パッシブロボティクスと その応用に基づく知的歩行支援機の開発*

Development of Intelligent Walker Based on Passive Robotics

平田泰久** 小菅一弘**
Yasuhisa HIRATA and Kazuhiro KOSUGE

Key words

human assistive system, robot, welfare system, intelligent walker, passive robotics, physical interaction

1. はじめに

人間支援システムの開発は、今後の高齢社会にとって必要不可欠である。特にロボット技術を用いた福祉システムの開発に注目が集まっており、歩行支援システム、離床支援システム、パワーアシストスーツ、パワーアシストカート等多くのシステムが提案されている。人間を支援する福祉システムの多くは、人間と直接的な接触を伴う力学的相互作用に基づいた支援を行う必要がある。このためには、システムが人間によって加えられる操作力に基づいて制御されることが望ましい。これにより、高齢者をはじめとした利用者が、システムを直感的に操作できるようになるが、力覚に基づいたシステムの運動制御系設計においては、制御系の安定性やシステムの安全性を考慮することが重要となる。

そこで、本稿では、このような力学的相互作用に基づく人間支援システムを実現するために、パッシブロボティクスという概念を紹介する。パッシブロボティクスとは、力に対して受動的であるという特性に注目して、知的システムのハードウェアおよびソフトウェア（運動制御系）を設計しようとする概念である。ここで、パッシブロボティクスには2つの設計指針があると考えられる。ひとつはハードウェア自身を力に対して受動的な要素で構成し、その受動要素のパラメータをロボット技術を用いて適切に調節するこ

とにより、人間の操作力に対して、多くの機能を実現するというものである。本稿ではこの概念に基づいて実現できるシステムの運動特性を本質的受動特性 (Inherent Passive Dynamics) と呼ぶ。

もうひとつのパッシブロボティクスの概念としては、システムにみかけの受動特性 (Apparent Passive Dynamics) を実現するというものである。これは、システムの動特性を、人間の操作力に対して受動的となるようにその運動制御系を設計するアプローチである。従来、ロボットシステムをはじめ様々な人間支援システムの多くはサーボモータをその駆動力として用い、人間の操作力を検出する力覚センサの情報を用いて、サーボモータを適切に制御することにより、様々な機能を実現してきた。その際、人間の操作力に対して受動性を有するみかけの運動特性をシステムに設計することにより、人間とシステムとの安定かつ直感的な相互作用を実現した。

システムのみかけの動特性を力に対して受動的となるようにシステムの運動を制御する手法は、テレオペレーションの分野においてよく知られており¹⁾、最近では、物体搬送に代表される人間とロボットの協調制御に関する研究²⁻⁴⁾や、パワーアシストシステム⁵⁾、歩行支援システム^{6,7)}等の研究に应用されている。

力覚センサの情報に基づいてサーボモータを適切に制御することにより、ロボットや福祉システムに受動的な運動特性を持たせる研究は数多く行われているが、サーボモータ等の駆動力を用いることなくハードウェア自身において受動特性を実現する本質的受動特性を持ったシステムに関する研究はまだ少ない。そこで、本稿では特に本質的受動特性を実現するシステムに注目し、そのいくつかの研究を紹介する。また、特にパッシブロボティクスに基づいて開発された知的歩行支援機の研究に注目し、我々が開発したサーボブレーキを利用したパッシブ型知的歩行支援機 RT Walker を紹介する。

2. 本質的受動特性を持つ人間支援システム

ロボットシステムをはじめ多くの人間支援システムの駆

*原稿受付 平成 18 年 12 月 25 日

**東北大学大学院工学研究科 (宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

平田泰久

2000 年東北大学修士課程修了。同年同大学助手。2006 年同大学助教授。2002-2006 年科学技術振興機構さきがけ研究 21 研究員 (兼任)。現在に至る。博士 (工学)。複数ロボットの協調、ロボットヘルパー、歩行支援システム等の研究

に従事。

小菅一弘

1980 年東京工業大学修士課程修了。同年日本電装 (株) (現 (株) デンソー) 入社。1982 年東京工業大学助手。1990 年名古屋大学助教授を経て、1995 年東北大学教授。現在に至る。工学博士。ロボット、マン・マシンシステム、知能機械などの研究に従事。

動力には、サーボモータが利用され、そのサーボモータを各種センサ情報に基づいて適切に制御することにより、高性能・多機能なシステムが実現されてきた。しかし、このようなシステムは構造が複雑化し、重量増、高コスト化となる傾向がある。またサーボモータの高い消費電力のために稼働時間が少なくなるといった問題もある。その他、最も重大な問題となるのは、サーボモータを用いたシステムの誤動作による危険性であり、そのようなシステムを一般環境で使用するための法整備も必要となるであろう。現在、いろいろな機関で多くの人間支援システムが開発されているが、このような問題が解決されないと、実際に人間の生活環境下で物理的な支援を行うのは難しいと考える。

元来、パッシブロボティクスという言葉は、Goswamiらによってパッシブなハードウェアをベースとした知的システムの概念として提案された⁸⁾。彼らは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ことを目指し、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、それら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した。これにより、手先に加えられる力に基づいて様々な運動を実現することができる。また、この概念に基づいていくつかのロボットシステムが提案されている^{9)~11)}。

その後、パッシブロボティクスに概念に基づいてPeshkinらは、Cobotと呼ばれる非駆動型の物体搬送システムを開発した¹²⁾。医療分野においては、PADyC (Passive Arm with Dynamic Constraints) と呼ばれる手術支援ロボットアームが提案されており¹³⁾、文献14)では他のパッシブ型の手術ロボットが紹介されている。リハビリテーションの分野では、古荘らの研究がよく知られており¹⁵⁾、また、バーチャルリアリティを実現するためのハプティックディスプレイの研究も見受けられる¹⁶⁾¹⁷⁾。

本質的な受動特性を持ったハードウェアの駆動力は、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を生成す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、比較的簡易な構造で軽量かつ、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。本質的な受動特性に基づく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よる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. パッシブロボティクスに基づく知的歩行支援機

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。本稿では、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

の支援を実現する知的歩行支援機について解説する。

知的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6)、7)では、利用者の加える操作力に基づいて歩行支援機の運動を制御する手法が提案されている。また、文献18)~20)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²¹⁾。

しかし、これらの歩行支援機は Apparent Passive Dynamics に基づいたシステムであるか、もしくは、環境情報等に基づいてシステムを能動的に駆動させるものである。そのため、移動ベースには駆動力としてサーボモ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、サーボモータを制御することにより歩行を支援している。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はできるが、前述したような構造や安全性に関して様々な問題が生じる場合がある。

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簡易かつ軽量の構造となっており、その操作およ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本質的な受動特性を持つ。このような機器は人が直感的に操作でき、かつ構造が簡易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ため、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る、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といった場合がある。

そこで、近年、本質的な受動特性を有するシステムの高機能化に関する研究が注目されており、いくつかのパッシブ型知的歩行支援機が開発されている。文献22)~24)では、ステアリング用の車輪のみ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った知的歩行支援機が提案されている。また、著者らは、サーボモータを一切用いることなく、歩行支援機の手車輪に取り付けられたブレーキのトルクを制御することにより多機能な歩行支援機を実現してきた²⁵⁾²⁶⁾。また、文献27)においてはER流体ブレーキを利用し、速度超過による転倒を防ぐ歩行支援機も報告されている。

4. パッシブ型知的歩行支援機—RT Walker—

本章では、パッシブロボティクスの概念において特に Inherent Passive Dynamics のアプローチに注目して著者らが開発してきた、多機能知的歩行支援機 RT Walker

図 1 RT Walker

図 2 軌道追従制御

(Robot Technology Walker) を紹介する。通常どのような歩行器においても速度超過の抑制や転倒防止等の危険回避を実現するために車輪にはブレーキが取り付けられている。そこで、著者らは、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を目指した。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おり、それらのブレーキを人間や環境の状態に基づいて独立に制御することにより、単に歩行支援機の進行方向への速度の調整だけでなく、回転運動の支援も実現できる。

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、サーボブレーキのみを用いて構築することから、構造が比較的簡易となり、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て済むといった利点がある。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、バッテリー容量をより小さくすることも可能となる。

図 1 に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。本システムは、フレーム、制御装置、キャスタ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。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 は能動的に作用する駆動系を有していないため、システム自身で駆動力を発生することではなく、人が加える力や重力等に基づいて運動する。すなわちブレーキ

を使った制御の場合、操作力や重力に基づく車輪の回転に対して、その回転の反対方向のみにしかトルクの制御を行うことが出来ない。したがって、従来のサーボモータの制御と異なり、この条件を考慮した制御系の設計が必要となる。以下では、この条件に基づいて実現された RT Walker の機能である人間適応型運動制御と環境適応型運動制御を紹介する。

人間適応型運動制御とは、歩行支援機の運動特性をその進行方向や回転方向に関して任意に変化させる制御系である²⁵⁾。これにより、利用者の多岐にわたる障害等に適応し、速度超過の防止、ふらつき防止、操作性の改善、リハビリテーションの観点から歩行支援機に負荷を与える等の機能を実現した。また、利用者の状態を推定する手法を構築し、リアルタイムに変化するその状態に応じて、RT Walker に実現された各種機能を適切に切り替え、転倒の防止などの機能を実現した。

環境適応型運動制御においては、例えば、環境認識センサから得られる情報を基に、障害物や段差の回避を行う機能や図 2 に示すように利用者がある目的地まで誘導するナビゲーション機能を開発した²⁶⁾。また、坂道などで重力の影響で歩行支援機が利用者の意図に反して運動してしまうことを防止する図 3 に示すような重力補償制御を提案した²⁶⁾。

このように、本質的受動特性を有した知的歩行支援機であっても、サーボモータを用いたシステムとほぼ同等の機能を実現することが可能であり、その構造の簡易さや高い安全性といった利点から、近い将来の実用化が期待できる。

5. お わ り に

本稿では、人間と力学的相互作用を行う人間支援システムの問題について考え、パッシブロボティクスという概念を紹介した。そして、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。パッシブロボティク

図3 重力補償制御

スという概念は、人間とシステムが力学的相互作用を行い、人間の操作力に基づいて、システムを直感的かつ安全に操るためには必要不可欠な技術である。しかし、力に対して受動的であるという特性に固執する必要は無く、著者らのダンスパートナロボットの研究²⁸⁾に見られるように、システムも時には能動的に動作し人間支援を実現することは重要である。今後は、人間への安全性を最優先として考えた上で、実用的かつ効果的な支援が可能なロボットシステムを構築していくことが必要であると考え。

参考文献

- 1) R.J. Anderson et al.: Bilateral Control of Telemanipulators with Time Delay, IEEE Trans. on Automatic Control, **34**, 5 (1989) 494-501.
- 2) K. Kosuge et al.: Robot-Human Collaboration for New Robotic Application, Proc. of IEEE IECON'94, (1994) 713-718.
- 3) K. Kosuge et al.: Mobile Robot Helper, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2000) 583-588.
- 4) Y. Hirata et al.: Distributed Robot Helpers Handling a Single Object in Cooperation with a Human, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2000) 458-463.
- 5) H. Yabushita et al.: Environment-Adaptive Control Algorithm of Power Assisted Cycle, Proc. of IECON2003, (2003) 1962-1968.
- 6) M. Fujie et al.: Power Assisted Walking Support and Walk Rehabilitation, Proc. of Int. Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, (1998).
- 7) Y. Hirata et al.: Motion Control of Omni-directional Type Walking Support System "Walking Helper", Proc. of IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2A5, (2003).
- 8) A. Goshwami et al.: Passive Robotics: An Exploration of Mechanical Computation, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1990) 279-284.
- 9) A. Goshwami et al.: Mechanical Computation for Passive Force Control, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1993).
- 10) A. Goshwami et al.: Mechanically Implementable Accommodation Matrices for Passive Force Control, Int. Journal of Robotics Research, **18**, 7 (1999).
- 11) T. Worsnopp et al.: Controlling the Apparent Inertia of Passive Human-Interactive Robotics, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2004) 1179-1184.
- 12) M.A. Peshkin et al.: Cobot Architecture, IEEE Trans. on Robotics and Automation, (2001) 377-390.
- 13) O. Schneider et al.: PADyC: a Synergistic Robot for Cardiac Puncturing, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2000).
- 14) J. Troccaz et al.: Surgical Robot Dependability: Propositions and Examples, IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments, (2002).
- 15) 古荘ら: ER ブレーキを用いた筋力評価・訓練システム開発のための基礎研究, 日本ロボット学会誌, **20**, 1 (2002) 77-84.
- 16) M.A. Peshkin et al.: Passive Robots and Haptic Displays Based on Nonholonomic Elements, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1996) 551-556.
- 17) 小柳ら: 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).
- 18) J. Manuel et al.: Non-Holonomic Navigation System of a Walking-Aid Robot, Proc. of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, (2002) 518-523.
- 19) A.M. Sabatini et al.: Mobility Aid for the Support to Walking and Object Transportation of People with Motor Impairments, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (2002) 1349-1354.
- 20) S. Dubowsky et al.: PAMM-A Robotic Aid to the Elderly for Mobility Assistance and Monitoring: A "Helping-Hand" for the Elderly, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2000) 570-576.
- 21) S. Kotani et al.: Development of the Robotic Travel Aid HITOMI, Robotics and Autonomous Systems, **17**, 1-2 (1996) 119-128.
- 22) G. Wasson et al.: An Assistive Robotic Agent for Pedestrian Mobility, Proc. of Int. Conf. on Autonomous Agents 2001, (2001) 169-173.
- 23) S. MacNamara et al.: PAMAID: A Passive Robot for Frail Visually Impaired People, Proc. RESNA Annual Conference, (1999) 358-361.
- 24) S. MacNamara et al.: A Smart Walker for the Frail Visually Impaired, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2000) 1354-1359.
- 25) 平田ら: パッシブロボティクス概念に基づいた知的歩行支援機の開発, 日本ロボット学会誌, **24**, 2 (2006) 124-130.
- 26) 平田ら: パッシブ型知的歩行支援機のための環境適応型運動制御, 日本機械学会論文集(C編), **72**, 719 (2006) 181-188.
- 27) 中川ら: 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, (2000) 349-350.
- 28) T. Takeda et al.: HMM-Based Dance Step Estimation for Dance Partner Robot—MS DanceR—, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (2005) 1602-1607.