

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 24 年度
修士論文

**直進と回転の運動制御に基づく
電動アシスト車椅子のための片手漕ぎの実現**
Realisation of one-handed propulsion
for a power-assist wheelchair based on
straight and rotational motion control

2013 年 02 月 提出
指導教員 堀 洋一 教授

47116081 ペイン 孝二

要旨

身体不自由のある人が積極的に社会に参加し、生活を楽しむためには、自由かつ快適な移動手段が必要である。車椅子は身体不自由のある人に移動手段を提供する重要な福祉機器である。

片麻痺や怪我によって片手の機能を失った人は広く普及されている両手用車椅子を使うことができず、片手で操作できる車椅子が必要となる。また、片手用車椅子の使用で助かる人は片手の機能を失った人だけでなく、利便性のために片手で車椅子を操作しながらもう一つの手で日常作業をしたい車椅子利用者である。

そこで、本研究では電動アシスト車椅子のための片手漕ぎ制御方法を提案する。この提案法は片手漕ぎによる直進操作と旋回操作を実現する。

電動アシスト車椅子とは、左右主輪にモータを搭載し、左右ハンドリムにトルクセンサを搭載した電動車椅子である。車椅子利用者の漕ぐ力を測り、その力をモータを用いて増幅することによって、利用者を補助（アシスト）する物である。電動アシスト車椅子はアシストによって利用者の負担を軽減しながら、ハンドリム使用による腕の機能維持と健康増進に役立つという利点がある。

更に、両主輪のモータを制御することによって安全性、快適性、操作性、移動性などの性能と機能を向上させることができるという利点もある。本研究ではそれぞれの利点を活かす片手漕ぎ制御方法を提案することを目的とする。

両手漕ぎ操作の場合、左右ハンドリムの適切な使用によって直進と旋回を操作することができる。一方、本研究では片手漕ぎ操作を前提とするため、両手漕ぎ車椅子の操作方法に基づく直進と旋回の片手漕ぎ操作方法を定義する。

従来のハンドリム付き車椅子の漕ぎ方に基づいて片手漕ぎ操作方法を決定し、片手漕ぎにおける直進操作と旋回操作の特性と片側ハンドリムの力に基づく識別方法を明確にし、直進と回転の運動制御に基づく片手漕ぎ制御系を構築し、被験者評価によって片手漕ぎ制御の実用性を示すことを目的とする。

直進と旋回の片手漕ぎ操作方法を定義した後、実験によって片手漕ぎ操作におけるトルクの特性を調査し、直進操作と旋回操作の識別方法を検討し、直進と回転の運動成分の分離に基づく片手漕ぎ制御系を構成する。提案法の妥当性を直進、回転と走行中旋回の実験によって確認する。また、被験者実験によって提案法の実用性を評価する。

Abstract

In order to allow people with disabilities to participate in society actively and to enjoy a high quality of life, a method of mobility that can be used freely and with comfort is required. The wheelchair is an important welfare device that provides these people with a method of transport.

For people with hemiplegia or who have sustained injuries in one hand, use of the widely available two-handed wheelchair is not possible, and an alternative type of wheelchair that allows one-handed operation is required. Also, people that can benefit from a one-handed wheelchair are not only people who have lost function in one hand, but also existing wheelchair users who want the convenience of performing everyday tasks while operating a wheelchair.

In this research, I propose a one-handed propulsion control system for the power-assist wheelchair. The proposed system realises one-handed straight and turning operations.

The power-assist wheelchair is a form of electric wheelchair that has motors in each of the two main wheels as well as torque sensors in each of the handrims. It assists the wheelchair user when the user pushes the handrims by measuring the user's pushing force and amplifying that force using the motors. The power-assist wheelchair lightens the physical burden on the user by providing assistance, while encourages maintenance of arm function as well as improvement of health and fitness through handrim use.

Also, by controlling both motors appropriately, wheelchair functionality as well as performance factors such as safety, comfort, handling and mobility can be enhanced. This research is aimed at proposing a practical one-handed propulsion system that takes advantage of the benefits of the power-assist wheelchair.

For the case of two-handed wheelchair operation, straight and turning motion can be controlled by appropriate use of the left and right handrims. However, since one-handed operation is assumed in this research, methods for one-handed straight and turning operations are decided based on how a handrim-operated wheelchair is typically used.

After defining methods for straight and turning operations, handrim torque properties of both one-handed operations are investigated experimentally, classification of straight and turning operation based on handrim torque signal is considered, and a one-handed propulsion control system is formed based on the decomposition of straight and rotational components of motion. Adequacy of the proposed system is confirmed by experiments of straight, pure rotation and in-motion turning. Finally, subject trial tests were conducted to evaluate the practicality of the proposed system.

目次

要旨	i
Abstract	ii
記号集	viii
第 1 章 序論	1
1.1 車椅子の役割と重要性	1
1.2 電動アシスト車椅子	2
1.3 車椅子分野における先行研究	2
1.4 直進成分と回転成分を分離した制御	3
1.5 車椅子の片手操作	4
1.6 制御工学の方法を用いた片手漕ぎ操作方法	6
1.7 ハンドリム操作と制御方法の利点	7
1.8 本研究の目的	7
1.9 論文構成	7
第 2 章 車椅子の動特性と運動学	8
2.1 車輪運動と車体運動との関係	8
2.2 車椅子の直進運動と回転運動のモデル化	9
第 3 章 片手漕ぎを実現する制御方法	10
3.1 車椅子実験機	10
3.2 両手漕ぎ車椅子を操作した場合の操作トルク	11
3.3 片手漕ぎ操作方法と制御系の設計概念	12
3.4 制御系の構造	13
3.5 アシストと指令値生成器	14
3.6 外乱抑制	15
3.7 操作モード論理回路	16
3.8 操作識別のための操作関数	18
3.9 直進操作と回転操作の実験結果	19
3.10 走行中旋回の操作方法と実験結果	20
第 4 章 直進と旋回の片手漕ぎ操作におけるハンドリム操作の特性	23
4.1 ハンドリム操作の特性を調べる目的	23
4.2 直進操作と旋回操作の調査のための実験方法	24
4.3 ハンドリム操作特性の調査結果	26
4.4 ハンドリム操作特性のまとめ	28

第 5 章	片手漕ぎ操作のための操作識別	29
5.1	識別の概要	29
5.2	識別の評価基準	30
5.3	サポートベクトルマシンの紹介	31
5.4	識別関数の設計方法	32
5.5	識別性能	33
5.6	識別関数のまとめ	34
第 6 章	片手漕ぎ制御系の被験者評価	35
6.1	被験者評価の目的	35
6.2	提案法の比較対象とする片手操作方法	35
6.3	被験者評価の実験方法	36
6.4	評価基準	38
6.5	被験者について	39
6.6	被験者の段階評価の結果	40
6.7	被験者のテストコース走行に関する結果	41
6.8	実験中の観察と被験者からの感想	42
6.9	被験者評価のまとめ	42
第 7 章	結論	43
7.1	本研究のまとめ	43
7.2	今後の課題	44
	謝辞	45
	参考文献	47
	発表文献	51
付録 A	運動と動特性に関連する導出	52
A.1	車椅子の直進運動と回転運動の導出	52
付録 B	被験者に記入をお願いした実験前と実験後のアンケート	55

4.1	操作特性の調査実験に用いる制御系の構造。	24
4.2	一定トルク指令値の配列。	25
4.3	ハンドリム操作特性の調査実験の流れ。条件：直進操作、前方向、 $\tau_{EC} = 25 \text{ N m}$ 、 $\tau_{ED} = 30 \text{ N m}$ 。上：左車輪速度、中：左右モータトルク、下：片手漕ぎトルク。	25
4.4	片手漕ぎ操作をした場合の $(\tau_H, \dot{\tau}_H)$ 平面上のハンドリム操作の軌跡。青：直進操作、赤：旋回操作。点：漕ぎ始めと 100 ms 後を印す。	26
4.5	トルクとトルク微分の運動への依存性。青：直進操作、赤：旋回操作。上：トルク微分、下：トルク。左右： ω_L 軸と $\dot{\omega}_L$ 軸の角度が異なる。	27
5.1	教師あり学習における訓練と識別の過程。	29
5.2	SVM から得た識別関数。 $\chi = [\dot{\tau}_H]$ 、 $D = 1$ 。左： $c = 10^{-4}$ 、右： $c = 10^{-1}$ 。青：直進操作、赤：旋回操作。●：成功、×：失敗、△：遷移領域に位置する旋回操作の点（成功）。	33
5.3	SVM から得た識別関数。 $D = 2$ 、 $c = 10^{-1}$ 。左： $\chi = [\dot{\tau}_H \ \omega_L]^T$ 、右： $\chi = [\dot{\tau}_H \ \phi_L]^T$ 。青：直進操作、赤：旋回操作。●：成功、×：失敗。	34
6.1	片手漕ぎ制御の比較対象とするジョイスティックと片手片足操作。	36
6.2	被験者実験に用いたテストコースの寸法。赤：段差、青：スタート位置と向き。	36
6.3	テストコース 1 の動作。赤：動作、青：車椅子の停止位置と向き。	37
6.4	テストコース 2 の動作。赤：動作、青：車椅子の停止位置と向き。	37
7.1	車椅子のウィリー動作 [40] と Independence Technology 「iBot」 [18]。	44
A.1	座標系 B と座標系 S に関連する定義、一様傾斜角度。	52

表目次

1.1	日本国内における手動車椅子と電動車椅子の年度別販売台数 [5]。	1
1.2	日本における肢体不自由を持つ在宅障害者数 [6]。	1
3.1	車椅子実験機の主要パラメータ。	10
3.2	アシスト演算子のパラメータ。	14
3.3	外乱オブザーバのパラメータ。	15
3.4	操作モード論理回路のパラメータ。	17
3.5	一定トルク微分閾値を用いた操作関数のパラメータ。	18
4.1	操作特性の調査実験に用いる制御系のパラメータ。	24
4.2	ハンドリム操作特性の調査実験から得られたデータの数。	26
5.1	直進操作と旋回操作における識別の成功と失敗の定義。	30
5.2	識別関数設計方法のパラメータと該当する数値結果 (1次 Kernel 関数)。 . .	33
5.3	識別関数設計方法のパラメータと該当する結果 (変数 χ の比較)。	34
6.1	被験者の個人特徴。	39
6.2	被験者の全体特徴。	39
6.3	被験者の段階評価の結果の平均値 (標準偏差)。5段階。平均値が大きいほど良好。	40
6.4	被験者の段階評価の結果の平均値 (標準偏差)。*:3段階、その他の項目:5段階。平均値が大きいほど良好。	40
6.5	被験者のコース走行完了時間の平均値 (標準偏差)。*:被験者 S3 を除いた値。	41

記号集

略語

L	: left	左車輪
R	: right	右車輪
C	: common mode	車輪の共通成分 $(L + R)/2$
D	: differential mode	車輪の差分成分 $-L + R$
B	: body	車体座標系
S	: slope	傾斜座標系

指数等

\square^F	: 座標系 F における変数	$F \in \{B, S, G\}$
\square_μ	: 3次元ベクトルの μ 成分	$\mu \in \{1, 2, 3\}$
\square_{LR}	: 車輪座標の行列・ベクトル	
\square_{CD}	: 運動座標の行列・ベクトル	
t	: 時間	
k	: 離散時間における時間指数	
s	: Laplace 変換の変数	
z	: Z 変換の変数	
i, j	: 級数における指数	

車椅子と環境パラメータ

R	: 車輪半径
W	: 車輪間隔
L	: 車軸中心から利用者と車体の重心までの (x_1^B, x_2^B) 平面上の距離
E	: 車軸中心から前輪までの (x_1^B, x_2^B) 平面上の距離
E_1	: 前輪間半幅
g	: 重力加速度
Ω	: 傾斜角度
M_v	: 利用者と車椅子を合わせた総質量
M_B	: 利用者と車体を合わせた質量
M_W	: 車輪質量
D_v	: 車体に対する前後方向の総粘性力の係数
D_d	: 前輪からの粘性力の係数
D_f	: 後輪からの粘性力の係数
I	: 慣性モーメント

I_γ	: ヨー回転方向に対する総慣性モーメント
I_{B3}	: ヨー回転方向に対する利用者と車体の慣性モーメント
I_{W3}	: ヨー回転方向に対する車輪慣性モーメント
I_{W2}	: 車輪回転方向に対する車輪慣性モーメント
B	: 粘性係数
B_γ	: 車体に対するヨー回転方向の総粘性力の係数
B_W	: 車輪粘性係数

運動に関連する変数

x	: 位置
$R_\mu(\psi)$: x_μ 軸周りの角度 ψ の回転行列
U	: 運動エネルギー
V	: 位置エネルギー
ζ	: 一般化変数
θ	: 車輪角度
ω	: 車輪回転速度 $d\theta/dt$
τ	: 片手漕ぎとモータの総トルク
τ_M	: モータトルク
τ_H	: 利用者の片手漕ぎトルク
d	: 外乱
f	: 前後方向の駆動力
l	: 車椅子の軌跡の弧長
ψ	: 座標系 S におけるヨー角度
v	: 前後直進速度 dl/dt
γ	: ヨー回転速度 $d\psi/dt$
r	: 瞬時旋回半径 (軌跡曲率の逆数) v/γ
d_v	: 車体に対する直進方向の外乱
d_γ	: 車体に対するヨー回転の外乱
d_W	: 車輪自体に対する車輪の外乱
\bar{d}	: 前輪からの外乱
\bar{f}	: 車輪からの駆動力

制御系と操作識別に関連する変数とパラメータ

τ^*	: 所望総トルク
τ_M^*	: 指令値生成器から出力される所望モータトルク
T	: サンプル時間
A	: アシスト演算子
H	: 車輪座標 LR から運動座標 CD への変換行列
P	: 車椅子の実モデル (実際には不明)
P_n	: 車椅子の公称モデル
Q	: 外乱オブザーバに用いる低域通過フィルタ
T_Q	: 外乱オブザーバの Q フィルタの時定数

K	: 直進性係数
\bar{K}	: 操作関数
m	: 操作モード論理回路における操作モード変数
T_{\min}	: 操作モード論理回路における直進保持モードの最低保持時間
$\omega_{\{sC, rC, sD, rD\}}$: 操作モード論理回路における車輪速度の閾値
τ_{low}	: 操作モード論理回路における低トルク閾値
$\dot{\tau}_{\{1n, 0n, 0p, 1p\}}$: 操作関数におけるトルク微分の閾値
α	: アシスト率
T_A	: アシスト演算子の時定数 $T_A \in \{T_{\text{fast}}, T_{\text{slow}}\}$
T_{fast}	: 入力トルクが立ち上がる時のアシスト時定数
T_{slow}	: 入力トルクが立ち下がる時のアシスト時定数
τ_E	: ハンドリム操作特性の調査実験における一定トルク指令値
χ	: 操作識別における入力変数
Υ	: 識別関数
w	: SVM における超平面の法線ベクトル
b	: SVM における超平面のオフセット
ϕ	: SVM における変換関数 $\varrho = \phi(\chi)$
Ξ	: SVM における Kernel 関数
D	: SVM における Kernel 関数の次数パラメータ
c	: SVM におけるソフトマージンを導入するためのスラック定数
λ	: SVM における Lagrange 定数
\square^*	: 識別関数設計に用いる訓練データ
$\hat{\square}$: \square の推定値
$\tilde{\square}$: \square の推定誤差 $\tilde{\square} = \square - \hat{\square}$

第1章

序論

1.1 車椅子の役割と重要性

車椅子は身体不自由のある人に移動手段を提供することを目的とした重要な福祉機器である。利用者の移動性向上に連れてある程度自立できるようになると共に社会参加が進み、その人により豊かな生活質 (quality of life) に繋がる [1][2][3, pp.124–125]。

世界人口の増加と高齢化と共に、車椅子をはじめとした福祉機器の需要が増加しつつある。しかし、車椅子を必要とする人は高齢者だけではなく、長期間車椅子を利用する人もいれば、急性の負傷や病気で一時的に車椅子を必要とする人もいる。人が車椅子を必要とする原因は主に肢体不自由を起こす原因であり、先天的疾患、脳性麻痺、脊髄損傷、事故や病気による下肢に対する負傷や切断など多様であると考えられる [4]。

世界保健機関によると、世界人口の約 10% (約 6.5 億人) が障害を抱え、他の調査によるとそのうちの 10% が車椅子を必要とする [3, p.21]。日本では、車椅子利用者数の統計が不明であるが、下肢不自由者数と車椅子の販売台数から車椅子の需要が把握できる。財団法人保健福祉広報協会によると、2006 年度における日本国内の「手動車いす」の年間販売台数は 35.8 万台で漸減傾向であり、2006 年度における日本国内の「電動車いす」の年間販売台数は 7 千台で横這い傾向である [5] (表 1.1 参照)。内閣府によると、2006 年における肢体不自由を持つ在宅障害者数は 181.0 万人 (在宅身体障害者の 50.6%) であり、その人数が増加傾向である [6] (表 1.2 参照)。このような肢体不自由を持つ在宅障害者が生活を楽しみ、意欲的に社会に参加するためには、自由かつ快適な移動手段が必要である [7]。

年度	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
手動車いす (千台)	428	406	393	397	375	388	365	358
電動車いす (千台)	6	9	7	6	6	7	7	7

表 1.1: 日本国内における手動車椅子と電動車椅子の年度別販売台数 [5]。

年	1991	1996	2001	2006
肢体不自由を持つ在宅障害者数 (千人)	1602	1698	1797	1810
在宅身体障害者数との割合 (%)	57.2	56.3	54.0	50.6

表 1.2: 日本における肢体不自由を持つ在宅障害者数 [6]。



図 1.1: 電動アシスト車椅子の例。左から：Ulrich Alber GmbH 「e-motion」 [8]、Glide Rehabilitation Products 「Glide Power Assist System」 [9]、ヤマハ発動機 株式会社 「JW-II」 [10]、Max Mobility 「SmartDrive」 [11]。

1.2 電動アシスト車椅子

利用者がハンドリム（大車輪の外側に固定された小型の輪）を漕ぐと左右後輪に搭載したモータが利用者を補助（アシスト）する「電動アシスト車椅子」がある [8][9][10]。また、手動車椅子の車軸に取り付けることができる形式のアシスト機器もある [11]。Cooper と Cooper の 2003 年の調査によると、著者の自らの臨床サービス提供経験そして製造業者と供給業者との取引関係に基づいて、米国における電動アシスト車椅子 (PAPAW: pushrim-activated power-assist wheelchair) の市場規模が約 5 千台であり、急上昇傾向であることを推定した [12]。電動アシスト車椅子の例を図 1.1 に示す。

電動アシスト車椅子は、利用者のハンドリムに対する力のみで動く「手動車椅子」とモータの力のみで動く「完全電動車椅子」の間にあると考えられ、手漕ぎの負担を軽減しながらハンドリムの使用による運動促進と健康増進に役立つという利点がある [13, p.6]。傾斜上や不整地での走行など、手動車椅子にとって厳しい場所で特に役に立つ。脊髄損傷リハビリテーションにおける手動車椅子利用時の上肢の過使用による問題が多く [14]、アシスト機能による過労軽減は人や場合によって重要な機能であると考えられる [15]。

1.3 車椅子分野における先行研究

車椅子分野では、車椅子の機構、電動車椅子の運動制御、操作インターフェイス、手漕ぎ駆動における生体力学、リハビリテーション、ユニバーサルデザイン、社会福祉問題、長期使用における健康問題、車椅子スポーツなど、様々な研究が行なわれている。

国際オリンピック委員会の文献によれば、手動車椅子の機械機構と生体力学に関する研究は材料、耐久性、安全性などの機械的な視点から始まり、近年では手漕ぎ駆動時の生理反応と生体力学が注目されている [16]。車椅子と利用者の組み合わせに関して次の 3 つの要素があると考えられる。

- 利用者：手漕ぎ駆動によって機械力を供給する。
- 車椅子：機械的特性と形状によって必要な機械力を決める。
- 利用者と車椅子との相互作用：利用者から車椅子への機械力伝達効率を決める。

その要素が最終的な実用性を決めるため、生体力学を考慮した車椅子の開発が重要であると認識され、車椅子の機械機構と車椅子使用における生体力学の研究が並列に進んでいる。

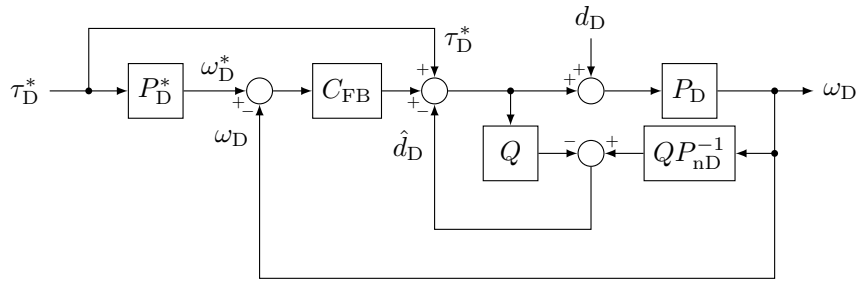


図 1.2: ヨー制御系の構造 [20]。

これらの研究は、車椅子の安全性、快適性、操作性、移動性などの向上を図っている。それだけではなく、車椅子使用の多様化に繋がり、福祉分野へ大きく貢献している。車椅子の屋外使用をはじめ、スポーツ、発展途上国への進出など、環境や利用者の状況に応じた車椅子が次々に開発されている。車椅子スポーツは障害者向けスポーツの中で中心的な立場を占め [16]、安定性や耐久性を考慮したテニス用、バスケットボール用、競走用などのスポーツ用車椅子が存在する。傾斜や不整地の多い道路と貧困の多い発展途上国に住む人の要求に応じて、両手レバー駆動車椅子は 2008 年から開発中である [17]。

一方、電動車椅子の研究開発も進められ、例を挙げれば段差越えとバランスができる超高機能車椅子「iBot」が市販されていた [18]。しかし、Ding と Cooper の調査によると、電動車椅子の開発が数十年前から改良されて来たが、制御方法が 1980 年代以降で大幅に改良されていない [19]。不整地、段差、傾斜、滑り易い路面など、電動車椅子にとって不利な状況における使用のための制御が必要になり、更に、様々な性能を向上させるために制御方法改良の研究の余地があると考えられる。完全電動車椅子のための速度制御の例が多くあるが、転倒防止などの安定化制御、自動車分野で実績のある滑り易い路面走行を想定した駆動力制御などは車椅子分野ではまだ珍しいことが現状である。

電動アシスト車椅子のための運動制御の研究に関して、傾斜上におけるヨー制御 [20]、後方転倒防止制御 [21][22]、ウィリー制御 [23]、段差越え制御 [24]、下り坂走行における回生制動による速度制御 [25]、環境を考慮した半自動走行制御と力制御 [26] などの例がある。これらの研究では、電動アシスト車椅子に取り付けた様々なセンサによって車椅子の運動や環境を把握し、両車輪のモータを制御することによって様々な機能を実現している。

1.4 直進成分と回転成分を分離した制御

車椅子の運動制御に関して、車輪毎の制御を中心とした例が少ないが [27][24]、直進と回転の制御をする方法もある [20]。利用者が左車輪または右車輪を操作する場合より、直進または回転を操作する場合の方が多。進む速さ、旋回の速さ、進む方向などの場合、直進と回転を分離する概念で制御系を開発した方がより自然である。

金は直進成分と回転成分の運動を分離した制御を行ない、傾斜上における操作性向上を図った [20]。電動アシスト車椅子の左右手漕ぎトルクセンサの信号に基づいて生成したヨーモーメント（回転トルク）指令値を用いたヨー制御系を開発し、傾斜を横切る時の直進と旋回の操作性向上の有効性を示した。ヨー制御系の構造を図 1.2 に示す。ヨー速度に比例する左右車輪速度差の指令値 ω_D^* は所望ヨー動特性 P_D^* で生成され、実際の左右車輪速度差 ω_D との差がフィードバックされる。

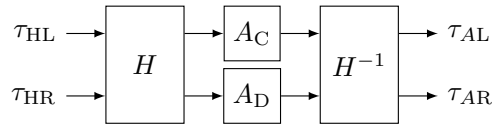


図 1.3: 手漕ぎトルクの直進成分と回転成分を分離して増幅するアシスト系の構造 [20]。 H は左右トルクから直進・回転のトルクへの変換演算子である。

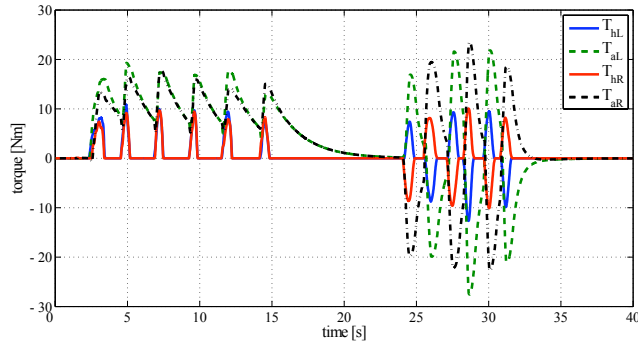


図 1.4: アシストトルクの直進成分と回転成分の実験結果 [20]。破線：アシストトルク、実線：手漕ぎトルク。

指令値生成も直進成分と回転成分を分離して行なわれる。直進成分と回転成分のトルクを分離して利用者をアシストする構造を図 1.3 に示す。利用者が左右車輪に同じ大きさで同じ方向の力を与えた場合と同じ大きさで反対方向の力を与えた場合をそれぞれ直進操作と旋回操作と見なし、直進操作トルク ($\tau_C = (\tau_L + \tau_R)/2$) と回転操作トルク ($\tau_D = -\tau_L + \tau_R$) の線形組み合わせに対応できるアシスト系を構築し、直進操作と旋回操作に対してそれぞれ異なるアシスト特性 (A_C, A_D) で利用者の手漕ぎ操作をアシストすることが可能である。

図 1.3 に示す構造を用いた場合のアシストトルクの結果を図 1.4 に示す。0 秒から 20 秒までの間に利用者が前方向への直進操作を行ない、20 秒から 40 秒までの間に利用者が左右の旋回操作を繰り返す。直進操作の場合のアシストトルクは旋回操作の場合に比べて立ち下がりが遅く、より持続的な直進アシストをする。一方、旋回操作の場合のアシストトルクは直進操作の場合に比べて立ち上がりの時のアシスト比 τ_A/τ_H が大きく短く、快速回転に適したアシストである。このように、直進操作と旋回操作に対して異なるアシスト特性を与えることができる。

1.5 車椅子の片手操作

利用者の両手漕ぎ操作を必要とする両手用車椅子を片手で操作しようとする、車椅子が回ることしかできず、直進と純回転の操作をはじめ、任意の旋回半径での旋回操作、ウィリー（前輪浮上）操作 [28] も非常に困難である。軽量で安価であるため最も普及されている手動車椅子は両手を必要とし、電動アシスト車椅子も両手を必要とする。

しかし、片麻痺患者や事故または疾患で両脚と片手が使えない人は、両手を必要とする車椅子が使えず、自由に移動できるために片手用車椅子が必要になる。また、片手用車椅子の需要はこの必要性だけではなく、片手で車椅子を操作しながらもう一つの手で荷物の持ち運びやドア開けなどの日常作業をするという利便性の要求もある。



図 1.5: 電動車椅子向けの入力装置。左：操作に使える体の部分 [29]、中：ジョイスティック [32]、右：多数ボタン式の入力装置 [31]。

車椅子の片手操作を実現する方法は様々であり、特に電動車椅子に向けた入力装置の種類が豊富である [29][30][31]。利用者の障害とその程度によって使える体の部分と使える程度が決まり、それに応じて適した入力装置を選択することができる。電動車椅子の操作に使える体の部分の候補を図 1.5 に示す。手の他に、頭、顔、口、舌、息、顎、肘、足などに対応した入力装置が開発または市販され、新たな入力装置の研究が進められている。

最も普及されている電動車椅子向けの入力装置は図 1.5 に示すようなジョイスティックである。ジョイスティックは片手で使われることが最も多いが、他の体の部分で操作できるように車椅子に対する配置を工夫することができる。ジョイスティックを倒すと同時に直進と旋回が操作できるため便利であるが、直進速度と旋回速度を同時に制御するために利用者側のある程度の器用さが必要である。利用者の手にジョイスティックが器用に使えない程の障害があった場合、手にとって操作がより簡単である多数ボタン式の入力装置があり、その例を図 1.5 に示す。

手動車椅子または電動アシスト車椅子の場合、片側ハンドリムで直進操作ができるように機構の改造またはモータの制御を入れ、片側ハンドリムと他の操作方法を併用した直進と旋回の操作方法の実現が可能である。旋回操作方法の例とえば、「片手片足駆動」とよく呼ばれる、健側の足を路面に付けて蹴る旋回操作方法がある。ヤマハ株式会社は片手片足駆動用電動アシスト車椅子「JW-II C タイプ」を市販している [10]。しかし、片手片足駆動に関して幾つかの欠点が挙げられる。車椅子が走行しながら足を接地すると足が車椅子の下に引き込まれる危険性がある。また、片足での旋回操作は努力が必要となり、素早く旋回できないため不便である。更に、片麻痺患者の場合、姿勢が崩れ易くなったり、片足駆動効率を上げるために体幹前傾姿勢を保つことが困難である。

電動アシスト車椅子の場合、片足駆動の代わりに入力装置による旋回操作方法もある。例えば、畠は加速度センサが取り付けられたイヤホンによって、利用者がロール方向に頭を傾げて旋回操作を可能にする方法を提案した [33, pp.109–112]。しかし、この方法では利用者が周辺を自由に見るために頭を動かすと誤操作のおそれがあり、操作のために頭に何かを掛ける必要があるという不便性がある。

片側の車輪に 2 本または 3 本のハンドリムを付ける機構の多重ハンドリム式片手漕ぎ車椅子の先行研究、そして市販されている 2 本ハンドリム式車椅子がある。図 1.6 に多重ハンドリム式片手漕ぎ車椅子の例を示す。左の 2 本ハンドリム式車椅子では、1 本ずつがそれぞれ直進と旋回に分けられている [34]。3 本ハンドリム式車椅子は、1 本ずつがそれぞれ左車輪、右車輪と直進に分けられている [35]。「TrackChair」は、1 本ずつがそれぞれ片側の車輪に繋がり、2 本ともを同時に握れば直進操作ができる [36]。

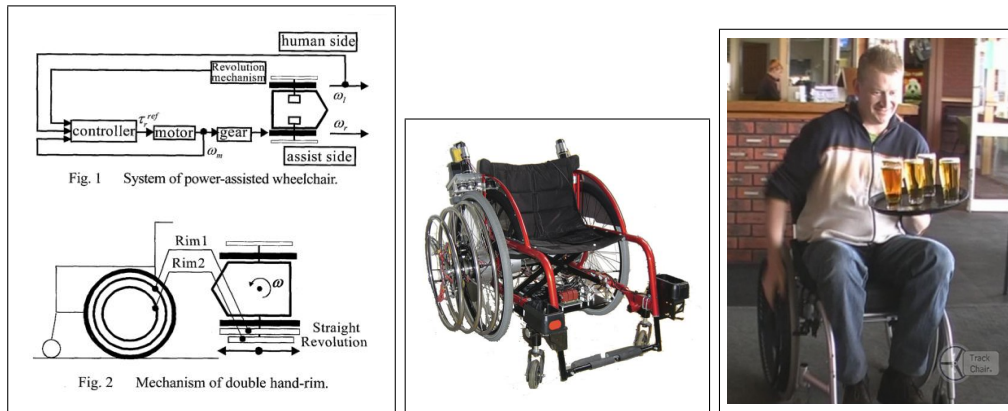


図 1.6: 多重ハンドリム式片手漕ぎ車椅子。左: 2 本ハンドリム式車椅子の研究例 [34]、中: 3 本ハンドリム式車椅子の研究例 [35]、右: Track Engineering 「TrackChair」 [36]。

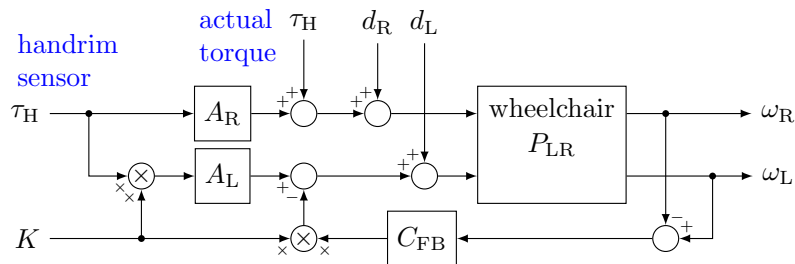


図 1.7: 先行研究における電動アシスト車椅子のための片手漕ぎ制御系 [27]。

しかし、多重ハンドリム式片手漕ぎ車椅子では、操作切換時にハンドリムを切り換える必要があり、混乱が生じる可能性がある。また、「TrackChair」の直進操作では、片手で2本のハンドリムを同時に握ることになり、手に握力または器用さを不足する人に向かない。

1.6 制御工学の方法を用いた片手漕ぎ操作方法

呉と堀は制御工学の方法で電動アシスト車椅子のための片手漕ぎを検討した [27]。片側ハンドリムのトルクセンサのトルク微分 $\dot{\tau}_H$ の値に基づいて直進性係数 $K \in [0, 1]$ を決め、図 1.7 に示すような制御系を構築することによって片手漕ぎ操作を実現した。トルク微分が大きくなるようにハンドリムに充分急速な力を入れれば $K = 1$ の値を保持し、車椅子が停止するまで連続の直進操作が可能になる。一方、緩やかに力を入れれば K が低い値 (理想的に $K = 0$) のままで残り、旋回操作ができる。

しかし、 $K = 0$ の場合に操作側と反対側の車輪が駆動されず、純回転運動にならない有限旋回半径の旋回をし、狭い場所で旋回できない。旋回するために緩やかな力の入れ方を維持する必要があり、快速に旋回不可能である。一方、直進操作のために静止状態で急速なトルクを入れる必要があり、狭い場所では物または人に衝突するおそれがある。更に、直進走行中における旋回操作が不可能であるため、曲がりくねった道や車椅子用スロープで直進→停止→旋回→停止→直進という多数の操作が必要になる。この片手漕ぎ制御系には不便性と安全性の問題があり、実用性のある物にするためには制御系の構造を改めて開発する必要がある。

1.7 ハンドリム操作と制御方法の利点

前述したように、電動アシスト車椅子は利用者に対する負担を軽減しながらハンドリムの使用による運動促進と健康増進に役立つ利点があり、また、制御方法による実用性向上が可能である。電動アシスト車椅子が活かせるハンドリム操作と制御方法の利点をまとめる。

ハンドリム操作の利点

- ハンドリムからの物理的な伝達によって路面状況や速度など、車椅子の動きや力が把握し易く、操作に役立つ。
- ハンドリムの使用による健康増進と運動促進。

電動車椅子制御方法の利点

- 高機能性と適応性による性能と機能性の向上。
- 駆動力とアシストによる利用者に対する負担軽減。

1.8 本研究の目的

本研究では、第 1.7 節で述べた利点を活かし、電動アシスト車椅子のための片手漕ぎ制御方法を提案する。提案法の対象者は、片麻痺患者や怪我で片手の機能を失った人だけではなく、日常生活における作業のために片手を空けておきたい車椅子利用者を想定する。

呉と堀は以前に電動アシスト車椅子のための片手漕ぎ制御系を提案したが [27]、他に単一ハンドリムでの片手漕ぎを実現しようとした先行研究が見られない。前述した呉と堀が提案した片手漕ぎ制御方法における不便性問題の解決、片手漕ぎの直進操作と旋回操作の操作特性と識別方法を明確にし、被験者評価によって片手漕ぎ制御系の実用性を示すことを目的とする。

1.9 論文構成

まず、第 2 章では、車椅子の車輪運動と車体運動との関係そして車椅子運動の動特性について述べる。直進と回転の運動に基づいて片手漕ぎ制御系が開発されるため、先に車輪速度の「車輪座標」と「運動座標」について説明する。

第 3 章では、まず車椅子実験機を紹介する。そして、片手漕ぎ操作方法を定義する必要性について述べ、片手漕ぎ操作方法と設計概念を述べた後、片手漕ぎ制御系の構造と動作について説明する。構造の説明では、所望トルクと指令値生成方法を述べ、動作の説明では直進、回転、走行中旋回などの実現方法を述べる。

第 4 章では、直進操作と旋回操作に関するハンドリム操作の調査方法、そしてハンドリム操作特性について説明する。第 4 章で述べるハンドリム操作の調査実験では、片手漕ぎ制御系と同じ構造を持つ制御系を用いる。

第 5 章では、ハンドリム操作特性に基づく操作識別方法について説明する。トルクセンサ信号から得たトルク微分のみを用いた操作識別と、運動も考慮した操作識別を比較する。

第 6 章では、片手漕ぎ制御に対する被験者評価のための実験方法を説明し、評価の結果について考察する。片手漕ぎ制御の実用性を示すことを目的とする。

第 7 章では、論文をまとめ、片手漕ぎ制御に関する今後の課題について述べる。

第2章

車椅子の動特性と運動学

2.1 車輪運動と車体運動との関係

本研究では、車椅子または車椅子の運動について次のことを前提とする。

- 左右対称：乗車する利用者と車椅子の質量分布と寸法が左右対称を持つこと。
- スリップ無し：車輪と路面の間にスリップ（滑り）が発生しないこと。
- ピッチ運動無し：車椅子の前輪（キャスト）が浮上しないこと。

車椅子はほぼ左右対称の質量分布と寸法で設計され、利用者の体重分布がほぼ左右対称であることを仮定する。車椅子の運動に関して、特に雪上や雨天時など摩擦が低下した場合にスリップが発生する可能性が高まる。また、モータまたは利用者が大きな前方向のトルクを出すと前輪浮上があり得る。ところが、主に高摩擦の路面上での車椅子の利用そして前輪を浮上させないトルクを想定し、スリップとピッチ運動を考慮しない。

車椅子の車体と利用者（以下：車体）の直進運動と回転（ヨー）運動を考える時に、式(2.1)の車輪速度の座標変換が便利である。車輪速度は、「車輪座標」における左成分 L と右成分 R を ω_L と ω_R で表し、「運動座標」における直進成分 C と回転成分 D を ω_C と ω_D で表す。車輪速度の直進成分と回転成分は車体の直進速度と回転速度に比例する。

$$\begin{aligned}\omega_C &= \frac{\omega_L + \omega_R}{2} \\ \omega_D &= -\omega_L + \omega_R\end{aligned}\tag{2.1}$$

式(2.1)は車輪速度 ω だけでなく、車輪角度 θ 、トルク τ と外乱 d にも用いられる。また、車輪座標と運動座標との変換がよく用いられるため、式(2.2)のように座標変換行列 H を定義する。図 2.1 に座標変換を表すブロック線図を示す。

$$H = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow H^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 \\ 1 & 1/2 \end{bmatrix}\tag{2.2}$$

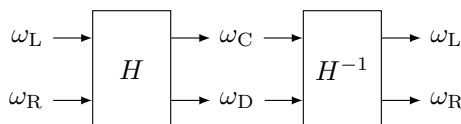


図 2.1: 車輪座標と運動座標との間の変換。

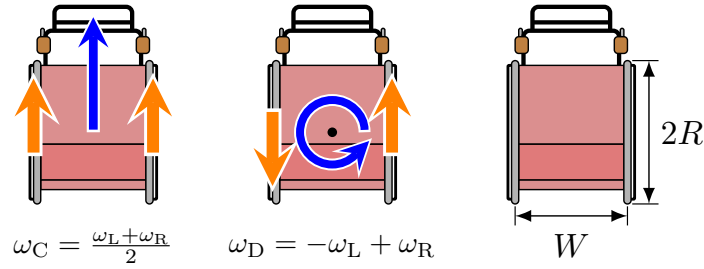


図 2.2: 直進運動、回転運動、車輪半径と車輪間隔。

スリップ無しと左右対称を前提に、車輪運動と車体運動の関係式 (2.3) が成り立つ。左右車輪の速度が一致すれば、 $\omega_D = 0$ であるため車椅子が直進する。一方、左右車輪の速度の大きさ一致しながら方向が反対であれば、 $\omega_C = 0$ であるため車椅子が純回転する。図 2.2 に車椅子の直進運動、回転運動、そして車輪直径 $2R$ と車輪間隔 W を示す。

$$\begin{aligned} v &= R\omega_C \\ \gamma &= \frac{R}{W}\omega_D \end{aligned} \quad (2.3)$$

車椅子の軌跡における瞬間旋回半径 r を式 (2.4) で表す。車椅子の直進性と回転性を評価する時に用いる。無限大の $|r|$ は直進、 $|r| = 0$ は純回転を意味する。

$$r = \frac{v}{\gamma} = W \frac{\omega_C}{\omega_D} \quad (2.4)$$

2.2 車椅子の直進運動と回転運動のモデル化

車椅子が並進移動をしないことと同様傾斜を前提に、車椅子の車体運動と車輪運動の動特性を表す式 (2.5) が成り立つ。導出は付録 A を参照。車体が駆動力 f_{LR} と外乱 $\{d_v, d_\gamma\}$ (主に前輪と重力の影響) を受ける。左右車輪が粘性力 $B_W\omega_{LR}$ 、トルク τ_{LR} 、路面摩擦トルク $f_{LR}R$ と外乱 d_{WLR} (主に粘性力以外の摩擦力) を受ける。

$$\begin{aligned} \text{body straight motion: } & M_v \dot{v} + D_v v = (f_L + f_R) + d_v \\ \text{body rotational motion: } & I_\gamma \dot{\gamma} + B_\gamma \gamma = \frac{W}{2} (-f_L + f_R) + d_\gamma \\ \text{left wheel motion: } & I_{W2} \dot{\omega}_L + B_W \omega_L = \tau_L - f_L R + d_{WL} \\ \text{right wheel motion: } & I_{W2} \dot{\omega}_R + B_W \omega_R = \tau_R - f_R R + d_{WR} \end{aligned} \quad (2.5)$$

式 (2.3) を車体運動方程式に代入し、車輪運動方程式の和と差を取った後に車体運動方程式に代入すれば、式 (2.6) の車輪運動のみに依存する動特性を得る。

$$\begin{aligned} \text{common (straight) mode: } & P_{nC} : I_C \dot{\omega}_C + B_C \omega_C = \tau_C + d_C \\ \text{differential (rotational) mode: } & P_{nD} : I_D \dot{\omega}_D + B_D \omega_D = \tau_D + d_D \end{aligned} \quad (2.6)$$

車輪運動に基づく運動方程式の重要点として次のことが挙げられる。車椅子運動の共通成分と差分成分が非結合化され、それぞれ直進運動と回転運動をモデル化する。そして、車体の直進速度と回転速度がそれぞれ車輪速度の共通成分と差分成分に比例するため、両方とも一次特性を持つ。

第3章

片手漕ぎを実現する制御方法

3.1 車椅子実験機

車椅子実験機を図 3.1 に示す。実験機は電動アシスト車椅子「ヤマハ JW-II・A タイプ」を使用する。背もたれの後ろに取り付けたエムティティ株式会社の信号処理機「s-BOX」に片手漕ぎ制御系を実装する。s-BOX がセンサ信号を受け、モータトルク指令値を出力して JW-II 駆動ユニットに与える。車椅子実験機の主要パラメータを表 3.1 に示す。

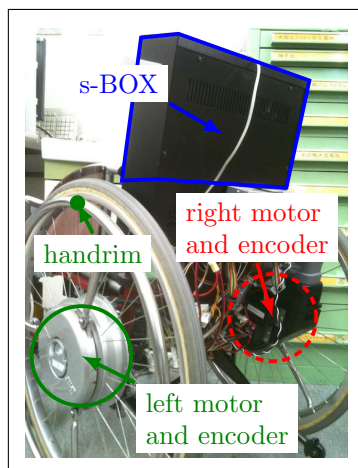


図 3.1: 車椅子実験機。

電動アシスト車椅子の左右ハンドリムにトルクセンサがあるが、本研究では左手操作ができるように片手漕ぎ制御系を設計するため、左ハンドリムのトルクセンサのみを用い、左側のハンドリムトルクを τ_H で表す。また、車椅子の運動状態を把握するために、左右車輪に取り付けたエンコーダで車輪角度 θ_{LR} を測り、擬似微分で車輪速度 ω_{LR} を算出する。

車輪半径	R	0.30	m
車輪間隔	W	0.47	m
サンプル時間	T	5	ms

表 3.1: 車椅子実験機の主要パラメータ。

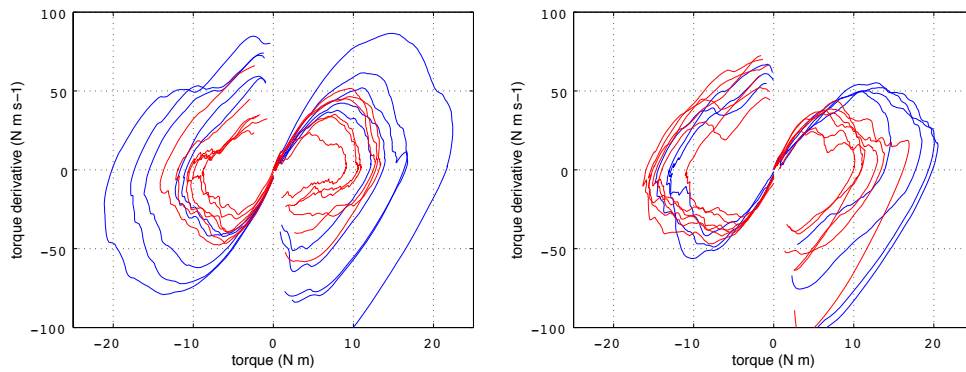


図 3.2: 両手漕ぎ車椅子を操作した場合の $(\tau_{HL}, \dot{\tau}_{HL})$ 平面上の軌跡。青：直進操作、赤：旋回操作。左右：人が異なる。

3.2 両手漕ぎ車椅子を操作した場合の操作トルク

両手漕ぎ車椅子を両手で直進操作と回転操作をした場合に、片側の手漕ぎトルクのみを見て直進操作と旋回操作の識別が困難であることを確認する。そのために、車椅子の前後直進操作そして左右回転操作を行なってもらった。2人の両手漕ぎ操作時の左側ハンドリムトルクの結果を図 3.2 に示す。

片側のハンドリムトルクセンサ信号のみで直進操作と旋回操作を識別することが困難である。また、両手用車椅子の場合、個人差によって操作トルクが著しく異なることがわかる。そのため、本研究では前もって片手漕ぎのための「直進操作」と「旋回操作」を決め、片側のハンドリムのトルクセンサ信号から利用者の操作を識別する。

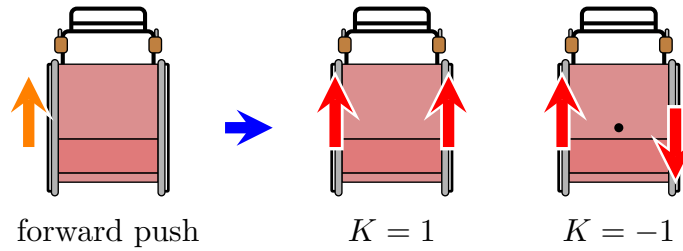


図 3.3: 直進操作と旋回操作の場合のトルク。左手操作の場合の前方向に漕いだ時の方向。

3.3 片手漕ぎ操作方法と制御系の設計概念

両手漕ぎでは二つの入力（左右のハンドリム）があるため直進や旋回が自由に操作できるが、片手漕ぎでは一つの入力（左側または右側のハンドリム）のみであらゆる操作をすることになる。そのため、片側のハンドリム操作を用いた複数種類の運動の操作方法を開発する必要がある。

片手漕ぎ制御系の設計を次の流れで行なう。まず「直進操作」と「旋回操作」の方法を決定し、それらの操作方法に対応できる制御系の構造を設計し、最後に片手漕ぎ操作を直進操作または旋回操作に識別する方法を開発する。

両手漕ぎでは、加速したり速度を維持する時に比較的急速な直進操作で行なうことが多い。一方、進む方向（ヨー角度）の調整をする時に細かい旋回操作で行なうことが多い。より自然な操作のために、それに倣って片手漕ぎ操作方法を次のように決定する。

- **直進操作** ハンドリムに急速な力を入れる漕ぎ方。
- **旋回操作** ハンドリムに緩やかな力を入れる漕ぎ方。

操作方法をこのように決定すれば、直進走行からの急停止がそのまま可能となる。操作側のハンドリムが車輪と同時に回る時に手でできるハンドリム擦り操作は両手漕ぎの場合に直進速度の微制動と旋回操作によく用いられる。片手漕ぎでは、ハンドリム擦り操作は直進走行中の速度の微制動に使えなくなるが、回転速度の微制動や走行中旋回操作に使えらる。

直進操作をした時に車椅子を直進させる直進成分のみのトルクが望ましく、旋回操作をした時に車椅子を旋回させる回転成分のみのトルクが望ましい。式 (3.1) のように操作の種類と望ましいトルクの関係を表すことができる。直進操作と旋回操作にそれぞれ $K = 1$ と $K = -1$ の「直進性係数」の値を与えると、一つの式にまとまる。直進操作と旋回操作の場合のトルクを図 3.3 に示す。

$$\begin{array}{l}
 \text{straight operation:} \\
 \text{turning operation:}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_R \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tau_H \\
 \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_R \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \tau_H
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_R \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 \\ K \end{bmatrix} \tau_H \quad (3.1)$$

本研究では、主にハンドリム操作におけるトルク微分 $\dot{\tau}_H$ の値で操作を識別する。その理由について第 4 章で後述する。ハンドリムに対する緩やかな力で旋回操作を行なうため、ハンドリムが操作されていない場合の直進性係数の既定値を $K = -1$ とし、旋回操作を既定操作とする。第 3.7 節と第 5 章で直進性係数の決め方について述べる。

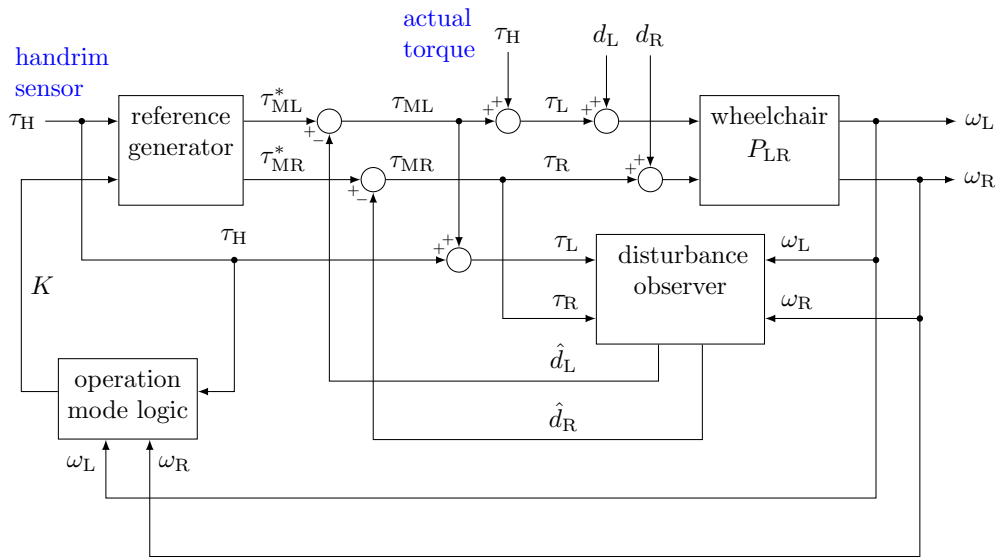


図 3.4: 片手漕ぎ制御系。左側のハンドリムを操作入力とする。

3.4 制御系の構造

片手漕ぎ制御系はトルク指令値を生成する「指令値生成器」と直進性係数の値を選択する「操作モード論理回路」で構成する。「外乱オブザーバ」と外乱フィードバックで構築する外乱抑制は操作性向上を図るためである。左手を操作側とした場合の片手漕ぎ制御系の構造を図 3.4 に示す。図 3.4 の左上側にある τ_H はトルクセンサからの信号であり、上側にある τ_H は左車輪に対する実際のトルクである。

指令値生成器はトルクセンサ信号を受け、左右車輪に対するモータトルク指令値を生成する系である。重力の影響を打ち消すために、左右車輪に対する外乱 d_{LR} の推定値を出力する外乱オブザーバとフィードバックで外乱抑制を構成する。指令値生成器は第 3.5 節で説明し、外乱オブザーバは第 3.6 節で説明する。

図 3.4 の左下側にある操作モード論理回路から出る直進性係数 $K \in [-1, +1]$ は指令値生成器からどのようなトルクが生成されるかを決定する。直進性係数 K の決め方は第 3.7 節で説明し、直進操作と旋回操作の識別方法について第 3.8 節と第 5 章で後述する。

左手操作の場合、総トルクは式 (3.2) に示すように片手漕ぎトルクとモータトルクの和である。左車輪に実際の手漕ぎトルクも加わるため、指令値生成器の中で τ_H の大きさの分のトルクを右車輪に対して補う必要がある。

$$\begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{ML}^* + \tau_H \\ \tau_{MR}^* \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

外乱抑制が有効である場合、車椅子に与えられるトルクと外乱の和は式 (3.3) のように所望総トルク τ^* と外乱抑制誤差 \tilde{d} の和になる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_L \\ d_R \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tau_{ML}^* + \tau_H \\ \tau_{MR}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{d}_L \\ \tilde{d}_R \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \tau_L^* \\ \tau_R^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{d}_L \\ \tilde{d}_R \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

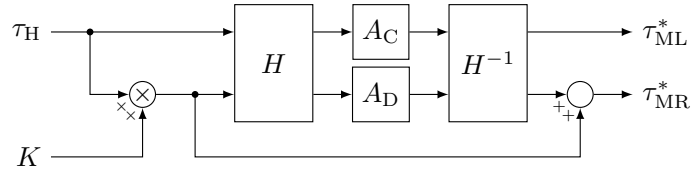


図 3.5: 二重アシスト構造を持つ指令値生成器。

アシスト率 (直進)	α_C	1.0	—
アシスト率 (回転)	α_D	1.5	—
アシスト立ち上がり時定数	T_{fast}	0.08	s
アシスト立ち下がり時定数 (直進)	T_{slowC}	1.5	s
アシスト立ち下がり時定数 (回転)	T_{slowD}	1.0	s

表 3.2: アシスト演算子のパラメータ。

3.5 アシストと指令値生成器

指令値生成器の構造を図 3.5 に示す。 A_C と A_D はアシスト (増幅) 演算子である。アシスト演算は入力トルク信号の増減による可変時定数を持つ 1 次低域通過フィルタであり、立ち上がりが速いながら持続的なトルク指令値を出力することができる。

入力トルクの直進成分と回転成分を独立に増幅し、直進成分と回転成分のアシスト演算子を独立に調整できる二重アシスト構造は金ら [4] が提案したものである。二重アシスト構造のアシスト演算子を $A_{LR} = H^{-1}A_{CD}H$ で表す。直進性係数 K の値によって二重アシスト構造への入力に変化するため、指令値生成器は直進トルク ($K = 1$) や回転トルク ($K = -1$) の総トルクとなるトルク指令値を出力することができる。左車輪に実際の手漕ぎトルク τ_H も加わるため、直進成分と回転成分の総トルクを得るために右側のトルク指令値 τ_{MR} に $K\tau_H$ を加える必要がある。

式 (3.2) から、指令値生成器からのトルク指令値と操作側の実際の手漕ぎトルクを合わせると式 (3.4) の所望総トルクを得る。式 (3.4) から、 $K = 1$ と $K = -1$ を代入した場合、式 (3.5) のように直進成分と回転成分の所望総トルクを得る。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_L^* \\ \tau_R^* \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tau_{ML}^* + \tau_H \\ \tau_{MR}^* \end{bmatrix} = (H^{-1}A_{CD}H + 1_2) \begin{bmatrix} 1 \\ K \end{bmatrix} \tau_H \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}A_C(1+K) + \frac{1}{2}A_D(1-K) + 1 \\ \frac{1}{2}A_C(1+K) - \frac{1}{2}A_D(1-K) + K \end{bmatrix} \tau_H \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} K = 1 &\Rightarrow \begin{bmatrix} \tau_L^* \\ \tau_R^* \end{bmatrix} = (A_C + 1) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tau_H \\ K = -1 &\Rightarrow \begin{bmatrix} \tau_L^* \\ \tau_R^* \end{bmatrix} = (A_D + 1) \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \tau_H \end{aligned} \quad (3.5)$$

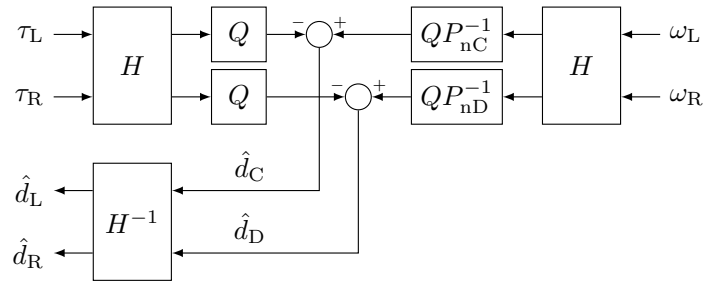


図 3.6: 外乱オブザーバ。外乱推定は運動座標で行なう。

慣性モーメント (直進)	I_C	7.0299	kg m^2
慣性モーメント (回転)	I_D	10.9374	kg m^2
粘性係数 (直進)	B_C	7.8555	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
粘性係数 (回転)	B_D	14.9031	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
時定数	T_{QC}, T_{QD}	0.1	s

表 3.3: 外乱オブザーバのパラメータ。

3.6 外乱抑制

本研究では平坦地において実験を実施するため、実験では外乱抑制を必要とせず、有効にしない。しかし、実際の使用において、外乱抑制を入れる必要があると考えられる。

直進運動の直進性と回転運動の回転性を向上させ、重力の影響を抑制するために、片手漕ぎ制御系に外乱オブザーバとフィードバックによる外乱抑制を含める。車椅子の非対称、傾斜上の場合の重力、前輪の影響などをまとめて総外乱 d とする。

外乱を抑制すれば、直進性と回転性を向上させることができ、より真っ直ぐ進んだりより狭い場所で回転できることに繋がる。より重要なことは、傾斜上で生じる重力は片手漕ぎ操作を妨げてしまう問題がある。重力の影響を受けると、片手漕ぎ操作では傾斜上において自由に停止したり方向を変えることが困難になる。片手漕ぎの操作性を保証するために外乱を抑制することが重要である。

図 3.6 に外乱オブザーバの構造を示す。式 (2.6) の車椅子公称モデルの逆系 P_{nC}^{-1} に基づいて直進成分と回転成分の外乱を独立に推定する。フィルタ Q には 1 次低域通過フィルタを使用する。推定した外乱 \hat{d}_{LR} をフィードバックすることによって外乱を抑制する。そうすれば、車椅子の動特性が式 (2.6) の車椅子モデルに公称化される。式 (3.6) にモデル P_{nCD} とフィルタ Q の伝達関数を示す。

$$\begin{aligned}
 P_{nC}(s) &= \frac{1}{I_C s + B_C} \\
 P_{nD}(s) &= \frac{1}{I_D s + B_D} \\
 Q(s) &= \frac{1}{T_Q s + 1}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

パラメータを表 3.3 に示す。時定数に大きい値を持たせる理由は、更なる検討が必要だと思われるが、小さいと動きがぎくしゃくになることを経験したからである。

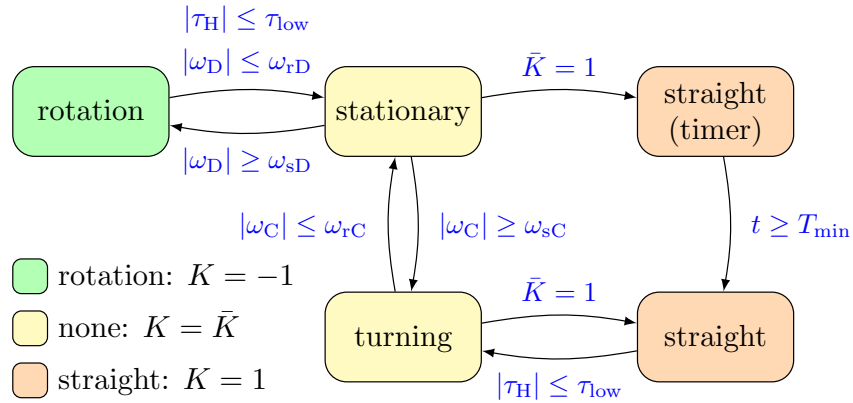


図 3.7: 操作モード論理回路のモード遷移図。

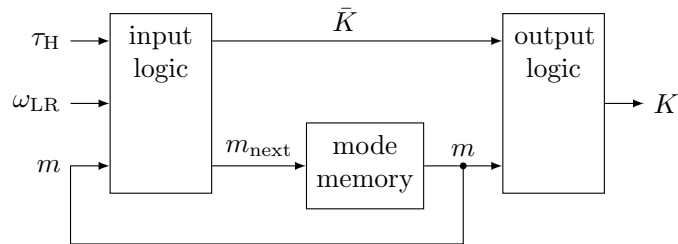


図 3.8: 操作モード論理回路の構造。

3.7 操作モード論理回路

第 3.3 節で述べた操作方法だけでは、例えば直進運動の微調整や快速回転運動が不可能になる。低速直進と快速回転の操作を可能にするためには、「操作モード論理回路」を設計する。操作モード論理回路は主に車椅子の運動状態を考慮し、「操作モード」という論理回路状態によって適切な直進性係数を出力する。

操作モード論理回路の状態遷移図を図 3.7 に示す。操作モード論理回路は静止状態モード、直進保持モード (2つ)、回転保持モードと旋回可能モードの 5つのモードで構成され、片手漕ぎ制御系は静止状態モードから始まる。

操作モード論理回路の構造について説明する。全体構造を図 3.8 に示し、その中の入力論理の構造を図 3.9 に示す。図 3.9 の右下側にある「制御論理」は操作モード論理回路の状態遷移を制御する役割がある。トルクとトルク微分に依存する「操作関数」と出力論理から出力される「直進性係数」をそれぞれ \bar{K} と K で区別する。

図 3.8 の右側の出力論理では、直進性係数 K は操作モード m によって次のように決まる。

- 回転保持モード: $K = -1$
- 静止状態モードと旋回可能モード: $K = \bar{K}$
- 両方の直進保持モード: $K = 1$

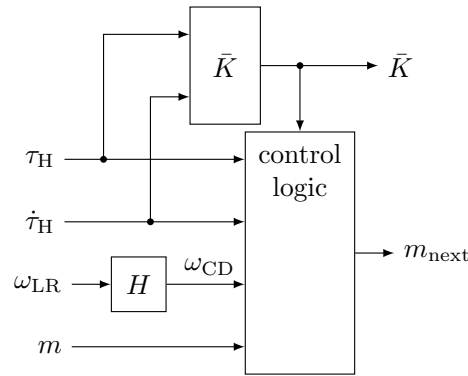


図 3.9: 操作モード論理回路の中の入力論理の構造。

旋回可能モード起動の速度閾値	$\omega_{sC}R$	0.50	m s^{-1}
旋回可能モード解除の速度閾値	$\omega_{rC}R$	0.06	m s^{-1}
回転保持モード起動の速度閾値	$\omega_{sD}R/W$	30	deg s^{-1}
回転保持モード解除の速度閾値	$\omega_{rD}R/W$	12	deg s^{-1}
低トルク閾値	τ_{low}	0.5	N m
低値トルク微分閾値	$\dot{\tau}_{\text{low}}$	1.0	N m s^{-1}
直進保持モードの最低保持時間	T_{min}	1.0	s

表 3.4: 操作モード論理回路のパラメータ。

操作モード論理回路が可能にする操作について述べる。操作モード論理回路のパラメータを表 3.4 に示す。

快速回転 静止状態モードの間に速度の回転成分の大きさ $|\omega_D|$ が閾値 ω_{sD} を上回ると回転保持モードに入る。回転保持モードでは $K = -1$ が保持されるため、快速回転が可能になる。利用者が操作を止め ($|\tau_H| \leq \tau_{\text{low}}$)、 $|\omega_D|$ が閾値 ω_{rD} を下回ると、回転保持が解除され、静止状態モードに戻る。

直進 また、静止状態モードの間に $\bar{K} = 1$ を満たすと直進保持（タイマー）モードに入り、直進保持（タイマー）モードに遷移してから時間 T_{min} が経過すると直進保持モードに遷移する。両方の直進保持モードでは $K = 1$ が保持される。利用者が操作を止める ($|\tau_H| \leq \tau_{\text{low}}$) と、直進保持が解除され、旋回可能モードに遷移する。

直進と旋回 旋回可能モードでは K が固定されず、直進も走行中旋回も可能な操作モードである。速度の直進成分の大きさ $|\omega_C|$ が閾値 ω_{rC} を下回ると、静止状態モードに戻る。

低速直進 直進保持（タイマー）モードに入ってから時間 T_{min} が経過するまでモード遷移が行なわれない。そのため、時間 T_{min} が経過する前に操作を始めれば、操作を止める ($|\tau_H| \leq \tau_{\text{low}}$) まで直進運動を自由に調整できる。この時間条件は低速直進の操作を可能にする役割がある。静止状態モードの間に $\bar{K} = 1$ を満たすようにハンドリムを少し揺らすとトルク微分が大きくなり、低速直進操作を始めることができるようになる。

静止状態モードの間に車椅子が何らかの理由で $|\omega_C|$ が閾値 ω_{sC} を上回ると、旋回可能モードに入る。このモード遷移は、直進速度が比較的速い状態での快速回転操作を不可能にし、車椅子の横転を防止する安全機能である。

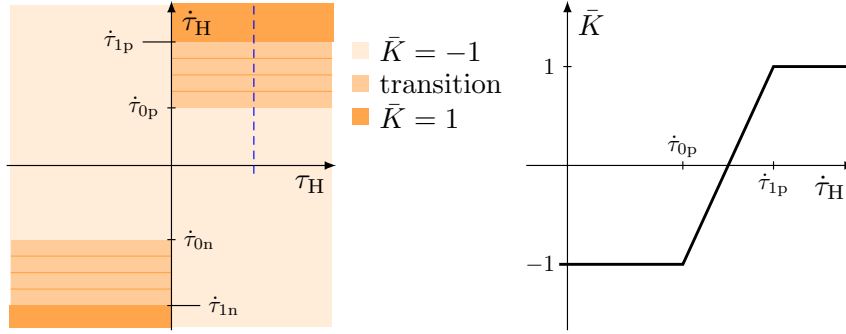


図 3.10: 一定トルク微分閾値の場合の操作関数。左： $(\tau_H, \dot{\tau}_H)$ 平面上の領域による操作関数の値、右：図中左にある青色破線の断面。

正の上限閾値	$\dot{\tau}_{1p}$	85.7	N m s^{-1}
正の下限閾値	$\dot{\tau}_{0p}$	85.7	N m s^{-1}
負の下限閾値	$\dot{\tau}_{0n}$	-100.0	N m s^{-1}
負の上限閾値	$\dot{\tau}_{1n}$	-100.0	N m s^{-1}

表 3.5: 一定トルク微分閾値を用いた操作関数のパラメータ。

3.8 操作識別のための操作関数

操作関数 \bar{K} は、図 3.10 と式 (3.7) に示す $(\tau_H, \dot{\tau}_H)$ 平面上の象限、そして識別関数 Υ の出力によって構成する。領域 $\tau_H \dot{\tau}_H \geq 0$ はトルクの立ち上がりを意味し、その補完はトルクの立ち下がりを含む。手漕ぎトルクが立ち上がる時に操作を識別したいため、手漕ぎトルクの立ち下がる時に操作関数を -1 とおく。

$$\bar{K}(\tau_H, \dot{\tau}_H, \chi) = \begin{cases} -1, & \tau_H \dot{\tau}_H < 0 \\ \Upsilon(\chi), & \tau_H \dot{\tau}_H \geq 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

トルク微分の閾値が一定である、即ちトルク微分のみ ($\chi = \dot{\tau}_H$) に依存する識別関数 Υ の例を式 (3.8) に挙げる。トルク微分のみの変数の関数であるため、パラメータ設定が簡単であるという利点があり、本研究ではこの関数を用いる。

$$\Upsilon(\dot{\tau}_H) = \begin{cases} 1, & \dot{\tau}_H \leq \dot{\tau}_{1n} \\ 2 \frac{|\dot{\tau}_H| - |\dot{\tau}_{0n}|}{|\dot{\tau}_{1n}| - |\dot{\tau}_{0n}|} - 1, & \dot{\tau}_{1n} < \dot{\tau}_H \leq \dot{\tau}_{0n} \\ -1, & \dot{\tau}_{0n} < \dot{\tau}_H < \dot{\tau}_{0p} \\ 2 \frac{|\dot{\tau}_H| - |\dot{\tau}_{0p}|}{|\dot{\tau}_{1p}| - |\dot{\tau}_{0p}|} - 1, & \dot{\tau}_{0p} \leq \dot{\tau}_H < \dot{\tau}_{1p} \\ 1, & \dot{\tau}_H \geq \dot{\tau}_{1p} \end{cases} \quad (3.8)$$

トルク微分が $\dot{\tau}_H \geq \dot{\tau}_{1p}$ または $\dot{\tau}_H \leq \dot{\tau}_{1n}$ を満たし、トルクの立ち上がり時であれば、操作関数が 1 の値を取る。一方、 $\dot{\tau}_{0n} < \dot{\tau}_H < \dot{\tau}_{0p}$ の場合、操作関数が -1 の値のみである。その他の場合、 $\Upsilon = -1$ 領域と $\Upsilon = 1$ 領域の間の識別関数が連続となるように定義する。もう一つ注目すべきことは、識別関数は一般的に正負対称を持たない。第 3.9 節と第 3.10 節の動作確認実験と被験者実験に用いる閾値を表 3.5 に示す。

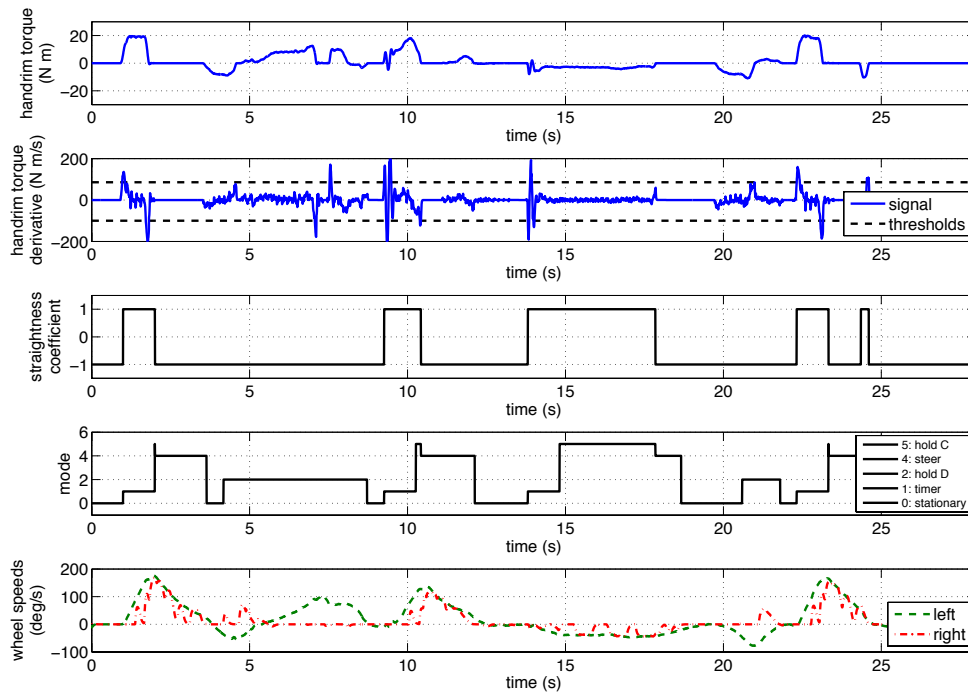


図 3.11: 片手漕ぎ制御系を用いた直進と回転の実験結果。上から：手漕ぎトルク、手漕ぎトルク微分値、直進性係数、操作モード、左右車輪速度。

3.9 直進操作と回転操作の実験結果

式 (3.8) のような一定トルク微分閾値の識別関数を用いて、片手漕ぎ制御系の走行実験結果を図 3.11 に示す。利用者が次のハンドリム操作で車椅子を動かした。2 番目と 3 番目の直進操作で、直進保持を起こすために利用者がハンドリムを揺らした。

- $t = 0.9\text{s}$ から $t = 1.8\text{s}$ までの前方向の直進操作、
- $t = 3.6\text{s}$ から $t = 4.6\text{s}$ までの反時計回りの回転操作、
- $t = 5.2\text{s}$ から $t = 8.2\text{s}$ までの時計回りの回転操作、
- $t = 9.2\text{s}$ から $t = 10.5\text{s}$ までの前方向の直進操作、
- $t = 13.8\text{s}$ から $t = 17.8\text{s}$ までの後方向の低速直進操作、
- $t = 19.8\text{s}$ から $t = 21.0\text{s}$ までの反時計回りの回転操作、
- $t = 22.3\text{s}$ から $t = 23.2\text{s}$ までの前方向の直進操作、
- 最後に $t = 24.3\text{s}$ での停止操作（後方向の直進操作）。

図 3.11 から、利用者の片手漕ぎ操作によって直進、回転と低速直進の操作ができていることが確認できる。図中 4 番目の波形である操作モードを見れば、操作モードの遷移が図 3.7 の通りになっていることがわかる。例えば、操作モードの値が $0 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 4$ のように変化するところで直進性係数が 1 秒間以上 $K = 1$ となっていること、ヨー回転速度によって操作モードの値が $0 \leftrightarrow 2$ の遷移が起こること、操作モードの値が $0 \leftrightarrow 2$ である時にトルク微分値に関わらず回転操作 ($K = -1$) になっていることが確認できる。

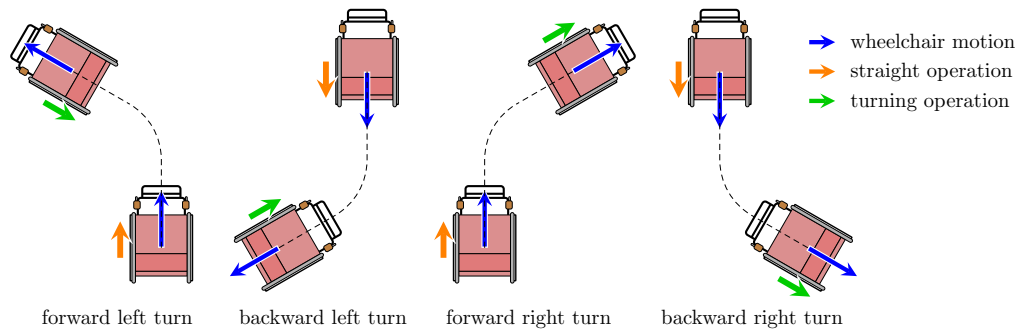


図 3.12: 走行中旋回の操作方法。左から：前方向左旋回、後方向左旋回、前方向右旋回、後方向右旋回。

3.10 走行中旋回の操作方法と実験結果

走行中旋回に関して、次の4種類の旋回がある。

- 前方向左旋回：前方向に進みながらの反時計回り旋回。
- 後方向左旋回：後方向に進みながらの時計回り旋回。
- 前方向右旋回：前方向に進みながらの時計回り旋回。
- 後方向右旋回：後方向に進みながらの反時計回り旋回。

操作側を左側とした場合、前後方向に関わらず、左旋回は操作側車輪回転方向と反対方向へのハンドリム操作、右旋回は操作側車輪回転方向と同じ方向へのハンドリム操作によって実現する。前方向左旋回、後方向左旋回、前方向右旋回と後方向右旋回を図 3.12 に示す。左旋回操作と右旋回操作では、車輪回転方向とハンドリム操作方向との関係が異なるため、ハンドリムの漕ぎ方も異なる。

左旋回では車輪回転方向とハンドリム操作方向が異なるため、車輪回転を減速させるようにハンドリムを手で軽く擦ることによって左旋回が実現できる。一方、右旋回では車輪回転方向とハンドリム操作方向が同じであるため、ハンドリムを緩やかに漕ぐことによって右旋回が実現できる。左旋回と右旋回の実験結果をそれぞれ図 3.13 と図 3.14 に示す。

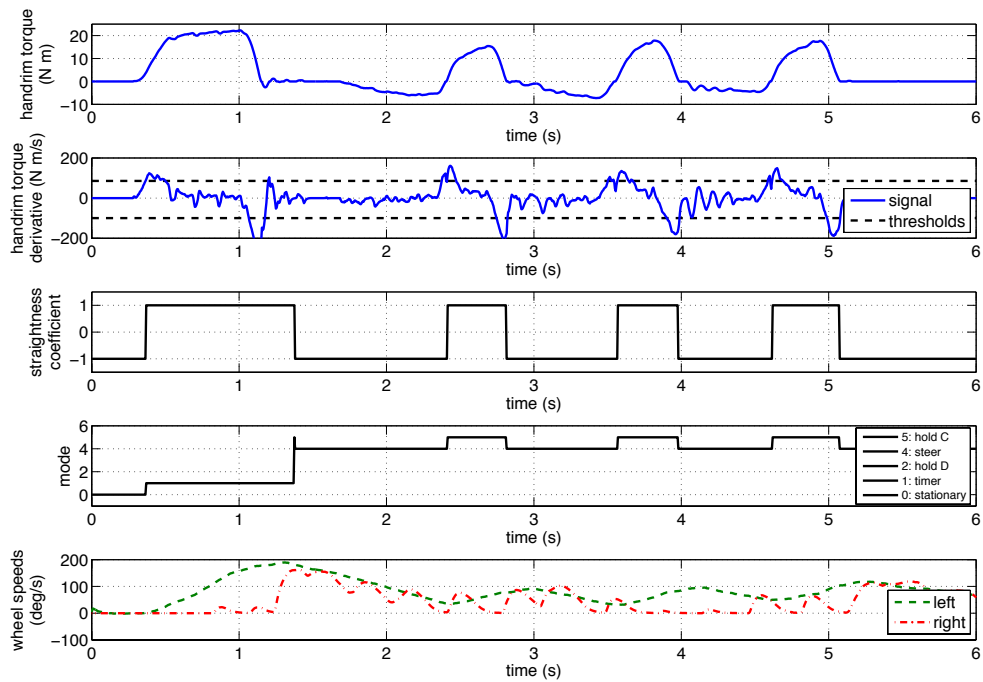


図 3.13: 片手漕ぎ制御系を用いた左旋回の実験結果。

前方向左旋回の実験結果を図 3.13 に示す。利用者が次のハンドリム操作をした：

- $t = 0.31\text{ s}$ から $t = 1.15\text{ s}$ までの前方向の直進操作、
- $t = 1.69\text{ s}$ から $t = 2.41\text{ s}$ までの反時計回りの旋回操作、
- $t = 2.41\text{ s}$ から $t = 2.82\text{ s}$ までの前方向の直進操作、
- $t = 2.89\text{ s}$ から $t = 3.54\text{ s}$ までの反時計回りの旋回操作、
- $t = 3.56\text{ s}$ から $t = 3.99\text{ s}$ までの前方向の直進操作、
- $t = 4.05\text{ s}$ から $t = 4.60\text{ s}$ までの反時計回りの旋回操作、
- 最後に $t = 4.62\text{ s}$ から $t = 5.08\text{ s}$ までの前方向の直進操作。

前方向左旋回はハンドリムを手で擦ることによって実現できている。図中 2 番目のトルク微分を見れば利用者がハンドリムを手で擦っている間にトルク微分が大きくなること確認できる。ところが、旋回操作中に直進速度が低下するため、旋回を持続させるために定期的に前方向への直進操作をする必要がある。

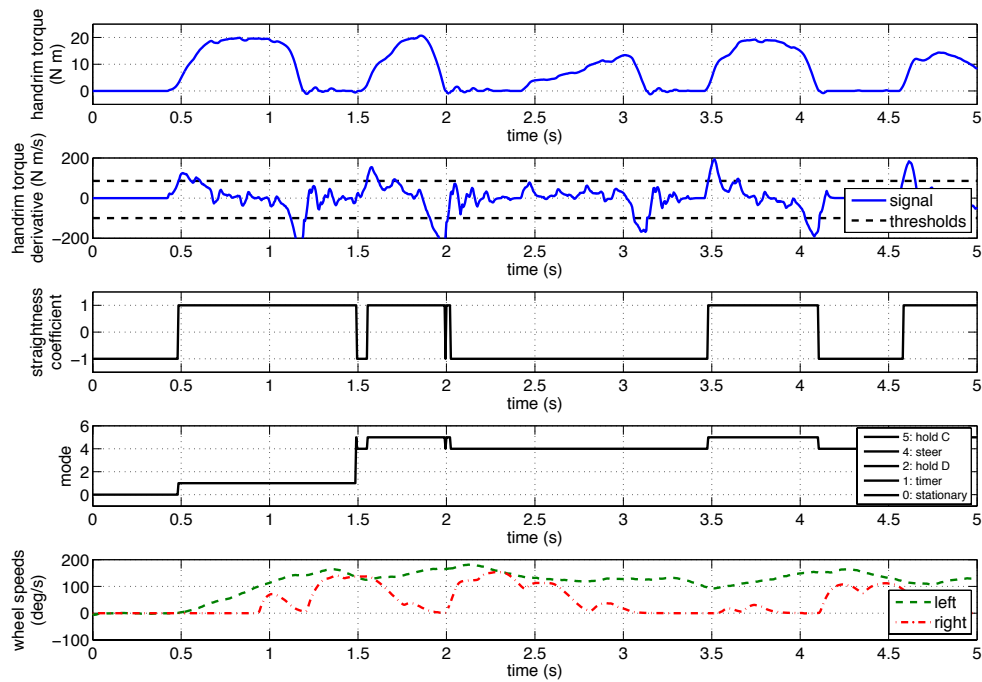


図 3.14: 片手漕ぎ制御系を用いた右旋回の実験結果。

前方向右旋回の実験結果を図 3.14 に示す。利用者が次のハンドリム操作をした：

- $t = 0.43\text{s}$ から $t = 1.19\text{s}$ までの前方向の直進操作、
- $t = 1.52\text{s}$ から $t = 1.99\text{s}$ までの前方向の直進操作、
- $t = 2.43\text{s}$ から $t = 3.13\text{s}$ までの時計回りの旋回操作、
- $t = 3.46\text{s}$ から $t = 4.10\text{s}$ までの前方向の直進操作、
- 最後に $t = 4.57\text{s}$ からの前方向の直進操作。

前方向右旋回は前方向へ緩やかな力で漕ぐことによって実現できている。図中 2 番目のトルク微分を見れば利用者が緩やかなハンドリム操作をしている間にトルク微分が閾値を超えないことが確認できる。ところが、旋回操作中に直進速度が低下するため、左旋回の場合と同じように旋回操作と直進操作を交互に行なう必要がある。

第4章

直進と旋回の片手漕ぎ操作におけるハンドリム操作の特性

4.1 ハンドリム操作の特性を調べる目的

直進と旋回の片手漕ぎ操作の識別するために、先にハンドリム操作の特性を調べ、操作特性に基づく識別方法を開発する必要がある。本章では、次の目的でハンドリム操作の特性を調べる。

- 片手漕ぎのトルクとトルク微分の大きさとパターンを把握するため。
- 車椅子の運動によるハンドリム操作への影響を把握するため。
- 識別方法の検討のためのデータを得るため。

式 4.1 のように左側の総トルク ($\tau_L = \tau_{HL} + \tau_{ML}$)、速度、加速度と外乱との関係があるため、ハンドリム操作は車椅子の運動による影響を受けると考えられる。片手漕ぎのトルク微分が車椅子の運動による影響を受けることを考慮することによって操作識別の性能向上を図ることを目的とする。

$$\begin{aligned} \frac{I_C + I_D}{2} \dot{\omega}_L + \frac{I_C - I_D}{2} \dot{\omega}_R + \frac{B_C + B_D}{2} \omega_L + \frac{B_C - B_D}{2} \omega_R &= \tau_L + d_L \\ \Rightarrow \frac{I_C + I_D}{2} \dot{\omega}_L + \frac{B_C + B_D}{2} \omega_L &\approx \tau_L + d_L \end{aligned} \quad (4.1)$$

右車輪の速度と加速度に該当する係数は左車輪に該当する係数より充分小さいと仮定すれば、左車輪に関連する項のみが残る。外乱オブザーバに用いたパラメータから計算すれば、左右車輪に対する慣性モーメントは左が約 9.0 kg m^2 で右が -2.0 kg m^2 である。一方、左右車輪に対する粘性係数は左が約 11.4 kg m^2 で右が -3.5 kg m^2 である。左右の係数を比較すれば、式 (4.1) に用いた仮定の妥当性に疑問があると考えられる。しかし、右車輪の速度と加速度を考慮しても操作識別性能向上に繋がると限らず、解析が困難となるため、その仮定を用いて操作特性の解析を行なう。

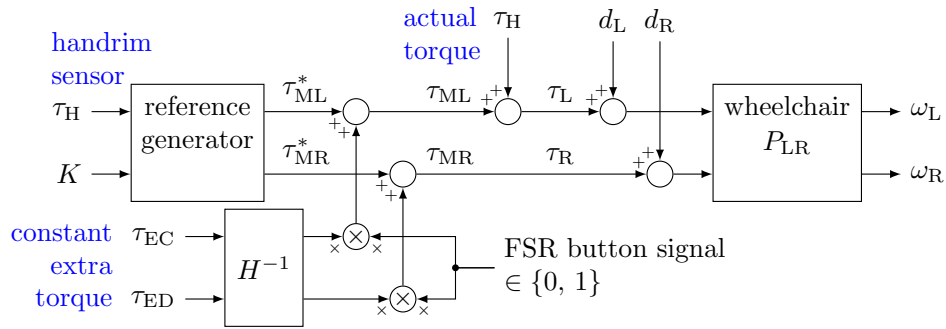


図 4.1: 操作特性の調査実験に用いる制御系の構造。

制御系	直進操作用	旋回操作用
直進性係数	$K = 1$	$K = -1$
アシスト率	$\alpha_C = 1.0$	$\alpha_D = 1.5$
アシスト立ち下がり時定数	$T_{\text{slow}C} = 1.5 \text{ s}$	$T_{\text{slow}D} = 1.0 \text{ s}$
アシスト立ち上がり時定数	$T_{\text{fast}} = 0.08 \text{ s}$	
外乱抑制	無効	

表 4.1: 操作特性の調査実験に用いる制御系のパラメータ。

4.2 直進操作と旋回操作の調査のための実験方法

調査実験は直進操作と旋回操作に分けて行なう。そのために、 $K = 1$ に固定した「直進操作用制御系」と $K = -1$ に固定した「旋回操作用制御系」を準備する。直進操作用制御系と旋回操作用制御系の構造を図 4.1 示す。指令値生成器からのトルクに加えて、一定トルク指令値 (τ_{EC} , τ_{ED}) も与える。この一定トルク指令値で車椅子を駆動させれば、多数の運動状態における操作特性の調査が可能になる。利用者のハンドリム操作側の反対側（右側）の手元にあるボタン装置 (FSR button signal) で一定トルク指令値のオン・オフ操作ができるようになっている。表 4.1 に制御系のパラメータを示す。また、図 4.2 のように、一定トルク指令値には 25 対の配列を用いる。

一つのハンドリム操作のデータを得るために、次の流れで実験を行なう。

1. 一定トルクで車椅子を加速させるために、ボタンを押さえ始める。
2. 車椅子がある程度の速度に達したら、ボタンを放す。
3. ボタンを放した直後に、車椅子が運動中にハンドリム操作をする。
4. ハンドリム操作を行なった後、段階 1. に戻る。

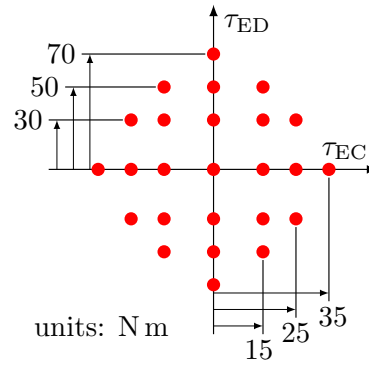
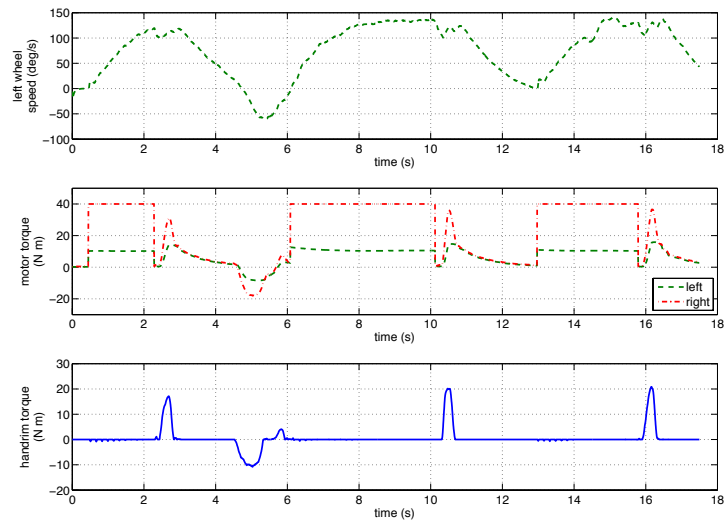


図 4.2: 一定トルク指令値の配列。

図 4.3: ハンドリム操作特性の調査実験の流れ。条件：直進操作、前方向、 $\tau_{EC} = 25 \text{ N m}$ 、 $\tau_{ED} = 30 \text{ N m}$ 。上：左車輪速度、中：左右モータトルク、下：片手漕ぎトルク。

実験の流れを図 4.3 に示す。段階 1. と段階 2. では、ボタンを右手で操作する。段階 3. では、調査したい操作（直進操作または旋回操作）を意識してハンドリム操作をする。段階 3. で実際の片手漕ぎ操作が模擬できるように、段階 2. で一定トルク指令値を切り、モータからアシストのみが掛かるようにする。段階 3. における所望総トルクは式 (3.5) となる。

このプロセスを数回繰り返した後、繰り返した回数分のハンドリム操作の信号データ (θ_{LR} , ω_{LR} , $\dot{\omega}_{LR}$, τ_{MLR} , τ_H , $\dot{\tau}_H$) を得る。同じような実験を、「直進」または「旋回」、「前方向」と「後方向」の片手漕ぎ、そして一定トルク指令値（全部で 100 通りの条件）を変化させることによって、多数の運動状態における直進操作と旋回操作のデータを得る。

N	後方向	前方向	合計
直進	128	127	255
旋回	143	145	288
合計	271	272	543

表 4.2: ハンドリム操作特性の調査実験から得られたデータの数。

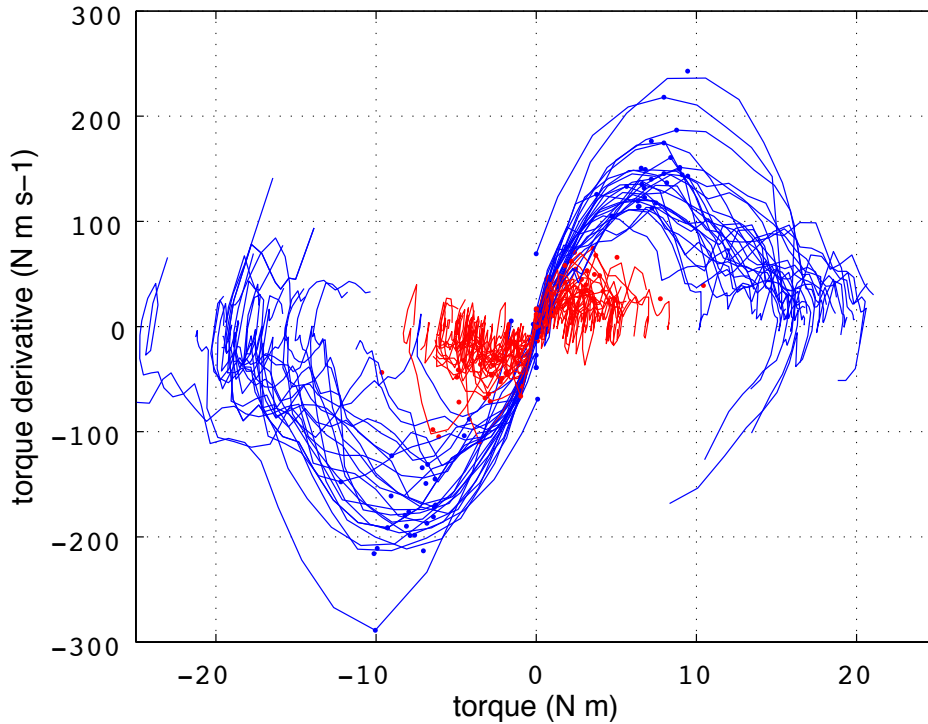


図 4.4: 片手漕ぎ操作をした場合の $(\tau_H, \dot{\tau}_H)$ 平面上のハンドリム操作の軌跡。青：直進操作、赤：旋回操作。点：漕ぎ始めと 100 ms 後を印す。

4.3 ハンドリム操作特性の調査結果

ハンドリム操作のデータ数を表 4.2 に示す。各条件（操作種類、操作方向、トルク指令値）における実験では、およそ 3~9 の操作特性データを得た。全ての 100 通りの条件における実験では、543 個の操作特性データを得た。

図 4.4 に $(\tau_H, \dot{\tau}_H)$ 平面上のハンドリム操作の軌跡を示す。図を見れば、直進操作の場合、トルク微分が漕ぎ始めから約 100 ms 後に最大値となる。利用者がトルクを入れる時にトルク微分が先に立ち上がり、トルク微分が最大となった後にトルクが最大値まで増加する。操作の早期識別のために、本研究ではトルク微分を利用した操作関数を提案する。また、正と負の値に該当する前方向と後方向へのハンドリム操作には強さの違いがあり、前方向と後方向に対応する識別関数設計を別々に行なう必要がある。

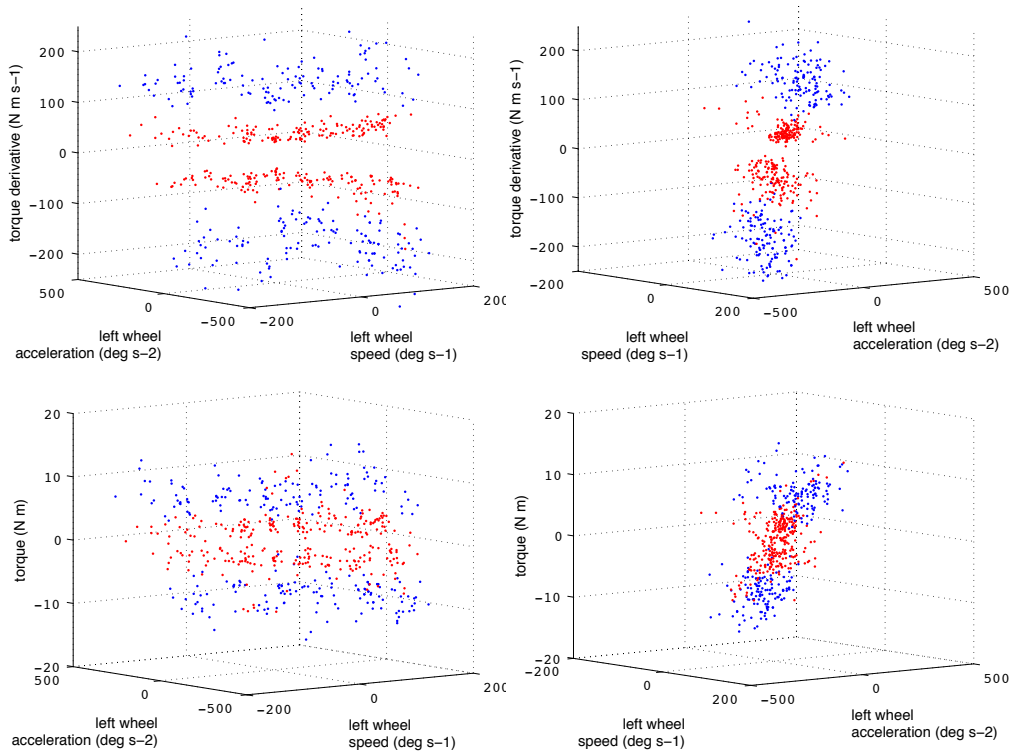


図 4.5: トルクとトルク微分の運動への依存性。青：直進操作、赤：旋回操作。上：トルク微分、下：トルク。左右： ω_L 軸と $\dot{\omega}_L$ 軸の角度が異なる。

トルクとトルク微分の運動への依存性を図 4.5 に示す。全てのデータ点における値は、トルク微分が最大となる時間における値である。図中右下のグラフを見れば、期待どおり点 ($\omega_L, \dot{\omega}_L, \tau_H$) が式 (4.1) のような相関を持つことがわかる。ただし、アシストトルク、右車輪の影響、外乱、ノイズと信号処理（フィルタなど）の影響があるため、データが式 (4.1) と完全一致しなくなる。図中左のグラフでは、左車輪速度の軸の通り、データ点が右に行くほど左車輪の前方向への回転速度が高いことを意味する。

図 4.5 中左上のトルク微分のグラフでは高速（データ群の左右の両端）において旋回操作時のトルク微分の大きさ（絶対値）が増加することが見られ、旋回操作のデータ点が直進操作のデータ点に近づいて行くように見える。その原因は 2 つが挙げられる。ハンドリムが左車輪と同時に回り、ハンドリムを握って操作できる時間が短くなる。そして、速度が上がるに連れてハンドリムの回転に対する粘性力が大きくなる。

図 4.5 中左下のグラフでは、左車輪の速度と加速度への依存性が見え易い。図中左下のトルクのグラフでは左車輪の速度と加速度への依存性が見られないが、前述したように図中左上のトルク微分のグラフでは高速における運動依存性が見られる。一方、図中右のグラフでは、直進操作と旋回操作の領域の重なり度合いが見え易い。図中下のトルクのグラフでは、直進操作と旋回操作の領域の重なりが多いが、図中上のトルク微分のグラフでは、直進操作と旋回操作の領域の重なりが少なく、ほぼ完全に分離していることがわかる。

4.4 ハンドリム操作特性のまとめ

トルクよりトルク微分の方を操作識別に用いる利点をまとめる。

- ハンドリム操作では、トルク微分はトルクより先に立ち上がる。
- 直進操作と旋回操作におけるトルク微分の最大値が異なり、分離し易い。

従って、操作識別のためにトルク微分を用いることが妥当である、トルクを用いることより効果的であると考えられる。第5章ではトルク微分を用いた操作識別について検討する。

本章の調査の限界として、私が車椅子を操作した時の調査結果であることを挙げる。従って、本章の調査の限界として、次の点を挙げる。

- 腕力や器用さなどの個人差を考慮しない。
- 片手漕ぎ操作の知識や使用経験によって結果が異なる可能性がある。

人によって腕力と器用さが異なる。また、片手漕ぎ制御系を開発したため片手漕ぎ操作方法を理解した私が本章の実験を行なったが、片手漕ぎ操作を使用したことが無い人が同じ実験を行なうと異なる結果が出る可能性がある。従って、本章で示したトルクとトルク微分の大きさ、立ち上がり時間、運動依存性などが人によって異なる。

ただし、個人差があっても、トルクよりトルク微分の方を操作識別に用いる利点が変わらないと考えられる。トルクが立ち上がるために先にトルク微分が立ち上がるのが数学的に真であり、第3.3章で定義した片手漕ぎのための直進操作と旋回操作では、力の入れ方が急速か緩やかかの違いであるため、同じトルク値でもトルク微分の大きさが異なると考えられる。

第5章

片手漕ぎ操作のための操作識別

5.1 識別の概要

本章では、ハンドリムのトルク信号と車椅子の運動状態に基づく操作識別について述べる。識別の出力は「直進操作」($\Upsilon = 1$)と「旋回操作」($\Upsilon = -1$)の二つのクラスである。識別関数の設計と設計した識別関数を用いた識別の過程を図5.1に示す。設計した識別関数を用いて識別を行なった後、識別関数の性能評価を行なう。本章の流れは以下である。

1. 訓練段階：識別関数の設計
2. 識別段階：設計した識別関数を用いた識別
3. 識別関数の評価

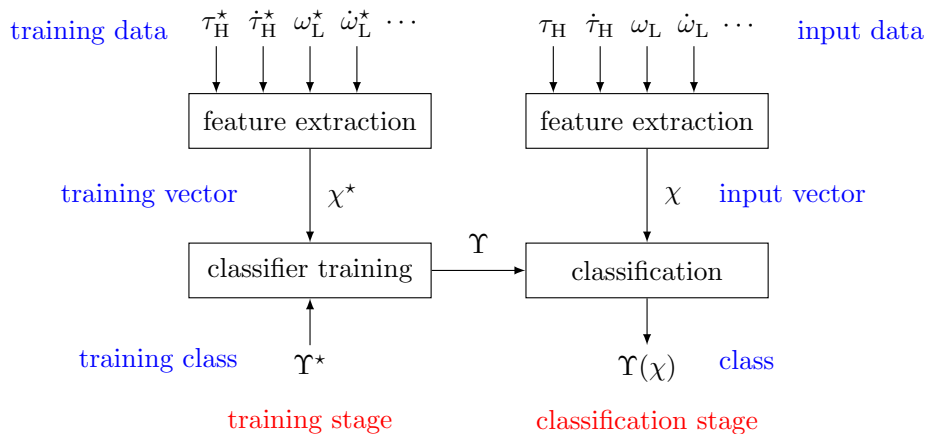


図 5.1: 教師あり学習における訓練と識別の過程。

第4章の調査実験から片手漕ぎにおける直進操作と旋回操作の操作特性を得た。このデータから、変数 τ_H^* , $\dot{\tau}_H^*$, ω_L^* , $\dot{\omega}_L^*$ などの組み合わせで識別関数設計のための「訓練データ」(χ^* , Υ^*)と、同じ組み合わせで識別の対象とする「入力データ」 χ を構成することができる。訓練データで識別関数 Υ の設計 (訓練) をした後、設計した識別関数 Υ で入力変数 χ に対して識別を行なう。

識別の対象とするデータの正しいクラス Υ^* がわかるが、識別段階で用いない。そのため、識別結果 $\Upsilon(\chi)$ と正しいクラス Υ^* の参照で識別成功率を出して識別関数が評価できる。

	直進操作 $\Upsilon^* = 1$	旋回操作 $\Upsilon^* = -1$
成功	$\Upsilon(\chi) = 1$	$\Upsilon(\chi) < 1$
失敗	$\Upsilon(\chi) < 1$	$\Upsilon(\chi) = 1$

表 5.1: 直進操作と旋回操作における識別の成功と失敗の定義。

5.2 識別の評価基準

識別関数の評価は次の基準で行なう。

- 識別失敗率
- 直進操作の識別に必要な時間
- 識別関数の複雑さ

第 3.7 節の操作モード論理回路では、 $\bar{K} = 1$ 、即ち、トルク微分が $\dot{\tau}_H \geq \dot{\tau}_{1p}$ または $\dot{\tau}_H \leq \dot{\tau}_{1n}$ を満たす時に直進モードに入る。本章では、 $\Upsilon = 1$ の場合に直進操作と識別し、 $\Upsilon < 1$ の場合に旋回操作と識別する。直進操作と旋回操作における識別の成功と失敗の定義を表 5.1 に示す。

ハンドリム操作の識別失敗率が高いと操作性が低下し、操作が困難になってしまう。識別失敗があつて利用者が再び操作すれば希望の操作を取り戻すことができる。しかし、人や場合によって要求される識別成功率があり、ある程度以下の識別失敗率が望ましい。また、安全や命に関わる時など操作識別の失敗が許されない場合、識別失敗率が更に重要な基準となる。識別成功率の計算に式 (5.1) を用いる。識別失敗率は識別成功率の補完である。

$$\text{success rate} = \frac{n(\text{success})}{n(\text{success}) + n(\text{failure})} \quad (5.1)$$

直進操作と旋回操作の正しい識別の他に、直進操作の識別に必要な時間も評価する。無操作の場合の識別関数の値は -1 であるため、旋回操作の場合、直進性係数 $K = -1$ を瞬時に得る。しかし、直進操作の場合、 K の値が -1 から $+1$ に変化する有限時間が存在し、 K の値が $+1$ になるまで出力されるトルクが直進トルクとはならない。 K の値が -1 から $+1$ に変化する有限時間が許容範囲（約 100 ms 以下）であることを確認する。

識別関数にパラメータが多ければ、識別関数の設定が困難になったり個人差に対応できなくなるおそれがあり、実用性を失うことがある。また、識別関数の入力変数 χ の次元が多すぎたり識別関数が複雑過ぎれば、入力変数や操作関数の値の計算が重くなり、制御器の計算資源が限られていれば実装できなくなるという実用性問題がある。

識別関数の評価基準について述べたが、識別関数を片手漕ぎ制御系に用いた時の快適性や操作性などの考慮すべき定性的な項目もある。そのため、識別関数の実際の有効性は片手漕ぎ制御系を用いた実験で検証する必要がある。

5.3 サポートベクトルマシンの紹介

識別関数の設計方法は、サポートベクトルマシン (support vector machine: SVM) という教師あり学習方法を用いる [37][38]。SVM は、線形分離可能である二つのクラスに所属するデータを最大余裕で分離する線形超平面を求めるための方法である。例えば、データが 3 次元であれば、データを分離する 2 次元の線形平面を SVM で求められる。

SVM で求める線形超平面を式 (5.2) で表す。 w は超平面の法線ベクトルであり、 b は超平面のオフセットを指定する定数である。

$$w^T \chi - b = 0 \quad (5.2)$$

$\Upsilon^* = 1$ クラスのデータ点に接する線形超平面を $w^T \chi - b = 1$ とし、 $\Upsilon^* = -1$ クラスのデータ点に接する線形超平面を $w^T \chi - b = -1$ とすると、クラスのデータ群に接する線形超平面の間の距離が $2/\|w\|$ になる。従って、 $\|w\|$ を最小化させれば余裕空間が広がる。データ点と超平面との関係に関する制約を考慮すれば、式 (5.3) の最適化問題を得る。 N はデータの数である。

$$\min_{w, b} \max_{\lambda \geq 0} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^N \lambda_i (\Upsilon_i^* (w^T \chi_i - b) - 1) \right\} \quad (5.3)$$

式 (5.3) の最適化問題は式 (5.4) の最適化問題と同等である。

$$\min_{\lambda \geq 0} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i, j=1}^N \lambda_i \lambda_j \Upsilon_i^* \Upsilon_j^* \chi_i^T \chi_j - \sum_{i=1}^N \lambda_i \right\} \quad (5.4)$$

ところが、運動依存性を考慮した識別関数を求める時に非線形超平面を求める。例えば、図 4.5 中左上のような速度依存性に合わせた識別関数のために非線形超平面を求める。そのため、まず入力変数 χ に対して変換 ϕ を適用した後、 $\phi(\chi)$ を入力変数と扱って SVM を適用する。しかし、その時に変換 ϕ を直接に求めようとせず、式 (5.4) の中の内積 $\chi_i^T \chi_j$ の代わりに非線形 Kernel 関数 Ξ を選んで入れることができる。選んだ関数が妥当な Kernel 関数であれば、式 (5.5) のように書き換えることができ、変換 $\phi(\chi)$ が間接にされる。

$$\Xi(\chi_i, \chi_j) = \phi(\chi_i)^T \phi(\chi_j) \quad (5.5)$$

更に、二つのクラスのデータ群が完全分離できない場合、「ソフトマージン」を導入する必要がある。式 (5.4) の最適化問題に、式 (5.6) のように「スラック (緩み) 定数」 c を導入することができる。スラック定数が小さいほど誤識別が許容される。

$$\min_{0 \leq \lambda \leq c} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i, j=1}^N \lambda_i \lambda_j \Upsilon_i^* \Upsilon_j^* \Xi(\chi_i, \chi_j) - \sum_{i=1}^N \lambda_i \right\} \quad (5.6)$$

最終的な超平面は式 (5.7) となる。ただし、 w と b は式 (5.8) のように求まる。

$$w^T \phi(\chi) - b = 0 \quad (5.7)$$

$$w^T \phi(\chi) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \Upsilon_i^* \Xi(\chi_i, \chi) \quad (5.8)$$

$$b = w^T \phi(\chi_i) - \Upsilon_i^* \quad \text{for any } i \in \{j | \lambda_j > 0\}$$

5.4 識別関数の設計方法

第4章から得られた操作特性に基づいて、次のように SVM のためのデータを得る。

- トルク微分の大きさが最大となる時間における値を用いる。
- 前方向と後方向それぞれに対する識別関数を設計する。

トルク微分の大きさが最大となる時間における値を用いる理由は、第節で述べた操作モード論理回路における操作関数 \bar{K} に関する遷移条件が満たされるか満たされないかがトルク微分の大きさが最大値によって決定されるからである。

SVM に用いた Kernel 関数は式 (5.9) のような内積関数である。 D は Kernel 関数の次数であり、SVM の1つのパラメータとなる。

$$\Xi(\chi_i, \chi_j) = (\chi_i^T \chi_j)^D \quad (5.9)$$

図 4.5 に示す操作データでは、速度と加速度において式 (5.10) で定義する ϕ_L 軸を用いればいい分離が得られる可能性があると考え、 ϕ_L を用いた識別関数の設計を行なう。

$$\phi_L = -\frac{I_C + I_D}{2} \dot{\omega}_L + \frac{B_C + B_D}{2} \omega_L \quad (5.10)$$

識別関数の設計には、式 (5.11) の入力変数と Kernel 次数を用いる。

$$\begin{aligned} \chi &= [\tau_H] && \rightarrow D = 1 \\ \chi &= [\tau_H, \omega_L]^T && \rightarrow D = 2 \\ \chi &= [\tau_H, \phi_L]^T && \rightarrow D = 2 \end{aligned} \quad (5.11)$$

SVM によって余裕を最大にする超平面を求めた後、式 (5.12) のように識別関数を定義する。飽和関数 sat の値域は $[-1, 1]$ である。

$$\Upsilon(\chi) = \text{sat}(w^T \phi(\chi) - b) \quad (5.12)$$

データ数 N を表 4.2 に示す。前方向と後方向のハンドリム操作のための識別関数設計にそれぞれ 272 点と 271 点を用いる。

パラメータ			識別成功率 (%)				平均直進識別時間 (ms)	
χ の成分	Kernel 次数	c	直進操作		旋回操作		後方向	前方向
$[\dot{\tau}_H]$	1	10^{-4}	78.1	85.0	81.1	84.8	57.4	70.6
		10^{-3}	78.1	99.2	81.8	100	57.1	65.0
		10^{-2}	95.3	100	95.1	100	53.3	63.0
		10^{-1}	96.9	100	95.8	100	48.6	62.8

表 5.2: 識別関数設計方法のパラメータと該当する数値結果 (1 次 Kernel 関数)。

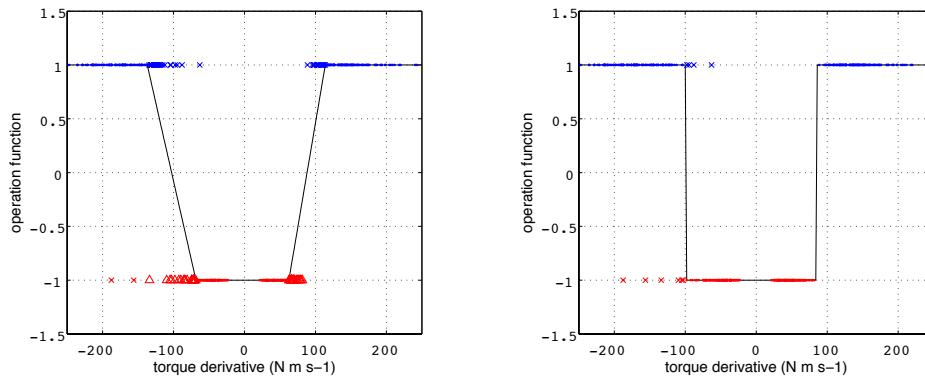


図 5.2: SVM から得た識別関数。 $\chi = [\dot{\tau}_H]$ 、 $D = 1$ 。左: $c = 10^{-4}$ 、右: $c = 10^{-1}$ 。青: 直進操作、赤: 旋回操作。●: 成功、×: 失敗、△: 遷移領域に位置する旋回操作の点 (成功)。

5.5 識別性能

従来法ではトルク微分のみ依存する識別関数を用いた。SVM で同じような識別関数を設計し、評価する。表 5.2 に c を変化させた場合の数値結果を示す。図 5.2 中左に広い遷移領域を持つ識別関数を示し、図 5.2 中右に狭まった遷移領域を持つ識別関数を示す。図 5.2 中左に存在する三角形の点は遷移領域に入ったハンドリム操作のデータ点であり、この場合は直進操作と識別されない。

c が大きくなるにつれ、識別成功率がある値まで上がり、識別成功率が 98.5% (直進) と 97.9% (旋回操作) に収束する。一方、直進操作の平均識別時間は全て 100 ms 以内であり、 c が大きくなるにつれて下がって行く。結果として、トルク微分のみ依存する識別関数に関して、遷移領域が小さい方が成功率と直進操作識別時間が良くなる。

パラメータ			識別成功率 (%)				平均直進識別時間 (ms)	
χ の成分	Kernel 次数	c	直進操作		旋回操作		後方向	前方向
$[\dot{\gamma}_H]$	1	10^{-1}	96.9	100	95.8	100	48.6	62.8
$[\dot{\gamma}_H, \omega_L]^T$	2		94.5	100	98.6	100	56.5	62.4
$[\dot{\gamma}_H, \phi_L]^T$			95.3	100	97.2	99.3	50.9	61.7

表 5.3: 識別関数設計方法のパラメータと該当する結果 (変数 χ の比較)。

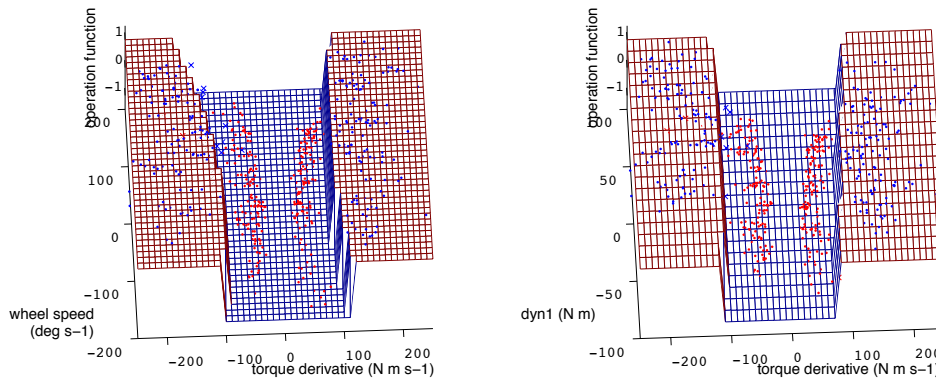


図 5.3: SVM から得た識別関数。 $D = 2$, $c = 10^{-1}$ 。左: $\chi = [\dot{\gamma}_H, \omega_L]^T$ 、右: $\chi = [\dot{\gamma}_H, \phi_L]^T$ 。青: 直進操作、赤: 旋回操作。●: 成功、×: 失敗。

表 5.3 に変数 χ を変化させた場合の識別関数の数値結果を示す。表に該当する識別関数は図 5.2 中右と図 5.3 である。

1 番目の識別関数では直進操作の識別成功率が最も高く、識別時間が短い。ところが、2 番目の識別関数では旋回操作の識別成功率が最も高い。この理由は、走行中における旋回操作時のトルク微分が増加することを、2 番目の識別関数がより近く回帰されているからである。

5.6 識別関数のまとめ

スラック変数 c が大きくなるにつれて、識別成功率が上がった。これは、直進操作と旋回操作のデータ群が完全分離可能でなかったからである。従って、正しい識別のために c に大きい値を持たせた方がいいという結論である。

運動 (ω_L または ϕ_L) に依存する関数を用いても識別成功率の僅かの向上しか見られず、パラメータの数がより多い非線形関数であるため片手漕ぎ車椅子の実際の使用にあたって実装の複雑さの問題が出る可能性がある。また、変数 ϕ_L では加速度の計算も必要となる。

従って、実用性を考え、表 5.2 に示す識別成功率の結果を見れば、図 5.2 中右に示す一次関数が最もいいという結果になる。第 6 章でこの識別関数を用いた片手漕ぎ制御の被験者評価を行なう。トルク微分の閾値は表 3.5 に示す値と同じである。

第6章

片手漕ぎ制御系の被験者評価

6.1 被験者評価の目的

被験者評価では、提案した片手漕ぎ制御方法の実用性を示すことを目的とする。第5章で提案した識別関数を用いた片手漕ぎ制御の被験者評価を行ない、ジョイスティックと両手漕ぎ車椅子を提案法の比較対象とする。

片手漕ぎ制御系の操作関数における閾値は私のハンドリム操作特性データに基づいて値を設定した。被験者に試乗してもらい、個人差によって使い易さなどがどう影響されるかを調査することを目的とする。

6.2 提案法の比較対象とする片手操作方法

被験者評価で比較する片手操作方法と両手漕ぎ操作を以下にまとめる。

- **片手漕ぎ操作** 左側ハンドリムによる直進と旋回。
- **片手片足操作** 左側ハンドリムによる直進と左足で路面を蹴ることによる旋回。
- **ジョイスティック** 左手にあるジョイスティックによる直進と旋回。
- **両手漕ぎ操作** 左右のハンドリムによる直進と旋回（片手操作との比較のため）。

ジョイスティックと片手片足操作を図6.1に示す。第1章で述べたように片手片足駆動の電動アシスト車椅子が市販され、一つの片手操作方法として存在する。直進性係数を $K = 1$ に固定することによって片手片足駆動を実験機で模擬して、片手漕ぎ制御の一つの比較対象とする。

ジョイスティック付きの電動車椅子が多く普及されているため、ジョイスティックを実験機に取り付けて、もう一つの比較対象とする。ジョイスティックを一つの比較対象とすることによってハンドリム操作の利点を確認することができる。

世界で最も多く普及されている手動車椅子は両手漕ぎ車椅子である。全ての片手操作方法との比較のため、両手漕ぎ操作も評価してもらう。



図 6.1: 片手漕ぎ制御の比較対象とするジョイスティックと片手片足操作。

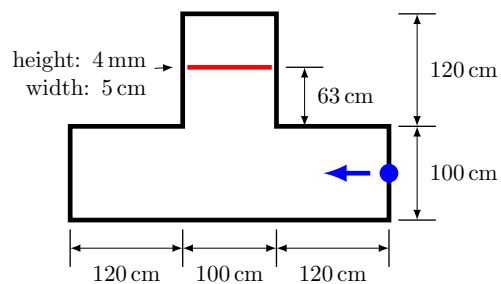


図 6.2: 被験者実験に用いたテストコースの寸法。赤：段差、青：スタート位置と向き。

6.3 被験者評価の実験方法

被験者実験は次の流れで実施する。実験で得られる情報は、被験者に記入をお願いしたアンケート、実験中にもらった被験者からのコメント、実験中の観察、そして被験者に走行してもらったテストコースにおける指標の情報である。

1. 実験機、実験内容と安全について説明した上で、参加者の同意を得る。
2. 実験前アンケートを記入してもらう。
3. 自由に各操作方法を使用してもらう時間を設ける。
4. 各操作方法で2つのテストコースを走行してもらう。
5. 実験後アンケートを記入してもらう。

各コースの各試みでは、両手漕ぎ操作、ジョイスティック、片手漕ぎ操作と片手片足操作の順で操作方法を使用してもらうことを決める。まず両手漕ぎ操作に慣れさせてから他の操作方法を使用してもらうことを決めた。

被験者実験に用いたテストコースの寸法を図 6.2 に示す。床にテープを貼ってテストコースを用意する。中の分岐に高さ 4 mm と幅 5 cm の段差がある。幅 1 m のコース内で被験者に車椅子実験機を試乗してもらう。車椅子実験機の車輪間隔 $W = 47 \text{ cm}$ に比べると、幅に対して約 53 cm の余裕がある。また、前輪から後輪への距離は前輪の姿勢によって約 40 cm から 50 cm であり、T 字の真ん中で 360° 回転することができる。

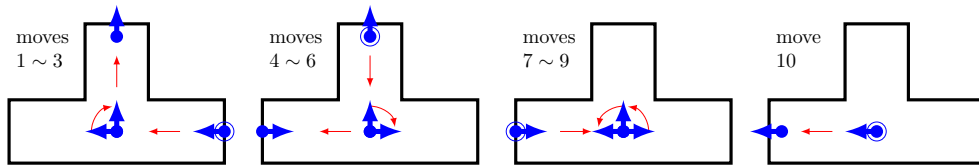


図 6.3: テストコース 1 の動作。赤：動作、青：車椅子の停止位置と向き。

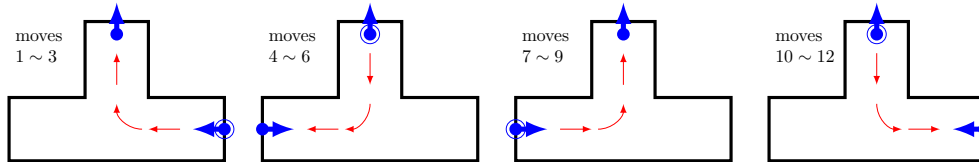


図 6.4: テストコース 2 の動作。赤：動作、青：車椅子の停止位置と向き。

テストコース 1 とテストコース 2 の動作の流れをそれぞれ図 6.3 と図 6.4 に示す。テストコース 1 は次の動作を含む：前方向の直進、90° の時計回り回転、前方向の直進、後方向の直進、90° の時計回り回転、後方向の直進、前方向の直進、90° の反時計回り回転を 2 回、前方向の直進。テストコース 2 は次の動作を含む：前方向の直進、時計回り旋回、前方向の直進、後方向の直進、時計回り旋回、後方向の直進、前方向の直進、反時計回り旋回、前方向の直進、後方向の直進、反時計回り旋回、後方向の直進。ただし、被験者が誤操作した場合、現在位置からそのままコースを続けてもらう。テストコースをこのように設定した理由は、前後方向への直進、反時計回りと時計回りの回転、そして前後方向への反時計回りと時計回りの旋回、即ち全ての方向への直進、回転と走行中旋回の動作が含まれるからである。

コースから外れずにできるだけ速く走行するように被験者に伝える。コース 1 における動作 3、動作 6、動作 10、そしてコース 2 における動作 3、動作 6、動作 9 と動作 12 各分岐への直進に関して、境界線から車輪まで 15 cm 程以内であれば直進を完了したと許容する。コース外れに関して、車椅子の前輪または後輪がテストコース境界線を越えた場合、コース外れと判断し、被験者にコース外れがあったと伝える。また、被験者に対する記憶試験ではないため、必要であると思った時に現在動作の次のすべき動作を被験者に伝える。

6.4 評価基準

本研究では、主に「操作性」「快適性」「安全性・安心感」「移動性」の4つの評価基準に対して片手漕ぎ制御の実用性を評価することを考える。被験者評価では直進性、回転性などの定量的な評価、経済性、設定・実装し易さなどを評価しない。

- **操作性** 操作が直感であり、使用に簡単に慣れることができること。
- **快適性** 長時間においても心身とも疲れずに使用できること。
- **安全性・安心感** 使用に伴う危険が充分低く、安心して使用できること。
- **移動性** 高速、機敏かつ自由に動けること。

専攻研究に用いられた評価項目を見れば、和多田ら [34] は、「操作性」「負担」「乗り心地」「直進性」「加減速」の項目を用いた。一方、関ら [21] は、「力の増幅、アシスト感」「安定性、安心感」「操作性、使いやすさ」の項目を用いた。専攻研究に用いられた評価項目は上に述べる評価基準に該当したり関係がある。

被験者に記入をお願いした下記に述べる項目に対する評価と質問、実験中に得られた被験者からのコメント、実験中の観察、そして被験者に走行してもらったテストコースにおける指標の情報によって被験者評価を行なう。また、参考のために、各被験者の年齢、性別、車椅子経験、利き手と利き足について、実験前に被験者に記入をお願いした。被験者に記入をお願いしたアンケートを付録 B として添付する。

各操作方法の性能は、操作性、快適性、安全性と移動性の4項目で評価するために、被験者に対して次の項目で各操作方法を評価してもらう。

- **操作の使い易さ** 各操作方法が直感であり、簡単に慣れることができるか。
- **快適性** 長時間においても心身とも疲れずに各操作方法で車椅子が使えるか。
- **安全・安心感** 危険を感じずに各操作方法が安心して使えるか。
- **移動性** 各操作方法で高速かつ機敏に動けるか。

各操作方法が利用者に要求する身体努力と集中力を別々に評価することを目的とする。次の項目で各操作方法の使用による被験者への負担を評価してもらう。

- **必要な身体努力** 各操作方法での使用はどれくらいの力や持続性を要求するか。
- **必要な集中力** 各操作方法での使用はどれくらいの集中力を要求するか。

更に、実際の使用に関して、次の項目で各操作方法における非操作手で日常作業の可能性と実用性を評価してもらう。

- 各操作方法で片手で車椅子を操作しながら、非操作手で日常作業ができると思うか。
- **実用性評価** 各操作方法を用いた車椅子は実際に使える物なのか。

予想する上記の項目の関係について述べる。「快適性」は「必要な身体努力」と「必要な集中力」と反比例する。操作性が低下すると要求される集中力が上がるため「操作性」と「必要な集中力」との近い関係があり、また、「操作性」が「必要な身体努力」に影響を与える可能性がある。利用者が車椅子を片手で操作しながら非操作手で日常作業をするためには、車椅子に乗っていることが忘れられるほど操作が直感的であり、快適にかつ安心して車椅子が使えることが重要であると考えられる。非操作手の日常作業への活用に関して、操作が精一杯であれば他の作業をし難くなるため「操作性」に依存する。また、不快感または恐怖感があると車椅子に乗っていることを忘れなくなり、他のことへの集中が低下するため、「快適性」と「安全性」にも依存する。

被験者	年齢	性別	車椅子経験	利き手	利き足	備考
S1	28	男性	なし	右/右	右/右	—
S2	31	男性	なし	右/右	右/右	—
S3	33	女性	なし	右/右	右/右	コース2をジョイスティックで試みを2回、その他の操作方法で1回

表 6.1: 被験者の個人特徴。

被験者数		年齢		車椅子経験	
男性	2人	平均	30.7	利用	0人
女性	1人	標準偏差	2.5	介助	0人
全体	3人			その他	0人

表 6.2: 被験者の全体特徴。

6.5 被験者について

参加同意が得られた被験者は、平均年齢 30.7 歳（標準偏差 2.5 歳）の車椅子の経験の無い男女 3 人である。被験者全員は利き手と利き足が右であると答えた。表 6.1 と表 6.2 に被験者の特徴をまとめる。被験者 S3 は時間の都合のため、コース 2 をジョイスティックで試みを 2 回、その他の操作方法で 1 回走行した。

表 6.1 と表 6.2 における「利き手」と「利き足」は、中点の左側が力に関する利き手または利き足、中点の右側が器用さに関する利き手または利き足である。実験前アンケートの次の質問で被験者に聞いた。

- **重い物を押す時の利き手** 力に関する利き手。
- **文章を書く時の利き手** 器用さに関する利き手。
- **遠くへボールを蹴る時の利き足** 力に関する利き足。
- **ボールを操る時の利き足** 器用さに関する利き足。

操作方法	操作の 使い易さ	快適性	安全・ 安心感	移動性
片手漕ぎ	3.0 (0.0)	2.7 (0.6)	2.7 (0.6)	2.3 (0.6)
片手片足	2.7 (1.2)	2.3 (0.6)	3.0 (1.0)	2.3 (0.6)
ジョイスティック	4.0 (0.0)	4.0 (1.0)	3.7 (0.6)	4.3 (0.6)
両手漕ぎ	4.0 (1.0)	4.3 (0.6)	4.0 (1.0)	3.3 (0.6)

表 6.3: 被験者の段階評価の結果の平均値 (標準偏差)。5 段階。平均値が大きいほど良好。

操作方法	必要な 身体努力	必要な 集中力	非操作手の 活用に関して*	実用性 評価
片手漕ぎ	2.7 (0.6)	2.3 (0.6)	2.7 (0.6)	3.0 (0.0)
片手片足	2.0 (1.0)	3.3 (0.6)	1.7 (0.6)	2.7 (1.2)
ジョイスティック	5.0 (0.0)	3.7 (0.6)	2.7 (0.6)	4.0 (0.0)
両手漕ぎ	3.0 (1.0)	4.3 (0.6)	2.0 (0.0)	3.7 (0.6)

表 6.4: 被験者の段階評価の結果の平均値 (標準偏差)。*: 3 段階、その他の項目: 5 段階。平均値が大きいほど良好。

6.6 被験者の段階評価の結果

被験者の段階評価の結果を表 6.3 と表 6.4 に示す。非操作手の日常作業への活用の可能性は「1 … 3」の 3 段階評価、他の項目は「1 … 5」の 5 段階評価である。評価のばらつきを把握するために、括弧に標準偏差を示す。結果によれば、両手漕ぎとジョイスティックが高く評価され、片手漕ぎ操作と片手片足操作の評価が比較的良かった傾向がある。

片手漕ぎ操作と片手片足操作の操作性と同等に評価された。片手漕ぎ操作では車椅子の動作に自信が無かった場合が少なくなかった。兆しの例として、利用者が直進したい時にハンドリム揺らしに頼ることと、操作間の停止時間が長かったことが挙げられる。一方、片手片足操作ではハンドリムと足の操作を同時に使うことが困難と感じた被験者があった。

両手漕ぎ操作とジョイスティックの快適性がほぼ同等であると評価された。ジョイスティックが身体努力をほぼ要求しないと評価された一方、両手漕ぎ操作より集中力を要求すると評価され、また、ジョイスティックに慣れていないと動きがぎくしゃくになることがある。

片手漕ぎ操作と片手片足操作の快適性がほぼ同等であると評価されたが、片手漕ぎ操作の方が若干高く評価された。片手片足操作の方が身体努力を要求すると評価され、片手漕ぎ操作の方が集中力を要求すると評価されたことと関係があると考えられる。

非操作手の活用に関して、片手漕ぎ操作とジョイスティックが最も高く評価された。しかし、一方、片手片足操作に対する評価が両手漕ぎ操作に対する評価より低く、予想外の結果となった。片手片足操作の快適性と操作性の低い評価が非操作手の活用の可能性に影響を与えたと考えられる。しかし、被験者に非操作手での作業をしてもらう実験を実施しなかったため更なる評価実験が必要である。

実用性が最も高いと評価されたのはジョイスティックである。高い移動性評価、非操作手の活用可能性の評価とジョイスティックに対する親しみがあるからであると考えられる。片手漕ぎ操作の実用性は普通であると評価され、片手片足操作のみより評価が高かった。

操作方法	コース走行完了時間 (s)			
	テストコース 1		テストコース 2	
	試み 1	試み 2	試み 1	試み 2
片手漕ぎ	82.3 (20.5)	74.0 (21.7)	74.0 (10.4)	67.0 (2.8)*
片手片足	66.0 (24.4)	43.0 (7.8)	36.3 (2.9)	36.0 (7.1)*
ジョイスティック	47.3 (10.2)	44.0 (6.6)	38.3 (5.1)	31.3 (11.7)
両手漕ぎ	41.3 (4.6)	45.0 (7.2)	33.7 (5.5)	38.0 (8.5)*

表 6.5: 被験者のコース走行完了時間の平均値 (標準偏差)。*: 被験者 S3 を除いた値。

6.7 被験者のテストコース走行に関する結果

被験者のコース走行完了時間の結果を表 6.3 と表 6.4 に示す。括弧内は標準偏差である。各コースと各操作方法に対する試み 1 と試み 2 の結果を見れば、両手漕ぎ操作以外の場合、被験者が各操作方法での走行に慣れて行く傾向がある。コース走行完了時間は、片手漕ぎ操作の場合の時間が最も長く、最も速い操作方法が両手漕ぎとジョイスティックとの接戦になったという一般的な結果である。

片手漕ぎ操作に関して、時間が最も長い原因は片手漕ぎ操作における誤操作の発生である。また、片手漕ぎ操作における誤操作が再びの誤操作に繋がる場合が少なくなかった。片手漕ぎ操作における時間の高い標準偏差は個人差変動も含むが、誤操作の連続発生の有無が支配的である。

誤操作が最も多かった条件はコース 2 における片手漕ぎ操作であり、被験者が走行中旋回をしようとした時に誤操作の発生が多かった。その原因として、直進操作と旋回操作を識別する操作関数のトルク微分閾値設定が被験者に合わないこと、片手漕ぎ操作方法の理解が低いことと操作に慣れていないことであると考えられる。

また、実験機の右車輪エンコーダ信号が出たり出なかったりした不具合によって、左右エンコーダ信号から算出した直進速度の値が落ちる。そのため、旋回可能モードから静止状態モードに遷移してしまっていたことが考えられ、それによって走行中旋回操作が困難になった可能性もある。

6.8 実験中の観察と被験者からの感想

片手漕ぎ操作では、回転性能が良いという感想をもらった。その理由を聞かなかったが、回転が素早くできること、または回転が十分にアシストされていることが考えられる。また、ハンドリム操作では人間、機械と環境との機械的接続があるため安心感を受け、後方向に進む時も操作が分かりやすいという感想をもらった。

片手漕ぎ操作に関して、2人の被験者から、時計回り旋回と反時計回り旋回のための漕ぐべき方向がわからなかったという感想をもらい、そのことを実験中に観察できた。その理由によって実験中に混乱した場合があった。考えられる原因として、車椅子の物理学を意識しないと漕ぐべき方向わからないと推測する。片手漕ぎ操作は両手漕ぎ車椅子と同じく、左側ハンドリムを前方向に漕ぐことによって前進または右旋回をする。

片手漕ぎ操作における操作の困難に関して、片手漕ぎで走行中旋回ができないことに関して異議が無かった。このことは走行中旋回の操作性向上の必要性があることを明らかにした。また、直進操作時にハンドリム揺らしをした方が確実であるというコメントをもらった。被験者が直進操作に自信が無かったことが多く、ハンドリム揺らしに頼ることがあった。

ジョイスティック操作時の恐怖感に関して、2人の被験者からジョイスティックが怖いという感想をもらった。ジョイスティック操作時に動きがぎくしゃくだった被験者が1人であり、もう1人はハンドリム操作の機械的接続の方を好むという感想がある。しかし、最初はジョイスティックが怖かったが、慣れて行ったというコメントと観察があった。

ジョイスティック操作に関して、後方向の走行中旋回時の誤操作を観察した。ジョイスティックでの走行中旋回は、前方向の場合に左に倒すと反時計回り旋回をするが、後方向の場合に左に倒すと時計回り（反対方向の）旋回をし、そのことが人によって非直感的であると感じる場合がある。

片手片足操作に関して、コース1試み1の時、1人の被験者から足への負担が重いという感想をもらったが、次の試みで片手片足操作が使えるかもという感想をもらい、使用に連れて慣れて行ったことを観察した。

6.9 被験者評価のまとめ

片手漕ぎ操作によって直進、回転、走行中旋回などの操作が可能であり、車椅子の片手操作方法の妥当性がある程度示した。しかし、提案法に操作性問題があり、被験者にとって特に走行中旋回の操作が困難だった。被験者の片手漕ぎ操作の理解度が低かったこともあるが、片手漕ぎの操作性向上の必要性がある。

片手漕ぎ操作の場合の結果は個人差によって異なった。原因として、個人差による腕力と手の器用さの変動、そして車椅子の使い方の理解度がある。このような個人差に対応し、操作性を向上させるために、トルク微分閾値の設定を被験者個人個人に合わせるか、立場の弱い利用者または共通範囲に向けて設定すればより多くの人々が片手漕ぎ操作が使えるようになると考えられる [39, pp.115-118]。その後は利用者が片手漕ぎ操作に使い慣れることである。

ジョイスティックと両手漕ぎ操作の快適性、必要な身体努力と必要な集中力を比較することによって、ハンドリム操作がある程度の身体努力を要求するが集中力を要求しないことがわかった。この結果は、ハンドリム操作の直感的であるという利点を確認する。

第7章

結論

7.1 本研究のまとめ

本研究では、電動アシスト車椅子のための片手漕ぎを提案した。

「直進操作」と「旋回操作」という片手漕ぎ操作を定義することによって、片側ハンドリムのトルクセンサ信号のみによる操作識別を可能にした。定義した直進操作と旋回操作における信号を比較すれば、トルク微分の大きさに対してほぼ完全に分離できるほどトルク微分が異なることを示した。また、トルクの波形の立ち上がり、トルク微分の波形の立ち上がりの方が早いことが確認できる。トルク微分の大きさの違いとトルク微分信号の早期立ち上がりを利用することによって、早期かつ正確な操作識別が可能であることを示した。

操作を識別した後、車椅子の適切な制御をする必要がある。本研究では、直進、回転、低速直進と走行中旋回を可能にする制御系を開発した。それぞれの操作を可能にする物は制御系の構造における指令値生成器と操作モード論理回路である。その結果、直進、回転、低速直進と走行中旋回を実現し、様々な場面における車椅子での移動を可能にした。

被験者実験では、被験者が片手漕ぎ操作によって直進と回転の操作ができ、走行中旋回（特に左旋回）ができた場合があった。しかし、被験者の片手漕ぎ操作の理解度が低かったこともあるが、操作性向上の必要性が明らかになり、今後の課題とする。

また、被験者実験では、ジョイスティックと両手漕ぎ操作の比較によって、ハンドリム操作の直感的であるという利点を示した。また、ジョイスティックが要求する身体努力の評価が満点となり両手漕ぎ操作より身体的に楽だった。ところが、腕の機能維持と健康増進を考えれば、ハンドリム操作の方が身体努力を要求することは短所であるわけではない。

操作性問題があるが、本研究では妥当性のある車椅子の片手漕ぎ操作方法、そしてその操作方法に対応する片手漕ぎ制御系を提案する。

提案した片手漕ぎ制御系は電動アシスト車椅子に向けた制御系であり、同時にハンドリム操作の利点、制御方法の利点とアシストの利点を活かす提案法である。ハンドリム操作では、ハンドリムからの物理的フィードバックによって車椅子の動きや力が把握し易く、操作に役立つ。制御方法では、単一ハンドリムの片手漕ぎ操作を実現し、外乱抑制を有効にすれば傾斜上における使用も可能になる。更に、アシスト機能が利用者の負担を軽減する。

想定する片手漕ぎ制御系の対象者は片麻痺患者だけではなく、車椅子を操作する時にも一つの手を日常作業のために空けたい車椅子利用者である。提案した片手漕ぎ制御系を用いた車椅子の普及まで幾つかの改良点があると考えられるが、片麻痺患者や怪我で片手の機能を失った人を含む車椅子利用者にとって役に立つ提案になることを望む。



図 7.1: 車椅子のウィリー動作 [40] と Independence Technology 「iBot」 [18]。

7.2 今後の課題

車椅子の片手漕ぎ制御に関して、次の課題を挙げる。

- 走行中旋回の操作性向上。
- 個人差によるハンドリム操作特性への影響の調査と対応。
- 片手漕ぎによるウィリー制御の実現。

第 3.10 章では、走行中旋回したい時に直進操作と旋回操作を交互に行なう必要性について述べた。また、被験者実験で明らかになったように、走行中旋回の操作性向上が必要である。操作性向上の方法として、指令値生成器における回転成分アシストを大きくすることや、トルク微分閾値の再設定が考えられる。最終的に、利用者が車椅子を操作していることを忘れられるほど操作性を向上させることを目標とすべきである。

第 6 章にまとめたように、片手漕ぎ操作の場合の結果は個人差によって異なった。個人差による腕力と手の器用さの変動、そして車椅子の使い方の理解度がある。本研究では利用者の使える片手が健常であることを前提にしたが、片麻痺患者の非麻痺手の力と器用さが個人差によって異なる。また、使える片手が健常であっても片手漕ぎ操作に十分な器用さを持ってない利用者があることが被験者実験でわかった。このような個人差に対応し、操作性を向上させるために、トルク微分閾値の設定を被験者個人個人に合わせるか、立場の弱い利用者または共通範囲に向けて設定すればより多くの人々が片手漕ぎ操作が使えるようになると考えられる。使い慣れに関して、被験者の推定によれば最大 2 週間で片手漕ぎ操作が使えるようになる。

車椅子のウィリー（前輪を浮上させる）動作は、不整地での走行、段差越え、下り坂走行の時の前方転倒防止、上向き視線の時の首の負担軽減など、様々な場面で使える重要な運動技能である [28]。しかし、本研究ではウィリー操作をまだ考慮されず、直進操作と旋回操作だけではウィリー動作に必要なピッチのバランス制御ができない。ウィリー操作を実現するためには、まず操作モード論理回路に「ウィリー」モードなどの新たな操作モードを作成し、次に「ウィリー」モードへの適切な往復遷移条件を考える必要がある。

謝辞

私を学生としてお受け入れ、3年間丁寧に指導頂いた指導教員の堀洋一教授に心より厚くお礼申し上げます。研究に関するご指導とご助言をもとより、私の研究が有意義であるというお励まし、更に人生観に関するお言葉まで頂き、深く感謝致します。当然であるように聞こえますが、「朝起きて夜になったらちゃんと寝る」というお言葉を頂き、仕事における生産性、健康そして仕事と生活とのバランスの重要性を意識するようになりました。この3年間に「秘密兵器」の活用例が少ないですが、仕事の場面だけではなく人生のあらゆる場面でもっと活用したいと思います。

研究に関して様々なご指摘を頂き、研究者のあるべき姿をご自身の情熱でお伝え頂いた藤本博志准教授に深く感謝致します。発表会の場でいつも鋭くご指摘頂き、良質研究のための追究をお励まし頂きました。研究の場だけではなく、研究室の人同士でスポーツをする時や飲み会の時など遊びの場でもその情熱溢れる姿で振る舞い、それを見て感動しました。

研究に不可欠な物をご提供頂いた内田利之技官に深く感謝致します。実験機や設備などを頂き、そして飲み会の場をお盛り上げ頂き、研究室にとって不可欠な存在でした。研究が円滑となるように事務仕事を素早くして頂いた越智由里子秘書、松島陽子秘書と広盛洋子秘書にお礼申し上げます。

私が研究室に入ってから約2年間福祉ロボットチームを積極的にリードして下さった呉世訓助教に心よりお礼申し上げます。研究室にいらっしゃった時に実験時に立ち会ってご指導を頂き、米国と韓国からでも定期的に Skype とメールを通じてご指導とお励まし頂き、大変お世話になりました。

車椅子の研究を積極的にリードして下さった金佳英氏に心より感謝致します。私の研究室での1年目、一緒に車椅子実験機の製作に手伝いました。私が手伝った時に工作をお教え、そして本研究に使用した実験機の殆ど全ての製作をして頂きました。そのほか、発表会前または学会発表前の度に非常に細かいご指摘を頂き、私の研究について議論させて頂きました。更に、私の研究が凄いと信じて頂いたことが非常に大きな励ましになり、私の研究にとって欠かせない存在でした。

チームミーティングと発表練習の場で議論、細かいところまで私の発表や資料に対してご指摘とご助言、発表資料や論文のご校正と励ましのお言葉を頂き、日常的にも話し合っただけで下さった他の福祉ロボットチーム構成員の Valerio Salvucci 氏、金潤河氏、園川真太氏、青木元伸氏、東野昌記氏、Carlos Alberto Miura 氏と中村隆央氏に深く感謝致します。

この3年間、堀・藤本研究室の教員と学生の皆様に大変お世話になり、お礼申し上げます。研究に関する議論、発表会でのご指摘やご助言、そして日々の碎けた話により、研究室で有意義な時間を過ごすことができました。研究や工作に関して丁寧に助言頂いた南康鉉氏、王亜飛氏、加藤昌樹氏、朱洪忠氏、阮平明氏と前田健太氏に感謝致します。また、私みたいに同じ時期に日本に来て一緒に研究室内外の時間をお過ごし頂いた João Marcus Abreu Curti、許金英 (Cammy) 氏と Vissuta Jiwariyavej (Paopao) 氏に感謝致します。

お金の問題について悩まずに研究に集中できたことは文部科学省のおかげです。国費留学生制度による経済的支援が無ければ本研究が可能でなかったことであり、深く感謝致します。私が国費留学生として日本に来たことが、私の第二の国である日本のためになるように、世界中において日本のいい代表になって活躍したいと思います。

成城大学の阿部友和助教に理学療法士の立場としてリハビリテーションセンターの見学の機会をご提供頂き、深く感謝致します。車椅子と福祉の実際について色々見ることができ、参考になりました。更に、私の被験者実験にご協力頂くためにお時間をお分け頂いた皆様に心から感謝致します。他の方に車椅子にご試乗頂くことにより、車椅子使用と片手操作における問題などが把握でき、大変貴重な機会でした。

柏キャンパスで私の日常生活をお支え頂いたサステイナビリティ学教育プログラムの小貫元治特任准教授と同氏のご家族に深く感謝致します。私が柏インターナショナルロッジに住んでいた2年間、ロッジの代表者としてご活躍頂き、何回も歓迎会と送別会をご開催頂き、ロッジ生活を楽しく盛り上げて頂きました。更に、40周年記念旭連会舞踊発表会で一緒に出演させて頂き、「おいしい三陸応援団」東北出張に参加させて頂きました。

新領域創成科学研究科教務係の皆様、先端エネルギー工学専攻の山崎弘美氏、柏インターナショナルオフィスの吉田雅深氏、珈琲をお淹れ頂いた山本幸子氏、日本舞踊をお教えた旭連富泉先生、毎朝ロッジを綺麗に掃除して頂きながら会話させて頂いた白石氏、更にロッジ生活をお支え頂いたロッジ事務室の岡田千尋氏、杉野喜美雄氏と松浦徹氏、更に、一緒に学生生活を盛り上げ、支えて頂いた学生友達の皆様に感謝致します。

日本にいる友達と親戚は私にとって心強い存在となり、この3年間大変お世話になりました。私の英会話生徒になって頂いた梅津静子氏と同氏のご家族、パルクールを紹介して頂き、一緒に練習させて頂いた Zoltán Vass 氏とトレーサーの皆様、母のお友達の平野嘉洋氏と大西宏枝氏、従兄の山下二郎氏と同氏のご家族、愛知県在住の幼馴染の山本ご家族と浅田ご家族、大阪で度々お世話頂いた親戚達、関西でいつも会ったり励まして頂いた西山陽子氏と Peter Rogers 氏、日本在住のメルボルン繋がり他の友達、更に鹿児島県でお世話頂いた友人と親戚に心より感謝致します。皆様のおかげで、日本で充実した生活を送り、沢山の素敵な思い出ができました。

I would like to thank with the deepest of gratitude my good friend Jinn Men Leong and loving girlfriend Mary Mar Noblezada. They gave me the courage, advice, support and love that allowed me to persevere, without such this research would not have been possible. Also, I express my gratitude to all my friends and relatives in Australia who supported me from afar and warmly welcomed me back every time I visit Australia.

Lastly, to my dear family, John Payne, Chizuko Payne and Satoshi Payne, I would like to say thank you with all my heart. By allowing me to take the opportunity to go to Japan, I was able to experience life at my second home as well as research, and for that I thank them for their patience and understanding. Through Skype sessions, emails and the occasional visit to Japan (thanks Sato for the surprise visit!), they gave me plenty of valuable encouragement, guidance, love and Aussie goodies that made my achievements here possible. I hope that my experience here will lead me to become a person driven by positivity and love, an active global citizen, as well as a great representative of my two homes, Australia and Japan, that will make my family proud.

ペイン 孝二 / Koji Payne

2013年02月

参考文献

- [1] Rory A. Cooper. “Wheeled Mobility and Manipulation Technologies”. The Bridge: linking engineering and society, Vol.39, No.1, pp.13–20. 2009.
- [2] Rory A. Cooper, Emily E. Teodorski, Michelle L. Sporer, Diane M. Collins. “Manual Wheelchair Propulsion Over Cross-Sloped Surfaces: A Literature Review” Assistive Technology: The Official Journal of RESNA, Vol.23, Issue.1, pp.42–51. 2011.
- [3] World Health Organization. “Guidelines on the provision of Manual Wheelchairs in less resourced settings”. ISBN 9789241547482. 2008.
- [4] 独立行政法人 日本学生支援機構. “肢体不自由”. 教職員のための障害学生修学支援ガイド, 平成 23 年度改訂版. 2012.
- [5] 財団法人 保健福祉広報協会. “福祉機器市場の今後の展開に関する調査”. H.C.R. 国際保健福祉レポート. 2008.
<http://www.hcrjapan.org/report/>
(2013 年 01 月に参照)
- [6] 内閣府. “障害者施策の概況”. 障害者白書, 平成 24 年版, 第 1 章, 2012.
- [7] 社団法人 日本福祉車両未来研究会. “統計調査 ～福祉をとりまく状況～”.
<http://www.294mirai.com/toukei.html>
(2013 年 01 月に参照)
- [8] Ulrich Alber GmbH. “e-motion”.
<http://www.alber.de/en/products/mobility-wheelchair-emotion.html>
(2013 年 01 月に参照)
- [9] Glide Rehabilitation Products. “Glide Power Assist System”.
<http://www.glide.com.au/products.php?id=39>
(2013 年 01 月に参照)
- [10] ヤマハ発動機 株式会社. “JW-II — 電動車いす”.
<http://www.yamaha-motor.jp/wheelchair/lineup/jw2/>
(2013 年 01 月に参照)
- [11] Max Mobility. “SmartDrive”.
<http://max-mobility.com/products/smardrive/>
(2013 年 01 月に参照)

-
- [12] Rory A. Cooper, Rosemarie Cooper. “Trends and Issues in Wheeled Mobility Technologies”. Proceedings of the International Workshop on Space Requirements for Wheeled Mobility. 2003.
<http://www.ap.buffalo.edu/ideaproto/Space%20Workshop/index2.asp>
(2013年01月に参照)
- [13] William Mark Richter. “Handrim compliance and the wheelchair user”. Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering Department, Stanford University. 2004.
- [14] The Spinal Cord Injury Rehabilitation Evidence. “Pain management”.
<http://www.scireproject.com/book/export/html/16>
(2013年01月に参照)
- [15] The Center for Universal Design. “Universal design principles”. North Carolina State University. 1997.
http://www.ncsu.edu/www/ncsu/design/sod5/cud/about_ud/udprinciples.htm
(2013年01月に参照)
- [16] L.H.V. van der Woude, H.E.J. Veeger, A.J. Dallmeijer. “Manual Wheelchair Propulsion”. *Biomechanics in sport: performance enhancement and injury prevention*, International Olympic Committee, pp.609–636. 2000.
- [17] Global Research Innovation and Technology. “Leveraged Freedom Chair”.
<http://gogrit.org/index.html>
(2013年01月に参照)
- [18] Independence Technology. “iBot”.
<http://www.ibtow.com/>
(2013年01月に参照)
- [19] D. Ding, R. A. Cooper. “Electric powered wheelchairs”. IEEE Control Systems Magazine, Vol.25, No.2, pp.22–34. 2005.
- [20] 金 佳英. “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”. 修士学位論文, 東京大学 大学院新領域創成科学研究科. 2012.
- [21] 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, 産業応用部門誌, Vol.124–D, No.3, pp.318–323. 2004.
- [22] 畠 直輝, 関 弘和, 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2): 重心位置推定と位相平面に基づく可変アシスト比制御”. 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, Vol.124–D, No.7, pp.699–705, 2004.
- [23] 佐藤 仁彦. “パワーアシスト車椅子におけるウィリー機能の実現”. 学士学位論文, 東京大学 工学部. 2002.
- [24] Hirokazu Seki, Takeaki Sugimoto, Susumu Tadakuma. “Novel Step Climbing Control for Power Assisted Wheelchair Based on Driving Mode Switching”. Proceedings of the 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, pp.3827–3832. 2006.

-
- [25] Hirokazu Seki, Kenji Ishihara, Susumu Tadakuma. “Novel Regenerative Braking Control of Electric Power-Assisted Wheelchair for Safety Downhill Road Driving”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.566, No.5, pp.1393–1400. 2009.
- [26] Seiichiro Katsura, Kouhei Ohnishi. “Semiautonomous Wheelchair Based on Quarry of Environmental Information”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.53, No.4, pp.1373–1382. 2006.
- [27] 呉 世訓, 堀 洋一. “車椅子における横方向外乱抑制を応用した片手漕ぎの実現”. 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.23, 3H33. 2005.
- [28] R. Lee Kirby, Cher Smith, Roxanne Seaman, Donald A. Macleod, Kim Parker. “The manual wheelchair wheelie: A review of our current understanding of an important motor skill”. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, Vol.1, No.1–2, pp.119–127. 2006.
- [29] K.Arshak, D.Buckley, K. Kanewaran. “Review of Assistive Devices for Electric Powered Wheelchairs Navigation”. ITB Journal, Vol.13, pp.13–23. 2006.
- [30] National Public Website on Assistive Technology. “Alternative wheelchair control”. http://atwiki.assistivetech.net/index.php/Alternative_wheelchair_control (2013 年 01 月に参照)
- [31] Wheelchair.ca. “Power Wheelchair Features and Components”. <http://wheelchair.ca/drives.php#.UQSt9rYuLBc> (2013 年 01 月に参照)
- [32] Marc’s Mobility. “Joystick controllers”. <http://www.marcsmobility.com/powerchair-joystick-controllers.html> (2013 年 01 月に参照)
- [33] 畠 直輝. “制御工学応用による移動用福祉機器の高機能化に関する研究”. 博士学位論文, 東京大学大学院 工学系研究科. 2004.
- [34] 和多田 雅哉, 中村 文俊, 金 容載. “片手漕ぎパワーアシスト車椅子の駆動制御”. 日本 AEM 学会誌, Vol.17, No.1, pp.108–113. 2009.
- [35] Toshihiko Yasuda, Takeshi Nakanishi, Shougo Kuwabara, Daisuke Furikado, Naoyuki Kawakubo, Katsuyuki Tanaka. “A One Hand Drive Wheelchair with New Manipulation Mechanism Constructed by a Triple Ring and with Assist Functions”. InTech, ISBN 978-953-7619-00-8. 2006.
- [36] Track Engineering Pty. Ltd. “TrackChair”. <http://www.trackchair.com.au/> (2013 年 01 月に参照)
- [37] Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, Chih-Jen Lin. “A Practical Guide to Support Vector Classification”. 2010. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf> (2013 年 02 月に参照)

- [38] Tristan Fletcher. “Support Vector Machines Explained”. 2009.
http://www.tristanfletcher.co.uk/SVM_Explained.pdf
(2013年02月に参照)
- [39] 横溝 克己, 小松原 明哲. “エンジニアのための人間工学”. 日本出版サービス, 改訂版,
ISBN: 978-4-88922-115-2. 2007.
- [40] Wheelchair Life, Inc. <http://www.wheelchairlife.net/>
(2013年02月に参照)

発表文献

1. ペイン 孝二, 金 佳英, 呉 世訓, 堀 洋一. “直進と回転を分離した運動記述法に基づく電動アシスト車椅子の片手漕ぎ制御”. 平成 24 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-12-165. 2012.

付録 A

運動と動特性に関連する導出

図 A.1 に座標系 B と座標系 S の定義、座標系 B における車体重心位置と左右車輪位置、座標系 S におけるヨー角度と直進・回転速度、そして一様傾斜角度を示す。座標系 B は x_1^B 軸と x_2^B 軸がそれぞれ車椅子の前方向と左方向に向き、原点が車軸中心位置と一致するように定義する。 (x_1^B, x_2^B) 平面において、車体重心位置と左右車輪位置が原点からそれぞれ距離 L と距離 $W/2$ で離れている。座標系 S は x_1^S 軸と x_2^S 軸がそれぞれ一様傾斜の上り坂方向と 90 度反時計回り方向に向くように定義する。 ψ は x_1^S 軸に対する反時計回りのヨー角度である。一様傾斜角度 Ω を非負と仮定しても一般性を失わない。

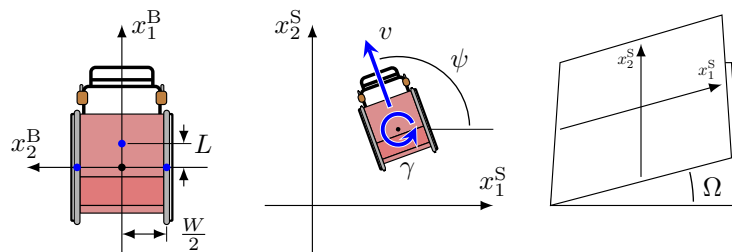


図 A.1: 座標系 B と座標系 S に関連する定義、一様傾斜角度。

A.1 車椅子の直進運動と回転運動の導出

車椅子が並進移動しないことを仮定するため、車椅子がヨー角度 ψ 方向に速度 v で進む時に、車軸中心の点が式 (A.1) のように座標系 S と座標系 B における速度ベクトルを持つ。

$$\dot{x}^S = \begin{bmatrix} v \cos \psi \\ v \sin \psi \\ 0 \end{bmatrix} = R_3(\psi) \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

しかし、ヨー回転速度 γ によって、車椅子の車体と左右車輪が式 (A.1) と異なる速度ベク

トルを持つ。回転を考慮すると、車体と左右車輪の速度ベクトルが式 (A.2) のようになる。

$$\begin{aligned}
 \text{body: } \dot{x}^S &= R_3(\psi) \begin{bmatrix} v \\ L\gamma \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \text{left wheel: } \dot{x}^S &= R_3(\psi) \begin{bmatrix} v - \gamma W/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \text{right wheel: } \dot{x}^S &= R_3(\psi) \begin{bmatrix} v + \gamma W/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

式 (A.2) のような車体と左右車輪の速度から、式 (A.3) のように車椅子の運動エネルギーが求まる。ただし、総質量 M_v と総ヨー慣性モーメント I_γ を式 (A.4) にまとめる。

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{2}M_B(v^2 + L^2\gamma^2) + \frac{1}{2}M_W(v - \gamma W/2)^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2}M_W(v + \gamma W/2)^2 + \frac{1}{2}(I_{B3} + 2I_{W3})\gamma^2 \\
 &= \frac{1}{2}M_v v^2 + \frac{1}{2}I_\gamma \gamma^2
 \end{aligned} \tag{A.3}$$

$$M_v = M_B + 2M_W$$

$$I_\gamma = (I_{B3} + M_B L^2) + 2 \left(I_{W3} + M_W \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right) \tag{A.4}$$

車椅子が式 (A.5) のように重力による位置エネルギーを持つ。右辺の第一項は x_1^S 軸（上り坂）方向への並進移動によって位置エネルギーが増加することを表す。第二項はヨー角度 ψ による位置エネルギーの正弦的な変化を表し、車椅子が上り坂方向に向く時に位置エネルギーが最も高く、下り坂方向に向く時に位置エネルギーが最も低い。

$$V = M_v g x_1^S \sin \Omega + M_B g L \sin \Omega \cos \psi \tag{A.5}$$

一般化座標 $\zeta = [x_1^S \ x_2^S \ \psi]^\top$ と Lagrangian 変数 $U - V$ で Euler-Lagrange 方程式を適用すると式 (A.6) の結果を得る。

$$\frac{d}{dt} \frac{dU}{d\zeta} = \begin{bmatrix} M_v \dot{v} \cos \psi - M_v v \gamma \sin \psi \\ M_v \dot{v} \sin \psi + M_v v \gamma \cos \psi \\ I_\gamma \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad \frac{dV}{d\zeta} = \begin{bmatrix} M_v g \sin \Omega \\ 0 \\ M_B g L \sin \Omega \sin \psi \end{bmatrix} \tag{A.6}$$

並進移動の成分に対して回転行列 $R_3^{-1}(\psi)$ の変換を行ない、駆動力 \bar{f}_{LR} 、前輪外乱 \bar{d}_{LR} と各車輪からの粘性力を加えた後、式 (A.7) のような車体動特性が求まる。

$$\begin{aligned}
 M_v \dot{v} + 2(D_f + D_d)v &= (\bar{f}_{L1} + \bar{f}_{R1}) + \bar{d}_{v1} - M_v g \sin \Omega \cos \psi \\
 M_v v \gamma + 2D_d E_1 \gamma &= (\bar{f}_{L2} + \bar{f}_{R2}) + \bar{d}_{v2} + M_v g \sin \Omega \sin \psi \\
 I_\gamma \dot{\gamma} + 2 \left(D_f \left(\frac{W}{2} \right)^2 + D_d E^2 \right) \gamma &= \frac{W}{2} (-\bar{f}_{L1} + \bar{f}_{R1}) + \bar{d}_\gamma + M_B g L \sin \Omega \sin \psi
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

直進成分 ($M_v \dot{v}$ の式) と回転成分 ($I_\gamma \dot{\gamma}$ の式) を取り、駆動力を $\bar{f}_{L1} = f_L$ と $\bar{f}_{R1} = f_R$ とおき、式 (A.8) のように粘性係数と外乱をまとめると、式 (2.5) の車体動特性を得る。

$$\begin{aligned}
 d_v &= \bar{d}_{v1} - M_v g \sin \Omega \cos \psi \\
 d_\gamma &= \bar{d}_\gamma + M_B g L \sin \Omega \sin \psi \\
 D_v &= 2(D_f + D_d) \\
 B_\gamma &= 2 \left(D_f \left(\frac{W}{2} \right)^2 + D_d E^2 \right)
 \end{aligned} \tag{A.8}$$

車体運動と車輪運動の方程式 (2.5) から車輪速度による式 (2.6) を導出する時、式 (A.9) のように慣性モーメントと粘性係数がまとめられ、式 (A.10) のように外乱がまとまる。ここでは外乱は前輪と重力の影響のみであると仮定したが、車椅子のモデル化誤差も外乱として取り入れることができる。

$$\begin{aligned}
 I_C &= I_{W2} + \frac{1}{2} M_v R^2 \\
 I_D &= I_{W2} + \frac{1}{2} I_\gamma \left(\frac{2R}{W} \right)^2 \\
 B_C &= B_W + \frac{1}{2} D_v R^2 \\
 B_D &= B_W + \frac{1}{2} B_\gamma \left(\frac{2R}{W} \right)^2
 \end{aligned} \tag{A.9}$$

$$\begin{aligned}
 d_C &= \frac{d_{WL} + d_{WR}}{2} + \frac{R}{2} d_v \\
 d_D &= (-d_{WL} + d_{WR}) + \frac{2R}{W} d_\gamma
 \end{aligned} \tag{A.10}$$

付録 B

被験者に記入をお願いした実験 前と実験後のアンケート

被験者に記入をお願いした実験前と実験後のアンケートを次のページ以降に添付する。

実験前のアンケート

Pre-experiment questionnaire

氏名 Name			
年齢 Age		性別 Gender	男 M / 女 F

文章を書く時の利き手 Preferred hand when writing	左 left / 右 right
重い物を押す時の利き手 Preferred hand when pushing something heavy	左 left / 右 right
遠くへボールを蹴る時の利き足 Preferred foot when kicking a ball afar	左 left / 右 right
ボールを操る時の利き足 Preferred foot when controlling a ball	左 left / 右 right

車椅子の経験（ご利用になったことがある場合） Wheelchair experience (if you have ever used a wheelchair)	
車椅子のご使用の支障になる可能性のある問題をお持ちですか？ Do you have any problems that may affect your ability to use a wheelchair?	
今現在の体調はいかがですか？ How is your physical condition right now?	

実験後のアンケート

Post-experiment questionnaire

各システムに対して、次の項目を評価して下さい： For each system, please rate the following:						
操作の使い易さ Ease of operation	片手操作 One-handed	5	4	3	2	1
	片手片足操作 One-hand one-foot	5	4	3	2	1
	ジョイスティック Joystick	5	4	3	2	1
	両手操作 Two-handed	5	4	3	2	1
快適性 Comfort	片手操作 One-handed	5	4	3	2	1
	片手片足操作 One-hand one-foot	5	4	3	2	1
	ジョイスティック Joystick	5	4	3	2	1
	両手操作 Two-handed	5	4	3	2	1
安全・安心感 Feeling of safety	片手操作 One-handed	5	4	3	2	1
	片手片足操作 One-hand one-foot	5	4	3	2	1
	ジョイスティック Joystick	5	4	3	2	1
	両手操作 Two-handed	5	4	3	2	1
移動性 Mobility	片手操作 One-handed	5	4	3	2	1
	片手片足操作 One-hand one-foot	5	4	3	2	1
	ジョイスティック Joystick	5	4	3	2	1
	両手操作 Two-handed	5	4	3	2	1

5	4	3	2	1
非常に良い	良い	普通	悪い	非常に悪い
Very good	Good	Average	Poor	Very poor

片手操作システム を搭載した車椅子に慣れるまでどれくらいの練習が必要と感
じますか？

How much practice do you feel is required in order to get used to the wheelchair
with the one-handed system?

片手操作システム に関して、何を改良すべきだと思いますか？

Regarding the one-handed system, what do you think should be improved?

ハンドリムのご使用について、何か利点があると感じますか？

もしあると感じればお教え下さい。

Do you feel that there are any benefits of using the handrim? If so, please explain.

もし他にご意見・ご感想があればご記入下さい。

If you have any other opinions or thoughts, please express them below.

各システムに対して、次の項目を評価して下さい：

For each system, please rate the following:

実用性評価 Practicality rating	片手操作 One-handed	5	4	3	2	1
	片手片足操作 One-hand one-foot	5	4	3	2	1
	ジョイスティック Joystick	5	4	3	2	1
	両手操作 Two-handed	5	4	3	2	1

5

非常に良い

Very good

4

良い

Good

3

普通

Average

2

悪い

Poor

1

非常に悪い

Very poor

ご協力ありがとうございました！

Thank you very much for your cooperation!

ペイン 孝二 / Koji Payne