

# 特異点近傍における冗長運動制御法の比較

武蔵工業大学 阿部崇志 D.N. Nenchev  
弘前大学 妻木勇一

## Comparison of Redundancy Resolution Techniques Around Kinematic Singularities

Takashi ABE, D.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 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。[2] 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。[1]

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比較を行う。

### 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 に分けることが出来る。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と取る。関節角度ベクトルを  $q_p = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$  とし、球状リストである手先の中心部の位置を W と表す。

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。

$$dq^{SC} = b_{sm} f_{sm}(q) + b_{ep} f_{ep}(q, \hat{v}) \quad (1)$$

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。

$$dq^{PI} = J^+ dx = J^T (JJ^T)^{-1} dx \quad (2)$$

ここで、 $dx$  は手先の微小変位であり、 $J$  はヤコビ行列である。

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間接角速度を実行可能な範囲に押さえ込む点に特徴がある。その間接角速度は次の式で得られる。

$$dq^{DLS} = J^T (JJ^T + \lambda^2 I)^{-1} dx \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  は次の式で与えられるスカラー量である。[4]

$$\lambda^2 = \begin{cases} 0 & \text{when } \hat{\sigma}_n > \epsilon \\ \epsilon^2 - \hat{\sigma}_n^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで  $\epsilon$  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。

### 3. シミュレーション

各制御法の違いを検証するためにシミュレーションを行った。7 自由度マニピュレータの特異点の一つに  $\sin q_2 = 0$  かつ  $\cos q_3 = 0$  という姿勢が存在する (Fig. 1)。今回のシミュレーションはこの姿勢より singular direction に向けて移動させた場合と、そうでない方向に移動させた場合の二つの場合についてシミュレーションを行った。

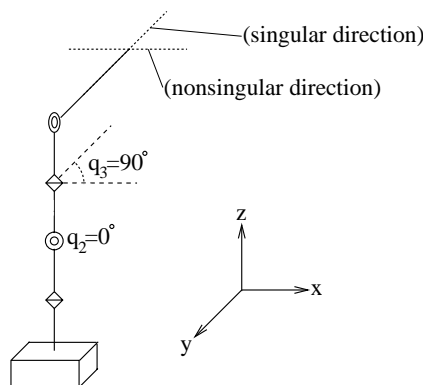


Fig.1 Kinematic singularity ( $\sin q_2 = 0$ ,  $\cos q_3 = 0$ ).

まず,  $\sin q_2 = 0$  かつ  $\cos q_3 = 0$  とするため, 初期角度  $[0, 0, 90, 90]^T$  とおいた. 入力手先方向のベクトルを singular direction の手先進行方向を  $[0, 1, 0]^T$  とし, singular direction ではない手先進行方向を  $[1, 0, 0]^T$  とした. この時, DLS の  $\epsilon$  の値には 0.01 を用いた.

これらのシミュレーションの結果を Fig. 2 ~ Fig. 4 に示す. Fig. 2 は SC 法の場合, Fig. 3 は DLS 法の場合, Fig. 4 は pseudo inverse の場合であり, それぞれ左側は singular direction の場合, 右側は nonsingular direction では無い場合である.

Fig. 4 を見ると  $y$  方向に動いているが, その方向は指示意図したものとは逆である. これは, SC 法を適用したマニピュレータが駆動可能限界の特異点に到達したときに, その進入方向と逆の方向を向いて戻ってくるという SC 法特有の動きである. 次に, singular direction ではない場合を見てみると, この場合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. このとき, 式 (1) 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は出来ない.

次に擬似逆行列の場合である Fig. 4 の左側のグラフを見ると  $y$  の位置は指令した方向に動いているが  $x$  方向にも大きく動いている. また, DLS の場合は Fig. 3 の左側のグラフを見ると damping の効果が見られるが, それでも  $x$  方向にも動いてしまっている. これにより, これらのケースでは singular direction 方向には正確に制御出来ないと言え, 一応指示した  $y$  方向には動いているが正確に軌道を追従してはいない. 一方, singular direction でない場合は両方とも問題なく制御出来ていることが見て取れる.

#### 4. 結論

今回は  $\sin q_2 = 0$  かつ  $\cos q_3 = 0$  の特異点に対し, 二通りの条件下での特異点適合法, DLS 法, 擬似逆行列それぞれの反応を比べ, SC 法の特徴の検証を行った. 今後は  $\sin q_2 = 0$  かつ  $\cos q_3 = 0$  の特異点へ各制御法を用いてアプローチした場合の個々の反応に対する比較や他の特異点で各制御法の反応の比較を行い, 特異点適合法の特徴の検証を行う.

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] S.B. Nokleby, R.P. Podhorodeski “Reciprocity-based resolution of velocity degeneracies for redundant manipulators,” Mechanism and Machine Theory, 36, 2001, pp. 397–409.
- [4] O. Egeland and I. Spangelo “Advanced Robot Control,” Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, 1991, pp. 296–306.

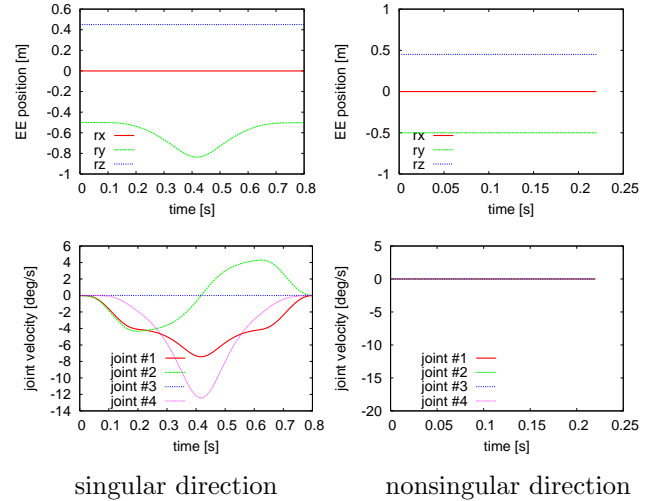


Fig.2 Simulation with SC method.

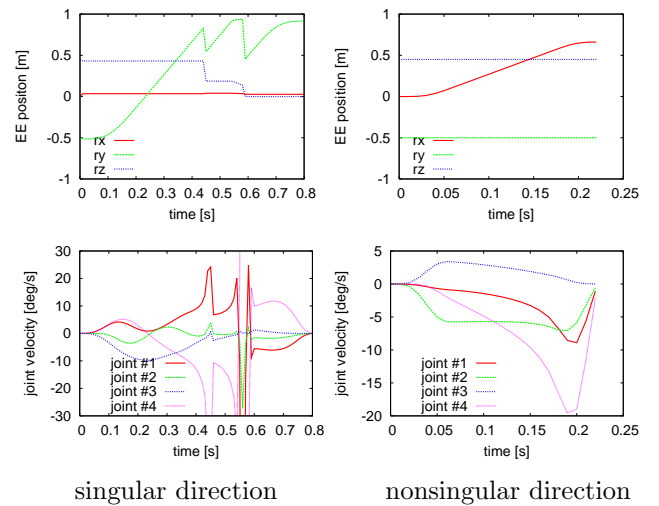


Fig.3 Simulation with DLS method.

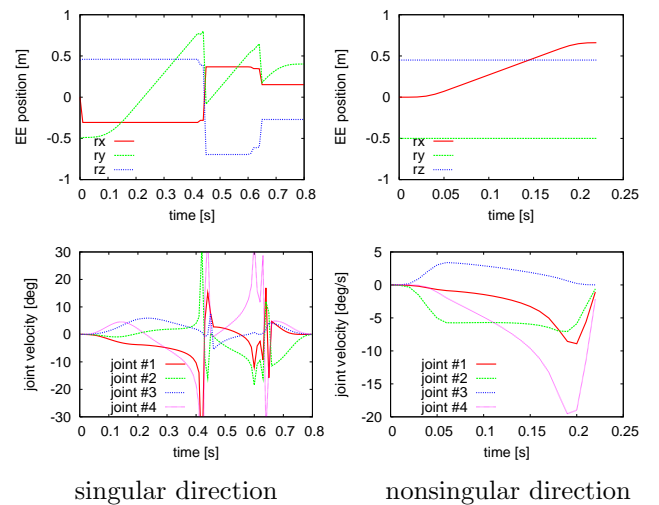


Fig.4 Simulation with pseudo inverse.