

# ナビゲーション関数を用いた 視覚フィードバック制御による障害物回避

正員 村尾 俊幸<sup>\*,\*\*</sup> 非会員 河合 宏之<sup>\*\*\*</sup>  
非会員 鶴尾 有生<sup>\*\*\*</sup> 非会員 藤田 政之<sup>\*\*\*\*</sup>

Obstacle Avoidance of Visual Feedback Control via Navigation Function

Toshiyuki Murao<sup>\*,\*\*</sup>, Member, Hiroyuki Kawai<sup>\*\*\*</sup>, Non-member, Yusei Tsuruo<sup>\*\*\*</sup>, Non-member,  
Masayuki Fujita<sup>\*\*\*\*</sup>, Non-member

This paper investigates passivity-based pose control via an obstacle avoidance navigation function for three-dimensional (3-D) eye-in-hand visual feedback systems. Firstly, we describe the representation of a relative pose and a camera model. Next, a stabilizing pose control law for a 3-D visual motion error system which a time-varying desired pose can be applied to is proposed. Moreover, a path planner to be appropriate for the visual motion error system is designed through an obstacle avoidance navigation function to keep collision-free. It should be noted that we develop a visual motion observer for path planning in order to estimate the position of the obstacles from the camera. The main contribution of this paper is to provide that the path planner which can achieve obstacle avoidance during the servoing is designed for the 3-D eye-in-hand visual feedback control. Finally, we present simulation results and actual nonlinear experimental results using an aerial vehicle in order to verify control performance of the proposed control scheme with obstacle avoidance.

キーワード：視覚フィードバック制御，障害物回避，ナビゲーション関数，受動性，安定性，飛行ビークル

**Keywords:** visual feedback control, obstacle avoidance, navigation function, passivity, stability, aerial vehicle

## 1. はじめに

近年，視覚フィードバック制御は，工場をはじめとしたあらかじめ可動範囲内の状況を整えられるような環境への適用だけでなく，より複雑な環境や幅広い分野，例えば医療分野や福祉分野，環境分野においても適用が見込まれるようになってきている<sup>(1)</sup>。視覚フィードバック制御の研究

は古くからおこなわれており，ロボットを制御対象とした研究成果も継続的に数多く発表されている<sup>(2)-(4)</sup>。

一方，その適用範囲を広げるために障害物回避問題を考えることは重要であり，ロボットを目標点まで移動させる問題において，障害物の判断に視覚情報を用いる手法は非常に有益となる。視覚フィードバック制御の研究と同様にロボットの障害物回避の研究も古くから注目されており，なかでも Rimon ら<sup>(5)</sup>によって提案されたナビゲーション関数を用いる手法は，障害物回避に対する非常に有効な手法として知られている。ナビゲーション関数は局所的な最小点への収束を回避できる人工的なポテンシャル関数であり，この関数を利用することで経路探索と軌道生成を同時におこなうことができる。

ナビゲーション関数と視覚フィードバック制御を融合させた研究では，Cowan ら<sup>(6)</sup>が視覚情報を組み込んだナビゲーション関数を，ロボットマニピュレータへのトルク入力に直接用いる手法を提案している。さらに，Chen ら<sup>(7)</sup>は2-1/2D 視覚フィードバック制御則に，また著者ら<sup>(8)</sup>は安定化予測視覚フィードバック制御則に，画像空間上のナビゲーション関数を用いて生成した目標軌道を適用させる手法をそれぞれ提案している。しかし，これまでのナビゲ-

\* 早稲田大学 理工学術院

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1  
Faculty of Science and Engineering, Waseda University  
3-4-1 Okubo Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555

\*\* 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8  
Japan Science and Technology Agency, CREST  
4-1-8 Honcho Kawaguchi-shi, Saitama 332-0012

\*\*\* 金沢工業大学 工学部

〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1  
College of Engineering, Kanazawa Institute of Technology  
3-1 Yatsukaho Hakusan-shi, Ishikawa 924-0838

\*\*\*\* 東京工業大学 大学院理工学研究科

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama Meguro-ku, Tokyo 152-8550

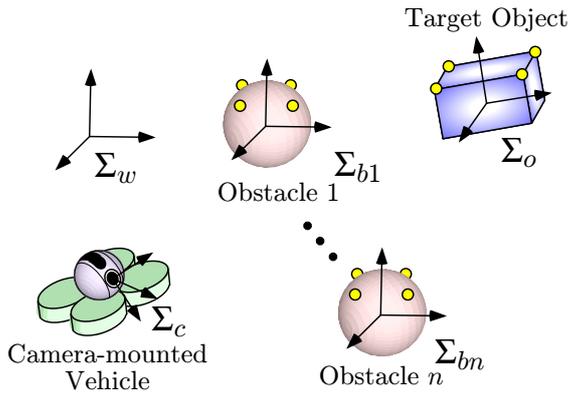


Fig. 1. Visual feedback system with an eye-in-hand configuration.

シオン関数と視覚フィードバック制御を組み合わせた研究は、制御の途中でカメラ視野から画像特徴点を外さないことを目的として提案されたものであり、障害物回避を目的とした手法ではなかった。

一方、ナビゲーション関数を用いずに障害物回避と視覚フィードバック制御を組み合わせた最近の研究として、文献(9)では地面を走行するモバイルロボットに対して外部環境モデルが不要な手法を提案している。この手法は、障害物が現れない場合の目標画像群に対する視覚フィードバック制御と障害物が現れた場合の2次元空間に特化した障害物回避制御を切り替えた制御手法となっている。また文献(10)では飛行ビークルに対して、安定性に対する議論はされていないものの、モデル予測制御を用いることで入力やカメラ視野に対する拘束を設けながら障害物回避をおこなう手法が提案されている。しかし、これらの手法<sup>(9)(10)</sup>はカメラだけでなくレーザレンジファインダなどの測距センサも別途必要となる。

そこで、本論文では Fig. 1 に示すようなカメラのみを用いた3次元の視覚フィードバックシステムに対して、障害物回避のためのナビゲーション関数を用いた安定化視覚フィードバック制御則を提案する。はじめに、目標位置姿勢が時変となる場合の受動性に基づく安定化視覚フィードバック制御則を提案する。つぎに、障害物を回避しながら設定する最終目標位置姿勢へ収束させるような安定化視覚フィードバック制御則への目標位置姿勢を、障害物回避ナビゲーション関数を用いることで生成する手法を示す。ナビゲーション関数をリアプノフ関数候補とすることで設計する目標位置姿勢が最終目標位置姿勢に収束することを示している。さらに、提案手法の有効性を検証するために、飛行ビークルを用いた実験をおこなう。本手法は文献(9)(10)の手法に対して、レンジセンサを用いずに一台のカメラのみで障害物回避をおこなえるという利点がある。

本論文の構成は以下のとおりである。2節では時変の目標位置姿勢に対する安定化視覚フィードバック制御について述べる。3節で、障害物回避のためのナビゲーション関数を用いた目標位置姿勢生成をおこなう。4節と5節でシ

ミュレーション結果と実験結果をそれぞれ示し、最後に6節でまとめをおこなう。

## 2. 安定化視覚フィードバック制御

本節は目標位置姿勢を時不変としていた文献(11)の手法に対して、時変の場合に拡張した安定化視覚フィードバック制御について示す。なお本節での目的は、カメラから見た対象物の相対位置姿勢を目標位置姿勢に一致させることとなる。

**2.1 剛体運動の表現とカメラモデル** 本論文では、Fig. 1 に示すような、カメラが取り付けられたビークル(以下、カメラと省略する)と目標となる対象物(以下、対象物と省略する)および $n$ 個の障害物からなるEye-in-Hand構造の視覚フィードバックシステムについて考える。本論文では、対象物は静止しているとする。基準とする座標系として基準座標系 $\Sigma_w$ 、カメラにカメラ座標系 $\Sigma_c$ 、対象物に対象物座標系 $\Sigma_o$ 、各障害物に障害物座標系 $\Sigma_{bi}$  ( $i = 1, \dots, n$ )を定義する。また、任意の二つの座標系 $\Sigma_a$ から $\Sigma_b$ の位置 $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ と姿勢を表す回転行列 $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \in SO(3)$ を要素に持つ同次表現 $g_{ab} = (p_{ab}, e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$ を以下のように定義する。

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{4 \times 4}, \dots, \dots, \dots (1)$$

ただし、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 $3 \times 3$ 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<sup>(12)</sup>。

本論文の視覚フィードバックシステムは対象物と障害物がカメラの観測対象となるが、本節では冗長な議論を避けるため、座標系 $\Sigma_o$ と $\Sigma_{bi}$ を一時的に観測対象座標系 $\Sigma_q$ として議論していく<sup>†</sup>。カメラ座標系から見た各観測対象の相対位置姿勢 $g_{cq}$ は同次表現の合成則から以下のように導かれる。

$$g_{cq} = g_{wc}^{-1} g_{wq} \dots, \dots, \dots (2)$$

また、カメラ座標系から見た各観測対象の相対速度は、相対位置姿勢 $g_{cq}$ を時間微分することで、

$$V_{cq}^b = -\text{Ad}_{(g_{cq}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wq}^b \dots, \dots, \dots (3)$$

のように導かれる<sup>(11)</sup>。ここで、 $V_{ab}^b = (g_{ab}^{-1} \dot{g}_{ab})^\vee \in \mathcal{R}^6$ 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<sup>(12)</sup>。

一方、本論文の視覚フィードバックシステムでは、観測出力として得られる情報はピンホールカメラから得られる画像特徴量のみである。ここで、各観測対象には $m_q (\geq 4)$ 点の特徴点が取り付けられており、すべて観測可能であるとす

<sup>†</sup>すなわち添え字の $q$ を $o$ と $bi$ に読み替えることで、それぞれの相対位置姿勢を表すことになる。

る。このとき、観測対象座標系  $\Sigma_q$  の原点から各特徴点までのベクトルを  $p_{ql} \in \mathcal{R}^3 (l = 1, \dots, m_q)$  とすると、カメラからみた相対的な特徴点  $p_{cql} \in \mathcal{R}^3$  は  $p_{cql} = g_{cq} p_{ql}$  で表される。ただし、特徴点  $p_{ql}$  はすべて既知であるとし、同次表現でよく用いられる表記法 ( $[p_{ab}^T \ 1]^T$  を  $p_{ab}$  と表記<sup>(12)</sup>) により表したものである。画像特徴量を  $f_{cql} := [f_{cqxl} \ f_{cqyl}]^T$  と定義すると、特徴量は透視変換を用いることで、

$$f_{cql} = \frac{\lambda}{z_{cql}} \begin{bmatrix} x_{cql} \\ y_{cql} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

で表される。ただし、 $\lambda \in \mathcal{R}$  はカメラの焦点距離であり、 $p_{cql}$  の各要素を  $p_{cql} = [x_{cql} \ y_{cql} \ z_{cql}]^T$  として表した。この  $f_{cql}$  を縦に並べたベクトル  $f_{cq} = [f_{cq1}^T \ \dots \ f_{cqm_q}^T]^T \in \mathcal{R}^{2m_q}$  が各観測対象に関してカメラから得られる視覚情報となる。

**2.2 受動性に基づく視覚フィードバック制御** 一般的な位置ベース法の視覚フィードバックシステムの制御目的は、相対位置姿勢  $g_{co}$  を目標位置姿勢  $g_{cd}$  に常に一致させておくことである。本研究ではこの目標位置姿勢  $g_{cd}$  を時変とする。制御則を構成するにあたり相対位置姿勢  $g_{co}$  は直接計測することができないため、その推定値  $\bar{g}_{co}$  を得るために (3) 式に基づいたつぎの動的視覚オブザーバを構成する。

$$\dot{\bar{V}}_{co}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e \dots\dots\dots (5)$$

$u_e \in \mathcal{R}^6$  は推定偏差の振舞いを安定にするために加えられる入力であり、後に制御則の一部として提案する。

ここで、制御偏差  $g_{ec} = (p_{ec}, e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})$  と推定偏差  $g_{ee} = (p_{ee}, e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})$  を

$$g_{ec} = g_{cd}^{-1} g_{co} \dots\dots\dots (6)$$

$$g_{ee} = \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \dots\dots\dots (7)$$

と定義する。また、 $r_{ei} := \text{sk}(e^{\hat{\xi}\theta_{ei}})^\vee \in \mathcal{R}^3$ ,  $\text{sk}(e^{\hat{\xi}\theta_{ei}}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta_{ei}} - e^{-\hat{\xi}\theta_{ei}})$  を用いて、制御偏差ベクトルを  $e_c := [p_{ec}^T \ r_{ec}^T]^T \in \mathcal{R}^6$  と、推定偏差ベクトルを  $e_e := [p_{ee}^T \ r_{ee}^T]^T \in \mathcal{R}^6$  と定義する。推定偏差ベクトル  $e_e$  は視覚情報  $f_{co}$  と推定値  $\bar{g}_{co}$  から得ることができる<sup>(11)</sup>。また、目標位置姿勢  $g_{cd}$  と推定偏差ベクトル  $e_e$  を用いると、制御偏差ベクトル  $e_c$  も計算可能となる<sup>(13)</sup>。

Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバック偏差システムは (6)(7) 式を時間微分することで

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ec}^b \\ \dot{V}_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \quad (8)$$

と導出できる。ただし、入力を

$$u := [u_c^T \ u_e^T]^T, \quad u_c := \text{Ad}_{(g_{cd}^{-1})} V_{wc}^b + V_{cd}^b \dots\dots\dots (9)$$

と定義している。Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバック偏差システムにおいて、状態  $x := [e_c^T \ e_e^T]^T$  を 0 にとどめておくことで相対位置姿勢  $g_{co}$  が目標位置姿勢  $g_{cd}$  に一致

することになる。ここで、次式の制御則を提案する。

$$u = -K(-x), \quad K := \text{diag}\{K_c, K_e\} \dots\dots\dots (10)$$

ただし  $K_c > 0, K_e > 0$  は、それぞれ制御偏差と推定偏差に対するゲインである。

このとき、安定性に関してつぎの定理が導かれる。

[定理 1] <sup>(11)</sup> 対象物が静止している ( $V_{wo}^b = 0$ ) とき、視覚フィードバック偏差システム (8) と (10) 式の入力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。この定理 1 は、視覚フィードバック偏差システム (8) が入力  $u$  から出力  $-x$  に対して受動性を有することに基づくことで、文献 (11) と同様の手法でリアプノフの安定定理により証明することができる。ただし、本論文では目標位置姿勢  $g_{cd}$  を時変としたことから入力  $u_c$  に目標位置姿勢  $g_{cd}$  のボディ速度  $V_{cd}^b$  が組み込まれる点で、文献 (11) の定理を拡張したものとなっている。すなわち、(9) 式の入力  $u_c$  において、 $V_{cd}^b = 0$  とすれば文献 (11) と一致する。

### 3. 障害物回避ナビゲーション関数を用いた目標位置姿勢生成

前節では、カメラからみた対象物の相対位置姿勢を目標位置姿勢に一致させる安定化制御則を提案したが、障害物回避については考慮されておらず、本論文で時変としている目標位置姿勢に対する議論もなかった。障害物回避を考慮した視覚フィードバック制御の制御目的は、障害物を回避しながら設定する最終目標位置姿勢  $g_{cd_f} = (p_{cd_f}, e^{\hat{\xi}\theta_{cd_f}})$  に収束するような時変の目標位置姿勢  $g_{cd} = (p_{cd}, e^{\hat{\xi}\theta_{cd}})$  を生成し、それにカメラからみた対象物の相対位置姿勢  $g_{co} = (p_{co}, e^{\hat{\xi}\theta_{co}})$  を一致させることとなる。ただし、本研究では実システムを考慮し、最終目標位置姿勢  $g_{cd_f}$  は一定値とする。

そこで本節では、障害物を回避しながら最終目標位置姿勢  $g_{cd_f}$  へ収束するような目標位置姿勢  $g_{cd}$  のボディ速度  $V_{cd}^b = [(v_{cd}^b)^T \ (\omega_{cd}^b)^T]^T$  を設計する。目標速度  $V_{cd}^b$  が設計されれば、 $g_{cd}$  はつぎの微分方程式を解くことで生成できる。

$$\dot{g}_{cd} = g_{cd} \hat{V}_{cd}^b \dots\dots\dots (11)$$

前節で提案した視覚フィードバック制御則 (10) と (9) 式で表される偏差システムの入力により、カメラ入力  $V_{wc}^b$  は

$$V_{wc}^b = \text{Ad}_{(g_{cd})} (K_c e_c - V_{cd}^b) \dots\dots\dots (12)$$

のように構成されるため、目標速度  $V_{cd}^b$  と目標位置姿勢  $g_{cd}$  を用いることで生成可能となる。

**3.1 目標軌道生成に対する姿勢偏差** 目標速度  $V_{cd}^b$  を設計するにあたり、本節では姿勢に対して議論する。障害物回避は、位置成分を用いて達成させるために、姿勢成分は目標姿勢  $e^{\hat{\xi}\theta_{cd}}$  をその最終値  $e^{\hat{\xi}\theta_{cd_f}}$  に収束させることのみを目的とする。そのため、つぎの姿勢偏差を定義する。

$$e^{\hat{\xi}\theta_{ed}} = e^{-\hat{\xi}\theta_{cd_f}} e^{\hat{\xi}\theta_{cd}} \dots\dots\dots (13)$$

また、偏差ベクトルを  $r_{ed} := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta_{ed}} - e^{-\hat{\xi}\theta_{ed}})^\vee$  として定義する。最終目標位置姿勢  $g_{cd_f}$  が時不変であることを考慮すると、(13) 式を時間微分することで、姿勢偏差速度の関係式はつぎのように導出することができる。

$$\omega_{ed}^b = \omega_{cd}^b \dots \dots \dots (14)$$

**3.2 障害物回避のための動的視覚オブザーバ** カメラに障害物を回避させるには、カメラ座標系からみた障害物の位置情報  $p_{cbi}$  が必要になる。位置情報はカメラから直接計測できないために、対象物のときと同様に、障害物の位置情報を推定するためにつぎの動的視覚オブザーバを設計する。

$$\bar{V}_{cbi}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{cbi}^{-1})} V_{wc}^b + u_{bi} \dots \dots \dots (15)$$

ただし、 $\bar{g}_{cbi}$  はカメラ座標系からみた障害物の相対位置姿勢  $g_{cbi}$  の推定値であり、 $u_{bi} \in \mathcal{R}^6$  は後に提案する推定偏差の振舞いを安定にするための入力である。

ここで、障害物の位置姿勢に対する推定偏差  $g_{ebi}$  をつぎのように定義する。

$$g_{ebi} = \bar{g}_{cbi}^{-1} g_{cbi} \dots \dots \dots (16)$$

また、推定偏差ベクトルを  $e_{bi} := [p_{ebi}^T \ r_{ebi}^T]^T \in \mathcal{R}^6$  と定義する。障害物に対する推定偏差ベクトル  $e_{bi}$  は視覚情報  $f_{cbi}$  と推定値  $\bar{g}_{cbi}$  からつぎのように得ることができる。

$$e_{bi} = J_e^{\dagger}(\bar{g}_{cbi})(f_{cbi} - \bar{f}_{cbi}) \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 $\bar{f}_{cbi}$  は画像特徴量  $f_{cbi}$  の推定値を表し、 $J_e(\cdot)$  は画像ヤコビアン的一种である<sup>(11)</sup>。また、(16) 式を時間微分することで、障害物に対する推定偏差システムは下記のように導出することができる。

$$V_{ebi}^b = -\text{Ad}_{(g_{ebi}^{-1})} u_{bi} + V_{wbi}^b \dots \dots \dots (18)$$

上述の障害物に対する動的視覚オブザーバを用いることで、カメラ座標系からみた障害物の位置  $p_{cbi}$  は (16)(17) 式より、

$$p_{cbi} = e^{\hat{\xi}\bar{\theta}_{cbi}} p_{ebi} + \bar{p}_{cbi} \dots \dots \dots (19)$$

と計算することができる。

**3.3 障害物回避ナビゲーション関数** 本節では、障害物を回避しながら最終目標位置へ収束させるためのナビゲーション関数  $\varphi(p_{cd})$  を設計する。

はじめに、カメラが移動可能かつ障害物に衝突しない集合  $D$  をつぎのように定義する。

$$D = F - \bigcup_{i=1}^n B_i \dots \dots \dots (20)$$

ここで、 $F$  はカメラが移動可能な領域を中心  $p_0$ 、半径  $\rho_0$  の球体で定義した集合である<sup>†</sup>。また、 $B_i$  は移動可能領域

<sup>†</sup> 本論文では対象物は静止しているとしているため、 $p_0$  は対象物座標系  $\Sigma_o$  を基準として考えることができる。たとえば、 $p_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$  とすると、対象物を中心に半径  $\rho_0$  の空間がカメラの移動可能領域となり、 $p_0 = p_{co}(0)$  とするとカメラの初期値が中心の空間となる。

$F$  の中に存在する  $n$  個の障害物を表す集合であり、中心に座標系  $\Sigma_{bi}$  を持つ半径  $\rho_i$  の球体で定義する。本論文では、移動可能な領域の境界と障害物および障害物同士は重ならないとする。すなわち、 $\|p_{cd} - p_0 - p_{cbi}\| + \rho_i < \rho_0$ 、 $\|p_{cbi} - p_{cbj}\| > \rho_i + \rho_j$ 、 $(1 \leq i, j \leq n)$  とする。

つぎに、ナビゲーション関数という特殊人工ポテンシャル関数を導入する。

[定義 1] <sup>(5)(14)</sup> 滑らかなモース関数  $\varphi(p_{cd}) : D \rightarrow [0, 1]$  が以下の性質を有するとき、 $\varphi$  はナビゲーション関数である。

- (1)  $p_{cd_f} \in D$  のとき唯一の最小値が存在し、 $\varphi(p_{cd_f}) = 0$  となる。
- (2)  $D$  の境界で最大値を持つ。

障害物回避のためのナビゲーション関数を具体的に設計していく。はじめに目標位置  $p_{cd}$  とその最終値  $p_{cd_f}$  との間の偏差に関するつぎの関数を定義する。

$$s(p_{cd}) = \|p_{cd} - p_{cd_f}\|^{2\kappa} \dots \dots \dots (21)$$

ここで、 $\kappa$  は形成されるポテンシャル場を変化させるためのパラメータである。つぎに、障害物関数  $\eta$  をつぎのように定義する。

$$\eta(p_{cd}) = \prod_{i=0}^n \eta_i(p_{cd}) \dots \dots \dots (22)$$

$$\eta_i(p_{cd}) = \begin{cases} \rho_0^2 - \|p_{cd} - p_0\|^2 & (i = 0) \\ \|p_{cbi}\|^2 - \rho_i^2 & (i = 1, \dots, n) \end{cases}$$

ただし、 $\eta_0$  は移動可能領域  $F$  の内部にカメラを留めるための関数である。障害物関数  $\eta(p_{cd})$  で必要となるカメラ座標系からみた障害物の位置  $p_{cbi}$  は前節で設計した動的視覚オブザーバにより得られることに注意されたい。この障害物関数は 0 に近づくほど領域の境界や障害物に近くなることを示している。さらに、パラメータ  $\kappa$  を用いたモデル空間上のナビゲーション関数  $\tilde{\varphi}(x) \in \mathcal{R} \rightarrow [0, 1]$  をつぎのように定義する。

$$\tilde{\varphi}(x) = \left( \frac{x}{\mu + x} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \dots \dots \dots (23)$$

ここで、 $\mu$  は収束速度を調整するためのパラメータである。(21)–(23) 式の関数を組み合わせることで、障害物回避のためのナビゲーション関数を

$$\varphi(p_{cd}) = \tilde{\varphi} \circ \frac{s}{\eta}(p_{cd}) = \left( \frac{s(p_{cd})}{\mu\eta(p_{cd}) + s(p_{cd})} \right)^{\frac{1}{\kappa}} (24)$$

と設計する。ここで、 $\circ$  は合成演算子を表している。紙面の都合上証明は省略するが、 $\kappa$  を適切に設定した (24) 式の関数がナビゲーション関数となることは、文献 (14) の定理 4 と同様の手法で証明できる。

**3.4 目標速度の提案と収束解析** ナビゲーション関数および姿勢偏差を用いることで、つぎの目標速度とそれを生成するための推定入力を提案する。

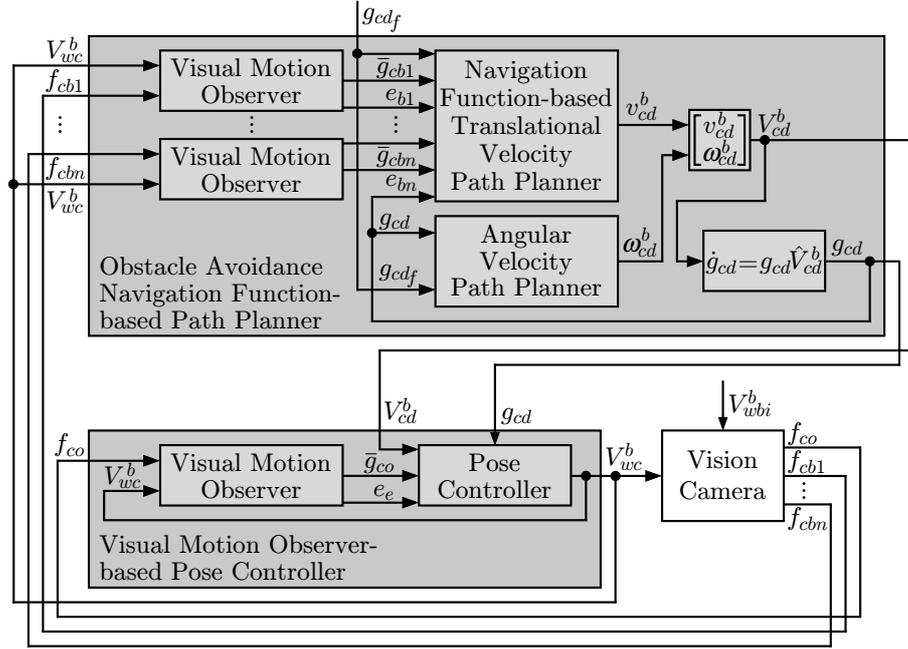


Fig. 2. Block diagram of visual motion observer-based pose control with obstacle avoidance navigation function-based path planner.

$$V_{cd}^b = \begin{bmatrix} -e^{-\hat{\xi}\theta_{cd}} K_{dp} \nabla\varphi(p_{cd}) \\ -K_{dr} e^{-\hat{\xi}\theta_{ed}} r_{ed} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (25)$$

$$u_{bi} = K_b e_{bi} \dots\dots\dots (26)$$

ただし、 $K_{dp} := \text{diag}\{k_{dp1}, k_{dp2}, k_{dp3}\}$  と  $K_{dr} := \text{diag}\{k_{dr1}, k_{dr2}, k_{dr3}\}$  は、それぞれ  $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸の並進と回転における目標速度に対するゲインであり、 $K_b := \text{diag}\{k_{b1}, \dots, k_{b6}\}$  は推定入力に対するゲインである。また、 $\nabla\varphi(p_{cd}) := \left(\frac{\partial\varphi(p_{cd})}{\partial p_{cd}}\right)^T$  は  $\varphi(p_{cd})$  の勾配ベクトルを表し、計算すると次ページ下部に示す (27) 式となる。

提案した目標速度 (25) と推定入力 (26) を用いることで、つぎの定理が成立する。

〔定理 2〕  $p_{cd}(0) \in D$  かつ対象物および障害物が静止している ( $V_{wo}^b = 0, V_{wbi}^b = 0$ ) とする。このとき、(25)(26) 式によって生成される目標トラジェクトリーは  $p_{cd}(t) \in D$  であり、かつ目標位置姿勢  $g_{cd}(t)$  は漸近安定な平衡点  $g_{cdf}$  を持つ。

証明：つぎの正定関数を考える。

$$V_n = \varphi(p_{cd}) + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ed}}) + \sum_{i=1}^n E(g_{ebi}) \dots\dots\dots (28)$$

ここで  $E(g_{ab}) := \frac{1}{2}\|p_{ab}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$  であり、関数  $\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$  は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である。(14)(18)(25)(26) 式を用いると、(28) 式の正定関数を解軌道に沿って時間微分することにより、つぎの関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= (\nabla\varphi)^T \dot{p}_{cd} + r_{ed}^T e^{\hat{\xi}\theta_{ed}} \omega_{ed}^b + \sum_{i=1}^n e_{bi}^T \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ebi}})} V_{ebi}^b \\ &= (\nabla\varphi)^T e^{\hat{\xi}\theta_{cd}} v_{cd}^b + r_{ed}^T e^{\hat{\xi}\theta_{ed}} \omega_{ed}^b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{i=1}^n e_{bi}^T \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ebi}})} (-\text{Ad}_{(g_{ebi})}^{-1} u_{bi}) \\ &= -(\nabla\varphi)^T e^{\hat{\xi}\theta_{cd}} e^{-\hat{\xi}\theta_{cd}} K_{dp} \nabla\varphi \\ &\quad - r_{ed}^T e^{\hat{\xi}\theta_{ed}} K_{dr} e^{-\hat{\xi}\theta_{ed}} r_{ed} + \sum_{i=1}^n (-e_{bi}^T K_b e_{bi}) \\ &= -(\nabla\varphi)^T K_{dp} \nabla\varphi - (e^{-\hat{\xi}\theta_{ed}} r_{ed})^T K_{dr} e^{-\hat{\xi}\theta_{ed}} r_{ed} \\ &\quad - \sum_{i=1}^n e_{bi}^T K_b e_{bi} \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

この計算過程において、推定偏差  $\hat{p}_{ebi}$  の歪対称性が用いられている。(28)(29) 式から、初期状態  $p_{cd}(0) \in D$  に対して、 $p_{cd}(t) \in D, \forall t > 0$  となることがわかる。推定偏差  $e_{bi}$  が 0 となるために、障害物関数で用いているカメラ座標系からみた障害物の相対位置の推定値  $\bar{p}_{cbi}$  が真値に一致する。またナビゲーション関数では  $\nabla\varphi(p_{cd}) \rightarrow 0$  のときには  $p_{cd}(t) \rightarrow p_{cdf}$  となる<sup>(14)</sup>。さらに、 $e^{-\hat{\xi}\theta_{ed}} r_{ed} \rightarrow 0$  は  $r_{ed} \rightarrow 0$  となるために、姿勢偏差の定義より  $e^{\hat{\xi}\theta_{cd}}(t) \rightarrow e^{\hat{\xi}\theta_{edf}}$  となる。したがって、 $g_{cd}(t) \rightarrow g_{cdf}$  が導かれる。□

定理 2 はナビゲーション関数をリアプノフ関数候補の一部とすることで証明している。この定理 2 により、提案したナビゲーション関数を用いた軌道生成をおこなうことで、目標位置姿勢  $g_{cd}(t)$  が障害物を回避しながら最終目標位置姿勢  $g_{cdf}$  に収束することが示された。Fig. 2 に障害物回避のためのナビゲーション関数を用いた受動性に基づく視覚フィードバック制御のブロック図を示す。3 節で提案した目標位置姿勢生成部分では、カメラから取得した各障害物に対する画像特徴量  $f_{cbi}$  とカメラ入力  $V_{wc}^b$  を用いて動的視覚オブザーバにより障害物の位置姿勢を推定し、障害物を避けるような目標速度  $V_{cd}^b$  と目標位置姿勢  $g_{cd}$  を生成し

ている。そして、2節で提案した動的視覚オブザーバを用いた安定化視覚フィードバック制御則を用いて、カメラからみた対象物の相対位置姿勢  $g_{co}$  が目標位置姿勢  $g_{cd}$  に追従するようなカメラ入力  $V_{wc}^b$  を生成している。

本論文の障害物回避ナビゲーション関数を用いた安定化視覚フィードバック制御の手法は、地面を走行するビークルに限定されず、さらにレーザレンジファインダなどの測距センサのようなカメラ以外の付加的なセンサを必要としないため適用範囲は広いと考えられる。また、障害物回避においては障害物までの距離が重要となるが、カメラモデルを通じた画像特徴量から障害物の位置を推定する問題も含んだ上で目標位置姿勢の生成に対する収束性の議論ができていることから、本手法は非常に有益であると考えられる。

本論文ではカメラモデルとしてピンホールカメラモデルを用いたが、文献(15)で導出した画像ヤコビアン  $J(\cdot)$  を用いることで、全方位カメラを用いた視覚フィードバック制御においても本論文で提案した手法を適用できると考えられる。また、本論文ではマニピュレータダイナミクスを陽に考慮していないが、文献(11)(13)ではマニピュレータダイナミクスを考慮した安定化視覚フィードバック制御を提案している。本論文では紙面の都合上割愛したが、同様の方法により、陽にマニピュレータのダイナミクスを考慮しなければならないシステムに対しても、本手法を適用することが可能となる。

#### 4. シミュレーション検証

本節では、提案した制御手法の有効性を確認するために二つの障害物が存在する状況のシミュレーション検証をおこなう。

はじめに、二つの障害物を静止させたシミュレーション検証をおこなう。初期設定は  $p_{wc} = [0 \ 0 \ 1]^T$  m,  $\xi\theta_{wc} = [\pi/12 \ -\pi/12 \ \pi/12]^T$  rad,  $p_{wo} = [-5 \ 6.5 \ 3]^T$  m,  $\xi\theta_{wo} = [0 \ 0 \ 0]^T$  rad とする。また最終目標位置姿勢は  $p_{cdf} = [0 \ 1.5 \ 0]^T$  m,  $\xi\theta_{cdf} = [0 \ 0 \ 0]^T$  rad とする。移動可能範囲及び障害物の設定は  $p_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$  m,  $\rho_0 = 8.5$  m,  $p_{wb1} = [-2 \ 2 \ 1.5]^T$  m,  $\rho_1 = 1$  m,  $p_{wb2} = [-5 \ 3 \ 2.5]^T$  m,  $\rho_2 = 1$  m とする。さらに、本シミュレーションにおけるゲインの設定や各パラメータは以下のようにした。  $K_c = 5I$ ,  $K_e = 10I$ ,  $K_{dp} = 50I$ ,  $K_{dr} = 2I$ ,  $K_{eb1} = 10I$ ,  $K_{eb2} = 10I$ ,  $\kappa = 3$ ,  $\mu = 4$ 。

Fig. 3 に相対位置姿勢  $g_{co}(t)$  と最終目標位置姿勢  $g_{cdf}$  との間の偏差  $e_r$  を示す。Fig. 3 より、全ての偏差が定常状態において 0 に収束していることが確認できる。したがって、障害物回避ナビゲーション関数を用いた視覚フィード

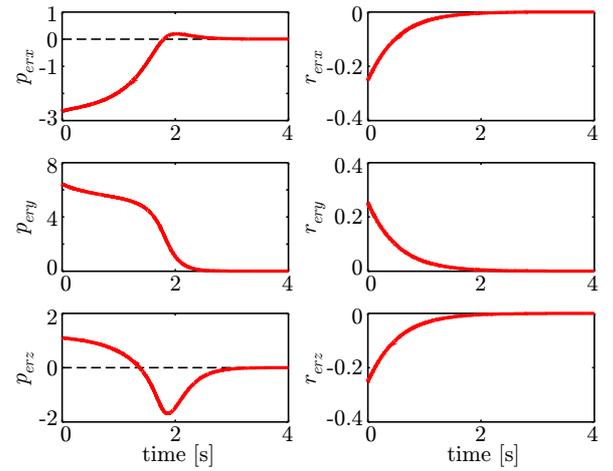


Fig. 3. Pose control error.

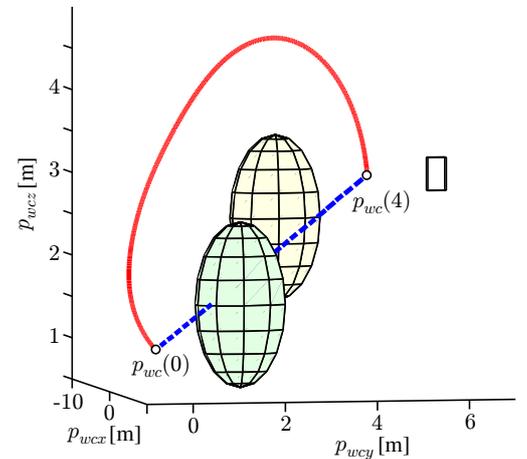


Fig. 4. Trajectory of camera in the case of the static obstacle (Solid: with proposed method, Dashed: with previous one<sup>(11)</sup>).

バック制御において、カメラが最終目標位置姿勢に収束することが示された。Fig. 4 にカメラのトラジェクトリーを示す。図中の実線が提案手法により目標軌道を与えたとき、破線が従来手法<sup>(11)</sup>となる時不変の目標位置姿勢を与えたときのトラジェクトリーとなっている。  $p_{wc}(0)$  と  $p_{wc}(4)$  はカメラの初期値と最終値を表しており、また図中の球体が障害物を、直方体が対象物を表している。つまり、Fig. 4 において、カメラは球体を避けて直方体の前まで進まなければならない。Fig. 4 より提案手法による目標軌道を与えることで、障害物をかわしながら対象物に向かっていることがわかる。一方、従来研究<sup>(11)</sup>である時不変の目標位置姿勢を与えた場合は、最終目標位置姿勢に収束しているものの障害物にぶつかっていることから、実際の実験におい

$$\nabla\varphi(p_{cd}) = \frac{2\mu}{\kappa(\mu\eta + s)^{\frac{1+\kappa}{\kappa}}} \left( \kappa\eta(p_{cd} - p_{cdf}) + \|p_{cd} - p_{cdf}\|^2 \left( \prod_{i=1}^n \eta_i(p_{cd} - p_0) - \sum_{j=1}^n \prod_{i=0, i \neq j}^n \eta_i p_{cbj} \right) \right) \dots \dots \dots (27)$$

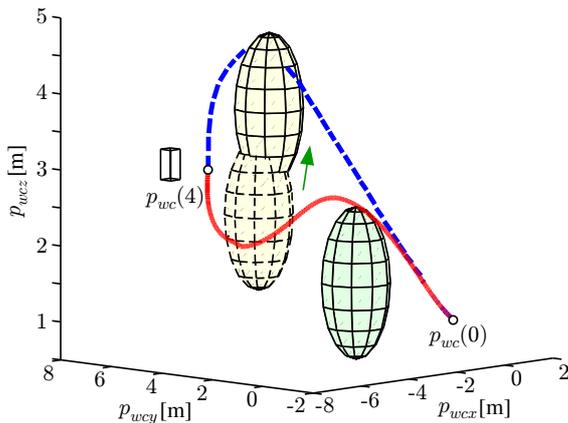


Fig. 5. Trajectory of camera in the case of the moving obstacle (Solid: with moving obstacle, Dashed: with static one).

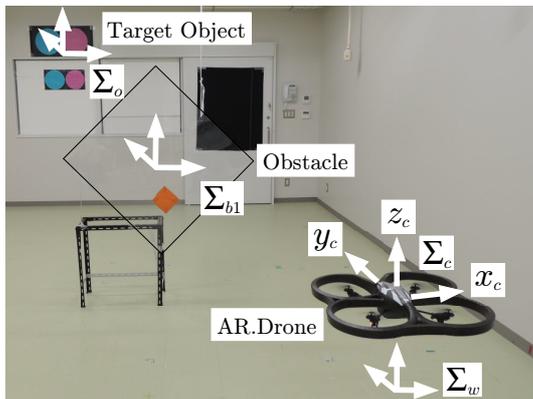


Fig. 6. Experimental environment.

ては失敗することに注意されたい。したがって、Figs. 3, 4 より、提案手法は障害物回避をおこないつつ、最終目標位置姿勢に収束していることが示された。

つぎに、理論的には示していないがより実用面を考慮して、障害物が運動しているときのシミュレーション検証を示す。前述のシミュレーション設定から  $p_{wb2} = [-5 + 0.2t \ 3 - 0.25t \ 2.5 + 1.5t]^T$  m に変更する。Fig. 5 にカメラのトラジェクトリーを示す。図中の破線が Fig. 4 中で実線で示したトラジェクトリーであり、実線が障害物が運動している状況においてリアルタイムで目標軌道を生成した場合のカメラのトラジェクトリーを示している。今回は障害物が運動しているために破線の軌道ではカメラが障害物に衝突してしまうのに対して、リアルタイムで目標軌道を生成することにより変化した実線の軌道は、障害物を回避しながら対象物の前まで移動していることがわかる。したがって、本シミュレーションでは、障害物が運動している状況においても、リアルタイムで目標軌道を生成することで、障害物を回避しながら最終目標位置姿勢に収束していることが示された。

### 5. 実験検証

本論文では Fig. 6 に示す小型自律飛行ロボットを用いた 3 次元空間上での検証実験をおこなった。小型自律飛行ロボットは 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。AR.Drone は  $x$  軸,  $y$  軸,  $z$  軸方向の並進運動と  $z$  軸周りの回転運動が可能である。本実験で使用した水平カメラは画角 93 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 30 fps である。実験した際の実測での画像取得周期は約 13 fps であり、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。水平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。観測対象の特徴量は、得られた画像から画像処理ライブラリ OpenCV を用いて抽出する。目標軌道や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。

本実験検証は、一つの静止した障害物が存在している状況にておこなった。本手法は障害物の特徴点が常に観測可能でなければならないが、本実験のカメラでは、障害物をかわした後は障害物を観測することができない。したがって、障害物をかわした後は障害物に再び当たらないと仮定し、障害物の特徴点が取得できなくなった後に (22) 式の障害物関数を下記のものに切り替えて目標軌道生成をおこなうこととする。

$$\eta(p_{cd}) = \rho_0^2 - \|p_{cd} - p_0\|^2 \dots \dots \dots (30)$$

初期設定および最終目標位置姿勢は  $p_{wc} = [0 \ 0 \ 0.65]^T$  m,  $\xi_{\theta_{wc}} = [0 \ 0 \ 0]^T$  rad,  $p_{wo} = [-2.5 \ 5.5 \ 2.15]^T$  m,  $\xi_{\theta_{wo}} = [0 \ 0 \ 0]^T$  rad,  $p_{cdf} = [0 \ 2.5 \ 0]^T$  m,  $\xi_{\theta_{cdf}} = [0 \ 0 \ 0]^T$  rad とする。移動可能範囲及び障害物の設定は  $p_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$  m,  $\rho_0 = 10$  m,  $p_{wb1} = [-1 \ 1.75 \ 1.05]^T$  m,  $\rho_1 = 0.95$  m とする。さらに、ゲインの設定や各パラメータは以下のようにした。  $K_c = \text{diag}\{1.5, 1.5, 0.6, 0.1, 0.1, 0.1\}$ ,  $K_e = 20I$ ,  $K_{dp} = \text{diag}\{6, 6, 3\}$ ,  $K_{dr} = 0.5I$ ,  $K_{eb1} = 20I$ ,  $\kappa = 2$ ,  $\mu = 4$ 。ただし、比較実験としておこなった従来手法<sup>(11)</sup>の場合においては、位置に対する制御ゲインのみすべて 1/10 倍とした。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位置から  $\pm 0.35$  m の範囲に、 $z$  軸の位置においては  $\pm 0.15$  m の範囲に、また  $z$  軸の回転においては  $\pm 0.1$  rad の範囲に収まった時点で収束したと判断する。この収束範囲はこれから示す実験結果では点線で示すこととする。

Figs. 7, 8 に実験結果を示す。Fig. 7 の実線は上から 3 次元空間での  $x, y, z$  軸の位置の推定値と  $z$  軸周りの回転角度を表している。また、破線は障害物関数ナビゲーション

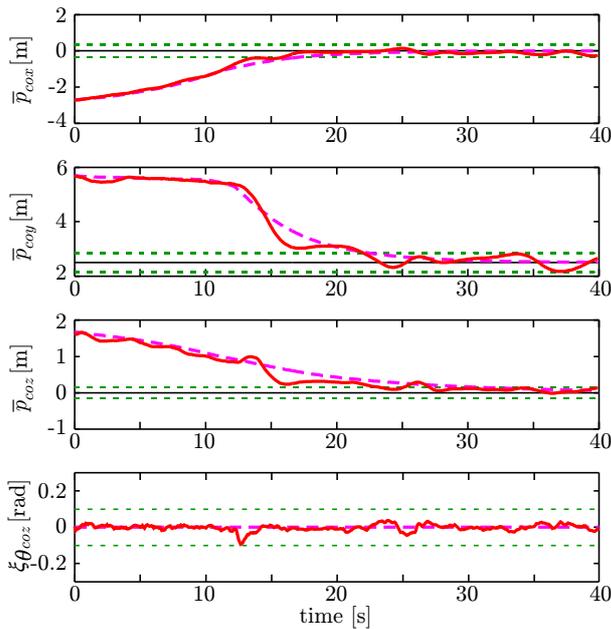


Fig. 7. Estimated relative position and the actual rotation along the  $z$ -axis (Solid: actual trajectory, Dashed: reference one).

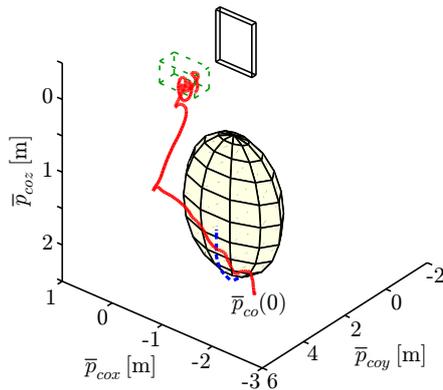


Fig. 8. Trajectory of camera (Solid: with proposed method, Dashed: with previous one<sup>(11)</sup>).

関数を用いて生成した目標位置姿勢を表している。シミュレーション検証に比べて収束時間が長いのは、モータに対して電圧制限がかからないように重みや目標軌道生成のためのゲインを設定しているためである。Fig. 7 より、目標位置姿勢に対して相対位置姿勢が追従しているのがわかる。また、Fig. 8 に、カメラのトラジェクトリーを示している。実線が提案手法、破線が従来手法<sup>(11)</sup>の実験結果である。従来手法は最終目標位置姿勢へ直線的に動いているものの、障害物を考慮していないために、8 s で障害物に衝突し実験は失敗してしまった。それに対して、提案手法では障害物を回避するように目標位置姿勢を設計しているために、障害物に衝突せずにカメラが対象物の前まで動いていることが確認できる。以上のことから、障害物回避のためのナビゲーション関数を用いた安定化視覚フィードバック制御

の有効性が示された。

## 6. おわりに

本論文では 3 次元 Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムに対して、障害物回避のためのナビゲーション関数を用いた安定化視覚フィードバック制御手法を提案した。制御則への目標位置姿勢生成を障害物回避のためのナビゲーション関数を用いて設計し、ナビゲーション関数をリアプノフ関数候補とすることで設計する目標位置姿勢が設定する最終目標位置姿勢に収束することを示している。提案手法は障害物を回避しながら最終目標位置姿勢へ収束する安定化視覚フィードバック制御手法となる。最後にシミュレーションと飛行ビークルを用いた検証実験により、提案した制御手法の有効性を示した。

(平成 24 年 10 月 12 日受付, 平成 25 年 3 月 1 日再受付)

## 文 献

- (1) F. Chaumette and S. A. Hutchinson: "Visual Servoing and Visual Tracking", In: B. Siciliano and O. Khatib (Eds), *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag, pp. 563–583 (2008)
- (2) T. Saitoh, N. Tada and R. Konishi: "Indoor Mobile Robot Navigation by Central Following based on Monocular Vision", *IEEJ Trans. Electronics, Information and Systems*, Vol. 129, No. 8, pp. 1576–1584 (2009) (in Japanese)  
齊藤 剛史, 多田 直也, 小西 亮介: "単眼カメラを用いた中央走行型の屋内移動ロボット", 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 8, pp. 1576–1584 (2009) (in Japanese)
- (3) K. Katoh, K. Hirata, T. Mizuno and K. Yamada: "Development of "KUWAEBACHI" Robot via Visual Feedback Robust Control", *Trans. the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 45, No. 10, pp. 530–537 (2010) (in Japanese)  
加藤健一, 平田健太郎, 水野貴志, 山田晃平: "視覚フィードバックとロバスト制御による大道芸「くわえ撥」の実現", 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 10, pp. 530–537 (2010) (in Japanese)
- (4) J. Satake and J. Miura: "Person Following of a Mobile Robot using Stereo Vision", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 28, No. 9, pp. 1091–1099 (2010) (in Japanese)  
佐竹 純二, 三浦 純: "ステレオビジョンを用いた移動ロボットの人物追従制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 9, pp. 1091–1099 (2010) (in Japanese)
- (5) E. Rimon and D. E. Koditschek: "Exact Robot Navigation using Artificial Potential Functions", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5, pp. 501–518 (1992)
- (6) N. J. Cowan, J. D. Weingarten and D. E. Koditschek: "Visual Servoing via Navigation Functions", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 4, pp. 521–533 (2002)
- (7) J. Chen, D. M. Dawson, W. E. Dixon and V. K. Chitrakaran: "Navigation Function-based Visual Servo Control", *Automatica*, Vol. 43, No. 7, pp. 1165–1177 (2007)
- (8) T. Muraio, H. Kawai and M. Fujita: "Stabilizing Predictive Visual Feedback Control via Image Space Navigation Function", *IEEJ Trans. Electronics, Information and Systems*, Vol. 132, No. 5, pp. 721–729 (2012) (in Japanese)  
村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之: "安定化予測視覚フィードバック制御に対するナビゲーション関数を用いた目標位置姿勢生成", 電気学会論文誌 C, Vol. 132, No. 5, pp. 721–729 (2012) (in Japanese)
- (9) A. Cherubini and F. Chaumette: "Visual Navigation with Obstacle Avoidance", *Proc. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1593–1598 (2011)
- (10) D. Lee, H. Lim and H. J. Kim, "Obstacle Avoidance using Image-based Visual Servoing Integrated with Nonlinear Model Predictive Control", *Proc. 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*,

- pp. 5689–5694 (2011)
- (11) M. Fujita, H. Kawai and M. W. Spong: “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and  $L_2$ -gain Performance Analysis”, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 40–52 (2007)
- (12) R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press (1994)
- (13) T. Murao, H. Kawai and M. Fujita: “Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Fixed Camera Systems”, *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 94, No. 8, pp. 1–11 (2011)
- (14) D. E. Koditschek and E. Rimon: “Robot Navigation Functions on Manifolds with Boundary”, *Advances in Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 4, pp. 412–442 (1990)
- (15) H. Kawai, T. Murao and M. Fujita: “Passivity-based Visual Motion Observer with Panoramic Camera for Pose Control”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 64, No. 3–4, pp. 561–583 (2011)

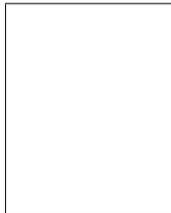
村尾俊幸 (正員) 2005 年金沢大学大学院自然科学研究科電



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。2013 年早稲田大学次席研究員 (研究院講師), 独立行政法人科学技術振興機構 CREST 研究員となり現在に至る。視覚フィードバック制御に関する研究に従事。博士 (工学)。

計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE などの会員。

河合宏之 (非会員) 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)。

計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE の会員。

鶴尾有生 (非会員) 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 (非会員) 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。