

# -MERNE MAŠINE-

Doc. dr Branko Štrbac

## 1.0 UVOD

Ocena kvaliteta savremenih mašinskih proizvoda zahteva upotrebu sofisticirane merne opreme. Standardi visokog kvaliteta, koje proizvodna preduzeća moraju ispuniti kako bi zadovoljili potrebe kupca, mogu se održati samo ako se može garantovati usklađenost svih zahteva na proizvodu. Na ovaj način se pred merne sisteme postavlja imperativ koji nalaže visoku tačnost merenja dimenzionalnih i geometrijskih karakteristika nasumice nadolazećih delova bilo kakve konfiguracije ili složenosti i da obezbede povratne informacija u realnom vremenu koje će poslužiti procesima proizvodnje i dizajna. U tipičnom proizvodnom okruženju koordinatni merni sistemi (KMS) kao što su koordinatne merne mašine (KMM) su ključni instrumenti koji omogućavaju da se izvrši tačna inspekcija. Savremene KMM su dizajnirane da rade u teškom okruženju čime se obezbeđuje fleksibilnost za rad i verifikacija procesa proizvodnje. KMM takođe služe da se smanji potreba za kompleksnim standardnim priborima čime se smanjuje ne samo putanja inspekcije nego i troškovi.

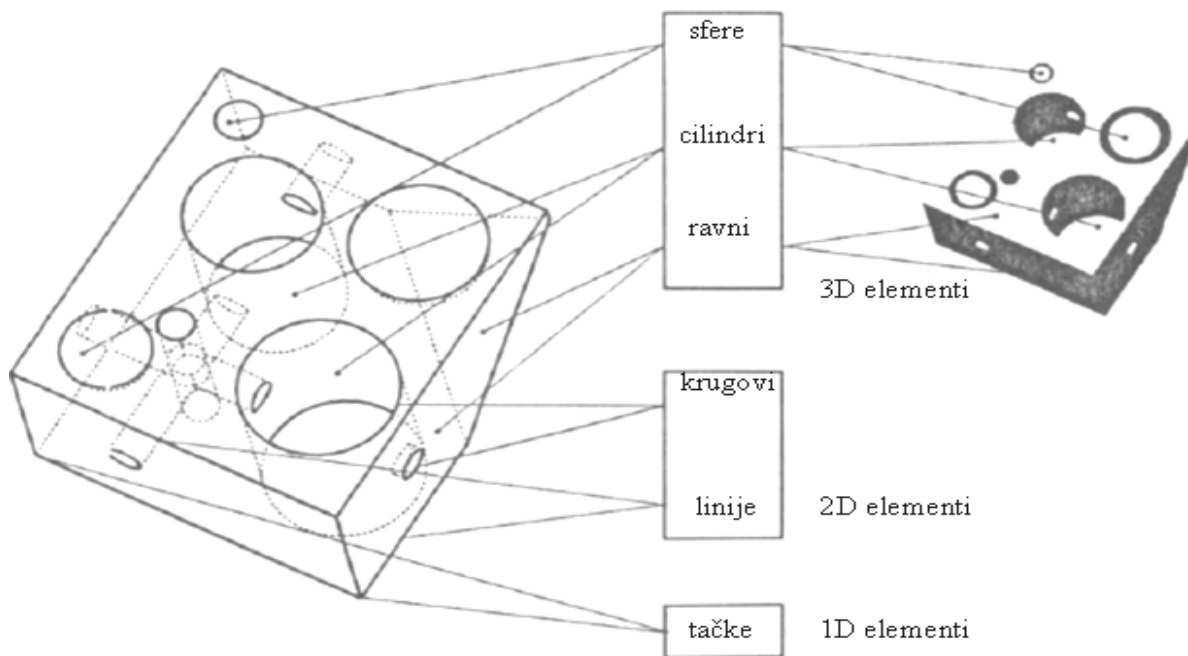
U poslednjih nekoliko godina kvalitet i funkcionalni zahtevi proizvoda prošli su kroz ogromne promene koje zahtevaju strožije dimenzionalne i geometrijske tolerancije. Tipične komponente imaju nekoliko dimenzija i površina sa tolerancijama utvrđenim od strane dizajnera i stoga treba da budu razvijeni tačni i efikasni procesi merenja. Za složenije zadatke merenja, kao što je npr. tolerancije položaja ili ponovljena merenja, uglavnom se koriste konvencionalne koordinatne merne mašine (KMM). Tokom poslednjih godina KMM su postale neizostavne u proizvodnom okruženju. Pored konvencionalnih koordinatnih mernih mašina postoje mnogi drugi koordinatni merni sistemi (KMS) koji se sve više koriste u dimenzionalnoj metrologiji. KMM su u stanju da vrše inspekciju svih makrokarakteristika naznačenih na tehničkoj dokumentaciji (dužina, oblik, orijentacija, položaj) sa velikom preciznosti i zahtevanom tačnosti.

Trodimenzionalna metrologija je donela znatne promene u dimenzionalnom merenju u poređenju sa tradicionalnim merenjem po principu „rastojanje dve tačke“. Umesto merenja dimenzija, one registruju koordinate tačaka uzorkovane sa merne površine, pružajući više sveobuhvatnih informacija u vezi merne geometrije. Izlaz iz procesa merenja je skup koordinata površinskih tačaka, čijom analizom se mogu posmatrati detalji površinskog oblika, procena karakteristika geometrijskih primitiva (veliçine i rastojanja) i njihova odstupanja od nominalne vrednosti. Obično je analiza podataka potpuno nezavisna od procesa prikupljanja podataka. Dakle, proces merenja se izvodi u dve nezavisne faze gde se u prvoj fazi vrši uzorkovanje koordinata tačaka sa površine mernog predmeta a druga faza je analiza tih tačaka preko odgovarajućih algoritama. Prvu fazu izvršava hadver merne mašine dok je za drugu fazu zadužen softver.

Međunarodni standard ISO 10360-1 definiše koordinatnu mernu mašinu kao „*merni instrument koji ima sposobnost da odredi prostorne koordinate na površini radnog predmeta i ima pokretni sistem mernog senzora*“.

## 2.0 KOORDINATNA METROLOGIJA

Kako je već napomenuto u uvodu princip merenja na koordinatnim mernim sistemima se značajno razlikuje od merenja upotrebom konvencionalnih merila (npr. kljunasto pomično merilo, mikrometar, itd.). Konvencionalna merila, kod kojih se poštuje Abbe-ov princip tj. da se radni predmet nalazi u produžetku merne skale, određuju rastojanje između dve susedne tačke i na taj način se dobija merni rezultat. Koordinatna metrologija, preko određenog tipa mernog senzora, uzorkuje tačke sa mernog predmeta i izlaz iz merenja je skup koordinata tačaka u vidu zapisa  $x_i, y_i, z_i$ . Uzorkovane tačke se grupišu u zavisnosti kom osnovnom geometrijskom primitivu pripadaju. Kada se posmatra nominalna geometrija radnog predmeta (CAD model) može se uočiti da je ona uglavnom sadržana od osnovnih geometrijskih elemenata (tačka, prava, ravan, krug, cilindar, itd...), slika 1. Geometrijski primitiv može biti klasifikovan kao idealni ili neidealni u odnosu u kom je kontekstu. Idealni geometrijski primitiv se odnosi na nominalni model dok neidealni geometrijski primitivi se odnose na skin model i realni radni predmet. Geometrijski primitivi su najjednostavniji elementi potrebni za potpuno definisanje bilo koje geometrije radnog predmeta i imenovani su po vrsti kojoj pripadaju.



**Slika 1.** Osnovni geometrijski primitivi

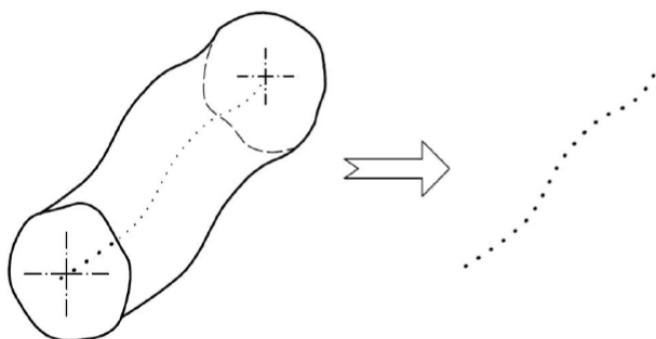
Minimalan broj tačaka potreban za definisanje osnovnih geometrijskih primitiva prikazana je u tabeli 1.

**Tabela 1.** Minimalan broj tačaka za definisanje osnovnih geometrijskih primitiva

Geometrijski primitiv	Minimalan broj tačaka
tačka	1
linija	2
ravan	3
krug	3
cilindar	5
konus	6
sfera	4
torus	7
elipsa	5

Geometrijski primitivi se takođe mogu definisati kao supstitutivni, sastavni ili izvedeni prema ISO 14660-2:2008:

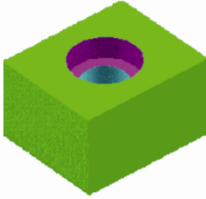
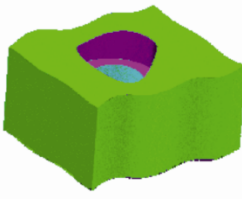
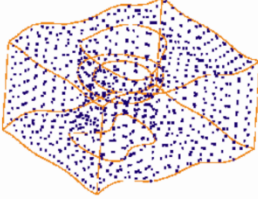
- Supstitutivni geometrijski primitivi su idealni geometrijski primitivi koji su dobijeni iz neidealnih geometrijskih primitiva prema određenim algoritmima fitovanja
- Sastavni geometrijski primitivi predstavljaju delove (linije ili površine) i zapravo pripadaju površini bez obzira na njihovu prirodu (nominalni, neidealni, realni).
- Izvedeni geometrijski primitivi su entiteti dobijeni uz primenu matematičkih operacija na određeni geometrijski primitiv. Primer je osa cilindra, centri krugova ili sfera ili ravni simetrije (slika 2).



**Slika 2.** Osa neidealnog cilindra: primer izvedenog geometrijskog primitiva

Prema ovoj podeli može se zaključiti da se geometrijski primitivi vezuju za prikaz geometrije radnog predmeta koja može da se prikaže u tri različita sveta (slika 3).

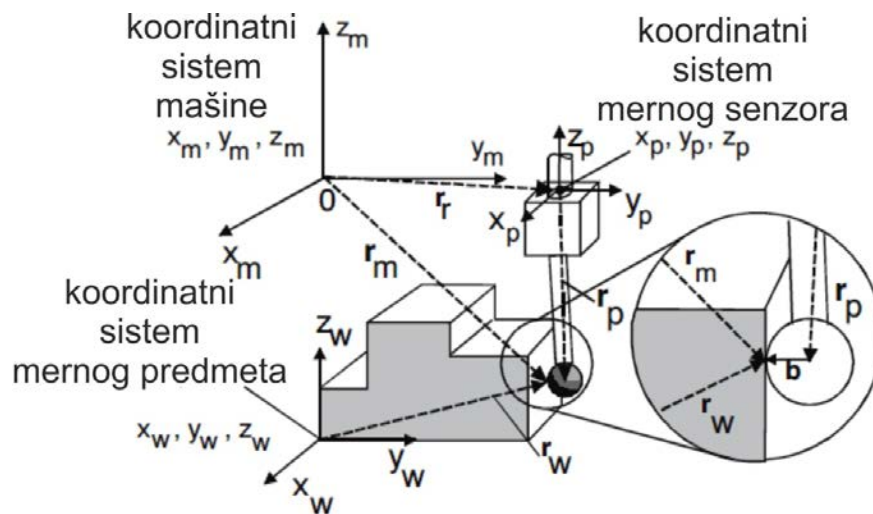
- **Nominalni model** je ideja projektanta i karakteriše se preko nominalnih dimenzija. On definiše idealan radni predmet sa oblicima i dimenzijama koje se savršeno uklapaju u funkcionalni mehanizam. Ovo predstavljanje je daleko od stvarnosti, jer i proces merenja i proces proizvodnje karakteriše njihova varijabilnost ili nesigurnost, ali je baza za tehničko predstavljanje u crtežima i CAD modelima.
- **Ne – idealni površinski model (skin model)** odgovara projektanskoj mašti varijacija koje mogu uticati na realnu geometriju radnog predmeta. Ovaj model se koristi od strane projektanta da shvati moguće efekte odstupanja geometrije radnog predmeta u cilju postavljanja granica potrebnih da garantuje funkcionalne zahteve proizvoda. Ova ograničenja su geometrijske specifikacije i izražene su u vidu dimenzionalnih i geometrijskih tolerancija da kompletiraju nominalnu geometriju na crtežima i CAD modelima.
- **Stvaran radni predmet** je geometrija koja je rezultat obrade radnog predmeta. Ona se razlikuje od nominalnog modela zbog unutrašnjih varijabilnosti svih činilaca realne proizvodnje (materijal, ambijentalni uslovi, proizvodni proces, itd.). Međutim, odstupanja od geometrije nominalnog modela treba da budu u okviru geometrijskih specifikacija postavljenih od strane projektanta. Merenje je jedinstven način da se sazna stvarna geometrija radnog predmeta ali uvodi dodatne varijabilnosti i nesigurnosti unutar instrumenta i merne procedure.

Projektovanje		Verifikacija
Idealni model	Skin model	Realan radni predmet
		

**Slika 3.** Tri različita predstavljanja proizvoda prema ISO GPS standardu [9]

Predstavljanje proizvoda u tri različita „sveta“ je bazirano na principu rada koordinatnih mernih sistema. Kod koordinatnih mernih sistema rezultat merenja se dobija tako što se uporede nominalna geometrija sa naznačenim tolerancijama i supstitutivna geometrija radnog predmeta. Supstitutivna geometrija radnog predmeta predstavlja takođe idealnu geometriju stin da se dobija iz koordinata uzorkovanih tačaka primenom odgovarajućih algoritama baziranih na matematičkim principima.

Mernom mašinom realni geometrijski primitivi se opisuju preko skupa konačnih koordinata tačaka. Koriste se razne vrste mernih senzora koji služe da signaliziraju kontakt sa predmetom u obliku električnog signala. Treba napomenuti da je ovo princip rada kontaktnih mernih senzora i da postoje i beskontaktni merni senzori koji koriste optiku, laser, itd. Merni senzor je pokretljiv u prostoru merenja, ručno ili pomoću CNC upravljanja i kod kontaktnih senzora koriste se merni pipci koji su najčešće rubinska sfera visoke tačnosti. U trenutku kontaktna vrha mernog pipka sa radnim predmetom i postizanja potrebne sile merenja, signal se prosleđuje upravljačkom sistemu. Podaci o položaju sve tri ose se kontinualno očitavaju uz pomoć mernog sistema. Koordinate tačaka se vezuju za jedan od dva dostupna koordinata sistema – koordinatni sistem merne mašine (referentni koordinatni sistem) i koordinatni sistem mernog predmeta. Pored ovih koordinatnih sistema definiše se i koordinatni sistem mernog senzora koji se uspostavlja procesom kalibracije mernog pipka. Različiti koordinatni sistemi su prikazani na slici 4.



**Slika 4.** Koordinatni sistem mernog predmeta, koordinatni sistem mernog senzora i referentni koordinatni sistem

## 3.0 OSNOVNI ELEMENTI KOORDINATNE MERNE MAŠINE

Koordinatne merne mašine su složeni sistemi gde se mogu naći sledeći podsistemi:

- noseća struktura KMM,
- merni sistem,
- sistem mernog senzora
- upravljačka jedinica.

### 3.1 NOSEĆA STRUKTURA KMM

Podsistem noseća struktura ima zadatak da obezbedi statičku i dinamičku krutost celog sistema MM. Statička i dinamička krutost su najvažniji činioci tačnog i pogonski sigurnog rada. Noseća struktura ima zadatak i da uležišti sve pokretne elemente KMM.

Noseća struktura se, kod većine KMM, sastoji iz granitne ploče i pokretnog dela koji na sebi uležištava pokretne elemente KMM. Na ploči KMM se, kod novijih mašina, nalaze još i magacin za automatsku izmenu mernih pipaka i obrtni sto (četvrta NU osa). Postoje KMM sa različitim konfiguracijama noseće strukture. Konfiguracija noseće strukture igra važnu ulogu u ostvarivanju zahteva koji se stavljaju pred njih, kao što su: tačnost, fleksibilnost, brzina merenja i cena. Zajedničko kod svih KMM je da imaju tri upravne ose  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Svaka osa je opremljena sa preciznom skalom, mernim uređajem ili pretvaračem koji registruje nosač KMM u odnosu na definisanu referencu. Ova pomeranja se dopremaju računaru za dalju obradu. Nosač na trećoj osi nosi sistem mernog senzora. Kada senzor dođe u kontakt sa radnim predmetom i postigne se sila merenja, očitava se pozicija za sve tri ose. Fizički se konfiguracije hadverske strukture veoma razlikuju ali im je cilj da obezbede troosno kretanje pokretnog dela KMM po radnom prostoru mašine. Postoji 5 osnovnih konfiguracija KMM koje se najčešće koriste u industrijskoj praksi: konzolna, mosna, stubna, horizontalna ruka i sa pokretnim postoljem.

**Konzolna** – kod ovog tipa KMM vertikalni senzor se kreće duž  $z$  ose, nošen konzolnom rukom koji se kreće po  $y$  osi (slika 6). Ova ruka se takođe pomera bočno kroz  $x$  osu. Veoma je lak pristup radnom prostoru i ovaj tip KMM pruža relativno velik radni prostor bez zauzimanja previše prostora u laboratoriji.

**Mosna** - najpopularniji tip strukture KMM i ova mašina ima pokretni most, slika 7. Postoje u dve varijante: sa pokretnim mostom i sa nepokretnim mostom. Slična je konzolnoj KMM jer ima oslonac za spoljne krajeve  $y$  ose na postolje. Konstrukcija mosta daje krutost mašini.

**Stubna** – ovaj tip konstrukcije KMM je sličan najpopularnijoj vrsti bušilice i često se naziva univerzalna merna mašina umesto KMM (slika 8). Ovakva konstrukcija obezbeđuje izuzetnu krutost i tačnost i ovaj tip mašina se uglavnom koristi u kalibracionim laboratorijama gde se zahveta visoka tačnost.



**Slika 6.** Konzolna KMM



**Slika 7.** Mosna KMM



**Slika 8.** Stubna KMM

**Horizontalna ruka** – za razliku od predhodnih mašina, osnova horizontalnog tipa KMM ima pokretnu ruku a senzor se kreće duž y ose, slika 9. Glavna prednost ove mašine je u tome što pruža veliki radni prostor, što je čini savršenom za gabaritne radne predmete. U jednoj varijanti zove se fiksna merna ruka, senzor je fiksiran za y osu.

**KMM sa pokretnim postoljem** - u ovom tipu KMM oslonac radnog predmeta je nezavisan od x i y ose, koje su poduprte sa četiri vertikalna stuba koji se dižu od poda, slika 10. Ovo omogućava nesmetano kretanje oko radnog predmeta što je izuzetno korisno kod ekstremno velikih radnih komada.



**Slika 9.** Horizontalna ruka



**Slika 10.** KMM sa pokretnim postoljem



### 3.2. POGONSKI SISTEM

Zahtev za povećanje propusnosti KMM zahteva brze pogonske sisteme i čvrste prenosne veze. Pogonski sistemi igraju značajnu ulogu u računarom kontrolisanim mašinama (DCC). Svrha pogonskog sistema je samo pomeranje senzora i/ili dela i ne pruža informacije o položaju. Pretvarači pomaka ili skale pružaju informacije o položaju. Postoji mnogo tipova pogonskih sistema kao što su zupčasti prenosnici, kaišnici, linearni motori. Izbor odgovarajućeg pogonskog sistema je odgovornost projektanta zasnovanog na željenom ishodu. KMM korisnici mogu imati koristi od razumevanja operativnih karakteristika i performansi različitih pogonskih sistema.

Generalno, prirodna frekvencija pogonskog sistema treba da bude projektovana da bude veća od noseće strukture, i opseg dinamičkog odziva servo sistema za upravljanje treba podesiti mnogo niže od prirodne frekvencije noseće strukture kako bi se izbegla strukturalna rezonanca. Prva rezonantna frekvencija KMM strukture diktira dinamički odziv pogonskog sistema.

### 3.3. MERNI SISTEM

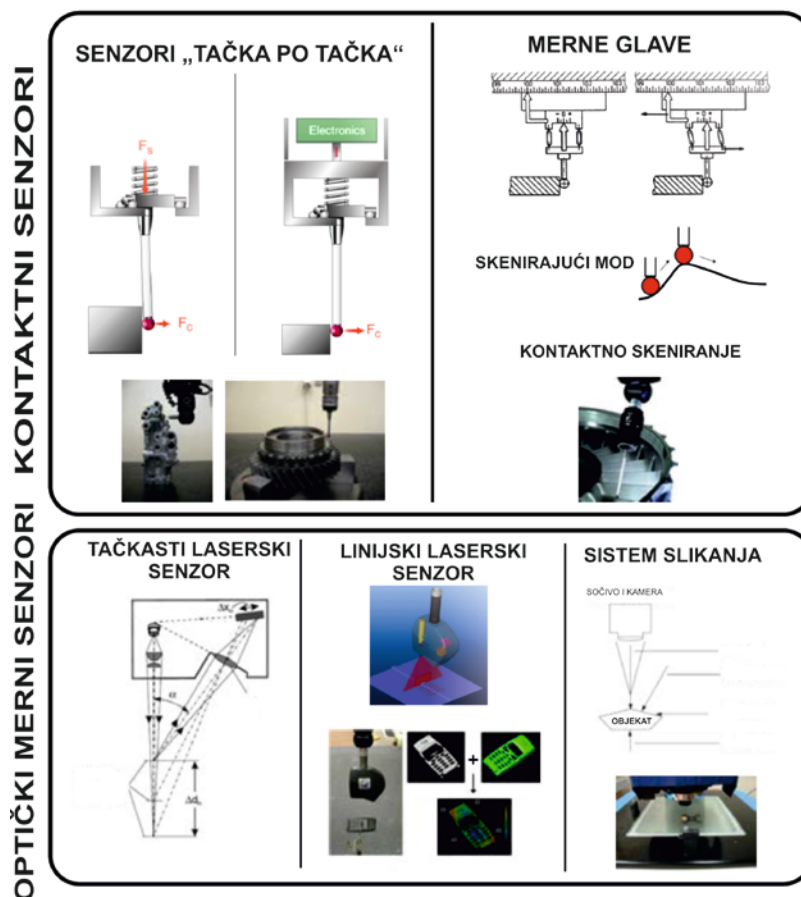
Kada sistem senzora dodirne radni predmet, položaj senzora se zapravo određuje preko pretvarača pomaka (mernog sistema) na svakoj od tri linearne ose KMM. Neki modeli senzora mere pomeranje vrha mernog pipka, dok skale mašine mere pomeranje senzora. U ovim slučajevima, stvarna merenja su kombinacija ova dva očitavanja.

U KMM se mogu naći različiti pretvarači pomaka, uključujući optičke skale, rotacione enkodere, magnetne skale, laserske interferometre. Najčešće se koriste optičke skale i laserski interferometri. U principu, optičke linearne skale se sastoje od elementa skale i elektro - optičke glave za očitavanje, jedna od dve je fiksirana na pokretni klizač KMM. Relativno kretanje između dve komponente generiše signal pozicioniranja. Među optičkim skalama, postoje tri opšta tipa: (1) fototransmisiona skala, (2) fotorefleksna skala i (3) interferencijska skala.

### 3.4 MERNI SENZOR

Postoji veliki broj različitih sistema mernog senzora (eng. *probe system*) kod KMM. Merni senzori mogu da se klasifikuju u dve grupe: **kontaktni** i **beskontaktni**. Kontaktni sistemi mernog senzora se obično nazivaju dodirni sistemi senzora a pošto većina nekontaktnih mernih senzora koriste optičke metode za detekciju tačaka, oni se često nazivaju optički merni senzori. Optički merni senzori ne moraju da ostvare (mehanički) kontakt sa radnim predmetom u cilju ispitivanja tačaka. Kao rezultat toga je mnogo brže merenje, štaviše oni neće deformisati

fleksibilne radne predmete tokom merenja. Kontaktni merni senzori imaju prednost u pogledu preciznosti i pouzdanosti. Slika 11. prikazuje dalju klasifikaciju ove dve grupe mernih senzora.



**Slika 11.** Tipovi kontaktnih i beskontaktnih mernih senzora

„Najpopularniji“ kontaktni merni senzori za KMM su definitivno senzori „tačka po tačka“. Kada senzor prilazi površini radnog predmeta, senzor dodirne površinu uz određenu silu i merni pipak će se saviti (skrenuti). Ovo se detektuje preko senzora merne glave i preko okidača mašine se očitava pozicija osa. Uzimajući u obzir prečnik vrha mernog pipka, može se odrediti položaj tačke na površini. Mnogi pristupi su se razvijali za detektovanje skretanja mernog senzora. Većina komercionalnih „tačka po tačka“ mernih senzora koristi električni prekidač ili merne trake. Neki merni senzori ne samo da detektuju skretanje (tj. kontakt) mernog pipka nego čak mere iznos ugiba mernog senzora. Ovi merni senzori su obično precizniji od „tačka po tačka“ senzora. Pošto je otklon mernog senzora poznat, ova informacija može se iskoristiti kao povratna informacija za KMM. Ovo daje mogućnost skeniranja dela dok je merni senzor u stalnom kontaktu sa radnim predmetom. Merni senzori koji koriste skenirajući mod odlikuje se manjom preciznošću zbog ubrzanja i zbog promenljivog trenja tokom skeniranja ali imaju

moгуćnost da mere veći broj taćaka za manji period. Tokom poslednje decenije razvijeno je nekoliko kontaktnih mikro – senzora, koje se koriste za merenje veoma malih dimenzija.

Kada se pogledaju bezkontaktni merni senzori, 2D sistemi senzora su najinteresantniji. Ovakvi merni senzori se uglavnom koriste u posebnim namenskim KMM (slika 11.). Takođe, laserski linijski skeneri su postali veoma popularni u poslednjih nekoliko godina zato što mogu da mere više od deset hiljada taćaka, drugo, mogu lako da digitalizuju završnu površinu obratka. Ovo ih čini veoma pogodnim za merenje složenih površina kao što su. npr. karoserija automobila i proizvoda od plastike. Taćnost laserskog linijskog skenera još uvek nije konkurentan sa kontaktnim mernim sensorima.

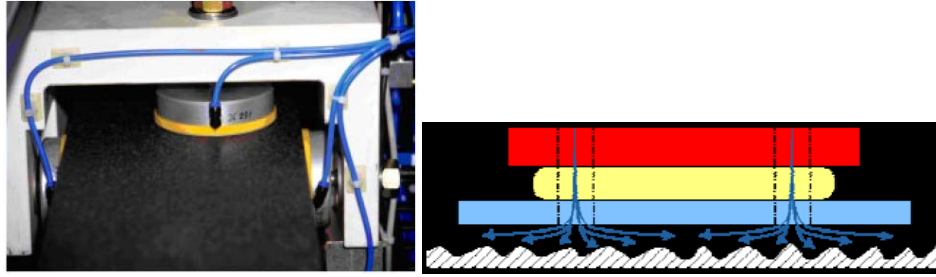
### 3.5. SISTEMI ULEŹIŠTENJA KOORDINATNIH MERNIH MAŠINA

Sistemi uležištenja za KMM su veoma bitni jer su deo petlje noseće strukture i direktno utiću na taćnost merenja. Takođe mogu uticati na karakteristike pogonskog sistema. Generalno, postoje dva tipa sistema uležištenja koji se koriste kod KMM:

- bezkontaktni vazdušni ležajevi
- mehanićki kontaktni ležajevi.

Među mnogim kriterijumima za sistema uležištelja prvo se razmatraju dinamićka krutost, nosivost, prigušenje i efekti trenja. Aerostatićni vazdušni ležajevi, poput onog na slici 12, koristi tanak vazdušni sloj pod pritiskom da pruži podršku za opterećenje. Niska viskoznost vazduha zahteva mali zazor od oko 1 – 10  $\mu\text{m}$ .

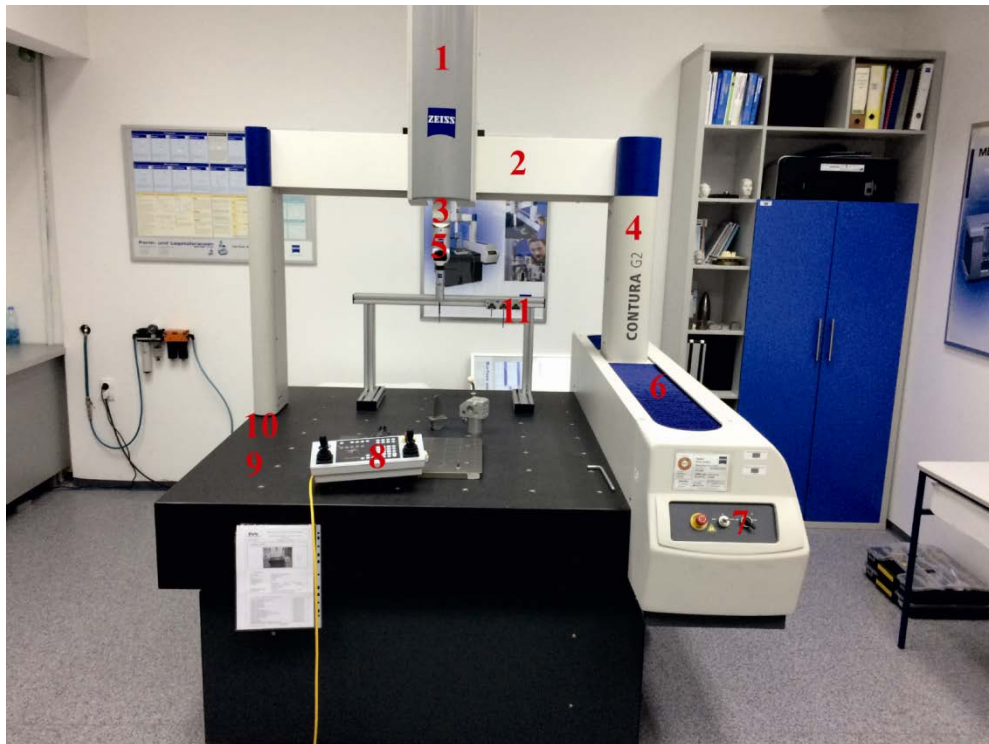
Kontaktni tvrdi ležajevi, kao što su precizni valjkasti ili kuglićni ležajevi i klizne vođice se takođe koriste kod KMM. Naroćito se mogu naći u KMM koje su razvijene od preciznih mašina alatki. Tvrdi ležajevi podnose veća opterećenja u odnosu na vazdušne. Danas se tvrdi ležajevi prvenstveno koriste za KMM projektovane za surova fabrićka okruženja kao što su livnice. Obe vrste ležajeva zahtevaju održavanje. Tvrdе ležajeve treba podmazivati i površine vođica na kojima rade vazdušni ležajevi treba održavati čistim. Vazdušni ležajevi takođe zahtevaju sisteme za filtriranje kako bi se onemogućilo da voda i ulje u vodovima kompromitovanog vazduha ulaze u ležajeve. Vazdušni ležajevi su dugotrajniji jer nemaju mahanićki kontakt (rad bez trenja). Kompesovan vazduh snabdevanja mora biti odgovarajući jer varijacija pritiska mođe proizrokovati geometrijske greške KMM i nagli gubitak vazduha pod pritiskom mođe dovesti do katastrofalnog oštećenja vođice i ležajeva.



**Slika 12.** *Vazdušni ležajevi*

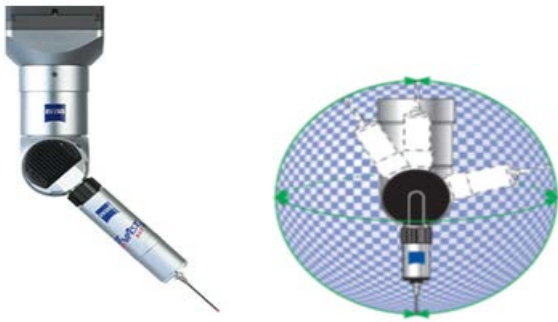
### 3.6 KOORDINATNA MERNA MAŠINA CARL ZEISS CONTURA G2

KMM Carl Zeiss CONTURA G2 ima mosnu hadversku strukturu i postoji u dve varijante RDS ili Activ, slika 13. Razlika se odnosi na sistem mernog senzora koji se koristi. RDS je oznaka za mernu glavu koji je u kombinaciji sa VAST XXT mernim senzorom koji može da vrši uzorkovanje tačaka u modu "tačka – po – tačka" ili u skeniranju. Uz to, glava RDS je okretna i može da zauzme bilo koji ugao u prostoru, slika 14. CONTURA G2 Activ ima aktivan merni senzor VAST XT bez merne glave i rotacija senzora je u ovom slučaju onemogućena. Takođe može da meri u oba moda, tačka po tačka i skeniranje, slika 15. Na slici 13 prikazani su osnovni delovi ove KMM. KMM koristi softversku podršku Calypso.



**Slika 13.** *KMM "carl zeiss CONTURA G2 RDS"*

1. nosač pinole
3. pinola
5. sistem mernog senzora
7. upravljački elementi
9. merni sto
11. magacin mernih pipaka



**Slika 14.** Merni senzor VAST XXT u kombinaciji sa RDS glavom

2. traverza
4. oslonac za pogon
6. pokretna membrana
8. džojstik
10. vodeća ploča



**Slika 15.** Aktivni merni senzor VAST XT

Merni glava RDS je kompatibilna sa beskontaktnim mernim senzorima: optički ViSCAN i laserski LineScan, slika 16.



**Slika 16.** Beskontaktni merni senzori kompatibilni sa mernom glavom RDS

KMM se snabdeva vazduhom preko kompresora čiji minimalni pritisak na ulazu u KMM treba da iznosi 5 bar-a. Raspoloživa merna zapremina je  $X1000 \times Y12000 \times Z600mm$ . Uspostavljanje komunikacije između hadvera i softvera računara se vrši tako što pri starovanju mašine softver zahteva da merni senzor zauzme poziciju u jedinstvenom referentnom koordinatnom sistemu mašine. Sledeći korak jeste kalibracija mernih pipaka koji će se koristiti u mernom planu o čemu će se više govoriti u sledećem poglavlju.

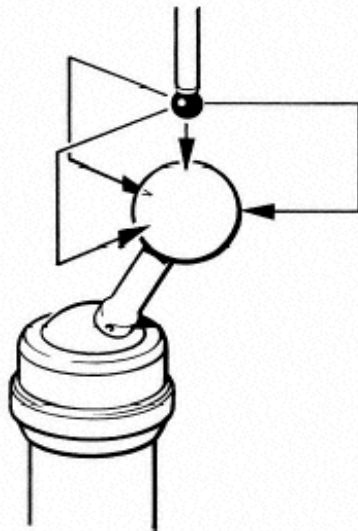
## 4.0 KALIBRACIJA MERNIH PIPAKA

Termin „kalibracija“ se može opisati kao skup postupaka kojima se, u određenim uslovima, uspostavlja odnos između vrednosti veličina koje pokazuje merilo ili merni sistem ili vrednosti koje predstavlja materijalizovana mera ili referentni materijal, i odgovarajućih vrednosti ostvarenih etalonima. Za kalibraciju koja obuhvata niz postupaka kojima se u određenim uslovima uspostavlja odnos između vrednosti koje pokazuje merni sistem ili instrument vezana je nesigurnost merenja. To je rezultat ocene koji ima za cilj da odredi opseg unutar kojeg se procenjuje da će ležati prava vrednost merne veličine sa datom verovatnoćom. Kalibraciju nije moguće izvesti bez merne opreme. Merna oprema mora imati metrološke karakteristike kakve zahteva nameravana primena (tačnost, stabilnost, opseg i rezolucija). Oprema i dokumentacija se održavaju tako što se zabeleži svaka korekcija ili promena koje se izvrše na opremi ili dokumentaciji. Ako se razmotri ova teorija može se zaključiti da se ovo odnosi na kalibraciju mernih instrumenata. Slično se može definisati i za kalibraciju mernih pipaka, tj. vrši se umeravanje mernog pipak tako što se meri etalon sa poznatim referentnim vrednostima i njima pripadajućim nesigurnostima.

Kalibracija je fundamentalna aktivnost kod upravljanja sistemom uzorkovanja (merni senzor (ponekad i merna glava), sistem mernih pipaka, merni pipak) i ciklusom merenja u celini. Sistem uzorkovanja predstavlja jedan od najvažnijih podsistema KMM. Njegovo pravilno definisanje direktno utiče na mogućnost realizacije mernog ciklusa. Sistem uzorkovanja je potrebno odrediti i po položaju mernih pipaka od kojih je on sastavljen, i po vrsti i prečniku mernih kuglica. U okviru ove aktivnosti se krije i visok nivo heurističkih znanja merioca i tehnologa. Pored definisanja mernog senzora u smislu njegove konfiguracije i vrste kuglica, potrebno je voditi računa i o krutosti i o masi tog sistema. Da bi merenje na KMM bila ispravna položaj centra vrha mernog pipka koji se odnosi na referentnu tačku sistema uzorkovanja (vektor  $\vec{r}_p$  na slici 4) i radijus vrha kuglice (apsolutna vrednost vektora  $b$  na slici 4) moraju biti poznati. Ovi parametri zavise od sile uzorkovanja, elastičnog ponašanja sistema uzorkovanja, mernog pipka, radnog predmeta, itd.

Kada je definisan sistem uzorkovanja on mora biti kalibrisan. Kalibracija predstavlja postupak definisanja koordinatnog sistema sistema uzorkovanja kao i memorisanje podataka o svakom mernom pipku ponaosob. Za ovaj posao se obično koristi etalon u obliku nekog pravilnog geometrijskog oblika (kocka, sfera, itd.). Kasnije, u postupku merenja i inspekcije, podaci koji su dobijeni kalibracijom, služe za proračun pozicija mernog senzora i za proračun i ocenu geometrijskih elemenata koji su mereni. Kalibracija sistema uzorkovanja mora da predhodi utvrđivanje merne sile. Pravilan izbor merne sile je jako važan za statičku krutost sistema uzorkovanja. Gabaritne mere su važan kriterijum za sve elemente sistema uzorkovanja, jer što je konfiguracija na kojoj se nalazi merni pipak duža, veći je statički ugib i, u principu, veće su mase takvih konfiguracija. Vrednost statičkog ugiba definiše veoma važnu karakteristiku sistema uzorkovanja, mernu silu, a preko nje i proces kalibracije.

Kalibracija se sastoji u tome da se mernim pipkom, koji predstavlja krajnji element sistema uzorkovanja opipava kalibracioni etalon (slika 17). Merenjem etalona automatski se određuju korekcije pipka (dužine i radijus). Kada se izvrše prethodno opisane operacije, moguće je uzastopno koristiti svaki sistem uzorkovanja tokom ciklusa merenja i korekcije će se automatski ažurirati kako bi se obezbedili koherentni merni rezultati.



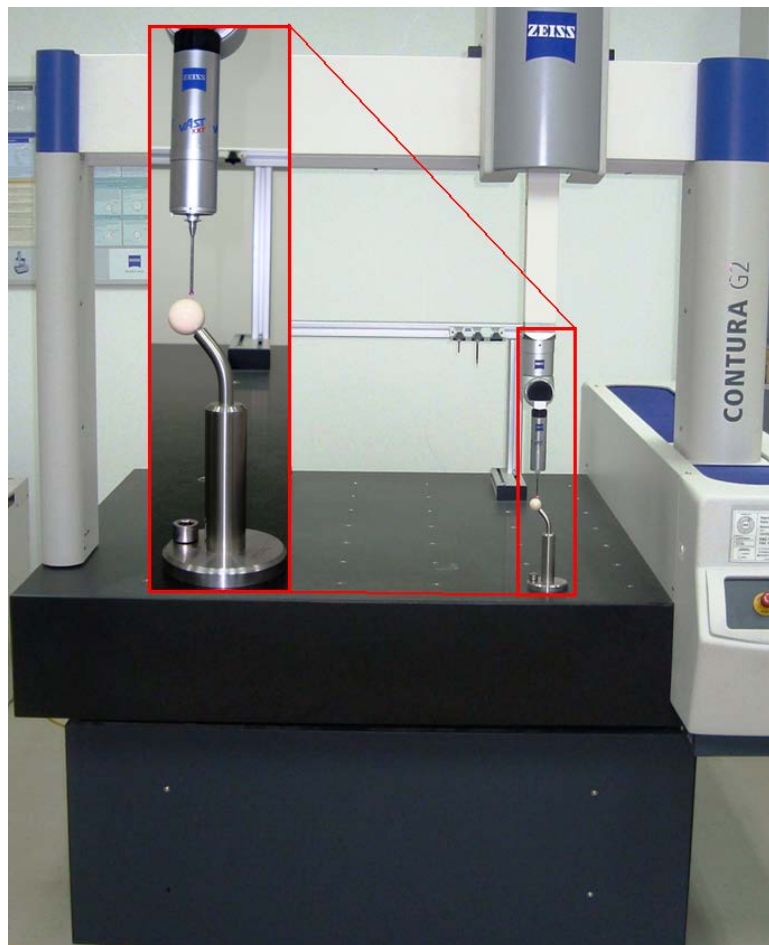
**Slika 17.** *Postupak kalibracije sistema uzorkovanja*

Savremene KMM obezbeđuju postupak automatske kalibracije. Kalibracija ima važan uticaj na pouzdanost mernih rezultata, stoga se moraju izvršiti ispravno prema metrološkim kriterijumima koji uključuju uputstva za učestalost kalibracija i uslove pod kojim se kalibracija prihvata. Kalibracioni etalon je definisan pri instalaciji KMM kao parametar sistema, a jedna KMM može imati i više kalibracionih etalona.

Kako je rečeno kalibracijom se definiše koordinatni sistem sistema uzorkovanja, koji u sebi sadrži podatke o položaju i prečnicima kuglica mernih pipaka. Fizički posmatrano, položaj centara kuglica mernih pipaka definišu vrednost statičkog ugiba mernih pipaka pod dejstvom merne sile. Prečnih merne kuglice definiše efektivne položaje potencijalnih tačaka opipavanja mernog predmeta od strane mernog pipka.

#### 4.2 KALIBRACIJA MERNIH PIPAKA NA CARL ZEISS CONTURA G2

Pre nego što se otpočne sa merenjem na KMM presudno je da se kalibrišu merni pipci za sve merne pozicije. Efektivne dimenzije komponenata mernog pipka (vrh mernog pipka i dužina mernog pipka) moraju da budu uspostavljeni da bi se izvršila tačna merenja. Ove vrednosti se podhranjuju u bazu podataka mašine. Kalibracija se izvodi pomoću etalon kugle (slika 18) koja se pričvršćuje za merni sto mašine pomoću vijka. Etalon kugla je napravljena od keramike prečnika 25mm visokog kvaliteta. Maksimalno odstupanje ovih kugli od sfernog oblika je 0,0005mm. Kalibracione vrednosti etalon kugle se moraju uneti u softver KMM.



**Slika 18.** Etalon kugla i sistem uzorkovanja

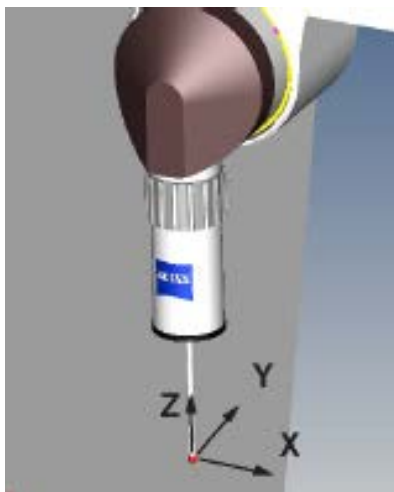


Merni pipak se mora kalibrisati u dva slučaja:

- u slučaju da smo instalirali novi merni pipak koji još nije kalibrisan i verifikovan,
- ako želimo da ponovo rekvalifikujemo sistem mernih pipaka npr. posle promene temperature u radnom prostoru mašine.

Prva kalibracija se mora obaviti ručno. Nakon što je merni pipak prvi put kalibrisan naredne kalibracije se mogu obaviti automatski uz uslov da referentna kugla ne menja svoj položaj u radnom prostoru mašine.

Pre kalibracije bilo kog mernog pipka u sistemu uzorkovanja mora se izvršiti kalibracija tog sistema uzorkovanja sa master mernim pipkom. Referentni (master) merni pipak se koristiti samo za kalibraciju i retko za merenje. Koristi se za proces prve kalibracije i na osnovu njega se vrši korekcija drugih pipaka. Postupak kalibracije se može opisati prema sledećem: zamisli se sopstveni koordinatni sistem mernog senzora čija nulta tačka je u referentnom mernom pipku. Polazeći od ove nulta tačke, svi drugi merni pipci imaju svoje koordinatne vrednosti X, Y, Z. Znači da opisani proces kalibracije sa masterom određuje nulti koordinatni sistem, slika 19. Ovo je preduslov za ispravno korišćenje bilo kog mernog pipka sa kojim će se vršiti merenje.



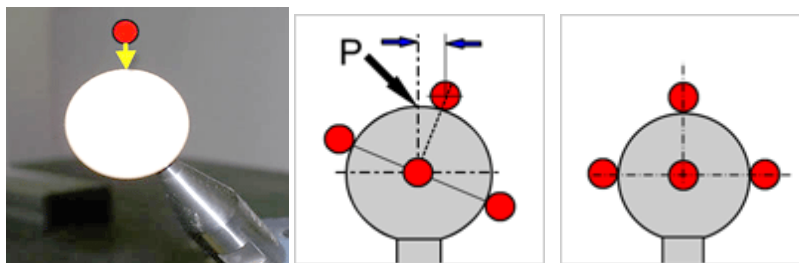
**Slika 19.** Postavljanje koordinatnog sistema sistema uzorkovanja sa master mernim pipkom

Kalibracija mernih pipaka koji će se koristiti za merenje se opisuje tako da se pozicije svih vrhova mernih pipaka verifikuju u koordinatnom sistemu koji je dobijen postupkom kalibracije sa masterom. Rezultat svakog mernog pipka će biti  $x,y,z$  vrednosti u odnosu na referentni (master) merni pipak.

U zavisnosti od tipa glave sistema uzorkovanja na raspolaganju je nekoliko metoda za kalibracioni postupak:

## 1. Metoda šest tačaka

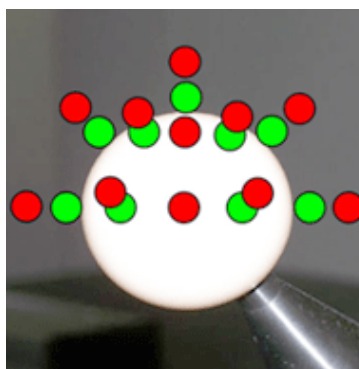
Ovo je standardna metoda za senzore “tačka po tačka”. Može se koristiti za sve sisteme uzorkovanja čiji merni pipak je oblika sfere. Proces kalibracije se odvija tako da se manuelno uzorkuje jedna tačka normalna na orijentaciju pernog pipka i nakon izvršenog uzorkovanja matematički se proverava položaj. Ako je položaj u prihvatljivim granicama ostale tačke se uzimaju automatski. Nije pogodna za veoma kratke merne pipke i posebne kombinacije mernih pipaka. Za određivanje pozicije se koriste četiri tačke, a zatim šest tačaka za proces kalibracije. Tačke opipavanja su raspoređene tako da se prvo opipavaju četiri u ravni koja je približna ekvatorijalnoj ravni kugle, a ostale dve na kaloti koja je sa strane mernog pipka koji se kalibriše. Kalibracija je izvedena ispravno, ako se mera standardne devijacije izmerenih vrednosti na sferi nađe u opsegu 0,0001 do 0,0015 mm. Ako je pipak postavljen na velikom prepustu ili je konfiguracija mase velika, standardna devijacija može imati veću vrednost. Kada se prekorači navedena mera standardne devijacije, ponavlja se postupak kalibracije za taj pipak.



Slika 20. Metod kalibracije šest tačaka

## 2. Tenzor metoda

Ova metoda se koristi kod skenirajućih mernih senzora. Kod ove metode se određuje jedan statički tenzor. Tenzor ukazuje savijanje mernog pipka u odnosu na primenjenu snagu. Vršiti se ukupno 30 opipavanja na 15 tačaka sfere. Ovde, svaka tačka se meri dva puta i to svaki put sa različito primenjenom silom. Statički tenzor proizilazi iz te razlike između obavljenih merenja.



Slika 21. Tenzor metoda kalibracije

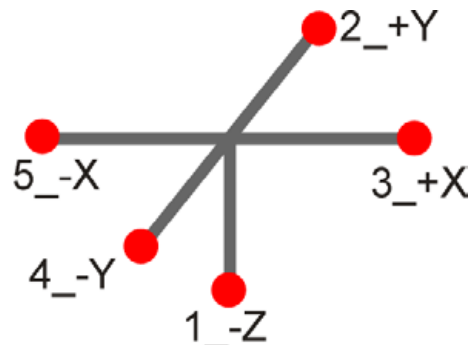
### 3. Ručna metoda

Koristi se samo ako automatska kalibracija (npr. zbog geometrije osovine) nije moguća. Takođe se koristi za kalibraciju temperature mernog pipka ili za početnu kalibraciju cilindra mernog pipka. Kod ove metode tačke koje su potrebne za kalibraciju uzima proizvoljno operater na mašini. Ovde, prva uzeta tačka određuje pravac kretanja mernog pipka. Naknadno uzimanje tačaka se koristi za izračunavanje geometrije mernog pipka. Rezultati su stoga mogući posle petog uzimanja tačaka).

### 4. Geometrijski ponovljena kalibracija

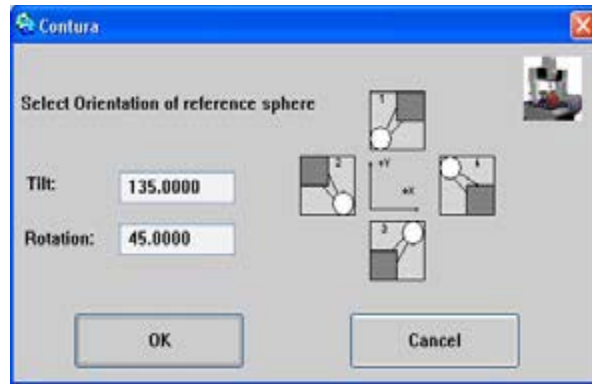
Koristi se za naknadno definisanje geometrije mernog pipka ako je bilo neželjenih promena u toku rada same KMM. Predhodno definisani statički tenzor ostaje jer to se obično ne menja. Princip kalibracije ovom metodom je sličan metodi 6 tačaka.

Kako se može primetiti na slici 18. referentna kugla zauzima neki ugao u odnosu na dršku. To je iz razloga da se mogu kalibrisati svi sistemi uzorkovanja koji zauzimaju različite uglove u odnosu na nosač sistema uzorkovanja koji se nalazi u položaju  $-z$ . Slika 22 pokazuje neke od mogućih orijentacije sistema uzorkovanja.



**Slika 22.** Neke moguće orijentacije sistema uzorkovanja

U zavisnosti od orijentacije potrebno je adektno postaviti i kasnije u softveru definisati položaj referentne kugle, slika 23.



**Slika 23.** Postavka referentne kugle u radnom prostoru mašine

Sem izbora kalibracionog postupka i postavke referentne kugle, operater mora, ako se prvi put vrši kalibracije, da ručno uzorkuje tačku sa referentne kugle koja za tu postavku sistema uzorkovanja predstavlja pol. Dalji postupak se odvija automatski prema izabranom modu kalibracije.

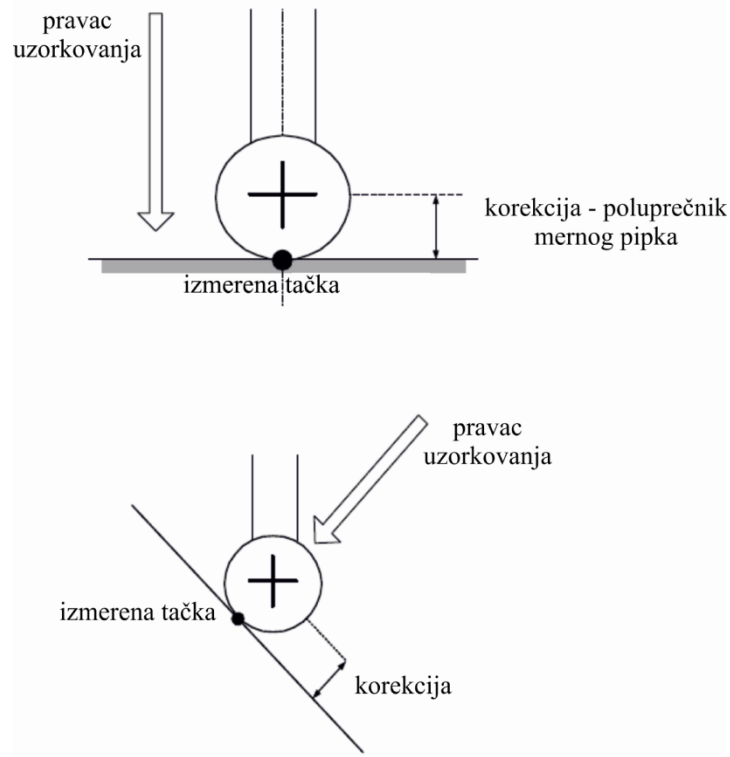
Može se zaključiti da kalibracija sistema uzorkovanja sadrži sledeće:

- Izbor referentnog etalona
- Izbor položaja i orijentacije referentnog etalona
- Definisane broja, položaja i redosleda tačaka u strategiji kalibracije

Rezultat kalibracije predstavljaju informacije o korekciji mernog pipka u odnosu na master, poluprečnik mernog pipka i vrednost standardne devijacije. Standardna devijacija predstavlja ocenu uspešnosti kalibracionog postupka i u idealnom slučaju njena vrednost je 0. Na vrednost standardne devijacije utiču sledeći faktori:

- Rezolucija i tačnost KMM,
- Dužine i krutosti mernih pipaka,
- Kvalitet sistema uzorkovanja, i
- Čistoće i okoline.

Visoka vrednost standardne devijacije povećava netačnost merenja i sistematski se pojavljuje u svakom merenju. Vrednost poluprečnika mernog pipka se kasnije koristi u merenjima za korekciju položaja mernog pipka, tj. radni predmet se uzorkuje vrhom mernog pipka a softver beleži koordinate centra, slika 24.



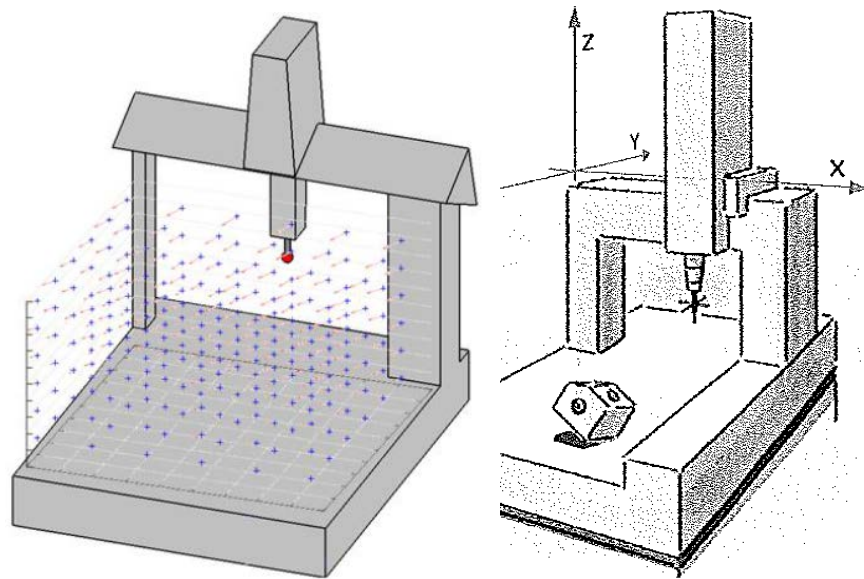
**Slika 24.** *Korekcija mernog pipka*

Na slici 24 dole može se uočiti da pravac uzorkovanja može biti promenjiv i stoga je bitno da ove tačke imaju jedinični vektor normale sa ciljem da se korekcija radijusa mernog pipka sprovede pravilno.

## 5.0 PROCES MERENJA NA KMM

### 5.1 DEFINISANJE RADNOG PREDMETA U RADNOM PROSTORU MAŠINE

Nakon što je izvršena kalibracija sistema uzorkovanja KMM je spremna za merenje. Radni prostor KMM se može zamisliti kao skup koordinata tačaka sa veoma visokom rezolucijom, slika 25.

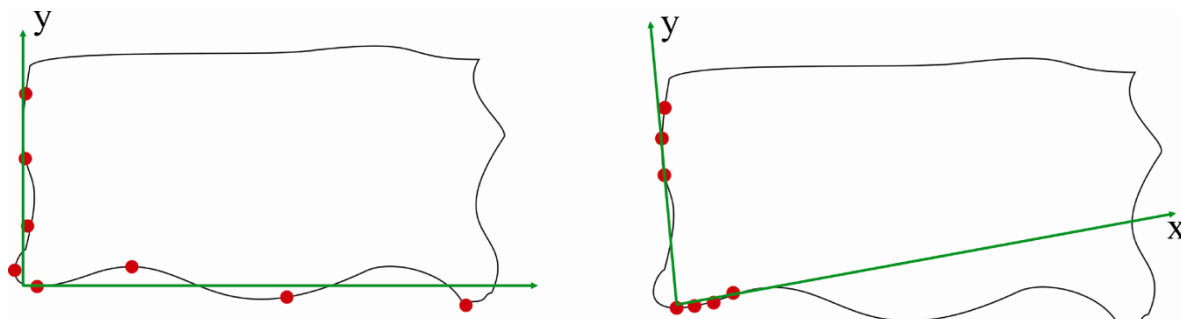


*Slika 25. a) Radni prostor KMM izražen kroz skup koordinata tačaka; b) "nepoklapanje" radnog predmeta sa koordinatnim mernim sistemom mašine*

Ove koordinate tačaka se vežu za neki od koordinatnih sistema. Kada se radni predmet pričvrsti za sto KMM, bez upotrebe odgovarajućeg pribora, njegove površine je veoma teško poravnati sa osama KMM, slika 24.b. Kao rezultat neporavnavanja, saglasnost sa Abbe-ovim principom ne može biti osiguran tokom merenja i veće ili manje greške se mogu javiti. Da bi se eliminisale ove greške potrebno je adekvatno postaviti koordinatni sistem radnog predmeta.

Pri postavljanju koordinatnog sistema radnog predmeta (ovaj process se još naziva i proces poravnavanja radnog predmeta) najbolje je koristiti tehničku dokumentaciju radnog predmeta, tj. konstruktivne baze treba da se koriste za merne baze. Proces uravnavanja je u principu definisanje položaja radnog predmeta u softveru KMM. Za proces poravnavanja koriste se merne baze tj. osnovni geometrijski primitivi razmatranog radnog predmeta. Kod oba slučaja programiranja, bez CAD modela (obučavanjem) ili sa CAD modelom (off-line) poravnavanje se mora izvršiti manuelno. U prvom slučaju moraju se definisati geometrijski primitivi koji će

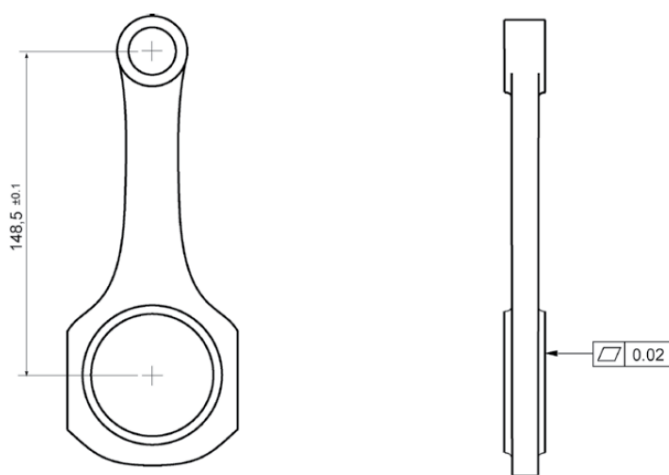
učestvovati u definisanju koordinatnog sistema radnog predmeta uzorkovanjem tačaka sa površine tih primitive. U drugom slučaju, koordinatni sistem je definisan u CAD modelu i da bi softver znao gde se nalazi radni predmet moraju se ručno uzorkovani geometrijski primitivi od kojih se definise koordinatni sistem radnog predmeta. Pri definisanju ovih geometrijskih primitiva mora se voditi računa o primenjenoj strategiji uzorkovanja (broj i položaj mernih tačaka koje opisuju realnu geometriju primitiva) jer neadekvatno definisani primitive mogu biti uzročnih loše postavljenog koordinatnog sistema radnog predmeta, slika 26.



**Slika 26.** Značaj strategije uzorkovanja geometrijskih primitive koji definišu koordinatni sistem mernog predmeta

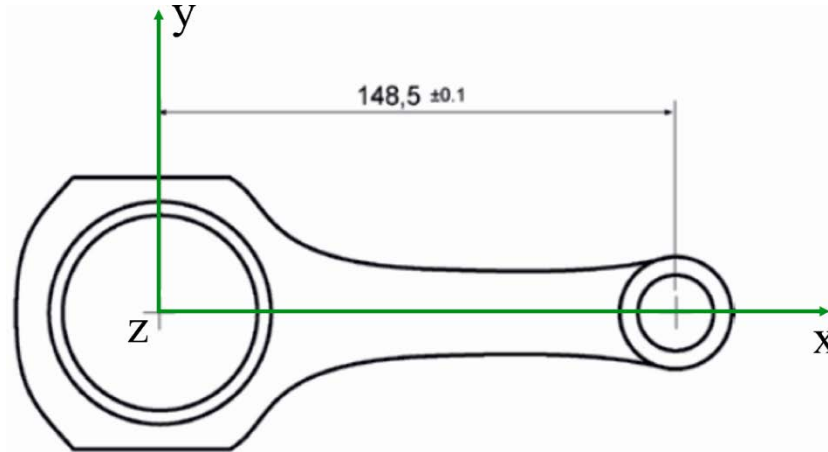
### 5.1.1 PRIMER DEFINISANJA KOORDINATNOG SISTEMA RADNOG PREDMETA U SOFTVERU CALYPSKO

Na slici 27 prikazana je tehnička dokumentacija radnog predmeta koji se meri i geometrijske karakteristike čija uslađenost sa naznačenim tolerancijama treba da se proveri na KMM.



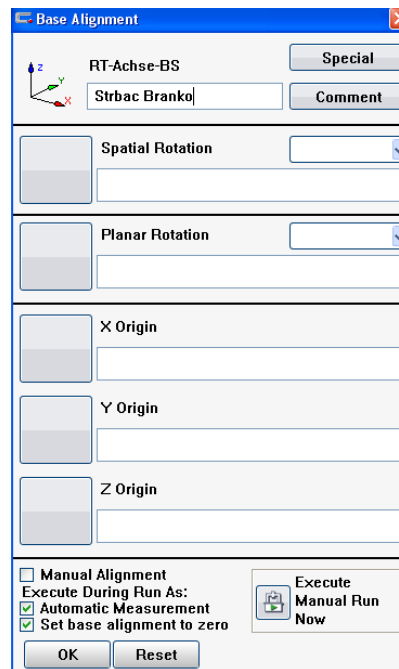
**Slika 27.** Tehnički crtež sa naznačenim tolerancijama

Sa crteža se može uočiti da su konstruktivne baze za rastojanje između dva otvora upravo ova dva otvora i ravna čeona površina kod većeg otvora. Ovo ukazuje da koordinatni sistem mernog predmeta treba postaviti u centar većeg otvora stim, zavisno od položaja radnog predmeta na stolu KMM, x ili y osu treba usmeriti u pravcu ose manjeg otvora, slika 28.



Slika 28. Koordinatni sistem radnog predmeta

Dakle potrebno je definisati (izabrati strategiju uzorkovanja) tri geometrijska primitive: veći cilindar, krug na manjem cilindru (za definisanje centra manjeg otvora) i ravan koja ograničava veći cilindar. Značaj strategije uzorkovanja će detaljnije biti objašnjeno u sledećem poglavlju. Za definisanje koordinatnog sistema u Calypso softveru pojavljuje se sledeći prozor, slika 29.



Slika 29. Prozor za definisanje koordinatnog sistema radnog predmeta



Sa slike se može uočiti da je potrebno definisani koordinatne početke posebno za svaku osu (X, Y, Z Origin), prostornu rotaciju (spatial rotation) i ravansku rotaciji (Planar rotations). Za ovaj slučaj početak koordinatnog sistema se nalazi u osi većeg cilindra i to u preseku ove ose i ravni. Dakle, X početak i Y početak se definišu tako što se izabere cilindar a početak Z ose je definisan ravni gde se cilindar završava. Prostorna rotacija određuje položaj radnog predmeta u 3D prostoru. U tom slučaju ako se izabere ravan da usmerava osu z u + pravcu radni predmet je ograničen u 3D prostoru. Ostala je još ravanska rotacija i za ovaj slučaj ona je definisana položajem centra kruga na manjem otvoru.

## 5.2 STRATEGIJA UZORKOVANJA

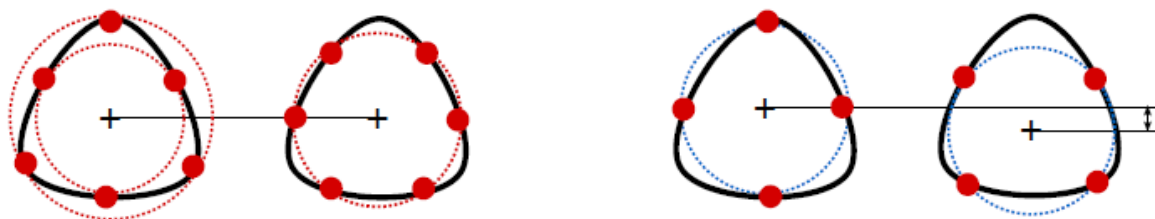
Izabrana strategija uzorkovanja ima važnu ulogu jer omogućava validne zaključke o dimenzijama i oblicima radnog predmeta. Potrebno je poznavati celu površinu da bi se ocenila odgovarajuća tolerancija na crtežu. Strategija uzorkovanja pri korišćenju KMM mora da bude pravilno odabrana jer diskretni broj tačaka koji se koristi kod KMM za merenje treba da pruži adekvatne informacija o površini za utvrđivanje usaglašenosti sa specifikacijom i istovremeno smanji troškove i vreme inspekcije. Strategija uzorkovanja se sastoji od optimalnog broja mernih tačaka koje čine geometrijski primitiv i položaja tih tačaka. Određivanje veličine uzorka je kompleksan proces jer utiče mnogo faktora kao što su korišćeni proizvodni proces, specifikacije tolerancija, greška evolutivne metode i nivo pouzdanosti rezultata merenja. Pošto uzorkovanje treba da bude dobar represent cele površine, položaj tačaka treba da bude takav da se dobije maksimalna količina informacija. Ovi položaji mogu se odrediti korišćenjem statističkih procedura ili iz poznavanja proizvodnog procesa ili kombinacijom oba. U praksi se uglavnom koriste strategije uzorkovanja kao što su:

- uniformna,
- slučajna, i
- stratifikovana.

Strategija uzorkovanja u interakciji sa odstupanjem oblika može znazno da utiče na rezultat merenja. Sledi nekoliko primera uticaja merne strategije.

### **Interakcija odstupanja oblika i strategije uzorkovanja: kružni geometrijski primitiv**

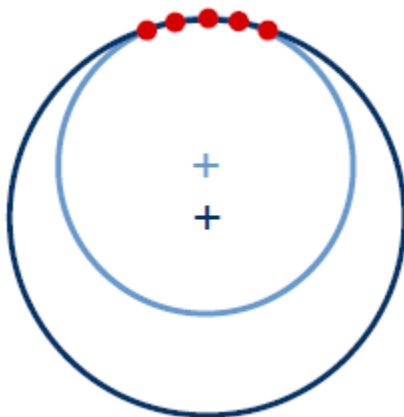
Najpoznatiji primer odstupanja od oblika u interakciji sa strategijom uzorkovanja je merenje 3-lučnog odstupanja od kružnosti, slika 30.



*Slika 30. Uticaj strategije uzorkovanja na karakteristike kruga: dimenzija, kružnost i položaj centra*

### **Loša merna strategija: merenje segmenta kruga**

Dobro poznat primer loše usvojene strategije merenja je merenje segmenta kruga. Merenje malog segmenta kruga uvek će rezultirati veoma velikom netačnošću kako prečnika tako i pozicije. Male greške merenja će imati veliki uticaj na rezultate merenja. Ovo je ilustrovano na slici 29, gde oba prikazana kruga mogu da se fituju kroz izmerene tačke.



*Slika 31. Loše izabrana strategija merenja*

Ako se merenje vrši u diskretnom modu, tačka po tačka, veliki broj tačaka može znatno da poveća vreme inspekcije i veoma je važno da izabrani redukovani broj tačaka bude adekvatno raspoređen po ispitivanom primitivu. Ako se merenje vrši u modu skeniranja (kontakno ili beskontakno) ovde nije problem uzorkovati veliki broj tačaka za veoma kratak vremenski period ali sa aspekta tačnosti mod merenja skeniranjem je znatno netačniji, tj. uzorkovana tačka ima mnogo veću mernu nesigurnost u ovom modu nego pri diskretnom uzorkovanju. Posebno, ako se vrši uzorkovanje u modu skeniranja potrebno je koristiti filtriranje podataka.

## 5.3 METODE PROCENE SUPSTITUTIVNE IDEALNE GEOMETRIJE

Nakon uzorkovanja koordinata tačaka određenih strategijom merenja i eventualne primene operacije filtriranja, potrebno je odrediti idealnu supstitutivnu geometrijskog primitive primenom algoritama fitovanja. Metode fitovanja se mogu podeliti na:

- statističke algoritme (metoda najmanjih kvadrata), i
- ekstremne algoritme (minimalna zona, maksimalno upisan i minimalno opisan omotač kod rotacionih geometrijskih primitiva)

### 5.3.1 METODA NAJMANJIH KVADRATA

Zahvaljujući svojoj analitičkoj formulaciji i mogućnosti da se implementira sa brzim algoritmima, metoda najmanjih kvadrata (LS) je algoritam fitovanja koji je najviše ugrađen u KMM softvere.

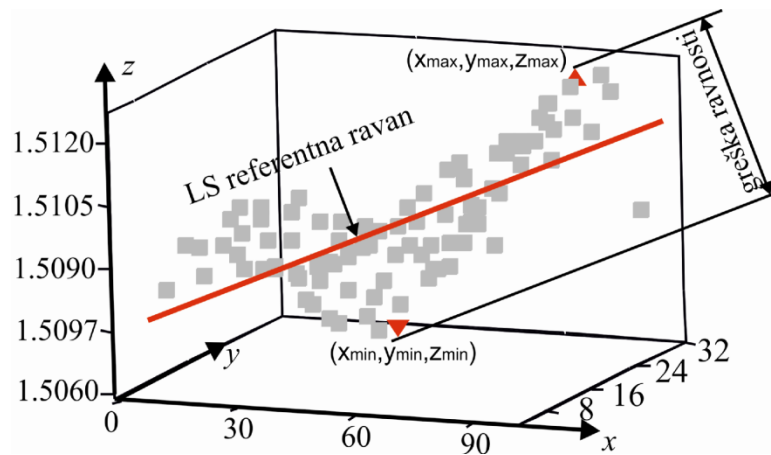
Obično, kada KMM ne nudi mogućnost izbora algoritama fitovanja, LS je jedan od podrazumevanih koji je implementiran.

LS se bazira na regresionoj analizi tj. zasnovan je na minimizaciji sume kvadrata rastojanja mernih tačaka od fitovanog nominalnog geometrijskog primitiva.

Metoda najmanjih kvadrata će biti objašnjena na primeru merenja ravnosti na KMM.

Ako se posmatra skup uzorkovanih tačaka sa koordinatama  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $x_i, y_i$  su nezavisne promenjive a  $z_i$  je zavisna promenjiva čija vrednost se pronalazi statističkim posmatranjem. Model funkcije ima oblik  $f(x, y, \beta)$ , u vektoru  $\beta$  u sebi sadrži podesive parametre  $m$ . Model funkcije ima za cilj da pronađe vrednosti parametara  $m$  koji na najbolji način uklapaju (fituju) uzorkovane tačke. Metoda najmanjih kvadrata pronalazi optimum kada je suma kvadrata reziduala minimizirana, slika 32. Rezidual ili ostatak se definiše kao razlika između vrednosti zavisne koordinate ( $z$  – koordinata) i vrednosti dobijene predloženim modelom. Za rešenja problema ravnosti, jednačina referentne ravni treba, prema predloženom modelu, da uklopi skup mernih tačaka.

LS metoda uvek daje jedinstveno rešenje za razliku od ekstremnih algoritama kao što je MZ, ali njen najveći nedostatak je u tome da nije u skladu sa matematičkom definicijom tolerancijske zone. LS je u stanju da definiše okvirnu zapreminu koja sadrži sve merne tačke, ali ovaj okvir nije minimalna veličina. Zbog toga obično procenjena greška oblika može dovesti do odbacivanja dobrih delova koje bi bile u specifikaciji sa minimalnom zonom.



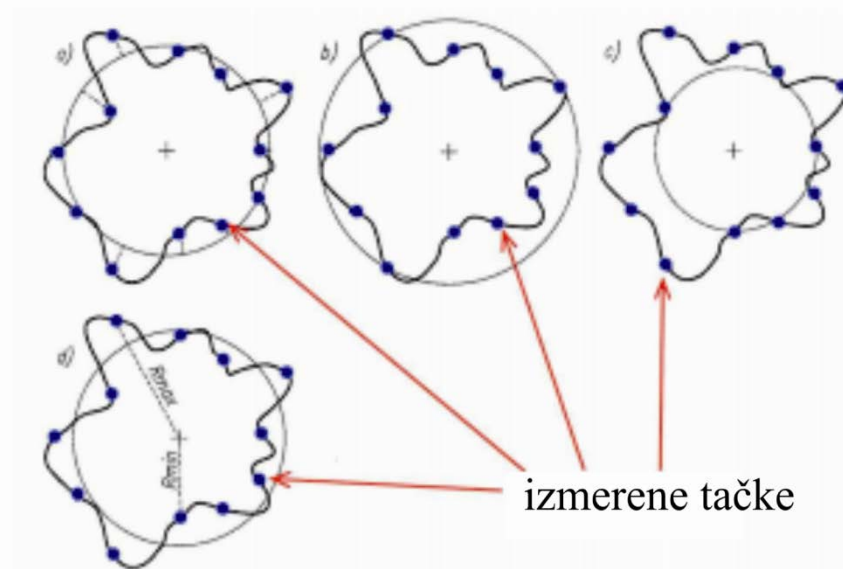
**Slika 32.** Metoda najmanjih kvadrata pri proceni odstupanja ravnosti

### 5.3.2 EKSTREMNI ALGORITMI

Ekstremni algoritmi su više u skladu sa geometrijskom definicijom tolerancijskih zona stoga su pogodniji za funkcionalnu verifikaciju. Na drugoj strani ekstremni fit algoritmi su mnogo osjetljiviji na uzorkovanje. Najpopularniji ekstremni asocijativni kriterijum je nesumljivo minimalna zona. To prirodno proizilazi iz definicije tolerancijske zone (prema ISO i prema ASME standardu), i nekoliko algoritama je na raspolaganju za njegovo izračunavanje za većinu primitiva. Ostali ekstremni fit asocijativni kriterijumi su na raspolaganju koji imaju rotacionu simetriju. Na primer maksimalno upisan i minimalno opisan algoritam kože da se koristi za krug, cilindar i sferični primitiv; njihova upotreba mora biti u vezi sa funkcionalnim zahtevima primitiva.

Treba napomenuti da skoro uvek, kada se na iste tačke uzorkovanja primene različiti algoritmi fitovanja, dobiju različiti rezultati merenja. To ukazuje na veliki problem i ISO standard radi na tome da se tolerancijski okvir proširi, tj. da već u fazi projektovanja mora da se definiše koji algoritam fitovanja će se koristiti za dobijanje supstitutivne geometrije.

Na slici 33, na primeru kružnog geometrijskog primitiva, prikazane su različiti algoritmi fitovanja.



**Slika 33.** *Primena različitih algoritama fitovanja da isti strategiju uzorkovanja; a) najmanji kvadrati, b) minimalno opisan krug, c) maksimalno opisan krug, d) minimalna zona*

## 6.0 TAČNOST I MERNA NESIGURNOST KMM

Postoji nekoliko tipova metoda ocenjivana tačnosti koordinatnih sistema. Najpopularnije metode su zasnovane na merenju kontrolnih dužina kao što su graničke merke, koračno merilo, ball bar merilo, ploča sa otvorima, ploča sa kuglama, itd. One su opisane u standardima kao što je ISO 10360. Drugi tip, zasniva se na identifikaciji geometrijskih grešaka. One predstavljaju sličan pristup kao u slučaju metoda ocene preciznosti alatnih mašina. One su zasnovane na određivanju specifičnih tačaka geometrijskih grešaka KMM i proveravaju da li dobijeno odstupanje su u navedenom opsegu dozvoljenog limita greške. Ova metoda se koriste za testiranje sposobnosti realizacije merenja na KMM i jedna je od prvih i uvedena je od udruženja proizvođača KMM kao preporuka.

### 6.1 PROVERA TAČNOSTI KMM PREKO ISO 10360

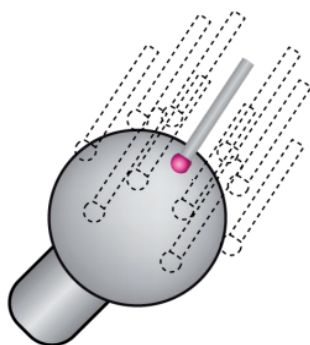
ISO 10360 standard opisuje nekoliko testova evolucije za konvencionalne KMM. Najčešće korišćen deo ovog standarda je ISO 10360-2:2012. Ovaj standard opisuje dva testa performansi, jedan za procenu performansi mernog senzora i jedan za procenu performansi merenja dužine.

### 6.1.1 TEST MERNOG SENZORA

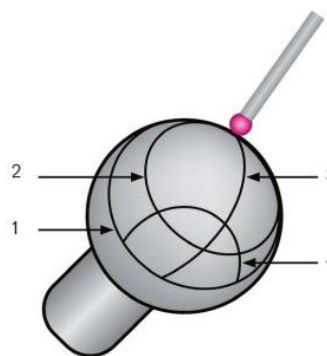
Kalibrisana sfera se meri sa 25 tačaka prema datoj stateziji. Orijehtacija mernog pipka može biti izbrana od strane korisnika. Koristi se metoda najmanjih kvadrata za dobijanje supstitutivne sfere. Za svaku od 25 tačaka računato je radijalno odstojanje  $R$ . Raspon ovih rastojanja definiše grešku mernog senzora  $P$ :

$$P = R_{max} - R_{min}$$

Ovaj test se radi posebno za mod uzorkovanja “tačka po tačka” i obeležava se sa  $MPE_p$  (slika 34.a) i posebno za mod skeniranja  $MPE_{THP/\tau}$  (slika 34.b). Vrednost  $MPE$  predstavlja



**Slika 34.a.**  $MPE_p$

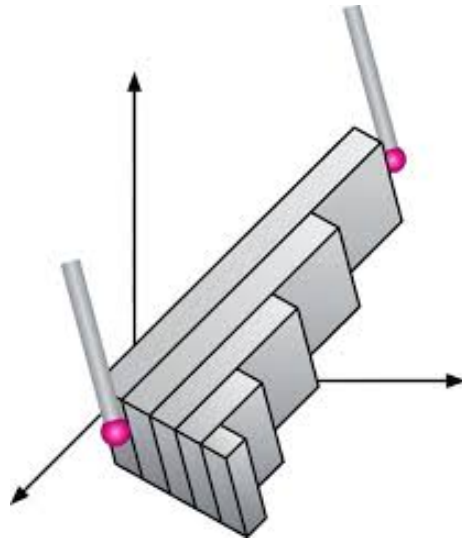


**Slika 34.a.**  $MPE_{THP/\tau}$

Vrednost  $MPE$  predstavlja maksimalno dozvoljenu grešku. Kod testa  $MPE_{THP/\tau}$  referentna sfera se skenira u četiri definisane linije.  $THP$  je opseg svih radijusa tj. prati se greška oblika sferičnosti u modu skeniranja. Greška je u direktnoj vezi sa brzinom skeniranja is toga se u standardu navodi maksimalno vreme skeniranja predstavlja vrednost  $\tau$ . Vrednost greške skeniranja je uglavnom veća od vrednosti greška za mod merenja “tačka po tačka” zbog ubrzanja i promenljivog trenja tokom skeniranja ali imaju mogućnost da mere veći broj tačaka za manji period.

### 6.2.2 TEST DUŽINE

Set od pet materijalnih standardna dužine (kalibrisani koraci ili granične merke) se meri pod sedam različitih orijentacija na KMM, slika 35. Svako merenje se ponavlja tri puta. Najkraća materijalna dužina treba da bude manja od 30mm, najveća bi trebala da bude duža od 66% najveće prostorne dijagonale merne zapremine KMM.



**Slika 35.** Test dužine  $MPE_E$

Za svako od 105 merenja, greška dužine E se proračunava). Sve greške su iscrtane na grafikon kao funkcija izmerene dužine. Ova greška se izražava preko sledeće jednačine:

$$MPE_E = A + L/K,$$

gde je:

$MPE_E$  – maksimalno dozvoljena greška za merenje rastojanja između dve tačke

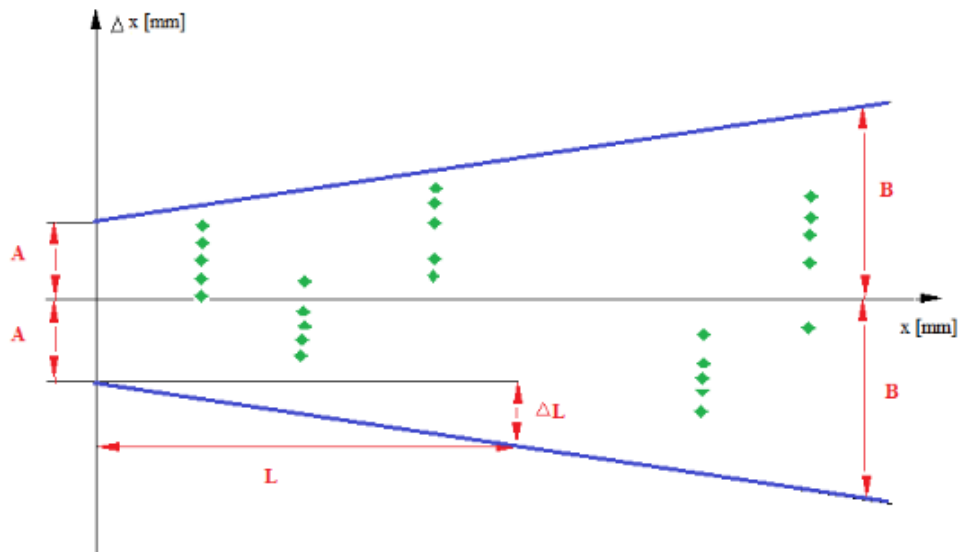
A – pozitivna konstanta izražena u  $\mu\text{m}$

K – dimenzionalna konstanta

L veličina merenja u mm

Greška mernog senzora, P, i greška veličine, E, ne bi trebala da prelaze zadati maksimum dozvoljene greške (MPE).  $MPE_P$  je specificirana kao pojedinačna vrednost, dok se  $MPE_E$  obično prikazuje na sledeći način, slika 36.

$$MPE = A + B \cdot L$$



**Slika 36.** Grafički prikaz  $MPE_E$

U slučaju prihvatanja testova, ove vrednosti se iskazuju od strane proizvođača. U slučaju reverifikacionih testova, oni su definisani od strane korisnika. Na kraju materijala je dat „Kalibracioni sertifikat“ koji se izvršen nakon instalacije KMM Carl Zeiss Contura g2 RDS na Departman za proizvodno mašinstvo.

Testovi performansi su veoma važni i korisni. Međutim, za razliku od onoga što mnogi ljudi misle, oni apsolutno ne daju izjavu nesigurnosti pri merenju KMM. Moglo bi se tvrditi da performanse specifikacija koordinatnih mernih sistema može se posmatrati od specifičnosti zadatka merne nesigurnosti za radni predmet koje su slične sa test etalomom korišćen tokom testa performanse. U ovoj perspektivi, ISO 10360-2 izjava greške o veličini može se smatrati kao izjava nesigurnosti za slična merenja dužine kao je konfiguracija mernog senzora, uslovi okoline, merna strategija, kvalitet površine, itd. su sve (približno) iste kao i tokom testa performanse. Ovi uslovi su retko ispunjeni u praksi. Nemoćuće je na primer koristiti  $MPE_E$  vrednost, koja je obezbeđena preko ISO 10360-2 specifikacije, da izračun nesigurnost kada se mere karakteristike kruga. Takođe je ovo nemoguće da se koristi za izračunavanje nesigurnosti pri merenju ugla.

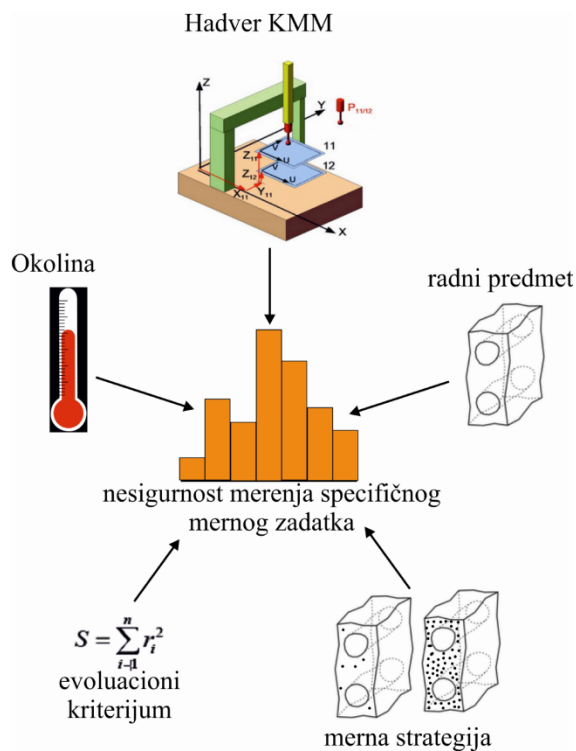
KMM eksperti mogu dobiti grubu ideju o mernoj nesigurnosti za nekoliko merno kontrolnih zadataka. Za mnoge druge merne zadatke će biti daleko teže ili čak nemoguće. Dobijanje pouzdanih izjava nesigurnosti, zasnovano samo na specifikacijskim performansama i ekspertnog znanja je veoma teška, zbog specifičnosti merno kontrolnog zadatka merne



nesigurnosti za KMM. Svaki meri zadatak će imati različitu mernu nesigurnost. Specifikacione performanse su različite za jedan specifičan meri zadatak pod veoma specifičnim okolnostima i rezultati ne mogu samo biti „izvedeni“ za druge merne zadatke.

## 6.2 PROCENA MERNE NESIGURNOSTI KMM MERENJA

Procena merne nesigurnosti KMM merenja predstavlja kompleksan zadatak jer treba identifikovati i kvantifikovati sve uticajne izvore nesigurnosti. Nakon toga treba da se proceni uticaj ovih izvora na rezultat merenja. Zbog jake interakcije između različitih izvora uticaja, stroga klasifikacija je nemoguća. Uticajni izvori na mernu nesigurnost se mogu podeliti u pet kategorija, slika 37.



*Slika 37. Uticajni faktori na mernu nesigurnost*

- Hadverska struktura. Greške hadverske strukture se često smatraju kao veoma bitan izvor merne nesigurnosti. Dele se u dve glavne kategorije: geometrijske greške i greške sistema uzorkovanja.
- Radni predmet: Ove nesigurnosti se odnose na osobine radnog predmeta i interakcije merenja sa radnim predmetom. Odstupanje od oblika dela, ograničena pristupačnost, položaj mernih tačaka, efekat stezanja, valovitost, hrapavost i elastične deformacije

izazvane mernom silom predstavljaju glavne faktore kojima radni predmet utiče na mernu nesigurnost.

- Strategija merenja: Ovde su uključene greške zbog neadekvatne akvizicije tačaka sa površine radnog predmeta, interakcije strategije merenja sa greškom oblika kao i brzina merenja.
- Evoluacioni kriterijum. Pogodnost algoritma i izbor, filtriranje, interakcija algoritma sa gustinom mernih tačaka, itd.
- Uticaj okoline: Odstupanje od referentne temperature, temperaturne fluktuacije i temperaturni gradijent, vibracije, nečistoće, itd.

Za određivanje merne nesigurnosti kod KMM u literaturi se ustalio izraz „nesigurnost specifičnog mernog zadatka“ (*eng. task - specific uncertainty*), jer skoro svako merenje sprovedeno na KMM će imati drugačiju nesigurnost. Nesigurnost specifičnog mernog zadatka je najbolje definisana kao:

*„merna nesigurnost čiji rezultat, je izračunat prema ISO upustvu za izražavanje merne nesigurnosti (GUM), kada se specifični geometrijski primitiv meri koristeći specifičan merni plan“.*

---

## 6.2.1 METODE PROCENE MERNE NESIGURNOSTI KOD KMM

Proceniti mernu nesigurnostu KMM merenja predstavlja problem prvenstveno zbog složenosti ovih mašina. Znatni naponi su sprovedeni od strane akademija, nacionalnih i međunarodnih institucija i organizacija, dovodeći do različitih pristupa. Ove metode pokrivaju na primer: empirijski usklađene metodologije, savetovanja od eksperata merenja, i numeričkih simulacija što je drugo je omogućeno preko dramatičnog povećanja računarske snage. Generalno rigorozna primena GUM smernica je često teška te su standardizovane i simulativne metode primenjivije.

---

### 6.2.1.1 GUM METODA

Vodič za procenu merne nesigurnosti GUM je standardo upustvo za procenu nesigurnosti svih merenja, ali da je teško primenjivo za merenja izvršena na KMM. Međutim, u slučajevima nedostatka drugih metoda, u nekim slučajevima omogućava zadovoljavajuće procene. Ova metodologija se zasniva na analitičkoj geometriji. Početni korak u primeni ove metodologije je jednačina referentnog – supstitutivnog elementa (linija, ravan, krug, cilindar) dobijena na osnovu podataka o koordinatama uzorkovanih tačaka. Nesigurnost se određuje iz nesigurnosti koordinata koje čine grešku oblika i nesigurnosti određivanja referentnog elementa. Uočavaju se sledeći nedostaci u primeni GUM-a za određivanje merne nesigurnosti na KMM:

- **Pretpostavka o nezavisnosti:** u cilju izbegavanja sločenih termina kovarijanse često se pretpostavlja da su faktori koji čine mernu nesigurnost nezavisni. Ovo se radi zbog činjenice da to pojednostavljuje proračun ali takođe zato što je često nemoguće diti kovarijanse svih ulaznih kvantitativnih karakteristika. U cilju da se uzmu u obzir sve kovarijanse, kompletna matrica kovarijanse treba da bude poznata. Ponekad je opravdano da se pojednostavi ali to može dovesti do velike greške u proceni merne nesigurnosti.
- **Raspodela standardne devijacije:** Konvencionalna GUM metoda koristi standardnu devijaciju kao meru merne nesigurnosti. Nesigurnosti svih ulaznih kvantitativnih veličina su izražene kao standardna devijacija, nesigurnost izlaznih kvantitativnih karakteristika je takođe standardna devijacija. Mogla bi se koristiti proširena nesigurnost sa faktorom pokrivanja  $k$  za dobijanje intervala nesigurnosti. Obično se odabere vrednost  $k$  koja odgovara određenom nivou poverenja  $p$  (npr. 95% ili 99%). To je moguće pod veoma specifičnim okolnostima jer to zahteva informacije o izlaznoj distribuciji. Pretpostavlja se da faktor pokrivanja  $k=2$  odgovara 95% intervalu poverenja. Ovo će jedino biti tačno pod uslovom da rezultat merenja ima normalnu raspodelu.
- **Prvi red Tejlor - ove aproksimacije:** Konvencionalna GUM metoda se bazira na prvom redu Tejlor - ove aproksimacije funkcije merenja. Dok god je linearna aproksimacija prihvatljiva u intervalu od interesa (interval oko rezultata merenja) to dovodi do ispravne izjave merne nesigurnosti. Ako je linearna aproksimacija nedovoljna, izračunate merne nesigurnosti će biti netačne.
- **Analitički odnos:** konvencionalna GUM metoda pretpostavlja da proces merenje može biti napisan kao analitička funkcija skupa ulaznih kvantitativnih vrednosti sa pridruženim nesigurnostima. Ako ovaj analitički odnos nije dostupan, koeficijenti osetljivosti ne mogu biti određeni. Kao alternativa, koeficijenti osetljivosti se mogu odrediti eksperimentalno, ali je ovo dugotrajan proces i jedina mogućnost za ograničen skup problema. Složenost procesa merenja kod KMM, sa svim različitim faktorima koji čine mernu nesigurnost, čini nemogućim definisati analitički odnos između svih faktora koji čine mernu nesigurnost i merenje. Pored toga, većina rezultata KMM merenja se dobijaju korišćenjem iterativnih algoritama fitovanja koji ne pružaju analitički odnos.
- **Sistematske greške:** GUM metod takođe pretpostavlja da su svi poznati sistematski efekti identifikovani i kompenzovani. Nesigurnosti zbog nesavršene kompenzacije poznatih sistematskih efekata uzimaju se kao dodatni činoci nesigurnosti. Međutim, u

praksi je veoma teško nadoknaditi sve poznate sistematske efekte. Temperaturno odstupanje (od 20 stepeni) dela ima važan sistematski efekat na mernu nesigurnost. Međutim kod većine KMM ne postoji kompenzacija za temperaturna odstupanja radnog predmeta.

Nedostatak analitičkog odnosa između ulaznih kvantitativnih veličina i rezultata merenja je najvažniji razlog zašto se konvencionalna GUM metoda teško primenjuje za KMM merenja. Korisna alternativa konvencionalnoj GUM metodi je korišćenje Monte Karlo simulatora za određivanje mernih nesigurnosti.

#### 6.2.2.2 PROCENA MERNE NESIGURNOSTI KMM MERENJA PRIMENOM SERIJE STANDARDA ISO 15530

ISO 15530 serije imaju za cilj da pruže terminologiju, tehnike i smernice za procenu nesigurnosti KMM merenja. Kompleksnost u vezi sa temom KMM merne nesigurnosti se ogleda u napretku postignutom u poslednjoj deceniji od strane ISO TC213 radne grupe. U okviru ovog standarda razvile su se četiri tehnike za procenu merne nesigurnosti kod KMM merenja:

- korišćenje višestrukih strategija merenja bez kalibrisanog radnog predmeta (ISO/TS 15530 -2),
- korišćenje kalibrisanih radnih predmeta ili standarda (ISO/TS 15530 -3:2011),
- korišćenje računarske simulacije (ISO/TS 15530 -4:2011), i
- korišćenje ekspertnih presuda.

##### ***Određivanje merne nesigurnosti primenom višestrukih staregija merenja bez kalibrisanog radnog predmeta (ISO/TS 15530-2)***

Ova tehnika za određivanje merne nesigurnosti kod KMM merenja je nastala kao alternativa tehnikama koje koriste kalibrisane radne predmeta zbog ograničenja dostupnosti kalibra. Procena nesigurnosti primenom višestrukih strategija se vrši preko eksperimenata u kome su činioci nesigurnosti varirani i merenja se vrše više puta. Sledeći faktori se uglavnom variraju: položaj i orijentacija radnog predmeta na stolu KMM, položaj i gustina tačaka u mernoj strateziji, brzina merenja (ako se meri u modu skeniranja), konfiguracija mernog pipka, poravnavanje radnog predmeta, itd. Veoma je pogodno u ovim slučajevima koristiti dizajn eksperimenta (DOE). Nedostatak ove tehnike je da ponovljenim merenjima određuje ponovljivost/raproduktivnost merenja a pri tom se sistematska greška ne uzima u obzir. Stoga, na ovaj način ne može da se dokaže puna sledljivost merenja. Možda je i to glavni razlog zašto je ovaj projekat standardadizacije izbrisan, ali da se ipak koristi kada ne postoje drugi načini za

određivanje merne nesigurnosti. Još jedan nedostatak ove metode je vreme trajanja eksperimenata u odnosu na metodu sa “kalibrisanim radnim predmetima”.

### ***Određivanje merne nesigurnosti primenom kalibrisanih radnih predmeta (ISO/TS 15530-3:2011)***

Ovaj deo ISO 15530 precizira procenu merne nesigurnosti za rezultate merenja dobijene na KMM korišćenjem kalibrisanih radnih predmeta. Kalibrisani radni predmeti i radni predmeti treba da budu isti ili slični. Standard uključuje metodologiju za nesupstitutivno merenje – merenja gde nekorigovani pokazatelji na KMM se koriste kao rezultat i supstitutivno merenje – merne procedure gde radni predmet i standard provere (kalibar) se mere u cilju pružanja dodatnih korekcija za sistematsku grešku. Kalibrisani deo treba minimalno da se meri 20 puta stim da se položaj i orijentacija kalibra sistematski menjaju. Ukupna nesigurnosti se sastoji od sledećih standardnih nesigurnosti:

- Standardna nesigurnost koja rezultira iz nesigurnosti kalibracije kalibrisanih radnih radnih predmeta navedenih u kalibracionom sertifikatu,
- Standardna nesigurnost koja rezultira iz procedure merenja (ponovljena merenja), i
- Standardna nesigurnost koja rezultira iz varijacije materijala i proizvodnje (zbog variranja koeficijenta ekspanzije, grešaka oblika, hrapavosti, elastičnosti i plastičnosti).

### ***Određivanje merne nesigurnosti koristeći računarsku simulaciju (ISO/TS 15530-4:2011)***

Primenom simulacionih računarskih tehnika, stvarno merenje se simulira nekoliko puta. Simulacija je zasnovana na matematičkom modelu procesa merenja i uzima u obzir sve bitne uticajne kvantitativne vrednosti. Tokom simulacije, ove uticajne kvantitativne vrednosti su varirane u okviru svojih pretpostavljenih opsega. Ovo će rezultirati u različitosti na simuliranim rezultatima merenja. Dijapazon simuliranih rezultata merenja se koristi za određivanje merne nesigurnosti. Budući da je ovo ne eksperimentalni pristup, ovo je mnogo brže i jeftinije. Glavni problem je naći matematički model koji obuhvata sve uticajne faktore. Bitno je znati koji uticaji su uključeni tokom simulacije. Glavne sekcije u okviru ISO 15530-4 se dele na sledeći način:

- A – UES softver za procenu merne nesigurnosti
- B – UES model
- C – UES validacija.

Softver za procenu merne nesigurnosti je softverski alat koji se koristi za procenu merne nesigurnosti preko simulacije sveukupnog mernog procesa radnog predmeta. UES alati mogu biti u okviru KMM softvera ili mogu biti off-line alati. Dobavljači UES alata moraju da dostave spisak ključnik karakteristika koji uključuju listu KMM metroloških karakteristika (geometrijske greške, karakteristike okoline, sistem mernog senzora, strategija merenja).

### ***Određivanje merne nesigurnosti presudom eksperata***

Određivanje Tipa B nesigurnosti, kako je definisano preko GUM, obično predstavlja vrednost presude zasnovano na mišljenju eksperta. Značajna iskustva sa KMM, ili specifičnim mernim mašinama, u kombinaciji sa povratnim informacijama na više merenja, može obezbedi da stručnjak realno proceni nesigurnost strogo koristeći Tip B metod. Ova tehnika je bila primarno korišćenja od strane ekspertnih metrologa decenijama, isto tako može biti efikasna za procenu jednog dominantnog izvora nesigurnosti ili, u stvari, grupe izvora, ili celog budžeta nesigurnosti. Metrolozi su u prošlosti zapravo mogli da procene efekte parametarskih grešaka bez primene matematičkih modela zbog dobro razvijenog shvatanja geometrijskih implikacija Abbe-ovog odstupanja, geometrijskih grešaka.

### **Primena Monte Karlo metode za procenu nesigurnosti**

Monte Karlo metoda je razvijena od strane Stanislava Ulama i koristi se u istraživanjima od 1943. godine. Spada u grupu numeričkih metoda i koristi se za modelovanje složenih matematičkih procesa čiju vrednost je teško odrediti analitičkim putem. Može se koristiti, između ostalog, za propagiranje verovatnoća. U ovom slučaju, njegova upotreba se zasniva slučajnom uzorkovanju iz funkcije raspodele verovatnoće. Upotreba Monte Karlo metode za određivanje merne nesigurnosti postaje dragocena alternativa za konvencionalnu GUM metodu. Nedavno je objavljeno dopunsko izdanje GUM –a. Ovaj dodatak opisuje propagiranje raspodela verovatnoće kroz matematički model merenja kao osnova za procenu merne nesigurnosti, a njegova implementacija je preko Monte Karlo metode. Primena ove metode je posebno značajna u slučajevima kada linearizacioni model pruža neadekvatno predstavljanje ili u slučajevima kada funkcija verovatnoće izlazne kvantitativne vrednosti odstupa značajno od Gausove raspodele ili smanjene i pomerene t raspodele, npr. zbog asimetrije ili spljoštenosti.

Pristup procene merne nesigurnosti metodom Monte Karlo je da se izvede funkcija gustine verovatnoće  $g_Y(\eta)$  koja kodira date informacije u vezi sa izlazom  $Y$ ;  $\eta$  označava moguću vrednost koja se može prepisati  $Y$ , i  $g_Y(\eta)\Delta\eta$  jednako je verovatnoći (prema datoj informaciji) da je vrednost  $Y$  unutar  $\Delta\eta$  oko  $\eta$ . Prema funkciji gustine verovatnoće  $g_Y(\eta)$  rezultati merenja  $y$  od  $Y$  se uzimaju kao matematičko očekivanje

$$y = \int g_Y(\eta) \eta d\eta,$$

i njihova pridružena standardna nesigurnost kao varijansa

$$u^2(y) = \int g_Y(\eta) (\eta - y)^2 d\eta,$$

Ove funkcije gustine raspodele verovatnoće. Interval poverenja sa verovatnoćom pokrivanja  $p$  može biti konstruisan kao interval  $[a, b]$  za koje

$$\int_a^b g_Y(\eta) d\eta = p,$$

Kada  $Y$  zavisi od nekoliko ulaznih veličina  $X_1, X_2, \dots, X_n$  za koje su dostupne informacije, analiza se sprovodi na sledeći način. Prvo se dodeljuju funkcije gustine raspodele  $g_{X_1, X_2, \dots, X_N}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$  ulaznim kvantitetima  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Moguće vrednosti ulaznih kvantiteta su označene  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$  i  $g_{X_1, X_2, \dots, X_N}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) \Delta \xi_1, \Delta \xi_2, \dots, \Delta \xi_N$  je verovatnoća da vrednosti ulaznih kvantiteta su u okviru  $\Delta \xi_1, \Delta \xi_2, \dots, \Delta \xi_N$  oko  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ . Kvadrat standardne nesigurnosti  $u^2(x_i)$  i kovarijanse  $u(x_i, x_j), i = j$  su date preko:

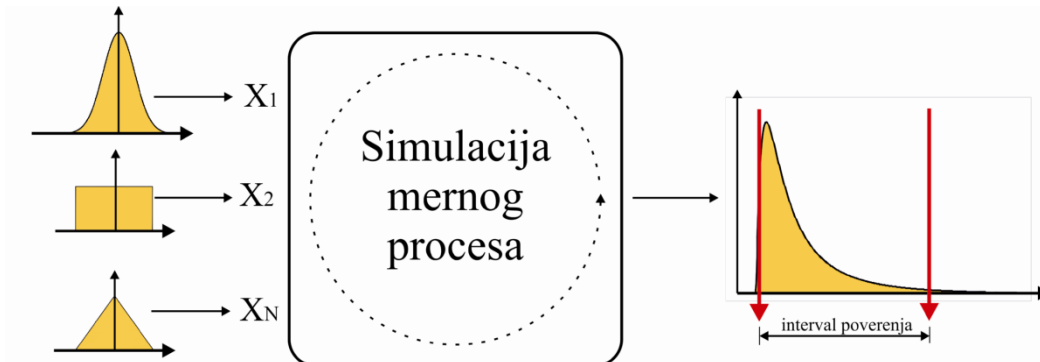
$$u^2(x_i) = \int g_{X_1, X_2, \dots, X_N}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) [x_i - \xi_i]^2 d\xi_1, d\xi_2, \dots, d\xi_N, \quad ($$

i

$$u(x_i, x_j) = \int g_{X_1, X_2, \dots, X_N}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) [x_i - \xi_i][x_j - \xi_j] d\xi_1, d\xi_2, \dots, d\xi_N,$$

gde je

$$x_i = \int g_{X_1, X_2, \dots, X_N}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) \xi_i d\xi_1, d\xi_2, \dots, d\xi_N.$$



Slika 38. Procena merne nesigurnosti Monte Karlo metodom

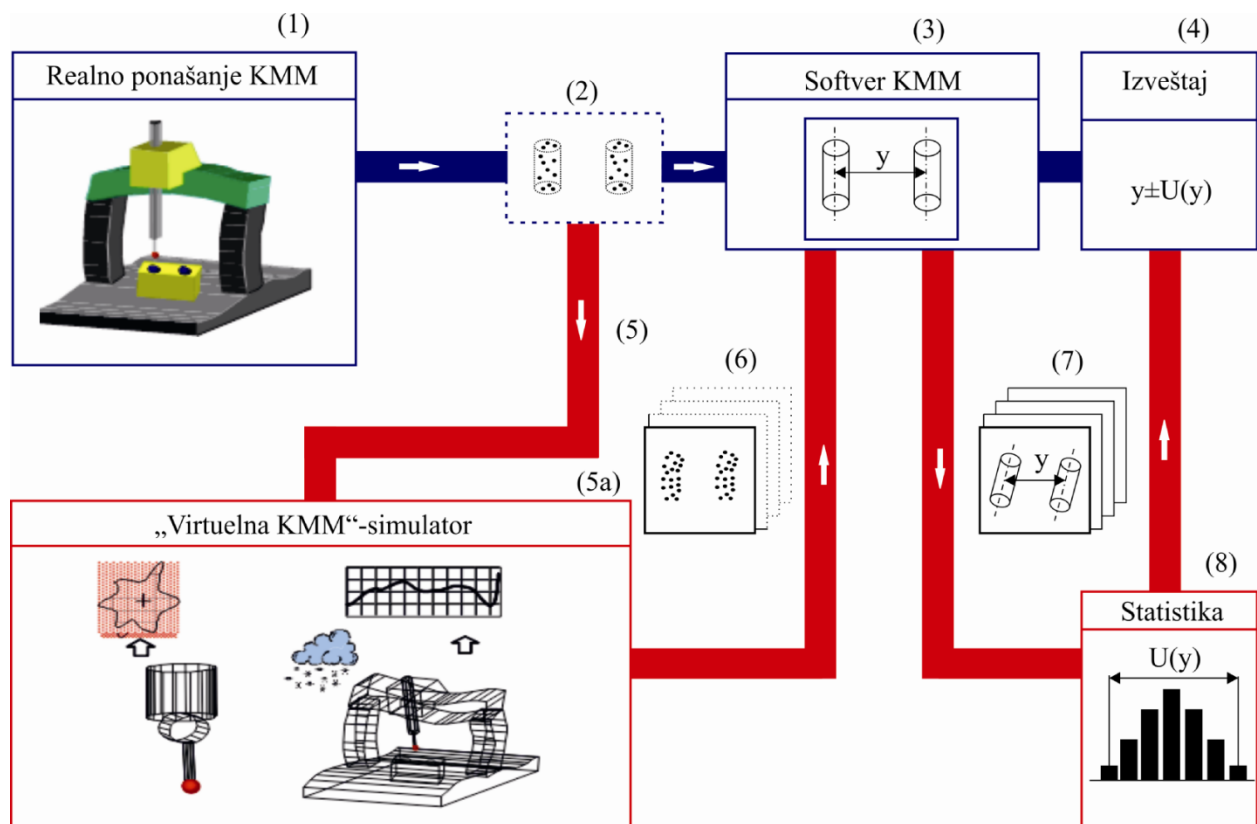
Ako informacija na bilo kom ulaznom kvantitetu se može smatrati kao nezavisna od drugih ulaznih veličina, pridružena funkcija gustine raspodele se može razložiti na činioce prema  $g_{X_1, X_2, \dots, X_N}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) = g_{x_1}(\xi_1), g_{x_2}(\xi_2), \dots, g_{x_N}(\xi_N)$ . Znači, ulaznim kvantitativnim veličinama se dodele odgovarajuće funkcije gustine verovatnoće (uniformna, normalna, trougaona,...) koje se propagiraju kroz model u cilju dobijanja funkcije gustine raspodele verovatnoće izlazne kvantitativne vrednosti. Slika 38 ilustruje procenu merne nesigurnosti primenom Monte Karlo metode.

Na bazi Monte Karlo metode razvijena je Virtuelna koordinatna merna mašina, realizovana je od strane PTB-a (deut. Physikalisch-Technische Bundesanstalt). Model procesa merenja i činioci nesigurnosti su, kao i kod klasičnog budžeta nesigurnosti, osnova za procenu nesigurnosti. Rešenje problema se ne izvodi analitički, već preko „virtuelnog eksperimenta“. Virtuelna koordinatna merna mašina oponaša strategiju merenja i fizičko ponašanje KMM kao dominantne činioce nesigurnosti merenja. Sprovođenje merenja preko simulacije bi trebalo da uključi sve aspekte realnog merenja, međutim, u praktičnim primerima VKMM ne može da obuhvati sve činioce nesigurnosti. Ova činjenica predstavlja glavni nedostatak ovih simulacionih alata. Pri modeliranju VKMM uzimamo u obzir tri osnovna činioca nesigurnosti: poznate sistematske uticaje, nepoznate sistematske uticaje i slučajne uticaje.

Princip rada VKMM je prikazan na slici 39. Plave linije pokazuju princip rada normalnog KMM merenja a crvene VKMM. U normalnom KMM merenju, kako je već ranije objašnjeno, mašina sa mernim sensorom (1) se koristi da uzorkuje tačke sa površine radnog predmeta izdelfjenog na osnovne geometrijske primitive (2). Ove tačke se koriste za dobijanje substitutivne (asocijativne) geometrije preko algoritama koji su obično implementirani u KMM softver (3). Nakon toga se vrši procena usaglašenosti sa nominalnim (CAD) modelom ili tehničkim crtežom (4).

Ulaz u VKMM predstavlja skup tačaka (5) koje se uzorkuju na određenom geometrijskom primitivu. Za svaku ovu uzorkovanu tačku VKMM simulator (5a) generiše verovatnosti prostor opisan preko funkcije gustine raspodele u kom se tačke mogu pojaviti zbog uticaja činioca nesigurnosti. Takon toga, za svaki primitiv se generiše skup simulacionih rezultata u (6) i nakon toga se u softveru KMM određuje supstitutivna geometrija. Zbog postojanja velikog broja supstitutivnih elemenata za jedan geometrijski primitiv dobija se funkcija gustine raspodele izlaza zbog rezultata (8) koja se može koristiti za procenu nesigurnosti.





Slika 4.5. Koncept virtuelne koordinatne merne mašine (VKMM)

Za rad na VKMM, činioci nesigurnosti moraju biti procenjeni za svaku pojedinačnu KMM pod specifičnim uslovima sredine. Za svaku KMM, baza podataka sa informacijama koje karakterišu ove nesigurnosti su korišćenje kao ulaz u VKMM simulator. Ovi činioci nesigurnosti uključuju standardnu devijaciju procesa uzimanja tačaka, rezidualne greške KMM kretanja (skala, pravost, rotacija), dozvoljen temperaturni gradijent, i koeficijent ekspanzije.

Za ulazne parametre se koriste kalibracione procedure i dugotrajno posmatranje. Merenja kalibrisanih ploča sa kuglama ili ploče sa otvorima mogu se koristiti za procenu svih geometrijskih grešaka KMM. Za potpuno mapiranje greške potrebno je meriti kalibrisanu ploču u najmanje šest položaja u radnom prostoru KMM. Umesto kalibrisanih elemenata može se koristiti interferometar. Greška mernog senzora se može okarakterisati merenjem referentne kalibracione sfere, ali i nakon kalibracije mernog pipka ostaju rezidualna sistematska i slučajna odstupanja koja utiču na nesigurnost. Mnogi drugi činioci ne mogu biti lako ili ekonomično procenjeni.

Naravno, nemoguće je uključiti sve uticajne faktore nesigurnosti. Zato je važno dokumentovati koji faktori su uključeni a koji nisu. Ovo je takođe naglašeno u ISO 15530-4:2011. Trenutna implementacija UES fokusira se uglavnom na nesigurnost hadvera.

VKMM kao simulacioni softver može da generiše validne nesigurnosti za sve izmerene ili izvedene geometrijske primitive i stoga proces merenja i simulacije mogu se smatrati kao sledljivost kalibracije.

KMM simulator je integrisan u dva nemačka KMM softverska paketa tj. CALYPSO od strane Zeissa i Quindos od strane Messtechnik Wetzlar.