

# 運転者の重心位置変動を考慮した パワーアシスト車椅子の拡張運転状況オブザーバ

東野昌記\*, 金佳英, 呉世訓, 藤本博志, 堀洋一 (東京大学)

Extended operation state observer of power-assist wheelchair  
considering the change of driver's center of gravity

Masaki Higashino\*, Kayoung Kim, Sehoon Oh, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

## Abstract

This paper proposes a novel operation state observer for a power-assist wheelchair. Longitudinal velocity, pitch angle, and center of gravity are considered as the significant states in regard to wheelchair motion, and the proposed observer estimates these states with high precision. In order to design the observer, dynamics of the wheelchair is modeled as a parallel double inverted pendulum, and a pressure sheet to measure the position of center of gravity is developed. The observer gain is designed with steady-state Kalman filter theory and the effectiveness of the proposed observer is verified by experiments.

キーワード：圧力センサ, パワーアシスト車椅子, カルマンフィルタ, 並列二重倒立振り子, 重心位置検知, 車体角検知  
(pressure sensors, power-assist wheelchair, Kalman filter, parallel double inverted pendulum, center of gravity estimation, pitch angle estimation)

## 1. はじめに

現在普及している福祉機器でもっとも普及しているものの1つが車椅子である<sup>(1)</sup>。その中でパワーアシスト車椅子は、使用者が加えた力をモータがアシストするものであり、従来の自走式車椅子に比べて使用者の負担を減らすことが出来る。しかし、アシスト力が大きすぎると、斜面を登る際に後方へ転倒する危険性がある<sup>(2)</sup>。また、段差を越える場合<sup>(3)(4)</sup>や斜面を走行する場合<sup>(5)</sup>など、車椅子が不安定になる場合がある。そのため、運転状況においてはアシスト力を制御する必要がある。

しかし、運転状況に適した制御を行うには、車椅子の速度や人の姿勢などの情報を知る必要がある。そのため先行研究において、車椅子の状態変数を推定するための状態推定オブザーバが設計されてきた<sup>(2)(6)</sup>。しかし、従来のオブザーバは人間の重心と車椅子の背面部が同じである台車モデルを用いているため、人が前かがみになると重心位置を推定することができない。さらに、文献(2)では推定した重心位置を用いた後方転倒防止制御法が提案されているが、使用者が後方へ転倒しないよう姿勢を前かがみにしても、後方へ転倒する危険性が高い判断され、アシスト力を制御してしまう。その結果、斜面が登りにくくなってしまふ。そのため、重心位置の推定が必要がある。

本稿では、並列二重倒立振り子モデルを適用し、重心位置の推定を行うために圧力センサを用いることにより設計した、車椅子の車体角と人間の重心を分けて推定できる拡張運転状況オブザーバについて述べる。また、推定検証実験を行い、提案法の有効性を検証する。

## 2. 車椅子の運転状況と推定したい状態変数

本章では、判別したい車椅子状況と推定したい状態変数を定義する。

2.1 車椅子の運転状況 図1と図2に判別したい運転状況を示す。図1は車椅子が走行する路面の状況を示している。図2の車椅子の状態では、段差を越えるために前輪を浮上した場合と操縦者の意思に反して前輪が浮上してしまった場合を示す。本稿で示したのは車椅子の運転状況の一例であり、他にも路面が雨でぬれている場合、でこぼこな道を走行する場合など、判別しなくてはならない環



(a) Driving on level ground (b) Driving on slope

図1 車椅子の運転環境の状態

Fig. 1. The state of driving environment of wheelchair



(a) Wheelie (b) Overturn

図2 車椅子の状態

Fig. 2. the state of wheelchair

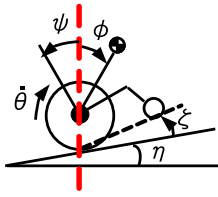


図 3 状態変数の定義  
Fig. 3. Definitions of states

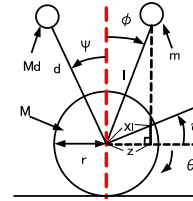
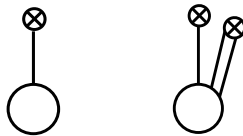


図 5 並列二重振り子による車椅子モデル  
Fig. 5. Wheelchair model using parallel double inverted pendulum



(a)Cart model (b)Double model  
図 4 倒立振り子を用いた車椅子モデル

Fig. 4. Wheelchair model using inverted pendulum

境は多い。

パワーアシスト車椅子の制御を行う際、車椅子の運転状況を判別し、それぞれの状況に合わせた制御を行う必要がある。次節では、制御及び運転状況を判別するために必要な状態変数を定義する。

2.2 推定したい状態変数 図 3 に推定したい状態変数を示す。各状態は以下のように定義される。

- η: 傾斜面の角度
- ζ: 車椅子の路面に対する前輪浮上角
- φ: 重力に対する人間の重心位置角
- θ: 車椅子の車輪速度

上記の状態変数を推定できれば、2.1 節で述べた車椅子の運転状況を判別し、その運転状況に応じた制御が行える。なお、α と ζ を区別し、それぞれを精度よく推定することは困難である<sup>(7)</sup>。そのため、η と ζ の推定は今後の課題とし、本稿では α + ζ を絶対平地からの前輪浮上角 ψ として、φ, ψ, θ について推定を行う。

### 3. 車椅子のモデル化

2 章で定義した状態変数には、センサで正しく測定することが難しいものもあるため、状態変数を推定するためにはオブザーバを設計する必要がある。本章では、オブザーバを設計するために必要なモデルの設計を行う。

3.1 倒立振り子を用いた車椅子のモデル化 車椅子は倒立振り子としてモデル化できる<sup>(8)</sup>。図 4 に倒立振り子を用いた車椅子モデルを示す。文献(2),(6)では、車椅子の背面部と人間の重心が同じであると仮定し、図 4(a)のように、車椅子を単振り子の台車モデルとしてモデル化している。しかし、車椅子に座る姿勢は車椅子の運転状況により変化する可能性がある。また、運転状況に関わらずユーザーが姿勢を変えることもある。そのため、車椅子の背面部と人間の重心を分けて車椅子をモデル化する必要がある。本稿で

は、人間の重心位置と車椅子の背面部を別々の倒立振り子であると考え、図 4(b)のように車椅子のピッチ方向の運動と人間の重心位置変動の関係が独立である並列二重振り子モデルを考える。

3.2 車椅子の状態方程式 図 5 に並列二重振り子による車椅子モデルを示す。ここで、 $m[\text{kg}]$  は人間の質量、 $M[\text{kg}]$  は車椅子の車輪の質量、 $M_d[\text{kg}]$  は車椅子の背面部の重さ、 $\theta[\text{rad}]$  は車輪の回転角、 $l[\text{m}]$  は人間から車輪中心までの長さ、 $r[\text{m}]$  は車輪の半径、 $d[\text{m}]$  は車椅子における背面部の長さである。ラグランジェ方程式を解くと、以下の式が導出される。

$$\tau = (M + M_d + m)r^2\ddot{\theta} + mrl\dot{\phi} \cos \phi - mrl\dot{\phi}^2 \sin \phi - M_d r d \ddot{\psi} \cos \psi + M_d d \dot{\psi}^2 \sin \psi + J_M \ddot{\theta} \dots \dots \dots (1)$$

$$d_\phi = ml^2 \ddot{\phi} + mrl\ddot{\theta} \cos \phi + J_l \dot{\phi} + mgl \sin \phi + B_m \dot{\phi} (2)$$

$$d_\psi = M_d d^2 \ddot{\psi} + M_d r d \ddot{\theta} \cos \psi + J_d \dot{\psi} + M_d g d \sin \phi + B_d \dot{\psi} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $J_m[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  は振り子の慣性モーメント、 $J_M[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  は車輪の慣性モーメント、 $J_d[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  は車体の慣性モーメント、 $B_m[\text{m}^2/\text{s}]$  は人間の運動における摩擦係数、 $d_\phi[\text{N} \cdot \text{m}]$  は人間が姿勢を変えることにより生じる未知入力トルク、 $B_d[\text{m}^2/\text{s}]$  は車体の運動における摩擦係数、 $d_\psi[\text{N} \cdot \text{m}]$  は車体が前輪浮上することにより生じる未知入力トルク、 $\tau[\text{N} \cdot \text{m}]$  は車輪を回すトルクである。式(1)~(3)を、 $\phi, \psi, \theta$  が十分に小さいと仮定して線形化し、これを状態空間法で表すと、以下の式が導かれる。

$$\dot{x} = Ax + B\tau \dots \dots \dots (4)$$

$$x = \left( \begin{matrix} \dot{\theta} & \dot{\phi} & \dot{\psi} & \theta & \phi & \psi & d_\phi & d_\psi \end{matrix} \right)^T \dots \dots (5)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & a_1 & a_2 & 0 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ 0 & a_7 & a_8 & 0 & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ 0 & a_{13} & a_{14} & 0 & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

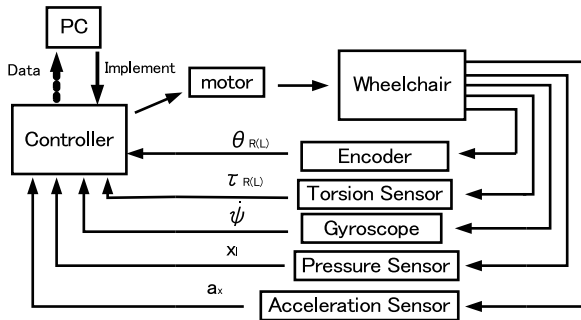


図 6 実験機の構成

Fig. 6. Composition of experimental environment

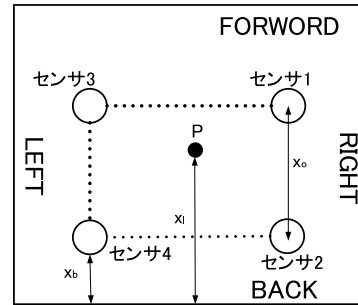


図 7 圧力センサの配置

Fig. 7. Arrangement of pressure sensors

$$\dots\dots\dots (6)$$

$$B = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \dots\dots (7)$$

A, B のパラメータについては、付録に記す。

#### 4. 出力方程式とオブザーバ設計

本章では、第 3 章で述べたモデル化を用いたオブザーバ設計について述べる。測定できるセンサとして、エンコーダ、ジャイロセンサ、圧力センサ、加速度センサを用いて出力方程式を立てる。ここで、エンコーダは  $\theta$  を、ジャイロセンサは  $\dot{\psi}$  を測定する。また、導出した出力方程式を元に、定常カルマンフィルタを用いたオブザーバを設計する。

##### 4.1 実験機の構成

図 6 に実験機の構成を示す。本稿で用いるパワーアシスト車椅子は、市販されているパワーアシスト車椅子 JW-II にエンコーダや加速度センサなどのセンサと、リアルタイムの制御器を取り付けたものである。また、重心位置 P から車椅子の背もたれまでの直線距離  $x_l$  を測定するため、座面に発泡スチロールを乗せ、その上に圧力センサを図 7 のように敷く。

##### 4.2 圧力センサの値を用いた重心位置推定

本稿では、重心位置を推定するために圧力センサを用いる。図 7 に示したように、4 枚の圧力センサを車椅子の座面に置き、各々のセンサにかかる圧力の値より重心位置 P から車椅子の背もたれまでの直線距離  $x_l$  [m] を推定する。センサ 1~4 にかかる圧力をそれぞれ  $p_1, p_2, p_3, p_4$  [kPa] とすると、 $x_l$  は以下の式で表される。

$$x_l = x_b + x_0 \times ((p_1 + p_3) - (p_2 + p_4)) \dots\dots (8)$$

また、3.2 節で定義した  $l, \phi, \psi$  を用いると、図 5 における  $z$  の長さは式 9 で表せられる。

$$z = x_l \cos \psi = l \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \dots\dots (9)$$

$\psi$  が十分小さい値であると仮定し、式 (9) を線形化すると以下の式になる。

$$\phi = \frac{x_l}{l} \dots\dots (10)$$

4.3 加速度センサの値を用いた方程式 加速度センサで測定する車椅子進行方向の加速度  $a_x$  は、 $\psi$  が十分に小さければ式 (11) で表せる<sup>(6)</sup>。

$$a_x = r\ddot{\theta} \cos \psi + g \sin \psi = r\ddot{\theta} + g\psi \dots\dots (11)$$

4.4 車椅子の出力方程式 式 (10) と式 (11) より出力方程式を立てる。出力としては、 $x_l, a_x$  と  $\theta, \psi$  を用いる。従って、出力方程式は以下ようになる。

$$y = Cx + D\tau \dots\dots (12)$$

$$y = \begin{pmatrix} \theta & a_x & x_l & \dot{\psi} \end{pmatrix}^T \dots\dots (13)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ra_1 & ra_2 & 0 & ra_3 & ra_4 + g & ra_5 & ra_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots (14)$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & pb_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \dots\dots (15)$$

4.5 定常カルマンフィルタを用いたオブザーバの設計 4.4 節で、車椅子の出力方程式を導出した。しかし、状態変数として 2.2 節で定義した  $\phi, \psi, \dot{\theta}$  の値を直接測定することはできない。本稿では、オブザーバを用いることにより、 $\phi$  などの値を推定する。

推定値  $\hat{x}$  は以下のように表すことができる。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\tau + K\{y - (C\hat{x} + D\tau)\} \dots\dots (16)$$

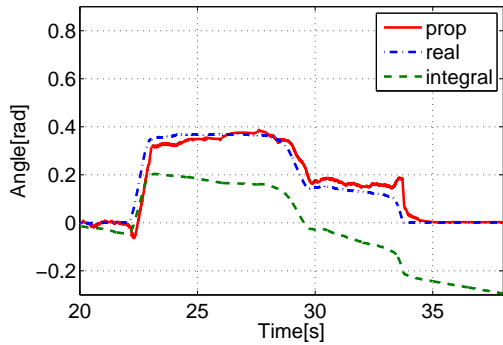
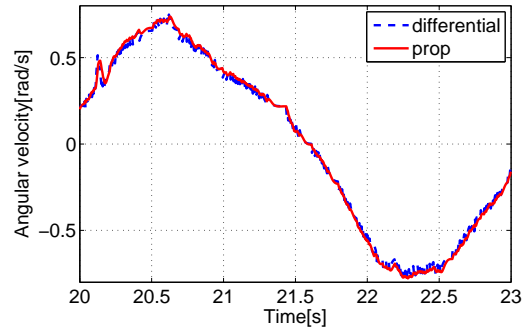
$$\hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{\theta} & \hat{\phi} & \hat{\psi} & \hat{\theta} & \hat{\phi} & \hat{\psi} & \hat{d}_\phi & \hat{d}_\psi \end{pmatrix}^T \dots\dots (17)$$

K はオブザーバゲインであり、K を変えることで推定する  $\hat{x}$  が実際の  $x$  となるようにする。

オブザーバゲインの設計はカルマンフィルタ<sup>(9)</sup>を用いる。そこで、状態方程式の式 (5) と出力方程式の式 (13) を以下のように書き換える。

$$\dot{x} = Ax + B\tau + v \dots\dots (18)$$

$$y = Cx + D\tau + w \dots\dots (19)$$

(a)  $\hat{\psi}$ (b)  $\hat{\theta}$ 図 8 前輪浮上角  $\hat{\psi}$  と車輪速  $\hat{\theta}$  の推定結果Fig. 8. Experimental results of estimation of pitch angle  $\hat{\psi}$  and longitudinal velocity  $\hat{\theta}$ 

(a) Posture X

(b) Posture Y

図 9 車椅子における姿勢

Fig. 9. Postures in wheelchair

$$\mathbf{v} = \left( v_{\dot{\theta}} \quad v_{\dot{\phi}} \quad v_{\dot{\psi}} \quad v_{\theta} \quad v_{\phi} \quad v_{\psi} \quad v_{d_{\phi}} \quad v_{d_{\psi}} \right)^T \quad (20)$$

$$\mathbf{w} = \left( w_{encoder} \quad w_{acc} \quad w_{pressure} \quad w_{d_{gyro}} \right)^T \quad (21)$$

ここで、 $\mathbf{v}$  はシステム雑音、 $\mathbf{w}$  は測定雑音である。 $\mathbf{v}$  と  $\mathbf{w}$  の値を変えることによりオブザーバゲインが決まり、よい状態推定が出来るようになる。未知入力のシステム雑音  $v_{d_{\phi}}$  や  $v_{d_{\psi}}$ 、ノイズを多く含む加速度センサに対する測定雑音  $w_{acc}$  の共分散値は大きく設定し、速度のシステム雑音  $v_{\dot{\theta}}$  など、滑らかな推定結果がほしい状態の共分散値は小さく設定する必要がある。

### 5. 拡張運転状況オブザーバを用いた状態変数の推定精度検証実験

第2章で定義した状態変数を、第4章で提案したオブザーバにより推定し、その精度を検証する。また、車椅子の前輪が浮上している場合、ウィリーしている時と坂道で運転している時で状態変数がどのように変化するかについて検討を行う。さらに、従来用いられてきたオブザーバと比較を行い、拡張運転状況オブザーバの精度について検討を行う。

**5.1 前輪浮上角  $\psi$  の推定精度について** 一定時間前輪を浮上させた時の  $\psi$  の推定精度について検討を行う。比較値としては、車椅子に搭載しているジャイロセンサを積分させた値を用いる。また、前輪浮上角を精度よく計れ

る光学式の車高センサの測定値を真値として用いる。

図8(a)に結果を示す。提案したオブザーバにより推定した  $\psi$  とジャイロセンサの積分値を比べた場合、積分値の方は真値と大きくずれているのに対し、提案方の推定値は真値とのずれが小さい。ジャイロセンサの積分値の場合、ジャイロセンサのノイズによりドリフト現象が起きる。一方提案法の場合は、ドリフト現象が起こることがなく推定できている。そのため、 $\psi$  を求めるにはジャイロセンサの積分値を用いる手法より本稿の提案手法が適している。

**5.2 車輪速  $\dot{\theta}$  の推定精度について** 次に、前輪を浮上させずに、前後に数回漕いだ時の  $\dot{\theta}$  について、推定精度の検討を行う。比較値としてはエンコーダの微分値を用いる。

図8(b)に結果を示す。オブザーバによる値と微分値は同じような挙動を示している。また、微分値の方はノイズが乗っているのに対し、オブザーバによる値はノイズが乗ることなく推定できている。

以上より、提案手法により推定した  $\dot{\theta}$  は、車椅子の速度として用いれる。

**5.3 重心位置角  $\phi$  の推定精度について** 次に、様々な運転状況における  $\phi$  の推定精度の検討を行う。

**5.3.1  $\phi$  の推定精度検証 (姿勢変動)** 実験開始時は図9(a)に示した姿勢Xで座っているが、その後車椅子を動かさず図9(b)に示した姿勢Yへと姿勢を変えた。その時の実験結果を図10(a)に示す。姿勢Xの時の値は0.4 rad、姿勢Yの時の  $\phi$  の値は  $\pi/2$  rad に近いものになっている。

**5.3.2  $\phi$  の推定精度検証 (前輪浮上)** 姿勢Xのまま車椅子の前輪を浮上させる。この時の実験結果を図10(b)に示す。 $\psi$  は約0.2 radだが、 $\phi$  の変化の絶対値もそれに近い値となっている。

**5.3.3  $\phi$  の推定精度検証 (斜面)** 斜面を走行し、斜面にて姿勢をXからYへと変化させる。結果を図10(c)に示す。斜面の角度は約0.3 radであり、斜面へ姿勢Xで登った際の  $\phi$  絶対値の変化も約0.3 radとなっている。また、坂

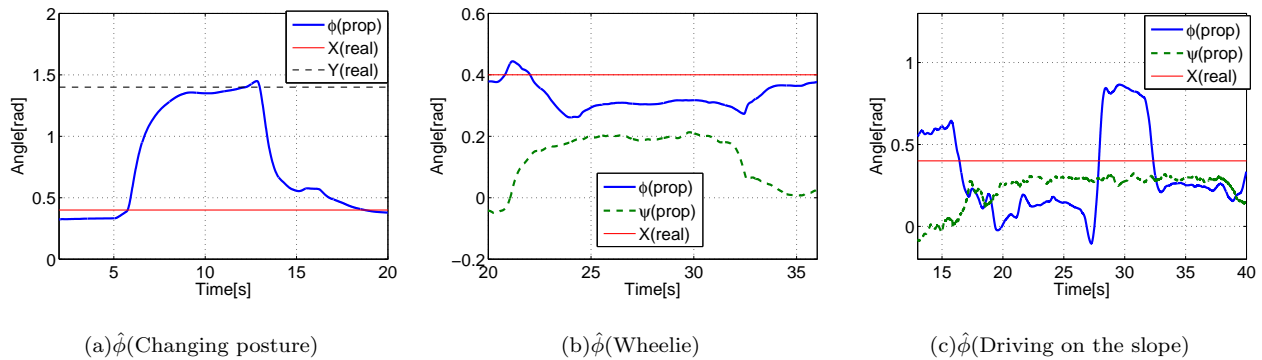


図 10 重心位置角  $\hat{\phi}$  の推定結果

Fig. 10. Experimental results of estimation of the position of driver's center of gravity  $\hat{\phi}$

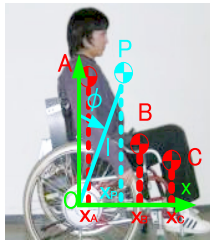


図 11 姿勢 X における重心位置

Fig. 11. Position of center of gravity in posture X

道で姿勢 Y へと変化させた場合の  $\phi$  の絶対値の変化は 5.4.1 節の実験の時の変化と同じ値となっている。

5.3.4  $\phi$  の真値について 以上の実験で推定された  $\phi$  が正しいのかを検証するために、本節では  $\phi$  の真値について述べる。

図 11 のように、人間を上半身部 A、太腿部 B、踵部 C の 3 箇所にわけ、その重心の重さ及び点 O からの距離を求める。この 3 つの重心位置を平均したものが人間の重心位置 P となる。O と P の距離  $x_P$  を求めれば、姿勢 X における重心位置  $\phi$  を求めることができる。A, B, C にかかる重さはそれぞれ体重の 67.8%, 20.6%, 11.6% であり<sup>(10)</sup>、身長 1.7 m、体重 60 kg の人の場合の姿勢 X における重心位置は約 0.4 rad である。同様に計算すると、姿勢 Y の  $\phi$  は約 1.4 rad である。また、姿勢を変えずに前輪を浮上させた場合、 $\phi$  の変化の絶対値は、 $\psi$  の値と同じになる<sup>(2)</sup>。

以上より、推定された  $\phi$  は真値に近く、提案したオブザーバは精度よく  $\phi$  を推定できるといえる。

5.4 運転状況における状態変数の比較 5.2~5.4 節では、第 2 章で定義した 3 つの状態変数が、本稿で提案した運転制御オブザーバにより精度よく推定できることが検証された。本節では、ウィリーさせた場合と斜面で走行した場合をどのようにに判別するかについて述べる。

図 12 に、5.1 節における実験の時の重心位置  $\phi$  の推定値を示す。ウィリーを行った場合、姿勢を変えようとするときそれにあわせ車体角も変化してしまう。このため、 $\phi$  が変動

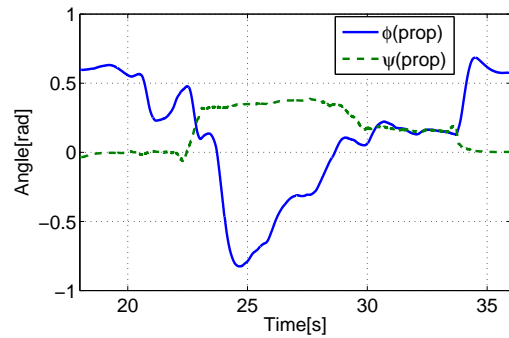


図 12  $\hat{\phi}$  の推定結果 (前輪浮上時)

Fig. 12. Experimental results of estimation of the position of driver's center of gravity  $\hat{\phi}$  (Wheelie)

した際  $\psi$  も変動する。一方、斜面を走行する場合は、5.3.3 節における実験から分かるように、斜面では姿勢を变化することが出来るため、 $\phi$  が変動しても  $\psi$  は変動しない。すなわち、同じ  $\psi$  の値であっても、本稿で提案した  $\phi$  により前輪浮上した時の運転状況の判別が可能である。

5.5 従来法との比較 5.1 節における実験において、従来の前輪浮上角の推定手法と提案法と比較する。従来法としては、従来法 1 を文献(2)で提案されている重心位置推定オブザーバとし、従来法 2 を文献(6)で提案されている運転状況オブザーバとする。従来法 1, 2 では、図 4(a)の台車モデルを用いて推定を行っている。なお、従来法 1 は重心位置を推定しているが、前提として、高齢者の場合前輪が浮上した時車椅子のピッチ方向の角速度と重心位置の角速度が等しいと仮定して重心位置推定を行っている。そのため、従来法 1 で推定した重心位置は、本稿における  $\phi$  ではなく  $\psi$  であると考えて、比較を行う。その結果を図 13 に示す。

従来法 1 は、精度がかなり悪くなっている。従来法 2 では、真値が一定の場合でも  $\psi$  の値が変動している。図 12 の  $\phi$  の変動を見ると、実験開始から 25 秒あたりで  $\phi$  が大

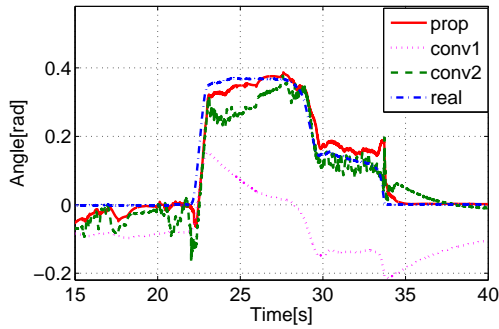


図 13 従来法との比較

Fig.13. Comparison of proposal method with conventional method

大きく変動しているが、この時従来法 2 で推定した  $\psi$  も変動している。従来法 2 では台車モデルを用いているため、 $\psi$  の推定に重心位置の影響が大きく出てしまうと考えられる。一方、提案法は二重並列振子を用いているため、 $\psi$  の推定に重心位置が影響されない。従って、提案法が従来法より精度の高い重心位置の推定が可能である。

## 6. まとめ

本稿では、車椅子の様々な運転状況において安定な走行を実現するために必要な状態変数を推定する手法について検討した。車椅子の運転状況とその判別に必要な状態変数を定義し、人間の車椅子に対する重心位置、および車体の速度、車体角などを推定できる拡張運転状況オブザーバを提案した。オブザーバを設計するために、車椅子のモデルには二重並列倒立振子モデルを用い、重心位置を推定するために圧力センサを用いた。また、オブザーバゲインを決めるために定常カルマンフィルタを用いた。そして、提案したオブザーバを用い、状態変数の推定精度、運転状況における状態変数の差異の検証、従来用いられた推定法との比較を行い、有効性を確認した。

今後は、提案したオブザーバを用いて、段差を越えるのに必要なウィリー制御、斜面を安全に走行するための制御法を考案し、実験により検証を行う。また、絶対平地からの前輪浮上角  $\psi$  を、傾斜角  $\eta$  と地面からの前輪浮上角  $\zeta$  に分けて推定を行えるようにするのも課題である。

## 付 録

3.2 節の行列  $A$ ,  $B$  のパラメータは、

$$p_1 = mrl, p_2 = mr^2 + J_m, p_3 = -M_d r d, p_4 = M_d r^2 + J_d, \\ p_5 = (M + M_d + m)r^2 + J_M, q_1 = mgl, q_2 = M_d g d,$$

$$c = \frac{1}{p_2(p_4 p_5 - p_3^2) - p_1^2 p_4}$$

とおくと、

$$a_1 = cp_1 p_4 B_m, a_2 = cp_2 p_3 B_d, a_3 = cp_1 p_4 q_1,$$

$$a_4 = cp_2 p_3 q_2, a_5 = -cp_1 p_4, a_6 = -cp_2 p_3,$$

$$a_7 = c(p_3 p_4 - p_3^2) B_m, a_8 = cp_1 p_3 B_d, a_9 = c(p_5 p_4 - p_3^2) q_1,$$

$$a_{10} = cp_1 p_3 q_2, a_{11} = c(p_4 p_5 - p_3^2) p_2, a_{12} = cp_1 p_3, \\ a_{13} = \frac{-p_3 a_1}{p_4}, a_{14} = \frac{-p_3 a_2 - B_d}{p_4}, a_{15} = \frac{-p_3 a_3}{p_4}, \\ a_{16} = \frac{-p_3 a_4 + q_2}{p_4}, a_{17} = \frac{-p_3 a_5}{p_4}, a_{18} = \frac{-p_3 a_6 + 1}{p_4}, \\ b_1 = cp_2 p_4, b_2 = -cp_1 p_4, b_3 = \frac{-p_3 b_1}{p_4}$$

である。

## 参考文献

- (1) H. Seki: "Research on Measurement and Control System Aiming at Support for Elderly People - Towards Establishment of Welfare Control Engineering -", The thesis for a doctorate in the University of Tokyo(2002)(in Japanese)
- (2) N. Hata, H. Seki, Y. Koyasu, and Y. Hori: "Novel Control Scheme of Power Assisted Wheelchair for Preventing Overturn(Part II)- Variable Assistance Ratio Control Based on Estimation of Center-of-Gravity Angle and Phase Plane -", IEEJ Trans. IA, Vol.124-D, No.7, pp.699-705(2004)(in Japanese)
- (3) T. Yasuda, S. Yamano, N. Kawakubo, K. Sakai, and K. Tanaka: "On a function for step climb by using wheelie action of a one hand drive wheelchair", the Japan Society of Mechanical Engineers, JSME annual meeting 2008(7), pp.197-198(2008)(in Japanese)
- (4) S. Yokota, T. Ito, T. Yamaguchi, D. Chugo, and H. Hashimoto: "An Assistive Wheelchair Caster Unit for Step Climbing", Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation(IECON'11), pp.2027-2032,(2011)
- (5) K. Kim, K. Nam, S. Oh, H. Fujimoto, and Y. Hori: "Human Friendly Yaw Motion Control for Power Assist Wheelchair", Proc.IEEJ Industry Applications Society Conf.(JIASC2011), vol.2, pp.II-603-pp.II-606(2011)(in Japanese)
- (6) S. Oh, and Y. Hori: "Development of a Driving State Observer for the Advanced Control of a Wheelchair and its Applications", Proc.IEEJ Industry Applications Society Conf.(JIASC2005), vol.2, pp.II-369-pp.II-374(2005)(in Japanese)
- (7) S. Sato, and H. Fujimoto: "Consideration on Pitching Control of Electric Vehicle on Sloping road with Braking-Torque Estimation", Proc.IEEJ Industry Applications Society Conf.(JIASC2008), vol.2, pp.II-353-pp.II-368(2008)(in Japanese)
- (8) Y. Takahashi, S. Ogawa, and S. Machida: "Front wheel raising and inverse pendulum control of power assist wheel chair robot", Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation(IECON'99), pp.668-673(1999)
- (9) R. E. Kalman: "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Journal of Basic Engineering, 82-D, pp.35-45, (1960)
- (10) Charles E. Clauser, John T. McConville, J. W. Young, ANTIOCH COLL YELLOW SPRINGS OH: "WEIGHT, VOLUME, AND CENTER OF MASS OF SEGMENTS OF THE HUMAN BODY", NNTS(1969)