

5 自由度脚の解析的逆運動学計算と実装

2020SC043 松崎勇斗

指導教員：稲垣伸吉

1 はじめに

6 脚ロボットは災害現場での安定した歩行が期待されている。そして、脚の自由度を増やすことで、歩行中での物の保持ができたり、脚先を地面に垂直に接地しやすくなり歩行性能が上がることを期待できる。従来研究 [1] では、5 自由度脚の逆運動学計算にニュートン・ラブソン法を用いていたが、脚の姿勢によっては計算時間がかかってしまい、ばらつきがあるという課題があった。本研究では 5 自由度脚の逆運動学計算に段階的解法を用いることで、計算時間の短縮や脚先の姿勢を地面に垂直に保つといった制約条件を入れることを可能にし、災害現場などの不整地における歩行を安定させることが目的である。

2 5 自由度脚について

本研究で使用される脚の構造は図 1 であり、川瀬ら [1] により可動範囲が広い構造として提案された。引き続き同じ構造の脚を使用する理由としては川瀬らのアルゴリズムと本研究の段階的解法によるアルゴリズムを比較するためである。しかし、この脚には部品の大きさ、ネジがはまりきっていない、部分的に耐久性が低いという問題があった。そのためこの問題点を改善しつつ新しい脚を作成した。

表 1 はリンク長を a_i 、関節のねじれの角度を α_i 、リンク間のオフセット量を d_i 、リンクの回転角を θ_i としたときの DH (Denavit-Hartenberg) パラメータである。

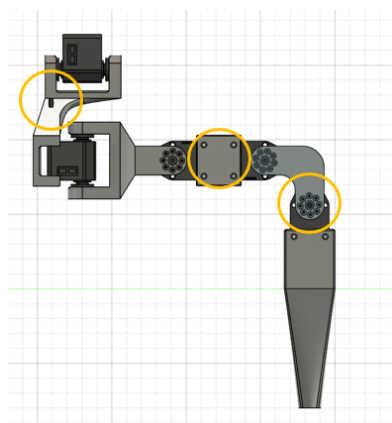


図 1 改良した 5 自由度脚：ネジがむき出しになっていたためその部分の改良、部品の長さを短く調整、脚の接続部分が破損していたため耐久性を上げるため厚みを増やした

3 逆運動学計算について

使用する脚の各関節の座標系は図 2 となっている。本研究に用いる逆運動学計算法として、Bjelonic ら [2] の方法

表 1 脚の DH パラメータ

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
a_i	0.0mm	0.0mm	60.6mm	62.1mm	136.2mm
α_i	0.0	90.0	90.0	0.0	0.0
d_i	58.2mm	59.1mm	0mm	0.0	0.0
θ	0.0	90.0	0.0	50.24	40.0

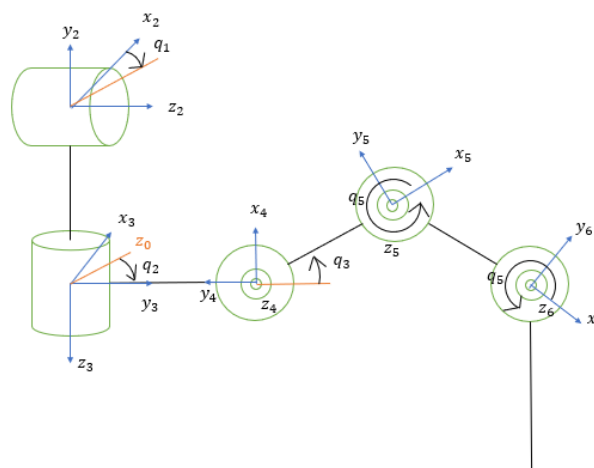


図 2 各関節の座標系

を使用する 5 自由度脚の構造に適用した計算法を導入する。なお、本研究で用いる脚 (図 2) と Bjelonic ら [2] の 5 自由度脚とは、第 1, 第 2 関節の回転軸が入れ替わっている点が違う。

本節で使う変数は以下の通りである。

- (x_{d2}, y_{d2}, z_{d2}) : 脚の根本を原点とした座標系での脚先座標
- q_1, q_2 : 根本から 1, 2 つ目の関節の回転角度
- δ, β : 脚先から 3 つの関節からなる平面の法線ベクトルを重力ベクトルに垂直に配置するための角度
- L_C, L_{TA} : 根本関節からの第 1, 脚先リンクの長さ
まず、第 1 第 2 関節の角度を導出する。脚先から 3 つの関節からなる脚平面の方程式は

$$-\cos q_1 \sin q_2 x + \cos q_1 \cos q_2 y + \sin q_1 (z - L_c) = 0 \quad (1)$$

となる。式 (1) に目標脚先座標 (x_{d2}, y_{d2}, z_{d2}) と、脚先関節の座標 $(x_{d2} + (\sin \delta \cos \beta - b_1 \sin \beta)b_2 L_{TA}, y_{d2} + (\sin \beta + b_1 \sin \delta \cos \beta)b_2 L_{TA}, z_{d2} - \cos \delta \cos \beta L_{TA})$ を代入し、整理することで第 1 第 2 関節の角度 q_1, q_2 を求めることができる。

$$q_1 = \arctan(-\sin q_2 a_1 + \cos q_2 a_2) \quad (2)$$

$$q_2 = \arctan \left(\frac{a_2(L_C - z_{d2}) - y_{d2}}{a_1(L_C - z_{d2}) + x_{d2}} \right) \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{(\cos \beta \sin \delta - \sin \beta b_1) b_2}{\cos \beta \cos \delta} \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{(\sin \beta + b_1 \sin \delta \cos \beta) b_2}{\cos \beta \cos \delta} \quad (5)$$

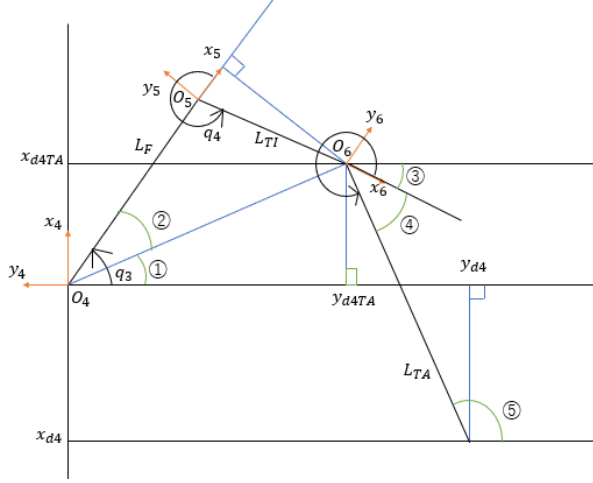


図3 各関節の座標系

次に q_3 を求める。図3の①, ②より,

$$q_3 = \arctan \left(\frac{x_{d4TA}}{y_{d4TA}} \right) - \arctan \left(\frac{L_{TI} \sin(q_4)}{L_F + L_{TI} \cos(q_4)} \right) \quad (6)$$

となる。次に q_4 を求める。図3の③, ④, ⑤からなる余弦定理より,

$$\cos q_4 = \frac{(x_{d4TA}^2 + y_{d4TA}^2) - L_F^2 - L_{TI}^2}{2L_FL_{TI}} \quad (7)$$

となる。ここで $D = \cos q_4$ とし、三角関数の公式より

$$q_4 = \arctan \left(\pm \frac{\sqrt{1+D^2}}{D} \right) \quad (8)$$

となる。最後に q_5 を求める。

$$q_3 - (2\pi - q_4) + 2\pi - q_5 + \arctan \left(\frac{x_{d4TA} - x_{d4}}{y_{d4TA} - y_{d4}} \right) = \pi \quad (9)$$

これを整理すると,

$$q_5 = q_3 + q_4 + \arctan \left(\frac{x_{d4TA} - x_{d4}}{y_{d4TA} - y_{d4}} \right) - \pi \quad (10)$$

となる。これによって $q_1 \sim q_5$ まで求められる。

4 実機実験

本研究で実験に使用したマイコンは Teensy3.6 である。これは参考文献 [1] で使用されていたマイコンと同じものであり、実験環境をそろえるためである。いくつかの目標値と重力方向を与えてプログラムを実行、計算時間を測定

し脚を動かした。表2は目標値と重力方向を示している。表3は計算時間を示している。計算時間は目標値と重力方向から脚の関節角度を求めるまでの時間であり、10回測定し、その平均を取った値である。川瀬ら [1] の数値解法による逆運動学計算は 6ms~72ms とばらつきがあり、本手法はより計算時間が短く、ばらつきも小さい。また、目標座標と順運動学から得られた脚先座標との誤差を求めた。1~7での誤差の平均は 0.512mm であった。

表2 目標値と重力方向

	座標 [mm]	重力方向
1	(0, -130, 100)	(0, -1, 0)
2	(-50, -200, 150)	(0, -1, 0)
3	(50, -100, 160)	(0, -1/√2, 1/√2)
4	(0, -100, 160)	(1/√2, -1/√2, 0)
5	(-60, -150, 160)	(-1/√2, -1/√2, 0)
6	(100, -150, 130)	(1/√3, -1/√2, 1/√3)
7	(50, -160, 150)	(-1/√3, -1/√2, 1/√3)

表3 本研究の逆運動学計算の計算時間

	計算時間 [μ s]		計算時間 [μ s]
1	21.0	5	20.8
2	20.9	6	21.3
3	21.3	7	21.0
4	20.9		

5 おわりに

本研究では Bjelonic ら [2] の方法を使用する 5 自由度脚の構造に適用した計算法を導入し、実機実験を行った。実験結果により川瀬ら [1] の数値解法による逆運動学計算に比べて脚の姿勢による計算時間のばらつきが小さいことが分かった。本計算手法を接地点追従法 [3] に利用することが今後の課題である。

参考文献

- [1] 川瀬茉裕, “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”, 南山大学卒業論文, 2022.
- [2] 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), Daejeon, Korea (South), pp.2042–2049, 2016.
- [3] 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, pp.304–313, 2022.