Barbu BRAUN, Ciprian OLTEANU, Cătălin COBLIŞ

Maşini de măsurare în coordonate

vol III

Mașini de măsurare în coordonate bazate pe principiul emisiei de radiație LASER

EDITURA UNIVERSITĂȚII TRANSILVANIA DIN BRAȘOV

2022

Referent ştiinţific: Prof. dr. ing. Mihaela Ioana BARITZ
Coordonator lucrare: Prof. dr. ing. Ciprian OLTEANU
Tehnoredactare şi corectură: autorii

3 vol.
ISBN 978-973-598-646-9
Vol. 3. – 2022 – ISBN 978-686-19-1539-2

Prefață

Volumul III al cărții Mașini de măsurare în coordonate, Mașini de măsurare în coordonate bazate pe principiul emisiei de radiație LASER are un rol preponderent educațional, adresându-se cu precădere studenților din anul IV, specializările Mecatronică, Optometrie, Inginerie medicală, Design industrial sau Sisteme de energii regenerabile. În acest sens, scopul principal al acestui manuscris este acela de a fixa cunoștiințele teoretice și practice specifice măsurăii și scanării cu mașni și sisteme în coordonate ce au în componență capete de măsurare/scanare pe principiul emisiei radiației LASER.

Volumul prezintă aspecte teoretice dar și practice privind construcția, tipologia, principiul de funcționare și procedura de lucru în cazul acestor tipuri de mașini de măsurare în coordonate. Principalul scop este nu doar de a cunoaște evoluția tehnologiilor clasice și moderne de măsurare și scanare 3D, ci și de a forma cuncoștiințele și competențele de a utiliza astfel de sisteme, în perspectiva creșterii șanselor studenților absolvenți de a se putea angaja în domeniul de pregătire.

Volumul se adresează studenților din anii terminali cu specializări diferite, având în vedere faptul că sunt prezentate și descrise aplicații ale mașinilor de măsurare în coordonate bazate pe emisia LASER în domenii foarte variate, precum: industrie, robotică, biomecanică, inginerie medicală și optimetrie, construcții etc.

Pentru a răspunde acestor două deziderate, formarea cunoștiințelor teoretice și practice ale studentilor absolvenți, acest al treilea volum al cărții Mașini de măsurare în coordonate este structurat pe cinci capitole, în prmimul fiind prezentate aspecte generale privind principiul măsurării și al scanării cu sisteme bazate pe emisia LASER. Deoarece este cunoscut faptul că evoluția acestor tehnici de măasurare și scanare cunosc o dinamică foarte rapidă, în continuare, în capitolul al doilea sunt prezentate și explicate caracteristicile tehnice, constructive și cele funcționale pentru o gamă cât mai largă de sisteme de măsurare cu sursă LASER. Principalele aspecte ce vizează însușirea cunoștiințelor teoretice și practice legate de tehnicile de scanare cu LASER sunt tratate în cel de-al treilea capitol, "Tehnici de măsurare prin radiația LASER". Pentru a se înțelege cât mai bine nu doar aspectele teoretice și practice ale procedurilor de scanare pe principiul LASER, în capitolul 4 sunt prezentate diverse aplicații, în domeniile sus-menționate, acestea fiind ilustrate și explicate detaliat. Trebuie menționat că o bună parte dintre acestea reprezintă chiar etape de cercetare specifice pregătirii doctorale și post-doctorale în cazul a doi dintre autorii manuscrisului. În ultimul capitol se pune accentul pe variante ultra moderne de sisteme de scanare, ce țin pasul cu evoluția tehnologiei, și anume sisteme portabile de scanare, ce se doresc a fi din ce în ce mai performante atât sub aspectul eficienței, cât și al preciziei de numerizare. Prin cele prezentate aici se urmărește în primul rând informarea studenților și absolvenților, dar și a cercetătorilor cu privire la soluțiile existente specifice obținerii unor modele 3D virtuale ale unor obiecte reale, scanate ultra – rapid cu astfel de sisteme. Informațiile pot fi de mare ajutor celor care au de proiectat și/sau de modelat un obiect sau un reper cu aplicații în domenii variate, utilizarea unor astfel de sisteme de scanare portabile putând fi una dintre cele mai convenabile soluții. Mai mult, în acest ultim capitol sunt prezentate exemple și informații concrete asupra modului în care astfel de sisteme de scanare pot fi utilizate cu succes nu doar în domeniul ingineriei, ci și al construcțiilor, al arhitecturii, al industriei auto etc. Acesta fapt se explică

prin faptul că astfel de sisteme permit scanarea unor piese/obiecte/repere fixe, de mari dimensiuni și/sau foarte greu transportabile.

*În concluzie, volumul III se dorește a fi unul cu rol de formare a studenților și absolvenților cu profil tehnic, informația prezentată putând fi accesată pe viitor nu doar prin surse convenționale (sisteme de stocare în format electronic), ci și din surse on-*line (prin *accesarea rapidă a unor site-uri sau baze de date ale Bibliotecii și Eduturii Universității TRANSILVANIA din Brașov.*

Noiembrie 2022
Autorii.

Capitolul 1
Generalităţi privind măsurarea în coordonate cu ajutorul emisiei de radiaţie LASER

1.1 Generalităţi. Avantaje şi dezavantaje ale măsurării cu sursă LASER

În ultimii ani, sistemele de măsurare bazate pe emisia de radiaţie LASER au cunoscut o dezvoltare foarte puternică, datorită unor avantaje mari, din punctul de vedere practic. Dintre acestea se pot aminti următoarele:
- creşterea eficienţei în cazul scanării şi numerizării unor suprafeţe cu geometrii complexe ale unor repere cu aplicaţii în industrie şi medicină [1], [2], [3];
- scăderea drastică a duratei unui ciclu de scanare a unui reper, comparativ cu cazul utilizării sistemelor de măsurare şi scanare prin contact, în componenţa MMC. Generarea modelului CAD scanat al profilului reperului se poate realiza integral, în doar câteva minute, în timp ce în cazul utilizării de sisteme de măsurare clasice, prin palpare, pentru aceeaşi operaţie ar fi necesare câteva ore sau chiar zile [1], [4];
- scanarea 3D cu sursă LASER permite o inspecţie, dar şi o modelare completă pentru conformaţii complexe ale reperelor, chiar şi în cazul în care acestea se compun din mai multe accesorii [4], [5] ;
- scanarea cu radiaţie LASER permite inclusiv măsurarea de repere confecţionate din materiale fragile şi/sau deformabile, fără a exista riscul deteriorării acestora [4], [6], [8];
- posibilitatea interschimbabilităţii sculelor de măsurare, prin trecerea rapidă de la un sistem de măsurare cu sursă LASER la un sistem de măsurare prin contact [7], [8];
- în cazul scanării reperelor prin utilizarea de MMC cu susră LASER, modelele CAD, odată obţinute, pot fi mai uşor şi mai rapid prelucrate, analizate şi/sau modelate [4].

În ciuda acestor mari avantaje, există unele situaţii când pentru măsurarea şi/sau scanarea anumitor repere, în cadrul MMC se preferă utilizarea de sisteme de măsurare clasice, prin contact, ca urmare a unor neajunsuri sau probleme care pot apărea:
- preţul de cost ridicat. Există situaţii când pentru scanarea unor repere (nedeformabile) este mai rentabilă, nefiind necesară o productivitate ridicată şi deci nu se justifică utilizarea unor astfel de sisteme cu costuri ridicate [5];
- influenţa strălucirii suprafeţei reperului. Ca urmare a interferenţelor dintre radiaţia emisă şi cea reflectată, apare o variaţie parazită a intensităţii radiaţiei, la nivelul senzorilor de detecţie din cadrul sistemelor de măsurare. Acest lucru poate conduce la scăderea preciziei de măsurare şi/sau de scanare a reperelor, putându – se ajunge chiar la erori de măsurare de ordinul zecimilor de milimetru [1], [8]. Pentru compensarea acestor erori, o soluţie poate consta în utilizarea mai multor camere de achiţiţie a imaginilor (sub formă de niveluri de gri), dispuse în diferite unghiuri şi poziţii, pentru medierea nivelurilor de intensitate (de gri), corespunzătoare aceloraşi zone măsurate / scanate de pe reper. Această soluţie, însă prezintă dezavantajul unei creşteri mari a preţui sistemului de măsurare, prin interpunerea de sisteme optice şi opto-electronice complexe de compensare.

1.2 Principii fundamentale ale măsurării în coordonate, utilizând sistemele cu sursă LASER

Pe parcursul dezvoltării tot mai accentuate a MMC cu sisteme de măsurare pe principiul emisiei LASER, s-au descoperit şi perfecţionat în mod continuu diferite metode şi tehnici de măsurare a distanţelor, dintre care se pot aminti: tehnica Radar, tehnica triangulaţiei, tehnica stereoviziunii,

tehnica Moire etc. Toate acestea, însă, din punctuld e vedere al măsurării variaţiei distanţelor pe principiul emisiei radiaţiei LASER, au în comun faptul că în funcţie de variaţia distanţei de la obiectul măsurat la sursa de emisie-recepţie, are loc o variaţie a intensităţii radiaţiei reflectate. Astfel, cu cât distanţa dintre reperul măsurat şi sistemul de măsurare creşte, cu atât intensitatea radiaţiei reflectate va scădea [9]. Pornind de la acest considerent, s-a dezvoltat conceptul privind tehnica analizei de profunzime, nu doar în scopul detectării obiectelor aflate la distanţă, sau a deplasării acestora, ci mai ales în scopul evaluării dimensiunii acestora, în scopul măsurării unor parametri geometrici. Analiza de profunzime se referă la captarea de imagini ale unor suprafeţe, sub forma unor hărţi în niveluri de gri, reprezentând hărţile de variaţie a intensităţii radiaţiei LASER reflectată de pe suprafaţa obiectului. Nivelurile de gri mai închise corespund unor intensităţi mai mici ale radiaţiei captate şi, implicit la o distanţă mai mare între sistemul de măsurare şi punctul sau suprafaţa de corespondenţă, pe reper, iar cele mai deschise corespund unor intensităţi mai mari, deci unei distanţe mai mici faţă de reper.

Mai mult, cercetări ulterioare au condus la dezvoltarea unor tehnici privind analiza de profunzime chiar în scopul scanării şi numerizării unor suprafeţe ale uor repere cu geometrie simplă şi complexă. Pentru aceasta, în ultimii ani, s-au descoperit şi s-au dezvoltat mai multe tehnici pentru obţinerea imaginii de profunzime, prezentate după cum urmează:

Tehnica Radar constă în iluminarea obiectului cu o sursă LASER şi obţinerea informaţiei de profunzime în funcţie de durata de emisie a energiei reflectate de obiect. Ştiut fiind faptul că radiaţia electromagnetică se propagă relativ cu viteză constantă, distanţa până la un punct situat pe suprafaţa obiectului se poate determina prin dirijarea unei unde LASER către acel punct şi şi măsurând perioada de timp necesară până când radiaţia LASER se întoarce la sistemul de emisie – recepţie [1], [10], [11].

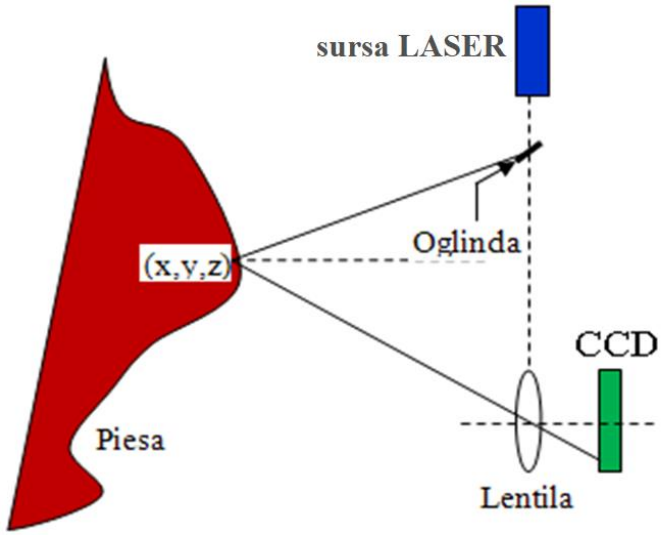


Fig. 1.2.1 *Tehnica de scanare prin triangulaţie LASER [7], [8]*

Triangulaţia optică presupune utilizarea de sisteme de scanare bazate formate dintr-o cameră CCD (Charged Coupled Device) şi o sursă de radiaţie LASER (figura 1.2.1) [7], [8]. Principiul de funcţionare constă în proiectarea unui fascicul luminos punctiform pe suprafaţa reperului de măsurat, studiindu-se interacţiunea fascicolului cu obiectul, în vederea calculării coordonatelor în punctul de intersecţie dintre spotul luminos şi suprafaţa obiectului studiat.

Cunoscându-se poziţia sursei luminoase în raport cu camera CCD, se poate determina (prin metode trigonometrice) distanţa de la sursă la punctul de proiecţie al spotului până la suprafaţa reperului [12 ÷ 15]. Se recomandă ca unghiul de incidenţă dintre radiaţia emisă şi direcţia normalei la suprafaţa obiectului să fie cât mai mic (să tindă spre zero).

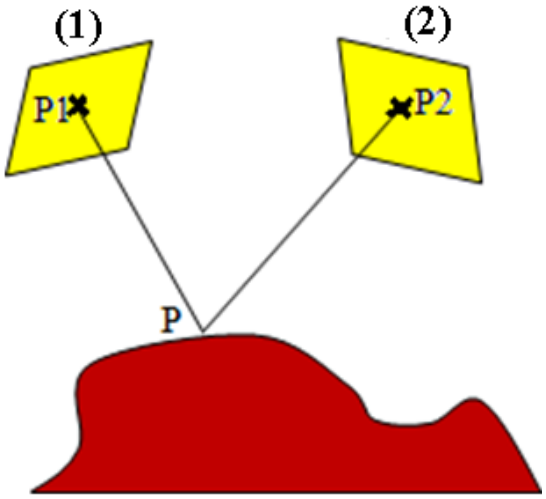


Fig. 1.2.2 *Tehnica de stereoviziune [16]*

Tehnica de stereoviziune (fotogrametria) (figura 1.2.2) determină distanţa de la sursă la obiect cu ajutorul spaţiului format între două sau mai multe camere foto [5], [16]. Fiecare punct P de pe suprafaţa obiectului (suprafaţă aflată în câmpul vizual al celor două camere) se proiectează în punctele P_1 şi P_2, în planele – imagine (1) şi (2). Identificarea punctelor P_1 şi P_2 din cele două imagini, ce corespund punctului P de pe obiect, permit calcularea coordonatelor carteziene ale punctului P. Principalul dezavantaj al acestei tehnici constă în dificultatea selectării caracteristicilor identice ale celor două imagini şi deci stabilirea corespondenţelor între acestea [17 ÷19].

În funcţie de modul de obţinere a imaginilor, tehnica de stereoviziune poate fi *statică*, cu utilizarea mai multor cadre, preluate din poziţii diferite, în acelaşi timp sau *dinamică*, fiind utilizate mai multe cadre, dar la momente de timp diferite.

Proiecţia unei grile de lumină structurată este o tehnică mai des utilizată în cadrul MMC, datorită eficienţei de măsurare şi/sau scanare, dar şi a posibilităţii unei mai bune compensări a erorilor de măsurare. Principiul acestei tehnici constă în proiecţia unei grile de dungi luminoase pe o suprafaţă tridimensională, a cărei distorsiune (în funcţie de geometria acesteia) este vizualizată din mai multe ipostaze, informaţia privind distorsiunea fiind utilizată pentru reconstrucţia virtuală a suprafeţei. Deviaţia dungilor faţă de forma iniţială permite o determinare precisă a coordonatelor 3D pentru fiecare detaliu de pe suprafaţa reperului măsurat. În practică, cel mai adesea sunt întâlnite proiecţile de de grile de benzi paralele sau cu dispunere radială [20 ÷ 22]. Principalele metode utilizate pentru generarea grilei de lumină structurată sunt interferenţa radiaţiilor LASER şi proiecţia pe baza unui afişaj [23], [24].

1.3 Probleme întâlnite la scanarea prin utilizarea radiaţiei LASER

Orice perturbare a energiei fascicolului LASER influenţează calitatea imaginii obţinute a suprafeţei obiectului scanat, implicit exactitatea valorilor coordonatelor punctelor măsurate ale reperuluiva fi afectată [6], [25]. Perturbările la nivelul radiaţiei luminoase reflecate apar în următoarele situaţii:

a) în cazul reflexivităţii neuniforme a suprafeţei reperului;
b) dacă suprafaţa are un grad ridicat de reflexivitate;
c) dacă geometria suprafeţei prezintă discontinuităţi;
d) dacă fascicolul luminos este parţial obturat;
e) la apariţia fenomenului de granularitate.

a) Reflexivitatea neuniformă a suprafeţei

Acest fenomen se întâlneşte cu precădere în cazul suprafeţelor rugoase şi/sau granulare, cum ar fi, de exemplu vopseaua sau hârtia mată [26]. Dacă se reprezintă direcţia şi cantitatea de lumină incidentă, sub forma uni vector $\bar{\boldsymbol{I}}$, atunci reflexivitatea unei suprafeţe ideale, $\boldsymbol{L}$ este proporţională cu produsul dintre cantitatea de lumină şi normala la suprafaţa $\bar{\boldsymbol{n}}$:

$$\boldsymbol{L} = \rho \cdot \bar{\boldsymbol{I}} \cdot \bar{\boldsymbol{n}} \qquad (1.3.1)$$

unde ρ > 0 este o constant caracteristică a materialului.

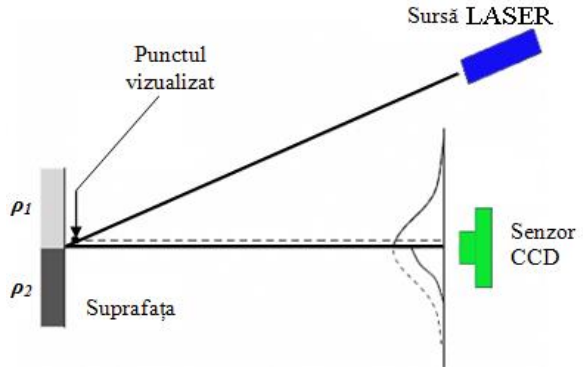


Fig. 1.3.1 *Cazul suprafeţelor cu grade diferite de reflexie [6], [25], [26]*

În acest caz problemele apar ca urmare a faptului că există o tendinţă în a considera fiecare punct la fel de luminos, din toate direcţiile de vedere. Figura 1.2.3 ilustrează cazul a două cu două caracteristici de diferite, ceea ce produce o schimbare în reflexivitatea suprafeţei. Această variaţie a gradului de reflexie implică o schimbare a imaginii la nivelul camerelor CCD şi, ca urmare apare o eroare în determinarea poziţiei punctului de proiecţie pe suprafaţa obiectului [19], [27].

b) Suprafeţe cu grad înalt de reflexivitate

În cazul în care piesa are un grad înalt de reflexivitate, pot apărea erori chiar mari de măsurare / scanare [6], [26]. Un caz reprezentativ este acela în care reperul are o geometrie cu două sau mai multe suprafeţe plane, dispuse la unghiuri diferite (Figura 1.3.2).

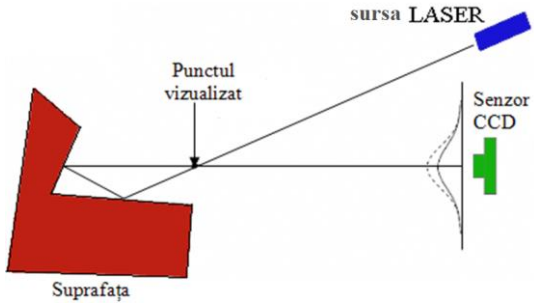


Fig. 1.3.2 *Erorile ale punctului măsurat datorită unei suprafeţe cu grad înalt de reflexie [19]*

Dacă reperul având o asemenea geometrie prezintă suprafeţe cu un grad mare de reflexivitate, fascicolul LASER cade pe o suprafaţă a piesei ce nu se află în câmpul vizual al camerei CCD, însă, ca urmare a fenomenului de reflexie, la nivelul primei suprafeţe, radiaţia va ajunge pe o altă suprafaţă (adiacentă) ce se va afla în câmpul vizual al sistemului CCD.

Ca urmare, se poate ajunge în situaţia în care un punct ce nu se află pe suprafaţa reperului să apară ca punct măsurat. Iată, deci că există anumite puncte de pe suprafaţa reperului care nu pot fi măsurate (fie apar în câmpul vizual al camerei, dar nu sunt direct baleiate de fascicolul LASER, fie sunt baleiate de radiaţia LASER, dar acestea nu apar în câmpul vizual al sistemului CCD) [28].

c) Discontinuităţi ale geometriei suprafeţei

Dacă radiaţia LASER ajunge pe un colţ sau o muchie a piesei (Figura 1.3.3), apare o modificare a imaginii punctului luminos la nivelul detectorului CCD, ccea ce, evident, conduce la o măsurare eronată.

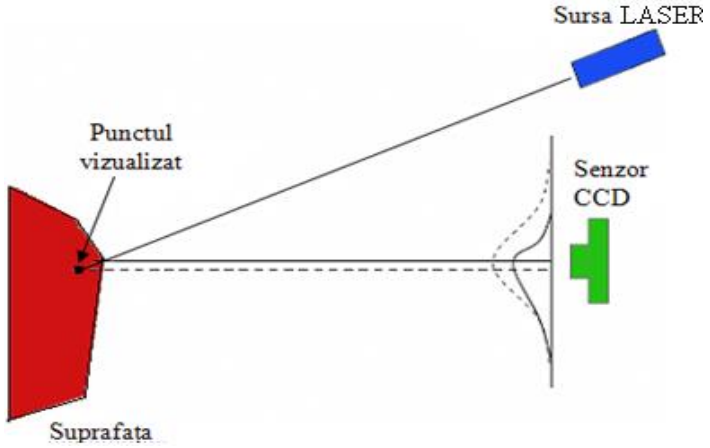


Fig. 1.3.3 *Eroarea punctului de profunzime datorită discontinuităţii suprafeţei [1], [19]*

Pentru alte forme geometrice, o parte din fascicolul LASER ce ajunge pe o muchie sau pe un colţ al reperului poate „cădea” în afara suprafeţei, dar o anumită cantitate a radiaţiei reflectate totuşi poate fi recepţionată de către senzorul CCD. În acest caz se poate ajunge în situaţia în care un punct de profunzime poate fi găsit chiar şi acolo unde nu se află nici o suprafaţă [19].

d) Fascicul luminos parţial sau complet obturat

Există şi situaţii în care, prin geometria suprafeţei piesei scanate, o anumită cantitate din radiaţia reflectată se pierde, la nivelul senzorului CCD ajungând doar o parte din cantitatea de radiaţie reflectată iniţial (Figura 1.3.4).

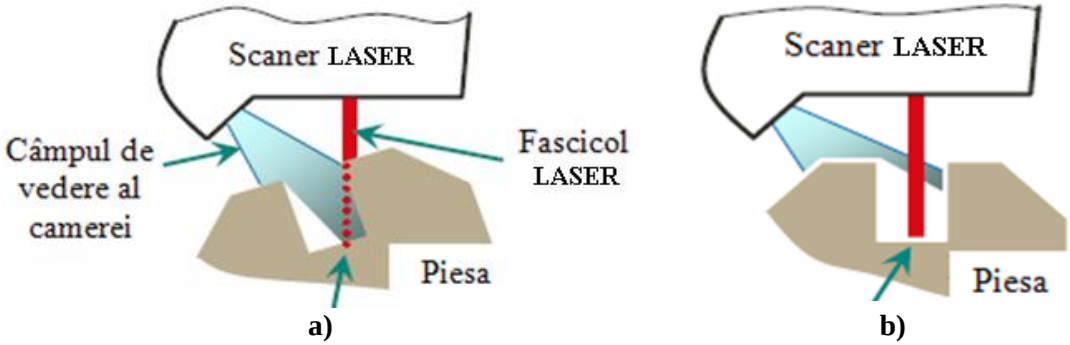


Fig. 1.3.4 *Fenomenul de obturare a radiaţiei reflectate: a) situaţia în care suprafaţa se află în câmpul vizual al camerei CCD, dar radiaţia LASER nu o baleiază complet; b) situaţia în care suprafaţa este baleiată, dar aceasta nu se află în câmpul vizual al camerei CCD [19], [29]*

În ambele situaţii intervine fenomenul de ocluziune al fascicolului între suprafaţa reperului şi camera de recepţie CCD. O parte din radiaţia LASER reflectată de către suprafaţa reperului, este blocată înainte de a ajunge la senzorul CCD [19], [29]. Tot în cadrul fenomenului de ocluziune apare şi fenomenul prin care radiaţia LASER ce cade pe suprafaţa de măsurat, poate fi obturată în totalitate. Ca urmare imaginea punctului de profunzime este generată în mod eronat [30].

e) Fenomenul de granularitate

Dacă radiaţia LASER cade pe o suprafaţă rugoasă, măsurătorile pot fi, de asemenea, considerabil influenţate. Granularitatea suprafeţei produce variaţii aleatoare ale lungimii drumului optic, determinând un fenomen de interferenţă variabilă şi aleatorie în tot spaţiul dintre suprafaţa reperului şi senzorul CCD [31].

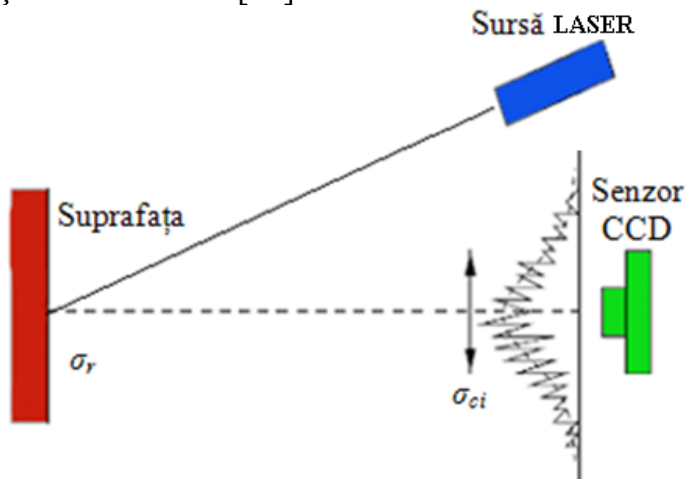


Fig. 1.3.5 *Influenţa granularităţii asupra preciziei, în cazul sistemelor bazate pe principiul triangulaţiei [31]*

Infleunţa granulaţiei asupra preciziei de măsurare se manifestă cel mai mult în cazul sistemelor de măsurare cu sursă LASR, bazate pe principiul triangulaţiei. În acest caz, din cauza suprafeţei granulare a reperului scant se produce următorul fenomen: la baleierea unei zone finite a reperului de către spotul LASER, granularitatea pe acea zonă implică un număr mare de micro-neregularităţi, ceea ce produce o „împrăştiere” a componentelor radiaţiei reflectate. Ca urmare apar impulsuri cu niveluri de „zgomot” ce pot afecta valoarea medie a impulsurilor detectate la nivelul sistemului CCD.

Aceasta cauzează erori ale coordonatelor punctelor de profunzime măsurată, chiar şi în cazul unor suprafeţe plane. Acest fenomen apărut în cazul suprafeţelor cu granulaţie mare se poate explica şi prin faptul că imaginea fascicolului LASER captată la nivelul detectorului CCD este „bruiată”, ceea ce înseamnă producerea unui decalaj aleatoriu în detectarea valorii medii a poziţiei punctului sau zonei măsurate. Aceasta se traduce printr-o incertitudine în stabilirea poziţiei medianei, adică o incertitudine a punctului sau a zonei de măsurare [31].

Cea mai mare problemă în cazul suprafeţelor granulare este că, în acest caz, exactitatea măsurătorilor este limitată în cadrul sistemelor optice de triangulaţie ce utilizează lumina coerentă a LASER-ului, chiar şi în condiţii ideale de suprafaţă plană sau de suprafaţă fără variaţii de reflexivitate [31].

1.4 Soluţii de remediere a problemelor întâlnite la scanarea prin utilizarea radiaţiei LASER

Problemele în cazul măsurării cu ajutorul principiului emisiei de radiaţie LASER din cauza variaţiei reflexivităţii suprafeţei pot fi mult diminuate prin aplicarea unui strat subţire de vopsea pe toate suprafeţele reperului ce urmează a fi măsurate sau scanate. În cazul reperelor cu suprafeţe cu grad mare de reflexie, ce prezintă şi muchii sau ocluziuni, se pot diminua prin controlul amplasării scannerului, pentru o mai corectă digitizare (pe baza nivelurilor de gri, date de variaţia intensităţii radiaţiei LASER captate în urma reflexiei) a suprafeţelor. Având în vedere acestea, se recomandă cunoaşterea modelului CAD asociat piesei de scanat, nu doar cunoaşterea caracteristicilor scannerului, în scopul determinării unei poziţionări optime a acestuia. Acest lucru este deosebit de util pentru a se rduce cât mai mult situaţiile în care apare fenomenul de ocluziune a radiaţiei LASER între suprafaţa reperului şi senzorul CCD [30], [31].

Capitolul 2
Sisteme şi echipamente pentru măsurarea pe principiul optic, fără contact, din componenţa MMCO

2.1 Tipologia MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER

Ca şi în cazul principiului de măsurare şi scanare prin contact, în cazul utilizării surselor de emisie a radiaţiei LASER, structura generală a unei MMCO este asemănătoare, incluzând elementele mobile (pentru deplasările de-a lungul celor trei axe), batiul maşinii şi sistemul de măsurare (Figura 2.1.1) [32].

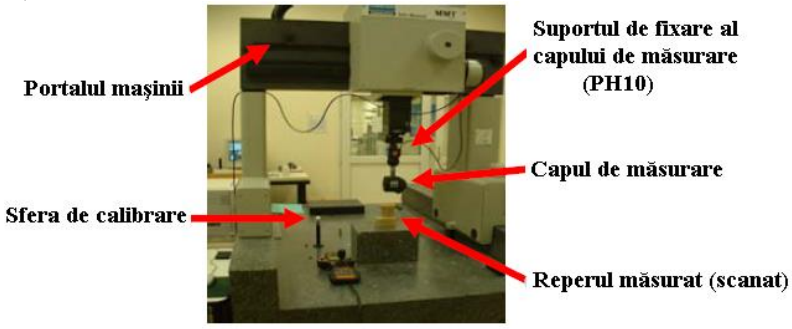


Fig. 2.1.1 *Structura generală a unei MMCO cu sistem de măsurare bazat pe emisia de radiaţie LASER [32]*

Ceea ce diferă fundamental în componenţă este sistemul (capul) de măsurare, care include sistemul opto-electronic pentru emisia şi recepţia radiaţiei LASER, precum şi captorul sau camera CCD pentru prelucrarea şi interpretarea datelor sub formă de imagini pe niveluri de gri [32], [33].

Ca şi în cazul sistemelor de măsurare prin contact, orientarea capetelor de măsurare cu sursă LASER se poate face după două axe, una în plan orizontal, cealaltă în plan vertical (Figura 2.1.2).

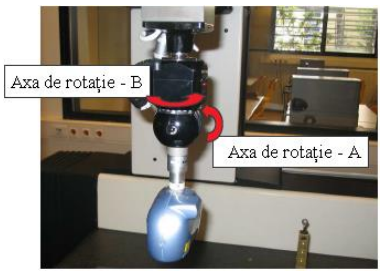


Fig. 2.1.2 *Dispunerea sursei de radiaţie LASER pe un cap de măsurare Renishaw [33]*

Modalitatea prin care se poate face poziționarea capului de scanare, implicit definirea orientărilor acestuia este una similară cu cea în cazul sistemelor prin palpare. Și în acest caz, prin intermediul mediului software dedicat se procedează la stabilirea orientărilor, prin indicarea unghiurilor de poziționare în cele două plane. Coroborat cu alegerea configurării, din punctul de vedere al stabilirii tipului de sursă LASER, se procedează la calificarea sculelor de măsurare și scanare. Procedura este una foarte asemănătoare cu cea specifică pregătirii procesului de măsurare sau scanare prin contact [74].

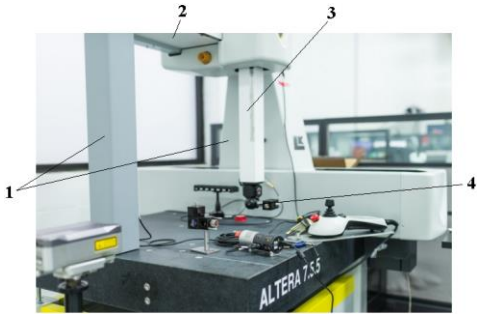


Fig. 2.1.3 *Construcţia clasică a unei MMCO cu sistem de măsurare şi scanare cu sursă de emisie LASER:*
1 – portalul; 2 – traversa; 3 – coloana; 4 – sistemul de măsurare [34]

Din punctul de vedere al construcţiei, cele mai întâlnite MMCO cu sursă LASER, ca şi în cazul celor cu sistem de măsurare/scanare prin contact, sunt cele pe trei axe, cu batiu şi masă fixă, elementele mobile fiind un portal, o traversă şi coloana pe care este dispus sistemul de măsurare (Figura 2.1.3) [5], [34]. Cee ce este însă de menționat este faptul că pentru o mașină de măsurare și scanare în coordonate prevăzută cu sistem de măsurare cu sursă LASER, volumul de lucru trebuie să fie suficient de mare. Acest lucru implică un volum acoperitor, încât să poată avea loc procesul de numerizare al reperelor cu geometrie simplă sau complexă [5], [50].

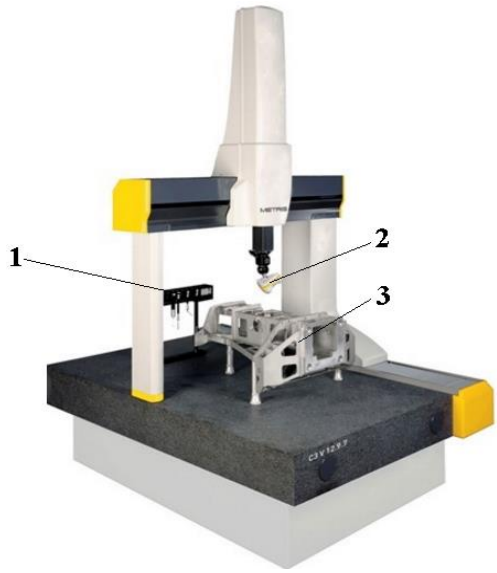


Fig. 2.1.4 *MMCO cu magazii pentru schimbarea capetelor de măsurare: 1 – magazie; 2 – cap de măsurare cu sursă LASER; 3 – reperul scanat [34]*

Din punctul de vedere al eficientizării procesului de scanare, există variante constructive de MMCO prevăzute cu magazii ce permit în mod automat sau semi-automat interschimbarea sistemelor de măsurare în timpul funcţionării. Aceste magazii pot fi prevăzute atât pe masa mașinii, cât și pe un perete aflat în imediata vecinătate a zonei de lucru a mașinii. Principiul de funcționare al automatizării schimbării capului de scanare în timpul procesului este unul similar cu cel în cazul MMC bazate pe sisteme de scanare prin contact. Ceea ce diferă în mod clar față de sistemele clasice de scanare este arhitectura magazinelor, sub aspectul conformației locașurilor de depozitare a capetelor de scanare. Un mare avantaj este acela că astfel de magazii permit trecerea rapidă de la scanarea prin contact la cea fără contact, chiar în cadrul aceluiași ciclu de lucru [34], [50].

2.2 Tipuri de sisteme de măsurare cu sursă LASER

Este cunoscut faptul că în cadrul MMCO pe principiul utilizării radiaţiei LASER, un rol esenţial îl au *sistemele de măsurare*, în ultimii ani punându-se un accent deosebit pe dezvoltarea şi optimizarea acestora. În cele ce urmează sunt tracute în revistă câteva dintre variantele cele mai moderne de sisteme de măsurare şi scanare cu sursă LASER:

a) Sistemul G-Scan RX2 (Figura 2.1.1)

Fig. 2.2.1 *Sistemul G-Scan RX2 – dispunerea capului de scanare [35]*

Capul de scanare se dispune pe braţul de măsurare, după acelaşi procedeu ca şi în cazul unui cap de măsurare prin contact. Acesta utilizează o axă rotativă integrată având o conexiune de tip firewire. Avantajul acestui sistem de măsurare este acela că procedura de măsurare este simplu de efectuat, nefiind necesară o recalibrare în prealabil. Această variantă este disponibilă în special pentru braţele de măsurare portabile, cu mai multe grade de libertate (Capitolul 2.3). Sistemul oferă posibilitatea stocării şi transmiterii datelor în formate ASCII, STL, DXF, IGES [35].

b) Sistemul Perceptron V4

Fig. 2.2.2 *Dispunerea captoarelor Perceptron V4 [36]*

Acest sistem permite o dispunere rapidă şi uşoară a capului de măsurare, permiţând măsurători de înaltă precizie şi achiziţii în timp real a minim 23.000 de puncte pe secundă. Modul de dispunere al capului de măsurare este prezentat în figura 2.2.2, aceste sisteme fiind utilizate, de asemenea cu precădere pentru braţele portabile cu 6 sau 7 grade de libertate (Capitolul 2.3) [36]. Numărul mare al gradelor de libertate permite obținerea unui număr suficient de mare de orientări ale capului, astfel încât, într-un singur ciclu să poată fi numerizată o cât mai mare parte a suprafeței reperului cu geomerie complexă. Mai mult, în anumite dispuneri ale reperului pe masa

mașinii se poate asigura chiar scanarea în integralitate a reperului respectiv, crescându-se considerabil eficiența procesului [36], [50].

c) Sistemul Metris LC15

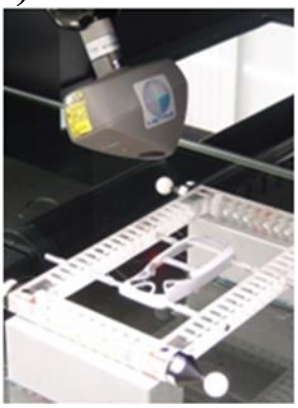


Fig. 2.2.3 *Captorul Metris LC 15 [37]*

Utilizarea acestor variante de traductoare în componenţa capetelor de scanare se înscrie în tendinţa tot mai acută de a scana şi/sau inspecta obiecte de dimensiuni din ce în ce mai mici, dar cu o acurateţe şi precizie tot mai ridicate. Acest tip de captor permite scanări cu densităţi de puncte ridicate chiar şi pentru repere de mici dimensiuni, cu geometrii complexe.

Printre avantajele acestui tip de traductor se pot enumera:

- rezoluţie şi acurateţe înalte ale radiaţiei de tip LASER;
- greutate redusă;
- compatibil cu capetele de măsurare *Renishaw PH10* (cele mai des utilizate);
- este uşor de programat;
- poate fi adaptat cu uşurinţă pe majoritatea MMC [37].

Aceste tipuri de traductoare pot fi utilizate cu succes la:

- scanarea reperelor cu geometrie complexă, de mici dimensiuni, de exemplu telefoane mobile, palete de turbine [3], [5], [6];
- ingineria inversă, în scopul unei precizii ridicate.

Principalele caracteristici tehnice ale acestor categorii de captoare sunt următoarele:

- distanţa optimă de scanare: 65 mm;
- precizia: 8 μm;
- viteza de scanare: 19.200 puncte / secundă;
- greutate: 302g [37].

d) Sistemul Metris LC50 este unul de uz general în cadrul sistemelor de scanare pe principiul radiaţeie LASER, având şi acesta o viteză de scanare de până la 19.200 puncte / secundă, fiind, de asemenea compatibil cu capul de măsurare PH10M (figura 2.2.4).

Avantajele acestui tip de captor sunt:

- viteza de scanare relativ ridicată (până la 19.200 puncte / secundă);
- compatibilitate cu capetele de măsurare PH10M şi MQ ale companiei Renishaw;
- greutate redusă;
- calitate ridicată a imaginilor pentru diferite tipuri de suprafeţe, în medii diferite;
- uşurinţă în programare;
- posibilitatea unor proceduri de scanare automată în cazul unor cicluri de măsurare repetitivă, pentru serii medii şi mari de repere de acelaşi tip şi dimensiuni [5], [38].

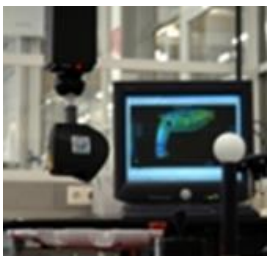


Fig. 2.2.4 *Utilizarea captorului Metris LC50 [38]*

Principalele aplicaţii ale acestui tip de captor:

- inspecţia şi scanarea unor repere având în componenţă foiţe metalice: caroserii, panouri etc.;
- în domeniul automobilelor: inspecţia motoarelor, a cutiilor de viteză, a paletelor de turbine, a parbrizelor [3], [5];
- în multimedia: - scanarea carcaselor de telefon.

Caracteristicile tehnice ale captoarelor din seria *Metris LC50* sunt:
- distanţa optimă de scanare: 70 mm;
- precizia: 15 μm;
- viteza de scanare: 19.200 puncte / secundă;
- greutate: 290g [38].

e) Sistemul Metris XC 50 (figura 2.2.5) este un model revoluţionar, utilizat pentru măsurarea diferitor parametri geometrici ai reperelor. Sistemul prezintă un scanner în cruce care confer o viteză mare de scanare, pe 3 linii de emisie a radiaţiei LASER, oferind o eficienţă sporită în numerizarea tridimensională a suprafeţelor complexe şi foarte complexe [39].

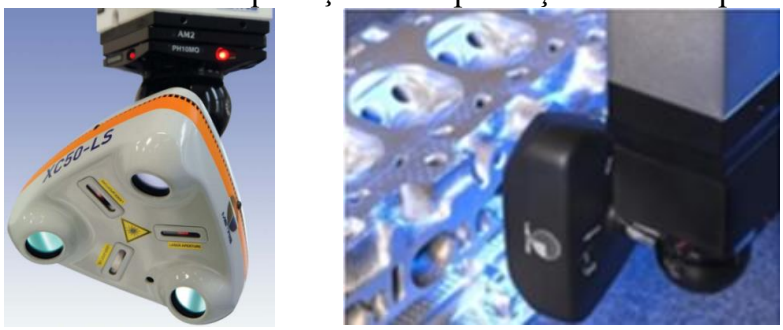


Fig. 2.2.5 *Utilizarea sistemului de scanare Metris XC50 [39]*

Principalele avantaje ale acestui sistem sunt:
- scanarea pe 3 linii de emisie a radiaţiei LASER, pe 3 unghiuri diferite – eficienţă ridicată;
- compatibilitate cu capetele de măsurare Renishaw PH10;
- uşurinţă în programare etc.

Printre aplicaţiile în care aceste sisteme sunt cu success utilizate se pot aminti:
- inspecţia reperelor confecţionate din foiţe metalice;
- inspecţia reperelor confecţionate din plastic turnat etc [39].

Caracteristicile tehnice ale captoarelor din seria Metris LC50 sunt:
- distanţa optimă de scanare: 70 mm;
- precizia: 15 μm;
- viteza de scanare: 3 x 6400 puncte / secundă;
- greutate: 510g;
- dimensiuni: 148 mm x 86 mm x 136 mm [39].

Tot în această categorie se încadrează şi sistemul *Metris XC 50 LS* (figura 2.2.6) este un sistem de scanare bazat pe radiaţia LASER, având în componenţă 3 camere. Principalul avantaj este acela că acesta permite scanarea reperelor situate şi la distanţe mai mari, chiar şi până la 180 – 200 mm, ceea ce este foarte util, de exemplu în cazul scanării caroseriilor auto [39].

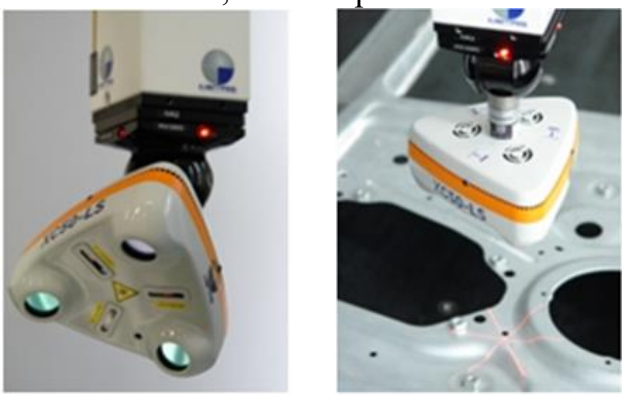


Fig. 2.2.6 *Utilizarea captoarelor din seria XC 50 LS pentru scanarea caroseriilor auto [37]*

Sistemul se bazează pe tehnologia de scanare în cruce, cu ajutorul a 3 raze LASER, ceea ce permite o măsurare şi/sau scanare eficientă a zonelor speciale, cum ar fi degajări, nervure etc., fără a fi necesară o reorientare a sa [39].

Printre avantajele acetui sistem se pot enumera următoarele:
- viteză mare de scanare, de până la 19.200 puncte / secundă;
- permite distanţe mai mari de scanare pentru numerizarea unor suprafeţe complexe, cu degajări şi nervuri având cote mari de profunzime;
- permite o scanare eficientă, datorită celor 3 raze LASER, fără a mai fi necesară o rotire suplimentară a traductorului în timpul procesului;
- are greutate şi dimensiuni reduse.

Printre aplicaţiile în care acest sistem poate fi folosit eficient se pot aminti:

- scanarea de componente auto;
- repere confecţionate din foiţe metalice etc.

Caracteristicile tehnice ale captoarelor din seria Metris LC50 sunt:

- distanţa optimă de scanare: 195 mm;
- precizia: 20 μm;
- viteza de scanare: 13 x 6400 puncte / secundă;
- dimensiuni: 145 x 103 x 135 mm;
- greutate: 560g [39].

f) Sistemul Kreon Zephyr KZ 25 (figura 2.2.7)

Acestea sunt printre cele mai performante scannere 3D cu linie LASER, fiind flexibile şi eficiente atât pe MMC, cât şi pe braţele de măsurare portabile, pretându-se la un domeniu larg de aplicaţii [1], [5], [40].

Avantajele acestor sisteme sunt:

- viteză şi acurateţe de scanare ridicate;
- rezoluţie înaltă;
- compatibile cu capetele de măsurare *Renishaw PH10*;
- oferă un grad de flexibilitate mult mai mare decât sistemele clasice de scanare prin contact;
- tehnologie digitală avansată;
- posibilitatea reglării parametrii camerelor video ai fascicolului LASER şi indicatorul de scanare la distanţa optimă [40].

Fig. 2.2.7 *Sistemul de scanare Kreon Zephyr KZ25 [40]*

Aplicaţiile acestor sisteme de scanare se referă la ingineria inversă şi inspecţia calităţii pentru:

- matriţe şi piese turnate;
- suprafeţe regulate şi neregulate cu geometrii complexe;
- piese realizate din material plastic, injectat;
- piese confecţionate din foi metalice;
- pale şi aripi de turbine etc [40].

Principalele caracteristici tehnice ale acestor sisteme sunt:

- viteza de scanare: 30.000 puncte pe secundă;
- clasa 2 de siguranţă LASER;
- rezoluţie de scanare: 3 μm;
- reproductibilitate cuprinsă între 9 şi 15 μm [40].

g) Sistemul Hexagon CMS 106 (figura 2.2.8) este foarte întâlnit în aplicaţii de metrologie, cum ar fi inspecţia suprafeţelor cu geometrii complexe şi în procesele de inginerie inversă. Ceea ce deosebeşte acest sistem de scanare faţă de celelalte, din punctul de vedere al caracteristicilor, este faptul că acesta

permite o rezoluţie variabilă prin posibilitatea utilizării a 3 lungimi pentru linia de scanare [3], [5], [41].

Avantajele utilizării unor astfel de sisteme derivă şi din faptul că rezoluţia de scanare este variabilă, prin faptul că:

- o line de scanare poate un număr mare de puncte, acest lucru fiind foarte util pentru numerizarea unei suprafeţe mari de măsurare sau a unei zone izolate a acesteia;
- adaptare automată, în timp real, a intensităţii fascicolului LASER;
- repetabilitate a rezultatelor obţinute;
- unghi maxim de măsurare mare (de până la ±60°) chiar şi în cazul suprafeţelor prelucrate;
- echipament complet automatizat;
- nu necesită setări complexe;
- compatibil cu diferite dispozitive pentru schimbarea sistemului de măsurare [41].

Fig. 2.2.8 *Sistemul de scanare CMS 106 [41]*

Caracteristicile tehnice ale acestor sisteme sunt:

- variaţie a linie de scanare: 60 mm / 80 mm / 120 mm;
- numărul de puncte pe linia de scanare: 1000;
- precizia de scanare: 20 μm.

Printre aplicaţiile la care sistemele *CMS 106* sunt utilizate pot fi menţionate repere confecţionate din diferite materiale:

- materiale prelucrate, semifinisate, ştanțate, turnate, forjate;
- metale vopsite;
- miezuri de nisip;
- fibră de carbon, lut, cauciuc, lemn, ceramică, materiale plastice [41], [50].

h) Scannerul Nikon XC65D (figura 2.2.9) este un scanner multilinie şi are ca principală caracteristică posibilitatea numerizării tuturor detaliilor geometrice ale reperelor simple, complexe printr-o singură scanare [1], [42].

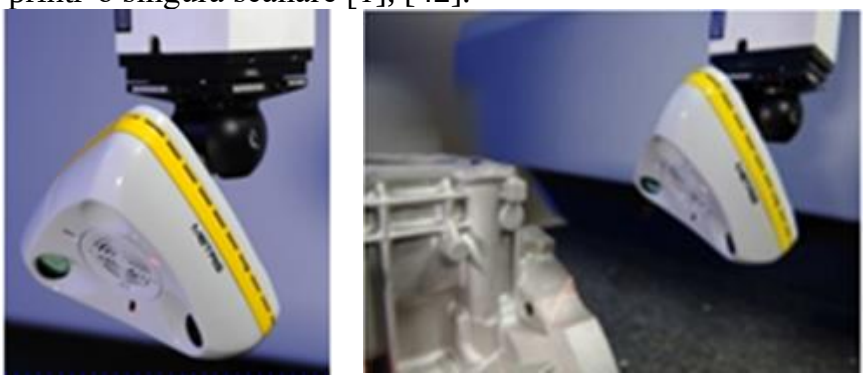


Fig. 2.2.9 *Sistemul de scanare Nikon XC65D [42]*

Avantajele principale ale acestor sisteme de scanare sunt:

- eficienţă sporită în procesele de scanare, datorită posibilităţii de digitizare rapidă a suprafeţelor complexe;
- adaptare inteligentă a intensităţii fascicolului, ceea ce face posibilă scanarea oricărei suprafeţe, fără intervenţia utilizatorului;
- prin poziţiile şi orientările fascicolelor se elimină necesitatea reorientării scannerului la numerizarea unor geometrii complexe;
- viteză de scanare net superioară comparativ cu alte sisteme de scanare bazate pe principiul LASER;
- adaptare uşoară la majoritatea CMM [42], [43].

Caracteristicile principale ale acestui tip de scanner sunt:

- tehnologie digitală de mare viteză;
- tehnologie de scanare cu LASER, multi-linie, ce permite numerizarea reperului din 3 direcţii;

- varianta XC65D-LS are o distanţă de scanare mai mare, optimă pentru numerizarea alezajelor adânci sau a canelurilor;
- posibilitatea adaptării intensităţii fascicolului LASER, pentru fiecare punct în parte al suprafeţei numerizate;
- viteza de scanare: 3 x 25.000 puncte/secundă, pentru modul de scanare în cruce şi 75.000 puncte/secundă pentru modul de scanare în linie;
- distanţa de scanare: 75 mm;
- precizia de scanare: 15 μm;
- clasa de siguranţă LASER: 2;
- compatibilitate cu gama capetelor de măsurare Renishaw PH10M(Q) [42], [44].

Principalele aplicaţii ale acestui sistem sunt:
- inspecţia caroseriilor de automobile;
- inspecţia pieselor turnate;
- inspecţia pieselor din material plastic;
- verificarea dimensională a unor repere cu geometrii complexe (de exemplu blocuri motoare cu alezaje adânci) [42].

i) Sistemul Nikon LC15 (figura 2.2.10)

Deoarece în multe procese de inspecţie dimensională există nevoia crecândă de a inspecta obiecte cu dimensiuni mici şi foarte mici, dar cu o precizie ridicată. Pentru aceasta s-a dezvoltat scannerul din seria Nikon LC15, care, datorită câmpului de vedere mic asigură o acurateţe şi densitate de puncte ridicate, necesare scanării reperelor mici şi cu geometrie complexă cu câmpuri de toleranţe mici [1], [5], [6], [45].

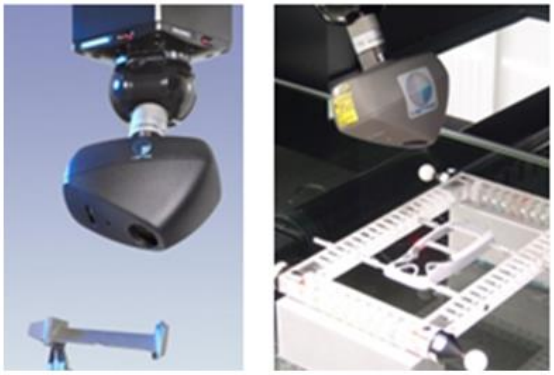


Fig. 2.2.10 *Sistemul de scanare Nikon LC 15 [45], [46]*

Avantajele acestui sistem de scanare sunt următoarele:
- posibilitatea inspectării de repere mici, cu precizie ridicată;
- scanare eficientă, datorită densităţii ridicate de puncte şi a vitezei de scanare;
- rezoluţie şi acurateţe ridicate ale razei LASER;
- robusteţe;
- greutate redusă;
- compatibilitate cu capetele de măsurare Renishaw;
- calibrare automată a orientărilor;
- adaptabil cu uşurintă pe majoritatea MMC [45].

Principalele caracteristici ale acestor sisteme sunt unrătoarele:
- viteza de scanare: 19.200 puncte/secundă;
- câmp de vedere: 15 x 15 mm;
- distanţa de scanare: 65 mm;
- clasa de siguranţă LASER: 2 [45], [46].

Printre aplicaţiile acestui sistem se pot enumera:
- obiecte mici şi complexe: telefoane mobile, pale de turbină;
- ingineria inversă.

2.3 Sisteme portabile pentru scanarea în coordonate a suprafeţelor tridimensionale complexe

Un aspect deosebit de important se referă şi la numerizarea rapidă a reperelor amplasate în zone în care nu port fi transoprtate maşinile în coordonate, cum ar fi conducte, ţevi, elemente din

componenţa instalţiilor. O serie de aplicaţii ale acestor sisteme de scanare portabile se regăsesc şi în ortopedie, cum ar fi: măsurarea şi/sau scanarea unor orteze sau proteze de picior, scanarea conformaţiei picioarelor etc.) [47], [48]. Printre sistemele portabile de ultimă oră se pot aminti:

a) Artec Eva 3D Scanner (Figura 2.3.1)

Fig. 2.3.1 *Sistemul de scanare portabil Artec Eva 3D Scanner [49]*

Aceste sisteme de scanare se bazează pe o cameră video care achiziţionează imagini 3D, cu posibilitatea alinierii imaginilor în timp real, ccea ce asigură o scanare rapidă şi uşoară. Achiziţia imaginilor este posibilă datorită fenomenului de reflexie a radiaţiei ce ajunge pe suprafaţa elementului supus scanării.
Avantajele utilizării acestui mijloc de măsurare sunt:
- posibilitatea scanării în timp real;
- reperele scanate nu necesită elemente de marcaj speciale;
- uşurinţă în utilizare;
- posibilitatea scanării chiar şi a obiectelor aflate în mişcare;
- sistemul este uşor de manevrat şi de transportat;
- datorită vitezei de scanare foarte ridicate, acest sistem să devine de câteva ori mai rapid chiar decât sistemele clasice de scanare cu surssă LASER;
- se pretează pentru un domeniu larg de aplicaţii, inclusiv pentru captarea de iamgini ale obiectelor aflate în mişcare, de diferite texturi şi cromatici [49].

Printre principalele caracteristici tehnice şi funcţionale ale acestui sistem se pot aminti:
- posibilitatea achiziţionării de până la 16 cadre / secundă;
- viteze de scanare de până la 500.000 de puncte / secundă.

Printre aplicaţiile acestui sistem se pot enumera:
- domeniul medicinei – reconstituirea prin scanare a modelelor faciale, dentare etc.;
- domeniul biomecanicii – scanarea şi modelarea diferitor forme şi texturi de proteze şi orteze;
- domeniul industrial – scanarea şi-sau modelarea unor componente de mici dimensiuni, din domeniul auto;
- domeniul construcţiilor – scanarea conductelor, a ţevilor de instalaţii etc [47], [48], [50].

b) Artec Spider 3D Scanner (Figura 2.3.2). Bazat tot pe achiziţia de imagici în timp real, cu ajutorul mai multor micro-camere video încorporate, acesta este un sistem de scanare destinat utilizatorilor CAD şi pentru reconstituirea modelelor prin tehnica ingineriei inverse [51].

Fig. 2.3.2 *Sistemul de scanare portabil Artec Spider 3D Scanner [51]*

Specificaţiile tehnice, din care rezultă avantajele utilizării acestor sisteme de scanare sunt menţionate după cum urmează:
- rezoluţie de scanare înaltă, de până la 0,15 mm;
- acurateţe de măsurare ridicată (0,03 ÷ 0,05 mm);
- greutate redusă, uşurinţă în manevrare;
- capacitate de a detecta muchii ascuţite şi pereţi subţiri;
- autonomie a bateriei de ordinul orelor;
- scanare ultra-rapidă (ssitemul poate scana de până la de 10 ori mai rapid decât sistemele clasice cu sursă LASER);
- scanează şi reproduce modelul CAD al piesei în timp real [51].

Printre aplicaţiile principale ale acestui sistem de scanare se pot enumera:

- domeniul industrial: - designul de produs și controlul calităţii produselor, în cadrul producţiei de masă; prototipare rapidă;
- domeniul biomecanic: - scanarea şi prototiparea rapidă a unor proteze, orteze externe [47], [48];
- domeniul bio-medical - reproducerea modelelor faciale, dentare etc [47], [51].

c) Rexcan 4 3D Scanner (figura 2.3.3) este un sistem de digitizare 3D de talie mondială, bazat pe tehnologia emisiei de radiaţie albă compusă, conducând spre o nouă eră a digitizării 3D, cu precizie ridicată, flexibilitate şi comoditate în utilizare.

Fig. 2.3.3 *Sistemul de scanare portabil Rexcan 4 3D Scanner [52]*

Caracteristicile tehnico-funcţionale şi avantajele, care derivă din acestea, sunt:

- precizie ridicată: - sistemul se bazează pe fenomenul de triangulaţie optică, prin deplasare în 4 faze, utilizând o serie de camere CCD similare, dispuse vectorial sau matriceal, cu rezoluţie fină, pentru achiziţia datelor de înaltă acurateţe; se asigură astfel o eroare de cel mult 10 μm la scanarea suprafeţelor; prin acesata se garantează fiabilitate în măsurări şi scanări de înaltă precizie şi acurateţe, în toate aplicaţiile la care sistemul poate fi utilizat [52];
- flexibilitate crescută: sistemul *Rexcan 4* poate realiza scanări de micro-suprafeţe de adâncime şi de apropiere ale diferitor obiecte cu geometrii complexe, datorită unui unghi de triangulaţie de 10°, pentru adâncimea de penetrare multă mărită în raport cu diametrului spotului luminos. Sistemul generează 24 de volume de scanare, adaptabile pentru dimensiuni variabile ale obiectelor, fiind capabil să realizeze inclusiv numerizări de obiecte de mari dimensiuni, cu lungimea diagonalei de până la 1,5 metri. Cu ajutorul unui set de lentile (cu care sistemul este livrat) se pot obţine instantaneu 4 volume de scanare, prin utilizarea diferitor locaşuri de dispunere a camerelor de achiziţie [50], [52];
- uşurinţa în exploatare derivă din faptul că procesul este rapid şi uşor de realizat. În ceea ce priveşte durata de scanare este necesară doar o secundă pentru o singură etapă de numerizare (a unei zone finite din suprafaţa reperului scanat). Obţinerea rapidă a unor modele continue, fără întreruperi, fără nivel mare de zgomot, este posibilă datorită modului de expunere ridicată pentru suprafeţele întunecate. Din punctul de vedere al uşurinţei de manevrare, sistemul este dotat şi cu o telecomandă specială. Referitor la procedeul de numerizare, sistemul are capacitatea de a procesa rapid datele, prin integrarea de funcţii de automatizare a etapelor de lucru specifice preluării şi interpretării datelor în timpul procesului de numerizare. Un alt avantaj derivă din faptul că sistemul software specific permite prelucrarea datelor de tip coordonată a milioane de puncte de scanare. Procedura simplă şi rapidă de calibrare a sistemului, ce durează doar aproximativ 5 minute este un alt aspect al uşurinţei în cazul utilizării acestui sistem de scanare [3], [48], [50], [52].

Aplicaţiile principale ale acestui sistem de scanare se regăsesc în:

- domeniul industrial: - designul de produs;
  - controlul calităţii produselor, în cadrul producţiei de masă;
  - prototipare rapidă [46], [63];
- domeniul biomecanic: - scanarea şi prototiparea rapidă a unor proteze, orteze externe.

d) Surveyor Space Arms (figura 2.3.4) reprezintă acea categorie a sistemelor de scanare de tip braţ mobil de scanare în coordonate, 3D, bazate pe sistemele de măsurare prin emisie de radiaţie LASER.

Fig. 2.3.4 *Sistemul de scanare cu sursă LASER, de tip braţe mobile, Surveyor Space Arms [53]*

Specificaţiile tehnice din care derivă avantajele ale acestui sistem de scanare sunt prezentate mai jos:
- braţ mobil cu acurateţe înaltă;
- rapid, flexibil şi uşor de utilizat;
- prezintă mai multe opţiuni de utilizare, în funcţie de aplicaţiile de măsurare / scanare la care este folosit;
- prezintă sistem electromagnetic de frânare (amortizare);
- domeniul de măsurare poate varia între 1,8 şi 9 metri, cu acurateţe de scanare între 1 şi 10 mm;
- prezintă sistem de compensare a variaţiilor de temperatură;
- sistemul de scanare cu sursă LASER (SLP Laser Probe) asigură viteze de scanare de până la 50.000 de puncte de coordonate / secundă;
- kitul de scanare este livrat în 3 game de dimansiuni ale capetelor de scanare (de la 33 mm la 250 mm), ccea ce îi conferă sistemului capacitatea de a scana zone de suprafaţă foarte detaliate, precum şi zone foarte întinse de suprafaţă, cu acurateţe de aproximativ ± 0,04 ÷ 0,05 mm;
- sistemul de braţe mobile este disponibil în variante pe 5, 6 sau 7 axe de coordonate, ceea ce face ca aceste variante mobile să poată completa cu succes maşinile în coordonate fixe (cu costuri de aproximativ 2 ori mai mari);
- acurateţea de poziţionare a braţelor mobile este de ± 0,002 ÷ ± 0,008 mm;
- sistemul software permite o procesare rapidă şi uşoară a datelor de scanare 3D, atât pentru rapoarte privind inspecţia calităţii produselor, cât şi pentru aplicaţii privind ingineria inversă;
- sistemul permite o scanare directă în mediile software Geomagic, Rapidform şi PolzWorks;
- sistemul software este compatibil cu diferite medii software pentru modelarea CAD: Geomagic Probe, Verisurf, TouchDMIS, DelcamPowerINSPECT, CMM Manager, Metrolog XG [53].

Aplicaţiile de utilizare a braţelor de măsurare din seria *Surveyor Space Arms* se referă la:
- domeniul industrial – scanarea caroseriilor de autovehicule;
- domaniul construcţiilor – conducte de canalizare, ţevi etc.

e) Geomagic Capture Scanner (figura 2.3.5) reprezintă un sistem portabil de scanare 3D pentru inspecţia calităţii, respectiv pentru proiectarea CAD-CAM pe baza scanării modelelor [54].

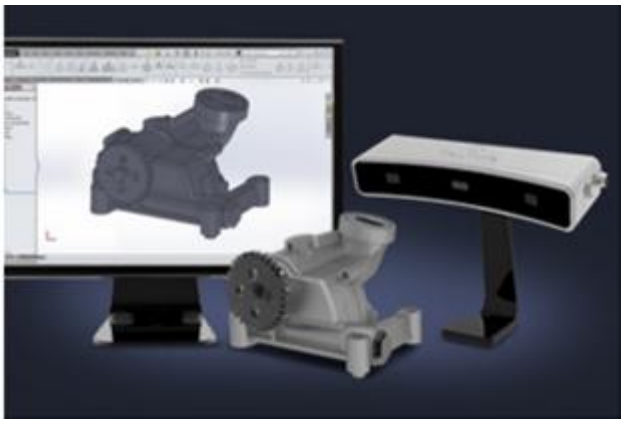


Fig. 2.3.5 *Sistemul portabil de scanare 3D, Geomagic Capture Scanner [54]*

Carcteristicile tehnice şi avantajele utilizării acestui sistem sunt:
- capul de măsurare este echipat cu un sistem de scanare de tip LED, în lumină de culoare albastră;
- sistem software uşor de utilizat în vederea reconstituirii modelului CAD al reperului scanat [54];
- sistemul software permite verificarea calităţii reperelor scanate, din punctul de vedere dimensional, putându-se măsura virtual cotele, direct pe modelul CAD generat prin scanare.

Principalele aplicaţii ale utilizării acestor sisteme de scanare se regăsesc:
- în domeniul industriei (domeniul auto, al producţiei de serie, al producţiei de prototipuri etc.);
- în domeniul biomecanic – obţinerea modelelor CAD a diferitor tipuri de proteze.

f) Rexscan CS + 3D Scanner (figura 2.3.6), ca şi sistemul *Geomagic Capture Scanner*, reprezintă o soluţie fiabilă pentru aplicaţiile în domeniul ingineriei inverse [55].

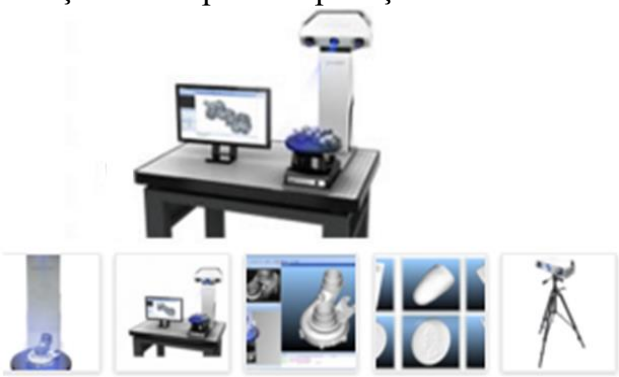


Fig. 2.3.6 *Sistemul de scanare 3D, Rexscan CS+3D Scanner [55]*

Principalele avantaje ale acestui sistem derivă din următoarele specificaţii tehnice:
- utilizează tehnologia LED-ului în lumină albastră, implicând un consum redus de energie;
- integrează senzorica şi controller-ul într-un singur sistem de măsurare;
- include o gamă largă de variante de scanare, și anume la distanţe de: 100mm, 200 mm şi 400 mm;
- rezoluţia camerei de captare a imaginilor este de 2 megapixeli;
- sistemul este unul portabil, uşor de transportat, cu dimensiunile de gabarit de 400 x 110 x 210 mm;
- ideal pentru măsurarea, respectiv scanarea şi reconstrucţia modelelor CAD a reperelor simple şi complexe de dimensiuni mici şi medii;
- precizia de măsurare: ± 0,02 mm.
- sub-sistemul de scanare automată şi de sincronizare activă permite ca printr-o simplă comutare a unui buton se poate genera foarte rapid procesul de scanare; mai mult, prin aceasta se realizează o sincronizare aproape perfectă a procesului de scanare a modelului cu cel de generare a imaginii cu ajutorul camerelor; astfel, operatorul poate uşor să recunoască fiecare poziţie de scanare, în parte şi, după caz, poate să realizeze şi să integreze mai multe scanări acolo unde este necesar (pentru o rezoluţie şi acurateţe mai bune);
- nu este necesară o aliniere manuală, prealabilă a reperului scanat sau măsurat: prin utilizarea informaţiilor privind calibrarea axelor, se efectuează o aliniere de mare precizie, în mod automat;
- procesul de scanare este unul foarte simplu: pentru scanări complexe ce necesită procedeul „Patch”, sistemul Rexcan oferă flexibilitatea generării automate a traiectoriei de scanare de tip „Patch”, permiţându-i operatorului să creeze propria traiectorie de scanare, permiţând repetarea în mod automat a algoritmului de preluare a datelor, în mod similar, pentru diferite dimnsiuni şi forme ale obiectelor [48], [55];
- calibrarea în mod automat: dacă pentru versiunile mai vechi, procesul de calibrare a sculelor de măsurare era extrem de important, dar, totodată dificil de realizat, în noua versiune, prin instalarea accesoriului software specific procesului de calibrare automată, această problemă este mult simplificată: printr-o simplă accesare a pictogramei de calibrare, utilizatorul este ghidat foarte simplu şi rapid în realizarea procesului de calibrare automată a sculelor de măsurare; prin acest sistem, procesul de calibrare automată a sculelor de măsurare devine unul accesibil şi chiar atractiv pentru orice utilizator [48], [55].
- opţiunea *Tripod – Rexcan CS*: în cazul în care este necesar să se scaneze obiecte mai mari sau mai grele decât cele specifice în mod obişnuit acestui sistem, se poate proceda la detaşarea simplă şi rapidă a capului de scanare de corpul întregului sistem; capul de scanare se poate instala pe un alt trepied sau stand de măsurare, mai mare;
- poate fi instalat chiar la biroul utilizatorului: pentru sarcini regulate privind operaţii de scanare periodice, nu este necesară deplasare scannerului 3D, respectiv nu este necesară deplasarea operatorului la standul de scanare (dispus în altă parte decât la birou). Prin aceasta, utilizatorul se va putea concentra şi dedica şi mai bine sarcinilor zilnice ce-i revin la serviciu [55].

g) Rexscan DS3 Scanner (figura 2.3.7) este un scanner 3D cu structură uşoară, dedicat reperelor de mici dimensiuni, specifice fiind viteza şi precizia de scanare foarte ridicare [56].

Fig. 2.3.7 *Sistemul DS3 Scanner [56]*

Printre principalele avantaje rezultate din caracteristicile tehnice și funcționale ale scannerului 3D, DS3 se pot enumera următoarele:
- viteză sporită;
- flexibilitate;
- precizie;
- simplitate în ceea ce privește numerizarea pieselor de mici dimensiuni;
- camera dublă de achiziție a imaginilor oferă o precizie net superioară și o linie de scanare mai mare, în comparație cu o cameră simplă;
- scanarea rapidă permite o scanare completă în doar 3-4 minute a unui obiect, fără a fi afectată precizia de numerizare;
- compatibilitate cu majoritatea mediilor software de design; permite generarea de fișiere de tip .STL ale reperelor scanate, compatibile cu majoritatea mediilor CAD cele mai frecvent utilizate;
- prezintă 2 axe de deplasare (de basculare și de rotire);
- sistemul este disponibil în 2 versiuni:

- DS3 SILVER, cu rezoluția de scanare de 1.3 megapixeli și linia de scanare de 100 mm;
- DS3 GOLD, cu rezoluția de scanare de 5.0 megapixeli și linia de scanare de 100 mm, respectiv de 40 mm [56].

Principalele aplicații ale acestui sistem de scanare sunt următoarele:
- confecționarea bijuteriilor
- industrie (mecanică de precizie, robotică etc.);
- structuri dentare [56].

h) Handy Scan 300 TM / 700 TM (figura 2.3.8) este unul dintre sistemele cele mai eficiente din punctul de vedere al ingineriei inverse și/sau al design-ului [57].

a) **b)**

Fig. 2.3.8 *Sistemul Handy Scan: a) modelul 300TM; b) modelul 700 TM [57]*

Principalele caracteristici tehnice sunt specificate după cum urmează:
- greutate: 0,85 kg;
- dimensiuni de gabarit: 77 x 122 x 294 mm;
- rata de măsurare: modelul 300 TM: 205 măsurări/s; modelul 700 TM: 480 măsurări/s;
- aria de scanare: modelul 300 TM: 225 x 250 mm; modelul 700 TM: 275 x 250 mm;
- sursa de radiație: modelul 300 TM: 3 spoturi LASER în formă de cruce; modelul 700 TM: 7 spoturi LASER în formă de cruce;
- tipul radiației LASER: 2M;
- rezoluția de scanare: - modelul 300 TM: 0,1 mm;
  - modelul 700 TM: 0,05 mm;
- precizia de scanare volumetrică: - modelul 300 TM: 0,02 ÷ 0,1 mm / m;
  - modelul 700 TM: 0,02 ÷ 0,06 mm / m;
- precizia de scanare volumetrică (cu extensia MaxShot 3D): 0,02 ÷ 0,025 mm/m;
- distanța – limită de scanare: 300 mm;
- profunzimea câmpului de radiație LASER: 250 mm;

- gama de dimensiuni ale reperelor scanate (recomandat): 0,1 ÷ 4 m;
- mediul software: Vxelements;
- formatele fișierelor generate: .dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr;
- sisteme software compatibile: 3D Systems (Geomagic R Solutions), InnovMetric (PolyWorks), Dassault (CATIA V5 și SolidWorks), PTC (ProEngineer), Siemens (NX și Solid Edge), Autodesk (Inventor, Alias, 3ds Max, Maya, Softimage);
- conexiuni standard: 1 x USB 3.0;
- domeniul temperaturii de lucru: 5 ÷ 40°C;
- domeniul umididății în zona de lucru (fără condens): 10 ÷ 90% [57].

Printre principalele aplicații ale acestui sistem se pot enumera:
- industria auto (caroserii, șasiuri etc.);
- construcții.

f) Hexagon HP-L-20.8 Laser Scanner (figura 2.3.9) [58]

Fig. 2.3.9 *Sistemul Hexagon HP-L-20.8 [58]*

Sistemul *HP-L-20.8* cu scanner LASER este o soluție pentru brațele mobile *ROMER Absolute Arm SE*, caracrerizat prin următoarele avantaje și specificații tehnice:
- asigură o achiziționare rapidă a norului de puncte;
- sistem portabil, ușor de utilizat;
- prezintă 5 linii de scanare, ajustabile;
- rată de scanare de până la 150.000 puncte / s;
- distanța minimă între punctele de coordonate achiziționate: 0,013 mm;
- gamele de lățimi ale scannerului: 220 mm / 130 mm / 63 mm / 51 mm / 25 mm;
- controller-ul extern: nu este necesar;
- siguranța radiației LASER: clasa 2;
- temperatura de lucru: 5 ÷ 40°C [58].

Printre principalele aplicații ale acestui sistem de scanare se pot aminti:
- inspecția reperelor în raport cu modelele CAD;
- inspecția suprafețelor neregulate, raportate la modelele CAD specifice;
- ingineria inversă;
- o gamă foarte mare de aplicații metrologice [58].

g) Hexagon Absolute Arm – 6 Axis (figura 2.3.10) [59]

Fig. 2.3.10 *Sistemul Absolute Arm – 6 Axis [59]*

Caracterizându-se printr-un mecanism foarte ergonomic de articulații ale brațelor, urmărind conturul și mișcările naturale, specifice mâinii operatorului, sistemul *Absolute Arm – 6 Axis*, prezintă o serie de alte avantaje:
- feed-back-ul senzorial permite utilizatorului să facă măsurători chiar și în încăperi cu cele mai dificile condiții de lucru (praf, vibrații, umiditate sporită, nivel mare de zgomot, variații mari de temperatură etc.);
- s-a dovedit a fi sistemul cel mai rapid și ușor de utilizat în industrie;

- sub-sistemul de schimbare rapidă și inteligentă a capetelor de scanare nu necesită scule speciale sau vreo recalibrare după schimbarea lor;
- datorită sistemelor de codificare a semnalelor, poziția brațelor poate fi monitorizată în permanență, eliminându-se procedura complexă de inițializare, prin revenrea în origine a brațelor de scanare;
- soluția dispunerii unui tub dublu din fibră de carbon (ce protejează senzorii de poziție) face ca modificările de temperatură să nu afecteze calitatea procesului de măsurare și scanare [59].

h) Hexagon RS3 Integrated Scanner (figura 2.3.11) [60]

Fig. 2.3.11 *RS3 Integrated Scanner [60]*

Datorită posibilității de a măsurăra și scanăra în mod selectiv (prin contact cu obiectul sau cu ajutorul radiației LASER), acest sistem devine unul dintre cele mai flexibile și practice pentru diferite aplicații și categorii de obiecte scanate.

Printre principalele avantaje de rezultă din caracteristicile tehnice, se pot menționa:

- rată de scanare dublă în comparație cu versiunea precedentă, RS2; ca urmare, utilizatorul poate scana aceleași tipuri de repere dar într-un timp înjumătățit;

- densitate crescută a norului de puncte, ceea ce conduce la o precizie mare de scanare.

Printre principalele aplicații se enumeră: digitizarea 3D, analiza comparativă a produselor de referință; asamblarea virtuală, ingineria inversă, prototiparea rapidă și posibilitatea unor prelucrări pe mașinile cu comandă numerică [60].

i) Perceptron Smart 3D (figura 2.3.12) [61]

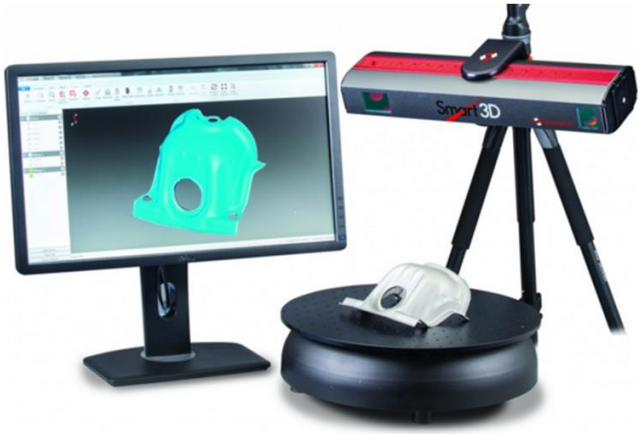


Fig. 2.3.12 *Perceptron Smart 3D [61]*

Smart 3D reprezintă un sistem de scanare foarte accesibil, prevăzut cu o masă rotativă, permițând o scanare completă, fără a mai fi necesară vreo repoziționare, respectiv a reperului, respectiv aliniere a sistemului de scanare față de acesta.
Caracteristicile tehnice și avantajele sunt prezentate mai jos:
- volumul de scanare: 200 x 225 x 225 mm;
- sistemul software, SCANWORKS STUDIO este unul intuitiv, permite o îmbunătățire a proiectelor ce se bazează pe ingineria inversă și pe design;
- prin utilizarea opțiunii ”auto rescan” ce permite scanarea linie cu linie, prin suprapunere, se poate realiza totodată și imprimarea 3D, prin generarea de fișiere de tip .STL [48], [50], [61].

j) Proto 3000 3D Laser Scanning (figura 2.3.13)

Acesta se remarcă prin măsurări rapide și corecte, datorită celui mai precis scanner portabil 3D de pe piață, din prezent [62]. Principalele sale avantaje ce rezultă din caracteristicile tehnice și funcționale sunt prezentate după cum urmează:
- scannere pe principiul LASER portabile viabile pentru inovații tehnologice;
- accesorii 3D robuste și eficiente;
- scannerele 3D pe principiul LASER îi permit utilizatorului să detecteze proprietățile fizice ale unui obiect, în condițiile unei măsurări foarte eficiente și precise;

- linia de scanare 3D scoate în evidență portabilitatea acestei remarcabile tehnologii; chiar și reperele cele mai mari pot fi scanate datorită mobilității scannerelor HandyScan [50], [62];

Scannerele LASER 3D sunt utilizate în diferite industrii unde inspecția și analiza produselor sunt de o maximă importanță, ca urmre a următoarelor considerente [62]:

- aceste tipuri de scannere LASER sunt ușor de utilizat, mărind considerabil eficiența și productivitatea;
- alinierea scannerelor LASER 3D permite chiar realizarea de laboratoare metrologice, după necesitate;

Fig. 2.3.13 *Sistemul Proto 3000 3D LASER scanning [62]*

- aceste sisteme de scanare folosesc optica specifică pentru transmiterea a trilioane de fotoni către un obiect, receptând înapoi doar un mic procent din fotonii emiși; datorită acestei tehnici, aceste scannere 3D sunt capabile să reproducă foarte rapid modele 3D ale diverselor obiecte, fără a mai fi necesare operații minuțioase de măsurare, care luau foarte mult timp, cum era în cazul utilizării aparatelor de măsurare clasice;
- scannerele 3D ilustrează și descriu informațiile unor puncte de referință specifice în raport cu obiectele selectate;
- mai mult, tehnologia înaltă a acstor capete de scanare permite ca fotonii emiși să verifice calitatea suprafețelor obiectelor, la viteza luminii [62], [63].

Printre principalele aplicații ale acestui sistem se pot aminti:

- modelarea reperelor tridimensionale;
- ingineria inversă în aplicații post-proces [62].

Sistemul FaroArm (figura 2.3.14) reprezintă o soluție inovativă pe plan mondial privind măsurările portabile [64].

Fig. 2.3.14 *Sistemul portabil Faro Arm [64]*

Caracteristicile tehnice și avantajele acestor sisteme sunt prezentate mai jos:

- prin dispunerea capului de scanare *FARO LASER Line Probe* la brațele portabile, se obțin performanțe foarte înalte în privința măsurării detaliate a formelor suprafețelor, făcând ca sistemul să devină o combinație perfectă între o MMC portabilă pe principiul măsurării prin contact și, totodată fără contact;
- volumul de lucru al acestor sisteme de scanare este prezentat în tabelul 2.1.

Faro Arm este o MMC portabilă permițând fabricanților verificări simple și rapide a calității produselor, cu ajutorul tehnologiei de inspecție 3D, printre principalele aplicații putându-se enumera:

- certificări ale sculelor pe prelucrare;
- comparare de modele CAD;
- analize dimensionale;
- inginerie inversă [64].

Tabelul 2.1 *Volumul de lucru şi repetabilitatea sistemelor de scanare protabile Faro Arm [64]*

Volumul de lucru (m)						
	1,2	1,8	2,4	2,7	3	3,7
Repetabilitatea (mm)						
Versiunea Edge		0,024		0,029		0,064
Versiunea Prime	0,016	0,019	0,024		0,042	0,060
Versiunea Fusion		0,036	0,043		0,074	0,104

k) Sistemul de scanare ExaScan (figura 2.3.15) este dedicat scanării de repere de dimensiuni mici şi medii, având avantajul achiziţiei de imagini în timp real, sistemul fiind unul foarte eficient din punctul de vedere al obţinerii rapide a modelelor CAD; scanerele din seria *ExaScan* permit generarea şi exportul de fişiere cu extensia .IGS şi .STL, fiind ulterior relativ uşor de prelucrat [63], [65].

Fig. 2.3.15 *Prezentarea sistemelor portabile de scanare din seria ExaScan [65]*

Principiul de funcţionare al acestora se bazează pe emisia de radiaţie LASER, pentru obţinerea unei precizii mai bune de scanare fiind recomandat ca reperele să fie confecţionate din materiale cu grad relativ redus de reflexie; mai mult, se recomandă ca pe obiectul scanat să se dispună marcatori (plasaţi echidistant), pe cât posibil în concordanţă cu dispunerea acestora pe placa de calibrare, aceasta în scopul obţinerii unei rezoluţii cât mai bune a modelului CAD;

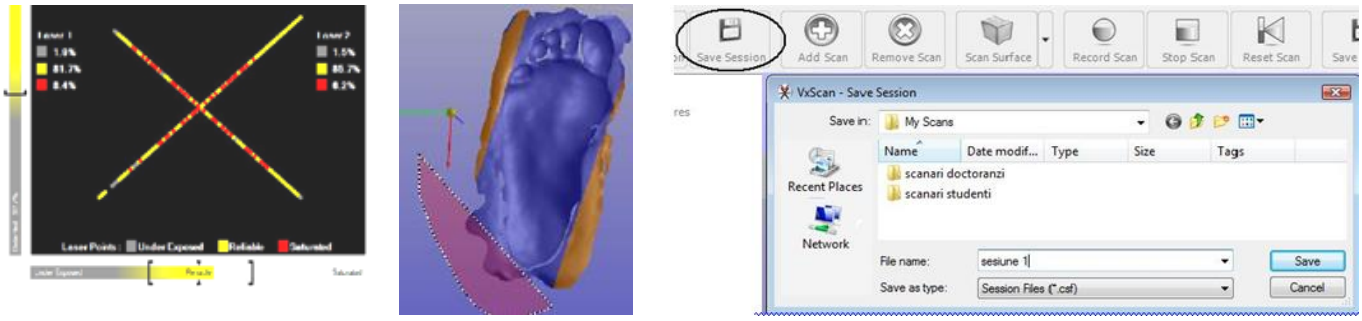
Caracteristicile tehnice şi funcţionale ale acestor tipuri de scannere sunt prezentate în tabelul 2.2:

Tabelul 2.2 *Caracteristicile tehnico-funcţionale ale sistemelor de scanare ExaScan [65]*

Domeniul de măsurare [mm]	± 22,5
Rata de măsurare [nr cicluri de măsurare (emisie-recepţie)/s]	25000
Rezoluţia de măsurare [mm]	0,05
Distanţa de scanare [mm]	300

Sistemele de scanare *ExaScan* sunt prevăzute cu interfeţe software care permit deopotrivă calibrarea scanerului, înainte de începerea sesiunii de lucru, cosmetizarea modelului CAD obţinut şi exportul modelului CAD în fişiere compatibile cu medii consacrate precum CATIA, ProEngineer, SolidWorks, ANSYS etc (figura 2.3.16).

Aceste scannere au aplicaţii în domenii precum: industrua auto (arbori, turbine, roţi dinţate), biomecanică (proteze, orteze), artă (transpunerea în format digital a picturilor, sculpturilor etc.) [1], [63]. Avantajelul major al acestor sisteme manuale de scanare este acela că procedura este una ușoară, rapidă și foarte practică. Singurul aspect care necesită o atenție deosebită este cel referitor la etapa premergătoare numerizării, și anume procesul de calibrare a sistemului (figura 2.3.16, a).



a) b) c)

Fig. 2.3.16 *Etape de lucru cu interfaţa software asociată modelelor ExaScan: a) etapa de calibrare a scannerului; b) etapa de cosmetizare a modelului scanat; c) Etapa de salvare în fişiere compatibile cu medii de modelare CAD-CAM [63], [65]*

2.4 Companii producătoare de MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER

În ultimele decenii s-au dezvoltat o serie de companii şi concerne internaţionale specializate în echipamente de măsurare şi control al calităţii produselor, printre care se disting maşinile de măsurare în coordonate, deosebit de utile şi eficiente în acest scop. Mai mult, în ultimii ani, cercetările acestor companii în dezvoltarea şi perfecţionarea continuă a MMC cu sisteme de măsurare şi scanare fără contact, pe principiul emisiei radiaţiei LASER au cunoscut o continuă amploare [5], [6].

Printre companiile producătoare de MMC şi sisteme de scanare pe principiul pe principiul radiaţiei LASER, cele mai cunoscute pe plan mondiale la ora actuală se pot menţiona următoarele:

2.4.1 Nikon Metrology (Japonia)

Nikon Metrology reprezintă un brand de renume mondial, considerat ca fiind, la origine, lider domeniul instrumentaţiei optice, specializată pe microscopie şi sisteme optice şi optometrice, ulterior specializat şi în domeniul echipamentelor şi sistemelor de măsurare în coordonate, având la bază principii optice (fugura 2.4.1) [66].

Fig. 2.4.1 *Prezentarea brandului companiei Nikon Metrology [66]*

Compania joaponeză *Nikon* s-a înfiinţat în anul 1917, când trei fabricanţi de componente optice s-au unit în vederea constituirii unei companii, cunoscută la acea vreme sunb denumirea *Nikon Kogaku Japan Optics,* remarcându-se prin producerea de sticlă optică specială. În anul 1925 compania şi-a extins activitatea în scopul producerii primului microscop având suportul obiectivelor rotativ şi obiective interschimbabile, microscopul Joico. Următoarele câteva decade au adus o creştere puternică în domeniul perfecţionării în domeniul microscopiei, dezvoltându-se microscoape inovative stereo, cu sisteme de polarizare. *Nikon* a introdus şi a dezvoltat conceptul de sisteme pentru inspecţia pe principiul optic cu aplicaţii industriale, cum ar fi: comparatoare optice, auto-colimatoare. În anii 1970 au dezvoltat microscoapele Optiphot şi Labphot, iar în anii ′80 compania a lansat peste 80 de produse. Anii ′90 au adus încă şi mai multe inovaţii prin introducerea gamei de sisteme optice Eclipse Infinity. Începutul mileniului III a însemnat explozia imagisticii digitale ca soluţie în domeniul microscopiei,

iar compania *Nikon* a condus încă o dată piaţa în promovarea camerelor digitale performante şi fiabile în acest scop. Introducerea seriei de camere DS şi Coolscope anunţa un mare progres în ceea ce priveşte transferul imaginilor, pe plan mondial [66].

Fig. 2.4.2 *Exemple de produse dezvoltate de compania internaţională Nikon Metrology în ultimii ani [66]*

În privinţa metrologiei tridimensionale, în ultimul deceniu, compania *Nikon* a dezvoltat o serie de sisteme performante, bazate, evident pe integrarea şi utilizarea aparaturii optice de înaltă performanţă, cu aplicaţii atât la MMC, cât şi la sistemele de inspecţie a calităţii, respectiv la braţele de măsurare şi/sau scanare etc (figura 2.4.2) [66].

- MMC / braţe de măsurare portabile / MMC pe principiul optic reprezintă echipamente şi sisteme de primă clasă, oferind soluţii metrologice pentru o gamă foarte largă de aplicaţii;
- scannere pe principiul LASER reprezintă următoiarea generaţie digitală (sistemele *LC* şi *XC LASER scanning*) permiţând inspecţii complete şi precise ale suprafeţelor cu geometrii simple şi complexe;
- scannere digitale 3D - ideale pentru dispunerea pe braţele de măsurare articulate, fiind utile pentru diferite tipuri de inspecţie a calităţii, dar şi pentru aplicaţii privind ingineria inversă;
- sisteme multi-senzoriale HN-6060 - ideale pentru metrologia 3D, asigurând eficienţă, precizie ridicată, inspecţie pe principiul fără contact ale reperelor cu geometrii complexe;
- sisteme bazate pe emisia de raze X – acestea sunt utilizate în tomografia coputerizată; se remarcă prin analiza detaliată în interiorul structurilor reperelor scanate, furnizând imagini digitale de înaltă rezoluţie; evident, acestea sunt folosite foarte frecvent şi în defectoscopie, pentru depistarea şi măsurarea defectelor din structura materialelor (fisuri, incluziuni, impurităţi etc.);
- sistemele Vision reprezintă maşini cu comandă numerică (CNC) prevăzute cu sisteme de măsurare pe principiu optic, cu posibilitatea generării de imagini digitale pentru inspecţia calităţii suprafeţelor pe principiul fără contact, având ca avantaje productivitate maximă şi precizie ridicată;
- microscoape şi sisteme de inspecţie optică - specializate în domeniul măsurărilor industriale şi analiza imaginilor, destinate pentru controlul digital complex şi complet, cu acurateţe maximă de măsurare;
- microscoape industriale – utile pentru o gamă largă de aplicaţii privind inspecţia vizuală; acestea s-au adâugat de curând la portofoliul microscoapelor clasice, oferind utilizatorilor o manipulare simplă şi rapidă a instrumentelor şi permiţând măsurări rapide şi imagini cu rezoluţie mare oriunde este necesar;
- comparatoare optice – robuste, folosite în vederea obţinerii de imagini clare, luminoase pentru un domeniu extrem de larg de repere, datorită autocolimatoarelor care asigură o precizie de măsurare excelentă şi o mare fiabilitate, în special în cazul măsurărilor de repere plane şi/sau cu suprafeţe cu geometrie simplă;

- radare LASER – utilizate şi acestea la scară largă în aplicaţii industriale, permiţând măsurători non-contact, în regim automat, prin inspecţie, la distanţe de până la 60 de metri faţă de obiectele analizate;
- IGPS reprezintă sisteme modulare de urmărire, cu scanare în volume mari, utilizat în tehnologia fabricaţiei şi a montajului, cu posibilitatea localizării simultane a mai multor obiecte, cu maxim de precizie;
- *Nikon Metrology* furnizează de asemenea o gamă completă de interfeţe software adaptate MMC, având la bază principiul scanării cu generarea modelelor CAD prin tehnica „norului" de puncte, mediile software fiind totodată utile ingineriei inverse [66].

2.4.2. Compania FARO

Compania *FARO*, la ora actuală, reprezintă cea mai credibilă sursă pe plan mondial privind tehnologia măsurărilor 3D. Aceasta dezvoltă şi comercializează sisteme de măsurare asistată de calculator, precum şi dispozitive pentru captarea imaginilor şi interfeţe softeware (figura 2.4.3).

Tehnologia dezvoltată de către compania *FARO* permite măsurări 3D de înaltă precizie, imagistică şi compararea dimensională a componentelor şi a structurilor complexe în timpul procesului de producţie, asigurându-se verificarea şi certificarea în permanenţă a calităţii produselor. Dispozitivele realizate de către această companie sunt dedicate inspecţiei elementelor şi a structurilor, prototipării rapide, cu aplicaţii în industrie şi în construcţii, dar şi în identificarea de circumstanţe în care s-au produs anummite accidente sau crime.

Marea majoritate a sediilor companiei *FARO*, la ora actuală se regăseşte îm Lake Mary (Florida, SUA). Compania, de asemenea are un nou centru tehnlologic şi de producţie, de aproximativ 30.00 m^2, localizat în Extron, Pennsylvania, SUA, specific cercetării şi dezvoltării, producţiei şi operaţiilor de servisare pentru sistemele de urmărire pe principiul LASER (Faro Laser Tracker TM) şi sistemele de captare matriceală a imaginilor (Array 3D Imager). Cel mai important sediu al companiei din Uniunea Europeană este localizat în Stuttgart, Germania. Alte sedii ale acestei companii în Europa se găsesc în Marea britanie, Franţa, Spania, Italia, Polonia, Turcia, Olanda, Elveţia. Pe continentul asiatic sediul cel mai important se află în Singapore, dar sedii ale companiei se află şi în China, Vietnam, India, Korea de Sud, Thailanda, Japonia şi Malaezia [67].

Compania *FARO* dezvoltă şi produce MMC portabile şi dispozitive de captare a imaginilor 3D, în scopul rezolvării problemelor privind metrologia dimensională. Tehnologia dezvoltată în cadrul companiei FARO permite măsurări 3D de mare precizie, imagistică şi tehnologii comparative a componentelor şi structurilor, în cadrul proceselor de fabricaţie, în contextul nui proces continuu de asigurare a calităţii. Dispozitivele sunt utilizate cu precădere pentru inspecţia reperelor componente şi a subansamblurilor, pentru procesele de planificare a producţiei [67]. Tehnologia de măsurare 3D permite o continuă îmbunătăţire şi eficientizare a acestor tipuri de procese industriale [60]. Printre cele mai des utilizate sisteme de scanare şi măsurare 3D se pot aminti:

a)

b) c)

Fig. 2.4.3. *Sisteme de măsurare dezvoltate şi comercializate de către compania FARO: a) portalul companiei; b) exemple de scannere LASER; c) exemplu de sistem matriceal de captare a imaginilor [67]*

- sistemul de scannere cu sursă *LASER, HDR Laser Scanners*, cu sisteme software pentru interpretarea instantanee a imaginilor (figura 2.4.3, b) generează imagini extrem de detaliate cu rezoluţie mare pentru o vastă gamă de nuanţe cromatice, în condiţii de iluminare slabă şi puternică; împreună cu sistemul software SCENE, dedicat, specializat pe tehnologia „norului de puncte”, aceste scannere permite o interpretare instantanee a datelor scanate şi, prin aceasta, o simplificare considerabilă a fluxului de lucru;
- sistemul de captare matriceală a imaginilor, *Smart 3D imager arrays* reprezintă o nouă soluţie ce asigură măsurări sofisticate în timpul procesului, minimizând costurile de integrare şi de infrastructură; acest sitem este echipat cu procesoare „on-board” dedicate în primul rând aplicaţiilor industriale; senzorica inteligentă permite o configuraţie matriceală unică pentru generarea şi suprapunerea simultană a mai multor imagini preluate instantaneu, crescând astfel calitatea şi rezoluţia imaginii finale a reperului scanat; prin aceasta este asigurată creşterea semnificativă a productivităţii la un nivel care până în prezent nu putea fi posibil; imaginile instantanee 3D (într-un număr nelimitat) pot fi plasate într-o configuraţie matriceală, oriunde în cadrul procesului de producţie, toate operaţiile fiind simultan controlat printr-un singur calculator [67].

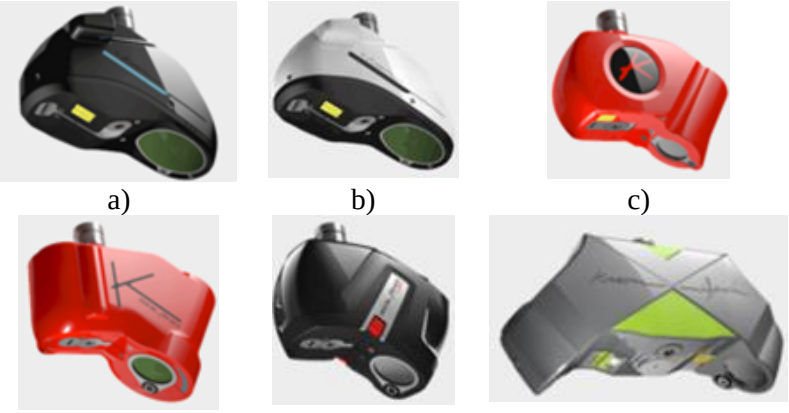
2.4.3 Compania KREON

Fig. 2.4.4 *Portalul companiei KREON [68]*

De peste 20 de ani, compania *KREON* a implementat tehnologii şi sisteme de producţie avansate, la standarde înalte de calitate (figura 2.4.4). Printre sistemele de măsurare dezvoltate şi comercializate de către compania *KREON* se pot aminti: MMC (figura 2.4.5, a), roboţi de măsurare (figura 2.4.5, b), maşini de lucru dedicate (figura 2.4.5, c), braţe de măsurare (figura 2.4.5, d) [68].

a) **b)** **c)** **d)**

Fig. 2.4.5 *Categorii de sisteme de măsurare dezvoltate şi comercializate de către compania KREON: a) MMC clasice; b) roboţi de măsurare; c) maşini dedicate; d) braţe de măsurare [68]*



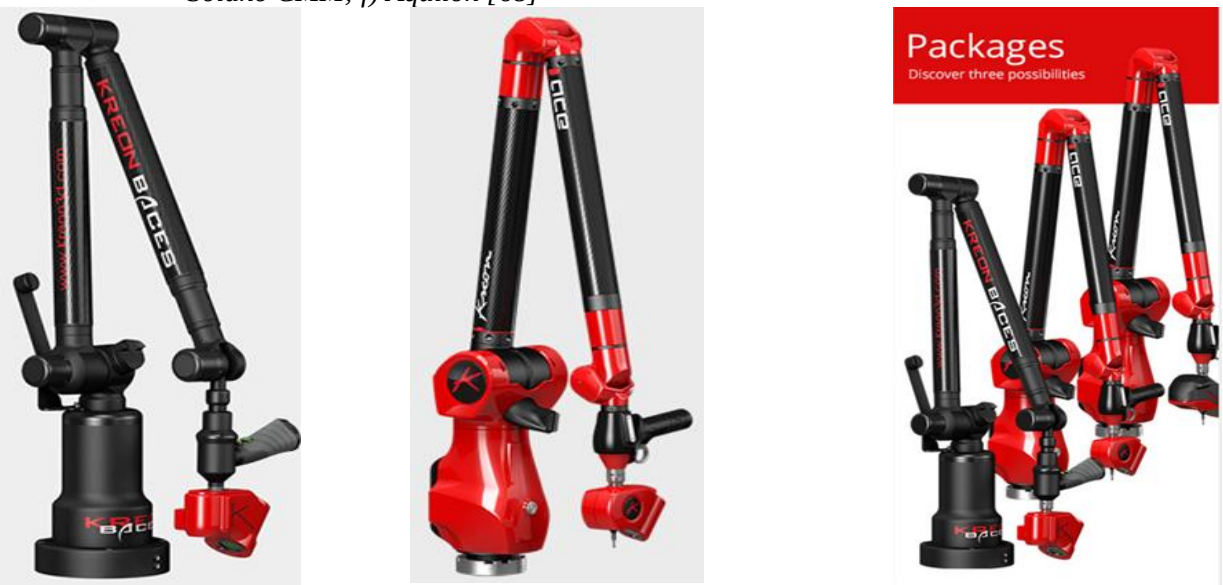
a) b) c)

d) e) f)

Fig. 2.4.6 *Capete de scanare pe principiul emisiei radiaţiei LASER, dezvoltate şi comercializate de către compania KREON: a) Zaphyr II blue; b) Zaphyr II, c) Solano Blue; d) Solano; e) Solano CMM; f) Aquilon [68]*

Un rol aparte în construcţia acestor sisteme de măsurare, bazate pe principiul emisiei de radiaţie LASER, îl au capetele de scanare specifice, dintre care pot fi amintite: *Zaphyr II* (figura 2.4.6, a, b), *Solano* (figura 2.4.6, c, d, e), *Aquilon* (figura 2.4.6, f).

În privinţa braţelor de măsurare, principalele tipuri sunt prezentate în figura 2.4.7:



a) b) c)

Fig. 2.4.7 *Principalele tipuri de braţe de măsurare dezvoltate şi comercializate de compania KREON: a) Kreon Baces Arm; b) Kreon Ace Arm; c) varianta asamblată a breţelor de măsurare [68]*

Braţele Kreon Baces sunt utilizate în condiţii de iluminare puternică, iar braţele Kreon Ace se caracterizează prin design inteligent şi precizie de scanare ridicată [68].

2.4.4 Compania Perceptron

Compania *Perceptron* (figura 2.4.8) oferă un portofoliu valoros în privinţa standurilor de măsurare dimensională a produselor, standuri prevăzute cu sisteme de ghidare robotizată, cu soluţii de măsurare de nivel şi de decalaj dar şi cu soluţii de scanare 3D cu sisteme cu emisie LASER. Av'nd 30 de ani de experienţă, compania Perceptron poate fi considerată o întreprindere parteneră în domeniul metrologiei [69].

Fig. 2.4.8 *Portalul companiei Perceptron [69]*

Soluţiile metrologice oferite de compania *Perceptron* pot fi considerate ca referinţe în domeniul managerierii proceselor complexe de fabricaţie, în vederea îmbunătăţirii calităţii şi, totodată pentru reducerea costurilor şi a timpilor proceselor. La ora actuală, pe plan mondial se află în uz peste 900 de sisteme de măsurare şi peste 3.000 de MMC, toate fiind dezvoltate şi comercializate de către compania *Perceptron*. Această companie îşi are sediul central în Plymouth, Michigan, SUA, având mai multe sedii subsidiare în Brazilia, China, Cehia, Franţa, Germania, India, Italia, Spania, Japonia, Singapore, Slovacia şi Marea Britanie [69].

Principalul deziderat al companiei *Perceptron* este acela de a fi lider mondial în asigurarea tehnologiei metrologice avansate, venind în sprijinul utilizatorilor de a identifica şi de a rezolva problemele privind asigurarea calităţii produselor cel puţin din punctul de vedere metrologic [69].

Compania *Perceptron* a fost înfiinţată în anul 1981 de către absolvenţii Institutului „General Motors" (în prezent Kettering University). Lucrând prin colaborate cu industria auto, absolvenţii respectivi au analizat şi au înţeles efectele dăunătoare ale variaţiei proceselor în cadrul opraţiilor de asamblare a produselor şi au nconchis că „un proces care nu poate fi măsurat nu va putea niciodată să fie efectiv controlat sau optimizat". Prin viziunea revoluţionară şi a eforturilor de pionierat în domeniul ingineriei, aceştia au dezvoltat o soluţie unică şi inovativă, privind măsurarea care a condus rapid şi eficient nu doar la o izolare a problemelor privind asigurarea calităţii, atunci când ele apar, dar şi privind abilitatea de a identifica în mod proactiv aspectele care generează variaţii de regim ale proceselor industriale. Rezultatul final a fost unul revoluţionar: prima soluţie viabilă, privind măsurarea dimensională în timpul procesului de producţie, soluţie dezvoltată cu succes în cele mai grele condiţii de producţie. Pornind de la această soluţie originală, compania Perceptron şi-a continuat perioada de înflorire şi de evoluţie, în jurul dezideratul celor „5 aspecte de diamant": Clientul, Produsul, Cercetarea, Organizarea şi Procesul [69].

În ceea ce priveşte sistemele de măsurare dezvoltate şi comercializate de către compania Perceptron se pot aminti:

- <u>standuri pentru inspecţia dimensională</u> (figura 2.4.9, a) – acestea oferă măsurări fără contact de mare precizie, fiind foarte utile în cazul producţiei componentelor, dar şi în cadrul proceselor de asamblare pe liniile tehnologice, asigurându-se un permanent controlul al calităţii în timpul producţiei;
- <u>MMC pentru inspecţia dimensională</u> (figura 2.4.9, b) – acestea sunt prezentate în mai multe variante constructive: pod rulant, cu masă fixă, cu braţ orizontal, cu fixare pe podea, toate fiind prevăzute cu sisteme senzoriale complexe, pe principiul optic, dar şi cu sisteme software actualizate, asigurând soluţii de metrologie în coordonate de ultimă oră;
- <u>sisteme de scanare 3D</u> (figura 2.4.9, c) – reprezintă sisteme senzoriale avansate de scanare pe principiul emisiei de radiaţie LASER, dispuse pe MMC, braţe de măsurare sau sisteme robotizate, cu aplicaţii în generarea şi analiza modelelor CAD, dar şi în domeniul iingineriei inverse;

- sisteme robotizate de ghidare (figura 2.4.9, d) – deosebit de utile din punctul de vedere al automatizării operaţiilor de producţie;
- sisteme pentru scanarea de repere mari, cu suprafeţe plane şi denivelate (figura 2.4.9, e), se bazează pe soluţia de măsurare prin inspecţia automatizată, non-contact, în scopul creşterea calităţii şi optimizarea proceselor de producţie; sistemele pot fi instalate şi pe liniile de asamblare aflate în mişcare sau în imediata vecinătate a acestora;
- sisteme software metrologice (figura 2.4.9, f) sunt utile pentru colectarea şi analiza datelor privind măsurătorile, cu semnalizarea automată a unor anomalii în cadrul procesului de producţie [69].

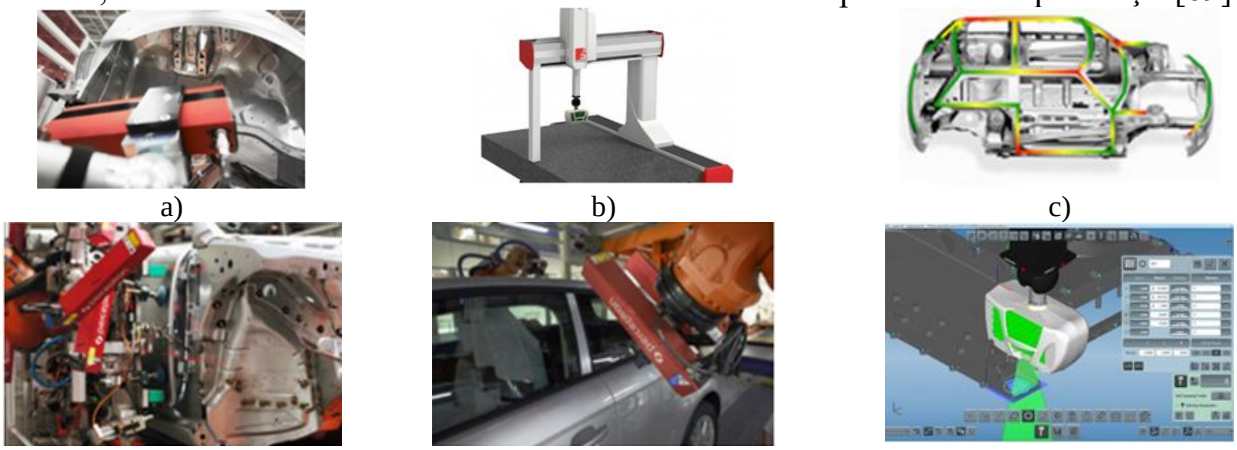


Fig. 2.4.9 *Produse ale companiei Perceptron, cu aplicaţii în metrologie şi inspecţie 3D: a) standuri pentru inspecţia dimensională; b) MMC pentru inspecţia dimensională; c) sisteme de scanare 3D; d) sisteme robotizate de ghidare; e) sisteme pentru scanarea de repere mari; f) sisteme software metrologice [69]*

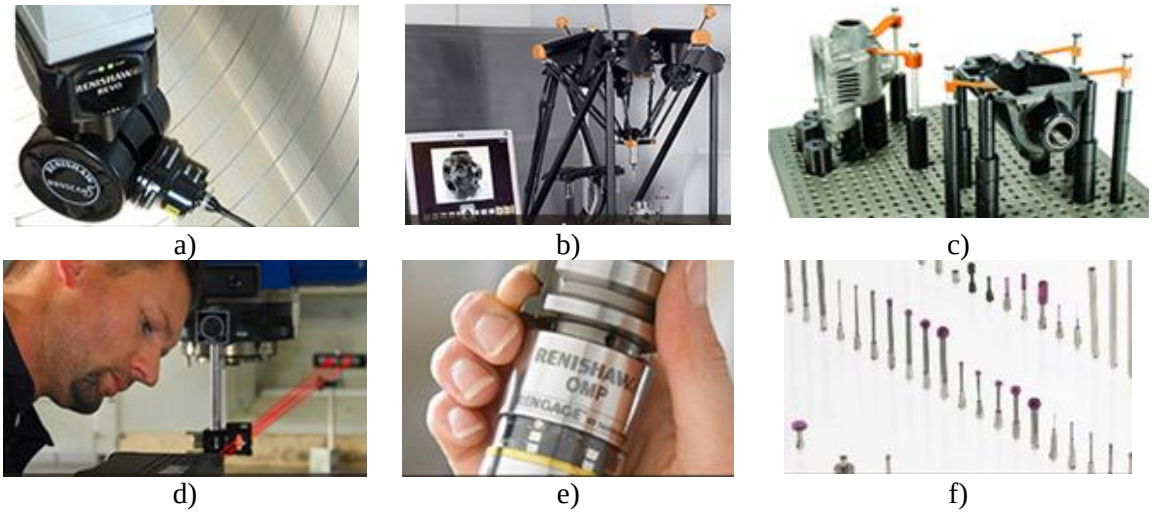
2.4.5 Compania Renishaw (Marea Britanie)

Compania *Renishaw* reprezintă unul dintre leaderii în domeniul ingineriei şi tehnologiei ştiinţifice, cu expertiză în măsurările de precizie şi evaluarea stării de sănătate. Compania furnizează produse şi servicii cu diferite aplicaţii, de la aplicaţii cum ar fi motoare cu jet, turbine eoliene, până la aplicaţii precum stomatologie şi operaţii pe creier. Este de asemenea leader în domeniul operaţiilor auxiliare în cadrul proceselor tehnologice de fabricaţie, cum ar fi prototiparea 3D prin depuneri de pulberi metalice.

La ora actuală, grupul *Renishaw* are peste 70 de oficii în 35 de ţări, având aproximativ 4.000 de angajaţi. Aproximativ 2.600 de persoane sunt angajate în Marea Britanie, acolo unde compania îşi desfăşoară marea majoritatea a activităţilor de cercetare şi dezvoltare, dar şi de producţie [70].

Principalul deziderat al grupului *Renishaw* este de a reduce considerabil timpii necesari necesari producţiei şi inspecţiei componentelor, precum şi de a păstra fiabilitatea maşinilor de măsurare în coordonate. În domeniul automatizărilor industriale, sistemele de măsurare şi calibrare îi ajută pe utilizatori să realizeze produse fiabile şi de înaltă precizie şi calitate [70].

Printre principalele sisteme dezvoltate şi comercializate de compania *Renishaw* se pot specifica următoarele:
- capete de măsurare ataşabile la MMC (figura 2.4.10, a);
- standuri de măsurare mobile, de mici dimensiuni (figura 2.4.10, b);
- sisteme de fixare a reperelor pe masa MMC (figura 2.4.10, c);
- sisteme de calibrare şi optimizare (figura 2.4.10, d);
- sisteme de palpare detaşabile (figura 2.4.10, e);
- vârfuri de palpare pentru capetele de măsurare prin contact (figura 2.4.10, f) [70].



a) b) c)

d) e) f)

Fig. 2.4.10 *Exemple de produse dezvoltate şi comercializate de compania Renishaw în domeniul aplicaţiilor industriale: a) capete de măsurare ataşabile la MMC; b) standuri de măsurare mobile, de mici dimensiuni; c) sisteme de fixare a reperelor pe masa MMC; d) sisteme de calibrare şi optimizare; e) sisteme de palpare detaşabile; f) vârfuri de palpare [70]*

În scopul măsurării parametrilor de poziție și mișcare (în cadrul proceselor tehnologice), compania *Renishaw* oferă o gamă largă de sisteme de codificare/decodificare liniare și rotative, în coordonate absolute și relative, de mare viteză, utilizate cu succes la automatizările industriale. Dintre acestea se pot aminti: codificatoare prin interferometrie LASER (figura 2.4.11, a), codificatoare magnetice (figura 2.4.11, b) și codificatoare optice (figura 2.4.11, c):

a) b) c)

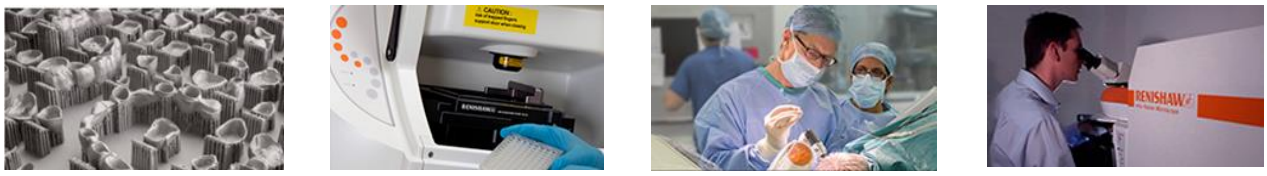
Fig. 2.4.11 *Sisteme de codificare pe principiul radiației LASER, dezvoltate de compania Renishaw: a) prin interferența radiației LASER; b) pe principiul magnetic; c) pe principiul optic [70]*

În medii de lucru ostile, cum ar fi spații expuse la intemperii, subsoluri, produsele *Renishaw* pentru măsurări spațiale ajută beneficiarii să obțină date exacte în privința determinării distanței, a poziției și a orientării obiectelor [70] (figura 2.4.12).

Fig. 2.4.12 *Sisteme dedicate măsurărilor spațiale, pe principiul emisiei radiației LASER [70]*

În domeniul sănătății, compania *Renishaw* își pune în aplicare tehnologia ingineriei de precizie, în scopul provocărilor privind aplicațiile în domeniul sănătății și al medicine. În acest sens s-au dezvoltat o serie de echipamente și sisteme dedicate, după cum urmează:

- în scopul produselor dentare (figura 2.4.13, a);
- variante cu aplicații în diagnosticarea moleculară (figura 2.4.13, b);
- pentru produse neurologice și terapii (figura 2.4.13, c);
- în domeniul spectroscopiei (figura 2.4.13, d) [70].



a) b) c) d)

Fig. 2.4.13 *Sisteme și aparatură dezvoltată de compania Renishaw, în domeniul aplicațiilor din medicină: a) pentru produse dentare; b) pentru diagnosticarea molecular; c) pentru produse neurologice și terapii; d) pentru spectroscopie [70]*

Compania *Renishaw* a dezvoltat o tehnologie de precizie cu utilizare în aplicații științifice de analiză și cercetare, cum ar fi: calibrarea și optimizarea mașinilor (figura 2.4.14) sau spectroscopia (figura 2.4.13, d) [70].

Fig. 2.4.14 *Sisteme pentru calibrarea și optimizarea mașinilor și aparatelor optice și mecanice [70]*

Produsele *Renishaw* se remarcă de asemenea în domeniul prototipării rapide, și anume în fabricarea prin depunere strat cu strat (cu imprimare 3D prin depunere succesivă de straturi formate din pulberi metalice sau din plastic special (de exemplu ABS)) (figura 2.4.15). Imprimarea 3D se realizează pronind de la un fișier CAD în format digital, realizându-se astfel prototiparea pas cu pas a unor compoente tehnice și funcționale din cadrul produselor finale.

a) b)

Fig. 2.4.15 *Tehnologii de prototipare rapidă: a) prin depuneri de pulberi metalice; b) prin depuneri de plastic [70]*

Avantajul este acela că prin această tehnologie se pot prototipa și modele complexe, care, prin metodele convenționale (turnare, forjare, prelucrare prin CNC) [70].

2.4.6 HEXAGON Metrology

Acest concern internaţional are reprezentanţe în ţări din toate continentele și include mai multe companii mai mici, dedicate echipamentelor specifice, cum ar fi, de exemplu:

- DEA GLOBAL – specializată în MMC pe 3 axe;
- ROMER – specializată pe braţe de măsurare, portabile etc.

Compania *HEXAGON Metrology* oferă o gamă largă de produse și operații de servisare pentru toate aplicațiile metrologice cu aplicații în domeniul auto, aerospațial, al energiei și în domeniul medical.

Cu peste 20 de facilități de producție și 70 de centre de precizie pentru servisare, compania are peste 100 de parteneri de distribuție, distribuite pe 5 continente, oferind posibilitatea unui control perfect și continuu a proceselor de producție, îmbunătățind calitatea produselor și crescând eficiența liniilor de producție, pe plan mondial [71].

Compania *HEXAGON Metrology* face parte din concernul *HEXAGON* (*HEXA B*), fiind un lider global pe design, măsurători și viziune tehnologică, ajutând utilizatorii pe partea de design, măsurări și prelucrare și procesare de date. Având o cifră de afaceri de peste 13 milioane de lire sterline, compania furnizează o gamă largă de ateliere de servisare, destinate inclusiv MMC şi instalării şi depanării de sisteme software, operaţii de calibrare, dar şi de iniţiere (de exemplu National Physical Laboratory este acreditat în domeniul iniţierii în domeniul inspecţiei dimensionale, metrologiei şi ssitemelor software dedicate proceselor de producţie) [71].

În ceea ce priveşte produsele cele mai utilizate la ora actuală pe plan mondial, dezvoltate şi comercializate de cămpania *HEXAGON Metrology*, dintre acestea se pot menţiona următoarele:

- sisteme automatizate (figura 2.4.16):

Fig. 2.4.14 *Exemplu de automatizare pentru inspecţia caroseriilor auto [71]*

Acestea sunt adaptate prezentului şi viitorului, prin implementarea de soluţii inteligente şi a unui design futurist, dovedindu-şi maximul de utilitate în proceselor de asamblare. Procesul de automatizare joacă un rol semnificativ în domeniul industrial, asftel încât *HEXAGON Metrology* oferă soluţia cea mai potrivită pentru procesele de măsurare şi control în regim complet automatizat, atât la nivelul liniilor de producţie, cât şi în vecinătatea acestora, cu sau fără contact [71];

- MMC de dimensiuni mici şi medii (figura 2.4.17, a) – destinate măsurării 3D a unor componente cu dimensiuni mici şi medii cu geometrii complexe, fără a fi afectată performanţele legate de precizia de măsurare; acestea permit crearea rapidă de rutine de program pentru preluarea şi interpretarea datelor direct de la modelele CAD [71];

a) b)

Fig. 2.4.17 *CMM de dimensiuni mici şi medii comercializate de compania HEXAGON Metrology: a) de dimensiuni mici şi medii; b) de dimensiuni mari [71]*

- MMC de dimensiuni mari (figura 2.4.17, b) sunt diferite în mai multe variante constructive (de tip pod rulant sau cu masă fixă); acestea se remarcă prin robusteţe stabilitate dar, totodată şi printr-o precizie ridicată de măsurare şi/sau scanare [71];
- pentru o cât mai bună siguranță în exploatare, acestea se recomandă să fie amplasate la parterul instituțiilor de profil.

Fig. 2.4.18 *MMC cu braţe orizontale, utilizate în ndustria auto [71]*

- MMC cu braţ orizontal (figura 2.4.18): acestea se pretează cel mai bine în cazul inspecţiei componentelor din tablă, cum ar fi caroseriile auto sau a altor componente voluminoase, folosite, de exemplu în industria aeronautică, navală, sisteme de apărare, dar şi în industria feroviară; structura deschisă a acestor tipologii de MMC permite accesul direct la reperul măsurat [71];

Fig. 2.4.19 *MMC cu batiul dispus la podea [71]*

- MMC cu dispunerea batiului pe podea (fig. 2.4.19) se remarcă prin precizie ridicată de măsurare, în ciuda dispunerii direct pe podea (sursă de vibraţii) prin stabilitatea acestor variante constructive; acestea devin foarte eficiente şi utile în mediile de producţie, inspecţia automatizată [71];
- prin faptul că batiul mașinii este dispus direct pe podea, datorită stabilității, precizia de măsurare / numerizare crește prin eliminarea uneia dintre cauzele erorilor instrumentale.

- standuri şi scule de măsurare manuale (şublere, micrometre etc.) (figura 2.4.20) – fac parte din seria instrumentelor de măsurare de precizie TESA, cu o înaltă reputaţie privind calitatea, fiabilitatea şi durabilitatea;

Fig. 2.4.20 *Şubler digitalTESA [71]*

De peste 70 de ani, brandul TESA s-a remarcat pe piaţă prin produsele sale de excelenţă, prin bogata expertiză în domeniul micro-mecanicii şi a mecanicii de precizie şi, în egală măsură, prin experienţa vastă, dovedită în domeniul metrologiei dimensionale [6], [71].

- teodoliţi industriali şi staţii cu sursă LASER (figura 2.4.21) – se remarcă prin faptul că asigură procese de măsurare eficiente din punctul de vedere al preciziei şi al costurilor;

Fig. 2.4.21 *Echipamente de tip teodoliţi şi staţii cu sursă LASER, pentru optimizarea sistemelor de navigare şi inspecţia calităţii reperelor de foarte mari dimensiuni [71]*

Prin eficienţa ridicată, aceste echipamente se ridică la cele mai înalte standarde de calitate; volumul de măsurare extrem de peste 500 m^3 face ca aceste staţii să fie o alegere excelentă în ceea ce priveşte inspecţia calităţii şi asamblarea unor componente de dimensiuni mari şi foarte mari; teodoliţii industriali sunt de mult timp un etalon în privinţa compensării optice a sateliţilor şi sistemelor de navigare [71]

- scannere LASER (figura 2.4.22) – acestea joacă un rol cheie în asigurarea calităţii; achiziţia de imagini 3D a formelor şi suprafeţelor reperelor cu geometrii neregulate,

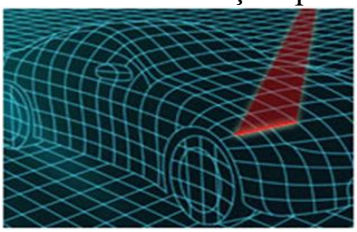


Fig. 2.4.22 *Aplicaţie de scanare cu sisteme detaşabile cu sursă LASER a unei caroserii auto [71]*

prin utilizarea sistemelor de emisie LASER presupune un proces ce necesită eforturi mari pentru asigurarea preciziei necesare; pentru aceasta, în industrie, utilizarea scannerelor LASER se face în primul rând în scopul controlului calităţii privind geometria şi suprafeţele reperelor, dar, totodată şi pentru ingineria inversă, pentru operaţii tehnologice de rectificare şi finisare, în scopul asamblării unor componente funcţionale;

- un sistem de scanare 3D poate fi simplu şi rapid ataşat la un braţ de măsurare şi poate furniza cea mai bună rezoluţie şi precizie de scanare [71], [75].

Fig. 4.2.23 *Sisteme de urmărire cu sursă LASER, dezvoltate de compania HEXAGON Metrology [71]*

- sistemele de urmărire cu sursă LASER (figura 2.4.23) reprezintă un standard pe termen lung în metrologia industrială; aceste sisteme s-au remarcat în privinţa preciziei, a fiabilităţii şi a durabilităţii, fiind utilizate cu mare succes în cadrul MMC portabile; acestea se pretează pentru volume de lucru cu distribuţie sferică, având un volum de până la 160 m^3 [71].

Fig. 2.4.24 *Sisteme de verificare a calităţii pieselor uzinate pe maşinile – unelte [71]*

- sistemele pentru verificarea maşinilor-unelte (figura 2.4.24) – sunt folosite cu succes pentru verificarea pieselor uzinate pe maşinile-unelte; marele avantaj constă în faptul că ele pot asigura inspecţia calităţii chiar în timpul procesului de uzinare, reducându-se într-un mod semnificativ nu doar timpii de producţie, dar şi costurile [71].

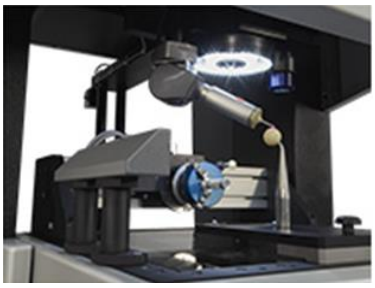


Fig. 2.4.25 *Exemplu de sistemele selectiv de măsurare pentru inspecţia reperelor funcţionale [71]*

- sisteme selective de măsurare (figura 2.4.25) se caracterizează prin flexibilitate, oferind posibilitatea de a alege între sistemele de măsurare pe principiul cu sau fără contact (pe principiul optic), utilizând un singur sistem de măsurare; acesta deci poate asigura fie selectiv, fie simultan atât măsurări prin contact, cât şi pe principiul optic pentru inspecţia calităţii unui reper cu goemetrie simplă şi/sau complexă; de exemplu pentru reperele confecţionate din materiale sensibile la atingere, soluţia este de măsurarea pe principiul optic [71].

- brațele de măsurare portabile (figura 2.4.26):

Fig. 2.4.26 *Brațe de măsurare portabile [71]*

- acestea permit realizarea de măsurători în mod direct în mediul de fabricație, în condițiile în care îmbunătățirile aduse procesului sunt cele mai eficiente și benefice; nu necesită timpi mari pentru instalare, simplitate în manipulare și măsurări 3D din ce în ce mai fiabile: brațele articulate pot fi echipate cu sisteme de palpare pe diferite principii, de diferite dimensiuni, permițându-se inclusiv scanarea unor zone greu accesibile prin metodele convenționale; se remarcă printr-un excelent raport calitate – preț [71].

Fig. 2.4.27 *Sistem de inspecție dimensională de formă tubulară [71]*

- sisteme inspecție de formă tubulară (figura 2.4.27): compania *HEXAGON Metrology* a găsit o soluție eficientă din punct de vedere al costurilor pentru măsurări de preciyie pe principiul fără contact, constând într-un sistem de coturi tubulare cu unghiuri de până la 180°; tehnologiile radiației LASER și în infraroșu sunt compatibile cu toate brațele de măsurare realizate de compania *HEXAGON Metrology* [71].

Fig. 2.4.28 *Sistem de scanare cu sursă LASER, în lumină albă [71]*

- sistemele de scanare cu sursă LASER în lumină albă (figura 2.4.28) – acestea reprezintă o soluție pentru măsurările 3D pe principiul optic, având drept scop îmbunătățirea proceselor inginerești și de producție în cadrul industriilor automatizate și nu numai; prin aceasta se asigură o accelerare a proceselor de fabricație și posibilitatea de a se atinge standarde mai înalte de calitate într-un timp mai scurt; mai mult sunt reduse și costurile de producție, aducând profituri considerabile pentru fiecare produs fabricat, în parte [63], [71].

- senzori folosiți la capetele de scanare (figura 2.4.29):

Fig. 2.4.29 *Variante de capete de măsurare/scanare dezvoltate de compania HEXAGON Metrology [71]*

- compania *HEXAGON Metrology* produce și comercializează o gamă largă de capete de palpare și accesorii pentru MMC, însemnând o evoluție de ultimă oră în domeniul capetelor de măsurare pentru MMC; această tehnologie modernă adresează o gamă largă de echipamente de precizie, destinate dezvoltării și asigurării unor măsurări cât mai rapide și precise; prin aceste produse, compania *HEXAGON Metrology* garantează o calitate la cele mai înalte standarde în ceea ce privește MMC [71].

- sisteme software: compania *HEXAGON Metrology* se află printre dezvoltatorii cei mai de renume în domeniul interfețelor software cu aplicații în domeniul metrologiei și a proceselor industriale și oferă o gamă largă de medii software dedicate și/sau personalizate, ce permit achiziții, analize, gestionări și statistici de înalt nivel ale datelor; compania *HEXAGON Metrology* produce interfețele software cele mai populare în domeniul metrologiei dimensionale, în special cele asociate MMC, dar nu numai [71];
- accesorii: exploatând la maximum potențialul instrumentelor de măsurare, accesoriile originale specifice HEXAGON Metrology optimizează eficiența și flexibilitatea echipamentelor de măsurare și chiar de fabricație; accesoriile pe principiul optic, dispozitivele de siguranță, caracteristicile de rețea, fac chiar posibilă comunicarea între echipamente, în cadrul mai multor linii de fabricație [64];
- sistemele de protecție ale sistemelor aflate în gestiune permit securizarea acestora, prin vânzarea și pregătirea de operații în acest scop [71];
- echipamentele de calibrare stau la baza standardelor de măsurare dimensională în cadrul laboratoarelor metrologice: produsele din această categorie se referă la: interferometre, sisteme cu emisie LASER cu frecvență stabilizată etc. [71].

2.4.7 ARTEC 3D (Luxemburg)

Încă de acum o decadă, compania *Artec 3D* s-a remarcat printre liderii mondiali în privinţa scannerelor manuale 3D, cu aplicaţii în industrie, fiind expert în domeniul tehnologiei 3D şi având drept aplicaţii: procesele de fabricaţie şi designul industrial, sănătatea publică, ştiinţa şi educaţia, respectiv arta şi designul. Compania – mamă îşi are sediul central în Luxemburg, acesta fiind nucleul produselor specifice acesteia. În afară de Luxemburg, compania are pionierate şi echipe de specialişti şi în Palo Alto, California (SUA), respectiv în Moscova [72].

Printre principalele variante de scannere produse şi comercializate de către compania *Artec 3D* se remarcă următoarele:

Fig. 2.4.30 *Scannerele protabile 3D din seria Artec Eva [72]*

- sistemul Artec Eva (figura 2.4.30) face parte din seria de scannere portabile 3D, pentru profesionişti, fiind ideale pentru numerizarea rapidă şi precisă a modelelor 3D, cu textură, asociate obiectelor de mărimi medii, cum ar fi busturi, jante din aliaj sau sisteme de evacuare ale motoarelor de motocicletă;

- aceste sisteme se caracterizează printr-o scanare rapidă, în condiţiile unor măsurători precise, de înaltă rezoluţie, cu aplicabilitate în aproape toate domeniile, fără a mai fi necesare echipamente suplimentare [72].

- uşoare, rapide şi foarte flexibile, scannerele *Artec Eva* sunt cele mai populare, fiind un lider pe piaţă în domeniul scannerelor portabile 3D; bazându-se pe tehnologia utilizării în condiţii de siguranţă a radiaţiei luminoase, Artec Eva reprezintă o soluţie viabilă în orice situaţie pentru numerizarea obiectelor de aproape orice tip, inclusiv a obiectelor cu suprafeţe foarte întunecate şi foarte strălucitoare, totodată;
- aceste sisteme de scanare se mai remarcă prin viteză mare de lucru, precizie şi uşurinţă în utilizare, aceste aspecte făcându-le să fie un produs esenţial pentru o gamă largă de aplicaţii industriale: prototipare rapidă, controlul calităţii, conservarea patrimoniului, industria auto, criminalistică, medicină (în domeniul protezelor şi ortezelor) şi industria aeronautică; în acest scop, scannerele Artec Eva sunt utilizate pentru personalizare, inovare şi fluidizarea proceselor industriale; sistemele de scanare Artec Eva au fost utilizate înclusiv pentru a-l scana pe preşedintele SUA, domnul Barack Obama, obţinându-se primu portret 3D al unui preşedinte american [72].
- scannerele Artec Space Spider (figura 2.4.31) reprezintă un nou instrument de precizie, îmbunătăţit pentru utilizatorii CAD şi pentru ingineri; acestea se caracterizează printr-o rezoluţie 3D înaltă, obţinută pe principiul emisiei de radiaţie în lumină albastră; aceste scannere sunt ideale pentru numerizarea de obiecte mici, dar şi pentru detalii complexe în cazul obiectelor industriale de mari dimensiuni, permiţând reproducerea cu precizie şi rezoluţie ridicată a imaginilor obiectelor scanate, imaginile având culori clare, strălucitoare şi contururi nete [72].

Fig. 2.4.31 *Scannerele în lumină albastră, din seria Artec Space Spider [72]*

- abilitatea scannerelor de a reproduce geometrii complexe, muchii ascuţite, răsfrângeri, pereţi subţiri etc., le conferă acestora o tehnologie aparte; mai mult ele sunt ideale pentru numerizarea cu rezoluţie înaltă a unor obiecte, cum ar fi mulaje, chei, monede, urechea umană, cu procedeul de exportare a modelelor virtuale 3D în format CAD;
- scannerele *Space Spider* oferă posibilităţi aproape nelimitate în domenii precum ingineria inversă, controlul calităţii, designul produselor şi al fabricaţiei;
- ultimele generaţii de scannere se caracterizează printr-un sistem foarte performant de compensare a erorilor de temperatură şi o electronică avansată, ceea ce face ca acestea să reproducă modelele 3D cu maximum de precizie, în doar 3 minute, de 10 ori mai rapid decât modelele mai vechi (Spider); mai mult, ele asigură o repetabilitate pe termen lung în privinţa achiziţiei de date, aceasta în condiţiile în care precizia nu este afectată de fluctuaţiile condiţiilor de mediu [72].

2.4.8. Compania WENZEL (Germania)

Compania *WENZEL* reprezintă o soluţie inovativă şi flexibilă pentru problemele utilizatorilor, o soluţie a ingineriei de precizie şi a perteneriatului, este o companie suficient de puternică, încât să răspundă cerinţelor clienţilor pe plan mondial, atât în domeniul metrologiei, cât şi al aspectelor de fineţe, ca de exemplu finisajele auto [73]. Această companie este organizată pe 5 linii principale de producţie:
- MMC pentru metrologia 3D (figura 2.4.32) sunt disponibile în mai multe variante constructive, cum ar fi: pod rulant, cu masă fixă, cu braţ orizontal etc.

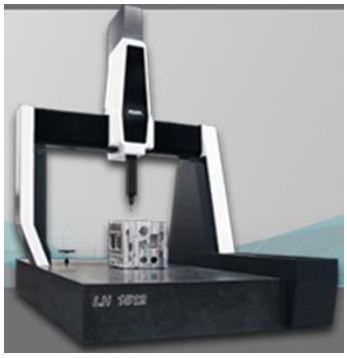
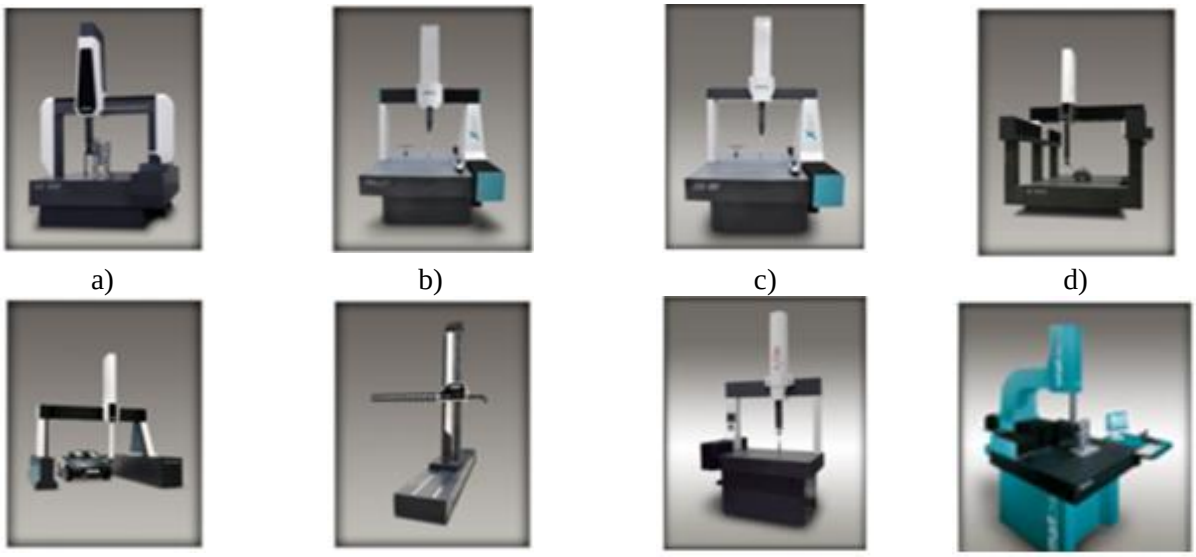


Fig. 2.4.32 *MMC dedicate aplicaţiilor metrologice [73]*

- de mai bine de 4 decade, domeniul MMC constituie piatra de temelie a companiei *WENZEL*, integrând perfect toată gama de capete de măsurare Renishaw, împreună cu accesoriile sale; sediile *WENZEL* localizate în America prezintă o ofertă completă în ceea ce priveşte servisare şi mentenanţa MMC;
- varietatea MMC reprezintă o parte a echipamentelor *WENZEL* în domeniul metrologiei, incluzând: un sistem de scanare 3D cu sursă LASER, un sistem de marcaj, un cap de scnare cu emisie în lumină albă, un scanner inductrial (*exaCT*), o linie completă de standuri de inspecţie şi o gamă de MMC de mare viteză, pe principiul optic [73];

- în figura 2.4.33 sunt prezentate mai multe modele de MMC produse şi dezvoltate de compania *WENZE*L:



a) b) c) d)

e) f) g) h)

Fig. 2.4.33 *Variante constructive de MMC produse de compania WENZEL: a) LH generation; b) XOplus; c) XOrbit; d) LH Gantry; e) LFH; f) R Series; g) XCite Manual; h) Smart [73]*

- <u>standuri metrologice</u> (figura 2.4.34) – acestea reprezintă segmentul cel mai mare al maşinilor de inspecţie pe 4 axe;

Fig. 2.4.34 *Stand metrologic dezvoltat în cadrul companiei WENZEL [73]*

- standurile metrologice produse de compania *WENZEL* au capacitatea de a măsura repere de dimensiuni mari şi foarte mari, cum ar fi de exemplu roţi dinţate cu diametre cuprinse între 280 mm şi 4 m, aceste standuri fiind disponibile în mai multe variante constructive (de tip pod rulant, de tip masă fixă etc. (figura 2.4.35));
- standurile metrologice *WENZEL* folosesc exclusiv capete de măsurare Renishaw, garantând costuri scăzute de achiziţie şi livrare rapidă;

- standurile *WENZEL* produse în America asigură de asemenea servisarea şi inspecţia funcţionării angrenajelor [73].

a) b) c)

Fig. 2.4.35 *Variante constructive de standuri metrologice produse de compania WENZEL: a) WGT Series Precision; b) LH; c) LH Hybrid [73]*

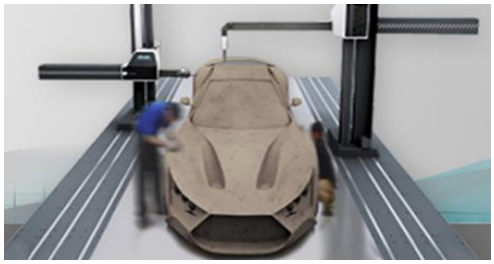


Fig. 2.4.36 *Exemplu de utilizare a sistemelor de palpare în domeniul industriei auto [73]*

- sisteme de palpare (figura 2.4.36): - compania *WENZEL* produce o gamă largă vârfuri de palpare şi freze pentru materiale moi (cum ar fi lutul, lemnul, plasticul etc.); în plus, compania poate furniza şi o gamă de cuţite de freze, instrumente de trasare şi alte accesorii similare [73], [75];

- sisteme de scanare rapidă, pe principiul optic (figura 2.4.37) asigură cel mai rapid proces de inspecţie pentru piese cu geometrii complexe, cum ar fi palele de turbină sau elemente similare;

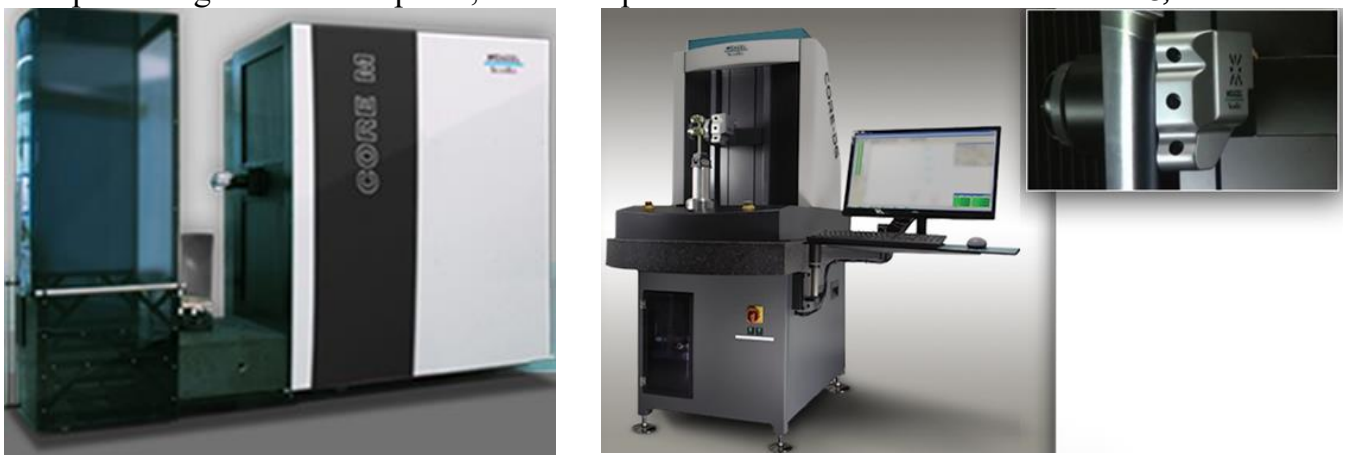


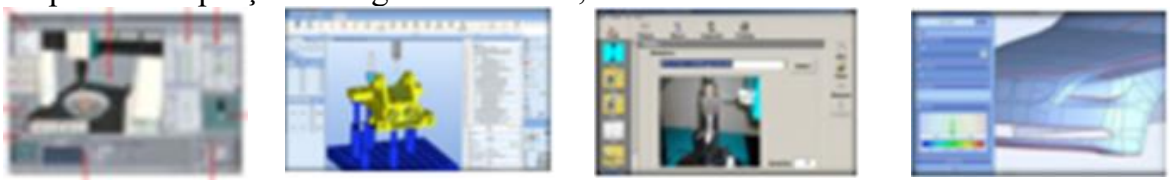
Fig. 2.4.37 *Sistemele CORE de scanare optică de înaltă viteză [73]*

- sistemele *CORE* reprezintă de fapt MMC cu accesorii de scanare pe principiul optic pe 5 sau 6 axe, fiind ideale pentru pentru inspecţia palelor de turbine, pentru măsurarea implanturilor medicale sau alte elemente cu caracteristici similare, având suprafeţe rectificate şi polisate şi muchii ascuţite; aceste sisteme de scanare prezintă elemente de ranforsare şi ocupă un spaţiu restrâns la nivelul solului;
- aceste soluţii de măsurare reprezintă o provocare din punctul de vedere al concurenţei pentru MMC clasice, pentru scannerele pe principiul LASER şi pentru sistemele de scanare în lumină albă;
- maşinile din seria *CORE* pot măsura obiecte cu dimensiuni cuprinse între 2,5 şi 200 mm şi pot fi calibrate cu ajutorul standardelor ISO, întocmai ca în cazul MMC clasice;

Fig. 2.4.38 *Exemplu de model exaCT de tomograf computerizat, produse şi comercializate de compania WENZEL [73]*

- tomografe computerizate (figura 2.4.38): modelele *exaCT*sau sistemele de scanare *Industrial CT* deschid o nouă eră a metrologiei, oferind mult mai multe performanţe decât un sistem de scanare cu sursă LASER; atât componentele, cât şi piesele asamblate pot fi măsurate atât pe exterior, cât şi la interior, prin posibilitatea unei achiziţii complete de imagini digitale; mai mult, tomografele computerizate exaCT pot fi folosite şi pentru analiza materialelor şi testarea non-distructivă [73];

- componenta măsurată este penetrată de raze X, iar imaginile instantanee 2D sunt recompuse într-o imagine 3D, cu ajutorul mediului software exaCT Analysis;
- reprezentanţele *WENZEL* din America oferă operaţi de servisare şi pentru aceste variante de sisteme performante de scanare [73];
- interfeţe software - compania *WENZEL* produce sisteme software inteligente asociate MMC, ca soluţii pentru numeroase aplicaţii de măsurare asistată; colaborarea în mod constant cu utilizatori din diferite medii industriale a avut drept rezultat dezvoltarea de pachete software adecvate acestor aplicaţii;
- *WENZEL* oferă posibilitatea de a alege mediul software adecvat aplicaţiei specifice MMC; în figura 2.4.39 sunt prezentate diferite interfeţe software, dedicate, oferind soluţia ideală pentru fiecare situaţie;
- pentru aplicaţiile bazate dpe tehnica „norului” de puncte (prin combinaţie cu sistemele de scanare pe principiul LASER sau cu tomografele computerizate exaCT) este garantată soluţia adecvată aplicaţiilor privind inspecţia sau ingineria inversă;



a) b) c) d)

Fig. 2.4.39 *Variante de interfeţe software dezvoltate în cadrul companiei WENZEL: a) Open DMIS CMM; b) Metrosoft Quartis CMM; c) TGear Inspection; d) PointMaster Point Cloud [73]*

- pentru inspecţia angrenajelor, interfaţa software adecvată este TGear având module adiţionale pentru măsurarea oricărui tip de angrenaje şi de roţi dinţate, arbori şi scule, putând fi exportate şi prelucrare date în acord cu standarde specifice;
- pentru biblioteca de vârfuri de palpare se recomandă interfaţa software DesCAD, gestionând eficient datele provenite de la procesele de măsurare ale scanerelor cu surse LASER, respectiv de la procesele de frezare; aceste date sunt cu succes procesate în cadrul fişierelor CAD generate în mod automat [73].

Capitolul 3
Metode de măsurare pe principiul emisiei radiaţiei LASER

În ultimii ani, aplicarea tehnicii de scanare prin utilizarea radiaţiei LASER a cunoscut o dezvoltare fără precedent, datorită numeroaselor avantaje, precum: creşterea sensibilă a eficienţei, mărirea considerabilă a domeniului de aplicaţii, reducerea riscurilor de coliziuni, accidente etc. Cele mai des utilizate tehnici de scanare la ora actuală, pe plan mondial sunt prezentate în cele ce urmează:

3.1 Tehnica triangulaţiei LASER

Aceasta poate fi aplicată, indiferent de tehnica folosită (bazată pe punt, pe linie sau pe suprafaţă), având ca principiu dispunerea mai multor senzori, având rolul de a recepţiona razele LASER reflectate de către suprafaţa obiectului scanat. Cea mai bună soluţie constă în utilizarea unei camere CCD (circuit cu cuplaj de sarcină), la nivelul căruia semnalul luminos se converteşte în semnal electric. Principalul avantaj al sistemului CCD constă în faptul că permite detectarea mai multor spoturi luminoase şi, ca urmare, erorile de citire ale datelor vor putea fi compensate într-o mai bună măsură.

Lumina utilizată în cazul metodei triangulaţiei poate fi generată fie prin utilizarea unor bande de lumină albă compusă (oferind siguranţă în operare, neafectând ochii), fie prin folosirea generatoarelor LASER ce se pot achiziţiona din comerţ [76], [77].

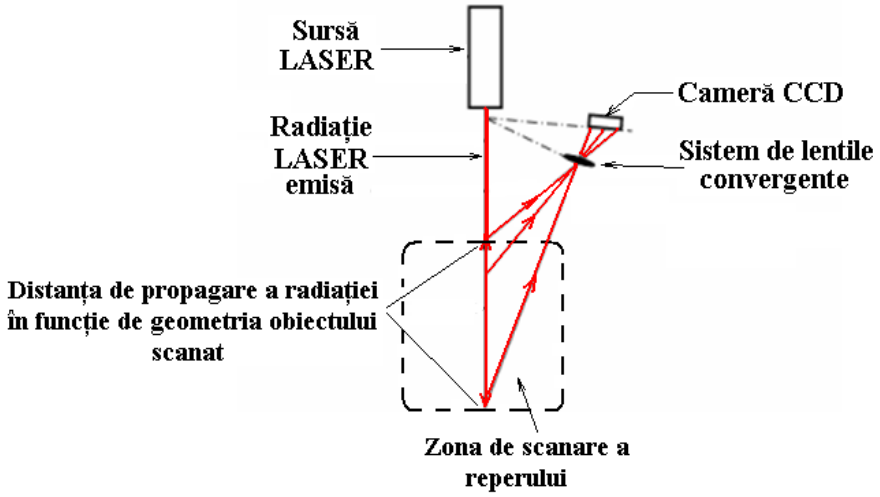


Fig. 3.1.1 *Principiul metodei triangulaţiei LASER [76]*

Acest procedeu se caracterizează prin faptul că raza emisă, raza reflectată şi distanţa dintre emiţătorul LASER şi sistemul CCD formează un triunghi (figura 3.1.1). Ca principiu, se pune problema determinării poziţiei unui punct prin determinarea unghiurilor dintre punctul măsurat şi alte două puncte de referinţă (punctul de emisie – recepţie şi punctul (zona) sistemului CCD). Poziţiile acestor două puncte fiind cunoscută şi constituind o bază fixă.

Principala problemă poate consta în blocarea captării de imagini în situaţiile reducerii unghiului sau a aplicării radiaţiei din partea opusă camerei. Pentru a se preveni această problemă, fie se foloseşte o pereche formată din două sau mai multe surse de iluminat, fie se utilizează mai multe camere CCD, prin aceasta înlăturându-se zgomotele. În acest caz o altă problemă ar fi legată de determinarea poziţiei pentru fiecare cameră în parte. Unghiul de triangulaţie fiind întotdeauna diferit de zero, există întotdeauna pericolul blocării sistemului.

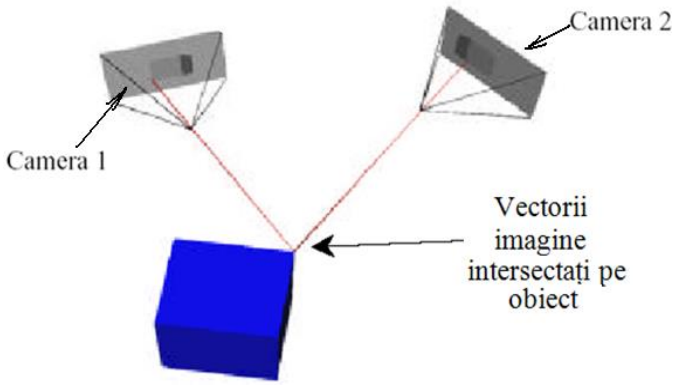


Fig. 3.1.2 *Metoda fotogrametriei [78], [79]*

Folosind componente autonome (cu posibilităţi de poziţionare şi reglare în mod automat) aceste neajunsuri pot fi compensate într-o oarecare măsură. În acest caz se poate ajunge la o precizie a măsurării de ordinul zecimilor de milimetru (de aproximativ 0,15 mm) [76], [77]. Din tehnica triangulaţiei derivă două metode moderne pentru creşterea performanţelor şi, mai ales, a preciziei de scanare/măsurare, şi anume: metoda fotogrametriei (figura 3.1.2) şi metoda profilometriei (figura 3.1.3) [76], [78], [79].

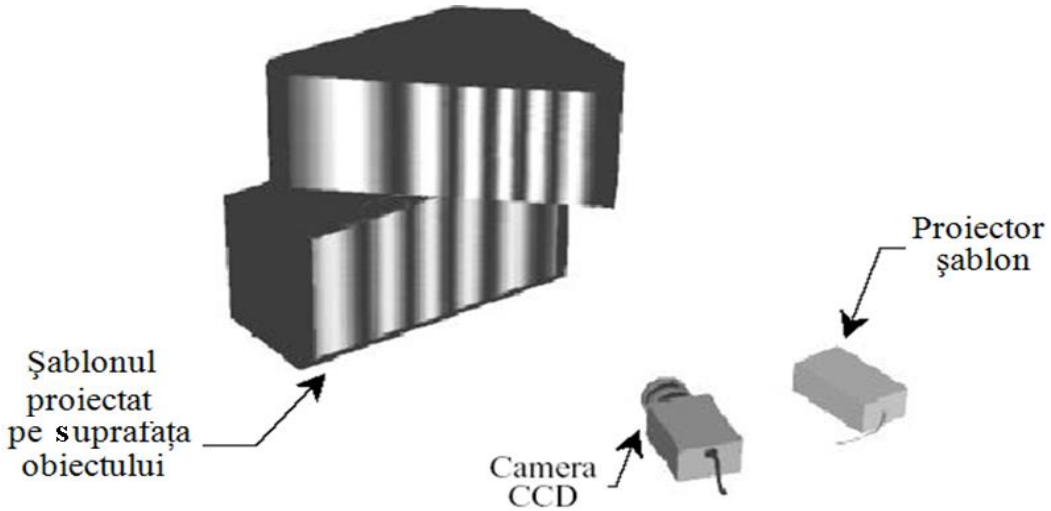
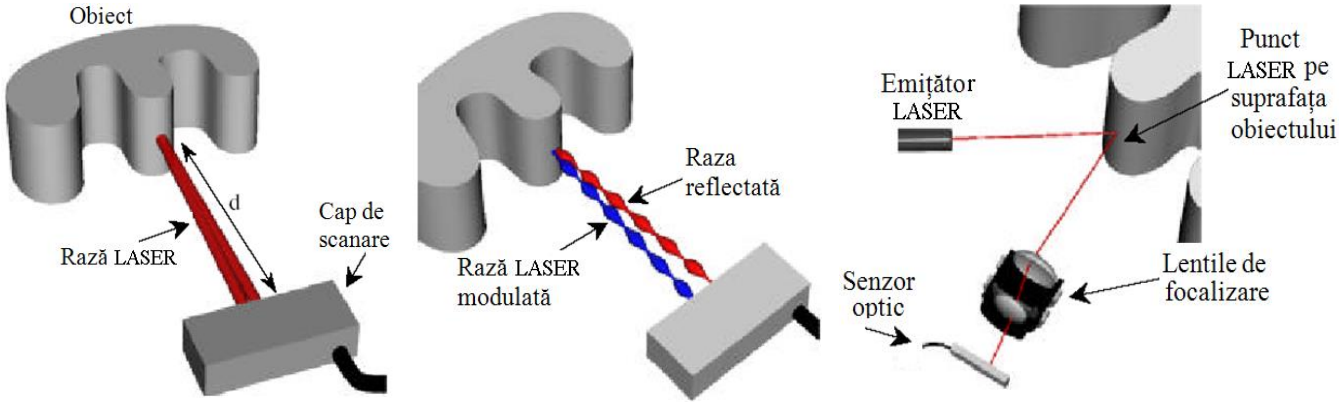


Fig. 3.1.3 *Metoda profilometriei [78], [79]*

Cele mai întâlnite tehnici de scanare prin triangulaţie LASER sunt: tehnica bazată pe punct, pe linie şi pe suprafaţă.

a) Tehnicile bazate pe punct au ca principiu măsurarea punct cu punct, ceea ce înseamnă că un ciclu de măsurare se referă la determinarea coordonatelor după cele trei axe carteziene specifice punctului respectiv. Această procedură se realizează într-un mod secvenţial, necesitând numeroase deplasări ale capului de măsurare al MMC (de obicei în puncte succesive). Această tehnică este utilizată în special în situaţia măsurării unor parametri de formă (abateri de la circularitate, de la cilindricitate, de la planeitate, de la rectilinitate etc.). Utilizarea (autosincronizare) sistemelor optice poate face capul de scanare să exploreze suprafaţa obiectului fără a fi necesară deplasarea întregului sistem de măsurare. Deoarece datele sunt preluate în mod secvenţial de către sistem, suprafaţa obiectului trebuie să rămână stabilă pe toată perioada măsurării. Principalul dezavantaj al acestei metode constă în faptul că procesul devine unul ineficient în cazul scanării de suprafeţe ale reperelor de dimensiuni medii şi mari, de orice natură ar fi acestea [6], [75].

Ca şi principiu, tehnica bazată pe punct, la rândul său se poate aplica prin mai multe procedee (figura 3.1.3), şi anume: procedeul LRF (LASER Range Finding) (figura 3.1.3, a), procedeul Radar (figura 3.1.3, b) şi procedeul triangulaţiei (figura 3.1.3, c):



a) **b)** **c)**

Fig. 3.1.3. *Procedee ale tehnicii de scanare LASER bazată pe punct: a) procedeul LRF; b) procedeul Radar; c) procedeul triangulației [80]*

Primul procedeu utilizează ca parametru de bază măsurarea timpului în care un impuls de lumină emis parcurge distanța până la suprafața piesei, este reflectat și recepționat de către capul de scanare.

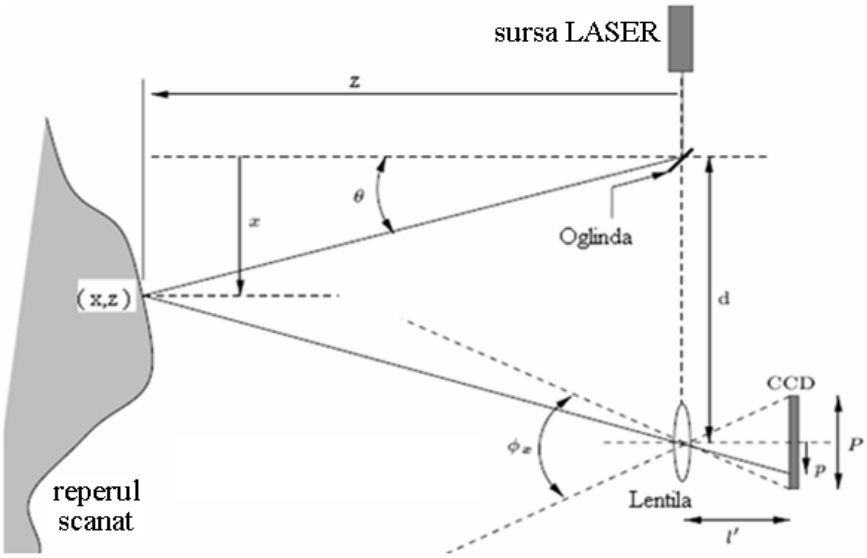


Fig. 3.1.4. *Tehnica de măsurare cu radiație LASER, bazată pe punct, prin aplicarea procedeului triangulației [81]*

Cel de al doilea procedeu are ca principiu măsurarea unui defazaj dintre radiația LASER emisă și cea recepționată. Cel de al treilea procedeu, cel al triangulației (figura 3.1.4), constă în ghidarea radiației LASER spre reperul supus scanării, prin intermediul unor sisteme optice, cum ar fi oglinzile. Prin intermediul unei camere CCD se măsoară poziția imaginii punctului luminos proiectat pe suprafața obiectului, fiind calculate coordonatele punctului proiecta pe obiect [75], [80], [81].

Relația de calcul a distanței (d) de la sursă la obiect este exprimată mai jos:

$$z = \frac{d \cdot f}{p + f \cdot tg(\theta)} \tag{3.1.1}$$

unde: f este distanța focală a lentilei, p – poziția fasciculului reflectat pe sistemul CCD, iar θ - unghiul de reflexie al radiației LASER.

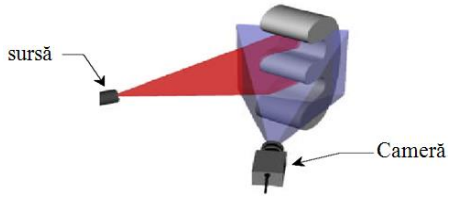


Fig. 3.1.5 *Tehnica scanării bazată pe linie [76], [78]*

b) Tehnicile bazate pe linie au drept principiu realizarea într-un singur pas a mai multor măsurători după o linie transversală la suprafața reperului scanat (figura 3.1.5).

Toate punctele fiind măsurate în paralel într-un singur ciclu de măsurare după o linie, face ca acest procedeu să fie în general mai rapid decât cel bazat pe punct. În urma scanării suprafeței, linie cu linie se generează o grilă de citiri. Ca prodecee de scanare, se poate proceda fie la deplasarea continuă a

capului de scanare faţă de suprafaţa reperului (fix), fie la deplasarea prin translaţie a reperului în raport cu sistemul de scanare (fix) [76 ÷ 78].

c) Tehnicile bazate pe suprafaţă (figura 3.1.6) sunt cele mai eficiente şi furnizează cele mai flexibile date privind coordonatele măsurate ale suprafeţei scanate a reperului, valorile fiind organizate într-o grilă deasupra suprafeţei de măsurat. Aceaste tehnici necesită prelevarea mai multor imagini ale obiectului, acestea nefiind generate simultan, ci succedîndu-se la momente de timp foarte mici [78].

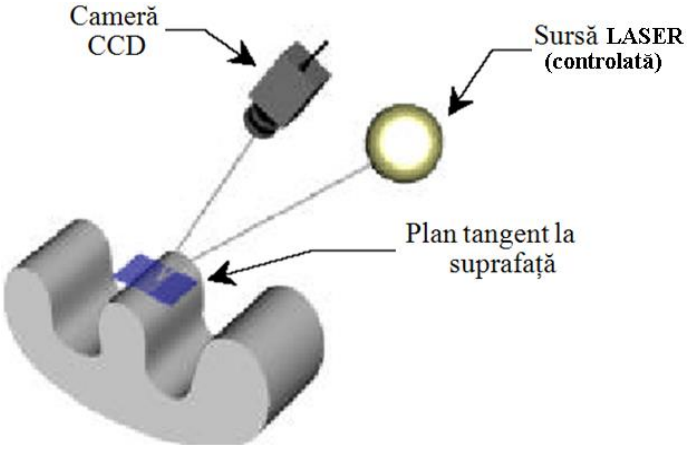


Fig. 3.1.6 *Tehnica de scanare bazată pe suprafaţă [78]*

Razele de lumină sunt proiectate paralel către suprafaţa reperului, acestea reflectându-se şi fiind preluate de către o cameră ce formează o diagramă binară, tridimensională a umbrelor formate, pe măsură ce lumina este deplasată pe suprafaţa obiectului. Diagrama binară generată se va utiliza ulterior pentru determinarea câmpului înalţimilor suprafeţei obiectului de măsurat. Principala problemă constă în faptul că echipamentul de achiziţie de imagini generează o proiecţie de perspectivă, care, adesea este ignorată, ceea ce poate conduce la anumite distorsiuni ale valorilor coordonatelor măsurate.

Avantajul principal al acestui procedeu constă în simplitatea echipamentului (o cameră CCD şi una sau mai multe surse LASER), aceasta presupunând un cost scăzut pentru realizarea sistemelor de scanare ce utilizazeă această tehnică [78], [81].

Traductoarele ce folosesc tehnica triangulaţiei se pot clasifica în funcţie de tipul fascicolului LASER

- cu proiecţie *punctiformă* , atunci când proiecţia fascicolului laser pe obiect este un *punct*; în acest caz, la fiecare achiziţie este numerizat *doar un singur punct* de pe suprafaţa obiectului;
- cu proiecţie liniară, unde fascicolul punctiform este înlocuit cu un fascicol liniar; acest tip de proiecţie este mai rapid decât cel punctiform, deoarece la fiecare achiziţie este numerizat câte un vector de puncte măsurate la fiecare proiecţie;
- cu proiecţia unor planuri luminoase; această metodă permite achiziţia rapidă a unei suprafeţe întregi dar pune totuşi probleme de interpretare fiind mai puţin precisă [78].

3.2 Tehnica Radar

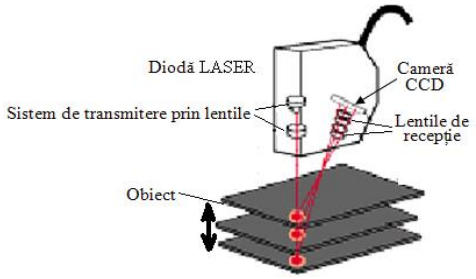


Fig. 3.2.1 *Exemplu de măsurare a variaţiei distanţei până la obient, prin aplicarea tehnicii Radar [83]*

Principiul constă în măsurarea timpului de parcurgere a distanţei de la suprafaţa măsurată la sistemul de recepţie. Ţinând cont de faptul că razele LASER se propagă cu o viteză constantă, distanţa până la un punct oarecare aflat pe suprafaţa obiectului se poate afla dirijând unda LASER spre acel punct şi măsurând perioada de timp necesară pentru care impulsul reflectat se întoarce la sistemul de captare (figura 3.2.1) [82].

Această tehnică se bazează pe iluminarea obiectului măsurat cu o sursă LASER, calculând informaţia de profunzime (distanţa până la suprafaţa de reflexie) în funcţie de energia reflectată.

3.3 Tehnica stereoviziunii se foloseşte în cazul sistemelor de captare pasive, pentru a calcula informaţia de distanţă pe baza spaţiului format între două sau mai multe camere de achiziţie de imagini (figura 3.3.1).

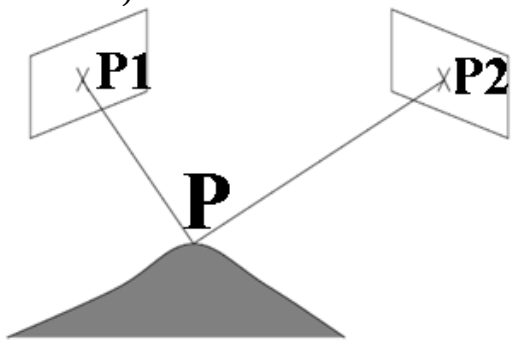


Fig. 3.3.1 *Principiul tehnicii stereoviziunii [82]*

Fiecare punct *P* de pe suprafaţa măsurată, aflată în câmpul vizual al celor două camere se proiectează în planele – imagine P_1 şi P_2 ale celor două camere, respectiv în punctele P_1 şi P_2, conţinute în cele două plane; identificarea punctelor din cele două imagini permit calcularea coordonatelor 3D ale punctului curent *P*. Dificultatea metodei constă în selectarea unor caracteristici identice ale celor două imagini şi stabilirea corespondenţelor [82].

În funcţie de provenienţa imaginilor, stereoviziunea poate fi clasificată în:

- viziune stereoscopică *statică*, unde se utilizează mai multe cadre filmate din poziţii diferite şi în acelaşi timp;
- viziune stereoscopică *dinamică*, unde se folosesc, de asemenea, mai multe cadre, dar la momente diferite de timp [82].

3.4 Tehnica Moiré

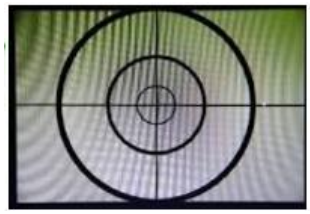


Fig. 3.4.1 *Exemplu de formare a unei imagini prin fenomenul Moiré [84]*

Aceasta presupune proiectarea pe obiectul supus măsurării a unor grile luminoase sinusoidale de frecvenţă înaltă, diferenţele de fază a undelor luminoase, care conduc la franje de interferenţă; informaţia conţinută în imaginea franjelor permite generarea reliefului formei. Această tehnică asigură măsurări fiabile, dar necesită multă aparatură pentru analizarea semnalului [84].

3.5 Tehnici de achiziţie a imaginilor

Scopul principal al unei strategii de achiziţie de date este acela de a îmbunătăţi precizia procesului de numerizare unei suprafeţe complexe a unui reper scanat, mai exact se face în scopul cunoaşterii coordonatelor fiecărui punct 3D achiziţionat. Strategia constă în determinarea coordonatelor pentru un ansamblu *X* de puncte de vedere x^i (sub forma unui nor de puncte) pentru obţinerea unei imagini tridimensionale optime specifice reperului scanat [1], [85].

Algoritmul unei strategii de numerizare presupune următoarele etape:

a) Studiul datelor de intrare:
   - extragerea informaţiei din fişierul CAD;
   - crearea unui model Voxel[1];
b) Cercetarea ansamblului X de puncte de vedere:
   - determinarea punctelor de vedere;
   - localizarea optimă în spaţiu a fiecărui punct de vedere;
c) Estimarea preciziei datelor 3D;
d) Reprezentarea optimă a ansamblului X al punctelor de vedere [85], [86].

3.5.1 Studiul datelor de intrare constă în două etape asociate extragerii informaţiei necesare, în funcţie de datele de intrare, în vederea realizării studiului ansamblului de puncte de vedere. În prima

[1] Un voxel reprezintă o valoare pe o grilă regulată în spațiu tridimensional

etapă, fişierul CAD (în format IGES) este citit şi utilizat pentru determinarea suprafeţelor componente ale reperului. În ceea ce priveşte prima etapă, formatul IGES oferă o reprezentare precisă a tuturor suprafeţelor ce compun un reper, numite suprafeţe NURBS[2] (Non uniform rational rational basis spline), iar o suprafaţă este, la rândul ei compusă din mai multe curbe de tip segment drept, arc de cerc, curbă NURBS etc. [1], [3], [86].

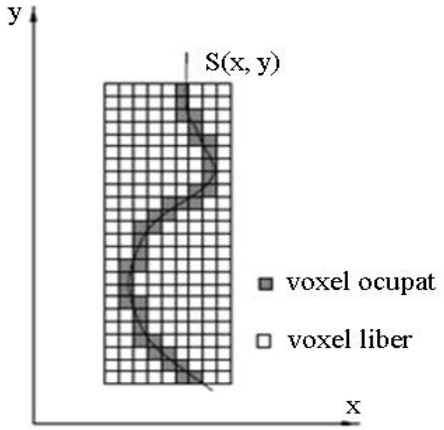


Fig. 3.4.2 *Exemplu privind reproducerea modelului Voxel pentru un profil al unei suprafeţe neregulate a unui reper numerizat [1], [86]*

La rândul lor, suprafeţele NURBS pot fi suprafeţe nedecupate (pline), respectiv suprafeţe decupate sau parametrice (o curbă aşezată într-un plan îl împarte pe acesta într-o componentă externă şi nelimitată şi una internă şi limitată).

Modelul Voxel al unui reper scanat este un model spaţial, în care fiecare pixel poate lua două valori, repsectiv valoarea „0” (pixel liber) sau valoarea „1” (pixel ocupat). Figara 3.4.2 prezintă un model Voxel pentru un profil al unei suprafeţe oarecare [85], [86]. Cea de a doua etapă constă în crearea unui model Voxel al reperului scanat, pe baza identificării punctelor de vedere [85], [86].

3.5.2 Studiul ansamblului punctelor de vedere

Un punct de vedere x^i se defineşte ca un ansamblu de mai mulţi parametri, $x^i = \{x, y, z, \Phi, \theta, \Psi, \gamma\}$ (unde $x, y, z, \Phi, \theta, \Psi$ sunt coordonatele carteziene şi unghiulare ale punctului), ansamblul fiind notat cu X, fiind minimul de puncte de vedere x^i care permit numerizarea completă a unei suprafeţe sau chiar a unui întreg reper. Studiul asamblelor de vedere se face independent pentru fiecare suprafaţă de interes şi presupune parcurgerea a 3 etape: iniţial este cercetară o imagine binară (2D) (ce reprezintă suprafaţa), pentru generarea punctelor de vedere proiectate pe aceasta. Cea de a doua etapă o constituie formarea ansamblului de puncte de vedere proiectate, care este utilizat ţinând cont de toţi parametrii săi, pentru obţinerea punctului de vedere din spaţiu. Ultima etapă constă în modificarea (după caz) a punctului de vedere astfel încât să se asigure accesibilitatea şi vizibilitatea regiunii suprafeţei care trebuie numerizată [1], [86].

Principiul poate fi exemplificat astfel: se defineşte un punct de vedere proiectat pe o suprafaţă ca fiind un punct central pe suprafaţă în timpul unei baleieri LASER. Sistemul de măsurare (captorul) este dispus astfel încât radiaţia LASER să fie normală la acest punct, prin urmare acesta se numeşte punct de vedere proiectat [86].

Generarea unui ansamblu de puncte de vedere implică folosirea a două sisteme, și anume:

- sistemul A, compus dintr-un captor de profunzime (autosincronizat), montat pe coloana MMC;
- sistemul B, compus dintr-un captor de profunzime de tip Biris, montat pe un braț de măsurare [85], [86].

[2] O suprafață de tip NURBS este o suprafață modelată analitic, utilizată în mod obișnuit în grafica pe calculator pentru generarea și reprezentarea curbelor și a suprafețelor

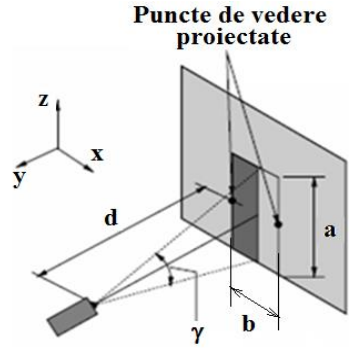


Fig. 3.5.1. *Dreptunghiul de numerizare pentru sistemul A [1], [86]*

Generarea punctelor de vedere la nivelul sistemului A presupune deplasarea sistemului de măsurare al MMC între două puncte din spațiu, urmărind dreapta ce unește punctele intermediare de pe traiectoria descrisă de sistem, cu condiția ca orientarea sistemului de măsurare în timpul deplasării să rămână constantă. Dacă sistemul de măsurare este orientat astfel încât baleierea razei LASER să fie perpendiculară pe deplasarea între punctele de vedere proiectate și viteza mișcării de baleiere este mai mică decât viteza baleierii razei LASER, atunci porțiunea de suprafață numerizată între cele două puncte este dată de un dreptunghi $R = a \cdot b$ (figura 3.5.1) [1], [86].

Laturile a și b ale dreptunghiului de numerizare R depind de distanța d dintre captor și reperul scanat, de câmpul de vedere γ al sistemului de măsurare și distanța b dintre cele două puncte de vedere proiectate. În general câmpul de vedere al captorului γ este fix (aproximativ 15°), iar distanța d este stabilită în funcție de strategia de achiziție, fiind în intervalul 120 mm – 160 mm. Precizia punctelor măsurate de o cameră autosincronizată este în funcție de distanța d dintre cameră și piesă scanată și de unghiul de incidență al razei LASER, deci este direct influențată de parametrii a și b. În general viteza de deplasare a MMC între două puncte este mai mică decât viteza de baleiere a razei LASER [85 ÷ 87].

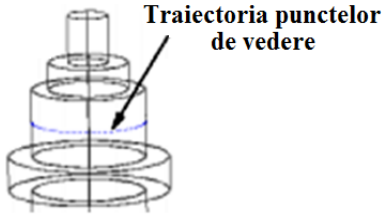


Fig. 3.5.2 *Traiectoria punctelor de vedere proiectate în cazul numerizării unei suprafețe cilindrice [1], [86]*

În figura 3.5.2 este prezentat un exemplu privind traiectoria punctelor de vedere proiectate, traiectorie obținută prin numerizarea unei suprafețe cilindrice. Unghiul de incidență al razei LASER pe suprafață la o baliere completă va fi mai mare atunci când baleierea se face în plan orizontal (aproape 180°) decât atunci când baleierea se face în plan vertical (aproximativ 45°) [85], [86].

În figura 3.5.3 este prezentat un alt exemplu privind generarea ansamblului de puncte de vedere proiectate pentru două suprafețe plane.

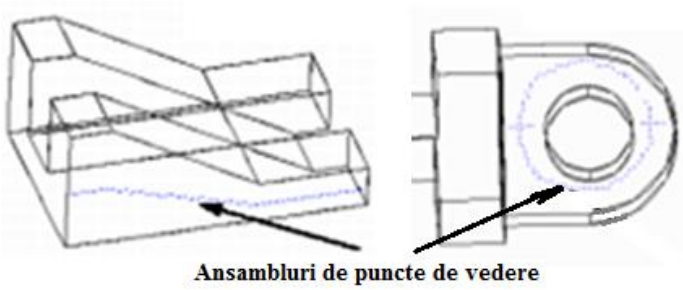
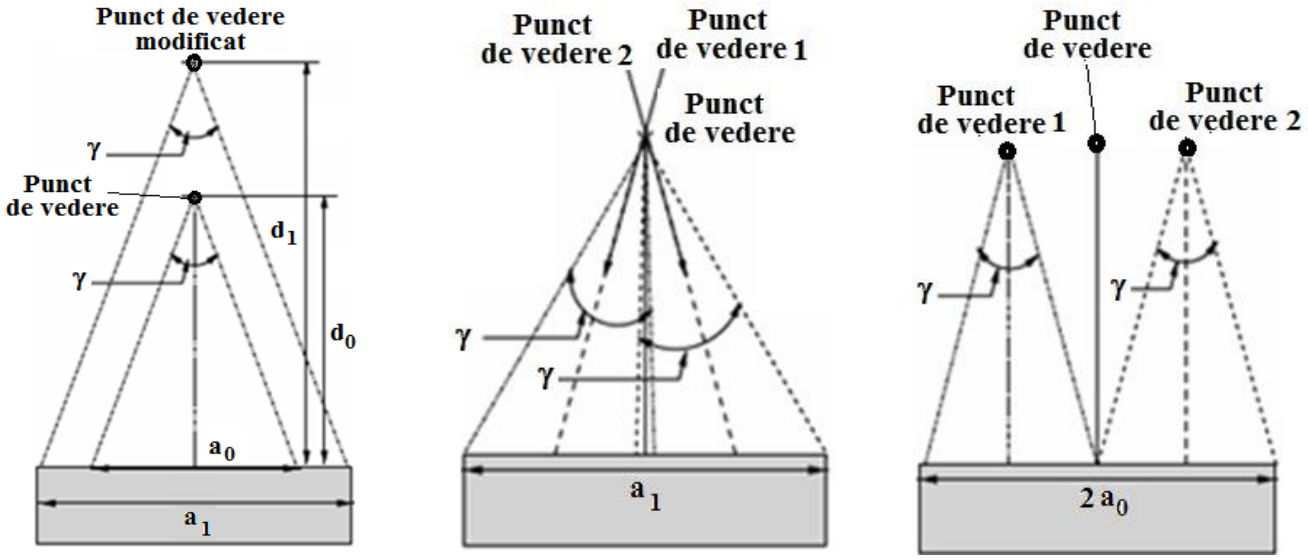


Fig. 3.5.3 *Traiectoria punctelor de vedere proiectate pentru cele mai mici distanțe de baleiere pentru două suprafețe plane [1], [85]*

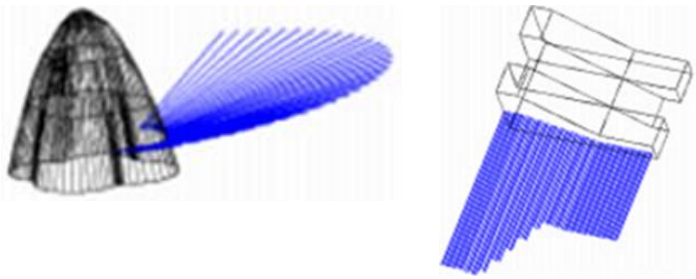
Distanța de baleiere pentru fiecare punct, până la margini este simetrică și trebuie să fie cât mai mică. Dacă această distanță este prea mare, atunci fascicolul LASER baleiază suprafața cu un camp de vedere mare (cu un unghi de incidență mare), sau există o distanță mare între amplasarea sistemului de măsurare și piesă, modificând condițiile optime pentru numerizare în raport cu precizia datelor 3D [1], [85].

În figura 3.5.4 este prezentat un exemplu în care poate fi baleiată întreaga suprafață a unui reper, iar figura 3.5.5 prezintă două exemple de numerizare a unor suprafețe printr-un ansamblu de puncte de vedere:



a) b) c)

Fig. 3.5.4 *Numerizarea unei suprafețe pe întreaga lățime: a) modificarea distanței între captor și suprafață; b) definirea noilor puncte de vedereca având aceeași poziție, dar orientare diferită; c) amplasarea noilor puncte de vedere, amplasate pe aceeași linie de baleiere a razei LASER la o distanță egală între punctul p și marginea suprafeței [1], [85]*



a) b)

Fig. 3.5.5 *Exemple de numerizare prin obținerea unui ansamblu de puncte de vedere, în urma procesului de baleiere: a) pentru o suprafață complexă; b) pentru o suprafață plană [1]*

În figura 3.5.5, a) este prezentat un exemplu privind modificarea orientării unui punct de vedere, în cazul numerizării unei suprafețe complexe. Principiul este acela al variației distanței punctului de vedere pentru a se mări lărgimea suprafeței de baleiere. Fiecare linie (reprezentată cu culoarea albastră) reprezintă câte o proiecție a razei LASER din punctul de vedere în care este amplasat capul de măsurare până la punctul de vedere proiectat [1], [86].

O altă variantă este cea în care numerizarea se face prin executarea unei mișcări de rotație a brațului MMC pe care este dispus sistemul de măsurare (figura 3.5.6).

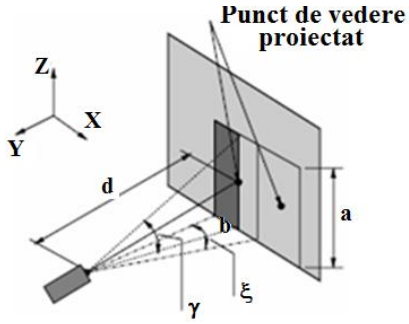
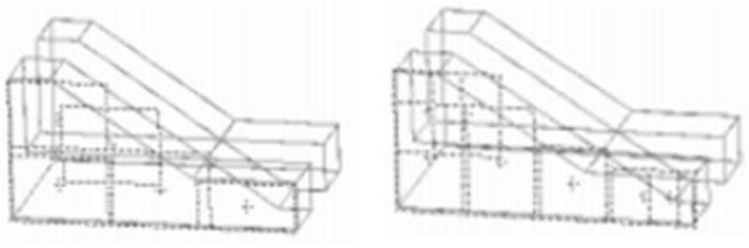


Fig. 3.5.6 *Definirea elementului de suprafață de numerizare, în cazul procedurii de rotire a articulației brațului de scanare [86]*

Orientarea capului de măsurare trebuie să fie făcută astfel încât baleierea razei LASER să fie perpendiculară pe direcția dată de mișcarea produsă de rotația articulației brațului de scanare al mașinii. Elementul de suprafață numerizat dintr-un anume punct de vedere se definește ca fiind un dreptunghi $R = a \cdot b$, unde a și b sunt parametrii ce depind de distanța d dintre capul de măsurare și reperul scanat, de câmpul de vedere γ și de unghiul de rotație ξ al articulației brațului pe care este amplasat sistemul de măsurare (pe care este dispusă camera de achiziție de imagini) (figura 3.5.6) [86].

În figura 3.5.7 este prezentat un exemplu de numerizare a unei piese cu suprafețe plane, prin generarea a 5 puncte de vedere (figura 3.5.7, a), respectiv a 7 puncte de vedere (figura 3.5.7, b):



a) b)

Fig. 3.5.7 *Numerizarea unei piese cu suprafețe plane: a) prin 5 puncte de vedere; b) prin 7 puncte de vedere [86]*

Etapa următoarea a procesului este aceea de a verifica dacă poziția punctului de vedere este accesibilă și ferită de orice problemă de ocluziune. Un punct de vedere este accesibil dacă acesta poate fi atins de către suportul mecanic al brațului pe care este dispus capul de măsurare, iar în deplasarea necesară pentru a-l atinge este exclus orice risc de coliziune.

Legat de problema ocluziunii, din punctul de vedere din care se dorește realizarea unui proces de numerizare a unei suprafețe, raza LASER nu va fi întreruptă de nici un obstacol, putând deci atinge suprafața dorită [1]. Atunci când este detectată o problemă de ocluziune, sistemul de măsurare caută un nou punct de vedere, prin deplasarea pe direcția de baleiere a fascicolului LASER. Deplasarea va presupune creșterea și micșorarea unghiului de incidență al razei LASER, pe direcție baleierii, respectiv între două margini ale punctului de vedere proiectat.

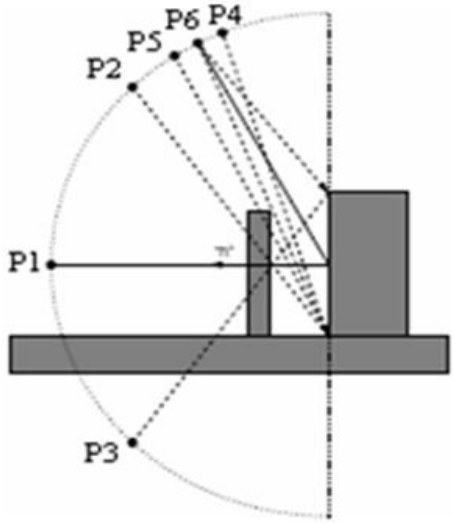


Fig. 3.5.8 *Procesul de căutare al unui nou punct de vedere [86]*

Noul punct de vedere trebuie să permită numerizarea suprafețelor dorite și, de asemenea trebuie să rămână cât mai aproape posibil de direcția normală a punctului de vedere proiectat (figura 3.5.8) [86]. Punctul inițial P_1, care a fost definit în cele mai bune condiții de precizie prezintă o problemă de ocluziune. Ca urmare sunt identificate punctele P_2 și P_3, dar care, de asemenea prezintă și ele probleme de ocluziune și, prin urmare doar puncte de vedere P_4, P_5 și P_6 elimină această problemă de ocluziune. Astfel, punctul P_4 elimină problema ocluziunii, dar strategia continuă să caute un punct care să fie cât mai aproape de punctul inițial, P_1, în acest fel găsindu-se punctele P_5 și P_6. Procesul se oprește atunci când variația unghiului dintre cele două puncte valide va fi mai mică de 5° [86].

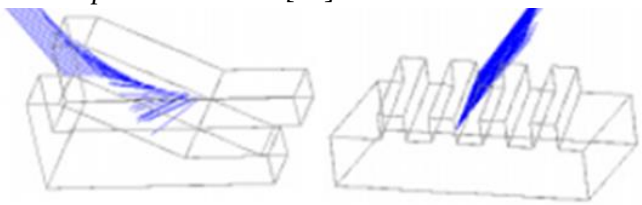


Fig. 3.5.9 *Exemple de remediere a problemelor de ocluziune pentru două suprafețe, prin redefinirea punctelor de vedere [86]*

Figura 3.5.9 prezintă un exemplu în care punctele de vedere găsite pentru două suprafețe ce prezintă inițial probleme de ocluziune:

3.5.3 Estimarea preciziei datelor 3D

După ce toate punctele de vedere au fost localizate și satisfac condițiile privind evitarea ocluziunii, strategia calculează precizia de măsurare, în funcție de caracteristicile fiecărui punct de vedere.

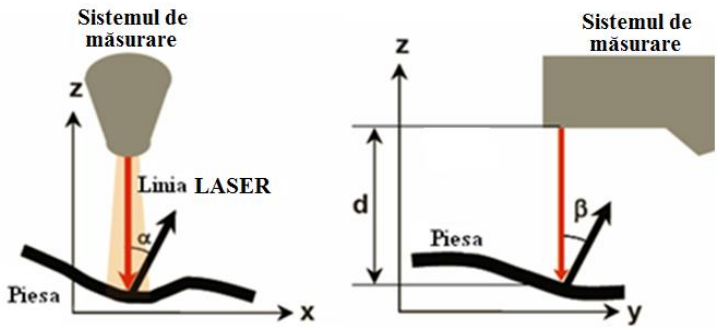


Fig. 3.5.10 *Rolul parametrilor geometrici pentru evaluarea preciziei coordonatelor punctelor de măsurare, în procesul de numerizare al unui reper [85]*

Precizia coordonatelor punctelor măsurate este în funcție de distanța *d* dintre sistemul de măsurare și reperul scanat, precum și în funcție de unghiurile de incidență α și β ale razei LASER (figura 3.5.10). Acești parametri geometrici contribuie de asemenea la determinarea orientării și la poziționarea capului de măsurare în raport cu piesa numerizată [85], [86]. Unghiul α definește unghiul de incidență în planul de numerizare dintre linia spotului LASER și direcția normală la suprafața reperului scanat

Unghiul β reprezintă unghiul de incidență în planul perpendicular pe planul de numerizare, dintre direcția razei LASER și normala la suprafața piesei [85], [86].

3.5.4 Prezentarea optimă a ansamblului X de puncte de vedere

Aceasta reprezintă ultima etapă a strategiei și constă în prezentarea ansamblului X de puncte de vedere, astfel încât deplasarea suportului mecanic între punctele de vedere să fie una optimă, în scopul reducerii duratei procesului de numerizare. Prezentarea optimă se definește în funcție de ansamblul de puncte de vedere proiectate, utilizând totodată parametrii fiecărui punct de vedere, în parte. Astfel, problema se reduce la studierea drumului minim între punctele de vedere, astfel încât punctul de plecare să fie punctul extrem care se află cel mai aproape de origine [85 ÷ 87].

3.6 Tehnici moderne pentru optimizarea performanţelor sistemelor de scanare cu sursă LASER

Performanţele unui sistem de numerizare pe principiul emisiei radiaţiei LASER se referă în general la următoarele aspecte fundamentale, ce vor fi analizate pe rând:
- conceptul de vizibilitate;
- influenţa culorii suprafeţei măsurate asupra preciziei scanării [1], [6];
- identificarea poziţiilor optime în funcţie de precizia de măsurare.

3.6.1. Conceptul de vizibilitate

Procesul de numerizare înseamnă rezultatul interacţiunii dintre un fascicul LASER cu suprafaţa unei piese, proces înregistrat printr-o cameră sau un ansamblu de camere CCD. Pentru ca acest proces de interacţiune cu reperul scanat să fie cât mai bun, un aspect foarte important îl are noţiunea de vizibilitate, acest concept vizează determinarea ansamblului de direcţii, asociate diferitor suprafeţe ale piesei scanate, ce pot fi potenţial vizibile de către sistemul de măsurare [87]. Cercetările în acest sens, din punctul de vedere al robusteţii şi al uşurinţei de implementare s-au axat în principal pe discretizarea spaţiului de vizibilitate şi a reperului scanat. În acest scop se consideră geometria formei perfecte a piesei, considerată cunoscută. Pornind de la modelul CAD asociat, reperul este convertit în format .STL, în figura 3.6.1 fiind prezentat un caz al unui reper în formă de ''L'', discretizat într-o reţea de tetraedre (figura 3.6.1). Pentru fiecare faţetă F_i a piesei ($i \in [1 \div n]$), cu *n* numărul de triunghiuri de discretizare a piesei, va fi asociată sfera unitară pentru determianrea ansamblului de direcţii de vizibilitate al sistemului de măsurare [87], [88].

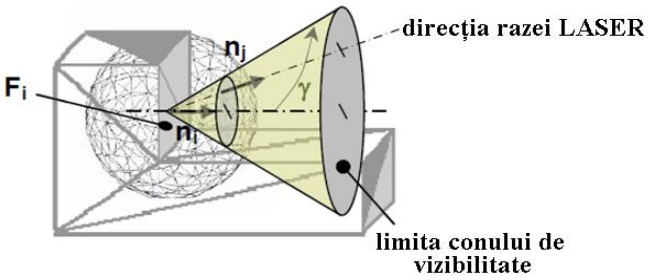


Fig. 3.6.1. *Vizibilitatea locală a unei faţete F_i [88], [89]*

Spaţiul de vizibilitate creat se bazează pe geometria sferică, astfel că o sferă unitară discretizată modelează un ansamblu de direcţii potenţiale de vizibilitate. Numărul acestor direcţii depinde de rezoluţia reţelei de discretizare, cu V_j notându-se fiecare tetraedru ce compune sfera unitară, unde $j \in [1 \div m]$, m reprezintă numărul total de tetraedre ale sferei [88 ÷ 90].

Conceptul de vizibilitate se poate defini în trei etape succesive: în prima etapă se defineşte vizibilitatea din punctul de vedere al al razei LASER, cea de a doua etapă se referă la vizibilitatea din punctul de vedere al camerei de achiziţie, iar cea de a treia etapă reprezintă vizibilitatea totală a ansamblului sistemului de măsurare, mai exact sistemul de emisie-recepţie LASER, împreună cu camera de achiziţie a imaginilor. În acest context s-au făcut două ipoteze simplificatoare, prima se referă la faptul că sistemul de baleiere LASER se poate considera ca un sistem punctiform. Cea de a doua ipoteză presupune că raza reflectată de către piesă atinge camera CCD în centrul său. Cele două ipoteze pot fi aplicate pentru determinarea vizibilităţii sursei LASER, precum şi a vizibilităţii camerei [87], [90].

Vizibilitatea din punctul de vedere al razei LASER se referă la determinarea ansamblului potenţial de direcţii de emisie de fascicule LASER ce pot atinge o anumită faţetă a reperului scanat. Într-o primă fază această detecţie se face independent de alte faţete ce compun piesa. Prin această etapă se defineşte conceptul de vizibilitate locală. Se poate formula ipoteza prin care sursa LASER emite după o direcţie ce corespunde axului sistemului de măsurare, ceea ce poate duce la formularea ipotezei sus – menţionate, şi anume că sistemul de baleiere LASER poate fi considerat ca un sistem punctiform [87], [88].

Din punct de vedere matematic, modelul de vizibilitate locală se poate exprima după cum urmează:
- fie F_i (cu $i \in [1 \div n]$) o faţetă a piesei de numerizat;
- fie n_i vectorul normal-unitar, asociat faţetei F_i;
- fie n_j (cu $j \in [1 \div m]$) un vector normal-unitar ce defineşte direcţia de emisie a razei LASER, asociată unei faţete F_j a sferei unitare de vizibilitate; ca urmare, faţeta F_i va fi vizibilă pe direcţia de propagare (n_j) a razei LASER dacă unghiul dintre vectorul n_i şi normala n_j se încadrează într-un con limitat de vizibilitate. Unghiul ce caracterizează acest con corespunde unui unghi-limită de incidenţă a fascicolului LASER ce se proiectează pe suprafaţa piesei (figura 3.6.1) [87], [88], [90].

Ca urmare, ecuația privind reprezentarea vizibilității asupra unei fațete a unui reper discretizat este de forma [87]:

$$\frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j}{\left\|\vec{n}_i\right\| \cdot \left\|\vec{n}_j\right\|} \le cos(\gamma) \qquad [3.6.1]$$

Prin aplicarea ecuației (3.6.1) la întregul ansamblu de fațete, se obține o hartă de vizibilitate locală, identificată pe sfera unuitară. Aceasta reprezintă o interpretare geometrică a direcțiilor prin care fațeta studiată este vizibilă de către sistemul de scanare cu sursă LASER [87], [88].

În etapa următoare se pune problema determinării vizibilității globale. Prin reconstituirea acestei hărți este posibilă prevenirea anumitor fenomene de ocluziune între sursa LASER, fațeta vizată și alte fațete ale piesei numerizate. Metoda folosită se bazează pe harta de vizibilitate locală a piesei, reconstituită anterior.

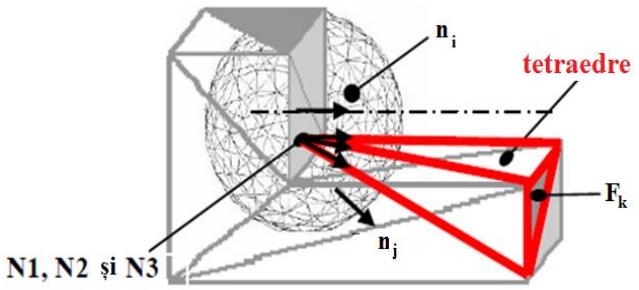


Fig. 3.6.2 *Vizibilitatea globală a unei fațete F_i [1], [85]*

Concret, este vorba de o proiecție a triunghiurilor F_k ($k \neq i$) piesei asupra sferei unitare. După aceasta se face un test prin care se verifică dacă se respect condiția ca direcția n_j nu se intersectează cu nici unul dintre triunghiurile F_k. Pornind de la central de masă al triunghiului current F_i se construiește un tetraedru și se verifică vectorul n_j, direcția fasciculului LASER, nu se află în interiorul tetraedrului (conform figurii 3.6.2) [87], [88].

Vizibilitatea din punctul de vedere al camerei de achiziție presupune determinarea vizibilității locale și apoi a vizibilității globale a camerei, mai exact presupune stabilirea câmpului de vedere potențial al camerei CCD [87].

Pentru simplificarea modelului de vizibilitate specific camerei CCD, s-au formulat două ipoteze simplificatoare: Prima presupune că raza reflectată de piesă va ajunge întotdeauna în centrul camerei CCD. Cea de a doua ipoteză consideră o direcție de numerizare a piesei, ce corespunde axei OY a mașinii în coordonate, perpendiculară pe planul fasciculului LASER. Din punct de vedere matematic, aceasta implică aplicarea unei rotații asupra sferei de vizibilitate, cu un unghi de rotație ce depinde de orientarea direcției fasciculului LASER față de axa optică a camerei. Se va ține cont de dimensiunile câmpului de măsură a camerei, definite de unghiurile – limită ρ_1 și ρ_2 (figura 3.6.3), reprezentând limitele sistemului de măsurare ce permit numerizarea unei zone a reperului. Din acest motiv, modelul de vizibilitate globală a camerei, VG_c, este foarte asemănător cu cel al sistemului de emisie LASER [87], [91].

Modelul de vizibilitate locală poate fi definit astfel:

- fie F_i (cu $i \in [1 \div n]$) o fațetă a piesei și n_i – vectorul asociat al normalei la fațetă;
- fie n_j un vector normal unitar la sfera unitară, definind direcția de percepție la nivelul camerei CCD a imaginii unei fațete F_j (cu $j \in [1 \div m]$); ca urmare fațeta F_i va putea fi considerată ca vizibilă în direcția n_j, dacă aceasta verifică ecuația (3.6.2) [87], [88].

$$cos(\delta_2) \geq \frac{\vec{n_i} \cdot \vec{n_j}}{\left\|\vec{n_i}\right\| \cdot \left\|\vec{n_j}\right\|} \geq cos(\delta_1) \qquad [3.6.2]$$

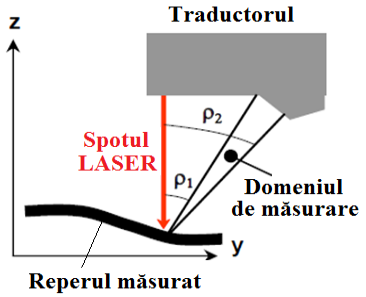


Fig. 3.6.3 *Reprezentarea unghiurilor de captare a imaginii în funcție de geometria piesei și a direcției spotului LASER [89]*

Ca urmare, modelul obținut cu ajutorul camerei (VG_c) se va situa foarte aproape de cel real. Conform reprezentării din figura 3.6.3, se poate exprima relația [3.6.2].

În ceea ce privește determinarea unghiurilor specifice unei vizibilități globale prin intermediul camerei, relațiile de calcul se vor aplica îm mod identic. În acest caz, obiectivul este acela de a verifica dacă raza LASER reflectată de către suprafața piesei scanate ajunge exact în dreptul camerei CCD, fără a fi deviată (ascunsă) de către vreo altă fațetă a piesei [89].

3.6.2. Identificarea punctelor de vedere potențiale în cadrul procesului de numerizare se referă la aspectul alegerii celei mai bune configurații spațiale a tradutorului cu sursă LASER pentru o fază de numerizare a unui reper de tip mecanic. Acest lucru vizează stabilirea hărții reale de vizibilitate a unui reper, în scopul determinării pozițiilor și a orientărilor preferențiale a traductorului. Această

determinare trebuie să se realizeze respectând condițiile metrologice și ținând seama și de specificațiile dimensionale și geometrice ale piesei, în vederea asigurării unui proces complet de numerizare [88], [89], [91].

Pentru aceasta, este necesar să se ia în considerare rezultatele analitice, prin exprimările matematice ale parametrilor direcțiilor de reflexie a radiației, în scopul stabilirii gradului de incertitudine a măsurării parametrilor de poziționare și de orientare a traductorului în raport cu reperul. Ca urmare vor fi reținute valorile considerate optime ale parametrilor unghiulari și de distanță. Acestea vor fi determinate în funcție de nivelul de incertitudine de măsurare. Aceste incertitudini vor putea defini valorile de toleranță a abaterilor, în vederea verificării conformității standardelor metrologice, potrivit standardului NF E 02-204 , din 1993 [89], [90].

Din punctul de vedere practic, modelul propus al reperului scanat se bazează pe cartografierea vizibilității reale a piesei, aceasta fiind luată în considerare pentru definirea orientării cât mai bune a traductorului. Normalele la fațetele specifice sferei de vizibilitate reală reprezintă un ansamblu de direcții potențiale ale numerizării. Aceste direcții normale vor face obiectul unei analize individuale în scopul de a determina care sunt fațetele ale căror orientări ce asigură un unghi cât mai apropiat de unghiul optim de numerizare.

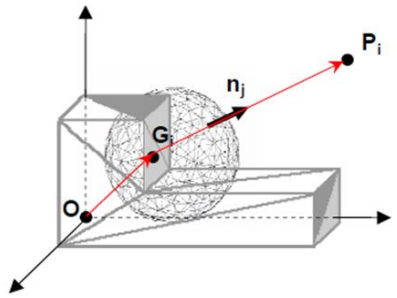


Fig. 3.6.4 *Identificarea unui punct de vedere potențial optim în vederea procesului de numerizare [88], [89], [91]*

$$\vec{OP} = \vec{OG}_I + d_{opt} \cdot \vec{n}_j \qquad [3.6.3].$$

Acest unghi este definit ca fiind parametrul principal ce arată precizia de măsurare determinată. Astfel va fi posibil să se determine coordonatele punctelor de vedere potențiale ale numerizării, luând în calcul poziționarea și orientarea traductorului. Acestea sunt determinate cu ajutorul relației [3.6.3], unde P_i reprezintă un punct de vedere potențial al numerizării fațetei F_i, față de centrul de masă G_i, aflat la o distanță optimă d_{opt}, după direcția preferențială n_j.

3.6.3 Influenţa culorii suprafeţei măsurate asupra preciziei scanării

Cel mai bun exemplu din acest punct de vedere îl reprezintă reperele de culoare închisă, însă cercetările s-au realizat pentru diferite spectre de culoare.

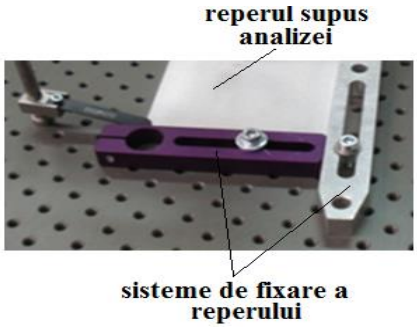


Fig. 3.6.5 *Dispunerea pe masa mașinii în coordonate a unui reper prelucrat prin electroeroziune, în scopul determinării influenței culorii asupra preciziei de măsurare [1]*

Din puntul de vedere al formei reperelor studiate, s-a stabilit că reperele având forme paralelipipedice sunt cele mai potrivite studiului. Pentru ca determinările să fie cât mai corecte, de-a lungul timpului, cercetările realizate au dus la concluzia că este indicat ca suprafețele pieselor să fie prelucrate prin procedeul tehnologic de electroeroziune, spre a nu se genera reflexii parazite, iar suprafața să fie mată (figura 3.6.5) [1]. Pentru simularea cât mai multor situații ale procesului de scanare, în care piesele sunt de diferite culori, pe suprafața acestor repere prelucrate prin procedeul de electroeroziune se aplică fâșii de bandă adezivă, de diferite culori omogene (roșu, albastru, alb, negru, verde, sau galben).

Pentru delimitarea zonei de scanare, se procedează la aplicarea unei benzi format din culorile verde și galben, cu dispunere succesivă (figura 3.6.6). Este important ca fâșiile de bandă aplicate peste reper

să aibă aproximativ aceeași textură sau, cel puțin, texture apropiate de cea a materialului reperului prelucrat, spre a se reduce riscul apartiției erorilor de scanare [1], [92].

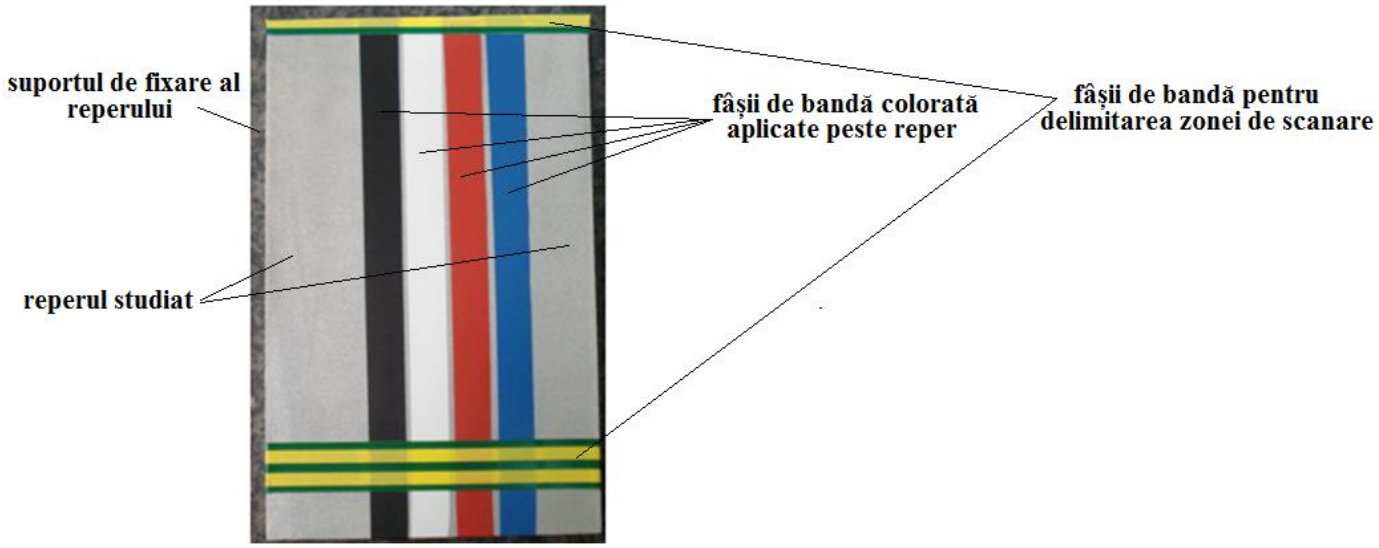
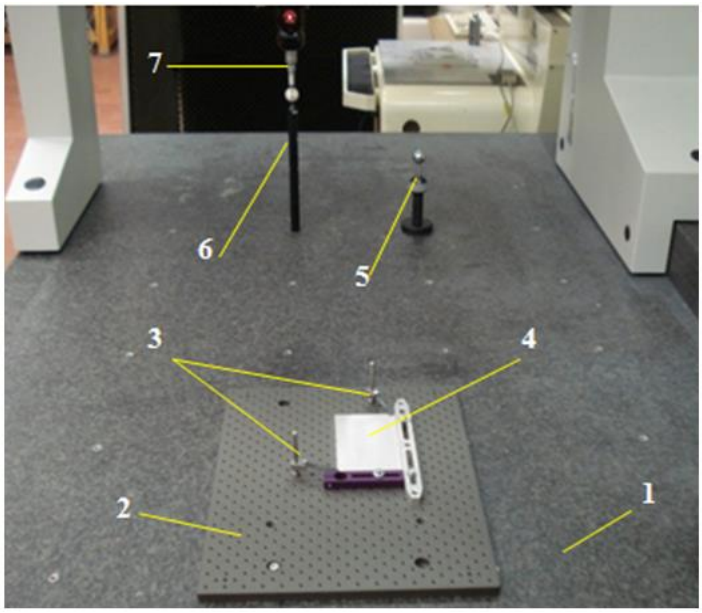


Fig. 3.6.6 *Procedeul de aplicare a fâșiilor de benzi colorate pentru simularea mai multor situații de scanare din punctul de vedere al culorii reperului [1], [92]*

Din punctul de vedere al configurației de măsurare, pe masa mașinii este dispus un sistem de fixare al piesei, două sfere de calibrare și un palpator cu contact, având rolul de a localiza și de a etalona sferele de calibrare (figura 3.6.7). Prin aceasta se determină sistemul de coordonate propriu al piesei, urmând a se scana zona acoperită cu bandă adezivă, delimitată de cele două benzi galben – verde, cu dispunere transversală. În prima etapă se procedează la scanarea prin contact (în vederea obținerii unui nor de puncte de coordonate, cu valori contând ca fiind etalon), iar, ulterior se trece la scanarea aceleiași zone, dar cu ajutorul unui cap de măsurare cu sursă LASER [1], [92].



1 - masa de măsurare;

2 - suport de fixare al reperului;

3 - cleme de fixare;

4 - reperul suspus scanării;

5 - sfera de calibrare pentru palpator;

6 - sfera de calibrare pentru capul de scanare cu sursă LASER;

7 - sistemul de palpare prin contact.

Fig. 3.6.7 *Reprezentarea configurației de măsurare a reperului studiat [1], [92]*

Strategia de măsurare constă în scanarea prin contact a unui număr cât mai mare de punte pe suprafața delimitată a reperului, după care, aceeași zonă va fi scanată pe principiul emisiei de radiație LASER. Cele două modele (ca nori de puncte) ale reperului scant urmează apoi să fie suprapuse, spre a se observa diferențele de coordonate. În vederea comparației rezultatelor se consideră ca etalon

scanarea prin contact, deoarece în acest caz precizia este mai ridicată decât în cazul scanării cu radiație LASER (caz în care intervin unele erori parazite cauzate de interferențele între radiațiile emise și cele reflectate). La scanare se va stabili ca originea sistemului de coordonate să se plaseze în colțul din stânga, spate al reperului, pentru a se înregistra valori numerice mici ale punctelor scanate, acestea putând fi prelucrate și verificate mai ușor. Pentru definirea sistemului de coordonate asociat reperului, de regulă se preferă utilizarea și alinierea a trei entități, de tip plan, linie, punct, fiind cea mai eficientă metodă de aliniere [1], [74].

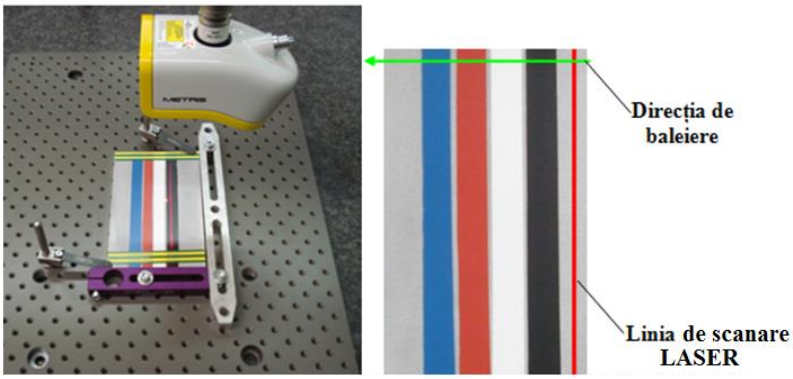


Fig. 3.6.8 *Metoda scanării transversale [1]*

Scanarea prin procedeul emisiei radiației LASER, presupunând digitalizarea suprafeței delimitate se poate efectua în două metode diferite, după cum urmează:

- prin scanarea transversală, prin care linia LASER parcurge o singură fâșie (de o anumită culoare) la un moment dat, prin deplasare pe direcție perpendiculară față de direcția de dispunere a benzilor adezive (figura 3.6.8);
- prin scanarea longitudinală, în care linia LASER baleaiază mai multe culori odată, prin deplasarea de-a lungul benzilor adezive (figura 3.6.9) [1].

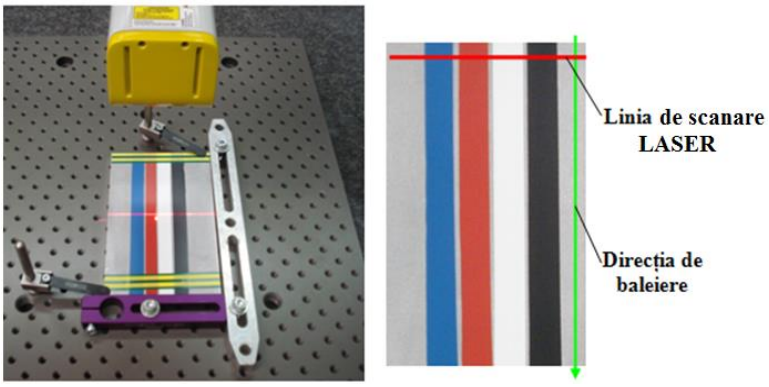


Fig. 3.6.9 *Metoda scanării longitudinale [1]*

Cele două metode, practic, acoperă situațiile de scanare, întâlnite în procesele de verificare metrologică. Se acordă o atenție deosebită determinării preciziei obținute pentru fiecare culoare în parte, aceasta în ambele situații [1]. Procesarea și compararea valorilor coordonatelor, ca nori de puncte, se face prin intermediul unor interfețe software dedicate, precum *Camio* sau *Focus Inspection*, acestea permițând o gamă largă de operații [93].

Pentru analiza rezultatelor se folosesc grafice, obținute pe baza datelor statistice, generate anterior în cadrul mediului software specific. Acestea, la rândul lor, sunt generate în urma comparației norilor de puncte rezultați în urma scanării prin contact, respective prin emisie LASER. În cazul scanării cu emisie LASER, în general sunt necesare unele prelucrări ale norului de puncte, constând în îndepărtarea zonelor ce depășesc suprafața marcată prin delimitarea cu benzile transversale (figura 3.6.6). În figura de mai jos este prezentată discretizarea pe principiul triangulației a norului de puncte prelucrat, în urma scanării prin metoda transversală (când linia LASER baleiază) o singură culoare la un moment dat. Se poate observa o diferență între zona pe care au fost dispuse benzi adezive și zona lăsată liberă. În general, se poate constata că în cazul benzii adezive de culoare neagră sistemul de scanare întâmpină dificultăți în numerizarea zonei respective, neputându-se procesa întreaga suprafață [1], [92].

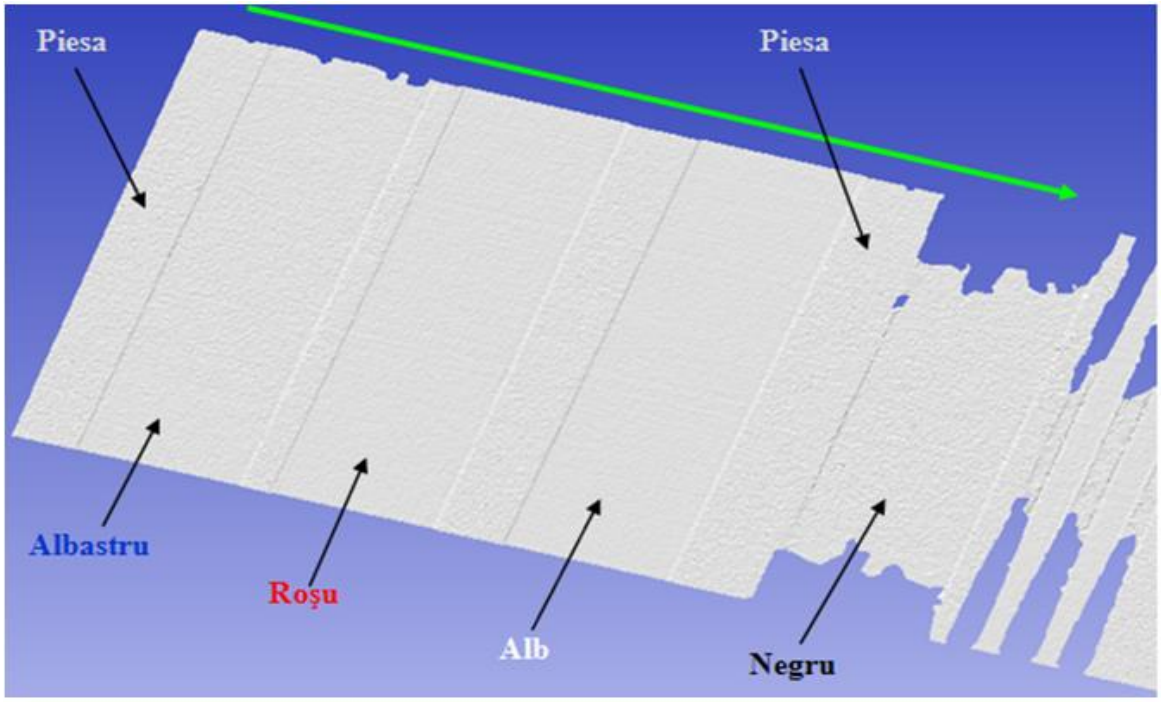


Fig. 3.6.10 *Procesarea norului de puncte, prin triangulare, în urma scanării prin baleiere LASER transversală [1]*

Cercetări în acest scop metrologic, au evidențiat clar diferențe nete în ceea ce privește rezultatele scanării diferitor benzi de culoare. Astfel, prin identificarea și separarea zonei aferente fiecărei culori în parte, iar comparația cu etalonul (norul de puncte obținut prin scanarea cu contact) făcându-se, de asemenea, pe rând, pentru cazul fiecărei culori, în parte [1], [94].

Cercetări metrologice complexe, realizate în cadrul unor teze de doctorat au scos în evidență clar rezultate comparative, în acest sens, pentru repere de formă paralelipipedică precum cel prezentat în figurile 3.6.8 și 3.6.9.

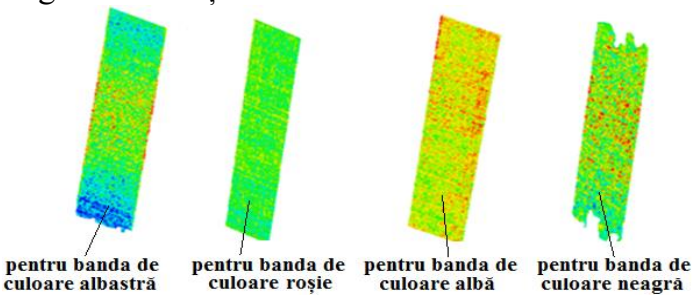


Fig. 3.6.11 *Identificarea norilor de puncte pentru fiecare culoare în parte [1]*

În acest sens, în cele ce urmează este prezentat un exemplu concret în care s-a scanat un astfel de reper și s-au realizat cercetări în scopul influenței culorii asupra preciziei de scanare. În figura 3.6.11 sunt prezentate rezultatele comparației pentru fiecare culoare în parte. Informații referitoare la date statistice legate de comparații între norii de puncte specifici fiecărei color se pot vizualiza în tabelul 3.6.1:

Tabelul 3.6.1 *Valori statistice obținute pentru fiecare bandă de culoare în cazul scanării transversale pe principiul LASER, a unui reper de formă paralelipipedică [1]*

Scanarea după direcție transversală	Pentru banda albastră	Pentru banda roșie	Pentru banda albă	Pentru banda neagră
Numărul de puncte valide	41.415	37.607	37.791	25.020
Abaterea maximă [mm]	0,078	0,036	0,051	0,084
Abaterea minimă [mm]	-0,058	-0,035	-0,01	-0,078
Amplitudinea [mm]	0,137	0,072	0,061	0,161
Abaterea medie [mm]	-0,002	0,001	0,016	0,008
Abaterea standard [mm]	0,016	0,008	0,007	0,015
Rădăcina pătrată medie [mm]	0,016	0,008	0,018	0,017

Pe baza unor studii teoretice, coroborate cu rezultatele prezentate în acest exemplu, se poate constata că din punctual de vedere al abaterii standard, în cazul scanării benzii de culoare albă s-a obținut precizia de măsurare cea mai bună [1], [95 ÷ 97].

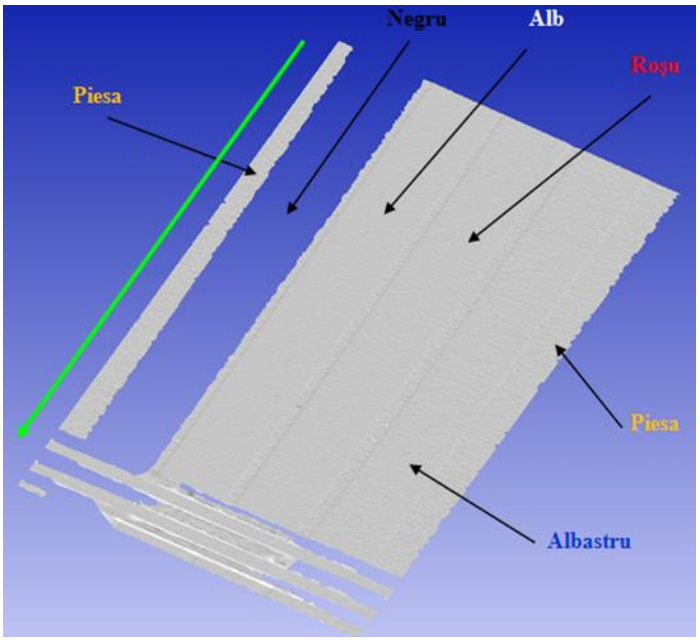


Fig. 3.6.12 *Exemplu de rezultatele obținute prin triangularizarea în urma scanării longitudinale a unui reper de formă paralelipipedică, de care s-au aplicat benzi colorate diferit [1]*

S-a putut determina faptul că, la polul opus se situează benzile de culoare albastră și neagră, cu cele mai mari abateri standard, ceea ce înseamnă că pentru reperele de culoare închisă precizia de scanare scade față de cazul reperelor de culori deschise. Tendința este valabilă și din punctul de vedere al abaterilor maxime și minime, rezultatele putând fi observate și în cazul exemplului prezentat în tabelul 3.6.1 [1]. În figura 3.6.12 este prezentat un exemplu de discretizare prin triangulație a unui nor de puncte prelucrat, generat în urma unui proces de scanare longitudinală, în cazul în care radiația LASER baleiază simultan mai multe culori. Și acest caz, într-o măsură mai mare, chiar decât în cazul scanării transversale, se poate observa că scannerul LASER întâmpină dificultăți mari la digitizarea benzii de culoare neagră, aceasta, nefiind văzută deloc de către camera CCD [1].

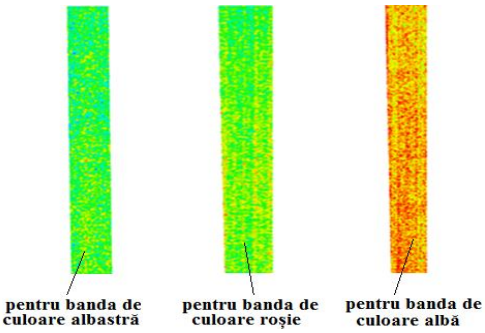


Fig. 3.6.13 *Extragerea mostrelor din norii de puncte rezultați în urma scanării longitudinale, cu generarea rezultatelor specifice fiecărei benzi de culoare [1]*

În figura 3.6.13 se observă norii de puncte pentru fiecare bandă colorată în parte, cu excepția benzii de culoare neagră, aceasta nefiind detectată de către camera CCD:

În tabelul de mai jos sunt prezentate rezultatele legate de compararea între culori, în cazul exemplului menționat mai sus:

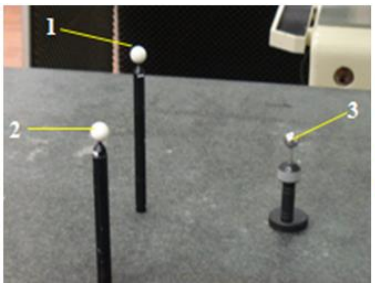
Tabelul 3.6.2 *Valori statistice obținute pentru fiecare bandă de culoare în cazul scanării longitudinale pe principiul LASER, a unui reper de formă paralelipipedică [1]*

Scanarea după direcție transversală	Pentru banda albastră	Pentru banda roșie	Pentru banda albă
Numărul de puncte valide	43.835	39.502	46.444
Abaterea maximă [mm]	0,04	0,049	0,054
Abaterea minimă [mm]	-0,056	-0,029	-0,005
Amplitudinea [mm]	0,096	0,078	0,059
Abaterea medie [mm]	0,001	0,006	0,024
Abaterea standard [mm]	0,01	0,008	0,007
Rădăcina pătrată medie [mm]	0,01	0,01	0,025

Cele două seturi de rezultate specificate în cadrul exemplului prezentat vin să certifice concluzia potrivit căreia reperele de culoare deschisă se pretează mult mai bine la procesul de numerizare LASER decât cele de culoare închisă, în special din punctual de vedere al preciziei.

3.6.4 Identificarea poziţiilor optime în funcţie de precizia de măsurare

Este cunoscut faptul că în etapele pregătitoare proceselor de măsurare și/sau scanare a reperelor, de cele mai multe ori se întâmpină dificultăți la calibrarea orientărilor capetelor de măsurare (a palpatorului, respectiv a capului de scanare LASER). Din acest motiv, cercetări în scopul reducerii acestor sincope, au dus la concluzia că este util să se testeze performanțele sistemului de scanare LASER, în vederea găsirii pozițiilor optime pentru care să se poată obține precizia maximă în cadrul proceselor de măsurare/scanare. Pentru aceasta, operația prin care se testează performanțele traductorului LASER trebuie să se facă obligatoriu în laboratoare de metrologie, menținând pe tot parcursul testelor o temperatură constantă, respectiv o iluminare omogenă [1], [95], [97]. În scopul realizării testelor, este indicat să se respecte o anumită conformație, având ca elemente principale două sfere de calibrare penrtu scannerul LASER (figura 3.6.14).



1, 2 - sfere ceramice de calibrare a capului de scanare;

3 - sferă metalică pentru calibrarea palpatorului cu contact

Fig. 3.6.14 *Exemplu de configurare a sistemului de testare aperformanțelor sistemului de măsurare / scanare [1]*

Sfera de calibrare metalică are rolul de a calibra palpatorul cu contact, cu ajutorul căruia se identifică și se măsoară cele două sfere ceramice de calibrare [63], [74]. Poziționarea celor trei sfere de calibrare se recomandă a fi făcută în așa fel încât să se evite posibilitatea vreuei coliziuni cu scannerul în timpul calibrării / măsurării [1], [97].

Testele constau în realizarea unor scanări pe principiul emisiei LASER a celor două sfere ceramic, prin folosirea mai multor orientări unghiulare ale capului de scanare, preum și în realizarea unei scanări prin contact a celor două sfere. Cu ajutorul mediilor software dedicate (ex. *Focus Inspection*, *Camio*, *PC-DMIS* etc.) interpretarea rezultatelor testelor se face prin generarea unor nori de puncte, de formă sferică, aspectul primordial constând în determinarea distanței dintre centrele sferelor virtual și compararea cu distanța dintre centrele sferelor reale [1], [97].

Prima etapă necesară pentru testarea pozițiilor optime ale capului de scanare (figura 3.6.15), de regulă constă în identificarea și măsurarea celor două sfere prin utilizarea palpatorului cu contact (acesta fiind în prealabil calibrat cu ajutorul sferei metalice).

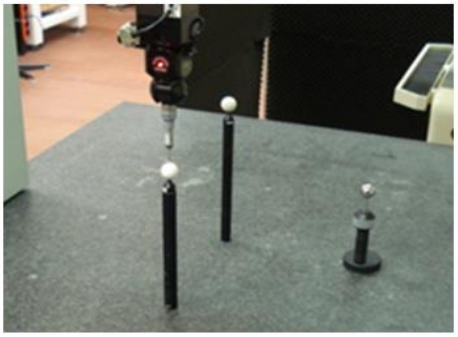


Fig. 3.6.15 *Etapa de identificare și măsurarea celor două sfere ceramice, prin determinarea distanței dintre centrele acestora [1], [97]*

Pentru ca rezultatele să fie cât mai corecte, se recomandă ca fiecare sferă ceramică, în parte să fie măsurată prin contact prin intermediul unui număr cât mai mare de puncte (minim 20), luate echidistant pe întreaga suprafață [1], [97]. După înlocuirea palpatorului cu contact cu scannerul LASER, se stabilește direcția de scanare. Scanarea trebuie să pornească înainte de sfera 1 și să se încheie după sfera 2 (figura 3.6.16).

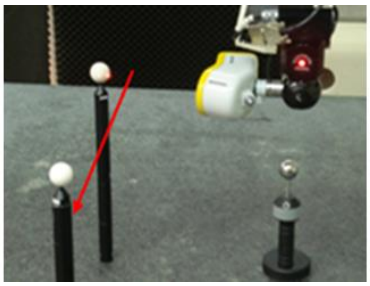


Fig. 3.6.16 *Stabilirea direcției și a distanței de scanare LASER [1]*

Se recomandă ca sferele să fie poziționate la înălțimi diferite, și anume sfera 1 să fie situată mai sus decât sfera 2, fără, însă, a se depăși câmpul de vedere al senzorului LASER. Această măsură se ia spre a rezulta mai multe situații în determinarea pozițiilor optime de scanare (figura 3.6.17) [1], [98].

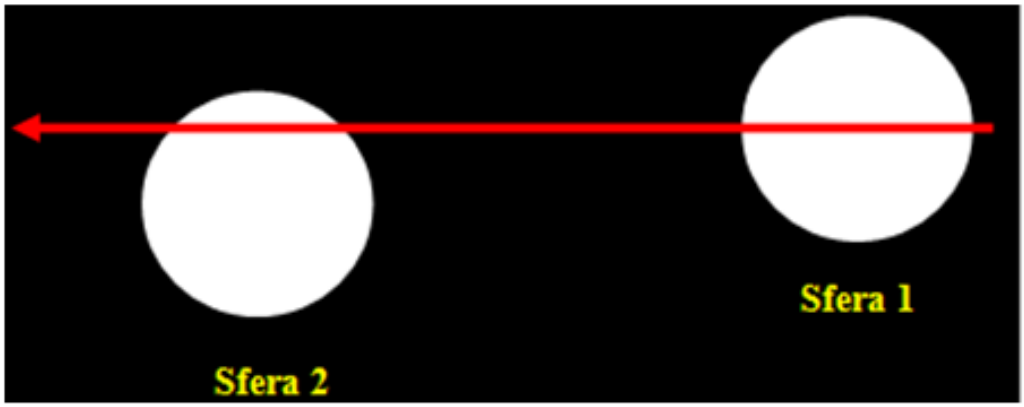


Fig. 3.6.17 *Poziționarea pe direcție verticală a sferelor ceramice de calibrare [1], [98]*

Pe parcursul procedurii de testare, este necesar să se utilizeze diferite orientări ale capului de scanare LASER, toate în planul vertical, cu unghiul director A care pornește de la 0°, putând fi incrementat cu un pas de 30°, până la valoarea de 90°. Celălalt unghi, B, va putea lua doar două valori unghiulare, și anume ± 90°. Prin combinarea celor două unghiuri directoare se poate astfel ajunge la un număr de 7 orientări distincte (figura 3.6.18) [1], [98].

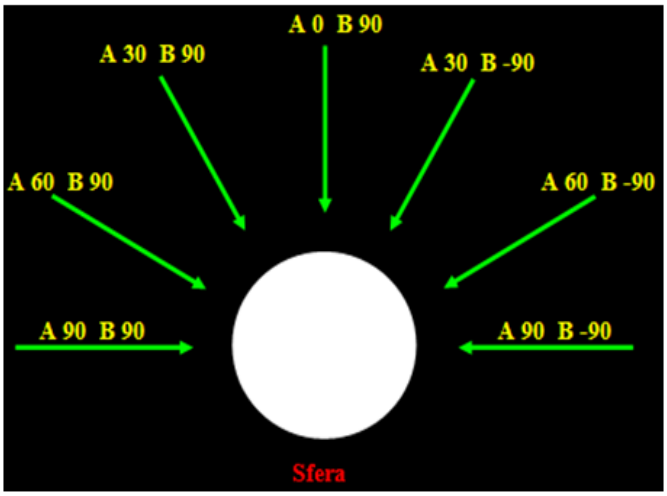


Fig. 3.6.18 *Orientările unghiulare ale capului de scanare, utilizate pe fiecare sferă de calibrare, în cadrul testelor [1], [98]*

Tot în scopul asigurării unei analize cât mai complexe (prin generarea unui număr cât mai mare de situații de măsurare), se recomandă ca pentru numerizarea sferelor de calibrare să se folosească trei distanțe de scanare (figura 3.6.19). Acestea se recomandă a fi în progresie aritmetică, cu rația de aproximativ 5 mm.

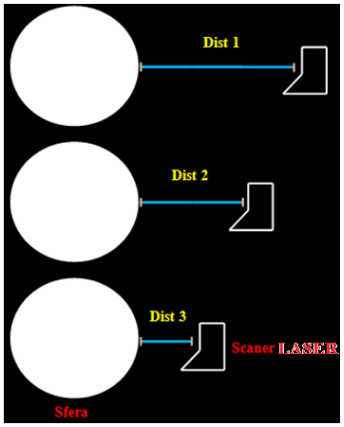


Fig. 3.6.19 *Stabilirea distanțelor de scanare ale capului LASER față de sferele ceramice de calibrare [1]*

Combinând astfel cele 7 orientări ale capului de scanare cu cele trei distanțe, rezultă în final un număr de 21 de determinări, pe baza cărora se pot stabili destul de precis și corect performanțele scannerului LASER [1], [97], [98].

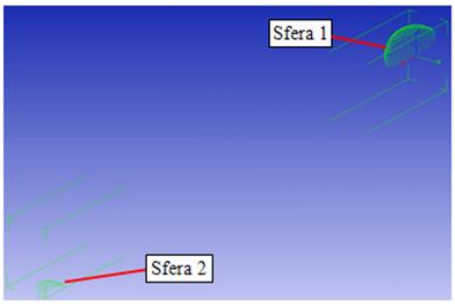
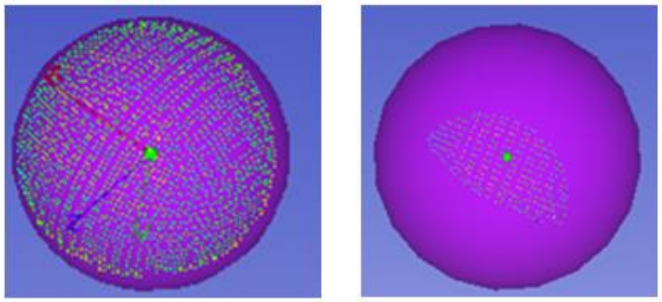


Fig. 3.6.20 *Exemplu de nor de puncte rezultat în urma unei scanări a celor 2 sfere de calibrare [1]*

În figura 3.6.20 este prezentat un exemplu de nor de puncte rezultat în urma scanării celor două sfere de calibrare, printr-o singură baleiere și o singură orientare. Pentru ca mediul software să poată identifica ambele sfere, norul de puncte trebuie împărțit în două (figura 3.4.20) [1].

Pentru determinarea pozițiilor centrelor sferelor de calibrare se recurge la interpolarea sferelor prin norul de puncte, cu ajutorul mediilor software (figura 3.6.21), după care se procedează la exportarea datelor obținute în format .TXT, pentru fiecare sferă generată, în parte [1].



a) **b)**

Fig. 3.6.21 *Sferele virtuale, generate cu ajutorul norilor de puncte: a) pentru sfera ceramică 1; b) pentru sfera ceramică 2 [1]*

Se poate observa faptul că pentru sfera 2, situată mai jos în câmpul de vedere al scannerului LASER, norul de puncte este mai redus decât în cazul sferei 1, deoarece senzorul nu poate vedea suprafața în mod corespunzător [1]. Datele exportate pot fi ulterior prelucrate în mediul *Matlab*, fiid apoi sitetizate în tabele, putând fi astfel interpretate rezultatele și concluziile privind amplasarea optimă a scannerului LASER. Analiza datelor se poate face în funcție de abaterea standard, distanțele dintre cele două sfere fiind raportate la fiecare axă în parte.

De asemenea pozițiile centrelor sferelor se raportează la cele trei axe carteziene. În figura 3.6.22 este prezentat un exemplu de reprezentare a rezultatelor privind abaterile standard, în funcție de diferite orientări ale capului de scanare [1].

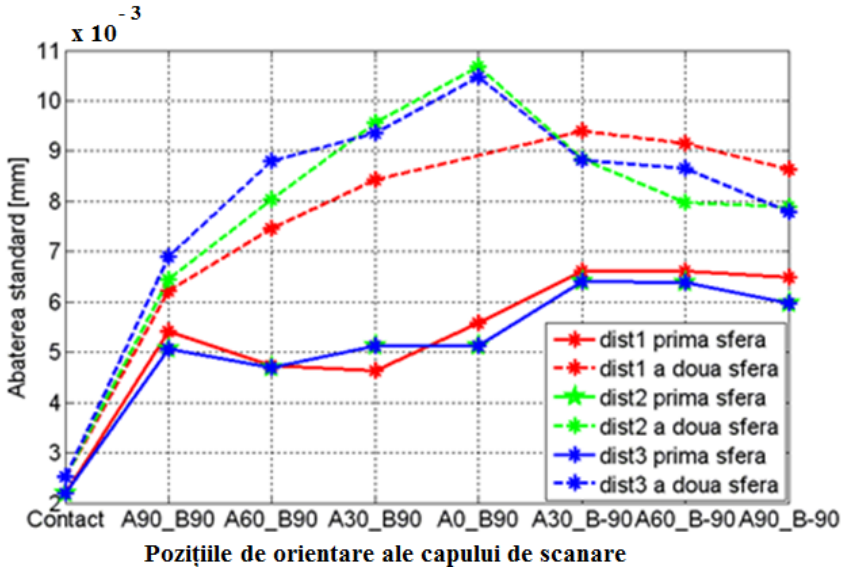


Fig. 3.6.22 *Comparația din punctul de vedere al abaterii standard, pentru diferite orientări ale capului de scanare, în cazul celor două sfere de calibrare [1]*

Prin comparația din punctual de vedere al abaterii standard pentru ambele sfere (figura 3.6.23), urmărindu-se diferențele dintre valorile obținute pentru prima și cea de a doua sferă, se poate constata următorul lucru: Cu cât scannerul baleiază mai mult din suprafața de măsurat, cu atât norul de puncte este mai mare (mai complet), iar măsurările vor fi mai precise. Spre exemplu, în cazul sferei 1, atunci când scannerul numerizează o suprafață mai mare, diferența privind abaterile standard în cazul celor 7 orientări este una foarte mică (de ordinal a 2 – 3 μm).

Se poate, deci trage concluzia că indiferent de orientarea capului de scanare, la digitizarea unei suprafețe, aspectul cel mai important pentru obținerea unei precizii cât mai ridicate se referă la scanarea unei zone cât mai mari, dar menținând distanța de scanare în limitele câmpului de vedere al scannerului [1], [97], [98].

În general, se poate deci constata că orientările pentru care se obțin deviațiile cele mai mari în raport cu scanarea prin contact sunt A90_B90 și A60_B-90. Modalitatea de testare exemplificată și descrisă poate fi generalizată și utilizată ca procedură de testare standard în cadrul oricărui proces de măsurare / scanare pe principiul LASER, atunci când sunt necesare precizii mari pentru repere cu geometrie complexă [1], [98].

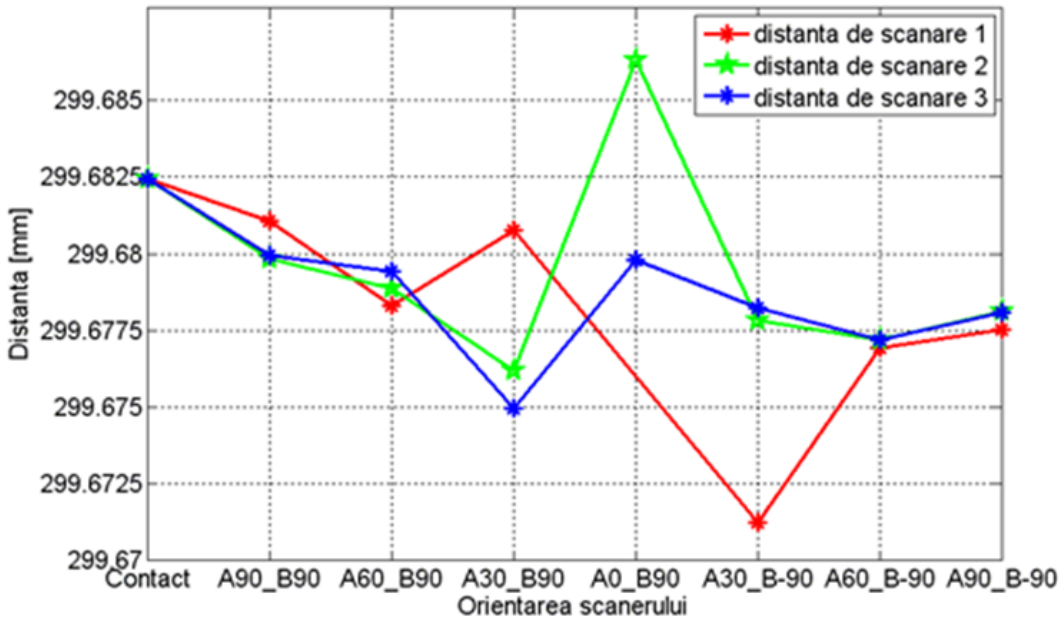


Fig. 3.6.23 *Exemplu de comparație a distanțelor dintre cele două sfere, raportat la axa OX [1]*

Capitolul 4

Aplicații ale mașinilor de măsurat în coordonate cu sisteme de scanare cu sursă LASER

În ultimul timp, pe plan mondial aplicațiile pentru care se utilizează atât mașinile complexe, cât și cele simple, bazate pe sistemul emisiei de radiație LASER a cunoscut o dezvoltare deosebită [80], [82], [99]. Acest lucru se datorează unor avantaje nete, cum ar fi scanarea reperelor complexe și/sau deformabile, precum și eficiența foarte mare, timpul necesar unui proces de numerizare al unui reper cu geometrie complexă putând fi redus de până la zece ori în comparație cu durata specifică procesului de scanare clasică (prin contact cu reperul). Ca urmare, în ciuda unor dezavantaje, cum ar fi costul ridicat, respectiv sensibilitatea în cazul scanării unor repere de culoare închisă și/sau cu grad înalt de reflexie, utilizarea sistemelor de scanare LASER în cadrul mașinilor de măsurare fixe și portabile a cunoscut și cunoaște o continuă dezvoltare [86], [87].

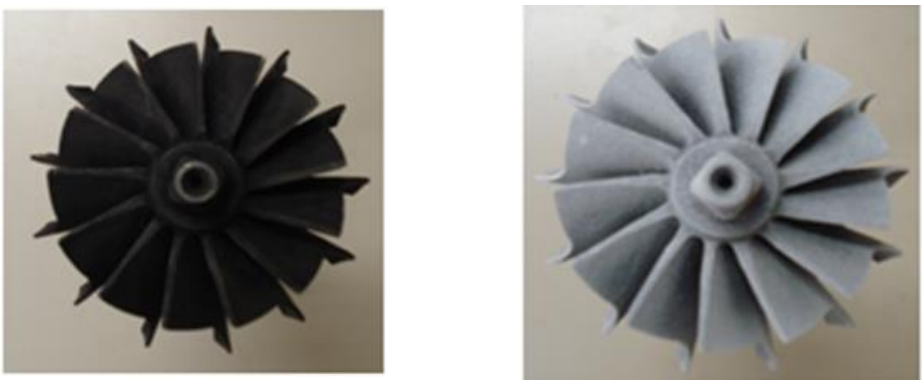
În cele ce urmează, în acest capitol sunt prezentate câteva exemple de aplicații atât a mașinilor clasice (fixe) de măsurare în coordonate, cât și a celor portabile, în care diferite repere utilizate în industrie și medicină au putut fi numerizate eficient cu ajutorul sistemelor de scanare cu LASER [1], [48], [50].

4.1 Aplicații ale sistelelor de scanare LASER, utilizate în cadrul mașinilor de măsurare fixe

Procesul de numerizare cu ajutorul echipamentelor de scanare pe principiul emisiei LASER, la ora actuală îşi găseşte aplicaţii cu precădere în domeniul industrial, al biomecanicii şi al ingineriei medicale. În domeniul industrial, o ramură aparte o constituie industria auto, aici fiind necesare procese de verificare şi scanare a diferitor repere cu rol funcţional şi tehnologic în construcţia motoarelor, a ambreiajelor, a sistemelor de transmisie etc [1], [48], [50], [75].

4.1.1 Exemplu de reper de tip turbină supus procesului de numerizare cu sisteme LASER

În cele ce urmează este prezentat pe larg un exemplu de aplicaţie a proceselor de numerizare pe principiul radiaţiei LASER pentru un reper de tip turbină, cu rol în componenţa motoarelor auto complexe. Luarea în considerare a acestui reper ca obiect de studiu s-a făcut deoarece acesta prezintă o geometrie complexă şi, totodată se pretează foarte bine pentru procesele de numerizare asigurate de către maşinile în coordonate pe principii moderne de scanare. Scanarea unor repere cu geometrii complexe, cum este cel de tip turbină prezentat în exemplul de faţă se pretează, dup caz, la operaţii tehnoilogice de acoperire a suprafeţelor lucioase, spre reducerea erorilor cauzate de interferenţa radiaţiilor incidente cu cele reflectate. În descrierea exemplului de faţă este prezentat modul în care se poate proceda pentru numerizarea suprafeţei turbinei, atât în cazul în care suprafaţa rămâne în stare liberă, cât şi în cazul în care se procedează la acoperirea acesteia. Pentru aceasta, în general se recomandă acoperirea suprafeţei reperului cu un strat subţire de pulbere albă, prin procedeul de şpreiere.



a) b)

Fig. 4.1.1 *Prezentarea reperului supus numerizării în cele două ipostaze: a) în stare naturală; b) în stare şpreiată [1]*

Procedeul se aplică în special atunci când reperul este de culoare închisă şi prezintă suprafeţe cu grad ridicat de reflexie [100]. În figura 4.1.1 este prezentată turbina scanată în stare naturală (neacoperită), precum şi în stare şpreiată.

În acest caz, pentru procesul de numerizare a reperului de tip turbină s-a folosit o maşină în coordonate echipată cu capete de scanare cu sursă LASER de tip *LC 50* şi *LC 60 DX*, produse de către compania *Nikon Metrology* [1].

a) b)

Fig. 4.1.2 *Scanarea turbinei cu capetele LC 50 și LC 60 DX, prin utilizarea diferitor orientări ale acestora: a) scanarea turbinei în stare naturală; b) scanarea turbinei acoperită cu stratul de pulbere albă [1]*

Procedeul de scanare a turbinei, cu ajutorul capetelor de scanare *LC 50* și *LC 60 DX*, presupune utilizarea diferitor orientări, în funcție de geometria palelor turbinei, prin respectarea distanței optime de lucru de la treductor la suprafața de scanat (figura 4.1.2).

Motivul pentru care în industrie se utilizează în mod frecvent sistemele de scanare din seria *LC 50* constă în performanțele ridicate ale acestora, acestea putându-se remarca și din caracteristicile tehnice specificate în tabelul de mai jos:

Tabelul 4.1.1 *Caracteristicile tehnice ale sistemelor de scnare cu LASER din seria LC 50 [1], [101]*

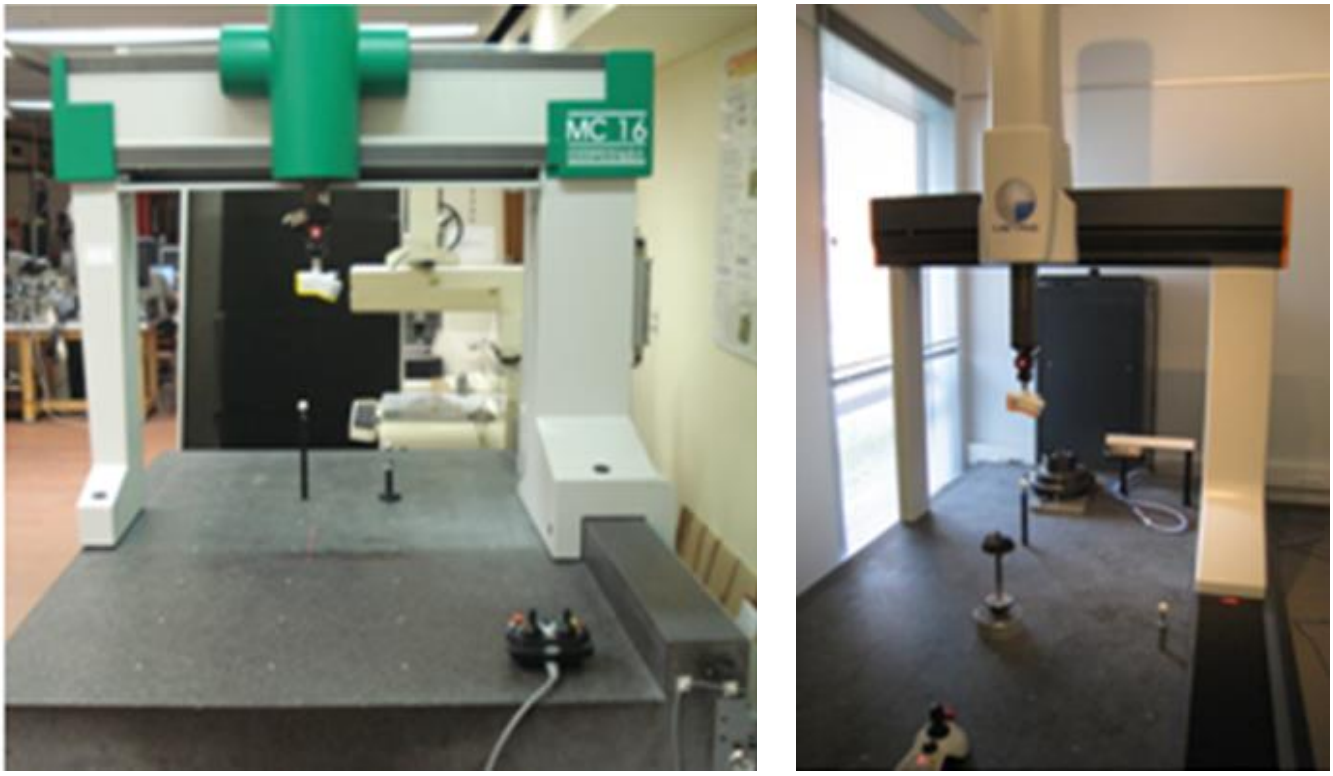
Denumirea caracteristicii	**Valoarea**
precizia	15 μm
domeniul de măsurare (câmpul de vedere, pe lățime și înălțime)	50 x 60 mm
masa	315 g
lățimea liniei spotului LASER	50 mm
adaptabilitatea la MMC	la toată gama de capete de măsurare PH10

Produs tot de către compania *Nikon Metrology*, sistemul de scanare *LC 60 DX* are performanțe îmbunătățite, având următoarele caraceristici tehnice:

Tabelul 4.1.2 *Caracteristicile tehnice ale sistemelor de scnare cu LASER din seria LC 60 DX [102]*

Denumirea caracteristicii	Valoarea
precizia	7 μm
rezoluția de scanare	0,06 mm
viteza maximă de achiziție	75.000 pct / s
distanța de scanare	95 mm
domeniul de măsurare (câmpul de vedere, pe lățime și înălțime)	60 x 60 mm
masa	390 g
lățimea liniei spotului LASER	60 mm
adaptabilitatea la MMC	la toată gama de capete de măsurare PH10

În figura 4.1.3 este prezentat un exemplu în care astfel de capete de scanare au putut fi montate și utilizate pe mașini în coordonate *COORD3 MC16*, respectiv *Metris C3* [103]:



a) b)

Fig. 4.1.3 *Exemplu de adaptare și utilizare a unui cap de scanare din seria LC 60 DX pe două tipuri de MMC: a) pe modelul COORD3 MC 16; b) pe modelul Metris C3 [1]*

Pentru manipularea sistemului de scanare, procesarea norilor de puncte, operațiile cu suprafețe, alinieri, comparații și generare de rapoarte se utilizează medii software dedicate, cum ar fi de exemplu mediul *Focus Inspection* [1], [104].

În exemplul prezentat, legat de scanarea reperului de tip turbină, în cele ce urmează vor fi descrise trei proceduri de digitizare, în condiții diferite de stare a suprafeței reperului, respectiv pentru diferite performanțe ale scannerului LASER. Pentru fiecare procedeu de numerizare se atribuie câte un acronim, acest lucru fiind recomandat în vederea unei mai rapide și mai ușoare identificări, în situația în care procedeele de scanare sunt evaluate din punctul de vedere metrologic. De exemplu pentru scanarea turbinei în stare naturală cu capul de scanare *LC 50* se poate atribui simbolul *T50-N*, pentru scanarea turbinei acoperită cu pulbere albă cu același cap de scanare se poate atribui simbolul *T50-S*,

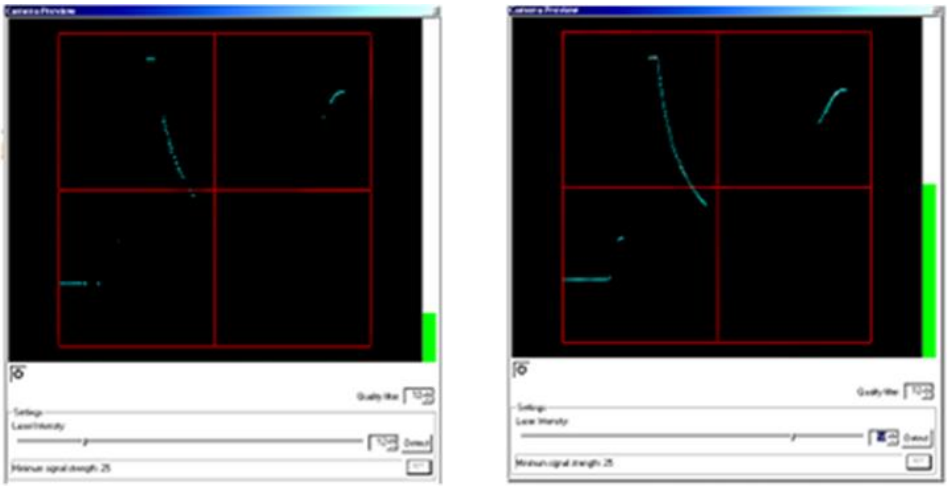
iar pentru scanarea turbinei în stare naturală cu capul de scanare *LC 60 DX* se poate atribui simbolul *T60-N* [1].

În vederea digitizării turbinei este necesară o manipulare cu mare atenție a sistemului de scanare, pentru evitarea riscurilor de coliziune cu reperul scanat. Din acest motiv se are în vedere degajarea de oricare alte elemente a zonei de lucru a scannerului. Pentru sporirea accesului la suprafețe din zone greu vizibile ale unor repere complexe, cum este cel de tip turbină, se recomandă o amplasare a reperului pe diferite elemente de tip suport. De asemenea, trebuie ținut seama de faptul că pentru numerizarea pe principiul emisiei LASER, spațiul de lucru necesar este mult mai mare decât în cazul numerizării prin contact cu reperul. Ca urmare nu este necesare o calibrare pentru fiecare orientare, în parte, cum este necesar în cazul scanării prin contact, ceea ce presupune, în mod evident o scădere drastică a timpilor de lucru.

Fig. 4.1.4 *Exemplu de orientare a capului de scanare cu LASER, după cele două unghiuri de rotație, în cele două plane [1]*

În scopul creșterii eficienței în lucru, se recomandă calibrarea orientărilor capului de scanare înainte de începerea scanării propriu-zise. În cazul unor repere cu geometrii complexe (cum este cazul reperului de tip turbină), în multe situații sunt necesare calibrări de noi orientări, neprevăzute inițial [1]. În figura 4.1.4 este prezentat un exemplu prin care definirea orientărilor capului de scanare se face în funcție de unghiurile de rotație în cele două plane (unghiurile A și B), în mod identic cu cazul folosirii capetelor de scanare prin contact.

În vederea digitizării unor repere precum cel de tip turbină, prima etapă constă în realizarea operației de inițializare a mașinii, cu temporizarea unei durate de 30 de minute, necesară încălzirii senzorului LASER. Următoare etapă constă în calibrarea orientărilor necesare numerizării reperului, urmată de ajustarea intensității spotului LASER în scopul înregistrării unui număr cât mai mare de puncte într-un interval cât mai scurt de timp.



a) b)

Fig. 4.1.5 *Fereastra de vizualizare a camerei CCD: a) pentru intensitate mică; b) pentru intensitate ridicată [1]*

De această etapă de ajustare (deosebit de importantă) depind atât acuratețea, cât și timpul necesar procesului de scanare [105]. Pentru reglarea intensității fasciculului LASER se utilizează o fereastră de vizualizare a camerei CCD (figura 4.1.5), în care operatorul poate observa efectul schimbărilor [1].

Se poate observa că la o distanță oarecare, intensitatea radiației poate avea drept efect o mai bună vizibilitate a suprafețelor scanate, ceea ce înseamnă achiziția unui număr mai mare de puncte. Pentru o distanță corespunzătoare de scanare, bara din partea dreaptă ce corespunde intesnității razei LASER

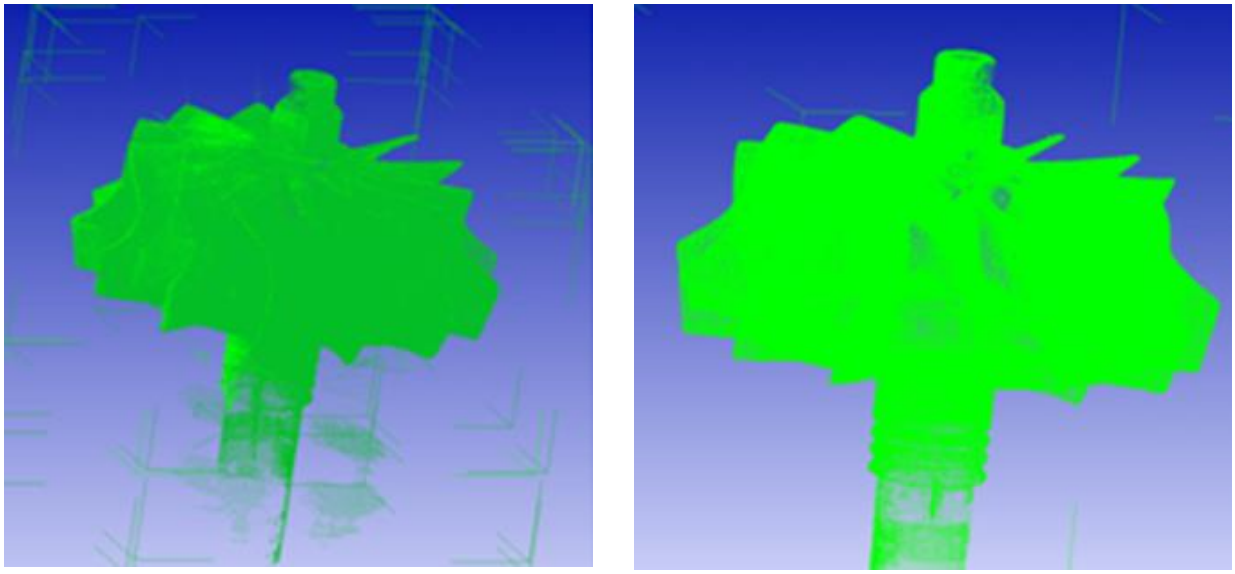
este de culoare verde, în cadrul ferestrei de vizualizare punctele fiind reprezentate cu culoarea albastru deschis. Dacă, însă reprezentarea este de culoare portocalie sau roșie, înseamnă că suprafața de scanat se află prea aproape de scanner, punctele fiind în acest caz saturate. În acest caz exactitatea informațiilor achiziționate va fi una scăzută. Având în vedere faptul că de cele mai multe ori, prin complexitatea geometriei reperului numerizat, au loc schimbări bruște ale distanței de scanare (de exemplu în cazul turbinei), există riscul apariției unor probleme de acuratețe chiar și pe lungimi mici ale direcției de scanare. În general complexitatea geometriei reperelor scanate, făcând absolut necesară definirea și calibrarea mai multor unghiuri de orientare a capului de scanare, face ca durata procesului efectiv de scanare a reperului să crească foarte mult. În tabelul de mai jos este prezentat un exemplu de definire a mai multor unghiuri de orientare a capului de scanare pentru captarea întregii suprafețe a reperului de tip turbină [1].

În funcție de tipul de scanare, în cadrul procesului de numerizare este necesar un număr mai mare sau mai mic de orientări unghiulare, presupunând timpi de scanare diferiți. Din tabelul 4.1.3 se poate observa faptul că scanarea turbinei în culoarea sa naturală, cu scannerul *LC 50* (scanarea cod T50-N) ridică mai multe probleme decât în celelalte două situații. Scanarea turbinei cu capul de scanare *LC 60 DX* (codul de scanare T60-N) este mult mai rapidă, datorită vitezei sporite de achiziție. De exemplu pentru scanarea unor repere de tip turbină cu cote de gabarit de aproximativ 200 mm lungime și 120 mm în dimetru (la nivelul palelor turbinei) sunt necesare aproximativ 3 ore pentru un proces complet de numerizare. În cazurile T60-N și T50-S (vezi mai sus atribuirea codurilor de scanare) numărul de orientări se reduce aproape la jumătate față de cazul scanării T50-N (cel mai defavorabil). Ca urmare, este evident că utilizarea unui cap de măsurare performant, cum este modelul LC60 DX, coroborat cu procedura aplicării unui stat subțiere de pulbere, de culoare alb- mat contribuie împreună la eficientizarea procesului de scanare [1].

Tabelul 4.1.3 *Utilizarea orientărilor unghiulare pentru cele 3 tipuri de scanări [1]*

Unghiul de rotație în planul vertical (A)	**Unghiul de rotație în plan orizontal (B) pentru scanarea cu modelul LC 50 a turbinei în starea naturală**		**Unghiul de rotație în plan orizontal (B) pentru scanarea cu modelul LC 50 a turbinei acoperită cu pulbere**		**Unghiul de rotație în plan orizontal (B) pentru scanarea cu modelul LC 60 DX a turbinei în stare naturală**	
	Unghiul de rotație B	*Numărul orientărilor*	*Unghiul de rotație B*	*Numărul orientărilor*	*Unghiul de rotație B*	*Numărul orientărilor*
0°	0°; 90°	2	0°; 90°	2	0°; 90°	2
45°	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 45°	8	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4
90°	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 15°	24	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 30°	12	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 30°	12
105°	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 45°	8	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4	-180° ÷ 180°, cu incrementul de 90°	4
Timpul necesar procesului de scanare	7 ore	42	5 ore	22	3 ore	22

Pentru fiecare trecere a liniei LASER peste câte o suprafață rezultă câte un nor de puncte, astfel încât, pentru *N* operații de baleiere vor rezulta *N* nori de puncte. După realizarea scanării și digitizarea suprafețelor, norii de puncte obținuți pot fi prelucrați ulterior, în scopul obținerii unei discretizări cât mai bune a suprafețelor scanate. Primul pas în proceasarea norilor de puncte constă în operația de fuzionare a acestora, deoarece, pentru discretizare, norul de puncte trebuie să se comporte ca o entitate singură. Ulterior acestei operații, norul va avea o formă grosieră (figura 4.1.6, a), fiind necesară o curățare manuală a punctelor reziduale vizibile (figura 4.1.6, b) [1].



a) b)

Fig. 4.1.6 *Generarea norului de puncte: a) în forma grosieră; b) în forma prelucrată [1]*

Punctele de zgomot care se observă în figura 4.1.1.6, a) se datorează zgomotului sau reflexiilor secundare de pe muchiile mai lucioase, respectiv de pe arborele turbinei (cu grad înalt de reflexie) [1], [105].

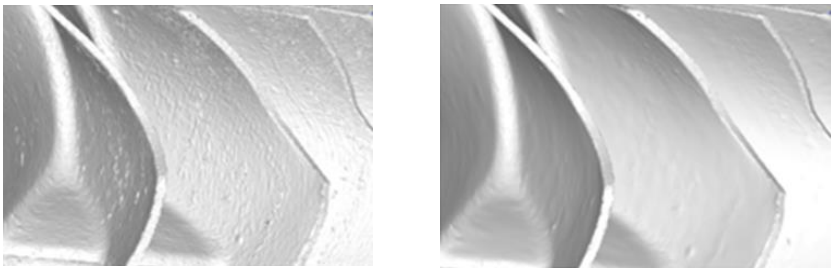
Etapa următoare constă în operaţia de filtrare, având drept scop ştergerea automată a puntelor considerate ca fiind extreme. Tot în cadrul filtrării se şterg şi punctele care, pentru anumite zone din nor, conferă o densitate mai mare decât cea necesară discretizării. Astfel, ca urmare a operaţiie de filtrare, norul de puncte va avea o densitate constantă în toate zonele, putându-se defini suprafaţa virtuală a reperului scanat.

Fig. 4.1.7 *Exemplu de disctretizare prin triangulaţie a norului de puncte asociat turbinei scanate [1]*

Etapa următoare necesară în cadrul procesului de prelucrare a norului de puncte constă în discretizare prin triangulaţie, norul de puncte fiind discretizat în mai multe suprafeţe, care, prin intermediul mediilor software specifice, va putea fi vizualizat ca o singură entitate (figura 4.1.7). Ca urmare se va obţine o imagine a formei scanate sub forma unei suprafeţe virtuale, putându-se analiza vizual diferite aspecte ale sale [1], [105].

Se poate observa că pe suprafaţa virtuală obţinută există zone în care apar mici bavuri. De asemenea trecerea de la o zonă la alta prezintă anumite muchii inexistente la reperul real, ceea ce denaturază calitatea suprafeţei.

Aceste muchii aparente sunt cauza unor puncte care nu au fost considerate ca fiind extreme în cadrul algoritmului de filtrare [1], [105]. Pentru eliminarea acestei probleme se foloseşte un procedeu de netezire, cu rolul de a armoniza suprafaţa, cu eliminarea punctelor extreme, prin generarea mai multor triunghiuri de dimensiuni mici. În figura 4.1.1.8, a) se poate observa detaliat modul în care arată suprafaţa rezultată imediat după procesul de discretizare, iar în figura 4.1.8, b) se pot vedea clar efectele procesului de netezire.

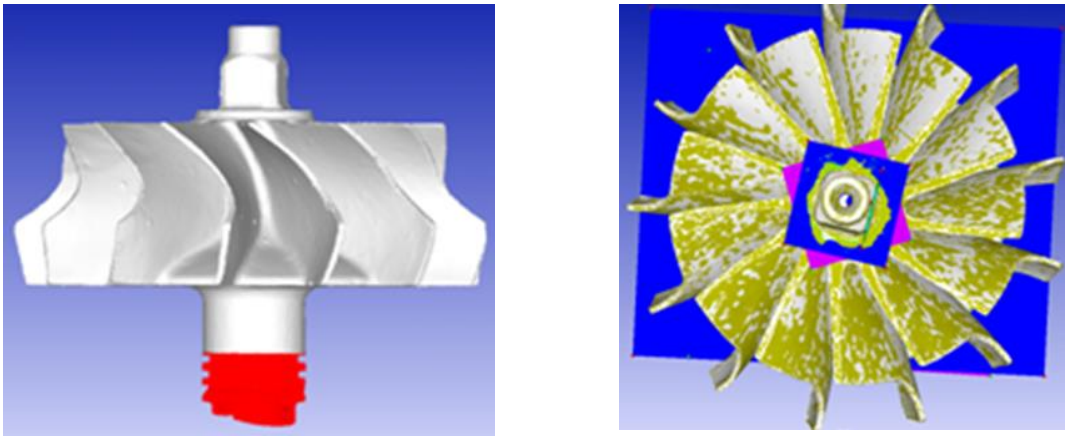


a) b)

Fig. 4.1.8 *Netezirea suprafeţei generate în urma procesului de triangulaţie:*
a) suprafaţa rezultată în urma triangulaţiei; b) suprafaţa netezită

Pentru operaţia de netezire, utilizatorul poate defini numărul de iteraţii; astfel cu cât mai mare este numărul de iteraţii, cu atât suprafaţa va prezenta un grad mai mare de netezire Prin aceasta, calitatea suprafeţei obţinută în urma digitizării are gradul înalt de optimizare, reproducând cu o marjă mică de erori reperul scanat [106].

Pentru a se asigura o creştere a performanţelor procesului de numerizare, numeroase cercetări în domeniu au avut drept scop realizarea mai multor procese de scanare ale aceluiaşi reper, în condiţii diferite de acoperire, respectiv prin utilizarea diferitor sisteme de scanare. În cazul exemplului prezentat este vorba de compararea între ele a celor trei scanări ale turbinei (având codurile T50-N, *T50-S* şi *T60-N* – vezi mai sus). În scopul comparării scanărilor, o operaţie deosebit de importantă este cea de aliniere a suprafeţelor scanate. În cazul de faţă, cea mai bună metodă constă în compararea câte două a suprafeţelor scanate, astfel, în scopul realizării comparaţiei, două suprafeţe scanate trebuie să fie aliniate una peste cealaltă. Ca suprafaţă de referinţă se poate lua în considerare oricare dintre suprafeţele scanate (în exemplu considerat, se poate considera oricare dintre scanările *T50-N*, *T50-S* şi *T60-N*. Pentru a nu se denatura relevanţa comparaţiei, toate modelele scanate au fost pregătite, astfel ca zonele situate în afara suprafeţei etalonului să fie eliminate (figura 4.1.9, a) [1]. Alinierea suprafeţelor poate fi realizată prin diferite metode, în funcţie de complexitatea reperului scanat şi de existenţa zonelor de referinţă corespondente ambelor modele. În figura 4.1.9, b) pot fi observate planele asociate celor două modele (cu albastru, respectiv cu mov). Datorită acestor constrângeri, modelul scanat contând ca măsurand se va suprapune peste modelul scanat contând ca etalon (referinţă). Pentru certitudinea unei suprapuneri juste, prin utilizarea mediilor software specifice, se recomandă procedarea la alinierea în mod automat, în figura 4.1.10 putând fi vizualizat un exemplu de rezultat al acestui procedeu [1].

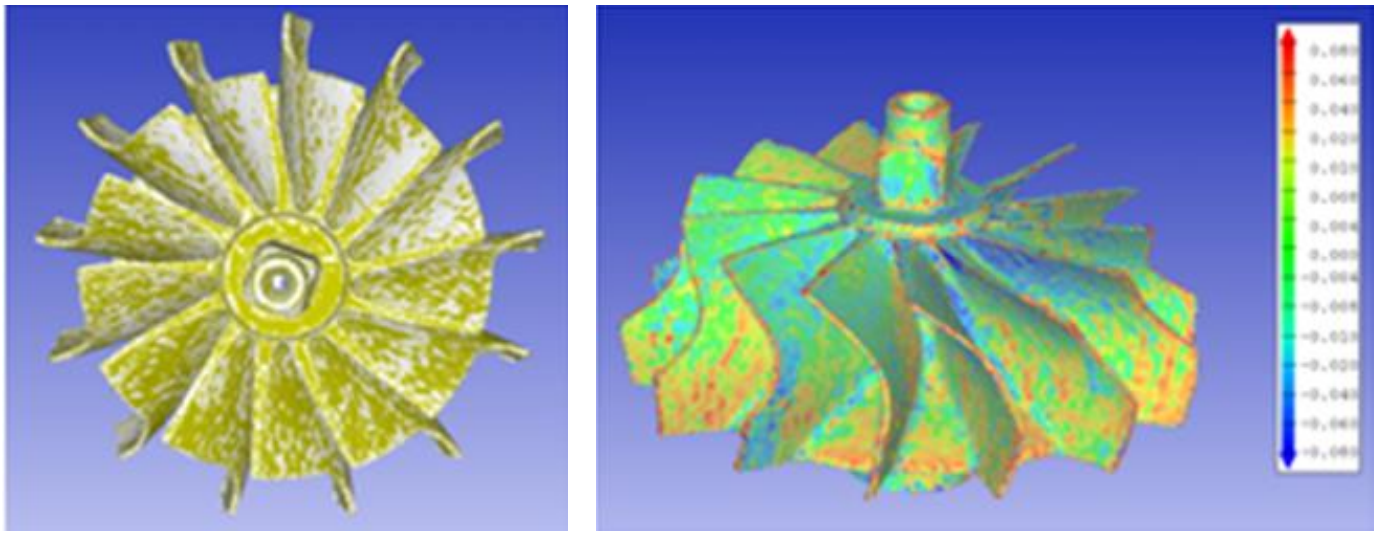


a) b)

Fig. 4.1.9 *Exemplu al aplicării procedurii de aliniere în cazul a două scanări pe un reper de tip turbină: a) pregătirea suprafeţelor; b) referinţele de aliniere [1]*

După această etapă este realizată comparaţia globală între cele două modele (ca entităţi distincte, suprapuse), putând fi apoi generat raportul de măsurare (figura 4.1.11, b). Pe baza raportului, cu ajutorul unei scale gradate virtuale (în cadrul mediului software specific), în care sunt integrate intervalele de culoare, pot fi analizate datele necesare comparării. Concret este vorba de compararea

poziţiilor punctelor modelului măsurand în raport cu poziţiile punctelor mdelulului etalon. În plus, se mai pot obţine informaţii referitoare la procentajul punctelor pentru fiecare interval în parte şi numărul punctelor pe baza cărora s-a realizat comparaţia [1].



a) b)

Fig. 4.1.10 *Exemplu al aplicării procedurii de aliniere în cazul a două scanări pe un reper de tip turbină: a) pregătirea suprafeţelor; b) referinţele de aliniere [1]*

Cercetările metrologice privind compararea modelelor au drept scop o amplă analiză în vederea identificării zonelor celor mai problematice ale reperului scanat. Exemplul prezentat aici, legat de tiurbină este foarte relevant, putându-se obține o imagine foarte clară asupra eficienței procesului de scanare, în contextul unor situații de măsurare diferite [107]. Compararea celor trei situații de scnare în cazul exemplului prezentat cu turbine se poate face după cum urmează:

- turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 60 DX*, cu turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 50* (scanarea *T 60N* versus *T 50N*);
- turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 60 DX* cu turbina acoperită cu pulbere albă și scanată cu sistemul *LC 50* (*T 60N* versus *T 50S*);
- turbina în culoare naturală, scanată cu sistemul *LC 50* cu turbina acoperită cu pulbere albă și scanată cu sistemul *LC 50* (*T 50N* versus *T 50S*).

Analiza vizuală a comparației are un rol foarte important, deoarece, pe baza diferitelor coduri de culoare, specific fiecărui interval de abateri, se pot identifica aspecte privind zonele de pe suprafața piesei care, fie pun probleme la scanare, fie au abateri dimensionale mari. În acest mod, pentru fiecare comparație în parte, se pot obține informații referitoare la încadrarea procentuală a punctelor de pe suprafața modelului – măsurand în intervalul pozitiv sau negativ al abaterilor. Printr-o reprezentare grafică liniară se pot evidenția diferențele privind procentajul punctelor încadrate în intervale dimensionale siimetrice față de valoarea zero [1].

În figura 4.1.11 este prezentat un exemplu privind imaginea rezultată în urma comparării scanărilor *T 60N* (etalon) și *T 50N* (măsurand).

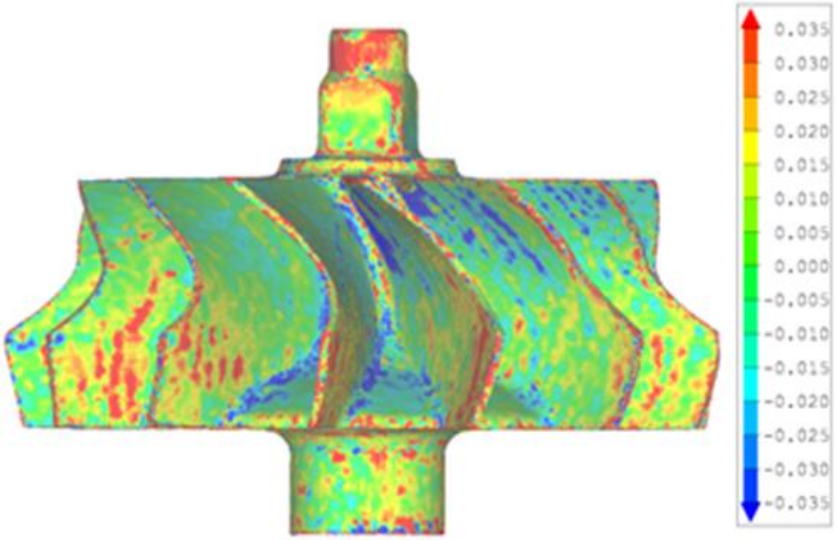


Fig. 4.1.11 *Exemplu de imagine comparativă între scanările T 60N și T 50N, pentru un reper de tip turbină [1]*

Printr-o analiză vizuală se pot observa zonele unde apar abateri negative mai mari (de peste -0,03 mm), fiind reprezentate în albastru închis. Zonele reprezentate cu roșu închis reprezintă abaterile pozitive mai mari de 0,03 mm. În figura 4.1.12 este prezentat un exemplu privind distribuția procentuală a punctelor, în cadrul comparației, putându-se observa cuantumul punctelor integrate în fiecare interval dimensional, în parte [1].

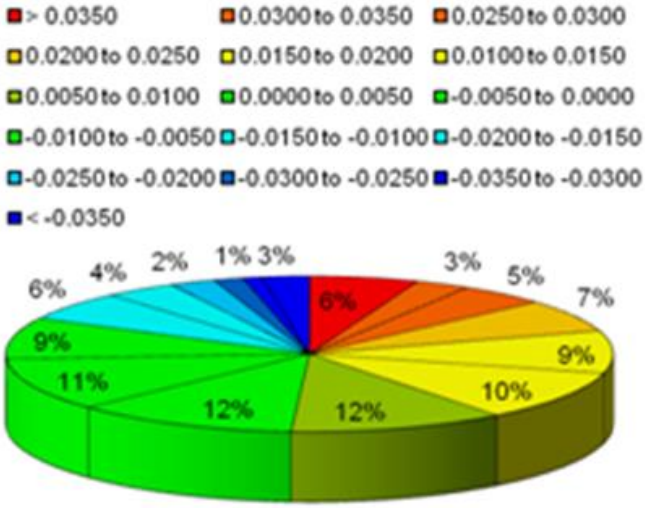


Fig. 4.1.12 *Distribuția procentuală a punctelor în comparația scanărilor T 60N și T 50N, pentru un reper de tip turbină [1]*

Mediile software asociate sistemelor de scanare cu LASER permit, de asemenea obținerea de date, privind compararea scanărilor, având caracter statistic, tabelul de mai jos reprezentând un exemplu legat de scanarea reperului de tip turbină. Astfe se pot obține informații importante referitoare la precizia măsurării, dar și la numărul de puncte ale modelului – măsurand [1].

Tabelul 4.1.4 *Exemplu valori statistice obținute în urma comparației scanărilor T60N – T50N, în cazul reperului de tip turbină*

Numărul de puncte valide	584.964
Abaterea maximă [μm]	3,22
Abaterea minimă [μm]	-9,5
Amplitudinea [μm]	12,72
Abaterea medie [mm]	0,004
Abaterea standard [mm]	0,118
Rădăcina medie pătrată [mm]	0,118

În figura de mai jos este prezentat un exemplu de reprezentare grafică liniară privind apartenența procentuală a punctelor întru-un anumit interval de abateri [1].

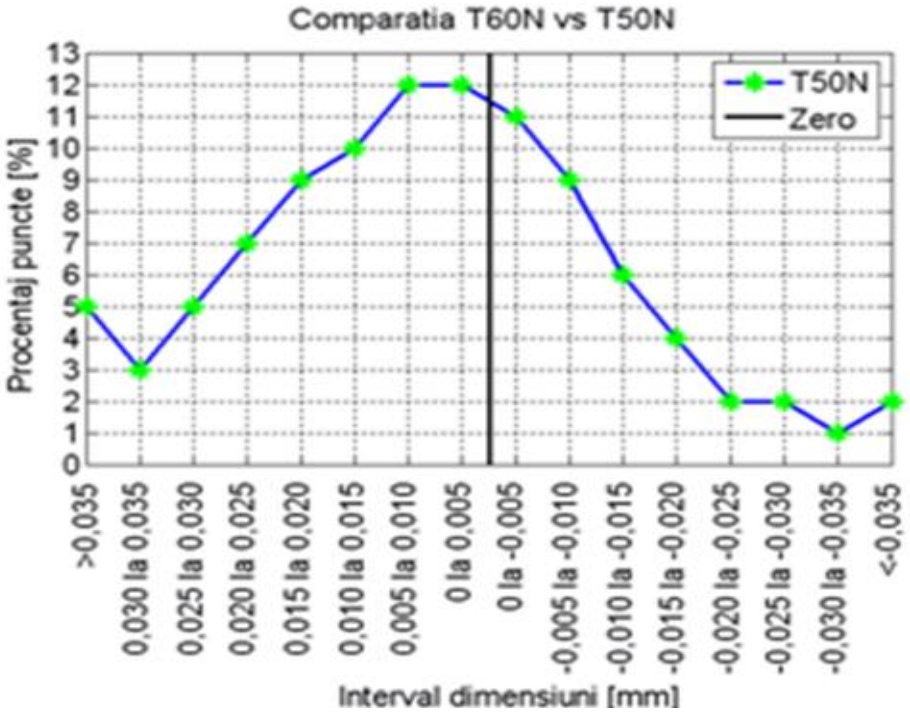


Fig. 4.1.13 *Exemplu de reprezentare grafică liniară în comparația dintre scanările T60N și T50N pentru repere de tip turbină [1]*

În cazul exemplului de față, se poate deduce că majoritatea punctelor din cadrul comparației (într-un procent de 63%) aparțin unui interval pozitiv de abateri (figura 4.1.14) [1].

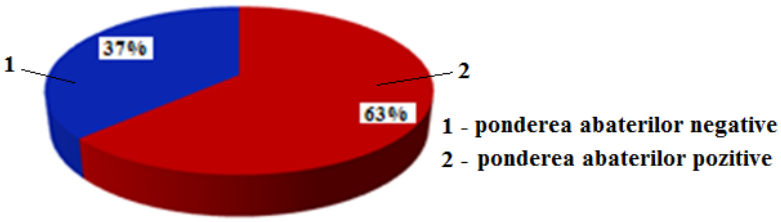


Fig. 4.1.14 *Exemplu de reprezentare a ponderilor abaterilor în cazul comparației dintre scanările T60N și T50N pentru reperele de tip turbină [1]*

Ca urmare, în cadrul exemplului privind compararea scanărilor, dimensiunile obținute la scanarea *T50N* rezultă a fi mai mari decât la scanarea T60N. Aceasta se explică și datorită faptului că sistemul de scanare *LC 60 DX* are performanțe mai bune decât sistemul de scanare *LC 50* [1], [102].

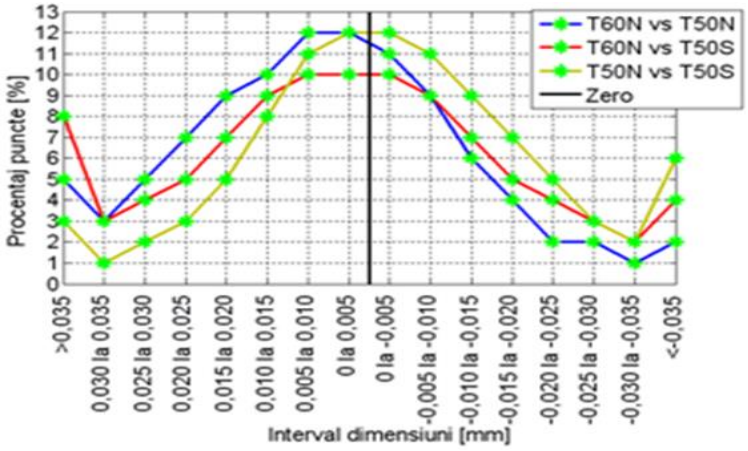


Fig. 4.1.15 *Exemplu de reprezentare grafică liniară a tuturor comparațiilor scanărilor pentru un repere de tip turbină [1]*

Printr-o reprezentare grafică a abaterilor în cazul tuturor comparațiilor scanărilor pentru reperele de tip turbină (figura 4.1.15), se poate face o determinare statistică a ponderilor procentuale ale abaterilor (tabelul 4.1.15) [1].

Tabelul 4.1.5 *Exemplu de obținere de rezultate statistice privind ponderea abaterilor în cazul celor trei scanări pentru un reper de tip turbină*

Comparația	Abateri	
	Negative	Pozitive
T60N / T50N	37%	67%
T60N / T50S	44%	56%
T50N / T50S	55%	45%

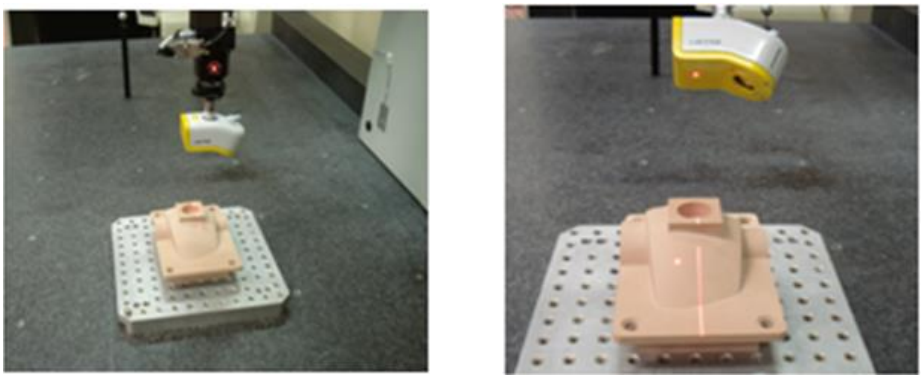
Se poate observa că pentru comparațiile *T60N – T50N* și *T60N – T50S*, majoritatea punctelor se încadrează în intervalul pozitiv de abateri. Pentru cazul comparației T50N – T50S, majoritatea abaterilor se înscriu în intervalul negativ [1], [108]. Linia notată cu "zero" în cadrul diagramei reprezentate în figura 4.1.15 marchează diferența dintre deviațiile negative și cele pozitive. Zona în care se află majoritatea abaterilor (în stânga sau în dreapta liniei de zero) dă informații legate de dimensiunile scanării – măsurand în raport cu cele ale scanării – etalon. Aceasta înseamnă că pentru primele două comparații, dimensiunile scanării – măsurand depășesc dimesniunile celei etalon [1], [108].

4.1.2 Exemplu de reper de tip carcasă supus procesului de numerizare cu sisteme LASER

În cele ce urmează este prezentat un exemplu prin care un alt tip de reper (de tip carcasă) poate fi foarte eficient numerizat, cu ajutorul capetelor de scanare LASER *LC50* și *LC60 DX* [102]. În acest al doilea caz, este prezentat un exemplu în care, în cadrul proceselor de scanare, modelul virtual ca nor de puncte poate fi eficient comparat cu modelul CAD existent al reperului. În acest caz etalonul va putea fi considerat modelul CAD, și aici fiind relevant comparația dintre cele două modele și analiza erorilor ca diferență între acestea.

Etapele în cadrul procesului de scanare sunt aceleași cu cele din cazul exemplului anterior (al turbinei), diferența majoră constând în numărul stărilor de măsurare. Ca urmare a faptului că în acest al doilea caz, geometria reperului este una mult mai simplă, respectiv culoarea acestuia este deschisă, nu se justifică scanarea acestuia în mai multe ipostaze (acoperit, neacoperit etc.) ca în cazul turbinei. Ca urmare, pentru acest tip de reper este suficientă o singură stare de scanare, și anume în culoare naturală, cu sistemul de scanare cel mai performant (de exemplu *LC 60 DX*), aici nefiind întâmpinate probleme la scanare generate de natura și geometria reperului [1], [105].

Pentru digitizarea acestui tip de reper se recomandă poziționarea acestuia pe un suport dispus în partea frontal a mesei de lucru (figura 4.1.16, a).



a) b)

Fig. 4.1.16 *Scanarea reperului de tip carcasă: a) dispunerea pe masa mașinii a reperului; b) scanarea propriu – zisă a reperului [1]*

Următoare etapă de lucru este calibrarea scannerului și determinarea orientărilor necesare procesului. Având în vedere geometria relativ simplă a acestui tip de reper, orientările utile pot fi destul de ușor identificate, ca fiind, de exemplu: A0 B0, A45 B0, A45 B90, A45 B180, A45 B-90.

După identificarea orientărilor capului de scanare, următoarea etapă constă în calibrarea orientărilor, urmată apoi de digitizarea propriu-zisă a piesei [1], [105].

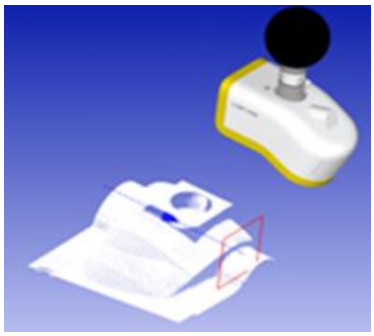
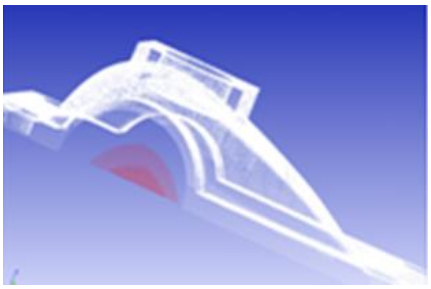
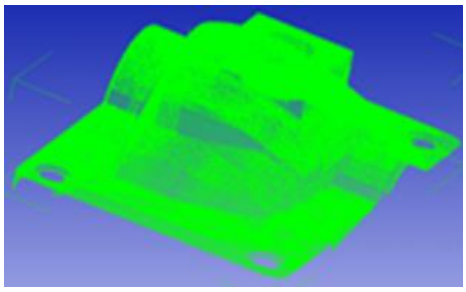


Fig. 4.1.17 *Digitizarea unui reper de tip carcasă, cu obținerea modelului virtual al reperului [1], [105]*

Obținerea modelului CAD în urma scanării reperului este exemplificată în figura 4.1.17, pentru astfel de repere, scanate cu capetele *LC60 DX*, fiind necesar un timp de aproximativ o oră [1]. Procesarea norului de puncte asociat acestui tip de model se face în mod similar cu cazul modelului prezentat în examplul 1 (paragraful 4.1.1), fiind eliminate zonele zonele irelevante din cadrul modelului (figura 4.1.18) [1].



a)



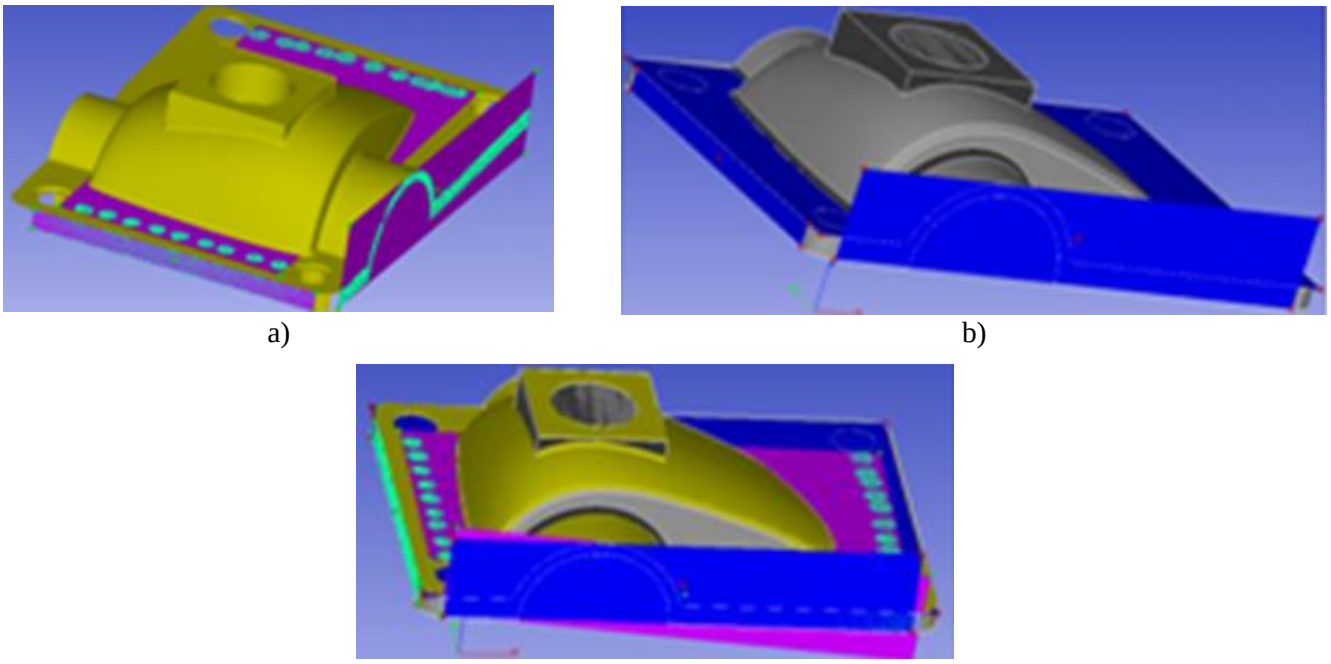
b)

c)

Fig. 4.1.18 *Procesarea norului de puncte în cazul scanării unui reper de tip carcasă: a) eliminarea zonelor care nu prezintă interes; b) filtrarea norului de puncte; c) obţinerea formei finale a norului de puncte [1]*

În cazul acestor tipuri de repere, cu geometrii mai simple, suprafaţa se pretează mai bine pentru numerizarea pe principiul LASER şi, ca urmare numărul de puncte reziduale şi/sau de extrem, cu abateri mari pot fi mult mai uşor identificate. Aceste pot fi eliminate printr-un proces de curăţire manuală. Punctele rămase sunt ulterior supuse unui proces de filtrare (etapa din figura 4.1.18, b), după care modelul este supus unui procedeu de triangulaţie şi de netezire, obţinându-se forma finală (figura 4.1.18 c) [1].

Din punct de vedere metrologic, această formă finală a modelului, obţinută în mod similar pentru fiecare scanare a modelului (cu diferite capete de scanare şi/sau cu diferite grade de acoperire) este utilizată pentru procesul de comparare. Procesul de comparare, şi în acest caz, presupune în primul rând o aliniere a modelelor (de tip nor de puncte precesat) specifice tuturor scanărilor. În cazul de faţă este vorba de compararea dintre una dintre cele două scanări, şi anume cu două tipuri de capete de scanare (*LC50* şi *LC60 DX*) şi modelul CAD al reperului. În situaţia de faţă, reperul neavând grad mare de reflexie, nu se mai pune problema acoperirii suprafeţei acestuia. Astfel, în exemplu de faţă se pune problema suprapunerii a două modele, şi anume modelul scanat şi modelul CAD al reperului de tip carcasă. Pentru aliniere se foloseşte aşa numita metodă „3-2-1” (adică alinierea bazată pe entităţi fundamentale, de tip plan – linie – punct sau plan – linie - cerc), în scopul creşterii gradului de precizie a alinierii. În urma unor studii analitice şi experimentale s-a putut constata că pentru o cât mai bună aliniere, aceasta se recomandă a fi făcută în funţie de trei plane comune pentru fiecare entitate [1], [107]. Existenţa modelului CAD permite definirea planelor de referinţă ale etalonului prin selectarea cu ajutorul mouse-ului a suprafeţelor. În figurile 4.1.19 a) şi b) se pot observa planele de referinţă de pe suprafaţa discretizată, respectiv de pe modelul CAD al reperului scanat. Figura 4.1.19, c) prezintă forma finală a alinierii celor două modele. Forma finală a alinierii este prezentată în figura 4.1.20.



a) b)

c)

Fig. 4.1.19 *Exemplu de procedură de aliniere 3-2-1 în cazul unui reper de tip carcasă: a) planele de referinţă specifice modelului ca nor de puncte discretizat; b) planele de referinţă specifice modelului CAD; c) suprapunerea modelelor [1]*

Fig. 4.1.20 *Alinierea modelelor, în vederea comparaţiei*

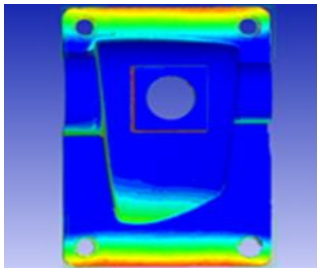


Fig. 4.1.21 *Exemplu de comparaţie globală în cazul reperului de tip carcasă [1]*

Se poate observa, înainte de realizarea comparaţiei, faptul că între modelul CAD şi suprafaţa discretizată există anumite diferenţe geometrice [1].

Spre a se determina preciza de numerizare, această comparaţie globală (figura 4.1.21) are menirea de a evidenţia abaterile dintre modelul CAD (considerat ca etalon) şi suprafaţa discretizată a norului de punte (considerată ca fiind modelul - măsurand) [1].

Pe baza scării gradate și a codurilor de culoare, aferente fiecărui interval de abatere se pot concluziona diverse aspecte legate de forma și dimensiunile modelului reperului de tip carcasă, scanat. În exemplul de față, limita maximă a abaterii s-a determinat la -0,35 mm, iar cea minimă la -0,35 mm, pasul incrementului fiind de 0,05 mm.

În figura 4.1.22 se poate vedea exemplul privind rezultatul specific comparării modelelor asociate reperului de tip carcasă [1].

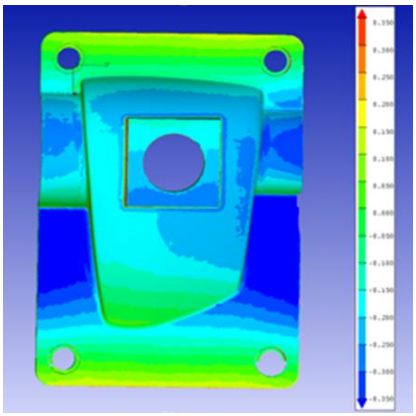


Fig. 4.1.22 *Exemplu de afișare a rezultatelor abaterilor în urma comparației dintre modelul CAD și cel scanat în cazul unui reper de tip carcasă [1]*

Pe baza analizei vizuale și a codurilor de culoare ce corespund fiecărui interval dimensional al scării gradate, pot fi identificate diverse aspecte privind comparația dintre modele. De exemplu se poate observa zona centrală a reperului ca fiind preponderent colorată în albastru, evidențiind abaterile negative dintre modelul CAD (etalon) și cel scanat (măsurand). Culoarea albastru închis, cu care sunt reprezentate extremitățile laterale ale comparației indică faptul că în acele zone abaterile dimensionale sunt sub valoarea de -0,35 mm, însemnând că acele zone se află mult sub valorile nominale.

Modul în care sunt reprezentate culorile în cadrul comparației, de la galben la portocaliu n extremitățile verticale spre albastru în zona mediană, indică faptul că reperul prezintă unele erori de fabricație [1], [109].

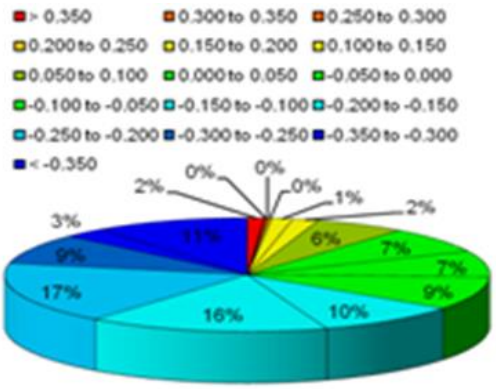


Fig. 4.1.23 *Exemplu de afișare statistică a procentajului distribuției abaterilor dimensionale, ca urmare a comparației dintre modelul CAD și cel scanat al unui reper de tip carcasă [1]*

Următorul pas după analiza vizuală a rezultatelor constă în general în interpretarea graficelor și a tabelelor de date. În exemplul descris, procentajul punctelor ce se situează într-un anumit interval dimensional se poate determina prin analiza unor grafice statistice, precum cel exemplificat în figura 4.1.23.

În exemplul prezentat, abaterile dimensionale care se încadrează sub valoarea de -0,35 mm ocupă o proporție destul de mare în comparație cu abaterile ce depășesc intervalul ± 0,35 mm [1].

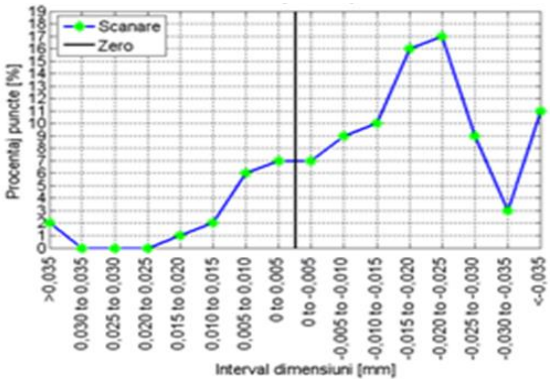


Fig. 4.1.24 *Exemplu de reprezentare grafică liniară privind rezultatele comparației dintre modelul CAD și cel scanat al unui reper de tip carcasă [1]*

Reprezentarea grafică liniară (figura 4.1.24) are ca scop să evidențieze diferențele privind procentajul punctelot încadrate în intervale simetrice față de valoarea zero. Aici se poate constata că intervalul abaterilor între -0,25 mm și 0,25 mm încadrează un procent mare de puncte (aproximativ 17%).

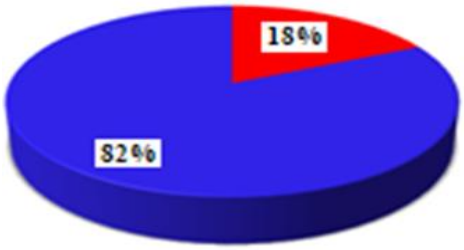


Fig. 4.1.25 *Situația generală privind abaterile punctelor în cazul comparației pe reperul exemplificat [1]*

Aceste rezultate, împreună cu cele arătate în exemplul din figura 4.1.25, privind situația generală a abaterilor punctelor (82% dintre acestea fiind în zona abaterilor negative), scot în evidență faptul că reperul a fost realizat cu erori mari de prelucrare. Aceste erori provin, fie din modul de fixare a semifabricatului în timpul prelucrării sale, precum și ca urmare a variației forțelor dinamice dezvoltate de sculele așchietoare pe parcursul prelucrării [1].

Aspectele privind datele statistice ale scanării sunt prezentate în tabelul 4.1.6, putându-se observa că abaterea standard este de 0,151 mm, iar amplitudinea are valoarea de 2,084 mm [1].

Tabelul 4.1.6 *Exemplu de afișare a rezultatelor statistice privind abaterile dimensionale în cazul scanrării pe principiul LASER a unui reper de tip carcasă [1]*

Parametrul determinat	Valoarea
Numărul de puncte valide	292.100
Abaterea maximă [mm]	1,054
Abaterea minimă [mm]	-1,03
Amplitudinea [mm]	2,084
Abaterea medie [mm]	-0,157
Abaterea standard [mm]	0,151
Rădăcina medie pătrată	0,217

4.1.3. Concluzii privind utilizarea capetelor de scanare pe principiul LASER pe mașinile în coordonate fixe

Pe baza analizei celor două exemple prezentate la paragrafele 4.1.1 și 4.1.2 (acestea fiind printre cele mai relevante) se pot trage următoarele concluzii:

Pentru cazul primului tip de reper, în urma analizei se poate constata că suprafața rezultată ca urmare a scanării turbinei în stare naturală depășește ca dimensiuni modelul scanat în stare acoperită cu pulbere, în condițiile utilizării primului cap de scanare (*LC50*). Aceast lucru este cauzat de situația în care, în cazul reperelor închise la culoare scanate pr principiul LASER, erorile sunt mari și foarte mari. Un alt aspect ce poate influența precizia de scanare în cazul reperelor complexe (cum este cel prezentat în exemplul 1, paragraful 4.1.1) îl constituie variația geometrică pe o arie relativ mică a înălțimii suprafeței. Aceasta poate conduce la erori, ca urmare a diferențelor apărute în interiorul câmpului de vedere al sistemului de scanare [1], [100]. Urmărind procesele de scanare pentru fiecare situație în parte, se poate constata că în cazul suprafețelor de culoare închisă, pentru scanarea cu sistemul *LC50*, acoperirea cu pulbere are o influență pozitivă datorită faptului că reduce cu aproximativ o treime durata procesului. Mai mult, în acest caz, acoperirea cu pulbere albă influențează pozitiv și precizia scanării, abaterile positive scăzând, de exemplu în cazul turbinei cu aproximativ 15%. O altă concluzie importantă este aceea că reperele complexe, cum este turbina prezentată în primul exemplu generează probleme la digitizarea muchiilor, fiindcă în aceste regiuni apar puncte extreme, care denaturează norul de puncte, implicit precizia scanării și a modelului generat [1]. Se poate concluziona că pentru scanarea cu sistemul *LC50* este necesară intervenția umană în vederea curățirii suprafeței de punctele extreme, generate de gradul înalt de reflexie. În cazul scanării cu sistemul *LC60 DX*, aceste puncte extreme dispar, datorită performanțelor îmbunătățite ale sistemului de scanare, însemnând un timp redus de procesare a datelor. Zonele ascunse dintre palele turbinei (în cazul exemplului 1) creează

de asemenea mari dificultăți, deoarece multe orientări, poziții și distanțe de scanare diferite sunt necesare pentru a numeriza complet și cât mai precis turbina [1].

Pentru cel de al doilea caz, referitor la reperul de tip carcasă, o primă concluzie este că modelul CAD asociat aduce un aport pozitiv în cadrul etapei de procesare a datelor, prezența acestuia simplificând procesul de aliniere a modelului la modelul generat ca nor de puncte, prin scanare. Faptul că modelul CAD reprezintă chiar etalonul, spre deosebire de cazul turbinei, acesta oferă un mai mare grad de credibilitate privind eficiența comparației. Astfel este eliminată posibilitatea ca anumite puncte de extrem sau erori generate de problemele măsurărilor cu LASER să afecteze determinarea abaterilor dimensionale. Pe de altă parte, timpul de doar o oră, necesar scanării în cazul reperului specific exemplului 2 (paragraful 4.1.2), în comparație cu cele 3 ore pentru reperul de tip turbină, scoate în evidență influența complexității reperului asupra procesului de numerizare. Astfel, cu cât piesa are mai multe zone ascunse, unghiuri ascuțite, suprafețe de culoare neagră sau diferențe mai mari de înălțime pe o arie mică, cu atât procesul de scanare necesită mai mult timp pentru realizare [1], [103], [105].

4.2 Aplicații ale sistelelor de scanare LASER, utilizate în cadrul mașinilor de măsurare portabile

4.2.1 Descrierea caracteristicilor şi a funcţionării sistemelor de scanare portabile

În afară de maşinile fixe în coordonate, capetele de scnare cu LASER, în prezent, îşi găsesc tot mai mult utilitatea şi în componenţa sistemelor portabile de scanare, acestea având ca principal avantaj faptul că pot fi deplasate pe teren, în scopul numerizării unor semi-fabricate greu transportabile. Un exemplu de astfel de sistem portabil de scanare pe principiul emisiei de radiaţie LASER este scannerul portabil *EXA Scan 30144* (figura 4.2.1), ale cărui caracteristici sunt specificate în tabelul 4.2.1:

Tabelul 4.2.1 *Caracteristicile tehnice ale sistemului de scanare portabil EXA Scan 30144*

Modelul	ExaScan 30144
Domeniul de măsurare [mm]	± 22,5
Rata de măsurare [nr. cicluri de măsurare (emisie – recepție) / s]	25.000
Rezoluția de măsurare [mm]	0,05
Distanța de scanare [mm]	300
Mediul software	VXScan
Masa [kg]	≅ 1,8

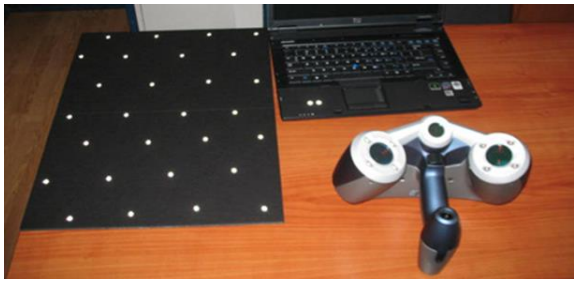


Fig. 4.2.1 *Sistemul portabil de scanare cu sursă LASER, ExaScan 30144*

Principiul de scanare se bazează pe măsurarea timpului de emisie – recepție al radiației LASER, de la senzor la obiect, fiind asemănător cu cel întâlnit la sistemele de scanare din componența mașinilor în coordonate fixe.

Pentru transmiterea undei LASER către suprafața obiectului, o diodă emite un impuls LASER cu o frecvență cunoscută, unda fiind reflectată difuz de pe suprafața obiectului, iar o parte din aceasta se întoarce la sistemul de recepție. Pentru fiecare impuls este măsurat timpul dintre emisie și recepție.

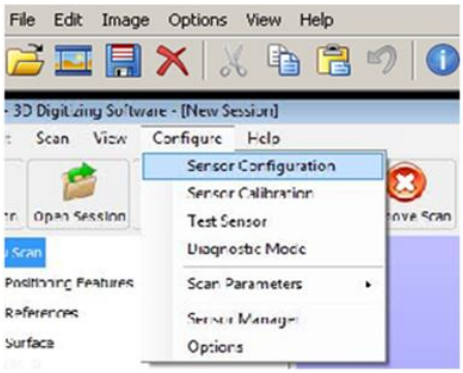


Fig. 4.2.2 *Etapele necesare lansării comenzii de configurare a scannerului [109]*

Pentru asigurarea corectitudinii și a eficienței în lucru cu acest sistem de scnare, în prealabil se recomandă o operație de configurare, prin intermediul mediului software, necesitând o succesiune de pași, din meniul principal al ferestrei de lucru al interfeței.

Primul pas constă în accesarea meniului *Configure*, opțiunea *Sensor configuration* (figura 4.2.2), după care se procedează la orientarea corectă a poziției scannerului în raport cu suprafața reperului, urmărindu-se variația intensității fasciculului LASER, după direcțiile celor două axe din planul de scanare.

Aceasta se face printr-o urmărire atentă a ferestrei grafice afișate (figura 4.2.3) [63], [109].

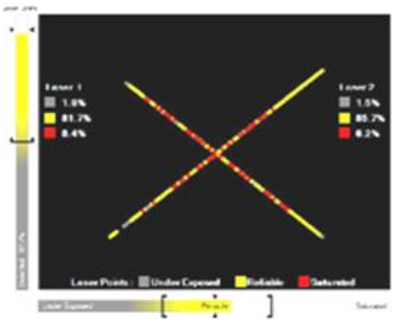


Fig. 4.2.3 *Modul de configurare a intensității luminoase a fasciculului emis, în funcție de distanța până la suprafața scanată [109]*

În funcție de complexitatea suprafeței de scanat se recomandă configurarea în două moduri. În modul manual, se presupune o stabilire manuală, intuitivă a distanței optime de scanare, asociate unei intensități luminoase adecvate a fasciculului. Această metodă are drept avantaj faptul că permite scanare unor repere cu geometrii mai complexe, dar și dezavantajul că operația figurare este mai complexă, durează mai mult și pot interveni erorile subiective [96], [110].

În modul automat, configurarea implică accesarea opțiunii *Auto Adjust*, după ce, în prealabil, s-a parcurs succesiunea de operații necesare apelării comenzii de configurare (figura 4.2.4).

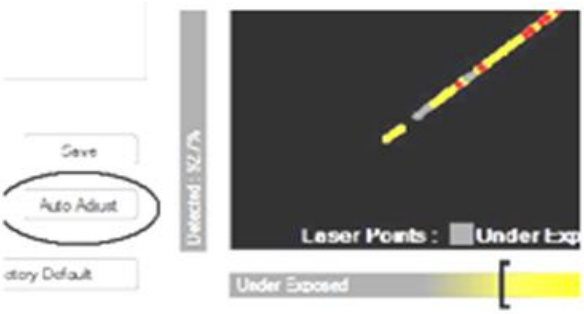


Fig. 4.2.4 *Apelarea opțiunii pentru configurarea sistemului în modul automat [109]*

Această metodă de configurare aduce avantajul unei proceduri mai simple și mai rapide, precum și o mai bună rezoluție de scanare, dar are ca principal inconvenient faptul că nu este prea eficientă în cazul scanării unor repere cu geometrii complexe [47], [110].

În vederea scanării propriu-zise, după operația de configurare a senzorului, se apelează comanda *Record Scan*, din meniul principal al interfeței software, asociat scannerului (figura 4.2.5).

În timpul scanării, senzorul trebuie menținut la o distanță adecvată față de reper, stabilită anterior prin operația de configurare. De asemenea este indicat ca fasciculul să cadă după o direcție normal la suprafața reperului, pentru obținerea unui model virtual asociat cât mai precis. În timpul acestui process poate fi urmărit stadiul de achiziție a imaginii în fereastra grafică a mediului software (figura 4.2.6) [109].

Fig. 4.2.5 *Comanda necesară lansării unei noi sesiuni de scanare [109]*

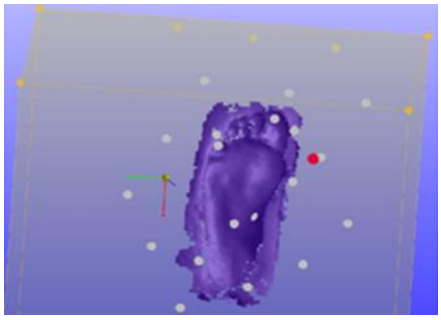


Fig. 4.2.6 *Generarea imaginii unui reper pe durata procesului de scanare [47], [110]*

În figura 4.2.6 este prezentat un exemplu de obținere în urma scanării a unui model virtual pentru o amprentă plantară. Pentru a se asigura o continuitate cât mai bună a modelului, înaintea procesului de scanare s-a procedat la lipirea unor repere pe modelul real în genul celor dispuse pe placa – suport a sistemului de scanare [63], [109]. La terminarea procesului de scanare se accesează meniul *Stop Scan* din bara principală de meniuri (figura 4.2.7), putându-se observa rezultatul scanării [109].

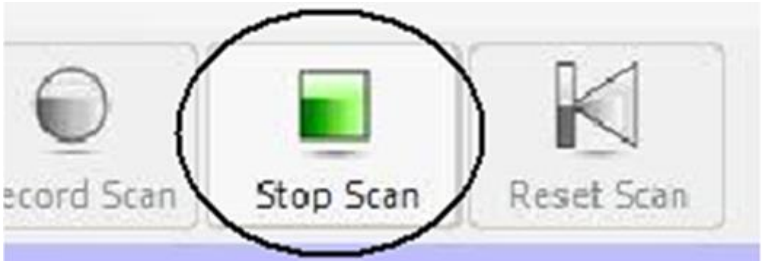


Fig. 4.2.7 *Accesarea meniului Stop Scan pentru finalizarea unui proces de scanare [109]*

După finalizarea scanării există două posibilităţi de îmbunătăţire a imaginii scanate, după cum urmează: prima variantă constă într-o continuare a procesului de scanare, prin reaccesarea meniului *Start Scan*. Această metodă se aplică în cazul în care în urma primului proces de scanare au rămas zone pentru care nu s-a putut reconstitui imaginea.

Cea de a doua metodă se referă la ajustarea imaginii, prin ştergerea unor porţiuni ce nu prezintă interes [48], [109]. Pentru aceasta este necesară folosirea meniului *Edit Facets*, urmată de selectarea uneia dintre entităţile de ştergere de tip *Free form, circle, rectangle* etc. În urma acestor operaţii se procedează la selectarea zonelor respective , iar apoi la ştergerea efectivă a acestora, prin accesarea comenzii *Delete facets*.

4.2.2 Exemple de aplicaţii ale utilizării sistemelor portabile de scanare cu sursă LASER

Ca şi sistemele de scanare dispuse pe maşinile în coordonate fixe, sistemele portabile de scanare, pot fi utilizate cu succes în diverse aplicaţii ce se regăsesc în domenii precum: industrie, medicină, biomecanică, arte plastice etc. Scannerele mobile au ca principal avantaj faptul că acestea pot fi cu uşurinţă transportate pe teren, sunt uşor de manevrat şi sunt relativ eficiente în scanarea de repere chiar şi cu geometrie complexă. Însă principalul dezavantaj este acela că, un astfel de scnaner, în timpul procesului, fiind manipulat manual de către operator (chiar dacă există opţiunea de calibrare a capului), va putea introduce erori subiective. Acestea sunt în principal cauzate de abateri ale spotului LASER de la direcţia normală la suprafaţa reperului scanat, ca urmare a modului în care operatorul ţine în mână scannerul. Un alt neajuns ar fi acela că un asemenea sistem se pretează doar pentru repere de mici dimensiuni (adică într-o unitate de volum de maxim 500 mm x 500 x 500 mm, neputând, deci fi utilizate în aplicaţii precum industria auto sau aerospaţială, de exemplu [50], [75].

În cele ce urmează este descris un exemplu de utilizare a scannerului model *EXAScan 30144* într-o aplicaţie în domeniul biomecanicii, fiind vorba aici de obţinerea unui model CAD al unei conformaţii plantare. Aceasta se poate face în scopul modelării şi prototipării unor elemente de ortezare şi/sau protezare la nivelul piciorului, în funcţie de necesitate. Exemplul este descris în două ipostaze distincte, şi anume în ipostaza în care, pentru obţinerea modelului virtual se procedează la scanarea directă a piciorului subiectului, respectiv în ipostaza scanării indirecte, după cum va fi descris mai jos [63], [110].

Ipostaza scanării directe constă în scanarea piciorului subiectului după ce, în pralabil au fost dispuse elemente de marcaj pe acesta, pentru o mai bună reproducere a imaginii (figura 4.2.8).

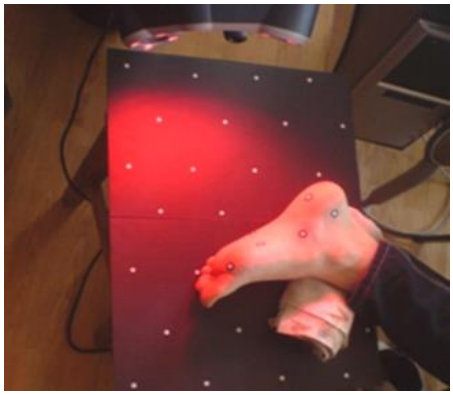


Fig. 4.2.8 *Exemplu de scanare a tălpii piciorului unui subiect, prin aplicarea metodei directe [110]*

Dezavantajul major al acestei metode constă în faptul că, deşi prelucrat în prealabil subientul, acesta, în timpul procesului de scanare, fie şi involultar, îşi poate mişca piciorul, afectând negativ calitatea reproducerii modelului. De asemenea în astfel de situaţii, este necesară o bună experienţă privind numărul potrivit de elemente de marcaj, dat fiind faptul că, pielea, fiind iluminată sunb unghiuri diferite, va induce grade variate de reflexie.

Ca urmare un număr insuficient de elemente de marcaj poate conduce la o reproducere incomletă a modelului. Pe de altă parte, un număr prea mare de elemente de marcaj (acestea având alt grad de strălucire) va conduce, de asemenea la zone „oarbe” în cadrul modelului generat. În figura 4.2.9 este prezentat un exemplu de model generat ca urmare a scanării directe a piciorului unui subiect, putând fi observate multiple zone practic incomplete.

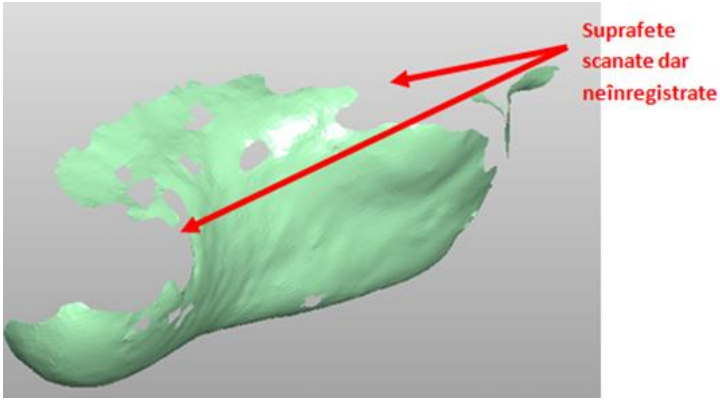


Fig. 4.2.9 *Exemplu de model CAD obţinut prin scanarea directă, marcat prin zone neînregistrate, prin dispunerea unui număr insuficient de repere de marcaj [110]*

Se poate spune, deci, că în acest caz, nerespectându-se cu stricteţe indicaţiile specifice metodei scanării directe, modelul obţinut este incomplet. Principala problemă, în acest caz nu vizează atât posibilitatea mişcării piciorului subiectului, cât, mai ales, dispunerea unui număr insuficient de elemente de marcaj. Ca urmare, în acest caz, reproducerea obţinută poate fi utilizată pentru o modelare CAD, doar pe o anumită porţiune (cea plantară mediană), însă nu va putea fi utilizat, de exemplu pentru modelarea CAD a unei proteze de peroneu, tibie etc.

Varianta completării manuale sau automate a zonelor neînregistrate este exclusă din start, deoarece aceste zone incomplete sunt mult prea mari spre a mai putea fi reproduse [63], [110].

În figura 4.2.10 este prezentat un exemplu similar, ca urmare a unei scanări directe a piciorului, înse, de data acesta prin aplicarea unui număr adecvat de repere de marcaj (aproximativ 20 de astfel de repere). Reperele au rolul de a ajuta sistemul de scanare să detecteze mai uşor poziţia obioectului vizat (în situaţia de faţă, piciorul subiectului).

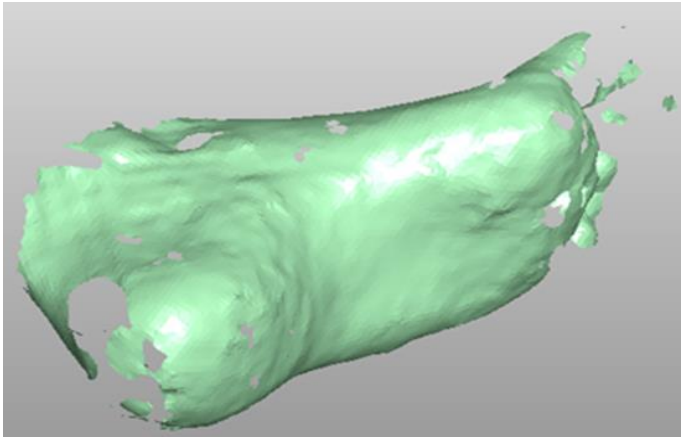


Fig. 4.2.10 *Exemplu de model CAD obţinut prin scanarea directă, marcat prin zone neînregistrate, prin dispunerea unui număr suficient de repere de marcaj [110]*

În cazul scanării de membre ale sistemului locomotor, de exemplu, dat fiind gradul variat de reflexie, scannerul întâmpină dificultăţi în detectarea poziţiei obiectului. Ca urmare este necesar să se utilizeze un număr relativ mare de astfel de repere de marcaj, putându-se chiar compensa unele mişcări de amplitudini mici ale piciorului (de până la 4-5 mm). Cu toate acestea se pot observa, chiar şi în acest caz, mici găuri în reproducerea modelului scanat. Avantajul, însă în această situaţie, este că aceste goluri pot fi relativ uşor umplute, obţinându-se, în final un model ce se apropie detul de mult de cel real [47], [109], [110]. Iată, deci, că, printr-o bună instruire a persoanei vizate, dar, mai ales, prin dispunerea unui număr suficient de mare de repere, scanarea în ipostaza directă se poate dovedi a fi una suficient de precisă şi eficientă.

Cea mai utilă medodă de umplere a golurilor din modelele generate prin scanare constă în importarea modelului în mediul software *CATIA*, aici, operaţia putându-se practica mai eficient. Astfel, prin apelarea modului *Digitized Shape Editor* (figurile 4.2.11 şi 4.2.12) se pot importa scanările anterioare, având extensia *.STL*. Cu ajutorul comenzii *Fill Holes* (figura 4.2.13) se poate cu uşurinţă realiza umplerea golurilor, suprafaţa rămânând neschimbată (figura 4.2.14).

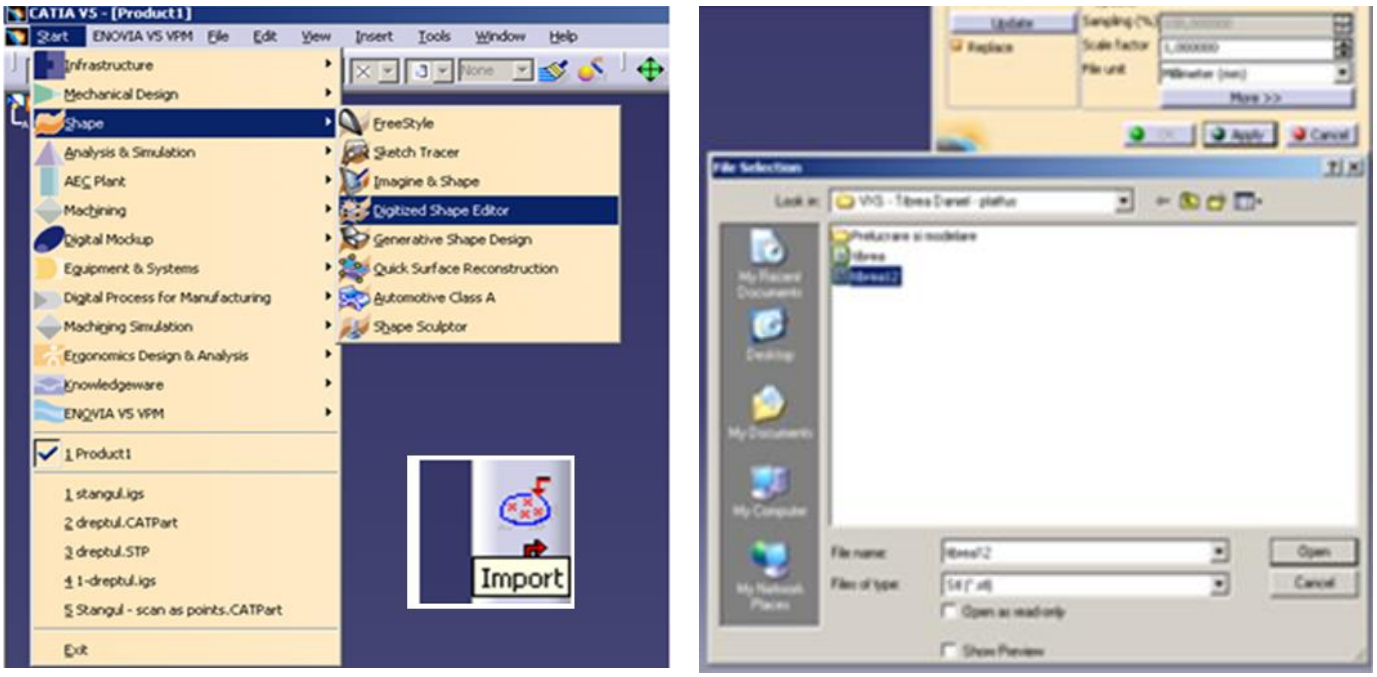


Fig. 4.2.11 *Importarea unui model scanat anterior în mediul software de modelare CATIA [47], [110]*

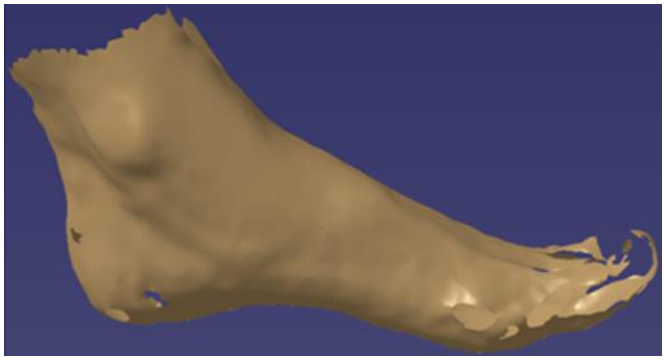


Fig. 4.2.12 *Exemplu de model importat în mediul CATIA, în urma scanării directe, prin respectarea recomandărilor privind numărul de marcaje [63], [110]*

Ulterior, pornind de la modelul obţinut, caracterizat printr-o continuitate a suprafeţei, acesta poate fi utilizat ca model de referinţă în vederea construirii şi modelării de entităţi pentru prototiparea unor elemente de protezare şi/sau ortezare [47].

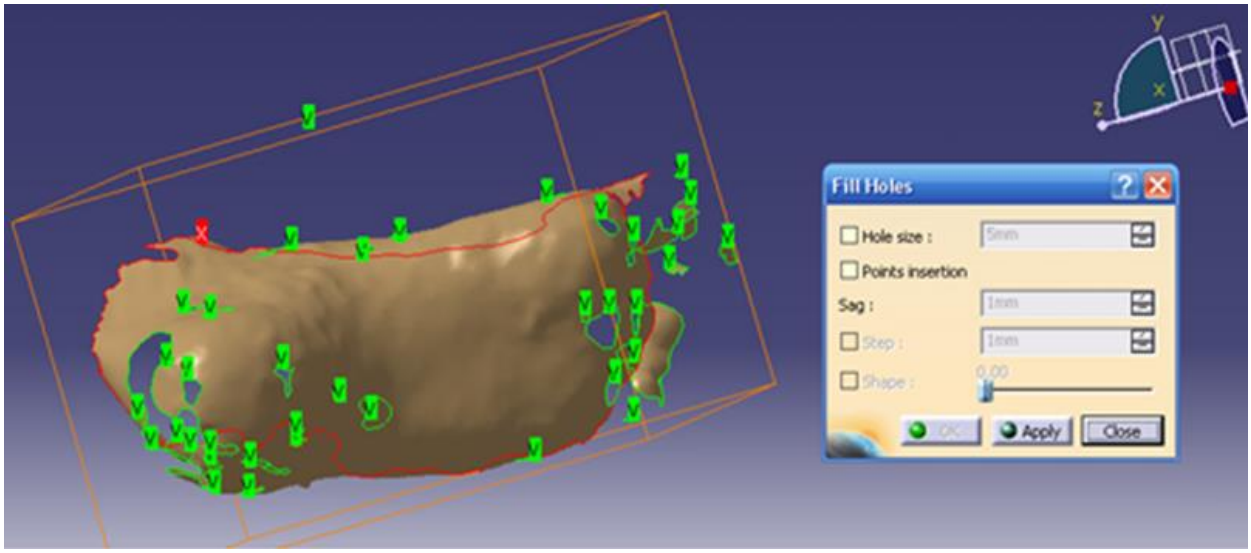


Fig. 4.2.13 *Exemplu de utilizare a comenzii Fill Holes, în CATIA, pentru completarea unui model reproducând talpa unui picior scnat prin metoda directă [47], [63], [110]*

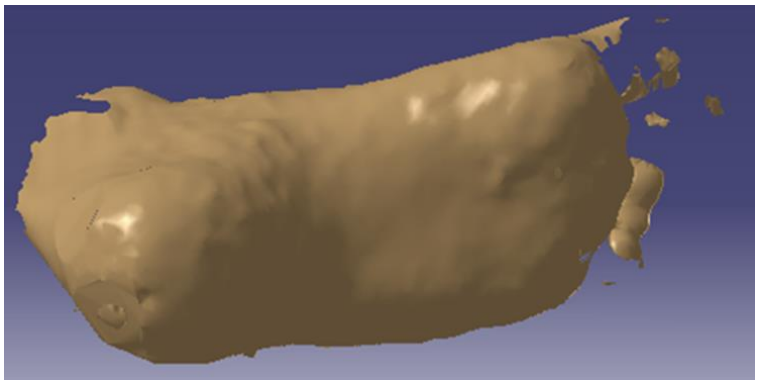


Fig. 4.2.14 *Generarea modelului CAD în urma operaţiei de umplere a găurilor [47], [110]*

În figura 4.2.15 este prezentat un exemplu prin care, ulterior operaţiei de generare a modelului de referinţă, ca suprafaţă continuă, se pot aplica operaţii de construire de entităţi de prototipare. Concret, este prezentat un exemplu de generare prin extrudare a unei entităţi (iniţial într-o formă brută) în vederea modelării şi prototipării utâlterioare a unor elemente de ortezare plantară, cu rol de corecţie progresivă a unor afecţiuni precum platfusul [47], [48], [63].

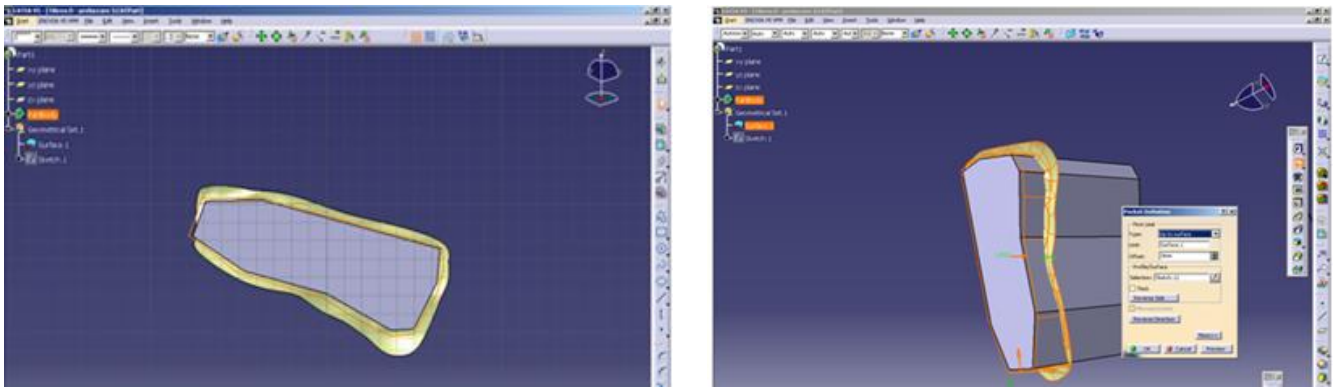


Fig. 4.2.15 *Generarea prin extrudare şi modelare CAD a unor elemente de prototipare de orteze plantare cu rol de corecţie progresivă [47], [48], [63], [111]*

Ipostaza scanării indirecte constă în scanarea unui mulaj obţinut, în prealabil prin amprentarea pe un pat de ipsos a tălpii piciorului subiectului [48], [111]. Ca principal avantaj, în acest caz se poate menţiona faptul că dispare riscul ca în timpul scanării să se mişte piciorul subiectului. De asemenea, în această situaţie, procedura de dispunere a reperelor de marcaj nu mai este atât de strictă, deoarece mulajul din ipsos, având un grad mai redus de reflexie, nu conduce la dificultăţi majore de identificare a poziţiei obiectului.

Ca şi în metoda scanării directe, în acest caz este indispensabilă necesitatea configurării senzorului, procedura fiind similară cu cea descrisă anterior.

Fig. 4.2.16 *Dispunerea de repere pe mulaj, în situaţia scanării indirecte [48]*

Deosebirea este că, în acest caz, dispunerea reperelor de marcaj se va face pe mulajul din iposos, acesta fiind considerat ca obiect de scanat. Se recomandă, în acest caz ca numărul şi dispunerea elementelor de marcaj să se facă în conformitate cu numărul şi dispunerea elementelor de pe suportul din dotarea kitului de scanare (figura 4.2.16) [48].

Fig. 4.2.17 *Scanarea modelului de tip mulaj [48]*

Procedura de scanare propriu-zisă a obiectului este similară cu cea în cazul scanării directe, în această ipostază, nemaifiind necesară supravegherea subiectului (pentru a nu mişca piciorul). Concret, se procedează la deplasarea scannerului portabil, la distanţa prestabilită în urma configurării, faţă de mulaj (figura 4.2.17).

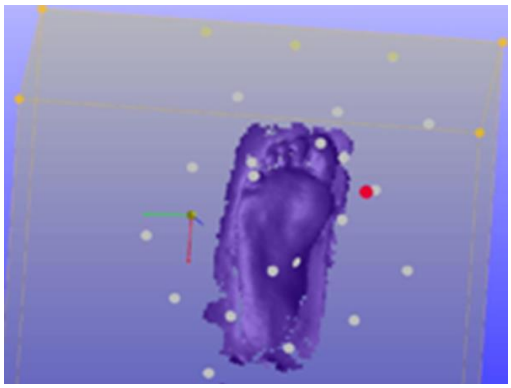


Fig. 4.2.18 *Generarea modelului în timpul procesului de scanare a mulajului [48], [111]*

Generarea imaginii în timpul procesului de scanare este ilustrată în figura 4.2.18, putându-se observa delimitarea volumului de lucru de formă paralelipipedică. De asemenea pot fi observate reperele generate pe modelul virtual, pe baza reperelor lipite pe mulaj și a celor dispuse pe suportul de scanare [48], [111].

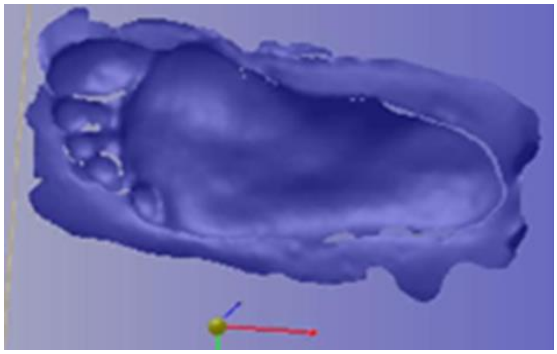
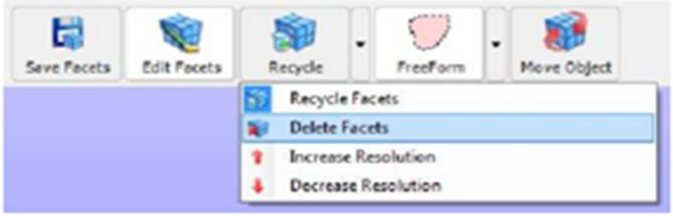


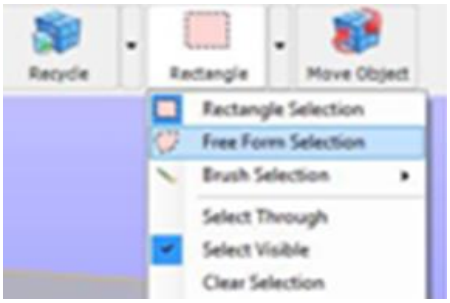
Fig. 4.2.19 *Obţinerea modelului virtual în urma procesului de scanare indirectă a unui mulaj [48]*

În figura 4.2.19 este prezentat un exemplu privind scanarea indirectă a mulajului, observându-se că, în acest caz zonele de tip găuri (de neacoperire) sunt mult mai mici şi mai puţine decât la folosirea metodei directe de scanare.

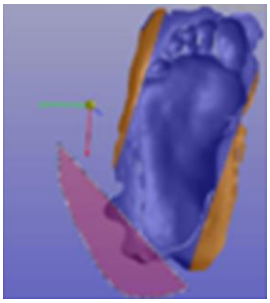
Ca şi în cazul scanării directe, etapa următoare scanării, în acest caz, constă în operaţia de eliminare a porţiunilor ce nu prezintă interes (figura 4.2.20, c), prin apelarea meniului *Edit facets*, urmată de alegerea uneia dintre opţiunile *rectangle*, *free form* etc. (figura 4.2.20, a, b). [48]



a)



b)



c)

Fig. 4.2.20 *Procedura de eliminare a porţiunilor ce nu prezintă interes: a) accesarea meniului de ştergere, b) alegerea opţiunii de ştergere; c) ştergerea efectivă a porţiunilor [48]*

În funcție de complexitatea geometriei modelului scanat, opțiunile de ștergere a zonelor nedorite din modelul virtual pot fi alese în mod corespunzător. Spre exemplu, pentru un model cu geometrie complexă, de cele mai multe ori se preferă opțiunea de ștergere de tip *free form*.

Ca şi în cazul scanării prin metoda directă, în urma prelucrării modelului chiar în mediul asociat sistemului de scanare, următorul pas este cel de salvare cu extensia *.STL* şi de a fi exportat într-un mediu de modelare CAD (*CATIA*, *SolidWorks* etc.) (figura 4.2.22).

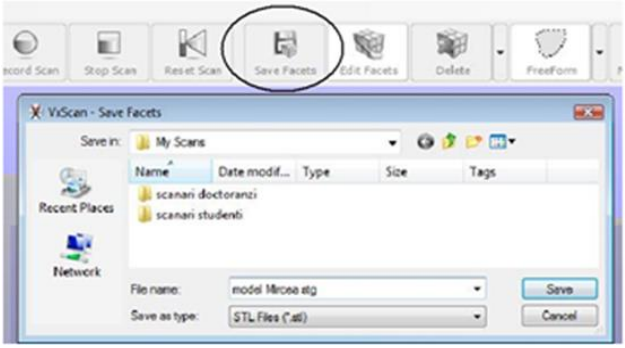


Fig. 4.2.21 *Procedura de salvare a operaţiei de prelucrare a modelului scanat [48], [109]*

În prealabil, însă, operaţiunea de prelucrare a modelului trebuie şi ea salvată, apelând meniul *Save Facets* (figura 4.2.21) [48], [109].

Prin utilizarea în mediile CAD ale modelelor exportate, ulterior se pot modela elemente de protezare şi ortezare, pornind de la modelul de referinţă anterior creat.

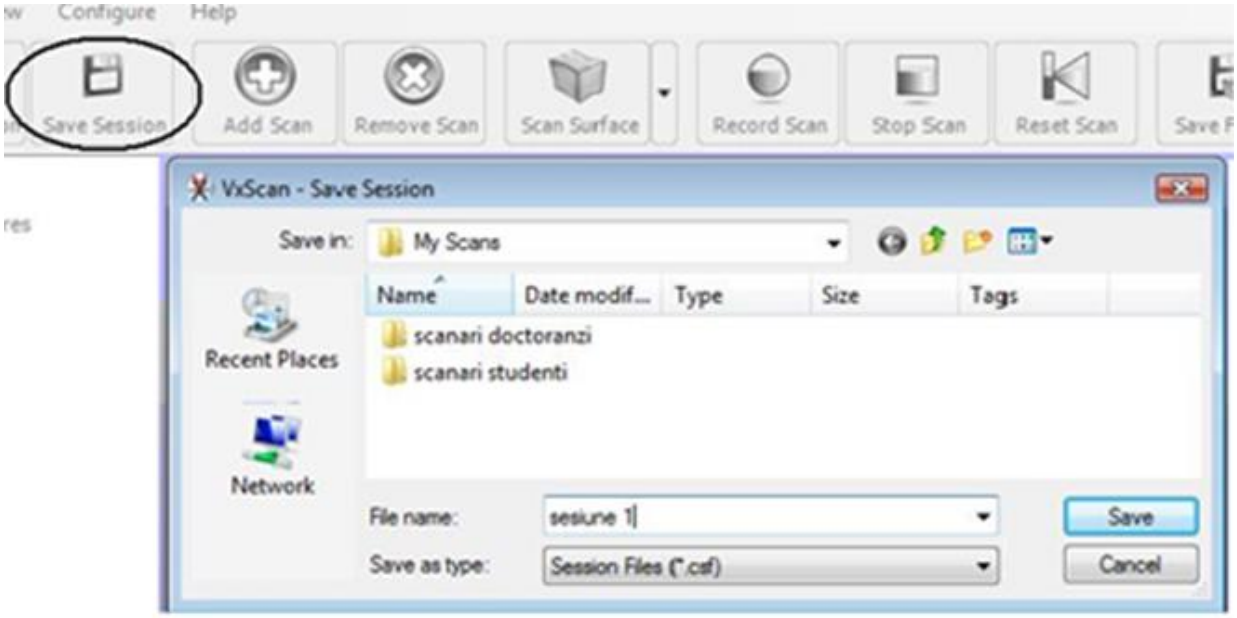


Fig. 4.2.22 *Salvarea sesiunii de lucru şi a modelului scanat în format compatibil cu mediile de modelare CAD [48], [109]*

În vederea prototipării ulterioare a acestor elemente, modelele CAD asociate acestora pot fi salvate şi importate în medii software specifice unor simulări, cum ar fi, de exemplu analiza cu element finit. Se are în vedere testarea, iniţial într-un mediu virtual a comportării acestora într-un mediu static şi dinamic, spre a se cunoaşte dacă geometria şi dimensiunile modelelor corespund spre a putea fi apoi prototipate şi implementate [48], [63] [111].

Exemplul prezentat mai sus a făcut referire la o aplicaţie în domeniul biomecanicii, aceasta, deoarece sistemele biomedicale, în ultimii ani îşi găsesc o tot mai largă utilizare, urmărindu-se în mod constant asigurarea şi creşterea calităţii vieţii. Domeniul industria rămâne, însă un reper de o mare însemnătate, de asigurarea şi verificarea calităţii producţiei depinzând într-o măsură covârşitoare siguranţa şi fiabilitatea în exploatare a produselor de uz general. De asemenea, sistemele de scanare cu LASER, în special cele portabile pot fi folosite cu succes şi aplicaţii de recunoaştere şi de restaurare a unor opere de valoare. Acest lucru este posibil datorită avantajului că aceste sisteme portabile de scanare pot fi deplasate cu uşurinţă şi în condiţii maxime de siguranţă, pe teren. În exemplul de faţă, aceste sisteme ar putea fi aduse în cadrul unor muzee de patrimoniu, de unde nu ar putea fi extrase operele de valoare pentru a fi transportate către un centru dotat cu maşini fixe în coordonate, greu transportabile [47], [63], [110].

Capitolul 5

Tendinţe privind utilizarea sistemelor şi tehnicilor de scanare cu surse de emisie LASER

În contextul creşterii susţinute a situaţiilor în care este necesară deplasarea echipamentului de scanare la faţa locului şi, coroborat cu cercetările în scopul creşterii continue a performanţelor, utilizarea sistemelor portabile de scanare cunoaşte o răspândire tot mai largă. Datorită diversificării domeniilor şi aplicaţiilor, sistemele portabile de scanare, bazate pe principiul emisiei de radiaţie LASER au cunoscut o puternică dezvoltare, la ora actuală, aceste sisteme fiind folosite într-o proporţie covârşitoare. Acest fapt se explică datorită eficienţei foarte bune în procesul de numerizare, dar şi prin extinderea aplicaţiilor ce presupun scanarea de repere de foarte mici dimensiuni şi/sau de repere deformabile, necesitând în exclusivitate o scanare fără contact [61], [62], [64].

5.1 Tendinţe privind sistemele moderne de scanare şi aplicaţiile acestora

Printre cele mai răspândite şi utilizate sisteme portabile de scanare, la ora actuală se află sistemele de scanare manuală, ca urmare a faptului că acestea sunt foarte practice şi eficiente. În cele ce urmează sunt prezentate câteva astfel de sisteme portabile de scanare, de ultimă generaţie [64]:

a) Sistemul GoScan3D (figura 5.1.1) permite măsurări şi numerizări eficiente şi uşor de realizat, ca urmare a proceselor rapide de scanare 3D a reperelor.

Fig. 5.1.1 *Manevrarea sistemului de scanare GoScan3D [112]*

Aceste scannere s-au dovedit a fi cele mai robuste şi, totodată flexibile sisteme, asigurând o soluţie profesionistă privind scanarea 3D, incluzând o interfaţă software *VXmodel*, compatibilă cu mediile software pentru modelarea CAD [112].

Principalele caracteristici tehnice şi funcţionale sunt prezentate mai jos:

- kit-ul include toate capetele de scanare pentru scanarea profesională 3D a reperelor de diferite culori, cu includerea următoarei succesiuni de operaţii: scanare, curăţire, unire de entităţi, alinierea modelului şi obţinerea variantei finale a modelului;
- sistemul prezintă un grad foarte ridicat de portabilitate şi manevrabilitate, putând fi cu uşurinţă adus în aproape orice locaţie;
- sistemul de scanare prezintă un an garanţie, posibilităţi de actualizare a mediului software şi un ghid al utilizatorului;
- compatibilitate cu toate mediile CAD cele mai utilizate (*CATIA*, *ProEngineer*, *SolidWorks* etc.) [63], [64], [112].

Fig. 5.1.2 *Manevrarea scannerului HandyScan3D, pentru numerizarea unei caroserii auto [113]*

b) Sistemul HandyScan3D (figura 5.2) este o generaţie încă şi mai nouă de scannere portabile, acestea fiind optimizate astfel încât să vină în întâmpinarea necesităţilor conceptelor de dezvoltare şi design de produs şi de profesionalism ingineresc, asigurând cel mai eficeint şi fiabil mod de achiziţie de date şi de imagini 3D ale obiectelor cu geometrii simple şi complexe [113].

Avantajele majore ale acestor sisteme constau într-un grad foarte înal de portabilitate şi manevrabilitate, precum şi în măsurări cu un nivel înalt de precizie [113].

Fig. 5.1.3 *Utilizarea sistemului METRASCAN3D [114]*

c) Sistemul METRASCAN3D (figura 5.1.3) reprezintă un sistem portabil de scanare şi măsurare în coordonate, pe principiul optic, fiind una dintre cele mai precise şi automatizate soluţii de scanare 3D, atât în condiţii de laborator, cât şi în mediul industrial [114].

d) Sistemul Profi 3D Scanner (figura 5.1.4) este un echipament profesionist, funcţionând pe principiul luminii structurate, asigurând o precizie de scanare deosebit de ridicată, atât pentru numerizarea obiectelor de mici, cât şi a obiectelor de mari dimensiuni [115].

Fig. 5.1.4 *Sistemul de scanare Profi 3D Scanner [115]*

Principalul avantaj al acestui sistem constă în faptul că permite obţinerea de modele virtuale ce reproduc orice tip de obiect. Procedura de scanare poate recomanda sau nu, după caz, utilizarea de repere de scanare şi, prin urmare acest sistem este capabil să reproducă foarte precis, cu o înaltă rezoluţie, modelele supuse scanării. Pe lângă acest avantaj, acest sistem oferă şi alte beneficii:

- posibilitatea de a scana obicte cu dimensiuni (lungimi) între 5 mm şi 5 m;
- calibrare şi scanare foarte rapidă cu durata totală de până la 3 minute;
- sistemul este livrat într-un ambalaj foarte practic, putând fi transportat cu uşurinţă în orice loc;
- sistemul are disponibile versiuni avansate ce utilizează camere de rezoluţie înaltă [115].

e) Sistemul Kaarta-Real Time Slam (figura 5.1.5) reprezintă se asemeena o soluţie mobilă de scanare automom de producere a sursei de lumină, având o serie de avantaje majore, cum ar fi rapiditatea, precizia şi preţul de cost scăzut [116].

Fig. 5.1.5 *Sistemul autonom de scanare Kaarta-Real Time Slam [116]*

Acest sistem permite generarea modelului digital 3D după obiectul real în doar câteva secunde. Acest lucru se explică prin faptul că rata de trensfer a datelor este de 8 ori mai mare în comparaţie cu scannerele tradiţionale [116].

Principalele specificaţii tehnice ale acestui sistem de scanare sunt prezentate mai jos:

- este dotat cu adaptoare de tip *VLP-16* şi *HDL-32E LIDAR*;
- porturi pentru transferul de date: *HDMI* şi *USB3 X2*;
- sistemele de conexiune sunt incluse în kit;
- tensiunea de alimentare: 12 V ÷ 19V, în curent continuu;
- masa kit-ului: 0,7 kg;
- procesor *I7, dual core*;
- sistemul este potrivit pentru cartarea prin inspecţie a drumurilor din centrele urbane, dar şi a drumurilor din afara marilor oraşe;
- poate fi utilizat în condiţiile dispunerii pe autovehicule ce rulează cu viteze de până la 70 km/oră, chiar şi pe drumuri prevăzute cu tuneluri, poduri peste cursuri de apă sau drumuri ce trec prin zone împădurite;
- scannerul *Kaarta-Real Time Slam* asigură un sistem de generare a hărţilor 3D cu o precizie foarte înaltă, cu erori de localizare de maxim 0,03 m;
- oferă excelente informaţii în vederea utilizării lor la structurile de modele CAD;
- permite măsurarea directă a structurilor şi a clădirilor [116].

f) Sistemul Kaarta Contour – Real Time Slam (figura 5.1.6) este o soluţie perfectă pentru scanări de interior, acesta fiind un sistem de scnare care generează modelele scante 3D în timp real. Ecranul integrat, de tip touch screen conferă uşurinţă în utilizarea acestui tip de scanner portabil. Pe ecran se generează modelul construit în timp real, permitându-i utilizatorului să îmbunătăţească procesul de scanare chiar în timpul procesului. În plus operatorul are posibilitatea de a utiliza ecranul în scopul obţinerii de informaţii cu privire la condiţiile de mediu [116].

Fig. 5.1.6 *Sistemul portabil Kaarta Contour – Real Time Slam [116]*

Sistemul de scanare poate fi asociat cu un kit compus dintr-o platformă inerţială şi o cameră foto fotogrametrică pentru denerarea de hărţi 3D în timp real. Tehnologia *Kaarta Engine TM* garantează o precizie cu eroare de doar 0,2%, raportată la întreaga distanţă, în raport cu erori de circa 1 ÷ 2% în cazul sistemelor tradiţionale de scanare rapidă. Sistemul de scanare poate fi dispus pe o dronă, pe un autovehicul. Poate fi transportat cu uşurinţă, fie în mână, fie chiar într-un rucsac [116].

Printre principalele sale catacteristici tehnico-funcţionale se pot menţiona următoarele:

- domeniul de scaanre: 15 metri;
- uşurinţă în utilizare;
- adaptabilitate pe diferite platforme;
- rată de transfer foarte ridicată în transmiterea de date (43.200 puncte / s);
- procesare a datelor în timp real;
- cameră fotogrametrică integrată;
- ecran de tip touch screen pe 7 inch;

- acurateţea razei LASER: 30 mm;
- posibilitatea generării de imagini HD, de tip color [116].

În figura 5.1.7 sunt prezentate două exemple de hărţi 3D ale unor cladiri şi spaţii scanate cu acest tip de scanner.

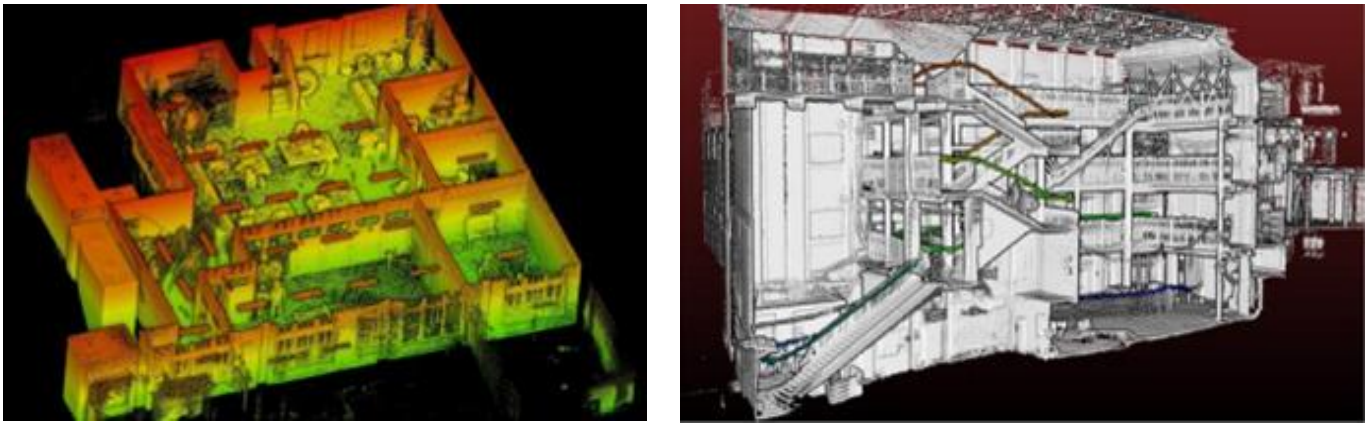


Fig. 5.1.7 *Exemple de hărţi de scanare 3D, cu ajutorul sistemului Kaarta Contour – Real Time Slam [116]*

g) Sistemul LIFA Surveyors

Fiind produs de către compania daneză *LIFA A/S*, acest sistem este utilizat cu precădere în servicii de supraveghere, prin intermediul monitorizării prin cartarea, respectiv prin scanarea cu LASER. În cazul scanării pe principiul utilizării radiaţiei LASER, se pot numeriza obiecte de mari dimensiuni, prin reproducere în detaliu, cu precizii de 5 μm, putând fi folosite cu succes pentru orice tip de aplicaţie industrială (figura 5.1.8) [117].

Fig. 5.1.8 *Sistemul LIFA Surveyors [117]*

În figura 5.1.9 este prezentat un exemplu de numerizare a unui reper, prin utilizarea sistemului *LIFA surveyors* [117].

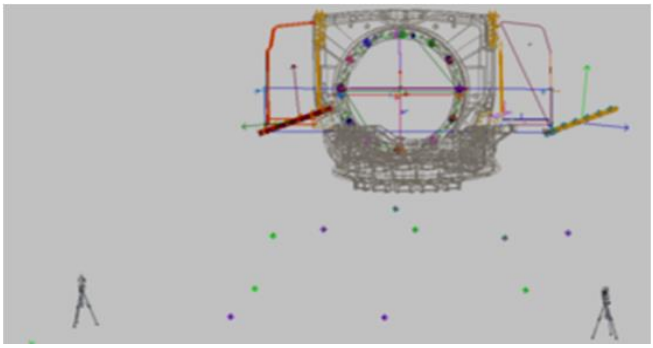


Fig. 5.1.9 *Exemplu de aplicaţie de numerizare a reperelor, prin folosirea sistemului LIFA surveyors [117]*

Principalele caracteristici tehnico-funcţionale şi accesorii, din care derivă avantajele folosirii unui astfel de sistem, se regăsesc după cum urmează:
- măsurare pe principiul trasării LASER;
- braţ portabil pentru măsurare;
- fotogrametrie digitală;
- sistem pentru analiza măsurărilor;
- consultanţă metrologică;

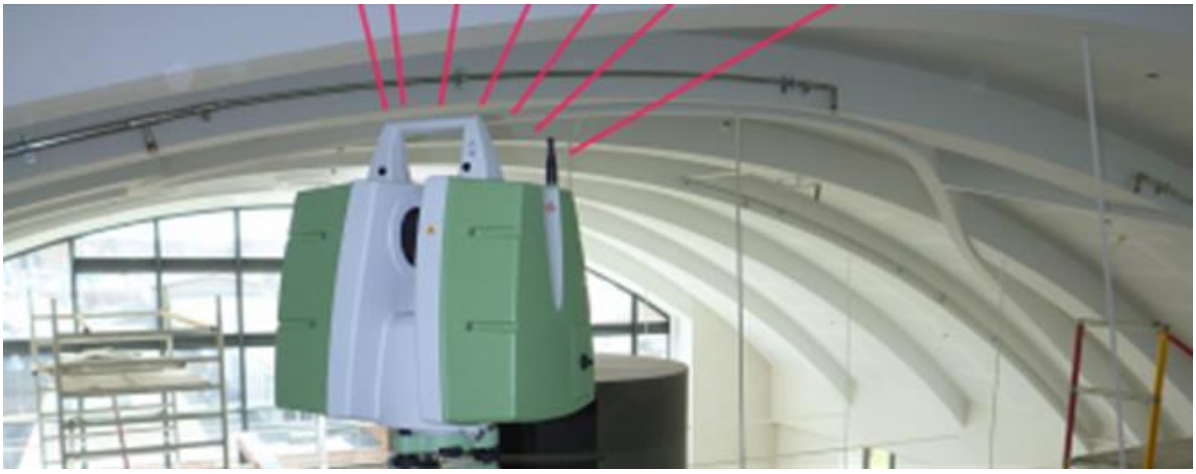
- sistem de optimizare a funcţionării maşinii;
- inginerie inversă;
- dispune de configuraţia maşinii [117].

Printre exemplele de aplicaţii ale folosirii unui astfel de sistem se pot enumera:
- alinierea şi verificarea palelor morilor de vânt;
- alinierea cadrelor uşilor şi ferestrelor din aluminiu, în cazul construcţiilor cu structuri complexe;
- determinarea erorilor şi alinierea pe 6 axe a maşinilor de frezat, prin utilizarea sistemului de cartare LASER;

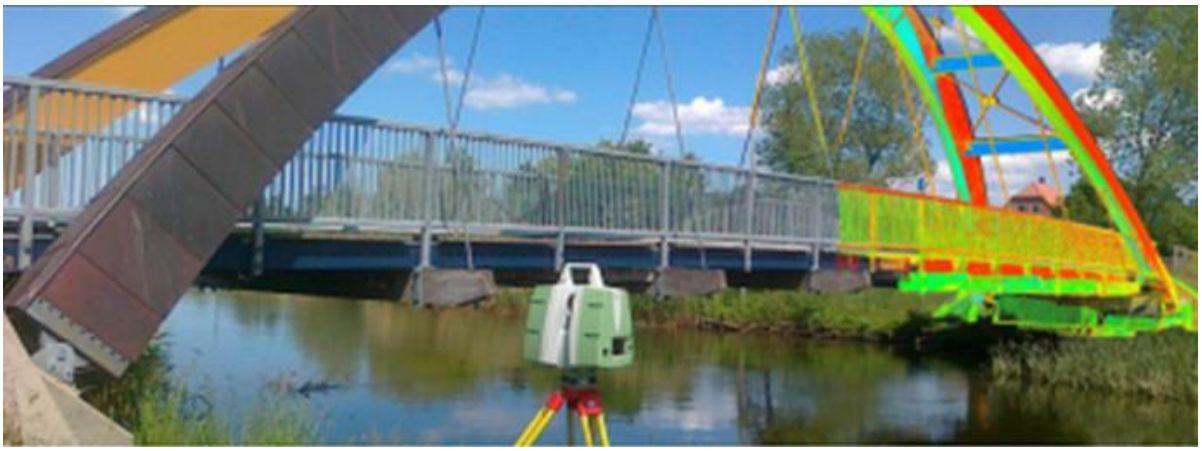
Fig. 5.1.10 *Exemplu de măsurare pe teren a alinierii şi formei palelor unei mori de vânt, cu ajutorul sistemului LIFA surveyors [117]*

- inspecţia rapidă a palelor morilor de vânt (figura 5.1.10);
- inspecţia maşinilor utilizate pe platformele de extracţie a petrolului;
- nivelarea şi inspecţia urmelor, cu ajutorul sistemului de cartare LASER;
- măsurarea şi inspecţia maşinilor de debitat hârtia;
- măsurări de înaltă precizie a podurilor de cale ferată;
- programarea sesiunilor de măsurare în cadrul mediilor software *PC-DMIS* şi *Spatial Analyzer*;
- ingineria inversă în cadrul proiectării / fabricaţiei de cutii de viteze [117].

h) Sistemul LASER scanning (figura 5.1.11) este utilizat pentru cartarea de mare precizie a unor structuri şi sisteme de mari dimensiuni, în domeniul naval, rutier, al construcţiilor etc. Avantajul acestui sistem este acela că permite o foarte bună reproducere fotografică în culori , în format 3D a structurilor, oferind o excelentă şi flexibilă oportunitate în modelarea şi vizualizarea CAD [117].



a)



b)

Fig. 5.1.11 *Utilizarea sistemului LASER Scan: a) la scanarea încăperilor; b) la cartarea structurilor de tip pod sau pasarelă [117]*

Printre aplicaţiile de bază ale sistemului LASER Scan se pot specifica următoarele:
- operaţiuni de supraveghere a clădirilor şi a instalaţiilor tehnice;
- scanarea faţadelor clădirilor;
- scanarea şi măsurarea conductelor şi a rezervoarelor;
- scanarea navelor;
- cartarea structurilor de tip poduri, drumuri, pasarele etc.

Principalul avantaj este acela că sistemul permite o reproducere fidelă a modelului 3D al structurii scanate [117].

Fig. 5.1.12 *Exemplu de utilizare a sistemului LIFA Monitoring Solution în supravegherea clădirilor [117]*

i) Sistemul LIFA Monitoring Solution peremite o monitorizare atentă şi precisă a deplasărilor în coordonate carteziene, de-a lungul axelor OX, OY şi OZ, în scopul creşterii siguranţei în supravegherea clădirilor (figura 5.1.12).
Prin urmărirea pe toate cele 3 axe, sistemul asigură o prevenţie totală în a se evita eventuale pagube sau furturi la nivelul construcţiilor şi/sau echipamentelor, inclusiv în a se evita producerea de accidente soldate cu victime [117].

Deviza acestui sistem este: "*Prin monitorizarea mişcărilor pe toate cele 3 axe, se garantează siguranţa*". Scopul principal în utilizarea acestui sistem este creşterea siguranţei, astfel că, orice deplasare pe o clădire sau pe o pantă poate fi monitorizată, înregistrată, prin transmiterea în timp util a unui semnal de avertizare, în vederea luării de măsuri necesare spre a se evita paguble la nivelul echipamentelor, respectiv pentru a se evita accidentările la locul de muncă. Prin aceasta, se pune în funcţiune sistemul *SHM* (*Structural Health Monitoring*, adică sistemul de monitorizare structurală a sănătăţii), prin care structuri precum clădirile, podurile sau alte construcţii sunt monitorizate în mod continuu, în vederea impunerii unor schimbări în ceea ce priveşte desfăşurarea activităţilor, precum chiar şi în ceea ce priveşte condiţiile de lucru [117].

Printre altele, sistemul *LIFA Monitoring Solution* utilizează următoarele echipamente:
- instrumente clasice de supraveghere:
  - staţii complet robotizate (*RTS – Robotic Total Station*);
  - senzor GPS;
  - sisteme de cartare;

- senzori geo-tehnici:
  - senzor de înclinare;
  - extensometru;
  - senzor hidrostatic;
  - senzor de forţă;
- senzori de monitorizare a condiţiilor meteorologice:
  - staţie Meteo;
  - senzor pentru măsurarea nivelului apei.

Printre principalele aplicaţii ale sistemului *LIFA Monitoring Solution*, se pot enumera:
- supravegherea liniilor de cale ferată;
- supravegherea podurilor;
- supravegherea faţadelor secundare ale clădirilor;
- supravegherea alunecărilor de teren [117].

5.2 Tendinţe privind tehnologiile de scanare

În ceea ce priveşte tehnologiile de scanare, s-au dezvoltat diferite tehnologii moderne, printre care cea mai răspândită este tehnologia *Reverse Engineering*, cu aplicaţii în scanările 3D ale maşinilor în coordonate [118].

Tehnologia *Reverse Engineering* reprezintă un proces prin care un reper sau o componentă a unui ansamblu fără nici un fel de dată sau informaţie prealabilă este digitizat. O scanare sau un nor de puncte este creat, după care este transformat într-o reţea poligonală de tip *Mesh*. Aceasta, ulterior este folosită pentru crearea unei reţele de suprafeţe de tip *NURBS* (figura 5.2.1). Aduse într-un mediu software CAD, aceste modele sunt utile în modificarea (prin modelare CAD) a componentelor, pentru asamblarea virtuală a acestora şi pentru generarea datelor privind cordonatele şi cotele măsurate ale reperelor numerizate [118].

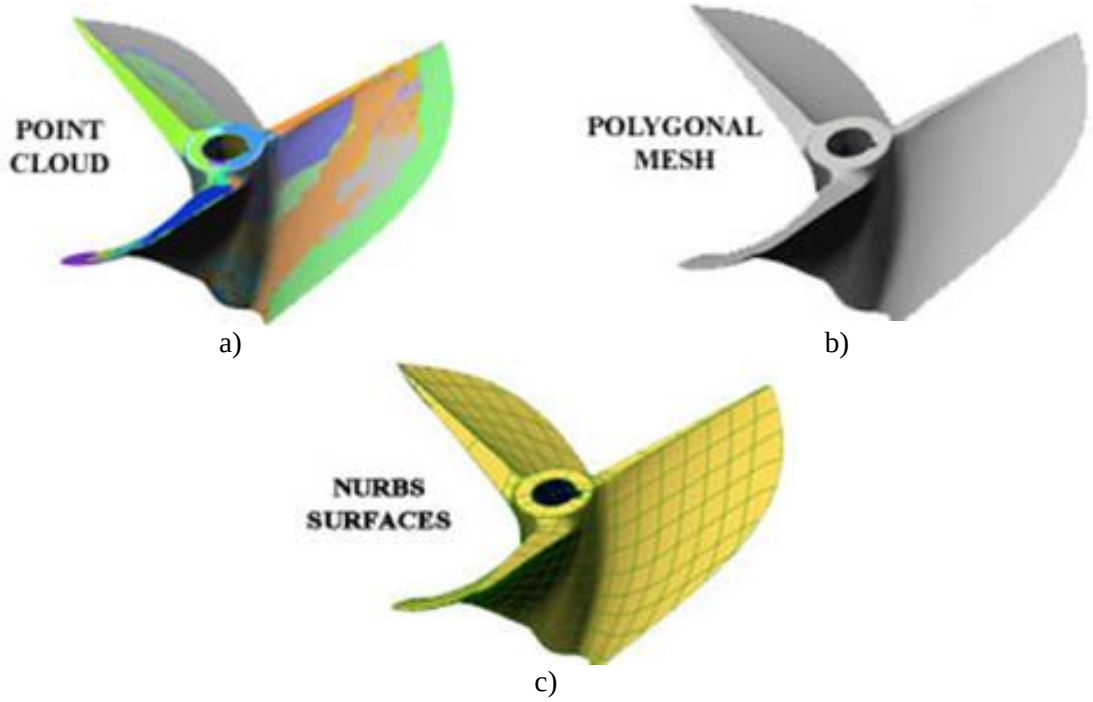
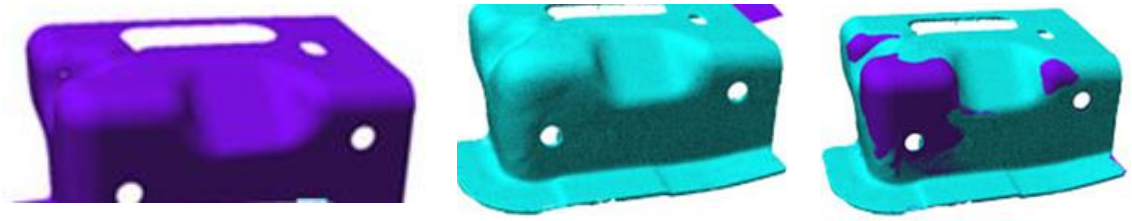


Fig. 5.2.1 *Digitizarea unui reper de tip elice, prin utilizarea tehnologiei Reverse Engineering: a) etapa obţinerii norului de puncte; b) etapa generării reţelei de tip poligonal; c) etapa generării suprafeţelor de tip NURBS [118]*

Prin această tehnică de scanare, cu utilizarea principiului emisiei de radiaţie LASER, se asigură măsurarea şi scanarea de înaltă acurateţe şi precizie, cu generarea modelului CAD (virtual) în timpul procesului de numerizare. Ca urmare, se poate spune că această tehnică devine mai eficientă, mai rapidă decât cele utilizate în cadrul maşinilor de măsurare în coordonate clasice, prin folosirea unui sistem de digitizare a norilor de puncte, a unei hărţi de comparare. Prin aceasta se garantează o inspecţie cu acurateţe înaltă a reperelor scanate, în comparaţie cu modelele CAD asociate acestora (figura 5.2.2) [118].



a) b) c)

Fig. 5.2.2 *Utilizarea hărţilor de comparare cu un model CAD, în cadrul procesului de numerizare a unui reper de tip carcasă: a) modelul CAD; b) harta de comparare a modelului; c) alinierea prin suprapunere a hărţii peste modelul CAD [118]*

În figura 5.2.3 este prezentat un exemplu de numerizare a unui reper, cu generarea modelului CAD şi a raportului privind inspecţia dimensională. În acest exemplu este prezentată tehnica de suprapunere şi comparare a modelului CAD, generat în urma numerizării reperului peste modelul CAD obţinut ca raport al inspecţiei dimensionale [118].

Fig. 5.2.3 *Suprapunerea modelului CAD peste harta de comparaţie şi generarea rapoartelor inspecţiei dimensionale, în cazul numerizării unui reper de tip carcasă [118]*

Bibliografie:

[1] Cobliş, C. - *Contribuţii privind măsurarea numerică 3D a suprafeţelor complexe. Teză de Doctorat*, Braşov, 2011, conducător ştiinţific: prof. dr. ing. Ciprian OLTEANU;

[2] Advancedmcode.org - *Surface reconstruction from scattered points cloud*, http://www.advancedmcode.org/surface-recostruction-from-scattered-points-cloudmycrust-robust - accesat în iulie 2010;

[3] Coblis, C.; Olteanu, C.; Faluvegi, E. - *Analysis of a turbine wheel inspection process*, Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, volumul 39, paginile 181 -184;

[4] COORD 3 Metrology. Metrology in Focus - *Benefits of CMM Laser Scanning*, http://www.coord3-cmm.com/benefits-of-cmm-laser-scanning/ - accesat în octombrie, 2015**;**

[5] Braun, B., Olteanu, C., Cobliş, C. – *Maşini de măsurare în coordonate, vol I*, Editura Universităţii TRANSILVANIA din Braşov, 2009, ISBN: 978-973-598-646-9-gen., 978-973-598-647-6-vol. I;

[6] Braun, B. *Contribuţii privind optimizarea echipamentului de măsurare de la automatele de control*, teza de Doctorat, conducător ştiinţific: prof. dr. ing. Ciprian Justin OLTEANU, 2009;

[7] ZUMBACH Catalog - http://www.zumbach.com/products/product-finder/odac/odac-overview.html, accesat în luna septembrie, 2015;

[8] Braun, B. - *Non contact displacement transducers implementation as stage in the development of a flexible low cost coordinate measuring machine*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 772 pp 312-317, ISSN: 978-3-0385-502-1 (www.scientific.net), iunie 2015;

[9] Maxime, C.; Samy, F.; Soizic, G.; Minh, H - *Rapport de projet: Les capteurs de deplacement* - INSA Rouen, 2001 – 2002, pag. 7,8, 32;

[10] Olteanu C. – *Maşini de măsurare în coordonate. Notiţe de curs*, 2007;

[11] Toru, Y - *Handbook of Optical Metrology Principles and Applications*, CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2008;

[12] Haibin, Z. - *Multisensor Integration and Discrete Geometry Processing for Coordinate Metrology*, Teză de doctorat, Cachan, France, 2010;

[13]Josep, F. C. - *New Methods for Triangulation – Based Shape Acquisition Using Laser Scanners*, Teză de doctorat, Girona, Spain, 2004;

[14] LASER Design - *New advances in 3D laser scanning technologies from Laser Design*, www.laserdesign.com - accesat în februarie 2009.

[15] Rastogi P.K. - *Topics in Applied Physics. Photomechanics*, Springer, 3540659900, Heidelberg, 1999;

[16] Optical Metrology Centre, www.optical-metrology-centre.com - accesat în martie 2010;

[16] Dias-da-Costa D., Jónatas, V., Eduardo N.J. - *Laboratorial test monitoring applying photogrammetric post-processing procedures to surface displacements. Measurement*, vol. 44, pag. 527–538, 2011;

[18] Rajpal, S. - *Optical Methods of Measurement*, Wholefield Techniques, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 2009;

[19] Prieto, F. - *Metrologie assistee par ordinateur: apport des capteurs 3D sans contact, Computer assisted metrology: Contribution of the laser range sensors*, Teză de doctorat, Montreal, 2000;

[20] Manzella I., Labiouse V. - *Extension of the Fringe Projection Method to Measure Shape and Position of the Centre of Mass of Granular Flow Deposit*, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, pag. 4547 – 4554, 2008;

[21] Wolfgang, O. - *Fringe 2005*, The 5th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Springer, Berlin, 2006;

[22] Zhaoyang, W., Hua Du, Hongbo, Bi - *Out-of-plane shape determination in generalized fringe projection profilometry*, Optical Society of America, volumul 14, nr. 25, OPTICS EXPRESS, 2006;

[23] Marek, D. - *Influence of LASER diode wavelength tunability on the range, resolution and repeatability of interferometric distance measurement*, Optics & Laser Technology, vol. 40, pag. 352–359, 2008;

[24] Quan C., He X. Y., Wang C. F., Tay C. J., Shang H. M. - *Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting*, Optics Communications, vol. 189, pag. 21 – 22, 2001;

[25] Zuojun, T., Dejia H. - *Improve accuracy of laser beam width measurement using a genetic algorithm*, Optics and Lasers in Engineering, volumul 47, pag. 1091–1096, 2009;

[26] Zonghua, Z., Catherine, E., T. and David P., T. - *Shape and colour measurement of colourful objects by fringe projection*, Techniques, vol. 7063, pag. 1 - 12, 2008;

[27] Andrew M., W. - *Ultrafast Optics*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2009;

[28] Rifat, B. and Cem, U. - *Single Stripe Projection based Range Scanning of Shiny Objects Under Ambient Light*, Computer and Information Sciences, volumul 24, paginile 1 - 6, 2009;

[29] Jure, R., Justin, C., Marko, M. - *Dimensional measurements of a gray - iron object using a robot and a LASER displacement sensor*, Robotics and Computer, Integrated Manufacturing, vol. 25, pag. 155–167, 2009;

[30] Ponsar, M., Chicot, J. et al – *Three - dimensional measurement with LASER*, The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, volumul 18, nr. 33, paginile 91 - 96, 2008;

[31] Arai Y., Takegawa T., Yokozeki S. - *Measurement optimum condition of speckle interferometry based on dual-camera technique, Measurement*, vol. 44, pag. 29 – 33, 2011;

[32] Mahmud, M.; Joannic, D.; Fontaine, J. C.; Gonnet, J. P. - *Analyse de processus de numérisation de pièces tridimensionnelles complexes*, CPI 2005, Casablanca, Morocco, 2005;

[33] Derigent, W.; Chapotot, E.; Ris, G. – *Contrôle de piece par capteur LASER – definition de fonctions d'aide a la numerisation*, CPI 2005, Casablanca, Morocco, 2005;

[34] http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/Coordinate-Measuring-Machines/LK-CMM-Technology - *Sistemul de scanare ALTERA 7.5.5* – accesat în decembrie 2015;

[35] http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hxmt/romer/romer-gscan-rx2/brochures/pdf - *Sistemul GS Scan RX2*, Romer – accesat în februarie 2010;

[36] http://perceptron.com/products/3d-scanning-solutions/ - *CMM Scanning.* Perceptron – accesat în martie 2010;

[37] http://www.metris3d.hu/lc15 - *Captorul de măsurare și scanare LC15 Optical Probe* – accesat în ianuarie 2016;

[38] http://www.metris3d.hu/lc50_eng_1007.pdf - *LC50 Optical Probe* – accesat în ianuarie 2016;

[39] http://www.metris3d.hu/xc50ls_eng_1007.pdf - *XC 50 – LS Cross Scanner* - accesat în noiembrie 2015;

[40] http://www.kreon3d.com/3d-scanners/zephyr25kz_ - *Kreon technolody scanners* - accesat în iunie 2011;

[41] http://www.hexagonmetrology.asia/cms-106_812.html - *Hexagon Metrology, CMS 106 – 3D point scanning* – accesat în iunie 2011;

[42] http://www.nikonmetrology.com/products/cmm_scanners/xc65d/ - *Nikon Metrology, XC65D (LS) Digital Cross Scanner* – accesat în iulie 2011;

[43] Ruey, T., L.; Fang, J., S. - *Multi-beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface*, Measurement 2011, Vol. 44, pag. 1-10;

[44] http://www.nikonmetrology.com/products/cmm_scanners/xc65d/ - *Nikon Metrology, XC65D (LS) Digital Cross Scanner* - accesat în mai 2011

[45] http://www.nikonmetrology.com/cmm_scanners/lc15 - *Nikon Metrology, LC 15 High resolution and high accuracy digitizing* - accesat în decembrie 2010;

[46] Lehman, J.; Cromer, C.; Shao Yang, S.; Dowell, M. - *Review of ultraviolet and high power laser measurement standards at NIST*, Simposio de Metrologia, Boulder, Colorado, 2006;

[47] Roşca, I.; Braun, B.; Marosy, Z., I., *Computer aided optimization of quality inspection methods for complex models used in Biomechanics*, Annals of DAAAM Vienna, Zadar, Croatia, 20-23 October 2010, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, pp 0053, 0054, 2010;

[48] Braun B.; Roşca, I.; Drugă, C.; Ionescu, I. - *Assisted scanning techniques optimization with application in Biomechanics*, International Conference on Medicine, and Health Care through Technology, MediTECH 2011, Cluj – Napoca, 29 august – 2 septembrie 2011, ISBN: 978-3-642-22585-7, pp. 376 – 379;

[49] http://www.laserdesign.com/products/artec-eva-3d-scanner/ - *Artec Eva 3D Scanner* – accesat în ianuarie 2016;

[50] Braun, B.; Repanovici, A.; Ionescu, M. - *CAD models obtaining for ECO-TECH and Biomechanics*, Annals of DAAAM Vienna for 2010, Zadar, Croatia, 20-23 October 2010, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, pp 1281, 1282;

[51] http://www.laserdesign.com/products/artec-portable-3d-scanners/ - *Dispozitivul Artec Spoider 3D Scanner* - accesat în ianuarie 2016;

[52] http://www.laserdesign.com/products/rexcan-3d-scanner/ - *Sistemul Rexscan 4 3D Scanner* - accesat în ianuarie 2016;

[53] http://www.laserdesign.com/products/surveyor-space-arm/ - *Sistemul Surveyor Space Arms* - accesat în ianuarie 2016;

[54] http://www.laserdesign.com/products/geomagic-capture-scanner/ - *Geomagic Capture Scanner* - accesat în ianuarie 2016;

[55] http://www.laserdesign.com/products/rexcan-cs-3d-scanner/ - *Rexscan CS + 3D Scanner* - accesat în ianuarie 2016;

[56] http://www.laserdesign.com/products/rexcan-ds3/ - *Rexscan DS3 Scanner* - accesat în ianuarie 2016;

[57] http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d - *Portable 3D Scanners – Handy Scan 3D* - accesat în decembrie 2015;

[58] http://www.hexagonmetrology.us/products/portable-measuring-arms/romer-laser-scanners/hp-l-20-8-laser-scanner - *HP – L – 20.8 Laser Scanner* - accesat în decembrie 2015;

[59] http://www.hexagonmetrology.us/products/portable-measuring-arms/romer-absolute-arm - *Absolute Arm - 6 Axis* - accesat în decembrie 2015;

[60] http://www.hexagonmetrology.us/products/portable-measuring-arms/romer-laser-scanners/rs3-integrated-scanner - *RS3 Integrated Sensor* - accesat în decembrie 2015;

[61] http://3dprint.com/49306/smart3d-perceptron-scanning/ - *Perceptron Smart 3D Laser Scanning System* - accesat în ianuarie 2016;

[62] http://proto3000.com/3d-laser-scanning.php - *Proto 3000 - 3D Laser Scanning* - accesat în ianuarie 2016;

[63] Braun, B.; Baritz, M. – *CAD-CAM procedure using for rapid prototyping with application in Biomechanics*, 6th International Conference Engineering Graphics Design, ICEGD 2015, by SORGING, Brasov, Romania, 11th – 13th June, 2015, Fascicle 3, Section Engineering Computer Graphics, ISSN: 2344-4681

[64] http://www.faro.com/products/metrology/faroarm-measuring-arm/overview - *Brațele de măsurare și scanare Faro Arm products* - accesat în ianuarie 2016;

[65] https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d - *Handy Scan 3D – EXA Scan* - accesat în ianuarie 2010;

[66] http://www.nikonmetrology.com/en_EU/ - *Nikon Metrology NV* – accesat în iunie 2016;

[67] http://www.faro.com/home - *The world's most trusted source for 3D measurement technology* - accesat în iulie 2016;

[68] http://www.kreon3d.com/scanning-arms-portable-cmm/ace-measuring-arm-portable-cmm/ - *Ace measuring arm, portable CMM*, accesat în iulie 2016;

[69] http://perceptron.com/ - *Automated Enterprise Metrology Solutions* - accesat în iulie 2016;

[70] http://www.renishaw.com/en/about-renishaw-6432 - Precision Measurement and Process Control - accesat în iulie 2016;

[71] http://www.hexagonmetrology.co.uk/ - *Hexagon Manufacturing Intelligence* - accesat în septembrie 2016;

[72] https://www.artec3d.com/about - *Handheld 3D Scanners* - accesat în septembrie 2016;

[73] http://wenzelamerica.com/ - *Wenzel Innovative Technology* - accesat în septembrie 2016;

[74] Braun, B., Olteanu, C., Cobliş, C. – *Maşini de măsurare în coordonate, vol II*, Editura Universităţii TRANSILVANIA din Braşov, 2014, ISBN: 978-973-598-646-9-gen., 978-606-19-0434-1-vol. II.

[75] Voicu, A., C.; Gheorghe, I. Gh. - *Măsurarea 3D a reperelor complexe din industria auto utilizând scanare LASER*, Buletinul AGIR, nr. 3, pag. 109, 2013;

[76] Cojocaru, A., F. – *Principiul triangulaţiei, Lucrare de Disertaţie*, 2016, Universitatea Gh. Asachi din Iaşi, Facultatea de Electronică, Telecomunicații şi Tehnologia Informației;

[77] Braun, B.; Drugă, C.; Baritz, M. - *Virtual Laboratory and Virtual Instrumentation in Engineering Education* - 1st International Conference, Computational Mechanics and Virtual Engineering, COMEC 2005, 20–22 October 2005, Brasov, Romania, ISBN 973 – 635 – 593 – 4

[78] Bradshaw, G. - *Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques*, Trinity College, Dublin, 1998/1999;

[79] Lunazzi, J., J., Noemi, R., R. – *3D Shadowgram projection using a simple diffractive screen*, XXIX ENFMC, Annals of Optics, 2006;

[80] Baritz, M., I., Conte, M., Roşca, I. C.: *Surface Deformations Analysis by Double Exposure Holography Using Guided Waves and Image Processing, Interferometry in Speckle Light*, Springer Berlin Heidelberg, pag. 161-168, 2000;

[81] K. Hegensbach, F. Koch – *Fachwissen Metall. Grundstufe und Fachstufe 1* - Stam – Verlag Koln – Munchen, 1996;

[82] Fowles G. R. - *Introduction to Modern Optics*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1968;

[83] Chambreuil, M; Fouilleux, S. – *Les capteurs de deplacement. Raport de projet*, INSA Rouen, 2001;

[84] https://www.google.ro/tehnicamoire - *Fenomenul Moiré*, site accesat în noiembrie 2016;

[85] http://www.advancedmcode.org/surface-recostruction, *Surface reconstruction from scattered points cloud*, Advancedmcode.org, , site accesat în iulie 2010;

[86] Peng, T., Satyandra, G., Kam L., *Algorithms for constructing 3 – D Point Clouds Using Multiple Digital Fringe Projection Patterns*, Computer – Aided Design and Applications, vol. 2, nr. 6, pag. 737 – 746, 2005;

[87] Mahmud, M., Fontaine, J., F., *Analyse de processus de numerisation de pieces tridimensionnelles complexes*, CPI, Casablanca, Maroc, pag. 5 – 14, 2005;

[88] Fontaine J.F., Gonnet J.P., Isheil A., Joannic A., *Parameters analysis influencing 3D measurement without contact by LASER scanner to make a compensation model*, Int. Seminar on Computer Aided Tolerancing, CIRP, 2005;

[89] Contri A., *Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques, Thèse de doctorat*, ENS de Cachan, 2002;

[90] Kwan, H., L., Hyun-Pung P., *Automated inspection planning of free-form shape parts by LASER scanning*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 16, nr 4, pag. 201-210, 2000;

[91] Woo T. C., *Visibility maps spherical algorithms*, Computer-Aided Design, vol. 26, nr. 1, pag. 6-16, 1994;

[92] Cobliş Cătălin & Olteanu Ciprian, (2009), *LASER scanning for lens edging machines*, Annals of DAAAM for 2009 and Proceedings of the 20 th International Symposium , Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Theory, Practice and Education, pag. 1275 – 1276;

[93] Braun, B., Olteanu, C., Corneliu D., *Virtual metrological instrument for the dimensional control accuracy statistics*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, publicat de c[tre Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Tomul LIV (LVIII), Fasc. 3, secția Construcții de Mașini, 2008;

[94] Cobliş Cătălin, (2011), *Măsurarea suprafeţelor complexe*. *Lucrare de disertaţie*, Braşov

[95] Roșca, I., *Metrologie generală*, Colecția "Universitaria", Editura "Macarie", Târgoviște, 1998;

[96] Roșca, I., Iordache, P., Cristea, L., *Îndrumar de metrologie*, Editura Universității "Transilvania" din Brașov, 1996;

[97] Franco P., Alistair B., F., *Data Modeling for Metrology and Testing*, in Measurement Science, Birkhauser, Boston. 2009;

[98] Bleys P., Van Gestel N., Cuypers S., Kruth J.,P., *Uncertainty due to Limited Sampling of Circular Features on Coordinate Measuring Machines*, Proceedings of the 10th CIRP Computer Aided Tolerancing, 2007;

[99] Cristea, L., Repanovici, A., Curtu, I., Cristea D., *The improvement of performances in automatic dimensional control, an important way to quality assurance in mechanical engineering*, 10th International Research / Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", TMT, 2006;

[100] Gestel N. V., Cuypers S., Bleys P., Kruth J-P, *A performance evaluation test for LASER line scanners on CMMs*, Optics and Lasers in Engineering, volumul 47, pag. 336 – 342, 2009;

[101] Cobliş, C., *Măsurări cu LASER. Proiect de diplomă*, Braşov, 2008;

[102] Nikon Metrology, *LC60DX / LC50CX digital CMM laser scanners*, link: http://www.nikonmetrology.com/products/cmm_scanners/lc60dx_laser_scanner, accesat în iunie 2010;

[103] Lassila A., Kari M., Koivula H., Koivula U., Kortström J., Leinonen E., Manninen J., Manssila J., Mansten T., Meriläinen T., Muttilainen J., Nissilä J., Nyblom R., Riski K., Sarilo J., Isotalo H., *Design and performance of an advanced metrology building for MIKES*, Measurement, volumul 44, pag. 399–425, 2011;

[104] Focus Inspection, *Users Manual*, 2008;

[105] Huinh C., *How to improve the laser scanning of shiny surfaces which can give unwanted reflections*, CVMT 2010 Aalborg University: Department of Electronic System, Project Group: gr 1025, 2010;

[106] Faro Measuring Arms, http://measuring-arms.faro.com/distri/features/, accesat în iunie 2011;

[107] Gianfranco Genta, *Methods for uncertainty evaluation in measurement, statistical issues in metrology*, VDM Verlag Dr. Muller, Torino, 2010;

[108] Coblis C., Olteanu, C., Faluvegi, E., *Analysis of a turbine wheel inspection process*, Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, volumul 39, pag. 181 -184, 2011;

[109] Handy Scan, Catalogue, *Handy 3D Scanners*, link: http://www.handyscan3d.com/Scan, accesat îm: octombrie 2008;

[110] Crăciun, M., S., *Analiza structurilor morfo-funcţionale pe eşantion de subiecţi, cu implicaţii asupra presiunii plantare. Proiect de Diplomă*, conducător științific: Prof. dr. ing. Ileana Constanța ROȘCA, Universitatea TRANSILVANIA, Facultatea de Inginerie Mecanică, specializarea Mecatronică, Brașov, 2011;

[111] Braun, B.; Serban, I.; Cotoros, D. - *The Plantar Orthosis Modeling and Simulating Assisted by Computer* - Proceedings of the 3rd International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB Iaşi, 23th – 26th November 2011, ISBN: 978-606-544-078-4, pp. 183 – 186, 2011;

[112] GoSCAN 3D™, *White-light portable scanner*, site: https://www.creaform3d.com/pulp/ goscan-3d-scanner/, accesat în septembrie 2017;

[113] Creaform, *When accuracy meets portability. Introducing Handyscan 3D laser scanners*, site: https://www.creaform3d.com/pulp/ goscan-3d-scanner/, accesat în septembrie 2017;

[114] Creaform, *The optical CMM 3D scanner for industrial applications*, site: https://www. creaform3d.com/pulp/ goscan-3d-scanner/, accesat în septembrie 2017;

[115] Range Vision, *Scan anything*, site: http://www.rangevision.eu/profi-3d-scanner/, accesat în septembrie 2017;

[116] MicroGeo, *Kaarta - Mobile Scanning Solution*, site: http://www.microgeo. it/en/prodotti-e-soluzioni/landing-kaarta-stencil.aspx, accesat în septembrie 2017;

[117] LIFA Surveyors, *3D Metrology on site*, link: http://website.lifa.dk/Flyer_LIFA_Laser tracker_UK. pdf, accesat în septembrie 2017;

[118] FENIXX, Technologies LLC, *CMM and 3D Scanning*, link: http:// www.fenixxtech.com/cmm.php, accesat în septembrie 2017.

Cuprins:

Prefaţă..... 1
Capitolul 1 - Generaltăţi privind măsurarea în coordonate cu ajutorul emisiei de radiaţie LASER..... 3
1.1 Generalităţi. Avantaje şi dezavantaje ale măsurării cu sursă LASER..... 3
1.2 Principii fundamentale ale măsurării în coordonate, utilizând sistemele cu sursă LASER..... 3
1.3 Probleme întâlnite la scanarea prin utilizarea radiaţiei LASER..... 5
1.4 Soluţii de remediere a problemelor întâlnite la scanarea prin utilizarea radiaţiei LASER..... 8
Capitolul 2 - Sisteme şi echipamente pentru măsurarea pe principiul optic, fără contact, din componenţa MMCO..... 9
2.1 Tipologia MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER..... 9
2.2 Tipuri de sisteme de măsurare cu sursă LASER..... 10
2.3 Sisteme portabile pentru scanarea în coordonate a suprafeţelor tridimensionale complexe..... 15
2.4 Companii producătoare de MMCO cu sisteme de numerizare cu sursă LASER... 25
2.4.1 Compania Nikon Metrology..... 25
2.4.2 Comapnia FARO..... 27
2.4.3 Compania KREON..... 28
2.4.4 Compania Perceptron..... 29
2.4.5 Compania Renishaw..... 31
2.4.6 Compania HEXAGON Metrology..... 33
2.4.7 Compania Artec 3D..... 37
2.4.8. Compania WENZEL..... 38
Capitolul 3 - Metode de măsurare pe principiul emisiei radiaţiei LASER..... 42
3.1 Tehnica triangulaţiei LASER..... 42
3.2 Tehnica Radar..... 45
3.3 Tehnica stereoviziunii..... 46
3.4 Tehnica Moiré..... 46
3.5 Tehnici de achiziţie a imaginilor..... 46
3.5.1 Studiul datelor de intrare..... 46
3.5.2 Studiul ansamblului punctelor de vedere..... 47
3.5.3 Estimarea preciziei datelor 3D..... 50
3.5.4 Prezentarea optimă a ansamblului X de puncte de vedere..... 51
3.6 Tehnici moderne pentru optimizarea performanţelor sistemelor de scanare cu sursă LASER..... 51
3.6.1. Conceptul de vizibilitate 51
3.6.2. Identificarea punctelor de vedere potenţiale în cadrul procesului de numerizare..... 53
3.6.3 Influenţa culorii suprafeţei măsurate asupra preciziei scanării..... 54
3.6.4 Identificarea poziţiilor optime în funcţie de precizia de măsurare..... 59
Capitolul 4 - Aplicaţii ale maşinilor de măsurat în coordonate cu sisteme de scanare cu sursă LASER..... 63
4.1 Aplicaţii ale sistelelor de scanare LASER, utilizate în cadrul maşinilor de măsurare fixe..... 63
4.1.1 Exemplu de reper de tip turbină supus procesului de numerizare cu sisteme LASER 63

4.1.2 Exemplu de reper de tip carcasă supus procesului de numerizare cu sisteme LASER 73
4.1.3. Concluzii privind utilizarea capetelor de scanare pe principiul LASER pe maşinile în coordonate fixe..... 77
4.2 Aplicații ale sistelelor de scanare LASER, utilizate în cadrul maşinilor de măsurare portabile..... 78
4.2.1 Descrierea caracteristicilor şi a funcţionării sistemelor de scanare portabile..... 78
4.2.2 Exemple de aplicaţii ale utilizării sistemelor portabile de scanare cu sursă LASER..... 80
Capitolul 5 - Tendinţe privind utilizarea sistemelor şi tehnicilor de scanare cu surse de emisie LASER..... 87
5.1 Tendinţe privind sistemele moderne de scanare şi aplicaţiile acestora..... 87
5.2 Tendinţe privind tehnologiile de scanare..... 93
Bibliografie..... 95