運動推定オブザーバによる特徴量予測を用いた ビジュアルサーボ

学生員 猿 田 訓 彦 (東 京 大 学)

正 員 藤 本 博 志 (長岡技術科学大学)

正 員 堀 洋 一 (東 京 大 学)

Visual Servoing System with Feature Prediction using Motion Observer

Kunihiko Saruta, Student Member (The University of Tokyo), Hiroshi Fujimoto, Member (The Nagaoka University of Technology), Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

Visual servo is the eye-in-hand robot system directly using real time visual information for control. In this paper, we propose a novel visual servoing system with Motion Observer (MOB) based Feature Prediction. The position of the target object cannot be directly observed. Motion Observer is designed using a minimum order observer and is useful for high performance servoing. We show the effectiveness of the proposed method is shown through simulations and experiments.

キーワード：ビジュアルサーボ, 特徴ベース法, 運動項推定, 最小次元オブザーバ, 運動推定オブザーバ (MOB)

Keywords: visual servo, feature based method, motion estimation, minimum order observer, motion observer(MOB)

1. はじめに

視覚センサをシステムに含むロボット系の研究は古くから行なわれてきたが、研究初期の段階では、カメラによる画像認識と画像情報に基づくロボットアームの制御がタスクとして独立している、「見てから動く」タイプのものが大半であった。しかしこの手法では、目標位置が時間変化する場合には追従が難しい上、画像認識を行なっている間はロボットは停止しており、結果的に非常に不自然な動きになってしまう。

その欠点を補うために「見ながら動く」ビジュアルサーボが考案された⁽¹⁾。ビジュアルサーボでは画像情報を常に参照しながら制御を行なっているため、より柔軟な制御が可能となり、運動する物体に対しても追従が容易となる。ビジュアルサーボには、目標値に実世界上の位置をとる位置ベース法と、画像上の特徴量をとる特徴ベース法の2種類がある。

位置ベース法は、ロボットの制御系は通常の位置制御系であり、既存の制御法をそのまま適用できる。しかし、画像による推定情報にかなりの雑音が含まれるため、研究はもっぱらその雑音を取り除く手法の開発へと進んだ。また、画像の解釈に長い時間を要するため、フィードバックループが遅くなり、むだ時間が大きくなってしまいうという欠点

が存在する⁽²⁾。

それに対して特徴ベース法は、画像解釈が不要であるためにフィードバックループが高速である。また物体やロボットハンドの位置計算が不要であり、位置ベース法と比較して高精度の制御が期待できる。図1に特徴ベース法によるビジュアルサーボのブロック図を示す。

図1 特徴ベース法に基づくビジュアルサーボ系
Fig.1. Visual Servo System based on Feature Based Method

本論文では、第2章において特徴ベース法を用いたビジュアルサーボシステムのモデルを示し、既出の研究について簡単に分類を行なった上で本研究の位置づけを試みる。第3章では他のシステムと比較する形で、運動推定オブザーバを用いたビジュアルサーボシステムを提案する。第4章および第5章では、シミュレーションと実験により提案手法の有効性を検討し、考察を行なう。

2. 特徴ベース法を用いたビジュアルサーボ系の設計

〈2・1〉 システム全体のモデル 本研究では図2に示すような2軸DD(direct drive)ロボットを用い、その先端に上向きにカメラを取り付ける。またカメラの位置、姿勢を s_c 、物体の位置、姿勢を s_o とする。

図2 ビジュアルサーボ系のモデル
Fig. 2. Model of Visual Servo System

このとき、カメラの中心を原点として見た実世界上の物体の位置を $(X, Y)^T$ とすると、画像上で対応する点 $(x, y)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} u(s_c, s_o) \quad (1)$$

と表される。 f はカメラの焦点距離、 Z はカメラ位置を原点とした座標系における Z 軸座標である。 u は、 s_c と s_o から表される写像であり、この写像によって表される $(x, y)^T$ を特徴点と呼ぶ。本研究では、目標物体は単一の特徴点によって表されるとする。よって、制御量である特徴量ベクトル ξ は次のように定義される。

$$\xi \stackrel{\text{def}}{=} u(s_c, s_o) = u(\theta)(s_o - s_c) \quad (2)$$

次に、ロボットアームを微小角度動かしたときの特徴量ベクトルの変化を考える。式(2)を微分すると、カメラの位置 s_c はロボットアームの角度ベクトル $\theta = (\theta_1, \theta_2)^T$ の関数であるから、

$$\Delta \xi = \frac{\partial u}{\partial s_c} \frac{\partial s_c}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial u}{\partial s_o} \Delta s_o \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \theta$ の項と Δs_o の項は独立なので、ロボットアームを $\Delta \theta$ 動かしたときの $\Delta \xi$ は

$$\Delta \xi = \frac{\partial u}{\partial s_c} \frac{\partial s_c}{\partial \theta} \Delta \theta \stackrel{\text{def}}{=} J(\xi, \theta) \Delta \theta \quad (4)$$

となる。 $J(\xi, \theta)$ を画像ヤコビアンとして定義する。画像ヤコビアンはロボットアームの角度の変分と特徴量の変分との関係を表す。

これらから、特徴ベース法によるビジュアルサーボ系のブロック図は図3のように表される。

〈2・2〉 画像ヤコビアンの近似 本研究では、基本的にはカメラの中心に物体を捉えることを目標とする。よって、目標特徴量 ξ_d は通常の制御においては0である。つ

図3 ビジュアルサーボ系のブロック図
Fig. 3. Block Diagram of Visual Servo using Feature Based Method

まり、全体としては検出される特徴量にネガティブフィードバックをかけてこれをゼロに収束させる構成となっている。そして特徴量誤差 $\Delta \xi \stackrel{\text{def}}{=} \xi - \xi_d$ から、 $\Delta \theta = J^{-1} \Delta \xi$ により $\Delta \theta$ を算出する。また、本研究のようなロボット系では写像 $u(\theta)$ と画像ヤコビアン $J(\xi, \theta)$ はそれぞれ

$$u(\theta) = \frac{f}{Z} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ -\sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$J = \begin{pmatrix} \xi_y - \frac{f}{Z} L_1 \sin \theta_2 & \xi_y \\ -\xi_x - \frac{f}{Z} L_1 \cos \theta_2 - \frac{f}{Z} L_2 & -\xi_x - \frac{f}{Z} L_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

と表せる。 $\xi = (\xi_x, \xi_y)$ と θ はともに観測可能であるから、画像ヤコビアンは(6)式を用いて簡単に計算可能である。

しかし、実際にシステム内で用いるのは、 J^{-1} であるから、 J が正則であるための条件を調べる必要がある。

$$\det J = \left(\frac{f}{Z} \right)^2 L_1 (Y_o \cos \theta_1 - X_o \sin \theta_1) \quad (7)$$

であるから、これがゼロになるのは $Y_o \cos \theta_1 = X_o \sin \theta_1$ のとき、すなわち目標物体が、1軸上もしくは1軸の延長上に位置しているときである。この場合、ロボットの可動範囲内の任意の場所で、 $\det J = 0$ となりうるので好ましくない。

そこで、画像ヤコビアンから u の変化による項を無視すると、

$$J = \begin{pmatrix} -\frac{f}{Z} L_1 \sin \theta_2 & 0 \\ -\frac{f}{Z} L_1 \cos \theta_2 - \frac{f}{Z} L_2 & -\frac{f}{Z} L_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

と(6)式から特徴量の項を省いた形になる。この近似式を用いても計算上ではほとんど問題ないので、画像ヤコビアンの逆行列 J^{-1} は、(8)式をもとに計算することとする。この近似式の行列式は、

$$\det J = L_1 L_2 \sin \theta_2 \quad (9)$$

である。よって、 J^{-1} が存在しないのは、 $\sin \theta_2 = 0$ 、つまり2本のアームが伸びきった状態、もしくは畳まれた状態である。このような状態は特異姿勢であり、ロボットを制御する際にはこのような姿勢にならないことが必要である。しかし、ロボットの目標位置が可動範囲内にあれば、通常特異姿勢をとることはないため、特に対策を講じる必要はない。

〈2・3〉 目標物体の運動モデルによる制御手法の分類
ビジュアルサーボ系の制御には様々なアプローチが存在し、目標物体の運動モデルの取り扱い方も様々である。

最も基礎的な運動モデルは、目標物体が静止している場合である。この場合は、画像処理時のむだ時間や制御入力
の調節などが問題となってくる。画像情報をFB的に用い
るビジュアルサーボでは、むだ時間が存在すると当然制御
入力が遅れるため、追従性能は劣化してしまう。これに対
して、岡崎らによるむだ時間そのものに対してアプローチ
する手法^{(2) (4)}、橋本、木村らによるむだ時間そのものには
アプローチせずに、系の安定性を向上させる手法⁽⁷⁾などが
提案された。

また、目標物体の運動が既知である場合における研究も
行なわれている。この場合には、予め与えられた目標物体の
軌道情報とリアルタイムの画像情報を用いて、確実な制御
を行うことが主な目的となる。この目的を達成するために、
遠藤、田中らは、追従すべき目標軌道は予め与えられてい
ることから、目標軌道全体の情報を利用した最適予見制御
を用いることで滑らかかつ正確な軌道追従を実現した⁽⁸⁾。

それに対して本研究は、目標物体の軌道が一般に未知で
ある場合について扱う。この場合、物体の軌道情報は全く
のリアルタイムでしか得られないため、目標物体の運動が
既知である場合と同様な精度で制御を行なうことは難しい。
しかし、特徴ベース法を用いたビジュアルサーボ系で、任
意の軌道の運動物体を対象にした研究は、カルマンフィル
タを用いた手法などが提案されたもののあまり多くはない。
そこで本研究では、過去における物体の運動を参照して、そ
の未来位置を予測する制御系を考える。これを実現する運
動推定オブザーバを提案し、その有効性をシミュレーショ
ンおよび実験で検証する。

3. 運動推定オブザーバを用いた特徴量予測の提案

〈3・1〉 ビジュアルサーボの基本手法 ビジュアルサー
ボの基本手法は、図4のコントローラ $C(s)$ にP制御器を
用いたものである。

このシステムにおいて、カメラによって得られる画像情
報はおよそ33msごとに更新される。よって、画像特徴量
などFB系の情報は、この周期でサンプリングされる離散
系で考える。それに対し、2軸DDロボットのジョイント
サーボ系は、1ms以下の周期で実行することが可能である。
制御系全体が単一の制御周期で構成されている系に対し、
このような制御系をマルチレートサンプリング系とよぶ。
本研究では特に考慮していないが、我々はその特徴を生か
した制御手法の提案もすでに行っている⁽⁶⁾。

さて、目標物体の運動を考慮にいれない場合、特徴量 ξ
における状態方程式、および制御入力 は(4)式から

$$\xi(k+1) = \xi(k) + J\Delta\theta(k) \quad (10)$$

$$\Delta\theta_{ref} = -KJ^{-1}\Delta\xi \quad (11)$$

と書ける。(11)式は、特徴量誤差をゼロにするような状態
フィードバックになっている。

次に、目標物体の運動を考慮にいれた状態方程式を考え
ると、物体位置の変分 Δs_o を用いて

$$\xi(k+1) = \xi(k) + J\Delta\theta(k) + L\Delta s_o(k) \quad (12)$$

と表される。 $L(\theta)$ は、目標物体の微小変化とそれに対す
る画像特徴量の変分の関係を表す行列であり、画像ヤコビ
アンに対して運動ヤコビアンとよばれる⁽⁸⁾。

比例制御のみの場合、目標物体が運動すると、むだ時間
やロボットのダイナミクスにより制御性能が大幅に劣化し
てしまう。そこで、目標物体の運動項である $L\Delta s_o$ を推
定し、これを制御に用いることでシステムの高精度化をは
かる。

〈3・2〉 等速直線近似を直接的に用いた運動推定 目
標物体の運動を推定する方法はいくつか考えられるが、単
純に等速直線近似を用いることを考える。前節の(12)式と
等速直線近似

$$L\Delta s_o(k+1) = L\Delta s_o(k) \quad (13)$$

$$\xi(k+1) - \xi(k) = \xi(k) - \xi(k-1) \quad (14)$$

を用いて、(15)式のように次ステップの運動項 $L\Delta s_o(k+1)$
を推定する。

$$L\Delta s_o(k+1) = \xi(k+1) - \xi(k) - J\Delta\theta(k) \quad (15)$$

この手法でもある程度の効果は期待できるが、基本的に
推定はデッドビート的になってしまう。よって、安定な誤
差の収束は期待できず、さらにモデル化誤差やノイズの影
響によりシステムが不安定になってしまう恐れがある。

〈3・3〉 運動推定オブザーバ 本研究では、外乱オブ
ザーバを用いて目標物体の運動を推測することを提案し、
これを運動推定オブザーバと呼ぶこととする。

運動推定オブザーバは、 $L\Delta s_o(k) = d(k)$ を新たに状
態変数とする拡大系について、最小次元オブザーバを用い
て構成する。そして特徴ベース法における物体の運動項を
推定し、これを制御に用いる。特徴量 ξ が観測可能な状態
変数、運動項 d が観測できない状態変数である。

まず、 $d(k+1) = d(k)$ という近似を用いる。これは前
節の等速直線近似と同様であるが、前節の手法と区別す
るためにこれをステップ近似と呼ぶことにする。

さて、ステップ近似を用いると、システムは

$$\begin{pmatrix} \xi(k+1) \\ d(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & I \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi(k) \\ d(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} J \\ 0 \end{pmatrix} \Delta\theta(k) \quad \dots (16)$$

と書き表せる。この式について、最小次元オブザーバを適
用すると、次のような構成になる。

$$\hat{d}(k+1) = \hat{d}(k) + K(\xi(k+1) - \hat{\xi}(k+1)) \quad (17)$$

図7 運動推定オブザーバを用いたシミュレーション結果

Fig. 7. Simulation Result in case of using MOB

うことで、システムの制御性能が向上することが確かめられた。また位相遅れは、運動推定オブザーバを用いることで、70ms からおよそ 30ms まで減少した。

〈4・3〉 オブザーバの次数を増やした場合に対する検討
本研究では、運動推定オブザーバは目標物体の運動項をステップ近似して設計した。しかし、たとえば運動項の加速度を一定として運動推定オブザーバを設計することも可能である。以後、この場合をステップ近似に対してランプ近似と呼ぶ。このときは、以下のようにオブザーバの次元を拡張すればよい。

目標物体の運動モデルをランプ近似すると、運動項を表す式は

$$\hat{d}_{k+1} = d_k + (d_k - d_{k-1}) = d_k + \Delta d_k \quad (22)$$

となる。よって、 $\hat{d}_1(k) = \hat{d}(k)$, $\hat{d}_2(k) = \Delta d(k)$ としてシステムの状態方程式を立てると、

$$\begin{pmatrix} \xi(k+1) \\ \hat{d}_1(k+1) \\ \hat{d}_2(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & I & 0 \\ 0 & I & I \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi(k) \\ \hat{d}_1(k) \\ \hat{d}_2(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} J \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta \theta(k) \quad (23)$$

と書き表せる。このシステムについて、運動推定オブザーバを構成してシミュレーションを行なった。比較対象は等速直線近似による運動推定オブザーバである。目標物体は前節と同様の等速円運動を行なっているとして、両オブザーバの推定運動項の誤差を図8に示す。左側のグラフがむだ時間をいれない場合、右側のグラフが40msのむだ時間を考慮した場合である。むだ時間がない場合は、ランプ近似によるオブザーバの方が良い精度で推定できているが、この程度の違いでは制御性能にはほとんど差が出ない。さらにむだ時間が存在する場合には、過渡応答がやや振動的になってしまっている。また、目標物体が急に運動方向を変えた場合などでも振動的な応答になりやすく、安定性という面では問題が残る。よって、オブザーバは速度までを考慮した本手法のもので十分であると思われる。

5. 2軸DDロボットによる実験

〈5・1〉 実験システムの構成 提案手法の有効性を確かめるため、2軸DDロボットを用いて実験を行った。

図8 オブザーバの次数による運動項推定の比較

Fig. 8. Comparison of Motion Estimation on the Order of Observer

実験システム全体の構成を図9に示す。

図9 実験システムの構成

Fig. 9. Construction of the Experiment System

実験では一定のサンプリング間隔で計算を行うこと、またカメラが得た画像情報をPCにリアルタイムで受け渡すことなどリアルタイム性が要求されるため、OSとしてRT-Linuxを用いた。目標物体は、ACモータを用いて円盤を回し、円盤の端の部分に印をつけてそれを追従させる構成とした。円盤は、2軸ロボットの上に組まれたやぐらに取り付けた。

ロボットの各数値は、1軸の長さが $L_1 = 359[\text{mm}]$ 、2軸の長さが $L_2 = 240[\text{mm}]$ 、 $F = f/Z = 0.006$ である。また、目標物体は半径 $5[\text{cm}]$ の円周軌道上を $\pi[\text{rad/s}]$ の速さで等速円運動をさせ、ジョイントサーボ系はPD制御器と外乱オブザーバを用いてロバストな制御系を構成した。

〈5・2〉 実験結果および考察 運動推定オブザーバを用いない場合と適用した場合におけるカメラ軌道、およびそのX軸方向の時間変化を図10に示す。また、X軸方向の追従誤差と両手法における画像特徴量の時間変化を図11に表す。

実際の実験では、ビジョンループはおよそ $100[\text{ms}]$ ほどであった。これは特徴量の計算や画像の描画にかなり時間を要してしまったためである。また、画像特徴量は $100 \times 100[\text{pixel}]$ でとったデータを $-1 \sim +1$ で正規化して得られた。

従って画像特徴量のデータは、時間・空間方向ともかなり量子化誤差が大きい。さらに、目標物体は簡単なものを使ったため、画像データはある程度の外乱を含んでいることが予想される。しかし、図10から分かるように、オブ

図 10 カメラ軌道の比較

Fig. 10. Comparison of Camera Orbit

図 11 追従誤差の比較

Fig. 11. Comparison of the Tracking Error

ザーバを用いない場合に比べて、用いた場合には明らかに位相誤差が減っている。振幅はやや大きくなってしまっているが、これは目標物体の運動を等速直線近似したために目標位置がやや外側に膨らんでしまったためと思われる。

なお、目標物体が運動している場合では、追従誤差はほとんど位相遅れによるところが大きい。従って図 11 で示すように、オブザーバを用いたほうが追従誤差は減少する。

また、運動推定オブザーバを用いない場合に比べて、オブザーバを用いた場合は画像特徴量が小さくなっている。目標特徴量は原点としているので、これは望ましい制御ができているといえる。以上から提案手法の有効性が確かめられた。

6. 結 論

以上、本論文では画像上における目標物体の運動を推定する運動推定オブザーバを提案した。目標物体の位置情報は本来検出できないものであるが、それをオブザーバによって推定するシステムを提案した。そして、そこで推定した情報を制御に用いることで、特徴ベース法においてより高精度なビジュアルサーボ系が実現できることをシミュレーションと実験によって示した。

また、オブザーバを用いずに単純な推定を行なった場合、オブザーバの次数を上げた場合についても考察を行ない、オブザーバを用いた推定手法の優位性、オブザーバはステップ近似で十分であることをシミュレーションで検証した。

今後の課題としては、推定された運動項に対する適当な制御器の考察、実験装置の改良などが挙げられる。

(平成 13 年 5 月 25 日受付, 同 13 年 11 月 16 日再受付)

文 献

- (1) S.Hutchinton, G.D.Hager, P.I.Corke: 「A Tutorial on Visual Servo Control」, IEEE, Transactions on Robotics and Automation, p.651-670, (1996)
- (2) 岩崎靖志, 村上俊之, 大西公平: 「時間遅れ補償を考慮に入れたビジュアルサーボ制御系の一構成法」 電気学会産業計測制御研究会, IIC-97-23, pp.91-96, (1997)
- (3) 中野正一, 駒田論, 堀孝正: 「推定画像特徴量を用いた 3 次元再構成を行わないロボットマニピュレータのステレオビジュアルサーボ」, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, vol.1, pp.451-454, (1999)
- (4) 岡崎俊太郎, 藤本博志, 堀洋一: 「むだ時間を持つ視覚フィードバック系における高速でロバストな制御器の一提案」, 電気学会産業計測制御研究会 IIC-00-18, pp.103-108, (2000)
- (5) 遠藤公啓, 田中弘一, 荒川賢一, 武川直樹: 「予見制御による視覚軌道追従制御法」, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4, pp.85-92, (1997)
- (6) 藤本博志, 堀洋一: 「マルチレートサンプリング制御を用いた繰返し外乱抑圧制御法の提案とビジュアルサーボへの応用」, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol.1, pp.503-506, (2000)
- (7) 橋本浩一, 海老根巧, 木村英紀: 「ビジュアルサーボインテグ-最適制御によるアプローチ」, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.5, pp.773-778, (1994)
- (8) 橋本浩一, 木村英紀: 「ビジュアルサーボインテグ-非線形オブザーバアプローチ」, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.7, pp.92-99, (1995)

塚 田 訓 彦 (学生員) 1978 年生。2001 年東京大学工学部電気工学科卒業。東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程在学中。学部ではビジュアルサーボ系の制御, 大学院ではマイクロマシンの制御に関する研究に従事。電気学会の会員 (学生員)。

藤 本 博 志 (正員) 1974 年 2 月 3 日生。1996 年横浜国立大学工学部電子情報工学科卒業。1998 年同大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程前期 (修士課程) 修了。2001 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2001 年長岡技術科学大学工学部電気系助手。デジタル制御, メカトロニクス, モーションコントロールに関する研究に従事。電気学会, 計測自動制御学会, IEEE の会員。

堀 洋 一 (正員) 1978 年東京大学工学部電気工学科卒業, 1983 年同大学院博士課程修了。助手, 講師, 助教授を経て, 2000 年 2 月より電気工学科教授。門は制御工学とその産業応用, とくに, モーションコントロール, メカトロニクス, 電気自動車などの分野への応用研究。最近では福祉制御工学を開始。1993 年 IEEE Trans. on IE 最優秀論文賞, 2000 年電気学会論文賞などを受賞。電気学会, 計測自動制御学会, IEEE, 日本ロボット学会, 日本機械学会, 自動車技術会などの会員。