

- 卒業論文 -

# パワーアシスト車椅子における ウィリー機能の実現

平成14年2月13日提出

指導教官：堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

00513 佐藤 仁彦

## 内容梗概

本研究では、高齢者・障害者への工学的支援の一環として、歩行障害者の移動の支援をするパワーアシスト車椅子に注目し、その欠点であるウィリー動作を実現する手法を提案する。

本論文では、まずパワーアシスト車椅子の現状について述べる。つまり、ユーザからの評価、市場の大きさなどに言及し、現在のパワーアシスト車椅子を取り巻く状況を述べる。日本で発売されているヤマハ発動機社製の JW-II の基本構成に触れ、利点と欠点を述べる。

つぎに、現在のパワーアシスト車椅子の欠点であるウィリー動作を実現する手法について大きく2つに分類する。具体的には、角度情報に基づくウィリー制御の実現手法と人間の調整能力を活かしたウィリー動作の実現手法である。前者の手法と後者の手法における、基本的な考え方およびブロック図について述べ、その利点と欠点について述べる。

角度情報に基づくウィリー制御の実現手法の一つとして倒立振子モデルを用いた実現手法を取り上げ、車椅子のモデル化を行いPID制御器を用いた角度制御のシミュレーション結果を示す。また、重心位置の角速度から最小次元オブザーバを用いて角度を推定して角度制御に用いた際のシミュレーション結果を示す。

最後に人間の調整能力を活かしたウィリー機能の実現手法を述べる。ウィリーする際の人間のトルク入力の様子を実験データで示し、パワーアシスト車椅子でウィリーできない原因について考察する。そして、従来型の車椅子とは全く異なるウィリー動作を可能とするパワーアシスト車椅子の模擬慣性機能を用いた実現手法を提案し、実験により有効性を確認する。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
第2章	パワーアシスト車椅子の現状	4
2.1	パワーアシスト車椅子の現状について	4
2.2	パワーアシスト車椅子 JW-II の基本構成	4
2.3	ウィリー機能の必要性	7
第3章	ウィリー機能の実現手法の分類	8
3.1	角度情報に基づくウィリー制御	8
3.2	人間の調整能力を活かした実現手法	9
3.3	両手法の比較	10
第4章	倒立振子モデルを用いた実現手法	11
4.1	車椅子のモデル化	11
4.2	角度情報に基づく倒立振子モデルを用いたシミュレーション	12
4.3	最小次元オブザーバによる角度推定	13
4.4	角度推定値に基づく倒立振子モデルを用いたシミュレーション	15
第5章	人間の調整能力を生かしたウィリー機能の実現手法	17
5.1	ウィリー動作における人間のトルク入力の解析	17
5.2	ウィリー走行時のデータの分析	19
5.3	模擬慣性機能を生かしたウィリーの実現手法	20
5.4	実験機の構成	21
5.5	電圧オフセット回路の製作	23
5.6	実験結果と考察	24
5.6.1	実験環境	24
5.6.2	実験結果	25
第6章	結論	26
	参考文献	27
	発表文献	28
	謝辞	29

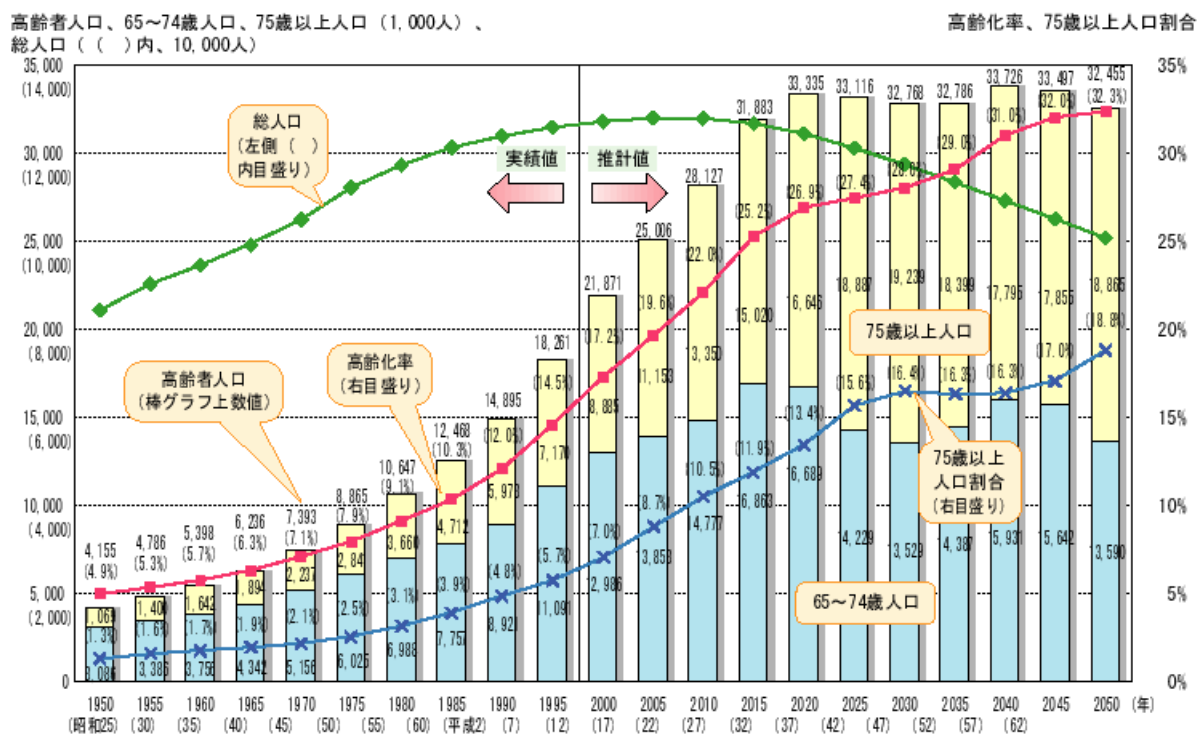
# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

現代日本は、将来に渡って進展している高齢化問題という深刻な問題を抱えている [1]。図 1.1 に示すように、1970 年には 65 歳以上人口は 739 万人、総人口に占める割合（高齢化率）は 7.1% であったのが、2000 年には 65 歳以上人口は 2,187 万人、高齢化率は 17.2%（概ね人口の 6 人に 1 人）となり、この 30 年間に急速に高齢化が進行している。一方で少子化も進んでおり、すでに 65 歳以上人口は、0～14 歳の年少人口（2000 年には 1,860 万人）を上回っている。

今後更に高齢者数と高齢化率は増加し、2020 年には 65 歳以上人口は 3,334 万人、高齢化率は 26.9% になると予想され、今後 20 年間の高齢者数の増加は現在の東京都人口にも匹敵する規模である。

高齢化とあいまって少子化が進み、高齢者の介護が十分にいきわたらなくなることが予想される。



資料：1995年までは総務庁統計局「国勢調査」、2000年以降は国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口(平成9年1月推計)」  
 (注) 1955年の沖縄は70歳以上人口23,328人を前後の年次の70歳以上人口に占める75歳以上人口の割合を基に70～74歳人口と75歳以上人口に按分した。

図 1.1: 高齢化の推移と将来推計

また、現在、日本には約 400 万人の身体障害者が生活しており、そのうち 250 万人以上の方が肢体不自由者だといわれている。その数も年々上昇している。(図 1.2) これは、高齢者数の増加と結び付いていると考えられる。

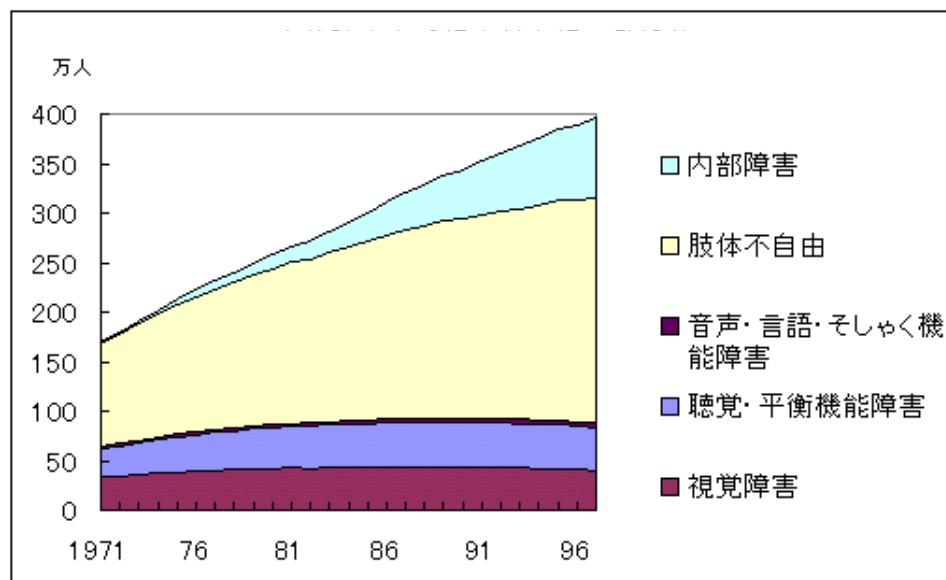


図 1.2: 障害者数の推移

このような社会状況を迎え高齢者と障害者を取り巻く環境が厳しくなる中で、我々は、計測・制御の技術を用いて高齢者、あるいは障害者を工学的立場から支援することを目的とした「福祉制御工学」という分野を提唱しており、本研究もこれに基づいている。高齢者や障害者を支援する機器は、家庭の中に入り、より人間に近いところで働くので、安全性や使いやすさ、安価であることなどが求められる。そのためには、既存技術を生かし、適切に組み合わせることが必要であると考えられる。少子化と高齢化が進んでいる現状を考えると、医療・介護における人手不足はさらに深刻なものとなり、高齢者・障害者に対する工学的支援の必要性は一層高まっていくと考えられる。

高齢者や障害者の自由な移動を助けるために、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。そこで、本研究では、高齢者や障害者の自立した行動への工学的支援の一環として、パワーアシスト車椅子を対象とした研究を行う。

## 1.2 研究の目的

本論文では、歩行障害者の自立した行動に対する工学的支援、とくに自操型パワーアシスト車椅子におけるウィリー動作の実現を目的として研究を行う。

歩行障害者の主な移動手段は車椅子であり、介護者に押してもらいものと、自分一人で移動できるものがある。自分一人で移動できるものには、手動式のものや電動式のものがある。介護者を必要とせず、自分で漕ぐタイプの手動式車椅子を自操型(自走型)車椅子と呼ぶ。表 1.1 に手動式と電動式の利点と欠点をまとめる。

電動式で主に利用されているものは、モータで車輪を駆動し、ジョイスティックで操作する。手先しか自由が利かないように見えるため障害の程度が重いように周囲に感じられること、重量が大きく持ち運びに適さないことなどが欠点として挙げられる。電動式の方が移動の際にかかる労力は少ないのだが、障害が重く見られること、筋力が低下することなどからユーザに避けられる傾向にある。手動式の利点は、自力で操作しているという実感が得られ、また、折り畳みができ軽量であることから持ち運びに適しているということである。自動車で移動する際には車椅子を載せなければならないので、一人でも積み込むことが出来る手動式の方が行動範囲は広がる。

表 1.1: 車椅子の分類

	利点	欠点
手動式	軽量である 操作が容易	駆動力が小さい
電動式	労力が小さくて済む	重量が大きい 障害が重く見られる

しかし、手動式は、パワーの小さい上肢による駆動になるため、坂道を上れないなど、現実的には行動範囲は限定されたものになる。さらに、手動車椅子を漕ぐことによる上肢への負担も無視できない。そこで開発されたのが、電動自転車のパワーアシスト技術を応用した、モータにより駆動力を補助する自操型パワーアシスト車椅子である。

このパワーアシスト車椅子により、従来の人力のみでの駆動に比べて駆動力が格段に大きくなり、坂道やスロープが楽に上れるようになり、手動式車椅子の行動範囲は大きく広がった。また、長時間の移動の際にも上肢の負担が軽減されるようになった。しかし、駆動力が人力単独に比べ格段に大きいため、上り坂で強く漕いだときや、前輪に小枝などを踏んでいて気付かない場合などに強引に前進しようとしたときなどに、前輪が持ち上がり、後方へ転倒してしまう危険性がでてきた。これを防止するために、現在は転倒防止バーを取り付けている。しかし、このバーがあるため、段差越えの際に必要なウィリー動作が出来なくなっている。

そこで、本研究では人間の入力した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パワーアシスト車椅子でウィリー動作を実現することを目的とする。パワーアシスト車椅子は駆動力を補助して移動を楽にしようとするものだから、使用する人は普段から外出するときにも車椅子を用いているような人であると考えられる。従って、本研究でもある程度自力で車椅子を操作することが出来る人を対象として考えた。

## 第2章 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 [2]。

- JW-II ヤマハ発動機 1996 年発売 [3]
- E-motion アルバー社 (独) 2000 年発売 [4]

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 台程の販売実績しかなく、あまり普及していないのが現状である。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現段階ではあまり普及してはいないとはいえ、ユーザの評価は高い。文献 [5] 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、芝生などの走行抵抗が大きい路面も楽に走れるようになり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出来なかった人も、パワーアシスト車椅子によって、スロープ等も気にせず移動できるようになり、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、電動車椅子だ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。知名度はまだまだ低い、将来的に大きな市場になることは確実なようである。

### 2.2 パワーアシスト車椅子 JW-II の基本構成



図 2.1: JW II を装着した車椅子

ヤマハ発動機の JW-II [6] は、左右の動力輪とバッテリー、充電器で構成されており、各ユーザの車体に後付けすることにより、使用する。図 2.1 に車椅子に JW-II を装着した状態を示す。

従来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。

制御システム全体のブロック図は図 2.2 のようになる。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。これは、もともと自転車に対するパワーアシストシステムを車椅子にそのまま応用しようとしたため、各輪が独立した存在になっていると考えられる。

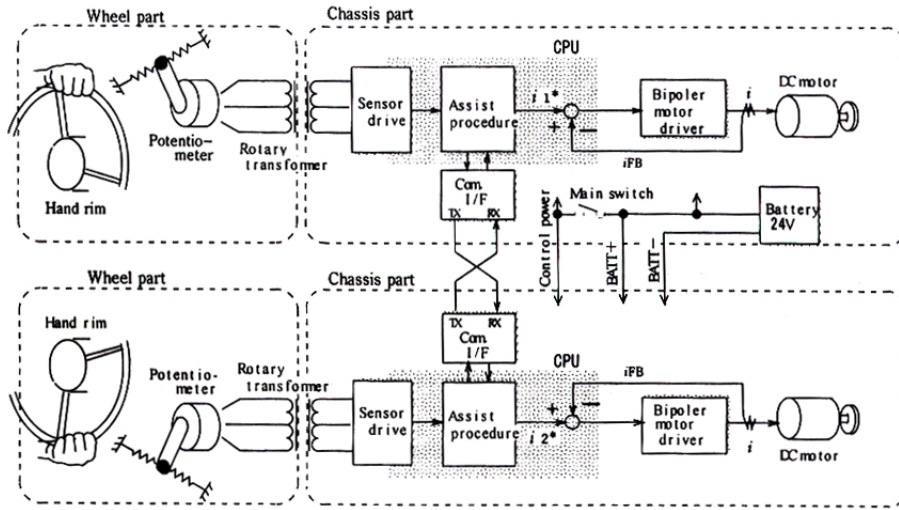


図 2.2: 制御システムの概略図 ([6] より引用)

演算要素には、16bit CPU を搭載し、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 2.3 にアシスト機能のブロック図を示す。左右輪のアシスト量  $\tau_1^*$ ,  $\tau_2^*$  は、それぞれ次式により

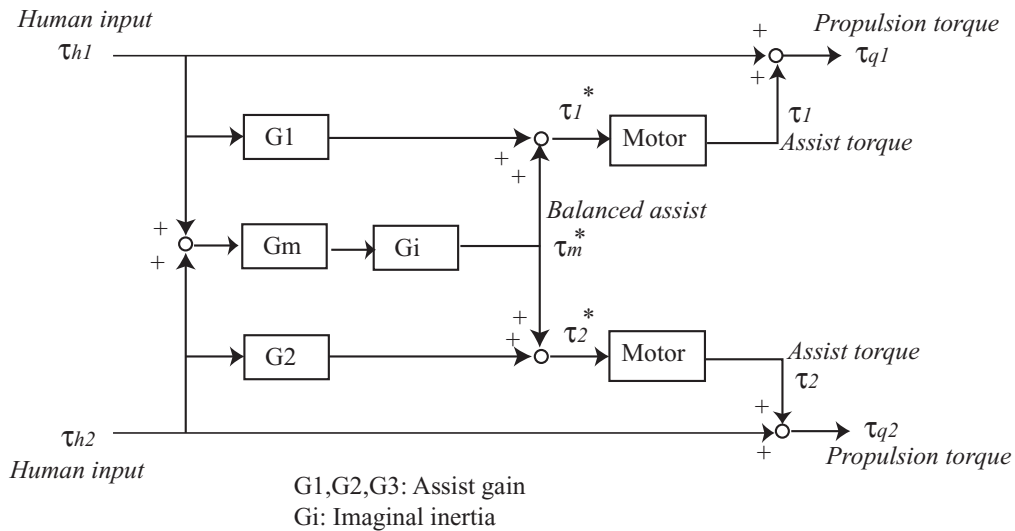


図 2.3: アシスト機能のブロック図

与えられる。

$$\tau_1^* = \tau_m^* + \tau_{11}^*$$

$$\tau_2^* = \tau_m^* + \tau_{22}^*$$

$$\tau_m^* = G(f_1 + f_2)$$

但し、

$\tau_m^*$  : 両輪の入力に依存するアシスト成分



$\tau_{11}^*, \tau_{22}^*$  : 自入力のみ依存するアシスト成分

$f_1, f_2$  : 各輪への入力 (人力)

$\tau_m^*$  は両輪から均等に出力されている。これが、実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。自輪成分と重心成分を変更することにより、直進性と旋回性を任意に設定することが出来る。つまり、ユーザに合わせて調節できるのである。

アシスト比は、次式で定義されている。

$$\varepsilon = \frac{\int P_m(t) dt}{\int P_h(t) dt} \quad (2.1)$$

但し、 $P_m(t)$  : モータによる推進動力 [W]

$P_h(t)$  : 人力による推進動力 [W]

同一の行程を走行した場合の走行エネルギー比較から、マクロにアシストの効果を評価している。一般的な走行では 1.5 ~ 3 の値となる。これは、従来型の車椅子でかろうじて平地のみの移動が可能だったユーザが自力で 4 度の坂を上れる程度、また、上肢の健全なユーザがほとんどの路面を踏破できる程度のアシスト効果である。実用上十分なアシストが得られていると言える。

モータは小型 DC モータを用い、バイポーラドライバで駆動している。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法手段を設けていない。自操車椅子は、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、「模擬慣性機能」なるものを装備している。これは、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する。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 2.4 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、手動車椅子の惰行距離と同等となるように設定されている。

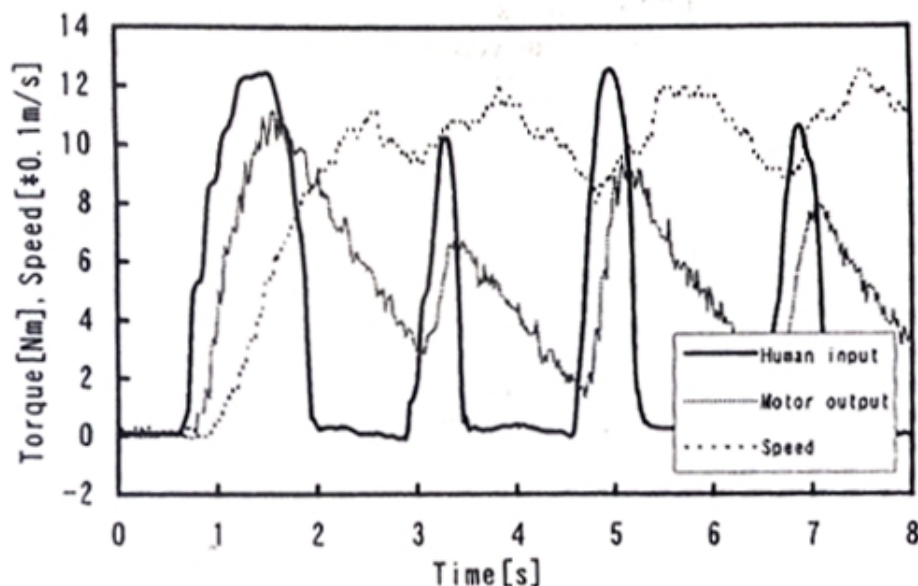


図 2.4: 入力に対するモータ出力 ([6] より引用)

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。

## 2.3 ウィリー機能の必要性

文献 [5] の南氏の意見によると、ヤマハ発動機のパワーアシスト車椅子 JW-II は、かなり使いやすく、改良すべき点は少ない。以前は重くて持ち運びに向いてないとの意見もあったのだが、バッテリーが軽量化されたことにより日常で使う範囲では支障がない程度になっている。そのような中で、敢えて改善点を挙げるとすれば、ウィリー動作ができるようにしてほしいということだった。

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、前輪を段差の上に載せなければならない。しかし、現在の JW-II では、通常の操作ではパワーを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。

また、前輪に小枝などがはさまっているのに気付かず、強引に力を加えてしまったときも後方に転倒する危険性がある。そのため、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出来ない。

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のである。本論文では、この制御をウィリー機能と呼ぶことにする。

## 第3章 ウィリー機能の実現手法の分類

### 3.1 角度情報に基づくウィリー制御

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の1つに、角度情報に基づくウィリー制御がある。この手法のブロック図を図3.1に示す。

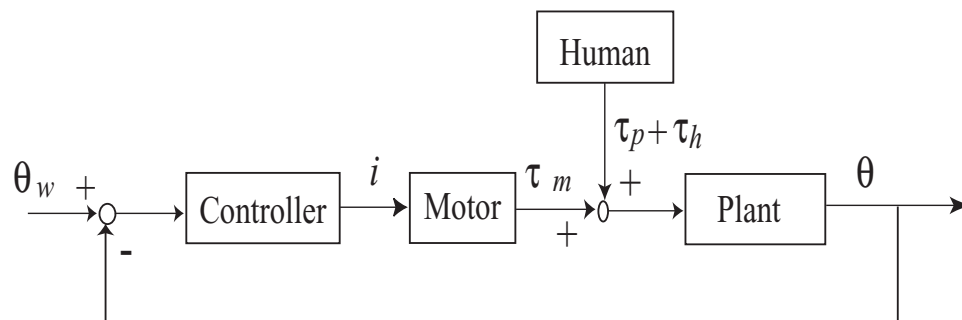


図 3.1: 人間の動きに無関係なウィリーのブロック図

図 3.1 において

- Plant : 人間と車椅子
- $\tau_m$  : モータが出力するトルク
- $\tau_h$  : 人間が車椅子を漕ぐトルク
- $\tau_p$  : 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
- $\theta$  : 車椅子の角度
- $\theta_w$  : 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。

この手法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。モータの駆動力のみでウィリーを行う場合は、図3.1の $\tau_h$ はゼロとなる。

一例として、高橋らが行った倒立振り子制御を用いた研究がある [7, 8, 9, 10]。図3.2にブロック図を示す。図中の $\phi$ は車椅子の傾きを表す。ジャイロセンサで車椅子の傾きを測定し、指令値を与え

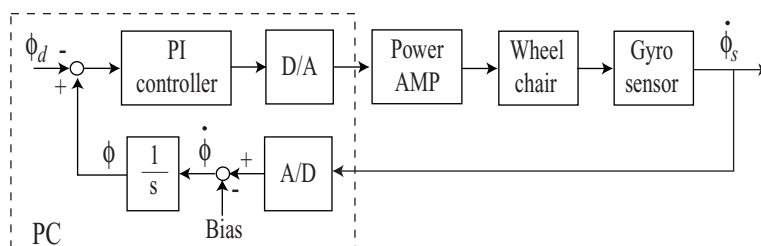


図 3.2: 高橋らの倒立振り子制御のブロック図

PI 制御器で制御を行っている。

図 3.3 に実験データを示す。約 3 秒後から  $\phi$  が一定となって、前輪が上がった状態で姿勢が保た

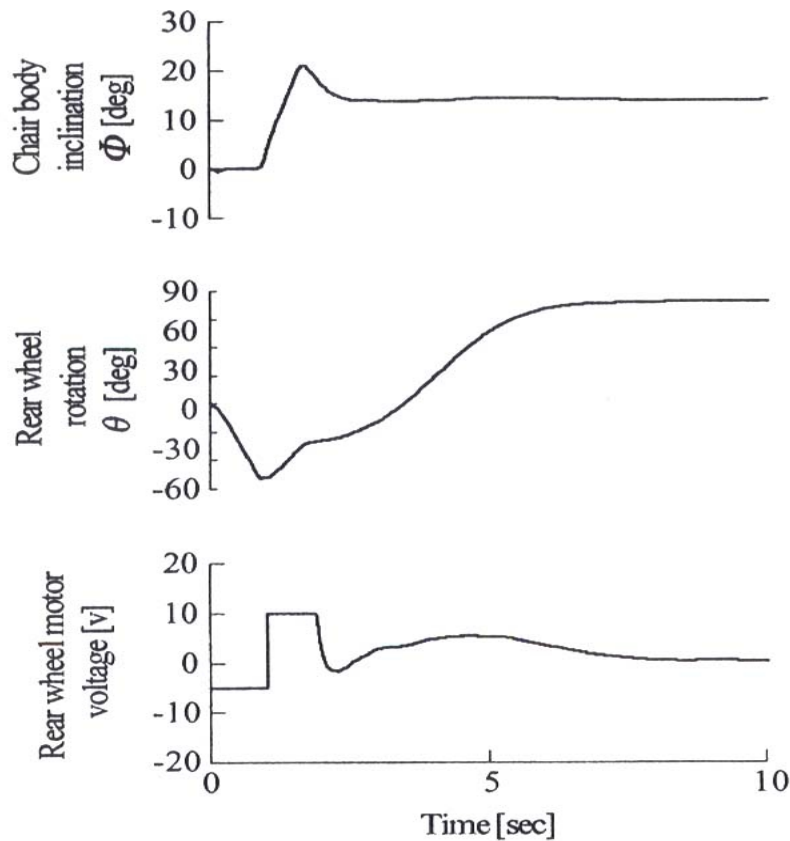


図 3.3: 高橋らの倒立振り子制御の実験データ

れていることが分かる。

### 3.2 人間の調整能力を活かした実現手法

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もう 1 つの手法としては、人間の調整能力を活かした手法が考えられる。ブロック図で表すと、図 3.4 のようになる。

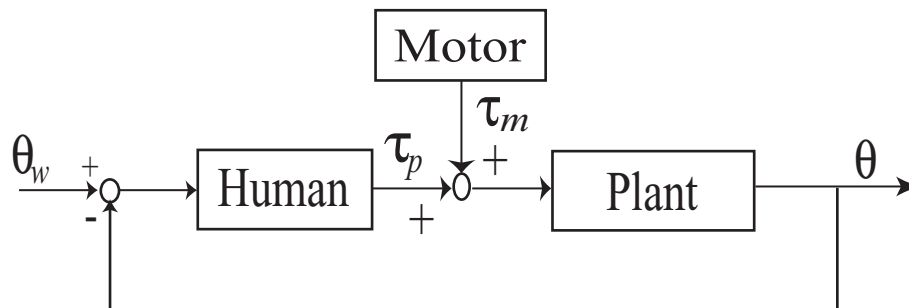


図 3.4: 人間の調整能力を生かしたウィリーのブロック図

人間は車椅子の傾き  $\theta$  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。

### 3.3 両手法の比較

以上のように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、次に示す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

手法 2. 角度情報に基づいて機械主導でウィリーする

それぞれの利点と欠点を表 1 に示す。

表 3.1: 実現手法による利点・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が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が、福祉機器においては、機械に頼りすぎることはあまり歓迎されないという点で問題がある。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、ある程度自力で行動できる人に関しては手法 1 の方が望ましい。

本論文では、上述した2つの手法に対して実現手法を検討する。

# 第4章 倒立振り子モデルを用いた実現手法

## 4.1 車椅子のモデル化

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 4.1 に示す。

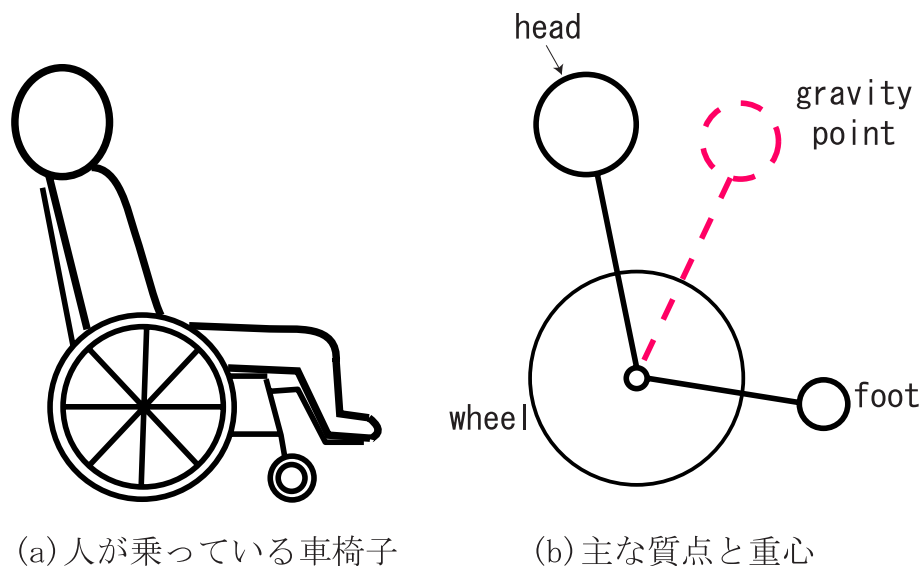


図 4.1: 人が乗っている車椅子と質点の位置

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 4.2 に示すような倒立振り子と対応付けることができる。

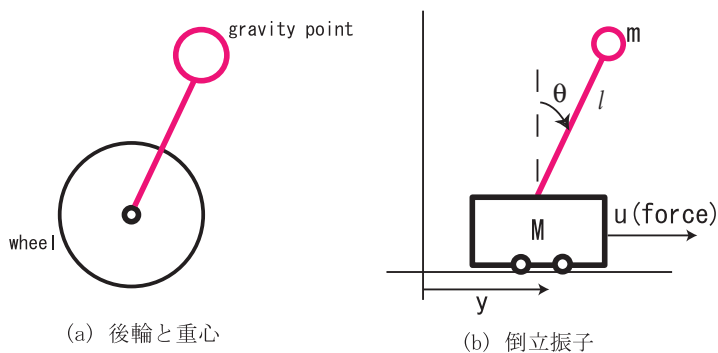


図 4.2: 重心位置と倒立振り子の対応

## 4.2 角度情報に基づく倒立振り子モデルを用いたシミュレーション

倒立振り子モデルを用いて、車椅子のウィリー動作のシミュレーションを行う。図 4.2 において、倒立振り子の台車部分の車輪が車椅子の後輪と対応し、振り子の先端が乗っている人間と椅子を合わせた全体の重心位置に対応している。車椅子がウィリーした状態と振り子が倒立している状態が対応し、車椅子では、後輪を漕ぐことにより前進方向の力  $u$  が得られる。

この倒立振り子の状態方程式は、非線形のまま作り、 $\theta$  を出力として、

$$\dot{x} = Ax + B \quad (4.1)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x \quad (4.2)$$

$$x^T = \begin{bmatrix} y & \dot{y} & \theta & \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{(M/m)+\sin^2\theta} \left[ \frac{u}{m} + \dot{\theta}^2 l \sin\theta - g \sin\theta \cos\theta \right] \\ 0 \\ \frac{1}{l(M/m)+\sin^2\theta} \left[ -\frac{u}{m} \cos\theta - \dot{\theta}^2 l \cos\theta \sin\theta + (1 + \frac{M}{m})g \sin\theta \right] \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

となる。

車椅子がウィリーするまでの様子を調べるために、角度  $\theta$  を制御することによって倒立振り子を立たせるシミュレーションを行った。

状態方程式より、入力  $u$  から角度  $\theta$  までの伝達関数は

$$\frac{\theta}{u} = \frac{K}{s^2 - a^2} \equiv P(s) \quad (4.7)$$

$$\text{但し、} K = -\frac{1}{Ml}, a = \sqrt{\frac{(M+m)g}{Ml}}$$

となる。図 4.3 のように PID 制御器によって制御を行った。ここで、角度の指令値は  $\theta^*=0$ (倒立状

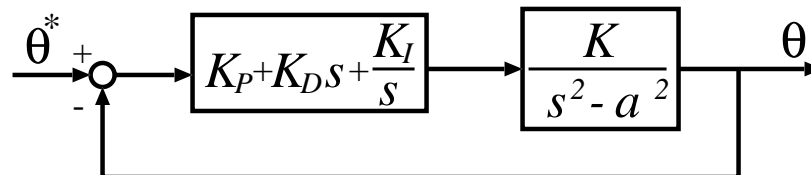


図 4.3: 角度制御のブロック図

態) とし、状態変数の初期値は

$$\begin{aligned} x^T &= \begin{bmatrix} y & \dot{y} & \theta & \dot{\theta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.8)$$

とした。

### 4.3 最小次元オブザーバによる角度推定

また、各定数は次のように設定した。

$$M = 10[kg]$$

$$m = 50[kg]$$

$$l = 0.5[m]$$

この値は、厳密に測定したわけではなく、シミュレーションのためにおおよその値を設定した。車椅子のモデル化ということで、 $m$  は  $M$  に対して非常に大きくなると考えられる。

シミュレーション結果を図 4.4 に示す。

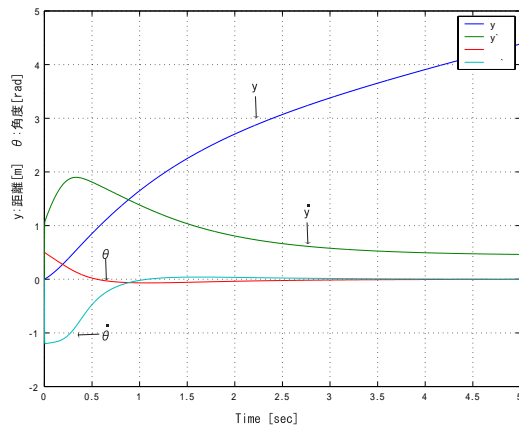


図 4.4: 角度制御のシミュレーション結果

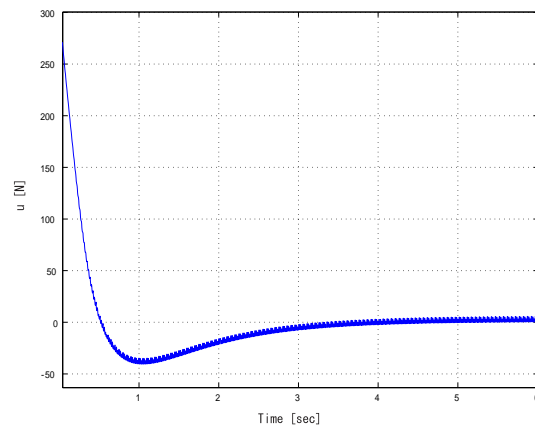


図 4.5: 角度制御中の入力  $u$  の様子

このシミュレーションでは、安定した倒立状態に至るまで 3.5 秒程度かかり、それまでに 3m 強台車が移動していることがわかる。

また、入力  $u$  の様子を図 4.5 に示す。これより、振子を倒立させるために、シミュレーション開始直後に約 260N という大きな力が必要であることがわかる。

### 4.3 最小次元オブザーバによる角度推定

4.2 節では、重心の倒立位置からのずれをゼロにすることを目標に制御を行ったが、実際の車椅子では重心の位置を測定できない。

しかし乗っている人間が姿勢を変えないと仮定すれば、車椅子の角速度と重心位置の角速度は一致していると考えうるので、車椅子の角速度をジャイロセンサなどで測定すれば重心位置の角速度は測定することができる。

そこで、この節では角速度を測定出来るものとし、その値から最小次元オブザーバを用いて角度  $\theta$  を推定する。状態変数を角度と角速度に着目すれば、倒立振りモデルの状態方程式は、以下のようになる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (4.9)$$

$$\mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} \theta & \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{(M+m)g}{Ml} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{Ml} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$



### 4.3 最小次元オブザーバによる角度推定

最小次元オブザーバの構成として、Gopinath の方法を用いる [11]。  
オブザーバの方程式は、

$$\dot{\hat{\theta}} = \dot{\theta} + k(\ddot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}) \quad (4.14)$$

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

$$\dot{\hat{\theta}} = \frac{(M+m)g}{Ml}\hat{\theta} - \frac{1}{Ml}u \quad (4.15)$$

となる。(4.14) 式において、 $\ddot{\theta}$  がでてくるので、

$$\hat{\theta} = \xi + k\dot{\theta} \quad (4.16)$$

とにおいて、式 (4.14) に代入して  $\xi$  に関する状態方程式を書くと

$$\dot{\xi} + k\ddot{\theta} = \dot{\theta} + k(\ddot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}) \quad (4.17)$$

となるから、

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \dot{\theta} - k\dot{\hat{\theta}} \\ &= \dot{\theta} - k\left[\frac{(M+m)g}{Ml}\hat{\theta} - \frac{1}{Ml}u\right] \\ &= \left[1 - k^2\frac{(M+m)g}{Ml}\right]\dot{\theta} - k\frac{(M+m)g}{Ml}\xi + \frac{k}{Ml}u \end{aligned} \quad (4.18)$$

という方程式になる。

式 (4.16) と式 (4.18) より、 $\dot{\theta}$  を用いて  $\hat{\theta}$  を推定できることになる。

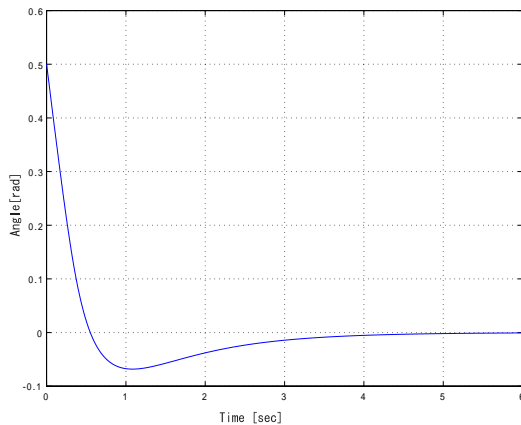


図 4.6: 角度制御中の角度の変化

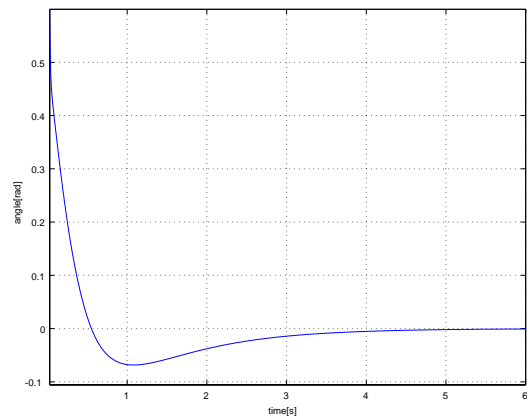


図 4.7: 角度制御中のオブザーバによる角度の推定

$k = 1$  として、4.2 節で行った角度制御のシュミレーション中で、オブザーバを用いて、角速度から角度を推定する。図 4.7 にその結果を示す。角度制御中の角度の変化を示した図 4.6 と比較すると、2つのグラフはほぼ完全に一致しており、推定がうまくいっていることがわかる。

また、振り子を倒立させていくと、徐々に入力  $u$  は減少し、倒立した状態では入力がゼロになるものと予想されるので、入力  $u$  の様子 (図 4.5) と角度制御中の角度の様子 (図 4.6) との比較を行う。振動が大きいため正確ではないが、 $\theta = 0$  となる時刻と  $u = 0$  となる時刻がほぼ一致し、波形も同じような形になっている。オブザーバによる推定に比べて振動が大きいため、信頼性は低いですが、入力  $u$  を観測することにより、 $\theta$  のおおまかな状態を知ることが可能であることが分かる。

### 4.4 角度推定値に基づく倒立振り子モデルを用いたシミュレーション

4.14 節では、角速度から最小次元オブザーバを用いて角度の推定を行い、推定が成功していることを示した。そこで、オブザーバからの角度推定値に基づいて角度制御のシミュレーションを行った。図 4.8 にオブザーバを用いた角度制御のブロック図を示す。制御器  $C(s)$  は 4.2 節で用いたのと同じ PID 制御器である。

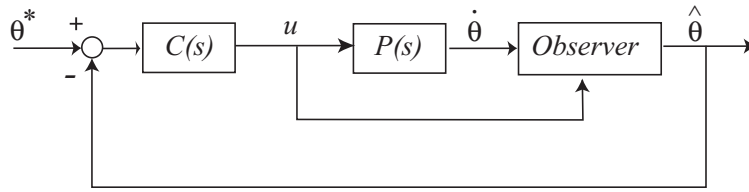


図 4.8: オブザーバを用いたブロック図

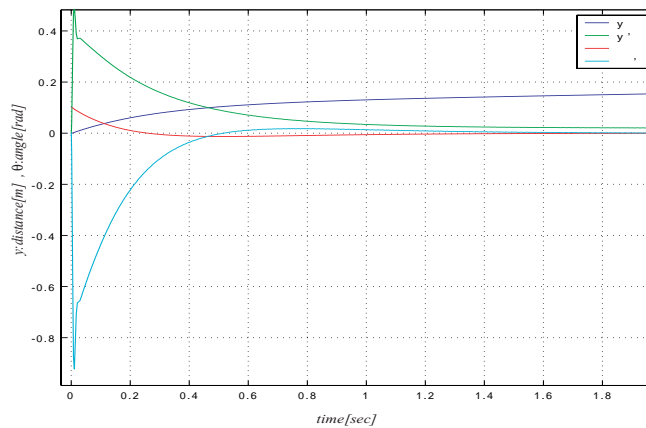


図 4.9:  $K = 1$ 、 $\theta_0 = 0.1$  のときのシミュレーション結果

$K = 1$ 、初期角度  $\theta_0 = 0.1(rad)$  としたときのシミュレーション結果を図 4.9 に示す。約 1.4s 程度で倒立に成功したことが確認できた。

つぎに、 $K = 1$ 、 $\theta_0 = 0.2(rad)$  としてシミュレーションを行った結果を図 4.10 に示す。

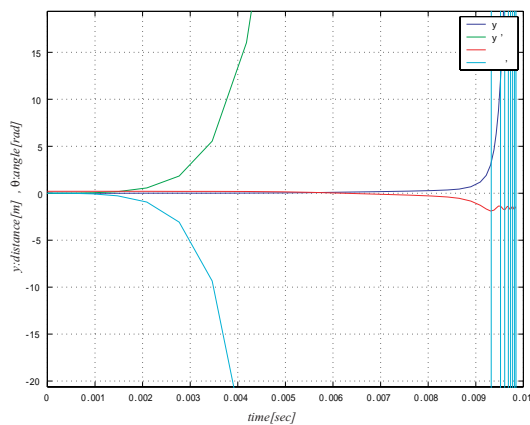


図 4.10:  $K = 1$ 、 $\theta_0 = 0.2$  のときのシミュレーション結果

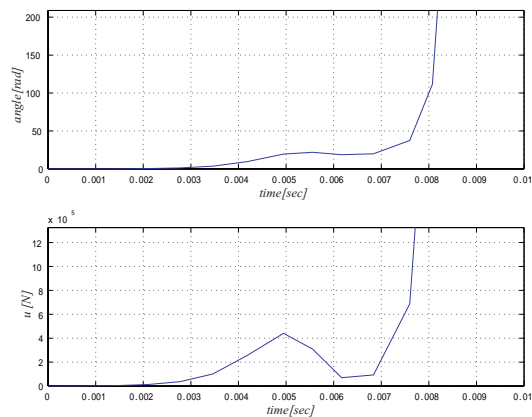


図 4.11:  $K = 1$ 、 $\theta_0 = 0.2$  のときの  $\hat{\theta}$ (上) と  $u$ (下) の様子

9ms あたりから暴走していることが分かる。このときの、角度推定値  $\hat{\theta}$  と入力  $u$  の様子を図 4.11 に示す。

3ms あたりから  $\hat{\theta}$  が実際の値から離れ始めている。図 4.10 を見ると、3ms あたりから角速度が発散しており、このため推定がうまくいかなくなったと考えられる。実際の車椅子ではウィリーを開始する前は地面に前輪がついており安定した状態にあるが、倒立振子モデルでは振子が傾いて非常に不安定な状態からシミュレーションを開始せねばならず、また振子部分が極端に重いためシミュレーション開始後すぐに角速度が発散してしまう傾向にある。そのため、角速度に基づく推定がうまくいかなくなってしまうのである。

シミュレーションを繰り返した結果、 $\theta_0 = 0.16(rad)$  までは倒立させることが可能であることが分かった。現実には比喩条件であるにも関わらず、限られた範囲ではあるがシミュレーション上ではこの手法が有効であることが確かめられた。車椅子のモデル化を厳密に行い、制御器やオブザーバに関してさらに検討を進めれば実用できるものと考えられる。

## 第5章 人間の調整能力を生かしたウィリー機能の実現手法

### 5.1 ウィリー動作における人間のトルク入力への解析

人間の調整能力を活かしたウィリー動作を実現するために、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 5.1 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。

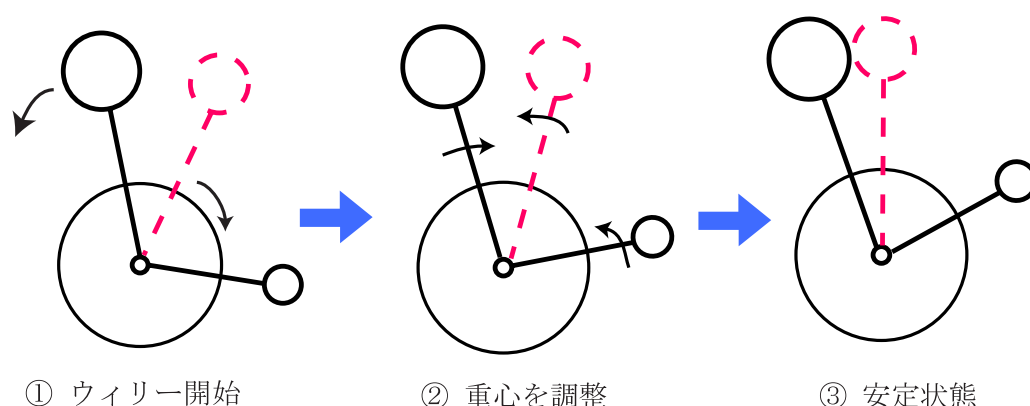


図 5.1: 従来型車椅子におけるウィリー動作

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いられるし前進・後進も自由にできるようになるが、相当な訓練を要するの言うまでもない。

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。

## 5.1 ウィリー動作における人間のトルク入力の解析

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。

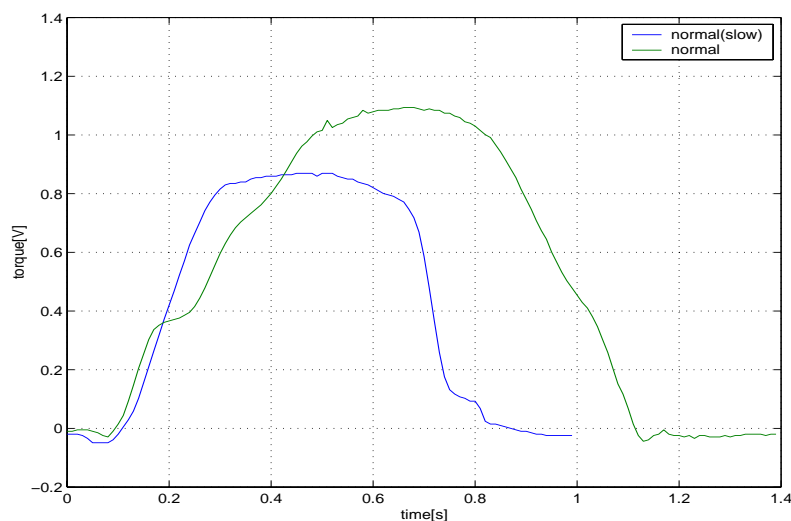


図 5.2: 通常走行の際の人間のトルク入力

通常走行の際の人間のトルク入力の様子を、普通に漕ぎだした場合と、ゆっくり漕ぎだした場合について図 5.2 に示す。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。

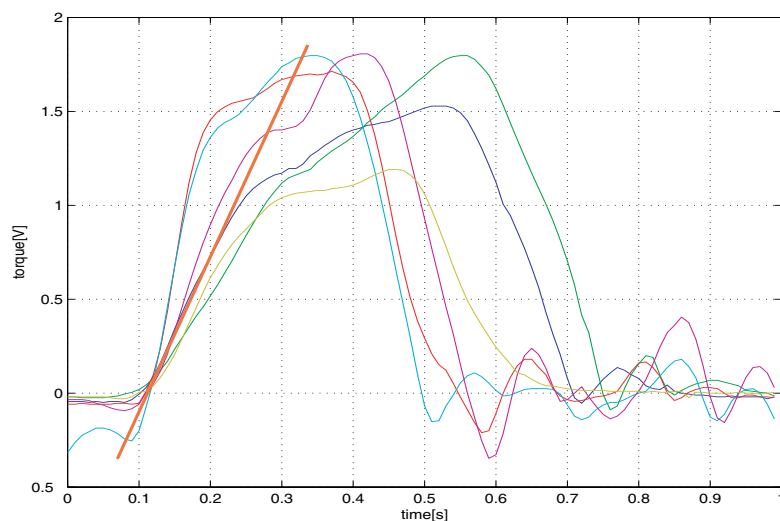


図 5.3: 後方へ転倒した際の人間のトルク入力

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 5.3 に示す。複数回の実験データを示している。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。

## 5.2 ウィリー走行時のデータの分析

JW-II でウィリーを試みても、必ず後転するわけではなく、前輪が浮いた状態でいくらか進むことが出来る場合もある。

ウィリー走行について以下の3通りに分類して評価した。

1. 成功 (前輪が浮いた状態で1m以上進んだ)
2. 失敗 (前輪は浮いたが、すぐに落下した)
3. 転倒 (勢いがありすぎて、転倒防止バーが地面についた)

転倒したときの波形は図 5.3 に示した通りである。ウィリーが成功したときの波形を図 5.4 に示す。図中の赤い太線は、立上りの傾きを示す。

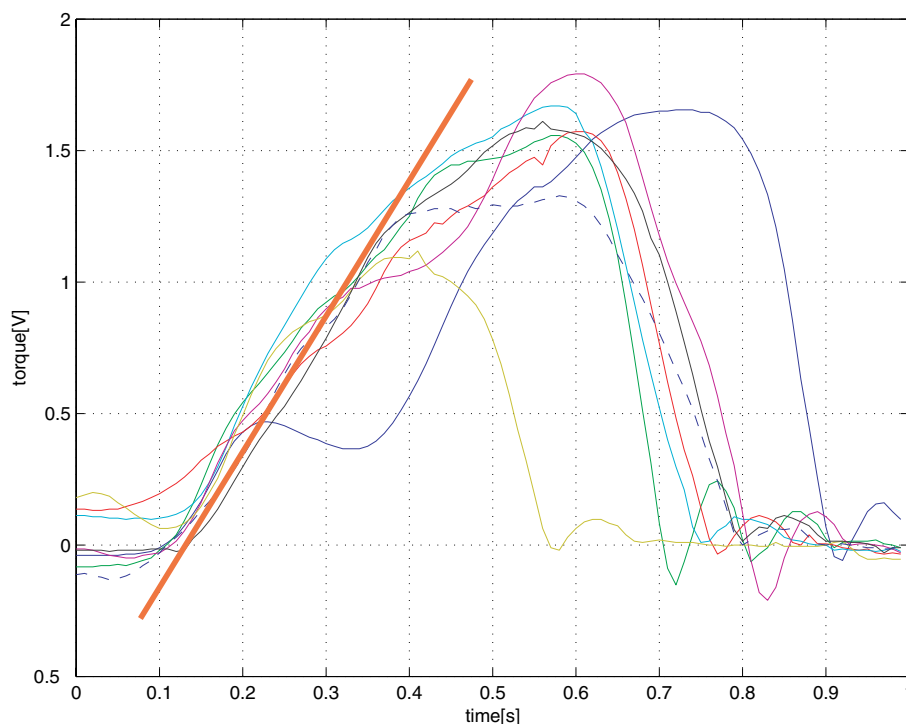


図 5.4: ウィリーが成功した際の人間のトルク入力

立上りの傾きは約  $5.1[V/s]$  で、通常走行のときと転倒したときの間程度の値になっている。

失敗したときの波形を図 5.5 に示す。

立上りの傾きは約  $4.8[V/s]$  で、ウィリーが成功したときとほぼ同じ値になっているが、力が加わっている時間が成功したときよりも短いことが分かる。

人間は常に成功したときと同じ波形の力を出そうと試みるのだが、重心位置の調整と同時に毎回同じ力を出すのは難しい。そのため、転倒するような波形の力を出してしまったり、逆に、浮いてもすぐ落ちてしまうような波形の力を出ることがある。

そこで、成功するときの波形を入力として JW-II の CPU に与えるという考え方も出来る。しかし、成功したときの波形の力を人間が出してモータがその波形に応じた力を出したときにウィリーが成功するので、JW-II が成功するときのトルクを出したとしても、人間が違う波形の力を加えてしまったら必ずしも成功するとは言えない。

人間が車椅子をウィリーさせようとするときに、急激に大きな力を出すことは必要なので仕方ないが、問題なのはモータが人間の力に追従して大きな力を出してしまうことである。その結果、

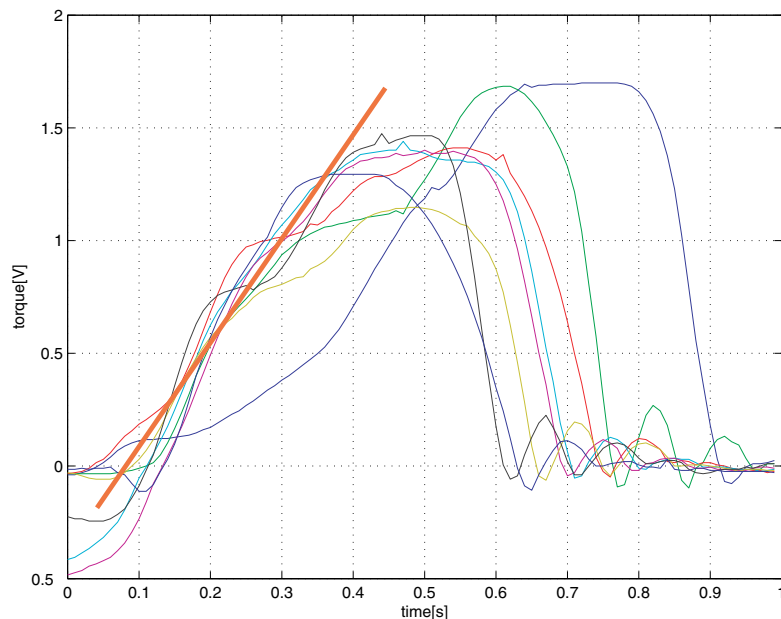


図 5.5: ウィリーが失敗した際の人間のトルク入力

人間が重心位置を調整しようとしても間に合わず、後転してしまうことになるのである。また、後転を恐れて力をあまり入れないようにすると、力が不足し前輪が浮いてもすぐに落ちてしまうという結果になる。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手法を提案する。

### 5.3 模擬慣性機能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 5.6 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。

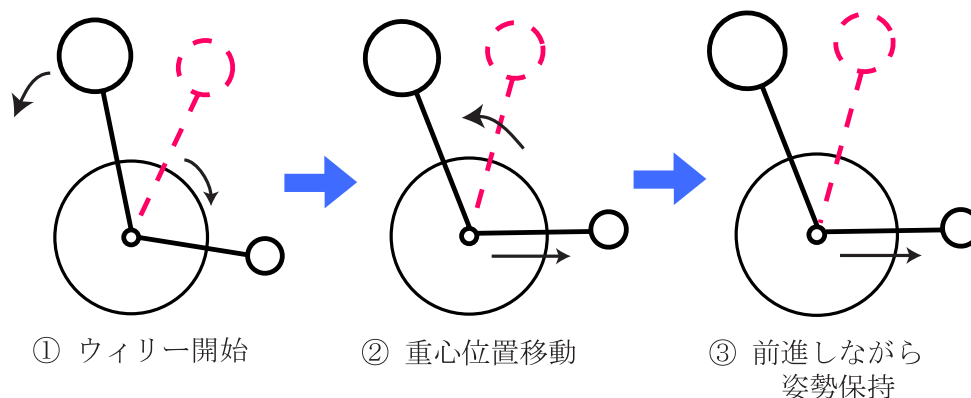


図 5.6: パワーアシスト車椅子におけるウィリー動作

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 5.1 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ることができるのでしばらくはウィリー状態を保てる。

モータの役割としては、下記の二つが考えられる。

- 前輪を上げる動作 (①) の駆動力の補助
- 前進方向への推進力の出力 (③)

前輪を上げる動作は主に人間が後輪を漕ぐ動作と体を後ろに傾ける動作で実現して、前輪が浮いた後、前進する動作をモータに依存する。人間がハンドリムから手を離れた後もモータが回転するという JW-II の特性を生かしたウィリーが実現できる。

この方法だと、人間は前輪を浮かすことに集中できるから操作がしやすくなる。つまり、大きい力を出したとしてもモータの出力は小さいから後転する危険性は無くなり、思い切って大きな力を出すことができる。前輪が浮いた後はモータの出力により前進するので、重心をうまく調整してやればよい。

現状の JW-II では、転倒しないが車輪が浮く程度の微妙な力を人間が調整して出力し、さらに重心の調整までしなければならず、操作が難しくなっていた。

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 5.7 のようになる。

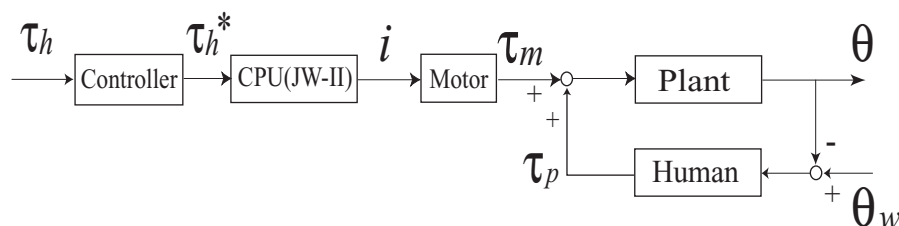


図 5.7: 人間の調整能力を生かした実現手法のブロック図

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  $\tau_m$  は抑えられる。従って、 $\tau_m$  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。

## 5.4 実験機の構成

図 5.8 に実験機の構成を示す。

図 5.8 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  $\tau_h$  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 ボードにロードした。トルクセンサからの電圧信号を DSP に取り込み、以下の 2 通りの調整を行って JW-II の CPU に入力している。



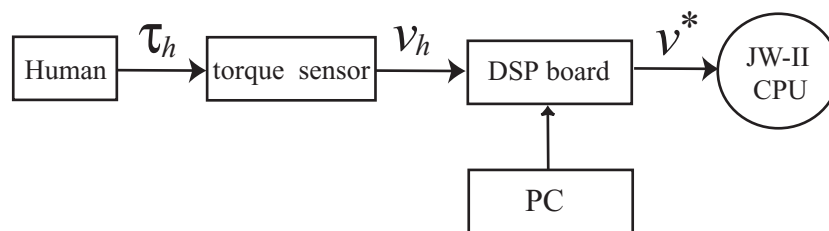


図 5.8: 実験機の構成

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 5.9 に調整方法 1 を施した信号を示す。

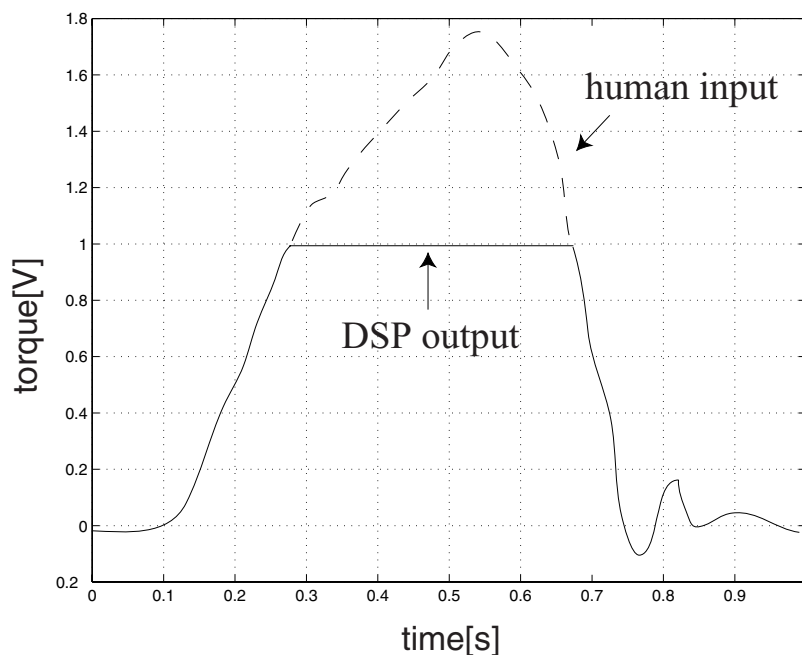


図 5.9: 調整方法 1 を施した信号

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す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。

## 5.5 電圧オフセット回路の製作

JW-II 内部で扱える信号の大きさは  $0 \sim 5V$  であるが、DSP の扱える信号の大きさは  $-3 \sim +3V$  であるため図 5.10 のように電圧を調整する回路が必要になる。

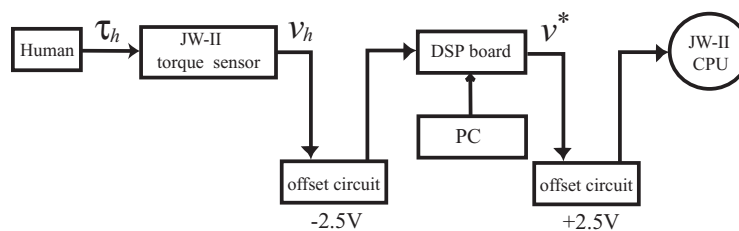


図 5.10: DSP と JW-II 間の電圧調整

この電圧オフセット回路の回路図を図 5.11 に示す。

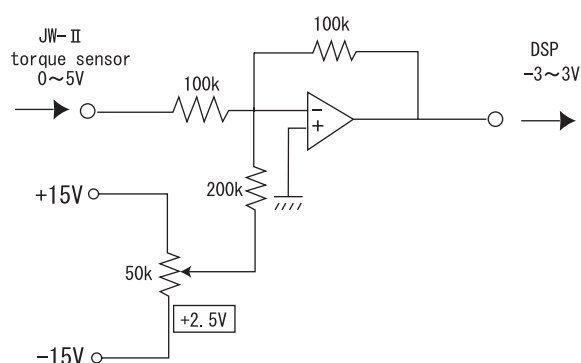


図 5.11: 電圧オフセット回路図

JW-II からの信号がオペアンプで反転され  $2.5V$  底上げされて DSP に入っている。DSP から出力された信号も同様の回路を通り、オペアンプで反転されてから  $2.5V$  底上げされ JW-II に入る。実際に製作した回路を図 5.12 に示す。

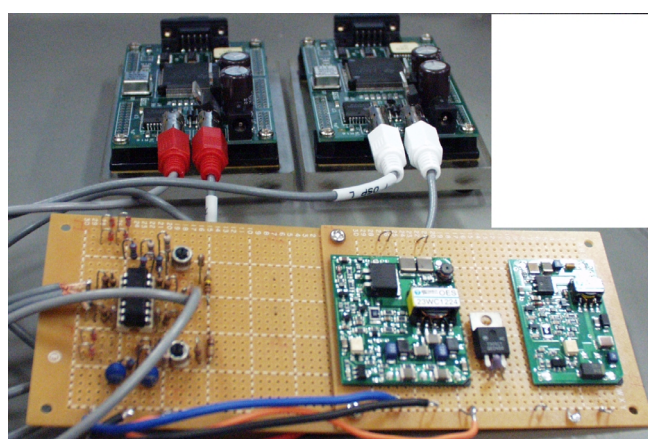


図 5.12: 電圧オフセット回路と DSP ボード

手前の回路が自作の電圧オフセット回路で、奥にあるのが実験で使用する DSP ボードである。左右独立に制御を行っているので、DSP ボードは 2 台用いた。

## 5.6 実験結果と考察

### 5.6.1 実験環境

ここでは、上述の調整方法のうち、最大値  $\tau_{max}$  以上は出力させない方法について実験を行う。



図 5.13: 高さ 7cm の段差

複数の被験者に、図 5.13 に示すような高さ 7cm の段差に前輪が載せられるようにウィリーをしてもらい次の基準で評価を行う。

1. 成功 ( ) : 転倒防止バーが地面に着くことなく段差を越える
2. 転倒 ( × ) : 転倒防止バーが地面に着いて段差を越える
3. 衝突 ( ) : 前輪が上がり切らず段差に衝突する

転倒防止バーは図 5.14 に示すように車椅子の後部に付いているもので、後方への転倒を防止するために JW-II に付いているものである。



図 5.14: 転倒防止バー

## 5.6.2 実験結果

各被験者に制御ありの場合と制御なしの場合それぞれについて 10 回ずつウィリーを試みてもらい、成功率を表 5.1 に示す。

表 5.1: 成功率の比較

	制御なし	制御あり
被験者 A	20 %	50 %
被験者 B	20 %	40 %
被験者 C	80 %	100 %
被験者 D	90 %	90 %

被験者 A、B のように制御なしのときに成功率が低い被験者が制御を加えることにより成功率が高まることが分かる。しかし、C、D のように制御なしでもうまく段差を越えることができる被験者もいる。

表 5.2 に被験者 A の実験結果を示す。

表 5.2: 被験者 A の実験結果

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
制御なし	×	×	×	×						×
制御あり		×		×						×

制御ありの場合は回数を重ねるにつれ、成功率が高くなっている。制御なしの場合は、転倒を恐れて大きな力を加えられなくなり前輪が上がり切らない失敗が多かったが、制御ありの方では大きな力を加えてもモータが大きな力を出力しないため、適度な力を加えやすくなっている。

被験者 B についても 6 回目以降から成功率が急激に上がり、コツをつかめば安全にウィリーすることが出来るようになると考えられる。

## 第6章 結論

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。

最初にパワーアシスト車椅子の現状について述べ、市場は小さいがユーザの評価が高く、歩行障害者の行動範囲を広げる支援をする手段として将来性の高さを評価した。またパワーアシスト車椅子 JW-II の基本構成に触れ、ウィリー動作が難しいという欠点を指摘した。

つぎに、パワーアシスト車椅子の欠点を解消する実現手法について分類した。すなわち、角度情報に基づくウィリー制御と人間の調整能力を生かした実現手法である。それぞれの手法の利点と欠点について述べた。

1つ目の実現手法として倒立振り子モデルを用いた実現手法を提案した。人間が乗っている車椅子を倒立振り子でモデル化し、角度情報を用いた制御で倒立振り子を倒立させるシミュレーションを行った。また、現実の車椅子では全体の重心位置を測定できないことを考慮して、最小次元オブザーバを用いて角速度から角度を推定して角度制御に利用する手法を提案した。この手法で倒立振り子を倒立させるシミュレーションを行い、その有効性を確かめた。

2つ目の実現手法として人間の調整能力を生かした実現手法を提案した。まずパワーアシスト車椅子において従来型と同様のウィリーができない原因について考察した。トルクセンサの出力を測定することにより、ウィリーを行うとき人間がどのようなトルクを入力するかを解析した。つぎに、JW-II の特徴である模擬慣性機能を生かしたウィリー動作の実現手法について述べた。この手法によって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り、車椅子利用者のウィリー動作習得が容易になるとの見解を示した。また、実験機の構成を示し、電圧オフセット回路の製作を行った。最後に段差を乗り越える実験を行い、提案手法の有効性を示した。

## 参考文献

- [1] [http://www1.mhlw.go.jp/wp/wp00\\_4/chapt-a1.html](http://www1.mhlw.go.jp/wp/wp00_4/chapt-a1.html)
- [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, Vol. 40, No. 5, 2001.
- [3] <http://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/index.html>
- [4] [http://www.ulrich-alber.com/proemo\\_em\\_e.htm](http://www.ulrich-alber.com/proemo_em_e.htm)
- [5] 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, 2001.
- [6] 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.
- [7] Y. Takahasi, S. Ogawa, and S. Machida: “Front wheel raising and inverse pendulum control of power assist wheel chair robot”, in *Proc. IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON'99)*, pp. 668-673, 1999.
- [8] Y. Takahasi, S. Ogawa, and S. Machida: “Step climbing using power assist wheel chair robot with inverse pendulum control”, in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2000)*, pp. 1360-1365, 2000.
- [9] Y. Takahasi, 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.
- [10] 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.
- [11] 堀洋一・大西公平: 「応用制御工学」, 丸善, pp. 56-58, 1998.

## 発表文献

[1] 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, 2002(発表予定).

# 謝 辞

私が堀研究室に在籍していたこの1年間は、非常に勉強になることが多く、充実した1年間だったと思います。ミーティングでの発表などを通して、資料作りやプレゼンテーションの方法など多くのことを学ぶことができました。また外部との接触も多く、研究者として、人間として一回り大きくなれたように思います。

本研究を進めるにあたり、指導教官の堀洋一教授には、御多忙の中さまざまな御指導・御助言を頂きました。時には厳しい言葉も頂きましたが、暖かく私の研究を見守り終始懇切丁寧な御助言をいただきました。また、工学者としてのあり方や、研究に対する姿勢なども教わりました。ここに深く感謝致します。自分は来年度からは他研究室へ配属になりますが、その心構えを忘れずに頑張りたいと思います。

東京都福祉機器総合センターの橋詰努氏には、研究の初期段階から様々なアドバイスを頂き、また実験に際しては快く実験設備を貸して頂きました。ここに深く感謝致します。

JW-II のユーザである南浩一氏には、パワーアシスト車椅子の欠点に対して指摘を頂き、研究テーマの決定に大きな影響を受けました。ここに深く感謝致します。

ヤマハ発動機の戸倉賢治氏には JW-II の構成について親切に教えて頂き、JW-II が故障した際には丁寧な助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

文部技術官の内田利之さんには、実験装置の製作についてさまざまなご助言を頂き、また、実際に作業をして頂きありがとうございました。厳しい言葉のなかにも細かな配慮があり、的確な助言を何度も頂きました。ここに深く感謝致します。

研究員のチャンダン・チャクラボラティさん、宋申民さんには、いろいろな話をして心を和まして頂きました。ここに深く感謝致します。

博士課程3年の及部七郎齋さんには、研究室のミーティングの時などの的確な助言を頂きました。また研究が思うようにはかどらない時期に、自分のことを気にかけて話し相手になってくださいました。ここに深く感謝致します。

博士課程2年の関弘和さんには、研究内容のみならず、論文の構成などにまで懇切丁寧な助言を頂きました。また、外部の施設などを訪れる際には必ず同行して頂きました。ここに深く感謝致します。

博士課程1年の呉世訓さん、馬澄斌さんには、過ごした時間は短かったですが暖かい態度で接して頂きました。ここに深く感謝致します。

修士過程2年の畠直輝さんには、シミュレーションの方法やPCの使い方などについて親身になって説明していただきました。同じ修士過程2年の坂東信尚さんには、研究全般について助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

修士課程1年の岡野隆宏さん、戴建華さん、張炳勳さん、井上友子さん、呉俊徳さんには、気軽に話相手や相談相手になって頂きました。ここに深く感謝致します。

卒論生の磯将人君、大埜健君、高橋啓君、長瀬啓明君には、研究についての議論のみならず、くだらない世間話をしたり研究室での生活を楽しく過ごす上で本当に大きな支えとなってくれました。ここに深く感謝致します。

最後になりましたが、秘書の木村麻里子さんには、優しく接して頂き、お茶の時間にはお菓子やコーヒーを用意していただきました。ここに深く感謝致します。