

CONCEPTION OF A SYNTHETIC VISION SYSTEM FOR MOBILE FLIGHT NAVIGATION AND INFORMATION*

H. Flühr¹, M. Gruber¹, P. Lackner¹, S. Sporer-Fellner¹, T. Kahraman¹, A. Almer², T. Schnabel²

¹ FH JOANNEUM Graz, Luftfahrt / Aviation, Graz (AT)

² JOANNEUM Research, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Graz (AT)

Zusammenfassung

Ein mobiles Flugnavigations- und Flugsupportsystem bestehend aus einem Display mit Instrumentenansicht und virtueller Geländedarstellung soll die Navigation beispielsweise in Alpentälern unterstützen. Hierdurch soll primär die Hagelbekämpfung, bei der die Orientierung an Geländemerkmale erfolgt, die aber durch aufziehende Gewitterwolken stark behindert werden kann, trotz eingeschränkter Sicht auch in voralpinen Regionen möglich werden. Die verwendete Technologie baut auf einem mobilen Notebook mit Navigationssensoren auf, deren Ausgabe mittels moderner Signalverarbeitung in eine Positions- und Orientierungsinformation aufbereitet wird. Hierzu sind alternativ eine kommerzielle Trägheitsplattform (IMU) bzw. eine selbst entwickelte Low Grade/Low Cost-Sensorik für Beschleunigung, Drehrate, Magnetfeld sowie ein GNSS-Empfänger über ein USB-Netzwerk mit einem Tablet-PC verbunden. Während die IMU die Signalverarbeitung bereits inkludiert, erfolgt die Datenvorverarbeitung der Low Grade-Sensorik durch Linearisierung und Kompensation der Temperaturabhängigkeit, bevor anhand eines Fusionierungsalgorithmus die Position und Lage des Fluggeräts geschätzt wird. Die Grundlage für die Echtzeiterstellung des 3D-Landschaftsmodells ist ein digitales Geländemodell, aus dem ein gleichmäßiges Gitternetz mit der dementsprechenden Höheninformation generiert und dynamisch in den Speicher geladen wird. Als Overlay stehen sowohl Texturdaten als auch geografische Informationsschichten optional zur Verfügung. Auf diese Weise erhält der Pilot ein ergänzendes mobiles Flugführungsinstrument, welches durch eine integrierte künstliche Darstellung des Terrains eine neue Informationsquelle eröffnet.

1. EINLEITUNG

Ein mobiles Flugnavigations- und Flugsupportsystem bestehend aus einem Display mit Instrumentenansicht und virtueller Geländedarstellung soll die Navigation in Alpentälern unterstützen. Hierdurch soll primär die Hagelbekämpfung, bei der die Orientierung an Geländemerkmale erfolgt und die durch aufziehende Gewitterwolken verhindert wird, trotz eingeschränkter Sicht auch in voralpinen Regionen möglich werden. Die verwendete Technologie baut auf einem mobilen Notebook mit Navigationssensoren auf, deren Ausgabe mittels moderner Signalverarbeitung in eine Positions- und Orientierungsinformation aufbereitet wird. Die Darstellung des Terrains greift auf eine Geländedatenbank zu, die aus Fernerkundungsdaten erstellt ist. Auf diese Weise erhält der Pilot ein ergänzendes mobiles Flugführungsinstrument, welches durch eine künstliche Darstellung des Terrains eine neue Informationsquelle eröffnet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Systemkonzept des Flugnavigations- und Supportsystems vorgestellt, welches durch Modularisierung den flexiblen Einsatz von mobilen Rechnern (Tablet-PC bzw. Ultra Mobile-PC) ermöglichen soll. In weiterer Folge sollen anhand mehrerer Testreihen die erzielbare Navigationsperformance als auch die Usability unter operationellen Gesichtspunkten evaluiert werden.

2. SYSTEMKONZEPTION

Im Rahmen des Systemdesigns wurden die Anforderungsspezifikationen aus den Use Cases und dem Stand der Technik zusammengefasst und verfeinert. Die daraus entstandene Genauigkeitsanalyse deckt mehrere Aspekte ab. So wurde die erforderliche Positionsgenauigkeit des zu entwickelnden Systems mit 25 m in der horizontalen Ebene abgeschätzt. Da das System als Navigationssupportsystem konzipiert und nicht als primäre Informationsquelle für die Flugführung konzipiert ist, wurde die Genauigkeit in der Vertikalen ebenfalls mit 25 m festgesetzt. Die nötige Lagegenauigkeit (Nick-, Roll-, Steuerwinkel) wurde auf 10° abgeschätzt. Diese „Requirements“ spiegeln auch die Qualität der verfügbaren Geodaten wieder. Nachdem das digitale Geländemodell mit einer Auflösung von 25 m vorliegt (siehe unten), erscheint eine bessere Navigationsperformance als nicht notwendig. Auf der anderen Seite wurde untersucht, welche Genauigkeit kommerzielle Navigationssensoren aufweisen bzw. welche Genauigkeit Systeme basierend auf einer dem Projektansatz vergleichbaren Low Grade-Sensorik ermöglichen.

In der Zivilluftfahrt zugelassene Trägheitsplattformen (Inertial Measurement Unit - IMU, Inertial Reference System – IRS; z.B. INS-80, NS BKV-95, H-764G, µ-

* Die Arbeit wird im Rahmen des Projekts „NavAlp“ durchgeführt und vom Zukunftsfond des Landes Steiermark bzw. der Steiermärkischen Landesregierung gefördert.

INS/GPS [1]) weisen eine Genauigkeit von einigen $0,1^\circ$ für den Roll- und Nickwinkel, von besser als 1° für den Steuerkurs, und 100 m (INS-80) für die Position auf. Durch Einbindung von GPS-Systemen wird diese auf Werte kleiner als 16 m (H-764G) verbessert (Herstellerangaben). Kommerzielle INS-Module (z.B. Analog Devices, ADIS16354) ohne GPS-Unterstützung erreichen aufgrund des internen Aufbaus eine Auflösung des Lagewinkels von etwa $0,1^\circ$. Bei diesen Modulen ist die Langzeitstabilität problematisch, da speziell der Nullpunkt der Lagemessung über die Zeit driftet (Herstellerangabe: ca. $0,015^\circ/\text{s}$). Integrierte INS/GPS-Module (z.B. XSens MTi-G) weisen eine Genauigkeit des Roll- und Nickwinkel von $0,5^\circ$, des Steuerkurses von 1° sowie (wenn GPS-Augmentierung durch EGNOS verfügbar) der Lage von 2 m (Herstellerangabe) auf. Auf Low Grade-Sensorik zurückgreifende Systeme hingegen erreichen Genauigkeiten der Lagewinkel von wenigen $0,1^\circ$ [2] bis zu wenigen Winkelgrad [3]. Diese Unterschiede resultieren aus den jeweils gewählten Ansätzen zur Integration von INS und GPS. Bei diesen Systemen liegt die Genauigkeit der Position im Bereich der GPS-Genauigkeit und erreicht (sofern EGNOS verfügbar ist) Werte von wenigen Metern.

Das System soll als hochmobile Anwendung einsetzbar sein. Als Sichtsystem bzw. Recheneinheit werden daher wahlweise ein Tablet-PC bzw. ein Ultra Mobile-PC (UMPC) verwendet. Die Navigationsinformation wird von einer mittels GPS und Erdmagnetfeld gestützten IMU bereitgestellt. Auch hier werden zwei Optionen untersucht. Einerseits wird eine kommerzielle IMU eingesetzt, zum anderen soll die Einsetzbarkeit eines mit kostengünstigen Einzelsensoren erstellten Mess-Systems verifiziert werden. Für die Visualisierung des Terrains stehen ein digitales Geländehöhenmodell sowie die zugehörige Textur zur realitätsnahen Darstellung zur Verfügung. Ergänzt werden diese um ein Modell des Erdmagnetfeldes sowie um applikationsspezifische Informationsschichten (siehe Bild 1).

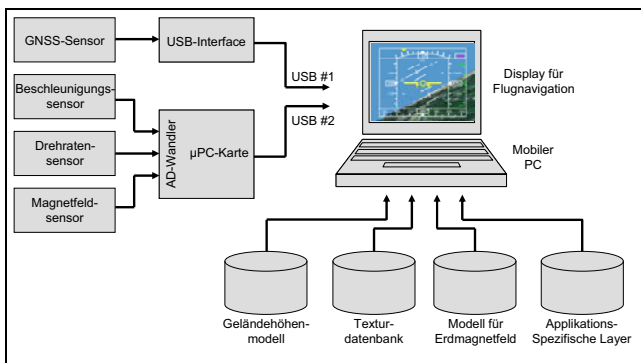


BILD 1. Architektur des Flugnavigations- und Informationssystems

Die Schnittstellen des Systems sind möglichst offen gehalten, um dem User-Segment eine einfache Möglichkeit zum Hinzufügen oder Ändern der applikationsspezifischen Informationen zu geben.

Basierend auf den Navigationsdaten als auch der Geoinformation soll mit einer wählbaren Bildrate das Terrain und die Instrumentensicht errechnet werden. Hierzu wird als Visualisierungstool Shockwave 3D (Adobe Director) verwendet und in die Hauptapplikation eingebunden.

3. SENSORIK UND DATENVERARBEITUNG

Für die Positionsermittlung werden zwei Optionen eingesetzt, die im Folgenden beschrieben sind.

3.1. Kommerzielle Sensorik

Die Bestimmung der Lage- und Positionsinformation, von Geschwindigkeit und Beschleunigung erfolgt mittels einer kommerziellen IMU. Für den Einsatz im Projekt gewählt wurde die MTi-G (XSens), die mittels GPS und Erdmagnetfeld die inertialen Sensoren stützt (s. Bild 2). Die Anbindung an den Rechner erfolgt mittels USB-Schnittstelle.



BILD 2. Kommerzielle Sensorik (MTi-G, XSens) des Systems

3.2. Low Cost/Low Grade-Sensorik

Als Gegenstück zur kommerziellen IMU und zur Untersuchung der erzielbaren Performance wird eine Low Cost/Low-Grade-Sensoreinheit entwickelt. Diese besteht aus einem dreiachsigen Beschleunigungsaufnehmer mit umschaltbarer Empfindlichkeit, aus einem dreiachsigen Drehratengeber, einem dreiachsigen Magnetfeldsensor, einem Temperatursensor sowie einem GPS-Code-Empfänger. Die analogen Spannungswerte der Sensoren werden von einem Mikroprozessor digitalisiert und über die USB-Schnittstelle an die Recheneinheit weitergeleitet. Im Bild 3 sind die Sensoren im nichtmontierten Zustand dargestellt.

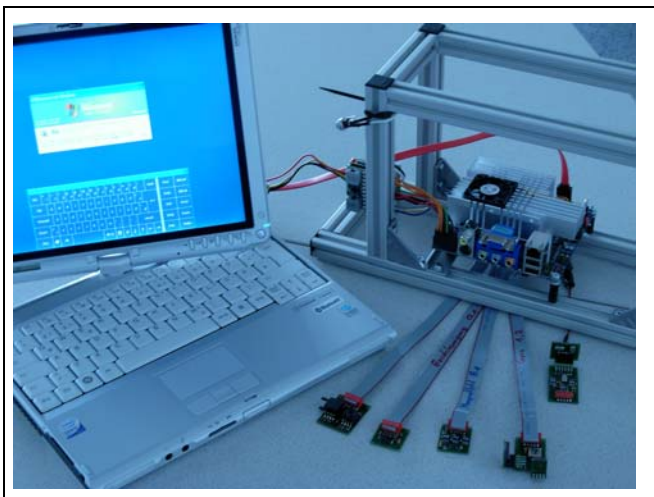


BILD 3. Komponenten der Low Cost/Low Grade-Sensorik mit mobilen Rechnern (von links nach rechts: statischer/dynamischer Druck, Beschleunigung, Magnetfeld, Drehrate)

Am Rechner erfolgt eine Datenvorverarbeitung, bei der Anhand von Kalibrationsdaten der Einzelsensoren die

Temperaturabhängigkeit sowie Fehler der Einbaulage eliminiert werden, bevor mittels des Strapdown-Algorithmus nach Bild 4 die Mechanisierung der im flugzeugfesten Koordinatensystem ermittelten Messdaten erfolgt [4-7].

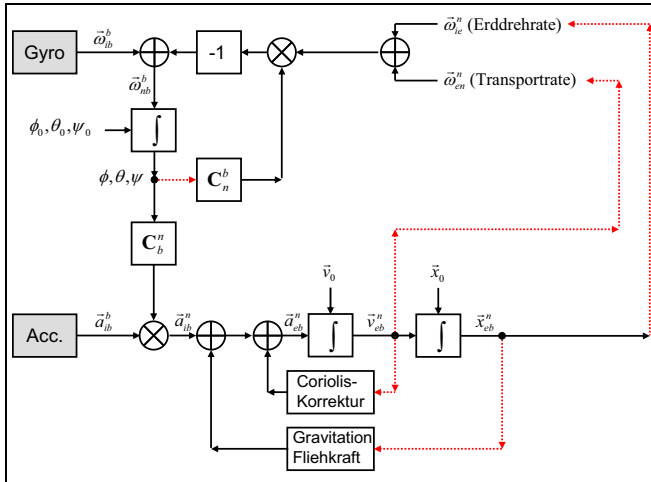


BILD 4. Struktur des Strapdown-Algorithmus

Die Repräsentation der Lage erfolgt dabei mit Hilfe des Orientierungsvektors μ , der in Form eines Quaternions abgelegt wird. Die Transformation zwischen flugzeugfestem Koordinatensystem und dem Navigations-Koordinatensystem erfolgt anhand der Richtungskosinusmatrix (DCM-Matrix) C . Anhand der gemessenen Drehraten ω_{ib} wird mittels numerischer Integration der Bortzschen Orientierungsvektor-Differentialgleichung die Lageänderung $\Delta\mu$ im Beobachtungszeitraum und hieraus die neue Lage ermittelt. Anschließend wird die DCM-Matrix aktualisiert und mit den gemessenen Beschleunigungen a_{ib} die neue Geschwindigkeit v_{eb} sowie die neue Position (λ, φ, h) in Bezug auf das verwendete Erdmodell WGS-84 berechnet:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{\mu}} &= \vec{\omega}_{ib}^b + \frac{1}{2} \vec{\mu} \times \vec{\omega}_{ib}^b + \frac{1}{\mu^2} \left(1 - \frac{\mu \sin \mu}{2} \right) \vec{\mu} \times (\vec{\mu} \times \vec{\omega}_{ib}^b) \approx \vec{\omega}_{ib}^b + \frac{1}{2} \vec{\mu} \times \vec{\omega}_{ib}^b \\ \vec{\omega}_{ib}^b &= \vec{\omega}_{ib}^n - C_n^b (\vec{\omega}_e^n + \vec{\omega}_{en}^n) \\ \dot{\vec{v}}_{eb}^n &= C_n^b \vec{a}_{ib}^b - (2 \vec{\omega}_e^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times \vec{v}_{eb}^n + \vec{g}_I^n \\ (1) \quad \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix}_{eb}^n &= \begin{pmatrix} \frac{v_{eb,E}^n}{R_e(\varphi) + h} ; \frac{v_{eb,N}^n}{R_n(\varphi) + h} ; -v_{eb,D}^n \end{pmatrix}^T \end{aligned}$$

Mit:

Gemessene Drehrate: $\vec{\omega}_{ib}^b$
Gemessene Beschleunigung: $\vec{a}_{ib}^b$
DCM-Matrix: C_n^b
Lokale Schwerebeschleunigung: $\vec{g}_I^n$

$$\begin{aligned} \text{Erddrehrate:} \quad \vec{\omega}_e^n &= \begin{pmatrix} \omega_{ie} \cos \varphi \\ 0 \\ -\omega_{ie} \sin \varphi \end{pmatrix} \\ \text{Transportrate:} \quad \vec{\omega}_{en}^n &= \begin{pmatrix} \frac{v_{eb,E}^n}{R_e + h} \\ -\frac{v_{eb,N}^n}{R_n + h} \\ -\frac{v_{eb,E}^n \tan \varphi}{R_e + h} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Zur Stützung der IMU-Daten werden Messungen des Erdmagnetfeldes sowie die anhand des GPS-Empfängers ermittelte Position herangezogen und die Fehler des Zustandsvektors anhand einer Kalman-Filterung geschätzt. Die Entwicklung des Navigationsfilters erfolgt mit Hilfe einer Simulationsumgebung, die anhand einer vorgegebenen Trajektorie Daten einer Inertialplattform und eines GPS-Empfängers generieren kann. Hierbei bekommt der Anwender die Möglichkeit, die Modelle der Sensoren bzw. die Anzahl der sichtbaren Satelliten zu verändern, um das reale Verhalten der Navigations-sensoren nachzubilden. Das öffentlich zugängliche US/UK World Magnetic Model 2005-2010 (WMM2005) [8] wurde gewählt. Es beschreibt die lokalen Variationen des Erdmagnetfeldes.

Ein zeitdiskretes lineares System kann anhand seiner Zustandsraumdarstellung mit Hilfe des Zustandsvektors x beschrieben werden [4]:

$$(2) \quad \dot{x} = A x + B u$$

Mit:

Systemmatrix: A
Eingangsmatrix: B
Eingangsvektor: u

Durch Lösung der DGL aus (2) und Approximation wird damit der Folgezustand x_{k+1} des Systems mit Hilfe der Transitionsmatrix angegeben:

$$(3) \quad \vec{x}_{k+1} \approx \Phi_k \vec{x}_k + \frac{1}{2} (I + \Phi_k) B \Delta t \vec{u}_k \approx \Phi_k \vec{x}_k + B_k \vec{u}$$

Mit:

Transitionsmatrix: $\Phi_k = e^{A(t_{k+1}-t_k)}$
Eingangsmatrix: B_k
Eingangsvektor: $\vec{u}$
Zeit zwischen zwei Zuständen: Δt

Wird (3) um einen Term $G_k w_k$ erweitert, und der Zusammenhang zwischen Messwerten y und dem Systemzustand anhand eines Messmodells angegeben, kann in weiterer Folge durch Schätzung mittels Kalman-Filter der Systemzustand anhand zurückliegender Messungen ermittelt werden [2, 4, 10]:

$$(4) \quad \begin{aligned} \vec{x}_{k+1} &= \Phi_k \vec{x}_k + B_k \vec{u} + G_k \vec{w} \\ \vec{y}_k &= H_k \vec{x}_k + \vec{v}_k \end{aligned}$$

Mit:

Transitionsmatrix: $\Phi_k = e^{A(t_{k+1}-t_k)}$
Eingangsmatrix: B_k
Eingangsvektor: $\vec{u}$
Zeit zwischen zwei Zuständen: Δt

Hierzu werden in einer Estimationsphase bereits vorliegende Messwerte verarbeitet, um die Schätzung des aktuellen Systemzeitpunkts mittels einer als Kalman-Gain bezeichneten Matrix zu verbessern. Anschließend wird der geschätzte Systemzustand auf den nächsten Beobachtungszeitpunkt propagiert, d.h. der folgende Systemzustand berechnet.

Die Einbindung der Messungen des Erdmagnetfeldes erfolgt anhand des Complementary Filtering-Ansatzes bei dem langzeitstabile (Magnetfeld) und kurzzeitstabile (Drehrate) Daten fusioniert werden, um jeweils die Zuverlässigkeit der Messung zu erhöhen.

4. SICHTSYSTEM

Besonderes Augenmerk wurde auf die Konzeption der integrierten Darstellung der Fluginstrumente gelegt. Hierzu sind 3 der 4 Instrumente des Basic-T (Fahrtmesser, Höhenmesser, Kurskreisel) implementiert. Der künstliche Horizont als viertes im Basic-T verbautes Instrument ist zusätzlich durch die Geländeansicht abgedeckt. Um auch die Darstellung modular zu gestalten, wurden die verschiedenen Informationen in Ebenen gegliedert (s. Bild 6). So ist die Maske der Instrumentenansicht in einer Ebene zusammengefasst, ebenso wie die Darstellung der Geländeansicht. Weitere optional verfügbare Ansichten wie die Struktur der bei der Hagelabwehr verwendeten Planquadrate, Hindernisse für die Luftfahrzeuge (Obstacles, z.B. Sendemasten), Bezeichnungen geografischer Natur (z.B. Benennung von Bergen), höherrangige Straßen oder Ortsnamen sollen in weiterer Folge definiert und darstellbar sein.

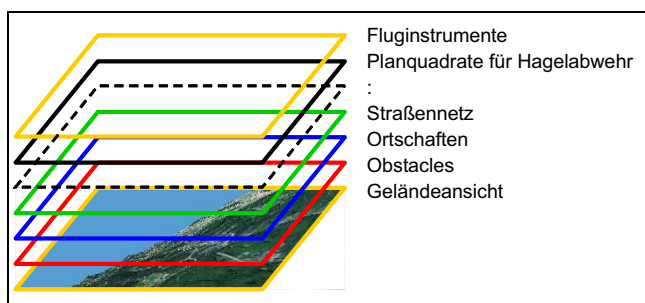


BILD 5. Konzeption des Navigationsdisplays anhand von Informationsebenen

Die Grundlage für die Echtzeiterstellung des 3D-Landschaftsmodells ist ein digitales Geländemodell (DGM) als 8 Bit Graustufenbild. Aus diesem wird ein gleichmäßiges Gitternetz mit der dementsprechenden Höheninformation generiert. Entscheidend für die Ausdehnung des Gitternetzes ist die Rasterweite des verwendeten DGMs. Die Grauwerte der jeweiligen Pixel stellen dabei einen Indikator für die Höhe der einzelnen Scheitelpunkte dar. Die Genauigkeit basiert dabei auf der minimalen bzw. maximalen Höhe des aktuellen durch das DGM abgedeckten Gebiets. Die Differenz ist dabei in 256 (8-Bit) Stufen unterteilbar. In der folgenden Abbildung ist ein Beispiel für eine Darstellung eines DGM als fertiges Gitternetz aufgeführt.

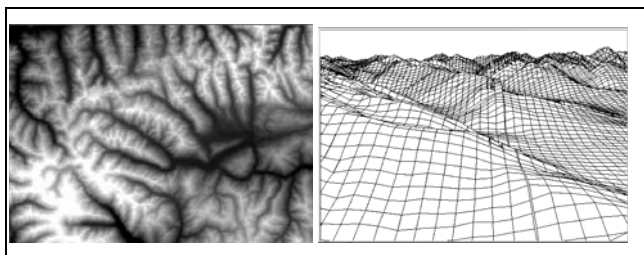


BILD 6. 8 Bit-DGM-Modell (links) und Wireframe-Modell (rechts)

Das DGM wird dynamisch in den Speicher geladen und bietet somit die Möglichkeit unterschiedlichste Landschaftsbereiche bei Bedarf zu laden und darzustellen. Hierbei ist auf die Pixelanzahl (und somit die Rasterweite) des DGM zu achten, da es durch eine höhere Pixelanzahl zwar möglich ist, eine größere Region darzustellen bzw. eine genauere Modellierung zu ermöglichen, jedoch damit

auch die Anforderungen an die Grafikkarte sehr stark ansteigen. Auf das fertige Gitternetz wird die dazugehörige Textur gelegt. Man ist somit in der Lage, nicht nur ein spezielles Modell anzuzeigen, sondern dieses auch mit verschiedenen Texturen (Luftbilder, digitale Karten, Geländemodellen usw.) zu versehen. Über eine perspektivische Ansicht erhält der Benutzer einen realistischeren Eindruck der Umgebung. Durch die Überblendung der Darstellung mit Fluginstrumenten und Navigationsinformationen wird dem User ein umfassender Überblick über den aktuellen Status (Fluglage, Geschwindigkeit, Höhe, Kurs, etc.) geboten. Das folgende Bild 7 zeigt einen Screenshot der 3D-Darstellung inkl. eingeblendeter Instrumente.

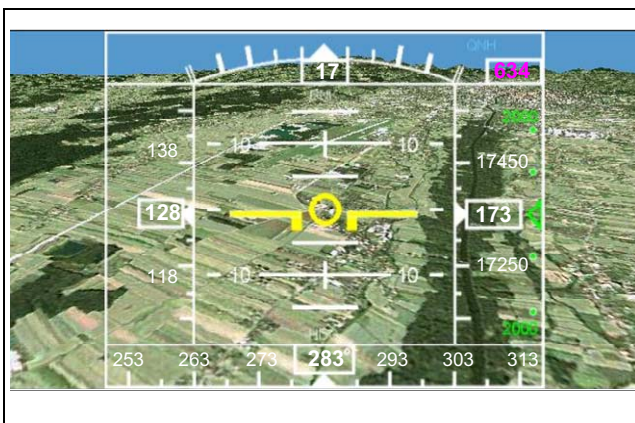


BILD 7. Aus Höhenmodell und Textur errechnete Geländeansicht mit überlagerten Fluginstrumenten

Die gezeigte Visualisierung wird mit Hilfe von Shockwave 3D des Autorensystems Adobe Director errechnet und als Plug-in in die Hauptapplikation geladen. Durch Verwendung des Grafikprozessors des mobilen Endgeräts mit zugeordnetem Grafikspeicher wird eine Beschleunigung des Bildaufbaus erreicht, um die benötigte Darstellungs-Performance zu erreichen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Das Konzept eines mobilen Flugnavigations- und Flugsupportsystems bestehend aus einem Display mit Instrumentenansicht und virtueller Geländedarstellung zur Unterstützung der Navigation in Alpentälern primär bei der Hagelbekämpfung wird in diesem Artikel vorgestellt. Das im Rahmen des Projektes NavAlp entwickelte System soll trotz eingeschränkter Sicht durch aufkommende Gewitterwolken die Durchführung von Hagelabwehr-Missionen auch in voralpinen Regionen ermöglichen.

Das Systemkonzept sieht sowohl die Verwendung kommerzieller als auch selbst entwickelter Sensorik vor. Im weiteren Projektverlauf wird der Navigationsfilter anhand simulierter als auch gemessener Sensordaten entwickelt und gemeinsam mit dem Strapdown-Algorithmus in den Berechnungsalgorithmus integriert. Die erzielbare Navigationsperformance soll anhand von statischen und dynamischen Analysen mit der einer kommerziellen IMU verglichen werden.

Als Endgeräte werden ebenfalls mehrere Lösungen evaluiert. Neben einem Tablet-PC wird das System auch mit einem UMPC untersucht, um anhand von

Betrachtungen unter dem Aspekt der Usability Rückschlüsse auf die operationelle Einsetzbarkeit zu erhalten. Nach dem Ende der Testphase soll ein Evaluierungsbericht vorliegen, der neben den navigationstechnischen Aspekten auch die erzielbare Grafikperformance (Bildrate), die Einsatzdauer der jeweiligen Lösung und die Usability des Systems abdeckt.

Die Verwendung des Systems ist nicht auf den dargestellten Anwenderfall begrenzt. Das Visualisierungsmodul des Systems könnte auch für Trainingszwecke eingesetzt werden, um vorhandene Flugdaten bzw. Flugverläufe zu visualisieren. Eine potentielle Nutzergruppe sind Bedarfsflugunternehmen, die anhand des Systems und geeigneter Visualisierungssysteme realitätsnahe Präsentationen ihres Portfolios erstellen könnten. Die Sensorik ist aufgrund der erzielbaren Größe leicht für miniaturisierte, unbemannte Flugzeuge (UAVs) einsetzbar, wie dies bereits bei [2] demonstriert wurde. Die Bodenkontrollstation eines solchen UAV's könnte mit Hilfe von Modulen des Visualisierungssystems ausgestattet werden, um neben den technischen Daten des Flugzeugs auch eine synthetische Außensicht zu erhalten.

LITERATUR

- [1] Jane's Avionics 1998/99. Chris Johnson, Ed., Jane's Information Group Ltd. (UK), 1999.
- [2] Winkler, Vörsmann: Multi-Sensor Data Fusion for Integrated Navigation Systems of Small Autonomous Unmanned Aircraft. Proceedings des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2006, DGLR-2006-168, Braunschweig, 2006.
- [3] Luethi, Moser: Low Cost Inertial Navigation System. Institut für Elektrotechnik, ETH Zürich. Online unter: http://www.tmoser.ch/typo3/uploads/media/LowBudget_INS.pdf (24.01.2008).
- [4] Wendel: Integrierte Navigationssysteme. Oldenbourg-Verlag, München, 2007.
- [5] Titterton: Strapdown Inertial Navigation Technology. AIAA, Reston, 2004.
- [6] Savage: Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithms. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 21(1):19-28, 1998.
- [7] Savage: Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 2: Velocity and Position Algorithms. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 21(2):208-221, 1998.
- [8] National Geophysical Data Centre: The World Magnetic Model. Online unter: <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/WMM/DoDWMM.shtml> (24.01.2008).
- [9] Welch, Bishop: An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina, 2006.
- [10] Winkler: Zur Sensordatenfusion für integrierte Navigationssysteme unbemannter Kleinstflugzeuge. Shaker Verlag, Aachen, 2007.