

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	大荷重支持2自由度球面リンク機構を用いた防塵型手首機構の開発
Title	
著者(和文)	上田紘司, 山田浩也, 石田悠朗, 広瀬茂男
Authors	Koji Ueda, Hiroya Yamada, Hiroaki Ishida, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	日本ロボット学会学術講演会, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2012, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2012 The Robotics Society of Japan.

大荷重支持2自由度球面リンク機構を用いた 防塵型手首機構の開発

上田 紘司 山田 浩也 石田 悠朗 広瀬 茂男 (東京工業大学)

1. はじめに

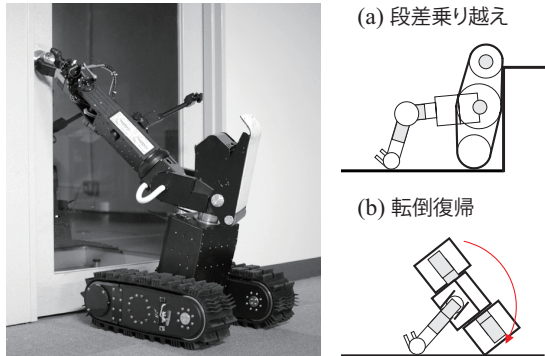


図1 HELIOS とその動作形態

地震やテロなどで被災した建物内においてロボットを用いて情報収集活動を行うことが望まれている。このようなロボットには遠隔操作により階段などの障害物を踏破する能力や、ドアの開閉、不審物などの物体ハンドリング能力などが、要求される。

筆者らは高い移動性能と作業性能の両立を目指したレスキューロボットとして HELIOS シリーズ [1] の開発を継続的に行っている。HELIOS シリーズは、図 1 に示すように胴体の左右に独立した 2 つのクローラユニットと、物資のハンドリングと障害物踏破を補助するためのマニピュレータを胴体部に装備している。本稿では、そのマニピュレータの手首機構に注目する。まず、この手首に要求される仕様を挙げる。

- 防塵防水性: 除染のため水洗い可能であることや水没した場所での作業も想定される。
- 広い可動範囲: ドアやバルブを回転させる動作などを考慮し、できるだけ大きな可動範囲を確保する。
- 耐荷重: 図 1-(a), (b) に示すように地面などを押さえつける動作にも対応する。
- 応答性: マスタースレーブシステムによって遠隔操作されるため、高い応答性を持つことが望ましい。

多足歩行ロボットの足首機構についても上記と同様の仕様が要求され、尾形らは、それらを満たすように干渉駆動機構を用いた歩行ロボットの足首機構を開発し、大きな可動範囲 ($\theta_{roll} : \pm 65^\circ$, $\theta_{pitch} : \pm 80^\circ$) を実現した [2]。しかし、従来の設計、解析方法では設計パラメータが多く、可動範囲を最大化するためにリンク長などは試行錯誤的に決定していた。また、特異点の解析については入出力間の速度の関係式だけでなく、その間の受動対偶の特異姿勢も考慮しなければならず容易ではなかった [3]。本研究ではこの機構を球面リンク機構として設計することで、設計パラメータが減少し、可動範囲

の最大化と特異点の解析も容易に行えることを示す。

1-1 球面リンク機構を用いた手首機構

球面リンク機構は各リンクが同心球殻上を運動する機構である。他の平行リンク機構と同様に、歯車などで構成した場合と比較し軽量で高剛性、アクチュエータをベース部に配置できるため、慣性を小さくできるなどの利点を持つ。また、常に全ての回転軸が 1 点で交わる機構であるため、文献 [3] で議論している受動対偶の特異姿勢を特に考慮する必要はない。

これまでに多くの球面リンク機構を用いた姿勢制御機構が研究・開発されてきた。Gosselin らは 3 自由度を有するカメラの雲台を開発した [4]。この機構は回転対偶のみで構成され、その回転軸は 1 点で交わる。そこに移動台を配置すれば慣性を小さくすることができるため、このような構成は小さい力で高速に動作させる場合に有利となる。しかし中心を通る力に対して各リンクに曲げモーメントが発生するため、荷重のかかる手首機構としては不向きである。一方で、ベースと移動台を球対偶で接続し、その周囲に 3 つの駆動用のリンクを配置する構成も文献 [5] などで報告されている。中心を通る力は中心部の球対偶が受けるため、駆動用のリンクへ負荷がかからない。移動台を中心部に配置することはできないが、大きな荷重に耐え得る。

3 自由度を有するものは、運動学計算が非常に複雑であることや roll 軸の可動範囲を大きくとることが難しいといった問題があるため、本研究では、roll 軸はアームの根元側に配置し、pitch, yaw の 2 自由度を持たせることとした。その手首機構の概念図を図 2 に示す。ベース (前腕) と移動台 (手先) は回転自在のユニバーサルジョイントによって連結される。さらに pitch 軸と同軸に取り付けられた左右のリンクは受動回転対偶を介して手先と連結され、この左右のリンクを駆動することで手首の 2 自由度運動を生成する。図 1(a), (b) や重量物を持ち上げる動作時には、ユニバーサルジョイントが中心を通る力を受け駆動用のリンク機構には負荷がかからないため、大きな荷重を支持し得る。

2. 運動学解析

この機構の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') をユニバーサルジョイントに図 2 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

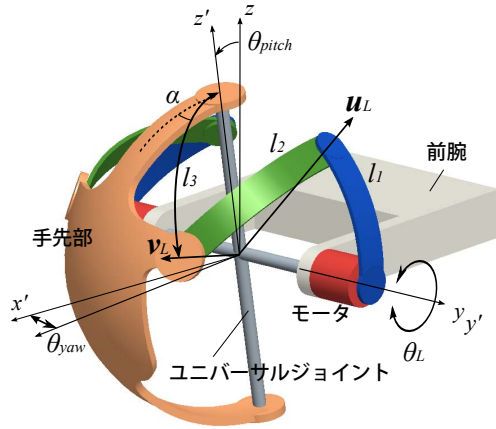


図2 手首機構の運動学モデル

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 とそれらの内積は, 回転行列 $R(\text{axis}, \text{angle})$ を用いて以下のように表せる.

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

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

$$u_L \cdot v_L = \cos l_2 \quad (3)$$

式3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.

$$f_L = S_{l_1} C_{l_3} C_{(\theta_L - \theta_{pitch})} + S_{l_3} C_{l_1} S_{(\theta_{yaw} + \alpha)} + S_{l_1} S_{l_3} S_{(\theta_L - \theta_{pitch})} C_{(\theta_{yaw} + \alpha)} - C_{l_2} = 0 \quad (4)$$

θ_L について解くと逆運動学解が解析的に得られる. 右側のリンクについても同様である. また, 順運動学・静力学解析については文献 [2] と同様にして得られる.

2.1 可動範囲

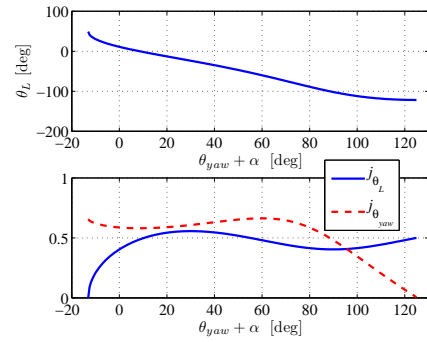
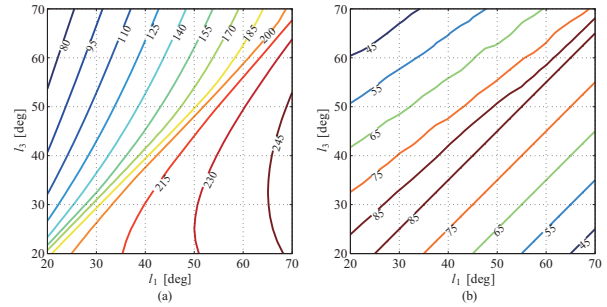
2つのアクチュエータは pitch 軸と同軸に取り付けられており, θ_{pitch} を変化させてもリンク系の形状は変化しないため, pitch 方向の可動範囲は部品同士の干渉のみによって制限される. そのためここでは yaw 方向の可動範囲を議論する. θ_{yaw} は逆運動学を解き θ_L が実数解を持つような値をとり得るが, 途中で特異点を含む可能性があるため, これを調べる. 式4を微分し, θ_L, θ_{yaw} 間の速度の関係式を得る.

$$j_{\theta_L} \dot{\theta}_L + j_{\theta_{yaw}} \dot{\theta}_{yaw} = 0 \quad (5)$$

$$j_{\theta_L} = \frac{\partial f_L}{\partial \theta_L} = S_{l_1} (S_{l_3} C_{(\theta_{yaw} + \alpha)} C_{(\theta_L - \theta_{pitch})} - C_{l_3} S_{(\theta_L - \theta_{pitch})}) \quad (6)$$

$$j_{\theta_{yaw}} = \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{yaw}} = -S_{l_3} (S_{l_1} S_{(\theta_{yaw} + \alpha)} S_{(\theta_L - \theta_{pitch})} - C_{l_1} C_{(\theta_{yaw} + \alpha)}) \quad (7)$$

文献 [6] によれば, $j_{\theta_L} = 0$ となる点は第1種特異点, $j_{\theta_{yaw}} = 0$ 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. 実数の逆運動学解を持ち, これら3種類の特異点を含まない最大の区間を可動範囲とする.

図3 yaw 軸の可動範囲 ($l_1 = 40^\circ, l_2 = 60^\circ, l_3 = 50^\circ$)図4 等高線. (a) 最適な l_2 を選択したときの可動範囲 [deg]. (b) 可動範囲を最大にする l_2 [deg].

例えば, $l_1 = 40^\circ, l_2 = 60^\circ, l_3 = 50^\circ$ としたときの $\theta_{yaw} + \alpha$ と θ_L の関係, $\theta_{yaw} + \alpha$ と $j_{\theta_L}, j_{\theta_{yaw}}$ の関係を図3に示す. ここでは yaw 方向のみに注目するため, $\theta_{pitch} = 0$ としている. j_{θ_L} は $\theta_{yaw} + \alpha = -12^\circ$ 付近で0に, $j_{\theta_{yaw}}$ は $\theta_{yaw} + \alpha = 125^\circ$ 付近で0になる. これらの特異点間の幅 (137°) が可動範囲となる. 右側のリンクについては, 図3と左右対称なグラフとなり, α を可動範囲の中間点 (56° 付近) とすると左右の可動範囲が一致し, 両者の可動範囲を効率よく利用できる.

片側のリンクの可動範囲は (l_1, l_2, l_3) によって決定される. これらの関係を調べるため, l_1, l_3 を変化させ, l_2 は l_1, l_3 が与えられた時の最大の可動範囲を持つような値 (図4(b)) としたときの可動範囲を調べた. 図4(a)はその可動範囲の等高線を示している. 現実的な可動範囲 (200° 以下) において, 適切な l_2 を選んだ場合 l_1 を大きくするほど, l_3 を小さくするほど可動範囲は大きくなる傾向が読み取れる. 以下に可動範囲を最大化する手順をまとめる.

1. 部品同士が干渉しない程度に l_1 を大きく, l_3 を小さくする.
2. l_1, l_3 から図4を用いて最適な l_2 を求める.
3. l_1, l_2, l_3 から図3のように可動範囲を求め, その中間点を α とする.

3. 機械設計と動作確認

製作した手首機構の動作中の様子を図5に, 断面図を図6に, 諸元を表1に示す. 2.1節での考察の通りにリンク長を決定し, $l_1 = 42^\circ, l_2 = 74^\circ, l_3 = 50^\circ, \alpha = 40.8^\circ$ とした. 可動範囲は pitch 軸と yaw 軸はそれぞれ最大

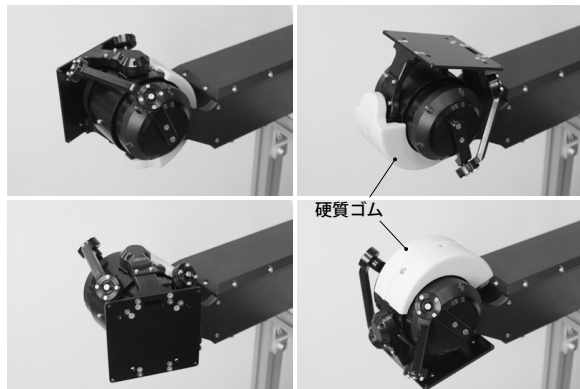


図5 手首の動作. yaw(左): $\pm 75^\circ$, pitch(右): $-120^\circ \sim +100^\circ$

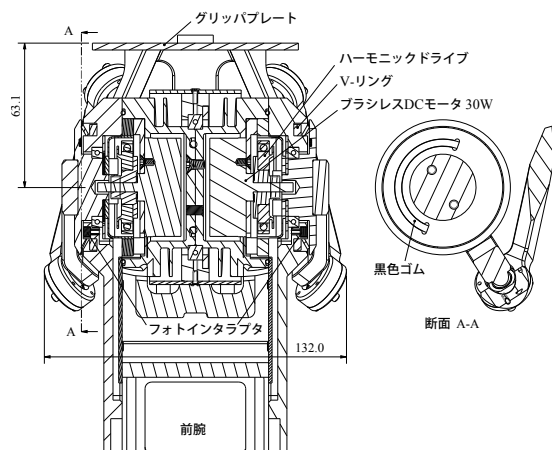


図6 手首機構の断面図

表1 諸元

重量	2.3 kg (前腕部含む)
自由度	2
可動範囲	$-120^\circ \leq \theta_{pitch} \leq 100^\circ$ $-75^\circ \leq \theta_{yaw} \leq 75^\circ$
アクチュエータ	ブラシレス DC モータ 30 W
減速	ハーモニックドライブ (1/100)

で、 $-120^\circ \sim +100^\circ$ 、 $-75^\circ \sim +75^\circ$ となっている。

以下にこの手首機構の特徴を列挙する。

- 防塵防水性を確保するため、外側の部品の連結部には O-ring やガスケットを、ハーモニックドライブの出力シャフトには V-ring を、各リンクの受動対偶にはシール型のボールベアリングを配置する。
- 初期位置合わせ用に反射型フォトインタラプタ (SG-2BC) を図6左側のように取り付け、シャフト側 (図6右) の半周分に黒いゴムなどを貼り付けてそのゴムとアルミの境界を初期位置とし、任意の姿勢から初期化が可能であることを確認した。
- 図5右上のように、3D プリントで製作した硬質ゴムの部品は pitch 軸の回転と連動し、地面を押す際に手先やリンク機構の破損を防ぐ。

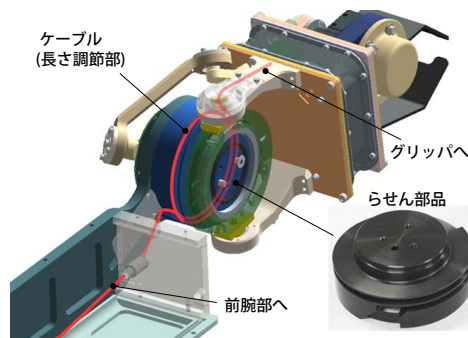


図7 手先への配線

- 手先からの配線の取り回しは、文献 [7] の手法を用いて全て機構の内部を通過させる。前腕部からの配線を螺旋の切っただけのモータの外側の部品に1, 2周巻きつけてから手先部へ接続する。こうすることで手首の pitch 軸周りの回転による長さの変化を吸収し、手首の運動を妨げない。

4. おわりに

未知の環境で遠隔操作により移動・作業を行うレスキューロボットのための、球面リンク機構を用いた手首機構を提案した。まず、その運動学解析を行い、それに基づいて可動範囲を最大化する手法を提案した。そして、十分大きな可動範囲と防塵・防水性など実用的な機能を持たせた実機を製作し、動作の確認を行った。

今後は開発中の HELIOS X に搭載し、アームレストジョイスティック [8] による操作実験による性能評価を行う予定である。

参考文献

- [1] K. Ueda, et al., "Development of HELIOS IX: An arm-equipped tracked vehicle," *J. of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 1031-1040, 2011.
- [2] M. Ogata and S. Hirose, "Study on ankle mechanism for walking robots -development of 2 d.o.f. coupled drive ankle mechanism-," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 4, pp. 3201-3206, 2004.
- [3] 尾形勝, 米田完, 広瀬茂男, "歩行ロボットの足首機構の研究-干涉駆動式 2 自由度能動足首機構の特異点解析," 第23回日本ロボット学会学術講演会, 3G17, 2005.
- [4] C. Gosselin and É. St-Pierre, "Development and experimentation of a fast 3-dof camera-orienting device," *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 16, no. 5, p. 619, 1997.
- [5] C. Innocenti and V. Parenti-Castelli, "Echelon form solution of direct kinematics for the general fully-parallel spherical wrist," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 28, no. 4, pp. 553-561, 1993.
- [6] 内山勝, "パラレルマニピュレータの機構と特性," 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 6, pp. 715-720, 1992.
- [7] 本村和寛, 広瀬茂男, "単腕車輪ハイブリッドロボット「槍騎II号機」の開発 (機構設計と基礎動作実験)," *設計工学*, vol. 42, no. 9, pp. 527-533, 2007.
- [8] 石田悠朗, 萩原哲夫, 広瀬茂男, "アームレストジョイスティックの開発-基本構成の提案と設計-, " 第29回日本ロボット学会学術講演会, 202-6, 2011.