

Introducing SpectroCam™

The multispectral imaging camera from Ocean Optics

The SpectroCam™ Multispectral Imaging (MSI) camera offers a cutting edge, flexible platform for MSI applications. The SpectroCam cameras are available in full turn-key solutions. We can also customize the SpectroCam for integration into OEM products that utilise MSI. Available with multiple sensor options and your choice of wide and narrow band pass filters, SpectroCam is the perfect solution for a wide array of MSI applications.



Applications

- » Atmospheric and environmental imaging
- » Medical imaging systems for diagnostics
- » Medical imaging systems for surgery
- » Imaging systems for authentication of art work
- » Multispectral Imaging Fluorescence Microscopy
- » Drug discovery applications

Features

- » Colour wheel with 8 removable filters (filters are available from stock or can be custom made)
- » 24 images per second (3x 8 filters)
- » Customised housing for mechanical and environmental requirements
- » Multiple camera interfaces / software packages
- » Proof of concept prototypes to high volume manufacturing

Contact us today for more information about this new multispectral imaging camera or go to www.oceanoptics.eu/spectrocam for more information.



Ocean Optics BV www.oceanoptics.eu
Tel: +31 26 3190500 info@oceanoptics.eu

Special 10% Discount on Accessories*

Let us know the reference on this coupon and get a 10% discount on all Ocean Optics accessories ordered before December 31, 2011.

FOTONICA2011



*Only on accessories by Ocean Optics



Slimme optische systemen compenseren voor dynamische verstoringen

Rufus Fraanje • Michel Verhaegen • DCSC • TU Delft

Hoge resolutie en sterk contrast zijn belangrijke design drivers in de ontwikkeling van hoogwaardige optische systemen, zoals lithografie machines, microscopen en telescopen. Dankzij voortdurende verbeteringen in de fabricage van lenzen, spiegels, bevestigings- en positioneermechanismen, is het tegenwoordig mogelijk om optische systemen te maken waarvan de resolutie en het contrast vrijwel alleen beperkt worden door de diffractie limiet. Echter, de omgeving waarin de optiek wordt geplaatst is vaak onderhevig aan allerlei dynamische verstoringen, zoals mechanische trillingen waardoor lenzen en spiegels ten opzichte van elkaar gaan bewegen, of temperatuur en druk variaties in het medium waar de lichtstralen door propageren waardoor de brekingsindex van het medium varieert en de lichtstralen steeds anders worden afgebogen. In slimme optische systemen worden deze dynamische verstoringen van de lichtstralen gemeten, en vervolgens gecompenseerd met actieve optische componenten, welke kunnen bestaan uit bijvoorbeeld vervormbare spiegels of vloeibare kristal schermen (LCD's). Omdat er gebruik wordt gemaakt van actieve optische componenten, worden deze slimme optische systemen ook wel adaptieve optische systemen genoemd.

In dit artikel zullen we allereerst ingaan op het principe van slimme optische systemen, waarna we eentwee resultaten zullen behandelen die behaald zijn binnen de onderzoeksgroep onder leiding van Prof. Michel Verhaegen aan de TU Delft.

Het principe van Adaptieve Optica

Adaptieve Optica werd in de jaren 80 geïntroduceerd in op aarde gebaseerde telescopen voor het compenseren van verstoringen veroorzaakt door turbulentie. Deze turbulentie zorgt voor variaties in de brekingsindex van lucht in de atmosfeer en is met name sterk op zo'n 10 km waar de zogenaamde jet-stream heerst. De meeste telescopen waarin gebruik wordt gemaakt van adaptieve optica systemen zijn afgesteld om de turbulentie van deze laag te compenseren. Gewoonlijk is de dikte van de jet-stream laag beperkt en zijn de brekingsindex variaties niet te groot, zodat we de laag kunnen beschouwen als oneindig dun en de voortplanting van de lichtstralen in de laag kunnen verwaarlozen¹. Deze laag noemen we in het vervolg de verstoringslaag.

Wanneer er nu een variatie in de brekingsindex ontstaat op een bepaald punt in de verstoringslaag, dan worden de lichtstralen door dat punt afgebogen in een bepaalde richting. Al naar gelang de sterkte van de turbulentie, zal de afbuiging voor elk punt in de verstoringslaag weer anders zijn. De diameter r_0 van de schijf waarover de standaarddeviatie van de variatie in de afbuiging 1rad is, wordt de coherentie lengte of Fried parameter, genoemd. Figuur 1 laat zien hoe de afbeelding van een punt object verstoord wordt door turbulentie met verschillende coherentie lengtes in vergelijking met de diffractie gelimiteerde waarneming. Wanneer de coherentie lengte kleiner is dan de diameter van de telescoop, wordt de observatie vooral beperkt door de turbulente verstoring. Met adaptieve optica wordt de verstoring gecompenseerd, zodat de coherentie lengte van het gecompenseerde licht in de orde grootte van de diameter van de telescoop ligt en de observatie weer gelimiteerd wordt door de diffractie limiet (vergelijk de linker en rechter afbeelding in Figuur 1).

¹ In situaties wanneer deze aanname niet voldoende nauwkeurig is, kan de laag beschouwd worden als zijnde samengesteld uit een aantal oneindig dunne lagen, waarbij voor elk van de lagen de verstoring afzonderlijk wordt gecompenseerd.



Rufus Fraanje
Email: p.r.fraanje@tudelft.nl



Michel Verhaegen
Email: m.verhaegen@tudelft.nl

Contact gegevens:
Delft Center for Systems and Control,
Faculty 3ME, TU Delft
Mekelweg 2
2628 CD, Delft
Telefoon: +31 (0)15 27 85189



Diffactie gelimiteerd

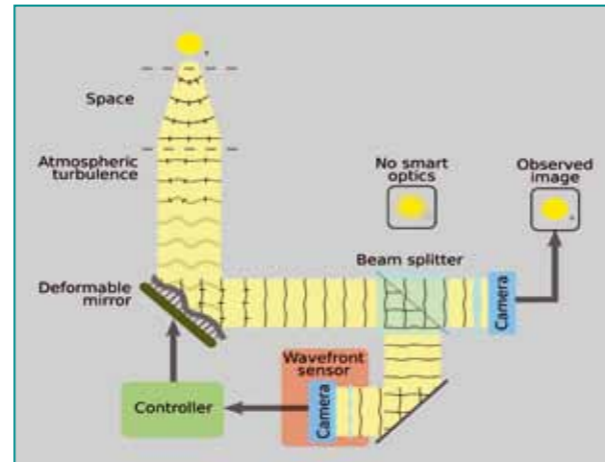
Turbulentie gelimiteerd, $r_0=0.40\text{m}$ Turbulentie gelimiteerd, $r_0=2.0\text{m}$

Figuur 1: Afbeeldingen van een punt object door een 2m telescoop: alleen gelimiteerd door diffractie (links), en tevens door atmosferische turbulentie met een coherentie lengte van $r_0=0.40\text{m}$ (midden) en $r_0=2.0\text{m}$ (rechts).

De vervormbare spiegel in het adaptieve optica systeem van de telescoop wordt vervolgens in het afbeeldingsvlak van de verstoringsslaag geplaatst, zodat elk punt in deze laag wordt afgebeeld in een punt op de vervormbare spiegel. Dat wil zeggen dat de verstoringsslaag en de vervormbare spiegel optisch geconjugeerd zijn. Wanneer op een bepaald punt in de verstoringsslaag de lichtstralen worden afgebogen in een bepaalde richting, dan kan met de vervormbare spiegel in het overeenkomstige afbeeldingspunt een helling worden gemaakt, zodat de lichtstralen weer terug worden gebogen en de verstoring wordt gecompenseerd, zie Figuur 2. In de praktijk zal de brekingsindex een glad verloop hebben, zodat de vervormbare spiegel met een glad verloop in de helling kan compenseren voor de verstoring.

Om dit verloop in helling aan het spiegelende oppervlak op te kunnen leggen, moet de spiegel een voldoende groot aantal vrijheidsgraden hebben en een voldoende grote buiging kunnen maken. En omdat de variaties in de brekingsindex voortdurend veranderen in de tijd, zal de vervormbare spiegel dus ook voldoende snel van vorm moeten kunnen veranderen. Een goede vuistregel voor het aantal actuators wordt gegeven door het aantal schijven, elk met een diameter gelijk aan de coherentie lengte van de verstoring, waarmee de volledige apertuur van de telescoop wordt bedekt. Eenvoudige vervormbare spiegels bestaan al snel uit enkele tientallen actuators en hebben meestal een insteltijd (settling time) in de orde van 1ms. Voor de Europese extreem grote telescoop (E-ELT) met een apertuur van zo'n 40m die momenteel wordt ontwikkeld, is de verwachting dat de vervormbare spiegel zal bestaan uit enkele duizenden tot tien duizenden actuators en de insteltijd minder dan 1ms.

Om de vervormbare spiegel aan te kunnen sturen, is het nodig om te weten hoe de lichtstralen worden afgebogen in de verstoringsslaag. Dit kunnen we doen, door middel van een golffront (wavefront) sensor. Er zijn meerdere soorten golffront sensoren, maar de meest gebruikte is de zogenaamde Shack Hartmann sensor, die bestaat uit een array van een groot aantal lensjes en een camera in het brandpunt van de lensjes, zie Figuur 2.



Figuur 2: Schematische weergave van de compensatie van atmosferische verstoringen door middel van adaptieve optica, voor de eenvoud is de optiek van de telescoop weggelaten.

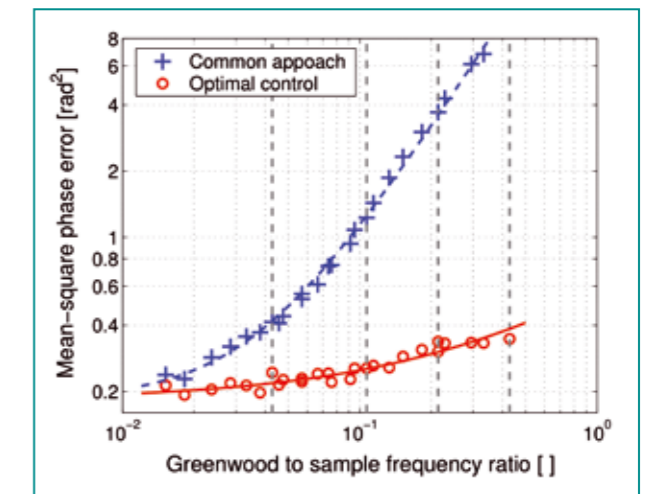
Een deel van het waargenomen licht wordt door middel van een bundelscheider (beamsplitter) omgeleid naar de Shack Hartmann sensor, welke zodanig is gepositioneerd zodat het array van lensjes optisch geconjugeerd is met de vervormbare spiegel en de verstoringsslaag. Stel nu voor, dat er geen verstoring is. Omdat het astronomische object waar we naar kijken met de telescoop op zeer grote afstand staat, zullen de lichtstralen afkomstig uit elk punt van het object vrijwel allemaal parallel lopen, zodat elke lens een zelfde afbeelding zal maken van het object. Dit is evenals de waarneming van een object op grote afstand die nagenoeg niet veranderd als je een stap opzij zet. Stel nu, dat in een bepaald gebied in de verstoringsslaag, welke wordt afgebeeld op een lensje van de golffront sensor, de lichtstralen allemaal in één richting worden afgebogen, dan zal dit resulteren in een verschuiving van het beeld van het object. Deze verschuiving wordt waargenomen met de camera, op basis waarvan de richting van de lichtstralen kan worden berekend. Het vlak loodrecht op de lichtstralen wordt het golffront genoemd, vandaar de naam golffront sensor. In de praktijk zullen de lichtstralen die op een lensje vallen niet allemaal worden afgebogen in precies dezelfde richting. Maar als het verloop van de brekingsindex in de verstoringsslaag voldoende glad is, en de lensjes klein genoeg zijn, kan aan deze voorwaarde bij benadering worden voldaan. Analooq aan de vuistregel voor het aantal actuators,

wordt een goede schatting van het aantal benodigde lensjes gegeven door het aantal schijven, elk met een diameter gelijk aan de coherentie lengte van de verstoring, waarmee de volledige apertuur van de telescoop wordt bedekt. In dat geval zal de afbeelding per lensje voornamelijk gelimiteerd zijn door diffractie. Het aantal lensjes in de golffront sensor is dus meestal in dezelfde orde van grootte als het aantal actuators van de vervormbare spiegel, en de snelheid van de camera is vergelijkbaar met de insteltijd van de vervormbare spiegel. Op basis van de gemeten variaties in de richting van de lichtstralen berekent de regelaar vervolgens hoe de actuators aangestuurd moeten worden, zodat de verstoring wordt gecompenseerd. In de terugkoppelregelsconfiguratie, zoals weergegeven in Figuur 1, wordt vaak gekozen voor een integrerende regelaar, die het stuursignaal voor de actuators voortdurend corrigeert op basis van de laatst gemeten resterende verstoring. Omdat de golffront sensor de hellingen bepaalt van het golffront, en het stuursignaal voor de vervormbare spiegel vrijwel dezelfde vorm heeft als de compensatie van het golffront, zal de regelaar het golffront moeten reconstrueren uit de gemeten hellingen. Deze stap wordt de golffront reconstructie genoemd, en komt, bij verwaarlozing van meetfouten als gevolg van ruis, neer op een spatiale integratie. Een goede introductie in adaptieve optica voor telescopen is de tutorial van A. Tokovinin [1], met tevens verwijzingen naar verdere relevante literatuur.

Voorspellend regelen

Ondanks zijn eenvoud, heeft de integrerende regelaar als nadeel dat deze altijd achter de feiten aanloopt: het stuursignaal voor de actuators brengt de vervormbare spiegel in de vorm die de laatst gemeten verstoring zou hebben gecompenseerd, echter in de tijd na de meting, de berekening van het stuursignaal en de aansturing van de vervormbare spiegel is de verstoring alweer veranderd. Voor dit probleem is enige jaren terug een oplossing voorgesteld in een baanbrekende promotie studie door K. Hinnen onder begeleiding van Prof. Verhaegen en in samenwerking met TNO. K. Hinnen heeft rekentechnieken ontwikkeld die modellen bepalen uit metingen ("data driven") van de golffront sensor op basis waarvan het golffront in de tijd voorspeld kan worden. Deze modellen zijn vervolgens gebruikt in voorspellende regelaars [2]. De methode is geverifieerd met een adaptieve optica test opstelling bij TNO. Figuur 3 laat zien hoe de prestatie van de optimale data driven, voorspellende, regelaar zich verhoudt tot die van de klassieke, integrerende, regelaar als functie van de verhouding tussen de zogenaamde Greenwoodfrequentie en de bemonster frequentie. De Greenwood frequentie is een maat voor de bandbreedte van de verstoring, ofwel de snelheid van de variatie in de brekingsindex. In de typische situatie dat de bemonster

frequentie 10 keer groter is dan de Greenwood frequentie, zien we dat de prestatie van de voorspellende regelaar ongeveer een factor 5 beter is dan die van de integrerende regelaar, en deze verbetering neemt nog verder toe bij sneller variërende verstoringen. Een bijkomend voordeel van de benadering in [2] is dat de regelaar volledig wordt bepaald op basis van gemeten data, zodat het niet nodig is om modellen af te leiden aan de hand van fysische wetmatigheden en deze vervolgens te calibreren, hetgeen erg lastig en tijdrovend kan zijn. Huidig onderzoek is gericht op de ontwikkeling van rekenkundig efficiënte regelaars die geïmplementeerd kunnen worden op een groot aantal parallele processoren, welke toegepast kunnen worden in adaptieve optica systemen met een zeer groot aantal vrijheidsgraden zoals voor de E-ELT.



Figuur 3: Gemiddelde van het kwadraat van het golffront residu als functie van de verhouding tussen de Greenwood frequentie en de bemonster frequentie van de regelaar voor de integrerende regelaar (blauwe curve) en de optimale regelaar gebaseerd op voorspellingen van de verstoring (rode curve) [2].

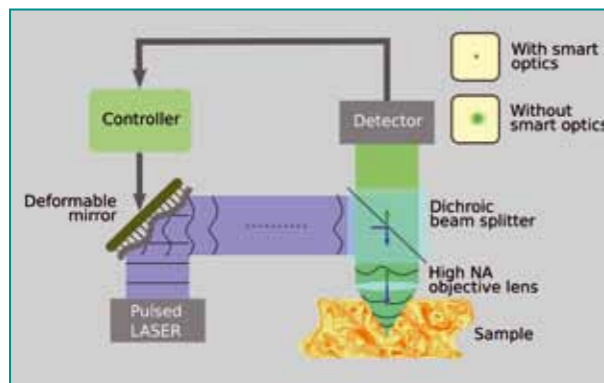
"Smart Optics Systems"

Het principe van de Adaptieve Optica kan gebruikt worden in vele optische instrumenten waarbij hoge resolutie beeldvorming bemoeilijkt wordt ten gevolge van optische verstoringen. Voorbeelden naast de astronomie zijn de lithografie, de laser beam shaping, de microscopie, en de beeldvorming op het netvlies van het oog, enz. Om de resolutie van deze optische instrumenten te verbeteren is een grootschalig onderzoeksprogramma van de Stichting Technische Wetenschappen in 2008 gestart. Het programma "SmartOptics Systems" wordt uitgevoerd onder leiding van Prof. M. Verhaegen en heeft als doel adaptieve opticasystemen te ontwikkelen voor andere toepassingen dan de astronomie. Deze schaalvergroting van de technologie wordt met name onderzocht door tijdens het ontwerp van het optische instrument de mogelijkheden te benutten van een dynamisch terugkoppelsysteem. Daardoor wordt het mogelijk een betere

balans te realiseren tussen de beeldresolutie enerzijds en de prijs/complexiteit van het instrument anderzijds. In de volgende paragraaf vatten we enige resultaten samen op het gebied van de microscopie.

Microscopie

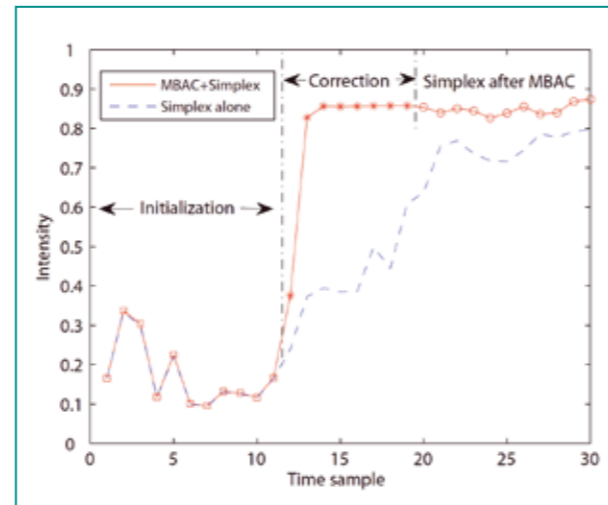
Slimme optische systemen kunnen ook gebruikt worden om de resolutie van confocale microscopen zoals een 2-foton microscoop te vergroten tijdens het (in vivo) scannen van een sample, bijvoorbeeld weefsel, op een relatief grote diepte (1µm tot 1mm). In een 2-foton microscoop wordt de lichtbundel van een gepulseerde laser gefocussed op een punt in het sample zodanig dat dit punt zal gaan fluoriseren. Dit fluorescentie licht zal worden gedetecteerd met een detector, zie Figuur 4. Omdat de resolutie van de microscoop wordt bepaald door de grootte van het focuspunt wordt er een objectief gebruikt met een grote numerieke apertuur. Echter, omdat het weefsel bestaat uit gelaagde structuren met verschillende brekingsindices, zal licht afkomstig van de laser worden afgebogen in het sample, zodat het focuspunt uitgesmeerd zal worden en de grootte niet meer volledig bepaald wordt door de diffractie limiet van de microscoop. Met een vervormbare spiegel kan het laserlicht worden voorbewerkt, zodat de afbuiging van het licht in het sample wordt gecompenseerd, ende grootte van het focuspunt, en dus het fluorescentie punt, weer beperkt zal zijn door slechts de diffractie van het licht, zoals weergegeven in Figuur 4, zie ook [3].



Figuur 4: Schematische weergave van de compensatie van verstoringen van het fluorescentie punt in 2-foton microscopie door middel van adaptieve optica.

Om te weten hoe de vervormbare spiegel aangestuurd moet worden, moet er worden bepaald hoe het licht wordt verstoord in het sample. Eén van de manieren om dit te doen, is direct op basis van het detector signaal. Wanneer het focuspunt uitgesmeerd wordt vanwege variaties in de brekingsindex in het weefsel waar niet voor gecompenseerd is, zal er minder fluorescentie licht worden gegenereerd zodat

de detector een lagere intensiteit meet. Als de vervormbare spiegel dus zodanig wordt aangestuurd zodat de intensiteit die gemeten wordt met de detector maximaal is, dan zal de verstoring dus geheel of gedeeltelijk worden gecompenseerd.



Figuur 5: Vergelijking van de model-gebaseerde (MBAC, rode curve) intensiteits maximalisatie methode met de (standaard) simplex optimalisatie (simplex, blauwe curve) [4].

Omdat confocale microscopen punt na punt afbeelden, is het belangrijk dat de vervormbare spiegel zeer snel de juiste vorm aanneemt, wil de observatie van een volledig beeld niet te lang duren.

Recent heeft promovendus H. Song, onder begeleiding van Prof. M. Verhaegen, een model-gebaseerde methode ontwikkeld waarmee verstoringen bestaande uit N vrijheidsgraden aan de hand van $N+1$ metingen per afbeeldingspunt bepaald, en vervolgens gecompenseerd, kunnen worden [4]. Figuur 5 laat de maximalisatie van de intensiteit gemeten met een detector in een confocale microscoop zien voor $N=10$ vrijheidsgraden, waarbij de model-gebaseerde methode voorgesteld in [4] wordt vergeleken met de model-vrije simplex optimalisatie methode. De grafiek laat zien dat met de model-gebaseerde methode een significante winst is te behalen in de tijd die nodig is om voor de verstoring te compenseren.

Conclusie

Slimme optische systemen zijn oorspronkelijk ontwikkeld om in telescopen voor astronomische observatie te compenseren voor verstoringen van het licht als gevolg van turbulentie in de atmosfeer, maar hebben potentie in een divers scala van toepassingen. Onderzoek is erop gericht om de toepassing van slimme optische systemen in deze toepassingen mogelijk te maken en hun werking optimaal te integreren met bestaande optische systemen. ♦

Literatuur

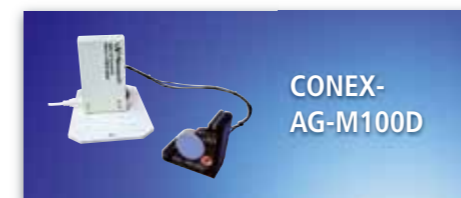
- [1] A. Tokovinin, Adaptive Optics Tutorial at CTIO, [Online, Nov. 2011] <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/intro.html>.
- [2] K. Hinnen, M. Verhaegen en N. Doelman, Exploiting the spatiotemporal correlation in adaptive optics using data-driven H2-optimal control, J. Opt. Soc. Am., 24(6):1714-1725, 2007.
- [3] T.I.M. van Werkhoven, H. C. Gerritsen, J. Antonello, R. Fraanje, M. Verhaegen en C. U. Keller, Coherence-gated phase-shifting wavefront measurements, Proc. of the 8th Int Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, Murcia, Spain, Jun.2011.
- [4] H. Song, R. Fraanje, G. Schitter, H. Kroese, G. Vdovin en M. Verhaegen, Model-based aberration correction in a closed-loop wavefront-sensor-less adaptive optics system, Optics Express, 18(23):24070-24084, 2010.

CV Fraanje

Rufus Fraanje is afgestudeerd in de elektrotechniek aan de TU Delft en gepromoveerd aan de Universiteit Twente op een proefschrift over snelle en robuuste regelmethode voor de actieve onderdrukking van geluid en trillingen in respectievelijk 1999 en 2004. Na zijn promotie heeft hij onderzoeksposities vervuld aan het Delft Center for Systems and Control (DCSC) van de TU Delft en TNO Industrie en Techniek. Momenteel is hij verbonden als postdoctoraal onderzoeker bij DCSC, waar zijn onderzoek gericht is op de regeling van optische systemen. Rufus is gast onderzoeker geweest bij INRIA te Rennes (Frankrijk), het Intitute of Sound and Vibration Research te Southampton (UK) en het Adaptive Systems Lab aan de Universiteit van California, Los Angeles (USA). Zijn onderzoeks interesses gaan uit naar de modelering en voorspelling van dynamische optische verstoringen en rekenkundig efficiënte regelingen voor grootschalige adaptieve optische systemen met toepassing op grote astronomische telescopen, lithografie systemen en microscopen.

CV Verhaegen

Michel Verhaegen received the doctoral degree in applied sciences from the Catholic University, Leuven, Belgium, in 1985. From 1985 to 1994, he has been a Research Fellow of the U.S. National Research Council (NRC) and the Dutch Academy of Arts and Sciences. In the period 1994-1999 he was an Associate Professor of the Control Laboratory, Delft University of Technology and became a full Professor with the faculty of Applied Physics, University of Twente, The Netherlands, in 1999. From 2001 on, he moved back to the University of Delft and jointly initiated the Delft Center for Systems and Control (DCSC). He held short visiting professorships at McGill, Lund, Uppsala and UCLA. His main research directions include system identification, distributed and fault tolerant control, and data driven controller design methodologies. Application areas include adaptive optics and wind energy.



Piezo Motor Innovations Designed For Your Needs

Connect Easily, Control Simply.

Since the introduction of its Agilis™ products, Newport has continued to deliver leading advancements in piezo-motor technology. Design and manufacturing innovations have led to a breadth of low-cost, high resolution, closed-loop or absolute positioning piezo-motor solutions used in cutting edge research and ideal for OEM applications in the areas of cytometry, ultrafast beam stabilization and genome research. Integrated CONEX™ controllers and our exclusive NSTRUCT™ enhanced instrument management software platform, simplify the setup and allows a single point of control for your entire instrument needs.

If you're looking for a solution – For Motion, Think Newport.
Visit www.newport.com/piezo-11 or call us.



To receive a free catalog, register at
www.newport.com/resource2011

Visit Newport at
PRECISIEBEURS 2011
Nov. 30–Dec. 1, Booth #128

© 2011 Newport Corporation.



Experience | Solutions