

# Smart Disc

Actieve compensatie van vervormingen

J. Holterman, T.J.A. de Vries, M.P. Koster

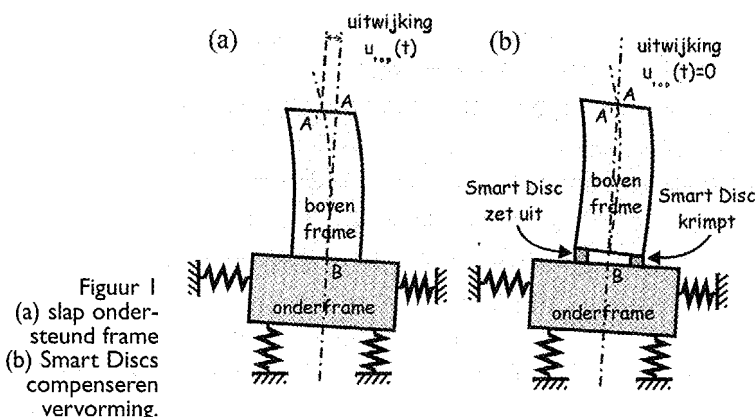
Hoge nauwkeurigheid is een belangrijk aspect bij hedendaagse hightech productiemachines. Onder invloed van in- en uitwendig optredende krachten vervormt het machineframe, waardoor nauwkeurigheid verloren gaat. Wanneer een machine nauwkeurig en ook snel moet opereren, dient een ontwerp met actieve elementen te worden overwogen. Aan de Universiteit Twente, bij het Drebbeel Instituut, wordt gewerkt aan de ontwikkeling van zo'n actief element: de Smart Disc.

Een machineframe heeft twee taken. Ten eerste fungeert het frame als meetreferentie bij het positioneren van bewegende delen in de machine. Ten tweede moet het frame krachten doorleiden. Deze krachten kunnen er voor zorgen dat het frame vervormt. Als gevolg hiervan kan het frame de eerste taak niet altijd goed vervullen. Zeker nu aan machines voortdurend hogere nauwkeurigheidseisen worden gesteld, wordt het steeds moeilijker de twee taken van het frame te combineren. De bedoeling van 'Smart Disc' is nu dit dilemma te doorbreken. Een Smart Disc kan men zich het beste voorstellen als een actief constructie-element met een negatieve stijfheid: onder invloed van een drukkracht zet het uit en, omgekeerd, wanneer het een trekkracht ondervindt wordt het dunner. Dit tegendraadse gedrag kan gerealiseerd worden door een piëzo-elektrische sensor, een piëzo-elektrische actuator en de juiste regelelek-

tronica in één behuizing te integreren. Door nu op geschikte plaatsen in een machineframe Smart Discs in te bouwen, kunnen elastische vervormingen van het frame worden gecompenseerd. Op deze manier kan in theorie een schijnbaar volkomen stijf frame worden gerealiseerd.

## Probleemschets

Om een indruk te krijgen van de haalbaarheid van het op Smart Discs gebaseerde 'actieve dempingsconcept' beschouwen we een frame dat model staat voor een brede klasse van machines, zoals elektronenmicroscopen, wafersteppers en telescopen. Deze nauwkeurige apparaten worden doorgaans geplaatst op een zwaar, slaggeveerd onderframe dat trillingen vanuit de buitenwereld absorbeert. De grote massa en de lage stijfheid vormen samen een filter dat slechts zeer laagfrequente bewegingen doorlaat (zo'n 10 Hz en lager). Maar ook al zijn de bewegingen laagfrequent, de bijbehorende versnellingskrachten zullen het frame toch enigszins vervormen; zie figuur 1a. Tot dusver was de invloed van dergelijke laagfrequente vervormingen van het frame slechts beperkt. Maar voor de toepassingen die we hier beschouwen kunnen ook deze vervormingen, enkele tientallen nanometers, niet meer worden verwaarloosd. Om dit probleem op te lossen zou men enerzijds kunnen overwegen de band-



Figuur 1  
(a) slap ondersteund frame  
(b) Smart Discs compenseren vervorming.

breedte van het mechanische laagdoorlaatfilter (het onderframe) verder te verkleinen en anderszins kan men proberen nóg stijvere frames te ontwerpen. Beide oplossingen zijn gebaseerd op het optimaal ontwerp van passieve constructies, maar we veronderstellen hier dat beide oplossingen niet meer toereikend zijn. In dat geval dient men een ontwerp met actieve elementen, bijvoorbeeld Smart Discs, te overwegen.

### Smart Disc concept

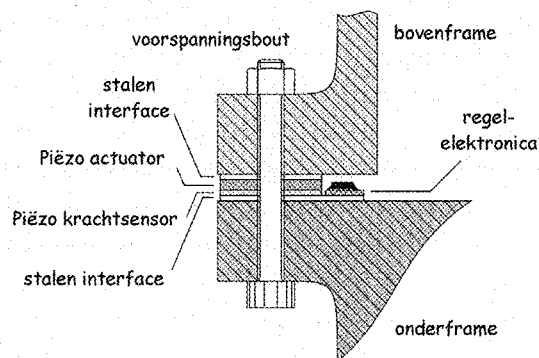
Het 'Smart Disc concept' is gebaseerd op de aanname dat voor een goede werking van de beschouwde machine niet de vervorming van het gehele frame (zwaar onderframe plus 'slap' bovenframe) van belang is. Het gaat slechts om de onderlinge positie van bepaalde punten: A en B in figuur 1. Het probleem is dat A' niet meer overeenkomt met de gewenste positie A, loodrecht boven B. De 'actieve' oplossing hiervoor is geschetst in figuur 1b. In deze tweedimensionale weergave is het bovenframe met twee Smart Discs verbonden aan het onderframe. In een driedimensionale configuratie zouden drie Smart Discs nodig zijn.

In essentie ziet het Smart Disc concept er als volgt uit. De piëzo-elektrische actuatoren van de Smart Discs kunnen de vervorming van het bovenframe compenseren door dit ten opzichte van het onderframe te roteren. Deze rotatie kan worden gerealiseerd door de Smart Discs op een geschikte manier te laten krimpen of juist te laten uitzetten. De gewenste rotatie hangt af van de uitwijking  $u_{top}$  van het frame. Vaak is het niet wenselijk of zelfs onmogelijk om deze uitwijking direct te meten. De uitwijking moet dan geschat worden aan de hand van metingen elders in het frame.

Indien, omwille van de eenvoud, de voorkeur uitgaat naar één enkel geïntegreerd constructie-element, dan dient de uitwijking  $u_{top}$  te worden geschat met behulp van sensoren in de Smart Discs. Door alleen de laagste trillingsmode van het frame te beschouwen kan de doorbuiging van het frame worden afgeleid uit de kracht die

het bovenframe uitoefent op het onderframe. Hiertoe dienen de Smart Discs te zijn uitgerust met kennis van de machine waarin ze zijn opgenomen. Alleen in dat geval kan de regel-elektronica aan boord van de Smart Disc de juiste hoeveelheid uitzetting of samentrekking bepalen.

Een mogelijke uitvoering van de voornaamste drie geïntegreerde onderdelen in een Smart Disc (piëzo-elektrische sensor, piëzo-elektrische actuator, regelelektronica) is weergegeven in figuur 2.



Figuur 2. Mogelijke uitvoering van de Smart Disc.

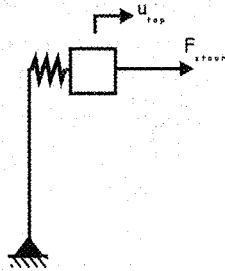
### Experiment

Het Smart Disc concept voor de hier beschouwde klasse van systemen is gebaseerd op een rotatie van het bovenframe, met als doel het dempen van een uitwijking van de bovenkant van het frame. Om de haalbaarheid van dit actieve dempingsconcept in praktijk te testen, kan, zoals hierna wordt uitgelegd, worden volstaan met een opstelling waarin slechts één prototype Smart Disc voorkomt.

### Stoorkracht op het frame

Het grootste deel van de uitwijking van de bovenkant van het frame  $u_{top}$  in figuur 1 is een gevolg van de laagste trillingsmode van het frame. Deze trillingsmode kan worden benaderd met een model bestaande uit een discrete massa

en een discrete stijfheid aan de bovenkant van een massaloos, oneindig stijf frame; zie figuur 3. Op deze manier wordt slechts één eigenfrequentie van het bovenframe gemodelleerd: de laagste.

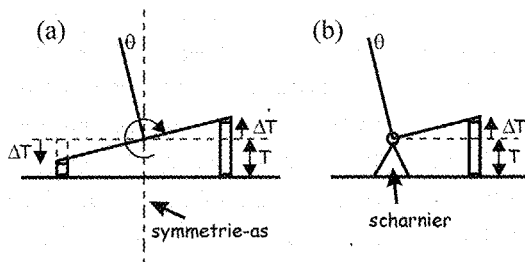


Figuur 3. Model van een 'slap' frame dat vervormd wordt door een stoorkracht aan de bovenkant.

Voor het aldus gemodelleerde frame geldt dat trillingen van de 'vaste wereld' dezelfde soort plaatsafwijkingen veroorzaken als een stoorkracht die aan de bovenkant van het frame aangrijpt. Om die reden kan, om de haalbaarheid van het Smart Disc concept in praktijk te testen, gebruik worden gemaakt van een frame dat niet vervormt door trillingen vanuit de vaste wereld, maar dat vervormt onder invloed van een stoorkracht aan de bovenkant.

**Voorgeschreven draaipunt**

De uitwijking van de bovenkant van het bovenframe kan worden verkleind of zelfs geheel worden gecompenseerd door een rotatie van de onderkant van het frame; zie figuur 1b. De rotatie van het frame kan gerealiseerd worden door de twee Smart Discs op een geschikte manier te laten uitzetten of samentrekken.

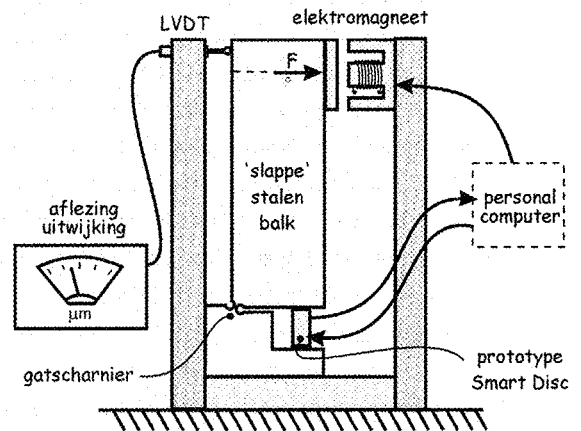


figuur 4. (a) symmetrie in de opstelling (b) één Smart Disc in plaats van twee.

Om het frame, onafhankelijk van de benodigde rotatie, op een constante gemiddelde hoogte te houden, moet de diktevariatie van de twee Smart Discs even groot zijn. In dat geval kan een fictief draaipunt halverwege de twee Smart Discs worden gedefinieerd; zie figuur 4a. Om de haalbaarheid van het Smart Disc concept in praktijk te testen kan daarom net zo goed een fysiek rotatiepunt worden geconstrueerd, zodat er slechts één prototype Smart Disc in de proefopstelling hoeft te worden opgenomen; zie figuur 4b.

**Proefopstelling**

Met de voorgaande overwegingen in het achterhoofd is de proefopstelling ontworpen; zie figuur 5. Het machineframe is gemodelleerd



Figuur 5. Schematische weergave van de proefopstelling.

door een eenvoudige stalen balk met een beperkte stijfheid (afmetingen: 200 x 50 x 10 mm<sup>3</sup>). Het gatscharnier in de linkerbenedenhoek van het frame staat slechts een kleine rotatie toe. Omdat het scharnier vrij van speling en hysteresis is, vormt het werkelijk een vast, voorgeschreven draaipunt van het frame. De stoorkracht wordt gegenereerd door een elektromagneet, gemonteerd op een aparte balk.

Met de elektromagneet kan de grootte van stroomkracht eenvoudig worden bepaald. Om de werking van de Smart Disc te kunnen evalueren dient uiteraard de verplaatsing van de bovenkant van het frame gemeten te worden.

### Quasi-statisch piëzo model

De dikte van de piëzo-elektrische laagjes waaruit de piëzo mono-stacks zijn opgebouwd bedraagt 20 µm. Afgeleid kan worden dat de laagst mogelijke eigenfrequentie van de piëzo-stapeltjes boven de 50 kHz ligt. Net als de hogere orde modes van de stalen balk ligt deze dus ruim buiten bandbreedte van ons experiment. Het dynamisch gedrag van het piëzomateriaal is daarom verwaarloosd en er is gebruik gemaakt van een quasi-statisch model [2]. Een piëzo mono-stack met  $d_{33}$ -koppeling (dat wil zeggen dat de richting waarin de piëzo uitzet dezelfde is als de richting waarin het elektrisch veld wordt aangelegd) kan worden beschreven door middel van de volgende vergelijking:

$$\begin{bmatrix} t_h \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{mech} & d \\ d & C_{elek} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_3 \\ U \end{bmatrix}$$

waarin:

$t_h$  : uitzetting van de piëzo [m],

$Q$  : lading op de piëzo [C],

$F_3$  : kracht op de piëzo [N],

$U$  : elektrische spanning over de piëzo [V],

en

$C_{mech}$  : mechanische compliantie (inverse stijfheid) van de piëzo [m/N],

$C_{elek}$  : elektrische capaciteit van de piëzo [C/V],

$d$  : piëzo-elektrische ladingsconstante [C/N] [m/V].

Hiertoe is een verplaatsingsopnemer (LVDT, linear variable differential transformer) gemonteerd op een aparte balk. Deze evaluatiemeting wordt niet gebruikt voor de regelactie van de Smart Disc actuator.

We zien dus dat een aangebrachte kracht op de piëzo vanwege de beperkte stijfheid  $C_{mech}^{-1}$  leidt tot een dikteverandering van de piëzo.

Daarnaast leidt diezelfde kracht ertoe dat, vanwege de piëzo-elektrische koppeling  $d$ , een elektrische lading op de piëzo wordt opgebouwd. Vanwege de elektrische capaciteit  $C_{elek}$  van de piëzo kan een aangebrachte elektrische spanning er natuurlijk ook voor zorgen dat een zekere elektrische lading wordt opgebouwd.

Maar, opnieuw vanwege de piëzo-elektrische koppeling  $d$ , heeft een elektrische spanning ook een dikteverandering van de piëzo tot gevolg.

Bijgevolg kan een piëzo zowel als krachtsensor maar ook als positieactuator gebruikt worden.

In het ene geval levert de piëzo een spanning evenredig met de uitgeoefende kracht, in het andere geval is de uitzetting evenredig met de aangelegde spanning. De maximale dikteverandering van de gebruikte piëzo mono-stacks, bij maximaal toelaatbare elektrische spanning, is 0,5%.

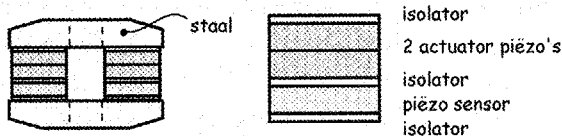
### Prototype

In de proefopstelling is gebruik gemaakt van een prototype van de Smart Disc, waarin een PC de taak van de regelelektronica vervult. Dit prototype bestaat dus slechts uit een sensor en een actuator. Voor zowel de actuator als de sensor is gebruik gemaakt van piëzo-elektrisch materiaal dat bekend staat onder de naam CMA

(ceramic multilayer actuator; zie bijvoorbeeld [4]), in het vervolg 'piëzo mono-stacks' genoemd.

Het Smart Disc prototype is opgebouwd uit twee stapeltjes piëzomateriaal (hoogte: 8.4 mm), die beide zijn opgebouwd uit drie piëzo mono-stacks (afmetingen: 772 mm<sup>3</sup>; zie figuur 6).

Twee van de mono-stacks worden gebruikt als actuator. De derde mono-stack doet dienst als sensor. Hoewel het in theorie mogelijk is om slechts één piëzo mono-stack te gebruiken om zowel te actueren als te meten, zal in praktijk de te meten spanning (ca. 1.5 V) te veel verstoord worden door de spanning over de actuator (maximaal ca. 60 V).



Figuur 6. Prototype Smart Disc (links), opgebouwd uit twee stapeltjes piëzo (rechts)

### Krachtsensor

Wanneer een piëzo gebruikt wordt als krachtsensor zijn er twee mogelijkheden. Ten eerste kan de piëzo elektrisch worden kortgesloten. In dat geval is de stroom door de kortsluiting een maat voor de verandering van de aangebrachte kracht in de tijd. De piëzo kan dan beschouwd worden als een stroomgenerator. Wanneer de piëzo niet wordt kortgesloten, blijft de lading op de piëzo juist behouden. De spanning over de piëzo is dan een maat voor de aangebrachte kracht. Omdat in het tweede geval het gemeten signaal niet geïntegreerd hoeft te worden om de gewenste informatie te krijgen, is de piëzo-elektrische krachtsensor ontworpen als spanningsgenerator.

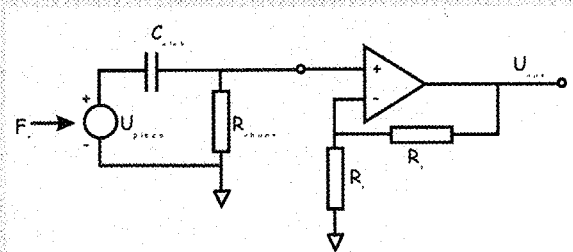
### Krachtsensor

Wanneer een piëzo gebruikt wordt als spanningsgenerator is de elektrische weerstand tussen de twee aansluitpunten van de piëzo vrijwel oneindig groot. Als gevolg hiervan kan de initiële lading op de piëzo niet weg lekken. Bovendien kan de lading op de piëzo, door elektrische storing, drift vertonen. Om deze problemen te voorkomen is parallel aan de piëzo een weerstand met een zekere eindige waarde opgenomen ( $R_{shunt}$  in figuur 7). Daarnaast wordt, in plaats van een ideale voltmeter, een versterker met een vrijwel oneindige ingangsweerstand gebruikt. Het elektrisch schema van de krachtsensor ziet er dan uit als geschetst in figuur 7. De piëzo is hier weergegeven als een spanningsbron in serie met een condensator. Het aldus verkregen netwerk, met als overdrachtsfunctie

$$U_{out}(j\omega) = K \frac{j\omega}{j\omega + \omega_0} U_{piezo}(j\omega)$$

is dus in feite een hoogdoorlaatfilter met versterking

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Figuur 7. Krachtsensor.

Een belangrijk gevolg hiervan is dat de krachtsensor niet werkt beneden de afsnijfrequentie

$$\omega_0 = (C_{elek} R_{shunt})^{-1}$$

en dus geen statische kracht kan meten. De afsnijfrequentie van de krachtsensor in de proefopstelling van figuur 5 bedroeg 0,02 Hz.

**Positie-actuator**

Wanneer een piëzo gebruikt wordt als positie-actuator zijn er opnieuw twee mogelijkheden. Vanwege zijn eenvoud wordt vaak gekozen voor een ontwerp waarin de elektrische spanning over de piëzo geregeld wordt. De uitzetting van een mechanisch onbelaste piëzo varieert dan lineair met de aangebrachte spanning. Spanningssturing kent echter een belangrijk nadeel, te weten hysteresis. Bij ladingssturing, de tweede mogelijkheid, doet dit probleem zich niet voor [3]. In dit geval varieert de uitzetting van de piëzo lineair met de aangebrachte elektrische lading. Hoewel de hiervoor benodigde versterker complexer is, is in de proefopstelling toch gebruik gemaakt van een ladingsgestuurde positie-actuator.

**Ontwerp regelaar**

Wanneer de dynamica in de proefopstelling wordt verwaarloosd, kan de opstelling gemodelleerd worden met behulp van vier constante overdrachten ( $k_1 \dots k_4$ ):

$$\begin{bmatrix} u_{top} \\ U_{piezo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ext} \\ U_{act} \end{bmatrix}$$

waarin

- $u_{top}$  : de te compenseren uitwijking [m],
  - $U_{piezo}$  : spanning over de krachtsensor [V],
  - $F_{ext}$  : stoorkracht bovenin het frame [N],
  - $U_{act}$  : spanning over de positie-actuator [V],
- en

- $k_1$  : totale compliantie in de opstelling,  $0,467 \cdot 10^{-6}$  [m/N],
- $k_2$  : piëzo-actuator constante,  $-6,22 \cdot 10^{-6}$  [m/V],
- $k_3$  : piëzosensor constante, 0,15 [V/N],
- $k_4$  : piëzo-overspraak constante, 1,95 [-].

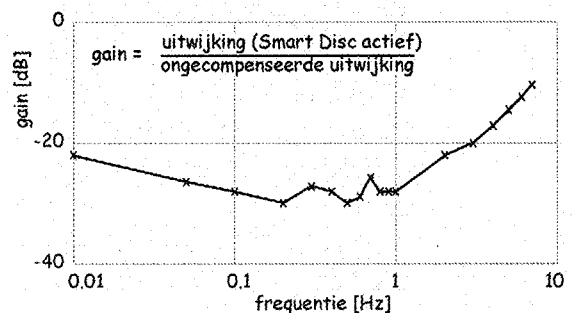
De uitwijking van de bovenkant van het frame is dus opgebouwd uit een component die het gevolg is van de stoorkracht (via  $k_1$ ) en een component (via  $k_2$ ) die het gevolg is van de aangebrachte elektrische spanning over de Smart

Disc actuator. Op dezelfde manier is ook de sensorspanning opgebouwd uit een component veroorzaakt door de stoorkracht (via  $k_3$ ) en een component veroorzaakt door de actuatorspanning (via  $k_4$ ). De waarden voor de vier versterkingsfactoren in de proefopstelling zijn experimenteel bepaald.

Op basis van het bovengenoemde statische model is een eenvoudige proportionele regelaar ontworpen. De nadruk in de experimenten lag namelijk niet op het regelaarontwerp, maar op de haalbaarheidstest met betrekking tot het Smart Disc concept.

**Resultaten**

Met de proefopstelling zoals die in het voorgaande beschreven is, zijn twee experimenten uitgevoerd. Als eerste is de dempingskarakteristiek van het Smart Disc prototype in het frequentiedomein bepaald. Hiertoe is een sinusvormige stoorkracht met een amplitude van 25 N aangebracht, waarvan de frequentie varieerde tussen 0,01 en 7 Hz. De uitwijking van de bovenkant van het frame bedroeg 12,5  $\mu$ m, zonder actieve damping door de Smart Disc. De reductie van de uitwijking die de Smart Disc leverde is weergegeven in figuur 8 (-20 dB

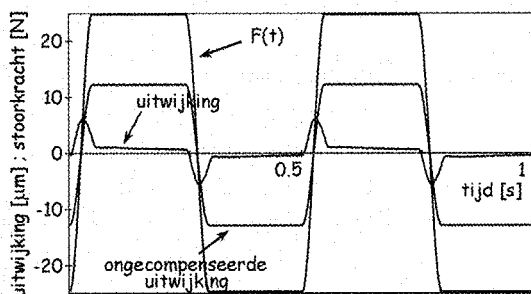


Figuur 8. Frequentiekarakteristiek actieve damping

betekent een factor 10 damping, -40 dB betekent een factor 100 damping).

In het tweede experiment is de responsie van de proefopstelling in het tijddomein geëvalueerd. Ook hier is het resultaat van de actieve damping vergeleken met de responsie van de

opstelling zonder actieve demping. De aangebrachte kracht, een blokgolf met een frequentie van 2 Hz, staat model voor bewegingen binnen in een machineframe. Deze zouden niet alleen laagfrequente, maar ook hoogfrequente verstoringen tot gevolg kunnen hebben. Uit de resultaten (figuur 9) kan opnieuw worden afgeleid dat de Smart Disc in staat is laagfrequente verstoringen zeer goed te compenseren. Hoogfrequente verstoringen worden echter, zoals verwacht, minder goed onderdrukt.



Figuur 9. Responsie op een blokvormige stoorkracht.

### Conclusie

Om de werking van het Smart Disc concept in praktijk te testen, kan in principe worden volstaan met een opstelling waarin een stoorkracht aangrijpt aan een balk met een gatscharnier en slechts één Smart Disc, zoals weergegeven in figuur 5.

Uit experimenten met de proefopstelling blijkt dat de Smart Disc in staat is uitwijkingen boven in het frame te dempen. Binnen de in deze experimenten beoogde bandbreedte (0.1 tot 10 Hz) kan de Smart Disc een demping realiseren van 10 tot 30 dB, hetgeen overeenkomt met een reductie van 3 tot 30 keer. In de praktijk komt het erop neer dat ongewenste vervormingen van een machineframe gereduceerd kunnen worden tot enkele nanometers.

Deze resultaten wijzen uit dat het op Smart Discs gebaseerde actieve dempingconcept in praktijk haalbaar is. In aansluiting op de experimenten met de tweedimensionale proefopstel-

ling zal het Smart Disc concept weldra in een driedimensionale opstelling worden getest.

### Literatuur

- [1] Geraeds, P.M.J., *Active damping of low frequent vibrations in non-infinite stiff frames with a Smart Disc (an experiment design)*, afstudeerverslag, rapport nr. 029R96, (1996), Laboratorium voor Regeltechniek, Faculteit Elektrotechniek, Universiteit Twente, Enschede.
- [2] Geraeds, P.M.J., *Overview of piezoelectric ceramics*, rapport nr. 034R96, (1996), Laboratorium voor Regeltechniek, Faculteit Elektrotechniek, Universiteit Twente, Enschede.
- [3] Main, J.A., E. Garcia, D.V. Newton, *Precision Position Control of Piezoelectric Actuators Using Charge Feedback*, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 18(1995)5 p. 1068-1073.
- [4] Miu, D.K., *Mechatronics, Electromechanics and Contromechanics*, Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, University of California, Los Angeles, (1993), Springer Verlag New York, USA.

### Auteursnoot

De dank van de auteurs gaat uit naar Pascal Geraeds; het artikel is grotendeels gebaseerd op zijn afstudeerwerk [1].

Dit artikel is een bewerkte versie van Holterman, J., T.J.A. de Vries, M.P. Koster, 'Experiment to evaluate the feasibility of the Smart Disc concept'. In: J. Adolfsson and J. Karlsén (editors), *Proc. 6<sup>th</sup> UK Mechatronics Forum International Conference Mechatronics '98*, Skövde, Sweden, (1998) p. 217-222, Elsevier Science Ltd., ISBN: 0-08-043339-1.

Voor meer informatie:

Jan Holterman, Cornelis J. Drebbel Instituut voor Systems Engineering, EL-RT, Universiteit Twente, Postbus 217, 7500 AE Enschede.

Tel.: 053-489 2788, Email: j.holterman@el.utwente.nl