

可視度を評価関数とした冗長マニピュレータの 視覚フィードバック制御のシミュレーション

システム制御研究室 松田 浩義

平成 17 年 12 月 5 日

1 はじめに

前回は、冗長性を利用し与えられる評価関数を増大する制御方法について述べた。今回は、その評価関数として [2] からの画像ヤコビアンにより計算される可視度 w_v を用い、シミュレーションを行い検証する。

2 冗長マニピュレータを用いた動的視覚フィードバックシステム

[2] のシステムに対し、マニピュレータを冗長にすることで、制御目的を達成する際に、障害物を回避することや、マニピュレータの特異姿勢を回避することができる。従来研究 [1] では、[2] のシステムを冗長マニピュレータを用いた視覚フィードバック制御として発展させた。冗長マニピュレータをもちいた動的視覚フィードバックシステムは (1) のように定式化され、システムの状態を x とし、入力を u 、外乱を w として (2)(3) のように示されている。

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_e \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_e^{-1}C_e\xi_e + M_e^{-1}J_e^{-T}(q)J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})}J_b(q)J_e^{-1}(q)\xi_e \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_e^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} & I \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M_e^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} w \quad (1)$$

$$x := \begin{bmatrix} \xi_e^T & e_c^T & e_e^T \end{bmatrix}^T \quad u := \begin{bmatrix} u_{\xi_e}^T & u_d^T + (\text{Ad}_{(g_d)}V_d^b)^T & u_e^T \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$w := \begin{bmatrix} \mathcal{F}_d^T & (V_{wo}^b)^T \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

ここで ξ_e は、

$$\begin{aligned} \xi_e &= \dot{x}_e - \dot{x}_{ed} \\ &= J_e(\dot{q} - \dot{q}_d) \\ \dot{q}_d &= J_b^\dagger u_d + (I - J_b^\dagger J_b)k \end{aligned} \quad (4)$$

であり、この任意ベクトル k が評価関数を最適にするのに重要であり、今回はそこに可視度 w_v を用いようということである。

3 受動性に基づく視覚フィードバックシステム制御則

受動性に基づくアプローチにより、システムへの入力 u を以下のように決定されている。

$$u = -KNx$$

$$N := \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T Wc & 0 \\ 0 & \text{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})} Wc & -We \end{bmatrix}$$

$$K := \begin{bmatrix} K_{\xi_e} & 0 & 0 \\ 0 & K_c & 0 \\ 0 & 0 & K_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

以上の入力を用いることで、外乱 w が存在しない場合、システム (1) の平衡点 $x = 0$ は漸近安定であることが [1] で述べられている。

4 シミュレーション

[1] の提案した制御則より、評価関数として可視度 w_v を与え、シミュレーションによりその有効性を検証する。

4.1 環境設定

マニピュレータの初期角度を $q_1 = 1/9\pi[\text{rad}]$, $q_2 = 1/6\pi[\text{rad}]$, $q_3 = 1/9\pi[\text{rad}]$, $q_4 = 1/9\pi[\text{rad}]$ (それぞれ, 20° , 30° , 20° , 20° に相当) とする。リンクの長さを $l_1 = 1[\text{m}]$, $l_2 = 1[\text{m}]$, $l_3 = 1[\text{m}]$, $l_4 = 0.5[\text{m}]$ とし、マニピュレータの手先と観測対象の相対位置姿勢 $p_{ho} = [0 \ 0 \ -2.5]^T[\text{m}]$, $\xi\theta_{ho} = [0 \ 0 \ 0]^T[\text{rad}]$ と設定する。観測対象の運動は $0 \leq t \leq 0.5$ 秒間は直線運動をさせ、 $0.5 < t \leq 1$ は回転運動も考え、 $1 < t$ では観測対象を静止させておく。以下に観測対象の位置姿勢 p_{wo} , $\xi\theta_{wo}$ を示す。

$$x(0) = l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} + l_4 c_{1234} \quad (6)$$

$$y(0) = l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} + l_4 s_{1234} \quad (7)$$

$$\theta(0) = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (8)$$

$$p_{wo} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x(0) & y(0) - (3-2t)t^2 y(0) & -2.5 \end{bmatrix}^T & (0 \leq t \leq 1) \\ \begin{bmatrix} x(0) & 0 & -2.5 \end{bmatrix}^T & (1 < t) \end{cases}$$

$$\xi\theta_{wo} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \theta(0) \end{bmatrix}^T & (0 \leq t \leq 0.5) \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \theta(0) - \sin((t-0.5)\pi/2) \end{bmatrix}^T & (0.5 < t \leq 0.7) \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \theta(0) - \sin(0.1\pi) \end{bmatrix}^T & (0.7 < t) \end{cases} \quad (9)$$

観測対象には 4 つの特徴点を取り付け、カメラが特徴点をとらえることで観測対象の中心を求め、カメラと観測対象の相対位置姿勢 g_{co} と目標位置姿勢 g_d を一致させることとする。目標位置姿勢 g_d は、 $p_d = [0 \ 0 \ -2.5]^T$, $\xi\theta_d = [0 \ 0 \ 0]^T$ として与える。

また、(5) 式のゲイン K を

$$\begin{aligned} K_{\xi_e} &= \text{diag}\{40 \ 40 \ 40 \ 40\} \\ K_c &= \text{diag}\{160 \ 160 \ 80 \ 80 \ 80 \ 160\} \\ K_e &= \text{diag}\{40 \ 40 \ 40 \ 40 \ 40 \ 40\} \end{aligned} \quad (10)$$

とした。

4.2 可視度に関するシミュレーション

Fig. 1-2 はそれぞれ、ゲイン K_e を変化させてみた場合の可視度 w_v の変化, 推定偏差 e_e の変化を示す.

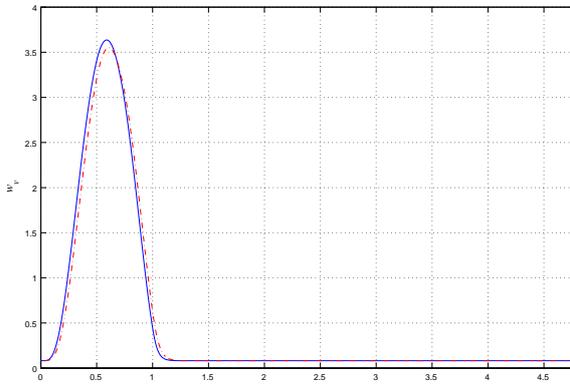


Fig. 1: 可視度 w_v の変化

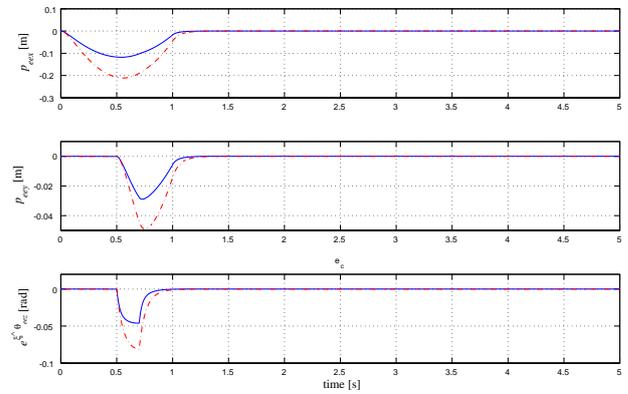


Fig. 2: 偏差 e_e の変化

実線がゲイン $K_e = \text{diag}\{40\ 40\ 40\ 40\ 40\ 40\}$ の結果を示し, 破線がゲイン $K_e = \text{diag}\{20\ 20\ 20\ 20\ 20\ 20\}$ の結果を示す. Fig. 1 より K_e の大きいほうが可視度 w_v がわずかに大きいとわかる. また, Fig. 2 より可視度 w_v が大きいほうが画像の推定偏差 e_e が小さくなっている. これより, 可視度 w_v を大きくするように制御することは推定偏差 e_e をより小さくできるのではないかと考えられる.

Fig. 3-6 に可視度 w_v を評価関数とした場合の結果と, 冗長性を利用しない $k = 0$ とした場合のシミュレーション結果をそれぞれの Fig に示す.

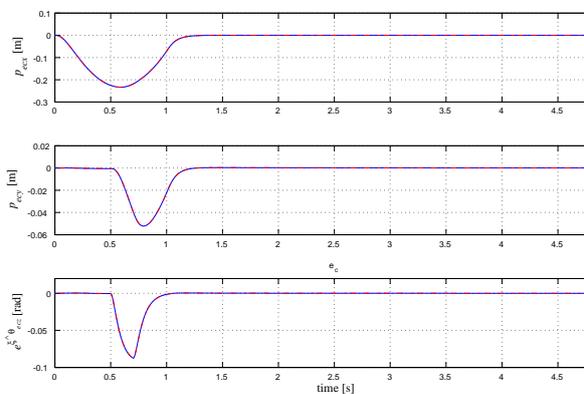


Fig. 3: 偏差 e_c

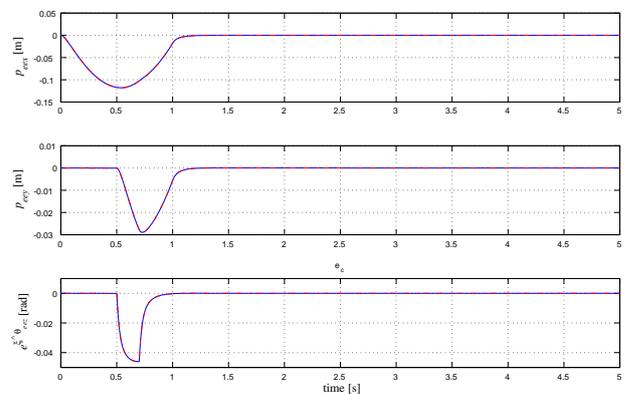


Fig. 4: 偏差 e_e

可視度 w_v を評価関数とした場合と, $k = 0$ とした場合の結果が全く同じであることが分かる. Fig. 5 からマニピュレータの位置姿勢も同様であることもわかる. さらに, 両方の可視度 w_v を比較しても変化は見られない. つまり, 可視度が増大するように制御できていないといえる.

次に, 冗長性を利用して, マニピュレータの self-motion を変化させた場合と, 可視度を考慮した場合のシミュレーションを行い比較検討する. Fig. 7-8 に結果を示す.

Fig. 7 でマニピュレータの手先の位置姿勢が同じだが, 各関節の角度が違っていると見て取れる. しかし, Fig. 8 の可視度 w_v には全く変化が見られない.

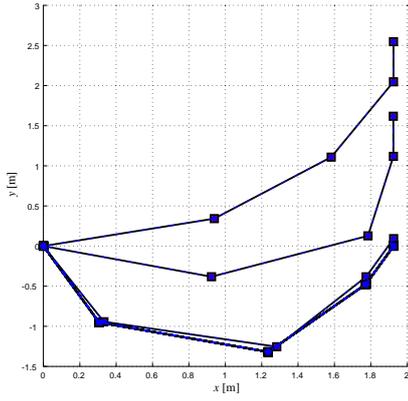


Fig. 5: マニピュレータの位置姿勢

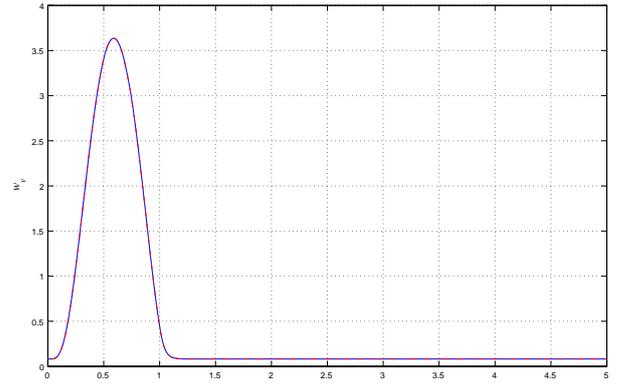


Fig. 6: 可視度 w_v の変化

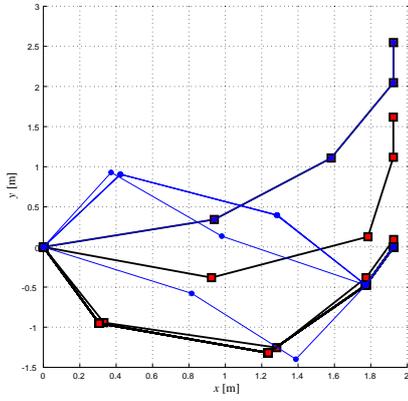


Fig. 7: マニピュレータの位置姿勢

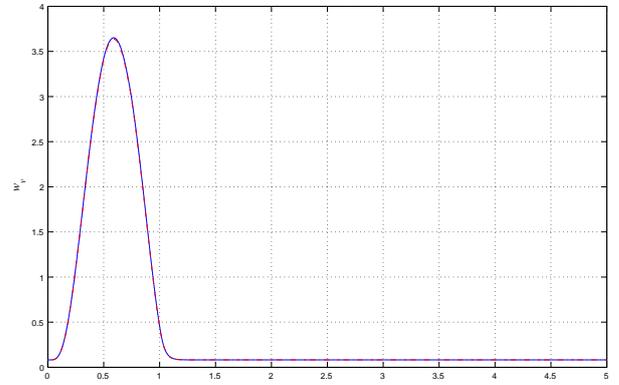


Fig. 8: 可視度 w_v の変化

4.3 考察

シミュレーションでは、可視度 w_v を増大するように制御するが、変化は全く見られない。可視度 w_v は以下のように定義した。

$$w_v := \sqrt{\det(J^T J)} \quad (11)$$

$$J := [J_1^T \ J_2^T \ J_3^T \ J_4^T]^T$$

$$J_i := \lambda g(\bar{p}_{ci}) \bar{R}_{co} \begin{bmatrix} I_3 & -\hat{p}_{oi} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \\ 0 & 1 & -\frac{\bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \end{bmatrix} \bar{R}_{co} \begin{bmatrix} I_3 & -\hat{p}_{oi} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、関節 q の変化により変化する部分は、 $g(\bar{p}_{ci})$ と \bar{R}_{co} である。ここで、冗長マニピュレータの特徴について考えてみる。冗長マニピュレータの関節空間の微小変化と作業空間の微小変化の関係は、

$$\dot{r} = J_r \dot{q} \quad (13)$$

$$\dot{q} = J_r^\dagger \dot{r} + (I - J_r^\dagger J_r) k \quad (14)$$

で与えられる。(14)の第2項目が冗長マニピュレータの特徴であるが、第2項をいくら変化させたところで、作業空間の微小変化(13)には影響がない。

$g(\bar{p}_{ci})$, \bar{R}_{co} は、カメラの位置姿勢に依存するため、冗長さを利用して関節角をいくら変化させても、冗長さを利用しない場合と変わらないことがわかる。つまり Eye-in-hand 構造では提案した可視度 w_v (11) はマニピュレータの冗長さを利用して全く変化しないといえる。

5 新たな可視度の提案

提案した可視度 w_v は関節の self-motion により変化しないことがわかった。そこで新たに提案し直すことにする。カメラから得られる画像特徴量 f の推定値を \bar{f} とすると、 i 点の画像特徴量の推定値は以下のように示すことができる。

$$\bar{f}_i = \begin{bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} \bar{x}_{ci} \\ \bar{y}_{ci} \end{bmatrix} \quad (15)$$

上式を時間微分すると、

$$\dot{\bar{f}}_i = \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \\ 0 & 1 & -\frac{\bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \end{bmatrix} \dot{\bar{p}}_{ci} \quad (16)$$

となる。ここで、 $\dot{\bar{p}}_{ci}$ には以下の関係が成立する。

$$\bar{p}_{ci} = \bar{p}_{co} + \bar{R}_{co} p_{oi} \quad (17)$$

$$\dot{\bar{p}}_{ci} = \bar{R}_{co} \begin{bmatrix} I_3 & -\hat{p}_{oi} \end{bmatrix} \bar{V}_{co}^b \quad (18)$$

$$\bar{V}_{co}^b = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wh}^b + \bar{V}_{wo}^b \quad (19)$$

ここで、特徴点がマニピュレータの手先に取り付けられているとすると、推定画像特徴量の微小変化 $\dot{\bar{f}}_i$ は、

$$\begin{aligned} \dot{\bar{f}}_i &= \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \\ 0 & 1 & -\frac{\bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \end{bmatrix} \dot{\bar{p}}_{ci} \\ &= \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \\ 0 & 1 & -\frac{\bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \end{bmatrix} \bar{R}_{ch} \begin{bmatrix} I_3 & -\hat{p}_{hi} \end{bmatrix} \bar{V}_{ch}^b \quad (\because (18) \text{ の } c \rightarrow h) \\ &= \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \\ 0 & 1 & -\frac{\bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \end{bmatrix} \bar{R}_{ch} \begin{bmatrix} I_3 & -\hat{p}_{hi} \end{bmatrix} (I_6 - \text{Ad}_{(\bar{g}_{ch}^{-1})}) V_{wh}^b \quad (\because (19) \text{ の } c \rightarrow h) \\ &= \frac{\lambda}{\bar{z}_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\bar{x}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \\ 0 & 1 & -\frac{\bar{y}_{ci}}{\bar{z}_{ci}} \end{bmatrix} \bar{R}_{ch} \begin{bmatrix} I_3 & -\hat{p}_{hi} \end{bmatrix} (I_6 - \text{Ad}_{(\bar{g}_{ch}^{-1})}) J_b \dot{q} \\ &\quad (J^b \text{ はボディーマニピュレータヤコビアン}) \\ &= J_i (I_6 - \text{Ad}_{(\bar{g}_{ch}^{-1})}) J_b \dot{q} \quad (\because (12)) \\ &= J_{hi} \dot{q} \end{aligned} \quad (20)$$

$$J_{hi} := J_i (I_6 - \text{Ad}_{(\bar{g}_{ch}^{-1})}) J_b \in \mathcal{R}^{2 \times 6} \quad (21)$$

となる。この J_{hi} は関節角度の微小変化 \dot{q} と推定画像特徴量 $\dot{\bar{f}}_i$ を関係付けるものである。いま、特徴点をマニピュレータの手先に 4 つ以上つけるとし、新たな可視度 w_{hv} として、

$$w_{hv} := \sqrt{\det(J_h^T J_h)} \quad (22)$$

$$J_h = [J_{h1}^T \ J_{h2}^T \ \cdots \ J_{hk}^T]^T \quad (23)$$

と定義する。これを評価関数とし、 w_{hv} が増大するように動かすことができれば、 \bar{f} の変化のしやすさが大きくなり、 f への一致速度が速くなるのではないかと予想する。以上の議論は、観測対象を手先に取り付けた場合を考えており、これを従来研究 [3] に適用することで、手先位置推定の改善に役立てれるのではないかと考える。

6 今後の展望 Uncertainty of Camera Coordinate Frame への展開

[3] のシステムに対し、マニピュレータを冗長にすることで、新たな可視度の有効性を検証したい。冗長マニピュレータをもちいた動的視覚フィードバックシステムは (24) 式ようになる。ここで、システムの状態を x とし、入力を u 、外乱を w として (25)(26) 式のように示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_e \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \\ V_{eh}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_e^{-1}C_e\xi_e + M_e^{-1}J_e^{-T}J_b^T \left(\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c + \text{Ad}_{(R_{eh}^T)} e_h \right) \\ -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} J_b J_e^{-1} \xi_e \\ 0 \\ -J_e^{-1} J_b \xi_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_e^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & -\text{Ad}_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} \\ 0 & 0 & -\text{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} & 0 \\ 0 & I & 0 & -\text{Ad}_{(g_{eh}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M_e^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w \quad (24)$$

$$x := \begin{bmatrix} \xi_e^T & e_c^T & e_e^T & e_h^T \end{bmatrix}^T \quad u := \begin{bmatrix} u_{\xi_e}^T & u_d^T + (\text{Ad}_{(g_d)} V_d^b)^T & u_e^T & u_h^T \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

$$w := \begin{bmatrix} \mathcal{F}_d^T & (V_{wo}^b)^T \end{bmatrix}^T \quad (26)$$

7 おわりに

本ゼミでは、冗長性を利用し可視度 w を評価関数として、それを増大とするような制御を試みた。

参考文献

- [1] 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.
- [2] M. Fujita, H. Kawai and M. W. Spong, “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L2-gain Performance Analysis,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005(submitted).
- [3] H. Kawai, T. Murao and M. Fujita, “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control with Uncertainty of Camera Coordinate Frame,” *Proc. of the 2005 American Control Conference*, pp. 3701-3706, 2005.