

# パワーアシスト車椅子における後方転倒現象の解析とその防止制御

小安 雄一\*, 畠 直輝, 関 弘和, 堀 洋一 (東京大学)

## Analysis and Control for Prevention of Overturn on Power Assisted Wheelchair

Yuichi Koyasu, Naoki Hata, Hirokazu Seki, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

### Abstract

Aged people and disabled people who have difficulty in walking are increasing especially in Japan. As one of mobility support, significance of power assisted wheelchairs which assist driving force using electric motors and spread their areas of life has been enhanced. However, the increased driving force often causes a dangerous overturn of wheelchair. In this paper, two kinds of the control methods which prevent overturn on power assisted wheelchair are proposed.

First, the method by limiting the assisted torque based on its magnitude and time constant is proposed, and its effectiveness is shown through performance evaluation using the experimental subjects.

As the second, the novel method to estimate the center-of-gravity angle of human-wheelchair system is proposed. This leads to detail analysis on phase plane when the system can be regarded as an inverse pendulum. The proposed control method to decrease the assist ratio according to the estimated angle realizes prevention of overturn, and its safety in wheelchair driving is verified through some experiments.

キーワード: 高齢者・障害者支援, パワーアシスト車椅子, 後方転倒防止, 位相平面, アシストトルク制限, 重心位置オブザーバ  
( Keywords: support for aged people and disabled people, power assisted wheelchair, prevention of overturn, phase plane, limit of assisted torque, center-of-gravity angle observer )

## 1. はじめに

現在わが国は深刻な高齢化問題に直面しており、将来この状況はさらに進展すると予想されている。さらに高齢化に伴う少子化問題とあいまって介護者の減少が予想され、高齢者や障害者の自立した行動のための工学的な分野からの支援が必要不可欠となってきた。我々は、高齢者・障害者を工学的に支援する「福祉制御工学」という新しい分野を提唱しているが、本研究ではこれを実現するための手段として歩行障害者への支援の一つであるパワーアシスト車椅子を対象とした研究を行う。

パワーアシスト車椅子によって、車輪の駆動力が増大されユーザの行動範囲が広がる反面、大きい駆動力のために後方転倒の危険性が出てきた。現実問題として、街の道路だけでなく公民館など公共施設の入口などにも坂道は存在し高齢者や障害者には後方転倒の危険性が日常的につきまとっている。従って、本研究では駆動力をアシストしつつ、後方転倒を防止する制御の実現を目的とする。

## 2. 車椅子の転倒現象の解析

### 2.1 車椅子の後方転倒の発生

最初に車椅子が後方転倒へ至る過程を考える。図1に車椅子の前輪浮上の様子と、全体系のモデルを示す。

前輪が接地している状態の時は、二点支持の安定系であるが、前輪が浮上すると不安定な倒立振り子にモデリングされることが分かる<sup>(6)</sup>。つまり、前輪浮上は転倒の前段階と言える。

### 2.2 位相平面を用いた車椅子の転倒条件の表示

次に、後方転倒のメカニズムとその発生条件について

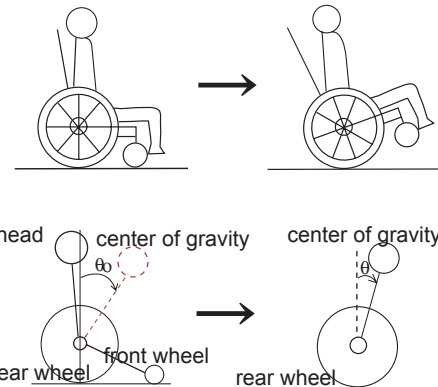


図1 前輪浮上時の車椅子のモデル

Fig. 1. Model of front wheel raising on wheelchair.

倒立振り子モデルに基づいて考える。図2はシミュレーションによって算出した倒立振り子における $\theta$ と $\omega$ の関係を位相平面に表したものである<sup>(2)</sup>。ここで、 $\theta$ は図1で表されている重心位置の車軸周りの角度であり、 $\omega$ は $\theta$ の時間微分、つまり重心位置の車軸周りの角速度である。

前輪が浮上して不安定な状態となった際に、 $\theta$ が $\theta_0$ の点PからA、B、Cいずれかの領域にシフトする。

Aの領域は完全安定領域であるが、本研究においては前方転倒は考えないので、考慮する必要のない領域である。

Bの領域は不完全安定領域である。 $\omega$ は正であり転倒方向のモーメントがかかるが、 $\theta$ が大きいので自然に安定状態に復帰できる。

Cの領域は不安定領域である。このままでは確実に転倒してしまう状態である。

位相平面を用いた考え方によると、転倒を防止するためには以下の手法が考えられる。

(1) B、Cの領域に入らないように制御する。

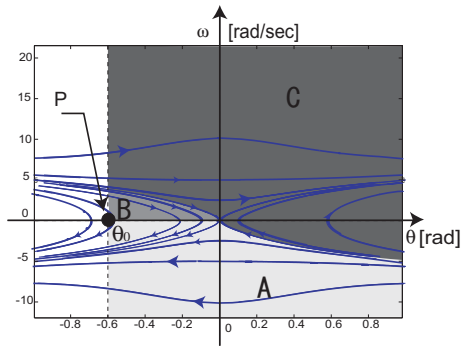


図2 倒立振り子モデルにおける位相平面  
Fig. 2. Phase plane in inverse pendulum.

フィードフォワード制御

(2) B、Cの領域に入ったとしても、制御によって安定領域に戻す。

フィードバック制御

3. パワーアシスト車椅子における後方転倒防止の実現手法の提案

3.1. アシストトルク制限による制御手法

3.1.1. 人間のトルク入力に基づくアシスト制御手法

今回我々が YAMAHA 製パワーアシスト車椅子 JWII を改造する形で製作したパワーアシスト車椅子の実験機は、単に出力を数倍にするだけでなく人間が手を離れた後でもある程度の出力が維持されるように、トルクセンサからの入力に対して一次遅れのローパスフィルタをかけることによって惰性機能を実現した。この様子を図3に示す。

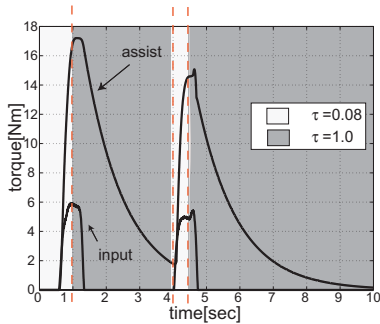


図3 トルク入力とアシストの関係  
Fig. 3. Relation between input and assisted torque.

この制御システムを表したものが図4である。 $T_{assist}$  はアシストされたトルク出力、 $T_h$  は人間のトルク入力、 $\tau$  はローパスフィルタの時定数、 $\alpha$  はアシスト比である。

$$T_{assist} = \alpha \frac{1}{1 + \tau s} T_{human} \dots\dots\dots (1)$$

ローパスフィルタの時定数はアシスト出力の最大値までの立ち上がりは早く、最大値からの立下りは遅くという機構を以下のように実現した。つまり、アシストトルクの時定数は  $T_{human}$  を人間の入力トルクとすると次式で表される。

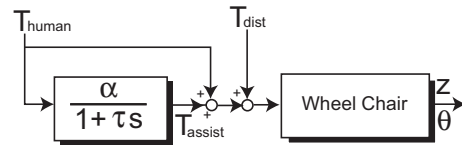


図4 トルク入力に対するアシストの構成法

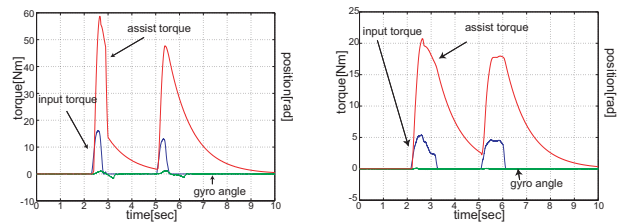
Fig. 4. Construction of power assist control system.

$$\tau = \begin{cases} \tau_{fast} & \frac{dT_{human}}{dt} > 0 \\ \tau_{slow} & \frac{dT_{human}}{dt} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

3.1.2. アシストトルク制限による後方転倒防止の実現手法

フィードフォワード的に制御する場合、予想外の外乱が入った時などの対処ができない。よって、より安全性を期するため前輪浮上も許容しないものとする。

具体的に、どのような入力を与えたときに前輪が浮上するかを示す。図5(a)は前輪が浮上したとき、図5(b)は前輪が浮上しないときの入力トルク、アシストトルクとジャイロセンサの値である。ジャイロセンサが大きく反応することは前輪が浮上したことを示す。



(a) 前輪浮上する場合 (b) 前輪浮上しない場合

図5 トルク入力とアシストの様子

Fig. 5. Input torque and assisted torque.

図5(a)ではジャイロセンサが振れており、前輪が浮上したことが分かる。この時の入力トルクは急激な立ち上がりを示しており、トルクの最大値も図5(b)に比べると大きいことが見て取れる。それに対して、図5(b)では緩やかで最大値も小さなトルク入力が入っていることが分かる。これより、入力トルクを制限することにより前輪浮上を防止するには、

- 出力するトルクの大きさを抑えること
- 出力するトルクの立ち上がりを遅くすること

の二通りの手法が考えられる。

前輪浮上を防止するための入力トルクの大きさを制限する手法、時定数を制限する手法ともに実現が望まれるが、操作性、乗り心地に違いが出てくるものと思われる。このことについては、後述の実験的検証の章で詳しく言及する。

3.2. 重心位置の角度情報に基づく制御手法

3.2.1. オブザーバを用いた車椅子 - 人間系の重心位置の推定

前輪浮上時の車椅子 - 人間系を倒立振り子と考えて、モデル化を行った。位相平面からも分かるように、後方転倒現象は重心位置の角度情報と角速度に大きく依存する

が、実際の車椅子では  $\theta$  は測定できない。しかし車椅子の車軸周りの角速度  $\omega$  に関しては、車椅子の車軸にジャイロセンサを取り付けることで測定が可能なので、この  $\omega$  を用いて最小次元オブザーバを構成し、 $\theta$  を推定することを考える。

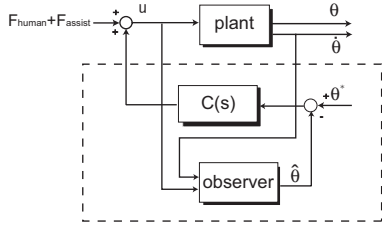


図6 系全体のブロック線図

Fig. 6. Block diagram of control system

最小次元オブザーバの構成としては Gopinath の方法を用いる<sup>(3)</sup>。オブザーバの方程式は、

$$\dot{\hat{\theta}} = \dot{\theta} + k(\theta - \hat{\theta}) \dots\dots\dots (3)$$

である。ここで、 $\dot{\hat{\theta}}$  の再構成を行うと、

$$\dot{\hat{\theta}} = \frac{(M+m)g}{Ml}\hat{\theta} - \frac{1}{Ml}u \dots\dots\dots (4)$$

となる。式(3)において、 $\dot{\theta}$  がでてくるので、

$$\hat{\theta} = \xi + k\hat{\theta} \dots\dots\dots (5)$$

とにおいて、式(3)に代入して  $\xi$  に関する状態方程式より

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \dot{\theta} - k\dot{\hat{\theta}} \\ &= \dot{\theta} - k\left[\frac{(M+m)g}{Ml}\hat{\theta} - \frac{1}{Ml}u\right] \\ &= \left[1 - k^2\frac{(M+m)g}{Ml}\right]\dot{\theta} \\ &\quad - k\frac{(M+m)g}{Ml}\xi + \frac{k}{Ml}u \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

という方程式になる。式(5)と式(6)より、 $\dot{\theta}$  を用いて  $\hat{\theta}$  を推定できることになる。

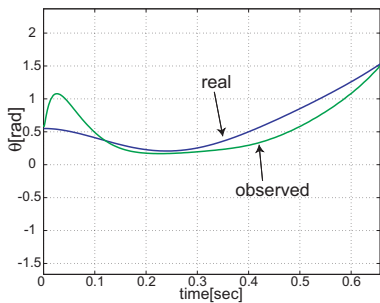


図7 オブザーバによる重心位置の推定

Fig.7. Simulation result of estimation of center-of-gravity angle.

このオブザーバを用いて重心位置の推定のシミュレーションを行った。ここで、実際には乗っている人の身長、体重によってパラメータは変動し得るため、このシミュレーションにおいても倒立振り子モデルとオブザーバとの間に10%のパラメータ誤差を与えた。このシミュレーション

結果を図7に示す。このとき、オブザーバゲイン  $k=1$  とした。これを見ると、真値に追従しようという挙動は見せるもののオーバーシュートが大きく、追従特性もあまりいいとは言えない。 $k$  の値を様々に変えてシミュレーションを行ったところ、 $k$  が小さければ小さいほど良い推定が得られ、 $k=0$  では推定値と実際値が完全に一致してしまった。これは現実問題として有り得ないことである。

この原因としては以下のことが考えられる。

- シミュレーションに使った車椅子の倒立振り子モデルに対してオブザーバは線形化された倒立振り子モデルを用いていること
- センサから得られる情報にも誤差が含まれていることを考慮していない
- 実際の車椅子は前輪浮上していても完全な倒立振り子とは言い切れない

これらに起因する誤差項を考慮していないために、 $k$  が小さければ良いという結論になってしまったと考えられる。

今回設計したオブザーバを実験に適用するためには、オブザーバゲイン  $k$  は適当に決めるのではなく現実の車椅子と人間系との誤差を最小にするような値に決定しなければならない。

### 3.2.2 . オブザーバの誤差に関する検討

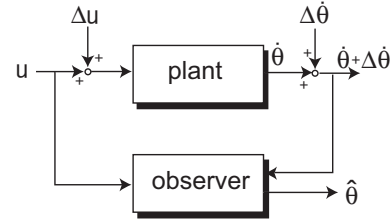


図8 誤差を考慮したオブザーバのブロック線図

Fig. 8. Block diagram of observer in consideration of the error

図8のように  $\Delta\dot{\theta}, \Delta u$  などのジャイロセンサの誤差、トルクセンサの誤差が入ってくることを考慮に入れる。ここで、オブザーバには入力  $u$  の誤差は入ってこないと考え、ジャイロセンサの値にのみ誤差を含んだものが入ってくるとする。つまり、

$$\dot{\theta}_{true} = \dot{\theta} + \Delta\dot{\theta} \dots\dots\dots (7)$$

である。

これより推定値  $\hat{\theta}$  は

$$\hat{\theta} = \frac{1 - k^2 A_{12}}{s + k A_{12}} \dot{\theta} + \frac{k B_1}{s + k A_{12}} u + \frac{1 - k^2 A_{12}}{s + k A_{12}} \Delta\dot{\theta} \quad (8)$$

となる。この式より、 $k=0$  としたときに誤差分  $\Delta\dot{\theta}$  は積分されてしまうので  $k$  は小さければ良いというわけではなく、ある範囲の値に決めなければならないことが分かる。次に、このオブザーバの実際モデルとの誤差を最小にする  $k$  を求める。式(3)より  $\Delta\theta$  の係数に注目し、

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\hat{\theta}} - \dot{\theta} \dots\dots\dots (9) \\ &= -He + \Delta\dot{\theta} + k(V\dot{\theta} + S) \end{aligned}$$

のように変形できる。 $S$  に関しては  $k$  によらない値となる。これは入力トルクに起因する誤差項をオブザーバゲインの調節によって抑圧することができないことを意味する。角速度に比例する摩擦項を  $B$ 、パラメータ誤差を



$M_d$ 、 $D$ として、 $V = 0$ の式を解くことより

$$k = \frac{-B}{2M_d} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{M_d}\right)^2 + \frac{4Ml}{(M+m)g}} \dots (10)$$

人間 車椅子系を倒立振り子と見なした際、大きく変化すると考えられるのは乗る人の体重によって変化する  $m$  と座高によって変化する  $l$  である。それぞれの値を考えられる範囲で変えたときの  $k$ 、 $V$  をプロットしたシミュレーション結果を図 9(a)、図 9(b)、図 10(a)、図 10(b) に示す。パラメータとしては

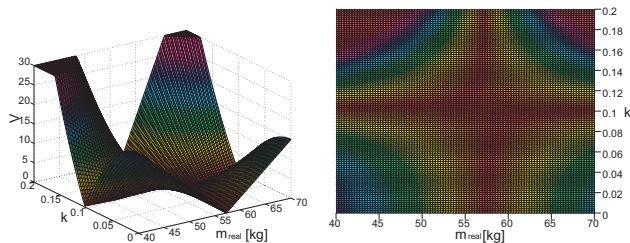
図 9 : オブザーバのパラメータ  $M = 25[kg]$ 、 $m = 50.05[kg]$ 、 $l = 0.301[m]$

モデルのパラメータ  $M_{real} = 25[kg]$ 、 $l_{real} = 0.33[m]$ 、 $B = 0.05$ 、 $m_{real}$  を  $40 \sim 70[kg]$  まで変化

図 10 : オブザーバのパラメータ  $M = 25[kg]$ 、 $m = 50.05[kg]$ 、 $l = 0.301[m]$

モデルのパラメータ  $M_{real} = 25[kg]$ 、 $m_{real} = 50.02[kg]$ 、 $B = 0.05$ 、 $l_{real}$  を  $0.2 \sim 0.5[m]$  まで変化

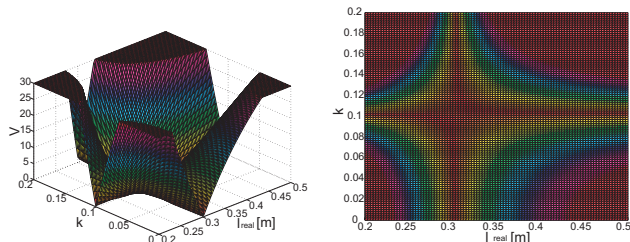
としてシミュレーションを行った。



(a) 概観

(b) 真上から見た図

図 9  $m$  を変化させたときのゲイン  $k$  と  $V$  の様子  
Fig. 9. Simulation result of  $k$  and  $V$  when  $m$  is variable.



(a) 概観

(b) 真上から見た図

図 10  $l$  を変化させたときのゲイン  $k$  と  $V$  の様子  
Fig. 10. Simulation result of  $k$  and  $V$  when  $l$  is variable.

図 9(a)、図 10(a) より、オブザーバゲイン  $k$  が 0.1 付近において  $V$  の値が最も小さくなっているのが分かる。図 9(b)、図 10(b) はそれぞれ図 9(a)、図 10(a) を上から見た図である。中央の十字型の領域が最も誤差の少ない領域であるが、 $k$  を 0.1 付近にとった場合は各パラメータが真値に近い時はもちろん、真値から離れていても誤差が少ないことが分かる。これより、オブザーバゲイン  $k$  は 0.1 付近にとっておけばパラメータ変動に強い推定が可能となることが分かった。

## 4. 各制御手法の実験的検証

### 4.1 アシストトルク制限の被験者を用いた実験

PC を含めたパワーアシスト車椅子の実験系を模式的に表したものを図 11 を示す。

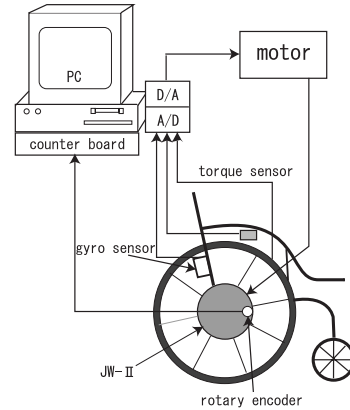


図 11 実験系の模式図

Fig. 11. Construction of the experimental setup.

この実験機を用いて、最初にパワーアシスト車椅子の後方転倒防止の実現手法のうちの一つ、アシストトルク制限による実現手法の実験的検証を行った。

実験方法としては、

手法 A : 通常のアシスト手法

$$\tau_{fast} = 0.08, \tau_{slow} = 1.0, \alpha = 4$$

手法 B : アシストトルクの大きさを制限する手法

$$\tau_{fast} = 0.08, \tau_{slow} = 1.0, \alpha = 4$$

30[Nm] でリミット

手法 C : アシストトルクの立ち上がりを制限する手法

$$\tau_{fast} = 2.0, \tau_{slow} = 1.0, \alpha = 4$$

以上 3 種類のアシスト手法を適用した実験用のパワーアシスト車椅子を 10 人の被験者に運転してもらい、幾つかのポイントにおいて被験者の評価を点数にした。

実験における評価ポイントとしては

評価ポイント 1 : 十分にアシストされているか

評価ポイント 2 : 安定した走行ができたか

評価ポイント 3 : 立ち上がりや立下りでの操作性

の三点においてそれぞれ-3点 (very bad) から+3点 (very good) までの点数をつけてもらった。これとは別に前輪浮上が起こったかどうかを判断した。加えて実験終了後に被験者に「自分が乗るとしたらどの手法の車椅子が一番乗りたいか」という質問をした。被験者は 20 代から 50 代の男女の方を対象とした。

この結果から算出した各手法ごとの前輪浮上率と好みの結果を表 1 に示す。

表 1 各手法の前輪浮上率と被験者の好みの結果

	手法 A	手法 B	手法 C
前輪浮上率	60%	30%	0%
好み	40%	50%	10%

手法 A では高い確率で前輪浮上していたものが、トル

クの大きさを制限する手法 B ではその半分になっていることが分かる。さらにトルクの時定数を制限する手法 C では、前輪浮上率 0% という結果となった。この結果より、前輪浮上に直接関わってくるのはトルクの大きさよりも立ち上がりの速さだということが分かる。通常の走行アルゴリズムと比べたときのトルク制限手法によるパワーアシスト車椅子の後方転倒防止の有効性が示された。次に、被験者の評価ポイントの平均と偏差を示したグラフを図 12 に示す。

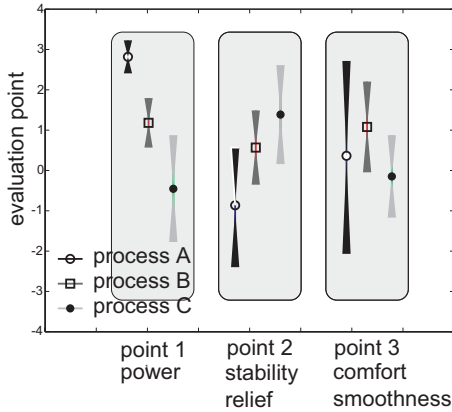


図 12 被験者の各手法に対する評価得点

Fig. 12. Evaluation result from the experimental subjects.

評価ポイント 1 について、手法 C は大きな時定数のため、アシストトルクが最大値を迎える前に人間の入力トルクが下がり始めてしまうことによりアシストトルクの最大値も下がってしまうことより、この結果は当然であろう。

評価ポイント 2 の安定した走行については、「安定」という言葉に前輪浮上が起こらない、恐怖心を抱かないというニュアンスで捉えたのか、前輪浮上率に反比例する結果となった。やはり、前輪浮上率が高い手法 A に比べると手法 C は安心して乗ることができるという意見が多かった。

評価ポイント 3 の立ち上がり、立ち下がりにおける操作性、違和感については、かなりばらけた評価となった。とくに手法 A のばらつきが目立つが、手法 A は高いアシストパワーと立ち上がりの速さを、「軽すぎる」と感じた被験者と「快適」と感じた被験者の二通りがいたことが考えられる。やはり手法 C では入力立ち上がり付近においては、人間の入力トルクのほうがアシストトルクよりも大きいため違和感を感じた被験者が多かったようである。

前輪浮上率と被験者の好み、さらには評価ポイントなどを総合的に判断すると、現実的に有効な前輪浮上を防止するアルゴリズムは手法 B と考えられる。被験者の性格にもよるが全体的な傾向をまとめる。

- 20 代の若い世代の被験者は自身の力も十分にあるため、大きなアシストパワーよりも安定した走行手法を求めることが分かった。
- 高齢者、特に女性は力が弱いいため、大きなアシストパワーによる駆動力を求めることが分かった。このような被験者は手法 A においても前輪浮上しないことが多かった。

- 抜群の安定感を誇る手法 C だが、立ち上がりの遅れを重いと感じる被験者が多く、あまり好まれなかった。ただし、上半身不随の方や、前輪浮上に対する恐怖感が大きな方などには最も有効な前輪浮上防止のための制御手法といえるだろう。

同じ手法において比べたときでも、被験者の性別、性格、年齢などによって評価は異なってくるが、本実験によりトルク制限による後方転倒防止の有効性が示された。

#### 4.2 重心位置推定に基づいた制御手法の実験

最初に、重心位置推定が正しいかを検討するために、後方転倒直前まで前輪を持ち上げたときの重心位置をオブザーバで推定したときの結果を示す。

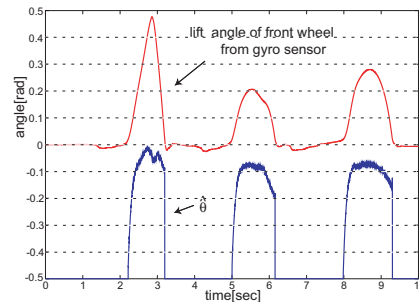


図 13 重心位置を推定した様子

Fig. 13. Estimation of center-of-gravity angle.

グラフ中の上の線は、車軸に装着しているジャイロセンサから得られた角速度を積分した値、つまり、車椅子の車軸の傾き角度である。それに対して、下の線がオブザーバによって推定した重心位置である。重心位置は、人間が乗っているために車軸の傾き角度とはずれていると考えられる。しかし、両者は似たような挙動を示すはずである。図 13 より、推定された重心位置が  $\theta = 0$  付近まで立ち上がっている様子が良く分かる。この実験は前述の通り、前輪浮上状態で釣り合いが取れる程度まで行ったのでこの推定は正しいと考えられる。

この時の推定された重心位置と角速度を前章の倒立振り子モデルにおける位相平面に示したものを図 14 に示す。このとき、オブザーバによって推定された重心位置は後方に倒れこむ方向を正としている。

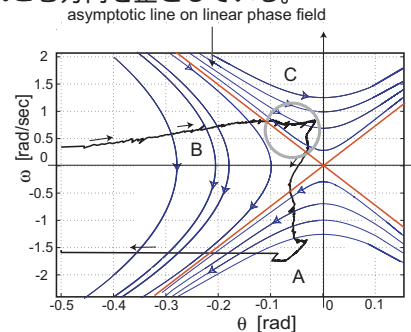


図 14 位相平面に実験結果を重ねた図

Fig. 14. Experimental result represented on phase plane.

入力が加わって位相平面を危険領域の方向へ進んでいき、印付近で転倒領域に入っている様子が分かる。こ

の付近で、急激に傾きが変化しているが、これは被験者が危険を感じて安定領域に戻すようなトルク入力を加えたことによるものと考えられる。結果的に安定領域に戻っていき、無事前輪が接地したことが分かる。

次に、位相平面を用いた解析を行うために、倒立振り子モデルを線形化したモデルの位相平面を求めることにより、危険領域と安定領域の漸近線の式を算出した。

$$\omega = \pm \sqrt{\frac{M+m}{Ml}} g \theta \dots\dots\dots (11)$$

この式は倒立振り子モデルにおいては位相平面の原点から離れる程誤差が大きくなるものの、後方転倒を判別する一つの指標にはなり得る。

位相平面上での原点からの傾きを考慮して、漸近線に近づくにつれて指数関数的にアシスト比  $\alpha$  を減衰させていくという手法で後方転倒防止を実現する。

具体的には、 $\eta$  は位相平面上での点と原点を結んだ直線の傾き、 $\beta$  は危険領域に近づく際のアシスト比の立下りの速度を決めるパラメータである。 $\alpha_{max} = 4$  として、

$$\alpha = \alpha_{max} \exp \beta \eta \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\eta$  は

$$\eta = \tan\left(\frac{\omega}{\dot{\theta}}\right) \dots\dots\dots (13)$$

と表される。このときの  $\beta$  を減衰定数と呼ぶこととし、この値を様々に変えて実験を行った。

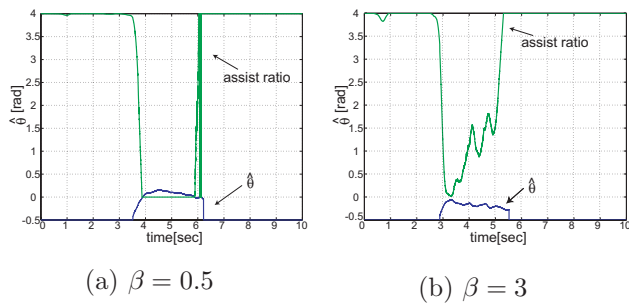


図 15  $\beta$  を変化させた時の実験結果  
Fig. 15. Experimental results for various  $\beta$ .

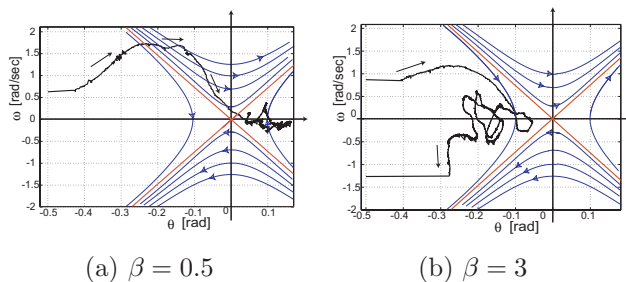


図 16  $\beta$  を変化させた時の位相平面上的実験結果  
Fig. 16. Experimental results represented on phase plane for various  $\beta$ .

図 15(a)、図 15(b) に、上記の実験結果を示す。このときの重心位置と角速度を位相平面に表したものを図 16(a)、図 16(b) に示す。 $\beta = 0.5$  のときには、前輪浮上が起こってから減衰が遅く、推定された重心位置  $\hat{\theta}$  も 0 を越えてしまい、これは後方転倒が発生したことを示している。

$\beta = 3$  の時には前輪浮上が発生してからのアシスト比の減衰は十分に速く、このとき、推定された重心位置  $\hat{\theta}$  も 0 を越えていないことがわかる。

位相平面での実験結果を見れば分かるように、図 16(a) では明らかに危険領域に入っているのに対して、図 16(b) では安定領域内に収まっている。

以上より、重心位置の推定に基づく後方転倒防止制御の有効性が示された。この手法を用いることにより、アシストトルク制限の手法に比べて大きな駆動力を出せるため、効率の良い走行が可能となる。さらに、転倒に直結する、重心位置を位相平面において制御することは坂道においても有効な制御手法となるだろう。

## 5. 考 察

本論文では後方転倒防止を実現する走行手法を、前輪浮上を許容しない手法と許容する手法の二通り提案したが、福祉機器は人間と接して働くため、どちらの手法が好まれるかはユーザの性格や障害の程度、走行状況などによって異なってくる。アシストトルク制限による手法は、アシスト機能の原理から導かれる手法である。前輪浮上を許容しない安全性、安定性重視の手法と言える。さらに、制御系の仕事はアシストトルクの制限のみなので、人間の調整能力が活かせる人間主体の走行手法と考えられる。対して、重心位置推定に基づく手法は前輪浮上を許容するため、従来のパワーアシスト車椅子と変わらない駆動力を出すことができる。つまり、利便性重視の手法と言える。しかし制御系に常に見張られていて人間の調整能力を必要としない機械まかせの手法とも言える。

今後より多くの被験者、特に障害者に両手法を試してもらい、ユーザの意向や実験環境に応じた考察を行うことが課題である。さらに、重心位置推定を利用することによりウイリーによる段差越えや坂道における転倒防止などの可能性も広がると考えられる。

## 6. ま と め

本論文では、高齢者・障害者への工学的支援を目指す「福祉制御工学」の一研究として、パワーアシスト車椅子における後方転倒現象の防止制御を実現する手法を提案した。

本研究においては、前輪浮上時の人間 - 車椅子系を倒立振り子にモデル化することで得られる位相平面を用いた解析により、後方転倒防止の実現手法を主に二つに分類し、それぞれについて、実験機を用いた検証により、有効性を示した。

## 文 献

- (1) 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.
- (2) 矢島信男:「常微分方程式」, 岩波, 1988.
- (3) 堀洋一, 大西公平:「応用制御工学」, 丸善, 1998.
- (4) 垣本映:「高齢者の移動支援のための制御技術」, 計測と制御, Vol.40, No. 5, pp.357-362 (2001).
- (5) 内山敦, 福井巧:「パワーアシスト車椅子の制御システム」, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, pp.204-208 (1997).
- (6) 佐藤仁彦, 関弘和, 畠直輝, 堀洋一:「パワーアシスト車椅子におけるウイリー機能の実現」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-02-41, pp.143-148, 2002.