

# 冗長自由度を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成

○石田 匡平      細田 耕      浅田 稔  
大阪大学 工学部

## Visual Servoing Utilizing Kinematic Redundancy

○Kyohei Ishida      Koh Hosoda      Minoru Asada  
Osaka University

### 1 はじめに

近年、ビジュアルサーボ系の研究が多くなされているが、そのほとんどがロボットや環境に関してかなりの知識を必要とするものであった。それに対して、細田ら<sup>1)</sup>はロボットの構造やパラメータに関する先験的知識を用いない適応型ビジュアルサーボ系を提案した。ここで提案されている適応型ビジュアルサーボ系は、ある画像特徴量を目標値に収束させる軌道追従タスクに対して、これを実現するためのヤコビ行列推定則を有しているが、追従タスクに対してロボットが冗長である場合について考察していない。

そこで本報告では、適応型ビジュアルサーボ系がロボットの画像特徴量追従タスクに対する冗長性を持っている場合それを利用し、推定されたヤコビ行列を用いてさらに別のタスクを達成する方法を提案する。また、実機による実験によりその有効性を検証する。

### 2 問題設定

適応型ビジュアルサーボ系による画像特徴量追従タスクを以下の仮定のもとで定式化する。

- ロボットは画像特徴量目標値追従タスクに対して冗長な自由度を持つ。
- 環境やロボットの構造・パラメータに関する先験的知識は用いない。
- 画像特徴量・各関節の角度・角速度指令値・トルク指令値は観測できる。
- 個々の関節の可動範囲は既知である。

### 3 画像特徴量と関節変位間の関係の推定

#### 3.1 画像特徴量と関節変位間のヤコビ行列

サンプリング時間  $T$  が十分短く、注視対象が基準座標系に対して静止していると見なせる場合、ロボットの関節角ベクトル  $\theta \in \mathbb{R}^n$  と注視対象の画像特徴量  $x \in \mathbb{R}^m$  の間には

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (1)$$

という関係が成立する。ここで、 $J(\theta) = \partial x / \partial \theta^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$  は関節角速度と画像特徴量速度の関係を表すヤコビ行列である。

#### 3.2 ヤコビ行列の推定則<sup>1)</sup>

システムに関する先験的な知識を用いない実時間でヤコビ行列の推定則は次のようになる。サンプリング時間  $T$  が十分短く、その間のヤコビ行列  $J$  が一定であると仮定し、式(1)を離散化する。

$$x(k+1) = x(k) + J(k)u(k) \quad (2)$$

ここで  $u = T\dot{\theta}$  である。式(2)を満たすヤコビ行列の推定値およびその第  $i$  行ベクトル  $\hat{J}, \hat{j}_i$  を逐次最小二乗法をもとに、

$$\begin{aligned} \{\hat{j}_i(k+1) - \hat{j}_i(k)\} = \\ \frac{\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}(k)u(k)\}_i}{\rho_i + u(k)^T W_{(i,k)} u(k)} W_{(i,k)} u(k) \end{aligned} \quad (3)$$

と推定する。ただし、 $W_{(i,k)} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は  $\hat{j}_i(k)$  の変化に対する重み、 $\rho_i$  は正の定数で、 $\|u\|$  が十分に大きい時には無視でき、また小さい時には右边が発散しないような適当な値を選ぶ必要がある。この推定則は真のヤコビ行列を推定するのが目的ではなく、

$$\dot{x} = \hat{J}\dot{\theta} \quad (4)$$

を満たすように推定していることに注意されたい。

### 4 冗長性の利用および制御則

#### 4.1 重み付き疑似逆行列

ロボットが画像特徴量追従タスクに対して冗長である時、その冗長自由度を利用して別のタスクを実行させる。ここでは、各タスク間に適当な重みを付ける重み付き疑似逆行列によってタスクを適切に関節空間に分解する。重み付き疑似逆行列は式(4)の条件の下で、次のような形式のポテンシャル関数が極値をとるような、条件付き極値問題の解である。

$$E = \dot{\theta}^T \Phi \dot{\theta} + \epsilon \quad (5)$$

ただし、 $\Phi \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は正定対称行列、 $\epsilon$  は1項目に対するオフセットの定数である。式(4)を満たし、式(5)が極値をとるような  $\dot{\theta}$  は、Lagrange の未定乗数法によって

$$\dot{\theta} = \Phi^{-1} \hat{J}^T \left( \hat{J} \Phi^{-1} \hat{J}^T \right)^{-1} \dot{x} \triangleq J^\# \dot{x} \quad (6)$$

と求められる。

#### 4.2 制御則

式(6)より、次のように制御系を構成する。

$$u = -J^\# K e \quad (7)$$

ただし、 $e = x - x_d$  は画像特徴量誤差であり、 $K$  は正定ゲイン行列である。式(7)によって、画像目標値に追従し、さらに式(5)で与えられるポテンシャル関数を極値にするようなビジュアルサーボ系を構成できる。

#### 4.3 別のタスクを実現するポテンシャル関数の構成

##### 4.3.1 可操作度に関するポテンシャル

マニピュレータが特異点からできるだけ離れるようなポテンシャルを考える。マニピュレータにおける可操作度は特異姿勢までの一種の距離を表す<sup>2)</sup>ので、このようなポテンシャルはヤコビ行列の推定値を用い、疑似的に

$$\begin{aligned} E_1 &= \dot{\theta}^T (\hat{J}^+ \hat{J})^T (\hat{J}^+ \hat{J}) \dot{\theta} - 1 \\ &= \dot{\theta}^T (\hat{J}^+ \hat{J}) \dot{\theta} - 1 \triangleq \dot{\theta}^T \Phi_1 \dot{\theta} - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

と書くことができる。

##### 4.3.2 可動範囲に関するポテンシャル

関節角度  $(\theta_i, i = 1 \dots n)$  が可動範囲を越えてしまわないように次のようなポテンシャル関数を構成する。

$$E_2 = \dot{\theta}^T \Phi_2 \dot{\theta}, \quad \Phi_2 = \text{diag}(\phi_1, \dots, \phi_n) \quad (9)$$

$$\phi_i \triangleq \begin{cases} 1 / ((\theta_i - \theta_{i,min})(\theta_{i,max} - \theta_i)) & (\theta_i \text{ が可動限界へ近付く時}) \\ \epsilon_2 & (\theta_i \text{ が可動限界から遠ざかる時}) \end{cases} \quad (10)$$

可動限界方向へ動く時は可動限界近傍において重みが非常に大きくなり、可動限界と反対方向へ動く時や、可動範囲の中心近傍では重みが十分小さくなるように設定している。

#### 4.3.3 トルクによるポテンシャル

トルク ( $\tau_i, i = 1 \dots n$ ) の消費が少ない関節により多くのタスクを分配するように重み付けするポテンシャルとして

$$E_3 = \dot{\theta}^T \Phi_3 \dot{\theta}, \Phi_3 = \text{diag}(\phi_1, \dots, \phi_n) \quad (11)$$

$$\phi_i \triangleq \int_{t_0}^t \tau_i^2 dt + \varepsilon_3 \quad (12)$$

を与える。ここで  $\varepsilon_3$  は  $\tau_i$  が 0 の時に  $\Phi$  が特異行列にならないように選ぶ定数である。 $\phi_i$  は単調増加であるので、実験の際には  $\Phi_3$  を正規化して用いる。

#### 4.3.4 複数のタスクを実現するポテンシャル

以上の複数のタスクを実現するポテンシャルは、次のように  $\alpha_i$  を重みとした和によって構成できる。

$$\Phi = \alpha_1 \Phi_1 + \alpha_2 \Phi_2 + \alpha_3 \Phi_3 \quad (13)$$

## 5 実験

### 5.1 実験装置

三菱重工製可搬式汎用知能アーム PA10(7自由度まで可)を使用する。ホストとして MVME167(MC68040 33MHz) をバスマスタとする VME バスシステム (OS: VxWorks) を用いた。VME システムは他にロボットコントローラと接続するためのアークネットボード (東洋マイクロシステム社製)、カメラ画像からテンプレート画像を相関演算によって実時間追跡 (1/30[s]) するトラッキングビジョン (富士通製) で構成される。ビジュアルサーボ制御周期は 34[ms] である。

### 5.2 実験結果

Fig.1 で示すように 2・6 軸を使用し、2 自由度の動作をさせる。カメラは単眼を用いる。画像特徴量は 1 つの点であり、上下方向の 1 自由度運動をする。ロボットは 2 自由度を持つので画像追従タスクに対して冗長系となる。システムに対する先験的知識が無いとの仮定より、ヤコビ行列の初期値を

$$\hat{J}(0) = \begin{bmatrix} -10 & -1 \end{bmatrix}$$

と適当に決めた。また、 $\rho_i = 0.5$ ,  $W = I$ , 式 (7) のフィードバックゲイン  $K = 5.0 \times 10^{-2}$  は実験的に選んだ。可動範囲は 6 軸のみ設け、47 ~ 53 度とした。

Fig.2, 3 に実験結果を示す。[CASE1]  $\Phi = \Phi_1$  の時、2 軸へのタスクの分配が顕著である。幾つかの  $\hat{J}(0)$  について実験的したところ、分配の程度は初期値の選び方によって大きく変化することを確認した。[CASE2] そこで、 $\Phi = \Phi_3$  にした所、 $\hat{J}(0)$  に関係なく、6 軸への分配が顕著になった。[CASE3]  $\Phi = 2.0 \times 10^{-5} \Phi_2 + 1.0 \Phi_3$  では可動範囲の中央付近では 6 軸、可動限界付近では 2 軸に多くタスクが分配され、消費トルクをなるべく少なくするタスクと可動範囲を超えさせないタスクがロボットの姿勢に応じて達成できている。

## 6 おわりに

本報告では適応型ビジュアルサーボ系が冗長自由度を持つ場合に、重み付き疑似逆行列を用いることにより、構造やパラメータに関する知識を用いないで冗長自由度を利用して複数のタスクを実現する方法を提案し、実験でその有効性を検証した。

## 参考文献

- [1] 細田, 浅田. 構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 313-319, 1996.

- [2] 吉川. ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.

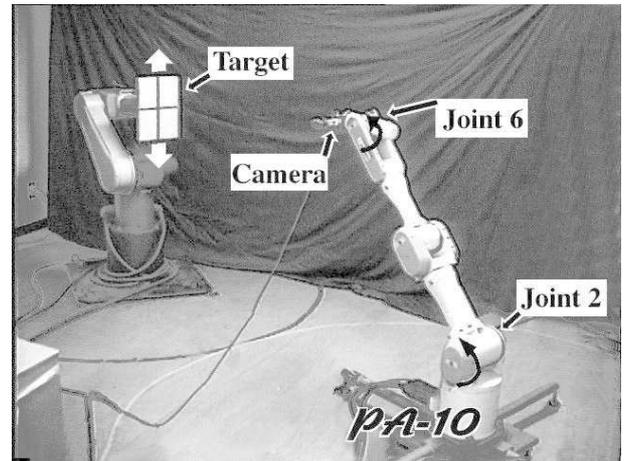


Fig.1 System ( $\theta_{1,3,4,5,7}$  is fixed.)

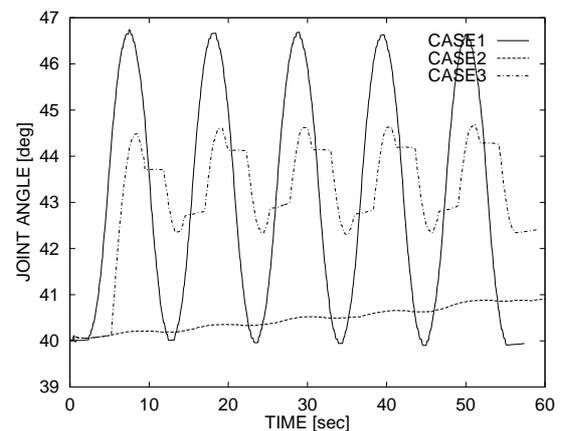


Fig.2 Joint 2

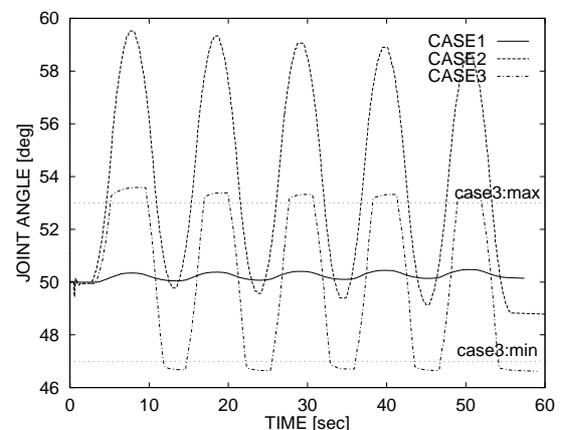


Fig.3 Joint 6