

Jan Schattenberg, Thorsten Lang, Martin Becker, Simon Batzdorfer, Peter Hecker und Franz Andert

Präzise Relativpositionierung in Maschinenschwärmen

Neben der automatischen bzw. teilautomatischen Führung von einzelnen Maschinen rückt das Thema der Fahrzeugführung für Maschinenschwärme immer mehr in den Fokus. Gerade bei Maschinen, die auch miteinander kooperieren, ist die präzise Relativpositionierung der Maschinen zueinander sowie die Bestimmung der exakten Ausrichtung von Anbauteilen oder -geräten in Bezug auf die Hauptmaschine wesentlich. Um diese Aufgabe auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen mit schlechtem GNSS-Empfang (Global Navigation Satellite System) gewährleisten zu können, sind verschiedene technologische Ansätze möglich – sie werden in diesem Artikel vorgestellt.

Schlüsselwörter

Ortung, Kommunikationsstrukturen, kooperativer Maschinenbetrieb, Sensorfusion, GNSS, INS, optischer Fluss, mobile Ad-hoc-Netzwerke, Relativpositionierung

Keywords

Tracking, communication structures, cooperative machine operation, sensor fusion, GNSS, INS, optical flow, ad-hoc mobile networks, relative positioning

Abstract

Schattenberg, Jan; Lang, Thorsten; Becker, Martin; Batzdorfer, Simon; Hecker, Peter and Andert, Franz

Precise relative positioning in machine swarms

Landtechnik 66 (2011), no. 5, pp. 333–336, 3 figures, 4 references

In addition to automatic or semi-automatic guidance of individual machines, guidance of machine swarms is an increasingly important topic. Especially if the machines are cooperating with each other it is essential to know the precise relative position between the machines and to determine the exact orientation of attachments or devices in relation to the machine. To ensure this task even under difficult environmental conditions with poor GNSS (Global Navigation Satellite System) reception, various technological approaches are possible. These approaches will be presented in this article.

■ Mit zunehmender Automatisierung mobiler Maschinen und fortschreitendem Einsatz von Maschinenschwärmen spielt die präzise relative Positionierung der Maschinen zueinander wie auch von Anbaugeräten eine große Rolle. Daneben ist auch die Kenntnis der absoluten Positionen wesentlich. Die präzise relative Positionierung ist vor allem notwendig, um Maschinen bei verschiedensten Aufgaben in einer Formation zu führen. Darüber hinaus muss besonders bei Ausfall oder schlechten Empfangsbedingungen des GNSS-Empfängers eine Bestimmung von relativen Positionen gewährleistet werden, um z.B. Kollisionen der Maschinen zu verhindern. Eine Möglichkeit die relative Position zu garantieren, ist die GNSS-Positionslösung durch die Informationen inertialer Messsysteme (IMU) oder durch bildgebende Systeme zur Bewegungsschätzung zu stützen. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung ist die Schwarmortung, bei der die GNSS-Rohdaten der einzelnen Schwarmteilnehmer über ein mobiles Ad-hoc-Netzwerk ausgetauscht werden. Durch die Verwendung von speziellen Filtern lassen sich fehlerhafte Signale herausrechnen und eine verbesserte Relativpositionierung erzielen. Im Folgenden werden zunächst die Versuchsträger und der grundsätzliche sensorische Aufbau vorgestellt, bevor auf die einzelnen Technologien eingegangen wird.

Technische Ausstattung

Neben der in Heft 3.2010 der Landtechnik [1] vorgestellten flexiblen Forschungsplattformen comRoBS werden für die Versuche die unbemannten Hubschrauber-Versuchsträger ARTIS (Autonomous Rotorcraft Testbed for Intelligent Systems) und der Quadrocopter eingesetzt (**Abbildung 1**). Der Versuchsträger ARTIS wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt, der Quadrocopter von der Ascending Technologies GmbH.

Zusätzlich zu ihrer individuellen Aktorik und Sensorik für die im Projekt relevanten Untersuchungen sind sie mit einem

Abb. 1



comRoBS, DLR ARTIS, AscTec Pelican Quadrocopter (v.l.n.r.)
 Fig. 1: comRoBS, DLR ARTIS, AscTec Pelican Quadrocopter (LTR)

einheitlichen System ausgerüstet. Dieses besteht aus einem Navigationsrechner zur Datenprozessierung, einer Inertialmesseinheit und einem Kommunikationssystem zum Austausch der GNSS-Rohdaten. Zudem verfügen sie über eine WLAN-Verbindung zum Datenzugriff und Debugging. Der Versuchsträger ARTIS ist darüber hinaus mit einem weiteren Rechner zur Bildverarbeitung und den dazugehörigen zwei Kameras als Verbundsystem zur Bewegungsschätzung ausgestattet.

Positionierung im Schwarm

Für eine sinnvolle Koordination verschiedener Fahrzeuge, die in einem Verbund bzw. Schwarm agieren, ist zum einen die Kenntnis der absoluten Position der Fahrzeuge und zum anderen deren relative Position zueinander - die Basislinien zwischen den Fahrzeugreferenzpunkten - notwendig. Ein Weg die Basislinien zu bestimmen, ist die vektorielle Differenzbildung der einzelnen Absolutpositionen. Diese können durch ein Satellitennavigationssystem bestimmt werden. Im Fall von Standalone GNSS-Positionen, d. h. wenn keine Referenzstationsdaten verfügbar sind, unterliegt ein solches Vorgehen großen Fehler-

einflüssen. Um diese zu minimieren, sollen die GNSS-Rohmessungen der einzelnen Schwarmteilnehmer über eine mobile Ad-hoc-Kommunikation (**Abbildung 2**) untereinander ausgetauscht werden. Unter Ausnutzung aller zur Verfügung stehenden Einzelmessungen mit differenziellen Verfahren werden dann die Relativpositionen zwischen den Schwarmteilnehmern bestimmt. Dieses Vorgehen ist jenen differenziellen Verfahren ähnlich, wie sie bei der Verwendung von Referenzstationen angewandt werden. Im Unterschied zum differenziellen Verfahren werden mehr als zwei Teilnehmer berücksichtigt und die absolute Position ist im Gegensatz zu einer Referenzstation nicht im Zentimeterbereich bekannt, sondern variabel.

IMU/GNSS Integration und Fehlererkennung

Der vollständige Fahrzeugzustandsvektor wie Position, Geschwindigkeit und Lage ist für verschiedene Anwendungen im Rahmen von Fahrzeugführungsaufgaben neben der absoluten und relativen Position von Interesse. Zu diesem Zweck wird in dem beschriebenen System eine Inertialmesseinheit (**Abbildung 3**) eingesetzt, die vom Institut für Flugführung der Technischen Universität Braunschweig entwickelt wurde. Die Inertialmesseinheit verwendet Mikro-Elektro-Mechanische-Sensoren (MEMS) zur Messung von inertialen Drehraten und Beschleunigungen. Die Messungen werden über die Zeit zu Geschwindigkeit, Position und Lage integriert; diese Informationen sind hochfrequent. Um das systembedingte „Anwachsen“ der Fehler mit der Zeit zu kompensieren, werden IMUs z. B. mit GNSS-Positionsinformationen in einem Koppelfilter (Kalman-Filter) gestützt. Das beschriebene Konzept sieht eine tiefe Kopplung von IMU, GNSS und Bilddaten vor, mit GNSS-Rohmessungen als Stützgröße für die IMU. Der Vorteil bei diesem Vorgehen ist, dass auch mit weniger als vier GNSS-Einzelmessungen eine Stützung erfolgen kann.

Zur Detektion von Messfehlern oder degradierten GNSS-Signalen erfolgt ebenfalls - mithilfe der IMU - ein Monitoring um fehlerhafte Einzelmessungen zu identifizieren [3]. Dazu werden, wie in **Abbildung 3** dargestellt, mehrere Koppelfilter ($N+1$, N = Anzahl der GNSS-Messungen) parallel ausgeführt. Davon ist ein Filter der Hauptfilter, der alle GNSS-Messungen verwendet. Bei N Subfiltern wird jeweils eine GNSS-Messung von der Prozessierung ausgeschlossen. Auf diese Weise kann

Abb. 2

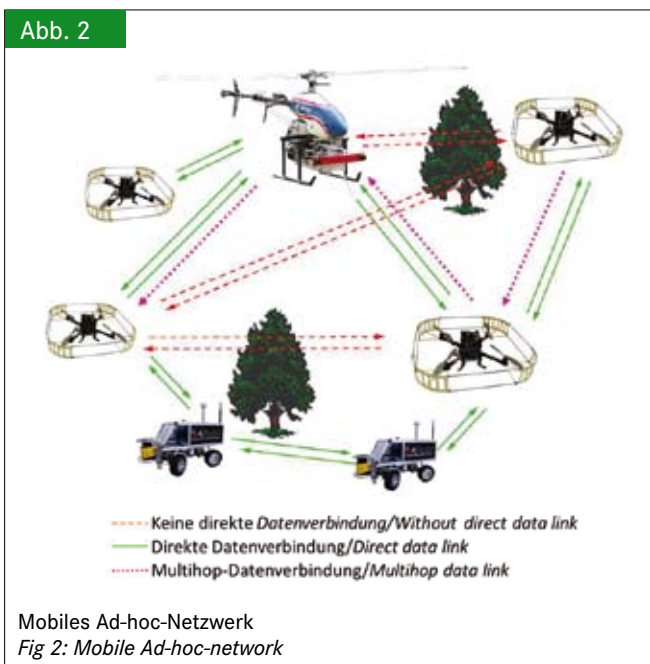
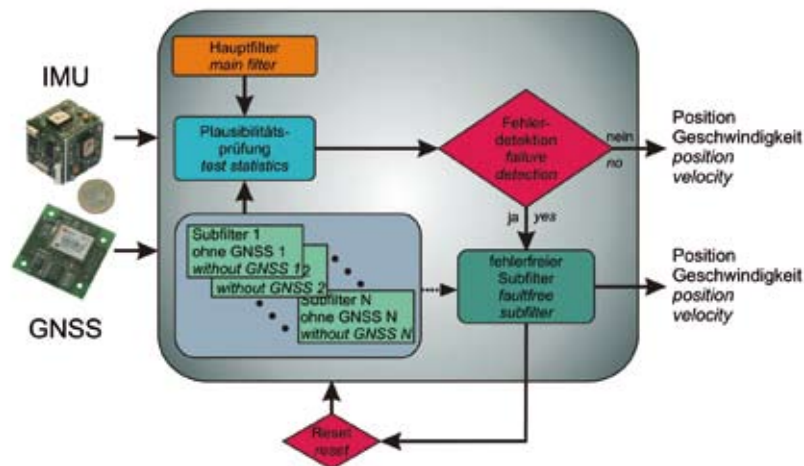


Abb. 3



Filterbankarchitektur

Fig. 3: Filter bank architecture

mit einer Plausibilitätsprüfung bzw. statistischen Tests auf Basis der Ergebnisse des Haupt- und der Subfilter eine fehlerhafte Messung detektiert und von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen werden (Failure Detection and Exclusion, FDE).

Bildgestützte Relativortung

Durch kleine und leichte Kameras sowie leistungsfähige Rechensysteme gewinnen Verfahren zur Bildverarbeitung auch bei mobilen Systemen zunehmend an Bedeutung. Grundlage der Ortung mithilfe von Kameras sind moderne Rechenverfahren, die die Eigenbewegungen der Kamera in Echtzeit aus den aufgenommenen Bildsequenzen ableiten. Dies geschieht über die Identifikation von signifikanten Bildmerkmalen mit eindeutigen und wiedererkennbaren Mustern, z. B. kontrastreiche Kanten und Ecken der aufgezeichneten Objekte und deren zeitlicher Verfolgung innerhalb einer Videosequenz. Anhand der Charakteristik der Bewegungsmuster von einer Vielzahl von Bildmerkmalen lässt sich dann die Eigenbewegung der Kamera und damit auch des Kameraträgers bestimmen. Für die Filterbank zur Ortung steht damit ein weiterer Sensor zur Verfügung, mit dem die Nachteile von GNSS und IMU kompensiert werden können [2]. Die Verfahren und Algorithmen zur vollständigen Integration von Kameras in ein zuverlässiges und robustes Navigationssystem sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

Die aus Bildsequenzen in solchen Umgebungen ableitbaren Daten liefern zunächst eine Menge von Merkmalen und deren Bewegungen zwischen verschiedenen Bildern. Da in dem hier beschriebenen Projekt eine Ortung in beliebigen und auch unbekanntem Umgebungen ermöglicht werden soll, erfolgt kein Abgleich zwischen den aufgezeichneten Bildern und Vorwissen aus entsprechenden Karten. Damit ist aus den Merkmalsbewegungen zunächst nur die relative Orientierung zwischen zwei Bildaufnahmen bestimmbar. Dies bedeutet, dass das Bildverarbeitungssystem ähnlich wie ein Inertialsystem nur relative Bewegungen bestimmt, und sich bei der Integration dieser Bewegungen zu Positionen ein Schleppfehler akkumuliert. Zudem

besteht das Problem der Skalierungsinvarianz, d. h., es lässt sich mit genau einer Kamera nur die Richtung der Bewegung bestimmen, jedoch nicht deren absolute Größe. Werden jedoch wie in diesem Projekt zwei oder mehr Kameras verwendet, kann die Kamerabewegung auch mit absoluter Größe bestimmt werden. Dies gilt jedoch nur dann, wenn ausreichend nahe Objekte in den Bildern vorhanden sind. Der infrage kommende Entfernungsbereich ist vom Aufbau des Stereo- oder Multikamerasystems abhängig und liegt bei dem verwendeten System etwa zwischen 10 und 40 m.

Mobile Ad-hoc-Kommunikation

Um die Positionslösung zu verbessern, müssen die GNSS-Rohdaten der einzelnen Teilnehmer möglichst schnell und möglichst zuverlässig ausgetauscht werden. Zudem muss das System flexibel auf Änderungen der Netztopologie reagieren und den Ausfall einzelner Schwarmteilnehmer kompensieren. Darüber hinaus ist die Sende- und Empfangsleistung wie auch die Antennentechnik beschränkt. Da die einzelnen Teilnehmer austauschbar sind, ist ein dezentral organisiertes System nötig. Für solche Aufgaben eignen sich mobile Ad-hoc-Netze (engl. MANet) oder Mesh-Netze. Durch spezielle Routingverfahren, welche dynamisch auf Änderungen der Netztopologie reagieren, kann ein effizienter Datenaustausch erreicht werden. Der Datenaustausch erfolgt dabei direkt und auch indirekt über Zwischenstationen. **Abbildung 2** zeigt eine mögliche Konstellation der im Projekt verwendeten Versuchsträger, bei dem einige Teilnehmer direkt, andere nur indirekt über eine oder mehrere Zwischenstationen kommunizieren können.

Im Bereich der mobilen Ad-hoc-Netzwerke finden sich verschiedene Entwicklungen und Ansätze [4]. Diese sind in der Regel auf die speziellen Anforderungen wie Teilnehmerzahl, Energieverbrauch, Reichweite usw. zugeschnitten, sodass auch spezielle Routingverfahren zum Einsatz kommen. Hierbei wird grundsätzlich zwischen proaktiven und reaktiven sowie Mischformen – den hybriden Verfahren – unterschieden. Zudem bie-

ten sich bei Systemen mit bekannten Ortsinformationen auch positionsbasierte Routingverfahren an. Alle Verfahren haben Vor- und Nachteile, z. B. in Bezug auf die Zeit des Netzaufbaues oder den benötigten Datenoverhead für den Austausch der Netzinformationen. Ziel ist es daher, mehrere Routingverfahren in das System zu integrieren und durch Erkennen der Situation am besten geeignete Verfahren dynamisch auszuwählen. Eine weitere Herausforderung liegt in der Synchronisation des Schwarms. Die notwendige echtzeitnahe Verarbeitung der Rohdaten bei allen Teilnehmern stellt zudem hohe Anforderungen an einen zeitlich effektiven Datenaustausch. Zum Einsatz kommt der Funkstandard IEEE 802.15.4, welcher vor allem wegen der geringen Latenzzeit zum Aufbau einer Verbindung für dynamische Netze geeignet ist.

Schlussfolgerungen

Die technologische Herausforderung des vorgestellten Ansatzes zur präzisen Relativpositionierung in Maschinenschwärmen liegt vor allem in der erstmaligen Kombination der vorgestellten Teilansätze in einem System. Dass die Teilansätze jedoch geeignet sind, zeigen Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten. Zusätzlich sind die technischen Beschränkungen der Versuchsträger wie auch die Anforderung der Realisierung mit günstigen Komponenten eine Herausforderung. Die Forderung nach geringem Gewicht und niedrigem Energieverbrauch muss ebenfalls beachtet werden.

Literatur

- [1] Schattenberg, J.; Dopichay, T.; Lang, T. (2010): comRoBS - Flexible Forschungsplattform für den kooperativen Maschinenbetrieb. Landtechnik 65(3), S. 217-219
- [2] Koch, A.; Wittich, H.; Thielecke, F. (2006): A Vision-Based Navigation Algorithm for a VTOL UAV. In: AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit
- [3] „UniTaS IV Wissenschaftsprogramm“, 4. Zwischenbericht, 1. Halbjahr 2008, BMWi (FKZ 50 NA 0734), Inst. f. Flugführung, TU Braunschweig
- [4] Abolhasan, M.; Wysocki, T.; Dutkiewicz, E. (2004): A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks, Volume 2, Issue 1, p. 1-22

Autoren

Dipl.-Ing. Jan Schattenberg ist wiss. Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig,

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Lang ist kom. Institutsleiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig,

E-Mail: j.schattenberg@tu-bs.de, <http://www.tu-braunschweig.de/ilf>

Dipl.-Ing. Martin Becker und **Dipl.-Ing. Simon Batzdorfer** sind wiss. Mitarbeiter am Institut für Flugführung der TU Braunschweig,

Prof. Dr.-Ing. Peter Hecker ist Institutsleiter am Institut für Flugführung der TU Braunschweig,

Dr.-Ing. Franz Andert ist wiss. Mitarbeiter am DLR-Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig, Abt. Unbemannte Luftfahrzeuge.

Danksagung

Die Untersuchungen werden im Rahmen des Projektes „Navigation zur Exploration von tieffliegenden UAV in Katastrophenszenarien“ (NEXT UAV) durchgeführt. Das Verbundvorhaben wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BWi) durch das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) gefördert (FKZ 50 NA 1002 und 50 NA 1003).

Besuchen Sie uns auf der

AGRITECHNICA

13.–19. November 2011

**Halle 5
Stand E11**

Forum 2

Halle 19, Stand E29

Di. 15.11. 17 Uhr

Kosten und Technik
von Bewässerungsverfahren

Forum 3

Halle 21, Stand A04

Di. 15.11. 15 Uhr

Gärreste als Dünger –
Technik und Wirtschaftlichkeit

Do. 17.11. 10 Uhr

Kosten der Energiepflanzenproduktion

Fr. 18.11. 12 Uhr

Biomasselogistik – Verfahren und Kosten

www.ktbl.de

Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)
Bartningstr. 49 | 64289 Darmstadt
Tel.: +49 6151 7001-0
Fax: +49 6151 7001-123