

東京大学大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

平成23年度
修士論文

パワーアシスト車椅子の斜面における
操作性向上のためのヨー運動制御に関する研究

Research on Yaw Motion Control of Power-assisted
Wheelchair for Improvement of Handling on Slopes

2012年2月提出
指導教員 堀 洋一 教授

47106057 金 佳英

概要

車椅子は足の不自由な方々の移動手段としてよく使用されている装置の一つである。車椅子の操作性や安全性を向上させるために、様々な研究や開発がなされてきた。パワーアシスト車椅子も同様な目的で開発された車椅子である。パワーアシスト車椅子はハンドリムにトルクセンサが内蔵されており、両輪にモータが装着されている車椅子である。

本論文ではパワーアシスト車椅子に適した新たなアシスト制御システムを提案する。従来のアシスト制御システムは前後方向と側面方向を区別せずに左右の各輪にアシスト制御を行った。しかし、車椅子の前後方向と側面方向のダイナミクスは異なるため、直進運動と旋回運動の両方に適した制御を行うことは困難であった。

従来のアシスト制御システムの問題点の解消のため、本論文では新たな2次元アシスト制御システムを提案する。新しく提案する制御システムでは左右のトルクの和のモードと差のモードを用いて直進成分と旋回成分を区別し、アシスト制御を行う。提案した制御法を用いることで直進及び旋回運動の両方のダイナミクスを考慮した車椅子のアシスト制御が実現可能となった。

本論文ではヨー運動制御も提案する。横斜面では車椅子が重力の影響を受けるため、操作が困難である。横方向の外乱(重力の分力)により、使用者は車椅子の進行方向及び速度を制御することが難しくなる。横方向の外乱が使用者の補償のできない大きさであると、事故に繋がる恐れがあるため、安全性の向上のためにも制御が必要である。

本論文では、横方向外乱のある環境での操作性と安全性の向上のため、ヨーモーメントオブザーバを用いたヨー運動制御を提案する。提案するヨー運動制御は2自由度制御システムで、フィードフォワード制御、フィードバック制御及びヨーモーメントオブザーバを用いて横方向外乱を抑制する。提案した制御システムは横斜面での直進運動の実験及び旋回運動の実験によりその有効性が実証された。

Abstract

Wheelchairs are important devices for people with leg disabilities. There are many kinds of wheelchairs being developed to minimize injury while improving the ease of maneuver. Power-assisted wheelchairs were developed for the same reason.

In this paper, a novel two-dimensional assist control for power-assisted wheelchairs is proposed. Conventional assist control is designed for motion of traveling only in straight line. Therefore, it is difficult for wheelchair users to rotate using conventional assist control. The proposed assist control is designed for wheelchair both going straight and rotating, so power assist in rotating motion is improved.

In this paper, yaw motion control under lateral disturbance environments is proposed. On slope, due to effects of gravity, power assist alone is not sufficient to make movement on slopes easy. Lateral disturbances make the wheelchair's speed as well as direction unable to manage, which can cause accidents and may lead to injury. To overcome this problem, two-degree-of-freedom yaw motion control is proposed. Using the proposed yaw motion control, a wheelchair would not be subject to influence from lateral disturbance, and hence overall performance of the wheelchair would improve. To demonstrate the effectiveness of the yaw motion control, two kinds of experiments have been performed: going straight on the slope, and turning on the slope. Effectiveness of the proposed control system has been verified by experiments.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	現在の福祉	1
1.2	車椅子の種類	2
1.3	車椅子分野の先行研究	3
1.4	本研究の目的	4
1.5	論文構成	5
第 2 章	パワーアシスト車椅子	7
2.1	パワーアシスト車椅子の特徴	7
2.2	パワーアシスト車椅子の長所と短所	8
第 3 章	直進運動と旋回運動を考慮した 2 次元アシスト制御システム	10
3.1	車椅子に加わるトルクの直進運動成分と旋回運動成分	10
3.2	直進運動を考慮した従来のアシスト制御システム	11
3.3	直進と旋回を考慮した新たな 2 次元アシスト制御システムの提案	13
3.4	従来のアシスト制御システムと提案した 2 次元アシスト制御システムの比較	14
第 4 章	ヨー運動制御のためのヨーレート指令値の生成	16
4.1	ヨーモーメント N_z の定義	16
4.2	人間が加えたトルクを用いたヨーモーメント入力 $N_{z_{in}}$ の生成とその問題点	17
4.3	従来のアシスト制御システムを用いたヨーモーメント入力 $N_{z_{in}}$ の生成とその問題点	17
4.4	提案した 2 次元アシスト制御システムを用いたヨーモーメント入力 $N_{z_{in}}$ の生成	18
4.5	ヨーモーメント入力 $N_{z_{in}}$ を用いたヨーレートの指令値 γ^* の生成	18
第 5 章	ヨーモーメントオブザーバを用いた横方向外乱抑制のヨー運動制御システム	20
5.1	ヨー方向の運動を考慮した車椅子の運動方程式	20
5.2	ヨー方向の車椅子のモデリング	22
5.2.1	ヨー方向の慣性係数 J の計算	22
5.2.2	ヨー方向の車椅子のモデリング方法	22
5.3	横方向外乱抑制のためのヨー運動制御の提案	23
5.4	ヨー運動制御におけるトルク分配	25
第 6 章	提案したヨー運動制御システムの実証実験の実験方法	26
6.1	運動制御に適した車椅子の実現のための実験装置の改良	26
6.2	側面方向の外乱のある実験環境	29
6.3	従来法と提案法の横方向外乱の有する環境での直進性および旋回性の実験	29
6.3.1	横斜面での直進運動実験	29
6.3.2	横斜面での旋回運動実験	30

第 7 章	提案したヨー運動制御システムの実証実験の実験結果	31
7.1	従来法と提案法の横方向外乱の有する環境での直進性の実験結果	31
7.1.1	横斜面での直進運動の実験結果	31
7.1.2	横斜面での直進運動実験の考察	33
7.2	従来法と提案法の横方向外乱の有する環境での旋回性の実験結果	35
7.2.1	横斜面での旋回運動の実験結果	35
7.2.2	横斜面での旋回運動実験の考察	38
第 8 章	結論	39
第 9 章	今後の課題	41
	謝辞	42
	参考文献	43
	発表論文	46
付録 A	横方向外乱オブザーバを用いた運動制御	47
A.1	横方向外乱オブザーバ	47
A.2	前後方向の車椅子のモデリング	48

目次

1.1	日本の人口と将来の人口推定 (厚生労働省)	1
1.2	自走用車椅子 (株式会社美貴工業所 (MiKi) M-43SK SP)	2
1.3	介助用車椅子 (日進医療器株式会社 (NISSIN) NC-2CB)	2
1.4	電動車椅子 (C.T.M. Homecare Product, Inc. HS-6200)	2
1.5	縦横方向外乱オブザーバを用いた運動制御ブロック図 [6]	3
1.6	横斜面での車椅子の運動の一例	4
1.7	本論文の構成	5
2.1	パワーアシスト車椅子のアシストシステム概念図	7
2.2	パワーアシスト車椅子 (YAMAHA JW-II)	8
3.1	提案するアシスト制御およびヨー運動制御システムのブロック図	10
3.2	従来のアシスト制御のブロック図	11
3.3	直進と旋回を考量した新たなアシスト制御のブロック図	13
3.4	従来のアシスト制御システムの実験結果	15
3.5	提案した2次元アシスト制御システムの実験結果	15
4.1	ヨーモーメント N_z (車椅子の上面図)	16
4.2	ヨーレート指令値 γ^* の生成のブロック図	18
5.1	ヨー方向の運動を考慮した車椅子のダイナミクス (上面図)	21
5.2	パワーアシスト車椅子の慣性係数の計算	22
5.3	ヨー方向の車椅子のモデリングのブロック図	23
5.4	提案したヨー運動制御系のブロック図	24
5.5	ヨー運動制御におけるトルク分配	25
6.1	パワーアシスト車椅子のシステムの概念図	27
6.2	パワーアシスト車椅子のセンサとハードウェアの詳細	28
6.3	横斜面での直進運動実験方法	30
6.4	横斜面での旋回運動実験方法	30
7.1	横斜面での直進運動の実験結果 (制御なし)	31
7.2	横斜面での直進運動の実験結果 (従来法)	33
7.3	横斜面での直進運動の実験結果 (提案法)	34
7.4	横斜面での旋回運動の実験結果 (制御なし)	36
7.5	横斜面での旋回運動の実験結果 (提案法)	37
7.6	横斜面での旋回運動の実験結果 (従来法)	38

A.1	横方向外乱オブザーバを用いた運動制御ブロック線図 [6]	47
A.2	前後方向の車椅子のモデリングのブロック線図	48

表 目 次

5.1	ヨー方向ダイナミクスに用いる記号	20
6.1	車椅子に付けたセンサ及びハードウェアシステム	26
6.2	実験環境及び車椅子のパラメータ	29
7.1	各手法における使用者の負担の数値化	36

第 1 章

序論

1.1 現在の福祉

2009年に厚生労働省が公表した政策レポートによると、日本の65歳以上の高齢者の人口は日本の総人口の2割を超えている[1]。高齢者の割合は今後さらに増加すると予測されている。図1.1に示したように、厚生労働省の試算によると2020年には65歳以上の高齢者が日本の人口3割を占める見通しが出されている。65歳以上の高齢者の内、要介護者はおよそ3割程度と推計される。従って、総人口が1億2千万人とすれば、要介護者は1千80万人となる。さらに、身体障害者が総人口の2.6%程度と推計しており、その内、67%が車椅子利用者と言われている。従って、総人口が1億2千万人とすれば、車椅子を利用している身体障害者は210万人と推算できる。高齢者と身体障害者を合わせれば、車椅子を利用すると予想される人口は1千3百万人である。ゆえに、移動困難な交通弱者が2010年には総人口の1割を超える。

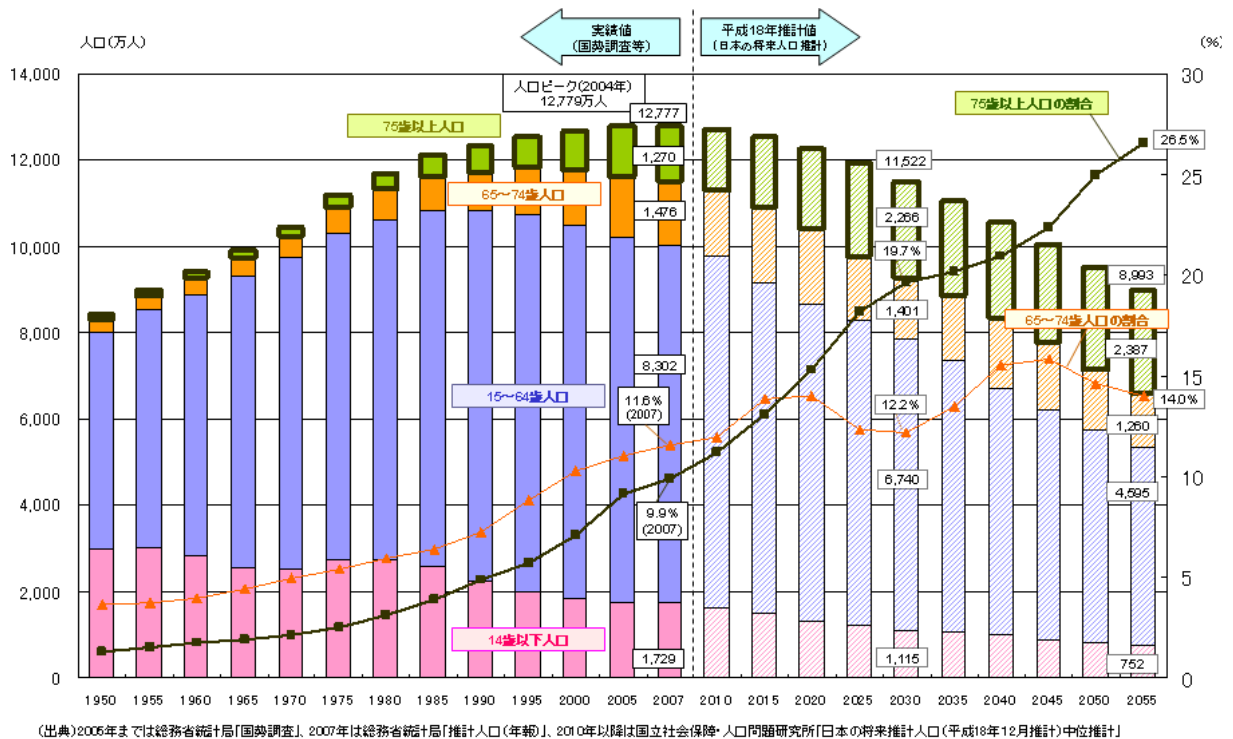


図 1.1 日本の人口と将来の人口推定 (厚生労働省)

車椅子の利用率の増加は日本だけの傾向ではない。Stephen らによると、アメリカでは 2000 年にすでに 680 万人（総人口の 2.6%）が移動支援装置を利用している [2]。その内、165 万人（総人口の 0.6%）が車椅子利用者である。

移動困難な交通弱者が増加に伴い、日本では交通弱者を配慮した様々な政策が立てられている。その一例として、公共交通政策が挙げられる。国土交通省によると、車椅子利用者を含む交通弱者の公共交通利用の利便性や快適性の向上を図るために調査を行う他、新たな交通システムの導入やバスの乗り継ぎの改善の計画を立てるなど、様々な政策が立てられている [3]。さらに、高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律（バリアフリー法）が平成 18 年 6 月 21 日に公布され、同年 12 月 20 日より施行されている [4]。

1.2 車椅子の種類

近年社会の認識の変化により、普段の生活の中でも車椅子を見かけることが多くなってきた [5]。車椅子を利用する多様な目的に合わせ、様々な車椅子が開発されてきた。

車椅子は自走用（標準型）車椅子、介助用（標準型）車椅子および電動車椅子の 3 つのタイプに分類することができる [5]。自走用車椅子は使用者が車椅子のハンドリムを自分で漕いで移動する車椅子で、病院や施設などの公共施設でよく見かけるタイプの車椅子である。自走用車椅子は使用者本人がハンドリムを握って車椅子を漕ぐため、後輪が大きいという特徴を持っている。

介助用車椅子は介助者が移動操作を行う前提で作られた車椅子である。自走用ではないためハンドリムが付いておらず、後輪が自走用車椅子より小さいという特徴がある。さらに、介助者が使用する前提でブレーキが後輪の後方に付いているものが多く、グリップにもブレーキが付いている。

電動車椅子はモータで駆動する車椅子で、コントロール部分を操作して移動する。電動車椅子はバッテリーを積む必要があるため、車椅子が相当の重量になる。コントロール部分として一般的に利用されるのはジョイスティックである。ジョイスティック以外にも多様なインターフェースが提案されている。

上述した 3 つのタイプ以外にも長時間車椅子を利用する方や姿勢保存の難しい方のために、リクライニング機能やティルト機能が付いたものなどがある。さらに、スポーツ用のもの、特別な素材で作られたものなど様々な種類の車椅子が存在する。



図 1.2 自走用車椅子（株式会社美貴工業所（MiKi）M-43SK SP）



図 1.3 介助用車椅子（日進医療器株式会社（NISSIN）NC-2CB）



図 1.4 電動車椅子（C.T.M. Home-care Product, Inc. HS-6200）

1.3 車椅子分野の先行研究

1.2 節で述べたように、車椅子利用者のニーズに合わせた様々な種類の車椅子が開発されてきた。車椅子の開発はハードウェアのみならず、そのシステムの改良も行われている。斜面での車椅子の利用は加速による危険性や後方転倒問題などがあり、安全性向上のための工夫が必要である。

Oh らは斜面での安全走行のため、後方転倒を防止するための制御と縦横方向外乱の影響を低減する制御を提案した [6]。Oh らはピッチ方向の質量中心の角度とその角速度の関係より後方転倒の危険性の範囲を定義し、後方転倒危険領域に入らないようにアシスト率の制御を行った。さらに、下り坂でも横斜面でも有効な縦横方向外乱抑制制御を提案した。彼らが提案した制御法はエンコーダの測定値の微分である車椅子の両輪の角速度と車椅子の使用者が車椅子に加えるトルクを用いた。Oh らが提案した縦横方向外乱抑制制御のブロック図を図 1.5 に示す。左右のプラントが同じであると想定し、ノミナルプラント $P_n(s)$ を設計する。 T_l, T_r はそれぞれ左右の車輪に加わるトルクで、 y_l, y_r はそれぞれ左右の車輪の角速度である。 e_l, e_r はそれぞれ左右の車輪の角速度のエラーで、それにより生じる横方向のエラーを e_{lat} とする。 e_{lat} を補償することで、横方向の外乱による影響を低減することができる。 $P_l(s), P_r(s)$ はそれぞれ車椅子の左側と右側のプラントであり、 $P_n(s)$ は $P_l(s)$ と $P_r(s)$ のノミナルプラントである。 $C_1(s)$ は車椅子の前後方向の逆モデルで、 $C_2(s)$ は横方向モデルの逆モデルである。Oh らが提案した制御システムに関しては付録 A で詳しく述べる。

さらに、Seki らは下り坂での安全性に着目した制御法を提案した [7]。Seki らは下り坂での安全のために回生ブレーキを提案した。回生ブレーキを用いることで、下り坂での加速による危険性を低減するのみならず、エネルギー節約にも繋げている。

電動車椅子の操作性向上の研究や新たなコントローラの提案もなされてきた。Nam らは舌が脳と直接繋がっていることや舌は一般的に脊髄損傷の影響を受けないこと、特別な筋肉があり素早い動きができることに着目し、舌の動きを用いた車椅子の操作を提案した [8]。彼らは舌の動きにより EEG 信号が変化することを利用し、車椅子の制御を行った。

さらに、Tashiro らは介護者に注目し、段差のある環境で車椅子を利用する際、介護者をアシストする制御システムを提案した [9]。Miyata らも介護者をアシストする制御システムに関する研究を行った [10]。

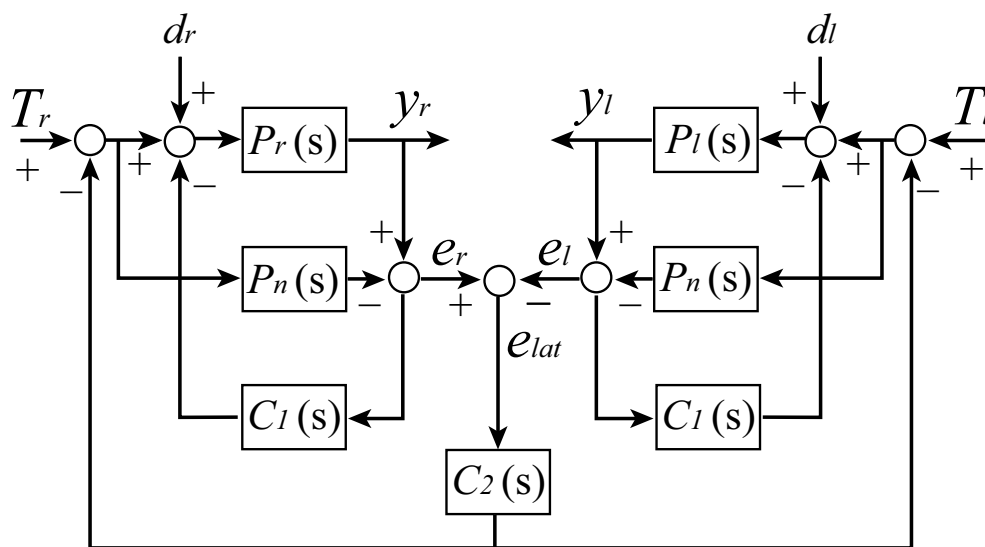


図 1.5 縦横方向外乱オブザーバを用いた運動制御ブロック図 [6]

車椅子の研究は制御を応用した車椅子の利用環境改善のための研究のみならず、車椅子の運動や車椅子使用者への運動の分析などの研究もなされてきた。Chénierらは従来無視していた車椅子のキャストを考慮した車椅子のダイナミクス分析を行った [11]。Desrochesらは、自走用車椅子利用時の関節への負担を分析した [12]。さらに、Tanimotoらは車椅子の乗り移しの際の動きを分析した [13]。

1.4 本研究の目的

1.3節で述べたように、車椅子を安全かつ便利に使用するため、様々な研究がなされてきた。本節では本研究の目的を述べる。

本論文の目的は斜面での車椅子の安全性向上である。1.3節で述べたように斜面での安全性向上のための先行研究として Oh らの後方転倒防止制御と縦横方向外乱抑制制御 [6] と Seki らの電気的なブレーキコントロールの提案 [7] がある。

本論文では横斜面の車椅子の運動に着目する。横斜面では車椅子が重力の影響を受けるため、車椅子の操作が困難である。図 1.6 に横斜面での車椅子の運動の一例を示す。図 1.6 に示したように、車椅子の使用者が直進しようとして操作しても重力の影響で車椅子が旋回してしまう。ゆえに、横斜面では使用者の意志通りの操作が不可能である。

このような予想外の運動は操作性の問題のみならず、事故に繋がる恐れがあるため安全性の問題もある。横方向外乱抑制のための制御法を Oh らが提案したが、その制御法は各車輪の角速度を用いるため、各車輪の角速度と車体のヨー方向関係式が成り立たないと制御ができなくなるという問題があった。そこで、本論文では各車輪の角速度ではなく、車体のヨーレートを用いたヨー方向外乱抑制制御を提案する。ヨー方向の外乱抑制制御を用いることで、横斜面など横方向外乱のある環境で車椅子の安全性を向上させる。

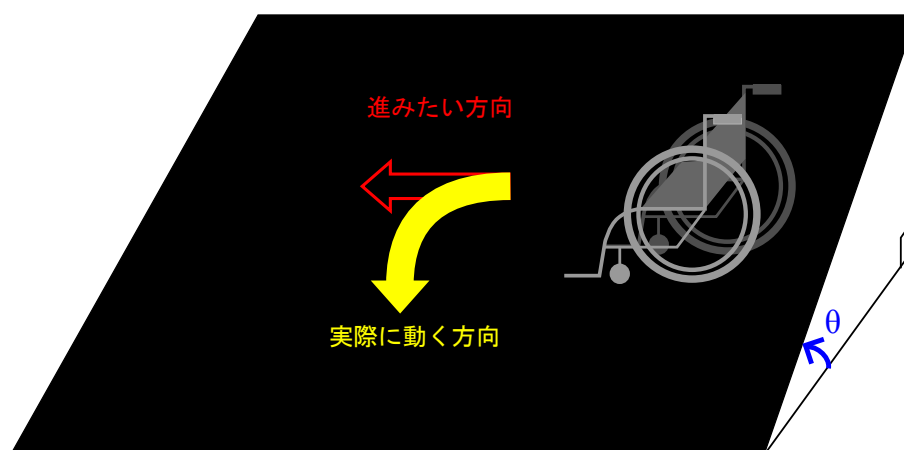


図 1.6 横斜面での車椅子の運動の一例

1.5 論文構成

本論文の構成を図 1.7 に示す。

第 1 章では研究背景として、福祉の現状と車椅子の種類及び車椅子に関する先行研究について述べた。さらに、本研究の目的について述べた。

第 2 章では、本研究で用いるパワーアシスト車椅子について説明する。パワーアシスト車椅子の特徴について紹介し、その長所と短所について述べる。

第 3 章では、旋回運動を考慮した 2 次元アシスト制御システムを提案する。従来のアシスト制御システムの問題点を述べ、新たなアシスト制御システムを提案する。さらに、従来法と提案法の比較を行う。

第 4 章では、ヨー運動制御のためのヨーレート指令値の生成について述べる。ヨーモーメント入力 N_{zin} の生成について述べ、 N_{zin} を用いたヨーレート指令値 γ^* の生成について述べる。

第 5 章では、ヨーモーメントオブザーバを用いた横方向外乱抑制の制御システムを提案する。横方向に重力などの外乱を受ける環境を想定し、車椅子の運動方程式を立て、横方向外乱抑制に影響されない新しい制御シ

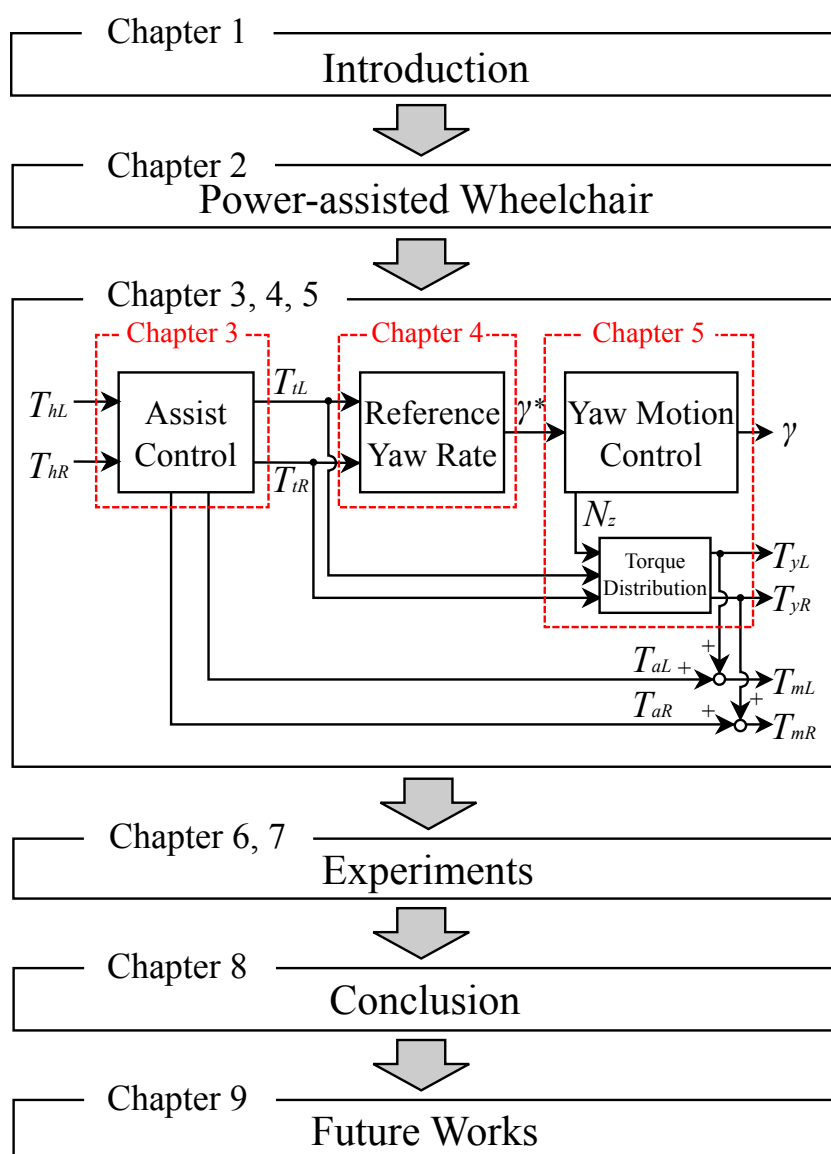


図 1.7 本論文の構成

ステムについて詳細に述べる。

第 6 章では，第 3 ～ 5 章で提案した新しいヨー運動制御システムの実証実験の実験方法について述べる。実験環境と実験装置を紹介する。実験装置は，普遍的なパワーアシスト車椅子を制御に適した車椅子にするために，改良したものであり，それについて詳細に述べる。さらに，実証実験である直進運動実験と旋回運動実験について述べる。

第 7 章では，第 6 章で説明した実証実験の結果を述べる。直進運動実験及び旋回運動実験に関する考察も行う。第 8 章では，本論文をまとめて結論を述べ，第 9 章では今後の課題を述べる。

第 2 章

パワーアシスト車椅子

第 1 章では本研究の背景及び目的について述べた。

1.2 節で述べたように様々な種類の車椅子が存在する。本章では車椅子の一種であるパワーアシスト車椅子について述べる。

2.1 パワーアシスト車椅子の特徴

パワーアシスト車椅子は便利な車椅子を実現するため、開発された車椅子の一つである [14]。パワーアシスト車椅子は自走用車椅子に制御や電動駆動に必要な電動ユニットをつけた車椅子で、自走用簡易形電動車椅子とも呼ばれる [5]。パワーアシスト車椅子の両輪にはモータが装着されており、両ハンドリムにはトルクセンサが内蔵されている。

車椅子の利用者がハンドリムを漕ぐと、左右のハンドリムに内蔵されているトルクセンサーよりその漕ぐ力が測定される。トルクの測定値を用いてモータのアシストトルクを計算し、そのアシストトルクをモータが出力する仕組みになっている。図 2.1 にパワーアシスト車椅子のアシストシステム概念図を示す。

パワーアシスト車椅子は人の力のみならず、モータのアシストトルクも車椅子の駆動力となるため、人の力のみが車椅子の駆動力になる自走用車椅子に比べ、使用者の負担が少ない [20]。

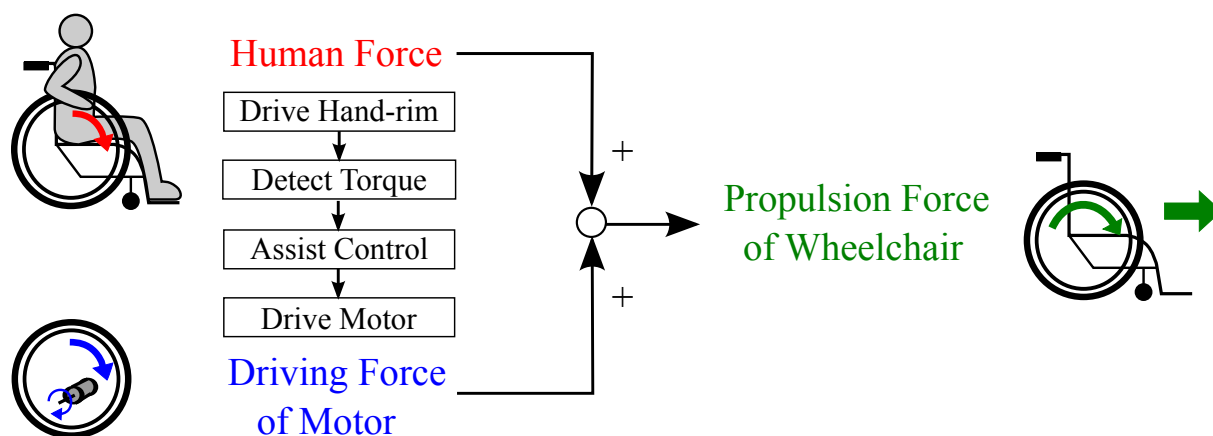


図 2.1 パワーアシスト車椅子のアシストシステム概念図

2.2 パワーアシスト車椅子の長所と短所

本節ではパワーアシスト車椅子を異なる種類の車椅子と比較し、その長所と短所を述べる。パワーアシスト車椅子は利用者が自らの力で操作する前提で作られた車椅子であるため、その比較対象も介助用車椅子ではなく、利用者本人が操作する前提のもののみ限定する。

パワーアシスト車椅子は自走用車椅子より使用者の負担が少ない。自走用車椅子は車椅子の追進力が利用者本人の力のみであるため、長距離移動や斜面走行などは困難である。さらに、自走用車椅子の頻繁な利用により関節の損傷の恐れがあるという報告もある。それに比べてパワーアシスト車椅子はモーターがアシストしてくれるため、使用者の負担が低減されるという利点がある。

パワーアシスト車椅子や自走用車椅子の利用時「車椅子を漕ぐ」という動作はリハビリテーション効果があると期待されている。ジョイスティックで操作する電動車椅子はジョイスティックを片手で握り、手首を動かす程度の動作で移動可能である。筋力が非常に弱まっている方や片麻痺患の方の場合、このタイプの車椅子を利用することで自立的に移動できる範囲が広がる。しかし、まだ腕の筋力のある方はこの車椅子を利用すると手首を動かす程度の動きしかしなくなるため、まだ使える腕の筋力が徐々に弱まってしまう恐れがある。パワーアシスト車椅子は自分で漕ぐという動作を通して腕の筋肉を使うため、車椅子を利用することで腕の筋肉のリハビリテーション効果があると期待されている。

パワーアシスト車椅子は一般的に電動車椅子に比べてコンパクトである。一般的に折りたたみが可能であるため、収納性が良く、電動車椅子ほど重くないため、車のトランクに車椅子をいれて長距離移動をする際も便利である。

さらに、様々な制御を用いてより様々な環境で便利な車椅子の実現ができるという利点がある。モーターを制御することにより環境に合わせたアシスト制御や安全性向上のための制御など、様々な制御を行うことができ、安全で便利な車椅子の利用をサポートすることができる。



図 2.2 パワーアシスト車椅子 (YAMAHA JW-II)

しかし、パワーアシスト車椅子にも短所がある。パワーアシスト車椅子はモータを駆動させるためにバッテリーを使用する。バッテリーがあるため、自走用車椅子ほど軽量でなく、出かけた先でバッテリーの電源が切れると、自走用車椅子より何倍の力を要するため、非常に困難である。この問題はパワーアシスト車椅子だけの問題ではなく、電動車椅子の全般的な問題でもある。

さらに、過渡的なアシストによる転倒の危険性も短所である。モータの過剰なアシストにより前輪が浮かんでしまう。予想外の前輪浮上は転倒事故に繋がる恐れがあるため、注意が必要である。この問題を解決するための研究もなされてきている。

上述したように、パワーアシスト車椅子は様々な長所と短所を持っている。本研究では、パワーアシスト車椅子を使用することでリハビリテーション効果が期待されるという長所と、車椅子に内蔵されているモータを用いて様々な制御が可能という長所に注目する。

第 3 章

直進運動と旋回運動を考慮した 2 次元アシスト制御システム

第 2 ではパワーアシスト車椅子について述べた。第 3 章 ~ 第 5 章では本論文で新たなアシスト制御システム及びヨー運動制御を提案する。

図 3.1 に本論文で提案するアシスト制御およびヨー運動制御システムのブロック図を示す。図 3.1 に示したように、本章ではアシスト制御について述べる。

3.1 車椅子に加わるトルクの直進運動成分と旋回運動成分

車椅子の運動は直進運動と旋回運動の結合である。

車椅子の左右の車輪に加わるトルクをそれぞれ T_L, T_R とする。車椅子の左右の車輪のトルクの直進運動に関わる成分をそれぞれ T_L^s, T_R^s , 旋回運動に関わる成分をそれぞれ T_L^r, T_R^r とすると、 T_L, T_R は式 (3.1) と式

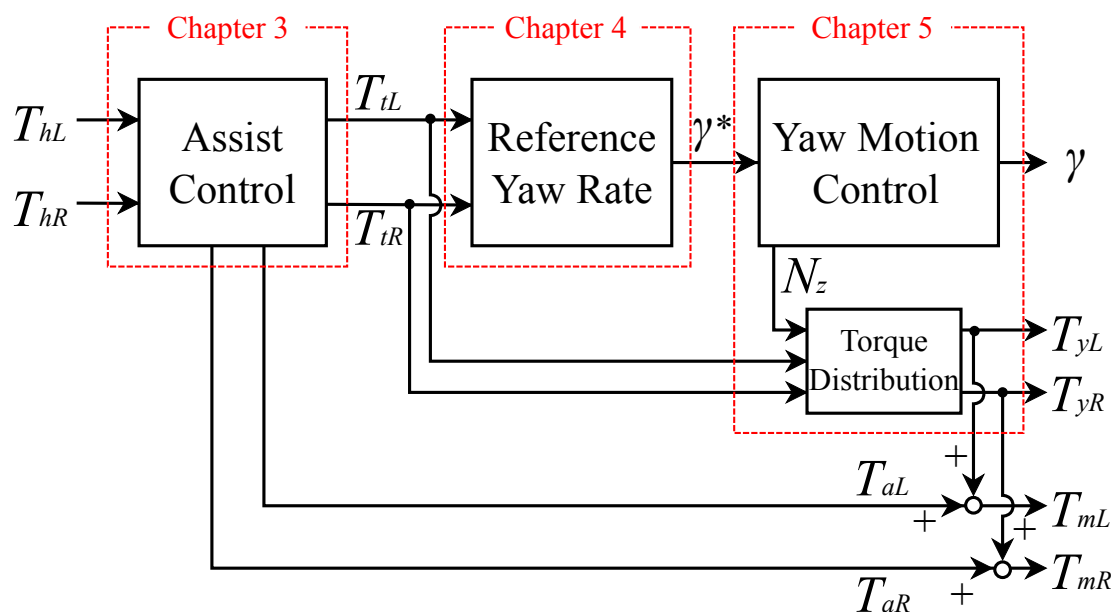


図 3.1 提案するアシスト制御およびヨー運動制御システムのブロック図

(3.2) のように表すことができる。

$$T_L = T_L^s + T_L^r \quad (3.1)$$

$$T_R = T_R^s + T_R^r \quad (3.2)$$

直進運動時は左右の力の向きと大きさが一致し，旋回運動時は向きが逆なので，

$$T_L^s = T_R^s \quad (3.3)$$

$$T_L^r = -T_R^r \quad (3.4)$$

となる。式 (3.3) と式 (3.4) を式 (3.2) に代入すると

$$T_R = T_L^s - T_L^r \quad (3.5)$$

となる。式 (3.1) と式 (3.5) を連立すれば

$$T_L = T_R^s = \frac{T_L + T_R}{2} \quad (3.6)$$

$$T_L^r = -T_R^r = \frac{T_L - T_R}{2} \quad (3.7)$$

となる。

ここで， $T^s = T_R^s$ ， $T^r = T_R^r$ と定義すれば，式 (3.1) と式 (3.2) は

$$T_L = T^s - T^r \quad (3.8)$$

$$T_R = T^s + T^r \quad (3.9)$$

となる。

3.2 直進運動を考慮した従来のアシスト制御システム

本節ではパワーアシスト車椅子のための従来のアシスト制御システムを紹介する [16]。

従来のアシスト制御のブロック図を図 3.2 に示す。 T_{hL} ， T_{hR} はそれぞれ使用者が車椅子の左右に加えるトルクで， T_{aL} ， T_{aR} はそれぞれ左右のモータの出力トルクで， T_{tL} ， T_{tR} はそれぞれ左右の車輪に加わる総トルクである。左右にアシスト制御を行う。 α はアシスト率で， τ_a は時定数である。

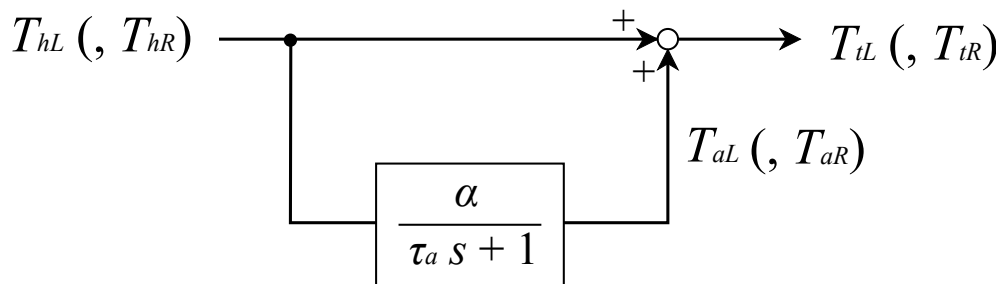


図 3.2 従来のアシスト制御のブロック図

ゆえに、左右の総トルクは式 (3.10) と式 (3.11) のように表される。

$$T_{tL} = T_{hL} + T_{aL} = T_{hL} \left(1 + \frac{\alpha}{\tau_a s + 1} \right) \quad (3.10)$$

$$T_{tR} = T_{hR} + T_{aR} = T_{hR} \left(1 + \frac{\alpha}{\tau_a s + 1} \right) \quad (3.11)$$

ここで、時定数 τ_a は式 (3.12) のように定義する。

$$\tau_a = \begin{cases} \tau_{fast} & \left(\frac{dT_h}{dt} \geq 0 \right) \\ \tau_{slow} & \left(\frac{dT_h}{dt} < 0 \right) \end{cases} \quad (3.12)$$

但し、 T_h は T_{hL} または T_{hR} を表し、使用者が車椅子に加えるトルクである。

使用者が車椅子に力を加えている区間では、時定数 τ_a を小さく設定することでモータが素早く使用者の力をアシストするようにする。ゆえに、 $\frac{dT_h}{dt} \geq 0$ の区間での時定数 τ_{fast} は小さい値にする。しかし、使用者が車椅子に力を加えていない区間では時定数 τ_a が小さいと、使用者がハンドリムから手を離す瞬間アシストが急減してしまう。従って、使用者がハンドリムから手を離してもモータがアシストしてくれるように τ_{slow} を決める。ゆえに、時定数 τ_{fast} と τ_{slow} は

$$\tau_{fast} < \tau_{slow} \quad (3.13)$$

とする。

車椅子に連続的に力を入れ続けることは不可能であり、車椅子を漕いで再び漕ぐためにはハンドリムから一度手を離すことになる。使用者が直進するように車椅子を漕ぐ際、一度車椅子のハンドリムを握って車椅子を漕いで再び漕ぐために一度ハンドリムから手を離してまた握るまでの時間を t_{off} とする。直進運動時は漕いでハンドリムから手を離しても、次に漕ぐまではモータがアシストして車椅子が直進し続けるように設計する。従って、時定数 τ_{slow} は

$$\tau_{slow} > t_{off} \quad (3.14)$$

が成り立つように決める。

上述したように、従来のアシスト制御システムではアシスト率 α をかけるだけでなく時定数 τ_a を入れることで、使用者が力を加える瞬間の素早いアシストの実現と車椅子のハンドリムから手を離れた瞬間に急減しないアシストの実現ができた。時定数 $\tau_{slow} > t_{off}$ になるよう τ_{slow} を決めることで、車椅子のハンドリムから手を離している間でも車椅子が直進し続ける。ゆえに、従来のアシスト制御システムを用いることで直進運動時の使用者の負担を低減することができた。

しかし、従来のアシスト制御システムを用いると旋回運動時も τ_{slow} の影響で一度旋回したら旋回し続けるようになってしまう。旋回運動は直進運動と異なり、車椅子での移動時旋回し続けるケースは非常に少ない。ゆえに、従来のアシスト制御システムは直進運動に最適化すると旋回運動に不適切となるという問題点がある。さらに、旋回運動を考慮して τ_{slow} を小さく設定すると $\tau_{slow} > t_{off}$ が満たされなくなり、直進運動時十分アシストされなくなってしまう問題点がある。

3.3 直進と旋回を考慮した新たな2次元アシスト制御システムの提案

3.2節で述べたように、従来のアシスト制御システムは直進運動と旋回運動の両方に適した制御を行うことが困難であった。この問題の解決策として直進運動と旋回運動を区別してアシスト制御を行う新たなアシスト制御システムを提案する。

すべての運動は直進と旋回の組み合わせである。3.1節で述べたトルクの直進成分と旋回成分を考慮して制御システムを設計する。ここでは左右のトルクの和のモードと差のモードを用いる。和のモードでは直進運動のアシストを考慮し、差のモードでは旋回運動のアシストを考慮する。改善したアシスト制御のブロック図を図3.3に示す。 α_s と α_r はそれぞれ直進運動時と旋回運動時のアシスト率で、 τ_a^s と τ_a^r はそれぞれ直進運動時と旋回運動時の時定数である。

3.1節で $T^s = T_R^s$, $T^r = T_R^r$ と定義したので、式(3.6)と式(3.7)より

$$T_h^s = \frac{T_{hL} + T_{hR}}{2} \quad (3.15)$$

$$T_h^r = -\frac{T_{hL} - T_{hR}}{2} \quad (3.16)$$

である。さらに、式(3.8)と式(3.9)より左右のアシストトルク T_{aL} と T_{aR} は

$$T_{aL} = T_a^s - T_a^r = \frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} T_h^s - \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} T_h^r \quad (3.17)$$

$$T_{aR} = T_a^s + T_a^r = \frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} T_h^s + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} T_h^r \quad (3.18)$$

である。式(3.17)と式(3.18)に式(3.15)と式(3.16)を代入すれば、

$$T_{aL} = \frac{1}{2} T_{hL} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) + \frac{1}{2} T_{hR} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} - \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) \quad (3.19)$$

$$T_{aR} = \frac{1}{2} T_{hL} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} - \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) + \frac{1}{2} T_{hR} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) \quad (3.20)$$

となる。

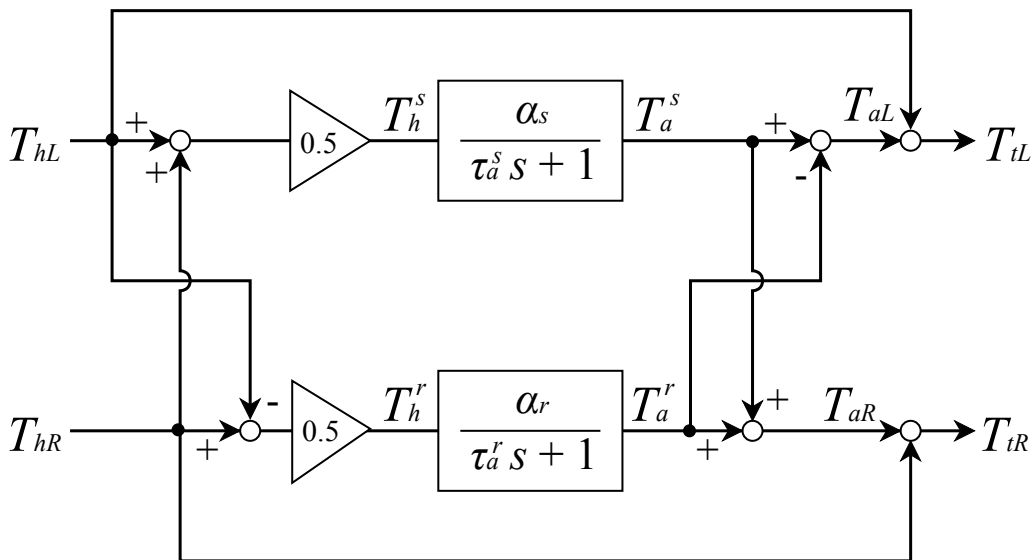


図 3.3 直進と旋回を考慮した新たなアシスト制御のブロック図

従って、左右の総トルク T_{tL} と T_{tR} は下記の式のように表される。

$$T_{tL} = T_{hL} + T_{aL} = T_{hL} + (T_a^s - T_a^r) \quad (3.21)$$

$$= T_{hL} + \frac{1}{2}T_{hL} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) + \frac{1}{2}T_{hR} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} - \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) \quad (3.22)$$

$$T_{tR} = T_{hR} + T_{aR} = T_{hR} + (T_a^s + T_a^r) \quad (3.23)$$

$$= T_{hR} + \frac{1}{2}T_{hL} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} - \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) + \frac{1}{2}T_{hR} \left(\frac{\alpha_s}{\tau_a^s + 1} + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r + 1} \right) \quad (3.24)$$

ここで、時定数 τ_a^s と τ_a^r は

$$\tau_a^s = \begin{cases} \tau_{fast}^s & \left(\frac{dT_h^s}{dt} \geq 0 \right) \\ \tau_{slow}^s & \left(\frac{dT_h^s}{dt} < 0 \right) \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\tau_a^r = \begin{cases} \tau_{fast}^r & \left(\frac{dT_h^r}{dt} \geq 0 \right) \\ \tau_{slow}^r & \left(\frac{dT_h^r}{dt} < 0 \right) \end{cases} \quad (3.26)$$

である。但し、 $\tau_{fast}^s < \tau_{slow}^s$ 、 $\tau_{fast}^r < \tau_{slow}^r$ 、 $\tau_{slow}^s > \tau_{slow}^r$ である。

上述したように、提案する2次元アシスト制御システムでは左右のトルクの和のモードと差のモードを用いることで、直進運動と旋回運動を独立的に制御することができる。従来のアシスト制御システムでは適切な時定数 τ_{slow} の設定が困難であったが、提案するアシスト制御システムでは直進運動時の時定数 τ_{slow}^s と旋回運動時の時定数 τ_{slow}^r を独立的に設定可能な制御システムを構築することで、従来法の問題を解決した。

3.4 従来のアシスト制御システムと提案した2次元アシスト制御システムの比較

本節では同じ人間トルクに対する従来のアシスト制御システムと提案したアシスト制御システムによるアシストトルクについて実験結果を用いて説明する。

図3.4と図3.5はそれぞれ従来のアシスト制御システムを用いた実験結果と提案した2次元アシスト制御システムを用いた実験結果を示す。人間の入力トルクは3～15秒では直進運動するように左右に同じトルクを加え、23～32秒には旋回運動するために左右に逆方向のトルクを入れたものである。

図3.4より時定数 τ_{fast} を小さい値にすることで、素早いアシストが実現されていることが読み取れる。さらに、時定数 τ_{slow} を使用者が手を離す時間 t_{off} (図3.4では1.5秒) より大きく設定することで、直進運動時、使用者が力を入れていない区間でもアシストトルクが生じ、直進運動の駆動力となっていることが読み取れる。

旋回運動の区間を見ると、時定数 τ_{slow} は旋回運動時にも影響を与える。旋回運動の区間で使用者がハンドリムから手を離した後、アシストされる時間が長くなっていることが図3.4より読み取れる。しかし、旋回運動は直進運動と異なり、一度車椅子に力を加えた後、その運動状態を維持するケースは少ない。ゆえに、図3.4より直進運動を考慮して決めた時定数 τ_{slow} は旋回運動に不適切であることが示唆される。実験結果として乗せてはいないが、旋回運動を考慮して時定数 τ_{slow} を小さく設定すると、直進運動時手をハンドリムから離れた後、アシストトルクが急減してしまう。従って、従来のアシストシステムでは、直進運動時のアシストと旋回運動時のアシストが分離されていなかったため、時定数 τ_{slow} を直進運動に合わせると旋回運動に不適切になり、旋回運動に合わせて時定数 τ_{slow} を設定すると直進運動に不適になるというトレードオフがあった。

提案したアシスト制御システムを用いた図 3.5 では τ_a^s と τ_a^r を独立的に設定できる。従来のアシスト制御システムを用いた図 3.4 を比較すると、図 3.5 では直進運動時は従来のアシスト制御と同じ時定数 $\tau_a^s = \tau_{slow}$ を持ちながら、旋回運動時はより小さい時定数 $\tau_a^r < \tau_{slow}$ を適用することができた。時定数のみならずアシスト率 α も直進運動と旋回運動を区別して設定できるため、直進運動と旋回運動を両方適したアシスト制御の実現ができる。

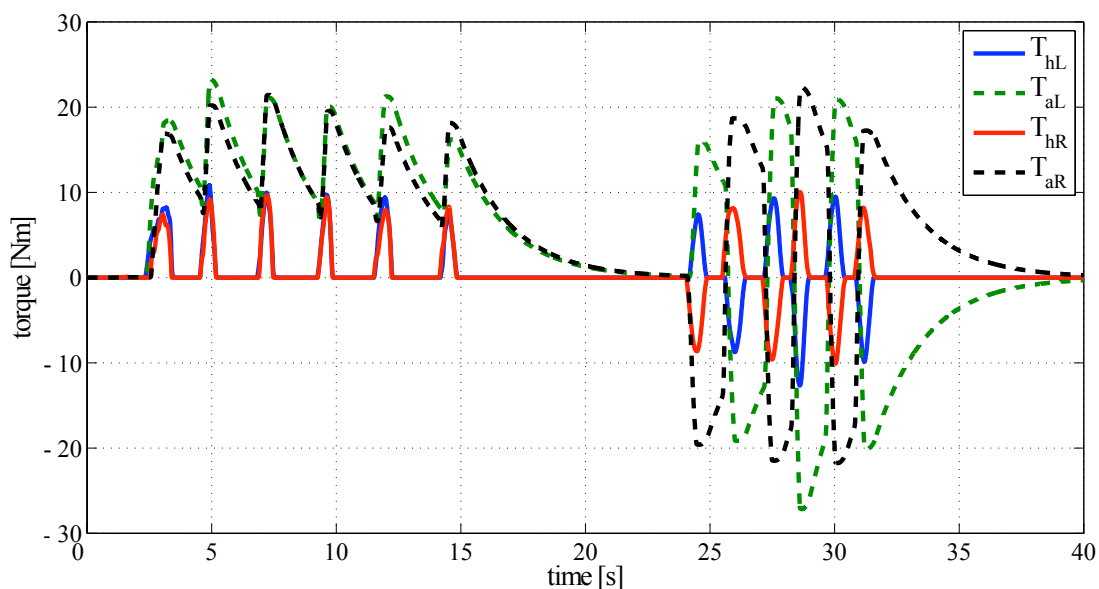


図 3.4 従来のアシスト制御システムの実験結果

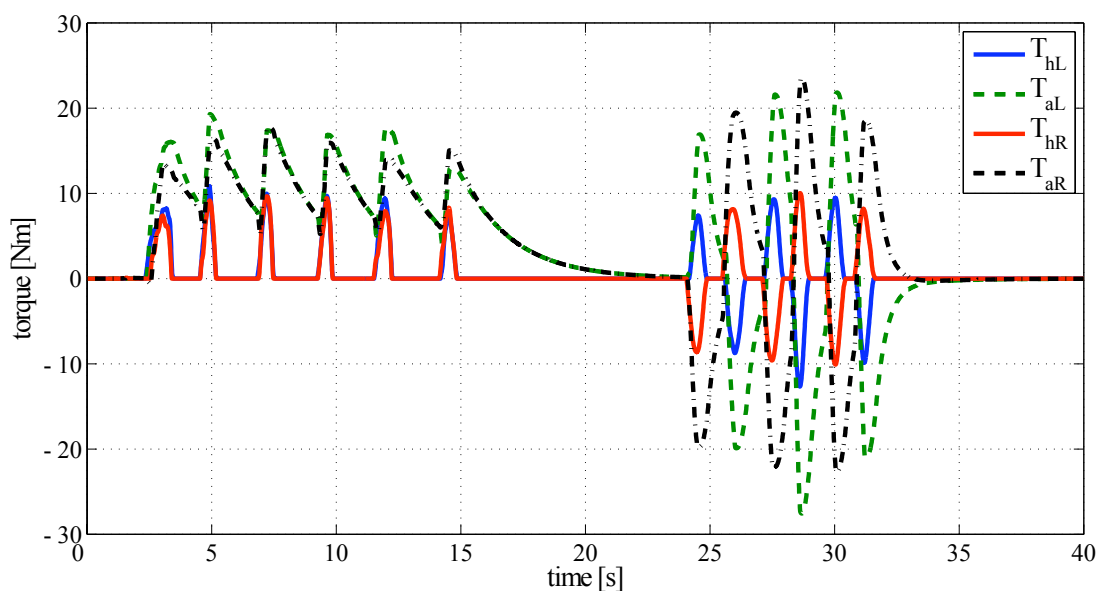


図 3.5 提案した 2 次元アシスト制御システムの実験結果

第 4 章

ヨー運動制御のためのヨーレート指令値の生成

第 3 章では従来のアシスト制御システムと提案したアシスト制御システムについて述べた。

本論文で提案するヨー制御システムは 2 自由度制御システムで、指令値が必要である。ヨー運動制御のため、適切な指令値の生成が求められる。本章ではヨーモーメント入力 N_{zin} の生成とヨーレートの指令値 γ^* の生成について述べる。使用者が加えたトルク T_{hL} と T_{hR} を用いたヨーモーメント入力 N_{zin} の生成とその問題点について述べ、第 3 章で述べた従来のアシスト制御システムを用いて得られた総トルク T_{tL} と T_{tR} を用いたヨーモーメント入力 N_{zin} の生成とその問題点について述べる。さらに、第 3 章で提案した新たな 2 次元アシスト制御システムを用いて得られた総トルク T_{tL} と T_{tR} を用いたヨーモーメント入力 N_{zin} の生成について述べる。

4.1 ヨーモーメント N_z の定義

図 4.1 にヨーモーメント N_z と各車輪に加わる力との関係を示す。 F_L, F_R はそれぞれ車椅子の左右の車輪に加わる力で、 R は車輪の半径、 d は車椅子の幅である。

スリップがないと仮定すると、ヨーモーメント N_z は式 (4.1) のように表すことができる。

$$N_z = \frac{d}{2} (F_R - F_L) = \frac{d}{2} \left(\frac{T_R}{R} - \frac{T_L}{R} \right) = \frac{d}{2R} (T_R - T_L) \quad (4.1)$$

ここで、 T_L, T_R はそれぞれ車椅子の左右の車輪に加わるトルクである。

ヨーモーメントの式およびヨー方向の車椅子のダイナミクスは 5.1 節で詳細に述べる。

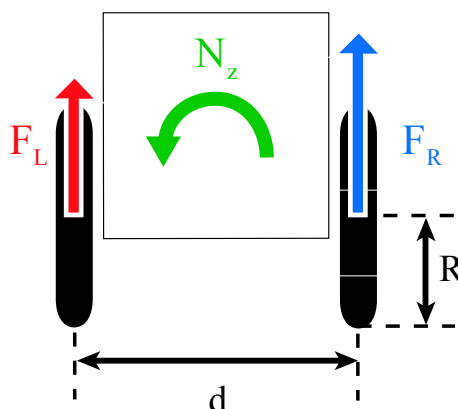


図 4.1 ヨーモーメント N_z (車椅子の上面図)

4.2 人間が加えたトルクを用いたヨーモーメント入力 N_{zin} の生成とその問題点

4.1 節で述べたように、ヨーモーメント入力 N_{zin} は車椅子の左右の車輪に加わるトルクを用いて計算できる。

人間が車椅子に加える力を用いてヨーモーメント入力 N_{zin} を生成すれば、人間の意志を反映したヨー指令値の生成が可能である。人間が加えるトルク T_{hL} 及び T_{hR} を用いてヨーモーメント入力 N_{zin} を生成すると、式 (4.1) よりヨーモーメント入力 N_{zin} は

$$N_{zin} = \frac{d}{2R} (T_{hR} - T_{hL}) \quad (4.2)$$

となる。

しかし、式 (4.2) で計算したヨーモーメント入力 N_{zin} にはアシスト成分が含まれていない。従って、このヨーモーメント入力 N_{zin} を用いてヨーレート指令値 γ^* を生成すると、旋回運動時モータの出すアシストトルクが外乱とされ、ヨー運動制御システムより抑制されてしまう。その結果、直進運動時はモータが人の加える力をアシストしてくれるが、旋回運動時はアシストしてくれないシステムになってしまう。従って、使用者は旋回するために大きい力を要することになり、間が加えたトルクを用いたヨーモーメント入力 N_{zin} を用いると、使用者の旋回の意志は反映できるが、使用者の負担低減がされないという問題が生じる。

4.3 従来のアシスト制御システムを用いたヨーモーメント入力 N_{zin} の生成とその問題点

第 3 章で従来のアシスト制御システムと新たに提案したアシスト制御システムについて述べた。

本節では従来のアシスト制御システムを用いたシステムでのヨーモーメント入力 N_{zin} の生成について述べる。本節での議論は第 3 章で新たに提案した 2 次元アシスト制御システムの必要性とも関連深い。

左右の車輪に加わる使用者のトルクとモータのトルクを合わせたトルク T_{tL} , T_{tR} は式 (3.10) と式 (3.11) より求まる。式 (4.1) より従来のアシスト制御システムを考慮したヨーモーメント入力 N_{zin} は

$$\begin{aligned} N_{zin} &= \frac{d}{2R} (T_{tR} - T_{tL}) \\ &= \frac{d}{2R} [T_{hR} + T_{aR} - (T_{hL} + T_{aL})] \\ &= \frac{d}{2R} (T_{hR} - T_{hL}) \left(1 + \frac{\alpha}{\tau_{as} + 1} \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

である。

3.2 節で述べたように従来のアシスト制御システムでは、 $\frac{dT_{hL}}{dt} < 0$ ($\frac{dT_{hR}}{dt} < 0$) での時定数 τ_{slow} を手を離す時間 t_{off} より長く設定することで、直進運動時手を離す区間でも車椅子がその運動状況を維持するようになり、直進運動時の使用者の負担が低減される。

しかし、直進運動に合わせた時定数 τ_{slow} は旋回運動時には適しておらず、一度車椅子を旋回させると車椅子が時定数 τ_{slow} の影響を受け、使用者が力を加えなくても回り続ける。さらに、旋回運動時は左右を逆向きに操作する 경우가多いが、左右のそれぞれがアシストトルク出すため、過渡なアシストが生じる恐れがある。

従来のアシストシステムで生成したヨーモーメント入力 N_{zin} によるヨーレート指令値が旋回運動に適していないということは従来のアシスト制御システムが旋回運動に適していないことを意味する。従って、第 3 章で述べた新たな 2 次元アシスト制御システムが必要である。4.4 節で提案したアシスト制御システムを用いたヨーモーメント入力 N_{zin} の生成について述べる。

4.4 提案した2次元アシスト制御システムを用いたヨーモーメント入力 N_{zin} の生成

本節では3.3節で紹介した新たな2次元制御システムを考慮したヨーモーメント入力 N_{zin} の生成について述べる。

左右の車輪に加わる使用者のトルクとモータのトルクを合わせたトルク T_{tL} , T_{tR} は式(3.21)と式(3.23)で求まる。式(4.1)と式(3.21)および式(3.23)より提案したアシスト制御システムを用いたヨーモーメント入力 N_{zin} は

$$\begin{aligned}
 N_{zin} &= \frac{d}{2R} (T_{tR} - T_{tL}) \\
 &= \frac{d}{2R} [T_{hR} + T_{aR} - (T_{hL} + T_{aL})] \\
 &= \frac{d}{2R} (T_{hR} - T_{hL} + 2T_a^r) \\
 &= \frac{d}{2R} \left(T_{hR} - T_{hL} + 2 \frac{\alpha_r}{\tau_a^r s + 1} T_h^r \right) \\
 &= \frac{d}{2R} \left[T_{hR} - T_{hL} + 2 \frac{\alpha_r}{\tau_a^r s + 1} \left(-\frac{T_{hL} - T_{hR}}{2} \right) \right] \\
 &= \frac{d}{2R} \left[T_{hR} - T_{hL} + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r s + 1} (T_{hR} - T_{hL}) \right] \\
 &= \frac{d}{2R} (T_{hR} - T_{hL}) \left(1 + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r s + 1} \right)
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

と表される。

式(4.4)で示したように、提案したアシスト制御システムを用いると直進運動に関するアシスト率 α^s と時定数 τ_a^s の影響を受けないことが示唆される。旋回運動時は旋回運動に合わせたアシスト率 α_r と時定数 τ_a^r のみがヨーモーメント入力 N_{zin} に影響を与える。

4.5 ヨーモーメント入力 N_{zin} を用いたヨーレートの指令値 γ^* の生成

ヨーレート γ とヨーモーメント N_z は $\gamma = \frac{1}{J_s} N_z$ の関係式が成り立つ。ここで、 J はヨー方向の慣性係数である。ヨーレート γ とヨーモーメント N_z の関係式は第5章で詳しく述べる。

しかし、ヨーレート γ とヨーモーメント N_z の関係式には積分器が入っているため、発散する恐れがある。1次遅れを用いると関係式は

$$\gamma = \frac{1}{J_n s + B_n} N_z \tag{4.5}$$

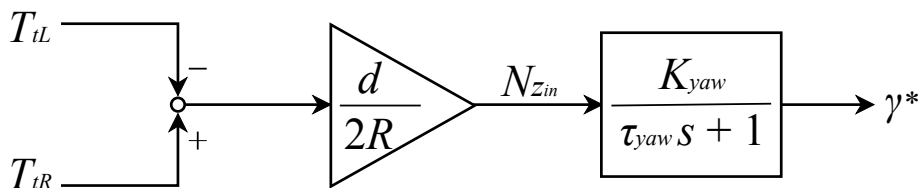


図 4.2 ヨーレート指令値 γ^* の生成のブロック図

となる。ここで、 J_n は慣性係数で、 B_n はダンピング係数である。式 (4.5) は

$$\gamma = \frac{K_{yaw}}{\tau_{yaw} s + 1} N_z \quad (4.6)$$

とおき、プロントのゲイン K_{yaw} と時定数 τ_{yaw} で表すことができる。但し、 $K_{yaw} = \frac{1}{B_n}$ で、 $\tau_{yaw} = \frac{J_n}{B_n}$ である。

図 4.2 にヨーレート指令値 γ^* の生成のブロック図を示す。

提案したアシスト制御システムを用いたヨーモーメント入力 N_{zin} (式 (4.4)) を用いて生成されるヨーレートの指令値 γ^* は

$$\begin{aligned} \gamma^* &= \frac{K_{yaw}}{\tau_{yaw} s + 1} N_{zin} \\ &= \frac{K_{yaw}}{\tau_{yaw} s + 1} \left[\frac{d}{2R} (T_{tR} - T_{tL}) \right] \\ &= \frac{d}{2R} \frac{K_{yaw}}{\tau_{yaw} s + 1} (T_{hR} - T_{hL}) \left(1 + \frac{\alpha_r}{\tau_a^r s + 1} \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

である。

第 5 章

ヨーモーメントオブザーバを用いた横方向外乱抑制のヨー運動制御システム

第 2 章ではパワーアシスト車椅子を紹介した。第 2 章で述べたようにパワーアシスト車椅子はモータを制御することで様々な制御が実現可能という長所を持っている。第 3 章ではパワーアシスト車椅子を用いたアシスト制御システムについて述べ、第 4 章ではヨー運動制御システムに用いられるヨーレート指令値の生成について述べた。

本章ではパワーアシスト車椅子を用いたヨー運動制御について述べる。斜面では重力の影響を受けるため、車椅子の操作が困難である。特に横斜面の場合、重力の分力が横方向の外乱となり、直進運動が困難という問題がある。この問題の解決法として、本章では横方向の外乱がある環境で車椅子の操作性向上させるためのヨー運動制御を提案する。

5.1 ヨー方向の運動を考慮した車椅子の運動方程式

図 5.1 に重力の影響による横方向外乱を考慮した車椅子のダイナミクスを示す。

表 5.1 にヨー方向ダイナミクスで用いる記号を示す。

表 5.1 ヨー方向ダイナミクスに用いる記号

V	進行方向の速度
γ	ヨーレート
$F_{f\Box}^{\Box}$	前輪 (キャスト) に加わる力
$F_{r\Box}^{\Box}$	後輪に加わる力
$F_{\Box l}^{\Box}$	左側の車輪に加わる力
$F_{\Box r}^{\Box}$	右側の車輪に加わる力
$F_{\Box\Box}^x$	車輪に加わる力の x 方向成分
$F_{\Box\Box}^y$	車輪に加わる力の y 方向成分
δ_L	車両の進行方向に対する左側の前輪 (キャスト) の角度
δ_R	車両の進行方向に対する右側の前輪 (キャスト) の角度
d_c	左右前輪 (キャスト) 間の距離 (トレッド)
d	左右後輪間の距離 (トレッド)

車椅子のヨーイング運動は式 (5.1) のようになる。

$$I\dot{\gamma} = l_f(F_{fl}^x \sin\delta_L + F_{fr}^x \sin\delta_R + F_{fl}^y \cos\delta_L + F_{fr}^y \cos\delta_R) - l_r(F_{rl}^y + F_{rr}^y) + N_z \quad (5.1)$$

ここで、ヨーモーメント N_z は

$$N_z = \frac{d}{2}(F_{rr}^x - F_{rl}^x) + \frac{d_c}{2}(F_{fr}^x \cos\delta_R - F_{fl}^x \cos\delta_L) \quad (5.2)$$

である。ヨー方向の車椅子のダイナミクスでの仮定を下記に示す。

- (1) モータ及び使用者による駆動力は後輪のみ生じ、前輪の駆動力は 0 である。

$$F_{fl}^x = F_{fr}^x = 0$$

- (2) タイヤによる横力は発生しない。

$$F_{fl}^y = F_{fr}^y = F_{rl}^y = F_{rr}^y = 0$$

- (3) コーナリングは後輪のトルクの差によるものである。

仮定 (1) より、式 (5.1) の右辺の 1 項と 2 項と式 (5.2) の右辺の 3 項と 4 項が無視でき、仮定 (2) より、式 (5.1) の右辺の 3, 4, 5, 6 項が無視できる。

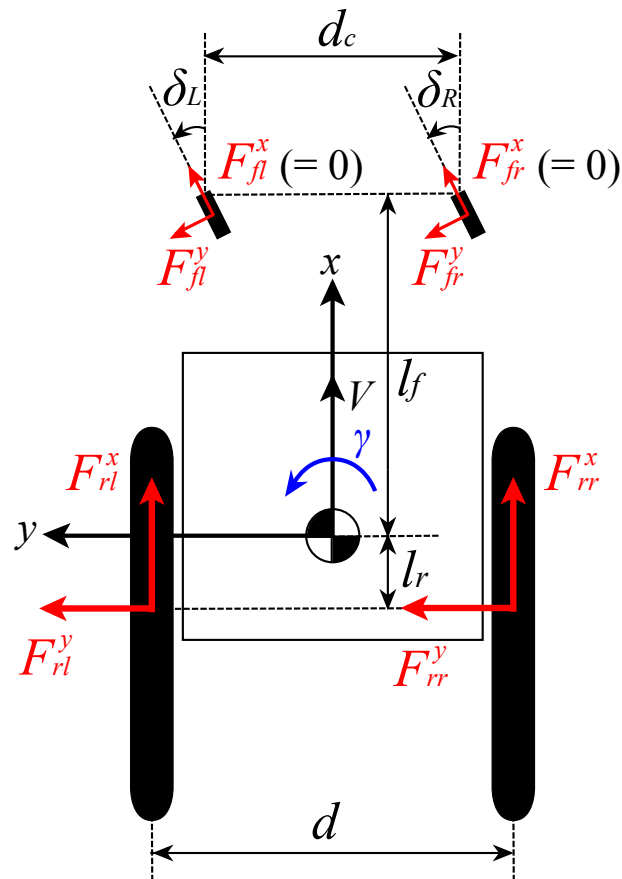


図 5.1 ヨー方向の運動を考慮した車椅子のダイナミクス (上面図)

従って、式 (5.1) と式 (5.2) は

$$I\dot{\gamma} = N_z \quad (5.3)$$

$$N_z = \frac{d}{2}(F_{rr}^x - F_{rl}^x) \quad (5.4)$$

と簡略化することが可能である。

5.2 ヨー方向の車椅子のモデリング

5.2.1 ヨー方向の慣性係数 J の計算

車椅子に使用者が乗っている際の車椅子の慣性係数を求める。

図 5.2 のように車椅子のヨー方向の運動を円筒に簡略化し、その慣性係数を求める。円筒の半径を r_i 、質量を M とすると、円筒の慣性係数 J は式 (5.5) のように定義される。

$$J = \frac{1}{2} M r_i^2 \quad (5.5)$$

質量 M は車椅子の質量 m_w とその利用者の質量 m_h の和であるため、式 (5.5) は

$$J = \frac{1}{2} (m_w + m_h) r_i^2 \quad (5.6)$$

である。ここで、車椅子の質量 m_w は 30 kg である。車椅子の利用者の質量の範囲が $30 \text{ kg} < m_h < 110 \text{ kg}$ で、 r_i が 0.4 m と仮定すれば、慣性係数 J の範囲は $4.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 < J < 11.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ となる。

本研究ではノミナルモデルの慣性係数 J_n を $7.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ とする。

5.2.2 ヨー方向の車椅子のモデリング方法

4.5 節で車椅子のヨーレート $\dot{\gamma}$ とヨーモーメント N_z 関係について述べた。ヨー方向車椅子のモデルの入力はヨーモーメント $N_{z_{in}}$ で、出力はヨーレート $\dot{\gamma}$ である。

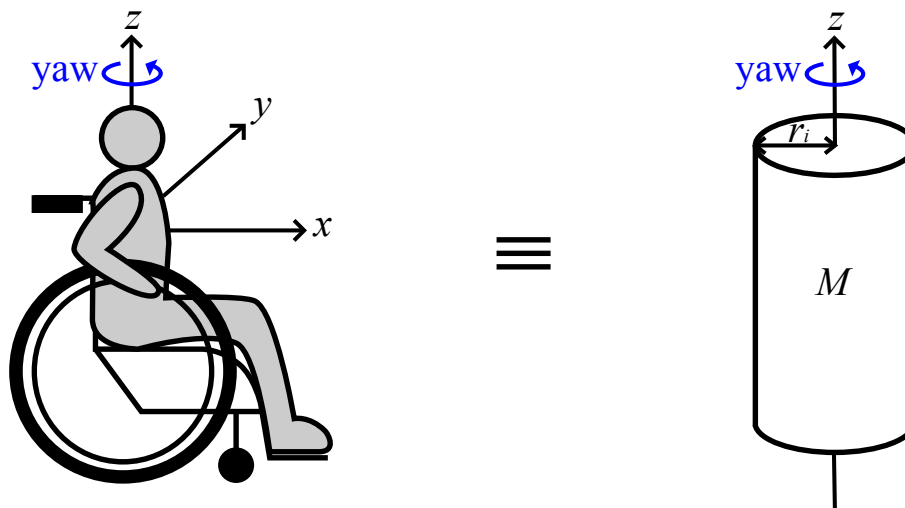


図 5.2 パワーアシスト車椅子の慣性係数の計算

図 5.3 で示すように $T_R - T_L$ に正弦波を入力する。トルクの入力は使用者が加えるのではなく、モータの出力で与える。車椅子のヨーレート γ は車椅子に装着したジャイロスコプを用いて測定する。入力 $T_R - T_L$ より計算したヨーモーメント N_{zin} と測定したヨーレート γ のデータを用いて、適切な慣性係数 J_n とダンピング係数 B_n を求める。慣性係数 J_n は 5.2.1 で計算したように、 $4.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 < J < 11.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ の値を用いる。

5.3 横方向外乱抑制のためのヨー運動制御の提案

図 5.4 に提案するヨー運動制御系のブロック図を示す。

提案する制御系は車椅子のヨーレート γ がヨーレートの指令値 γ^* に追従するように設計した。提案する制御系はフィードフォワード (FF : Feedforward) , フィードバック (FB : Feedback) 及びヨーモーメントオブザーバ (YMO : Yaw Moment Observer) [25] を用いた 2 自由度 (2 DOF : 2-degree-of-freedom) 制御系である。

車椅子使用者およびモータが両輪に加える力の差により生じるヨーモーメントを N_z , 重力などの外乱により生じる外乱ヨーモーメントを N_d とすると、式 (5.3) よりヨーイング運動方程式は

$$I\dot{\gamma} = N_z + N_d \tag{5.7}$$

と表される。ここで、 I はヨー方向の慣性係数で、 γ はヨーレートである。式 (5.7) により車椅子は

$$\gamma = \frac{1}{I_n s} N_z \tag{5.8}$$

とノミナル化される。

フィードフォワード制御

式 (5.8) で示したように車椅子は $\frac{1}{I_n s}$ とノミナル化される。ヨーレートの指令値 γ^* をフィードフォワード制御はノミナルモデルの逆数 $I_n s$ を用いる。

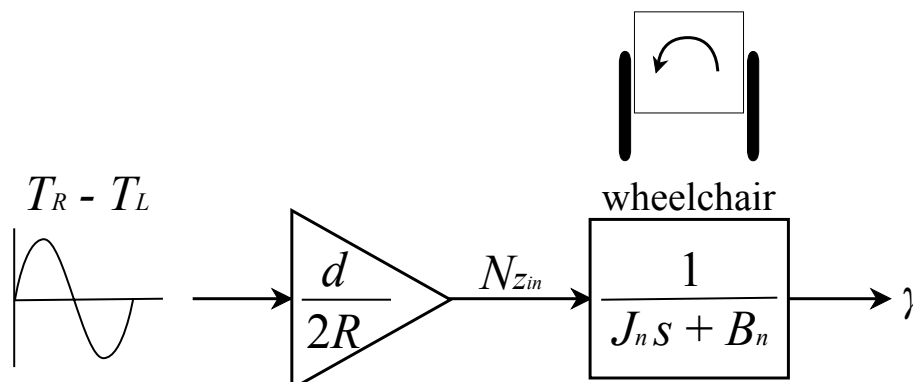


図 5.3 ヨー方向の車椅子のモデリングのブロック図

フィードバック制御

車椅子のモデリングのエラーがなく、外乱のない環境ではフィードフォワード制御でも十分である。しかし、横方向外乱が存在する環境であるため、ヨーレートがその指令値に追従するよう、フィードバック制御を行う。

提案したフィードバック制御系の伝達関数を式 (5.9) に示す。

$$\frac{\gamma}{\gamma^*} = \frac{\frac{1}{I_n s} C_{FB}(s)}{1 + \frac{1}{I_n s} C_{FB}(s)} = \frac{C_{FB}(s)}{I_n s + C_{FB}(s)} \quad (5.9)$$

フィードバック制御はP制御を用いる。P制御のゲインを K_p とすると

$$C_{FB}(s) = K_p \quad (5.10)$$

となる。式 (5.9) と式 (5.10) より提案した制御系の極は

$$s = -\frac{C_{FB}(s)}{I_n} = -\frac{K_p}{I_n} \quad (5.11)$$

である。

ヨーモーメントオブザーバ

ヨーモーメントオブザーバを用いることで、実際のプラントの車椅子をノミナルプランと $\frac{1}{I_n s}$ とすることができる。式 (5.7) より外乱ヨーモーメントの推定値 \hat{N}_d は

$$\hat{N}_d = (\gamma I_n s - N_z) Q(s) \quad (5.12)$$

となる。但し、 $Q(s)$ は

$$Q(s) = \frac{1}{\tau_q s + 1} \quad (5.13)$$

である。

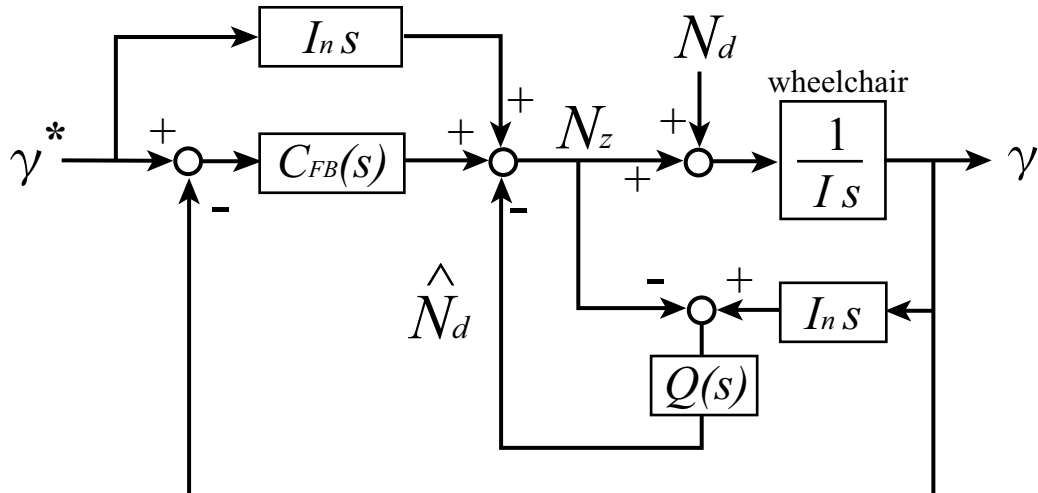


図 5.4 提案したヨー運動制御系のブロック図

5.4 ヨー運動制御におけるトルク分配

5.3節で提案した制御法について述べた。本節では車椅子のヨーモーメント N_z のトルク分配法を述べる。ヨー方向の外乱の影響を補償するための左右のトルクをそれぞれ T_{yL}, T_{yR} とすると、左右の車輪のトルク T_L, T_R は

$$T_L = T_{hL} + T_{aL} + T_{yL} = T_{tL} + T_{yL} \quad (5.14)$$

$$T_R = T_{hR} + T_{aR} + T_{yR} = T_{tR} + T_{yR} \quad (5.15)$$

となる。但し、 T_{hL}, T_{hR} はそれぞれ左右の車輪に車椅子の使用者が加えるトルクで、 T_{aL}, T_{aR} はそれぞれ左右のモータによるアシストトルクである。さらに、 T_{tL}, T_{tR} はそれぞれ左右の車輪に加わる使用者のトルクとモータのトルクを合わせたトルクである。従って、ヨーモーメント N_z は

$$N_z = \frac{d}{2R} (T_R - T_L) \quad (5.16)$$

$$= \frac{d}{2R} (T_{tR} + T_{yR} - (T_{tL} + T_{yL})) \quad (5.17)$$

$$= N_{zin} + \frac{d}{2R} (T_{yR} - T_{yL}) \quad (5.18)$$

となる。ここで、ヨーモーメント入力 N_{zin} は $N_{zin} = \frac{d}{2R} (T_{tR} - T_{tL})$ である。従って、

$$T_{yR} - T_{yL} = \frac{2R}{d} (N_z - N_{zin}) \quad (5.19)$$

となる。ここで、 $T_{yR} = -T_{yL}$ と仮定すると、

$$T_{yR} - (-T_{yR}) = \frac{2R}{d} (N_z - N_{zin}) \quad (5.20)$$

$$T_{yR} = \frac{R}{d} (N_z - N_{zin}) \quad (5.21)$$

$$T_{yL} = -T_{yR} = -\frac{R}{d} (N_z - N_{zin}) \quad (5.22)$$

となる。

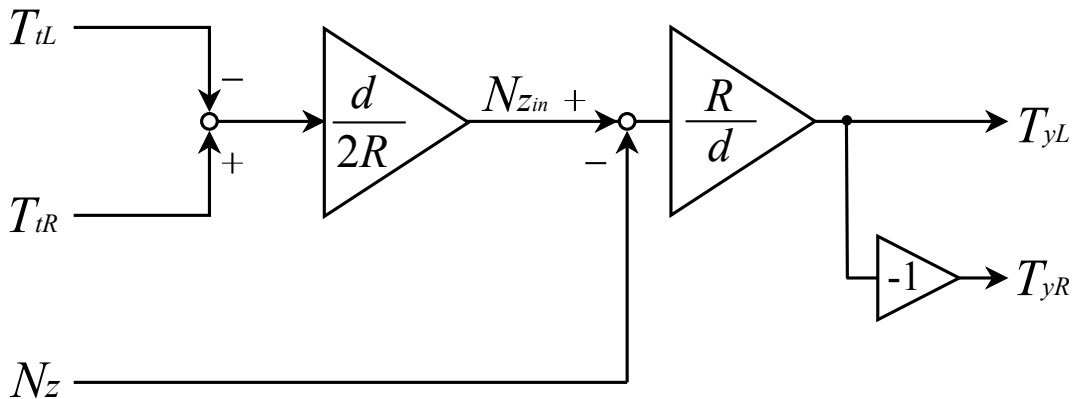


図 5.5 ヨー運動制御におけるトルク分配

第 6 章

提案したヨー運動制御システムの実証実験の実験方法

本論文では横方向の外乱のある環境で使用可能な車椅子の実現のために、新たな制御システムを提案した。第 5 章で、提案したフィードフォワード制御、フィードバック制御及びヨーモーメントオブザーバを用いた 2 自由度制御システムについて述べた。

第 6 章では提案した制御システムの有効性を検証するために行った実験について述べる。

6.1 運動制御に適した車椅子の実現のための実験装置の改良

本節では実験装置について述べる。

普遍的な車椅子を運動制御に適した装置にするため、パワーアシスト車椅子を改良した。車椅子に取り付けたセンサ及びハードウェアシステムの情報を表 6.1 に示す。

市販されているパワーアシスト車椅子 JW-II (ヤマハ発動機製) は各車輪のハンドリムにトルクセンサが装着されており、各車輪にモータが内蔵されている。トルクセンサを用いて使用者が各車輪に加えたトルクを測定する。モータは使用者の加えた力をアシストする目的で付けられているもので、モータを制御することで、上位の制御を行うことができる。

モータの駆動は秋月電子通商製のマイコンボードキット AKI-H8-3052F を用いて回路を作成し、パルス幅変調 (PWM: Pulse Width Modulation) で実現する。

車椅子の動作測定や使用環境の推定に使用するため、必要なセンサを取り付けた。車椅子の車輪の角速度の

表 6.1 車椅子に付けたセンサ及びハードウェアシステム

種類	型番	製造会社	
パワーアシスト車椅子	JW-II	ヤマハ発動機	
高速デジタル信号処理システム	s-BOX	mtt Corporation	
ジャイロ스코ープ	ヨー方向	CRS03-01R	SILICON SENSING
	ピッチ方向	HS-EG3 司 21	S.T.L. Japan
3 軸加速度センサ (アナログ)	KXM52-1050	Kionix	
ロータリエンコーダ (光学式)	RE20F-100-200	COPAL ELECTRONICS	
マイコン	AKI-H8-3052F	(株) 秋月電子通商	

測定のため、各車輪に COPAL ELECTRONICS 製の光学式ロータリエンコーダを取り付けた。さらに、エンコーダの信号処理に必要な信号処理回路も作成した。

車椅子の加速度の測定には、Kionix 製の 3 軸アナログ加速度センサを使用する。また、車椅子の背もたれの動作を推定するために、ピッチ方向のジャイロスコプを設置し、車椅子のヨー方向の回転の測定のために、ヨー方向のジャイロスコプも設置した。

制御には PC ベースの高速デジタル信号処理 (DSP: Digital Signal Processing) システムである s-BOX (mtt Corporation 製) を使用する。s-BOX は DSP の実験キットで、MATLAB によるソフトウェア開発支援ライブラリとして、Simulink で使用できる I/O ブロック (S-Function) が標準添付されている他、C 言語での直接コーディングも可能である。

パワーアシスト車椅子と s-BOX の入出力システムの概念図を図 6.1 に示す。

但し、s-BOX のアナログ入力は 6 チャンネルであるため、図 6.1 に記述しているすべてのセンサの信号を取得することは不可能である。図示している 7 個の入力の中で 6 個以下のセンサ出力を必要に応じて s-BOX のアナログ入力として与えるようにする。

エンコーダの信号は s-BOX のカウンタを利用する。6 チャンネルのカウンタ入力 no 中、2 チャンネルを用いて左右の車輪に付いているエンコーダの情報を取得する。

s-BOX のアナログ出力を用いてモータへの指令を出す。アナログ出力は 8 チャンネルだが、その内 2 チャンネルを用いてモータ駆動の指令を出す。

s-BOX には 8bit のデジタル入力と 8bit のデジタル出力もあるが、現在の車椅子のシステムでは利用していない。

図 6.2 にパワーアシスト車椅子のセンサとハードウェアの詳細について示す。

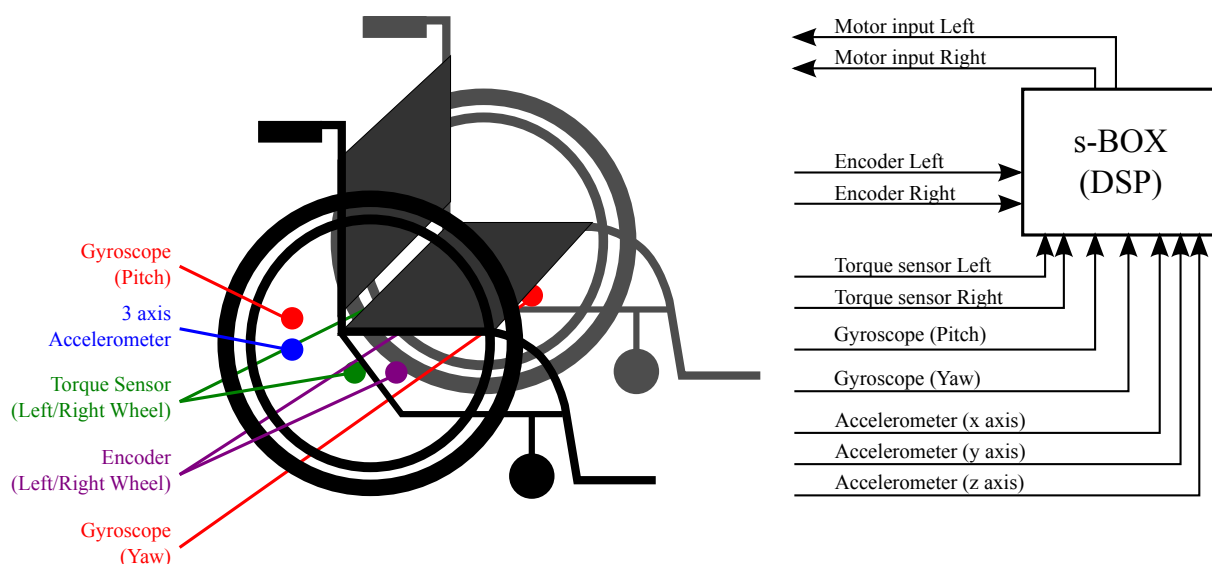


図 6.1 パワーアシスト車椅子のシステムの概念図

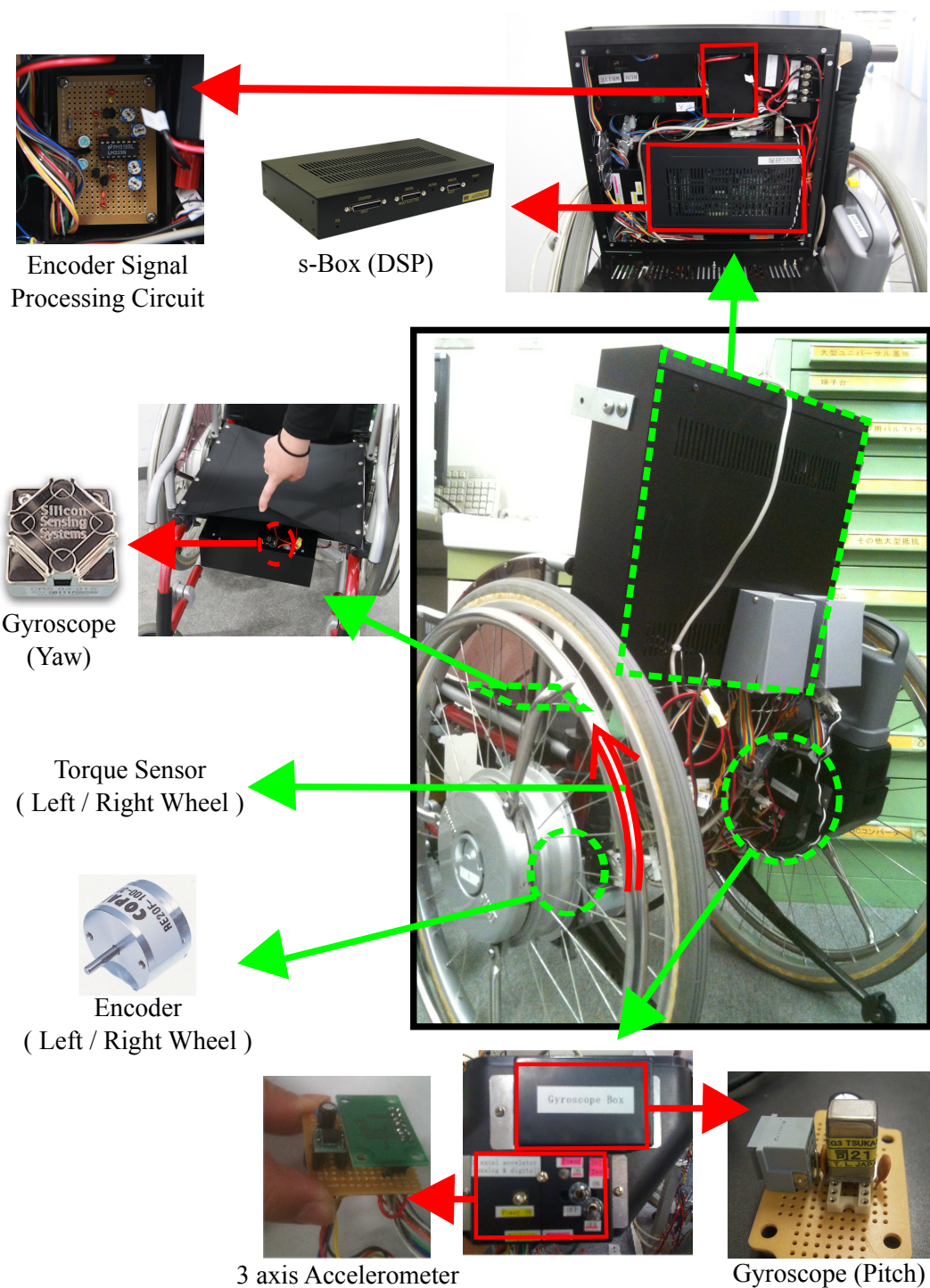


図 6.2 パワーアシスト車椅子のセンサとハードウェアの詳細

6.2 側面方向の外乱のある実験環境

提案した制御システムの横方向外乱抑制の有効性を実証をするため、横斜面で検証実験を行う。

側面方向外力の計算

横斜面では重力の分力が側面方向の外乱になる。車椅子使用者の質量を m_h 、車椅子の質量を m_w 、斜面の傾斜を θ 、車椅子の進行方向の角を ϕ とすると、車椅子の側面方向に働く外力 F_d は

$$F_d = (m_h + m_w) g \sin\theta \cos\phi \quad (6.1)$$

である。ここで、 g は重力加速度である。

実験環境

実験環境を表 6.2 に示す。

6.3 従来法と提案法の横方向外乱の有する環境での直進性および旋回性の実験

6.3.1 横斜面での直進運動実験

横斜面での直進運動実験の実験方法を図 6.3 に示す。

表 6.2 実験環境及び車椅子のパラメータ

横斜面の角度	θ	8 deg
車椅子の質量	m_w	30 kg
車椅子の幅	d	0.47 m
車椅子の車輪の半径	r_w	0.30 m
車椅子のハンドリムの半径	r_h	0.27 m
慣性係数 (ヨー方向)	J_n	7.2 kg·m ²
減衰係数 (ヨー方向)	B_n	14 N·s/m
直進時のアシスト率	α^s	2
旋回時のアシスト率	α^r	2
直進時の時定数	τ_{fast}^s	0.08 s
	τ_{slow}^s	4 s
旋回時の時定数	τ_{fast}^r	0.08 s
	τ_{slow}^r	0.8 s
YMO の Q フィルタの時定数	τ_q	1.5915 s
FB の P 制御ゲイン	K_p	45.24

横方向外乱のある環境で実験を行う。本実験では一定な横方向外乱の存在する環境で、車椅子の直進性を実証するための実験である。横方向外乱は重力の分力で、出発時車椅子の左方向に働いている。進行方向の角度 ϕ が 0 であるため、本実験での側面外力 F_d は

$$F_d = (m_h + m_w) g \sin\theta \quad (6.2)$$

である。本実験は 2.5 m 直進し、方向転換のために 180 度旋回し、再び 2.5 m 直進する実験である。

6.3.2 横斜面での旋回運動実験

実験方法を図 6.4 に示す。

本実験は横方向外乱のある環境での旋回運動実験である。坂での反時計回り及び時計回りの旋回をする実験で、旋回運動時ヨー運動制御の有効性を実証のための実験である。

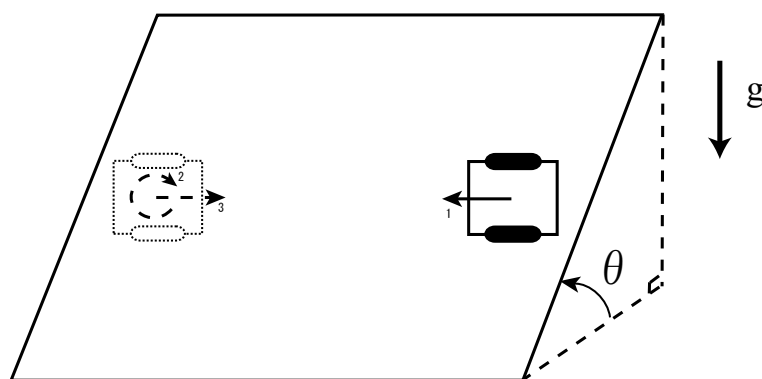


図 6.3 横斜面での直進運動実験方法

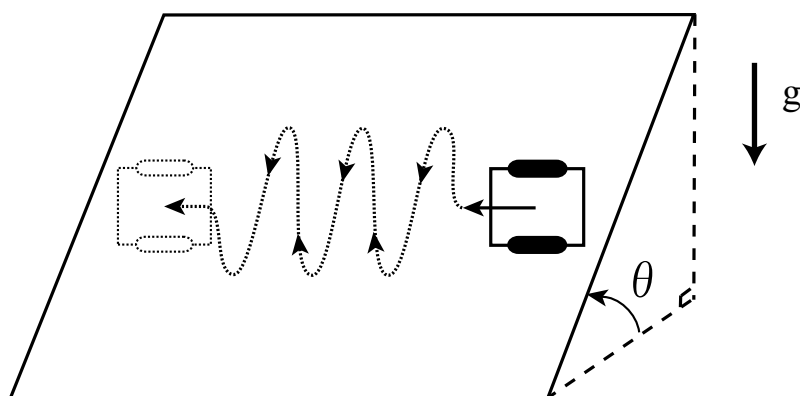


図 6.4 横斜面での旋回運動実験方法

第 7 章

提案したヨー運動制御システムの実証実験の実験結果

7.1 従来法と提案法の横方向外乱の有する環境での直進性の実験結果

7.1.1 横斜面での直進運動の実験結果

横斜面での直進運動実験の実験結果の一部を図 7.1 ~ 7.3 に示す。

制御なし

図 7.1 に制御なしの実験結果を示す。

1 番目のグラフは両車輪の角速度のグラフである。赤い実線は左側の車輪の角速度 ω_L を表し、青い破線は右側の車輪の角速度 ω_R を表す。さらに、緑色の一点鎖線は両車輪の角速度の差 $\omega_R - \omega_L$ を表す。2 番目の

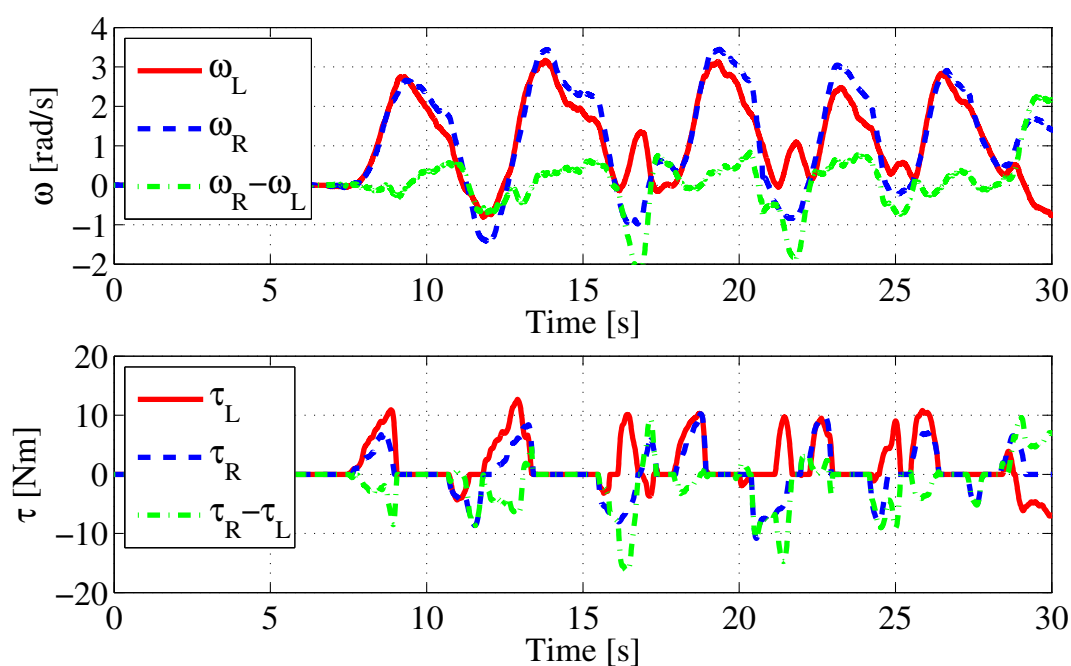


図 7.1 横斜面での直進運動の実験結果 (制御なし)

グラフは人が車椅子に加えるトルクのグラフである。赤い実線は左側の車輪に加えるトルク $\tau_L (= T_{hL})$ を表し、青い破線は右側の車輪に加えるトルク $\tau_R (= T_{hR})$ を表す。さらに、緑色の一点鎖線は両トルクの差 $\tau_R - \tau_L (= T_{hR} - T_{hL})$ を表す。

図 7.1 は直進区間 (車椅子が動き出してから 28 秒まで) と旋回区間の一部 (28 ~ 30 秒) を示している。

図 7.1 の角速度のグラフより、車椅子の動きを 3 段階に分けることが可能である。はじめに両車輪の角速度が増加する区間があり、その後、両車輪の角速度が減少しはじめる。次に両車輪の角速度の差が急減し、負の値を持つ区間がある。さらに、両車輪の角速度の差が急減した後、17~18 秒のように急増する区間もある。

トルクのグラフをみると、両車輪の角速度が増加する区間 (車椅子が加速している区間) では左右に正のトルクを加えている。22 ~ 23 秒以外の区間では、左側の方が右側より大きいトルクを与えている。この区間での左右の車輪の角速度の差は、両車輪の角速度が減少する区間 (車椅子が減速している区間) に比べて小さい。

両車輪の角速度が減少する区間 (車椅子が減速している区間) では、右の車輪の角速度が左の車輪の角速度より大きくなっている。この区間のトルクのグラフを見ると、使用者がトルクを加えていないことがグラフより読み取れる。

12 ~ 13 秒, 16 ~ 17 秒, 21 ~ 22 秒, 24.5 ~ 25.5 秒では、左の車輪の角速度が右の車輪の角速度より大きくなっており、12 ~ 13 秒以外の区間では左側は正の値を持ち、右側は負の値を持っている。17 ~ 17.5 秒では、それに反して左側は負の値を持ち、右側は正の値を持っている。

横方向外乱オブザーバを用いた運動制御 (従来法)

図 7.2 は横方向外乱オブザーバ用いた横斜面での直進運動の実験結果を示す。

1 番目のグラフは両車輪の角速度を示し、2 番目のグラフは人が車椅子に加えるトルクのグラフである。各線が表す詳細な情報は図 7.1 と同様である。

図 7.2 は直進区間 (車椅子が動き出してから 28 秒まで) と旋回区間の一部 (28 ~ 30 秒) を示している。

角速度のグラフをみると、両車輪の角速度が増加する区間 (車椅子が加速している区間) では両車輪の角速度の差が小さい。この区間でのトルクのグラフをみると左側のトルクが右側より多少大きくなっている。

両車輪の角速度が減少する区間 (車椅子が減速している区間) では右の車輪の角速度が左の車輪の角速度より大きくなっている。この区間で車椅子の使用者の入力トルクは 0 である。

さらに、右の車輪の角速度が負の値を持つ区間の存在する。この区間では右側のトルク入力に負の値を持っていることがグラフより読み取れる。

ヨーモーメントオブザーバを用いたヨー運動制御 (提案法)

図 7.3 に提案したヨー運動制御を用いた横斜面での直進運動の実験結果を示す。

1 番目のグラフは両車輪の角速度を示し、2 番目のグラフは人が車椅子に加えるトルクのグラフである。各線が表す詳細な情報は図 7.1 と同様である。

図 7.3 は直進区間 (車椅子が動き出してから 23 秒まで) と旋回区間 (23 ~ 28 秒) 及び直進区間の一部 (28 ~ 30 秒) を示している。

角速度のグラフをみると、直進する区間で左右の車輪の角速度が常に正の値を持つ。さらに、両車輪の角速度の差が図 7.1 (制御なし) より小さいことが読み取れる。

トルクのグラフをみると、動き始める 7 ~ 8 秒の区間以外は人の加えるトルクの左右の差も図 7.1 (制御なし) より小さいことが読み取れる。

7.1.2 横斜面での直進運動実験の考察

7.1.1 節では左側に外乱が存在する環境での直進運動の実験結果を示した (図 7.1 ~ 7.3)。本実験での外乱は重力の分力であり、式 (6.1) を用いてその大きさを求めることができる。

制御なし

直進運動の制御なし (図 7.1) では、両車輪の角速度の差が大きい区間が生じていることより直進が不可能であることが読み取れる。

使用者が力を加える区間では、両車輪の角速度の差が小さく直進が可能である。この区間のトルク入力を見ると、車椅子の使用者が右側より左側に大きいトルクを与えていることが読み取れる。ゆえに、左側 (反時計回り) に外乱の影響を受けるため、使用者が左側により大きい力を与えることで外乱の補償が行われていることが読み取れる。

しかし、力を加えない区間では外乱の影響により、車椅子が反時計回りに旋回してしまう。従って、直進運動が不可能である。

トルクのグラフをみると右側のトルクが負の値を持つ区間があるが、この区間は使用者が反時計回りに旋回

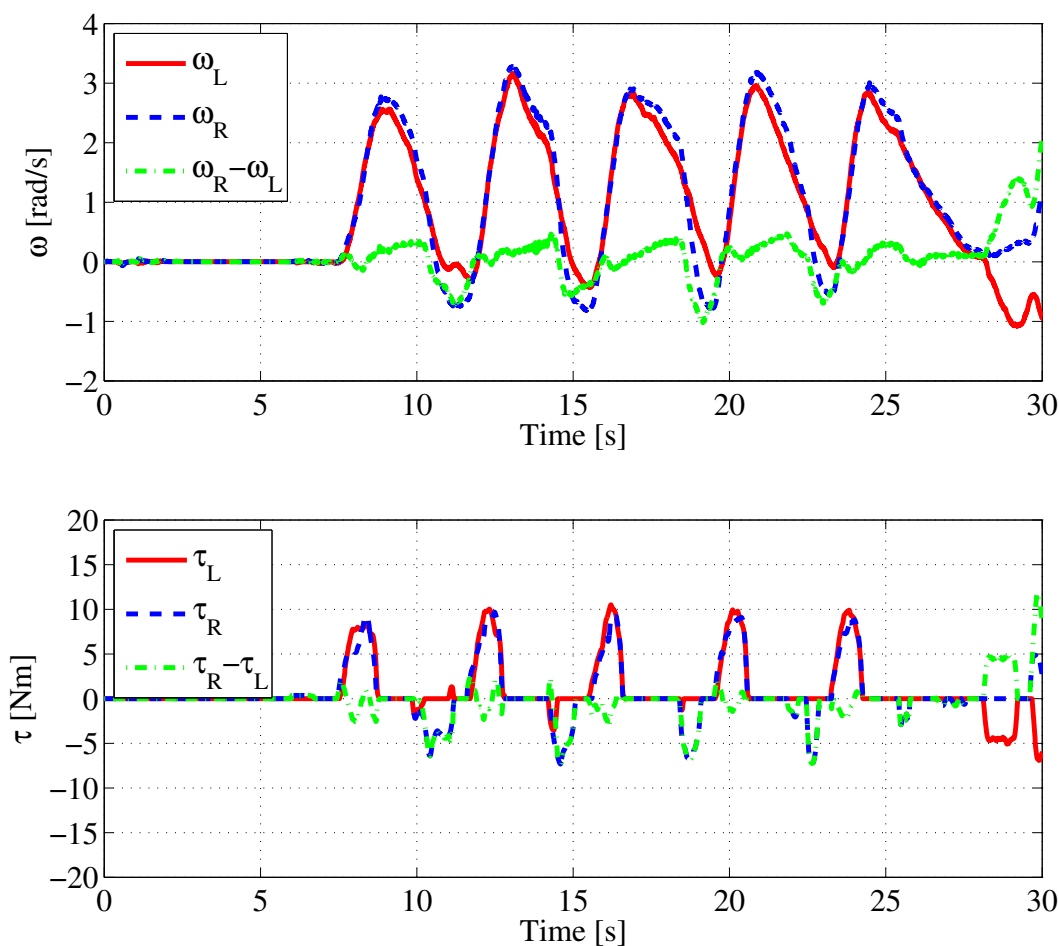


図 7.2 横斜面での直進運動の実験結果 (従来法)

してしまった車椅子の向きを元の進行方向に変えるため、時計回りに車椅子を旋回させた区間である。この区間の両車輪の角速度の差からも同様なことが読み取れる。

従って、制御なしでの直進運動時は [区間 1] 使用者が車椅子に力を加え、直進できる区間, [区間 2] 使用者がハンドリムから手を離し、力を加えられなくなり、車椅子が外乱の影響を受ける区間, [区間 3] 使用者が車椅子の直進運動を続けるために車椅子の進行方向を補償する区間, の3段階に分けることができる。[区間 2] の区間が存在するため、車椅子は直進できず、旋回してしまう。さらに、外乱の影響を補償するために [区間 1] 及び [区間 3] で使用者が力を与える必要がある。この補償する力が使用者への負担になり、それは斜面の傾斜角が大きくなると様々な危険性を伴う。さらに、使用者の力では補償できないと大きい事故に繋がる恐れもある。

横方向外乱オブザーバを用いた運動制御 (従来法)

図 7.2 より横方向外乱オブザーバを用いた運動制御では両車輪の角速度の差が大きい区間が生じていることより直進が不可能であることが読み取れる。

直進するために使用者が左右に正のトルクを与えている区間 ([区間 1]) では左右の入力トルクの差 $\tau_R - \tau_L$ の最大値が - 3 Nm (16 秒) である。制御なし (図 7.1) では最大値が - 8 Nm (9 秒) で、直進するために使用者が補償しているトルクの大きさが制御なしより小さいことが読み取れる。

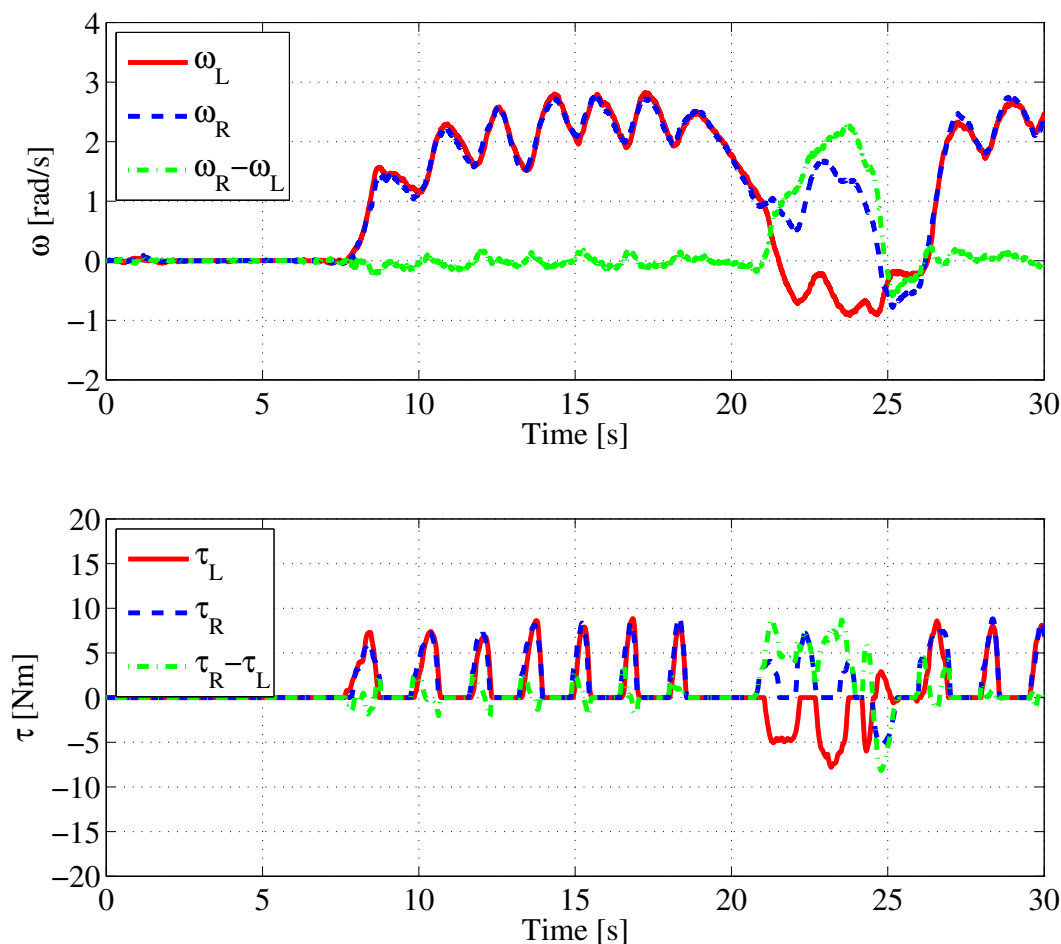


図 7.3 横斜面での直進運動の実験結果 (提案法)

手をハンドリムから話す区間（[区間2]）では制御なし（図7.1）と同様に両車輪の角速度の差が生じる。しかし、制御なしと比較してみると制御なしではその差の最大値が -0.8 rad/s （20.4 秒）であるのに比べ、従来法を用いた運動制御ではその最大値が -0.4 rad/s （14.4 秒）である。

進行方向の補償をする区間（[区間3]）では補償時の左右のトルクの差の最大値が制御なしでは -16 Nm （16.4 秒）で、本手法では -7 Nm （14.5 秒）である。

従って、本手法は制御なしと同様に外乱の影響で直進ができないが、外乱の影響を低減するため、制御なしより使用者の負担が少なく、車椅子の経路離脱も制御なしに比べその程度が軽微である。

ヨーモーメントオブザーバを用いたヨー運動制御（提案法）

図7.2よりヨーモーメントオブザーバを用いたヨー運動制御では直進可能である。

図7.2は図7.1と図7.2とはグラフの傾向が違う。

図7.1と図7.2では角速度のグラフが3つの区間に分類できたが、図7.2では両車輪の角速度の差が他のグラフに比べ、非常に小さく、直進区間（車椅子が動き出してから23秒まで）全般的に正の値を持っている。ゆえに、車輪が後ろに回ったり、両車輪の速度さが生じたりせず、両輪がほぼ同じ速度で前に進む直進運動をしている。

使用者の入力トルクは、動き出す際は左右の入力トルクの差が -4 Nm （7～8.5 秒）であるが、その他の区間では図7.1と図7.2に比べて小さい。動き出す際、トルクの差がキャストの初期位置により影響をうけるため、キャストの位置補償のためのトルク入力であると想定される。

従って、本論文で提案したヨーモーメントオブザーバを用いたヨー運動制御を用いることで、横外乱のある環境での直進運動が可能であることが本実験により実証された。提案法は従来法より横外乱抑制に有効であることが示唆された。

各手法における使用者の負担の数値化

本実験は傾斜角が 8 deg である横斜面で、直進して 2.5 m を進む実験であった。同じ環境で同じ目標を達成するために、車椅子の使用者が出したトルクを比較することで、各手法における使用者の負担について議論する。

仕事は力を距離で積分する値であるが、ここでは時間の積分を用いて比較する。 t_0 を車椅子が動き出した時刻、 t_1 を直進運動が終わった時刻とする。人が加えるトルクは正の値のみならず負の値もあるため、式(7.1)を用いて算出する。

$$K_{load} = \int_{t_0}^{t_1} \left(\sqrt{T_{hL}^2} dt + \sqrt{T_{hR}^2} \right) dt \quad (7.1)$$

式(7.1)を用いて計算結果を表7.1に示す。表7.1より車椅子より 2.5 m 先の目標場所まで移動するために使用者が出すトルクの大きさは提案法が一番小さく、制御なしが一番大きい。制御なしと従来法は、直進するために左側に外乱補償のための力が必要である他、車椅子の進行方向補償のために力が必要であるため、提案法より大きい力を必要とする。ゆえに、提案法をもちいることが使用者の負担が一番小さい。

7.2 従来法と提案法の横方向外乱の有する環境での旋回性の実験結果

7.2.1 横斜面での旋回運動の実験結果

横斜面での直進運動実験の実験結果を図7.4～7.6に示す。

表 7.1 各手法における使用者の負担の数値化

手法	t_0	t_1	K_{load}
制御なし	7.5	28.3	102.8
従来法	7.5	28	82.5
提案法	7.5	23	44.8

制御なし

図 7.4 に制御なしの実験結果を示す。

1 番目のグラフは両車輪の角速度のグラフである。2 番目のグラフは車椅子の車体のヨーレート γ を赤い実線で示す。各線が表す詳細な情報は図 7.1 と同様である。

実験では、14 ~ 15 秒、22 ~ 23 秒で右折し、18 ~ 19 秒および 26 ~ 27 秒で左折する。

車椅子が右折時、右側の車輪の角速度は負の値になる。22 ~ 23 秒では車椅子の車体のヨーレートが -20 deg/s に至り、14 ~ 15 秒では車椅子の車体のヨーレートが -15 deg/s を超える。

車椅子が左折時、左側の車輪の角速度は負の値になり、車体のヨーレートは 20 deg/s を超える値を持つ。

ヨーモーメントオブザーバを用いたヨー運動制御 (提案法)

図 7.5 に提案したヨー運動制御を用いた横斜面での旋回運動の実験結果を示す。1 番目のグラフは両車輪の角速度を示し、各線が表す詳細な情報は図 7.1 と同様である。2 番目のグラフは車椅子の車体のヨーレートのグラフである。最後のグラフはヨーレートのエラー $\gamma^* - \gamma$ のグラフで表す。各線が表す詳細な情報は図 7.3 と同様である。

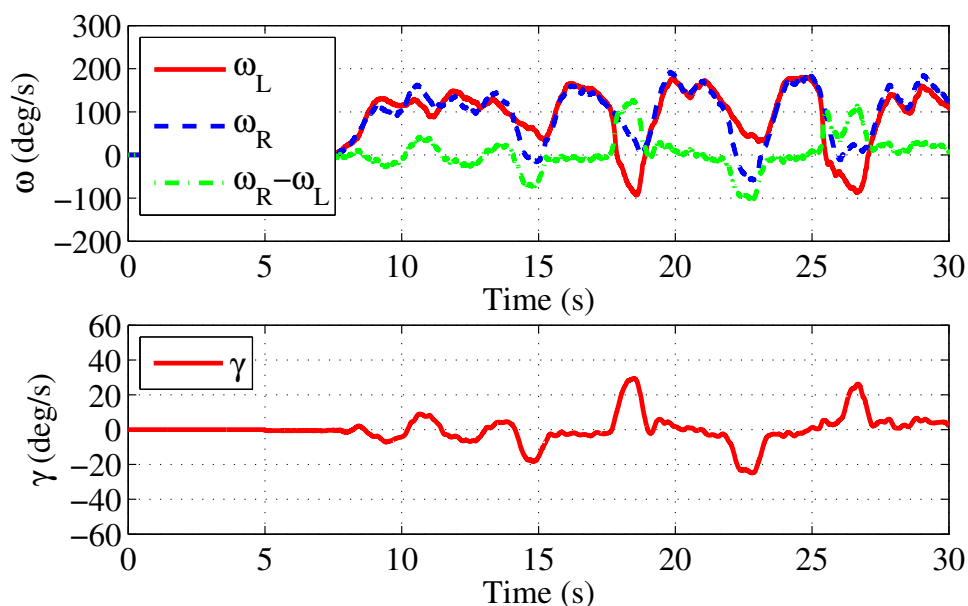


図 7.4 横斜面での旋回運動の実験結果 (制御なし)

本実験では、13～14 秒および 22～23 秒で右折し、9～11 秒、17～18 秒および 25～28 秒で左折する。旋回時を除いた全区間では両車輪の角速度がほぼ一致する。

ヨーレートは右折時 -60 deg/s を超える値を持ち、左折時は 60 deg/s より大きい値を持つ。車椅子が直進する区間では $-10 \sim 10 \text{ deg/s}$ である。

横方向外乱オブザーバを用いた運動制御 (従来法)

図 7.6 は横方向外乱オブザーバ用いた横斜面での旋回運動の実験結果を示す。

図 7.4 に制御なしの実験結果を示す。1 番目のグラフは両車輪の角速度のグラフである。2 番目のグラフは車椅子の車体のヨーレート γ を赤い実線で示す。各線が表す詳細な情報は図 7.1 と同様である。

本実験では、11～13 秒、19～21 秒および 27～29 秒で右折し、9～10 秒、16～17 秒および 23～24.5 秒で左折する。

ヨーレートの絶対値は旋回する区間で 60 deg/s より大きい値を持ち、その他の区間で 20 deg/s より大きくなるどころが何カ所か存在する。

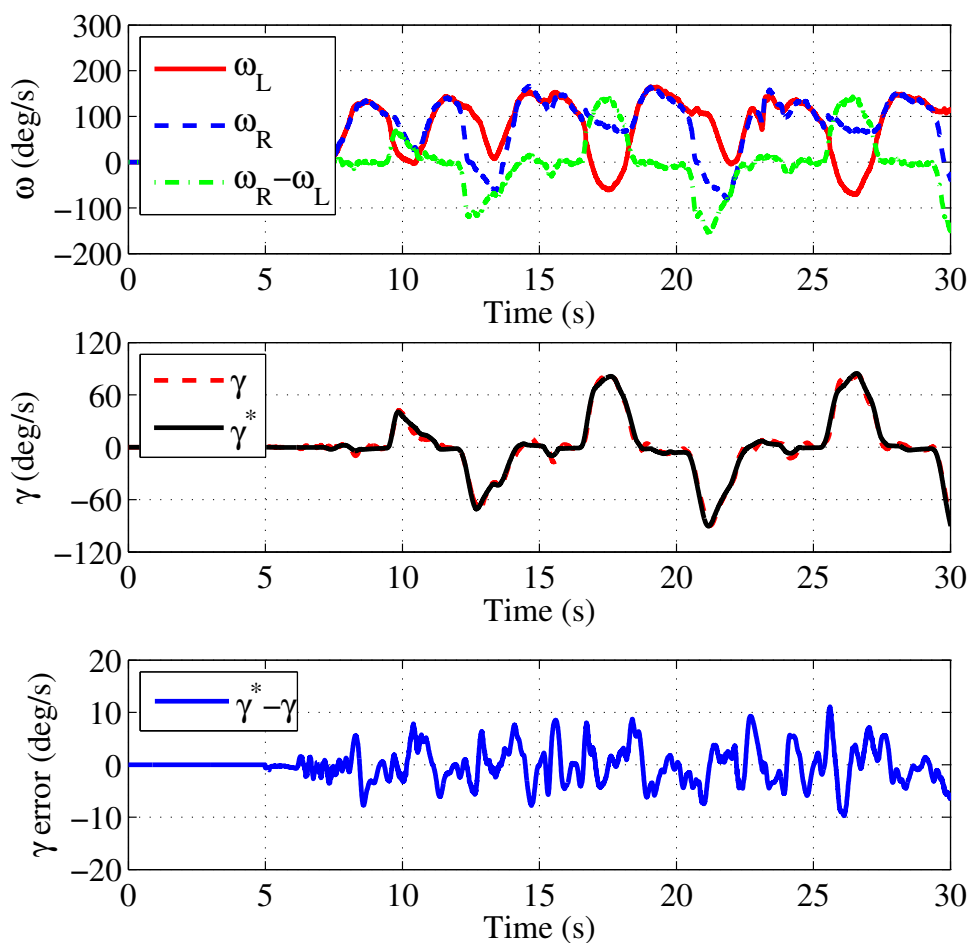


図 7.5 横斜面での旋回運動の実験結果 (提案法)

7.2.2 横斜面での旋回運動実験の考察

図 7.4 より制御なしでの旋回運動の実験をみると、右折をしている区間で -15 deg/s を超えるヨーレートをもち、左折をしている区間で 20 deg/s を超えるヨーレートをもち、

図 7.5 よりヨーモーメントオブザーバを用いたヨー運動制御を行った旋回実験ではヨーレートのエラーが十分小さく、その指令値に追従して車椅子が動いている。

図 7.6 より外乱オブザーバを用いた制御は旋回時は図 7.5 のヨー運動制御と同様な結果となっている。しかし、旋回する区間以外でも 20 deg/s ヨーレートをもつところが何カ所か存在し、旋回すべきところ以外の場所でも車椅子にヨー方向の回転が生じていることが読み取れる。

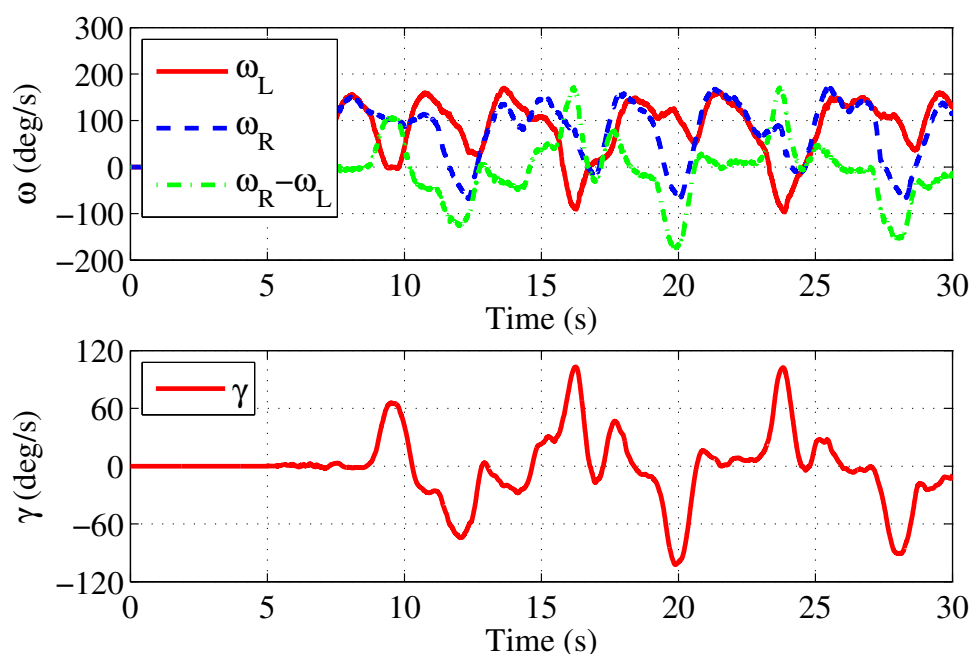


図 7.6 横斜面での旋回運動の実験結果 (従来法)

第 8 章

結論

本論文ではパワーアシスト車椅子における操作性向上のためのヨー運動制御を提案した。

本論文では大きく 3 つのことにについて述べた。まず、本論文の目的でもあるヨー運動制御の提案である。本論文では横斜面で重力の影響により車椅子の操作が困難であることに着目し、新たな制御システムを提案した。提案した横方向外乱抑制のためのヨー運動制御システムはフィードフォワード制御、フィードバック制御及びヨーモーメントオブザーバを用いた 2 自由度制御システムである。提案した制御システムの有効性を実証するため、横斜面での実証実験を行った。実験では制御なし、従来の制御システム、新たに提案した制御システムの実験を行った。実験結果より提案した制御システムの側面方向外乱抑制が従来の制御システムより優れていることが実証された。さらに、使用者の負担に関する係数を定義し、他の方法と比較してみた結果、直進運動に対する車椅子使用者の負担が従来の制御システムや制御なしより低減されていることが判明された。従って、提案したシステムは側面方向の外乱のある環境で有効であることが示唆された。

本論文では改良した実験装置についても述べた。本研究のために、実験機の改良も行った。実験機の改良は市販されているパワーアシスト車椅子を制御に適した装置にすることがその目的である。制御に用いられる様々なセンサを取り付け、必要な回路を作成した。さらに、制御システムの構築のために高速デジタル信号処理システムである s-BOX を取り付け、センサの測定値を読み込んで制御に用いることやモータに指令値を与えることが可能なシステムを構築した。

さらに、本論文では新たなアシスト制御システムについて述べた。従来のアシスト制御システムは直進運動時のアシストが主な目的であった。従来のアシスト制御システムでは欠けていた旋回運動時のアシストを十分考慮した新たな 2 次元アシストシステムを提案した。新たなアシストシステムでは左右に与えられるトルクの和と差を用いて直進方向と旋回方向を区別し、それぞれに合わせたアシスト制御が実現できるように設計した。お互いに独立した制御システムを実現することで、直進運動時及び旋回運動時の時定数のそれぞれの運動状況に合わせた適切な時定数を与えることができ、直進運動時は十分アシストされ、旋回運動時は過剰なアシストをしないように設計することができた。

本研究の工学的な観点意義は、提案した 2 自由度ヨー運動制御システムを車椅子に適用し、指令値への追従の良いシステムを構築したところにある。車椅子におけるヨー運動制御はいままで行われていなかった新たな制御の応用であり、その有効性を本論文で実証された。さらに、和と差のモードを用いた新たな 2 次元アシスト制御システムの提案は様々な車椅子の制御に広く応用できると期待される。

本研究の福祉的な観点でも意義は、横斜面での車椅子の操作性と便利性の向上にある。提案したヨー運動制御を用いることで、側面方向の外乱抑制ができる。制御がない場合は、使用者が外乱を抑制するための力を加えるなど、使用者への負担が重い上に、思い通りの操作が出来ない。本論文で提案するヨー運動制御を用いることで側面方向の外乱が抑制され、使用者の負担が低減された。制御なしで使用者が補償できない範囲の外乱がある環境では、使用者の意志通りの直進や旋回運動が不可能であるが、本論文で提案した制御を用いること

で、使用者の意志通りの運動ができるようになった。側面方向の外乱のある環境ではそれによる事故の恐れもあるため、制御により事故の発生確率を低減させることで安全性の向上が期待される。さらに、横斜面でも直進及び旋回が可能となり、操作性と便利性も向上された。様々な環境での車椅子の操作性の向上は、車椅子の利用可能な環境の拡大を意味するため、本研究により車椅子の利用可能範囲が広がったと言える。

第 9 章

今後の課題

本論文では横方向の外乱を考慮した制御システムを提案した。本論文で述べたように、横方向の外乱の抑制が可能となり、より安全で操作性の良い車椅子を実現できた。

本論文では横方向の外乱のみを考慮したが、側面方向のみならず前後方向を考慮した外乱抑制制御系を今後の課題とする。横斜面での操作性向上が本論文の目的で、拡張した制御システムは様々な斜面で利用可能な操作性の優れた制御システムの実現がその目的である。

さらに、乗り心地向上のための指令値の作成を今後の課題とする。人間の感覚に合わせた指令値を生成し、それに追従する制御系を実現することで乗り心地の良い車椅子が実現可能であると期待される。

最後に、本論文で提案した新たなアシストシステムの様々な制御への応用も今後の課題とする。新たなアシストシステムを利用することで、他の制御システムの操作性の向上が期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたって、東京大学堀洋一教授には、終始懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました。ここに、厚く御礼申し上げます。

常日頃から細かな御教示、御指導を頂きました藤本博志准教授と呉世訓助教に深く感謝致します。

そして、実験装置の製作に当り、ご助言して下さった技官の内田利之氏に深く感謝致します。

さらに、研究を進めるに当たり、懇切丁寧にご助言して下さった博士課程3年の南康鉉氏と博士課程1年の金潤河氏に深く感謝いたします。

本研究をまとめることができたのは、ここに挙げることのできなかつた方々を含め、多くの方々の御指導、御協力によるものであり、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 厚生労働省, 「政策レポート 高齢者の住まい」, 平成 21 年 3 月
- [2] Kaye, H. Stephen, Kang, Taewoon, LaPlante, Michell P., “ Mobility Device Use in the United States. Disability Statistics Report 14,” National Rehabilitation Information Center, 2000
- [3] 国土交通省 (公式ホームページ), 「地域公共交通活性化・再生総合事業 (平成 22 年度)」, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_fr_000056.html
- [4] 国土交通省 (公式ホームページ), 「バリアフリー・ユニバーサルデザイン / 交通消費者行政 / 公共交通事故被害者支援」, <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/barrierfree/index.html>
- [5] 財団法人 保健福祉広報協会, 「国際福祉機器展 H.C.R.2010 福祉機器選び方・使い方 副読本 基本動作編 はじめてのベッド, リフトなどの移乗用品, 杖・歩行器, 車いす ~おきてから移動するまで~」, pp.53-69, 2010
- [6] Sehoon Oh, Naoki Hata, and Yoichi Hori, “ Integrated Motion Control of a Wheelchair in the Longitudinal, Lateral, and Pitch Directions,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 4, pp. 1855-1862, 2008
- [7] Hirokazu Seki, Kenjii Ishihara, Susumu Tadakuma, “ Novel regenerative Braking control of Electric Power-Assisted Wheelchair for Safety Downhill Road Driving,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 5, pp. 1393-1400, 2009
- [8] Yunjun Nam, Qibin Zhao, Andrzej Cichocki, Seungjin Choi, “ Tongue-Rudder: A Glossokinetic-Potential-Based Tongue-Machine Interface,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 59, No. 1, pp.290-299, 2012
- [9] Sakiko Tashiro, Toshiyuki Murakami, “ Step Passage Control of a Power-Assisted Wheelchair for a Caregiver,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 4, pp. 1715- 1721, 2008
- [10] Junichi Miyata, Yukiko Kaida, Toshiyuki Murakami, “ $v-\dot{\phi}$ -Coordinate-Based Power-Assist Control of Electric Wheelchair for a Caregiver,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 6, pp. 2517-2524, 2008
- [11] Félix Chénier, Pascal Bigras, Rachid Aissaoui, “ An Orientation Estimator for the Wheelchair’s Caster Wheels,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 19, No. 6, pp. 1317-1326, 2011
- [12] Guillaume Desroches, Rachid Aissaoui, Daniel Bourbonnais, “ The Effect of Resultant Force at the Pushrim on Shoulder kinetics During Manual Wheelchair Propulsion: A Simulation Study,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 55, No. 4, pp. 1423-1431, 2008

- [13] Yoshio Tanimoto, Kuniharu Nanba, Akihiro Tokuhiko, Hiroyuki Ukida, Hideki Yamamoto, " Measurement System of Transfer Motion for Patients With Spinal Cord Injuries," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 1, pp. 213-219, 2008
- [14] R. A. Cooper, L. A. Quatrano, P. W. Axelson, W. Harlan, M. Stineman, B. Franklin, J. S. Krause, J. Bach, H. Chambers, E. Y. S. Chao, M. Alexander, and P. Painter, " Physical activity and health among people with disabilities," *J. Rehab. Res. Dev.*, Vol. 36, No. 2, pp. 142-154, 1999
- [15] D. Ding and R.A. Cooper, " Electric powered wheelchairs," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 25, No. 2, pp. 22-34, 2005
- [16] 関 弘和, 畠 直輝, 小安 雄一, 堀 洋一, 「パワーアシスト車椅子の後方転倒防止制御 (その1) -アシストトルク調整法と被験者評価による検証-」, *電気学会論文誌 D 部門*, Vol. 124, No. 3, pp.318-323, 2004
- [17] P. J. Nichols, P. A. Norman, and J. R. Ennis, " Wheelchair user's shoulder? Shoulder pain in patients with spinal cord lesions," *Scandinavian Journal of Rehabilitative Medicine*, Vol. 11, pp. 29-32, 1979
- [18] C. E. Levy and J. W. Chow, " Pushrim-activated power-assist wheelchairs: Elegance in motion," *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, Vol. 83, pp.166-167, 2004
- [19] R. A. Cooper, M. L. Boninger, D. M. Spaeth, D. Ding, Guo Songfeng, A. M. Koontz, S. G. Fitzgerald, R. Cooper, A. Kelleher, D. M. Collins, " Engineering Better Wheelchairs to Enhance Community Participation," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 14, No. 4, 2006
- [20] D. Ding and R. A. Cooper, " Electric powered wheelchairs," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 25, No.2, pp. 22-34, 2005
- [21] H. Seki, T. Sugimoto, S. Tadakuma, " Novel Straight Road Driving Control of Power Assisted Wheelchair Based on Disturbance Estimation of Right and Left Wheels," *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol.126, No. 6, pp. 764-770, 2006
- [22] S. Katsura, K. Ohnishi, " Advanced Motion Control for Wheelchair Based on Environment Quarrier," *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol.125, No.7, pp. 698-704, 2005
- [23] R. P. Gaal, N. Rebholtz, R. D. Hotchkiss, P. F. Pfaelzer, " Wheelchair rider injuries: Causes and consequences for wheelchair design and selection," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 34, No. 1, pp. 58-71, 1997
- [24] S. Oh, N. Hata, and Y. Hori " Proposal of human-friendly motion control; control design for power assistance tools and its application to wheelchair," in *Proc. IECON 2004*, Vol. 1, pp. 426-441, 2004
- [25] H. Fujimoto, T. Saito, T. Noguchi, " Motion stabilization control of electric vehicle under snowy conditions based on yaw-moment observer," in *proc. 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 35-40, 2004
- [26] Rory A. Cooper, Louis A. Quatrano, Peter W. Axelson, William Harlan, Margaret Stineman, Barry Franklin, J. Stuart Krause, John Bach, Henry Chambers, Edmund Y.S. Chao, Michael Alexander, Patricia Painter, " Research on Physical Activity and Health among People with Disabilities: A Consensus Statement," *Journal of Rehabilitation Research & Development*, Vol. 36, No.2, pp. 142-154, 1999

- [27] C.E. Brubaker, “ Wheelchair prescription : an analysis of factors that affect mobility and performance,” *Journal of Rehabilitation Research & Development*, Vol. 23, No.4, pp. 19-26, 1986
- [28] Dan Dimmb, Rory A. Cooper, Songfeng Guo, Thomas A. Corfman, “ Analysis of Driving Backward in an Electric-Powered Wheelchair,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 12, No. 6, pp. 934-943, 2004
- [29] Tatsuya Matsu, Toshiyuki Murakami, “ Force Sensorless Power-assist Control of Yaw Motion Direction for Two Wheels Driven Wheelchair,” *World Automation Congress*, pp. 1-6, 2010
- [30] Salmiah Ahmad, M.O. Tokhi, Zakaria Hussein, “ Rejection of Yaw Disturbance in a Two-Wheeled Wheelchair System,” *Asia International Conference on Modelling & Simulation*, pp. 454-459, 2009
- [31] Cihan Acar, Toshiyuki Murakami, “ Motion Control of Dynamically Balanced Two-Wheeled Mobile Manipulator through CoG Manipulation,” *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 715-720, 2010
- [32] Shinsuke Nomura, Toshiyuki Murakami, “ Power Assist Control of Electric Wheelchair Using Equivalent Jerk Disturbance under Slope Environment,” *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 572-576, 2010
- [33] 安倍 正人, 「自動車の運動と制御」, 東京電機大学出版局, 2008
- [34] 堀 洋一, 大西 公平, 「電気・電子・情報・通信基礎コース 制御工学の基礎」, 丸善株式会社, 平成 12 年
- [35] Katsuhiko Ogata, “ Modern Control Engineering Fifth Edition,” PEARSON, 2010
- [36] Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado, “ Control System Design”
- [37] 鈴木 浩明, 「快適さを測る : その心理・行動・生理的影響の評価」, 日本出版サービス, 1999
- [38] 横溝克己, 小松原明哲 「エンジニアのための人間工学 - 第 4 版 - 」, 日本出版サービス, 2006
- [39] 産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門編, 「人間計測ハンドブック」, 朝倉書店, 2003

発表論文

- [1] 金 佳英, 南 康鉉, 吳 世訓, 藤本 博志, 堀 洋一, “パワーアシスト車椅子における人間親和型ヨー運動制御,” 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, Vol.2, pp.II-603–II-606, 2011
- [2] Kayoung Kim, Kanghyun Nam, Sehoon Oh, Hiroshi Fujimoto and Yoichi Hori, “Yaw Motion Control of Power-assisted Wheelchairs under Lateral Disturbance Environment,” *in Proc. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, 2011

付録 A

横方向外乱オブザーバを用いた運動制御

A.1 横方向外乱オブザーバ

1.3 節で述べたように斜面での安全性向上のための先行研究として Oh らの後方転倒防止制御と縦横方向外乱抑制制御を提案した [6]。Oh らが提案した縦横方向外乱抑制制御の中の横方向外乱抑制制御を本論文で提案した横方向外乱抑制の制御の比較対象とする。Oh らが提案した縦横方向外乱抑制制御のブロック線図を 1.3 節 (図 1.5) に示した。図 1.5 は縦方向の外乱及び横方向の外乱を両方考慮したシステムで、本論文では横方向のみを対象としているため、横方向の外乱抑制制御のみを比較対象とする。Oh らの提案法の内、横方向のみを考慮したシステムを図 A.1 に示す。本論文で比較対象とした制御システムは図 A.1 にしめした横方向のみを考慮した横方向外乱オブザーバである。

本制御法は車輪に装着しているエンコーダとハンドリムに内蔵されているトルクセンサを利用する。左右のプラントが同じであると想定し、ノミナルプラント $P_n(s)$ を設計する。 T_L, T_R はそれぞれ左右の車輪に加わるトルクで、 y_L, y_R はそれぞれ左右の車輪の角速度である。 e_L, e_R はそれぞれ左右の車輪の角速度のエラーで、それにより生じる横方向のエラーを e_{lat} とする。 e_{lat} を補償することで、横方向の外乱による影響を低減することができる。 $P_L(s), P_R(s)$ はそれぞれ車椅子の左側と右側のプラントであり、 $P_n(s)$ は $P_L(s)$ と $P_R(s)$ のノミナルプラントである。 $C_{lat}(s)$ は車椅子の横方向モデルの逆モデルである。

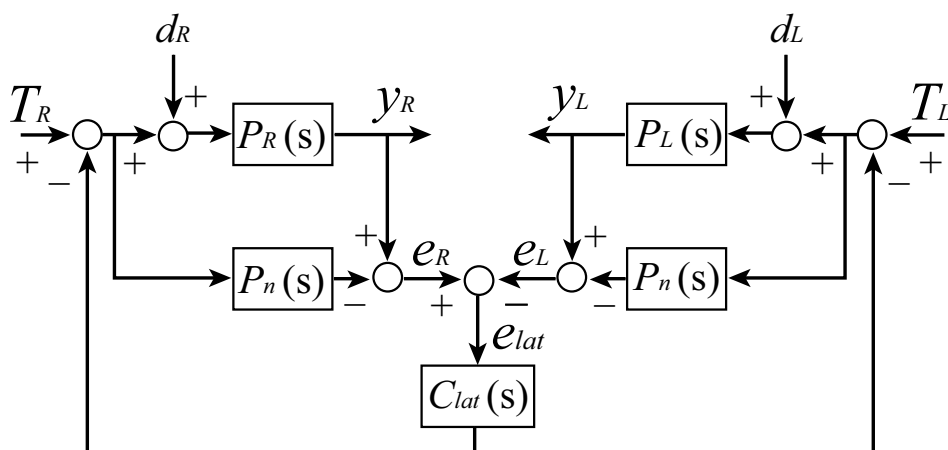


図 A.1 横方向外乱オブザーバを用いた運動制御ブロック線図 [6]

A.2 前後方向の車椅子のモデリング

前後方向車椅子のモデルの入力は各車輪に加えるトルク T_L, T_R で、出力は各車輪の角速度 ω_L, ω_R である。

図 A.2 で示すように T_L と T_R に同じ正弦波を入力する。トルクの入力は使用者が加えるのではなく、モータの出力で与える。車椅子の各車輪の角速度 ω_L, ω_R は車椅子の各車輪に装着したエンコーダの微分値を用いる。入力トルク T_L と T_R と測定した車輪の角速度 ω_L, ω_R のデータを用いて、適切な慣性係数 J_{nlong} とダンピング係数 B_{nlong} を求める。

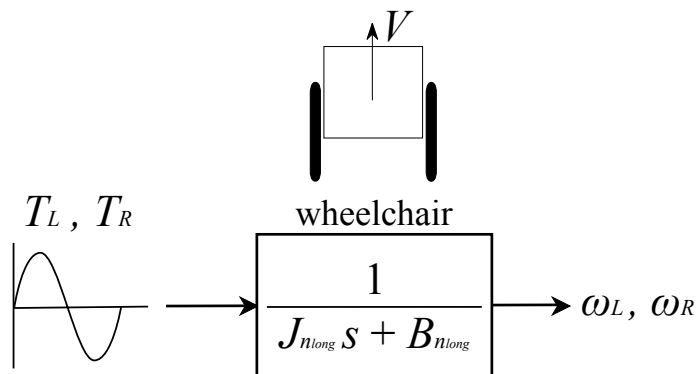


図 A.2 前後方向の車椅子のモデリングのブロック線図