

## 飛行船を利用した異種ロボットシステム

細井 一弘<sup>†</sup> 森 晶洋<sup>††</sup> 杉本 雅則<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科

〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5 丁目 1-5

<sup>††</sup> 東京大学工学部

〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: †{hosoi,mori,sugi}@itl.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本研究では、飛行ロボットを用いた異種ロボットシステムを提案する。環境埋め込みのセンサ群がない状況において、3次元移動可能な飛行ロボットが地上ロボットや人間、環境を統括的に観測することで、各ロボットの活動や地上ロボットと人間とのインタラクションを支援することを目指す。飛行ロボットとしては、カメラ搭載の飛行船を用いる。飛行船からの広視野の情報を用いることで、地上ロボットから目標を認識できない状況においても、地上ロボットを効率よく目標に導くことが示せた。

キーワード 異種ロボット、飛行船、地上ロボット、センサネットワーク

## Heterogeneous Robot System Using Blimps

Kazuhiro HOSOI<sup>†</sup>, Akihiro MORI<sup>††</sup>, and Masanori SUGIMOTO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, JAPAN zip code: 277-8561

<sup>††</sup> School of Engineering, University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, JAPAN zip code: 113-8656

E-mail: †{hosoi,mori,sugi}@itl.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** We propose an indoor heterogeneous robot system using flying modules. The flying robots can move in a three-dimensional space about according to the situation, and monitor a large area from a higher view point. The information taken from the flying robots enables ground robots to provide the service to humans more effectively, in a dynamic environment with many people. Therefore we develop the heterogeneous robot system which makes flying robots work as sensors. For this purpose, we use indoor blimps as platforms of the flying robots. In this paper, we mainly describe system configuration and preliminary experiments.

**Key words** heterogeneous robot, blimp, ground robot, sensor network

### 1. はじめに

近年、様々なロボットが開発され、人と同じ空間を自由に移動してサービスを提供するロボットの実用化が進んでいる。しかし、単体のロボットだけで実現できる機能には限りがあり、人と同じ空間を共有するのも難しい。ロボットがよりスムーズに人の生活に入り込むためには、ロボットが周囲とのつながりを持ち、より多くの情報を得られるようにすることが必要になる。ネットワークロボットは、ユビキタスネットワークの中にロボットを組み込みこむことで、単体のロボットだけでは実現することが難しい機能を提供できるようにするシステムである [1]。このようなネットワークでつながっているセンサや端末も含めて全てのノードをロボットとみな

し、ビジブルロボット、アンコンシャスロボット、バーチャルロボットの3つに分類される [2]。ビジブルロボットは、実際に形のあるロボットで、ユーザに直接サービスを提供する役割を持つ。アンコンシャスロボットは、人の動きや環境の変化を観測する役割を持つ。バーチャルロボットは、ユーザの命令に従って、インターネットやデータベースなどの仮想空間内で作業を行う役割を持つ。ネットワークロボットのシステムにおいては、以上の異種のロボットが相互に情報を交換することで、より高いレベルのサービスが提供できるようにする。

一般的に、ユビキタス環境における環境に埋め込まれたセンサをアンコンシャスロボットと呼ぶことが多い。これを用いることで、単体では得られない情報が得られるようになる

が、センサを環境に埋め込む事による弊害もある。まず、センサが環境に固定されていると、物の配置や人の移動によって観測対象が隠れ、必要な情報が得られなくなる場合がある。また、カメラなどのセンサを多数設置すると、ユーザが常にカメラによって監視されている状態になり、ユーザのプライバシーを侵害したり、精神的な圧迫感を与える可能性がある。さらに、センサが設置されていない空間ではシステムが利用できないという問題もある。以上のような問題を解決するためには、ネットワークロボット環境におけるセンサノードが自律的に移動できる必要があると考えられる。例えば、天井にレールを設置し、レール上を移動可能なカメラを配置することで、対象物の位置によってカメラを移動させる方法がある。しかし、このようなシステムをあらゆる環境に設置するのは困難である。また、マルチロボットシステムでは、各ロボットが持つ情報を共有することで、タスクを遂行する手法がとられている。各ロボットは必要に応じて移動し、タスク達成のために必要な環境情報を獲得する。しかし、例えば小型ロボットが搭載したカメラから得られる情報は、その視点が環境に設置されているカメラ等に比べて低いので、一度に環境全体を見渡すことができない。

本研究では、このような問題に対して3次元空間内を移動する飛行ロボットをセンサとして用いることで、人や地上ロボットの行動をサポートするシステムを提案する。人間がサービスを提供する地上ロボットとインタラクションをとる状況において、飛行ロボットが人や地上ロボットの位置や状態を観測し、地上ロボットにその情報を伝達する。地上ロボットはその情報を受けて、より高度な作業を行えると考えられる。飛行ロボットは、3次元空間を自由に移動できるので、人や地上ロボットが移動した場合に、すぐに最適な観測位置へ移動し、適切な状況判断が行える。また移動しながら環境中の情報を収集することで、環境全体の状況を把握し、地上ロボットの広範囲の行動をサポートすることが可能であると考えられる。飛行ロボットは、屋内環境において天井付近の高い位置に高度を保つことで、飛行ロボットの行動が人間や他のロボットに影響を与えたり、作業の妨げとなることを回避できる。さらに、飛行ロボットは常に人間を観測することはなく、必要なときにだけ人間に近づき状況やその人の意図を把握する。要求がないときには、人から離れた（あるいは見えない）場所で休止状態になり、呼びかけに対して起動し、高い視点へ移動して呼び出した人を検出すればよい。このような方法をとることで、ユーザのプライバシー問題を解決することが可能であると考えられる。

上記のような飛行ロボットの実現には、飛行ロボットが自律的に行動可能であり、様々な環境情報を読み取ることも可能でなければならない。一方、飛行ロボットはペイロード（積載重量）の制約や高度な制御を必要とする等の様々な問題を抱えている。そこで、本研究では飛行ロボットが外界の情報を取得するだけでなく、地上ロボットからも飛行ロボットを観測することで、飛行ロボットの相対的な自己位置を推定したり、飛行ロボットの観測データを補正したりする。飛行ロ

ボットと地上ロボットが、外部のセンサ情報を利用することなく、それぞれの情報を共有し、協調することで、単体のロボットでは難しい、より高度なサービスを提供できるシステムの構築を目指す。

本研究では、このようなシステムの実現の初期段階として、地上ロボット単体では発見や到達が難しい移動目標を設定し、飛行ロボットからの情報によって地上ロボットが目標まで到達するタスクを設定した。飛行ロボットには小型飛行船を用い、カメラのみをセンサとして搭載して地上ロボットを観測した。本稿では、このタスクを達成するためのシステムの詳細について述べる。

以下、2.節で本研究に関連する先行研究について述べ、3.節でシステムの構成を説明する。4.節では、簡単な実験とその結果を述べ、最後にまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 飛行ロボットと地上ロボットの協調に関する研究

飛行ロボットと地上ロボットが連携してタスクを行う研究は、屋外環境を想定した研究と屋内環境での利用を目的とした研究に大別できる。屋外環境を想定した研究としては、Corke や Chaimowicz らの研究が挙げられる。Corke らの研究 [3] では、ヘリコプターから地上に設置されたセンサを検出し、GPS の情報を合わせて計画したパス通りに飛行させている。また、Corke らが行った別の実験 [4] では、ヘリコプターから地上に設置されたセンサを検出し、地図上でその位置関係を再現している。しかし、GPS 情報のずれや、センサからの情報が正しく届かない事が原因で精度が悪くなっている。

また、Chaimowicz らは、飛行船から真下を向けて撮影したカメラ映像と、GPS・IMU センサを使用することによって、地上のロボットを目標まで導く実験を行っている [5]。しかし、GPS や IMU センサは共にデータの精度が低く、信頼できるシステムを構築するためにはその両方を効率的に使用する方法が必要であると結論付けている。

屋外での利用においては、飛行ロボット自身の大きさが大きいと、様々なセンサが搭載でき、得られる情報も多い。また、GPS を搭載することで容易に絶対位置を把握することもできる。本研究では、屋内での利用を目的としており、センサとして用いる飛行ロボットも小型のものが望まれる。そのため、飛行ロボットに多くのセンサを搭載することができない。また、GPS の利用も困難であるため、自己位置を同定するために別の機構が必要である。Bertuccelli の研究 [6] では、屋内環境において、飛行船からの情報を使って複数の地上ロボットの移動パスを決定する実験を行っている。飛行船と地上ロボットは、既に製品として実用化されている赤外線による屋内位置認識システムにより位置を計測する。また、飛行船には磁気センサも取り付けられており、方向が得られるようになっている。Bertuccelli は、以上のシステムを用いて、ターゲットの発見や地上ロボットの誘導が可能であることを実証している。

以上のように、飛行ロボットと地上ロボットがネットワークを介して協調する技術はあるが、絶対位置を計測できるシステムを利用していることが多い。本研究では、飛行ロボットをセンサノードとして利用することで、センサを環境に埋め込まなくても稼働可能なネットワークロボットの構築を目標とする。したがって、絶対位置を計測できるシステムを利用せず、環境にセンサを埋め込まないという点で他の研究と異なっている。

## 2.2 小型飛行船の自律飛行に関する研究

小型飛行船は、空気より軽い気体（通常はヘリウム）をエンベロープ（気球部分）に充填することで浮力を得る。また、そのペイロード（積載重量）はエンベロープの大きさに応じて決まるので、用途に応じて大きさを変える。飛行船は、飛行ロボットを実現させるのに比較的簡単な手段であるため、小型飛行船の自律移動に向けた研究が盛んに行われている。Bermudez ら [7] は昆虫の視覚をモデルとした認識アルゴリズムを用いた実験を行った。この研究では、位置を認識するために壁にランダムに黒い正方形が描かれており、飛行船に取り付けた 2 つのカメラで認識することで移動の安定と衝突回避に成功している。また、Iida ら [8] の研究では進化的ロボティクスの観点から、昆虫を模倣したビジョンシステムによる飛行船の自律移動の研究を行った。Pfisterer らの研究 [9] では、磁気センサ、超音波センサ、赤外線センサを載せた飛行船での移動制御の安定化を行っている。まず、磁気センサにより飛行船の向きを測定する。また、外部のビーコンから同時に発信された超音波と赤外線の到達時刻を観測し、その差によりビーコンからの距離を得る。向きと距離の情報を処理することで、室内における現在の位置を推定している。また、Zufferey らの研究 [10] では、飛行船の制御を外部の PC に頼ることなく、飛行船に載せたチップにより制御している。ここでは軽量で小さな制御基板、センサなどを使用することで、飛行ロボットの完全な自律化を行っている。また、Bluetooth を使用して外部のネットワークと接続できるようになっている。Zhang ら [11] の研究では、小型飛行船にセンサ類としてカメラだけを搭載し目標物までの自動操縦を実現させるシステムを研究した。Welsby ら [12] の研究では複数台の飛行船を用いて群ロボットとしての自律移動の研究を行っている。この研究では位置推定のために超音波センサや赤外線センサを利用している。

## 3. システムの構成

本システムは、図 1 のように地上ロボット、飛行船ロボットとそれらを制御するためのサーバ PC から構成される。飛行ロボットに取り付けたカメラの映像が無線で PC へ送信され、それと併せて PC で地上ロボットや環境の状態を認識して、地上ロボットと飛行船へ制御命令を出す構成になっている。

### 3.1 飛行船

飛行船は図 3 のように、浮力を保持するエンベロープと推進力を得るためのプロペラ、モータ及びコントローラと受信

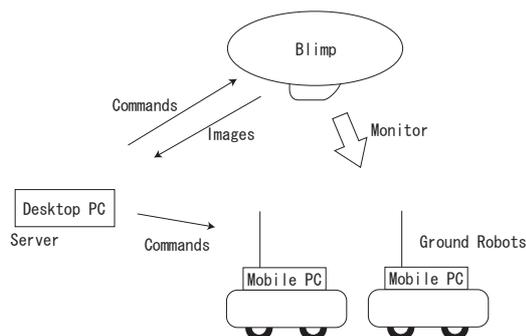


図 1 システム概要

機、また、地上ロボットを観測するための無線カメラを搭載している。長さ約 1.2m、体積約 150l のエンベロープを用い、総重量は 100g 程度である。プロペラは、水平方向を移動するためのプロペラが左右に 1 つずつ、鉛直方向の移動のために 1 つあり、無線信号によりそれぞれ独立に回転することができる。また、地上ロボットや環境の状態を観測するためにカメラを搭載し、斜め下 45 度方向に向けて取り付けられている。カメラ画像は 640 × 480 ピクセルのサイズで約 30fps でサーバの PC に送られる。



図 2 飛行船

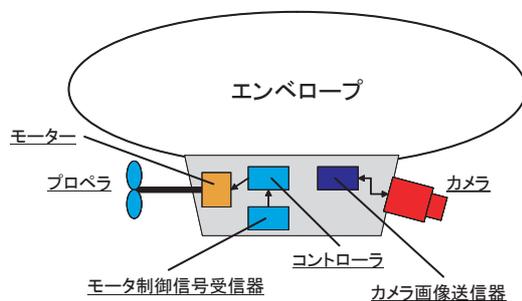


図 3 飛行船の構成

### 3.2 地上ロボット

地上ロボットは、図 4 のように 2 輪の移動ロボットを用いる。左右のモータは独立に制御可能で、信地旋回が可能である。飛行船から地上ロボットの認識を容易にするため、3 つの赤外 LED を搭載している。進行方向の先端に取り付けた赤外 LED は、方向認識に用いるため、0.5 秒間隔で点滅して

いる。飛行船のカメラには赤外線透過フィルタを装着し、地上ロボットの赤外 LED を認識しやすくしている。

また、このロボットはモバイル PC(Sony, vaio typeU) を搭載し、地上ロボット自身が搭載するセンサや飛行船からの情報を基に行動計画を立てる（本稿で述べる実験では飛行船のみの情報で行動決定を行っている）。

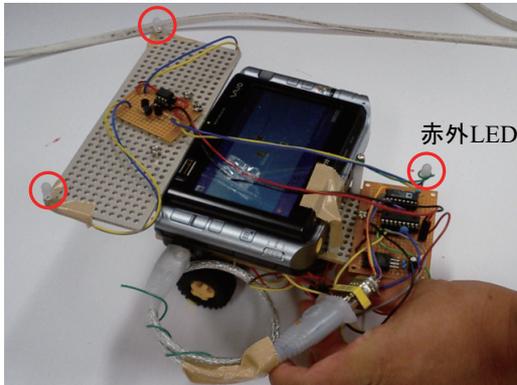


図 4 地上ロボット

### 3.3 サーバ PC

サーバ PC は、飛行ロボットからの情報を受け取って処理し、地上ロボットと飛行ロボットへ制御命令を出す役割を果たす。地上ロボットへ制御命令を送る赤外線送信機、飛行ロボットへ制御命令を送る無線送信機、飛行ロボットに付けた無線カメラからの映像を受け取る無線受信機が接続されている。

現段階では、地上ロボット等の位置認識のために赤外 LED のマーカーを地上ロボットに搭載している。数通りのマーカーを判別するために、無線カメラから得られた画像中から点灯と 3 通りの点滅パターンを認識している。以下に、その認識手法を述べる。

- (1) 無線カメラで得られた画像を、あらかじめ決めておいた閾値を用いて全てのピクセルを二値化する
- (2) 二値化された画像を膨張させる（各ピクセルが”1”が”0”で表現された画像を  $3 \times 3$  ピクセルの長方形で区切り、長方形内に 1 ピクセルでも”1”があれば全てのピクセルを”1”とする）
- (3) 二値化された画像の中から輪郭を全て抽出し、観測された LED のリストを作る
- (4) 前回のフレームで LED が観測された位置から LED が消えていれば、点滅している LED として、位置を推測して LED のリストに加える
- (5) 前回のフレームで点滅中の LED があると推測した位置に LED が観測された場合は、消えていた時間から、何ミリ秒周期で点滅しているのかを推測する
- (6) 以上を繰り返す

この認識手法に従うと、常時点灯している LED と点滅している LED の座標を常に得ることができる。しかし、カメラのぶれが激しく前回のフレームで認識された LED との対

応が取れない場合に、認識の精度が落ちる。

## 4. 実験

前節で述べたシステムを使用して、飛行船から地上ロボットと目標の両方が見える状態を作り、地上ロボットを目標まで導く 2 つの実験を行った。

目標となる位置には、200 ミリ秒ごとに点滅する赤外 LED を設置する。

### 4.1 飛行船を固定した実験

まず、飛行船を、地上ロボットと目標の両方がカメラで捕捉できる位置に固定して実験を試みた。各ロボットと目標の位置関係を図 5 に示す。

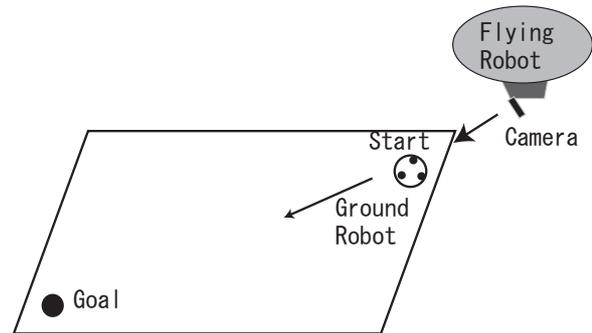


図 5 実験環境

地上ロボットと目標の位置関係を観測し、地上ロボットを目標まで近づけるために、次のような処理を行う。

- (1) カメラより得られた画像から、前節で述べた LED 認識アルゴリズムを用いて地上ロボットと目標の位置を観測する
- (2) 地上ロボットが向いている方向のベクトルと、地上ロボットの中心からゴール方向のベクトルが作る角度  $\theta$  を求める
- (3) 角度が  $-\frac{\pi}{8} < \theta < \frac{\pi}{8}$  である時は前進、 $\theta < -\frac{\pi}{8}$  の時は左回転、 $\frac{\pi}{8} < \theta$  の時は右回転の命令を地上ロボットへ送る
- (4) 1~3 を繰り返すことによって、ロボットを目標まで近づける

実験の結果、地上ロボットは図 6 の実線で示す軌跡を描いて目標へ到達した。数回試行したところ、毎回正しく目標へ到達した。この結果から、飛行船（カメラ）が動かない環境では、正しく LED の認識ができ、地上ロボットを目標まで導けることが確認された。

### 4.2 飛行船を固定しない実験

次に、飛行船を固定しない状態での実験を試みた。固定しないことによって、地上ロボットをカメラで捕捉し続けるために、飛行船を停滞させる制御が必要となる。なお、本実験は、飛行船がカメラで地上ロボットを捕捉できる位置へ行ってから手を離してから開始するものとし、自律的に地上ロボットを探すことはしない。

前項の実験の処理に加えて、次のような処理を行う。

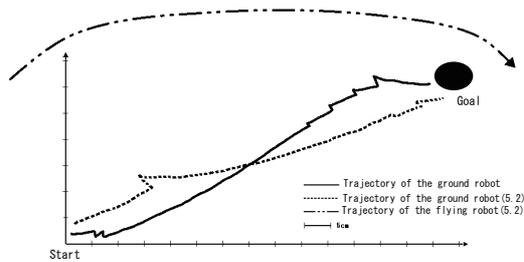


図 6 図 5 の環境における地上ロボットと飛行船の移動軌跡

- (1) 地上ロボットの認識位置がカメラ画像の中でどこにあるかによって、飛行船に対して表 1 のような命令を送る
- (2) 地上ロボットに付いている赤外 LED の、カメラ画像中における距離を計算し、あらかじめ決めておいた閾値より短ければ飛行船が地上へ近づくようにし、決めておいた閾値よりも長ければ飛行船が地上から離れるようにする
- (3) 左右の回転や上下の移動を行った後は、逆回転をさせて、慣性で動き続けられないようにする

表 1 画像中のロボットの位置と飛行船への制御命令の対応表

Up and Left	Up	Up and Right
Left	move about according to the distance between LEDs	Right
Down and Left	Down	Down and Right

実験の結果、地上ロボットは図 6 の実線で示す軌跡を描いて目標へ到達した。また、飛行船は二点鎖線で示したような軌跡を描きながら地上ロボットをカメラで捕捉し続けた。しかしながら、数回試行した結果、ロボットを見失ってしまう場合もあり、現状のアルゴリズムに改良を加える必要があることが分かった。

#### 4.3 障害物を設置した実験

次にゴールと地上ロボットの間に障害物があった場合について、実験を行った。図 7 に示すように、地上ロボットはゴールを直視できない位置関係である。実験は、飛行船を係

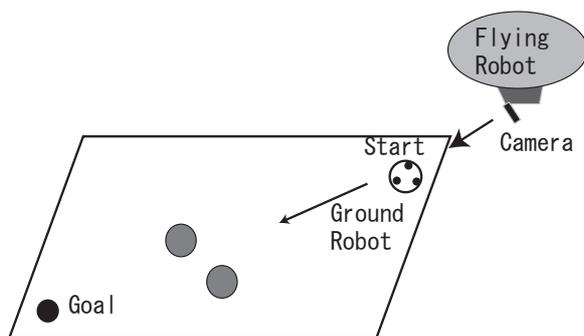


図 7 障害物を設置した実験環境

留した状態で、障害物が存在するフィールド上を目標点まで

向かわせた。実験の結果、図 8 のような軌跡を描いて目標点へ辿り着いた。障害物を避けて目標点へ到達したが、カメラの小さな揺れによってロボットの動きも揺れてしまう傾向があった。

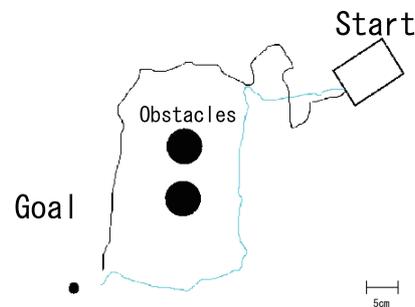


図 8 図 7 の環境における地上ロボットの移動軌跡

## 5. まとめと考察

本稿では、ネットワークロボットにおけるセンサの死角の問題やプライバシーの問題を解決する手段として、3次元移動可能な飛行ロボットをセンサとして用いた異種ロボットシステムを提案した。飛行ロボットには飛行船を用い、飛行船からの広視野の情報を与えることで、地上ロボットを効率的に移動させることができる。

飛行船と地上ロボットを用いた簡単な予備実験から、飛行ロボットを用いることで地上ロボットでは認識不可能な目標を発見し、障害物を避けて目標まで地上ロボットを導くことができた。今後の課題としては、複雑な環境で地上ロボットのナビゲーションを行うことが第 1 に挙げられる。そのためには、飛行ロボットが地上ロボットや環境を正しく認識し、状況に応じて移動できるような制御システムを構築する必要がある。

### 文献

- [1] 萩田：“ネットワークロボットの将来展望”，日本ロボット学会，23, 6, pp. 642–643 (2005).
- [2] 総務省：“「ネットワークロボット技術に関する調査研究会」報告書”. 2003.7.
- [3] P. Corke, R. Peterson and D. Rus: “Networked robots: Flying robot navigation using a sensor net”, International Symposium of Robotics Research 2003 (2003).
- [4] P. Corke, S. Hrabar, R. Peterson, D. Rus, S. Saripalli and G. Sukhatme: “Deployment and connectivity repair of a sensor net with a flying robot”, International Symposium of Robotics Research 200(ISSR’04) (2004).
- [5] L. Chaimowicz, B. Grocholsky, J. F. Keller, V. Kumar and C. J. Taylor: “Experiments in multirobot air-ground coordination”, International Conference on Robotics and Automation, pp. 4053–4058 (2004).
- [6] Bertuccelli and L. Francesco: “Robust planning for heterogeneous uavs in uncertain environment”, Massachusetts Institute of Technology (2004).
- [7] S. B. i Badia, P. Pyk and P. F. Verschure: “A biologically based flight control system for a blimp-based uav”, International Conference on Robotics and Automation 2005 (2005).
- [8] F. Iida and D. Lambrinos: “Navigation in an autonomous

flying robot by using a biologically inspired visual odometer”, Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic System III, Photonics East, Proceeding of SPIE, pp. 86–97 (2000).

- [9] S. F. C. Buschmann, D. Pfisterer: “Experimenting with computer swarms: a mobile platform based on blimps”, *MobiSys* (2004).
- [10] J.-C. Zufferey, D. Floreano, M. van Leeuwen and T. Merenda: “Evolving vision-based flying robots”, *Biologically Motivated Computer Vision Second International Workshop, BMCV 2002*, pp. 592–600 (2002).
- [11] H. Zhang and J. P. Ostrowski: “Visual servoing with dynamics: control of an unmanned blimp”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **1**, pp. 618–623 (1999).
- [12] J. Welsby and C. Melhuish: “Autonomous minimalist following in three dimensions: a study with small-scale dirigibles”, *Towards Intelligent Mobile Robots* (2001).