

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560246  
 研究課題名（和文） 多重軸駆動機構を用いた脚協調制御に基づく歩行いすの研究  
 研究課題名（英文） Study on a walking chair driven by cooperative control of legs using torque transmission mechanism of multi-layered axes.  
 研究代表者  
 岡田 徳次（OKADA TOKUJI）  
 新潟大学・自然科学系・教授  
 研究者番号：60194362

研究成果の概要：平地に限らず、斜地、凸凹や起伏の多い不整地面における移動、あるいは段差、等の昇降を可能にする装置として、車いすに代わる斬新な脚型乗り物を提案し、電動車いす以上に高いモビリティをもつ「電動歩行いす」に作り上げるために必要な運動機構と制御技術を開発した。また、特別な電子装置や機械要素の着脱を不要にする制御プログラムによって1台の装置を車輪型にも脚型にも自由に切換え可能にする知的制御アルゴリズムを構築し、一方から他方への移動方式を安定に切換えることの実証に成功した。

## 交付額

（金額単位：丸）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	420,000	3,920,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知能機械システム

キーワード： 移動ロボット、歩行機械、自律歩行、操舵制御、制御アルゴリズム、ペイロード、操縦桿、インターフェイス

## 1. 研究開始当初の背景

脚型、車輪型、のいずれかに限定した移動はこれまで多種多様な方式によって実現してきた。昆虫の動きや形を真似る装置の大半は脚型の移動である。これに対し、曲げや伸縮用の関節を使わず、単一軸の周り

に丸棒を回転させる装置の大半は車輪型の移動である。車社会に欠かせない自動車は車輪型移動の典型である。車輪型を基本にしたバリアフリーな移動手段もある。例えば、東工大の田口らによる爪つき車輪、広瀬らによる複数の車輪に案内されるクロー

ラ車輪(ヘリオス) 関節構造の脚先に畳み込み自在に取付ける小さな車輪の内側/外側への倒し操作による脚屈伸車輪(ローラウォーカー) クレーテ大(ギリシャ)の脚伸縮車輪(キドナス)、東北大の逆V型リンクの屈曲による脚車輪(チャーリ) 他がある。

しかし、路面を傷めることなく、また、機械要素、等を付け替えることなく制御プログラムの選択のみで脚型本来の移動と車輪型本来の移動のいずれの形態にも切換えられる装置は、国の内外を調べて殆ど見当たらなかった。装置の構造や制御が複雑になる、等が技術の開発を困難にしてきた理由と考えられる。

## 2. 研究の目的

互いに逆方向に伸びる腕の先端に1つの膝関節を有する股関節を四隅に備え、腰掛けて移動できる1人乗り用いすの機構と制御を明らかにする。実際に、股関節軸と同心状に2つの回転駆動力を伝達し、その1つで逆向きに伸びる2つの腕を回転させ、他の一つで両腕先の膝関節周りの脚を揺動させる。使用するアクチュエータ数を低減する目的で2つの脚は互いに逆方向に1つのアクチュエータで揺動可能に設計する。

そのため、股関節軸上のスプロケットと膝関節に軸支されて脚を駆動するスプロケットをチェーンで結合し、一方を内側に、他方を外側に噛みあわせて脚の一方を同方向に、他方を逆方向に回す。装置本体はベアリングを介して4隅の股関節の最外周を支持する。

また、股関節を中心とする膝関節の回転半径より大きな半径の丸棒を腕に同心状に固定してその外側を車輪とする。脚姿勢制御装置は、脚を概略地面側に向けて立脚相を生成させる脚型用プログラムと、概略天井側に向けて遊脚相として待機させる車輪

型用プログラム)と、両者をスムーズにつなげるプログラム、の3種を予め記憶し、これらを必要に応じて選択可能な状態にしておく。そして、特別に手を加えることなくユーザが装置に乗車したまま実行プログラムをソフト的に選択するだけで脚型歩行、あるいは車輪型転動のいずれの移動型式にも自在に切換え可能にする。さらに、斜面や前方に障害物を有する場合の車輪型移動において、脚を常時高い位置に置くことで脚と障害物との衝突を避け、車軸の回転力に応じた斜面の乗り上げや障害物の乗り越えを可能にする。

## 3. 研究の方法

### (1) モボットの詳細設計

動力伝達機構として同一軸上に筒状の軸を3重に配置する股関節を四隅に備える4脚歩行モボットを詳細に設計し、精密機械加工業者に特別に発注して製作する。

### (2) 脚姿勢制御パターンの最適化

これまでに見出した股関節の回転に同期させて脚の着地方向をソの字、八の字、リof字、に定める関数を見なおし、股関節の回転に同期してモボット胴体を一定速度で移動させる関数を導出し、これらによる歩行が作り出す特長を明らかにし、平地、上り坂、下り坂、軟弱路、階段昇降、あるいは、直進、操舵、その場旋回、の歩行に適する関数を吟味する。

### (3) 歩行速度の一定制御

脚姿勢制御パターンに基づく制御量を演算するプログラムをPC上に組み込み、I/Oインターフェースを介してサーボ回路に出力し、ソの字で小股、八の字で大股、リof字で中股、さらに、左右脚の一方をソの字、他方を八の字にして歩幅や操舵角を変更し、モボット胴体速度を一定にする制御を検証する。これらの脚姿勢を周期関数で定義する。

#### (4) モボット本体の構造と制御の簡単化

モータ数と所要パワーを最小限に抑えるため、直前後方向に歩行する場合を除き、モボットのいくつかの脚を床面で滑らせる。とくに、脚先の路面上の摩擦力を少なくしてエネルギー消費を低減するため、球形キャストをモボットの脚先に導入し、操舵やその場回転動作時の負荷を小さくする

#### (5) 傾斜角センサを使った対地適応

モボット本体は上下方向のみならず採用する脚姿勢制御パターンの違いにより前後方向への速度を変える。また、階上から降りる場合、水平状態から階段の勾配角に変わり、振動することが多い。センサの検出手段が振子型である場合には共振して振動を拡大することもある。したがって、本研究で使用できるセンサは振動幅の平均値を出力し定常偏差をゼロにするものに限られる。このようなセンサを吟味し、座位部を水平に制御するサーボ制御系を組む。

#### (6) 歩行いすの各部動作確認と点検調整

試作機を調整し、また、実験を重ねて不具合を調整する。とくに、消費電力の低減に有効でない組立箇所を見つけ改善を図る。さらに、与えられた環境に適するモボットの歩行軌道と着地点位置の決定プロセスを構築し、歩行いすとしての機能や効率を高める。最適化の結果固定できる機械部品の結合箇所を溶接して固め、安全性と軽量化を図る。

#### (7) 脚型移動時所要エネルギーの最小化

組込まれるモータのペイロードを均一化して脚型移動時の全消費エネルギーを最小にする方法を明らかにする。

#### (8) 脚の障害物回避制御

転動中の脚先と路面上障害物との衝突を回避し、斜面においても衝撃力を作らずにスムーズな移動を実現する脚の運動と

制御アルゴリズムを構築する。

#### (9) 路面摩擦係数を考慮した操舵時の旋回軌道半径の定量的推定

搭乗者の乗り心地をよくするためにも装置のピッチやロールを低減できるよう左右脚の開き角と閉じ角の大きさを同じにすることが重要である。また、左右歩幅の差が同じであっても脚先の摩擦係数や車輪荷重配分が異なる場合、進行方向は変わる。このような変化を仮想仕事の原理を使って理論的に明らかにし、また、実験で確認する。

#### (10) 車輪型移動時の操舵のし易さと遊脚制御の最適化

通常の車輪走行が可能な整地面では遊脚は不要である。この場合の遊脚運動の領域最小化、あるいは動きの滑らかさ、リズムカルな運動パターンの実現等、様々な制御則が考えられる。これらについて検討し、効果の大きいものを見出す。

#### (11) エネルギー利用効率向上のためのモータ制御

車両の移動に必要なモータの消費電力和が小さいほどよい。この観点からエネルギー消費を最小にするための股関節と膝関節の同期制御則を明らかにする。また、一部のモータに負荷を集中させるとオーバーヒートによる性能低下を引き起こし、他の一部のモータはそれとは対照的に小出力で活かしきれないことも起こる。このようなアンバランスな使用は好ましくない。そこで、各モータの定格出力容量に対する稼働率を同一にするように各関節の制御変数決定法を明らかにする。

#### (12) 自律歩行用制御プログラムの完成

製作する歩行形態シミュレータを使い、移動方式切換え制御の最適化を図るとともに、知的な歩行軌道生成プログラムを完成させる。また、操縦桿による多様な指令を

容易に受け付ける制御入力システムを構築し、実用化に役立てる。

### (13) 実験データの収集と評価

歩行、転動、そして両者の切換え実験を重ね、性能改善に必要な機能や項目を明らかにする。また、これまでの研究結果をまとめる。

## 4. 研究成果

(1) 脚型でありながら車輪型としても使える移動ロボットを新規に提案し運動機構を詳細に設計し製作した。実際に、互いに逆方向に伸びる腕の先端に1つの膝関節を備えて脚を揺動させるのみならず、膝関節を配置するリムの外周に一周り大きな輪を配置し、これを車輪として活用可能な股関節を四隅に備える歩行ロボットの運動機構を追求し、詳細に設計した。また、モータの動力を股関節と膝関節に確実に伝達するための多重軸駆動機構の仕様を定め、外注して試作機を完成させた(図1参照)。さらに、車輪型移動時の脚運動の遊脚姿勢をシミュレーションによって視覚的に明らかにし、脚を取り外しあるいは機械要素を付加することなしに制御アルゴリズムを切替えるだけで脚型にも車輪型にも兼用可能になることを示した。

歩行時の大股、標準、小股の値は、脚姿勢制御パターンや路面の傾き角の違いによって異なり脚歩行や車輪走行のシミュレーションを難しくするが、想定できる脚姿勢パターンを定式化し、路面傾き角を変数として扱い、脚型から車輪型に、あるいはその逆になめらかに遷移可能なパターンを得るための最適化法を明らかにした。この他、歩行いすの駆動に要するエネルギーを最小限にする目的で、いすを指定された高さに維持する制御変数の算出法を明らかにした。具体的に、負荷の集中による一部のモータの過熱を避けるため全てのモータのペイロードを等しくする条件下で全モータの駆動トルク和を

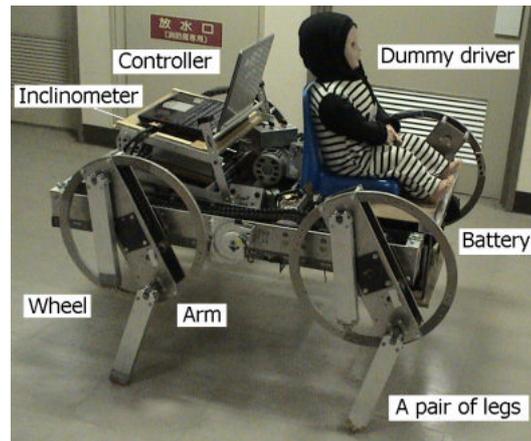


図1 試作した歩行いす

最小にした。

(2) 歩行いす試作機の各部動作確認と大股、小股、操舵、その場回転、等の正常動作の点検調整を行い、実験を重ねて不具合を調整した。とくに、動力伝達箇所を改善し、歩行いすとしての機能や効率を高めた。また、車輪型への切換え時の下降動作、あるいは脚型への切換え時の上昇動作を後戻りすることなく滑らかに行うため、路面の斜角、歩容、股関節の回転方向同一性、上昇時及び下降時の総駆動トルクの低減化、障害物に対する脚先の衝突回避性、等を考慮して路面に適應させる制御アルゴリズムを見出した。実際に、組込まれるモータのペイロードを均一化して脚型移動時の全消費エネルギーを最小にする方法を明らかにした。

さらに、路面の斜角に適する歩容の存在に着目し、進行方向に対して膝関節が股関節に比べて先んじる形態を膝先行歩容、その逆を膝後行歩容と呼び、脚型から車輪型への切換えに膝後行歩容が、また、車輪型から脚型への切換えには膝先行歩容が適することを確認した。脚先と路面上障害物との衝突回避には、常時遊脚の先端が路面から所定の高さを維持する条件を反映する関節角計算アルゴリズムを有効な制御法として見出した。この他、歩行いすの標準的設計仕様と段差開始位

置が与えられた時に重要となる脚の踏み込み位置、及び脚制御の最適化を考察するため、昇降動作のシミュレーションプログラムを作成し、連続した階段を昇りきる段数の大小との相関を明らかにした。

(3) 車輪型移動時の遊脚制御法を明らかにした。また、股関節と膝関節の協調制御によって脚型と車輪型の移動方式を一方から他方に切替えるプログラムを開発し、試作したモボットにダウンロードして両方式をスムーズに切替えることを成功させた。その一例として、図2に車輪型から脚型に切替える作業を記録した動画を時間順(a, b, c, d, e, f)に並べて示す。

実際に、車輪走行時に不要になる遊脚の退避領域の最小化、退避中動作の滑らかさ、リズムカルな運動パターンの実現等、様々な制御則を検討し、効果の大きいものを見出した。また、エネルギー消費を低減するための股関節と膝関節の同期制御則を明らかにした。すなわち、一部のモータに負荷を集中させるとオーバーヒートを起こし、他の一部のモータはそれとは対照的に小出力ですむことも起こる。このようなアンバランスな使用をなくすため、各モータの定格出力容量に対する稼働率を同一にする関節の制御変数決定法を明らかにした。移動方式の切替は、立ち上がり、座り込み時に見られる車体重心上下動の滑らかさ、移動方向の不変性、エネルギー効率、のいずれを重視するかによって股関節と膝関節の協調形態を異にすることを明らかにし、それぞれに存在する特徴的な制御則を切替え制御サイクルとして一般化した。さらに、路面摩擦係数を考慮した操舵時の旋回軌道半径を定量的に定める式を導いた。

後半では歩行、転動、操舵、その場旋回、等の様々な実験を重ねて動画に記録し、試作

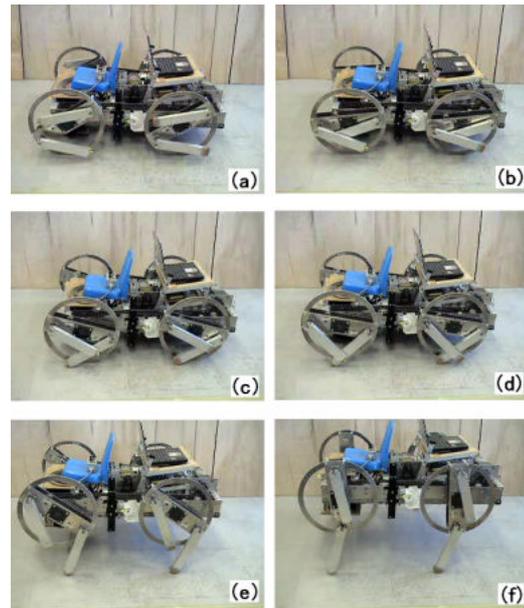


図2 車輪型から脚型への切替え(右進行)  
した歩行いすが脚型と車輪型を自由に切替えるハイブリッドモボットとして有効なことを実証した。着地面の摩擦係数や車輪荷重配分が移動中の路面変化により異なる場合、旋回角度や移動軌跡が変わる。このような変化は、仮想仕事の原理を使って理論と実際の両面から説明できることを明らかにした。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

W.T. Botelho, T. Okada and T. Shimizu: Smooth Switching Phases Control with Simulation and Experimental Verification of a Hybrid Mobile Robot from Leg-type to Wheel-type and Vice Versa, 査読有, J. Cybernetics and Systems, Vol.2, pp.101- 109, 2009.

T. Okada, W.T. Botelho and T. Shimizu : Walking Gait Control for Making Smooth Locomotion Mode Change of a Legged and Wheeled Robot, 査読有, Proc. of 11th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR), Vol.11, pp.711-719, 2008.

A. Mahmoud and T. Okada: Circular Path Estimation of a Rotating Four-Legged Robot using a Hybrid Genetic Algorithm LSM, 査読有, Proc. Egypt-

Japan Int. Sym. on Science and Technology 2008 (EJISST2008), Vol.1, p.144, 2008.

T. Okada, B. W. Tanaka, and T. Shimizu: Leg Control for Changing Locomotion between Leg-type and Wheel-type Designs based on Effective Use of Total Power, 査読有, Proc. of the 10th Int. Conf. on CLAWAR, Vol.10, pp.365-372, 2007.

T. Okada, B. Wagner, T. Shimizu: Compatible use of a legged robot as a wheeled robot and its demonstrative simulation, 査読有, Proc. of the 9th Int. Conf. on CLAWAR, pp.34-44, 2006.

[学会発表](計 6 件)

岡田, 吉田, 清水: 脚型ロボットの上下動解消制御, 査読無, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2008 年 9 月 10 日, 神戸大学.  
A. Mahmoud, T. Okada and T. Shimizu: A Circular Trajectory Simulation Analysis of a Rotating Four-Legged Robot, 査読有, Proc. SICE Annual Conf. 2008, 2008 年 8 月 20 日, 電気通信大学.

岡田, 森田, 清水: 指定された階段の昇降に適する歩行ロボット PEOPLER の制御, 査読無, 第 17 回電気学会東京支部新潟支所研究発表会, 2007 年 11 月 23 日, 長岡技術科学大学.

ヴァーグナ, 岡田, 清水: Mobot Control for Changing Locomotion between Leg-type and Wheel-type, 査読無, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007 年 9 月 15 日, 千葉工業大学.

岡田, ヴァーグナ, 清水: 必要に応じて脚型と車輪型をプログラムで切り換え可能にする移動ロボットの設計と制御の概念, 査読無, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 2006 年 9 月 26 日, 岡山大学.

岡田, ヴァーグナ, 清水: エネルギー消費を低減するための脚型車輪型切り換え時における過渡的移動制御, 査読無, 計測自動制御学会 第 7 回システムインテグレーション部門講演会, 2006 年 12 月 16 日, 北海道大学.

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 脚型車輪型兼用移動装置

発明者: 岡田徳次

権利者: 国立大学法人 新潟大学

種類: 特許権

番号: 2008-62306

出願(公開)年月日: 平成 20 年 3 月 21 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 1 件)

名称: 脚型ロボットの安定歩行法、歩幅制御法、操舵法、およびその装置

発明者: 岡田徳次

権利者: 株式会社新潟 T L O

種類: 特許権

番号: 2003-342928

出願(特許査定)年月日: 平成 21 年 3 月 3 日

国内外の別: 国内

[その他]

- ・ JST イノベーションジャパン 2008、対地適応性を有する一人乗り用脚車輪切り換え移動装置、公式ガイドブック、pp.51、東京国際フォーラム、2008 年 9 月 16-18 日.
- ・ ホームページ等  
<http://okada.eng.niigata-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 徳次 (OKADA TOKUJI)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 60194362

(2) 研究分担者

清水 年美 (SHIMIZU TOSHIMI)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号: 70377183