

6 脚ロボットの 5 自由度脚の開発と数値解法による逆運動学計算

2019SC024 川瀬茉裕

指導教員：稲垣伸吉

1 はじめに

多脚ロボットは災害現場などの不整地環境における移動性能が期待されている。多脚ロボット Weaver [1] と LAURON V [2] は、脚の自由度を増やすことで急な斜面での歩行やより複雑な地形での歩行を可能にしている。Weaver と LAURON V は脚の構造に特化した逆運動学計算が使われている。本研究では 6 脚ロボットの 5 自由度脚を設計し、様々な構造の脚に適用できる数値解法による逆運動学計算を行う。

2 5 自由度脚の種類と設計

6 脚ロボットの 5 自由度脚を図 1, 2, 3 の 3 種類考えた。脚の根元から第 1, 2, ..., 5 関節とする。何れのタイプも第 1 関節と第 2 関節を上下に配置することで脚全体の長さを短くするように工夫した。type1 は第 2 関節をヨー回転させることで脚先の可動範囲を大きくする特徴を持ち、脚先で物を挟むことで把持を可能にする。type2 は第 4 関節をヨー回転させ、第 4 リンクと第 5 リンクのみを動かすことでより小さい動作で物の把持を可能にする特徴をもつ。type3 は第 3 関節をヨー回転させることで物を抱えて運ぶことを可能にする特徴を持つ。本研究では物を把持するこ

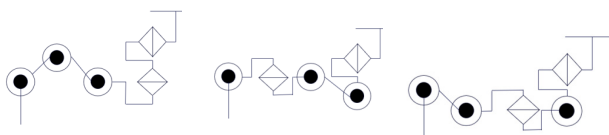


図 1 type1

図 2 type2

図 3 type3

とができ、可動範囲が広い type1 を採用した。設計した脚を図 1 に示す。脚の根元から第 1, 2, ..., 5 関節とする。第 1 関節と第 2 関節を上下に配置することで脚全体の長さを短くするように工夫し、第 1 関節と第 2 関節の回転軸を直交に交差するように配置することで運動学計算を簡単に行えるように工夫した。また第 1 関節と第 2 関節を繋ぐ部品を 2 つに分け、壊れにくい設計にした。脚 1 本の横の長さは約 17cm, 高さは約 20cm である。

3 同時変換行列を用いた運動学計算

DH 記法を用いた運動学計算を行った。各関節の座標系を図 1 に示す。type1 のリンク長を a_i , 関節間のねじれ角を α_i , リンク間のオフセット量を d_i , リンク回転角を θ_i と表す。各関節に対する各パラメータを計測した結果を表 1 に示す。

5 座標系における脚先の座標は $({}^5r, 0, 0) = (96.905, 0, 0)$ で

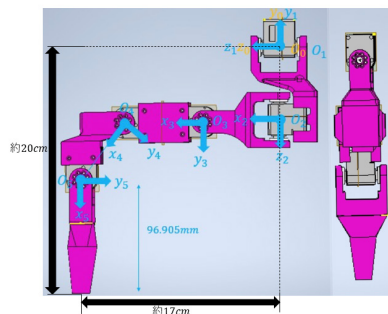


図 4 type1 の設計図

表 1 type1 の脚の DH 記法におけるパラメータ

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
a_i	0.0mm	0.0mm	64.9mm	73.0mm	60.5mm
α_i	0.0°	90.0°	90.0°	0.0°	0.0°
d_i	0.0mm	61.9mm	0.9mm	1.2mm	0.0mm
θ_i	0°	90.0°	0°	50.24°	40.0°

ある。0 座標系における脚先の座標を 0r とする。そして、 i 座標系から $i - 1$ 座標系への変換を表す同時変換行列を ${}^i T_{i+1}$ とする。

初期角度の場合の 0 座標系における脚先の座標は、

$$\begin{bmatrix} {}^0r \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 {}^4 T_5 \begin{bmatrix} {}^5r \\ 1 \end{bmatrix}$$

と計算することが出来る。上記の式に表 1 のパラメータを代入すると図 1 の姿勢の際の 0 座標系における脚先の座標は以下ようになる。

$${}^0r = \begin{bmatrix} 2.1 \\ -205.31 \\ 176.19 \end{bmatrix}.$$

4 逆運動学計算

逆運動学計算により脚先の座標から各関節の角度を求めた。マニピュレータの先端の時刻 $t \in \mathcal{N}$ における微小変位を $\Delta r[t] \in \mathcal{R}^{N \times 1}$, 関節の回転角度 $\theta[t] \in \mathcal{R}^{M \times 1}$, type1 は $N = 3, M = 5$ であるから冗長マニピュレータ ($M > N$) の場合を考える。以下では、文献 [3] に従い逆運動学を計算する。まず、ヤコビ行列 $J(\theta[t - 1]) \equiv J \in \mathcal{R}^{N \times M}$, および微小時間 Δt を用いて、 $t = 2, 3, \dots$ について、

$$\frac{\Delta r[t]}{\Delta t} = J \frac{\theta[t] - \theta[t - 1]}{\Delta t} \quad (1)$$

とする。式 (1) の $\theta[t]$ は、 $\Delta r[t]$ と $\theta[t - 1]$, J が与えられた上で、

$$\min_{\theta[t]} \frac{1}{2} (\theta[t] - \theta[t - 1])^T (\theta[t] - \theta[t - 1]) \quad \text{s.t. (1)} \quad (2)$$

を求めることで得られる。式 (2) を解くと次のようになる。

$$\theta^*[t] = \theta[t-1] + J^T (JJ^T)^{-1} \Delta r[t]. \quad (3)$$

プログラムの流れをブロック線図 (図 5) に示す。ここで

$$\Delta r[t] = k(r_d - r[t]) \quad (4)$$

$$d\theta[t] = J^T (JJ^T)^{-1} \Delta r[t] \quad (5)$$

とした。このプログラムを $|\Delta r[t]| \approx 0$ になるまで繰り返す。本研究では $k = 0.05$ とした。

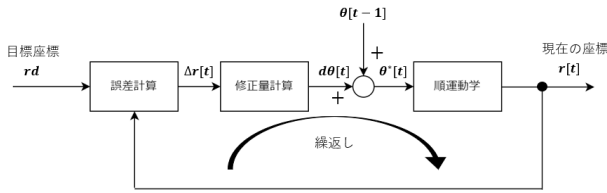


図 5 プログラムのフローチャート

5 実機実験

初期値を 5 通り、目標値を 5 通り決め全 25 通りプログラムを実行させた。初期値と目標値を表 2 に示す。25 通り実行したときの計算回数の平均は 39.96 回であり、最大が 2-iii の 142 回、最小が 5-ii の 11 回であった。

表 2 初期値と目標値

	初期値		目標値
1		i	
2		ii	
3		iii	
4		iv	
5		v	

また図 6, 7 のように脚先を目標座標に動かしているか確認するため CAD を使って確認した。CAD における目標座標と脚先の誤差を表 3 に示す。この誤差はリンク長の測定誤差が原因と考えられる。

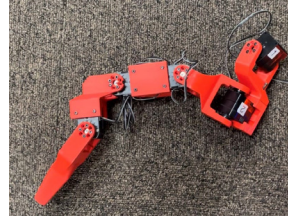


図 6 2-iii の実機動作

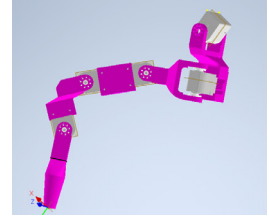


図 7 2-iii の CAD 結果

表 3 脚先座標の目標座標との誤差

	誤差 [mm]
2-iii	6.2707
3-i	3.4733
5-ii	1.4466

6 おわりに

本研究では、5 自由度脚を設計し、運動学計算、逆運動学計算を行い実機実験を行った。計算時間を短くするために、目標座標に収束する途中の関節角度でモータを動かし、モータの角度を取得する部分から逆運動学アルゴリズムを繰り返す工夫が必要である。接地点追従法 [4] に適用させるためには逆運動学の計算に制約を加えて接地点追従法に適用させる方法が考えられる。例えば第 1 関節の可動範囲に制約を加える。脚を斜めに接地させることができるようになり、脚の入れ替えが容易になると考えられる。

参考文献

- [1] M. Bjelonic, N. Kottege and P. Beckerle, "Proprioceptive control of an over-actuated hexapod robot in unstructured terrain," 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016, pp. 2042-2049, doi: 10.1109/IROS.2016.7759321.
- [2] A. Roennau, G. Heppner, M. Nowicki and R. Dillmann, "LAURON V: A Versatile Six-Legged Walking Robot with Advanced Maneuverability", Computer Science, Engineering 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 8 July 2014
- [3] 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, コロナ社, 2007
- [4] 細萱広高, 稲垣伸吉, 鈴木達也, 歩脚の減少・増加に対応可能な接地点追従式 6 脚移動制御, 計測自動制御学会論文集 58 巻 6 号 pp304-313, 2022