

# Een fase gestapte interferometer met verscheidene optische kanalen voor metingen van vervormingen

A.J.P. van Haasteren, A.L. Weijers en H.J. Frankena  
Technische Universiteit Delft, Postbus 5046, 2600 GA Delft

## 1. Inleiding

Fase gestapte interferometrie is een techniek waarmee verplaatsingen of vervormingen van een voorwerp gemeten kunnen worden. Door het object monochromatisch te belichten en het gereflecteerde licht te laten interfereren met een coherente hulpbundel (de referentiebundel) wordt een interferentiepatroon gegenereerd. Door dit patroon een aantal malen op te nemen waarbij tussen de opnames de optische weglengte van de referentiebundel wordt veranderd, verkrijgt men een verzameling van interferogrammen waaruit de fase van de lichtdistributie over het voorwerpsvlak berekend kan worden. Door deze fase voor en na de verplaatsing te meten en de resultaten van elkaar af te trekken verkrijgt men de faseverandering en deze is direct gerelateerd aan de verplaatsing van het object. Op deze wijze kan de voorwerpsverplaatsing snel, kwantitatief en contactloos worden gemeten met een nauwkeurigheid van ongeveer een honderdste van de golflengte van het gebruikte licht. De huidige technieken zijn echter gevoelig voor externe verstoringen zoals luchtstromingen, temperatuurveranderingen en trillingen, doordat de verschillende in fase verschoven interferogrammen na elkaar worden opgenomen. Bovendien kunnen deze technieken alleen worden gebruikt voor het inspecteren van statische processen. Vanwege deze beperkingen is een interferometer ontwikkeld die bestaat uit verscheidene optische kanalen waardoor de interferogrammen die benodigd zijn voor de faseberekeningen tegelijk kunnen worden opgeno-

men. Bovendien worden deze opgenomen beelden met videosnelheid verwerkt waardoor verplaatsingen 12,5 maal per seconde kan worden gemeten met een nauwkeurigheid van 9,3 nm.

## 2. Optische configuratie

Het optische systeem is gebaseerd op, via de polarisatie, fase gestapte interferometrie, zie [2]. Bij deze techniek worden de voorwerps- en de referentiebundel zodanig gecombineerd dat de resulterende bundel uit twee lineair gepolariseerde bundels bestaat met onderling loodrechte polarisatie-richtingen, één afkomstig van de voorwerpsbundel terwijl de ander door de referentiebundel wordt gegenereerd. Na combinatie worden de polarisatietoestanden van beide bundels omgezet van lineair in circulair door middel van een kwart-lambda plaatje. Achter dit element is een lineair polarisatiefilter is geplaatst. De transmissierichting van dit filter bepaalt nu het faseverschil tussen de voorwerps- en referentiebundel in het detectievlak en daarmee ook de geregistreerde intensiteit via de volgende relatie:

$$I(x,y) = I_b(x,y) + M(x,y) \sin[\varphi_o(x,y) - \varphi_r(x,y) + 2\alpha], \quad (1)$$

waarin  $I_b$  de achtergrondintensiteit en  $M$  de modulatieintensiteit representeren:

$$I_b(x,y) = I_o(x,y) + I_r(x,y), \quad (2)$$

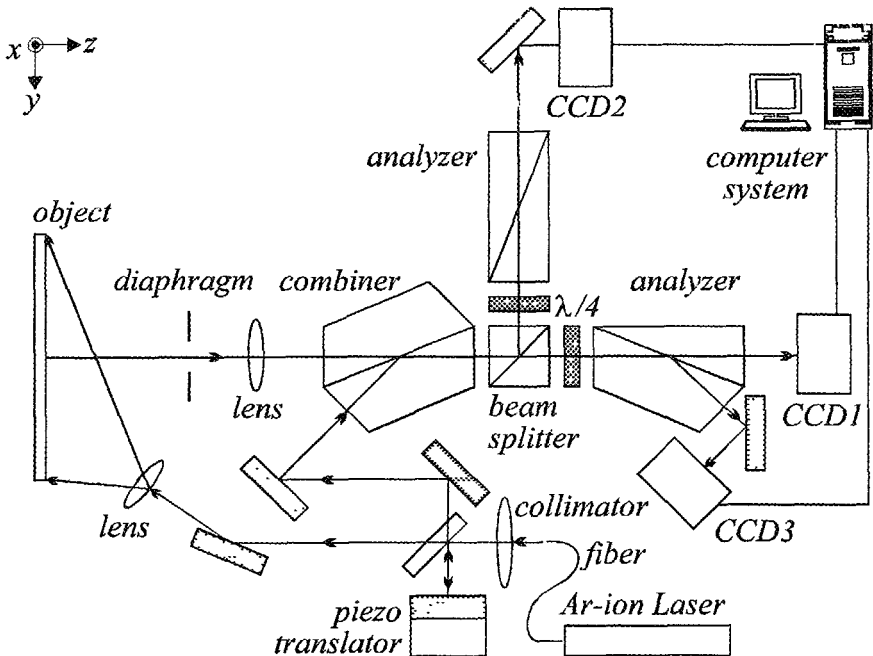
$$M(x,y) = 2\sqrt{I_o(x,y)I_r(x,y)}. \quad (3)$$

Verder worden de indices  $o$  en  $r$  gebruikt om de parameters van de voorwerps- en referentiebundels te onderscheiden, terwijl  $\varphi$  de fase van de lichtbundel ter plaatse van de detector representeert en de hoek aanduidt tussen de  $x$ -as en de transmissierichting van het polarisatiefilter. Vanaf nu zullen de variabelen  $x$  en  $y$ , die de positie in het detectievlak aanduiden, worden weggelaten ter bevordering van de overzichtelijkheid van de formules.

In onze opstelling wordt een Ar-ion laser gebruikt met een golflengte van 514 nm. Het licht, gegenereerd door deze laser, wordt via een glasfiber naar de opstelling getransporteerd, waar het gecollimeerd wordt. Vervolgens wordt de bundel gesplitst in twee aparte bundels met een intensiteitsverhouding van 4/96. De sterkste van deze twee bundels wordt ge-

bruikt om het te onderzoeken voorwerp te belichten terwijl de andere dienst doet als referentiebundel.

Het voorwerp wordt afgebeeld op drie afzonderlijke CCD camera's door een lens met een brandpuntsafstand van 140 mm. Het licht dat diffuus verstrooid is aan het voorwerp wordt gecombineerd met de referentiebundel door een speciaal ontworpen optisch element dat gebaseerd is op een Glan-Thompson prisma. Door het ontwerp van dit prisma wordt alleen het deel van de voorwerpsbundel dat langs de  $y$ -as gepolariseerd is, doorgelaten, terwijl alleen de bijdrage van de referentiebundel dat langs de  $x$ -as gepolariseerd is, wordt gereflecteerd. De gecombineerde voorwerps- en referentiebundel wordt vervolgens gesplitst in twee afzonderlijke bundels. Een van deze bundels doorloopt een kwart-lambda plaat-



Figuur 1  
Schema van de opstelling

je dat zodanig is georiënteerd dat zijn 'snelle' as een hoek van  $45^\circ$  maakt met de x-as. Deze bundel valt vervolgens in op een Glan-Thompson polarisator waarvan de doorlaatrichting langs de snelle as van het  $\lambda/4$ -plaatje ligt. De intensiteitsverdeling van deze bundel wordt opgenomen met de camera CCD2. De andere bundel die de bundelsplitser verlaat propageert ook door een kwart-lambda waarvan de 'snelle' as eveneens een hoek van  $45^\circ$  maakt met de x-as. Vervolgens valt deze bundel echter in op een Glan-Thompson-achtig prisma met twee uitgangen zodat twee aparte bundels worden gegenereerd die door camera's CCD1 en CCD3 worden geregistreerd. Op deze wijze ontstaan drie verschillende interferogrammen met  $\alpha=0$ ,  $\alpha=\pi/4$  en  $\alpha=\pi/2$ , zie (1). Vanaf nu worden de intensiteiten die met een verschillende camera's zijn opgenomen voorzien van een index die het bijbehorende cameranummer aangeeft.

### 3. Fase berekening

Om de twee verschillende interferometer-takken te creëren is gebruik gemaakt van een bundelsplitser. Dit element heeft echter als nadeel dat de reflectie- en transmissie-factoren voor s-gepolariseerd licht verschillen van die van p-gepolariseerd. Hierdoor zal in het algemeen  $I_{o,2}$  en  $I_{r,2}$  afwijken van  $I_{o,1}$  ( $=I_{o,1}$ ) en  $I_{r,1}$  ( $=I_{r,1}$ ) en daarom wordt de fase over het voorwerpsvlak berekend met behulp van de volgende vergelijking, zie [3]:

$$\varphi_o \varphi_r = \arctan \left[ \frac{I_1 - I_3}{2k(I_2 - I_{b,2})} \right] \quad (4)$$

In deze vergelijking is  $k$  een factor die corrigeert voor het verschil in de modulatie-intensiteiten van de opgenomen interferogrammen. Aangezien deze parameter volledig wordt bepaald door de karakteristieken van de bundelsplitser hoeft deze slechts éénmaal te worden gemeten voor een gegeven opstelling. Zoals uit Vergelij-

king (4) blijkt, moet ook de achtergrondintensiteit van camera CCD2 gemeten worden en aangezien deze afhankelijk is van de voorwerps- en referentie-intensiteiten moet deze meting worden herhaald zodra één van deze intensiteiten verandert.

### 4. De camera's

De interferogrammen worden opgenomen met drie CCD camera's die  $739 \times 575$  beeld-elementen bevatten van  $11 \times 11$  m. Een van deze camera's genereert horizontale en verticale synchronisatiesignalen die door de andere camera's zodanig worden gebruikt, dat de camera's synchroon lopen. Elke camera is verbonden met een aparte A/D-omzetter en om te garanderen dat de beelden pixelsynchroon worden gedigitaliseerd, zendt iedere camera zijn horizontale-, verticale en kloksignaal naar de A/D-omzetter die deze voor zijn interne tijdgeneratie gebruikt. Op deze wijze wordt de zogenaamde video jitter aanzienlijk gereduceerd, hetgeen leidt tot een verhoogde meetnauwkeurigheid.

### 5. De computer configuratie

#### 5.1 Het beeldbewerkingssysteem

De voorwerpsverplaatsing wordt berekend uit de geregistreerde interferogrammen door een VMEbus gebaseerde computer systeem met pijplijn structuren. De informatie wordt tussen deze systemen getransporteerd over een speciale bus, de zogenaamde MAXbus (10MHz). Om de beeldbewerkende systemen te initialiseren maken wij gebruik van een minicomputer\*) en een VMEbus/Sbus-koppelaar.

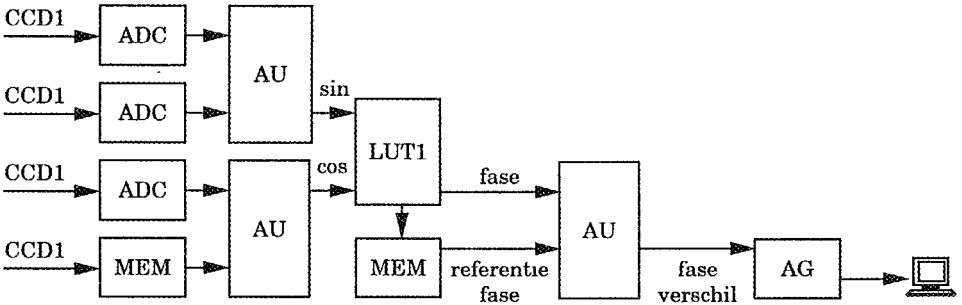
Het beeldbewerkende systeem bestaat (zie Fig 2) uit twee MaxScan-kaarten, met elk een asynchrone Analoo/Digitaal omzetter (ADC), en een MaxVideo20-kaart, die bestaat uit een Analoo/Digitaal omzetter (ADC), een rekeneenheid (AU), geavanceerde processors, 4MByte geheugen (MEM) en een Digitaal/Analoo omzetter

\*) SUN SPARC station by SUN microsystems, Inc, USA

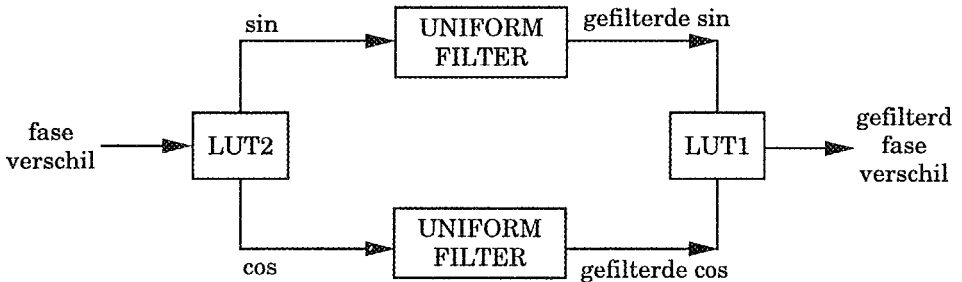
(AG) De ADC's digitaliseren de analoge signalen van de CCD camera's in 8 bits datastromen die naar de rekeneenheid worden gestuurd. Deze rekeneenheid bepaalt vervolgens de teller en noemer in Vgl. (4) en de resultaten van deze operatie gaan naar een look-up tabel (LUT1) die de uitkomst van het rechterlid modulo  $2\pi$  naar buiten stuurt. Dit fasebeeld kan vervolgens als referentie worden opgeslagen in het geheugen van de MaxVideo20. Door nu het verschil tussen deze referentie en het fasebeeld uit de LUT1 te berekenen met behulp van de AU, wordt de faseverandering verkregen en deze is een directe maat voor de verplaatsing van het voorwerp. Met dit computersysteem kan de verplaatsing van een voorwerp 25 maal per seconde worden gemeten en direct worden getoond op een videomonitor.

### 5.2 Beeldverbetering

Vanwege de aanwezigheid van verzadigde beeldelementen, decorrelatie tussen de drie opgenomen interferogrammen en de intrinsieke decorrelatie tussen de geregistreerde fasebeelden door de voorwerpsverplaatsing, bevat de gemeten verplaatsing ruis. Om deze ruis te verwijderen wordt er gebruik gemaakt van een speciale filtertechniek (zie Fig. 3) [4]. Allereerst worden de sinus en de cosinus van de gemeten faseverandering berekend door gebruik te maken van een tweede look-up tabel (LUT2). Wanneer de voorwerpsverplaatsing continu in de plaats verloopt, zullen de sinus en de cosinus ook continu over het voorwerp verlopen en dit betekent dat de ruis in deze beelden kan worden verwijderd door gebruik te maken van uniforme filters. Uit de gefilterde sinus



Figuur 2  
Het beeldbewerkende systeem



Figuur 3  
Het filteralgoritme

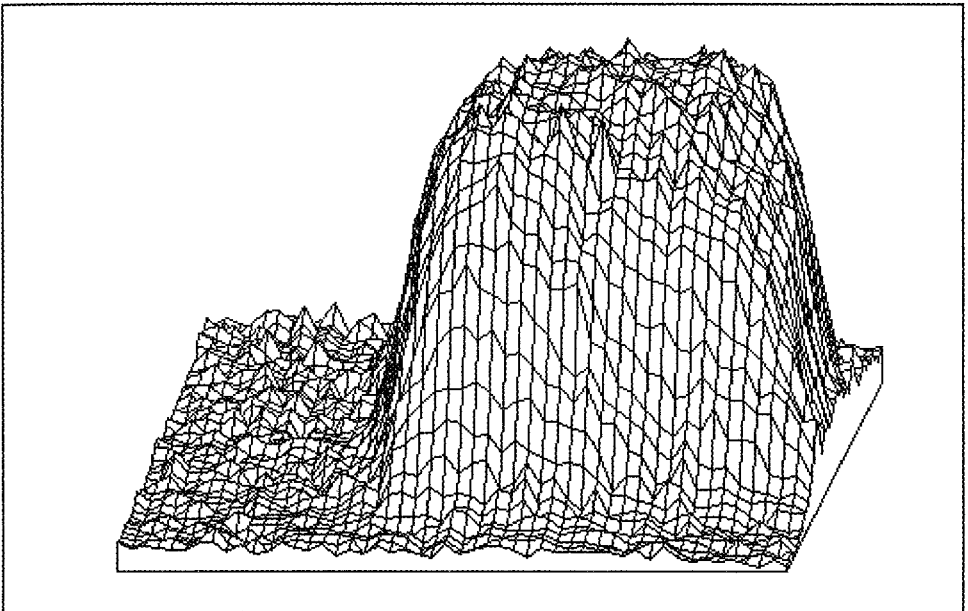
en cosinus wordt vervolgens het fasebeeld opnieuw berekend en dit beeld bevat aanzienlijk minder ruis dan het oorspronkelijk 'gemeten' fasebeeld. Deze kwaliteitsverbetering vereist echter een aanzienlijk aantal rekenslagen en hierdoor neemt de snelheid van het meetsysteem af tot 12.5 metingen per seconde.

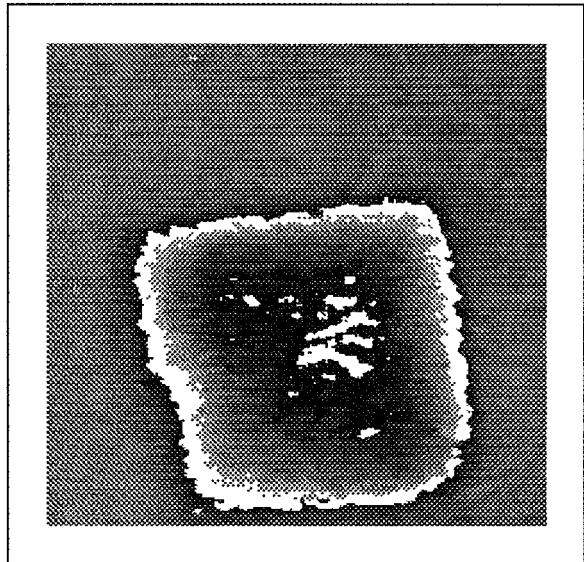
### 7. Nauwkeurigheid

De meetnauwkeurigheid van het systeem wordt bepaald door de verplaatsing te bepalen van een vlak voorwerp ten gevolge van een rotatie uit het vlak. Aangezien de geïntroduceerde verplaatsing lineair met de coördinaten over het voorwerp verloopt, is de afwijking van de gemeten verplaatsing ten opzichte van dit gedrag als maat voor de nauwkeurigheid genomen. Op deze wijze is gemeten dat de nauwkeurigheid van de fasemeting  $13^\circ$  bedraagt, wat overeenkomt met een nauwkeurigheid in de verplaatstingsmeting van  $9.3 \text{ nm}$  ( $\cong \lambda/55$ ). De reproduceerbaarheid van de fasemetingen bedraagt  $4^\circ$  ( $\cong \lambda/90$ )

### 8. Een toepassing: defect detectie

Het ontwikkelde meetsysteem kan gebruik worden voor het contactloos detecteren van defecten in composiet materialen. Om deze defecten op te sporen wordt het voorwerp enkele graden verwarmd, hetgeen zal leiden tot een vervorming van het voorwerp. Wanneer dit voorwerp defecten bevat zal deze vervorming in de corresponderende gebieden inhomogeniteiten vertonen. Aangezien de gemeten faseverandering direct gerelateerd is aan de vervorming, zullen de inhomogeniteiten ook zichtbaar zijn in de fase patronen. Met andere woorden, een verstoring in het gemeten fase patroon betekent dat er een defect in het voorwerp aanwezig is. Een voorbeeld van zo'n verstoring veroorzaakt door een delaminatie in een composiet materiaal (een 32 laags Carbon Fiber Reinforced Plastic) is weergegeven in Fig. 4.





Figuur 4  
Een voorbeeld een delaminatie in een cfrp laminaat

## 9. Acknowledgment

Het werk zoals gepresenteerd in dit artikel is gesponsord door de EEG onder het BRITE-EURAM project BREU-0100C.

## 10. Referenties

- [1] Creath, K.: Phase shifting speckle interferometry. *Appl Opt.*, 24(1985), 3053-3085.
- [2] Kothiyal, M P.; Delisle, C.: Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter. *Appl. Opt* 24(1985), 4439-4442.
- [3] Colucci, D., Wizinowich, P.: Milisecond phase acquisition at video rates. *Appl. Opt.*, 31(1992), 5919-5925.
- [4] Höffling, R. Fraunhofer Institut für Umformtechnik, Chemnitz, Germany (personal communication, 1993).