

# 四足歩行ロボットによる不整地運搬補助に関する基礎検討

伊藤 壮生, 浦池 隆文, 今岡 広一, 林 峻輔

## Basic Study for Transportation Assistance on Rough Terrain with a Quadruped Robot

Soki ITO, Takafumi URAIKE, Koichi IMAOKA, Shunsuke HAYASHI

キーワード：運搬作業，不整地，四足歩行，協調

### 1. はじめに

林業現場や工事現場などに見られる急傾斜や起伏の激しい不整地では、車輪やクローラといった一般的な移動機構の使用が困難であり、運搬作業が作業者の負担となっている。そのような環境では不整地での踏破性に優れる四足歩行ロボットの活用が作業の省力化に有効と考えられる。しかし、ロボットによる不整地環境での運搬作業の自動化には様々な課題が存在する。

ロボットを用いて運搬作業を完全自動化するためには自己位置認識が必須であるが、不整地環境では建物や樹木によりGNSSの電波障害が発生し、さらに、周辺環境が刻々と変化することなどから画像処理等による自己位置認識技術の適用も困難である。したがって、不整地環境での運搬作業をロボットで完全に自動化することは現実的ではない。このような場合、図1のような人とロボットを協調させた運搬補助システムによる軽労化が有効と考えられる。人とロボットを協調させることで、台車やリヤカーなどと同様に作業現場で容易に活用することができ、ロボット単体では困難な作業への適用が可能となる。

本研究では、図1のような人とロボットの協調による運搬補助システムの実現を目指し、作業者が力を加えることで歩行する四足歩行ロボットを開発し、基本動作の確認を行った。

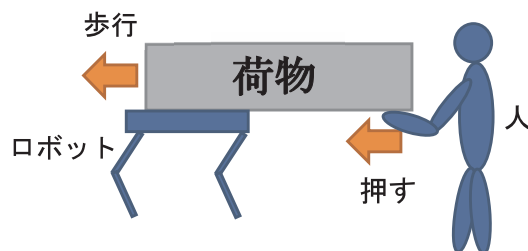


図1 運搬補助システムによる作業イメージ

事業名：職員研究奨励事業

課題名：脚式移動機構の活用による不整地向け運搬補助システムの開発に関する基礎的研究

以下、開発したロボットの概要、実装した歩行アルゴリズム、動作確認試験により得られた知見について報告する。

### 2. 開発したロボット

図2に、開発したロボットのハードウェア構成を示す。全長25cm、全幅20cm、全高20cm、重量3.1kgの大きさで、脚部は3個の関節を有し、合計12個のサーボモータ(DYNAMIXEL XM430-W210-R)で駆動される。モータの制御にはシングルボードコンピュータ(UP board 4GB RAM)を用いている。また、ロボットの姿勢を計算・推定するために9軸センサ(InvenSense mpu9250)を搭載した。

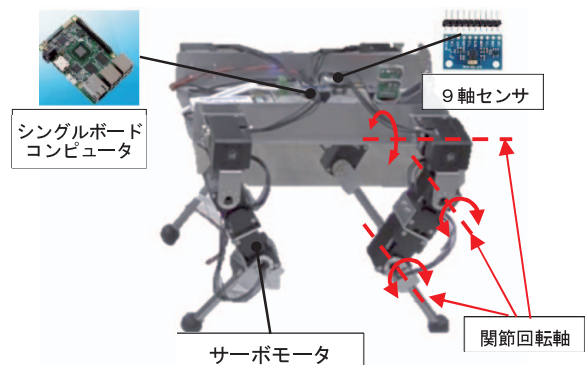


図2 ハードウェアの構成

### 3. 歩行制御

図3にロボットの歩行制御系の概略図を示す。歩行制御では足先軌道制御、逆運動学計算、姿勢推定などの処理を行う。足先軌道制御では脚の状態遷移に関する処理と、状態に応じて足先軌道を生成し、足先位置を計算する処理を行う。また、逆運動学計算により、足先位置から対応する関節角度を求め、9軸センサを使用した姿勢の推定を行い、進行方向の補正などを行う。

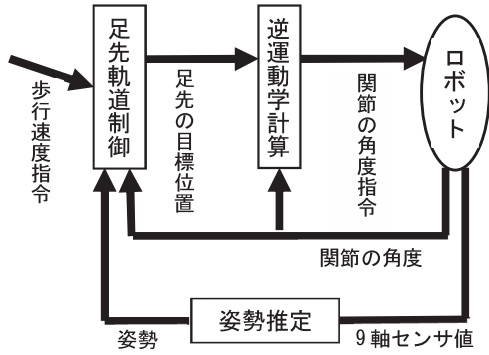


図3 歩行制御系の概略図

### 3.1 脚の状態遷移

歩行中、脚は地面に接触している支持脚期と地面から離れて振出されている遊脚期の2つの状態に分けられ、脚の状態に応じて適切な制御を行う必要がある。本研究では、この2つの状態を切り替えるために以下のようなパターン発生器を用いた<sup>1,2)</sup>。図4にパターン発生器の概略図を示す。パターン発生器は周期的に変化する振動子によって構成される。基準となる振動子の状態を $\phi$ とすると、 $\phi$ は式(1)に示す周期関数で表される。ただし $t$ は現在の時間、 $t_0$ は現在のサイクルを開始した時間 ( $\phi=1$ となったとき  $t_0=t$  とし、 $\phi$ を0にリセットする)、 $T$ は歩行周期を表す。

$$\phi = \frac{t-t_0}{T} \quad \text{ただし、} 0 \leq \phi < 1 \quad (1)$$

これを用いて各脚の状態 $\phi_i$  ( $i = \{FR(\text{右前脚}), FL(\text{左前脚}), BR(\text{右後脚}), BL(\text{左後脚})\}$ 。以下、添え字の $i$ は脚の位置を表すものとする)は、基準となる振動子の状態と各脚の振動子の状態との位相差 $\phi_{i,offset}$ を用いて式(2)のように計算する。

$$\phi_i = \begin{cases} \phi + \phi_{i,offset} & (\phi + \phi_{i,offset} < 1) \\ \phi + \phi_{i,offset} - 1 & (\phi + \phi_{i,offset} \geq 1) \end{cases} \quad (2)$$

一歩行周期における支持脚期の割合であるデューティ比を $\beta_i$ とすると $\phi_i < \beta_i$ のときに支持脚、 $\phi_i \geq \beta_i$ のときに遊脚となる。本研究では $\phi_{FR,offset}$ 、 $\phi_{BL,offset}$ を0とし、 $\phi_{FL,offset}$ 、 $\phi_{BR,offset}$ を0.5とすることで対角の脚を交互に動作させる「トロット歩容」を行った。

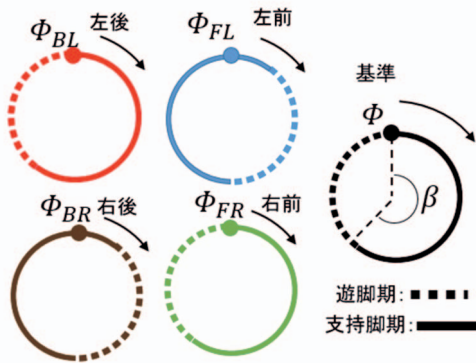


図4 パターン発生器を用いた脚の状態遷移

### 3.2 足先軌道の生成

支持脚、遊脚の状態に応じて足先軌道を計算し、足先位置( $p_i = [p_x, p_y, p_z]^T$ )を求める。図5にロボットの足先位置と初期姿勢を示す。座標系 $B$ はロボットの胴体を基準とした座標系であり、原点は胴体の中心、 $X$ 軸はロボットの正面を向くようにとる。座標系 $I$ はロボットの初期姿勢を基準とした慣性座標系である。特に記載のない限りは座標系 $B$ を基準とするものとする。 $p_i$ は座標系 $B$ からみた足先への位置ベクトル、 $p_{ini,i}$ は $p_i$ の初期位置である。また、胴体の地面からの高さを $h$ 、歩行速度指令は $V_d$ 、ヨー方向角速度指令は $\omega_d$ であり、胴体高さは一定とみなす。

まず遊脚期の足先軌道について、支持脚期から遊脚期に切り替わったタイミングで脚の踏み出し位置 $p_{d,i}$ を式(3)により計算する。

$$p_{d,i} = p_{ini,i} + \frac{\beta_i}{2} T V_d \quad (3)$$

着地時の衝撃を小さくするため、遊脚軌道は支持脚期と切り替わる瞬間の足先の地面との相対速度が0となるように設計する必要がある。ここでは、三角関数を用いた遊脚軌道を図6のように設計した。遊脚軌道の $XY$ 成分は以下の式により計算した。

$$\phi_{sw} = \frac{\phi_i - \beta_i}{1 - \beta_i} \quad (4)$$

$$T_{sw} = T(1 - \beta_i) \quad (5)$$

$$A = \frac{p_{d,i} + V_d T_{sw} - p_{o,i}}{2} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (p_{o,i} + A(1 - \cos \pi \phi_{sw}) - V_d T_{sw} \phi_{sw}) \quad (7)$$

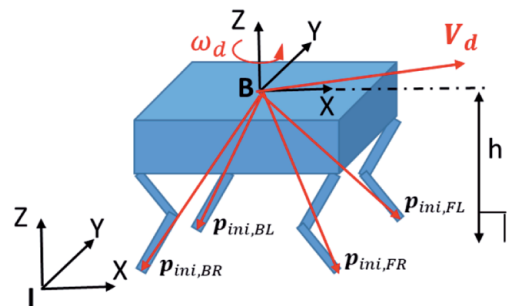


図5 ロボットの足先位置と初期姿勢

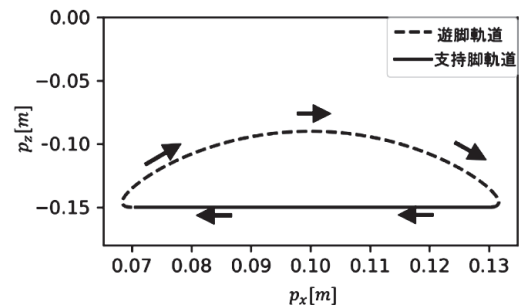


図6 脚軌道の例

ここで、 $p_{0,i}$  は支持脚期から遊脚期へ切り替わる瞬間の足先位置であり、サーボモータから得られる関節角度を順運動学にしたがって計算することで得られる。式(7)右辺の2行3列の行列は3次元ベクトルから2次元ベクトルへの変換に使用している。遊脚軌道のZ成分  $p_z$  を式(8)に示す。

$$p_z = \frac{\Delta h}{2}(1 - \cos 2\pi\phi_{sw}) - h \quad (8)$$

$\Delta h$  は足の持ち上げ高さである。また、幾何学的な位置関係から支持脚期の足先位置  $p_i^k$  は式(9)のように計算した。

$$p_i^{k+1} = R_z(\omega_d \Delta t)(p_i^k - V_d \Delta t) \quad (9)$$

ただし、添え字の  $k$  は離散時間、 $R_z(\cdot)$  はZ軸まわりの回転行列、 $\Delta t$  は制御周期を表す。

以上の手順により算出される目標の足先位置から対応する関節角度を逆運動学により計算し、ロボットのサーボモータへ送信する。本研究では順運動学・逆運動学の計算にはオープンソースのライブラリである KDL を使用した。

### 3.3 進行方向の補正

歩行ロボットは足の滑りなどにより、進行方向と目標方向にズレが生じるため、9軸センサを使用して進行方向の補正を行う。まず、9軸センサの測定値からカルマンフィルタを用いて、座標系  $I$  を基準とした姿勢を表すクォータニオン ( $\mathbf{Z} = [z_w, z_x, z_y, z_z]^T$ ) の推定値を得る。9軸センサからのデータ取得とカルマンフィルタの処理にはオープンソースのライブラリである RTIMULib2 を使用した。座標系  $I$  のX軸方向とロボットの正面方向との間の角度である方位角  $\theta$  は式(10)により求める。

$$\theta = \arctan\left(\frac{2(z_w z_z + z_x z_y)}{1 - 2(z_y^2 + z_z^2)}\right) \quad (10)$$

目標のヨー方向角速度  $\omega_{cmd}$  を積分することで得られる目標の方位角  $\theta_{ref}$  を用いて、(9)式の  $\omega_d$  を定数  $K_\theta$  を用いて以下のように計算する。

$$\omega_d = K_\theta(\theta_{ref} - \theta) \quad (11)$$

方位角を強制的に動かしたところ、上記の方法によりロボットが旋回し、進行方向が補正されることを確認した(図7)。

本研究で使用した歩行パラメータを表1にまとめる。

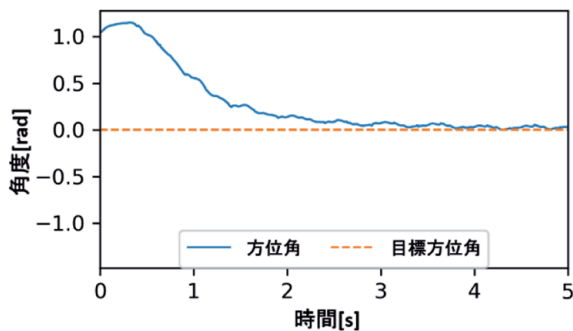


図7 進行方向の補正

表1 歩行制御パラメータ

項目	値
$T$	0.5[s]
$\phi_{FR,offset}$ $\phi_{BL,offset}$	0
$\phi_{FL,offset}$ $\phi_{BR,offset}$	0.5
$B$	0.6
$h$	0.15[m]
$\Delta h$	0.03[m]
$\Delta t$	3.3[ms]
$K_\theta$	2

## 4. 歩行動作試験

上記の歩行制御プログラムの実装は、C++を用いて行った。シミュレーションを活用して繰り返し検証を行うことで、プログラム開発の効率化を図った。図8に歩行動作のシミュレーションの様子を示す。シミュレーションはオープンソースのシミュレータである Gazebo を使用して行った。図9に実機による歩行動作試験の様子を示す。実機での歩行動作試験の結果、ユーザが与えた歩行速度指令に応じてロボットが前後左右、旋回移動が可能であること、また、最大で20 cm/s 程度の速度で歩行可能であることを確認した。

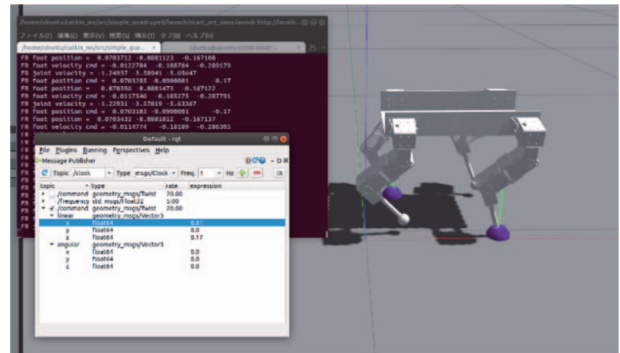


図8 Gazebo によるシミュレーションの様子

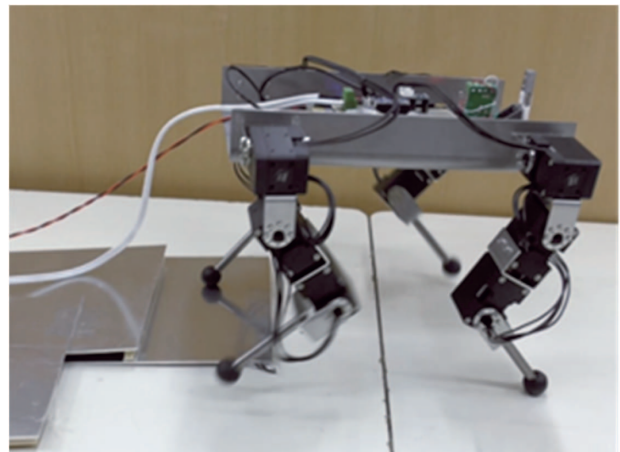


図9 実機による歩行動作試験の様子

## 5. 力の計測値を用いた協調動作

### 5.1 作業者の加える力による自動歩行

簡便な操作による人との協調作業を実現するため、作業者がロボットに加える力に応じて歩行する四足歩行システムの開発を行った。なお、本研究では基礎検討として、X軸方向のみについて力の計測値から歩行速度指令を生成し、図3のロボット制御系へ入力することでロボットの歩行制御を行った。ロボットに加わる力はロボット後部に取り付けた一軸のロードセルで測定し、マイコン（Arduino Nano）を通して取得した（図10）。力の測定値  $f$  から歩行速度指令の X 成分である  $V_{d,x}$  を、比例定数  $K_f$  を用いて次式で求めた。なお、 $K_f$  は  $0.02[m/s \cdot N]$  とした。

$$V_{d,x} = K_f f \quad (12)$$

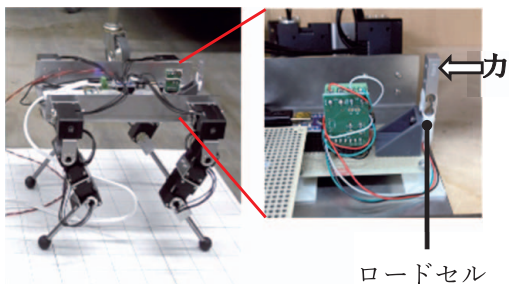


図10 ロードセルの取り付け位置

### 5.2 動作試験

ロボットに取り付けたロードセルに手で力を加えることにより歩行動作の確認を行った。図11に実験の様子、図12にロードセルの計測値を示す。実験の結果、加えた力の大きさに比例して歩行速度が変化することを確認した。しかし、歩行に伴う本体の揺動などにより、ロボットに加える力の大きさを一定に保つことは困難であった。式(9)と式(12)より、力の値の急激な変化は支持脚の動作へ直接影響を与えるため、さらに揺動が激しくなることが懸念される。

以上の検証により、運搬補助システムとして安全に動作させるためには、今後ロボット本体の揺動を低減するための姿勢制御方法や、力の測定値からの歩行速度の計算方法などを検討する必要があることがわかった。

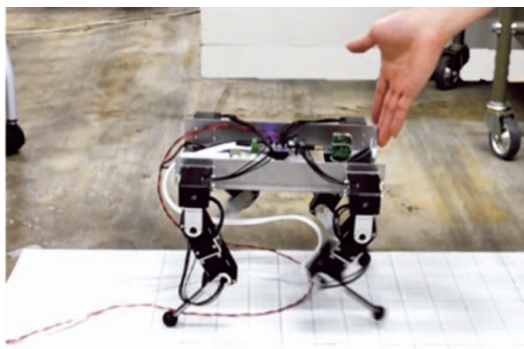


図11 加えた力に応じて歩行する様子

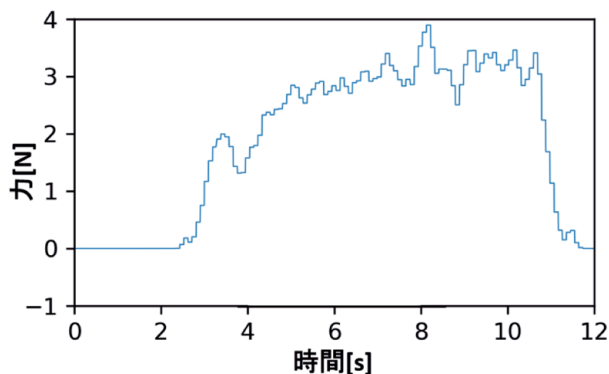


図12 歩行中のロードセルの測定値

## まとめ

四足歩行ロボットについてシミュレーションによるアルゴリズムの検証と実機による動作試験を行い、前後左右や、旋回などの歩行が可能であることを確認した。人との協調による運搬作業を実現するため、加えた力に応じて歩行するシステムの検討を行い、ロードセルによる力の計測値から胴体の目標速度を生成し歩行制御が可能であることを確認した。

今後は歩行中の揺動の低減対策や、傾斜地での歩行を考慮したシステムの改良などの実用化に向けた検討を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 辻田勝吉, 重弘祐二, 増田達也: 四脚歩行ロボットの最適歩行パターンに関する一考察, 第48回自動制御連合講演会, DOI: 10.11511/jacc.48.0.159.0, (2005)
- 2) Bledt G., Patrick M., Sam I., et. al: Contact Model Fusion for Event-Based Locomotion in Unstructured Terrains, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.21-25, (2018)