

研究課題別評価

1 研究課題名： 人間・環境適応型知的歩行支援システム

2 研究者氏名： 平田 泰久

3 研究の狙い：

現在、急速に進んでいる少子高齢化において、高齢者に対する労働人口の減少は避けることができず、高齢者のための様々な福祉介護システムの開発が求められている。このような福祉介護の分野では、人間とシステムとの力学的な相互作用に基づく支援が必要不可欠である。このようなシステムは、人間と直接的な接触を前提としているためその安全性の確保が重要となるとともに、専門知識のない利用者が直感的かつ容易に操作できる高い操作性の実現が期待される。本研究では特に、高齢者や障害者が自律した生活を送るために最も重要な機能の一つである歩行の支援に注目し、高い安全性と操作性を実現する歩行支援システムの研究開発を行った。本システムは、人間とシステムもしくはシステムと環境とが相互作用を行うことにより、人間や環境の情報に基づいた運動を生成し、利用者それぞれの障害に適応した高い操作性と高い安全性を提供するシステムの実現を目指している。本研究では特に駆動力が異なる2つのタイプの歩行支援システムに注目し研究開発を行った。

3.1 アクティブ型歩行支援システム

アクティブ型歩行支援システムでは、従来のロボットシステムに多く用いられるサーボモータをその駆動力として利用し、センサ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、高い操作性と安全性の確保を実現する。本研究では、利用者の障害に適応し高い操作性を実現するために全方向移動機構を利用した歩行支援システムを開発した。また、高い安全性を実現するために、ボディフォースセンサと呼ぶ力覚センサシステムを提案し、直感的かつ安全に歩行支援システムを操作することが可能なインタフェースの研究開発を行った。特にアクティブ型の歩行支援システムでは、全方向移動ベースとそれに取り付けられたサーボモータを利用することにより、システムに様々な運動特性を持たせることが可能となり、知的歩行支援システムで実現できる機能や性能の可能性を検証した。

3.2 パッシブ型歩行支援システム

サーボモータを用いたアクティブ型の歩行支援システムでは、非常に多機能かつ高性能な歩行支援システムを実現することができる。しかし、サーボモータの誤動作等に基づく安全性の問題は、ボディフォースセンサを用いただけでは完全に解決できるものではなく、法律等の整備も必要となることから、このような歩行支援システムがなかなか実用化されない大きな原因のひとつとなっている。そこで、本研究では、より実用的な観点から歩行支援システムに必要な駆動力の見直しを行い、サーボモータを一切使わず、ブレーキのみによってシステムの運動を制御するパッシブ型の歩行支援システムの研究開発を行った。このようなシステムは、能動的な運動を生成することはなく、利用者の加える力を駆動力として用い、その操作力をブレーキを用いて適切に制限することにより歩行支援システムに様々な機能を持たせるものである。本研究では、このようなパッシブロボティクスと呼ばれる技術に基づき、全く新しい観点からの歩行支援システムの研究開発を通して、パッシブシステムにおいて実現できる支援機能の可能性について検証を行った。

4 研究成果：

4.1 アクティブ型歩行支援システムの研究開発

本研究では、図1に示すようなアクティブ型歩行支援システムにおいて高い安全性と操作性を実現することを目指し、ボディフォースセンサを用いた力覚情報に基づく人間・システム協調制御技術の構築および全方向移動ベースを利用した人間適応型運動制御技術の研究開発を行った。

4.1.1 ボディフォースセンサ

従来、歩行支援システムを含め人間との力学的な相互作用を前提としたシステムの研究は数多く行われているが、これらのシステムの多くは、システムの一部にセンサを取り付け、そのセン

サが検出した力情報を主に利用してシステムの運動制御を行っていた。そのため、人間や障害物がセンサ部以外に接触した場合、その情報を検出するためには超音波センサ等の別のセンサが必要となり、安全対策が大掛かりなものとなっていた。また、利用者が接触できる部分が限られるため、システムの直感的な操作が難しくなり、その操作に熟練を要し、高齢者や障害者が使う歩行支援システム等ではその使用が困難となる場合がある。

そこで、本研究では、ボディフォースセンサという概念に基づきシステムを設計することにより、人間や環境に適応し、利用者にとって最適な操作性や高い安全性を有するシステムを提案する。ボディフォースセンサとは、図2に示すように力覚センサをシステムの駆動系とボディ(歩行支援システムではサポートフレームやカバー)との間に搭載することにより実現したセンサシステムであり、これによりシステムのボディ全体に加わる力・モーメントを検出できるものである。このセンサシステムを利用し、かつ加わる力に対してシステムが受動的な運動を生成するような制御系を設計すれば、人間はあたかもアクチュエータの搭載していない受動的な機器を操っているかのように、システムの操作を行うことができる。これにより、高齢者や障害者であっても、直感的かつ容易にシステムを操ることができるようになる。また、環境との接触も同様に検出することができることから、安全対策も容易に行うことができる。

4.1.2 全方向移動ベースを用いた歩行支援システム

知的歩行支援システムにおいて利用者の障害に適応し高い操作性を提供する技術の開発は必要不可欠である。従来開発されてきた歩行支援システムでは、その移動を実現するための車輪の種類や配置が限定されており、非ホロノミック拘束を有した移動ベースを用いたものがほとんどである。しかし、このようなシステムは直進性の安定性は増すが、移動ベース自体の運動特性を大きく変化させることはできないため、利用者の様々な障害に適応した歩行の支援に用いることは困難な場合がある。また、狭い場所での運動や歩行支援システムを利用しながらの複雑な作業を行うことを考慮すると、その操作性は必ずしも良いものではない。そこで、本研究では、このような問題を考慮し、様々な障害を有した高齢者や障害者が、あらゆる環境で快適にかつ適切にシステムを利用することが可能な歩行支援システムの研究開発を目指し、図3に示すような移動ベースに全方向移動車輪を用い、システムの運動特性を自由に変化させることが可能なシステムを実現した。

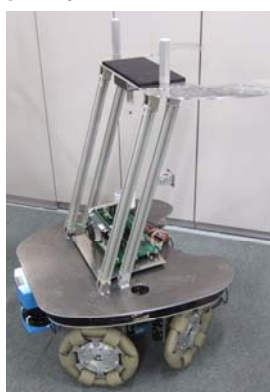


図1 アクティブ型歩行支援機

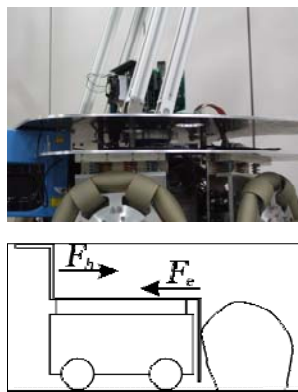


図2 ボディフォースセンサ



図3 全方向移動ベース

4.1.3 人間適応型運動制御技術

通常、アクチュエータを搭載した歩行支援システムでは、システムにある代表点を設定し、その点回りに仮想的な運動モデルを構築し、そのモデルに基づいてシステムの運動を生成する。従来提案されてきた歩行支援システムの多くは、このモデルの制御パラメータを変化させることにより、運動特性を変化させ、利用者に適した操作性を提供してきた。しかし、システムの運動特性は、モデルの制御パラメータの変更だけでなく、その運動モデルを設計する代表点の位置に大きく依存する。通常の歩行支援システムは非ホロノミックな拘束を有しているものが多く、利用者の様々な障害に基づいてその代表点を任意の位置に変化させることはできず、実現できる運動特性にも限界がある。そこで、本研究では、全方向移動ベースを用いることによって、機構的特性に影響され

ることなく、任意の位置に代表点を変化させ、その点において制御系を設計することにより、多くの人間の障害や癖等に適応し、高い操作性を提供する人間適応型運動制御系を開発した。

人間適応型運動制御技術の有効性を確認するために、利用者が歩行支援機を操作し、床面に示されたある軌道に沿わせる実験を行った。この実験では高齢者等の障害を模擬する観点から、システムの操作を難しくするため片手により歩行支援システムを操作した。このとき、図4に示されるような利用者の障害を予め学習し、代表点を利用者の状態に適応させリアルタイムに変化させる制御系を用いた場合と、従来のように代表点を固定した場合とでの比較実験を行った。その時の結果を図5、図6に示す。これにより、利用者に適応し運動特性を変化させた場合には、ほぼ目標の軌道に沿って運動することができ、その操作性が向上できていることがわかる。

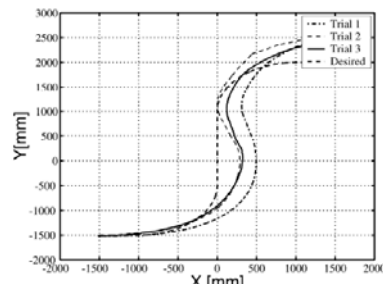
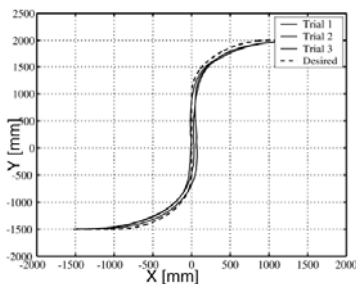
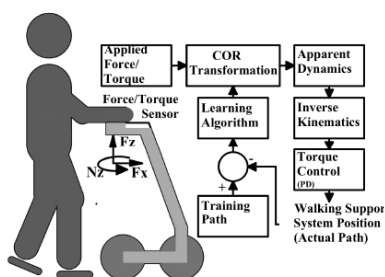


図4 人間適応型運動制御

図5 実験結果(人間適応型)

図6 実験結果(従来制御系)

4.1.4 マニピュレータを利用した軽作業実行システム

歩行支援システムを使用するためには、通常、腕等の上半身で自身の体重をサポートしたり、バランスを取ったりするため、上半身の運動が拘束される場合が多い。そのため利用者の簡単な作業の補助を行うために、図7に示すような歩行支援システムにマニピュレータを搭載したプロトタイプシステムを構築した。また、図8に示すようなタッチパネルを利用したマン・マシンインタフェースを開発することにより、マニピュレータの簡易な操作を実現し、物体のハンドリングに代表される軽作業を実現した。



図7 マニピュレータ搭載型歩行支援システム

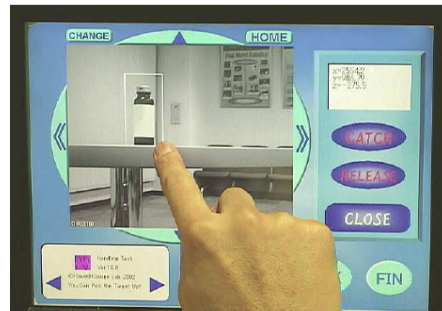


図8 タッチパネル型インタフェース

4.2 パッシブ型歩行支援システムの開発

4.2.1 パッシブロボティクス

従来のロボティクスでは、モータなど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。これにより高機能で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、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ギア等の減速機を用いなければならない。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、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プロボティクスという概念が提案されている。そこで、本研究ではこの概念に基づき、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システムをベースに、歩行支援システムの車輪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、多機能な歩行支援システムを実現することを考える。

パッシプロボティクスの概念を歩行支援システムに適応すると、駆動力が基本的に人の操作力に依存するため、システムが例え誤動作しても人の意図に反して駆動するようなことはない。また、シンプルで軽量かつ、少量のバッテリー容量でも、長時間の稼動が可能になるといった利点もある。パッシプロボティクスの概念は、システムとの力学的相互作用に基づく人間支援という問題において、今後、非常に重要な技術となると考える。

4.2.2 RT Walker

図9に本研究において開発した歩行支援システムのプロトタイプを示す。本システムは、フレーム、制御装置、従属輪であるキャスト、そして対向二輪型に配置したブレーキ付固定輪から構成される。ブレーキにはパウダブレーキを使用した。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。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、歩行支援システムに様々な機能を実現するため、本システムを RT Walker と呼ぶ。RT Walker には過剰な性能を有したパウダブレーキを用いているが、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 35[kg]程であるが、これはプロトタイプのためであり、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、大幅な軽量化が実現できると考える。また、このプロトタイプの技術を応用し、図10に示すような全方向移動型のパッシブ歩行支援システムも開発した。

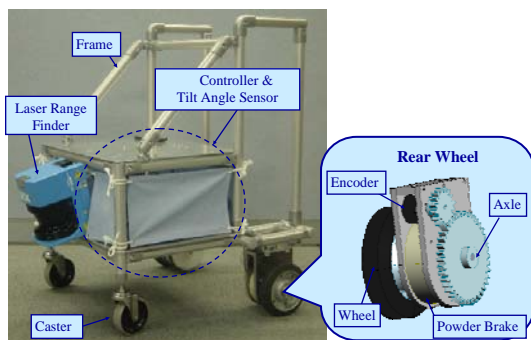


図9 パッシブ型歩行支援機 RT Walker



図10 全方向移動型パッシブ歩行支援機

4.2.3 人間適応型運動制御アルゴリズム

人間適応型運動制御系としては、図11、図12に示すように歩行支援システムの運動特性を任意に変化させる制御系を提案した。これにより、アクティブ型歩行支援システムの研究開発で構築された技術を拡張することにより、利用者の障害等に適応することや、リハビリテーションの観点から歩行支援システムにある程度の負荷を与えることなどが実現できた。また、図13に示すように利用者の状態を推定する手法を構築し、図14に示すようにリアルタイムに変化するその状態に応じて適切に歩行支援システムに実現された機能を切り替える手法を開発した。これにより、歩行支援システムの使用時において最も危険であるといわれる転倒の防止を実現する機能を持たせることも可能とした。

4.2.4 環境適応型運動制御アルゴリズム

環境適応型制御アルゴリズムとしては、環境認識センサから得られる情報を基に、図15に示すように障害物や段差の回避を実現する機能や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。また、坂道等での歩行支援システムの利用を考慮し、重力の影響で歩行支援システム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、重力補償制御系を提案した。こ

れにより、利用者はあらゆる環境で、あたかも平地で歩行支援システムを利用しているような感覚を持つことができる(図16)。これらの機能を統合することにより一般かつ複雑な環境においても、図17に示すように、歩行支援システムを安全に使用することが可能となる。

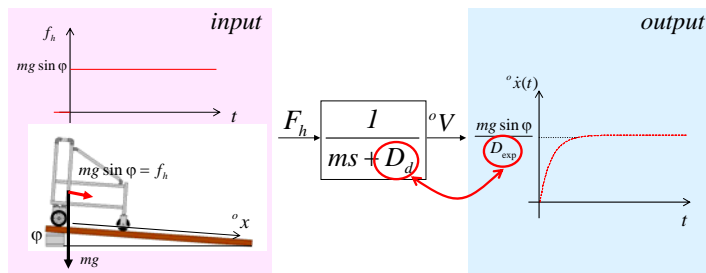


図11 運動特性可変制御の検証実験

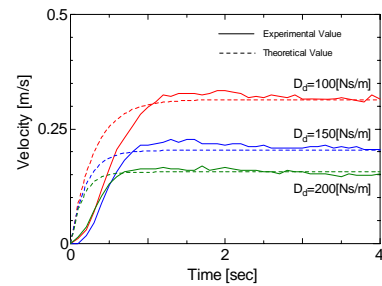


図12 実験結果(理論値との比較)

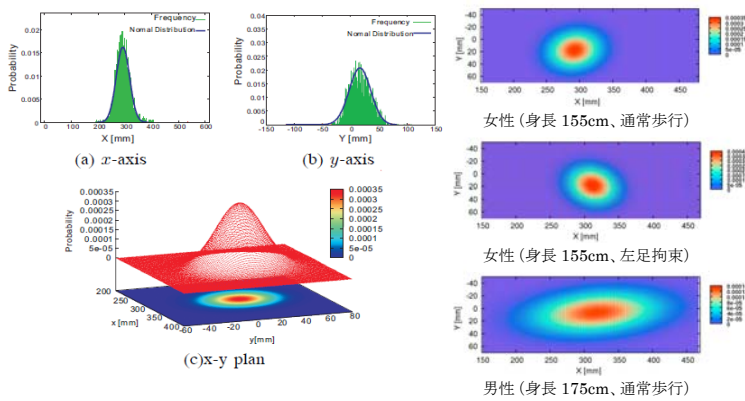


図13 システムと利用者の相対距離分布
(2次元正規分布に従う)

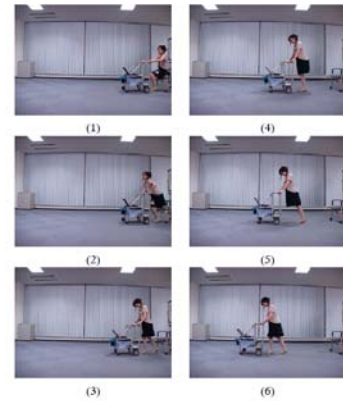


図14 利用状態による機能切り換え
(立位支援、歩行支援、転倒防止)

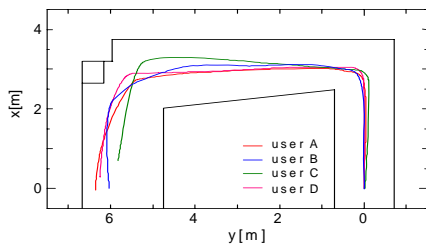


図15 障害物回避実験結果

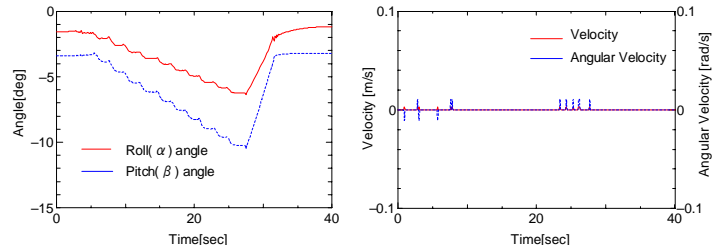


図16 重力補償実験結果



図17 実際の環境でのパッシブ型歩行支援システムの利用 (アイマスク着用)

5 自己評価:

本研究では、安全性と操作性という観点から歩行支援システムの高機能化を実現する研究開発を行った。特にモータを利用したアクティブ型システムにおいてはボディフォースセンサを用いることにより安全かつ直感的な操作性を実現するセンサシステム設計概念を提案するとともに、利用者それぞれの障害に適応することにより操作性が向上し、かつリハビリテーションにも応用が期待できる全方向移動型歩行支援システムのための運動制御系を提案した。このような技術は、人間との接触を前提とした多くの力学的相互作用型人間支援システムに適用可能な基盤技術であり、その発展に大きく貢献するものと考えられる。

また、ブレーキのみを利用して人間の歩行を支援するパッシブ型歩行支援システムの開発を行うとともに、そのブレーキを適切に制御し人間の障害や歩行機の使用状態、環境の情報等に基づいて適切な支援を実現する運動制御手法を構築した。このようなシステムは、自ら駆動力を持つことがないため、本質的に安全なシステムであり、かつモータを利用しなくとも多くの機能を持たせることができる。このようなパッシブロボティクスの基盤技術の研究開発を通して新しい研究領域を開拓することができたと考えている。そして、このような技術は近い将来に実際に社会で使われる人間支援技術の一つになりえると考えている。

本研究では、特にマニピュレータを用いた作業実行システムの実現において、必ずしも研究計画どおりの成果を挙げることができなかつたが、アクティブ型システムのための基盤技術の開発や、研究計画段階ではほとんど考慮していなかつたパッシブ型システムを大きく発展させることができ、非常に中身の濃い研究開発ができたと考えている。今後は今回研究開発してきた基盤技術をさらに発展させ、歩行支援システムの研究のみならず、多くの人間支援システムの研究開発に取り組み、よりディペンダブルかつ実用的なシステムの研究開発を行っていきたいと考えている。

6 研究総括の見解:

本研究では、安全性と操作性という観点から歩行支援システムの高機能化を実現する研究開発を行った。ボディフォースセンサを用いることにより安全かつ直感的な操作性を実現するセンサシステムの設計概念を提案するとともに、利用者それぞれの障害に適応することにより操作性が向上し、かつリハビリテーションにも応用が期待できる全方向移動型歩行支援システムのための運動制御系の提案により、モータを利用したアクティブ型歩行支援システムを、さらには、ブレーキを適切に制御し人間の障害や歩行機の使用状態、環境の情報等に基づいて適切な支援を実現する運動制御手法を構築することにより、ブレーキのみを利用したパッシブ型歩行支援システムを開発したことは、大きな成果であり、高く評価できる。

今後は今回研究開発してきた基盤技術をさらに発展させ、歩行支援システムの研究のみならず、多くの人間支援システムの研究開発に取り組み、よりディペンダブルかつ実用的なシステムの研究開発を行っていくことを期待する。

7 主な論文等:

論文

1. 平田泰久, 小菅一弘, 浅間一, 嘉悦早人, 川端邦明, “キャスト特性を有した複数の人間協調型移動ロボット(DR Helper)と人間との協調による単一物体の搬送”, [日本ロボット学会誌,21(7),(2003),80-88]
2. 平田泰久, 小菅一弘, 浅間一, 嘉悦早人, 川端邦明, “人間と複数の移動ロボットによる大型物体のハンドリング”, [日本機械学会論文集(C編),70(691),(2004),151-157]
3. Yasuhisa Hirata, Youhei Kume, Zhi-Dong Wang, Kazuhiro Kosuge, “Handling of a Single

Object by Multiple Mobile Manipulators in Cooperation with Human Based on Virtual 3-D Caster Dynamics”, [JSME International Journal, (掲載決定)]

4. 平田泰久, 原麻美, 小菅一弘, “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, (掲載決定)]
5. Oscar Chuy Jr., Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, “A New Control Approach for a Robotic Walking Support System in Adapting User Characteristic”, [IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics, (掲載決定)]

国際会議発表論文

1. Yasuhisa Hirata, Takahiro Baba, Kazuhiro Kosuge, “Motion Control of Omni-directional Type Walking Support System “Walking Helper””, [Proceedings of The 12th International IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication,(2003),85-90]
2. Yasuhisa Hirata, Asami Hara, Kazuhiro Kosuge, “Passive-type Intelligent Walking Support System “RT Walker””, [Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,(2004),3871-3876]
3. Yasuhisa Hirata, Asami Hara, Kazuhiro Kosuge, “Motion Control of Passive-type Walking Support System based on Environment Information”, [Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation,(2005),2932-2937]
4. Yasuhisa Hirata, Asami Muraki, Kazuhiro Kosuge, “Motion Control of Passive-type Intelligent Walker Based on Caster-like Dynamics”, [Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics,(2005),477-481]
5. Oscar Chuy Jr., Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, “Augmented Variable Center of Rotation in Controlling a Robotic Walker to Adapt User Characteristics”, [Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,(2005),2806-2811]

国内会議発表論文

1. 平田泰久, 馬場貴大, 小菅一弘, “回転中心可変型歩行支援システムの人間適応制御”, [日本ロボット学会学術講演会, (2003), 2H11]
2. 原麻美, 平田泰久, 小菅一弘, “ブレーキを利用した運動特性可変型歩行支援機の制御”, [日本ロボット学会学術講演会, (2003), 2H25]
3. Oscar Chuy, 平田泰久, 小菅一弘, “Variable Admittance Control of Walking Helper Based on Human Characteristics”, [SI2003 学術講演会, (2003), 227-228]
4. 平田泰久, 原麻美, 小菅一弘, “パッシブロボティクスに基づいた歩行支援システム “RTWalker”, [ロボティクスシンポジウム予稿集, (2004), 248-253]
5. 平田泰久, 原麻美, 小菅一弘, “パッシブ型歩行支援機による障害物・段差回避制御”, [ロボット学会学術講演会, (2004), 1I36]

著書

1. Kazuhiro Kosuge, Yasuhisa Hirata, “Coordinated Motion Control of Multiple Manipulators”, [Robotics and Automation Handbook,(2005)]
2. 平田泰久, 王志東, 小菅一弘, “複数ロボットの協調制御, 制御系のためのシミュレーション, 非線形制御”, [新版ロボット工学ハンドブック, コロナ社,(2005)]

総説・解説

1. 平田泰久, “人間支援ロボットシステム -ロボットヘルパー-”, [病院設備,45(1),(2003),57-64]

特許出願

1. 直動アクチュエータユニット 2003年4月24日出願(特願2003-119930)
2. パワーアシスト型移動台車 2003年5月22日出願(特願2003-145485)
3. パッシブ型移動台車 2003年9月8日出願(特願2003-315912)
4. Translator Actuator Unit 2004年4月23日出願(ASAIN0143)
5. 人体モデルに基づく装着型支援システム 2004年9月16日出願(特願2004-264978)
6. 人間状態推定に基づく知的移動台車システムの運動制御 出願中

招待講演

1. Yasuhisa Hirata, “Robot Technologies for Human-Robot Cooperation Systems in Ubiquitous Age”, [Proceedings of 2003 International Symposium on Microelectronics,(2003),560-565]
2. 平田泰久, “人とロボットの相互作用に基づく人間・ロボット協調システム -ロボットパートナーの開発-”, [SI2003 学術講演会, (2003), 157-158]

受賞

1. Best Paper in Robotics Award(2004年8月 ROBIO2004)[From Human to Pushing Leader Robot: Leading a Decentralized Multirobot System for Object Handling]
2. SI2004 ベストセッション講演賞(2004年12月, SI2004) [Variable Center of Rotation Control for Walking Support System Based on Environment Information]
3. SI2004 ベストセッション講演賞(2004年12月, SI2004) [RoBEを用いたモバイルマニピュレータの実時間自己衝突回避制御]
4. SI2004 ベストセッション講演賞(2004年12月, SI2004) [立ち上がり動作支援システムの動力学解析]
5. 青葉工学振興会研究奨励賞 (2004年12月, 青葉工学振興会)[パッシブ型歩行支援システムに関する研究]
6. 日本機械学会賞(論文) (2005年4月, 日本機械学会)[仮想3-D キャスタ特性を有した複数の移動マニピュレータと人間との協調による物体のハンドリング]
7. ROBOMECH表彰 (2005年6月, ロボティクス・メカトロニクス講演会2004)[Cagingを用いた物体の搬送のための複数ロボットのフォーメーション制御の提案]
8. 日本ロボット学会論文賞 (2005年9月, 日本ロボット学会)[キャスタ特性を有した複数の

人間協調型移動ロボット (DR Helper) と人間との協調による単一物体の搬送]

新聞・雑誌・テレビ

1. 歩行支援システムに関する研究(テレビ サイエンスチャンネル)(2004)
2. パッシブ型歩行支援システムに関する研究(テレビ ミヤギテレビ)(2004)
3. 高齢者の坂道歩行支援(新聞 日経産業新聞)(2005)

展示会

1. 産業交流展 (2004)
2. さきがけライブ(2005)
3. 東北電力「でんき屋台村」(2005)
4. 東北大学 先端技術交流会(2005)
5. ROBOTREX (2005)