

- 卒業論文 -

傾斜環境を考慮したパワーアシスト車椅子
制御の高機能化

平成16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

20354 渡辺信哉

内容梗概

高齢化社会を迎えている我が国において、高齢化に伴う少子化問題もあいまって、高齢者や身体障害者の介護者不足は深刻な問題である。この状況は将来にわたってさらに深刻になると思われる。このような状況のなか高齢者や身体障害者のいっそうの自立が求められ、そのための工学的な支援が必要不可欠となってきた。

本論文では工学的支援をおこなう移動用機器であるパワーアシスト車椅子に注目し、現在のパワーアシスト車椅子の課題である、坂道での走行の諸問題が、重力による影響が原因になっていることに注目し、重力による影響を除去するための制御手法を2つ提案する。

ひとつは外乱オブザーバを用いたフィードバック制御で、重力を外乱として除去することで、重力による影響を取り除く。もうひとつは、傾斜角の推定に基づく重力成分の補償を行う方法で、傾斜角を推定し、そこから重力成分を計算することでモータトルクを増やして重力成分の補償を行う。

初めにこの2つの制御手法の制御手法を紹介し、いくつかの実験を通してこれらの制御法の有効性を紹介していく。

次にこれらの手法の問題点を整理し、これら2つの制御法を組み合わせることで、互いの問題点を打ち消し、より良い制御法となることを実験結果を通して紹介する。

最後に今後の展望について述べる。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	車椅子を取り巻く環境	1
1.1.2	パワーアシスト車椅子とは	2
1.1.3	パワーアシスト車椅子の問題点	3
1.2	研究の目的	3
1.3	本論文の構成	4
第2章	坂道におけるパワーアシスト車椅子の運動	5
2.1	車椅子の運動モデル	5
2.2	パワーアシスト車椅子の運動モデル	5
第3章	傾斜環境を考慮した重力補償制御の提案	7
3.1	重力成分の推定の必要性	7
3.2	制御方法の提案	7
3.2.1	外乱オブザーバによるフィードバック制御	7
3.2.2	傾斜角推定に基づいた重力補償法	8
3.2.3	両手法の特徴の比較	11
3.3	シミュレーション	12
3.3.1	シミュレーションに使用した車椅子の運動モデル	12
3.3.2	シミュレーション結果および考察	12
第4章	提案した手法の実験機による比較検討	16
4.1	実験機の紹介	16
4.2	実験機による制御手法の検証と考察	17
4.2.1	外乱オブザーバによるフィードバック制御の実験結果	17
4.2.2	傾斜角推定に基づいた重力補償法の実験結果	20
4.3	両手法の比較検討	21
4.4	両手法を組み合わせた新たな制御手法の提案	22
4.5	実験結果	23
第5章	まとめと今後の課題	25
	参考文献	27
	謝辞	28

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 車椅子を取り巻く環境

統計資料 [1] によると、平成 13 年度の肢体不自由者数は 2,480,584 人にも上る。障害の程度はそれぞれあるとして車椅子利用者の数は相当な数になる。また交通事故などで一時的に車椅子を利用する人なども含めれば、車椅子利用者の数は数十万人にも上る。

10 年前、平成 3 年度の肢体不自由者数が 2,058,998 人であるのと比較すると、実に 40 万人も増加している。また交通事故の発生件数も年々増加しており、車椅子利用者の数も年々増加していると考えられる。

また現在日本は高齢化社会を迎えており、高齢者人口は今後さらに上昇していくと考えられる。高齢化に伴う少子化問題もあり、高齢者や障害者の介護者不足が指摘されており、この状況は今後さらに深刻になると予想され、高齢者や障害者の自立が求められている。そのために高齢者や身体障害者の自立を工学的に支援する必要が高まっている。

近年ではバリアフリー化への意識が高まり公共施設や駅、都心部の主要な建物などでは、階段に車椅子用のリフトを取り付けたり、エレベーターを設置し、高齢者や車椅子利用者にやさしい環境が、少しずつではあるが整備がされつつある。しかし、それらの建物はまだ全体のほんの一部に過ぎず、長いスロープが設置されていたり、スロープすら接地されていない場所も依然として多いのが事実である。

普通の車椅子で坂道を登るためにはどのような力が必要か図 1.1 に示す。

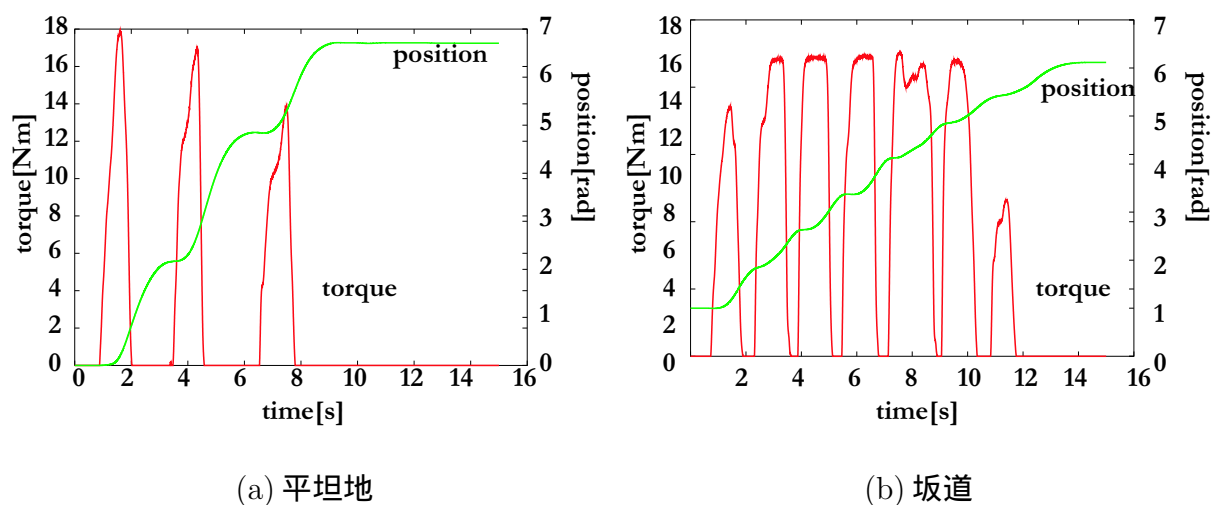


図 1.1: 車椅子走行の傾斜地の影響

1.1 研究の背景

図 1.1 にそれぞれ平坦地と坂道を、普通の車椅子で走行したときの様子を示した。坂道は傾斜角 8.5 °である。図中の各値は、車椅子を漕ぐトルクと移動距離を表している。このように坂道での走行は、操作者にとって大変な負担になっており、工学的な支援が必要である。

車椅子は、大きく分類すると自操型車椅子と他操型車椅子とに分類できる。さらに前者は手動車椅子、パワーアシスト車椅子、電動車椅子の 3 つに分類することができる。

電動車椅子はジョイスティックを用い簡単に操作でき、駆動力が大きいことが特徴である。しかし手先しか動かせない重度の障害者という印象を与える恐れがあり、敬遠されがちである。また重量が重いことが欠点である。

手動車椅子はいわゆる車椅子である。駆動力は操作者の力に依存するので電動車椅子に比べ駆動力は劣るが、軽いため携帯性に優れ車に積むことも容易である。

パワーアシスト車椅子は次節で詳しく説明するが、電動車椅子の駆動力と手動車椅子携帯性を兼ね備えた車椅子として大変注目されている。比較的新しい技術であるため、まだ普及率もあまり高くない。パワーアシスト車椅子の制御はまだまだ完全とはいえず、いくつかの問題点が指摘されている [2]

自操型の車椅子の特徴を表 1.1 にまとめる。

表 1.1: 車椅子の分類

	手動車椅子	パワーアシスト車椅子	電動車椅子
負担	大きい	小さい	ほとんどなし
駆動力	操作者に依存	大きい	大きい
機動性	良い	良い	悪い
携帯性	良い	良い	悪い

1.1.2 パワーアシスト車椅子とは

車椅子の原型は古くは紀元前の中国に見られるそうだが、現在のような車椅子は 1932 年ごろから製作され始めた。電動車椅子は 1940 年代には車椅子に改良を加え、DC モータと減速機をつけたものが発売されている [2]。パワーアシスト車椅子は手動車椅子の利用者や介護者の要望をもとに、手動車椅子の携帯性と電動車椅子軽快な操作性を併せ持った車椅子として開発・商品化されてきた [3][4]。

1996 年にヤマハ発動機社から発売された JW II [5] を例にその制御法の基本を説明する。JW II では人間がリムに加えた力を検出するトルクセンサに、ばねとポテンシオメータを用いたトルクセンサを用いている。操作者がハンドリムに力を加えると、トルク信号とともに速度センサの情報も取り込まれ、マイコンによってアシスト量を決定する。アシスト量の決定は最高速度 6km/h までは一定の比でアシストし、それ以上ではアシストは行わない。また駆動力が小さい範囲では誤動作を防ぐために閾値が設定されている。その後決定されたアシスト量になるように駆動用モータを制御している。ハンドリムを持ち替えるために、操作者の力は間欠的になり、その間は駆動系の摩擦が妨げとなって自然な動きが損なわれるため、モータの駆動力を時間とともに減衰させ慣性を作っている。

1.1.3 パワーアシスト車椅子の問題点

パワーアシスト車椅子に求められる性能は、

- 力の増幅・動作の補助
- 安全性・安心感・操作性・使いやすさ
- 操作者に環境の情報を感じさせること
- 幅広く対応できること

があげられる。第一番目はパワーアシスト動作そのものであり、あらゆる路面環境であっても走り続けられる必要がある。第二番目は急な加速での後方転倒の防止など危険防止の性能や、直進性など操作者にストレスを感じさせない制御が必要になる。第三番目は坂道や多少走りにくい路面では、操作者に環境の情報を感じさせることで、操作者に危険な状況にあらかじめ備えさせることで、事故の防止にもつながる。第四番目は車椅子の性質上さまざまな場面での走行が考えられるので、どのような状況でもある程度の力が発揮できるような制御が必要である。

これらの要求事項のうち、力を増幅し、操作者の負担を軽減することはできているがまだまだ問題は多い[6]。現在のパワーアシスト車椅子ではパワーをアシストする制御しか行われていない。例えば砂利道や石畳などの路面状況や、坂道などで走行負荷が2倍になれば、操作者の負担も単純に2倍になる。このような状況ではアシスト量を増やすなどして、操作者の負担を軽減させる制御が必要である。

市街地を走行するとスロープを使用する機会は大変多い。スロープを登るためには登りきるまで漕ぎ続けるか、長いスロープなどでは途中で止まらざるを得ない状況も考えられる。また止まっている状態で急にリムを漕いだり、後ろ向きに下っているときにリムを押さえたりすると前輪が浮上し、後方転倒の危険があり、上り坂ではあまり力を入れて漕ぐことがない。このようにスロープの走行は高齢者に限らず、車椅子利用者にとって大変な負担になっている。

また下り坂では、リムを手で押さえその摩擦で速度が出過ぎないように調節しながら下りなければいけない。この際もし手が離れてしまうと車椅子は一気に加速し、車椅子利用者にとって下り坂の走行は常に危険と隣り合わせの状況である。

砂利道などの悪路では通常の車椅子よりも楽に走行できるが、その性能が十分発揮できているとはいえない。無理に力を入れて漕ごうとすると後方転倒の危険あり、気をつけなければいけない。

このようにパワーアシスト車椅子の制御には、まだいくつかの問題が残っている。

1.2 研究の目的

以上の問題点をふまえ、本研究では走行する機会の多い坂道での走行に焦点を当て、重力による影響を除去する方法を提案し、

- 上り坂での負荷を減らす

1.3 本論文の構成

- 下り坂を安心して下れる
- 坂道以外にも幅広く対応できる

これらを目標にパワーアシスト車椅子制御の高機能化を目指す。

1.3 本論文の構成

本論分ではまず 2 章でパワーアシスト車いすの運動を数学的に記述する。次に 3 章では本論文で提案する制御法を紹介し、シミュレーションによる理論の検証をおこなう。4 章では実験機の構成を説明した後、実験の結果を示し、考察する。以上をふまえ、最後に 5 章でまとめ、今後の課題と展望について述べる。

第2章 坂道におけるパワーアシスト車椅子の運動

2.1 車椅子の運動モデル

車椅子の運動モデルとして、Cooper による車椅子のモデル式がよく知られている [7]。Cooper によるモデルは競技用の車椅子に対して行われたものである。ここでは左右輪をあわせて一对の車輪とみなし、前後輪の2輪をベースとした2輪モデルとしてモデル化を行う。

$$f = M \frac{dV}{dt} + \left(\frac{I_f}{r} + \frac{I_r}{R} \right) \frac{dV}{dt} + kV + F_r + Mg \sin \theta + F_a \quad (2.1)$$

$$F_f = \frac{W_f b_f}{r} \cos \theta \quad (2.2)$$

$$F_r = \frac{W_r b_r}{R} \cos \theta \quad (2.3)$$

$$F_a = CV^2 \quad (2.4)$$

f は操作者がプッシュリムに加える力、 r は前輪半径、 R は後輪半径、 M は操作者と車椅子全体の質量、 I_f 、 I_r はそれぞれ前後輪の車輪慣性、 k は軸粘性減衰係数、 F_f 、 F_r は前後輪における転がり抵抗、 W_f 、 W_r は前後輪の質量、 b_f 、 b_r は前後輪における転がり抵抗係数、 θ は地面の傾斜角（上り坂を正とする）、 C は空気抵抗係数、 g は重力加速度を表す。

2.2 パワーアシスト車椅子の運動モデル

2.1 でモデル化したモデルを元に、パワーアシスト車椅子の運動モデルを数学的に記述する。車輪慣性はその等価慣性質量が、車椅子全体の質量と比べて十分小さいものとし、無視する。また競技用車椅子と比べて最大速度が小さいことから、空気抵抗も無視できるものとする。転がり抵抗については転がり抵抗係数を効力に対する係数としてまとめることができる。

以上よりパワーアシスト車椅子の運動モデルは左辺にモータによるトルク T_m を足して、

$$f + \frac{T_m}{R} = M \frac{dV}{dt} + kV + \mu Mg \cos \theta + Mg \sin \theta \quad (2.5)$$

と表すことができる。 μ は転がり抵抗係数である。これをラプラス変換して係数でまとめると、

$$V = \left\{ \frac{T_h + T_m}{MR} - g(\mu \cos \theta + \sin \theta) \right\} \frac{1}{s + \frac{K}{M}} \quad (2.6)$$

となる。パワーアシスト車椅子の力学系をまとめると図 2.1 のようになる。またブロック線図は図 2.2 である。

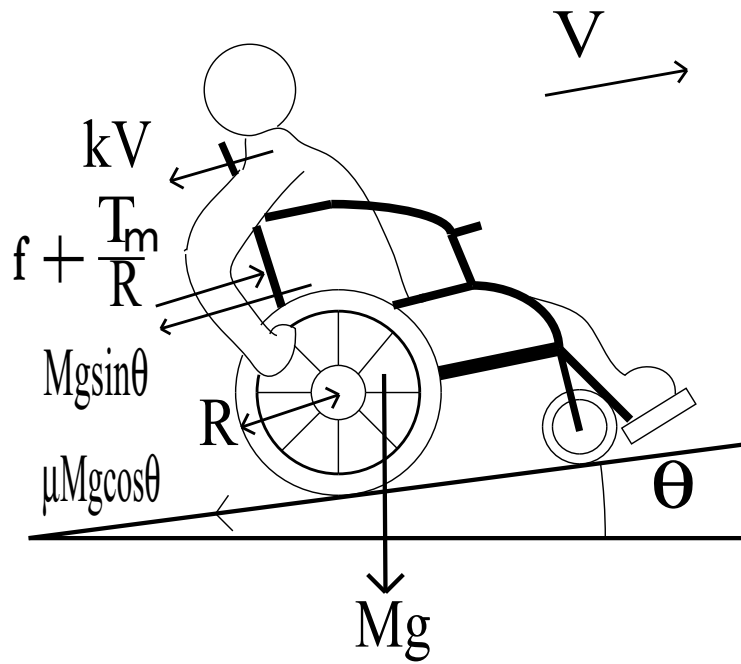


図 2.1: パワーアシスト車椅子のモデル

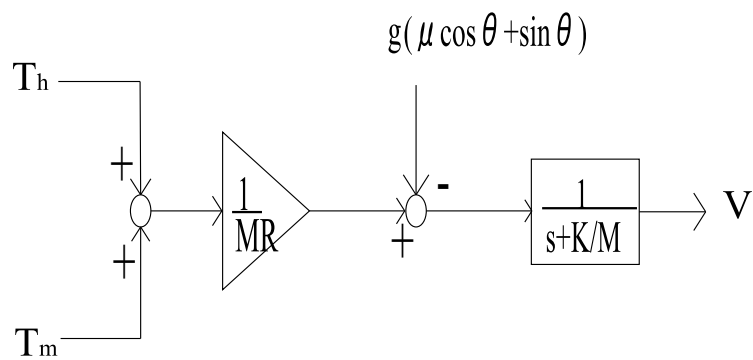


図 2.2: パワーアシスト車椅子のブロック線図

第3章 傾斜環境を考慮した重力補償制御の提案

3.1 重力成分の推定の必要性

1.1.3 で述べたパワーアシスト車椅子の坂道走行における不具合・問題のうち、そのほとんどが重力による影響である。重力による影響を除去することができれば平坦地走行と同じ力で坂道を登ることができ、手を離してもどんどん加速することなく安心して坂道を下ることもできるようになる。車椅子に働く重力の、斜面と水平方向の重力成分（以降これを重力成分と呼ぶ）を検出、もしくは推定することができれば、これをモータ出力に足すことで重力による影響を除去することができる。

重力成分を検出する方法としては、直接重力成分によって車椅子にかかる力を検出・推定する方法と、傾斜角を推定することによって間接的に重力成分を推定する方法とが考えられる。

この章ではそれぞれについての方法を提案し、解説していく。

3.2 制御方法の提案

3.2.1 外乱オブザーバによるフィードバック制御

重力成分を直接検出する方法として外乱オブザーバを使う方法が考えられる。図 2.2 を見て分かるように重力成分は外乱として車椅子に作用する。重力成分を外乱と考えれば外乱オブザーバにより重力成分を求め、モータトルクにフィードバックすることで補償することができる。(2.5) 式から明らかなように、パワーアシスト車椅子の系の状態変数は加速度と速度である。加速度を検出する方法として、加速度センサによる検出が考えられる。加速度センサによる情報は純粋な車体の加速度ではなく、重力ベクトルを含んだ情報が加速度として検出される。純粋な加速度を求めるためには、重力ベクトルを除くための処理がいくつか必要となるので、本稿では速度を用いて外乱オブザーバを設計する。加速度センサに含まれる重力ベクトルを利用する方法は後述する。

速度の検出にはロータリーエンコーダを用いる。ロータリーエンコーダの回転各情報から速度を求めるには、車輪の現在の回転角を $\theta_{now}[\text{rad}]$ 、サンプルタイム $T[\text{s}]$ 秒前の回転角を $\theta_{old}[\text{rad}]$ とすると、車輪の回転角速度 $\omega[\text{rad}]$ は、

$$\omega = \frac{\theta_{now} - \theta_{old}}{T} \quad (3.1)$$

であらわされ、車体の速度 $V[\text{ms}]$ は、

$$V = R\omega$$

3.2 制御方法の提案

$$= R \frac{\theta_{now} - \theta_{old}}{T} \quad (3.2)$$

であらわされる。

しかしロータリーエンコーダの分解能があまり高くないため、このように差分をとるとノイズが無視できない。そこでここでは擬似微分を用いることにする。擬似微分は次式で表される。

$$\omega = \frac{\tau s}{1 + \tau s} \theta \quad (3.3)$$

τ は時定数である。今回の実験では $\tau = 0.1[s]$ とした。逆モデルを使って車体速度から力を求め入力との差を取ることで外乱の力を知ることができる。

外乱オブザーバの構成を図 3.1 に示す。

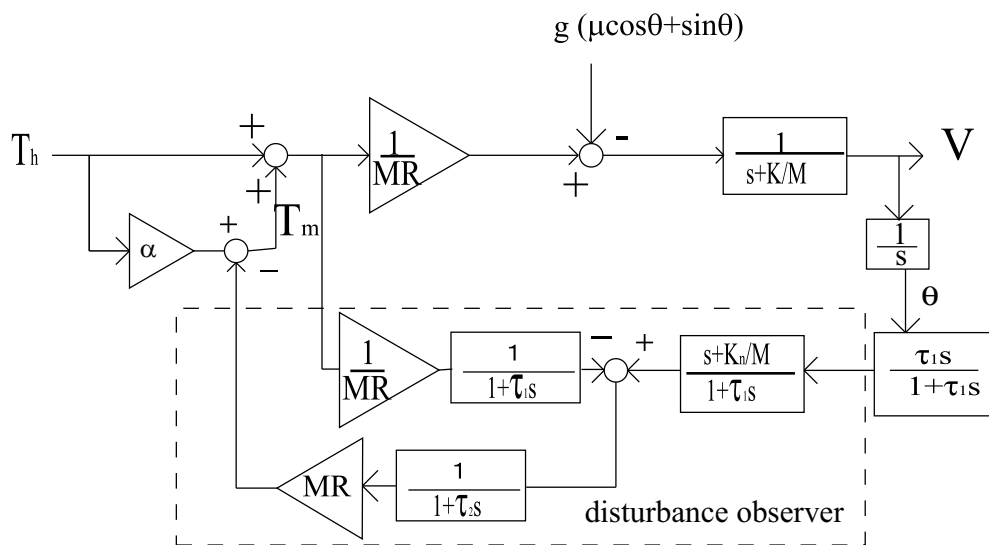


図 3.1: 外乱オブザーバの構成図

入力から出力までの伝達関数 $G_u(s)$ は次式で表される。

$$G_u(s) = \frac{1}{\tau_1 \tau_2 s^3 + (\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \frac{K}{M}) s^2 + \{(\tau_1 + \tau_2) \frac{K}{M} + 1\} s + \frac{K_n}{M}} \quad (3.4)$$

また外乱から出力までの伝達関数 $G(s)_d$ は、以下の式で表される。

$$G_d(s) = \frac{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2) s}{\tau_1 \tau_2 s^3 + (\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \frac{K}{M}) s^2 + \{(\tau_1 + \tau_2) \frac{K}{M} + 1\} s + \frac{K_n}{M}} \quad (3.5)$$

3.2.2 傾斜角推定に基づいた重力補償法

ここでは先ほど述べた加速度センサに含まれる重力ベクトルの情報を利用して、傾斜角を推定するための手順を紹介する。加速度センサの情報による鉛直方向・水平方向の加速度をそれぞれ (A_x, A_y) とし、ジャイロセンサによる車椅子のピッチ回転角速度を ψ とし、エンコーダによる後輪の車輪回転角を左右それぞれ (θ_l, θ_r) とする。

3.2 制御方法の提案

まず加速度センサの座標系と重力ベクトルを鉛直方向とする空間座標系とのオフセット角 θ_0 を測定する。この θ_0 は実験開始後 300[ms] 後において (A_x, A_y) を測定し求めている。

$$\theta_0 = \arccos \frac{A_x}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \quad (3.6)$$

これより加速度センサの座標系と空間座標を合わせる変換式は次式になる。

$$A_{nx} = A_x \cos \theta_0 + A_y \sin \theta_0 \quad (3.7)$$

$$A_{ny} = -A_x \sin \theta_0 + A_y \cos \theta_0 \quad (3.8)$$

静止体であれば、上式より容易に姿勢角 ζ が次式として求まる。

$$A_{ny} = g \sin \zeta \simeq g\zeta, g = \sqrt{A_{nx}^2 + A_{ny}^2} \quad (3.9)$$

$$\zeta = \frac{A_{ny}}{\sqrt{A_{nx}^2 + A_{ny}^2}} \quad (3.10)$$

基本的手法としては、上式より重力ベクトル、姿勢角を求めるが、車椅子が移動体であるためにさまざまな外乱要素が加わってくる。ここで外乱として扱う要素は以下の3点である。

- 直進に伴う加速度 (A_{ny} に作用)
- 方向転換に伴う遠心力 (A_{ny} に作用)
- ピッチ方向の回転角速度・加速度
($\dot{\theta}_l, \dot{\theta}_r, A_{nx}, A_{ny}$ に作用)

直進に伴う加速度

車椅子を前進・後退する際に発生する加速度は、直接 A_{ny} に作用する。この加速度は車輪の回転角速度、すなわち回転角の二階微分 $\ddot{\theta}_r$ に等しい。

$$g\zeta = A_{ny} - \ddot{\theta}_r \quad (3.11)$$

方向転換に伴う遠心力

車椅子の方向転換は自動車に比べはるかに回転半径が小さく、定置旋回など回転中心が車体範囲内に存在することもある。このため後輪接地位置と加速度センサの設置位置の違いを考慮する必要がある。左右輪の回転速度をそれぞれ $(\dot{\theta}_l, \dot{\theta}_r)$ とし、この場合の加速度センサを設置している右車輪の半径 R を次式で定義する。

$$R = \frac{\dot{\theta}_l L}{\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l} \quad (3.12)$$

旋回角速度 w は左右の車輪の間隔 L を用いて、次式のように表せる。

$$w = \frac{\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l}{L} \quad (3.13)$$

3.2 制御方法の提案

これより A_{ny} 方向に作用する遠心力成分は、

$$r_1 w^2 \quad (3.14)$$

となる。 r_1 は車軸と加速度センサの距離である。さらに旋回角加速度は、まず加速度の回転中心を次式で定義する。

$$R_A = \frac{\ddot{\theta}_l L}{\ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_l} \quad (3.15)$$

旋回角加速度 \dot{w} は次式となる。

$$\dot{w} = \frac{\ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_l}{L} \quad (3.16)$$

これより右車輪に発生する加速度と加速度センサに発生する加速度の差は、

$$r_2 \dot{w} \quad (3.17)$$

となる。 r_2 は右車輪と加速度センサの距離である。以上より、

$$A_{ny} = \ddot{\theta}_r + g\zeta + R w^2 - R_w \dot{w} \quad (3.18)$$

となる。

ピッチ方向の回転角速度・加速度

ここではピッチ方向、すなわちウィリーなどの運動方向の外乱を考える。車椅子の直進速度の検出にエンコーダを用いているが、エンコーダ情報そのままではウィリーなどの直進でない運動も検出してしまふ。具体的には、静止した状態で前輪を持ち上げると、静止しているにもかかわらずエンコーダは回転を検出する。したがってピッチ方向の外乱を除去する必要がある。

ウィリー動作の除去には、ジャイロセンサからの回転角速度 ψ がそのまま利用可能である。したがって車輪回転角速度 ($\dot{\theta}_l, \dot{\theta}_r$) から差し引くことで解決する。

$$\dot{\theta}_{nr} = \dot{\theta}_r - \psi, \quad \dot{\theta}_{nl} = \dot{\theta}_l - \psi \quad (3.19)$$

エンコーダ情報の補正は以上である。次にピッチ方向の運動が加速度センサに与える影響を考察する。回転運動に伴う遠心力などの影響が A_{ny} の外乱であるから、

$$A_{ny} - r_1 \dot{\psi}^2 \quad (3.20)$$

が考えられる。さらに、 A_{nx} においては純粹に回転の加速度が外乱として加わる。したがって A_{nx} に加わる外乱は、

$$A_{nx} - r_1 \dot{\psi} \quad (3.21)$$

となる。以上より、重力ベクトル・路面傾斜角を検出するために除去する外乱も含めて記すと、

$$A_{ny} = g + r_1 \dot{\psi} + D_x \quad (3.22)$$

$$A_{nx} = g\zeta + \ddot{\theta}_r + r_1 \dot{\psi}^2 + r_1 w^2 - r_2 \dot{w} + D_y \quad (3.23)$$

となる。 (D_x, D_y) は依然として残っている外乱成分をまとめたものとする。以上をまとめると図 3.2 のようにあらわせる。

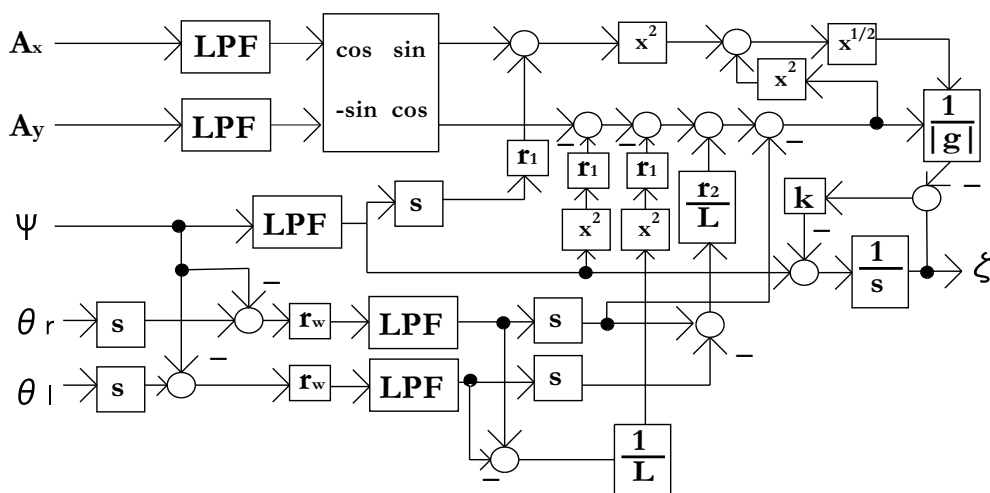


図 3.2: 傾斜角推定のブロック線図

ジャイロの回転角速度の積分による姿勢角

これまで車椅子の姿勢角の検出には簡易的にジャイロセンサの情報を積分しただけの角度情報を用いてきた。これまでは実験時間が短く蓄積する誤差は問題にならなかったからである。しかし常時車椅子の姿勢角を検出するには誤差の蓄積が大きくなるため、積分は不向きである。したがって加速度センサによる検出を目指す。

上述したようにいくつかの処理を加えることでほとんどの外乱を除去し、車椅子の姿勢角を検出できるようになった。残る問題は移動中に路面から受ける衝撃である。加速度センサではこのノイズの影響を受けてしまい姿勢角の検出精度を下げってしまう。一方ジャイロセンサではこのノイズによる影響は加速度センサに比べて小さい。したがってジャイロセンサと加速度センサを組み合わせられればよりノイズの影響を受けにくい手法となるだろうこのような手法に、本稿では単純にジャイロセンサの積分に、加速度センサからの誤差を含めるフィードバックを採用し次式で表す。

$$\dot{x}_g = \psi - k(x_g - \zeta) \tag{3.24}$$

3.2.3 両手法の特徴の比較

外乱オブザーバを使うフィードバック制御の特徴は、坂道以外に不整地にも幅広く対応できることである。不整地などで走行抵抗が増したときでも、走行抵抗は外乱となるので走りにくい路面でも通常の走行と同じ力で走行できると考えられる。また外乱オブザーバの最大の特徴は前節で示したように、 τ_1 、 τ_2 、 K_n の値をいろいろと調整することで入力応答、外乱応答を变化することができる。その様子については次節で詳しく見ていく。前節でのべたパワーアシスト車椅子に求められる条件のうちかなりの部分を満たすことができる。特に下り坂においてはスピードが出すぎる危険性がないので安心感という点では、かなりの向上を見込める。しかし上り坂については以前よりも有効にパワーを使えるようになった分、後方転倒の危険性は増す可能性があり、注意が必要である。

傾斜角推定に基づく重力補償法の特徴は平坦地で通常走行している場合には、従来のパ

ワーアシスト車椅子とまったく変わらないことである。したがって不整地など走行抵抗が大きくなればその分使用者に対する負荷も増すことになる。また坂道においては、外乱オブザーバと同様に重力による影響の補償はするがその特性自体を変えることは難しい。傾斜の検出が正確に行われたとしても、車椅子と操作者の重量がわかっていなければ、完全に重力の影響を除去できないなどの問題もある。また傾斜の検出がなければ、モータ出力は従来のみである。両手法の特徴を表 3.1 にまとめた。

表 3.1: 両手法の特徴

	外乱オブザーバ	傾斜角推定
重力の補償	重量が分からなくてもできる	重量がわからないと完全にはできない
不整地への対応	走行抵抗を打ち消す	不可
特性の変更	ある程度設定できる	不可

3.3 シミュレーション

3.3.1 シミュレーションに使用した車椅子の運動モデル

提案した制御法のうち、外乱オブザーバを用いた重力補償法について MATLAB を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションの目的はオブザーバの定数である K_n 、 τ_1 を変化させることで、入力応答や外乱応答にどのような影響を与えるかを調べること、坂道や平坦地での走行の様子を知るためである。

シミュレーションモデルには 2.2 でモデル化したモデルを用いたが、摩擦による影響は無視した。エンコーダからは正しい車輪の回転角が得られているとする。シミュレーションに用いた各パラメータの値は $M = 90[\text{kg}]$, $K = 120$, $T = 0.001[\text{s}]$, $\tau_2 = 0.1[\text{s}]$, $R = 0.3[\text{m}]$, $\theta = 3[\text{degree}]$, $\alpha = 3$, $g = 9.8[\text{m/s}]$ である。なお T はサンプルタイムである。

3.3.2 シミュレーション結果および考察

まずはじめにパラメータの変化による外乱特性の変化を知るために $\tau_1 = 0.5[\text{s}]$ に固定し、 $K_n = 50 \sim 250$ の間で変化させたときの外乱特性の変化をシミュレーションした。次に、今度は $K_n = 120$ に固定し、 $\tau_1 = 0.1 \sim 1.5$ の間で変化させたときの外乱特性の様子をシミュレーションした。その様子を図 3.3、3.4 に示す。

外乱としては傾斜角 5° における重力成分による力をシミュレーション開始後 $1[\text{s}]$ の時点からステップ状に加えたものを用いた。 K_n を大きくしていくとだんだん速度の最大値が小さく、速度の減衰が速くなり、さらにはアンダーシュートを生じる。 K_n が大きいほど外乱に対して強くなっていくが、大きくしすぎるとアンダーシュートが生じ振動を生じる。またあまり急に減衰して止まると上り坂では前輪浮上の可能性も考えられる。

τ_1 においても τ_1 が小さくなるほど速度の最大値が小さく、減衰が早くなっていく。しかし τ_1 を小さくしていてもアンダーシュートを生じることはなかった。外乱を抑圧するの

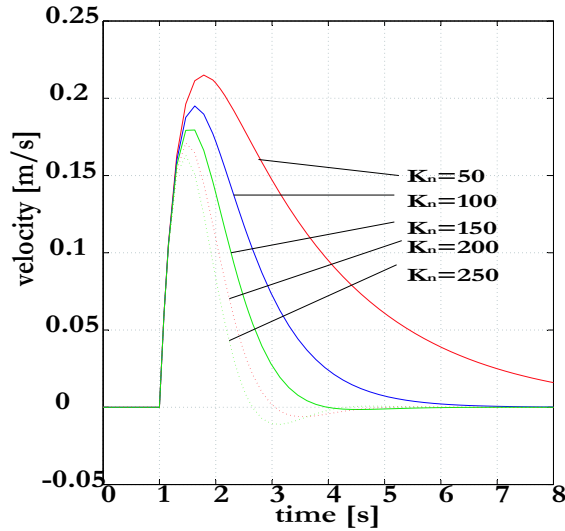


図 3.3: 外乱応答 ($\tau_1 = 0.5[s]$)

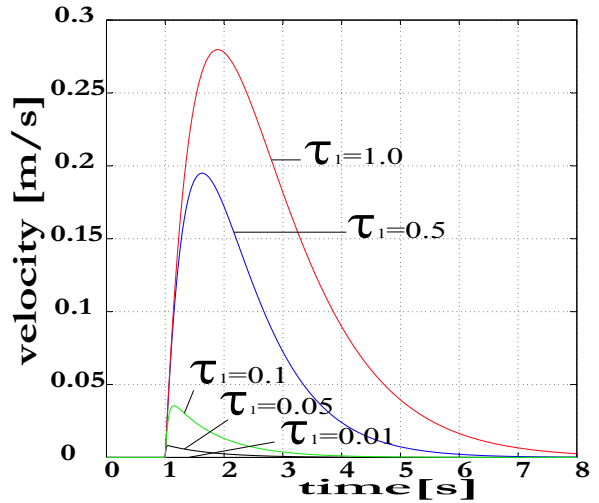
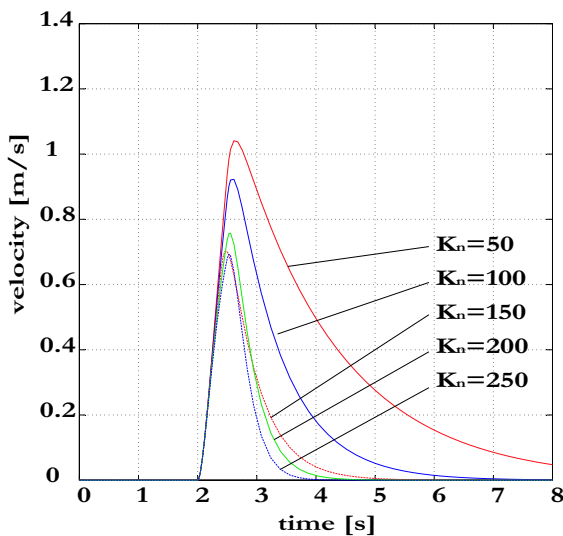


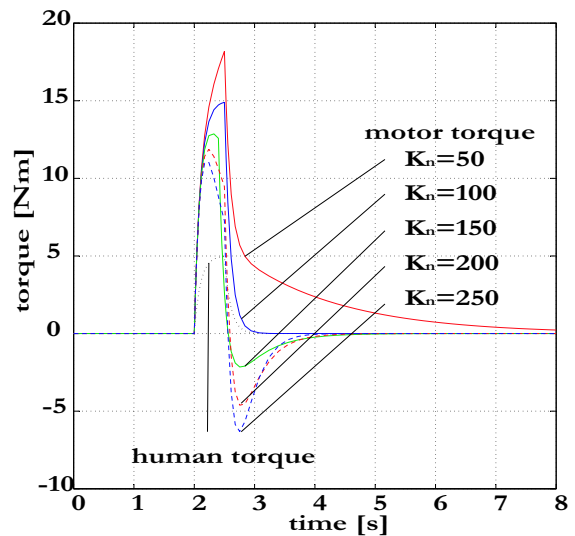
図 3.4: 外乱応答 ($K_n = 100$)

が早くなり、したがって外乱に対して強くなっているのがわかる。しかし τ_1 はローパスフィルタの時定数であるので、あまり小さくしすぎるとノイズを除去できなくなり振動的になってくる可能性がある。

また外乱オブザーバでは入力に対する応答も K_n を変化させることで変えることができる。 $\tau_1 = 0.1$ に固定して、 $K_n = 50 \sim 250$ まで変化させたときの入力応答を図 3.5 に示す。



(a) 入力応答 ($\tau_1 = 0.1$)



(b) Torque

図 3.5: K_n による入力応答の変化

K_n が大きくなると入力に対する応答も速度の減衰が速くなる。またモータトルクもアンダーシュートを生じている。外乱応答を考えると K_n を大きくとりたいが、速度の立ち上がり立下りが速くなり、乗り心地は良くないであろう。 K_n をどの程度に決めるかが重要で

3.3 シミュレーション

ある。

次に $K_n = 120$ 、 $\tau_1 = 0.1$ として、坂道の登り、下りの各走行をシミュレーションした。シミュレーション開始時点では車椅子は平坦地に位置し、0.3 m 走行すると坂道になる。坂道は傾斜角 3° で、全長 2 m である。その後はまた平坦地とする (図 3.6)。下り坂はその逆である。シミュレーションの結果を図 3.7 に示す。

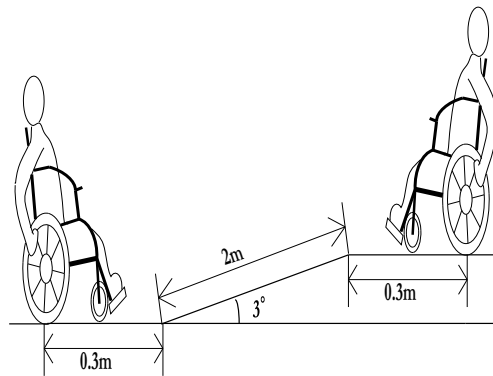


図 3.6: シミュレーションの位置関係

登り、下りどちらにおいても重力による影響をモータによって補償し、重力の影響を除去している。特に下りにおいては、手を離しても車椅子が加速することなく速度が減衰していくので安心して走行することができる。

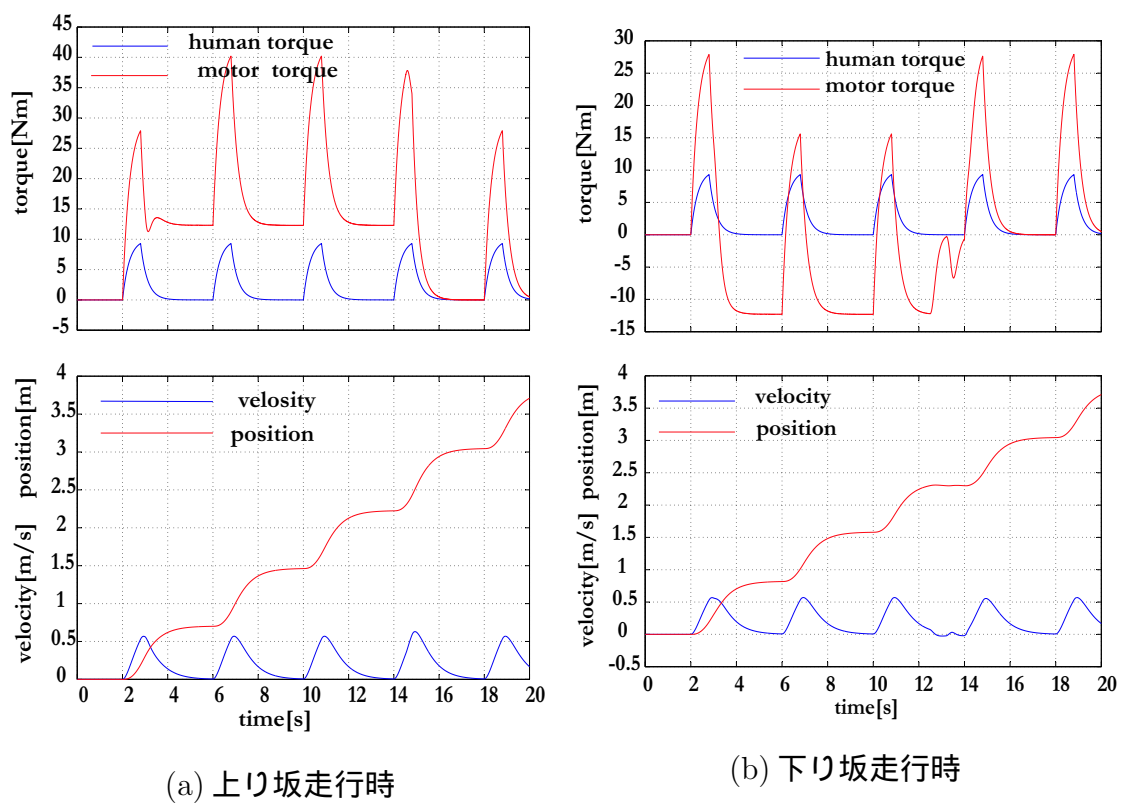


図 3.7: 外乱オブザーバを用いたフィードバック制御

第4章 提案した手法の実験機による比較検討

4.1 実験機の紹介

今回提案した制御手法の有効性を実験機によって検証する。実験機はYAMAHAから市販されているパワーアシスト車椅子、JWIIを改造したものを用いた。トルクセンサやモータ、制御基盤の一部を利用し、周辺に使うセンサ類やPCとのインターフェイスを実現した。このJWIIの基盤にリレーのための電圧信号やPWMを送るためにマイコンを用いた。各種センサとマイコンの型番を表4.1に示す。

表 4.1: センサとマイコンの型名

	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
加速度センサ	ANALOG DEVICES	ADXL202
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PCを用いた。これはRT-Linux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当て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機能を持つ。この計算機のインターフェイスを表4.2にしめす。

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	PCI-6201E

パワーアシスト車椅子の両車輪の回転角度を測るため、それぞれにロータリーエンコーダを取り付けた。ロータリーエンコーダの電源は車椅子の24Vの電源を変換回路により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め、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。

4.2 実験機による制御手法の検証と考察

ジャイロセンサは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。加速度センサも車椅子の車軸に近いバッテリー付近に取り付けた(図4.2)。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。



図 4.1: 実験機の外観



図 4.2: 加速度センサ・ジャイロセンサの取り付け

4.2 実験機による制御手法の検証と考察

4.2.1 外乱オブザーバによるフィードバック制御の実験結果

はじめにシミュレーションで得られた入力特性・出力特性を調べるための実験を行った。 $\tau_1 = 0.5[s]$ で固定し、 $K_n = 50 \sim 250$ まで変化させた時の外乱応答を図4.3に示す。次に $K_n = 120$ 一定として、 $\tau_1 = 0.1 \sim 1.5$ まで変化させた時の外乱応答を図4.4に示す。実験は傾斜約 8.5° の坂において、初め車椅子を支えておいて実験開始後1秒付近で手を離し、重力成分を外乱として与え、応答の様子を計測した。

実験に用いた各パラメータの値を以下に示す。

$K = 140$, $M = 20 + 70$ (車椅子+人間)[kg], $\tau_1 = 0.3[s]$, $\tau_2 = 0.1[s]$, $R = 0.3[m]$, サンプルタイム $T = 0.001[s]$

図4.3、4.4より K_n 、 τ_1 による外乱応答の変化はシミュレーション結果(図3.3、3.4)とほぼ一致した。

つづいて、図4.5に入力応答の K_n による変化を示す。入力を等しくするためにPC上でモータにトルク指令を与えて行った。

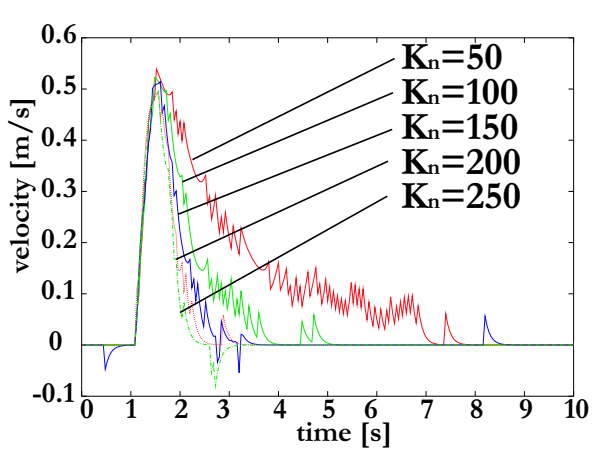


図 4.3: 外乱応答 ($\tau_1 = 0.5$ 一定)

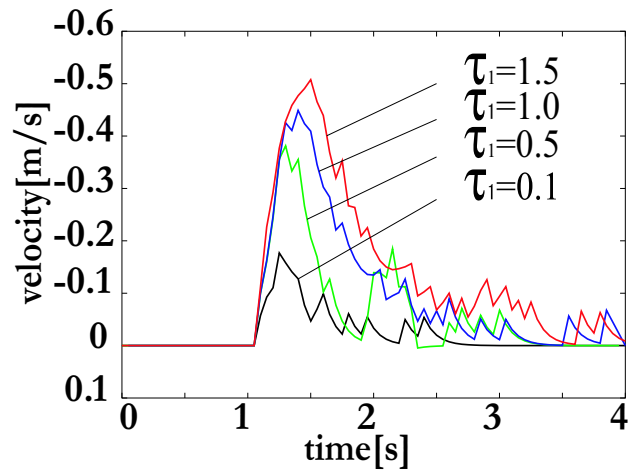
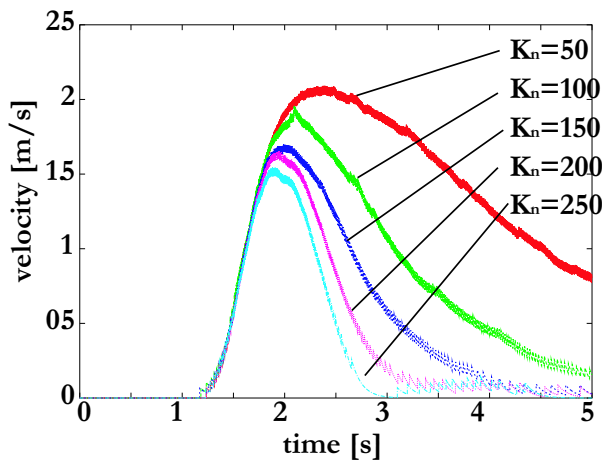
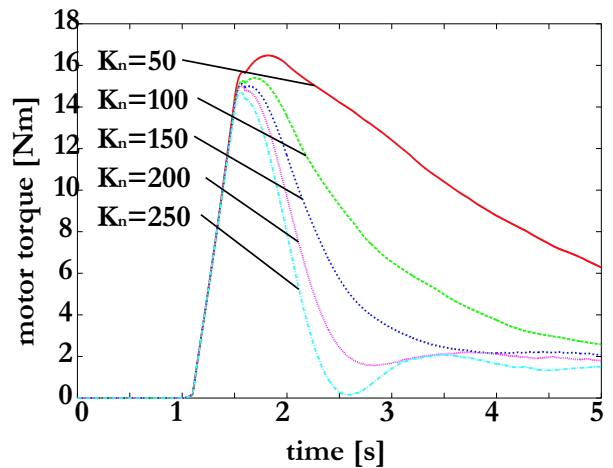


図 4.4: 外乱応答 ($K_n = 120$ 一定)



(a) 速度



(b) モータトルク

図 4.5: 入力応答

4.2 実験機による制御手法の検証と考察

次に各種走行条件での実験結果を図 4.6~4.8 に示す。各図中 1 段目は入力トルクとモータトルクを、2 段目は移動距離を、3 段目は推定外乱を示している。

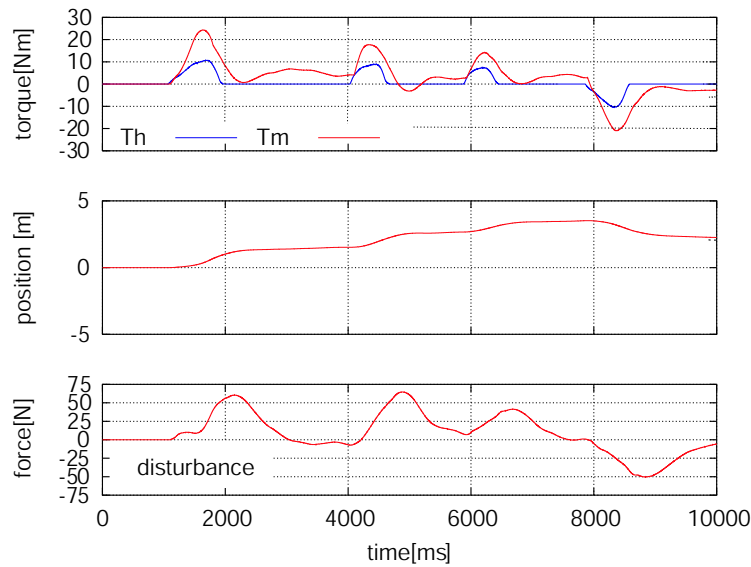


図 4.6: 平坦地での走行

図 4.6 は平坦地を走行したときのデータである。モデルに摩擦の影響を無視したため、速度に比例した摩擦の影響が外乱として推定されてしまっている。この結果少しぎこちない動きになってしまった。車椅子が停止している 3 秒付近でもモータトルクが出ているのは摩擦の影響である。このモータトルクが最大静止摩擦力と釣り合っているため車椅子が止まっている状態である。

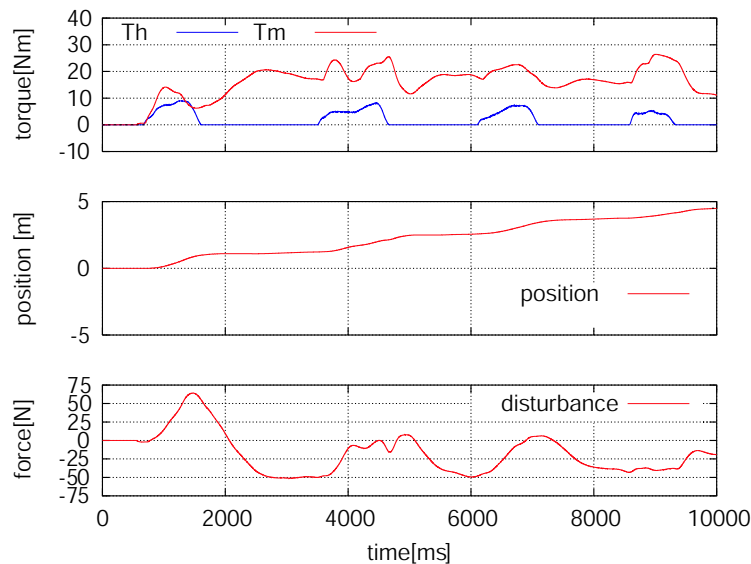


図 4.7: 坂道での走行

図 4.7 は傾斜角約 8.5 度の坂を上ったときの様子を示したものである。坂道に入ってから推定外乱がマイナスにシフトし、モータの出力が重力成分を補償する分だけ、上にシフト

し、重力成分を補償していることが分かる。図 4.6 と比べても、重力の影響はほとんど感じられない。

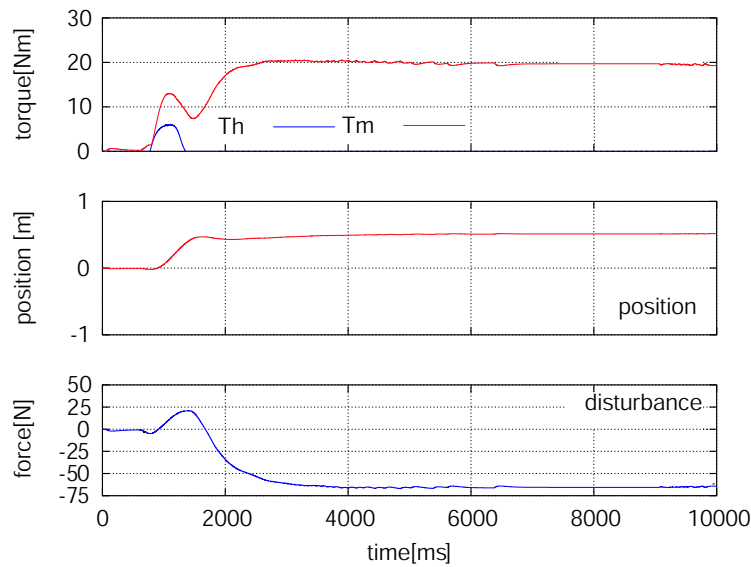


図 4.8: 坂道での停止

図 4.8 は坂道の途中で手を離れたときの様子である。坂の途中で手を離しても車椅子が完全に静止することができた。これによって長い坂道もゆっくりと、楽に登ることができ、また下り坂では安心して走行することが可能となる。

以上の実験によって、提案した外乱オブザーバによる重力項の推定に基づき重力項を補償する方法の有効性が示された。

4.2.2 傾斜角推定に基づいた重力補償法の実験結果

こちらの実験も外乱オブザーバと同様の条件で行った。図 4.9、4.10 にそれぞれ平坦地、上り坂を登ったときの様子を示す。左図中の各値はジャイロセンサの積分値、加速度センサから求めた傾斜角の推定値、両者から求めた傾斜角の推定値を表している。右図中の各値はそれぞれ、入力トルク、モータトルク、移動距離を示している。

平坦地の走行において傾斜角の推定値は $\zeta = \pm 0.02[\text{rad}]$ になっている。 $0.02[\text{rad}] \approx 1.15[\text{degree}]$ でかなり精度よく推定できている。モータトルクも通常のパワーアシスト車椅子と、同じように作用している。外乱オブザーバのときのようになぎこちない動きはなかった。

傾斜角の推定がうまくいけば後は車椅子と操作者の体重を知ることができれば重力成分の補償は容易である。今回の実験では操作者の体重と車椅子の重量は分かっているものとして実験した。

傾斜角の推定値は $0.15[\text{rad}]$ で $0.15[\text{rad}] \approx 8.6[\text{degree}]$ となり、坂道においても精度よく測定できている。

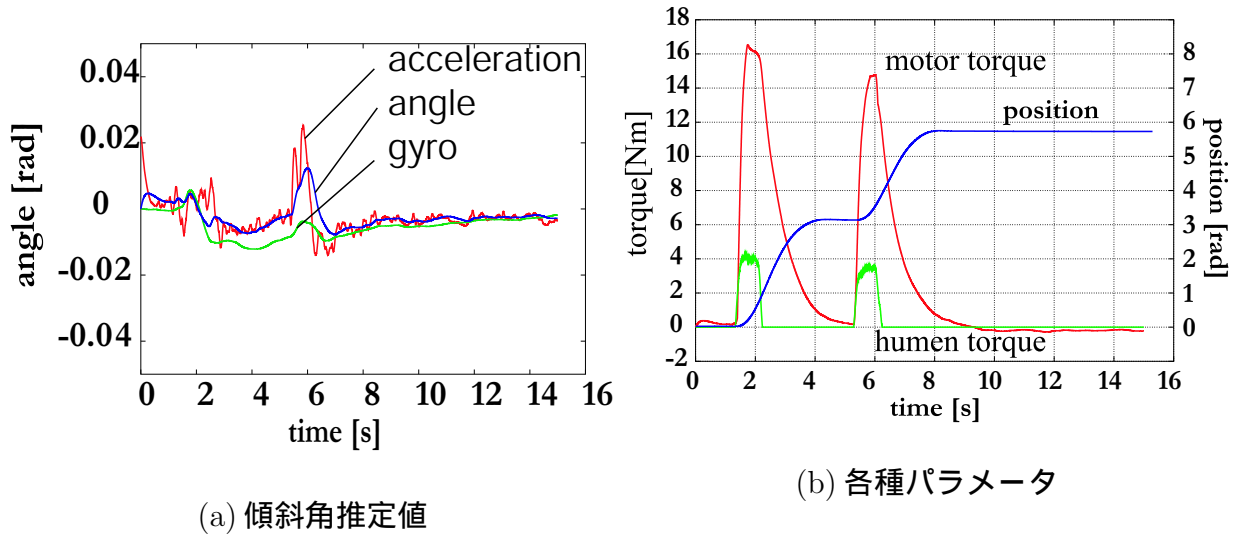


図 4.9: 平坦地での走行

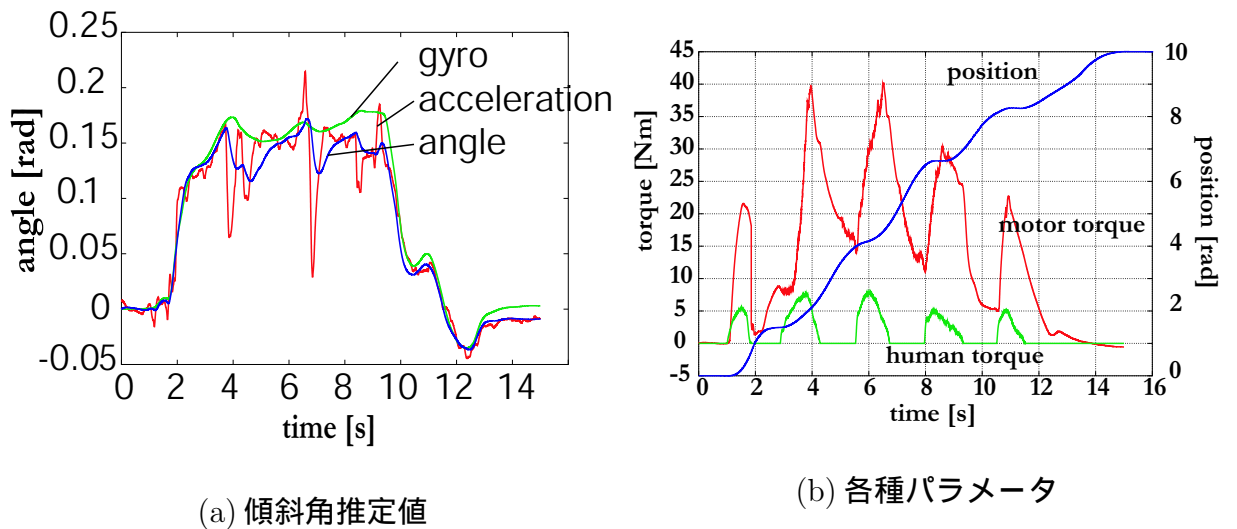


図 4.10: 坂道での走行

4.3 両手法の比較検討

外乱オブザーバによる重力成分の補償では、坂道においては当初の目的であった上り坂での負荷を減らし、下り坂を安心して下れるような制御をすることができた。しかし平坦地の走行においては摩擦を無視したモデルを採用したため、摩擦の影響を想像していた以上に受ける結果になり、摩擦が外乱として作用し、それを補うため、少しぎこちない動きになってしまった。外乱オブザーバを使用するためには、この摩擦の影響を無視することができず、摩擦を考慮したモデルが必要である。

一方傾斜角推定に基づく重力補償法については、傾斜角の推定が高い精度で行われた。その結果平坦地の走行では、従来のパワーアシスト車椅子と変わらないが、傾斜地になるとその成果を発揮した。しかし、操作者の体重が未知な場合には、重力成分の完全な補償はできない。

4.4 両手法を組み合わせた新たな制御手法の提案

それぞれの特徴を表 4.3 に示す。

表 4.3: 両手法の長所と短所の比較

	長所	短所
外乱オブザーバ	体重を正確に知らなくても良い	平坦地の運動がぎこちない
傾斜角推定	傾斜が正確に推定できる 平坦地は従来どおり	体重を正確に知らないと 十分な補償ができない

両者ともにそれぞれ長所と短所が存在するが、両者を組み合わせることで、その短所を補える可能性がある。そこで新たに両者を組み合わせた手法を提案する。

4.4 両手法を組み合わせた新たな制御手法の提案

外乱オブザーバを用いる場合の短所は平坦地のぎこちない走行であり、長所は坂道における重力の完全な補償である。傾斜角推定の短所は体重情報を必要とすることで、長所は傾斜角の高精度な推定である。外乱オブザーバの重力成分の推定には、厳密な体重情報は必要でないので、傾斜角推定によってある一定以上の傾斜角になれば外乱オブザーバを使うようにすれば、両手法の長所を生かしながら、短所を補うことができると考えられる。モデル図を図 4.11 に示す。

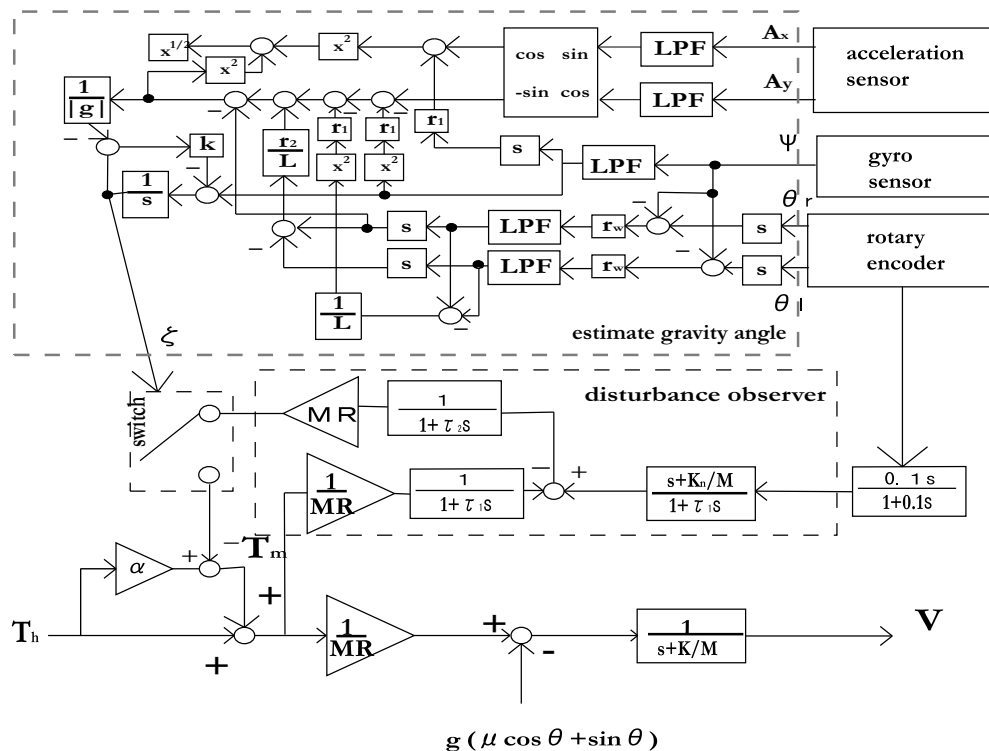


図 4.11: 外乱オブザーバと傾斜角推定の組み合わせモデルのブロック線図

4.5 実験結果

外乱オブザーバを傾斜角何度から使うかについては、図 4.9(a) の場合、傾斜角の推定値は $\zeta = \pm 0.02[\text{rad}]$ だったので、今回の実験ではこの推定値に余裕を持たせて、

$$|\zeta| \geq 0.05 \quad (4.1)$$

を満たすとき、外乱オブザーバを使って外乱を求め、フィードバックにより補償するようにした。実験に使用したパラメータは、

$$K_n = 90, \tau_2 = 0.2, M = 90$$

である。

図 4.12、4.13 に新しい制御法を使って、平坦地と坂道を走行したときの様子を示す。

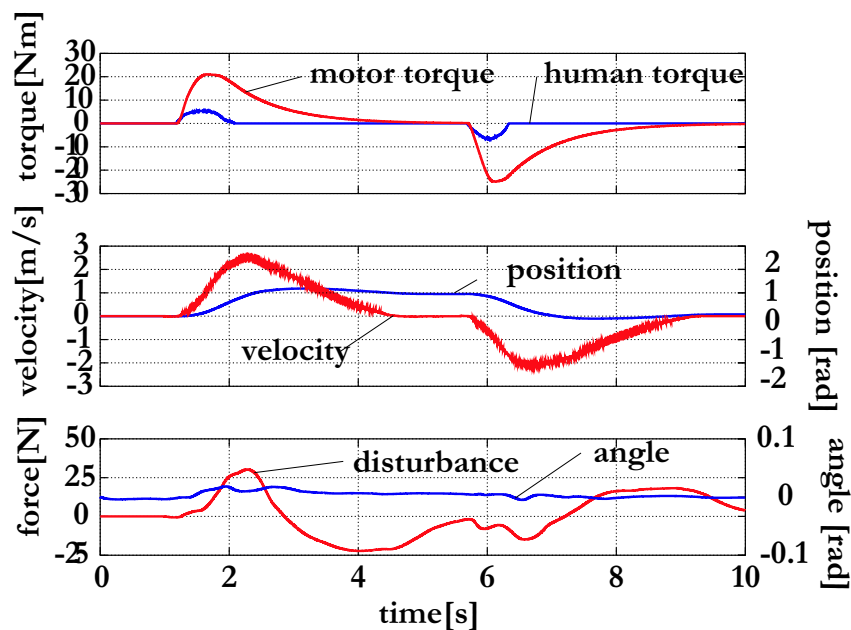


図 4.12: 平坦地の走行

図より平坦地の走行時は外乱の推定は行っているが、フィードバックはしていないので、それに伴ったモータトルクの変動はない。摩擦の影響を受けてぎこちなくならずに、従来のパワーアシスト車椅子のように走行することができた。

坂道走行時は、フィードバックがかかって、モータトルクが補償され、従来より少ない力で走行することができ、坂道での静止も可能にした。

2つの制御法を組み合わせることでそれぞれの手法の持っていた長所が、互いの短所を打ち消しあって、より良い制御法になった。

次に今回外乱オブザーバを用いた重力補償法で、坂道における負荷がどの程度軽減されたか定量的に検討する。図 4.14、4.15 は傾斜角約 8.5° 、長さ 2 m の坂道を、1. 普通の車椅子 (アシストなし)、2. パワーアシスト車椅子 (パワーアシストのみ)、3. パワーアシスト車椅子 (パワーアシスト + 外乱補償) の三通りで登ったときの坂道を登りきるのに要する力と、そのときの移動距離を表している。

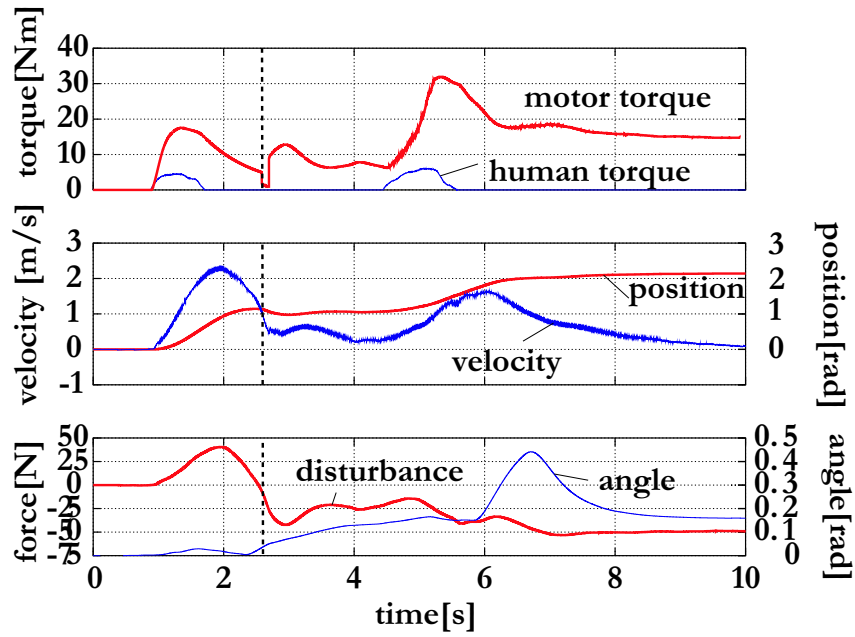


図 4.13: 坂道の走行

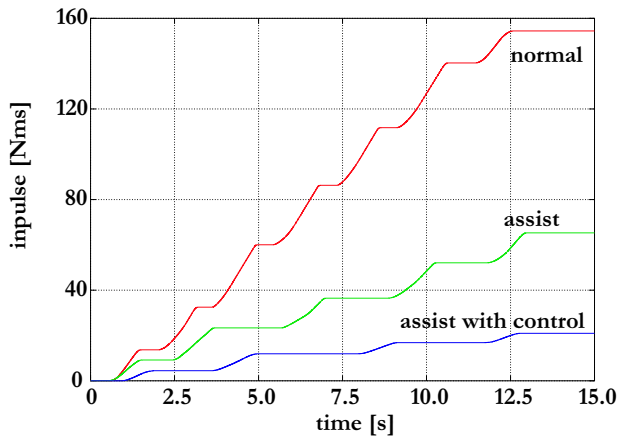


図 4.14: 坂道を登るのに必要な力

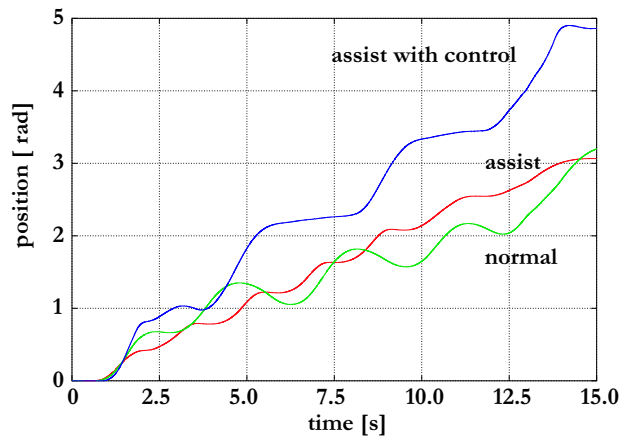


図 4.15: 移動距離

図 4.14 を見ると市販品のパワーアシスト車椅子では、普通の車椅子の三分の一程度まで負担を軽減しているのが分かる。今回提案した制御手法ではさらにその五分の三程度まで負担を軽減している。また漕ぐ回数も7回から5回、4回と操作者の負担を軽減することに成功している。

第5章 まとめと今後の課題

本論文ではパワーアシスト車椅子の坂道におけるさまざまな問題点が、重力成分の影響によって生じていることに注目し、重力成分を推定する方法を2つ紹介し、実験によってその効果を確かめた。どちらの方法においても重力成分を推定し、

- 上り坂での負荷を減らす
- 下り坂を安心して下れる
- 坂道以外にも幅広く対応できる

当初の目的であったこれらの三項目をある程度は満足することができた。

しかし外乱オブザーバによる推定では、摩擦をモデルに組み込まずそのまま外乱として取り扱っていたので、平地における走行では無視できないほどの外乱の推定値を与えてしまう原因となり、ぎこちない運動になってしまった。摩擦の影響を如何に取り除くか課題が残った。しかし、坂道においては操作者の負担を軽減し、坂道での静止を可能にしたことによって、精神的な負担も軽くすることができた。

加速度センサを用いた傾斜角推定では、精度の高い傾斜角の推定ができることを示した。これによって体重さえ分かれば重力成分の影響は取り除くことができる。しかし操作者が変わった場合や、重い荷物を持っているときなど乗る機会によって体重は変わってしまう恐れがある。この問題の解決法としてオブザーバなどで推定する方法も考えられるが、ゲインを調整するつまみなどをユーザーインターフェイスとして取り付ける方法でもよいと思われる。しかしこの方法では走行中に急に体重が変わってしまった場合などには対応できない。体重情報をどのようにして取得するかが課題となった。

そこで両手法を組み合わせ、推定した傾斜角を用いて、平坦地では外乱オブザーバによるフィードバックを行わず、従来どおりのアシスト制御をすることで、ぎこちない動きを回避した。また坂道においてだけ外乱オブザーバによるフィードバック制御を行うことで、正確な体重情報を知らなくても、坂道で静止できるようにした。これによって両手法の弱点を補い、よりよい制御法を提案することができた。

しかし、今回最後に提案した手法では走行抵抗の大きい不整地には対応しておらず、坂道以外で負担を軽減するにはいたらなかった。

本来福祉機器というものは人間と接するものなので、その絶対的な優劣をつけがたい。路面状況が操作者に伝わることも大事なことなので、必ずしもすべての外乱を除去すればいいというものでもない。このあたりの判断はそれぞれの好みに左右されると思う。しかしオプションとしてこういったことができる、と示すことで、幅広いニーズに対応していくことは可能になる。

今後の課題としては、走行抵抗が変わっても幅広く対応できるような制御法の開発が期待される。また今回提案した手法については多くの被験者を用いたアンケートなどの評価

まとめと今後の課題

実験を行っていないので、外乱オブザーバのパラメータ変動が与える乗り心地への影響などを評価実験をし、検証することがあげられる。

参考文献

- [1] 厚生労働省統計情報部, ”平成 13 年度社会福祉行政業務報告 (福祉行政報告例)”,
http://www.dbtk.mhlw.go.jp/toukei/youran/indexyk_3_3.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] E. Abel, T. Frank, G. Boath and N. Lunan, ”*An evolution of different designs of providing powered propulsion for attendant propelled wheelchairs*”, Ann.International Conference of IEEE EMBS, Vol. 13, No. 4, pp. 1863-1864, 1991.
- [4] G. B. Cremers, ”*Hybrid-powered wheelchair: a combination of arm force and electrical power for propelling wheelchair*”, Journal of Medical Engineering and Technology, Vol. 13, No. 1/2, pp. 142-148, 1989.
- [5] 内山敦, 福井巧, ”パワーアシスト車椅子の制御システム”, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, pp. 204-248, 1997.
- [6] 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 回リハビリ工学カンファレンス講演論文集, pp. 85-88, 2000.
- [7] R. A. Cooper, ”*A system approach to the modeling of racing wheelchair propulsion*”, Journal of Research and Development, Vol.27, No.2, pp.151-162, 1990.
- [8] 堀洋一, 大西公平, ”応用制御工学”, 丸善株式会社, 1998.
- [9] 宮沢崇, 桂誠一郎, 大西公平, ”走行環境を考慮した自走式パワーアシスト車椅子の一構成法”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-03-50, pp. 29-34, 3月14日, 2003. (横浜)
- [10] 佐藤仁彦, 関 弘和, 畠 直輝, 堀 洋一, ”パワーアシスト車椅子におけるウィリー機能の実現”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-02-41, pp. 143-148, 2002.3.
- [11] 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制御”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-03-51, pp. 35-40, 2003.3.

謝辞

私が堀研究室にお世話になったのはわずか一年間だけでしたが、大学生生活4年間を締めくくるにふさわしく、非常に中身の濃い一年間でした。

指導教官である堀洋一先生には、ご多忙の中、私の研究に気を使っただき、ミーティングでの適切なアドバイスや、研究に関する指導をいただきました。この研究室で学んだことはこれから研究者として社会に出て行く私にとって、大変貴重な財産になりました。ここに深く感謝いたします。

技術官の内田利之さんには、あまり接する機会がありませんでしたが、たまに会った時などは気さくに声をかけていただきいろいろな話を聞かせていただきました。ここに深く感謝いたします。

研究員の李練兵さんには気さくに声をかけていただき、また熱心に研究に励む姿は私にとって大変な刺激になりました。ここに深く感謝いたします。

D2の呉世訓さん、馬澄斌さん、畠直輝さん、坂東信尚さんには研究に関する数多くの質問に答えていただき、研究室での生活の仕方などもご指導いただきました。特に呉世訓さん、畠直輝さんには研究内容が近いこともあり、研究の方針や論文の構成にいたるまで研究のあらゆる面でお世話になりました。ここに深く感謝いたします。

D1の張炳勳さんには、研究方針について私に頻繁に声をかけていただいたり、韓国のお話をしていただいたりとお世話になりました。ここに深く感謝します。

M2の呉俊徳さん、福井龍さん、古川公久さんには、いつも気さくに声をかけていただいたり、雑談にに応じてくれたりとやさしくしていただきました。深く感謝いたします。

M1の青木健一郎さん、小玉晋也さんには、学年が近いこともあり研究室での過ごし方からいろいろなソフトの使い方など、いろいろな疑問に答えていただきました。ここに深く感謝します。

研究生のアルバートカウソさんには、いつも笑顔で私の気持ちを和ませてくれました。ここに深く感謝いたします。

卒論生の青木良文君、齊藤知之君には、研究についてお互い議論しあったり、研究とは関係のない話をしたりと、同じ卒論生として大変刺激になり、一年間を有意義に過ごすことができました。ここに深く感謝いたします。

秘書の崎山さんには、いつも飲み会の際においしい料理を作ってきていただき、一人暮らしの自分にとってはとても嬉しかったのを記憶しています。ここに深く感謝いたします。