

## いもむし型レスキューロボットの進行方向制御

### How to control the course of a robot what like a green caterpillar

内藤 惇 †, 加藤厚生 † †

Naito, Jun, kato, Atsuo

Abstract: A study to automate an approach to a dangerous place and work contents is performed flourishingly so that a person works. The purpose reducing danger to the person is to be going to let work replace it to a robot to give precision more. I decided to wrestle for the improvement of the control design to let it depended in the disaster spot, and the traveling wave drive type robot that had been studied as a rescue robot in Aichi Institute of Technology intelligence mechanical engineering specialty environment adaptation robot laboratory (an old electronics department bionics laboratory) be worse in debris in this study smoothly. The characteristic of the traveling wave drive type robot does not have the movement mechanism such as a wheel or the crawler and is it occurs, and to move the exercise of the floor side direction by a traveling wave to generate to a human trunk. I get the driving force from friction to act on a contact surface with the floor. I do a length axial direction and exercise to the cross direction with a main purpose in the past study and realize a gradient to around 45 degrees and exercise to go up and down vertically in a one's area of jurisdiction. However, flexure did all body joints all at once and asked it loop posture and asked it the back, a method I extended all at once again, and to come back to the going straight movement when I did a wheel because I did not add enough examination about the direction revolve. As for this method, a turning angle is uncertain, and there may not be the space that can always take the ringed posture a real disaster on the site; of the improvement was urgent.

#### 1. はじめに

ロボットの語源はチェコ語で「労働」を意味する *robota* とされている。その語源の通り、今や、ありとあらゆる場所でロボットが活躍している。機械としてのロボットは産業用ロボットやロボットカーに代表されるようなある程度自律的に連続した自動作業を行う機械や SF 作品に登場するような人に近い形及び機能を持つ機械や人に可愛がられる家庭用ロボットなどがある。前者はまさしく、語源の通り工業製品を作り出すための「労働」をししてくれるロボットである。

産業用ロボットは部品の搬送に数多く用いられ、作業の正確性や効率性、高出力が求められている。一般に産業用ロボットの作業内容はあらかじめ与えられた命令の繰り返しであり、作業環境もロボットにあわせて設計できるため、工場内の環境情報をあらかじめ与えることが可

能であり、ロボット自身が環境を認識して動作を変更する必要はない。また、ロボットの機構自体も作業に適した必要最小限の構成に設計されており、自由度の少ない物が大多数を占め、作業自体はあらかじめ与えられた軌道追従であり、外乱も少なく、制御の面からも簡単である。

#### 1.2 従来の研究

一方でロボット技術の進歩、計算機技術や半導体技術、通信技術の発達とそれの融合により、ロボットは家庭環境やオフィス環境にも導入されてきている。家庭環境で使用されるロボットには家事を代行するためのロボットや防犯のために使われるロボット、また、ペット型のロボットなどもある。これらのロボットと産業用ロボットとの違いは作業環境が工場内のように規格化されておらず、環境内に未知な物体や複雑な形状の物体があり、時間の経過とともにそれらが変化する点にある。工場内では、人とロボットが接触することはないが、日常生活環境においては常に人間と接触する可能性を持ち、作業の

† 愛知工業大学大学院工学研究科 (豊田市)

† † 愛知工業大学工学部機械学科(豊田市)教授

種類によっては積極的に人間との接触を求めめる必要さもある。また、ロボットに与えられる作業タスクは、人間からの作業指示や人間との相互作用から動的に生成され、工業用ロボットのようにあらかじめ定められたシーケンシャル制御ではない。そのため、未知環境や動的に変化する環境に適応可能な制御が必要となる。ロボットには環境を認識する画像認識や音声認識のような人間の五感に匹敵する環境認識機能が求められる。

地震大国日本においては、十数年に 1 度は必ず大きな地震が発生し、30 年以内に 80%以上の確率で東海・東南海地震が発生するとの予想もある。ここ数年をみても、新潟中越沖地震や岩手・宮城内陸地震で大きな人的被害や経済的被害が出ている。地震などによる自然災害では、人間による救助が困難な現場や二次災害の恐れがある現場が数多く存在する。そのような現場においてはこれまで人手による非効率的な救助方式がとられていた。そこで最近、人による救助が困難な場所において、人間に代わって救助作業を行うレスキューロボットの研究・開発が盛んに行われている。

人間が救助を行う時には、要救助者の発見、掘削、瓦礫の除去、要救助者の搬出、搬送そして情報の伝達が必要とされる。こうした人間が行っている手順をすべて 1 台のロボットで実行することは困難である。こうした手順は整理分類することにより小型ロボットと大型ロボットに分担させることができる。小型ロボットには要救助者の発見を受持たせ、大型ロボットには掘削、瓦礫の除去、要救助者の搬出、搬送を行わせる。情報伝達は両方のロボットで可能である。このことから、救助活動を探索活動と救出活動に分類でき、レスキューロボットもこの 2 種類に分類できる。

特に探索型ロボットは災害発生時の初期段階において、早急に瓦礫内にいる被災者を捜し出す事を目的としている。そのため、小型で狭い環境でも移動可能な形態と高い踏破性が重視される。移動機構に着目すると探索型ロボットは非連結型ロボットと連結型ロボットに分類される。両者の大きな違いはそのロボットの持つ関節自由度にあり、非連結型に比べ、連結型の方が自由度は多い。連結型ロボットは単一または複数のユニットを連結した構造を持ち、必要に応じユニット数を増やすことができる。

連結型、非連結型を問わず、推進力を得る方法として車輪型やクローラ型が多く採用されている。推進力を得る方法としては、効率が良く、簡単な方法であるが、災害環境下で転倒したり障害物に進行を阻害される可能性が高いため、どのような姿勢でも移動できるよう冗長な

移動機構をロボットの体幹に設置する必要がある。そこで、本研究室では受動車輪やクローラを必要としないイモムシ型レスキューロボットを開発した。

### 1.3 研究目的

これまで、イモムシ型レスキューロボットは直進移動、横移動、旋回移動と 3 種類の移動方法が可能であったが、進行方向を随意に変えることはできなかった。災害現場においては、必ずしも旋回移動のできるスペースがあるとは限らず、その 3 種類の移動方法だけでは不十分である。本研究では進行方向を随意に決定できる制御方法についてシミュレーションと実機による実験によって実現した。

## 2 移動メカニズム

### 2.1 移動原理

本研究のロボットは第 1 章で述べたように受動車輪やクローラを用いていない。ユニット型の探索レスキューロボットであり、駆動方法として体幹に進行波を作ることにより推進力を得ている。

進行波型ロボットを三次元直交空間に置き、進行方向を  $x$  軸方向、体幹の振動方向を  $z$  軸方向に採れば、 $x-z$  面内の運動を考えると考えられる。そのため、 $y$  軸方向への運動は 0 となる。このとき、進行波は次式のように表すことができる。

$$V = \frac{1}{2} A \sin\left(2\pi\left(\frac{1}{\lambda}x - \frac{1}{\kappa}t\right)\right) \quad (2.1)$$

$V$  は進行波の振幅、 $\lambda$  は位置周期、 $\kappa$  は時間周期、 $t$  は時間、 $x$  は原点からの  $x$  軸座標である。

進行波を体幹に発生させることによって、ロボットの接地点は楕円運動をしながら次々と入れ替わっていく。この楕円運動の  $x$  軸成分によってロボットは床面との摩擦によって推進力を発生する。ロボットの長さ(以後、体幹長とする)を  $L$  とすると、 $L$  は進行波の線積分と等しいため、体幹長は式(2.1)の線積分に等しい。

ある関数  $f(x)$  の線積分は次のように表される。

$$L = \int_0^x \sqrt{1 + f'(x)^2} dx \quad (2.2)$$

式(2.2)に式(2.1)を代入すると、

$$L(x_i, t_0) = \int_0^{x_i} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi A}{\lambda}\right)^2 \cos^2\left(2\pi\left(\frac{1}{\lambda}x - \frac{1}{\kappa}t_0\right)\right)} dx \quad (2.3)$$

となる. さらに,  $B = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $C = \frac{2\pi}{\kappa}$  として各項を整

理すると,

$$L(x, t_0) = \sqrt{1 + A^2 B^2} \int_0^y \sqrt{1 - \frac{A^2 B^2}{1 + A^2 B^2} \sin^2(Bx - Ct)} dx \quad (2.4)$$

ここで,  $(Bx - Ct) = y$  において置換積分を行うと,

$$\frac{\sqrt{1 + A^2 B^2}}{B} \int_{Ct}^y \sqrt{1 - \frac{A^2 B^2}{1 + A^2 B^2} \sin^2 y} dy \quad (2.5)$$

となる. さらに  $\psi$  を位相,  $m$  を振幅として以下に示す第2種楕円関数

$$E(\psi, m) = \int_0^\psi \sqrt{1 - m \sin^2 \psi} d\psi \quad (2.6)$$

を導入すれば, 式(2.3)は

$$L(x, t_0) = \frac{\sqrt{1 + A^2 B^2}}{B} \left\{ E(Bx - Ct, \frac{A^2 B^2}{1 + A^2 B^2}) - E(Ct, \frac{A^2 B^2}{1 + A^2 B^2}) \right\} \quad (2.7)$$

と表すことができる.

以上の事より,  $L$  は第2種楕円積分形となり, 単調増加関数であることがわかる.

## 2.2 進行波上の任意の点における軌道

体幹に進行波を生成しているロボット上にある任意の点における軌道を求める. 2.1節で述べたようにロボットの進行方向を  $x$  軸方向とし, ロボットの先頭に座標原点をとる. 原点から体幹長  $L_1$  の位置にある点  $P_{L_1}$  の

$x, y, z$  座標への射影をそれぞれ  $x_1, y_1, z_1$  とする.  $x_1$  を求めるためには式(2.7)の積分範囲を求めることと等しいため, 式(2.7)の逆関数

$$x_1 = L^{-1}(L_1, t_0) \quad (2.8)$$

と定義し,  $y_1, z_1$  はそれぞれ

$$y_1 = 0 \quad (2.9)$$

$$z_1 = A \sin\left(\frac{1}{\lambda} L^{-1}(L_1, t_0) - \frac{1}{\kappa} t_0\right) \quad (2.10)$$

となる.

## 2.3 関節角度

ロボットはモータの回転軸を関節として, 前後の関節をリンクで結んだ構造になっている. ロボットのリンク長を  $L_n$ , 先頭から  $i$  番目のリンクを  $L_{ni}$ , 先頭リンク端, つまり原点を  $P_0$ , 先頭から  $i$  番目の関節を  $P_i$  とする.

先頭から  $i$  番目のリンク  $L_{ni}$  を相対ベクトルで次のように表す.

$$\vec{L}_{ni} = P_{i+1} - P_i \quad (2.11)$$

$i$  番目のリンクの単位ベクトル

$$\vec{N}_i = (N_x, N_y, N_z)^T \text{ をとる. 関節 } P_i \text{ の目標角度 } \alpha_i$$

は  $\vec{N}_i$  と  $\vec{N}_{i+1}$  のなす角となる.  $\alpha_i$  は反時計回りを正とし次のように表すことができる.

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{\vec{N}_i \times \vec{N}_{i+1}}{\vec{N}_i \cdot \vec{N}_{i+1}}\right) \quad (2.12)$$

## 第3章 シミュレーション

本論文において, シミュレーションは3次元動力学エンジン ODE(Open Dynamics Engine)を用いた. ODE は, 剛体同士を連結する関節の力学モデルを C 言語で記述し, 剛体または関節にコンピュータ内で力や加速度を与えた時にその剛体がどのような挙動を示すかを計算できる. また, その結果を3次元表示することが可能で, 視覚的にロボットの動きが把握できる.

### 3.1 シミュレーションモデル

本論文におけるシミュレーションモデルを図 3.1 に示す. ロボットは, 実機同様, 5 個のユニットを連結させた構造とした. ユニット間の軸間距離を  $l_y = 107[mm]$ , ユニットの  $x$  軸方向長さ,  $z$  軸方向長さを  $l_x = l_z = 68[mm]$  とした. これは, ロボットの実機と同じ構成である. シミュレーション内部では, シミュレーション周期毎にロボットの目標角度を計算し, その角度と現在の関節角度から関節に与えるトルクを導出する.

また, ロボットと床面との間には静止摩擦係数  $\mu_s$  がはたらくとし, その大きさは 0.2 とした.

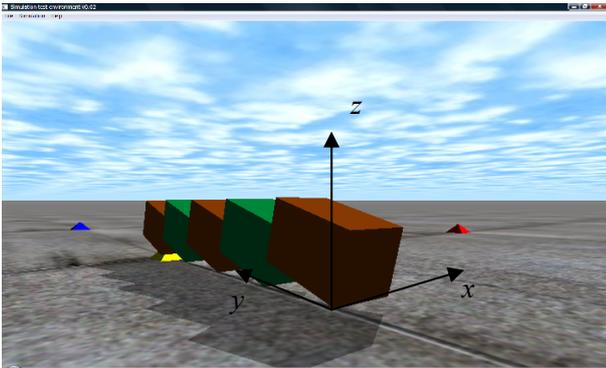


図 3.1 シミュレーションモデル

## 3.2 シミュレーション方法

### 3.2.1 移動速度の導出

直線運動から旋回運動に移る制御をするためにはロボットの直線運動時の移動速度を知ることが大切である。

本論文では  $y$  軸と  $x$  軸に平行な 2 個の 1 自由度能動関節を持ったユニットを  $x$  軸方向に複数個連結したロボットを提案している。すなわち、ユニットは、2 個の屈伸関節  $\theta_p$  と  $\theta_y$  がリンク  $l_{py}$  で連結され、その両端に  $l_p$  と  $l_y$  のリンクが連結されている。

このロボットの全長は次式で表すことができる。

$$L_r = \sum_{i=1}^n (l_p + l_{py} + l_y) + l_t \quad (3.1)$$

ロボットの全長  $L_r$  上で作り出す正弦波形の 1 周期の長さ  $l_\lambda$  の数を  $k_n$  とし、ロボットが任意の微小時間  $t$  から  $t + T_\lambda$  の間に移動する距離を  $S_0$  とする。  $S_0$  は 1 周期の正弦波を作るために必要なロボットの体幹上長さ  $L_w$  とその長さをもとに算出した正弦波を床面へ投影した周期長  $L_{r\lambda}$  の差で

$$S_0 = L_w - L_{r\lambda} \quad (3.2)$$

$$L_w = \frac{L_r}{k_n} \quad (3.3)$$

と表すことができる。よって、移動速度  $v$  は

$$v = \frac{S_0}{T_\lambda} \quad (3.4)$$

となる。

### 3.2.2 進行方向の決定

直進移動ではユニット内のピッチ軸の関節  $\theta_{pi}$  を動かすことにより体幹長軸方向への移動を行った。ユニット内のヨー軸関節  $\theta_{yi}$  はロボットの推進力には寄与しないが、ロボットの進行方向制御に用いることができる。

本シミュレーションにおいて、まず、直進運動の移動速度をシミュレートした後、周期  $T_\lambda$  を求め、直進移動中に  $i$  ユニットのヨー軸  $\theta_y$  を進行方向に対し任意の角度に変更したのち、  $T_\lambda$  後に再びヨー軸  $\theta_y$  を 0 に戻すと同時に  $i+1$  ユニットのヨー軸を  $\theta_y$  に変更する。また、シミュレーションにおいて、旋回移動時に起きる慣性力や遠心力はロボット自体が低速で移動するため、その影響はないと考え、無視することとした。

## 第 4 章 Rebo5 号機

### 4.1 Rebo5 号機の構成

構造は生産性やメンテナンス性、低コストであることを目指すため、ユニット構造を採用し、構造材はベークライトを用いた。ベークライトは入手しやすく、費用も安い。また、軽くて加工が容易であるといったメリットがある。ユニット構造の場合、故障時に故障したユニットのみを交換すればよい。

Rebo5 号機のユニット外観を図 4.1 に、ロボットの全体を図 4.2 に示す。ピッチ方向とヨー方向に 1 自由度ずつの屈曲関節を持つ。軸方向、  $z$  軸方向に 69[mm]、  $x$  軸方向に 107[mm]の直方体で 5 ユニット連結させた全長は 583[mm]ある。制御用回路は外付けで先頭ユニットのサーボモータに接続する。サーボモータと制御用回路の動作電力は安定化電源装置から供給する。



図 4.1 ユニット外観図

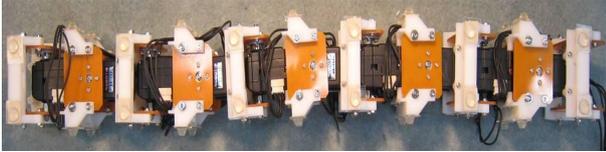


図 4.2 ロボット全体図

## 4.2 制御方式

### 4.2.1 従来の Rebo との違い

Rebo5 号機において、配線の簡素化によるメンテナンス性の向上や低コストで実機を制作することを目的としているため、集中制御方式を採用した。Rebo3 号機までは超小型汎用分散型コントローラ *c-chip* を搭載し、ロボットの運動を分散制御していた。隣り合うユニットと共有メモリを介して通信しながら目標角度を求めている。そのため、Rebo5 号機と構造は同じでも計算速度は速く、環境に対する適応性という面では Rebo3 号機の方が優れている。Rebo3 号機では環境の変化に応じてリング型にするなどユニットの構成を変えることを考えていたため、分散型のコントローラを用いていた。

Rebo5 号機では構造を変更する事は考えていないため、構成システムやプログラムの変更は必要最小限になる。コントローラの数を減らせばコストは削減でき、ロボット自体の大きさも小さくできる。併せて本研究では RS-485 で知られる EIA485 プロトコルによるデジタイチェーン配線が可能な Dynamixel 社のサーボモータ DX-117 を採用したことによりコントローラとサーボモータ間の配線が省略でき、メンテナンス性において簡略化することができた。

Rebo5 号機が安定走行するためには、環境面との接触点が 3 点以上であることが望ましい。そこで、今回は 5 ユニットで Rebo5 号機の構成とした。

ロボットの  $i$  番目のピッチ回転軸に配置された目標角度  $D_{\theta_i}$  は、振幅  $A$  が位置位相  $\lambda$  より十分大きければ次式のように目標角度を与えることができる[1]。直進移動時の目標角度は

$$D_{\theta_i} = A \sin(\omega t + \theta_i) \quad (4.1)$$

旋回移動時の目標角度は

$$D_{\theta_i} = A \sin(\omega t + \theta_i + \phi_i) \quad (4.2)$$

と表すことができる。  $\omega$  は角速度、  $\theta$  はユニット間に与えるピッチ軸方向の位相差、  $\phi$  はヨー軸方向の位相差である。 ロボットを直進移動からある角度  $\phi$  進行方向を変更し走行させるためには、ある地点  $P$  にユニット  $i$  がさしかかったらユニット  $i$  にヨー軸方向の目標角度  $\phi$  を与え、その地点を完全に通り過ぎたら目標角度  $\phi$  を 0 に再び戻すという制御を行うこととした。

ユニットの長さを  $l$  とし、移動速度を  $v$  とすると  $l$  の距離を進む時間  $t$  は

$$t = \frac{l}{v} \quad (4.3)$$

となる。そのため、式(4.2)は次のように表すことができる。

$$D_{\theta_i} = A \sin\left(\omega \frac{l}{v} + \theta_i + \phi_i\right) \quad (4.4)$$

ある地点  $P$  に到達したユニット  $i$  が時間  $t$  の間に式(4.4)の目標角度軌道をたどり、その他のユニットは式(4.1)の直線移動の目標角度軌道をたどるものとした。

## 5 実験結果

### 5.1 シミュレーション結果

#### 5.1.1 移動速度の導出

ロボットの体幹中に作り出す進行波について、表 5.1 に示すパラメータでシミュレーションを行った。

表 5.1 進行波のパラメータ

パラメータ名	意味	単位
$n$	リンク数	5
$k_n$	形状の数	2
$L_r$	全長	535[mm]
$l$	リンク長	107[mm]

移動速度は式(3.4)、式(4.1)を元に算出し、振幅  $A$  と位相差  $\omega_p$  を変化させ、移動速度の移り変わりを見た。図 5.1

にその結果を示す.

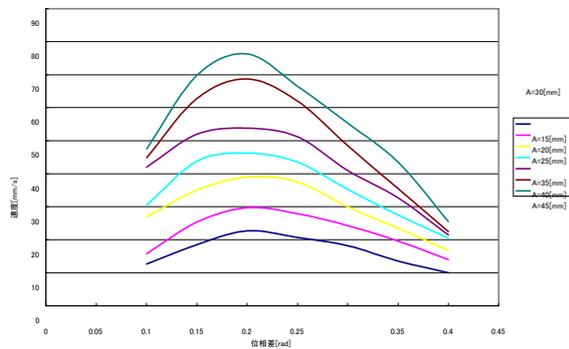


図 5.1 速度変化

シミュレーション結果によれば同じ位相差であれば, 振幅が大きいほど速度は上がることがわかった. 周期は振幅が大きいほど長くなる傾向にあるが, 1 周期あたりの移動距離が大きくなることから, 周期の影響に比べ 1 周期あたり移動距離が速度に与える影響が大きいことを示している.

また, 位相差に目を向けると速度は位相差が大きいほど速くなるというわけではなく, 最速点は位相差が 0.2[rad]あたりである.

### 5.1.2 ロボットシミュレーション結果

本研究において, ロボットシミュレーションは数値計算的にロボットの動作を設定したうえ, 3 次元動力学エンジン ODE(Open Dynamics Engine)を使用して, ロボットが進行方向を変更できるかどうか確認した.

5.1.1 節から振幅が 35[mm], 位相差が 0.2[rad]の時, 2 秒で 1 ユニット分の距離を移動できることが導出されたため, その値を使用して計算し, ロボットが進行方向を変えられるかどうかを視覚的に検証した.

図 5.2 に進行方向を 30°]変えた時のシミュレーション画像を示す.

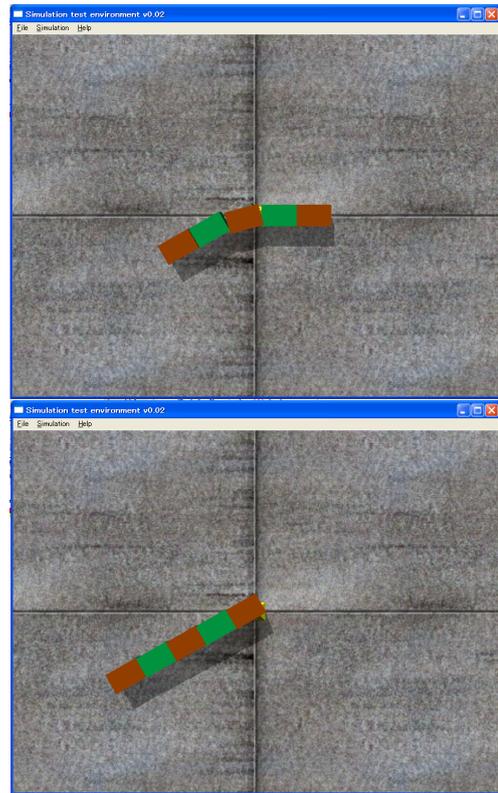


図 5.2 進行方向の変化

## 5.2 実機実験

### 5.2.1 移動速度の測定

5.1.1 節と同様のパラメータを使用し, 実機の直線移動時の移動速度を測定した. その結果を図 5.3 に示す.

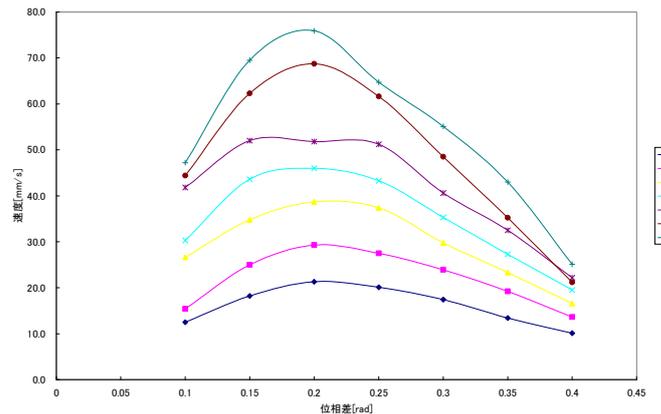


図 5.3 移動速度の変化

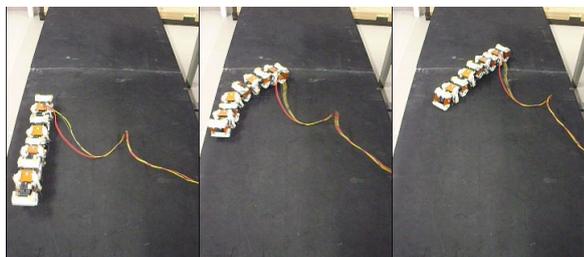
シミュレーション結果に比べわずかに速度は落ちるが, ほぼシミュレーション通りである. しかし, 振幅が大きいほど移動の安定性が欠けることがわかった. 地面との接触点が少なくなるためであると考えられる. そこで, 実機実験においては振幅が 25[mm], 位相差は 0.25[rad]とした. そのパラメータの場合, 約 3 秒で 1 ユニット分

## イモムシ型レスキューロボットの進行方向制御

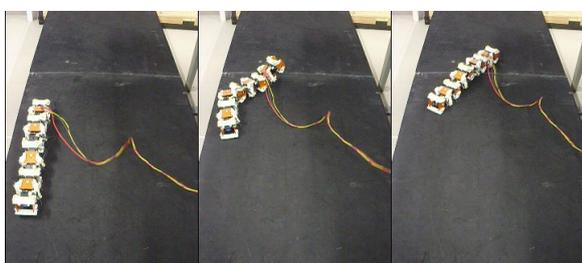
の距離を移動することが可能である。

### 5.2.2 実機による進行方向制御の検証

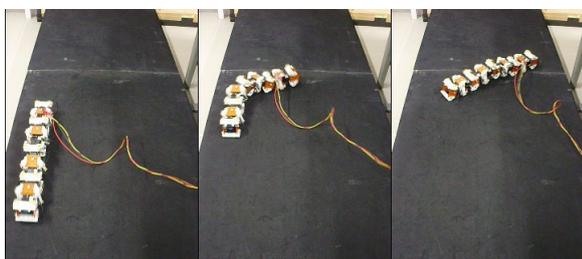
実機による進行方向制御の検証は進行方向を  $30^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $60^\circ$  の3種類の進路変更の検証, 進路変更が可能な最大角度の検証の計4種類実験することとした。実験結果を図5.4に示す。



30° 進路変更



45° 進路変更



60° 進路変更

図 5.4 3種類の進路変更

図5.4の通り,  $30^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $60^\circ$  の進路変更は可能であることがわかった。しかしながら,  $60^\circ$  進路を変更する時は動作が安定しておらず, それ以上の角度での進路変更は不可である。 $60^\circ$  以上の進路変更をする時は2段階で進路を変更するという方式をとることを提案する。たとえば,  $90^\circ$  の進路変更をする場合, まず,  $45^\circ$  で進路変更し, 再び  $45^\circ$  で進路変更するという手順を踏めば  $90^\circ$  の進路変更も可能である。

## 6. 終わりに

本研究では, イモムシ型レスキューロボットの活動範囲拡大の可能性を探るために直線移動から進行方向を変えることが可能かどうか視覚的にロボットの動きが確認できる3次元動力学シミュレーションソフト ODE(Open

Dynamics Engine)を用い, その有効性を確認した。

従来のイモムシ型レスキューロボット Rebo は直線運動, 横移動, 旋回移動とそれぞれ単独に行っていた。旋回移動においては, 一度, 体幹を丸め姿勢にしてから再び直線姿勢に戻して行うため方向転換角の制御は困難であった。そこで, 本実験では, 観測した直線移動速度から, 各ユニットが目標転換地点を通過するタイミングを推定し, ヨー軸方向に目標角度を与える事によって進行方向を変更した。このことから進行方向を自由に選択でき, より狭小空間での活動が可能となり, 救助活動の幅を広げる可能性を示した。

今後の課題として, 制御回路をロボットに内蔵し, 自律型もしくは無線による指示が可能なロボットの検討, 提案などがあげられる。

## 謝辞

本研究は愛知工業大学工学部機械工学科知能機械工学専攻環境適応ロボット研究室において行った。愛知工業大学工学部機械工学科知能機械工学専攻加藤厚生教授には様々な面においてご指導, ご助言を賜った。また, 独立行政法人理化学研究所バイオメックコントロールセンター運動系システム制御理論研究チーム所属平野慎也氏には研究面で多大なサポート, 指針を頂いた。

研究を行うに当たり, 本研究室の村松秀祐君をはじめとする学部生の皆様, 大学院生の皆様に多大なご助力を頂いた。精神面, 経済面, 健康面において家族に多大な支援を頂いた。

この場を借りて感謝の辞を表す。

(受理 平成21年3月19日)