

Graduiertenkolleg 1103
Embedded Microsystems



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Lokalisierung von eingebetteten Mikrosystemen

Statusbericht

Matthias Sippel

Betreuer: Prof. Dr. Leonhard Reindl
Lehrstuhl: Elektrische Mess- und Prüfverfahren

Freiburg, im September 2008



Institut für Informatik



Institut für Mikrosystemtechnik

1 Aktueller Stand der Promotion

Meine Promotion befindet sich im dritten Jahr. Die zu entwickelnde Hard- und Software ist fertiggestellt und die letzten Versuche werden durchgeführt. Parallel erfolgt das Schreiben der Dissertation.

2 Zusammenfassung der Dissertation

2.1 Einleitung und Motivation

Meine Promotion im Rahmen des Graduiertenkollegs „Embedded Microsystems“ soll die Problematik der Orientierungs- und auch Positionsbestimmung von eingebetteten Mikrosystemen näher beleuchten. Eingebettete Mikrosysteme unterliegen im Allgemeinen Einschränkungen in Bezug auf Größe, Gewicht, Leistungsaufnahme und Rechenleistung. Diese Einschränkungen, aber auch der geplante Einsatzbereich, zum Beispiel inner- oder außerhalb von Gebäuden, wirken sich direkt auf die zur Ortung möglichen Verfahren aus. Generell kann zwischen passiven und aktiven Ortungsverfahren unterschieden werden.

Bei den passiven Verfahren kommen Transponder beziehungsweise Reflektoren zum Einsatz, die für ihre Funktionsweise die Energie durch die Abfrage bereitgestellt bekommen oder gar keine Energie benötigen. Passive RFID-Chips, farbige Markierungen bei einigen optischen Ortungsverfahren oder Radarreflektoren bei der Ortung mittels Radar sind nur einige Beispiele. Primär sind diese Verfahren zur reinen Bestimmung der Position ausgelegt. Wird jedoch zusätzlich die Orientierung des zu ortenden Objektes benötigt, stoßen die Systemvorgaben der passiven Ortungsverfahren meistens an ihre Grenzen und entsprechen nicht mehr den Systemanforderungen des Mikrosystems.

Deswegen und aufgrund der Tatsache, dass eingebettete Mikrosysteme über eine Energieversorgung und in gewisser Weise Intelligenz (Mikrocomputer) verfügen, richtet sich das Hauptaugenmerk der Arbeit auf aktive Ortungsverfahren. Bei diesen Verfahren kommt es zu einem Informationsaustausch zwischen einer Basisstation und mindestens einem aktiven Transponder, aus dem die Information über Position und Orientierung gewonnen wird.

Prinzipiell lassen sich die aktiven Ortungsverfahren in drei Kategorien unterteilen: In die erste Kategorie fallen die elektromagnetischen Verfahren wie das Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System (NAVSTAR-GPS), die Feldstärkenmessung in Funknetzen (Received Signal Strength Indication, RSSI) oder Radarortungsverfahren. Die zweite Kategorie umfasst die optischen Ortungsverfahren: zum einen die Kamera-basierten, die mittels Mustererkennung die Position bestimmen, und zum anderen die strahlbasierten, die beispielsweise mittels Infrarotstrahl die Entfernung zwischen Transponder und Basisstation messen. Die dritte Kategorie bilden die Ortungsverfahren mittels Ultraschall, die jedoch aufgrund ihrer Nachteile wie der Mehrwegausbreitung des Schalls und dem hohen Installationsaufwand für dreidimensionale Messungen eher selten verwendet werden.

2.2 Ortung mittels Radar

Die Ortung mittels Radar basiert auf dem Prinzip der Trilateration: Mit diesem Prinzip wird die dreidimensionale Position mit mindestens drei Abständen zwischen dem zu ortenden Objekt und bekannten Aufpunkten bestimmt. Um die Aufpunkte herum entstehen so Kugelschalen, deren Schnittpunkt der gesuchten Position entspricht. Aufgrund von Messungenauigkeiten entsteht jedoch ein Schnittbereich. Um hier die optimale Positionsschätzung zu erhalten, kann entweder

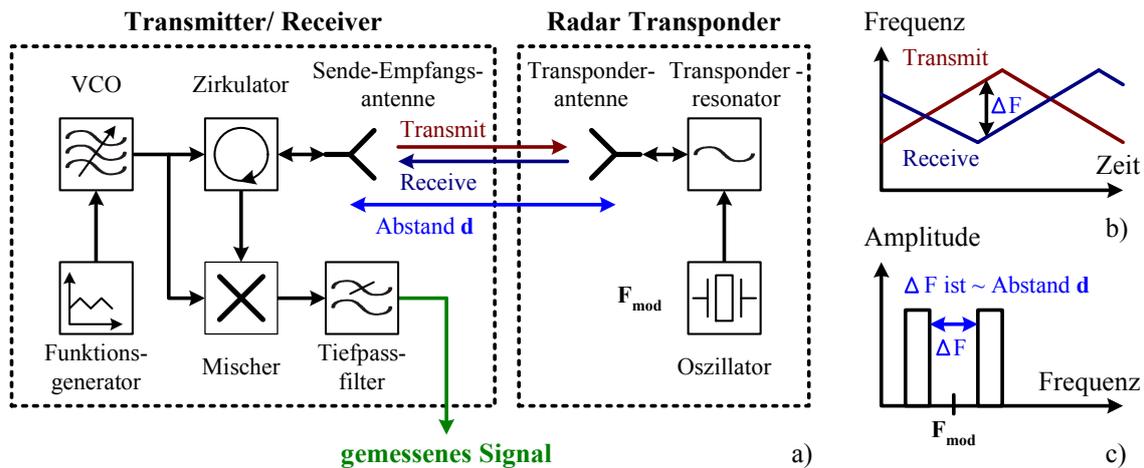


Abbildung 1: a) Schematische Zeichnung des Funktionsprinzips des FMCW-Radars. b) Diagramm der Frequenzen der an der Sende- und Empfangsantenne anliegenden Signale. c) Spektrum des gemessenen Signals um F_{mod} . Die resultierende Frequenzverschiebung ist proportional zu dem Abstand d .

ein kleinster quadratischer Fehler (MMSE)-Ansatz verwendet werden oder die Position mittels prädiktiver Filter, wie dem Kalman-Filter, geschätzt werden. Handelt es sich zudem um ein dynamisches System und es steht die hinreichend genaue Beschreibung dieses Systems zur Verfügung, kann mit prädiktiven Filtern das Rauschen, ein statistisch verteilter Messfehler, zum größten Teil heraus gefiltert werden.

Das verwendete System ist ein FMCW-Radar (Frequency Modulated Continuous Wave) mit einer Mittenfrequenz von 5,8 GHz und einer Bandbreite von 150 MHz [6]. Die Information über die zu messende Entfernung erhält das System durch das Mischen des gesendeten mit dem empfangenen Signal. Der Frequenzunterschied, der mit Hilfe einer Fourieranalyse der Zeitsignale errechnet wird, ist direkt proportional zu der gesuchten Entfernung. Um die Signalantworten den entsprechenden Transpondern zuzuordnen, besitzen die aktiven Transponder einen schaltenden Oszillator, welcher der Trägerwelle eine der ID des Transponders entsprechende Frequenz aufmoduliert. So erhält das System mit einer Fourieranalyse gleichzeitig die Entfernungsinformationen aller sich in Reichweite befindenden Transponder (siehe Abbildung 1).

Bei der Benutzung des Systems in kleinen Räumen (kleiner 100 m^2) treten jedoch Probleme auf: Zum einen kommt es aufgrund von Reflexion, Beugung und Streuung zu Fehlmessungen und so zu einer schlechteren Ortsauflösung und zum anderen durch Intermodulation der Transponder untereinander gar zum Verlust der aktuellen Messung. Diese ungewünschte Modulation resultiert aus der Faltung des Trägersignals mit dem Frequenzvielfachen des Modulationssignals F_{mod} und schränkt somit den Einsatzbereich dieses Systems zur Ortung eingebetteter Mikrosysteme innerhalb von Gebäuden enorm ein. Deshalb wurde nach einer Alternative gesucht, welche die Positionsbestimmung von Objekten mit einer hohen Genauigkeit sowohl in kleinen Räumen als auch in größeren Hallen oder außerhalb von Gebäuden zulässt.

2.3 Ortung mittels optischer, strahlbasierter Verfahren

Der große Vorteil der optischen strahlbasierten Ortungsverfahren liegt zum einen an der Bündelung des Lichtstrahls und zum anderen an der zur Verfügung stehenden Bandbreite. Anders als bei Systemen, die ihre Information bezüglich der zu messenden Größe aus der Signatur der elektro-

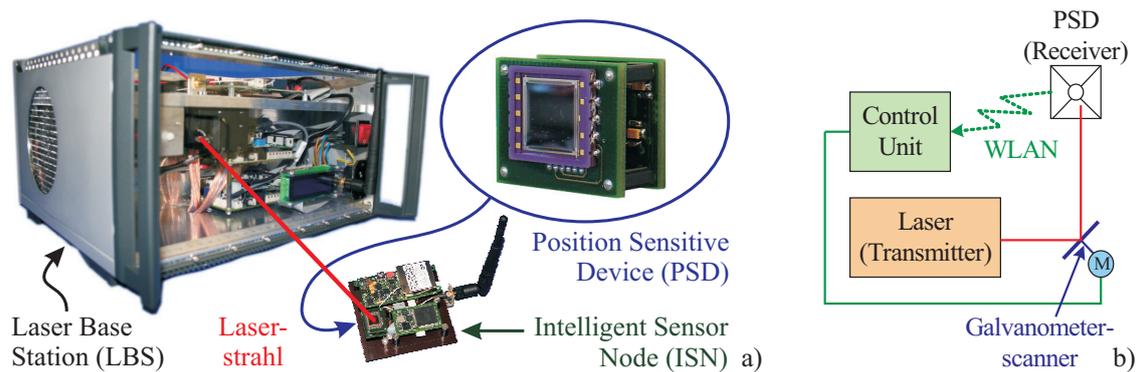


Abbildung 2: a) Foto der Komponenten des Optical Local Positioning System (OLPS). b) Schematische Zeichnung des Funktionsprinzips des OLPS.

magnetischen Welle entnehmen und somit den Auflagen der ISM-Bänder (Industrial, Scientific, and Medical Band) unterliegen, steht dem optischen Kanal die volle Bandbreite bis zur Frequenz der Trägerwelle zur Verfügung. Je nachdem mit welcher Genauigkeit und welcher Entfernungsbereich gemessen werden soll, kann die Entfernung mittels Interferometrie (Nanometer bis Meter), Laufzeitmessung (Meter bis mehrere Kilometer) oder per Triangulation (Millimeter bis mehrere 100 Meter) gemessen werden.

Anhand der Entfernungsbereiche ist ersichtlich, dass für eine Ortung von Objekten in Gebäuden die Triangulation einen geeigneten Messbereich aufweist. Aus dieser Tatsache wurde ein Systemkonzept (Optical Local Positioning System, OLPS) erarbeitet, mit dem es möglich sein soll, eingebaute Mikrosysteme innerhalb und außerhalb von Gebäuden zu lokalisieren und deren Orientierung zu bestimmen (siehe Abbildung 2) [4, 3]. Das System beruht darauf, dass ein Zielobjekt permanent von einem Laserstrahl verfolgt wird, dessen Aufpunkt, Elevation und Azimut genau bekannt sind. Die Ablenkung des Laserstrahls wird durch einen Galvanometerscanner vorgenommen. In einem zweidimensionalen Messaufbau entspricht der Punkt an dem der Laserstrahl die Messebene durchstößt der gesuchten Position. Für eine dreidimensionale Messung mit vergleichbarer Genauigkeit könnten zwei Laser verwendet werden, wobei der Schnittpunkt beziehungsweise die Stelle mit dem geringsten Abstand zwischen den beiden Geraden (Laserstrahlen) der gesuchten Position entspricht. Somit ist es möglich, die Position eines Objektes ohne Laufzeitmessung oder Interferometrie zu bestimmen.

Die Laserstrahlen werden permanent von einer aktiven Sensorelektronik nachgeführt, welche sich auf dem zu ortenden Objekt befindet. Hierzu wird ein positionssensitives Device (PSD) verwendet, welches die Abweichung des Laserstrahls aus dem Mittelpunkt des PSD (Δ_{xy}) detektiert und per Funk die Spiegelstellung des Galvanometerscanners in der Basisstation so korrigiert, dass die Abweichung Δ_{xy} minimiert wird.

Um die Strahlkorrektur durchführen zu können, müssen die Messwerte des PSD aus dem lokalen Koordinatensystem (Body Frame) in das globale Koordinatensystem (Navigation Frame) transformiert werden. Hierzu benötigt das System die genaue Orientierung des zu ortenden Objektes im Raum. Diese Information erhält es von einem inertialen Messsystem (engl. Inertial Measurement Unit, IMU), welches ebenfalls auf dem zu ortenden Objekt angebracht ist.

Das PSD mit Auswerteelektronik und die IMU bilden zusammen den intelligenten Sensorknoten (engl. Intelligent Sensor Node, ISN). Zu Evaluierungszwecken wurde das System vorerst lediglich mit einer Basisstation konzipiert, womit eine Positionsbestimmung nur in der Ebene möglich ist.

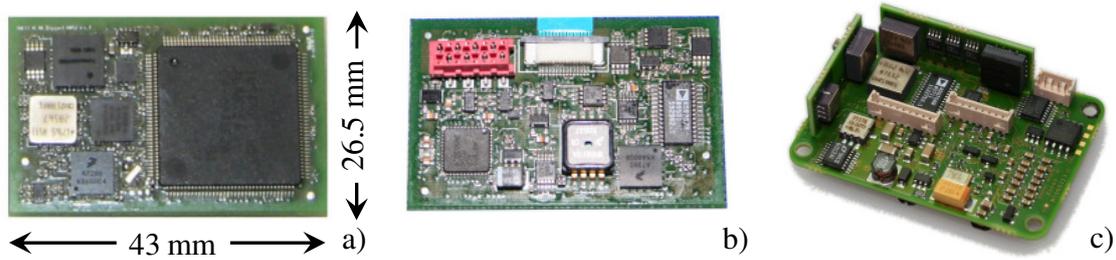


Abbildung 3: a,b) Photo der Oberseite (a) und Unterseite (b) der entwickelten planaren, strap-down IMU. c) Photo einer IMU von Xsens mit Aufbauten aus der Leiterplattenebene heraus.

2.4 Inertialsensorik - Inertiales Messsystem (IMU)

Im Gegensatz zu den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Ortungsverfahren, wird bei der Inertialnavigation, auch Trägheitsnavigation genannt, eine Bestimmung von Lagewinkeln, Geschwindigkeit und Position im Raum durch numerische Integration der gemessenen Beschleunigungen und Drehraten durchgeführt. Verglichen mit Ortungsverfahren, die auf absoluten Messungen zu einer ortsfesten Koordinate beruhen (Navigation Frame), errechnet ein inertiales Navigationssystem (INS) seine neue Position anhand von relativen Änderungen zur aktuellen Position. Die Messungen finden somit in einem sich bewegenden Koordinatensystem (Body Frame) statt. Aufgrund der Integration der Messwerte kommt es zu einer Aufsummierung der Fehler und somit zu einer zunehmenden Ungenauigkeit in der Orientierung und der Position.

Zur Kompensation der Drift der Lagewinkel wird das Erdmagnetfeld verwendet. Ähnlich wird durch die Integration eines barometrischen Höhenmessers eine Korrektur der Z-Koordinate möglich. Trotz dieser Korrekturen ist es mit einem INS nicht möglich, ein Objekt über längere Zeit hinweg zu orten. Vielmehr dient eine IMU anderen Ortungsverfahren, um deren Dynamik oder Genauigkeit zu erhöhen, beziehungsweise bei einem kurzfristigen Ausfall des Ortungssignals die Position weiterhin bestimmen zu können (Dead Reckoning).

Um variabel auf die spezifischen Anforderungen eines eingebetteten Mikrosystems eingehen zu können, wurde im Laufe der Dissertation eine miniaturisierte IMU entwickelt. Diese IMU basiert ausschließlich auf Sensoren in MEMS-Technologie und ist komplett planar aufgebaut. Das finale Layout hat eine Abmessung von $26,5 \times 43 \text{ mm}^2$ bei einem Gewicht von 12 g (siehe Abbildung 3). Gemessen werden die physikalischen Größen Beschleunigung, Winkelgeschwindigkeit und Erdmagnetfeld, jeweils in drei Dimensionen, sowie der Druck, die Temperatur und einige Referenzspannungen zur Kompensation der Messwerte. Die Sensordatenfusion übernimmt ein Texas Instruments Mikrocontroller mit ARM 7 Kern. Zur Transformation der Messwerte aus dem Body Frame in den Navigation Frame wird auf Quaternionen zurückgegriffen. Diese bieten eine effiziente Möglichkeit um Koordinatentransformationen durchzuführen, ohne Eulersche-Drehmatrizen anwenden zu müssen. Somit entfällt die rechenzeitintensive Berechnung der trigonometrischen Funktionen Sinus und Cosinus auf dem Microcontroller. Auf der IMU läuft ein Extended Kalman Filter mit einer Update-Rate von 200 Hz, welcher uns zusätzlich die Möglichkeit bietet, alle Filterparameter individuell für eine gewählte Applikation anzupassen [2].

2.5 Demonstrationsplattform „Blimp“

Kleinskalige autonom fliegende Roboter, wie der von uns gewählte Blimp (Prallluftschiff), eignen sich hervorragend um das volle Potential von eingebetteten Mikrosystemen in einer Anwendung

demonstrieren zu können. Hierbei handelt es sich um eine Plattform, die viele typische Anforderungen eingebetteter Mikrosysteme abbildet. Geringe Größe, Gewicht und Leistungsaufnahme bei hoher Rechenleistung seien hier nur exemplarisch aufgeführt. Die Steuerung des Blimps wird von einem embedded Power-PC (Gumstix) übernommen. Um den Gumstix jedoch effizient einsetzen zu können, wurde im Rahmen meiner Arbeit zusätzliche Hardware erstellt: zum einen die „Gumstix Peripheral Interface Card“ (GPIC), welche als Interface zwischen dem Gumstix und den angeschlossenen Sensoren und Aktoren dient, aber auch die Spannungsversorgung des gesamten Systems übernimmt; zum anderen das „Blimp Engine Control Board“ (BECB), welches die Regelung der Motoren sowie des angeschlossenen Servos übernimmt. Diese Hardware wurde von meinen Kollegen Axel Rottmann aus der Arbeitsgruppe „Autonome Intelligente Systeme“ und Thorsten Zitterell aus der Arbeitsgruppe „Betriebssysteme“ verwendet, um ihrerseits neue Softwarekonzepte implementieren zu können. Der Blimp ist somit ideal geeignet, um Informatik und Mikrosystemtechnik tiefer zu vernetzen.

3 Ausblick

Die bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der Inertialsensorik, der Radar-Ortung und der Ortung mittels optischer, strahlbasierter Verfahren können als Grundlage verwendet werden, um neue miniaturisierte Positionssysteme für kleinskalige Flugobjekte aufzubauen.

Die IMU kann als Plattform dienen, um neue Ansätze prädiktiver Filter zu erarbeiten. Gesichtspunkte können hier beispielsweise dynamische Kovarianzmatritzen oder erweiterte Sensor-Fehlermodelle sein.

Im Bereich Radarortung sind die Grundlagen gelegt um ein 24 GHz FMCW-Radar aufzubauen, welches leicht genug wäre, um auf dem Blimp eingesetzt zu werden. Damit würde die Reichweite der Ortungssensorik von 4 m (Ultraschallsensor) auf etwa 80 m erhöht. Gleichzeitig werden zusätzliche Informationen über die Umgebung erfasst, welche zu einer genaueren Positionsschätzung führen.

Bei dem in Abschnitt 2.3 vorgestellten OLPS wäre eine Weiterentwicklung des ISN wünschenswert. Hier könnten durch die Projektion eines Musters auf das PSD mit anschließender Auswertung auf dem ISN zusätzliche Informationen zur Orientierung des ISN ermittelt werden und somit die Stabilität des Positionssystems erhöhen.

4 Zusammenarbeit

Wie schon in Abschnitt 2.5 erwähnt, motivierte der Blimp zu einer engen Zusammenarbeit mit den Kollegen aus der Informatik. Sukzessiv wurde der Blimp mit besserer Hardware ausgestattet, die softwaretechnisch immer mehr Möglichkeiten bot aber auch neue Anwendungsszenarien erschloss: von einer ersten Version mit einem simplen 8051 Microcontroller mit 22 MHz Systemtakt und proprietärer 434 MHz Funkschnittstelle zu einem XScale-Prozessor mit 624 MHz Systemtakt, onboard Betriebssystem und Standard IEEE 802.11g WLAN. Durch die Integration der in Abschnitt 2.4 erwähnten IMU konnte die Navigation verbessert werden und eine Korrektur der Messdaten für die visuelle Lokalisierung durchgeführt werden. Zwei gemeinsame Veröffentlichungen [1, 5] und ein geplantes gemeinsames Journalpaper belegen die intensive Zusammenarbeit mit den Arbeitsgruppen „Autonome Intelligente Systeme“ und „Betriebssysteme“.

Literatur

- [1] A. Rottmann, M. Sippel, T. Zitterell, W. Burgard, L. Reindl, and C. Scholl. "Towards an experimental autonomous blimp platform". In *Proceedings of the 3rd European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. Freiburg, Germany, 2007, pp. 19–24.
- [2] M. Sippel, A. Abdul-Majeed, W. Kuntz, and L. Reindl. "Enhancing the accuracy of an indoor radar by the implementation of a quaternion- and unscented kalman filter- based lightweight, planar, strapdown IMU". In *European Navigation Conference - Global Navigation Satellite Systems (ENC-GNSS)*. Toulouse, France, April 2008.
- [3] M. Sippel, W. Kuntz, and L. Reindl. "GNSS augmented with precise laser tracking". In *IEEE/ION Position, Location And Navigation Symposium*. Monterey, CA, USA, 2008, pp. 886–891.
- [4] M. Sippel, W. Kuntz, and L. Reindl. "New approach in precise laser tracking". In *I²MTC 2008 - IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. Victoria, BC, Canada, 2008, pp. 446–451.
- [5] M. Sippel, A. Rottmann, T. Zitterell, B. Steder, C. Scholl, W. Burgard, and L. Reindl. "Multisensor-Navigation für autonome Flugroboter". In *Sensoren und Messsysteme 2008*. ser. VDI-Berichte 2011, Ludwigsburg, Germany, 2008, pp. 667–676.
- [6] L. Wiebking, M. Vossiek, L. Reindl, M. Christmann, and D. Mastela. "Precise local positioning radar with implemented extended kalman filter". In *33rd European Microwave Conference (EUMC)*. München, Germany, 2003, pp. 459–462.