

オンボード処理・超小型クアッドロータロボットのハードウェア・ソフトウェアの設計、製作

Designing Hardware And Software Of Very Compact and On-Board Quadrotor Toward Fully Automation

此村 領^{*1} 堀 浩一^{*1}
Konomura Ryo Hori Koichi

^{*1}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

In this paper, we describe the design and performance of hardware and software systems toward very compact and fully autonomous quadrotors(120g), where they can complete rescue or surveillance missions without external assistance systems like ground station computers, high-performance wire less communication devices or motion capture system.

1. はじめに

近年、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)の小型化、高性能化が著しく進んでおり、海外を中心に災害救助や監視任務、エンターテインメントを目的とした研究や製品化が進んでいる。

中でも小型マルチロータにおける研究の多くは、視覚フィードバックを用いたものである。地上ロボットとは異なり、車輪のオドメトリ情報に基づいた自己位置推定ができないことがその背景にあり、そのシステムは以下の2つに大別される。

1つ目は、外部の静止系に取り付けられた高速度モーションキャプチャシステムを用いて、マーキングされた UAV を数百 Hz で撮影し、各 UAV の制御命令を無線信号で伝達し、フィードバック制御を行うという方法である [1]-[6]。この方法を用いた群飛行によるパフォーマンスといった海外の研究が既に行われており、動画も公開されている。しかしながら、この方法ではモーションキャプチャシステムの可視範囲外 (10m 立方程度) の UAV の制御を行うことが出来ないという問題点もある。

2つ目は、機体自身に取り付けられたカメラを用いて、自己位置推定を行う方法である。この方法は古くからアルゴリズム面で研究がされていたが、近年の計算機の小型化、高性能化を背景に、小型の UAV を使ったハードウェアの実装例が研究 [7][8][9][10][11]、商業分野 [14][15] で増えている。また、近年では画像処理分野の研究の進歩により、PTAM に代表されるような高速な VSLAM(Visual SLAM) アルゴリズムが提案、公開されており、それを UAV に実装した最近の研究 [8] も存在する。

以上で述べたシステムの多くは、地上局の計算機を必要としている。その背景として、オンライン画像処理を中心とした計算と、周期的な姿勢推定と制御を機体上の計算機のみで行うことが難しいことが挙げられる。

本研究では、以上の従来研究に関する知識を前提に、以下の2つのアプローチを提案する。

1つ目は、姿勢制御や、様々なミッションを全て機体上で行う、すなわちオンボードミッションに特化した飛行ロボットのシステムを作ることである。地上機に頼ることなく、ロボットが自身で判断し行動することによって、通信距離に束縛されな



図 1: Our Palm-sized Quadrotor

い広範囲の環境でミッションを行うことが可能になる。

2つ目は、オンボードミッションの達成に必要な動作は実現しながらも、高度に集約された電子回路を設計することによって機体重量を極力小さくすることである。当然ながら、機体が大いほど地上機なみのスペックを持つペイロードを載せることが可能になる。しかしながらその結果として、障害物のある環境での行動の制限、エネルギー消費量の増大、機体の製造コストの増大といった問題が生じる。本研究ではそのような手段をとらないものとする。

研究の最終目的は、以上に述べたような全自動化された小型飛行ロボットを、震災時や、警備のための情報収集といった実際のミッションへ応用することである。

本研究では、そのような目的を達成するための設計解の一つとして、3つの工夫を行った。1つ目は後述するFPGA(Field-Programmable Gate Array)とMCU(Micro-Controller Unit)を中心とした、小型ながら強力な情報処理性能を持った電子回路の設計。2つ目は、自機の制御とミッションの達成という2つの要求仕様の実現のために、できる限り計算量を削り、最適化したアルゴリズムを実装した動作プログラムの設計。3つ目は、機体本体の設計を、現在新しいモノづくりのツールとして注目されている3Dプリンタによって製作し、市販されているモータやバッテリー、プロペラなども含め、製造コストの非常に小さな手のひらサイズのクアッドコプターロボットとして統合した(図1)。

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

2. システム

2.1 電子回路

電子回路全体 (図 2) はメイン回路 (図 3)、モータドライバ回路で構成されている。メイン回路は FPGA、DDRSDRAM、MCU、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、イメージセンサで構成されている。MCU は、周期的に呼び出される関数の中でセンサ情報に基づいた姿勢制御処理を行う一方で、周期関数を終えて時間に余裕がある状態で、ミッション達成のために必要な処理を行う。その中心となるのは画像処理であるが、情報量の多く発生するフロントエンド部分の信号処理を FPGA によって並列処理させることで、画像からリアルタイム (30fps) で特徴点検出 (FAST[12])、記述 (BRIEF[13])、対応関係の記述を行うことが出来る。その一方で、MCU の命令によって、FPGA を経由して DDRSDRAM に生画像を保存することが出来る。画像は 160x120 のカラー情報として得ている。なお、マイクロコントローラへの情報の伝達は DMA 転送によって行われるため、マイクロコントローラは CPU リソースをほとんど消費すること無く、画像情報を得ることができる仕様となっている。

2.2 機体

機体のベースは十字型の ABS 樹脂製であり、CAD データを市販の 3 D プリント [16] に出力させることにより作成した。各足の先には市販のブラシレスモータと直径 4 インチのプロ

ペラが搭載されており、中央には、電子回路、バッテリーを取り付けた。

2.3 プログラム

MCU 上のプログラムは、100Hz 周期で呼び出される姿勢制御関数と、それ以外の時間帯で行われるミッション処理関数に分けて設計した。後者は画像処理と、特徴点の変位量に基づく制御量の計算に費やしている。本研究では、機体の下向きにイメージセンサとレンジセンサを取り付け、床の特徴点を検出、記述し、時間領域に渡って変位量を計算することにより、機体の水平方向位置の推定を行っている。

姿勢制御関数では、以下のプロセスを行う。

1. 加速度センサ、ジャイロセンサ、コンパスセンサ、レンジセンサの値の取得
2. 加速度センサ、コンパスセンサにローパスフィルタ、ジャイロセンサにハイパスフィルタをかけ、統合することで現在の姿勢角度 (ロール・ピッチ・ヨー角度)、及びレンジセンサから現在の高度の推定を行う。
3. ミッション処理関数での視覚フィードバック処理から得られた現在の水平方向座標と、目標の水平方向座標を元に、目標姿勢角度を計算する。
4. 現在の姿勢角度と目標姿勢角度、現在の高度と目標高度を元に、PID 制御により 4 つのモーターへの制御量を決定する。

3. 実験

本研究で設計、製作で製作したクアッドロータロボットの諸元を表 1 に示した。また、イメージセンサから得られる画像上に特徴点、対応関係の可視化を施した例を図 4 に示す。

表 1: Basic Specification

メイン回路重量	9g
機体全重量	120g
機体長さ (max)	260mm
航続時間	10min
パワー側電力消費	24W
ロジック側電力消費	1.4W

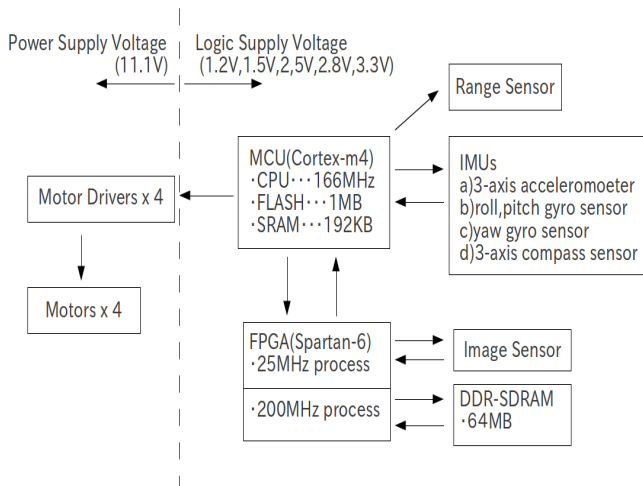


図 2: Circuit System Overview

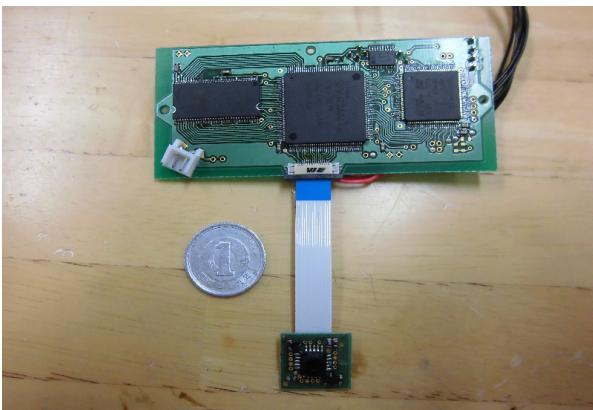


図 3: Size of main circuit board is about 7.9cm x 3.8cm.

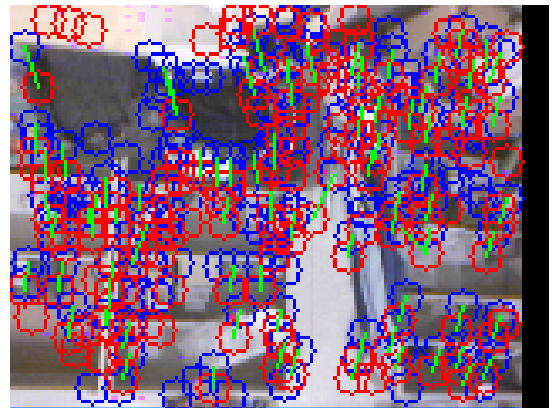


図 4: On-Board Image and Feature Points

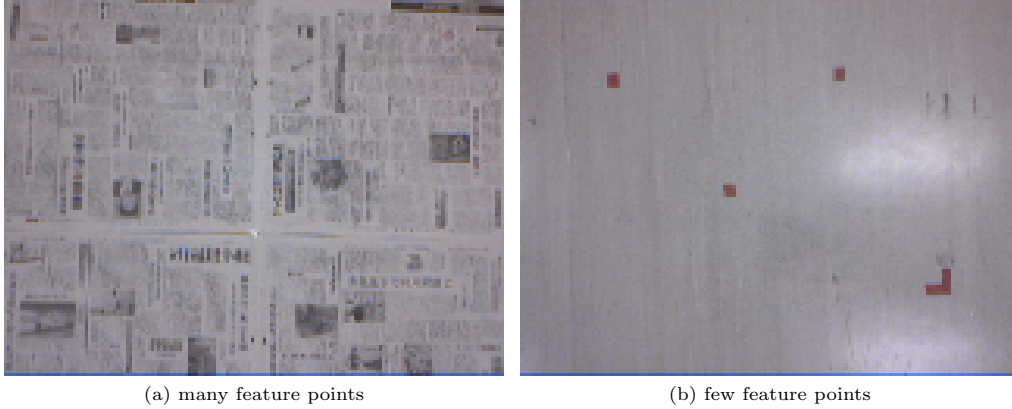


図 5: On-board image on the ground

表 2: Repeatability Performance

	$cs_n == 1$	$cs_0 == 1$	Success Times	Trial Times	Success Rate
No visual feedback	0.0%	0.0%	0	25	0.0%
Many Feature Points	97.9%	27.6%	24	25	96.0%
Few Feature Points	89.2%	2.8%	13	25	52.0%

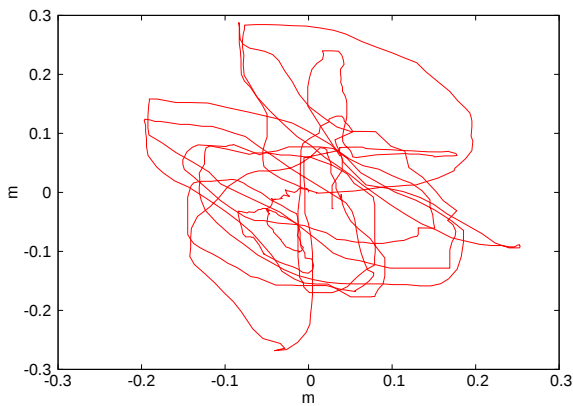


図 6: Self Estimated Position (many feature points)

以上で述べたクアドロータロボットを用いて、全自動下におけるホバリング性能を示すことを目的に、以下の実験を行った。

まず、床面には $0.8m \times 0.8m$ の領域を作成し、2種類の床面を用意した。1つは、特徴点が豊富に存在する環境として、新聞紙を敷き詰めた場合と、もう1つは特徴点が少ない環境として、ビニールテープを散らして貼り付けた場合とした。実際にホバリングさせたときのイメージセンサからの画像を図5に示す。それぞれの環境下での特徴点の検出数を平均すると、前者では61個、後者では8個の特徴点が発見された。

次に、全自動でのホバリング状態に入る前に、一定の高度を維持するまで手動コントローラを使って機体を誘導し、その後30秒間の全自動飛行状態を維持した。その際に領域内に止まることができれば成功、それ以外では失敗として処理し、それぞれの環境下で試行を繰り返した。

なお、自己位置推定は、計算機の性能の都合により、最近の2枚の画像と全自動モードに入った瞬間に得られた画像の3枚

での特徴点の対応関係を用いて計算しており、表2には、最近2枚の画像の対応関係の計算に成功した事象を ($cs_n = 1$)、最近の画像と全自動モードに入った瞬間に得られた画像の対応関係の計算に成功した事象を ($cs_0 = 1$) として表記している。その結果を可視化したものを図6に示した。

表2の結果から得られることとして、特徴点の多い環境下では、ほぼ確実に安定した水平方向のフィードバック制御が行われている一方で、特徴点での少ない環境下では、半分程度の成功率に留まった。この背景として、後者の場合では最近の画像と全自動モードに入った瞬間に得られた画像の対応関係の計算の成功率 ($cs_0 == 1$) が極めて低く、推定誤差を補正する効果がほとんど得られないことにより、自己位置の推定誤差が時間と共に増加していくことが背景にあると考えられる。

この問題の改善点として、対応関係の計算を撮像フレームベースで行うのではなく、各特徴点ベースで行う方法が考えられる。つまり、一般的なバンドル調整問題を解く方法にするべきであるが、その際に用いる特徴点と時間スケールをどのように選択し、限られた計算資源と記憶容量の中で解くかという問題が、今後の課題である。

4. 知能化に向けた取り組み

今後の研究の視野として、冒頭で述べた災害救助や監視警備といった実用化という目的に関連して、飛行ロボットが人間を自然な形で助けることのシステムにしたいと考えている。つまり、人間がいちいち細かい命令を送ることもなく、飛行ロボット自体の存在をあまり意識する必要の無い、より抽象度の高いインターフェースを持ったシステムを作り上げたいと考えている。

地図と自己位置の認識は最も基本的な問題であるが、その他にも経路の認識と通行、さらには目的地までの自動の経路設計といった機能についても考える必要がある。

本研究では画像ベースによって自己の位置を推定し、その場に留まるためのフィードバック制御に反映したが、その効果は

ホバリング角度のキャリブレーションという形で役に立てると考えられる一方で、画像ベースでの処理の限界として、特徴点の無い環境での運用が難しいという問題が存在する。この点については、レンジセンサを用いた二次元マップを中心とした、よりトポロジカルな自己位置推定、環境認識方法をとることで、計算コストの問題と環境依存性の問題双方を解決したいと考えており、現在は機械学習ベースのアプローチを模索している。

5. おわりに

本研究では、オンボード処理、手のひらサイズのクアッドロータロボットの設計、製作において実装したハードウェア・ソフトウェアの概要と、地上機を中心とした外部の助けを受けることなく、自機に装着された単眼イメージセンサからの視覚フィードバックのみを用いた全自動でのホバリング性能計測実験を通して、災害救助、監視警備といった実用的な応用への実現可能性を示した。今後はさらに自由度の高い問題に取り組み、飛行ロボットがより人間を自然な形で助けることのできるシステムにしたいと考えている。

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] D. Mellinger and V. Kumar, "Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors," in IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2011, pp. 2520-2525.
- [3] Robin Ritz, Mark W. Müller, Markus Hehn, and Raffaello D 'Andrea, "Cooperative Quadcopter Ball Throwing and Catching," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2012.
- [4] Mark W. Müller and Raffaello D 'Andrea "Critical subsystem failure mitigation in an indoor UAV testbed," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2012.
- [5] M. Hehn and R. D 'Andrea, "A flying inverted pendulum," in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011.
- [6] P. Bouffard, A. Aswani, and C. Tomlin, "Learning-based model predictive control on a quadrotor: On-board implementation and experimental results," in Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, May 2012, pp. 279-284.
- [7] M. Achtelik, A. Bachrach, R. He, S. Prentice, and N. Roy, "Autonomous navigation and exploration of a quadrotor helicopter in GPS-denied indoor environments," in Robotics: Science and Systems Conference, June 2008.
- [8] 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.
- [9] B. herisse, F. Russotto, T. Hamel, and R. Mahony, "Hovering flight and vertical landing control of a vtol unmanned aerial vehicle using optical flow," in International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept. 2008, pp. 801-806.
- [10] S. Saripalli, J.F. Montgomery, and G.S. Sakhatme. "Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle." In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington DC, Virginia, June 2002.
- [11] E. Altug, J. Ostrowski, and R. Mahony. "Control of a quadrotor helicopter using visual feedback." In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington DC, Virginia, June 2002.
- [12] 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.
- [13] M. Calonder, V. Lepetit, C. Strecha, and P. Fua. "Brief: Binary robust independent elementary features." In European Conference on Computer Vision, 2010.
- [14] "Ascending Technologies" <http://www.asctec.de/uav-applications/research/products/>
- [15] "AR-Drone" <http://ardrone.parrot.com/parrot-ardrone/select-siteh>
- [16] "UP! 3Dprinter" <http://www.pp3dp.com/>