

6脚ロボットの脚の設計におけるトルクの算出と脚の設計製作

2019SC042 内藤健人

指導教員：稲垣伸吉

1 はじめに

6脚ロボットには、安定性が高い、重いものを運ぶことができる、高い不整地踏破能力があるという特徴がある。これらの特徴を実用化に繋げるべく、6脚ロボット SOL (Shinmei Original Locomotion) が開発された [1]。しかし、関節モータのトルク不足のために移動速度、可搬重量、および不整地踏破能力に限界があった。そこで、6脚ロボットの実用化を目指した仕様を設定し、静力学に基づく関節トルクの算出手順 [2] に従って必要トルクを概算する。そして、モータと減速機を選定し、6脚ロボット SOL の新しい脚を設計製作する。

2 ロボットに求められる仕様

現在の SOL を図 1 に示す。SOL は、3本の脚が左右対称になっており、全て 3 リンク 3 自由度を持った 6 脚ロボットである。進行方向を前方として、右側の脚を前から Rleg 1, 2, 3, 左側の脚を Lleg 1, 2, 3 と呼ぶ。現在のロボットは、モータのトルクに不足がある (13.1Nm ほど)。

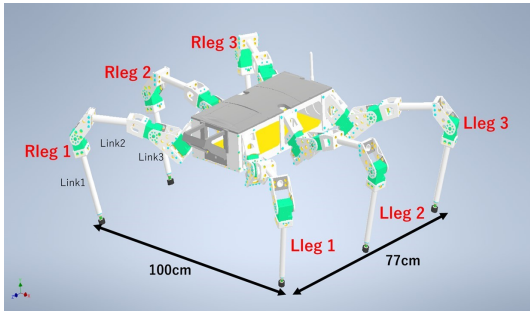


図 1: SOL (Shinmei Original Locomotion)

新しい SOL に求められる仕様として、運搬できる重さが 20kg, 移動速度 3m/s, 傾斜面 33.7 度, 最大段差 20cm を目標とする。

3 ロボットにおける脚の必要トルクの計算

はじめに、文献 [2] よりトルク計算を考える。図 2 のように、関節角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を水平面とリンクの間に取り、リンクの長さをそれぞれ L_1, L_2, L_3, L_4 とする。また、関節のモータを脚先から A_1, A_2, A_3 とする。対角の 3 つの脚 Lleg 2, Rleg 1, Rleg 3 のみが接地しているときにそれらの脚にかかる力を考える。この時、静止状態であるとする。接地している 3 つの脚について、各関節に作用するトルクや力の大きさについても図 2 に示す。 W_1, W_2, W_3 [N] をアクチュエータを含むリンクの重量、 W_4 [N] は胴体重心に作用する重量であり、フレーム、コントローラ、バッテリー、上げている 3 つの脚の、運搬物の重量が含ま

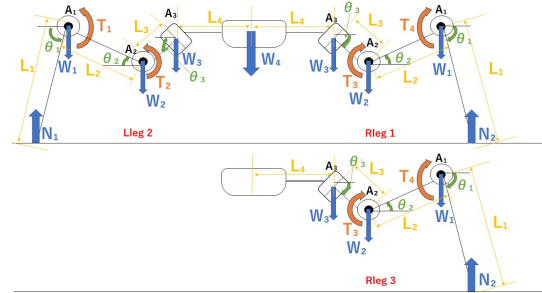


図 2: 6脚ロボットのリンクの長さや角度の設定、各関節に作用するトルクや力の大きさ

れる。 T_1, T_2, T_3, T_4 [Nm] を各ジョイントに作用するトルクとする。また、 N_1, N_2 は接地面からの垂直抗力である。

まず、ロボット全体のバランスをとるために力の釣り合いを考えると、以下の式で求めることができる。

$$N_1 + 2N_2 = W_4 + 3(W_1 + W_2 + W_3) \quad (1)$$

また、左脚の接地点中心にトルクの釣り合いの関係が成り立つので、

$$\begin{aligned} & -W_1 L_1 \cos \theta_1 - W_2 (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2) \\ & -W_3 (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3) \\ & -W_4 (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 + L_4) \\ & -2W_3 (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 + 2L_4) \\ & -2W_2 (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + 2L_3 \cos \theta_3 + 2L_4) \\ & -2W_1 (L_1 \cos \theta_1 + 2L_2 \cos \theta_2 + 2L_3 \cos \theta_3 + 2L_4) \\ & + 2N_2 (2L_1 \cos \theta_1 + 2L_2 \cos \theta_2 + 2L_3 \cos \theta_3 + 2L_4) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

となる。この式より、 N_2 を求めることができる。また、(1) 式に N_2 を代入することによって、 N_1 を導く。

以下では、脚の各アクチュエータに必要なトルクの最大値を算出する。まず、Lleg 2 の A_1 部分を中心に働くトルク T_1 を考える。脚先のリンクのトルクの関係から

$$T_1 = N_1 L_1 \cos \theta_1 \quad (3)$$

となる。さらに、Lleg 2 の A_2 部分を中心に考える。脚先のリンクのトルクの関係から

$$T_2 = N_1 (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2) - W_1 (L_2 \cos \theta_2) \quad (4)$$

となる。ここでは、平面で立っているときのアクチュエータのそれぞれの最大トルクを考えているので、 T_3, T_4 は $T_1 > T_4, T_2 > T_3$ が成り立つので、考えなくてよい。

次に、斜面上で静止したときに作用する力の関係からアク

チュエータ A_3 に必要なトルクを計算する。斜面で静止するとき、 W [N] をロボット全体に掛かる重量として、斜面方向にかかる力の W_x を W を用いて表すと、

$$W_x = W \sin \beta \quad (5)$$

となる。この時、斜面の角度は β である。そして、3つの接地している脚の斜面方向にかかる力を図3に図示する。 T_5, T_6 [N] を各ジョイントに作用するトルクとする。図3

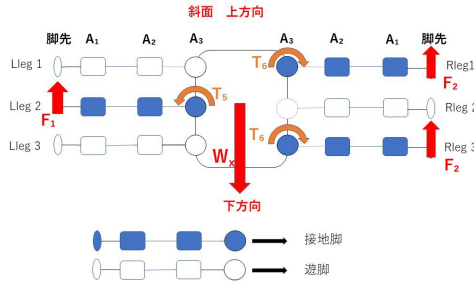


図3: 斜面において各脚に働く力

より、斜面方向の力のつり合いを考えると次の式で表せる。

$$W_x = F_1 + 2F_2 \quad (6)$$

ロボットが斜面を真っ直ぐに動くためには、左側の力が右側の力と等しい必要があるため、 $F_1=2F_2$ で表すことができる。斜面で静止するとき、 A_3 でトルク T_5 が発生し、

$$T_5 = F_1(L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3) \quad (7)$$

となる。ここでは最大トルクを求めるので、明らかに $T_6 < T_5$ であるから、 T_6 は求めなくてよい。

4 様々な姿勢での必要トルクの見積もり

様々な脚の姿勢を変えた際に必要となるトルクを見積もるために、関節角度 θ_1, θ_2 を変えた際の各アクチュエータのトルクを図4に示す。縦軸を θ_1 、横軸 θ_2 とする。現行のSOLの動作からそれぞれの可動範囲を、 $70^\circ \leq \theta_1 \leq 135^\circ$ 、 $-90^\circ \leq \theta_2 \leq 0^\circ$ と設定する。この時、 θ_3 は最大トルクを計算したいので、最大値の $\theta_3 = 0^\circ$ を考える。表は緑、黄、赤の順に大きくなっている。その結果、各トルクの最大値は、 $|T_1|=56.63$ [Nm]、 $|T_2|=100.62$ [Nm]、 $|T_5|=77.42$ [Nm] であった。

5 モータの選定

モータの選定方法として A_1, A_2 はそれぞれ $|T_1|, |T_2|$ の最大値、 A_3 は前進のための加速度を生成することも考えるために $|T_5|$ の最大値の1.2倍以上のトルクを持つモータを選ぶものとする。それぞれのトルク値と文献 [3] のADRA HR-A063, HR-A072, HR-A086の最大トルクを表1に示す。表1より、モータのトルクがそれぞれの最大トルクとほぼ同じであるので、選定したモータをSOLに用いる。設計・製作したロボットを図5に示す。

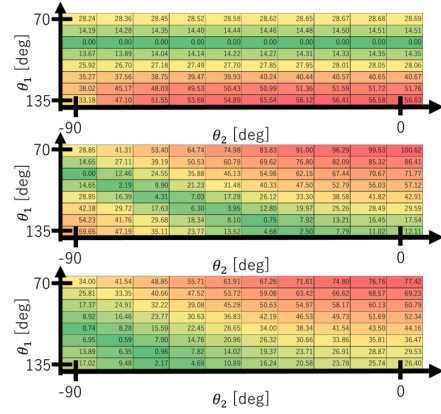


図4: 様々な姿勢でのトルクの見積もり (上から $|T_1|, |T_2|, |T_5|$)

表1: 算出は各モータの最大トルクと選定したモータ

トルク	値 [Nm]	1.2倍 [Nm]	モータ	最大トルク [Nm]
T_1	56.63	—	HR-A063	56
T_2	100.62	—	HR-A072	100
T_5	(77.42)	92.90	HR-A086	157

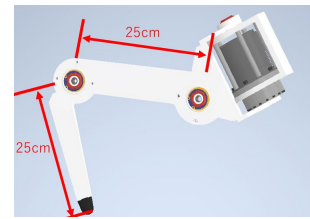


図5: 選定したモータを用いた脚 (3DCAD)

6 おわりに

6脚ロボットの実用化を目指した仕様を設定をし、静力学に基づく関節トルクの算出手順に従い必要トルクを概算した。また、必要トルクに基づきモータを選定し、6脚ロボットSOLの新しい脚を設計することができた。設定した仕様に対して、運搬できる重さ、傾斜面、最大段差は満たすが、移動速度は満たさないため改善が必要がある。

参考文献

- [1] Yuki MURATA et.al, Contact Assistance for Event-Driven Hexapod Robot with Reaction Force Observer Developing Multi-Legged Robot as Seamless Mobile Platform in Unpaving Grounds, No.22-2 Proceedings of the 2022 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Sapporo, Japan, June 1-4, 2022
- [2] Robot Leg Torque Tutorial, "https://www.robotshop.com/community/tutorials/show/robot-leg-torque-tutorial", 2018
- [3] umbratek, ADRA Actuators Technical Data-V0.2.1,2022