

Fluglageregelung für einen Quadrokofter

Michael Waldowski, Hochschule Furtwangen

Quadrokofter – in diesem Wort steckt die lateinische Bezeichnung für „vier“ und der Begriff „Helikopter“ – sind kleine, unbemannte Flugkörper, die mit vier quadratisch angeordneten Rotoren angetrieben werden. Ihr möglicher Einsatz liegt im Bereich ziviler Überwachungsaufgaben, z.B. bei Naturkatastrophen wie Überschwemmungen oder Waldbränden oder bei der Verkehrskontrolle. In diesem Artikel wird der Prototyp einer Fluglageregelung für einen solchen Quadrokofter beschrieben. Besonderes Merkmal ist die einfache Struktur der Hardware und Software. Berichtet wird über erste Flug Erfahrungen auf einem Standard-Quadrokoftersystem.

Schlüsselworte: Quadrokofter, Fluglageregelung

Wozu eine Fluglageregelung?

Fluglageregelungen, wie zum Beispiel der Autopilot eines Verkehrsflugzeuges, unterstützen den Piloten bei der Steuerung eines Luftfahrzeuges und sind komplexe elektronische Regelsysteme. Insbesondere Mikrodrohnen vom Typ Quadrokofter sind ohne eine Fluglageregelung vom Piloten kaum zu beherrschen und eröffnen zudem in Verbindung mit GPS -Sensoren die Möglichkeit der autonomen Navigation. Quadrokofter ähneln kleinen Modellhubschraubern und wurden bereits in einem früheren horizont-Beitrag [1] näher beschrieben. Es gibt kommerzielle Systeme (z.B. [2]-[7]) und Forschungsprojekte (z.B. [8]-[17]), in denen Fluglageregelungen selbst entwickelt wurden, die jedoch im Allgemeinen aufgrund ihrer Komplexität schwer zu durchschauen sind. In diesem Beitrag wird ebenfalls eine selbst entwickelte Fluglageregelung für einen Quadrokofter beschrieben, die gegenüber den bekannten komplexen Systemen durch einen minimalen Aufwand gekennzeichnet ist. Geklärt werden soll hier also die Frage: Wie groß ist der mindestens erforderliche Aufwand für eine Fluglageregelung, um einen Quadrokofter sicher in der Luft zu halten? Auf diese Weise werden die wesentlichen Strukturelemente einer Fluglageregelung verdeutlicht,

um weitere Eigenentwicklungen zu erleichtern. Es wird nicht beabsichtigt, eine Alternative zu marktgängigen Lösungen anzubieten.

Die Hardware der Fluglageregelung

Abb. 1 zeigt die selbst entwickelte Fluglageregelung. Der Status eines Prototyps ist leicht daran zu erkennen, dass eine Lötpunktrasterplatine für den Aufbau verwendet wurde. Das Design folgt den Regeln, die für die gleichzeitige Verwendung digitaler und analoger Elektronik üblich sind. Dies trifft insbesondere auf die Spannungsversorgung zu. Als Besonderheit ist hervor zu heben, dass für die stabilisierte Spannungsversorgung ein hochpräziser Regler verwendet wurde, da dieser die Referenzspannung für die Gyroskope liefern muss. Die Details der Hardware (Schaltplan) werden nicht offen gelegt. Die Fluglageregelung besteht im Wesentlichen aus folgenden Hardware-Komponenten:

- einem ADuC7020 MiniKit (Analog Devices)
- drei ADXRS610-Gyros auf Breakout-Boards (Analog Devices, SparkFun)
- einem ADXL204EB-ACC Evaluations-Board (Analog Devices)
- einem LT1086 Präzisionsspannungsregler (Conrad Electronic)



Prof. Dr. M. Waldowski

Der ADuC7020 MiniKit ist eine kleine Adapterplatine in der Größe eines Kaugummistreifens, auf dem sich der Mikroconverter ADuC7020 befindet. Es handelt sich dabei um einen ARM7TDMI-Microcontroller, der um analoge und digitale Schnittstellen erweitert wurde. Hier wird der 12-Bit A/D-Wandler mit 5-fach-Multiplexer, die D/A-Wandler, die I2C-Bus-Schnittstelle, sowie ein Universal-Digitaleingang (GPIO) benötigt. Die Sensorik besteht aus den 3 Gyros (Drehraten-Sensoren), welche die Winkelgeschwindigkeit um die 3 Raumachsen messen. Da nur diese drei Freiheitsgrade, und nicht noch die 3 weiteren, nämlich die drei Raumachsen selbst, für die Regelung verwendet werden, wäre eigentlich die Verwendung von Drehratensensoren hinreichend. Leider neigen die Gyros dazu zu drifteten, so dass ein Referenzsensor sinnvoll ist. Dies ist der Beschleunigungssensor (ACC), der den Winkel um die Nick- und Roll-Achse misst. Dieser alleine kann aber nicht verwendet werden, da er zwei Nachteile hat: Er ist langsam, und er erzeugt bei Beschleunigungen fehlerhafte Signale.

Die Software der Fluglageregelung

Eine wichtige Aufgabe der Software ist die geschickte Kombination und Filterung von langsamen (ACC) und schnellen (Gyros, genauer: Gyro-Integral) Sensorsignalen, um ein möglichst

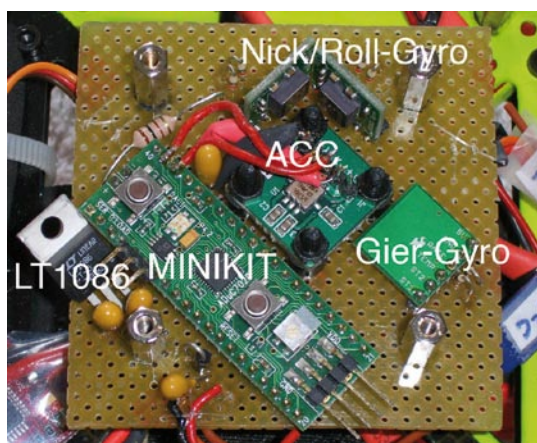


Abb.1: Prototyp der selbst entwickelten Fluglageregelung

Annonce in der Druckversion

genaues Signal für die Lage des Quadropters im Raum zu erhalten. Hier wird dafür ein einfacher sogenannter Komplementärfilter verwendet (Eine anschauliche Darstellung findet sich unter [18]). Rekursive statistische Schätzung des Systemzustandes aus den Sensorsignalen (Kalman-Filter) ist eine weitere, wesentlich aufwendigere Methode. Die Literatur hierzu ist nahezu unüberschaubar. Einen Einstieg gibt [19].

Gut gefilterte Sensorsignale sind erforderlich, da durch die Vibrationen der Motoren die Qualität der Sensorsignale erheblich beeinträchtigt wird. Für die Regelung wird ein Soll-Istwert-Vergleich durchgeführt, wobei die von den Drehraten-Sensoren gemessenen Winkelgeschwindigkeiten die Istwerte

sind, und die Steuerknüppelpositionen der Funkfernsteuerung die Sollwerte. Für den Regelalgorithmus gibt es viele verschiedene Möglichkeiten. Die Praxis zeigt, dass ein einfacher PI-Regler ([20], [21], [22]) ausreichend ist.

Die Implementierung auf dem 32-Bit-ARM7TDMI-Prozessor hat folgende Eigenschaften:

- 249 Programmzeilen C-Code (Stand: 3. Nov. 2009)
- 2100 Byte Codeumfang (Stand: 3. Nov. 2009)
- Ausschließlich Integerarithmetik
- PI-Regler
- Komplementärfilter
- Nur eine Interruptroutine (für die Fernsteuersignale)
- Kein Betriebssystem

Hervorzuheben ist der vergleichsweise geringe Codeumfang. So umfasst beispielsweise die Lösung [16] nach Angabe des Autors ca. 14.000 Zeilen C-Code (Hier wurde zusätzlich eine aufwändige Kollisionsvermeidung mittels Ultraschallsensoren implementiert, zudem verfügt dieses System über eine komfortable Diagnoseschnittstelle und baut auf einem Echtzeit-Betriebssystem auf).

Die Ansteuerung der Motoren erfolgt über den I2C-Bus, der von der Hardware als nebenläufiger Prozess unterstützt wird, so dass dafür praktisch keine Rechenzeit verloren geht. Die Zykluszeit wird von dem I2C-Bus-Timing bestimmt, und wurde auf ca. 2 Millisekunden festgelegt. Durch die



Abb. 2: Der Wakopter flugbereit

erwähnte Nebenläufigkeit stehen diese ca. 2 Millisekunden fast vollständig für die A/D-Wandlungen und den Regelalgorithmus zur Verfügung und werden derzeit bei weitem nicht ausgenutzt.

Obwohl ein Referenzsystem mit JTAG-Debugger aus einer anderen Arbeit ([23]) zur Verfügung stand, wurde dieses nur zu Anfang verwendet. Da die in der Praxis auftretenden Probleme hauptsächlich im Bereich der Echtzeitauswertung der Sensorsignale lagen, führte in diesem Falle ein Debugging ohnehin nicht zum Ziel. Vielmehr wurden die relevanten Daten über Digital-Analog-Wandler mit dem Oszilloskop ebenso analysiert, wie die Signale, die über die Pins des MiniKits bequem von oben zugänglich waren. Diese sehr einfache Methode führte hier zum Ziel, obwohl ein Monitorprogramm, welches wesentliche Systemparameter über die serielle Schnittstelle ausgibt eine sinnvolle Alternative darstellt.

Der Sourcecode steht (auszugsweise) unter [24] zum Download bereit.

Erste Erfahrungen mit dem Wakopter

Die Fluglageregelung wurde nun mit folgenden Standardkomponenten zu einem Quadrocopter integriert:

- Rahmenbausatz 40cm (HiSystems GmbH)
- Motoren Roxxy 2827-34 (Robbe)
- Motorregler (HiSystems GmbH)
- Propeller EPP1045 (Lipoly, HiSystems GmbH)
- LiPo-Akku 3s2100mAh (Lipoly)
- Fernsteuerung MC12 (Graupner)

Der Zeitaufwand für die Entwicklung und die Integration zu einem Gesamtsystem lag bei ca. 250 Arbeitsstunden.

Erwartungsgemäß muss der PI-Regler sorgfältig abgestimmt werden. Dazu wurden Proportional- und Integralanteil auf Drehregler der Fernsteuerung

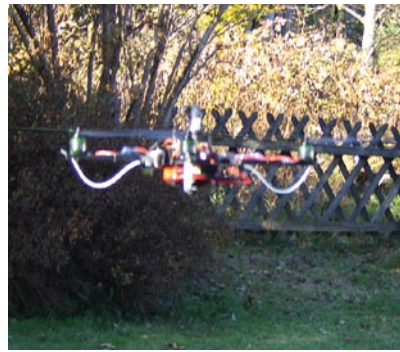


Abb. 3: Der Wakopter im Fluge am 29. Oktober 2009

gelegt, um die Parameter im Flugbetrieb verändern zu können. Die Anteile der Nick- und Roll-Achse wurden gleichlaufend verändert, was kein Problem darstellte. So sollte die Flugdynamik in Nick- und Rollachse etwa gleich sein. Die Gierachse wurde separat abgestimmt. Auf diese Weise wurde für den ruhigen Schwebeflug ein einwandfrei beherrschbares Flugverhalten erreicht.

Fazit

Die in diesem Beitrag beschriebene erfolgreiche Realisierung einer Fluglageregelung für einen Quadrocopter unter Anwendung minimalistischer Prinzipien lässt die wesentlichen Strukturmerkmale deutlich sichtbar werden und eröffnet somit die Perspektive, diese Thematik auch im Bereich der Grundlagenausbildung einer Hochschule zu behandeln. Die vollständige Erfassung dieser doch recht komplexen Thematik lag bisher mindestens im Bereich einer Bachelor-Thesis.

Danksagung

Mein Dank gilt den Entwicklern des Selbstbauprojektes [25]. Aus dem offen gelegten Quellcode und dem Forum erhielt ich wertvolle Hinweise für die Realisierung des beschriebenen Systems.

Literatur und Links

- [1] M. Waldowski: Das Projekt „Flying Objects“: Die ersten Mikrodrohnen an der Hochschule Furtwangen, horizonte Nr. 32, Juli 2008
- [2] www.conrad.de, Quadrocopter 450, Artikel-Nr.: 208000
- [3] www.rctoy.com
- [4] www.intellicopter.de
- [5] www.asctec.de
- [6] www.airrobot.de

- [7] www.microdrones.com
- [8] www.ite.uni-karlsruhe.de
- [9] G. H. Hoffmann et al.: Quadrocopter Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment, AIAA Guidance Navigation and Control, August 2007
- [10] S. Bouabdallah and R. Siegwart: Towards Intelligent Miniature Flying Robots, in Proc. Field Service Robotics, Port Douglas, Australia 2005
- [11] P. Pounds, R. Mahony et al.: Towards Dynamically-Favourable Quad-Rotor Aerial Robots, Australian Conference on Robotics and Automation, 2004
- [12] S. D. Hanford et al.: A small Semi-Autonomous Rotary-Wing Unmanned Air Vehicle (UAV), AIAA 2005
- [13] www.fh-rosenheim.de/2241+M52087573ab0.html
- [14] http://javiator.cs.uni-salzburg.at
- [15] www.freexcopter.org
- [16] Th. Kusch: Quadrocopter mit automatischer Kollisionsvermeidung, Master-Thesis, Hochschule Furtwangen, Juli 2009
- [17] O. Rempel: Entwicklung einer inertialen Lageregelung für einen Quadrocopter auf ARM7 Basis, Bachelor-Thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Mai 2008
- [18] http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf
- [19] www.cs.unc.edu/~welch/kalman/
- [20] O. Föllinger: Lineare Abtastsysteme, R. Oldenbourg Verlag, 2. Auflage, 1982
- [21] R. Isermann: Digitale Regelsysteme, Springer-Verlag, 1977
- [22] H. Unbehauen: Regelungstechnik II, Vieweg, 9. Auflage, 2007
- [23] M. Harter: Mikrocontrollergestützte Stabilitätsmessung eines Diodenlasers, Diplomarbeit, Hochschule Furtwangen, Februar 2007
- [24] http://www.dm.hs-furtwangen.de/sgfiles/FlightCtrl_wakopter.LST.pdf
- [25] www.mikrokoetter.de/ucwiki/

Kontakt

Prof. Dr. M. Waldowski, Hochschule Furtwangen, Robert-Gerwig-Platz 1, 78120 Furtwangen, Tel. 07723/920-2390, Fax. 07723/ 920-2625, E-Mail: wa@hs-furtwangen.de; http://www.dm.hs-furtwangen.de