

Actieve demping ... haaks Optimale stijfheid ...

Hoewel piëzo-elektrisch materiaal op zich welbekend en goed begrepen is, is het vooral de kunst om er op een goede manier gebruik van te maken. Een aardig voorbeeld is het 'Smart Disc'-concept, waarin piëzo's worden gebruikt om trillingen in precisie-apparatuur actief te dempen. Het regeltechnische principe achter actieve demping is op zich niet ingewikkeld. De uitdaging ligt er in om de regeltechniek een plaats te geven tussen de gevestigde constructieprincipes voor het ontwerpen van nauwkeurige mechanismen.

• Jan Holterman • Theo J.A. de Vries •

In een eerdere Mikroniek-bijdrage [1] hebben we geschetst hoe trillingen in een wafer scanner gedempt kunnen worden met behulp van piëzo's in de lensophanging. Een van de nadelen ten opzichte van de originele, passieve lensophanging bleek de afgenomen stijfheid: het principe van actieve demping staat daarmee haaks op het constructieprincipe om machineframes zo stijf mogelijk te maken. In dit artikel gaan we nader in op dit ontwerpprobleem, opnieuw aan de hand van de lensophanging van een wafer scanner. De belangrijkste les die we hieruit zullen leren is dat we niet alleen moeten zorgen voor voldoende stijfheid in de *actieve* richting van het piëzo-materiaal, maar vooral ook in de *niet-actieve* richtingen. Speciale aandacht derhalve voor *stijfheid haaks op de richting van actieve demping*.

Voor een wafer scanner gelden, net als voor tal van andere apparaten die worden ingezet bij de productie van IC's, extreme nauwkeurigheidseisen. Positioneringsfouten mogen typisch niet groter zijn dan een tiende micrometer, en veelal worden ze uitgedrukt in nanometers. De minste of

geringste verstoring kan er al toe leiden dat de specificaties niet worden gehaald.

Trillingen vormen een belangrijke bron van ellende in een wafer scanner. Met de almaar toenemende nauwkeurigheidseisen zullen vooral trillingen van de lens, het gevoeligste onderdeel van de machine, op termijn voor problemen gaan zorgen. Aan de Universiteit Twente is daarom, in het kader van het 'Smart Disc'-project, geprobeerd om deze trillingen *actief* te dempen. Om dit mogelijk te maken, zijn piëzo-elektrische actuatoren en sensoren ingebouwd in de lensophanging van een speciaal daartoe aangepast frame van een wafer scanner [2].

Constructieprincipes

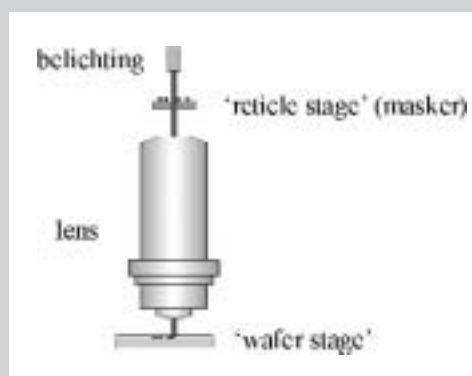
Bij het opnemen van piëzo-elektrisch materiaal in het frame van een nauwkeurig apparaat als een wafer scanner moet rekening worden gehouden met de constructieprincipes die aan het ontwerp van het frame ten grondslag liggen. In de oorspronkelijke lensophanging van de wafer scanner (sche-

op optimale stijfheid? haaks op actieve demping!

Wafer scanner

Wafer scanners worden ingezet bij de productie van IC's (integrated circuits). Ze brengen volgens een lithografisch procédé een patroon van elektronische schakelingen aan op een siliciumschijf, de zogeheten wafer (zie Figuur A).

Het masker met het gewenste patroon wordt op de juiste plek gebracht door de 'reticle stage', die zich boven in de machine bevindt. De wafer wordt gepositioneerd met behulp van de 'wafer stage', onderin de machine. Tussen beide stages bevinden zich ver-



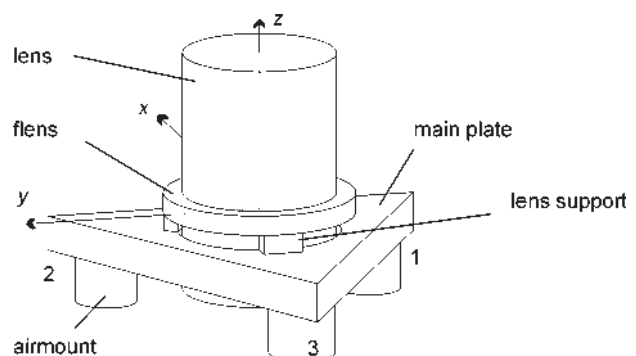
Figuur A. Eenvoudige voorstelling van het lithografisch proces in een wafer scanner.

scheidene opeengestapelde lenzen, samen gemakshalve aangeduid als lens. Via deze lens wordt het gewenste patroon op het silicium geprojecteerd. Het niet-belichte materiaal op de wafer wordt na de belichting weggeëtst, zodat uiteindelijk een circuit met de gewenste vorm overblijft. Hierbij is het de kunst om de patronen van het circuit zo klein mogelijk te maken. Hoe fijner de lijnen, hoe meer schakelingen per oppervlak, hoe kleiner en hoe sneller het IC.

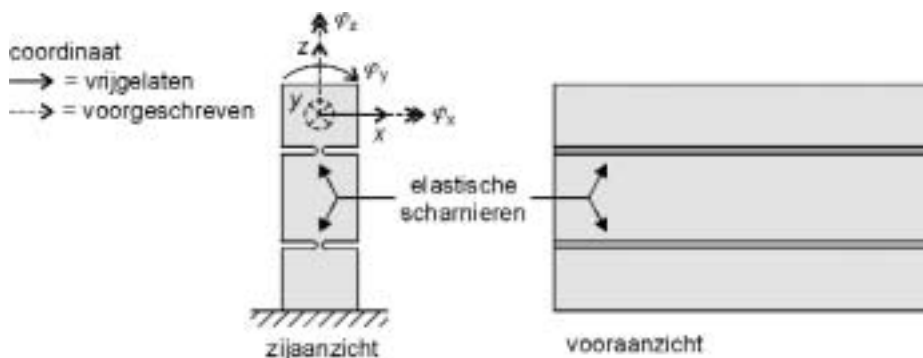
matisch weergegeven in Figuur 1) herkennen we de volgende constructieprincipes:

- *Trillingsisolatie* – De machine is opgesteld op drie trillingsisolatoren of *airmounts*. De basis voor de trillingsarme 'schone wereld' is de zogeheten *main plate*.
- *Statisch bepaald* – De *lens* is bevestigd aan de *main plate* middels een *flens*, ondersteund door drie stalen blokken. Deze zogeheten *lens supports* zijn symmetrisch opgesteld rond de lens. Om de zes vrijheidsgraden van de lens exact één keer voor te schrijven moet elk van de drie lens supports lokaal twee coördinaten voorschrijven: verticaal en tangentieel. De overige vier lokale coördinaten moeten worden vrijgelaten. De lens supports zijn daartoe uitgevoerd met scharnieren.
- *Vrij van speling en hysteresis* – Om speling en hysteresis, notoire bronnen van onnauwkeurigheid, te vermijden, is gebruik gemaakt van *elastische* scharnieren. Een gevolg van het spelingsvrij en hysteresisvrij ontwerpen is dat in het systeem nauwelijks wrijving optreedt, en daarmee dat trillingen van de lens of de *main plate* nauwelijks gedempt worden. De relatieve demping van de belangrijkste trillingsmodes bedraagt minder dan 0,5%.
- *Optimale stijfheid* – Een conventionele lens support is uitgerust met twee horizontale elastische scharnieren over de volle lengte van de support. Hiermee worden per ophang-

punt niet vier, maar slechts twee coördinaten vrijgelaten (zie Figuur 2). Deze keuze is het resultaat van de afweging tussen de constructieprincipes om de lens enerzijds zo stijf mogelijk en anderzijds netjes statisch bepaald op te hangen. Het vrijlaten van meer dan twee lokale coördinaten zou leiden tot te veel stijfheidsverlies. Een gevolg van dit besluit is dat de twee eindvlakken van de lens support, en ook de daarmee corresponderende aanlegvlakken in de machine, voldoende evenwijdig moeten worden aangeboden.



Figuur 1. Schematische weergave van de lensophanging in een wafer scanner.



Figuur 2. Schematische weergave van conventionele lens support; $l \times b \times h = 100 \times 20 \times 60$ [mm³].

Lenstrillingen

Bij het opnemen van piëzo-elektrisch materiaal ten behoeve van het actief dempen van trillingen is het bovendien van groot belang te weten welke trillingsmodes tot de meeste problemen leiden. Wanneer we gemakshalve aannemen dat de lens, de flens en de main plate intern niet vervormen, dan kan het systeem in Figuur 1 worden gekarakteriseerd door zes trillingsmodes van de lens ten opzichte van de main plate:

- De twee trillingsmodes met de laagste eigenfrequenties (circa 100 Hz) worden de 'joystick modes' genoemd (Figuur 3a). Bij deze modes is er sprake van kanteling van de lens om een as in het vlak van ophanging (x - y -vlak in Figuur 1). Hierbij wordt een beroep gedaan op de *verticale stijfheid* van de lens supports.
- Twee andere trillingsmodes zijn de zogenaamde 'pendulum modes' (Figuur 3b). Hierbij beweegt de lens min of meer horizontaal in het vlak van ophanging. In deze modes wordt vooral een beroep gedaan op de *horizontale*

stijfheid, dat wil zeggen de afschuifstijfheid van de lens supports.

- In de twee overige trillingsmodes van de lens ten opzichte van de main plate (niet geschetst in Figuur 3) is er respectievelijk sprake van relatieve verticale verplaatsing en van relatieve rotatie om de verticale as.

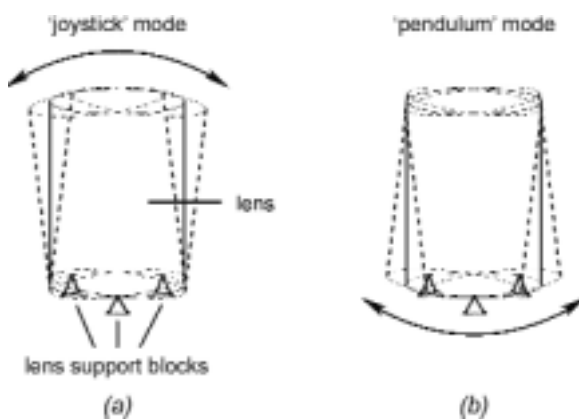
In de wafer scanner leiden vooral de joystick modes, en in iets mindere mate de pendulum modes, tot de hoogste trillingsniveaus. In de loop van het 'Smart Disc'-project zijn daarom twee prototype actieve lens supports ontworpen. Het eerste prototype, de zogenaamde Smart Lens Support (SLS), was gericht op demping van de joystick modes. Het tweede prototype, de zogenaamde Piezo Active Lens Mount (PALM), was gericht op demping van zowel de joystick als de pendulum modes.

Smart Lens Support

De *Smart Lens Support* (SLS) is ontwikkeld om de joystick modes in de wafer scanner actief te dempen. Hiertoe is de SLS voorzien van Smart Disc-functionaliteit in *verticale* richting, dat wil zeggen [2]:

- een piëzo-elektrische actuator die vervormt in verticale richting;
- een piëzo-elektrische sensor die de kracht meet in verticale richting.

Het mechanisch ontwerp van de Smart Lens Support is in eerste instantie gebaseerd op de conventionele lens support. Hiervan zijn de twee horizontale elastische scharnieren gekopieerd, evenals de aanlegvlakken en de draadgaten voor de bouten aan de boven- en de onderkant. Bovendien heeft de SLS dezelfde afmetingen als een conventionele lens support.



Figuur 3. Schematische weergave van dominante trillingsmodes van de lens ten opzichte van de main plate.

Regeltechniek: 'collocation'

De gebruikte regelstrategie om met de SLS en de PALM actief te dempen, is gebaseerd op het feit dat de actuator en de sensor zich op dezelfde plek in het frame bevinden. Dit maakt het mogelijk 'collocated control' toe te passen, waarmee actief (dat wil zeggen met behulp van actuatoren, sensoren en versterkers) het gedrag van een passief element (bijvoorbeeld een demper) kan worden gerealiseerd.

Het sensorsignaal vormt, samen met (de tijdsafgeleide van) het stuursignaal voor de actuator, een zogenaamd vermogensgeconjugeerd variabelenpaar: het product van de gemeten kracht en de gestuurde snelheid is gelijk aan het vermogen dat van het mechanische systeem naar het regelsysteem vloeit. Door er nu voor te zorgen dat dit product te allen tijde positief is, kan men er zeker van zijn dat het regelsysteem energie aan het mechanisch systeem onttrekt.

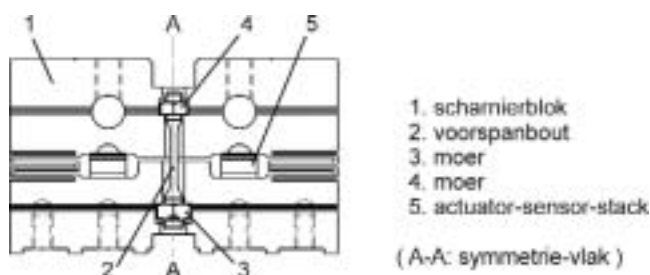
Deze situatie kan eenvoudig gerealiseerd worden door in de regellus een eerste-orde laagdoorlaatfilter op te nemen.

Wanneer dit filter een voldoende lage afsnijfrequentie heeft, gedraagt de regelaar zich rond de resonantiefrequenties als een integrator. De actief geregelde actuator-sensorstack vertoont dan hetzelfde gedrag als een visceuze demper.

Voor de regelaar hoeft, naast de afsnijfrequentie, slechts één parameter ingesteld te worden, een zekere versterkingsfactor. Omdat hiervoor geen gedetailleerde modelkennis nodig is, anders dan de wetenschap dat de actuator en de sensor zich op dezelfde plek in het frame bevinden, is deze regelstrategie zeer robuust en 'gegarandeerd' stabiel.

De SLS is opgebouwd uit (zie Figuur 4; zie ook [1]):

- een scharnierblok, waarvan de boven- en onderkant verbonden zijn met zogeheten harmonicaveren, die zorgen voor een elastische graad van vrijheid in (onder meer) verticale richting;
- twee actuator-sensorstacks, elk bestaande uit een piezoelektrische actuator en sensor; zowel de beide actuatoren als de beide sensoren zijn parallel geschakeld, dat wil zeggen ze functioneren effectief als één actuator-sensorpaar;
- een voorspanbout, met twee bijbehorende moeren, om ervoor te zorgen dat de piezo's te allen tijde op druk en niet op trek belast worden. De stijfheid van de voorspanbout bedraagt minder dan 5% van de stijfheid van de actuator-sensorstacks. Als gevolg van deze lage voorspanstijfheid is de invloed op de slag van de actuator minimaal. Bovendien blijft hiermee de voorspankracht over het hele werkgebied voldoende constant.



Figuur 4. Smart Lens Support.

Met de SLS bleek het goed mogelijk om de joystick modes (en de verticale trillingsmode) actief te dempen. Met de SLS kan de relatieve demping van deze modes actief worden opgeschroefd tot maar liefst 16%. Trillingen van de lens kunnen hiermee gereduceerd worden tot minder dan 25% van het oorspronkelijke niveau.

De pendulum modes worden met de SLS daarentegen nauwelijks gedempt, simpelweg omdat de actuator-sensorstacks enkel actief zijn in verticale richting.

Piezo Active Lens Mount

Om naast de joystick modes ook de pendulum modes te kunnen dempen is een tweede prototype lens support ontwikkeld die ook actief is in horizontale (of tangentiële) richting: de PALM [3] (zie Figuur 5). De meest in het oog springende wijzigingen in het ontwerp van de PALM ten opzichte van de SLS zijn de volgende:

- In de PALM zijn de actuator-sensorstacks 45° gekanteld. Door de actuator-sensorstacks onafhankelijk van elkaar aan te sturen en uit te lezen worden per PALM twee actieve graden van vrijheid gecreëerd.
 - Wanneer de actuatoren *in fase* worden aangestuurd, resulteert een *verticale* beweging. De *som* van de sensorsignalen is maat voor de *verticale* kracht op de PALM.
 - Wanneer de actuatoren *in tegenfase* worden aangestuurd, resulteert dit in *horizontale* beweging van het bovenste deel van de PALM ten opzichte van het onderste deel. Het *verschil* tussen de sensorsignalen is een maat voor de *horizontale* kracht op de PALM.
- Als gevolg van het kantelen van de piezo's over 45° (in plaats van over een andere hoek), heeft de PALM in horizontale en in verticale richting een even groot actuatiebereik, en leveren de piezo's in horizontale en in verticale richting een gelijke bijdrage aan de PALM-stijfheid.
- Om het piezomateriaal te behoeden voor eventuele

afschuifbelastingen zijn in het scharnierblok rondom de actuator-sensorstacks extra gatscharnieren aangebracht. Deze zijn zo gedimensioneerd dat de trekstijfheid voldoende hoog is in verhouding tot de andere 'slappe' onderdelen van de PALM, te weten de oorspronkelijke elastische scharnieren en de actuator-sensorstacks.

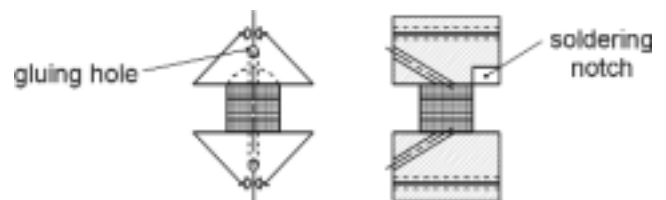
- In de SLS werd de mechanische voorspanning voor de piëzo's geleverd door een voorspanbout, die nogal onhandig in gebruik is gebleken. Het bepalen van de juiste aan draaihoek, en daarmee het reproduceerbaar instellen van de voorspankracht in de SLS, bleek nagenoeg onmogelijk. Om die reden is besloten in het PALM-ontwerp de voorspanbout weg te laten, en de harmonicaveren zo te dimensioneren dat deze voldoende mechanische voorspanning kunnen leveren. Dit is mogelijk gemaakt door enerzijds gebruik te maken van een ander type staal, met een hogere vloeigrens, en anderzijds de maximale oprekking van het scharnierblok (nodig om tijdens assemblage van de PALM ruimte te creëren voor het plaatsen van de piëzo's) tot een minimum te beperken.
- De piëzo's in de PALM zijn, net als in de SLS, vastgelijmd. Om na assemblage de juiste hoogte van de PALM te kunnen garanderen is gebruik gemaakt van een speciaal hiervoor ontworpen lijmmal. Omdat voor het aanbrengen van de lijm in de PALM nauwelijks enige ruimte was, als gevolg van het toestaan van een minimum aan rek van het scharnierblok, is er voor gekozen de lijm aan te brengen via speciale kanaaltjes in het scharnierblok (zie Figuur 6).
- Met het oog op eventueel gebruik in een ander machine-type is de hoogte van de PALM gewijzigd van 60 in 85 [mm]. Dit komt de stijfheid van de lensophanging, zowel in verticale als in tangentiële richting, niet ten goede.

Evenals met de SLS bleek het ook met de PALM goed mogelijk om actieve demping te realiseren, zij het nu voor alle zes de trillingsmodes van de lens ten opzichte van de



main plate – inclusief de pendulum modes. De relatieve demping voor de diverse modes kan zelfs worden opgeschroefd tot meer dan 20%.

Figuur 5. Piezo Active Lens Mount (foto: Job van Amerongen).



Figuur 6. Detail van de PALM: lijmkanaaltjes. (De uitsparing aan de achterzijde – 'soldering notch' – is aangebracht om soldeerreplicaties aan de elektrodes van het piëzomateriaal mogelijk te maken.)

Stijfheidsverlies

Hoewel zowel de SLS als de PALM uitstekend geschikt zijn gebleken om trillingen van de lens te dempen, kleven er aan beide ontwerpen toch de nodige nadelen. Het voornaamste probleem bij zowel de SLS als de PALM is zonder twijfel de afgenomen stijfheid van de lensophanging, en daarmee de afgenomen eigenfrequenties. In Tabel 1 zijn de eigenfrequenties van de joystick en de pendulum modes voor de verschillende lens supports verzameld. Hieruit is gereconstrueerd hoe de effectieve verticale en horizontale stijfheden van de SLS en de PALM zich verhouden tot de stijfheden van de conventionele lens support (genormaliseerd op 100%).

Vanzelfsprekend was voor beide actieve lens supports enig stijfheidsverlies wel ingecalculiseerd, simpelweg vanwege het feit dat 'een plak staal' met een oppervlak van 20×100 [mm²] is vervangen door twee stapeltjes piëzo-materiaal met een oppervlak van 10×10 [mm²]. Zo bezien valt de stijfheidsafname bij de SLS in de actieve, verticale richting nog mee: van 100% naar 76%.

Zorgwekkender is dat juist in de niet-actieve, *horizontale* richting van de SLS de stijfheidsafname zoveel groter is: van 100% naar 45%! De les die we hieruit kunnen leren, is dat we – terwijl we bij het ontwerp van de actuator-sensorstacks voor de SLS de aandacht met name hadden gericht op de stijfheid in *actieve* richting – juist zuiniger om hadden moeten springen met de stijfheid van de lens support in de *niet-actieve* richting.

Voor de PALM geldt eenzelfde verhaal. Hier is bij het ontwerp van de extra gatscharnieren rond de actuator-sensorstacks vooral gezorgd voor voldoende trekstijfheid. Met het kantelen van de stacks heeft dit ertoe geleid dat het extra stijfheidsverlies in horizontale richting binnen de perken is gebleven: van 45% naar 40%.

Bij de PALM is juist de afname van de *verticale* stijfheid het meest zorgwekkend: van 76% naar 37%. Deze extra afname van de stijfheid (een halvering!) is te verklaren uit het feit dat, waar in de SLS alle normaalstijfheid van de piëzo's beschikbaar was voor de verticale richting, daar in de PALM slechts de helft van over is. De andere helft van de normaalstijfheid van de piëzo's wordt nu immers aangewend in horizontale richting.

Dat dit laatste niet heeft geleid tot een toename van de *totale* stijfheid in horizontale richting, is te verklaren uit het feit dat de horizontale stijfheid in de SLS wordt gevormd door de *afschuifstijfheid* van de piëzo's. Als gevolg van de extra gatscharnieren, bedoeld om de piëzo's op afschuiving te ontlasten, speelt in de PALM deze afschuifstijfheid – logisch – geen rol meer. Ten tweede male kunnen we dus concluderen dat we zuiniger om hadden moeten springen met de stijfheid, vooral in de *niet-actieve* richting van de piëzo's.

Tabel 1. Vergelijking dominante trillingsmodes voor verschillende types lens supports.

type lens support	joystick modes			pendulum modes		
	frequentie [Hz]	verticale stijfheid	(actieve) demping	frequentie [Hz]	horizontale stijfheid	(actieve) demping
passief	107	100%	< 0,5%	270	100%	< 0,5%
SLS	94	76%	≈ 16%	181	45%	≈ 1,5%
PALM	65	37%	> 20%	170	40%	> 20%

Als gevolg van het drastische stijfheidsverlies heeft de PALM ten opzichte van de SLS, in termen van de trillingsniveau's op de lens, ondanks de toegenomen dempingsmogelijkheden nauwelijks tot enige verbetering geleid.

Conclusie

De SLS en de PALM zijn voorbeelden van het met behulp van piëzo-elektrisch materiaal realiseren van actieve demping in frames voor nauwkeurige apparatuur. Mits verstandig toegepast kan actieve demping op basis van het 'Smart Disc'-concept de nauwkeurigheid van precisie-apparatuur aanzienlijk verbeteren. In experimenten met een wafer scanner zijn lens-trillingen gereduceerd tot minder dan 25% van het oorspronkelijke niveau.

Een nadeel van het opnemen van piëzo-elektrisch materiaal in een machineframe is het onvermijdelijke verlies van stijfheid. Actieve demping staat hiermee haaks op het construc-

tieprincipe om machineframes zo stijf mogelijk te maken. Bij het ontwerpen van piëzo-mechanismen is het dan ook zaak om het stijfheidsverlies tot een minimum te beperken. Uit de stijfheidsanalyse van de actieve lens supports in de wafer scanner is gebleken dat hierbij vooral de stijfheid in de *niet-actieve* richting van het piëzo-materiaal speciale aandacht verdient.

Literatuur

- [1] Holterman, J. en T.J.A. de Vries, (2002), "Actieve demping. Een nieuw constructieprincipe?", *Mikroniek* nr. 5.
- [2] Holterman, J., (2002), "Vibration Control of High-precision Machines with Active Structural Elements", proefschrift, Universiteit Twente, Enschede.
- [3] Van den Elzen, S.A., (2001), "Design of a Smart Lens Support with Two Active Degrees of Freedom", afstudeerverslag, Universiteit Twente, Enschede.

Auteursnoot

Het 'Smart Disc'-project (1998-2004) is uitgevoerd binnen de vakgroep Regeltechniek aan de Universiteit Twente en is mede mogelijk gemaakt dankzij financiële ondersteuning door het ministerie van Economische Zaken in het kader van het Innovatiegerichte Onderzoeksprogramma (IOP) Precisietechnologie, onder de noemer 'Intelligente structuurelementen (Smart Disc)'.

De PALM-experimenten zijn mede mogelijk gemaakt door Frank Auer en Stefan van den Elzen. Dank daarvoor.

Informatie

www.senternovem.nl/iopprecisietechnologie
j.holterman@imotec.nl