

3 脚車輪型移動ロボット試作機の開発

Development of Breadboard Model for Locomotion of 3-Leg Wheeled Type Robot

曽根原 光 治	技術開発本部総合開発センター機械システム開発部
山 本 忠 幸	技術開発本部総合開発センター機械システム開発部
田 中 宏 一	技術開発本部総合開発センター機械システム開発部
小 林 研 吾	技術開発本部総合開発センター機械システム開発部 課長
村 上 弘 記	技術開発本部総合開発センター機械システム開発部 課長

オフィス、工場などで働く人間が共存する環境を移動するためのロボットとして新しい機構を考案した。本機構は3本のスライド脚と二つの股関節、四つの足首関節および4組の車輪の計13自由度から成る。脚を前後に開くことで静的安定姿勢を確保し、また平坦地を車輪走行することで効率良く移動し、階段などを2足歩行形態で踏破する。考案した機構の成立性を実証するため試作機を開発し、基本性能を確認した。本稿では考案したロボットのコンセプト・機構、試作機を用いた走行・歩行試験結果および今後の展望について述べる。

A leg-wheeled type mobile robot is being developed to move around indoors efficiently. This mechanism has 13 degrees of freedom, 3 sliding legs, 2 hip joints, 4 ankle joints and 2 wheels for each ankle, but requires only 9 actuators. This robot can move on its wheels when standing with its legs apart to maintain balance. In addition, this robot can go up and down the stairs using its legs like a human. This paper describes the concept and mechanism of this 3-leg wheeled type robot, the modes of locomotion by wheels and legs, experimental system configuration, the results of experiments and prospects for the future.

1. 緒 言

今後、市場における生活、医療福祉、公共分野などへのサービスロボットの需要増加が見込まれるなか、人間との共存空間における移動形態として2足歩行ロボットの研究開発が盛んに進められている。この方式は階段などの障害物に対する踏破性能が高い反面、転倒時の安全性やエネルギー効率が高いといった問題もある。また車輪を利用した高効率な走行性能と脚を利用した高い踏破性能を併せもつ脚車輪型^{(1)~(3)}の開発も数多く進められている。しかし、脚車輪型の多くは常時、静的安定状態をとる機構を採用しており、このため自由度数が多くなり、複雑な構成となってしまう問題がある⁽⁴⁾。この問題を解決するため車輪型倒立振子に上体構造をもたせた移動機構^{(4)~(6)}なども提案されている。

本研究ではオフィス、工場などの屋内空間を効率良く、かつ高速に移動することが可能なシステムの構築を目指し、静的安定を成立させる3本の脚と脚先端の車輪機構をもつ脚車輪型移動ロボットの開発を進めている⁽⁷⁾。本ロボットの特長は屋内空間の大部分を占める平坦地では静的安定姿

勢で車輪走行することで効率性と安全性をねらい、また車輪で走行困難な階段、段差、溝などでは2足歩行方式と同様な歩行形態をとることで、歩行時の高速化とコストへの影響が大きいアクチュエータ数の削減を図ったことである。

本稿では考案した3脚車輪型移動ロボットのコンセプトとそれを実現する機構について述べる。また機構の成立性を実証するための試験システムの構成と試作機を用いた歩行試験の結果について述べる。

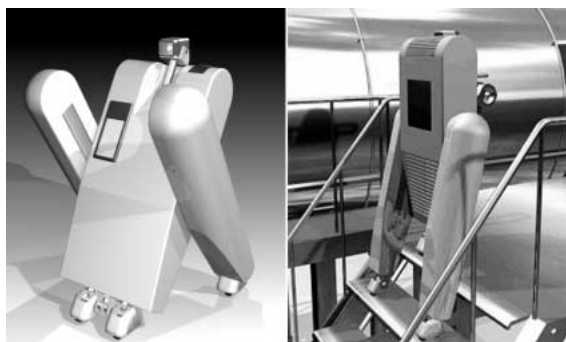
2. ロボットの移動コンセプトと機構

第1図にロボットの移動コンセプトを示す。中央胴体部に取り付けられた脚とその脚を基準に矢状面内で回転する左右の脚の3脚構造としている。第2図にロボットのモデルを示す。脚にはそれぞれ上下スライド自由度を設け、脚先端には中央脚に2、左右脚に各1の計4か所に足首関節と2列に並んだ車輪を配置している。

屋内空間は整備された環境であり、うねりなどが小さい平坦地であるとする。走行は第1図に示すように中央脚と左右脚を前後に開脚し、機構的に安定な状態で行うことができる。この機構は操舵機構をもたないが、接地する

(a) 走行モード

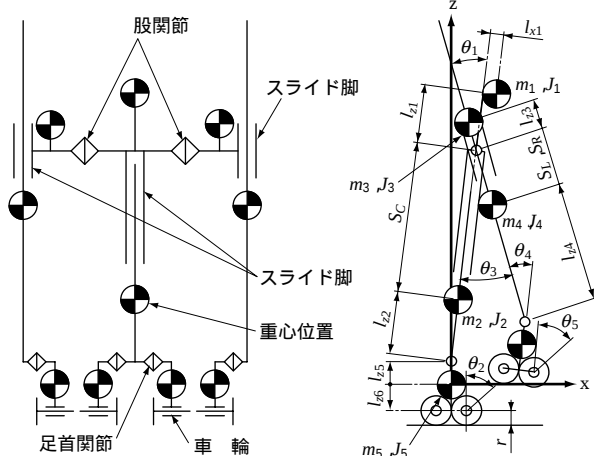
(b) 歩行モード



第 1 図 ロボットの移動コンセプト
Fig. 1 Concept of robot

(a) 自由度配置

(b) モデル



(注) $\theta_{1LR}, \theta_{4LR}$: 足首関節角度 (1: 中央脚 4: 左右脚)
 $\theta_{2LR}, \theta_{5LR}$: 車輪回転角度 (2: 中央脚 5: 左右脚)
 θ_{3LR} : 股関節角度
 S_C : 股関節 - 中央脚重心位置長さ
 S_L, S_R : 股関節 - 左右脚重心位置長さ
 $m_1 \sim 5$: 各部質量
 $J_1 \sim 5$: 重心回りの慣性モーメント
 $l_{x1}, l_{z1} \sim 6$: 各部長さ
 r : 車輪半径

第 2 図 ロボットのモデル化
Fig. 2 Modeling of robot

各車輪に回転速度差を設定することで旋回を行うことが可能である。

歩行については第 1 図に示すように左右脚を同軌道で動作させ、左右と中央の脚を交互に振り出すことで、矢状面内においては 2 足歩行と同等な形態をとることができる。また、遊脚中の立脚側は前後左右の 4 車輪を接地することで足裏平面を形成する。前頭面方向の重心は接地車輪間に納まるため、機構的な安定性を得ることができる。本ロボットは平坦地を走行し、段差、階段などに対しては歩行することを想定している。このため、歩行は障害物との位置合わせなどを走行動作中に行うことで、矢状面方向のみ

で十分と考え、前頭面方向の自由度を省略している。ら旋階段などの昇降時は歩行しながら曲がる動作が少なからず必要になる。しかし、歩行と車輪旋回動作を組み合わせることで踏破可能であると考え。

さらにアクチュエータ数の削減を図るため足首・車輪駆動機構として特殊な機構を考案した。第 3 図に足首・車輪駆動機構を模式的に示す。本機構には 2 本の車輪軸と駆動軸の計 3 本の軸があり、モータトルクはベベルギヤを介して、駆動軸が回転するとともにベルトを介して両車輪軸も回転する構造になっている。駆動軸端のブレーキが作動すると駆動軸は足部全体と機械的に結合され、車輪がロックされる。第 4 図に足首と車輪の動きを示す。ブレーキが作動すると第 4 図 - (a) に示すように車輪接地部が足底と同じ状態となり、モータトルクは上体を起こし上げる動きに作用する。一方、ブレーキ非作動時、モータトルクは第 4 図 - (b) に示すように上体を起こし上げる動きと同時に、その反力は車輪が上体重心の下側に入り込む動きにも作用し、車輪型倒立振子とほぼ等価な系になる。第 4 図 - (b) の運動方程式を次の (1) 式に示す。

$$M \cdot \ddot{x} - F_r \cdot \dot{x} - M_o = D \cdot u = T$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 l^2 + J_1 + n^2 J_m & m_1 r l \cos \theta_1 - n^2 J_m \\ m_1 r l \cos \theta_1 - n^2 J_m & (m_1 + m_2) r^2 + J_2 + n^2 J_m \end{bmatrix}$$

$$M_o = \begin{bmatrix} m_1 g l \sin \theta_1 \\ m_1 r l \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$F_r = \begin{bmatrix} -2 f_{r1} & 2 f_{r2} \\ 2 f_{r1} & -2 f_{r2} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} -2 n \cdot k_t \\ 2 n \cdot k_t \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

r : 車輪半径

J_m : モータロータのイナーシャ

n : ギヤ比

k_t : モータトルク定数

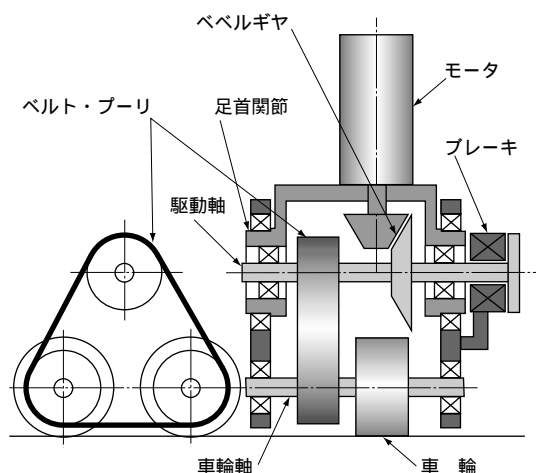
f_{r1} : 足首関節駆動粘性係数

f_{r2} : 車輪駆動粘性係数

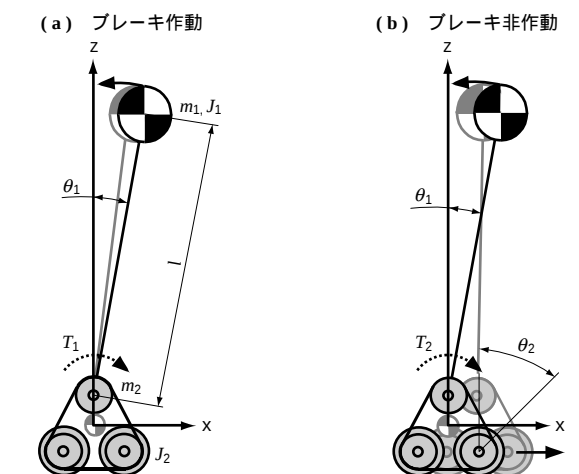
g : 重力加速度

u : モータ入力電流

(1) 式から 1 入力で 2 自由度が負荷バランスによって駆動されることが分かる。またブレーキ作動 / 非作動で上体起こし上げ動作を比較すると、ブレーキ非作動時には車輪が動くことでトルク T が低減されることも分かる。一方、歩行状態で車輪移動する場合、移動量のある程度抑制する必要もあることから、 θ_1, θ_2 の 2 軸を 1 アクチュエータで制御する必要がある、制御上の困難が予想される。しかし



第 3 図 足首・車輪駆動機構
Fig. 3 Drive mechanism for ankle wheels



(注) θ_1 : 足首関節角度
 θ_2 : 車輪回転角度
 m_1 : 上体質量
 m_2 : 車輪部質量
 J_1 : 上体の重心回りの慣性モーメント
 J_2 : 回転部 (車輪, 軸など) の駆動軸回りの慣性モーメント
 l : 上体重心 - 足首関節長さ

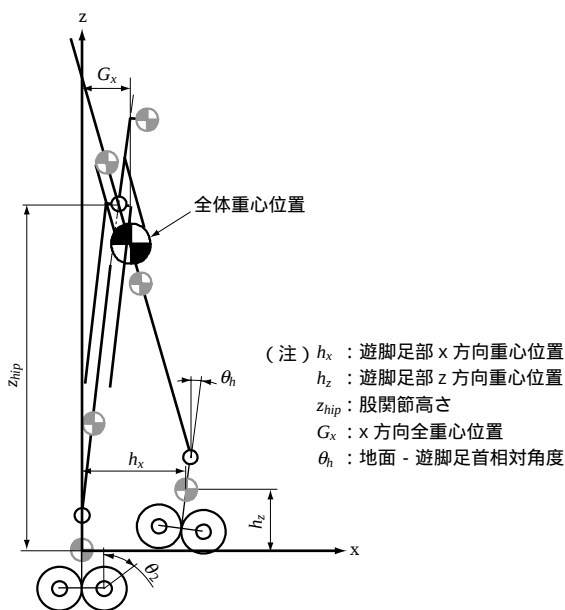
→ : 動き
 : 駆動トルク T

第 4 図 足首と車輪の動き
Fig. 4 Motion of ankle and wheels

力学的な優位性から歩行時には立脚側をブレーキ非作動とし、遊脚側のみブレーキを作動させる方式とした。

3. 歩行制御系の構成

以上からロボットは 9 入力 13 出力システムとなる。ロボットは機軸中心に左右対称形であることから第 5 図に示す歩行軌道パラメータのように平面モデルと見なし、5 入力 (中央足首・車輪, 左右足首・車輪, 股関節回転, 中央スライド, 左右スライド), 7 自由度 (中央脚足首関節角度 θ_1 , 中央脚車輪回転角度 θ_2 , 股関節角度 θ_3 , 左右脚足首関節角度 θ_4 ,



第 5 図 歩行軌道パラメータ
Fig. 5 Parameters of walking trajectory

左右脚車輪回転角度 θ_5 , 股関節 - 中央脚重心位置長さ S_C , 股関節 - 左右脚重心位置長さ S_{LR}) システムとしてモデル化した。歩行時のブレーキ設定を 2 章のようにすることで、さらに θ_5 を除いた 5 入力 6 自由度システムとしてモデル化し、ロボット全体の運動方程式としては (1) 式を拡張して次の (2) 式のように表現することができる。

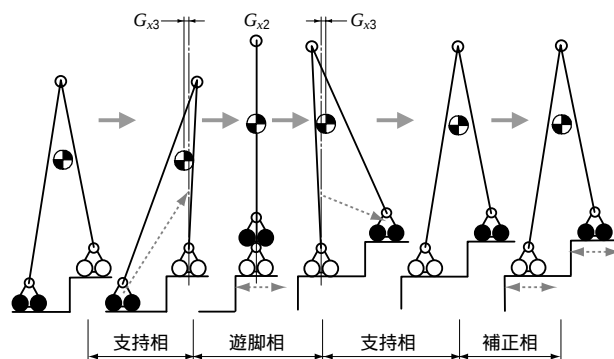
$$M(\theta_1, \theta_3, \theta_4, S_C, S_{LR})\ddot{x} - F_r \cdot \dot{x} - M_o(\theta_1, \theta_3, \theta_4, S_C, S_{LR}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \dot{S}_C, \dot{S}_{LR}) = D \cdot u$$

$$x = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ S_C \ S_{LR}]^T \in \mathcal{R}^{1 \times 6}$$

$$M, F_r, M_o \in \mathcal{R}^{6 \times 6}, \quad D \in \mathcal{R}^{5 \times 6}, \quad u \in \mathcal{R}^{1 \times 5}$$

..... (2)

歩行軌道生成については松本らの研究⁽⁴⁾を参考として、第 5 図に 5 軌道を任意に設定した。第 6 図に具体的な階段歩行軌道を示す。立脚側足首が車輪と力学干渉しているこ



第 6 図 階段歩行軌道
Fig. 6 Trajectory for climbing stairs

とから前半の両脚期間では遊脚中、最も安定状態となる足首軸直上の手前に重心を移動する (G_{x1})。この状態から遊脚開始し、重心をほぼ足首軸直上でいったん停止し (G_{x2})、着地時は立脚足首軸前方とする (G_{x3})。着地後は短期間で重心を前方に移動して安定姿勢を保つようにした。それぞれの期間における軌道を時間に関する 5 次多項式でスムーズにつなぐことで歩行軌道を計画した。また遊脚中は立脚足首制御反力で車輪が動くため、安定な姿勢を確保した後、車輪走行によって移動量補正を行う。

すべての設定重心位置 (G_{x1}, G_{x2}, G_{x3}) を立脚足首軸直上 ($= 0$) とすると遊脚直前、着地直後の姿勢はわずかな誤差でも不安定になる。また遊脚を後方から前方に振り出す慣性力によって、遊脚中に車輪が若干前方に走行する。この状態を回避するため $G_{x1} < 0, G_{x3} > 0$ の条件で設定重心位置を適当な値に設定することで遊脚直前 / 着地直後の姿勢は安定方向に移動し、かつ上体移動の慣性力に伴う車輪移動量を相殺できる。(2) 式の θ_1, θ_2 に関する運動方程式の右辺は反転した同入力であることから、これを变形すると車輪型倒立振子と同様の力学干渉条件を導出できる。この条件式を加えて逆運動学を解くことで遊脚中の車輪移動量を計算できる。実際に G_{x1}, G_{x3} は数 mm ずらすことで車輪移動量を 0 付近に設定できる。

このようにオフラインで計画した軌道に対して、各軸ごとに極配置法に基づき決定したゲインを用いて位置・速度フィードバック制御を行った。立脚足首車輪軸については足首軸の状態量のみをフィードバックした。またこのような運動制御ではサーボ系の遅れや摩擦など、非線形性による応答の遅れなどがシステムの安定性に大きく影響する。このため、比較的重心への影響が大きい股関節およびスライド脚についてはフィードバック項に加え、算出軌道と逆動力学モデルを基に計算した計算電流 u_d を加えた。次の (3) 式で立脚足首駆動電流 u_1 、股関節駆動電流 u_3 、計算電流 u_d の計算式を示す。遊脚足首は立脚足首と、スライド脚は股関節と同じ計算方法による。また添字 d は目標軌道を示す。

$$\begin{aligned} u_1 &= k_{v1}(\dot{\theta}_{1d} - \dot{\theta}_1) + k_{p1}(\theta_{1d} - \theta_1) \\ u_3 &= u_{3d} + k_{v3}(\dot{\theta}_{3d} - \dot{\theta}_3) + k_{p3}(\theta_{3d} - \theta_3) \\ &\quad + k_{i3} \int (\theta_{3d} - \theta_3) dt \\ u_d &= D^{-1}(M \cdot \ddot{x} - F_r \cdot \dot{x} - M_0) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

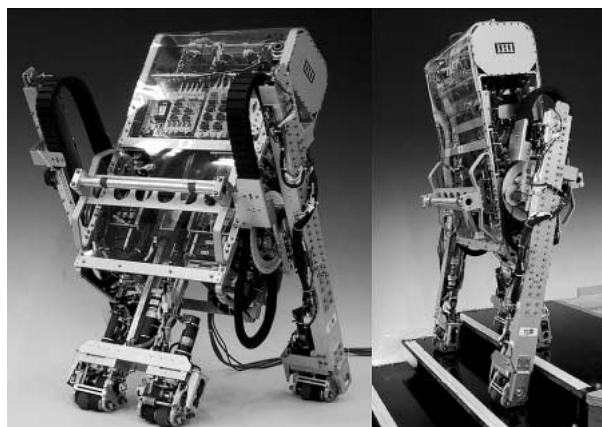
k_p : 位置 P ゲイン
 k_v : 速度 V ゲイン
 k_i : 位置 I ゲイン

4. 試作機およびシステム構成

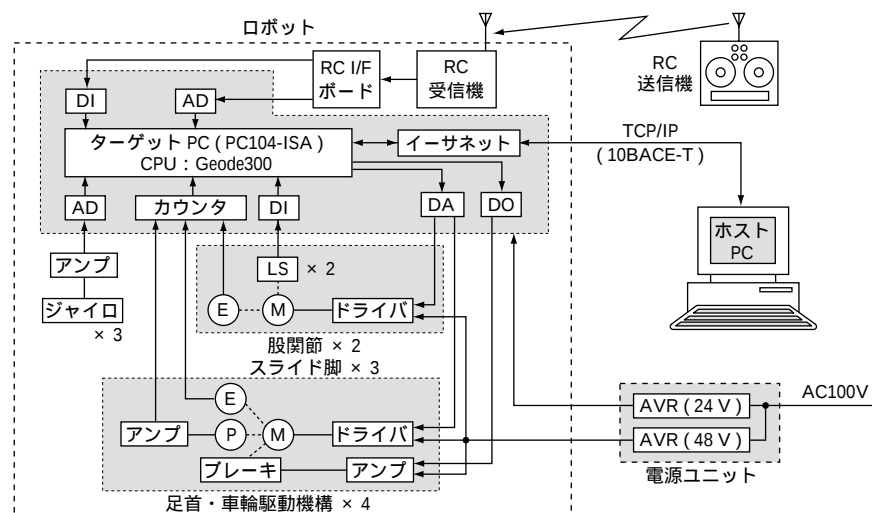
考案した機構を検証するためのロボットを試作した。試作機のサイズは実際の階段などの障害に対する踏破性を考慮して決定した。試作機の主な仕様を次に示す。第 7 図に試作機外観を示す。

サイズ (脚最短時)	750 (W) × 500 (D) × 1 050 (H) mm
車 輪	φ46 mm × 8 個
質 量	52.5 kg
自由度配置 (合計)	13 か所
脚スライド	3 "
股関節回転	2 "
足首関節回転	4 "
車輪回転	4 "
アクチュエータ	DC サーボモータ × 9 台
ブレーキ	電磁式ブレーキ × 4 台
可動範囲	
脚スライドストローク	295 mm
股関節回転角度	± 70 度
足首関節回転角度	± 45 度
電源 (外部供給)	
動力電源 (最大値)	48 V × 30 A
制御電源 (最大値)	24 V × 5 A

脚スライドの自由度は DC サーボモータ + ボールねじ、股関節の自由度は DC サーボモータ + ハーモニックスギヤで実現している。第 8 図にシステム構成を示す。基本システムとして、アメリカの Mathworks 社製 xPC target を利用した。xPC target は同社製の制御系設計支援ツール Matlab, Simulink, Stateflow などで作成した制御ロジック



第 7 図 試作機外観
Fig. 7 Overview



第 8 図 システム構成
Fig. 8 System configuration

クからシームレスにリアルタイム制御ソフトウェアに移行できるツールである。このため Host PC でシミュレーション時に開発した制御ブロックから自動生成されたソフトウェアを、ターゲット PC にダウンロードすることで走行・歩行などの試験を行うことができる。このシステムをベースにロボット本体用の組込型 PC として小型の PC104 システムを採用した。CPU には Geode300 を使用している。

xPC target では Host PC とターゲット PC (ロボット本体)間を TCP/IP で接続し、Host PC で作成したソフトウェアのターゲット PC へのダウンロード、サーボゲインなどの設定変更が可能である。またロボットの内部状態、センサ情報などを Host PC 上でモニタリングすることも可能である。試験用ハンディコントローラとして安価なラジコン用の送受信機を使用し、受信機で受けたパルス信号をインタフェース基板で変換し、ターゲット PC に取り込み、走行時マニュアル操作、自動操作トリガ信号として使用する。

センサは股関節およびスライド脚の 5 軸はエンコーダ、足首車輪部の 4 軸について車輪回転検出用エンコーダ、足首角度検出用ポテンショメータの値をターゲット PC に取り込み、(3) 式のようなソフトウェアサーボを構成している。

5. 歩行試験

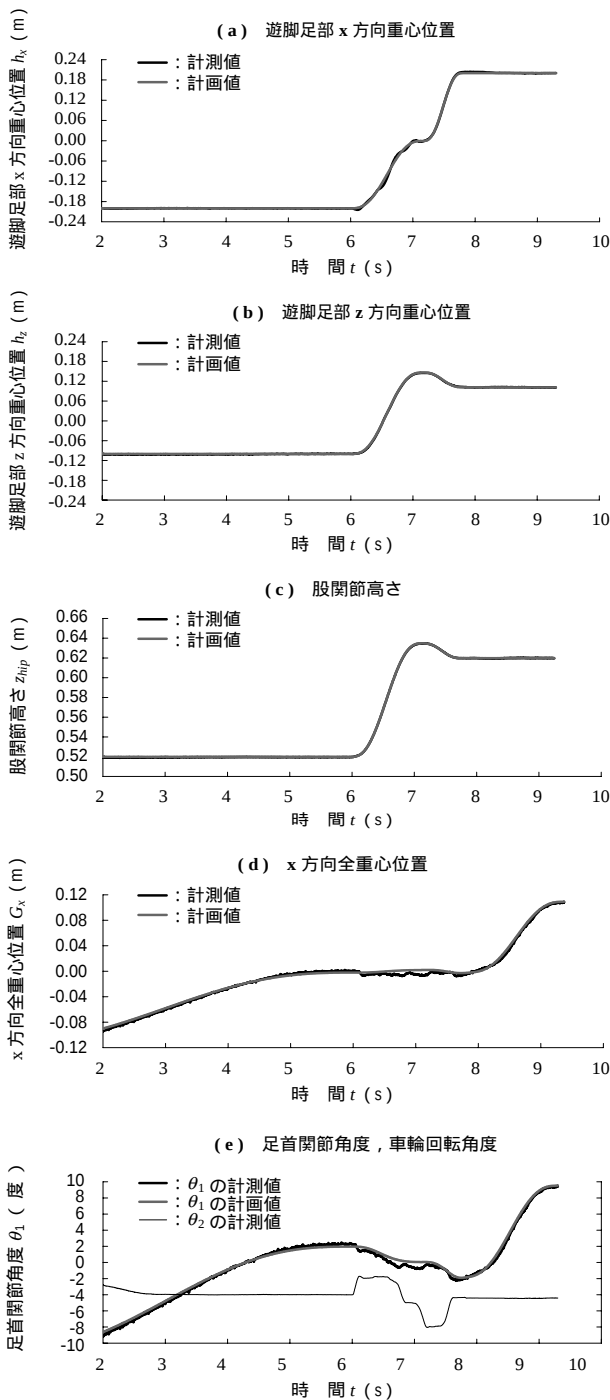
機構の成立性を検証するため、試作機を用いて歩行試験を行った。対象階段は踏面奥行き 230 mm、高さ 100 mm とした。歩行制御系に使用するロボットのモデルの各部質量や慣性モーメントなどの値は試作機の 3D-CAD データなどから設定した。しかし設定した値と実際の試作機との

間にはずれがあり、また実際にロボットが歩行動作を行う路面も緩やかな傾斜やうねりなどがあり、これらの影響から歩行がうまくいかないケースが発生した。このため実際には設定重心位置 (G_{x1} , G_{x2} , G_{x3}) を計画値よりずらして調整した。

第 9 図は第 6 図に示す 1 歩分の段差昇り (車輪移動量補正を除く) を中央脚が前の状態から始めたときの試験結果である。結果は第 5 図に示す歩行軌道 h_x , h_z , z_{hip} , G_x について、それぞれ計画値と計測値を示す。計測値は各関節、スライド長さのセンサ計測値とモデルに使用した値から算出した。また力学干渉している立脚側の足首関節角度 θ_1 と車輪回転角度 θ_2 について、 θ_1 は計画値と計測値を、 θ_2 は計測値を示す (第 9 図 - (e))。またこのときの階段歩行の様子を第 10 図に示す。

この軌道は歩行開始から 6 秒間で体重移動を行い、2 秒間遊脚して、遊脚着地後 1.5 秒間で初期姿勢に戻る軌道である。遊脚位置 h_x , h_z 、股関節高さ z_{hip} については問題なく追従している。全重心位置 G_x についても遊脚中 (6~8 s) に若干の誤差があるものの、ほぼ追従している。立脚側の足首関節角度 θ_1 と力学干渉している車輪回転角度 θ_2 については遊脚中に前後移動したが、最大 40 度 (移動距離換算: 16 mm) 程度であり、次の歩行動作を行ううえで特に問題とならない値である。

以上の結果から、同じ高さの階段 3 段で 4 歩の連続昇り動作を行った。立脚中の車輪移動量については各歩によるばらつきがあったが、第 6 図に示すように 1 歩ごとに車輪移動量補正を行うことで階段 3 段の連続昇り動作に成功した。



第 9 図 試験結果 (1 段昇り)
Fig. 9 Results of experiment (one step up)

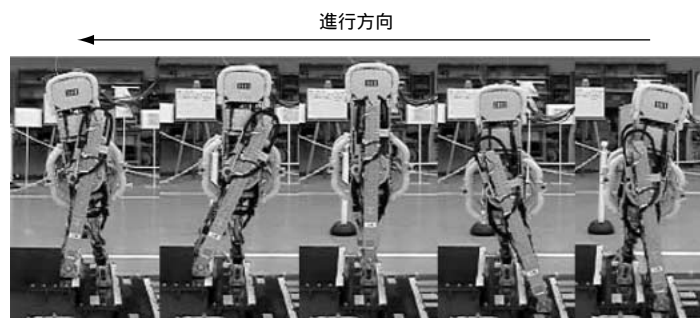
6. 結 言

考案した 3 脚車輪型移動ロボットのコンセプトとそれを実現する機構について述べた．新たに開発した試作機で走行・歩行試験を行い，考案した移動機構の成立性を確認した．

しかし歩行試験中に，わずかな着地タイミングのずれや路面の影響などで立脚車輪が予定より大きく移動し，階段を踏み外すケースも発生するなど，動作としての安定性にはまだ問題がある．今後はさらなる性能向上を目指し，外乱補償などを取り込んだ制御系の構築や足首トルクが極小となる軌道生成手法の開発を考えている．

今回の試作機は主に機構・運動制御に関する検証を目的としたため比較的単純なシステムを採用しているが，実際の環境でロボットに作業をさせるには数多くの機能を盛り込んだ複雑なシステムの構築が必要となる．ロボットの機能としては 通路・段差・階段といった環境情報を取得・処理する機能 得られた環境情報や作業内容を総合的に判断して自己の行動を計画する機能，などに加え 複数台のロボットがネットワークなどを介して協調して動作をするような機能，も必要となる．このため環境認識，行動計画，運動制御などの機能別の処理を分散化して行うことができ，外部との通信などによる情報交換を容易に行うようなロボット内部のシステムアーキテクチャの構築が不可欠である．さらに自立化するため，以上のようなシステムや電源などの搭載が必要であり，ロボット機構本体の小型・軽量化とともに実際に搭載するための小型・軽量・高機能なシステム・電源の開発が必要である．

また人間共存型システムでは人間に危害を加えないことが重要なポイントとなる．2 足歩行ロボットなどの実用化では不測の事態で電源が切れたりした場合，人間に倒れこんだりする危険性などが問題となっている．今回開発した



第 10 図 階段歩行の様子
Fig. 10 Walking motion on stairs

ロボットでは大半を占める平坦地での走行姿勢であれば、安定した姿勢保持が可能なため人間に危害を加える可能性は低い、階段などの歩行時には2足歩行と同様の問題がある。

以上のような実用化上の問題点についても検討を始めている。今後はこれらの問題点を総合的に検討し、実用的で安全なシステムの構築を目指していく。

参 考 文 献

- (1) 中野栄二, 木村 浩, 野中洋一: 脚車輪分離型ロボットの開発および胴体振動抑制 日本機械学会論文集 (C 編) 第 58 巻 551 号 1992 年 7 月 pp.2 138 - 2 143
- (2) 広瀬茂男, 竹内裕喜: ローラウォーカー・新しい脚 - 車輪ハイブリッド移動体の提案 日本機械学会誌 (C 編) 第 62 巻 599 号 1996 年 7 月 pp.242 - 248
- (3) 安達弘典, 小谷内範穂: 脚・車輪複合型移動機構

の開発 (第 1 報 機構の試作と基本動作) 第 3 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集 1998 年 5 月 pp.169 - 174

- (4) 松本 治, 梶田秀司, 西郷宗玄, 谷 和男: 静的歩容を規範とした 2 足歩行型脚車輪ロボットの階段昇降制御 日本ロボット学会誌 第 16 巻第 6 号 1998 年 9 月 pp.868 - 875
- (5) 松本 治, 梶田秀司, 西郷宗玄, 小森谷清, 谷 和男: 自立型脚車輪 2 足システムの開発 (第 1 報) 機構と移動形態 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 2001 年 9 月 pp.399 - 400
- (6) 山藤和男, 越山 篤: 可変構造平行二車輪車の姿勢および走行制御 日本機械学会論文集 (C 編) 第 56 巻 527 号 1990 年 7 月 pp.1 818 - 1 825
- (7) 田中宏一, 曾根原光治, 小林研吾, 安住一郎, 小川俊昭: 3 脚車輪型ロボットの開発 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 2003 年 9 月