走行モード切換えに基づく電動アシスト車いすの段差踏破制御法

Step Climbing Control of Electric Power Assisted Wheelchair

Based on Driving Mode Switching

関 弘和(正会員), 南方 英明(非会員), 多田隈 進(非会員)

Hirokazu Seki, Hideaki Minakata and Susumu Tadakuma

Abstract

“Electric power assisted wheelchair” which assists the driving force by electric motors is expected to be widely used as a mobility support system for elderly people and disabled people. This paper aims at realizing the safe and reliable step climbing motion control. The reason is that power assisted wheelchairs are in danger of backward overturning when raising the front wheels due to the excessive driving torque and of stopping in front of steps when the rear wheels try to climb over steps due to the insufficient driving torque. This study proposes a novel step climbing control scheme for electric power assisted wheelchairs based on driving mode switching. The first driving mode, “front wheel raising mode”, applies torque control system with the variable assistance ratio to prevent the dangerous overturning. The second mode, “rear wheel climbing mode”, applies position control system based on the polynomial trajectory to surely climb over steps and stop at the suitable position. Some experiments show the effectiveness of the proposed control system.

Key Words

mobility support, electric power assisted wheelchair, step climbing control, phase plane analysis, trajectory control, driving mode switching

1. はじめに

本論文は、電動パワーアシスト車いすの安全で確実な段差踏破走行を実現するための一制御法を提案するものである。

Fig.1に示す電動パワーアシスト車いすは、人間の入力した力に対し電気モータにより補助し、その増幅された力で駆動するものである。筋力の落ちた高齢者・障害者でも利用でき、行動範囲を広げるものとして期待は大きい。ヤマハ製JWⅡ¹⁾²⁾が有名であるが、実際の走行場面において様々な問題点も指摘されている³⁾。立花隆氏の提言⁴⁾にもあるが、社会的インフラのバリアフリー化を目指

だけでなく、車いす自体のハイテク化、高機能化によりバリアを乗り越え、健常者と同じように行動できるようにすることも重要であり、利用者の自由度やコストの点において良いとも考えられる。そのような高機能化の例として、大きすぎる駆動力により生じる危険な後方転倒現象を防止するための制御手法の検討⁵⁾⁶⁾、加加速度を考慮した制御法により乗り心地向上を目指した研究⁷⁾⁸⁾、安定で確実な直進旋回走行を実現する制御法の開発⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾なども行われている。

Fig. 1 Electric power assisted wheelchair

2006 年 12 月 8 日受理

2007 年 2 月 26 日最終原稿受理

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

Chiba Institute of Technology, Department of

Electrical, Electronics and Computer Engineering,

2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba, 275-0016

電動パワーアシスト車いすの高性能化の要素の一つとして、安全で確実な段差踏破の実現がある。ビルの入口や歩道など街中の至る所に段差が存在しているが、車いすの走行にとっては非常に大きな障害となりうる。電動アシスト車いすにとっては、手動車いすの場合と同様、まず前輪を段差の上に安全に着地させてから、後輪を乗り上げて踏破するという手順で段差踏破が実現される。手動車いすの場合には、車いすを駆動させる駆動トルクは人間の入力トルクそのものであり調整しやすく、訓練によって段差越えのウィリー動作を習得できるが、アシスト車いすの場合には、人間の入力トルクと電気モータのアシストトルクの合計が駆動トルクとなるため、これを人間自身が調整することは難しくなる。駆動トルクが大きすぎると、前輪を浮上させる際に後方に転倒しそうになったり、逆に小さすぎると、前輪が浮上しきれず段に激突したり、あるいは前輪が乗り越えられても後輪が踏破できなかったりと、危険な動作を含めた多くの失敗例が考えられる。実際、市販の車いすや著者らの製作した実験機でそのような例を数多く確認している。

そこで本論文は、安全で確実な段差踏破走行を実現するアシスト制御手法を提案し、実機を用いた検証を行う。機構的にその性能を向上させることも考えられるが¹²⁾、本研究では電気制御的な立場からアプローチすることとする。

2. 電動アシスト車いすの走行制御法

2.1 アシスト走行制御法の分類

一般にパワーアシスト機器のアシスト制御法は、その指令値として何を生成するかによって、力・トルク制御ベース法と位置・速度制御ベース法に分類することができる¹³⁾。力・トルク制御をベースとしたパワーアシスト車いすのアシスト制御法として、あるアシスト比と一次遅れ系を用いることで、人間が手を離れた後に惰性走行を生み出すアシスト手法が実現されている⁵⁾。また、位置・速度制御ベース法として、仮想インピーダンス制御により速度指令を生成し、これをPI制御による速度制御系の指令値とする手法が、介助用のアシスト車いすにおいて実現されている¹⁴⁾。本研究ではこれら二つのアシスト制御法をともに用いることとなる。

2.2 一次遅れ系によるアシスト走行制御法

一次遅れ系とアシスト比を用いた電動アシスト車いすの走行制御法⁵⁾の構成図をFig.2に示す。

Fig. 2 Configuration of torque control based system

トルクセンサから得た人間の入力トルク T_h に対して一次遅れ系を介し、その時定数 τ_a を切り替えている。 T_a はアシストトルク出力、 T_d は外乱トルク、 α はアシスト比であり、式(1)(2)のように設計する。

$$T_a = \frac{\alpha}{1 + \tau_a s} T_h \quad (1)$$

$$\tau_a = \begin{cases} \tau_f & \frac{dT_h}{dt} \geq 0 \\ \tau_s & \frac{dT_h}{dt} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

操作者がハンドリムを握り入力トルクを増加させている間は時定数を小さくして ($\tau_a = \tau_f$) アシストトルクの速い立ち上がりを実現し、手を離しかけて入力トルクが減少していく際には時定数を大きくして ($\tau_a = \tau_s$) 惰性走行を生み出す。このようなアシスト制御法を左右輪それぞれに適用しパワーアシスト車いすの走行が実現される。この手法による走行実験の一例について、右輪のみの結果をFig.3に示す。 θ_w は車輪の回転角度である。 $\alpha = 2.5$, $\tau_f = 0.3[s]$, $\tau_s = 1.0[s]$ とし、平坦路において走行を行ったものであり、アシスト走行が実現されていることがわかる。

Fig. 3 Example of driving experimental result

2.3 位置・速度制御に基づくアシスト走行

位置制御をベースとした電動アシスト車いすの走行制御法はFig.4のような構成で実現される。人間の入力トルク T_h から位置指令 θ_w^{ref} を生成するアルゴリズムが操作性や安定

性を左右する部分であり様々な工夫が要求される。位置制御の代わりに速度制御を用いることも可能である。

Fig. 4 Configuration of position control based system

3. 段差踏破走行制御の実現

先の 1 章に述べたように、電動アシスト車いすの段差踏破においては、まず後方転倒などすることなく安全に前輪を段上に着地させ、その後、後輪を確実に段差踏破させ適切な位置に停止させるような制御を行う必要がある。このことから、段差踏破動作は Fig.5 に示すように、安全に前輪を段上に着地させる「前輪浮上モード」と、後輪を確実に踏破させ適切な位置に停止させる「後輪乗り上げモード」の二つの走行モードに分けて定義することができる。

Fig. 5 Definition of step climbing motion process

「前輪浮上モード」では、前輪を段差よりも高く浮上させ、かつ後方転倒を防ぐように制御し安全に段上に着地させるという制御目的が設定できるため、4 章で提案するように、前輪浮上角やその角速度などを測定しながらアシストトルクを適切に調整する手法を適用する。また、「後輪乗り上げモード」では、確実に後輪を段差踏破させ適切な位置に停止させるという制御目的が設定できるため、5 章に述べるように、多項式を用いた後輪の位置軌道制御を適用する。前者がトルク制御ベース、後者が位置制御ベースの手法であるため、二つの制御モードを切替える際の初期値補償を考慮する必要があるが、これについても 5 章で検討している。

4. 位相平面解析に基づく可変アシスト比制御 (前輪浮上モード)

4.1 倒立振り子モデル

前輪が浮上しているときの車椅子の挙動は倒立振り子としてモデル化することができる⁶⁾¹²⁾。また、前輪浮上は一瞬の現象であり、短い時間内の動作であることから、人間の姿勢変動等はほとんどないと仮定する。 M は車いす後輪における質量、 m は倒立振り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、 θ, ω は重心位置が倒立位置からなす角度と角速度で、後方転倒への方向を正としている。

Fig. 6 Inverse pendulum model

重心位置の角速度 ω は前輪浮上角速度と同一であり、車いすにジャイロセンサを装着し測定することができる。一方、重心位置の角度 θ はセンサ等では直接測定することができない。角速度 ω や車いすへの駆動入力トルクなどを用いてオブザーバを構成することで θ を推定することもできるが⁶⁾、ゲインの調整が難しく、上記の様々なパラメータを正確に同定することも容易ではないため、ここでは簡単に、人間を乗せた車いすを $\theta = 0$ の位置まで持ち上げて倒立させ、このときの前輪浮上角 θ_0 をあらかじめ測定しておくこととする。この場合、前輪接地時に $\theta = -\theta_0$ であり、前輪浮上にともなって ω を積分した値を足していくことで重心位置 θ を計算することができる。前述のように、前輪浮上現象は短い時間内に起き、使用者が高齢者や障害者であることを想定すれば、上体を素早く動かすようなことがあまりできないと考えられるため、本研究ではこのような手法を採用した。

4.2 位相平面解析

倒立振り子モデルに基づき、後方転倒現象の発生条件について考える。Fig.7 は Fig.6 の各パラメータに実際の車いすを想定した値を代入し、倒立振り子の運動に関する解軌道のフローベクトルを位相平面上に表示したものである⁶⁾。重心位置の角度を横軸、角速度を縦軸にとっている。

A 領域は前方転倒を意味し、本研究では安全な動作である。B 領域は後方転倒方向に動作しているがまだ倒立位置までは遠いため安全な前方転倒動作に復帰できる領域である。C 領域はこのままでは確実に後方転倒してしまう領域である。前輪が浮上したとき、位相平面上的の動作点 P は C 領域のほうに近づくこととなり、もし C 領域に入ってしまうえば危険な転倒にいたってしまうと考えられる。B, C 領域の境界である漸近線は式(3)で表される。

$$\omega = -\sqrt{\frac{M+m}{Ml}} g \theta \quad (3)$$

Fig. 7 Pendulum behavior on phase plane

4.3 可変アシスト比制御

Fig.8 に動作点 P の挙動例を示す. 式(3)の漸近線に動作点が近づくほど後方転倒の危険性が増すと考えられることから, その漸近線との距離 L に応じてアシスト比を減少させていく可変アシスト比制御を式(4)のように提案する. なお, L は垂線(図中の P1 と P2 を結ぶ破線)の距離であるが, Fig.8 では縦軸と横軸のスケールが異なるため, 垂直に交わっているようには見えていない.

Fig. 8 Phase plane analysis

$$\alpha = \alpha_0 \frac{L - \beta}{L_0 - \beta} \quad (4)$$

式(4)において, α_0 は通常時のアシスト比, L_0, β はアシスト比を減衰させるための調整パラメータであり, $L < L_0$ となった時点から式(4)を適用しアシスト比を減衰させる. また, 漸近線に大きく近づき, $L < \beta$ となれば, 可変アシスト比 α は負にまで変化しうるようにしているが, これは, 動作点 P が安定限界を越えていなくても, 近づきすぎた場合には操作者に大きな恐怖感を抱かせることになるため, 早めに負のアシストトルクで車椅子を後退させて前輪浮上角を抑えるようにすることができるとある. 先の研究⁶⁾ではこのような点は考慮し

ていなかった.

このような可変アシスト比制御により, 危険な後方転倒を防ぎ安全な前輪浮上動作が実現されると考えられる. 一方, 1章で述べたように, 前輪が段差以上の高さに浮上する必要性もある. これは, Fig.2 のアシストトルク生成において, 時定数 τ_a の値を小さく設定することによりトルクの立ち上がりを速くし容易に前輪浮上が誘発されるようにして工夫している. つまり, 前輪浮上はしやすく, かつ後方転倒は必ず防ぐという制御設計が実現されていると言える.

5. 多項式に基づく走行軌道制御(後輪乗り上げモード)

5.1 三次多項式による軌道生成

後輪乗り上げモードにおいては, 確実に段差を踏破し, 適切な位置に安全に停止することを目的とするため, 後輪の車輪角度を制御する軌道制御を行う. 左右の後輪には位置制御系を設計するが, その位置指令をいかに生成するかが問題となる.

本研究では多項式を用いて柔軟に軌道指令を生成するが, ここでは Fig.9 のような三次多項式により後輪の位置軌道を生成する. 三次以上の多項式であれば, モード切換え時点における車輪速度がたとえ小さいものであっても, Fig.9 の速度波形が示すように, 再び加速をして速度を上昇させることができるからである. ここで, モード切換え時点を $t = t_0$ としたとき, 後輪の位置指令軌道 $\theta_w^{ref}(t)$ の式は式(5)で表される.

Fig. 9 Position reference based on three order polynomial

$$\theta_w^{ref}(t) = a(t - t_0)^3 + b(t - t_0)^2 + c(t - t_0) + d \quad (5)$$

四つの未知係数 a, b, c, d は, 走行モード切換え時と走行終了時における四つの境界条件を用いることで求めることができる. 走行モード切換え時 ($t = t_0$) の車輪角度, 角速度をそれぞれ $\theta_w^{sw}, \omega_w^{sw}$, 走行終了時 ($t = t_0 + t_f$) の車輪角度, 角速度をそれぞれ $\theta_w^{sw} + \theta_w^f, 0$ として, 未知係数の式を導くと式(6)のようになる.

$$\begin{cases} a = \frac{-2\theta_w^f + \omega_w^{sw} t_f}{t_f^3} \\ b = \frac{3\theta_w^f}{t_f^2} - \frac{2\omega_w^{sw}}{t_f} \\ c = \omega_w^{sw} \\ d = \theta_w^{sw} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、再加速を行うような三次多項式を生成する場合には、後輪乗り上げモードの走行距離、走行時間がある範囲に設定する必要がある。Fig.9 にも示すように、二次多項式となる速度信号の極値をとる点が、この後輪乗り上げモードの時間内に入るようにする必要があることがわかる。これを満たす条件を計算すると、

$$a < 0, \quad 0 < -\frac{b}{4a} < t_f \quad (7)$$

となり、これに式(6)を代入して整理すると、

$$\theta_w^f > \frac{2}{3} \omega_w^{sw} t_f \quad (8)$$

なる条件が導かれる。すなわち、モード切換え時の車輪角速度 ω_w^{sw} を読み取り、式(8)を満たすような θ_w^f, t_f の組を決定する必要がある。例えば、先の研究⁷⁾でも検討したように、先に走行時間 t_f を決定し、その後、式(8)の条件を満たすような適切な走行距離 θ_w^f を決定するという手順も可能である。

5.2 位置制御系の設計

2.3 節で述べたように、車いすを望みの軌道に追従させるため、後輪に対し位置制御系を設計する必要がある。本研究では、後輪回転角度をロータリエンコーダにより検出してフィードバック制御を行う。制御器には PD 制御を用いる。

5.3 制御モード切換え時の初期値補償法

前輪浮上モードから後輪乗り上げモードへの切換え時点の検出を自動的に行う必要があるが、これには Fig.10 に示す前輪浮上角速度を利用することができる。 θ_f は前輪浮上角速度、 ω_f はその角速度である。 ω_f はジャイロセンサで測定され、 θ_f はその積分値として計算される。モード切換えは、前輪が段に着地した時点とするのが適切であるが、このとき、前輪浮上角速度 ω_f が 0 になるため、これを検出することで自動的なモード切換えが可能となる。

また、トルク制御をベースとする前輪浮上モードから位置制御をベースとする後輪乗り上げモードへ切換えるとき、車いすはその時点でもつ速度などを考慮した初期値補償が不可欠となる。そこで本研究では、モード切換え時点を初期状態とみなし、この時点において制御器の状態変数に初期値を設

Fig. 10 Detection of mode switching timing

定して過渡応答などの制御性能の向上をはかる初期値補償法¹⁵⁾を適用することとする。山口ら¹⁵⁾は磁気ディスク装置の位置決めサーボ系におけるモード切換え型制御系に対しこのような初期値補償法を提案している。詳細については省略するが、制御器の初期状態変数 $X_c(0)$ に対し、制御対象の初期状態変数 $X_p(0)$ とある適切な値 K を用いて、

$$X_c(0) = K \cdot X_p(0) \quad (9)$$

のように設計することで、 $X_p(0)$ から制御出力までの伝達関数の零点を移動させ、応答の望ましくない閉ループ系の極を相殺することで初期値応答の過渡特性を改善する。本研究では、 $X_p(0)$ はモード切換え時の車いすの速度などを含むものであり、モード切換え時に式(9)を計算し、 $X_c(0)$ を与えることになる。

6. 実機による実験的検討

6.1 実験装置の構成

本手法の制御実験を行うため、ヤマハ製パワーアシスト車いす JW II をベースに Fig.11 のような実験装置を構成した。左右輪の回転角度を測定するロータリエンコーダを装着し、RT-Linux を搭載した計算機に取り込み、モータへのトルク指令値が作成したモータドライブ回路に送られる。人間のトルクを検出するトルクセンサはヤマハ製のものを活用し、計算機に取り込めるようにしている。その原理はバネを用いたポテンシオメータであり、入力トルクに比例した変位が電気信号として出力されるものである。また、前輪浮上角速度測定のためのジャイロセンサも搭載している。これらセンサの出力信号には雑音も存在するが、計算機のプログラム上でローパスフィルタを用いて除去している。本実験では制御周期を 1[ms]としている。

なお、本実験での段差踏破走行は直進方向のみの運動であるため、左右輪ともほぼ同様の挙動であり、実験結果については右輪を代表させて示している。

Fig. 11 Experimental setup system

6.2 前輪浮上モード

最初に前輪浮上モードにおける実験を行う。実験の風景を Fig.12 に示す。段差の高さは 45mm としている。また制御パラメータは、 $\alpha = 2$, $\tau_a = 0.03[s]$, $\beta = 0.1$, $L_0 = 0.31$ とする。

Fig. 12 Scene of step climbing control experiment

この実験結果について、前輪浮上角度 θ_f と右輪のアシストトルク T_a を Fig.13 に示す。アシストトルクについては、提案した可変アシスト比制御によって生成されたトルクに加えて、一定のアシスト比とした場合の値も示している。走行モード切換え時点は $t = 2.13[s]$ であり、前輪浮上角度は最大で $\theta_f = 1.5[rad]$ 程度となった。倒立位置における浮上角を $0.4[rad]$ としているため、これに近づくような前輪浮上角度の過度の上昇を防ぎ、後方転倒現象を防いでいることがわかる。また、アシストトルクは式(4)の制御により $10[Nm]$ 程度減じられている。前輪浮上角とアシストトルクの関係我倒立振子モデル等を用いて解析的に求めることは難しいため、どれだけトルクを減じれば浮上角をどれだけ抑えられるかを具体的に求めることはできないが、本手法では式(4)における β によって、浮上角等の挙動に応じたアシストトルクの減じ方を調整できるようにしており、これを実験的に調整し設定しているため、後方転倒防止が実現されていると考えられる。

Fig. 13 Experimental results of front wheel raising mode

6.3 後輪乗り上げモード

次に後輪乗り上げモードの実験を行う。各制御パラメータは、 $t_f = 1.5[s]$, $\theta_w^f = 2[rad]$ としている。これは乗り心地等を損なわないことを考慮するとともに、前節で示した条件式(8)を満たすような値を実験的に決定したものである。この実験結果について、前輪浮上角度 θ_f 、モード切換え後の右側後輪指令角度 θ_w^f と応答角度 θ_w を Fig.14 に示す。後輪角度応答に指令値からの誤差が生じているが、これは段差という外乱が位置制御系に与えられているためである。位置制御系をさらにロバストなものに設計すればこの誤差は減らすことができるが、本研究が目的としているのは確実な段差踏破であるため、多少の誤差は許容され、本実験での設計は妥当と考えられる。しかし段差の高さがさらに高くなった場合などを想定したとき、段差踏破の確実性を上げるという意味からもロバストな位置制御系の設計は重要であり、外乱オブザーバ等の適用を検討していく予定である。

Fig. 14 Experimental results of rear wheel climbing Mode

6.4 考察

本研究では、電動アシスト車いすの安全で確実な段差踏破走行を実現するため、二つの走行モードを定義し、それぞれで要求される性能に合わせた制御法を開発し、実機による実験を通してその有効性を確認した。いくつかの制御パラメータについては実験的に調整したが、実用場面での設計においてはユーザの感覚、好みなどに基づいて調整していく必要があると考えられる。

段差踏破という一連の動作を実現するには、動作前半と後半での要求が異なるため、一つの制御モードでは実現が難しいと考え、それぞれでの要求に合わせた制御モードを使い分ける「走行モード切換え」という手法を提案し、その切換えを自動的かつ滑らかに行う手法も検討した。

前輪浮上モードにおいては、後方転倒することなく前輪を着地させるのは車いすの位置などではなく駆動トルクという物理量の調整によって実現されうると考えた。式(4)と其中的の β という調整パラメータの設定によって後方転倒を防ぎうることから「安全」な段差踏破が期待される。また後輪乗り上げモードにおいては、後輪が段を乗り越え適切な位置まで進んで停止するためには、トルクではなく車いすの位置軌道という物理量の制御によって実現されうると考えた。多項式を用いた軌道生成により Fig. 14 の実験結果が示すような「確実」な段差踏破走行が期待できる。位置制御系が外乱に対してロバストであれば確実に段差を乗り越え、目標軌道に追従し停止すると考えられ、今後は外乱オブザーバ等を利用したロバスト性なども検討していきたい。

このように本手法による実現が期待される段差踏破走行制御の安全、確実さについては、多くの被験者を用いた実地試験による評価が不可欠である。安全・確実の程度や操作者へ与える恐怖感、操作性などについて今後の評価実験で明らかにしていきたい。

後輪乗り上げモードの軌道生成において、本研究では三次多項式を用いた。再加速を行うために最低三次の多項式が必要であるためであるが、停止に至るまでの減速などを含めた滑らかな加減速走行を実現するためには、さらに高次の多項式の適用も考えられる。例えば、先の研究⁷⁾では五次多項式を用いた走行軌道生成法を提案しているが、これは加速度の変化率である躍度が最小となるような滑らかな加減速を実現するものであり、本研究における後輪乗り上げモードへの適用も可能である。ただし、先の研究論文⁷⁾でも述べているように高次多項式の場合にも三次多項式と同様、極値などを解析した上でその走行距離や走行時間の適用範囲が限定され、高次になるほどこの解析は難しいものとなる。本研究で用いた三次多項式は比較的シンプルであり実用的であると言える。

また、高橋ら¹²⁾も本研究と同様に段差踏破制御を目的とした手法を提案している。後輪車軸をずらすという機構的工夫と重心位置をPI制御により直接制御するという手法が用いられている。重心位置等に注目した点以外は本研究では全体の制御指針が大きく異なる。本研究では、前輪浮上が一瞬の現象であることから、重心位置等を直接は制御せずフィードフォワード的なトルク調整で十分であると考え、また走行モードを切換え、後輪の確実な踏破まで考慮した手法であることなどが特徴的である。

7. まとめ

本論文では、電動パワーアシスト車いすの安全で確実な段差踏破走行制御法を提案し、実機を用いた実験的検証によりその有効性を示した。今後はさらに多くの路面、多くの被験者についての実験的検証によって、本手法の妥当性や各制御パラメータの設計法の確認を行っていく予定である。

参考文献

- 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 1997: 204-208.
- 2) 垣本映: “高齢者の移動支援のための制御技術”, 計測と制御 2001, 40(5): 357-362.
- 3) 橋詰努, 川田徳紀, 谷川知嘉子, 杉山琢磨: “介助用補助動力付き車いすの使用評価”, 第15回リハ工学カンファレンス講演論文集 2000: 85-88.
- 4) 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 2001, 104(996): 720-723.
- 5) 関弘和, 畠直輝, 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1)～アシストトルク調整法と被験者評価による解析～”, 電気学会論文誌 D 2004, 124-D(3): 318-323.
- 6) 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 2004, 124-D(7): 699-705.
- 7) 関弘和, 杉本武明, 多田隈進: “躍度最小軌道に基づくパワーアシスト車椅子の走行制御法”, 電気学会論文誌 C 2005, 125-C(7): 1133-1139.
- 8) 関弘和, 南方英明, 多田隈進: “加速度と加加速度制限を考慮したパワーアシスト車いすの速度パターン生成法”, ライフサポート 2006, 18(3): 19-25.
- 9) 関弘和, 杉本武明, 多田隈進: “左右輪のトルクバランスによるパワーアシスト車いすの直進・旋回走行制御”, ライフサポート 2005, 17(4): 25-32.

- 10) 関弘和, 杉本武明, 多田隈進: “左右輪の外乱推定に基づくパワーアシスト車椅子の直進走行制御法”, 電気学会論文誌 D 2006, 126-C(6): 764-770.
- 11) H. Seki and S. Tadakuma: ” Straight and circular road driving control for power assisted wheelchair based on fuzzy algorithm”, Proceedings of The 32th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06) 2006: 3898-3903.
- 12) Y. Takahashi, S. Ogawa and S. Machida: ” Step climbing using power assist wheel chair robot with inverse pendulum control”, Proceedings of The 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2000: 1360-1365.
- 13) H. Seki, M. Iso and Y. Hori: ”How to design force sensorless power assist robot considering environmental characteristics - position control based or force control based -”, Proceedings of The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'02) 2002: 2255-2260.
- 14) 垣本映, 松田英夫, 関口行雄: 介助型パワーアシスト車いすの開発, 精密工学会誌 1999, 65(8): 1126-1130.
- 15) 山口高司, 宍田和久, 遠山聡一, 平井洋武: モード切り換え型制御系の初期値補償設計と磁気ディスク装置ヘッド位置決めサーボ系への適用, 計測自動制御学会論文集 1995, 31(6): 780-788.