

投下型 AR マーカを用いた小型マルチロータ機の自己位置推定

Localization of a Small Multi-rotor UAV Using Dropping AR Markers

○正 大塚 光 (東北大) 谷島 諒丞 (東北大)
正 永谷 圭司 (東北大) 久保 大輔 (JAXA)

Hikaru OTSUKA, Tohoku University, h-otsuka@astro.mech.tohoku.ac.jp
Ryosuke YAJIMA, Tohoku University
Keiji NAGATANI, Tohoku University
Daisuke KUBO, Japan Aerospace Exploration Agency

This study is a proposal of small UAV (Unmanned Aerial Vehicle) localization technique in GPS (Global Positioning System)-denied indoor environment using dropping type AR (Augmented Reality) markers. For the in-door flight of UAV, self-localization is important. However, most of localization techniques are computationally expensive, such as SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), and it requires high-performance on-board computers. Thus, it is appropriate for UAV localization to use augmented reality system because of low-calculation-cost. To clarify the possibilities of AR systems for indoor UAV localization, we implemented an on-board AR system, mounted a dropping device of AR markers, and implemented a localization method on a small multi-rotor UAV. Evaluation tests clarified the advantages and issues of the localization technique.

Key Words: Unmanned Aerial Vehicle, AR, Localization, Computer Vision

1. 緒言

地震等の災害によって人が立ち入れない屋内環境の探索に対し、無人探査ロボットを利用することが計画され、被災した建物の探査活動に利用されてきた。これらの探査活動では、クローラ型ロボットを始めとした地上移動型の探査ロボットの開発が行われ、利用されてきた。さらに、近年では地上探査ロボットに加え、より移動の自由度が高い無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) の利用が検討されている。屋内探査活動で利用が検討されている UAV は、複数の回転翼を備えた垂直離着陸機であるマルチロータ機であり、滞空飛行を行うことで屋内環境でも障害物の回避し、3次元的な動きによってより広範囲を探索することが可能である。一方で、屋内探査におけるマルチロータ機の技術課題として、継続飛行時間の延長、搭載可能ペイロードの増加、未知環境探査に向けた環境地図の作成並びに、自己位置推定手法の確立が挙げられている。

UAV の屋内探査の課題の中で、自己位置推定に関しては複数の手法が検討されており、その手法の一つとしてレーザ距離センサによる距離計測と点群情報の解析を用いた SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) による自己位置推定の研究が盛んに行われている。例えば、Kumar らは、マルチロータ機に計算機とレーザ距離センサを搭載し、SLAM によって環境地図の作成と位置推定を行い、UAV に対する SLAM の有用性を示した [1]。しかし、一般的に SLAM には大量の環境情報の取得と位置情報の解析が必要であり、計算負荷が重いという短所がある。計算負荷が重くなると、機体に搭載する計算機が大型し、機体重量が増加することで飛行性能を悪化させてしまう恐れがある。さらに、SLAM による自己位置推定精度は、対象環境の特徴量に依存するという問題もある。

そこで本研究では、通常の SLAM よりも計算負荷が軽い、AR マーカを用いた自己位置推定手法と、投下型 AR マーカを用いた探索範囲の拡張を提案する。AR (Augmented Reality) は、画像上の特徴点や認識パターンを解析し、画像などを重ねて表示する技術である。AR 技術による計算過程では、画像を解析して対象物の位置と姿勢の解析を行っており、これを UAV の位置推定に応用することが可能である。これまでも

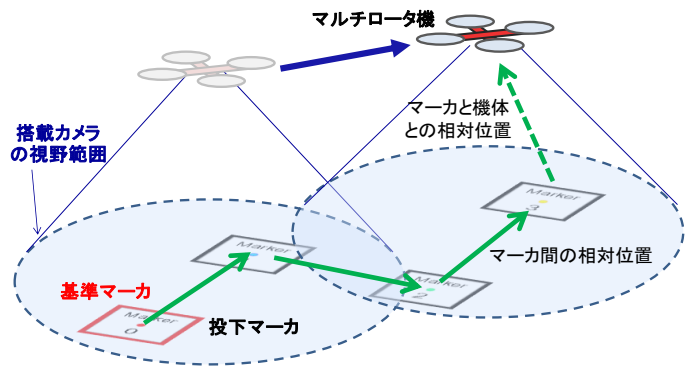


Fig.1 Concept of UAV Localization Using Dropping AR Markers

AR マーカを用いた UAV の自己位置推定が試みられている [2] が、レーザ距離センサを用いた SLAM に比べて、研究例は少ない。加えて、本研究では、機体から複数の AR マーカを投下することで、探索範囲の拡張を試みる。

本研究の目的は、投下型 AR マーカとオンボードの AR システムを用いた、小型 UAV の自己位置推定手法の実現と課題点の検証である。本稿では、小型マルチロータ機への AR システムの実装の過程と、実施した各機能の評価試験結果について述べる。

2. 自己位置推定手法

2.1 自己位置推定手法の概念

図 1 に、投下型 AR マーカを用いた自己位置推定についての概念図を示す。本手法では、オンボード環境での AR システムの組み込みとマーカの投下機能の実装を行い、機体から AR マーカを投下し、画像解析からマーカと機体の位置関係を推定する。また、機体が一定距離を移動した際にマーカを投下し、投下されたマーカ間の相対位置を推定することで、最初のマーカからの機体の位置を推定する。このようにマーカを複数個床面に設置し、マーカ間の相対位置を把握することで探索範囲を拡張することが可能となる。また、AR 技術による位置推定は、SLAM に比べて計算負荷が小さくなるため、搭載する計算機を小型化できる。さらに、投下型マーカを用いること



Fig.2 AR System Components.

で特徴点の少ない環境であっても、一定の自己位置推定精度を確保できるとともに、他の機体から投下されたマーカを利用することができるため、屋内環境における探査範囲の拡張に有用である。

本手法の実現には、オンボード環境で機体に取り付けたカメラからの画像解析と投下型マーカの設置が必要となる。よって、マルチロータ機には、軽量の AR システムの実装とマーカ投下機構の実装が求められる。

2.2 AR 技術の利用

通常の AR 技術のアルゴリズムでは、対象物の撮影、画像解析による特定パターンの認識、相対位置関係と対象物の大きさの把握、画像の投影を行う。本手法の位置推定には、AR 技術のアルゴリズムの中で、対象物との位置関係解析までを行い、AR マーカと機体の位置関係を取得する

AR マーカを用いた画像処理技術は、加藤らによって開発が行われ、一連のプログラムライブラリが公開されている [3]。また、Wagner らはオリジナルのプログラムを改良し、認識するマーカパターンを少なくすることで計算負荷の軽い位置推定処理を行うプログラムを開発しており [4]、本研究ではこれを用いた。

3. 小型 UAV への自己位置推定システムの実装

本手法を小型マルチロータ機上で実現するため、軽量の AR システムの実装とマーカの投下機構の開発を行った。以下では、各システム要素の開発過程と機体への組み込みについて述べる。

3.1 AR システム

AR システムの構築には、画像取得用のカメラと計算機が必要である。ペイロードの小さいマルチロータ機上で、このシステムを実現するためには、搭載機器が小型であり軽量であることが求められる。今回は、小型 PC (Raspberry B+)、USB カメラ、モバイルバッテリー (2600mAh) によってシステムを構成した (図 2)。これに加えて、機体の外で位置推定結果を取得するための、無線 LAN アダプタを取り付けた。この状態で約 1Hz での推定位置の更新と約 40 分間の継続的な AR システムの動作可能である。

3.2 マーカ投下機構

機体から 4 つのマーカを順次落とすための機構を製作した。使用するマーカの大きさは、AR システムの重量とペイロード

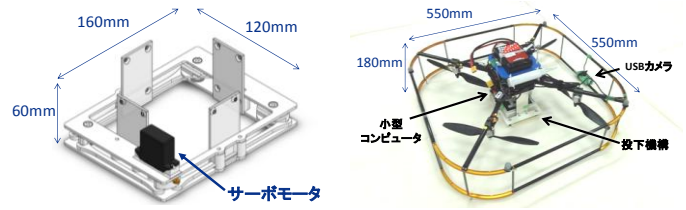


Fig.3 An AR Marker Dropping Unit.

Fig.4 A Small Multi-Rotor UAV. (550mm×550mm)

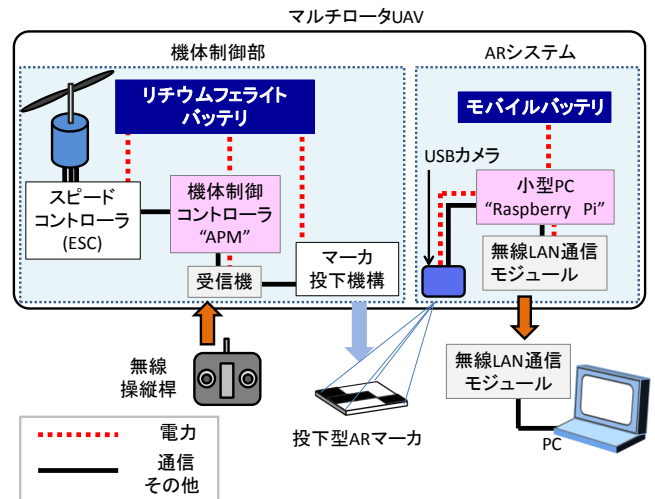


Fig.5 All System Components.

に基づいてマルチロータ機を選定し、機体下部に機構を取り付けることを想定して大きさを 95 [mm] 四方とした。なお、機体のペイロード制限から、投下機構の重量は 200 [g] 以内に収める必要があった。そこで、投下型マーカを含め、173 [g] で投下機構を開発した。この機構はサーボモータによって、リンクした 4 つの爪が動き、装填されたマーカを一つずつ投下することができる。

3.3 マルチロータ機

図 4 に、本研究で用いたマルチロータ機を示し、機体のシステム構成を図 5 に示す。この機体のペイロードの上限は 800 [g] 程度であり、飛行用バッテリー、マーカ投下機構、AR システムの重量を抑える必要があった。最終的に機体全体の重量は 1929 [g] となり、ペイロードを 804 [g] とすることができた。表 1 に、機体の重量構成を示す。

機体の操作は、無線によるマニュアル操縦とし、自己位置推定結果は無線 LAN (Local Area Network) 経由でコンピュータに記録することとした。

Table.1 Weight of UAV Components

総重量	1929 [g]
機体	1125 [g]
リチウムフェライトバッテリー (2500mAh)	332 [g]
投下機構 (機構, 投下マーカ)	173 (125, 48) [g]
ARシステム (カメラ, 小型PC, モバイルバッテリー)	299 [g]

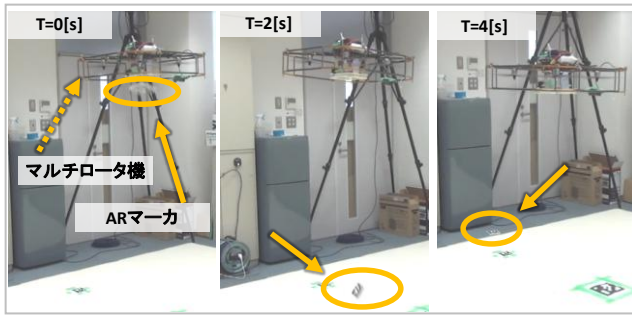


Fig.6 A Moment of AR Marker Dropping from Flying UAV.

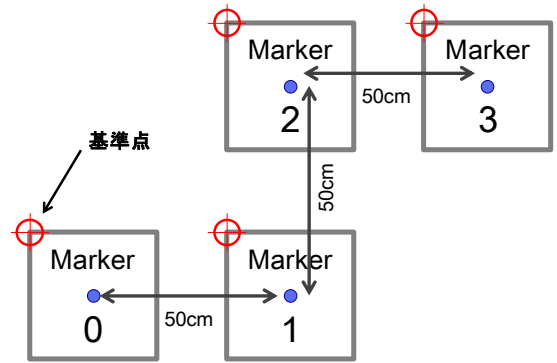


Fig.7 A Rayout of AR Markers.

4. 実験

4.1 飛行能力とマーカ投下動作の検証

まず、機体の継続飛行時間の確認と飛行状態での投下機構の動作を確認するため、飛行試験を行った。

飛行時間の確認では、機体を1[m]の高さで滞空させ、バッテリーを使い切るまでの時間を計測した。投下動作の検証では、機体を1.5[m]の高さで滞空させ、マーカの投下動作を観察した。

飛行試験に結果から、ARシステムを搭載した状態で機体が5分59秒間の継続飛行が可能であることを確認した。また、マーカの投下動作の検証では、マーカがロータの後流によって吹き飛んでしまうことが分かった(図6)。機体の重量を考慮すると、マーカが吹き飛ばないようにマーカの質量を増加させることが難しいため、別の手段によってマーカを床面に設置する必要があることが判明した。

4.2 AR マーカによる位置推定精度の検証

次に、ARシステムによって得られる位置推定精度の検証を行った。位置推定には、マーカ間相対位置の推定とマーカに対するカメラ位置の推定が必要であるため、以下に示す2つの実験を行った。

まず、マーカ間相対位置の検証では、図7のようにマーカを床面に貼り付け、1.5mの高さにおいて機体を手で動かして画像を取得し、マーカ間相対位置の推定結果と比較した。また、マーカに対するカメラ位置の推定では、マーカを床面に貼り付け、手で機体を持ち上げて数段階に分けて高さ2[m]まで上昇させる動作を繰り返し、機体の推定位置と3次元位置計測装置(VICON)による計測位置との比較を行った。

図8にマーカ間の相対位置の推定結果を示す。また、図9に高さ方向(Z軸方向)、図10にY軸方向の実験結果を示す。図8のマーカ相対位置の計測実験より、マーカ本来の位置に対して、推定位置が20%程度ずれていた。これは、マーカの基準長さの調整に誤差が生じたものと思われ、初期校正によって改善すると考えられる。一方、推定位置への収束性に関しては、位置の大きさに対して10%以内にマーカの推定位置が集まっており、推定位置から計測値が外れる頻度は少なかった。マーカの相対位置に関して、UAVの誘導に必要な位置推定が実

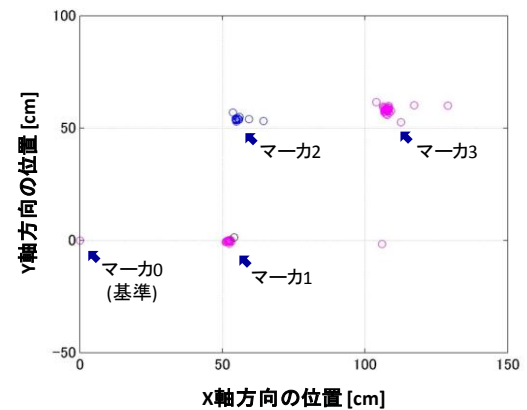


Fig.8 Relative Position Estimating using an AR System.

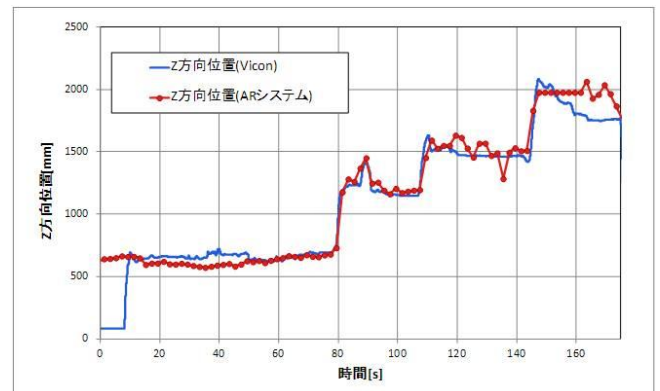


Fig.9 Camera Position to an AR Marker in Z Axis.

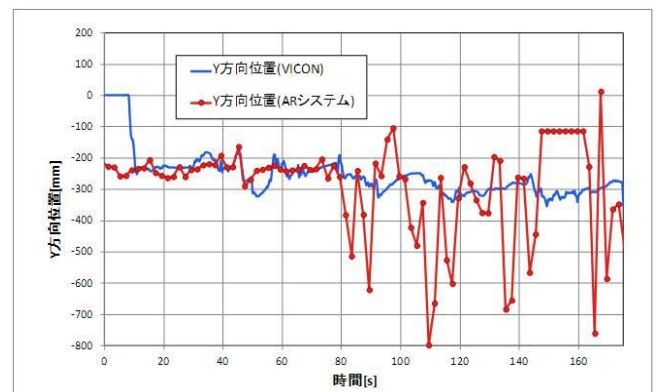


Fig.10 Camera Position to an AR Marker in Y Axis.

現できていると考えられる。

一方、図9、10のマーカに対するカメラの位置推定結果からは、Z軸方向で推定位置と飛行軌跡がおおむね一致した。しかしながら、図10に示すように、Y軸方向ではカメラが上昇してマーカから離れるにつれて推定位置が振動し、飛行軌跡と一致しないことがわかった。Z軸方向に対しては、マーカの大きさを解析すれば距離を求められるが、水平位置に関してはマーカの姿勢や1ピクセルの画像の大きさが解析結果に影響するため、撮像画像の解像度が位置推定結果に影響したものと考えられる。水平位置の推定精度を高めるためには、高解像度の画像を取得することが可能なカメラの利用とマーカの大型化が有効であると考えられる。しかし、このような対策は計算負荷の増大や機体システムの大型化を引き起こすため、安易な高解像度カメラへの切り替えやマーカの大型化は難しいという問題がある。

4.3 飛行状態での自己位置推定

次に、飛行状態で機体の位置推定が可能であるか検証するために、ARシステムによる自己位置推定を行いながら、飛行試験を行った。

飛行試験の際は、機体を高さ 1.5[m]で飛行させ、床面に貼り付けた大型マーカ(190mm×190mm)を撮像し、ARシステムによる位置推定を行った。

実験の結果、飛行状態ではマーカを認識することができず、推定位置を取得できないことがわかった。原因としては、飛行時の振動によって、撮像画像が歪み、ARシステムでマーカを認識できなくなったものと推察される。図11に、飛行状態を模擬し、細かい振動を加えた時とカメラを安定させた時の撮像画像を示す。図11上の図では振動によって、マーカが認識されていない事がわかる。今回探査対象としている屋内環境は、屋外と比べて暗いためカメラの露光時間を必要とし、撮像画像が機体の振動の影響を受けやすくなっている。飛行中にARマーカを認識するためには、カメラへの機体の振動を防ぐとともに、カメラの露光時間を調整することで画像が歪まないようにする対策を講じる必要がある。

5. 結言

本研究では、非協力的な屋内環境における小型 UAV の自己位置推定について、低計算不可の位置推定を実現するため、投下型ARマーカとARシステムによる自己位置推定手法を提唱した。また、本手法の実現性の検証のため、機体へのシステムの組み込みを行い、複数の要素検証試験を実施した。

本手法に基づく自己位置推定機能を備えた UAV の開発では、小型マルチロータ機を用いて、ARシステムの組み込みとマーカ投下機構の実装を行い、機体総重量 1929[g]でおよそ 6 分間飛行が可能な機体を開発した。

飛行試験では、投下マーカがロータ後流によって吹き飛ばすことを確認し、マーカの設置には機体からの投下だけでなく、別手法によってマーカを固定する必要があることを確認した。

ARシステムによる自己位置推定では、マーカ間の相対位置は、機体の誘導を満足する位置推定結果を得た。一方で、マーカに対するカメラの位置推定では、高さ方向の推定結果は良好であったが、水平方向の推定位置は、カメラの上昇によりカメラとマーカが離れるにつれて、実際の位置からずれるという問題が判明した。

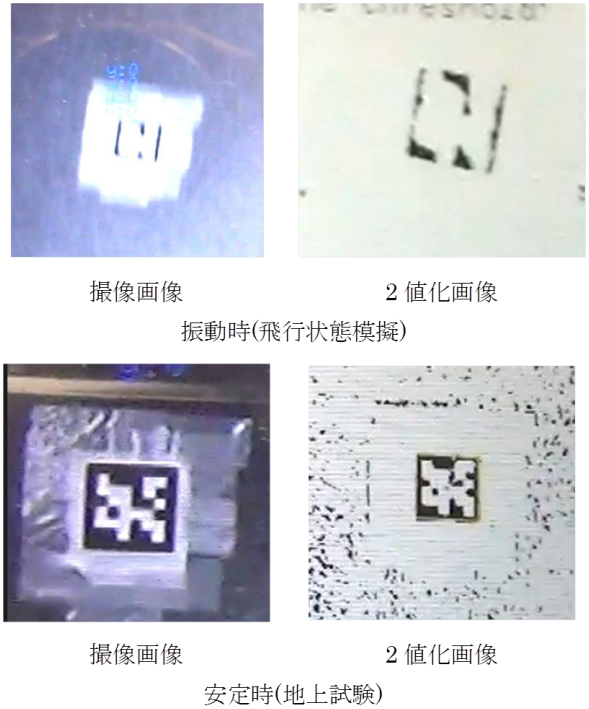


Fig.11 Captured Pictures by the USB Camera in Vibration and Stable Conditions.

また、飛行状態でのARシステムによる位置推定では、カメラの露光時間と機体の振動の影響によって、撮像画像が歪み、ARシステムがマーカを認識できなかった。今後振動対策とカメラの調整が必要である。

以上、実際の機体を用いた検証実験によって、投下型マーカによる自己位置推定手法の課題点の把握を行った。今後、開発で明らかになった問題点を改善し、さらなる位置推定精度の向上を試みる。

謝辞

本研究は、平成 25 年度航空宇宙技術開発機構(JAXA)、航空本部公募型研究「MAV が能動的に設置するマーカーを用いた MAV の自己位置推定」として平成 25 年 4 月からの 2 年間に渡って採択を受け、執り行われました。

文献

- [1] Shen, S., Michel, N., and Vijay, K. "Autonomous Multi-Floor Indoor Navigation with a Computationally Constrained MAV", *Proceeding of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 2011.
- [2] Krajnik, T., Matias, N., Faigl, J., Vanek, P., Saska, M., Preucil, L., Duckett, T. and Marta, M., "A Practical Multirobot localization System", *Journal of Intelligent and Robotic Systems 2014*, Volume 76, Issue 3-4, pp. 539-562, 2014.
- [3] Kato, H., Billingham, M., Morinaga, K. and Tachibana, K., "The Effect of Spatial Cues in Augmented Reality Video Conferencing", *Proceedings of the 9th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2001)*, New Orleans, LA, USA, 2001.
- [4] Wagner, D. and Schmalstieg, D., "Handheld Augmented Reality Displays", *Proceeding of IEEE Virtual Reality 2006*, 2006.