

DLR-IB-FT-BS-2021-101

**Messdatenvalidierung im AVES
Bewegungssystem**

Interner Bericht

Autor: Carsten Seehof



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institutsbericht
IB 111-2021/101

Messdatenvalidierung im AVES Bewegungssystem

Carsten Seehof

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

17 Seiten
11 Abbildungen
2 Tabellen
4 Referenzen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abteilung Flugdynamik und Simulation

Stufe der Zugänglichkeit: I, öffentlich zugänglich

Braunschweig, den 15.07.2021

Unterschriften:

Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. H. Duda

Betreuer: n. a.

Verfasser: Dipl.-Ing. C. Seehof







Änderungsverfolgung

Version	Datum	geänderte Seiten/Kapitel	Bearbeiter
1.0	15.07.2021	Erstausgabe	C. Seehof

Inhaltsverzeichnis

Änderungsverfolgung	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Einleitung	4
1.1 Zweck des Dokuments.....	4
1.2 Gültigkeit des Dokumentes	4
1.3 Begriffsbestimmungen.....	4
1.4 Abkürzungen	4
1.5 Formelzeichen	5
1.6 Koordinatenindizes.....	5
1.7 Zusammenhang mit anderen Dokumenten.....	5
2 Grundlagen	6
2.1 Koordinatensysteme	6
2.2 Datenaustausch zwischen Interfacecomputer und dem Bewegungssystem	8
2.3 Die eingesetzte Inertialplattform Xsens MTi-20	8
2.4 Aufbereitung der Daten des Bewegungssystems.....	11
2.5 Aufbereitung der IMU Daten.....	12
3 Vergleich von Messdaten	13
4 Literatur	17

1 Einleitung

1.1 Zweck des Dokuments

Das vorliegende Dokument beschreibt den Aufbau einer vom Bewegungssystem unabhängigen und parallel betriebenen Messstrecke für die Erfassung von Drehraten und translatorischen Beschleunigungsdaten des AVES Bewegungssystems. Es stellt die für die Interpretation der gewonnenen Daten notwendigen mechanischen und mathematischen Grundlagen zur Verfügung und dokumentiert abschließend die Ergebnisse einer beispielhaften Vermessung im Vergleich zu den vom Bewegungssystem zur Verfügung gestellten Daten.

1.2 Gültigkeit des Dokumentes

Dieses Dokument ist unbeschränkt gültig.

1.3 Begriffsbestimmungen

Aktuator	Lineare Stellglieder des Bewegungssystems, die den Unter- mit dem Oberrahmen verbinden.
Inertialplattform	Im Sinne dieses Berichtes eine vom Bewegungssystem unabhängige Meseinrichtung zur Bestimmung von Drehraten und translatorischen Beschleunigungen
Oberrahmen	Verbindungsrahmen der oberen Gelenkpunkte, im Sinne der Getriebelehre das Koppelglied eines parallelen Getriebes
Unterrahmen	Verbindungsrahmen der unteren Gelenkpunkte, im Sinne der Getriebelehre das Gestell eines parallelen Getriebes

1.4 Abkürzungen

AVES	Air Vehicle Simulator
CWA	Classic Washout Filter Algorithm (klassischer Washoutfilteralgorithmus)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
IC	Interface Computer
IMU	Inertial Measurement Unit / Inertialplattform
ISTAR	In-Flight Simulation Technology Airborne Research
LN	Luftfahrtnorm
OMCT	Objective Motion Cueing Test
VRU	Vertical Reference Unit

1.5 Formelzeichen

\bar{a}_1, \bar{a}_2	Beschleunigung an den Punkten 1 bzw. 2 eines starren Körpers
\bar{a}_{Ps}	Beschleunigung im Augenpunkt des Piloten im Simulatorcockpit
\bar{a}_S	Gemessene Beschleunigung der Inertialplattform
g	Erdbeschleunigung
$\bar{\bar{M}}_{IS}$	Transformationsmatrix oberrahmenfestes in geodätisches Koordinatensystem
$\bar{R}_{I,Ps}$	Vektor Augenpunkt – Inertialplattform im geodätischen Koordinatensystem
$\bar{R}_{S,Ps}$	Vektor Augenpunkt – Inertialplattform im oberrahmenfesten Koordinatensystem
\bar{S}	Vektor Ursprung inertiales KOS – Ursprung oberrahmenfestes KOS
ω	Drehgeschwindigkeit eines starren Körpers
$\dot{\omega}$	Drehbeschleunigung eines starren Körpers
Θ	Nickwinkel der Simulatorkabine
Φ	Rollwinkel der Simulatorkabine
Ψ	Gierwinkel der Simulatorkabine

1.6 Koordinatenindizes

I	Geodätisches Koordinatensystem
D	Oberrahmenfestes Koordinatensystem
Ps	Pilotenfestes Koordinatensystem
S	Simulatorfestes Koordinatensystem

1.7 Zusammenhang mit anderen Dokumenten

keine

2 Grundlagen

Das im AVES Simulatorzentrum eingesetzte Bewegungssystem vom Typ Moog MB-EP-6DOF-60-14000kg stellt über seine Ethernetschnittstelle eine große Anzahl von Zustandsdaten in Echtzeit zur Verfügung. Diese werden auch für die objektive Vermessung des Bewegungssystems im Hinblick auf die Simulationsgüte der Bewegungssimulation genutzt. So beruht der „Objective Motion Cueing Test (OMCT)“ aber auch die klassischen Nachweisverfahren aus den gesetzlichen Anforderungen beispielsweise zum Nachweis einer gleichmäßigen Aktuatorbewegung oder einer ruckfreien Umkehrbewegung auf diesen Daten. Umso wichtiger ist der Nachweis, dass diese frei von Sensorfehlern in den proprietären Komponenten sind. Hierfür ist eine von Moog-Komponenten unabhängige Vermessung notwendig.

Diese wurde erstmalig im Zuge der Abnahmeprozedur während der Beschaffung und Installation durch den Systemhersteller durchgeführt und dokumentiert. Jedoch ist ein Verschleiß und/oder eine schleichende Verschlechterung der Sensorgüte während des laufenden Betriebes nicht auszuschließen. Um dies zu erkennen ist eine jederzeit verfügbare und unabhängige Vermessungsmethode notwendig. Bereits während der Konstruktionsphase wurde hierfür in der Nähe des Referenzpunktes des Bewegungssystems („Motion Reference Point (MRP)“) eine Befestigungsmöglichkeit für Beschleunigungs- und/oder Drehratensensoren vorgesehen. An dieser Stelle wurde eine Inertialplattform vom Typ Xsens Mit-20 installiert und unabhängig von der sonstigen Spannungs- und Datenversorgung des Bewegungssystems von der Schnittstelle zum Interface Computer (IC) getrieben.

2.1 Koordinatensysteme

In diesem Kapitel werden die für die Ansteuerung und Vermessung eines Bewegungssystems relevanten Koordinatensysteme nach (Reid & Nahon, 1985) erläutert. Um die Vergleichbarkeit mit der zu Grunde liegenden englischsprachigen Literatur zu gewährleisten, wird auf die Indizierung aus dem angelsächsischen Raum zurückgegriffen. Wo immer möglich wird ein Bezug zur Indizierung gemäß Luftfahrtnorm LN9300 hergestellt.

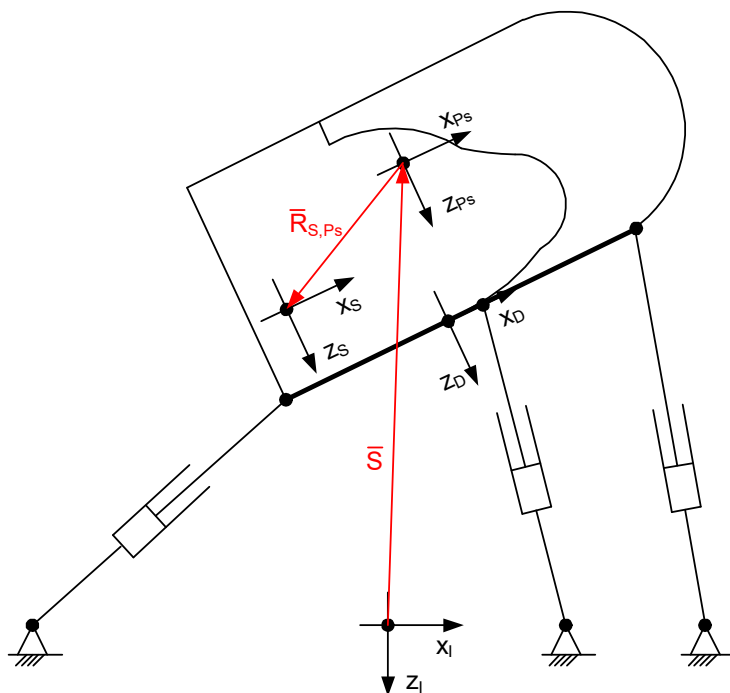


Abb. 1: Koordinatensysteme im AVES

2.1.1 Inertiales Koordinatensystem (Index: I)

Das inertielle Koordinatensystem ist mit seiner z-Achse fest mit dem Vektor der Erdbeschleunigung g verbunden. Der Ursprung liegt im Mittelpunkt des Unterrahmens, die Ausrichtung der x_i -Achse wird so gewählt, dass sie für das betrachtete Problem günstig liegen. Für diesen Bericht: Positiv in Simulatorflugrichtung

LN9300: Geodätisches (erdfestes) Koordinatensystem, Index g

2.1.2 Oberrahmenfestes Koordinatensystem (Index D)

Das Oberrahmenfeste Koordinatensystem liegt im geometrischen Mittelpunkt der sechs oberen Gelenkpunkte. Der Mittelpunkt fällt damit mit dem Referenzpunkt des Bewegungssystems („Motion Reference Point“, MRP) zusammen. Die x_D -Achse weist in Flugrichtung vorwärts, die z_D -Achse in Richtung Unterrahmen. Damit liegt im Fall des AVES Bewegungssimulators die x_D - y_D -Ebene in der durch die oberen Gelenkpunkte aufgespannten Ebene und parallel zum Cockpitboden.

2.1.3 Simulatorfestes Koordinatensystem (Index: S)

Das simulatorfeste Koordinatensystem liegt mit seinem Ursprung an einer frei wählbaren günstigen Position. Die Lage der Achsen ist grundsätzlich frei wählbar. Im vorliegenden Bericht wird der Ursprung des simulatorfesten Koordinatensystems in den Bezugspunkt der eingebauten Inertialplattform gelegt.

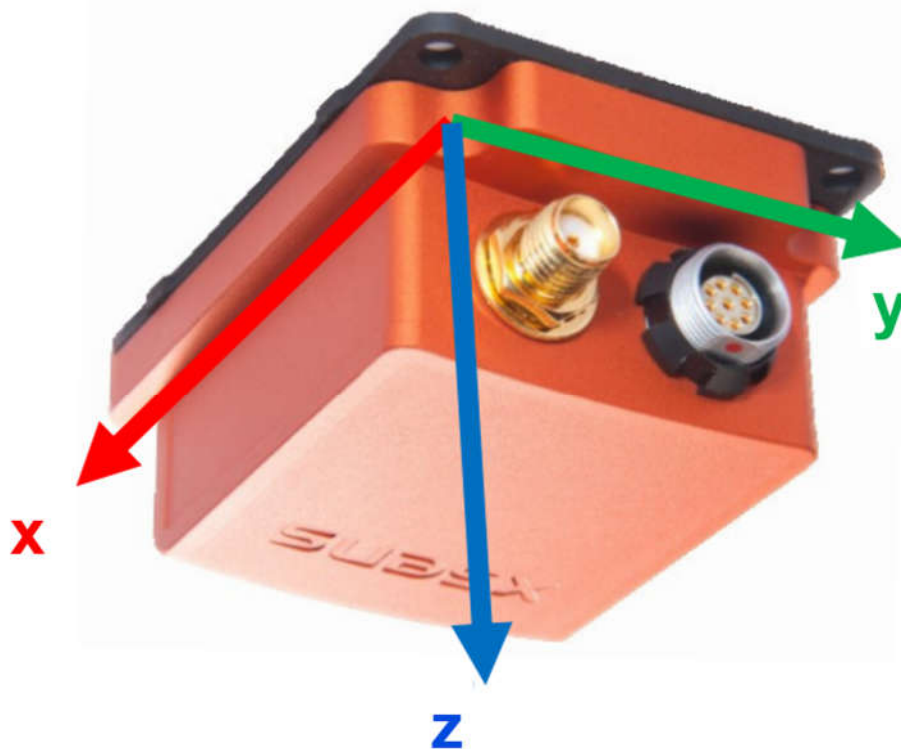


Abb. 2: Die Lage des simulatorfesten Koordinatensystems in Bezug auf die eingesetzte Inertialplattform

Auf Grund der konstruktiven Ausführung der mechanischen Anbindung der Inertialplattform an den Oberrahmen sind die Achsen des simulatorfesten Koordinatensystems parallel zu den Achsen des oberrahmenfesten Koordinatensystems ausgerichtet.

2.1.4 Pilotenfestes Koordinatensystem im Simulator (Index Ps)

Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt im Simulator zwischen den Pilotensitzen in der Cockpitmitte. In guter Näherung entspricht dies dem Augenpunkt beider Flugzeugführer. Die Ausrichtung der Achsen entspricht der des simulatorfesten Koordinatensystems.

2.2 Datenaustausch zwischen Interfacecomputer und dem Bewegungssystem

Die in einem realen Luftfahrzeug spürbaren Beschleunigungskräfte werden durch das Bewegungssystem des Flugsimulators so realitätsnah wie möglich dargestellt. Zu diesem Zweck werden die am Pilotensitz herrschenden translatorischen bzw. spezifischen Beschleunigungskräfte (Specific Forces) und rotatorischen Geschwindigkeiten durch ein Filter in der Weise manipuliert, dass ein Sollsignal für die Ansteuerung des Bewegungssystems zur Verfügung gestellt wird. Die spezifischen Kräfte entsprechen hierbei definitionsgemäß den Beschleunigungen, die ein parallel zum flugzeugfesten Koordinatensystem am Augenpunkt des Piloten angebrachter Beschleunigungssensor erfassen würde. Das Sollsignal beinhaltet die anzufahrende Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Bewegungssystems in den drei translatorischen und den drei rotatorischen Freiheitsgraden. Die am häufigsten eingesetzte Variante eines solchen Filters ist der klassische Washoutfilteralgorithmus (CWA). Dieser und weitere Filtertypen werden beispielsweise ausführlich in (Reid & Nahon, 1985) beschrieben.

Die Sollsignale sind zunächst für den Augenpunkt des Flugzeugführers und im Inertialen Koordinatensystem definiert. Die Lage des Augenpunktes wird über die Augenpunktkoordinaten im simulatorfesten Koordinatensystem zur Verfügung gestellt. Die Ansteuerung des Bewegungssystems ist, da es sich aus Sicht der Getriebelehre um ein paralleles Getriebe handelt, mit diesen Informationen in der Lage die Sollbeschleunigung, -geschwindigkeit und -position der einzelnen Aktuatoren zu bestimmen und entsprechend der internen Regelungslogik anzufahren. Störgrößen wie träge Massen oder Betriebsgrenzen der einzelnen Aktuatoren führen zu mehr oder weniger großen Abweichungen zunächst der Aktuatoren und damit insgesamt auch der Zustände des Augenpunktes. Aus diesem Grund werden sowohl die Soll- wie auch die Ist-Zustände vom Bewegungssystem über die Datenschnittstelle mit dem IC ausgetauscht und stehen für die weitere Auswertung zur Verfügung.

Dagegen werden die tatsächlich herrschenden spezifischen Kräfte im Augenpunkt des Cockpits nicht zurückgesendet. Dies hat zur Folge, dass für einen Vergleich der Beschleunigungsdaten aus dem Bewegungssystem sowohl der Abstandsvektor zwischen Augenpunkt und Sensorposition als auch die Erdbeschleunigung nachträglich berücksichtigt werden müssen.

2.3 Die eingesetzte Inertialplattform Xsens MTi-20

Die MTi-20 VRU (Vertical Reference Unit) ist eine kreiselgestützte Plattform zur Bestimmung der Lage des Trägerobjektes im inertialen Raum. Ausgangsdaten sind die Roll-, Nick- und Giergeschwindigkeiten, die translatorischen Beschleunigungen in den zugehörigen Achsen sowie die daraus abgeschätzten Winkellagen. Die Plattform besitzt im Gegensatz zu einigen Schwestermodellen weder einen Erdmagnetfeldsensor, der eine Kalibrierung der Gierlage in Bezug auf magnetisch Nord erlauben würde, noch eine statische Druckabnahme für die Bestimmung der barometrischen Höhe. Beide Funktionalitäten sind für die Anwendung im Simulator nicht relevant, was Auswahl dieses Typs begründet.

Die Ausgangsdaten werden über eine RS232 Schnittstelle ausgelesen, in ein RS485-Format gewandelt und mittels einer RJ45 Verbindung an den IC übertragen. Aufgrund der RS232/RS485-Wandlung ist die Übertragungsrate der Daten auf 100Hz begrenzt.

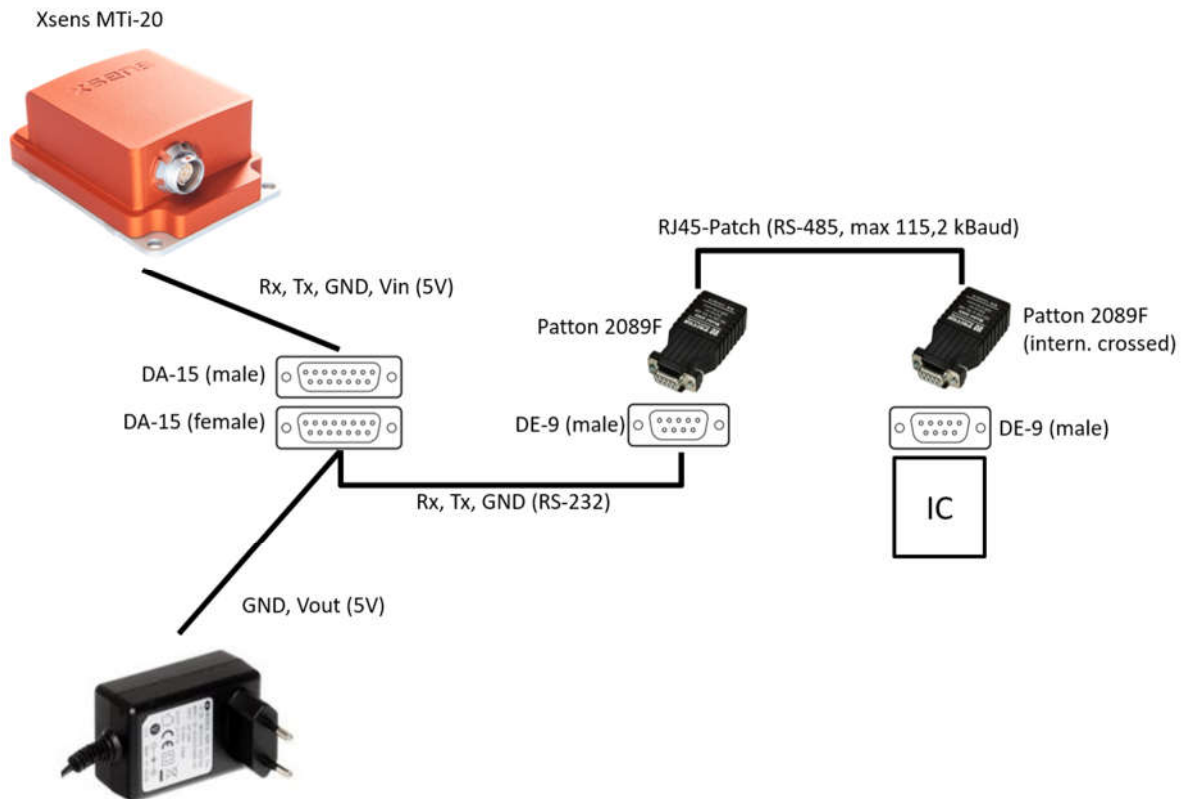


Abb. 3: Schematische Darstellung der Schnittstellen zur eingesetzten Inertialplattform Xsens Mit-20

Die Genauigkeit der Ausgangsdaten wird seitens der verbauten Sensorkomponenten wie folgt angegeben:

Komponente	Kenngroße	Spezifikation
Uhr	Zeitabweichung	< 25 ns
Kreisel	Messbereich	450 °/s
	Offset	0.2 °/s
	Drift	18 °/h
Beschleunigungssensoren	Messbereich	200 m/s ²
	Offset	0.05 m/s ²
	Ablagefehler	15 µg

Tab. 1: Genauigkeit der Messgrößen der eingesetzten IMU Xsens Mit-20

Bereits während der Designphase des AVES Bewegungssimulators wurde der Einbau einer unabhängigen Trägheitsplattform in der Nähe des MRP vorgesehen. Die folgenden Bilder zeigen die Lage des Befestigungsplatte im AVES Dome und die eingebaute IMU.

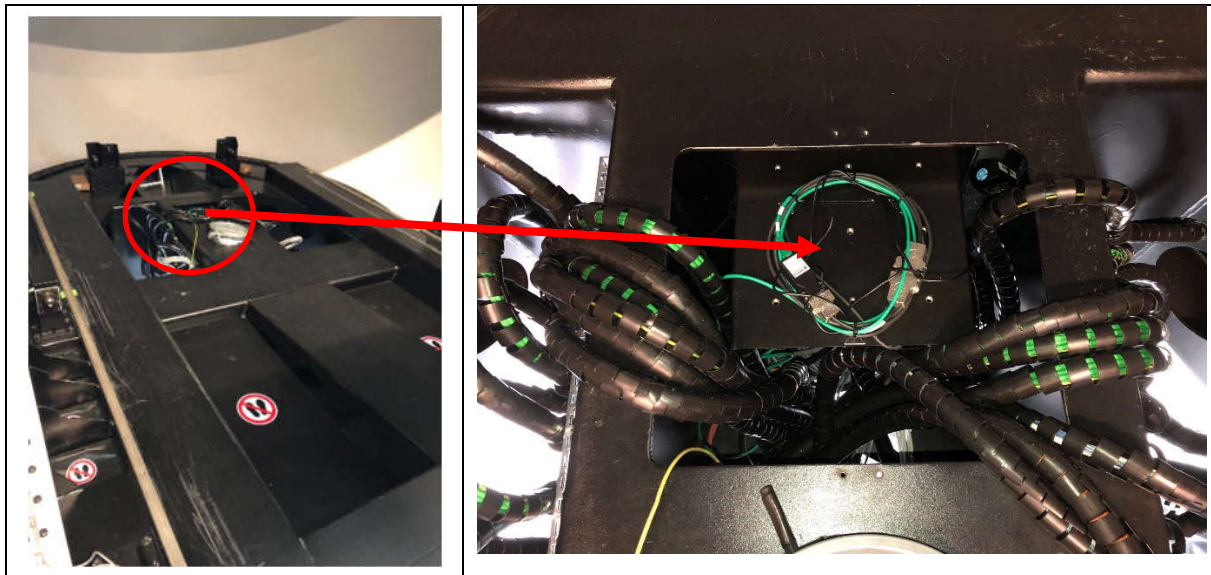


Abb. 4: Position der Inertialplattform im AVES Bewegungssimulator

Auf der Unterseite der Platte ist der Sensor eingebaut, wie in folgendem Bild gezeigt:

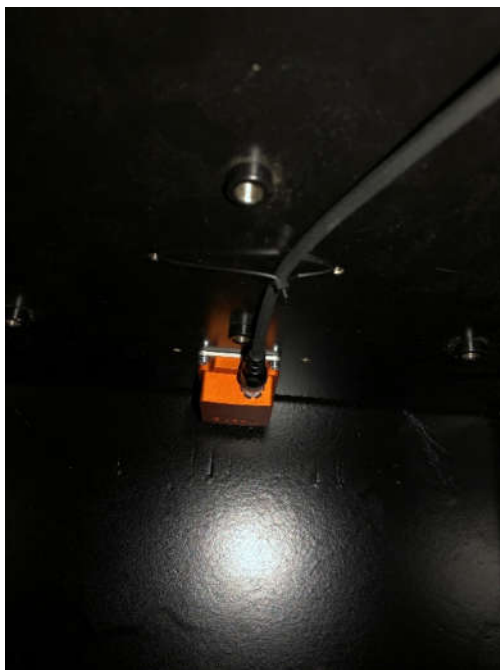


Abb. 5: Eingebaute Inertialplattform im AVES Bewegungssimulator

Durch die Befestigung auf der konstruktiv eingerichteten Platte in Verbindung mit dem Einbau des Sensors auf deren Unterseite ist das Koordinatensystem des Sensors parallel zum oberrahmenfesten Koordinatensystem ausgerichtet. Der Vektor vom Augenpunkt zur IMU ist angegeben mit

$$\bar{\mathbf{R}}_{S,Ps} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2,75 \end{pmatrix} m \quad (1)$$

2.4 Aufbereitung der Daten des Bewegungssystems

Der Datenaustausch zwischen IC und Bewegungssystem ist aus dem Normalbetrieb des Simulators bekannt und stellt insofern keinen zusätzlichen technischen Aufwand dar. Bei den hier beschriebenen Tests mussten die aufgezeichneten Daten allerdings nachträglich in die richtige Bitreihenfolge gewandelt werden, da IC und Steuerrechner des Bewegungssystems unterschiedliche Standards (Big Endian bzw. Little Endian) verwenden. Diese Umwandlung ist zwingend vorzunehmen bevor die Daten in ein (lesbares) ASCII-Format gewandelt werden. Da der IC die Datenausgabe sowohl in einem (maschinenlesbaren) Binärformat als auch im ASCII-Format vom Endungstyp .reca anbietet, muss bei weiteren Untersuchungen dieser Art bereits bei der Einrichtung der Datenablage im Simulator das Binärformat ausgewählt und entsprechend eine Datei vom Endungstyp .recb erzeugt werden.

Die Messdaten des Bewegungssystems und der Inertialplattform unterscheiden wegen der unterschiedlichen Lage ihrer Bezugskoordinatensysteme erheblich voneinander und müssen in einem ersten Schritt auf einen gemeinsamen Ursprung transformiert werden. Mit dem Zusammenhang zwischen den Beschleunigungen an verschiedenen Orten eines starren Körpers kann bei bekannter Beschleunigung in einem Punkt mittels des Abstandsvektors, der Drehrate und dem Lagewinkel die Beschleunigung in einem zweiten Punkt bestimmt werden.

$$\vec{a}_2 = \vec{a}_1 + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} \quad (2)$$

Weiter oben wurde bereits der unterschiedliche Bezugsrahmen für beiden Datenquellen beschrieben. Während das Bewegungssystem die Beschleunigungsdaten im Sinne der Augenpunktbewegung zur Verfügung stellt werden die Beschleunigungsdaten der Inertialplattform durch die Beschleunigungssensoren bestimmt und enthalten somit die Erdbeschleunigung in ihren Werten.

Grundsätzlich ist die Inertialplattform auch in der Lage, die Beschleunigung um die Erdbeschleunigung zu reduzieren (s. „Free-Acceleration“). Jedoch erfolgt dies mittels Abschätzung der Lagewinkel aus den Drehraten, deren niederfrequente Fehler aus Drift und Anfangsabweichung mit Hilfe der translatorischen Beschleunigungssensoren eliminiert werden. Die Güte dieser Abschätzung hängt demnach von der Dauer des Einlaufens und der zeitlichen Länge des Versuchs ab. Eine Ausgabe der Drehbeschleunigungen erfolgt nicht und müsste als Ableitung der Drehgeschwindigkeiten im Zuge einer Datenaufbereitung erzeugt werden. Wie in den Darstellungen der Messdaten zu sehen ist sind die Drehratensignale der IMU im Vergleich zu den Signalen des Bewegungssystems sehr verrauscht, was eine solche Bearbeitung erheblich erschwert.

Dagegen werden seitens des Bewegungssystems die vollständigen translatorischen Beschleunigungen sowie die rotatorischen Werte für Drehwinkel, -geschwindigkeit und -beschleunigung auf Grundlage der Aktuatorzustände ermittelt. Durch den bereits erwähnten Aufbau des Bewegungssystems als paralleles Getriebe kann die Position des Oberrahmens nur mittels eines iterativen Verfahrens aus den Aktuatorlängen bestimmt werden. Da die Oberrahmenposition und -lage eine wichtige Regelgröße für die Ansteuerung ist, muss für dieses Verfahren die Echtzeitfähigkeit sichergestellt sein und in der Folge die Iteration zum Ende eines Zeitschrittes angebrochen werden. Ein nicht näher definierbarer Restfehler ist damit unvermeidbar. Davon abgesehen ist ab einer errechneten Position die Geschwindigkeit und Beschleunigung aus Aktuatorgeschwindigkeit und -beschleunigung eindeutig berechenbar. Dies führt zu einem wesentlich weniger verrauschten Signal. In der Folge kann das Augenpunktsignal somit lediglich mit den vom Bewegungssystem zur Verfügung gestellten Größen in die Position der Inertialplattform überführt werden.

Einzig der im oberrahmenfesten Koordinatensystem bekannte Vektor vom Augenpunkt zur Inertialplattform muss noch in das geodätische Koordinatensystem mittels

$$\bar{\mathbf{R}}_{I,PS} = \bar{\mathbf{M}}_{IS} \cdot \bar{\mathbf{R}}_{S,PS} \quad (3)$$

mit

$$\bar{\mathbf{M}}_{IS} = \begin{bmatrix} \cos \Phi \cdot \cos \Psi & \sin \Phi \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Psi - \cos \Phi \cdot \sin \Psi & \cos \Phi \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Psi + \sin \Phi \cdot \sin \Psi \\ \cos \Phi \cdot \sin \Psi & \sin \Phi \cdot \sin \Theta \cdot \sin \Psi + \cos \Phi \cdot \cos \Psi & \cos \Phi \cdot \sin \Theta \cdot \sin \Psi - \sin \Phi \cdot \cos \Psi \\ -\sin \Theta & \sin \Phi \cdot \cos \Theta & \cos \Phi \cdot \cos \Theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

transformiert werden. Damit ergibt sich die vollständige Gleichung

$$\bar{\mathbf{a}}_S = \bar{\mathbf{a}}_{PS} + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{R}}_{I,PS}) + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{R}}_{I,PS} + \begin{pmatrix} -\sin \Theta \\ \sin \Phi \cdot \cos \Theta \\ \cos \Phi \cdot \cos \Theta \end{pmatrix} \cdot g \quad (5)$$

2.5 Aufbereitung der IMU Daten

Die Sensoren der eingesetzten Inertialplattform zeichnen systembedingt neben den gesuchten Größen zusätzliche Störgrößen auf. Dies sind im Wesentlichen hochfrequente Störsignale in der Beschleunigungs- und der Drehratenerfassung, beispielsweise infolge von Schwingungen des Untergrundes und/oder des Fundamentes oder auch elektromagnetischen Einflüssen wie der Netzfrequenz der Spannungsversorgung am Simulator. Daneben erfassen die Kreisel auch niederfrequente Störungen hervorgerufen beispielsweise durch die Drehung der Erde im inertialen Raum. Diese Störungen machen die direkte Auswertung der Messdaten schwierig, sofern bekannt können sie aber herausgefiltert werden. Insbesondere die genannten Effekte liegen in Bezug auf die Größenordnung ihrer Frequenzen recht weit entfernt von den gesuchten Effekten. Aus diesem Grund wurden die IMU-Daten wie in der folgenden Tabelle aufgeführt gefiltert:

Messwert	Filter	Eckfrequenz
Drehraten	Tiefpass (1. Ordnung)	10 Hz
Drehraten	Hochpass (1. Ordnung)	0,01 Hz
Translatorischen Beschleunigungen	Tiefpass (1. Ordnung)	10 Hz

Tab. 2: Liste der für die Aufbereitung der IMU Daten eingesetzten Filtermethoden

Nur der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Winkel und Winkelgeschwindigkeiten der IMU in Grad abgelegt sind und entsprechend für die weiteren Schritte in Radian gewandelt werden müssen.

3 Vergleich von Messdaten

Mit den oben beschriebenen Maßnahmen können die Daten der Inertialplattform und des Bewegungssystems direkt miteinander verglichen werden. Die folgende sechs Grafiken vergleichen die jeweils gemessenen drei translatorischen Beschleunigungen und Drehgeschwindigkeiten miteinander.

Für den Vergleich wurden Messdaten aus einem Evaluierungsflug im AVES Simulator im Zuge der Vorbereitung des Projekts „DinaFlex“ verwendet. Die aufgezeichneten Daten beinhalten neben vielen anderen Parametern sowohl die Messdaten der unabhängigen IMU als auch die Daten des Bewegungssystems. Beide Datenquellen sind in einer Datei mit einem vom IC generierten gemeinsamen Zeitstempel aufgezeichnet.

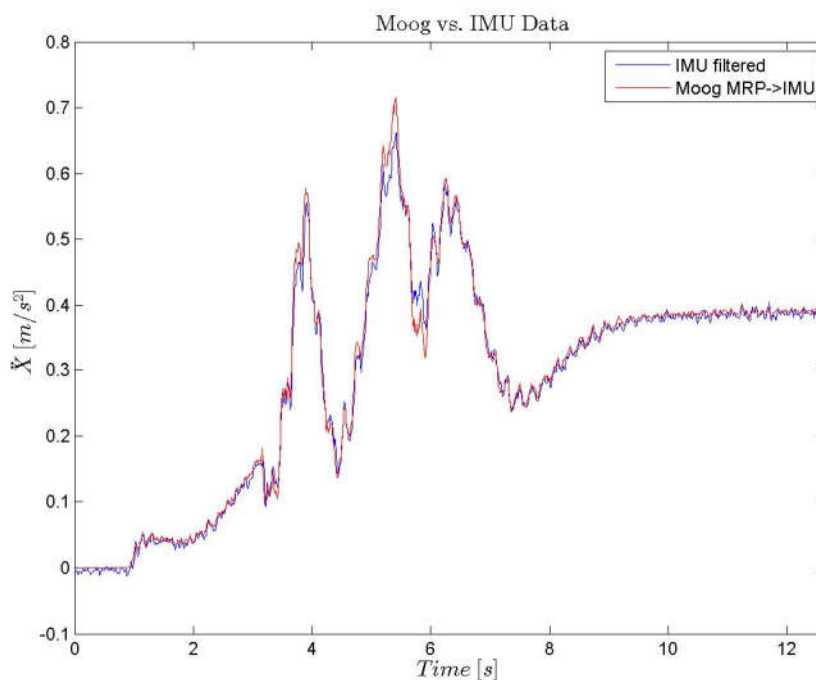


Abb. 6: Vergleich der Messwerte für die translatorische Beschleunigung in x

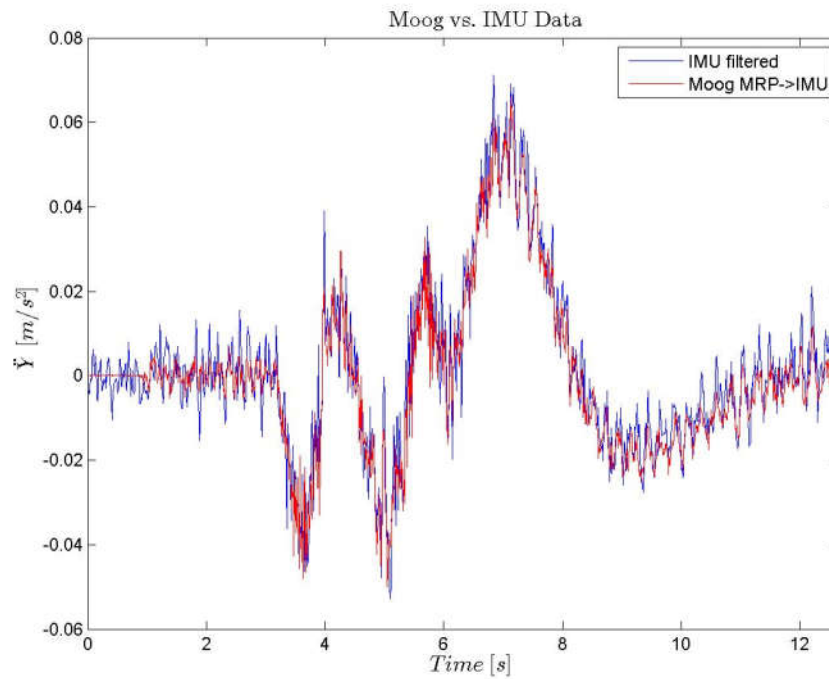


Abb. 7: Vergleich der Messwerte für die translatorische Beschleunigung in y

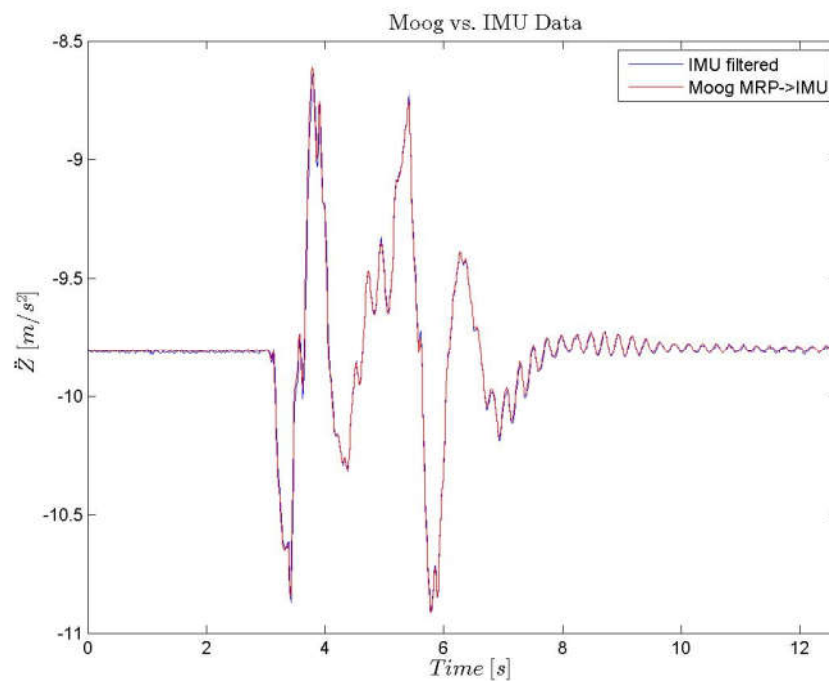


Abb. 8: Vergleich der Messwerte für die translatorische Beschleunigung in z

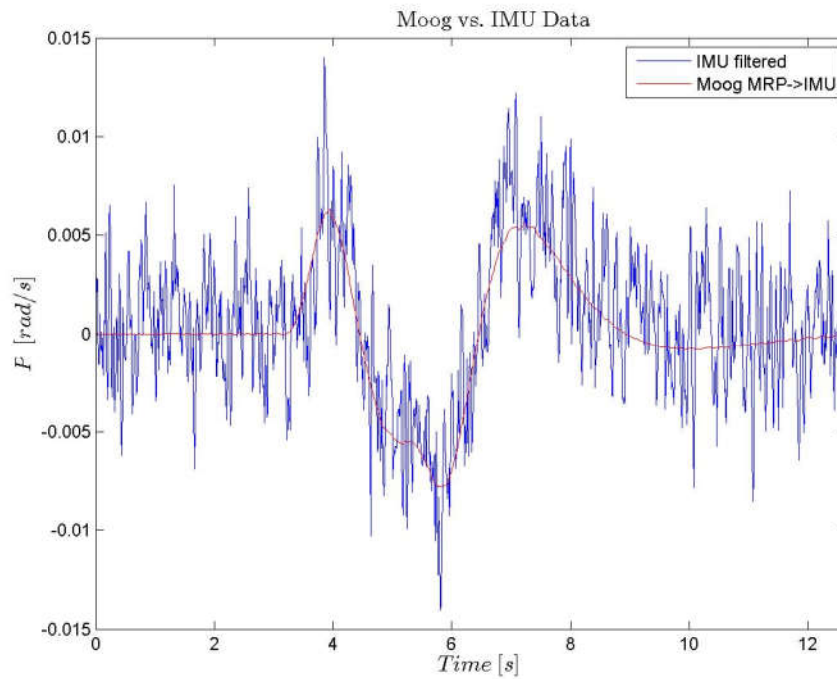


Abb. 9: Vergleich der Messwerte für die Rollgeschwindigkeit

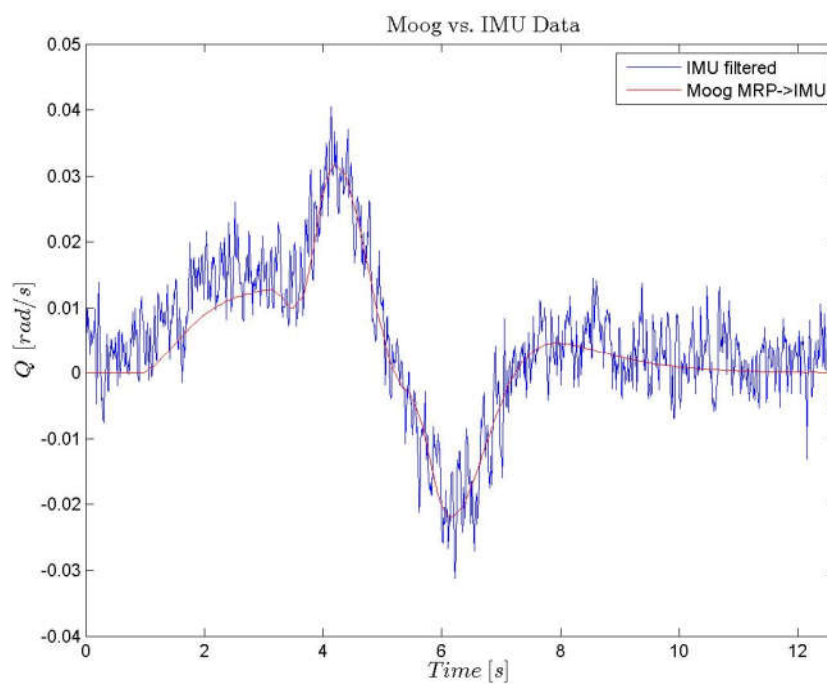


Abb. 10: Vergleich der Messwerte für die Nickgeschwindigkeit

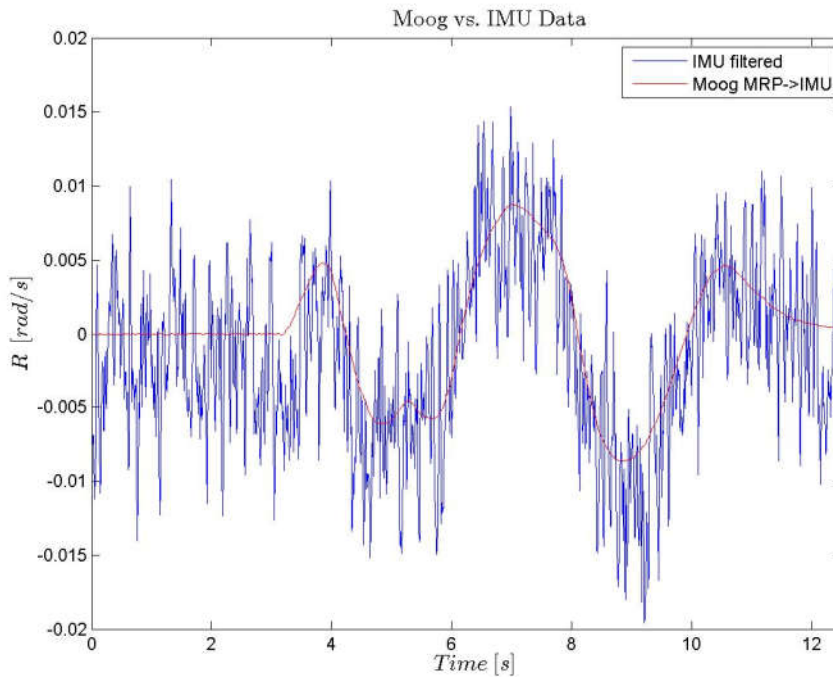


Abb. 11: Vergleich der Messwerte für die Giergeschwindigkeit

Die translatorischen Freiheitsgrade zeigen hierbei eine sehr gute Übereinstimmung. Der Zeitverzug zwischen den beiden Datenquellen ist klein. Die Abweichungen in den absoluten Werten sind ebenfalls klein. Bei den Drehraten fällt insbesondere das vergleichsweise große Rauschen in den Daten der Inertialplattform auf. Obwohl diese schon mit einem Tiefpassfilter erster Ordnung mit einer Eckfrequenz von 10 Hz gefiltert wurden ist das Signal deutlich unruhiger als das des Bewegungssystems. Da eine niedrigere Eckfrequenz jedoch unterhalb der Obergrenze der Nutzsignale läge, ist eine weitere Einschränkung mit einer einfachen Filterung, z. B. über eine niedrigere Eckfrequenz, schwierig. Hier wären stattdessen aufwendigere Methoden einzusetzen, sollte dieses Signal beispielsweise für die Ansteuerung des Bewegungssystems genutzt werden. Für diese Untersuchung genügt jedoch die gute Übereinstimmung im niederfrequenten Signalbereich für die Feststellung, dass die Messwerte der IMU in Bezug auf die Drehraten ebenfalls die Gültigkeit der vom Bewegungssystem zur Verfügung gestellten Zustandsdaten bestätigen.

Zusammengefasst zeigt die gute Übereinstimmung insbesondere für die translatorischen Beschleunigungen, dass für zukünftige Untersuchungen die vom Bewegungssystem zur Verfügung gestellten Zustandsdaten für die Analyse der Systemeigenschaften verwendet werden können. Frühere Testergebnisse, beispielsweise zum Objective Motion Cueing Test (OMCT), können darüber hinaus abschließend als valide betrachtet werden.

4 Literatur

- Vydhyathan, A.; Bellusci, G. (2018). The Next Generation Motion Trackers for Industrial Applications; Whitepaper by Xsens
- Xsens Technology B. V. (2019) MTi User Manual, Document MT0605P, Rev. 2019.A, Xsens B. V., Enschede, The Netherlands
- Xsens Technology B. V. (2019) MT Low Level Communication Documentation, Document MT0101P, Rev. 2019.A, Xsens B. V., Enschede, The Netherlands
- Reid, L. D., & Nahon, M. A. (1985). Flight Simulation Motion-Base drive Algorithms: Part I - Developing and Testing the Equations, UTIAS Report No 296, CN ISSB 0082-5255, Toronto, Canada.