

パワーアシスト車椅子におけるウィリー機能の実現

佐藤 仁彦*, 関 弘和, 畠 直輝, 堀 洋一 (東京大学)

Realization of "Wheele" Function on Power Assisted Wheelchair

Masahiko Sato, Hirokazu Seki, Naoki Hata, 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.

Power Assisted Wheelchair has received high appreciation from users. However, if they try "wheele" for climbing over steps, there is high risk that wheelchairs are overturned. Therefore, an additional function which realize "wheele" in safety is required. In this paper, a new method of "wheele" on a power assisted wheelchair is proposed. By adjusting the input torque imposed by users, safe "wheele" motion without overturn can be realized.

キーワード: 高齢者・障害者支援, パワーアシスト車椅子, ウィリー機能, 転倒防止, 模擬慣性機能

(Keywords: support for aged people and disabled people, power assisted wheelchair, "Wheele" function, prevention of overturn, imaginal inertia function)

1 はじめに

周知の通り、現代日本は将来にわたり更に進展するであろう深刻な高齢化社会を迎えている。一方、身体障害者、特に肢体不自由者の数も年々上昇している。こうした社会的状況の中で、近年、高齢者や障害者が住みよい、バリアフリーな街作りの必要性が訴えられている。しかし、公共施設で十分なバリアフリーが達成されているとは言えず、高齢者や障害者の自由な移動が妨げられているケースがまだまだ多い。

我々は高齢者・障害者を工学的に支援する「福祉制御工学」という分野を提唱しているが、本研究では、高齢者や障害者の自立した行動の助けとなるパワーアシスト車椅子を対象とした研究を行う。

従来型の自操型車椅子では、パワーの小さい上肢によって駆動するため、坂道を上れないなど、行動範囲が限定されたものとなっていたが、モータによって駆動力を補助するパワーアシスト車椅子の登場により、行動範囲は大きく広がった。しかし、パワーが強すぎて後方へ転倒する危険性があり、転倒防止バーが取り付けられているため、段差越えの際に必要なウィリー動作が不可能になっている。本研究では、人間の入力するトルク信号を調整することにより、後方へ転倒することなく、ウィリー動作を実現する手法を提案する。

2 パワーアシスト車椅子の現状

2.1 パワーアシスト車椅子の現状について

現在、市販されている自操型パワーアシスト車椅子には次の2つがある。[1]

- JW-II ヤマハ発動機 1996年発売 [2]
- E-motion アルパー社(独) 2000年発売 [3]

日本では、ヤマハ発動機の JW-II が発売されているが、年間 200 台程度しか売り上げていない。原因としては、日本の医療現場では患者の自立を妨げるとして、動力を用いた福祉機器の導入に消極的であることなどが挙げられるが、いまのところ、知名度の低さが大きいと考えられる。

パワーアシスト車椅子は现阶段ではあまり普及してはいないが、実際のユーザの評価は高い。文献 [4] の南氏に会って話を聞いたところ、従来型の自操型車椅子では上れなかった坂道も楽に上れ、スロープも気にならなくなり、また芝生などの走行抵抗が大きい路面も楽に走れ行動範囲が大きく広がったとのことである。上半身の力が弱く、従来型の車椅子では自由に行動できなかった人も、パワーアシスト車椅子によって、スロープ等も楽に上れるようになり、長時間漕いでも疲れが少ないなど、メリットは大きい。また、電動車椅子を使うと障害の程度が重いように見られてしまうが、パワーアシスト車椅子では、従来型の車椅子と見た目が変わらないため、その点も評価が高い。知名度はまだ低いですが、将来的に大きな市場になることは確実なようである。

本研究では、ヤマハ発動機の JW-II に改良を加え、ウィリー機能を実現するものとする。

2.2 パワーアシスト車椅子 JW-II の基本構成

ヤマハ発動機の JW-II [5] は、左右の動力輪とバッテリー、充電器で構成されており、各ユーザがすでに使用している車椅子の車体に後付けされる。従来型の自操型車椅子の動力輪を交換しただけなので、外見上の変化はない。図 1 にアシスト機能のブロック図を示す。

各動力輪は、それぞれ入力要素から演算要素、出力要素までを独立に持っているが、直進性を確保するために両輪間でシリアル通信を行ない必要な情報を交換している。図 1 中の τ_m^* は両輪から均等に出力され、実

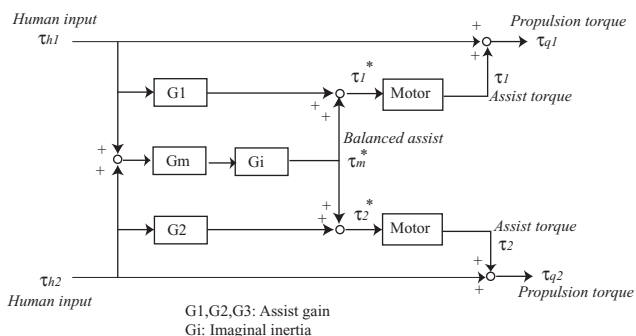


図 1: アシスト機能のブロック図

質的に車椅子の重心に作用するアシスト成分になっていて、直進性の確保につながっている。

JW-II の特徴的な機能として、模擬慣性機能がある。JW-II ではモータから車輪までは常時結合しており、負荷との間で機械的な解放手段を設けていない。通常の車椅子は、一度駆動力を加えると、次に駆動力を加えるまで慣性によって走行する。しかし、JW-II ではモータが常時結合されているため、駆動系の摩擦等が慣性的な走行を妨げ、操作の自然さを損なう。そこで、JW-II ではモータを制御することにより慣性走行に近いものを実現している。ハンドリムに人力が作用している時、当然モータはアシスト分のトルクを出力するが、人力解放後もこのトルクを維持し、かつ時間的に減衰するようにしている。図 2 に、実際に操作した際のモータ出力と速度を示す。減衰の時定数は、手動車椅子の行情距離と同等となるように設定されている。

この機能は、平地での移動よりも、登坂時での効果が大きい。つまり、人力解放後もトルクが維持されるため、重力により車椅子が後退することを阻止する役割を果たす。

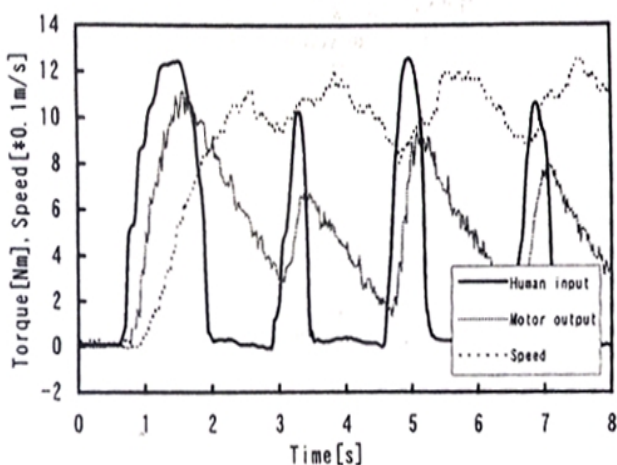


図 2: 人間の入力トルクに対するモータ出力 ([5] より引用)

2.3 ウィリー機能の必要性

車椅子で移動する際、進行方向に段差がある場合には前輪を持ち上げてウィリー走行を行い、前輪を段差の上に乗せなければならない。しかし、現在の JW-II では、通常の操作ではモータの出力を人間がコントロールすることが難しく、前輪を浮かせた際に勢い余って後方に転倒しかねない。転倒防止バーが取り付けられているが、見た目が良くなく、ウィリーするとバーが地面に着いてしまうためうまくウィリーができない。そこで、前輪を浮かした状態での姿勢制御が必要になってくる。

健常者が気付かない段差は至る所にあり、ウィリー動作ができないというのは車椅子利用者にとって移動範囲が極端に小さくなってしまふので致命的な欠点であるといえる。パワーアシスト技術によって広がるはずの行動範囲が、この欠点で狭まってしまふのは惜しいことである。本論文では、車椅子利用者の行動範囲を広げるために、パワーアシスト車椅子において、後方に転倒することなく安全にウィリーできる手法を提案する。

3 パワーアシスト車椅子におけるウィリー機能の実現手法

3.1 車椅子のモデル化

車椅子の動作を分析するために、車椅子のモデル化を行う。車椅子に人が乗っている状態での主な質点の位置と重心位置のイメージを図 3 に示す。

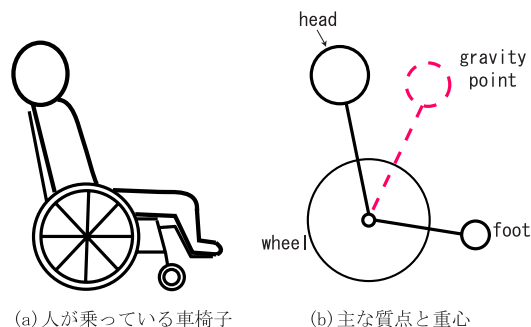


図 3: 人が乗っている車椅子と質点の位置

主な質点は頭と足にあり、車軸を中心に結ばれていると近似的に表すことができ、全体の重心位置は点線部分にあると考えられる。全体の重心位置にのみ着目すれば、図 4 に示すような倒立振り子と対応付けることができる。

3.2 実現手法の分類

パワーアシスト車椅子を用いてウィリー走行を実現する手法には、以下の 2 通りの考え方がある。

手法 1. 人間の調整能力を生かしてウィリーする

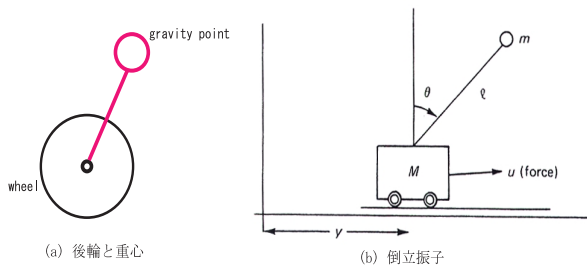


図 4: 重心位置と倒立振子の対応

手法 2. 人間の動きとは無関係にウィリーする

手法 1. および手法 2. をブロック図で表すと、図 5、図 6 のようになる。図 5、図 6 において

- Plant : 人間と車椅子
- τ_m : モータが出力するトルク
- τ_h : 人間が車椅子を漕ぐトルク
- τ_p : 人間が姿勢を変えることによって車椅子に加わるトルク
- θ : 車椅子の角度
- θ_w : ウィリーするための車椅子の角度
- i : モータへの電流指令値

を表す。

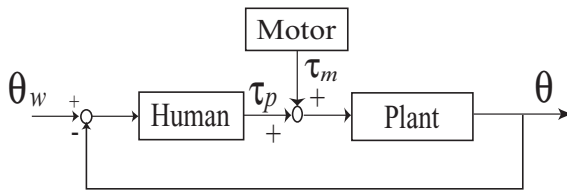


図 5: 人間の調整能力を生かしたウィリーのブロック図

手法 1 で、人間は車椅子の傾き θ を感じて重心を動かすことによって傾きを調整しようとする。モータからの出力と、人間の姿勢の変化によるトルクは協調してウィリー状態を保とうとする。

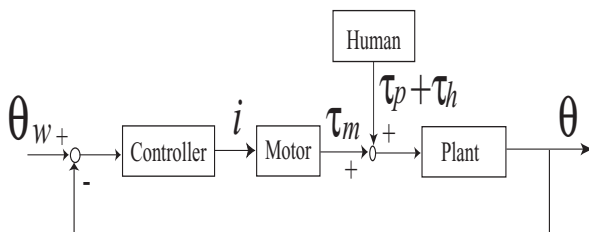


図 6: 人間の動きに無関係なウィリーのブロック図

一方、手法 2 では車椅子の角度をジャイロなどで測定してフィードバックし、制御器が電流指令をモータに与えることによってウィリーを実現する。このとき、

人間が姿勢を保つために行う重心移動は外乱とみなされる。

手法 2 の一例として、前節で述べた倒立振子モデルを用いて制御を行う方法も考えられる [6, 7]。倒立振子モデルを用いた制御では、重心位置が倒立するような制御を行い、安定なウィリー状態になってから前進して段差を越えることになる。モータの駆動力のみでウィリーを行う場合は、図 6 の τ_h はゼロとなる。

それぞれの利点と欠点を表 1 に示す。
表 1 実現手法の利点と欠点

	利点	欠点
手法 1.	操作に慣れれば上達する	失敗する危険性がある
手法 2.	確実にウィリーできる	機械に支配されている

手法 1 では、人間の感覚に頼ってウィリー動作をするので失敗する危険性もある。しかし、人間の能力が活かされるので、操作に慣れるにしたがって、思い通りのウィリーができるようになる。

手法 2 ではセンサからの情報をフィードバックしているため、確実にウィリー動作を実現させることはできる。しかし、人間の持つ平衡感覚などの調整機能を無視することになるので、機械に支配されている感じが強く、乗り心地が悪くなる可能性もある。

確実にウィリー動作ができるという点では手法 2 のほうが優れているように思えるが、福祉機器においては、機械に頼りすぎるとあまり歓迎されないので、受け入れられないと思われる。もちろん、ウィリー動作を自力でするには障害の程度が大きい人には自動的にウィリーできた方が良いのだが、本論文では、ある程度自力で行動できる人を対象に考えており、手法 1 を採用することとする。

3.3 ウィリー動作における人間のトルク入力の分析

手法 1 でウィリーを実現するために、パワーアシスト車椅子でウィリー動作を行ったときの人間のトルク入力の様子を分析する。

まず、従来型の車椅子で人間がどのようにウィリーするかについて考える。図 7 に従来型車椅子で人間がウィリー動作を行う様子を示す。

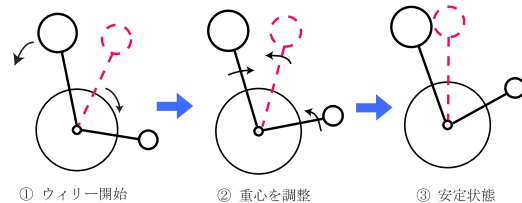


図 7: 従来型車椅子におけるウィリー動作

① では体を後ろに傾けながら車輪を前に漕いで前輪を浮かす。そのままの状態だと後方に転倒してしまうので、② で体(主に頭)を前に傾ける。この動作によって

後方へ重心が移動する速度を緩和することになる。③で重心が地面と垂直の位置に来て、バランスがとれる。倒立振り子モデルで考えると、振子がうまく倒立した状態になっている。

以上が従来型の車椅子で人間がウィリーを行う際の質点と重心のおおまかな動きになる。実際に段差を越えるときには、③の安定状態を保ちながら前進し、前輪が段差を越えたら着地して後輪を漕いで段差を乗り越えることになる。

このウィリー動作は力の加え方や重心の移動にコツがあるので、習得するにはかなりの練習が必要になる。車椅子に乗り始める人は最初にウィリー動作を習得しなければ段差を越えることができず外出することは不可能になるので、繰り返し練習をして習得することになる。車椅子利用者にとって一つの壁になっているとも言える。熟達した人になると、ウィリーした状態のまま、静止してられるし、前進・後進も自由ができるようになるが、相当な訓練を要するのは言うまでもない。

パワーアシスト車椅子において従来型と同じ動作ではウィリーができない原因は、①の前輪を浮かす動作においてモータの補助により駆動力が出すぎる。そのため②の後方への転倒を防止するための動作をしても、重心の後方への角速度が大きいため間に合わず転倒してしまう。また、従来型の車椅子では車輪を漕いだときしか駆動力を得られないのに比べ、JW-IIではハンドリムから手を離れた後もモータが回転し続けることが後方への転倒を助長していると考えられる。

そこで、JW-IIのトルクセンサからの出力をPCに取り込み、人間が車椅子にどのような力を加えているのかを分析する。

一般的にウィリーは停止した状態から行われるため、通常走行の漕ぎだしと、ウィリー走行の比較を行った。トルクセンサの信号を直接見ているため、トルクの値はV単位で表示されている。駆動力を加えていないときは0Vで、前進方向に駆動力を加えた際には正の電圧になり、後進方向に加えた際は負電圧になる。

通常走行の際の人間のトルク入力の様子を、普通に漕ぎ出した場合と、ゆっくり漕ぎ出した場合について図8に示す。

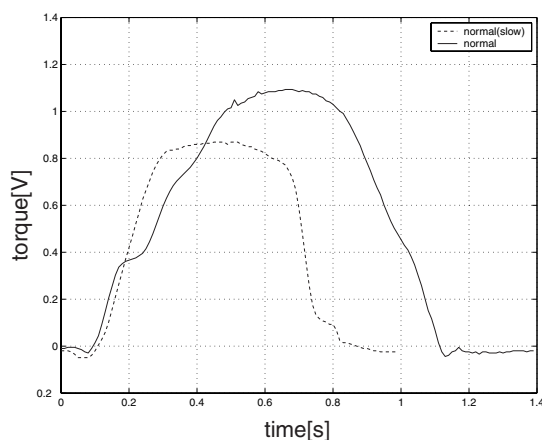


図 8: 通常走行の際の人間のトルク入力

ゆっくり漕いだ方が最大値も小さく、力が加わっている時間も短いことが分かる。漕ぎ出しの際のトルクの傾きは、およそ2.3[V/s]となった。

次に、ウィリーを行おうと試みて、後方へ転倒した場合の波形を図9に示す。複数回の実験データを示している。

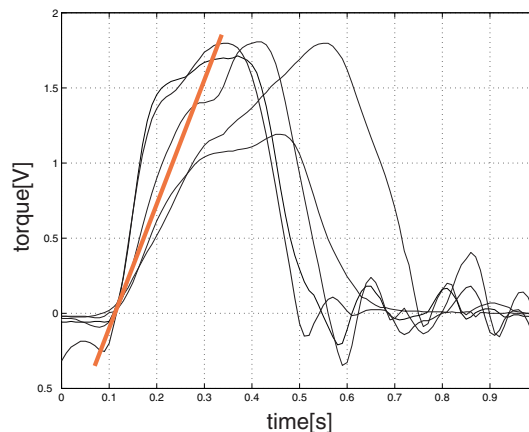


図 9: 後方へ転倒した際の人間のトルク入力

図中の太線は、立上りの傾きを示すが、この傾きは約8.4[V/s]となった。後転する際には、通常走行の4倍近く大きいことが分かる。予想通り、ウィリー動作を試みて後転する時には、急激に大きな力が加わっていることが分かる。

ウィリーするとき、前輪を浮かすために人間が傾きの大きな波形の力を出すのは仕方のないことだが、問題はモータがそれに追従して大きな力を出してしまうことである。そこで、本論文ではトルクセンサからの信号を調整して、モータの出力を抑えることにより安全なウィリーを実現する。

3.4 JW-II の特徴を生かしたウィリーの実現手法

JW-II を用いると、従来型車椅子とは違ったタイプのウィリーができると考え、JW-II の特徴を生かしたウィリーの実現手法を提案する。図10にパワーアシスト車椅子におけるウィリー動作のイメージを示す。

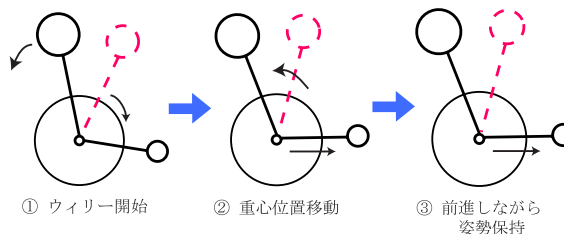


図 10: パワーアシスト車椅子におけるウィリー動作

①では、従来型と同様に体を後ろに傾け、前進方向に駆動力を与える。人間は前輪を浮かすために大きな

力を加えるが、モータは大きな力を出さないように制御する。②では体を後ろに傾けたまま、つまり頭と足の角度を保ったまま重心を倒立位置に近づける。こうすると、車椅子が大きく傾かないので搭乗者に与える恐怖感を少なくできる。図7に比べて前輪の傾きが小さいことが分かるだろう。③では重心が傾いたまま前進して姿勢を保持している。パワーアシスト車椅子 JW-II では、従来型の車椅子と異なり、人間が一旦ハンドリムに入力を加えると、模擬慣性機能によりしばらくモータが駆動し続ける。そこで、多少重心が倒立位置からずれていても前進させればしばらくはウィリー状態を保てる。

この手法は、JW-II の模擬慣性機能を活かしたもので、従来の車椅子では為し得なかった全く新しい形のウィリー動作と言える。モータの駆動力があるため、従来よりも小さな力でウィリーをすることができ、また、車輪もそれほど上げずに済むため乗っている人の恐怖心も抑えることができる。そのため従来型の車椅子に比べ、短い練習時間でウィリーを習得することができると考えられる。

この手法をブロック図で表すと図11 のようになる。

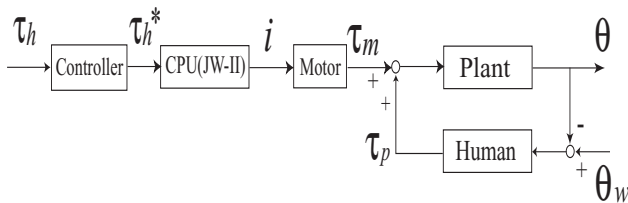


図 11: 人間の調整能力を生かした実現手法のブロック図

人間は後輪を漕いで前輪を浮かすために大きな力を出す。JW-II の CPU には制御された信号が与えられ、モータのトルク τ_m は抑えられる。従って、 τ_m は車椅子の姿勢には大きな影響を与えず、前進方向への駆動力となり、人間の重心移動によって車椅子の傾きを調整しながら段差までウィリー状態を保って前進することができる。

4 今後の予定

今後の予定としては、前節で述べた実現手法に対して下記に示す実験機で実験を行い、その有効性を確かめる。左右の前輪の挙動に関するデータおよび、複数の被験者にウィリーを行ってもらいその成功率の統計データを研究会で報告する予定である。

実験機の構成

図12に、本実験で使用するパワーアシスト車椅子を、図13にその実験機の構成を示す。

図13中のトルクセンサは、JW-IIのものでハンドリムに加わる人間の駆動力 τ_h をばねの歪みで測定し電圧信号を出力している。DSP ボードは TexasInstruments 社製の TMS320C5x を用い、プログラムはアセンブラ言語で記述し、RS232 ケーブルを通して PC から DSP ボードにロードする。トルクセンサからの電圧信号を



図 12: JW II を装着した車椅子

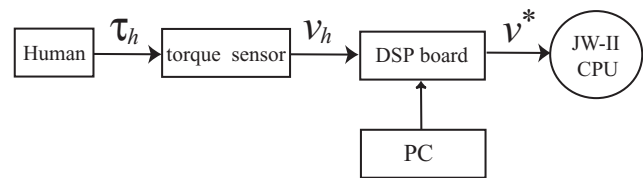


図 13: 実験機の構成

DSP に取り込み、以下の2通りの調整を行って JW-II の CPU に入力する。

調整方法 1. トルクセンサからの信号 v_h に対し最大値 v_{max} を設定し、それ以上の信号が入ってきたら v_{max} を出力する

$$v_h^* = \begin{cases} v_{max} & \text{if } v_h > v_{max} \\ v_h & \text{otherwise} \end{cases}$$

調整方法 2. トルクセンサからの信号 v_h がある閾値 v_{th} を越えたら v_{step} のステップ波を出力する

$$v_h^* = \begin{cases} v_{step} & (t_0 < t < t_1) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

t_0 は、 v_h が最初に v_{th} を越えた時間、 t_1 は、 v_{step} のステップ波出力が終わる時間である。

調整方法 1 の最大値 v_{max} 及び、調整方法 2 の閾値 v_{th} およびステップ波の振幅は v_{step} 実験を繰り返し、最適なものを選ぶ。図14に調整方法1を施した信号を示す。

点線が人間が加えた入力でトルクセンサから DSP に入る信号で、実線は DSP から出力され JW-II の CPU に入る信号である。この手法は、急激に大きな力をモータ

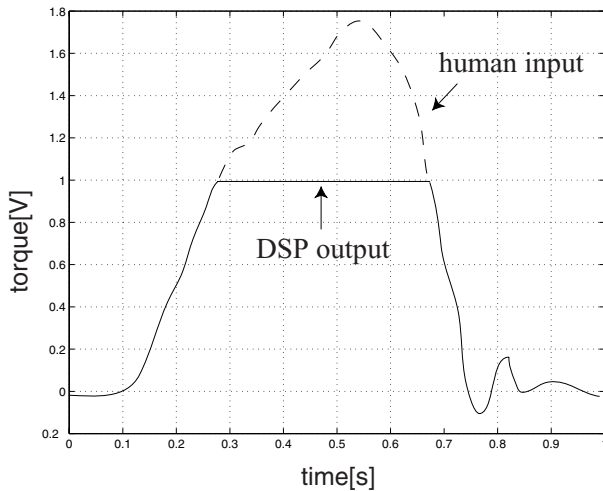


図 14: 調整方法 1 を施した信号

タが出力しないようにするためのものであり、モータが大きな力を出力しないので、人間は思い切って大きな力を出ることができるようになる。

調整方法 2 では、振幅が小さなステップ波を短い時間出力することにより、モータに前進方向への推進力を出力させることが目的である。モータのスイッチを ON にするという感覚である。

5 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ウィリー機能の実現手法を提案した。

倒立振り子モデルに基づくウィリー実現の研究例もあるが、本研究では、姿勢変化など、人間自身もつ調整能力をできるだけ活かした手法を検討した。これは、福祉機器は人間と接して働くので機械と人間が協調することが望ましいとの考えに基づくものである。

また、JW-II の模擬慣性機能を活用すると従来型の車椅子とは違う全く新しい形のウィリー動作が可能となる。車椅子の傾きを小さくすることにより、搭乗者の恐怖感を抑え、ウィリー動作の習得も容易になると考えられる。

人間とパワーアシスト車椅子が協調して安全なウィリー動作を行うために、人間がウィリーする際に駆動輪に加えるトルクを測定することにより解析した。その結果、通常走行と比べてウィリーをする際には人間は大きなトルクを急激に加えるが、トルクの傾きと最大値が大きすぎると後方へ転倒してしまうという知見が得られた。この結果をふまえて、トルクセンサからの信号を調整する方法を検討した。

倒立振り子モデル等を用いたアプローチにも利点は多く、本手法との比較検討を行うことが今後の課題である。

本研究を進めるにあたり多くの御助言、御協力を頂いたヤマハ発動機の戸倉賢治氏、JW-II のユーザである南浩一氏、東京都福祉機器総合センターの橋詰努氏

に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 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.
- [2] <http://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/index.html>
- [3] http://www.ulrich-alber.com/proemo_em_e.htm
- [4] 南浩一: “Wheelchair Power assist in Sydney Paralympics”, リハビリテーション・エンジニアリング, Vol. 16, No. 1, pp. 23-24, 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 [No.97-34] シンポジウム講演論文集, pp. 204-208, 1997.
- [6] Y. Takahashi, S. Machida and S. Ogawa: “Analysis of front wheel raising and inverse pendulum control of power assist wheel chair robot”, in *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON2000)*, pp. 96-101, 2000.
- [7] Y. Takahashi, T. Takagaki, J. Kishi, and Y. Ishii: “Back and Forward Moving Scheme of Front Wheel Raising for Inverse Pendulum Control Wheel Chair Robot”, in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2001)*, pp. 3189-3194, 2001.