

# 歩行時の脚関節の負荷に基づく接地点追従型多脚ロボットの形態評価

2020SC103 鵜飼 雄哉

指導教員：稲垣伸吉

## 1 はじめに

6脚ロボットは複雑な不整地を移動し、作業も同時に行える能力が期待されている。そのような6脚ロボットを実現する上でも、優れた歩行性能を引き出せるような形態(デザイン)の設計は重要である。文献[1]では、歩行機械が有すべき安定性や移動エネルギー効率の観点から、脚の形態について考え、最適な脚の形状や脚の機構の提唱を行っている。そこで本研究では、形から設計に入るのではなく、動かし方、つまり歩行制御法が先にあり、そこから6脚ロボットの形態を設計する手法の開発を目指す。具体的には、歩行制御法として「接地点追従法」[2]を考え、歩行中の胴体と接地点との位置関係を調べ、脚先が受ける力から導出した各関節のトルクを元にロボット形態を評価する手法を開発する。

## 2 形態評価を行うロボットの概要

### 2.1 使用する脚の構造

ロボットに取り付ける脚はすべて同一のものとし、図1のような各関節の回転角度をそれぞれ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ とし、各関節間のリンクの長さを $l_1, l_2, l_3$ とする。

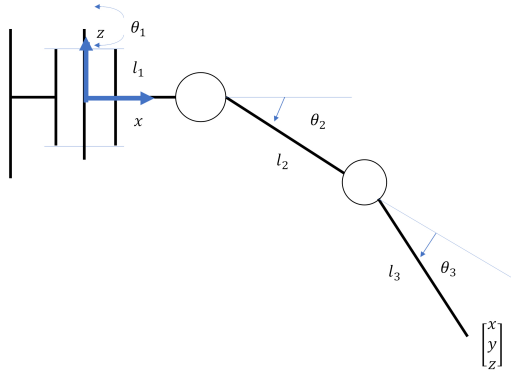


図1: 使用する脚の構造

### 2.2 評価を行うロボットの構造

図2は使用するロボットの図である。左図のように、胴体座標系の原点を胴体中心とし、ロボットを上から見たとき横軸と縦軸に $x$ 座標と $y$ 座標となるように定める。胴体中心から各辺までの距離を80[mm]とする。ロボットの進行する方向から順番に前脚(青色)、中脚(黒色)、後脚(赤色)とし、この3脚を対象に各関節モータにかかる負荷トルクの評価を行う。右図はロボットを背面から見たときの図であり、横軸と縦軸にそれぞれ胴体中心から見た脚先の $x$ 座標と $z$ 座標となるように定める。ロボット全体の重量を1[kg]とし3脚が接地していると仮定する。このと

き想定される脚先の負荷は、胴体座標系で $z$ 軸方向(各脚の根元座標系では $z$ 軸から $\pi/4$ 傾いた方向)に約3.27[N]である。

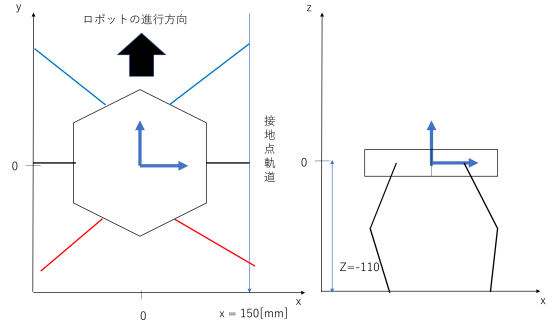


図2: ロボットの脚の配置(左:上面図, 右:背面図)

## 3 関節トルクの導出

各回転関節にかかるトルクの負荷を見るために同時変換行列を考える。脚先が根本に入り込むような位置でも接地できるように第1関節の回転関節を $\pi/4$ 傾けた脚について考える。脚先の座標を $[x, y, z]$ とする。根本座標系から脚先座標系への同時変換行列は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}C_1l_1 + \sqrt{2}C_1C_2l_2 - \sqrt{2}S_2l_2 + \sqrt{2}C_1C_2C_3l_3 - \sqrt{2}C_3S_2l_3}{S_1l_1 + C_2S_1l_2 + C_2C_3S_1l_3} \\ \frac{-\sqrt{2}C_1l_1 - \sqrt{2}C_1C_2l_2 - \sqrt{2}S_2l_2 - \sqrt{2}C_1C_2C_3l_3 - \sqrt{2}C_3S_2l_3}{2} \\ \frac{2}{1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、この行列において、 $C_i = \cos \theta_i, S_i = \sin \theta_i, C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ のように表すものとする。順運動学のヤコビアン $J$ を求めて、根本座標系の $z$ 軸方向に力がかかることを想定し、 $\tau = J^T f$ で、 $f = [0 \ 0 \ 1]^T$ とすると

$$\tau = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}S_1(l_1 + l_2C_2 + l_3C_{23}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\{l_2(C_1S_2 - C_2) + l_3(C_1S_{23} - C_{23})\} \\ \frac{1}{\sqrt{2}}l_3(S_{23}C_1 - C_{23}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。ここで、各関節トルク $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ とする。

## 4 シミュレーション

関節の負荷を測る脚先の位置について、高さは胴体座標系からみた高さ $z = -110$  [mm]とし、接地点軌道は胴体座標系からみた $x = 150$  [mm]の直線軌道とする(図2)。図3は左側に横軸と縦軸に胴体中心から見た脚先の $x$ 座標、 $y$ 座標をとり、前脚のトルクのカラーマップと $x = 150$  [mm]における接地点軌道がプロットされている。このカラーマップをもとにトルク線図を右側のように作成した。

このトルク線図は横軸に脚先の  $y$  座標をとり、縦軸にトルクの大きさをとっている。トルク線図の色分けは図 2 の色分けに対応しており、青色が前脚、黒色が中脚、赤色が後脚のトルク線図を表している。使用するモータの最大トルクの目安を  $0.66 \text{ [N} \cdot \text{m]}$  として、トルク線図に記した。一

の長さを一定に保ったまま  $l_1, l_2, l_3$  の値を変化させ、評価値を算出した。各パラメータにおける代表値と評価値を表 1 に、最大トルクを越えるトルクの有無を表 2 にまとめる。

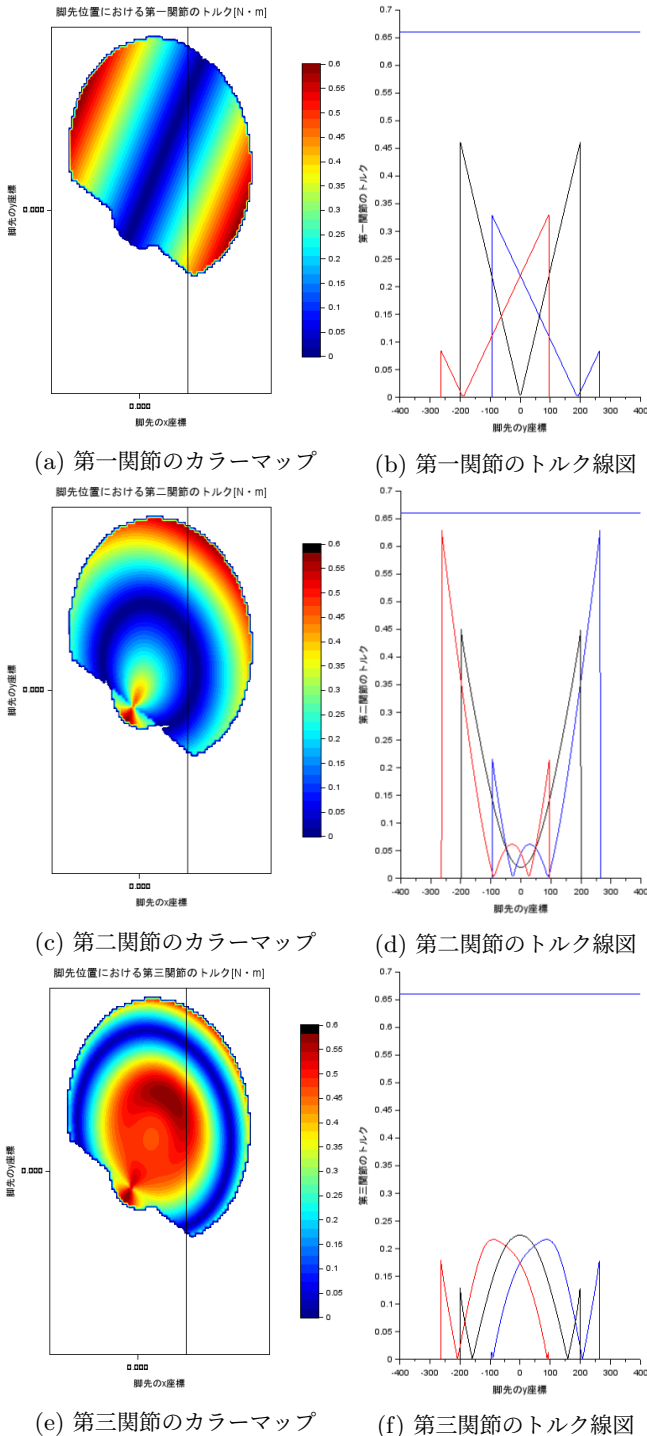


図 3: 脚の可到達範囲における負荷トルクのカラーマップと接地点軌道上のトルク線図

連の接地点軌道における各関節のトルクの最大値をその関節のトルクの代表値とする。さらに、各関節のトルクの代表値の平均をとった値をその形態の評価値とする。脚全体

表 1: 各リンク長におけるトルクの代表値と評価値

$l_1$	$l_2$	$l_3$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	評価値
50	120	70	0.461	0.629	0.224	0.438
50	95	95	0.461	0.66	0.254	0.458
50	70	120	0.461	0.691	0.33	0.494
80	100	40	0.403	0.452	0.13	0.328
80	70	70	0.403	0.489	0.1	0.350
80	40	100	0.403	0.527	0.281	0.403

表 2: 各リンク長における最大トルクを越えるトルク

$l_1$	$l_2$	$l_3$	最大トルクを越えるトルク
50	120	70	なし
50	95	95	なし
50	70	120	$\tau_2$
80	100	40	なし
80	70	70	なし
80	40	100	なし

- $l_1$  の値は  $l_1 = 50 \text{ [mm]}$  よりも  $l_1 = 80 \text{ [mm]}$  のほうが全体的に良い評価値
- $l_2$  の値が大きいほうが良い評価値
- $l_3$  の値が小さいほうが良い評価値

これらの点があげられる。各関節間の距離は  $l_1$  は大きく、 $l_2, l_3$  は最大トルクを超えない範囲で  $l_2$  の値を大きく、 $l_3$  の値を小さくするように定めることでその形態の評価値は小さくすることができることが分かった。

## 5 おわりに

本研究では各関節間のリンクの長さだけに着目して、トルクの値がどのように変化するかをシミュレーションした。また、本研究では整地を歩行した時に最も頻繁に起こる単一の接地点軌道のみを考えた。しかし、そのため様々な環境を想定した評価を行うには、取り得る接地点軌道を考慮して評価できるよう、改善を行う必要があると考える。また、本研究で提案した評価を活用してロボットの形態を設計する手法を開発していく。

## 参考文献

- [1] 広瀬茂男, 梅谷陽二 “歩行機械の脚形態と移動特性”, バイオメカニズム, Vol.5, pp.242-250 1980.
- [2] 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.