回転中心位置を変更可能な大傾斜角球面パラレル機構の開発

Development of a spherical parallel mechanism with large orientation workspace around controllable target point

池田 剛 (東工大) 正 武田 行生 (東工大)
○正 松浦 大輔 (東工大)

Tsuyoshi Ikeda, Tokyo Institute of Technology
Yukio TAKEDA, Tokyo Institute of Technology
Daisuke MATUURA, Tokyo Institute of Technology

This paper proposes a rotational parallel mechanism, which can perform rotational output motion around two orthogonal axes and translational motion of the center of rotation of the output link called "target point". This mechanism is composed of three connecting chains; one target point control chain with actuators for changing the target point, and two rotational motion control chains having single actuator on each chain for generating rotational motion. Structures of these chains were clarified for achieving position-orientation decoupled feature. To enlarge the orientation workspace without singularity configurations, adjustment method of design parameters were figured out based on the equations determining the existence of solution, and the equation of transmission characteristics about input velocity and input torque.

Key Words: Robotics, Manipulation, Parallel Mechanism, Position-Orientation Decoupled Parallel Mechanism

1. 緒言

球形に近い物の加工や低侵襲手術を行うロボットにおいて、機構的な回転中心の変更が可能かつ大きな姿勢角変化ができることは、回転運動に関する運動精度向上や回転運動についての作業領域を広くとれるといった点から有効である。また並進運動を創成する能動対偶と回転運動を創成する能動対偶が別々である完全分離形とすることが制御を容易にするために有効である。例えば低侵襲手術においては体に穴を開け、体内へ器具を挿入して手術を行うが、ロボットを用いる場合その穴と機構的な回転中心を一致させることによって安全に手術が行える。球形に近い物の加工においては、ロボットが球面運動を行いながら、その球の中心を変更することによって、様々な加工を行える。

このような特徴を持つロボットとして球面機構によって機構的な回転中心を作り、その機構全体を並進運動させるロボット[1]がある。このロボットはシリアル機構であるため、全ての対偶にアクチュエータを配置する必要があり、可動部質量が増大し、リンクの高剛性化が必要であり、そしてアクチュエータの保護が困難である。パラレル機構のロボットは、スチュワートプラットフォーム形[2][3]や球面機構[4][5]がある。文献[2][3]のロボットはスチュワートプラットフォームを構成する球対偶のうち3つを同一点にした機構であり、その点が機構的な回転中心となる。しかし回転中心を支持する必要があるため、上記の作業対象には適さない。文献[4][5]の機構は球面機構と直進対偶を用いた3つの同一の連鎖からなる対称的な機構である。このような連鎖をとりうる機構の構成は文献[6]にまとめられている。しかし受動直進対偶を用いずに、アクチュエータをベースやその付近にまとめた機構は著者の知る限り存在しない。

そこで本研究では、球面機構をベースとして非対称の構造とすることにより、受動直進対偶を用いることなく、アクチュエータをベース付近に配置可能で、完全分離形の新しいパラレルメカニズム(SPM_VTP)を提案する。そして変位解析、および特異点解析を行うことによってこの機構の妥当性を確認し、変位解析の解の存在条件式と特異点を評価する式を用いた、作業領域の拡大手法を提案し、数値例を示す。

2. SPM_VTP

2.1 SPM_VTP の基本構成

本研究で提案する SPM_VTP は図1に示すように1本の回転中心制御用連鎖(TPC)と2本の回転運動制御用連鎖(RMC)からなる。SPM_VTP は回転中心点 TP の3次元座標(X_p, Y_p, Z_p)と傾斜方向角 θ_x 、傾斜角 θ_y の計5つの成分を制御する機構である。機構図における四角柱はその長手方向に対偶軸を持つ直進対偶である。TPC における $w_{j,1}$ ($j=1,2,3$)はその対偶軸方向の単位ベクトルである。円柱はその軸方向に対偶軸を持つ回転対偶であり、 $w_{j,1}$ ($j=4,5$)はその対偶軸方向の単位ベクトルである。円は回転対偶、もしくは直進対偶の1自由度の対偶であり、その選択によって異なる特性を持つ SPM_VTP が構成できる。また灰色の対偶は能動対偶を表す。

TPC は軸が1点で交差する2つの受動回転対偶と並進3自由度の能動運動を行う機構からなる。図1には一例として3つの直進対偶が直列に連結されたものを示している。2つの受動回転対偶の交差点がプラットフォームの回転中心 TP となり、3つの能動直進対偶を動かすことにより、回転中心の空間的位置の独立制御が可能である。

RMC は回転中心の並進運動に対応しつつ、回転運動を創成するため、5つの受動対偶と1つの能動対偶からなる6自由度連鎖となっている。

TPC は全ての能動対偶を固定することによってプラットフォームの並進3自由度と回転1自由度を拘束する。したがって、すべての能動対偶変位を決定した時にプラットフォームの位置、姿勢が一意に定まるためには、それぞれの RMC の能動対偶を固定した時にプラットフォームの1自由度の回転運動が拘束されなければならない。このような機構を構成することによって、5つの能動対偶で並進3自由度、回転2自由度の計5自由度の出力運動が制御可能となる。

Fig.1 Basic composition of SPM_VTP

2.2 SPM_VTP のヤコビ行列

RMC の構造によって機構の特性が変わるため、まずは一般的な場合について SPM_VTP の速度に関する入出力関係式を求める。2本の RMC の能動対偶を固定した時に生じる拘束力、拘束モーメントをそれぞれ f_i , m_i ($i=2,3$) とする。この時、入出力関係式は次式のようにになる。

$$\begin{bmatrix} m_2^T & f_2^T \\ m_3^T & f_3^T \\ (w_{5,1} \times w_{4,1})^T & 0 \\ 0 & w_{1,1}^T \\ 0 & w_{2,1}^T \\ 0 & w_{3,1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2^T \omega_{1,2} + f_2^T v_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_3^T \omega_{1,3} + f_3^T v_{1,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1,2} \\ \dot{\theta}_{1,3} \\ 0 \\ \dot{q}_{1,1} \\ \dot{q}_{2,1} \\ \dot{q}_{3,1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし v_p , ω_p はそれぞれプラットフォームの並進速度と角速度である。 $w_{1,i}$, $v_{1,i}$ ($i=2,3$) はそれぞれの RMC の能動対偶がプラットフォームに与える角速度の方向と並進速度の方向を表すベクトルである。 $\theta_{1,2}, \theta_{1,3}$ はそれぞれの RMC の能動対偶の変位、 $q_{1,1}, q_{2,1}, q_{3,1}$ はそれぞれ TPC の能動直進対偶の変位である。

式(1)を 3×3 行列 J_A, J_B, J_C および J_E , 3×1 行列 $\dot{\theta}, \dot{q}$ を用い次式のように書き換える。

$$\begin{bmatrix} J_A & J_B \\ 0 & J_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_E & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)より $J_B=0$ となるように SPM_VTP を構成することによって、完全分離形になることが分かる。

Fig.2 Position-orientation decoupled composition of SPM_VTP

3. 完全分離形 SPM_VTP

3.1 完全分離形 SPM_VTP の条件

式(2)より SPM_VTP を完全分離形とするために $J_B=0$ となる構成を考える。このためには式(1)より $f_i=0$ ($i=2,3$) となればよい。また $f_i=0$ の時、 J_E が零行列とならないためには、 $w_{1,i}$ ($i=2,3$) が有限の値を持つ必要がある。以上より RMC の構造としては能動対偶を固定した時に、力を拘束せずモーメントのみを拘束すること、また能動対偶はプラットフォームに角速度を与えられる回転対偶である必要があるということが分かる。文献[6]よりこの条件を満たす RMC の連鎖として、 $6R(\bar{R}\bar{R}\bar{R}\bar{R}\bar{R}\bar{R})$ を取り上げ、これを用いた完全分離形 SPM_VTP の機構を図 2 に示す。 $w_{j,i}$ ($i=2,3$, $j=1,2,3,4,5,6$) はそれぞれ RMC_i の各回転対偶の対偶軸方向の単位ベクトルを示し、図 2 の機構では $w_{2,i}=w_{3,i}=w_{4,i}$, $w_{5,i}=w_{6,i}$ となるように構成されている。

3.2 完全分離形 SPM_VTP のヤコビ行列

完全分離形 SPM_VTP のヤコビ行列は次式のようにになる

$$\begin{bmatrix} (w_{2,2} \times w_{6,2})^T & 0 \\ (w_{2,3} \times w_{6,3})^T & 0 \\ (w_{5,1} \times w_{4,1})^T & 0 \\ 0 & w_{1,1}^T \\ 0 & w_{2,1}^T \\ 0 & w_{3,1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (w_{2,2} \times w_{6,2})^T w_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (w_{2,3} \times w_{6,3})^T w_{1,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1,2} \\ \dot{\theta}_{1,3} \\ 0 \\ \dot{q}_{1,1} \\ \dot{q}_{2,1} \\ \dot{q}_{3,1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)を式(2)の形式で次のように書く。

$$\begin{bmatrix} J_A & 0 \\ 0 & J_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_E & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 完全分離形 SPM_VTP の特異点

完全分離形 SPM_VTP は J_A, J_C, J_E のランクが 3 未満の時に特異点となる。本報告では TPC を直交する 3 つの直進対偶を用いて構成しており、 J_C は常に単位行列となり、 J_C に関する特異点は存在しない。 J_A, J_E に関しては特異点が存在するため、それぞれの行列式の絶対値をとった I_A, I_E を評価量とする。それぞれの評価量の値が 0 の時、特異点となる。

$$I_A = |\det J_A| \quad (0 \leq I_A \leq 1) \quad (5)$$

$$I_E = |\det J_E| \quad (0 \leq I_E \leq 1) \quad (6)$$

$I_A=0$ の時、プラットフォームの姿勢を保持できなくなる。また $I_E=0$ の時、運動の自由度が減少する。

3.3 完全分離形 SPM_VTP の変位解析

プラットフォームの位置 $TP(Xp, Yp, Zp)$ と姿勢 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ が与えられた時の完全分離形 SPM_VTP の変位解析を行う。ベース座標系からプラットフォーム座標系への同次変換行列として、入力と与えられる T_{input} 、TPC 連鎖、RMC_i 連鎖 ($i=2,3$) のそれぞれの各対偶変位を用いて求められる T_{TPC} 、 T_{RMC_i} を考える。これらの間には次式が成立する。

$$T_{input} = T_{TPC} = T_{RMC_2} = T_{RMC_3} \quad (7)$$

次に入力変数は 5 変数であるので、5 つの対偶を持つ TPC から変位解析を行う。 T_{input} はプラットフォームの位置 Xp, Yp, Zp 、傾斜方向角 θ_z 、傾斜角 θ_y 、および θ_x と θ_y に従属する自転角を表す ϕ によって次のように表せる。

$$T_{input} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ P_{(Xp, Yp, Zp)} & Rx_{(\theta_z, \theta_y, \phi)} & Ry_{(\theta_z, \theta_y, \phi)} & Rz_{(\theta_z, \theta_y, \phi)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし P は回転中心の位置を表す 3×1 行列、 Rx, Ry 、および Rz はそれぞれ姿勢を表す 3×1 行列である。TPC の回転対偶の変位をベースから近い順に $\theta_{1,1}, \theta_{2,1}$ と表した時、TPC による同次変換行列 T_{TPC} は次のようになる。

$$T_{TPC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ P_{TPC(q_{1,1}, q_{2,1}, q_{3,1})} & Rx_{TPC(\theta_{1,1}, \theta_{2,1})} & Ry_{TPC(\theta_{1,1}, \theta_{2,1})} & Rz_{TPC(\theta_{1,1}, \theta_{2,1})} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(8),(9)の係数を比較すると、 $P=P_{TPC}$ により TPC の直進対偶の変位 $q_{1,1}, q_{2,1}, q_{3,1}$ が求まり、 $Rz=Rz_{TPC}$ により TPC の回転対偶の変位 $\theta_{1,1}, \theta_{2,1}$ が求まる。 $\theta_{1,1}, \theta_{2,1}$ の解の組み合わせは 2 通り存在する。

続いて RMC_i ($i=2,3$) の変位解析を行う。 T_{TPC} を次のように表す。

$$T_{TPC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ P_{TPC} & R_{TPC} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ただし R_{TPC} は姿勢を表す 3×3 行列である。TPC の各対偶変位は既に求まっているので、 T_{TPC} は既知である。RMC_i の各対偶の変位をベースから順に $\theta_{1,i}, \theta_{2,i}, \theta_{3,i}, \theta_{4,i}, \theta_{5,i}, \theta_{6,i}$ とする

と、RMC_i による同次変換行列 T_{RMC_i} はこれらの変数によって求められる。そのため次式の閉回路方程式を解くことによって RMC_i の各対偶変位が求まる。

$$T_{TPC} = T_{RMC_i} \quad (i=2,3) \quad (11)$$

式(11)を解くにあたって、まず $\theta_{1,i}, (\theta_{2,i} + \theta_{3,i} + \theta_{4,i})$ 、および $(\theta_{5,i} + \theta_{6,i})$ がそれぞれ姿勢を表す R_{TPC} のみによって求まることに着目する。続いて $\theta_{2,i}, \theta_{5,i}$ がそれぞれ R_{TPC} と P_{TPC} 両方によって次のように求まる。

$$\theta_{2,i} = \tan^{-1}(a_i) + \cos^{-1}(g'_i) \quad (12)$$

$$\theta_{5,i} = \sin^{-1}(f'_i) \quad (13)$$

ただし a_i, g'_i 、および f'_i は既知である。 $\theta_{2,i}, \theta_{5,i}$ は計算において位置の成分 P_{TPC} を用いているため、 f'_i, g'_i がそれぞれ以下の時のみ解が存在する。

$$-1 \leq f'_i \leq 1 \quad (14)$$

$$-1 \leq g'_i \leq 1 \quad (15)$$

求まった $\theta_{2,i}, \theta_{5,i}, (\theta_{2,i} + \theta_{3,i} + \theta_{4,i})$ 、また $(\theta_{5,i} + \theta_{6,i})$ より $\theta_{3,i}, \theta_{4,i}, \theta_{6,i}$ が求まる。以上より RMC_i の各対偶変位が求まる。以上、解の組み合わせは RMC_i について 8 通り存在する。

3.4 完全分離形 SPM_VTP の解析例

回転中心を固定し、傾斜角 θ_y を 30[deg] に固定し、傾斜方向角 θ_z を 0[deg]~360[deg] まで動かした時の RMC の入力変位と I_A, I_E の変化を求めた結果を図 3 に示す。

次に $\theta_y=30$ [deg]、 $\theta_z=0$ [deg] に設定し、回転中心の位置を Xp 方向に -20~20[mm] まで動かした時の RMC の入力変位と I_A, I_E の変化を求めた結果を図 4 に示す。この図において RMC の入力変位が一定になっていることからこの機構が完全分離形になっていることが分かる。

図 3、図 4 両方において I_A, I_E それぞれが同一符合であり、かつ 0 となっていないため、機構が特異点となることなくそれぞれの運動を行っていることが確かめられる。

Fig.3 Input displacement, I_A , and I_E of RMC_1,2 for fixed target point

Fig.4 Input displacement, I_A , and I_E of RMC-1,2 for variable position of target point

3.3 完全分離形 SPM_VTP の実用作業領域拡大

完全分離形 SPM_VTP の実用作業領域拡大を行う。実用作業領域とは幾何学的に到達可能、かつ特異点から離れている状態と定義する。特異点に関しては I_A, I_E を用い評価し、また解の存在については、式(14),式(15)における f_i と g_i ($i=2,3$)それぞれの2乗をとった f_i, g_i を用いて判定する。ここではこれらの評価量において次式の閾値全てを満たす作業領域を実用作業領域と定義する。

$$\begin{aligned} 0 \leq g_i \leq 1 \quad (i=2,3) \\ 0 \leq f_i \leq 1 \quad (i=2,3) \\ I_A \geq 0.4 \\ I_E \geq 0.1 \end{aligned} \quad (16)$$

本報告ではプラットフォームの位置を固定し、全ての傾斜方向角($\theta_z: [0^\circ : 360^\circ]$)において、取り得る傾斜角 θ_y の最小値が大きくなるように実用作業領域を拡大していく。手順としては式(16)の範囲の境界をとる θ_z, θ_y において θ_y が最小となる $\theta_{zmin}, \theta_{ymin}$ を求める。そしてその点において、その点を与える評価量の機構パラメータによる偏微分係数を取り、 θ_{ymin} を拡大できる機構パラメータの候補を取得する。その候補の機構パラメータを変更することによって実用作業領域を拡大する。一例としてパラメータ調整前のそれぞれの評価量による作業領域を図5に、実用作業領域を図6に示す。円周方向が θ_z 、半径方向が θ_y である。青い領域はそれぞれの評価量を満たす作業領域を表す。この場合では、 I_A によって $(\theta_{zmin}, \theta_{ymin}) = (270^\circ, 22.5^\circ)$ と求まる。そのためこの点における I_A の機構パラメータによる偏微分係数を計算することによって調整パラメータを決定し、パラメータを調整する。図7にパラメータ調整を行った後の実用作業領域を示す。パラメータ調整により、 θ_{ymin} が 22.5° から 33.7° へ拡大した。

4. 結言

本報告では回転中心の空間位置の独立制御が可能な球面パラレル機構として、1本のTPCと2本のRMCからなる構造を提案した。そして具体的に速度解析に基づいて機構構造を明らかにし、その変位解析と特異点の解析を行うことで機構の妥当性を示した。また解の存在を表す評価量と特異点に関する評価量を用いて実用作業領域を拡大する手法を提案し、その有効性を具体的に示した。

Fig.5 Workspace determined by each evaluation function

Fig.6 Usable workspace

Fig.7 Usable workspace after parameter adjustment

文 献

- [1] Y. Baek, Y. Kozuka, N. Sugita, A. Morita, S. Sora, R. Mochizuki, and M. Mitsuishi, "Highly Precise Master-Slave Robot System for Super Micro Surgery", *Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2010, pp 740-5
- [2] K. Wohlhart, "Displacement analysis of the general spherical stewart platform", *Mechanism and Machine Theory*, Vol 29, 581(1994)
- [3] Y. Takeda, K. Kamiyama, Y. Maki, M. Higuchi, K. Sugimoto, "Development of position-orientation decoupled spatial in-parallel actuated mechanisms with six degrees of freedom", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2005, Vol. 59
- [4] Y. Jin, I.M. Chen, G. Yang, "Kinematic design of a 6-dof parallel manipulator with decoupled translation and rotation", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, 2006, pp 545-551
- [5] C.-C. Lee, J.M. Hervé, "Parallel mechanisms generating 3-DoF finite translation and (2or1)-DoF infinitesimal rotation." *Mechanism and Machine Theory* Vol. 51, 2012 pp 185-194.
- [6] M. Tanabe and Y. Takeda, "Kinematic Design of a Translational Parallel Manipulator with Fine Adjustment of Platform Orientation", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2010, Article ID 485358