

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	脚車輪型階段昇降車両Zero Carrierの開発
Title	
著者(和文)	広瀬茂男, 袁 建軍, 小沼洋介
Authors	SHIGEO HIROSE, Jianjun Yuan, Yosuke Konuma
出典 / Citation	日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 330-336
Citation(English)	, Vol. 23, No. 3, pp. 330-336
発行日 / Pub. date	2005, 3
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2005 The Robotics Society of Japan.

# 脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier の開発

広瀬 茂 男<sup>\*1</sup> 袁 建 軍<sup>\*1</sup> 小沼 洋 介<sup>\*2</sup>

## Development of the Stair Climbing Leg-Wheel Hybrid Vehicle

Shigeo Hirose<sup>\*1</sup>, Jianjun Yuan<sup>\*1</sup> and Yosuke Konuma<sup>\*2</sup>

A development of stair climbing mobile vehicle to be the base for stair climbing wheelchairs and/or inspection robots is greatly demanded. Several types of the vehicles using crawlers, wheels and legs have been proposed to perform such a stable stair climbing motion. However, conventional vehicles are limited by their mobility, safety, and mechanical size and weight. We propose a new stair climbing leg-wheel hybrid vehicle coined as "Zero Carrier". The Zero Carrier composed of unified eight prismatic-joint legs, four of which attached active wheels and other four attached passive casters. Proposing Zero Carrier can be designed lightweight and powerful. It can also maintain high stability on stair climbing motion and perform slip-less turning motion. Design of driving mechanisms, sensors, and motion control of the Zero Carrier are then performed and demonstrated its motion by the mechanical model Zero Carrier I.

**Key Words:** Zero Carrier, Mobile Robot, Leg-Wheel Hybrid Vehicle, Stair Climbing Wheelchair

### 1. はじめに

現在、交通バリアフリー法の施行により 1 日の利用者数が 5 千人以上の鉄道駅などでは、バリアフリー化のためエレベータやレール式の階段昇降支援装置などが盛んに設置され始めている。しかし、すべての階段にこのような装置を取り付けることは困難である。また小規模な駅や全国の病院、官公庁などの公共スペースにはちょっとした段差や階段は数多く存在する。そのため、環境に手を加えることを必要とせず、補助を必要とする人を搭載して段差踏破や階段昇降ができる、あるいは在来の車椅子に乗った人を車椅子ごと搭載して階段昇降ができる装置、つまり「階段昇降型車両」が開発できれば、バリアフリー化社会の実現に大きく貢献できるものと思われる。また、階段のある建物内においての重たい物資の搬送などにおいても、そのような汎用的な階段昇降型搬送装置の開発が待たれている。そのため本論文では「階段昇降型車両」の開発を論じることとする。

「階段昇降型車両」の開発においては、何よりもまず搭乗者、搭載物の安全な搬送性を確保することが重要である。そのため、走行中の車両の安定性は最大限の注意を払って確保することが必要である。同時に軽量、コンパクト化、そして量産化したときの低価格化など、実用化のために不可欠な特性を發揮する形

態と駆動機構の導入も不可欠である。

そのため、本研究では八つの直動脚から構成され、そのうち四つは動輪、四つは自在キャストを装備し、各直動脚の能動的運動制御で環境適応的な階段昇降を行うことを特徴とする脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier を提案する。そして、その機構設計と走行制御を検討し試作した第 1 次モデル Zero Carrier I による走行実験によってその妥当性を検討する。

### 2. 従来の階段昇降可能な移動車両

階段昇降が可能な移動ロボットとしては、これまでもクローラ型、車輪型、脚型、これらの組み合わせ型ロボットなどが提案されている。それぞれの一般的な特性は以下の通りである。

クローラ型は機構や制御が比較的簡単であり実用化マシンも報告されているが [1]、階段のエッジのみで自重を支えるためエッジを傷めやすい。ゴム製クローラでは、階段が濡れていると滑落しやすい。さらに凹凸のある地形でも適応性と階段昇降時の安定性を高めようとするクローラ機構は、結果的に機構が複雑化し重量過多になりがちである。車輪型はかなりの大きさの車輪を有するものでないと車輪のみでは階段昇降は困難であり、クローラ型と同様、濡れた階段においては滑落しやすい。脚型は階段昇降に適しているが、機構が複雑になりがちであり平地での移動効率が悪い。

本研究は、これらの要素のうち車輪と脚を組み合わせた脚車輪ハイブリッド型に注目し新たな機構提案を行うこととする。脚車輪ハイブリッド型はもちろんこれまでいくつか提案されている。

原稿受付 2004 年 3 月 18 日

<sup>\*1</sup>東京工業大学

<sup>\*2</sup>(株)リコー

<sup>\*1</sup>Tokyo Institute of Technology

<sup>\*2</sup>Ricoh Co., Ltd.

例えば 3 本脚と脚先端に動輪機構を有する 3 脚車輪型移動装置 [2] が最近提案されている。これは少ない自由度で階段昇降できるという点で興味深い。階段では動的安定支持を行うものであるため安定性に限界があり、身障者や老人を搭載して階段昇降する車両としては不適と思われる。

胴体と足先に動輪を装備する 2 関節 4 脚 6 車輪の装置 [3] も試作されている。これは、脚の可動範囲も広く急な階段でも昇降可能な装置であるが、関節型の脚機構を使用しているため脚駆動機構がかさばり、また、傾斜面をその最大傾斜線に直交する方向に横切ろうとするときには必ずしも安定性は高くないという問題点が予測される。

放射状に配置した、5 本の直動型脚の先端に操舵できる動輪を取り付けた装置 [4] も試作されている。これは、単純化された直動脚を使用しており、1 脚を浮かせても安定性がそれほど低下しない特性を有する車両である。しかし、この車両ではそれぞれの直動脚に伸縮機構と同時に車輪の方向も変える操舵機構が必要であるため、脚ユニットの重量が増大しがちである。また静的安定性を保持しながら段差を踏破しようとする遊脚化シーケンスに制限が大きく、一つの段差を乗り越えるだけでもかなり時間が必要となる問題点が予測される。

1 対 4 脚、計 8 本の直動型脚を単一のモータで駆動し、各脚先端に動輪を取り付けた宮城らの車両 [5] も試作されている。これは 8 脚によって階段面において高い静的安定性を生成しようとする興味深い車両である。

本論文で提案する脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier の形態は、最後に例示した宮城らの車両に、駆動系の設計原理と運動特性は大きく異なるものの、外見的にはかなり類似している。そのため両者の内部構造と特性の違いは、次の章で改めて論じることにする。

### 3. 脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier の提案

#### 3.1 脚車輪型階段昇降車両の設計条件

平坦地でももちろん任意の方向の傾きのある走行面で荷台を水平に保って走行でき、段差の踏破、階段の昇降を安定にできる実用的な車両は、前章に述べたようにこれまで実現されていなかった。このような階段昇降を可能とする車両に必要とされる機構設計は、これまでの事例を検討してみると、以下のような方針で行うべきと考えられる。

(1) 階段昇降時は、階段のエッジ部ではなく階段の上面の踏み面に確実に自重を支持する支持部材を乗せて歩行的な推進ができる機構とするべきである。(2) 歩行的な推進を使用する場合は、できる限り単純でユニット化した機構で構成するようにし、軽量化と低価格化を計るべきである。(3) 主要な応用分野である車椅子を想定すると、移動すべき環境は基本的に平坦な環境が多い。そのため平坦地においては移動効率の高い車輪走行ができる方が望ましい。(4) 同じく車椅子への応用を想定すると、駆動機構がコンパクトに収納でき、車体の中心部はできるだけ多くの空間を搬送物の搭載空間として使用できる機構が望ましい。(5) 市街地の移動を考えてもいろいろな方向に傾斜した通路があるため、どの方向に傾斜した走行面でも車両を常時安定な水平姿勢に保持できる能動姿勢制御機能を装備すべき

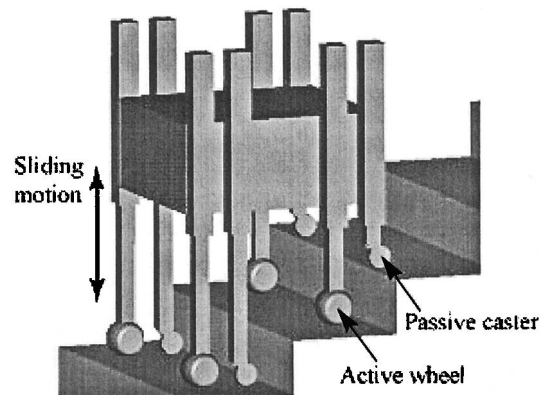


Fig. 1 The proposal of Zero Carrier

である。(6) 頻繁にその場旋回などを含む操舵運動を行っても走行面を傷つけない、つまり skid steer を避けながら滑らかな操舵運動が実現可能な機構とするべきである。

#### 3.2 Zero Carrier の基本構成とその特徴

以上のような設計条件を満足する階段昇降車両として、本論文では Fig. 1 に示す八つの直動脚と車輪から構成される、脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier を提案する。

提案する Zero Carrier は、Fig. 1 に示すように、胴体と、胴体の四隅に取り付けられ独立して上下にスライド運動可能な 8 本の直動脚から構成されるものである。そして各脚の接地部には車輪を装備するが、そのうちの四つは動輪を装備し、残りの四つには自在キャスタを装備させており、車体の四隅に動輪脚と自在キャスタ脚をそれぞれセットで配備するという構造となっている。

Zero Carrier にこのような形態を導入したのは、この形態によって以下に述べるような特性が実現できると期待できたためであった。

(1) 8 本の独立した直動脚と四つの動輪から構成されるため合計 12 自由度を有した構造となっている。自由度の数は比較的多い。しかし、各直動脚はすべてユニット化された著しく単純な直動機構であり、また荷重支持はこの直動運動軸に沿って行われる。そのため各直動機構は結果的にかなり軽量に構成できる可能性がある。さらに、自重を支持する八つの直動駆動アクチュエータ、また推進のための四つの動輪アクチュエータは、いずれも干渉駆動 [6] を生成しやすい構成で配置される。つまり、自重支持は通常では 8 本、階段走行中も 4 本以上の直動軸で分散して行い、推進力生成は四つの動輪が分担して行っている。そのため、アクチュエータ出力は必要とする動作に有効に積算して作用に生かされる構造となっている。その結果装備すべきアクチュエータの出力パワーは低く抑えることができ、結果的に全重量の軽減化が図れる可能性がある。

(2) うねりのある走行面での推進運動においても、直動脚の長さを調整すれば胴体部を水平に保持しながら地形の凹凸に合わせた対地適応的な推進運動が可能である。なおこのような走行面でも、当然二つ以上の動輪を接地させ干渉駆動的に推進力が生成可能である。

(3) 階段においては、Fig. 2 のように階段形状に合わせて直

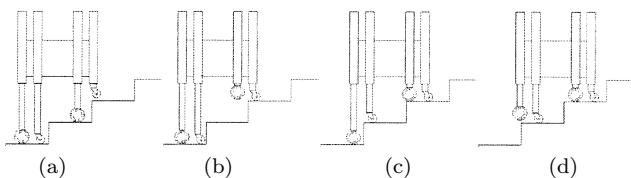


Fig. 2 Stair climbing procedure of Zero Carrier

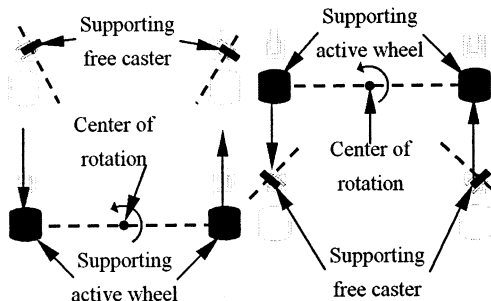


Fig. 3 Rotation motion of Zero Carrier

動脚を次々に上下させる運動を生成することで、安定な昇降運動実現できる。また各脚が独立に駆動できるため、螺旋階段においても昇降動作が可能であり、階段で方向転換することも機能的には十分可能である。

(4) 本機構の動輪の方向は、Fig. 1 のようにすべて車両の方向に固定されて装備され、操舵用の自由度は装備されていない。そのため操舵は一見 skid steer で行わなければならないように見える。しかし Zero Carrier の場合、Fig. 3 のように、車体の前方の 2 脚は自在キャスタで支え、車体の後方 2 脚は動輪で支えるようにして、動輪に逆向きの回転を与えれば、車体は動輪の中間点を巡回中心としてすべりなしの巡回動作を生成できる。同様の操舵は前方 2 輪を動輪、後方 2 輪を自在キャスタとしても実現可能である。このため Zero Carrier は床面を痛めない滑らかな方向転換運動が可能である。

(5) 階段昇降運動のすべての状態で、常時四隅の動輪と自在キャスタのどちらかはおもろく接地している状態を維持できる。そして階段に凹凸があってももちろんこの状態は維持できる。そのため、階段昇降中も車体の安定性を著しく高く保てる、また、自重を支持する車輪は階段の踏み面の上に置かれるため、クローラ型等で問題となる濡れた階段での滑落の危険性や階段のエッジを損傷する問題なども生じ難い。

### 3.3 Zero Carrier と宮城らの車両 [5] との比較

すでに述べたように Zero Carrier の外形は宮城らの車両 [5] と類似している。しかし、その駆動系の設計原理は根本的に異なる。宮城らの車両では八つの脚伸展動作は 1 個のモータと 4 個のクラッチ、そして動力伝達機構で構成され、平地と階段でいくつかの駆動モードを選択しながら走行する車両である。足先には八つの動輪を備えている。このような構造であるため、車両は合計 9 個のモータと 4 個のクラッチで駆動されている。一つの駆動モータで八つの脚を駆動する機構は大変興味深い。しかし、それを実現するため、結果的にかなりの動力伝達機構を車両中央部と車両の四隅に配備した一対の直動脚機構に使用することになっている。車体重量は 75 [kg] であると報告されて

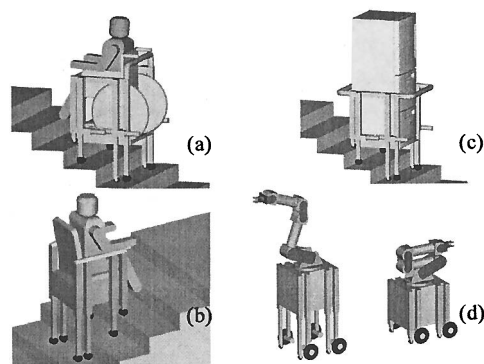


Fig. 4 The application of Zero Carrier

いる（人を乗せた実験は報告されていない）。

それに対し本論文で提案する Zero Carrier は、外見적으로는同様な形態であるが、すべての脚をユニット化された単純な直駆動機構で駆動し、動輪は四つのみであるという構造となっている。つまり、脚の伸縮運動用に 8 個、推進車輪に 4 個の合計 12 個のモータで駆動される。Zero Carrier のモータの数は宮城らの車両 [5] に比較して 3 個分多いが、4 個のクラッチとかなりの重量の動力伝達系は使用されておらず、このことが車両の軽量化を可能にすると考えられる。実際、後で述べる試作モデル Zero Carrier I の車体重量は 46 [kg] であり、宮城らの車両よりはるかに軽量である（また Zero Carrier I では 70 [kg] の体重の人間を搭載した平地走行も実現している）。

さらに、宮城らの車両 [5] では駆動機構の構成から推定して、Zero Carrier で実現可能と考えられる、3.2 節の (2) の凹凸のある走行面での安定走行 (3) の螺旋階段の昇降や階段面での方向転換 (4) のすべりのない操舵性能、そして (5) の凹凸のあるような階段での安定走行などは、実現不可能であることが推定される。これらの点を考慮すると、提案する Zero Carrier は従来になかった、まったく新たな機能性を発揮することが可能な階段昇降車両であると筆者らは考えている。

### 3.4 Zero Carrier の応用

以上のような特性が期待できるため、提案する Zero Carrier には多くの応用が考えられる。Fig. 4 にいくつかの例を示す。Fig. 4 (a) は車椅子を搭載して階段昇降する搬送機、Fig. 4 (b) は階段昇降車椅子、Fig. 4 (c) はエレベータのない建物での重い家電製品などの搬送機、さらに Fig. 4 (d) はアームやカメラを搭載した階段を含むプラントや屋内を点検して動き回るロボットへの応用などである。

## 4. Zero Carrier I の試作

以上述べた設計方針で開発した、脚車輪型階段昇降車両の第 1 次モデル Zero Carrier I を Fig. 5 に示す。またその諸元を Table 1 に示す。

### 4.1 駆動機構の設計

Zero Carrier I の直動脚ユニットの機構を Fig. 6 に示す。支持角パイプの側面にギアードモータを取り付け、そのモータ軸に取り付けたスプロケットと他端のスプロケット間にチェーンを張り、そのチェーンの一部に支持角パイプ内をスライドする

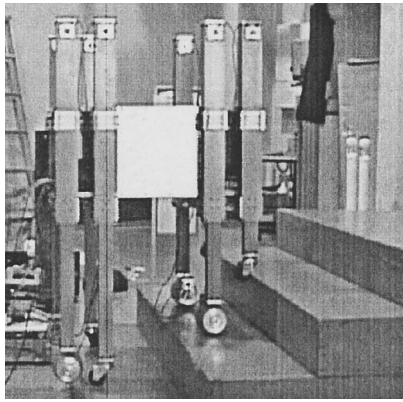


Fig. 5 Overview of the trial model Zero Carrier I

Table 1 Specification of Zero Carrier I

Dimensions(L×W×H)	602×622×700[mm]
Weight	46[Kg]
Actuator	90[W] DC Motor×12 (Leg: 8, Wheel: 4)
Stroke of each leg	400[mm]

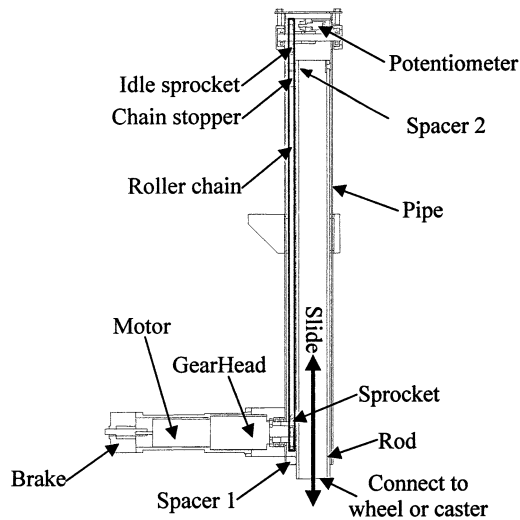


Fig. 6 Leg mechanism

角型脚ロッドを装備した。角型脚ロッドの移動距離は、上部スプロケットに取り付けたポテンショメータで計測する構成とした。

またギアードモータには負性動作ブレーキを装備し、上下運動を生成するときにはブレーキが解除され、脚を上下に動かさないときはブレーキが働くようにした。これにより立位姿勢保持時の無駄なエネルギー消費が回避でき、またバッテリー切れ等の非常事態でも安定姿勢が保持できる安全性を確保できた。

駆動輪としては、Fig. 7 に示すような wheel in motor 型の機構を開発した。

#### 4.2 センサ系の設計

安定な昇降運動を実現するため、脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier I には以下のようなセンサ群を搭載した。

各直動脚の状態計測としては、長さ制御に上述のポテンショメータ、また駆動用ギアードモータの駆動電流を計測できるよ

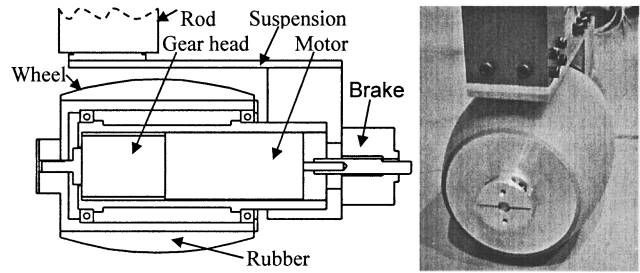
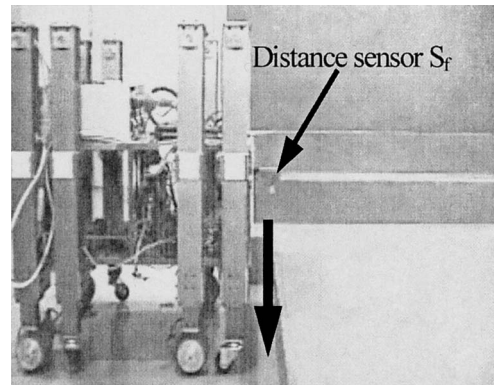
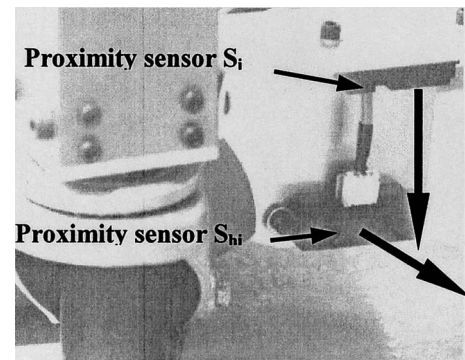


Fig. 7 Wheel mechanism

Fig. 8 Distance sensor  $S_f$  used in Zero Carrier IFig. 9 Proximity sensors  $S_i$ ,  $S_{hi}$  used in Zero Carrier I

うにして支持力も推定できるようにした。

さらに車体各部に Fig. 8～10 に示すように近距離を測定するセンサを装備した。それらは機能的に分けて以下の3種類である。

(i) Fig. 8 に示すように、車体先頭部に垂直に取り付け走行面の高さを計測する距離センサ  $S_f$ 。これは SICK 製の WTA24 であり 100～700 [mm] の距離を計測可能である。

(ii) Fig. 9 および Fig. 10 に示すように、各脚の側面に取り付け車輪と床面の距離を計測する近接センサ  $S_i$  ( $i = 1 \sim 8$ )。これは SHARP の PSD センサ GP2D12 を使用し 100～800 [mm] の距離を計測可能である。実装時にはオペアンプ回路で車輪接地部から 40 [mm] の距離の接近を計測するようにした。

(iii) Fig. 9 および Fig. 10 のように、左右とも前方から三つ目の脚  $L_3$  の車輪部に進行方向に向かって水平に取り付ける近接センサ  $S_{hi}$  ( $i = 1 \sim 2$ )。これは(ii)と同じ近接センサを使用

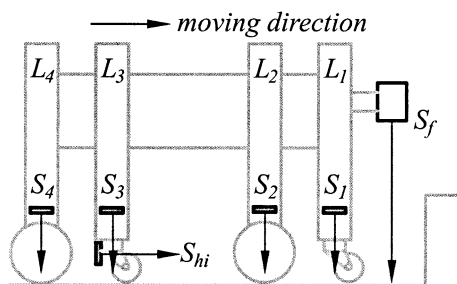


Fig. 10 The arrangement of proximity sensors

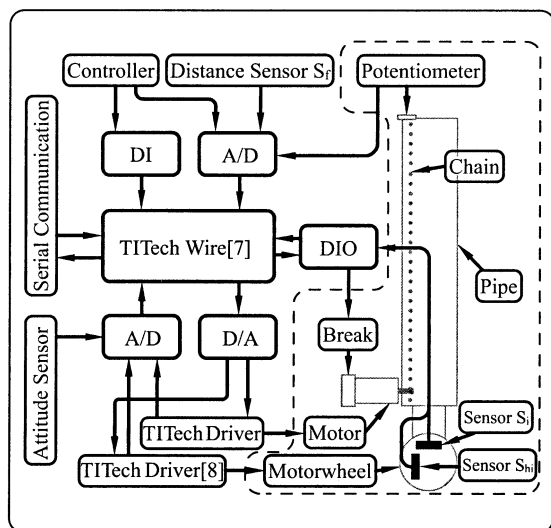


Fig. 11 The control diagram of Zero Carrier I

した。

車体の胴体を水平に保つ動作を可能とするために姿勢センサも搭載した。これは MURATA の角速度センサ ENC-03J を 2 個と加速度センサ ADXL202 を組み合わせたものであり、車体のロール角とピッチ角を計測可能とした。

#### 4.3 制御系の設計

脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier I の制御系は Fig. 11 に示すように構成した。これは筆者らの研究室で開発した TI Tech Wire [7] と TI Tech Driver [8]、A/D、D/A、DIO モジュールなどから構成されるものである。OS としては RTLinux を採用し実時間制御性の高い制御システムとした。

### 5. Zero Carrier I の走行制御

階段昇降を行うための Zero Carrier I 運動制御シーケンスは、以下のように構成した。

(1) 先端に装備した距離センサ  $S_f$  によって上りあるいは下りの階段段差の接近と高さを計測し、車輪回転速度に同期して前脚を伸縮させる。Fig. 12 (a), (b) に示すように、この動作は先端の 1 番目の脚を段差に合わせて上下させると同時に、その脚の可動範囲の限界を考慮し、車両を支持する脚全体の伸展量を適当に調整するものである。

(2) Zero Carrier I が階段を上る場合には、Fig. 12 (c) に示すように、距離センサ  $S_f$  の誤差で階段に車輪が当たらないよ

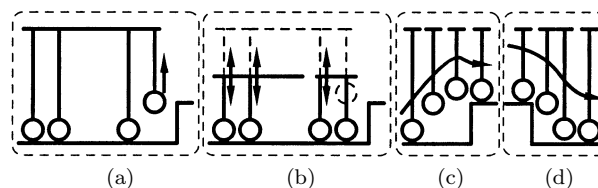


Fig. 12 The motions of each leg

うに、先端節の車輪が段差面より余分に高くなるように脚長の制御を行い、前進し、その後足先近接センサ  $S_i$  ( $i = 1 \sim 8$ ) の情報を基に脚の降下速度を落として着地させる。

(3) Zero Carrier I が階段を下る場合には、Fig. 12 (d) に示すように、近接センサ  $S_i$  ( $i = 1 \sim 8$ ) で車輪と段差面との距離を計測し、一定距離以上離れていることが計測されたら直ちに脚を降下させ地面に十分接近したら脚の降下速度を落として接地停止させる。

(4) 脚が接地したことは直動脚駆動用モータの発生電流の値で計測し、接地次第脚の伸縮駆動系へ電力供給を停止し、負性ブレーキを作動させて立位姿勢を保持する。

(5) Fig. 10 に示す車両左右の 4 本の直動脚  $L_1, L_2, L_3, L_4$  について、脚  $L_1$  の伸縮駆動は最前部の距離センサ  $S_f$  の情報と車輪の回転信号で制御する。脚  $L_2$  も脚  $L_1$  に接近しているため、同様の制御法で伸縮させる。脚  $L_3$  の伸縮制御は、Fig. 9 および Fig. 10 に示す水平近接センサ  $S_{hi}$  ( $i = 1 \sim 2$ ) からの信号を利用して行うこととした。その理由は、Zero Carrier I の移動量は車輪回転で計測しており、脚  $L_2$  と脚  $L_3$  の距離が比較的離れているため走行面の状態によっては誤差が出やすいからである。ただし、水平近接センサ  $S_{hi}$  ( $i = 1 \sim 2$ ) を利用するのは上がりの段差に面した場合のみであり、下りの段差での動作タイミングは各車輪の足先近接センサ  $S_i$  ( $i = 1 \sim 8$ ) の信号を用いている。さらに脚  $L_4$  の伸縮駆動は脚  $L_3$  からの車輪の回転情報を利用して行っている。

(6) 車体の水平維持制御は、基本的には車体にはヨー角、ピッチ角計測センサを搭載しているため、その信号に合わせて四隅の脚セットの長さを常時ヨー角ピッチ角ともゼロになるように行うこととした。ただし、この調整を続けると脚長の絶対値が変動する。そのため、実際には左前方の自在キャスタを装備した脚を基準脚とし（原理的にはどの脚を選択しても同じである）、その基準脚長さは変えずに他脚の長さを微調整することとした。ただし、階段昇降時などで上述の基準脚が遊脚状態にあるときには、実際には左前方の動輪脚を基準脚とした。なお、この水平維持制御を常時遂行すると、各脚の長さ調整用アクチュエータは常時駆動状態になり、アクチュエータに装備した負性特性ブレーキを用いた省エネルギー立位姿勢維持は行えない。そのため、ヨー角とピッチ角が一定の値以下に抑えられる環境、つまり車体の揺れを生じさせにくい平坦な環境での走行では以上で説明した車体の水平維持制御は行わず、各脚の長さは固定して走行させるようにした。

(7) 4 輪以上で自重支持をする場合には、不整定支持状態であるため、通常支持力は各脚に均等に配分されずに浮いてしまう脚も生成し、安定な操舵制御が不可能となる。この問題を解決する最も直截な手法は、各脚を力制御しながら、姿勢制御と

車体の高さ制御を行うものである。こうすれば各脚に支持力を均一に分散する制御も可能である。しかし、このような力制御を行うには各脚の長さ制御は常時実施し続けることが必要であり、上述した負性ブレーキを利用した省エネルギー走行は難しい。そのため本研究では、動輪が浮き上がって空転したときのみ脚を伸展する制御を導入した。そして動輪の浮き上がりは車輪の駆動電流の変化で判別する方式を導入した。予備測定によると、使用した動輪は車輪が空転状態では 0.3 [A] 以下であり、接地して駆動力を生成して走行しているときは 0.6 [A] 以上の電流が流れ、接地状態は容易に判別可能である。

## 6. Zero Carrier I の走行実験

Zero Carrier I の基本移動性能を検証するため、まず凹凸のある斜面走行の実験を行った。この実験はベニヤ板で 7 度ほどの斜面 (幅 100 [cm]) を作り、Zero Carrier I をこの上で、前述したように 2 脚自在キャスタと 2 脚動輪の 4 脚支持状態で走行させるものである。その様子は Fig. 13 (a) ~ (c) に示す。また、Zero Carrier I の左半分の車輪だけを斜面に沿って走行させロール角傾斜も生成する実験は Fig. 13 (d) ~ (f) に示す。Fig. 13 (a) に示すような斜面に上るときのピッチ角と、左後方の動輪脚に与える指令電圧の時間軸に対するデータを Fig. 14 に示す。

Fig. 14 にある太い線は、指令電圧 2.5 [V] でモータの回転が

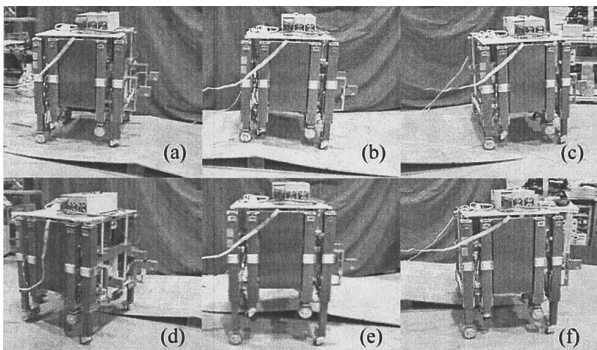


Fig. 13 Slope moving experiment

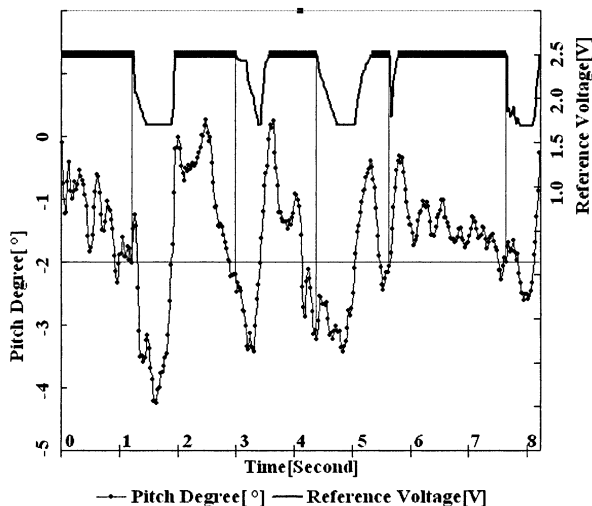


Fig. 14 A result of the pitch angle attitude control

停止して、負性ブレーキがかかっている状態を示すものである。前述したように省エネルギーのため、ロール角とピッチ角はある程度傾いたときのみ姿勢制御指令を出すようにした。具体的には、0.2 秒間以上  $\pm 2$  度以上を超えたとき指令を出すようにした。ここで 0.2 秒動作を遅らせたのは、振動的な姿勢変化に敏感に反応し過ぎないようにさせるためである。Fig. 14 からこの制御が実際行われていることが分かる。

車輪の浮き上がり防止制御の効果を確認するため、Zero Carrier I を動輪二つと自在キャスタ二つで支持して平坦地で走行させ、車輪の浮き上がり防止制御を行った場合と行わなかった場合の走行状態の比較実験を行った。Fig. 15 (a) に示すように、油性ペンを二つの動輪に取り付け、車輪が着地して走行するときには走行痕跡を床面に描かせ、浮き上がったときに描かせないようにすることで車輪の接地状態を記録した。同じ状態から走行をはじめ (Fig. 15 (b), (e)), 浮き上がり制御を行わなかった場合の走行結果を Fig. 15 (c), (d) に、そして浮き上がり制御を行ったときの走行結果を Fig. 15 (f), (g) に示す。この実験の結果、浮き上がり制御がないと 4 [m] ほど走行するときの走行痕跡の残留率は 50% 程度であり走行後 60 度程度の進行方向の誤差が生じたが、浮き上がり制御があると走行痕跡の残留率は 90% 程度であり走行後の進行方向誤差は 10 度程度に抑えられた。これらのことから、脚の浮き上がり防止制御はある程度の効果を発揮することが確認できた。

距離センサ  $S_f$  および近接センサを利用した、Fig. 16 に示すような段差踏破実験も行った。この実験では制御パラメータの調整がまだ不十分で 1 段の乗り上げりに約 8 秒かかったが、自動乗り上げりが確認できた。なおこの動作は現状では段差が計測されると、いったん車両を停止し、脚を引き上げ、前進し、脚を下げていき接地直前で十分下降速度を低下して接地させ、その接地を電流センサで確認して停止するという動作を重複せずに順に実施するものになっており、特に脚の接地時には距離センサの精度の限界からかなり上方から減速し、この動作だけで全体の 40% 程度を占めていた。この動作は、今後センサ精度を向上して動作の重複を図るなどにより、はるかに改善すると考えている。

Zero Carrier によって階段昇降が可能であることを示す、

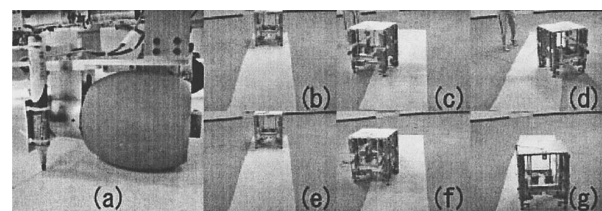


Fig. 15 Comparison experiment of floating control

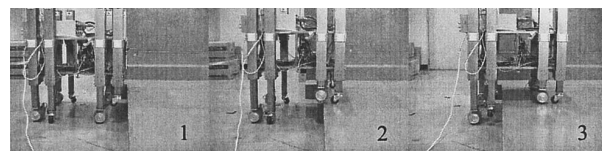


Fig. 16 Automatic stair climbing experiment

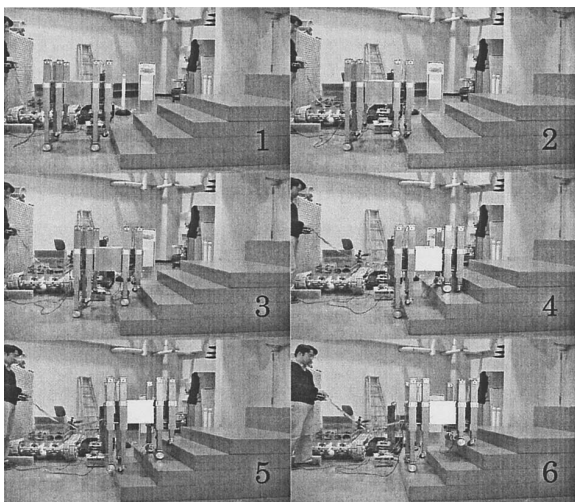
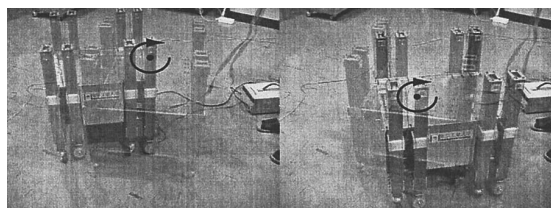


Fig. 17 Stair climbing experiment of Zero Carrier I



(a) Turn using driving wheels of the rear side (b) Turn using driving wheels of the front side

Fig. 18 Turning experiment

Fig. 17 に示すような階段昇降実験も行った．この実験においては、まだ搭載したセンサ系を利用することによる連続的な階段昇降のための制御システムは完成できていないため、脚の昇降動作のタイミングはマニュアルで制御した．使用した階段は踏み面 180 [mm]、蹴り上げ 145 [mm] であった．この連続的な階段昇降実験では、1 段を平均 15 秒で昇降できた．下り動作も上りとほとんど同じ速度であった．

Zero Carrier I の旋回実験の様子を Fig. 18 に示す．Fig. 18 (a) は前方の左右を自在キャスタで支持し、後方の左右を動輪で支持して、両動輪を逆回転させた場合、Fig. 18 (b) は前方の左右を動輪で支持し、後方の左右を自在キャスタで支持して、両動輪を逆回転させた場合である．実験の結果、動輪と

自在キャスタを 2 輪ずつ接地させて旋回動作を行うことで、すべりなしのスムーズなその場旋回が可能であること、また、この場合の旋回中心は予測通り接地させている両動輪の間点であった．

人間 (体重 70 [kg]) を搭載することで、約 0.4 [m/s] の平地走行を行う実験も実施した．

## 7. 結論と将来の課題

本研究では、バリアフリー化社会の実現や重量物搬送の目的から階段昇降が可能な車両の必要性が高いことを論じ、八つの直動脚と四つの動輪、四つの自在キャスタから構成される脚車輪型階段昇降車両 Zero Carrier I の提案を行った．そして、その具体的な機構設計と階段での運動制御法を明らかにした．

本研究では、機構の提案と制御系の構成、そして試作モデルによる基本動作の確認実験までを行ったが、今後はさらに接地動作の高速制御、段差の高速計測と走行モードの高速生成を可能とする制御系を構築し、階段の連続的な自動走行を実現するとともに、3.2 節で列挙した Zero Carrier が発揮可能な数々の運動性能を具体的に実現していき、3.4 節に示すような具体的な応用を実現する階段昇降車両を実現していく予定である．

## 参考文献

- [1] 広瀬, 青木: “対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発と実験”, 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.303-304, 1991.
- [2] 曾根原, 小林, 田中, 山本, 藤井, 村上: “3 脚車輪型ロボットの機構設計と実験システムの開発”, 第 9 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.236-241, 2004.
- [3] 大道, 井辺: “脚車輪型移動装置の開発 (その 1)”, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.3, pp.244-251, 1984.
- [4] 市川, 貞包, 佐藤, 富沢, 尾崎: “5 足走行機構の開発”, 知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp.107-112, 1982.
- [5] 宮城, 内田, 米田, 小山, 舟久保: “脚・車輪式による階段昇降可能な車椅子の開発 (第 1 報)”, 精密工学会誌, vol.64, no.3, pp.403-407, 1998.
- [6] 広瀬, 佐藤: “多自由度ロボットの干涉駆動”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.128-135, 1989.
- [7] E. F. Fukushima, K. Takita, S. Hirose and T. Nakamura: “Development of TITech Wire: a High Speed Serial I/O for Robot Controllers,” Proc. of TITech COE/Super Mechano-System Symposium 2001, Nov. 19/20, p.HRS8, 2001.
- [8] 福島, 妻木, 広瀬: “普及版 DC サーボモータ駆動回路 “TITech Robot Driver” の開発”, 第 1 回重点領域研究「知能ロボット」シンポジウム予稿集, 1995.



広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 6 日生．1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了．工学博士．同年同大学機械物理工学科助手．1979 年同大学助教授，1992 年同大学教授，2000 年以降東京工業大学大学院機械宇宙システム専攻教授．ロボットの創造設計学研究に従事．IEEE Robotics and Automation Society より

1999 年 Pioneer in Robotics and Automation Award など受賞．主な著作は、「ロボット工学」(裳華房), 「生物機械工学」(工業調査会), 「Biologically Inspired Robots」(Oxford University Press, 1993) など．

(日本ロボット学会正会員)



袁 建軍 (Jianjun Yuan)

1975 年 5 月 9 日生．1999 年中国清华大学精密機械学部卒業．2001 年同大学大学院機械製造および自動化専攻修士課程修了．2001 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程機械宇宙システム専攻所属，現在に至る．(日本ロボット学会学生会員)



小沼洋介 (Yosuke Konuma)

1976 年 11 月 29 日生．2000 年東京工業大学機械宇宙学科卒業．2002 年同大学大学院機械宇宙システム専攻修士課程修了．同年株式会社リコーに入社．現在は、循環型社会実現を目指した環境対応技術の研究開発に従事．(日本ロボット学会正会員)