

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Zabret, B., 2014. Multisenzorski merilni sistemi in njihova aplikacija v industriji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kogoj, D.): 94 str.

Datum arhiviranja: 04-11-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Zabret, B., 2014. Multisenzorski merilni sistemi in njihova aplikacija v industriji. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kogoj, D.): 94 pp.

Archiving Date: 04-11-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GEODEZIJA  
SMER GEODEZIJA

Kandidat:

**BOŠTJAN ZABRET**

**MULTISENZORSKI MERILNI SISTEMI IN NJIHOVA  
APLIKACIJA V INDUSTRIJI**

Diplomska naloga št.: 965/G

**MULTISENSOR MEASURING SYSTEMS AND THEIR  
APPLICATION IN INDUSTRY**

Graduation thesis No.: 965/G

**Mentor:**

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

**Predsednica komisije:**

doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek

**Član komisije:**

doc. dr. Dušan Petrovič

Ljubljana, 27. 10. 2014

## ERRATA

<u>Stran z napako</u>	<u>Vrstica z napako</u>	<u>Namesto</u>	<u>Naj bo</u>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

Ta stran je namenoma prazna.

## IZJAVE

Podpisani **Boštjan Zabret** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»Multisenzorski merilni sistemi in njihova aplikacija v industriji«.**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, oktober 2014

Boštjan Zabret

---

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	351.824:528.5(497.4)(043.2)
<b>Avtor:</b>	Boštjan Zabret
<b>Mentor:</b>	izr. prof. dr. Dušan Kogoj
<b>Naslov:</b>	Multisenzorski merilni sistemi in njihova aplikacija v industriji
<b>Tip dokumenta:</b>	diplomska naloga – univerzitetni študij
<b>Obseg in oprema:</b>	94 str., 15 preg., 68 sl., 26 en.
<b>Ključne besede:</b>	laserski sledilnik, koordinatno merilna roka, merilni senzor, prenosna koordinatno merilna naprava, šest prostostnih stopenj, natančnost

**IZVLEČEK**

Diplomska naloga obravnava multisenzorske merilne sisteme in primere njihove uporabe v industriji. Na kratko je predstavljena zgodovina industrijskih merilnih sistemov. Razložene so tehnične osnove in opisane posamezne enote multisenzorskih sistemov – laserski sledilnik, merska tarča, koordinatno merilna roka in merilni senzor. V preglednicah so podrobno opisane tudi tehnične lastnosti in natančnosti posameznih enot. Predstavljene so prenosne koordinatno merilne naprave treh različnih proizvajalcev ter njihove rešitve pri določanju položaja in orientacije merilnih senzorjev v prostoru (določanje šestih prostostnih stopenj). Na koncu so predstavljeni še primeri uporabe multisenzorskih merilnih sistemov iz različnih vej industrije.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	351.824:528.5(497.4)(043.2)
<b>Author:</b>	Boštjan Zabret
<b>Supervisor:</b>	Assoc. Prof. Dušan Kogoj, Ph. D.
<b>Title:</b>	Multisensor measuring systems and their application in industry
<b>Document type:</b>	Graduation Thesis – University studies
<b>Scope and tools:</b>	94 p., 15 tab., 68 fig., 26 eq.
<b>Keywords:</b>	laser tracker, coordinate measuring arm, measuring sensor, portable coordinate measuring machine, six degrees of freedom, accuracy

## **ABSTRACT**

This thesis discusses multisensor measuring systems and examples of their use in the industry. The history of industrial measuring systems is briefly presented. Technical basis and individual units of multisensor systems are explained and described – laser tracker, measuring target, coordinate measuring arms and measuring sensor. The technical characteristics and accuracies are also described in detail in tables. Portable coordinate measuring machines from three different manufacturers and their solutions determining the spatial position and orientation (six degrees of freedom) of measuring sensors are represented. In the end examples of multisensor measuring systems applications from different parts of the industry are also represented.

Ta stran je namenoma prazna.



## **ZAHVALA**

*Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Dušanu Kogoju za vso pomoč, komentarje in usmeritve pri pisanju diplomske naloge.*

*Zahvala gre staršema za vso moralno in finančno podporo. Brez vaju te diplomske naloge ne bi bilo.*

*Na koncu bi se posebno zahvalil Špeli za vso podporo in vse vzpodbudne besede skozi študij. Hvala ti!*

**KAZALO VSEBINE**

ERRATA.....	I
IZJAVE .....	III
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	IV
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA.....	VII
KAZALO VSEBINE.....	VIII
KAZALO SLIK.....	X
KAZALO PREGLEDNIC .....	XII
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2 KRATKA ZGODOVINA IN RAZVOJ INDUSTRIJSKIH MERILNIH SISTEMOV .....</b>	<b>2</b>
2.1 Teodolitski merilni sistemi.....	2
2.2 Fotogrametrični merilni sistemi .....	6
2.3 Koordinatno merilne naprave.....	11
<b>3 SODOBNI TRENDI V INDUSTRIJSKI METROLOGIJI.....</b>	<b>14</b>
<b>4 TEHNIČNE OSNOVE MULTISENZORSKIH SISTEMOV .....</b>	<b>19</b>
4.1 Optično merjenje dolžin .....	19
4.1.1 Interferometrija.....	19
4.1.2 Impulzni način .....	21
4.1.3 Fazni način .....	24
4.1.4 Merjenje dolžin z lasersko triangulacijo .....	27
4.2 Elektronsko merjenje kotov .....	29
4.3 Sistem za usmerjanje žarka laserskega sledilnika .....	29
4.4 Merske tarče.....	31
4.4.1 Krogelni reflektor.....	32
4.4.2 Ponovljivostna tarča .....	36
4.4.3 Površinsko-točkovna tarča.....	36
4.5 Lasersko skeniranje.....	37
4.5.1 Triangulacijski skenerji.....	38
4.6 Videogrametrija .....	41
<b>5 ENOTE MULTISENZORSKIH MERILNIH SISTEMOV .....</b>	<b>42</b>
5.1 Laserski sledilnik.....	42
5.1.1 Vrste laserskih sledilnikov .....	43

5.1.1.1	IFM sledilnik .....	43
5.1.1.2	ADM sledilnik .....	45
5.1.1.3	AIFM sledilnik .....	46
5.1.2	Natančnost laserskih sledilnikov .....	47
5.1.2.1	Dolžinska natančnost .....	48
5.1.2.2	Kotna natančnost .....	48
5.1.2.3	Volumetrična natančnost .....	49
5.1.2.4	Tehnične lastnosti in natančnosti laserskih sledilnikov .....	50
5.2	Koordinatno merilna roka .....	57
<b>6</b>	<b>MULTISENZORSKI SISTEMI</b> .....	<b>59</b>
6.1	Multisenzorski sistem Leica .....	59
6.1.1	Merilni sistem za določitev šestih prostostnih stopenj (6DoF) merilne naprave .....	59
6.1.2	Laserski sledilnik AT901 in T-Cam .....	61
6.1.3	Laserski sledilnik AT901, T-Cam in T-Probe .....	63
6.1.4	Laserski sledilnik AT901, T-Cam in T-Scan .....	67
6.1.5	Laserski sledilnik AT901, T-Cam in T-Mac .....	70
6.2	Multisenzorski sistem API .....	72
6.2.1	Laserski sledilnik Radian in merilni senzor SmartTrack .....	72
6.2.2	Laserski sledilnik Radian in merilna naprava API I-360 .....	74
6.3	Multisenzorski sistem Faro .....	76
<b>7</b>	<b>APLIKACIJE MULTISENZORSKIH SISTEMOV V INDUSTRIJI</b> .....	<b>79</b>
7.1	Precizna industrija .....	79
7.2	Avtomobilska industrija .....	82
7.3	Letalska industrija .....	83
7.4	Vetrna industrija .....	86
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČEK</b> .....	<b>88</b>
VIRI	.....	90

**KAZALO SLIK**

Slika 2.1: Teodolitski merilni sistem (Joeckel in sod., 2008, str. 309).....	3
Slika 2.2: Merilni sistem Kern SPACE (www.kern-aarau.ch).....	5
Slika 2.3: Mapvison iz leta 1986 (Luhmann in sod, 2006) .....	7
Slika 2.4: Industrijski merilni sistem GSI VSTARS (Luhmann in sod., 2006).....	8
Slika 2.5: Fotogrametrični »on-line« merilni sistem (www.foto.hut.fi) .....	9
Slika 2.6: Merilni princip fotogrametričnega »on-line« sistema z merilnim tipalom (Luhmann in sod., 2006).....	9
Slika 2.7: Koordinatno merilna naprava (www.brownandsharpe.com).....	12
Slika 3.1: Princip polarnih merilnih sistemov (Cuypers in sod, 2009) .....	14
Slika 3.2: Princip triangulacijskega sistema s tremi linearnimi CCD kamerami (Cuypers in sod, 2009) 15	
Slika 3.3: Sistem iGPS (Cuypers in sod, 2009).....	16
Slika 3.4: Princip fotogrametrije (www.opticalengineering.spiedigitallibrary.org).....	16
Slika 3.5: Merilni doseg in natančnost prenosnih koordinatno merilnih naprav (Cuypers in sod, 2009) .....	18
Slika 4.1: Delovanje Michelsonovega interferometra (Kogoj, 2005, str. 21).....	20
Slika 4.2: Princip delovanja impulznega načina merjenja dolžine (Kogoj, 2005, str. 16) .....	22
Slika 4.3: Princip delovanja faznega načina merjenja dolžine (Kogoj, 2005, str. 29) .....	24
Slika 4.4: Shema ADM laserskega sledilnika Leica (www.faro.com/werbinars).....	26
Slika 4.5: Shema ADM laserskega sledilnika Faro (www.faro.com/webinars).....	27
Slika 4.6: Merjenje dolžin z lasersko triangulacijo (Joeckel, 2008, str. 41).....	28
Slika 4.7: Sistem za usmerjanje laserskega žarka .....	30
Slika 4.8: Vrste PSD senzorjev (www.laserfocusworld.com) .....	31
Slika 4.9: Lom žarka pri krogelnem reflektorju (Joeckel, 2008, str. 85) .....	32
Slika 4.9a: Lom žarka pri krogelnem reflektorju (Joeckel, 2008, str. 85).....	32
Slika 4.10: Osnovni tipi krogelnih reflektorjev (Estler in sod.) .....	33
Slika 4.11: Zgradba krogelnega reflektorja (www.faro.com) .....	34
Slika 4.12: Krogelni reflektor (www.faro.com).....	34
Slika 4.13: Zgradba mačjega očesa (Joeckel, 2008) .....	35
Slika 4.14: Mačje oko (www.faro.com) .....	35
Slika 4.15: Ponovljivostne tarče (www.faro.com) .....	36
Slika 4.16: Površinsko-točkovna tarča (www.faro.com).....	37
Slika 4.17: Primer skeniranja letala (www.leica-geosystems.com).....	38
Slika 4.17: Skener z eno (levo) ali dvema (desno) CCD kamerama (Mozetič, 2004, str. 354) .....	39
Slika 4.18: Princip delovanja linijskega triangulacijskega skenerja (Joeckel, 2008) .....	40
Slika 4.19: Primer ročnega skenerja Leica T-Scan5 v multisenzorskem merilnem sistemu (www.hexagonmetrology.us).....	40
Slika 5.2: IFM laserski sledilnik (Joeckel, 2008, str. 314) .....	44
Slika 5.3: Merjenje relativnih dolžin (Joeckel, 2008, str. 315).....	44
Slika 5.4: Absolutno merjenje dolžin z laserskim sledilnikom (www.faro.com).....	46

---

Slika 5.5: Koncept postavitve laserskega sledilnika za doseg najvišje možne natančnosti pri merjenju dolžin (www.faro.com).....	48
Slika 5.6: Teoretična kotna odstopanja (www.faro.com) .....	48
Slika 5.7: Volumetrična natančnost (www.faro.com) .....	49
Slika 5.8: Levo – laserski sledilnik v liniji s točkama; desno – laserski sledilnik pravokotno na linijo med dvema točkama (www.faro.com) .....	49
Slika 5.9: Primer koordinatno merilne roke z nameščenim laserskim skenerjem (www.warwick.uk) .	57
Slika 6.1: Merski podatki za izračun položaja in orientacije merilne naprave .....	60
Slika 6.2: Določitev naklona in odklona reflektorja s CCD senzorjem (Kyle, 2007, str. 5).....	60
Slika 6.3: Določitev nagiba s pomočjo digitalne fotogrametrije (Zumbrunn in sod., 2007, str. 3) .....	61
Slika 6.4: Videokamera Leica T-Cam (www.hexagonmetrology.us) .....	62
Slika 6.5: Stalno vidno polje med 1.5 m in 15 m (Dold, 2004, str. 43) .....	62
Slika 6.6: Merilna naprava Leica T-Probe (www.hexagonmetrology.us) .....	63
Slika 6.7: Laserski sledilnik AT901, kamera T-Cam in merilna naprava T-Probe (www.hexagonmetrology.us).....	64
Slika 6.8: Levo – povezava merilni sistem in merilna naprava; desno – povezava merilna naprava in merilni sistem (Dold, 2004, str. 44).....	64
Slika 6.9: Merilna naprava Leica B-Probe (www.hexagonmetrology.us).....	66
Slika 6.10: Primerjava natančnosti (www.leica-geosystems.com).....	67
Slika 6.11: Princip delovanja Leica T-Scan (www.hexagonmetrology.us) .....	67
Slika 6.12: Multisenzorski merilni sistem Leica z ročnim skenerjem T-Scan (Steiger, 2009, str. 6) .....	68
Slika 6.13: Laserski sledilnik AT901, kamera T-Cam in merilni senzor T-Mac (www.hexagonmetrology.us).....	70
Slika 6.14: Shema 6D merskega sistema .....	72
Slika 6.15: Sistem Faro ScanArm ES (www.faro.com) .....	77
Slika 6.16: Primer uporabe sistema Faro TrackArm (www.youtube.com).....	78
Slika 7.1: Merjenje položajev točke TCP robota z laserskim sledilnikom (Kleinkes, 2007) .....	79
Slika 7.2: Primerjava merjenih in programiranih položajev (Kleinkes, 2007) .....	80
Slika 7.3: Dinamična povezava med robotom, laserskim sledilnikom in računalnikom (Kleinkes, 2007) .....	81
Slika 7.4: Odstopanja zaradi slabe montaže tirnic (Kleinkes, 2007).....	81
Slika 7.5: Merjenje območja delovanja robota na različnih položajih tirnice (Kleinkes, 2007).....	82
Slika 7.6: Uporaba merilnega sistema Leica (www.leica-geosystems.com) .....	83
Slika 7.7: Uporaba merilne naprave T-Probe za doseganje težko dostopnih mest komponent letala (www.leica-geosystems.com) .....	84
Slika 7.8: Avtomatizirano skeniranje dela trupa letala (www.leica-geosystems.com) .....	84
Slika 7.9: Prikaz delovanja MAP sistema (www.leica-geosystems.com).....	85
Slika 7.10: Skeniranje letala (www.leica-geosystems.com) .....	85
Slika 7.11: Laserski sledilnik nadzira gibanje in položaj rezalnega orodja pri izdelavi stolpa (www.lvmc.eu) .....	86
Slika 7.12: Avtomatiziran zajem geometrije lopatice s skeniranjem (www.lvmc.eu).....	87
Slika 7.13: Kontrola oblike in dimenzij lopatice (www.faro.com) .....	87

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 3.1: Vplivni faktorji pri izbiri merilnega sistema .....	17
Preglednica 5.1: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Leica AT402.....	51
Preglednica 5.2: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Faro Vantage.....	52
Preglednica 5.3: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika API Omnitrack .....	53
Preglednica 5.4: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Leica AT901.....	54
Preglednica 5.5: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika API Radian.....	55
Preglednica 5.6: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Faro Ion.....	56
Preglednica 6.1: Tehnične lastnosti in natančnosti Leica T-Probe .....	65
Preglednica 6.2: Tehnične značilnosti Leica PROBEscanner.....	66
Preglednica 6.3: Tehnične lastnosti in natančnost Leica T-Scan 5 .....	69
Preglednica 6.4: Tehnične lastnosti in natančnost merilnega senzorja T-Mac .....	71
Preglednica 6.5: Tehnični podatki merilnega senzorja API SmartTrack .....	73
Preglednica 6.6: Tehnični podatki in natančnosti merilne naprave API IntelliProbe 360 .....	74
Preglednica 6.7: Tehnični podatki in natančnosti ročnega skenerja API IntelliScan 360 .....	75
Preglednica 6.8: Tehnične lastnosti in natančnosti merilnih rok FaroArm .....	76
Preglednica 6.9: Tehnične lastnosti in natančnost linijskega laserskega skenerja Faro .....	77

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

KMN	<i>koordinatno merilna naprava</i>
PKMN	<i>prenosna koordinatna merilna naprava</i>
IFM	(angl. Interferometer); <i>interferometer</i>
ADM	(angl. Absolute Distance Meter); <i>absolutno merjenje dolžine</i>
AIFM	(angl. Absolute Interferometer); <i>absolutno merjenje dolžine z interferometrom</i>
PSD	(angl. Position Sensitive Device); <i>položajno občutljiva naprava</i>
SMR	(angl. Spherically Mounted Reflector); <i>krogelni reflektor</i>
ASME	(angl. American Society of Mechanical Engineers); <i>ameriško združenje strojnih inženirjev</i>
MPE	(angl. Maximum Permissible Error); <i>največje dovoljeno odstopanje</i>
KMR	<i>koordinatno merilna roka</i>
DoF	(angl. Degrees of Freedom); <i>prostostna stopnja</i>
TCP	(angl. Tool Center Point); <i>središčna točka orodja</i>
MAP	(angl. Metrology Assisted Positioning); <i>pozicioniranje s pomočjo metrologije</i>

Ta stran je namenoma prazna.



## 1 UVOD

Metrologija<sup>1</sup> je znanost merjenja. Zajema merske enote in njihove standarde, merilne sisteme in področja njihove uporabe ter vse teoretične in praktične vidike, ki se nanašajo na merjenje. Del tega je *industrijska metrologija*, ki se ukvarja z meritvami v proizvodnji in nadzoru kakovosti. Vključuje postopke in intervale kalibriranja, nadzor merskih procesov in upravljanje merilnih sistemov v industriji za zagotovitev skladnosti z zahtevami za njihovo uporabo.

Namen diplomske naloge je predstaviti in opisati uporabo *multisenzorskih industrijskih merilnih sistemov*. Merske podatke se na ta način pridobi iz različnih vrst merilnih senzorjev (brezkontaktni, kontaktni), ki skupaj tvorijo visoko natančen merilni sistem. Takšni sodobni sistemi so v številnih vejah industrije že postali standardni merilni sistem. Ker so to večinoma prenosni in zelo natančni merilni sistemi, je njihova uporabnost raznolika, od kalibriranja in avtomatiziranega upravljanja industrijskih robotov ter nadzora kakovosti med procesom proizvodnje do kontrole končnega proizvoda in reverzibilnega inženiringa.

Rdeča nit diplomske naloge je *laserski sledilnik*, ki je najpomembnejša komponenta multisenzorskega merilnega sistema. Laserski sledilnik je merilni senzor oziroma merski instrument, s katerim lahko z visoko natančnostjo določimo prostorski položaj merskega objekta. Podobno kot elektronski tahimeter položaj pridobi z merjenjem dolžine in dveh kotov (polarna metoda). Skupaj z laserskim sledilnikom in ostalimi merilnimi senzorji (merilno tipalo, ročni skener, merilna roka, digitalna videokamera) tako realiziramo merilni sistem, s katerim pridobimo prostorske podatke o merskem objektu z mikrometrsko natančnostjo. Ti merski podatki so tridimenzionalni položaj in orientacija objekta v prostoru.

Diplomska naloga je, vključno z uvodom in zaključkom, vsebinsko razdeljena na osem poglavij. V drugem in tretjem poglavju je na kratko opisan zgodovinski razvoj industrijskih merilnih sistemov in predstavljene so sodobne metode v industrijski metrologiji. V četrtem poglavju so razložene tehnične osnove za izvedbo multisenzorskih merilnih sistemov.

Jedro diplomske naloge predstavljata peto in šesto poglavje. V petem poglavju obravnavam dve prenosni koordinatno merilni napravi, laserski sledilnik in koordinatno merilno roko. Večji poudarek je namenjen laserskem sledilniku, saj je le-ta ključna komponenta multisenzorskih sistemov. Predstavljene in opisane so vrste laserskih sledilnikov glede na način merjenja dolžine in vrste natančnosti – dolžinska, kotna in volumetrična. Priložene so tudi preglednice s podrobno predstavitevijo tehničnih lastnosti in natančnosti laserskih sledilnikov različnih vrst in proizvajalcev.

V šestem poglavju so podrobno opisane in predstavljene izvedbe multisenzorskih merilnih sistemov treh različnih proizvajalcev – Leica, API in Faro. Sedmo poglavje je namenjeno predstavitvi primerov uporabe multisenzorskih merilnih sistemov v različnih vejah industrije – precizni, avtomobilski, letalski in vetrni industriji.

---

<sup>1</sup> Uporablja se tudi pojem meroslovje.

## 2 KRATKA ZGODOVINA IN RAZVOJ INDUSTRIJSKIH MERILNIH SISTEMOV

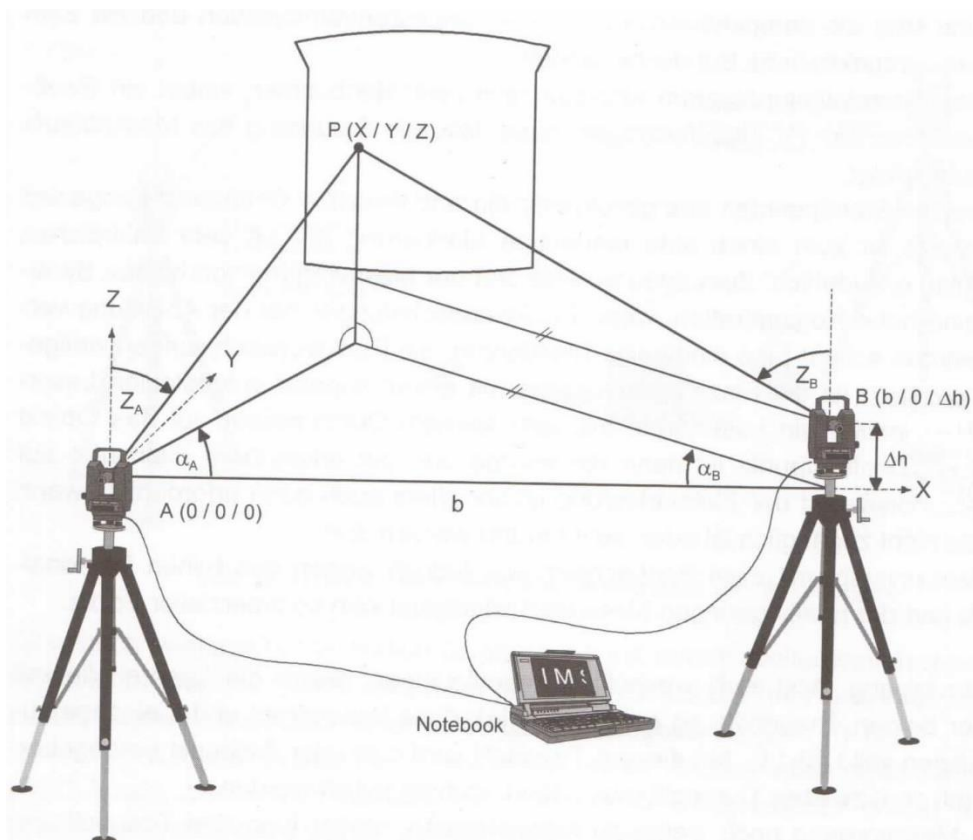
### 2.1 Teodolitski merilni sistemi

Pred uveljavitvijo elektronskih teodolitov v 80. letih prejšnjega stoletja se je za natančno izmero in zakoličbo uporabljala metoda *zunanjega ureza*. V geodeziji je zunanji urez trigonometrična metoda določanja horizontalnih koordinat točke na osnovi merjenih horizontalnih smeri z dveh stojišč teodolitov na iskano točko. Koordinate obeh stojišč morajo biti znane. Iz izračunanih orientiranih smeri in dolžin stranic trikotnika se določita horizontalni koordinati iskane točke. Izračuni so bili izvedeni po opravljenih meritvah.

Leta 1979 je podjetje Hewlett-Packard združilo dva elektronska teodolita z računalniško enoto. S tem je bil realiziran *prostorski zunanji urez* v realnem času, tj. signalizirana točka objekta je bila istočasno vizirana z obeh stojišč teodolitov. Instrumenta sta bila preko podatkovnih kablov povezana z računalnikom, ki je na podlagi merilnih vrednosti ( $H_z$  in  $V$  kota) izračunal koordinate vizirane točke objekta. S tem sistemom, ki je bil sestavljen iz dveh elektronskih teodolitov HP 3820A, krmilne enote HP in programske opreme za izračun koordinat točk z metodo prostorskega zunanjega ureza, je bilo omogočeno tudi neposredno opazovanje velikih objektov za kontrolo dimenzij in oblike objekta ali postavitve samega objekta v prostor z relativno visoko natančnostjo (približno 1 : 100 000 glede na velikost objekta, oziroma 0.1 mm za objekt dimenzije 10 m) (Deumlich in sod., 2001).

V kasnejših obdobjih so vsa večja podjetja, ki so se ukvarjala z izdelavo merilnih instrumentov, razvila podobne triangulacijske sisteme in jih poimenovala *industrijski merilni sistemi (IMS)*. S pojmom industrijski merilni sistemi so želeli ponudniki poudariti prisotnost geodetskega načina merjenja v ponujenih sistemih za industrijske aplikacije. Tudi znotraj geodetske stroke se je ta izraz hitro uveljavil. Vendar pa to ni veljalo za dejansko ciljno skupino – tehnike in inženirje strojništva, ki pri načrtovanju, proizvodnji in preverjanju kakovosti uporabljajo takšne sisteme. Izraz je sam po sebi zelo splošen, saj ne navaja informacij niti o vrsti meritve niti o samih rezultatih merjenja. Ustreznejši je tako izraz *teodolitski merilni sistemi (TMS)*. Poleg tega sta se uveljavila tudi izraza *teodolitski industrijski merilni sistemi (TIMS)* in *geodetski industrijski merilni sistemi (GIMS)*.

*Teodolitski merilni sistem* običajno sestavljata dva (ali več) elektronska teodolita, ki sta povezana z računalnikom. Računalnik služi kot kontrolna enota, baza podatkov in orodje za izračun pravokotnih koordinat točk na merskem objektu (slika 2.1).



Slika 2.1: Teodolitski merilni sistem (Joeckel in sod., 2008, str. 309)

Z istočasnim viziranjem točke na merskem objektu z dveh stojišč teodolitov lahko določimo koordinate točke v lokalnem prostorskem koordinatnem sistemu. Izhodišče koordinatnega sistema je eno izmed stojišč teodolitov. Pred dejansko meritvijo je potrebno teodolita medsebojno orientirati. To vključuje določitev horizontalne razdalje oziroma baze ( $b$ ) med stojiščema, višinske razlike med teodolitoma ( $\Delta h$ ) in začetne (orientacijske) smeri na obeh horizontalnih krogih teodolitov. Orientacijske parametre lahko določimo tudi skupaj s koordinatami točk s skupno izravnavo. V tem primeru je potrebno meriti mejne točke referenčne mreže in poznati število veznih točk. Presečišče kolimacijskih osi teodolitov lahko obravnavamo analogno kot v fotogrametriji – kot perspektivni center centralne projekcije, kjer kolimacijski osi teodolitov predstavljata projicirne žarke. Ker je potrebno istočasno z obeh stojišč opazovati isto točko objekta, mora biti le-ta dobro definirana oziroma signalizirana. Pri samem postopku merjenja je tu potrebna popolna koncentracija operaterjev, če se želimo izogniti napakam. V izogib temu je potrebno točko jasno definirati z ločenim laserskim žarkom. Laserski žarek (majhnega premera) se usmeri na ciljno točko objekta. Ciljna točka na opazovanem objektu je tako enolično in natančno definirana. Takšen način signaliziranja točk je še posebej uporaben takrat, ko je merilni objekt težko dostopen ali se ga ne moremo (ne smemo) fizično dotakniti.

Takšen merilni sistem komercialno ni uspel zaradi visokih stroškov dela in razmeroma dolgotrajnega postopka merjenja.

Postopek merjenja se lahko občutno pospeši, če na enega izmed teodolitov namestimo laser tako, da laserski žarek in vizirna os teodolita sovpadata. V tem primeru omenjeni teodolit

označuje točko objekta, na katero se nato usmeri še drugi teodolit. Merilni postopek se lahko dalje racionalizira tako, da se oba teodolita opremi s servomotorji za usmerjanje v horizontalni in vertikalni smeri. Takšen merilni sistem se tako usmerja s pomočjo krmilne ročice ali računalnika. V tem primeru je potreben le en operater. Za upravljanje takšnega sistema potrebujemo ustrezno programsko opremo, ki omogoča rastrski zajem objekta, pri čemer se širina rastra prilagaja obliki objekta. Z določitvijo koordinat mejnih točk objekta je tako natančno določen okvir rastrskih točk. Znotraj tega okvira teodolit z laserjem avtomatsko poda rastrske točke.

Nadaljnja racionalizacija je mogoča s popolno avtomatizacijo sistema. To se doseže tako, da drugi teodolit opremimo s servomotorji in CCD kamero – *video-teodolit*. Takšen sistem se uporablja pri popolnoma avtomatiziranem točkovnem zajemanju objekta (z znanimi približnimi koordinatami). Teodolit z laserjem usmeri žarek na točko, ki jo drugi (video-teodolit) avtomatsko zajame. Video-teodolit se s pomočjo približnih koordinat usmeri proti točki le toliko, da se le-ta preslika na CCD senzor. Fokusiranje CCD kamere poteka avtomatsko. V matriki CCD določene slikovne koordinate laserske točke  $(x, y)$  instrument transformira v koordinati  $(Hz, V)$  polarnega koordinatnega sistema teodolita. Dosežena kotna natančnost v tem primeru ustreza natančnosti viziranja točke. Pri teh sistemih se lahko zajame do 500 točk/uro, operater je potreben le pri orientaciji sistema.

Posledica nadaljnjega razvoja teodolitskih merilnih sistemov z integrirano CCD kamero so fotogrametrični sistemi digitalnih kamer v industriji (glej 2.2).

Za *prvo generacijo* teodolitskih merilnih sistemov, ki so na trg prišli po letu 1980, je značilno (Deumlich in sod., 2001):

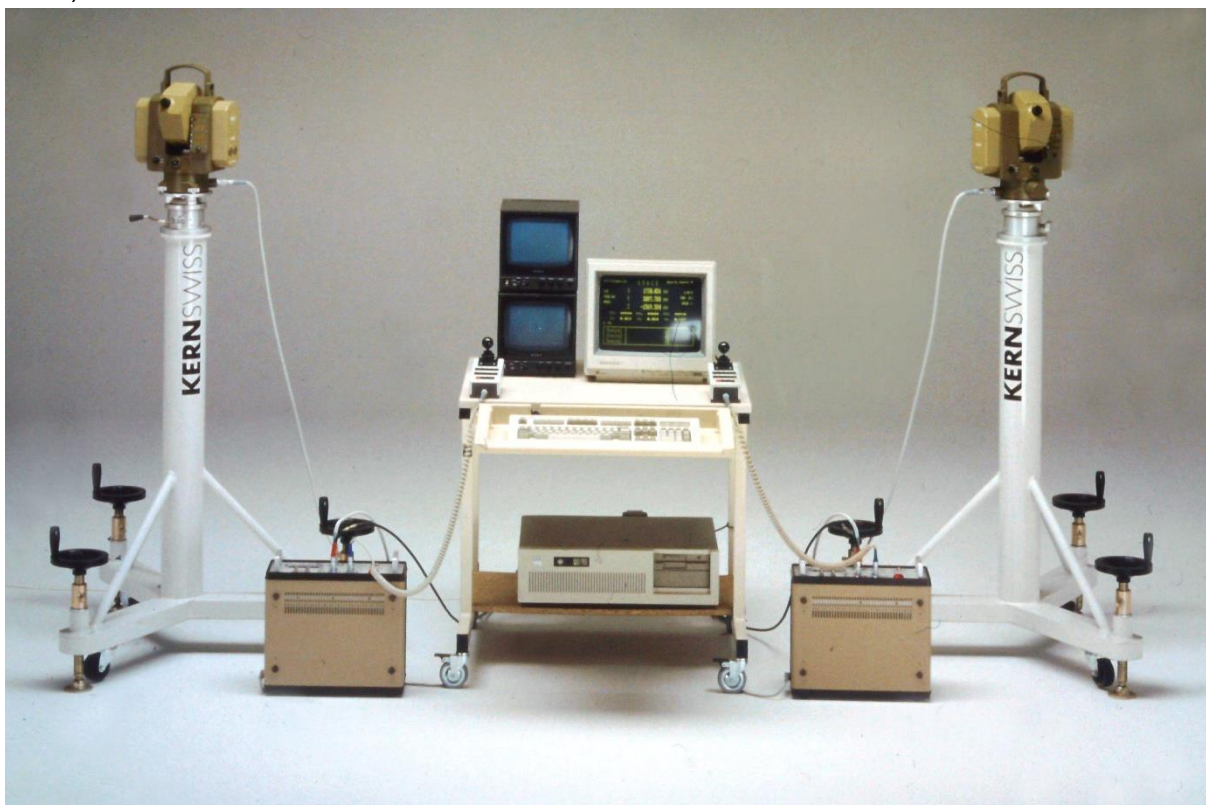
- merjenje z dvema elektronskima teodolitoma;
- merilni sistemi so bili zaprti paketi, tj. uporaba je možna samo z instrumenti istega ponudnika v povezavi s posebnim računalnikom, kar je zahtevalo svoj lastni operacijski sistem;
- orientacija horizontalnega kroga instrumenta na osnovi medsebojne usmerjenosti teodolitov (avtokolimacija);
- uporaba osnovne programske opreme za analiziranje in izračun geometrijskih oblik objekta;
- izračunane so približne 3D koordinate točk objekta.

Prvi merilni sistemi *druge generacije* so se na trgu pojavili po letu 1986. Razlike glede na prvo generacijo sistemov so sledeče (Deumlich in sod., 2001):

- merjenje z dvema ali več elektronskimi teodoliti (4, 8 ali 16);
- drugačna metoda orientacije merilnega sistema – pogoj vidljivosti med instrumenti ni potreben;
- računalnik IBM v povezavi z operacijskim sistemom MS DOS je postal standard na področju merilnih sistemov;
- napredna programska oprema za analiziranje in obdelavo podatkov.

Na osnovi sistemov druge generacije sta podjetji Kern in Wild približno ob istem času razvili popolnoma avtomatizirana teodolitska sistema (Kern SPACE in Wild AUTOCAT), ki sta na trg prišla leta 1988. Prednost takšnih sistemov je popolna avtomatizacija merskega postopka.

Avtomatiziran teodolitski merilni sistem *Kern SPACE* je bil sestavljen iz najmanj dveh video-teodolitov Kern E2-SE, ki sta bila preko kontrolne enote E2-SC povezana z računalnikom (slika 2.2). Video-teodoliti temeljijo na običajnem elektronskem teodolitu z integrirano digitalno CCD kamero. Vrednosti horizontalnih in vertikalnih smeri se pridobijo elektronsko, medtem ko se zajeto sliko digitalizira in obdelava, kar omogoča avtomatsko prepoznavanje tarče in točkovno merjenje. Z uporabo dveh video-teodolitov lahko določimo 3D koordinate točke merskega objekta s prostorskim zunanjim urednikom. Merilni sistem Kern SPACE je imel dva osnovna načina meritev: *ročno* in *avtomatizirano merjenje*. Pri ročnem merjenju so se instrumenti usmerjali s krmilno ročico ali preko tipkovnice računalnika. Za boljšo orientacijo v prostoru so na daljnogled instrumentov dodatno namestili kamere s širokokotnim objektivom. Pri merjenju orientacije so se shranjevali podatki o horizontalnih smereh, vertikalnih kotih in goriščni razdalji kamere. S tem se kasnejše meritve orientacije avtomatsko ponovijo. Izračunane koordinate objekta so se shranile na računalnik. Pri avtomatiziranem načinu merjenja so se instrumenti proti ciljni točki usmerili avtomatsko z vgrajenimi motorji. Zajem in obdelava podatkov je potekala avtomatizirano. Po opravljeni orientaciji sistema je program za obdelavo podatkov izračunal orientacijske parametre. Ko je bil sistem orientiran, se je začelo merjenje koordinat objekta. Za signaliziranje ciljne točke objekta so se uporabljale okrogle odbojne tarče ali projicirane laserske pike. Dosegljiva natančnost merjenja je bila odvisna od merskega volumna in je znašala med 0.05 in 0.2 mm. Hitrost merjenja je bila 8–12 s/točko (Deumlich in sod., 2001).



Slika 2.2: Merilni sistem Kern SPACE ([www.kern-aarau.ch](http://www.kern-aarau.ch))

Za sisteme *tretje generacije* so značilni (Deumlich in sod., 2001):

- motorizirani precizni teodoliti z integrirano CCD kamero – *video-teodoliti*;
- programska oprema za obdelavo zajetih posnetkov pri samodejni določitvi koordinat točk;
- popolnoma avtomatiziran postopek meritev, katerega potek programira uporabnik/operater. Programiranje je odvisno od načina meritev – ročni ali avtomatizirani način.

Po združitvi podjetij Kern in Wild v podjetje Leica so obstoječe sisteme nadomestili novi sistemi z industrijsko specifičnimi senzorji. Začela se je *četrt generacija* teodolitskih merilnih sistemov, ki traja še danes. Temeljni gradnik delovanja je postala enotna platforma programske opreme. Glavne značilnosti tega koncepta so (Deumlich in sod., 2001):

- skupna baza podatkov;
- enoten uporabniški vmesnik;
- različni, medsebojno povezani merilni senzorji;
- enostavna povezava s programsko opremo;
- vmesniki za CAD sisteme in ISO/DIN skladno programsko opremo za obdelavo in vrednotenje rezultatov.

Podjetje Leica je del takšnega koncepta izvedla s sistemom Axyz, ki je na trg prišel leta 1996. S programsko opremo Axyz se je lahko posamezno in/ali skupno uporabljalo različne tehnologije: prostorski zunanji urez (TMS) in merjenje prostorskih polarnih elementov (polarna metoda – laserski sledilnik in elektronski tahimeter) lahko pri zajemanju objekta poljubno kombiniramo.

Na podlagi praktičnih izkušenj pri vsakodnevnih nalogah in tehnološkem razvoju na področju senzorjev ter informacijske tehnologije se ti merilni sistemi konstantno razvijajo.

## 2.2 Fotogrametrični merilni sistemi

Industrijski fotogrametrični merilni sistemi so postali tehnično in ekonomično uspešni sredi 80. let s povečano uporabo optično-elektronskih slikovnih senzorjev za avtomatizirane in visoko natančne 3D meritve. Relativna natančnost predhodnih fotogrametričnih sistemov, ki so temeljili na analognih kamerah velikih formatov, je znašala do 1 : 500 000 glede na velikost merskega objekta (npr. 0.1 mm za objekt dimenzije 15 m).

Napredna računalniška tehnologija je omogočala obdelavo digitalnih podob, še posebej avtomatsko prepoznavanje in zajemanje podob – *digitalna fotogrametrija*. Sprva so se uporabljale standardne videokamere, katerih analogni videosignali so se digitalizirali z ločljivostjo 780 x 580 slikovnih elementov in obdelali v dejanskem času (*video fotogrametrija*).

Prvi uporabni večslikovni fotogrametrični sistemi so na trg prišli v poznih 80. letih (slika 2.3). Precizni avtomatizirani monokomparatorji<sup>2</sup> v kombinaciji z »reseau« kamerami velikega formata so bili razviti za visoko natančne meritve v industrijskih aplikacijah. Analitični ploterji so bili nadgrajeni z videokamerami in tako postali analitični korelatorji, ki so jih uporabljali v avtomobilski industriji (Zeis Indusurf; leta 1987 – sistem za tridimenzionalno merjenje oblik površin z uporabo žičnih modelov).



**Slika 2.3: Mapvision iz leta 1986 (Luhmann in sod, 2006)**

Omejitve videokamer – majhni formati in slaba ločljivost – so vodile v razvoj skenirnih kamer, ki so omogočale zajem statičnih objektov v visoki ločljivosti (do 6000 x 4500 slikovnih elementov). Vzporedno s tem razvojem so bili elektronski teodoliti opremljeni z videokamerami za avtomatski zajem točk (Kern SPACE).

Digitalne kamere visoke ločljivosti, ki omogočajo zajem digitalnih podob brez obdelave analognih signalov, so se na trgu pojavile v začetku 90. let. Ločljivosti digitalnih kamer so se gibale od 1000 x 1000 do preko 4000 x 4000 slikovnih elementov. To je vodilo v občutno širjenje fotogrametričnih sistemov, zlasti v industrijskem okolju. Fotogrametrični sistemi (slika 2.4) se vse bolj uporabljajo kot prenosni sistemi v stacionarnih konfiguracijah. Kodirane tarče omogočajo popolno avtomatizirano prepoznavanje in zajemanje podob. Merjenje površin velikih objektov je postalo možno z razvojem metode vzorčnih projekcij v kombinaciji s fotogrametričnimi tehnikami.

---

<sup>2</sup> Naprava za merjenje razdalj med točkami ali določitev ravninskih koordinat posameznih točk na fotografiji.



Slika 2.4: Industrijski merilni sistem GSI VSTARS (Luhmann in sod., 2006)

Z razpoložljivostjo videokamer in digitalnih kamer v povezavi z direktnim dostopom do podatkov digitalne slike so se pojavili novi koncepti za fotogrametrične aplikacije. Prvi izmed teh konceptov je t. i. »off-line« fotogrametrični sistem, ki ga sestavljajo visokoločljive digitalne SLR kamere s širokokotnimi objektivami, zrcalno odbojnimi tarčami in subpikselsko ločljivostjo snemanja. S tem je lahko operater objekt posnel v nekaj minutah po metodi blokovne izravnave s snopi, ki vključuje tudi samokalibriranje kamer. Najnovejši sistemi podjetij GSI, AICON in GOM so praktično popolnoma avtomatizirani (Luhmann in sod., 2006).

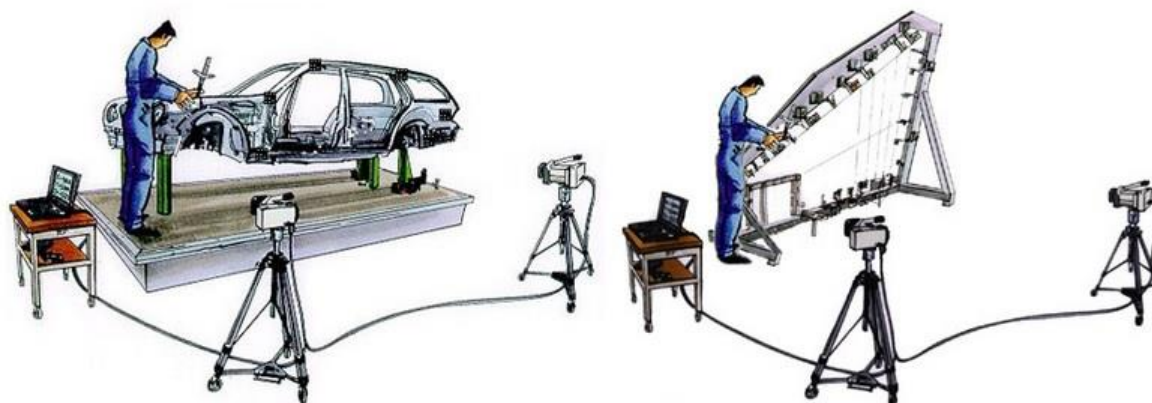
Fotogrametrični »off-line« sistem je okarakteriziran z (Luhmann in sod., 2006):

- fotografiranjem objekta, tj. zajem vsaj dveh slik z eno ali več kamerami,
- naknadno orientacijo niza posnetih slik in istočasno kalibracijo in določitev 3D koordinat točk.

Pridobivanje podatkov (snemanje) se izvaja na območju merskega objekta, medtem ko se obdelava podatkov običajno izvede v pisarni. Dosegljiva natančnost je močno odvisna od konfiguracije meritve (s katerih položajev v prostoru okoli objekta zajamemo podobe) in stabilnosti kamere med zajemom. »Off-line« fotogrametrični sistemi ponujajo najvišjo stopnjo natančnosti. Natančnost merjenja točk na posnetku je v velikosti do 1/50 slikovnega elementa. S tem se običajna natančnost meritev poveča na 0.1 mm (za objekt velikosti 10 m). Absolutna natančnost merjenja dolžine je običajno 2–3-krat manjša (npr. 0.05 mm za objekt velikosti 2 m) kot natančnost koordinat točk objekta, kar izraža relativno natančnost rekonstrukcije 3D oblike (Luhmann in sod., 2006).

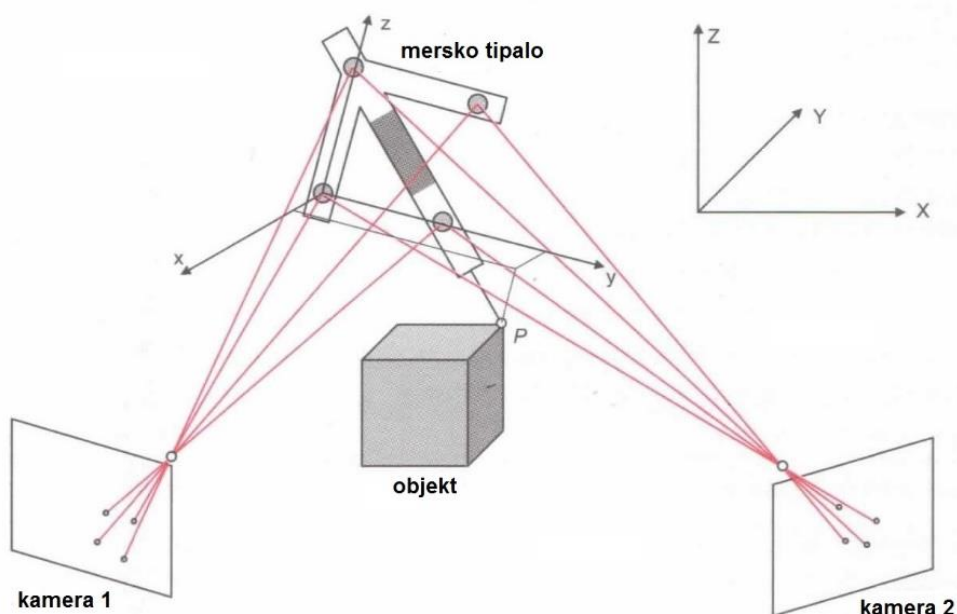
Drugi koncept so t. i. »on-line« fotogrametrični sistemi, ki omogočajo merjenje v dejanskem času in z direktno povezavo z zunanji procesi – obdelavo podatkov in izračunom prostorskih koordinat točk na enem mestu. Takšen sistem običajno sestavljata dve (ali več) kalibrirani in orientirani digitalni kameri, ki opazujeta specifičen merilni objekt (slika 2.5).





**Slika 2.5: Fotografometrični »on-line« merilni sistem (www.foto.hut.fi)**

Ustrezna postavitev merilnih tarč na merskem objektu zagotavlja popolnoma avtomatiziran proces zajema. Informacije o (3D) točkah in površinah so neposredno generirane za kontrolo medsebojno povezanih procesov, kot npr. proizvodna linija ali za postavitev objekta v prostor glede na zunanji referenčni okvir. Pri meritvah se običajno uporablja kontaktno mersko tipalo; prostorski položaj in orientacija znotraj merskega volumna sta določena fotogrametrično v trenutku, ko operater aktivira kamero. S tem se izračunajo položaji referenčnih točk na merskem tipalu glede na vzpostavljen koordinatni sistem. Položaji konice merskega tipala  $P$  in referenčnih točk na merskem tipalu so znani glede na lokalni koordinatni sistem merskega tipala. Tako je možno transformirati koordinate konice tipala  $P$  v vzpostavljen koordinatni sistem (slika 2.6).



**Slika 2.6: Merilni princip fotogrametričnega »on-line« sistema z merilnim tipalom (Luhmann in sod., 2006)**

Delovanje kamere, bliskavice in prenos slik kontrolira računalnik, ki prav tako omogoča obdelavo slik in izračun koordinat. Računalnik se lahko nahaja zunaj (namizni računalnik) ali

znotraj kamere. V slednjem primeru se merjenje koordinat točk izvede neposredno znotraj kamere, tako da je potrebno na računalnik prenesti le majhno število slikovnih koordinat za kasnejšo obdelavo.

Obstajajo različne konfiguracije in aplikacije »on-line« fotogrametričnih sistemov, kot so:

- sistem z dvema kamerama z ročno vodenim merilnim tipalom,
- sistem z dvema kamerama za sledenje dinamičnih procesov, npr. prostorsko gibanje robota,
- večkamerni sistem za opazovanje deformacij.

Natančnost meritev je slabša kot pri »off-line« sistemih (zaradi omejenega števila posnetkov, omejitev, ki se odražajo v neoptimalni kalibraciji in orientaciji kamere in ročnega vodenja merilnih tipal) ter znaša 0.1–0.2 mm pri razdalji do 2 m od objekta. To ustreza relativni natančnosti približno 1 : 10 000 do 1 : 20 000 oziroma natančnosti merjenja posnetka 1  $\mu$ m (Luhmann in sod., 2006).

Za uspešno aplikacijo fotogrametričnih sistemov v industriji potrebujemo številne tehnične komponente, ki oblikujejo učinkovit in ekonomičen sistem (Luhmann, 2010):

- *slikovni senzor*: ločljivost (število slikovnih elementov), razpoložljivi objektiv, hitrost zajema in prenosa podatkov, stabilnost kamere, sinhronizacija itd.;
- *merske tarče in osvetlitev*: označitev pomembnih značilnosti objekta, velikost in oblika tarč, valovne dolžine virov svetlobe, omejitev dostopa do objekta, moč osvetlitve in merilni volumen;
- *konfiguracija sistema*: število postavitvev kamer, želena natančnost meritev, oblika mreže, nadštevilnost, zmožnost samokalibracije, definicija datuma, samokontrola kalibracije in orientacije;
- *slikovna obdelava*: avtomatizirano prepoznavanje merilnih tarč, subpikselsko merjenje centra tarče;
- *3D rekonstrukcija*: metode za določitev 3D koordinat (npr. prostorski zunanji urez, blokovna izravnava) in statistika o pogreških;
- *podatkovni vmesniki*: integracija v CAD/CAM okolja, strojni in podatkovni vmesniki, uporabnikova interakcija.

Trend v fotogrametriji je integracija fotogrametričnih komponent v uporabno usmerjene merilne sisteme. To vključuje tudi povezave do podatkovnih baz, informacijskih sistemov, 3D CAD sistemov, analizo kvalitete in kontrolnih sistemov za proizvodnjo, navigacijskih sistemov za avtonomne robote in vozila.

*Bližnjelikovna fotogrametrija* je danes dobro uveljavljena, kot univerzalna 3D merilna tehnika, ki se spretno uporablja v širši paleti interdisciplinarnih področij. Zaradi nenehnega tehnološkega razvoja na področju digitalnih kamer in informacijskih tehnologij lahko v prihodnosti pričakujemo tudi nadaljnji razvoj fotogrametričnih sistemov.

### 2.3 Koordinatno merilne naprave

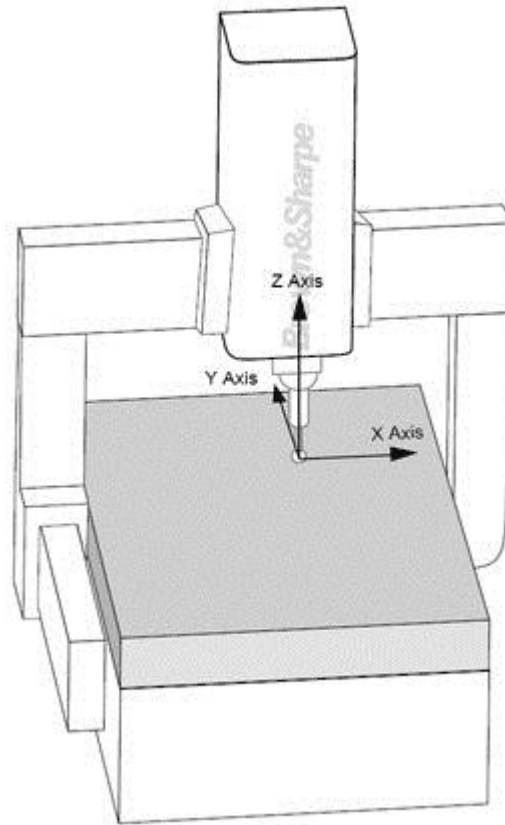
*Koordinatno merilna naprava* (KMN) je naprava za merjenje fizičnih geometrijskih karakteristik objekta. Napravo lahko ročno usmerja operater ali je popolnoma računalniško vodena. Meritve so definirane z merilnim tipalom, ki je nameščeno na napravi. Naprava zajame položaj in orientacijo objekta v prostoru.

KMN se je prvič pojavila leta 1959 v Parizu na mednarodni razstavi strojnih orodij. Napravo je razvilo podjetje Ferranti iz Velike Britanije. Prva KMN z natančnostjo 0.03 mm je bila izdelana za (2D) lociranje lukenj na merskem objektu. Sestavljena je bila iz dveh pravokotno horizontalnih merilnih osi ( $x$  in  $y$ ), vsaka s svojim merilnim sistemom, in mostu, na katerem je bila realizirana vertikalna os. Snemljivo tipalo je bilo nameščeno na vertikalno os in položeno v luknje.

Kasneje je leta 1965 podjetje Sheffield predstavilo svojo linijo KMN z uvedbo tretje (vertikalne) merske osi. To je zagotavljalo razširjeno mersko območje z izboljšano natančnostjo, ki je bila dvakrat večja od prvotnih naprav. Poleg omenjenega so naprave vključevale tudi številne novosti, kot so visoka ločljivost, višinsko nastavljiva merilna miza in povezava s tiskalnikom za izpis rezultatov. V naslednjih letih so se na trgu pojavila številna podjetja iz Evrope, ZDA in Japonske s svojimi različicami KMN.

Hitra rast številnih proizvajalcev KMN se je pojavila v zgodnjih 70. letih z uvedbo na dotik občutljivega merskega tipala podjetja Renishaw. Ta inovativni produkt je povzročil revolucijo v tridimenzionalnem (3D) merjenju koordinat, ki omogoča avtomatsko in natančno merjenje komponent objekta.

Tipična KMN je sestavljena iz treh osi –  $X$ ,  $Y$  in  $Z$  osi, ki so medsebojno ortogonalne v običajnem tridimenzionalnem koordinatnem sistemu (slika 2.7). Vsaka os ima svoj merilni sistem, ki določi njen položaj na merskem objektu. Naprava registrira položaj merskega tipala in uporabi te koordinate posamezne točke za določitev velikosti in položaja z  $\mu\text{m}$  natančnostjo. Mersko tipalo omogoča samodejno merjenje točk na površini objekta z istočasnim in avtomatskim registriranjem 3D položaja točke v prostoru.



**Slika 2.7: Koordinatno merilna naprava (www.brownandsharpe.com)**

KMN je sestavljena iz treh glavnih komponent:

- *glavnega sestava*, ki vključuje tri premikajoče osi (Prvotne KMN so bile narejene iz granita in jekla; danes vsi vodilni proizvajalci KMN gradijo okvire iz aluminijske zlitine in uporabljajo tudi keramiko ter silikonski karbid za povečanje togosti vertikalne osi pri aplikacijah skeniranja.),
- *merskega tipala* (optično ali mehansko) in
- *podatkovnega sistema* – običajno vključuje kontrolno enoto naprave, namizni računalnik in ustrezno programsko opremo.

Čeprav se KMN nenehno razvijajo, so osnovni elementi ostali nespremenjeni. KMN so razvili za natančno merjenje 3D koordinat, ki temeljijo na industrijskih merilnih in proizvodnih tehnikah. So učinkoviti, zelo natančni 3D strojni digitalizatorji, ki uporabljajo enkoderje za zaznavo zasukov in premikov. Ti sistemi so postali pomembno orodje v industriji, ker so zelo natančni. KMN imajo zelo močno povezavo z industrijskimi CAD sistemi, so zmožni avtomatiziranega merjenja in ponovljivih procesov, imajo široko paleto tipalnih senzorjev, ki lahko dosežejo natančnost do nekaj mikrometrov. Ena izmed največjih slabosti KMN je, da so velike in fiksno nameščene. Zaradi tega obstaja meja največjih dimenzij objektov, ki se lahko izmerijo s KMN. Poleg tega je potrebno merilni objekt pripeljati do KMN, kar občutno poveča stroške, še posebej v primeru velikih objektov. Največje KMN lahko izmerijo merske objekte dimenzij do nekaj metrov, z natančnostjo do nekaj mikrometrov. Toda takšni sistemi potrebujejo milijonske investicijske stroške, kontrolirano okolje in velike stroške vzdrževanja sistema.

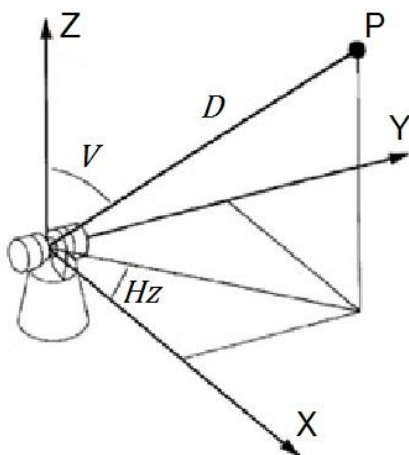
Kot odgovor na zgoraj omenjene slabosti so se v zadnjih desetih letih na trgu pojavile *prenosne koordinatno merilne naprave* (PKMN), ki premagujejo nekaj omejitev fiksno nameščenih KMN. Prenosni sistemi, kot npr. *merilne roke* in *laserski sledilniki*, so fleksibilni, lahki in učinkoviti pri merjenju položaja in orientacije objekta v prostoru. Merilni volumen ni omejen, lahko se poveča z večkratnimi namestitvami naprav znotraj referenčnega koordinatnega sistema. PKMN so bile široko sprejete, še posebej v letalski in avtomobilski industriji, kot zelo fleksibilna in prenosna tehnika, ki je enostavna za uporabo in jo lahko na enostaven način namestimo.

### 3 SODOBNI TRENDI V INDUSTRIJSKI METROLOGIJI

Zahteve po natančnosti postajajo vedno višje tudi pri objektih velikih dimenzij, predvsem v letalski in avtomobilski industriji. V teh primerih konvencionalne KMN pogosto niso ustrezne, saj omogočajo merjenje objektov dimenzije na nekaj metrov natančno. Poleg tega so stacionarno nameščene, tako da je potrebno merilni objekt prinesiti k napravi, kar je še posebej pri večjih objektih zamudno in drago.

Trend v industrijski metrologiji se zato nagiba k uporabi prenosnih koordinatno merilnih naprav. Prenosne naprave v večini primerov temeljijo na optičnem merjenju položaja. Obstaja širok izbor prenosnih optičnih merilnih sistemov za merjenje objektov velikih dimenzij, ki delujejo po različnih principih.

Večina merilnih sistemov temelji na *merjenju ene dolžine in dveh kotov* (slika 3.1). Koordinate so prvotno določene v polarnem koordinatnem sistemu  $(D, Hz, V)$ , ki se lahko transformirajo v prostorske 3D koordinate  $(X, Y, Z)$ . Kota sta merjena z uporabo optičnih enkoderjev. Način merjenja dolžine se pri različnih merilnih sistemih razlikuje in določa tudi končno dosegljivo natančnost sistema.

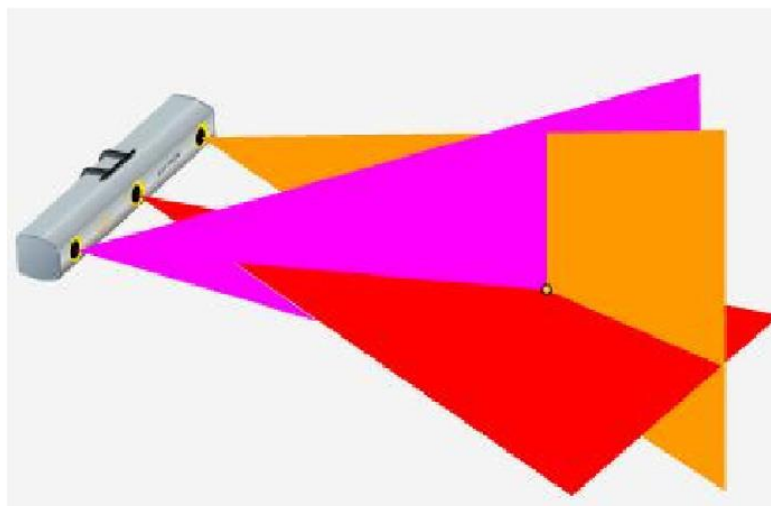


**Slika 3.1: Princip polarnih merilnih sistemov (Cuypers in sod, 2009)**

Najsodobnejši način v industrijski metrologiji (v smislu 3D natančnosti) so *laserski sledilniki*. Laserski sledilniki merijo dolžino na interferenčni IFM in/ali absolutni ADM način. Interferenca referenčnega in merskega žarka določi relativni premik reflektorja, ki je običajno krogelni reflektor. Ker je merjenje premika relativna količina, je potrebno v primeru prekinitve žarka ponovno vrniti reflektor na referenčni položaj (referenčno gnezdo – home point). Za merjenje absolutnih dolžin se uporabljajo ADM laserski sledilniki. Sodobni laserski sledilniki so opremljeni z AIFM sistemom, ki je kombinacija IFM in ADM sledilnikov.

Tehnika *laserski radar* omogoča merjenje dolžin brez uporabe reflektorja. Koherentni laserski radar potrebuje odbojnost signala samo 1 % in omogoča merjenje dolžin direktno na površino objekta. To omogoča skeniranje številnih točk v kratkem času, pri tem načinu kompenzacija geometrije reflektorja ni potrebna.

Namesto merjenja dolžine in dveh kotov lahko s *tremi koti* enolično definiramo položaj točke v prostoru. To tehniko uporabljajo *triangulacijski sistemi na osnovi digitalnih kamer*. Tri linearne CCD kamere opazujejo tarče v prostoru. Vsaka CCD kamera določi en kot oziroma eno ravnino v prostoru, na kateri je tarča. Z uporabo treh kamer je položaj tarče določen glede na tri merjene kote. To lahko vizualiziramo kot presek treh ravnin (slika 3.2).



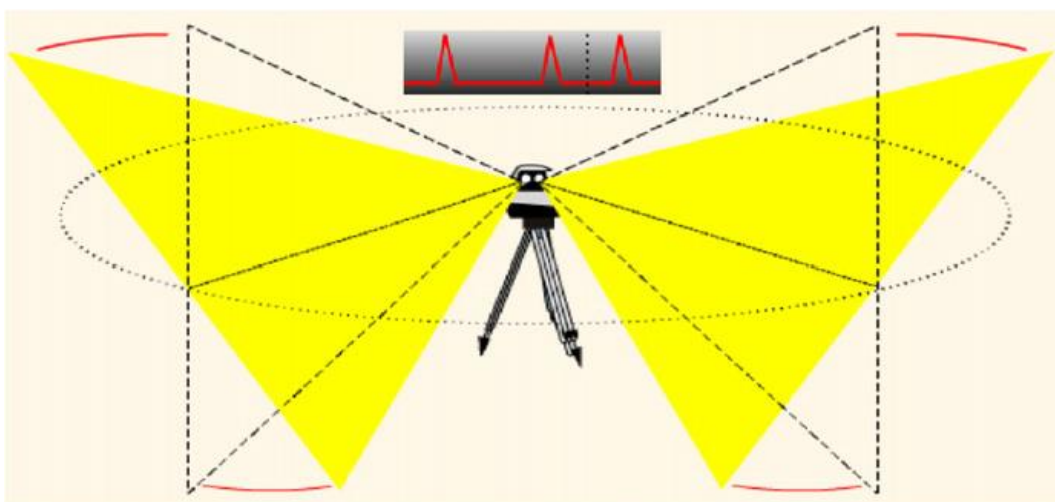
**Slika 3.2: Princip triangulacijskega sistema s tremi linearnimi CCD kamerami (Cuypers in sod, 2009)**

Obstajajo tudi sistemi z dvema matričnima CCD kamerama namesto treh linearno postavljenih. Na ta način se določijo štirje koti namesto treh. Ta nadštevilnost omogoča odkrivanje odstopanj od predhodno kalibriranih položajev kamer. Nekateri izmed teh sistemov delujejo s fiksnimi položaji kamer, drugi uporabljajo premične kamere, ki omogočajo prilagoditev na merilni volumen in ločljivost, odvisno od merske naloge.

Princip merjenja dokaj novega *iGPS sistema* prav tako temelji na merjenju več kotov; toda struktura sistema je popolnoma drugačna (slika 3.3). Komponente iGPS sistema so:

- vsaj dva oddajnika,
- kontrolna enota,
- žični/brezžični senzorji.

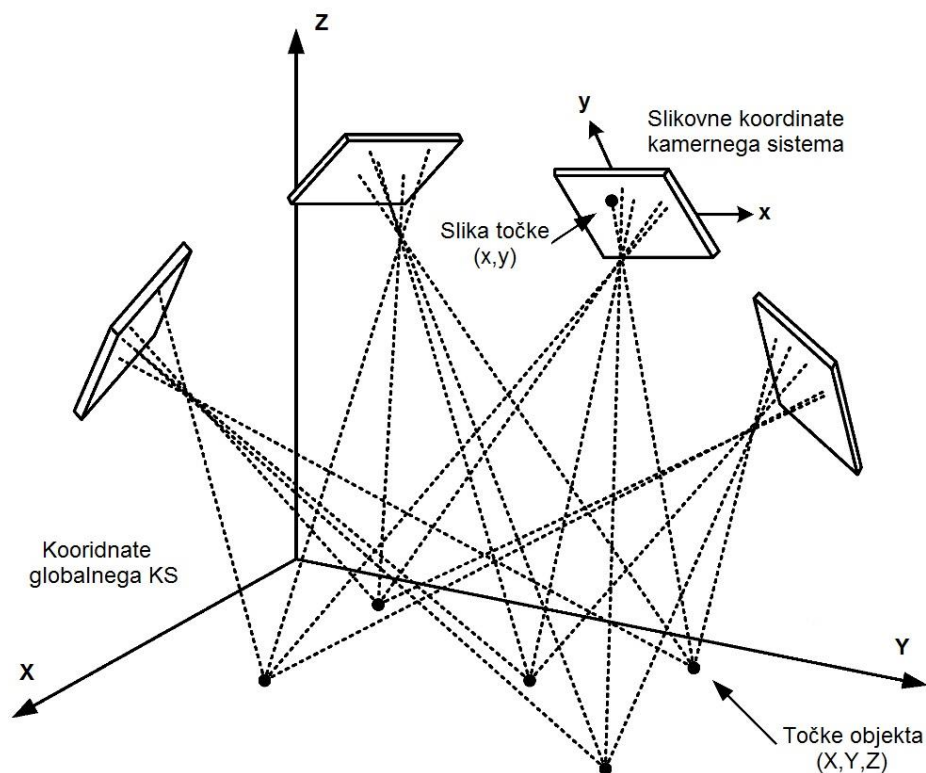
Vsak oddajnik generira dva »vrteča« IR laserska žarka in utripajoč IR LED signal. Ti optični signali se pretvorijo v časovne impulze z uporabo fotodetektorja. Hitrost vrtenja obeh glav oddajnikov je nastavljena na različno vrednost, s tem je signal oddajnika nedvoumno določen. Dodatno se meri kotna hitrost oddajnika, ki se uporabi za pretvorbo časovnih intervalov v kote. Kot je prikazano na sliki 3.3, sta oba »vrteča« laserska žarka nagnjena glede na os vrtenja, običajno za  $\pm 30^\circ$ . Za merjenje horizontalnega kota potrebujemo horizontalni indeks, ki se ustvari z utripajočim IR LED signalom v določeno smer pri vrtenju glave oddajnika.



Slika 3.3: Sistem iGPS (Cuypers in sod, 2009)

Senzorji so pasivni elementi, ki jih namestimo na površino merskega objekta in tako odkrijejo časovni interval med svetlobnimi impulzi. Ko senzor »vidi« vsaj dva oddajnika, se lahko določi njegov položaj v prostoru, ob predpostavki, da so položaji oddajnikov predhodno znani in kalibrirani.

*Fotogrametrija* je tudi tehnika za merjenje velikih dimenzij in dejansko temelji na kotnih merjenjih. Določitev položaja temelji na zajemu različnih 2D posnetkov objekta, na katerem se nahajajo merske tarče (slika 3.4).



Slika 3.4: Princip fotogrametrije ([www.opticalengineering.spiedigitallibrary.org](http://www.opticalengineering.spiedigitallibrary.org))



Bistvena razlika v primerjavi s triangulacijskimi sistemi na osnovi kamer je dejstvo, da položaji kamer niso predhodno kalibrirani. Položaji kamer se izračunajo skupaj s položaji merilnih tarč v blokovni izravnavi. Tehnika fotogrametrije je znana že več desetletij, vendar je šele od uvedbe digitalne fotogrametrije in zmogljivih računalnikov ter visoke stopnje avtomatizacije postala tudi tehnično in ekonomično uspešna.

Poleg omenjenih merilnih sistemov, ki temeljijo na merjenju več kotov, dolžine in dveh kotov, se uporabljajo tudi takšni sistemi, kjer se *meri več dolžin*. Ta pristop se včasih uporablja za premagovanje slabše natančnosti kotnih enkoderjev pri laserskih sledilnikih. Položaj točke je tako določen s konfiguracijo več laserskih sledilnikov ali s samo enim laserskim sledilnikom z različnih položajev (stojišč). Uporabljena je samo (natančna) dolžinska meritev. Ko je dovolj točk merjenih z različnih položajev, je možno izračunati položaje stojišč sledilnikov in položaje merilnih točk (princip trilateracije).

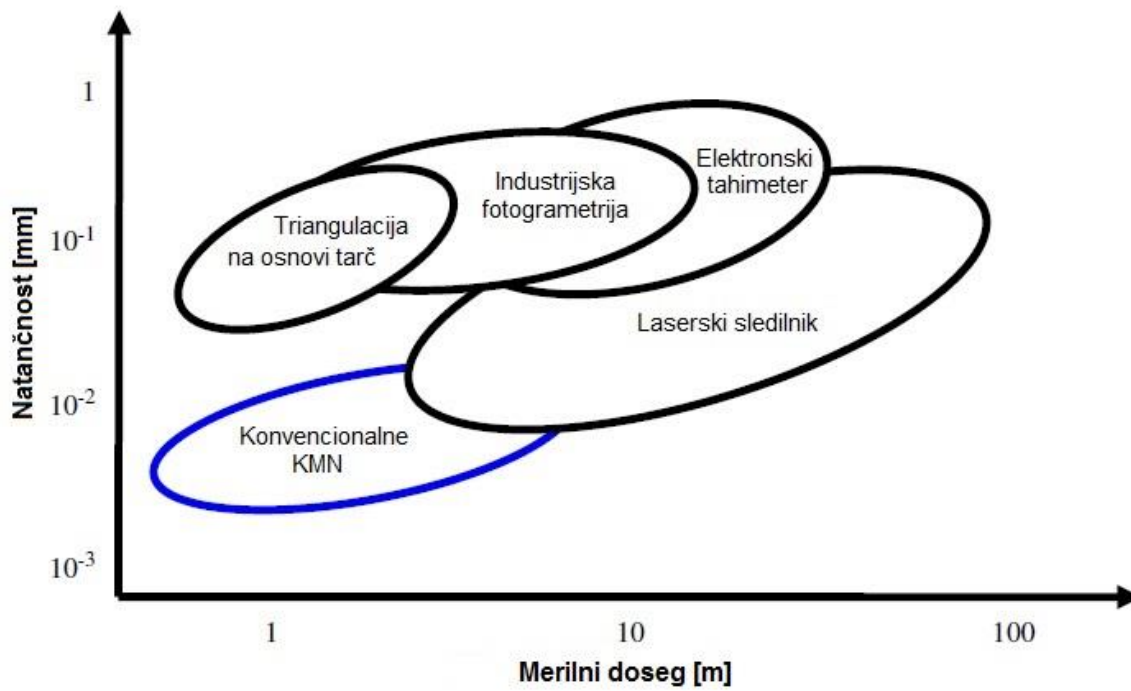
Vsi omenjeni merilni sistemi imajo svoje prednosti in slabosti. Tako je nemogoče določiti en sam najboljši sistem za vse meritve; tudi za eno samo specifično mersko nalogo je težko najti najboljšo možno rešitev. Razen investicijskih stroškov so vsi faktorji, po katerih se odloča o izbiri merilnega sistema, prikazani v preglednici 3.1.

**Preglednica 3.1: Vplivni faktorji pri izbiri merilnega sistema**

<b>ZAHTEVE NALOGE</b>	<b>OMEJITVE MERSKEGA OBJEKTA</b>	<b>OKOLJSKE OMEJITVE</b>
<i>Natančnost</i> <i>Zanesljivost rezultatov</i> <i>Število točk</i> <i>Lokacija točk</i> <i>Število meritev</i> <i>Čas meritev</i>	<i>Dimenzije</i> <i>Material</i> <i>Trdnost</i> <i>Kvaliteta površine</i> <i>Dostopnost</i>	<i>Temperatura</i> <i>Vibracije</i> <i>Meritve znotraj/zunaj</i> <i>Razpoložljiv prostor</i> <i>Turbulenca zraka</i> <i>Svetloba okolice</i> <i>Onesnaženje</i>

Pri izbiri primerne merilnega sistema je tako potrebno jasno določiti *potrebe* (zahteve naloge) in *omejitve* (omejitve merskega objekta in okolja). Pogosti izbirni kriterij za prenosne sisteme pri merjenju objektov velikih dimenzij sta *merilni doseg* in *natančnost* (slika 3.5).

Zadnja leta je opazen občuten napredek na področju združevanja različnih merilnih sistemov. Posamezni merilni sistemi se tako lahko med seboj združijo, npr. fotogrametrične sisteme lahko kombiniramo z drugimi sistemi, kot so sistemi za lasersko sledenje ali skeniranje. Združitve prednosti dveh vrst merilnih senzorjev za tvorbo nove vrste merilnega sistema s povečano funkcionalnostjo ali zmogljivostjo imenujemo *multisenzorski merilni sistem*.



Slika 3.5: Merilni doseg in natančnost prenosnih koordinatno merilnih naprav (Cuypers in sod, 2009)

## 4 TEHNIČNE OSNOVE MULTISENZORSKIH SISTEMOV

### 4.1 Optično merjenje dolžin

Osnovni princip optičnega merjenja dolžin je določitev velikosti dolžine na osnovi izmerjenega časa, v katerem elektromagnetno valovanje prepotuje razdaljo med začetno in končno točko. Na eno krajno točko postavimo instrument, na drugo pa reflektor, ki predstavlja dodatni pribor pri meritvah. Instrument je izvor elektromagnetnega valovanja, ki ga preko oddajne optike instrumenta usmerimo proti reflektorju. Na prizmi reflektorja se elektromagnetni valovi odbijejo in še enkrat prepotujejo merjeno dolžino v obratni smeri ter padejo na sprejemno optiko instrumenta (Kogoj, 2005).

Predpostavimo, da poznamo čas, ko valovanje zapusti instrument, in čas, ko se isto valovanje ponovno vrne v instrument. Čas potovanja valovanja, na osnovi katerega izračunamo dolžino, je enak razliki obeh časov. Instrument ta čas določi direktno ali indirektno s primerjavo *referenčnega* in *merskega signala* oziroma s primerjavo *notranje* in *zunanje* poti elektromagnetnega vala. Ker se v homogenem ozračju elektromagnetno valovanje širi s konstantno hitrostjo, dolžino med točkama A in B izračunamo po enačbi:

$$D = \frac{c\Delta t}{2},$$

kjer je

$D$  - dolžina med točkama,

$c$  - hitrost elektromagnetnega valovanja,

$\Delta t$  - čas, ki ga valovanje potrebuje, da dvakrat prepotuje merjeno dolžino.

Če hočemo torej izračunati dolžino, moramo zelo natančno poznati dve količini, hitrost valovanja  $c$  in čas  $\Delta t$ . Čas je zelo majhen, določiti pa ga je potrebno s primerno visoko natančnostjo. Zaradi velike hitrosti valovanja je to zelo zahtevno. Tehnično je to rešeno tako, da meritev opravimo dvakrat, enkrat z merilnim signalom, ki potuje do končne točke in nazaj, enkrat pa z referenčnim signalom, ki opravi pot znotraj instrumenta (Kogoj, 2005).

Različne tehnične rešitve omogočajo različne načine merjenja dolžin. Poznamo *interferenčni*, *impulzi* in *fazni način merjenja*.

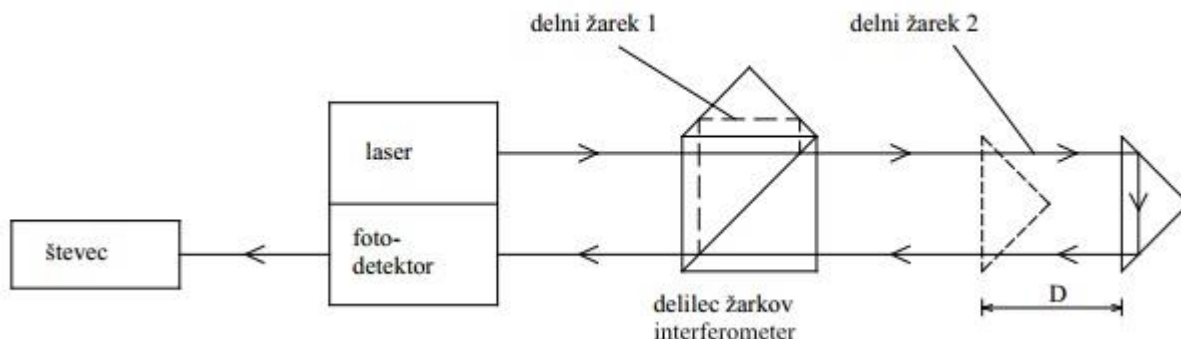
#### 4.1.1 Interferometrija

Laserska interferometrija je že dalj časa uveljavljena metoda za merjenje dolžin z visoko natančnostjo. Uporaba interference svetlobe kot merilnega orodja je bila prvič predstavljena že leta 1880. Čeprav se je tehnologija od tedaj močno razvila, se je ohranil osnovni princip uporabe majhne, stabilne in natančno določene valovne dolžine svetlobe kot merilne enote za dolžino.

Osnovni princip merjenja izkorišča fizikalni pojav interference svetlobe. Interferenca svetlobe je postopek združitve dveh ali več koherentnih<sup>3</sup> valovanj, pri čemer nastane novo valovanje. Pri združitvi dveh koherentnih svetlobnih žarkov nastane interferenčna slika. Obliko interferenčne slike določa fazna razlika med svetlobnima žarkoma. Pri združevanju valovanj z enako fazo se valovni hrbti prvega valovanja ujema z valovnimi hrbti drugega valovanja, zato je skupna amplituda večja (se sešteje). Pravimo, da pride do *konstruktivne interference*. Če pa sta valovanja v protifazi, tj. njuna fazna razlika je enaka  $\pi$ , se amplitudi valovanj med seboj odštejeta in dobimo temo. V tem primeru pravimo, da pride do *destruktivne interference*.

Koherentnost svetlobnih žarkov zagotovimo z laserjem kot izvorom svetlobe in delilnikom žarka. Kot izvor svetlobe se najpogosteje uporablja helij-neonov laser z valovno dolžino 0.632  $\mu\text{m}$ . Na delilniku žarka se laserski žarek deli na dva žarka – *referenčni* in *merilni žarek*. Referenčni žarek ima na fotodetektorju stalno fazo, medtem ko se faza merskega žarka spreminja s spreminjanjem položaja merske prizme. Vsak od njiju potuje po različnih poteh nazaj na delilnik, kjer se ponovno združita (interferenca) in nadaljujeta pot do fotodetektorja. Razlika poti, tj. razlika v dolžini poti, ki sta jo žarka opravila, povzroči fazno razliko med njima. Pri delitvi laserskega žarka je fazna razlika pokazatelj vsega, kar spremeni fazo vzdolž poti obeh žarkov. To je lahko fizična sprememba na sami dolžini poti (npr. premik merske prizme) ali sprememba lomnega količnika vzdolž poti merskega žarka (Kogoj, 2005).

Ta merilni princip se pri merjenju dolžin realizira z *Michelsonovim interferometrom* (slika 4.1).



**Slika 4.1: Delovanje Michelsonovega interferometra (Kogoj, 2005, str. 21)**

Pri premiku merske prizme za vrednost  $\lambda/4$ , se dolžina poti merskega žarka spremeni za vrednost  $\lambda/2$ . Sprememba faze merskega žarka na detektorju je v tem primeru  $\Delta\varphi = \pi$ . Če premaknemo mersko prizmo za četrtno valovne dolžine svetlobe laserskega žarka, se torej spremeni faza merskega žarka na fotodetektorju za  $\pi$ . Ojačitev se spremeni v oslabitev ali obratno. Merjenje dolžine z Michelsonovim interferometrom pomeni štetje ojačitev oziroma oslabitev  $N$  pri premiku merske prizme. Celotna dolžina je enaka

$$D = N \frac{\lambda}{2},$$

<sup>3</sup> Koherentna svetlobna žarka imata enaki frekvenci, valovni dolžini in stalno fazno razliko.

kjer je  $N$  število ojačitev pri interferenci obeh žarkov. Meritev je možna, če je zagotovljen kontinuiran premik merske prizme vzdolž merjene dolžine. Premik mora biti tak, da je referenčna prizma vedno v osi merskega žarka. Med meritvijo ne sme priti do prekinitve žarka (Kogoj, 2005).

Ta enostaven Michelsonov princip interferometra ima pri praktični uporabi dve bistveni pomanjkljivosti. Prva pomanjkljivost je oteženo štetje interferenčnih maksimumov pri turbulenci zraka, druga pa določitev smeri premika merske prizme. Oba problema rešuje *dvofrekvenčni interferometer*. Merjenje dolžin z dvofrekvenčnim interferometrom temelji na merjenju frekvence elektromagnetnega valovanja, ustvarjenega z interferenco svetlobe, in časa. Na osnovi teh izmerjenih vrednosti instrument določi vrednost iskane dolžine (Kogoj, 2005).

Merjenje dolžin z interferometrom je možno le v primeru, ko se merska prizma od začetne do končne točke premika tako, da je ta vedno na osi merskega žarka. Pri prekinitvi merskega žarka se mora meritev ponoviti, tako da se prizma ponovno postavi v začetno točko. Prečno odstopanje osi merskega žarka ne sme presegati milimetrskega območja. Zaradi tega se takšen postopek merjenja dolžin uporablja predvsem za laboratorijske meritve (kalibriranje merilnih instrumentov) ter pri natančnem merjenju premikov in deformacij (Joeckel in sod., 2008).

Zaradi vseh zgoraj omenjenih slabosti interferometrov je njihova uporaba močno omejena. Ena izmed glavnih slabosti oziroma omejitev je zagotoviti kontinuiran premik reflektorja brez prekinitve merskega žarka. V primeru, da ne moremo zagotoviti neprekinjenosti laserskega žarka, je potrebna uporaba postopka absolutnega merjenja dolžin z uporabo laserske interferometrije. Pri *absolutni laserski interferometriji* se reflektor ne premika in tako ne moremo šteti ojačitev (oziroma oslabitev) pri interferenci obeh žarkov. Ob prekinitvi laserskega žarka daje ta absolutni postopek takoj pravilne merske vrednosti, brez ponovnega premikanja reflektorja v referenčno (izhodiščno) lego. Za merjenje absolutnih dolžin z uporabo interferometra se tačas uporabljata dva pristopa.

Prvi pristop je v skladu s principom faznega merjenja dolžin (glej 4.1.3). Slabost tega pristopa na zdajšnji stopnji razvoja je omejena natančnost in potreba po štirih ali več laserskih diodah, če želimo doseči milimetrsko natančnost. Prednost pristopa je absolutno merjenje dolžin z nanometrsko ločljivostjo.

Drugi pristop temelji na linearni frekvenčni modulaciji oziroma Chirp modulaciji (glej 4.1.2). Pri tem pristopu je potrebna linearno nastavljiva laserska dioda. Merilni doseg pri ločljivosti 0.01 mm znaša do 100 m. Omenjena ločljivost je bistveno manjša kot pri »klasični« laserski interferometriji, toda to je dovolj za mnogo aplikacij v industrijski metrologiji (Joeckel in sod., 2008).

#### 4.1.2 Impulzni način

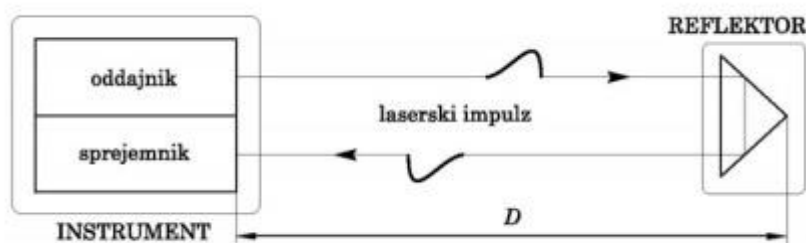
Osnovni princip impulznega načina merjenja dolžin je merjenje časa, ki ga potrebuje svetlobni impulz, da prepotuje razdaljo od instrumenta do reflektorja in nazaj (slika 4.2). Svetlobni impulz, ki ga generira svetilo v instrumentu, je kratek svetlobni sunek pravokotne ali trikotne

oblike. Čas trajanja impulza je približno 10 ns, kar pomeni, da je njegova dolžina približno 3 m (Kogoj, 2005).

Svetlobni impulz zato, da dvakrat prepotuje merjeno pot, potrebuje čas  $\Delta t$ , ki ga instrument direktno izmeri. Ob znani hitrosti svetlobe  $c$  lahko izračunamo dolžino:

$$D = \frac{c\Delta t}{2}.$$

Merjenje časa  $\Delta t$  poteka s pomočjo elektronskega števca. Pri oddaji svetlobnega impulza se del le-tega (referenčni signal) usmeri na sprejemnik in s tem se začne meriti čas. Števec nato šteje tako dolgo, dokler od reflektorja odbiti del impulza (merilni signal) ne prispe nazaj do sprejemnika (takrat se štetje konča).



**Slika 4.2: Princip delovanja impulznega načina merjenja dolžine (Kogoj, 2005, str. 16)**

Drugi postopek merjenja dolžine, ki temelji na impulznem načinu, je postopek z linearno frekvenčno modulacijo (*»Chirp<sup>4</sup>«* modulacija). Tukaj se frekvenca nosilnega valovanja  $f_N$  oziroma impulza linearno spreminja glede na čas (Joeckel in sod., 2008).

Izoblikuje se impulz z veliko dolžino in časom trajanja  $\Delta T$ , ki ima na začetni točki merjenja časa  $t_0$  frekvenco  $f_N$  in na končni točki merjenja časa  $t_K$  frekvenco  $f_K$ . Impulz se od reflektorja odbije in potuje nazaj v instrument. Odhodni (referenčni) in dohodni (merilni) signal pokažeta razliko frekvence  $\Delta f$ . Iz  $\Delta f$  lahko izračunamo čas potovanja impulza  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{\Delta F} \Delta f,$$

kjer so znane vrednosti:

$$\Delta T = t_K - t_0 \text{ in } \Delta F = f_K - f_N. \quad (4.1)$$

Iskana dolžina je torej:

$$D = c \cdot \frac{\Delta t}{2} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta F} \Delta f.$$

<sup>4</sup> Chirp je signal, ki se mu v določenem časovnem intervalu poveča ali zmanjša frekvenca.

Iz enačb (4.1) izrazimo:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta T}$$

in sledi modulirana frekvenca  $f_M$  :

$$f_M = f_N + k \cdot t \text{ (»Chirp-up«) ali}$$
$$f_M = f_K - k \cdot t \text{ (»Chirp-down«), kjer je } t_0 \leq t \leq t_K.$$

Maksimalna izmerljiva dolžina je tako omejena z dolžino impulza:

$$D_{max} = \frac{c}{2} \Delta T.$$

Tako opredeljeno maksimalno dolžino pa v praksi ne moremo izkoriščati. Bližje kot smo tej dolžini, manjše je območje prekrivanja za merjenje razlike frekvenc  $\Delta f$ . Pri času trajanja impulza npr. 1 ms je maksimalna izmerljiva dolžina približno 150 km. Teoretično se lahko tako izvede 1000 posameznih meritev na sekundo (Joeckel in sod., 2008).

Tretji postopek preciznega merjenja dolžine, ki temelji na impulznem načinu, so razvili pri podjetju Leica in se uporablja v AIFM laserskem sledilniku. Z uporabo polarizacijsko modulirane laserske svetlobe za določitev dolžine lahko vsakršna neznana sprememba v stanju polarizacije laserskega žarka povzroči napako. Te napake so običajno zelo majhne, v območju mikrometra. Z uporabo širokopasovnega vira svetlobe, pri katerem je laserska svetloba oddana preko širokega območja valovnih dolžin, lahko te napake občutno zmanjšamo.

Za izračun dolžine potrebujemo tri glavne parametre: *valovno dolžino vira svetlobe*, *hitrost svetlobe* in *modulacijsko frekvenco polarizirane svetlobe*. Najpomembnejši parameter pri ADM sistemih je modulacijska frekvenca, toda za natančno merjenje dolžine moramo analizirati povratno obliko valovanja za določitev minimalne točke (najnižje točke valovanja). Ta fina meritev merskega valovanja je vrsta nihajne meritve, ki skače naprej/nazaj preko minimalne točke valovanja za izračun merjenja srednje vrednosti. Do nedavnega je moral biti reflektor med to fino meritvijo stabilen. Če se je reflektor premaknil, se je spremenila tako oblika valovanja kot tudi minimalna točka.

Potrebujemo torej takšen sistem, da se oblika valovanja ne bi spremenila v primeru premika reflektorja, ampak bi se premikala relativno glede na dolžino premika reflektorja. To pomeni, da dejansko ne potrebujemo stabilnega reflektorja med integracijo, potrebujemo samo zmožnost sledenja njegovega relativnega premika.

To je pripeljalo do združitve ADM sistema in interferometra v absolutni interferometer AIFM. Takoj ko je laserski žarek usmerjen na reflektor, interferometer začne slediti njegovo relativno gibanje. Sistem ADM nato izmeri dolžino in uporabi informacijo interferometra za kompenzacijo premikanja reflektorja med meritvijo.

Merjenje še vedno traja približno 0.2 s, vendar v primerjavi s sistemom ADM ni izgube v natančnosti zaradi premikanja reflektorja. Relativno gibanje reflektorja je znano med celotno meritvijo, tako da so rezultati kljub daljšemu času integracije še vedno znotraj natančnosti sistema ADM (približno 5  $\mu\text{m}$ ). Druga prednost je, da AIFM ne uporablja samo ene meritve v času. Ker ima kot referenco vedno interferometer, lahko opravimo nadštevilne meritve za povečanje natančnosti. Tako je nemogoče posredovati slabe meritve, ki bi posledično vsako nadaljnjo meritev poslabšale.

#### 4.1.3 Fazni način

Postopek merjenja dolžine temelji na modulaciji nosilnega valovanja. Modulacija pomeni združitvev dveh ali več valovanj iste vrste. Pri faznem načinu merjenja dolžine združujemo nosilno in mersko valovanje.

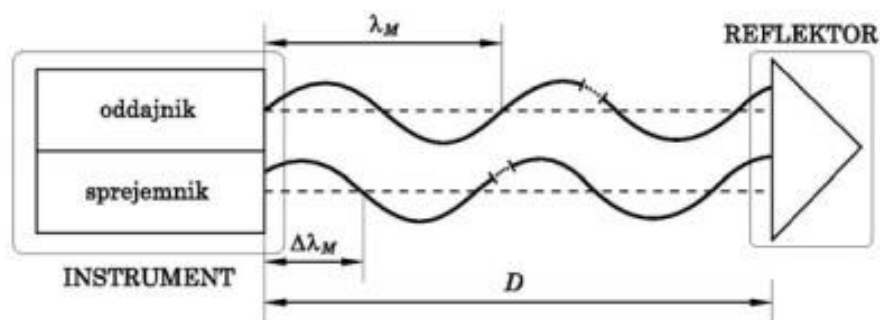
*Nosilno valovanje:* izvor valovanja je svetilo (običajno laserska dioda) zelo visokih frekvenc  $f_N$  ( $\sim 10^5$  GHz). Govorimo o nosilnem valovanju, ki zagotavlja premočrnost razširjenja v atmosferi in predstavlja merilni trak brez nanešene razdelbe. Od lastnosti nosilnega valovanja so odvisni doseg instrumenta, hitrost valovanja in absorpcija svetlobe (Kogoj, 2005).

*Mersko valovanje:* izvor merskega valovanja, s katerim moduliramo nosilno valovanje, je kremenov kristal, ki generira modulacijsko oziroma mersko frekvenco  $f_M$ , ki je občutno nižja od  $f_N$  (15-100 MHz, najnatančnejši do 500 MHz). Modulacijska frekvenca zagotavlja mersko enoto dolžine, katere velikost je odvisna od velikosti modulacijske frekvence (Kogoj, 2005).

Rezultat modulacije je tako modulirano nosilno valovanje oziroma mersko valovanje. Najpomembnejši parameter moduliranega valovanja je tako valovna dolžina moduliranega valovanja  $\lambda_M$ , ki je odvisna od modulacijske frekvence  $f_M$  in hitrosti nosilnega valovanja v sredstvu  $c$ :

$$\lambda_M = \frac{c}{f_M}.$$

Dolžino  $D$  med začetno in končno točko zapišemo v enotah merilnih valovnih dolžin  $\lambda_M$ .



Slika 4.3: Princip delovanja faznega načina merjenja dolžine (Kogoj, 2005, str. 29)



Velja torej:

$$2D = N \cdot \lambda_M + \Delta\lambda_M \text{ oziroma } D = N \frac{\lambda_M}{2} + \frac{\Delta\lambda_M}{2}, \quad (4.2)$$

kjer je  $N$  število polovičnih valovnih dolžin na merjeni poti in  $\Delta\lambda_M$  del modulacijske valovne dolžine. Če označimo:

$$\frac{\lambda_M}{2} = U$$

in

$$\frac{\Delta\lambda_M}{2} = R.$$

Glede na enačbo (4.2) sledi:

$$D = NU + R.$$

Izmeriti dolžino torej pomeni določiti število merilnih enot  $U$  in velikost ostanka  $R$ .

Del modulacijske valovne dolžine  $\Delta\lambda_M$  oziroma ostanek  $R$  se določi se na osnovi merjenja fazne razlike  $\Delta\varphi$  med merilnim in referenčnim žarkom, in sicer:

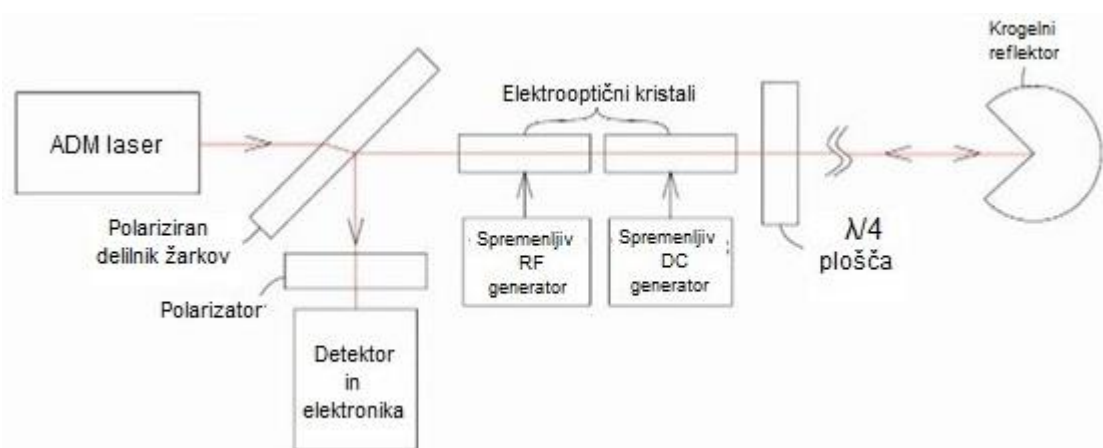
$$\Delta\lambda_M = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda_M.$$

Fazna razlika  $\Delta\varphi$  med merilnim in referenčnim signalom oziroma ostanek  $R$  se določa na več načinov.

Celo število modulacijskih valovnih dolžin oziroma merilnih enot  $U$  se lahko določi samo posredno. Za določitev števila  $N$  je potrebno meriti dolžino z različnimi vrednostmi merilnih enot  $U$  oziroma različnimi modulacijskimi frekvencami  $f_M$ . Te vrednosti modulacijskih frekvenc instrument generira s prekrivanjem frekvenc, ki so običajno večkratniki osnovne frekvence ali z zveznim spreminjanjem modulacijske frekvence (Kogoj, 2005).

Fazni način merjenja dolžine se uporablja v ADM sledilnikih. Podjetje Leica je prvo, ki je v laserski sledilnik vključila ADM sistem. Predstavitev laserskega sledilnika LTD500 leta 1995 je temeljito spremenila njihov način uporabe. V obdobju nekaj let so vsi večji proizvajalci laserskih sledilnikov postavili neko vrsto oblike ADM tehnologije na trg. Nekateri so se preveč posvečali samo hitrosti takšnih sistemov namesto natančnosti. Problem teh »hitrih« sistemov je bil, da se je z njihovo uporabo občutno zmanjšala dosegljiva natančnost laserskega sledilnika. Čeprav so nekateri proizvajalci želeli preusmeriti trg le v izdelavo laserskih sledilnikov z ADM sistemom, so bili primorani obdržati interferenčne laserske sledilnike v svoji ponudbi za uporabo pri nalogah, ki zahtevajo zelo visoko natančnost. Cilj nadaljnjega razvoja je bila izdelava visoko natančnega ADM laserskega sledilnika z zmožnostjo statičnega in dinamičnega merjenja dolžin.

Tehnologija za prvi ADM laserski sledilnik LTD500 je izhajala iz preciznega razdaljemera *Kern ME5000*, ki se je na trgu pojavil leta 1986 (danes ga ne izdelujejo več). Uporabljal se je za merjenje dolžin do 8 km, s tipično natančnostjo 0.2 mm + 0.2 ppm. To je bil najbolj natančen elektronski razdaljemer za merjenje velikih razdalj svojega časa in se ponekod še uporablja za visoko natančna inženirska opazovanja. Danes najdemo posodobljeno različico te naprave v laserskih sledilnikih Leica.



**Slika 4.4: Shema ADM laserskega sledilnika Leica ([www.faro.com/werbinars](http://www.faro.com/werbinars))**

Kot izvor svetlobe služi He-Ne laser z natančno definirano valovno dolžino. Po naravi linearno polariziran laserski žarek potuje mimo polariziranega delilnika žarka in pade na modulator. Kot modulator služi elektrooptični kristal. S pomočjo sintetizatorja se ustvari temperaturno stabilna frekvenca, ki skupaj z modulatorjem spremeni smer polarizacije. Pri dovajanju napetosti na kristal se valovanje deli v dve smeri  $x$  in  $y$ , ki sta pravokotni v smeri širjenja valovanja, z dvema različnima lomnima količnikoma  $n_x$  in  $n_y$  in različnima hitrostma faz.

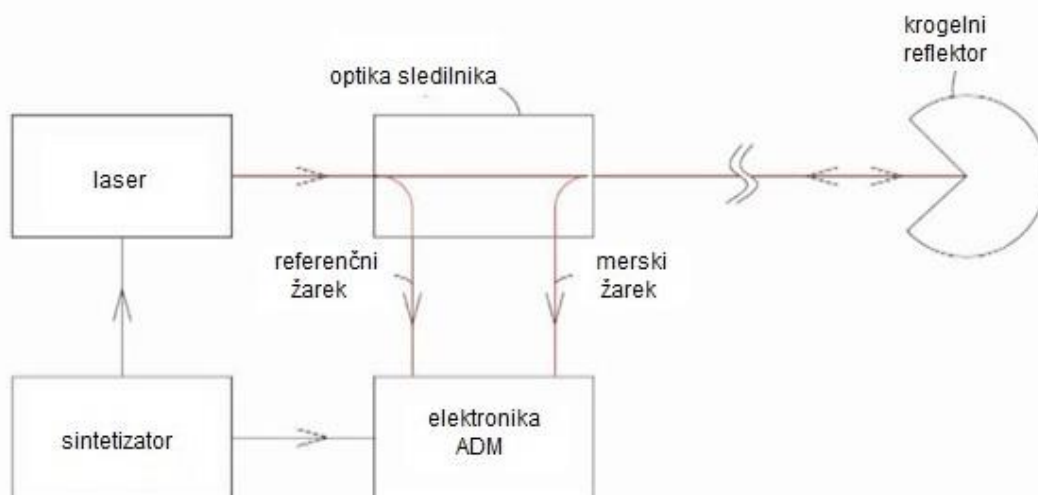
Delitev vektorja žarka v medsebojno pravokotni komponenti (ki se različno hitro širita) daje pri izhodu iz kristala fazno razliko. Rezultat tega je nova smer valovanja, ki je odvisna od velikosti uporabljene modulacijske napetosti. Če je pri seštevanju valovnih dolžin  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  med vhomom in izhodom iz instrumenta razlika točno  $\lambda/2$ , komponenti  $x$  in  $y$  nihata v nasprotnih fazah. Smer valovanja izhodnega laserskega žarka je tako pravokotna na smer valovanja povratnega laserskega žarka.

Zaradi vpliva spremenljivega električnega polja nastane spremenljiva smer valovanja. Nastalo *polarizacijsko modulirano valovanje* ima modulacijsko valovno dolžino  $\lambda_M$ . Modulirani svetlobni žarek potuje skozi oddajno optiko proti reflektorju, kjer se odbije in potuje nazaj proti kristalu, ki sedaj deluje kot demodulator. Če je fazna razlika med izhodnim in povratnim signalom enaka 0, se linearna polarizacija ponovno obnovi v prvotno smer in polarizirani delilnik žarka usmeri žarek na fotodetektor. Ta ničla velja za vse dolžine, ki so večkratniki  $\lambda_M/2$ . V tem primeru se ne meri faze ampak frekvenco, ki se v korakih toliko časa spreminja, dokler fazna razlika ni enaka 0. Z določitvijo ničle je fino merjenje končano; rezultat je ustrezna modulacijska frekvenca  $f_M$  (Joeckel in sod., 2008).

Trije ključni parametri, ki vplivajo na dosego natančnosti, vplivajo tudi na najkrajšo izmerjeno dolžino. To so *modulacijska frekvenca*, *interval frekvence* in *sintetizatorja*. Prvotni precizni razdaljemer Kern ME5000 je deloval z maksimalno frekvenco 510 MHz in intervalom frekvence 20 MHz. Manjši kot je interval frekvence, daljša je najkrajša izmerjena dolžina (z ME5000 je ta dolžina 20 m). Za delovanje te tehnologije v prvotni generaciji ADM laserskih sledilnikov je bila maksimalna modulacijska frekvenca povišana na 900 MHz in interval frekvence zvišan na 150 MHz. Povečanje teh parametrov je kot uporaba boljšega merila za merjenje; višja kot je modulacijska frekvenca in manjša kot je ločljivost sintetizatorja, bolj natančen je rezultat. Prednost takšnega načina merjenja razdalj je, da natančnost frekvenc določi natančnost dolžine.

Modulacijska frekvenca sodobnega ADM laserskega sledilnika je 2.4 GHz z intervalom frekvence 300 MHz (Leica AT402). To zvišanje frekvence, poleg izboljšane sintetizatorja visokih hitrosti, ki omogoča večjo ločljivost korakov frekvence, daje tipično natančnost 10  $\mu\text{m}$  ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ) na območju 80 m.

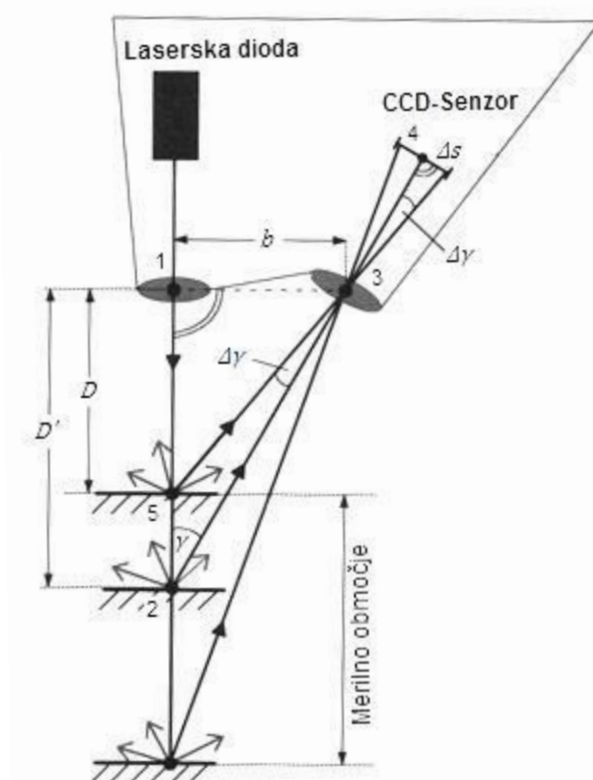
Laserski sledilnik podjetja Faro prav tako uporablja fazni princip merjenja dolžine (slika 4.5). Sintetizator modulira laserski žarek s stabilno frekvenco med 2.5–2.8 GHz. Elektronika izmeri fazno razliko referenčnega in merskega laserskega žarka za določitev dolžine.



Slika 4.5: Shema ADM laserskega sledilnika Faro ([www.faro.com/webinars](http://www.faro.com/webinars))

#### 4.1.4 Merjenje dolžin z lasersko triangulacijo

Postopek merjenja dolžin z uporabo laserske triangulacije se uporablja zlasti v industrijski metrologiji za avtomatsko merjenje razdalj v decimetrskem območju (triangulacijski skenerji). Princip merjenja temelji na enostavnih trigonometričnih povezavah v pravokotnem trikotniku (slika 4.6).



Slika 4.6: Merjenje dolžin z lasersko triangulacijo (Joeckel, 2008, str. 41)

S pomočjo laserske diode in oddajne optike (1) instrumenta se na merskem objektu, ki se nahaja na osnovni razdalji  $D'$ , projicira laserska točka (2). Laserska točka se pod kotom  $\gamma$  preko sprejemne optike (3) instrumenta preslika na sredino linearnega CCD senzorja (4). Glede na znano dolžino baze  $b$  in kota  $\gamma$  med obema optičnima osema 1-2 in 2-3, lahko izračunamo osnovno razdaljo  $D'$ :

$$D' = \frac{b}{\tan \gamma}.$$

Če se laserska točka ne nahaja na osnovni razdalji glede na instrument, se le-ta ne preslika na sredino CCD senzorja. Iz odmika  $\Delta s$  odbitega laserskega žarka glede na sredino senzorja CCD izpeljemo spremembo kota  $\Delta \gamma$  in izračunamo dolžino  $D$ :

$$D = \frac{b}{\tan(\gamma + \Delta \gamma)}.$$

Dolžina CCD senzorja v tem primeru določa mersko območje. Tipično mersko območje je od 1 mm do nekaj decimetrov. Ločljivost je v tem primeru od  $0.5 \mu\text{m}$  do  $50 \mu\text{m}$ , ki je odvisna od ločljivosti CCD senzorja, razdalje do objekta  $D$  in površine merskega objekta (Joeckel, 2008).

## 4.2 Elektronsko merjenje kotov

Pri elektronskem določanju odčitkov na horizontalnem in vertikalnem krogu ločimo dve metodi čitanja, statično in dinamično metodo. Dinamična metoda je svoj vrhunec in zaton doživela z instrumentom Leica T2000 v 80. letih prejšnjega stoletja.

Pri *statični metodi* lahko odčitke na krogih določimo na kodirni ali inkrementalni način.

Pri kodirnem načinu klasično numerično razdelbo zamenja kodirna razdelba. Odčitek na krogih sestavljajo kode, ki so sestavljene iz kodnih linij. Potrebno je definirati mesto čitanja, ki je definirano s položajem niza fotocelic. Fotocelica je kombinacija luminiscenčne diode in fotodiode. Od števila kod je odvisna natančnost odčitkov, število kod pa je odvisno od števila kodnih linij. Za inštrument z natančnostjo 3", bi potrebovali približno 19 kodnih linij, oziroma 400 000 različnih kod, kar pa tehnično ni mogoče izdelati. Zato so se različni proizvajalci posluževali dodatnih interpolacij, s katerimi so dosegli natančnejše odčitke (Kovač, 2006).

Pri inkrementalnem načinu ni možna absolutna določitev, ker na krogu ni kodne razdelbe. Razdelbo na krogih predstavljajo enako široka svetla in temna polja – inkrementi. Definirati je potrebno osnovno enoto – to je interval, ki pomeni kombinacijo svetlo-temnega polja ( $T$ ). Sistem za detekcijo deluje na principu štetja svetlih in temnih polj na krogu s pomočjo svetlobnega izvora, ki je na eni strani kroga in sveti skozi razdelbo na fotodiodo, ki spremlja svetlobni signal. Ta signal se z vrtenjem alhidade sinusno spreminja.

Vsaka perioda sinusne krivulje odgovarja premiku alhidade za eno polje oziroma inkrement. Sinusni signali se pretvorijo v pravokotne, te pa uporabimo kot elektronski števec. Rezultat se lahko prikaže na ekranu ali pa se shrani v pomnilnik (Kovač, 2006).

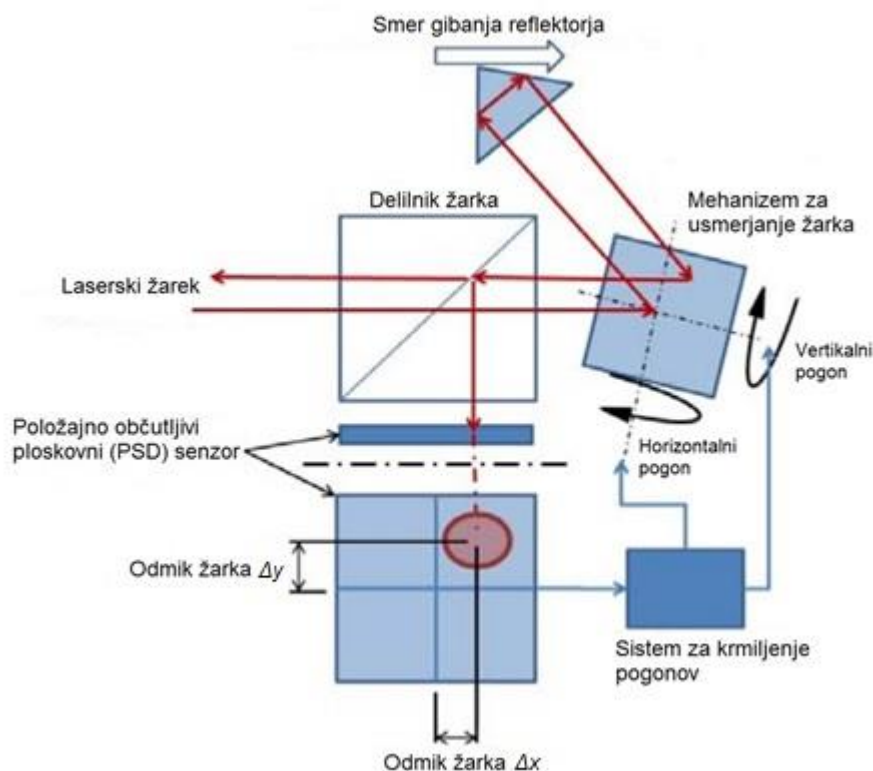
Ker osnovni interval  $T$  ne more biti poljubno majhen (velikost je omejena na okoli 5  $\mu\text{m}$ ), je ločljivost omejena. Na krog s premerom 80 mm lahko namestimo okoli 50 000 osnovnih intervalov oziroma 100 000 svetlih in temnih polj. Velikost intervala je v tem primeru okoli 8 mgon. Za merjenje smeri z večjo natančnostjo je potrebna interpolacija znotraj intervalov.

## 4.3 Sistem za usmerjanje žarka laserskega sledilnika

Sistem za usmerjanje žarka laserskega sledilnika je sestavljen iz pogonov, kotnih enkoderjev, zrcal, nosilcev zrcal in sistema za krmiljenje pogonov.

Laserski žarek potuje preko zrcal (število zrcal in konfiguracija sta odvisna od proizvajalca) do oddajne optike laserskega sledilnika (nameščena sta v glavi sledilnika) in naprej proti reflektorju, kjer se odbije in potuje nazaj v instrument, kjer del žarka pade na pozicijsko občutljivi ploskovni senzor (PSD senzor). PSD senzor je integriran v kontrolno zanko s kotnimi enkoderji in pogoni, ki usmerjajo laserski žarek tako, da je ta vedno v sredini reflektorja. Ko se reflektor giblje v izbrano smer, se žarek premakne iz prvotnega položaja na PSD senzorju – odmik  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ . Ta odmik je preko krmilnega sistema posredovan pogonskemu sistemu, ki pozicionira laserski žarek nazaj v center reflektorja (in posledično v sredino PSD senzorja). Zaradi optičnih lastnosti laserskega žarka pri oddaljevanju reflektorja vedno manj svetlobe

(žarka) pade nazaj na PSD senzor. Posledično zaradi tega na daljših razdaljah PSD senzor ne deluje, ker ne zazna več položaja reflektorja.



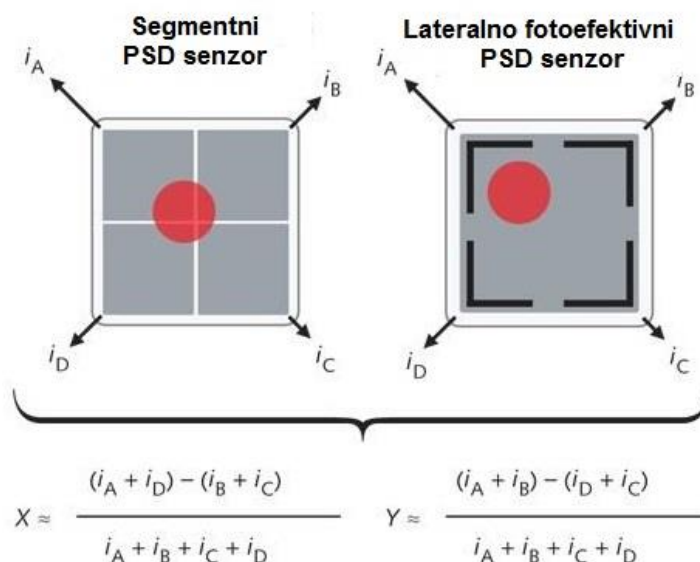
Slika 4.7: Sistem za usmerjanje laserskega žarka

*Elektromagnetni pogon* direktno pretvori električno energijo v mehanično premikanje. Za takšne pogone je značilna maksimalna hitrost in pospešek z nanometrsko ločljivostjo in izredno majhno porabo energije. Vsak pogon je sestavljen iz para diametralno nameščenih magnetov, ki natančno pozicionirajo keramični cilindrični obroč, nameščen na osi alhidade.

*Položajni občutljivi ploskovni (PSD) senzor* je običajno silicijeva fotodioda, ki se uporablja za optično zaznavanje položaja. Sestavljena je iz uporovne plasti, ki je pritrjena na silicijevo podlago, in elektrod, nameščenih na robovih uporovne plasti, kjer se meri fotonapetost. Fotonapetost se ustvari kot rezultat fotoefekta, njena velikost je relativna glede na razdaljo od elektrode do središča žarka na aktivni površini sensorja. Velikost oziroma moč fotonapetosti se običajno ojači in pretvori tako, da tvori uporaben podatek za krmilni sistem.

Poznamo tudi druge senzorje za optično zaznavanje položaja (CCD in CMOS senzorja), vendar je PSD senzor s svojo nanometrsko ločljivostjo, izredno hitrim odzivnim časom, relativno enostavnim vezjem in visoko zanesljivostjo najbolj primeren za uporabo v laserskih sledilnikih. PSD senzorje delimo na dve vrsti – segmentne PSD in lateralno fotoefektivne PSD. Segmentni PSD senzor je sestavljen iz štirih segmentov, ki so med seboj ločeni z majhnim presledkom – imenuje se »dead region« (mrtvo območje). PSD deluje tako, da meri fotonapetost vsakega segmenta. Ko laserski žarek pade točno v središče PSD sensorja, je vrednost fotonapetosti na vseh segmentih enaka. Ločljivost segmentnega PSD sensorja je neodvisna od razmerja med signalom in šumom, kar omogoča zaznavanje zelo šibke svetlobe.

Slabost te vrste PSD senzorja je v zahtevah za nemoteno delovanje senzorja – žarek mora neprestano pokrivati vse štiri segmente, imeti mora enotno intenzivnost in premer žarka mora biti večji od velikosti mrtvega območja. V primeru, da žarek pade samo na zgornja dva segmenta, lahko določimo samo položaj v x smeri. Te omejitve segmentnih PSD senzorjev vplivajo na velikost območja sledenja tarče, ki v tem primeru postane majhno in ozko.



Slika 4.8: Vrste PSD senzorjev ([www.laserfocusworld.com](http://www.laserfocusworld.com))

*Lateralno fotoefektivni PSD senzor* je sestavljen iz enega samega elementa PSD, zato nima mrtvih območij. Položaj žarka je izračunan iz podatka fotonapetosti čez celotno aktivno površino senzorja. Prednost lateralno fotoefektivnih PSD senzorjev je, da imajo zelo širok dinamični razpon in da intenzivnost žarka ne vpliva na merjenje oziroma določanje položaja. Glavni slabosti senzorja sta cena in ločljivost, ki je pri tej vrsti odvisna od razmerja med signalom in šumom.

#### 4.4 Merske tarče

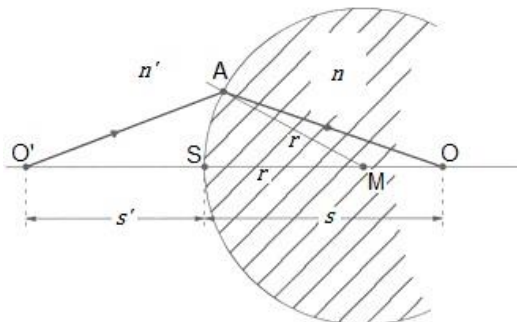
Tarče laserskih sledilnikov so kompleksne mehanske strukture žlahtnih kovin, visoko zmogljivih lepil, precizne optike in skoraj popolne geometrije. Osnovna naloga tarče je odboj laserskega žarka z največjo intenziteto brez deformacije žarka pri odboju.

V praksi je težko ohraniti zahtevane strukturne tolerance in proizvodne procese za konstantno proizvodnjo teh optično-mehanskih sistemov. Pomembno je, da uporabniki laserskih sledilnikov poznajo različne tehnične lastnosti tarč in vedo, kako njihova odstopanja lahko prispevajo k slabemu delovanju laserskih sledilnikov oziroma pogreškom v meritvah.

V nadaljevanju so opisane najpogostejše oblike merskih tarč laserskih sledilnikov: krogelni reflektor (angl. *SMR*), mačje oko (angl. *cateye*), ponovljivostna (angl. *repeatability*) tarča in površinsko-točkovna tarča (angl. *surface reflector/retro probe*).

#### 4.4.1 Krogelni reflektor

S krogelnim reflektorjem dosežemo, da sta vpadni in odbiti merski žarek vedno vzporedna. Pri lomu svetlobnega žarka na površini krogle z radijem  $r$  velja razmerje (slika 4.9):



Slika 4.9: Lom žarka pri krogelnem reflektorju (Joeckel, 2008, str. 85)

$$n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right).$$

Vzemimo, da je vpadni žarek v točki A vzporeden z osjo S-O (slika), tako da gre  $s'$  proti neskončnosti. Za  $n' = 1$  velja:

$$\frac{1}{r} = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right).$$

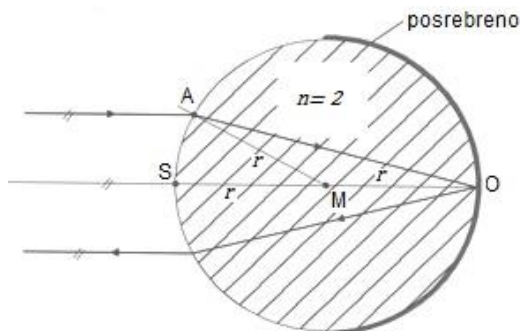
Izpeljemo  $s$ :

$$s = \frac{n \cdot r}{n - 1}.$$

Če bi proizvajalcem uspelo izdelati krogelni reflektor iz materiala z lomnim količnikom  $n = 2$ , bi veljalo:

$$s = 2 \cdot r,$$

točka O leži na krogli z radijem  $r$  (slika 4.9a).



Slika 4.9a: Lom žarka pri krogelnem reflektorju (Joeckel, 2008, str. 85)

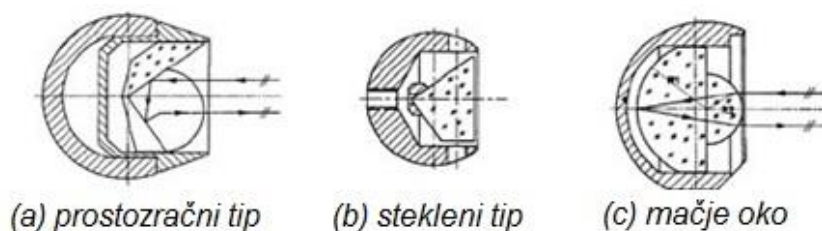


V primeru, da je polovica krogle zrcalna, pride do popolnega odboja svetlobnega žarka, ki je simetričen glede na navidezno os S-O, tako da je vpadni žarek vzporeden odbitemu žarku.

Krogelni reflektor je standardna tarča za merjenje z laserskim sledilnikom. Najbolj precizne aplikacije si prizadevajo za vsak  $\mu\text{m}$  natančnosti, tako da je izdelava vsakega posameznega elementa krogelnega reflektorja izrednega pomena. Najbolj natančni modeli krogelnih reflektorjev zahtevajo najbolj precizna in kvalitetna krogelna ohišja s skoraj popolno geometrijo in optiko ter so zgrajena s procesi, ki dovoljujejo odstopanja v območju  $\mu\text{m}$ . Ti vrhunski optično-mehanski predmeti so kalibrirani z visoko zmogljivimi instrumenti v temperaturno kontroliranih prostorih za potrditev kriterijev izdelave. Skupaj z modernimi laserskimi sledilniki, neverjetno natančnostjo in dosegom so kos najbolj zahtevnim inženirskim nalogam v različnih aplikacijah. Zaradi pomembnosti krogelnih reflektorjev in njihovem prispevku k natančnosti laserskih sledilnikov je najboljši laserski sledilnik na svetu toliko natančen, kot je natančen krogelni reflektor, ki se uporablja.

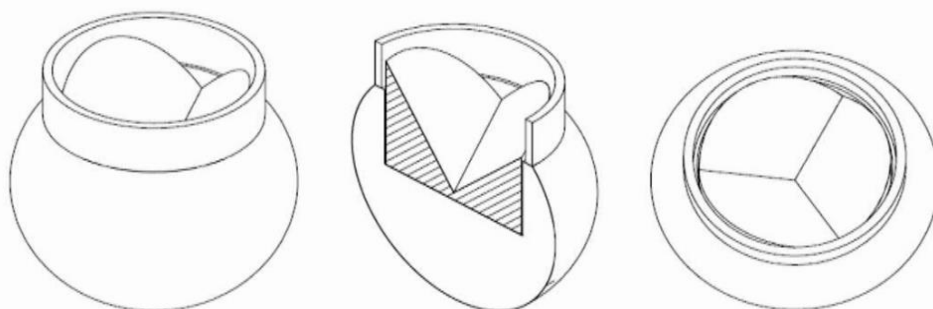
Od krogelnih reflektorjev se pričakuje, da so precizni in vzdržljivi. To zagotavlja nerjaveče jeklo, iz katerega je sestavljeno ohišje tarče. To ohišje varuje optiko pred poškodbami. Uporabljene so različne zlitine nerjavečega jekla za uravnoteženje magnetских lastnosti glede na odpornost proti koroziji. Nerjaveča jeklena krogla lahko prispeva merski negotovosti v primeru, če premer krogle ni natančno določen ali če se krogla obrabi in se na površini pojavijo sploščena mesta. S poznavanjem zgradbe krogelnega reflektorja pridobimo potrebno osnovno znanje za razumevanje, kako različne lastnosti reflektorjev lahko vplivajo na zmožnost laserskega sledilnika pri sledenju in merjenju točk.

Ločimo tri osnovne tipe krogelnih reflektorjev (slika 4.10), ki se med seboj razlikujejo glede na izdelavo odbojnega dela krogelnega reflektorja (prizme).



**Slika 4.10: Osnovni tipi krogelnih reflektorjev (Estler in sod.)**

V praksi je najbolj pogost prosto-zračni tip (angl. *open air*), ker merski žarek ne potuje skozi steklo – ni pogoškov zaradi refrakcije merskega žarka (a). Slika 4.11 prikazuje zgradbo krogelnega reflektorja. Zgrajen je iz treh medsebojno pravokotnih zrcal (oblika robu kocke), kar pomeni, da se vpadni laserski žarek na vseh treh zrcalih lomi tako, da je smer povratnega laserskega žarka vzporedna vpadnemu laserskemu žarku. Te medsebojno ortogonalne stranice so prevlečene z zlatom ali srebrom (visoka odbojnost).



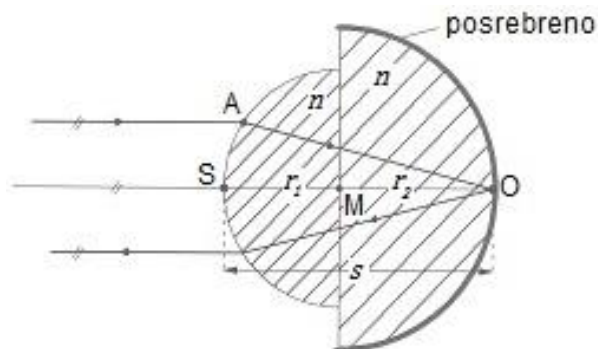
**Slika 4.11: Zgradba krogelnega reflektorja (www.faro.com)**

Drugi tip (b) krogelnega reflektorja je stekleni (angl. *glass*). V tem primeru se v kroglo vstavi steklena prizma (podobno kot pri klasičnih reflektorjih elektronskih razdaljemero). Takšen tip reflektorja je relativno enostavno proizvajati, tako da so posledično stroški izdelave majhni. Pri vsakem prehodu svetlobe skozi steklo so prisotni pogreški zaradi ukrivljanja le-te. Zaradi tega nekateri proizvajalci ponujajo podaljšan obroč, ki zmanjša vpadni kot laserskega žarka (kontrola pogreškov). Stekleni krogelni reflektorji so po velikosti večinoma majhni.



**Slika 4.12: Krogelni reflektor (www.faro.com)**

Tretji tip krogelnega reflektorja (c) – »mačje oko« – je poseben krogelni reflektor, oblikovan za aplikacije, pri katerih so veliki vpadni koti laserskih žarkov. Običajna oblika teh najbolj redkih in najdražjih tarč je sestavljena iz dveh steklenih polkrogel z različnima polmeroma in identičnima lomnima količnikoma. Prednja polkrogla je manjša in lomi laserski žarek proti središču krogle. Laserski žarek preide nato v večjo, zadnjo polkroglo, kjer se reducira na zelo majhno točko na zadnji strani krogle. Od tu se žarek odbije in potuje nazaj preko obeh polkrogel, kjer izstopi kot svetlobni žarek, ki je vzporeden vpadnemu žarku in potuje nazaj proti laserskemu sledilniku.



Slika 4.13: Zgradba mačjega očesa (Joeckel, 2008)

Posebna krogelna geometrija tarče omogoča velikosti vpadnega kota žarka do  $120^\circ$ , kar je dvakrat več od običajnih krogelnih reflektorjev. Pomembno pozornost pri izbiri tarče zahtevajo valovne dolžine laserskih žarkov, ki jih odda sledilnik. Podobno kot prizma, ki deli vidno svetlobo v barve mavrice, mačje oko deli odbiti žarek glede na valovno dolžino. Pri nekaterih ADM laserskih sledilnikih je valovna dolžina toliko različna od valovne dolžine IFM sledilnikov, da je lom žarka vzdolž druge optične poti skozi polkrogli tarče in je odboj žarka stran od laserskega sledilnika, tako da sistem ADM ne izmeri dolžine. Številne lastnosti so pri oblikovanju in konstrukciji tarče kritične. Če tarča ni zgrajena pravilno, lahko to povzroči merske pogoške pri ekstremnih vrednostih vpadnih kotov. Najpogostejši vzrok pogoškov je striženje laserskega žarka na robovih tarče. Vzroki ostalih pogoškov so lahko odstopanja pri proizvodnji tarč, kjer obe polkrogli nista ustrezno centrirani. Posledica tega je, da prerez povratnega laserskega žarka ni okrogle, temveč pravokotne oblike. Druga odstopanja laserskega žarka lahko povzročajo neenakomerne vezne plasti ali deli steklene površine, ki niso krogelne oblike.



Slika 4.14: Mačje oko (www.faro.com)

Lastnosti krogelnega reflektorja:

- neodvisno od smeri vpadnega laserskega žarka (rob, sredina reflektorja itd.) bo celotna dolžina, ki jo laserski žarek prepotuje (tja in nazaj), popolnoma enaka,
- točka, kjer se zrcala stikajo, je točno v centru krogelnega ohišja, zato je razdalja med centrom krogle do merjene površine ne glede na način postavitve reflektorja vedno enaka (konstanta krogelnega reflektorja).

#### 4.4.2 Ponovljivostna tarča

*Tarče ponovljivosti* in krogelni reflektorji uporabljajo enako geometrijsko obliko za odboj laserskih žarkov. Odločilna razlika med njima je ta, da je središčna točka krogelnega reflektorja nameščena točno v sredino krogelnega ohišja. Reflektor pri tarčah ponovljivosti pa ni nameščen v sredino ohišja. Takšne tarče se običajno uporabljajo v večjih količinah za opazovanje sprememb ali premika objekta v določenem času. S temi merjenji se raziskujejo temperaturni vplivi, mehanične deformacije objekta pod obremenitvijo, spremembe dimenzij objekta pri redni uporabi in številni drugi parametri objekta v različnih aplikacijah. V teh primerih je potrebna le relativna sprememba koordinat – tarče se uporabljajo le za določitev ponovljivih vrednosti v statičnem položaju, ne absolutnih vrednosti koordinat.



Slika 4.15: Ponovljivostne tarče (www.faro.com)

Številni proizvajalci ponujajo različne vrste ponovljivostnih tarč za različne aplikacije. Stroški izdelave tarč so manjši zaradi manjše zahtevane natančnosti pri namestitvi reflektorja v ohišje tarče. Kljub temu mora reflektor odbiti laserski žarek enake kvalitete in intenzitete kot ostale tarče. Tako ohišje kot reflektor se lahko razlikujejo glede na proizvajalca. Ohišje je lahko krogelne oblike ali valjaste oblike z zaokroženim koncem.

#### 4.4.3 Površinsko-točkovna tarča

Če je krogelni reflektor nameščen v posebnem ohišju, mora biti glede na namen nameščen tako, da središčna os ohišja poteka skozi točko središčno točko reflektorja. Takšno obliko merske tarče imenujemo *površinsko-točkovna tarča*. Prednost takšne oblike je zajem katerih koli točk na površini merskega objekta, tudi težko dostopnih. Velika prednost površinskih tarč je veliko večje območje za vpadanje merskega žarka kot pri običajnih reflektorji.



Slika 4.16: Površinsko-točkovna tarča ([www.faro.com](http://www.faro.com))

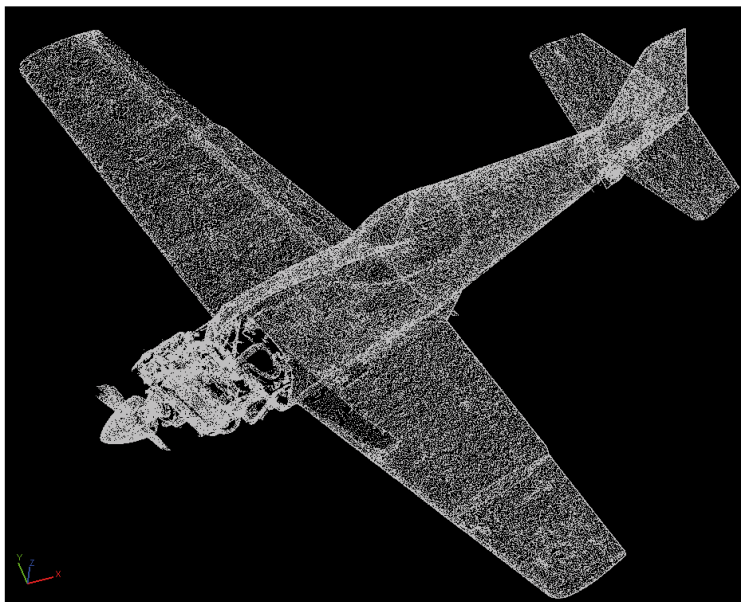
#### 4.5 Lasersko skeniranje

Lasersko skeniranje je metoda za digitalizacijo večjih objektov ali območij. Osnovni princip je merjenje odklona laserskega žarka pri vrtenju ali rotiranju zrcal, odboja laserskega žarka od površine objekta in sprejema odbitega laserskega žarka. Pogoj za uspešno skeniranje je, da skenirana površina zrcalno odbija lasersko svetlobo.

Lasersko skeniranje realiziramo z laserskimi skenerji. Laserski skener zajame objekt na osnovi odčitkov laserskega žarka v mrežo točk z izbrano gostoto. Skenerji zabeležijo 3D koordinate številnih točk na površini objekta v relativno kratkem času. Laserski žarek je projiciran na površino objekta. Učinek skeniranja je dosežen z uporabo različnih tehničnih rešitev za odklanjanja laserskega žarka (ločimo okenske, hibridne in sferne oziroma panoramske skenerje). Pri zasuku smeri laserskega žarka se tako registrira in shrani njegova prostorska usmerjenost kot horizontalni in vertikalni kot ter poševna razdalja do želene točke glede na koordinatni sistem instrumenta. Na ta način pridobimo prostorske vektorje z začetkom v instrumentu in koncem v točkah, ki predstavljajo površino skeniranega objekta v obliki 3D koordinat točk mreže. Pomembna je visoka natančnost določitve kotov, saj koti skupaj z razdaljo merjenja določajo lokacijo odbite točke. Za določitev prostorskih koordinat točk tako potrebujemo podatek o odklonskem kotu sistema za odklanjanje ter poševni razdalji med laserskim skenerjem in merjeno točko objekta.

Rezultat laserskega skeniranja je oblak točk (angl. »point cloud«), ki se lahko z ustrežno programsko opremo obdela in predstavi na računalniku. Med procesom skeniranja se samostojno obnavlja in tako omogoča spremljanje poteka skeniranja. Vse točke imajo prostorske (3D) koordinate v koordinatnem sistemu skenerja z izhodiščem v njegovem centru. Rezultat skeniranja večjih objektov je več skenogramov, ki jih je potrebno v fazi obdelave združiti v enoten 3D model. Skenogrami se združujejo na osnovi najmanj treh identičnih veznih točk, ki so predhodno označene s posebnimi tarčami. V primeru, da želimo skenirane točke v oblaku podati v koordinatah državnega koordinatnega sistema, uporabimo t. i. oslonilne točke,

ki imajo koordinate tako v lokalnem koordinatnem sistemu skenerja, kakor tudi v državnem koordinatnem sistemu. Oslonilne točke se določijo s klasičnimi geodetskimi metodami in nam služijo za transformacijo med lokalnim in globalnim referenčnim sistemom.



Slika 4.17: Primer skeniranja letala ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))

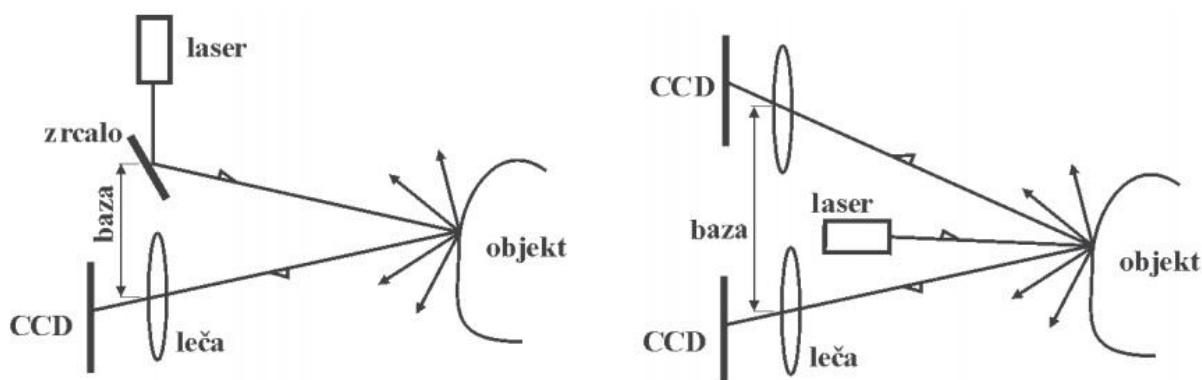
Lasersko skeniranje se je uveljavilo kot zanesljiva metoda posebej na področju industrije, grafičnega oblikovanja in medicine. Metoda je uporabna tudi na področju inženirstva tako za snemanje zgradb, spomenikov, votlin ter arheoloških predelov, kakor tudi za topografske načrte in izmere v industriji.

#### 4.5.1 Triangulacijski skenerji

Triangulacijski 3D laserski skener je aktivna, brezkontaktna naprava, ki na osnovi laserskega žarka pridobiva prostorske podatke o skeniranem objektu. Triangulacijski skenerji se od drugih skenerjev razlikujejo po načinu merjenja razdalje. Razdaljo med skenerjem in objektom se meri posredno s pomočjo triangulacije (glej 4.1.4).

Poznamo dve tehnični rešitvi triangulacijskih skenerjev – triangulacijski skener z eno ali dvema CCD kamerama (slika 4.17).

*Triangulacijski skener z eno CCD kamero* sestavlja oddajnik laserske svetlobe in CCD kamera, ki zaznava lasersko piko ali linijo na objektu. Razdalja med oddajnikom in CCD kamero je znana in jo imenujemo baza (vrednost pridobimo iz kalibracije skenerja). Triangulacijski skenerji z eno CCD kamero se uporabljajo predvsem pri bližnjem skeniranju objektov (razdalje do objekta so majhne).

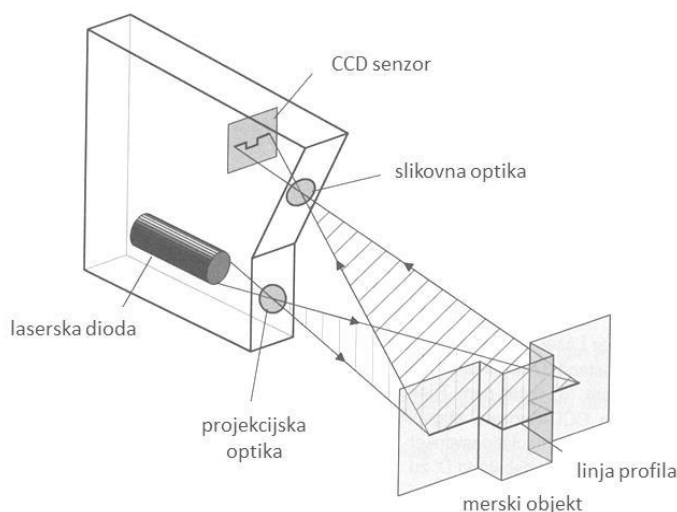


**Slika 4.17: Skener z eno (levo) ali dvema (desno) CCD kamerama (Mozetič, 2004, str. 354)**

*Triangulacijski skener z dvema CCD kamerama* je sestavljen iz oddajnika laserske svetlobe in dveh CCD kamer, ki sta med seboj oddaljeni za znano dolžino – bazo. Tu gre za uporabo dveh CCD kamer, ki sta nameščeni vsaka na svoji strani baze. Geometrijska rešitev je enaka kakor v principu z eno kamero, zato so tudi rezultati enake natančnosti. Vse naprave, ki uporabljajo dvojno kamero, ne omogočajo visoke gostote točk, vse tudi ne dosežejo 3D koordinat v realnem času. Če je zagotovljena visoka gostota točk ter obdelava v realnem času, so ti instrumenti alternativa za več kakor le naprave za skeniranje ter utegnejo biti cenjeni tudi za praktične zahteve.

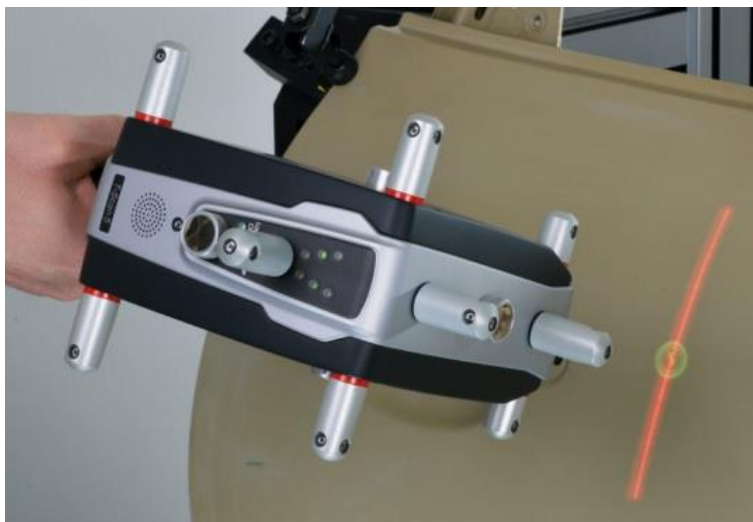
Triangulacijski skenerji dosegajo natančnost določitve prostorskega položaja točke boljše od milimetra pri razdaljah krajših od dveh metrov. Natančnost je odvisna od dolžine baze skenerja, oddaljenosti med objektom in skenerjem ter se zmanjšuje s kvadratom oddaljenosti objekta od baze skenerja. Zaradi visoke natančnosti in kratkega dosega se triangulacijski skenerji uporabljajo predvsem v industriji, npr. v strojništvu, medicini, avtomobilski in letalski industriji ter pri grafičnem oblikovanju in modeliranju.

Novejši triangulacijski skenerji so lahki, prenosni in omogočajo skeniranje objekta v njihovem naravnem okolju – *ročni linijski triangulacijski skenerji*. Pred oddajno optiko skenerja je nameščeno vrtljivo zrcalo, ki laserski žarek razširi v obliki »pahljače« pod določenim kotom, ki se ves čas spreminja, medtem ko je dolžina med oddajno optiko in sprejemno optiko skenerja (*baza*) znana in se pridobi iz podatkov kalibriranja. Med potekom skeniranja se kot spreminja, njegovo vrednost poznamo, saj podatke o tem pridobiva računalnik. Na površino merskega objekta se nato projicira laserska linija, ki se preslika na slikovno ravnino CCD kamere in njena vrednost registrira (slika 4.18). Dolžino do površja objekta računalnik izračuna na podlagi dolžine baze in znanega kota ter točke odboja, ki jo registrira CCD kamera (glej 4.1.4).



**Slika 4.18: Princip delovanja linijskega triangulacijskega skenerja (Joeckel, 2008)**

Programska oprema omogoča združevanje skenogramov skoraj istočasno z zajemom, kar omogoča hitro pridobivanje podatkov. Podatke gibajočega ročnega skenerja tako pridobimo, če je določen položaj skenerja v prostoru. Ta položaj lahko določimo z uporabo referenčnih točk na skenirani površini (običajno lepljive odbojne tarče) ali z uporabo zunanje metode sledenja. Metoda zunanje sledenja je pogosto v obliki laserskega sledilnika (za določitev položaja skenerja) z integrirano kamero (za določitev orientacije skenerja). Druga možnost zunanje določitve položaja je uporaba metode fotogrametrije, tj. z uporabo treh ali več kamer, ki zagotovijo položaj in orientacijo skenerja v prostoru. Obe metodi uporabljata infrardeče LED diode, ki so pritrjene na ročni skener. Podatke zbira računalnik, zapišejo se kot podatkovne točke znotraj 3D prostora. Ročni laserski skener lahko te podatke združi za izdelavo 3D modela. Z uporabo prenosnega ali namiznega računalnika lahko zajamemo dovolj podatkov, da programska oprema izdela 3D model objekta. Ta model lahko nato neposredno primerjamo s CAD modelom objekta. Poleg preverjanja kvalitete izdelave in dimenzij, lahko preverimo tudi posamezne točke na objektu v smislu odstopanja od nominalnih točk na CAD modelu.



**Slika 4.19: Primer ročnega skenerja Leica T-Scan5 v multisenzorskem merilnem sistemu ([www.hexagonmetrology.us](http://www.hexagonmetrology.us))**



## 4.6 Videogrametrija

*Videogrametrija* (uporabljata se tudi izraza digitalna fotogrametrija in bližnjelikovna fotogrametrija) je merilna tehnika, pri kateri se tridimenzionalne koordinate točk na merskem objektu določijo na osnovi merjenj, opravljenih iz dveh ali več videoposnetkov. Posnetke lahko pridobimo iz dveh kamer, ki hkrati snemata objekt, ali ene kamere, ki zajame več zaporednih posnetkov. Osnovni princip delovanja je podoben principu fotogrametrije (glej 2.2), le da namesto digitalnih fotoposnetkov obdelujemo videoposnetke.

V zadnjih desetih letih se je videogrametrija uveljavila kot zelo popularno merilno orodje za industrijske aplikacije. Z razvojem programske in strojne opreme se je občutno izboljšal doseg tehnologije. Zaradi izboljšav programske opreme za obdelavo digitalnih posnetkov, kodirnih tarč in avtokorelacijskih metod je veliko število merskih nalog postalo popolnoma avtomatizirano. Takoj po zajemu digitalne podobe je običajno potreben samo en »klik« za pridobitev tridimenzionalnih koordinat merjenih točk. Posledica razvoja strojne opreme pa je pripeljala do »inteligentne« kamere. Inteligentna kamera ima integriran računalnik in tako takoj obdela zajete posnetke. Posnetke pridobimo z digitalnimi kamerami z visoko hitrostjo zajema, tj. videokamerami ali visoko hitrostnimi kamerami. Videokamere se uporabljajo v različnih aplikacijah fotogrametričnih »on-line« sistemov, npr. stereo navigacija in usmerjanje robotov. Visoko hitrostne digitalne kamere so običajno opremljene s CMOS senzorjem, ki omogoča hiter dostop do podatkov, programsko nastavljivo vidno polje in izjemno kratek čas osvetlitve. Običajne visoko hitrostne kamere omogočajo zajem posnetkov s 1500 x 1000 slikovnimi elementi in hitrostjo zajema 1000 Hz (danes so na trgu že na voljo kamere s hitrostjo zajema več kot 2000 Hz).

V primeru multisenzorskih merilnih sistemov videogrametrija rešuje problem relativne in absolutne orientacije merilnega senzorja v prostoru (ročnega skenerja, merilnega tipala ...) na osnovi oslonilnih točk. Tu se v dejanskem času zajema kontrolne točke merilnega senzorja, ki imajo določene lokalne koordinate, ter se jih transformira v enoten prostorski koordinatni sistem.

## 5 ENOTE MULTISENZORSKIH MERILNIH SISTEMOV

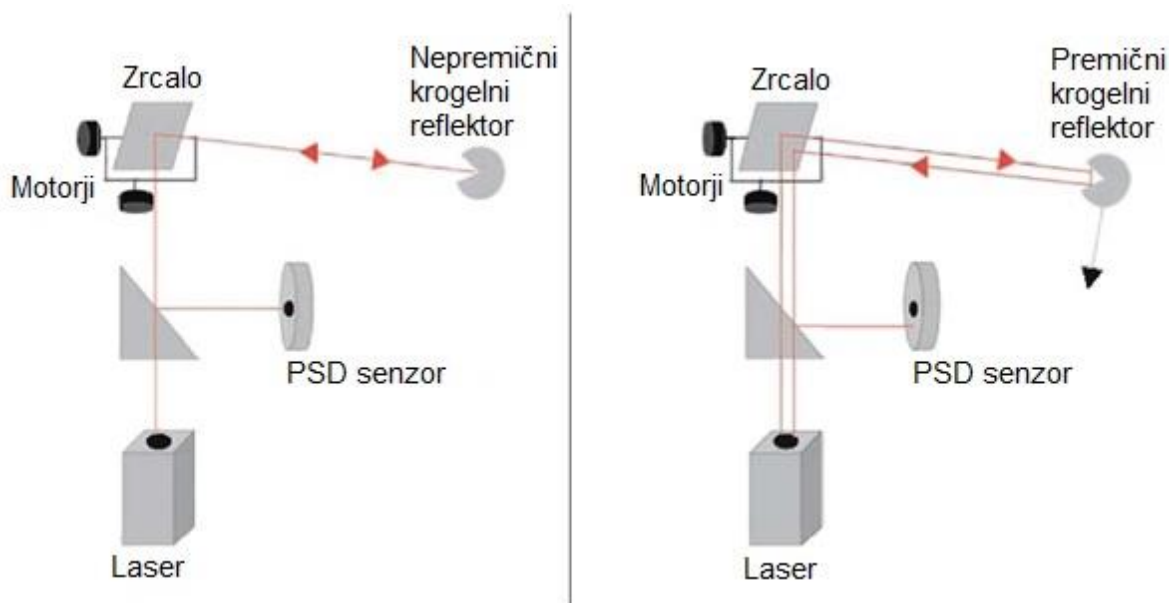
### 5.1 Laserski sledilnik

*Laserski sledilnik* je prenosna koordinatno merilna naprava, ki se uporablja za visoko natančne meritve objektov. Delovanje laserskega sledilnika temelji na principu elektronskega tahimetra – iz prostorske dolžine in dveh smeri (kotov) dobimo polarne 3D koordinate, ki jih kontrolna enota instrumenta pretvori v kartezične koordinate XYZ. Laserski sledilnik lahko opravlja statična in/ali dinamična merjenja, medtem ko tradicionalne koordinatno merilne naprave lahko opravljajo le statične meritve.

Tehnologija laserskih sledilnikov je prisotna že več kot 20 let. Različni proizvajalci trdijo, da so izumitelji te tehnologije, vendar je bila v osnovni obliki razvita s strani ZDA v času hladne vojne za sledenje in sestrelitev orožij z neba. Ko se je hladna vojna končala, je bila tehnologija prenesena v industrijsko okolje. Zgodnji laserski sledilniki so bili zelo dragi, njihova postavitve in kalibriranje pa dolgotrajno.

Danes so laserski sledilniki industrijski standard za merjenje v avtomobilski in letalski industriji, proizvodnji električne energije (vetrne elektrarne), strojništvu in drugih industrijah, ki zahtevajo visoke natančnosti.

Odločilna prednost tehnologije laserskega sledilnika je zmožnost sledenja hitro premikajoče merske tarče in merjenje položaja le-te med samim sledenjem. Princip sledenja je prikazan na sliki 5.1. Laserski žarek potuje proti reflektorju, se odbije in potuje nazaj proti instrumentu. Del povratnega laserskega žarka se na delilniku žarka usmeri na PSD senzor (senzor za avtomatsko sledenje).



Slika 5.1: Princip sledenja (Dold, 2004, str. 41)

V primeru, da je reflektor med meritvijo nepremičen, povratni laserski žarek pade točno na sredino PSD senzorja (*idealni položaj povratnega žarka*). To pomeni, da laserski žarek pade točno v sredino krogelnega reflektorja. V primeru, da je reflektor med meritvijo premičen, pa povratni laserski žarek ne pade na sredino senzorja (*dejanski položaj žarka*). PSD senzor to informacijo o oddaljenosti od središča senzorja uporabi za usmerjanje motorjev laserskega sledilnika v sredino krogelnega reflektorja. Zaradi krogelne oblike reflektorja je center vedno na stalni oddaljenosti glede na merjeno površino, tako da lahko pridobimo koordinate površin ali točk.

Pogosto je potrebno premakniti sledilnik na drugo lokacijo za zajem vseh podatkov, ki so pomembni za natančen opis objekta. Ustrezen način za doseg tega je, da si na objektu izberemo vsaj tri referenčne točke, ki so vidne z vseh stojišč laserskega sledilnika. Pri vsakem premiku instrumenta ponovno izmerimo referenčne točke. Z zadostno količino pridobljenih podatkov se le-ti lahko nato avtomatsko transformirajo v enoten lokalni koordinatni sistem.

Zaradi izvedbe meritev z minimalnimi predhodnimi pripravami so sledilniki med najbolj vsestranskimi koordinatno merilnimi instrumenti. Programska oprema laserskega sledilnika analizira pridobljene podatke in rezultate predstavi v uporabni obliki. Laserski sledilniki tako postajajo vse bolj popularni, še posebej pri proizvodnji velikih komponent, kjer se uporabljajo pri vseh fazah proizvodnega procesa.

Na trgu trenutno najdemo tri ponudnike laserskih sledilnikov: *Leica*, *Faro* in *API*. Vsi instrumenti so si v osnovi podobni, razlikujejo se le po načinu usmerjanja laserskega žarka in metodi merjenja dolžine.

### **5.1.1 Vrste laserskih sledilnikov**

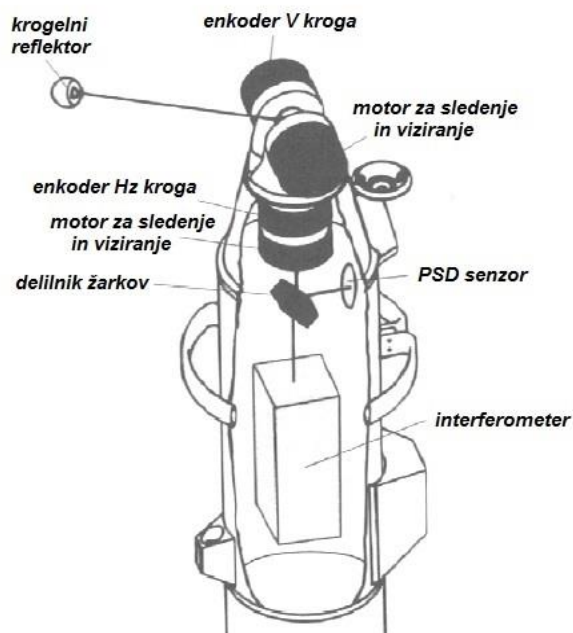
Laserske sledilnike delimo na različne načine glede na doseg, natančnost itd. Osnovna delitev laserskih sledilnikov pa se nanaša na princip merjenja dolžine med laserskim sledilnikom in tarčo. Glede na vrsto sistema za merjenje dolžine ločimo:

- IFM sledilnik,
- ADM sledilnik,
- AIFM sledilnik.

V nadaljevanju so opisani vsi trije različni tipi laserskih sledilnikov.

#### **5.1.1.1 IFM sledilnik**

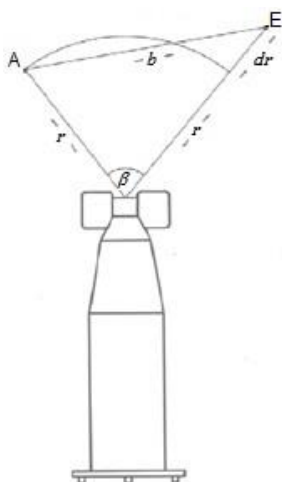
Ena izmed glavnih prednosti interferometra je, da omogoča najnatančnejši način merjenja dolžin. Vendar pa je postopek merjenja mogoč le v primeru, da je zagotovljen kontinuiran premik reflektorja ter da med meritvijo ne pride do prekinitve laserskega žarka. Reševanje teh omejitev je pripeljalo do laserskih sledilnikov. Prvi laserski sledilniki so za merjenje dolžin uporabljali interferometre – *interferometrični (IFM) laserski sledilniki*. Z njimi merimo relativne dolžine.



Slika 5.2: IFM laserski sledilnik (Joeckel, 2008, str. 314)

Princip merjenja dolžin z interferometrom že poznamo (glej 4.1.1), zato bom v nadaljevanju opisal njihovo realizacijo v laserskem sledilniku.

Izvor svetlobe je He-Ne laser s stabilno frekvenco, ki se razdeli na dva delna žarka (*referenčni* in *merilni žarek*). Referenčni žarek potuje direktno do interferometra (opravi pot znotraj instrumenta). Drugi, merilni žarek, pa potuje preko oddajne optike instrumenta do reflektorja, kjer se odbije in vrne nazaj v interferometer. Merilni žarek se proti reflektorju usmeri z uporabo motorjev za sledenje in viziranje ter PSD senzorja. Znotraj interferometra se oba delna žarka združita in nastane interferenčna slika. Posledica tega je ciklična sprememba vsakič, ko se reflektor približuje ali oddaljuje od laserskega sledilnika za dolžino, ki je enaka  $\lambda/4$ . Števec v instrumentu meri te spremembe (ojačitve/slabitve) za določitev dolžine.



Slika 5.3: Merjenje relativnih dolžin (Joeckel, 2008, str. 315)

Slika 5.3 prikazuje princip merjenja relativnih dolžin. Pri premiku reflektorja s točke A proti točki E se izmeri premik  $dr$ . Z uporabo kotnih enkoderjev se iz dveh vertikalnih ( $V_A, V_E$ ) in horizontalnih ( $H_{Z_A}, H_{Z_E}$ ) smeri določi prostorski kot  $\beta$ . Polarni dolžini  $r$  in  $r + dr$  sprva nista znani. Izračun dolžine  $r$  je možen na več načinov. Eden izmed načinov je, da se dolžina  $r$  izračuna s pomočjo referenčne dolžine oziroma baze. Če je dolžina baze  $b$  med točkama A in E znana, lahko z uporabo kosinusnega stavka in danih podatkov ( $\beta, dr$ ) izpeljemo enačbo za izračun dolžine:

$$r = \sqrt{\frac{dr^2}{4} + \frac{b^2 - dr^2}{2(1 - \cos \beta)} - \frac{dr}{2}}$$

kjer je:

$$\cos \beta = \cos V_A * \cos V_E + \sin V_A * \sin V_E * \cos(H_{Z_E} - H_{Z_A}).$$

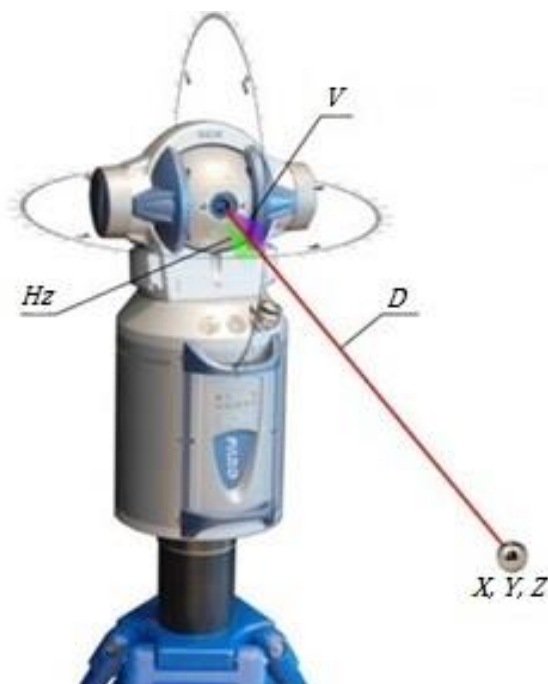
Iz podatkov o dolžini in vrednosti horizontalnega ter vertikalnega kota lahko izračunamo koordinate točke E:

$$\begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + (r + dr) \begin{bmatrix} \sin(H_{Z_E} - H_{Z_A}) \sin V_E \\ \cos(H_{Z_E} - H_{Z_A}) \sin V_E \\ \cos V_E \end{bmatrix}.$$

V tipičnem postopku meritve operater najprej položi krogelni reflektor na referenčno lego laserskega sledilnika (»home point«), katere dolžina je znana (»home distance«). Tako je interferometer nastavljen in lahko pričnemo z merjenjem. Medtem ko operater premika krogelni reflektor na želeni položaj, instrument sledi centru krogelnega reflektorja in izvaja meritve. Ta postopek deluje le v primeru, da ne pride do prekinitve optične poti laserskega žarka v prostor. V tem primeru instrument opozori operaterja, da je prišlo do napake. Operater mora nato ponovno položiti reflektor na referenčno lego in ponoviti postopek nastavitve interferometra. Predvsem ta pomanjkljivosti je bila glavni razlog za nadaljnji razvoj laserskih sledilnikov. Ta razvoj je pripeljal do laserskih sledilnikov, ki imajo poleg interferometra tudi visoko natančni sistem za merjenje absolutnih dolžin (ADM).

### 5.1.1.2 ADM sledilnik

Sistem za absolutno merjenje dolžin (ADM) se je v laserskih sledilnikih prvič pojavil sredi 90. let. Takrat so bile takšne meritve dolžin še prepočasne, da bi dovoljevale dinamična merjenja (npr. skeniranje površin). Zaradi tega so vsi zgodnji laserski sledilniki vsebovali ali samo interferometer ali pa kombinacijo interferometra in ADM sistema. Danes so ADM laserski sledilniki dovolj hitri in imajo zanemarljivo izgubo natančnosti. Zaradi tega nekateri moderni laserski sledilniki vsebujejo le sistem ADM brez interferometra.



Slika 5.4: Absolutno merjenje dolžin z laserskim sledilnikom ([www.faro.com](http://www.faro.com))

Prednost absolutnega merjenja dolžin je sposobnost usmeritve laserskega žarka na reflektor in takojšnja izmera dolžine (t. i. »point and shoot« način). ADM sistem avtomatsko izmeri dolžino, tudi če pride do prekinitve laserskega žarka. IR laserski žarek se odbije od reflektorja in ponovno vstopi v instrument, kjer se pretvori v električni signal. Elektronsko vezje analizira signal za določitev časa potovanja žarka od instrumenta do reflektorja in nazaj ( $\Delta t$ ). Z množenjem te vrednosti z vrednostjo hitrosti svetlobe ( $c$ ) določimo absolutno dolžino med instrumentom in reflektorjem ( $D$ ):

$$D = \frac{c\Delta t}{2}.$$

Iz podatkov o dolžini in vrednosti horizontalnega ter vertikalnega kota lahko izračunamo koordinate točke:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \sin Hz \sin V \\ \cos Hz \sin V \\ \cos V \end{bmatrix}.$$

### 5.1.1.3 AIFM sledilnik

Absolutni interferometer (AIFM) združuje najboljše s področja tehnologije ADM in interferometrov. Zagotavlja vodilno rešitev za večletni problem z uporabo izpopolnjene tehnologije. Obe tehnologiji sta (ločeno) v laserskih sledilnikih v uporabi več kot desetletje. Ti tehnologiji sta bili izpopolnjeni in združeni za izdelavo absolutnega interferometra, ki predstavlja najbolj natančno in stabilno enoto za dinamično merjenje na trgu.

ADM laserski sledilniki dolžino določijo z visoko natančnostjo, toda tudi najhitrejši ADM sistem ne bo nikoli dosegel hitrosti in natančnosti interferometra za dinamična merjenja. Pri vseh ADM sistemih je potrebno upoštevati integracijski čas – čas potreben za izvedbo meritve, ki določi položaj reflektorja (podobno kot čas odprtja zaklopke pri fotoaparatih - daljši kot je čas osvetlitve, težje je dobiti jasen posnetek hitro premikajočega objekta). Enako je pri integracijskem času, daljši kot je, večja je verjetnost prisotnosti napak v meritvi premikajočega objekta. Ker interferometer meri relativne dolžine, je vrednost takoj znana. Prav ta omejitev sistema ADM je pripeljal do razvoja absolutnega interferometra, ki meri absolutne dolžine premikajočega reflektorja brez izgube v natančnosti zaradi nestabilnosti reflektorja med integracijo.

### 5.1.2 Natančnost laserskih sledilnikov

Natančnost je termin, ki ga lahko opišemo kot bližino skladnosti med merjeno in pravo vrednostjo količine, ki jo merimo. V realnosti prava vrednost merjene količine nikoli ne bo znana. Zaradi tega je v primerih, kadar je potrebna visoka zanesljivost merjene količine, velik poudarek na zagotovitvi optimalne natančnosti merskega instrumenta.

Laserski sledilniki se uporabljajo v primerih, ko je zahteva po zmogljivosti merskega sistema najvišja. Eden izmed razlogov zakaj so se laserski sledilniki razvili v visoko natančne merske instrumente, je njihova izrazita sposobnost natančnega merjenja dolžin. Sposobnost merjenja dolžin pa sama po sebi ni dovolj za določitev koordinat. Za doseg tega je laserski sledilnik v svoji osnovni obliki opremljen s sistemom za merjenje kotov, kar omogoča hkratno obdelavo obeh vrst meritev za izračun potrebnih koordinat. V želji po izpolnitvi vedno večjih zahtev uporabnika mora biti poudarek na natančnosti obeh vrst meritev.

Leta 2007 je ameriško združenje strojnih inženirjev ASME (angl. American Society of Mechanical Engineers) objavilo standard *ASME B89.4.19-2006*. Predstavitev standarda ASME B89.4.19 je pomagala ponudnikom laserskih sledilnikov pri standardizaciji njihovega pristopa k navajanju zmogljivosti instrumenta.

Standard ponuja ponudnikom in posledično uporabnikom laserskih sledilnikov koncept *MPE vrednosti* (angl. Maximum Permissible Error). To je maksimalna vrednost, ki je izmerjeno odstopanje ne sme preseči. Te vrednosti predstavljajo zmogljivost specifičnega testa na znane nominalne vrednosti (običajno preverjene s sledljivim interferometrom), medtem ko pogosto navedene vrednosti 2 sigma ( $2\sigma$ ) predstavljajo statistično oceno/vrednost. Koncept je uporaben v smislu, da obsega ekstremne vrednosti pogreška, ki jih dopušča proizvajalec v tehnični specifikaciji. V specifikacijah so poleg MPE vrednosti velikokrat dane tudi *tipične vrednosti*, ki so definirane kot polovica vrednosti MPE. Tipične vrednosti predstavljajo vrednosti, ki bodo običajno dosežene pri večini meritev.

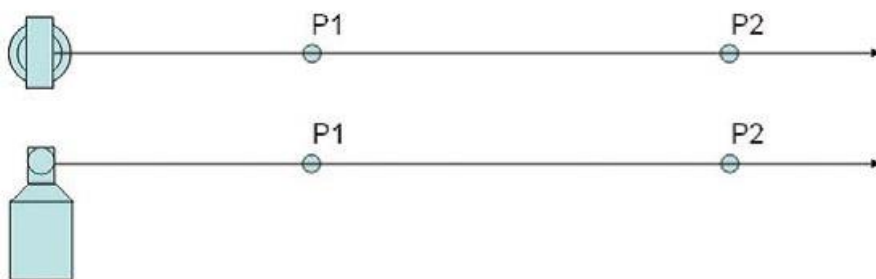
### 5.1.2.1 Dolžinska natančnost

Proizvajalci običajno v svojih specifikacijah takole navajajo zmogljivost laserskega sledilnika pri merjenju dolžine (numerične vrednosti so simbolične):

- za IFM sistem:  $3 \mu\text{m} + 0.7 \mu\text{m}/\text{m}$ ,
- za ADM sistem:  $18 \mu\text{m} + 0.7 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Kot vidimo iz zgornjega zapisa, je potrebno upoštevati dve vrednosti – prva vrednost je *odstopanje*, medtem ko je druga vrednost *faktor merila*, ki je funkcija dolžine. Vrednost faktorja merila je posledica atmosferskih vplivov na različnih oddaljenostih od laserskega sledilnika.

Za optimalno izmero dolžine mora biti laserski sledilnik postavljen vzdolž merjenih točk (slika 5.5). V tem primeru odpravimo vpliv natančnosti merjenja kotov.

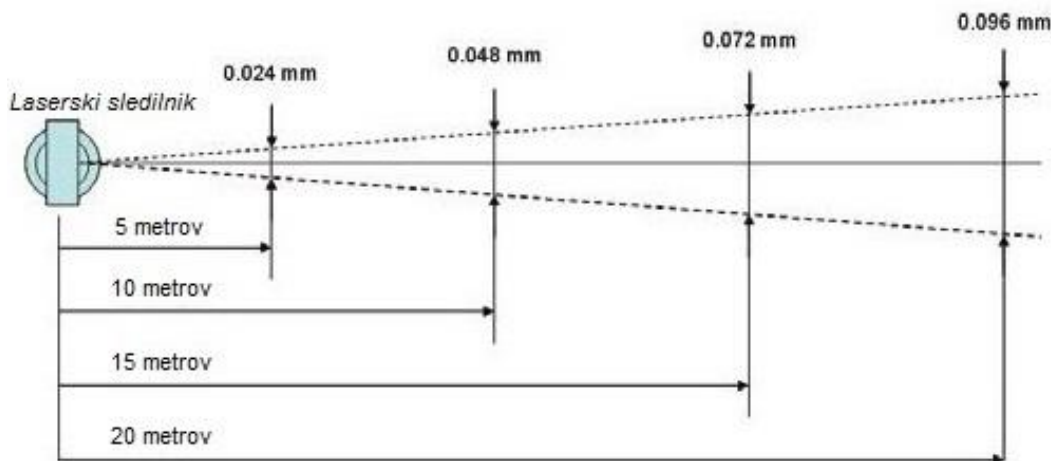


Slika 5.5: Koncept postavitve laserskega sledilnika za doseg najvišje možne natančnosti pri merjenju dolžin (www.faro.com)

### 5.1.2.2 Kotna natančnost

Kotna natančnost laserskega sledilnika opisuje, kako »dobro« instrument z optičnim enkoderjem odčita merjena kota. Kotna ločljivost laserskih sledilnikov je običajno 1".

Slika 5.6 prikazuje možna odstopanja na posameznih mestih, ki so različno oddaljena od instrumenta s kotno ločljivostjo 1".

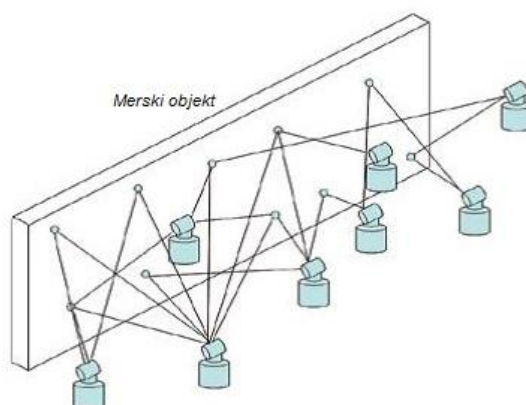


Slika 5.6: Teoretična kotna odstopanja (www.faro.com)



### 5.1.2.3 Volumetrična natančnost

Izraz *volumetrična natančnost* je pogosto uporabljen za opis natančnosti instrumenta pri določenem merskem volumnu. Če je ta podatek naveden v specifikacijah proizvajalca, mora biti le-ta prikazan tudi v ilustrirani obliki, da lahko na podlagi opisa uporabnik praktično postavi instrument v dejansko situacijo za merjenje določenega objekta. Pri velikih merilnih volumnih je velikokrat bolj učinkovito, če uporabnik prestavi instrument na mesto, ki omogoča pregled nad vsemi potrebnimi merilnimi točkami. Posledica uporabe večjega števila stojišč instrumenta je zmanjšanje razdalje med instrumentom in merilnim objektom. Na ta način je natančnost meritev odvisna predvsem od natančnosti merjenja kotov (slika 5.7).

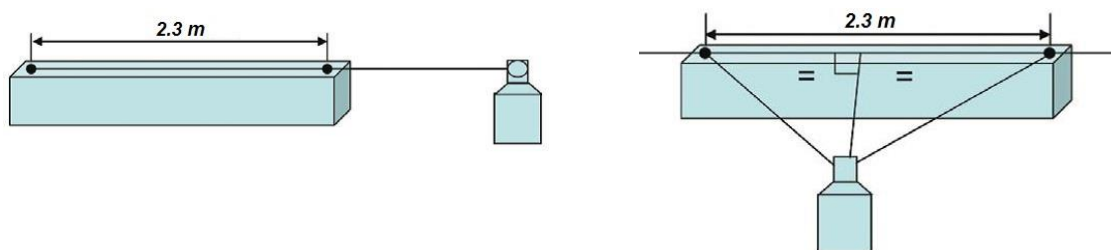


Slika 5.7: Volumetrična natančnost (www.faro.com)

Pri situaciji na sliki 5.7 je pomembno:

- vse merske točke niso vidne z enega stojišča,
- večje število stojišč za dosego najvišje možne natančnosti,
- merilni volumen narekuje, da se preizkuša zmožnost laserskega sledilnika pri merjenju kotov, še posebej v vertikalni smeri.

Za ponazoritev vpliva kotnih merenj na natančnost si oglejmo sliko 5.8.



Slika 5.8: Levo – laserski sledilnik v liniji s točkama; desno – laserski sledilnik pravokotno na linijo med dvema točkama (www.faro.com)

Če predpostavimo, da je laserski sledilnik v omenjenih primerih od merskega objekta oddaljen 2 m, lahko pri merjenju 2.3 m dolge referenčne dolžine dosežemo MPE vrednosti (predpostavimo uporabo IFM):

- laserski sledilnik v liniji s točkama:  $3 \mu\text{m}$ ,
- laserski sledilnik pravokotno na linijo med točkama:  $33 \mu\text{m}$ .

Veliki razliki nastaneta zaradi tega, ker relativni položaj laserskega sledilnika glede na merjeni točki na sliki 5.8 (desno) narekuje, da prevladujejo kotna merjenja in posledično kotni pogoški. Situacija, kot je prikazana na sliki 5.8 (levo), je v praksi redka, saj so merilni objekti različnih oblik in velikosti ter običajno nimamo pregleda nad vsemi merilnimi točkami. Tipični primeri so velika montažna orodja v letalski industriji.


Glede na vse omenjeno lahko zaključimo, da imata navedena in dejanska zmogljivost kotnega merskega sistema pomembno vlogo pri praktični uporabi laserskega sledilnika. Omenjeno dejstvo lahko uporabniki hitro pozabijo, ko so soočeni s specifikacijami in izrazito zmogljivostjo modernih IFM in ADM merilnih sistemov.

Razumevanje pojmov natančnosti je pomemben vidik pri izbiri najboljšega merskega instrumenta za določeno aplikacijo. V primeru laserskih sledilnikov natančnosti pri merjenju dolžin običajno niso dosegljive v praktičnih primerih zaradi omejitev v prostoru. V večini časa uporabnik laserskega sledilnika meri točke in oblike, ki zahtevajo vrtenje instrumenta v Hz in V smeri (sledenje) ter postavitve le-tega v določen prostor (volumetrična natančnost). Tako je volumetrična natančnost instrumenta najbolj pomembna, ko se odločamo za laserski sledilnik, ki ga bomo uporabljali v večini aplikacij.


#### **5.1.2.4 Tehnične lastnosti in natančnosti laserskih sledilnikov**

V preglednicah 5.1 do 5.6 so zbrane tehnične lastnosti in natančnosti različnih vrst laserskih sledilnikov, ki jih na trgu ponujajo podjetja Leica, Faro in API.

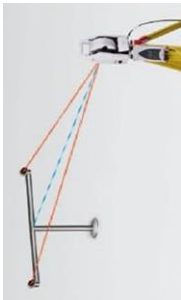
**Preglednica 5.1: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Leica AT402**

<b>LEICA AT402</b>			
<b>OSNOVNE INFORMACIJE</b>			
TIP	ADM		
IZVOR SVETLOBE	/		
MASA (kg)	7.3 (instr.) / 0.8 (kontr.)		
LASERSKI RAZRED	2		
<b>MERJENJE DOLŽIN</b>			
DOSEG	80 m		
LOČLJIVOST	0.1 µm		
NATANČNOST (MPE)	± 1 µm		
PONOVLJIVOST (MPE)	± 5 µm		
<b>MERJENJE SMERI</b>			
OBMOČJE MERITEV Hz/V	± 360° / ± 145°		
LOČLJIVOST	0.07 arc sek (0.07")		
NATANČNOST (MPE)	± 15 µm + 6 µm/m		
PONOVLJIVOST (MPE)	± 7.5 µm + 3 µm/m		
NATANČNOST DOL.			
VERTIKALNE SMERI	± 1 arc sek (2σ)		


<b>MERJENJE DOLŽIN NA VZDOLŽNI LINIJI</b>			TIPIČNE VREDNOSTI [mm]
	Doseg [m]	MPE [mm]	
	2-5	0.014	0.007
	2-10	0.014	0.007
	2-20	0.014	0.007
	2-30	0.014	0.007
	2-35	0.014	0.007
2-40	0.014	0.007	



<b>MERJENJE DOLŽIN NA PREČNI LINIJI (2.3 m)</b>			TIPIČNE VREDNOSTI [mm]
	Doseg [m]	MPE [mm]	
	2	0.036	0.018
	5	0.063	0.032
	10	0.106	0.053
	20	0.191	0.096
	30	0.276	0.138
35	0.318	0.159	
40	0.361	0.180	

\*Navedene natančnosti so izračunane glede na standard ASME B89.4.19-2006 (vir: www.leica-geosystems.com).

Preglednica 5.2: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Faro Vantage




<b>FARO VANTAGE</b>	
	
<b>OSNOVNE INFORMACIJE</b>	
TIP	TruADM
IZVOR SVETLOBE	0.653–0.663 µm
MASA (kg)	12.6 (instr.) / 4.8 (kontr.)
LASERSKI RAZRED	2
<b>MERJENJE DOLŽIN</b>	
DOSEG	0–80 m**
LOČLJIVOST	0.5 µm
NATANČNOST (MPE)	16 µm + 0.8 µm/m
RO PARAMETER (MPE)	16 µm
<b>MERJENJE SMERI</b>	
OBMOČJE MERITEV Hz/V	360° / 130° (+77.9° do -52.1°)
LOČLJIVOST	± 2 arc sek
NATANČNOST (MPE)	20 µm + 5 µm/m
<b>RAZNO</b>	
HITROST MERJENJA	16,000 točk/s

<b>MERJENJE DOLŽIN NA VZDOLŽNI LINIJI</b>				
	Doseg [m]	Razdalja [m]	MPE [mm]	TIPIČNE VREDNOSTI [mm]
	2-5	3	0.018	0.009
	2-10	8	0.022	0.011
	2-20	18	0.030	0.015
	2-30	28	0.038	0.019
	2-35	38	0.046	0.023
	2-40	58	0.062	0.031
2-80**	78	0.078	0.039	
<b>MERJENJE DOLŽIN NA PREČNI LINIJI (2.3 m)</b>				
	Doseg [m]	MPE [mm]	TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	
	2	0.044	0.022	
	5	0.064	0.032	
	10	0.099	0.049	
	20	0.17	0.085	
	30	0.24	0.12	
	35	0.312	0.156	
40	0.452	0.191		
80**	0.594	0.297		



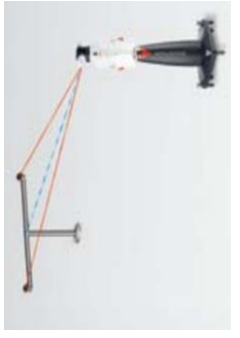
\*Navedene natančnosti so izračunane glede na standard ASME B89.4.19-2006 (vir: www.faro.com).  
\*\*Z izbranimi tarčami.

Preglednica 5.3: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika API Omnitrack

<p><b>API OMNITRACK2</b></p> 	<p><b>OSNOVNE INFORMACIJE</b></p> <p>TIP ADM2 IZVOR SVETLOBE IR MASA (kg) 10.9 LASERSKI RAZRED 1</p>	<p><b>MERJENJE DOLŽIN NA VZDOLŽNI LINIJI</b></p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Doseg [m]</th> <th>MPE [mm]</th> <th>TIPIČNE VREDNOSTI [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>0.018</td><td>0.009</td></tr> <tr><td>2-5</td><td>0.023</td><td>0.012</td></tr> <tr><td>2-10</td><td>0.030</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>2-20</td><td>0.045</td><td>0.023</td></tr> <tr><td>2-30</td><td>0.060</td><td>0.030</td></tr> <tr><td>2-40</td><td>0.075</td><td>0.038</td></tr> <tr><td>2-50</td><td>0.090</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>2-60</td><td>0.105</td><td>0.053</td></tr> <tr><td>2-80</td><td>0.135</td><td>0.068</td></tr> </tbody> </table>	Doseg [m]	MPE [mm]	TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	2	0.018	0.009	2-5	0.023	0.012	2-10	0.030	0.015	2-20	0.045	0.023	2-30	0.060	0.030	2-40	0.075	0.038	2-50	0.090	0.045	2-60	0.105	0.053	2-80	0.135	0.068
Doseg [m]	MPE [mm]	TIPIČNE VREDNOSTI [mm]																														
2	0.018	0.009																														
2-5	0.023	0.012																														
2-10	0.030	0.015																														
2-20	0.045	0.023																														
2-30	0.060	0.030																														
2-40	0.075	0.038																														
2-50	0.090	0.045																														
2-60	0.105	0.053																														
2-80	0.135	0.068																														
<p><b>MERJENJE DOLŽIN</b></p> <p>DOSEG 100 m** LOČLJIVOST 0.1 µm NATANČNOST (MPE) ± 15 µm + 1.5 µm/m</p> <p><b>MERJENJE SMERI</b></p> <p>OBMOČJE MERITEV HzV ± 320° / 138° (+79° do -59°) LOČLJIVOST ± 0.018 arc sekund NATANČNOST (MPE) ± 18µm + 5 µm/m</p>	<p><b>MERJENJE DOLŽIN NA PREČNI LINIJI (2.3 m)</b></p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Doseg [m]</th> <th>MPE [mm]</th> <th>TIPIČNE VREDNOSTI [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>0.042</td><td>0.021</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.065</td><td>0.033</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.101</td><td>0.051</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.173</td><td>0.087</td></tr> <tr><td>30</td><td>0.245</td><td>0.123</td></tr> <tr><td>40</td><td>0.317</td><td>0.159</td></tr> <tr><td>50</td><td>0.390</td><td>0.195</td></tr> <tr><td>60</td><td>0.462</td><td>0.231</td></tr> <tr><td>80</td><td>0.606</td><td>0.303</td></tr> </tbody> </table>	Doseg [m]	MPE [mm]	TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	2	0.042	0.021	5	0.065	0.033	10	0.101	0.051	20	0.173	0.087	30	0.245	0.123	40	0.317	0.159	50	0.390	0.195	60	0.462	0.231	80	0.606	0.303	
Doseg [m]	MPE [mm]	TIPIČNE VREDNOSTI [mm]																														
2	0.042	0.021																														
5	0.065	0.033																														
10	0.101	0.051																														
20	0.173	0.087																														
30	0.245	0.123																														
40	0.317	0.159																														
50	0.390	0.195																														
60	0.462	0.231																														
80	0.606	0.303																														


\*Navedene natančnosti so izračunane glede na standard ASME B89.4.19-2006 (vir: www.apisensor.com).  
\*\*Z izbranimi tarčami.

Preglednica 5.4: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Leica AT901


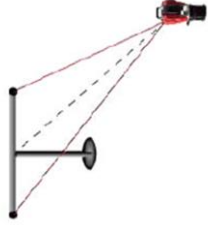
<b>LEICA AT902</b>				
<b>OSNOVNE INFORMACIJE</b>				
TIP	AIFM			
IZVOR SVETLOBE	0.633 μm (vidna) 0.795 μm (IR)			
LASERSKI RAZRED	2			
MASA (kg)	22 (instr.) / 17 (kontr.)			
<b>MERJENJE DOLŽIN</b>				
TIPIČNI DELOVNI VOLUMEN (Ø)	160 m (B) / 50 m (MR) / 160 m (LR)			
LOČLJIVOST IFM	0.32 μm			
NATANČNOST IFM (MPE)	± 0.4 μm + 0.3 μm/m			
NATANČNOST ADM (MPE)	± 10 μm			
PONOVLJIVOST (MPE)	± 5 μm			
<b>MERJENJE SMERI</b>				
OBMOČJE MERITEV Hz/V	± 360° / ± 45°			
LOČLJIVOST	0.14 arc sek			
NATANČNOST	± 15 μm + 6 μm/m			
Celoten obseg U <sub>x/y/z</sub>	± 10 μm + 5 μm/m			
Volumen 2.5x5x10m	± 7.5 μm + 3 μm/m			
PONOVLJIVOST				
<b>MERJENJE DOLŽIN NA VZDOLŽNI LINIJI</b>				
Doseg [m]	MPE [mm]		TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	
	ADM	IFM	ADM	IFM
2-5	0.0141	0.0011	0.0071	0.0006
2-10	0.0141	0.0025	0.0071	0.0013
2-20	0.0141	0.0054	0.0071	0.0027
2-30	0.0141	0.0084	0.0071	0.0042
2-35	0.0141	0.0099	0.0071	0.0050
2-40	0.0141	0.0141	0.0071	0.0057
				
<b>MERJENJE DOLŽIN NA PREČNI LINIJI (2.3 m)</b>				
Doseg [m]	MPE [mm]		TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	
	ADM	IFM	ADM	IFM
2	0.036	0.036	0.018	0.018
5	0.063	0.063	0.032	0.032
10	0.106	0.106	0.053	0.053
20	0.191	0.191	0.096	0.096
30	0.276	0.276	0.138	0.138
35	0.318	0.318	0.159	0.159
40	0.361	0.361	0.180	0.180
				

\*Navedene natančnosti so izračunane glede na standard ASME B89.4.19-2006 (vir: www.leica-eosystems.com).

Preglednica 5.5: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika API Radian


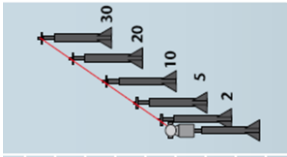
<b>API RADIAN</b>			
<b>OSNOVNE INFORMACIJE</b>			
TIP	AIFM	He-Ne (IFM) / IR (ADM)	
IZVOR SVETLOBE	9 (instr.) / 3.2 (kontr.)		
MASA (kg)	2/1		
LASERSKI RAZRED			
<b>MERJENJE DOLŽIN</b>			
DOSEG	80 m		
LOČLJIVOST IFM	0.08 µm		
NATANČNOST IFM (MPE)	± 1.5 µm + 0.5 µm/m		
LOČLJIVOST ADM	0.1 µm		
NATANČNOST ADM (MPE)	± 10 µm + 1.2 µm/m		
<b>MERJENJE SMERI</b>			
OBMOČJE MERITEV Hz/V	± 320° / 138° (+79° do -59°)		
LOČLJIVOST	± 0.018 arc sekund		
NATANČNOST (MPE)	± 18 µm + 5 µm/m		
<b>RAZNO</b>			
ABSOLUTNA NATANČNOST (statično)	± 10 µm (2σ)		

<b>MERJENJE DOLŽIN NA VZDOLŽNI LINIJI</b>			
	Doseg [m]	MPE [mm]	
		ADM	IFM
	2	0.012	0.003
	2-5	0.016	0.004
	2-10	0.022	0.007
	2-20	0.034	0.012
	2-30	0.046	0.017
	2-40	0.058	0.022
	2-50	0.070	0.027
	2-60	0.082	0.032
	2-80	0.106	0.042
	<b>MERJENJE DOLŽIN NA PREČNI LINIJI (2.3 m)</b>		
	2	0.041	0.040
	5	0.063	0.061
	10	0.099	0.096
	20	0.170	0.167
	30	0.242	0.238
	40	0.314	0.309
	50	0.385	0.308
	60	0.457	0.451
80	0.601	0.593	

\* Navedene natančnosti so izračunane glede na standard ASME B89.4.19-2006 (vir: www.apisensor.com).

Preglednica 5.6: Tehnične lastnosti in natančnost laserskega sledilnika Faro Ion

<b>FARO ION</b>		<b>MERJENJE DOLŽIN NA VZDOLŽNI LINIJI</b>	
			
<b>OSNOVNE INFORMACIJE</b>		<b>MERJENJE DOLŽIN NA PREČNI LINIJI (2.3 m)</b>	
TIP	AIFM	TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	
IZVOR SVETLOBE	0.633-0.635 µm	ADM IFM IFM IFM IFM	
LASERSKI RAZRED	2	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
MASA (kg)	19.5 (instr.) / 5.2 (kontr.)	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
<b>MERJENJE DOLŽIN</b>		TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	
TIPičNI DELOVNI DOSEG	0-55m*	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
LOčLJIVOST IFM	0.158 µm	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
NATANČNOST IFM (MPE)	4 µm + 0.8 µm/m	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
RO PARAMETER IFM (MPE)	16 µm	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
LOčLJIVOST ADM	0.5 µm	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
NATANČNOST ADM (MPE)	16 µm + 0.8 µm/m	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
RO PARAMETER ADM (MPE)	16 µm	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
<b>MERJENJE SMERI</b>		TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	
OBMOČJE MERITEV HzV	±270° / 125° (+72.5° do -52.5°)	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
LOčLJIVOST	± 2 arc sek	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
NATANČNOST (MPE)	20 µm + 5 µm/m	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	
<b>RAZNO</b>		TIPIČNE VREDNOSTI [mm]	
HITROST MERJENJA	10,000 točk/s	ADM IFM IFM IFM IFM IFM	

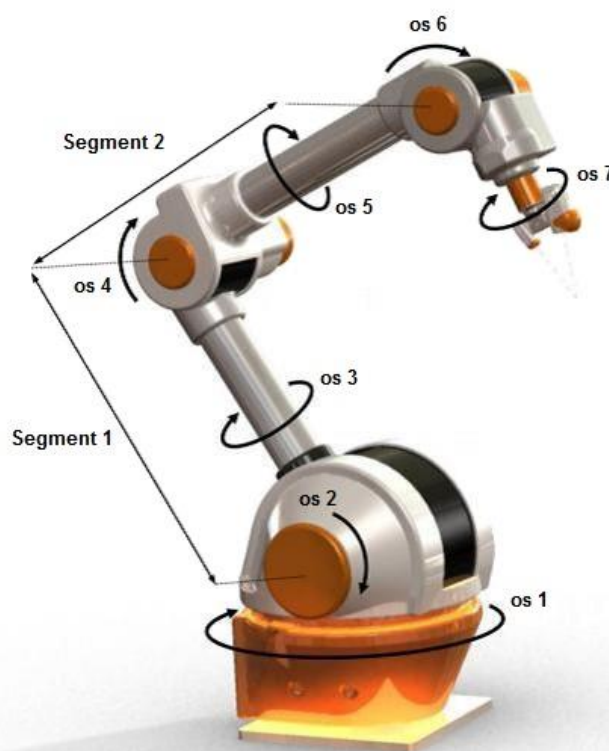
\*Navedene natančnosti so izračunane glede na standard ASME B89.4.19-2006 (vir: www.faro.com).

\*\*Z izbranimi tarčami.



## 5.2 Koordinatno merilna roka

Koordinatno merilna roka (KMR) je prenosna koordinatno merilna naprava, ki natančno izmeri objekt v 3D prostoru in predstavi rezultate preko ustrezne programske opreme, običajno v primerjavi s CAD modelom. Merilne roke so merilni mehanizmi s pretežno antropomorfnimi konfiguracijami ter izključno pasivnimi rotacijskimi sklepi. Merilna roka operira v 3D prostoru s šestimi ali sedmimi sklepi, kar omogoča določitev položaja  $(X,Y,Z)$  in orientacije  $(\varphi, \chi, \psi)$  izmerjene točke v 3D prostoru, tj. določitev šestih prostostnih stopenj objekta.



Slika 5.9: Primer koordinatno merilne roke z nameščenim laserskim skenerjem  
([www.warwick.uk](http://www.warwick.uk))

Mehanizem roke mora omogočati natančno pozicioniranje tipala na vrhu. Za doseg poljubne orientacije krogelnega tipala potrebujemo pet prostostnih stopenj. Ker je mehanizem popolnoma pasiven, je pomembna majhna masa, hkrati pa je potrebno zagotoviti čim večjo togost konstrukcije. Za izdelavo segmentov se zato uporabljajo karbonska vlakna, ker imajo najugodnejše razmerje med težo in elastičnim modulom, sklepi pa so izdelani iz aluminija. Jeklen je le podstavek baze, saj mora omogočati trdno pričvrstitev roke na merilno površino. Kotna vrednost posameznega rotirajočega sklepa merilne roke je določena z uporabo optičnih kotnih enkoderjev. Enkoderji določijo kot na inkrementalni način (glej 4.2) preko natančno razporejenih svetlo-temnih polj na steklenem disku. Merilne roke imajo običajno šest oziroma sedem rotacijskih sklepov. Kovinsko tipalo s krogelno konico je nepremično in opremljeno s tipko za sproženje meritve. Na ta način je možno drsenje po merjenem objektu oziroma

skeniranje. Kot druga možnost se ponuja uporaba na dotik občutljivega tipala, ki avtomatsko sproži enkraten zajem položaja, zagotavlja večjo točnost in ponovljivost. Doseg takšnih sistemov je v območju 1–3 m, medtem ko je natančnost položaja merjene točke reda 0.1 mm.

V primerjavi z običajnimi koordinatnimi merilnimi napravami imajo merilne roke številne prednosti. Naprave so prenosne, kar je pomembno pri velikih objektih, meritve pa se lahko izvajajo tudi med samim procesom izdelave. S prestavljanjem položaja merilne roke lahko poljubno razširimo tudi merilno območje. Predvsem se merilne roke izkažejo za veliko bolj prilagodljive in hitrejše pri ročnem merjenju. V veliki meri se olajša digitalizacija pri obratnem inženirstvu izdelkov, kjer se uporabljajo tako kontaktne kot optične metode zajema. Med slabosti merilnih rok lahko štejemo v osnovi predvsem manjšo točnost, ki je posledica kompromisa med togostjo in težo merilne roke na eni strani ter preciznostjo in velikostjo ter s tem gibljivostjo sklepov na drugi strani. V tem pogledu merilne roke ne dosegajo natančnosti konvencionalnih koordinatno merilnih naprav. Poleg tega so to občutljive naprave, ki za uporabo zahtevajo relativno izkušenega operaterja.

Slabost merilnih rok je manjša dosegljivost točnosti meritev. To je predvsem posledica kinematične strukture roke, ki je relativno občutljiva na zunanje vplive in notranje nepravilnosti. Posredno merjenje položaja konice tipala preko različnih vrednosti kotov v sklepih, omejena togost rotacijskih sklepov in segmentov, ki morajo biti optimizirani na težo, ter nedoločljivi človeški faktor so le nekateri od teh dejavnikov. Izboljšanje ponovljivosti in absolutne natančnosti je zato v središču razvojnih naporov na področju koordinatno merilnih rok (Vrhovec, 2009).

Bistvene lastnosti KMR:

- prenosnost in s tem možnost postavitve v delovno okolje,
- merjenje med samim procesom izdelave (na stroju ali v proizvodni liniji),
- merjenje izdelkov in njihove medsebojne lege, ko se ti že nahajajo v sestavu (npr. v avtomobilski in letalski industriji),
- poenostavljeno merjenje kompleksnih izdelkov zaradi redundantnosti mehanizma,
- fleksibilnost pri ročnem laserskem skeniranju.

Področja uporabe KMR:

- analiza dimenzij objektov,
- neposredno merjenje objekta za primerjavo s CAD podatki v dejanskem času,
- kontrola strojev – kontrola posameznih delov na stroju,
- kontrola proizvodov – merjenje posameznih delov za primerjavo z nominalnimi podatki,
- poravnava – poravnava delov za oceno odmika in relativnega položaja,
- obratno inženirstvo – digitalizacija posameznih delov in/ali objektov za izdelavo CAD modelov.

## 6 MULTISENZORSKI SISTEMI

Multisenzorski merilni sistemi združujejo optične, laserske in kontaktne senzorje. Takšni sistemi omogočajo hitrejšo in natančnejšo pridobivanje podatkov o objektu kot navadni merilni sistemi. Vsak merilni sistem uporablja vsaj eno senzorsko tehnologijo. Za izvedbo meritev merilni senzor zbira podatke točk objekta. Poznamo dve vrsti tehnologij senzorjev – *kontaktni* in *brezkontaktni senzorji*. Senzor, ki za izvedbo meritev potrebuje stik z merskim objektom, je kontaktni senzor. Brezkontaktni senzorji za izvedbo meritve dejansko ne potrebujejo priti v stik z merskim objektom. Primeri brezkontaktnih senzorjev so video merilni sistemi, ki uporabljajo kamere pri snemanju objektov in nato te posnetke obdelajo. Drugi primer so laserski skenerji, ki podatke o objektu pridobijo z uporabo optike in detektorjev, ki zajamejo od površine objekta odbito lasersko svetlobo. Kombinacijo dveh ali več senzorjev na samostojni merilni enoti tako imenujemo *multisenzorski merilni sistem*.

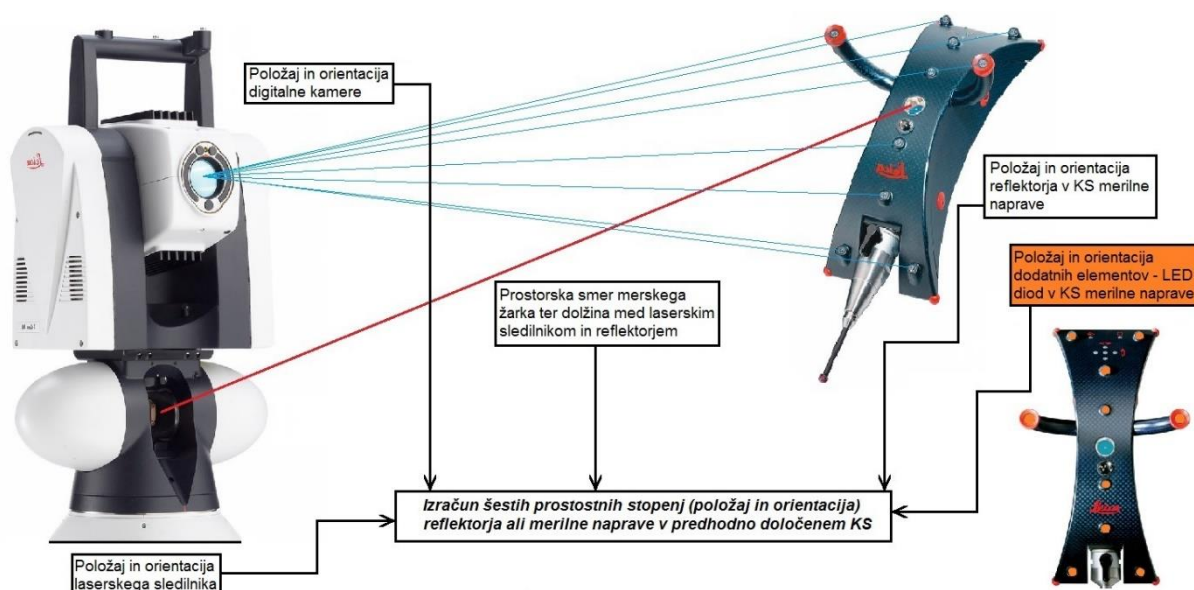
### 6.1 Multisenzorski sistem Leica

#### 6.1.1 Merilni sistem za določitev šestih prostostnih stopenj (6DoF) merilne naprave

Naprava, kateri določamo položaj in orientacijo v prostoru, je lahko reflektor sam ali naprava, na kateri je stacionarno nameščen reflektor. Merilna naprava je tako lahko ročno orodje za merjenje koordinat (*T-Probe*) ali premikajoč se ročni triangulacijski skener (*T-Scan*), kjer je položaj konice merskega tipala ali skenirane točke določen iz šestih prostostnih stopenj orodja ali skenerja. Merilna naprava je lahko tudi naprava, ki jo avtomatizirano vodi robot ali vozilo na predhodno določeni tirnici (*T-Mac*).

Merski podatki, ki so uporabljeni v merilnem sistemu in služijo za izračun šestih prostorskih stopenj reflektorja ali merilne naprave v predhodno določenem koordinatnem sistemu (npr. koordinatni sistem laserskega sledilnika), so naslednji:

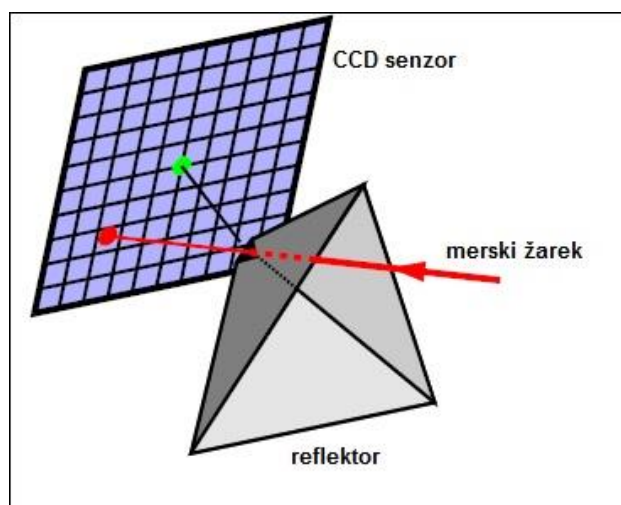
- položaj in orientacija laserskega sledilnika v predhodno določenem koordinatnem sistemu;
- položaj in orientacija reflektorja in svetlobno občutljive površine (CCD senzor), ki je nameščena za reflektorjem v koordinatnem sistemu merilne naprave;
- položaj in orientacija dodatnega elementa v koordinatnem sistemu merilne naprave ali koordinatnem sistemu laserskega sledilnika;
- položaj in orientacija digitalne kamere za opazovanje dodatnega elementa v koordinatnem sistemu merilne naprave ali koordinatnem sistemu digitalne kamere;
- prostorska smer merskega žarka v koordinatnem sistemu laserskega sledilnika in dolžina med laserskim sledilnikom in reflektorjem;
- prostorska kota med merilnim žarkom in osjo reflektorja (kot naklona (angl. pitch) in odklona (angl. yaw)), določena s svetlobnim CCD senzorjem, ki se nahaja za reflektorjem in
- smer ali linija, ki jo definira dodatni element in jo zajame digitalna kamera.



**Slika 6.1: Merski podatki za izračun položaja in orientacije merilne naprave**

S pomočjo matematičnih algoritmov iz omenjenih podatkov nato izračunamo položaj in orientacijo merilne naprave v prostoru oziroma določimo šest prostostnih stopenj naprave (6DoF).

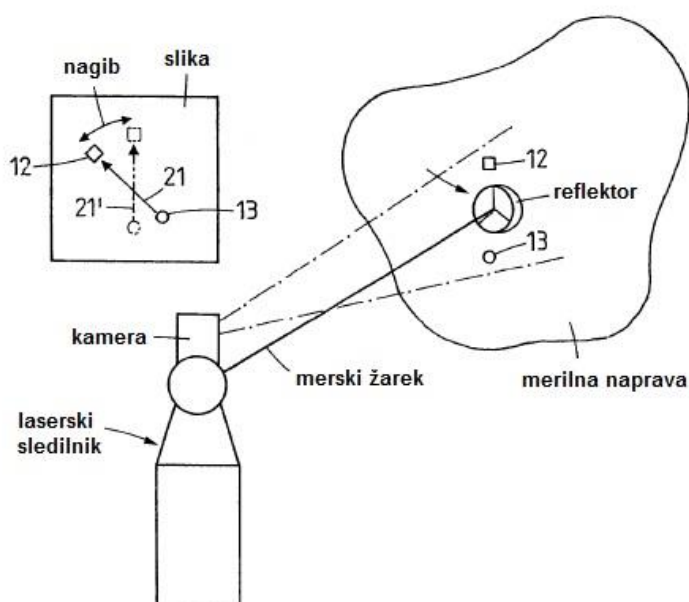
Laserski sledilnik izmeri polarne koordinate reflektorja ( $H_z$ ,  $V$  in dolžina  $D$ ) v koordinatnem sistemu, ki ga definira laserski sledilnik. Pri merjenju dolžine majhen del laserskega žarka prodre skozi odprtino, ki se nahaja v stičišču triobega reflektorja (slika 6.2). Ta del laserskega žarka pade na slikovni CCD senzor, ki se nahaja za reflektorjem. Slikovni CCD senzor ustvari merilni signal, ki ustreza položaju točke, ki jo označuje pika laserskega žarka (dve slikovni koordinati), in predstavlja neposredno merjenje naklona in odklona osi reflektorja glede na merilni žarek. Os reflektorja je pravokotna na CCD senzor in je usmerjena skozi center reflektorja ter predstavlja os  $z$  koordinatnega sistema merilne naprave. Optični center reflektorja je izhodišče koordinatnega sistema.



**Slika 6.2: Določitev naklona in odklona reflektorja s CCD senzorjem (Kyle, 2007, str. 5)**

Računalnik izračuna pet prostostnih stopenj reflektorja ali merilne naprave, na kateri je nameščen reflektor iz merilnih podatkov laserskega sledilnika ( $H_z$ ,  $V$ ,  $D$ ) in CCD senzorja (slikovni koordinati  $xy$ ).

Šesti element je nagib (angl. roll) reflektorja glede na os reflektorja ali merskega žarka. Določimo ga s pomočjo dodatnega elementa merilne naprave in digitalne kamere (*T-Cam*) (sliki 6.3, 6.4). Dodatni element je sestavljen iz vsaj dveh svetlobnih točk. Svetlobne točke so lahko pasivne oznake, reflektorji ali aktivni viri svetlobe (LED diode). Na merilno napravo so razporejeni na ravnino, ki je pravokotna na os reflektorja. Digitalna kamera zajame te svetlobne točke na slikovno ravnino in pridobi kot nagiba reflektorja v prostoru, ki ga je potrebno transformirati iz koordinatnega sistema kamere v koordinatni sistem laserskega sledilnika ali v nadaljnji predhodno določen koordinatni sistem, če os kamere ni poravnana z merilnim žarkom. Za natančno določitev nagiba je tako potrebno paziti, da digitalna kamera zajame zadostno število svetlobnih točk merilne naprave.



Slika 6.3: Določitev nagiba s pomočjo digitalne fotogrametrije (Zumbrunn in sod., 2007, str. 3)

Vse določene prostostne stopnje lahko transformiramo v nadaljnje koordinatne sisteme z uporabo znanih algoritmov, če je položaj in orientacija koordinatnega sistema laserskega sledilnika znan oziroma ju lahko določimo.

### 6.1.2 Laserski sledilnik AT901 in T-Cam

S kombinacijo tehnologije laserskega sledilnika AT901 in digitalne kamere T-Cam dobimo merilni sistem, s katerim poleg položaja merske točke oziroma reflektorja določimo tudi orientacijo objekta v prostoru. Naprava za merjenje objekta (npr. ročno tipalo, ročni skener) je zgrajena iz integriranega reflektorja in nizom prostorsko razporejenih LED diod. Položaj reflektorja glede na LED diode je predhodno znan. Medtem ko laserski sledilnik natančno določi položaj reflektorja z merjenjem dveh kotov in dolžine, kamera določi orientacijo naprave

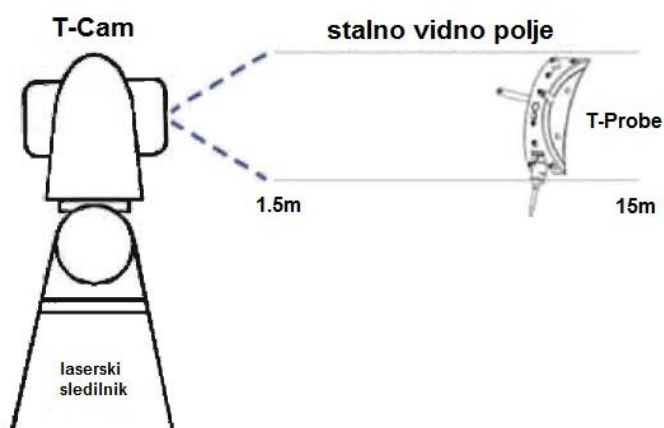
s pomočjo digitalne fotogrametrije (glej 6.1.1). S takšno izvedbo lahko določimo šest prostostnih stopenj (6DoF) poljubnega objekta v prostoru.

Posebej za ta namen so pri podjetju Leica razvili visoko natančno digitalno kamero T-Cam, ki se namesti na glavo laserskega sledilnika Leica AT901. Ohišje v notranjosti kamere je iz titana, ki pri majhni teži zagotavlja visoko mehanično stabilizacijo. Vgrajen slikovni senzor CMOS s 1024 x 1024 slikovnimi elementi, omogoča frekvenco zajema slik 100 Hz. Poleg tega ima kamera integriran digitalni procesor signalov, ki ovrednoti in poda rezultat obdelave zajetih slik.



Slika 6.4: Videokamera Leica T-Cam ([www.hexagonmetrology.us](http://www.hexagonmetrology.us))

Kamera ima vgrajen tudi motoriziran pogon za gibanje v smeri vertikale in je opremljena z objektivom, ki zagotavlja stalno vidno polje velikosti 30 x 30 cm (pri razdaljah 1.5 do 15 m).



Slika 6.5: Stalno vidno polje med 1.5 m in 15 m (Dold, 2004, str. 43)

Prednost stalnega vidnega polja je na razdaljo neodvisna natančnost orientacijskih parametrov. Kalibracija kamere temelji na običajnih postopkih v fotogrametriji in se izvaja s strani proizvajalca s popolnoma avtomatiziranim postopkom.

Optična povečava kamere ohranja stalno velikost naprave s tarčo, ki jo zazna CMOS senzor. Na ta način so rešili največjo težavo, s katero so se prej spopadali fotogrametrični sistemi – njihova nenatančnost zaradi optičnega spreminjanja velikosti merjenega objekta (tj. bolj oddaljena je naprava s tarčo, manjša je njena velikost na senzorju kamere).

Sistem laserskega sledilnika AT901 in digitalne kamere T-Cam omogoča sledenje signaliziranega objekta, ki se premika s hitrostjo do 2 m/s in pospeškom 2 g. S to merilno tehnologijo lahko v dejanskem času (100–500 Hz) določimo šest prostostnih stopenj premikajočega objekta.

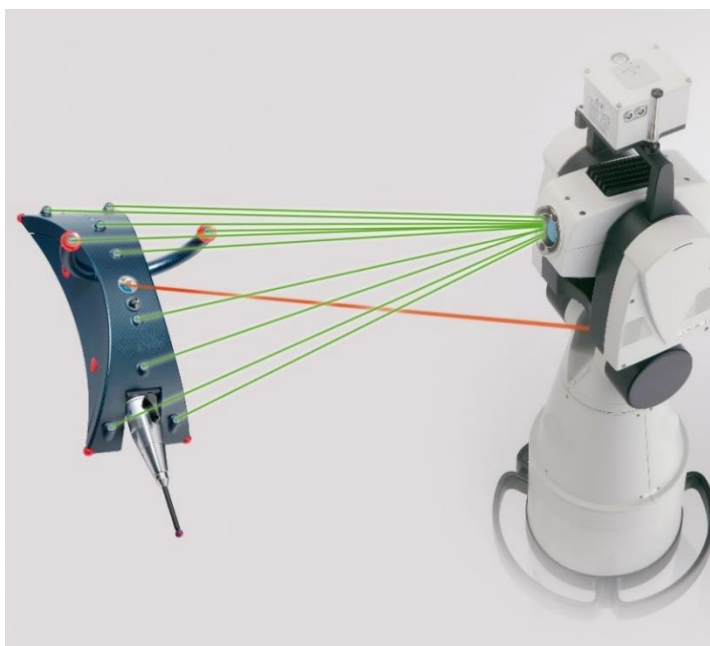
### 6.1.3 Laserski sledilnik AT901, T-Cam in T-Probe

*Leica T-Probe* je ročno vodena koordinatno merilna naprava, ki ji položaj in orientacijo v prostoru določimo preko sistema laserskega sledilnika *AT901* in digitalne kamere *Leica T-Cam*. Ohišje naprave je zgrajeno iz karbonskih vlaken, na njem je centralno nameščen reflektor in 10 prostorsko porazdeljenih LED diod (slika 6.6). Reflektor skupaj z nizom LED točk predstavljajo merske tarče sistema. Tako lahko natančno izmerimo položaj konice merskega tipala oziroma 3D položaj točke na površini merskega objekta.



Slika 6.6: Merilna naprava Leica T-Probe ([www.hexagonmetrology.us](http://www.hexagonmetrology.us))

Šest merilnih parametrov popolnoma opisuje povezavo merilne naprave in sistema za lasersko sledenje. To so trije parametri položaja ( $X, Y, Z$ ) in trije parametri orientacije (rotacije okoli treh osi – *naklon* (pitch), *odklon* (yaw) in *nagib* (roll)). Skupaj predstavljajo šest prostostnih stopenj naprave v prostoru (6DoF). Ti parametri so določeni z laserskim sledilnikom (*položaj*) in digitalno kamero (*orientacija*).

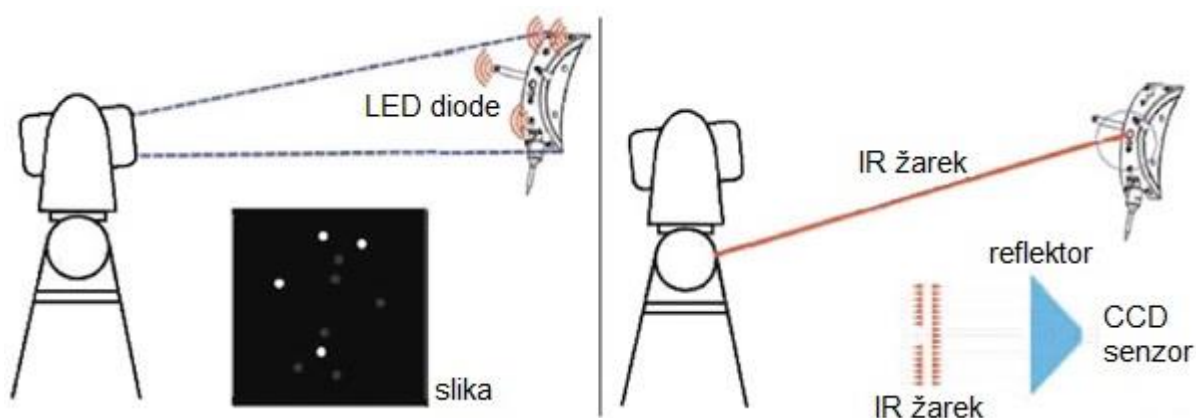


**Slika 6.7: Laserski sledilnik AT901, kamera T-Cam in merilna naprava T-Probe  
([www.hexagonmetrology.us](http://www.hexagonmetrology.us))**

Merilna naprava *T-Probe* pri meritvi oddaja utripajočo infrardečo svetlobo znane valovne dolžine. Kamera *T-Cam* uporablja zaslonko, ki se vključi pri isti frekvenci, kot utripajo infrardeče LED diode na napravi. Na ta način kamera učinkovito »izključi« preostale vire svetlobe oziroma kamera »vidi« samo merilno napravo *T-Probe*.

Komunikacija med merilno napravo *T-Probe* in sistemom za sledenje (laserski sledilnik in kamera) poteka na dva različna načina.

Po prvem načinu merilna naprava komunicira s kamero preko svetlobnih LED diod. Položaj svetlobnih diod se preslika na slikovno ravnino digitalne kamere. Preko posebnih matematičnih algoritmov se nato določi nagib naprave v prostoru (slika 6.8).



**Slika 6.8: Levo – povezava merilni sistem in merilna naprava; desno – povezava merilna naprava in merilni sistem (Dold, 2004, str. 44)**




Komunikacija med merilno napravo in merilnim sistemom se realizira z IR laserskim merilnim žarkom za merjenje dolžine. Laserski žarek tako modulira signal, ki ga merilna naprava sprejme na CCD senzorju, ki se nahaja tik za reflektorjem. S tem se določi naklon in odklon merilne naprave T-Probe v prostoru.

S tema načinoma povezave med laserskim sledilnikom, digitalno kamero in merilno napravo T-Probe postanejo številne merske operacije avtomatizirane. Pri postavitvi T-Probe v vidno polje kamere T-Cam sistem avtomatsko prepozna, kakšno mersko tipalo (vrsta, dolžina) se uporablja. Z ročno vodeno merilno napravo T-Probe lahko opravimo visoko avtomatizirane meritve znotraj merskega volumna do 50 m.

V preglednici 6.1 so opisane tehnične lastnosti in natančnosti naprave T-Probe.

**Preglednica 6.1: Tehnične lastnosti in natančnosti Leica T-Probe**

<p style="text-align: center;"><b>LEICA T-PROBE</b></p> 	NATANČNOST (MPE)**	<b>± 0.035 mm</b>
	MERILNI VOLUMEN (Ø)	<b>18 m (T-Cam MR)</b> <b>30 m (T-Cam LR)</b> <b>50 m (T-Cam XR)</b>
PREMIK Hz V	<b>360°</b> <b>± 45°</b>	
KOTI ZAJEMA NAKLON (pitch) ODKLON (yaw) NAGIB (roll)	<b>± 45°</b> <b>± 45°</b> <b>360°</b>	
MERILNA IN SLEDILNA ZMOGLJIVOST HITROST MERITEV (efektivno) HITROST SLEDENJA (vse smeri) POSPEŠEK (vse smeri)	<b>1000 točk/s</b> <b>&gt; 1 m/s</b> <b>1 g</b>	
MASA	<b>670 g</b> (naprava in baterija)	
<b>MERILNE NEGOTOVOSTI</b>		
MERILNA NEGOTOVOST 3D TOČKE $U_{3D}^1$	<b>100 µm (&lt; 7 m)</b> <b>30 µm + 10 µm/m (&gt; 7 m)</b>	
MERILNA NEGOTOVOST PROSTORSKE DOLŽINE $U_L^2$	<b>± 60 µm (&lt; 8.5 m)</b> <b>± 7 µm/m (&gt; 8.5 m)</b>	
MERILNA NEGOTOVOST PREMERA KROGLE $U_R^3$	<b>± 20 µm + 2 µm/m</b>	

\*Vir: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com).

\*\*Merilna negotovost koordinate  $U_{xyz}$  je definirana kot razlika med merjeno koordinato točke in njeno nominalno vrednostjo. Vse specifikacije so izračunane glede na standard ISO10360-10.

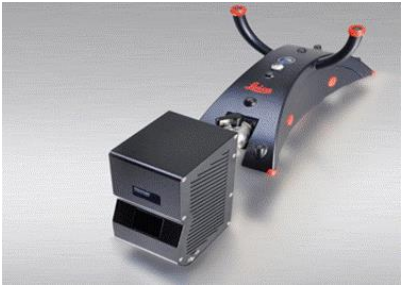
<sup>1</sup>Definirana kot razdalja med merjeni koordinatami točke in nominalnim koordinatami te točke. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija razdalje med laserskim sledilnikom in merjeno točko.

<sup>2</sup>Definirana kot razlika med merjeno dolžino in njeno nominalno vrednostjo. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija najkrajše razdalje med laserskim sledilnikom in merjeno dolžino.

<sup>3</sup>Definirana kot razlika med merjenim premerom krogle in njeno nominalno vrednostjo. Prevzete vrednosti krogelnega premera v omenjenih specifikacijah so med 10 do 50 mm. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija razdalje med laserskim sledilnikom in merjenim premerom krogle.

Kot dodatek lahko na merilno napravo namestimo linijski skener *PROBScanner* z integrirano kontrolno enoto. Na ta način pridobimo enostaven in cenovno dostopen laserski skener. V preglednici 6.2 so opisane značilnosti skenerja.

**Preglednica 6.2: Tehnične značilnosti Leica PROBScanner**

LEICA PROBScanner		TIPIČNE NATANČNOSTI	
	MERILNA NEGOTOVOST PREMERA KROGLE ( $2\sigma$ )*	<b>0.10 mm</b>	
	MERILNA NEGOTOVOST RAVNE POVRŠINE ( $2\sigma$ )*	<b>0.16 mm</b>	
<b>SPECIFIKACIJE SKENERJA (Steinbichler Scan-Probe)**</b>			
MERSKA GLOBINA	<b>100 mm</b>		
ŠIRINA SKENIRANJA	<b>55 mm</b>		
RAZDALJA SKENIRANJA	<b>110 mm</b>		
FREKVENCA LINIJ	<b>100 linij/s</b>		
HITROST SKENIRANJA	<b>64 000 točk/s</b>		
ŠTEVILO TOČK NA LINIJI	<b>640</b>		
GOSTOTA TOČK	<b>0.093 mm</b>		
NATANČNOST	<b>0.040 mm</b>		

\*Doseženo s sistemom Leica T-Probe pod stabilnimi pogoji (vir: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))).

\*\*Vir: specifikacije Steinbichler, januar 2010.

Zadnja novost podjetja je njihova merilna naprava Leica *B-Probe*. *Leica B-Probe* je brezžična naprava za merjenje koordinat, ki poveča zmogljivost laserskega sledilnika Leica AT402. Ročna naprava *B-Probe* je izdelana za kontrolo, poravnavo in montažo objektov velikih dimenzij in zapolnjuje vrzel med standardnim krogelnim reflektorjem in visoko zmogljivo 6DoF merilno napravo Leica *T-Probe*.



**Slika 6.9: Merilna naprava Leica B-Probe ([www.hexagonmetrology.us](http://www.hexagonmetrology.us))**

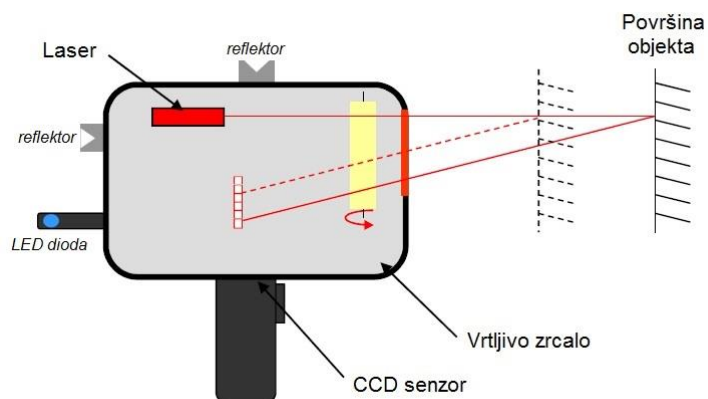


Slika 6.10: Primerjava natančnosti (www.leica-geosystems.com)

Naprava B-Probe deluje do oddaljenosti 10 m od laserskega sledilnika AT402 z natančnostjo 0.2 mm na celotnem merskem območju. S prestavljanjem laserskega sledilnika po prostoru lahko enostavno povečamo mersko območje sistema brez občutnega zmanjšanja natančnosti.

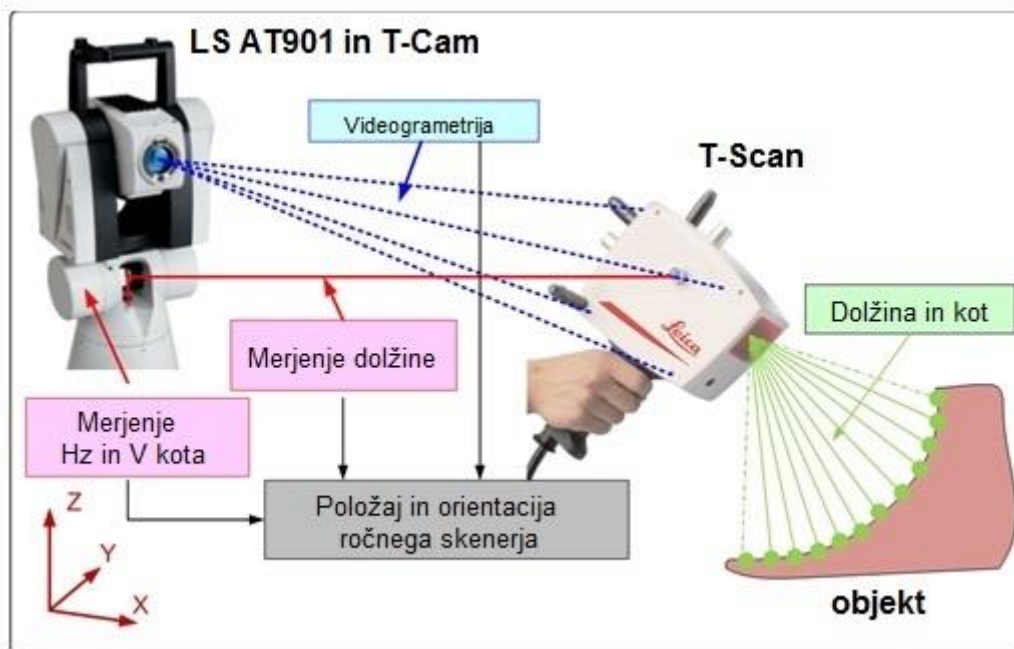
#### 6.1.4 Laserski sledilnik AT901, T-Cam in T-Scan

Leica T-Scan je ročni triangulacijski laserski skener, primeren za natančne meritve večjih objektov. Laserski žarek se projicira na površino objekta z uporabo hitro rotirajočega zrcala. Glede na razdaljo med izvorom laserskega žarka in objektom odbiti laserski žarek pade na CCD senzor na različnih mestih (slika 6.11).



Slika 6.11: Princip delovanja Leica T-Scan (www.hexagonmetrology.us)

Ročni laserski skenerji se uporabljajo relativno blizu merskega objekta. S skeniranjem tako lahko pridobimo 3D koordinate objekta. Vendar pa je tu pogoj, da mora biti za vsako merjeno točko znan prostorski položaj in orientacija skenerja. Pri podjetju Leica so to realizirali tako, da so ročni skener T-Scan združili z laserskim sledilnikom AT901 in digitalno kamero *T-Cam* (slika 6.12).




Slika 6.12: Multisenzorski merilni sistem Leica z ročnim skenerjem T-Scan (Steiger, 2009, str. 6)

Operater ročno vodi skener po površini merskega objekta. Na ta način se lahko prostorsko zajame tudi zelo kompleksne objekte. Prostorski položaj in orientacija ročnega skenerja se določita s pomočjo digitalne fotogrametrije v dejanskem času. V ta namen je ročni skener *T-Scan* opremljen s številnimi svetlobnimi LED diodami (9) in reflektorji (4) na vseh straneh naprave. Pri tem je potrebno paziti, da se skener vodi tako, da lahko v celotnem postopku meritev fotogrametrični sistem zajame zadostno število merilnih tarč (LED diod).

Zaradi hitrosti in visoke zmogljivosti lahko skener uporabljamo tudi za avtomatizirano skeniranje večjih objektov. To realiziramo tako, da skener namestimo na robotsko roko, ki se avtomatizirano giblje po predhodno določeni tirnici.

Trenutno je na trgu že četrta generacija ročnega skenerja *T-Scan 5*, ki je še natančnejši in je bolj zmogljiv pri skeniranju neobičajnih materialov. Odlikuje ga izjemna hitrost zajema točk. V preglednici 6.2 so zbrani tehnični podatki skenerja *T-Scan 5*.

**Preglednica 6.3: Tehnične lastnosti in natančnost Leica T-Scan 5**

 <p><b>LEICA T-SCAN 5</b></p>		<p><b>18 m (T-Cam MR)</b></p> <p><b>30 m (T-Cam LR)</b></p> <p><b>50 m (T-Cam XR)</b></p>
	<p>MERILNI VOLUMEN (Ø)</p>	
PREMIK Hz V		<p><b>360°</b> <b>± 45°</b></p>
KOTI ZAJEMA NAKLON (pitch) ODKLON (yaw) NAGIB (roll)		<p><b>± 45°</b> <b>± 45°</b> <b>360°</b></p>
MERILNA IN SLEDILNA ZMOGLJIVOST HITROST SLEDENJA (vse smeri) POSPEŠEK (vse smeri)		<p><b>&gt; 1 m/s</b> <b>1 g</b></p>
MERSKA GLOBINA ŠIRINA SKENIRANJA FERKVENCA LINIJ HITROST SKENIRANJA GOSTOTA TOČK		<p><b>do 200 mm</b> <b>100 mm</b> <b>do 160 linij/s</b> <b>210,000 točk/s</b> <b>0.075 mm</b></p>
MASA		<b>1.080 g</b>
<b>MERILNA NEGOTOVOSTI</b>		
MERILNA NEGOTOVOST PROSTORSKE DOLŽINE $U_L^1$ ( $2\sigma$ )		<p><b>± 60 μm (&lt; 8.5 m)</b> <b>± 26 μm + 4 μm/m (&gt; 8.5 m)</b></p>
MERILNA NEGOTOVOST PREMERA KROGLE $U_R^2$ ( $2\sigma$ )  $U_S^{**}$		<p><b>± 50 μm (&lt; 8.5 m)</b> <b>± 16 μm + 4 μm/m (&gt; 8.5 m)</b></p> <p><b>± 85 μm + 1.5 μm/m</b></p>
MERILNA NEGOTOVOST RAVNE POVRŠINE $U_P^3$ ( $2\sigma$ )		<b>± 80 μm + 3 μm/m</b>

\*Vir: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com).

<sup>1</sup>Definirana kot odstopanje med merjeno dolžino in njeno nominalno vrednostjo. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija najkrajše razdalje med laserskim sledilnikom in merjeno dolžino. Centra dveh fiksno nameščenih krogel (radij med 15 in 20 mm) na koncu referenčne dolžine predstavljata nominalno razdaljo. Merjena razdalja med centri krogel je izračunana z uporabo podatkov skeniranja vseh štirih strani naprave T-Scan.

<sup>2</sup>Definirana kot odstopanje med merjenim premerom krogle in njeno nominalno vrednostjo. Prevzete vrednosti krogelnega premera v omenjenih specifikacijah so med 10 do 50 mm. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija razdalje med laserskim sledilnikom in merjenim premerom krogle. Podatki skeniranja z vseh strani naprave so zbrani za izračun premera krogle in površino krogle.

<sup>3</sup>Definirana kot vrednost vseh odstopanj glede na najboljšo prilegajočo ravnino, ki je izračunana z uporabo vseh skeniranih točk. Podatki skeniranja z vseh strani naprave so zbrani za izračun ravne površine. Omenjena merilna negotovost je dosegljiva z uporabo T-Scan z gostoto točk vsaj 0.35 mm in linijskim razmikom vsaj 0.35 mm pod stabilnimi pogoji okolja.

\*\*Merilna negotovost krogelne površine  $U_S$  je definirana kot vrednost vseh odstopanj glede na najboljšo prilagajočo kroglo, ki je izračunana z uporabo vseh skeniranih točk.

### 6.1.5 Laserski sledilnik AT901, T-Cam in T-Mac

Leica T-Mac je 6DoF merilni senzor za precizno sledenje robotov, kar omogoča povsem avtomatizirano merjenje. Posebna oblika merskega senzorja omogoča pritrditev na različne robotske roke ali druge avtomatizirane naprave. Na napravo lahko namestimo dodatne reflektorje, kar omogoča sledenje pri vsaki orientaciji in položaju. Senzor T-Mac komunicira s sistemom preko svetlobnih LED diod in zvočnih signalov.



**Slika 6.13: Laserski sledilnik AT901, kamera T-Cam in merilni senzor T-Mac  
([www.hexagonmetrology.us](http://www.hexagonmetrology.us))**

Merilni sistem s senzorjem T-Mac se uporablja za kontrolo prostorskega položaja robotov ali drugih naprav v šestih prostostnih stopnjah (kalibracija) za popolnoma avtomatizirano merjenje koordinat točk merskega objekta (z namestitvijo merskega tipala) in za precizno vodenje robotov pri montaži posameznih delov objektov velikih dimenzij (npr. v letalski industriji). V preglednici 6.4 so navedeni tehnični podatki senzorja.

**Preglednica 6.4: Tehnične lastnosti in natančnost merilnega senzorja T-Mac**

<p><b>LEICA T-MAC</b></p> 	<p>MERILNI VOLUMEN (Ø)</p>	<p><b>18 m (T-Cam MR)</b> <b>30 m (T-Cam LR)</b></p>
<p>PREMIK Hz V</p>	<p><b>360°</b> <b>± 45°</b></p>	
<p>KOTI ZAJEMA NAKLON (pitch) ODKLON (yaw) NAGIB (roll)</p>	<p><b>± 45°</b> <b>± 45°</b> <b>360°</b></p>	
<p>MERILNA IN SLEDILNA ZMOGLJIVOST HITROST MERITEV (efektivno) HITROST SLEDENJA (vse smeri) POSPEŠEK (vse smeri)</p>	<p><b>1000 točk/s</b> <b>&gt; 1 m/s</b> <b>1 g</b></p>	
<p>MASA</p>	<p><b>1.480 g</b></p>	
<b>NATANČNOSTI</b>		
<p>KOTNA NATANČNOST</p>	<p><b>0.01° (= 18 µm/100 mm)</b></p>	
<p>POLOŽAJNA NATANČNOST ZA TIPIČNE ROBOTSKE APLIKACIJE</p>	<p><b>50 µm</b></p>	
<p>POLOŽAJNA NATANČNOST</p>	<p><b>± 15 µm + 6 µm/m</b></p>	

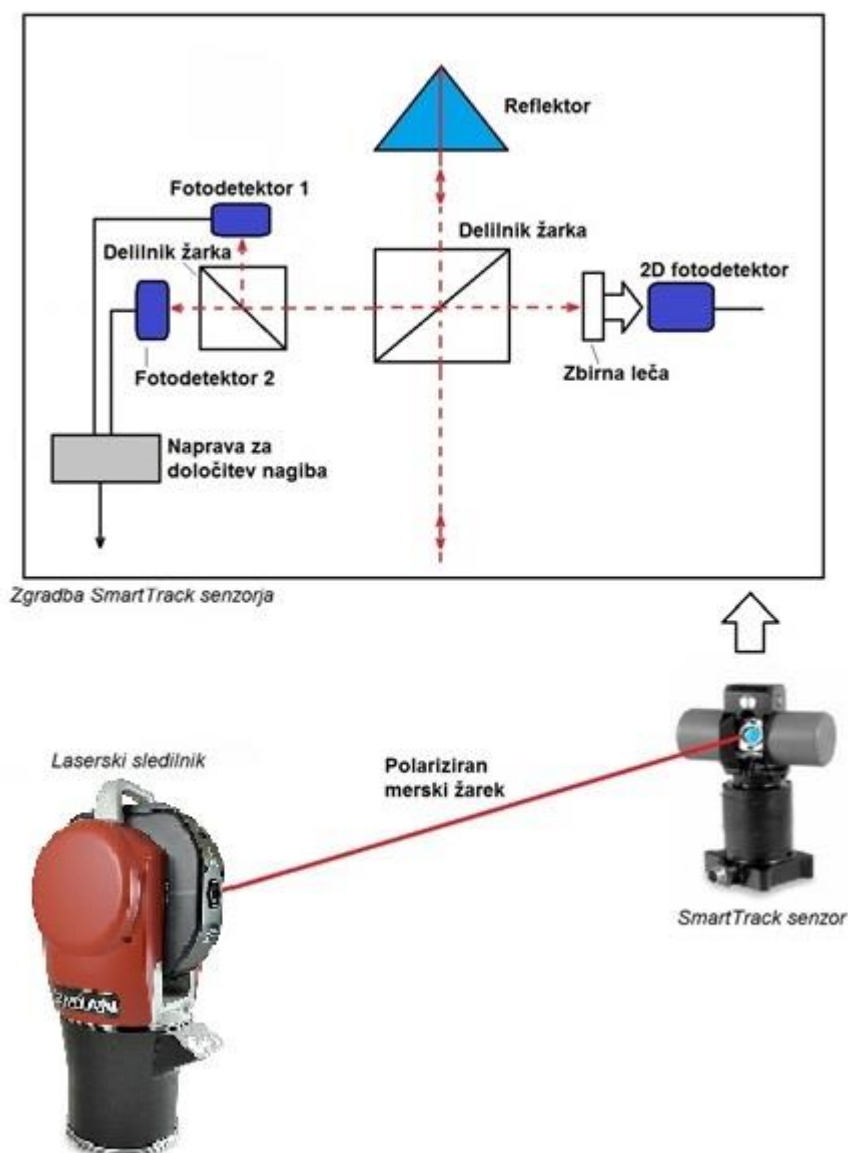
\*Vir: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com).

## 6.2 Multisenzorski sistem API

### 6.2.1 Laserski sledilnik Radian in merilni senzor SmartTrack

Merilni sistem združuje kombinacijo laserskega sledilnika (*Radian*) in aktivnega merskega sensorja (*SmartTrack*) za doseg laserskega sledenja v šestih prostostnih stopnjah (6DoF). Kot že omenjeno, so ti elementi nagib, naklon in odklon ter polarne koordinate merskega sensorja. Z uporabo aktivne, motorizirane merilne naprave koordinate naprave ohranjajo relativno pravokotno zvezo glede na vpadni laserski žarek.

Podatka o naklonu in odklonu pridobimo iz optičnega enkoderja, ki je nameščen znotraj sensorja *SmartTrack*. Nagib pa pridobimo iz obdelave merskega žarka laserskega sledilnika. Slika 6.14 prikazuje komponente za določitev orientacije merskega sensorja.



Slika 6.14: Shema 6D merskega sistema



Polariziran merilni žarek se na prvem delilniku žarka deli v tri smeri, ki vodijo do zbirne leče, reflektorja in delilnika polariziranega žarka.


Smer žarka proti zbirni leči je osredotočena na dvodimenzionalen fotodetektor, iz katerega pridobimo podatka (merska signala) o naklonu in odklonu, ki usmerjata motorje merskega senzorja, tako da je ravnina reflektorja vedno pravokotna na vpadni merilni žarek.

Pot merskega žarka mimo delilnika žarka proti reflektorju, kjer se odbije in potuje nazaj proti laserskemu sledilniku, služi za merjenje razdalje med instrumentom in merilnim senzorjem.

Tretja pot laserskega žarka je smer proti delilniku polariziranega žarka, ki deli polariziran merilni žarek na dva dela. Prvi del (vertikalna komponenta polariziranega žarka) je usmerjen proti prvemu fotodetektorju, drugi del (horizontalna komponenta polariziranega žarka) pa proti drugemu fotodetektorju. Na obeh fotodetektorjih se generira merilni signal, ki je ustrezen intenziteti horizontalne oziroma vertikalne komponente polariziranega merskega žarka. Ojačevalnik oba merska signala združi in generira merilni signal, ki predstavlja nagib med laserskim sledilnikom in merilnim senzorjem.

Podatek o 3D položaju senzorja (reflektorja) pridobimo iz znanih postopkov, ki so bili opisani v predhodnih poglavjih. V preglednici 6.4 so zbrane tehnične lastnosti merskega senzorja.

#### Preglednica 6.5: Tehnični podatki merilnega senzorja API SmartTrack

API SmartTRACK	
	NAKLON (pitch) $\pm 55^\circ$
	ODKLON (yaw) $\pm 140^\circ$
	NAGIB (roll) $\pm 30^\circ$
	RAZDALJA SLEDENJA 40 m
	HITROST SLEDENJA 50°/sek
	NATANČNOST CENTRIRANJA $\pm 25 \mu\text{m}$
	KOTNA LOČLJIVOST $\pm 3 \text{ arc sek}$

\*Vir: [www.apisensor.com](http://www.apisensor.com).


Poseben primer takšnega merskega sistema je *SmartScan*, ki združuje laserski sledilnik, merilni senzor *SmartTrack* in laserski skener *Steinbichler COMET5* za avtomatizirano skeniranje objektov velikih dimenzij. Sistem izkorišča natančnost laserskega sledilnika in merskega senzorja za določitev točnega položaja in orientacije skenerja. Programska oprema sistema z uporabo podatkov o položaju in orientaciji skenerja nato združi različne skenirane bloke ter tako ustvari enoten 3D oblak točk skeniranega objekta. Z uporabo preprostega

sistema za pozicioniranje skenerja (npr. robotska roka) postane merjenje oziroma skeniranje popolnoma avtomatizirano.

### 6.2.2 Laserski sledilnik Radian in merilna naprava API I-360

Merilna naprava API I-360 je kombinacija merilne naprave *IntelliProbe 360* in ročnega skenerja *IntelliScan 360*, ki ponuja vsestranski in obširni dodatek k laserskemu sledilniku. Položaj in orientacija naprave v prostoru sta določena preko vgrajenega senzorja in giroskopa, kar je natančneje kot uporaba laserskega sledilnika skupaj z CCD kamero, še posebej pri povečanju merske dolžine. V spodnjih preglednicah so zbrane tehnične lastnosti merilne naprave *IntelliProbe* in ročnega skenerja *IntelliScan*.

**Preglednica 6.6: Tehnični podatki in natančnosti merilne naprave API IntelliProbe 360**

<b>API IntelliProbe 360</b>			
	BREŽIČNO DELOVANJE	> 40 m	
	FREKVENCA DELOVANJA	2.4 GHz	
	ČAS DELOVANJA BATERIJE	3-9 ur	
<b>MERILNE NEGOTOVOSTI</b>			
<i>HORIZONTALNI POLOŽAJ MERSKEGA TIPALA (dolžine 50 mm)</i>			
	<i>7 m</i>	<i>15 m</i>	<i>&gt; 15 m</i>
MERILNA NEGOTOVOST 3D TOČKE 3D <sup>U1</sup>	<b>100 µm</b>	<b>140 µm</b>	<b>65 µm + 5 µm/m</b>
MERILNA NEGOTOVOST PROSTORSKE DOLŽINE SL <sup>U2</sup>	<b>50 µm</b>	<b>90 µm</b>	<b>15 µm + 5 µm/m</b>
MERILNA NEGOTOVOST PREMERA KROGLE R <sup>U3</sup>	<b>30 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>15 µm + 2 µm/m</b>
<i>VERTIKALNI POLOŽAJ MERSKEGA TIPALA (dolžine 50 mm)</i>			
	<i>7 m</i>	<i>15 m</i>	<i>&gt; 15 m</i>
MERILNA NEGOTOVOST 3D TOČKE 3D <sup>U1</sup>	<b>125 µm</b>	<b>165 µm</b>	<b>90 µm + 5 µm/m</b>
MERILNA NEGOTOVOST PROSTORSKE DOLŽINE SL <sup>U2</sup>	<b>65 µm</b>	<b>105 µm</b>	<b>30 µm + 5 µm/m</b>
MERILNA NEGOTOVOST PREMERA KROGLE R <sup>U3</sup>	<b>34 µm</b>	<b>50 µm</b>	<b>20 µm + 2 µm/m</b>

\* Vir: [www.apisensor.com](http://www.apisensor.com).


<sup>1</sup>Definirana kot razdalja med merjenimi koordinatami točke in nominalno vrednostjo. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija razdalje med laserskim sledilnikom in merjeno točko.

<sup>2</sup>Definirana kot razlika med merjeno dolžino in njeno nominalno vrednostjo. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija najkrajše razdalje med laserskim sledilnikom in merjeno dolžino.

<sup>3</sup>Definirana kot razlika med merjenim premerom krogle in njeno nominalno vrednostjo. Prevzete vrednosti krogelnega premera v omenjenih specifikacijah so med 10 do 50 mm. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija razdalje med laserskim sledilnikom in merjenim premerom krogle.

VSE VREDNOSTI SO 2SIGMA!

**Preglednica 6.7: Tehnični podatki in natančnosti ročnega skenerja API IntelliScan 360**

<b>API IntelliScan 360</b>			
			
<b>MERILNE NEGOTOVOSTI</b>	<i>7 m</i>	<i>15 m</i>	<i>&gt; 15 m</i>
MERILNA NEGOTOVOST PREMERA KROGLE R <sup>U 1</sup>	<b>50 µm</b>	<b>75 µm</b>	<b>30 µm + 5 µm/m</b>
MERILNA NEGOTOVOST RAVNE POVRŠINE S <sub>r</sub> <sup>U 2</sup>	<b>100 µm</b>	<b>110 µm</b>	<b>80 µm + 2 µm/m</b>

\* Vir: [www.apisensor.com](http://www.apisensor.com).

<sup>1</sup>Definirana kot razlika med merjenim premerom krogle in njeno nominalno vrednostjo. Prevzete vrednosti krogelnega premera v omenjenih specifikacijah so med 10 do 50 mm. Ta merilna negotovost je podana kot funkcija razdalje med laserskim sledilnikom in merjenim premerom krogle.

<sup>2</sup>Definirana kot razlika med merjeno površino in njeno nominalno vrednostjo.




VSE VREDNOSTI SO 2SIGMA!

### 6.3 Multisenzorski sistem Faro

Multisenzorski sistem *Faro TrackArm* je prenosni 3D merilni sistem, ki ga sestavljata laserski sledilnik *Vantage* ter linija merilnih rok *FaroArm*. Kombinacija teh dveh prenosnih koordinatno merilnih naprav poveča mersko območje z enostavnim in hitrim prestavljanjem položaja merilne roke znotraj dosega laserskega sledilnika.

*Merilna roka* je prenosna koordinatno merilna naprava, ki določi in registrira položaj konice merskega tipala v 3D prostoru. Podjetje Faro ima v svoji ponudbi tri modele merilnih rok *FaroArm* – *Edge*, *Prime* in *Fusion*, ki uporabljajo dve ali več čitalnih glav enkoderjev za izboljšanje natančnosti pri merjenju kotov. Tehnične lastnosti in natančnosti merilnih rok so prikazane v preglednici 6.8.

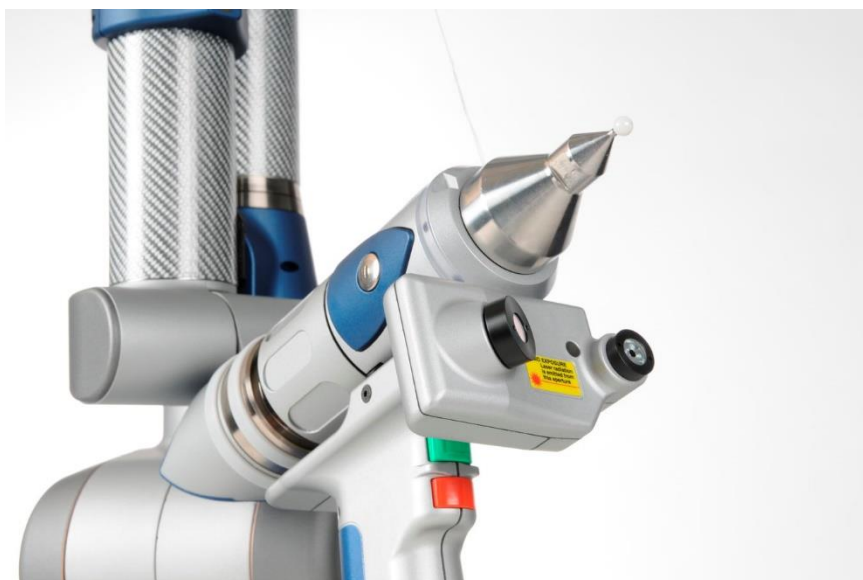
**Preglednica 6.8: Tehnične lastnosti in natančnosti merilnih rok FaroArm**

<b>FARO EDGE</b> (število osi: 7) 	Doseg [m]		Ponovljivost [mm]		Natančnost [mm]	
		1.8		0.024		± 0.034
	2.7		0.029		± 0.041	
	3.7		0.064		± 0.091	
<b>FARO PRIME</b> (število osi: 6) 	1.2		0.016		± 0.023	
	1.8		0.019		± 0.027	
	2.4		0.024		± 0.034	
	3.0		0.042		± 0.059	
	3.7		0.060		± 0.085	
<b>FARO FUSION</b> (število osi: 6 ali 7) 	osi		6	7	6	7
	1.8		0.036	0.046	± 0.051	± 0.064
	2.4		0.043	0.051	± 0.061	± 0.071
	3.0		0.074	0.089	± 0.104	± 0.124
	3.7		0.104	0.124	± 0.147	± 0.175

\*Vir: [www.faro.com](http://www.faro.com).

*Faro ScanArm* je popolnoma integrirana, prenosna merska naprava. Združuje vse prednosti merilne roke z ročnim linijskim laserskim skenerjem in je učinkovit kontakten/brezkontakten merilni sistem. S pomočjo laserskega skenerja lahko digitaliziramo obliko in položaj merskega objekta, ki je v vidnem polju skenerja.

Posebna prednost tega sistema je, da lahko izvajamo tako kontaktne kot brezkontaktne meritve istočasno, npr. pri skeniranju merskega objekta lahko brez zamenjave komponent merilne roke izmerimo določen položaj na merskem objektu z uporabo merskega tipala z visoko natančnostjo.



Slika 6.15: Sistem Faro ScanArm ES ([www.faro.com](http://www.faro.com))

Merilna roka deluje kot referenčna naprava, ki sledi in podaja informacije o položaju vsakega laserskega profila v prostoru. Ko laserski žarek »pometa« po merskem objektu, je takoj zajetih ogromno število točk. Končni rezultat skeniranja je popoln 3D digitalni model objekta.

#### Preglednica 6.9: Tehnične lastnosti in natančnost linijskega laserskega skenerja Faro

<b>FARO EDGE ScanArm ES</b> (za model Edge)	Natančnost [mm]	<b>± 0.035</b>
	Ponovljivost [mm]	<b>0.035</b>
	Število točk/liniji	<b>752</b>
	Efektivna širina skeniranja	<b>53 mm–90 mm</b>
	Frekvenca skeniranja	<b>45,120 točk/s</b>
	Laserski razred	<b>2</b>

\*Vir: [www.faro.com](http://www.faro.com).

Zaradi velikih dimenzij merilnih objektov z enega samega stojišča laserskega sledilnika velikokrat ne moremo pridobiti celotne informacije oziroma podatkov o obliki in velikosti objekta. Prav zaradi te omejitve so pri podjetju Faro na trg poslali merilni sistem Faro TrackArm.

Merilno roko postavimo v mersko območje laserskega sledilnika. Vzpostaviti je potrebno povezavo med računalnikom, laserskim sledilnikom in merilno roko. To se izvede preko

brežžične povezave. Enotni koordinatni sistem (datum) obeh naprav se vzpostavi s pomočjo krogelnega reflektorja (del dodatne opreme), ki se namesti na vrh merilne roke. Laserski sledilnik sledi gibanju krogelnega reflektorja po prostoru in registrira položaje reflektorja. Praktično se to izvede tako, da s krogelnim reflektorjem oziroma merilno roko v prostoru opišemo osmico. Na ta način sinhroniziramo koordinate oziroma vzpostavimo enoten koordinatni sistem merilne roke in laserskega sledilnika. Ta postopek je potrebno ponoviti po vsaki zamenjavi stojišča merilne roke.



**Slika 6.16: Primer uporabe sistema Faro TrackArm ([www.faro.com](http://www.faro.com))**

Sistem lahko hitro preklaplja med laserskim sledilnikom in merilno roko, kar omogoča merjenje točk, ki so zunaj vidnega polja laserskega sledilnika. Rešitev je idealno primerna za merjenje objektov velikih dimenzij v avtomobilski, letalski in težki industriji, kot tudi za dobavitelje večjih delov v industriji, npr. vodna industrija, vetrna industrija.

Sistem *TrackArm* je stroškovno učinkovita alternativa konkurenčnim sistemom. Skupni strošek nakupa tako merilne roke kot laserskega sledilnika je še vedno manjši kot 2/3 stroška konkurenčnih sistemov. Poleg tega lahko napravi uporabljamo ločeno, saj sta samostojni merilni enoti. Tipična merska zmogljivost sistema *TrackArm* je  $80 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m/m}$ .

## 7 APLIKACIJE MULTISENZORSKIH SISTEMOV V INDUSTRIJI

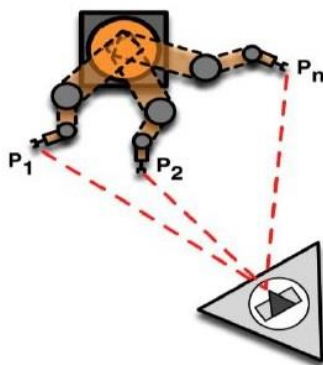
### 7.1 Precizna industrija

Izraz precizna industrija se uporablja za področja v industriji, ki se ukvarjajo z zelo natančnimi postopki, npr. kontrolo delovanja avtomatiziranih robotskih sistemov, postavitvijo in kontrolo proizvodnih linij, kontrolo izdelave visokotehnoloških in dragih delov itd. Kot sam izraz pove, je najpomembnejši element natančnost – preciznost. Glavno področje precizne industrije so predvsem roboti, ki avtomatizirano opravljajo delovni proces. Prav natančnost položaja in prostorskega gibanja robota je izrednega pomena, tako da delovni proces poteka avtomatizirano in brez napak. Prav napake v pozicioniranju in gibanju robota lahko pripeljejo do napak na proizvodu in predvsem finančnih izgub.

Zahteve v industrijski proizvodnji se povečujejo ne samo glede večje natančnosti, ampak tudi večje hitrosti delovanja in produktivnosti. Vedno več je nalog, ki zahtevajo uporabo robotov. Roboti in stroji so natančni, vendar velikokrat natančnost le-teh ni zadovoljiva za določeno nalogo. Izdelava natančnejših robotov ali bolj robustnih strojev poveča zapletenost in ceno.

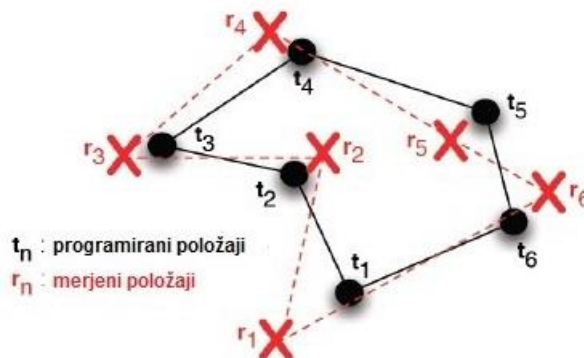
Glede na tolerance posameznih komponent, ki so uporabljene za izdelavo industrijskih robotov, vrednost pravega položaja in orientacije središčne točke orodja robota (TCP točka) nikoli ne bo enaka programirani vrednosti. Vodenje robota se vselej spopada s položajnimi odkloni v izračunih, katerih vzrok so med drugim tako tolerance pri geometričnih velikostih delov robotskih rok, kot tudi omejena ločljivost integrirane merske enote. Za zagotovitev ustrezne kakovosti določene naloge robota potrebujemo minimalno natančnost položaja TCP točke robota. Tukaj se pojavi vprašanje, kako na objektivni način določiti trenutno natančnost robota, ki je neodvisna od časa. Eden večjih pristopov je bilo definiranje mednarodnega standarda za ugotavljanje natančnosti robota, objavljenega v DIN EN ISO 9283.

Kot je prikazano na sliki 7.1, se robot premika na različne položaje znotraj svojega delovnega območja, kjer laserski sledilnik meri položaje TCP (na orodju nameščen reflektor ali *T-Mac*). Končni rezultati se lahko uporabijo za izračun statične položajne in ponavljajoče natančnosti, ki je v skladu z ISO9283.



Slika 7.1: Merjenje položajev točke TCP robota z laserskim sledilnikom (Kleinkes, 2007)

Z uporabo laserskega sledilnika lahko učinkovito in enostavno določimo osnovno območje delovanja robota, ki se ga potrebuje pri primerjavi merjenih in programiranih koordinat. Slika 7.2 prikazuje razliko med merjenimi in programiranimi položaji TCP točke robota, pri premikanju robota na več različnih položajev.

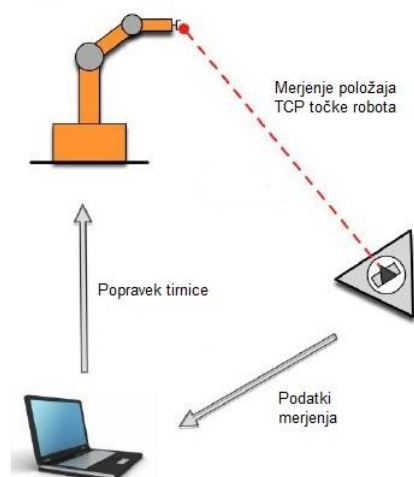


**Slika 7.2: Primerjava merjenih in programiranih položajev (Kleinkes, 2007)**

Po procesu merjenja lahko rezultat transformacije med laserskim sledilnikom in robotom izračunamo z iterativnim reševanjem niza nelinearnih funkcij (npr. metoda najmanjših kvadratov). Z uporabo te metode lahko na brezkontaktni način določimo osnovno območje delovanja robota. To metodo lahko uporabimo tudi za določitev geometričnih parametrov teoretičnega modela robota. Standardni niz parametrov, ki so vključeni med procesom izdelave robota, se ne bo točno prilagajal dejanskim geometričnim parametrom robota. To rešimo z merjenjem točke TCP v šestih prostostnih stopnjah.

Velika frekvenca meritev sodobnih laserskih sledilnikov omogoča opazovanje gibanja točke TCP v (navidezno) neprekinjenem načinu. V kombinaciji z velikim območjem merjenja (do 60 in več metrov premera) lahko analiziramo tudi gibanje robotov večjih dimenzij. Avtomatizirana programska oprema, ki usmerja laserski sledilnik preko programskega vmesnika, lahko sinhronizira merilni proces glede na smeri premikanja robota brez prisotnosti operaterja. Za predstavbo celotnega sistema slika 7.3 prikazuje interakcijo med računalnikom, robotom in laserskim sledilnikom.

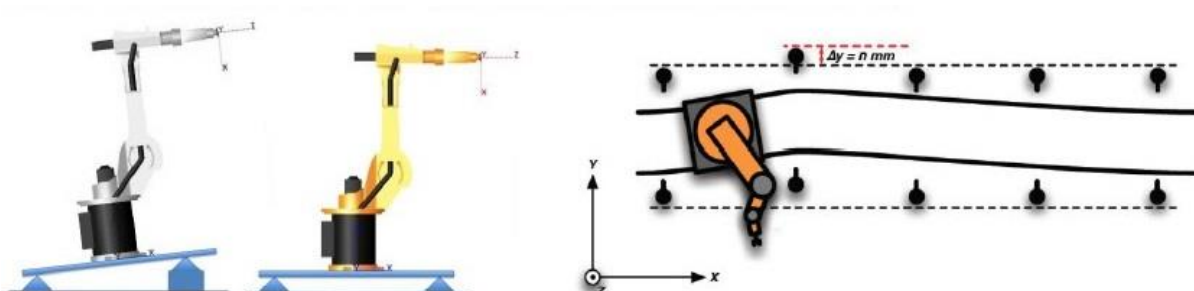




**Slika 7.3: Dinamična povezava med robotom, laserskim sledilnikom in računalnikom (Kleinkes, 2007)**

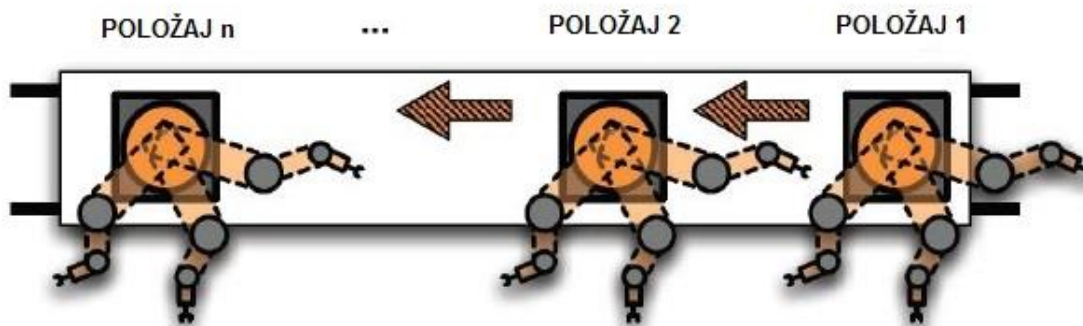
Za ugotavljanje popravkov položajev (tirnice) robota je idealna rešitev stalno merjenje TCP točke robota med njegovim delovanjem. V tem primeru so vse meritve in popravki določeni v lokalnem koordinatnem sistemu objekta in s tem se izognemo netočnosti v določitvi osnovnega območja delovanja robota. Prav tako je vsaka vplivna komponenta robotskega sistema integrirana v skupino pogreškov, ki vplivajo na položaj TCP točke. S kontrolo gibanja TCP točke lahko vse pogreške kompenziramo z enim samim vektorjem popravkov, ki ga izračunamo s pomočjo natančnih merilnih podatkov laserskega sledilnika.

Kot primer ključne zunanje komponente robota velja omeniti *linearno tirnico*. Linearne tirnice se, predvsem v avtomobilski industriji, uporabljajo za razširitev delovnega območja robota vzdolž proizvodne linije in predstavlja enega izmed najpomembnejših vplivov na natančnost robotskega sistema. Najtežavnejša naloga je določitev nelinearnih deformacij tirnic. Zaradi konstrukcijskih omejitev je tirnica nameščena na enojne, paralelne in višinsko nastavljive opornike. Nastavitev točne višine posameznega opornika za doseg ravne linije tirnice se običajno izvede med procesom montaže (brez robota). V tem koraku je pomembna nastavitev pravilne višine tirnice na posameznem oporniku in pravilnega položaja opornika na tleh. Oba postopka povzročata nelinearnost tirnice v različnih koordinatah (višinske in položajne koordinate). Spodnja slika prikazuje možna odstopanja zaradi nenatančne nastavitve višine in položaja opornika.



**Slika 7.4: Odstopanja zaradi slabe montaže tirnic (Kleinkes, 2007)**

Z uporabo laserskega sledilnika lahko uvedemo nov pristop v nastavitvi linearnih tirnic za robotske sisteme. Ta pristop se odraža v merjenju TCP točke robota za določitev osnovnega območja delovanja robota (slika 7.5).



**Slika 7.5: Merjenje območja delovanja robota na različnih položajih tirnice (Kleinkes, 2007)**

Po tem postopku lahko uporabimo šestdimenzionalni opis linearnosti tirnice za izdelavo matematičnega modela. Ko izdelamo model za vsak programiran položaj robota, lahko izračunamo vektor popravkov (6D) za izravnavo trenutne lokalne nelinearnosti tirnice. Ena izmed velikih prednosti te metode popravkov je integracija robota kot vplivnega faktorja v procesu odkrivanja nelinearnosti tirnice. Različni parametri (npr. vpliv teže ali sil na tirnico), ki jih povzroča konfiguracija robotske roke, so integrirani v odkriti nelinearnosti tirnice.

## 7.2 Avtomobilska industrija

V današnjem času je izdelava avtomobila večinoma avtomatiziran proces z visoko natančnimi industrijskimi roboti. Izdelava avtomobila poteka v več fazah, od oblikovanja, izdelave prototipa do serijske proizvodnje. Prav v vseh fazah izdelave je pomembna pridobitev kvalitetnih in zanesljivih podatkov o modelu avtomobila ter samem procesu izdelave. Ker je izdelava avtomobila dinamičen proces, je uporaba tradicionalnih koordinatno merilnih naprav za pridobitev teh podatkov neprimerna, predvsem zaradi časovnih zamud in s tem visokih stroškov v primeru prenosa posamezne komponente do naprave. Zato je najbolj primerna oblika zajema podatkov sistem laserskega sledilnika. Zaradi njegove fleksibilnosti ni potrebno zaustaviti procesa izdelave, saj meritve lahko opravimo med samo proizvodnjo.

Uporaba sistema laserskega sledilnika je prisotna v vseh fazah izdelave. V začetni fazi je potrebno digitalizirati model avtomobila (narejenega iz gline) z uporabo ročnega skenerja za primerjavo vrednosti s CAD modelom.

Za izdelavo prototipa je najprej potrebno izdelati vsa potrebna orodja. Ta orodja so varilni in montažni roboti, ki jih je potrebno kalibrirati (glej 7.1). Ta faza procesa je zelo pomembna, saj je potrebno pridobiti natančne podatke o vseh komponentah avtomobila (šasija, vrata, notranjost ...), ki jih je potrebno posredovati dobaviteljem teh komponent. Običajni postopki so brezkontaktni (ročni skener) in kontaktni (mersko tipalo) meritve celotnega vozila. Vse

pridobljene rezultate meritev ponovno primerjamo s CAD modelom za pridobitev informacije o kvaliteti izdelave prototipa.



**Slika 7.6: Uporaba merilnega sistema Leica ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))**

Na koncu in med samim procesom serijske proizvodnje je potrebno preverjati tudi kvaliteto izdelave. Tako lahko med samim procesom izdelave hitro pridobimo informacije o morebitnih odstopanjih, ki so lahko posledica neoptimalnega delovanja robotov.

### **7.3 Letalska industrija**

Izdelava letala je kompleksen proces, zato je visoka natančnost pri sami izdelavi in montaži ključna. Tako kot avtomobil je letalo sestavljeno iz številnih komponent različnih dimenzij, ki se morajo med seboj natančno prilegati. Zaradi svoje fleksibilnosti in predvsem visoke natančnosti zajema 3D in 6D podatkov je sistem laserskega sledilnika postal standard v letalski industriji.

V grobem se izdelava letala lahko deli na dva dela – izdelavo posameznih komponent in njihovo montažo. Komponente letala so izdelane na različnih lokacijah, zato je pomembno, da so le-te natančno izdelane. Kvaliteto izdelave komponent se kontrolira z brezkontaktnimi in kontaktnimi meritvami. Kombinacija laserskega sledilnika in ročnega skenerja omogoča digitalizacijo površine posameznih delov in primerjavo teh rezultatov s CAD modeli. Pri kontaktnih meritvah se uporablja laserski sledilnik in ustrezne merilne naprave s tipali za točkovni zajem težko dostopnih ali nevidnih mest. Zaradi velikih dimenzij posameznih komponent se meritve večinoma opravljajo avtomatizirano s pomočjo robotov, na katere namestimo merilne naprave ali ročni skener.



**Slika 7.7: Uporaba merilne naprave T-Probe za doseganje težko dostopnih mest komponent letala ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))**

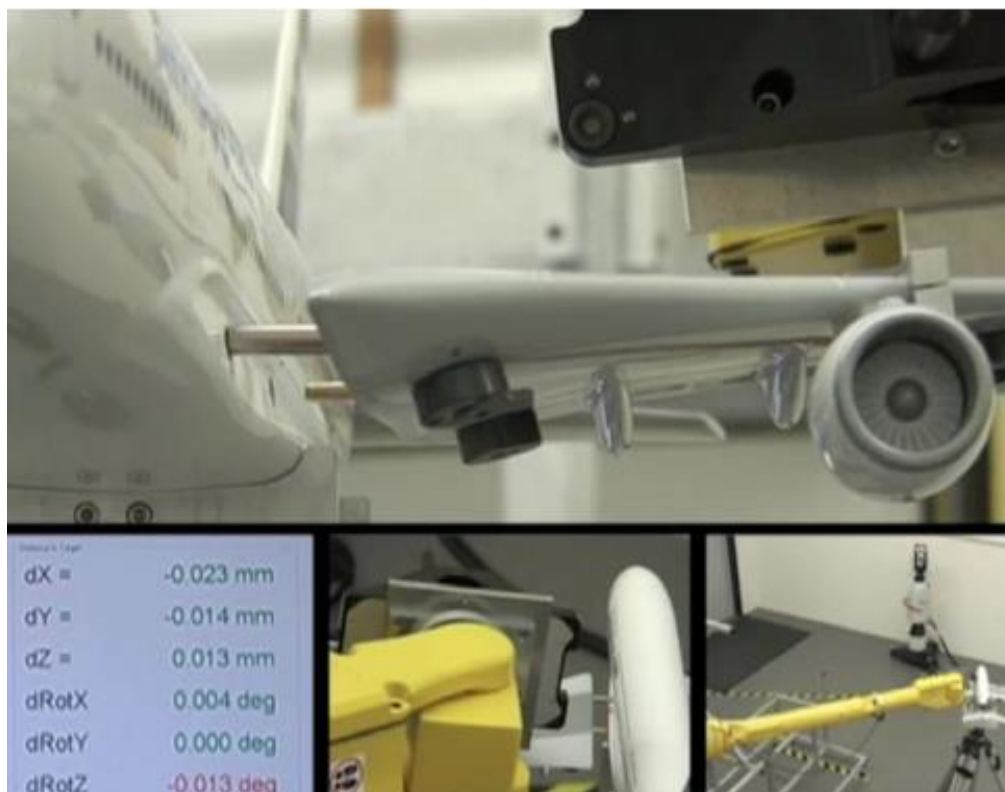


**Slika 7.8: Avtomatizirano skeniranje dela trupa letala ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))**

Prenos komponent na mesto montaže je drag in zahteven postopek, zato nenatančna izdelava le-teh pomeni visok strošek ponovne premestitve in predelave.

Laserski sledilnik se pri montaži uporablja za vodenje montažnih orodij in naprav. Ena izmed novejših tehnik montaže letalskih komponent je sistem 6DoF MAP (Metrology Assisted Positioning). Sestavljen je iz merskega senzorja Leica T-Mac, v kombinaciji z laserskim

sledilnikom AT901 in digitalno kamero T-Cam. Merilni senzor T-Mac se namesti na komponento, ki jo je potrebno namestiti (npr. krilo letala). S sledenjem letalskega krila pri postopku montaže v šestih dimenzijah se lahko v dejanskem času posredujejo vektorji popravkov montažnemu orodju – robotu (slika 7.9).



Slika 7.9: Prikaz delovanja MAP sistema ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))

Slika 7.10 prikazuje še en primer uporabe ročnega skenerja *T-Scan*. Tu se digitalizira oblika letala, ki ne leti več in je razstavljen v muzeju. S pomočjo multisenzorskega sistema Leica se tako pridobi podatke za popolno digitalno rekonstrukcijo letala.

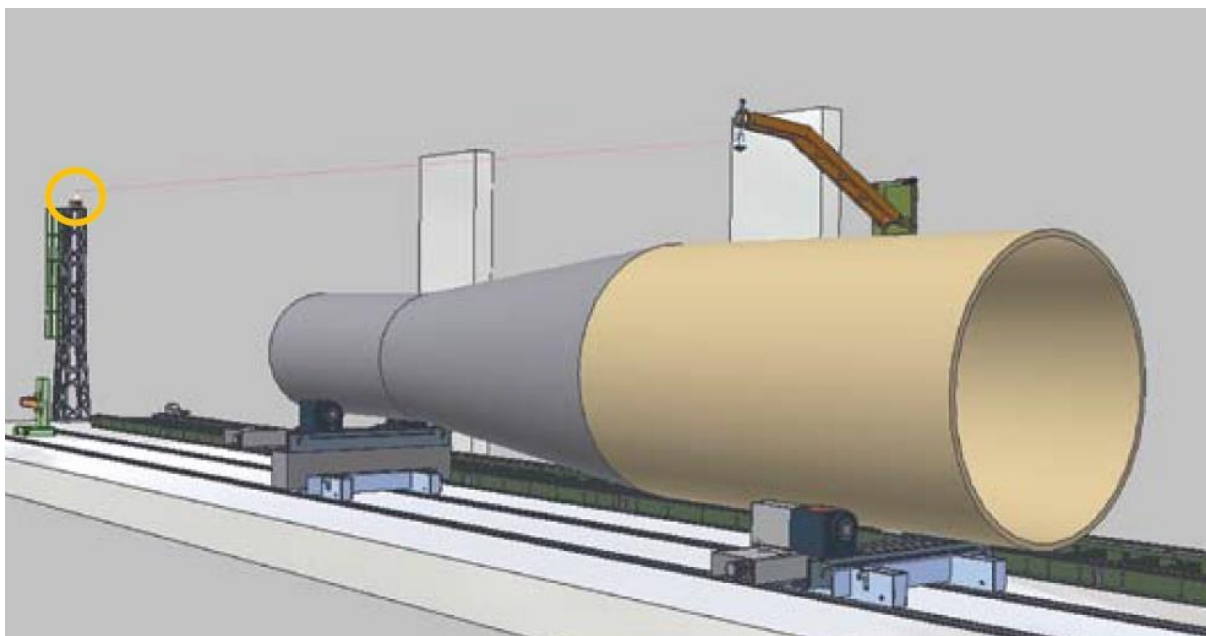


Slika 7.10: Skeniranje letala ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com))

## 7.4 Vetrna industrija

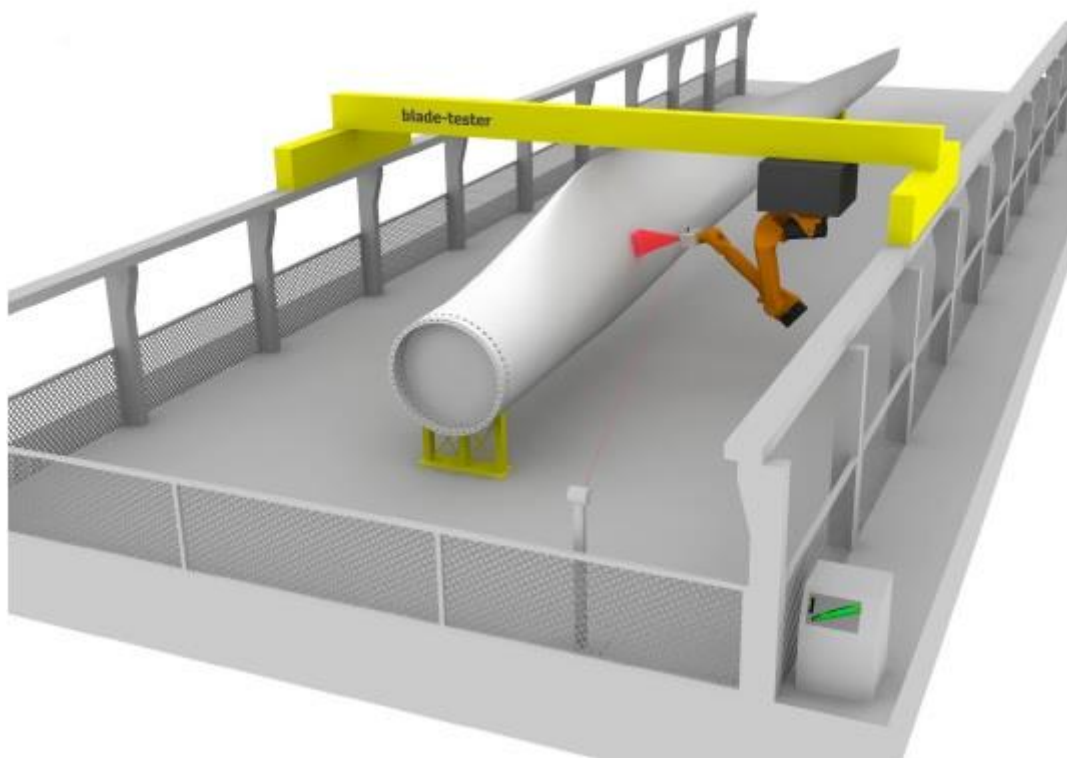
Zahteve po visokih natančnostih so prisotne tudi pri izdelavi vetrnih elektrarn za proizvodnjo električne energije. Zaradi velikih dimenzij nekaterih komponent je lahko pridobitev natančnih 3D podatkov o njih težka in dolgotrajna naloga. Z uporabo sistema laserskega sledilnika lahko enostavno pridobimo te podatke o stolpu, lopaticah in ohišju turbine, preden se prenesejo na mesto montaže.

*Stolp* vetrne elektrarne je brezšivna komponenta, ki podpira celotno konstrukcijo vetrne turbine. Zaradi tega je izredno pomembna natančna izdelava stolpa, da se izognemo visokim stroškom predelave. Slika 7.11 prikazuje primer uporabe laserskega sledilnika pri izdelavi stolpa.



**Slika 7.11: Laserski sledilnik nadzira gibanje in položaj rezalnega orodja pri izdelavi stolpa (www.lvmc.eu)**

Ene izmed najpomembnejših komponent so *lopaticice rotorja*, ki so večinoma izdelane ročno. Zaradi ročne izdelave so nagnjene k nepopolni geometriji, strukturi slojev (trdota, smer plasti, debelina) in kvaliteti izdelave. Podatke pridobimo s skeniranjem površine, z uporabo ročnega skenerja in laserskega sledilnika. Druga možnost pridobitve podatkov je popolnoma avtomatiziran način z uporabo industrijskega robota (slika 7.12). Prav natančna izdelava te komponente je zelo pomembna, saj najbolj vpliva na učinkovitost delovanja vetrne elektrarne.



**Slika 7.12: Avtomatiziran zajem geometrije lopatice s skeniranjem (www.lvmc.eu)**

Natančen zajem vseh podatkov o komponentah vetrne elektrarne je izredno pomembna, če ne najpomembnejša faza izdelave. Konstruiranje vetrne elektrarne se začne za računalnikom, kjer strokovnjak izdela računalniški model konstrukcije. Dimenzije komponent računalniškega modela so takšne, da je izkoristek energije glede na podatke o hitrosti vetra na mestu končne postavitve največji. Prav zaradi tega je ključna visoka natančnost izdelave vseh komponent glede na dimenzije računalniškega modela.



**Slika 7.13: Kontrola oblike in dimenzij lopatice (www.faro.com)**

## 8 ZAKLJUČEK

V industrijskih panogah, kjer so ključnega pomena natančna in točna merjenja, so v zadnjih desetletjih nepogrešljive koordinatno merilne naprave, ki združujejo najnovejše dosežke v multisenzorski tehnologiji. Ta združuje moderno elektroniko, podprto s kompleksno programsko opremo, ki krmili merilne naprave in izvaja obsežne obdelave podatkov v realnem času. Vse to omogoča trirazsežno merjenje objektov zapletenih geometrij, kar je bilo še do nedavnega nemogoče. Z vedno večjimi tolerančnimi zahtevami ob vedno večji kompleksnosti izdelanih komponent koordinatno merilne naprave postajajo nepogrešljivo orodje v industrijskih proizvodnih procesih. Poleg natančnosti je ključna zahteva uporabnika tudi prilagodljivost merilnega sistema, zlasti v smislu *kje* in *kako* se lahko takšen sistem uporablja.

Temeljna enota multisenzorskega merilnega sistema je laserski sledilnik. Vodilni ponudniki laserskih sledilnikov so te kompleksne merilne instrumente oblikovali tako, da jih je mogoče dokaj enostavno integrirati z ostalimi senzorji, kot sta mersko tipalo in laserski skener. Takšen multisenzorski merilni sistem omogoča pridobitev večjega števila merskih podatkov in istočasno zagotavlja visoko natančne ter zanesljive merske rezultate. V vseh večje razvitih sektorjih industrije uporabljajo takšne merilne sisteme za svoje edinstvene namene. Uporabljajo se predvsem v letalski in avtomobilski industriji, kjer je visok nivo natančnosti bistvenega pomena. Na primer ključne aplikacije v avtomobilskem sektorju vključujejo poravnavo, profiliranje, dimenzijske meritve in nadzor kakovosti. V letalskem sektorju se takšni sistemi uporabljajo za merjenje ukrivljenosti letalskih kril, kontrolo posameznih komponent, obrnjeno inženirstvo in za kinematične meritve.

Povprečna cena multisenzorskega merilnega sistema je med 100 000 in 150 000 €, lahko tudi več, kar je odvisno od zmogljivosti merilnega sistema ter njegove uporabnosti. V primerjavi z ostalimi tehnologijami (merilne roke, fotogrametrični sistemi ...) je cena takšnega sistema relativno visoka. Prav zaradi tega srednje velika podjetja z omejenimi proračuni ne morejo upravičiti tako visokih stroškov nabave te opreme. Zato se takšna podjetja odločajo za stroškovno sprejemljive enostavne rešitve. Prav visoka cena tehnologije multisenzorskih sistemov je lahko ovira za njihov hitrejši razvoj, saj so za veliko uporabnikov ti sistemi cenovno nedostopni.

Prisotnost vodilnih podjetij, kot so Leica (del Hexagon Metrology), FARO Technologies in API Sensors, na trgu, je postavila visok mejnik v smislu tehnologije in razvoja multisenzorskih merilnih sistemov. Njihova globalna prisotnost in tehnološke inovacije jim pomagajo, da so vseskozi korak pred konkurenco. Prav medsebojno tekmovanje med vodilnimi podjetji utemeljuje potrebo po visoko natančnih merilnih sistemih skupaj z novimi senzorskimi tehnologijami, ki povečujejo mersko fleksibilnost in dajejo zanesljive rezultate. Poleg tega bodo strateška povezovanja z zunanji ponudniki senzorskih tehnologij doprinesla najboljše tehnološke produkte na trg. Posledično se bodo stroški raziskav in razvoja dodatnih tehnologij prenesli na druga podjetja.

Evropa in Severna Amerika sta najdonosnejši regiji za multisenzorske merilne sisteme in glede na povečano število končnih uporabnikov na teh trgih je pričakovati več poslovnih priložnosti



za takšne visoko napredne merilne sisteme. S stalnimi izboljšavami, predvsem v zmogljivosti programske opreme, je tako razvoj multisenzorskih merilnih sistemov obetaven.

Priložnost za razvoj geodetskega poklica zato vidim predvsem na področju industrije, kjer so meritve, predvsem zaradi multisenzorskih merilnih sistemov, postale nepredstavljive brez uporabe geodetskih metod in tehnik. Zaradi tega je potrebno, da geodetska stroka razvije ustrezne opredelitve, postopke in terminologijo, kar bi področje uporabe multisenzorskih merilnih sistemov približalo geodetom, tako da bi lahko sodelovali tudi pri razvoju takšnih sistemov. Koristi bi bile večdimenzionalne, saj bi geodeti postali prepoznavni kot kompetentni strokovnjaki na področju tehnologije multisenzorskih sistemov in pri reševanju problemov na področju njihove uporabe (izbira ustrezne metode meritev, vzpostavitve in optimizacija geodetskih mrež v industrijskem okolju). Natančno poznavanje te tehnologije je nujno potrebno, saj različni ponudniki teh sistemov uporabljajo različne tehnične rešitve, ki omogočajo optimizacijo pristopa pri reševanju geodetskih nalog v industrijskih aplikacijah.

Multisenzorski merilni sistemi tako predstavljajo pomembno osnovo za širjenje geodetske dejavnosti na področjih in trgih, ki so bili do nedavnega geodetski stroki nedostopni zaradi nenatančnih in neučinkovitih geodetskih metod merjenja za industrijske aplikacije.

## VIRI

### *Uporabljeni viri*

ASME B89.4.19-2006. Performance evaluation of laser-based spherical coordinate measurement systems.

Bridges, R., Hoffer, J. 2009. Absolute distance meter that measures absolute distances. Številka patenta: US 20090066932 A1, 2009-03-12. Virginia, Urad Združenih držav za patente in blagovne znamke: 7 str.

<https://www.google.de/patents/US20090066932?hl=sl&dq=7352446+B2&ei=UoZwU7DVHK6y7AbSm4CADA> (Pridobljeno 19. 02. 2014.)

Cramer, P., Bridges, R., Steffensen, N., Mehler, R., Steffey, K., Hoffer, J., Lasley, D. 2013. Target method using indentifier element to obtain sphere radius. Številka patenta: US 8593648 B2, 2013-11-26. Virginia, Urad Združenih držav za patente in blagovne znamke: 12 str.

<https://www.google.de/patents/US8593648?dq=8593648+B2&hl=sl&sa=X&ei=C1pwU4baHdCM7Aa75IHQCg&ved=0CDgQ6AEwAA> (Pridobljeno 19. 02. 2014.)

Cuypers, W., Van Gestel, N., Voet, A., Kruth, J.-P., Mingneau, J., Bleys, P. 2009. Optical measurement techniques form obile and large-scale dimensional metrology. Optics and Lasers in Engineering. 47, 3-4: 292–300.

[https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/211745/1/Optics-and-Lasers-in-Engineering\\_2009\\_Cuypers.pdf](https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/211745/1/Optics-and-Lasers-in-Engineering_2009_Cuypers.pdf) (Pridobljeno 22. 01. 2014.)

Defining accuracy. 2008. White paper.

<http://www.faro.com/> (Pridobljeno 27. 01. 2014.)

Deumlich, F., Staiger, R. 2001. Instrumentkunde der Vermessungstechnik (9. izdaja), Berlin, Herbert Wichmann: 435 str.

Dold, J. 2004. Neue Laser-Technologien für die Industrievermessung. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation. 8, 1: 39–46.

[http://www.dgpf.de/neu/pfg-digital/2004/Heft\\_1.pdf](http://www.dgpf.de/neu/pfg-digital/2004/Heft_1.pdf) (Pridobljeno 10. 03. 2014.)

Estler, W. T., Edmundson, K. L., Peggs, G. N., Parker, D. H. Large-Scale Metrology – An Update

Gallagher, B. 2003. Optical shop applications for laser tracker metrology systems.

[http://www.loft.optics.arizona.edu/documents/journal\\_articles/2003\\_Ben\\_Gallagher.pdf](http://www.loft.optics.arizona.edu/documents/journal_articles/2003_Ben_Gallagher.pdf) (Pridobljeno 08. 11. 2013.)

Grilc, M. 2007. Analiza karakteristik terestričnega laserskega skenerja domače izdelave. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Grilc): 65 str.

ISO 9283: 1998. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods.

Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. 2008. Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung...(5. izdaja), Berlin, Herbert Wichmann: 526 str.

Kleinkes, M., Loser, R. 2007. Laser Tracker and 6DoF measurement strategies in industrial robot applications.

[www.cmssc.org/stuff/contentmgr/files/0/2bdcf766d9d5daf6e892c46153c591d3/misc/cmssc2011\\_thur\\_gh\\_0800\\_loser\\_paper.pdf](http://www.cmssc.org/stuff/contentmgr/files/0/2bdcf766d9d5daf6e892c46153c591d3/misc/cmssc2011_thur_gh_0800_loser_paper.pdf) (Pridobljeno 12. 03. 2014.)

Kleinkes, M., Loser, R. 2011. Laser Tracker and 6DOF measurement strategies in industrial robot applications.

[http://www.cmssc.org/stuff/contentmgr/files/0/2bdcf766d9d5daf6e892c46153c591d3/misc/cmssc2011\\_thur\\_gh\\_0800\\_loser\\_paper.pdf](http://www.cmssc.org/stuff/contentmgr/files/0/2bdcf766d9d5daf6e892c46153c591d3/misc/cmssc2011_thur_gh_0800_loser_paper.pdf) (Pridobljeno 14. 02. 2014.)

Kogoj, D. 2005. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 159 str.

Kogoj, D. 2014. Laserski sledilnik – ppt. Osebna komunikacija (04. 03. 2014.)

Kovač, P. 2006. Določitev praktične natančnosti elektronskih tahimetrov – Sokkia SET 4000. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Kovač): 74 str.

Kunzel, A., Petryna, Y. 2009. Measurement and model based geometry recording of rotorblades of wind energy plants.

[http://www.lvmc.eu/lvmc-archive/presentations\\_2009/presentation\\_kunzel\\_lvmc2009.pdf](http://www.lvmc.eu/lvmc-archive/presentations_2009/presentation_kunzel_lvmc2009.pdf) (Pridobljeno 12. 01. 2014.)

Kyle, S. 2007. Optically jointed probing systems for large volume coordinate metrology. Journal of the CMSC. 4, 2: 26–32.

[http://www.researchgate.net/publication/256801743\\_Optically\\_jointed\\_probing\\_systems\\_for\\_large\\_volume\\_coordinate\\_metrology](http://www.researchgate.net/publication/256801743_Optically_jointed_probing_systems_for_large_volume_coordinate_metrology) (Pridobljeno 11. 03. 2014.)

Kyle, S. 2008. Roll angle in 6DOF tracking. Journal of the CMSC. 10, 3: 28–32.

[http://www.researchgate.net/publication/256802432\\_Roll\\_angle\\_in\\_6DOF\\_tracking](http://www.researchgate.net/publication/256802432_Roll_angle_in_6DOF_tracking) (Pridobljeno 11. 03. 2014.)

Lau, K. 2003. Six dimensional laser tracking system and method. Številka patenta: US 20030043362 A1, 2003-03-06. Virginia, Urad Združenih držav za patente in blagovne znamke: 5 str.

<https://www.google.de/patents/US20030043362?dq=20030043362+A1&hl=sl&sa=X&ei=ToBwU7H8AqWL7Aa85YGIDw&ved=0CDgQ6AEwAA> (Pridobljeno 19. 02. 2014.)

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. 2006. Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications, London, Wiley: 510 str.

Luhmann, T. 2009. Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 64, 3: 275–284.

Luhmann, T. 2010. Close range photogrammetry for industrial applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 65, 6: 558–569.

Meier, D. 1998. Electro-optical measuring device for absolute distances. Številka patenta: US 5764360, 1998-06-09. Virginia, Urad Združenih držav za patente in blagovne znamke: 5 str.

<https://www.google.de/patents/US5764360?dq=5764360&hl=sl&sa=X&ei=Y4dwU-iNBuuV7AbqoYDADg&ved=0CDgQ6AEwAA> (Pridobljeno 19. 02. 2014.)

Meier, D. 2009. Method and measuring device for measuring an absolute distance. Številka patenta: US 20090033945 A1, 2009-10-27. Virginia, Urad Združenih držav za patente in blagovne znamke: 5 str.

<https://www.google.de/patents/US20090033945?hl=sl&dq=7609387+B2&ei=B4hwU6urLKG M7Qaor4DgCg> (Pridobljeno 19. 02. 2014.)

Metrology assisted assembly and automated inspection. 2009. White paper.

[http://metrology.leicageosystems.com/downloads123/m1/metrology/Laser%Tracker%System/white-tech-paper/White%20Paper%20MAA\\_en.pdf](http://metrology.leicageosystems.com/downloads123/m1/metrology/Laser%Tracker%System/white-tech-paper/White%20Paper%20MAA_en.pdf) (Pridobljeno 10. 01. 2014.)

Mozetič, B. 2004. Terestrično 3D (trirazsežno) lasersko skeniranje. Geodetski vestnik. 48, 1: 351–362.

Position sensing with photodiodes. 2012

[http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user\\_upload/home/Datasheets/lc/applikationsreport/position-sensing.pdf](http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc/applikationsreport/position-sensing.pdf) (Pridobljeno 12. 08. 2014.)

Steiger, R. 2009. Push the Button – or Does the »Art of Measurement« Still Exist?

[http://www.fig.net/pub/monthly\\_articles/june\\_2009/june\\_2009\\_staigner.pdf](http://www.fig.net/pub/monthly_articles/june_2009/june_2009_staigner.pdf)

(Pridobljeno 08. 04. 2013.)

The Leica Absolute Interferometer. 2008. White paper.

[http://www.hexagonmetrology.us/images/applications/absolute\\_interferometer/leica\\_absolute\\_interferometer\\_white\\_paper\\_en.pdf](http://www.hexagonmetrology.us/images/applications/absolute_interferometer/leica_absolute_interferometer_white_paper_en.pdf) (Pridobljeno 12. 11. 2013.)

Understanding laser tracker targets. 2012. White paper.

<http://www.faro.com/> (Pridobljeno 13. 12. 2013.)

Vrhovec, M. 2009. Laserski sistem za merjenje prečnega odmika. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko (samozaložba M. Vrhovec): 97 str.

Zumbrunn, R., Markendorf, A., Loser, R., Dold, J. 2007. Measurement system for determining six degrees of freedom of an object. Številka patenta: US 20060222314 A1, 2006-10-05. Virginia, Urad Združenih držav za patente in blagovne znamke: 5 str.

<https://www.google.de/patents/US20060222314?hl=sl&dq=7312862+B2&ei=e4NwU9iBKNCM7Aa75IHQCg> (Pridobljeno 19. 02. 2014.)

#### *Ostali viri*

API Sensor. 2014.

<http://www.apisensor.com> (Pridobljeno 08. 04. 2014.)

Faro Technologies. 2014.

<http://www.faro.com> (Pridobljeno 08. 04. 2014.)

Fotogrametrični »on-line« merilni sistem. 2013.

[www.foto.hut.fi](http://www.foto.hut.fi) (Pridobljeno 15. 11. 2013.)

Hexagon Metrology. 2014.

<http://www.hexagonmetrology.us> (Pridobljeno 08. 04. 2014.)

Leica Geosystems. 2014.

<http://www.leica-geosystems.com> (Pridobljeno 08. 04. 2014.)

Koordinatno merilna naprava. 2014.

[www.brownandsharpe.com](http://www.brownandsharpe.com) (Pridobljeno 07. 06. 2014.)

Koordinatno merilna roka. 2014.

[www.warwick.uk](http://www.warwick.uk) (Pridobljeno 02. 03. 2014.)

Merilni sistem Kern SPACE. 2013.

[www.kern-aarau.ch](http://www.kern-aarau.ch) (Pridobljeno 15. 11. 2013.)

Princip fotogrametrije. 2013.

[www.opticalengineering.spiedigitallibrary.org](http://www.opticalengineering.spiedigitallibrary.org) (Pridobljeno 24. 11. 2013.)

PSD senzorji. 2014.

[www.laserfocusworld.com](http://www.laserfocusworld.com) (Pridobljeno 22. 08. 2014.)

Vetrna industrija. 2014.

[www.lvmc.eu](http://www.lvmc.eu) (Pridobljeno 19. 05. 2014.)