

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	2自由度球面リンク機構の可動範囲最大化に関する検討
Title	Workspace Maximization of the 2-DOF Spherical Parallel Mechanisms
著者	上田紘司, 山田浩也, 石田悠朗, 広瀬茂男
Author	Koji Ueda, Hiroya Yamada, Hiroaki Ishida, SHIGEO HIROSE
掲載誌/書名	, , ,
Journal/Book name	, , ,
発行日 / Issue date	2013, 5
URL	http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

2自由度球面リンク機構の可動範囲最大化に関する検討

Workspace Maximization of the 2-DOF Spherical Parallel Mechanisms

上田 紘司 (東工大) 正 山田 浩也 (東工大)
石田 悠朗 (東工大) 正 広瀬 茂男 (東工大)

Koji UEDA, Tokyo Institute of Technology, kueda12048@gmail.com
Hiroya YAMADA, Tokyo Institute of Technology
Hiroaki ISHIDA, Tokyo Institute of Technology
Shigeo HIROSE, Tokyo Institute of Technology

For robot arms, wrist mechanisms are important elements for handling ability. We have proposed a heavy-duty wrist mechanism with a large motion range named, "2-DOF Spherical Parallel (2DSP) mechanism." The 2DSP mechanism is driven by a 2-DOF spherical parallel mechanism and supported by a universal joint located at its center. In this paper, we propose a method to maximize workspace in avoidance of singularities or too small output torque. The test model was developed, and the feasibility of the proposed method was verified.

Key Words: parallel mechanism, motion range, spherical linkage

1. 緒言

ロボットアームの手首機構は、そのハンドリングの作業性に大きな影響を与える主要部材であり、その最適化設計の重要性は著しく高い。筆者らはこれまで、文献[1]で報告したように、遠隔操作される移動マニピュレータのための大きな可動範囲と高い耐荷重性能を持つ、2-DOF Spherical Parallel(2DSP)機構と呼ぶ手首機構を研究・開発してきた。

2DSP機構は図1に模式的に示すように、前腕部と手先部が軸a、軸bで構成されるユニバーサルジョイントで連結され、軸aの同軸に回転を出力する左右のアクチュエータに取り付けられたリンクの先端の受動対偶 u_L, u_R と、手先部に取り付けられた受動対偶 v_L, v_R を連結リンク c_L, c_R でつないだ構成をなすことが特徴である。そしてこのような構成であるため、4つの受動対偶 u_L, u_R, v_L, v_R はすべて、軸a、bの交点oを中心とする球殻上を移動する球面リンク機構となっている。

文献[1]では、左右のリンク系の内、片側のリンク系、つまり1入力1出力モデルの特異姿勢を考慮した可動範囲の最大化手法を提案し、図2に示す大きな可動範囲($-75^\circ \leq \theta_{yaw} \leq 75^\circ$, $-120^\circ \leq \theta_{pitch} \leq 100^\circ$)をもつ手首機構を開発した。本稿では、この手法を発展させ、対象とする2入力2出力の機構における特異姿勢と、出力トルクを考慮した可動範囲の最大化手法を提案する。

2. 基本運動学解析

次章での可動範囲解析の基となる運動学解析を行う。解析に使用する座標系 (x, y, z) と (x', y', z') の原点をユニバーサルジョイントの回転軸の交点に置き、座標系 (x, y, z) を前腕に、座標系 (x', y', z') を手先に図1のように固定する。前腕に対する手先の姿勢 $(\theta_{pitch}, \theta_{yaw}) = (0, 0)$ のとき両座標系は一致する。以下では左側のリンクに注目し、添え字Lをつける。単位ベクトル u_L, v_L は受動対偶 u_L, v_L の回転軸を表し、 θ_L はy軸と u_L を通る平面とyz平面との角度、 l_1 はy軸と u_L 、 l_2 は u_L と v_L 、 l_3 はz'軸と v_L とがなす角度とする。αは、z'軸と v_L を通る平面とx'z'平面との角度と定義する。右側のリンクについても同様に定義し、各対偶間の角度 (l_1, l_2, l_3, α) は左右で共通とする。

u_L, v_L は回転行列 $R(axis, angle)$ を用いて以下のように表

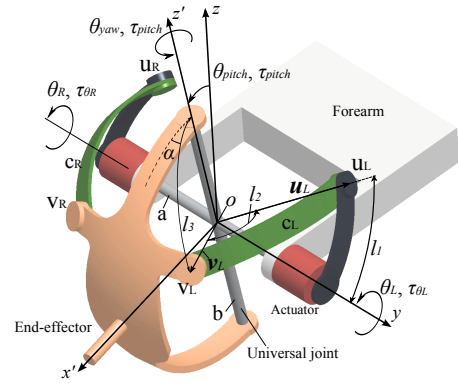


Fig. 1 Kinematic model of the 2DSP mechanism

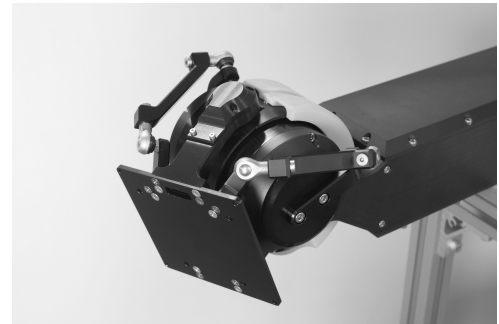


Fig. 2 2-DOF spherical parallel wrist mechanism ($l_1 = 42^\circ$, $l_2 = 74^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 40.8^\circ$).

すことができる。

$$u_L = R_{y, \theta_L} R_{x, l_1} (0 \ 1 \ 0)^T \quad (1)$$

$$v_L = R_{y, \theta_{pitch}} R_{z, (\theta_{yaw} + \alpha)} R_{y, l_3} (0 \ 0 \ 1)^T \quad (2)$$

$$(3)$$

これらの内積は、

$$u_L \cdot v_L = \cos l_2 \quad (4)$$

右側のリンクについても同様にして、これらを整理すると

次の式が得られる。以下、 $\sin(x) = S_x$, $\cos(x) = C_x$ と省略して表す。

$$f_L \equiv S_{l_1} C_{l_3} C(\theta_L - \theta_{pitch}) + S_{l_3} C_{l_1} S(\theta_{yaw} + \alpha) + S_{l_1} S_{l_3} S(\theta_L - \theta_{pitch}) C(\theta_{yaw} + \alpha) - C_{l_2} = 0 \quad (5)$$

$$f_R \equiv S_{l_1} C_{l_3} C(\theta_R - \theta_{pitch}) + S_{l_3} C_{l_1} S(-\theta_{yaw} + \alpha) + S_{l_1} S_{l_3} S(\theta_R - \theta_{pitch}) C(-\theta_{yaw} + \alpha) - C_{l_2} = 0 \quad (6)$$

式5, 6をそれぞれ θ_L , θ_R について解くと、逆運動学解が解析的に得られる。式5を

$$d = (C_{l_2} - C_{l_1} S_{l_3} S(\theta_{yaw} + \alpha)) / S_{l_1} \quad (7)$$

$$r = \sqrt{C_{l_3}^2 + S_{l_3}^2 C(\theta_{yaw} + \alpha)^2} \quad (8)$$

$$\phi = \text{atan2}(C_{l_3}, S_{l_3} C(\theta_{yaw} + \alpha)) \quad (9)$$

と置くと、

$$\sin(\theta_L - \theta_{pitch} + \phi) = \frac{d}{r} \quad (10)$$

$$\theta_L = \text{atan2}\left(\frac{d}{r}, \pm\sqrt{1 - \frac{d^2}{r^2}}\right) - \phi + \theta_{pitch} \quad (11)$$

θ_L が求まる。 θ_R についても同様にして求めることができる。また、式5, 6を行列形式で表し、

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_L \\ f_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_L \cdot \mathbf{v}_L - \cos l_2 \\ \mathbf{u}_R \cdot \mathbf{v}_R - \cos l_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\theta_I = (\theta_L, \theta_R)^T$, $\theta_O = (\theta_{pitch}, \theta_{yaw})^T$ として、式12を微分すると入出力間の速度の関係式とヤコビ行列 \mathbf{J} が得られる。

$$\mathbf{J}_I \dot{\theta}_I + \mathbf{J}_O \dot{\theta}_O = 0 \quad (13)$$

$$\dot{\theta}_O = \mathbf{J} \dot{\theta}_I, \quad (\mathbf{J} = -\mathbf{J}_O^{-1} \mathbf{J}_I) \quad (14)$$

$$\mathbf{J}_I = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \theta_I} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_L}{\partial \theta_L} & \frac{\partial f_L}{\partial \theta_R} \\ \frac{\partial f_R}{\partial \theta_L} & \frac{\partial f_R}{\partial \theta_R} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_O = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \theta_O} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{pitch}} & \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{yaw}} \\ \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{pitch}} & \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{yaw}} \end{bmatrix}$$

3. 出力トルクを考慮した可動範囲の最大化

2DSP機構は、 θ_{pitch} を変化させてもリンク系の形状は変化しないため、pitch方向の可動範囲は部品同士の干渉のみによって制限される。そのためここではyaw方向の可動範囲を議論する。

左側のリンクに着目し、式11が解をもつための条件は $(\frac{d}{r})^2 \leq 1$ となることである。この条件は右側のリンクについても存在し、 θ_{yaw} はこれらの条件を満たす値をとり得るが、途中で特異点を含む可能性があるため、これを調べる。式13の \mathbf{J}_I , \mathbf{J}_O の行列式は、以下のように表すことができる。

$$\det(\mathbf{J}_I) = \frac{\partial f_L}{\partial \theta_L} \cdot \frac{\partial f_R}{\partial \theta_R} \quad (15)$$

$$\det(\mathbf{J}_O) = \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{pitch}} \cdot \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{yaw}} - \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{pitch}} \cdot \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{yaw}} \quad (16)$$

文献[2]によれば、 $\det(\mathbf{J}_I) = 0$ となる点は第1種特異点、 $\det(\mathbf{J}_O) = 0$ となる点は第2種特異点、これらが同時に起こる場合は第3種特異点となる。この3種類の特異点を含まない範囲を可動範囲と考えることもできるが、第2種特異点の近傍では、出力節に与えられたトルクを支持できない可能性があるため、出力節において出力可能なトルクを考えて行くことにする。

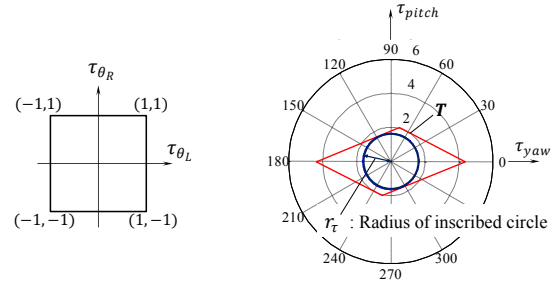


Fig. 3 Left: input torque space. Right: Output torque space.

図1に示す2DSP機構のアクチュエータのトルク、つまり入力トルクを $\boldsymbol{\tau} = (\tau_{\theta_L}, \tau_{\theta_R})^T$ とすると、出力トルク $\mathbf{T} = (\tau_{pitch}, \tau_{yaw})^T$ は、式14のヤコビ行列 \mathbf{J} を用いて、

$$\mathbf{T} = (\mathbf{J}^T)^{-1} \boldsymbol{\tau} \quad (17)$$

と表される。出力トルクの限界はアクチュエータのトルクの限界により定まる。入力トルク $\tau_{\theta_L}, \tau_{\theta_R}$ の最大の大きさをそれぞれ1とすると、入力トルクは図3左のように横軸に τ_{θ_L} 、縦軸に τ_{θ_R} とすれば、正方形の内側として表すことができる。これに対応する出力トルク \mathbf{T} は図3右のような平行四辺形の内側となり、その平行四辺形の内接円の半径を r_τ とする。 r_τ は、ある姿勢で出力節が全方向に発生できるトルクの、アクチュエータトルクに対する比の最大値を意味し、文献[3]で全方向最大発生モーメントと呼んでいるものに対応する。

本稿では、2DSP機構の可動範囲を第1種から3種までの特異点を含まない範囲であることに加えて、 $r_\tau > r_{\tau min}$ ($r_{\tau min}$ は正の定数)である範囲とし、その範囲を最大化することを考える。

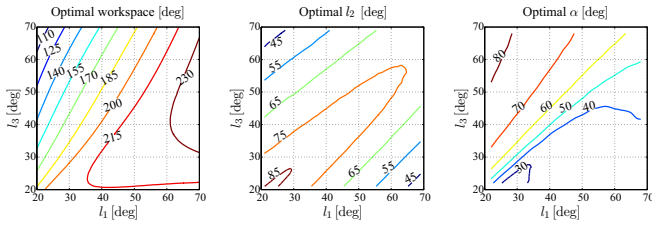
例として、 $r_{\tau min} = 0.5$ と設定し、 l_1, l_3 を与えて可動範囲を最大化する l_2, α をしらみつぶしに探索したときの結果を図4(a)に示す。図2に示す製作した手首機構と同じ l_1, l_3 (それぞれ $42^\circ, 50^\circ$)を選択すると、 $l_2 = 71.7^\circ, \alpha = 64^\circ$ となり、その時の可動範囲は $\pm 95.5^\circ$ となる。そのリンクパラメータを採用した時の機構のモデルを図4(b)に、 r_τ と θ_{yaw} の関係を図4(c)に示す。

本研究の可動範囲を最大化する手順を以下にまとめる。

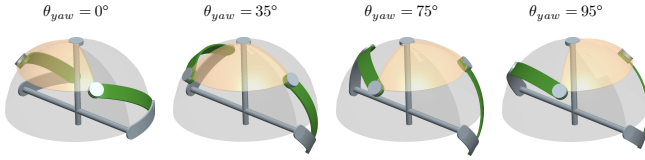
- 出力節が全方向に発生できるトルクのアクチュエータトルクに対する比の最大値 r_τ の全ての姿勢の中で最小の値 $r_{\tau min}$ を設定する。
- 図4(a)のように可動範囲をマッピングし、 l_1, l_3 を部品同士が干渉しない程度に可動範囲が大きくなる方へ変化させる。
- l_2, α を図4(a)のようなマップにしたがって決定する。

4. 試作機の製作

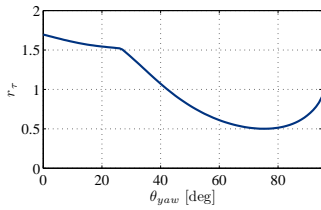
提案手法の有効性を実験的に確かめるため、図5に示す試作機を製作した。前章での例と同様に $r_{\tau min} = 0.5$ とし、リンクパラメータは($l_1 = 42^\circ, l_2 = 71.7^\circ, l_3 = 50^\circ, \alpha = 64^\circ$)とした。実際の各リンクは、ラピッドプロトotypingにより製作した。そして、向かい合わせに配置したRCサーボモータにより入力リンクを駆動し、yaw方向に約 $\pm 95^\circ$ の可動範囲を持つことを確かめた。



(a) Optimum range of θ_{yaw} .



(b) Kinematic model ($l_1 = 42^\circ$, $l_2 = 71.7^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 64^\circ$).



(c) r_τ : omni-directional maximum output torque.

Fig. 4 Workspace maximization ($r_{\tau min} = 0.5$).

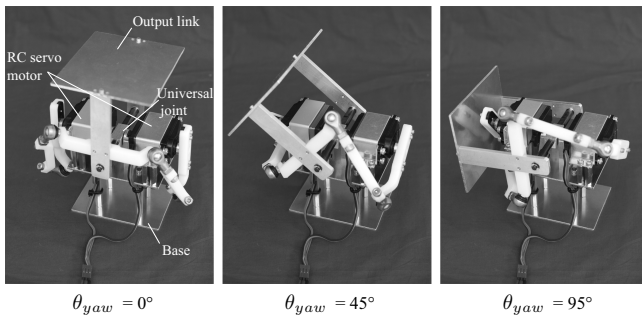


Fig. 5 Developed test model.

5. 結論

本稿では、著者らが提案する2DSP機構のための、特異姿勢含まず、さらに出カトルクの下限に制限を設けた可動範囲の最大化手法を提案した。また、試作機を製作し、提案手法により文献[1]で示した機構よりも可動範囲の広い2DSP機構を実現できることを確かめた。

謝 辞

本稿は、東京工業大学 機械物理学専攻 武田行生教授の文献[1]での特異点解析方法についてのご指摘、ご助言を基に再考したものです。ここに謝意を表します。

文 献

- [1] K. Ueda, H. Yamada, H. Ishida and S. Hirose, "Design of Large Motion Range and Heavy Duty 2-DOF Spherical Parallel Wrist Mechanism," accepted for publication in *J. of Robotics and Mechatronics*, 2013.
- [2] C. Gosselin and J. Angeles, "Singularity analysis of closed-loop kinematic chains," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 3, pp. 281–290, 1990.

- [3] 武田行生, 舟橋宏明, "ロボット機構の出力の空間的等方性の評価," 日本機械学会論文集. C 編, vol. 61, no. 586, pp. 2636–2642, 1995.