

# 環境適用を目指した車椅子の運転状況オブザーバの設計と応用

呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学)

## Development of a Driving State Observer for the Advanced Control of a Wheelchair and its Applications

Sehoon Oh, Yoichi Horii (The University of Tokyo)

For the advanced control of a power assisted wheelchair, we need to know some information on the state of the wheelchair. The information that is necessary for the control is (1) the speed of the wheelchair, (2) the inclination angle of the wheelchair body from the ground, and (3) external disturbance. This paper proposes an observer that can estimate that information in real time. The kalman filter theory is adopted for the observer design. Experimental results validate that estimation by the proposed observer is correct, robust, and fast.

This observer can evolve the performance of various advanced controls of a wheelchair. Several controls such as prevention of overturning, force sensor-less power assisting control and the gravity compensation control are introduced as examples that need this proposed observer. The way how to use this driving state observer in those controls is explained.

キーワード：車椅子，カルマンフィルター，運転状況オブザーバ，傾斜角検知，パワーアシスト制御，後方転倒防止，力センサーレスパワーアシスト制御，重力補償，加速度計，ジャイロスコープ  
Keywords: wheelchair, kalman filter, driving state observer, inclination angle estimation, power assisting control, prevention of overturning, force sensor-less power assisting control, gravity compensation, accelerometer, gyroscope

### 1. 序 論

福祉機器への関心が高まっている<sup>(1)</sup>。特にモータを利用した生活支援は、まだそれほど確立はしていないがその必要性や多様な応用を考えるとこれから最も重要な技術の一つになるに違いない。パワーアシスト車椅子はその中の移動支援にかかわるツールで高い必要性和広い普及度を持ち合わせている上、人間とモータの協調作業が必要である点から制御工学面から見たときも興味深いアプリケーションである。



図1 福祉機器の代表的な例としてパワーアシスト車椅子 (YAMAHA JW II)

Fig. 1. Power-assisted wheelchair as an example of power assisting tools (YAMAHA JW II)

それにもかかわらず市販のパワーアシスト車椅子はセンサーで人間操作力の測定し、その何倍かのトルクをオープンループ的に入れている、まだ簡単な制御を行っているだけである。産業応用で培ってきた様々なアドバンスト制御を適用することで、このパワーアシスト車椅子をより広い環境でより快適に人間をアシストする便利なツールとすることができるようである。そこで本研究では、このパワーアシスト車椅子の高性能化を目指し運転状況推定オブザーバの設計し、それを利用した高機能制御をいくつか紹介する。

提案する運転状況オブザーバはパワーアシスト制御時に必要な車椅子の運転状況を推定するもので、その必要な運転状況としては

- (1) 車椅子の進行速度
- (2) 地面 (絶対平地) に対するボディーの角度
- (3) モータトルク以外の車輪を回転させる力

の三つを定義しそれを観測する。その観測のためにエンコーダ、ジャイロスコープ、加速度センサーの三つのセンサーを利用、オブザーバによってセンサーフュージョンを行う。

まず2節では、この状態定義に基づき運転状況オブザーバを設計するための運動方程式を導出する。特に外乱項を導入することで簡略化した数学モデルを説明する。そして3節では実際に運転状況オブザーバの設計を行う。エンコーダ、ジャイロスコープ、加速度計の三つのセンサーを利用するマルチセンシングシステムであるので、カルマンフィルタをオブザーバゲインの設計法に採用し、実験を行う。

その実験結果から各センサーを単体で利用する観測とオブザーバを利用したセンサーフュージョンを行う状態推定との比較を行う。

このオブザーバで得られる情報から車椅子が平地を運転しているのか、坂を上っているのか、あるいは前輪が浮上したウィリー状態にいるのかが判別できる。その結果、運転状況に合わせた後方転倒防止制御<sup>(4)</sup>、力センサーレスパワーアシスト制御<sup>(5)</sup>、重力抑制制御<sup>(7)</sup>などの制御が、より正確かつ滑らかに実現できる。4節ではこれらの制御に、提案する運転状況オブザーバがどのように利用できるかを説明する。

## 2. 車椅子の制御に必要な状態の定義と簡易運動モデルの導出

2.1 運転状況把握に必要な状態の定義 車椅子の制御に必要な運転状況として図2のような三つの運転状況を想定する。アシスト制御の設計を考えたときに、このそれぞれの状況に合わせた制御が必要である。たとえば、車椅子の前輪が浮上している（ウィリー）時に平地運転と同じアシスト制御をすると過剰なトルクアシストにより後方転倒してしまうことがある。また下り坂では平地でのアシスト制御と違うアシスト制御が必要である。すなわち図2に見られる運転状況区分はアシスト制御時に判別する必要がある区分である。

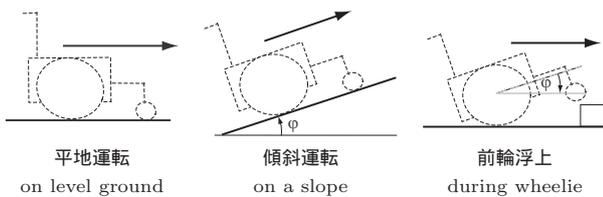


図2 想定している運転状況

Fig. 2. Driving states considered in this paper

ではこの運転状況判別のために必要な、また各運転をしているときの制御に必要な情報には何があるのか。本研究では図3をその重要な情報として定義し、推定を試みる。

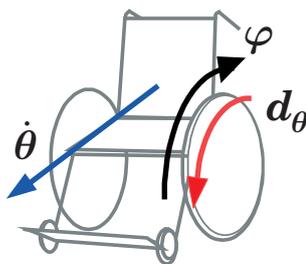


図3 運転状況の把握のために必要な状態

Fig. 3. States necessary for the perception of driving state

各状態は以下のように定義される。

$\dot{\theta}$  : 車輪の回転角 ( $\theta$ ) の角速度

$\varphi$  : 車椅子ボディの平地（重力に対する絶対平面）に対する角度

$d_\theta$  : 車輪に加わるモータトルク以外のトルク

特に  $\dot{\theta}$  は車輪のスリップを無視すると車椅子の進行速度と等価に取り扱える。通常車椅子使用環境でこのスリップが大きい影響を与えることは少なく、 $\dot{\theta}$  を車椅子の進行速度と等価に取り扱うことがアシスト制御の安定性や性能を著しく悪化することはないと考えられる。ということで、この三つの状態を観測するオブザーバを運転状況オブザーバと名づけることにする。以下ではこの運転状況オブザーバ設計に必要な物理モデルを設計する。

2.2 車椅子運動の簡易物理モデル設計 車椅子は回転する車輪と使用者が乗るボディで構成される。この構成は倒立振子が乗っている台車にアナロジーできる<sup>(2)</sup>。図4に倒立振子つき台車といくつかの物理量の関係をイラストで示した。 $M, m$  は車輪と振り子の質量、 $r$  は車輪の半径、 $l$  は振り子の長さであり、注目している状態量である車輪の回転角は  $\theta$ 、振り子の傾き角度は  $\varphi$  と定義した。この構成に基づくと  $\theta$  と  $\varphi$  の方程式は式(1)と(3)で与えられる。 $\tau_\theta$  と  $\tau_\varphi$  はそれぞれ  $\theta$  と  $\varphi$  へのトルク入力である。また、車椅子運転時にボディの傾斜角  $\varphi$  がそれほど大きくないことから式(5)の仮定をし、式(2)、(4)の線型方程式を得ることができる。

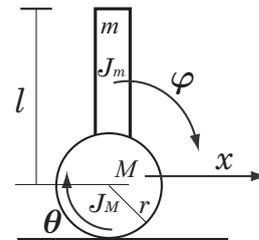


図4 倒立振子つき台車モデル

Fig. 4. Cart with an inverted pendulum model

$$\tau_\theta = \{(M + m)r + J_M\} \ddot{\theta} - mlr\ddot{\varphi} \cos \varphi + mlr\dot{\varphi}^2 \sin \varphi + B_M \dot{\theta} \dots \dots \dots (1)$$

$$\simeq \{(M + m)r + J_M\} \ddot{\theta} - mlr\ddot{\varphi} + B_M \dot{\theta} \dots \dots \dots (2)$$

$$\tau_\varphi = (J_m + ml^2) \ddot{\varphi} - mlr\ddot{\theta} \cos \varphi - mgl \sin \varphi + B_m \dot{\varphi} \dots \dots \dots (3)$$

$$\simeq (J_m + ml^2) \ddot{\varphi} - mlr\ddot{\theta} - mgl\varphi + B_m \dot{\varphi} \dots \dots \dots (4)$$

$$\cos \varphi \simeq 1, \quad \sin \varphi \simeq \varphi, \quad \dot{\varphi}^2 \ll 1 \dots \dots \dots (5)$$

しかし、本研究ではこの線形化した倒立振子モデルをオブザーバ設計に利用しない。

図5で見られるような人間がリムを強く握り前輪が浮上した状態で止まっているウィリー状態に注目する。

このときに人間が出すトルクは車輪を回す  $\tau_\theta$  として作用するのでなく、振り子の角度に直接係わる  $\tau_\varphi$  として働く。



図5 前進せずにボディだけを傾けているウィリー動作

Fig. 5. Wheelie action without going forward

すなわち、車椅子に対する人間のトルク入力 $\tau$ は倒立振り子モデルの $\tau_\theta$ として働くことも、 $\tau_\varphi$ として働くこともあることを考えると、このモデルを利用して正確に車椅子の運動を表すことは難しくなる。そこで、本研究では外乱項を利用することやオブザーバゲインを適切に選定することでその問題を解決する。また、この外乱項を導入することで物理方程式をより簡単化することができる。式(6)に $\theta$ と $\varphi$ 、それぞれの状態に外乱 $d_\theta, d_\varphi$ を入れた方程式を示す。

$$J_\theta \ddot{\theta} = -B_\theta \dot{\theta} + \tau + d_\theta, \quad J_\varphi \ddot{\varphi} = -B_\varphi \dot{\varphi} + d_\varphi \quad (6)$$

式(2), (4)にあった両状態間の干渉項もここでは外乱の中を含むことにし簡単化した。 $\tau$ は車輪へのモータトルク入力であり、測定可能な値である。ただし $d_\theta$ には、式(6)の $\tau$ に力センサーで観測した人間のトルクを考慮するかしないかによって人間の操作力までが含まれることも、そうでないこともある。

### 3. カルマンフィルタ理論を利用したオブザーバ設計

3.1 マルチセンサーの出力方程式 状態推定のためにエンコーダ、ジャイロスコープ、加速度センサーの三つのセンサーを利用する。もちろん、それぞれのセンサーを個別に利用して必要な状態を観測することができる。たとえば車輪の回転速度 $\dot{\theta}$ を求めるためにエンコーダ出力を微分する、また $\varphi$ を得るためにジャイロスコープの出力を積分することが考えられる。しかし、このようなセンサー単体による状態推定は微分による雑音や積分によるドリフト現象などの弱点を持つ。この問題点を克服するためにここでは状態推定オブザーバを設計する。この設計は状態推定オブザーバを利用したセンサーフュージョンともいえる。まず式(7)のように状態を定義し、その状態方程式を式(8)のように記述する。

$$\mathbf{x} = \left( \dot{\theta} \quad \dot{\varphi} \quad \theta \quad \varphi \quad d_\theta \quad d_\varphi \right)^T \dots\dots\dots (7)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} -\frac{B_\theta}{J_\theta} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{B_\varphi}{J_\varphi} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_\varphi} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} \frac{1}{J_\theta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (8)$$

前出したように $\theta$ は車輪の回転角、 $\varphi$ はボディの傾斜角であり、 $d_\theta, d_\varphi$ はそれぞれへの外乱状態である。この状態定義に基づく三つのセンサーから得られる出力は表1のような出力方程式であらわされる。

表1 各センサーの出力方程式

Table 1. Output equation of each sensor

エンコーダ	$y_{\text{enc}} = \theta$
ジャイロスコープ	$y_{\text{gyro}} = \dot{\varphi}$
加速度計	$y_{\text{acc}_x}(a_x) = r\ddot{\theta} \cos \varphi + g \sin \varphi$
	$y_{\text{acc}_y}(a_y) = g \cos \varphi - r\ddot{\theta} \sin \varphi$

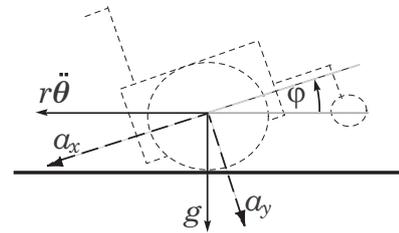


図6 加速度計に測定される加速度

Fig. 6. Accelerations measured by an accelerometer

ただし、 $r$ は車輪の半径、 $g$ は重力は速度である。加速度計は2軸加速度計を利用し図6のように $a_x, a_y$ の二つの方向の加速度を測定する。図でわかるように車椅子の進行速度と重力加速度が $a_x, a_y$ に観測される。この中で線形化しやすい $a_x$ を式(5)の仮定下で線形化すると、式(9)の線形出力方程式が得られる。

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \theta \\ a_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{rB_\theta}{J_\theta} & g & 0 & 0 & \frac{r}{J_\theta} \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r}{J_\theta} \end{pmatrix} u \quad (9)$$

3.2 状態とセンサーの特徴を考慮したオブザーバゲインの設定 オブザーバゲインの設計はカルマンフィルタ<sup>(3)</sup>の設計に従った行う。カルマンフィルタはよく知られている通りに式(10)の白色雑音 $w, v$ が入っているシステムでの状態推定を行うオブザーバである。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u + w \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u + v \\ w &= \left( w_{\hat{\theta}} \quad w_{\hat{\varphi}} \quad w_{\theta} \quad w_{\varphi} \quad w_{d_{\theta}} \quad w_{d_{\varphi}} \right)^T \\ v &= \left( v_{\text{gyro}} \quad v_{\text{encoder}} \quad v_{\text{acc}} \right)^T \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

ここではシステムノイズ  $w$  やセンサー  $v$  の共分散値を適切に選ぶことでよい状態推定ができるようにする。外乱状態のシステムノイズ  $w_{d_{\theta}}, w_{d_{\varphi}}$  には大きい共分散を設定する必要があるが、その他の共分散値はセンサーのノイズなどを見ながら試行錯誤的に決めることができる。 $\hat{\theta}$  など滑らかな推定結果が欲しい状態に対してはシステムノイズを小さく設定し、センサーの特徴からノイズを多く含んでいる加速度計に対するセンサーノイズ  $v_{\text{acc}}$  の共分散は大きく設定する必要がある。

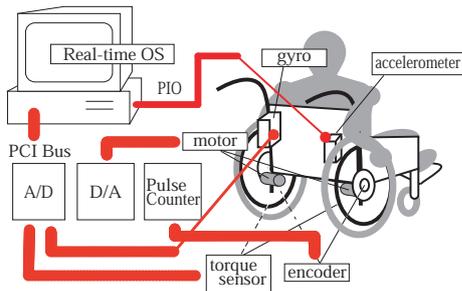


図7 実験装置の構成  
Fig. 7. Experimental Setup

3.3 運転状況オブザーバの実験結果 図7の実験構成で提案するオブザーバの実験を行った。図8に車輪角速度  $\hat{\theta}$  の推定結果を示した。比較のためにエンコーダ出力の擬似微分値も一緒に示した。実線が提案オブザーバによる推定結果で破線がエンコーダの微分値である。エンコー

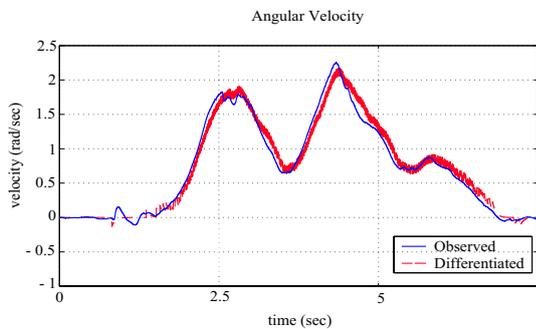


図8 車輪角速度 ( $\hat{\theta}$ ) の推定結果 (実線: 推定結果, 破線: エンコーダ出力微分値)

Fig. 8. Estimated angular velocity  $\hat{\theta}$  (solid line: observer estimation, dashed line: differentiation of encoder outputs)

ダの擬似微分はローパスフィルタを入れているにもかかわらず

らずノイズが多く、しかもローパスフィルタのため推定速度も遅れている。それに比べオブザーバの推定値は速度推定にエンコーダだけを利用するのではなく、加速度計も利用しているので滑らかでかつ速い速度推定特性を見せている。車椅子は低速運転と停止を繰り返している。このような低速運動ではエンコーダ出力の微分による速度観測は上記の実験結果でも見られるように様々な問題を持つようになる。それに比べ、提案するオブザーバは車椅子の低速運動の速度推定に適していることがわかる。

図9に  $\hat{\varphi}$  の推定結果を示す。 $\hat{\varphi}$  に関しては比較のためジャイロスコープから得られたボディーの回転速度を積分した値も一緒に示した。同じく実線が提案オブザーバの推定結果、破線がジャイロスコープの積分である。

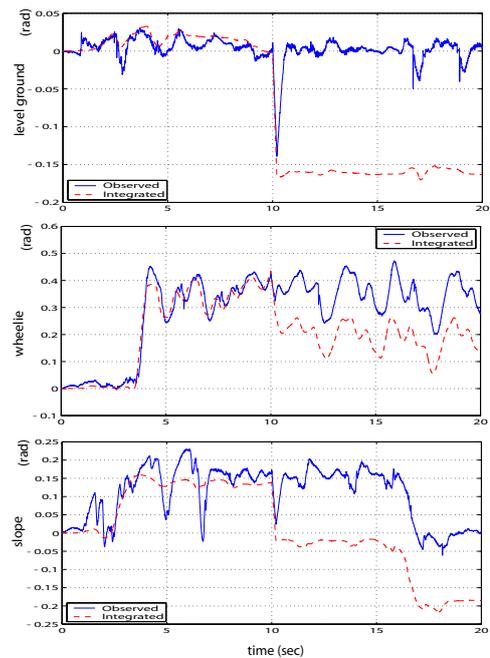


図9 ボディーの傾斜角 ( $\hat{\varphi}$ ) の推定結果 (実線: 推定結果, 破線: ジャイロスコープの積分値)

Fig. 9. Estimated inclination angle ( $\hat{\varphi}$ ) (solid line: observer estimation, dashed line: integration of gyroscope output)

ジャイロスコープの積分による傾斜角推定は雑音までも積分してしまうドリフト現象が問題になる。ここではその特徴をよりわかりやすくするため、10秒の時に意図的にジャイロスコープにインパルス的な雑音を入れた。それによる推定結果が図9である。上段は平地での実験、中段はウィリー時の実験、下段は坂での実験結果である。10秒までの推定結果を比較すると、どの状況においても提案するオブザーバはジャイロスコープと同じ程度の推定結果を見せており、正しく  $\hat{\varphi}$  が推定されていることがわかる。また意図的な雑音が入れた10秒以降の推定結果をみると、ジャイロスコープの積分には入った雑音の影響がずっと残りおり不正確な推定結果を見せていることに対し、提案オブ

ザーバは加速度計からも傾斜角を推定していることで雑音による推定誤差を修正していくことがわかる。この  $\hat{\varphi}$  の推定におけるジャイロスコプと加速度計への依存度は、前節で説明したカルマンフィルタゲイン設計に利用するセンサーノイズの共分散設定によって変更することができる。しかし、加速度計への依存度を高めるとジャイロスコプの雑音に対してはロバストになるが、加速度計自体の雑音が多いので推定結果が振動的になる傾向がある。図 10 に実験に表れるその傾向を示した。

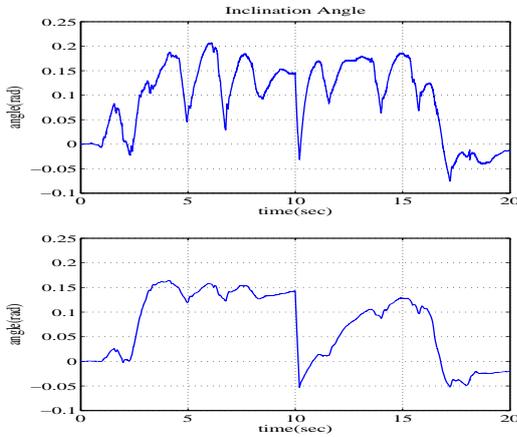


図 10 オブザーバゲインによる推定結果の違い  
Fig. 10. Different estimation by different observer gains

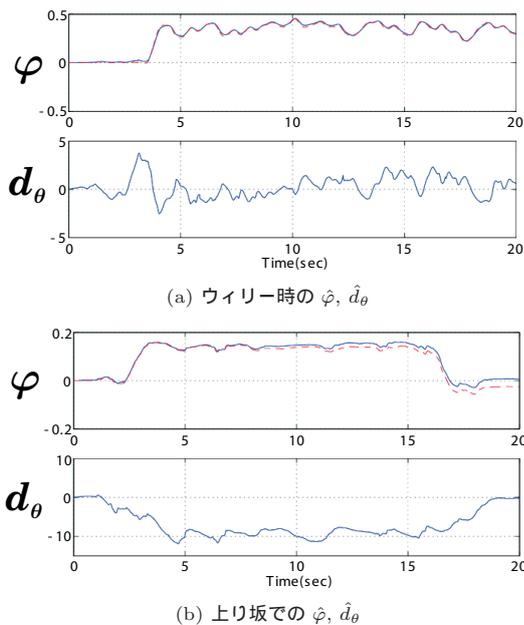


図 11  $\hat{d}_\theta$  を利用したウィリー動作と坂環境の区別  
Fig. 11. Distinction between a wheelie action and slope using  $\hat{d}_\theta$

図 11 では  $\hat{d}_\theta$  を利用した運転状況判断を示した。ポディー

の傾斜角  $\hat{\varphi}$  だけでは車椅子がウィリー状態なのか上り坂にしているかの判断はできない。しかし、提案オブザーバで推定している  $\theta$  に対する外乱  $\hat{d}_\theta$  の推定値を利用するとこの区別ができる。図 11 の (a),(b) はそれぞれウィリー時と上り坂での運転実験で得られた推定結果で、 $\hat{\varphi}$  はどちらも一定の角度を示している。しかし  $\hat{d}_\theta$  をみると上り坂では大きな一定値が推定されている反面、ウィリー時では殆ど外乱が観測できない。これは上り坂では重力が車椅子の前後移動に係わる外乱として働くが、ウィリーでは重力は外乱とならないためである。

以上の実験結果から提案するオブザーバが車椅子の運転状況オブザーバが様々な環境を正確に把握できる優れたオブザーバであることがわかる。次節からはこのオブザーバで推定した状態を利用するいくつかの制御例を紹介する。

#### 4. 提案オブザーバを利用した様々な運転環境に適応する車椅子制御の設計

4.1 転倒防止制御<sup>(4)</sup> 参考文献<sup>(4)</sup>では過剰なアシスト力による慣性力を防ぎ、車椅子の後方転倒を防ぐ制御が紹介されている。図 12 のようなパワーアシスト制御器におけるアシスト比を調整する制御である。

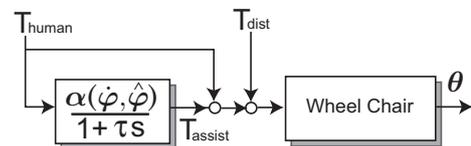


図 12 可変アシスト比を利用したアシスト制御  
Fig. 12. Power assisting control with variable assistance ratio

アシスト制御は一般的に人間の力  $T_{human}$  を観測し、式 (11) のようにフィルターをかけて倍増した出力をモータから出すことで人間の力をアシストしているが、この比が一定であると転倒する可能性が高い。

$$T_{assist} = \alpha \frac{1}{1 + \tau_s} T_{human}, \dots \dots \dots (11)$$

そこで、車椅子の運転状況を見てこのアシスト比を変えてやることで転倒を防止することができる。参考文献ではこのアシスト比  $\alpha$  を以下のように可変にする。

$$\alpha(\dot{\varphi}, \hat{\varphi}) = \alpha_{max} \exp(-\beta \frac{\dot{\varphi}}{\hat{\varphi}}), \dots \dots \dots (12)$$

しかし、参考文献<sup>(4)</sup>で利用している  $\hat{\varphi}$  を推定するオブザーバは人間のトルクとジャイロスコプを利用したオブザーバであり、2 節で述べた人間のトルク入力に車椅子の運動に与える影響の特徴とジャイロスコプのノイズへの弱さからその推定の正確性には問題が多いといえる。また、ウィリーと坂の区別ができない問題もあり、参考文献では閾値をもってその区別を行うしかなかった。しかし、本研究で提案するオブザーバはこれらの問題を解決しており、後方転倒防止制御により適したオブザーバだといえる。

4.2 カセンサーレスパワーアシスト制御<sup>(5)</sup> 推定した外乱  $\hat{d}_\theta$  を利用してカセンサーを用いないパワーアシスト制御を実現することができる。参考文献<sup>(5)</sup>で提案するカセンサーレスパワーアシスト制御はフィードバックにより見かけ上の慣性を減少させる意味でのパワーアシストになっている。図13にその制御器のブロック線図を示す。まずは外乱オブザーバを利用して入力端外乱を推定する。

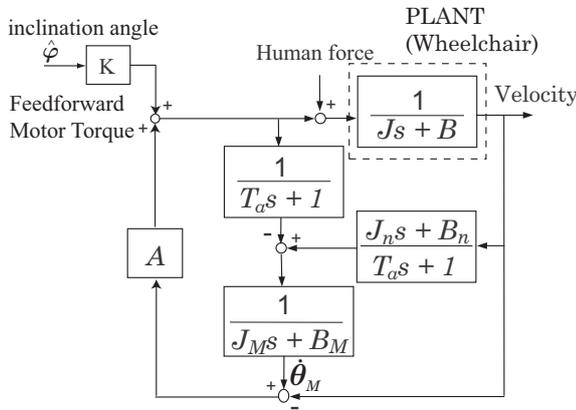


図13  $\hat{\phi}$  を利用した重力補償とカセンサーレスパワーアシスト制御

Fig.13. Force sensor-less power assisting control with gravity compensation using  $\hat{\phi}$

この推定を提案するオブザーバを利用して行うことができる。もちろん、そのときは人間のトルク入力観測しないので式(6)の $\tau$ に人間のトルクは入らないことになる。その推定外乱  $\hat{d}_\theta$  を利用して目標となる速度  $\dot{\theta}_M$  を計算する。推定外乱からの目標速度  $\dot{\theta}_M$  の計算は  $\frac{1}{J_M s + B_M}$  の目標モデルを持って行く。もちろんモデルプラントの  $J_M, B_M$  は実際プラントの  $J, B$  より小さく設定し、外乱への感度を高めることにする。ゲイン  $A$  は実速度の目標速度への追従特性を決めるファクターであり、安定性を考慮して選定する。このフィードバック制御により、外乱(人間の力)から車椅子の速度までの伝達関数は以下の式(13)のようになる。

$$T_{yd}(s) = \frac{1}{J_s + B + A} \left( \frac{J_M s + B_M + A}{J_M s + B_M} \right) \quad (13)$$

これは低周波外乱に対するプラントの感度を上げるパワーアシストになっており、人間のトルク入力特性に合わせたアシストになっているが、同じ低周波外乱である重力までも増幅させてしまう。そこで、図13の左上段で示したフィードフォワード重力補償制御が必要となる。提案オブザーバを利用することで坂の角度が検出できるので、その  $\hat{\phi}$  に比例したトルクを前もって入れておくことによって重力を補償できる。参考文献<sup>(5)</sup>以外にも車椅子のカセンサーレスパワーアシスト制御に関する研究は多数あるが(たとえば、参考文献<sup>(6)</sup>)、そのどれにおいても重力と人間の操作力の区別が難しく、重力を何らかの形で推定しその補償を行う

制御が必要不可欠になっている。そこに、絶対平面からの傾斜角の推定が正確にできる提案オブザーバによる推定が上記したように適用できるのである。

この他にも参考文献<sup>(7), (8), (9)</sup>で見られるような車椅子のフィードバック制御は速度をフィードバックして、よい速度の観測値が必要となる。しかし、低速運転と停止を繰り返す車椅子では、エンコーダだけによる速度観測は適していない。そこで、提案するオブザーバによる速度  $\dot{\theta}$  推定を利用すればより滑らかで使用者にも違和感を与えない制御が期待できる。

## 5. 結論

本研究ではパワーアシスト車椅子のアシスト制御に必要な運転状況オブザーバを設計し、車椅子の進行速度に係わる車輪角の回転角速度  $\dot{\theta}$ 、ボディの傾斜角  $\phi$ 、そして外乱  $d_\theta$  を推定した。その結果従来のエンコーダとジャイロスコープを利用した推定結果に比べより正確で雑音が少なく、しかもセンサーノイズにも強い観測ができた。

使用したエンコーダ、ジャイロスコープ、加速度計のセンサーは車椅子だけに限らず、ロボットなどの正しい姿勢や移動速度の観測が必要な対象に利用できる。そのような対象にも提案するオブザーバが同じ原理で適用できることから、本研究は序論で述べた福祉関連機器に必要な重要技術であると言える。

## 文献

- (1) 伊福部 達, 「福祉工学の挑戦」, 中公新書 1776 (2004)
- (2) Yoshihiko Takahashi, Tsuyoshi Takagaki, Jun Kishi, and Yohei Ishii: "Back and forward moving scheme of front wheel raising for inverse pendulum control wheelchair robot", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3189-3194 (2001)
- (3) R.E.Kalman: "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Journal of Basic Engineering*, **82-D**, pp. 35-45 (1960)
- (4) 畠 直輝, 関 弘和, 小安雄一, 堀 洋一: 「パワーアシスト車椅子の後方転倒防止制御(その2)~重心位置推定と位相平面に基づく可変アシスト比制御~」, 電気学会論文誌D, **124**, 7, pp.699-705 (2004.7)
- (5) 呉 世訓, 堀 洋一: 「外乱オブザーバを利用した速度ベースのパワーアシスト制御器設計とロボットや車椅子への応用」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-05-12 (2005.3)
- (6) 開田 有紀子, 村上 俊之: 「電動車椅子における人の入力トルクのセンサレス検出とパワーアシスト」, 平成16年電気学会産業応用部門大会, **II**, pp.419-424 (2004)
- (7) 呉 世訓, 堀 洋一: 「やわらかい外乱抑制を利用した人間親和型制御法の一提案」, 平成16年電気学会産業応用部門大会, **II**, pp.527-530 (2004)
- (8) 桂 誠一郎, 大西 公平: 「コンプライアンス制御に基づく環境外乱を考慮した車椅子型移動ロボットの一構成法」, 電気学会論文誌D, **122**, 9, pp.942-947 (2002.9)
- (9) 杉本武明, 関 弘和, 多田限進: 「左右輪の外乱推定によるパワーアシスト車椅子の直進性向上に関する検討」, 平成16年電気学会産業応用部門大会, **Y-35**(2004)