

Vervaardigen van asferische oppervlakken met behulp van een buis

Oliver W. Föhnle en Jacob-Jan Korpershoek,
TNO-TPD, Postbus 155, 2600 AD Delft
Hedser van Brug, Cees J. van der Laan en Hans J. Frankena,
Technische Universiteit Delft, Faculteit der Technische Natuurkunde
Vakgroep Optica, Lorentzweg 1, 2628 CJ Delft

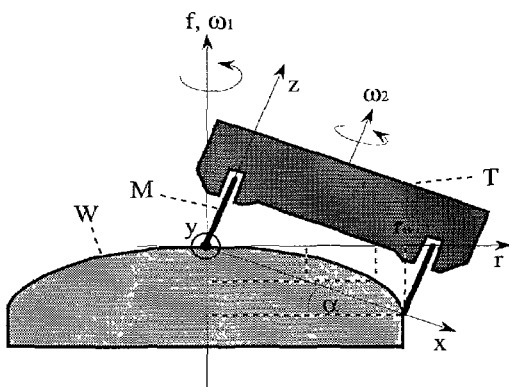
Inleiding

Een nieuwe fabricage methode voor de vervaardiging van rotationeel symmetrische asferische oppervlakken is ontwikkeld binnen een samenwerkingsverband tussen de twee hierboven genoemde groepen in Delft. Een machine gebaseerd op de hier beschreven methode wordt momenteel vervaardigd als prototype. In dit artikel zullen we de eigenschappen van de voorgestelde methode geven. Zowel de machine als de methode worden door ons aangeduid met het acroniem FAUST (Fabrication of Aspherical Ultraprecise Surface using a Tube); octrooi aanvraag in behandeling) FAUST is een lijncontact methode

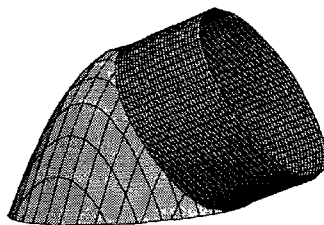
voor de vervaardiging van rotationeel symmetrische optische oppervlakken. Er wordt gebruik gemaakt van een zelf correctie proces en het is mogelijk om 'loose abrasive ductile slijpen' [Gol91] te gebruiken gevolgd door 'bowl-feed' [Win92] polijsten voor de vervaardiging van zowel bolle als holle asferische oppervlakken van hoge kwaliteit.

Methode

Zoals getoond in de Figuren 1 en 2 wordt er een onder druk belaste buis met een niet-circulaire dwarsdoorsnede geplaatst boven een werkstuk, dusdanig dat de z-as van de buis en de f-as van het werkstuk



Figuur 1
Langsdoorsnede van FAUST. Het werkstuk is aangeduid met W, de buis met T en de bewerkende band met M



Figuur 2
Computer simulatie van de werking van FAUST. (bol oppervlak)

een hoek α maken en dat de oorsprong van het x, y, z -coördinaten systeem gerelateerd aan de buis en van het r, y, f -coördinaten systeem behorend bij het werkstuk samenvallen. Het werkstuk roteert om zijn verticale z -as van symmetrie, die samenvalt met de f -as. Het bewerken van het oppervlak vindt plaats in het x, y -vlak door een bewerkende band die roteert langs de onderrand van de buis rond een z -as parallel aan de z -as. Het werkstuk en de bewerkende band zijn dus in lijncontact. In het volgende zal de dwarsdoorsnede van de bewerkende band in het x, y -vlak aangeduid worden met de term buisrand. Gedurende de productie van het werkstuk is de gehele buisrand in contact met het werkstuk, zie Fig. 2. De buis heeft slechts één enkele translatie-vrijheid, dusdanig dat de buis beweegt langs de f -as. Op deze wijze worden de laterale positie van de buisrand ten opzichte van het werkstuk behouden, zowel als de hoek α . FAUST wordt dus beschreven door 3 vrijheidsgraden: rotatie van het werkstuk, rotatie van de bewerkende band en de translatie van de buisrand. Gedurende de productie van het werkstuk wordt de buisrand tegen het werkstuk gedrukt en wordt het materiaal verwijderd door brosslijpen ('loose abrasive grinding'), gevolgd door taaï slijpen ('loose abrasive ductile grinding') en uiteindelijk 'bowl-feed' polijsten.

Genereren van de vorm

Het genereren van de gewenste vorm van het werkstuk oppervlak is gebaseerd op het overnemen van de vorm van een mal ('shape copying'). De vorm van de buisrand, samen met de hoek α tussen de buis en het werkstuk (zie Fig. 1), bepalen de vorm van het werkstuk dat vervaardigd wordt. Voor het vervaardigen van een rotationeel symmetrisch oppervlak met een dwarsdoorsnede in het r, f -vlak beschreven door de functie $f(r)$, met een maximale diameter $d_m = 2r_m$, een buisrand en een hoek α zijn benodigd die volgen uit de doorsnijdingskromme van het oppervlak van het werkstuk met een vlak door de y -as en het punt $\{r_m, 0, f(r_m)\}$ (in het coördinaten

systeem van het werkstuk). We hebben voor de rand van de buis en de benodigde hoek α afgeleid dat

$$x(r) = \frac{f(r)}{\sin(\alpha)}, \quad (1)$$

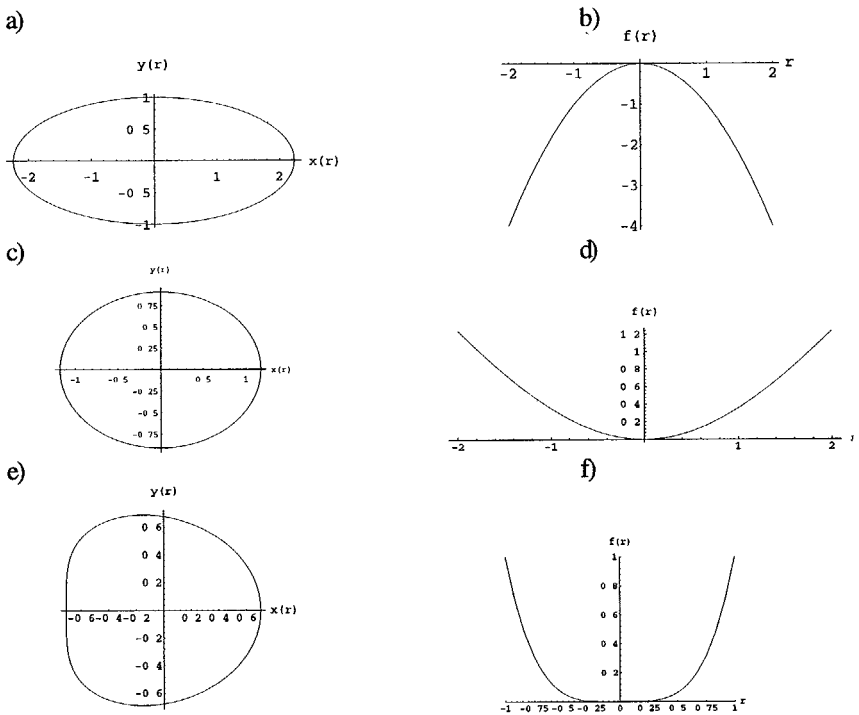
$$y(r) = \sqrt{r^2 - \left(\frac{f(r)}{\tan(\alpha)}\right)^2}, \quad (2)$$

waarbij

$$\tan(\alpha) = \frac{f'(r_m)}{r_m} \quad (3)$$

Met behulp van FAUST is het dus mogelijk om verschillende bolle en holle omwentelingsoppervlakken te vervaardigen. Figuur 3 toont de benodigde buisrandvormen voor enige werkstukoppervlakken.

De productie stappen FAUST bestaat uit drie opeenvolgende productie stappen: een ruwe slijp methode, een volgende micro-slijp methode en uiteindelijk een afwerk stap. Alle drie de stappen worden uitgevoerd met het zelfde apparaat. Dit heeft als voordeel dat de vormnauwkeurigheid zelfs in de afwerk stap verbeterd kan worden. Het verwijderen van materiaal wordt veroorzaakt door de druk op de buis en door de twee draaiende bewegingen: de draaiing van de bewerkende band langs de dwarsdoorsnede van de buis. Wanneer de hoek α tussen de buis en het werkstuk constant gehouden wordt gedurende het gehele proces, en de bewerkende band en het werkstuk zijn steeds in lijncontact, dan is de snelheid waarmee het materiaal verwijderd wordt constant langs de hele buisrand. Daarnaast komt ieder deel van de buisrand in contact met elk punt van het oppervlak. De voornoemde eigenschappen, tezamen met het slijten van de buisrand, maken het mogelijk een zelf-corrigerend, oppervlakte uitmiddellend proces te gebruiken bij zowel het slijpen als het polijsten [Kir94] voor de vervaardiging van asferische oppervlakken. De zelfcorrectie komt voort uit het feit dat de uitgeoefende



Figuur 3

Vervaardiging van drie verschillende oppervlakken. In de linker kolom is de benodigde buisrand getoond voor het vervaardigen van de oppervlakken, getoond in langsdoorsnede in de rechter kolom: (a) elliptische rand, (b) parabolisch oppervlak, (c) elliptische rand, (d) hyperbolisch oppervlak, (e) niet-elliptische rand, (f) $f(r) = r^4$.

druk in het ideale geval gelijkmatig verdeeld wordt over de hele buisrand. In het geval dat er een fout optreedt zal lokaal de druk hoger zijn waardoor hier tijdelijk de polijst-snelheid/slijtsnelheid zal toenemen totdat de druk weer overal gelijk is. Doordat ieder punt van de buisrand in principe in contact komt met ieder punt van het werkstuk zal deze fout niet doorwerken in de uiteindelijke vorm van het werkstuk en zal de kopsen kant van de buis vlak blijven. De eerste stap maakt gebruik van loose abrasive brittle mode slijpen, waarbij losse deeltjes het oppervlak grof voorbereiden. Hierbij worden op kleine schaal deeltjes uit het oppervlak gebroken, doordat het materiaal

onder de gestelde omstandigheden zich als broos gedraagt. In de tweede stap, waarbij de proces instellingen veranderd worden, vindt loose abrasive ductile slijpen plaats. Hierbij wordt materiaal verspaand, waarbij het materiaal verwijderings proces gebaseerd is op plastische vervorming, hetgeen leidt tot een lagere oppervlakte ruwheid dan het brosse verwijderen. De beschadigingen vlak onder het oppervlak, de zogenaamde 'subsurface damage' zullen hierdoor ook veel kleiner zijn. In de derde en laatste stap, bowl-feed polijst stap, wordt het oppervlak nabehandeld met als hoofddoel de ruwheid verder te verlagen. Hierbij worden zowel werkstuk als buis on-

gedempeld in een vloeistof die het polijstmateriaal bevat en waarbij gedurende het proces de dichtheid van polijstmiddel afneemt doordat het bezinkt. Hierdoor zal de grootte en de concentratie van de polijstkorrels als functie van de polijsttijd afnemen totdat uiteindelijk alleen nog oplosmiddel overblijft en een klein deel van het polijstpoeder dat ingevangen is in de buisrand.

Nauwkeurigheds overwegingen

De vormnauwkeurigheid van het gegeneerde oppervlak wordt door twee eigenschappen van FAUST bepaald, en deze worden beide in het hierna volgende nader toegelicht: de vormnauwkeurigheid van de effectieve buisrand en de instelling van de relatieve positie en oriëntatie van de buis ten opzichte van het werkstuk.

1. De effectieve buisrand

De bewerkende band wordt geleid langs de dwarsdoorsnede van de buis met een maximale fout van $\pm \delta$ (δ in het x, y -vlak loodrecht op de bewerkende band). Voor bolle oppervlakken ligt de contact lijn tussen de bewerkende band en het oppervlak aan de binnenzijde van de band terwijl voor holle oppervlakken het aan de buitenzijde ligt. Hieruit blijkt dat de onnauwkeurigheid van de voering slechts aan één kant doorwerkt, $+\delta$ voor holle en $-\delta$ voor bolle oppervlakken. De effectieve buisrand, die de vorm van het geproduceerde oppervlak bepaalt, is dus vergroot dan wel verkleind met δ , afhankelijk van het type oppervlak en wordt bepaald door de doorsnede van de buis. Het is hierdoor mogelijk om voor fouten in de geleiding van de bewerkende band te corrigeren bij het ontwerp en de vervaardiging van de buis. Geleidings onnauwkeurigheden parallel aan de z -as veroorzaken geen onnauwkeurigheden in het geproduceerde oppervlak doordat de buis vrij is te bewegen langs deze z -richting. Hoewel de oppervlakte-nauwkeurigheid van het gegeneerde oppervlak bepaald wordt door de vormnauwkeurigheid van de doorsnede van de buis is het niet noodza-

kelijk de buisdoorsnede met eenzelfde nauwkeurigheid te maken als die voor het oppervlak vereist is. Twee effecten zijn verantwoordelijk voor deze gunstige doorgeef-factor van fouten tussen werktuig en werkstuk. Ten eerste, de buisrand middelt tot op zekere hoogte fouten veroorzaakt bij de productie van de buis uit. Ten tweede, de relatie tussen een fout in de buisrand en die in het werkstuk hangt van de hoek α : voor $\alpha = 0^\circ$ zullen fouten in de buisrand geheel niet doorwerken in het oppervlak doordat dan een vlak oppervlak gemaakt wordt en voor (het niet realistische geval) $\alpha = 90^\circ$ wordt de fout in de buisrand geheel doorgegeven naar het werkstuk. Bij gebruik van FAUST bij kleine hoeken zullen eventuele fouten in de vorm van de buisrand dus slechts gering doorwerken in de nauwkeurigheid van het geproduceerde oppervlak.

II. Instelling van de relatieve positie en oriëntatie van de buis

Zoals voor iedere machine voor het vervaardigen van hoognauwkeurige asferische oppervlakken, wordt de vorm nauwkeurigheid voor een belangrijk deel bepaald door de stijfheid van de constructie zowel als door de isolatie van vibraties en temperatuur variaties, omdat het behouden van de relatieve posities essentieel is tussen de buis en het werkstuk. Om deze reden is het belangrijk dat de rotaties zowel als de translatie van de buis zeer accuraat uitgevoerd worden. Het is echter zo dat FAUST minder gevoelig is voor externe verstoringen dan bijvoorbeeld een precisie slijpmachine, doordat de buis door een kracht tegen het werkstuk gehouden wordt maar nog wel vrij is om parallel aan zijn vrijheidsgraad te transleren. Een mechanische verstoring leidt er toe dat er slechts tijdelijk een foute vorm geproduceerd wordt. Verder is het mogelijk om voor kleine positionerings onnauwkeurigheden van de buis ten opzichte van het oppervlak te compenseren in de ontwerpfase van de buis dwarsdoorsnede. Daarbij kunnen we ook compenseren voor de fout in de vorm van de buis veroorzaakt door het afslijten

van de buisrand door het kiezen van een bepaalde richting waarin de buis kan transleren. In dit geval zal de buis verschuiven langs een as in het r , f -vlak, onder een hoek met de f -as, dusdanig dat de buisrand parallel aan de f -as verschuift. De genoemde hoek wordt bepaald door de verhouding tussen slijten van de buisrand en van het werkstuk.

Conclusies

FAUST maakt gebruik van een zelfregulerend proces door te bewerken langs een lijncontact. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om loose abrasieve ductile te slijpen, gevolgd door bowl-feel polijsten voor het vervaardigen van asferische optische omwentelings oppervlakken. Doordat alle bewerkingstappen binnen één apparaat plaatsvinden zal de vormnauwkeurigheid ook in de laatste stap nog verbeterd worden. De vorm van het gegeneerde oppervlak wordt bepaald door de vorm van de bewerkende band en de hoek tussen buis en oppervlak. Hierdoor is het slechts noodzakelijk twee rotaties en een translatie aan te sturen en is er geen moeilijke sturing nodig voor het werktuig zoals bij computer gestuurde freesbanken waarbij het pad van een diamant-beitel gestuurd wordt in de x , y , z -ruimte. Het genereren van een asferisch oppervlak is omgezet naar het vervaardigen van een bepaalde dwarsdoorsnede van een buis samen met het instellen van de relatieve positie en oriëntatie van de buis ten opzichte van het werkstuk. Dit heeft als voordeel dat de nauwkeurigheid van de vorm van de dwarsdoorsnede

van de buis minder hoeft te zijn dan die van het gegeneerde oppervlak: naarmate de hoek tussen buis en werkstuk kleiner wordt, wordt de fout minder doorgegeven. Het is verder nog mogelijk om voor verschillende fouten te compenseren in het ontwerp van de buis vorm: kleine onnauwkeurigheden in de relatieve positie van de buis, geleidings fouten van de buis, en laterale verplaatsing ten gevolge van afslijten van de buisrand. Doordat de vorm van het gegeneerde oppervlak afhangt van de hoek tussen buis en werkstuk is het mogelijk om met één buis door een variatie in de hoek verschillende typen oppervlakken te genereren [Fäh96]. We mogen dus concluderen dat FAUST een nuttige productie techniek is voor complexe vormen en de potentie heeft geschikt te zijn voor ultra preciese asferische oppervlakken dankzij de zelfcorrigerende werking

Referenties

- [Fäh96] O.W. Fähnle, H. van Brug, C.J. van der Laan and H.J. Frankena, "FAUST: generation of conic surfaces", ingezonden naar Boston Topical Meetings, 1996
- [Gol91] D. Golini and S.D. Jacobs, "Physics of loose abrasive microgrinding", Applied Optics, **30** pp 2761-2777 (1991)
- [Kir94] N.B. Kirk and J.V. Wood, "Glass polishing", British Ceramic Transactions **93** p 25 (1994)
- [Win92] J. van Wingerden, H.J. Frankena, and B.A. van der Zwan, "Production and measurement of superpolished surfaced", Opt. Eng. **31** pp. 1086-1092 (1992)