

Opto-elektronisch meten van driedimensionale vormen

Alfons M.F. Wegdam, R. Visman,
O. Podzimek

De verscherping van eisen aan industriële producten bij toenemende concurrentie en scherper wordende wetgeving met betrekking tot produkt-aansprakelijkheid, dwingen tot doelmatige productie en kwaliteitsbeheersing van het gehele fabricageproces. Betrouwbaarheid, nauwkeurigheid, snelheid, automatiseerbaarheid en vastleggen van gegevens worden daardoor voor de productie en kwaliteitsbewaking onontbeerlijke kenmerken. In het licht van deze trend is het niet verwonderlijk dat snelle, contactloze en robuuste – dat wil zeggen voor storingsbronnen ongevoelige – methoden voor het meten van driedimensionale vormen in de industrie steeds belangrijker worden.

Inleiding

Enkele van de vele toepassingsgebieden van optisch driedimensionaal vormmeten zijn: controle van de vormnauwkeurigheid van onderdelen, aanwezigheidscontrole van samengestelde

delen, bepalen van plaats en orientatie van delen ten behoeve van flexibele montage, alsook het genereren van banen en het detecteren van botsingen in de robotica.

Ook bij onderzoek en ontwikkeling speelt vormmeting een belangrijke rol. Bijvoorbeeld: snelle geometriemeting van met de hand gemaakte modellen voor het verkrijgen van CAD-gegevens of de vervormingsanalyse van onderdelen onder verschillende belastingen.

De aan de driedimensionale meettechniek te stellen eisen kunnen in belangrijke mate vervuld worden door optische methoden welke de ruimtelijke informatie uit beelden verkrijgen. Beeldgegevens zijn contactloos en snel verkrijgbaar. Het verwerken en berekenen van de gewenste geometrie-kentallen kan eventueel op een later tijdstip geschieden.

In het hierna volgende wordt ingegaan op de basisprincipes waarop de opti-

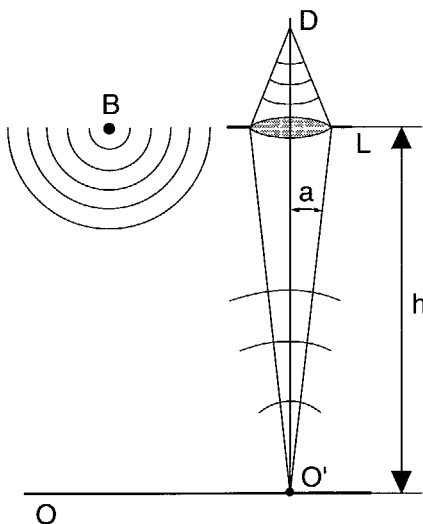
sche meetmethoden voor het meten van driedimensionale vormen zijn gebaseerd. Tevens zal worden aangegeven welke nauwkeurigheden in praktijk-situaties bereikt kunnen worden.

De basisprincipes

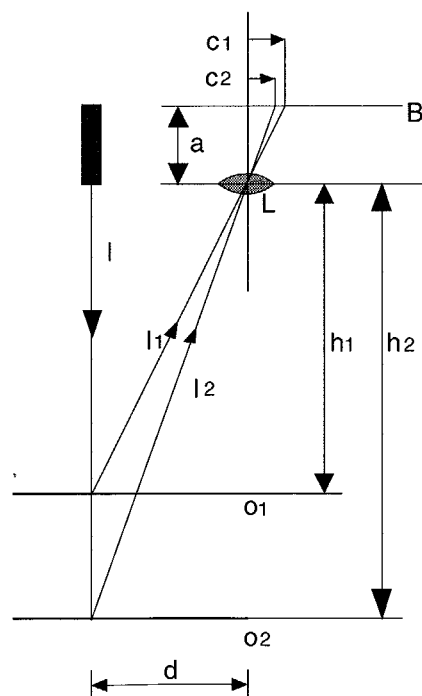
Er zijn vele meetmethoden bekend waarmee men optisch de driedimensionale vorm van een object kan bepalen. Analyse leert dat deze methoden gebaseerd zijn op een beperkt aantal natuurkundige basisprincipes. De belangrijkste zijn: intensiteits-, hoek-, focus-, tijd- en fasemeting. In de volgende paragrafen worden deze basisprincipes en de hierbij behorende meetmethoden nader toegelicht.

Intensiteitsmeting

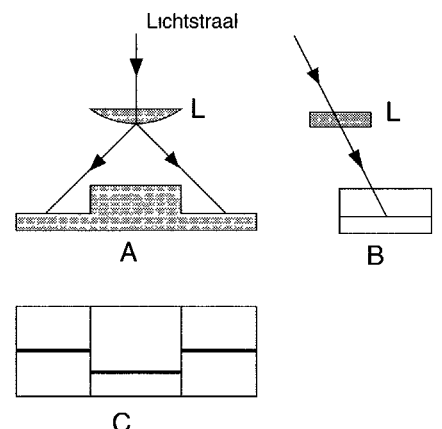
Deze methode werkt als volgt, zie figuur 1. Een bron B zendt een lichtgolf uit, die object O treft. Een punt O' van dit object wordt afgebeeld op de puntvormige detector D. Punt O' zendt op zijn beurt een bolvormig golffront uit. Een deel van dit golffront wordt door de intrepupil van lens L doorgelaten en afgebeeld op detector D. De verlichting van deze detector is afhankelijk van de volgende parameters: de lichtsterkte van puntbron B en de numerieke apertuur $A = n \cdot \sin(a)$ van het opti-



Figuur 1 Het meten van afstand door middel van intensiteitsbepaling



Figuur 2 Basisschema voor hoekmeting (triangulatie)



Figuur 3 Hoekmeting met behulp van een lijnbron. De lijnbron wordt gecreeerd met behulp van een cilinderlens

sche systeem. Daarbij geldt dat $\tan(a) = d/2h$, met d de diameter van de lensopening. Uit de laatste relatie volgt dat er een correlatie bestaat tussen de verlichtingssterkte op de detector en de objectafstand h .

In praktische systemen wordt deze methode zelden toegepast ten gevolge van de grote invloed van de oppervlaktegesteldheid: ruwheid, soort materiaal en vervuiling.

Hoekmeting

In figuur 2 is de basisopzet voor het meten van hoogte door middel van hoekbepaling, ook wel triangulatie genoemd, weergegeven. Een smalle laserbundel creëert een spotje op object O_1 . In het desbetreffende punt wordt het licht diffuus gereflecteerd. Een deel van het gereflecteerde licht wordt door lens L opgevangen en gebruikt voor het afbeelden van het spotje. Afhankelijk van de

hoogte h_1 van het object zal de afstand c_1 van het beeldpunt ten opzichte van de optische as variëren. Wordt er nu in het beeldvlak B een positiegevoelige detector geplaatst, dan kan met behulp van de relatie $h_1 = (a \cdot d)/c_1$ de afstand van het object tot de sensor worden bepaald. Door het object af te tasten in x - en y -richting is het mogelijk driedimensionale vormen te meten.

Een andere mogelijkheid is uit te gaan van een lijnbron en een 2D-detector, waarbij het object dan maar in één richting hoeft te worden afgetast, zie figuur 3. Door een raster te nemen is het mogelijk een driedimensionaal object te meten zonder het af te tasten, zie figuur 4. Het probleem bij het meten met een raster is echter dat het niet eenduidig bekend is welke lijn op het object bij welke rasterlijn behoort. Dit probleem is te omzeilen door gebruik te maken van een LC-scherm dat licht, dat door middel van een Gray-code is gecodeerd, naar het object stuurt. Ieder punt op het object is daardoor voorzien van een eenduidige code, waaruit de positie is te berekenen, zie figuur 5.

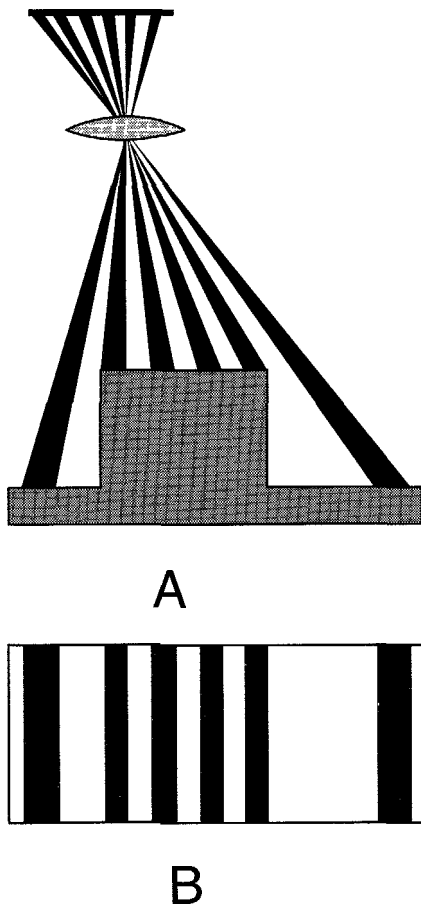
Theoretisch is het oplossend vermogen van de hiervoor besproken systemen – afhankelijk van de uitvoering – 10^{-3} tot 10^{-4} van het meetbereik. Tengevolge van onder meer niet-lineariteiten in de sensor, invloeden van de oppervlaktegesteldheid en lensfouten ligt in de praktijk de nauwkeurigheid een orde lager: 10^{-2} . De nauwkeurigheid van de triangulatiemeting kan verbeterd wor-

den door gebruik te maken van een tweevoudige lichtweg, zie figuur 6. (Zie ook het artikel over de TWIN-sensor van TPA, elders in dit nummer van Mikroniek.)

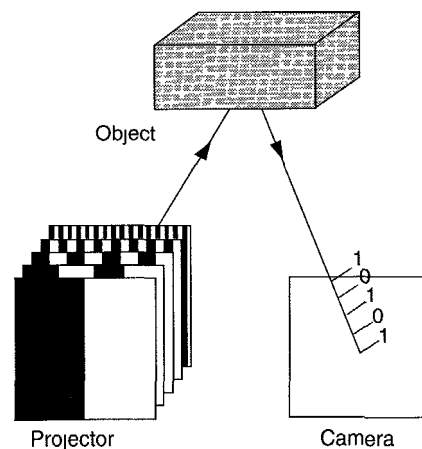
Focusmeting

In figuur 7 is de basisconfiguratie weergegeven voor hoogtemeting door middel van focusbepaling. De werkwijze van dit meetsysteem is als volgt. Licht, in dit geval afkomstig van een diodelaser, treft oppervlak O . Dit oppervlak reflecteert dat licht, waarna het via wigvormige prisma's terecht komt op de sensoren a_1b_1 en a_2b_2 . Afhankelijk van de positie van het oppervlak O ten opzichte van het focuspunt van de objectieflens ontstaan de drie situaties die in figuur 7a, b en c zijn weergegeven. De afwijking van het oppervlak ten opzichte van het brandvlak van de objectieflens wordt gegeven door een foutsignaal ter waarde $(B_1+B_2)-(A_1+A_2)$, waarin A_1, A_2, B_1 en B_2 de respectievelijke signalen voorstellen van de detectoren a_1, a_2, b_1 en b_2 . Met het foutsignaal wordt een servosysteem gevoed dat de objectieflens zodanig verplaatst dat dit signaal gelijk aan nul wordt. Door de positie van de objectieflens te meten is de plaats van het oppervlak bekend. Voor het verkrijgen van driedimensionale informatie dient het object in x - en y -richting te worden afgetast.

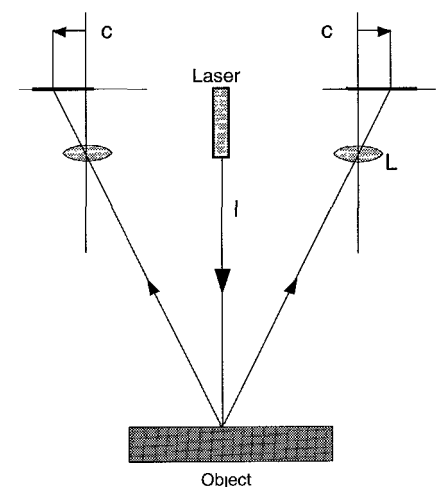
De nauwkeurigheid van de focusmethode bedraagt 10^{-3} van het meetbereik.



Figuur 4 Hoekmeting door middel van het afbeelden van een raster

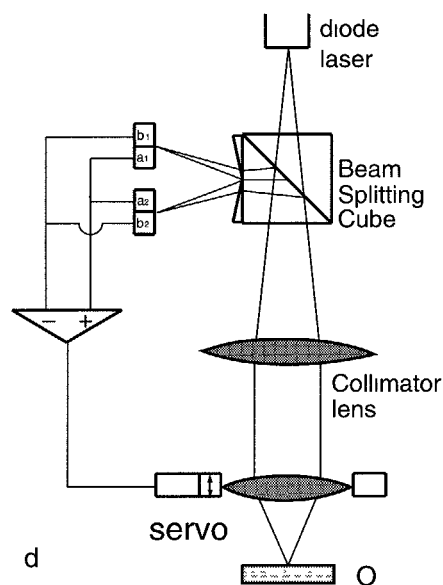
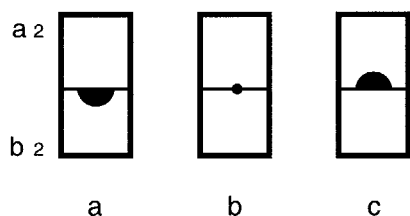
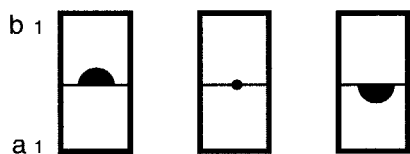


Figuur 5 Hoekmeting met behulp van gecodeerd licht

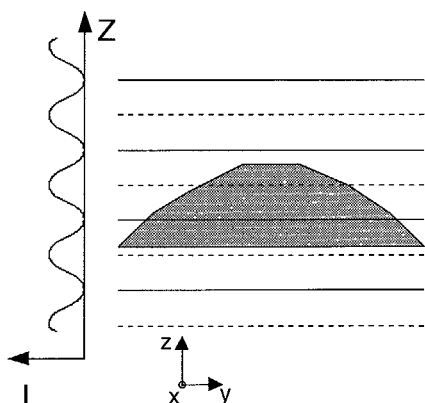


Figuur 6 Hoekmeting door middel van een dubbele lichtweg

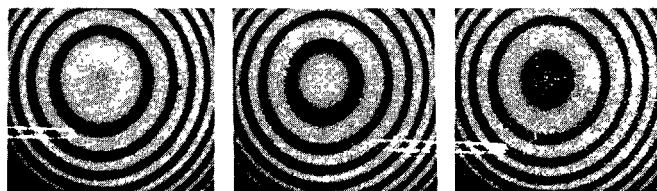
Opto-elektronisch meten van driedimensionale vormen



Figuur 7 Basisschema van focusmeting. a) focus boven, b) focus op, en c) focus onder oppervlak O, d) optische balans met wigvormige prisma's



Figuur 8 Basisschema van fasemeting



Figuur 9 De intensiteitsverdeling (hoogtekaart) op een bol. De onderlinge fase verschilt respectievelijk 0, $2/3\pi$ en $4/3\pi$

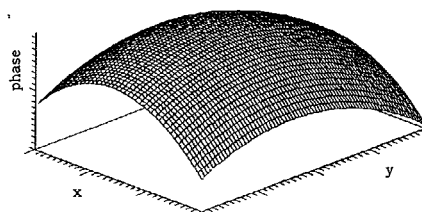
De gangbare meetbereiken liggen in de orde van 3 tot 300 μm .

Tijdmeting

De snelheid van licht in lucht bedraagt ongeveer $300 \cdot 10^6$ m/s. Door de tijd t te meten die een lichtpuls nodig heeft om een afstand te overbruggen, is het mogelijk deze afstand te berekenen. De lichtpuls wordt uitgezonden door een sensor en treft vervolgens een object. Na reflectie wordt de lichtpuls weer opgevangen door de sensor. De afstand d die de lichtpuls heeft afgelegd, is te berekenen uit $d = v \cdot t$. De tijdverschillen die nog gemeten kunnen worden, liggen in het picoseconde-gebied. Daardoor worden meetnauwkeurigheden verkregen in de orde van enkele mm's. Van objecten die zeer ver weg liggen (km's), kan op deze manier de afstand worden bepaald.

Fasemeting

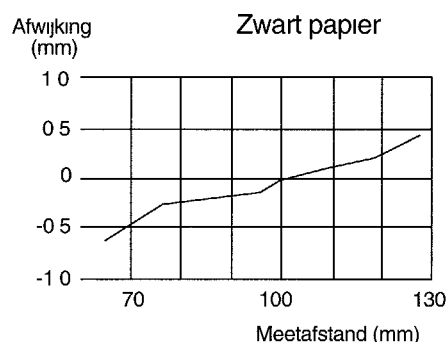
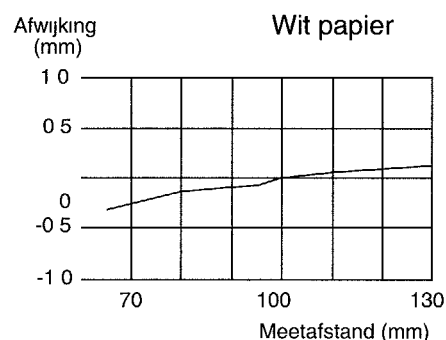
Het laatste principe dat wordt behandeld, is afstandmeting door middel van fasebepaling. Dit principe berust op het feit dat het mogelijk is in een ruimte vlakken van gelijke lichtintensiteit te creëren, zie figuur 8. In de z -richting varieert de lichtintensiteit dan periodiek, meestal sinusvormig. Hierdoor kan men van een object een hoogtekaart laten ontstaan, zie figuur 9. Het patroon op het object kan beschreven worden door $I_1(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos(\phi(x,y) + \tau_1)$ met $a(x,y)$ de variërende achtergrondintensiteit, $b(x,y)$ de variërende amplitude, $\phi(x,y)$ de aan het object gerelateerde fase en τ_1 de beginfase.



Figuur 10 De vorm van een bol, weergegeven als pseudo-3D-vorm

se. Fasehoek $\phi(x,y)$ kan worden berekend door variatie van de beginfase, waarbij τ_1 respectievelijk gelijk is aan 0, $2/3\pi$ en $4/3\pi$. In figuur 9 wordt dit gedemonstreerd. De aan het object gerelateerde fase volgt dan uit de relatie $\phi(x,y) = \arctan[\sqrt{3}(I_3 - I_2)/(2I_1 - I_2 - I_3)]$. Daar er een verband bestaat tussen de onderlinge afstand van de hoogtelijnen en de fase is zo de vorm van het object te bepalen, zie figuur 10.

Methoden om dergelijke hoogtelijnen op een object te genereren zijn onder meer interferometrie, holografische interferentie, "speckle-interferometrie" (tijdfrequentie) en moiré-techniek (ruimtelijke frequentie). De afstand tussen de hoogtelijnen ligt – afhankelijk van methode en uitvoeringsprincipe – in de orde van de golflengte van licht ($5 \cdot 10^{-7}$ m) tot enkele mm's. De aan het object gerelateerde fase is te berekenen met een nauwkeurigheid groter dan



Figuur 11 De invloed van lichtintensiteit op de nauwkeurigheid van een triangulatiesensor

1/100 van de afstand tussen de hoogtelijnen.

Tot besluit

In het voorgaande zijn de meest belangrijke principes beschreven waarop optische driedimensionale meetmethoden zijn gebaseerd. Hierbij is niet alleen aandacht geschonken aan de basisprincipes waarop deze methoden berusten, maar tevens zijn enkele van de mogelijke probleemgebieden aangeduid. Het moge duidelijk zijn dat het niet mogelijk is alle facetten in extenso te behandelen. De gebruiker van optische

meetmiddelen dient echter wel te beschikken over enig inzicht in de toegepaste principes. Dat inzicht maakt het gebruikers van optische meetsystemen mogelijk de bruikbaarheid van zo'n systeem voor hun eigen situatie beter in te schatten. Dat kan worden toegelicht aan een sensor gebaseerd op hoekmeting. Wordt er in plaats van een CCD-chip (Charge-Coupled Device) een PSD (Position-Sensitive Device) gebruikt, dan blijkt dat de intensiteit van het gereflecteerde licht van invloed is op de meetnauwkeurigheid. In figuur 11 is daarvan een voorbeeld gegeven. Een gebruiker die niet op de hoogte is

van dit effect, oordeelt dat optische driedimensionale meetmethoden niet betrouwbaar zijn. In feite wordt echter het systeem niet volgens de specificaties gebruikt.

De hier gepresenteerde waarden geven slechts een globale indicatie en behoeven niet voor alle gevallen te gelden.

Auteursnoot

Dr ir Alfons M F Wegdam, Ir R Visman en Dr O Podzimek zijn respectievelijk werkzaam bij DEMCON Twente BV te Enschede, het Centrum voor Productietechniek te 's-Hertogenbosch en de Universiteit Twente te Enschede

Het artikel is bewerkt door Frans Zuurveen

NVFT, vereniging voor precisie-technologie

De NVFT is een vereniging van technici die hoogwaardige professionele apparatuur ontwerpen, ontwikkelen of fabriceren. Het betreft zowel consumenten- als kapitaalgoederen. Door integratie van technieken als mechanica, optica, elektronica en glastechniek ontwikkelen zij steeds nieuwe, geavanceerde producten.

- De NVFT stimuleert de onderlinge contacten en informeert haar leden over ontwikkelingen in het vakgebied door regionale bijeenkomsten, cursussen, symposia en publikaties in Mikroniek.
- Bij deelname aan de **Mikropool** worden moeilijk (in kleine hoeveelheden) verkrijgbare materialen en specialistische bewerkings-technologieën uitgewisseld.
- NVFT-leden krijgen korting op de door de NVFT georganiseerde activiteiten, evenals op de activiteiten van andere verenigingen waarmee de NVFT een samenwerkingsovereenkomst heeft.

Inlichtingen:

Secretariaat NVFT, Postbus 6367, 5600 HJ Eindhoven, tel.: 040 - 473 659 fax: 040 - 460 645.