

# 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～

学生員 畠 直輝\* 正員 関 弘和\*\*  
非会員 小安 雄一\* 正員 堀 洋一\*

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 -

Naoki Hata\*, Student Member, Hirokazu Seki\*\*, Member, Yuichi Koyasu\*, Non-member, Yoichi Hori\*, Member

Aged people and disabled people who have difficulty in walking are increasing. As one of mobility support, significance of a power assisted wheelchair which assists driving force using electric motors and spreads their living areas has been enhanced. However, the increased driving force often causes a dangerous overturn of wheelchair. This paper proposes a novel control method to prevent power assisted wheelchair from overturning.

The man-wheelchair system can be regarded as an inverse pendulum model when the front wheels are rising. The center-of-gravity(COG) angle of the model is the most important information directly-linked to overturn. Behavior of the system can be analyzed using phase plane as shown in this paper. The COG angle cannot be directly measured using a sensor, therefore, COG observer based on its velocity is proposed. On the basis of the analysis on phase plane, a novel control method with variable assistance ratio to prevent a dangerous overturn is proposed. The effectiveness of the proposed method is verified by the practical experiments on the flat ground and uphill slope.

キーワード：福祉制御工学, パワーアシスト車椅子, 後方転倒防止制御, 位相平面, 重心位置オブザーバ, 可変アシスト比

**Keywords:** Welfare Control Engineering, power assisted wheelchair, control for prevention of overturn, phase plane, center-of-gravity observer, variable assistance ratio

## 1. はじめに

本論文は、電動パワーアシスト車椅子における危険な後方転倒現象を防止し、安全な走行を実現する制御手法を提案するものである。論文”その1”では、フィードフォワード的にアシストトルクを調整し、後方転倒の前兆である前輪浮上を抑制するような制御手法について述べた。”その2”と題した本論文はこれと立場が異なり、前輪浮上を許容するが、浮上後に重心位置情報などに基づき後方転倒を防

ぐ制御手法の提案と実験的検討について詳しく記す。さらに、各制御手法を比較し、様々な人間が持つ意向や感じる走行感覚と制御系の関係についても議論を広げる。

電動パワーアシスト車椅子は、人間の入力した力に対し電気モータにより補助して駆動するため、筋力の落ちた高齢者・障害者にとっても使いやすい。ヤマハ製 JWII<sup>(1)(2)</sup>などがすでに市販されている。筆者らの経験からも、平坦地や上り坂において、大きすぎるアシストトルクによって後方へ転倒する危険性が生じるが、論文”その1”と本論文は、車椅子自体の高機能化<sup>(3)</sup>により、そのような危険性を回避しようとするものである。

図1に、ヤマハ製パワーアシスト車椅子 JWII<sup>(1)</sup>を改造する形で製作した実験用車椅子と構成について示す。

## 2. 車椅子の後方転倒現象の解析

2・1 倒立振り子によるモデル化 最初に、車椅子が後方転倒へ至る過程を詳しく解析する。図2に車椅子の前

\* 東京大学 工学系研究科 電気工学専攻  
〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1  
Department of Electrical Engineering, Division of Engineering,  
University of Tokyo  
4-6-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8505

\*\* 千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科  
〒 275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1  
Department of Electrical, Electronic and Computer Engineer-  
ing Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology  
2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016

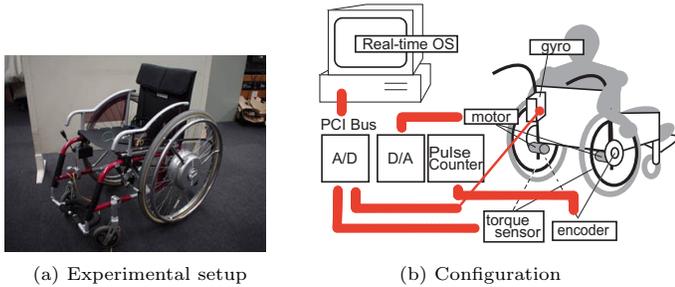


図1 実験用パワーアシスト車椅子

Fig.1. Experimental setup of power assisted wheelchair.

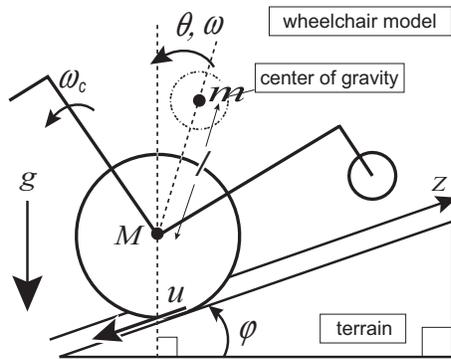


図2 前輪浮上時のモデル

Fig.2. Model of man-wheelchair system.

輪浮上時の様子とその系のモデルを示す。前輪が接地している状態で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子にモデリングできる<sup>(4)</sup>。前輪浮上現象は後方転倒現象の前段階、前兆と言える。 $M$  は車椅子後輪における質量、 $m$  は倒立振子モデルの重心における質量、 $l$  は重心位置と後輪との距離、 $g$  は重力加速度、 $z$  は前後方向の位置、 $u$  は後輪における駆動力、 $\theta$ 、 $\omega$  は重心位置が倒立位置からなす角度と角速度、 $\phi$  は地面の傾斜角である。また、 $\omega_c$  は後輪車軸回りの車椅子本体の回転角速度であり、 $\omega$  とは区別して定義しておく。前輪浮上動作中に搭乗者の姿勢が変動すれば、 $\omega$  と  $\omega_c$  は異なる値となる。また本研究では車椅子横方向の傾斜は考慮せず、水平であると仮定する。

2.2 位相平面を用いた後方転倒現象の解析 次に、後方転倒のメカニズムとその発生条件について倒立振子モデルに基づいて考える。自由運動中の倒立振子はあるエネルギーを持ち、エネルギーの大小に応じた角速度  $\omega$  と角度  $\theta$  についての解軌道が決定される。図3は、実際の車椅子を想定した場合の各パラメータ、 $M = 20.0[kg]$ 、 $m = 56.0[kg]$ 、 $l = 0.3[m]$ 、 $g = 9.81[m/s^2]$  を用いた倒立振子モデル(後述の式(1))のフロー・ベクトル  $f = (\dot{\theta}, \dot{\omega})$  を位相平面上に表示した結果である。これにより、各座標における遷移方向とその加減速の大きさが分かる。ここで、横軸  $\theta$  は図2で示されている重心位置の車軸回りの角度であ

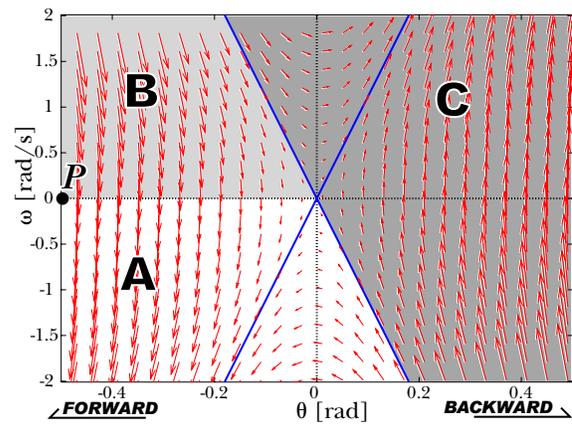


図3 位相平面図

Fig.3. Phase plane.

り、後方転倒へ方向を正とする。縦軸  $\omega$  は重心位置の車軸回りの角速度である。

前輪が浮上し不安定な状態となった際に、位相平面上では点  $P$  から  $A$ 、 $B$ 、 $C$  いずれかの領域にシフトする。点  $P$  の初期位置は、前輪接地状態での倒立位置からの角度である。

**A** : 完全安定領域である。本研究においては前方転倒は考えない。

**B** : 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、 $\theta$  が負側(前方)へ大きく傾いているため自然に安定状態に復帰できる。

**C** : 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。

位相平面での点  $P$  の挙動に基づいて解析すると、後方転倒の前兆である前輪浮上現象が発生したとき、初期位置から  $B$  の領域へ移り、後方転倒へ至る過程で  $B$  から  $C$  の領域へ移っていきと考えられる。

本論文で提案する転倒防止制御手法は、位相平面上で  $B$  の領域に入ったときに安定領域  $A$  に戻すような制御である。つまり、前輪が浮上した後、重心位置  $\theta$  の情報に基づいて制御を行う。領域  $C$  に近づくほど後方転倒の危険性が大きいことから、この位相平面上での挙動は、その危険度を表す平面であるとも考えられる。前輪浮上は許容するが、浮上後にこの情報を利用して転倒防止制御を行うことが考えられる。

一方、この位相平面上で、 $B$  の領域に入らないようにする制御も一つの後方転倒防止法として考えられる。これはまさに、論文”その1”で述べたような前輪浮上を抑制するためのフィードフォワード手法である。前輪が浮上する現象に恐怖感を覚える操作者も存在するため、より安心感を与えるという意味でも有効である。

### 3. 車椅子 - 人間系の重心位置推定

3.1 重心位置オブザーバの提案 前述のとおり、前輪浮上時には車椅子 - 人間系が倒立振子系としてモデル化できる。位相平面上での解析からもわかるように、後方

転倒現象は重心位置の角度  $\theta$  と角速度  $\omega$  に大きく依存する。実際の車椅子では何らかのセンサ等で  $\theta$  を測定することはできないが、車椅子の車軸回りの角速度  $\omega_c$  に関しては、ジャイロセンサを取り付けることで測定が可能である。ここで、前輪が浮上してまた着地するような動作は、論文”その1”の図5からもわかるように1秒前後という短い時間の現象である。上体を素早く動かすことができないような高齢者や障害者が使用することを想定すれば、このような短い時間に姿勢が大きく変動することは考えられない。実際に我々が行った数多くの実験においてその傾向が見られた。そこで、前輪浮上中に搭乗者の姿勢は変わらず、車椅子の車軸回りの角速度  $\omega_c$  と重心位置の車軸回りの角速度  $\omega$  は一致するものと仮定する。この  $\omega (= \omega_c)$  を用いて最小次元オブザーバを構成し  $\theta$  の推定を行う。

オブザーバ設計に用いるため、倒立振子モデルを以下のように線形化する。

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{M+m}{Ml}g \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{Ml} \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

最小次元オブザーバの構成法として Gopinath の方法を用いる。オブザーバの方程式は、

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

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、 $\ddot{\theta}$  がでてくるので、

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

とおき、式 (3) に代入して  $\xi$  に関する状態方程式を導くと、

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

となる。式 (5) と式 (6) より、 $\dot{\theta}$  を用いて  $\hat{\theta}$  を推定できる。この車椅子 - 人間系の重心位置  $\theta$  を推定するオブザーバを「重心位置オブザーバ」と呼ぶこととする。

3.2 オブザーバ誤差に関する検討 オブザーバによる推定においては、ジャイロセンサの誤差  $\Delta\dot{\theta}$ 、トルクセンサの誤差  $\Delta u$  が含まれる可能性がある。ここで、オブザーバには入力  $u$  の誤差はないものとし、ジャイロセンサの値にのみ誤差が含まれると仮定する。つまり、角速度の真値が、

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

で表されるとする。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  $\Delta\hat{\theta}$  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わかる。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  $\Delta\dot{\theta}$  の係数に注目し、

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

のように変形できる。 $S_A$  と  $S_B$  の各ノルムを計算すると、 $S_A$  は  $k$  に依存するが、 $S_B$  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。 $S_A$  のノルムを 0 にすることができれば、重心位置の角速度に起因する誤差項を抑圧できる。

A 行列の要素  $A_{12}$ 、 $B_1$  におけるパラメータ誤差をそれぞれ  $M_d$ 、 $D$ 、角速度に比例する摩擦項を  $B (= A_{11})$ 、 $\|S_A\|$  の中に出てくる  $k$  の二次式を  $V$  とおき、 $V = 0$  の式を  $k$  について解くことより以下が得られる。

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

人間 車椅子系を倒立振子と見なした際、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4(a)(b)、図5(a)(b)に示す。各パラメータは以下のとおりである。

< 図4 >

オブザーバのパラメータ

$$M = 25[\text{kg}], m = 50.05[\text{kg}], l = 0.301[\text{m}]$$

モデルのパラメータ

$$M_{real} = 25[\text{kg}], l = 0.33[\text{m}], B = 0.05, \\ m_{real} \text{ を } 40 \sim 70[\text{kg}] \text{ で変化}$$

< 図5 >

オブザーバのパラメータ

$$M = 25[\text{kg}], m = 50.05[\text{kg}], l = 0.301[\text{m}]$$

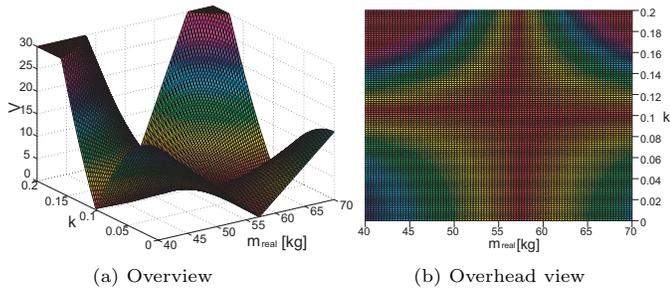


図4  $m$  を変化させたときのゲイン  $k$  と  $V$  の様子  
Fig. 4. Simulation of  $k$  and  $V$  with variable  $m$ .

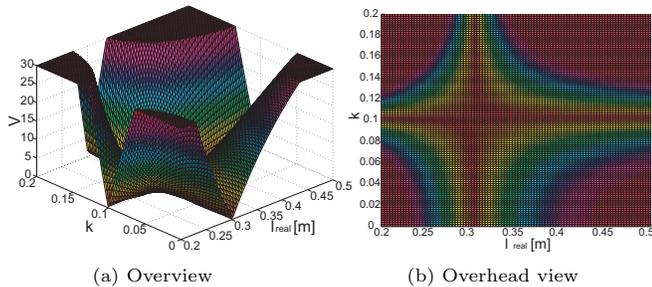


図5  $l$  を変化させたときのゲイン  $k$  と  $V$  の様子  
Fig. 5. Simulation of  $k$  and  $V$  with variable  $l$ .

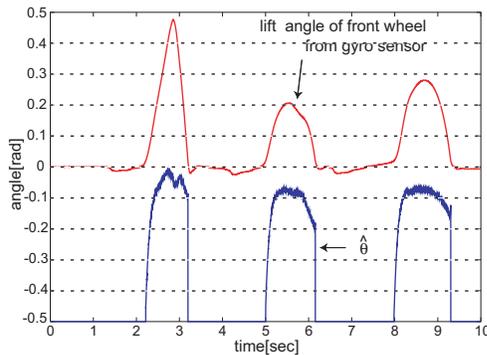


図6 重心位置推定の実験結果  
Fig. 6. Estimation of the center-of-gravity angle.

#### モデルのパラメータ

$M_{real} = 25[\text{kg}]$ ,  $m_{real} = 50.02[\text{kg}]$ ,  $B = 0.05$ ,  
 $l_{real}$  を  $0.2 \sim 0.5[\text{m}]$  で変化

3.3 重心位置推定の実験的検証 重心位置推定が正しく行われるかを検討するために、後方転倒直前、つまり  $\theta = 0$  付近まで前輪を持ち上げたときの重心位置を推定した結果を図6に示す。

グラフ中の上の線はジャイロセンサから得た角速度の積分値、つまり車椅子の傾き角度である。下の線がオブザーバにより推定した重心位置である。推定された重心位置が  $\hat{\theta} = 0$  付近まで立ち上がっている様子がよく分かる。この実験は前輪浮上状態で釣り合いが取れる程度まで行ったので、推定が正しく行われていると考えられる。

#### 4. 重心位置と位相平面に基づく後方転倒防止制御

4.1 人間のトルク入力に基づくアシスト制御手法論文”その1”で述べたように、他のパワーアシスト機器と同様、パワーアシスト車椅子の制御系にも以下のような項目が要求される。

<第一要求事項> : 力の増幅, 補助

<第二要求事項> : 安全性, 操作性, 使いやすさ

これらをとともに満たすような制御系が求められるが、どちらを重視するかという点で使用者に違いが見られる。

また、人間の入力トルクに基づくアシスト制御系の構成についても”その1”ですでに述べている。トルクセンサから得た人間の入力トルクに対して、アシスト比  $\alpha$  の倍率を掛け合わせるだけでなく、一次遅れ系を介し、その時定数を切り替えることにより、人間が手を離れた後の慣性走行を実現している。

4.2 可変アシスト比による転倒防止制御法 重心位置情報に基づいた転倒防止制御手法を提案する。位相平面上での点と原点を結んだ直線の傾きを計算し、これが大きく、危険領域に近いほど転倒の危険性が高いと判断する。直線の傾きが大きくなる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制御を実現する。 $\frac{\omega}{\theta}$  を位相平面上での点と原点を結んだ直線の傾き、 $\beta$  を危険領域に近づく際のアシスト比の減衰速度を決める係数とする。前輪が浮上していない状態でのアシスト比を  $\alpha_{max}$  としたとき、可変アシスト比  $\alpha$  は次のように表される。

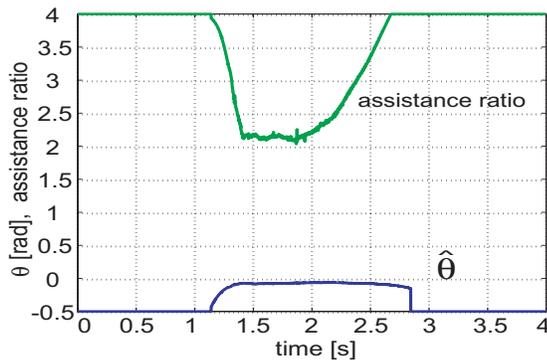
$$\alpha = \alpha_{max} \exp\left(\beta \frac{\omega}{\theta}\right) \dots \dots \dots (11)$$

$\beta$  を減衰定数と呼ぶこととし、この値を調整して実験を行う。

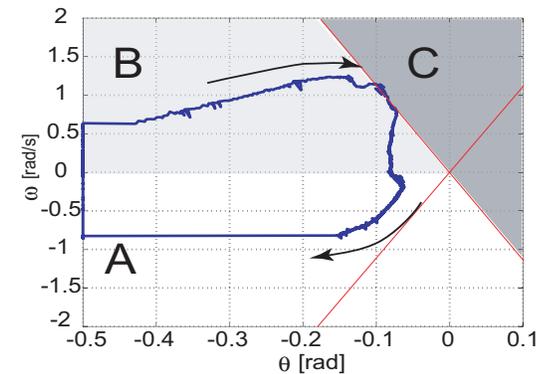
4.3 平坦地における実験的検討 最初に、平坦な路面で後方転倒防止制御の実験を行う。図7, 8に、 $\alpha_{max} = 4.0$ ,  $\beta = 0.3, 3.0$  として行った実験結果を示す。それぞれアシスト比の変化の様子と位相平面での挙動を示している。

$\beta = 0.3$  のとき、前輪浮上が起こってからのアシスト比の減衰が遅く、位相平面上での挙動は危険領域 C に進入してしまっている。実験では安全のため、後ろで別の方が支えていたため転倒には至らずに前輪が着地しているが、支えがなければそのまま転倒していた。一方、 $\beta = 3.0$  のときには前輪浮上が発生してからのアシスト比の減衰が十分に速く、危険領域 C に進入することなく前輪が無事着地していることがわかる。これらの実験からわかるように、本手法で  $\beta$  を適切に設定することにより、後方へ転倒する危険性を抑え、安全な走行を実現することが可能である。

4.4 坂道における実験的検討 さらに、後方転倒が起こりやすい上り坂での本手法の有効性を確認する。図9のようにスロープを設置し、同様の実験を行う。傾斜角は約 8.5 度である。 $\alpha_{max} = 4.0$ ,  $\beta = 3.0$  としたときの後方転倒防止制御の実験結果を図10に示す。平坦面と同様、位相平面上での挙動も危険領域 C に進入しておらず、後方転倒することなく無事前輪が着地していることがわかる。



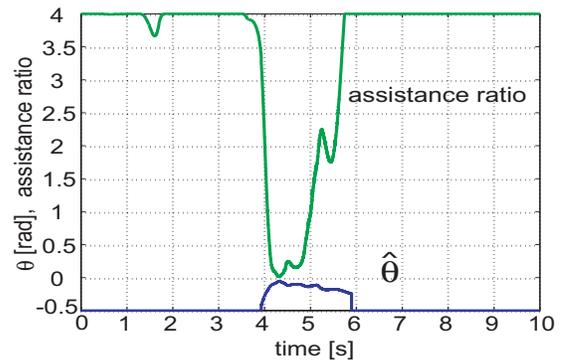
(a) Assistance ratio



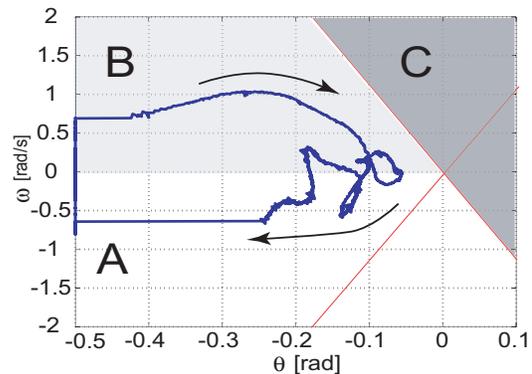
(b) Behavior on phase plane

図7 平坦地での後方転倒防止制御 ( $\beta = 0.3$ )

Fig.7. Experimental result on the flat ground with  $\beta = 0.3$ .



(a) Assistance ratio



(b) Behavior on phase plane

図8 平坦地での後方転倒防止制御 ( $\beta = 3.0$ )

Fig.8. Experimental result on the flat ground with  $\beta = 3.0$ .

以上より、推定された重心位置情報に基づく後方転倒防止制御の有効性が示された。 $\beta$ を適切に設定した場合の位相平面からわかるように、本手法は、前輪の浮上は許容するが危険領域にできるだけ近づかせない、つまり危険度を減じていると言える。ジャイロセンサから得た角速度を積分した値、つまり前輪の浮上角度そのものを用いてアシスト比を減じる手法も可能であるが、どの程度浮上すれば危険であるかは搭乗者の姿勢や調整能力などによって異なる。本研究では、後方転倒に直結する情報である重心位置を利用することで、確実に転倒を防止し、かつ、姿勢などの使用者の個性、特徴に合わせた制御手法を実現した。

本手法は、重心位置情報を用いてはいるが、その目標値を設定してフィードバック制御を行うわけではなく、単にアシスト比を減じているだけであり、完全なフィードバック制御とは言えない。また、前輪浮上が起きないかぎりアシストトルクの制限を行わないため、論文”その1”で述べたフィードフォワード手法と違って通常走行時には大きな駆動力を出すことができ、効率の良い走行が可能となる。

### 5. 被験者による評価実験

本提案手法の有効性を確認するために、複数の被験者を用いた評価実験を行う。3名の被験者(20代男性、健常者)に対し、市販のパワーアシスト車椅子(ヤマハ製 JWII)と



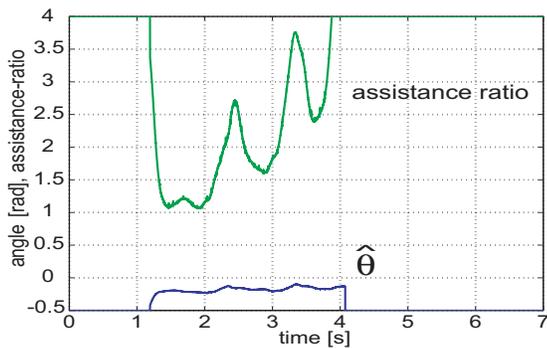
図9 坂道での走行実験の様子

Fig.9. Experiment on the uphill slope.

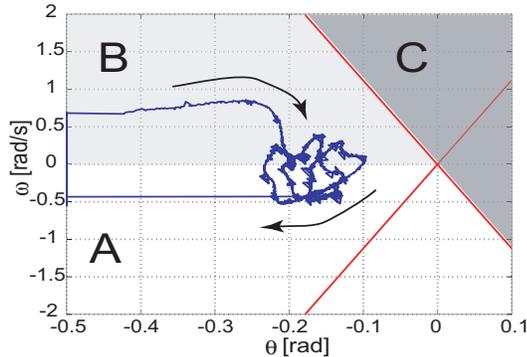
本提案手法を備えた実験機にそれぞれ搭乗し、評価をしてもらう。

走行環境として、平坦な路面と傾斜角が約8.5度の上り坂を用意し、提案した制御手法が動作をする条件である前輪浮上現象を含めた走行を実現する。また、提案手法が、危険な後方転倒を防ぎ、安全で安心な車椅子を目指したものであるため、評価してもらうポイントはそのような走行における安心感の点のみとする。被験者には、安心感を得られるほど0からプラスポイントへ、逆に恐怖感を覚えるほど0からマイナスポイントへ評価点をつけてもらう。

さらに、使用者が車椅子の操作に慣れていく度合、つまり熟練度による評価の違いも考慮するために、初期(訓練初日)・中期(1週間半後)・終期(3週間後)とそれぞれ期



(a) Assistance ratio



(b) Behavior on phase plane

図 10 坂道での後方転倒防止制御

Fig. 10. Experimental result on the uphill slope.

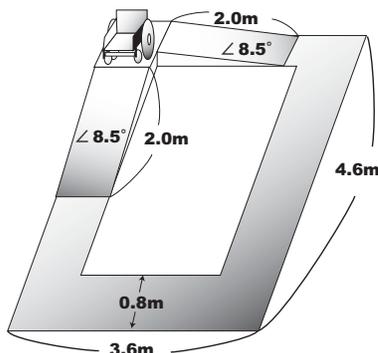


図 11 評価実験に用いるテストコース

Fig. 11. Test course of performance evaluation.

間をもうけ、熟練度の異なる計 3 回の評価実験を行う。各評価実験日の間に数日間走行練習を行うこととする。

この評価実験に用いるテストコースと評価結果をそれぞれ図 11, 12 に示す。図 12 において、縦軸は被験者による評価点の平均であり、横軸方向は 3 回の評価実験実施日である。市販車椅子では、前輪浮上後そのまま転倒しそうになることが多く、安心感の評価点が低い、つまり使用者に恐怖感を招いていることがわかる。特に上り坂では顕著であることも図から見てとれる。一方、提案手法では、使用者の熟練度合にかかわらず、平坦面や上り坂において、より安心感の高い走行を実現していることがわかる。被験者からは、「介助者が後ろで手助けしてくれているような感覚

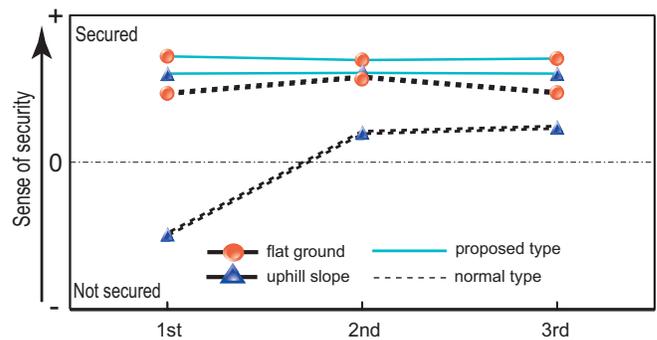


図 12 被験者評価実験の結果

Fig. 12. Result of performance evaluation.

を覚えた」という感想も得られた。市販車椅子は、熟練度にしたがって恐怖感が少しずつ和らいでいるものの、提案手法による高い安心感まででは得られていない。この評価実験により、パワーアシスト車椅子の安心・安全走行を実現する上で、本手法が有効であることが確認された。

## 6. 考 察

本論文では、パワーアシスト車椅子の後方転倒防止を実現する制御手法について、前輪浮上を許容するという立場に立ち、前輪が浮上した後に、重心位置とその位相平面に基づいて求めた後方転倒の危険度にしたがってアシスト比を変化させる制御手法を提案した。平坦地や坂道における実験的検討、複数の被験者を用いた評価実験により後方転倒防止実現への有効性を示した。

本手法は前輪浮上を許容し、浮上が起こってから初めて制御が行われる。このため、前輪が浮上しなければ従来と変わらない駆動力を出すことができる。また、制御系が常に重心位置情報を監視して確実にアシスト比を減じるため、人間の調整能力をあまり必要としない、やや「機械まかせ」の手法と言える。

これに対し、論文”その 1”で述べたフィードフォワード的にアシストトルクを調整する手法では、最大値や立ち上がり時定数において一定の制限を行い、安定性、安全性を重視した手法であるが、操作者の姿勢変化や調整能力などによる影響も少なくない。人間の調整能力がある程度活かされるような「人間主体」の走行手法であると考えられる。

操作者がどのようなことを最も重視し、どのようなことを機械に求めているかは様々に異なる。障害の程度、性格、走行状況などもその要因となる。前輪浮上などの多少の危険性があっても、第一要求事項である「力の増幅」を最も重視する人もいれば、アシスト感は二の次にして、第二要求事項である「安定性、安心感」を重視する人もいる。本提案手法は、前者のような操作者に有効であり、論文”その 1”のフィードフォワードの手法は、後者のような操作者に有効であると考えられる。このように、操作者の意向を制御系に反映させることの必要性を見出したとともに、

本研究での成果がその制御系設計の一つの指針となりうることを示した。

重心位置をある目標値に近づけるように直接制御する,つまり重心位置に基づく完全なフィードバック制御も一つの実現手法として考えられるが,人間の姿勢変化などは外乱要素としてみなされるため,ここで検討した手法と比較して,より機械が支配的な制御手法であると言える。

ここで述べた議論はまだ一見解にすぎないが,今後,障害者を含めた多くの被験者に各手法を評価してもらい,操作者の意向や走行環境に応じた制御法の確立へ向けてさらなる考察を行うことが課題となる。

## 7. 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」<sup>(5)</sup>の一研究として,パワーアシスト車椅子における危険な後方転倒現象を防止するための新しい制御手法とその実験的検討について示した。論文”その1”とは異なる立場からの提案として,最初に,前輪浮上時の人間-車椅子系を倒立振子にモデル化することで得られる重心位置とその位相平面に基づき,後方転倒に至る過程とその危険度について解析をし,また,重心位置を推定するオブザーバを設計し,その位相平面における挙動から見出した転倒の危険性にしがってアシスト比を変化させる制御手法を提案した。平坦地や坂道における実験的検討,被験者を用いた評価実験によりその有効性を示すとともに,その操作者である人間との関係性についても議論した。

現在は車椅子横方向の傾斜はないものとしていたが,今後傾斜を考慮した左右輪駆動力補償も含めた検討も可能と考えている。さらに,今回は位相平面での原点からの傾きを利用した可変アシスト比制御を提案したが,この他にも原点までの距離などを利用する方法も考えられる。

パワーアシスト車椅子の場合,段差を越える際に前輪浮上をさせるウィリー動作において,やはり後方へ転倒する危険性が大きい<sup>(6)</sup>。倒立振子モデルに基づくウィリー動作実現の研究例もあるが<sup>(4)</sup>,ここで示した手法の応用も可能であり,今後の課題として検討したい。

本研究を進めるにあたりご指導ご協力頂きましたヤマハ発動機(株)福井巧氏,戸倉賢治氏に深く感謝いたします。

本研究は,文部科学省科学研究費基盤研究(B)(2)(課題番号:13450175 福祉制御工学の体系化に関する基礎的研究)の支援を受けて行われたことを付記し,謝意を表します。

(平成15年7月29日受付,同16年1月5日再受付)

## 文 献

- (1) 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)
- (2) A. Kakimoto: "Control technology of mobility aids for the elderly", *Journal of The Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 40, No. 5, pp.357-362 (2001) (in Japanese)  
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)

- (3) T. Tachibana: "Bioengineering in 21st century", *Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 104, No. 996, pp.720-723 (2001) (in Japanese)  
立花隆:「21世紀のバイオエンジニアリング技術開発への提言」,日本機械学会誌, Vol. 104, No. 996, pp.720-723 (2001)
- (4) 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)
- (5) H. Seki and Y. Hori: "Detection of abnormal action using image sequence for monitoring system of aged people", *IEEJ Trans. IA*, Vol. 122-D, No. 2, pp.182-188 (2002) (in Japanese)  
関弘和・堀洋一:「高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出」,電気学会論文誌D, Vol. 122, No. 2, pp.182-188 (2002)
- (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ィリー機能の実現」,電気学会産業計測制御研究会, IIC-02-41, pp.143-148 (2002)

畠 直 輝 (学生員) 1977年12月26日生まれ。2000年3月東京立科学技術大学工学部電子工学システム科卒業。2002年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。2002年4月同大学院工学研究科電気工学専攻博士課程入学,現在に至る。主として計測,制御工学に基づく高齢者障害者支援,福祉制御工学に関する研究に従事。日本機械学会などの会員。

関 弘 和 (正員) 1975年9月5日生まれ。1998年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。2000年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。2003年同大学院博士課程修了。2003年より千葉工業大学工学部電気電子情報工学科助手。2004年より同講師。主として計測,制御工学に基づく高齢者障害者支援,福祉制御工学に関する研究に従事。計測自動制御学会,ライフサポート学会,IEEEなどの会員。

小 安 雄 一 (非会員) 1980年8月28日生まれ。2003年3月東京大学工学部電気工学科卒業。2003年4月東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程入学,現在に至る。主として,計測,制御工学に基づく高齢者障害者支援,福祉制御工学に関する研究に従事。

堀 洋 一 (正員) 1955年7月14日生まれ。1978年東京大学工学部電気工学科卒業,1983年同大学院博士課程修了。助手,講師,助教授を経て,2000年2月より電気工学科教授。2002年10月より東京大学生産技術研究所教授。専門は制御工学とその産業応用,とくに,モーションコントロール,メカトロニクス,電気自動車などの分野への応用研究。最近は福祉制御工学を開始。この間,1991年~

1992年,カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。2001-2002年,IEEE Japan Council および Tokyo Section トレジャラ。現在,電気学会産業応用部門副部門長。1993年および2001年,IEEE Trans. on IE 最優秀論文賞,2000年電気学会論文賞などを受賞。電気学会,計測自動制御学会,IEEE,日本ロボット学会,日本機械学会,自動車技術会,日本シミュレーション学会などの会員