



Precisionsstyrning

Mikromekanik utmanar fiberoptiska gyron

Under de senaste åren har navigationsindustrin sett hur mikromekanik, mems, vunnit mark tack vare förbättrade felegenskaper, miljömässig stabilitet, ökad bandbredd, bättre g-känslighet och den ökade tillgången till inbyggd beräkningskraft för körning av avancerade fusions- och givarfelsmodelleringsalgoritmer.

DET VÄXER UPP NYA marknader för tröghetsnavigeringssystem (Inertial Navigation System) med hög precision och memstekniken träder också in på marknader som tidigare dominerats av fiberoptiska gyron. Bland annat går det att se en tydlig övergång från dessa till memstekniken i stabiliseringstillämpningar för styrbara antenner. Maskinstyrningstillämpningar kan också dra nytta av framstegen inom memsteknik. Traditionellt har användarna nyttjat navigationssystem baserade på fiberoptiska- eller ringlasergyron som kostar mer än 30 000 dollar, eftersom prestanda har varit 20 gånger exaktare och tillförlitligare än motsvarande mikromekaniska navigationssystem för 1000 dollar. Precisionsjordbruk och förarlösa fordon är två exempel på tillämpningar som skulle gynnas kraftigt av förbättringar från mer överkomlig memsnavigation.

DET NAVIGATIONSSYSTEM som användes i detta arbete utformades för att leverera attityden (en flygtern som anger orienteringen i förhållande till horisontalplanet oavsett flygriktningen) till en motor som sedan stabiliserade en styrbar antenn på ett fordonstak. Antennen var riktad mot en geostationär satellit.

Navigationsystemet användes som en förankrad tröghets/satellitnavigator som tillhandahöll täta positioner och has-



Av Chris Goodall och Sarah Carmichael, Trusted Positioning samt Bob Scannell, Analog Devices

Chris Goodall är vd, teknikchef och medgrundare av Trusted Positioning. Han arbetar med att utveckla, implementera och missionera om navigeringssystem med många olika typer av sensorer. Chris har publicerat över 40 artiklar i ämnet och har sex patent.



Sarah Carmichael är marknadskoordinator på Trusted Positioning. Hon har ansvaret för alla marknadsföringsaktiviteter.



Bob Scannell har arbetat på Analog Devices i över 15 år och sysslar med affärsutveckling kring företagets memprodukter för navigation. Tidigare har han arbetat på Rockwell International med konstruktion och marknadsföring.

tigheter. IMU-data (Inertial Measurement Unit) strömmade till navigationsfiltret med 1000 Hz och dessa datapaket användes för att förutsäga position, hastighet och attityd. Satellitbestämda positioner, hastigheter och riktningar härledda från dubbla antenner användes som uppdateringar till navigationsfiltret. När satelliterna inte var tillgängliga användes en magnetometer för att beräkna riktningen. En barometer användes också till att underlätta höjdbereäkningar.

SÄRSKILDA KALIBRERINGSRUTINER användes parallellt med navigationsfiltret. Dessa rutiner kalibrerade magnetometern, dubbelantennens feljustering, IMU-feljusteringen och mängden fordonsvibrationer för statisk perioddetektering.

Systemet utformades för att fungera i två maskinvarukonfigurationer. Den första konfigurationen bestod av två fiberoptiska

gyron (för riktning och lutningsvinklar), ett mikromekaniska gyro (för rullning), en treaxlig mikromekanisk accelerometer, en treaxlig mikromekanisk magnetometer och en mikromekanisk barometer med en total kostnad på cirka 8000 dollar för låga volymer.

DEN ANDRA KONFIGURATIONEN innehöll tre mikromekaniska gyron (för alla attitydvinklar), samma treaxliga mikromekaniska accelerometer, treaxliga mikromekanisk magnetometer och mikromekanisk barometer som den föregående konfigurationen, med en total kostnad på cirka 1000 dollar för låga volymer. Priserna på dessa system kan variera med marknadsförhållandena och volymen, men i allmänhet är fiberoptiska gyrosystem åtta till tio gånger dyrare.

Det huvudsakliga problemet med detta system är det höga bandbreddskravet. Många mikromekaniska accelerometrar ►

	Mått	Värde	Enheter
Gyro	Bandbredd	330	Hz
	Lutningsinstabilitet	6,25	grader/tim
	"Angular random walk"	0,3	grader/kvadratt (tim)
	g-känslighet	0,009	grad/s/g
Accelerometer	Bandbredd	330	Hz
	Lutningsinstabilitet	32	µg
	"Velocity random walk"	0,023	m/s/kvadratt (tim)

Tabell 1. MEMS IMU-specifikationer (ADIS16485).

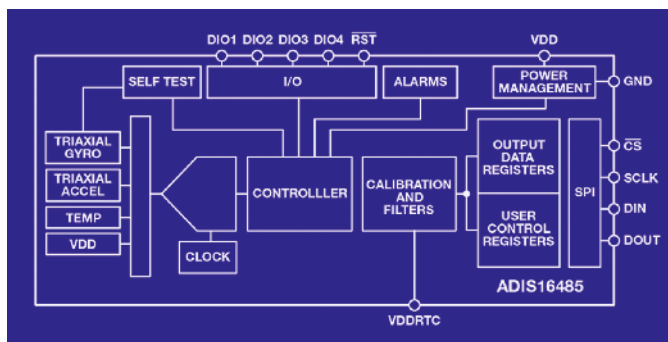


Bild 1. Memsbaserad IMU-konfiguration (ADIS16485).

erbjuder en hög bandbredd, men mikromekaniska gyron har vanligen 100 Hz bandbredd eller mindre. Det finns flera mikromekaniska gyron som ger bra lutningsstabilitet, men har då lägre bandbredd eller högt brus. De gyron som valdes för detta system balanserade bandbredd och prestanda. Specifikationerna för systemet anges i tabell 1.

Gyrona har en flerkärnig arkitektur som ger en optimerad balans mellan stabilitet, brus, linjäritet och linjära g-prestanda.

MED MEMSGYRON OCH accelerometrar integrerade i den fleraxliga IMU-enheten, är givarnas x/y/z-ortogonalitet en potentiell dominerande felkälla. Detta anges ofta som antingen tvåaxlig känslighet eller felinpassning. Man ser ganska typiskt en specifikation på ± 2 procent tvåaxlig känslighet. IMU-enheten i detta system har en tvåaxlig känslighet på 0,087 procent (0,05 graders ortogonalitet). Men framförallt håller denna specifikation över ett brett temperaturområde, tack vare en enhetsspecifik kalibrering som görs på fabriken. För en given rotationshastighet, till exempel på giraxeln, kommer de ortogonala axlarna att ha en girutsignal lika med CrossAxisSensitivity \times YawRate, även när det är noll verklig rotation på rull- och lutningsaxlarna. Ett 2 procent tvåaxligt fel resulterar typiskt i ett betydligt större brustillskott vid sidan av axeln än gyrots interna brus; medan IMU-enhetens känslighet på 0,087 procent här är noggrant balanserad till det gyrots interna brusnivå.

Den tillgängliga bandbredden och betydelsen den har för att kunna matcha fasererna över axlarna är också viktigt för fleraxliga konstruktioner. Vissa gyron har en begränsad bandbredd med total brusreducering, medan andra har begränsad bandbredd (vanligtvis under 100 Hz) som ett resultat av den givarbearbetning som används i



Bild 2. Resultat för enbart GPS med reflekterade signaler.



Bild 3. Lösning med integrerad FOG/GPS (FOG + GPS rött, endast GPS blått).

återkopplingselektroniken. Detta kan resultera i fasrelaterade fel i givarens signalbana, särskilt i Kalmanfiltret. Med 330 Hz tillgänglig bandbredd och ett inbyggt och inställbart filtreringssystem, tillhandahåller den mikromekaniska IMU:n en väl avvägd strategi för att minimera det totala antalet felkällor.

Kärnsensorerna som används i denna IMU har inneboende styrkor när det gäller både vibrationsavvisning och linjäritet, vilket gör deras prestanda lämpliga inte bara för högdynamiska tillämpningar utan också särskilt robusta och förutsägbara i extrema miljöer.

DE FIBEROPTISKA GYRONA som används i denna konstruktion valdes baserat på en kombination av pris, prestanda och storlek. Bandbredden, lutningsstabiliteten och brusnivån hos dessa var en avgörande faktor i det slutliga valet av givare. De viktiga prestandaparametrarna anges i tabell 2. De fiberoptiska enheterna har bättre lutningsstabilitet och en betydande förbättring av driften i vinkeln (angular random walks) jämförelse med mikromekaniska enheter.

Realtidsnavigationsprogramvaran klockade med 1 000 Hz och använde traditionell SINS-mekanik med mätningssuppdateringar. Mätningssuppdateringarna kom från flera olika källor:

1. Positioner och hastigheter från satellitnavigeringen
2. Riktningssuppdateringar från dubbelantennen
3. Riktningssuppdateringar från magnetometer
4. Höjduppdateringar från barometer
5. Hastighetsuppdateringar från bilens diagnostikdata OBDII (tillval)

VARJE UPPDATERING ANVÄNDES för att korrigera avvikelser i tröghetsnavigeringen, men uppdateringarna själva kunde avbrytas eller vara felaktiga.

Riktningssuppdateringar från dubbelantennen har hög noggrannhet, men är benägna att ge reflekterade signaler. Därför är riktningssuppdateringar från dubbelantenn bara tillförlitliga under bar himmel. Det samma kan sägas om positions- och hastighetsuppskattningarna från satellitmottagaren som också drar nytta av markbundna korrigeringssystem.

Riktningssuppskattningar från magnetometern kunde påverkas av stora lutningsvinklar på grund av dålig sikt uppåt under kalibrering. Magnetometrar kan också ge felaktiga resultat runt järnhaltiga föremål, till exempel när man kör bredvid andra fordon. Det betyder att magnetometern användes för att initiera systemet när satellitnavigatören inte var tillgängligt eller för att minska avdriften under väldigt långa perioder med driftsstopp i satellitnavigeringen (t.ex. 20 minuter).

BAROMETERN ANVÄNDES för att underlätta höjdvälsläsningar när satellitnavigeringen inte var tillgängligt eller gav felaktiga värden. Hastighetsuppdateringarna användes för att förhindra hastighetsavdrift utan satelliter, i synnerhet i spårriktningen. Dessa hastighetsuppdateringar bidrog även till att minska lösningens positionsosäkerhet, vilket bidrog till att avvisa dåliga positionsuppdateringar. Hela navigationsprogramvaran utformades till att tillhandahålla exakta resultat under alla förhållanden.

För att kunna jämföra båda systemen på ett korrekt sätt utarbetades tre prestanda-tester på systemnivå:

1. Bar himmel med bra satellitsignaler för att bedöma noggrannheten för rullning, lutning och riktning.

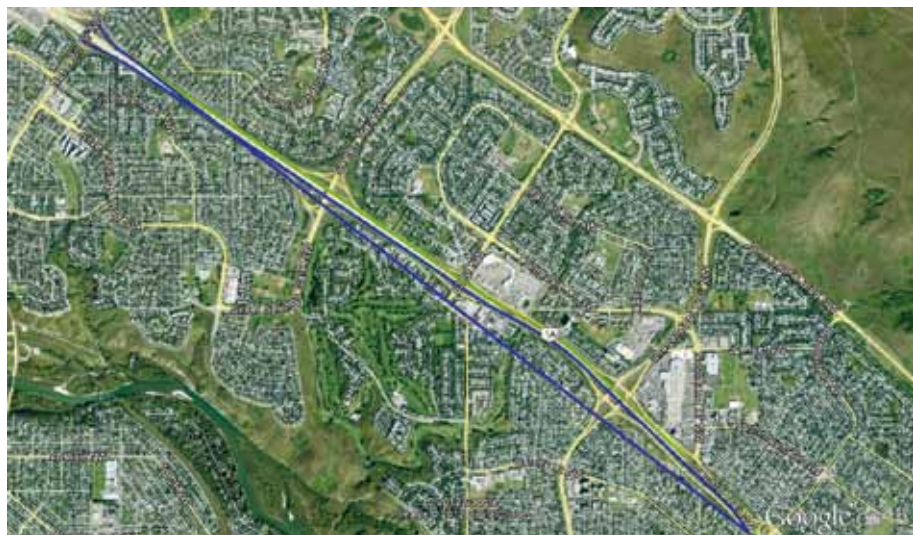


Bild 7. Testbana med enbart INS.



Bild 4. Lösning med integrerad MEMS/GPS (MEMS + GPS grönt, endast GPS blått).



Bild 5. Lösning med integrerad MEMS/GPS/OBDII (MEMS + GPS + OBDII grönt, endast GPS blått).



Bild 6. MEMS med OBDII (grönt) jämfört med FOG utan OBDII (rött), endast GPS i blått.

	Mätning av prestanda	Värde	Enheter
Gyro	Bandbredd	1000	Hz
	Lutningsinstabilitet	3	grader/tim
	"Angular random walk"	0,1	grader/kvadrerat (tim)

Tabell 2. Specifikationer för det fiberoptiska gyrot (uFors-6U).

	FOG	MEMS
RMS-fel för rullning (grader)	0,08	0,10
RMS-fel för lutning (grader)	0,08	0,10
RMS-fel för riktning (grader)	0,13	0,14

Tabell 3. Resultat för bar himmel-attityd.

- Scenarier med reflektioner, till exempel i stadsområden där satellitlösningen kan fungera sämre på grund av höga byggnader. Syftet med detta test var att jämföra filtrerade positionsprestanda som även kunde visa attityds- och hastighetsfel.
- Prestanda för enbart tröghetsnavigering för att utvärdera avdrift i position, som återigen representerar hastighets- och attitydprestanda.

MED GPS TILLGÄNGLIGT och en fri siktlinje till flera satelliter, var positions- och hastighetsresultaten jämförbara mellan de båda systemen. Attitydvinklarna – rullning, lutning och riktning – var de primära navigationsparametrar som jämfördes eftersom de till stor del fastställs av gyroskoppres-tanda.

Attitydprestanda var nästan samma när satelliterna var tillgängliga med en 5-procentig fördel för det fiberoptiska gyrot.

Nästa test utformades för att jämföra de två systemen i närvaro av reflekterande satellitsignaler. En bana kördes i Calgarys centrum som innehöll några riktigt smala gränder och långsam körning i trafik och omgivet av höga byggnader.

Fokus på prestanda kan nu inkludera positioneringsresultat eftersom gyron kan vara en stor bidragande orsak till positionsprestanda i avsaknad av satellitpositioner av hög kvalitet. Resultatet av detta test visar att de två systemen är jämförbara. Där-

emot var det fiberoptiska systemet cirka 20 till 30 procent bättre.

Bild 2 visar en lösning med enbart GPS. GPS-mottagaren som användes i det här testet drabbades av ganska betydande signalreflektion vid navigering längs den tuffa stadsbanan. Lösningen med enbart GPS uppvisade fel upp till 100 meter.

Lösningen med fiberoptiska gyro i rött (bild 3) visar tydligt fordonets bana, med en exakthet till 10 meter eller bättre i stads-miljö.

Den mikromekaniska lösningen (i grönt) i bild 4 ligger hela tiden inom 15 meter. Denna lösning är mer benägen att "vika av" på grund av dåliga uppdateringar av satellitpositionen orsakade av sämre viktning av förutsägelserna från tröghetsnavigerings-systemet.

FÖR ATT HJÄLPA MEMSLÖSNINGEN att övervinna de felaktiga GPS-uppdateringarna användes ytterligare givare. Bild 5 visar när OBDII lades till i systemet för att erhålla fordonets hastighet.

Den mikromekaniska lösningen ligger hela tiden inom 10 meter och kan bli ännu lite bättre än fiberoptiska gyron utan OBDII, som visas i inzoomningen i bild 6.

Den slutliga jämförelsen mellan de två systemen var ett navigationstest med enbart tröghetsnavigering. Systemen konvergerade med ställetuppdateringar under bar himmel. Antennanslutningen togs sedan

bort från båda systemen under 4,5 minuter, och positionsavdrifterna användes sedan för att uppskatta prestanda. Den avverkade sträckan under den här tiden var cirka 5 500 meter.

Bild 7 visar en översikt av banan. Den raka blåa linjen visar var GPS-enheten kopplades bort – längst ner till höger till längst upp till vänster där den anslöts igen.

DET FIBEROPTISKA SYSTEMET presterade mycket väl under denna period med drifts-stopp i satellitmottagningen med en maximal avdrift på sju meter som visat i bild 8. Typiska avdriftsprestanda för det fiberoptiska systemet efter fem minuter har uppmätts till 25 meter, så detta driftsstopp var något bättre än typisk prestanda.

Memssystemet hade en avdrift på 75 meter. Mycket av denna avdrift var spårningsfel, som främst kan hänföras till accelerometrarna. Memssystemet har uppmätts ha en typisk avdrift på 75 meter efter fem minuter utan satellituppdateringar, vilket ungefär 3 gånger mer än avdriften fr det fiberoptiska systemet.

När OBDII lades till i memssystemet förbättrades avdriften till mindre än 10 meter eller motsvarande fiberoptiska lösning. Typiska prestandatest av Memssystemet med OBDII ger en positionsavdrift på cirka 30 meter efter fem minuter utan satellit-uppdateringar, vilket också motsvarar prestanda med fiberoptiska gyron. ■



Bild 8. Avdrift med enbart FOG.



Bild 9. Avdrift med enbart MEMS.



Bild 10. Avdrift för MEMS med OBDII.