

# Flugregler für ein autonomes Luftschiff

Thomas Krause<sup>1</sup>, Pedro Lima<sup>2</sup>, Peter Protzel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Chemnitz  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Institut für Automatisierung  
thomas.krause@infotech.tu-chemnitz.de  
peter.protzel@infotech.tu-chemnitz.de

<sup>2</sup>Institute for Systems and Robotics Lisbon  
Intelligent Systems Lab  
pal@isr.ist.utl.pt  
Lisbon - Portugal

## 1 Einleitung

Sowohl am Institut für Automatisierung der TU Chemnitz als auch am ISR (Institute for Systems and Robotics) in Lissabon existieren Projekte auf dem Gebiet "Outdoor Robotics", wobei heterogene Multi-Robot Teams Aufgaben in einem simulierten Search and Rescue Szenario durchführen. Search and Rescue Robotics hat sich in den letzten Jahren als eigene Disziplin etabliert, wobei wir uns im Gegensatz zum RoboCup Rescue [6] auf den Einsatz von Robotern im Außenbereich konzentrieren. Am ISR wird dazu neben mobilen Robotern am Boden auch ein autonomes Luftschiff (Blimp) eingesetzt, was einen globalen Blick auf das Gelände ermöglicht und die Navigation der Roboter am Boden unterstützen soll [7]. Im Gegensatz zu einem Zeppelin hat ein Blimp kein festes Innengerüst, sondern besteht aus einer frei verformbaren Hülle. Die Flugeigenschaften sind jedoch vergleichbar und wenn solche Luftschiffe autonom fliegen sollen, so ist aufgrund der ständigen Störeinflüsse durch Wind eine robuste Regelung der Position und der Bewegung notwendig. Es gibt zwar weltweit einige Projekte zu halbautonomen und autonomen Luftschiffen, aber universelle Lösungen zur Steuerung der Luftschiffe im dreidimensionalen Raum unter Berücksichtigung der dynamischen Umgebung haben wir bislang vergeblich gesucht. Meist wird das Problem in verschiedene, typische Flugphasen aufgeteilt [8] oder es wurden zunächst nur einzelne Teilstücke untersucht, wie das Schweben über einer Position [9]. Im folgenden beschreiben wir daher den von uns entwickelten und erprobten Ansatz zur Regelung, der im Rahmen einer Kooperation zwischen der TU Chemnitz und dem ISR entstanden ist.

## 2 Aufbau des Luftschiffs

Der Blimp besteht aus einem mit Helium gefüllten Druckballon. Der Ballon ist vier Meter lang und hat einen Durchmesser von zwei Metern. An der Unterseite ist eine Gondel befestigt, in der sich die Elektronik und die Akkus befinden. An

dieser Gondel sind zwei Motoren an einer Achse drehbar gelagert. Am Heck sind vier Flügel befestigt, an denen im unteren Flügel ein dritter Propeller für Dreh- und Wendebewegungen eingebaut ist. Abbildung 1 zeigt den Blimp und eine Detailaufnahme des Heckrotors. Der Blimp wird über eine Modellbaufernsteuerung gesteuert, die über eine serielle Schnittstelle an einen PC angeschlossen ist. Als Sensor befindet sich eine kleine Videokamera an Board, die ihre Bilder über eine Funkstrecke zur Bodenstation sendet.

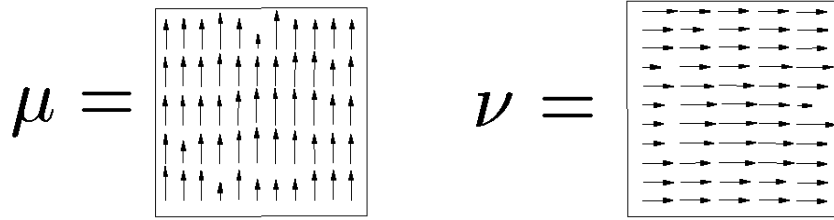


**Abb. 1.** Bilder des Luftschiffs, a: Detailaufnahme des Heckflügels mit Propeller b: Komplettaufnahme

### 3 Die Kamera als Sensor

In der ersten Ausbaustufe wird als einziger Sensor eine kleine CCD-Kamera verwendet, die ihre Videodaten über eine Videofunkstrecke zur Bodenstation sendet, wo die Bilder über einen Framegrabber digitalisiert werden. Die gewählte Lösung bietet sich an, da sie klein und leicht ist. Durch die integrierte Funkstrecke ist auch keine extra Netzwerkverbindung notwendig. Aus den gesendeten Bildern müssen alle Informationen extrahiert werden, die für den Regler benötigt werden. Bei einer Positionsregelung im Raum ergeben sich sechs Freiheitsgrade. Bei den Flugeigenschaften des Blimp kann man davon ausgehen, dass er sich nicht neigt oder rollt. Dadurch reduzieren sich die zu regelnden Freiheitsgrade auf vier. Um diese Freiheitsgrade zu definieren, wird in den Blimp ein Koordinatensystem gelegt, bei dem die Y-Achse vorwärts in Flugrichtung, die X-Achse nach rechts und die Z-Achse nach oben zeigt. Die vier Freiheitsgrade sind damit die translatorischen Bewegungen entlang der drei Achsen und die Rotation um die Z-Achse.

Um die Bewegungen zu berechnen, wird der "optische Fluss"[3] zwischen zwei Bildern berechnet. Durch diesen optischen Fluss erhält man zwei Matrizen ( $\mu$ ,  $\nu$ , Abb. 2), die zusammen den Bewegungsvektor für jeden Bildpunkt in der Bildebene ergeben.



**Abb. 2.** Bewegungsmatrizen in Y-Richtung und X-Richtung

Um bei der verfügbaren Rechenleistung eine Bildwiederholrate von 25 Hertz zu erreichen, wurde die Bildauflösung beim Grabben auf 120 x 90 Pixel beschränkt (vgl. [4]). Wie in [2] beschrieben wird, kann man die Bildbewegungen approximiert als Ebene beschreiben, wenn die Kamera relativ senkrecht auf den Boden ausgerichtet ist.

$$\mu_0 + ax_j + by_i = \mu_{\perp}(x_j, y_i) \quad (1)$$

$$\nu_0 + cx_j + dy_i = \nu_{\perp}(x_j, y_i) \quad (2)$$

Schreibt man das für die gesammte Matrix, so erhält man:

$$A\Theta_1 = \mu_{\perp} \quad (3)$$

$$A\Theta_2 = \nu_{\perp} \quad (4)$$

Der Parametervektor  $\Theta$  enthält die notwendigen Parameter zur Berechnung der Bewegung des Bildes. Stellt man die Gleichungen (3) und (4) nach  $\Theta$  um, so erhält man:

$$(A^T A)A^T \mu_{\perp} = \Theta_1 \quad (5)$$

$$(A^T A)A^T \nu_{\perp} = \Theta_2 \quad (6)$$

Je ein Parameter beschreibt die Bewegung des Bildes entlang der X- und Y- Achse, zwei Parameter die Drehung um die Z-Achse und zwei Parameter die Bewegung entlang der Z-Achse. Die Rotation um die X- und Y- Achse wird hier vernachlässigt, weil die Fehler durch das Bildrauschen so hoch sind, dass keine zuverlässigen Aussagen über diese beiden Bewegungen möglich sind. Das Modell kann hierfür jedoch leicht erweitert werden, wenn in einer weiteren Ausbaustufe durch die verbesserte Technik ein besserer Signal-Rausch Abstand erreicht wird.

## 4 Aufbau der Regelung

Das Luftschiff ist ein nichtholonomer Roboter und kann nur drei Bewegungen ausführen. Mit den beiden vorderen Motoren kann es sich in Y- und Z-Richtung bewegen und mit seinem Heckrotor kann es sich um die Z-Achse drehen. Eine

Positionsregelung im Raum lässt sich mit nur einer Regelungsebene schwer realisieren, da mindestens drei miteinander gekoppelte, nichtlineare Größen zu regeln sind. Ein weiteres Problem ist die dynamische Umgebung in der das Luftschiff ständig Wind unterschiedlicher Stärke und Richtung kompensieren muss. Als Lösungsansatz wurde daher eine verteilte und kaskadierte Regelung verwendet. Abb. 3 zeigt die grobe Struktur der Regelung in drei Ebenen.

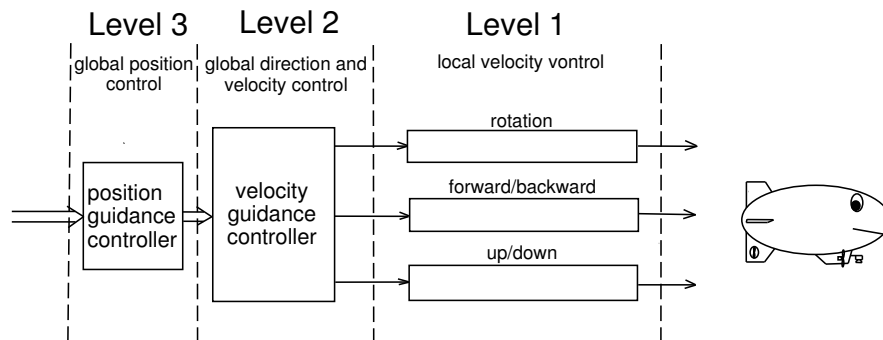


Abb. 3. Grobstruktur der Regelung

Eine Aufteilung vereinfacht das Problem: Durch wiederholte Ableitung kommt man von der Position über die Geschwindigkeit bis zur Beschleunigung, bei der man ein angenähertes lineares Modell verwenden kann. Um eine Entkopplung der einzelnen Größen zu erreichen, werden die einzelnen Bewegungen ab der Geschwindigkeit getrennt betrachtet und geregelt (Level1).

#### 4.1 Regelung der einzelnen Bewegung

Hier werden die drei Bewegungen (Vorwärts, Höhe, Orientierung) geregelt. Für jede dieser drei Bewegungen wird die gleiche Reglerstruktur verwendet (s. Bild 4).

Um möglichst schnell auf dynamische Einflüsse reagieren zu können, wird in der untersten Kaskade die Beschleunigung geregelt. Dadurch ist es auch möglich, ein lineares Modell für die Kinematik zu benutzen. Bei einer klassischen, linearen Regelung lässt sich ein Regelkreis entweder auf ein schnelles Führungsverhalten oder eine gute Störgrößenkompensation einstellen. Hier wird jedoch beides benötigt. Aus diesem Grund wird ein reiner Steuerzweig eingesetzt, der über ein nichtlineares Modell die benötigte Kraft berechnet. Parallel dazu arbeitet dann ein Regelkreis, der die auftretende Abweichung korrigiert, die durch die Approximation des Modells und die dynamischen Einflüsse entstehen. Dadurch reagiert die Steuerung extrem schnell und der Regelkreis kann so eingestellt werden, dass er schnell auf auftretende Abweichungen reagiert. Modell

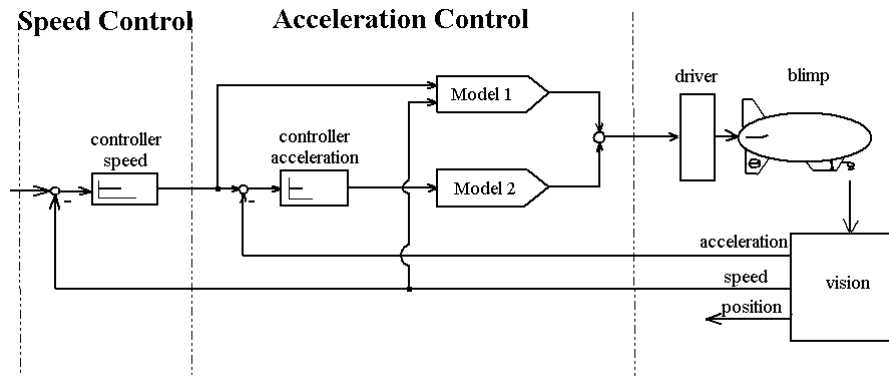


Abb. 4. Regelung einer Bewegung

1 nach (7) für den Steuerzweig setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zum einen aus der vereinfachten Beschleunigungsgleichung  $F(a) = m \cdot a$  und zum anderen aus dem Luftwiderstand  $F(v) = c \cdot v^2$ . "c" ist eine Widerstandskonstante, die experimentell bestimmt wird.

$$F(a, v) = m \cdot a + c \cdot v^2 \quad (7)$$

Da der Regelkreis nur die Abweichung ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes korrigieren soll, reicht für Modell 2 eine lineare Gleichung, wodurch eine lineare Regelung möglich wird.

$$F(a) = m \cdot a \quad (8)$$

Als Regler für die Beschleunigung wird ein PI-Regler eingesetzt, der bei entsprechender Parametrierung leichtes Rauschen und auftretende Offsets kompensiert. Nachdem die Beschleunigung geregelt ist, kann für die übergeordnete Kaskade (Geschwindigkeit) ebenfalls ein einfacher linearer Regler verwendet werden (hier P-Glied). Mit dieser Struktur lassen sich die drei Bewegungen problemlos und robust steuern. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis eines Versuches.

## 4.2 Richtung und Synchronisation

Um mit diesen geregelten Bewegungen in eine bestimmte Richtung fliegen zu können, ist es notwendig, die einzelnen Bewegungen untereinander zu synchronisieren. Da die Bewegungen entlang der Y- und Z-Achse direkt gesteuert werden können, werden diese beiden Bewegungen lokal synchronisiert. Die Orientierung muss mit Wissen aus der globalen Bewegung gesteuert werden. Je größer die Regelabweichung einer Bewegung ist, desto stärker wird die Führungsgröße der anderen Bewegung zurück genommen. Auf diese Art und Weise wird zwar die Geschwindigkeit nicht mehr garantiert aber die Richtung wird eingehalten. Im

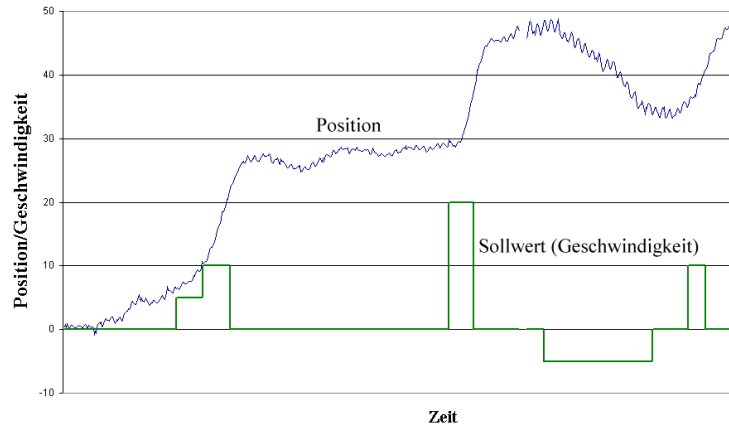


Abb. 5. Regelung einer lokalen Bewegung

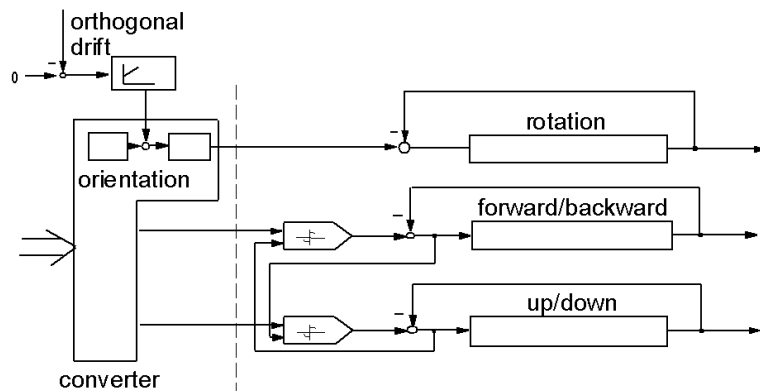


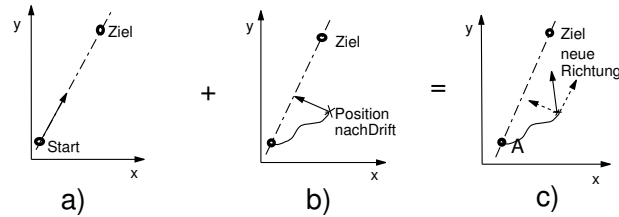
Abb. 6. Synchronisation und Regelung der Richtung

Converter wird der von der Positionsregelung vorgegebene Richtungsvektor in die lokalen Bewegungen umgerechnet. Je stärker die orthogonale Drift der Bewegung in der X-Y-Ebene ist, desto stärker wird die Orientierung entgegen der Drift verändert. Dadurch wird erreicht, dass sich der Blimp immer so in den Wind dreht, dass er in die gewünschte Richtung driftet.

### 4.3 Positionsregelung

Nachdem die Richtung bereits geregelt wird, braucht die Positionsregelung nur noch die entsprechenden Richtungsvektoren zu berechnen. Bei einer Positionsregelung im n-dimensionalen Raum ist neben der gewünschten Position auch der Weg dorthin von Bedeutung. Der einfachste und kürzeste Weg ist eine Linie zwischen den beiden Punkten im Raum. Die Linie wird in Vektorschreibweise

beschrieben, was die Berechnung mit den kartesischen Koordinaten erleichtert und die Kompatibilität mit den unteren Regelungsebenen sicherstellt. Damit der Blimp auf seinem Weg nicht abdriftet, was durch die Richtungsregelung bereits kompensiert wird, aber durch Regelabweichungen immer noch geringfügig auftreten kann, muss zusätzlich zur Entfernung zum Zielpunkt auch die relative Position zum geplanten Weg berücksichtigt werden. Abb. 7 illustriert die dafür genutzte Vektorberechnung. Zu Beginn (Diagramm a in Abb. 7) wird eine virtu-



**Abb. 7.** Positionsregelung a) Berechnung der Linie zum neuen Zielpunkt bei Vorgabe eines neuen Zieles b) Berechnung des Abstandes von der berechneten Linie während des Fluges c) Ergebnis der Addition beider Vektoren

elle Linie von der aktuellen Position (A) zur neuen Zielposition (B) berechnet. Der Richtungsvektor der Linie wird als Richtungsvektor an die untere Ebene (Level 2) gegeben. In jedem weiteren Zyklus wird der Abstand zur virtuellen Linie berechnet (Diagramm b in Abb. 7) und der orthogonale Vektor zur Linie zum Richtungsvektor addiert. Dadurch entsteht ein Bewegungsvektor, der zur Linie und zum Zielpunkt (B) zeigt (Diagramm c in Abb. 7).

## 5 Testergebnisse und Auswertung

Die vorgestellte Regelung wurde am beschriebenen Luftschiff in einer ersten Testphase zunächst in einer Turnhalle erprobt. Dabei wurde die Regelung auch auf ihre Robustheit gegenüber Wind, unterschiedlichen Batterieladezuständen und verschiedenen Gasdrücken im Ballon (veränderter Auftrieb und Windwiderstand) getestet. Störeinflüsse in einer dynamischen Umgebung wurden durch manuelle Bewegungen und künstliche Luftbewegungen simuliert. Die Regelung reagierte auf auftretende Abweichungen und Änderungen der Modellparameter und der Umgebung sehr robust. Vorgegebene Positionen und Wege wurden sehr gut eingehalten. Auch das Schweben über einer vorgegebenen Stelle stellte keine Schwierigkeit dar. Bedingt durch die Konstruktion und die momentan geringe Antriebsleistung ( $v_{max} = 7\text{km/h}$ ) konnte die Regelung noch nicht im Außenbereich getestet werden. Weitere Arbeiten sind z. Zt. konstruktive Änderungen am Luftschiff sowie die Integration weiterer Sensoren und Bildverarbeitungsalgorithmen. Die Regelung kann durch zusätzliche Module wie Pfadplanung ergänzt und erweitert werden.

## Literatur

- [1] *Identification and Control Of A Lighter Than Air Blimp*, Gauthier Lambert, 2001, Final Year Project at Instituto Superior Tecnico
- [2] *Foveated Active Tracking with Redundant 2D Motion Parameters*, Alexandre Bernardino, José Santos-Victor, Giulio Sandini, VisLab-TR 06/2002, Robotics and Autonomous Systems (Elsevier), 39(3-4), June 2002
- [3] *Probability Distributions of Optical Flow*, Eero P Simoncelli, Edward H Adelson, David J Heeger, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Maui, Hawaii, June, 1991
- [4] *Performance of optical flow techniques*, J. Barron, D. Fleet, S. Beauchemin, International Journal of Computer Vision, 1995
- [5] *Vision based station keeping and docking for floating vehicle*, S. van der Zwaan, A. Bernardino, J. Santos-Victor, Proc. of the European Control Conference 2001, Porto, Portugal, September 2001
- [6] *RoboCup Rescue: Search and Rescue in Large-Scale Disasters as a Domain for Autonomous Agents Research*, H. Kitano, S. Tadokoro, I. Noda, H. Matsubara, T. Takahashi, A. Shinjou, S. Shimada, Proc. of IEEE International Conference on Man, Systems and Cybernetics, 1999
- [7] *The RESCUE Project - Cooperative Navigation for Rescue Robots*, Pedro Lima, Luis Custódio, M. Isabel Ribeiro, José Santos-Victor, 1<sup>st</sup> International Workshop on Advances in Service Robotics ASER03, March 2003, Bardolino, Italy
- [8] *The Autonomous Blimp Project at LAAS/CNRS: Achievements in Flight Control and Terrain Mapping*, E. Hygounenc, I. Kyun Jung, P. Soures, S. Lacroix, LAAS Report 03181
- [9] *Visual Servo Control for the Hovering of an Outdoor Robotic Airship*, José R. Azinheira, Patrick Rives, José R. H. Carvalho, Geraldo F. Silveira, Ely C. de Raiva, Samuel SBueno, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, May 2002