

# 実用性を備えた手のひらサイズ・完全オンボード処理 UAV のための 3次元自己位置推定手法の提案と全自動飛行の実現

此村 領\*<sup>1</sup>      堀 浩一\*<sup>1</sup>  
Konomura Ryo      Hori Koichi

\*<sup>1</sup> 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻

Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo

災害発生時や日常業務における情報収集を目的とした実用性を備えた超小型飛行ロボットの実現を目的に、単眼 CMOS カメラと FPGA を用いた高速な画像特徴点検出・記述手法と MCU, IMU を組み合わせた 3 次元自己位置推定手法の提案に加え、それらを搭載した合計 8 グラムのハードウェアの設計、製作、及び手のひらサイズのクアッドコプターによる全自動飛行実験について述べる。

## 1. はじめに

近年のコンピューターの小型化と高性能化に伴い、小型飛行ロボットの実験研究が進んでいる。ここ数年のホバリングロボットの小型化は著しく、肩幅程度のもや手のひらサイズのものまで登場するようになった。それに伴い、小型飛行ロボットの活躍可能な環境は大きく広まったと考えられる。小型化のレベルはすでに屋内環境での応用も物理的には可能という域に達しており、災害救助や非常時の情報収集といった実用的なミッションを遂行できる超小型飛行ロボットの活躍という新しい分野の開拓が期待できる。

飛行ロボットの持つ大きな特徴は地面の障害物や形状に依存せずに移動でき、視点に自由度があることである。一方で、車輪のオドメトリ情報を使うことができないため、自己位置推定を行うためには技術的な困難が存在する。したがって、関連研究では、飛行ロボットに GPS やカメラ、レンジセンサを取り付けたり、モーションキャプチャシステム [1] を用いて外部から飛行ロボットの位置を推定するといった手法が取り入れられてきた。

それらの研究の多くは地上のコンピューターのマシンパワーを活用していたが、最近では機体上のコンピューターとセンサのみを用いて、完全オンボードで自己位置推定を行いながら飛行することのできる小型飛行ロボットも登場した。この手法は主に 2 つに分類され、1 つ目は単眼カメラを用いた PTAM (Parallel Tracking and Mapping) [2] アルゴリズムを用いた方法 [3]、2 つ目はレーザーレンジセンサを用いた手法 [4] であり、双方ともに OS が搭載されたコンピューターを搭載している。これらの研究が示すことは、地上機なみのスペックを持った計算機をホバリングロボットに搭載することで、自己位置推定とホバリングコントロール動作を行うことが可能であるということである。

本研究の目的は、以上のようなホバリングロボットにおける自己位置推定と姿勢制御という要求仕様を、可能な限りローエンド向けのデバイスのみで構成されたハードウェアで達成し、その上でリアルタイムに動作可能なアルゴリズムを提案し、非常に小さなオンボード型ホバリングロボットとして統合することである。

このような取り組みを行う背景として、さらなるオンボード飛行ロボットの小型化を達成することはもちろんであるが、

連絡先: 此村 領, 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻,  
konomura at ailab.t.u-tokyo.ac.jp

連絡先: 堀 浩一, 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻,  
hori at computer.org

今後実用的な飛行ロボットに当たり前のように搭載されるべき自己位置推定・環境構築の機能の計算コストを大幅に減少させ、ミッションの遂行に必要な計算処理にリソースを割くことが重要になってくると考えるからである。

## 2. システムの概要

本研究で製作したホバリングロボットを図 1 に示す。市販の 4 つのブラシレスモーターとプロペラが ABS 樹脂製のフレームに搭載されており、中央に配置された基板 (図 2) には、単眼 CMOS カメラ、超音波センサ、姿勢センサ (3 軸加速度センサ、3 軸ジャイロセンサ、3 軸コンパスセンサ)、FPGA、MCU が搭載されている。この電子回路システムの総重量は 8g、バッテリーを含めた機体総重量は 110g である。

なお、本回路の試作コストは (実装する人の人件費を除いて) 1 万円程度となっている。



図 1: クアッドコプターロボット

システム全体の概要を図 2 に示す。図 2 は本セクションの実験のために設計した電子回路と、画像データから自己位置推定を行い、機体制御を行うまでの一連のプロセスの概要を示している。この一連のプロセスについて、以下に説明する。

まず、CMOS カメラからのイメージデータが 30fps の速度で FPGA にストリームされる。FPGA はそのストリームデータに対して特徴点検出処理 (FAST [5]) と記述処理 (BRIEF [6]) を行う。次に、そのデータを MCU の SRAM に DMA 転送 (Direct

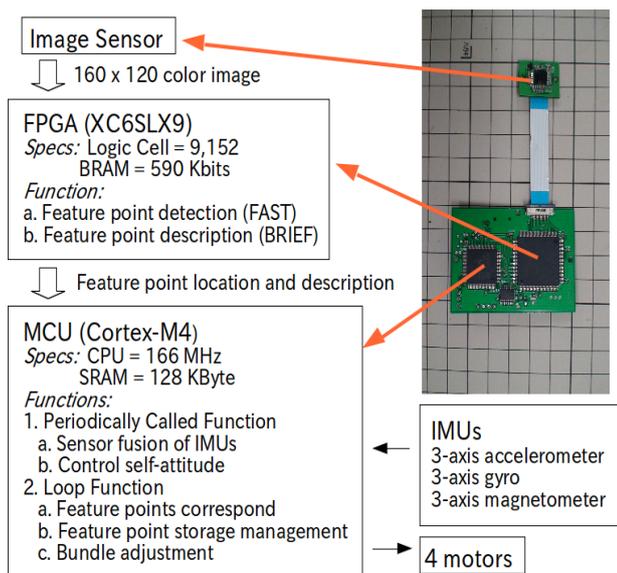


図 2: 電子回路とシステム概要

Memory Access) する。この情報には、2次元のイメージ座標における特徴点の座標と、256byteのBRIEF記述子が含まれる。なお、本研究で提案するFPGAの並列化処理は、生画像を保存するための外部メモリやDSP(Digital Signal Processor)を必要としない。

MCUのプロセスは大きく分けて2つに分類される。1つ目はタイマ割り込みによって周期的に呼び出される関数群で、加速度センサ、ジャイロセンサ、コンパスセンサから取得した情報のセンサフュージョンによって姿勢角度を得たのち、現在位置と目標位置から計算された目標角度についてPID制御を行う。2つ目は、タイマ割り込みから抜けた状態の空き時間で行う関数群で、FPGAから転送された特徴点座標とその記述子を元に、過去の特徴点との対応関係をとったのち、自己位置推定を行うというものである。

### 3. 実験

本研究で構築したシステム上で動作する自己位置推定の精度を調べるための実験を行った。装置には下向きカメラと超音波センサを並列に並べて配置し(図3)、地面に新聞紙を引いた状態で、奥行き方向に動かしたときの推定結果を比較した。なお、カメラには初期条件として長さ(cm)を画素間隔(pixel)に変換する係数を与えるため、時刻 $t=0$ で超音波センサと自己位置推定の値を一致させており、自己位置推定のロストは無い環境で行っている。図4から分かることとして、推定値は大きく外れることなく誤差10cm以内で推定できていることが分かる。また、静止状態の間でも推定誤差が蓄積することなく推定が行われていることが読み取れる。

なお、この手法を用いて実際にクアッドコプターを全自動させ、4つの目的地を与えて長方形に描かせたときに得られた軌跡を図5に示す。

### 4. おわりに

FPGAを用いた画像特徴点の検出と記述アルゴリズム、MCUでの3次元自己位置推定アルゴリズムの提案と実装を行った。そして機体下向きに取り付けたCMOSカメラと超音波センサ

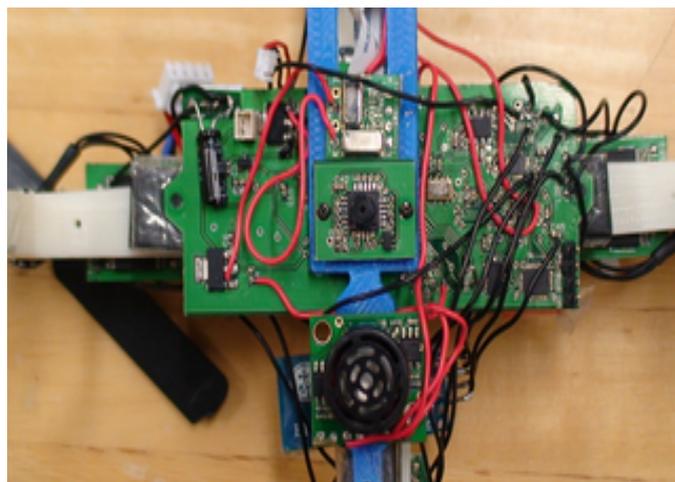


図 3: カメラ(中央)と超音波センサ(中央下)

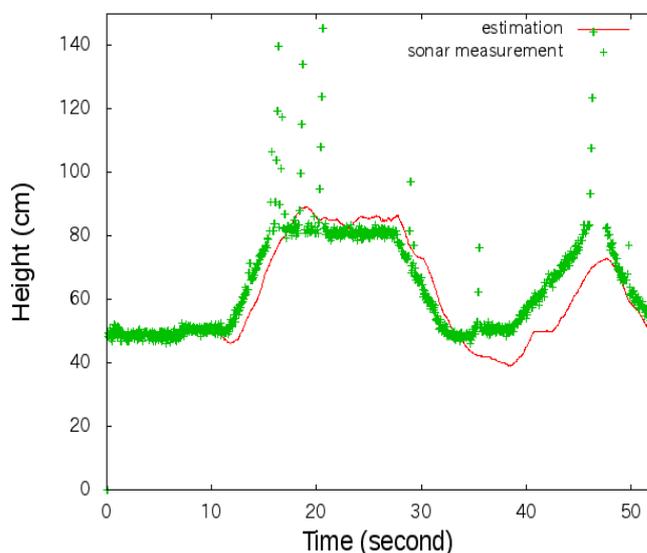


図 4: 超音波センサ(緑)と提案手法(赤)

情報を組み合わせ、地面形状が平坦で特徴点豊富な元での全自動飛行を地上コンピュータのアシストなしで達成した。

今後の課題として、まずは様々な地面形状の中でも自己位置推定が可能であるようなシステムを構築すること、自己位置推定以外の実用的なミッションのために必要なハードウェア、ソフトウェアの改良を行うことの2つが必要であると考えている。

### 参考文献

[1] N. Michael, D. Mellinger, Q. Lindsey, and V. Kumar, "The grasp multiple micro uav testbed," in IEEE Robotics and Automation Magazine, Sept. 2010.  
 [2] Georg Klein and David Murray, "Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces", International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07, Nara)

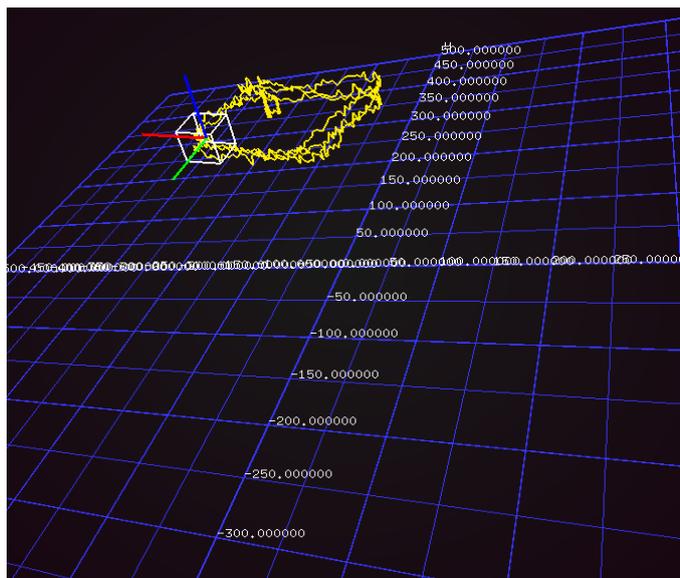


図 5: 全自動航行推定軌跡

- [3] M. Achtelik, S. Weiss, and R. Siegwart, "On-board IMU and Monocular Vision Based Control for MAVs in Unknown In-and Outdoor Environments," in Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2011.
- [4] Shaojie Shen; Michael, Nathan; Kumar, V., "Autonomous multi-floor indoor navigation with a computationally constrained MAV," Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on , vol., no., pp.20,25, 9-13 May 2011
- [5] E. Rosten, R. Porter, and T. Drummond. "Faster and better: A machine learning approach to corner detection." IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32:105-119, 2010.
- [6] M. Calonder, V. Lepetit, C. Strecha, and P. Fua. "Brief: Binary robust independent elementary features." In European Conference on Computer Vision, 2010.