

# 特異点摂動設計に基づいた平面運動パラレルロボットの制御実験

## Experimental Study on the Control of a Planar Parallel Robot with Singularity-Perturbed Design

安田智彦\*, D.N.ネンチェフ\*\*

Tomohiko Yasuda\*, Dragomir N. Nenchev\*\*

\*新潟大学, \*\*弘前大学

\*Niigata University, \*\*Hirotsaki University

キーワード : パラレルメカニズム (parallel mechanism), 特異点 (singular point), ブランチモードの切替え (branch mode exchange)

連絡先 : 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地・弘前大学理工学部知能機械システム工学科・知能制御工学講座  
D.N.ネンチェフ, Tel.: (0172)39-3678, Fax.: (0172)39-3678, E-mail: nenchev@cc.hirosaki-u.ac.jp

### 1. はじめに

今までの文献の主な業績はマニピュレータの運動学の特異点や例えば特異点解析に関連した問題<sup>1)–7)</sup>、特異点なしのデザイン<sup>8),9)</sup>、特異点近傍での運動に対する特別な制御デザイン<sup>10)–16)</sup>に費やされてきた。手先の軌道が運動学の特異点を通過するか、もしくはすぐ近くを通るようなコントロール制御方法<sup>1)</sup>はネンチェフ、妻木、内山らによって発展され<sup>17)</sup>、シリアルマニピュレータの遠隔操作<sup>18)</sup>やパラレルリンクマニピュレータ HEXA<sup>19)</sup>の Cartesian path control を使用した劣可動特異点 (undermobility) の通過実験<sup>20)</sup>などが行われた。パラレルリンクマニピュレータには、順運動学問題や逆運動学問題に関連した様々な種類の特異点が存在することはよく知られている<sup>2),4)</sup>。逆運動学問題に関連した特異点は、SC 逆運動学解法<sup>21)</sup>を

使って解析された。この解法は劣可動特異点 (undermobility) を通過する運動制御を考慮している。これに対して、順運動学問題に関連した特異点<sup>2)</sup>は、運動方程式を用いて解析されている<sup>22)</sup>。しかし現在までこの過可動特異点を通過する実験は行われていなかった。

現在の研究目的は、特異点摂動設計 (*singularity-perturbed design*<sup>23)</sup>) に基づいた平面 5 パーメカニズムの劣可動特異点と過可動特異点近傍における運動制御実験することである。この論文は以下のように構成されている。2 章では 5 パーメカニズムの特異点摂動設計について紹介している。3 章では本研究で使用している実験システムを述べている。4 章では実験データの結果、解析を述べている。最後に結言を 5 章で述べている。

<sup>2)</sup>overmobility と呼ばれる過可動特異点。

<sup>1)</sup>特異点適合法 (*singularity-consistent (SC) method*)。

## 2. 5 バーメカニズムの特異点摂動設計<sup>23)</sup>

図 1 に 5 バーメカニズムに基づいた平行リンクマニピュレータの幾何学モデルを示す。このモデルは passive joint  $T$  に接続された 2 つのシリアル機構からなっておりこれによりエンドポイントの運動を制御する。

Nenchev と Uchiyama は  $a_1 = a_2 = 0$ 、 $m_1 = m_2 = m \gg 0$  と微小な定数で表される  $|l_1 - l_2| = \varepsilon$  から得られる 5 バーメカニズムの特異点摂動設計と呼ばれる新しいデザインを提案した<sup>23)</sup>。このデザインでは、機構がいわゆるシリアルブランチモードと呼ばれる 2 自由度平面シリアルリンクマニピュレータの姿勢をとることができる。図 2 にシリアルモードと平行モードの 2 つのブランチモードを示す。これらの 2 つのモードの切替は、図 3 に示され、内円もしくは外円のワークスペースの境界線をエンドポイントが通過することにより変えることができる。図のワークスペースの境界線上では、劣可動特異点 (undermobility) となる。また過可動特異点 (overmobility) はワークスペースの内円と外円の間でこの姿勢をとる。

この特異点摂動設計に基づいた平面平行リンクロボットアームを考案した目的は、現在までよく知られているシリアルリンクと平行リンクの長所を合わせ持ったロボットアームの実現である。

## 3. 実験システム

### 3.1 システムの構成

本研究の 5 バー平行リンクマニピュレータは 2 本の同様の長さを持つ  $m = 0.19$  m の distal link と、長さが  $l_1 = 0.380$  m から  $0.393$  m まで調節可能である proximal link 1 と、 $l_2 = 0.39$  m のリンクから構成されている。proximal link 1 の長さ

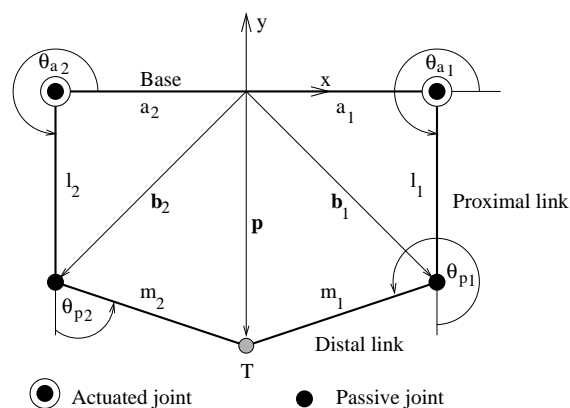


Fig. 1 Parallel-link manipulator based on the five-bar mechanism.

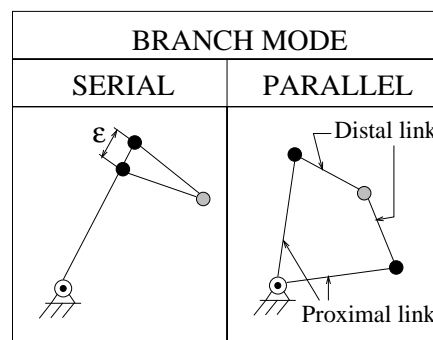


Fig. 2 Branch modes of the singularity-perturbed design.

はモータトルクに起因する singularity-perturbance parameter  $\varepsilon$  の影響を考慮することで調節されている。本実験では  $l_1 = 0.393$  m に固定した。さらに 2 つの proximal link はレゾルバーを内蔵している DD モータ 2 つによってそれぞれ独立に駆動することができる。実験システムの全体図を図 4 に示す。

図のコントロールループはサンプリングタイム 3 ms でコントロールコンピュータから制御される。レゾルバーの信号は 409600 puls/rev という高分解能でモータコントローラにおいてデジタル化されており、これは A 相、B 相、Z 相という 3 相出力信号として出力されている。この信号をコントロールコンピュータに搭載されたロボット

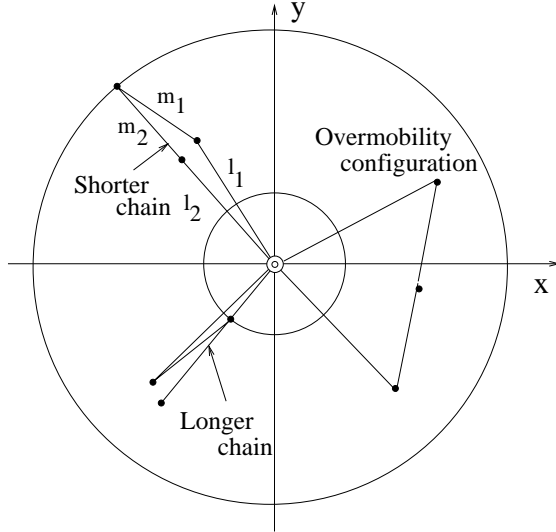


Fig. 3 Work space boundaries of the singularity-perturbed design.

インターフェイスボード RIF-01 内のプログラマブルカウンタを使用して関節角度の検出をしている。また RIF-01 ボードにはモータ制御のために使用する D/A 変換器も内蔵されており、制御モードはトルク制御モードを使用している。RS232C 通信はモータコントローラのパラメータの設定に使用している。

### 3.2 コントローラ

図 5 に示したコントローラは 2 つの独立した部分から構成されており、それぞれのモータの制御のための PID コントローラ部と、SC 逆運動学にコントローラ部に分類することができる。各モータの PID コントローラ部のフィードバックゲインは  $K_p = 115 \text{ Nm/rad}$ 、 $K_d = 4.2 \text{ Nms/rad}$ 、 $K_i = 0.08 \text{ Nm/rads}$  である。SC 逆運動学コントローラの出力は目標関節角度ベクトル  $\theta_{ad}$  と、目標関節角速度  $\dot{\theta}_{ad}$  である。これに類似したコントローラは HEXA パラレルリンクマニピュレータに使用されている<sup>20)</sup>。SC 逆運動学コントローラ中の表記は以下ようになる。

$h(q)$  はパラレルリンクマニピュレータの拡大

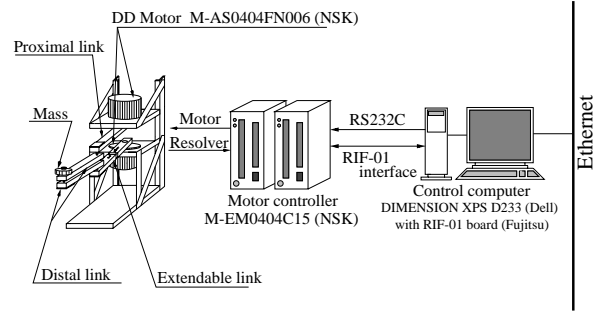


Fig. 4 The experimental system.

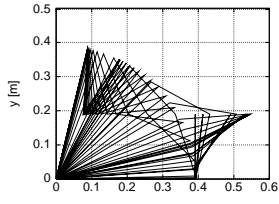
された運動学関数、このとき  $q = (s, \theta_a^T)^T$  は、軌道パラメータ  $s$  と active joint の関節角度ベクトル  $\theta_a \in \mathbb{R}^2$  である。 $D_q h(q)$  と  $\nu(q)$  はそれぞれ  $h(q)$  のヤコビ行列と零空間関数である。 $b$  は任意のパラメータで目標軌道上の目標速度である。またフィードバックゲインは  $K_{SC} = 500 \text{ 1/s}$  で固定した。

SC 逆運動学は劣可動特異点 (undermobility) の通過を<sup>21)</sup> で可能としているのが示されている。また過可動特異点 (overmobility) を通過するときにも連続した速度が生じる。一方<sup>22)</sup> で示している力学的解析は、過可動特異点近傍のモータトルクは運動学と動力学の視点から、時間に関して不連続になる可能性が示されている。このため過可動特異点を通過するには適切なトルク制御が必要である。本実験では、簡単な制御を試みているために我々のコントローラにはフィードフォワードトルクの項を加えていない。これ故、過可動特異点の近傍を通過するときには、問題が生じると予想することができる。

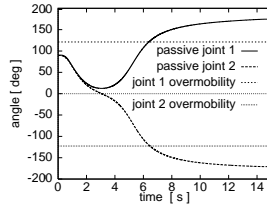
## 4. 実験

マニピュレータのホームポジションは図 6 に示したシリアルブランチモードの姿勢とする。目標軌道は直線で  $x$  軸に平行しており、目標運動方向は同じ図に示した通りである。エンドポイントが外円のワークスペースの境界線に到達してパラレ



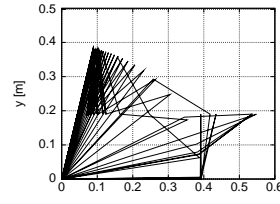


(a)

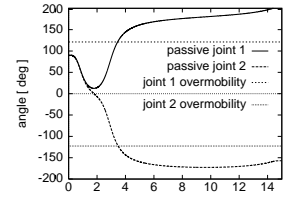


(b)

Fig. 7 Manipulator motion (a) and passive joint angles (b) for a motion with  $b_{max} = 30$ .

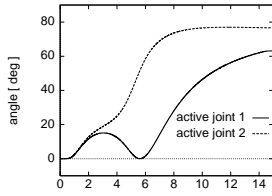


(a)

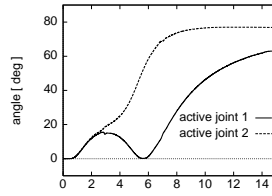


(b)

Fig. 10 Manipulator motion (a) and passive joint angles (b) for a motion with  $b_{max} = 60$ .



(a)



(b)

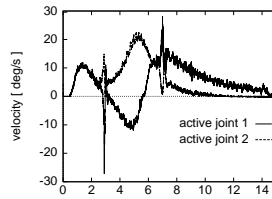
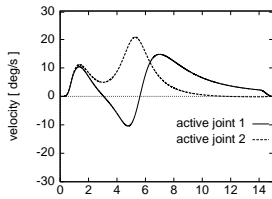
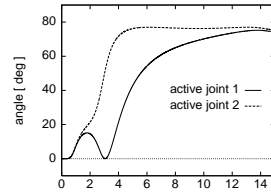
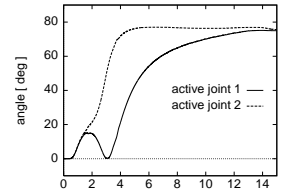


Fig. 8 Simulation data (a) and experimental data (b) for the motion with  $b_{max} = 30$ .



(a)



(b)

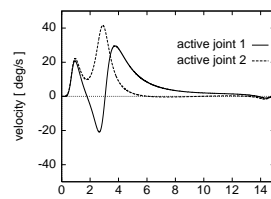
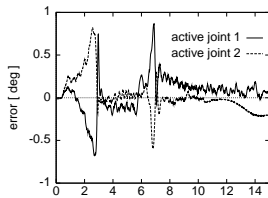
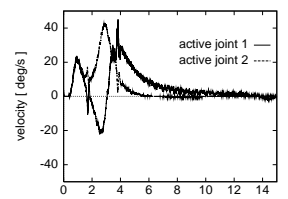
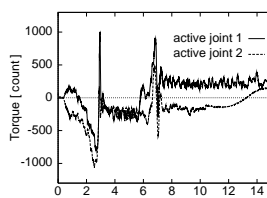


Fig. 11 Simulation data (a) and experimental data (b) for the motion with  $b_{max} = 60$ .

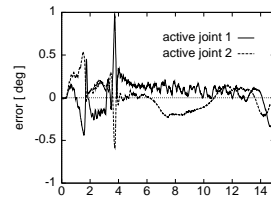


(a)

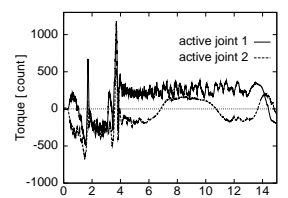


(b)

Fig. 9 Joint errors (a) and motor torque (b) for the motion with  $b_{max} = 30$ .



(a)



(b)

Fig. 12 Joint errors (a) and motor torque (b) for the motion with  $b_{max} = 60$ .

験により示した。劣可動特異点を通過するアームの運動は、逆運動学に関係した特異点では常に補償することができる。一方過可動特異点の場合では適切なトルク制御が必要であり、以上のコントローラでは補償することができない。今後の我々の方針としては、トルクのフィードフォワードの項を加えてこの問題に対応していく予定である。

## 参考文献

- 1) K. Sugimoto, J. Duffy, and K. H. Hunt: Special configurations of spatial mechanisms and robot arms, *Mechanism and Machine Theory* **17**-2, 119/132 (1982)
- 2) F. Pierrot et al.: A new design of a 6-DOF parallel robot, *Journal of Robotics and Mechatronics* **2**-4, 92/99 (1989)
- 3) J. P. Merlet: Singular configurations of parallel manipulators and Grassman geometry, *The International Journal of Robotics Research* **8**-5, 45/56 (1989)
- 4) C. Gosselin and J. Angeles: Singularity analysis of closed loop kinematic chains, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **6**-3, 281/290 (1990)
- 5) O. Ma and J. Angeles: Architecture singularities of platform manipulators, Proc. 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, California (1991), 1542/1547
- 6) S. Lee and S. Kim: Kinematic feature analysis of parallel manipulator systems, Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, California (1994), 77/82
- 7) H. R. Mohammadi Daniali, P. J. Zsombor-Murray and J. Angeles: Singularity analysis of planar parallel manipulators, Proc. 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya, Japan (1995), 1547/1552
- 8) F. DiCaprio and M. M. Stanisic: The kinematic control equations of a singularity-free manipulator, *ASME Journal of Mechanical Design*, **116**, 17/21, (1994)
- 9) M. M. Stanisic and O. Duta: Symmetrically actuated double pointing systems: The basis of singularity-free robot wrists, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **6**-5, 62/569 (1990)
- 10) Y. Nakamura and H. Hanafusa: Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control, *ASME Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control*, **108**, 163/171 (1986)
- 11) L. Nielsen, C. C. de Wit and P. Hagander: Controllability issues of robots in singular configurations, Proc. 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, California (1991), 2210/2215
- 12) S. Chiaverini, B. Siciliano and O. Egeland: Review of damped least-squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulator, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **2**-2, 123/134 (1994)
- 13) J. Kieffer: Manipulator inverse kinematics for untimed end-effector trajectories with ordinary singularities, *The International Journal of Robotics Research*, **11**-3, 225/237 (1992)
- 14) K. Tchoń and I. Dulęba: On inverting singular kinematics and geodesic trajectory generation for robot manipulators, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, **8**, 325/359 (1993)
- 15) S. K. Singh: Motion planning and control of non-redundant manipulators at singularities, Proc. 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, Georgia (1993), 487/492
- 16) M. Kirćanski, N. Kirćanski, Dj. Leković, and M. Vukobratović, "An experimental study of resolved acceleration control of robots at singularities: damped least-squares approach, *ASME Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control*, **119**, 97/101 (1997)
- 17) D. N. Nenchev, Y. Tsumaki and M. Uchiyama: Singularity-consistent parameterization of robot motion and control, *The International Journal of Robotics Research*, **19**-2, 159/182 (2000)
- 18) Y. Tsumaki, S. Kotera, D. N. Nenchev, and M. Uchiyama: Singularity-consistent inverse kinematics of a 6 D.O.F. manipulator with a non-spherical wrist, Proc. 1997 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, (1997) 2980/2985
- 19) M. Uchiyama et al.: A new design of a very fast 6-DOF parallel robot, Proc. 23rd Int. Symposium on Industrial Robots (ISIR), Barcelona, Spain, (1992) 771/776
- 20) D. N. Nenchev et al: Singularity-consistent control of nonredundant robots, Video Proceedings of the 1996 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota (1996)
- 21) D. N. Nenchev and M. Uchiyama: Singularity-consistent path planning and motion control through instantaneous self-motion singularities of parallel-link manipulators, *Journal of Robotic Systems*, **14**-1, 27/36 (1997)
- 22) D. N. Nenchev, S. Bhattacharya and M. Uchiyama: Dynamic analysis of parallel manipulators under the singularity-consistent parameterization, *Robotica*, **15**-4, 375/384 (1997)
- 23) D. N. Nenchev and M. Uchiyama: PARA-Arm: A Five-Bar Parallel Manipulator With Singularity-Perturbed Design, *Mechanism and Machine Theory*, **33**-5, 453/462 (1998)