

Ontwikkeling van een Planaire Motor in Closed

Tijdens de precisiebeurs van 9 en 10 oktober in Koningshof te Veldhoven, heeft dr. Ir. Marc Vermeulen op woensdag 9 oktober een plenaire lezing gegeven over de ontwikkeling van een Surface Acoustic Wave planaire motor. Voor Mikroniek heeft hij deze lezing omgezet in een artikel. Het resultaat treft u hieronder aan.

• M.M.P.A. Vermeulen¹, F.G.P. Peeters¹, H. Soemers¹, P.J. Feenstra², P.C. Breedveld² •

Introductie

Conventionele meerdimensionale manipulators zijn vaak gebaseerd op een stapeling van lineaire systemen, bestaande uit een elektromotor, een transmissie en een lineaire geleiding. Dit resulteert in relatief grote afmetingen en een geringe stijfheid vanwege de serieschakeling van componenten, met als gevolg, verlies aan nauwkeurigheid en dynamische performance. Daarnaast draagt elk onderdeel bij aan de totale massa, afmeting en prijs van de manipulator. Om deze redenen heeft een parallelle manipulator, die bestaat uit minder componenten, de voorkeur. In dit artikel wordt een direct aangedreven planaire (dat wil zeggen: parallel) manipulator gepresenteerd, welke is gebaseerd op aandrijving met behulp van Surface Acoustic Waves (SAW's)

Aandrijfprincipe van SAW-motor

Het aandrijfprincipe van een SAW motor is gebaseerd op het voortbewegen van een slider over een elastisch vast lichaam, stator genoemd (zie afbeelding 1). Door het oppervlak van de stator, bewegen zogenaamde Rayleigh golven zich voort. De golven worden opgewekt door het aanbrenge van AC spanning op zogenaamde Inter Digital Transducers (IDTs), een galvanisch patroon van vingers, dat

is aangebracht aan de randen van het stator-oppervlak. De stator, die gemaakt is van PXE43 – een homogeen polycrystal –, is onder de IDT's lokaal gepolariseerd. Gegeven de Rayleigh-snelheid van de golven door de stator ($2.2 \cdot 10^3$ m/s), en een gekozen frequentie van de AC-spanning van 2.3 MHz volgt een golflengte van 0.95 mm. Deze golflengte ligt vast in de afstand tussen twee IDT-vingers met dezelfde polariteit. Voor een goede vermogensoverdracht dient de impedantie van een IDT 50Ω te zijn. Hiervoor is de IDT, die zich capacitief gedraagt, elektronisch 'gematched' met behulp van een spoel

Praktische waarden van de golf-amplitude bij deze frequentie zijn ca. 20 tot 40 nm, wat afhankelijk is van de opgedrongen spanningsamplitude. Dit vraagt om een oppervlakte-ruwheid kleiner dan 20 nm. Door gebruik te maken van ELID-slijpen is een oppervlakte-ruwheid van 10 nm bereikt. Om voldoende tractiekracht te kunnen genereren om de slider te bewegen en om te voorkomen dat een squeeze luchtfilm ontstaat tussen slider en stator, is het contactoppervlak van de slider (1 cm^2) voorzien van een groot aantal (ca $4 \cdot 10^4$) bol-segmenten, gemaakt door lithografisch etsen van silicium (Kurosawa, 2000). Afhankelijk van het aantal bol-segmenten per cm^2 slider oppervlak moet een zekere voorspankracht worden aangebracht om een zekere tractiekracht te genereren. Voor dit doel is het gewicht van de slider mogelijk onvoldoende. In ons geval bedraagt de aangebrachte voorspankracht 40 N/cm^2 , resulterend in een

1 Philips Centre for Industrial Technology (CFT), Eindhoven

2 Universiteit Twente (Enschede)

Surface Acoustic Wave

Loop Regeling

trachtiekracht van 4 N. Uit de verhouding tussen beide krachten volgt de wrijvingscoëfficiënt voor de materiaalcombinatie Slicium op PXE43: $\mu = 0.1$. Afhankelijk van de toepassing kunnen diverse voorspan-principes worden toegepast, bijvoorbeeld op basis van vacuüm of magnetische krachten, et cetera.

Lineair prototype

In ons eerste prototype is de voorspanning gerealiseerd door twee sliders die simultaan bewegen aan weerszijden van de stator, en die elkaar voorspannen middels een veer, zie afbeelding 1. De gewenste voorspankracht tussen één van de sliders en de stator is identiek aan de kracht tussen de andere slider en de stator. Een externe geleiding – nodig om zijdelingse beweging in y-richting te verhinderen – wordt als gevolg niet belast door de voorspankracht. Dit beperkt de doorbuiging van de geleiding en de wrijving van het systeem.

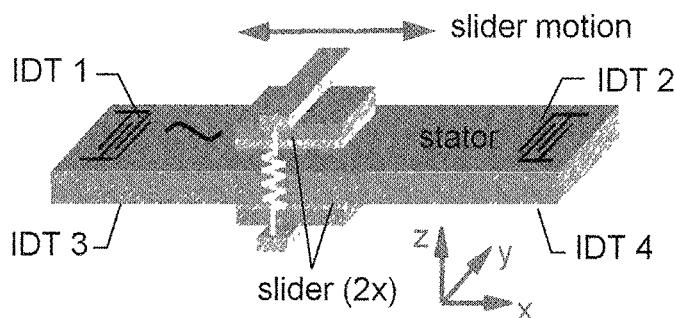
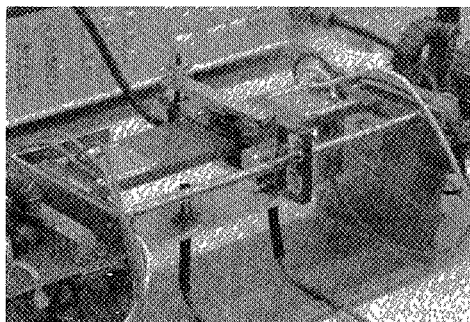
Modellering voor de regeling

Publicaties die tot dusver zijn verschenen over SAW motoren vermelden zeer kleine stapjes van 2 nm, bereikt door open loop aansturing (Shigematsu, 2001). Echter, in een industriële omgeving wordt de reproduceerbaarheid van deze stapjes mogelijk beïnvloed door verstoringen. Daarom hebben we ons gericht op *closed loop regeling* van de SAW actuator. Onze eerste experimenten met een lineaire motor

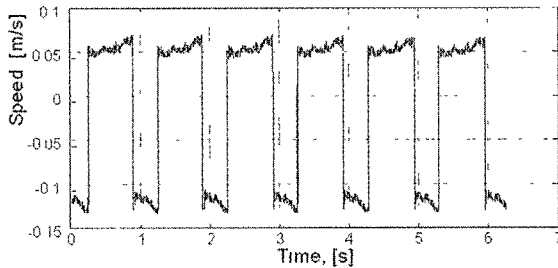
bestonden uit stapresponsies. Afbeelding 2 toont de responsie van een blok golf als ingangsspanning, resulterend in een beweging heen en terug.

De metingen tonen een reproduceerbaar snelheidsverloop voor een aantal heen en teruggaande bewegingen. Echter, de snelheidsamplitude verschilt voor de beweging heen en terug, als gevolg van verschillen in elektronische matching (is nog niet geoptimaliseerd). Daarnaast varieert de snelheid met de positie van de slider: dicht bij de actuator is de snelheid hoger. Dit wordt veroorzaakt door interne materiaaldemping en divergentie van de golf tijdens voortplanting door de stator. Door toepassen van closed loop regeling kan deze positie-afhankelijkheid worden ondervangen.

Uit experimenten blijkt dat de snelheid van de slider bij een stapresponsie toeneemt volgens een exponentiële functie. Dit impliceert eerste orde gedrag, dat kan worden voorgesteld door een eenvoudig eerste orde systeem bestaande uit een massa en een demper, belast door een externe kracht F , zie afbeelding 3b. De responsie van de ingangsspanning naar de snelheid lijkt op de responsie van een spanningsgestuurde DC motor. Voor dit type actuator – met een bepaalde interne weerstand en verwaarloosbare zelfinductie – kan de demper in het model fysisch worden verklaard door de tegen-EMK: voor toenemende snelheid neemt de geïnduceerde spanning toe. Voor de SAW motor ligt de fysische verklaring van de demper in het 'in en uit lopen' van nieuw



Afbeelding 1 a en b. Lineaire SAW motor met twee sliders die elkaar voorspannen.

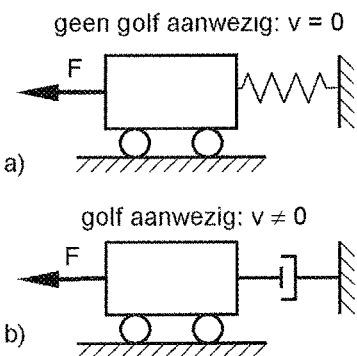


Afbeelding 2. Slider responsie op blokvormige input

materiaal in de contactzone tussen stator en slider. Uitgaande van elastische deformatie van de contact-partners, nemen we het in en uit lopen van materiaal macroscopisch waar als demper in plaats van als stijfheid, aangezien de deformatie niet leidt tot volledige teruggave van energie als de kracht wordt weggenomen. In het dagelijks leven kan dit fenomeen worden waargenomen bij een auto in aanwezigheid van zijwind. Als de auto stilstaat leidt een constante zijwind tot een constante verplaatsing van de auto ten gevolge van de laterale elastische deformatie van de banden (je voelt een stijfheid, zoals weergegeven in afbeelding 3a). Echter, wanneer de auto rijdt en materiaal loopt in en uit de contactzone tussen de banden en het wegdek, dan leidt een constante zijwind tot laterale verplaatsing met constante snelheid. Wil de automobilist rechtuit rijden, dan zal hij hiervoor moeten tegensturen. Dus, hoewel de stijfheid in het contact nog steeds de reactiekracht levert, is het macroscopisch gedrag dat van een demper (constante kracht leidt tot constante zijdelingse snelheid).

Experimenten

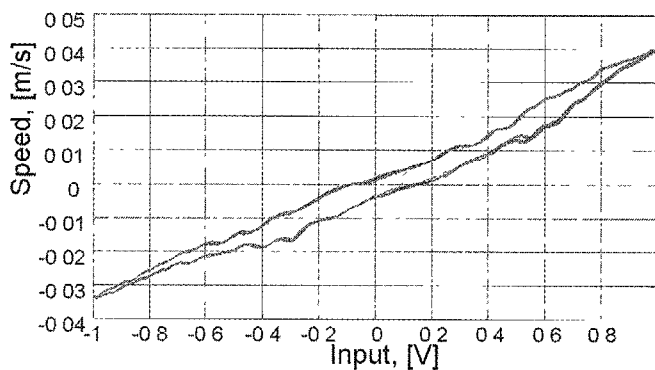
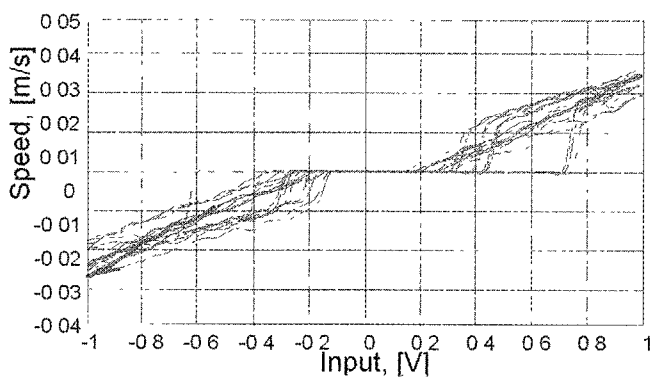
Het voorgestelde model suggereert een lineair systeem, echter, metingen laten zien dat Rayleigh golven met een amplitude beneden een zekere threshold, geen beweging van de slider tot gevolg hebben (zie afbeelding 4a). In de relatie



Afbeelding 3. Model van SAW motor.

tussen golfamplitude en (steady state) snelheid is een dode band aanwezig. De oorzaak van deze dode band is dat bij lage ingangsspanningen de golfamplitude in transversale richting kleiner wordt dan de oppervlakteruwheid van de stator en de Hertzse indrukking. Ook treedt stick slip op in de overgang van stilstand naar beweging. Deze fenomenen verstoren een goede regeling van een SAW motor.

Om een dode band te voorkomen is een alternatieve manier van continue aandrijven bedacht en gepatenteerd. Hierbij wordt de slider gemanipuleerd door van beide zijden simultaan golven te genereren met een (mogelijk zeer) klein verschil in amplitude. Door gebruik te maken van deze manier van aandrijven, die we 'Dual Side Actuation' noemen, kan de dode band worden geëlimineerd, zoals blijkt uit de experimenten, weergegeven in afbeelding 4b. Uit deze figuur blijkt bovendien dat de reproduceerbaarheid van het systeem hoog is: Figuur 4b toont het verloop van tien heen en teruggaande bewegingen. Op deze manier kan een significante reductie van de kleinste mogelijke slider beweging worden gemaakt, vergeleken met enkelzijdige continue aansturing. Als gevolg kan een groot dynamisch bereik (verhouding tussen slag en resolutie) worden behaald, evenals een significante reductie van de minimale snelheid van de slider. Door gebruik te maken van deze oplossing kan de SAW motor worden beschouwd als lineair systeem, wat een goede performance in closed loop mogelijk maakt. Van een lineair systeem kunnen we een frequentie responsie functie (FRF) maken, zoals voor de lineaire SAW motor weergegeven in afbeelding 5. Inderdaad kunnen we het gedrag van een massa demper systeem waarnemen. Beneden 100 Hz is de demper dominant, daarboven worden traagheidskrachten overheersend. De resonanties in deze figuur zijn het gevolg van rigid body modes van de slider op zijn geleiding, door een offset tussen het zwaartepunt en de plaats waar de tractiekracht aangrijpt. Deze offset is in een volgend ontwerp geminimaliseerd. In dit stadium kunnen we concluderen dat wanneer de dode band tussen golfamplitude en responsie is geëlimineerd, het closed loop regelen van een SAW motor lijkt op het regelen van een spanningsgestuurde DC motor. Dit impliceert het toepassen van eenvoudige regelstrategieën. In lijn der verwachting resulteert toepassing van standaard PID regelaars op dit type systeem (wellicht met extra filters), gecombineerd met massa- en damping-feedforward in hoge positioneeruwigheden. In closed loop regeling bedraagt de behaalde positioneeruwigheid van de lineaire prototype één à twee incrementen (i.h.c. 0.15 µm) van het gebruikte meetsysteem. Wanneer de genoemde drive-offset is geëlimineerd, wordt de bandbreedte beperkt door de looptijd van de golf door de stator en door de sample tijd van de digitale regelaar.



Afbeelding 4a en b Gemeten open loop snelheid als functie van ingangsspanning. a) dode band aanwezig, b) dode band verdwenen.

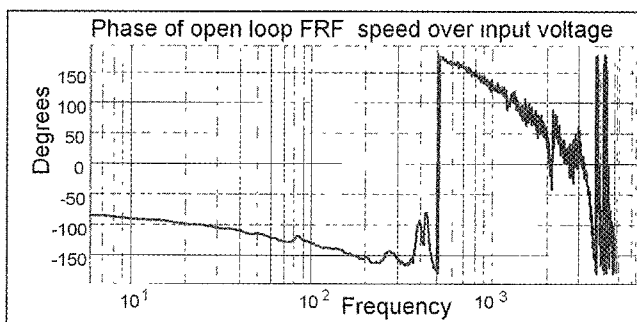
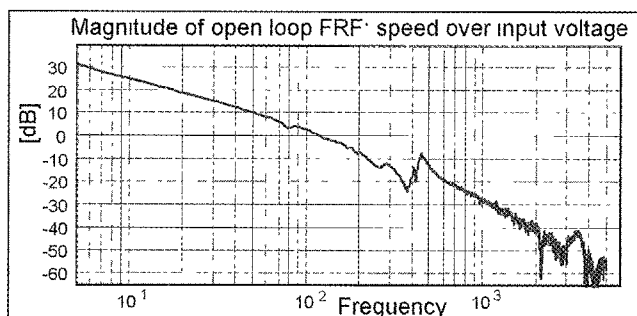
Planaire SAW motor

Gebruik makend van de kennis van de experimenten met de lineaire prototypes is het aandrijfconcept zoals hierboven beschreven, uitgebreid naar een planaire SAW motor, zonder dat sledes moeten worden gestapeld. Afbeelding 6 geeft het ontwerp van zo'n planaire motor weer en afbeelding 7 toont het gerealiseerde prototype (afmetingen: 250 x 250 x 60 mm). Bewegingen van een carrier in het horizontale vlak kunnen worden bereikt door drie graden van vrijheid te regelen: twee translaties (x en y) en de rotatie om de verticale as (Rz). Hiervoor is een carrier voorzien van drie sliders (twee zou voldoende zijn om de gewenste beweging te maken, de derde slider zorgt voor stabiliteit tegen kanteling om de x-as, zie afbeelding 6), die individueel kunnen worden bewogen in x- en y-richting over hun respectievelijke statoren. Een rotatie Rz kan worden gegenereerd door het aandrijven van de sliders 1 en 2 in tegengestelde richting en van slider drie in de bijbehorende x-richting. Instelbare voorspanning van elke slider is gerealiseerd door magnetische aantrekkingskracht tussen magneten in de carrier (boven iedere slider) en een staalplaat onder elke PXE-stator, wat resulteert in een korte structurele loop van de voorspankracht. Een complementaire functie van de staalplaat is het verbeteren van de warmtegeleiding van de piezo-actuatoren naar de omgeving.

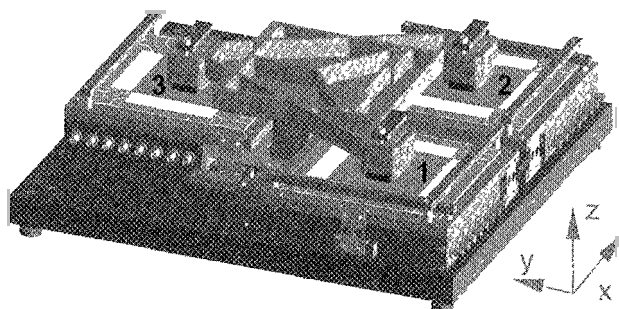
De positie van carrier wordt gemeten met behulp van een planair meetsysteem bestaande uit een rasterplaat aan de onderzijde van de carrier en een meetkop die instelbaar is verbonden met het frame. Als gevolg zijn er geen bewegende kabels en slangen – die verstoringen kunnen veroorzaken – verbonden met de carrier. De regelstrategie van deze planaire SAW motor is gebaseerd op de regelprincipes zoals hierboven beschreven, gecombineerd met een ontkoppelstrategie voor zowel de gemeten als de geactu-

cerde graden van vrijheid. Met het prototype zoals weergegeven in afbeelding 7 zijn eerste testen uitgevoerd waarmee het gecombineerd en in regeling aansturen van de planaire SAW motor in de drie vrijheidsgraden x, y en Rz is aangetoond. Verdere experimenten zijn gepland om de eigenschappen van de planaire SAW motor in closed loop regeling aan te tonen.

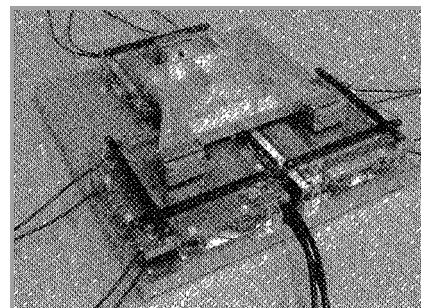
De planaire SAW motor kenmerkt zich door een compacte en eenvoudige constructie met geringe bewegende massa, aangezien de aandrijving en geleiding zijn gecombineerd, zonder gebruik te maken van externe lagers, transmissies en



Afbeelding 5a en b. Open loop FRF van de lineaire SAW motor.



Afbeelding 7.
Prototype planaire
SAW motor.



geleidings-systemen Na het bereiken van de gewenste positie kan het genereren van golven worden gestopt en staat de carrier met een hoge contactstijfheid stil op die positie. Een additionele rem is niet nodig, dit komt de eenvoud ten goede en verhoogt de nauwkeurigheid (geen overname). Vergeleken met een conventionele stapeling van sledes kan met het planaire concept een hoge stijfheid en eigenfrequentie worden bereikt. Een grote slag (orde 50x50 mm) kan worden bereikt zonder dat parasitaire krachten – aanwezig bij elastische geleidingen – hoeven te worden overwonnen.

Conclusies

Dit artikel beschrijft de ontwikkeling van een planaire SAW motor in closed loop regeling Om het open- en closed loop gedrag te onderzoeken zijn twee lineaire prototypes ontwikkeld. Een alternatieve manier van aansturen is bedacht en gepatenteerd om de dode band in de responsie van een conventioneel aangedreven SAW motor te voorkomen. Daarnaast

Samenvatting

Dit artikel beschrijft de ontwikkeling van een Surface Acoustic Wave (SAW) planaire motor in closed loop regeling, die kan worden toegepast als een ultraprecisie meerdimensionale manipulator In publicaties die tot dusver zijn verschenen over dit onderwerp, worden (lineaire) SAW motoren bedreven in open loop. De slider wordt daarbij gemanipuleerd door een repeterend klein aantal golfperiodes. Op deze manier kan een langzame beweging worden gegenereerd, die echter niet constant is gedurende de cyclus tijd. Hoewel zeer kleine stapjes zijn behaald voor SAW motoren in open loop bedrijf (ca. 2 nm) is de reproduceerbaarheid beperkt in een industriële omgeving waarin verstoringen optreden. Daarom hebben we ons gericht op *closed loop regeling* van de SAW actuator. Hiervoor zijn twee lineaire prototypes ontwikkeld. Experimenten hebben aangetoond dat bij een con-

ventionele manier van aansturen een dode band ontstaat in de responsie van het ingangssignaal naar de snelheid van de motor. Om dit fenomeen te ondervangen, is een alternatieve manier van aansturen bedacht, waarop patent is aangevraagd. Gebaseerd op dit alternatieve aandrijfconcept, dat staat beschreven in dit artikel, is een *planaire SAW motor* ontworpen (Vermeulen, 2002). Eerste tests hebben aangetoond dat het principe van planair aandrijven in closed loop regeling werkt. Aangezien het aandrijfsysteem en de geleiding zijn gecombineerd, zonder gebruik van externe lagers, transmissies en geleidings-systemen, is het concept gebaseerd op een eenvoudige en compacte constructie met geringe bewegende massa. Vergeleken met een gestapeld lineair systeem kan een hoge stijfheid en een goed dynamisch gedrag worden behaald. Verdere experimenten zijn gepland om de potentiële voordelen van een planaire SAW motor aan te tonen voor toepassingen in Precision Engineering en Nanotechnologie.

Literatuur

- Kurosawa, M.K , State-of-the-art surface acoustic wave linear motor and its future applications, Elsevier, Ultrasonics 38, pp. 15-19, 2000
- Shigematsu, T., Kurosawa, M.K., Nano Meter Stepping Drive of SAW motor, 2001.
- Vermeulen, M.M.P.A. et al. Development of a Surface Acoustic Wave Planar Motor under Closed Loop Control, Proc. of the 3rd Euspen International Conference, p.p. 107-110, 2002.

ventionele manier van aansturen een dode band ontstaat in de responsie van het ingangssignaal naar de snelheid van de motor. Om dit fenomeen te ondervangen, is een alternatieve manier van aansturen bedacht, waarop patent is aangevraagd. Gebaseerd op dit alternatieve aandrijfconcept, dat staat beschreven in dit artikel, is een *planaire SAW motor* ontworpen (Vermeulen, 2002). Eerste tests hebben aangetoond dat het principe van planair aandrijven in closed loop regeling werkt. Aangezien het aandrijfsysteem en de geleiding zijn gecombineerd, zonder gebruik van externe lagers, transmissies en geleidings-systemen, is het concept gebaseerd op een eenvoudige en compacte constructie met geringe bewegende massa. Vergeleken met een gestapeld lineair systeem kan een hoge stijfheid en een goed dynamisch gedrag worden behaald. Verdere experimenten zijn gepland om de potentiële voordelen van een planaire SAW motor aan te tonen voor toepassingen in Precision Engineering en Nanotechnologie.