



ISOBUS Inertial Measurement Unit

Real-time 3D oriëntatiebepaling ten behoeve van GPS besturing

Ir. V.T.J.M. Achten

PROBOTIQ B.V.

Augustus 2012

Colofon

Titel	ISOBUS Inertial Measurement Unit
Auteur	Ir. V.T.J.M. Achten
Opdrachtgever	SBG Precision Farming B.V. / Programma Precisielandbouw
Projectnummer	403
Bestandsnaam	Rapportage PPL105-IMU-v1.docx

Dit project (105) is uitgevoerd op initiatief van SBG Precision Farming en is gefinancierd door het Programma Precisielandbouw (PPL, www.pplnl.nl)



PROBOTIQ B.V.

Kleefkruid 74
5432EE Cuijk
Telefoon 0485-393812
Fax 0485-785287
E-mail info@probotiq.com
Internet www.probotiq.com

Contactpersoon

Ir. V.T.J.M. (Vincent) Achten
Telefoon 06-13626371
E-mail vincent.achten@probotiq.com

© 2012 PROBOTIQ B.V. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van PROBOTIQ.

PROBOTIQ is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

INLEIDING EN DOELSTELLING

Sinds een aantal jaren neemt het gebruik van centimeterprecieze Real Time Kinematic (RTK) GPS toe in de landbouw. Deze nauwkeurige vorm van GPS wordt met name gebruikt om landbouwvoertuigen en -werktuigen aan te sturen zodat bewerkingen in het veld kaarsrecht en met minimale overlap kunnen worden uitgevoerd. Hiermee kunnen agrarische ondernemingen hun efficiëntie verhogen en kan worden bespaard op brandstof, meststof en gewasbeschermingsmiddelen.

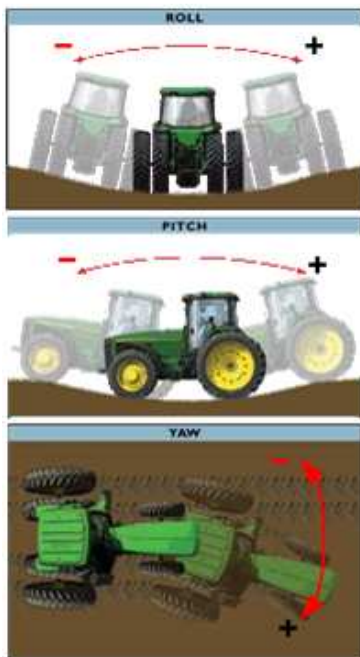
Bij de besturing van voertuigen en werktuigen dient RTK-GPS antenne als basis. Eén enkele RTK-GPS antenne levert echter alleen een puntmeting op, de positie. Om een voer- of werktuig te kunnen besturen is ook de oriëntatie van de machine (richting in het driedimensionaal vlak) van groot belang. Bij GPS besturing wordt gebruik gemaakt van een (virtuele) referentielijn waarover de machine wordt gestuurd. Deze referentielijn bevindt zich op het grondvlak. De GPS antenne wordt vaak hoog op de machine (voertuig / werktuig) geplaatst om optimale ontvangst van satellietsignalen te garanderen. Door oneffenheden in het veld zal de antenne, door de hoge plaatsing, op en neer bewegen. De positie van de GPS antenne komt dan niet altijd overeen met de positie van de machine (het werkpunt) ter hoogte van het grondvlak. Hiervoor moet worden gecorrigeerd op basis van metingen van de oriëntatie van de machine. Wordt dit niet gedaan dan zal de GPS besturing de antenne een rechte lijn laten volgen, maar de machine zal bij oneffenheden er als het ware 'onderdoor slingeren'. Dit komt de precisie uiteraard niet ten goede. Door een nauwkeurige 3D oriëntatiebepaling kan voor bijvoorbeeld scheefstand worden gecorrigeerd kunnen rechte lijnen, ook op hellende percelen, worden gegarandeerd.

SBG Precision Farming (SBG) past hiervoor reeds een analoge enkelvoudige 'waterpas' toe waarbij analoge sensorsignalen rechtstreeks naar de bedieningsterminal gaan. Het nadeel van het gebruik van analoge signalen is dat deze storingsgevoelig zijn en dat het aantal signalen beperkt is waardoor er maar een beperkt aantal sensoren kunnen worden ingelezen. Tevens is de nauwkeurigheid van de analoge signalen niet optimaal.

De doelstelling van dit project is het ontwikkelen van een Inertial Measurement Unit (IMU) welke de bewegingen en oriëntatie van trekker, cabine en werktuigen snel en nauwkeurig kan registreren en digitaal communiceert via het CAN/ISOBUS protocol. Een belangrijk voordeel van het CAN/ISOBUS principe is dat meerdere van deze geavanceerde IMU's op eenvoudige wijze binnen het besturingssysteem kunnen worden geïntegreerd. De communicatie geschiedt digitaal waardoor grotere hoeveelheden sensordata met grote nauwkeurigheid kunnen worden geregistreerd. Door het gebruik van meerdere IMU's op een trekker/werktuig combinatie kan de positiebepaling van het werkpunt centimeters tot millimeters vergroot.

Roll, Pitch en Yaw

Bij de implementatie van hard- en software is het van belang een eenduidige definitie te hebben van de oriëntatie van de machine. Deze 3D-oriëntatie wordt uitgedrukt met 'Roll', 'Pitch' en 'Yaw'. Figuur 1 geeft deze termen schematisch weer:



Figuur 1. Roll, Pitch en Yaw.

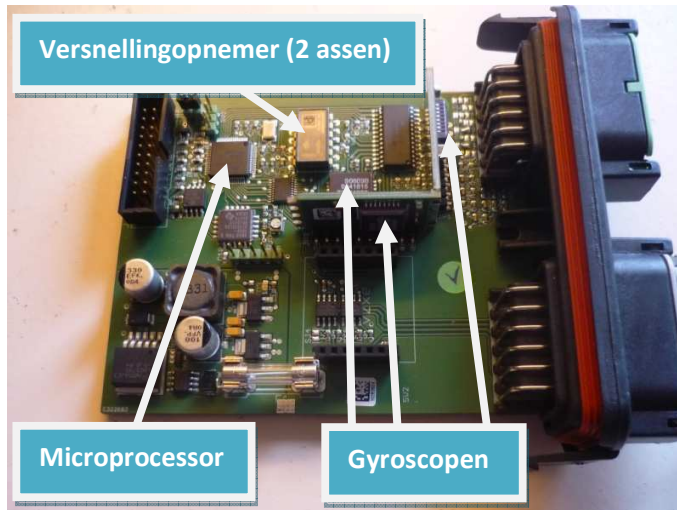
In het geval van trekkerbesturing is het werkpunt vaak gekozen op grondniveau, midden tussen de achteras. De GPS antenne bevindt zich vaak aan de voorzijde van het trekkerdak, enkele meters boven de grond. Om de gemeten GPS positie te vertalen naar de positie van het werkpunt is een coördinatentransformatie noodzakelijk over de Roll-, Pitch- en Yaw-assen. De Roll, Pitch en Yaw moeten dan ook accuraat worden gemeten.

HARDWARE

Om de oriëntatie van de machine te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van verschillende sensoren die tesamen, via 'Sensor-Fusion', een optimale schatting opleveren voor de oriëntatie van de machine. Voor de bepaling van Roll en Pitch wordt gebruik gemaakt van een combinatie van versnellingsopnemer en gyroscoop, voor de bepaling van Yaw wordt gebruik gemaakt van GPS waarnemingen en een gyroscoop.

In totaal zijn twee versnellingsopnemers (Roll en Pitch) en drie gyroscopen (Roll, Pitch en Yaw) op een printplaat geïntegreerd tesamen met een krachtige ARM7TDMI microprocessor die de sensoren digitaal

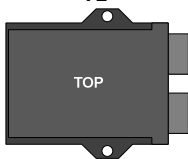
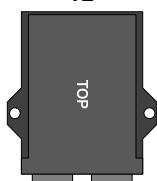
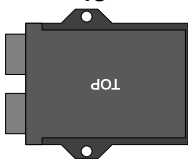
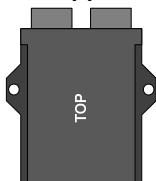
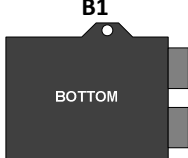
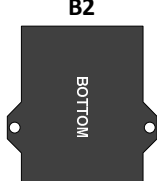
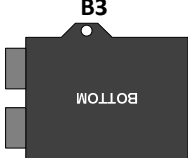
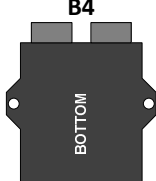
uit kan lezen en de sensordata in real-time kan combineren om tot een optimale schatting van de oriëntatie te komen. Figuur 2 geeft de ontwikkelde hardware en de plaatsing van de sensoren weer.



Figuur 2. Ontwikkelde hardware met de plaatsing van de sensoren.

De hardware wordt geplaatst in een compacte behuizing die door de configuratie van sensoren op acht verschillende manieren op de machine kan worden gemonteerd. Tabel 1 geeft de verschillende montage mogelijkheden weer.

Tabel 1. Montagemogelijkheden IMU.

	Stekkers naar achter	Stekkers naar links	Stekkers naar voor	Stekkers naar rechts
Bovenkant wijst naar boven	T1 	T2 	T3 	T4 
Onderkant wijst naar boven	B1 	B2 	B3 	B4 

De montagerichting is van belang bij de implementatie van de firmware omdat de draairichting van de sensoren bij elke montagerichting anders is. De montagerichting is dan ook een instelparameter in de software.

FIRMWARE

De ontwikkeling van de firmware kan globaal in twee fasen worden opgedeeld: signaalverwerking en communicatie.

Signaalverwerking

De interne sensoren worden digitaal uitgelezen via een SPI (Serial Peripheral Interface) bus. Dit betekent dat sensordata louter digitaal wordt uitgewisseld en dat de analoge signaalverwerking op de sensoren zelf plaats vindt. Om de sensoren uit te kunnen lezen zijn speciale drivers ontwikkeld. De GPS-data komt van de GPS ontvanger en wordt via het ISO/CAN interface verstuurd. De sensordata die voor de signaalverwerking wordt gebruikt is weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Sensoren, hun interface en de gegenereerde data.

Sensor	Interface	Data
Versnellingsopnemer	SPI	Versnelling Temperatuur
Gyroscoop	SPI	Draaisnelheid Temperatuur Offset (fabriekscalibratie) Schaalfactor (fabriekscalibratie)
GPS	CAN	Heading (Yaw) Snelheid

Om tot een optimale schatting te komen van Roll, Pitch en Yaw worden telkens data van twee sensoren gebruikt. In het geval van Roll en Pitch zijn dit versnellingsopnemer en gyroscoop en in het geval van Yaw is dit GPS en gyroscoop. In alle drie de gevallen wordt een absolute hoekmeting gecombineerd met een hoeksnelheidsmeting. De reden voor het gebruik van twee sensoren is omdat elke sensor op zich zowel een voor- als een nadeel heeft waardoor ze afzonderlijk weinig bruikbaar zijn. Tabel 3 geeft dit schematisch weer.

Tabel 3. Sensoren, hun voor- en nadelen.

Sensor	Voordeel	Nadeel
Versnellingsopnemer	Meet rechtstreeks de absolute hoek die van belang is voor Roll en Pitch.	Veel verstoring door trillingen en centripetaalkrachten. Ongeschikt om snelle hoekveranderingen te meten.
Gyroscoop	Kan goed snelle draaiingen meten en is slechts beperkt gevoelig voor trillingen	De offset varieert in de tijd waardoor de sensor naar verloop van tijd draaiing waarneemt die niet aanwezig is.
GPS	Meet rechtstreeks de absolute hoek die van belang is voor de bepaling van Yaw.	De gemeten heading is bij snelle richtingsveranderingen en ongelijk terrein onnauwkeurig.

Door de goede en slechte eigenschappen van twee sensoren te modelleren en te combineren kan een optimale schatting worden gemaakt van de Roll, Pitch en Yaw. Hiervoor wordt een Kalman filter gebruikt. Het Kalman filter is een algoritme waarbij tijdsgebonden metingen van sensoren (met ruis en andere onzuiverheden) worden gebruikt om tot een optimale schatting te komen van een toestandsvariabele (als Roll, Pitch en Yaw), die preciezer is dan de meting van een enkele sensor. Het Kalman filter is een recursief filter dat onzuivere sensordata gebruikt als input en in staat is om uit deze data een statistisch optimale output te genereren. Het filter is vernoemd naar Rudolf E. Kálmán, de bedenker van dit filter. Het Kalman filter bestaat grofweg uit twee delen: 1) Het schatten van de toestand en een schatting van de covariantie 2) het meten van de toestand, het bijwerken van het filter en de schatting van de covariantie.

Bijvoorbeeld: het schatten van de toestand 'Roll' gebeurt op basis van een systeemmodel en de gemeten hoeksnelheid van de gyroscoop (potentiële offset). In de volgende stap wordt de hoek gemeten aan de hand van de versnellingsopnemer (potentieel veel ruis). Aan de hand van de metingen en de instellingen van het filter worden de covarianties bijgewerkt en wordt de geschatte hoek bijgewerkt aan de hand van de gemeten hoek en waarde in het filter.

Meer informatie over het Kalman filter is te vinden op o.m.: http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter.

Voor zowel Roll, Pitch en Yaw zijn Kalman filters geïmplementeerd. De data van de interne sensoren wordt met 250 Hz ingelezen en gefilterd. De GPS data wordt met een lagere frequentie (20 Hz) ingelezen omdat de data van de GPS ontvanger niet frequenter voorhanden is. Het inlezen van de sensoren gebeurt met deze hoge frequentie om laagfrequente motortrillingen effectief weg te kunnen filteren (Nyquist-Shannon theorema). De data van de versnellingsopnemers wordt gecompenseerd voor centripetaalkrachten die ontstaan wanneer bochten worden gereden. Dit vindt plaats op basis van de gemeten voorwaartse snelheid en Yaw-hoeksnelheid.

De output van de versnellingsopnemers en gyroscopen is temperatuurgevoelig hier is in de firmware rekening mee gehouden. Via 4^e graads polynomen wordt de sensordata gecorrigeerd voor de gemeten temperatuur in de sensor zelf alvorens de data wordt verwerkt.

Om Kalman filter goed te kunnen laten functioneren moet dit juist worden ingesteld. Hiervoor zijn per filter een drietal parameters gedefinieerd die informatie bevatten over onder meer de ruiskarakteristieken van de gebruikte sensoren.

Communicatie

De IMU communiceert met andere systemen (waaronder de GPS besturingscomputer) via het ISOBUS CAN protocol. Op basis van de ISO11783 standaard zijn communicatielagen ontwikkeld die de functionaliteit bevatten om IMU op gestandaardiseerde wijze aan het ISOBUS CAN verkeer te kunnen laten deelnemen. Dit omvat onder meer de ontwikkeling van low-level CAN drivers, netwerklagen en applicatielagen.

Via ISOBUS wordt 20 keer per seconde de gemeten Roll, Pitch en Yaw verstuurd naar de navigatie-computer. Daarnaast kan door de navigatiecontroller alle ruwe sensordata worden opgevraagd indien nodig. Alle instellingen voor de IMU kunnen eveneens via de CAN bus worden gewijzigd.

Busbelasting

Doordat de signaalverwerking op de IMU zelf plaats vindt wordt het dataverkeer sterk beperkt t.o.v. het oversturen van sensordata. De firmware verstuurd 'slechts' 20 keer per seconde de optimaal geschatte Roll, Pitch en Yaw over de CAN bus, hetgeen geen problemen oplevert voor het overige dataverkeer.

Tijdigheid

De IMU communiceert met de navigatiecomputer. Om tot een goede schatting van het werkpunt van de machine te komen is het belangrijk dat telkens de meest actuele Roll, Pitch en Yaw wordt gebruikt. De tijdigheid van berichten hangt af van onder meer het overige CAN-bus verkeer. De IMU heeft uiteraard geen invloed op de hoeveelheid en het tijdstip van berichten die worden verstuurd vanaf andere controllers die op het bus-systeem zijn aangesloten. Aan elk CAN bericht wordt een prioriteit gekoppeld en deze prioriteit heeft invloed op 'voorrang' van berichten. De berichten van en naar de IMU worden vooralsnog met ISO11783 Proprietary A berichten verstuurd. In ISO11783-3 zijn de proprietary A berichten gedefinieerd. Deze hebben een standaard prioriteit van 6 (ter info: 0=hoog, 7=laag), maar deze de prioriteit is 'recommended'. Voor berichten die een lage 'latency' (vertraging) vereisen mag de prioriteit worden verhoogd, ook met Proprietary A berichten. Voor alle control-gerelateerde berichten wordt een prioriteit van 3 aanbevolen; dit zorgt voor voorrang van deze berichten waardoor latency wordt geminimaliseerd. Door de berichten van en naar de IMU met prioriteit 3 te verzenden hebben deze 'voorrang' en kan de tijdigheid van deze berichten worden beïnvloed zodat de latency minimaal is.

Aan zowel de IMU- als de navigatiecontroller-zijde kan de tijdigheid ook worden bewaakt door de in de berichten gecodeerde zogenaamde 'time-stamps'.

RESULTATEN

De IMU met de ontwikkelde firmware is geïnstalleerd op een trekker en is via ISOBUS verbonden aan een SBGuidance navigatiecomputer waaraan een GPS ontvanger (Septentrio AsterRx2eH) was gekoppeld met twee GPS antennes; één antenne links van de trekker en één antenne rechts van de trekker. Hiervoor is een speciale constructie ontwikkeld waardoor de antennes op 3 meter afstand van elkaar konden worden gezet. Deze trekker met 'uitstekende' GPS antennes is gebruikt voor de validatie van de ontwikkelde firmware. Door de grote onderlinge afstand van de RTK-GPS antennes kan de werkelijke Roll (of Pitch) en Yaw worden gemeten en vergeleken met de door de IMU geschatte waarden.

Voor de SBG GPS besturing is met name de Yaw en Roll van belang. Hierop is in de metingen dan ook geconcentreerd. De manier waarop de Pitch wordt gemeten is overigens nagenoeg gelijk aan de manier waarop Roll wordt gemeten.

Off-line signaalverwerking en instellen filters

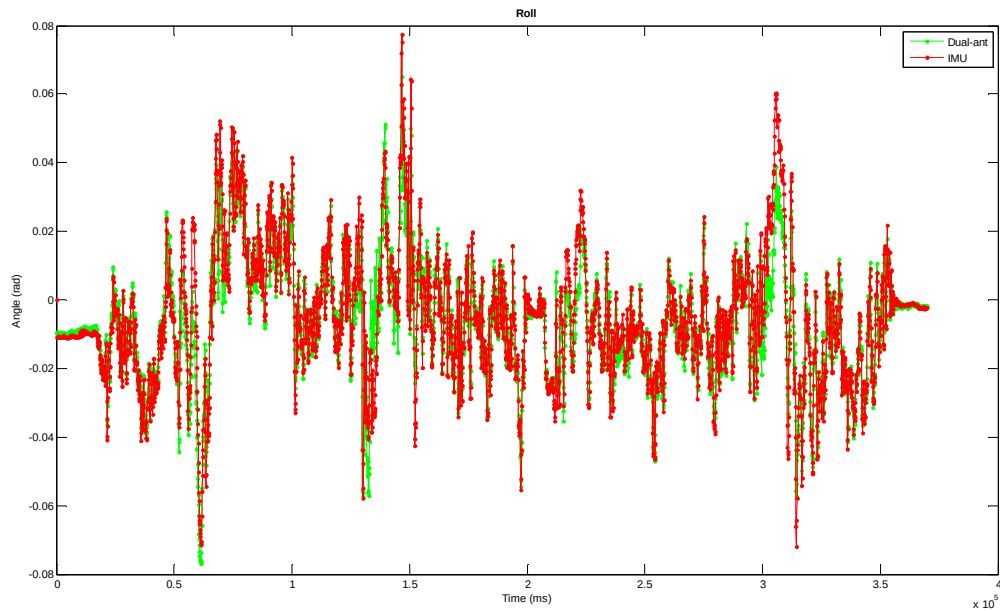
Om de ruwe sensordata goed te kunnen analyseren en om tot een optimale instelling van de Kalman filters te komen is de IMU voorzien van een aparte uitgang waarmee op hoge snelheid (real-time) ruwe sensordata kan worden verstuurd. In eerste instantie is dan ook sensordata verzameld samen met dual-antenna GPS metingen van de oriëntatie van de trekker. De data werd voorzien van een time-stamp om deze later precies te kunnen koppelen en vergelijken.

Met behulp van Matlab is de ruwe sensordata geanalyseerd en zijn de filterinstellingen geoptimaliseerd. Het grote voordeel bij deze off-line verwerking is dat dezelfde input-data met verschillende instellingen kan worden gefilterd en dat zodoende de invloed van de filterparameters goed kan worden geëvalueerd en gevisualiseerd.

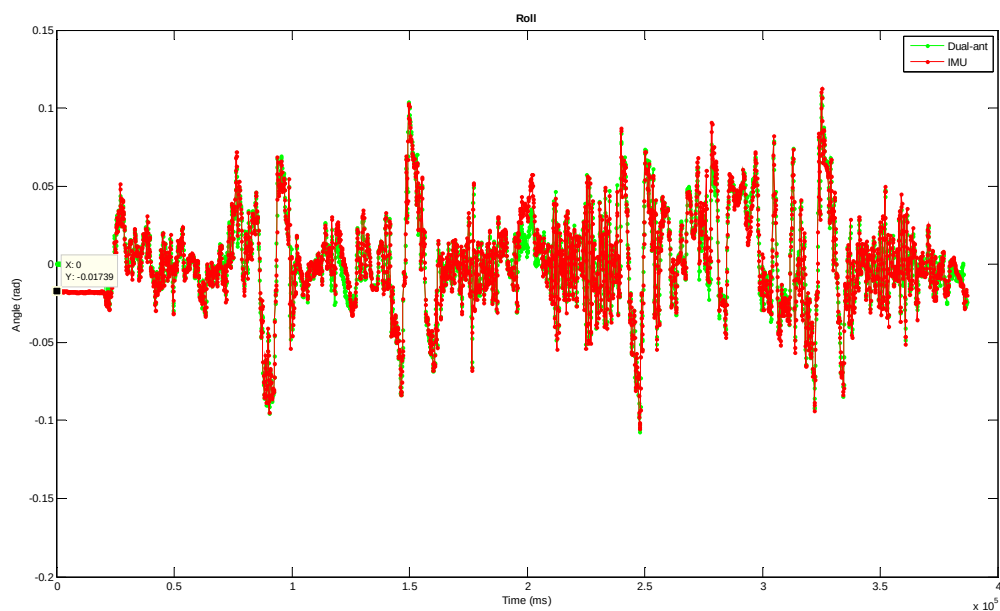
IMU vs. dual antenna GPS

Aan de hand van de off-line signaalverwerking zijn de optimale filterinstellingen bepaald en deze zijn in de IMU firmware ingesteld. Vervolgens zijn metingen gedaan met zowel de IMU als met de GPS ontvanger om de prestatie van de IMU te evalueren.

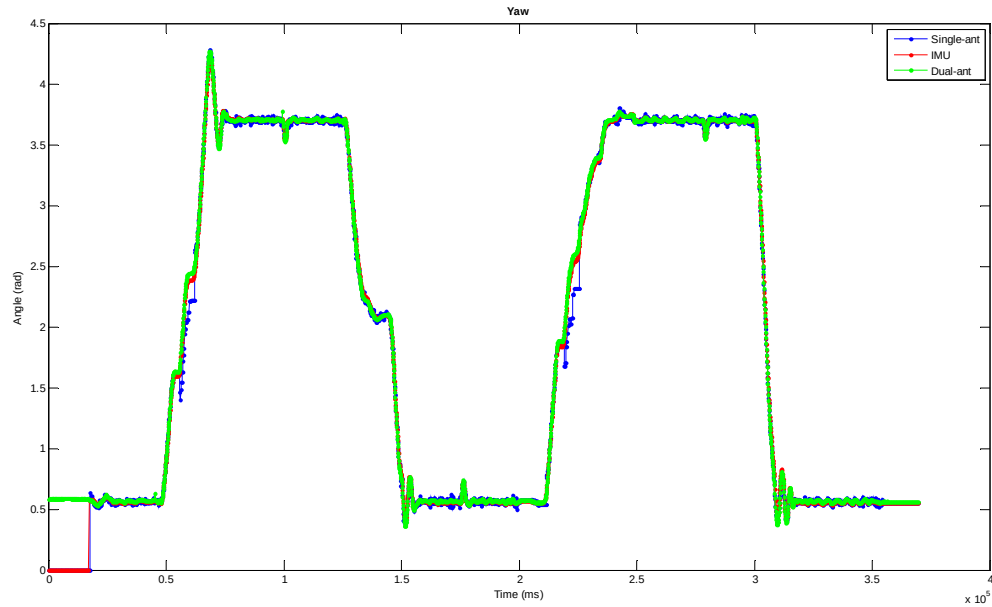
In de Figuren 3 t/m 6 (zie hieronder) zijn een metingen van Roll en Yaw afgebeeld in twee situaties: 1) 'normaal'; hier is met de werkgangen mee gereden en 2) dwars over de werkgangen. In de Figuren 3 en 4 is de Roll afgebeeld van zowel de IMU als de dual-antenna GPS-ontvanger. In de Figuren 5 en 6 is de Yaw afgebeeld van de IMU, de dual antenna GPS ontvanger en de berekende Yaw van een single-antenna GPS ontvanger (midden op de voorkant van het trekkerdak). In de figuren zijn de hoeken weergegeven in radialen.



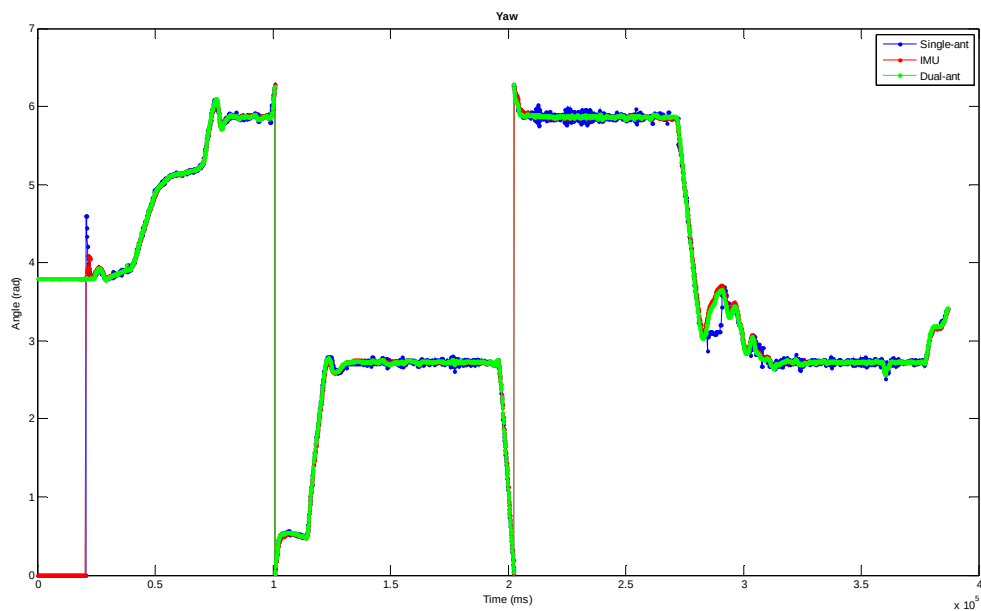
Figuur 3. Roll van zowel IMU als dual-antenna RTK-GPS ontvanger onder normale veldomstandigheden.



Figuur 4. Roll van zowel IMU als dual-antenna RTK-GPS ontvanger dwars over de werkgangen.



Figuur 5. Yaw van zowel IMU als dual-antenna RTK-GPS ontvanger onder normale omstandigheden.



Figuur 6. Yaw van zowel IMU als dual-antenna RTK-GPS ontvanger dwars over de werkgangen.

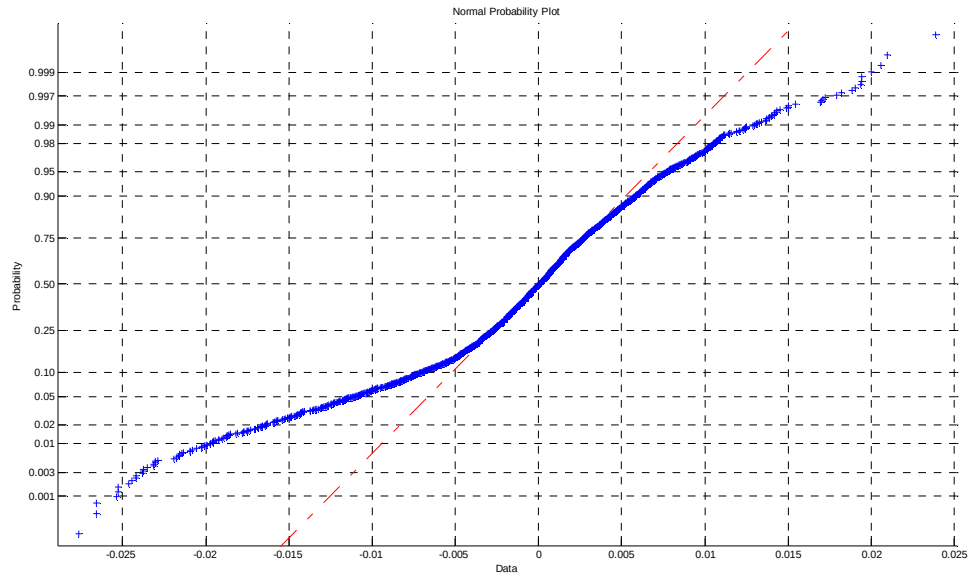
Uit de figuren 3 en 4 is af te leiden dat de Roll dwars over de werkgangen aanzienlijk meer varieert dan onder normale omstandigheden (let op de schaalverdeling van de y-as). In beide situaties is de Roll van de IMU en de dual-antenna GPS vergelijkbaar; de rode en groene lijnen volgen elkaar goed.

Uit de figuren 5 en 6 is af te leiden dat de Yaw van de IMU de Yaw van de dual-antenna GPS goed volgt, beter dan de single-antenna Yaw. Hier zijn soms kleine afwijkingen te zien, met name in Figuur 6 (dwars over de werkgangen). Dit komt omdat de Yaw van de single-antenna GPS berekend wordt vanuit achterliggende GPS posities. Omdat de single-antenna GPS ontvanger bij het rijden dwars op de werkgangen op en neer schudt is het lastiger om hieruit een correcte Yaw hoek te berekenen.

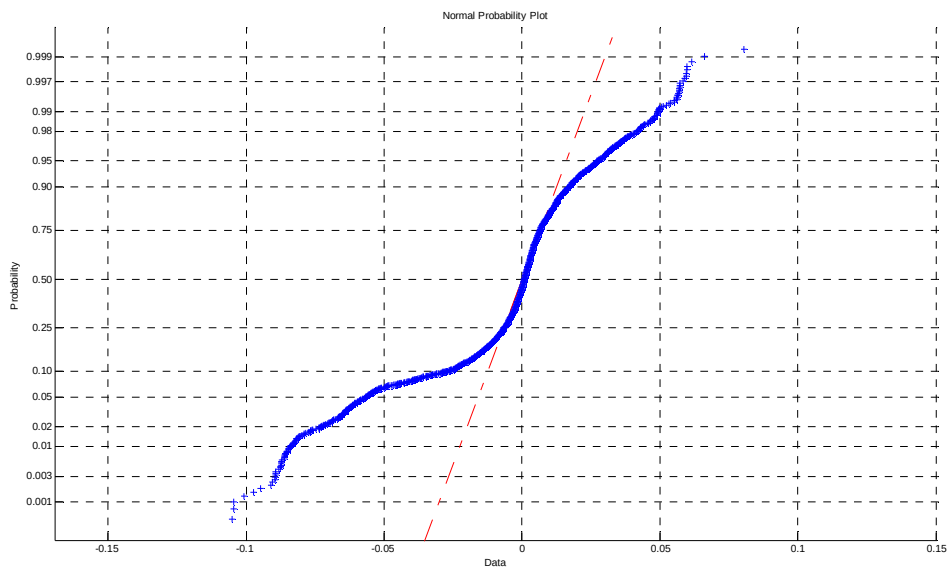
Prestatie IMU

Om uitspraken te doen over de prestatie van de IMU is de data vergeleken met die van de dual-antenna GPS ontvanger. Hierbij moet de kanttekening worden gemaakt dat de dual-antenna GPS ontvanger ook een meetonnauwkeurigheid heeft en dat dit dus niet een absolute referentie is. Daarnaast bevinden zich in de dual-antenna GPS allerlei (Kalman) filters die het resultaat van de meting, met name bij snelle bewegingen enigszins kunnen afvlakken. Voor de instelling 'Motion Dynamics' is de instelling 'Moderate' gebruikt die volgens de fabrikant de juiste instelling is voor voertuigbesturing. De dual-antenna GPS ontvanger is echter de enige praktisch bruikbare referentie voor dit soort metingen en biedt een nauwkeurige referentie.

Om de prestatie van de IMU te evalueren zijn de Roll en Yaw data van de IMU vergeleken met die van de dual-antenna GPS ontvanger; de Pitch data is vergelijkbaar met de Roll data. Van de gegevens zijn in Matlab zogenaamde 'Normal Probability Plots' gemaakt en is de standaarddeviatie berekend. Figuren 7 en 8 geven de Normal Probability Plots van Roll en Yaw weer.



Figuur 7. Normal Probability plot Roll.



Figuur 7. Normal Probability plot Yaw.

In Tabel 4 is de standaarddeviatie weergegeven van Roll en Yaw (de laatste met single antenna als referentie).

Tabel 4. Standaarddeviatie Roll en Yaw.

Orientatie	Standaarddeviatie (graden)
Roll	0.006
Yaw	0.18

De standaarddeviatie van de Roll blijft ruim binnen de gewenste waarde (0.2 graden). Omdat de Pitch voor GPS besturing minder van belang is, is deze verder niet uitgewerkt. De Pitch wordt in de IMU firmware op dezelfde manier berekend als de Roll en de afwijking zal in dezelfde orde van grootte liggen.

De standaarddeviatie van de Yaw is groter, maar blijft binnen de gewenste waarde (0.2 graden). Omdat de IMU de GPS richting gebruikt als absolute referentie is de IMU hiervan afhankelijk. Bij een single-antenna oplossing, zoals deze wordt toegepast in het SBGuidance systeem, wordt de GPS richting berekend aan de hand van vorige posities. De manier van berekenen van de GPS richting is daarmee van invloed op de uiteindelijke Yaw-hoek van de IMU. Door de berekening van de GPS richting te verfijnen kan ook de uiteindelijke Yaw-afwijking kleiner worden. Hiervoor hoeft de firmware van de IMU dus niet te worden aangepast.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De ontwikkelde firmware voor de IMU is in staat om de oriëntatie van het voertuig precies en in real-time te meten door data van verschillende sensoren slim te combineren. Door de ISOBUS communicatie is de IMU gemakkelijk in bestaande CAN-bus systemen te integreren en kunnen zelfs meerdere IMU's aan één bus-systeem worden gekoppeld. Dit is met name interessant voor GPS besturing van trekker en werktuig (SBGuidance Twin).

De berekening van Yaw (voertuig-rijrichting) kan verder worden verfijnd door aanpassingen in de berekening van de GPS-richting in de navigatiecomputer. Door een betere absolute GPS-richting aan de IMU aan te bieden zal de afwijking afnemen. De berekening van de GPS richting kan worden verfijnd door bijvoorbeeld te kijken naar de Roll-data. Varieert deze sterk in een tijdsspanne (hobbels in het terrein), dan zal de berekende rijrichting (Yaw) vanuit de GPS minder precies zijn. Het is dan beter om de IMU tijdelijk niet te voorzien van de GPS richting. De IMU zal dan op basis van de Yaw-gyroscoop de rijrichting tijdelijk schatten (dead reckoning), en is nauwelijks afhankelijk van de hobbels in het terrein. De door de IMU berekende rijrichting is in deze wellicht situaties beter dan de GPS-richting. Wanneer de GPS-richting weer betrouwbaarder is (minder variatie in Roll), kan de GPS-richting weer naar de IMU worden doorgestuurd. Desalniettemin blijft de Yaw met de huidige navigatiesoftware binnen de gestelde foutmarge.

Met de ontwikkelde IMU firmware worden bewegingen nauwkeurig en snel geregistreerd en worden volledig digitaal, via ISOBUS, met de navigatiecomputer uitgewisseld. Hiermee kan de precisie van bewerkingen verder toenemen waardoor er efficiënter kan worden omgegaan met brandstof, meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen.

Voor meer informatie omtrent de IMU en de ontwikkelde firmware kunt u contact opnemen met SBG Precision Farming:

SBG Precision Farming B.V.
Hoornseweg 22
1775 RB Middenmeer
Nederland
Telefoon (0227) 54 93 00
Fax (0227) 50 36 76
E-mail info@sbg.nl