

無線カメラを有する小型ヘリコプタの高信頼ビジュアルサーボ：離着陸制御系の設計

Dependable visual servoing of a small-scale helicopter with a wireless camera: design of a take-off and landing controller

○久保田祐樹, 岩谷靖

○ Yuki Kubota, Yasushi Iwatani

弘前大学

Hirosaki University

キーワード： 小型ヘリコプタ (small-scale helicopter), ビジュアルサーボ (visual servoing), 高信頼制御 (dependable control), 自律移動ロボット (autonomous mobile robot), ビジョン (vision)

連絡先： 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3, 弘前大学 大学院理工学研究科
岩谷靖, Tel.: (0172)39-3697, Fax.: (0172)39-3697, E-mail: iwatani.at.cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

ヘリコプタは、垂直離着陸やホバリングなどの他の航空機には無い優れた移動特性を有する¹⁾。ヘリコプタを自律制御することにより、操縦士の搭乗の必要がなくなるため、火災地帯、火山地帯や原子力発電所などの危険地帯での飛行が可能となる。ヘリコプタを小型化することで、狭小空間の移動などのさらなる移動特性を付加することができる。一方で、小型ヘリコプタはペイロード（最大積載量）が小さいため、利用できるセンサに制限がある。

小型ヘリコプタの誘導制御において、ビジョンは有用な計測装置の一つである。小型ヘリコプタの視覚制御系の構成は、大きく三つに分類される。一つ目は、カメラと、GPS や IMU などのセンサを組み合わせたものである^{2, 3, 4, 5, 6)}。二つ目は、カメラをヘリコプタに搭載するの

はなく、外部設置されたカメラを使用するものである^{7, 8, 9, 10)}。三つ目は、ヘリコプタに搭載されたカメラを使用するものである^{11, 12, 13, 14)}。三つ目のオンボードカメラを使用した配置は、ペイロードが小さいことと、飛行空間の制約が無いという二つの理由により、小型ヘリコプタ制御系に適している。

本研究は、一台の小型無線カメラのみを利用して、小型ヘリコプタの制御を行う。具体的には、ヘリコプタに鉛直下向きに搭載した無線カメラで床に設置したマーカを撮影し、撮影画像を基にホバリング制御を行う。小型無線カメラを利用すると、通信ノイズや機体の揺れの影響で正しい画像情報を取得できないことがある。そこで筆者らは、異常画像を自動で判定する高信頼ビジュアルサーボ手法を提案し、小型ヘリコプタの自律的なホバリング制御を達成している¹⁵⁾。本稿では、ホバリング制御に追加して離

陸制御と着陸制御を自動化した，離陸から着陸までの一連の自律制御手法を提案する．制御系の構成上，ヘリコプタが一定の高度以下にある場合，カメラ視野と機体自身の影の影響で，正しい視覚情報を得ることができない．すなわち，離陸時と着陸時にはカメラからの視覚情報を利用することができない．そこで本稿では，フォードバック制御とフィードフォワード制御を組み合わせた離着陸制御手法を提案する．また，離陸時におけるフィードフォワード制御を高精度化するための手順についても議論する．

2. システム構成

システム構成を Fig. 1 に示す．制御対象であるロータ径 0.35 m の同軸二重反転式小型ヘリコプタに，下向きに無線カメラを搭載する．マーカとして，床に白色長方形用紙 ($0.297 \times 0.060 \text{ m}^2$) を設置する．仕様を Table 1 に示す．

カメラが撮影した画像は，受信機を通して計算機に取り込まれる．撮影画像から制御信号が計算され，信号変換器を介して制御信号が無線送信機に送られる．最後に，無線送信機からヘリコプタに制御信号が送信され，ヘリコプタが制御される．

本研究では，キャプチャ画像を 2 値化し，膨張収縮処理をした後，最大連結要素の抽出を行うことでマーカの画像情報を取得する．ただし，

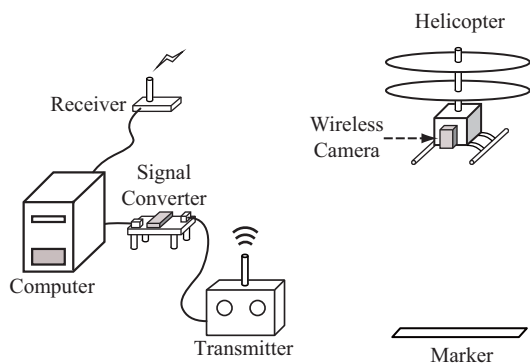


Fig. 1 System configuration

小型無線カメラの性能のため，正しいマーカ情報が常に取得できるとは限らない．

ヘリコプタには水平姿勢を保つためのメカニカルスタビライザが設置されている．そのため，ヘリコプタの三次元位置とヨー角を制御すれば良い．これらは，正しいマーカ画像を取得できている場合，マーカの横方向重心，縦方向重心，面積，傾きから計算できる．具体的には，白色面積を m ，第 i 画素のピクセル座標を (X_i, Y_i) ，白色画素の画素番号の集合を \mathbb{I} とするとき，

$$x = \frac{\sum_{i \in \mathbb{I}} X_i}{m} \quad (1)$$

$$y = \frac{\sum_{i \in \mathbb{I}} Y_i}{m} \quad (2)$$

$$z = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{m \sum_{i \in \mathbb{I}} X_i Y_i - \sum_{i \in \mathbb{I}} X_i \sum_{i \in \mathbb{I}} Y_i}{m \sum_{i \in \mathbb{I}} X_i^2 - (\sum_{i \in \mathbb{I}} X_i)^2} \quad (4)$$

より求まる．

3. 離着陸制御手法

本研究では，ヘリコプタに無線カメラを下向きに搭載している．このため，離陸直後や着陸直前など，ヘリコプタの高度が低い場合，カメラ視野や機体自身の影の影響でマーカの正しい画像情報を取得することができない．そのため，ヘリコプタとマーカの距離が近いときには，フィードフォワード制御によりカメラ画像を使用せず

Table 1 System specifications.

	System specifications.
Helicopter	Hirobo, X.R.B SR Shuttle
Camera	RF Systems, RC-12 240×740 pixels
Receiver	RF Systems, Morse typeS
Transmitter	Futaba, T6EXAP
PC	OS: Windows XP CPU: Intel Core 2 DUO 3.00 GHz Memory: 3.23 GB RAM

に制御を行う。自動離着陸制御の制御モードの流れを以下に示す。

離陸準備モード：このモードでは、ヘリコプタのロータを回転するが、離陸は行わない。制御入力は、ヘリコプタの水平方向（縦方向、横方向）と回転方向はゼロを、高さ方向はヘリコプタが離陸しない程度の値を設定する。後に議論するように、この準備動作により、次の離陸フィードフォワード制御時における意図しないヘリコプタの移動を減じることができる。一定時間後、次のモードへと移行する。

離陸フィードフォワード制御モード：ヘリコプタを離陸させ、マーカ画像を正しく認識できるまで高度を上昇させることを目的とする。制御入力は、水平方向と回転方向はゼロを、高さ方向は比例的に増加するように設定する。一定時間後、次のモードへと移行する。

離陸フィードバック制御モード：ヘリコプタの高度をさらに上げることを目的とする。制御入力はPD制御則に従って計算する。ここで、高さ目標値は比例的に増加するように設定する。ただし、文献¹⁵⁾で提案している異常画像判別法によって異常画像と判別された場合の制御入力は、水平方向と回転方向はゼロを、高さ方向は1ステップ前の制御入力値に定数を足したものを設定する。高さ目標値が、指定の目標値に達した場合、次のモードへと移行する。

ホバリング制御モード：文献¹⁵⁾の手法を用いる。

着陸フィードバック制御モード：離陸フィードバック制御と逆の手順で高度を下げる。ただし、PD制御則で得られた制御入力値に、ホバリング制御終了時の積分値を加える。

ヘリコプタが一定の高度まで降下した場合、次のモードへ移行する。

着陸フィードフォワード制御モード：ヘリコプタの高度をさらに下げ、着陸させることを目的とする。制御入力は、水平方向と回転方向はホバリング制御終了時の積分値を、高さ方向は比例的に減少するように設定する。一定時間が経過したら制御を終了する。

以下の手順で、離陸準備モードの有効性を確認する。制御に使用しているものと同じ無線カメラを、床から 2.5 m の高さの天井に設置し、離陸フィードフォワード制御開始時と終了時のヘリコプタの位置を天井のカメラ画像から計測する。この計測を、離陸準備ありと離陸準備なしの場合で10回ずつ行い、比較する。Fig. 2は、矢印原点を離陸フィードフォワード制御開始時の位置に、矢印先端を離陸フィードフォワード制御終了時の位置として意図しない移動距離を視覚化したものである。ただし、無線カメラのピクセルアスペクト比が2.2であるので、画像縦方向のピクセル値を2.2倍している。Table 2に平均移動距離、最大移動距離、最小移動距離を示した。また距離が分かりやすいように、地面において x 方向1ピクセルあたり 4.1×10^{-3} mであることを考慮し、ピクセル移動距離を 4.1×10^{-3} 倍した値も併記した。これら図と表より、離陸準備モードがある場合は、ない場合よりも水平方向の移動距離が少ない、つまりマーカ上から移動せずに離陸することができていることが分かる。以上から、離陸準備モードの有効性が確認された。

4. 離着陸制御実験

ヘリコプタの自動離着陸実験の結果を Fig. 3に示す。図の縦線は、制御モードの切替時刻を示している。Fig. 3より、離陸準備モードから離陸フィードフォワード制御モード途中まで、各値

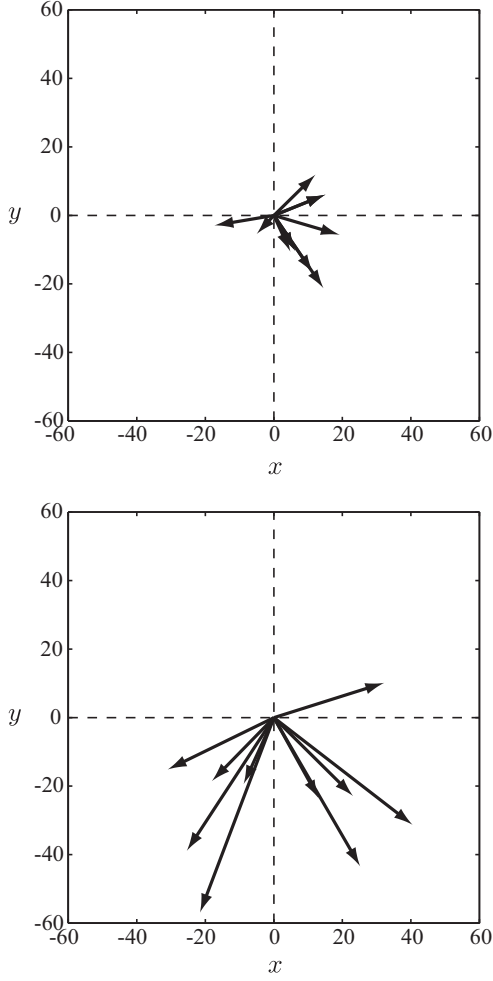


Fig. 2 Unintended motion at the feedforward takeoff mode. Top: Takeoff with preliminaries. Bottom: Takeoff without preliminaries.

Table 2 Travel distances of unintended motion at the feedforward takeoff mode.

	ave.	max.	min.	
with preliminaries	11.6	21.3	3.0	[pix.]
	0.048	0.087	0.012	[m]
without preliminaries	34.0	56.5	16.9	[pix.]
	0.139	0.232	0.069	[m]

がほとんど変化していないことがわかる。これは、カメラとマーカとの距離が近いためにマーカの正しい画像情報が得られていないことを示している。ただし、離陸フィードフォワード制御モード中はカメラ画像を使用したフィードバック制御は行っておらず、また、離陸フィードバック制御モードが始まる時にはヘリコプタは十分な高度まで上昇していてマーカ全体をカメラで捉えることができているため、制御に問題は生じない。また、Fig. 3より、水平方向はカメラ画像の縦幅240ピクセル、横幅704ピクセルの範囲内でヘリコプタが飛行していること、 z の値は離陸、着陸時ともに滑らかに変化していること、 θ の値の変化は全体的に小さく、離陸フィードフォワード制御モード中に値が大きく変化するものの、離陸フィードバック制御モードが始ま

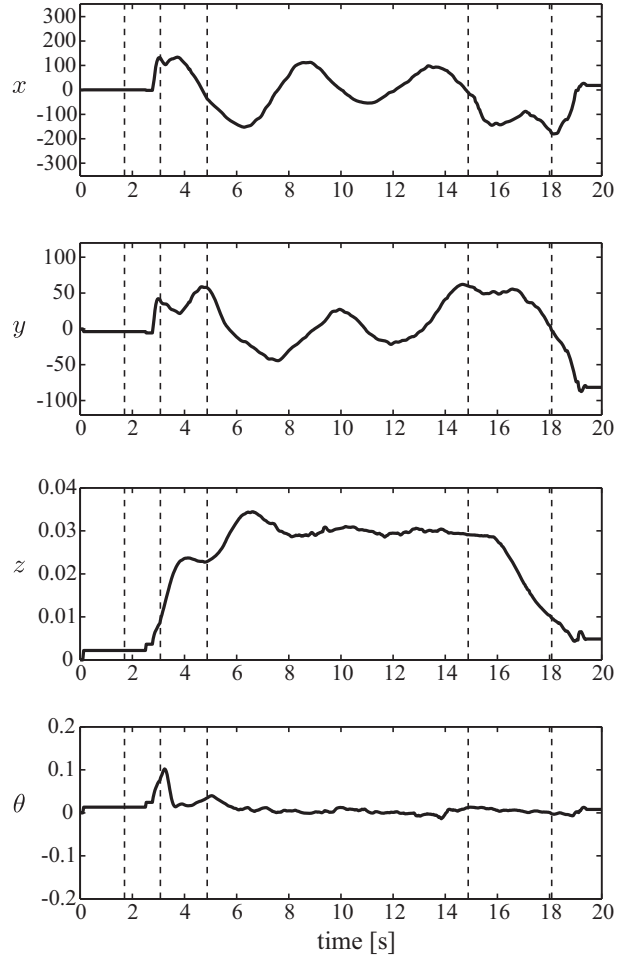


Fig. 3 Time series of the position and rotation of the helicopter during the flight.

るとすぐに0に収束していくことがわかる。以上から、精度よく離着陸制御を行うことができたと言える。

5. おわりに

本研究では、ヘリコプタの自動離着陸制御手法を提案し、その有効性を実験により確認した。提案手法は、文献¹⁵⁾で提案した高信頼ビジュアルサーボ手法を基にしたフィードバック手法と、カメラがマーカ情報を正しく取得できない高度で有効なフィードフォワード手法を組み合わせたものである。また、離陸時に離陸準備を行うことで、精度よくヘリコプタの離着陸を行うことができることを示した。

謝辞 本研究は、公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団の研究助成により行われました。

参考文献

- 1) 野波. 回転翼系空中ロボティクス. 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 8, pp. 890–896, 2006.
- 2) S. Saripalli, J. F. Montgomery, and G. S. Sukhatme. Visually-guided landing of an unmanned aerial vehicle. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 3, pp. 371–381, 2003.
- 3) L. O. Mejias, S. Saripalli, P. Cervera, and G. S. Sukhatme. Visual servoing of an autonomous helicopter in urban areas using feature tracking. *Journal of Field Robotics*, Vol. 23, No. 3, pp. 185–199, 2006.
- 4) T. Templeton, D. H. Shim, and S. Sastry. Autonomous vision-based terrain mapping using an unmanned aerial vehicle. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- 5) K. Çelik, S.-J. Chung, M. Clausman, and A. K. Somani. Monocular vision SLAM for indoor aerial vehicles. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
- 6) Syaril Azrad, Farid Kendoul, and Kenzo Nonami. Visual servoing of quadrotor micro-air vehicle using color-based tracking algorithm. *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 255–268, 2010.
- 7) E. Altug, J. P. Ostrowski, and C. J. Taylor. Control of a quadrotor helicopter using dual camera visual feedback. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 329–341, 2005.
- 8) K. Watanabe, Y. Yoshihata, Y. Iwatani, and K. Hashimoto. Image-based visual PID control of a micro helicopter using a stationary camera. *Advanced Robotics*, Vol. 22, No. 2-3, pp. 381–393, 2008.
- 9) J. P. How, B. Bethke, A. Frank, D. Dale, and J. Vian. Real-time indoor autonomous vehicle test environment. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 28, No. 2, pp. 40–50, 2008.
- 10) Dwi Pebrianti, Farid Kendoul, Syaril Azrad, Wei Wang, and Kenzo Nonami. Autonomous hovering and landing of a quad-rotor micro aerial vehicle by means of on ground stereo vision system. *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 269–284, 2010.
- 11) Glenn P. Tournier, Mario Valentiy, Jonathan P. How, and Eric Feron. Estimation and control of a quadrotor vehicle using monocular vision and moiré patterns. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2006.
- 12) Ryosuke Mori, Kenichi Hirata, and Takuya Kinoshita. Vision-based guidance control of a small-scale unmanned helicopter. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007.
- 13) N. Guenard, T. Hamel, and R. Mahony. A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle. *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 24, No. 2, pp. 331–340, 2008.
- 14) S. P. Soundararaj, A. K. Sujeeth, and A. Saxena. Autonomous indoor helicopter flight using a single onboard camera. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
- 15) Yuki Kubota and Yasushi Iwatani. Dependable visual servo control of a small-scale helicopter with a wireless camera. In *the 15th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 476–481, 2011.

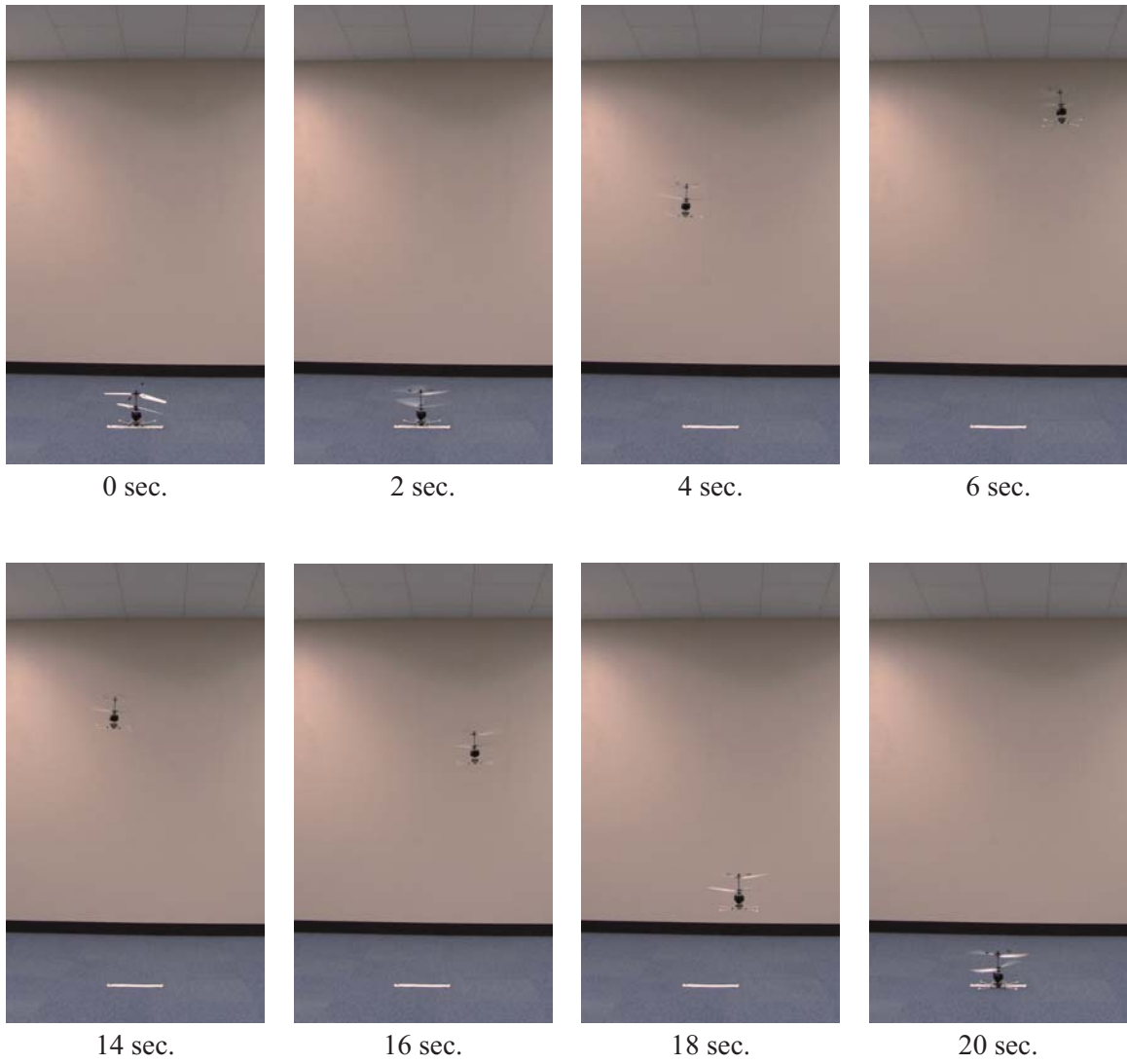


Fig. 4 Snapshots of the helicopter during the flight.