

— 卒業論文 —

# 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

平成15年2月12日提出

指導教官：堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

10338 小安 雄一

## 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、歩行障害者の移動を支援するパワーアシスト車椅子に注目し、その走行時に問題となる後方転倒現象を防止する手法を提案する。

まず、パワーアシスト車椅子の有効性とその現状を概説し、その上で実際の走行場面におけるパワーアシスト車椅子の問題点について述べる。

最初に通常走行時と前輪浮上時のモデルの違いを述べ、転倒の発生条件を人間 - 車椅子系の重心位置とその速度に基づく位相平面を用いて、後方転倒現象の解析を行う。位相平面による解析結果に基づいて、転倒防止の制御手法を二通りに分類し、各制御手法を詳しく説明する。始めに、パワーアシスト車椅子の基本となるアシスト制御を分析し、それに基づいて、フィードフォワード的にアシストトルクを制限する転倒防止制御手法を提案する。

次に、重心位置の角度情報に基づく転倒防止制御手法として、倒立振り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するシミュレーションの結果を示す。さらに、このときのオブザーバゲインの決定方法について、モデルとの誤差を考慮した一般的な数式を用いて検討する。

以上の理論を実験的に検討するため実験機の製作と構成について述べる。次に、モータトルク制限による転倒防止制御手法の被験者を用いた実験により、有効性を確認する。最後に重心位置の推定の実験と、それに基づく後方転倒防止制御手法の有効性を確認する。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	高齢社会を迎えて	1
1.2	パワーアシスト車椅子の登場と期待	2
1.3	パワーアシスト車椅子の問題と研究の目的	2
第2章	車椅子の後方転倒現象の解析	4
2.1	通常走行時の車椅子のモデル	4
2.2	前輪浮上時の車椅子のモデル	4
2.3	位相平面を用いた車椅子の後方転倒条件の解析	5
第3章	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	7
3.1	転倒防止制御手法の分類とその考察	7
3.2	アシストトルク制限による制御手法	8
3.2.1	人間のトルク入力に基づくアシスト制御手法	8
3.2.2	アシストトルク制限による後方転倒防止の実現手法	9
3.3	重心位置の角度情報に基づく制御手法	10
3.3.1	倒立振子モデルの力学	10
3.3.2	人間 - 車椅子系に倒立振子モデルを適用したシミュレーション	11
3.3.3	オブザーバを用いた人間 - 車椅子系の重心位置の推定	13
3.3.4	オブザーバの誤差に関する検討	15
第4章	後方転倒防止を目的とした各制御手法の実験的検証	19
4.1	実験機の製作と構成	19
4.2	アシストトルク制限による転倒防止制御の被験者を用いた実験的検証	21
4.3	重心位置推定に基づいた後方転倒防止制御の実験的検証	23
第5章	結論	27
5.1	結論	27
5.2	考察と今後の課題	27
	参考文献	28
	謝辞	29

# 第1章 序論

## 1.1 高齢社会を迎えて

現在、我が国は社会の高齢化という深刻な問題を抱えている [1]。図 1.1 にそのグラフを示す。これより、1970 年には 65 歳以上の人口は 739 万人で、総人口に占める割合は 7.1 % であったのが 2000 年には 2187 万人、17.2 % にまで増加していることが分かる。つまりこの 30 年で急速に高齢化が進んでいるのである。一方で少子化も進んでおり、既に、65 歳以上人口は、0 歳から 14 歳までの年少人口を上回っている。今後更に、この傾向は顕著になっていくと予想され、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。

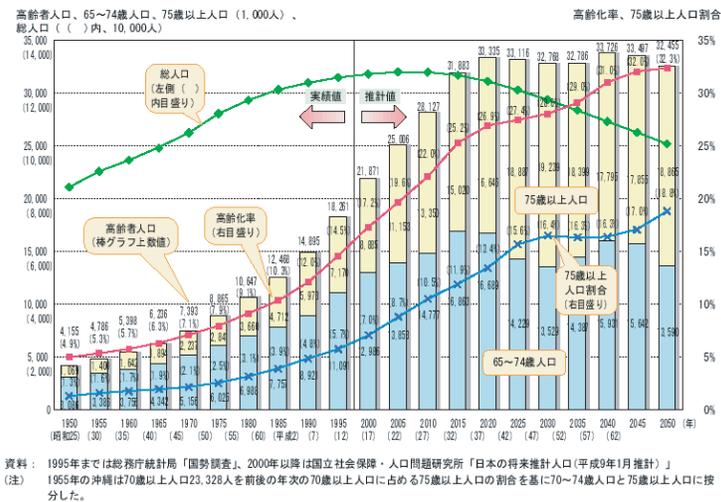


図 1.1: 高齢者人口の推移

このような少子高齢化社会の到来に伴い、被介護者の増加や介護者の不足が問題となってくる中で、介護支援やリハビリテーションを目的とした新しいシステムの研究開発が盛んに行われるようになった。これらの研究では、様々な高齢者や障害者向けの生活支援機器を開発することにより、高齢者や障害者の自立した生活の実現を目指している。我々は、計測・制御の技術を用いて高齢者や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、適切に組み合わせていくと同時に高機能化が求められる。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今後一層高まっていくと予想される。

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、高齢者や障害者の自由な移動を助けるための車椅子を対象とした研究を行う。

## 1.2 パワーアシスト車椅子の登場と期待

おそらく最も広く普及している福祉機器は車椅子である。

車椅子には主に、介護者に押しってもらう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タイプの車椅子を自操型車椅子という。自操型にも手動式と電動式とがある。手動式と電動式の利点、欠点を表 1.1 にまとめる。

世界で最初の手動車椅子と考えられるものが紀元前の中国の遺跡の石棺に見られるそうであるが、現在のようなスチール製パイプ材を用いたものは 1932 年ごろから製作され始めた。電動車椅子については、手動車椅子に改良を加えて、DC モータと減速機を付けスイッチ操作を行うようなものが 1940 年代に発売されているが、その後マイコンの出現により、複雑な制御も行われるようになってきた [2]。

表 1.1: 車椅子の分類

車椅子の種類	利点	欠点
手動式	軽量 操作が容易	駆動力が小さい
電動式	労力が少ない	重量が大きい 障害が重く見られる

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形態のものである。電動式車椅子の欠点としては、手先しか自由がきかない重い障害者だと思われることへの抵抗感があること、重いため持ち運びに適さないことが挙げられる。さらに自分の力で車輪を駆動させるわけではないので筋力の低下が起こるという欠点もある。これらの点において、移動の際にかかる労力が少ないというメリットの割にユーザに避けられる原因がある。

それに対して手動式車椅子の利点は自分で動かしているという実感が得られること、折り畳みができ、軽量であるから持ち運びに適しているという点である。自動車での移動の際には車椅子も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車椅子の方が行動範囲が広がる。

しかし、手動式車椅子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制限されたものとなる。そこで、手動車椅子の携帯性と電動車椅子の軽快な操作性の両面を折衷した車椅子が望まれるようになり、補助動力ユニットが徐々に開発・商品化されてきた [1]。最初は、補助駆動輪を付加する方式などもあったが、車椅子搭乗者や介助者の駆動力や移動速度などを考慮しておらず、多くの問題があった。これをふまえて、人間の駆動力を検知し、補助動力を協調させて作動させるという新しい概念に基づくパワーアシスト車椅子が登場した。

パワーアシストを取り入れた車椅子としては、自走型および介助型が存在する。人間と機械が協調して車椅子を駆動するという比較的新しく、単純ではない問題に対し、学術レベルでいくつかアプローチがある。本研究では、自走型電動パワーアシスト車椅子の制御に焦点をあてることにする。

## 1.3 パワーアシスト車椅子の問題と研究の目的

パワーアシスト車椅子として最もよく知られている、1996 年にヤマハ発動機社から発売された JWII を中心に、パワーアシスト車椅子の基本的な制御手法について紹介する。図 1.2、図 1.3 は JWII の外観とその構成を示したものである [3]。

この JWII で図 1.4 のような平坦地、図 1.6 のような砂利道、図 1.5 のような坂道などを運転したところ、通常の車椅子よりも楽に走行できた。しかし、上り坂を楽に上ることは難しく、上るために大きな入力を加えると転倒の危険性を感じた。

パワーアシスト車椅子では駆動力が人力単独駆動に比べて大きいため、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づかないとき、路面状態が悪いときなどに、強引に前進しよう



図 1.2: JWII の外観

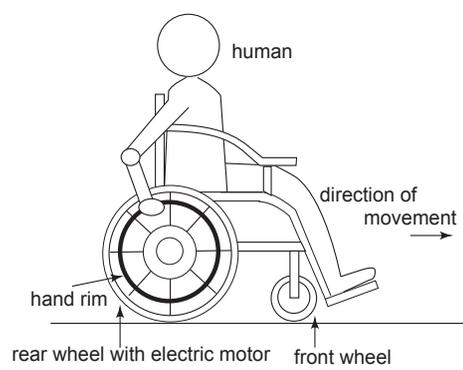


図 1.3: パワーアシスト車椅子の構成図

とすると前輪が持ち上がり、後方へ転倒してしまう危険がある。



図 1.4: 平坦地



図 1.5: 坂道



図 1.6: 砂利道

現実問題として、街の道路だけでなく公民館など公共の施設の入口などにさえも坂道は存在し高齢者や障害者には後方転倒の危険性は日常的につきまといっている。そのために転倒防止バーがついているのであるが、見た目の悪さやウイリーによる段差越えが出来なくなるなどの問題がある。そういった理由で近年、高齢者や障害者が住み良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実現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るケースが依然として多い。

従って、パワーアシスト車椅子においても高機能化が求められている。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。転倒しない入力を解析的に与えることが出来れば、効率の良い走行が可能となるはずである。

## 第2章 車椅子の後方転倒現象の解析

### 2.1 通常走行時の車椅子のモデル

まず、通常安全に走行している場合の、車椅子と人間が構成する系を図 2.1 に示す。さらに図 2.2 にこの系の質点と重心の様子を示す。ここでは簡単のため、平地でのモデルを考える。

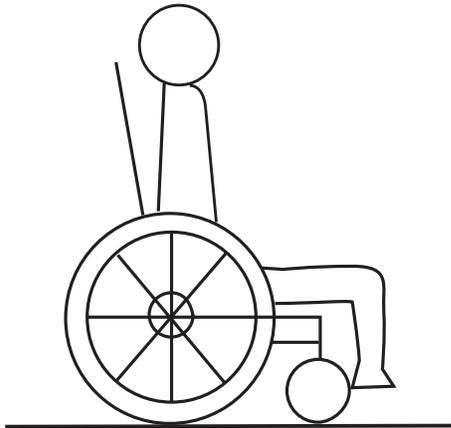


図 2.1: 通常走行時の車椅子

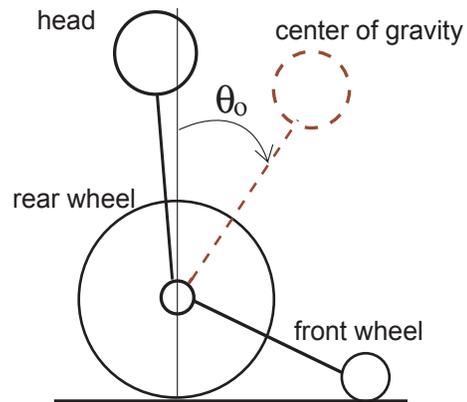


図 2.2: 質点と重心の位置関係

人間の主な質点は頭と足にあり、これらは車軸を中心に結ばれていると近似的に表すことができる。従って、図 2.1 のモデルを模式的に表す図 2.2 の様になる。図 2.2 において、系全体の重心位置は破線部分に存在すると考えられる。さらに、通常走行時には前輪は接地しているためこのような二点支持の安定な状態である。

本研究においては、人間が走行時に自分の意志で姿勢を変えることによりバランスをとる必要をなくするため、乗っている人の姿勢は常に一定とする。つまり、通常走行時には常に重心は一定の位置にあるということを仮定する。以後、このときの重心位置の鉛直方向からの傾きを安定点、 $\theta_0$  とする。

### 2.2 前輪浮上時の車椅子のモデル

次に、急激な入力を加え、前輪が浮上したときの状態を考える。図 2.3 に前輪浮上時の車椅子と人間の系の様子を、図 2.4 にこのときの質点と重心の位置関係を示す。図 2.4 の  $\theta$  は重心位置の鉛直方向からの傾き角度である。

前輪が浮上した場合、後輪のみが接地している不安定な状態となり、これは倒立振り子と見なすことが出来る。転倒の発生には必然的に前輪の浮上が前提条件となってくるので、この状態を回避できないことは転倒の危険性を高めることになる。ただし、転倒は  $\theta$  の位置によってのみ決定されるのではなく、たとえ  $\theta$  が鉛直軸よりも後ろの位置にあったとしても、図 2.4 において鉛直方向に対して右向きモーメントを与えることにより前輪を接地させることが可能である。つまり、転倒の発生は静的な力学ではなく、動的な力学に基づいて考えていかなければならないということである。

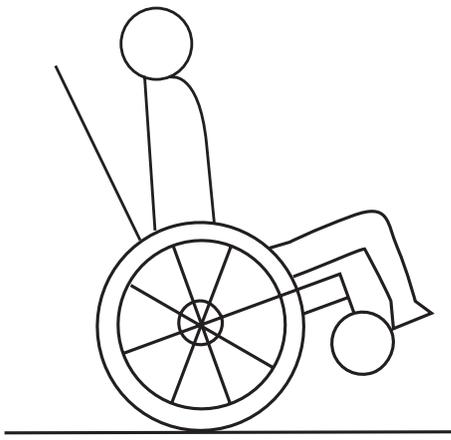


図 2.3: 前輪浮上時の車椅子

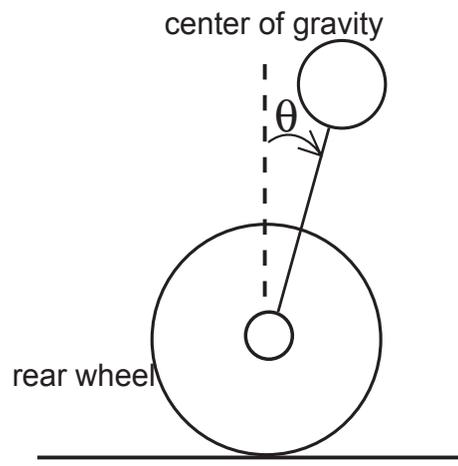


図 2.4: 質点と重心の関係

### 2.3 位相平面を用いた車椅子の後方転倒条件の解析

次に後方転倒のメカニズムと、後方転倒の発生条件を考える。前輪が浮いて初めて転倒が起こるので、ここでは前輪が浮いたモデルである倒立振り子モデルで考える。前輪が接地している状態はこの図ではP点として表される。つまり、重心位置は $\theta_0$ にあり、角速度は0の点である。図 2.5 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 [8]。一般の単振り子の挙動については運動方程式に基づいて位相平面が導かれるが、倒立振り子の場合にはそれとは異なり、運動方程式での解析が容易ではないため、シミュレーションモデルを用いて位相平面を導出した。そのモデルについては後述する。ここで、 $\theta$  は図 2.4 で表されているものであり、 $\omega$  は $\theta$ の時間微分、つまり重心の車軸周りの角速度である。

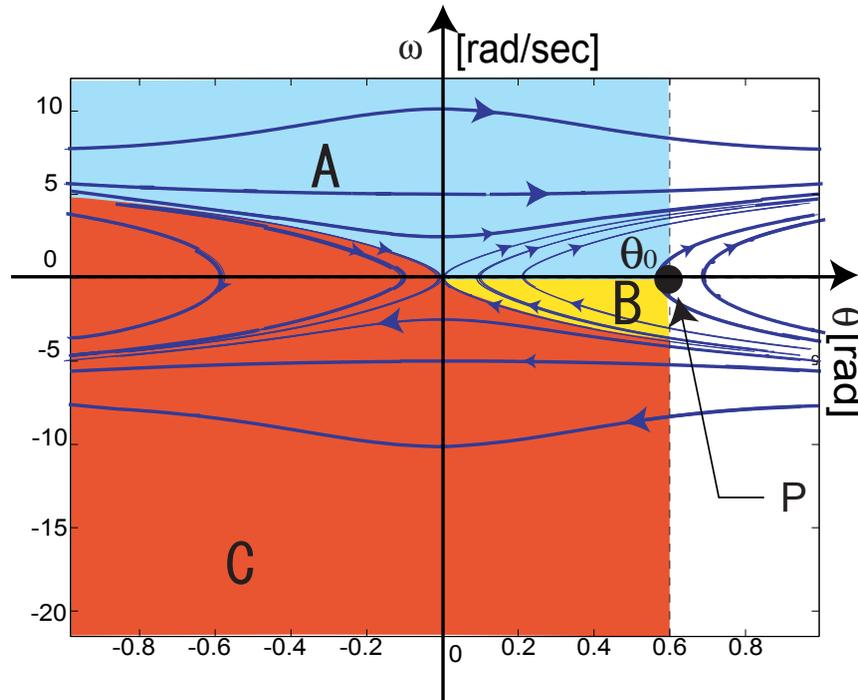


図 2.5: 倒立振り子における位相平面

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。 $\theta$ がどのような値でも安定状態に復帰出来るだけの $\omega$ が存在する領域であるが、実際の車椅子において転倒しそうになる時には通常、負の角速度がかかるので前輪が浮上した直後にこの領域に入ることは考えない。

Bの領域は不完全安定領域である。 $\omega$ は負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。

これは平地でのモデルであるが、坂道においては傾斜角を $\alpha$ とすればこの場合の安定点 $\theta'_0$ が

$$\theta'_0 = \theta_0 - \alpha \quad (2.1)$$

となり、Bの領域が狭くなる。つまり、坂道においては後方転倒が発生しやすくなるという直観にも一致する。

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

1. B、Cの領域に入らないように制御する。
2. B、Cの領域に入ったとしても、制御によってBに戻す。

このどちらかの制御が必要になるということである。

# 第3章 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 転倒防止制御手法の分類とその考察

前節において二種類の制御手法の可能性を述べた。ここでそれらについて具体的に論じる。制御工学的に見て前節の位相平面での解析結果は

1. 不安定領域に入らないようにする  
フィードフォワード制御
2. 不安定領域に入ったものを安定領域に戻す  
フィードバック制御

が適していると解釈される。

前者のフィードフォワード制御に関しては、常に転倒しないようにトルク入力を制限する手法が考えられる。フィードフォワード制御のみでは一般的にロバスト性に欠けるため、外乱が大きく入った際にBの領域を脱してCの領域に入ってしまうことが考えられるので前輪浮上は許容しないこととする。後者のフィードバック制御に関しては、安定域付近に持っていくような位置制御をかける手法が考えられる。つまり、前輪浮上を許容し、結果的に転倒しなければよいという考え方である。

ここで、前輪浮上について考える。前輪浮上はユーザに後方転倒に対する恐怖心を与えるため、前輪浮上を防止できることに越したことはない。しかし実際にパワーアシスト車椅子に乗ってみたところ、アシストされた駆動力は程度の相違は別にしても前輪浮上を誘発することが分かった。さらに、坂道を上る際には通常通り進もうと思うとかなりの確率で前輪浮上が起こった。多少の前輪浮上を許容しなければ坂道走行が不可能になるということが考えられる。さらに、前輪浮上は路面の悪さや、小石や小枝等の障害物によっても引き起こされるため、このような外乱を考える時に前輪浮上を許容しなければかなり駆動力を抑えなければならないことも予想される。

表 3.1 に前輪浮上を許容する場合と許容しない場合のメリット、デメリットをまとめる。

表 3.1: 前輪浮上について

前輪浮上は	利点	欠点
OK	より大きな駆動力を出せる	ユーザに恐怖心を与える 転倒の危険が大きい
NG	ユーザに恐怖心を与えない	駆動力が抑えられる

また、ユーザによっても前輪浮上の是非は異なる。交通事故などで一時的に車椅子に乗ることになってパワーアシスト車椅子に慣れていないユーザや、上半身でバランスをとることができないユーザなどは前輪浮上は軽い前輪浮上も転倒の危険性を高める。一方、長年パワーアシスト車椅子に乗っているユーザや、運動能力が高いユーザは前輪浮上など気にせず、より大きなアシストを求めるであろう。よって、本研究においては前輪浮上を許容する場合、許容しない場合の両方について検討する。

## 3.2 アシストトルク制限による制御手法

### 3.2.1 人間のトルク入力に基づくアシスト制御手法

パワーアシスト車椅子は前述の通り、人間のトルク入力をモータの力によって数倍に補助（アシスト）する車椅子である。しかし、実際には単にトルク入力を数倍にただけではハンドリムから手を離れた直後にモータは止まってしまう、人間はアシストされたとは感じない。YAMAHA の JWII でそうしているように、人間がハンドリムから手を離れた後でも惰性のようにある程度の出力が維持されるアシスト出力をしなければならない。

今回我々が製作した実験機でも、トルクセンサからの入力に対してアシストトルクがやや長い時定数で減衰するように設計してこの惰性機能を実現した。この様子を図 3.1 に示す。

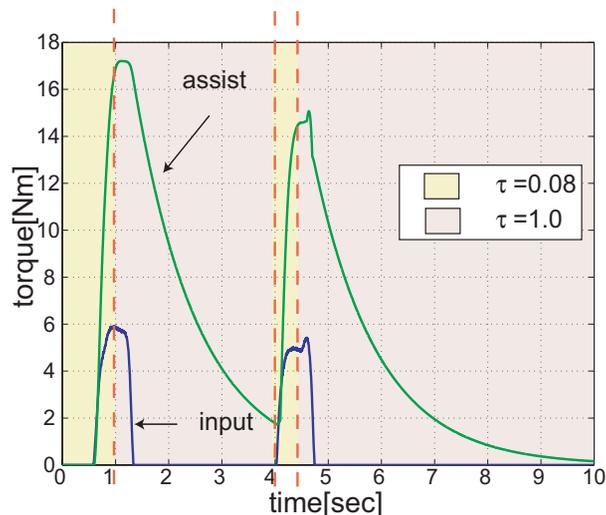


図 3.1: トルク入力とアシストの関係

トルク入力とアシスト出力の関係は以下の式で表される。 $T_{assist}$  はアシストされたトルク出力、 $T_{human}$  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。このシステムを表したものが図 3.2 である。

$$T_{assist} = \alpha \frac{1}{1 + \tau s} T_{human} \quad (3.1)$$

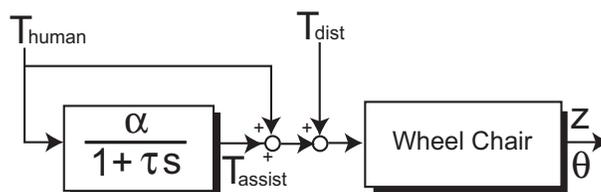


図 3.2: トルク入力に対するアシストの構成法

ここで、ローパスフィルタの時定数が問題となってくる。これが大きい場合はトルク入力に対してのアシスト出力の反応が遅くなり、トルク入力からアシストが十分大きくなるまでタイムラグが生じることになる。また、小さい場合はアシスト出力の反応が早くなり、惰性が働かないということになる。

より良いアシストを実現するためには、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ゆっくりという機構が必要である。このために、 $T_{human}$  を人間の操作入力トルクと

すると

$$\tau = \begin{cases} \tau_{fast} & \frac{d}{dt}T_{human} > 0 \\ \tau_{slow} & \frac{d}{dt}T_{human} < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

というように、大小異なる時定数を組み合わせてアシスト機能を実現している。今回通常の走行手法としては図 3.1 に示すように、

$$\begin{aligned} \tau_{fast} &= 0.08 \\ \tau_{slow} &= 1.0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

とした。

### 3.2.2 アシストトルク制限による後方転倒防止の実現手法

前述の通り、フィードフォワード制御のみでは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 3.3 は前輪が浮上したとき、図 3.4 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から得た車椅子車軸の角速度の値である。センサ類などの実験機構成に関しては実験の章で言及するが、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。

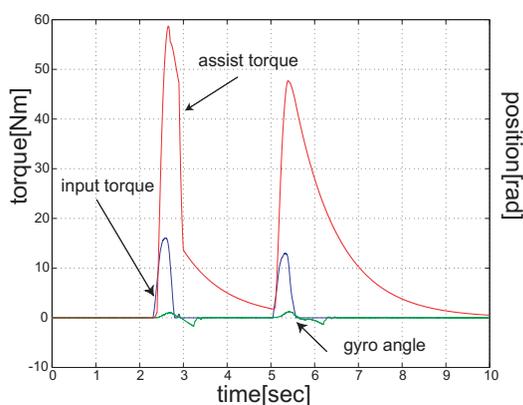


図 3.3: 前輪浮上時のトルク入力とアシストの様子

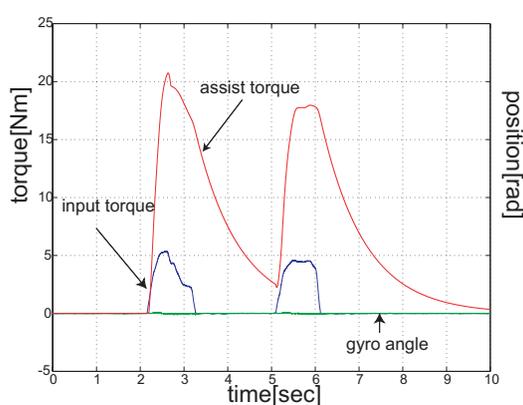


図 3.4: 前輪が浮上しないときのトルク入力とアシストの様子

図 3.3 と図 3.4 を比較したときに、図 3.3 では緑色のジャイロセンサが振れており、前輪が浮上したことを示している。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 3.4 に比べると大きいことが見て取れる。それに対して、図 3.4 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。ここではこのうち、トルク入力の大きさを制限する手法について考えてみる。

図 3.5 に前輪接地時の力学を示す。前輪にかかる力は

$$F = mg \sin(\theta_0 - \varphi) - u \cos \theta_0 \quad (3.4)$$

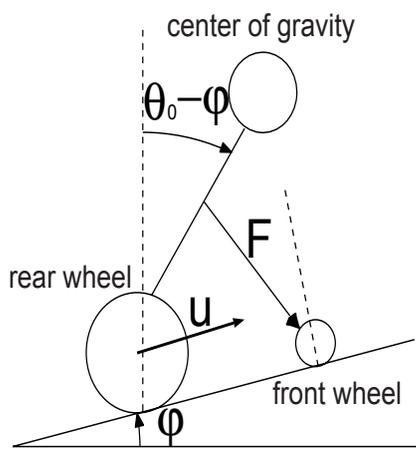


図 3.5: 前輪接地時の人間 - 車椅子系の力学

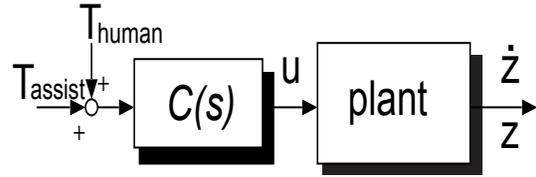


図 3.6: アシストトルク制限手法のブロック線図

前輪が離れるのは地面からの効力が 0 になるときより、このときの入力  $u$  の条件は

$$u = \frac{mg \sin(\theta_0 - \varphi)}{\cos \theta_0} \quad (3.5)$$

この式には  $\varphi$  が入っているので、坂道の傾斜角に応じたりミッタを設計することになる。このときのブロック線図は図 3.6 のようになる。

トルクセンサからの信号に対して、傾斜角度により決定された  $u_{max}$  よりも大きな入力が入った場合には  $u_{max}$  を出力し、それ以外の場合は通常のアシスト比で走行するという制御である。

$$u^* = \begin{cases} u_{max} & \text{if } u > u_{max} \\ u & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.6)$$

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。

### 3.3 重心位置の角度情報に基づく制御手法

#### 3.3.1 倒立振り子モデルの力学

前輪浮上が起こった時、車椅子と人間の系は倒立振り子モデルで表すことができる。ここで、その力学について述べる。

坂道での倒立振り子モデルの様子は図 3.7 のようになる。次にこの系の運動方程式を導出するため運動エネルギー  $T$  とポテンシャルエネルギー  $V$  からラグランジアン  $L$  を形成する。一般化座標を  $z$ 、 $\theta$  ととってラグランジュの方程式

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L}{\partial z} = u \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (3.8)$$

に代入すると、

$$u = (M + m)\ddot{z} + ml \cos \varphi (\ddot{\theta} \cos(\theta - \varphi) - \dot{\theta}^2 \sin(\theta - \varphi)) + (M + m)g \sin \varphi \quad (3.9)$$

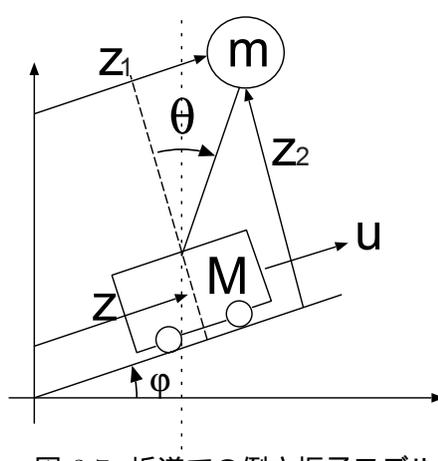


図 3.7: 坂道での倒立振り子モデル

$$\begin{aligned}
 0 = & ml\ddot{z} \cos(\theta - \varphi) \cos \varphi + ml^2\ddot{\theta} \cos^2 \varphi \\
 & + ml^2\dot{\theta}^2 \cos(\theta - \varphi) \sin(\theta - \varphi) \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi} - \cos^2 \varphi \right) \\
 & - mgl \sin(\theta - \varphi)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

のように表せる。この二式から  $\ddot{z}$ 、 $\ddot{\theta}$  について解くことで平地においての式 (3.9), 式 (3.10) に対応する式が得られる。系のモデルとしてはこの非線形要素を含むものを使う。

### 3.3.2 人間 - 車椅子系に倒立振り子モデルを適用したシミュレーション

まず、位置制御によって通常なら転倒する入力に対して、安全に前輪を接地させることが出来ることをシミュレーションによって示す。シミュレーション開始は前輪が浮上した瞬間とする。

状態方程式を

$$\dot{x} = Ax + B \tag{3.11}$$

$$\theta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} x \tag{3.12}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} x \tag{3.13}$$

B については、次のように  $a, b, c, d, e, f$  を設定して、

$$\begin{aligned}
 a = & M + m \\
 b = & \frac{ml \cos(\theta - \varphi)}{\cos \varphi} \\
 c = & \frac{ml\dot{\theta}^2 \sin(\theta - \varphi)}{\cos \varphi} - (M + m)g \sin \theta + u \\
 d = & \frac{\cos(\theta - \varphi)}{\cos \varphi} \\
 e = & \frac{l \cos^2(\theta - \varphi)}{\cos^2 \varphi} + l \sin^2(\theta - \varphi) \cos^2 \varphi
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$f = -l\dot{\theta}^2 \sin(\theta - \varphi) \cos(\theta - \varphi) \left( \cos^2 \varphi - \frac{1}{\cos^2 \varphi} \right) + g \sin(\theta - \varphi)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{ce-bf}{ae-bd} \\ 0 \\ \frac{cd-af}{bd-ae} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

のように表すことができる。

状態変数は、

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} z & \dot{z} & \theta & \dot{\theta} \end{pmatrix}^T \quad (3.16)$$

のようにとり、初期値を

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (3.17)$$

に設定した。各定数は、

$$\begin{aligned} M &= 20[kg] \\ m &= 50[kg] \\ l &= 0.5[m] \\ \varphi &= 0.05[rad] \end{aligned} \quad (3.18)$$

と定める。

入力としては、図 3.8 のような波形を与え、このときの結果を図 3.9 に示す。

これより、入力が大きいため、常に  $\omega$  は負となっており、当然の結果として  $\theta$  が安定位置に戻ることはなく、転倒していることが分かる。

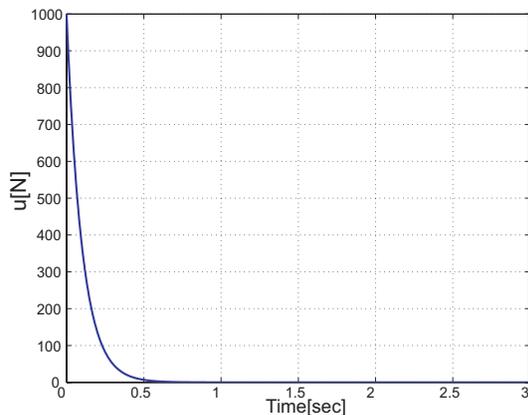


図 3.8: 入力の様子

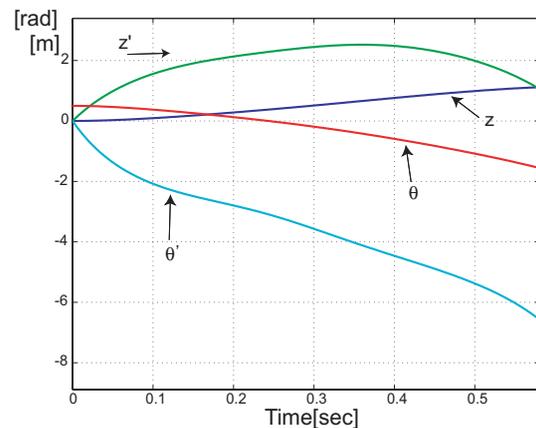


図 3.9: 車椅子の転倒を示す状態の様子

次に、同じ条件で図 3.10 のような位置制御を施して転倒を防止することを考える。通常走行時には図 3.10 の破線部を無視したブロック線図であるが、前輪浮上が発生し、後方転倒の危険が生じた場合に破線部のフィードバックが働くという制御である。 $u$  はプラントである車椅子に入る人間のトルク入力とモータの出力分を合計した操作量である。

コントローラ  $C(s)$  の設計に関しては、倒立振り子モデルを線形化することによって実現した。 $\theta$  は平衡点近くで保たれていると考えられるので、 $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\theta - \varphi$  を微小と見なして、 $\cos \theta \approx 1$ 、 $\cos(\theta - \varphi) \approx 1$ 、 $\sin \theta \approx \theta$ 、 $\sin(\theta - \varphi) \approx \theta - \varphi$  という近似をすると、系の運動方程式は以下のように書ける。

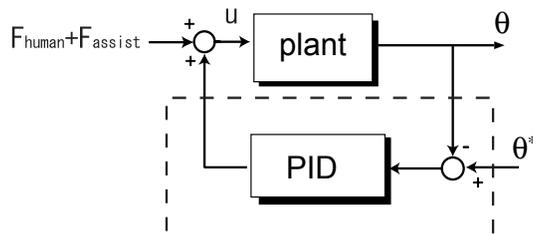


図 3.10: 位置制御のブロック線図

$$\begin{aligned}\ddot{z} &= -\frac{m}{M}g\theta + \frac{u}{M} - g\varphi \\ \ddot{\theta} &= \frac{M+m}{Ml}g\theta - \frac{u}{Ml}\end{aligned}\tag{3.19}$$

これに基づいて極配置することにより、PID 制御器の定数を決定した。

$$\begin{aligned}K_P &= -703 \\ K_D &= -45 \\ K_I &= -75\end{aligned}\tag{3.20}$$

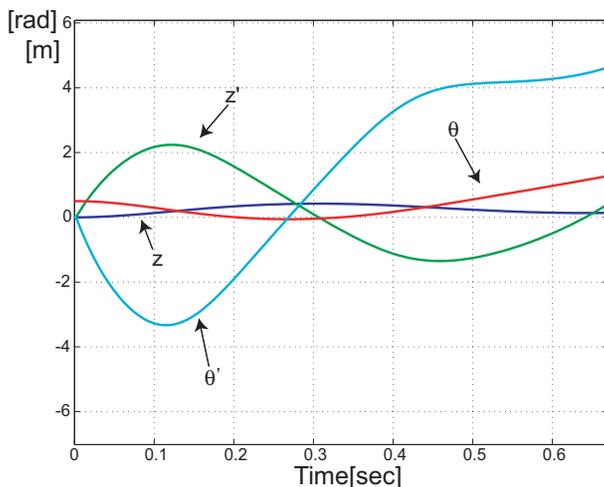


図 3.11: 位置制御を施した時の状態の様子

図 3.11 に  $\theta$  を用いた位置制御の様子を示す。角度指令値は安定領域である  $\theta = 0.6[\text{rad}]$  にとった。図 3.11 の  $\theta$  の挙動を見ると、シミュレーション開始直後は下がり始めているものの、0.3 秒付近で回復し始めていることが分かる。これは、強いトルク入力によって前輪浮上が起こり後方転倒しそうな車椅子が制御によって安定な状態に戻った事を意味している。これより、位置制御による転倒防止の有効性がシミュレーションによって示された。

### 3.3.3 オブザーバを用いた人間 - 車椅子系の重心位置の推定

位置制御をするためには重心位置  $\theta$  を用いなければならないが、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。つまり、実際にはこの推定された重心位置  $\hat{\theta}$  をフィードバック情報に用いて制御するので、系全体のブロック線図は図 3.12 のようになる。

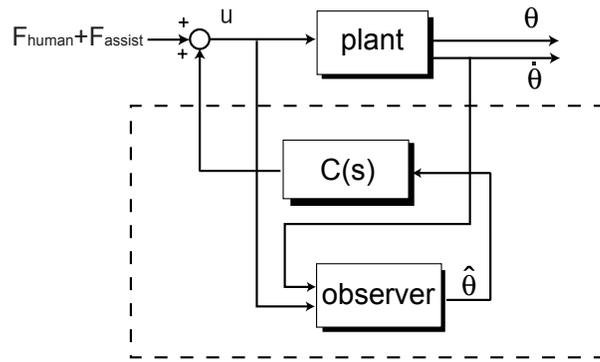


図 3.12: 系全体のブロック線図

オブザーバのモデルとしては式 (3.20) に示した線形化された倒立振り子モデルを用いた。オブザーバに関する角度成分の状態方程式のみを具体的に書き出すと以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{M+m}{Ml}g \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{Ml} \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (3.21)$$

$$\dot{\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

次に、最小次元オブザーバの構成としては Gopinath の方法を用いる [7]。オブザーバの方程式は、

$$\dot{\hat{\theta}} = \dot{\theta} + k(\ddot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}) \quad (3.23)$$

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

$$\dot{\hat{\theta}} = \frac{(M+m)g}{Ml} \hat{\theta} - \frac{1}{Ml} u \quad (3.24)$$

となる。式 (3.23) において、 $\ddot{\theta}$  がでてくるので、

$$\hat{\theta} = \xi + k\dot{\theta} \quad (3.25)$$

とにおいて、式 (3.23) に代入して  $\xi$  に関する状態方程式を書くと

$$\dot{\xi} + k\ddot{\theta} = \dot{\theta} + k(\ddot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}) \quad (3.26)$$

となるから、

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \dot{\theta} - k\dot{\hat{\theta}} \\ &= \dot{\theta} - k\left[\frac{(M+m)g}{Ml} \hat{\theta} - \frac{1}{Ml} u\right] \\ &= \left[1 - k^2 \frac{(M+m)g}{Ml}\right] \dot{\theta} - k \frac{(M+m)g}{Ml} \xi + \frac{k}{Ml} u \end{aligned} \quad (3.27)$$

という方程式になる。式 (3.25) と式 (3.27) より、 $\dot{\theta}$  を用いて  $\hat{\theta}$  を推定できることになる。

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

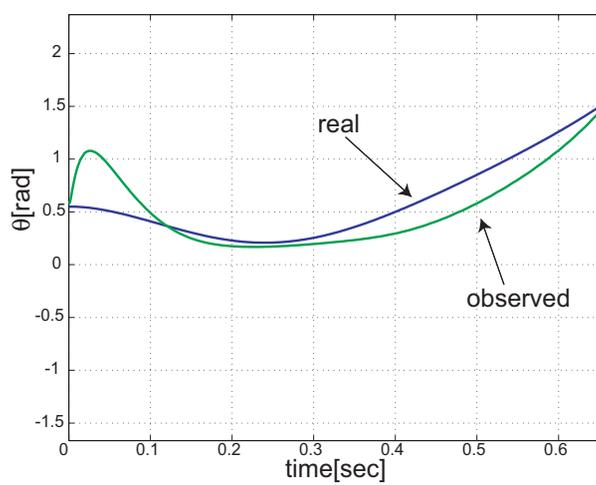


図 3.13: オブザーバによる重心位置の推定

振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 3.13 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、 $k = 0$  では純積分となり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子モデルに対してオブザーバは線形化された倒立振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。

### 3.3.4 オブザーバの誤差に関する検討

一般的な場合について下の状態方程式のようなシステムにおいてこれに  $D_1$ 、 $D_2$  のパラメータ誤差がある場合を考える。

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} + D_1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 + D_2 \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (3.28)$$

$$\dot{\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

図 3.14 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

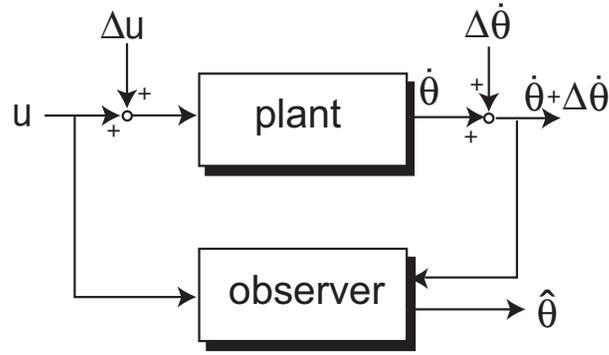


図 3.14: 誤差を考慮したオブザーバのブロック線図

にのみ誤差を含んだものが入ってくるとする。つまり、

$$\dot{\theta}_{true} = \dot{\theta} + \Delta\dot{\theta} \quad (3.30)$$

である。

これより推定値  $\hat{\theta}$  は

$$\hat{\theta} = \frac{1 - k^2 A_{12}}{s + kA_{12}} \dot{\theta} + \frac{kB_1}{s + kA_{12}} u + \frac{1 - k^2 A_{12}}{s + kA_{12}} \Delta\dot{\theta} \quad (3.31)$$

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 [9]。式 (3.23) より

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} &= \dot{\theta} + \Delta\dot{\theta} + k(A_{11}(\dot{\theta} + \Delta\dot{\theta}) + (A_{12} + D_1)\theta - (B_1 + D_2)u \\ &\quad + k(-A_{12}\hat{\theta} + B_2u) \end{aligned} \quad (3.32)$$

と表されるから、誤差分を  $e$  として

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\hat{\theta}} - \dot{\theta} \\ &= -kA_{12}(\hat{\theta} - \theta) + \Delta\dot{\theta} + k(A_{11}(\dot{\theta} + \Delta\dot{\theta}) + D_2u) + kD_1\theta \\ &= -kA_{12}e + \Delta\dot{\theta} + k(-B(\dot{\theta} + \Delta\dot{\theta}) + D_2u + D_1\theta) \end{aligned} \quad (3.33)$$

となる。ここで、 $\theta \simeq \hat{\theta}$  とすると以下のように式変形できる。

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -kA_{12}e + \Delta\dot{\theta} + k\left\{(A_{11} + \frac{D_1(1 - k^2 A_{12})}{s + kA_{12}})\dot{\theta} + (D_2 + \frac{kB_1 D_1}{s + kA_{12}})u\right\} \\ &= -He + \Delta\dot{\theta} + k(S_A \dot{\theta} + S_B u) \end{aligned} \quad (3.34)$$

ここで、

$$H = kA_{12} \quad (3.35)$$

$$S_A = A_{11} + \frac{D_1(1 - k^2 A_{12})}{s + kA_{12}} \quad (3.36)$$

$$S_B = D_2 + \frac{kB_1 D_1}{s + kA_{12}} \quad (3.37)$$

のように置き換えた [9]。ここで  $S_A$ 、 $S_B$  のノルムを考える。  $s = 0$  とすると、 $S_B$  に関しては

$$\|S_B\|_2 = D_2 + \frac{B_1 D_1}{A_{12}} \quad (3.38)$$

となり、 $k$  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。次に、 $S_A$  については

$$\begin{aligned} \|S_A\|_2 &= A_{11} + \frac{D_1(1 - k^2 A_{12})}{k A_{12}} \\ &= \frac{1}{k A_{12}} \{k A_{11} A_{12} + D_1(1 - k^2 A_{12})\} \\ &= H^{-1} V \end{aligned} \quad (3.39)$$

のように表せる。このとき、

$$V = k A_{11} A_{12} + D_1(1 - k^2 A_{12}) \quad (3.40)$$

とおいた。この  $V$  が 0 に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。よって、 $V = 0$  の方程式を  $k$  について解くことで

$$k = \frac{A_{11}}{2D_1} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{A_{11}}{D_1}\right)^2 + \frac{4}{A_{12}}} \quad (3.41)$$

となる。このときの  $k$  を具体的に算出することでオブザーバと実際の値との誤差が最も小さくなる時の  $k$  が求まる。各定数の値は

$$\begin{aligned} A_{11} &= -B \\ A_{12} &= \frac{M + m}{Ml} g \\ B_1 &= -\frac{1}{Ml} \\ D_1 &= M_d = \frac{M_{true} + m_{true}}{M_{true} l_{true}} - \frac{M + m}{Ml} \\ D_2 &= D = \frac{1}{M_{true} l_{true}} - \frac{1}{Ml} \end{aligned} \quad (3.42)$$

とした。  $B$  は角速度に比例する摩擦項、  $M_d$ 、  $D$  はパラメータ誤差である。これらを式 (3.41)、式 (3.40) に代入すると

$$V = -k B \frac{M + m}{Ml} g + M_d \left(1 - k^2 \frac{M + m}{Ml} g\right) \quad (3.44)$$

$$k = \frac{-B}{2M_d} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{B}{M_d}\right)^2 + \frac{4Ml}{(M + m)g}} \quad (3.45)$$

と表せる。  $M_d$ 、  $D$  は乗る人の身長、体重、姿勢などによる誤差であるが、この値は現実的な状況を考えたときに、大幅に変化するものではない。よって式 (3.45) に出てくるパラメータを考えられる範囲で動かすシミュレーションを行うことにより  $k$  の最適性を議論する。

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。それぞれの値を変化させたときの  $k$  と  $V$  をプロッ

としたシミュレーション結果を図 3.15、図 3.16、図 3.17、図 3.18 に示す。パラメータとしては

図 3.15 : オブザーバのパラメータ  $M = 25[kg]$ 、 $m = 50.05[kg]$ 、 $l = 0.301[m]$ 、 $g = 9.8[m/s^2]$   
 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 ~ 70[kg] まで変化

図 3.17 : オブザーバのパラメータ  $M = 25[kg]$ 、 $m = 50.05[kg]$ 、 $l = 0.301[m]$ 、 $g = 9.8[m/s^2]$   
 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 ~ 0.5[m] まで変化

としてシミュレーションを行った。

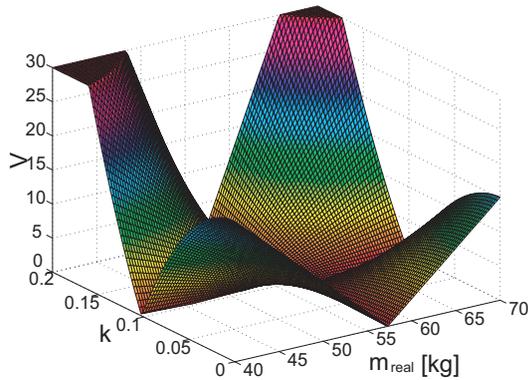


図 3.15:  $m$  を変化させたときのゲイン  $k$  と  $V$  の様子

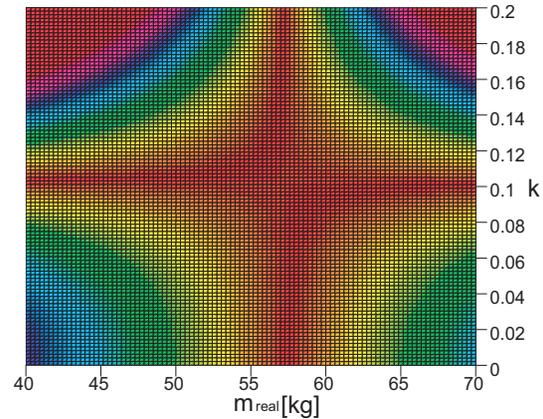


図 3.16: 図 3.15 を真上から見た図

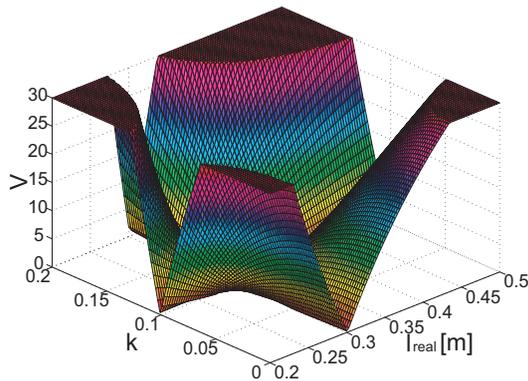


図 3.17:  $l$  を変化させたときのゲイン  $k$  と  $V$  の様子

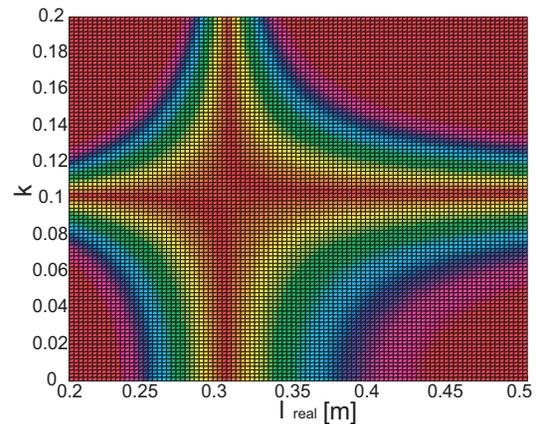


図 3.18: 図 3.17 を真上から見た図

図 3.15、図 3.17 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 3.16、図 3.18 はそれぞれ図 3.15、図 3.17 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る。

# 第4章 後方転倒防止を目的とした各制御手法の実験的検証

## 4.1 実験機の製作と構成

パワーアシスト車椅子の実験装置の製作としてはYAMAHAのJWIIを改造する形で行った。トルクセンサやモータ、制御基板の一部を利用し、周辺に制御に使うセンサ類やPCとのインターフェースを実現した。使用したJWIIの基板の様子を図4.1に示す。この基板は本来図4.2のように車輪の中心に設置してあるものである。

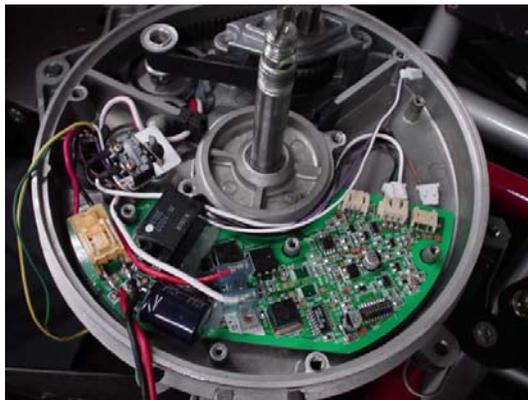


図 4.1: JWII の基板



図 4.2: JWII の車輪の概観と基板の装着の様子

このJWIIの基板にリレーのための電圧信号やPWMの信号を送るためにマイコンを用いた。ここで、パワーアシスト車椅子に取り付けたセンサとマイコンのメーカーと型番を表4.1まとめておく。

表 4.1: センサとマイコンの品名

	メーカー名	品名・型式
ジャイロセンサ	STL Japan	HS-EG3 司 21
ロータリーエンコーダ	日本電産コパル電子株式会社	光学式エンコーダ RE20F-100-200
マイコン	(株)秋月電子通商	H8/3052F 使用 AKI-H8 マイコンボード

パワーアシスト車椅子の制御演算を行う計算機としては、ART-LINUXを搭載したものを利用した。これはRT-LINUXと同様、リアルタイム処理を実現するためのOSであるがRT-LINUXを含めた従来のリアルタイムOSと異なり、メモリ保護機能が有効な非特権レベルでリアルタイム処理を行うため、万が一プログラムに不具合があっても、それ以外の処理やシステム全体は安全であるという特徴を持つ。この計算機のインターフェースは表4.2に示す。

パワーアシスト車椅子の両車輪の角度を測るため、それぞれにロータリーエンコーダを取り付けた。この様子を図4.3に示す。ロータリーエンコーダの電源は車椅子の24V電源を変換回路により $\pm 5V$ に変換して供給している。エンコーダには波形整形回路がなく、近似正弦波が出力されるた

表 4.2: PC のインターフェイス

	メーカー名	品名・型式
AD/DA 変換ボード	(株) インターフェイス	12 ビット入力 8 点出力 4 点 ± 10V 単一レンジ AD/DA 変換ボード CTP-3523
カウンタボード	(株) インターフェイス	エンコーダカウンタボード PCI-6201E

め、図 4.4 周辺回路においてコンパレータ LM319 とその正帰還回路を用いたヒステリシス回路により、カウンタボードに入力するパルス波を生成した。

ジャイロセンサは図 4.5 のように、車椅子の車軸に近いと考えられる、車椅子後部のバッテリー付近に装着した。

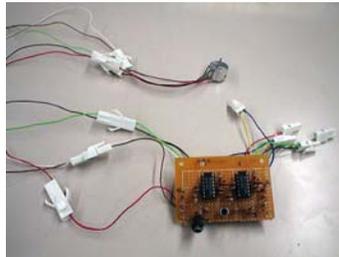


図 4.3: エンコーダの取り付け 図 4.4: エンコーダの周辺回路 図 4.5: ジャイロセンサの装着

ジャイロセンサ、トルクセンサは A/D ボードを通して PC へ、ロータリーエンコーダはカウンタボードへつながっている。エンコーダ制御用の回路やバッテリーの電圧を変換する回路はまとめて車椅子の下に積んである。

PC を含めたパワーアシスト車椅子の実験機の様子を図 4.6 に示す。さらに、図 4.7 にこの実験系を模式的に表した図を示す。

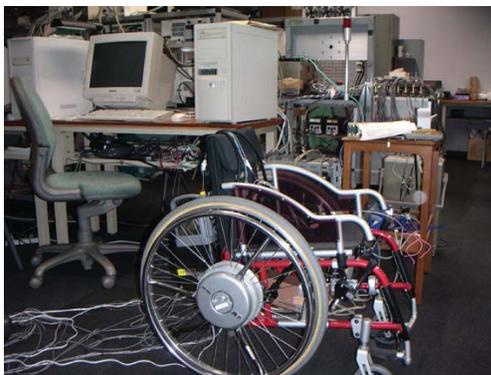


図 4.6: PC を含めた実験系の様子

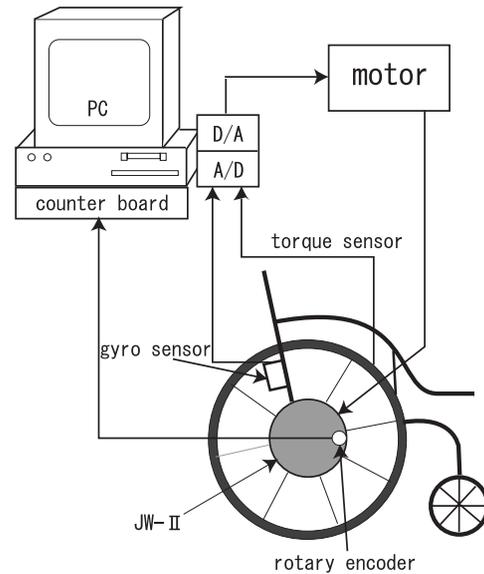


図 4.7: 実験系の模式図

## 4.2 アシストトルク制限による転倒防止制御の被験者を用いた実験的検証

この実験機を用いて三章で述べた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: 通常のアシストアルゴリズム

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

手法 B: アシストトルクの大きさを制限するアルゴリズム

$$\tau_{fast} = 0.08, \tau_{slow} = 1.0, \alpha = 4, 30[\text{Nm}] \text{ でリミット}$$

手法 C: アシストトルクの立ち上がりの早さを制限するアルゴリズム

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

以上 3 種類のアシストアルゴリズム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する。二種類のリミッタをかけたときのパワーアシスト車椅子のトルク入力とアシストトルクの様子を図 4.8、図 4.9 に示す。図 4.8 より、アシストトルクを 30[Nm] 以上出力していない様子が分かる。また、図 4.9 より、人間のトルク入力に対してアシストトルクがゆっくりと立ち上がっている様子が分かる。

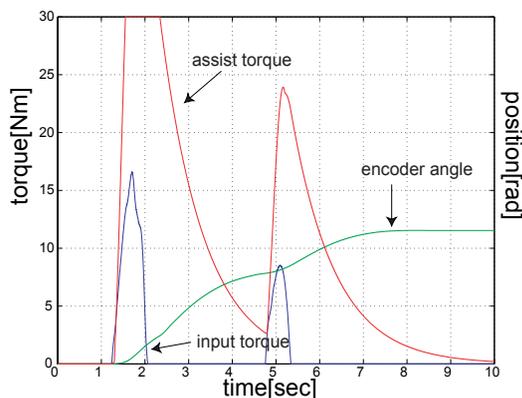


図 4.8: アシストの大きさを制限したアルゴリズム

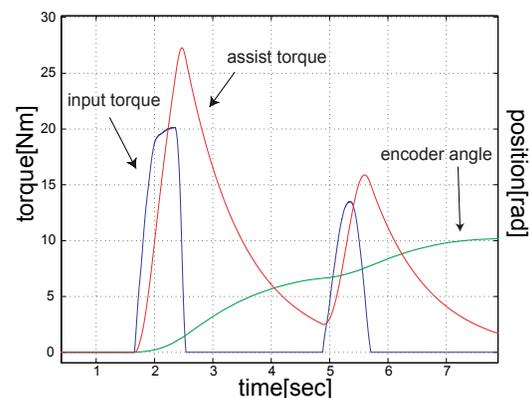


図 4.9: アシストの時定数を制限したアルゴリズム

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や乗り心地

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う。これとは別に前輪浮上が起こったかどうかを判断する。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。被験者としては、さまざまな性別や年齢層の方を対象としている。

このときの実験結果を表 4.3 に示す。前輪浮上の項目では が浮かなかったこと、×が浮いてしまったことを示している。

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 4.4 に示す。

手法 A では高い確率で前輪浮上していたものが、アシスト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。さらにアシスト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アシスト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アシスト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。つぎに、

表 4.3: アシストトルク制限による後方転倒防止の実験結果

被験者	手法 A				手法 B				手法 C				好み
	浮上	1	2	3	浮上	1	2	3	浮上	1	2	3	
1 (男性、20 代後半)	×	+3	+1	+3	×	+1	+1	+1		-1	+1	-1	A
2 (男性、20 代後半)	×	+2	-2	-2	×	+1	0	+1		+1	0	+1	B
3 (男性、20 代前半)		+3	-2	+2		+2	0	+2		0	+3	-1	B
4 (女性、20 代前半)		+3	-2	-1		+2	+1	+2		-2	+3	-1	B
5 (女性、20 代後半)	×	+3	-1	0	×	+1	0	+2		-1	0	0	B
6 (女性、40 代後半)		+3	+1	+3		+2	+2	+2		+1	+3	+1	A
7 (女性、30 代前半)		+3	+2	+3		+1	+2	+2		+1	+2	+2	A
8 (女性、20 代後半)	×	+2	-2	-3		+1	-1	-2		0	0	0	C
9 (女性、40 代前半)	×	+3	-1	+2		+1	0	0		0	+1	-1	A
10 (男性、50 代前半)	×	+3	-3	-3		0	+1	+1		-3	+1	-1	B

表 4.4: トルク制限による各手法の前輪浮上率と好みの結果

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

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 4.10 に示す。

評価ポイント 1 のアシストパワーという点では評価の高い順に手法 A、手法 B、手法 C、ときれいに並んでいる。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。よって大きな制限の手法 B と比べても、アシストトルクの最大値は小さな値となっているため、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早さを、「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 では入力の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と違和感を感じた被験者が多かったようである。手法 B に違和感を感じた被験者は少なかったようであるが、これはアシストトルクの上昇が急激にストップしたとしても人間の入力が加算されているため、トルクの総和としては滑らかになっているからと考えられる。

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。最も人間の調整能力を活かせる手法と考えられる。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。
- 高齢者の方、特に女性の方は力が弱いと、前輪浮上による恐怖感よりも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。実際に手法 A においても前輪浮上しない被験者

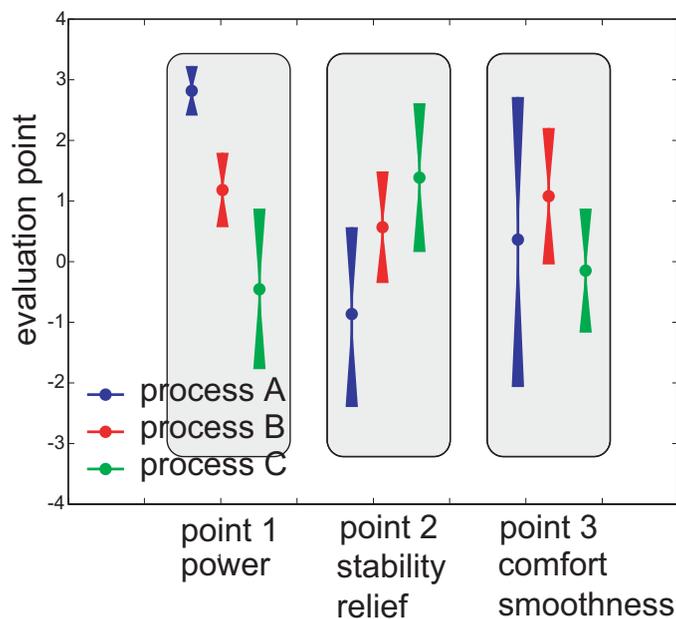


図 4.10: 被験者の各手法に対する評価得点

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、上半身不随で自ら姿勢を変えることが困難な方や、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、本実験でトルク制限によって前輪浮上を防止できることが分かった。今回の被験者は全て健康者だが、これが身障者となるとまた異なる実験結果となることが予想されるが、これは今後の課題としたい。

### 4.3 重心位置推定に基づいた後方転倒防止制御の実験的検証

前輪が浮上したときの重心位置の推定は前述のオブザーバにより行うが、重心位置の真値は測定できないので、正確な推定かどうかを判断する術はない。しかし、図 4.11 のように、前輪浮上状態で釣り合った時の様子と推定値とを比べることにより、推定が正しいかどうかを大まかには知ることができる。

図 4.12 に示すとおり、前輪浮上状態で釣り合って停止している時には重心位置は地面からちょうど鉛直方向にあると考えられる。よってこの図の地面から前輪までの角度が安定点(つまり、人間の姿勢が変化しないと仮定した上での通常走行時の重心位置)  $\theta_0$  と考えられる。この角度は約  $0.33\text{rad}$  ( $18.9^\circ$ ) であった。今回の実験においては通常走行時の人間の姿勢はやや前かがみになっているとして、 $\theta_0 = -0.5[\text{rad}]$  とした。このとき、オブザーバは後方に倒れこむ方向を正としている。

次に、このときの様子をオブザーバで推定したときの結果を示す。

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 4.13 より、推定された重心位置が 0 付近まで立



図 4.11: 前輪浮上状態で釣り合っている様子

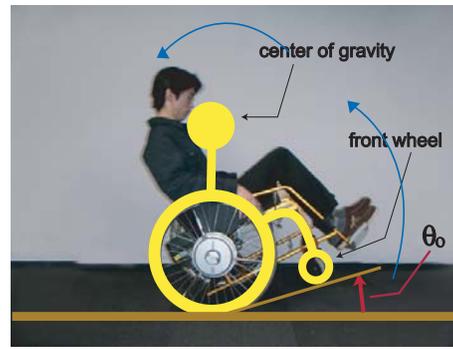


図 4.12: 図 4.11 の解析図

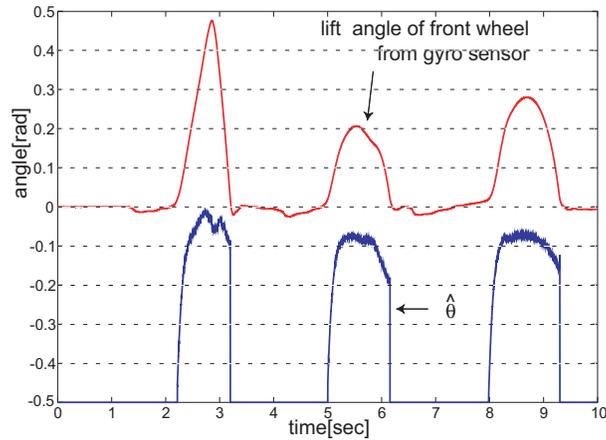


図 4.13: 図 4.12 の重心位置を推定した様子

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  $\theta = 0$  という推定は正しいと考えられる。

次に、位相平面を用いての後方転倒防止制御を行うために、式 (3.20) の入力  $u$  が存在しない場合のモデルを用いて、簡単化された位相平面を描いた。すなわち、用いた式は、

$$\ddot{\theta} = \frac{M + m}{Ml} g \theta \quad (4.1)$$

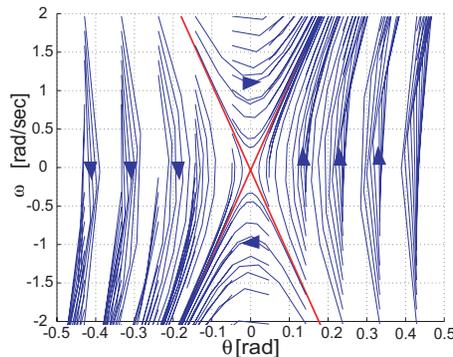


図 4.14: 簡単化された車椅子の位相平面

図 4.14 から、式の上からもこれは双曲線の集合になっていることが分かる。漸近線の式は、

$$\omega = \pm \sqrt{\frac{M + m}{Ml} g \theta} \quad (4.2)$$

となる。この図はこれまでの位相平面とは厳密には一致しないものの、後方転倒防止制御に用いる指標の一つとしては簡易のため扱いやすい。

推定された重心位置と角速度を位相平面に表したものを図 4.15 に示す。さらに、前章の倒立振り子モデルにおける位相平面にこの図を重ねたものを図 4.16 に示す。式 (4.2) の漸近線も重ねた。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ため、前出の位相平面とは角度、角速度共に正負が逆転していることを考慮する。

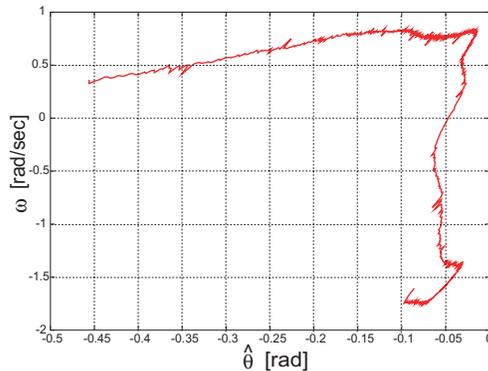


図 4.15: 位相平面に示した実験結果

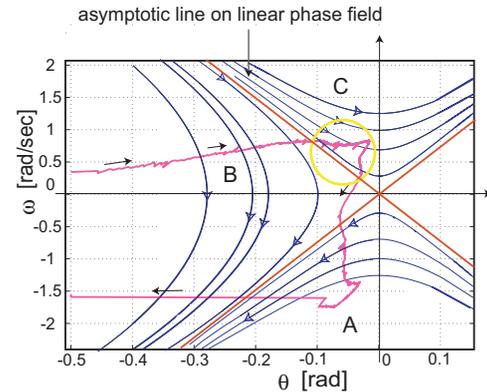


図 4.16: 倒立振り子モデルの位相平面に実験結果を重ねた図

入力に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。

このような危険領域と安定領域の境界線上での動作は熟練していない人にとっては困難かつ危険である。よって、推定された重心位置を用いて、位相平面上での原点からの傾きを考えて、図 4.16 に示す線形化した位相平面での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、 $\eta$  を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、

$$\alpha = \alpha_{max} \exp \beta \eta \quad (4.3)$$

ここで、 $\eta$  は

$$\eta = \tan\left(\frac{\omega}{\hat{\theta}}\right) \quad (4.4)$$

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。 $\beta$  の大小により、減衰の仕方は図 4.17 のように変わる。

図 4.18、図 4.19 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 4.20、図 4.21 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アシスト比の減衰は十分に早く、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 4.20 では明らかに危険領域に入っているのに対して、図 4.21 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の挙動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。

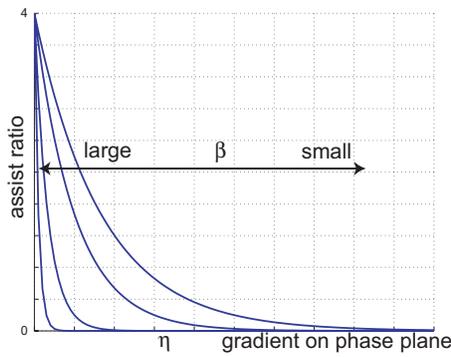


図 4.17: 減衰定数によるアシスト比の減衰の様子の変化

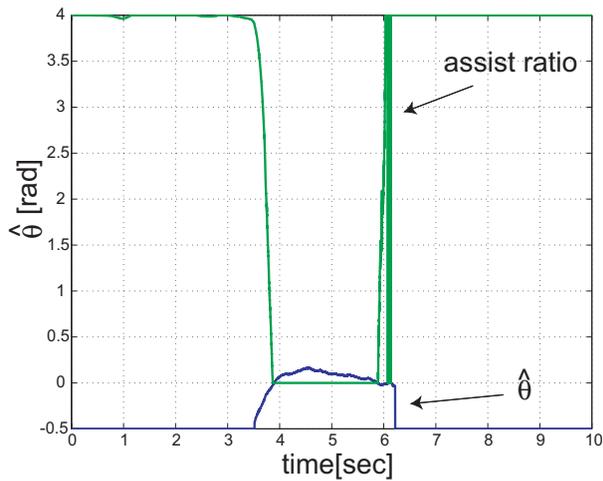


図 4.18: 減衰定数  $\beta = 0.5$  の時の位相平面に基づく後方転倒防止制御の実験結果

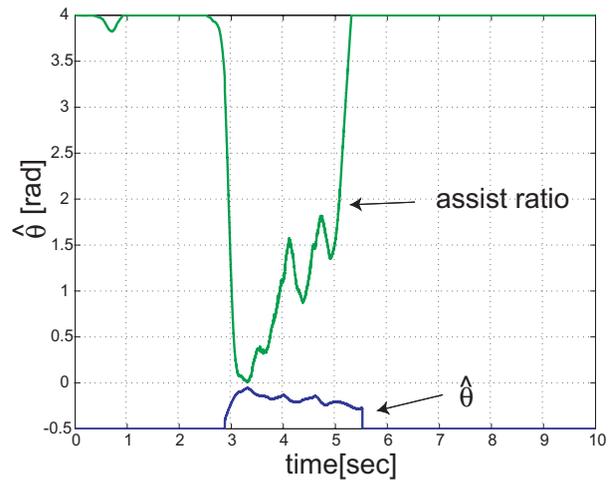


図 4.19: 減衰定数  $\beta = 3$  の時の位相平面に基づく後方転倒防止制御の実験結果

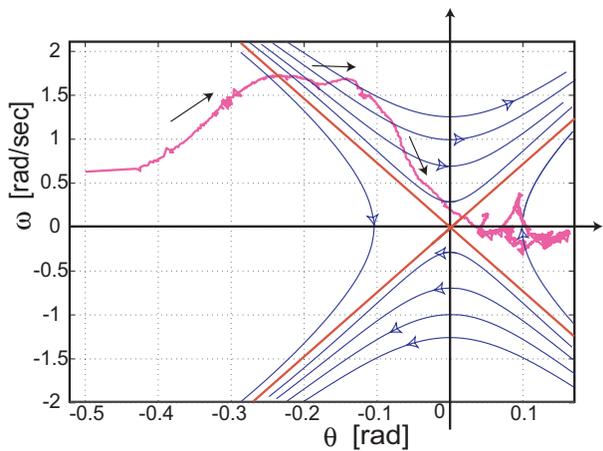


図 4.20: 減衰定数  $\beta = 0.5$  の時の位相平面に基づく後方転倒防止制御の実験結果

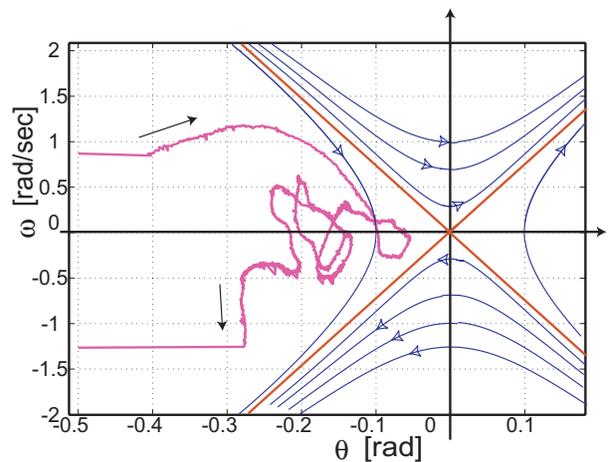


図 4.21: 減衰定数  $\beta = 3$  の時の位相平面に基づく後方転倒防止制御の実験結果

# 第5章 結論

## 5.1 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」の一環として、パワーアシスト車椅子における後方転倒防止現象の防止制御の実現手法を提案した。

始めに、パワーアシスト車椅子の性能と将来性の高さを評価した。次に、増幅された駆動力によって、後方転倒の危険が大きくなるという欠点を指摘し、具体的に後方転倒現象の発生原理を模式図を用いて説明し、位相平面によって解析した。その解析結果により、二通りの制御手法を提案した。

第一の制御手法として、アシストトルクを制限することによる実現手法を提案した。アシストの原理についての考察から導かれる、アシストトルクの大きさ、立ち上がりの早さを制限する二つの手法を提案した。

第二の制御手法として、車椅子 - 人間系の重心位置に基づく実現手法を提案した。車椅子 - 人間系を倒立振り子と見なし、位置制御による後方転倒防止のシミュレーション結果を示した。また、現実の車椅子で系全体の重心位置は測定できないことを考慮して、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。このとき、現実モデルに適用する際に生じる様々な誤差項の存在を指摘し、誤差を最小にするオブザーバゲインを決定する方法を数式とシミュレーションにより示した。

最後に、実験機の製作と構成について述べ、まず、第一のアシストトルク制限による実現手法の被験者を用いた実験結果を示し、有効性を確認した。このとき、被験者からの評価ポイントを考察することにより、各手法の特徴について考察した。次に最適なオブザーバゲインの選別により、重心位置の推定に成功したことを示した。さらに、推定された重心位置を用いた位相平面における解析に基づく制御により、後方転倒防止の提案手法の有効性を示した。

## 5.2 考察と今後の課題

本研究において前輪浮上を許容する場合、しない場合についての提案手法を示したが、福祉機器は本来人間と接して働くため、両者に絶対的な優劣をつけることはできない。

アシストトルク制限による実現手法は前輪浮上を許容しない、走行時の安全性やユーザの精神的な安心感を重視した手法である。パワーアシスト車椅子に慣れていないユーザや、上肢にも障害があり、バランスを取ることが困難なユーザなどには適切な手法と言えるだろう。ただし駆動力が弱いため、非力なユーザによる走行や坂道走行には適していない。

重心位置推定に基づく実現手法は前輪浮上が前提となるため、前輪接地時には通常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利便性を重視した手法である。そのため、ある程度熟練したユーザ、上肢の力が弱く、大きなアシストパワーを必要とする女性などには適切な手法であろう。ただし前輪浮上が頻繁に発生するため、ユーザに恐怖心が生まれるという問題はつきまとう。

人間と機械の協調という観点で考えると前者は、機械が許す範囲内で最大限に人間の調整能力を活かす走行手法と言える。後者は、重心位置を直接位置制御するほど機械主体ではないものの、常に機械に見張られていて、自らの調整能力は必要としない走行手法といえる。この意味でも、両手法はユーザの好みが分かれてくるだろう。

今後の課題として、こういった両手法の利点、欠点を被験者を用いてさらに検証しより良い制御手法を考案すること、坂道や悪路など様々な路面において両制御手法の有効性を検証することなどがあげられる。

## 参考文献

- [1] <http://www1.mhlw.go.jp/wp/wp0-04/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, pp.357-362 (2001).
- [3] 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).
- [4] 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.
- [5] <http://www.nedo.go.jp/iry/JITSUYOKA/link-c1.html>
- [6] Y.Takahashi, S.Ogawa and S.Machida: ”Front wheel raising and inverse pendulum control of power assist wheell chair robot”, in *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation(IECON'99)*, pp.668-673, 1999.
- [7] 堀洋一, 大西公平: 「応用制御工学」, 丸善, pp.56-58, 1998.
- [8] 矢島信男: 「常微分方程式」, 岩波, pp.185-187, 1988.
- [9] 梅野孝治: ”サーボ系のロバスト化とその運動制御への応用に関する研究”, 東京大学博士論文, 1990.

## 発表文献

- [1] 小安雄一, 畠直輝, 関弘和, 堀洋一: ”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”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-03-51, 2003 (発表予定)

# 謝 辞

私が堀研究室にお世話になったのは一年間でしたが、非常に中身の濃い充実した一年間でした。

指導教官の堀洋一先生にはご多忙の中、常に私の研究を気にかけてくださり、ミーティング中の適切なアドバイスはもとより、普段の生活の中でも気さくに話しかけて下さり、研究内容に関する指導を頂きました。先生の細かい気遣いのおかげで一年間頑張れたと言っても過言ではありません。時に厳しく、時に優しいお言葉は私にとって非常にためになり、これからの研究室生活においても深く心に留めて置きたいと思えます。ここに深く感謝いたします。

技術官の内田利之さんには実験機の製作に関するさまざまな適切なアドバイスを頂いた上に実際に作業を手伝っていただきました。深い経験に基づくそのお言葉一つ一つを尊敬の気持ちで受け止めていたことを覚えています。さらには日常生活においても論文の書き方から発表の仕方、そして気晴らしの雑談にも付き合ってください心から感謝しております。本当にありがとうございました。

及部七郎齋さんには、私の研究に関する他愛もない質問や、私の興味からくるネットワークやPC系に関する質問、さらにはTEXを始めとする論文執筆に関する質問にも親身に、そして分かりやすく答えてくださいました。さらに研究や、研究室生活全般に関するアドバイスを未熟な私に的確に示してくださいました。及部さんが研究室にいただけで研究内容や研究室生活全てにおいて安心できました。ここに深く感謝します。

D3の関弘和さんには、研究内容が近いということもあり、研究の進め方や方針、実験機の製作、実験、論文構成、論文執筆、発表構成など言葉では言い尽くせないほど全ての面においてお世話になりました。さらには研究の合間の息抜き、趣味に関する雑談など私生活においても数え切れない程の恩を受けました。私が悩んでいる時や誤った方向性を提示したときなど、的確なお言葉でご指導いただき、また、時には研究内容に関して共に議論を交わしたりと関さんと過ごした時間は私の財産です。日頃のお言葉の中にも福祉制御工学という分野への愛着、誇りを感じて自分も見習いたいと思えました。普段は控えめでありましたが、共に生活する中で見え隠れする強い意志と真っ直ぐな研究に対する情熱を私は尊敬の念で受け取っていました。そのような関さんは私にとって頼れる先輩そのものでした。未熟な私を一年間面倒見てくださり、心から感謝します。本当にありがとうございました。

D1の畠直輝さんには、研究内容が近いということで大変お世話になりました。特に車椅子の実験機製作や、実験に多大な協力を頂きました。マイコンやネットワークに関する広い知識を丁寧に、分かりやすくご指導いただき、さらには細かい計算や、制御プログラムに関する指導まで丁寧に指導いただきました。畠さんの熱心な研究に対する姿勢は私も見習いたいと常日頃思っていました。複雑なマイコンのプログラムや計算機のプログラムを冷静に、かつ適切に処理する姿は私の憧れでした。また、車椅子の実験にも協力して下さり、実験結果などを共に議論して下さった時間は私にとっての財産です。私生活においても、息抜きや雑談にも親切に付き合ってくださいました。ウィットに富んだそのお言葉に和ませてもらったことを覚えています。一年間のご恩をこの文では言い尽くせませんが、ここに深く感謝いたします。

同じくD1の坂東信尚さんは、研究内容やソフトの使い方の細かな疑問点などに親切に答えてくださいました。また、日常生活における雑学をインターネットのページなどを用いていろいろ教えて頂いたり、些細な雑談に付き合ってもらったり、とても話しやすく優しい先輩という印象でした。ここに深く感謝致します。

同じくD1の馬澄斌さんには、研究室生活の過ごし方や、中国語や中国のお話などを頂きました。

私の興味からくる中国に関する質問にも親身に答えてくださって、馬さんと話したことはとても印象深く残っております。ここに深く感謝致します。

M2の岡野隆宏さんには、制御理論を始め、matlabをはじめとするソフトの使い方から研究の進め方、メールの書き方、研究以外の学生生活に至るまで様々な面でお世話になりました。さらには異なる研究分野にもかかわらず、車椅子の実験機製作の際にはEVチームという視点から適切かつ有効なアドバイスを頂きました。些細な一言でも岡野さんの言葉には勇気付けられ、現在に至るまでの大きな糧となりました。ここに深く感謝致します。

同じくM2の戴建華さんには、計算機のシステムのことや、プログラミングに関することなど丁寧に教えていただきました。また、私生活においてもご自分の推奨する本などを貸して下さったりと大変お世話になりました。また、学生生活の息抜きに祖国のことや、様々なご自分の経験を話して下さったりと大変有意義でした。ここに深く感謝致します。

同じくM2張炳勳さんには、研究方針について私に頻繁に声をかけて気にかけて頂いたり、韓国のお話をして頂いたりとお世話になりました。さらに、趣味が同じということもあり、二人で話す機会が多く、とてもお世話になりました。ここに深く感謝致します。

同じくM2の井上友子さんには、TEXを始めとする論文執筆に関して大変お世話になりました。さらには、実家が近いこともあり、研究以外にも趣味や地元のお話などを共にしていただき、おかげで大変有意義な研究室生活を過ごすことができました。ここに深く感謝致します。

M1の呉俊徳さんには、席が隣ということもあり、些細な研究に関する質問をはじめ台湾のお話や、中国語の勉強など様々な面でお世話になりました。なにより研究熱心な呉さんの姿は私にとっての大きな励みとなり、研究に対する意欲と向上心を与えて下さいました。どんなときでも気さくに声をかけて頂いて一年間を頑張る気力を与えて下さいました。ここに深く感謝致します。

同じくM1の古川公久さんには、TEXのことやモータのことなどを懇切丁寧に説明して下さい、また普段の学生生活においても気さくに話して下さい有意義な学生生活を過ごすことができました。常に誠実でかつ勤勉で、誰に対しても優しい古川さんにはとても心癒され研究に対する意欲を与えて頂きました。ここに深く感謝致します。

同じくM1の福井龍さんには、ご自身の旅行先のことなど大変有意義なお話を頂きました。また、日頃から頻繁に声をかけて下さり、他愛もない雑談から研究に至るまで様々な話を共にして頂き、さらには私が悩んでいる時も励ましの声をかけて頂きましたことをここに深く感謝致します。

卒論生の青木健一郎君には、研究についてお互い議論しあったり、時には研究とは関係のない話をしたりと、一年間の研究室生活においてもっとも身近な存在として大変お世話になりました。中間報告、引越し、院試、卒論と様々な局面を同じ卒論生という立場で青木君と共に頑張ってきたこの一年間は私にとって忘れられない一年間です。本当にありがとうございました。

秘書の木村麻里子さんには、いつも私の机に話しかけに来て頂き、研究で疲れた気分を癒してくれたことをここに深く感謝致します。

最後になりましたが、今回の実験の際に被験者として協力していただいた、東京大学生産技術研究所第3部主任秘書の高島さんをはじめとする事務の方々には心から感謝いたします。