

解説

ビジュアルフィードバック制御と今後

Visual Feedback Control and Its Future

橋 本 浩 一* *東北大学

Koichi Hashimoto* *Tohoku University

1. はじめに

近年の急速なコンピュータ技術の進展に伴い、ビジョンセンサや画像処理システムが安価に利用可能となってきた。それに伴いビジョンセンサを制御システムに組み込む要求も高まってきた。しかし撮像系の特性は非線形であり、そのキャリブレーションも容易ではないので、大域的安定性やカメラパラメータに対するロバスト性などが重要な関心事となってくる。

本稿においては、ビジュアルフィードバック制御において何を制御変数とするのか、そのとき制御系の特性はどのように変化するか、どのような試みが進行中であるのか、これらの話題に焦点をあてて今後の展開を予想する。

2. ビジュアルフィードバック制御とは

2.1 基本的例題

読者の目の前に首振り機構つきのカメラ（図1）があり、読者の顔を追跡したいとする。人物画像を元にモータの動きを制御しているので立派なビジュアルフィードバック制御である。このような例は、ウェブカメラや街頭の監視カメラとして広く利用されている。

システム構成

カメラはこちらを向いている。簡単のため、パン（左右： θ_1 ）軸とチルト（上下： θ_2 ）軸はカメラ座標系の原点で交差するものとする。カメラに写る対象（読者の顔）の例を図2に示す。 x, y は顔中心の座標を表す。画面座標系において右が x 軸正の方向、上が y 軸正の方向である。

モデリング

読者が顔を上にあげれば対象は y が増加する方向に、顔を左に動かせば対象は x が増加する方向に移動する。同様に、 θ_1 を増加させれば x も増加し、 θ_2 を増加させれば y が増加する。このとき、対象の像 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ をカメラ視野の中心 $\mathbf{x}^* = [0, 0]^T$ に保つことが「顔を追跡する」こと

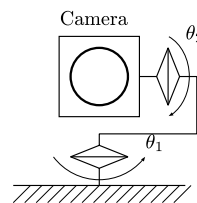


図1 パン・チルトカメラ

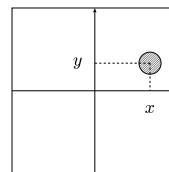


図2 カメラ画像

に相当する。

制御則

図2の状態では対象物はカメラの視線の右上にあるので、 θ_1 をマイナスに θ_2 もマイナスに動かすことにより、対象は画面中央に近づく。つまり、

$$\dot{\theta} = -\lambda(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) = -\lambda\mathbf{x} \quad (1)$$

とすればよい。ただし $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$, λ は正のゲインである。これが特徴ベースビジュアルフィードバック制御[1]の原点である。また、このフィードバック制御に画像処理の遅れ、制御対象の運動方程式、対象の運動モデルなどを組み込んで安定性を議論するための枠組みがビジュアルサーボである[2][3]。

2.2 定式化

ビジュアルフィードバック制御を一般的に定式化するには、画像出力 \mathbf{m} から制御したい量 \mathbf{s} を計算し、 \mathbf{s} が目標値 \mathbf{s}^* に収束するように制御できる量 \mathbf{v} を調整する。つまり制御偏差

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(\mathbf{m}(t), \mathbf{v}(t), \mathbf{a}) - \mathbf{s}^* \quad (2)$$

の最小化問題となる。 \mathbf{a} はカメラの内部・外部パラメータや対象のサイズ・形状のような、システムに関する事前情報パラメータである。ビジュアルサーボにおいては、 \mathbf{s} をどのように決めるかが重要な関心事であり、それにより制御系の性質が多様に変化する。

2.1 節の例では、制御したい量を画面内の対象の位置 ($\mathbf{s} = \mathbf{x}$)、制御できる量をモータ回転角 ($\mathbf{v} = \theta$) と設定している。式(2)は入出力（カメラの動きと対象の動き）に関する考察であり、モデリングに相当する。また、これらの間の微分関係式 ($\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\theta}$) を利用して制御則を導

原稿受付 2009年2月18日

キーワード: Feature-based, Position-based, 2-1/2D, Intensity-based, Robustness, Field of View

*〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

*Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi

出している．ここで J はヤコビ行列であり，カメラパラメータやカメラと対象の距離に依存して変動する．しかし，これを詳細に検討することをしないで制御則を決めている．のちに見るように特徴ベースビジュアルフィードバック制御では，実はこれで十分である．

式(2)の定式化では，ロボットの手先にカメラが取り付けられている場合 (Hand-in-eye case) を想定しているが，環境に固定されたカメラがロボットの手先を見る場合 (Hand-to-eye case) にも若干の変更を施すことにより同様に適用できる．したがって，以後，この定式化に従って，ハンドブック・チュートリアル [4] [5] の記号表記法に沿って解説する[†]．

3. 位置ベース法

3.1 位置ベース法 I

位置ベースビジュアルサーボでは， s を位置に関する変数にとる．例えば，ロボットの手先にカメラが搭載されており，対象の画像を元に目標のカメラ位置・姿勢 c^* と現在の位置・姿勢 c との差をゼロに収束させることを考える．これらのベクトルを目標カメラ座標系で表現する場合，それらの位置偏差は $t = {}^{c^*}t_c = {}^{c^*}c - {}^{c^*}c$ ，姿勢偏差は $R = {}^{c^*}R_c$ で与えられる (図3)．

三次元パラメータ t, R を求めるためのアルゴリズムの詳細はこの解説の範囲を越えるが，目標位置における見え方 m^* と現在位置における見え方 m とカメラパラメータなどの情報があれば求めることができる [6]．姿勢 R を回転軸 u と u まわりの回転角 θ で表すと，

$$e = s - s^*, \quad s = \begin{bmatrix} t \\ \theta u \end{bmatrix}, \quad s^* = 0 \quad (3)$$

と定式化できる．制御できる量 v が手先の速度 v_c ・角速度 ω_c である場合，微分関係式は

$$\dot{s} = Lv, \quad L = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & L_{\theta u} \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる．ただし，

$$L_{\theta u} = I - \frac{\theta}{2} u_{\times} + \left(1 - \frac{\text{sinc} \theta}{\text{sinc}^2 \frac{\theta}{2}}\right) u_{\times}^2 \quad (5)$$

であり [7]， $\text{sinc} x = \sin x / x$ ，また u_{\times} は u との外積と等価な演算をする歪対称行列である．行列 $L_{\theta u}$ が正則でなくなるのは θ が 2π の倍数となるときのみであり， $\theta = 0$ の近傍では I と近似できる．制御手法の一例は

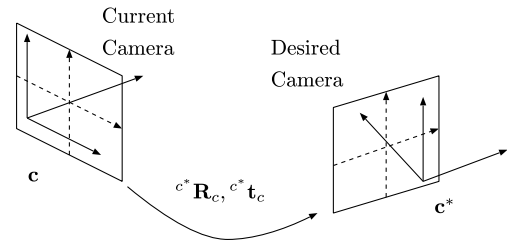


図3 位置ベース法 I

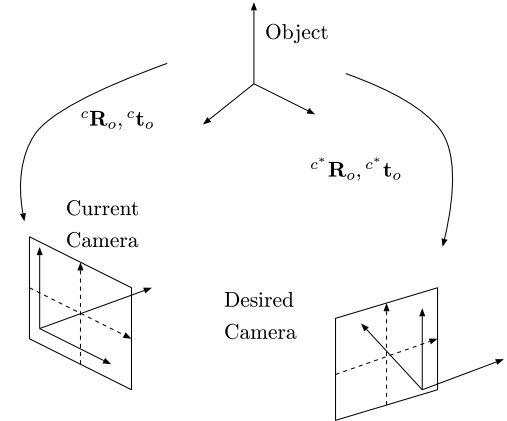


図4 位置ベース法 II

$$v = -\lambda L^{-1}e = -\lambda \begin{bmatrix} R^T t \\ \theta u \end{bmatrix} \quad (6)$$

と書ける．安定性は大域的に保証される．

3.2 位置ベース法 II

一方で，対象座標系を基準に考えると，対象とカメラの間の位置ベクトルをカメラ座標系で表現したベクトルを ${}^c t_o$ ，対象と目標カメラ位置の間の位置ベクトルを目標カメラ座標系で表現したベクトルを ${}^{c^*} t_o$ (定数ベクトル) で表す (図4)．姿勢偏差を θu で表すことにすると，制御したい量は

$$e = s - s^*, \quad s = \begin{bmatrix} {}^c t_o \\ \theta u \end{bmatrix}, \quad s^* = \begin{bmatrix} {}^{c^*} t_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

と書ける．制御できる量 v が式(4)の v と同じ場合，これらの間の微分関係式は

$$\dot{e} = Lv, \quad L = \begin{bmatrix} -I & [{}^c t_o]_{\times} \\ 0 & L_{\theta u} \end{bmatrix} \quad (8)$$

となり，制御則は

$$v = -\lambda L^{-1}e = -\lambda \begin{bmatrix} {}^c t_o - {}^{c^*} t_o + [{}^c t_o]_{\times} \theta u \\ \theta u \end{bmatrix} \quad (9)$$

を用いることができる．安定性は大域的に保証される．

4. 特徴ベース

位置ベース法では三次元復元 (R と t を求めること) が

[†]F. Chaumette と S. Hutchinson はこのことを快く許可してくれた．

必要である．しかしこれは，対象形状やカメラパラメータのモデル誤差に弱く，画像量子化の影響も受けやすい．それに対して特徴ベース法は，特徴量を直接制御することにより三次元復元を行う必要がなくなる方法である．例えば，特徴量として特徴点座標 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ を用いるとき，

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{L}_x \mathbf{v}$$

$$\mathbf{L}_x = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (10)$$

が成り立つ． Z はカメラ座標系におけるその点までの距離（以後，深さという）である．複数の特徴点 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ を用いて，目標座標 \mathbf{s}^* との差を制御偏差とする．つまり，

$$\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^*, \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1^* \\ \mathbf{x}_2^* \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

と置き，タスクを $\mathbf{e} \rightarrow 0$ として定式化する．このとき，微分関係式は $\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L} \mathbf{v}$ となる．ここで \mathbf{L} はおのおのの特徴点座標 \mathbf{x}_i に対して得られる式 (10) の行列を縦に積んだ行列であり，画像ヤコビ行列（または interaction matrix）と呼ばれる [8]．この画像ヤコビ行列の疑似逆行列 \mathbf{L}^+ をリアルタイムで計算できるならば，最も直接的な制御則は次式で与えられる．

$$\mathbf{v} = -\lambda \mathbf{L}^+ \mathbf{e} \quad (12)$$

しかし，画像ヤコビ行列には各点までの深さ Z_i ($i = 1, \dots, n$) が含まれるので，正確に計算するためにはある種の三次元復元をリアルタイムに計算する必要がある．これでは特徴ベース法の利点が失われる．最も単純な近似法は，目標位置における画像ヤコビ行列 \mathbf{L}^* を何らかの手法で推定して固定する方法であり，

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}^*}^+ \mathbf{e} \quad (13)$$

で表される．ここで $\widehat{\mathbf{L}^*}$ は \mathbf{L}^* の推定値である．目標位置における深さを求める必要はあるが，のちほど議論するように，あまり精度がよくなくても安定性は失われない．

一方で，リアルタイムで \mathbf{L} が計算できるとき， $\widehat{\mathbf{L}}_{\text{esm}} = (\mathbf{L} + \mathbf{L}^*)/2$ を用いて

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_{\text{esm}}^+ \mathbf{e} \quad (14)$$

とする方法も提案されている [9]．これによりカメラの位置 \mathbf{c} と特徴量 \mathbf{x} との間の非線形関係式 $\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{c})$ をテラー

展開の二次まで近似できる (Efficient Second-order Minimization: ESM)．その結果，非線形最適化の繰り返し回数（つまり $\mathbf{e} \rightarrow 0$ の収束に要する時間）を短縮できる．

制御に用いる画像ヤコビ行列の推定値を $\widehat{\mathbf{L}}$ とするとき，特徴ベース法の局所安定性は行列 $\widehat{\mathbf{L}}^+ \mathbf{L}$ の正定性で判定できる．これは比較的ゆるい条件であり，したがって，特徴ベース法はモデリング誤差にロバストである．しかし，Chaumette [10] が指摘したように，初期状態と目標状態が大きく離れる場合，目標値への収束が保証されず，偏差ノルムのローカルミニマで停止したり，期待しない方向に動き出したりする [8]．

5. 円筒座標系特徴ベース法

特徴点 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ に対し，円筒座標系

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \psi = \arctan \frac{y}{x} \quad (15)$$

を用いることを考える．オリジナル [11] の制御変数を少し変更しているため，原点において ψ が不定となるがこのほうが見通しがよい．これらを時間微分すると

$$\dot{\rho} = (x\dot{x} + y\dot{y})/\rho, \quad \dot{\psi} = (x\dot{y} - y\dot{x})/\rho^2 \quad (16)$$

を得る．ここで $c = \cos \psi, s = \sin \psi$ とおくと， $x = c\rho, y = s\rho$ であり， \dot{x}, \dot{y} に (10) の関係式を用いると，微分関係式は

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= (c\mathbf{L}_1 + s\mathbf{L}_2)\mathbf{v} = \mathbf{L}_\rho \mathbf{v}, \\ \dot{\psi} &= \frac{1}{\rho}(c\mathbf{L}_2 + s\mathbf{L}_1)\mathbf{v} = \mathbf{L}_\psi \mathbf{v} \end{aligned} \quad (17)$$

となる． $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$ は画像ヤコビ行列の 1 行目と 2 行目であり，

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_\rho &= \begin{bmatrix} \frac{-c}{Z} & \frac{-s}{Z} & \frac{\rho}{Z} & (1+\rho^2)s & -(1+\rho^2)c & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_\psi &= \begin{bmatrix} \frac{s}{\rho Z} & \frac{-c}{\rho Z} & 0 & c/\rho & s/\rho & -1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

とおいた．したがって，制御量を

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \rho_1, \psi_1, \dots, \rho_n, \psi_n \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^* \quad (19)$$

と考えると，微分関係式は $\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L} \mathbf{v}$ となる．ただし \mathbf{L} は各特徴点に対し (18) の行列を縦に積んだ行列である．

制御量 ρ, ψ の定義からも分かるように， ρ は Z 軸（光軸）周りの回転に不変であり， ψ は Z 軸方向の並進に不変である．したがって，Chaumette が指摘したようなケースに対しては有効であり，過渡特性も良好であることが報告されている．安定性は局所的である．

6. 2-1/2D

特徴ベース法の欠点を解決するために考案されたのが 2-1/2D (2.5 次元) と呼ばれる方法である [7]．これは一つの

特徴点 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ に対し特徴ベース法を行い、他の点を用いて姿勢 $\theta_{\mathbf{u}}$ と深さ比 $\rho_Z = Z/Z^*$ を推定する方法である。つまり、

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \log Z \\ \theta_{\mathbf{u}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}^* = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ \log Z^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

とおく。制御偏差は $\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^*$ であり、第 3 要素は $e_z = \log \rho_Z$ と書けることに注意する。 Z より ρ_Z のほうがロバストに求められるので、巧妙な手法である。このとき、微分関係式は

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_v & \mathbf{L}_\omega \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_{\theta_{\mathbf{u}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

となる。ただし

$$\mathbf{L}_v = \frac{1}{Z^* \rho_Z} \begin{bmatrix} -1 & 0 & x \\ 0 & -1 & y \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_\omega = \begin{bmatrix} xy & -(1+x^2) & y \\ 1+y^2 & -xy & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

となり、 $\mathbf{L}_{\theta_{\mathbf{u}}}$ は (5) と同じである。したがって、行列 \mathbf{L} はすべての稼働領域で正則となる。制御偏差における ρ_Z と $\theta_{\mathbf{u}}$ をリアルタイムで計算する必要がある。 \mathbf{L}_v に Z^* が必要となるが、おおよそその値でよい。この方法が大域的に安定であることは位置ベース法と同様である。また、パラメータ誤差に関するロバスト性についても検討されている [12]。

7. ピクセル輝度マップ

特徴量として、対称領域の明るさ分布（ピクセル輝度マップ）をそのまま用いることもできる。まず、目標画像の画像座標 $\mathbf{x}^* = [x^*, y^*, 1]$ における明るさを $I^*(\mathbf{x}^*)$ 、三次元空間の同じ点を指す現在画像の画像座標を $\mathbf{x} = [x, y, 1]$ 、その点の明るさを $I(\mathbf{x})$ とする。このとき、視点を変えても対象の明るさは変化しない、つまり、

$$I^*(\mathbf{x}^*) = I(\mathbf{x}) \quad (23)$$

が成り立つと仮定する。対象が平面のとき、その平面上のすべての対応点に対し、一つの 3×3 行列 \mathbf{G} が存在し、

$$\mathbf{x} = \mathbf{w}(\mathbf{G})\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} \frac{g_{11}x^* + g_{12}y^* + g_{13}}{g_{31}x^* + g_{32}y^* + g_{33}} \\ \frac{g_{21}x^* + g_{22}y^* + g_{23}}{g_{31}x^* + g_{32}y^* + g_{33}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

と書ける。この行列 \mathbf{G} はホモグラフィ行列、 \mathbf{w} は透視変換と呼ばれ、 g_{ij} は \mathbf{G} の要素である。ホモグラフィ行列が推定できれば、対象の三次元運動が推定できる。

ピクセル輝度マップに基づいてホモグラフィ行列を推定するわけであるが、まず、ホモグラフィ行列 \mathbf{G} をリー代数の基底 \mathbf{A}_i でパラメータ化する。つまり

$$\mathbf{G}(\mathbf{z}) = \exp(\mathbf{A}(\mathbf{z})), \quad \mathbf{A}(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^8 z_i \mathbf{A}_i \quad (25)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

とおき、 $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_8]^T$ で \mathbf{G} をパラメトライズする。

次に、この \mathbf{z} を運動の自由度として、明るさ分布の差を最小とする運動を求める。つまり、画像中のある領域 \mathcal{A} のなかのピクセル $i = 1, \dots, q$ に対して

$$s_i(\mathbf{z}) = I(\mathbf{w}(\mathbf{G}(\mathbf{z}))(\mathbf{x}_i^*)), \quad s_i^* = I^*(\mathbf{x}_i^*) \quad (26)$$

を定義し、

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1(\mathbf{z}) & s_2(\mathbf{z}) & \dots & s_q(\mathbf{z}) \end{bmatrix}^T \rightarrow \mathbf{s}^* \quad (27)$$

とする \mathbf{z} を求める。これは、テンプレート画像 \mathbf{s}^* に最も近い領域を現画像 I から求めるテンプレートマッチングとなる。

一般的にはテンプレート画像は 100×100 ピクセル程度となるので、特徴量ベクトルは $q = 10,000$ 次元程度となる。この情報を用いて 8 個のパラメータを最小 2 乗法により求めることになるので、たいへん冗長度の高い非線形最適化問題となる。しかし逆に、この冗長度のおかげで多少のオクルージョンや変形にもロバストなビジュアルフィードバック制御となることが期待できる。

図 5、図 6 に実行例を示す [13][†]。白線で囲まれた四角内がテンプレートであり、6 自由度の運動推定が良好にかつロバストに実現されている。画像一枚が入力されるごとに収束計算によりホモグラフィパラメータを求めるので、収束の高速化と計算の高速化が鍵となる。また、高速カメラを用いるとフレーム間における対象の動きを小さくするこ

[†] 追跡対象は日本ロボット学会誌, vol.26, no.1 の表紙



図5 オクルージョンの例
指でトラッキング対象が隠されても、外光でパターンが乱されてもロボバストにトラッキング可能である



図6 対象が変形する例
対象が平面であることを仮定しているが、最小2乗推定のため、変形に対してもロボバストにトラッキングできる

とができるので、IEEE1394B やカメラリンクのような高速通信が可能なカメラと高速ハードウェアを用いるとかなりロボバストなトラッキングが実現できる [13] .

高速解法の一つとして ESM が有力である . また、求めたホモグラフィ行列を用いてロボットを制御する方法も示されている [9] . さらに、全方位カメラモデルに対して同様の手法も提案されている [14] . ただし、安定性は局所的である .

8. 今後の展開

特徴ベース法がパラメータ誤差に対するロボバスト性を持つこと、特徴ベース法の欠点の改善、安定領域の大域化など、重要な成果を一通り紹介した . 3~6 章に示した方法は、対象の剛体性が仮定できないときや注目点が隠されるときには無力である . しかし、7 章に示した方法はその膨大な冗長性のおかげで変形やオクルージョンに対するロボバスト性という新しい方向性を見いだした . さらに、全方位カメラを用いる場合 [15]、カメラ冗長化による隠れに強いビジュアルフィードバック [16]、変形する対象のトラッキング [13] [17]、対象が視野に収まることを保証する制御法 [18] など、まだまだ興味ある展開が期待できる .

参考文献

- [1] 橋本浩一：“視覚フィードバック制御—静から動へ”，システム/制御/情報，vol.38, no.12, pp.659–665, 1994.

- [2] 橋本浩一：“ビジュアル・サーボイング”，計測と制御，vol.35, no.4, pp.282–285, 1996.
- [3] 橋本浩一：“ビジュアルサーボにおける予測と感度”，計測と制御，vol.40, no.9, pp.630–635, 2001.
- [4] F. Chaumette and S. Hutchinson: ‘Visual Servoing and Visual Tracking,’ Chapter 24, Springer Handbook of Robotics. pp.563–584, Springer, 2008.
- [5] F. Chaumette and S. Hutchinson: “Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches, Part II: Advanced Approaches,” IEEE Robotics and Automation Magazine, vol.13, no.4, pp.82–90, 2006, vol.14, no.1, pp.109–118, 2007.
- [6] D. Dementhon and L. Davis: “Model-based Object Pose in 25 Lines of Code,” Int. J. Computer Vision, vol.15, pp.123–141, 1995.
- [7] E. Malis and F. Chaumette and S. Boudet: “2-1/2D Visual Servoing,” IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.15, no.2, pp.238–250, 1999.
- [8] K. Hashimoto: “A review on vision-based control of robot manipulators,” Advanced Robotics, vol.17, no.10, pp.969–991, 2005.
- [9] S. Benhimane and E. Malis: “Homography-based 2D Visual Tracking and Servoing,” Int. J. Robotics Research, vol.26, no.7, pp.661–676, 2007.
- [10] F. Chaumette: ‘Potential Problems of Stability and Convergence in Image-based and Position-based Visual Servoing,’ in The Confluence of Vision and Control (Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol.237, D. Kriegman, G. Hager, and S. Morse, eds.). pp.66–78, Springer-Verlag, 1998.
- [11] M. Iwatsuki and N. Okiyama: “A New Formulation of Visual Servoing based on Cylindrical Coordinate System,” IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.21, no.2, pp.266–273, 2005.
- [12] E. Malis and F. Chaumette: “Theoretical Improvements in the Stability Analysis of a New Class of Model-Free Visual Servoing Methods,” IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.18, no.2, pp.176–186, 2002.
- [13] 遠藤義英，橋本浩一：“内視鏡手術のためのビジュアルトラッキング”，第 51 回自動制御連合講演会，pp.1023–1024, 2008.
- [14] C. Mei, S. Benhimane, E. Malis and P. Rives: “Efficient Homography-Based Tracking and 3-D Reconstruction for Single-Viewpoint Sensors,” IEEE Trans. Robotics, vol.24, no.6, 2008.
- [15] H. Haddj-Abdelkader, Y. Mezouar, N. Andreff and P. Martinet: “2 1/2D visual servoing with central catadioptric cameras,” Proc. IROS, pp.3572–3577, 2005.
- [16] 岩谷靖，渡部溪，橋本浩一：“隠れにロボバストなビジュアルサーボ”，日本ロボット学会誌，vol.27, no.1, pp.55–62, 2009.
- [17] E. Malis: “An efficient unified approach to direct visual tracking of rigid and deformable surfaces,” Proc. IROS, pp.2729–2734, 2007.
- [18] G. Chesi, K. Hashimoto, D. Prattichizio and A. Vicino: “Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing: A switching approach,” IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.20, no.5, pp.908–913, 2004.



橋本浩一 (Koichi Hashimoto)

1990 年大阪大学大学院博士課程修了，工学博士 . 大阪大学助手，岡山大学講師・助教授，東京大学助教授を経て，2004 年東北大学教授 . 一貫してビジュアルサーボの研究に従事 . ロボット制御，画像処理，およびそれらのアルゴリズムの並列実装と高速化，細胞・小動物のロボバストトラッキングシステムなどを研究中 .

(日本ロボット学会正会員)