
Summary

This thesis is about a “Micromachined capacitive long-range displacement sensor for nano-positioning of microactuator systems”.

Possible applications of such microsystems are found in future probe-based datastorage, scanning probe microscopy, microbiology, optical lens manipulation, microgrippers and microrobots, etc. These applications require positioning with nanometer precision over a long range (ten’s of micrometers) and benefit from further miniaturization and the application of sub-mm sized Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). In many cases open-loop operation is not sufficient and a form of system control is required to combine nanometer accuracy with a large dynamic range and to obtain better system performance. In order to make such systems both economically viable as well as compact, on-chip position sensing appears to be a requirement. The aim is therefore, to obtain optimal performance through an integration of sensor and actuator with micromachining fabrication technology without additional micro assembly.

The target specifications for the microsensors were to obtain 1-10 nm accuracy in a range of $X_{max} \sim 100 \mu\text{m}$ or more i.e. dynamic measurement range of $\sim 10^5$ or more.

An incremental measurement principle is investigated because in contrast with a non-incremental principle, it decouples resolution and range and thus reduces the demands for dynamic range. With two periodic sensor output signals with period P , a quadrature detection principle can be employed. Counting the number of $P/4$ -sized increments in position, in combination with an analog interpolation technique (e.g. arctan calculation) gives a high precision position measurement.

Using repetitive patterns with periods down to e.g. $P = 8 \mu\text{m}$ and application of quadrature detection, can reduce the dynamic range requirement of 10^5 by a factor of $4 \cdot X_{max} / P = 50$. For a velocity of $v = 50 \text{ mm/s}$, a bandwidth of at least $v / P = 6.25 \text{ KHz}$ would be required for each periodic sensor.

Various sensing principles were considered to be applicable as an incremental displacement sensor. A capacitive sensing principle has been chosen because it can have good performance in terms of accuracy, range, bandwidth and has a wide range of electronic interfacing possibilities. Moreover, it offers relative easy integration through micromachining technology of a capacitive sensor and an electrostatic microactuator system. The problematic aspect of this principle may be the influence of the ever present electrostatic forces and the parasitic capacitance.

This thesis presents two related concepts for an incremental capacitive position sensor. Both concepts are based on the change in capacitance ΔC_s between two periodic geometries S1 and S2 for a relative displacement between the two. One geometry is on a slider-structure movable in x-direction, the other is on sense-structures at both sides of the slider, which are movable in y-direction. In Incremental Capacitive Measurement Mode (ICMM) the position of the slider in x-direction is determined by measuring the periodic change in capacitance $\Delta C_s(x)$ between slider geometry and sense-structure. The gap between slider and sense-structure can be reduced by additional sense-actuators to

increase the signal-to-noise ratio (SNR).

In Constant Capacitance Measurement Mode (CCMM) the sense-actuators are closed-loop controlled in order to keep the capacitance C_s constant, equal to a setpoint value C_{setp} . (i.e. $C_s(x) = C_{setp}$). As a result the sense-structures with a finger-like geometry will move in y-direction, closely following the (sine) pattern on the slider. The required control voltage $U_c(x)$ becomes a sine-signal and a measure for the slider displacement. For typical conditions theoretical analysis predicts an increase in SNR of 320x relative to ICMM.

For experimental assessment various devices with various periodic geometries were designed for a surface micromachining process. The design integrates electrostatic actuators with a capacitive position sensor in a 5 μm -high poly-silicon structural layer, using one mask. The capacitance between the two geometries on sense-structures and slider is converted to a voltage and measured using a charge amplifier and a synchronous detection technique. All experiments were done without compensation for changes in humidity or temperature (e.g. through a reference capacitance).

Quasi-static experiments in ICMM mode show reasonable good agreement with 2D-Finite Element simulations with capacitance variations in the order of $\Delta C/\Delta x \sim 1\text{-}2$ fF μm^{-1} . It is further demonstrated for a sine – rectangular finger geometry with 10 μm period, that a gap-reduction gives an increase in maximum voltage variation to $|\Delta U|_{max} \sim 12$ mV per 5 μm displacement and a reduction in estimated position uncertainty to $\sim |\Delta x|_{max} = 24$ nm over a total displacement range of ~ 32 μm . This includes a systematic position uncertainty of $|\Delta x|_{mean\ hyst} = 12$ nm due to hysteresis.

For CCMM an estimated position uncertainty below 10 nm is demonstrated, although far from real-time operation. However, a position uncertainty of 1 nm or less appears feasible. CCMM can improve the non-linearity due to higher order spatial harmonics resulting ideally in a pure sine-shaped voltage $U_c(x)$.

Dynamic experiments for ICMM demonstrate that operation at frequencies above the resonance frequency of the test-device $f_r = 1.7$ KHz is possible with an estimated resolution of about 2 nm and an equivalent bandwidth of 1 Hz.

New experiments are anticipated in the near future with devices made with a novel bulk micromachining process called TWIN. These devices have an increase in structure height by a factor of 5 - 20x. This is expected to give an increase in SNR in the order of 25 - 200. With some further improvements in electronics and experimental setup, actual positioning with nanometer precision over a long range will be attainable. Characterization using e.g. image analysis techniques will be carried out to fully demonstrate nano-position capabilities.

Samenvatting

Dit proefschrift gaat over een “Micromachined capacitive long-range displacement sensor for nano-positioning of microactuator systems”.

Mogelijke applicaties van zulke microsysteemen worden gevonden in toekomstige probe- of tipgebaseerde data-opslag systemen, scannende probe microscopie, microbiologie, optische lens-manipulatie, micro-grijpers en microrobots, etc. Deze applicaties vereisen positionering met nanometer precisie over een groot bereik (decades van micrometers) en profiteren van verdere miniaturisatie en de toepassing van Micro Electro Mechanische Systemen (MEMS) met sub-mm afmetingen. In veel gevallen is open-lus bedrijf niet toereikend en een vorm van systeemregeling of terugkoppeling is nodig om nanometer nauwkeurigheid te combineren met een groot dynamisch bereik en om betere systeem prestaties te verkrijgen. Op-de-chip positie detectie lijkt een vereiste, teneinde dit soort systemen zowel compact als economisch uitvoerbaar te maken. Het doel daarom is, een optimale prestatie niveau te verkrijgen door integratie van sensor en actuator door *micromachining* fabricage technologie zonder aanvullende micro assemblage of fijnmechanische bewerkingen.

De gewenste specificaties voor de microsensoren waren: het behalen van een 1 – 10 nm nauwkeurigheid in een bereik van $X_{max} \sim 100 \mu\text{m}$ of meer, d.w.z een dynamisch meetbereik van 10^5 of meer.

Een incrementeel meetprincipe is onderzocht, omdat in tegenstelling tot een niet-incrementeel principe, de resolutie en het bereik worden ontkoppeld en daarmee de eisen aan dynamisch bereik worden gereduceerd. Met twee periodieke sensor-uitgangssignalen met periode P kan een kwadratuur detectie principe worden ingezet. Het tellen van incrementele positieveranderingen ter grootte van $P/4$, in combinatie met een analoge interpolatie techniek (b.v. door een arctan berekening) geeft een positiemeting met hoge-precisie.

Het gebruik van periodieke patronen met periodes tot b.v. $P = 8 \mu\text{m}$ en toepassing van kwadratuur detectie kan de eisen aan het dynamische bereik van 10^5 verkleinen met een factor $4 \cdot X_{max} / P = 50$ x. Voor een snelheid van $v = 50 \text{ mm/s}$ zou een bandbreedte van minstens $v / P = 6.25 \text{ KHz}$ nodig zijn voor elk van de periodieke sensoren.

Verschillende fysische meetprincipes zijn beschouwd op toepasbaarheid als incrementele verplaatsingssensor. Een capacitief detectie principe is gekozen omdat het een goed prestatieniveau kan hebben wat betreft nauwkeurigheid, bereik en bandbreedte en vele mogelijkheden voor elektronische connectie en manipulatie. Verder biedt dit principe relatief eenvoudige integratie van een capacitieve sensor en een elektrostatische *microactuator* door *micromachining* technologie. Een problematisch aspect van dit principe kan de invloed zijn van de altijd aanwezige elektrostatische krachten en parasitaire capaciteiten.

Dit proefschrift presenteert twee gerelateerde concepten voor een incrementele capacitieve positie sensor. Beide concepten zijn gebaseerd op de verandering in capaciteit ΔC_s tussen twee periodieke geometriën S1 en S2 voor een relatieve onderlinge verplaatsing. Eén geometrie is deel van een *slider*-structuur, bewegende in x-richting. De

andere is deel van *sense*-structuren aan weerszijden van de *slider* en beweegbaar in y-richting. In Incrementele Capacitieve Meet Modus (ICMM) wordt de positie van de *slider* bepaald, door de periodieke capaciteitsverandering $\Delta C_s(x)$ tussen *slider*-geometrie en *sense*-structuur te meten. De spleet of *gap* tussen *slider* en *sense*-structuren kan worden verkleind door additionele *sense*-actuators om daarmee de signaal-ruis ratio (SNR) te vergroten.

In Constante Capaciteit Meet Modus (CCMM) worden de *sense*-actuators in een terugkoppelings-lus geregeld, teneinde de capaciteit C_s constant en gelijk te houden aan een instel-waarde of *setpoint* C_{setp} . (d.w.z. $C_s(x) = C_{setp}$). Als gevolg daarvan zullen de *sense*-structuren met een op vingers lijkende geometrie in y-richting bewegen en het sinus-patroon op de *slider* met (zeer) kleine afstand volgen. De benodigde regelspanning $U_c(x)$ wordt sinusvormig en een maat voor de *slider*-verplaatsing. Voor typische condities voorspelt een theoretische analyse een verhoging in SNR van 320x in vergelijking met ICMM.

Voor experimentele evaluatie zijn verschillende microsystemen met verschillende periodieke geometriën ontworpen. Het ontwerp integreert elektrostatische actuators met een capacitieve positie sensor in een 5 μm dikke poly-silicium structuur laag met gebruik van één masker. De capaciteit tussen de *sense*-structuren en de *slider* wordt geconverteerd naar een spanning en gemeten door een trans-impedantie of ladingsversterker en een synchroon-detectie techniek. Alle experimenten zijn gedaan zonder compensatie voor veranderingen in relatieve luchtvochtigheid of temperatuur (bv. door middel van een referentie-capaciteit).

Quasi-statische experimenten in ICMM bedrijf laten redelijk goede overeenkomst zien met 2D-eindige elementen simulaties met capaciteitsvariaties ter grootte van $\Delta C/\Delta x \sim 1\text{-}2$ fF μm^{-1} . Verder wordt gedemonstreerd voor een sinus-rechthoekige vinger geometrie met 10 μm periode, dat een *gap*-verkleining een toename geeft van de maximale spanningsvariatie $|\Delta U|_{max} \sim 12$ mV per 5 μm verplaatsing en een reductie in geschatte positie onzekerheid tot $\sim |\Delta x|_{max} = 24$ nm over een totaal verplaatsings-bereik van ~ 32 μm . Dit omvat een systematische onzekerheid van $|\Delta x|_{mean_hyst} = 12$ nm door hysteresis.

Voor CCMM bedrijf wordt een geschatte positie-onzekerheid van minder dan 10 nm gedemonstreerd, hoewel verre van *real-time*. Echter, een positie-onzekerheid van 1 nm of kleiner lijkt haalbaar. CCMM kan de niet-lineariteit door hogere-orde spatiele harmonischen verbeteren, wat idealiter resulteert in een puur sinusvormige spanning $U_c(x)$.

Dynamische experimenten voor ICMM demonstreren dat het mogelijk is om de huidige implementatie te bedienen op frequenties hoger dan de resonantie-frequentie van het test-microsysteem van $f_r = 1.7$ KHz met een geschatte resolutie van circa 2 nm bij een equivalente bandbreedte van 1 Hz.

Nieuwe experimenten worden verwacht in de nabije toekomst met microsystemen die gemaakt zijn met een nieuw *bulk-micromachining* proces, genaamd TWIN. Deze microsystemen hebben een toename in structuur-hoogte met een factor 5 tot 20x. De verwachting is dat dit een toename in SNR geeft in de orde van 25 – 200 x. Met enkele verdere aanpassingen in elektronica en experimentele opstelling zal feitelijke nano-positionering met nanometer-precisie over een groot bereik haalbaar zijn. Karakterisatie door middel van b.v. beeld analyse technieken zal worden uitgevoerd om daarmee nano-positionering volledig te demonstreren.