

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

阿部 崇志 (武蔵工業大学) 正 Dragomir N. Nenchev (武蔵工業大学)
正 妻木 勇一 (弘前大学)

Singularity-Consistent Kinematic Redundancy Resolution for the S-R-S Manipulator

*Takashi ABE and Dragomir N. NENCHEV (Musashi Institute of Technology)
and Yuichi TSUMAKI (Hirosaki University)

Abstract— A kinematic redundancy resolution approach for the S-R-S manipulator is introduced which uses arm plane orientation as the redundancy resolution criterion. The approach can handle both kinematic and internal singularities in a consistent way, without introducing motion instabilities, yielding thereby motions that can be predicted easily by a human operator.

Key Words: Singularity, Redundant Manipulator, Singularity-Consistent Approach, Kinematic Redundancy Resolution, Inner Obstacle

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 (Singularity-Consistent method) をベースとした冗長運動制御を提案してきた [1][2]. 一方、二つの S-joint (肩関節と手首関節) の各中心と R-joint (肘関節) の中心によって求められる S-R-S マニピュレータのアームプレーンの姿勢に関する研究も行われている [3]-[6].

本論文では特異点適合法をベースとした冗長運動制御適用下での S-R-S マニピュレータの動きを検証し、セルフモーションの制御法を提案する.

2. Background

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. また、このマニピュレータの逆関数を用いた制御は特異点適合法を用いて行うことができる [1]. そこで Fig.1 にあるように 4 自由度からなる positioning subchain に注目してみる.

Denavit and Hartenberg の表記法を用いて 4 つ全ての関節角が零のとき全てのリンクが Z 軸方向を向くように座標を取り、関節角度ベクトルを $q_p = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ と表すと、球状リストである手先中心部の位置 W を表す式は次の様になる.

$$\begin{aligned} r_x &= -C_1c + d_5S_1S_3S_4 \\ r_y &= -S_1c - d_5C_1S_3S_4 \\ r_z &= (d_3 + d_5C_4)C_2 - d_5S_2C_3S_4 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 d_3, d_5 はリンクの長さを表し、 C_i, S_i はそれぞれ q_i を各関節角度とした時の $\cos q_i, \sin q_i$ を表す. また、 c は次の通りである.

$$c \equiv (d_3 + d_5C_4)S_2 + d_5C_2C_3S_4. \quad (2)$$

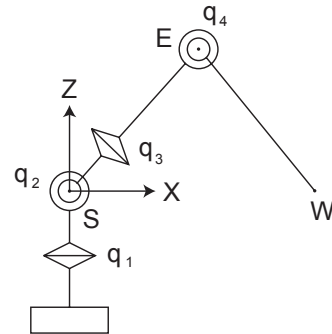


Fig.1 The four-DOF positioning subchain.

ここで、特異点適合法を適用する [2]. このヤコビ行列を求めると 3×4 となる. 特異点適合法に従い $H(q_p, \hat{v}) = [J(q_p) \quad -\hat{v}]$ と置く. ここで、 $\hat{v} = \hat{v}(\gamma)$ は W の移動方向を表す単位ベクトルであり、 γ は W の目標軌道を表すパラメータである. $H(q_p, \hat{v})[dq_p^T \quad d\gamma]^T = 0$ の時、 $H(q_p, \hat{v})$ の零空間ベクトルに基づき関節の微小変位を求めると次のようになる.

$$dq_p = b_{sm}f_{sm}(q_p) + b_{ep}f_{ep}(q_p, \hat{v}) \quad (3)$$

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る.

次に各ベクトル場を Mathematica で解析的に求めると次のような形になる.

$$f_{sm}(q_p) = \left\{ \begin{array}{ccccc} -\frac{d_5C_3S_4}{c} & \frac{d_5S_2S_3S_4}{c} & 1 & 0 & 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$f_{ep}(q_p, \hat{v}) = \left\{ \begin{array}{ccccc} \frac{*}{cS_4} & \frac{*}{cS_4} & 0 & \frac{*}{cS_4} & 1 \end{array} \right\} \quad (5)$$

ここで、(*) は [1] を参考に求められる。

式 (4),(5) を見ると、第 3 関節の値 q_3 はセルフモーションにしか存在していない。よって、この冗長運動制御法を用いて q_3 を制御することでセルフモーションを制御出来ると言える。また、 b_{sm} と b_{ep} という二つのスカラー量を用いることで、セルフモーションの速度と手先の速度を制御する事が出来る。

さらに、式 (4),(5) において $q_4 = 0$ と $c = 0$ を考えてみると、 $c = 0$ はセルフモーションと手先の運動の両方に作用しており、手先の運動については $q_4 = 0$ も作用している。これにより、 $q_4 = 0$ の場合は肘特異点を表し、 $c = 0$ の場合は $S_2 = 0$ かつ $C_3 = 0$ となり、肩特異点となる。よって、 $q_4 = 0$ は肘特異点にマニピュレータがある場合に満たされ、 $c = 0$ は肩特異点にマニピュレータがある場合に満たされる。しかし、後述するようにその他にも $c = 0$ が満たされる場合が存在する。

これらの特異点の問題を解決するため、任意のスカラー量である b_{sm} , b_{ep} に注目する。まず式 (4),(5) の右辺にそれぞれ c と q_4 をかける。すると次のようになる。

$$f_{sm}(q_p) = \begin{Bmatrix} -d_5 C_3 S_4 & d_5 S_2 S_3 S_4 & c & 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$f_{ep}(q_p, \dot{v}) = \begin{Bmatrix} * & * & 0 & * & c S_4 \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

この時、左辺にも同じようにかけなければならないのだが、式 (3) においてそれぞれにかけている任意のスカラー量 b_{sm} , b_{ep} にそれぞれ $1/c$ と $1/q_4$ を含ませることで式の整合性が保てる。これにより、特異点の速度が零となってしまうことが防げるので、特異点の問題を解決することが出来る。

3. 内部障害

式 (7) を見ると、 $S_4 = 0$ か $c = 0$ の場合、手先が動かない、つまり手先の中心部の位置を示す W が動かさなくなってしまうことが分かる。

$S_4 = 0$ の時を考えると、 $S_4 = 0$ は肘特異点である。これは、特異点適合法の物理的な性質と一致している。

次に $c = 0$ を考えてみる。Fig.2 は q_3 を固定したときのマニピュレータの駆動範囲を三次元空間の中に投影したものを、 q_3 の値を変えて二つ示したものである。空間の中に黒く球体状の通過不可能な領域が存在することが見られる。これを内部障害 (Inner obstacle) と呼ぶ。そして、この球体は q_3 が大きくなるにつれて $q_3 = |\pm \pi/2|$ を限界として大きくなり、同様に q_3 が小さくなるにつれて $q_3 = 0$ を限界として小さくなる。 $q_3 = |\pm \pi/2|$ の場合は境界上で肩特異点となり、 $q_3 = 0$ の場合は Z 軸に垂直に分離してしまう。この内部障害は q_3 を任意の値に固定することで大きさが決定される。7 つの関節のうちの一つである q_3 の値を固定してしまうということは、内部障害とは S-R-S マニピュレータの残っている 6 つの関節からなるマニピュレータの作業空間の内部境界であると分かる。

実際に内部障害に向けて動いていった時の手先の中心部の位置を示す W の動きを見てみると、障害に近づくにつれ動きが遅くなり ($c \rightarrow 0$)、障害との境界上で一瞬動きが止まり ($c = 0$)、来た方向に戻っていくという動きをする (c の符号が入れ替わった)。これは、特異点

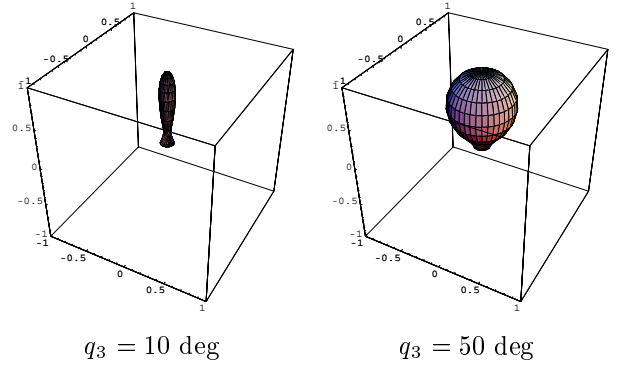


Fig.2 Inner obstacle visualization. The hypersurface $c = 0$ parameterized by q_3 and projected into workspace.

適合法を用いた制御を行ったとき、外側の駆動限界に到達したとき S_4 によって引き起こされる現象と同じである。

4. アームプレーンの位置制御法

b_{sm} をコントロールすることで、セルフモーションをコントロールする事が出来るため、遠隔操作などを行ったとき、オペレータが b_{sm} をコントロールすることで物理的な障害物を回避することが出来るようになると考えられる。同様に、もし内部障害に当たってしまうときはオペレータが b_{sm} をコントロールすることで内部障害の大きさを小さくしていくことで通過することが出来る。つまり、もし物理的な障害が存在しないと仮定すると、 b_{sm} を

$$b_{sm} = -k|q_3| \quad (8)$$

として、可能な限り $q_3 = 0$ と成るように設定することで内部障害を意識しないで制御することが出来るということである。ここで k はゲインである。

しかし、上記の方法よりも理想的なのは、初めは内部障害を小さくするように作用し、目標軌道を通じたあとは元の q_3 の値に戻すというのが理想的である。この様な制御を行うために b_{sm} に対し次のような制御側を使う。

$$b_{sm} = -k_1|q_3 - q_3^{ref}| - k_2|q_3|\frac{1}{c^2} \quad (9)$$

ここで、 k_1, k_2 は共にゲインである。式 (9) において、第 2 項は内部障害を小さくするために作用し、第 1 項は q_3 を元の値に戻すために作用している。

5. シミュレーション

シミュレーションには三菱重工製 7 自由度マニピュレータ “PA10-7C” を用いる。

シミュレーションは式 (9) で示した内部障害通過後に q_3 を保証する方法を検証する。

まず、各角度の初期位置は (0, 30, -30, -90, 0, 60, 0) deg とする。また、手先の目標軌道は Fig.3 に示すように Y 軸に沿ってマイナス方向にストレートに動かし、加減速は b_{ep} に 5 次多項式を適用することとする。

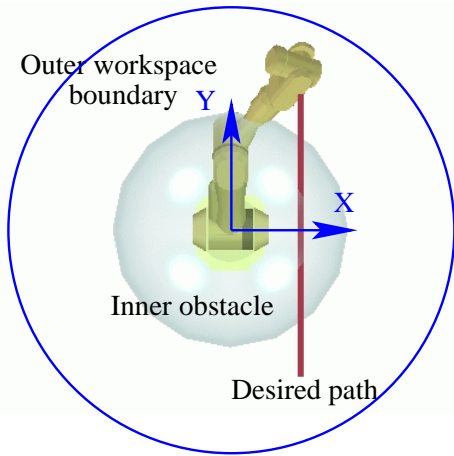


Fig.3 Initial configuration in the example.

最初のシミュレーションでは $k_1 = 10$, $k_2 = 0$ とおく。これにより, b_{sm} が常にほぼ零であるため大きなセルフモーションは起きなくなる。結果を Fig.4 に示す。この目標軌道の途中には内部障害が存在しており, 手先は必ず内部障害に衝突する。それ故, r_y は内部障害のある $r_y = -0.2$ m と外の駆動限界である $r_y = -0.8$ m の間で前進と後退を繰り返している。二つ目のグラフを見ても, c の符号が交互に入れ替わっており符号が入れ替わるたびに r_y がはね返っている。三つ目のグラフをみると, q_3 が -30° から動いていないのが分かる。

次に $k_2 = 0.05$ として, 内部障害を小さくしていき通過後は元に戻るように動かしてみる。結果は Fig.5 に示す。まず, 二つ目のグラフを見ると c の符号が変わっていないのが分かる。それ故, k_2 の作用で $c = 0$ とはならず内部障害が小さくなっていったことが分かる。これは q_3 が零になろうとし, 増えた結果であり, 三つ目のグラフを見ると q_3 が増えた後に, また初期値の -30° に戻ろうとして波打っているのが確認できる。

6. 結論

特異点適合法をベースとした冗長運動制御が, 運動学的特異点と内部特異点の両方の特異点をコントロールするのに有効である事を示せた。この方法を用いるとオペレータは簡単にセルフモーションと目標軌道をコントロールでき, 将来的には遠隔操作に応用できるものと考えられる。また, 内部障害の概念を示し, これに対する対処法を提案し, 証明した。

7. 謝辞

本研究は文部科学省科研費 一般研究 (B) 課題番号: 14350124 により行われたものである。

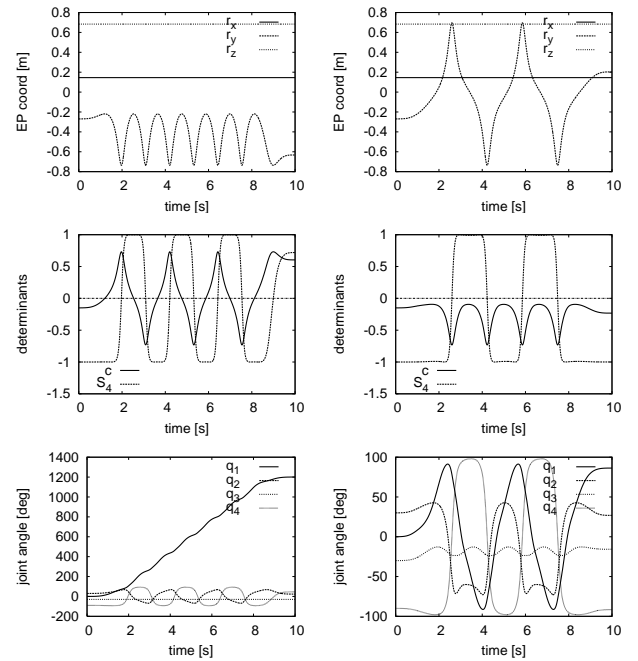


Fig.4 No self-motion case

Fig.5 Self-motion case

参考文献

- [1] 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, 2003, pp. 2760-2765.
- [2] D. N. Nenchev, Y. Tsumaki and M. Uchiyama, "Singularity-consistent parameterization of robot motion and control," The International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 2, pp. 159-182, February 2000.
- [3] E. Nakano, "Mechanism and control of antropomorphous manipulator," J. of the Society of Instrument and Control Eng., Vol. 15, No. 8, pp. 637-644, 1976 (in Japanese).
- [4] J. M. Hollerbach, "Optimal kinematic design for a seven degree of freedom manipulator," Robotics Research: The Second International Symposium, ed. by H. Hanafusa and H. Inoue, pp. 215-222, 1984.
- [5] K. Kreutz, M. Long and H. Seraji, "Kinematic analysis of 7-DOF manipulators," The Int. Journal of Robotics Research, Vol. 11, No. 5, pp. 469-481, 1992.
- [6] Y. Tsumaki et al., "A numerical SC approach for a teleoperated 7-DOF manipulator," in Proc. 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 21-26, 2001, pp. 1039-1044.