

入力飽和を考慮した動的視覚オブザーバによる位置姿勢制御[†]

—小型自律飛行ロボットへの適用—

河合 宏之*・村尾 俊幸**

鶴尾 有生***・藤田 政之****

Visual Motion Observer-based Pose Control with Input Saturation

—Application to Small Unmanned Aerial Vehicles—

Hiroyuki KAWAI*, Toshiyuki MURAO**,

Yusei TSURUO*** and Masayuki FUJITA****

This paper investigates the visual feedback control by the visual motion observer with input saturation. Firstly, using standard body-attached coordinate frames (the world frame, camera frame and object frame), we present the visual motion error system which consists of the estimation error system and the pose control error system. Next, we propose the control law with the input saturation. After that, stability analysis of the closed-loop system is discussed in the sense of Lyapunov. Although the proposed control law cannot be designed based on the passivity of the visual motion error system explicitly, the skew-symmetric property of the visual motion error system plays an important role in the stability analysis. Finally, experimental results are shown in order to confirm the proposed method by using AR.Drone as a small unmanned aerial vehicle.

Key Words: Visual Feedback Control, Visual Motion Observer, Input Saturation, Lyapunov Stability, Unmanned Aerial Vehicle

1. はじめに

近年，ロボットを用いたレスキュー活動や情報収集が様々な機関で研究されており，災害時に二次災害を防ぐための新たな救援活動や情報収集手段として期待されている^{1) 2)}．情報収集のための小型飛行ロボットの多くはカメラを搭載しているため，得られる視覚情報を自律飛行に用いることで，小型

飛行ロボットを視覚フィードバックシステムとして捉えることができる．視覚情報をフィードバックループに組み込んだ制御は視覚フィードバック制御と呼ばれ，画像ベース法と位置ベース法に大別できることが古くからよく知られており^{3) 4)}，従来の制御理論を単にロボットに適用するだけでなく，視覚フィードバックシステムを含むロボット特有の問題を制御理論の枠組みで捉えたロボット制御理論における安定性や制御性能解析にも期待が高まっている⁵⁾．

この小型自律飛行ロボットに対する視覚フィードバック制御は，ますます盛んに研究されており，Bourquardez ら⁶⁾は安定性が保証された画像ベース法を用いてその有効性を実験により比較および検証し，安定性を保証していても制御則によっては 3 次元 (特に光軸方向) の振る舞いが望ましくならない場合があると報告している．これは，もともと画像ベース法では 3 次元での偏差を考慮していないこと⁷⁾が原因のひとつとして考えられる．Altug ら⁸⁾は小型自律飛行ロボットに取り付けられたカメラと地面に設置されたカメラの 2 つを用いて位置を推定する位置ベース法を提案し，実験によりその有効性を示している．また，Azrad ら⁹⁾はカルマンフィルタと提案する画像トラッキングアルゴリズムにより 1 つのカメラで位置を推定し，その有効性を屋外での実験により示している．ただし，これら位置ベース法の従来研究において安定性解析は陽にはおこなわれていない．一方，筆者らは従来

[†] 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2011) で発表 (2011・12)

* 金沢工業大学工学部 野々市市扇が丘 7-1

** 産業技術大学院大学創造技術専攻 東京都品川区東大井 1-10-40

*** 金沢工業大学大学院工学研究科 野々市市扇が丘 7-1

**** 東京工業大学大学院理工学研究科 東京都目黒区大岡山 2-12-1

* College of Engineering, Kanazawa Institute of Technology, 7-1, Nonoichi, Ishikawa

** Master Program of Innovation for Design and Engineering, Advanced Institute of Industrial Technology, 1-10-40, Higashiohi, Shinagawa-ku, Tokyo

*** Graduate Program in Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology, 7-1, Nonoichi, Ishikawa

**** Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo

(Received January 21, 2006)

(Revised March 1, 2006)

研究¹⁰⁾において、動的視覚オブザーバを用いて安定性を保証した位置ベース法の制御則を提案しており、小型自律飛行ロボットに適用することも可能である。しかし、制御偏差を直接フィードバックしていることから、偏差が大きい場合には入力が過大となる状況が考えられ、画像ベース法と同様に望ましくない摂動を引き起こすことが問題として挙げられる。また、入力に制約を持つシステムに対する研究は活発におこなわれており¹¹⁾、最近では入力飽和を考慮した視覚フィードバックシステムに対するモデル予測制御も提案されているが、理論的な安定性は議論されていない¹²⁾。

そこで、本研究では入力飽和を考慮した動的視覚オブザーバによる視覚フィードバック制御を考える。具体的には飽和型三角関数を用いたカメラ速度入力の設計法を提案する。そして、提案する制御則と動的視覚オブザーバを含む閉ループ系の平衡点の安定性を議論する。さらに小型自律飛行ロボットとして AR.Drone を用いた実システムを構成し、位置姿勢制御実験により提案する制御則の有効性を検証する。

2. 視覚偏差システム

本研究では Fig. 1 に示すような 3 次元の視覚フィードバックシステムについて考える。座標系は、基準座標系 Σ_w 、カメラ座標系 Σ_c 、および観測対象座標系 Σ_o の 3 つを考える。このとき、基準座標系からみたカメラの位置姿勢および観測対象の位置姿勢をそれぞれ $g_{wc} = (p_{wc}, e^{\hat{\xi}_{\theta_{wc}}})$ と $g_{wo} = (p_{wo}, e^{\hat{\xi}_{\theta_{wo}}})$ で表す。ここで、任意の 2 つの座標系を Σ_A, Σ_B としたとき、 $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ は Σ_A の原点から Σ_B の原点への位置ベクトルを表し、 $e^{\hat{\xi}_{\theta_{ab}}} \in SO(3)$ (ただし、 $\xi_{ab} \in \mathcal{R}^3, \theta_{ab} \in \mathcal{R}$ であり、簡単化のため混乱がない限り添え字は θ のみにつけて表記する) は Σ_A を基準とした Σ_B の姿勢を意味する¹³⁾。演算子 $\wedge$ (wedge) はパラメータベクトル表現を行列表現に変換する演算子であり、3 次元の場合は 3 次元ベクトルを 3×3 の歪対称行列へ写像し $a \in \mathcal{R}^3$ と $b \in \mathcal{R}^3$ に対して $\hat{a}b = a \times b$ を満たす。また、その逆写像は $\vee$ (vee) で定義される (詳細は付録を参照のこと)。 g_{ab} は混同しない限り、よく知られた 4×4 行列の同次表現

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}_{\theta_{ab}}} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

として用いる¹³⁾。基準座標系からみたそれぞれの位置姿勢と同様に、カメラ座標系からみた観測対象の位置姿勢を $g_{co} = (p_{co}, e^{\hat{\xi}_{\theta_{co}}})$ と表す。

これらの座標系から、視覚フィードバックシステムにおける 3 つの座標系間に成り立つ剛体運動の表現を導出する。まず、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{co} は

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \quad (2)$$

で表される。また、カメラ座標系からみた観測対象の相対速度は、 g_{co} を時間微分することで、

$$V_{co}^b = -\text{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \quad (3)$$

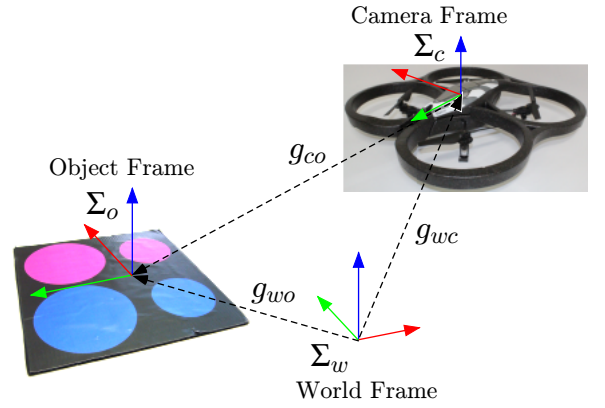


Fig. 1 Visual feedback system.

のように導かれる¹⁰⁾。ここで、 $V_{ab}^b = (g_{ab}^{-1} \dot{g}_{ab})^\vee = [(v_{ab}^b)^T (\omega_{ab}^b)^T]^T \in \mathcal{R}^6$ は剛体運動のボディ速度を表しており、 $\text{Ad}_{(g_{ab})} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ は同次表現 g_{ab} の随伴写像である¹³⁾。なお、ボディ速度 V_{ab}^b において、下付きの ab が座標系を表すのに対し、上付きの b はボディ速度を意味している。

位置ベース法の視覚フィードバック制御の制御目的は、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{co} を目標相対位置姿勢 g_d (本研究では時不変とする) に一致させることとなる。しかし、カメラから得られる視覚情報 $f = [f_{x1} f_{y1} \dots f_{xm} f_{ym}]^T \in \mathcal{R}^{2m}$ は画像特徴量として観測対象に取り付けられた m 点 ($m \geq 4$) の特徴点の画像面上での x 座標と y 座標である。したがって、カメラから直接計測することができない連続的に変化する相対位置姿勢 g_{co} を動的システムを通じて推定する必要がある。

そこで次の運動モデルを用いて動的視覚オブザーバを構築する。

$$\bar{V}_{co}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e \quad (4)$$

ただし、 $\bar{g}_{co}$ は g_{co} の推定値であり、 u_e は推定値を収束させるための入力である。

次に、カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の真値と推定値の偏差 $g_{ee} = (p_{ee}, e^{\hat{\xi}_{\theta_{ee}}})$ を

$$g_{ee} = \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (5)$$

と定義する。また、この推定偏差に対する推定偏差ベクトルを $e_e \in \mathcal{R}^6$ として、 $e_e := [p_{ee}^T r_{ee}^T]^T$ と定義する。ただし $r_{ee} := \text{sk}(e^{\hat{\xi}_{\theta_{ee}}})^\vee$, $\text{sk}(e^{\hat{\xi}_{\theta_{ee}}}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}_{\theta_{ee}}} - e^{-\hat{\xi}_{\theta_{ee}}})$ である。画像ヤコビアン J の疑似逆行列とカメラから得られる視覚情報 f 、推定値により構成される視覚情報 $\bar{f}$ より、推定偏差ベクトルは

$$e_e = J^\dagger(f - \bar{f}) \quad (6)$$

で与えられる¹⁰⁾。このとき、偏差ベクトル e_e を状態とした推定偏差システムは、(5) 式を時間微分することで

$$V_{ee}^b = -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \quad (7)$$

と導出される．

次にオブザーバから得られる推定値を用いて制御目的を達成するための制御偏差システムについて考えていく．まず，推定偏差と同様に制御偏差を

$$g_{ec} = g_d^{-1} g_{co} \quad (8)$$

と定義し，制御偏差ベクトルを $e_c := [p_{ec}^T r_{ec}^T]^T$ と定義する．(8) 式では，目標相対位置姿勢 g_d が既知であることを考慮すると g_{co} のみが未知情報である．一方，オブザーバから得られる推定相対位置姿勢 $\bar{g}_{co}$ と推定偏差ベクトル e_e を用いて，相対位置姿勢 g_{co} は近似的に求めることができる¹⁴⁾． g_{ec} を時間微分すると，制御偏差システムは

$$V_{ec}^b = -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} \left(\text{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wc}^b \right) + V_{wo}^b \quad (9)$$

となる．推定偏差システム (7) と制御偏差システム (9) をあわせ動的視覚オブザーバを用いた視覚偏差システムを次のように構成する．

$$\begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \quad (10)$$

ただし，入力と状態はそれぞれ $u := [(\text{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wc}^b)^T u_e^T]^T$ ， $x := [e_c^T e_e^T]^T$ で定義される．出力を $y := -x$ と定義すると， $V_{wo}^b = 0$ のもとで入力 u と出力 y の間に受動性が成り立つことが示される¹⁰⁾．

3. 入力飽和を考慮した視覚フィードバック制御

従来の制御則¹⁰⁾では，視覚フィードバックシステムが有する受動性に基づき，制御偏差 e_c を直接フィードバックすることで $x = 0$ を達成していた．しかし，制御偏差 e_c が非常に大きな値をとった場合は制御入力も大きくなり，結果としてカメラ速度が過大となるため，実システムへ適用すると望ましくない振動が起ってしまうことがあった^(注1)．そこで本研究では，飽和特性を有する関数（以下，飽和関数と呼ぶ）を用いることで，ある値で制御入力の値が飽和するような視覚フィードバック制御則を提案する．

姿勢制御偏差は $\|r_{eci}\| \leq 1$ ， $(i = x, y, z)$ であるため，位置制御偏差のみに飽和関数を介したものをを用いて制御入力を設計する．はじめに文献 15) に基づき位置制御偏差に対する飽和型三角関数 φ としてつぎのものを考える．

$$\varphi(p_{ec}) = \begin{bmatrix} \sin(p_{ecx}) & \sin(p_{ecy}) & \sin(p_{ecz}) \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

ただし

$$\sin(p_{eci}) = \begin{cases} \alpha_i & p_{eci} \geq \frac{\alpha_i \pi}{2} \\ \alpha_i \sin\left(\frac{p_{eci}}{\alpha_i}\right) & |p_{eci}| < \frac{\alpha_i \pi}{2} \\ -\alpha_i & p_{eci} \leq -\frac{\alpha_i \pi}{2} \end{cases} \quad (i = x, y, z) \quad (12)$$

(注 1) 観測対象がカメラ視野に収まっていることを前提としているため，振動が起るのは x, y 軸方向よりも光軸である z 軸方向における偏差の影響によるところが大きい．

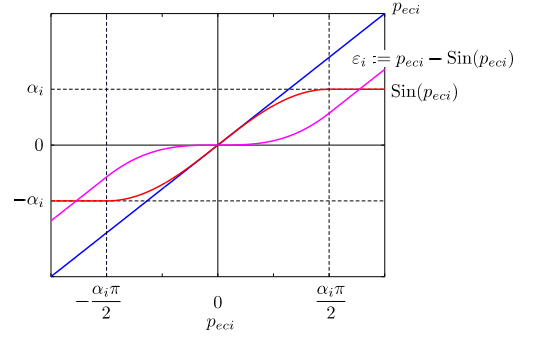


Fig. 2 Saturation function for the position error.

であり， $\sin(p_{eci})$ のパラメータ $\alpha_i > 0$ は飽和領域と飽和させる値の両方を設定する役割をもつ^(注2)．この関係を Fig. 2 に示す．

ここで，飽和を考慮した制御偏差ベクトルとして

$$e_{\varphi c} = \begin{bmatrix} \varphi(p_{ec}) \\ r_{ec} \end{bmatrix} \quad (13)$$

を考える．この飽和特性を与えた制御偏差ベクトル $e_{\varphi c}$ を用いて，制御入力 u をつぎのように提案する．

$$u = \begin{bmatrix} K_{\varphi c} & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\varphi c} \\ e_e \end{bmatrix} \quad (14)$$

ただし，正定行列 $K_{\varphi c} := \text{diag}\{K_{\varphi}, K_{cr}\} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ と $K_e := \text{diag}\{K_{ep}, K_{er}\} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ はそれぞれ制御偏差と推定偏差に対するゲイン行列であり，その要素は $K_{\varphi} := \text{diag}\{k_{\varphi x}, k_{\varphi y}, k_{\varphi z}\} \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ ， $K_{cr} := \text{diag}\{k_{crx}, k_{cry}, k_{crz}\} \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ ， $K_{ep} := \text{diag}\{k_{epx}, k_{epy}, k_{epz}\} \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ ， $K_{er} := \text{diag}\{k_{erx}, k_{ery}, k_{erz}\} \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ である．

このとき，安定性に関するつぎの定理が導かれる．

《定理 1》 観測対象が運動していない ($V_{wo}^b = 0$) 場合，視覚偏差システム (10) と制御入力 (14) で構成される閉ループ系の平衡点 $x = 0$ は漸近安定である．

(証明) リアプノフ関数候補として

$$V = \frac{1}{2} \|p_{ec}\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}_{ec}}) + \frac{1}{2} \|p_{ee}\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}_{ee}}) \quad (15)$$

を考える．関数 $\phi(e^{\hat{\theta}_{ei}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である．

エネルギー関数 V の時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V} &= p_{ec}^T \dot{p}_{ec} + r_{ec}^T e^{\hat{\theta}_{ec}} \omega_{ec}^b + p_{ee}^T \dot{p}_{ee} + r_{ee}^T e^{\hat{\theta}_{ee}} \omega_{ee}^b \\ &= \begin{bmatrix} p_{ec}^T & r_{ec}^T & p_{ee}^T & r_{ee}^T \end{bmatrix} \times \\ &\quad \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\hat{\theta}_{ec}} & 0 \\ 0 & e^{\hat{\theta}_{ec}} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} e^{\hat{\theta}_{ee}} & 0 \\ 0 & e^{\hat{\theta}_{ee}} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(注 2) 飽和させる値の大きさは後に示す制御偏差に対するゲイン K_{φ} で調整可能であるため，望ましい飽和領域をもとにパラメータ α_i を設定することが妥当である．

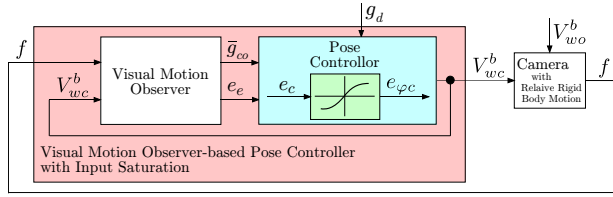


Fig. 3 Block diagram of the visual feedback system.

(16)

となる．(10)(14) 式を代入することで

$$\dot{V} = - \begin{bmatrix} e_c^T & e_e^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Ad}_{(-p_{ec})} & 0 \\ 0 & \text{Ad}_{(-p_{ee})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{\varphi c} e_{\varphi c} \\ K_e e_e \end{bmatrix} \quad (17)$$

が導かれる．ここで $p_{ec}^T \hat{p}_{ec} K_{cr} r_{ec} = -p_{ec}^T (K_{cr} r_{ec})^\wedge p_{ec} = 0$ と $p_{ee}^T \hat{p}_{ee} K_{er} r_{ee} = -p_{ee}^T (K_{er} r_{ee})^\wedge p_{ee} = 0$ を用いると

$$\begin{aligned} \dot{V} &= - \begin{bmatrix} e_c^T & e_e^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{\varphi c} & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\varphi c} \\ e_e \end{bmatrix} \\ &= - \begin{bmatrix} e_{\varphi c}^T & e_e^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{\varphi c} & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\varphi c} \\ e_e \end{bmatrix} - \varepsilon^T K_{\varphi} \varphi(p_{ec}) \end{aligned} \quad (18)$$

となる．ただし $\varepsilon := [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T$, $\varepsilon_i := p_{eci} - \sin(p_{eci})$, $(i = x, y, z)$ である．ここで Fig. 2 から明らかなように $\varepsilon_i \cdot \sin(p_{eci}) \geq 0$ であるので， $x \neq 0$ において $\dot{V} < 0$ が成り立つため，ラサールの不変性原理より平衡点 $x = 0$ の漸近安定性が示される．

定理 1 より，入力飽和を考慮した視覚フィードバック制御則の安定性が示された．本手法では入力飽和を考慮したため，視覚偏差システムの有する受動性に陽に基づいているわけではないが，安定性の議論においてシステムの有する歪対称性が重要な役割を果たしている．本研究の制御則は従来研究¹⁰⁾の制御則と異なり，制御偏差が大きくとシステムに摂動を与えるような入力を未然に抑えることができる．また，カメラ速度の上限値をパラメータとしてあらかじめ設定できることから，モータなどをその性能の範囲内で駆動させることが可能であるため，実システムへの適用を考えると非常に有効な制御則であると考えられる．Fig. 3 にこのシステムのブロック図を示す．

4. 検証実験

本実験では小型自律飛行ロボットのホバリングを前提とし，3次元の位置と z 軸周りの姿勢に対して提案する制御則の有効性を検証する．

4.1 小型自律飛行ロボットの概要と実験環境

本実験では小型自律飛行ロボットとして，2台のカメラ(水平カメラと垂直カメラ)が標準搭載された Parrot 社の AR.Drone を用いる．本実験で使用した垂直カメラは画角

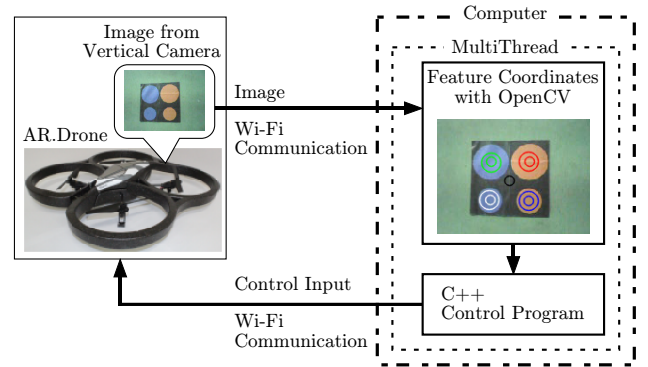


Fig. 4 Experimental system.

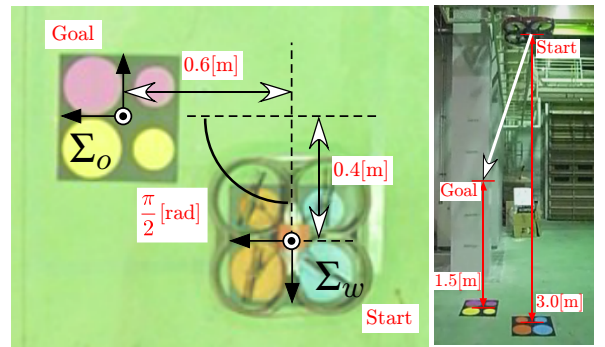


Fig. 5 Experimental environment.

64[deg] の CMOS イメージセンサを用いており，画像取得周期の公称値は 60[fps] である．実験した際の実測での画像取得周期は約 64[fps] のため画像の更新周期が約 16[ms] であるのに対し，動的視覚オブザーバを用いた閉ループシステム全体の処理周期は約 0.6[ms] である．Fig. 4 に本実験の実システム構成図を示す．垂直カメラで取得した画像は，AR.Drone に搭載されたアドホックモードで動作する 802.11b/g 集積モジュールにより PC に送られる．得られた画像から，画像処理ライブラリ OpenCV を用いて，視覚情報を抽出する．視覚フィードバック制御則は Visual Studio 2008 (Microsoft Co.) により C++ 言語を用いてプログラミングされ，カメラ速度入力をロール・ピッチ・ヨー角に対する入力に変換した後，AR.Drone に送信する．

位置姿勢制御実験をおこなうため，Fig. 5 に示すような 2 つの観測対象を用意した．観測対象上の 4 つの円の中心を特徴点とする．1 つはスタート地点上空にホバリングして初期値を合せるための基準座標系として，もう 1 つは目標値となる観測対象として使用した．観測対象は基準座標系に対して $p_{wo} = [-0.6 \ 0.4 \ 0.0]^T$ [m] だけ離れており， $\theta_{woz} = \pi/2$ [rad] だけ回転して設置してある．ここで，スタート地点での初期位置姿勢を $p_{co}(0) = [-0.6 \ 0.4 \ 3.0]^T$ [m] , $\theta_{coz}(0) = \pi/2$ [rad] とし，ゴール地点での目標相対位置姿勢を $p_d = [0.0 \ 0.0 \ 1.5]^T$ [m] , $\theta_{dz} = 0$ と設定する．制御則には用いないが，検証のため AR.Drone の位置姿勢は上方向と横方向に設置する観測カメラを用いて計測している．なお，本

実験で用いた AR.Drone は空中で完全に静止させる事が困難であるため、予備実験を通して x 軸と y 軸の位置においては目標値から $\pm 0.05[\text{m}]$ の範囲に、 z 軸の位置においては定常値から $\pm 0.05[\text{m}]$ の範囲に、また z 軸の回転においては $\pm 0.05[\text{rad}]$ の範囲に収まった時点で収束したと判断する。

4.2 実験結果

本研究で提案する制御則の各ゲインを $K_{\varphi c} = \text{diag}[1.25, 1.25, 0.5, 1.0, 1.0, 1.0]$, $K_e = 12I$ とした。 x 軸方向と y 軸方向の偏差よりも z 軸方向の偏差が大きいため、 z 軸方向の偏差を $|p_{ecz}| > 1$ で飽和させるために $\frac{\alpha_z \pi}{2} = 1$ と設定した。また x 軸方向と y 軸方向に関しては、 $\frac{\alpha_x \pi}{2} = \frac{\alpha_y \pi}{2} = 3$ と設定した。

Fig. 6 に提案する制御則による AR.Drone のトラジェクトリーを示す。上図が AR.Drone を上方から観測したトラジェクトリーであり、下図は横から観測したトラジェクトリーである。図中の四角は AR.Drone の 4 つのローター中心を結んだ外形を表しており、* 印が右後方のローター中心を意味している。AR.Drone が $\pi/2[\text{rad}]$ だけ回転しながら目標位置に近づいていることから、制御目的が達成されていることがわかる。

Fig. 7 は提案する制御則における z 軸方向の制御入力と位置制御偏差を示している。上図の実線が入力飽和を考慮した制御入力であり、破線が入力飽和を考慮しない場合に与えられる制御入力である。また、下図は z 軸方向の位置制御偏差 p_{ecz} を示している。上図より、制御入力が $\pm 0.318 (= k_{\varphi z} \alpha_z = 0.5 \times 0.637)$ で抑えられていることが確認される。また、下図より $t = 1.427[\text{s}]$ までは $|p_{ecz}| > 1$ であり、設定した範囲において飽和関数により入力が抑えられていることがわかる。

比較のため、入力飽和を考慮していない受動性に基づく視覚フィードバック制御則¹⁰⁾を実装して位置姿勢制御実験をおこなった。ゲインは上記の本研究で提案する制御則と同様に $K_c = \text{diag}[1.25, 1.25, 0.5, 1.0, 1.0, 1.0]$, $K_e = 12I$ とした。Fig. 8 の上図が AR.Drone を上方から観測したトラジェクトリーであり、下図は横から観測したトラジェクトリーである。Fig. 6 と Fig. 8 のトラジェクトリーを、横軸を時間軸としてプロットしたものを Fig. 9 に示す。Fig. 9 は上から順に x 軸、 y 軸、 z 軸における位置偏差と z 軸の姿勢偏差を示しており、 z 軸の位置偏差においては $0.09[\text{m}]$ の定常偏差がみられる。位置に関して $\pm 0.05[\text{m}]$ の範囲に、 z 軸の回転に関して $\pm 0.05[\text{rad}]$ の範囲に収まるまでの時間は、提案手法においては $t = 7.21[\text{s}]$ で従来法¹⁰⁾においては $t = 21.2[\text{s}]$ であった。従来法においても提案手法と同様に制御目的は達成されているものの、 z 軸方向に急激に下降し目標値付近では x 軸方向と y 軸方向に AR.Drone が大きく振れ、結果として望ましくない振動がみられる。Fig. 6 と同様に滑らかに下降させて振動を抑えるにはゲインを小さくせざるを得ないが、偏差が小さくなったときには入力も小さくなるため、安定時間が長くなるというトレードオフが発生してしまう。

以上より、入りに飽和特性を考慮した視覚フィードバック

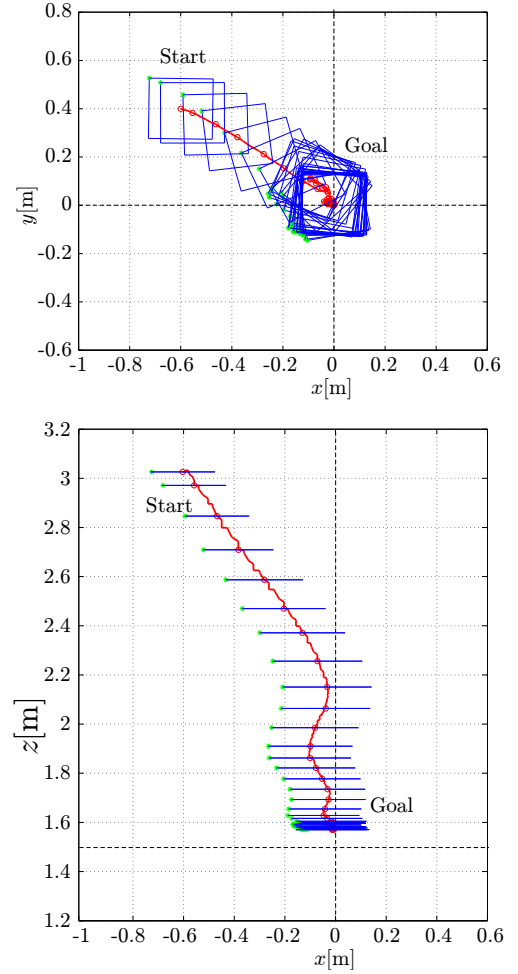


Fig. 6 Trajectory of AR.Drone by the proposed control law: top: top view; bottom: side view.

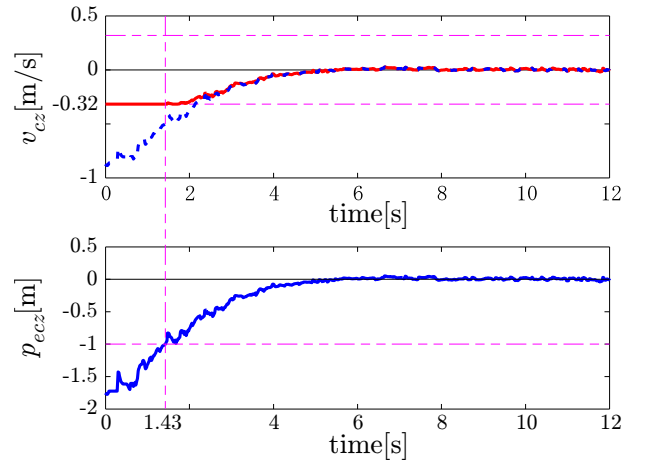


Fig. 7 Control input and the pose control error for the translation of z -axis.

制御を実システムに適用することで、入力が過大になる場合に引き起こす望ましくない振動を抑制可能であることを確認した。なお、実験の様子は Web site¹⁶⁾の動画で確認されたい。

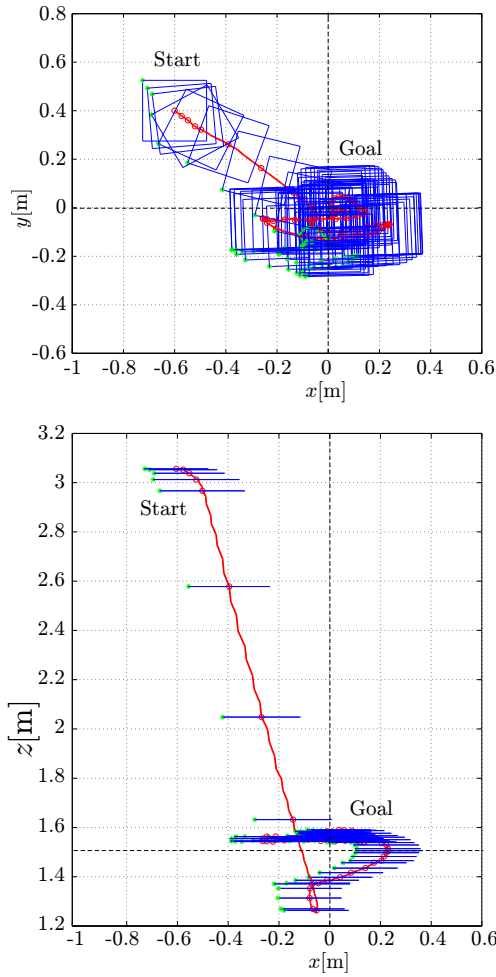


Fig. 8 Trajectory of AR.Drone by the previous control law¹⁰⁾: top: top view; bottom: side view.

5. おわりに

本研究では実システムへ実装することを考慮し、入力に飽和特性を与えた動的視覚オブザーバによる視覚フィードバック制御則を提案した。そして、提案した制御則による閉ループ系の平衡点の安定性をリアプノフの安定定理に基づき議論した。小型自律飛行ロボットとして AR.Drone を用いて視覚フィードバックシステムを構築し、位置姿勢制御実験により提案する制御則の有効性を検証した。

参考文献

- 1) 田所諭：レスキューロボットの技術チャレンジ日本ロボット学会誌，**28-2**，134/137 (2010)
- 2) 鈴木ほか：小型自律飛行ロボットを用いた災害時における情報収集システムの構築，日本ロボット学会誌，**26-6**，553/560 (2008)
- 3) F. Chaumette and S. A. Hutchinson: Visual Servoing and Visual Tracking,” In: B. Siciliano and O. Khatib (Eds), Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, 563/583 (2008)
- 4) 橋本浩一：ビジュアルサーボ-I -ビジュアルサーボとは，システム/制御/情報 (講座)，**53-9**，411/416 (2009)
- 5) 山北昌毅：ロボット制御理論概論，日本ロボット学会誌，**27-4**，

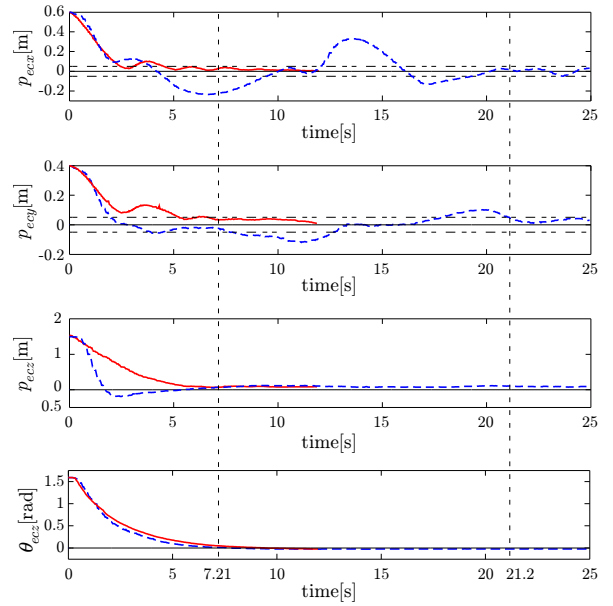


Fig. 9 Pose control error e_c (Proposed method: Solid, Previous method¹⁰⁾: Dashed).

370/374 (2009)

- 6) O. Bourquardez, R. Mahony, N. Guenard, F. Chaumette, T. Hamel and L. Eck: Image-Based Visual Servo Control of the Translation Kinematics of a Quadrotor Aerial Vehicle, IEEE Trans. on Robotics, **25-3**, 743/749 (2009)
- 7) F. Chaumette: Potential Problems of Stability and Convergence in Image-Based and Position-Based Visual Servoing, D. J. Kriegman, G. D. Hager and A. S. Morse (Eds), The Confluence of Vision and Control, Springer-Verlag, 66/78, (1998)
- 8) E. Altug, J. P. Ostrowski and C. J. Taylor: Control of a Quadrotor Helicopter Using Dual Camera Visual Feedback, The International Journal of Robotics Research, **24-5**, 329/341 (2005)
- 9) S. Azrad, F. Kendoul and K. Nonami: Visual Servoing of Quadrotor Micro-Air Vehicle Using Color-Based Tracking Algorithm, Journal of System Design and Dynamics, **4-2**, 255/268 (2010)
- 10) M. Fujita, H. Kawai and M. Spong: Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L_2 -gain Performance Analysis, IEEE Transactions on Control Systems Technology, **15-1**, 40/52 (2007)
- 11) 拘束条件を考慮したシステム制御の新展開特集号，システム/制御/情報，**47-11** (2003)
- 12) G. Allibert, E. Courtial and F. Chaumette: Predictive Control for Constrained Image-based Visual Servoing, IEEE Transactions on Robotics, **26-5**, 933/939 (2010)
- 13) R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press (1994)
- 14) T. Murao, H. Kawai and M. Fujita: Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Fixed Camera Systems, Electronics and Communications in Japan, **94-8**, 1/11 (2011)
- 15) S. Arimoto: Fundamental problems of robot control: Part I, Innovations in the realm of robot servo-loops, Robotica, **13-1**, 19/27 (1995)
- 16) <http://www.kanazawa-it.ac.jp/kawai/research/ARDrone/ARDronemovies.html>

《付 録》

A. 同次表現と随伴写像

演算子 $\wedge$ (wedge) は パラメータベクトル表現を行列表現に変換する演算子であり, その逆写像は $\vee$ (vee) で定義される. 座標空間 $\mathcal{R}^3$ と 3 次元回転群 (special orthogonal group) $SO(3) = \{e^{\hat{\xi}\theta} \in \mathcal{R}^{3 \times 3} : e^{\hat{\xi}\theta} e^{-\hat{\xi}\theta} = e^{-\hat{\xi}\theta} e^{\hat{\xi}\theta} = I, \det(e^{\hat{\xi}\theta}) = +1\}$ の積空間である 3 次元特殊ユークリッド群 (special euclidean group) を $SE(3) = \{(p, e^{\hat{\xi}\theta}) : p \in \mathcal{R}^3, e^{\hat{\xi}\theta} \in SO(3)\}$ と表す. 3×3 の歪対称行列の集合が $SO(3)$ のリー代数 (Lie algebra) であり $so(3) = \{S \in \mathcal{R}^{3 \times 3} : S^T = -S\}$ と表記する. 同様に $SE(3)$ のリー代数が $se(3)$ であり, $se(3) = \{(v, \hat{\omega}) : v \in \mathcal{R}^3, \hat{\omega} \in so(3)\}$ である. 6 次元ベクトル $V = (v, \omega) \in \mathcal{R}^6$ に対して, $\hat{V} \in se(3)$ を

$$\hat{V} = \begin{bmatrix} \hat{\omega} & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

と表す. また, その逆写像 $\vee$ (vee) を用いると

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega} & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{\vee} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

となる. このとき剛体運動における重要な性質として

$$(g\hat{V}g^{-1})^{\vee} = \text{Ad}_{(g)}V \quad (\text{A.3})$$

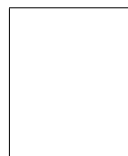
が成り立つ. ここで, $\text{Ad}_{(g)}$ は同次表現 $g = (p, e^{\hat{\xi}\theta}) \in SE(3)$ に対する随伴写像であり

$$\text{Ad}_{(g)} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta} & \hat{p}e^{\hat{\xi}\theta} \\ 0 & e^{\hat{\xi}\theta} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

と表される¹³⁾.

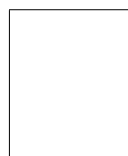
[著 者 紹 介]

河 合 宏 之 (正会員)



2001 年金沢大学大学院自然科学研究科電子情報システム専攻博士前期課程修了, 2004 年金沢大学大学院自然科学研究科機能開発科学専攻博士後期課程修了, 同年法政大学情報技術 (IT) 研究センターポスドクター. 2005 年金沢工業大学講師. 2010 年同准教授. 2008 年 IEEE TCST Outstanding Paper Award. 視覚フィードバック制御とその応用に関する研究に従事. 博士 (工学). IEEE CSS などの会員.

村 尾 俊 幸 (正会員)



2005 年金沢大学大学院自然科学研究科電子情報システム専攻博士前期課程修了, 2008 年東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻博士後期課程修了. 2006 年産業技術大学院大学研究員, 2007 年同助教. 視覚フィードバック制御に関する研究に従事. 博士 (工学). IEEE CSS などの会員.

鶴 尾 有 生 (学生会員)



2011 年金沢工業大学工学部ロボティクス学科卒業. 同年金沢工業大学大学院工学研究科博士前期課程入学. 飛行体の視覚フィードバック制御に関する研究に従事. 計測自動制御学会の会員.

藤 田 政 之 (正会員)



1984 年早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了. 1985 年同博士後期課程中退. 同年金沢大学助手, 同講師, 助教授を経て, 1992 年北陸先端科学技術大学院大学助教授. 1999 年金沢大学教授. 2005 年東京工業大学教授. 2011~2012 年 IEEE CSS Vice President, 2012 年 SICE 制御部門長, 2008~2011 年 IEEE CSS Board of Governor, 2005~2006 年 SICE 理事, 2010 年 IEEE MSC General Chair, IEEE TAC, IEEE TCST, Automatica, Asian J. Control の Associate Editor, SICE JCMSI の Editor. 2008 年 IEEE TCST Outstanding Paper Award, 環境・エネルギーのためのシステム制御, 受動性に基づく視覚と制御の融合, ロバスト制御とその応用の研究に従事. 工学博士. IEEE CSS などの会員.