

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500521

研究課題名（和文） 走行環境の認識による電動車いすの高機能化に関する研究

研究課題名（英文） A Study for High Functionality of Electric Wheelchair with Recognition of Driving Environment

研究代表者

藤本 真作（FUJIMOTO SHINSAKU）

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：00278912

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、走行環境を認識するパワーアシスト車いすの高機能化を実現することである。車いす利用者や介護者を支援するために、走行環境を認識することは非常に重要である。本研究では、上り坂または下り坂の傾斜環境における走行環境の状態を計測するために各種のセンサを使用する。また、本研究では低コストのセンサに基づいた加速度補償法と傾斜角の動的推定問題を取り扱う。そして、我々は傾斜角の推定法を組み合わせた適応制御系設計法を提案する。提案手法では、ユーザと車いすの質量、転がり摩擦係数および粘性摩擦係数の物理パラメータを推定することができる。最後に、提案した推定法と適応制御設計法の有効性をシミュレーションおよび制御実験により確認した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to realize a high functionality of a power-assisted wheelchair with recognition of the driving environment. It is very important to recognize the driving environment in order to support wheelchair users and caregivers. In this study, various kinds of sensors are used to measure the state of the driving environment where is slope angle of uphill or downhill. This study deals with the estimation problem of slope angle with acceleration compensation based on low-cost sensors. And we also propose the adaptive control system design that is combined the dynamic estimation method of the slope angle. The proposed method estimate physical parameters that are mass of user and wheelchair, coefficient of rolling friction and coefficient of viscosity. Finally, the effectiveness of the proposed estimation method and the adaptive control design was confirmed by simulation and experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：電動車いす，パワーアシスト，走行環境，動的計測，適応制御，ローコスト

1. 研究開始当初の背景

現在、わが国の高齢化率は23.3%に達している。そして、今後も増加の一途たどり2015年には4人にひとりが65歳以上の超高齢

社会を迎えようとしている。このような超高齢社会においては、老人医療費の増加や介護者不足などの様々な問題が深刻化するものと予想される。このような問題に対して、高

高齢者や障がい者の生活の質 (QOL: Quality of life) をできるだけ高い水準に維持しながら、健康で自立した生活をおくれる社会環境と自立を支援する福祉機器の開発すなわち、自立・看護・介護のために工学技術を積極的に活用することが重要であると考えられる。

加齢あるいは何らかの後遺症により、歩行障がいを持つ人にとって車いすや電動車いすは欠かせない移動手段の一つである。電動車いすは大きく分けて自操用と介助用の2種類に分類できる。自操用は使用者がジョイスティックやハンドルなどを操作することで利用する車いすであり、介助用は介助者が操作を行うものである。

車いすの操作方法は、使用者の運動能力や残存能力によって大きく異なる。そのため近年では、図1のようなBMIを利用した新たな操作方法が注目を集めつつある。BMIの利用は重度障がいを有する使用者にとって光明とも言うべき技術になりうると考えられている。しかしながら、電動車いすの操作において、ジョイスティック、ハンドル、BMI等の違いはあるものの、システム制御系設計の観点からすれば、どの操作方法も目標入力を与えているに過ぎない。つまり、車いすを意のままに操作できるかは、BMIの解析法や解析速度のみに依存するのではなく、むしろ車いすを取り巻く走行環境を正確に認識することで、電動車いすの高機能化を目指すことが重要であると考えられる。こうした基礎的な研究は、電動車いす技術のボトムアップに繋がるだけでなく、BMIなどの新たな入力(操作)方法にも対応できると考えられる。

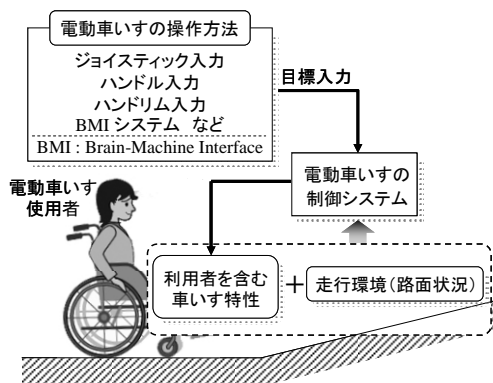


図1 電動車いすシステム

2. 研究の目的

電動車いすの走行環境の研究は、環境自体を陽に認識(推定)しないアプローチも含めると、以下の3つのタイプに分類できる。

- (I) 各種センサ情報を用いて走行環境(傾斜角・重量・路面摩擦係数など)を推定する方法
- (II) 外乱オブザーバを用いて外乱項(重量・路面摩擦係数など)を推定する方法

(III) 仮想車いすを設定する方法

(I)の方法は、車いすの走行環境すなわち路面状況を推定することで路面状況を認識する方法と言える。しかし、この方法は車いすの並進や旋回加速度などにより各種センサが影響を受け、正確な推定値が得られない問題点を有している。図2は車いすに傾斜角センサを取付け、平坦な路面を走行した結果である。この結果から傾斜角センサは並進加速度の影響を受け、全く傾斜角を計測できていないことが確認できる。このことは、車いすの制御に悪影響を及ぼすことになる。

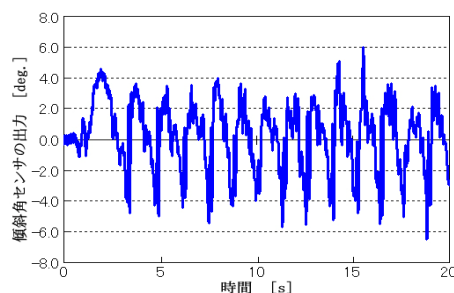


図2 傾斜角センサの出力例(平坦地)

(II)の方法は、直接外乱項が推定できるため有効な方法と言えるが、正確な車いすモデルが必要であり、環境や摩擦などを含む車いすモデルの生成は非常に困難である。このことから、外乱オブザーバからの推定値は、モデル以外のすべての動特性を含むことになる。すなわち過剰な補償を行うために電動車いすはぎこちない動作となってしまう、操作者に恐怖感や違和感を持たせることになる。

(III)の方法は、仮想車いすモデルの理想出力と実際の車いすの出力が等しくなるように、モータ制御を行う方法と言える。この方法は、常に平地で車いすを操作している感覚で不整地やスロープの走行が可能となり、有効な方法と言える。しかしながら、仮想車いすのモデル構築や環境に対する各種センサからの不確実な情報などをどのように処理するかが問題として残されている。

また、(I)、(II)、(III)のどの場合においても、介助者モードの構築に対する問題は未解決のままである。

そこで本研究では、車いすに生じる並進加速度の影響を軽減化し、できるだけ正確な推定値を検出すること、すなわち(I)の問題点を解決するとともに、この方法で得られた走行環境情報を利用した仮想車いすモデルに基づく適応制御系設計法を適用することで、電動車いすの高機能化を目指す。この方法は(I)と(III)の方法を組み合わせた方法と言える。また(III)の問題点が解決できることで(II)の問題点が回避され、より正確な補償が可能となる。

3. 研究の方法

電動車いすを取り巻く走行環境の認識と

して、まず、路面の傾斜角の推定を行う。路面の傾斜角は車いすの並進加速度の影響により、正確に動的計測することが困難である。そのため、この問題に対する解決方法について取り組む。路面の傾斜角が正確に推定できることで、路面と車いすとの転がり抵抗係数や粘性減衰係数および、車体の総重量を詳細に推定することができる。このとき、仮想モデルは、滑らかで平坦な環境における理想的な車いすモデルとする。すなわちこの問題は、車いすの未知パラメータを逐次推定しつつ、仮想モデルの出力に追従させる適応制御系設計問題に帰着される。本手法の有効性を確認するために、シミュレーションおよび制御実験を実施する。

走行環境の認識に基づいた電動車いすの制御方法の確立および高機能化の実現を図るためのシステム構成と課題研究との対応を図3に示す。

- (1) 車いすの走行環境の推定
- (2) 動的推定値を用いた適応制御系設計法
- (3) 電動車いすの性能評価と介護者モード

上述のアプローチでソフト面での理論的基礎を確立する。

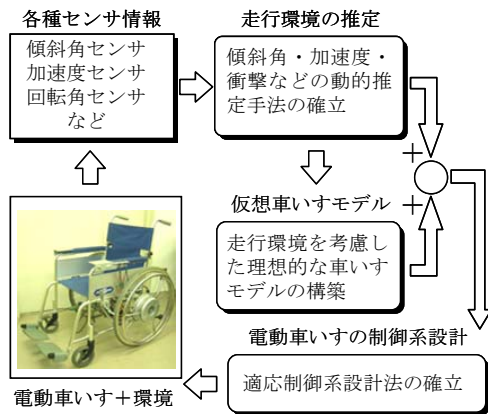


図3 システム構成と課題研究

(1) 車いすの走行環境の推定

傾斜角センサの計測原理は、磁気式やフロート式、膜スプリング容量式および液封入容量式などで大きく異なっているが、どの方式においても重力による力学的な方式であることが多い。そのため、センサに作用する加速度が傾斜角センサに悪影響を及ぼし、ときとしてその役目を全く果たさないという問題を有している。つまり、傾斜角センサのみの情報から走行環境を正確に抽出し、推定することは困難であると考えられる。そのため、加速度センサを用いてその影響を補償することを提案していたが、加速度センサが衝撃や雑音、微振動などの影響を受け実用には耐えられないため、同種の傾斜角センサを2個使用し、傾斜角と加速度情報を計測することを考える。

(2) 動的推定値を用いた適応制御系設計法

(1)によって得られた車いすと傾斜環境の状態推定値を用いて適応制御系設計を行う。このとき、推定された推定値と力学的な未知パラメータとは線形結合で表現することができる。そのため、使用する適応制御系は、逐次未知パラメータを更新しながら真値に収束するように調整する。また、平地走行を想定した理想的な仮想車いすモデルの設定も行う。仮想車いすモデルの出力と実際の車いす出力とが一致するようにサーボ補償を行う。サーボ補償項が零に収束するとき、正確な物理パラメータが得られるように適応制御系設計を施す必要がある。このときトルク情報の取得としてトルクセンサを使用することが考えられるが、車いすにトルクセンサを導入することは現実的ではない。そこで本研究では、DC モータに印加される入力情報 (PWM 信号など) とモータ特性から発生トルクを概算することにする。

(3) 電動車いすの性能評価と介護者モード

提案した制御系設計法の有効性を確かめるために実際に制御実験を行う。また、本手法は介護者への適用にも容易に対応できることを示す。

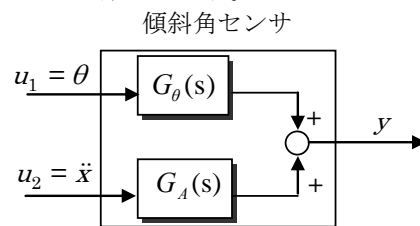
4. 研究成果

前章で示したアプローチ法に基づいて研究成果を報告する。

(1) 車いすの走行環境の推定

傾斜角センサの動特性モデルを、図4のように傾斜角 $u_1 = \theta$ とセンサに加わる加速度 $u_2 = \ddot{x}$ および、センサ出力 y の 2 入力 1 出力系と捉えることにする。また、傾斜角センサの特性は線形性が保証されており、線形モデルとして捉えることが可能であるとする。

従って傾斜角センサの出力 y は、次式のようにそれぞれの入力に対する出力の和として表現できるものとする。図4に傾斜角センサのブロック線図を示す。

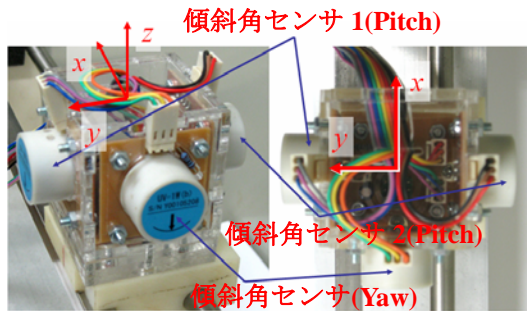


ここで、 $G_\theta(s)$ は傾斜角入力に対する伝達関数、 $G_A(s)$ は加速度入力に対する伝達関数をそれぞれ表している。これらの伝達関数は一般に未知であるため、システム同定の立場からモデリングを行うことにする。

① 傾斜角センサの同定

本実験で使用する傾斜角センサ (緑測器 (株) 製: UV-1W) を写真 1 に示す。この傾斜角センサの計測原理は、内部の振り子が傾斜

に応じて変化し、その変化量を磁気抵抗素子によって計測するものである。構造が単純で軽量 (10g) なうえ、安価で応答速度 (約 0.4 s) も比較的良好な特徴を有している。そのため、電動車いすに十分実装可能である。



(a)側面図 (b)上面図
写真1 傾斜角センサ

・ 同定実験 I (傾斜運動) :

傾斜角入力に対するモデル $G_\theta(s)$ を得るために、傾斜運動用の実験装置を製作した。傾斜角センサと加速度センサの計測位置が、DCモータの回転軸と一致するようにセンサを設置し、傾斜角の真値はロータリーエンコーダによって計測した。傾斜角の真値としてエンコーダを利用した理由は、エンコーダと同等の性能が傾斜角センサで得られれば十分車いすの制御には使用できるものと考えられるためである。ただし、使用したエンコーダの分解能は 0.09 度/パルスである。DCモータに与える制御入力 (電流) には、疑似白色信号である M 系列信号を用いた。サンプリング周期は 0.01 s とし、計測時間は 40.95s (データ数 : 4096 個) である。

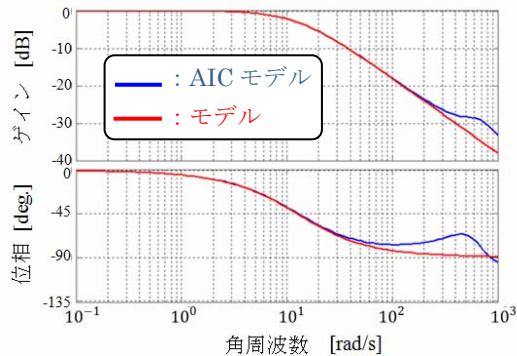


図5 傾斜角モデルのボード線図 ($u_2=0$)

図5より、AIC (赤池情報量規準) による高次モデルとモデル式とがよく一致していることが確認できる。また、本センサのバンド幅はおよそ 13 rad/s (約 2.0Hz) で、センサスペックの応答時間約 0.4s とほぼ一致していることがわかる。以上の結果から、傾斜角入力に対するモデル $G_\theta(s)$ は 1 次遅れ系で表現できることがわかった。

・ 同定実験 II (加速度運動) :

加速度入力に対するモデル $G_A(s)$ を得るた

めに、並進運動用の実験装置を製作した。DCモータによってボールネジを駆動させ、両センサに並進加速度運動を行う。

同定実験 II ではロータリーエンコーダの角度情報から、並進加速度を算出している。実験条件は同定実験 I と同様で、傾斜角を 0 度に固定した状態で同定実験 II を行った。

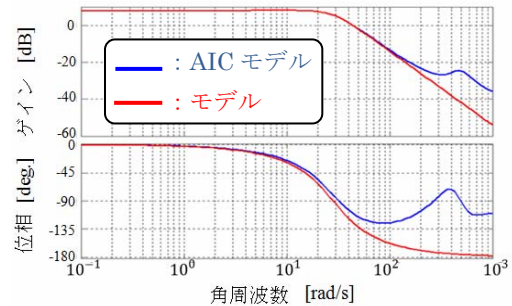


図6 加速度モデルのボード線図 ($u_1=0$)

図6より、AICによる高次モデルとモデル式とがよく一致していることが確認できる。加速度入力に対するモデル $G_A(s)$ が $G_\theta(s)$ (1 次系) に対して高い次数 (2 次系) のは、ゲイン特性および位相特性を高次モデルと一致させる必要があるためであり、位相特性の近似精度が傾斜角の推定精度を大きく左右するためである。

②傾斜角の動的推定法

同種の傾斜角センサを 2 つ使用し、その動特性の差異により、傾斜角と加速度情報を計測することを考える。提案する方法は、傾斜角または加速度を相互で補償しあう方式 (相互補償法) となる。ここで、 $F_\theta(s)$ 、 $F_A(s)$ は適当な次元のローパスフィルタである。

図7に本推定手法のブロック線図を示す。

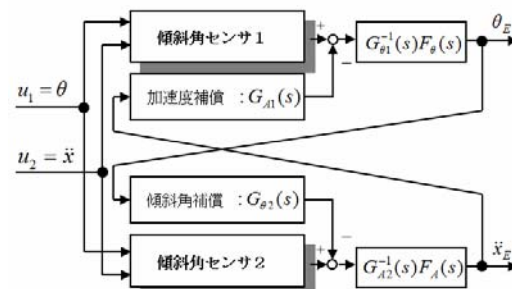


図7 相互補償法のブロック線図

提案した推定手法の有効性を確認するため、Matlab/Simulink を用いてシミュレーションを行った。

現実的なシミュレーションモデルを作成するために、車いすから傾斜角センサに入る加速度入力に標準偏差 0.1m/s² のホワイトノイズを加え、さらに傾斜角センサからの出力には標準偏差 0.1deg のホワイトノイズを加えた。推定した傾斜角の結果を図8に示す。観測ノイズの影響から、全体的に振動してい

るものの、正確に車いすの傾斜角と加速度が推定できていることが確認できる。

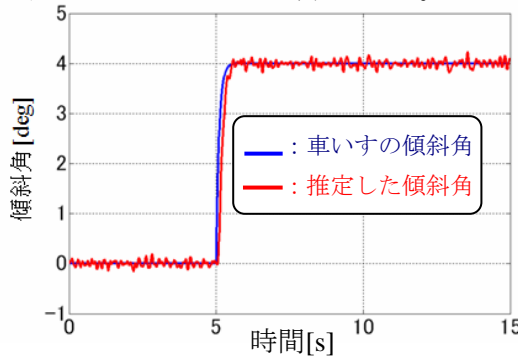


図8 傾斜角の推定結果

並進加速度の結果を図9に示す。推定開始後5秒に加速度が振動しているものの、傾斜角と同様に正確に車いすの加速度が推定できていることが確認できる。

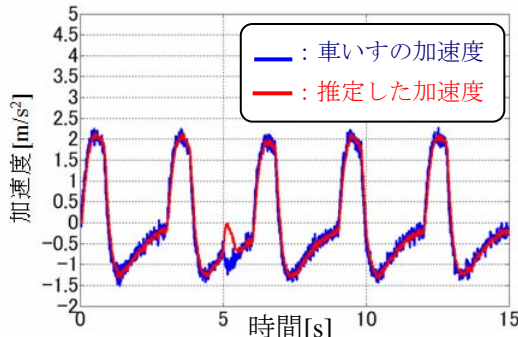


図9 並進加速度の推定結果

図8および図9の結果から、提案する推定手法の有効性をシミュレーションによって確認することができた。

提案した動的推定法の有効性を確かめるために、実際の車いすに写真1のセンサボックスを取り付け、推定実験を行った。その結果の一例を図10に示す。

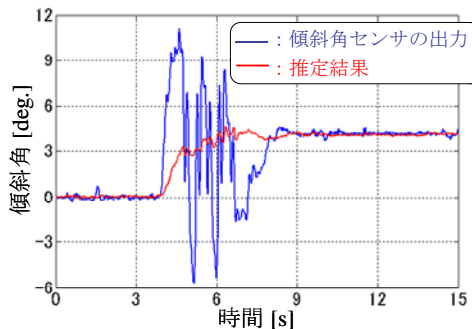


図10 傾斜角の推定結果（推定実験）

図10の結果から、傾斜角センサの出力は車いすの並進加速度の影響により、大きく振動していることが確認できる。それに対して、提案する推定法を用いた場合では正確に傾斜角を推定できることがわかる。

(2) 動的推定値を用いた適応制御系設計法

相互補償法によって得られた車いすと傾斜環境の状態推定値を用いて適応制御系設計を行う。提案する適応制御系は大きく分けると、車いすを含む環境の物理パラメータを同定するパラメータ推定器と、仮想車いすモデルの出力と実際の車いす出力とが一致するように制御を行うサーボ補償（フィードバック：FB）とから構成されている。また、パラメータ推定器から得られた推定値により、フィードフォワード：FF補償を行う。ただし、仮想車いすモデルは、滑らかで平坦な環境における理想的な車いすモデルの動特性とする。提案する適応制御系の概念図を図11に示す。

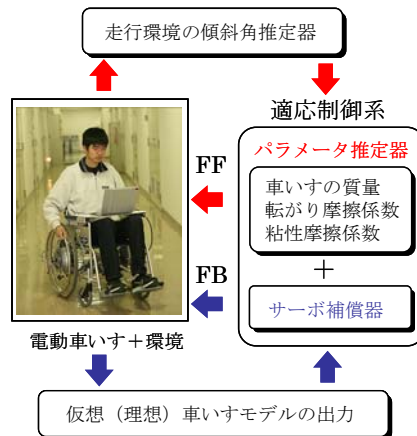


図11 適応制御系の概念図

(3) 電動車いすの性能評価と介護者モード

提案した適応制御系設計法の有効性を確かめるために実際に制御実験を行う。また、本手法は介護者への適用にも容易に対応できることを示す。

平地の状態から4度の上り坂を走行した傾斜角の結果を図12に示す。

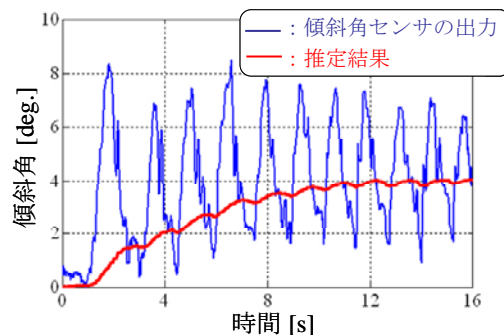


図12 傾斜角の推定結果（制御実験）

図12より、相互補償法を適応制御系に導入した場合、本制御系では推定の応答性能が劣化（図10との比較）していることがわかる。しかしながら、応答速度は悪いものの、傾斜角4度を推定できていることが確認された。

図 13 は車いすの移動距離を表した結果である。図 13 より、目標軌道となる仮想車いすモデルの出力と実軌道とが一致しているため、提案する電動車いすの利用者は平地感覚で操作できているものと考えられる。

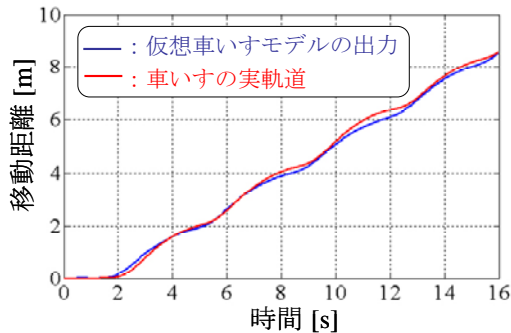


図 13 電動車いすの制御性能

図 14 はパラメータ推定器によって算出した各パラメータである。観測ノイズの影響から、時折振動的になるもののどのパラメータもほぼ真値（一点鎖線）に推定できているため、推定器が有効に作用しているものと考えられる。

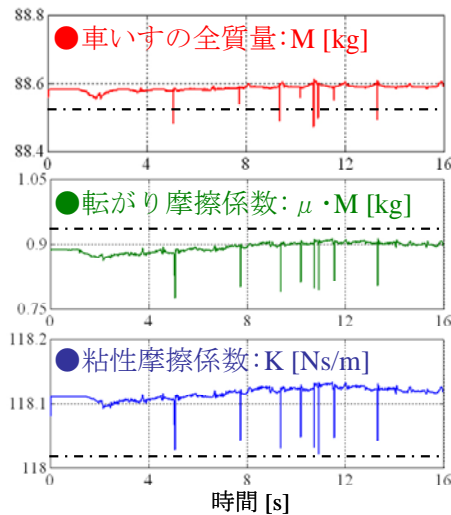


図 14 物理パラメータの推定結果

最後に、本制御系の最大の利点は走行環境を車いすが推定することで、FF 補償（図 11 の赤矢印のループ）が可能であることである。車いすユーザが入力を与えない状態、すなわち介護者が車いすを操作する場合でも、平地のような感覚で操作が可能となる。実際に坂道走行（上り・下りに関わらず）をした場合では、ユーザや介護者が手を離しても、その場で停止できることを確認している。

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）

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① 森本早斗志, 藤本真作, 吉田浩治, 走行環境を考慮したパワーアシスト車いすの開発—スロープ角の動的推定法と適応制御系設計—, 中国四国支部第 51 期総会・講演会, 2013 年 3 月 8 日, 高知工科大学
- ② 藤本真作, 電動車いす（移動体）を測り、制御する, ORIC 交流セミナー, 2013 年 1 月 16 日, 岡山リサーチパークインキュベーションセンター
- ③ 森本早斗志, 藤本真作, 吉田浩治, 走行環境を考慮したパワーアシスト車いすの開発—スロープ角の動的推定法と適応制御系設計—, 第 17 回知能メカトロニクスワークショップ, 2012 年 8 月 30・31 日, 広島工業大学
- ④ 秋庭祥二, 藤本真作, 路面状況を考慮したパワーアシスト車いすの開発—加速度と傾斜角の相互補償による路面状況の動的推定—, 第 20 回中国支部学術講演会, 2011 年 11 月 26・27 日, 岡山大学
- ⑤ 今瀧賢, 藤本真作, 走行環境を考慮したパワーアシスト車いすの開発—加速度補償による傾斜角の動的推定—, 中国四国支部第 49 期総会・講演会, 2011 年 3 月 5 日, 岡山理科大学
- ⑥ 今瀧賢, 藤本真作, 走行環境を考慮したパワーアシスト車いすの開発—加速度補償による傾斜角の動的推定—, 第 53 回自動制御連合講演会, 2010 年 11 月 6 日, 高知城ホール

〔その他〕（計 4 件）

- ① 藤本真作, 森本早斗志, 走行環境を考慮したパワーアシスト車いすの制御, 岡山理科大学 OUS フォーラム 2012, 2012 年 11 月 21 日, 岡山プラザホテル
- ② 藤本真作, 坂道の負担軽い車いす研究, 山陽新聞 WebNews, 2012 年 11 月 11 日, http://www.sanyo.oni.co.jp/news_s/news/d/2012111121324857/
- ③ 藤本真作, 秋庭祥二, 森本早斗志, パワーアシスト車いすの高機能化—傾斜角と加速度の相互補償による動的計測法—, 岡山理科大学 OUS フォーラム 2011, 2011 年 11 月 22 日, 岡山プラザホテル
- ④ 藤本真作, 走行環境を考慮したパワーアシスト車いすの制御, 岡山理科大学 OUS フォーラム 2010, 2010 年 11 月 24 日, 岡山プラザホテル

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 真作 (FUJIMOTO SHINSAKU)
岡山理科大学・工学部・准教授
研究者番号：00278912

(2) 研究分担者

吉田 浩治 (YOSHIDA KOJI)
岡山理科大学・工学部・教授
研究者番号：00254433