

Piëzo-stapper met submicron nauwkeurigheid

Ontwikkeling slede voor ultraprecieze bewerkingsmachines

Mark Versteyhe, Dominiek Reynaerts, Hendrik van Brussel Voor bewerkingen met sub-micrometer nauwkeurigheid zijn de bestaande traditionele geleidingen van sleden ongeschikt. Door het ontwikkelen van een piëzo-elektrisch aangedreven wandelmechanisme wordt de benodigde nauwkeurigheid tezamen met een hoge stijfheid gerealiseerd. Voor een vloeiend verlopende aandrijving is een regelaar ontwikkeld die er voor zorgt dat er tijdens het wandelen geen hameren voorkomt.

De vraag naar machinaal geproduceerde producten met een betere vormnauwkeurigheid, een lagere ruwheid en een geringere beschadiging van het materiaal vlak onder het oppervlak neemt gestaag toe. Traditioneel bestaat het productieproces van nauwkeurige en gladde oppervlakken uit enkele voorbereidingen, zoals draaien, en een aansluitende nabewerking zoals polijsten of precisie slijpen. Verbeterde slijpprocessen combineren hoge verspaningssnelheden met hoge oppervlaktekwaliteit van het product door sub-micron verspaning. Voorbeelden zijn het elektrolytisch vormgeven van de slijpschijf tijdens het slijpen (Electrolytic In-line Dressing of ELID), waarbij de vorm van de schijf niet meer beïnvloed wordt door slijtage, en ductiel slijpen met hoge snijsnelheid (High Speed Chipping). Voor een succesvolle toepassing van deze processen zijn uiterst stijve en uiterst nauwkeurige positionersystemen noodzakelijk. Klassieke oplossingen die gebaseerd zijn op de traditionele geleidingstechnologie, voldoen niet aan de eisen die deze nieuwe processen stellen aan de machine.

Een mogelijke oplossing is de aan de K.U.Leuven ontwikkelde piëzo-stapper (wandelaandrijving), die een nauwkeurige beweging combineert met een hoge stijfheid. Door de integratie van de aandrijf-overbrengings- en lageringsfunctie wordt een hoge passieve stijfheid verkregen. Dezelfde piëzo-actuatoren kunnen bovendien voorzien in een oneindig grote stijfheid, door het actief terugkoppelen van de positie van de slede ten opzichte van een absolute referentie (onbelaste liniaal). Deze piëzo-stapper onderscheidt zich van de reeds bestaande piëzo-stappers door zijn soepele gang en vanwege de rollende

aandrijving. Het hameren tijdens het stappen wordt vermeden door een klemming met hybride kracht- en positiesturing.

Positioneren in de 21e eeuw: stijf en nauwkeurig!

Overal in de industrie is een groeiende behoefte aan kosteneffectieve en kwalitatief hoogstaande fabricagemogelijkheden voor alle mogelijke soorten producten van hoge precisie zoals: conische rollagers, beeldbuizen, turbinebladen, silicium plakken, magnetische koppen, decoraties voor glasproducten, matrijzen voor contactlenzen, etc. [1]. De eisen ten aanzien van oppervlakteruwheid, vormnauwkeurigheid en geringe bewerkingschade onder het materiaaloppervlak nemen gestaag toe, evenals de kosten die gemaakt worden bij de eindbewerking door polijsten. Polijsten is een langdurig proces waarbij de afnamesnelheid van het materiaal en de vormnauwkeurigheid slecht te beheersen zijn. Door deze geringe afnamesnelheid wordt polijsten zelden of nooit toegepast om een product vanaf het uitgangsmateriaal vorm te geven. Vaak zijn een of meer tussenliggende stappen noodzakelijk, zoals voor- en naslijpen, lappen of voorpolijsten. Recent zijn enkele veelbelovende nieuwe slijptechnieken ontwikkeld. Materiaalafname door plastische vervorming in plaats van door afschuiving of door bros uit te breken, kan nu gerealiseerd worden op alle mogelijke soorten materialen, zoals metalen, glas en technische keramiek.

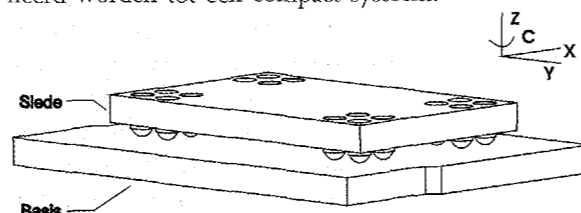
Voorbeelden van deze nieuwe slijpmethoden zijn "Electrolytic In-process Dressing" (ELID) [2] en

"High-Speed Chipping" (HSC) [3] slijpen. Deze processen zijn gebaseerd op de afname van zeer kleine (sub-micron) spanen. Om deze sub-micron verspanning met een machine te kunnen uitvoeren, is een baanbeheersing in het sub-microngebied van de relatieve positie van gereedschap en werkstuk (in alle richtingen) noodzakelijk. Bestaande slijpmachines zijn niet nauwkeurig en stijf genoeg voor deze bewerkingen, zodat nieuwe positioneermethodes ontwikkeld moeten worden. Dit artikel presenteert de ontwikkeling van een piezo-elektrisch aangedreven positioneerstelsel voor nauwkeurig en stijf positioneren. Met deze methode worden tevens de nadelen van traditionele geleidingen ondervangen, zoals speling, stick-slip en rolweerstand. Bestaande piezo-stappers, zoals bijvoorbeeld toegepast voor het positioneren van silicium plakken in waferstappers of het positioneren van monsters in een elektronenmicroscop, hebben niet de noodzakelijke stijfheid en realiseren niet de gelijkmatige en continue beweging van de wandelende aandrijving zoals beschreven in [4] of [5,6]. Zhang et al. [7] en Shamoto et al. [8] waren de eersten die de noodzaak onderkennen van een hoge stijfheid in combinatie met een hoge nauwkeurigheid.

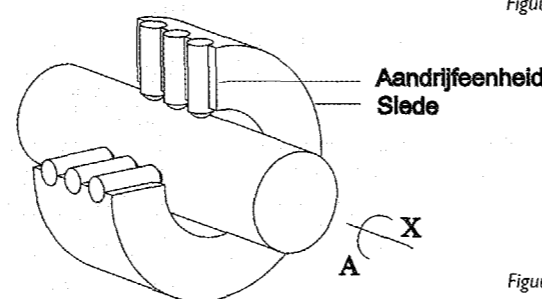
Een nieuw concept voor een piezo-stapper

In tegenstelling tot de bestaande piezo-stappers met hun hamerende stappen en hun ongelijkmatige bewegingssnelheid, moet deze slede een gelijkmatige beweging binnen nauwe toleranties uitvoeren. Sub-micron bewegingsresolutie en hoge passieve stijfheid worden gerealiseerd door het gebruik van piezo-elektrische actuatoren. Deze keuze is gemaakt omdat piezo-elektrische actuatoren een geringe responstijd (bandbreedte > 10 kHz) hebben en grote krachten

kunnen leveren (> 1kN). De beperkte slag van enkele micrometers wordt opgevangen door het maken van vele stapjes. Figuur 1 toont het principe van deze stappende aandrijving. De slede bestaat uit een serie aandrijfeenheden in een stijf frame. Elke aandrijfeenheid heeft een bolvormig hard contactelement dat op zijn plaats gehouden wordt door een stalen membraan. De aandrijfbeweging ontstaat door het afrollen van het bekrachtigde contactelement over de basis door middel van een duw- en trekkracht die door een set van twee piezo's geleverd wordt. De kracht wordt dus overgebracht door rollende wrijving. Aan het einde van de slag van de ene aandrijfeenheid, neemt een andere aandrijfeenheid de beweging over. In de tussentijd gaat de eerste aandrijfeenheid weer in de beginstand staan. De in figuur 1 getoonde cyclus spreekt voor zich. Door toepassing van een groot aantal aandrijfeenheden wordt als gevolg van het grote contactoppervlak van de bolvorm reeds een hoge passieve stijfheid gerealiseerd. Deze stijfheid wordt nog vergroot door een actieve regeling waarbij in feite lagerings- en aandrijffunctie gecombineerd worden tot één compact systeem.



Figuur 2.



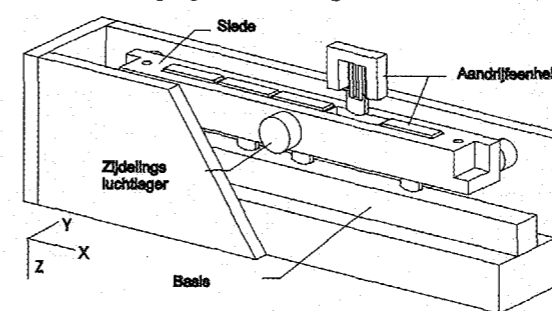
Figuur 3.

De aandrijfeenheden kunnen makkelijk in twee loodrecht op elkaar staande richtingen bewegen wanneer een tweede set piezo-elektrische actuatoren gemonteerd wordt. De aandrijfeenheden kunnen ook geometrisch op verschillende wijze samengesteld worden, zodat verschillende types van aandrijvingen gebouwd kunnen worden met één en dezelfde soort eenheden (zie de figuren 2 en 3). De contactkracht tussen de aandrijfeenheid en de basis moet op een

voldoend gelijkmatige manier worden opgebouwd. Zou dit niet het geval zijn, dan zal bij elke stap die de eenheid zet een schokgolf door het systeem lopen, die trillingen veroorzaakt. Dit hamer-effect maakt het systeem dan ongeschikt voor de nauwkeurige continue beweging die nodig is bij de eerder genoemde nauwkeurige verspaningsprocessen. Het maken van zachte stappen was reeds eerder gerealiseerd door middel van een positieregeling voor de gehele slede [9,10]. Verderop in dit artikel wordt een hybride kracht- en positiegestuurde aanpak gepresenteerd, om het hameren tegen te gaan. Krachtsturing maakt niet alleen het zacht stappen mogelijk, maar is bovendien een oplossing voor de hyperstatische ondersteuning van de aandrijfsystemen getoond op figuren 2 en 3.

Proeven met een lineaire slede

De slede
Figuur 4 toont een proefopstelling om het hier besproken concept te evalueren. De slede wordt aangedreven in de x-richting en ondersteund in de z-richting door de aan de slede bevestigde aandrijfeenheden. De slag in x-richting is 100 mm. De positie van de slede in x- en z-richting en de rotatie om de y-as worden gemeten en teruggekoppeld via een eenvoudige lineaire positieregelaar. De vrijheidsgraden in alle andere richtingen worden met luchtlagers geblokkeerd. Verder komt deze opstelling overeen met het concept getoond in figuur 1.

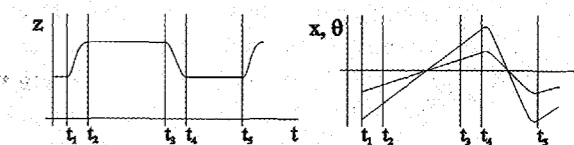


Figuur 4.

Functie van de eenheden

Elke eenheid heeft een dragende functie in de z-richting en een aandrijffunctie in de x-richting. Figuur 5 toont de x- en z-posities als functie van de tijd tijdens een typische aandrijfcyclus. De stapcyclus start op t₁. Het contactelement van de eenheid beweegt naar de basis terwijl de aandrijfbeweging reeds loopt. Op tijdstip t₂ is de gemeten contactkracht hoog genoeg om de aandrijfbeweging over te brengen op de basis. De z-beweging van het

element hangt af van de positie van het frame ten opzichte van de basis, maar die is onbekend. Daarom wordt de z-beweging gestuurd door een krachtregelaar. Tussen tijdstip t₂ en t₃ is het element in contact met de basis. Op tijdstip t₃ is het element aan het eind van zijn slag en wordt omhoog getrokken. Na tijdstip t₄ gaat het element naar de startpositie en begint een nieuwe cyclus.

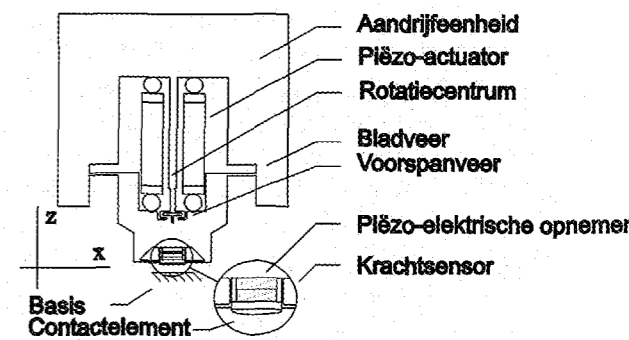


Figuur 5.

De duur van de cyclus heeft een vaste waarde. De slag van het element in de x-richting kan zowel positief als negatief zijn en wordt bepaald door de gewenste snelheid van de slede. Dit wordt getoond in figuur 5, de volle lijn voor hoge snelheid van de slede en de gestreepte lijn voor lage snelheid. De maximale snelheid wordt bepaald door de cyclusduur en de maximale slag in de x-richting. Deze slag wordt bepaald door de piezo-elektrische actuatoren en de mechanische versterkingsfactor van het ontwerp. De maximale aandrijfsnelheid kan worden verhoogd door de stapfrequentie te verhogen.

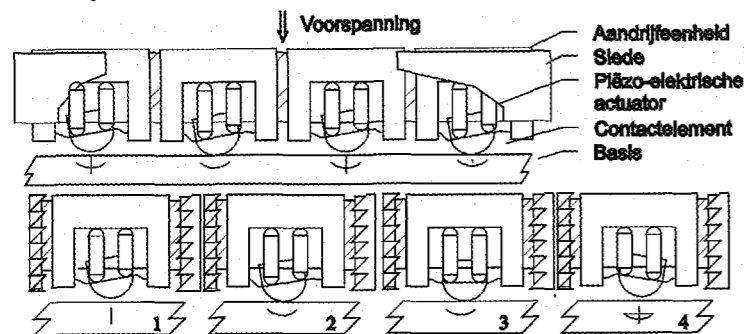
Ontwerp van de eenheid

Figuur 6 laat het ontwerp zien van het prototype dat bij de experimenten gebruikt werd. Twee meerklaagige piezo-keramische actuatoren zorgen in een trek- en duwconfiguratie voor het aandrijven van de eenheid. Ze worden voorgespannen door een centrale trekstang die verbonden is met een kleine gevouwen bladveer in het midden. Als de twee actuatoren in gelijke mate uitzetten beweegt het contactelement naar de basis. Als de twee actuatoren in de duw- en trekmode werken, beweegt het bolle contactelement



Figuur 6.

Figuur 1.

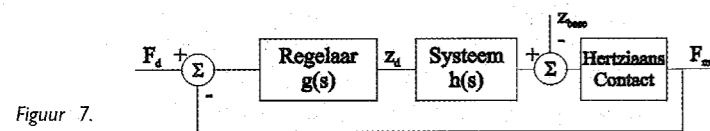


rond zijn middelpunt als gevolg van de kinematische beperking die wordt opgelegd door de horizontale bladveer. Wanneer het contactelement in contact is met de basis, resulteert deze rotatie in een aandrijfbeweging in de x-richting. Het ontwerp van figuur 6 heeft een mechanische versterking van twee. Dit wil zeggen dat de x-beweging gelijk is aan twee keer de uitzetting van de piëzo-actuator. Om de contactkracht continu te meten bevat het contactelement ook een krachtsensor. Deze sensor bestaat uit twee extra piëzo-elektrische pastilles. Deze pastilles zijn voorgespannen en gesteund door een membraan (zie detail in figuur 6). Door het membraan zal de aandrijfkraft in de x-richting de meting van de z-kracht niet beïnvloeden.

Klemmen door hybride kracht- en positie regeling

Problemen en aanpak

Omdat de individuele eenheden slechts een slag van ongeveer 30 µm hebben, en de gewenste sledesnelheid in de orde van 2 mm/s ligt, zal de stapfrequentie ongeveer 30 Hz moeten zijn. Dit vereist een stapcyclus van 30 ms. De tijd die de eenheid nodig heeft om contact te maken ($t_2 - t_1$, zie figuur 5) is derhalve erg kort. Als de positie van de eenheid ten opzichte van de basis niet exact bekend is, veroorzaakt het blind contacteren van de basis een stoot op het systeem. Dit kan vermeden worden door gebruik te maken van een krachtregeling die gestuurd wordt



Figuur 7.

door het krachtsignaal uit het contactelement. De cellen meten alle krachten die op de slede werken, dus ook deze veroorzaakt door voorspanning, snijkkrachten en versnellingen van de slede. Met de gemeten kracht als uitgangspunt berekent een algoritme de gewenste krachtverdeling en daarmee ook de gewenste kracht voor elke individuele eenheid. Twee verschillende benaderingen worden nu gepresenteerd: klemmen met een zuivere krachtregelaar en klemmen met een hybride kracht- en positieregelaar.

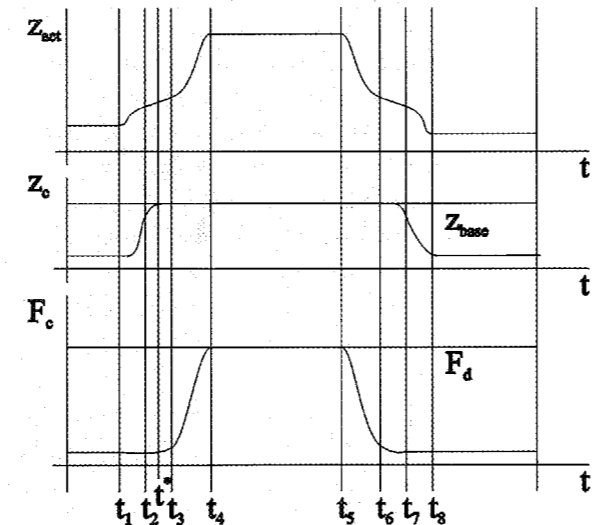
Zuiver krachtgestuurd klemmen

Figuur 7 toont een algemeen stuurschema voor het maken van een krachtgestuurd contact zoals besproken in referentie [11]. De gewenste kracht F_d is een

sprongfunctie op tijdstip t_1 van de stapcyclus. De regelaar vergelijkt de gewenste kracht F_d met de actuele kracht F_m die gemeten wordt in het contactelement van de eenheid, en levert een signaal om de positie van het contactelement te corrigeren. Voor de regelaar kan een zuiver integrerende regelaar gebruikt worden of een integrerende regelaar met extra terugkoppelingen (zie kader).

Klemmen met een hybride kracht- en positieregelaar

Een tweede benadering om stoten tijdens het krachtgestuurde klemmen te vermijden is veronderstellen van een vaste positie voor het berekenen van het moment van het eerste contact. Elke volgende cyclus wordt de positie-informatie aangepast door gebruik te maken van de krachtinformatie van de vorige cyclus. Hiermee kan een zachte contactovergang plaatsvinden zonder stoten. Daartoe wordt de verplaatsing van de actuators zo gestuurd dat ze snel naderen tot de positie waar het contact wordt verwacht om vervolgens te dalen tot een minimum waarde tot het moment van de aanraking. Het

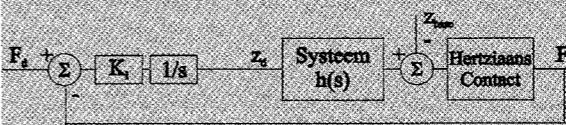


Figuur 11.

bovenste deel in figuur 11 toont het verplaatsingssignaal naar de actuators en tevens de verticale verplaatsing van de actuator z_{act} . De middelste tekening geeft de beweging van het contactelement z_c weer gemeten vanaf de basis. De onderste tekening toont het oplopen van de contactkracht op basis van de aanname dat de basis in werkelijkheid precies op de veronderstelde hoogte ligt. Zoals blijkt uit de figuur beweegt het contactelement met de actuators op

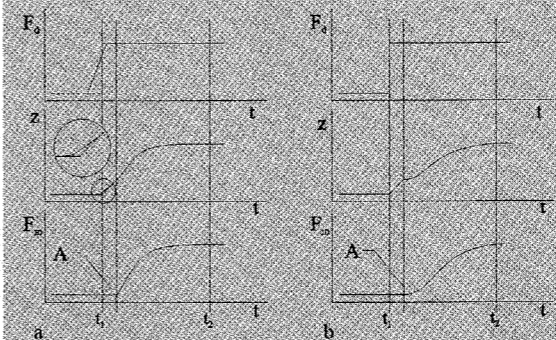
Krachtregeling door enkelvoudige integratie

Een pure integrerende regelaar (zie figuur 8) garandeert een eindwaarde zonder nulpuntsafwijking. Wanneer de gewenste kracht F_d wordt opgelegd aan de ingang en er geen contact is, (t_1 in figuur 9a) is het foutsignaal (op de kracht) constant. De integrator zet de constante fout om in een constante snelheid. Het contact element nadert dus de basis met een constante snelheid. Na botsing met de basis, ergens tussen t_1 en t_2 , neemt de snelheid van het contactelement af tot de gewenste contactkracht is bereikt op tijdstip t_3 . Op dezelfde manier wordt het contact verbroken wanneer men een kleine negatieve



Figuur 8.

ve kracht oplegt aan de ingang van de integrator. Het belangrijkste voordeel van deze methode is dat de naderingssnelheid van het contactelement naar de basis begrensd wordt door de regelaar [11]. Twee verbeteringen kunnen in dit schema aangebracht worden. In plaats van een sprongfunctie toe te passen, zou men een lineaire functie (streeplijn in figuur 9) als krachtinput kunnen gebruiken. Daardoor wordt de beweging van de actuators vloeiender. Verdere verbeteringen kunnen worden gemaakt door de afgeleide van het krachtsignaal te gebruiken, zoals verderop uitgelegd wordt.

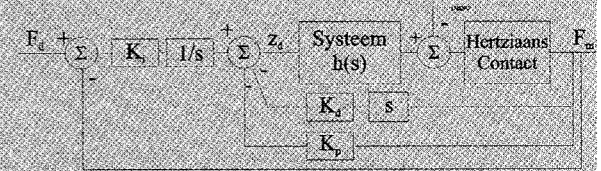


Figuur 9.

Uitbreiding op de integrerende regelaar

De dynamica van de overdrachtsfunctie $h(s)$ beschrijft een massa-veer systeem dat grofweg van tweede orde is met een hoge eigenfrequentie. Als

gevolg daarvan beïnvloedt $h(s)$ de dynamica van de integrator niet, zodat het gehele terugkoppelkring zich als een eerste orde systeem gedraagt. Dit heeft tot gevolg dat er een discontinuïteit optreedt in het krachtsignaal op het moment van de botsing met de basis (punt A in figuur 9a). Een gelijkmatiger gedrag kan verkregen worden door het gehele systeem van de derde orde te maken door gebruik van extra terugkoppelsignalen. Figuur 9b toont de krachtrespons op een sprong in het ingangssignaal F_d voor de uitgebreide regelaar waaraan twee terug-



Figuur 10.

koppelingen zijn toegevoegd: een eerste voor terugkoppeling van de kracht en de tweede voor het terugkoppelen van de afgeleide van de kracht. Het schema staat in figuur 10. Wanneer contact gemaakt is en de krachtsignalen aanwezig zijn, reageert het gehele systeem als een derde orde systeem op een sprongfunctie. Er is dan geen discontinuïteit meer waarneembaar in de opbouw van de kracht (zie figuur 9b). Het systeem beschreven door $h(s)$ kan weergegeven worden door de volgende functie:

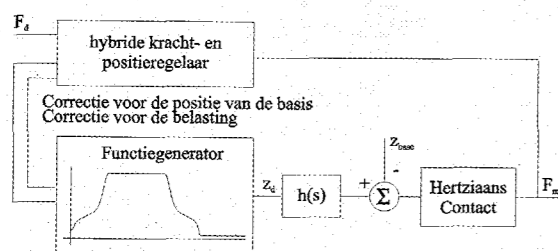
$$h(s) = \frac{1}{\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2\zeta \frac{s}{\omega_n} + 1 \right)}$$

Het gehele regelsysteem kan dan tijdens contact beschreven worden door een derde orde systeem dat bepaald wordt door de constanten K_i , K_d en K_p . De constanten K_i en K_p hebben een negatieve waarde en K_{H_2} is de niet-lineaire Hertziaanse contactstijfheid.

$$F_m(s) = F_d(s) \frac{1}{1 + \frac{K_i}{s} + \frac{2\zeta K_d + K_p + K_{H_2} \alpha}{\omega_n^2} + \zeta^2 K_p}$$

Omdat K_{H_2} varieert van nul, bij geen contact, tot de maximale contactstijfheid in de uiteindelijke contactsituatie is het systeem niet lineair. Het is aangetoond dat het systeem stabiel blijft volgens het Lyapunov criterium.

hoge snelheid gedurende het interval ($t_1 - t_2$). De verplaatsingscurve van de actuatoren is zodanig van vorm dat de snelheid tussen t_1 en t_2 minimaal is. Als de basis werkelijk op de verwachte hoogte ligt, ligt het contacttijdstip t^* tussen t_1 en t_2 . Doordat de botsing van het contact bij lage snelheid plaatsvindt zijn trillingen door het aanstoten van de constructie geminimaliseerd. Als het contact eenmaal tot stand gebracht is wordt de beweging weer versneld totdat de contactkracht F_c de gewenste eindwaarde F_d heeft bereikt.

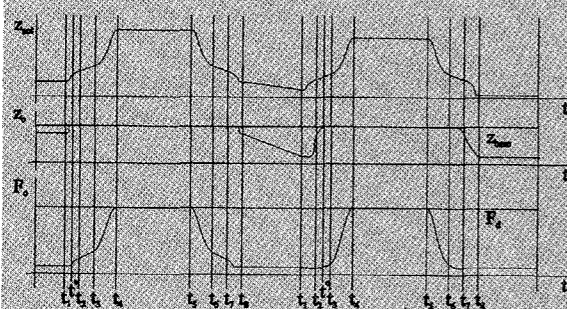


Figuur 12.

Correcties voor de positie van de basis

Als de basis niet op de verwachte plaats ligt, dan is de afstand tussen de basis en het contactelement niet juist. Dan ligt het contactmoment t^* niet tussen t_1 en t_2 . Daardoor vindt het contact plaats gedurende een snelle beweging van het contactelement en worden er trillingen in de constructie opgewekt. Het algoritme bewaakt het contactmoment t^* rekening houdend met de verschillende fasen in het bewegingspatroon van de actuatoren. Als contact plaatsvindt tussen t_1 en t_2 , dan is de veronderstelde relatieve afstand te klein, als contact plaatsvindt tussen t_3 en t_4 dan is de veronderstelde relatieve afstand te groot. Het algoritme past dan de relatieve afstand aan door de DC-waarde van het stuursignaal aan te passen.

Figuur 13 illustreert deze correctie. Aanvankelijk is de positie van de basis te ver weg verondersteld, de relatieve afstand van het contactelement en de basis is te klein. Het contactmoment t^* ligt daardoor



Figuur 13.

Er zijn twee redenen waarom dit ideale scenario niet goed zou werken:

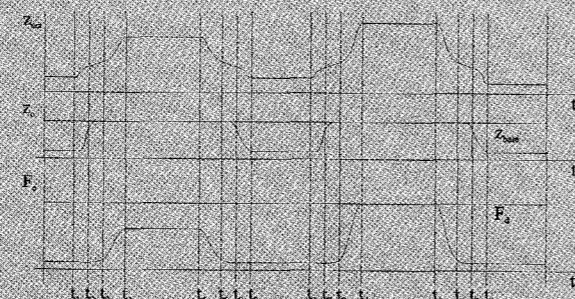
- De werkelijke positie van de basis is niet goed bekend en kan variëren langs de afgelegde weg van de slede, zodat het contact plaatsvindt op een ander deel van de verplaatsingscurve.
- De gewenste contactkracht F_d wordt niet gehaald als gevolg van een ongekeerde belasting van de slede.

Om dit te verhelpen is een externe "lerende" regelaar toegevoegd in het regelsysteem. Zoals weergegeven op figuur 12 geeft deze lus twee correctiesignalen aan de generator van de verplaatsingsfunctie (zie kader): een correctie voor de positie van de basis en een correctie voor de gewenste eindkracht F_d .

ergens tijdens de snelle beweging van t_1 tot t_2 . Het algoritme maakt de relatieve afstand groter door de DC spanning, die de beweging van de actuator stuurt, te verlagen. De gecorrigeerde functie aan de rechterkant van de figuur wordt dan zo dat het contact moment t^* tussen t_1 en t_2 ligt.

Correctie voor de belasting

Wanneer de na het contact opgebouwde contactkracht niet de gewenste eindwaarde bereikt, past het algoritme in het opwaartse deel $t_3 - t_4$ de kracht aan. Dit gebeurt door de gewenste waarde van de actuatorpositie aan te passen. Deze correctie beïnvloedt noch de beweging noch het tijdstip van het contact t^* . In figuur 14 is de kracht die door het

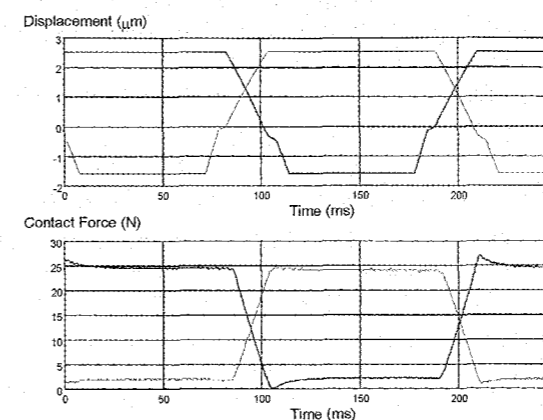


Figuur 14.

opgaande deel wordt veroorzaakt eerst te laag. De amplitude van de output is dan verhoogd zodanig dat de eindwaarde van de kracht overeenkomt met de gewenste kracht F_d .

Vergelijking van puur kracht geregeld en hybride geregeld klemmen

Omdat bij hybride klemmen de snelheid bij het maken van het contact laag is en daarbuiten hoog, kan de klemcyclus korter worden gemaakt dan in het geval van een zuivere krachtregelaar (waar de



Figuur 15.

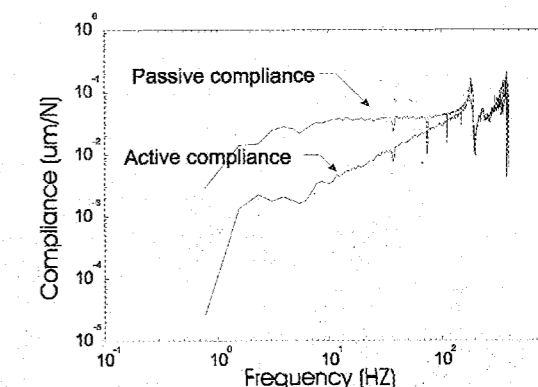
snelheid constant en dus altijd laag is). De verdere experimenten gebruiken dan ook een klemming met hybride regelaar. Figuur 15 illustreert daarbij de verschuiving van de kracht van de ene naar de andere eenheid tijdens het overnemen van het contact. In de bovenste figuur is de beweging van de actuatoren weergegeven door een ononderbroken lijn voor de eerste eenheid en door een streeplijn voor de tweede eenheid. Een zacht contact vindt plaats tijdens de langzame fase in de beweging van de actuatoren.

Experimentele resultaten

Voor de besturing van de slede is een globale positieregelaar in ontwikkeling. De positie van de slede wordt gemeten in alle vrijheidsgraden. De regelaar vergelijkt de gewenste positie met de actuele positie en zendt corrigerende stuursignalen naar de verschillende aandrijfeenheden. In de positieregelaar zijn twee vooruitkoppelingen opgenomen ter compensatie van de niet-lineaire Hertziaanse contactstijfheid en de hysteresis van de piëzo-actuatoren. Met deze regelaar zijn al voorlopige experimenten uitgevoerd ter bepaling van de actieve stijfheid en de nauwkeurigheid van de positionering van de slede.

Een ultra-stijf systeem

De mechanische stijfheid wordt bepaald door de componenten in de krachtlus: de basis van de slede, het contactelement, de aandrijfeenheid, en de piëzo-actuatoren. Het bolvormige contactoppervlak geeft de

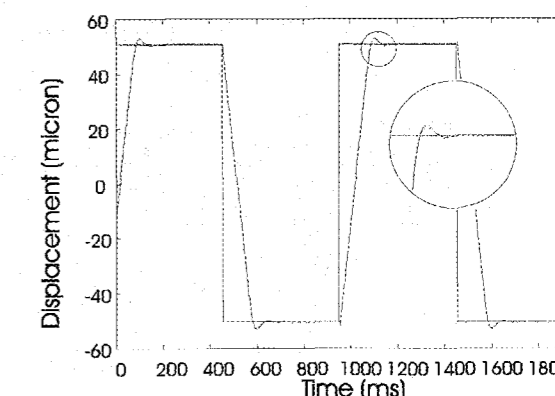


Figuur 16.

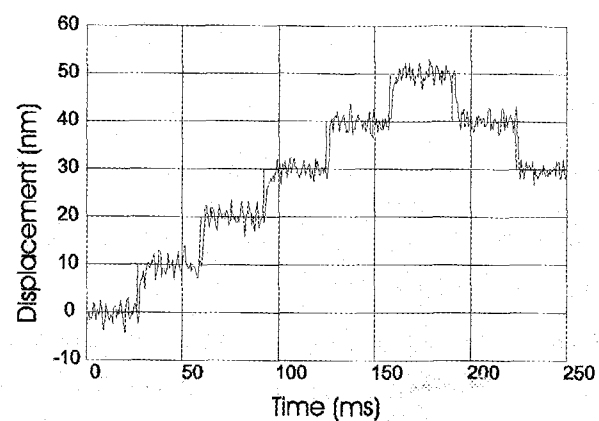
belangrijkste bijdrage aan de stijfheid. Het Hertziaanse contactgedrag met een vlak geeft in de gegeven situatie (radius, belasting en materiaal) een stijfheid van ongeveer 20 N/µm. De passieve stijfheid in de z-richting van de slede (gedragen door twee aandrijfeenheden) bedraagt dus 40 N/µm. Figuur 16 toont de gemeten passieve soepelheid van de slede in z-richting samen met de verbeterde soepelheid van het actieve systeem. Deze overdrachtsfunctie geeft de positieverstoring in de z-richting per eenheid stoorkracht (bijvoorbeeld de verspaningskracht) in functie van de frequentie. De regelaar zorgt voor een stijfheid die hoger is dan 100 N/µm (of een soepelheid van 0.01 µm/N) voor frequenties tot 100 Hz.

Een ultra-nauwkeurig systeem

De slede kan ofwel een snelle (onnauwkeurige) beweging uitvoeren, ofwel een fijne beweging met hoge positioneer-nauwkeurigheid uitvoeren. Voor snelle bewegingen wordt een hoge stapfrequentie gebruikt. Deze experimenten zijn met een vaste stapfrequentie van 40 Hz uitgevoerd. Figuur 17 toont het volgen van een blok golf met een slag van 100



Figuur 17.



Figuur 18.

μm . De maximale snelheid bij een stapfrequentie van 40 Hz is 2 mm/s, de nauwkeurigheid van het positioneren is ongeveer 0,1 μm . Voor hogere snelheden kan de stapfrequentie nog opgevoerd worden. De absolute nauwkeurigheid van de toegepaste sensoren is 50 nm. De bewegingsresolutie is echter beperkt door het ruisniveau van de meting, dat in ons geval 5 nm was. Figuur 18 toont het volgen van een trapfunctie met stappen van 10 nm. De rimpellijn is de gemeten positie, de rechte lijn de gewenste positie. De positioneer-nauwkeurigheid van het systeem is beter dan 10 nm. De responstijd voor het uitvoeren van een stap van 10 nm is ongeveer 10 ms.

Besluit

Een bijzonder nauwkeurig en stabiel positionersysteem is ontwikkeld. Er is aangetoond dat met een piëzo-stapper de bijzonder hoge specificaties kunnen worden gehaald die nodig zijn voor de nieuwste

sub-micron verspaningsprocessen. Krachtregeling wordt als oplossing voorgesteld voor het "hameren" van wandelende aandrijvingen. De eerste resultaten met krachtgeregeld stappen zijn zeer veelbelovend. De volgende problemen dienen nog verder uitgewerkt te worden: hyperstatische tractie bij meervoudige tractie, het verder elimineren van niet-lineariteiten en de ontwikkeling van een positieregelaar voor het gehele systeem.

Dankwoord

M. Versteyhe heeft een doctoraalbeurs van het Vlaamse Instituut voor de bevordering van het wetenschappelijk-technologisch onderzoek in de industrie (IWT). D. Reynaerts is post-doctoraal onderzoeker van het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek - Vlaanderen (FWO) en deeltijds docent aan de K.U.Leuven. H. Van Brussel is gewoon hoogleraar aan de K.U.Leuven. Dit onderzoek werd gefinancierd door het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek - Vlaanderen (FWO), project G0336.98N, en door het Belgische federale programma voor Interuniversitaire Attractiepolen, geïnitieerd door de Belgische Staat, kabinet van de Eerste Minister, Federale diensten voor wetenschappelijke, technische en culturele aangelegenheden, project IUAP4/24 "Intelligente mechatronische systemen". De auteurs bedanken R. Dona van het Philips Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven voor zijn waardevolle bijdragen en voor de vele stimulerende discussies.