

パッシブ型歩行支援システムの開発

平田 泰久, 小菅 一弘*

工学研究科 バイオリボティクス専攻 ロボティクス講座
ロボットシステム学分野 教授
E-mail: {hirata, kosuge}@irs.mech.tohoku.ac.jp



1. はじめに

社会の高齢化が急速に進む中、加齢に伴う筋力の衰えや、怪我、目の不自由さ等により、日常生活において最も重要な機能の一つである歩行が困難な高齢者や障害者の数が増大している。このような社会的背景に伴い、高齢者や障害者の自立した生活を支援する機器の開発が急務となっている。本研究では、特に人間とシステムとの力学的相互作用を前提とし、人間の体重を腕等でサポートしながら歩行の支援を実現するシステムを開発することを目指し、様々な障害を有した高齢者や障害者に対して、安全にかつ適切な支援を行う歩行支援機を提案する。

歩行支援機の研究開発では、従来、ロボットの研究によって開発されてきた運動制御技術、センシング技術、ビジョン技術、ソフトコンピューティング技術等の様々なロボット技術を応用することが期待され、多くの研究開発が進められている。文献[1,2]では、利用者の体重を腕等でサポートし、利用者の加える力に基づいた歩行支援機の運動制御手法が提案されている。また、文献[3-5]では、歩行支援機をある環境内でどのようにナビゲーションするかに重点をおいた研究が行われている。また、視覚障害者を対象とした歩行ガイドロボットの研究も行われている[6]。

これらの歩行支援機のほとんどは、その移動ベースにサーボモータ等のアクチュエータが搭載されており、利用者の操作力や環境からの情報に基づいて、それらのサーボモータを制御し、利用者の歩行を適切に支援するものである。これらの運動制御系を設計するためには、従来開発されてきたロボットの運動制御技術を応用することが可能であり、これにより非常に高機能で多機能な歩行支援機を実現することができる。しかし、サーボモータやサーボアンプ、減速機、センサ、制御装置、バッテリー等が搭載されることから、システムが複雑化、重量増となる傾向があり、また、モータの誤動作等に対応した安全対策が重要となる。

一方で、市販されている歩行器等はフレームと簡単な車輪やキャスタから構成されるシンプルかつ軽量の構造となっており、その操作及び駆動は基本的には全て人の力によってのみ行われるといったパッシブな特性を持つ。このようなシステムは人が直感的に操作でき、かつシンプルで軽量であることから、現在広く使用されている。また、駆動力を発生させるサーボモータ等も用いていないことから、サーボモータの誤動作等による危険性も無い。しかしながら、車輪の転がり抵抗の小ささにより、速度超過が起り、使用者が転倒するといった危険な状態に陥ったり、坂道、隘路等の環境の状態によっては、利用者が目的の歩行を行うことが困難となる場合もある。

そこで、本研究では、このような基本的には人の力のみで動作するパッシブな特性を有するシステムをベースとして、ロボットの要素技術を組み込むことで、高機能なシステムを実現することを考える。このような考え方をパッシプロボティクスと呼び、ここではその有効性を示すために、パッシプロボティクスの概念に基づいた高性能で多機能なパッシブ型知的歩行支援機 RT Walker(Robot Technology Walker)を開発する。本報告では、まずパッシプロボティクスについて説明し、次に、開発した RT Walker の概要を述べる。そして、RT Walker の基本的な運動制御系について考え、人間や環境に適応した高機能で多機能なパッシブ型知的歩行支援機の実現可能性を実験を通して確認する。

2. パッシプロボティクス

従来のロボティクスでは、サーボモータ等のアクチュエータを能動的に駆動することでロボットの運動制御を行ってきた。これにより多機能かつ高性能なロボットシステムを実現することが可能となる。しかし、人がそのようなシステムを扱うことを考慮する場合、サーボモータの誤動作等による安全対策が重要な問題となる。また、通常よ

く利用されるサーボモータは高回転・低トルクという特性を持つため、実際のロボットには減速機等を用いなければならず、また、センサやサーボアンプ、制御装置等を搭載する必要もあることからその構造が複雑化し、重量増につながるといった問題もある。また、サーボモータを駆動するためのバッテリーの容量不足によるロボットの稼働時間の短さも解決すべき問題のひとつである。

これに対し、アクチュエータによる駆動力を用いずにシステムに加わる外力のみを制御することによって、結果的にシステムの運動を制御する、パッシブロボティクスという概念が Goswami ら[7]によって提案されている。これは、スプリングやダンパ等の機械要素から構成されるマニピュレータの手先を、スプリングの剛性等の機械要素のパラメータを変更することによって、その運動をパッシブに制御するものであり、手先に加えられる力に基づいて手先に様々な運動を実現することができる。また、Peshkin ら[8]は、これらの概念を基に Cobot と呼ばれる非駆動型の物体搬送システムを開発した。また、小柳ら[9]は、バーチャルリアリティを実現するためブレーキを利用したパッシブ型力覚提示システムを開発した。

その他、歩行支援システムの研究においても、いくつかの研究が行われている[10,11]。これらの研究のほとんどは、ステアリング用の車輪にサーボモータを取り付け、環境情報等に基づき、そのステアリング角度を適切に制御することによって、システムの進行方向等を制御し、ナビゲーションに利用するというものである。

本研究でも、サーボモータ等のアクチュエータを用いることなく、基本的には人の力によってのみ駆動されるパッシブな歩行支援機をベースに、歩行支援機の手先に取り付けられたブレーキをロボットの制御技術を用いて制御し、結果的に高機能な歩行支援機を実現することを考える。パッシブロボティクスの概念を歩行支援機に適用すると、駆動力が基本的に人の操作力に依存するため、システムの誤動作により人の意図に反した運動が生成されるようなことはない。また、サーボモータ等の数も減らすことが可能となり、比較的シンプルで軽量かつ、少量のバッテリー容量でも、長時間の稼働が可能になるといった利点がある。パッシブロボティクスの概念は人と知能システムとの力学的相互作用に基づく協調というテーマにおいて、今後、非常に重要な技術となると考える。

3. RT Walker

本研究では、パッシブロボティクスの概念に基づいた多機能で高性能なパッシブ型知的歩行支援機 RT Walker(Robot Technology Walker)を開発することを考える。従来のパッシブな知的歩行支援機は、ステアリング用モータと手動もしくは自動ブレーキを組み合わせたものがほとんどである。このようなシステムは、ステアリング用モータを使うことにより、システムを目的地までガイドしたり、障害物との衝突を回避するといった機能を持たせることが可能となり、また、ブレーキを用いることにより、システムの手動・自動の区別はあるがブレーキはほとんどの歩行支援機に搭載されている。

そこで、本研究では、このような歩行支援機には必ず搭載されるべきであるブレーキのブレーキ力を適切に制御することにより、結果的にシステムの運動を制御することが可能なパッシブ型知的歩行支援機を開発する。そして、その運動制御アルゴリズムを提案し、実際に実機により実験を行うことにより、開発されたパッシブ型知的歩行支援機の有効性について議論する。通常、ブレーキは歩行支援機の複数の車輪に独立に取り付けられている。この複数のブレーキを利用者の状態や、環境情報に基づいて適切に制御することができれば、ステアリング用のモータ等を用いることなく、様々な運動制御が実現できると考える。

本研究で開発するシステムは、モータ等の能動的に動作するアクチュエータを用いず、主にサーボブレーキのみを用いて構築することから、ステアリング用モータを用いた従来のパッシブ型知的歩行支援機よりも更にシンプルなシステムとなる。また、ブレーキは基本的に不必要な運動を制限することのみに利用されることから、サーボモータを用いるシステムよりも消費電力が少なく済むといった利点もある。その他、このようなシステムの駆動力は基本的には人間の操作力となることから、その力をエネルギーとして回生することができれば、バッテリーをより小さくすることも可能となるであろう。

ステアリング用モータ等を用いず、サーボブレーキのみを搭載した知的歩行支援機としては、文献[12]において ER 流体ブレーキを利用し、速度超

過による転倒を防ぎ、かつリハビリに有効な歩行支援機が報告されているが、使用者の運動能力に対応し、その操作性を変化させることや、環境に適応した運動を実現するための研究は未だ成されていない。そこで本研究では、このブレーキ力を適切に制御することにより、速度超過による転倒を防ぐことはもちろんであるが、システムの使用特性を使用者の運動能力に適応させることや、段差や障害物を避けるといった環境に適応した運動を実現する安全でかつ高機能な歩行支援機を実現する。

図 1 に本研究において開発した歩行支援機のプロトタイプシステム“RT Walker”を示す。本シス



図 1. Passive Intelligent Walker
-RT Walker-

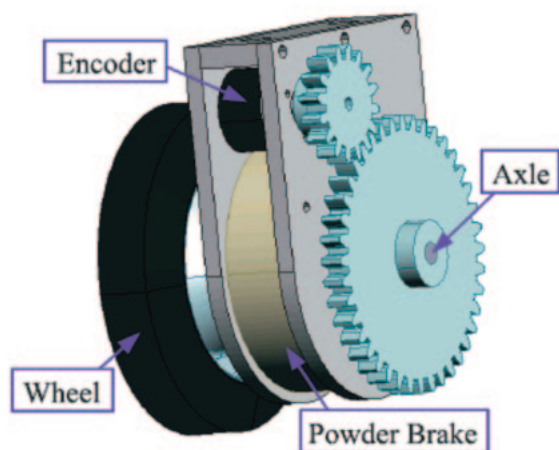


図 2. Real Wheel with Servo Brake

テムは、フレーム、制御装置、キャストそして対向二輪型に配置したサーボブレーキ付車輪から構成される。本研究ではサーボブレーキにはパウダブレーキ(三菱電機(株)製 ZX-1.2-24)を使用した。パウダブレーキは電流に関して比例したブレーキトルクを出力するため、連続的なトルク制御が可能となる。図 2 に後輪の構成図を示す。ブレーキによって発生したブレーキトルクは直接車軸に伝達されるようになっている。本システムでは、このブレーキをロボット技術(RT)を利用して適切に制御することにより、歩行支援機に様々な機能を実現する。

RT Walker はプロトタイプシステムということもあり、発生できるブレーキ力が過剰なパウダブレーキが搭載されているが、その消費電力はブレーキ 1 台当たり 10[W]程度であり、通常の DC モータと比較しても小さいことがわかる。また、現在の RT Walker の重量は約 25[kg]となっているが、基本的な構造が単純であるため、サーボブレーキや制御装置の小型化、フレームの軽量化等を行うことにより、今後大幅な軽量化が実現できると考える。

4. 人間適応型制御

使用者の運動能力に応じて歩行支援機の運動特性を任意に変化させることが出来れば、様々な障害を有した利用者それぞれに適応した操作性を実現することができるであろう。また、歩行支援機の運動を制限すると、利用者の負荷を増やすことができ、リハビリテーション機器としても利用可能であると考ええる。その他、利用者の状態に基づき、瞬間的に運動特性を変化させると、歩行支援機の前速度超過の防止や利用者の転倒防止にも役立つと考える。

歩行支援機の運動特性は通常、慣性係数と粘性係数から表現される場合が多い。本研究ではこの慣性係数と粘性係数を人間の障害や運動能力等によって適切に変化させることを考える。車輪に取り付けられたブレーキを用いることにより、RT Walker のみかけの運動特性を指定することができれば、操作特性を利用者それぞれに適応させることができ、その操作性の向上が実現できる。

この人間適応型運動制御の実現性を示すため、いくつかの実験を行った。最初の実験では図 3 に示すような傾斜面を用意し、RT Walker をその自重により駆動させた。この実験では、RT Walker が利用者に一定の力で押されている状態を模擬してお

り、その運動特性の変化を確認することができる。はじめに回転に関する粘性係数を一定にし、進行方向に関する粘性係数を変化させた場合の実験を行い、次に進行方向に関する粘性係数を一定にし、回転に関する粘性係数を変化させた場合の実験を行った。

まず、進行方向に関する粘性係数を 100, 150, 200[Ns/m]の三種類に指定し、図 3 に示すような傾斜を用いた重力によるステップ入力を人の力として与えた。そして、そのときの応答(速度)から実際の粘性係数を計算し、最初に指定したみかけの粘性係数と実験によって得られた粘性係数を比較し評価する。

実験結果として、そのときの速度応答を図 4 に示し、この実験結果から計算された実際の粘性係数を表 1 に示す。表 1 によりみかけの粘性係数と実験によって得られた粘性係数がおおむね一致していることから、本手法の有効性が確認できた。ここで、立ち上がりにおける応答が、理論値と一致していないのは、モデルにおいて静摩擦の影響等を考慮していないことによるモデル化誤差によるものと考えることができる。

次に、回転方向に関する粘性係数を変化させて実験を行った。実験は、上記の実験と同様に傾斜面を用意し、RT Walker の進行方向を傾斜方向から 43[deg]ずらした状態で配置し、RT Walker を自重によって駆動させた。本システムの質量中心は、厳密には車軸中央と一致していないため、このように配置することにより RT Walker 全体に回転モーメントが発生する。実験は回転に関する粘性係数を -40, -20, 0, 20, 40[Nms/rad]の 5 種類に指定し、運動特性の違いを観察した。また、このときの進行方向の粘性係数を 200[Ns/m]とし、実験中の進行方向における RT Walker の速度超過を抑制した。

図 5 にこのときの RT Walker の車軸中央の経路を、図 6 に角速度の時間変化を示す。図 5 よりみかけの粘性係数が大きいほど直線的に走行を行い、逆にみかけの粘性係数が小さいほど、曲線的な運動となった。また図 6 より、みかけの粘性係数が大きいほどその角速度変化が小さく、逆に粘性係数が小さいほどの角速度変化が大きいことがわかる。従って、RT Walker のみかけの粘性係数を変化させることが可能であることが確認できた。

以上より、RT Walker のみかけの動特性を変化させる運動特性可変制御アルゴリズムの有効性が示された。ここでは、RT Walker に装備したエンコーダの分解能の関係から、粘性係数行列のみを変化

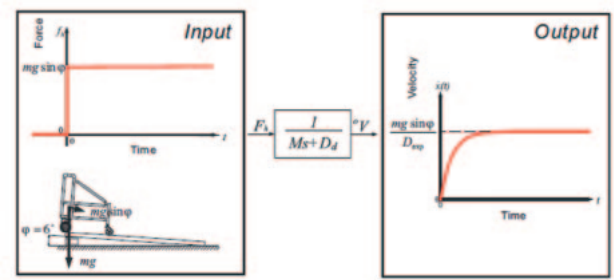


図 3. Experiment Using Slope for Variable Motion Characteristics Function

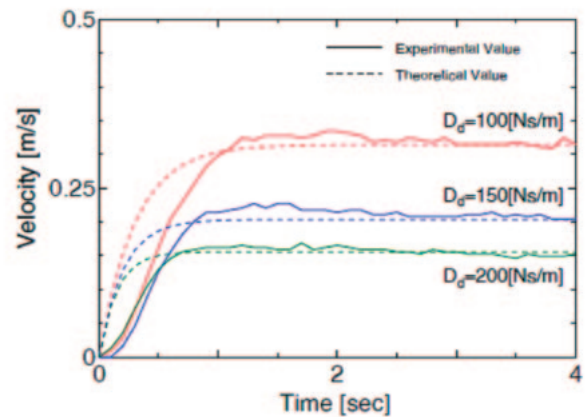


図 4. Velocity Responses of RT Walker

表 1. Damping Coefficients Calculated by Experiments

Desired Damping Coefficient D_d [Ns/m]	Actual Damping Coefficient D_{exp} [Ns/m]
100	94.89
150	146.29
200	203.95

させたが、高分解能のエンコーダや高精度な加速度センサを用いることにより、みかけの慣性行列を変化させることも可能であると考えられる。

5. 環境適応型制御

歩行支援機の使用において、その使用が困難である場所、または危険である場所が多数存在する。例としては、段差や傾斜、障害物のある場所、隘路、雑踏等があげられる。ここでは、これらの環境で、使用者が安全にかつスムーズに移動できるような機能を付加することを考える。

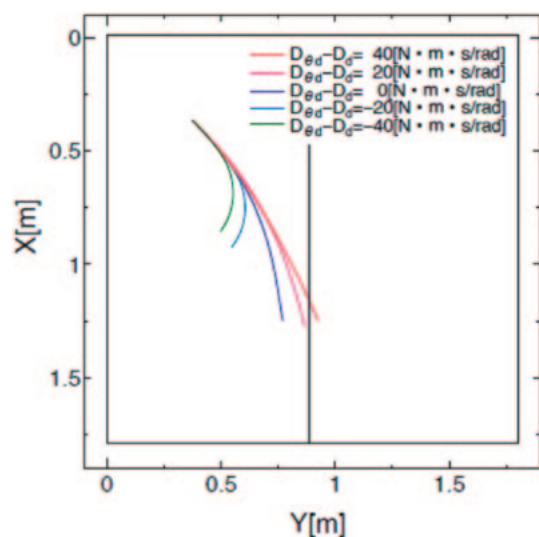


図 5. Motion of RT Walker

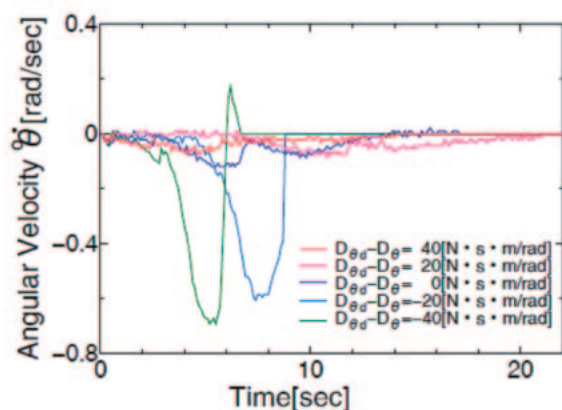


図 6. Angular Velocity of RT Walker

5.1 ナビゲーション機能

環境情報に基づくロボットの制御手法として、著者らは文献[13]において、地図情報に基づく複数の移動ロボットと人間の協調制御手法を提案してきた。本手法では、環境からの拘束力と人間の操作力を統合することにより、様々な環境内において効果的な大型物体の操りを実現した。本研究では、この手法を拡張し、環境からの拘束力を RT Walker に働かせ、その情報からブレーキトルクを導出することにより、様々な環境内において、効果的な利用者の支援を行う制御手法を提案する。

ここでは、環境からの拘束力を発生させるため、障害物回避法の一手法である、人工ポテンシャル法を用いる[14]。人工ポテンシャル法とは、ロボットと障害物の間に反発力、目標点に吸引力を仮想的に発生させ、障害物回避を行う方法である。RT

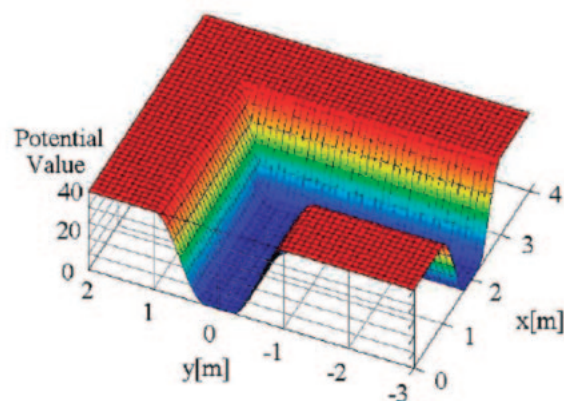


図 7. Potential Field of Environment

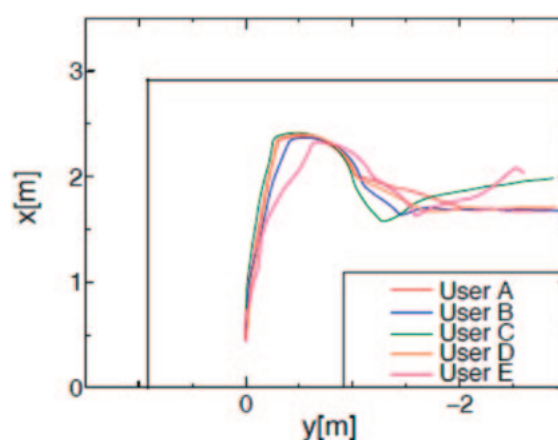


図 8. Experimental Results of Collision Avoidance Function

Walker を用いる場合、目標点への吸引力をブレーキのみで発生させることは困難であるため、ここでは障害物による反発力(斥力ポテンシャル)のみを環境からの拘束力とし歩行支援機に仮想的に発生させる。

本手法の有効性を検証するため実験を行った。本実験では、障害物(壁)を仮想的に用意し、あるポテンシャルを設定して、図 7 のような環境を構築した。実験は、健常者 5 人に高齢者を模擬した歩行速度(2[km/h]程度)で RT Walker を押すことを指示することによって行った。また、実験者にはアイマスクを着用してもらい、視覚的なフィードバックを除去した。

図 8 に実験結果として RT Walker の車輪に取り付けられたエンコーダから計測された 5 人の軌跡を示す。実験結果から壁に衝突する形跡は見られず、環境に適応した運動が行われていることがわかる。しかしながら、壁の近辺である被験者から「若干

違和感を覚える」という指摘を受けた。このような操作性に関する問題は、人間適応型制御において RT Walker のみかけの運動特性を変化させることや、ポテンシャルの重み関数を調整する、環境から目標経路を生成する等の様々な手法が考えられ、今後の課題である。

また、歩行支援機がある経路に追従可能であるかどうかを確認するため、経路追従制御実験を行った。ここでは、人工ポテンシャルを作成するためのパラメータを変更し、S 字型の非常に急勾配の人工ポテンシャルを作成することにより、RT Walker の経路とした。実験では、前述の実験と同様に、アイマスクをつけた 5 人の健常者に RT Walker を押してもらい、S 字型の目標経路を歩行してもらった。実験結果図 9 から、目標経路と RT Walker の軌跡の間に、偏差はほとんどないことが確認でき、経路追従性は良好であることがわかる。

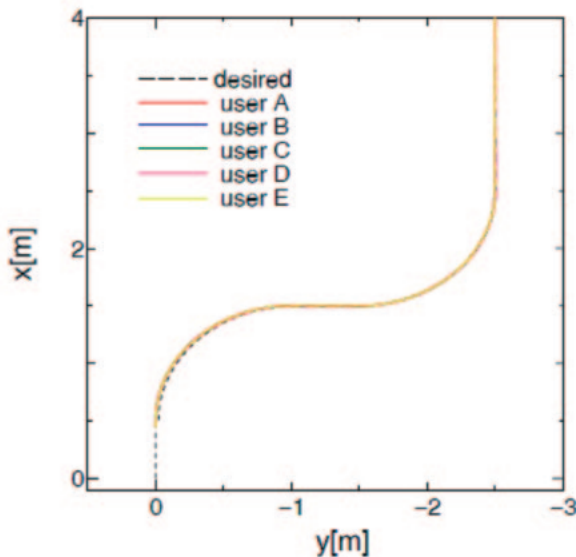


図 9. Experimental Results of Path Following

5.2 障害物・段差回避制御

障害物や段差と RT Walker の代表点との位置関係がわかれば、前節の手法を用いることにより RT Walker がそれらを回避することが可能となる。RT Walker には SICK 社製のレーザレンジファインダが搭載されており、本研究では、このレーザレンジファインダを、RT Walker の前方に、ある角度を付けて設置することにより、柵や壁などの障害物だけではなく、下り階段や車道と歩道の間の下りの段差を検出することも可能となる。

図 10 にその例を示す。図 10 は RT Walker の前方が平面のみである状態、下りの段差がある状態、障害物がある状態をそれぞれ表している。このときのレーザレンジファインダのそれぞれの測定値は、水平面であれば一定値となり、段差があるとその距離が長くなり、障害物があるとその距離が短くなる。すなわち、水平面において計測される基準値を用いることにより、水平面、段差、障害物の検出が可能となる。

ここで、障害物と RT Walker の代表点との最短距離を計測するのは、レーザレンジファインダから得られるある角度に関する距離データに関して一番小さい値を抽出するだけでよい。しかしながら、段差に関しては、若干その扱いが異なる。レーザレンジファインダによってある点を計測した場合、その点が水平面(RT Walker の置かれた平面)より低い場所にあるのはわかるが、段差がどこか

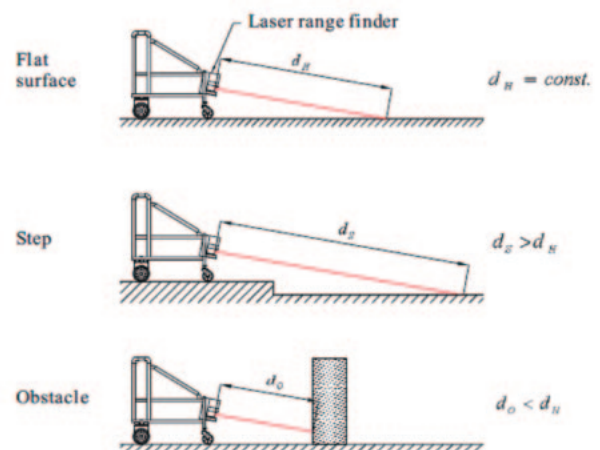


図10. Examples of Obstacle/Step Detection using Laser Range Finder

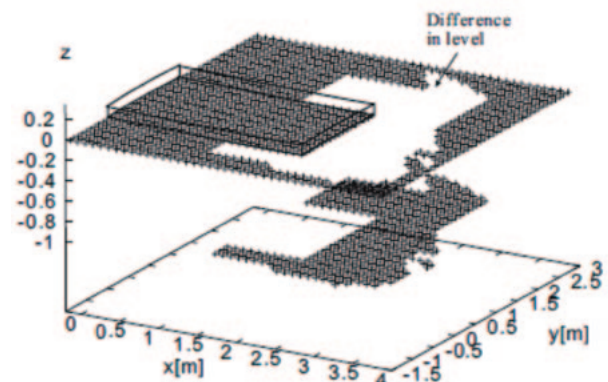


図 11. Global Map of Steps

ら始まっているのかという情報はその点の情報からだけでは得ることができない。そこで、段差に関しては、段差が存在する場所の情報を環境地図にストックし、その環境地図をリアルタイムに参照することで、RT Walker と段差との相対的な位置関係を計算する。

本研究においては、このような段差に関する環境地図を格子状に区切られたセル地図で表現する。ここではレーザレンジファインダによって計測された地点が水平面（RT Walker の置かれた平面）もしくは障害物がある場合には、図 11 に示すようにセル地図上の対応する格子の値を 0 のままとし、もし段差領域であった場合には-1 を代入する。これにより歩行支援機周辺の段差を表す地図を構築することが可能である。ここで、この地図の格子を精細にするほど、より高精度に段差領域が検出でき、その回避動作の性能が向上する。

また、この環境地図を用いることにより、歩行支援機と段差領域までの距離を計算することが出来るため、その距離を用いて障害物回避機能と同様に段差を回避するための人工ポテンシャルを設計することができ、それにより段差回避が実現できる。ここで、障害物回避に関しては速度が遅い状態に限定すれば実際に障害物と接触することは問題ない場合が多く、また障害物と認識された上りの段差を超えるような運動を行うことも考えられる。逆に下りの段差の場合にはその高さによって、無理に降りることは非常に危険であり、必ず停止もしくは回避するような動作が必要となる。したがって人工ポテンシャルの設計に関しては、環境の状態に応じて適切に設計される必要がある。

ここでは、本手法の有効性を確認するため、障害物・段差回避実験を行った。障害物回避実験では、人間が障害物に RT Walker を当てるように強く押し出す力を作用させた。また、段差回避実験でも、高さ 5.5[cm]の長方形の段差上で、この段差から落下するように人が RT Walker に押し出す力を作用させた。実験の様子を図 13 に示す。これより、RT Walker はレーザレンジファインダの情報を基に障害物や段差を認識し、回避運動を行っていることが分かる。また、その時の実験結果を図 14 に示す。

5.3 適用キャストアクション制御

前節で述べた環境適応型制御において RT Walker は、人工ポテンシャル法により障害物や段差を回

避する。しかしながら、その操作性は環境によって必ずしも良くない場合がある。障害物や段差を回避するためには、ロボットにある代表点を設定し、その点にポテンシャルフィールドから計算される仮想外力を発生させることによって実現される。通常、この代表点が障害物や段差に近いほど高いポテンシャルが構成されるため、これらの回避が実現できるが、例えば、ドアやエレベータ等の近づきたい対象があった場合、RT Walker に搭載されるセンサではそれらと障害物との区別がつかないために、利用者は人工ポテンシャルによって生成される反発力を超えた力を RT Walker に作用させなければならず、負担が増大する。この問題を解決するために、ここでは、従来著者らが提案してきた適応キャストアクションと呼ばれる手法[15]を RT Walker に適用する。

本手法は、移動ロボットの運動をキャストの運動特性を満たすように制御するものである。そこで、キャストのオフセットの長さを任意に変化させることにより、ロボットの運動特性を変化させ人間によるロボットの操作性を改善した。本論文では本手法を歩行支援機に適用するために、図 15 に示すように、RT Walker の車軸中央を仮想的な車輪と仮定し、環境適応型制御系のために用いられた代表点を仮想キャストのフリージョイント部と考える。このとき、図 16 に示すようにフリージョイント部の位置（仮想キャストのオフセット）を環境状態や歩行支援機の運動状態に基づいて適切に変化させることができれば、利用者が過大な操作力を RT Walker に加えることなく障害物等に近づくことが可能となる。

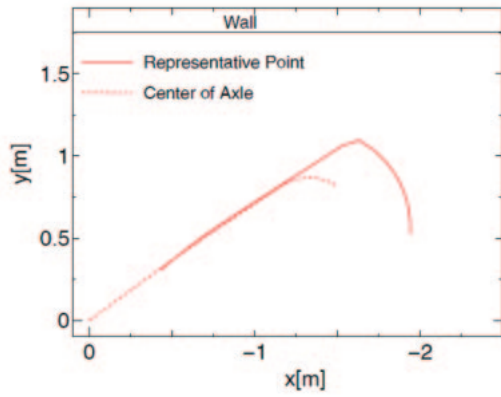


(a) Collision Avoidance Motion

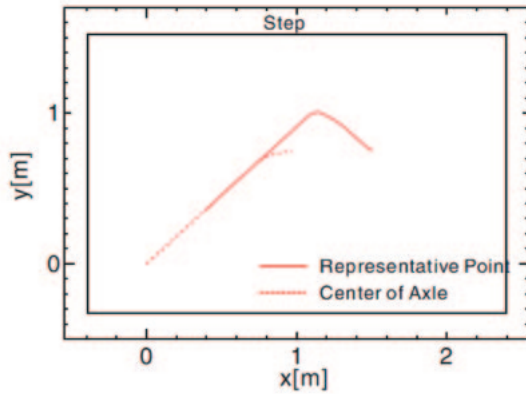


(b) Step Avoidance Motion

図 13. Collision/Step Avoidance Functions



(a) Collision Avoidance Motion



(b) Step Avoidance Motion

(c)

図 14. Experimental Results of Collision/Step Avoidance Functions

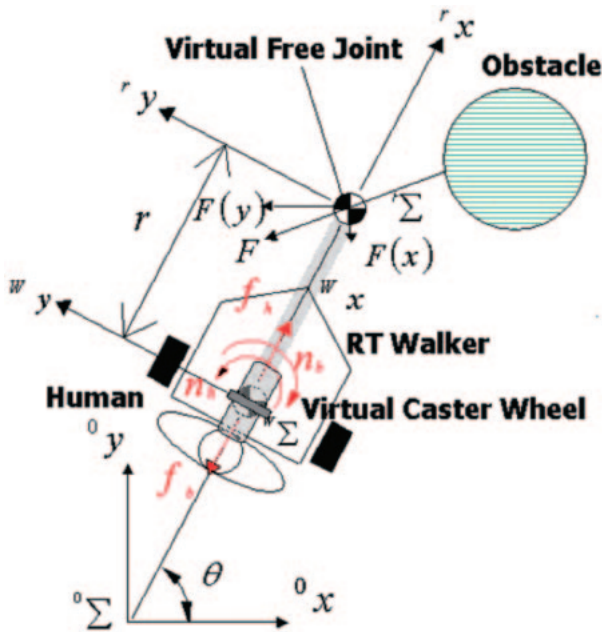


図 15. Collision/Step Avoidance Functions Using Adaptive Caster Action

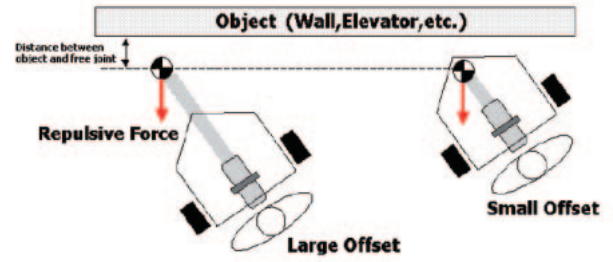
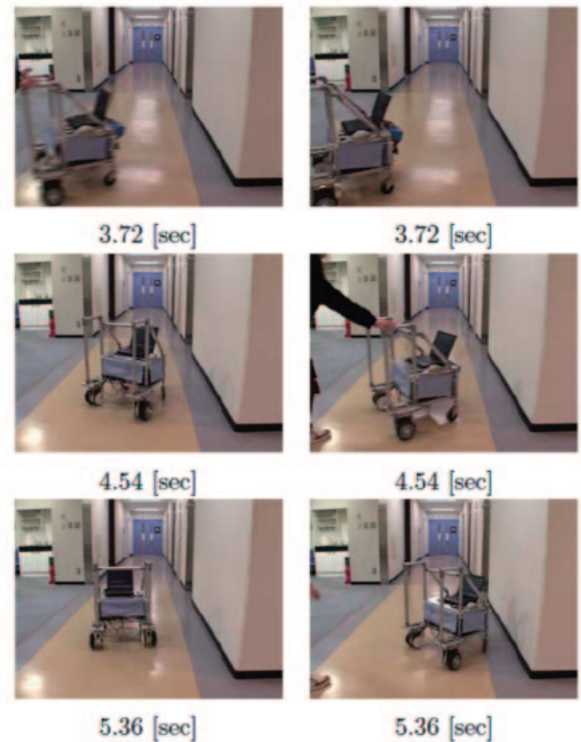


図 16. Environment-adaptive Motion Based on Adaptive Caster Action

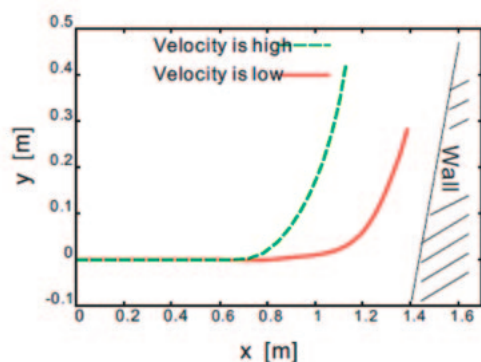
ここでは、提案した適応キャストアクションの有効性を示すために図 18 に示すように、RT Walker の速度が速い場合と遅い場合とで障害物回避実験を行った。このとき RT Walker に実現された仮想キャストのオフセットは RT Walker の進行方向の速度に基づいて変化するものとする。例えば、RT Walker の速度が速い場合には障害物からの拘束力が発生させられる仮想フリージョイント部と RT Walker との距離（オフセット）が大きくなり障害物回避が実現され、速度が遅い場合にはオフセットが小さくなり、レーザレンジファインダでは障害物と認識された対象にも近づくことが可能となる。

実験の様子を図 17 に示し、また、そのときの RT Walker の車軸中央の経路および仮想キャストの

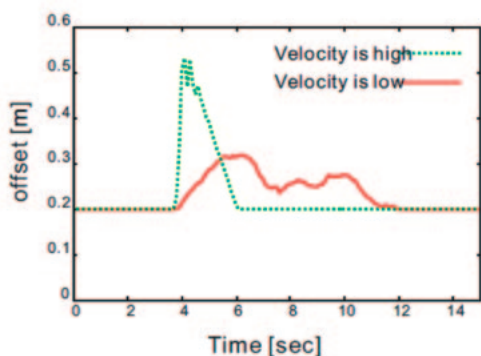


(a) High Speed Motion (b) Low Speed Motion

図 17. Experiments Using Adaptive Caster Action



(a) Motion Path of RT Walker



(b) Virtual Caste Offset

図 18. Experimental Results of Adaptive Caster Action

オフセットの大きさを図 18 に示す。これらの実験結果より、RT Walker の速度が速い場合は、遅い場合に比べて障害物から離れた地点から障害物回避をしていることが分る。一方速度が遅い場合は、障害物に近い場所で回避していることが分り、利用者は RT Walker の速度を変化させることにより目的の行動を実現することができる。

5.4 重力補償制御

市販されている歩行器の坂道や傾斜面上における使用は、歩行器がその自重により傾斜の下方側に走行してしまうため、使用者は自身の体重と歩行器の自重を支えながら歩行しなければならない。このことは使用者にとって大変な負担になると同時に、重大な事故へ発展する危険性も含む。そこで、傾斜面における RT Walker の操作性向上を目的とした、RT Walker の重力補償制御を考える。

RT Walker は水平面に対するロール角及びピッチ角を検出可能な傾斜角センサを持つ。図 19 に示すような傾斜面に RT Walker がある時、重力は、このロール角及びピッチ角により計算される。この計算された重力を基にブレーキ力・モーメントを

導出し、重力をキャンセルすることにより、重力補償を行う。RT Walker の車輪にブレーキトルクを発生させることにより重力は補償され、水平面で RT Walker を使用したときと近い操作感を提供することが期待される。

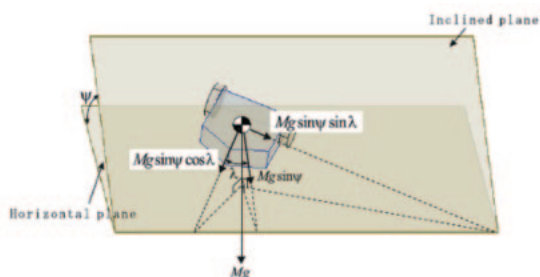


図 19. Roll/Pitch Angles of RT Walker on Slope

重力補償実験では、図 20(a)に示すような足踏み式のフォークリフトを用いて RT Walker を置いた台の傾斜角度を変化させ、RT Walker の挙動を観察した。実験結果として図 20(b)に RT Walker のロール角及びピッチ角の変化を、図 20(c)に速度変化を示す。実験結果より、急激な傾斜角の変化に対してその速度にほとんど変化が見られないことから、本アルゴリズムの有効性が確認できた。

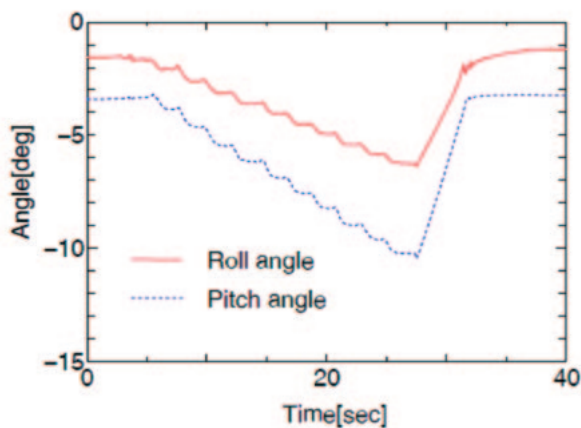
また、図 21 に示すように実際の坂道において RT Walker を用いることによって、その制御アルゴリズムの有効性を確認した。本実験では、利用者が坂道途中で RT Walker から手を離してもそれ自身が重力の影響で運動することは無く、また、重力のみが補償されているため、平地の使用に近い操作感で RT Walker を動かすことができ、安全な歩行の支援が可能であった。サーボモータを用いたシステムと違い、本システムでは、上り坂において利用者を上方へ引き上げることは出来ないが、重力により下方へ運動を生成しないというだけでも、利用者にとって安全かつ肉体的な負担を軽減するシステムとなるであろう。

5.5 一般的な環境での実験

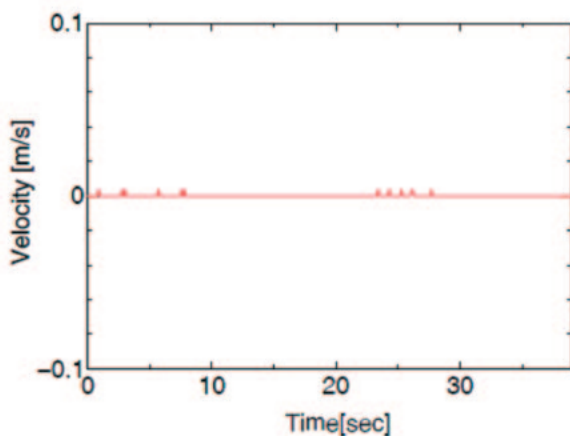
最後に、環境適応型運動制御アルゴリズムの有効性を検証するため、階段や壁、坂道等が存在する一般的かつ実際の環境において実験を行った。人間は視覚を利用した高度な環境認識能力があるため環境の状態に基づいて自ら操作力を調整してしまう恐れがある。そこで、環境からの情報を遮



(a) Experiments Using Fork Lift



(b) Roll/Pitch Angles



(c) Velocity of RT Walker

図 20. Experimental Results of Gravity Compensation Function

断するために被験者にはアイマスクを着用してもらい、その上で、利用者には高齢者の歩行速度（時速 2 km/h 程度）となるように歩行することで評価実験を行った。図 22 に示される実験の様子から、階段や壁、スロープ等がある環境において、適切に障害物・段差回避、重力補償等が実現され、安全な歩行支援が実現できることを確認した。



(a) Experiments Going Downhill



(b) Experiments Going Uphill

図 21. Gravity Compensation Function



図 22. Experimental Results in Real World

6. おわりに

本論文では、安全かつ高性能・多機能なシステムを実現することが可能なパッシブロボティクスの概念を説明し、その概念に基づいて開発された知的歩行支援機 RT Walker を紹介した。また、人間の操作性や環境に基づいて、その運動特性を変

化させる手法を提案し、実際に実験を行うことにより、RT Walkerの有効性を確認した。

今後の課題としては、人間の操作性を考慮したRT Walkerのみかけの慣性行列や粘性係数行列のより詳細な考察や、本システムを高齢者や障害者に実際に使ってもらうことで、使用者の運動能力に対応した、安全かつ操作性の良い歩行支援機の実用化を目指していきたいと考えている。

文 献

- [1] Fujie M, Nemoto Y, Egawa S, Sakai A, Hattori S, Koseki A, and Ishii T. Power Assisted Walking Support and Walk Rehabilitation. *Proc. of 1st International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics*, 1998.
- [2] Hirata Y, Baba T, and Kosuge K. Motion Control of Omni-directional type Walking Support System “Walking Helper”. *Proc. of IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2A5, 2003.
- [3] Manuel J, Wandosell H, and Graf B. Non-Holonomic Navigation System of a Walking-Aid Robot. *Proc. of IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 518-523, 2002.
- [4] Sabatini AM, Genovese V, and Pacchierotti E. A Mobility Aid for the Support to Walking and Object Transportation of People with Motor Impairments. *Proc. of IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2002.
- [5] Yu H, Spenko M, and Dubowsky S. An Adaptive Shared Control System for an Intelligent Mobility Aid for the Elderly, *Auton Robots* **15**, 53-66, 2003.
- [6] Kotani S, Mori H, and Kyohiro N. Development of the robotic travel aid HITOMI. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1990.
- [7] Goswami A, Peshkin MA, and Colgate J. Passive robotics: an exploration of mechanical computation (invited). *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 279-284, 1990.
- [8] Peshkin MA, Colgate JE, Wannasuphoprasit W, Moore CA, Gillespie RB, and Akella P. Cobot Architecture. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **17**, 2001.
- [9] 小柳, 古荘, 小野. ER ブレーキによる3次元パッシブ力覚提示システムの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04講演論文集, 1A1-H-4, 2004.
- [10] Wasson G, Gunderson J, Graves S, and Felder R. An Assistive Robotic Agent for Pedestrian Mobility, *International Conference on Autonomous Agents 2001*, 169-173, 2001.
- [11] MacNamara S and Lacey G. A Smart Walker for the Frail Visually Impaired. *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1354-1359, 2000.
- [12] 中川, 笠, 宮部, 井上. ER 流体を利用したインテリジェントブレーキ付き歩行器の開発. 日本機械学会2000年次大会講演論文集, 349-350, 2000.
- [13] Hirata Y, Takagi T, Kosuge K, Asama H, Kaetsu H, and Kawabata K. Motion Control of Multiple DR Helpers Transporting a Single Object in Cooperation with a Human Based on Map Information. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 995-1000, 2002.
- [14] Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *International Journal of Robotics Research*, 90-98, 1986.
- [15] Hirata Y and Kosuge K. Distributed Robot Helpers Handling a Single Object in Cooperation with a Human. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 458-463, 2000.