

# 可視度を評価関数として制御する方法

システム制御研究室 松田 浩義

平成 17 年 11 月 7 日

## 1 はじめに

視覚情報を用いたロボット制御では、マニピュレータの動きに伴う画像情報の変化の大小がロボットの制御性能に大きな影響を与えることが知られており、[1] らは吉川 [2] の提案したマニピュレータの操作性の概念を視覚部分に発展させた。

吉川 [2] は、冗長マニピュレータを用いて目標軌道を追従しつつ、可操作度が增大するように制御する方法を述べている。

[3] では、冗長マニピュレータの視覚フィードバック制御が行われており、[4] らの視覚フィードバック制御に [2] の可操作性の概念が融合されている。しかし、視覚情報を用いたロボット制御の重要な問題点である可視性については触れられていない。

本レポートでは、冗長性を利用した評価関数を最適にする制御方法について、その原理を述べる。その評価関数として [4] らの画像ヤコビアンにより計算される可視度を用いることを考える。

## 2 冗長性を利用した評価関数を最適にする制御法

ロボットマニピュレータの関節変数を  $q \in \mathcal{R}^n$  とすると、ロボットの手先の位置姿勢  $r \in \mathcal{R}^m$  は以下のように表される。

$$r = f(q) \quad (1)$$

これを時間微分することで、以下のような手先の速度  $\dot{r} \in \mathcal{R}^m$  と関節速度  $\dot{q} \in \mathcal{R}^n$  の関係が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \frac{\partial f}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial t} = J_r \dot{q} \\ J_r &= \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{m \times n} \end{aligned} \quad (2)$$

この  $J_r \in \mathcal{R}^{m \times n}$  はマニピュレータヤコビアンと呼ばれており、冗長マニピュレータ ( $m < n$ ) の場合、横長の行列となる。目標軌道  $r^*$  が与えられた場合、(2) の  $\dot{q}$  に関する一般解は、

$$\dot{q} = J_r^\dagger \dot{r}^* + (I_n - J_r^\dagger J_r) k \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $J_r^\dagger \in \mathcal{R}^{n \times m}$  はマニピュレータヤコビアンの疑似逆行列を示し、

$$J_r^\dagger = J_r^T (J_r J_r^T)^{-1} \quad (4)$$

で表される。また、 $k \in \mathcal{R}^n$  は任意ベクトルである。第 1 項目が第 1 サブタスクで、第 2 項目が冗長性を利用した第 2 サブタスクとなっている。[3] は (3) 式を Extended Task Space 表現で以下のように示している。

$$\dot{q} = J_e^{-1} \dot{x}_{ed} \quad (5)$$

$$J_e = \begin{bmatrix} J_r \\ J_n \end{bmatrix}, \quad \dot{x}_{ed} = \begin{bmatrix} \dot{r}^* \\ \dot{x}_{nd} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(3)(5) 式は全く同じ式であるため, [2] の方法で議論することにする. [2] では冗長マニピュレータの制御において, 第 1 サブタスクがある目標軌道  $r^*$  で与えられた場合の第 2 サブタスクとして, あるスカラーの評価関数  $p$  が以下のように表される場合について議論している.

$$p = g(q) \quad (7)$$

(7) の時間微分は,

$$\dot{p} = \frac{\partial g}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial t} = \xi^T \dot{q} \quad (8)$$

ここで  $\xi$  は,

$$\begin{aligned} \xi &= [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T \\ \xi_l &= \frac{\partial g(q)}{\partial q_l}, \quad (l = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (9)$$

である. (3) を (8) に代入すると,

$$\begin{aligned} \dot{p} &= \xi^T \{J_r \dot{r}^* + (I_n - J_r^\dagger J_r)k\} \\ &= \xi^T J_r \dot{r}^* + \xi^T (I_n - J_r^\dagger J_r)k \end{aligned} \quad (10)$$

を得る. いま第 2 サブタスクの任意ベクトル  $k$  を,

$$k = \xi k_1 \quad (11)$$

と決定すると, (10) は

$$\dot{p} = \xi^T J_r \dot{r}^* + \xi^T (I_n - J_r^\dagger J_r) \xi k_1 \quad (12)$$

となる.  $k_1$  は正の定数とすると, (12) の第 2 項は常に正となる. よって  $p$  が上昇する方向に動くことが分かる. つまり (3) に (11) を代入し,

$$\dot{q} = J_r^\dagger \dot{r}^* + (I_n - J_r^\dagger J_r) \xi k_1 \quad (13)$$

とすることで, 第 1 項目によって目標軌道  $r^*$  を満足しつつ, 第 2 項目によってある評価関数  $p$  を増大する様にマニピュレータを動かすことが可能になる. 反対に  $k_1$  を負の定数にすることによって, 与えられた評価関数  $p$  を減少させるようにマニピュレータを制御することが可能となる.

## 2.1 可視度 $w_v$ を評価関数とする場合

[1] らは画像の微小変化  $\dot{f} \in \mathcal{R}^k$  と関節角度の微小変化  $\dot{q} \in \mathcal{R}^n$  を関係付けるヤコビアン  $J_c$  により, 可視操作度  $w$  という量を評価関数として提案している.

$$\begin{aligned} \dot{f} &= J_c \dot{q} = J_v J_r \dot{q} \\ J_v &= \frac{\partial f}{\partial r} \in \mathcal{R}^{k \times m} \\ J_r &= \frac{\partial r}{\partial q} \in \mathcal{R}^{m \times n} \\ w(q) &= \sqrt{\det(J_c J_c^T)} \end{aligned} \quad (14)$$

一方, [4] らのシステムのイメージヤコビアンは推定ベクトル  $e_e \in \mathcal{R}^6$  と実際にカメラから得られる画像情報  $f$  とそれを推定した画像情報  $\bar{f}$  の偏差を関係付けるものだった. それを以下に示す.

$$f - \bar{f} = J_e e_e \quad (15)$$

このイメージヤコビアン  $J$  を用いて可視度  $w_v$  を以下のように提案した [5].

$$w_v = \sqrt{\det(J^T J)} \quad (16)$$

この可視度  $w_v$  を評価関数  $p$  とし, 制御則 (3) に適用することで目標軌道  $r^*$  に追従しつつ, 可視度  $w_v$  を増大する方向にマニピュレータを制御することができる. 第 2 サブタスクとして評価関数  $p$  をとる場合, それを関節角度  $q$  の関数とすればよい.

そこで, この画像ヤコビアン  $J$  を関節角度  $q$  の関数になるよう関係付けなくてはならない. 特徴点  $i$  番目の観測対象点に対する画像ヤコビアン  $J_i \in \mathcal{R}^2$  は以下のように示されている [4].

$$J_i := \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \\ 0 & 1 & -\frac{\bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \end{bmatrix} \bar{R}_{co} \begin{bmatrix} I_3 & -\hat{p}_{oi} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^2 \quad (17)$$

$\bar{p}_{ci} = [\bar{x}_{ci}, \bar{y}_{ci}, \bar{z}_{ci}]^T$  はカメラから特徴点  $i$  までの推定位置ベクトルであり,  $\bar{R}_{co}$  はカメラと観測対象座標系の相對姿勢を示す回轉行列,  $p_{oi}$  は観測対象座標系からみた特徴点  $i$  の位置ベクトルである. (17) 式を関節変数  $q$  の関数とするために以下のような関係を使用する.

$$R_{wc}(q)\bar{R}_{co} = \bar{R}_{wo} \quad (18)$$

$$\bar{R}_{co} = R_{wc}(q)^T \bar{R}_{wo} \quad (18)$$

$$\bar{p}_{co} = R_{wc}^T(\bar{p}_{wo} - p_{wh}(q)) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \bar{p}_{ci} &= \bar{R}_{co}p_{oi} + \bar{p}_{co} \\ &= R_{wc}(q)^T \bar{R}_{wo}p_{oi} + R_{wc}(q)^T(\bar{p}_{wo} - p_{wh}(q)) \end{aligned} \quad (20)$$

$(\bar{p}_{wo}, \bar{R}_{wo})$  基準座標系から観測対象座標系の相對位置姿勢を示しており, 関節  $q$  に無関係である. 関節変数  $q$  に関係するのは基準座標系から見たのカメラの位置姿勢  $(p_{wc}, R_{wc})$  であり, (18)(20) を (17) に代入することで, 画像ヤコビアン  $J$  が関節変数  $q$  の関数に関係付けることができ, 第 2 サブタスクとしての評価関数  $p$  が関節角度  $q$  の関数として表現できる.

### 3 今後の展望

現在, 簡単のため 3 自由度平面マニピュレータを用いて, シミュレーションを行っている. 作業タスクとしては単純な, マニピュレータの手先に取り付けてあるカメラ位置を観測対象の位置 ( $x$  と  $y$  だけ) と一致させることをしている. 本レポートでは結果を載せていないが, 今のところ可視度を評価関数として制御させても, 冗長性を利用しない制御とあまり変化が見られない結果となった. モデルを確かめている所である.

今後の展望としては, 自由度を 1 つ増やし 4 自由度マニピュレータを考え, 作業タスクに姿勢も考慮して行うことを考えている.

### 4 おわりに

本レポートでは, 冗長性を利用した評価関数を最適にする制御方法について, その原理を述べた. その評価関数として [4] らの画像ヤコビアンにより計算される可視度を用いることを考えた.

### 参考文献

- [1] R. Sharma and S. Hutchinson, "Motion Perceptibility and its Application to Active Vision-Based Servo Control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 4, pp. 607-617, 1997.
- [2] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulators with redundancy," M. Brady and R. Paul(eds), *Robotics Research: The First International Symposium of Robotics Research*, MIT Press, pp. 735-747, 1984.
- [3] F. Sawo, M. Fujita and O. Sawodny, "Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control of Manipulators with Kinematic Redundancy," *Proc. of the 2005 IEEE Conference on Control Applications*, pp. 1200-1205, 2005.

[4] 河合, 受動性に基づくロボットの 3 次元動的視覚フィードバック制御, Ph. D. Thesis, Kanazawa University, 2004.

[5] 松田, “可視性について,” 提出レポート, July. 11, 2005.