

Sensoren für kinematische Anwendungen^{*)}

Sensors for Kinematic Applications

Lasse Klingbeil, Heiner Kuhlmann

Dieser Artikel bietet einen Überblick über die Sensoren, die in kinematischen Anwendungen zur Bestimmung der Trajektorie einer bewegten Sensorplattform verwendet werden können. Dabei wird insbesondere darauf eingegangen, wie die eigentlich zur Objektraumbeobachtung eingesetzten Sensoren (Laserscanner und Kameras) zur Trajektorienbestimmung beitragen können. Ein Beispiel aus der eigenen Forschung zeigt, wie die hier vorgestellten Sensoren und Methoden unter besonderen Bedingungen, nämlich bei einem leichten unbemannten Flugobjekt mit begrenzter Traglast und zur Bestimmung der Trajektorie in Echtzeit eingesetzt werden.

Schlüsselwörter: Mobile Mapping, Multisensorsysteme, Georeferenzierung, Trajektorienbestimmung

The article presents an overview of various sensors, which can be used in kinematic applications for the determination of the trajectory of a moving sensor platform. It also describes how sensors, which are usually used for the observation of the object space (such as laser scanners and cameras) can be used as additional sensors for trajectory estimation. An example from a current research project shows, how all sensors shown here are utilized in special conditions, where the payload of sensor platform is very limited and where the trajectory estimation happens in real time.

Keywords: Mobile mapping, multi-sensor systems, georeferencing, trajectory estimation

1 EINLEITUNG

Unter kinematischen Anwendungen werden im Allgemeinen Anwendungen verstanden, bei denen sich entweder das zu vermessende Objekt in Bewegung befindet oder sich die Sensorplattform selbst durch eine zu vermessende Umgebung oder an zu vermessenden Objekten vorbei bewegt. Anwendungen mit bewegter Sensorplattform werden besonders in letzter Zeit häufig unter dem Überbegriff ‚Mobile Mapping‘ zusammengefasst. In diesem Artikel soll es generell um Sensoren gehen, die in Mobile-Mapping-Anwendungen eingesetzt werden oder werden können. Diese Sensoren wiederum lassen sich prinzipiell in Sensoren zur Objektraumerfassung und in Sensoren zur Trajektorienbestimmung unterteilen. Nur durch die Kombination beider Sensorarten können die Beobachtungen des Objektraumes in einem übergeordneten Koordinatensystem zusammengefasst werden. Wie später erläutert wird, verschwimmen die Grenzen zwischen den beiden Arten von Sensoren immer mehr, da durch geeignete Algorithmen auch die Sensoren zur Objektraumbeobachtungen zur Bestimmung der Bewegung der Plattform verwendet werden können.

2 MOBILE MAPPING SYSTEME

Auf eine systematische Vorstellung aktueller Mobile Mapping Systeme wird an dieser Stelle verzichtet. Es soll jedoch auf einige Entwicklungen und Trends eingegangen werden, die insbesondere auf die Art und die Auswertungsstrategien der verwendeten Sensoren Einfluss haben, und die das Thema Mobile Mapping nach wie vor zu einem interessanten Forschungsbereich machen.

Die wohl klassischsten Mobile Mapping Systeme sind luftgebundene Systeme aus dem Bereich Fernerkundung (siehe z. B. /Kraus 2004/). Üblicherweise werden hier die Daten von Sensoren zur Erfassung elektromagnetischer Strahlung (Kameras, Spektrometer) mithilfe der bekannten Positionen und Orientierung eben dieser Sensoren zu Karten zusammengefasst. Die Bewegung der Sensoren wird dabei mithilfe verschiedener Sensoren (z. B. GNSS und Inertialsensoren) nachträglich bestimmt. Eine Rückführung der Objektraumbeobachtungen auf die Trajektorienbestimmung geschieht in seltenen Fällen durch die Verwendung von Passpunkten und photogrammetrischen Methoden.

Die in den letzten Jahren sehr populär gewordenen bodengebundenen Mobile Mapping Systeme arbeiten prinzipiell mit der gleichen Methode. Ein Fahrzeug enthält eine Reihe hochpräziser Sensoren zur

^{*)} Überarbeitete Fassung des auf dem „10. Jenaer GeoMessdiskurs 2013“ am 02.07.2013 in Jena gehaltenen Vortrags.

Bewegungsvermessung (meist GNSS und Inertialsensoren), mit deren Hilfe die Daten der Sensoren zur Objektraumbeobachtung (üblicherweise Laserscanner und Kameras) in einem übergeordneten Koordinatensystem zu konsistenten Karten (z. B. 3D-Punktwolken) zusammengeführt werden. Die Bestimmung der Trajektorien geschieht üblicherweise im Nachhinein, wobei auch hier in seltenen Fällen die Georeferenzierung der Daten durch Passpunkte verbessert wird. Ein ausführlicher Überblick über den aktuellen Stand der Technik bodengebundener Mobile Mapping Systeme findet sich z. B. in /Puente et. al. 2013/ und einigen darin enthaltenen Referenzen.

Interessante neue Herausforderungen ergeben sich durch die Übertragung der Technologie auf andere Trägerplattformen, wie z. B. den Menschen selbst oder leichte unbemannten Flugobjekte (Unmanned Aerial Vehicle, UAV). Diese Plattformen zeichnen sich dadurch aus, dass sie das Gewicht und die Größe der einsetzbaren Sensoren limitieren und die erprobten kommerziell erhältlichen, aber großen und schweren GNSS/IMU Systeme meist keine Option sind. Die in diesen Fällen eingesetzten leichteren und kleineren Inertialsensoreinheiten sind aber weniger genau und weisen bereits nach sehr kurzen Zeiten hohe Abweichungen auf. Das wiederum führt zu besonderen Herausforderungen bei der Berechnung der Trajektorien und verlangt unter Umständen nach der Einbindung weiterer Sensormodalitäten, insbesondere wenn z. B. in der Nähe oder innerhalb eines Gebäudes keine zufriedenstellenden GNSS-Beobachtungen zur Verfügung stehen. Weitere Herausforderungen ergeben sich bei Bedarf nach einer direkten Georeferenzierung der Daten in Echtzeit, dass heißt, wenn z. B. auf das Ausbringen von Passpunkten verzichtet werden soll oder wenn die Ergebnisse der Positions- und Orientierungsbestimmung zur autonomen Navigation der Plattform verwendet werden soll. Aktuelle Arbeiten zur direkten Georeferenzierung von mit UAV aufgenommenen Bilddaten finden sich z. B. in /Skaloud & Legat 2008/ und /Turner et al. 2013/ sowie im Beispiel in Kapitel 4.

3 SENSOREN

Wie schon erwähnt, lassen sich die in Mobile Mapping Systemen einsetzbaren Sensoren in Sensoren zur Objektraumerfassung und Sensoren zur Positions- und Orientierungsbestimmung der Plattform

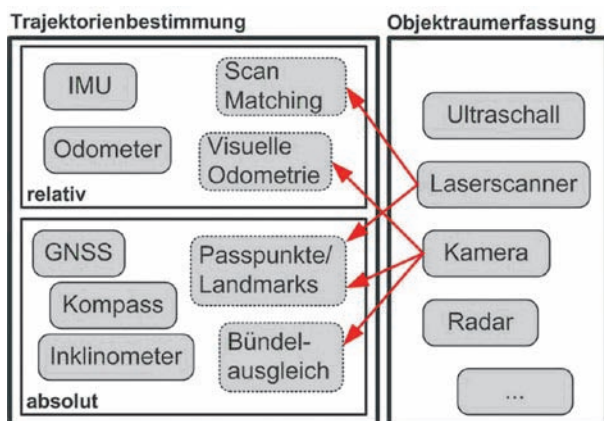


Abb. 1 | Kategorisierung verschiedener Sensoren und Auswertungsmethoden

unterteilen. Bei Letzteren unterscheidet man zwischen relativen und absoluten Sensoren (Abb. 1).

Ohne auf die Funktionsweise im Detail einzugehen, wird im Folgenden ein Überblick über die verschiedenen Sensoren gegeben. Ein besonderes Augenmerk richtet sich dabei auf die Sensoren zur Objektraumerfassung, die mittels geeigneter Auswertemethoden ebenfalls als Sensoren zur Position- und Orientierungsbestimmung der Plattform betrachtet werden können.

3.1 Relative Sensoren

Inertialsensoren

Mit Inertialsensoren werden die Beschleunigungen und die Drehraten eines bewegten Systems relativ zum Inertialsystem gemessen. Mithilfe einer Inertialsensoreinheit (IMU, Inertial Measurement Unit), bestehend aus einem jeweils dreiachsigen Beschleunigungs- und Drehratensensor (Gyroskop), lässt sich also prinzipiell bei bekannten Startwerten über zweifache Integration der Beschleunigungswerte und einfache Integration der Drehraten die absolute Trajektorie eines Objektes berechnen. Der hierbei üblicherweise eingesetzte sogenannte ‚Strapdown‘-Algorithmus (siehe z. B. /Titterton & Weston 2004/) berücksichtigt dabei auch die Erddrehrate und die Beschleunigungskomponente durch die Erdgravitation, da diese in einem erdfesten Koordinatensystem als Störkomponenten zusätzlich zu den durch die eigentlich zu vermessende Bewegung auftretenden Messgrößen auftreten. Hochwertige IMUs, basierend auf optischen Gyroskopen (Laserkreisel, Faserkreisel), werden seit Jahrzehnten in militärischen und zivilen Anwendungsbereichen eingesetzt und ermöglichen je nach Ausprägung eine eigenständige Positionsbestimmung über mehrere Minuten, in der die Positionsabweichung unterhalb von einem Meter bleibt. Die Entwicklung immer kleinerer und kostengünstigerer Inertialsensoren auf Basis der MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)-Technologie führte letztendlich dazu, dass Inertialsensoreinheiten zur Standardausstattung jedes Smartphones gehören. Obwohl die Anwendungsbereiche für MEMS-Inertialsensoren vielfältig sind, ist die inertielle Navigation, wie oben beschrieben, problematisch, da sich die hohen Ungenauigkeiten der Sensoren innerhalb von wenigen Sekunden auf mehrere hundert Meter Positionsabweichung aufintegrieren können. Dennoch sind MEMS-basierte IMUs in kosten- und größenlimitierten Systemen häufig die einzige Option, weshalb dort die Auswertelgorithmen und die Einbindung anderer Sensoren zur Stützung der Berechnung eine große Rolle spielen.

Odometer

Ein Odometer (oder Hodometer) ist im klassischen Sinne ein Sensor zur mechanischen Messung der zurückgelegten Wegstrecke, wobei z. B. die Anzahl der Umdrehung eines auf dem Boden rollenden Rades mit bekanntem Umfang gezählt wird. Heutzutage werden viele Sensoren, die die zurückgelegte Strecke oder die Geschwindigkeit entlang des Weges messen, als Odometer bezeichnet, wobei neben der Messung der Radumdrehung mithilfe von Radencodern auch optische Korrelationsverfahren, wie z. B. beim Geschwindigkeitssensor CorreVit der Firma Corrsys-Datron zum Einsatz kommen. Mithilfe von zwei in einem gewissen Abstand am bewegten Objekt befestigten

Odometern lassen sich neben der zurückgelegten Strecke auch Kurswinkeländerungen bestimmen (Differentialodometrie). Wie später gezeigt wird, können auch bildbasierte Verfahren, wie der optische Fluss zur Bestimmung der relativen Eigenbewegungen verwendet werden, was ebenfalls als (visuelle) Odometrie bezeichnet wird.

Der ursprünglich aus der Schifffahrt kommende Begriff der Koppelnavigation (engl.: Dead Reckoning) bezeichnet die fortlaufende Bestimmung der eigenen Trajektorie aus Geschwindigkeitsinformationen und absoluten oder relativen Kurswinkelinformationen unter der Annahme bekannter Anfangsbedingungen. Klassischerweise kommen hier die eben beschriebenen Odometer und Drehratensensoren oder auch ein Kompass zum Einsatz. Ähnlich wie bei der Strapdown-Integration von Inertialsensordaten treten jedoch durch die Verwendung relativer Informationen Drifteffekte auf, die nur durch die Hinzunahme zusätzlicher absoluter Sensoren korrigiert werden können. Beispiele dafür werden im Folgenden beschrieben.

3.2 Absolute Sensoren

GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System)-Empfänger sind die in Mobile Mapping Systemen am häufigsten eingesetzten absoluten Sensoren zur Bestimmung der Trajektorie des bewegten Objektes. Dabei werden meist differentielle Auswerteverfahren auf Basis von Trägerphasenbeobachtungen eingesetzt, da hier unter Idealbedingungen Positionsgenauigkeiten im Zentimeterbereich und Datenraten bis zu 20 Hz möglich sind (siehe z. B. /Hofmann-Wellenhof et al. 1994/). Unter üblichen Bedingungen, z. B. innerhalb von Städten, sind viele Satelliten durch Vegetation oder Gebäude abgeschattet, so dass hier häufig relative Sensoren zur Überbrückung kurzer Abschnitte oder zur generellen Verbesserung der Trajektorienbestimmung eingesetzt werden.

Mit einem GNSS-Empfänger kann auch die Geschwindigkeit eines Objektes gemessen werden. Bei bodengebundenen Fahrzeugen, bei denen die Orientierung des Fahrzeugs relativ zur Bewegungsrichtung häufig bekannt ist, lässt sich aus der Geschwindigkeit auch der Kurswinkel bestimmen. Bei „mobileren“ Objekten, wie z. B. UAV ist ein Rückschluss aus der Bewegungsrichtung auf die Orientierung des Objektes nur durch Hinzunahme einer IMU und unter einer beschleunigten Bewegung möglich (siehe z. B. /Wendel 2007/). Zusätzlich können auch zwei am Objekt befestigte GNSS-Antennen verwendet werden, um zumindest zwei Winkel der Orientierung absolut zu bestimmen (vgl. /Eling et al. 2013/). Dazu wird die durch die beiden Antennen aufgespannte kurze Basislinie ausgewertet. Aus der Nord- und der Ostkomponente der Basis kann dann der Kurswinkel und je nach Aufbau und unter Hinzunahme der Höhenkomponente auch der Roll- oder Pitch-Winkel bestimmt werden.

Magnetfeldsensoren/Kompass

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung des absoluten Kurswinkels ist die Verwendung von Magnetfeldsensoren als Kompass. Bei Verwendung dreiachsiger Sensoren lässt sich so in beliebiger Raumlage des Objektes über die Messung des Erdmagnetfeldes die Nordrichtung bestimmen. Leider wird das Erdmagnetfeld durch in der Nähe

des Sensors befindliche ferromagnetische Materialien überlagert („Hard Iron“ Effekte) oder gestört („Soft Iron“ Effekte), so dass nur mithilfe einer aufwändigen Kalibrierung des Sensors innerhalb des vollständigen Systemaufbaus eine Orientierungsbestimmung möglich ist (siehe z. B. /Vasconcelos et al. 2008/). Dennoch ist der Magnetfeldsensor häufig der einzige Sensor, der alleine überhaupt eine absolute Orientierungsinformation liefern kann.

Neigungssensoren

Mit Neigungssensoren kann der Winkel eines Objektes relativ zur Richtung der Erdgravitation bestimmt werden. Es gibt zahlreiche Messmethoden, die in diesen Sensoren zum Einsatz kommen, wobei alle direkt oder indirekt auf die Bestimmung der Gravitationsrichtung angewiesen sind, die wiederum in beschleunigten Systemen durch eine translatorische Komponente überlagert ist. Daher sind diese Sensoren üblicherweise so stark gedämpft, dass ihre Bandbreite für eine Vermessung bewegter Objekte nicht ausreicht. Daher werden hier üblicherweise die Beschleunigungssensoren der Inertialsensoreinheiten zusammen mit entsprechenden Filteralgorithmen verwendet.

3.3 Sensoren zur Objektraumerfassung

Welche Sensoren für die Erfassung des Objektraumes eingesetzt werden, wird durch die Aufgabenstellung der Mobile Mapping Anwendung bestimmt. Die Sensoren reichen von Kameras verschiedener Wellenlängenbereiche (optisch, infrarot, multi-/hyperspektral, thermisch) über Gravimeter bis zu Laserscannern. Wir beschränken uns in diesem Artikel auf die Anwendung von Laserscannern und Kameras, da diese zur geometrischen Erfassung des Objektraumes eingesetzt werden und daher auch durch entsprechende Methoden zur Rekonstruktion der Trajektorie durch den Objektraum verwendet werden können. Im Folgenden sind einige dieser Methoden aufgeführt.

Visuelle Odometrie

Bei der visuellen Odometrie werden aus aufeinander folgenden Bildern die Orientierungs- und Positionsänderung der Kamera zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten berechnet. Das geschieht, wie in *Abb. 2* dargestellt, üblicherweise über korrespondierende Punkte

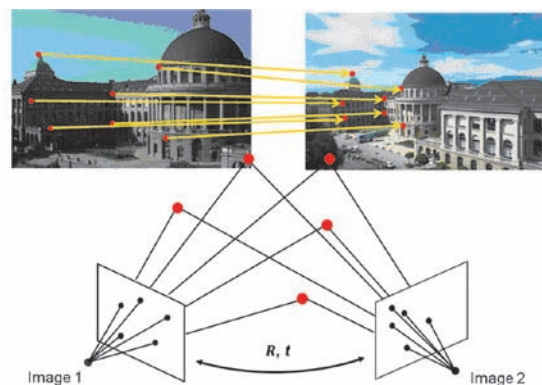


Abb. 2 | Prinzip der visuellen Odometrie /Scaramuzza & Fraundorfer 2011/

in den Bildern, die mithilfe verschiedener Merkmalen zugeordnet werden (z. B. SIFT, siehe /Lowe 1999/). Damit kann die visuelle Odometrie als relativer Sensor zur Trajektorienbestimmung gesehen werden. Eine ausführliche Beschreibung dieser Methode findet sich z. B. in /Scaramuzza & Fraundorfer 2011/.

Scan Matching

Scan Matching ist ähnlich zur visuellen Odometrie; gearbeitet wird jedoch auf mit einem Laserscanner aufgenommenen Punktwolken. In die Berechnung der relativen Sensorbewegung gehen entweder die Scanpunkte direkt oder aus der Umgebung mehrerer Scanpunkte berechnete Merkmale ein (Abb. 3). Ein häufig verwendeter Algorithmus ist der ICP-Algorithmus (Iterative Closest Points, siehe z. B. /Besl & McKay 1992/). Scan Matching entspricht somit ebenfalls einem relativen Sensor. Scan Matching spielt im Bereich der mobilen Robotik eine große Rolle. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode findet sich z. B. in /Lu & Milios 1997/.

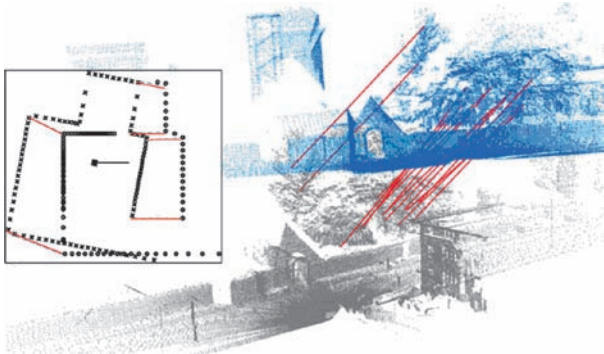


Abb. 3 | Scan Matching /Bengtsson & Baerveldt 2003/ und /Rusu & Cousins 2011/

Bündelausgleichung

Bei der Bündelausgleichung werden in einem prinzipiell beliebigen großen Satz von sich überlappenden Bildern die Kamerapositionen- und Orientierungen aller Bilder, sowie die Koordinaten von in den Bildern abgebildeten und wiedergefundenen Objektpunkten in einem

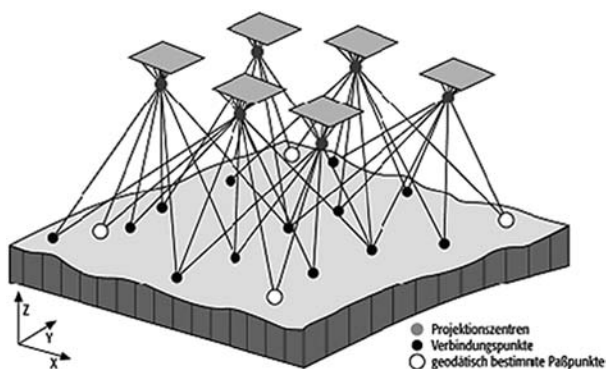


Abb. 4 | Bündelausgleichung für den Luftbildfall mit Passpunkten /Kraus 2004/

gemeinsamen Koordinatensystem bestimmt (siehe z. B. /Kraus 2004/). Die Bündelausgleichung kann somit als absoluter Sensor für ein bewegtes Kamerasystem gesehen werden, insbesondere dann, wenn sich unter den Objektpunkten auch Passpunkte bekannter Position befinden (Abb. 4).

Ein Nachteil der Bündelausgleichung ist, dass die daraus berechnete Trajektorie durch den erheblichen Rechenaufwand erst nach einer nachträglichen Auswertung zur Verfügung steht. Es gibt jedoch Ansätze, die Positionen und Orientierungen der Kamera über eine sogenannte inkrementelle Bündelausgleichung /Schneider et al. 2013/ zeitnäher zu bestimmen.

4 BEISPIEL AUS DER EIGENEN FORSCHUNG

Zum Schluss soll ein aktuelles Forschungsprojekt vorgestellt werden, in dem alle in diesem Artikel beschriebenen Sensoren unter besonderen Bedingungen zum Einsatz kommen. Ziel dieses Projektes, welches unter dem Namen „Mapping On Demand“ von der DFG als Forschergruppe gefördert wird, ist die Entwicklung von Methoden, mit denen unter der Verwendung eines leichten UAV schwer zugängliche Objekte mithilfe von Bildinformationen aus der Luft vermessen werden können. Die eigentliche Herausforderung dabei spiegelt sich in dem Namenszusatz „on Demand“ wieder. Neben der Aufgabe der 3D-Geometrierekonstruktion aus Kameradaten soll das UAV vollständig autonom, nur auf Basis einer semantischen Benutzeranfrage fliegen können, dabei Hindernisse eigenständig erkennen und die aufgenommen Bilddaten in Echtzeit prozessieren sowie semantische Informationen daraus extrahieren /Loch-Dehbi et al. 2013/. Eine genaue Positions- und Orientierungsbestimmung des UAV in Echtzeit ist daher nicht nur für die direkte Verarbeitung der Bilddaten, sondern auch für die autonome Navigation des Objektes notwendig. Abb. 5 zeigt den aktuellen Stand des innerhalb des Projektes entwickelten UAV. Es enthält neben der eigentlichen für die Geometrierekonstruktion gedachten hochauflösenden Kamera zwei Stereokamera Paare, die als zusätzliche Sensoren für die Positions- und Orientierungsbestimmung dienen /Schneider et al. 2013/. Ein kleiner Computer ist für die Bildverarbeitung und Trajektorienplanung zuständig /Nieuwenhuisen et al. 2013/. An einem variierten Aufbau, der hier nicht abgebildet ist, befindet sich außerdem ein rotierender

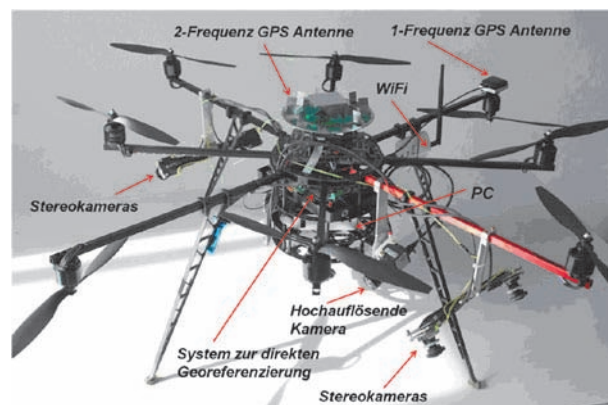


Abb. 5 | Aufbau des innerhalb des Projektes „Mapping on Demand“ entwickelten UAV

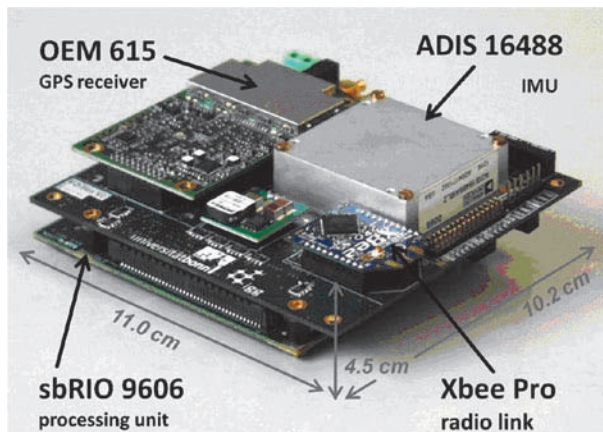


Abb. 6 | System zur direkten Georeferenzierung in Echtzeit

3D-Laserscanner /Droeschel et al. 2013/ der hauptsächlich für die lokale Hinderniserkennung eingesetzt wird /Holz et al. 2013/.

Ein zentrales Element des gesamten Aufbaus ist das System zur direkten Georeferenzierung in Echtzeit, welches die Informationen der beiden GNSS-Antennen, einer IMU, und der Odometrieinformationen aus den Stereokameras in Echtzeit zu einer präzisen und robusten Positions- und Orientierungsinformation verrechnet. Ein Foto des Systems, dessen Entwicklung ebenfalls Teil des Projektes „Mapping on Demand“ ist, ist in *Abb. 6* zu sehen /Eling et al. 2013/.

Das System besteht aus einer MEMS basierten IMU, einem 3-Achs-Magnetfeldsensor, einem Barometer, einem 2-Frequenz-GPS-Empfänger, einem 1-Frequenz-GPS-Empfänger und einer Proessoreinheit mit einem Echtzeit-Betriebssystem. Ein Funkmodem ermöglicht den Empfang von Korrekturdaten einer GPS-Referenzstation. Die Einheit misst etwa 11 cm x 10 cm x 4,5 cm und wiegt inklusive der Antennen etwa 400 g. Die Filteralgorithmen zur Positions- und Orientierungsbestimmung befinden sich zurzeit in Entwicklung. Eine besondere Herausforderung ist dabei die enge Kopplung von GPS-Beobachtungen, IMU-Daten und Informationen

aus den Stereokameras in Echtzeit, wobei z. B. die zeitliche Verzögerung durch die Bildverarbeitung auf angebrachte Weise einbezogen werden muss. Außerdem soll auch bei temporären GPS-Ausfällen und schlechten Lichtverhältnissen eine robuste Lokalisierung möglich sein. Im aktuellen Zustand wird die Position noch mithilfe eines eigens entwickelten RTK (Real Time Kinematic) GPS-Algorithmus ohne die Verwendung der IMU- und Kameradaten berechnet.

In *Abb. 7* ist beispielhaft die Trajektorie eines Testfluges gezeigt, wobei diese während des Fluges auf dem eben beschriebenen Georeferenzierungssystem berechnet wurde. Die Positionsgenauigkeit während des gesamten Fluges lag im Bereich weniger Zentimeter, was durch den Vergleich mit nachträglich von kommerziellen GPS-Softwarepaketen berechneten Trajektorien bestätigt werden konnte.

5 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel wurden zahlreiche Sensoren vorgestellt, die in kinematischen Anwendungen zur Bestimmung der Trajektorie einer bewegten Sensorplattform zum Einsatz kommen können. Auf einige wesentliche Herausforderungen bei der Verwendung kinematischer Multisensorsysteme, wie z. B. die zeitliche Synchronisierung der Daten unterschiedlicher Sensoren, sowie die räumliche Synchronisierung der einzelnen Sensorkoordinatensysteme, konnte aus Platzgründen nicht eingegangen werden.

Der kommerzielle Einsatz solcher Sensorsysteme wird heutzutage mehr und mehr erschlossen. Üblicherweise verlassen sich diese Systeme auf die Verfügbarkeit von GNSS-Beobachtungen, wobei Zeiten ohne oder mit schlechtem GNSS-Empfang durch die Verwendung einer hochpräzisen Inertialsensoreinheit überbrückt werden. Die Trajektorien werden erst nach der Messfahrt in einem Postprocessing-Schritt berechnet. Im Vergleich dazu zeigt sich weiterer Forschungsbedarf besonders dann, wenn die Sensoren durch Anforderungen an den Preis oder die Größe qualitativ schlechter werden (was im Falle der Inertialsensoren ein ernsthaftes Problem darstellt), und wenn aufgrund der Anwendung eine Verfügbarkeit der Trajektorie

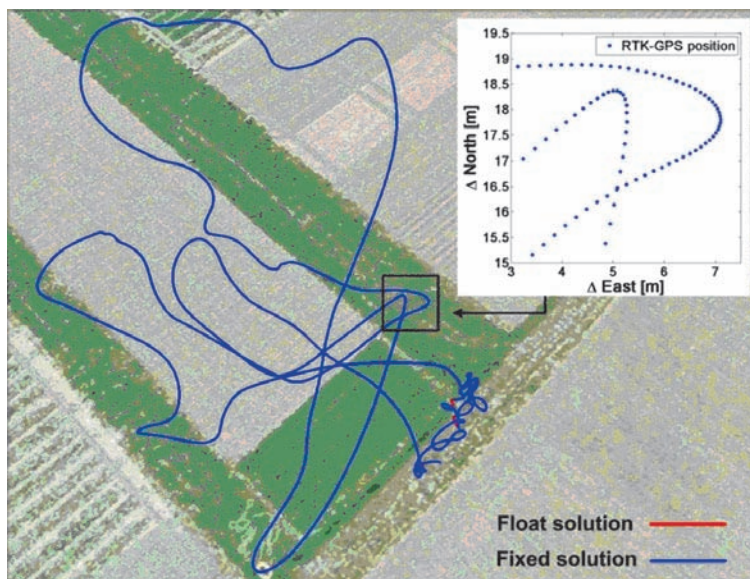


Abb. 7 | Horizontalkomponenten einer während eines Testfluges berechneten Trajektorie

in Echtzeit notwendig ist. In beiden Fällen kann die in diesem Artikel kurz vorgestellte Verwendung von Bildinformationen und Laserscans zur Unterstützung der Trajektorienbestimmung nützlich sein. Ein entsprechendes Anwendungsbeispiel wurde ebenfalls vorgestellt.

Offen bleibt die Frage, welche Genauigkeit mit einem solchen Sensorsystem, wie es in dem Beispiel gezeigt wurde, überhaupt erreichbar ist. Diese wird stark von der Dynamik des Objektes, der Verfügbarkeit von GNSS und bei Verwendung von Bildinformationen von den Eigenschaften der Umgebung abhängen. Offen ist auch, auf welche Weise eine Genauigkeitsevaluierung überhaupt durchgeführt werden kann, da ein Referenzsystem für die Position und Orientierung fliegender Objekte nicht auf Anhieb verfügbar ist. Es sind also in Zukunft noch zahlreiche Arbeiten zu den hier aufgeführten Themen zu erwarten.

DANKSAGUNG

Das in diesem Artikel vorgestellte Beispiel aus der eigenen Forschung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe FOR 1505 „Mapping on Demand“ gefördert.

LITERATUR

- Bengtsson, B. ; Baerveldt, A. J. (2003): Robot localization based on scan-matching – estimating the covariance matrix for the IDC algorithm: In: *Robotics and Autonomous Systems*, 44(2003)1, 29–40.
- Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992): A Method for Registration of 3-D Shapes. In: *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(1992)2, 239–256.
- Droeschel, D.; Schreiber, M.; Behnke, S. (2013): Omnidirectional perception for Lightweight UAV using a continuously rotating 3D laser scanner. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 107–112.
- Eling, C.; Klingbeil, L.; Wieland, M.; Kuhlmann, H. (2013): A precise position and attitude determination system for lightweight unmanned aerial vehicles. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 113–118.
- Eling, C.; Zeimet, P.; Kuhlmann, H. (2013): Development of an instantaneous GNSS/MEMS attitude determination system. In: *GPS Solution*, 17(2013), 129–138.
- Hofmann-Wellenhof, B. ; Lichtenegger, H.; Collins, J. (1994): *Global Positioning System, Theory and Practice*. Springer, Wien/New York, 353.
- Holz, D.; Nieuwenhuisen, M.; Droeschel, D.; Schreiber, M.; Behnke, S. (2013): Towards multimodal omnidirectional obstacle detection for autonomous unmanned aerial vehicles. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 201–206.
- Kraus, K. (2004): *Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin.
- Loch-Dehbi, S.; Dehbi, Y.; Plümer, L. (2013): Stochastic reasoning for UAV supported reconstruction of 3D building models. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 257–261.
- Lu, F.; Milios, E. (1997): Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 18(1997)3, 249–275.
- Lowe, D. G. (1999): Object recognition from local scale-invariant features. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 2, 1150–1157.
- Nieuwenhuisen, M.; Schädler, M.; Behnke, S. (2013): Predictive potential field based collision avoidance for multicopters. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 293–298.
- Puente, I.; González-Jorge, H.; Martínez-Sánchez, J.; Arias, P. (2013): Review of mobile mapping and surveying technologies. In: *Measurement*, 46(2013)7, 2127–2145.
- Rusu, R. B. ; Cousins, S. (2011): 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, Shanghai, China, <http://www.pointclouds.org>.
- Scaramuzza, D.; Fraundorfer, F. (2011): Visual Odometry: Part I – The First 30 Years and Fundamentals. In: *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 18(2011)4, 80–92.
- Schneider, J.; Laebe, T.; Förstner, W. (2013): Incremental real-time bundle adjustment for multi-camera systems with points at infinity. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 355–360.
- Skaloud, J.; Legat, K. (2008): Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(2008)2, 272–282.
- Titterton, D.; Weston, J. (2004): *Strapdown Inertial Navigation Technology*. The American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2nd edition.
- Turner, D.; Lucieer, A.; Wallace, L. (2013): Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. In: *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, PP(2013)99, 1–8, doi: 10.1109/TGRS.2013.2265295.
- Vasconcelos, J. F.; Elkaim, G.; Silvestre, C.; Oliveira, P.; Cardeira, B. (2008): A geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame. In: *Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*, 2 (2008), 1–11.
- Wendel, J. (2007): *Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation*. Oldenbourg, München.

Dr. rer. nat. Lasse Klingbeil

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION (IGG)

Nussallee 17 | 53115 Bonn
klingbeil@igg.uni-bonn.de



Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION (IGG)

Nussallee 17 | 53115 Bonn
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de



Manuskript eingereicht: 06.10.2013 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet