

# 多脚ロボットの脚の揺動による転倒復帰

M2020SC007 吉田 和司

指導教員:中島 明

## 1 はじめに

災害地や事故現場など人間が立ち入ることができない場合などで活躍する様々なロボットが研究されており、ロボットが人間の代わりにレスキュー活動や様々な作業を遂行することに期待が寄せられている。脚型ロボットは車両型ロボットなどの移動ロボットと比べ、自らの脚の接地点を任意に選んで移動できることが特徴的である。ただし、脚型ロボットは接地点の少なさ故に転倒の恐れがあり、その回避や回復について考える必要がある。

転倒の回避については、4脚ロボットや6脚ロボットで転倒しないような制御の研究 [1][2]、6脚ロボットで転倒しない脚の配置を提案した研究 [3] がある。転倒からの回復については、6脚ロボットで転倒後に脚で胴体を持ち上げるといった静的な起き上がり方の研究がある [4]。ただし転倒後も脚が地面につけるような構造の制約がある。また、昆虫は動的な起き上がり方をしているものがいることがわかっている [5]。動的な起き上がり方については、階層型強化学習による3リンク2関節ロボットの起立行動の獲得 [6] や、4リンク3関節ロボットの動的な起き上がり方の研究 [7]、ヒューマノイドロボットの動的な起き上がり方 [8] がある。さらに、ヒューマノイドロボットの背中を駆使した動的な起き上がりを研究した [9] がある。そこで本研究では脚の揺動を駆使して多脚ロボットが転倒した状態からの動的な起き上がりを目的とする。本研究では整地のみを考慮する。参考文献 [5] から、様々な転倒復帰方法があることから、本研究では2つの起き上がり方法を提案し、実験を行った。

## 2 転倒状態のモデル化

### 2.1 問題設定

作成する実験機は図1のようなものである。



図1 作成する実験機

本研究のシミュレーションでは図1を図手前からみた実験機を簡略化し、円弧で表現した背中が付いた本体部分と脚2脚でできた図2のようなモデルを考える。また6脚の脚について、左右3本を左右1本で考え、関節は考

慮せず1自由度の脚で考える。グローバル座標系  $\Sigma_W$  を用意し、背中の半円の中央の点に座標系  $\Sigma_B$  を設定する。

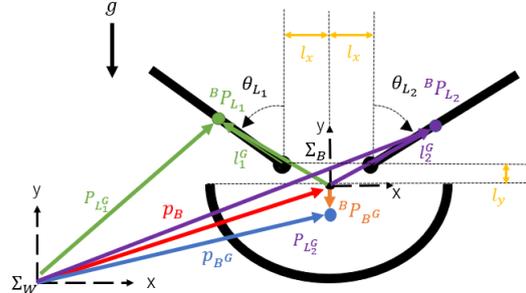


図2 座標系と座標の設定

### 2.2 変数と一般化座標・一般化力

使用する変数を表1にまとめた。また、一般化座標と入力  $\tau$  は、

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{B_x} \\ P_{B_y} \\ \theta_B \\ \theta_{L_1} \\ \theta_{L_2} \end{bmatrix} \in R^5 \quad (1)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{L_1} \\ \tau_{L_2} \end{bmatrix} \in R^2 \quad (2)$$

である。

表1 変数一覧

変数名	意味	単位
$P_{B_x}$	胴体の x 座標	m
$P_{B_y}$	胴体の y 座標	m
$\theta_B$	胴体の角度	rad
$\theta_{L_1}$	脚 1 の関節角度	rad
$\theta_{L_2}$	脚 2 の関節角度	rad
$r$	胴体の半径	m
$l_1$	脚 1 の長さ	m
$l_2$	脚 2 の長さ	m
$m_B$	胴体の質量	kg
$m_{L_1}$	脚 1 の質量	kg
$m_{L_2}$	脚 2 の質量	kg
$g$	重力	kg · m/s <sup>2</sup>
$J_{B^G}$	胴体の慣性モーメント	
$J_{L_1^G}$	脚 1 の慣性モーメント	
$J_{L_2^G}$	脚 2 の慣性モーメント	

### 2.3 拘束条件

本研究では以下の拘束が成立すると仮定し運動方程式を求める。

1. 半球の曲面が地面に接している。
2. 半球は地面を滑らず転がる。

## 2.4 運動エネルギーとポテンシャルエネルギー

システム全体の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求める。胴体部分の重心の移動速度と回転角速度は、

$$V_{B^G} = \dot{P}_{B^G} = \begin{bmatrix} -r\dot{\theta}_B + r_G\dot{\theta}_B C_{\theta_B} \\ r_G\dot{\theta}_B S_{\theta_B} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\omega_{B^G} = {}^W\dot{\theta}_{B^G} = \dot{\theta}_B \quad (4)$$

となる。また、脚1の重心の移動速度と脚の回転角速度は、

$$V_{L_1^G} = \dot{P}_{L_1^G} = \begin{bmatrix} -r\dot{\theta}_B(1 - S_{\theta_B}) - l_1^G(\dot{\theta}_{L_1} + \dot{\theta}_B)C_{(\theta_{L_1} + \theta_B)} \\ -r\dot{\theta}_B C_{\theta_B} - l_1^G(\dot{\theta}_{L_1} + \dot{\theta}_B)S_{(\theta_{L_1} + \theta_B)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\omega_{L_1^G} = {}^W\dot{\theta}_{L_1^G} = \dot{\theta}_B + \dot{\theta}_{L_1} \quad (6)$$

となる。同様にして、脚2の重心の移動速度と脚の回転角速度も求められる。

以上より、運動エネルギー  $T$  とポテンシャルエネルギー  $U$  は以下ようになる。

$$T = \frac{1}{2}m_B \|V_{B^G}\|^2 + \frac{1}{2}J_B^G(\omega_B^G)^2 \sum_{i=1}^2 \left( \frac{1}{2}m_{L_i} \|V_{L_i^G}\|^2 + \frac{1}{2}J_{L_i^G}(\omega_{L_i^G})^2 \right) \quad (7)$$

$$U = m_B g P_{B_y} + \sum_{i=1}^2 m_{L_i} g P_{L_{i_y}} \quad (8)$$

## 2.5 ラグランジュの運動方程式

ラグランジュの運動方程式は、未定乗数  $\lambda_1, \lambda_2$  と非保存外力  $\Upsilon \in \mathbb{R}^5$  を用いて

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Upsilon_i - \frac{\partial h_1}{\partial q_i} \lambda_1 - \frac{\partial h_2}{\partial q_i} \lambda_2 \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (9)$$

となる。したがって、以上の式からラグランジュの運動方程式は

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) = B\tau - A^T\lambda \quad (10)$$

と表す。ただし、

$$\Upsilon = B\tau = \begin{bmatrix} O_{3 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{L_1} \\ \tau_{L_2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

であり、 $M$  は慣性行列、 $c$  は遠心・コリオリ力項、 $g$  は重力項である。

## 3 シミュレーション

### 3.1 シミュレーション内容

転倒復帰のシミュレーションは図3のようなイメージで以下のように行う。初期条件を  $q = [0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{4}\pi \ \frac{1}{2}\pi]^T$ ,  $\dot{q} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$  とする。つまり、脚1, 脚2の初期状態をそれぞれ外側に45度傾けて静止しているとする。脚1と脚2の関節角の目標値をそれぞれ  $\theta_{L_{1d}} = 45, \theta_{L_{2d}} = 10$  とし、目標値に追従するようにPID制御を行った。PID制御に用いたゲインは  $K_P = 150, K_I = 70, K_D = 20$  を使用した。

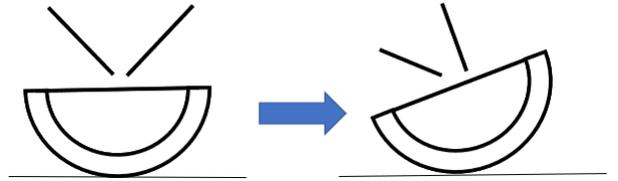


図3 転倒復帰イメージ

### 3.2 結果

シミュレーション開始1秒後に脚を制御し揺動させた。シミュレーションの結果は脚2の関節角度が図4、ロボットの胴体角度が図5、脚の揺動のトルクが図6のようになった。また、図5より、ロボットの胴体角度が90°以上になった。

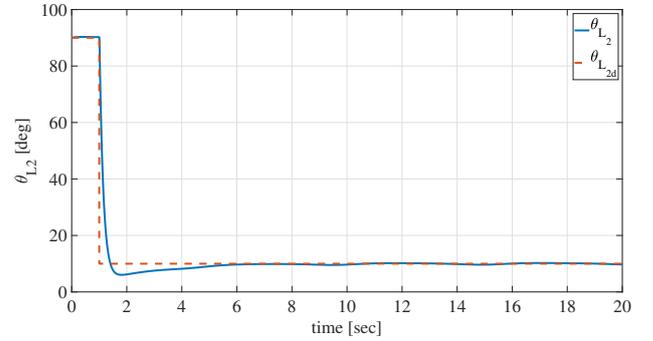


図4 脚の角度のシミュレーション結果 (半径15cm)

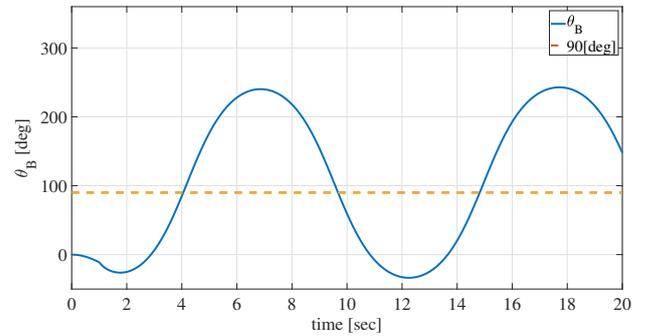


図5 胴体角度のシミュレーション結果 (半径15cm)

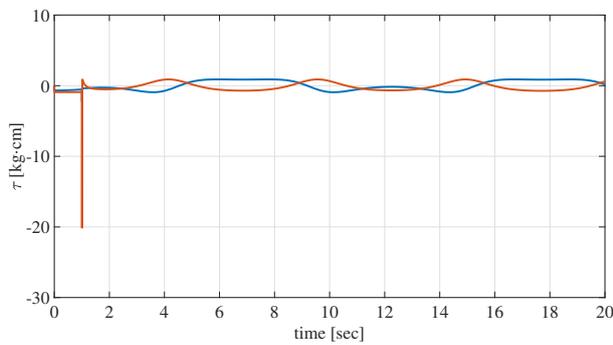


図 6 脚のトルクのシミュレーション結果

## 4 実験

### 4.1 作成した実験機

実験機は 3D プリンタを用いて 4 種類のパーツから構成される胴体を作成した. 4 種類のパーツから胴体を構成し, さらに脚がついた図を図 1 である. また, 実験機のパラメータを表 2 に示す.

表 2 実験機のパラメータ

変数名	意味	値
$r$	背中半径	15(cm)
$r_G$	背中から重心位置までの距離	6.8355(cm)
$l_x$	脚の位置 ( $x$ 座標)	9.12(cm)
$l_y$	脚の位置 ( $y$ 座標)	-5.9245(cm)
$m_{l_1}$	脚 1 の質量	336(g)
$m_{l_2}$	脚 2 の質量	336(g)
$m_B$	胴体の質量	1564(g)

本研究では図 1 のようなロボットを使用し 2 つの方法での起き上がりについて実験を行う. 1 つは片側の脚を 1 回揺動させて起き上がる方法, もう 1 つはロボットの固有角振動数に励振させるように脚を揺動させる方法である. 以下に 2 つの方法による起き上がりの実験結果を示す.

### 4.2 片側の脚を 1 回振り下ろし起き上がる方法

実験はシミュレーションと同様, 半径 15cm に設定したパーツを用いて実験機を作成し行った. 1 つ目の起き上がりの方法として, シミュレーションの設定と同様, 片側の脚を  $90^\circ$  から  $10^\circ$  に揺動させ転倒復帰を試みた. 実験は滑り止めマットの上でロボットが起き上がる際に滑ることを防止させた状態で起き上がりを行った. 揺動させた片側 3 本の脚の角度の実験結果を図 7 に, 胴体角度の実験結果を図 8 に示す.

### 4.3 ロボットの励振による起き上がり実験

次にロボットの固有角振動数に励振させるように脚を揺動させる実験を行う. ロボットの固有角振動数に対して励振させるように脚を揺動させるため, ロボットの固有角振動数を調べる. 本研究では, ロボットの胴体を傾け手を放して転がすことで, 実験的にロボットの固有角振動数を求めた. 半径 15cm の背中での固有角振動数の確認実験結果は図 9 のようになった.

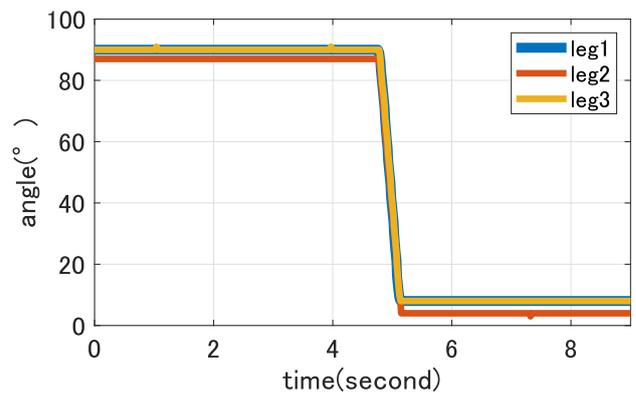


図 7 脚の揺動実験での 3 本の脚の角度の実験結果

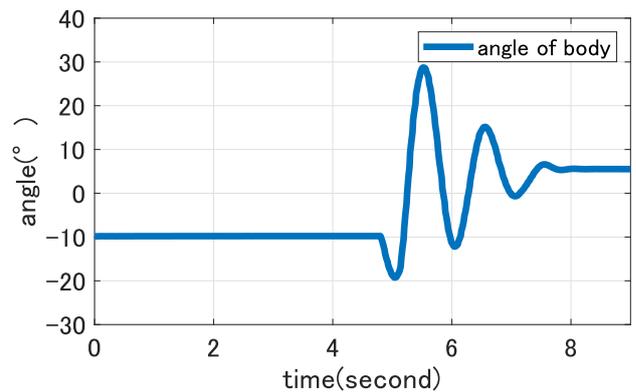


図 8 脚の揺動実験での胴体角度の実験結果

図 9 から, ロボットの胴体角度が  $0^\circ$  になる部分から周期 (1.32(s)) を求めた. 求められた周期からロボットの固有角振動数は 0.757(Hz) となり, 固有角振動数に励振させるように脚を揺動させる実験を行う.

揺動させた脚の角度の実験結果を図 10 に, 胴体角度の実験結果を図 11 に示す. また実験機の都合により, 脚の角度は 6 本の脚のうち左右各一本ずつの脚の角度の読み取りを行った.

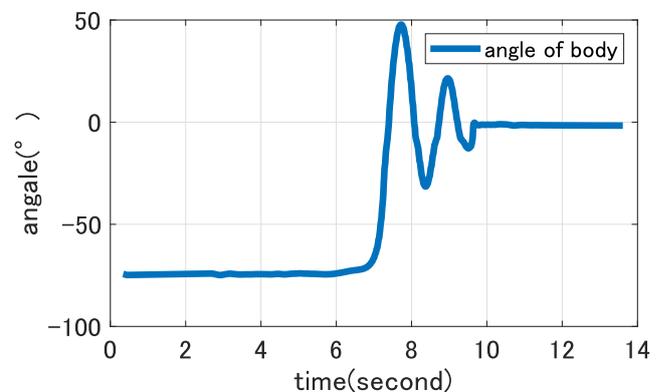


図 9 半径 15cm の背中での固有角振動数の確認実験結果

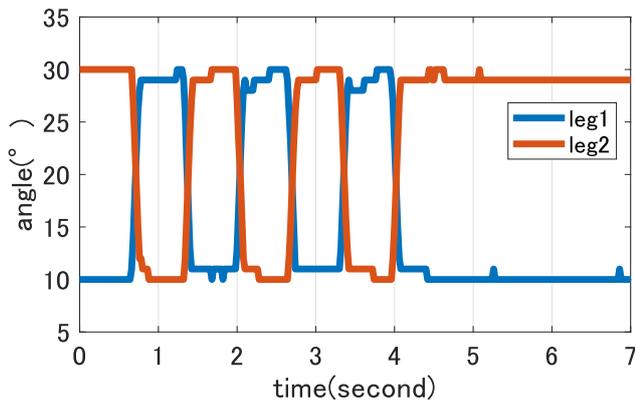


図 10 脚の励振による起き上がり実験結果 (脚の角度)

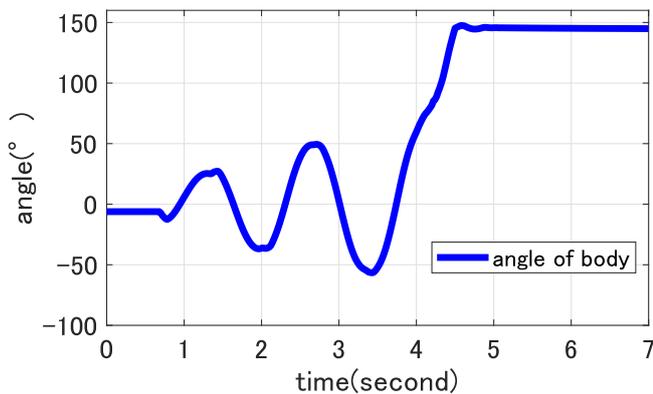


図 11 脚の励振による起き上がり実験結果 (胴体角度)

#### 4.4 考察

図8より片側の脚を1回揺動させる起き上がりでは、胴体と床面との間の粘性摩擦によりエネルギーが失われシミュレーションのように起き上がることができなかった。またシミュレーションでの脚の角速度は、実験での脚の揺動の際の角速度はであることから脚の角速度の誤差があることがわかる。

図11より胴体の固有角振動数に励振させるように脚を揺動させる方法では起き上がることに成功した。そのため、本研究のロボットには「励振による起き上がり」が適していると考えられる。

### 5 おわりに

本研究では、多脚ロボットを単純化したモデルを作成し、そのモデルの運動方程式を使用して転倒復帰のシミュレーションを行った。転倒復帰のシミュレーションでは片脚の揺動をPID制御し、ロボットの胴体角度を大きくしロボットを転倒復帰させることができた。シミュレーション後、3Dプリンタを利用してパーツを作成し実験を行った。

実験では2種類の起き上がり方を試みた。片側の脚を1回揺動させる起き上がりでは起き上がることができなかったが、胴体の固有角振動数に励振させるように脚を揺動させる方法では起き上がることに成功した。

今後は、シミュレーションにおいて、胴体と床面との間の粘性摩擦を実装と、脚の揺動を目標値ではなく目標軌道に設定することでより実験の状況に似たシミュレーションを作成することが考えられる。また、胴体の固有角振動数に励振させるように脚を揺動させる方法のシミュレーションを作成し、脚の励振による起き上がりのシミュレーションを行うことが目標である。

#### 参考文献

- [1] 白井有樹, 養手勇人, 永岡健司, 吉田和哉, “四脚ロボットの斜面歩行における転倒安定余裕に基づく歩容解析”, 計測自動制御学東北支部 第314回研究集会, 2018.
- [2] 村田勇樹, “時間的制約充足型統合制御に基づく事象駆動型6脚移動ロボットの不整地歩行”, 名古屋大学学位論文, 2020.
- [3] 池田和則 (未来大), 若原拓己 (未来大), 三上貞芳 (未来大), “転倒しない脚機構による不整地歩行に関する研究”, No. 12 - 3 Proceedings of the 20th JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hamamatsu, Japan, May 27 - 29, 2012.
- [4] Saijin Peng, Xilun Ding, Fan Yang and Kun Xu, “Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot”, Robotica, online 2015, Vol.35, pp.1107-1120, 2017.
- [5] 蟹谷啓 (茨城県石岡市立園部小学校3年), “むしの起き上がり方”, 筑波大学「科学の芽」賞, 2009.
- [6] 森本淳, 銅谷賢治, “階層型強化学習を用いた3リンク2関節ロボットによる起立運動の獲得”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.5, pp.574-579, 2001.
- [7] 伊藤聡, 阪圭央, “脚の振り降ろしを利用した起き上がり運動における角運動量条件”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.8, pp.932-939, 2003.
- [8] 國吉康夫, 大村吉幸, 寺田耕志, 長久保晶彦, “等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.6, pp.706-717, 2005.
- [9] 大賀淳一郎, 荻野正樹, 細田耕, 浅田稔, “ヒューマノイドロボットの動的起き上がり運動の理解と実現”, 人工知能学会研究会資料, 第17回SLG-Challenge研究会, 2003.