

完全自律飛行ロボットによる物体との相互作用飛行

本田 泰¹

¹ 室蘭工業大学大学院 しくみ情報系領域

概要

4回転翼型の小型飛行ロボットに、物体の色からその位置とサイズを識別できるカメラと地上までの距離を測定できる超音波センサーを搭載し、完全自律飛行実験を行った。物体位置の認識速度は、飛行ロボットの姿勢安定のための制御レートの約8分の1と低速である。また、超音波センサーによる正確な測距のための速度は姿勢制御レートの約10分の1以下とさらに低速である。そのため、これらを直接姿勢制御アルゴリズムに組み込み、軌道制御を行うと、姿勢制御の速度低下を招き飛行自体が不安定化するという問題がある。本研究では、それぞれの制御のための感覚運動写像を独立させ、プロセス間通信をもちいて、物体と相互作用しながら飛行可能な完全自律飛行ロボットを実現した。

Completely autonomous flying robot interacting with an object

Yasushi Honda¹

¹ College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology, Japan

Abstract

We carried out experiments of a completely autonomous flight by a flying robot with a camera which recognizes an object position and its size and with ultrasonic sensor which measures distance from the ground. The recognition rate is about 1/8 and the measurement rate is less than 1/10 of attitude-control rate. Therefore a direct implement of these information into the attitude control brings instability of the flying robot. In this study, it is found that a **completely autonomous flight** is possible by combining independent sensory-motor mappings by use of communications between each process.

1 はじめに

マルチ回転翼型の無人航空機（ドローン）は、近年空撮や社会インフラ点検、あるいは農業利用など、その応用分野が爆発的に広がりを見せている [1]。その飛行姿勢は専用のフライトコントローラーボードなどを用いて、自律制御されており、非常に安定した飛行が可能である。

一方、それらの無人航空機では、飛行軌道はほとんどの場合、手動で操縦することで利用されている。あるいは、GPS やモーションキャプチャーなど、無人航空機の外部からの位置情報をもとに軌道が制御

されている。その意味では、完全自律飛行とは言えない。

本研究では、飛行ロボット外部からの情報を用いず、その内部のセンサーなどのみを用いて姿勢および軌道・高度を制御する飛行のことを完全自律飛行と呼ぶこととする。

樋口らは、ドローンに搭載したカメラからの画像情報をもとに、移動する人物の追跡に成功している [2]。画像情報のみから対象物までの距離を正確に測定することの困難さが指摘されている。また、姿勢制御と軌道・高度制御の制御レートの違いおよびその影響については検討されていない。



図 1: カメラ画像を通じて物体と相互作用する飛行ロボット

小型の無人航空機を複数の回転翼によって姿勢制御を行うという性質上、その制御レートは比較的高速である必要がある。時間遅れが、姿勢の安定性に大きく影響するからである [3, 4, 5] たえば、本研究で開発した飛行ロボットの姿勢制御レートは約 400Hz である。

一方、軌道制御の制御レートは、用いるセンサー類のレートにも依存するが、一般的に姿勢制御レートよりも低速である。例えば、GPS の場合 1~5Hz 程度である。

本研究では、カメラによる物体認識 (50Hz)、および超音波センサーによる高度測定 (14Hz) を姿勢制御 (400Hz) と組み合わせた感覚運動写像により、小型回転翼型飛行ロボットが物体と相互作用しながら完全自律飛行可能であることを示す。

2 飛行ロボット

飛行ロボットの機体および制御プログラムを、本研究において独自に開発した (図 1 参照)。

2.1 機体構成

飛行ロボットと基地コンピュータの間は無線 LAN で通信し、離陸・着陸および安全確保のため、スロットル値のみを送信する。飛行高度のみを手動制御可能である。

4つのプロペラ軸は 225mm × 235mm の長方形の頂点にある。また、飛行重量は 621g である。

飛行の性質は、機体の身体性によっても大きく変化する。機体の構成を自由に変更可能とするため、4mm 厚シナベニアから CNC を用いて本体、脚、腕などの部分を切り出して全体を構成した。

構成部品およびセンサーなどの更新レートを表 1 に示した。

内容	部品	rate(Hz)
ボード コンピュータ	BeagleBone Black	-
モータ	T-Motor MN2206-13 KV2000	-
アンプ	CASTL TALON 15A	500
プロペラ	DJI 8040(184mm 改)	-
加速度・ ジャイロ	MPU9150	1000
カメラ	PIXY CMUcam5	50
超音波センサ	SRF02	14

表 1: 構成部品およびデータ更新レート

2.2 並列感覚運動写像

姿勢制御、軌道制御および高度制御のための感覚運動写像を組み合わせる (図 2 参照)。それぞれの制御を異なるプロセスとし、ボードコンピュータ内でプロセス間通信を行うことで、複数の速度をもつ感覚運動写像による制御を、それぞれ速度低下することなく調和させることが出来た。

ブラックボックスである既存のフライトコントローラーを用いず、すべての制御プログラムは、C 言語および並列処理ライブラリ PVM を用いて作成した。従って、アルゴリズムおよびゲインの微調整なども自由に行うことが可能である。

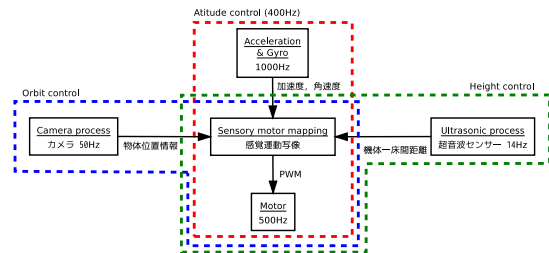


図 2: 速度の異なる 3 つの感覚運動写像を同時に調和させて実行する。

以下の 3 種類の感覚運動写像の和をとり、モーターへの出力値とした。

2.3 姿勢制御

本研究で用いた、姿勢制御のための時刻 t における 4 つのモーターに対する感覚運動写像の 1 例を次

式に示す.

$$r_i(t) = G_g \omega_x(t) + G_a \tanh^2 a_x(t) \int_{t-\Delta t}^t \omega_x(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここで, r_i は i 番目のモーター出力値である. G_g, G_a は, それぞれ機体の角速度に対するゲイン, および傾き角度に対するゲインである. ω_x はジャイロセンサーで観測された x 方向への角速度である. a_x は加速度センサーで観測された x 方向への加速度である.

機体が等速直線運動をしている場合, a_x は単純に機体の傾きに対応するが, 機体が加速度運動や回転運動している場合には, a_x は慣性力を含んでおり, 正確な機体の傾きに対応しない.

そこで, 第2項における角速度の Δt 秒間の積分によって機体の角度をもとめる. $\tanh^2 a_x$ は角速度の積分によって求められた機体角度が機体の実際の傾きによるものではない場合を排除するための a_x がゼロ近傍だけで0となり, それ以外では1となる関数である. Δt は機体の姿勢変化に要する時間よりも十分に長い値を用いる. 本研究では $\Delta t = 3.75\text{sec}$ とした.

2.4 軌道制御

カメラによって捉えた物体の位置に基づいて, 飛行ロボットの軌道制御を行った.

飛行ロボットの向きを, 画像中心から, 物体の x 軸方向への位置のずれに対して線形感覚運動写像を用いて制御した. この写像により, 常に物体の方向にカメラを向けるように飛行ロボットは運動する.

また, 画像中の物体の幅の目標幅 (33px) からのずれに対して線形感覚運動写像を用いた. 観測された物体の幅が, 目標幅よりも大きい場合, 物体に近づきすぎていると判断できるので, 前方 (カメラ側) のモーター出力を増加させ, 物体から遠ざかる反応を起こす. 一方, 目標幅より小さい場合にはその逆の反応を起こす. この写像により, 飛行ロボットは物体との距離を保とうとする相互作用が期待される.

2.5 高度制御

飛行高度は機体下部につけた超音波センサー (SRF02) により, 床までの距離を測定し, 飛行制御に用いた. 機体から床までの距離 (高度) 700mm を目標高度として, 測定された高度の値とその数値微分に対して線形感覚運動写像を用いて高度を制御した.

2.6 3つの制御の統合

姿勢制御のレートは 400Hz であるのに対し, 軌道制御のレートは 50Hz である. また高度制御のレートは 14Hz である. したがって, 姿勢制御の更新の際に, 軌道制御と高度制御の更新がなされない空白時間帯が生じる. その空白時間帯においては, 最新の物体位置と高度を用いて, 全体の軌道制御を行った. つまり, 物体の位置が更新されるまで, 過去の最新の位置を物体の位置とみなした.

また, 本研究では, 物体の位置を見失った場合, 物体は画像中心に存在するとみなした.

3 飛行実験

飛行ロボットの自律飛行は, 機体自体に搭載したセンサー類のみを用いて行う. GPS あるいはモーションキャプチャーなどの, 飛行ロボットの外部からの位置情報は用いずに完全自律制御を行った. すなわち, 姿勢制御, 軌道制御ともに人間による操作および外部からの情報なしに完全自律飛行を行った.

物体と相互作用しながら飛行する飛行ロボットの位置と物体の位置を観測するために, モーションキャプチャーを用いた [4]. 実験の様子を図3に示す.



図3: 飛行実験スナップショット. モーションキャプチャー装置 (MoCap) は, 飛行結果の測定に用いた. 自律飛行制御に MoCap は用いていない.

物体 (直径約 20cm のカラーボール) を人間が保持し, 任意の軌道で運動した. 物体の高さは約 700mm となるように保って物体の位置を動かした.

3.1 飛行高度

飛行ロボット高度の観測結果を図4に示す. 時刻 0 秒から 30 秒までの間は, 基地 PC から 4 つのモーターのスロットル値を手動で送り高度を安定させた. その後, 基地 PC からのスロットル制御は停止し, 約 45 秒の間, 完全自律飛行を行った.

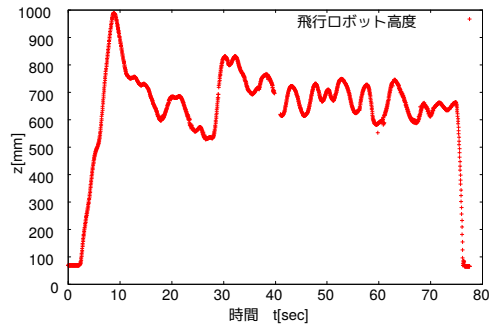


図 4: 飛行高度の時間変化. 0 から 30 秒までは出力の手動制御を行った. 31 秒から 75 秒までが完全自律飛行である.

本実験では、完全自律飛行によって、目標高度から $\pm 100\text{mm}$ 程度の安定性が得られた.

3.2 飛行軌道

飛行ロボットと物体の xy 平面内での軌道を図 5 (左) に示した. この軌道は、前節の高度制御の結果に示した飛行と同一の飛行によるものである.

本実験で位置測定に用いた MoCap は、原点の周囲 $\pm 2\text{m}$ が測定限界範囲であるため、物体を持った人間が飛行ロボットをその範囲内から外に出ないように意識しながら移動した結果、全体的に物体が飛行ロボットの周囲を巡るような軌道となっている.

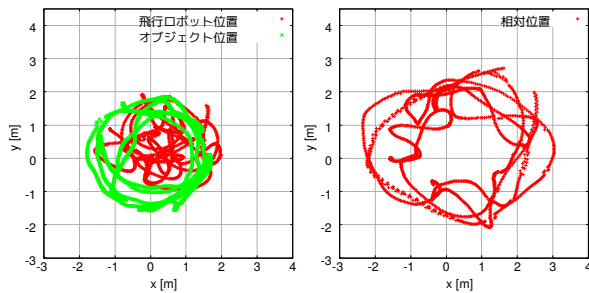


図 5: 飛行ロボットおよび物体それぞれの xy 平面内での軌道 (左) および飛行ロボットと物体との相対的な位置軌道 (右)

図 5 (右) に、飛行ロボットと物体の相対的な位置軌道を示した. 物体の幅が約 33px となるのは、物体とカメラの距離が約 1.5m の場合である. 物体と飛行ロボットの距離は約 $1\text{m}\sim 3\text{m}$ の距離を保ちながら完全自律飛行が可能であることがわかる.

4 まとめ

異なる更新レートを感覚入力とする複数の感覚運動画像を組み合わせる (並列感覚運動画像) ことで、飛行ロボットは物体と相互作用しながら完全自律飛行が可能であることを示した.

本研究では、単純に物体の幅を元に物体と飛行ロボット間の距離を制御した. 距離が目標距離より短い領域では 0.5m ほどのゆらぎであったが、距離が目標距離より長い領域でのゆらぎは 1.5m ほどと、相対的に大きなゆらぎが観測された. これは画像内の物体の大きさが距離に反比例しているためであると考えられる. すなわち、距離の短い領域では物体画像の幅の変化は大きく、逆に長い領域では、ほとんど変化しないため反応も小さいものとなったためであると考えられる.

物体との距離をより正確に保ちたい場合には、複数カメラによる立体視などを利用した距離の見積もりを行うことで、より物体との距離に関する精度を高めることが可能であると考えられる.

また、3次元空間で相互作用する自己駆動粒子としての飛行ロボットの可能性が示されたと考える.

本研究は、室蘭工業大学ロボットアリーナのサポートを受けて行われたので、ここに謝意を表す.

参考文献

- [1] 野波健蔵ほか, “飛躍するドローン”, (2016) (株) NTS.
- [2] Keita Higuchi, Yoshio Ishiguro and Jun Rekimoto, Flying Eyes: Free-Space Content Creation Using Autonomous Aerial Vehicles, ACM CHI EA 2011, pp.561-570,2011.
- [3] 佐藤宏樹, 橋本理寛, 本田 泰, “回転翼飛行ロボットの時間遅れ運動制御シミュレーション”, 第 19 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集 (2013)45-48.
- [4] 佐々木卓哉, 本田 泰, “モーションキャプチャを用いた回転翼飛行ロボットのリアルタイム姿勢計測”, 第 19 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集 (2013)49-52.
- [5] 本田 泰, “時間遅れの繰り込みによる感覚行動系の安定性”, 第 19 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集 (2013)53-56.