

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350696

研究課題名(和文) 電動車いすの2次元傾斜モデルとその制御系設計に関する研究

研究課題名(英文) A Study of Control System Design for Electric Wheelchair on Two-dimensional Inclination

研究代表者

藤本 真作 (FUJIMOTO, Shinsaku)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：00278912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、2次元傾斜面上での電動車いすのモデリングとその制御系設計法を確立することである。本研究では上りまたは下り坂(前後)の傾斜と片流れ(左右)の傾斜における車いすモデルの構築を行い、走行環境の状態を推定するために各種の慣性センサを使用する。また、その慣性センサ群を用いた拡張カルマンフィルタによって傾斜角の動的推定問題を取り扱う。そして、2次元の傾斜角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。最後に傾斜環境における重力補償はジョイスティック入力による電動車いすの場合でも有効であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish the modeling and the control system design of an electric (power-assisted) wheelchair on the two-dimensional inclination. In this study, various kinds of sensors are used to measure the states of the driving environment where are slope angles of uphill (or downhill) and side-slope in order to support wheelchair users and caregivers. This study deals with the estimation problem of slope angles by using the extended Kalman filter. And, we also propose the adaptive control system design that is combined the dynamic estimation method of the slope angles. The effectiveness of the proposed estimation method and the adaptive control design was confirmed by simulation and experimental results. Finally, we also confirmed the effectiveness of the gravity compensation for an electric wheelchair with the force-feedback joystick on two-dimensional inclination.

研究分野：ロボット工学

キーワード：計測工学 システム工学 システム同定 電動車いす パワーアシスト ジョイスティック 力提示

1. 研究開始当初の背景

平成24年10月1日現在、我が国の高齢化率は24.1%に達している。そして今後も増加の一途たどり、平成28年を迎えた今日においては4人にひとりが65歳以上の超高齢社会を迎えている。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顕在化するものと予想されている。このような問題に対して、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送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、歩行障害を持つ人にとって車いす(電動車いすも含む。)は欠かせない移動手段の一つであり、QOL向上の一助となりうる。

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ため、図1に示すような使用者に適した車いすの操作方法が考えられる。しかしながら、ジョイスティック、ハンドル、ハンドリム、BMI等の違いはあるものの、計測・制御の観点からすれば、どの操作方法も電動車いすの制御システムに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、操作方法の違いや応答速度のみに依存するのではなく、むしろ車いす特性(全質量や摩擦係数など)やそれを取り巻く走行環境(スロープや悪路走行など)を正確に推定することで、電動車いす自体の機能を高める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の計測・制御面での理論的体系を整えるだけでなく、BMIなどの新たな入力方法にも対応できると考えられる。このとき忘れてならない重要な設計仕様の一つにコストの問題が挙げられる。電動車いすの計測・制御を考えるうえで、ローコストな技術開発はシステムの構築で欠かせない要素であることを付言しておく。

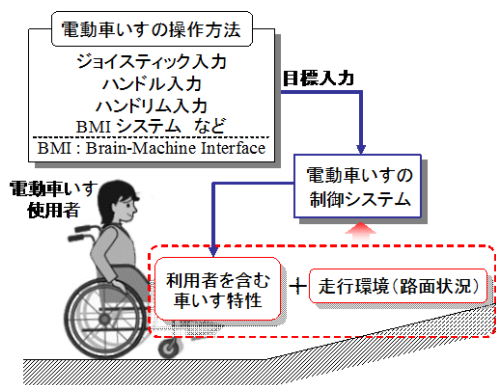


図1 電動車いすシステム

2. 研究の目的

電動車いすの特性とその走行環境の研究(図1を対象とした1次元傾斜モデル)は、

環境自体を陽に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) センサ情報に基づいた車いすの状態(姿勢・加速度など)を推定する方法

(ii) 外乱オブザーバを用いた外乱項(重力・路面摩擦・全質量など)を推定する方法

(iii) 仮想(理想的)車いすモデルを設定する方法

このとき、重要な設計仕様のひとつにコストの問題が挙げられる。生活支援機器である電動車いすの計測・制御を考えるうえで、ローコストな技術開発はシステムの構築で欠かせない要素と言えるためである。

(i)の方法は、車いすの状態(姿勢や加速度など)を推定することで、車いす特性と走行環境を推定する方法と言える。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(慣性)センサが影響を受け、正確な推定値が得られない問題を有している。現在では多自由度を有する慣性センサ群に対してフィルタやオブザーバを構成し、高精度な計測が可能となりつつあるが、その価格は数十万円(百万円を超えるものもある。)にもなってしまう。電動車いすの価格が数十万円オーダーであることを考慮すると、この技術の導入は極めて難しいと考えられる。

(ii)の方法は、未知の摩擦や質量変動を外乱項として直接推定できるため有効な方法と言える。しかし、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不可能である。なぜなら、車いすの動特性や環境は時々刻々変化するだけでなく、1次元傾斜モデルに対する議論であるため、実環境においては対応がしきれない。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んでしまうことになる。すなわち路面の凸凹や摩擦の変化および、切り捨てられた高次元項のモデル化誤差も補償を行うために電動車いすは一般にぎこちない動作となり、使用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、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る。しかしながら、仮想(理想的な)車いすのモデル、特に坂道を横断する場合の片流れ傾斜路面(2次元傾斜モデル)に対するモデル構築は手付かずの状態である。それに伴って2次元傾斜に対する慣性センサ群(加速度センサ・ジャイロセンサ・磁気センサ)からの不確実な情報などをどのように処理するか計測技術の問題も残されているのが現状である。

そこで本研究では、車いすに対する慣性センサ群の問題を拡張カルマンフィルタによって干渉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車いすの状態推定情報に基づい

た(iii)の仮想車いすモデル(2次元モデル)を構築することによって、電動車いすの計測・制御面での確立を目指す。さらに本研究では、車いす特性が曖昧な(ii)のオブザーバではなく、それらの特性パラメータを直接推定できる適応制御則によって(ii)の問題解決を図る。

3. 研究の方法

電動車いすの特性と傾斜面環境の2次元状態推定を行うために、それらの2次元動特性モデルを構築する。そのモデルに基づいて慣性センサ情報(計測の立場)から車いすの状態推定を実施する。一般に慣性センサは車いすの並進・旋回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組む。状態量が正確に推定できることで、車いす特性である転がり抵抗や粘性減衰および、車体の総重量を適応制御の観点から推定することができる。このとき、車いすの2次元仮想(平地)モデル出力を目標値に追従させる制御系を構成する。すなわち、使用者はどんな傾斜および路面環境においても、平地走行と同様の操作で車いすを制御することができる。また本手法は、介護者への適用にも容易に対応することができる利点がある。

車いす特性と傾斜面環境の2次元状態推定に基づいた電動車いすの制御方法の確立を図るためのシステム構成と課題研究との対応を図2に示す。

Phase a) 車いす特性と傾斜環境の状態推定

a-1) 車いすの2次元傾斜モデルの構築

a-2) 2次元傾斜面の状態推定

Phase b) 状態推定に基づいた適応制御法

状態推定値に基づく適応制御系設計

Phase c) 電動車いすの制御法の確立

上述のアプローチと以下に示す計画でソフト面での理論的基礎を確立する。

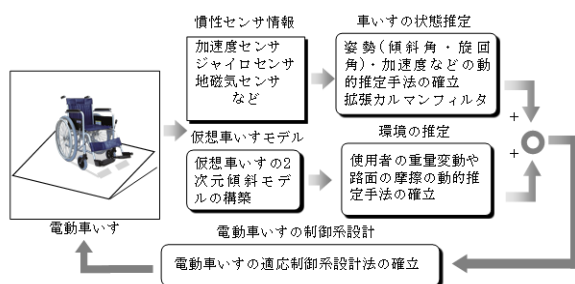


図2 システム構成と課題研究との対応

Phase a) 車いす特性と傾斜環境の状態推定

a-1) 車いすの2次元傾斜モデルの構築

実環境に対応するために2次元傾斜に対する車いすの運動方程式をラグランジュ法によって導出する。このとき車いすは運動学的な拘束つまり、車体と車輪とが連結されていることより車輪の接地点の速度と車体の並進・回転の速度が等しくことを利用する。また、斜面によってタイヤが横滑りを起こさない条件を考慮し、運動方程式を簡略化する。

摩擦項としては、車輪と軸に生じる粘性摩擦力や路面とタイヤとの転がり摩擦力を考慮することにする。こうして構築された動特性モデルは、車いすの状態計測およびシミュレーションに利用される。

a-2) 2次元傾斜面の状態推定

当然のことながら、電動車いすは移動機器であるため、並進加速度と旋回加速度が生じる。このような移動物体の姿勢や加速度を動的に計測することは難しいことが知っている。なぜなら、それらの物理量を計測する慣性センサは、計測量以外の物理量と干渉するためである。そのため、慣性センサとしてその役割を十分に発揮するためには、各種の計測技術と計測対象モデルを利用した理論体系が必要になる。また、上述したようにこの種の慣性センサ装置は非常に高価であり、一般に車いすシステムには導入できない。

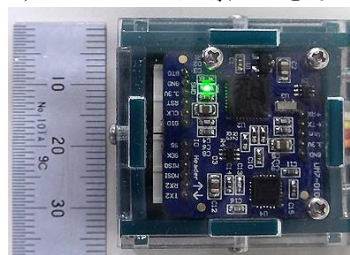


図3 計測用慣性センサ群

そこで本研究では、車いすの状態および傾斜環境を推定するためのセンサとして、図3の慣性センサ群を利用することにする。本製品は、小型で軽量なうえ、低価格(定価:1万円程度)で入手可能である。加速度と角速度の情報から拡張カルマンフィルタを構成することで、傾斜面環境の2次元状態推定を行うこととする。

Phase b) 状態推定に基づいた適応制御法

Phase a)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。このため、使用する適応制御則は、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。

4. 研究成果

本章では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。

4.1 車いすの動特性モデル

2次元傾斜面上で電動車いすを制御するためには車いすの運動方程式を知る必要がある。そこで本章ではラグランジュ法によって導出された2次元傾斜面上における電動車いすの運動方程式について述べる。

車いすの運動方程式を導出するために必要な記号を定義する。図4(a)は車いすを斜面に沿って上から見た図である。一方、図4(b)はXのように記号を設定する。ここで、座標系 $(O-X, Y, Z)$ は慣性座標系である。また、座標系 $(o-x_w, y_w)$ は車いすに設定した座標系(車いす座標系)である。 $(O-x, y)$ は、車いす座標系の原点 o を慣性座標系で表した座標である。

θ は斜面の傾斜角であり、 φ は車体の方向角である。このような車いすの動特性モデルを考えることで、2次元傾斜面上の運動方程式を求めることができる。

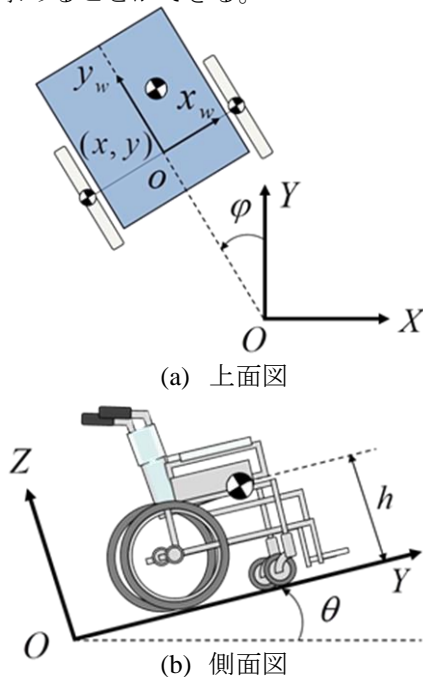


図4 車いすの動特性モデル

車いすの運動方程式を導出するためには、その導出条件を明確にしておく必要がある。そのため、以下に車いすと走行環境の条件を示す。

- ①車いすは左右方向に横滑りしないものとする。
 - ②路面と車輪とは滑らないものとする。
- という2つの条件を与える。

さらに、利用者と車いすの重心位置が図5のように x_w 方向($x_1=0$)にほぼずれないものとし、車いすの幅 $2L$ に比べ y_1 が小さいため、他項に比べ $(y_1/2L)^2$ が十分小さいと仮定すると、車いすの動特性モデルは、次式のようなロボットマニピュレータと同様の運動方程式として得られることを確認した。

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + G(\theta, \varphi) = \tau$$

ここで、 M は慣性行列、 D は粘性摩擦行列、 $G(\theta, \varphi)$ は重力項を表している。また、 τ は車いすに与えるトルクである。

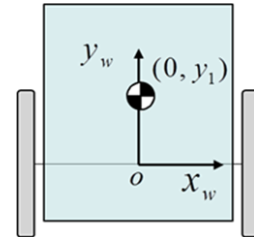


図5 重心位置の仮定

4.2 2次元傾斜面の動的計測法

本節では2次元傾斜面の計測するために車いすに取り付ける姿勢角センサについて説明し、このセンサによる姿勢角推定に用いられているクォータニオンと拡張カルマンフィルタについて述べる。またこの計測方法の有効性を確認するために実機を用いた傾斜角推定実験についても述べる。

4.2.1 クォータニオン表現

ロボット工学などで広く使用されているロール・ピッチ・ヨー角やオイラー角による姿勢表現では特異点が存在する。しかしながら、クォータニオン表現ではそうした問題がない。そのため、航空や宇宙分野における飛行体の姿勢計算には、演算の高速化からクォータニオンがしばしば用いられる。本研究でもクォータニオン表現で姿勢角を推定し、その後、ロール・ピッチ・ヨー角に変換する方法を用いる。

4.2.2 拡張カルマンフィルタによる推定法

車いすの走行環境を動的に推定する場合、各種慣性センサを用いてその状態を推定することが考えられる。しかしながら、慣性センサの多くは重力加速度の方向性に基づいた計測原理が多いため、車いすの並進・旋回加速度の影響から、推定精度が著しく低下することが知られている。また、計測原理に重力加速度を利用しないセンサは非常に高価で大型のものが多いため、車いすシステムには不適切である。そこで本研究では、比較的安価で小型・軽量の3軸加速度センサとジャイロセンサを用いた拡張カルマンフィルタアルゴリズムによって姿勢角を推定する。

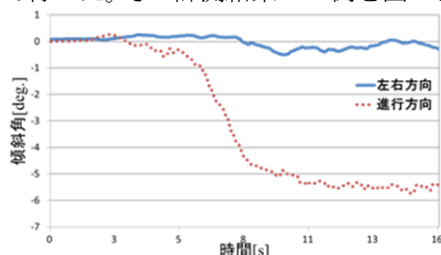
4.2.3 姿勢角センサについて

図3に本論文で使用した姿勢角センサ(CH Robotics製UM7-LT)を示す。このセンサは3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、3軸地磁気センサを内蔵したセンサユニットと通信・計算用マイコンから構成される姿勢角センサであり、サイズは27mm×27mm×6.6mm、重さは3.5gと小型軽量の姿勢角センサとなっている。この姿勢角センサは電動車いすの両輪中央に取り付けられ、USBシリアル変換基盤を介して制御用PCと接続される。拡張カルマンフィルタを適用するため、この姿勢角センサから加速度と角速度情報を受け取り、推定アルゴリズムを実行する。

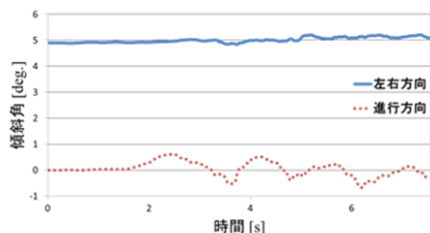
4.2.4 傾斜角の計測実験

推定方法の有効性を確認するために姿勢角センサを車いすに取り付けて傾斜角の計測実

験を行った。本実験では5度の傾斜面で車いすが斜面を下るように走行させた場合と斜面を横切る（片流れ）ように走行させた場合について行った。その計測結果の一例を図6に示す。



(a)坂道走行時の実験結果



(b)片流れ走行時の実験結果
図6 傾斜角の推定結果

図6(a)は斜面を下るように走行した場合の計測値、図6(b)は斜面を横切る（片流れ）ように走行した場合の計測結果のグラフである。ここで実線は左右方向に対して、破線は前後方向（進行方法）に対しての傾斜角の計測結果を表している。

図6(a)より坂道走行を行った場合では、左右方向の振動があまりなく(± 0.5 度未満)また坂道の傾斜角(約-5度)が計測できていることが確認できる。また図6(b)の片流れ走行時に見られる前後方向の振動(± 1 度未満)は車いすを漕ぐ際の加速度による影響と、車いす自体が実際に傾いている角度とが混在した結果であると考えられる。実際に車いすはある程度進行方向に対して振動していることが知られている。また左右方向(約5度)に関してはほぼ正確に傾斜角が計測できているものと考えられる。これらの結果より2次元傾斜面を動的に計測できるシステムを構築できた。

4.3 2次元傾斜面を考慮した適応制御

本節では、2次元傾斜面における適応制御系設計法について検討を行う。

坂道での理想的な走行は、平地と同じ力で走れることであると考えられる。これはパワーアシストによって利用者の残存能力を低下することを極力避ける必要があるためである。つまり、利用者がハンドリムに加えたトルクによって移動する距離が、平地を走行した場合と同じであれば適切なアシストができたと言える。

アシスト量の調整と物理パラメータの推定を行ったとき、提案した制御系設計法はリアプノフの意味で安定性が保証される。なお車いすの目標変位は、理想的な平地走行モデルを構築し、そのモデルに車いす利用者が与

えた τ (トルク) を入力することで、目標変位を生成することができる。また、重力項 $G(\theta, \varphi)$ の計算に必要な θ と φ は姿勢角センサから得られた推定値を利用する。

4.4 制御実験結果



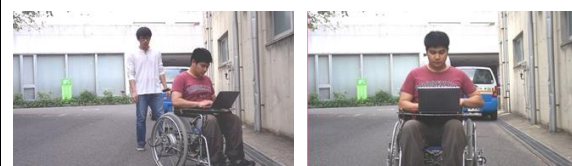
(a) 0秒(適応制御・無)

(d) 0秒(適応制御・有)



(b) 2秒(適応制御・無)

(e) 2秒(適応制御・有)



(c) 4秒(適応制御・無)

(f) 4秒(適応制御・有)

図7 検証実験・風景

図7(a)~(c)に示す適応制御がないケースでは、片流れ傾斜上(写真右側に3°傾斜している)を斜面下側へ流されていることが確認できる。一方、図7(e)~(f)に示す適応制御を行った検証実験の画像からは、車いすが片流れ傾斜上を斜面下側へ流されることなく直進できていることが確認できる。

これらの結果から、傾斜面を横切る操作において適応制御を行うことで、モーメントを補償するアシスト制御を行うことができ、車いすの操作性が向上することが確認できた。

4.5 カフィードバック(FFB)ジョイスティックによる電動車いすの制御

わが国では電動車いすの操作を考えると、ジョイスティック入力を利用するケースが多い。本節では、カフィードバックを施すことで危険や行きたい方向からのずれを修正する方法を検討する。

図8のように2つの軸を組み合わせて、両軸ともに同程度の可動域のジョイスティックを製作した。操作時にジョイスティックから手を離してしまった場合、そのまま移動を継続せず、ジョイスティックが自動で軸の中心へ向かうように2軸に直動バネを取り付けた。また、2軸にそれぞれDCモータとポテンショメータも取り付けた。これらによりジョイスティックの傾きを計測できるようにし、バネの作用で軸の中心に戻せるようにした。傾斜を上る場合、電動車いすの角度をセンサで計測することで、傾斜を下る方向へ

ジョイスティックを傾けづらくなるようにモータが利用者に力覚を提示することができる。

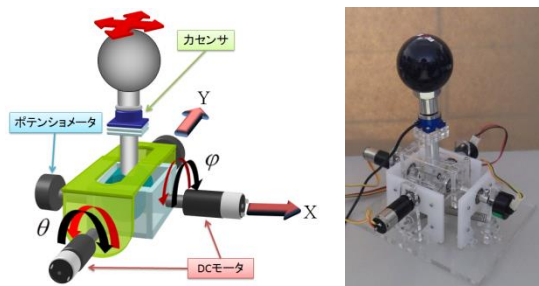
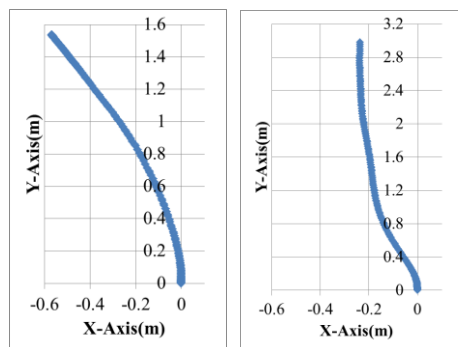


図8 試作した FFB ジョイスティック

FFBの有効性を確認するために、車輪のエンコーダによって走行距離と車いすの方向を推定する実験を約3°の片流れ傾斜で行った。その実験結果の一例を図9に示す。

図9は電動車いすの進行方向左側に片流れ傾斜のある場合の結果である。図9(a)のFFB無しでは傾斜方向に車いすが大きく流されていることが確認できる。それに対して、FFB有りの図9(b)では、最初に左側に流されているもののFFBによって操作のずれが補正され、直進できていることが確認された。



(a) FFB無し (b) FFB有り

図9 FFBの比較実験

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1件)

- ① T.Matsui, S.Fujimoto, K.Yoshida and T.Akagi : Development of Power-Assisted Wheelchair with Consideration of Driving Environment -Dynamic Estimation of Slope Angle and Adaptive Control System Design-, International Journal of Materials Science and Engineering, (IJMSE 2015), Vol.3, No.1, pp.25-30

〔学会発表〕(計6件)

- ① K.Sugihara, S.Fujimoto and K.Yoshida : Development of Electric Wheelchair with Input of Force Feedback Joystick, International Conference on Mechanical, Manufacturing, Modeling and Mechatronics (IC4M 2016)
- ② 松井拓磨, 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 - 2次元傾斜面における計測と制御 -, 第24回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.60-61, 岡山(2015)

- ③ 杉原圭亮, 藤本真作, 吉田浩治 : カフィードバックジョイスティック入力による電動車いすの試作, 第24回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.90-91, 岡山(2015)
- ④ T.Matsui, S.Fujimoto, K.Yoshida and T.Akagi : Development of Power-Assisted Wheelchair with Consideration of Driving Environment -Dynamic Estimation of Slope Angle and Adaptive Control System Design-, International conference on Robotics and Mechatronics (ICROM 2014)
- ⑤ 松井拓磨, 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 - 傾斜角の動的推定法と適応制御系設計 -, 第23回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.96-97, 福山(2014)
- ⑥ S.Morimoto, S.Fujimoto, K.Yoshida and T.Akagi : Development of Power-Assisted Wheelchair with Consideration of Driving Environment - Dynamic Estimation of Slope Angle and Adaptive Control System Design -, International Research Conference on Engineering and Technology IRCET, Sep.14-16, 2013, Singapore

〔その他〕(計5件)

- ① 藤本真作, 吉田浩治, 杉原圭亮 : カフィードバック型ジョイスティック入力による電動車いすの計測と制御, 岡山理科大学 OUS フォーラム 2015, (2015.11.20), 岡山プラザホテル
- ② 藤本真作, 吉田浩治, 松井拓磨 : 走行環境を考慮した電動車いすの計測と制御, 岡山理科大学 OUS フォーラム 2014, (2014.11.21), 岡山プラザホテル
- ③ 藤本真作 : パワーアシスト車いすの開発, 吉備の国クラスター協議会総会・基調講演 (2014.6.12)
- ④ 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適応制御, 岡山理科大学 OUS フォーラム 2013, (2013.11.22), 岡山プラザホテル
- ⑤ 藤本真作 : 電動車いすの動的計測とパワーアシスト制御, 平成25年度 第2回医療福祉機器研究交流会 (2013.9.27).

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・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