

# ニューラルネットワークを用いた可動する零自由度機構の運動計算

## Kinematics Computation of a Mobile Zero-DOF Mechanism with Neural Network

学 影山 将也 (阪大)

正 杉原 知道 (阪大)

Masaya KAGEYAMA, Osaka University, masaya.kageyama@ams.eng.osaka-u.ac.jp

Tomomichi SUGIHARA, Osaka University, zhidao@ieee.org

Forward/inverse kinematics solvers for a 3-UU parallel mechanism are provided in this paper. The mechanism can tilt largely in two directions and support heavy load, so that it is available for an inclining platform. In spite of that, its kinematics cannot be solved in straightforward ways due to an interesting feature that its degree-of-freedom in theory is zero. Although an iterative method was proposed in the previous report, its slow convergence had been a problem. An artificial neural network is used for the solver, where the training data is prepared by the above method. The network shows a fast reasoning ability that is available for real-time control.

**Key Words:** Zero-DOF parallel mechanism, Forward/inverse kinematics solution, Neural network

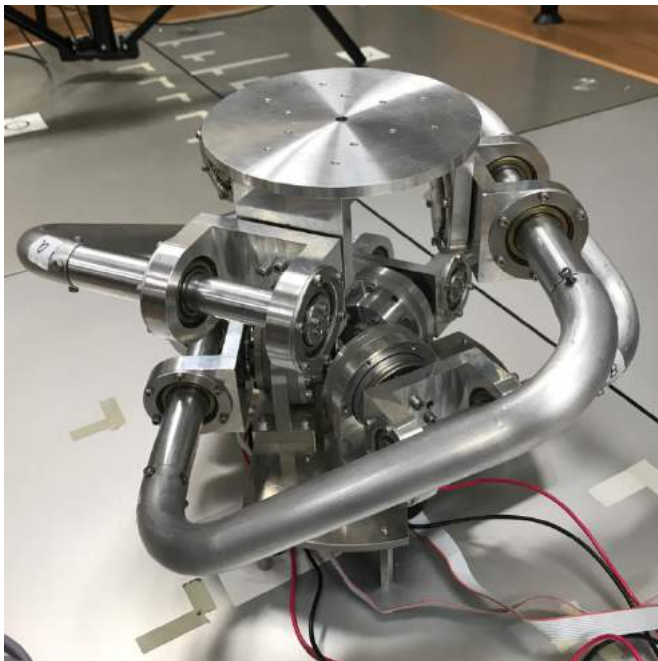


Fig.1 3-UU Parallel Mechanism[2]

### 1 はじめに

図1は、鹿田ら[1, 2]の開発した3-UUパラレル機構である。鉛直方向荷重に対する高い剛性を有しながら、任意の方向に90度近くまで傾斜できる特長を持つため、人型ロボットの腰部や大型アンテナの能動支持台等、重量物を支えながら大きく可動するプラットフォームとしての応用が期待されている。

興味深いことに、この機構は理論的には零自由度であることが証明されている[3]。それでも大可動する理由は、エフェクタプレートを支える3本のリンク系が各々独立に形成する作業空間を表す多様体が、機構成立点において曲率まで一致し、かつその微分も広範囲にわたって近い値をとるので、その差がわずかなバククラッシュや部材の変形で吸収されるためと分析されている。

本機構は実際に可動し有用性を持つが、理論的に零自由度であるため運動学の解が存在しない。したがって、何らかの方法で近似解を提供する必要がある。鹿田[4]は反復解法によりリンク結節点の誤差を最小化する意味での逆運動学解法を提案したが、これまでの実装では最速でも収束に数百ミリ秒程度を要していた[5]。収束性を向上させるためには慎重にパラメータを設定する必

要があり、かつその設定指針は今のところ明確でない。

本稿では、人工ニューラルネットワークによって運動学の近似解を高速に提供する方法を提案する。教師データとして上記反復解法で得た解を利用できることが、ニューラルネットワークを用いる理由になる。実際に学習を行った結果、上記反復解法による解との誤差が十分小さい結果を数百マイクロ秒程度で得られるようになった。

### 2 3-UUパラレル機構の運動学計算

#### 2.1 反復解法による運動学計算

3-UU機構の運動学特性の詳細については文献[3]を参照されたい。鹿田[4]は、次に記す反復解法によって3-UUパラレル機構の逆運動学解を得る方法を提案した。

1. 図2に示すように仮想的にエフェクタプレートと3本のリンクとの結節点を切断し、ベースプレートに対してエフェクタプレートが無制限に並進・回転できるようにする。
2. エフェクタプレートの初期位置および姿勢を与える。方位角 $\theta_E$ および仰角 $\phi_E$ は所望の値とし、法線ベクトルまわり回転角および中心位置には適当な値を与える。
3. 1で与えた位置・姿勢から決まるエフェクタプレート上の結節点位置と、3本のリンクの結節点との距離が最小となるように、各リンクの関節変位をSugihara[6]の方法によって求める。
4. 2と逆に、3本のリンク上の結節点位置と、エフェクタプレート上の結節点との誤差が最小となるように、法線ベクトルまわり回転角および中心位置を同様の方法で求める。
5. 目標姿勢との誤差および接続点の誤差が閾値より小さければ終了。さもなければ3に戻る。

図2は上記の手順を図解したものである。

#### 2.2 ニューラルネットワークを用いた運動学計算

前節の手順によって、所望のエフェクタプレート方位角 $\theta_E$ 、仰角 $\phi_E$ を与える駆動関節変位 $q_A$ が近似的に得られる。このとき同時に、エフェクタプレートの中心位置 $p_E$ 、法線ベクトルまわり回転角 $\psi_E$ 、受動関節変位 $q_P$ も同時に求まる。したがって、これらを教師データとして次の2種類の運動学写像 $F_1^*$ 、 $F_2^*$ を与える二つのニューラルネットワークを同時に学習できる。

$$F_1^* : \hat{z}_E \rightarrow (q_A, q_P, p_E, r_E) \quad (1)$$

$$F_2^* : q_A \rightarrow (q_A, q_P, p_E, r_E) \quad (2)$$

ただし、

$$\hat{z}_E \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \cos \theta_E \cos \phi_E \\ \sin \theta_E \cos \phi_E \\ \sin \phi_E \end{bmatrix} \quad (3)$$

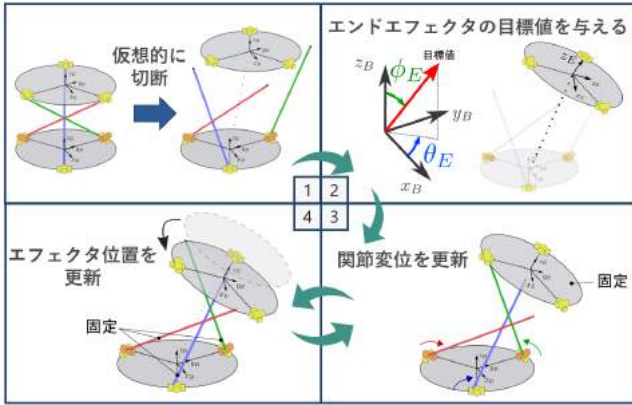


Fig.2 3-UU パラレル機構の逆運動学解法

Table 1 ニューラルネットワークの構成

	逆運動学	順運動学
入力数	3	2
出力数	18	18
隠れ層のユニット数	50	50
バッチサイズ	10	12
学習率	0.011	0.011
エポック数	50	50
活性化関数	シグモイド関数	シグモイド関数

であり、エフェクタプレートの単位法線ベクトルを与える。また、 $r_E$  は  $\theta_E, \phi_E, \psi_E$  から定まるエフェクタプレート姿勢を等価角軸変換したものである。実用上はこれらのうち必要な値のみを取り出し、次の逆運動学写像  $F_1$  および順運動学写像  $F_2$  を構成する。

$$F_1 : \hat{z}_E \rightarrow q_A \quad (4)$$

$$F_2 : q_A \rightarrow (p_E, r_E) \quad (5)$$

### 3 ニューラルネットワークを用いた運動学計算の検証

ニューラルネットワークの学習により前節の二つの写像  $F_1$  および  $F_2$  を得た。学習データは、方位角  $\theta_E$  を  $0 \sim 360^\circ$  の範囲で 120 分割、仰角  $\phi_E$  を  $0 \sim 60^\circ$  の範囲で 25 分割した計 3000 点について逆運動学の反復計算を行うことで生成した。ニューラルネットワークはどちらも 3 層フィードフォワード型とし、表 1 のように各パラメータを定めた。図 3 に、二つの写像  $F_1, F_2$  を学習している際の二乗和誤差平均値の推移を示す。これより、学習が適切に進行し、誤差の値が収束していることが確認できる。

次に、得られた写像の交差検定として、方位角  $\theta_E$  を  $0 \sim 360^\circ$  の範囲で 36 分割、仰角  $\phi_E$  を  $0 \sim 60^\circ$  の範囲で 6 分割した計 216 点について、上記ニューラルネットワークによる出力と反復解法による出力を比較した。駆動関節角の推定誤差を図 4 に示す。前者は後者に対し誤差 0.01rad 以下の精度で解を提供できることが示された。上記交差検定のうち、誤差が最大となった姿勢について順運動学を計算した結果を図 5 に示す。両者の違いはほとんど視認できない。

運動学計算に要する時間について、反復解法を用いた場合には数百ミリ秒かかっていたところを、数百マイクロ秒程度にまで短縮することができた。

### 4 おわりに

運動学に厳密な意味での解が存在しないが事実大可動する零自由度機構に対し、ニューラルネットワークを用いて運動学を高速に計算する手法を提案した。反復解法による逆運動学の計算結果

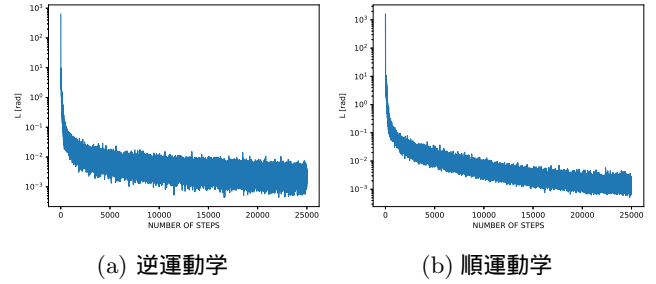


Fig.3 学習中の誤差の推移

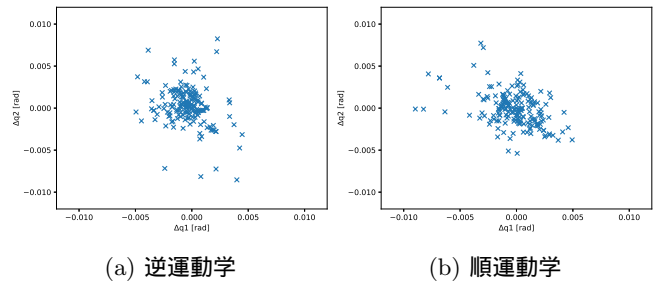


Fig.4 ニューラルネットワークによる駆動関節角の推定誤差

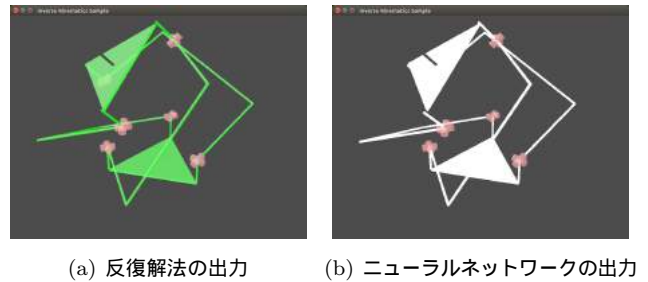


Fig.5 誤差が最大となる姿勢の順運動学計算結果

を教師データに用いることで、順運動学と逆運動学の写像を同時に学習することができる点が特長である。計算時間と精度の双方について、実時間制御への利用に十分耐えることを確認した。

通常の機構の運動学計算に学習を用いる理由はほとんど無い。可動する零自由度機構は極めて特殊なクラスの機構であり、例外的に機械学習の応用が有効であると言える。このことが、同種の機構の発見と実用につながることを期待する。

### 参考文献

- [1] 鹿田憲吾, 舛屋賢, 杉原知道, 2 方向に大傾斜可能な零自由度 3-UU パラレルメカニズム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 予稿集, 3P2-K02, 2014.
- [2] 下口紘輝, 杉原知道, 3-UU パラレルメカニズムのバックラッシュ低減化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 予稿集, 2P2-13b2, 2016.
- [3] 杉原知道, 能美承太郎, 可動する零自由度機構の解析, 第 23 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 85-90, 2018.
- [4] 鹿田憲吾, 2 方向に大傾斜可能な零自由度 3-UU パラレルメカニズム, 大阪大学修士論文, 2014.
- [5] 能美承太郎, 3-UU パラレル機構の機構解析と運動計算, 大阪大学修士論文, 2017.
- [6] T. Sugihara, Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg-Marquardt Method, IEEE Transaction on Robotics, Vol. 27, No. 5, pp. 984-991, 2011.