

# 4 足歩行ロボットの製作と制御

## —左右に曲がる機能の実現を目指して—

2015SC079 坂巻和実 2015SC062 水崎友也

指導教員：大石泰章

### 1 はじめに

4 足歩行ロボットは車両型ロボットと異なり、整地されおらず障害物があるような場所でも移動することができる。4 足歩行ロボットについては様々な研究がある [1]–[8] が、車両型ロボットを左右に曲げる方法は自明であるのに対して、4 足歩行ロボットを左右に曲げる方法は自明ではない。

本研究では、LEGO Mindstorms を使って 4 足歩行ロボットを製作し、左右に曲がる機能の実現を目指す。重心の位置を変えることで左右に曲がるロボットと足の動きを制限することで左右に曲がるロボットの 2 種類を製作し、それぞれのロボットがどれだけ曲がることのできるのか性能評価をする。また、足の動きを制限するロボットを用いて、障害物をよけながら歩く制御をする。

### 2 ロボットの基本構造



図 1: 基本形のロボット

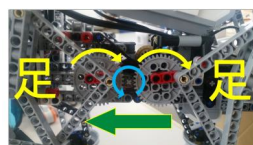


図 2: 足の駆動部分

ロボットは、材料として LEGO Mindstorms を使用し、足を動かす基本構造は LEGO education が提供する組み立て図を参考にした [9]。図 1 が、組み立て図通りに製作したロボットである。図 2 に示すように、足の根元部分の歯車が回転することで（水色の矢印）両側にある足の歯車が回転する（黄色の矢印）。足の歯車が回転することで足全体が揺動運動する。反対側も同じ動きをするので、1 つのモータで合計 4 本の足を同時に動かすことができる。4 本の足の運動の位相差により緑色の矢印の方向にロボット歩行をする。モータのパワーは最小値 0 から最大値 100 の間で変化させることができる。ただしロボットは直進するのみで左右に曲がる機能はない。これから紹介するロボットはすべて、この構造をもとにして足を動かしている。

### 3 重心を変える 4 足歩行ロボット

#### 3.1 製作したロボット

まず、重心の位置を変えることで左右に曲がる 4 足歩行ロボットを製作した。概観を図 3 に示す。体の上に回転するアームが取り付けられており、アームの先にはおもりが

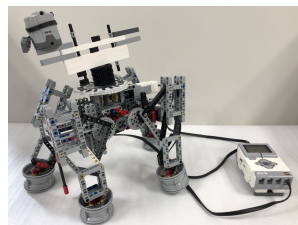


図 3: 重心の位置を変えられるロボット

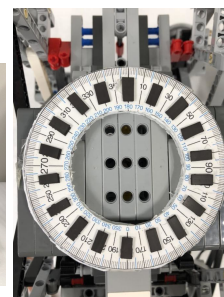


図 4: 上から見たロボット（アームを外した状態）

付いている。アームの角度を変えるモータが 1 つ付いており、20 度刻みで 360 度回転することで重心の位置を変える（図 4）。体の向きを測定するためにジャイロセンサが付いている。

#### 3.2 実験

製作したロボットを足のモータのパワーを 75 として 14 秒間アルミマットの上で歩かせ、どの程度左右に旋回するかを調べた。結果を図 5 のグラフに示す。横軸はおもりのついたアームの角度  $\phi$  を表し（図 6）、縦軸はロボットの正面方向がどれだけ回転したかという角度  $\theta$  を表す（図 7）。角度  $\phi$  が正であれば体の重心が左側にあることを表し、 $\phi$  が負であれば体の重心が右側にあることを表す。角度  $\theta$  が正であればロボットが左に曲がったことを表し、 $\theta$  が負であれば右に曲がったことを表す。

重心が右にあるときは右に曲がり、左にあるときは左に曲がると思われるので、図 5 の第 1, 3 象限に点があることが理想である。

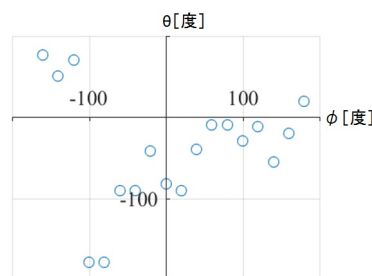


図 5: アームの角度  $\phi$  とロボットの回転角  $\theta$  の関係

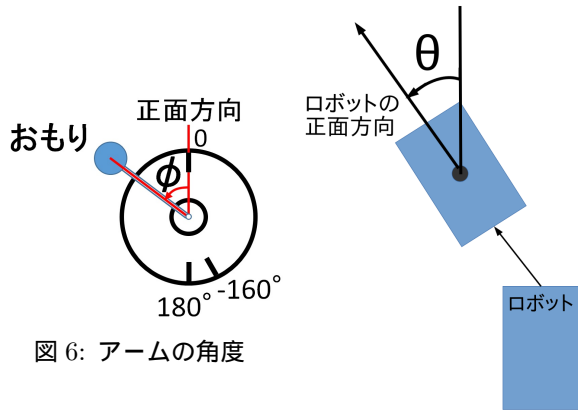


図 6: アームの角度

図 7: ロボットの回転角

### 3.3 実験の結果と考察

図 5 に見るように、 $\theta$  が正と負の両方の値をとるため、左右に曲ることができる。第 1, 3 象限に点が集まると考えていたが、重心が右にあっても左に曲ることがあるということが実験からわかった。原因としては、体が完璧に左右対称ではないことと足裏と地面の間の摩擦力が大きいことが考えられる。

また、大きな問題点として、再現性がないことが挙げられる。再度この実験を行ったところ、図 5 とは異なる結果になった。

そこで、左右に大きく曲がる時の足の動きを観察したところ、左に曲がる時は左後足の歩幅が小さくなり、右に曲がる時は右後足の歩幅が小さくなることに気がついた。

次章では足の歩幅を小さくすることで左右に曲げる方法について述べる。

## 4 足の動きを制限する 4 足歩行ロボット

重心を変えるロボットでは、重心を変えることで足の動きを制限し足の歩幅を小さくしていたが、重心の影響が予想していたよりも小さく、あまり左右に曲ることができなかった。

そこで、足に直接障害物となる棒を当てることで足の動きを制限するロボットを製作した。

### 4.1 曲がる原理

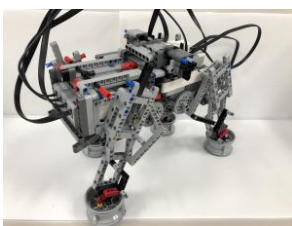


図 8: 足の動きを制限するロボット

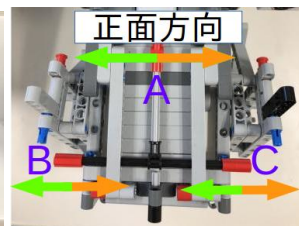


図 9: 足の動きを制限する仕組み

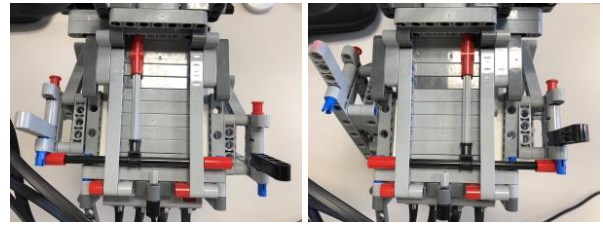
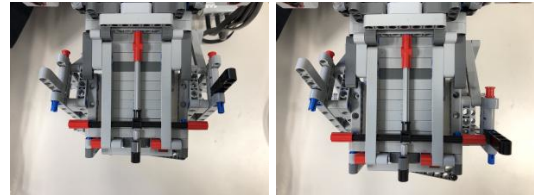


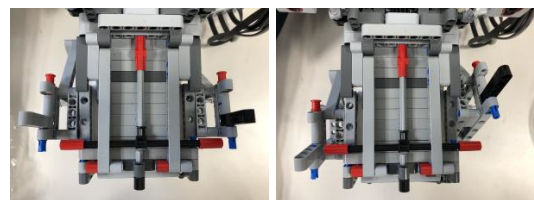
図 10: 左に曲がる時の棒の位置

図 11: 右に曲がる時の棒の位置



(a)

(b)



(c)

(d)

図 12: 足が動く様子

図 8 は、足の動きを制限するロボットである。図 9 は、足の動きを制限する仕組みの拡大図である。この図はロボットの後ろ半分を上から見たところであり縦方向の棒 A と、横方向の棒 BC が見える。棒 BC の左端を B 部、右端を C 部と呼ぶ。棒 A が緑色の矢印の方向に動くと、連動して棒 BC も緑色の矢印の方向に動き、B 部がはみ出した状態となる (図 10)。棒 A が黄色の矢印の方向に動くと、連動して棒 BC も黄色の矢印の方向に動き、C 部がはみ出した状態となる (図 11)。

ロボットの足は図 12(a) ~ (d) のように動く。棒 BC と左後足および右後足との位置関係はそれぞれ次のようになっている。

(a) B 部、C 部のどちらの正面にも足がない。

(b) C 部の正面に右後足がある。

(c) B 部、C 部のどちらの正面にも足がある。

(d) B 部の正面に左後足がある。

(a), (b) のタイミングでは棒 BC を左へ動かすことができる。図 10 のように棒 BC が左に動いた状態で歩くと、B 部が左後足の動きを制限するので左に曲ることができる。(a), (d) のタイミングでは棒 BC を右へ動かすことができる。図 11 のように棒 BC が右に動いた状態で歩くと、C 部が右後足の動きを制限するので右に曲ることができる。しかし、これ以外のタイミング、例えば (c), (d) のタイミングで棒 BC を左に動かすと、B 部が左後足にぶつかっ

て足が外れてしまいかねない。

正しいタイミングで棒 BC を動かすためにセンサを使用する。

以降に、異なるセンサを搭載した 2 種類のロボットの性能を比較する。

#### 4.2 タッチセンサを搭載したロボット

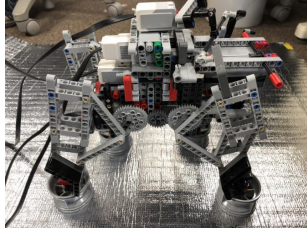


図 13: タッチセンサを搭載したロボット

図 13 が、タッチセンサを搭載したロボットである。棒を出すことができる足の位相になるとタッチセンサが反応するようになっている。

3.2 節の実験と同じ条件で歩かせた。左に曲がる場合と右に曲がる場合のそれぞれ 30 回ずつ記録を取った。図 14 と図 15 は、横軸をロボットの回転角 (図 7 と同じ) とするヒストグラムである。平均値を取ると左に 86.4 度、右に 38.9 度曲がっている。重心を変えるロボットは再現性がなかったのに対して、このロボットは再現性があることがわかる。

問題点として、左には 90 度近く曲がっているものの右にはあまり曲がっていないことがあげられる。原因として、歩く際にタッチセンサにぶつかることで足の動きが乱れてしまうことが考えられる。そこで、足がぶつかることのないカラーセンサを搭載したロボットを製作した。

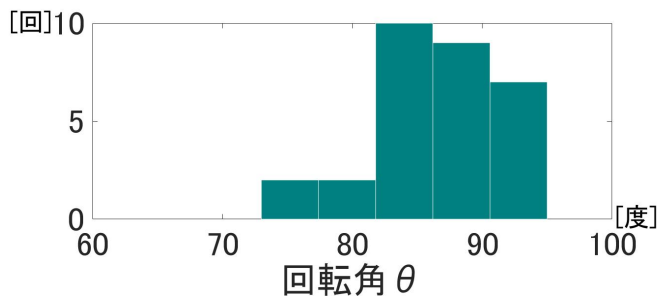


図 14: タッチセンサを使ったロボットの回転角  $\theta$  のヒストグラム (左に曲がる場合)

#### 4.3 カラーセンサを搭載したロボット

図 16 が、カラーセンサを搭載したロボットである。棒を出すことができる足の位相になるとカラーセンサが反応するようになっている。

3.2 節の実験と同じ条件で歩かせた。左に曲がる場合と右に曲がる場合のそれぞれ 30 回ずつ記録を取った。図 17 と図 18 は、横軸をロボットの回転角 (図 7 と同じ) とする

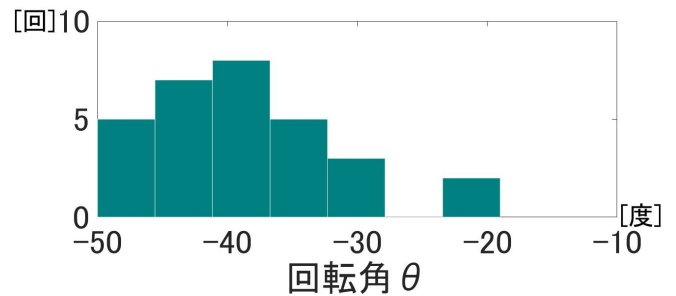


図 15: タッチセンサを使ったロボットの回転角  $\theta$  のヒストグラム (右に曲がる場合)

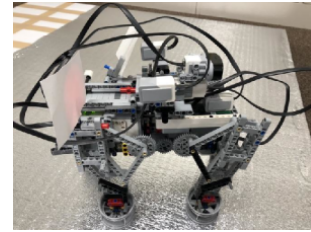


図 16: カラーセンサを搭載したロボット

ヒストグラムである。平均値を取ると左に 178.4 度、右に 106.1 度曲がっている。タッチセンサを搭載したロボットの結果 (4.2 節) と比べると、左に約 2 倍、右に約 2.5 倍曲がっており、カラーセンサを搭載したロボットの方がより大きく曲がることわかる。

以上の結果から、カラーセンサを使って足の動きを制限するロボットが最も性能が良いことが分かる。次章では、このロボットを使って障害物を避けて歩くことを試みる。

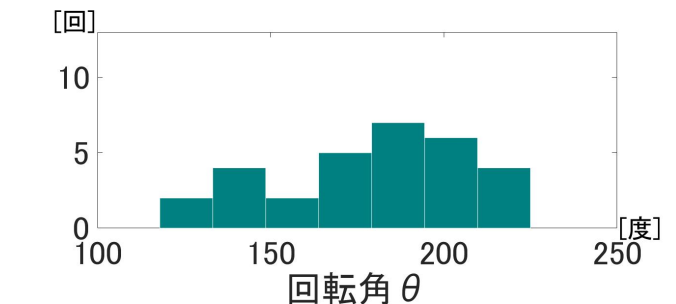


図 17: カラーセンサを使ったロボットの回転角  $\theta$  のヒストグラム (左に曲がる場合)

## 5 左右に曲がる機能を使った制御

人間が指令を出すことで、ロボットに図 19 のような障害物がある道を歩かせる制御をする。結果、ロボットは右に 90 度以上大きく曲がり左に 90 度曲がる (図 20 の矢印) ことでゴールまでたどり着くことができた。

## 6 おわりに

左右に曲がるためには、足の動きを制限することが有効である。重心の位置を変えるロボットの左右に曲がる機能には再現性がなかったが、足に直接障害物を当てることで



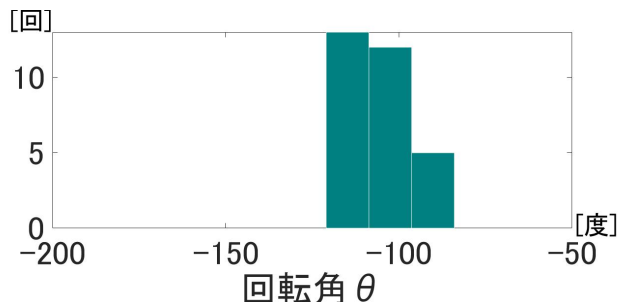


図 18: カラーセンサを使ったロボットの回転角  $\theta$  のヒストグラム (右に曲がる場合)

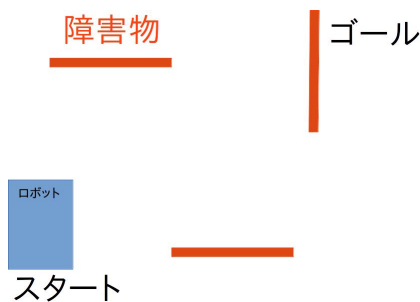


図 19: 障害物がある道

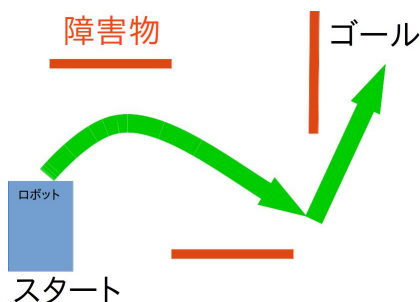


図 20: 障害物を避けて歩いた軌跡

足の動きを制限するロボットの左右に曲がる機能には再現性があった。さらにその中でも、カラーセンサを搭載したロボットの方がタッチセンサを搭載したロボットよりも優れていた。カラーセンサを搭載したロボットを用いて、障害物をよけてゴールまで歩く制御をすることができた。

今後の課題として、人間が指令を出してロボットを制御するのではなくロボットにセンサを増やすなどして自動化することが挙げられる。また、足場としてアルミマットのみを使用していたが、どんな足場でも歩行可能になるようにしたいと考える。

## 参考文献

[1] <https://www.bostondynamics.com/spot-mini>  
 [2] 孫悠洛・鎌野琢也・安野卓・鈴木茂行・原田寛信:「モータ動特性を考慮した CPG ネットワークによる 4 脚ロボットの歩行動作の生成」. 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 124, No. 10, pp. 2148–2154 (2004).

[3] 鈴木秀和・森崎巧一・渡邊香・林原泰子・西仁司:「動物型 4 脚ロボットにおける歩容生成と印象評価」. 知能と情報 (日本知能情報フuzzy学会誌), Vol. 24, No. 5, pp. 1012–1022 (2012).  
 [4] 倉爪亮・葉石敦生・米田完・広瀬茂男:「4 足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御」. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 3, pp. 380–386 (2001).  
 [5] 稲葉雅幸:「脊椎を持つ全身型メカトロニック行動体」. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 7, pp. 822–825 (2001).  
 [6] 亀川哲志・鈴木隆司・大谷浩一・松野文俊:「脆弱環境下での移動を実現するための 4 脚移動ロボットの足探り動作による足場認識と歩行の実現」. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 2, pp. 215–222 (2010).  
 [7] 安達弘典・小谷内範穂・新井健生・本間敬子・篠原善裕・西村賢一郎:「可動限界到達時の踏み換えルールに基づく 4 脚ロボットの操縦型歩行制御」. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 3, pp. 329–336 (1998).  
 [8] 山口智浩・渡辺桂吾・泉清高・木口量夫:「ニューラルネットワークによる 4 脚歩行ロボットの障害物回避行動を伴う目的地経路の獲得」. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 69, No. 687, pp. 2880–2887 (2003).  
 [9] <https://le-www-live-s.legoocdn.com/sc/media/lessons/mindstorms-ev3/building-instructions/model-expansion-set/ev3-model-expansion-set-elephant-3c8304efe699169ffe82b85cb01a01cb.pdf>