

# 単純な機構を用いた段差昇降を行う小型移動ロボットの製作

Manufacture of Small-size Mobile Robot which Performs  
the Difference in Level

Ascent Descent using Simple Mechanism

宗久 大輔 (岡山大学) ○ 正 永谷 圭司 (岡山大学) 正 田中 豊 (岡山大学)

Daisuke MUNEHISA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama  
Keiji NAGATANI, Okayama University Yutaka TANAKA, Okayama University

Robots being able to ascend and descend on stairs will increase the scope of their operation. Furthermore, in this research, we reinvented the mechanism of ascent and descent on stairs for mobile robots with a small number of actuators. In this paper, we gave a report on mechanism of ascent and descent on stairs, and validity of the performance of the mechanism using an actual robot.

*Key Words:* Mobile robot, Ascent and descent on stairs

## 1 はじめに

近年、ロボットは工場内だけでなく、家庭やオフィスなど、人間が生活する環境への導入が進められている。ロボットのみが作業する環境であれば、ロボットが移動しやすいように、環境面の整備を行うことで、ロボットの動作範囲を広げることが可能となる。しかし、人間がのために設計された人間が生活する環境では、階段等の障害物が存在するため、ロボットの行動範囲を確保するためには、ロボットに段差昇降能力が必要となる。

この段差昇降を行わせる研究は、これまでも数多く行われてきた。例えば、松本ら<sup>(1)</sup>は、二足歩行ロボットでの高速な段差昇降を目的に研究を行った。この研究ではロボットの脚に車輪を搭載し、歩行と車輪での移動を可能とした。これにより歩行で障害物を乗り越え、平坦地では車輪を用いて移動することが可能である。しかし、この歩行ロボットでは、重心安定のために機構が複雑となる。一方、石井ら<sup>(2)</sup>は、上下動可能な駆動輪を用い階段昇降ロボットの開発を行った。この研究はロボットを3つの部分に分け、1つの部分ごと3回に分けて階段昇降を可能にしている。しかし、このロボットでは、段差検知等のために多くのセンサを搭載する必要がある。

本研究では、できるだけ単純な機構により、階段昇降を行う手法を提案する。この機構は、台形ネジを用いて、本体を上昇させる機能を有し、さらに段差の上部に重心を預けるための、動滑車の原理を用いた本体の前後移動機能を有する。本研究では、この機構を有する移動ロボット「DAN」を製作し、自律での階段昇降を実現した。

本稿では、この階段昇降の手法、各機構の説明、重心解析について紹介し、実機による動作検証について報告する。

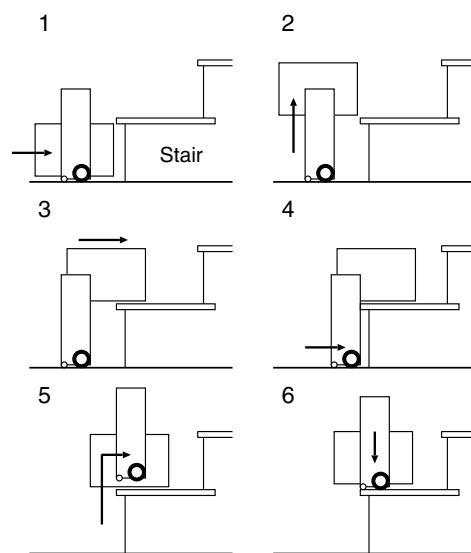
## 2 階段昇降ロボットの提案

### 2.1 階段昇降機能を有する車輪型移動ロボットの提案

本研究では、階段昇降を含む屋内移動機構の開発を目指し、以下の2点を達成可能なロボットの製作を行うこととした。

#### 車輪を用いた平面走行

屋内環境での使用を前提としているため、通常の走行手段として、車輪を採用した。これにより、スムーズな走行ならびに、車輪の回転を計数して自己位置を推定するオドメトリ手法を適用することが可能となる。



1. 階段まで車輪で移動する
2. 本体部分を上昇させる
3. 本体を前に移動させ、階段に乗せる
4. 車輪で前進し、本体をさらに前に移動させる
5. 本体の重心を階段に預け、脚を持ち上げる
6. 走行時の姿勢に戻す

Fig. 1 Method of ascent and descent on stairs

#### 安定した階段昇降

本研究で提案する階段昇降は、階段に重心を預ける手法を用いた。これにより、ロボットに多くの自由度を搭載せずに、重心を安定させることができる。この動作の具体的な手順を図1に示す。

### 2.2 階段昇降ロボット「DAN」の概要

前節の動作を可能とするため、ロボットに必要となる能力は、

- 本体の上下の移動
- 本体の前後移動
- ロボットの平坦地での移動
- ロボットの高さならびに階段の検知

である。

本研究では、これらの能力を可能とする機構を有する階段昇降ロボット「DAN」を製作した。製作したロボットの概観図を図2に示し、ロボットの概要を以下に示す。

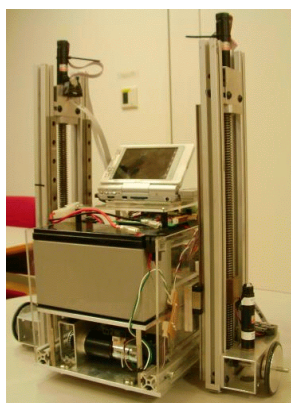


Fig. 2 Target robot "DAN"

### 1. サイズ

ロボット「DAN」の本体のサイズは、長さ250[mm]、幅180[mm]、高さ180[mm]で、本体全部が通常の階段に乗る大きさとした。また、脚の長さは400[mm]、幅100[mm]である。

### 2. 駆動機構

ロボットには本体の高さを調整する上下機構を脚自身に、本体を階段に預ける前後移動機構を本体に、さらに走行機構を脚の下部に有する。この機構の詳細については3章で述べる。

### 3. コントローラ

各機構のモータ制御、センサの制御を行うため、小型の制御用マイコン H8S/2633 を搭載した。また、通信機能ならびに、走行制御ソフトウェアを搭載するために LinuxOS を有する PDA 「Zaurus」を搭載した。

### 4. センサ

階段の検知を行うために、距離センサ (SHARP 製 PSD) を搭載した。このセンサの機能に関する詳細は6章で述べる。

## 3 ロボットのハードウェア

### 3.1 本体上下機構

本体上下機構は、ロボット本体を階段の高さまで上昇させるために必要な機構である (図1の手順2を参照)。

図3に、上下機構を有する脚機構の概観を示す。ロボットの脚部分の外枠にはラック材を使用し、真中の斜線部分は台形ねじを使用した。台形ねじにはブロックナットがついており、そのブロックナットと本体との固定部分が接合している。これにより、脚上部に搭載しているモータで台形ねじを回転させて

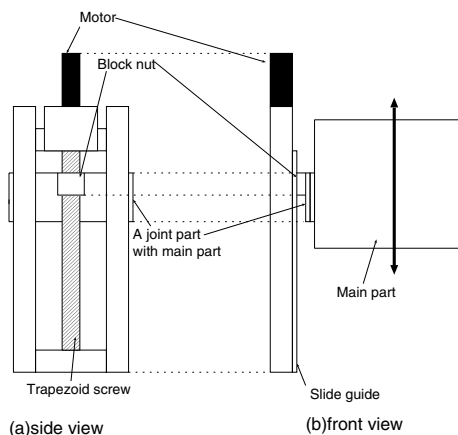


Fig. 3 Structure of vertical motion

ロックナットの位置を上下させることで、脚または本体を上下させることが可能となる。

脚の全長は約400[mm]で、そのうち約280[mm]が可動域である。よってロボット本体のサイズを考慮すると、230[mm]までの階段の乗り越えが可能である。これにより、一般的な階段は20[cm]程度なので、階段昇降が可能となる。また台形ねじを用いることにより、比較的トルクの小さいモータでも十分に本体、または脚を持ち上げるのに必要なトルクを発生させることができる。

上述の上下移動機構を製作し、この機構の動作確認を行った。その結果、可動域全ての移動にかかる時間は約10[s]であり、また本体を上下移動させるための必要な力 (本体重量7[kg]) を出せることが確認できた。

### 3.2 脚の前後移動機構

脚前後移動機構は、ロボットの重心を階段の上に乗せるために必要となる機構である (図1の手順3, 手順4参照)。この前後移動機構を上から見た構成を図4に、横から見た構成を図5に示す。この機構では、ロボット前部に配置したモータからタイミングベルトに駆動力を伝達する。この際、スライドガイドで支えられたシャフト部分のローラを介してタイミングベルトの両端が固定されているため、シャフト部分が前後に動く構造である。なお、この脚の可動域は120[mm]である。

この機構の動作確認を行ったところ、可動域120[mm]全ての移動にかかる時間は約10[s]であり、また本体を前後移動させるために必要な力を出せることが確認できた。

### 3.3 走行機構

本研究で実現を目指すロボットは、整備された屋内での使用を前提としているため、車輪を用いたスムーズな移動が可能である。ただし、ロボットが階段昇降を行うためには、重心が段上にのらなければならず、移動機構は、ロボットの脚部分の幅の間に収まる必要がある。そこで本研究では、図6に示すように、モータを縦にして取り付ける省スペース構造で、走行機構を実現した。このモータから鉛直軸回りの回転を得て、傘歯車を用い、水平軸回りの回転を得ることで車輪を回転させることが可能である。

製作した走行機構により、ロボットの平坦地でのスムーズな走行を行うことができた。これによりロボットを走行させるために必要なトルクを出力できていることが確認できた。

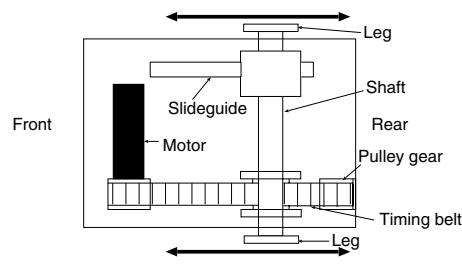


Fig. 4 Structure of back-and-forth motion (top view)

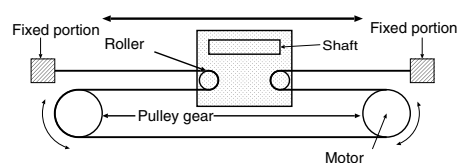


Fig. 5 Structure of back-and-forth motion (side view)

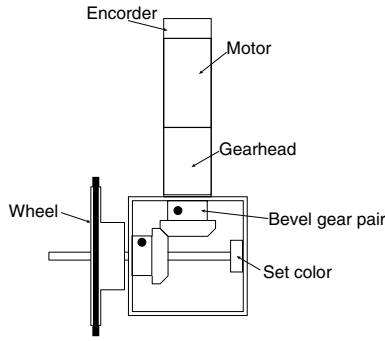


Fig. 6 Structure for locomotion

#### 4 重心解析

安定した走行動作ならびに階段昇降動作を実現するためには、ロボットの重心の安定が大きな問題となる。そこで、

1. 階段昇降時の本体部分が階段に乗っている姿勢
2. ロボットの走行時の姿勢

の2つの状況における静的なモーメント解析を行った。

この解析では、ロボットの主な重量となる部品と考えられる「ロボットの脚部分」、「バッテリー」、「本体底部」の3つの部品についてのみ、考慮することとした。

なお、バッテリーの重量は  $2.6[kg]$ 、両足の重量は  $7.5[kg]$ 、本体底部の重量は  $0.9[kg]$  であり、それぞれの重量に重力加速度  $g(=9.8[m/s^2])$  をかけると

$f1 = 25.5[N]$ 、 $f2 = 73.5[N]$ 、 $f3 = 8.8[N]$  となる。ここで、  
 $f1$ : バッテリーの重量による下向きの力  $[N]$   
 $f2$ : ロボットの脚部分の重量による下向きの力  $[N]$   
 $f3$ : 本体底部の重量による下向きの力  $[N]$   
 である。

##### 4.1 階段昇降時のモーメント

階段昇降時のモデルを図7に示す。各構成要素に加わるモーメント  $M$  は支点  $O$  を中心と考え、

$$M = f \times \cos \theta \times Ox [Nmm] \quad (1)$$

と求められる。ただし、

$f$ : 各物体の重量による下向きの力  $[N]$   
 $\theta$ : 支点  $O$  と対象物体の重心と結んだ際になす角度  
 $Ox$ : 支点  $O$  と対象物体の重心との距離  $[mm]$

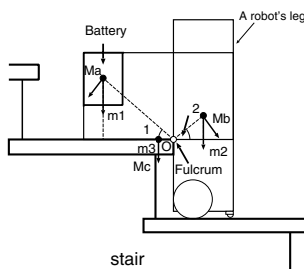


Fig. 7 Model of robots moment while ascending steps

である。よって、階段昇降の際にかかるモーメント  $M$  は、

$$M = f \times \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \times \sqrt{x^2 + y^2} = fx \quad (2)$$

で求められる。ただし、

$x$ : 支点から脚の重心までの  $x$  軸の長さ  
 $y$ : 支点から脚の重心までの  $y$  軸の長さ  
 とした。

以上を考慮し、各重量によるモーメントの計算結果すると、ロボット全体にかかるモーメント  $M$  は、

$$M = 432.3 [Nmm] > 0 \quad (3)$$

となった。ロボットの状態が安定するには、 $M$  が階段側に力がかかる状態である  $M < 0$  にしなければならないため、本研究では、バッテリー設置部分におもりを搭載することとした。必要となるモーメント  $Mx$  は  $432.3 [Nmm]$  より、おもりの重量  $x[kg]$  は

$$x > 0.3755 [kg] \quad (4)$$

を満たす必要がある。本研究では、 $0.4[kg]$  のおもりをバッテリー付近に搭載することとした。

##### 4.2 走行時のモーメント

走行時のロボットの姿勢の簡易的モデルを図8に示す。4.1節で必要となったおもりを考慮し、走行時の姿勢に対して同様の解析を行うと、ロボット全体にかかるモーメント  $M$  は

$$M = -127.5 [Nmm] \quad (5)$$

となり、モデルの支点から見て、反時計まわりにモーメントがかかっている状態となる。このままでは走行時、ロボットは前に転倒してしまう。

そこで、このモーメントを打ち消すために、駆動輪より前にキャスターを設置し支点の位置を変更することで、ロボットにかかるモーメントを後ろへ転換させることとした。

支点をロボット前方にずらす幅を  $x$  とし各構成要素より加わるモーメントを計算し、 $M > 0$  となる  $x$  の値を求めると、 $x > 3.0$  となる。本研究では、ロボットの脚幅と構造を考慮した上で、余裕を見て  $x = 22 [mm]$  の位置にキャスターを設置したことで、安定した走行が可能となった。

#### 5 コントローラ

提案するロボットは、上下機構で2つ、移動機構で2つ、前後移動機構で1つの合計5つのDCモータを使用する。これらのモータの制御は、日立製制御用マイコン H8S/2633 を利用することとした。また、走行軌跡制御を行うため、PDA「Zaurus」

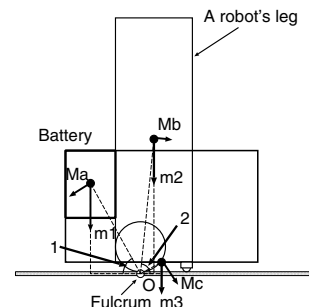


Fig. 8 Model of robots moment while surface navigation

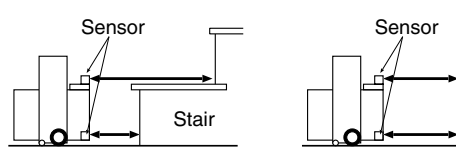


Fig. 9 Distance detection

を搭載することでロボットの自己位置推定を行うこととした。なお、H8S ボードと「Zaurus」間の通信には、シリアルケーブルを利用することとした。

## 6 動作検証

重心解析の検証ならびに、機構の有効性を確かめるため、製作したロボットの動作検証を行った。

### 6.1 オープンループによる階段昇降動作

この動作は、ロボットを階段手前に待機させた状態で始め、階段までの距離、階段の高さが既知という条件で行った。これにより、ロボットが上昇する高さ、階段の幅分の走行距離をあらかじめ決め、オープンループでプログラムを作成した。

動作結果として、ロボットは 5 段以上の階段を連続して昇ることに成功した。なお、この 5 段昇る動作に約 3 分の時間がかかった。

### 6.2 センサ搭載時の階段昇降動作

ロボットが自律での階段昇降を行うため、ロボット「DAN」の前部の上部と底部の 2 カ所に光学式測距方式センサ PSD を搭載した。これにより、ロボットは、踏破可能な階段であるか、また、ロボットがどの程度上昇したかを判断が可能である。ロボットが壁と階段を判断する方法を図 9 に示す。

動作結果として、壁を回避し、階段を検知しつつ、10 段の階段を昇ることできた。この動作にかかった時間は約 6 分であった。また階段踏破完了判断を行うことも可能となった。このときの 1 段を踏破する際の動作の連続写真を図 10 に示す。

### 6.3 考察

オープンループの動作においても、階段までの距離や高さが既知であれば、ほぼ問題なく動作することが可能であった。ただし、階段踏破完了の認識ができないという問題点がある。一方、センサ搭載時の動作では、階段の高さが変わった場合にも、期待どおり階段を踏破することが確認できた。

また、階段を降りる動作については、昇る動作を逆順で実行することで実現可能であると予想される。しかしながら、現段階では、下方の段差を検知するためのセンサ情報が不足しているため、実装が完了していない。

## 7 まとめと今後の課題

本研究では、ロボットの動作範囲拡張のため、ロボットに階段昇降能力を持たせる事を目的としたロボット「DAN」を製作した。この小型移動ロボットの製作にあたり、まず、小型ロボットの階段昇降の手法を考案し、その手法を行うために必要な機構の製作を行った。次に、考案した階段昇降の手法において、ロボットの姿勢についてのモーメントの解析を行い、ロボットの重量分布の変更を行った。さらにロボットにマイコン H8S/2633、光学測距方式センサ PSD を搭載し、ロボット自身で階段を検知し、階段を昇る動作を行った。

動作実験の結果、センサを用いることで自律での階段を昇る動作が可能となった。しかしながら、現時点では、階段を降りる動作は実現できていない。今後、階段を降りる動作について

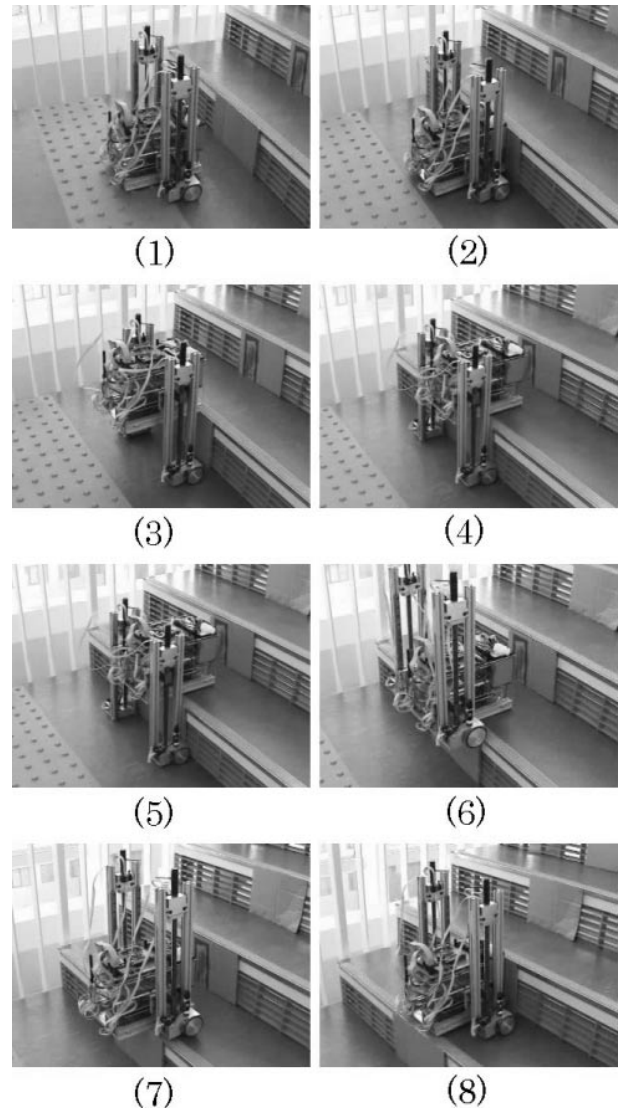


Fig. 10 A series of photograph in a motion of ascending steps

の動作の実装を行い、階間移動を含む自律ナビゲーションの実現を目指す。

### 【参考文献】

- (1) 松本 治, 梶田 秀司, 西郷 宗玄, 谷 和男: “動的軌道制御間の連続性を考慮した 2 足歩行型脚車輪ロボットの高速階段昇降制御”, 日本ロボット学会誌, 2000/01
- (2) 石井 淳也, 安藤 吉伸, 水川 真: “上下可能な駆動輪を搭載した自律階段昇降ロボットの開発”, システムインテグレーション部門学術講演会誌, 2003/12