

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18360202
 研究課題名(和文) 下肢麻痺者の歩行再建のためのインテリジェントシステムの開発
 研究課題名(英文) Development of an Intelligent System to Assist Paraplegics
 in Walking
 研究代表者
 宇野 洋二 (UNO YOJI)
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：10203572

研究成果の概要(和文)：脊髄の損傷等で下肢機能が麻痺したために車椅子の生活を送っている患者に対して、二本足での歩行を可能にするシステムの開発を行った。下肢麻痺患者にとっての根源的な問題は、脳からの運動指令が下肢に伝達されないために、自分の意図する動作が実現できないことである。そこで本研究では、下肢麻痺者が本来備えている感覚・運動能力と歩行補助ロボットの機能を統合した歩行再建システムを開発した。特に、各種のセンサを搭載し、センシング情報に基づいて予測的な制御が可能なインテリジェントなシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a legged locomotor device for paraplegic patients who were injured on the spinal cord and usually use wheelchairs. It is important in walking reconstruction with a wearable robot to predict and generate the motion patterns intended by the paraplegics. In this project, we construct an intelligent system to control the robot that assists the motion of paralyzed legs. The system has a human interface to decide the stride length of the robot according to the arm movements of paraplegics. Walking experiments of healthy subjects wearing the robot were carried out and the effectiveness and stability of the proposed system was confirmed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
総計	6,600,000	1,980,000	8,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：リハビリテーション、下肢麻痺者、装具歩行、歩行再建、補助ロボット、装着型ロボット、予測的制御、転倒防止

1. 研究開始当初の背景

車椅子の生活を送っている下肢麻痺患者にとって「立って歩きたい」という要望は強く、リハビリテーション医療の現場などで、立位や二足歩行を可能にするための装具や

訓練法が検討されてきた。しかしながら、これまでの装具等による歩行再建は身体的負荷が高くて効率的でない上に、安定性・安全性にも大きな問題があり、実用化されるには至っていない。そこで本研究では、ヒトの運

動制御の情報システム論的な観点から二足歩行のダイナミクスを検討するとともに、下肢麻痺者の感覚・運動能力を十分に生かした歩行再建システムの構築をめざした。

本研究課題（基盤研究(B)）は、NEDO の人間支援型ロボット実用化基盤技術開発（「自立動作支援ロボット及び実用化技術の開発」：平成 17～19 年度）の事業で採択された研究プロジェクト「実用性を追求した下肢麻痺者用の歩行補助ロボットの開発」（代表：アスカ株式会社）と密接に関係している。NEDO のプロジェクトでは、下肢麻痺者に装着して歩行を補助するロボット（WPAL: Wearable Power-Assist Locomotor）の開発と製品化をめざして、ハードウェア面の開発（ロボット本体の製作）と臨床応用が中心であった。一方、本研究課題（基盤研究(B)）では、WPAL の提供を受けて、ソフトウェア面（操作性）に焦点を当て、センサ・制御系を組み込んだインテリジェントなシステムの構築と、学習制御によるスキルアップが重要なテーマとなった。

2. 研究の目的

下肢麻痺患者にとっての根源的な問題は、脳からの運動指令が下肢に伝達されないために、自分の意図する動作が実現できないことである。それ故、単に歩行補助ロボットをつくるだけでは、下肢麻痺患者は機械的に歩かされるだけになってしまう。下肢麻痺患者自身が思う通りの歩行を実現するためには、上肢や体幹の自発的な動きに、補助ロボットによる下肢の運動を協調させることが重要になる。そこで本研究では、下肢麻痺患者の身体各部の動きから、意図する歩行パターン（歩幅、接地離脚のタイミングなど）を推測し、麻痺している下肢の運動を補助するシステムを開発する。具体的には、下肢に連動する上肢や体幹の動きと足底の圧情報、あるいは歩行器のセンサ情報などによって以後の動きをリアルタイムで予測し、歩行を制御する機構を組み込む。

装具や補助ロボットを装着した下肢麻痺患者の身体の拘束は大きく、歩行パターンが機械的に生成されるので、歩行中のわずかな不整地や傾斜などでもバランスを崩して転倒し重大な事故につながりやすい。よって、下肢麻痺患者の歩行補助システムにおいて、転倒防止は安全に直結するために確保すべき最も重要な課題である。そこで本研究では、下肢麻痺者が後方に転倒することなく歩行を安定に持続するための力学的な条件を導出するとともに、ポイントとなる重心を推定する法を考案する。さらに、転倒条件を検出するための計測システムを開発し、それに基づく転倒回避の制御機構を組み込む。

以上、本研究の目的は、下肢麻痺患者自身

が意図する歩行を安全かつスムーズに実現できるようなマンマシンインタフェースを構築し、センサ・制御系を組み込んだインテリジェントな歩行再建システムを開発することである。さらに、動作テストにより本歩行再建システムの有効性を確認するとともに、実用化に向けた問題点をチェックすることも重要な課題である。

3. 研究の方法

本研究では、才藤らが開発したプライムウォーク（図 1）を組み込んだ内側系装具（図 2）をベースにして、NEDO のプロジェクトで開発された装着型の歩行補助ロボット WPAL（図 3：アスカ株式会社製）を用いて、歩行再建システムを構築した。



図 1. プライムウォーク



図 2. 内側系装具



図 3. 歩行補助ロボット
WPAL（アスカ（株）製）

下肢麻痺患者の望む歩行を可能にする操作性に優れた歩行再建システムを開発するために、本研究で主として取組んだのは下記の 2 つの課題である。

(1) 予測的な運動補助

下肢に連動する上腕の運動に着目し、ユーザ（歩行補助ロボットを使用する下肢麻痺患者）の意図に従った歩行パターンを生成できるシステムを開発した。

① 腕の運動に基づく歩幅の予測

歩行パターンにおいて特に、歩幅を予測的に制御することは、ユーザの上肢および体幹の自発的な運動とロボットによる下肢の運動を協調させる上で重要である。図 4 に示すように、ユーザは下肢に歩行補助ロボットを装着し、杖の代わりに歩行器で身体を支えながら二足歩行をする。すなわち、ユーザは腕で歩行器を前に押し出して、その後重心を前方に移動しながら補助ロボットの制御によ

って下肢を前に振り出す。歩行器には、姿勢角度と加速度が計測可能な慣性センサが取り付けられ、並進方向の加速度データが検出可能である。そしてこの計測データに従って歩行器の移動距離と歩幅とが一致するように歩行補助ロボットを制御することにした。尚、図4で背中に背負っているザックにはコントローラが入っており、補助ロボット(WPAL)の動作が制御できる。

移動距離を推定するには、通常、加速度信号を2階積分する方法が考えられるが、歩行器への外乱等によって極端な加速度値が検出されたりして、大きな積分誤差が蓄積されるため、精度のよい距離推定はできなかった。そこで、ヒトの腕運動をよく再現する「滑らかさの運動規範(躍度最小モデル等)」に基づいて、加速度データから腕の進行方向の運動を推定し、腕の振り幅(すなわち、歩行器の移動距離)を算出した。具体的には、時間

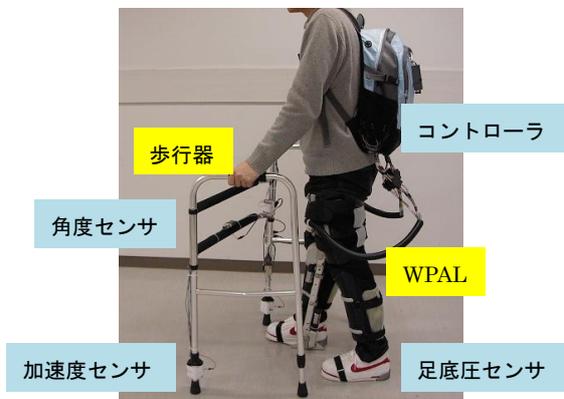


図4. 歩行補助ロボット(WPAL)を装着したユーザが歩行器を用いて歩行する動作テスト。

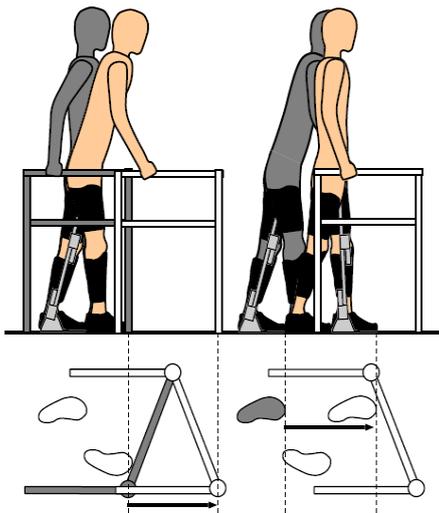


図5. 歩行器を用いた下肢麻痺者の歩行動作における腕と脚の位置関係。最初に腕で歩行器を前方に動かして(左図)、その後、スイング動作を行う(右図)。

に関する7次の多項式で加速データをフッティングするように係数を定めて、運動軌道を求めた。さらに腕の振り幅に対応してユーザの意図する歩幅を予測し、その歩幅が実現されるように歩行補助ロボットを制御するシステムを構成した。図5に歩行器を用いた下肢麻痺者の歩行動作における腕と脚の位置関係を模式的に示す。左図は右腕で歩行器を前方に動かす動作を示し、右図はその後の左脚のスイング動作を示す。反対側も同様の動作を行い、この1連の動作を1周期として歩行動作を行なった。

次に、システムの有効性を検証するために、移動距離の精度評価、および健常者による歩行補助ロボットの動作テストを行なった。その結果、歩行器の移動距離と歩幅(足つま先の移動距離)の間に高い相関があり、両者の値がほぼ一致することが確認された。図6に代表的な被験者の歩行器の移動距離と歩幅との回帰分析の結果を示すが、決定係数が0.844で有意な相関($p < 0.01$)を示すとともに、回帰直線の傾きが0.907と1に近い値を示した。さらに、健常者が装着した歩行補助ロボットの動作実験を行なって、歩幅の調整を確認した。

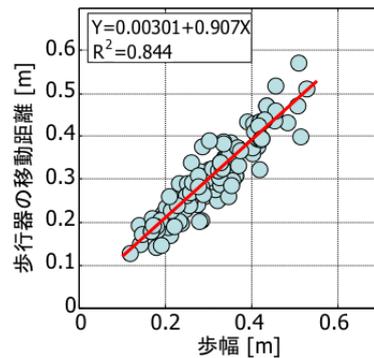


図6. 歩行器の移動距離と歩幅の回帰分析。

② 歩行補助ロボットの予測的制御

下肢麻痺患者の初期動作のセンサ情報から患者の望む歩様を推定して、ステップ動作の途中から補助ロボットを予測的に制御できるようにシステムを改良した。まず、慣性センサを歩行器に取り付けて歩行器の運動途中までの加速度データから多項式近似することによって、ユーザ(下肢麻痺患者)の意図する下肢の移動距離を推定した。運動途中で歩幅を予測することにより、その時点から補助ロボットの制御を開始することが可能となった。予備実験で適切な予測運動時間と予測開始時刻を決定することによって、ユーザの歩幅を高い精度で予測できることがわかった。次に健常者によるシステムの動作テストにより、予測した歩行器の移動距離に応じて補助ロボットの歩幅が制御されていることを確認した。

(2) 後方転倒の防止

歩行器を用いた歩行では、後方への転倒のリスクが高く、ロボットの動作によって支持基底面が変化する離脚時に転倒しやすい。そこで、筋骨格系のダイナミクスを考慮した転倒条件の導出、重心位置の推定法の考案、後方転倒予防機構の検討という手順で研究を行なった。

① 転倒条件の導出

下肢麻痺者が後方に転倒することなく歩行を持続するための必要条件について、倒立振り子モデル(図7左図)を用いて力学的な解析を行なった。その結果、歩行中の単脚支持器において重心位置が足関節の後方から前方に弾道的に移動するためには、離脚時の重心速度が重心位置と固有振動数の積より大きな値を持たなくてはならないという条件式(転倒条件)が導かれた。身体の詳細な骨格モデル(図7右図)を用いた計算機シミュレーション、および健常者と下肢麻痺者の歩行計測実験からもこの転倒条件を検証することができた。さらに、歩行中に重心運動の解析結果から、下肢麻痺者の安定かつ効率的な歩行補助のためには、弾道歩行の条件が満たされるように(すなわち、転倒条件を超える十分な重心速度が得られるように)、両脚支持期において制御を加えることが有効であることがわかった。

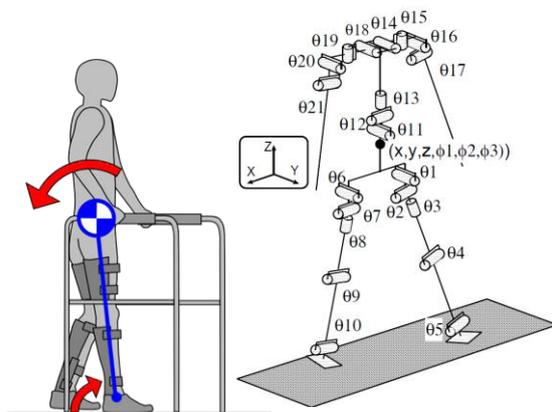


図7. 転倒条件を導出するための倒立振り子モデル(左図)と多リンクモデル(右図).

② 重心位置の推定

歩行の安定な制御や効率性を評価する上で、身体の重心運動を解析することは極めて重要である。ここでは、床反力計と3次元位置計測装置を用いて、体節と質量中心に関するパラメータを推定する方法を考案した。この方法で推定した物理パラメータ値と体節の角度から、幾何学的に重心位置を求めることができる。健常な被験者に対して起立動作と静止姿勢、ステップ動作の計測実験を行ない、推定した重心位置と床反力計による圧力中

心位置との誤差によってその推定精度を検証した。その結果、重心位置の推定精度はほとんどの姿勢で10 mm以下となり、また、このようにして計算された重心の加速度は、床反力計から得られた重心の加速度とほぼ一致することも確認した。なお、歩行器を用いた起立動作において、被験者に床反力を提示しながら訓練を行なったところ、荷重センサに基づく安定性の指標を与えることによって、身体負荷(関節トルクの値)が軽減することがわかった。

③ 足底圧センサを用いた後方転倒予防

歩行中の床反力のセンサ情報に基づいてユーザ(下肢麻痺患者)の運動状態を検出し、後方転倒を防止する制御機構を開発した。まず、歩行補助ロボットの足底に小型力覚センサをアルミ板で挟み込み、さらに計測回路も組み込んで、足底圧計測システム(図8)を製作した。このデバイスは僅か15 mmの薄さで、3軸方向の床反力と圧中心を精度よく計測でき、外部の床反力計の計測値と比較しても高い決定係数を示した。この床反力情報からゼロモーメントポイント(ZMP)を算出し、ZMPに基づいて後方転倒のリスクを低減する制御が可能になった。すなわち、ZMPに基づくステップ動作開始条件(両脚支持期にZMPがロボットの支持脚足底の内部に存在すれば遊脚のスウィングを開始すること)を導出した。

この制御方式をコントローラに実装して、健常者による歩行実験を行なった。歩行中のZMPの軌道を図9に示す。図中の長方形はロボットの足底を示し、赤点列が左足離地から右足離地の間ZMPに、青点列が右足離地から左足離地の間ZMPに対応する。この結果より、ZMPが足底の内部に入るタイミングでステップ動作が始まっていることがわかる。すなわち、安定にステップを開始できる状態を検出して、補助ロボットが動作を開始し、ユーザの前方への体重移動を適切に制御・補助することが確認できた。これにより歩行中のユーザの体重移動を検出して、安定にステップ動作を開始することが可能になった。

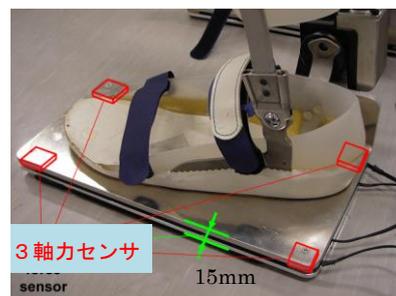


図8. 足底圧計測システム.

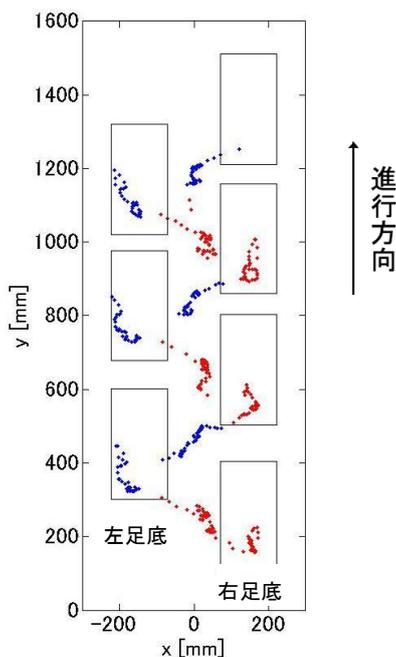


図9. 転倒防止制御における ZMP 軌道 (赤点列と青点列: 本文参照). 長方形はロボット足底を示す.

4. 研究成果

本基盤研究(B)では、マンマシーンインタフェースとして、ユーザの意図する歩幅とタイミングを歩行器の動きと足底センサから推定し、歩行補助ロボットの歩行パターンを生成するセンサ・制御システムを構築した。また、後方転倒の防止のために床反力計測システムを製作するとともに、そのセンサ情報に基づいて、安定にロボットの動作を開始する制御法を考案した。健常者による歩行補助ロボットの動作テストでは、ユーザが自ら歩幅を調整しながら安定に歩行できることが確認された。さらに、転倒防止の動作テストで、上腕三頭筋の表面筋電位を同時計測した結果、考案した制御法を適用することによって有意に筋電位が減少し、上肢の負担が軽減されることもわかった。

開発した歩幅調整可能な歩行補助システムは、健常者に対して動作テストを行ってきた。今後は、本歩行補助システムを下肢麻痺患者に試していただいて、その操作性を評価するとともに、センサ・制御系を再検討しシステムを改良していく予定である。

本研究で開発した運動補助システムでは、下肢麻痺者の平地面での前進運動を想定しているため、その用途は屋内のかなり限られた場所に限定されている。今後は、このシステムを発展させて、斜面や段差のある場所での運動補助、さらにはユーザがその歩行の方向を転換するときに補助ロボットの適切な制御ができるシステムへと発展させることが望まれる。これらの課題を達成することができれば、屋外での下肢麻痺者の自立歩行が

可能となり、本歩行補助システムの実用化への道が開けるであろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Takahiro Kagawa, Yoji Uno: Necessary condition for forward progression in ballistic walking, *Human Movement Science*, in press, 2010. 査読有.
- ② Yuji Harata, Fumihiko Asano, Zhi-Wei Luo, Kouichi Taji, Yoji UNO: Biped gait generation based on parametric excitation by knee-joint's actuation, *Robotica*, Vol.27, pp. 1063-1073, 2009. 査読有.
- ③ 原田祐志, 浅野文彦, 田地宏一, 宇野洋二: パラメータ励振に基づく鳥脚歩容生成, *日本ロボット学会誌*. Vol. 27, No. 5, pp. 575-582, 2009. 査読有.
- ④ 香川高弘, 山科秀貴, 宇野洋二: 対麻痺者の歩行補助に向けた歩行の重心運動解析. 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 51-59, 2009. 査読有.
- ⑤ 香川高弘, 宇野洋二, 神谷俊光, 河村耕造: 歩行補助ロボットの歩幅予測制御のためのヒューマンインタフェース. 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, No. 11, pp. 886-895, 2008. 査読有.
- ⑥ 村岡慶裕, 田辺茂雄, 才藤栄一, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットの開発と臨床. *日本リハビリテーション医学会誌*, Vol. 44, No. 1, pp. 29-35, 2007. 査読有.
- ⑦ Takahiro Kagawa, Hiroshi Fukuda, Yoji Uno: Stability analysis of paraplegic standing while wearing an orthosis, *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol.44, No.10, pp. 907-917, 2006. 査読有.
- ⑧ 香川高弘, 福田浩士, 宇野洋二: 対麻痺者の装具歩行の運動学的, 力学的解析. *電気学会論文誌 C*, Vol. 126 - C, No. 5, pp. 579-588, 2006. 査読有.

[学会発表] (計 35 件)

- ① 北村仁, 香川高弘, 宇野洋二: 床反力センサを用いた歩行補助ロボットの転倒予防制御. 電子情報通信学会 MBE 研究会, 2010年3月10日, 玉川大学.
- ② 東郷俊太, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行中の手先振動を抑制する協調動作の解析. 電子情報通信学会 NC 研究会, 2010年3月10日, 玉川大学.
- ③ F.M.ティエン, 香川高弘, 田地宏一, 宇野洋二: 準最適解を用いてヒトの到達運動の計画軌道を推定する方法. 電子情報通信学会 NC 研究会, 2010年3月9日, 玉川大学.

- ④ 北村仁, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットの床反力計測システムの開発. 第10回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2009年12月26日, 芝浦工業大学.
- ⑤ 小田佑樹, 香川高弘, 宇野洋二: 腕運動の予測に基づく歩行補助ロボットの制御. 第10回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2009年12月24日, 芝浦工業大学.
- ⑥ 日比野瑛, 香川高弘, 宇野洋二: 人間の重心軌道を手本としたヒューマノイドの起立動作の生成. 第10回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2009年12月24日, 芝浦工業大学.
- ⑦ Takahiro Kagawa, Yoji Uno: A human interface for stride control on a wearable robot, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009), 2009年10月14日, セントルイス (米国).
- ⑧ 香川高弘, 河村耕造, 宇野洋二: 姿勢と床反力に基づく身体の重心位置の推定. 第24回生体生理工学シンポジウム, 2009年9月25日, 東北大学.
- ⑨ 東郷俊太, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行中の手先振動を緩和する方策. 第24回生体生理工学シンポジウム, 2009年9月25日, 東北大学.
- ⑩ 川津信介, 福村直博, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行器を用いた起立動作中の負荷と安定性の解析. 電子情報通信学会 MBE 研究会, 2009年3月11日, 玉川大学.
- ⑪ 河村耕造, 香川高弘, 宇野洋二: 起立動作中の床反力と姿勢の計測に基づく重心位置推定法. 電子情報通信学会 MBE 研究会, 2008年11月21日, 東北大学.
- ⑫ 香川高弘, 宇野洋二, 村岡裕慶, 才藤栄二: 対麻痺者用歩行補助ロボットの歩行パターン生成. 第23回生体生理工学シンポジウム (研究奨励賞受賞). 2008年9月29日, 名古屋大学.
- ⑬ 小島拓郎, 香川高弘, 宇野洋二: ヒューマノイドロボットの転倒条件を考慮した歩容軌道生成. 第35回知能システムシンポジウム, 2008年3月18日, 東京工業大学.
- ⑭ 香川高弘, 宇野洋二: 下肢麻痺者用歩行補助ロボットのヒューマンインタフェースの開発と評価. 計測自動制御学会システム情報部門学術講演会 2007, 2007年11月28日, 東京.
- ⑮ 香川高弘, 宇野洋二: 下肢麻痺者の歩行補助ロボットにおけるセンサ・制御系開発. Motor Control 研究会, 2007年6月28日, 岡崎国立共同研究機構生理学研究所.
- ⑯ Takahiro Kagawa, Yoji Uno, Yoshihiro Muraoka, Eiichi Saitoh: A human interface

predicting intended strides for a paraplegic locomotor device, The 3rd International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, 2007年6月15日, (ポルトガル).

- ⑰ 宇野洋二: ヒトの運動制御の計算モデルと歩行再建システムへの応用. 計測自動制御学会第39自律分散システム研究会 (招待講演), 2006年12月8日, 山口大学.
- ⑱ 宇野洋二: 下肢麻痺者の歩行再建システムの研究開発, 最近の福祉関連支援技術日本設計工学会フォーラム (招待講演), 2006年11月24日, 名城大学.
- ⑲ 香川高弘, 山科秀貴, 宇野洋二: 対麻痺者の歩行補助のための重心運動解析. 21回生体生理工学シンポジウム, 2006年11月19日, 鹿児島.
- ⑳ 堀場幸生, 香川高弘, 宇野洋二: 下肢麻痺者の装具歩行における杖の動作解析. 21回生体生理工学シンポジウム, 2006年11月18日, 鹿児島.
- ㉑ 宇野洋二: 下肢麻痺患者用の歩行補助ロボットの研究開発. 第24回日本ロボット学会学術講演会人間支援型ロボットシンポジウム (招待講演), 2006年9月16日, 岡山大学.

他 14 件

[その他] ホームページ等:

<http://www.uno.nuem.nagoya-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇野 洋二 (UNO YOJI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10203572

(2) 研究分担者

香川 高弘 (KAGAWA TAKAHIRO)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 30445457

(3) 連携研究者

福村 直博 (FUKUMURA NAOHIRO)

豊橋技術大学・工学部・准教授

研究者番号: 90293753

福田 浩士 (FUKUDA HIROSHI)

広島市立大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 20335102

才藤 栄一 (SAITOH EIICHI)

藤田保健衛生大学・医学部・教授

研究者番号: 50162186