

空中機及び陸上機を用いた位置推定システム

Positioning System using Quadrotor and Land Vehicle

三平 悠磨*¹ 赤石 美奈*² 堀 浩一*¹
 Yuma Mihira Mina Akaishi Koichi Hori

*¹ 東京大学大学院工学系研究科
 School of Engineering, University of Tokyo

*² 法政大学情報科学部
 Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University

We propose a positioning system using an aircraft and a land vehicle which cannot detect their position. In this system, AR markers are carried by the land vehicle and their positions are detected by an on-board camera of the aircraft. The aircraft and the land vehicle are toys which are available at moderate prices. A positioning system can be constructed by such inexpensive instruments. The way to minimize positioning error by the proposed system is suggested.

1. 背景と目的

現在、陸上機¹同士の協調 [倉爪 07] や空中機同士の群飛行 [細井 05] に関する研究は行われているが、空中機と陸上機が協調した、空陸協調システムに関する研究は見当たらない。非常に異なった特性を持つ空中機、陸上機が、それぞれの利点を活かして協調することで、従来とは異なったミッションを遂行することができると考えられる。特に、地図作成や位置推定というミッションでは、空中機が上空からの視点を提供することで、障害物や高低差があるというような陸上機のみでは困難な環境においてもミッションを達成することができるようになる。

また、複数のエージェントによる位置推定や地図作成に関する研究では、レーザレンジファインダ [倉爪 07] や GPS [神原 05] を用いた研究が行われている。しかし、これらの機器は専門的であり、また高精度な結果を得るためには高価な機器を使わざるを得ない。そのため、機器の設計や操作にも専門知識を要し、位置推定というミッションを容易に行うことができないのが現状である。

本研究は、自己位置を推定することのできない陸上機及び空中機を用いて、未知環境での位置推定、探査を行うことを目的としている。提案するシステムで利用されている機器は、一般に玩具として販売されている陸上機及び空中機であり、このような安価なシステム構成においても、目標とするミッションを達成できることを示す。また、専門的な機器を用いる場合と比較して、本研究で提案されているシステム構成では位置の推定精度が悪くなるのが予想されるため、その誤差の大きさを見積もる。さらに、誤差を出来るだけ小さくするような測定方法を提案する。これにより、提案されている安価なシステム構成によって、どの程度の精度で位置推定というミッションを達成することができるのかということを調べる。

2. システムの全体構成

本研究で提案しているシステムは、陸上機ミニマイコンカー製作キット ver.2(図 1)、空中機 AR.Drone(図 2)、AR マーカ(図 3)及び PC からなっている。まず、測定の基準となる地上の 2

点を決定し、マーカを配置する。測量をしたい方向を定め、その方向の大体の位置まで陸上機によってマーカを運搬、配置する。マーカは、配置後に風などによって場所が動かないように、裏面に粘着テープがついている。続いて、空中機によって新たに配置されたマーカの位置を推定する。空中機によって位置を推定されたマーカを、新たな位置の基準とする。このような一連の操作を繰り返していくことで、未知環境の探査及び測量を行うことが出来るというシステムを本研究では提案している。

従来研究では陸上機のみが互いの距離を測定し、位置推定を行うというシステムを用いていた [倉爪 07]。一方本研究では、陸上機は通信機能やセンサを持たず、マーカを牽引するという役割のみを果たしている。また本研究では空中機が自己位置を推定する必要が無いので、提案システムには GPS が含まれておらず、屋内や地下などの環境においても測量を行うことが出来る。ただし、基準となる点を少なくとも 2ヶ所は、予め測量しておく必要がある。



図 1: ミニマイコンカー製作キット Ver.2



図 2: Parrot 社 AR.Drone

連絡先: 三平 悠磨, 東京大学大学院工学系研究科, 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 7 号館, 03-5841-1839, mihira[at]ailab.t.u-tokyo.ac.jp

*1 一般に陸上機とは陸上で離着陸する飛行機のことをいうが、本文中では空中を飛行するエージェントである空中機に対して、陸上を移動するエージェントを陸上機と呼んでいる。

本研究で使用したマーカは図3の9種類である。AR マーカは白紙に印刷後、牽引されるための金具がついた厚紙に、平面となるように貼りつけている。本論文中では、上段左からマーカ1、2、3、中段左からマーカ4、5、6、下段左からマーカ7、8、9という名前では呼ばれている。

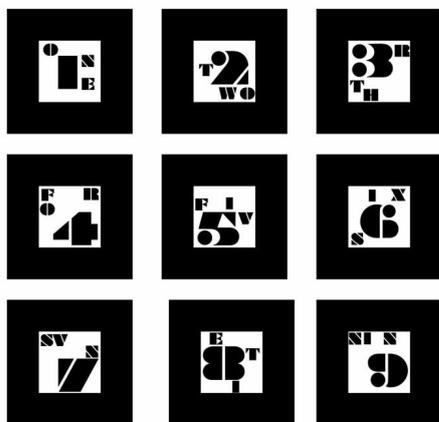


図3: 実験で使用したマーカ一覧

3. 実験と評価

3.1 ミッション概要

空中機と陸上機で協調して、未知環境の測量、探査をするというミッションを考える。空中機、陸上機は、それぞれが限られた機能のみを持っており、その中で、それぞれの利点を生かして未知環境を探索していく。

具体的には、まず基準となる地上の2点の座標を設定しマーカを配置する。その際、マーカの中心部が与えられた座標と一致するようにする。次に、陸上機によって新たなマーカを運搬し配置する。この時、陸上機は通信機能や自己位置の推定機能を持たないため、大体の方向と距離のみを与えることしかできない。陸上機によっておおまかな方向と位置に配置されたマーカを、予め配置されていた2つのマーカと同時に空中機からカメラを用いて測定する。位置のわかっている2つのマーカと未知のマーカとの距離を測定することで、図4のように新たなマーカの位置を推定することが出来る。ただし、3つのマーカは同一水平面上にあると仮定している。このように、新たにマーカを配置、位置を測定という手順を繰り返していくことで、未知環境を探索していくことが可能になる。

マーカのパターンファイルとサイズは予め与えてあるため、マーカを撮影することで、マーカの向き及び距離を測定することができる。また、カメラのキャリブレーションは事前に行なう。

3.2 マーカ位置の推定アルゴリズム

位置情報が既知のマーカ2つと未知のマーカ間の距離から、未知のマーカの位置を推定するアルゴリズムは以下の通りである。添字は、既知のマーカを1, 2、未知のマーカを3とした。また、各マーカの位置は同一水平面上にあるとして考えている。

既知のマーカ位置： $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$

未知のマーカ位置： (x_3, y_3)

測定によって得られたマーカ1, 3間、

2, 3間の距離： d_{13}, d_{23}

この時、以下の関数を最小にする (x_3, y_3) を、未知のマーカ位置とする。

$$f(x_3, y_3) = \left\{ \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} - d_{13} \right\}^2 + \left\{ \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} - d_{23} \right\}^2$$

この関数により、未知のマーカの位置として2点が定まるが、カメラの映像から3つのマーカの位置関係が定まるので、1点に決定することができる。

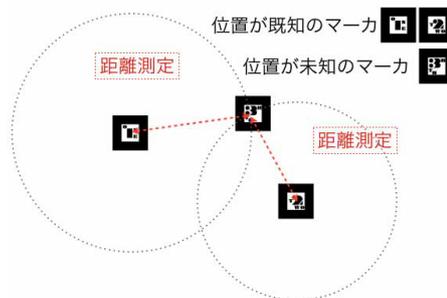


図4: 未知のマーカ位置の推定

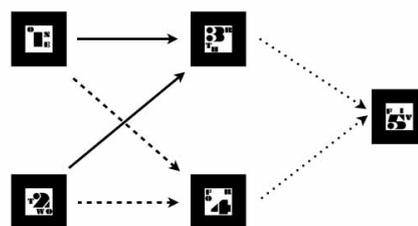


図5: 繰り返しマーカ位置を推定

未知のマーカ位置の推定は図4のように行なっている。まず、位置が既知のマーカと未知のマーカとの距離をそれぞれ測定する。まれにマーカ同士や、マーカと似た形のものがある場合があるので、測定回数は十分に多くして、そこから得られた距離の平均値を実際の距離と考えて用いている。本研究ではマーカ間の距離の測定回数は100回とし、その平均値を用いた。ARToolKitによってマーカとカメラの位置関係が求まるので、そこからマーカ間の距離を出力している。位置が既知のマーカと未知のマーカとの距離を測定し、中心を既知のマーカ位置、半径を未知のマーカとの距離とした2つの円の交点が、未知のマーカ位置と決定できる。一般に交点は2つ定まるが、3つのマーカの位置関係を空中機のカメラから撮影することで、1点に定めることができる。

このアルゴリズムを繰り返すことで、図5のように次々とマーカ位置を推定することが出来る。まず、基準となるマーカ1・2からマーカ3の位置を推定する(図5実線)。同様に、マーカ1・2からマーカ4の位置を推定する(図5太い点線)。そして、得られたマーカ3・4の位置情報から、マーカ5の位置を新たに推定する(図5細い点線)。このように、基準となる2点の位置情報を与えることで、次々と未知のマーカ位置を推定していくことができる。本研究では、基準となるマーカから新たなマーカを位置を推定する手順を、各マーカにつき5回ずつ行い、その位置の平均値を真のマーカ位置と仮定して、次のマーカ位置推定に使う。

3.3 結果と考察

ある一方向に目的地がある場合、最も誤差が小さくなる配置及び推定順序は以下の通りである。

- 目的地方向に対してできるだけ線対称になるようにマーカーを配置する
- 目的地方向に対して線対称になるような順序でマーカー位置を推定する

この配置は図6で示されているようなものである。図6ではマーカー1・2が基準点となり、点線に対してできるだけ線対称になるようにマーカーを配置している。また、目的地方向は点線方向であり、新たなマーカー位置を推定する際に基準となるマーカーは点線方向に対してほぼ垂直に配置されている。

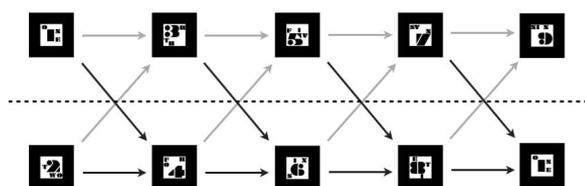


図6: 最も誤差が小さくなる配置及び順序

また、図6におけるマーカーの計測順序は以下のような順序である。

1. マーカー1, 2からマーカー3の位置を推定
2. マーカー1, 2からマーカー4の位置を推定
3. マーカー3, 4からマーカー5の位置を推定
4. マーカー3, 4からマーカー6の位置を推定

しかし、このような配置法では基準となるマーカーに対して垂直方向、つまり、図6の点線方向の位置推定のみしか、精度良く行うことができない。そのため、別の方向の位置推定を行う場合には、基準となるマーカー位置を更に増やす必要がある。そこで、図7のように、3つのマーカー位置を基準として定めておくことで、2軸4方向の位置を精度よく測定することが出来るようになる。図7では二本の矢印は直行しているが、実際に測定する場合は直行する必要がない。また、さら基準の位置を増やしていくことで、任意の方向のマーカー位置を精度よく測定することができる。

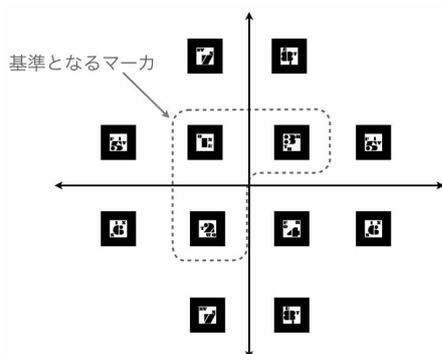


図7: 複数方向の測定

4. 結論と今後の課題

本研究で提案するシステム構成を用いることで、実際に位置推定というミッションを達成することは可能である。自己位置の推定ができないような、限られた性能のみを有する空中機および陸上機によっても、ある程度の精度で位置推定を行うことができる。また、提案するシステム構成による位置推定法では、マーカーの配置によって誤差の方向や大きさに特徴が見られる。この特徴を用い、マーカーの配置法やその測定順序を変えることで精度の向上を図ることが出来る。

本研究では陸上機は通信機能を持たず、マーカーの運搬のみを行っていた。陸上機に通信機能を持たせることで、陸上機自体がマーカーの役割を果たし、自由な方向へ移動、位置推定を行うことが出来るようになるのではないかと考えられる。

また、マーカーを撮影するカメラの解像度や性能を向上させることで、測定精度を更に向上させることが出来ると考えられる。また、ホバリング時の姿勢や位置を安定させることが出来れば、更に測定の誤差を小さくすることが出来るだろう。

本研究では3m四方程度の屋内環境のみで測定を行ったが、さらに広い空間や高高度における実験を行うことで、新たな課題が生じる可能性がある。また、本研究では、地上のマーカーは全て平面的に配置されていたが、実際の環境では地面に凹凸があることが考えられる。そこで、マーカーの傾きや空中機の高度の情報を用いることで、3次元的な位置推定を行える可能性がある。

参考文献

- [倉爪 07] 倉爪 亮, 戸畑 享大, 村上 剛司, 長谷川 勉: CPS SLAMの研究 —大規模建造物の高精度三次元幾何形状レーザ計測システム—, 日本ロボット学会誌, Vol.25, pp.1234-1242 (2007)
- [細井 05] 細井 一弘: 群飛行ロボットの協調位置推定に関する研究, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻 修士論文 (2005)
- [神原 05] 神原 誠之, 横矢 直和: RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感, 信学技報, vol. 104, no. 572, PRMU2004-160, pp. 37-42 (2005)