

可視度に関するシミュレーション解析について

藤田研究室 松田 浩義

平成 17 年 10 月 3 日

1 はじめに

[1][2] では、可操作性や可視性が楕円体により表されることを示している。そして、可操作性や可視性の度合いを、楕円体の体積を用いて表している。さらに [1] では、可視度と可操作度を合成した可視操作度について述べ、3 自由度 PUMA 型ロボットや平面 4 自由度マニピュレータを例に挙げ議論している。

本レポートでは、上記のマニピュレータに対して、可視度について議論し、今後の展望について述べる。

2 ImageJacobian の導出

カメラ座標系 Σ_c 、観測対象座標系 Σ_o を考え、その相対位置姿勢を $g_{co} = (p_{co}, R_{co})$ とする。さらに、その観測対象に k 個の特徴点を取り付け、観測対象座標系 Σ_o の原点から各特徴点までのベクトルを $p_{oi} \in \mathcal{R}^3$ ($i = 1, \dots, k$) とすると、カメラからみた各特徴点までの相対距離 $p_{ci} = [x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}]^T \in \mathcal{R}^3$ ($i = 1, \dots, k$) は以下のように表される。

$$\begin{aligned} p_{ci} &= p_{co} + R_{co}p_{oi} \\ &= g_{co}p_{oi} \end{aligned} \quad (1)$$

さらに、(1) の時間微分は、

$$\dot{p}_{ci} = \dot{p}_{co} + \omega_{co} \times (R_{co}p_{oi}) \quad (2)$$

となる。一方、カメラが 1 つの特徴点 i から得る情報 f_i は 2 次元の情報である。カメラの幾何学モデルが透視変換により表されるとすると、カメラから得られる画像情報 $f_i \in \mathcal{R}^2$ は以下のように表すことができる。

$$f_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{z_{ci}} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda \in \mathcal{R}$ はカメラの焦点距離を示す。Fig. 1 にそのモデルを示す。

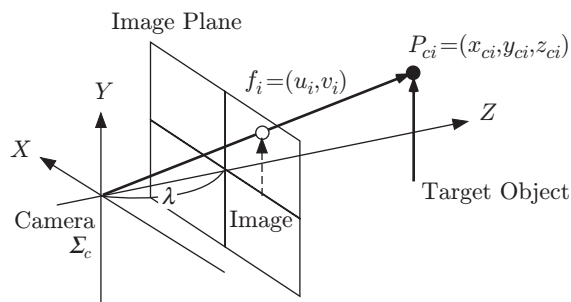


Fig. 1: カメラモデル

今, (3) の時間微分を考えると,

$$\dot{f}_i = \begin{bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{v}_i \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{z_{ci}^2} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ci}z_{ci} - x_{ci}\dot{z}_{ci} \\ \dot{y}_{ci}z_{ci} - y_{ci}\dot{z}_{ci} \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる. (1)(2) より (4) は

$$\dot{f} = J_i \begin{bmatrix} \dot{x}_{co} \\ \dot{y}_{co} \\ \dot{z}_{co} \\ \omega_{co_x} \\ \omega_{co_y} \\ \omega_{co_z} \end{bmatrix}$$

$$J_i := \frac{\lambda}{z_{ci}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_{ci}}{z_{ci}} & -\frac{x_{ci}}{z_{ci}}(y_{ci} - y_{co}) & \frac{1}{z_{ci}}(z_{ci}^2 + x_{ci}^2 - z_{co}z_{ci} - x_{co}x_{ci}) - (y_{ci} - y_{co}) \\ 0 & 1 & -\frac{y_{ci}}{z_{ci}} & -\frac{1}{z_{ci}}(z_{ci}^2 + y_{ci}^2 - z_{co}z_{ci} - y_{co}y_{ci}) & \frac{y_{ci}}{z_{ci}}(x_{ci} - x_{co}) & (x_{ci} - x_{co}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

となり, 画像ヤコビアン J_i が (5) のようになる. この J_i はカメラ座標系から見た観測対象座標系の相対速度と, 画像面での速度を関係付けるものである. この J_i は未知の情報 (p_{ci}, p_{co}) があるために, 実際に求めることはできない. [1] では, 特徴点がマニピュレータの手先にあるとしているために, 観測対象座標系 Σ_o と手先座標系 Σ_h を同一なものにし, 可視性について解析を行っている. これにより未知の情報 (p_{ci}, p_{co}) が以下の座標間の関係より求まることになる.

$$g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wh} \quad (6)$$

$$p_{ci} = g_{co} p_{oi} = g_{ch} p_{hi} \quad (7)$$

3 シミュレーション解析

この章では, Fig. 2-3 に示す 2 つのシステムを例に挙げ, 可視性について議論する. カメラの位置が変化することによって, どのように可視度が変化するかを示す.

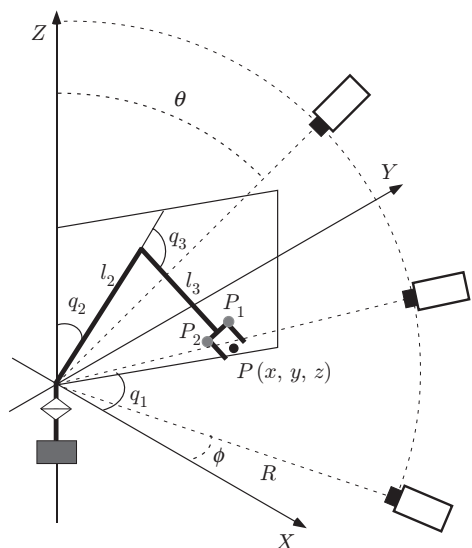


Fig. 2: 3 自由度 PUMA ロボットと 3 自由度アクティブカメラを用いたシステム

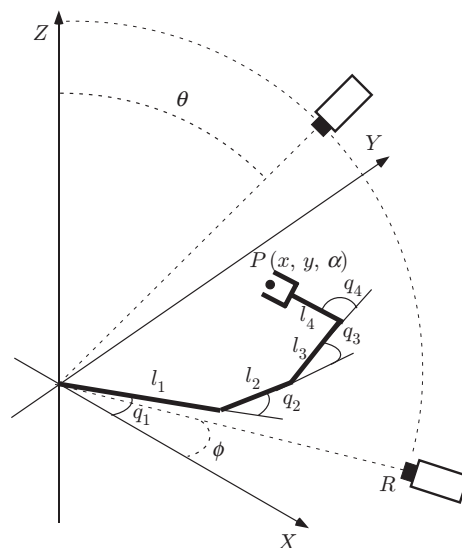


Fig. 3: 4 自由度平面ロボットと 3 自由度アクティブカメラを用いたシステム

3.1 3自由度 PUMA ロボットと3自由度アクティブカメラを用いたシステム

[1]では, Fig. 2 のシステムで, 2種類の解析を行っている. 1つは, ロボットの関節角度 (q_1, q_2, q_3) と原点 O からのカメラの距離 r を固定し, カメラの状態 (ϕ, θ) を変化させた場合の可視度解析である. 2つ目は, ロボットの関節角度 q_1 とカメラの状態 (r, ϕ, θ) を固定させ, ロボットの関節角度 (q_2, q_3) を変化させた場合の可視度解析である. どちらの場合もカメラから2つの特徴点をとらえ, そのうち3つの特徴量 ($k=3$) を使っている. [1]らは, 可視度を楕円体の体積で定義しており, 手先の作業次元 m によって変わり, 以下のようになる.

$$w_v = \sqrt{\det(J_v J_v^T)} \quad (k < m) \quad (8)$$

$$w_v = |\det(J_v)| \quad (k = m) \quad (9)$$

$$w_v = \sqrt{\det(J_v^T J_v)} \quad (k > m) \quad (10)$$

[1]らは作業変数を (x, y, z) の3次元にとっており回転を考えていないために, ヤコビアン J_v は 3×3 の行列となり, 可視度は (9) で表される. そして, 可視操作度 w として可視度 w_v と可操作度 w_r を掛け合わせた $w = w_v w_r$ を提案し, それが最大となるものが最適なカメラ位置や軌道であると述べている. 前者の解析による, 可視度 w_v と可操作度 w_r のシミュレーション結果を Fig. 4-5 に示す.

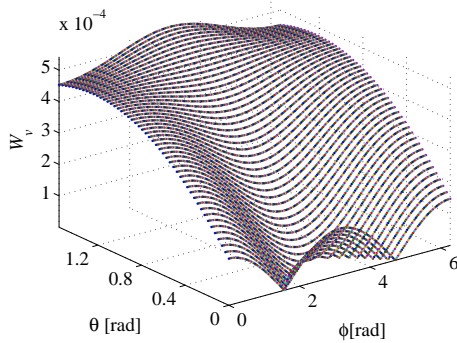


Fig. 4: $k=3$ の場合の可視度 w_v

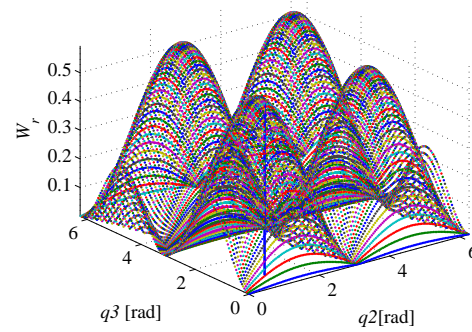


Fig. 5: 可操作度 w_r

画像ヤコビアンが (5) のように示せるとすると $m=6$ として, 可視度 w_v は特徴量の数により (8)(9)(10) ように変化する.

今, ロボットの手先に特徴点 i の数を同じ環境下で変化させた場合, どのように可視度は変化するか考えてみたい. Fig. 6-8 に, 特徴量の数を $k=4, 6, 8$ とした場合の結果を示す.

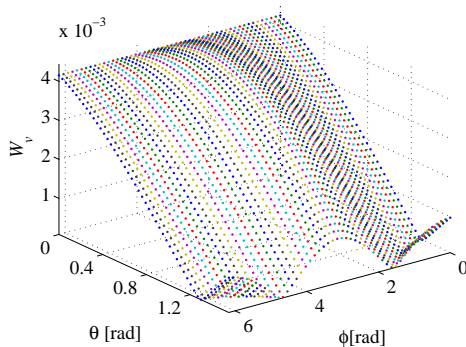


Fig. 6: $k=4$ の場合の可視度 w_v

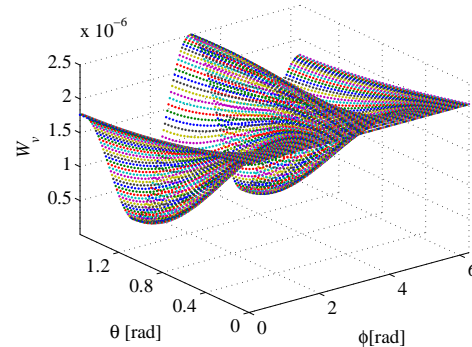


Fig. 7: $k=6$ の場合の可視度 w_v

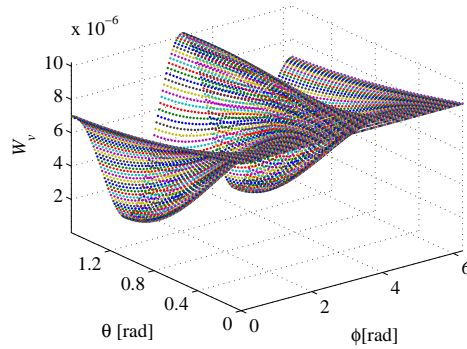


Fig. 8: $k = 6$ の場合の可視度 w_v

この結果は、ロボットは固定で、カメラを移動させた場合のものである。同環境下で特徴量の数を変化させた場合、特徴量が少ないほうが可視度が大きい事がわかる。特徴量の少ないほうが画像の変化がしやすい。ただ、特徴量というのはシステムによって固定であるため、可視度の大きさ自体は環境によって大きくできる。可視度の最大値と最小値との比で比較すると、Fig. 6 では最小値に比べて最大値が 50 倍大きく、Fig. 8 の場合では、 10^4 オーダーで最大値のほうが大きくなった。特徴量が多いほど、 w_v の変化の仕方が激しいということが分かる。可操作度 w_r というのは関節角度 q のみに依存しカメラの位置などに対し無関係である。可操作度が最大の関節角度をとったとしても、可視度 w_v というのは最大最小で 10^4 オーダで変化するため、可視操作度 w を $w_v w_r$ というように掛けあわせで表現しては、可操作度の特徴が消されてしまうのではないかと考える。

3.2 4 自由度平面ロボットと 3 自由度アクティブカメラを用いたシステム

[1] では、Fig. 3 のシステムで、2 種類の解析を行っている。1 つは、ロボットの関節角度 (q_1, q_2) と原点 O からカメラの距離 r を固定し、カメラの状態 (ϕ, θ) を変化させた場合の可視度解析である。2 つ目は、ロボットの関節角度 (q_1, q_2) とカメラの状態 (r, ϕ, θ) を固定させ、ロボットの関節角度 (q_3, q_4) を変化させた場合の可視度解析である。どちらの場合もカメラから 1 つの特徴点をとらえ、そのうち 2 つの特徴量 ($k = 2$) を使っている。Fig.9 に 2 種類のうちの 1 つ目での場合でのシミュレーション結果を示す。

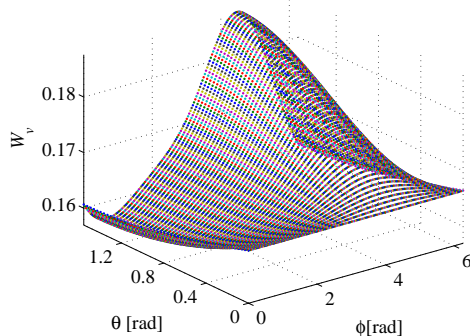


Fig. 9: $k = 2$ の場合の可視度 w_v

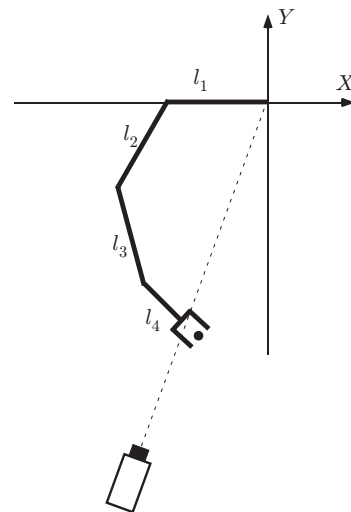


Fig. 10: w_v が最大値の場合のマニピュレータとカメラの位置姿勢

結果によると可視度の最大値は, $\phi = 250^\circ$, $\theta = 90^\circ$ のときであった. これを図に示すと Fig. 10 のようになる. 感覚的に手先速度の変化に対して変化画像速度が, 一番大きくなりそうだと分かる.

4 今後の展望

[1] らは画像速度と手先速度を関係付ける画像ヤコビアンを用いて可視性について議論していた. 可視性というものは, ある手先速度 \dot{r} を与えた場合に, どの方向に画像速度 \dot{f} が変化しやすいかというものである. 可視度というものは, 変化量の大きさといえるだろう. 彼らは予め動きの決まった作業において, 各状態ごとに可視操作度が最大となる部分を求め, そこをカメラ位置とする, または軌道を求めている. よってリアルタイム性が無いと言えるだろう. 一方, [3] らは画像の推定偏差と推定偏差ベクトルを関係付けるものを画像ヤコビアンとして定義していた. [1] らと同様なアプローチをすることで可視性 (可推定性) について議論することができる. 私たちのシステムでの可視性とは, カメラと観測対象の位置姿勢の推定偏差が生じた場合に, どの方向に画像面での推定偏差が変化しやすいかというものである. この場合の可視度も, 大きいほうが良いであろう. 可視度の組み合わせとしては, 以下の方法を考えている.

$$\dot{q} = J_b^\dagger \dot{r} + (I - J_b^\dagger J_b)k \quad (11)$$

(11) は, [4] の冗長マニピュレータの制御方法であり, 一般的に k の部分に可操作度を用いるが, その部分に可視度を用いばどうであろうか. この方法を適用するのは [5] のシステムで, 可操作度を用いるのは作業マニピュレータとし, 可視度を用いるのはカメラマニピュレータにすればよいと考える.

5 おわりに

本レポートでは, [1] を参考に同様なシステムに対しシミュレーションし, 可視性について考えた.

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] 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.
- [4] 吉川, ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.
- [5] T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, "Passivity-based Control of Visual Feedback Systems with Dynamic Movable Camera Configuration," *Proc. of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 2005(to appear).