

特異点通過軌道を用いた冗長運動制御法の比較

Comparison of Redundancy Resolution Techniques While Passing Through Singularities

学 阿部崇志 (武蔵工大) 正 Dragomir N. Nenchev (武蔵工大)
正 妻木勇一 (弘前大学)

Takashi ABE, Dragomir N. NENCHEV, Musashi Institute of Technology
and Yuichi TSUMAKI, Hirosaki University

Abstract: The Singularity-Consistent method can handle both kinematic and internal singularities in a consistent way, without introducing motion instabilities. Other existing methods use the pseudo inverse matrix and damped least-squares. This paper shows the advantages and disadvantages of the Singularity-Consistent method when passing through kinematic singularity, by comparing simulation results.

Key Words: Redundant manipulator, Singularity-Consistent approach, Pseudo-inverse matrix, Damped least-squares

1 序論

我々は、7 自由度 S-R-S マニピュレータの制御に関して特異点適合法 (SC 法: Singularity-Consistent method) をベースとした冗長運動制御を提案してきた [1][4]。一方、冗長マニピュレータの制御には、従来より疑似逆行列を用いる方法や特異点低感度法 (DLS: Damped Least-Squares method) などが存在する [2]。

本論文では特異点適合法と疑似逆行列を用いる方法、特異点低感度法について kinematic singularity を通過する軌道を用いて各制御法の比較を行う [3]。

2 背景

S-R-S マニピュレータは運動学を用いると構造上、肩関節 (S) と肘関節 (R) から成る positioning subchain と球状リストから成る orientation subchain に分けることができる。そこで、4 自由度からなる positioning subchain に注目して、各制御法を適用して 7 自由度 S-R-S マニピュレータの位置制御を行い比較を行った。

Denavit and Hartenberg の表記法を用いて 4 つ全ての関節角が零の時、全てのリンクが Z 軸方向を向くように座標を取る。関節角度ベクトルを $q_p = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ と

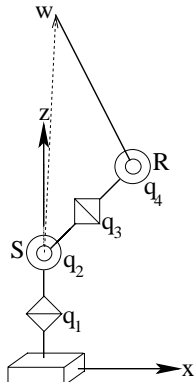


Fig.1: Positioning subchain.

し、球状リストである手先の中心部の位置を W と表すと次のようになる。

$$\begin{aligned} r_x &= -C_1c + d_5S_1S_3S_4 \\ r_y &= -S_1c + d_5C_1S_3S_4 \\ r_z &= (d_3 + d_5C_4) - d_5S_2C_3S_4 \end{aligned}$$

ここで、 d_3 , d_5 はそれぞれリンクの長さを表し、 C_i , S_i はそれぞれ q_i を各関節角としたときの $\sin q_i$, $\cos q_i$ を表す。また、 c は次の通りである。

$$c \equiv (d_3 + d_5C_4)S_2 + d_5C_2C_3S_4 \quad (1)$$

特異点適合法を用いると、関節角速度ベクトルが以下のように求められる [4]。

$$dq^{SC} = b_{sm}f_{sm}(q) + b_{ep}f_{ep}(q, \hat{v}) \quad (2)$$

ここで、 b_{sm} , b_{ep} は任意のスカラー量、 f_{sm} , f_{ep} はセルフモーションと呼ばれる冗長運動を決めるベクトル場と、手先の運動を決めるベクトル場であり、 \hat{v} は W の移動方向を表す単位ベクトルである。

一方、疑似逆行列を用いると次の関節角速度が得られる。

$$dq^{PI} = J^+ dx = J^T (JJ^T)^{-1} dx \quad (3)$$

ここで、 dx は手先の微小変位であり、 J は 3×4 のヤコビ行列である [4]。

特異点低感度法においては特異点近傍において発生する過大な関節角速度を実行可能な範囲に押さえ込む点に特徴がある。その関節角速度は次の式で得られる。

$$dq^{DLS} = J^T (JJ^T + \lambda^2 I)^{-1} dx \quad (4)$$

ここで、 λ は次の式で与えられるスカラー量である [5]。

$$\lambda^2 = \begin{cases} 0 & \text{when } \hat{\sigma}_n > \epsilon \\ \epsilon^2 - \hat{\sigma}_n^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

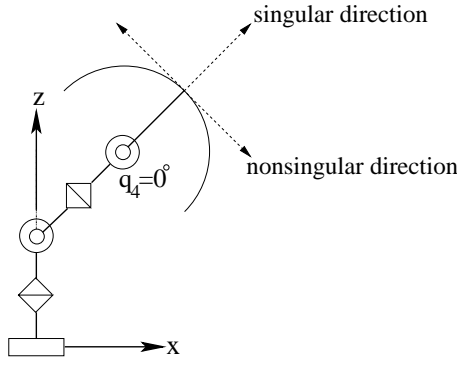


Fig.2: $S_4 = 0$ singular configuration

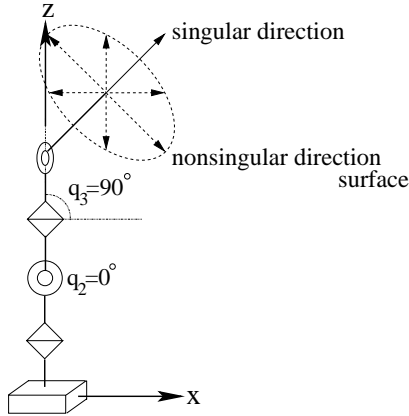


Fig.3: $S_2 = 0, C_3 = 0$ singular configuration

ここで ϵ は実験の経験より求められる値である．また， $\hat{\sigma}_n$ はヤコビ行列 J の最小の特異値である．

Positioning subchain の関係する kinematic singularity は二種類あり [7], Fig.2, Fig.3 に示す．また，特異点適合法には独自の algorithmic singularity (inner obstacle) が存在する [1]．これは特異点適合法において q_3 を固定してしまうために，機構的に到達できない領域が駆動範囲内に出来てしまうものであり，式 (1) の c が 0 となる時の式 (2) の解が張る空間であり， $q_3 = 0$ の時を最小とし， $q_3 = \pm\pi/2$ を最大として存在する．この algorithmic singularity の解決法は既に発表してあるのでここでは割愛する [1]．

3 シミュレーション

今回のシミュレーションは $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ の kinematic singularity へそれぞれ二つの方向からのアプローチを行った．一つ目は特異値分解を行ったときに左特異ベクトルで求められる singular direction であり，二つ目はその singular direction と直角に交わる nonsingular direction である．それぞれの方向から進入するパターンを特異点適合法，特異点低感度法，擬似逆行列のそれぞれの制御法を用いてシミュレーションを行い，比較を行った．

まず， $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ の姿勢を通り抜けさせるため，通り抜けさせる姿勢を $q = [0, 0, 90, 90]^T$ deg として行った．singular direction は最終リンクの向いている方向であるため，目標姿勢の最終リンクの向いている直線上より目標姿勢に向けて動かした．一方，nonsingular direction は

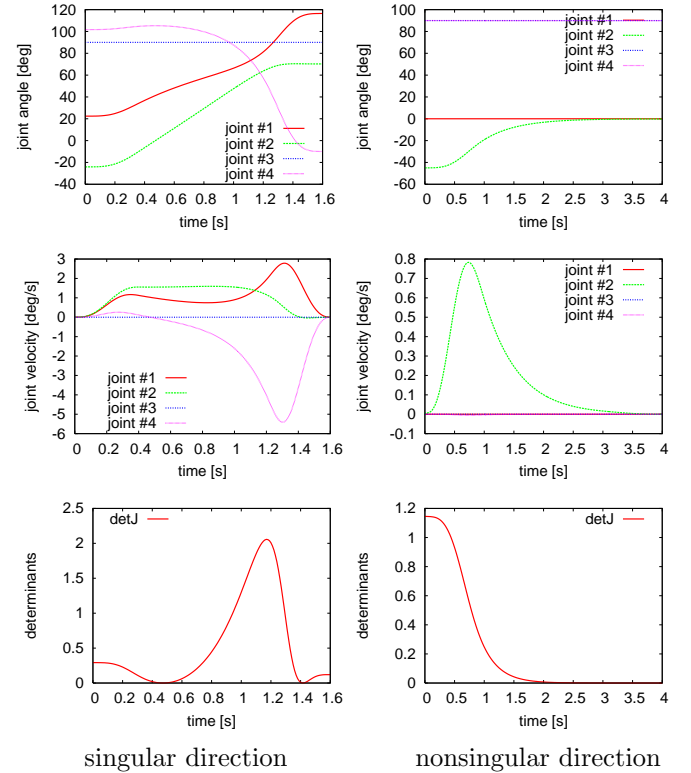


Fig.4: $S_2 = 0, C_3 = 0$ simulation with SC method.

最終リンクの向いている向き (singular direction) と直角に交わるため， q_2 を -45 deg 回転させた姿勢から q_2 のみをプラス方向に回転させることとした．シミュレーションの結果を Fig.4 ~ Fig.6 に示す．Fig.4 は特異点適合法の場合，Fig.5 は特異点低感度法の場合，Fig.6 は擬似逆行列の場合であり，それぞれ左側は singular direction の場合，右側は singular direction では無い場合である．また，特異点低感度法の場合はシミュレーションが成功するよう ϵ の値を調整した後，行った．

まずは，特異点適合法を用いた結果について考察する．Fig.4 の singular direction の場合を見ると，マニピュレータは $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ の姿勢を通り抜けているにもかかわらず，過大な角速度を生じさせることも無く制御が来ているのがわかる．次に，nonsingular direction の場合を見てみると， $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ に到達した後は全く動いていない．この方向は，マニピュレータの作業領域の外縁に接する円軌道を描くことと等しい．このため，式 (2) のすべての項がゼロとなりマニピュレータの運動を取り出すことが出来なくなってしまう．

特異点低感度法の場合は singular direction からのアプローチでは $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ の姿勢へ到達させることが出来なかった (Fig.5 の左側)．Nonsingular direction では ϵ を調節した結果，その姿勢へ到達させることは出来たが，指令は q_2 のみの回転であったのに対し実際は他の関節も回転してしまっており，正確に軌道を追従できていないことが分かる．

擬似逆行列の場合は singular direction からのアプローチでは $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ の近くへ行くと過大な角速度を生じてしまい，制御が出来なくなってしまう (Fig.6 の

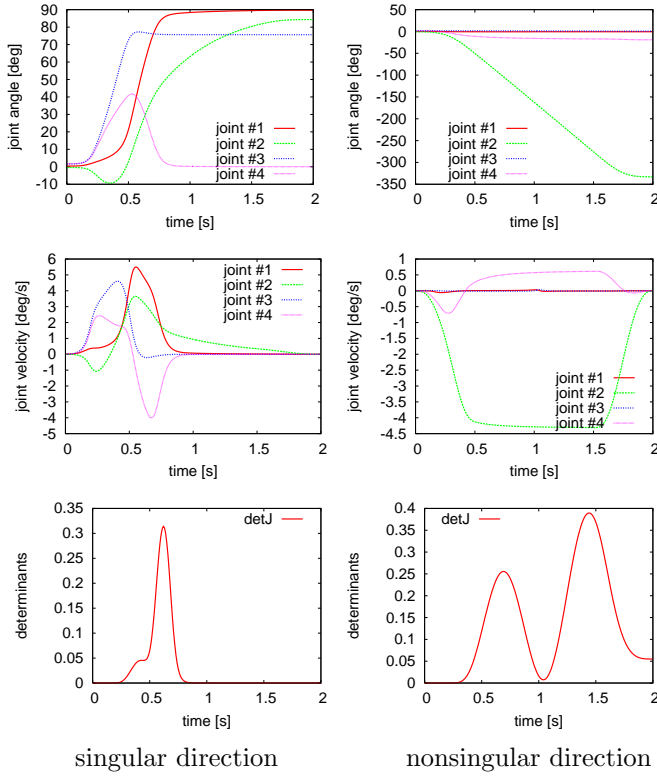


Fig.5: $S_2 = 0, C_3 = 0$ simulation with DLS method.

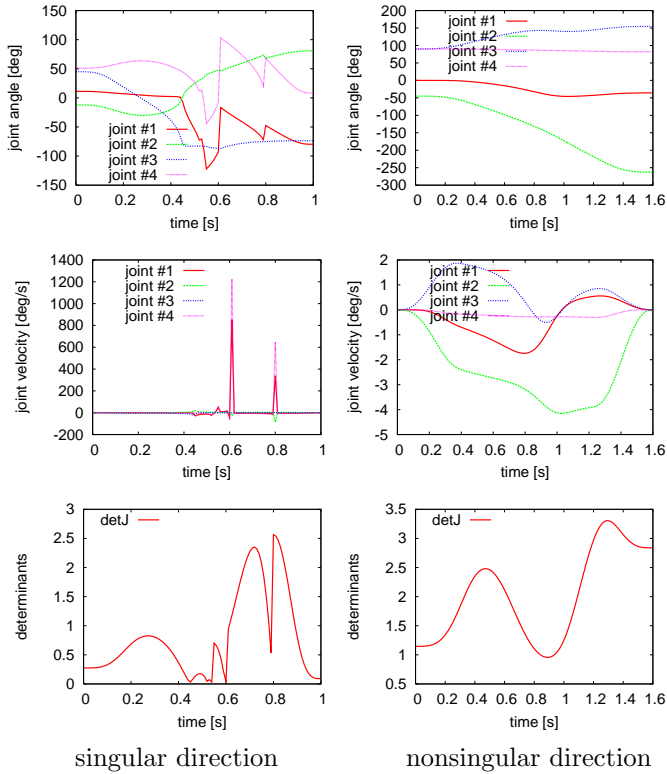


Fig.6: $S_2 = 0, C_3 = 0$ simulation with pseudo inverse.

左側). Nonsingular direction の場合は \det のグラフを見ても分かるように, 全くその姿勢へ近づかせることが出来なかった.

Table1: Result of $S_2 = 0, C_3 = 0$ simulation.

	SC	DLS	PI
$S_2 = 0$ and $C_3 = 0$ singular direction		×	×
$S_2 = 0$ and $C_3 = 0$ nonsingular direction	×		×

Table2: Result of $S_4 = 0$ simulation.

	SC	DLS	PI
$S_4 = 0$ singular direction		×	×
$S_4 = 0$ nonsingular direction	×		×

4 結論

今回は $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ の kinematic singularity に対し, 二通りの条件下での特異点適合法, 特異点低感度法, 擬似逆行列それぞれの反応を比べ, 特異点適合法の特徴の検証を行った. その結果を Table1 にまとめた.

また, 同様のシミュレーションを $S_4 = 0$ で行った結果も Table2 に示す.

この結果を見ると特異点適合法は kinematic singularity に対し, singular direction からの進入は行えるが, nonsingular direction からの進入が行えないことが確認できた. また, 特異点低感度法を用いると singular direction からの進入は不可能であるが, nonsingular direction からの進入は ϵ の調整を行えばできる可能性があることが分かった. ただし, ϵ の最適値を見つけるのは容易ではなく, 使いやすい制御法ではないことが確認できた. また, 擬似逆行列では kinematic singularity は通り抜けられないことが確認できた.

文 献

- [1] 阿部崇志, D. N. Nenchev, 妻木勇一, “S-R-S マニピュレータの特異点適合法を用いた冗長運動制御”, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, IH23, 2004.
- [2] 中村仁彦, 花房秀郎, “関節形ロボットアームの特異点低感度運動分解”, 計測自動制御学会論文集, 20-5, 1984, pp. 453–459.
- [3] 阿部崇志, D. N. Nenchev, 妻木勇一, “特異点近傍における冗長運動制御法の比較”, 第 5 回 (社) 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 2A4-2, 2004.
- [4] D. N. Nenchev and Y. Tsumaki, “Motion Analysis of a Kinematically Redundant Seven-DOF Manipulator Under the Singularity-Consistent Method,” in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, Sept. 14-19, pp. 2760–2765, 2003.
- [5] O. Egeland and I. Spangelo “Advanced Robot Control,” Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, pp. 296–306, 1991.
- [6] S. B. Nokleby, R. P. Podhorodeski “Reciprocity-based resolution of velocity degeneracies for redundant manipulators,” Mechanism and Machine Theory, 36, pp. 397–409, 2001.
- [7] 滝康嘉, 杉本浩一, “冗長マニピュレータの特異姿勢”, 日本機械ロボット学会 [No.03-4] ロボティクス・メカトロニクス講演会’03 公演論文集, 1A1-3F-A1(1), 2003.