

Contactloos meten van werkstukken

Projectnummer: IPT00201

Achtergrond

Binnen veel industrieën bestaat de mogelijkheid om op een zeer nauwkeurige manier producten te fabriceren. De huidige methode van productie bestaat uit een min of meer iteratief proces waarbij het product bewerkt wordt, daarna uit het apparaat gehaald wordt om gemeten te worden en dan indien nodig weer teruggeplaatst wordt voor een nabewerking. Deze iteratie van uit het apparaat halen, meten, en vervolgens weer terug plaatsen kost bij veel producten enorm veel tijd. De mogelijkheid van het monitoren van de productie tijdens de bewerking zou dan ook een uitkomst zijn.

Naast de wens om op het apparaat te kunnen meten zijn er ook nog producten die met de bestaande methoden in het geheel niet gemeten kunnen worden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan toroidale oppervlakken (contactlenzen) of andere typen van asferen. Voor dit type producten moet een apart meetsysteem ontwikkeld worden dat niet noodzakelijkerwijs op het apparaat hoeft te functioneren. Hier is de uitdaging het mogelijk maken de producten nauwkeurig te meten.

Doel

Het doel kan omschreven worden als het ontwikkelen en implementeren van methoden voor het contactloos bepalen van de bewerkingstoestand van een werkstuk. Daar waar geëist en/of mogelijk zal dit op de machine uitgevoerd worden. Er zijn in dit project drie subdoelen te onderscheiden:

- Het ontwikkelen en implementeren van optische meetmethoden op een bewerkingsmachine. De te meten grootheden zijn de uitlijning van het werkstuk ten

opzichte van de bewerkingsmachine en de materiaalafname. Daarnaast zal er nog een meting opgezet worden voor het bepalen van de oppervlakte gesteldheid gedurende de bewerking met als voordeel dat het proces gestopt kan worden zodra de eindsituatie bereikt wordt. Deze aanvulling is met name belangrijk indien een gepolijst eindresultaat gewenst is.

- Het ontwikkelen van een nieuwe methode voor het meten van diepe asferen, aan het einde van de bewerking. Hierbij zal gebruik gemaakt worden van shearografie, een bekende techniek, maar nu in combinatie van Temporal Phase Unwrapping gekoppeld aan het stapsgewijs vergroten van de shear
- In het geval dat er gewerkt wordt met optisch transparante materialen zal er onderzocht worden hoe de recentelijk ontwikkelde methode iTIRM toegepast kan worden binnen een bewerkingsmachine. iTIRM is een methode voor het in-proces meten van de oppervlakte gesteldheid en eventuele sub-surface beschadigingen.

Uitvoering

1 aio gedurende 4 jaar.

Totale projectkosten f 625,000

Projectteam

Dr. ir. H. van Brug, prof. dr. ir. J.J.M. Braat,

Sectie Optica, Fac. der Technische Natuurwetenschappen, TU Delft

Samenwerking met TNO-TPD

E-mail: brug@optica.tn.tudelft.nl

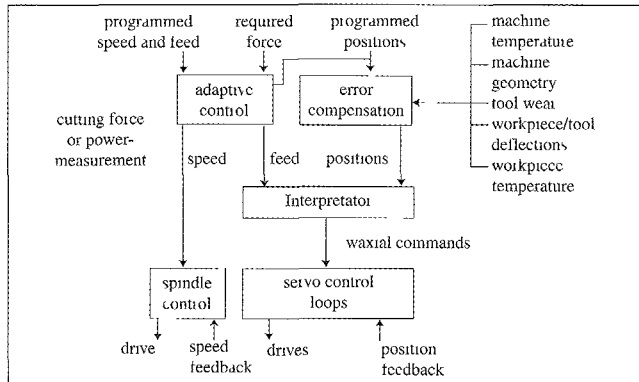
LET OP! REDACTIEADRES IS GEWIJZIGD

Twin Design bv, Postbus 317, 4100 AH Culemborg,

Telefoon: 0345-519525, Fax: 0345-513480,

E-mail: mikroniek@twindesign.nl

Precisiegericht ontwerpen



Afb 16 De drie hierarchische niveaus in CNC-regelsystemen

Montage van sensoren

Voor een nauwkeurige meting is het stabiel monteren van een sensor op de juiste plaats van essentieel belang. De principes van Abbe en Bryan zijn aan het begin al genoemd. Verder is het noodzakelijk sensoren ver verwijderd te houden van trillings- en warmtebronnen. Vaak is het goedkoper verplaatsingen te meten vóór een overbrenging naar hogere resolutie, maar fouten in de overbrenging beïnvloeden dan het meetresultaat. Bij het meten van sledeverplaatsingen moeten aandrijving en verplaatsingssensor zich aan dezelfde kant van het rotatiecentrum bevinden, daar er anders een faseverschil van 180° ontstaat tussen aandrijf- en meetsignaal, met een ongunstige invloed op de stabiliteit van toe te passen regelsystemen.

Regelsystemen

Verstoringen beïnvloeden op allerlei manieren de nauwkeurigheid van precisiemachines. Dat betekent dat regelsystemen onontbeerlijk zijn. Aan het begin van de jaren vijftig waren numeriek-bestuurde gereedschapmachines de eerste toepassing van teruggekoppelde regelingen. In de jaren zeventig werden zulke systemen geperfectioneerd door de introductie van CNC (Computer Numerical Control) en adaptieve regelingen. Afbeelding 16 laat drie verschillende niveaus zien in een blokschema voor CNC-regelsystemen

Servobesturing

Servobesturingen zijn te onderscheiden in analoge en digitale systemen en hybridevormen ervan. Het functioneren

van digitale systemen kan belemmerd worden door een te lage signaal-bemonsterfrequentie. De meeste regelsystemen maken gebruik van PID-regelaars. Daarin is de proportionele actie bedoeld om de stijfheid van de regeling te vergroten, de integrerende actie om blijvende afwijkingen te elimineren en de differentierende actie om demping te introduceren, dat laatste met het oog op verbetering van de stabiliteit. Daarvoor zijn snelheidsopnemers of het gedifferentieerde signaal van positiesensoren nodig.

De handbreedte van de regelaar moet zo hoog zijn dat rimpelvormige afwijkingen in bijvoorbeeld het motorkoppel of het tachometersignaal of onrondheidsfouten in kogellagers afdoende worden onderdrukt. De eisen die moeten worden gesteld aan de stijfheid van het regelsysteem, hangen af van de toepassing. Voor het draaien met diamantgereedschap is een stijfheid van 10^8 tot 10^9 N/m voldoende. Maar voor het precisie-slijpen van bros materiaal is een stijfheid van 10^{10} N/m beslist noodzakelijk.

Bij het ontwerpen van regelsystemen zijn er verschillende manieren om tot een optimaal resultaat te komen. Een vuistregel is bijvoorbeeld dat voldoende stabiliteit wordt verkregen als de verhouding van de frequenties van de eerste en de tweede ongedempte eigentrilling meer dan een factor 3 en minder dan een factor 10 bedraagt. Een waardevol hulpmiddel is ook de analyse van de frequentie-responsie met Bode- en Nyquist-diagrammen. Bij contour-bewerkingen is een bezwaar van PID-regelaars dat scherpe hoeken en dergelijke minder goed worden gevolgd. Dat is te vermijden door gelijkmatig verlopende bewegingsprofielen te kiezen, zoals "scheve-sinus"-bewegingen in plaats van een trapeziumachtig verloop.

Voorwaartse regelsystemen

In een teruggekoppeld regelsysteem reageert de regelaar pas als er een afwijking wordt geconstateerd. Toepassing van voorwaartse regeling betekent dat er sneller wordt gereageerd, met als resultaat een foutenreductie van maximaal een factor 20. Voorwaartse regeling - hetzij via verplaatsing hetzij via snelheid - vereist echter kennis van het gedrag van het mechanische systeem, bijvoorbeeld inzicht in traagheids-effecten of aandrijvingsfouten.

Interpolatoren

Vooral in contoursystemen zijn interpolatoren met succes toegepast. De interpolatoren op niveau 2 in afbeelding 16 genereren stuursignalen voor ieder segment van de beschreven contour, waarbij een lineair, cirkelvormig of parabolisch verloop in rekening kan worden gebracht. Real-time-interpolatie geeft daarbij hogere precisie dan conventionele indirecte CAD/CAM-berekening.

Adaptieve regeling en compensatie

Adaptieve regeling en foutencompensatie (niveau 3 van afbeelding 16) verbeteren de prestaties van een machine, hetzij door de productiviteit - bijvoorbeeld bij ruw vordraaien - te verhogen, hetzij door de nauwkeurigheid te verbeteren - bijvoorbeeld bij nabewerking met optische oppervlaktekwaliteit. Real-time-methoden voor het compenseren van afwijkingen door variërende temperatuur, geometrische fouten en gereedschapslijtage geven de beste resultaten.

Isolatie

Precisiemachines dienen te worden beschermd tegen uitwendige storende invloeden. Al in 1890 formuleerde Maxwell dat aldus: "Bij het ontwerpen van een experimentele opstelling moeten de effecten en verschijnselen die worden bestudeerd, gescheiden worden van alle andere, zodat ze zijn te beschouwen als het zuivere onderzoekgebied. Alle andere effecten dienen zo te worden behandeld dat hun versturende invloed zo klein mogelijk is." De belangrijkste verstoringen zijn trillingen, temperatuurveranderingen, vochtigheid, geluid en elektrische en magnetische velden. Op de eerste twee zullen we nader ingaan

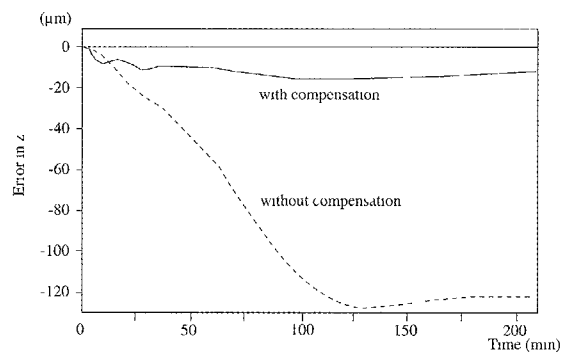
Thermische isolatie

De aandrijving is te beschouwen als een van de belangrijkste inwendige warmtebronnen. Die bron is te minimaliseren door een optimale afstemming van aandrijfsysteem en belasting. Het effect van temperatuurverschillen in een machine is kleiner naarmate de thermische uitzettingscoëfficiënt α kleiner is. De temperatuurverschillen zijn kleiner naarmate de warmtegeleidingcoëfficiënt ϕ groter is. Dus bepaalt het quotient α/ϕ de gevoeligheid van het materiaal voor ruimtelijke thermische gradiënten. Dat is de reden dat aluminium een gunstig materiaal is voor het construeren van precisiemachines. De firma Carl Zeiss ontwikkelde een speciale keramische oppervlaktelaag ter verbetering van de slijtvastheid van het aluminium voor haar computergestuurde meetmachines. Voor limalen past men exotische materialen met verwaarloosbare uitzettingscoëfficiënt toe, zoals invar en zerodur.

In het geval van een tijdafhankelijke temperatuurverdeling

speelt de thermische diffusiecoëfficiënt $\alpha/\phi c_p$, met σ de massadichtheid en c_p de soortelijke warmte, een belangrijke rol. Voor een snelle aanpassing aan temperatuurfluctuaties dient de waarde van deze coëfficiënt groot te zijn. Maar het gebruik van veel verschillende materialen dient te worden vermeden, aangezien dan de thermische tijdconstanten in de machine teveel verschillen.

Overbepaaldheid van een onderdeel veroorzaakt inwendige spanningen. Vanuit dat gezichtspunt is materiaal met een lage elasticiteitsmodulus te prefereren, wat weer in strijd is met de eis van een hoge stijfheid. Ook daarom zijn kinematische constructies gewenst.



Afb 17 De afwijking in de z-richting als functie van de tijd bij het frezen van een werkstuk met en zonder foutencompensatie [3]

De invloed van veranderingen van de omgevingstemperatuur is te minimaliseren door de machine op te stellen in een temperatuurgeregelde ruimte. Ook worden nevels van temperatuurgeregelde olie toegepast.

Trillingsisolatie

Passieve trillingsisolatie houdt in dat een secundaire - grote - hulpmassa wordt afgeveerd op slappe veren. De mate van verzwakking van de trillingsamplitudes van enerzijds de passieve trillingsisolator en anderzijds het gereedschap of de meetsensor volgt uit het kwadraat van de reciproque verhouding van de eigenfrequenties.

Een goedkope methode om de machine te isoleren van uitwendige trillingsbronnen is de toepassing van rubber dempers. Ook met lucht gevulde dempers zijn effectief. Deze hebben geen last van eigen trillingsmodes, wat bij metalen schroefveren wel het geval is. Regeling van de druk in pneumatische isolatoren maakt niveauregeling mogelijk, maar zulke systemen zijn in het algemeen nogal traag. Daarom zijn er actieve dempings- en hoogteregelingen ontworpen,

waarbij de hoogte en hoekoriëntatie van de machine worden gemeten met positie- of versnellingsopnemers. In nog geavanceerdere actieve trillingsisolatiesystemen wordt de eigenfrequentie elektronisch geregeld.

Foutenreductie- en compensatie

Bij het precisiegericht ontwerpen zijn er twee wegen te bewandelen. De eerste manier is het ontwerpen met minimale positieafwijking door het zo consequent mogelijk toepassen van de hiervoor behandelde ontwerpregels. Maar een zekere restfout blijft onvermijdelijk. De andere methode - de compensatiemethode - houdt in dat restfouten worden gecompenseerd door het verwerken van de gegevens afkomstig van geometrische kalibraties en van temperatuurmeting. In meetmachines is foutencompensatie aan het eind van het meetproces mogelijk. In precisie-bewerkingsmachines en in positioneermachines moet die compensatie echter in real-time plaatsvinden.

Foutencompensatie in meetmachines

In principe komt foutencompensatie neer op het toevoegen van een vector $d\mathbf{P}$ aan de uitkomst van een meetresultaat \mathbf{P} . Beide vectoren zijn een functie van de plaatscoördinaten x , y en z . Bij dynamische fouten is de compensatievector ook nog een functie van de tijd t . Het zal duidelijk zijn dat dat laatste het compensatieproces aanzienlijk moeilijker maakt dan het compenseren van (quasi)-statische fouten.

De technieken voor foutencompensatie zijn te onderscheiden in de parametrische en de volumetrische methode. Bij de eerste methode gaat men uit van modellen die het mogelijk maken te volstaan met het direct meten van foutparameters op discrete posities in het meetinstrument. Met behulp van de modellen kunnen vervolgens de compensatievectoren vanuit de gemeten parameters worden berekend.

Bij de volumetrische methode moet men de afwijkingen daadwerkelijk meten, en wel met kalibratiemiddelen als lasersinterferometer, eindmaten of speciaal gevormde kalibers. Uit deze meetgegevens worden via ingewikkelde modellen de foutparameters geschat, waarna hiermee weer de compensatievectoren worden berekend. Het voordeel van de volumetrische methode is dat de meettechnieken relatief simpel zijn, en daarom veel sneller uit te voeren dan bij de parametrische methode.

Real-time foutencompensatie in gereedschapsmachines

Real-time foutencompensatie in bijvoorbeeld CNC-machines is al bekend sinds de jaren zeventig. Het gaat er daarbij om de compensatiewaarden van tevoren door kalibratie te

bepalen. Moeilijk wordt het daarbij thermomechanische fouten en afwijkingen door eindige stijfheid vast te leggen, aangezien deze tijds- en/of taakafhankelijk zijn. Voor het vaststellen van thermomechanische fouten gaat men meestal uit van de gemeten temperatuurverdeling aan de buitenzijde van de machine. Daaruit wordt dan de verplaatsing van het gereedschap berekend. Recentelijk zijn daarbij statistische rekenmethoden en neurale-netwerk-methoden erg nuttig gebleken. Afbeelding 17 laat het resultaat van geometrische en thermische foutencompensatie zien voor een gefreesd werkstuk [3].

Foutencompensatie in gereedschapsmachines is nog niet zo goed ontwikkeld als die in meetinstrumenten, vooral door problemen bij het meten van de effecten van inwendige warmtebronnen in bijvoorbeeld freesmachines. Op het ogenblik is voor enkele typen gereedschapsmachines eerste-orde-foutencompensatie van geometrische en ten dele thermische fouten beschikbaar. Ook zijn er resultaten bereikt bij het compenseren van fouten veroorzaakt door de snijkrachten bij hard-draaien.

Trends in het precisiegericht ontwerpen

De laatste decennia heeft precisiegericht ontwerpen zich snel ontwikkeld, met als resultaat diverse precisie-machines en -instrumenten, zoals bijvoorbeeld computergestuurde meetmachines en wafersteppers. Verbeterde inzichten hebben de aan onnauwkeurigheid en resolutie gestelde grenzen verder teruggebracht. De ontwikkeling van software voor precisiegericht ontwerpen was daarbij erg belangrijk. In dat kader moeten vooral de softwarehulpmiddelen worden genoemd die het mogelijk maakten het gedrag van machines te voorspellen en problemen te onderkennen nog voordat er echte hardware was gerealiseerd. Daarnaast leidden de integratie van uiterst nauwkeurige sensoren, de introductie van teruggekoppelde regelsystemen en de ontwikkeling van geavanceerde besturingssoftware tot apparatuur met hogere nauwkeurigheid en flexibiliteit.

Vandaag de dag vormt de ontwikkeling in de informatietechnologie de belangrijkste drijfveer voor de vooruitgang van de precisietechnologie. Het onderzoek in de IC-technologie, de ontwikkeling van steeds gedetailleerdere LCD- en plasma-displays, het transport van steeds grotere datastromen en de opslag van voortdurend grotere hoeveelheden informatie zijn daarin de drijvende krachten. Die krachten brengen de precisietechnologie - en het precisiegericht ontwerpen in het bijzonder - op een steeds hoger plan.

De vooruitgang van de IC-technologie wordt vooral geïllustreerd door de groei van de capaciteit van DRAM-geheugens van 245 kbit tot 256 Mbit van 1982 tot 1997. (En ook nu in het magische jaar 2000 is het eind van die stormachtige ontwikkeling nog niet in zicht) De lijnbreedte en de spoorafstand zijn in dezelfde periode gereduceerd van 2 μm tot 0,2 μm . VLSI-IC's en ULSI-IC's zijn "gewoon" geworden. De diverse proces- en belichtingsstappen in het fotolithografische proces voor het maken van IC's op siliciumplakken van 12" en groter stellen ongehoorde eisen aan de besturing van positie, snelheid en versnelling. Dat uit zich in een reproduceerbaarheid van de siliciumplak-positionering van slechts enkele tientallen nanometers.

In een volgend stadium zal men in de IC-technologie zijn toevlucht moeten nemen tot röntgenlithografie ten einde het bezwaar van de verhoudingsgewijs "grote" golflengte van zichtbaar licht en UV-licht te overwinnen. Die golflengte begrenst de detailgrootte in fotolithografisch vervaardigde IC's tot 0,15 μm . Maar de extreem korte golflengte van 13 nm van zachte röntgenstraling maakt het gebruik van conventionele lenzen onmogelijk, zodat er met spiegelsystemen moet worden gewerkt bij het afbeelden van het masker op de siliciumplak. Dat betekent dat de vormnauwkeurigheid van die spiegels beter moet zijn dan 20 nm en de ruwheid kleiner dan 0,5 nm R_a . En dat bij een diameter van 200 mm! Om voldoende reflectie te verkrijgen is daarbij de toepassing van uiterst nauwkeurige meerslagige oppervlaktebedekkingen noodzakelijk. Daarom moeten er nieuwe technologieën worden ontwikkeld, niet alleen voor de waferstepper zelf, maar ook voor de machines voor het maken van de maskers en voor de instrumenten voor de procescontrole. Ook zijn er nieuwe machines nodig voor de fabricage van optische componenten met extreme precisie.

Het onderzoek en de ontwikkeling van optische-schijfgeheugens van hoge dichtheid veroorzaken een verschuiving in de grenzen die zijn gesteld aan het transport en de opslag van digitale informatie. Systemen als CD-Audio, CD-ROM, CD-Video en DVD brengen de toleranties op spoorbreedte en bitgrootte naar een steeds strengere waarde. Van deze geheugensystemen zijn inmiddels opneembare en overschrijfbaar versies verschenen. Ook hier eist men een afnemende golflengte en een toenemende openingshoek. DVD-systemen met twee en zelfs drie informatielagen bewerkstelligen een verdere toeneming van de opslagdichtheid. De schrijfprecisie van laserbundels vereist nanometer- onnauwkeurigheid van draaitafels en maskersystemen. Overschrijfbaar DVD-systemen voor de consumentenmarkt vereisen binnen niet al te lange tijd een schrijfproduceerbaarheid van niet meer dan enkele tientallen nanometers.

Voor PC-monitoren en HDTV-apparaten zijn er nieuwe vlakke beeldschermen ontwikkeld, respectievelijk kleuren-LCD's en plasma-panelen. Die vereisen geheel nieuwe fabricagetechnieken met een uiterst hoge overlappingsprecisie van elektrodenlagen en zorgvuldig beheerde ets- en laagdepositiesystemen.

Ten slotte moeten we ook nog de ontwikkelingen in de astronomie noemen. In het komende decennium vragen geavanceerde astronomische meetsystemen om geometrische stabiliteit in het nanometer- en nanoradiaalgebied.

Het voorgaande illustreert afdoende dat precisietechnologie - en precisiegericht ontwerpen in het bijzonder - op de drempel staan van een periode met niet alleen snelle groei, maar ook met heel veel spannende uitdagingen.

Literatuur

(Zie [1] voor een completer literatuuroverzicht)

- [1] P. Schellekens e a., Design for precision: current status and trends, CIRP-Annalen, vol. 2, blz. 1-30, 1998
- [2] P.H.J. Schellekens, Status en trends in de werktuigbouwkundige precisietechnologie, Mikroniek 39, blz. 112-118, 1999.
- [3] H.A.M. Spaan, Software error compensation of machine tools, Dissertatie TU Eindhoven 1995.
- [4] J.B. Bryan, The Abbe principle revisited: an updated interpretation, Precision Engineering 1, blz. 129-132, 1979.
- [5] W. van der Hoek, Het voorspellen van het dynamisch gedrag en de positioneringsnauwkeurigheid van constructies en mechanismen, Colledictaten TU Eindhoven, 1962-86.
- [6] M.P.Koster, Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren, Uitgeverij Universiteit Twente, 1996.
- [7] C.H. Schouten, Het ontwerp van een precisie spindel voor hoge snelheden, Afstudeerscriptie TU Eindhoven, 1997, ISBN 90-5282-754-0.
- [8] J. van Eijk, On the design of plate-spring mechanisms, Dissertatie TU Delft, 1985.
- [9] K. Lindsey e.a., Sub-nanometre surface texture and profile measurement with Nanosurf 2, CIRP-annalen 37/1, blz. 519-522, 1988.
- [10] J.P.M.B. Vermeulen, Development of a lightweight and ultrastiff single point diamond turning machine with submicron accuracy, Dissertatie TU Eindhoven, 1996, ISBN 90-5282-702-8.
- [11] H.J.J. Kraakman e.a., Een precisiedraaibank met hydrostatische lagering en aandrijving, Philips Technisch Tijdschrift 30/5, blz. 121-137, 1969.
- [12] F. Al-Bender en H. van Brussel, Active aerostatic bearing through control of film geometry, Proc. of the 9th IPES-4ME, vol. 2, blz. 389-392, Braunschweig 1997.
- [13] D.L. Trumper e a., Design and analysis framework for linear permanent-magnet machines, IEEE Transactions on Industry Applications 32/2, blz. 371-379, 1996.
- [14] D.M.H. Philips e.a., Design of a high precision rotary table, Proc. 8th IPES, Blz. 221-224, 1995.
- [15] N. Taniguchi, Nanotechnology: integrated processing systems for ultra precision and ultrafine products, Oxford Un. Press, 1996, ISBN 0-19-8562837

LET OP! REDACTIEADRES IS GEWIJZIGD

Twin Design bv, Postbus 317, 4100 AH Culemborg,
Telefoon: 0345-519525, Fax: 0345-513480.
E-mail: mikroniek@twindesign.nl