

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17560237  
 研究課題名（和文） 生体信号により操作される知能移動車椅子の高安全・高安心走行制御に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on a highly safe and comfortable motion control for a smart wheelchair operated by biopotential signal  
 研究代表者  
 橋本 雅文 (HASHIMOTO MASAFUMI)  
 同志社大学・理工学部・教授  
 研究者番号：10145815

## 研究成果の概要：

高齢者や障害者の移動を支援する操作性や安全性の高い知的移動車椅子を実現するための基礎研究として、①生体信号により搭乗者の意図を理解して車椅子を操作できるハンズフリー操作インタフェースの構築、②センサやアクチュエータ系の故障に対して安全な走行を可能とする故障診断システムの構築、③車椅子の安全な走行をサポートする先導者に車椅子を自動追従させる走行制御系の構築、④電動車椅子への実装と特性評価を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,500,000	0	1,500,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,500,000	420,000	3,920,000

研究分野：ロボティクス，メカトロニクス，知覚情報処理

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：車椅子，移動ロボット，走行制御，ヒューマンインタフェース，生体信号，眼電位，筋電位，故障診断

## 1. 研究開始当初の背景

超高齢化社会の到来により，高齢者や障害者の行動を支援する多機能，高機能な自律（もしくは半自律）電動車椅子の開発が進められる中，故障時にでも暴走を防ぐとともに，搭乗者に安心感を与える走行ができる安全性の高い知的移動車椅子を実現することが重要となっている。

知的移動車椅子の研究の多くは，あらかじめ生成された軌道に沿って自律的に移動する「自律走行制御」に関する議論であり，日常の多くの場面で使われる動作指令を操作デバイスにより搭乗者が与え，状況に応じて自動

制御する「半自律制御」の議論は比較的少ない。また，半自律型知的移動車椅子の研究の多くは，操作デバイスや操作方法，衝突回避等が中心であり，センサやアクチュエータ系の故障や搭乗者のストレスに対して賢く振舞う移動車椅子の研究は少ない。

## 2. 研究の目的

本研究では，高安全・高安心な知的移動車椅子を実現する基礎研究として，以下を行う。  
 (1) 生体信号により搭乗者の意図や状態を理解できる車椅子のハンズフリー操作インタフェースの構築，

- (2) センサやアクチュエータ系の故障に対して安全な走行を可能とする故障診断系の構築,
- (3) 車椅子の安全な走行をサポートする先導者に車椅子を自動追従させる走行制御系の構築,
- (4) 知的移動車椅子の構築と評価実験.

### 3. 研究の方法

#### (1) 電動車椅子の構築

試作した電動車椅子の外観を図 1 に示す。左右独立駆動輪タイプの車椅子で、内界センサとして、各車輪に速度計測用レゾルバ (以下、車輪センサ)、車体には旋回速度計測用のジャイロを備えている。車椅子の全周囲の環境をセンシングする外界センサとして、車体前部と後部に計 3 台(SICK 社の LMS200 を 1 台、北陽電機社の URG-04LX を 2 台)の 2 次元レーザレンジセンサ(LRS) を取り付けている。



図 1 電動車椅子

#### (2) 生体信号によるハンズフリー操作インタフェースの構築

図 2 に示すように、搭乗者の額に簡易型 BCI (Brain Computer Interface, CyberLink 社製) を装着して、EEG(脳波)、EMG (筋電位) と EOG (眼電位) の信号を取得する。簡易型 BCI が出力する EEG 信号は低次元であることから、それにより搭乗者の意図を知ることが困難であったため、EMG・EOG 信号から次の 3 種類の顔のジェスチャを認識する。

- ・EMG 信号により奥歯をかみ締める動作
- ・EOG 信号により眉間にしわを寄せる動作
- ・EOG 信号により左右に視線を向ける動作

これらのジェスチャにより車椅子の走行制御を行うため、車椅子の走行制御命令とジェスチャを表 1 のように対応づける。前進、後退、左右旋回、停止の命令をまとめて基本命令と称している。また、車椅子の操作性を高めるため、前進中は奥歯のかみ締め動作により速度を 0.1[m/s], 0.15[m/s], 0.2[m/s] の 3 段階に、左右に視線を向ける動作により操舵角を直進と左右 ( $\pm 30[\text{deg}]$ ,  $\pm 60[\text{deg}]$ ) の 5 段階に変更できる。速度変更と操舵角変更命令をまとめてサブ命令と称している。

ジェスチャの誤認識時や不認識時におい

ても安全性を確保するため、同じジェスチャが 2 回連続して行った場合のみ車椅子が動作するようにする。ただし、停止命令については、1 回のジェスチャで停止させる。また、搭乗者が 10 秒間ジェスチャを行わなかった場合は車椅子を自動停止させる。さらに、搭乗者が生成した命令を視覚的に確認できるように、コンピュータのディスプレイ上に GUI を設けている。



図 2 BCI

表 1 ジェスチャと制御命令の対応

ジェスチャ	基本命令	サブ命令
奥歯 1 回 かみ締め	前進	1 段階加速
奥歯 2 回 かみ締め	後退	1 段階減速
眉間にシワ を寄せ	停止	なし
右を見る	右旋回	1 段階右操舵
左を見る	左旋回	1 段階左操舵

#### (3) センサ・アクチュエータ故障診断系の構築

##### ①内界センサと車輪モータのハード故障診断

内界センサの故障時にその出力がゼロ (一定値) となるハード故障、車輪モータの故障時にモータが停止するハード故障を考える。

内界センサのハード故障診断ではすべてのセンサに対して、正常モードとハード故障モードに対応する 2 つのシステムモデルを設ける。そして、実際のセンサ出力と各モデルからの出力とを比較することで、IMM (Interacting Multiple Model)法を基礎として各モデルのモデル生起確率を推定する。それらのモデル生起確率の大きさにより、正常、ハード故障のいずれかを判断する。

しかし、車輪センサと車輪モータのハード故障ではともに車輪センサ出力がゼロとなることから、車輪センサのみではいずれの故障かを判別できない。そこで、ジャイロ出力を活用する。車輪センサにハード故障が生じた場合、車輪センサの出力と目標速度に偏差が生じ、操作量が增大する。すなわち、車輪センサ出力より算出される車体旋回速度とジャイロ出力より得られるそれとは異なる。他方、車輪モータにハード故障が発生した場合、車輪センサは正常であるため、車輪センサ出力より算出される車体旋回速度とジャ

gyro output more than it is almost consistent with.

そこで、車輪センサ出力から求まる回転速度とジャイロ出力との大きさを比較することで車輪モータ、車輪センサのいずれかがハード故障かを診断する。

### ②内界センサのソフト故障診断

内界センサのソフト故障として、故障時に出力スケール（ゲイン）が変化する故障を考える。このようなソフト故障の診断では、センサ出力の変化を推定することが重要となる。そこで、診断の指標として以下で定義するスケールファクタ(SF)を用いる。

$$\alpha = \frac{\text{センサから実際に観測された値}}{\text{センサから本来観測されるべき値}}$$

SF の推定には環境に対する車体の絶対速度情報が必要となる。そこで、周囲環境の静止物体を車載 LRS により追跡（レーザスキャンマッチング）することで車体速度を求め、そして、その情報と内界センサ情報とを比較して SF を求め、それが正常時 ( $\alpha=1$ ) と大きく異なる場合、ソフト故障と診断する。なお、スキャンマッチング手法としては、ICP(Iterative Closest Point)法を基礎としている。

### ③LRS の故障診断

LRS 情報に基づくスキャンマッチングにより車体速度を推定する際、LRS が故障するとスキャンマッチングが困難となる。そこで、ICP における評価規範

$$J_{LRS} = \sum_{i=1}^{361} \{q_i - (Rp_i + T)\}^2$$

が閾値以上になった場合、LRS の故障と判断する。

多数の移動物体が走行する動的環境下では上式の評価値が大きくなり、誤診が生じる可能性がある。そこで、占有グリッド法を基礎に静止物体を検出し、それをもとにスキャンマッチングを行うことで故障の誤診を軽減する。

### (4) 先導者追従制御系の構築

搭乗者が車椅子をハンズフリー操作インタフェースにより常時、操作することは搭乗者にとって疲労を伴い、その結果、安全な走行が困難となる。そこで、車椅子の安全な走行をサポートするアシスト機能のひとつとして、先導者に車椅子を自動追従させる手法を開発する。

先導者追従制御では、車椅子の前方に搭載した LRS の観測情報によって先導者の歩行軌跡を推定し、それをもとに走行経路を生成して、先導者との距離を一定に保ちながら先導者の歩行軌跡に車椅子を追従させる。

追従開始時に先導者を認識するため、先導者には小さな反射板を持たせる。追従開始時に先導者はその反射板を LRS 前方にかざす。レーザ反射強度を知ることによって車椅子は先導者を正確に認識できる。なお、目的地に到着し、追従制御終了する際も、先導者が反射板を LRS 前方にかざすことで追従制御は終了する。

走行中の先導者検出では、LRS 出力の中から占有グリッド法により移動物体（先導者）を検出した後、カルマンフィルタによって先導者の時々刻々の位置を推定し、先導者の歩行軌跡を得る。しかし、歩行軌跡はセンサ誤差や先導者の動きにより振動的なため、車椅子が歩行軌跡を厳密に追跡すると搭乗者の乗り心地が悪くなる。そこで、図3に示すように、平滑化スプライン関数を用いて歩行軌跡を平滑化する。なお、先導者は常に進行していることから、スプライン関数は経路を新たに継ぎ足し、延長していく逐次型とした。また、経路に関して曲率や傾きなど多くの情報が得られ、車椅子の制御が簡単になることから、スプライン関数の次数は3次としている。

生成した経路に車椅子を追従させるため、経路に対する車椅子の横偏差と方位偏差の情報をもとに非線形制御系により車体の回転速度を制御する。他方、先導者との距離を一定に保つため、車体の速度制御にはフィードフォワードと PI フィードバック制御を施している

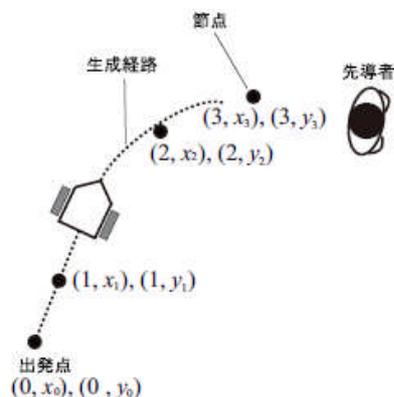


図3 経路生成

## 4. 研究成果

### (1) 生体信号によるハンズフリー操作インタフェースの構築

操作インタフェースを電動車椅子に実装し、走行実験を行った。走行環境は室内と廊下で走行経路の全長は約 150[m]である。搭乗者（健常者）は5回の練習走行を行った後、5回走行実験を行った。走行に要した時間は初回は 1033[s]、5回目は 618[s]となり、走行を重ねるにつれてスムーズな走行が可能になった。これは、走行を重ねるにつれて操作

が慣れ、停止回数が減少、操舵角や速度変更など多様な命令を使用したためである。

比較のため、搭乗者が通常のジョイスティックにより車椅子を走行させた場合の所要時間を調べたところ 359[s]であった。ジョイスティックによる走行と比較して、提案手法で大きな所要時間を要した理由は以下である。

- 1)搭乗者の安全を重視して、他の状態へ遷移する際は一度、停止する必要がある。
- 2)走行中に 10 秒間ジェスチャを行わないと、車椅子は自動的に停止する。
- 3)搭乗者のジェスチャが誤認識されたり不認識されたりする場合がある。

上記 3)に関して複数の被験者で詳細を調べたところ、奥歯をかみ締める動作と眉間にしわを寄せる動作の認識率(平均値)はほぼ 100%であるのに対し、左右に視線を向ける動作の認識率(平均値)は 85%程度であった。視線動作の認識率向上は今後の課題である。

本研究で開発した操作インターフェースは脳波計測に基づく手法に比べて容易である特長を有している。簡易型 BCI を使用したことから EEG 信号が低次元であり、それをもとに搭乗者のストレス等の状態を把握することが困難であった。今後、より高機能な BCI を用いて搭乗者の状態を把握することを検討していきたい。

## (2) センサ・アクチュエータの故障診断系の構築

電動車椅子に故障診断系を実装し、実験を行った。走行開始 17[s]後に左車輪センサに  $\alpha=0.5$  となるソフト故障が発生した場合の左車輪センサの SF 推定値を図 4 に示す。これより SF が正確に推定でき、ソフト故障診断が可能となった。

次に内界センサと車輪モータのハード故障診断の実験を行った。走行開始 7[s]後に車輪センサにハード故障が発生した場合の実験結果を図 5 に示す。車輪センサより算出された車体旋回速度(実線)とジャイロ出力(破線)が一致しないことから、車輪センサのハード故障と診断できる。図 6 は車輪モータにハード故障が発生したときの実験結果である。車輪センサより算出された車体旋回速度とジャイロ出力がほぼ一致することから、車輪モータのハード故障と診断される。

次に LRS 故障の検出実験を行った。図 7 は走行開始 30[s]後に LRS に  $\alpha=0.8$  となるソフト故障が発生した場合の評価値  $J_{LRS}$  の値である。故障発生時には評価値が大きく変化していることから故障検出ができる。

これらの故障診断機能を電動車椅子に実装したことでセンサやアクチュエータの故障に対しても車椅子の暴走を防ぐことができる。国内外において車椅子のセンサやアク

チュエータの故障診断機能に関する研究は少なく、本研究の意義は大きい。

現状のアルゴリズムでは、故障形態によっては故障診断が困難であったり、時間遅れが発生することから、より多様な故障形態に対応する故障診断アルゴリズムの構築が今後の課題として挙げられる。

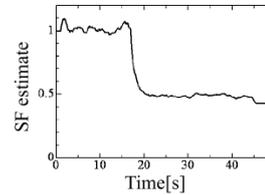


図 4 ソフト故障実験結果(車輪センサ)

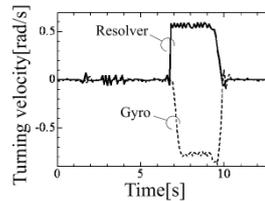


図 5 ハード故障実験結果(車輪センサ)

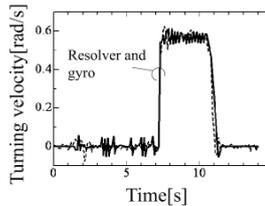


図 6 ハード故障実験結果(車輪モータ)

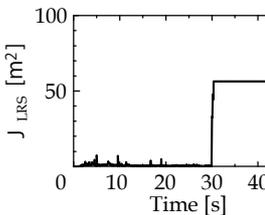


図 7 ソフト故障実験結果(LRS)

## (3) 先導者追従制御系の構築

電動車椅子に先導者追従制御系を実装し、平均速度 0.28[m/s]で歩行する先導者を追従する実験を行った。先導者との目標距離は 2[m]である。図 8~図 10 に実験結果を示す。

図 8 は先導者が実際に歩行した軌跡(点線)とそれらの代表点(■), 図 9 は車椅子の経路追従誤差を, 図 10 は車椅子と先導者との距離誤差である。これらより、先導者との距離を一定に保ちながら、先導者の歩行軌跡に沿って車椅子が追従していることが分かる。

従来の先導者追従制御法の多くは、現時刻での先導者の位置情報をもとに制御していることから、先導者の右左折時には車椅子がショートカットして障害物と衝突する危険性がある。本研究で開発した手法は先導者の

走行軌跡に追従することから安全性が高い。  
 今後の課題としては、混雑した環境下での  
 先導者追従法の確立が挙げられる。

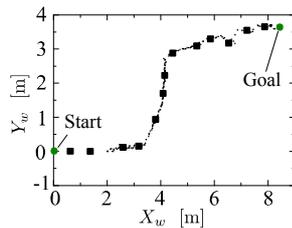


図 8 先導者の歩行軌跡

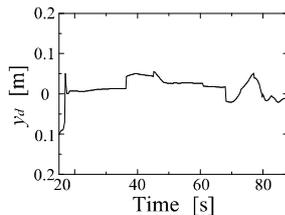


図 9 経路追従誤差

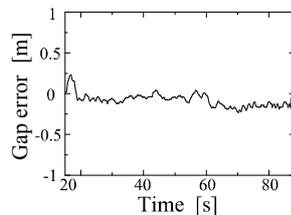


図 10 先導者との距離誤差

## 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 16 件)

- ① Koji Miyazaki, Masafumi Hashimoto, Masanari Shimada, and Kazuhiko Takahashi, Guide Following Control Using Laser Range Sensor for a Smart Wheelchair, Proc. of Int. Conf. on Instrumentation, Control and Information Technology, 2009, 査読無
- ② Masafumi Hashimoto, Kazuhiko Takahashi, Masanari Shimada, Wheelchair Control Using an EOG- and EMG-Based Gesture Interface, Proc. of 2009 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, 2009, 査読有
- ③ Masafumi Hashimoto, Yuuki Nakamura, and Kazuhiko Takahashi, Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of a Joystick Controlled Wheelchair, J. of Robotics and Mechatronics, 20 巻, pp.904-912, 2008, 査読有
- ④ Kazuhiro Takahashi, Takako Ohta, and Masafumi Hashimoto, Remarks on EOG and EMG Gesture Recognition in Hands-Free Manipulation System, Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.798-803, 2008, 査読有
- ⑤ Masafumi Hashimoto, Fumihito Itaba, and Kazuhiko Takahashi, Fault Diagnosis of Internal and External Sensors with Scan Matching for Mobile Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.3096-3101, 2008, 査読有
- ⑥ Masafumi Hashimoto, Ryohei Kitade, Fumihito Itaba, and Kazuhiko Takahashi, Voting Based Fault Isolation of In-Vehicle Multi-Sensors, Proc. of Int. Conf. on Instrumentation, Control and Information Technology, pp.1942-1946, 2008, 査読無
- ⑦ Fumihito Itaba, Masafumi Hashimoto, and Kazuhiko Takahashi, A Model-Based Fault Diagnosis of Powered Wheelchair, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp.1255-1259, 2007, 査読有
- ⑧ Kazuhiko Takahashi, Takashi Nakauke, and Masafumi Hashimoto, Hands-Free Manipulation Using Simple Bio-Potential Interface System, JSME Journal of System Design and Dynamics, 1 巻, pp.691-702, 2007, 査読有
- ⑨ Kazuhiko Takahashi, Takashi Nakauke, and Masafumi Hashimoto, Remarks on Hands-Free Manipulation Using Bio-Potential Signals, Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.2965-2970, 2007, 査読有
- ⑩ Masafumi Hashimoto, and Kazuhiko Takahashi, Sensor Fault Detection and Isolation for a Powered Wheelchair, Proc. of 2007 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, CD-ROM, 2007, 査読有
- ⑪ Kazuhiko Takahashi, Takashi Nakauke, and Masafumi Hashimoto, Hands-Free Manipulation System Using Bio-Potential Signals, Proc. of the 12th Int. Conf. on Human-Computer Interaction, pp.499-503, 2007, 査読無
- ⑫ Fumihito Itaba, Masafumi Hashimoto, and Kazuhiko Takahashi, A Model-Based Fault Diagnosis of Sensor and Actuator of Powered Wheelchair, Proc. of Int. Conf. on Instrumentation, Control and Information Technology, pp.1856-1860, 2007, 査読無
- ⑬ Kazuhiko Takahashi, Takashi Nakauke, and Masafumi Hashimoto, Remarks on Simple Gesture Recognition of Bio-Potential Signals and Its Application to Hands-Free Manipulation System, Proc. of IEEE Int. Conf. on Electrical and Electronic Technology, CD-ROM, 2006, 査読有
- ⑭ Kazuhiko Takahashi, Takashi Nakauke, and Masafumi Hashimoto, Remarks on Hands-Free

Manipulation System Using Simple Brain-Computer Interface, Proc. of IEEE Int. Conf. on Control Applications, pp. 295-300, 2006, 査読有

- ⑮ Kazuhiko Takahashi, Takashi Nakauke, and Masafumi Hashimoto, Remarks on Hands-Free Manipulation System Using Bio-Potential Signals From Simple Brain-Computer Interface, Proc. of 2006 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1642-1647, 2006, 査読有
- ⑯ Masafumi Hashimoto, Yuuki Nakamura, Fuminori Oba, and Kazuhiko Takahashi, Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of a Joystick Controlled Wheelchair, Proc. of the 4th IFAC Symp. on Mechatronics Systems 2006, pp.211-216, 2006, 査読有

[学会発表] (計18件)

- ① 宮崎 亘史, レーザレンジセンサによる知的電動車椅子の先導者追従制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009年5月, 福岡
- ② 北出亮平, 多数決論理による移動ロボットの内外界センサ故障検出, 第53回システム制御情報学会研究発表講演会, 2009年5月, 神戸
- ③ 北出亮平, 多数決論理による移動ロボットの内外界センサ故障検出, アドバンティ 2008 シンポジウム, 2008年12月, 大阪
- ④ 島田将成, 知的電動車椅子の走行制御に関する研究—生体信号による手動制御と先導者自動追従制御—, アドバンティ 2008 シンポジウム, 2008年12月, 大阪
- ⑤ 橋本雅文, 筋電位と眼電位による電動車椅子の走行制御, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月, 神戸
- ⑥ 大田貴子, 生体信号ジェスチャ認識を用いたハンズフリーマニピュレーションに関する一考察, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008年9月, 横浜
- ⑦ 島田将成, 生体信号による電動車椅子の走行制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月, 長野
- ⑧ 板羽史博, スキャンマッチングによる移動ロボットの内外界センサ故障診断, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月, 長野
- ⑨ 北出亮平, スキャンマッチングによる車載レーザレンジセンサの故障検出, 第52回システム制御情報学会研究発表講演会, 2008年5月, 京都
- ⑩ 橋本雅文, 車載レーザレンジセンサの故障検出, 第8回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2007年12月, 広島
- ⑪ 森川真依子, 生体信号による知的電動車椅子の走行制御, アドバンティ 2007 シンポジ

ウム, 2007年12月, 京都

- ⑫ 板羽史博, スキャンマッチングによる車載レーザレンジセンサの故障検出, 第50回自動制御連合講演会, 2007年11月, 横浜
- ⑬ 村田真依子, 生体信号による電動車椅子の移動制御に関する一考察, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2007年9月, 大阪
- ⑭ 板羽史博, 移動ロボットのモデルベースト故障診断法, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007年5月, 秋田
- ⑮ 板羽史博, 移動ロボットの故障診断に関する研究—車載レーザレンジセンサによる速度推定と故障診断—, アドバンティ 2006 シンポジウム, 2006年12月, 京都
- ⑯ 中請 隆, 生体信号インターフェースによる仮想空間での移動制御, 第49回自動制御連合講演会, 2006年11月, 神戸
- ⑰ 中請 隆, BCIによるハンズフリーオペレーションシステムに関する一考察, 2006年電子情報通信学会総合大会, 2006年3月, 東京
- ⑱ 渡辺真志, 電動車椅子の内外界センサ系の故障診断と安全走行制御, 第23回日本ロボット学会学術講演会, 2005年9月, 横浜

[図書] (計1件)

- ① Masafumi Hashimoto, Fumihito Itaba, and Kazuhiko Takahashi, IN-TECH, Model-Based Fault Detection and Isolation for a Powered Wheelchair (分担執筆), Mechatronic Systems, 2009, 発刊決定

[その他]

- ① 動く喜びかみしめて, 朝日新聞夕刊 2008年5月9日
- ② 介護・日常生活快適に, 日刊工業新聞 2008年6月16日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 雅文 (HASHIMOTO MASAFUMI)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号: 10145815

### (2) 研究分担者

高橋 和彦 (TAKAHASHI KAZUHIKO)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号: 90332808  
小松 信雄 (KOMATSU NOBUO)  
大阪工業大学・情報科学部・准教授  
研究者番号: 80215392