

Katero metodo za natančne 3D-dimenzijske meritve izbrati in kdaj

Z današnjimi metodami 3D-merjenja lahko podjetja hitro in učinkovito nadzirajo svoje izdelovalne procese. Podobno kot smo danes na skoraj vseh področjih priča veliki izbiri in konkurenci, pa je tudi na področju merjenja na voljo kar nekaj različnih metod. Te se med seboj razlikujejo v fizikalnem principu merjenja, tudi v točnosti meritev, ponovljivosti, robustnosti in prilagodljivosti sistema itn. Če načelno velja, da se lahko z vsemi metodami izmeri večina projektov, vseeno na izbiro optimalnega postopka vpliva veliko dejavnikov. Pričujoča primerjava različnih metod je zasnovana kot pomoč pri odločanju in izbiri pravega sistema za 3D-meritve.

**Samo Gazvoda,
Dušan Sivka**

Na splošno dimenzijske meritve delimo v dve skupini – dotične in brezdotične. Zaradi razmeroma enostavnega principa so se v zgodovini najprej razvile dotične metode, ki so pravzaprav mehanske narave. Z dotikom merjenca na enem ali več mestih izmerimo ali koordinato točke dotika (koordinatni merilni stroj) ali razdaljo med dvema dotikalnima točkama (pomična merila, mikrometri ...). V osemdesetih letih prejšnjega stoletja pa so se začele razvijati brezdotične metode 3D-merjenja, ki so svoj razmah doživele malo pred letom 2000 in predvsem po njem.

Splošen pregled metod natančnega 3D-merjenja

Laserski sistemi

Od optičnih metod dimenzijskega merjenja so se najprej pojavile laserske glave s točkovnim merjenjem, ki so v merilnih sondah zamenjale mehanska tipala. S tem se klasični dotični koordinatni merilni stroj spremeni v brezdotičnega. Položaj (koordinata) merjene točke se določi na podlagi odboja laserskega žarka. Naslednja stopnja so linijski laserski senzorji, ki podatkov ne zajemajo samo točkovno, ampak linijsko, s premikanjem glave pa tudi površino objekta. Podatki se zajemajo s triangulacijo na 2D-profilu, ki ga zazna senzor v laserski glavi. V slednjem primeru se meritve izvajajo s posebno programsko opremo po zajemu vseh potrebnih detajlov merjenca.

Laserska meritev je tako pravzaprav sestavljena iz dveh odčitkov: prvi je določanje položaja in orientacije laserske glave (pozicioniranje) v prostoru, drugi pa odčitek laserske glave. Zato je tudi merilna negotovost sestavljena iz merilnih negotovosti obeh odčitkov, velja pa pravilo, da je natančnost odčitka laserske glave zelo velika

v primerjavi z natančnostjo pozicioniranja laserske glave, ki je pri prostoročnih laserjih ali izvedbah z merilno roko lahko nižja za razred ali dva.

Optični sistemi na belo svetlobo

Drugačen fizikalni princip optičnih meritev uporablja metoda merjenja z belo svetlobo. Poznamo tri principe zajemanja podatkov: optično glavo za koordinatni merilni stroj, fotogrametrijo in topometrijo. Medtem

ko je optična glava za koordinatni merilni stroj samo nadomestek senzorja, preostala dva prinašata povsem drugo filozofijo merjenja.

Fotogrametrija se je razvila v geodeziji, zadnji dve desetletji pa so jo uspešno prilagodili za zelo natančne meritve v strojništvu. Na karakteristična mesta na merjencu se nalepi kodirane referenčne točke, zatem se merjenec poslika s fotoaparatom z naj-



Slika 1: Laserska roka FARO (vir: northwestmetrology.com)

Rio Tinto z rekordno proizvodnjo železove rude

Angleško-avstralska rudarska družba Rio Tinto je v tretjem četrtletju letos zabeležila rekordno proizvodnjo železove rude, saj se je glede na enako obdobje lani povečala za odstotek na 47,6 milijarde ton.

»V četrtletju smo beležili rekordno proizvodnjo železove rude, boksita in koks. Investicija v organsko rast dobiva zagon,« je dejal prvi mož družbe Tom Albanese. Rio Tinto je v četrtletju proizvedel 47,6 milijona ton železove rude, kar je štiri milijone ton več kot v drugem četrtletju. Celoletna proizvodnja je ocenjena na 179 milijonov ton. ■



Slika 2: Optični digitalizator na belo svetlobo ATOS III podjetja GOM iz Nemčije

manj treh zornih kotov, iz katerih morajo biti vidne vsaj tri skupne referenčne točke, da programska oprema samodejno s triangulacijo poravnava vse meritve v isti koordinatni sistem. Meritve se izvajajo s posebno programsko opremo pozneje.

Pri topometriji se v primerjavi s fotogrametrijo zajema celotne površine naenkrat. Na površino se v več prehodih projicira optični

vzorec, ki ga zajame ena ali več CCD-kamer. Programska oprema s triangulacijo določi koordinate za vse piksele iz zajetih 2D-slik, ki ustrezajo kriterijem. Na objekt moramo za precizne meritve oz. 3D-digitalizacijo nujno nalepiti referenčne točke za poravnavo podatkov iz zajetih 2D-slik v glavni koordinatni sistem. Pri manjših objektih se jih lahko nalepi tudi v okolico. Tudi v tem primeru se meritve izvajajo s posebno pro-

gramsko opremo potem, ko posnamemo vse potrebne detajle merjenja.

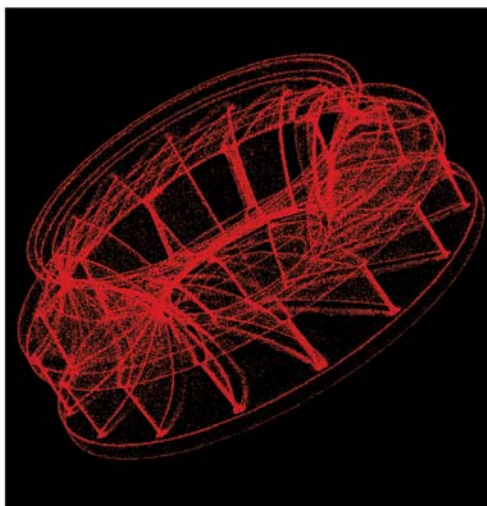
Optični koordinatni merilni stroji

To so pravzaprav zelo natančni fotogrametrični sistemi. Srce teh sistemov je zelo dober digitalni fotoaparati, s katerim z več stojišč poslikamo merjeni objekt. S kodiranimi referenčnimi točkami nato programska oprema vse slike združi v isti koordinatni

TOPOMATIKA

Ilica 231, 10000 Zagreb, Hrvatska
T/F: + 385 (0)1 348 4693
E: info@topomatika.hr
www.topomatika.hr

Trodimenzionalno
skeniranje,
optični merilni sistemi
in računalniška obdelava





Slika 3: Optični koordinatni merilni stroj TRITOP (fotoaparati, računalnik, kalibracijske letve) podjetja GOM iz Nemčije

tni sistem. V primerjavi z digitalizatorji na belo svetlobo ne zajemamo površin, ampak samo referenčne točke (nekodirane), ki jih moramo obvezno nalepiti na mesta, ki nas zanimajo. Uporabljajo se namenske referenčne točke, katerih debelina je kontrolirana in se lahko pri meritvah kompenzira, tako da se dobi točna mera.

Rentgenska tomografija

Zadnje čase se za meritve uveljavlja tudi rentgenska metoda, ki deluje po enakem principu kot v medicini. V zaprtih komorah, ki so pri nekaterih proizvajalcih primerne celo za uporabo v običajnem pisarniškem okolju, se ob zaporedni rotaciji merjenca po nekem koraku (npr. 1 stopinja) le-tega vsakič presvetli z rentgenskimi žarki. Žarki padejo na senzor in na njem naredijo 2D-sliko sivin glede na gostoto snovi. Programska oprema na podlagi vseh

meritev zajete slike združi v 3D-model, zapisan v STL-formatu, podobno kot pri drugih tehnikah 3D-digitalizacije. Kakovost STL-modelov, dobljenih z rentgensko metodo pri optimalnih pogojih uporabe, je zelo podobna kakovosti STL-modelov, dobljenih z vodilnimi sistemi na belo svetlobo (npr. sistemi ATOS podjetja GOM).

Ta tehnologija je trenutno edina neporushna metoda 3D-merjenja, ki omogoča tudi meritve votlih objektov. Edini pogoj je dovolj nizka gostota materiala, da rentgenske žarke spusti skozi. Pri današnjih strojih se s to metodo lahko skenira materiale z gostoto aluminija, če le niso preveč masivni. Za manj natančne meritve ali samo pregled poroznosti lahko metodo uporabljamo tudi za materiale z višjo gostoto (npr. titan). Metoda se je sicer najprej začela uporabljati za neporushno testiranje poroznosti ulitkov.



Slika 3: Rentgenski merilni stroj Metrotom podjetja Carl Zeiss

Izbor ustrezne tehnologije

Zagotovo je izbor ustrezne tehnologije odvisen od posamezne aplikacije. Vsaka od opisanih tehnologij ima svoje prednosti in slabosti, iz česar izhaja tudi področje uporabe. Res je tudi, da se področja uporabe za optične (laser in bela svetloba) in dotične metode bolj ali manj prekrivajo, vsaj na splošno, tako da je odločitev za ustrezno tehnologijo odvisna predvsem od cene meritve in dostopnosti. Tabela 1 prikazuje pregled opisanih tehnologij 3D-merjenja, njihovih prednosti in slabosti.

Tabela predpostavlja uporabo vodilnih sistemov pri posameznih tehnologijah. Vsekakor niso vsi merilni sistemi na belo svetlobo zelo točni, hkrati pa npr. tudi z vsemi dotičnimi sistemi ne moremo meriti globokih lukenj in ozkih utorov.

Kateri sistem torej izbrati? Seveda je to odvisno od aplikacije in predvsem zahtev po natančnosti meritev, vendar ne moremo spregledati dejstva, da je 3D-merjenje kot del kontrole kakovosti zelo konzervativno področje. Bolj ali manj vsi trenutno veljavni standardi in predpisi veljajo za klasične metode merjenja, tj. merjenje s koordinatnim merilnim strojem, podobno je tudi razmišljanje večine strokovnjakov. Ne zavedamo se še dovolj novih možnosti kontrole dimenzijskih odstopanj, ki jih prinašajo metode merjenja z zajemom površin, npr. kontrola toleranc oblike. Po drugi strani pa še vedno velja, da so pri sklopkih, ki vključujejo kakršno koli medsebojno gibanje sestavnih delov, za funkcionalnost še vedno odločilne razne medosne razdalje, tolerance lege (vzporednost, soosnost, pravokotnost ...) itn. Torej vseh merilnih projektov ne moremo strpati v en koš, zato tudi ni sistema, ki bi bil najboljša izbira za vse meritve.

Acroni in Metal dosegla lansko prodajo

V skupini SIJ – Slovenska industrija jekla letos beležijo bistveno ugodnejše tržne razmere kot lani. Jeklarski družbi skupine, jeseniški Acroni in Metal Ravne, sta že v prvih devetih mesecih letos dosegli lansko celoletno raven prodaje tako po količini kot po vrednosti, je povedal predsednik uprave skupine Tibor Šimonka.

Slovenski jeklarji so, tako Šimonka, v prvih devetih mesecih letošnjega leta v največji možni meri izkoristili ugodne tržne razmere na svetovnih trgih. Zadnje trimesečje se sicer kaže umirjanje gospodarske rasti, vendar bo leto v primerjavi z lanskim izjemno kriznim neprimerno boljše. ■

Tabela 1: Pregled različnih tehnologij 3D-merjenja – predpostavlja se uporaba vodilnih sistemov na trgu pri vseh tehnologijah (prirejeno po Kunststoffe 4/2010)

Princip merjenja	Brezdotično merjenje			
	Merilni sistem	Računalniška tomografija	Bela svetloba	Laserski digitalizator
Karakteristika				Dotično merjenje
				Koordinatni merilni stroj
Prilagodljivost velikosti merjenja	-	+	0	0
Merjenje poljubnih površin	+	-	0	+
Večkompontni polizdelki	-	+	+	+
Izvrstine L/D > 1,5	+	-	-	+*
Notranja struktura	+	-	-	-
Točnost	+	0	-	+
Investicijski stroški	-	0	0	-
Mobilnost	-	+	+	-
Hitrost merjenja	-	+	+	-
Postavitve merjenja	-	+	+	-
Merjenje serij	-	+**	0	+

+ - pozitivno, 0 - srednje, - - negativno;
* z uporabo prave merilne sonde; ** z dodatno opremo (vrtljiva miza, enota za avtomatizacijo...)

V nadaljevanju podajamo podrobnejši pregled tehnologij z vidika pomembnih kriterijev odločanja za tehnologijo merjenja.

Rentgenska tomografija

Rentgenska metoda je najprimernejša za merjenje srednjih in majhnih dimenzij iz materialov z manjšo gostoto (polimeri in lahke kovine, npr. aluminij). Merilno območje dosega pri največjih strojih največ $\phi 300 \times 300$ mm. Točnost je na splošno zelo dobra, tudi manj kot 0,01 mm (dosegljiva tudi 0,002 mm), vendar je odvisna od velikosti objekta. Zajemajo se površine, poravnava koordinatnega sistema se dela po zajemu podatkov. Meritve se izvajajo po digitalizaciji merjenja na poligoniziranem 3D-modelu (STL) in so odvisne od uporabljene programske opreme (na trgu je kar nekaj ponudnikov programske opreme za 3D-meritve poligoniziranih modelov, neodvisnih od proizvajalcev digitalizatorjev). Avtomatizacija je delno možna pri manjših merjenjih, saj jih lahko merimo več hkrati. Hitrost digitalizacije je odvisna le od gostote materiala, ker je postopek enak pri vseh oblikah merjencev, tudi če so še tako kompleksne.

Velika prednost metode je skeniranje vrtljivih predmetov, posebnost metode je tudi možnost kontrole zračnih vključkov, poroznosti in lunkejev na nekaterih strojih. Tehnologija je zaradi nevarnosti sevanja problematična s stališča varstva okolja, čeprav so novejši stroji primerni tudi za uporabo v pisarniškem okolju. Kakovost surovih poligoniziranih modelov (brez ročne dodelave) je zelo odvisna od gostote materiala. V primeru plastičnih materialov je slabša kot pri metodi z belo svetlobo in boljše kot pri laserski metodi. Poleg velike odvisnosti od gostote materiala je največja pomanjkljivost metode omejenost velikosti merjenja.

Laserski 3D-digitalizatorji

Sam koncept merjenja je podoben tistemu pri rentgenski tomografiji, torej najprej digitaliziramo površine merjenja, filtriramo in obdelamo podatke ter nato izvajamo meritve na STL-modelu. Ker gre za optično metodo, je treba zelo temne, odbojne in prozorne površine merjenja pripraviti s tankim slojem površinskega nanosa. Merilno območje je sicer majhno, vendar gre v večini izvedb za ročne sonde, s ka-

terimi lahko razmeroma hitro skeniramo tudi večje objekte (v praksi velike največ 3 metre, vendar so pri teh velikostih težave s točnostjo pozicioniranja merilne sonde v prostoru). Točnost laserjev zmanjšuje težava zaradi pozicioniranja merilne sonde – pri najboljših sistemih doseže 0,1 mm, pri majhnih objektih je lahko tudi boljše. Avtomatizacija je sicer možna z dodatno opremo (npr. vrtljive mize), vendar se tovrstni sistemi zaradi manjše točnosti ne uporabljajo za serijske meritve.

Laserska metoda je primerna za manj zahtevne meritve objektov srednjih dimenzij, kjer se tolerančna polja merijo v desetinkah milimetra. Kakovost surovih poligoniziranih modelov je razmeroma slaba, težave so predvsem ostri robovi in razmeroma velik šum, ker laser zajema linije namesto površin. Slabost so tudi meritve globokih lukenj in utorov, ki skoraj niso možni. So pa zelo fleksibilni, saj jih hitro pripravimo za teren.

3D-digitalizatorji na belo svetlobo

Koncept merjenja je na las podoben laserskim meritvam, le da podatke zajemamo s CCD-kamerami, ne z laserskim senzorjem. Ker gre tudi tu za optično metodo, je treba površine merjencev, če so pretemne, odbojne ali prozorne, pripraviti s tankim slojem prahu TiO_2 . Debeline nanosov so 0,002–0,003 mm, če nanašamo z brizgalno pištolo, oziroma 0,01 mm, če uporabimo industrijska pakiranja pršil. Merilno območje je odvisno od uporabljenih leč in je lahko od 30x20 do pribl. 2000x2000 mm, merjenci so lahko še večji, saj na referenčnih točkah z dodatnimi meritvami zajamemo precej večjo površino od nazivnega merilnega območja. V praksi so se s tovrstnimi sistemi digitalizirali tudi objekti, kot je krilo Airbusovega letala, trup 25-metrške barke ipd. Točnost je odvisna od merilnega območja

Stroji za rezkanje, brušenje, struženje, elektroerozijo ...

TBW

www.tbw.si

in za objekte, velike največ 500 mm, znaša pri vrhunski opremi 0,03 mm, za manjše objekte (manjše od 100 mm) tudi bolje od 0,01 mm (pri najboljših sistemih tudi 0,002 mm). Meritve se tudi pri tej metodi izvajajo na STL-modelu in so odvisne od uporabljene programske opreme. Avtomatizacija je možna z dodatno opremo (vrtljive mize, roboti, popolne avtomatske celice), vendar nekaj težav predstavljajo merjenci, katerih površine je treba prej pripraviti.

Tovrstni digitalizatorji veljajo za najbolj fleksibilne sisteme, saj so samo z zamenjavo leč na senzorski glavi primerni za precizne meritve tako velikih kot manjših dimenzij. Vrhunske sisteme na belo svetlobo odlikuje predvsem visoka kakovost surovih poligoniziranih modelov, ki jih ročno ni treba delovati. Slabost so podobno kot pri laserjih meritve globokih lukenj in ozkih utorov manjših dimenzij ($L/D > 2$). So večinoma prenosni in dajejo enako dobre rezultate tudi na prostem in v industrijskem okolju (z vključeno temperaturno kompenzacijo). Uporabljajo se tudi v avtomobilski industriji, za npr. končno kontrolo sestavov karoserije.

Optični koordinatni merilni stroji

Gre za specifično metodo merjenja, ki daje izredno točne rezultate, primerljive s klasičnimi koordinatnimi merilnimi stroji. Sistem se vedno pred uporabo kalibrira z letvami. Tako kalibriran je primeren za najtočnejše meritve objektov malih in večjih dimenzij, tudi na 0,001 mm za objekte, velike največ en meter. Metoda sicer zahteva, da na karakteristična mesta nalepimo referenčne točke in merimo razdalje med njimi. Luknje, utori in ostri robovi se merijo tudi brez referenčnih točk (primerno npr. za merjenje obreza komponent iz pločevine ali meritve poroznosti ulitkov na prerezihi, označenih na tehnični dokumentaciji).

Ta metoda je uporabna predvsem za natančno merjenje merjencev velikih dimenzij. V praksi se je izkazala pri meritvah ladij, dolgih 50 metrov in več, vetrnih turbin, turbin in vodih hidroelektrarn ipd. Sistem je predvsem zelo fleksibilen, saj ga sestavlja samo prenosni računalnik s fotoaparatom in kalibracijskimi letvami.

Koordinatni merilni stroji

Koncept merjenja je dobro poznan, zato ga ne bomo posebej opisovali. Ker zajemamo točke namesto površin kot pri prej opisanih metodah, je ta metoda zelo hitra pri manjšem številu kontrolnih mer in počasnejša, kadar je to število večje. Za merjenje odstopkov prostih površin je primerna, le kadar tehnična dokumentacija natančno določa majhno gostoto točk na točno določenih segmentih in se s tem preverja bodisi serija izdelkov bodisi proces izdelave. Točnost je sicer odvisna od uporabljene stroja, vendar

je zagotovo največja od vseh opisanih sistemov, saj lahko tudi večje objekte merimo z natančnostmi na 0,001 mm. Avtomatizacija postopka je preprosta, saj sproti z merjenjem prvega merjenca nastaja program, ki po vpetju naslednjega merjenca vse meritve in poročilo izdelava samodejno. Priprava merjencev ni potrebna, pojavijo pa se seveda težave pri meritvah deformabilnih in mehkih površin.

Podobno kot rentgenska metoda so koordinatni merilni stroji stoječi sistemi. Poznamo izvedbe z merilnimi rokami (enako kot pri laserskih sondah), vendar je tam točnost manjša, v najboljšem primeru 0,05 mm. Fleksibilnost je torej slaba, tudi digitalizacija nam zaradi točkovnega zajema podatkov da ali premalo informacij o objektu ali pa je preveč zamudna. Obstajajo sicer portalni stroji, namenjeni meritvam merjencev velikih dimenzij (tudi več kot 5 metrov), vendar niso primerni za meritve manjših merjencev, hkrati pa sta investicija in vzdrževanje zelo visoki postavki pri oblikovanju cene merjenja. Pogosto so za točne meritve (tudi prvih kosov) potrebne vpenjalne priprave ali pa uporabimo univerzalne vpenjalne sisteme za meritve ali obdelavo prototipov, ki so zadnje čase precej napredovali (npr. sistemi Matrix).

Namesto sklepa

Iz vsega povedanega lahko sklenemo, da bomo za najpreciznejše meritve še vedno izbrali klasične koordinatne merilne stroje, čeprav bi bil za nekatere aplikacije lahko primernejši optični koordinatni merilni stroj ali rentgenski digitalizator. Zelo blizu s točnostjo so tudi sistemi na belo svetlobo, ki pa imajo svoje posebnosti.

Zaradi svoje fleksibilnosti so za meritve prvih kosov in prototipnih serij najprimernejši sistemi na belo svetlobo, ki s hitro izdelavo barvne lestvice odstopkov površin dajo zelo dobro informacijo o splošni ustreznosti kosa. Za nameček lahko s kakovostno programsko opremo, ki je na voljo pri vodilnih sistemih (npr. ATOS), hitro izvedemo tudi kontrolo karakterističnih mer objekta. Hkrati so uporabni tudi za širok spekter velikosti merjencev (od manj kot 10 do več kot 2000 mm).

Pri meritvah serij so še vedno najprimernejši klasični koordinatni merilni stroji, čeprav se že dalj časa, npr. v industriji mobil-

nih telefonov, uporabljajo sistemi na belo svetlobo kot standardna metoda kontrole ohišij na popolnoma avtomatiziranih sistemih, lahko tudi kot 100-odstotna kontrola.

Za merjence majhnih dimenzij (manj kot 10 mm) je verjetno najprimernejša metoda rentgen, ker jih lahko merimo več hkrati in tudi dobimo vse detajle, vključno z utori in luknjami, ki jih je sicer zelo težko meriti.

Za meritve velikih dimenzij je najprimernejša uporaba optičnega koordinatnega merilnega stroja, ki je v primerjavi s klasičnimi portalnimi koordinatnimi merilnimi stroji veliko cenejši in predvsem zelo fleksibilen. Zato ga lahko uporabljamo na terenu, da zelo hitro dobimo informacije o točnosti izdelave.

Ker se klasični koordinatni merilni stroji večinoma uporabljajo pod kontroliranimi pogoji, pogosto pozabljamo, da lahko tudi vse ostale sisteme prav tako uporabljamo pod kontroliranimi pogoji, kar jim dodatno izboljša točnost in zanesljivost rezultatov. Sicer pa lahko skoraj enake rezultate kot v kontroliranih pogojih dosežemo tudi s temperaturno kompenzacijo (če se seveda temperatura med meritvijo ne spreminja). Pri tem ne smemo pozabiti, da imajo klasični koordinatni merilni stroji veliko težav s prahom in vlago v zraku ter tresljaji tal. Zagotavljanje kontroliranih pogojev (priprava zraka, ločeno temeljenje koordinatnega merilnega stroja in nadzor temperature) pa zahteva dodatne investicije in stroške vzdrževanja.

Laserski digitalizatorji zaradi manjše točnosti niso primerni za precizne 3D-meritve, so pa primerni za projekte 3D-digitalizacije, kjer niso zahtevane največje točnosti.

Seveda je uporaba prave metode odvisna od narave projekta, ki ga moramo izvesti. Pričujoči prispevek je samo opora pri izbiri med mnogimi rešitvami, ki so danes dostopne na trgu. Predvsem pa se morate pred izbiro prepričati, na kakšni opremi bodo vaše meritve izvedene, ker so razlike med posameznimi sistemi ogromne. Krog vrhunskih proizvajalcev je namreč pri posameznih tehnologijah veliko bolj ozek kot pri zreli tehnologiji klasičnih koordinatnih merilnih strojev. ■

Samo Gazvoda, TECOS, Celje. Dušan Sivka, Akrapovič, d. d.

Linija za natančno podajanje z valji

Podjetje Waddington Electronics Inc., Cranston, ZDA, predstavlja napravo za podajanje z valji True Feed SF, ki ponuja neposredno krmiljenje s servo tehnologijo za eliminiranje možnih napak, ki se običajno pojavljajo na konvencionalnih transportnih napravah. Enota je sestavljena iz štirih valjev premera od 32 mm do 102 mm in širine od 76 mm do 915 mm. Visoko zmogljiva naprava za sprotno kontrolo pomaga pri natančnosti podajanja - $\pm 0,001$ mm. Najvišja hitrost podajanja je 2400 spm. Poleg tega je možno dobiti še veliko dodatkov za natančno podajanje pri velikih hitrostih. ■

www.waddingtonelectronics.com