

平成26年3月修了
博士（工学）学位論文

歩行支援ロボットの運動制御に関する研究

Motion Control of a Walking Support Robot

平成26年3月20日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
基盤工学コース

学籍番号1156013

王 義娜

WANG Yina

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究内容.....	5
1.4 本論文の構成.....	7
参考文献.....	11
第 2 章 デジタル加速度制御法に基づいた制御法の開発	13
2.1 緒言.....	13
2.2 駆動力が重心位置に作用する歩行支援ロボットのモデル.....	15
2.3 非線形デジタル加速度制御法の開発.....	23
2.3.1 制御則の設計.....	23
2.3.2 制御パラメータの選択方法.....	24
2.4 シミュレーションによる検討.....	26
2.5 実験による検討.....	35
2.6 結言.....	44
参考文献.....	45
第 3 章 動力学式における慣性行列のリアルタイム同定法	46
3.1 緒言.....	46
3.2 慣性行列を同定するデジタル加速度制御系.....	47
3.3 シミュレーション及び考察.....	50
3.4 実験及び考察.....	54
3.5 結言.....	63

参考文献.....	64
第4章 重心情報を必要としないデジタル加速度制御法の開発.....	65
4.1 緒言.....	65
4.2 駆動力が中心に作用する動力学の導出.....	67
4.3 デジタル加速度制御系の設計.....	71
4.4 実験による検討.....	77
4.5 第2, 3と本章実験結果の比較.....	87
4.6 結言.....	89
参考文献.....	90
第5章 要支援者方向意図の同定.....	91
5.1 緒言.....	91
5.2 荷重センサーの装着と移動方向意図の概念.....	92
5.3 距離型ファジィ推論法を用いた方向意図の推定.....	94
5.3.1 前腕荷重の特性と方向意図との関連性.....	94
5.3.2 プロダクションルールによる知識表現.....	98
5.3.3 距離型ファジィ推論法により方向意図の同定.....	101
5.3.4 後件部角度の決定について.....	103
5.4 知識半径の導入.....	105
5.5 実験による考察.....	107
5.5.1 方向意図同定法の検証.....	107
5.5.2 知識半径に関する考察.....	109
5.5.3 指定された経路の追従.....	111
5.6 結言.....	114

参考文献.....	115
第 6 章 制御法に基づいて要支援者方向意図の実現.....	116
6.1 緒言.....	116
6.2 同定した方向による目標経路・軌道の計画.....	117
6.2.1 慣性座標系で方向意図角の定義.....	117
6.2.2 経路・軌道計画の説明.....	118
6.3 制御法に基づいて方向意図の追従実験と考察.....	122
6.4 結言.....	129
参考文献.....	130
第 7 章 結論.....	131
謝辞.....	136
本論文に関する研究業績.....	138

第1章

序論

1.1 研究背景

歩行機能は人間にとって非常に重要な能力であり、健康を維持するとともに日常生活を支える大きな要素である[1]。歩行というのは直立姿勢の維持とバランスの保持、足踏み運動という3つの基本的機能が組織化されて成り立っている[2]。高齢になると、筋力低下、バランス障害、関節の可動域制限などの原因で、歩行の不安定性が生じ、歩行を行う環境への適応能力低下により、転倒の危険性が高くなってしまう[3]。近年日本では、急速に進んでいる高齢化社会につれて、高齢者は大幅に増えている。また、疾病や事故によって歩くこと、立ち上がることが困難になり、自立歩行機能を失う人も増えている。この歩行機能を失った人の便利な日常生活と健康を維持するためには、歩行を続けることが必要である。一方、少子化社会において、若年人口の減少による介護者の不足が進んでいるので、本来軽度の歩行障害者や長距離歩行の困難な高齢者は「寝かされ老人」となり、結果として急速に寝たきり状態に陥ってしまうという問題が起きている[4]。そこで、軽度の歩行障害者の重度化予防に有効で且つ歩行機能が低下し・失う人の健康的で、自立した歩行機能を実現するために、様々な歩行補助用具が強く求められている。

現在、国内・国外で開発し、使用した歩行補助用具は図1.1に示すように杖、歩行器、歩行車がある[5]。図1.1(a)に示すのは歩行支援用杖の一種多脚型杖である。歩行補助用杖は屋内と屋外で使用でき、骨折、捻挫、股関節症、下肢切断や筋力低下などの方々に有効である。しかし、歩行補助用杖は使用者の力により移動するため、杖が重い時や重度障害者に対する時、杖は有効性が無い。

歩行器というのは、図1.1(b)に示すように、四脚のフレーム構造でできている歩行補助具である。歩行器の特徴として、前脚もしくは前輪を前に出しすぎると、バランスを崩しやすくなるので、おおよその目安として足を一步踏み出す

程度の長さで前に出すと良い。歩行車は図1.1(c)に示すように、立位バランスが良く、全身の筋力が低下している方に有効である。独歩、杖、歩行器で歩けるが、外出など持続した歩行が困難な方に有効である。歩行器と歩行車も使用者からの力により移動する、重度な患者に不便である。また歩行車は前後方向の移動しかできず、狭い場所で、不便である。



図 1.1 歩行補助用具



図 1.2 ロボットスーツ HAL

サイバーダイナミクス株式会社は歩行支援用ロボットスーツ HAL を開発し[6], 図 1.2 示す。しかし、このロボットスーツは装着時間がかかる及び転倒の危険がある。従って、看護師等の移乗補助による負担を軽減することができ、なおかつ患者毎の状態に合わせて多様な便利な支援を行う必要があるため、重度障害者には、歩行補助用具からの動力により移動できる補助用の新しい歩行支援ロボットが強く求められる。

1.2 研究目的

我々は、近年、要介護人口の急増と若年人口の減少による、「老老介護」という大きな社会問題に対して、立位姿勢保持筋力の不十分な下肢障害者が寝たきりにならないように、なるべく下半身運動機能の残存能力を生かす自立歩行支援ロボットを開発している[7].

歩行支援ロボットの概要を図 1.3 に示す. 狭い環境でもスムーズに歩行支援を行うには、開発した小型メカナムホイールを底角にそれぞれ一個ずつ取り付けることで、全方向移動機能を実現している.

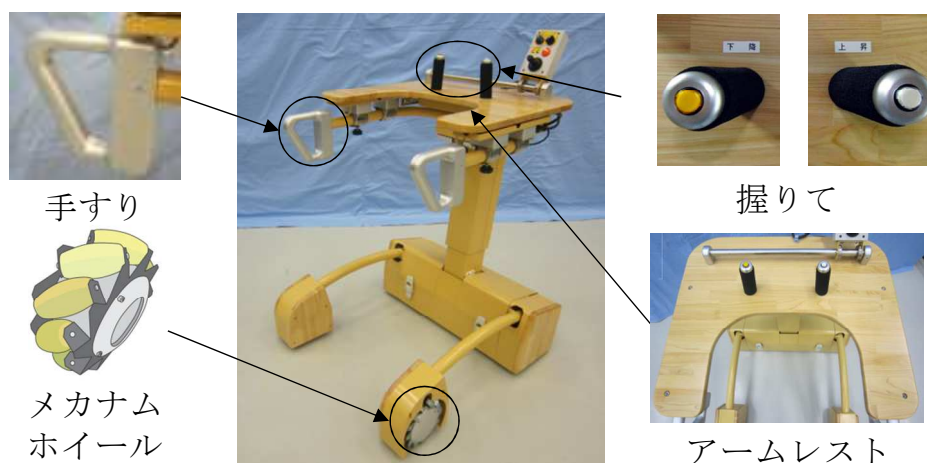


図 1.3 歩行支援ロボット

図 1.4 に示すように、要支援者は、アームレストに肘を掛けることにより、下半身の負担が減らされ、室内では自立歩行で移動する[8][9][10]. 握り手は、走行中での安定性を保つと同時に、上部にアームレストの上下方向の高さをコントロールするボタンを設けており、異なる身長や立ち上がり支援に対応できる. 現場調査した結果、実際の歩行は、ソファや椅子やベッドから立ち上がったから行う動作であるため、図 1.5 に示すように立ち上がりを支援するために、アームレストの後下方に手すりを取り付ける. 実際の自立歩行では、図 1.6, 図 1.7 に示す、アームレストの裏側に取り付けた四つの荷重センサーからの力覚情報を利用して、要支援者の方向意図を推定する.



図 1.4 歩行支援の様子



図 1.5 立ち上がり支援の様子

本研究は、開発した歩行支援ロボットを用いて、使用者に安全・便利な歩行支援動作を行うため、ロボットの実用化に不可欠な制御法と知能化を研究している。

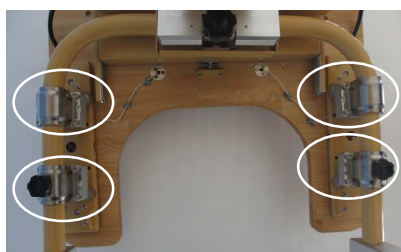


図 1.6 横から見た荷重センサー

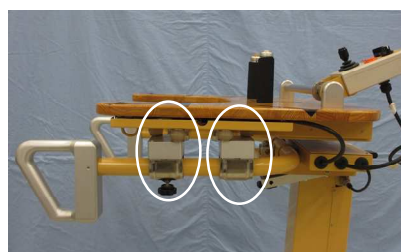


図 1.7 底から見た荷重センサー

1.3 研究内容

ロボットは、歩行を支援する時に、周囲の物や人にぶつけないように、高精度な経路追従制御精度が必須であり、また、適切に歩行支援を行うために、要支援者の行こうとする方向、つまり方向意図を正確に同定する必要がある。従って、本論文は、障害者や高齢者の自立生活に最も重要とされている、歩行を支援するロボットの高精度制御法と、使用者の歩行方向意図の同定法を開発したものである。

制御法の開発に関して、歩行支援を実施する時、主に三つの原因はロボットの経路追従精度に影響する。まず、歩行支援ロボットを室内で使用する時、地面条件が変化する可能性がある。異なる地面条件、例えば絨毯や畳やフローリングなどで移動する時、受ける摩擦力が異なる。また、メカナム・ホイールが受ける摩擦力は進行方向に依存する非線形で時変的な摩擦力である。そして、床からの非線形摩擦力は、ロボットの指定される経路追従精度に最も悪影響となる原因である。ロボットが絨毯や畳やフローリングなどの摩擦係数の異なる地面における走行精度を確保することは、困難とされています。そこで、私は、この摩擦の変化に対応できるように、適切な制御法を開発し、摩擦係数の異なる地面における走行精度を向上させます。また、異なる要支援者によるロボットに掛ける荷重の変化と、重心位置の変化も、歩行支援ロボットの運動精度に影響する。私は、開発した摩擦力に対応できた制御法に基いて、重心位置・荷重変化の問題に対応する制御方法を開発し、この二つの制御方法を融合することにより、摩擦力、重心位置・荷重変化問題を一括で対応できるように、ロボットの追従精度を向上させた。

知能化においては、歩行支援ロボットは、適切な歩行支援を行うために、要支援者の行こうとする方向、つまり歩行意図を正確に認識する必要がある。ジョイスティックやタッチパネルなどの方向指示装置を利用すれば、方向意図を歩行支援ロボットに伝えることができるが、立位姿勢保持筋力の不十分な下肢障害者は、歩行しながら、これらのデバイスを操作するのが困難である。そこで、私は、特に操作することを意識せず、要支援者の方向意図を認識するこ

とができないかと模索した結果，要支援者のアームレストに肘を掛ける力の情報を適切に利用すれば，要支援者の方向意図同定が可能であることが判った．従って，私は，要支援者からアームレストに掛ける等価荷重を荷重センサーで測定し，荷重と重心の位置情報に基づいて，距離型ファジィ推論法を用いて，要歩行支援者の方向意図同定法を提案する．

1.4 本論文の構成

本論文の構成ブロック線図は図 1.8 に示す。

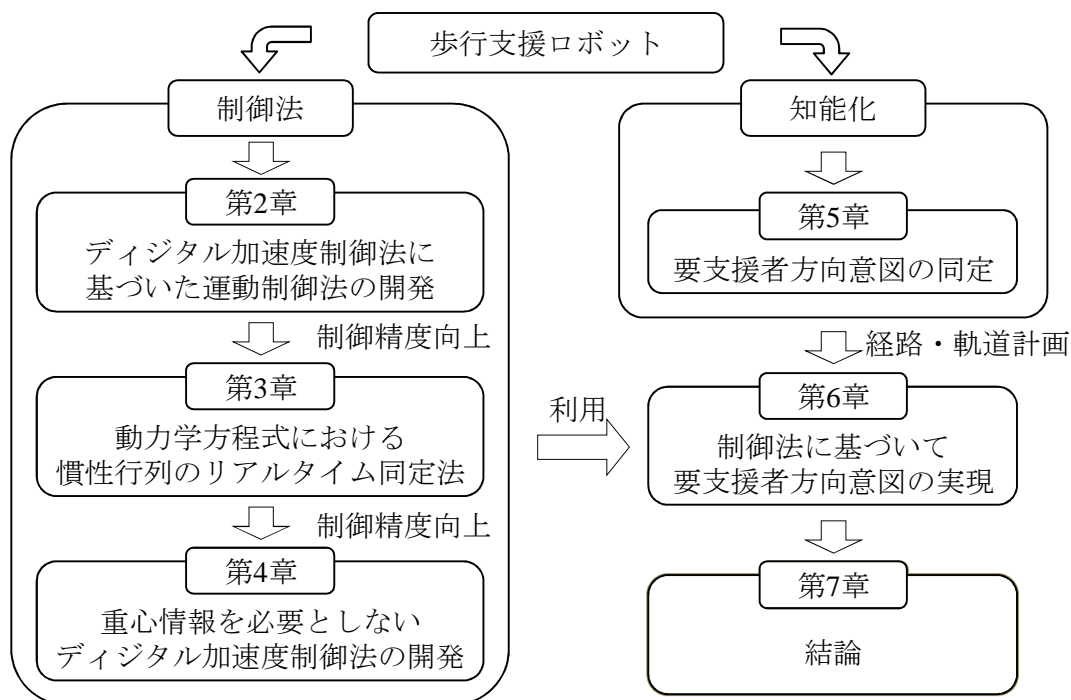


図 1.8 本論文の構成ブロック線図

本論文では、歩行支援支援ロボットの実用化に不可欠な制御法と知能化法を研究しています。

制御法の開発に関して、歩行支援を実施する時、主に三つの原因、つまり異なる地面による非線形摩擦力と、異なる要支援者によるロボットに掛ける荷重の変化と、重心位置の変化はロボットの経路追従精度に影響する。本論文では、デジタル加速度制御法に基づいて、非線形摩擦力に適応する、非線形デジタル加速度制御法を開発する。また、異なる荷重と重心位置に適応する、非線形デジタル加速度制御法にあるロボットの慣性行列のリアルタイム同定法を開発し、経路追従精度を向上させる。知能化においては、適切な歩行支援を行うために、要支援者の方向意図を正確に理解する必要があります。私は、歩行支援ロボットと利用者との力学インタラクションにより利用者の歩行方向意図を認識する方法を提案する。最後に、開発した制御法と同定法を結合し、要支

援者の歩行支援実験を行う。つまり、提案した制御法を用いて、同定した要支援者の意図方向に追従し、歩行支援ロボットは要支援者の移動意図を実現する。

以下では、論文の各章について説明する。

第2章では、デジタル加速度制御法に基づいた運動制御法の開発について説明する。

異なる地面による摩擦力が変化している、またメカナムホイールが受ける摩擦は機体の向きに対する進行方向に依存し非線形かつ時变的である。この摩擦力は経路追従制度に悪影響を与える。先行研究では、非線形摩擦力による影響に対処する方法として、PID (Proportional - Integral - Derivation)制御法を用いたが、特定の方向及び一定の地面条件により特定の摩擦しかに対してよい精度を得られなかった。全方向に移動した地面条件が一定ではない場合でも高精度な経路追従制御の結果を得るために、制御入力の中に非線形摩擦力を含んでいるというメカニカルシステムの物理的運動本質に着目して、加速度信号を利用すれば非線形摩擦力をキャンセルできることを発見した。この考え方に基づいて、本論文は、加速度信号を利用することにより、非線形摩擦力に対処するデジタル加速度制御法を提案する[11]。

デジタル加速度制御のアルゴリズムを設計するために、歩行支援ロボットのモデルを導出することが必要である。まず、床からの非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化を考慮し、歩行支援ロボットの動力学方程式を導出する。この動力学は非線形カップリングシステムである事が分かる。従って、本研究では、まず、歩行支援ロボットの非線形カップリングに対応できるように、非線形デカップリングマトリックスを導入し、制御入力と制御量との非線形カップリングをデカップリングする。次に、非線形摩擦力に適応して、デジタル加速度制御法を開発し、開発したデジタル加速度制御法では、加速度信号を利用して非線形摩擦をキャンセルさせる。さらに、システムを安定させるために、制御パラメータの範囲を求める。最後に、シミュレーションと実験により、制御法の有効性を検証する。シミュレーションを実施する時、非線形摩擦の有無にも関わらず、精度の高い経路・軌道追従結果が得られた。実験を実施する時、異なる地面条件でも、PID制御より、精度の高い経路・軌道追従結果を得られた。

第3章では、動力学方程式における慣性行列のリアルタイム同定法について説明する。

前章のデジタル加速度制御法を設計する時、ロボットの慣性行列情報が必要であるが、慣性行列が既知であると仮定して、制御力を導出した。実験において、直線経路を追従したので、慣性行列の精度は低くとも、ある程度追従できることが判った。しかし、複雑な経路を追従する場合、経路・軌道追従精度が低下した。その原因として、歩行支援ロボットの慣性行列は、要支援者の病症や体重により異なり、制御する前に把握することが困難である。もし、リアルタイムで慣性行列における各要素の値を同定しながら制御することができれば、制御精度を向上することが可能であり、より汎用性の高い歩行支援ができるようになる。したがって、本章では、制御則にあるロボットの慣性行列を逐次最小2乗法を用いてリアルタイムで同定することで、ロボットの追従精度を向上させる[12]。シミュレーション及び実験において、前述のデジタル加速度制御法より、荷重と重心位置が変化しとも、直線と円形経路の経路・軌道追従結果がよく得られた。

第4章では、重心情報を必要としないデジタル加速度制御法の開発について説明する。

第2章で導出した歩行支援ロボットの動力学方程式には、駆動力がロボットの重心位置に作用することにより、開発した非線形デジタル加速度制御法のデカップリングマトリックスの中に、ロボットの重心情報が含まれる。重心位置の変化はデジタル加速度制御法の制御精度に影響する。ここでは、歩行支援ロボットの運動精度を更に高上させるために、荷重変化と重心位置変化の影響は全部慣性行列の中に含まれるように、駆動力が中心位置を作用する動力学に変形した[13]。この動力学方程式に基づいて、新しい非線形デジタル加速度制御系を構成する。構成した新しい非線形デジタル加速度制御系のデカップリングマトリックス中には、歩行支援ロボットの向き、長さ、幅だけが必要である。ロボットの向きはリアルタイムで測定することができる。ロボットの長さとは幅は一定である。デジタル加速度制御則にある慣性行列の値を逐次最小2乗法を用いて同定する。以上により、制御則に必要な物理量が全てわかる。

この制御法により、非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化の影響全てに対処する。実験により、適切な制御パラメータを設定することにより、地面条件が一定でなくても、荷重と重心位置が異なっても、歩行支援ロボットの運動制御を保証できることが示された。

第5章では、要支援者の移動方向意図の同定について説明する。

歩行支援ロボットによって歩行支援を実施する時には、歩行支援ロボットが要支援者の移動方向意図を認識する必要がある。適切な歩行支援を行うために、歩行支援ロボットが要支援者の移動方向意図を理解する方法を開発する。例えば、要支援者が左方向に行こうとしている時に、体は少し左に傾き、その時アムレストに掛かる荷重が変化する。アムレスト下にある荷重センサーによりこの荷重を計測して、力情報から方向意図を同定できると考える。これを実現するには、先ず力から方向意図を推論する方法、および推論の根拠となる知識が必要である。知識とは、力情報と方向意図との定量的関係である。

先ず、力情報と方向意図との定量的関係を実験により測定し、この関係を知識として抽出するために、前腕荷重でプロダクションルールの前件部を表現し、8方向意図は後件部とし、ファジイルールを構築する。次に、計測した荷重データを事実として、事実と知識との距離に基づいて距離型ファジィ推論法を用いて要支援者の行こうとする方向意図を同定する[14]。実験により、提案した方向意図同定法の有用性を実証する[15]。

第6章では、制御法に基づいて要支援者方向意図の実現について説明する。

歩行支援ロボットの運動制御法と要支援者の方向意図同定法を開発した。本章では、開発した制御法と同定法を結合し、要支援者の歩行支援実験を行う。具体的な実験過程としては、被験者は先ず目標経路に従って、行こうとする方向を決める、体が少し目標方向に傾ける、提案した同定法により、被験者の方向意図を同定する。次に、要支援者の方向意図により決められた目標経路を実現するための目標軌道を計画する。最後に、提案した制御法に基づいて、ロボットが計画した目標軌道・経路を追従する。目標経路と方向同定結果と走行結果との比較により、提案手法の有効性が実証された。

第7章では、結論について記述する。

参考文献

1. I-M, Lee, D. M. Buchner, importance of walking to publish health, medicine and science in sports and exercise, no. 40(7 S):S512-8. 2008.
2. Y. Tsuruoka, R. Shibasaki, "Walking analysis using an acceleration sensor," Proceeding of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp. 4989-4992, Aug.2007.
3. 歩行補助用具の活用, 福祉用具シリーズ, vol.12
4. 王碩玉, 石田健司, 藤江正克, 新型自立生活支援ロボット, 第23回バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会講演論文集: BMFSA (23), 227-228, 2010-10-09
5. 加島守, 杖・歩行器等補助用品の選び方、利用のための基礎知識, 杖・歩行器等補助用品編, pp.34-44.
6. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, デジタル加速度制御法に基づく歩行支援機の運動制御, 第29回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2011AC2H1-8, 東京, 2011年9月.
7. 佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之, ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援, 日本機械学会論文集, C編, Vol.76, No.762, pp.227-235, 2010.
8. K. Yamasaki, R. Ueda, S. Hozawa, M. Kojima, K. Okada, K. Matsumoto, M. Ishikawa, I. Shimoyama and M. Inaba, Home-assistant robot for an aging society, proceedings of the IEEE, vol.100, no.8, pp.2429-2441, 2012.
9. Y. Nemoto, S. Egawa, A. Koseki, S. Hattori, T. Ishii, and M. Fujie, Power-assisted walking support system for elderly," Proc. 20th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, vol.20, no.5, pp. 2693-2695, 1998.
10. 王碩玉, 石田健司, 藤江正克, 立位筋力不足な患者を対象とする新型歩行訓練機, バイオメディカル・ファジィ・システム学会大会講演論文集: BMFSA, No.22, pp.151-152, 2009.

11. Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Motion Control for an Intelligent Walking Support Machine, ICIC Express Letters, Vol.6, No.1, pp.145-149, 2012.
12. Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, Improving the Motion Performance for an Intelligent Walking Support Machine by RLS algorithm, ICIC Express Letters, Vol. 7, No. 4, pp. 1177-1182, 2013.
13. 王 義娜, 王 碩玉, 姜 銀来, 石田健司, 小林 洋, 藤江 正克, 安藤 健, インテリジェント歩行支援機の走行制御：適応制御を用いた重心変化への対応, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC3C2-05, 東京, 2013年9月.
14. 王碩玉, 土谷武士, 水本雅晴, 距離型ファジィ推論法, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol.1, No.1, pp.61-78, 1999.
15. 王 義娜, 王 碩玉, 歩行支援ロボットの運動制御～要支援者の方向意図同定～, 第23回ライフサポートフロンティア講演会予稿集, 1A2-1, 東京, 2014年2月.

第2章

デジタル加速度制御法に基づいた制御法の開発

2.1 緒言

歩行支援ロボットは、要支援者を支援するため、要支援者の意図に従って、周りの移動できる空間により、走行経路・軌道を定め、経路・軌道に追従し、要支援者を目標位置まで支援する必要がある。しかし、歩行支援を実施する時、適切な制御をしないと、軌道・経路の追従誤差が生じる。その結果、目標経路から離れて目標位置に到達できないだけでなく、屋内にある家具、ドア、壁などに衝突する危険もある。さらに、ロボットが実際の走行速度が目標速度より速くなったり遅くなったりすることにより、転倒事故が発生する可能性がある。従って、要支援者が目標位置まで周囲の物や人にぶつけないように、高精度な軌道・経路追従制御法を開発することが必須である。

軌道・経路追従精度に影響を与える各要因を考察した。異なる地面による摩擦力が変化している、メカナムホイールが受ける摩擦力は機体の向きに対する進行方向に依存し非線形かつ時变的である。この摩擦力は経路追従制度に悪影響を与える。先行研究では、非線形摩擦力による影響に対処する方法として、PID(Proportional - Integral - Derivation)制御法を用いたが、特定な方向及び一定な地面条件により特定な摩擦力の場合でのみ高精度の結果が得られた。全方向において、また地面条件が一定ではない場合でも高精度な経路追従制御の結果を得るために、制御入力の中に非線形摩擦力を含んでいるというメカニカルシステムの物理的運動本質に着目して、加速度信号を利用すれば非線形摩擦力をキャンセルできることを発見した。この考え方に基づいて、本章は、加速度信号を利用することにより、非線形摩擦力に対処するデジタル加速度制御法を提案した。

デジタル加速度制御のアルゴリズムを設計するために、歩行支援ロボットのモデルを導出することが必要である。まず、床からの非線形摩擦力、荷重変

化と重心位置変化を考慮した，歩行支援ロボットの運動学と動力学方程式を導出する．この歩行支援ロボットの動力学方程式は非線形カップリングシステムである．従って，歩行支援ロボットの非線形カップリングに対して，非線形デカップリングマトリックスを導入し，制御入力と制御量との非線形カップリングをデカップリングした．次に，非線形摩擦に対応して，デジタル加速度制御法を開発した．開発したデジタル加速度制御法は，加速度信号を利用して非線形摩擦をキャンセルさせる．さらに，システムを安定させるために，制御パラメータの範囲を求めた．最後に，シミュレーションと実験により，提案した制御法の有効性を検証した．シミュレーション実施する時，非線形摩擦の有無にも関わらず，精度の高い経路・軌道追従結果が得られた．実験を実施する時，異なる地面条件，円形及び直線経路に追従するでも，PI 制御より，精度の高い経路・軌道追従結果を得られた．

2.2 駆動力が重心位置に作用する歩行支援ロボットのモデル

制御システムを設計する際に、制御対象の動的な挙動を表す数学モデルを作ることが重要である。そして、運動制御法を開発するために、まず運動学と動力学方程式を導出することが必要である。

【2次元モデル】

歩行支援ロボットを使用する時、使用者から歩行支援ロボットへの圧力により、歩行支援ロボットの荷重変化と重心位置変化が生じる。そのため、本節では、荷重変化と重心位置が変化した場合を考慮した、歩行支援ロボットを2次元モデル化し、中心から重心位置が変化した場合の座標系の設定と構造によって、歩行支援ロボットの運動学及び動力学を導出する。中心から重心位置が変化した場合の座標系の設定と構造モデル2.1に示す。

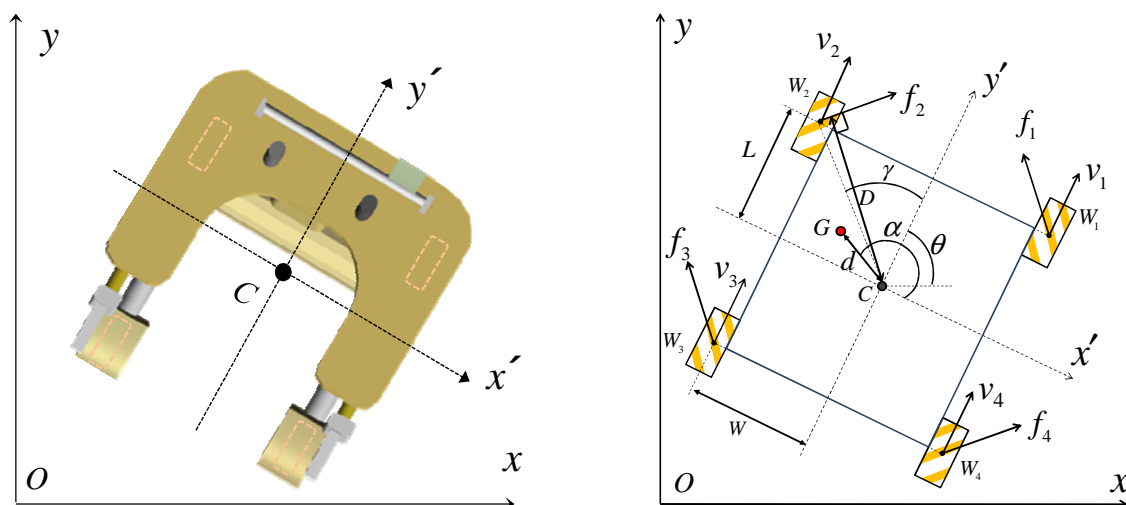


図 2.1 歩行支援ロボットの構造モデル

図 2.1 において、 $O-xy$ は慣性座標系、 $C-x'y'$ は歩行支援ロボットのボディ座標系で、ロボット本体の向きにつれて回転する。図を見やすくするため、メカナムホイールに関する記号は $i = 1, 2, 3, 4$ の各記号を除いて図中では一部省略している。 C は、ロボットの幾何中心位置です。 G は、被支援者から圧力の影響を受けている時のロボットの等価重心位置です。このモデルによるロボットのパラメータは表 2.1 に示す。

表 2.1 歩行支援ロボットのパラメータ

f_i	[N]	メカナムホイール i の駆動力($i=1,2,3,4$)
v_i	[m/s]	メカナムホイール i の速度($i=1,2,3,4$)
α	[rad]	線分 Cx' と線分 CG の成す角度
$2W$	[m]	歩行支援ロボットの幅
$2L$	[m]	歩行支援ロボットの長さ
D	[m]	中心と駆動力の距離.
θ	[rad]	歩行支援ロボットの姿勢角
d	[m]	重心と中心の距離
I	[kg \cdot m 2]	歩行支援ロボットの慣性モーメント
M	[kg]	本体の質量
m	[kg]	被支援者の等価負荷

【運動学】

運動学とは質量や力に関係なく、各位置における運動の状態を幾何学的に求める学問であり、ここでは、各ホイールとフリーローラーの詳しい位置関係と各座標系の関係を図 2.2 に示す。図中にはメカナムホールとフリーローラーの接地状態を示す[1].

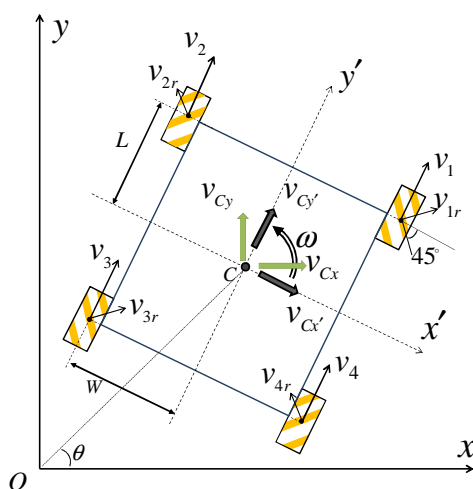


図 2.2 フリーローラーとメカナムホイール配置

$v_i(i=1,2,3,4)$ はホイール回転による速度ベクトルで、 $v_i = R_W \times \omega_i$ と表せる。 $(R_W$ は、ホイールの半径、 ω_i は各ホイールの回転速度)、 $v_{ir}(i=1,2,3,4)$ は、床に接触しているフリーローラーの接線方向の速度ベクトルである。

ボディ座標系 $C-x'y'$ で各ホイールの $x'y'$ 成分 $v_{ix'}, v_{iy'} (i = 1,2,3,4)$ は、各ホイールとフリーローラーの位置関係を考えることで、各ホイール速度 v_i と v_{ir} により得られる[2]。フリーローラーの取り付け角を 45° とすると各ホイールの x', y' 方向の速度成分は

$$\begin{aligned} v_{1x'} &= \frac{v_{1r}}{\sqrt{2}}, v_{1y'} = v_1 + \frac{v_{1r}}{\sqrt{2}} \\ v_{2x'} &= -\frac{v_{2r}}{\sqrt{2}}, v_{2y'} = v_2 + \frac{v_{2r}}{\sqrt{2}} \\ v_{3x'} &= \frac{v_{3r}}{\sqrt{2}}, v_{3y'} = v_3 + \frac{v_{3r}}{\sqrt{2}} \\ v_{4x'} &= -\frac{v_{4r}}{\sqrt{2}}, v_{4y'} = v_4 + \frac{v_{4r}}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$v_{Cx'}, v_{Cy'}$ は車両本体速度がボディ座標系 $C-x'y'$ での x' 成分 y' 成分、 ω は、車体のスピン回転角速度を示す。これより $v_{ix'}, v_{iy'}$ は $v_{Cx'}, v_{Cy'}$ と ω で表現される。

$$\begin{aligned} v_{1x'} &= v_{Cx'} - L\omega, v_{1y'} = v_{Cy'} + W\omega \\ v_{2x'} &= v_{Cx'} - L\omega, v_{2y'} = v_{Cy'} - W\omega \\ v_{3x'} &= v_{Cx'} + L\omega, v_{3y'} = v_{Cy'} - W\omega \\ v_{4x'} &= v_{Cx'} + L\omega, v_{4y'} = v_{Cy'} + W\omega \end{aligned} \quad (2.2)$$

式(2.1)と(2.2)より、各ホイール速度と本体の速度成分との関係は

$$\begin{aligned} v_1 &= -v_{Cx'} + v_{Cy'} + (L+W)\omega \\ v_2 &= v_{Cx'} + v_{Cy'} - (L+W)\omega \\ v_3 &= -v_{Cx'} + v_{Cy'} - (L+W)\omega \\ v_4 &= v_{Cx'} + v_{Cy'} + (L+W)\omega \end{aligned} \quad (2.3)$$

ホイールの回転速度は

$$\begin{aligned}
 v_1 &= R_w \cdot \omega_1 = -v_{Cx'} + v_{Cy'} + (L+W)\omega \\
 v_2 &= R_w \cdot \omega_2 = v_{Cx'} + v_{Cy'} - (L+W)\omega \\
 v_3 &= R_w \cdot \omega_3 = -v_{Cx'} + v_{Cy'} - (L+W)\omega \\
 v_4 &= R_w \cdot \omega_4 = v_{Cx'} + v_{Cy'} + (L+W)\omega
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

すなわち、本体の移動方向の速度成分を与えることにより、その時必要な各ホイールの速度を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R_w} \begin{bmatrix} -1 & 1 & (L+W) \\ 1 & 1 & -(L+W) \\ -1 & 1 & -(L+W) \\ 1 & 1 & (L+W) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Cx'} \\ v_{Cy'} \\ \omega \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

ボディ座標系 $C-x'y'$ から慣性座標系 $O-xy$ に座標変換は式(2.6)に示す

$$\begin{bmatrix} v_{Cx} \\ v_{Cy} \\ \omega_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Cx'} \\ v_{Cy'} \\ \omega \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

v_{Cx} , v_{Cy} , ω_C は車両本体速度が中心位置の x 成分 y 成分, と車体のスピン回転角速度を示す. θ はボディ座標系 $C-x'y'$ と慣性座標系 $O-xy$ との成す角である, この角度も慣性座標系 $O-xy$ 中でロボットの向きである. 式(2.5)と(2.6)により, 慣性座標系 $O-xy$ でロボットの運動学式を導出した.

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R_w} \begin{bmatrix} -\cos\theta - \sin\theta & \cos\theta - \sin\theta & (L+W) \\ \cos\theta - \sin\theta & \cos\theta + \sin\theta & -(L+W) \\ -\cos\theta - \sin\theta & \cos\theta - \sin\theta & -(L+W) \\ \cos\theta - \sin\theta & \cos\theta + \sin\theta & (L+W) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Cx} \\ v_{Cy} \\ \omega_C \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

ここまで, ロボットの中心位置の運動学を導出した, 次に, ロボットの中心位置と重心位置の関係を解析し, 導出し, ロボットの重心位置の運動学式も導出する. まず, 重心位置速度と中心位置の速度との幾何学関係を図 2.3 に示す.

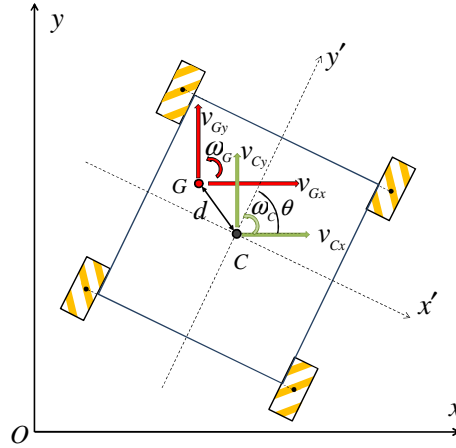


図 2.3 重心速度と中心速度との幾何学関係

ただし, v_{Gx}, v_{Gy}, ω_G は車両本体速度が重心位置の x 成分 y 成分, と車体のスピン回転角速度を示す. 図 2.3 示す幾何学関係により, ロボットの重心と中心位置速度との関係を式(2.8)に導出した.

$$\begin{bmatrix} v_{Gx} \\ v_{Gy} \\ \omega_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d \sin(\alpha + \theta - \pi/2) \\ 0 & 1 & d \cos(\alpha + \theta - \pi/2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Cx} \\ v_{Cy} \\ \omega_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & p \\ 0 & 1 & q \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Cx} \\ v_{Cy} \\ \omega_C \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

ただし $p = -d \sin(\alpha + \theta - \pi/2)$, $q = d \cos(\alpha + \theta - \pi/2)$

式(2.7)と(2.8)より, 重心位置の運動学を導出し, 式(2.9)に表す.

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R_w} \begin{bmatrix} -\cos\theta - \sin\theta & \cos\theta - \sin\theta & p(\cos\theta + \sin\theta) - q(\cos\theta - \sin\theta) + (L+W) \\ \cos\theta - \sin\theta & \cos\theta + \sin\theta & -p(\cos\theta - \sin\theta) - q(\cos\theta + \sin\theta) - (L+W) \\ -\cos\theta - \sin\theta & \cos\theta - \sin\theta & p(\cos\theta + \sin\theta) - q(\cos\theta - \sin\theta) - (L+W) \\ \cos\theta - \sin\theta & \cos\theta + \sin\theta & -p(\cos\theta - \sin\theta) - q(\cos\theta + \sin\theta) + (L+W) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Gx} \\ v_{Gy} \\ \omega_G \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

【動力学】

動力学とは, 物体の力と運動との関係を求める学問であり. 剛体の動力学は, 剛体の質量が重心に集中したものとしたときの並進運動に関するニュートンの運動方程式と, 重心のまわりの回転に関するオイラーの運動方程式で記述できる. ここで, 物体の力が直接重心に作用する, 重心位置と重心周りの回転運動を引き起こす. しかし, 歩行支援ロボットを使用する時, 使用者がロボットの

中心位置に立っている。そして、中心位置の運動と中心位置のまわりの回転に関する運動を求めるはもっと妥当であり。そして、歩行支援ロボットの中心位置における加速度と各メカナムホイールの駆動力との関係について述べる。

まず、剛体の動力学は、重心に全質量が集中したものとした並進運動に関するニュートンの運動方程式となる。従って、図 2.4 により、歩行支援機の重心位置動力学方程式は式(2.10)と表すことができる。

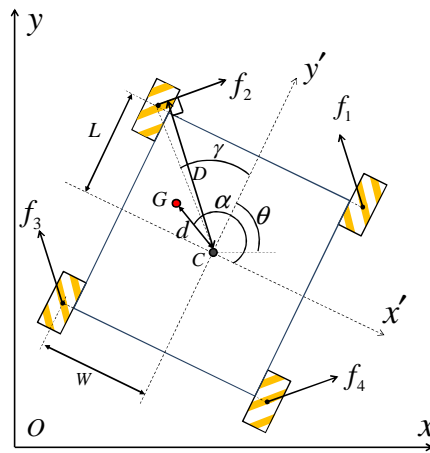


図 2.4 歩行支援ロボットのモデル

$$\begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix} \ddot{X}_G = \begin{bmatrix} f_{Gx} \\ f_{Gy} \\ \tau_G \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ただし： M ：歩行支援ロボット本体の質量， m ：被支援者から受ける荷重と等価な質量， I_G ：歩行支援ロボットと被支援者全体による重心位置での慣性モーメント， f_{Gx} ：重心位置における合力の x 軸方向ベクトル， f_{Gy} ：重心位置における合力の y 軸方向ベクトル， τ_G ：重心位置におけるトルク。

ここで、質量及び慣性モーメントを含む慣性行列を M_G とする。また、中心位置と重心位置の速度関係式(2.8)を次の記号を用いると簡単に表すことができる。

$$\dot{X}_G = A\dot{X}_C \quad (2.11)$$

ただし

$$\dot{X}_G = \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\theta}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Gx} \\ v_{Gy} \\ \omega_G \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & p \\ 0 & 1 & q \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \dot{X}_C = \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \\ \dot{\theta}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Cx} \\ v_{Cy} \\ \omega_C \end{bmatrix}$$

式(2.11)を微分した下記の式(2.12)を得られる.

$$\ddot{X}_G = \frac{d}{dt}(A\dot{X}_C) = A\ddot{X}_C + \dot{A}\dot{X}_C \quad (2.12)$$

式(2.12)を動力学方程式(2.10)に代入する, 式(2.13)になる.

$$M_G(\dot{A}\dot{X}_C + A\ddot{X}_C) = [f_{Gx} \quad f_{Gy} \quad \tau_G]^T \quad (2.13)$$

つまり :

$$\begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix} \ddot{X}_C + \begin{bmatrix} (M+m)p \\ (M+m)q \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_C + \begin{bmatrix} -(M+m)q \\ (M+m)p \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_C^2 = \begin{bmatrix} f_{Gx} \\ f_{Gy} \\ \tau_G \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

式(2.14)の第一項は, ロボットの中心位置運動に必要な駆動力と中心位置周りの回転に関する運動に必要な駆動トルクであり. 第二項は, 中心位置周りの回転運動により, ロボットの重心位置で引き起こす切線方向運動の x 軸と y 軸方向の構成部分に必要な駆動力であり. 第三項は重心が中心位置周りの回転に必要な向心力である.

モデルより重心位置における合力と各メカナムホイールに加わるネット力との関係により, 式(2.13)は式(2.15)となる.

$$M_G(\dot{A}\dot{X}_C + A\ddot{X}_C) = K_G^T(\theta)F_{net} \quad (2.15)$$

ただし, $F_{net} = [f_{net1} \quad f_{net2} \quad f_{net3} \quad f_{net4}]^T$, f_{neti} :各メカナムホイールのネット駆動力であり, $(i=1,2,3,4)$. $K_G^T(\theta)$ は重心位置における合力と各メカナムホイールに加わるネット力との関係であり.

$$K_G^T(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) \\ \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) \\ D - d \cos(\alpha - \pi/4) & -[D - d \sin(\alpha - \pi/4)] & -[D + d \cos(\alpha - \pi/4)] & D + d \sin(\alpha - \pi/4) \end{bmatrix}$$

ただし、 D はロボットの中心と駆動力の腕の長さであり、

$$D = \cos(\gamma - \pi/4)\sqrt{L^2 + W^2}, \quad \gamma = \arctan(W/L).$$

そして、駆動力が重心位置に直接作用して、荷重変化、重心位置変化、非線形摩擦を考慮した歩行支援ロボットの動力学方程式を次の式を示しめす。

$$M_0 \ddot{X}_c + N_0 \dot{X}_c = K_G^T(\theta)[F - f_f(X_c, \dot{X}_c)] \quad (2.16)$$

ただし、

$$M_0 = M_G A = \begin{bmatrix} M + m & 0 & -(M + m)d \sin(\theta + \alpha - \pi/2) \\ 0 & M + m & (M + m)d \cos(\theta + \alpha - \pi/2) \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix}$$

$$N_0 = M_G \dot{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(M + m)d \cos(\theta + \alpha - \pi/2)\dot{\theta} \\ 0 & 0 & -(M + m)d \sin(\theta + \alpha - \pi/2)\dot{\theta} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T$$

$$f_f(X_c, \dot{X}_c) = [f_{f1}(X_c, \dot{X}_c) \quad f_{f2}(X_c, \dot{X}_c) \quad f_{f3}(X_c, \dot{X}_c) \quad f_{f4}(X_c, \dot{X}_c)]^T$$

$M_G A$ は、荷重変化と重心位置変化を考慮した、ロボットの慣性マトリクスであり、 m と d は使用者により変化する。 $M_G \dot{A}$ は重心位置変化によって生じる行列項であり、 $K_G^T(\theta)$ はロボットの向き角度 θ に関する三角関数が入っているため、歩行支援ロボットの動力学方程式は、制御力と制御量との間が非線形カップリング関係であることがわかる。 $f_{fi}(X_c, \dot{X}_c)$ は床からの非線形摩擦である、 f_i は各メカナムホイールの駆動力であり、($i=1,2,3,4$)。従って、この荷重変化、重心移動、摩擦力が有る非線形動力学モデルに対して、対応できる制御法が必要である。次に、このモデルに対して、デジタル加速度制御法に基づいて、歩行支援ロボットの非線デジタル加速度制御法を開発する。

2.3 非線形デジタル加速度制御法の開発

異なる地面による摩擦力が変化している，またメカナムホイールが受ける摩擦力は機体の向きに対する進行方向に依存し非線形かつ時变的である．この摩擦力は経路追従精度に悪影響を与える．全方向においてまた地面条件が一定ではない場合でも高精度な経路追従制御の結果を得るために，本論文は，加速度信号を利用することにより，非線形摩擦力に対処するデジタル加速度制御法を提案した．

2.3.1 制御則の設計

非線形メカニカルシステムにおいて，外部から力を与えた時，その瞬間に変化し得るのは加速度のみであり，速度と位置はその瞬間は変化しない．加速度を積分して速度が決まり，更にそれを積分して位置が決まるという運動の基本に着目した制御法を開発し[3]．先行開発した制御法の大部分では，すべて連続時間の立場で制御則を導出しているので，これをデジタル計算機で実現する場合にはそれなりの検討が必要である．一方ここで述べるデジタル加速度制御法では，その考え方から自然にデジタル制御アルゴリズムが導出される[4][5]．

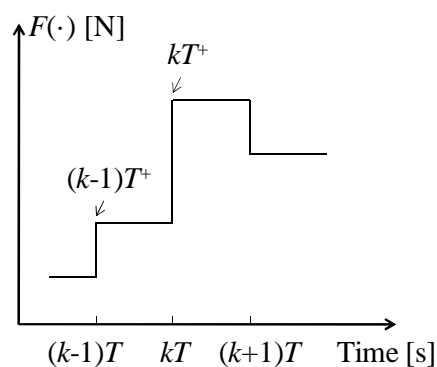


図 2.5 階段状に変化する入力

デジタル加速度制御法では，制御力は不連続のデジタル信号である．図 2.5 のように，入力のサンプリング周期を T として時刻 kT でのシステムの動力学方程式を式(2.17)に示す．

$$K_G^T(\theta)\{F[(k-1)T^+] - f_f[X_c(kT), \dot{X}_c(kT)]\} = M_0 \ddot{X}_c(kT) + N_0 \dot{X}_c(kT) \quad (2.17)$$

時刻 kT^+ で入力に変化した瞬間，ロボットに新たな加速度が生じることとなりますが，メカニカルシステムの運動特性の本質により，この外力変化の瞬間，位置，速度と非線形摩擦力は瞬時に変化しない．つまり，この時刻の動力学方程式は式(2.18)になる．

$$K_G^T(\theta)\{F(kT^+) - f_f[X_c(kT), \dot{X}_c(kT)]\} = M_0 \ddot{X}_c(kT^+) + N_0 \dot{X}_c(kT) \quad (2.18)$$

時刻 kT^+ の動力学方程式から時刻 kT の動力学方程式を引くと，入力に変化した瞬間の加速度との関係は式(2.19)となります．

$$K_G^T(\theta)[F(kT^+) - F(k-1)T^+] = M_0[\ddot{X}_c(kT^+) - \ddot{X}_c(kT)] \quad (2.19)$$

そして，この入力変化した瞬間，変化前の非線形摩擦力 $f_f[X_c(kT), \dot{X}_c(kT)]$ と重心移動引き起し行列項 $N_0 \dot{X}_c(kT)$ は変化後のこの量をキャンセルできる．従って，式(2.19)に示す入力に変化した瞬間の加速度との瞬間の関係によって，デジタル加速度制御法を得られる．

しかし，ロボットの動力学は，行列 $K_G^T(\theta)$ により，非線形カップリングシステムであることがわかる．そのため，デジタル加速度制御法を直接に使えない．従って，本研究は，デジタル加速度制御法に基づいて，ロボットの非線形に対処するために，非線形デジタル加速度制御法を開発する，式(2.20)に示す[6]．

$$F(kT^+) = F[(k-1)T^+] + K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}M_0\{[\ddot{X}_{cd}(kT^+) - \ddot{X}_c(kT)] + K_D[\dot{X}_{cd}(kT) - \dot{X}_c(kT)] + K_P[X_{cd}(kT) - X_c(kT)]\} \quad (2.20)$$

まず，歩行支援ロボットの制御力と制御量との間の非線形カップリング関係に対応するように， $K_G^T(\theta)$ の一般化逆行列 $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ を導入する．また，速度と位置偏差比例項を制御力に含まれる． $K_D = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3})$ と $K_P = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3})$ は速度と位置の比例偏差係数で，制御パラメータである． K_D と K_P は速度と位置の比例偏差係数で，制御パラメータである．次は，制御パラメータの選び方法を説明する．

2.3.2 制御パラメータの選択方法

システムの安定させるために，制御パラメータの有効範囲を求める．まず，目標軌道 $X_{cd}(kT^+)$ に対する追従誤差 $e(kT^+)$ を式(2.21)と定義する[8][9]．

$$e(kT^+) = X_{cd}(kT^+) - X_c(kT^+) \quad (2.21)$$

ロボットの時刻 kT と kT^+ における動力学式(2.17)と(2.18)を開発した制御法に代入した式(2.21)より、追従誤差 $e(kT^+)$ に関するダイナミクスはつぎのようになる。

$$\ddot{e}(kT^+) + K_D \dot{e}(kT^+) + K_P e(kT^+) = 0 \quad (2.22)$$

小さな時間区間 $[kT^+, (k+1)T]$ の内に、次の式(2.23)が成り立つとする。

$$\begin{aligned} \dot{e}[(k+1)T] &\approx \dot{e}(kT) + \ddot{e}(kT^+)T \\ e[(k+1)T] &\approx e(kT) + \dot{e}(kT)T + \ddot{e}(kT^+)T^2/2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

式(2.22)と(2.23)により式(2.24)を得る。

$$\begin{bmatrix} e[(k+1)T] \\ \dot{e}[(k+1)T] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} - \mathbf{K}_p T^2/2 & (\mathbf{I} - \mathbf{K}_D T/2)T \\ -\mathbf{K}_p T & \mathbf{I} - \mathbf{K}_D T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(kT) \\ \dot{e}(kT) \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} e(kT) \\ \dot{e}(kT) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

システムを安定させるために、 \mathbf{A} の固有値が全て単位円の内部に保証される。そのために、 $\mathbf{K}_D = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3})$ と $\mathbf{K}_P = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3})$ の有効範囲が得られる、デジタル加速度制御法を使用する時、 \mathbf{K}_D と \mathbf{K}_P の値はこの有効範囲の中に選定する。

デジタル加速度制御法のブロック線図を図2.6に示す。

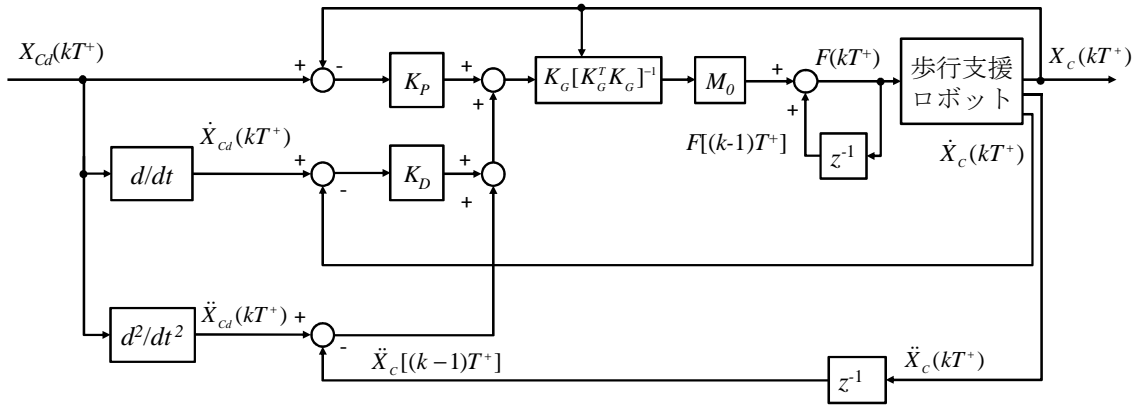


図 2.6 デジタル加速度制御法のブロック線図

2.4 シミュレーションによる検討

導出した非線形デジタル加速度制御法の有効性を理論面で確かめるために、本節は、この制御法を用いて、非線形摩擦力、荷重変化と重心移動に対する軌道・経路追従精度の向上についての有効性をシミュレーションで確かめる。シミュレーションは、非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化が無しと仮定した場合と非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化有りの場合の2種類行った。各シミュレーションにおいて、表 2.2 に示す同一な歩行支援ロボットのパラメータを使用する。

表 2.2 歩行支援ロボットのパラメータ

パラメータ	値と単位
高さ H	840-1240 mm
幅さ $2W$	600 mm
長さ $2L$	450 mm
質量 M	80 kg
最大荷重 m	80 kg
慣性モーメント I_G	$1.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

ロボットが回転しつつ直線移動を行う経路と円移動を行う経路の2種類行った。入力のサンプリング周期 T を 0.01s に選定する。その際、まず、非線形摩擦力、荷重変化、重心位置変化を無しする場合、直線経路を追従するシミュレーションを行う、有効範囲の中に、最応制御パラメータを探した。表 2.3 に示す。

表 2.3 制御系のパラメータ

パラメータ	値と単位
K_p	$\text{diag}(0.6, 0.6, 0.6)\text{s}^{-2}$
K_d	$\text{diag}(3, 3, 3)\text{s}^{-1}$

その後、別の条件にも表 2.3 に示す同一制御パラメータを使用する。

【直線経路を追従する】

最初は、回転しつつ直線移動を行う経路におけるシミュレーション結果及び考察について述べる。目標経路は式(2.25)に示す。

$$x_{cd}(t) = y_{cd}(t) \quad (2.25)$$

目標軌道の方程式を式(2.26)に示す。

$$\begin{aligned} x_{cd}(t) &= x_0 + (x_c - x_0)(1 - e^{-at}) \\ y_{cd}(t) &= y_0 + (y_c - y_0)(1 - e^{-at}) \\ \theta_{cd} &= \pi/4 \end{aligned} \quad (2.26)$$

ここで、 $a = 0.025s^{-1}$, $(x_0, y_0) = (4m, 3m)$ and $(x_c, y_c) = (14m, 13m)$ は目標軌道の初期位置と終了位置である。歩行支援ロボットの初期位置は $x_c(0) = 3m$, $y_c(0) = 4m$ とし、初期姿勢角は $\theta_c(0) = \pi/2$ rad とする。非線形摩擦、荷重変化、重心位置変化有りとなしにおける 150 秒間のシミュレーションを行う。

図 2.7(a-d)と図 2.9(a-d)は非線形摩擦力、荷重変化と重心移動が無しと仮定した場合と有り場合の歩行支援ロボットの位置と角度の軌道追従と経路追従結果を示している。図 2.7(a)と図 2.9(a)では、横軸は時間、縦軸は x 方向の位置、青い破線は x 位置の目標軌道、赤い実線は x 方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す。図 2.7(b)と図 2.9(b)では、横軸は時間、縦軸は y 方向の位置、青い破線は y 方向の目標軌道、赤い実線は y 方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す。図 2.7(c)と図 2.9(c)では、横軸は時間、縦軸はロボットの姿勢角度、青い破線は本体の向き角度の目標軌道、実線は角度における歩行支援ロボットの向きの角度応答を表す。図 2.7(d)と図 2.9(d)では、横軸は x 方向の位置応答、縦軸は y 方向の位置応答、青い破線は目標経路、赤い実線は歩行支援ロボットの走行結果であり。図 2.7(a-d)には、非線形摩擦力、重心位置と荷重変化が無いと仮定する場合、ロボットがよい軌道・経路追従結果が得られた事がわかる。図 2.9(a-d)は、非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化が有る場合にも、ロボットが良い軌道・経路追従結果を得られました。図 2.7(a-d)と図 2.9(a-d)の軌道・経路追従結果はほぼ同じであることが示された。

図 2.8 と図 2.10 は、非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化が無しと仮定した

場合と非線形摩擦力，荷重変化と重心位置変化が有り場合のロボット駆動力であり．図 2.8 には，非線形摩擦力と荷重変化が無しと仮定する場合，駆動力は目標加速度とロボット慣性モーメントの値により，小さい事が分かった．図 2.10 は，非線形摩擦力と荷重変化を考慮した場合，入力が非線形摩擦力に対応し重い対象を駆動するため，図 2.8 より，大きくなる結果が得られた．図 2.8 と図 2.10 より提案手法を使用して，前のサンプリング周期の制御トルクは，非線形摩擦の影響が含まれているため，前回のサンプリング周期の非線形摩擦力に基づく現在の制御トルクは非線形摩擦を補償する可能性があることを確認した．したがって，シミュレーション結果図 2.7，図 2.8，図 2.9 と図 2.10 より，提案したデジタル加速度制御法は，非線形摩擦力と重心位置変化引き起き行列項を補償できることが示された．

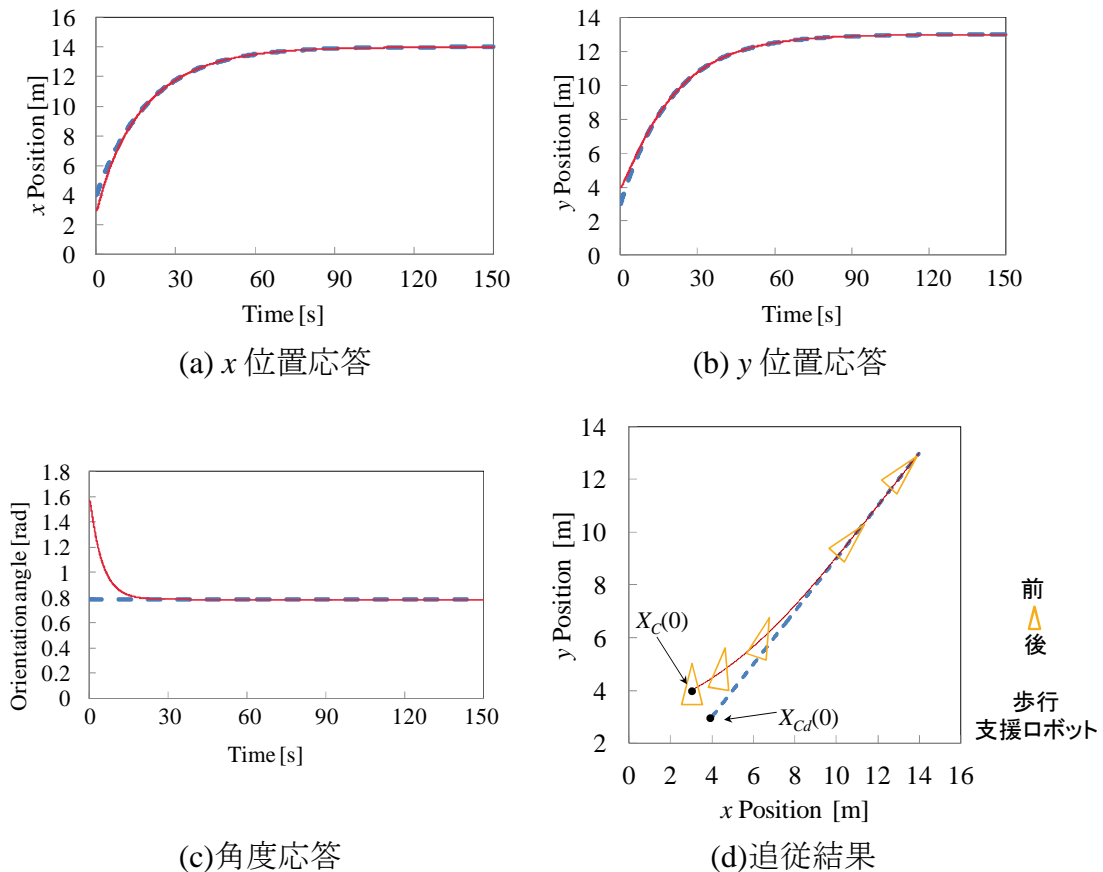


図 2.7 制御結果 $-f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0, m = 0, d = 0, \alpha = 0$

--- Reference ——— Response

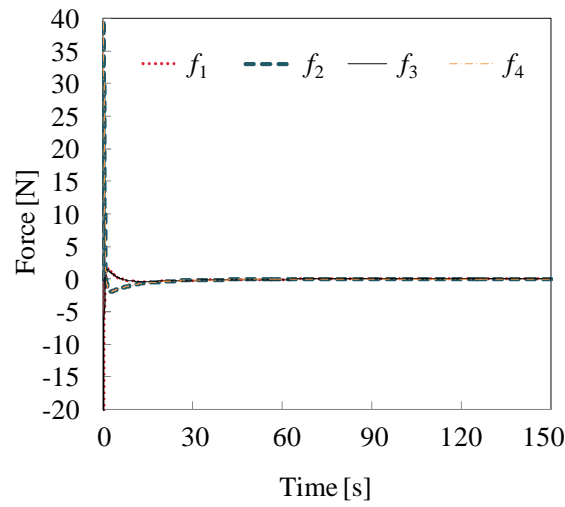
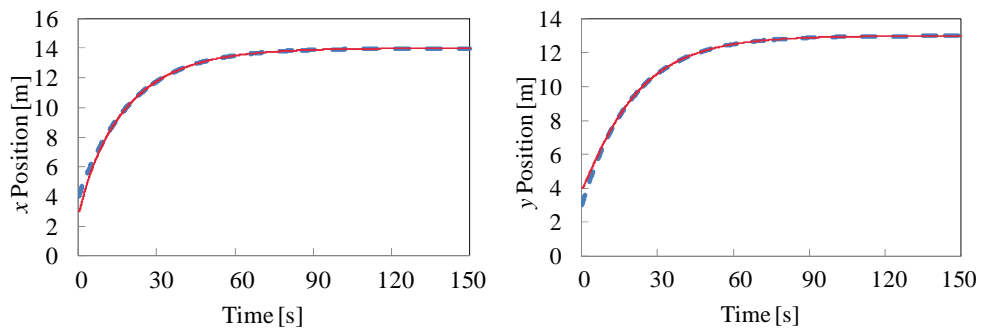
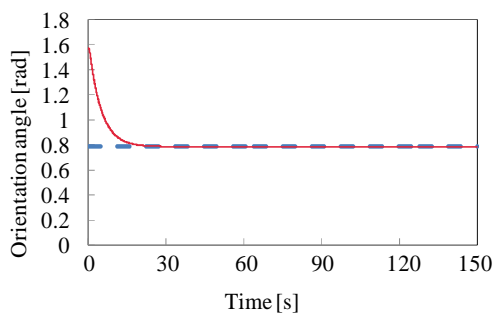


図 2.8 制御力 $-f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0, m = 0, d = 0, \alpha = 0$

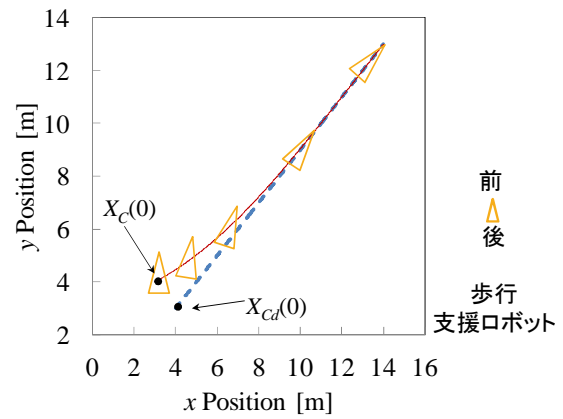


(a) x 位置応答

(b) y 位置応答



(c) 角度応答



(d) 追従結果

図 2.9 制御結果 $-f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0.2\dot{X}_c, m = 60, d = 0.2, \alpha = 2\pi/3$

--- Reference ——— Response

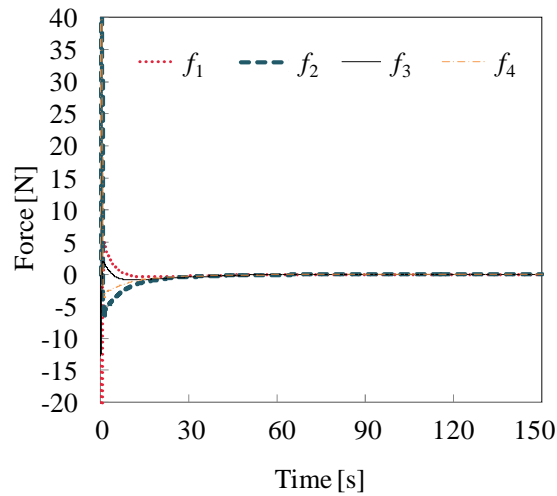


図 2.10 制御力 $-f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0.2\dot{X}_c$, $m = 60$, $d = 0.2$, $\alpha = 2\pi/3$

【円形経路を追従する】

目標経路は式(2.27)に示す.

$$[x_{cd}(t) - x_0]^2 + [y_{cd}(t) - y_0]^2 = r^2 \quad (2.27)$$

ただし, $(x_0, y_0) = (5\text{m}, 5\text{m})$ は目標円形経路の中心で, $r = 5\text{m}$ は目標円形経路の半径である. 目標軌道の方程式を式(2.28)に示す.

$$\begin{cases} x_{cd}(t) = x_0 + r \cos \sigma(t) \\ y_{cd}(t) = y_0 + r \sin \sigma(t) \\ \theta_{cd} = \pi/2 + \sigma(t) \end{cases} \quad (2.28)$$

ただし

$$\sigma(t) = \begin{cases} \frac{4\pi}{t_0^2} t^2 & 0 \leq t \leq \frac{t_0}{2} \\ 2\pi - \frac{4\pi}{t_0^2} (t - t_0)^2 & \frac{t_0}{2} \leq t \leq t_0 \end{cases}$$

ただし $t_0 = 150$, 目標速度を調節するようにパラメータである. 歩行支援ロボットの初期位置は $x_c(0) = 8[\text{m}]$, $y_c(0) = 4[\text{m}]$ とし, 初期姿勢角は $\theta_c(0) = 0 [\text{rad}]$ とする. 非線形摩擦, 荷重変化, 重心位置変化有り無しにおける 150 秒間のシミュレーションを行う.

図 2.11 は非線形摩擦力，荷重変化，重心位置変化無しと仮定する時，ロボットの経路・軌道追従結果．図 2.11(a-c)は，歩行支援ロボットの軌道追従結果である．図 2.11(a)では，横軸は時間，縦軸は x 軸の位置，破線は x 軸の目標軌道，実線は x 軸方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す．図 2.11(b)では，横軸は時間，縦軸は y 軸の位置，破線は y 縦軸の目標軌道，実線は y 縦方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す．図 2.11(c)では，横軸は時間，縦軸は角度，破線は本体の向き角度の目標軌道，実線は角度における歩行支援ロボットの向き角度応答を表す．図 2.11(d)は，ロボットの経路追従結果である．横軸は x 軸の位置応答，縦軸は y 軸の位置応答，破線は目標軌道，実線は歩行支援ロボットの位置応答を表す．図 2.11(a-c)のように，歩行支援ロボットが目標軌道に追従するためには 9s ほどかかる．図 2.11(d)の制御結果でもわかるように良く追従している．

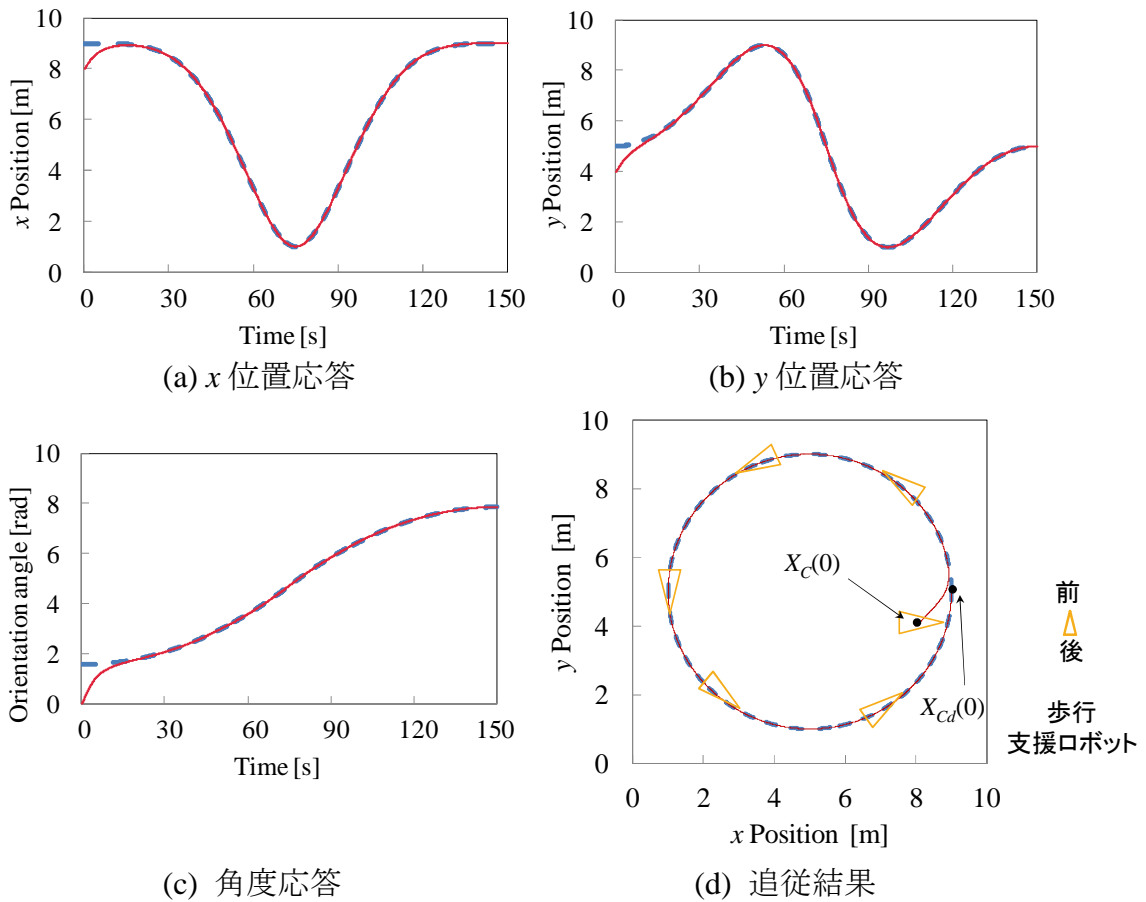


図 2.11 制御結果— $f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0, m = 0, d = 0, \alpha = 0$

--- Reference ——— Response

図 2.12 は非線形摩擦力，荷重変化と重心位置変化が無しと仮定する時，デジタル加速度制御法より得られる四つのメカナムホイールの入力であり，シミュレーション時間を横軸にとり，縦軸はそれぞれ，四つ入力 f_1, f_2, f_3, f_4 となる．図 2.12 より，非線形摩擦力，荷重変化と重心位置変化が無しと仮定する時，ロボットの入力はロボットの目標加速度より，0 に近づく．

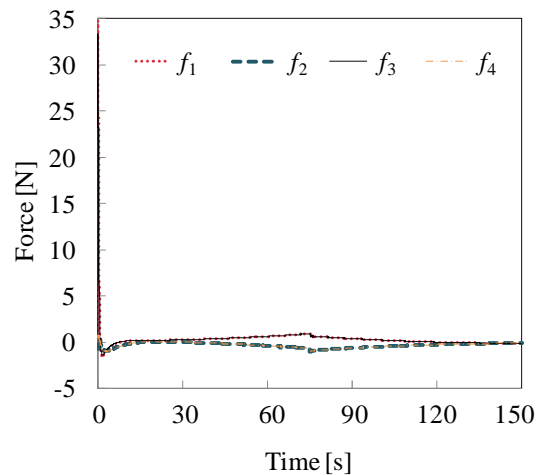


図 2.12 制御力- $f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0, m = 0, d = 0, \alpha = 0$

図 2.13 は非線形摩擦力，荷重変化と重心移動が有る場合，ロボットの経路・軌道追従結果．図 2.13(a-c)は，歩行支援ロボットの軌道追従結果である．図 2.13(a)では，横軸は時間，縦軸は x 軸の位置，破線は x 軸の目標軌道，実線は x 軸方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す．図 2.13(b)では，横軸は時間，縦軸は y 軸の位置，破線は y 縦軸の目標軌道，実線は y 縦方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す．図 2.13(c)では，横軸は時間，縦軸は角度，破線は本体の向き角度の目標軌道，実線は角度における歩行支援ロボットの向き角度応答を表す．図 2.13(d)は，ロボットの経路追従結果である．横軸は x 横軸の位置応答，縦軸は y 縦軸の位置応答，破線は目標軌道，実線は歩行支援ロボットの位置応答を表す．図 2.13(a-c)のように，歩行支援ロボットが目標軌道に追従するためには 9s ほどかかる．図 2.13(d)の制御結果でもわかるように良く追従している．図 2.11 と図 2.13 より，異なる非線形摩擦力,荷重と重心位置を考慮する場合，ほぼ同じ結果が得られたことが分かる．これらの結果により，提案したデジタル加速度制御法の有効性が確認された．

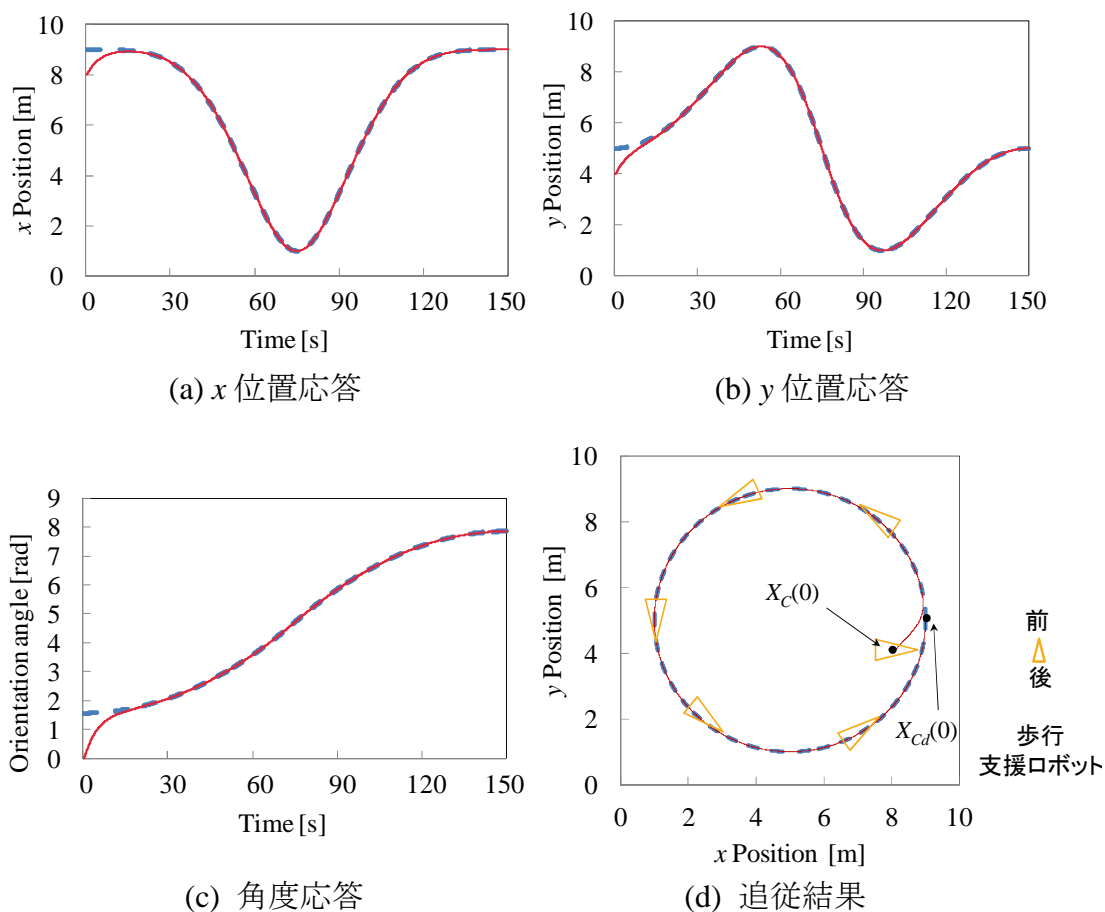


図 2.13 制御結果— $f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0.2\dot{X}_c, m = 60, d = 0.2, \alpha = 2\pi/3$

--- Reference — Response

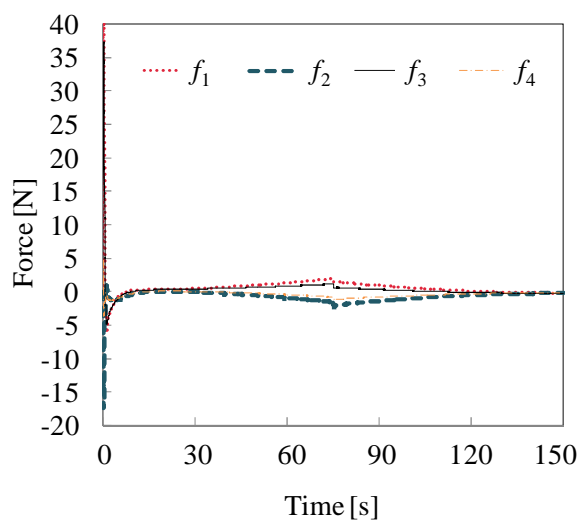


図 2.14 制御量— $f_f(X_c, \dot{X}_c) = 0.2\dot{X}_c, m = 60, d = 0.2, \alpha = 2\pi/3$

図 2.14 は非線形摩擦力，荷重変化と重心移動が有る場合，四つのメカナムホ

イールの入力であり．図 2.12 と比較する，制御力は非線形摩擦，荷重増加により大きくなる．提案したデジタル加速度制御法は前のサンプリング周期の制御入力，非線形摩擦力，荷重と重心位置変化の影響が含まれてから，前回のサンプリング期間の制御入力に基づく現在の制御入力は非線形摩擦，荷重変化と重心移動を補償する可能性がある．従って，シミュレーションにより，提案したデジタル加速度制御は，非線形摩擦力と重心位置変化引き起し行列項を補償できることが示された．

そして，シミュレーションにより，ロボットが円形経路と直線経路を追従するように，提案したデジタル加速度制御法の有効性を検証した．

2.5 実験による検討

前節では、シミュレーションにより、提案したデジタル加速度制御の有効性を検証した。ここでは、提案したデジタル加速度の有効性を更に検証するために、実験を行った。第一に、今回行った実験の概要について説明する。第二に、直線経路を追従し、PID 制御法と比較するように、デジタル加速度制御法の有効性を考察する。

【実験環境】

ここで、実験環境について説明する。実験風景の概略図を図 2.15 に、研究室の天井にカメラを設置し、歩行支援ロボットの絶対位置と姿勢角度を測定しつつ制御を行った。

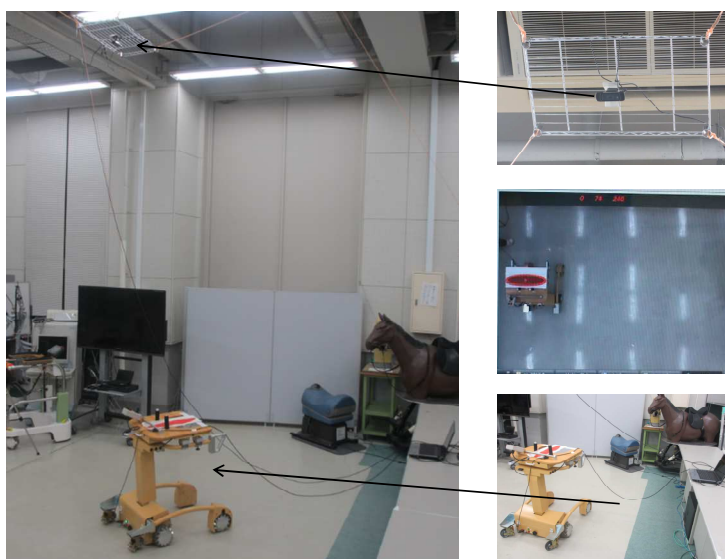


図 2.15 実験風景の概略図

【直線経路を追従する】

実験においては、実験室のサイズ制限により、ロボットが回転しつつ斜め方向で 3.5m の直線移動実験を行った、結果及び考察について述べる。まず、ロボットが図 2.16 に示す実験環境で移動経路の座標系の定義を図 2.16 に示す。x 軸と y 軸の位置は、0 から 2m までに移動する。角度は 90 度から 45°に回転する。

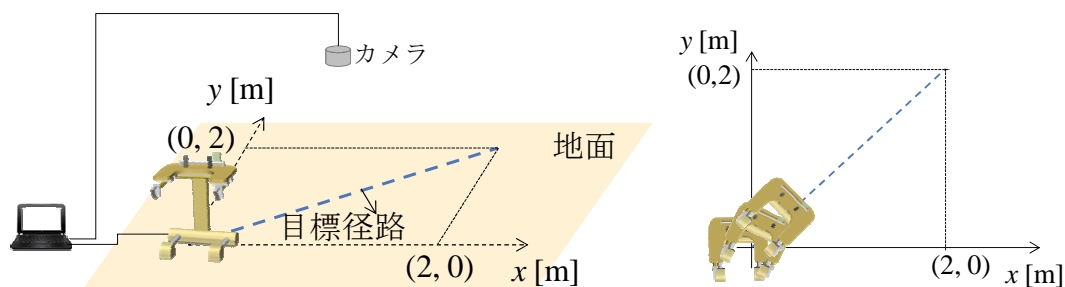


図 2.16 目標経路と実験環境内の座標系

目標経路は式(2.29)に示す.

$$x_{cd}(t) = y_{cd}(t) \quad (2.29)$$

目標軌道の方程式を式(2.30)に示す.

$$\begin{aligned} x_{cd}(t) &= 2(1 - e^{-0.1t}) \\ y_{cd}(t) &= 2(1 - e^{-0.1t}) \\ \theta_{cd} &= \pi/4 \end{aligned} \quad (2.30)$$

歩行支援ロボットの初期位置は $x_c(0) = 0 \text{ m}$, $y_c(0) = 0 \text{ m}$ とし, 初期姿勢角は $\theta_c(0) = \pi/2 \text{ rad}$ とする.

デジタル加速度制御法の有効性を検証するために, 図 2.17 に示す二つの実験条件を設定するように, 実験を行った. 図 2.17(a)には, ロボットが研究室平常の床で, 荷重無し時の走行実験を実施する, 一方, 図 2.17(b)はロボットの左に 40kg の荷重をかけ重心をずらし, 床にマットを敷き摩擦を増加させた場合の実験を行った.



- (a) 摩擦力 $\approx 46\text{N}$,荷重=0kg,重心位置 $(d = 0.10\text{m}, \alpha = \pi/2 \text{ rad})$ (b) 摩擦力 $\approx 173\text{N}$,荷重=43kg,重心位置 $(d = 0.08\text{m}, \alpha = 2\pi/3 \text{ rad})$

図 2.17 経路追従の実験条件

まず、図 2.17(a)実験条件で、手動で制御パラメータを調整によって高精度な経路追従が得られる。制御法中に使う歩行支援ロボットの慣性モーメント値は表 2.4 に示す。得られた制御パラメータを表 2.5 に示す。

表2.4 歩行支援ロボットの慣性モーメント

パラメータ	値と単位
M	40 kg
I_G	1.333kg·m ²

デジタル加速度制御法が非線形摩擦力、荷重変化と重心位置変化に対して有効性を検証する。図 2.17(b)の実験条件も、同じ制御パラメータである。

表2.5 制御系のパラメータ

パラメータ	値と単位
K_p	diag(0.1, 0.1, 0.1)s ⁻²
K_d	diag(1.0, 1.0, 1.0)s ⁻¹

提案した制御法と比較するため、従来の PID 制御法を用いて、デジタル加速度制御法と同じ実験条件で、図 2.17 に示す二つの場合の歩行支援機の走行実験を行った。

1) デジタル加速度制御結果：

図 2.18 は図 2.17(a)示す、摩擦力≈46N,荷重=0kg,重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2$ rad)の場合における実験結果である。図 2.18(a)では、横軸は時間、縦軸の点線は x 方向の目標軌道、実線は x 方向における歩行支援ロボットの位置応答を示している。図 2.18(b)では、横軸は時間、縦軸の点線は y 方向の目標軌道、実線は y 方向における歩行支援ロボットの位置応答を示している。図 2.18(c)では、横軸は時間、縦軸の点線は本体の向き角度の目標軌道、実線は角度における歩行支援ロボットの向きの角度応答を示している。図 2.18(d)では、横軸は x 方向の位置応答、縦軸は y 方向の位置応答、破線は目標軌道、実線は歩行支援ロボットの位置応答を示している。図 2.18 をように、歩行支援ロボットは全ての時間で、良い追従結果を得られている。図 2.19 は図 2.17(b)示す、摩擦力≈173N,荷重=43kg,重心位置($d = 0.08\text{m}$, $\alpha = 2\pi/3$ rad)の場合における実験結果である。図 2.19 の設定

は、図 2.18 と同様である。図 2.18 と図 2.19 の実験結果を比較すると、荷重変化、重心ずれと摩擦力が変化する場合でも、ほぼ同じ追従結果を得られた。これらの結果により、デジタル加速度制御法は荷重変化、重心ずれ、摩擦変化に対して、有効性があると考えられる。

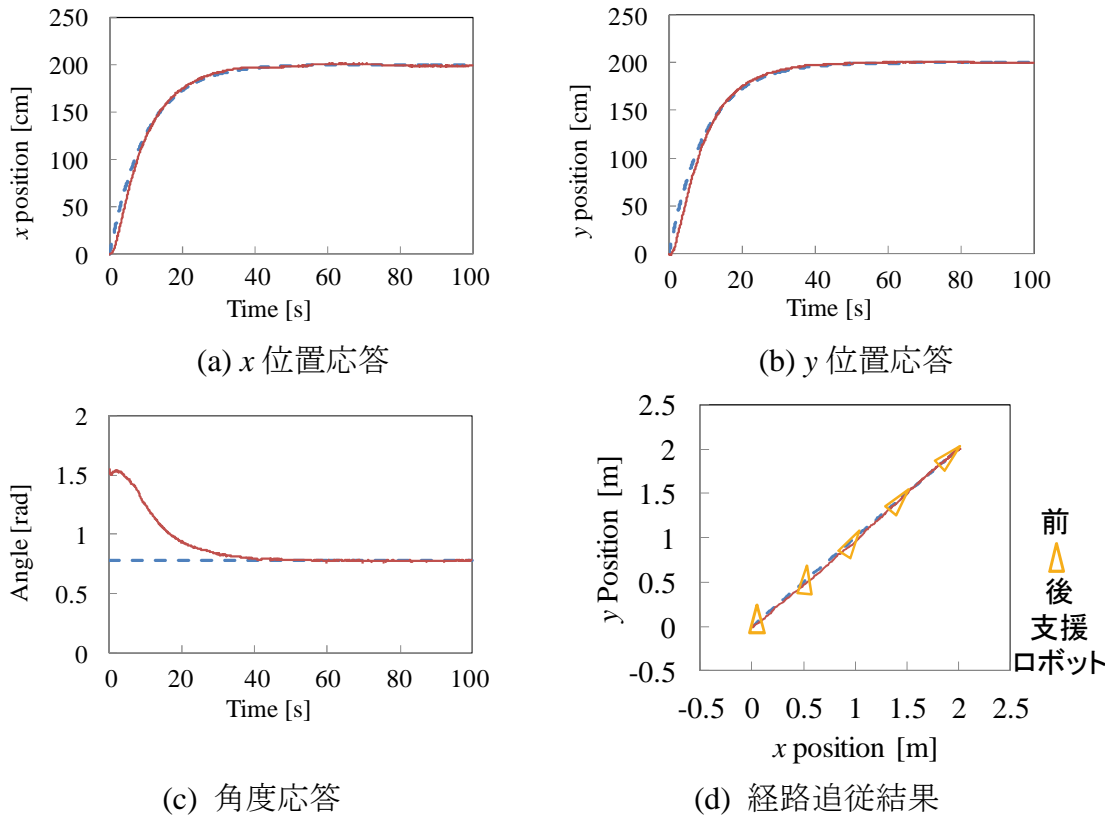
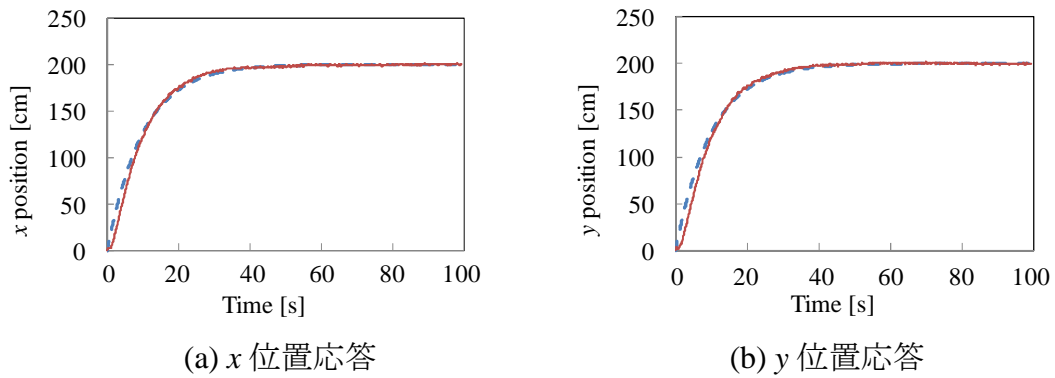
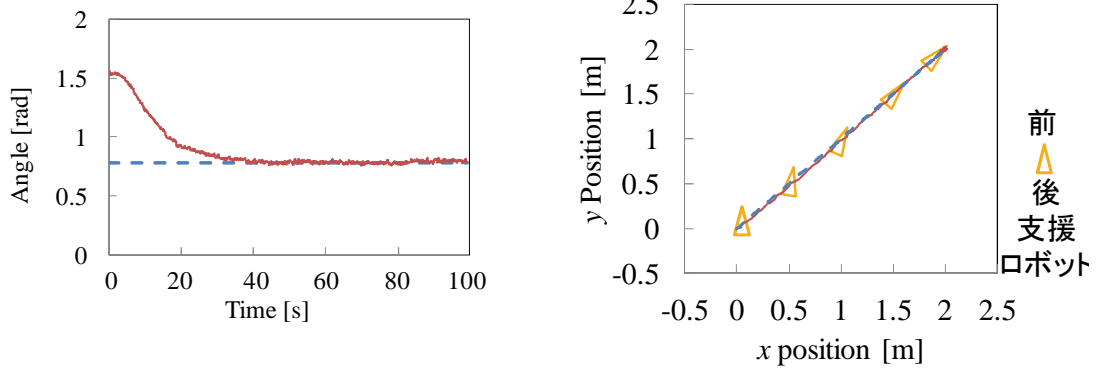


図 2.18 摩擦力 $\approx 46\text{N}$,荷重 $=0\text{kg}$,重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$)

--- Reference ——— Response





(c) 角度応答

(d) 経路追従結果

図 2.19 摩擦力 $\approx 173\text{N}$,荷重 $=43\text{kg}$,重心位置($d = 0.08\text{m}$, $\alpha = 2\pi/3 \text{ rad}$)

--- Reference ——— Response

図 2.20 は摩擦力 $\approx 46\text{N}$,荷重 $=0\text{kg}$,重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$)場合の歩行支援ロボットの四つのメカナムホールの入力量，即ち，デジタル加速度制御法の制御量である．横軸は実験時間で，縦軸はそれぞれ，四つの制御量 f_1 , f_2 , f_3 , f_4 となる．目標加速度は開始する時大きいので，制御量が最初の値は大きくなる，最後に，目標加速度が 0 になる，そして，最後の制御量が地面との摩擦力により決める．図 2.21 では，摩擦力 $\approx 173\text{N}$,荷重 $=43\text{kg}$,重心位置($d = 0.08\text{m}$, $\alpha = 2\pi/3 \text{ rad}$)の場合におけるロボットの制御量である．図 2.21 は図 2.20 より制御量が増加する．デジタル加速度制御法に示すように，非線形摩擦力とロボットの荷重が大きくなるにつれて，制御量が増加することがわかる．制御量を大きく調整することで，変化した摩擦力と荷重に対応できる．そして，デジタル加速度制御法は非線形摩擦力，荷重変化に対して，有効性が有る．

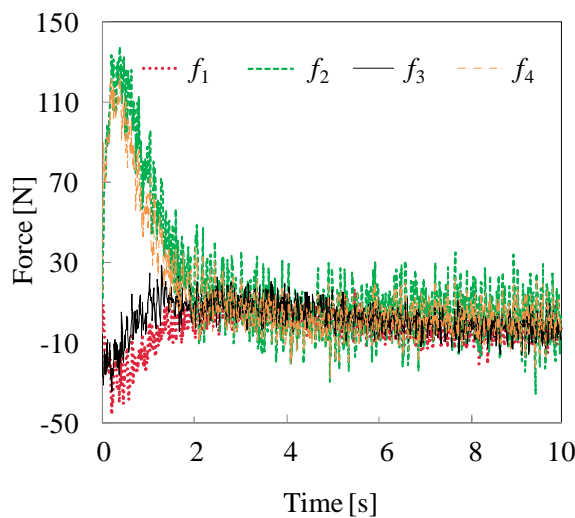


図 2.20 制御力-摩擦力 $\approx 46\text{N}$,荷重 $=0\text{kg}$,重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$)

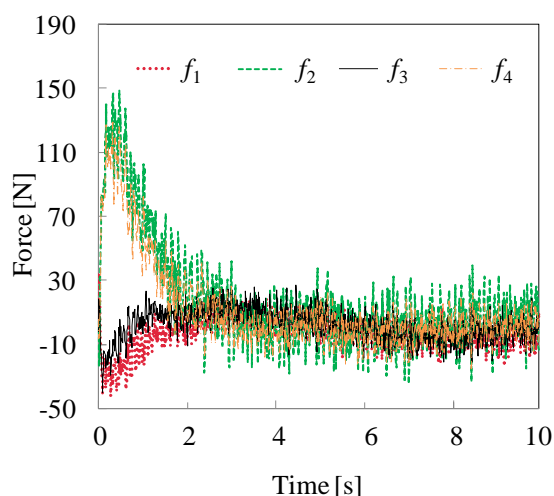


図 2.21 制御力-摩擦力 $\approx 173\text{N}$,荷重 $=43\text{kg}$,重心位置($d = 0.08\text{m}$, $\alpha = 2\pi/3 \text{ rad}$)

2) PID 制御結果 :

PID 制御法の制御パラメータも, 図 2.17(a)の条件で, 手動で調整によって高精度な経路追従が得られる, 表 2.6 に示す. 図 2.17(b)の条件も同じ制御パラメータを使う.

表2.6 PID制御系のパラメータ

パラメータ	値と単位
K_p	diag(490, 490.5, 5.0)
K_d	diag(4.9, 4.9, 0.5)
K_I	diag(0.0, 0.0, 0.0)

図 2.22 は, PID 制御を用いて, 図 2.17(a)に示す環境で, 摩擦力 $\approx 46\text{N}$,荷重 $=0\text{kg}$, 重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$)場合のロボット走行結果であり. 図 2.22(a),(b)と (c)はそれぞれロボットの x 軸, y 軸と姿勢角度の走行結果であり. 青い破線はそれぞれ x 方向, y 方向の目標軌道と本体の向き角度の目標軌道, 赤い実線はロボットの x 方向, y 方向における歩行支援ロボットの位置応答と角度における歩行支援ロボットの向きの角度応答である. 図 2.22(d)では, 横軸は x 方向の位置応答, 縦軸は y 方向の位置応答, 青い破線は目標軌道, 赤い実線は歩行支援ロボット位置応答を示している. 三角標記はロボットの向きであり. 図のように, PID 制御法は荷重無しと摩擦が増加前の場合, 歩行支援機の経路が目標経路に対して, 追従誤差がデジタル加速度制御法より大きくなった.

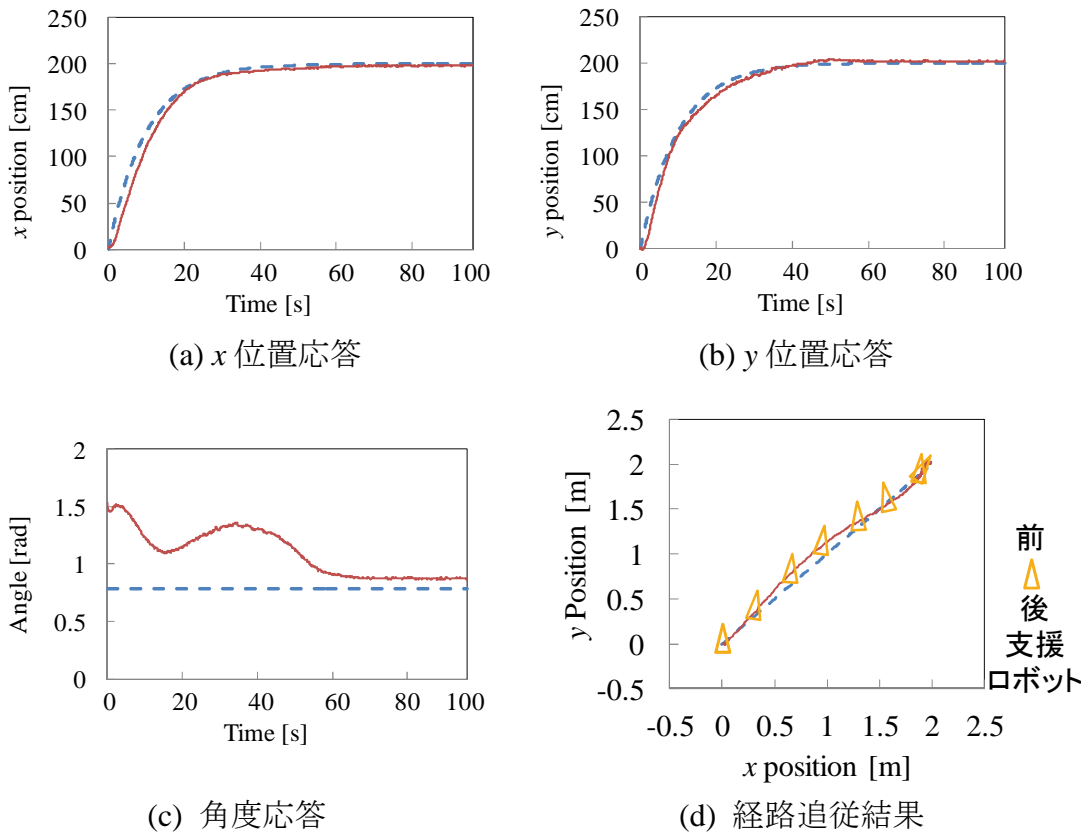
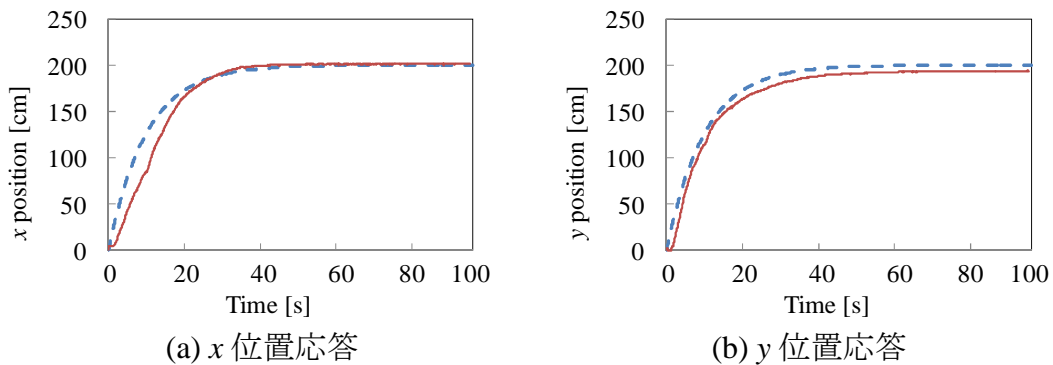
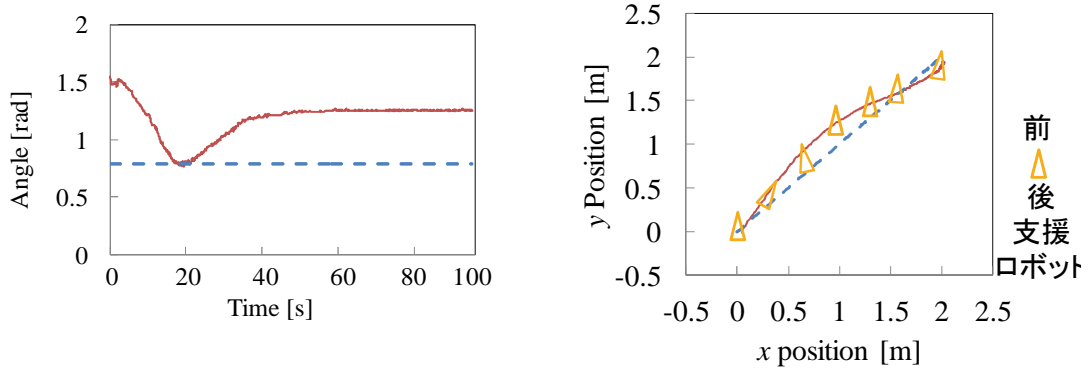


図 2.22 摩擦力 $\approx 46\text{N}$,荷重 $=0\text{kg}$,重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2$ rad)

--- Reference ——— Response

図 2.23 は、PID 制御を用いて、図 2.17(b)に示す環境で、摩擦力 $\approx 173\text{N}$,荷重 $=43\text{kg}$,重心位置($d = 0.08\text{m}$, $\alpha = 2\pi/3$ rad)場合のロボット走行結果であり。図 2.23 の設定は、図 2.22 と同様である。図 2.23 と図 2.22 で示すように、荷重有り且地面条件変化で摩擦が増加する場合、荷重無しの場合と比べて、追従誤差が増えている。これらの結果により、デジタル加速度制御法は、従来の PID の制御法より、重心ずれや摩擦力の変化に対して、有効性を確認した。





(c) 角度応答

(d) 経路追従結果

図 2.23 摩擦力 $\approx 173\text{N}$,荷重 $=43\text{kg}$,重心位置($d = 0.08\text{m}$, $\alpha = 2\pi/3 \text{ rad}$)

--- Reference ——— Response

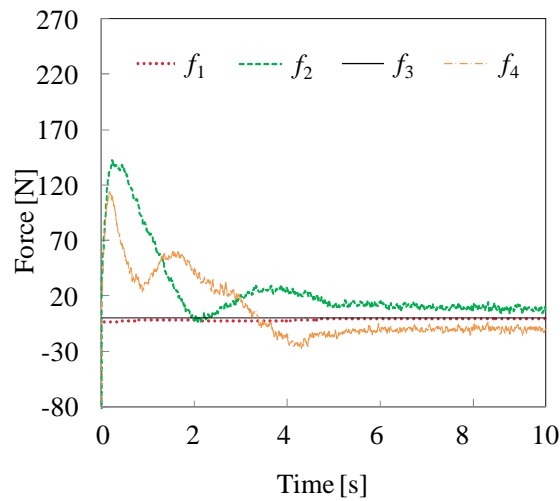


図 2.24 制御力-摩擦力 $\approx 46\text{N}$,荷重 $=0\text{kg}$,重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$)

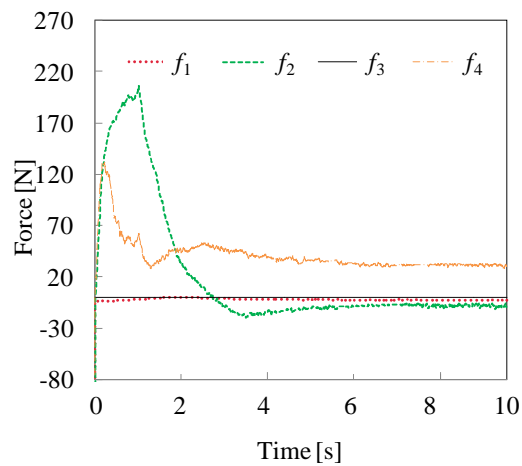


図 2.25 制御力-摩擦力 $\approx 173\text{N}$,荷重 $=43\text{kg}$,重心位置($d = 0.08\text{m}$, $\alpha = 2\pi/3 \text{ rad}$)

二つの実験条件における，メカナムホイールの入力 f_3 を 0 に選定する， f_1 , f_2

と f_4 は PID 制御より得られる。そして、ロボットが二つの実験条件における、四つのメカナムホイールの入力を図 2.24 と図 2.25 に示す。

デジタル加速度制御法に比べて、PID 制御法は荷重無しの時、歩行支援機の経路が目標経路に対して、追従誤差が大きい。また、荷重有りとな摩擦力が増加する場合、荷重無しの場合と比べて、追従誤差が増えている。摩擦力の強弱と荷重の有りと無しにも関わらず、デジタル加速度制御法は PID 制御法より、経路追従精度が高い。また、デジタル加速度制御法は、PID 制御法より、荷重と摩擦力の変化による誤差の変化が小さいである。この結果により、荷重変化と摩擦力に対して、デジタル加速度制御法の有効性を確認した。

2.6 結言

本章では、非線形摩擦力、荷重変化と重心移動を考慮した、歩行支援ロボットを対象に数学モデルを算出してデジタル加速度制御法を開発した。

歩行支援ロボットを使用する時、ロボットが適切な制御法を行わないと、目標経路からずれる。この問題に対して、歩行支援ロボットが、被支援者の肘かけ方による重心の移動に対して座標系を定義し、非線形摩擦力、荷重変化と重心移動を考慮したデジタル加速度制御法を開発した。

提案したデジタル加速度制御法を用いて、シミュレーションを行い、非線形摩擦力、荷重変化と重心移動が無しと仮定した場合の時、高精度の追従結果を得られるために、制御のパラメータを調整する。得られた制御パラメータを用いて、非線形摩擦力、荷重変化と重心移動が有り場合においても、目標経路と軌道に高精度で追従することができる。提案したデジタル加速度制御法を更に検証するために、ロボット実機実験を行った。同じ制御パラメータを使用する時、地面環境が変化する場合、荷重を掛る場合でも、ロボットが有る程度の高精度な直線経路追従結果が得られる。PID制御と比較して、提案した制御法の有効性を検証した。

参考文献

1. 立花智史, 永谷圭司, 永井伊作, 田中豊, メカナムホイールを用いた全方向移動車のナビゲーションの研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2000, 67, 2A1-44-050, 2000.
2. 細矢正廣, 制御対象装置:メカナムホイールを用いた全方向移動車の製作, 山形県立産業技術短期大学校紀要(11), pp.81-84, 2005.
3. 王碩玉, 土谷武士, 橋本幸男, ロボットマニピュレータの加速度制御法, 日本ロボット学会第1回ロボットシンポジウム予稿集, Vol.1, pp. 7-12, 1991.
4. 王碩玉, 土谷武士, 橋本幸男, 目標軌道の未来情報を利用したロボットマニピュレータの目標経路追従制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol.59, No.564, C (1993-8), pp.2512-2518.
5. 土谷武士, 深谷健一, メカトロニクス入門, 森北出版株式会社, 2004.
6. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 非線形摩擦と荷重変化に対処する歩行支援機の運動制御法, 第54回自動制御連合講演会論文集, 11PR0002/11/0000-1483, pp.1483-1484, 名古屋, 2011年11月.
7. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Motion Control for an Intelligent Walking Support Machine, ICIC Express Letters, Vol.6, No.1, pp.145-149, 2012.
8. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengeng Tan and Yinlai Jiang, Motion Control of a wheeled Mobile Robot Using Digital Acceleration Control Method. International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC). Vol. 9, No. 1, pp.387-396, 2013.

第3章

動力学式における慣性行列のリアルタイム同定法

3.1 緒言

第2章で述べたデジタル加速度制御法を設計する際に、ロボットの慣性行列 M_0 とデカップリングマトリックス $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ が必要であるが、慣性行列 M_0 と $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ が既知であると仮定して、制御力を導出した。実験において、直線経路を追従した結果より、慣性行列 M_0 と $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ の精度は低くても、有る程度追従が可能であることが判る。しかし、歩行支援ロボットの慣性行列 M_0 と $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ は、要支援者の病症や体重によって異なり、制御する前に把握することが困難である。もし、リアルタイムで慣性行列 M_0 における各要素の値を同定しながら制御することが可能であれば、制御精度を向上することが可能であり、より汎用性の高い歩行支援ができるようになる。したがって、本章では、制御則にあるロボットの慣性行列 M_0 を逐次最小2乗法を用いてリアルタイムで同定することで、ロボットの追従精度を向上させた。そして、シミュレーションにより、慣性行列 M_0 を同定する際の制御則の有効性を検証した。更に前述の慣性行列 M_0 を同定しない場合のデジタル加速度制御と比較した実験を行った。その結果、逐次最小2乗法を用いた制御則では、荷重が変化あると無し場合においても、円形経路の経路・軌道追従結果が用いない制御則より良いことが分かった。

3.2 慣性行列を同定するデジタル加速度制御系

歩行支援ロボットの動力学方程式に対して、デジタル加速度制御法に基づいて第2章で設計した非線形制御アルゴリズムは、式(3.1)で表される。

$$F(kT^+) = F[(k-1)T^+] + K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}M_0\{[\ddot{X}_{cd}(kT^+) - \ddot{X}_c(kT)] \\ + K_D[\dot{X}_{cd}(kT^+) - \dot{X}_c(kT)] + K_P[X_{cd}(kT^+) - X_c(kT)]\} \quad (3.1)$$

ここで、慣性行列 M_0 は次の通りに表せる。

$$M_0 = M_G A = \begin{bmatrix} M+m & 0 & -(M+m)d \sin(\theta + \alpha - \pi/2) \\ 0 & M+m & (M+m)d \cos(\theta + \alpha - \pi/2) \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} m_{01} & 0 & m_{02} \\ 0 & m_{01} & m_{03} \\ & & m_{04} \end{bmatrix}$$

式(3.1)で示したデジタル加速度制御則の中に、慣性行列 M_0 が含まれる。前章では、 M_0 の値を一定と仮定した。しかし、異なる要支援者の病症や体重により、 M_0 の値が変化する。ここでは、より多様な要支援者に適応するために、リアルタイムで慣性行列 M_0 の値の同定手法を開発する。最初に、第2章で導出した動力学方程式に基づいて、入力に変化した瞬間における、入力と加速度の関係を導出する。

$$M_0 \Delta \ddot{X}_c(kT^+) = \Delta U_G(kT^+) \quad (3.2)$$

ただし、 $\Delta \ddot{X}_c(kT^+)$ は時刻 kT^+ における加速度の変化である。

$$\Delta \ddot{X}_c(kT^+) = \begin{bmatrix} \Delta \ddot{x}_c(kT^+) \\ \Delta \ddot{y}_c(kT^+) \\ \Delta \ddot{\theta}_c(kT^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_c(kT^+) - \ddot{x}_c(kT) \\ \ddot{y}_c(kT^+) - \ddot{y}_c(kT) \\ \ddot{\theta}_c(kT^+) - \ddot{\theta}_c(kT) \end{bmatrix}$$

また、 $\Delta U_G(kT^+)$ は時刻 kT^+ における入力の変化である。

$$\Delta U_G(kT^+) = \begin{bmatrix} \Delta u_{Gx}(kT^+) \\ \Delta u_{Gy}(kT^+) \\ \Delta \tau_G(kT^+) \end{bmatrix} = K_G^T(\theta)[F(kT^+) - F(k-1)T^+]$$

このとき, u_{Gx} は重心位置における合力の x 軸方向ベクトル, u_{Gy} は重心位置における合力の y 軸方向ベクトル, τ_G は重心位置における回転トルクである. 式(3.2)に示す瞬間の関係により, 歩行支援ロボットの動力学に含まれるパラメータ m_{01} , m_{02} , m_{03} , m_{04} を逐次最小 2 乗法により同定する[1]. そのため, 式(3.2)を以下のよう

$$\Delta Y(k^+) \hat{J} = \Delta U_G(k^+) \quad (3.3)$$

ここで,

$$\Delta Y(k^+) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_c(kT^+) - \ddot{x}_c(kT) & \ddot{\theta}_c(kT^+) - \ddot{\theta}_c(kT) & 0 & 0 \\ \ddot{y}_c(kT^+) - \ddot{y}_c(kT) & 0 & \ddot{\theta}_c(kT^+) - \ddot{\theta}_c(kT) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddot{\theta}_c(kT^+) - \ddot{\theta}_c(kT) \end{bmatrix}$$

$$\Delta U_G(k^+) = K_G^T(\theta) \begin{bmatrix} f_1(kT^+) - f_1[(k-1)T^+] \\ f_2(kT^+) - f_2[(k-1)T^+] \\ f_3(kT^+) - f_3[(k-1)T^+] \\ f_4(kT^+) - f_4[(k-1)T^+] \end{bmatrix}$$

$$\hat{J} = [\hat{m}_{01} \quad \hat{m}_{02} \quad \hat{m}_{03} \quad \hat{m}_{04}]^T$$

\hat{J} は M_0 の同定値であり, 式(3.4)に示す逐次最小 2 乗法アルゴリズムを用いて, パラメータを推定する[2].

$$\begin{cases} \hat{J}(k) = \hat{J}(k-1) + K(k)[K_G^T(\theta)\Delta F(k) - \Delta Y(k)\hat{J}(k-1)] \\ K(k) = \frac{P(k-1)\Delta Y^T(k)}{I + \Delta Y(k)P(k-1)\Delta Y^T(k)} \\ P(k) = [I - K(k)\Delta Y(k)]P(k-1) \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで $P(k)$ は 4×4 行列, $K(k)$ は 4×3 行列であり.

具体的な同定の四つのステップは次のとおりである.

- (1) $\hat{J}(k), P(k), \Delta Y(k)$ の初期値 $\hat{J}(0), P(0), \Delta Y(0)$ を指定する.
- (2) $P(k-1)$ と $\Delta Y(k)$ により, $K(k)$ を計算し, $K_G^T(\theta)F(k)$, $\Delta Y(k)$, $K(k)$ と $\hat{J}(k-1)$ により, $\hat{J}(k)$ の同定値を更新する.
- (3) $\Delta Y(k)$, $K(k)$ と $P(k-1)$ により, $P(k)$ を更新する.
- (4) $k \leftarrow k+1$

同定する際の $\Delta Y(k^+)$ の値は, 二つのサンプリング時間で測定した歩行支援ロボットの x 軸, y 軸及び姿勢角度 θ の加速度の差値であり, $\Delta u_{Gx}(kT^+)$, $\Delta u_{Gy}(kT^+)$, $\Delta \tau_g(kT^+)$ は二つのサンプリング時間において, デジタル加速度制御法により計算した重心位置における合力の x 軸方向ベクトル, y 軸方向ベクトルと回転トルクの入力変化である.

以上より, デジタル加速度制御系は次の式(3.5)となる.

$$F(kT^+) = F[(k-1)T^+] + K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1} \hat{M}_0 \{[\ddot{X}_{cd}(kT^+) - \ddot{X}_c(kT)] + K_D[\dot{X}_{cd}(kT^+) - \dot{X}_c(kT)] + K_P[X_{cd}(kT^+) - X_c(kT)]\} \quad (3.5)$$

ここで

$$\hat{M}_0 = \begin{bmatrix} \hat{m}_{01} & 0 & \hat{m}_{02} \\ 0 & \hat{m}_{01} & \hat{m}_{03} \\ 0 & 0 & \hat{m}_{04} \end{bmatrix}.$$

慣性行列同定付きの制御法を図 3.1 に示す.

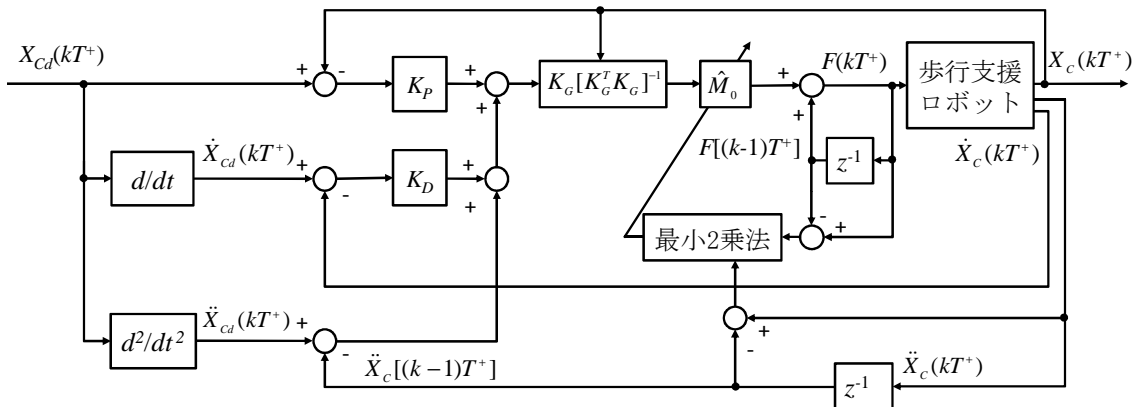


図 3.1 慣性行列同定付きの制御法のブロック線図

3.3 シミュレーション及び考察

本制御法の有効性を確かめるために、直線経路及び円形経路において歩行支援機の走行シミュレーションを行った。歩行支援機のパラメータを表 3.1 に示す。

表 3.1 歩行支援ロボットのパラメータ

パラメータ	値と単位
高さ H	840-1240 mm
幅さ $2W$	600 mm
長さ $2L$	450 mm
質量 M	80 kg
最大荷重 m	80 kg
慣性モーメント I_G	1.3 kg·m ²

シミュレーションにおけるデジタル加速度制御法の制御パラメータを設定する。具体的には、無荷重の場合に試行錯誤を行いマニュアルで調整している。制御系のパラメータと同定方法の初期値に関しては表 3.2 に示す。

表 3.2 制御パラメータ

パラメータ	値と単位
K_p	diag(0.6, 0.6, 0.6) s ⁻²
K_d	diag(3, 3, 3) s ⁻¹
$P(0)$	diag (1, 1, 1, 1),
$J(0)$	[0.1 15 -0.01 0.1]
$Y(0)$	0

【直線経路】

目標経路は次に通るである。

$$x_{cd}(t) = y_{cd}(t) \quad (3.6)$$

目標軌道の方程式を(3.7)式に示す。

$$\begin{aligned}
 x_{cd}(t) &= x_0 + \sigma(t) \\
 y_{cd}(t) &= y_0 + \sigma(t) \\
 \theta_{cd} &= \pi/2
 \end{aligned}
 , \sigma(t) = \begin{cases} \frac{20}{t_0^2} t^2 & 0 \leq t \leq \frac{t_0}{2} \\ 10 - \frac{20}{t_0^2} (t - t_0)^2 & \frac{t_0}{2} \leq t \leq t_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

目標軌道の初期値は $x_0 = 1$ m, $y_0 = 1$ m, 歩行支援機の初期位置は $x_c(0) = 0$ m, $y_c(0) = 2$ mとし, 初期姿勢角は $\theta(0) = 0$ radとする.

図 3.2 にパラメータの同定過程を示す. パラメータの同定値に関しては表 3.3 に示す. 表 3.3 より, 無荷重・重心ずれなしの場合でも, 有荷重・重心ずれありの場合でも, 同定で得られた値はほぼ真値に等しいことが分かる. この結果により, 逐次最小 2 乗法の有効性はあることが確認された.

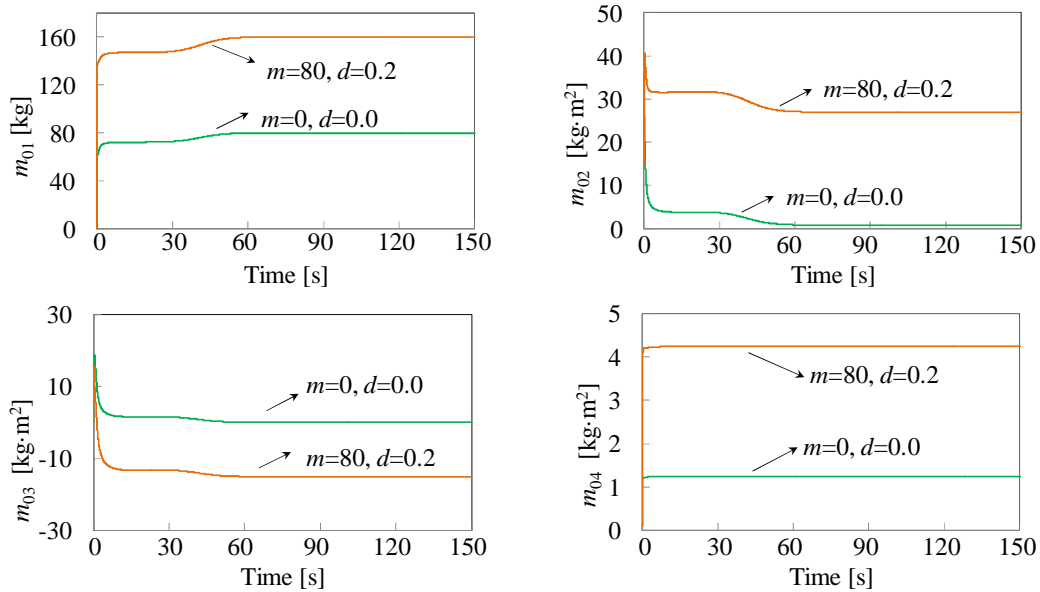


図 3.2 パラメータ $m_{01}, m_{02}, m_{03}, m_{04}$ の同定曲線

表 3.3 パラメータの同定値

パラメータ	$m=0[\text{kg}], d=0.0[\text{m}]$		$m=80[\text{kg}], d=0.2[\text{m}]$	
	真値	同定値	真値	同定値
$m_{01}[\text{kg}]$	80	79.753	160	159.376
$m_{02}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	0	0.843	27.713	26.995
$m_{03}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	0	-0.0006	-16	-15.097
$m_{04}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	1.3	1.240	4.53	4.246

図 3.3 に歩行支援ロボットの経路追従応答を示す。横軸は x 軸の位置応答，縦軸は y 軸の位置応答を表す。青破線は目標軌道，赤実線はシミュレーション結果である。荷重変化と重心ずれのある場合においても，精度よく追従したことが分かる。図 3.3 より，荷重の有無，重心ずれの有無にもかかわらず，ほぼ同じ結果が得られたことが分かる。以上の結果により，提案した制御法の有効性が確認された。

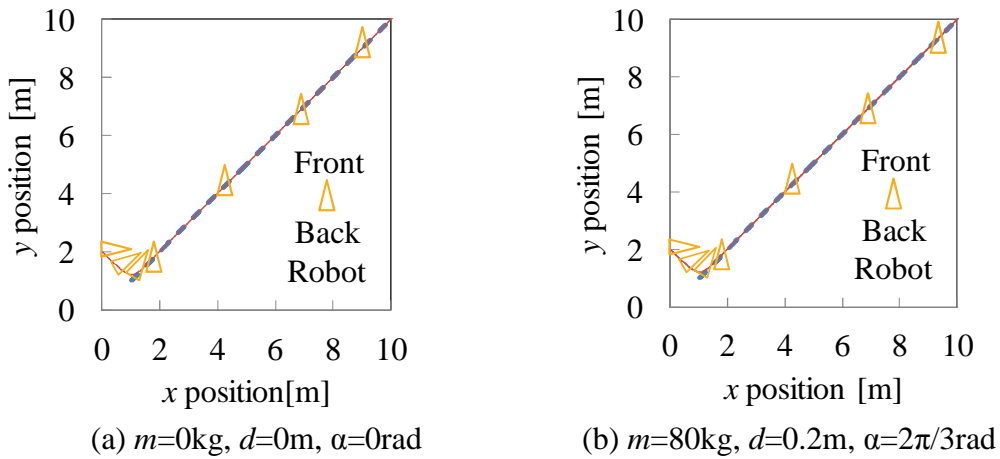


図 3.3 経路追従応答 --- Reference ——— Response

【円形経路】

目標経路は式(3.8)に示す。

$$[x_{cd}(t) - x_0]^2 + [y_{cd}(t) - y_0]^2 = r^2 \quad (3.8)$$

ここで， $(x_0, y_0) = (5, 5) \text{ m}$ は円形経路の中心で， $r = 4 \text{ m}$ は半径である。

目標軌道の方程式を(3.9)式に示す。

$$\begin{aligned} x_{cd}(t) &= x_0 + r \cos \sigma(t) \\ y_{cd}(t) &= y_0 + r \sin \sigma(t), \quad \sigma(t) = \begin{cases} \frac{4\pi}{t_0^2} t^2 & 0 \leq t \leq \frac{t_0}{2} \\ 2\pi - \frac{4\pi}{t_0^2} (t - t_0)^2 & \frac{t_0}{2} \leq t \leq t_0 \end{cases} \\ \theta_{cd}(t) &= \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

歩行支援機の初期位置は $x_c(0) = 8 \text{ m}$, $y_c(0) = 4 \text{ m}$ とし、初期姿勢角は $\theta(0)=0 \text{ rad}$ とする。

円形経路を追従する際の、パラメータの同定値に関して表 3.4 に示す。表 3.4 より、無荷重・重心ずれなしの場合でも、有荷重・重心ずれありの場合でも、同定で得られた値はほぼ真値に等しいことが分かる。この結果により、逐次最小 2 乗法の有効性が確認できる。

表 3.4 パラメータの同定値

パラメータ	$m=0[\text{kg}], d=0.0[\text{m}]$		$m=80[\text{kg}], d=0.2[\text{m}]$	
	真値	同定値	真値	同定値
$m_{01}[\text{kg}]$	80	79.753	160	159.754
$m_{02}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	0	1.020	27.713	27.938
$m_{03}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	0	-0.157	-16	-15.692
$m_{04}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	1.3	1.293	4.53	4.498

図 3.4 に歩行支援ロボットの経路追従応答を示す。図の各軸や各線の設定は図 3.3 と同じである。荷重変化と重心ずれがある場合においても、精度よく追従したことが分かる。図 3.4 より、荷重の有無、重心ずれの有無にもかかわらず、ほぼ同じ円形経路追従結果が得られたことが分かる。

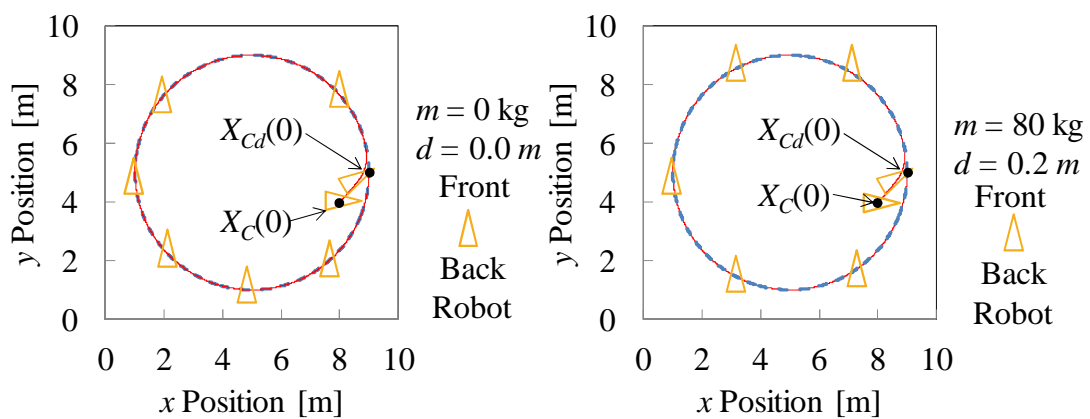


図 3.4 経路追従応答 --- Reference ——— Response

以上の直線・円形経路追従結果により、提案した制御法の有効性が確認された。

3.4 実験及び考察

前章では、簡単な直線経路においてデジタル加速度制御法の有用性を検証した。直線経路では高精度な慣性行列値でなくとも、ロボットは有る程度の追従結果を得られ、非線形摩擦力の有無に関わらず、ほぼ同じ追従結果を得られた。しかし、複雑な円形経路では、追従精度が低下した。本章では、制御アルゴリズムにある慣性行列の値を逐次最小 2 乗法を用いて同定し、追従精度を向上させる。

実験は、ロボットが無荷重と荷重有りの場合と慣性行列を同定しない場合と慣性行列を同定する場合の計 4 種類行った。ここでは、最小 2 乗法による慣性行列の同定をした場合としない場合における実験を比較し、最小 2 乗法の有用性を検証する。

慣性行列を同定しない場合において、使用する慣性行列の値は表 3.5 に示す。

表 3.5 歩行支援ロボットの慣性行列

パラメータ	値と単位
M	40 kg
I_G	1.333 kg·m ²

また、全ての場合において表 3.6 に示す同じ制御パラメータを使用する。

表 3.6 制御パラメータ

パラメータ	値と単位
K_p	diag(2.6, 2.2, 2.0) s ⁻²
K_d	diag(1.7, 1.4, 1.6) s ⁻¹

目標円形経路を式(3.10)に示す。

$$x_{cd}^2(t) + [y_{cd}(t) - 1]^2 = 1 \quad (3.10)$$

円の中心は(0,1) m であり、半径は 1 m である。

目標軌道を式(3.11)に示す、使用者の実際の走行状況に合わせて、開始速度と終了速度をゼロに設定した。

$$\begin{aligned} x_{cd}(t) &= \cos[-\pi/2 + \sigma(t)] \\ y_{cd}(t) &= \sin[-\pi/2 + \sigma(t)] - 1 \\ \theta_{cd} &= \sigma(t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

ただし,

$$\sigma(t) = \begin{cases} \frac{4\pi}{t_0^2} t^2 & 0 \leq t \leq \frac{t_0}{2} \\ 2\pi - \frac{4\pi}{t_0^2} (t - t_0)^2 & \frac{t_0}{2} \leq t \leq t_0 \end{cases}$$

ここで, $t_0 = 40$ s で, 目標速度を調節するパラメータである. 歩行支援ロボットの初期位置は $x_c(0) = 0$ m, $y_c(0) = 0$ m とし, 初期姿勢角は $\theta_c(0) = 0$ rad とする. 実験環境については図 3.5 に示す.

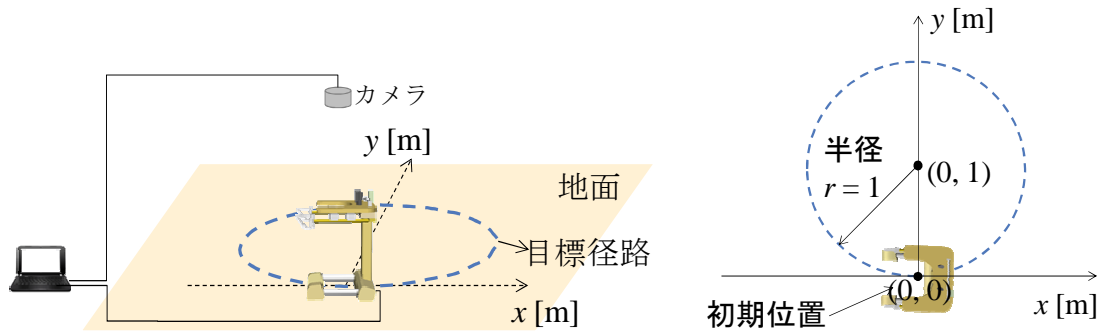


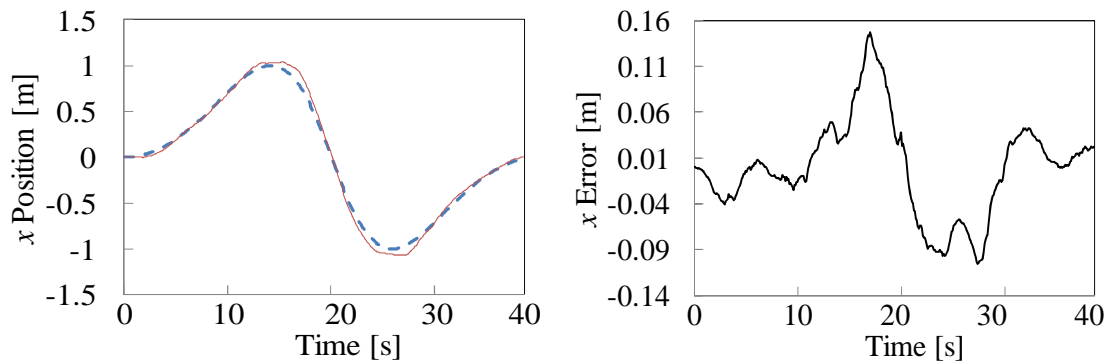
図 3.5 実験環境で目標経路の定義

【実験結果-無荷重, 重心位置, $d = 0.1$ m, $\alpha = 90^\circ$ 】

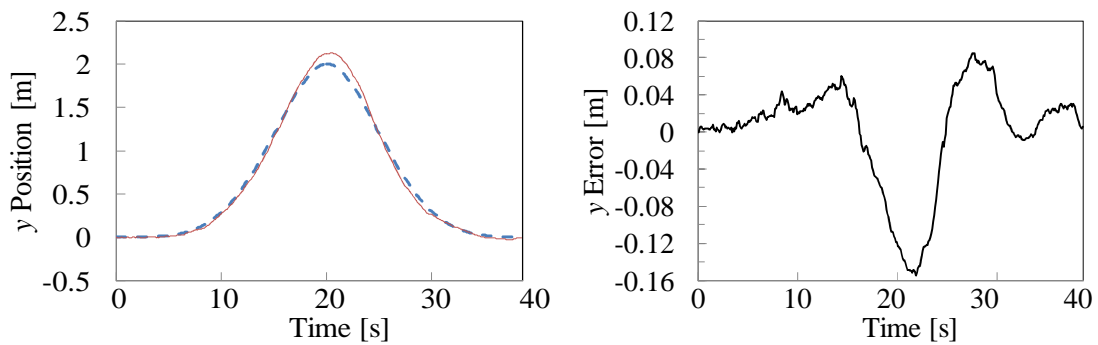
まず無荷重の場合における実験結果及び考察について述べる. 慣性行列を同定しない場合での実験結果における x 軸方向, y 軸方向, 姿勢角度の目標軌道追従結果と誤差についてそれぞれ図 3.6(a)–(c)に示す. また, 図 3.6(d)は慣性行列を同定しない場合のロボットの経路追従結果であり, 図 3.6(e)はロボットの制御入力である. 次に, 慣性行列を同定する場合での実験結果における x 軸方向, y 軸方向, 姿勢角度の目標軌道追従結果と誤差についてそれぞれ図 3.7(a)–(c)に示す. また, 図 3.7(d)は慣性行列を同定する場合のロボットの経路追従結果であり, 図 3.7(e)はロボットの制御入力である.

図 3.6(a)と図 3.7(a)において, 横軸は時間であり左図中の縦軸は x 方向の位置,

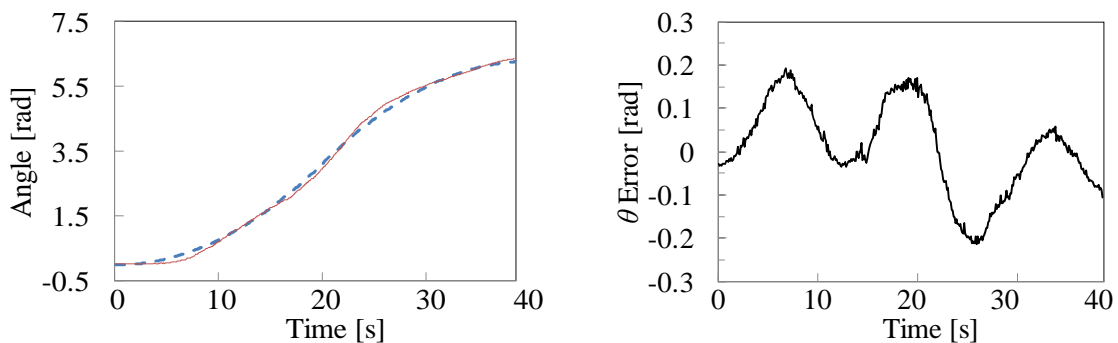
青い破線は目標軌道，赤い実線は x 方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す．右図中の縦軸は x 方向の軌道追従誤差である．図 3.6(b)と図 3.7(b)において，横軸は時間であり，左図中の縦軸は y 方向の位置，青い破線は目標軌道，赤い実線は y 方向における歩行支援ロボットの位置応答を表す．右図中の縦軸は y 方向の軌道追従誤差である．図 3.6(c)と図 3.7(c)において，横軸は時間であり，左図中の縦軸はロボットの姿勢角度，青い破線は目標軌道，赤い実線は角度における歩行支援ロボットの向きの角度応答を表す．右図中の縦軸は姿勢角度の追従誤差である．



(a) x 位置軌道追従結果と誤差



(b) y 位置軌道追従結果と誤差



(c) 姿勢角軌道追従結果と誤差

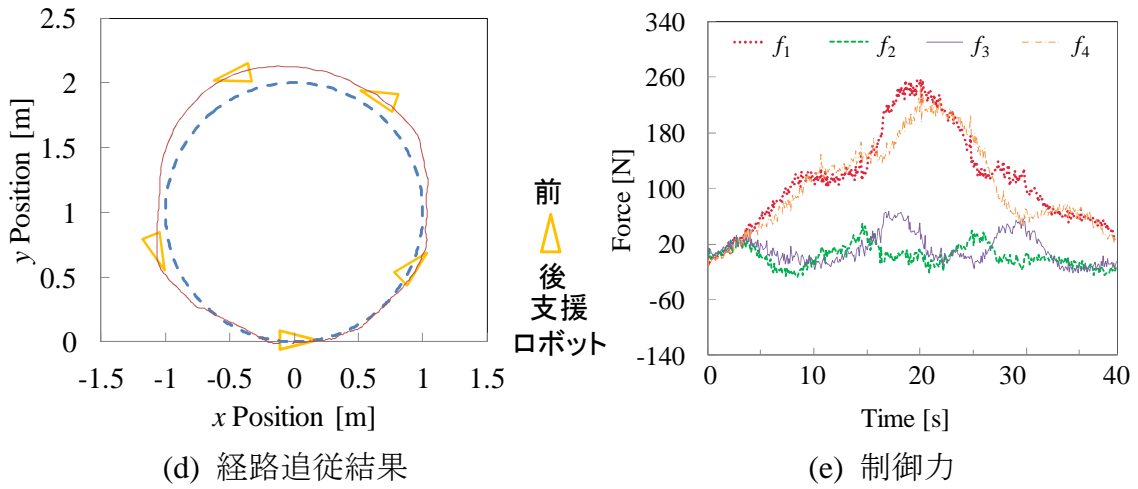
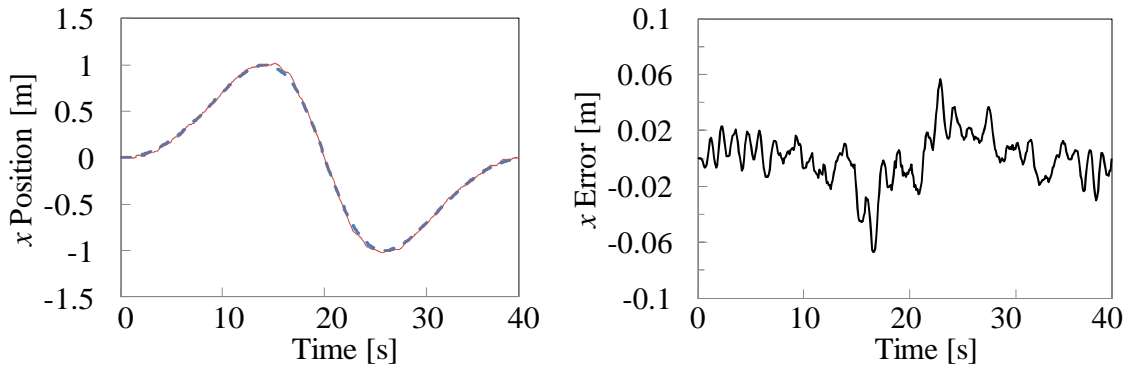
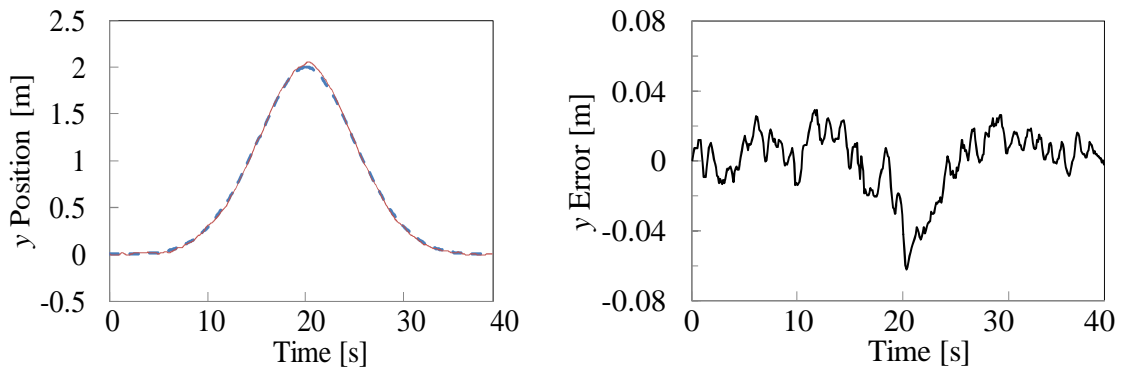


図 3.6 実験結果—無荷重（慣性行列を同定しない場合）

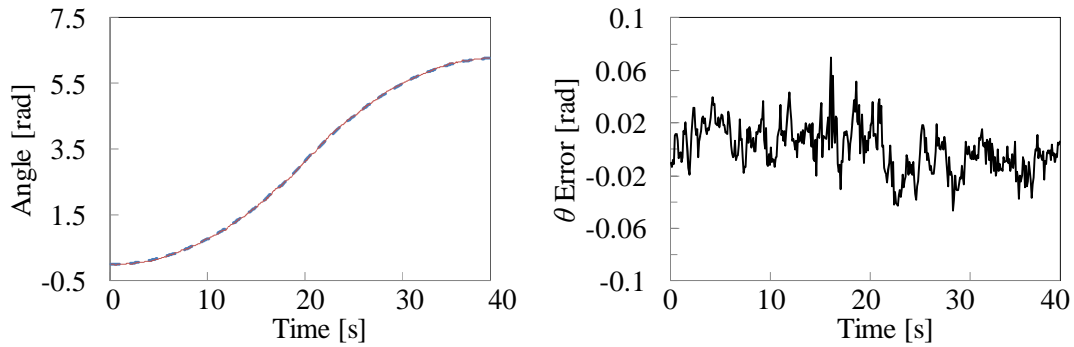
--- Reference — Response



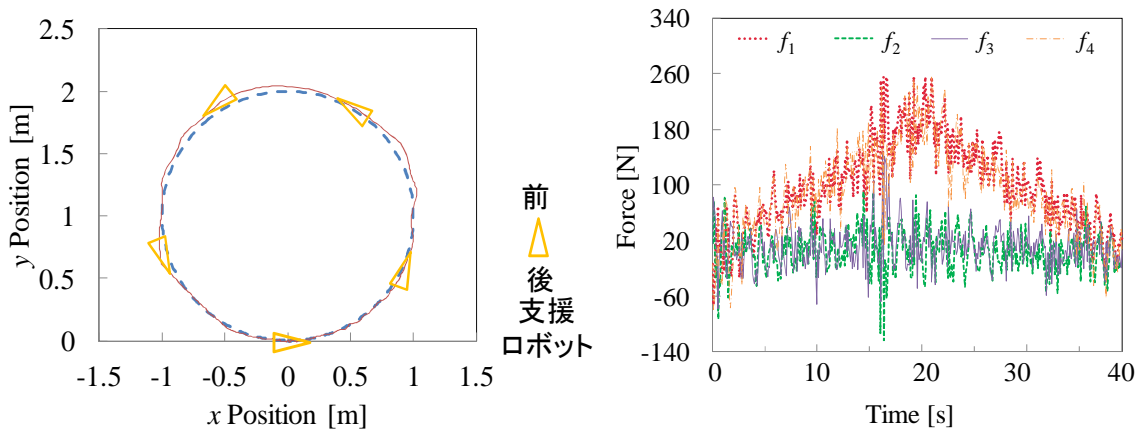
(a) x 位置軌道追従結果と誤差



(b) y 位置軌道追従結果と誤差



(c) 姿勢角軌道追従結果と誤差



(d) 経路追従結果

(e) 制御力

図 3.7 実験結果—無荷重（慣性行列を同定した場合）

--- Reference ——— Response

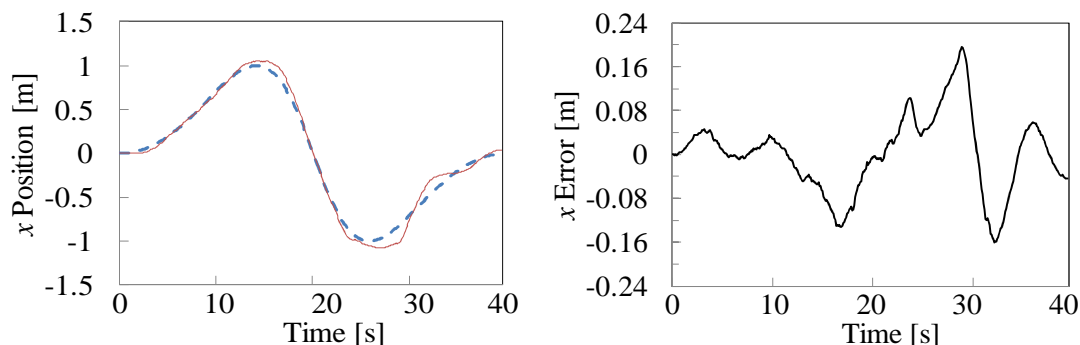
図 3.7 は図 3.6 より、軌道・経路追従誤差が減少したことがわかる。図 3.6 では、 x 軸、 y 軸及び姿勢角 θ の軌道追従誤差の絶対値の最大値がそれぞれ 0.148 m, 0.155 m, 0.213 rad である。一方、図 3.7 では x 軸、 y 軸と姿勢角 θ の軌道追従誤差の絶対値の最大値がそれぞれ 0.066 m, 0.06 m, 0.07 rad である。図 3.6(d)及び図 3.7(d)を比較すると、慣性行列を同定した場合の経路追従精度は慣性行列を同定しない場合の精度より良くなったことがわかる。これらの結果により、無荷重において、最小 2 乗法はデジタル加速度制御法の制御精度を向上させることが確認できる。

【実験結果-荷重有り，重心位置， $d = 0.066$ m, $\alpha = 106^\circ$ 】

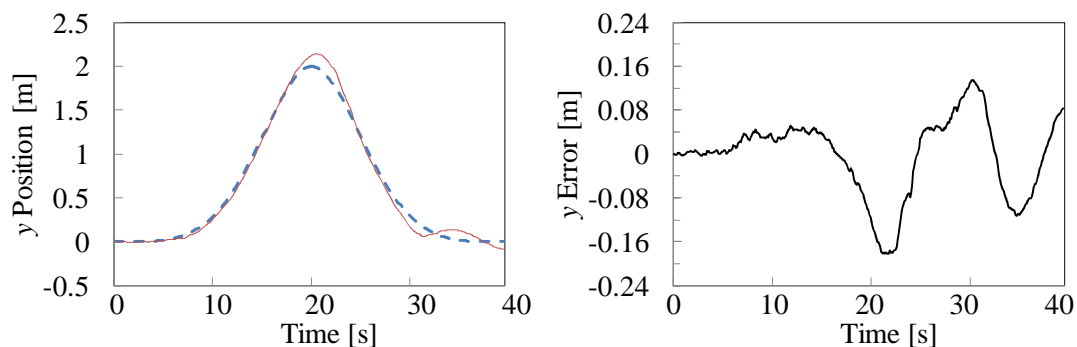
歩行支援ロボットの左中に 32.4 kg の荷重が掛る場合の実験結果及び考察につ

いて述べる．制御パラメータは無荷重の場合と同じ値を用いた．図 3.8 は，慣性行列を同定しない場合でのロボットの x 軸方向， y 軸方向，姿勢角度 θ におけるそれぞれの軌道追従結果・誤差と経路追従結果及び制御入力である．図 3.9 は，慣性行列を同定した場合でのロボットの x 軸方向， y 軸方向，姿勢角度 θ におけるそれぞれの軌道追従結果・誤差と経路追従結果及び制御入力である．図 3.8，図 3.9 の各軸や各線の設定は図 3.6，図 3.7 と同じである．

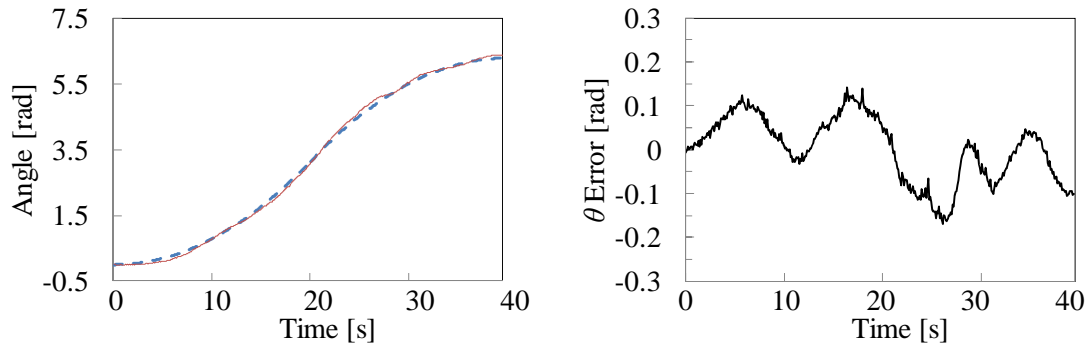
図 3.8 では， x 軸， y 軸と姿勢角 θ の軌道追従誤差の絶対値の最大値はそれぞれ 0.195 m，0.181 m，0.162 rad である．一方，図 3.9 に示す x 軸， y 軸と姿勢角 θ の軌道追従誤差の絶対値の最大値はそれぞれ 0.075 m，0.062 m，0.066 rad である．従って，荷重有りの場合においても慣性行列を同定した方が同定しないより軌道追従誤差が減少することがわかる．図 3.8(d)と図 3.9(d)の追従結果を比較しても，慣性行列を同定した方が同定しないより経路追従精度が良くなった事がわかる．従って，荷重有りの場合においても，最小 2 乗法はデジタル加速度制御法の制御精度を向上させることが確認できる．



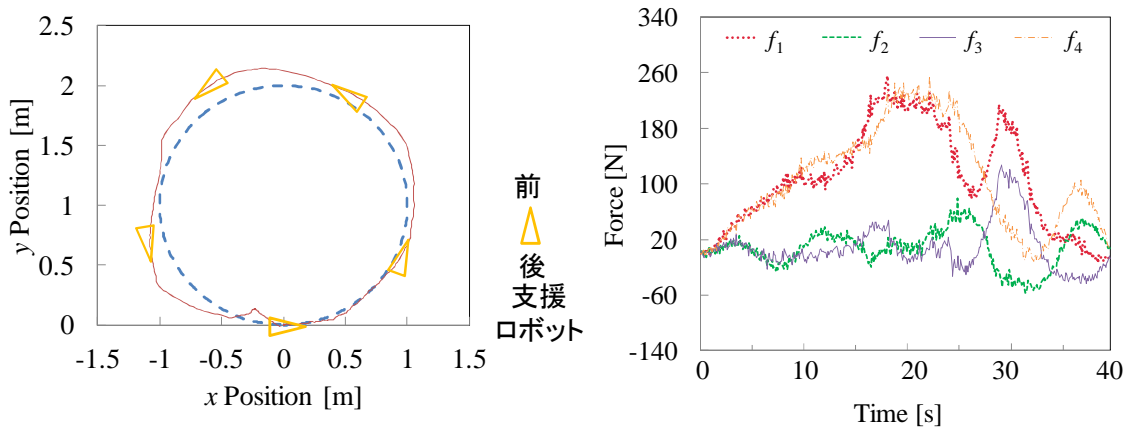
(a) x 位置軌道追従結果と誤差



(b) y 位置軌道追従結果と誤差



(c) 姿勢角軌道追従結果と誤差

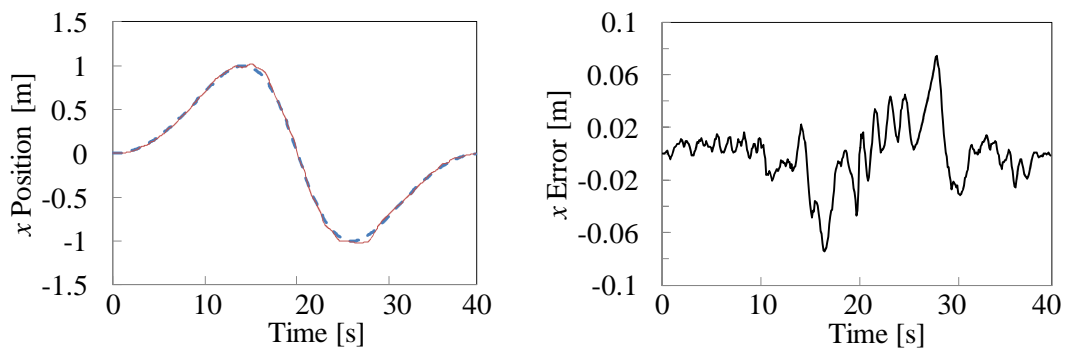


(d) 経路追従結果

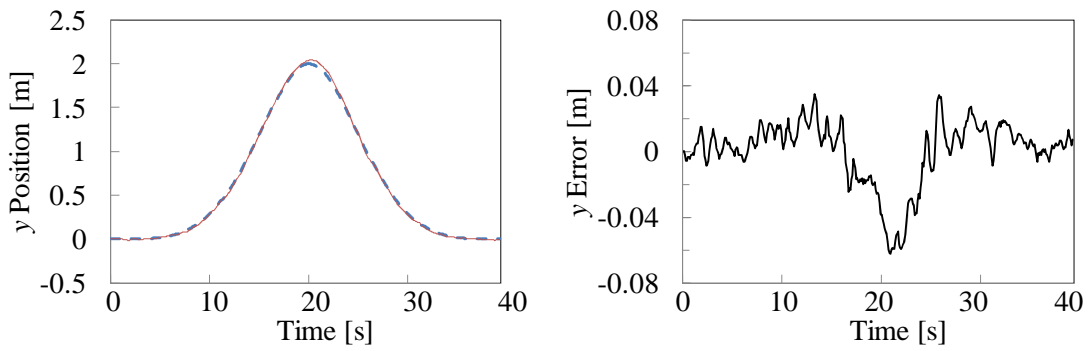
(e) 制御力

図 3.8 実験結果—荷重有り (慣性行列を同定しない場合)

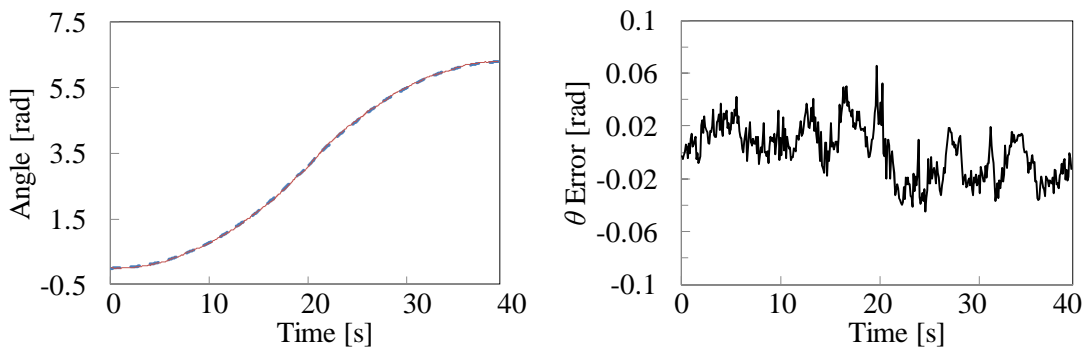
--- Reference ——— Response



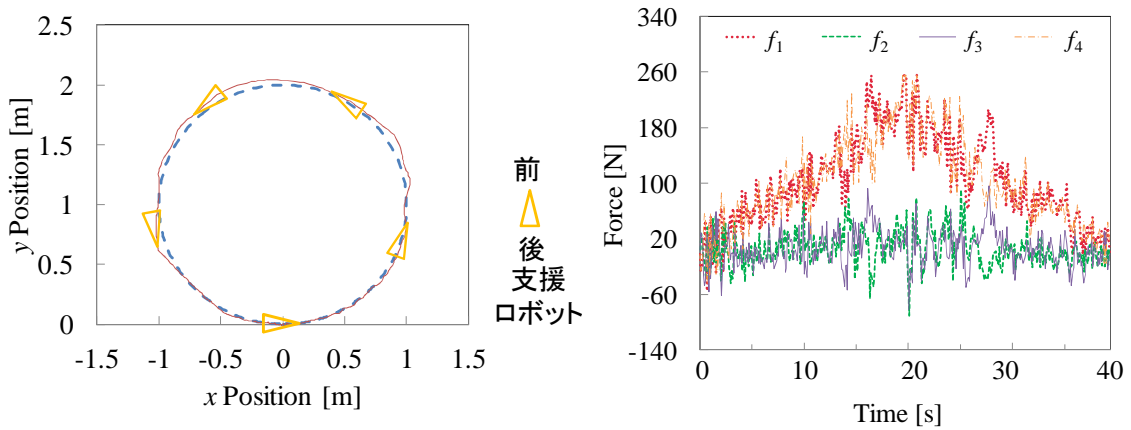
(a) x 位置軌道追従結果と誤差



(b) y 位置軌道追従結果と誤差



(c) 姿勢角軌道追従結果と誤差



(d) 経路追従結果

(e) 制御力

図 3.9 実験結果—荷重有り (慣性行列を同定した場合)

--- Reference ——— Response

【実験結果の比較】

最小 2 乗法によるデジタル加速度制御系の制御精度の向上について詳しく評価するために、荷重の有無及び慣性行列の同定の有無で分けた計 4 種類の場

合の軌道追従誤差を表 3.7 に示す。

表 3.7 で示すように無荷重で慣性行列を同定した場合は、 x 位置、 y 位置、姿勢角度 θ の追従誤差が慣性行列を同定しない場合より、それぞれ 0.082 m, 0.095 m, 0.143 rad 減少した。荷重有りで慣性行列を同定した場合は、 x 位置、 y 位置、姿勢角度 θ の追従誤差が慣性行列を同定しない場合より、それぞれ 0.08 m, 0.119 m, 0.096 rad 減少した。従って、最小 2 乗法の有効性がわかる。また、慣性行列を同定しない場合、荷重有りでの x 位置、 y 位置、姿勢角度 θ の追従誤差は無荷重より、それぞれ 0.047 m, 0.026 m 増加し、0.051 rad 減少した。慣性行列を同定しない場合、荷重有りでの x 位置、 y 位置、姿勢角度 θ の追従誤差は無荷重よりそれぞれ 0.009 m, 0.002 m 増加し、0.004 rad 減少した。従って、慣性行列を同定しない場合の方が同定する場合より荷重の有無による誤差の変化が大きいことがわかる。この結果から慣性行列を同定しない場合の方が同定した場合より荷重変化の影響が大きいことが考えられ、慣性行列を同定することが荷重変化の問題に対応できることがわかる。一方、慣性行列を同定しない場合も同定した場合も、荷重有りの姿勢角度追従誤差は無荷重より小さくなることを示した。この原因としては、表 3.7 に示す条件から荷重有りでの重心位置が、無荷重より中心位置に近くになった結果、姿勢角度の影響が小さくなったと考えられる。

表 3.7 軌道追従結果

実験条件	制御則	x 誤差 m	y 誤差 m	姿勢角 誤差 rad
無荷重 ($d=0.1\text{m}$, $\alpha=90^\circ$)	慣性行列を同定した	0.066	0.060	0.070
	慣性行列を同定しない	0.148	0.155	0.213
荷重有り ($d=0.066\text{m}$, $\alpha=106^\circ$)	慣性行列を同定した	0.075	0.062	0.066
	慣性行列を同定しない	0.195	0.181	0.162

以上の比較説明より、最小 2 乗法は、荷重変化の問題に対応できる有効性を示し、デジタル加速度制御系の制御精度を向上させることを確認した。

3.5 結言

本章では、最小 2 乗法に基づいてデジタル加速度制御則にあるロボットの慣性行列の同定法を開発し、歩行支援ロボットの経路追従結果を向上させた。シミュレーションでは、荷重の有無に関わらず、最小 2 乗法はロボットの慣性行列を正確に同定し、同定しない場合より良い軌道・経路追従結果が得られた。実験では、慣性行列を同定した場合と同定しない場合を比較するために、同定した慣性行列を利用し、その結果として経路追従誤差が低減できることを確認した。以上より最小 2 乗法は、デジタル加速度制御法の制御精度を向上させることを確認した。

参考文献

1. A. H. Sayed and T. Kailath , “Recursive least-squares adaptive filters" in the digital signal processing handbook,” CRC - IEEE Press, USA, 1998.
2. Pizarro, and D. Sbarbaro, Parameter subset identification by recursive least squares, Proceedings of the 1998 American Control Conference, Vol.6, pp.3590 - 3591, 1998.
3. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 小林洋, 藤江正克, 安藤健, インテリジェント歩行支援機の運動制御精度向上, 第30回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2012AC4C1-7,札幌, 2012年9月.
4. Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Yinlai Jiang and Kazuhiro Hamaguchi, Digital Acceleration Controller Based on Recursive Least Squares (RLS) Identification for an Excretion Care Support Robot, Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.1639-1644, Chengdu, China, Aug., 2012.

第4章

重心情報を必要としないデジタル加速度制御法の開発

4.1 緒言

第2章導出した歩行支援ロボットの動力学方程式には、駆動力はロボットの重心位置に作用する。この動力学モデルに基づいて、開発した非線形デジタル加速度制御法において、デカップリングマトリックス $K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1}$ の中に、ロボットの重心情報が含まれる。重心位置の変化によりデジタル加速度制御系の制御精度が影響される。

本章では、歩行支援ロボットの運動精度を更に高上させるために、荷重変化と重心位置変化の影響はすべて慣性行列の中に含まれるように、駆動力が中心位置に作用する動力学方程式を導出した。この動力学方程式に基づいて、新しいデジタル加速度制御系を構成する。新しい非線形デカップリングマトリックス中に、歩行支援ロボットの向き、ロボットの全長、幅が必要である。ロボットの向きはリアルタイムで測定することができる。ロボットの全長と幅が一定である。デジタル加速度制御則にある慣性行列の値を逐次最小2乗法を用いて同定する。以上により、制御則に必要な物理量が全て導出される。従って、この制御方法により、非線形摩擦、荷重変化と重心位置変化などの影響をすべての状況に対して対応する。実験により、適切な制御パラメータを設定することにより、地面条件が一定なくても、荷重と重心位置が異なっても、歩行支援ロボットの運動制御を保証できることが示される。

そして、本章では、まず、駆動力が中心位置に作用する動力学、つまり重心に関する動力学方程式を中心に関する動力学方程式に変形した。次に、この動力学を対象とし、新たなデジタル加速度制御系を設計し、逐次最小2乗法を用いてデジタル加速度制御則の中新たな慣性行列を同定した。最後に、実験

により、第3章の制御則を比較することにより、新たな制御系の有効性を実験で検証した。

4.2 駆動力が中心に作用する動力学の導出

第2章では、駆動力がロボットの重心位置を直接に作用する動力学方程式を導出した。本節では、まずこの重心に関する動力学方程式を、中心に関する動力学方程式に変形した。

【重心位置に作用する動力学】

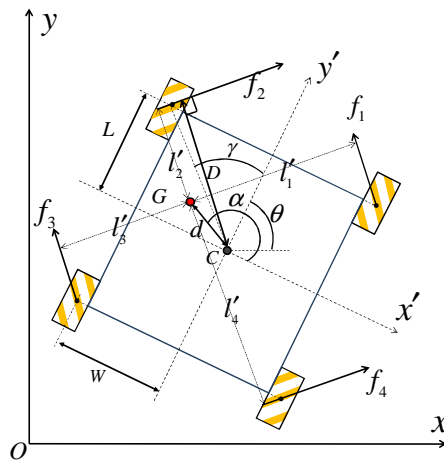


図 4.1 重心位置に作用するモデル

動力学とは、物体の力と運動との関係を求める力学の一分野であり。剛体の動力学は、重心に全質量が集中したものとした並進運動に関するニュートンの運動方程式となる。したがって、駆動力が重心位置に作用する動力学方程式を導出する。図 4.1 の中に、 l_1, l_2, l_3, l_4 は駆動力と重心位置との距離であり、 l_1, l_2, l_3, l_4 の長さはロボットの重心位置により変化する。そして、ロボットが重心位置に作用する動力学方程式を式(4.1)に示す。

$$M_G \ddot{X}_G = K_G^T(\theta)[F - f_f(X_C, \dot{X}_C)] \quad (4.1)$$

$$M_G = \begin{bmatrix} M + m & 0 & 0 \\ 0 & M + m & 0 \\ 0 & 0 & I_G \end{bmatrix}$$

$$\ddot{X}_G = [\ddot{x}_G \quad \ddot{y}_G \quad \ddot{\theta}_G]^T$$

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T$$

$$f_f(X_c, \dot{X}_c) = [f_{f1}(X_c, \dot{X}_c) \quad f_{f2}(X_c, \dot{X}_c) \quad f_{f3}(X_c, \dot{X}_c) \quad f_{f4}(X_c, \dot{X}_c)]^T$$

$$K_G^T(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) \\ \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) \\ l'_1 & -l'_2 & -l'_3 & l'_4 \end{bmatrix}$$

l'_1, l'_2, l'_3 と l'_4 駆動力と重心位置との距離は、下の通りであり。

$$l'_1 = D - d \cos(\alpha - \pi/4)$$

$$l'_2 = D - d \sin(\alpha - \pi/4)$$

$$l'_3 = D + d \cos(\alpha - \pi/4)$$

$$l'_4 = D + d \sin(\alpha - \pi/4)$$

そして、4つの駆動力 F と各制御量との関係 $K_G^T(\theta)$ の中に、重心位置情報が含まれる。この動力学方程式に基づいて、開発した非線形デジタル加速度制御法の中に、非線形デカップリングマトリックス $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ の得られるは難しい。そこで、駆動力が中心位置を直接作用する動力学モデルを導出した[1]。

【中心位置に作用する動力学】

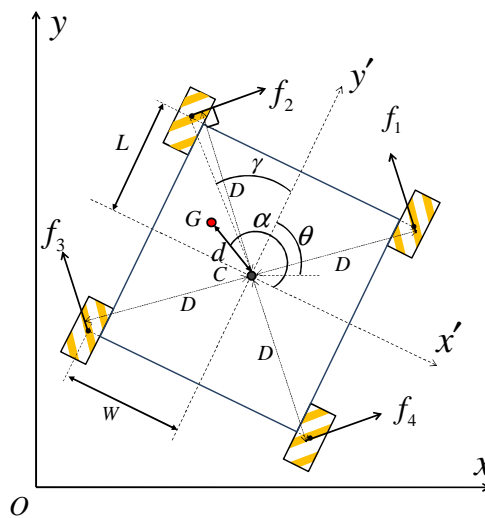


図 4.2 駆動力が中心位置に作用するモデル

駆動力が中心位置を直接作用する時、駆動力と作用点 C との距離は D であり、ロボットの構造が一定とし、 D も一定とする。剛体の動力学により、重心に全質量が集中したものとした並進運動の式を(4.2)示す[2].

$$A^T M_G \ddot{X}_G = K_c^T(\theta)[F - f_f(X_c, \dot{X}_c)] \quad (4.2)$$

ここで、 A は第2章で述べた、中心位置と重心位置の速度変換マトリックスである。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d \sin(\alpha + \theta - \pi/2) \\ 0 & 1 & d \cos(\alpha + \theta - \pi/2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & p \\ 0 & 1 & q \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

また、平行軸の定理により、中心位置まわりの質量中心の慣性行列が変化した[3]、つまり

$$M_G = \begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I_G + (M+m)d^2 \end{bmatrix}$$

$$K_c^T = \begin{bmatrix} -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) \\ \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) \\ D & -D & -D & D \end{bmatrix}$$

更に、第2章で述べた、中心位置と重心位置の加速度・速度関係式 $\ddot{X}_G = \frac{d}{dt}(A\dot{X}_c) = A\ddot{X}_c + \dot{A}\dot{X}_c$ により、重心位置の運動により引き起こす中心位置の運動に関する動力学方程式は、下の通りである。

$$M_1 \ddot{X}_c + N_1 \dot{X}_c = K_c^T(\theta)[F - f_f(X_c, \dot{X}_c)] \quad (4.3)$$

ここで

$$M_1 = A^T M_G A = \begin{bmatrix} M+m & 0 & (M+m)p \\ 0 & M+m & (M+m)q \\ (M+m)p & (M+m)q & I_G + (M+m)d^2 \end{bmatrix}$$

$$N_1 = A^T M_G \dot{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(M+m)q\dot{\theta} \\ 0 & 0 & (M+m)p\dot{\theta} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

そして式(4.3)より，駆動力がロボットの中心位置に直接作用する時，重心位置の影響がすべてロボットの慣性行列の $A^T M_G A$ 中に含まれる．駆動力と制御量との間非線形カップリング関係はロボットの重心位置関係しない， $K_c^T(\theta)$ が一定する．この動力学を対象とし，非線形デジタル加速度制御法を開発する時，非線形デカップリングマトリックス中に，歩行支援ロボットの向き，ロボット全長，幅が必要である．ロボットの向きはリアルタイムで測定することができる．ロボットの全長と幅が一定である．したがって，歩行支援ロボットの構造を一定する時， $K_c^T(\theta)$ が一定となり，制御量を得ることが容易である．

4.3 デジタル加速度制御系の設計

中心位置を直接に作用する動力学方程式を導出した，本節では，このモデルに基づいて，デジタル加速度制御系を導出する．

【デジタル加速度制御系】

動力学方程式(4.3)に基づいて，新たなデジタル加速度制御系を式(4.4)に示す．

$$F(kT^+) = F[(k-1)T^+] + K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1}M_1\{\ddot{X}_{cd}(kT^+) - \ddot{X}_c(kT)\} \\ + K_D[\dot{X}_{cd}(kT^+) - \dot{X}_c(kT)] + K_P[X_{cd}(kT^+) - X_c(kT)] \quad (4.4)$$

制御則にあるデカップリングマトリックス $K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1}$ は次の通りに示す．

$$K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & 1/4D \\ \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) & -1/4D \\ -\sin(\theta - \pi/4) & \cos(\theta - \pi/4) & -1/4D \\ \cos(\theta - \pi/4) & \sin(\theta - \pi/4) & 1/4D \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

式(4.5)より，デカップリングマトリックス $K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1}$ 中に，歩行支援ロボットの向き，ロボットの全長，幅が必要である．ロボットの向きはリアルタイムで測定することできる．ロボットの全長と幅が一定である．デジタル加速度制御則にある慣性行列の値を逐次最小 2 乗法を用いて同定する．以上により，制御則に必要な物理量がすべて導出される．この制御方法により，非線形摩擦，荷重変化と重心位置変化などの影響をすべての状況に対して対応した．

【逐次最小 2 乗法】

式(4.4)のデジタル加速度制御則の中で，慣性行列 M_1 が含まれる．ここで，より汎用性の高い歩行支援ができるように，リアルタイムで慣性行列の同定法を開発する．具体的に，式(4.3)の歩行支援機の動力学に基づいて，デジタル加速度制御則に含まれる慣性行列を逐次最小 2 乗法により求める．慣性行列を下

記の標記に示す.

$$M_1 = \begin{bmatrix} M+m & 0 & (M+m)p \\ 0 & M+m & (M+m)q \\ (M+m)p & (M+m)q & I_G + (M+m)d^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & m_2 \\ 0 & m_1 & m_3 \\ m_2 & m_3 & m_4 \end{bmatrix}$$

まず, 時刻 kT と時刻 kT^+ の動力学関係を求める. 時刻 kT^+ で, 入力変化する瞬間, 第2章で述べた, 新たな加速度を得られる, しかし, この瞬間位置, 速度, 非線形摩擦は瞬時に変化しない. つまりこの2つ時間の, 歩行支援ロボットの動力学方程式は次の通りである.

$$K_c^T(\theta)\{F[(k-1)T^+] - f_f[X_c(kT), \dot{X}_c(kT)]\} = M_1 \ddot{X}_c(kT) + N_1 \dot{X}_c(kT) \quad (4.6)$$

$$K_c^T(\theta)\{F(kT^+) - f_f[X_c(kT), \dot{X}_c(kT)]\} = M_1 \ddot{X}_c(kT^+) + N_1 \dot{X}_c(kT) \quad (4.7)$$

時刻 kT^+ の動力学方程式(4.7)から時刻 kT の動力学方程式(4.6)を引くと, 入力に変化した瞬間の加速度変化との関係は式(4.8)となります.

$$M_1[\ddot{X}_c(kT^+) - \ddot{X}_c(kT)] = K_c^T(\theta)[F(kT^+) - F(k-1)T^+] \quad (4.8)$$

式(4.8)により, この入力に変化した瞬間の加速度変化との関係中に行列 M_1 が含まれる. したがって, この関係に基づいて, 逐次最小2乗法により, ロボットの慣性行列 M_1 を導出する. まず, 式(4.8)は, 次の記号を用いると簡単に表すことができる.

$$M_1 \Delta \ddot{X}_c(kT^+) = \Delta U_c(kT^+) \quad (4.9)$$

ただし, $\Delta \ddot{X}_c(kT^+)$ は時刻 kT^+ で加速度の変化である.

$$\Delta \ddot{X}_c(kT^+) = \begin{bmatrix} \Delta \ddot{x}_c(kT^+) \\ \Delta \ddot{y}_c(kT^+) \\ \Delta \ddot{\theta}_c(kT^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_c(kT^+) - \ddot{x}_c(kT) \\ \ddot{y}_c(kT^+) - \ddot{y}_c(kT) \\ \ddot{\theta}_c(kT^+) - \ddot{\theta}_c(kT) \end{bmatrix}$$

また, $\Delta U_c(kT^+)$ は時刻 kT^+ で入力の変化である.

$$\Delta U_c(kT^+) = \begin{bmatrix} \Delta u_{cx}(kT^+) \\ \Delta u_{cy}(kT^+) \\ \Delta \tau_c(kT^+) \end{bmatrix} = K_c^T(\theta)[F(kT^+) - F(k-1)T^+]$$

u_{cx} : 中心位置における合力の x 軸方向ベクトル, u_{cy} : 中心位置における合力の y 軸方向ベクトル, τ_c : 中心位置における回転トルク.

更に, 式(4.9)を以下のように書き換える.

$$m_1 \Delta \ddot{x}_c(kT^+) + m_2 \Delta \ddot{\theta}_c(kT^+) = \Delta u_{cx}(kT^+) \quad (4.10)$$

$$m_1 \Delta \ddot{y}_c(kT^+) + m_3 \Delta \ddot{\theta}_c(kT^+) = \Delta u_{cy}(kT^+) \quad (4.11)$$

$$m_2 \Delta \ddot{x}_c(kT^+) + m_3 \Delta \ddot{y}_c(kT^+) + m_4 \Delta \ddot{\theta}_c(kT^+) = \Delta \tau_c(kT^+) \quad (4.12)$$

本章で, 式(4.10), (4.11)と(4.12)別々に基づいて, 慣性モーメント m_1, m_2, m_3, m_4 の値を求める. すなわち, 式(4.10)に基づいて, $\Delta \ddot{x}_c(kT^+)$, $\Delta \ddot{\theta}_c(kT^+)$ と $\Delta u_{cx}(kT^+)$ の値により, m_1 と m_2 の値を推定する. 式(4.11)に基づいて, $\Delta \ddot{y}_c(kT^+)$, $\Delta \ddot{\theta}_c(kT^+)$ と $\Delta u_{cy}(kT^+)$ の値により, m_1 と m_3 の値を推定する. 式(4.12)に基づいて, $\Delta \ddot{x}_c(kT^+)$, $\Delta \ddot{y}_c(kT^+)$, $\Delta \ddot{\theta}_c(kT^+)$ と $\Delta \tau_c(kT^+)$ の値により, m_2, m_3 と m_4 の値を推定する. m_1, m_2 , と m_3 を 2 個推定値が有る, この 2 個の推定値を平均するように得られた値をデジタル加速度制御則の中に使用する.

毎次の推定方法は, 逐次最小 2 乗アルゴリズムで, 第 3 章と同じ, 式(4.13)に示す.

$$\begin{cases} \hat{M}(k) = \hat{M}(k-1) + K(k)[\Delta u(k) - \Delta \ddot{X}(k)\hat{M}(k-1)] \\ K(k) = P(k-1)\Delta \ddot{X}^T(k)[I + \Delta \ddot{X}(k)P(k-1)\Delta \ddot{X}^T(k)]^{-1} \\ P(k) = [I - K(k)\Delta \ddot{X}(k)]P(k-1) \end{cases} \quad (4.13)$$

具体的な同定の 4 つのステップは次の通りである.

- (1) $\hat{M}(k), P(k), \Delta \ddot{X}(k)$ の初期値 $\hat{M}(0), P(0), \Delta \ddot{X}(0)$ を指定する.
- (2) $P(k-1)$ と $\Delta \ddot{X}(k)$ により, $K(k)$ を計算し, $\Delta u(k), \Delta \ddot{X}(k), K(k)$ と $\hat{M}(k-1)$ に

より, $\hat{M}(k)$ の同定値を更新する.

(3) $\Delta\ddot{X}(k)$, $K(k)$ と $P(k-1)$ により $P(k)$ を更新する.

(4) $k \leftarrow k+1$

【逐次最小 2 乗法の応用】

まず, 式(4.10)により, m_1 と m_2 の値を推定する, (4.13)式に示す逐次最小 2 乗アルゴリズムの各変数が下の通りであり.

$$\hat{M}(k) = \begin{bmatrix} \hat{m}_{1_1}(k) \\ \hat{m}_{2_1}(k) \end{bmatrix}, \quad K(k) = \begin{bmatrix} k_{1_1}(k) \\ k_{2_1}(k) \end{bmatrix}, \quad P(k) = \begin{bmatrix} p_{11_1}(k) & p_{12_1}(k) \\ p_{21_1}(k) & p_{22_1}(k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta u(k) = \Delta u_{c_x}(kT^+), \quad \Delta\ddot{X}(k) = [\Delta\ddot{x}_c(kT^+) \quad \Delta\ddot{\theta}_c(kT^+)]$$

$\hat{m}_{1_1}(k)$ は m_1 の第 1 回推定値である, また, $\hat{m}_{2_1}(k)$ は m_2 の第 1 回推定値である.

次に, 式(4.11)により, m_1 と m_3 の値を推定時, (4.13)式に示す逐次最小 2 乗アルゴリズムの各変数が下の通りであり.

$$\hat{M}(k) = \begin{bmatrix} \hat{m}_{1_2}(k) \\ \hat{m}_{3_2}(k) \end{bmatrix}, \quad K(k) = \begin{bmatrix} k_{1_2}(k) \\ k_{3_2}(k) \end{bmatrix}, \quad P(k) = \begin{bmatrix} p_{11_2}(k) & p_{12_2}(k) \\ p_{21_2}(k) & p_{22_2}(k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta u(k) = \Delta u_{c_y}(kT^+), \quad \Delta\ddot{X}(k) = [\Delta\ddot{y}_c(kT^+) \quad \Delta\ddot{\theta}_c(kT^+)]$$

$\hat{m}_{1_2}(k)$ は m_1 の第 2 回推定値である, また, $\hat{m}_{3_2}(k)$ は m_3 の第 1 回推定値である.

最後に, 式(4.12)により, m_2 , m_3 と m_4 の値を同定する時, (4.13)式に示す逐次最小 2 乗アルゴリズムの各変数が下に示す.

$$\hat{M}(k) = \begin{bmatrix} \hat{m}_{2_3}(k) \\ \hat{m}_{3_3}(k) \\ \hat{m}_{4_3}(k) \end{bmatrix}, \quad K(k) = \begin{bmatrix} k_{1_3}(k) \\ k_{2_3}(k) \\ k_{3_3}(k) \end{bmatrix}, \quad P(k) = \begin{bmatrix} p_{11_3}(k) & p_{12_3}(k) & p_{13_3}(k) \\ p_{21_3}(k) & p_{22_3}(k) & p_{23_3}(k) \\ p_{31_3}(k) & p_{32_3}(k) & p_{33_3}(k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta u(k) = \Delta\tau_c(kT^+), \quad \Delta\ddot{X}(k) = [\Delta\ddot{x}_c(kT^+) \quad \Delta\ddot{y}_c(kT^+) \quad \Delta\ddot{\theta}_c(kT^+)]$$

$\hat{m}_{2_3}(k)$ は m_2 の第2回推定値である, $\hat{m}_{3_3}(k)$ は m_3 の第2回推定値である, $\hat{m}_{4_3}(k)$ は m_4 の推定値である.

これらの使用する $\Delta\ddot{x}_c(kT^+)$, $\Delta\ddot{y}_c(kT^+)$, $\Delta\ddot{\theta}_c(kT^+)$ の値は, リアルタイムで測定した歩行支援ロボットの x 軸, y 軸及び姿勢角度 θ の加速度2つのサンプリング時間での差の値であり, $\Delta u_{cx}(kT^+)$, $\Delta u_{cy}(kT^+)$, $\Delta\tau_c(kT^+)$ は二つのサンプリング時間において, デジタル加速度制御法により計算した中心位置における合力の x 軸方向ベクトル, y 軸方向ベクトルと回転トルクの入力変化である.

上述べた3つの式により求める慣性行列の推定値を平均するように, 得られるはロボットの慣性行列の同定値であり, つまり,

$$\begin{aligned}\hat{m}_1(k) &= (\hat{m}_{1_1}(k) + \hat{m}_{1_2}(k)) / 2 \\ \hat{m}_2(k) &= (\hat{m}_{2_1}(k) + \hat{m}_{2_3}(k)) / 2 \\ \hat{m}_3(k) &= (\hat{m}_{3_2}(k) + \hat{m}_{3_3}(k)) / 2 \\ \hat{m}_4(k) &= \hat{m}_{4_3}(k)\end{aligned}\tag{4.14}$$

$\hat{m}_1(k)$, $\hat{m}_2(k)$, $\hat{m}_3(k)$, $\hat{m}_4(k)$ は m_1, m_2, m_3, m_4 の推定値である. したがって, デジタル加速度制御系を次の式になります.

$$\begin{aligned}F(kT^+) &= F[(k-1)T^+] + K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1}\hat{M}_1\{\ddot{X}_{cd}(kT^+) - \ddot{X}_c(kT)\} \\ &\quad + K_D[\dot{X}_{cd}(kT^+) - \dot{X}_c(kT)] + K_p[X_{cd}(kT^+) - X_c(kT)]\end{aligned}\tag{4.15}$$

ここで

$$\hat{M}_1 = \begin{bmatrix} \hat{m}_1 & 0 & \hat{m}_2 \\ 0 & \hat{m}_1 & \hat{m}_3 \\ \hat{m}_2 & \hat{m}_3 & \hat{m}_4 \end{bmatrix}.$$

重心情報を必要としないデジタル加速度制御系のブロック線図を図4.3に示す.

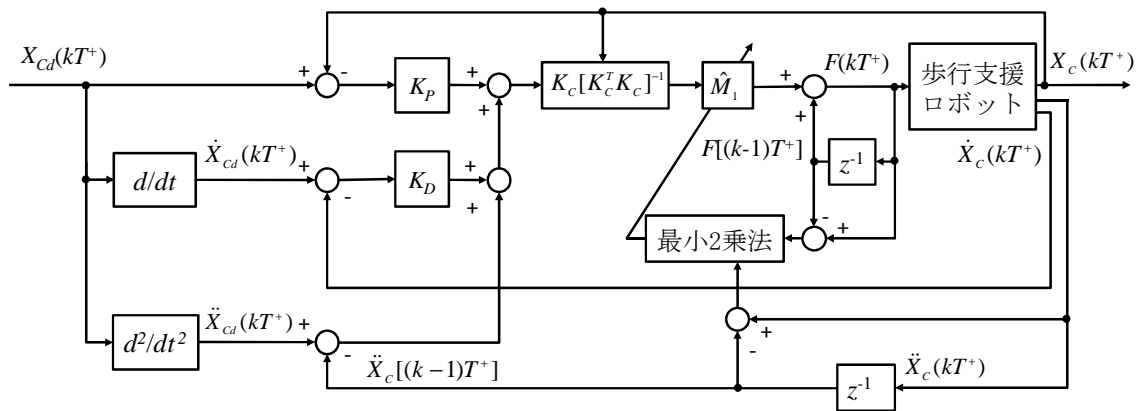


図 4.3 重心情報を必要としない制御法のブロック線図

4.4 実験による検討

本節で、提案した制御法の有効性を検証するために、走行実験を行った。まず、第3章と同じ条件で、追従実験を実施した。第3章の追従結果と比較するように、本章の制御系の優位性を検証した。次に、提案した制御則を更に検証するために、異なる荷重をロボットの違う位置に置き、同じの円形経路追従の実験を検討した。

【実験環境】

第2章と同じ実験環境で行った。環境を図4.4に示す目標経路を追従する。天井につるしているカメラを用いて、歩行支援ロボットの絶対位置を測定する。速度と加速度は、測定した位置から数値微分により計算する。

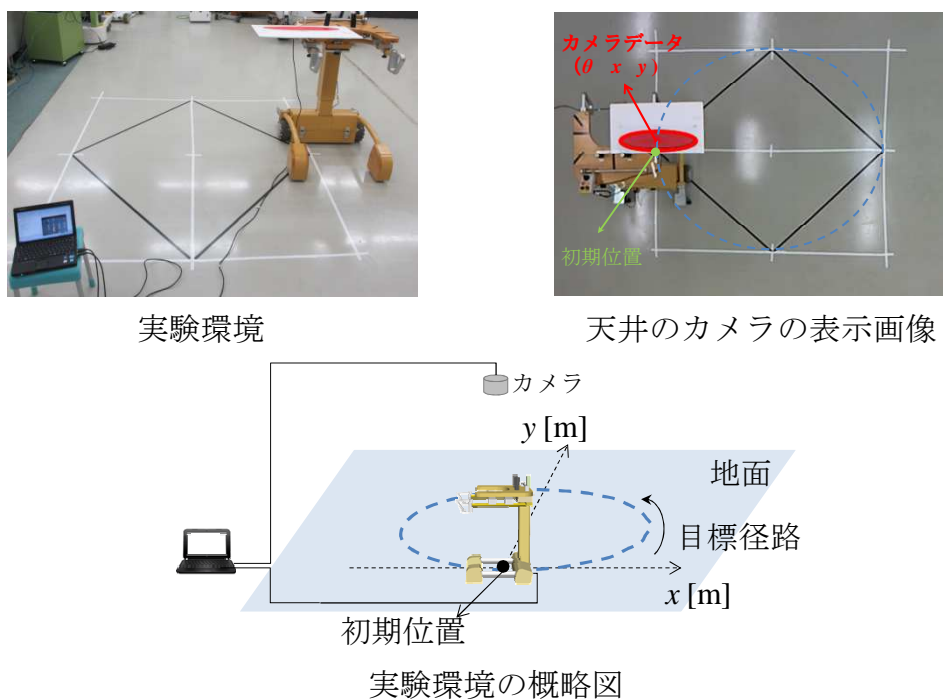


図 4.4 実験環境と準備

【目標経路・軌道】

まず、第3章と同じ円形経路を追従する。目標経路は下記の通りである。

$$x_{Cd}^2(t) + [y_{Cd}(t) - 1]^2 = 1 \quad (4.16)$$

目標軌道を式(4.17)に示す

$$\begin{aligned} x_{Cd}(t) &= \cos[-\pi/2 + \sigma(t)] \\ y_{Cd}(t) &= \sin[-\pi/2 + \sigma(t)] - 1 \\ \theta_{Cd} &= \sigma(t) \end{aligned} \tag{4.17}$$

ただし：

$$\sigma(t) = \begin{cases} \frac{4\pi}{t_0^2} t^2 & 0 \leq t \leq \frac{t_0}{2} \\ 2\pi - \frac{4\pi}{t_0^2} (t - t_0)^2 & \frac{t_0}{2} \leq t \leq t_0 \end{cases}$$

ここで、 $t_0 = 40\text{s}$.

【制御パラメータ】

まず、歩行支援ロボットのパラメータにより、最小二乗法推論パラメータの初期値を以下の通りで設定する。

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_{1_1}(0) \\ \hat{m}_{2_1}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50\text{kg} \\ 0\text{kg} \cdot \text{m}^2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} p_{11_1}(0) & p_{12_1}(0) \\ p_{21_1}(0) & p_{22_1}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10 \\ 1 & 10 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_{1_2}(0) \\ \hat{m}_{3_2}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50\text{kg} \\ 4\text{kg} \cdot \text{m}^2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} p_{11_2}(0) & p_{12_2}(0) \\ p_{21_2}(0) & p_{22_2}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10 \\ 1 & 10 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_{2_3}(0) \\ \hat{m}_{3_3}(0) \\ \hat{m}_{4_3}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\text{kg} \cdot \text{m}^2 \\ 4\text{kg} \cdot \text{m}^2 \\ 13\text{kg} \cdot \text{m}^2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} p_{11_3}(0) & p_{12_3}(0) & p_{13_3}(0) \\ p_{21_3}(0) & p_{22_3}(0) & p_{23_3}(0) \\ p_{31_3}(0) & p_{32_3}(0) & p_{33_3}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

次に、実験におけるデジタル加速度制御法の制御パラメータを設定する。具体的には、無荷重の場合に試行錯誤しマニュアルで調整している。値は下記の通りである。

表 4.1 制御パラメータ

パラメータ	値と単位
K_p	$\text{diag}(2.6, 2.7, 7.0) \text{ s}^{-2}$
K_d	$\text{diag}(1.8, 1.45, 8.6) \text{ s}^{-1}$

【無荷重の場合の実験結果-第3章と比較する】

図 4.5 は、無荷重時の最小 2 乗法により慣性行列の推定結果を示している。図 4.5(a)の横軸は時間、縦軸は m_1 の推定値。図 4.5(b)、図 4.5(c)と図 4.5(d)の座標設定についても図 4.5(a)と同様に設定している。図 4.5(b)はパラメータ m_2 の推定結果であり、図 4.5(c)はパラメータ m_3 の推定結果であり、図 4.5(d)はパラメータ m_4 の推定結果であり。図 4.6 は、デジタル加速度制御法により計算した 4 つのメカナムホイールの入力である。

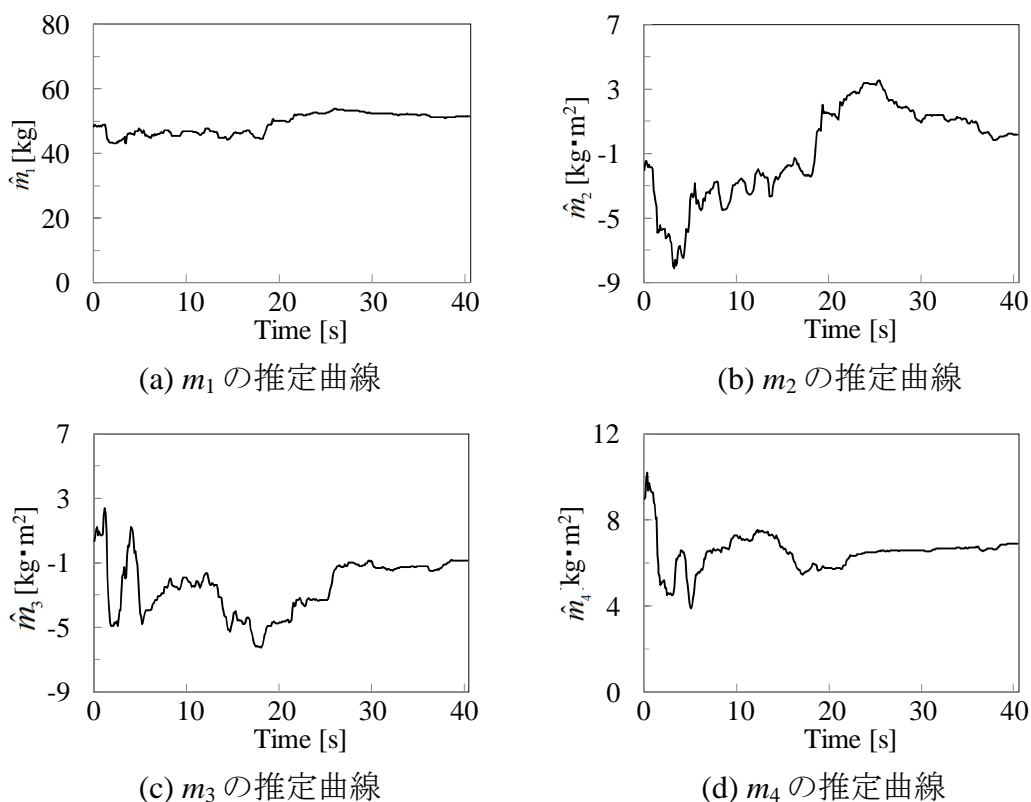


図 4.5 慣性行列の推定結果

図 4.7 は、無荷重時の実験結果である。その時、歩行支援ロボットの重心位置は中心位置から前方に 0.10m ずれる、すなわち、ロボットの重心位置の情報は $d = 0.10\text{m}$, $\alpha = \pi/2$ である。図 4.7(a)の左図は、横軸は実験時間、縦軸の破線は x 方向の目標軌道、実線は x 方向におけるロボットの位置応答を示している。図 4.7(a)の右図は、横軸は実験時間、縦軸は x 方向の軌道追従誤差である。図 4.7(b)の左図は、横軸は時間、縦軸の破線は y 方向の目標軌道、実線は y 方向におけるロボットの位置応答を示している。図 4.7(b)の右図には、横軸は実験時間、縦軸

は y 方向の軌道追従誤差である．図 4.7(c)の左図には，横軸は時間，縦軸の破線は本体の向き角度の目標軌道，実線は角度におけるロボットの向きの角度応答を示している．図 4.7(c)の右図には，横軸は実験時間，縦軸は姿勢角の軌道追従誤差である．図 4.7(a)–(c)により，開発した制御則により，歩行支援ロボットがより高精度な軌道追従結果を得られることがわかる．軌道追従誤差では， x 軸は 0.057m 以内， y 軸は 0.042m 以内，姿勢角は 0.078rad 以内，微小な軌道追従誤差，また高精度な軌道追従結果であることがわかる．図 4.7(d)では，横軸は x 方向の位置応答，縦軸は y 方向の位置応答，破線は目標軌道，実線は歩行支援ロボットの走行結果を示している．破線と実線はほぼ同じ経路であることがわかる．歩行支援ロボットは，本章で提案した制御法により，目標経路を高精度で追従することができる．

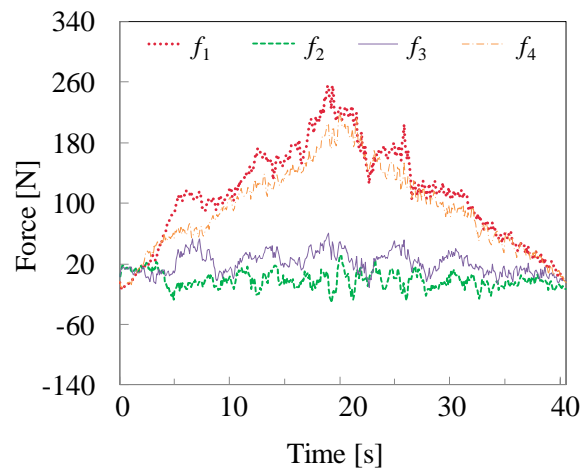
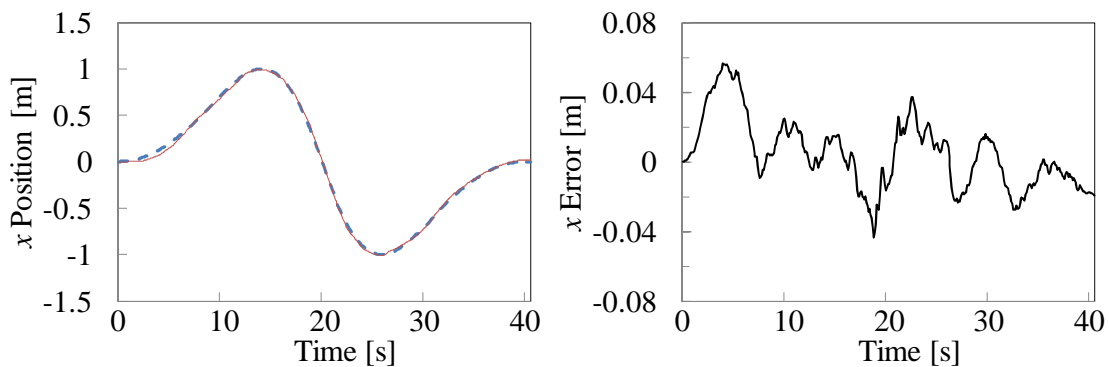
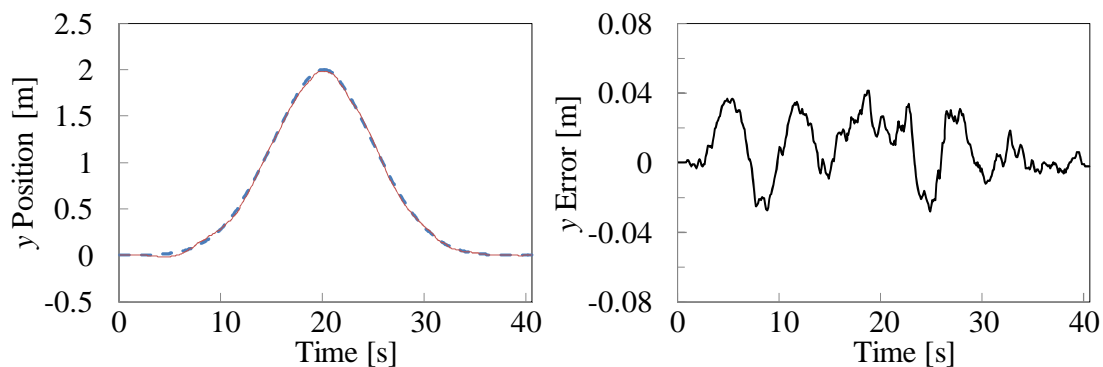


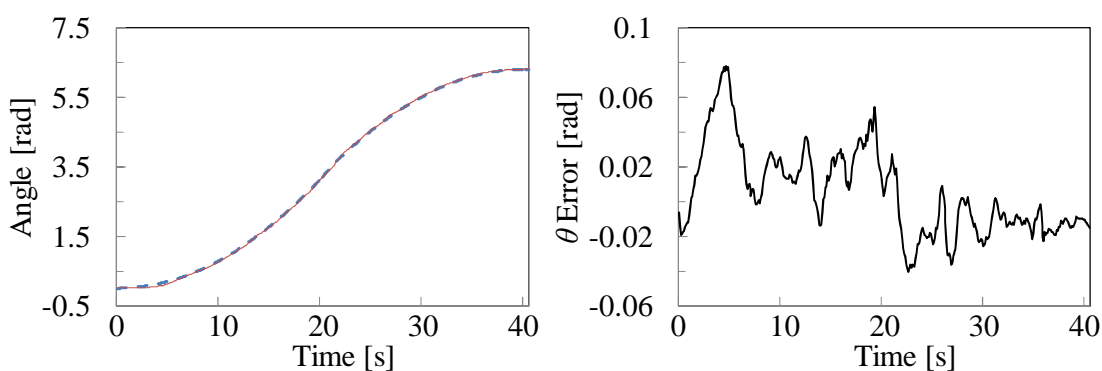
図 4.6 制御入力



(a) x 位置



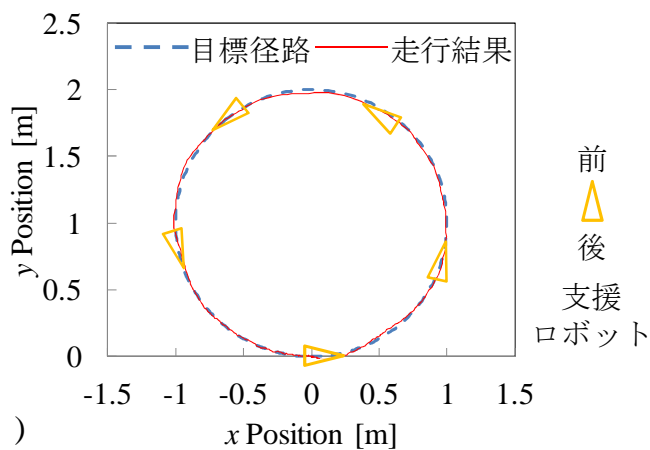
(b) y 位置



(c) 姿勢角



荷重無し
重心位置($d = 0.10\text{m}$, $\alpha = 90^\circ$)



(d) 経路追従結果

図 4.7 無荷重時の実験結果

--- Reference ——— Response

第 3 章の追従結果を比較するように、経路追従精度を定量的に評価する。評価誤差を図 4.8 に示すよう方法で、目標経路と走行結果との間の面積を計算する。

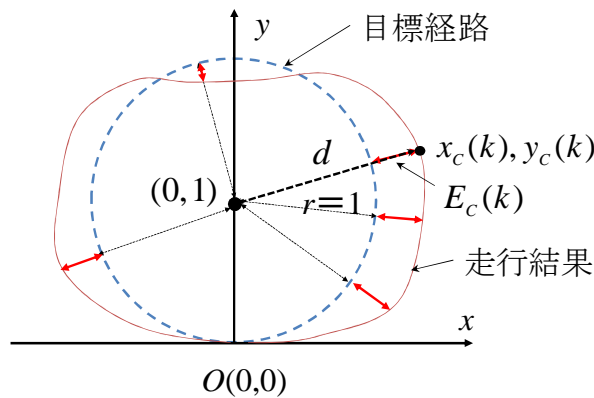


図 4.8 経路追従誤差の計算方法

まず，図 4.8 に示す時刻 k で，ロボットの経路追従誤差は現在の実際位置と円の中心と距離 d から目標経路の円の半径 r を引く．

$$E(k) = d - r = \sqrt{(x_c(k) - 0)^2 + (y_c(k) - 1)^2} - 1 \quad (4.18)$$

次に，すべての時間での経路追従誤差を合計するように，経路追従誤差の面積を得られる，すなわち次の通り示す．

$$E = \sum_{k=0}^{k=t_0/T_s} |E_c(k)| \quad (4.19)$$

表 4.2 は無荷重時，同じ条件下，本章と第 3 章との評価誤差を示したものである．

表 4.2 経路追従誤差

同じ実験条件	E (m)
第 3 章結果	6.264
本章結果	3.573

表 4.2 に示す，荷重 $m=0\text{kg}$ の場合，第 3 章の制御法における開始時間から終了までの評価誤差は 6.264m である，本章の制御法における開始時間から終了までの評価誤差は 3.573m である．制御則中に，非線形デカップリングマトリックスは重心位置情報必要としない場合は重心位置情報必要する場合より評価誤差が 2.691m 減少したが，重心ずれに対して精度よく追従することがわかる．

【荷重ありの場合の実験結果】

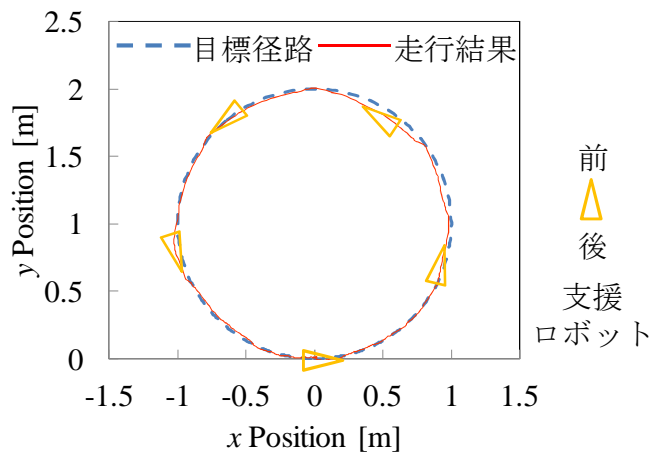
提案した制御法が，重心移動と荷重変化に対応する有効性を更に検証するた

めに、異なった質量の荷重をロボットの異なる位置に置いた場合の走行実験を行った。実験条件は無荷重時と同じ、すなわち同じ制御パラメータと最小 2 乗法の初期値を用いた同じ円形経路追従の実験を行った。実験結果を図 4.9—図 4.11 に示す。

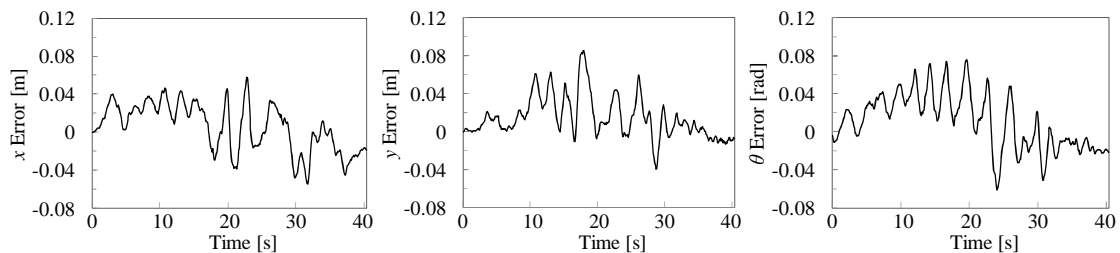
図 4.9 は、歩行支援ロボットの左前に 15.0kg の荷物を置いた場合の実験結果である。荷物の具体位置は、図 4.9(a)の左図に示す、この時重心位置は $d = 0.164\text{m}$, $\alpha = 74^\circ$ である、経路追従結果は図 4.9(a)の右図に示す。破線は目標経路、実線はロボットの実際の走行経路である。破線と実線はほとんど同じ示すように、目標経路を追従することができる。図 4.9(b)は歩行支援ロボットの x 軸方向、 y 軸方向と姿勢角 θ における、軌道追従誤差である。 x 軸は、無荷重時と同じ、軌道追従誤差の最大値は 0.057m 。 y 軸は、無荷重時より 0.044m 増加し、 0.086m になった。姿勢角 θ は、無荷重時より 0.002rad 減少し、 0.076rad になった。この結果より、荷重あるの場合も、高精度な軌道追従結果を得られたことがわかる。図 4.9(c)は慣性行列値の推定曲線を示す、図 4.9(d)は 4 つのメカナムホイールの制御入力である。



15.0kg 荷重-左前に
重心位置($d = 0.164\text{m}$, $\alpha = 74^\circ$)



(a) 実験条件と経路追従結果



(b) x 位置、 y 位置と姿勢角 θ の軌道追従誤差

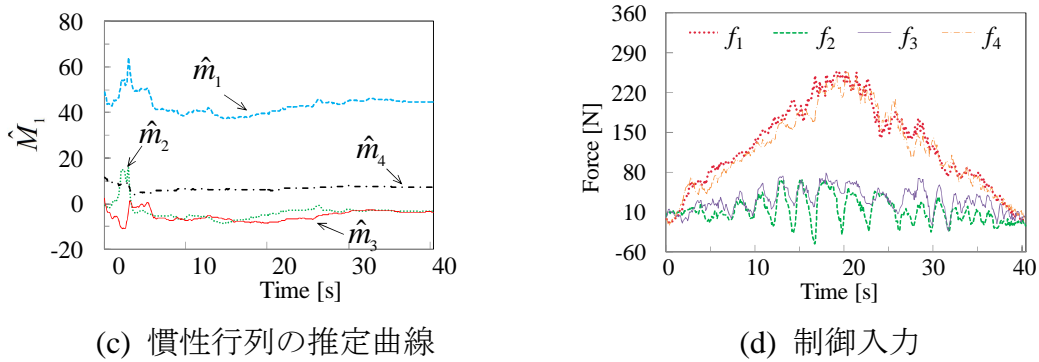
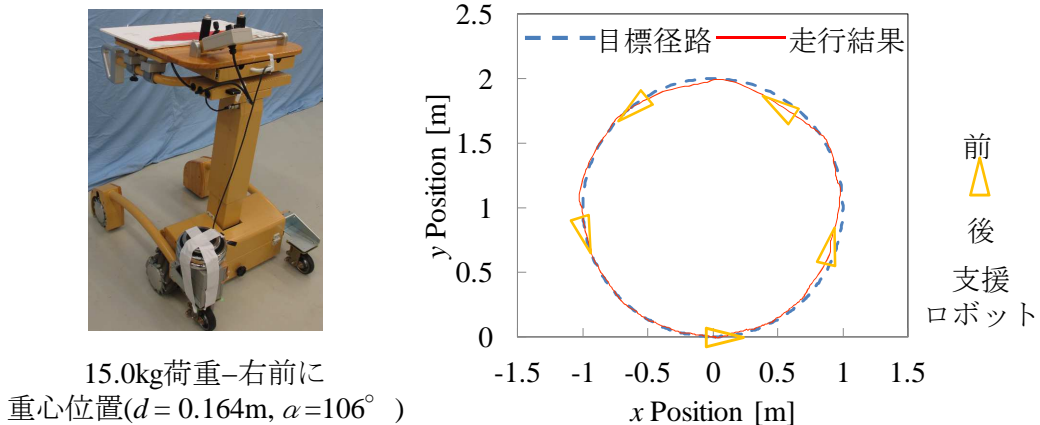
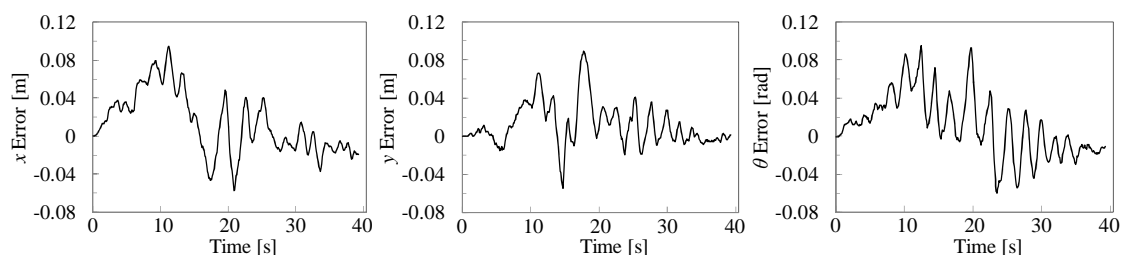


図 4.9 実験結果-左前に 15.0kg の荷重を置いた

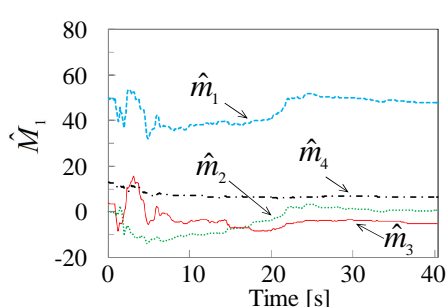
図 4.10 は、歩行支援ロボットの右前に 15.0kg の荷物を置いた場合の実験結果である。荷物の具体的な位置は、図 4.10(a)の左図に示す、この時重心位置は $d = 0.164\text{m}$, $\alpha = 106^\circ$ である、経路追従結果は図 4.10(a)の右図に示す。破線は目標経路、実線はロボット実際の走行経路である。破線と実線はほとんど同じ示すように、目標経路を追従することができる。図 4.10(b)は歩行支援ロボットの x 軸方向、 y 軸方向と姿勢角 θ における、軌道追従誤差である。 x 軸は、無荷重時より 0.037m 増加し、0.094m になった。 y 軸は、無荷重時より 0.047m 増加し、0.089m になった。姿勢角 θ は、無荷重時より 0.015rad 増加し、0.093rad になった。この結果より、荷重位置変化、重心位置移動でも、高精度な軌道追従結果を得られたことがわかる。図 4.10(c)は慣性行列の推定曲線を示す、図 4.10(d)は 4 つのメカナムホイールの制御入力である。



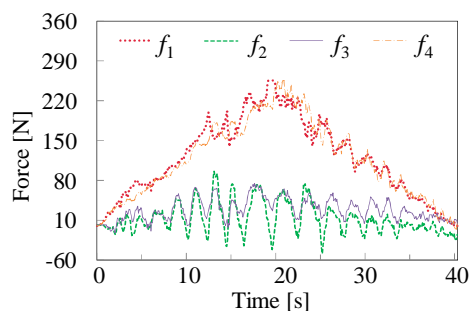
(a) 実験条件と経路追従結果



(b) x 位置, y 位置と姿勢角 θ の軌道追従誤差



(c) 慣性行列の推定曲線



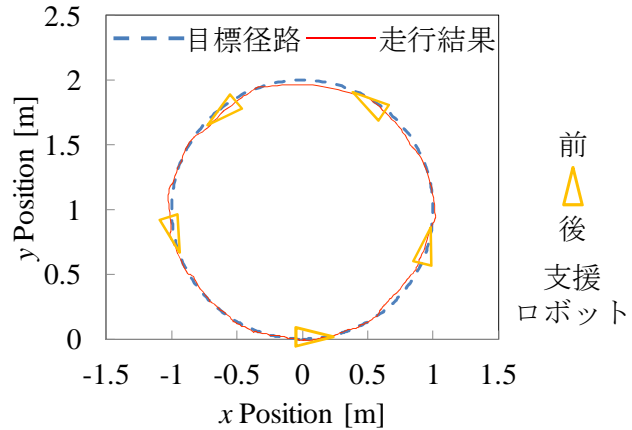
(d) 制御入力

図 4.10 実験結果-右前に 15.0kg の荷重を置いた

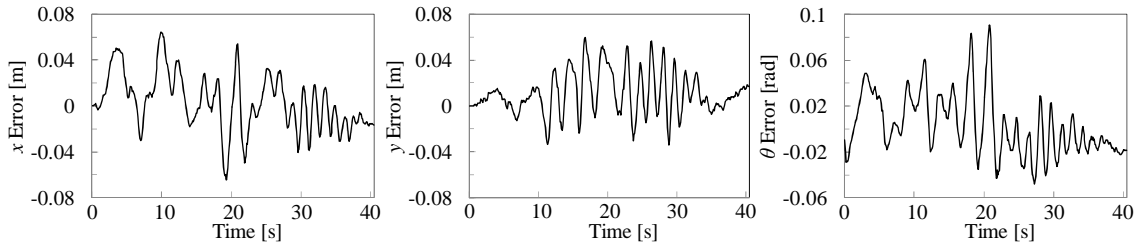
図 4.11 は、歩行支援ロボットの後真ん中に 30.8kg の荷物を置いた場合の実験結果である。荷物の具体的な位置は、図 4.11(a)の左図に示す、この時重心位置は $d = 0.01\text{m}$, $\alpha = 90^\circ$ で、中心位置とほとんど重なる。経路追従結果は図 4.11(a)の右図に示す。破線は目標経路、実線はロボットの実際の走行経路である。破線と実線はほぼ同じ示すように、目標経路を追従することができることがわかる。図 4.11(b)は歩行支援ロボットの x 軸方向, y 軸方向と姿勢角 θ における、軌道追従誤差である。 x 軸は、無荷重時より 0.007m 増加し、0.064m になった。 y 軸は、無荷重時より 0.017m 増加し、0.059m になった。姿勢角 θ は、無荷重時より 0.012rad 増加し、0.090rad になった。重心が重心位置に近くになることにより、荷重が更に多くても、軌道追従誤差は図 4.9(b)と図 4.10(b)より、小さくなる。図 4.11(c)は慣性行列の推定曲線を示す、図 4.11(d)は 4 つのメカナムホイールの制御入力である。



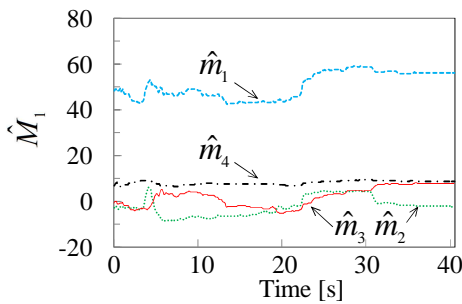
30.8kg荷重-後真ん中
重心位置($d = 0.01\text{m}$, $\alpha = 90^\circ$)



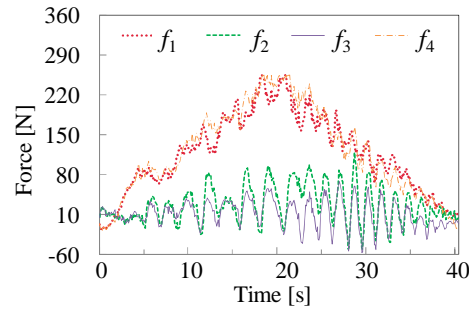
(a) 実験条件と経路追従結果



(b) x 位置, y 位置と姿勢角 θ の軌道追従誤差



(c) パラメータの推定曲線



(d) 制御入力

図 4.11 実験結果-後真中に 30.8kg の荷重を置いた

図 4.9-4.11 の実験結果により, 異なった質量の荷物をロボットの異なる位置に置いた場合の経路追従結果は, 無荷重時とほぼ同じであることがわかる. 軌道追従誤差も無荷重時と同じ少し誤差が生じた. 本制御則は荷重変化と重心ずれに対応できることがわかる. これらの結果により, 本章で, 提案した制御系の有効性が確認された.

4.5 第2, 3と本章実験結果の比較

第2章, 第3章と第4章の制御則を評価するために, 同じ実験条件で, 同じ円形経路を追従した経路追従誤差を表4.3に示す.

まず, 第2章の結果では, 無荷重時, 誤差が19.868mで, 大きいことがわかる. また, 32.4kgの荷物をロボット左中に置いた場合の誤差は無荷重の場合より5.826m増加した. すなわち, 荷重変化と重心ずれの影響は顕著であることがわかる. 原因として, デジタル加速度制御法は, ロボットの慣性行列と重心位置の情報が必要である. 第2章では, 歩行支援ロボットのパラメータより, 無荷重時の重心位置と荷重を仮定するようにデジタル加速度制御系中に使うロボットの慣性行列値 M_0 とデカップリングマトリックス $K_g(\theta)[K_g^T(\theta)K_g(\theta)]^{-1}$ を設定した. 仮定した値の精度が低いので, 無荷重時も大きい追従誤差を得られた. 荷重のある時, 仮定値は真値から更に離れるように, 追従誤差が顕著に増加した.

第3章の結果では, 無荷重時, 誤差が6.264mで, 第2章より顕著に減少した. また, 32.4kgの荷物をロボット左中に置いた場合の誤差は無荷重の場合より0.842m増えた. すなわち, 荷重変化と重心ずれの影響は小さくなる. 原因として, 第3章では, 最小2乗法により, デジタル加速度系中に使うロボットの慣性行列値 M_0 をリアルタイムで同定した. 重心位置の導出が困難であるため, 本章も仮定したデカップリングマトリックス $K_g(\theta)[K_g^T(\theta)K_g(\theta)]^{-1}$ を使用した. これらの同定した慣性行列値 M_0 より, デジタル加速度制御系の制御精度を向上させ, 追従精度が向上し, 荷重変化にも対応できた.

第4章の結果では, 無荷重時, 誤差が3.573mで, 第3章より更に減少した. また, 異なる質量の荷物をロボットの異なる位置に置いた場合の誤差は無荷重の場合よりそれぞれ0.663m, 1.735m, 0.488m増加した. 加之, これらの追従誤差は第3章の結果よりすべて減少していることがわかる. 第4章では, デカップリングマトリックス $K_g(\theta)[K_g^T(\theta)K_g(\theta)]^{-1}$ の問題を対応できるように, 追従精度を更に向上させた. $K_g(\theta)[K_g^T(\theta)K_g(\theta)]^{-1}$ の入手が困難な問題に対して, 制御力が中心位置を直接に作用する動力学方程式に基づいて, デジタル加速度制御系

を設計した。この時、重心ずれの影響はすべてロボットの慣性行列中に含まれるため、最小 2 乗法により獲得できる。デカップリングマトリックス $K_c(\theta)[K_c^T(\theta)K_c(\theta)]^{-1}$ が重心情報必要しないため、入手が容易になった。そして、本章は荷重ある場合と重心ずれた場合でも、第 3 章より、よい追従結果を得られた、制御精度の更に向上が確認された。

表 4.3 経路追従誤差

制御則	実験条件	誤差 E (m)
第 2 章	無荷重	19.868
	32.4 荷重-左中に	25.694
第 3 章	無荷重	6.264
	32.4 荷重-左中に	7.106
第 4 章	無荷重	3.573
	15.0kg 荷重-左前に	4.236
	15.0kg 荷重-右前に	5.308
	30.8kg 荷重-後真ん中	4.061

第 2 章，第 3 章と第 4 章経路追従誤差の比較を図 4.12 に示す。

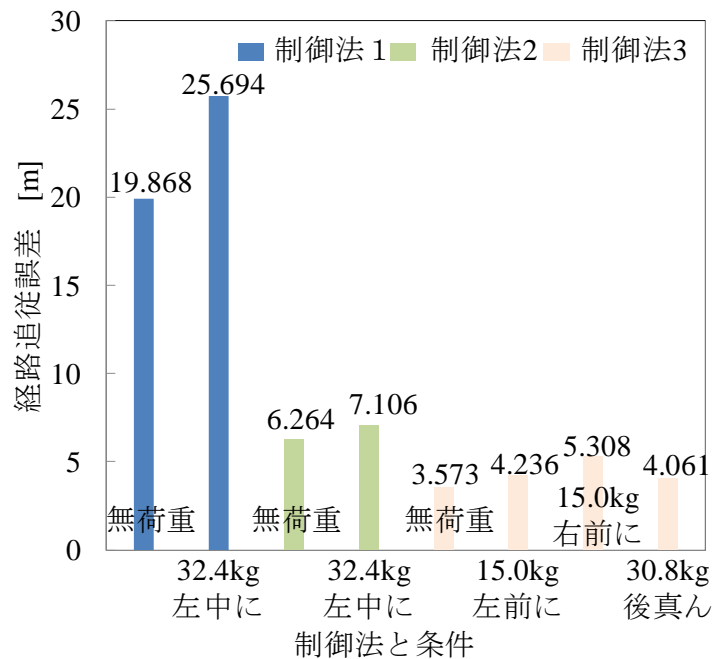


図 4.12 経路追従誤差の比較

4.6 結言

本章では、第3章の制御精度を更に向上させるように、まず、駆動力が中心位置を直接に作用する動力学式を導出した。次に、この動力学を対象し、新たなデジタル加速度制御系を設計し、逐次最小2乗法を用いてデジタル加速度制御則の中新たな慣性行列値を同定した。最後に、異なる荷物をロボットの異なる位置に置いた走行実験を行った。実験結果より、荷重変化と重心位置がずれでも、全て高精度な経路追従結果、小さい軌道追従誤差を得られた。提案した制御法の有効性を検証した。また、第2章と第3章の経路追従誤差を比較するように、本章で提案した制御法の制御精度が更に向上させたのを確認された。

参考文献

1. 王義娜, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 小林洋, 藤江正克, 安藤健, インテリジェント歩行支援機の走行制御: 適応制御を用いた重心変化への対応, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC3C2-05, 東京, 2013年9月.
2. 佐々木忍, Newton-Euler の運動方程式に基づくロボット・マニピュレータの動力学モデル, 研究開発報告書. JAERI-M 90-147, 1990.

第5章

要支援者方向意図の同定

5.1 緒言

前四章では、歩行支援ロボットを使用する時、周囲の物や人にぶつからないように、非線形摩擦力、荷重変化と重心移動問題に対応できるように、適切な運動制御法を開発し、高精度な経路追従を実現した。要支援者をサポートして、目標位置へ安全に到達するために必要な精度が得られた。

適切な歩行支援を行うために、要支援者の行こうとする方向を正しく認識する、つまり要支援者の方向意図を正確に認識する必要がある。ジョイスティックやタッチパネルなどの方向指示装置を利用すれば、方向意図を歩行支援ロボットに伝えることができるが、立位姿勢保持筋力の不足な下肢障害者は、歩行しながら、これらのデバイスを操作するのが困難である。そこで、本章では、特に操作することを意識せず、要支援者の肘がアームレストに掛ける力情報を利用して、要支援者の意図を推定する方法を提案する。距離型ファジィ推論法[1]を用いて、要支援者の方向意図同定法を開発する。具体的に、先ず、実験により、推論を行うための知識ベースを構築する。歩行支援ロボットのアームレストの中に四つの荷重センサーを埋め込み、被験者が指定する方向へ行こうとする時、四つの荷重センサーで要支援者からの荷重と荷重分布情報、つまり前腕荷重の特性を測定する。被験者前腕荷重の特性と移動方向意図との関連性により、プロダクションルールを用いて前腕荷重特性と方向意図との関係を知識として抽出する。即ちファジィ推論を行うための知識ベースを構築する。次に、距離型ファジィ推論法に基づいて方向意図の推定法を開発する。距離型ファジィ推論法は、分離規則や凸性を満たしているため、推論精度が高い。最後に、実験で方向意図の同定法の有効性を検証する。

5.2 荷重センサーの装着と移動方向意図の概念

【荷重センサーの装着】

歩行支援ロボットは、図 5.1 に示すように、アームレストの内側に荷重センサーを四か所（Sen.FR, Sen.FL, Sen.BR, Sen.BL）設ける．具体的には、図 5.1(a) とに図 5.1(b)示すように、白い楕円の場所に設ける、図 5.1(b)より、四つの場所はアームレストとロボットの本体との接続であり、アームレストは固いので、要支援者がアームレストに掛ける荷重は、四つの支点到に伝わる．従って、四つセンサーにより要支援者からアームレストに作用する荷重と荷重分配情報を測定できる．更に、要支援者から歩行支援ロボットにの作用力を、この四つのセンサーで測定することで、要支援者の方向意図を推定する．

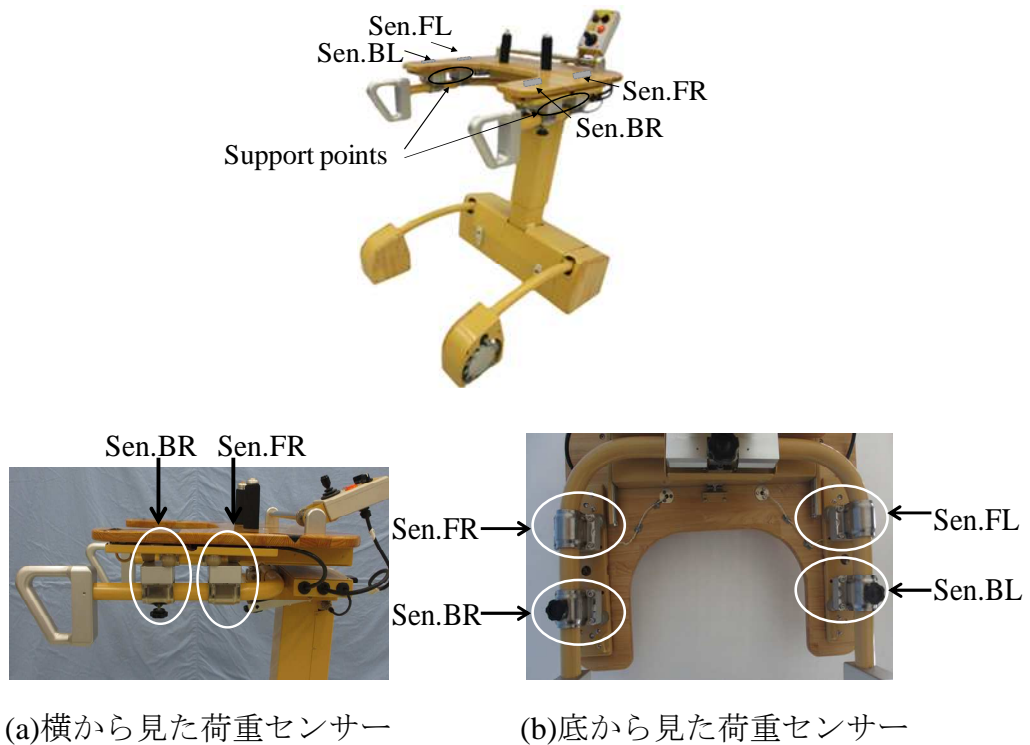


図 5.1 荷重センサーの装着

使用する荷重センサーは一軸の力センサーであり、歩行支援ロボットアームレストの中に装着し、上下方向の力を計測する．荷重センサーのサンプリングレートは 7Hz である．

【移動方向意図】

移動方向意図は要支援者の脳の中に思う行こう方向である。例えば，要支援者は，室内である位置へ行きたい時，先ず周りの環境により，自分の脳の中に移動経路を計画する。次に，計画した経路に沿って目標位置に移動するため，方向と速度を決める。最後に，決めた方向と速度に基づいて移動し，周りの障害物を回避しながら，目標位置へ到着する。ここでは，要支援者が目標位置へ到着するように，脳の中に決められた移動方向は，移動方向意図と呼ぶことにする。歩行支援ロボットは，適切な歩行支援を行うために，要支援者の移動方向意図を認識する必要がある。図 5.2 に示した歩行支援ロボットを用いて歩行支援を行う場合，要支援者は行きたい方向に行こうとしている時に，意識的に歩行支援ロボットをこの方向に押し進めようとする傾向があると考えられる。従って，異なる方向に行こうとしているときに，要支援者の前腕から，歩行支援ロボットアームレストへ圧力の分布状態が違ふ。四つの荷重センサーが測定した力が異なる。本章では，四つの荷重センサー測定値と分布状態，つまり，要支援者のアームレストに肘が掛ける力情報を適切に利用すれば，要支援者の方向意図同定が可能であることが判った[2]。

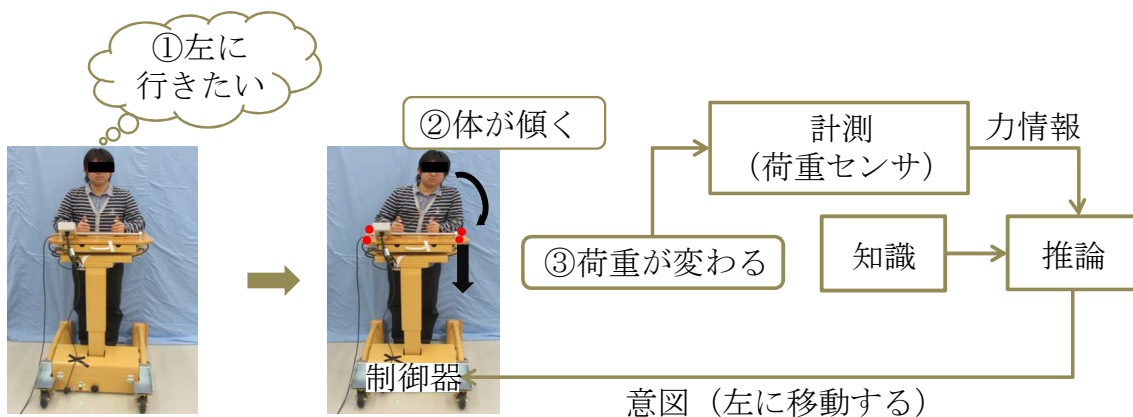


図 5.2 歩行支援ロボットと利用者との接触部分の力情報による意図同定

5.3 距離型ファジィ推論法を用いた方向意図の推定

要支援者から歩行支援ロボットへの作用力を、四つの荷重センサーで測定することで、要支援者の方向意図を推定する。本同定法は、要支援者は歩行しながら、特別に操作の意識や操作を行う必要はない。

5.3.1 前腕荷重の特性と方向意図との関連性

まず、実験により、ファジィ推論を行うための知識ベースを構築する、即ち、前腕荷重の特性と移動方向意図との関係をファジィ知識として抽出する。

実験において、被験者は指定する方向を意図方向として、歩行支援ロボットの助けをかりて、意図方向に行こうとする、四つの荷重センサーにより要支援者からの荷重と荷重分布情報を測定する。測定した荷重センサー値を解析し、前腕荷重の特性と移動方向意図との関連性を抽出する。

具体的に、健常な被験者5人に協力してもらい、計測実験を行った。被験者情報は、表5.1に示す。

表 5.1 被験者の情報

被験者	A	B	C	D	E
性別	女	男	男	女	女
体重(kg)	47	75	71	48	60
身長(cm)	158	176	169	163	155
年齢(歳)	28	25	29	26	34

測定のまえに、実験者は被験者に測定の手続について詳しい教示を行い、実験の応用意義をはっきり説明した。測定実験の実行は、被験者ごとに、行こうとする方向は、図5.3に示すように次の8方向の意図を提示する、右 (0°)、右前 (45°)、前 (90°)、左前 (135°)、左 (180°)、左後 (225°)、後 (270°)、右後 (315°)。この8方向毎に5回、毎回測定時間は20秒とした、即ち、5人被験者は合計200回 (5人×8方向×5回) の測定を行った。測定実験の様子は図5.3に示す。

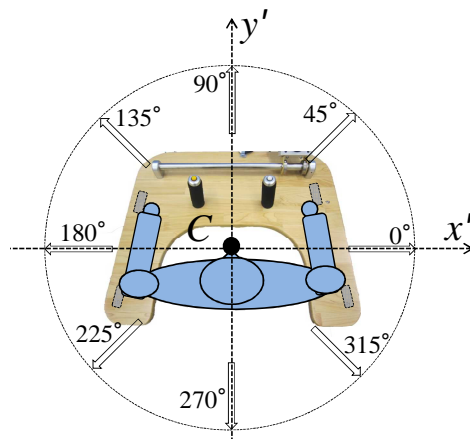


図 5.3 実験内容

まず、被験者毎に対して、前腕荷重の特性と方向意図との関連性を解析する。被験者毎に各方向意図における荷重センサーのデータを取り出す。各方向意図における5回実験で四つの荷重センサー測定したデータの平均値Meanと標準偏差SD求めた。5人被験者の結果をそれぞれ表5.2、表5.3、表5.4、表5.5と表5.6に示す。

表 5.2 被験者 A の測定結果

方向意図	Sen.FR,		Sen.FL,		Sen.BR,		Sen.BL	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R (0°)	18.1	3.9	-6.9	2.4	69.2	9.6	8.7	5.8
FR (45°)	31.0	7.0	1.2	5.8	30.5	10.8	-3.8	6.4
F (90°)	28.8	5.5	26.9	7.6	-0.1	2.5	3.7	7.5
FL (135°)	5.8	5.7	24.7	6.7	-0.3	3.3	19.5	5.6
L (180°)	-7.7	4.9	18.2	4.2	7.4	4.1	50.3	11.7
BL (225°)	-13.0	2.0	6.0	5.7	16.0	4.2	61.1	4.5
B (270°)	-6.0	1.8	-1.7	2.4	52.9	4.4	58.0	6.1
BR (315°)	8.3	5.0	-7.7	2.5	52.2	3.8	9.7	5.0

表 5.3 被験者 B の測定結果

方向意図	Sen.FR,		Sen.FL,		Sen.BR,		Sen.BL	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R (0°)	22.1	10.5	-9.4	1.6	62.6	6.3	-1.5	3.0
FR (45°)	38.0	10.0	8.6	3.8	24.8	10.7	-12.4	6.1
F (90°)	26.3	8.5	21.3	6.9	-1.4	5.8	1.5	7.1
FL (135°)	3.4	4.2	27.3	5.4	-9.5	2.8	35.8	3.3
L (180°)	-12.4	3.8	17.3	3.0	-1.6	3.1	61.6	4.9
BL (225°)	-23.9	5.3	11.1	1.2	7.7	5.9	86.9	16.9
B (270°)	-9.9	10.7	-10.5	4.2	66.8	13.9	59.4	37.0
BR (315°)	8.9	6.2	-15.7	3.2	71.3	10.9	5.6	5.8

表 5.4 被験者 C の測定結果

方向意図	Sen.FR,		Sen.FL,		Sen.BR,		Sen.BL	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R (0°)	74.4	5.3	0.3	2.5	90.4	9.7	11.6	1.9
FR (45°)	85.4	6.8	18.9	4.5	41.0	9.6	-6.1	2.6
F (90°)	55.1	6.7	50.5	5.6	20.5	5.3	21.2	6.4
FL (135°)	26.5	4.0	75.0	7.5	-8.6	2.2	36.6	7.3
L (180°)	-4.1	4.0	38.2	4.6	34.8	5.3	101.8	9.7
BL (225°)	-8.7	2.6	27.6	2.1	42.9	2.7	119.3	7.9
B (270°)	0.3	3.2	5.8	3.4	113.0	10.3	117.8	9.4
BR (315°)	35.5	3.7	-11.8	1.9	133.6	11.1	28.2	2.3

表 5.5 被験者 D の測定結果

方向意図	Sen.FR,		Sen.FL,		Sen.BR,		Sen.BL	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R (0°)	38.2	31.4	-5.3	5.0	74.0	14.5	6.3	6.9
FR (45°)	51.5	29.6	9.6	8.9	32.1	8.2	-7.4	4.4
F (90°)	36.7	15.9	32.9	15.5	6.3	12.3	8.8	10.8
FL (135°)	11.9	12.7	42.3	28.3	-7.0	3.7	30.6	9.6
L (180°)	-8.1	4.2	24.6	11.8	13.6	19.0	71.2	27.0
BL (225°)	-15.2	7.8	14.9	11.3	22.2	18.4	89.1	29.2
B (270°)	-5.2	5.1	-2.1	8.2	77.6	31.5	78.4	34.1
BR (315°)	17.5	15.5	-11.7	4.0	85.7	42.5	14.5	12.0

表 5.6 被験者 E の測定結果

方向意図	Sen.FR,		Sen.FL,		Sen.BR,		Sen.BL	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R (0°)	30.7	4.3	-7.1	7.1	77.7	23.6	14.7	9.7
FR (45°)	52.5	17.7	8.1	4.6	16.0	16.2	-8.3	7.6
F (90°)	37.7	4.4	34.5	4.1	-9.8	7.8	-7.7	5.1
FL (135°)	12.9	5.3	50.8	9.7	-10.9	3.4	16.9	4.7
L (180°)	-5.7	4.2	37.3	4.1	10.9	2.5	61.7	8.4
BL (225°)	-19.3	8.6	6.5	3.2	17.5	3.4	71.39	22.2
B (270°)	-1.1	9.0	-5.2	8.8	49.9	12.2	45.3	25.3
BR (315°)	4.6	6.2	-14.9	4.1	81.5	36.4	19.59	13.8

表5.2, 表5.3, 表5.4, 表5.5と表5.6に示した各被験者が各方向意図を持っている時, 四つのセンサーで測定した荷重の平均値Meanに基づいて, 方向意図に連れて荷重の変化傾向を図5.4に示す. 図5.4(a)は, 荷重センサーSen.FRで測定した被験者5人の結果である. 縦軸は, 荷重センサーSen.FRの平均値Mean (具体値は表5.2, 表5.3, 表5.4, 表5.5と表5.6の左第二列に示した) であり, 横軸は方向意図 (右, 右前, 前, 左前, 左, 左後, 後, 右後) である. 図5.4(b),(c)と(d)は,

それぞれ荷重センサーSen.FL, Sen.BR, Sen.BLの測定結果である。軸の設定は、図5.4(a)と同様である。図5.4のように、異なる被験者は、荷重データが違ってても、8個方向意図に連れて同様な変化傾向があることを示した。前腕荷重は方向意図とは高い関連性が有ることが考えられる。図5.4(a)に示す、前左方向に行きたい時、荷重センサーSen.BRは最小値が測定した、後右方向に行きたい時、荷重センサーSen.BRと隣りのセンサーは最大値が測定した。センサーSen.FLは、前左方向の周りに行きたい時、最大値を測定した。他のセンサーも同じような荷重を測定した。個人特性により、最大値の具体角度は異なることがあるが、一定の範囲にとどまることを示している。

そして、本章では、この実験で測定できた5人被験者の前腕荷重は方向意図の関連性に基づいて、プロダクションルールを用いて前腕荷重と移動方向意図関係のファジィ知識を抽出し、要支援者の方法意図を認識する。

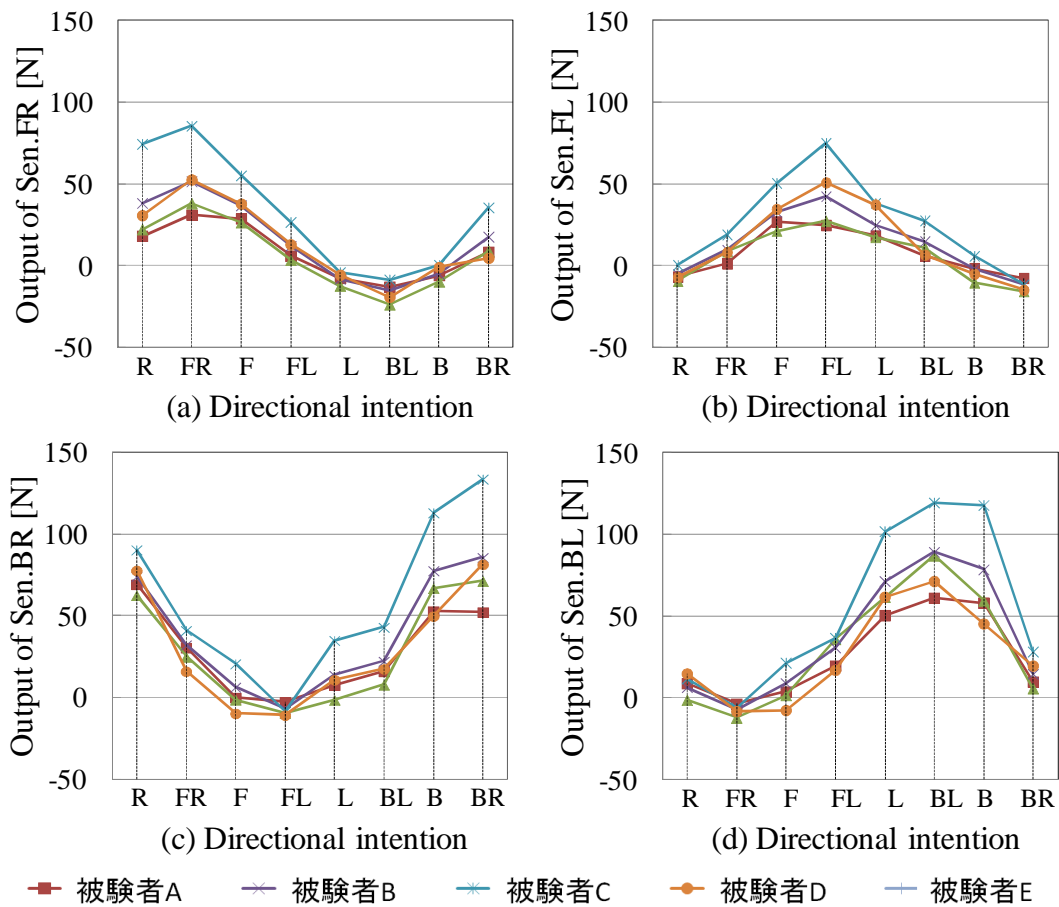


図5.4 前腕荷重の特性と方向意図との関連性

5.3.2 プロダクションルールによる知識表現

前節は、実験に基づいて、前腕荷重と方向意図との関連性があることを示した。本節では、実験結果による前腕荷重と方向意図との関係の知識を抽出する。具体的に、5人の被験者が8方向に行こうする時、4つの荷重センサに掛かる5人の被験者の平均値 Mean と標準偏差 SD により、前腕荷重と方向意図との定量的関係を構築した。この相関関係を知識として抽出するために、前腕荷重でプロダクションルールの前件部を表現し、8方向意図は後件部とし、ファジイルール R^1 から R^8 までを構築しました。前腕荷重と方向意図との相関関係はを表 5.7 で表しています。

表 5.7 ファジイ知識の抽出

ルール	前件部					後件部
	センサー	Sen.FR	Sen.FL	Sen.BR	Sen.BL	方向意図
R^1	集合	A^{11}	A^{12}	A^{13}	A^{14}	R(0°)
	Mean	36.7	-5.7	74.8	8.0	
	SD	22.4	3.7	10.4	6.2	
R^2	集合	A^{21}	A^{22}	A^{23}	A^{24}	FR(45°)
	Mean	51.7	9.3	28.9	-7.6	
	SD	20.9	6.3	9.3	3.2	
R^3	集合	A^{31}	A^{32}	A^{33}	A^{34}	F(90°)
	Mean	36.9	33.2	3.1	5.5	
	SD	11.2	11.0	11.3	10.6	
R^4	集合	A^{41}	A^{42}	A^{43}	A^{44}	FL(135°)
	Mean	12.1	44.0	-7.7	27.9	
	SD	9.0	20.4	3.1	9.2	
R^5	集合	A^{51}	A^{52}	A^{53}	A^{54}	L(180°)
	Mean	-7.6	27.11	13.0	69.3	
	SD	3.1	10.1	13.5	19.6	
R^6	集合	A^{61}	A^{62}	A^{63}	A^{64}	BL(225°)
	Mean	-16.0	13.2	21.3	85.6	
	SD	5.8	8.8	13.2	22.1	
R^7	集合	A^{71}	A^{72}	A^{73}	A^{74}	B(270°)
	Mean	-4.4	-2.7	72.0	71.8	
	SD	4.1	5.9	25.5	28.3	
R^8	集合	A^{81}	A^{82}	A^{83}	A^{84}	BR(315°)
	Mean	14.9	-12.4	84.9	15.5	
	SD	12.4	3.1	30.1	8.8	

表 5.7 に基づいて、前腕荷重と方向意図との相関関係を図 5.5 で表している。

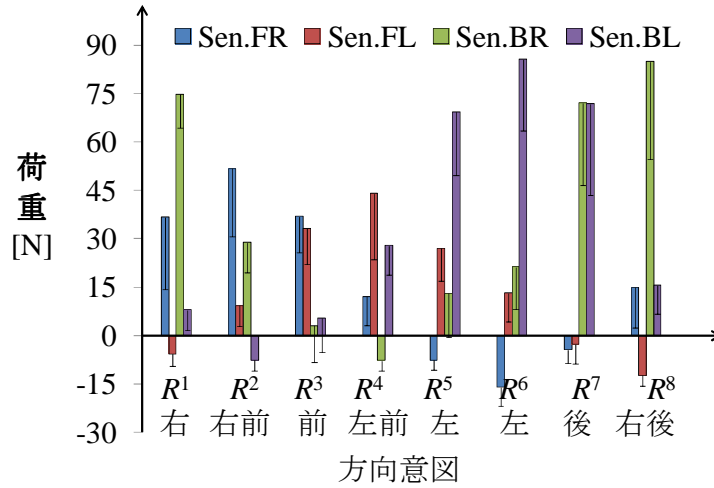


図5.5 前腕荷重の特性と方向意図との関連性

プロダクションルールを用いて、前腕荷重より、方向意図を同定する推論は、式(5.1)に示す。

$$\begin{array}{llllll}
 R^1: & \text{If } x_1 = A^{11} & \text{and } x_2 = A^{12} & \text{and } x_3 = A^{13} & \text{and } x_4 = A^{14} & \text{Then } y = b^1 \\
 R^2: & \text{If } x_1 = A^{21} & \text{and } x_2 = A^{22} & \text{and } x_3 = A^{23} & \text{and } x_4 = A^{24} & \text{Then } y = b^2 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 R^8: & \text{If } x_1 = A^{81} & \text{and } x_2 = A^{82} & \text{and } x_3 = A^{83} & \text{and } x_4 = A^{84} & \text{Then } y = b^8 \\
 \text{Fact:} & x_1 = a^1, x_2 = a^2, x_3 = a^3, x_4 = a^4 & & & &
 \end{array}$$

$$\text{Result:} \qquad \qquad \qquad y = \beta \tag{5.1}$$

ここで、前件部 $\{A^{11}, A^{21}, \dots, A^{81}\}$ は、表 5.7 示す荷重センサー Sen.FR の平均値 Mean と標準偏差 SD である、前件部 $\{A^{12}, A^{22}, \dots, A^{82}\}$ 表 5.7 示す荷重センサー Sen.FL の平均値 Mean と標準偏差 SD である、前件部 $\{A^{13}, A^{23}, \dots, A^{83}\}$ 表 5.7 示す荷重センサー Sen.BR の平均値 Mean と標準偏差 SD である、前件部 $\{A^{14}, A^{24}, \dots, A^{84}\}$ 表 5.7 示す荷重センサー Sen.BL の平均値 Mean と標準偏差 SD である。後件部変数 $\{b^1, b^2, \dots, b^8\}$ は 8 個方向意図である。四つの前件部はアンド関係である。

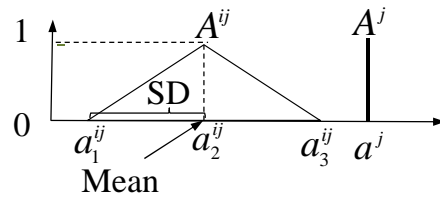
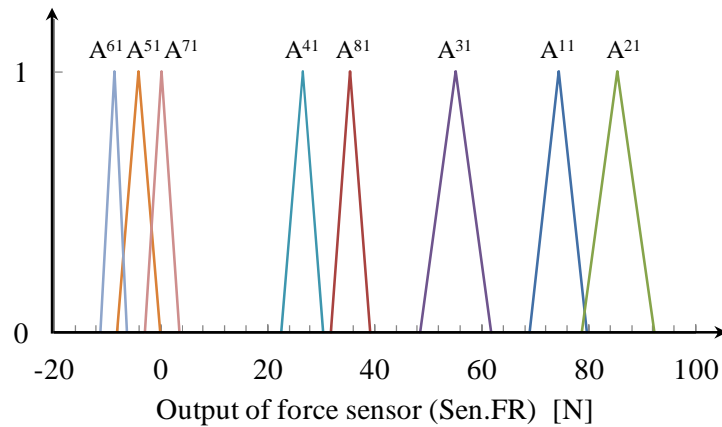
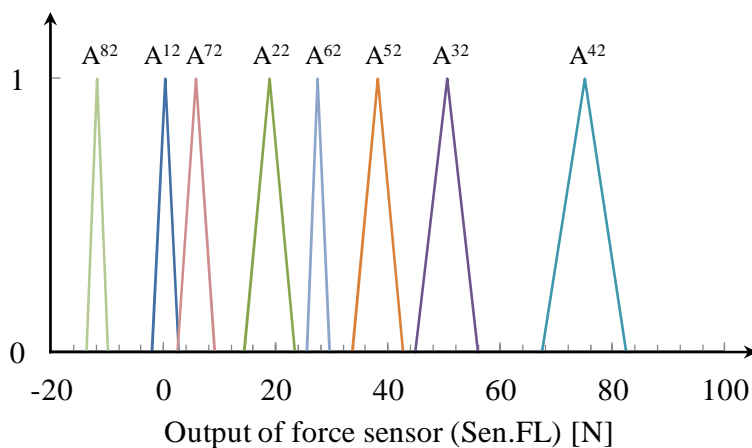


図 5.6 前件部と事実のファジィ集合

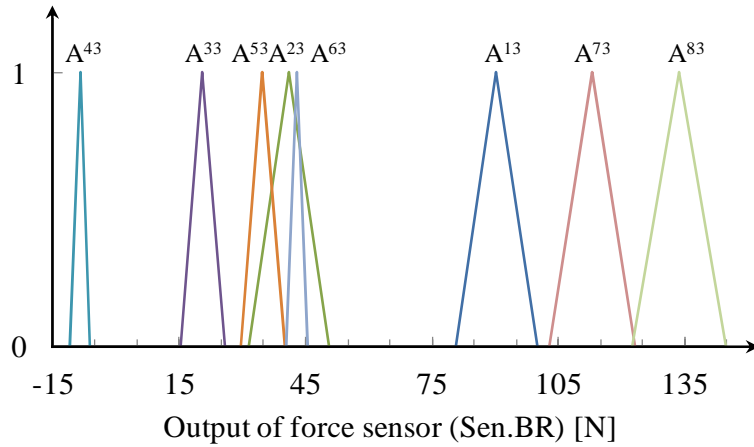
図 5.6 に示すように，前件部 A^j は正規な三角型ファジィ集合で記述した，パラメータ a_1^j, a_2^j, a_3^j は表 5.7 に示す荷重センサーデータの平均値 Mean と標準偏差 SD により計算する．つまり， $a_1^j = A^j \cdot \text{Mean} - A^j \cdot \text{SD}$ ， $a_2^j = A^j \cdot \text{Mean}$ ， $a_3^j = A^j \cdot \text{Mean} + A^j \cdot \text{SD}$ ．そして，表 5.7 に基づいて，前件部 x_1, x_2, x_3, x_4 のメンバーシップ関数は次の通りで示す．



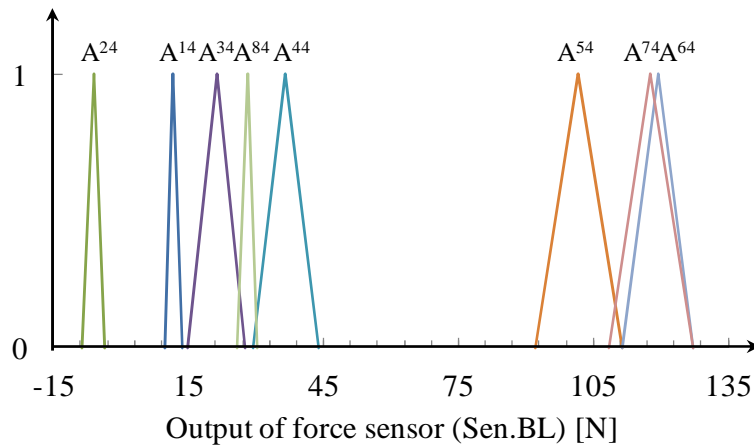
(a) 前件部 x_1 のメンバーシップ関数



(b) 前件部 x_2 のメンバーシップ関数



(c) 前件部 x_3 のメンバーシップ関数



(d) 前件部 x_4 のメンバーシップ関数

図 5.7 前件部のファジィ集合

一方では、図 5.6 に示した、事実 A^j はシングルトンで、パラメーター d^j は荷重センサー現在の測定値である。ここまで、ファジィルールとファジィ集合を構成した。図 5.7 では、前件部のファジィ集合は互いに共通部分をもっている場合がある。この時、直接推論法は推論の結論を求めることができない[3][4][5]。これに対して、本論文は、文献[1]で提案した距離型ファジィ推論法により、前件部と事実との共通集合が存在しない場合にも、被支援者の方向意図を推定できる。次に、距離型ファジィ推論法を用いて方向意図を推定する。

5.3.3 距離型ファジィ推論法により方向意図の同定

推定アルゴリズムとしては、文献[1]の距離型ファジィ推論法を用いる。距離

型ファジィ推論法は、強い非線形特性を精度よく表現でき、且つ論理学として必須とされる分離規則を満たしているので、様々な歩行障害者に適用できるからである。

距離型ファジィ推論法により要支援者の歩行方向意図の同定方法は三つのステップから講成される。

STEP1:式(5.2)により、シングルトンの事実 A^i と i 番目のルールにおける j 番目の前部件 A^{ij} との距離値 d_{ij} を求める。ただし、 $i = 1, 2, \dots, 8$ はルールの数、 $j = 1, 2, 3, 4$ は前部件の数を表す。

$$d_{ij}(A^{ij}, A^i) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{k=1}^2 \left[\sum_{l=k}^{k+1} (a_l^{ij} - a_l^i)^2 + \prod_{l=k}^{k+1} |a_l^{ij} - a_l^i| \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

式(5.2)は、二つのファジィ集合間の距離計算式を、三角型ファジィ集合 A^{ij} とシングルトンの事実 A^i との距離計算に適用する場合、簡略した距離の計算式である[6]。即ち、距離 d_{ij} が4個のパラメータで計算できる。事実 A^i と前部件 A^{ij} が離れれば離れるほど、計算される距離値 d_{ij} は大きくなる。事実 A^i と前部件 A^{ij} が完全に一致すれば、距離値 d_{ij} は0になる。

STEP 2: 前で述べた、各前件部変数の関係はアンドで、式(5.3)より i 番目のルールの前件部全体と事実との距離値 d_i を求める。ただし、 w_j は $w_j > 0$ を満たすパラメータである。

$$d_i = \sum_{j=1}^4 w_j d_{ij}(A^{ij}, A^i) \quad (5.3)$$

距離値 d_i は、事実と i 番目のルールとの相違を定量に表すものである。 d_i の値が多きければ多きいほど、事実と i 番目ルールの条件との関連性が無くなるということ意味である。また、 w_j は距離 d_{ij} の重みであり、大きいほど d_{ij} 距離値 d_i に反映される。同定する時、 w_j を調整するように、各センサーは同定結果の影響程度を調整している。

STEP 3: 式(5.4)により、被支援者の方向意図、即ち、行こう方向の角度 β を求める。ただし、 b^i はシングルトンの後部件 B^i のパラメータである、即ち、8方向の角度である。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \left[b^i \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (5.4)$$

式(5.4)からわかるように、前件部と事実との距離に近いほど、ルールの後件部が推論結果に反映される。特に、前件部と事実が完全に一致する場合には、距離値 d_i は 0 となり、ルールの後件部が推論結果として得られる。

5.3.4 後件部角度の決定について

式 (5.4) に示す、推論方法中に、 b^i はシングルトンの後件部 B^i のパラメータである、即ち、8 方向の角度である。推理結果の精度を保証させるように、適切な角度の決定方法は次に説明する。

まず、前節で計算した前件部全体と事実との距離 $d_i (i=1,2,\dots,8)$ の中に、最短距離を持っているルール番号 i を探し、その時、第 i 番ルールの後件部は次の通りを定義する。

$$b^i = 45^\circ \times (i-1) \quad (5.5)$$

次に、他のルールの後件部は図 5.8 に示す計算方法により得られる。全部のルールの端と端をつけて一列に並べた、円型を講成した。

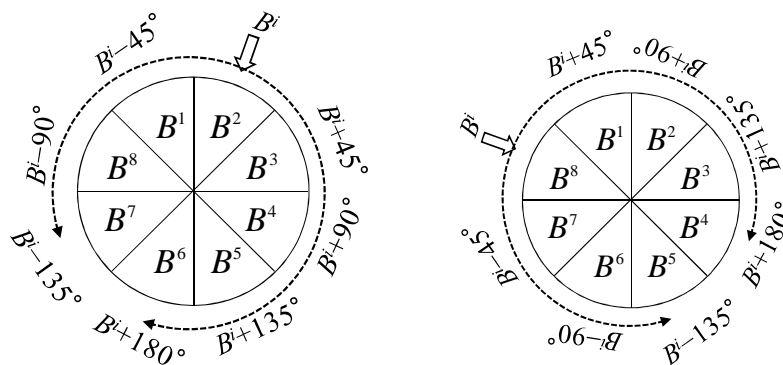


図 5.8 後件部角度の定義方法

例えば、図 5.8 の左では、2 番目のルールの事実との距離が最短である。そして、 $b^2=45^\circ$ とする。図の示す計算方法により、他のルール後件部は次の通りに決定する。

$$\{b^1, b^2, \dots, b^8\} = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, -90^\circ, -45^\circ\} \quad (5.6)$$

右に示す図は、最短距離は第8ルール番である、そして、 $b^8=315^\circ$ 。図の示す計算方法により、他の後件部の値は式(5.7)に示す。

$$\{b^1, b^2, \dots, b^8\} = \{360^\circ, 405^\circ, 450^\circ, 495^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\} \quad (5.7)$$

最短距離 d_i の番号は8個可能がある ($i=1,2,\dots,8$)，そして，図5.8に示すの定義方法より，ファジイルールの後件部は8個可能性がある，表5.8に示す。

表 5.8 後件部角度の決定

最短距離ルールの番号	後件部 $\{b^1, b^2, \dots, b^8\}$
1	$\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, -135^\circ, -90^\circ, -45^\circ\}$
2	$\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, -90^\circ, -45^\circ\}$
3	$\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, -45^\circ\}$
4	$\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$
5	$\{360^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$
6	$\{360^\circ, 405^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$
7	$\{360^\circ, 405^\circ, 450^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$
8	$\{360^\circ, 405^\circ, 450^\circ, 495^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$

方向意図を同定する時，リアルタイムで測定した荷重センサーのデータを事実となり，前件部全体と事実との距離を計算し，距離の最も近い d_i の番号を探し，ファジイルールの後件部を定義する。そして，式 (5.4) に示す推論法より，方向意図を推定している。

5.4 知識半径の導入

【知識半径】

ファジィ論理は人間の推論思考過程を曖昧な言語表現に基づくモデル化した推論方法である。人間の脳中にたくさん知識が含まれる、何が推論思考する時、全ての知識を利用することではなく、事実と関係性が高い知識だけを使用している。使用される知識が多ければ多いほど、時間が掛かるだけではなく、最も関連性のある知識の役割が返って薄れる。脳における知識の選択的使用策略を真似るために、知識の選択戦略に基づいて、いわゆる知識半径という概念を提案された[7]。

距離型ファジィ推論法は、距離情報を利用することにより、数学的に厳密に議論しやすいだけではなく、物理的な概念も明確である。前件部と事実との距離値が大きければ大きいほど、それらのルールは事実との関連性が低いことを意味する[8]。

知識半径とは、ルールの前件部と事実と各の距離値 $d_i(i = 1, 2, \dots, 8)$ から小さい順に選ばれるルールの数である。知識半径は整数で表される、例えば、知識半径は r であれば、現在の事実に最も近いルールの数は r 個であることを意味する。こちらの r 個最も近いのルールを利用する、推論を実施している。したがって、知識半径 r は範囲 ($2 \leq r \leq$ ルールの数) 内の整数である。知識半径を用いれば、事実と最も関係性のある知識を使用するという知識の選択的利用行為を表現することが可能になる。従って、本節は、知識半径を事実と最も近いルールの数と定義する。つづいて、知識半径の概念に基づいて、知識を選択的に利用し方向意図を同定する。

【知識半径を導入した距離型ファジィ推論法】

知識半径概念を使用する時、距離型ファジィ推論法も三つのステップから構成される。

STEP 1 : 前で述べたと同じ、式 (5.2) により、シングルトンの事実 A^j と i 番目のルールにおける j 番目の前部件 A^{ij} との距離値 d_{ij} を求める。

STEP 2 : 先ず, 前で述べたと同じ, 式(5.3)より i 番目のルールの前件部全体と事実との距離値 d_i を求める. 次に, ルールの前件部と事実との距離 $d_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ を単調増加の順に並べ替える.

STEP 3 : 式(5.4)により, 被支援者の方向意図, 即ち, 行こう方向の角度 β を求める. ただし, b^i はシングルトンの後件部 B^i のパラメータである, この角度の定義方法は, 前と同じである. 式 (5.4) 中の n は, 知識半径値 r , d_1 から d_r までは, 単調増加の順に並べ替えた d_i である, つまり, 今回は, 事実にもっとも近い r 個のルールを利用し, 方向意図を推定する.

5.5 実験による考察

5.5.1 方向意図同定法の検証

方向意図同定方法の有効性を検証するために、5人被験者に協力してもらい、実験を行った。

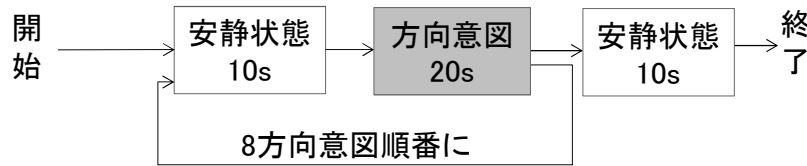
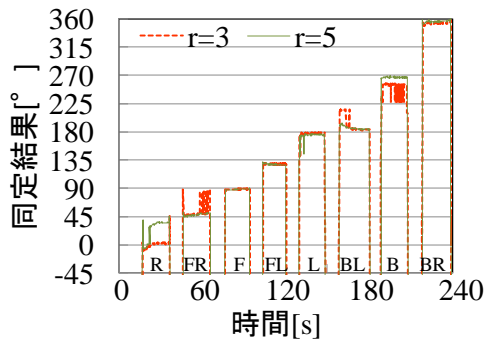
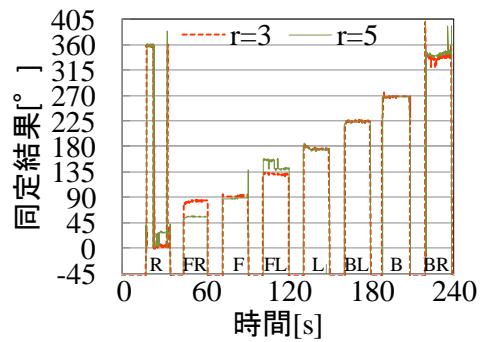


図 5.9 実験の流れ

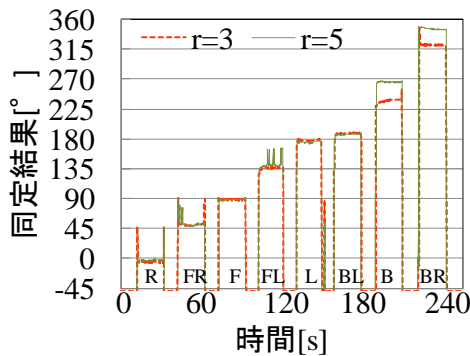
実験の流れは図 5.9 に示す、この実験は無移動状態で行った、一つのセットは、安静状態 10s、方向意図を持っている状態 20s とし、全部 8 セット、図 5.2 に示す 8 方向 8 方向を順番に実施します。5 人被験者は、每人 2 回実験を行う。荷重センサーの測定値より、提案した方向意図同定法を用いて、被験者の方向意図を推定する。同定する時、知識半径 r を 3 と 5 に設定し、同様な測定値に基づいて、同定結果を二回で求める、同定結果を図 5.10 に示す。



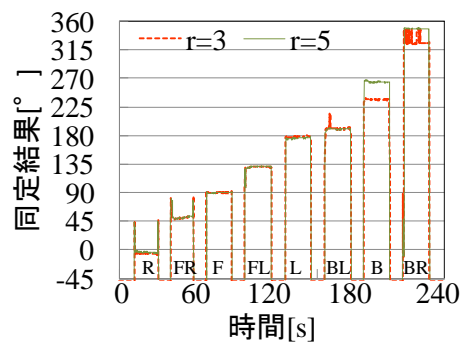
被験者 A の同定結果 1



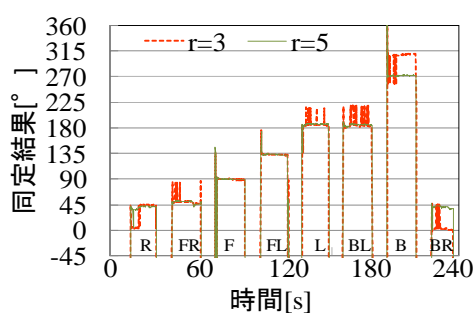
被験者 A の同定結果 2



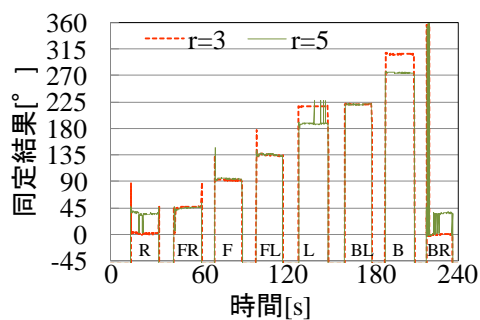
被験者 B の同定結果 1



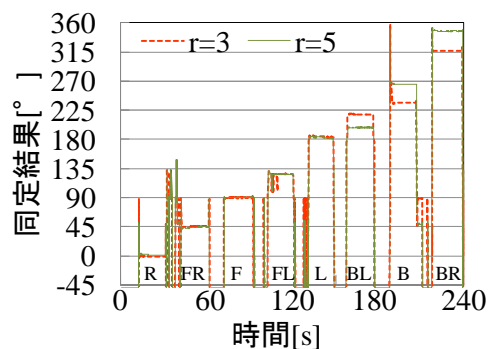
被験者 B の同定結果 2



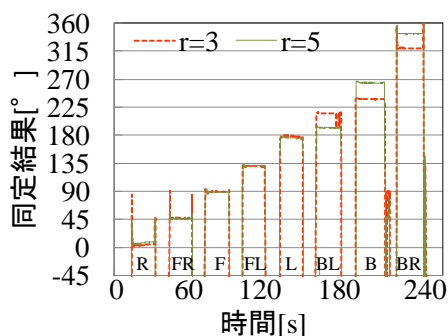
被験者 C の同定結果 1



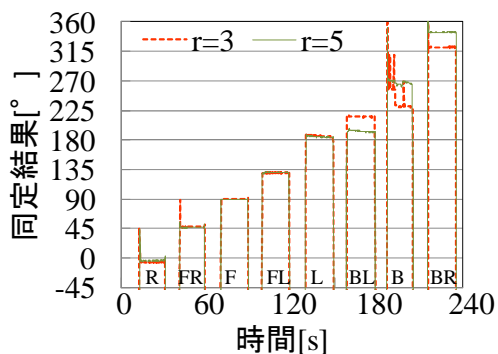
被験者 C の同定結果 2



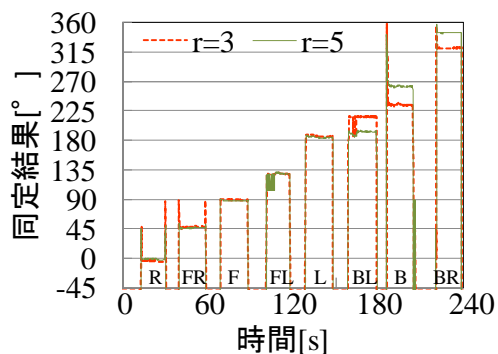
被験者 D の同定結果 1



被験者 D の同定結果 2



被験者 E の同定結果 1



被験者 E の同定結果 2

図 5.10 方向意図同定結果

図 5.10 には、横軸は時間、縦軸は同定した方向意図である。赤い破線は知識半径 $r=3$ 時の結果で、緑実線は知識半径 $r=5$ 時の結果である。図のように、提案した方向意図同定方法により、被験者の方向意図を認識できる事かわかる。その中に、右(0°)、前右(45°)、前(90°)、前左(135°)、左(180°)、これらの方向における結果の精度が高い。しかし、後左(225°)方向の同定精度は低い。知識半径 r は 3 の時、被験者 D と E だけの同定結果は、意図方向より近く。後(270°)方向において、知識半径 r は 5 の時、5 人の被験者の結果は良い。後右(315°)には、先ず

被験者 A に対して、同定結果は方向意図よりの偏差値が大きい。他の被験者には、知識半径 r を 5 に設定する時、同定結果は良いことが示された。異なる被験者の同定結果は異なり、精度も違うことが示された。被験者の個人特性が原因だと考えられる。

5.5.2 知識半径に関する考察

先節は、知識半径を 3 と 5 に設定する時の同定結果を示した。知識半径の定義により、知識半径 r の範囲は ($2 \leq r \leq$ ルールの数) である。ルールの数は 8 であり、 r の値を 2 から 8 まで設定し、知識半径の影響を考察する。具体的に、前節で 5 人被験者毎に 2 回実験で測定した荷重データを利用して、 r を 2 から 8 まで設定するように、同定結果を求める。次に、各同定結果と実際の方向意図との差を求める。更に、被験者毎に 2 回実験で、各方向意図の同定の差の平均値 Mean と標準偏差 SD を求める。表 5.9 と表 5.10 はそれぞれ、被験者 B と被験者 E の結果を示す。

表 5.9 同定偏差値の平均値 Mean と標準偏差 SD (被験者 B)

r		2	3	4	5	6	7	8
R 0°	Mean	-17.1	-5.4	6.5	-3.2	7.0	17.5	9.2
	SD	0.5	0.7	1.7	0.8	3.4	3.8	4.1
FR 45°	Mean	17.1	5.56	17.1	7.1	17.6	29.7	20.2
	SD	1.8	1.1	2.1	6.2	2.0	2.3	2.6
F 90°	Mean	-7.6	-0.7	-13.0	-1.1	-13.4	-2.2	8.2
	SD	15.7	0.7	0.8	0.9	0.7	0.7	0.9
FL 135°	Mean	-4.0	-1.7	-1.8	2.2	11.4	11.9	11.6
	SD	15.8	3.1	15.2	9.4	7.9	14.9	5.5
L 180°	Mean	-18.7	-1.9	-17.6	-4.5	-16.3	-6.0	5.3
	SD	6.0	0.9	4.7	1.1	3.8	4.4	4.4
BL 225°	Mean	-25.3	-35.5	-26.2	-36.8	-39.6	-31.5	-22.3
	SD	6.0	3.0	5.1	2.1	13.9	13.2	12.9
B 270°	Mean	-18.61	-32.88	-20.92	-4.9	-17.5	-5.4	7.1
	SD	13.7	2.1	1.1	1.0	1.2	0.9	1.2
BR 315°	Mean	15.5	10.9	18.1	31.9	42.9	30.4	22.7
	SD	32.5	8.4	1.7	1.4	1.0	1.3	1.5

表 5.9 により、被験者 B の場合は、知識半径 3 と 5 の時、方向意図の同定の差は他

の知識半径より小さいあることが示された。特に、右(0°)、前右(45°)、前(90°)、前左(135°)、左(180°)、これらの5個方向の同定結果は、他の知識半径より精度は高い事が分かる。

表5.9の結果より、方向意図は後左(225°)、後右(315°)する時、すべての知識半径の同定精度が低い事が示された。その原因は、前に抽出したファジィルールは、統計的な結果であり、5人実験者の統計の平均値である、個人差を考慮していないため、ファジィルールの精度が低下したので同定誤差が生じると考える。また、人間の方向に対する認知は、曖昧な概念で具体的な数値ではない。毎回の具体的な数値が異なる、更に、異なる場合、方向意識は完全に合致していない、従って、これも同定誤差の原因考える。

表 5.10 同定偏差値の平均値 Mean と標準偏差 SD (被験者 E)

<i>r</i>		2	3	4	5	6	7	8
R 0°	Mean	-17.7	-5.4	7.3	-3.0	7.6	7.6	9.7
	SD	0.8	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.0
FR 45°	Mean	15.2	3.0	0.0	2.3	13.8	13.8	13.8
	SD	1.9	0.8	11.7	1.1	1.4	1.4	1.4
F 90°	Mean	-3.1	-0.2	-14.5	-1.1	-14.9	-1.8	10.6
	SD	19.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4
FL 135°	Mean	-17.4	4.3	-17.0	-6.7	8.7	8.7	8.3
	SD	0.8	0.8	1.1	5.9	9.2	9.3	1.0
L 180°	Mean	185.9	3.1	-4.6	0.8	-10.1	-0.2	10.7
	SD	18.5	5.0	14.7	6.0	6.5	5.2	4.2
BL 225°	Mean	-36.2	-22.4	-34.6	-37.1	-33.5	-23.1	-11.6
	SD	21.1	17.4	20.4	7.3	23.2	19.3	16.0
B 270°	Mean	-13.6	-32.4	-18.0	-4.2	-15.3	-15.3	10.8
	SD	11.5	10.3	9.2	2.8	11.8	11.8	6.9
BR 315°	Mean	18.3	4.6	15.8	21.0	33.7	33.7	33.7
	SD	0.7	2.3	2.0	14.4	13.3	13.3	13.3

表5.10により、被験者Eにも、知識半径3と5の時、方向意図の同定の差は他の知識半径を設定する時より小さいことが示された。特に、右(0°)、前右(45°)、前(90°)、前左(135°)、左(180°)における結果は、他の知識半径よりの精度は高かつ

た. 表5.9の結果より, 被験者Eに対して, 方向意図は後左(225°)の時, 同定精度が低いである事が示した. こちらも, 個人差を考慮していない, ファジィルールが原因で同定誤差が生じると考える. 毎回, 方向に対する認知の具体的な数値が異なる事が誤差の原因である.

5.5.3 指定された経路の追従

開発した同定法を更に検証するために, 経路追従実験を行った. 具体的に, 図 5.9 示すように, 矩形と菱形経路を設定し(認識する方向として, 0° から 45° ずつ加え, 合計 8 方向とした), 被験者は二つの経路に沿うように, 意識的に歩行支援ロボットを押して, 制御した. 提案した方向意図同定法により, 被験者の方向意図を認識し, ロボットはこの同定した方向を目標移動方向になるように, 一定の速度で, この方向に移動した. カメラにより, 実際ロボットの位置を測定した. 実際の走行経路を指定された経路と比較するように, 方向意図同定方法の有効性を考察する.

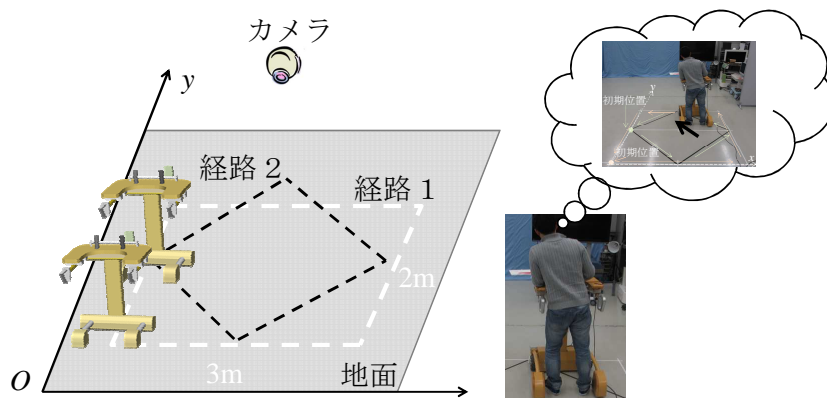


図 5.11 実験の様子

実験では, 知識半径を 5 にした. ロボットの姿勢角は 90° で一定とした. 提案した同定方法に対して, 5 人被験者に一般的な有効性を検証するために, 被験者の個体特性がすべて当てはまる被験者 B と被験者 E に協力してもらった. 每人 2 回実験を行った. 実験結果は図 5.12 と図 5.13 に示す. 図 5.12(a)と図 5.13(a)は前後左右四方向, 即ち, $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 方向角の走行結果である. 図 5.12(b)と図 5.13(b)は斜め四方向, 即ち $315^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 方向角の実験結果である. 破線は

指定された経路、つまり、方向意図である、太赤い実線は1回目の同定結果、細緑実線は2回目の実験結果を表す。図のように、目標方向に対して、誤差はあるが、方向意図を大まかに同定できた。提案した同定法の有用性が確認された。被験者 B と被験者 E 毎に二回の結果はほぼ同じであるように、提案した同定法のリライアビリティを示した。また、被験者 B と被験者 E の走行結果は違うことが示された、原因として、こちらは、人間の荷重のコントロールは、大雑把であり精密には行えない。被験者の個人特性, 例えば、歩行の姿勢、体重、身長などの原因により、被験者は異なる荷重のコントロールである事が分かる。

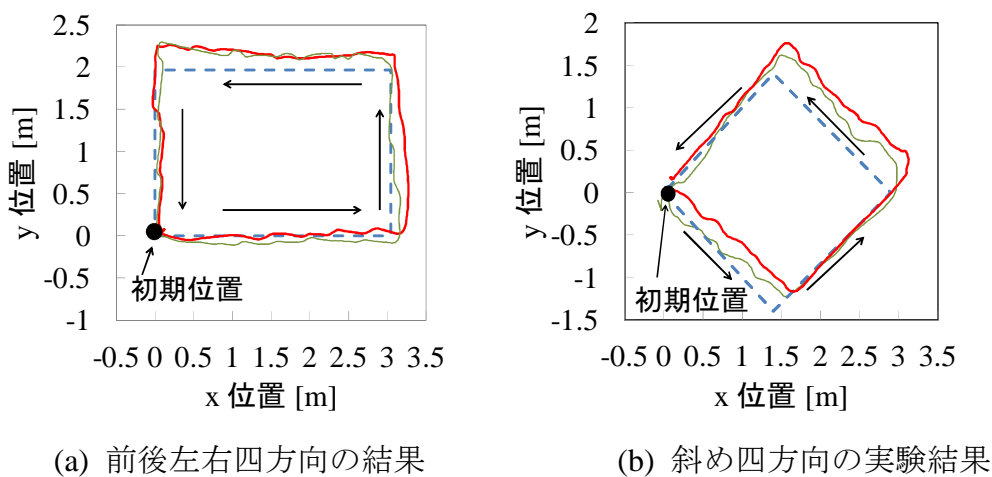


図 5.12 被験者 B の実験結果

--- 方向意図 — 同定結果1 — 同定結果2

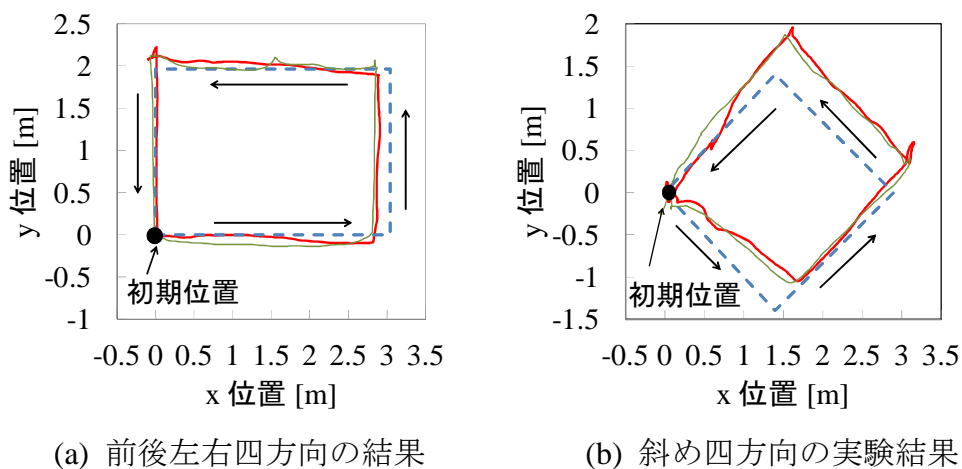
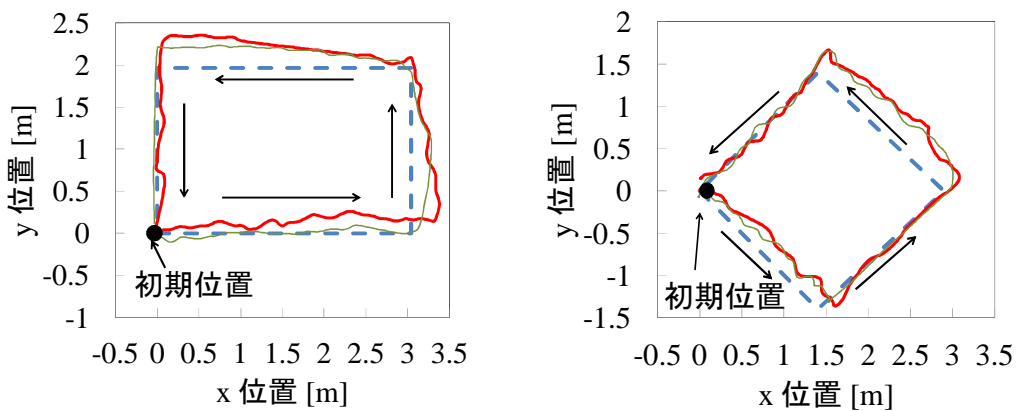


図 5.13 被験者 E の実験結果

--- 方向意図 — 同定結果1 — 同定結果2

提案した同定法を更に検証するために、被験者 A-E とは違う新たな被験者に協力してもらい、実験を行った。実験結果は図 5.14 に示す。図 5.14(a)は前後左右四方向、即ち、 $0^{\circ}, 90^{\circ}, 180^{\circ}, 270^{\circ}$ 方向角の走行結果である。図 5.14(b)は斜め四方向、即ち $315^{\circ}, 45^{\circ}, 135^{\circ}, 225^{\circ}$ 方向角の実験結果である。破線は方向意図である、太赤い実線は1回目の同定結果、細緑実線は2回目の実験結果を表す。図 5.14のように、被験者は目標経路に沿って行ったことが分かる。開発した歩行意図の同定法を用いて、要支援者の行きたい方向を認識できることが示された。



(a) 前後左右四方向の結果

(b) 斜め四方向の実験結果

図 5.14 他の被験者の実験結果

--- 方向意図 — 同定結果1 — 同定結果2

5.6 結言

本章では、適切な歩行支援を行うために、歩行支援ロボットと利用者との力学インタラクションにより要支援者の意図を認識する方法を提案した。先ず前腕荷重と移動方向意図との関連性について計測実験を行った。被験者は指定された8個方向に行こうとする時、荷重センサーにより前腕荷重を測定した。プロダクションルールを用いて前腕荷重と方向意図との関係を知識として抽出した。次に、距離型ファジィ推論法に基づいて方向意図の推定法を開発した。最後に、開発した方向意図の同定法の有効性を実験により検証した。

参考文献

1. 王碩玉, 土谷武士, 水本雅晴, 距離型ファジィ推論法, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol.1, No.1, pp.61-78, 1999.
2. Yinlai Jiang and Shuoyu Wang, Directional intention identification for running control of an omni-directional walker, 2010 IEEE International Conference on Fuzzy Systems(FUZZ), July, 2010.
3. 市橋, 渡辺: 簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御, 日本ファジィ学会誌, Vol.2, No.3, pp.429-437(1990).
4. L.T. KOczy and K. Hirota: Approximate Reasoning by Linear Rule Interpolation and General Approximation, International Journal of Approximate Reasoning, Vol.9, No.3 pp.197-225(1993).
5. Y. Shi and M. Mizumoto: Some Considerations on Koczy's Fuzzy Interpolative Reasoning Method, Proceedings of Fourth IEEE International conference on Fuzzy System, pp.2117-2122(1995).
6. 川瀬, 柳原: 多段ファジィ推論におけるファジィネス, 信学論(A), Vol. J77-A, No.7, pp.1006-1014(1994).
7. 王碩玉, ヒューマン推論エンジンの開発, 平成14年度未踏ソフトウェア創造事業プロジェクト, 2002.
8. 尚濤, 王碩玉, 知識半径を利用した距離型ファジィ推論法に基づく人間の操縦経路の模倣, 第21回ファジィシステムシンポジウム, pp.239-244.東京, 9月.

第6章

制御法に基づいた要支援者方向意図の実現

6.1 緒言

第5章では、距離型ファジィ推論法を用いて、要支援者の移動方向意図を同定した。本章では、同定した方向を目標とし、第4章で開発した制御法を用いた歩行支援ロボットを要支援者の方向意図に追従させた結果を実験により検討する。

実験方法について説明する。要支援者は、歩行支援ロボットにより、指定された目標経路に沿って進行する。まず、第5章で提案した方向意図同定法により、要支援者の移動方向意図が得られる。次に、同定した方向を目標とし、要支援者の方向意図により決められた目標経路を実現するための目標軌道を計画する。その後、開発した制御法を用いて、計画した目標経路をロボットが追従する。最後に、ロボットの走行結果と指定された目標経路を比較することにより、本論文で提案した方法を検討した。

6.2 同定した方向による目標経路・軌道の計画

6.2.1 慣性座標系で方向意図角の定義

第5章で、距離型ファジィ推論法に基づいて、要支援者の移動方向意図を同定した。図6.1に示すように、ロボットのボディー座標系 $C-x'y'$ 中に、同定した角度を β と定義した。つまり、 β はロボットの移動速度 V と線分 Cx' の成す角度である。第5章の説明により、 β の範囲は $[0^\circ, 360^\circ]$ である。

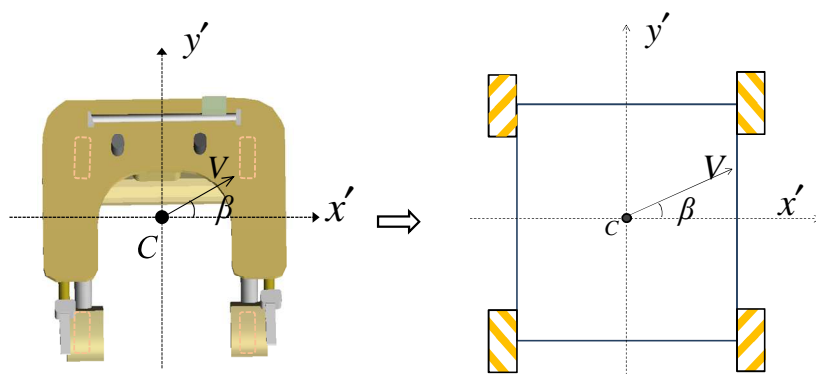


図 6.1 ボディー座標系で移動方向の定義

本章で、この目標角度 β により目標経路を決める及び目標経路を実現するための目標軌道を計画する。その際、ロボットは同一な姿勢で、同定した方向に直線経路で移動する。まず、ロボットの姿勢角度 $\theta = \pi/2$ と仮定する時、慣性座標系 $O-xy$ で、同定した要支援者移動方向意図角を定義する。姿勢角度 $\theta = \pi/2$ とする時、ボディー座標系 $C-x'y'$ は慣性座標系 $O-xy$ と同じである。

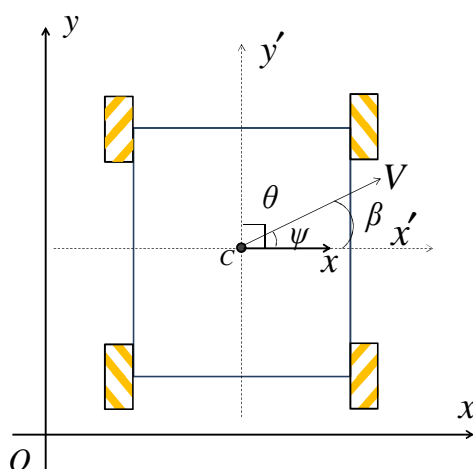


図 6.2 慣性座標系による移動方向の定義

図6.2に示すように、慣性座標系においてロボットの移動方向角 ψ も β となる。実際には、慣性座標系方向角 ψ とボディー座標系方向角 β との関係は次の通りである。

$$\psi = \theta + \beta - \pi/2 \quad (5.1)$$

慣性座標系で、ロボットの姿勢角度 $\theta = \pi/2$ する時、 x 軸方向と y 軸方向の速度はロボットの移動速度 V 及び移動方向意図により次のような関係となる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= \cos\psi \cdot V \\ \dot{y}_c(t) &= \sin\psi \cdot V \end{aligned} \quad (5.2)$$

被支援者の安全を考慮するために、ロボットの最高速度は 0.25m/s とした。今回、ロボットの目標移動速度を全て $V_d = 0.2\text{m/s}$ と設定する[1]。また、姿勢角は全て、 $\theta_{cd}(t) = \pi/2$ と設定する。

6.2.2 経路・軌道計画の説明

目標経路・軌道の設計方法について説明する。例えば、図6.3に示すように、要支援者が歩行支援ロボットの助けを借りて、初期位置 O 点から目標位置 L_i へ移動する場合を考える。まず、要支援者は、周りの環境により移動方向を定め、意識的に歩行支援ロボットを押して進む。次に、方向意図同定法により、要支援者の方向意図をリアルタイムで同定する。この同定した方向角により、ロボットの移動目標経路を決めると目標経路を実現するための目標軌道を計画する。最後に、ロボットがこの計画した目標経路・軌道を追従するように、要支援者の目標方向に移動する。さらに、要支援者は、ロボットの移動状況と周りの環境により、次の移動方向を定め、前述した過程をもう一度実施する[2][3]。実際には、この過程を繰り返して実施することで、要支援者は目標位置に到着する。

初期位置から目標位置まで移動する時、方向意図同定方法により、 $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i$ の移動方向意図角を連続的に同定したと仮定する。そして、目標経路はそれぞれ $OL_1, L_1L_2, \dots, L_{i-1}L_i$ の i 個の方向に、移動するための目標となる線分を組み立てる。

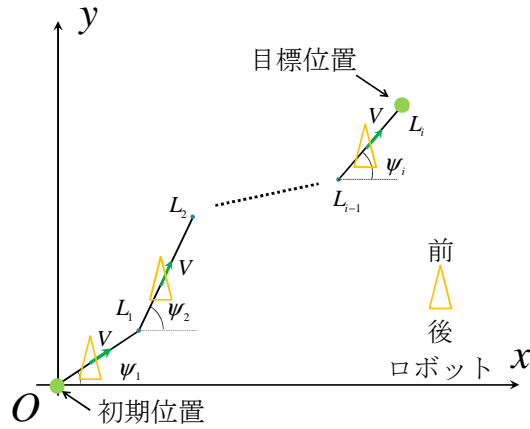


図 6.3 目標経路の設計方法

この i 個の線分を実現するために、目標軌道を設計する。

まず、線分 OL_1 に対して、この区間の時間は 0s から $t_1\text{s}$ で、同定した方向角は ψ_1 、目標速度は $V_d = 0.2\text{m/s}$ である、また、ロボットの x 軸と y 軸における目標速度は次の式で得られる。

$$\begin{cases} \dot{x}_{cd}(t) = \cos\psi_1 \cdot V_d \\ \dot{y}_{cd}(t) = \sin\psi_1 \cdot V_d \\ \dot{\theta}_{cd}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

さらに、目標速度を積分することで目標位置が得られる

$$\begin{cases} x_{cd}(t) = \cos\psi_1 \cdot V_d t \\ y_{cd}(t) = \sin\psi_1 \cdot V_d t \\ \theta_{cd}(t) = \pi/2 \end{cases} \quad (5.4)$$

線分 L_1L_2 での時間は $t_1\text{s}$ から $t_2\text{s}$ で、同定した方向角は ψ_2 、目標速度は $V_d = 0.2\text{m/s}$ 、そして、ロボットの x 軸と y 軸における目標速度は次の式で得られる。

$$\begin{cases} \dot{x}_{cd}(t) = \cos\psi_2 \cdot V_d \\ \dot{y}_{cd}(t) = \sin\psi_2 \cdot V_d \\ \dot{\theta}_{cd}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

目標速度を積分することで、線分 OL_1 の終了位置より、目標位置が得られる。

$$\begin{cases} x_{cd}(t) = \cos\psi_1 \cdot V_d t_1 + \cos\psi_2 \cdot V_d (t - t_1) \\ y_{cd}(t) = \sin\psi_1 \cdot V_d t_1 + \sin\psi_2 \cdot V_d (t - t_1) \\ \theta_{cd}(t) = \pi/2 \end{cases} \quad (5.6)$$

さらに、線分 $L_{i-1}L_i$ においては、時間は t_{i-1} s から t_i s となり、同定した方向角は ψ_i 、目標速度は $V_d = 0.2$ m/s、そして、ロボットの目標速度は次の式で得られる。

$$\begin{cases} \dot{x}_{cd}(t) = \sin\psi_i \cdot V_d \\ \dot{y}_{cd}(t) = \cos\psi_i \cdot V_d \\ \dot{\theta}_{cd}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

目標速度を積分することで、点 L_{i-1} の位置より、目標位置を得られる。

$$\begin{cases} x_{cd}(t) = \cos\psi_1 \cdot V_d t_1 + \cos\psi_2 \cdot V_d (t_2 - t_1) + \dots + \cos\psi_i V_d (t - t_{i-1}) \\ y_{cd}(t) = \sin\psi_1 \cdot V_d t_1 + \sin\psi_2 \cdot V_d (t_2 - t_1) + \dots + \sin\psi_i V_d (t - t_{i-1}) \\ \theta_{cd}(t) = \pi/2 \end{cases} \quad (5.8)$$

目標加速度は全て 0 m/s^2 に設定する、即ち、全ての時間で、

$$\begin{cases} \ddot{x}_{cd}(t) = 0 \\ \ddot{y}_{cd}(t) = 0 \\ \ddot{\theta}_{cd}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

従って、これらの方法により、初期位置から目標位置まで計画した目標軌道の加速度、速度、位置はそれぞれ式(5.10)、(5.11)と(5.12)となる。

目標加速度

$$\begin{cases} \ddot{x}_{cd}(t) = 0 \\ \ddot{y}_{cd}(t) = 0, \quad 0 \leq t \leq t_i \\ \ddot{\theta}_{cd}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

目標速度

$$\begin{cases} \dot{x}_{Cd}(t) = \cos\psi_k \cdot V_d \\ \dot{y}_{Cd}(t) = \sin\psi_k \cdot V_d, & t_{k-1} \leq t \leq t_k \\ \dot{\theta}_{Cd}(t) = 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

ここで, $k=(1,2\dots i)$, $t_0=0$ である.

目標位置

$$\begin{cases} x_{Cd}(t) = \cos\psi_1 \cdot V_d t, & 0 \leq t < t_1 \\ x_{Cd}(t) = \cos\psi_1 \cdot V_d t_1 + \cos\psi_2 \cdot V_d (t - t_1), & t_1 \leq t < t_2 \\ \vdots \\ x_{Cd}(t) = \cos\psi_1 \cdot V_d t_1 + \cos\psi_2 \cdot V_d (t_2 - t_1) + \dots + \cos\psi_i V_d (t - t_{i-1}), & t_{i-1} \leq t < t_i \\ y_{Cd}(t) = \sin\psi_1 \cdot V_d t, & 0 \leq t < t_1 \\ y_{Cd}(t) = \sin\psi_1 \cdot V_d t_1 + \sin\psi_2 \cdot V_d (t - t_1), & t_1 \leq t < t_2 \\ \vdots \\ y_{Cd}(t) = \sin\psi_1 \cdot V_d t_1 + \sin\psi_2 \cdot V_d (t_2 - t_1) + \dots + \sin\psi_i V_d (t - t_{i-1}), & t_{i-1} \leq t < t_i \\ \theta_{Cd}(t) = \pi/2 \end{cases} \quad (5.12)$$

6.3 制御法に基づいた方向意図の追従実験と考察

要支援者の方向意図より、適切な目標経路・軌道を計画した。本節では、この目標経路・軌道に対して、第4章で提案した制御法を用いて、ロボットが要支援者の方向意図に追従する実験を行った。具体的な実験過程を図6.4に示す。提案した同定法により、下肢障害者の方向意図を同定し、目標軌道・経路を計画する。次に、提案した制御法に基づいて、ロボットが計画した目標軌道・経路を追従する。

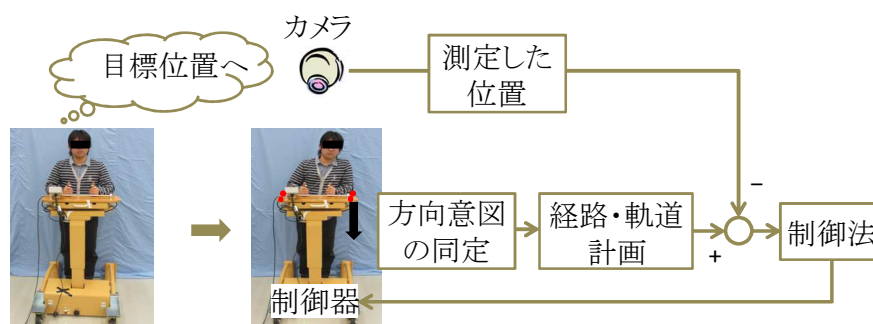


図 6.4 実験過程の概略図

まず、方向意図の追従において、同定誤差を考慮しないとする時、提案した制御法の有効性を検証するために、実験を行なった。実験には、床が平らな室内において、同じ荷重をロボットのアームレストの同じ位置に置き、同じ同定結果($\beta = 52.1^\circ$)を得られた時、提案した制御法と開ループ制御で方向意図の追従実験を行なった。デジタル加速度制御パラメータを表6.1に示す。走行結果は天井のカメラより測定する。

表 6.1 制御パラメータ

パラメータ	値と単位
K_p	$\text{diag}(1.8, 0.9, 1.1) \text{ s}^{-2}$
K_d	$\text{diag}(2.8, 2.0, 4) \text{ s}^{-1}$

実験結果を図6.5に示す。横軸はx軸方向の位置、縦軸はy軸方向の位置、破線は目標経路、点線は同定した方向角により決められた目標経路、実線はロボットの走行結果である。図6.5(a)は開発した制御法を用いて、ロボットの走行結果であり、図6.5(b)は開ループ制御での結果である。図6.5(a)の走行結果は目標経路

とほぼ同じである事が分かる．図 6.5(b)の経路追従誤差が大きいである．図のように，開発した制御法より，方向意図の追従精度を向上させた．

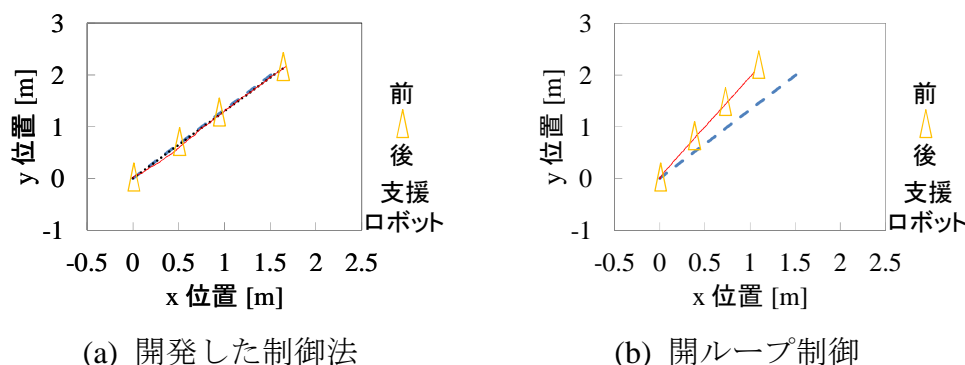


図 6.5 方向意図の追従

— 指定経路 - - - - 計画経路・軌道 — 走行結果

次に，要支援者の方向意図の追従において，実験を行った．要支援者は指定した経路（第 5 章と同じ）に追従する．つまり，床が平らな室内において，矩形と菱形二つの経路を設定し（認識する方向として， 0° から 45° ずつ加え，合計 8 方向とした），方向意図を同定する際，知識半径 r を 5 に設定している．被験者には，第 5 章の追従実験と同様に，先ず，知識ベースを構築するための被験者 E を選び，また，他の健常な男性 1 名と合わせて 2 人に実験対象として協力してもらった．被験者の個人情報を表 6.2 に示す．

表 6.2 被験者の情報

被験者	1	2
性別	女	男
体重(kg)	60	54
身長(cm)	155	174
年齢	34	24

制御法の有効性を検証するため，開ループ制御する時の結果と比較する．図 6.6 は開ループ制御する時における被験者 1 の走行結果である．図 6.6(a)は，前後左右四方向の経路追従結果であり，横軸は x 軸方向の位置，縦軸は y 軸方向の位置，破線は指定された目標経路，実線はロボットの走行結果である．一方，図 6.6(b)は，斜め四方向の経路追従結果であり，横軸は x 軸方向の位置，縦軸は y 軸方向の位置，破線は指定された目標経路，実線はロボットの走行結果である．

図 6.6(c)は前後左右四方向における姿勢角の軌道追従結果である。横軸は時間、縦軸はロボットの向き、破線は目標姿勢角軌道、実線はロボット実際の姿勢角度の応答である。図 6.6(d)は斜め四方向における姿勢角の軌道追従結果である。横軸は時間、縦軸はロボットの向き、破線は目標姿勢角軌道、実線はロボット実際の姿勢角度応答である。

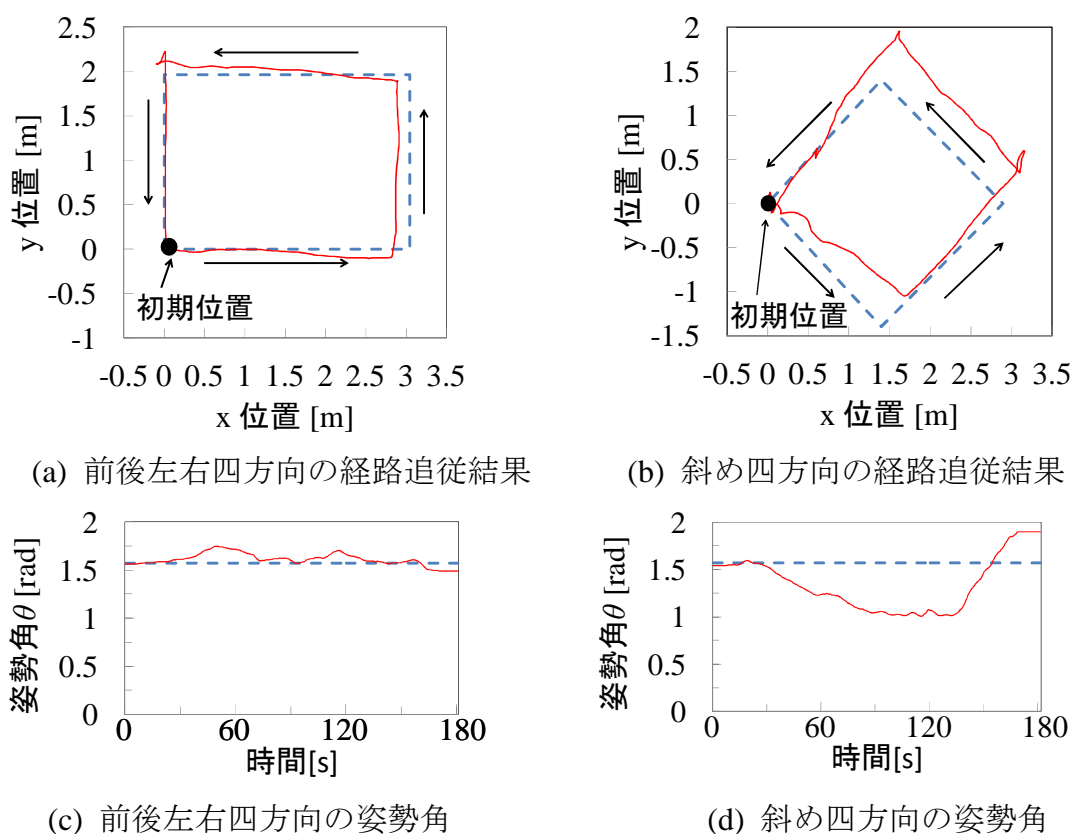


図 6.6 被験者 1 の走行結果 (開ループ制御)

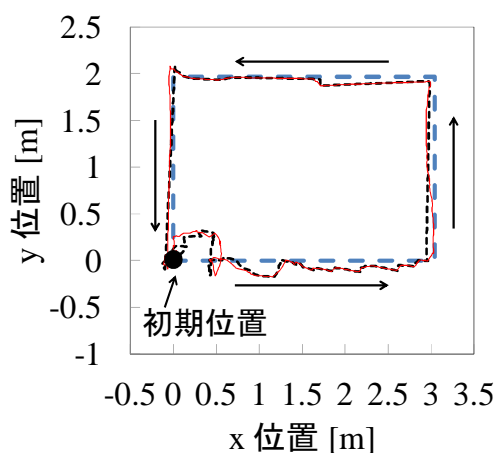
— — — 指定径路 — 走行結果

図 6.6(a)と図 6.6(b)より、ロボットは提案した方向意図同定法に基づいて、方向意図を認識できる。しかし、走行精度が低いことが示された。原因の一つとして、重心位置のずれにより走行精度が低くなったと考えられる。重心位置のずれは、図 6.6(c)と図 6.6(d)の姿勢角追従結果より明らかである。ロボットは開ループ制御する時、重心位置のずれにより、目標角度より大きい軌道追従誤差があることが示された。従って、開ループ制御する時、方向意図を正確に認識しても追従精度は低くなる。

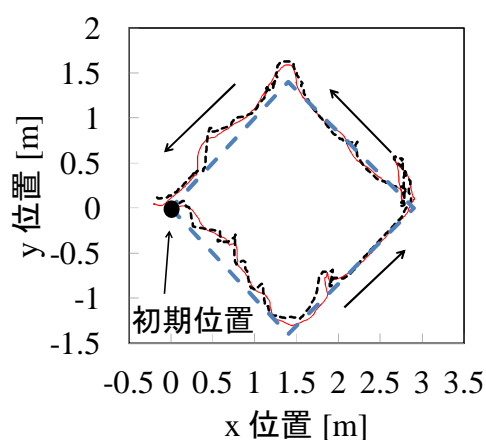
図 6.7 は制御ありの時，被験者 1 の走行結果である．図 6.7(a)は，前後左右四方向の経路追従結果であり，横軸は x 軸方向の位置，縦軸は y 軸方向の位置，破線は指定された目標経路，点線は計画した目標経路，実線はロボットの走行結果である．一方，図 6.7(b)は，斜め四方向の経路追従結果であり，図の設定は図 6.7(a)と同様である．図 6.7(c)と図 6.7(d)の設定は図 6.6(c)と図 6.6(d)の設定と同様である．図 6.7(e)と図 6.7(g)はそれぞれ前後左右四方向における x 軸と y 軸の軌道追従結果である．横軸は時間，縦軸は x 軸と y 軸軌道追従結果，点線は計画した x 位置 y 位置の目標経路，実線はロボットの x 軸と y 軸の応答である．図 6.7(f)と図 6.7(h)はそれぞれ斜め四方向における x 軸と y 軸の軌道追従結果である．図の設定は図 6.7(e)と図 6.7(g)と同じである．

図 6.7(b)–6.7(h)より，制御ありの時，ロボットが良い軌道追従を行い，高精度な目標軌道追従結果が得られる事が示された．図 6.7(a)と 6.7(b)より，実線は点線とほぼ同じであることが分かる，この結果より，制御法ありの時，ロボットの高い運動精度が示された．図 6.7 は図 6.6 の走行結果と比較すると，制御法による運動精度が示された上，指定された経路の追従結果も向上し，制御法の有効性が確認できた．

しかし，図 6.7(a)と 6.7(b)に示すように，ロボットの走行結果は，指定された経路よりある程度の追従誤差が生じる．原因としては，運動精度が少し影響するが，方向意図の認識誤差が主な原因であると考えられる．



(a) 前後左右四方向の経路追従結果



(b) 斜め四方向の経路追従結果

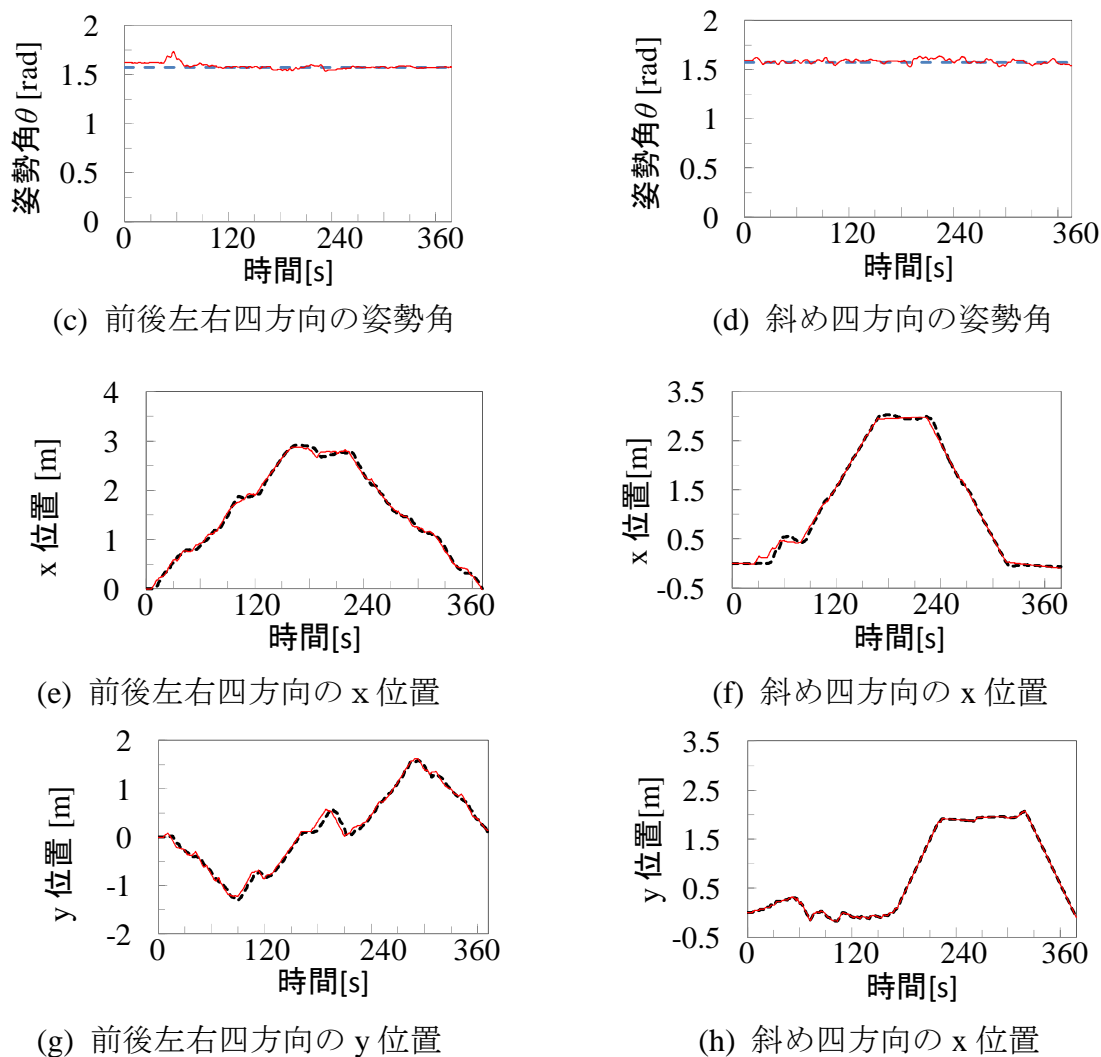


図 6.7 被験者 1 の走行結果 (制御あり)

— 指定径路 - - - - 計画径路・軌道 — 走行結果

図 6.8 は開ループ制御する時における被験者 2 の走行結果である。図 6.8 の設定は図 6.6 と同様である。図 6.8(a)と図 6.8(b)より、被験者 2 に対して、被験者 1 の結果同様に、ロボットは提案した方向意図同定法に基づいて、方向意図を認識できる。しかし、走行精度が低いことが示された。原因の一つとして、ロボットは開ループ制御する時、重心位置ずれが原因で走行精度が低い。重心位置のずれは、図 6.8(c)と図 6.8(d)の姿勢角追従結果より明らかである。従って、開ループ制御する時、方向意図を正確に認識しても追従精度は低くなる。

図 6.9 は制御ありの時、被験者 2 の走行結果である。図 6.9 は図 6.7 と同じ設定であり。図 6.9(b)–6.9(h)より、制御ありの時、被験者 2 に対しても、ロボット

は良い軌道追従精度を示した。高精度な目標軌道追従結果を得られる事が示された。図 6.9(a)と 6.9(b)より、実線は点線図とほぼ同じであることが分かる。この結果より、制御ありの時、ロボットの高い運動精度が示された。

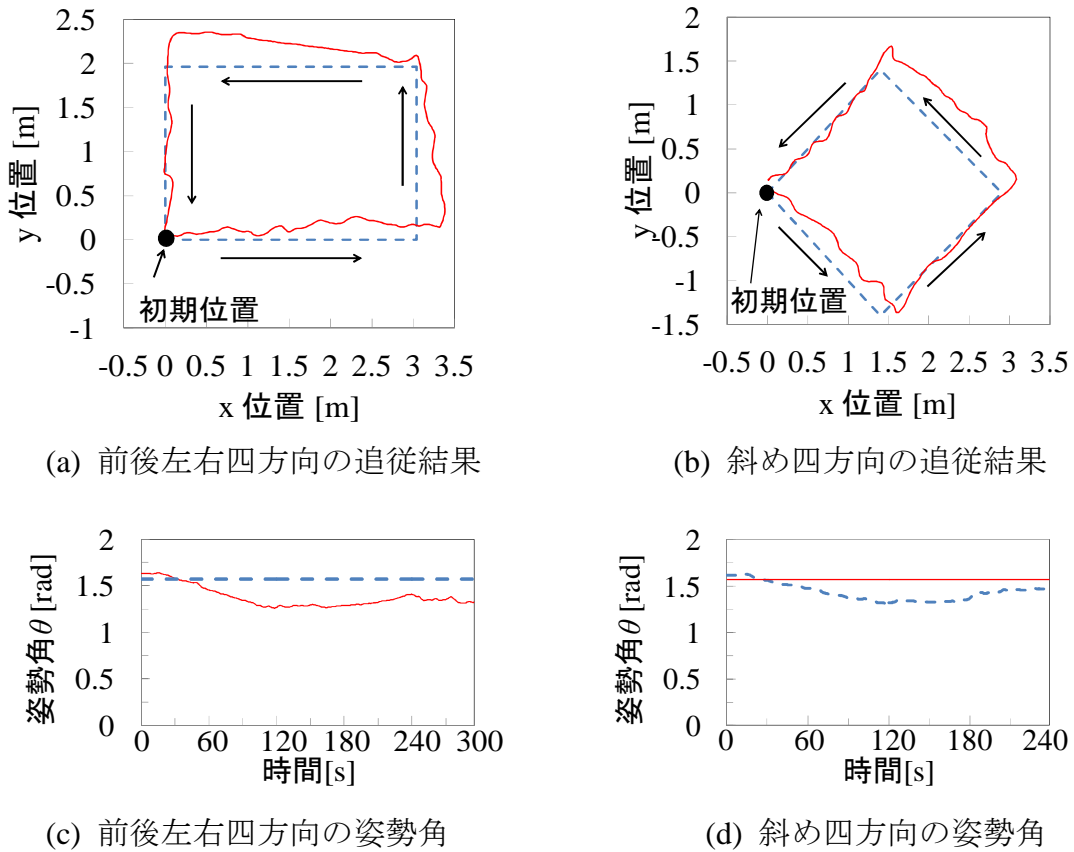
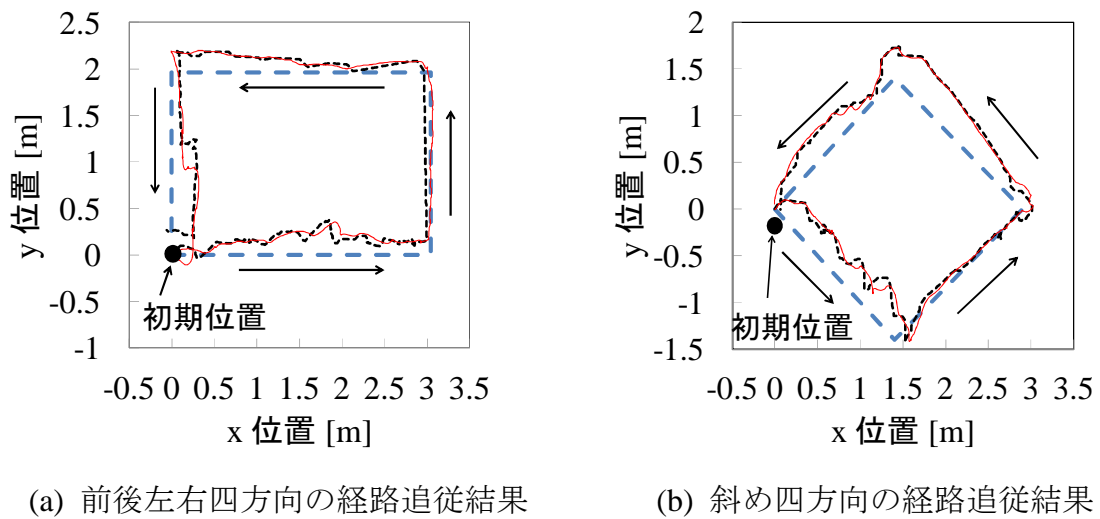


図 6.8 被験者 2 の走行結果 (開ループ制御)

— — — 指定径路 — 走行結果



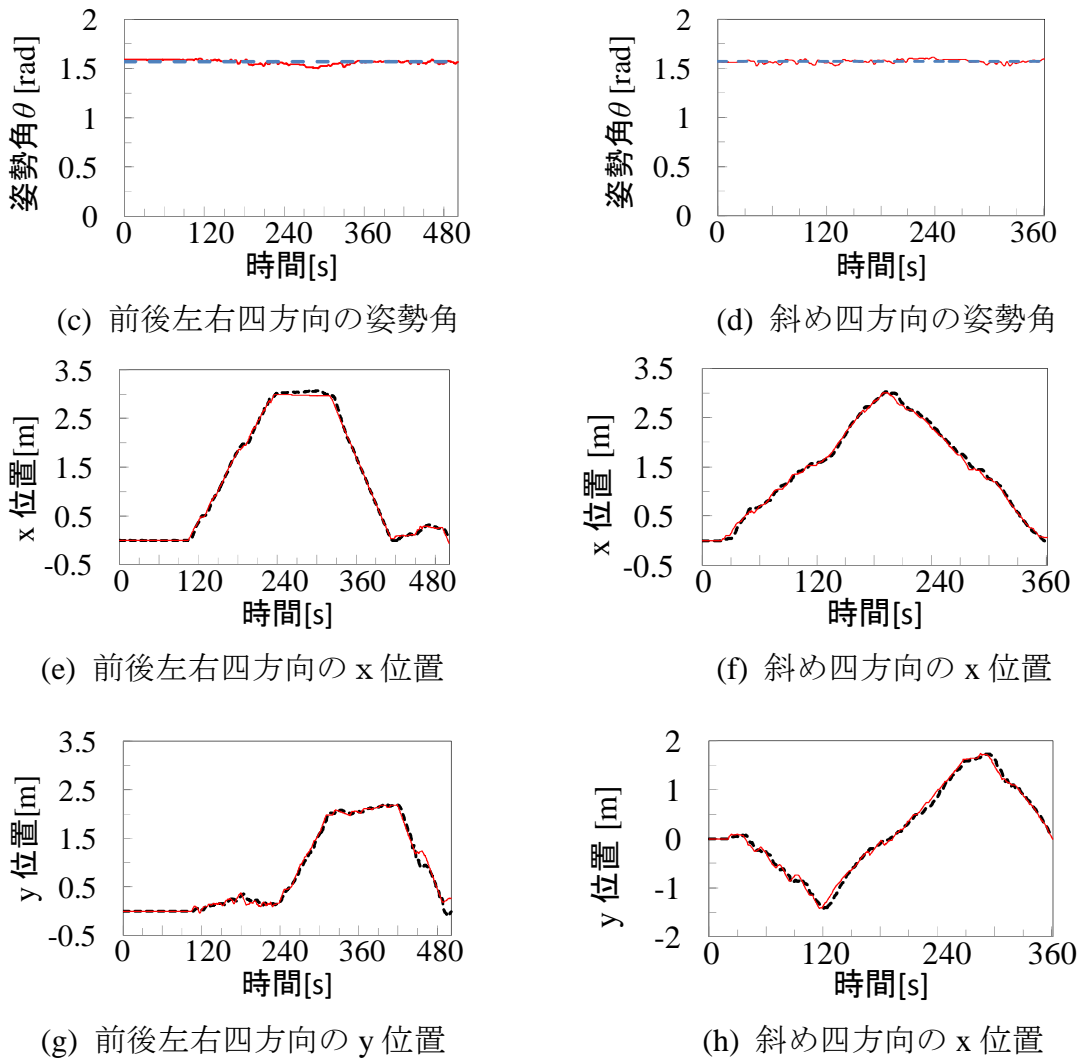


図 6.9 被験者 2 の走行結果 (制御あり)

— — — 指定径路 - - - - 計画径路・軌道 — 走行結果

図 6.9 は図 6.8 の結果と比較すると、制御法による運動精度を向上が示された上、指定された経路の追従結果も向上し、制御法の有効性が確認できた。

しかし、図 6.9(b)の計画した目標経路は図 6.8(b)の走行結果と比較すると、指定された目標経路からずれる程度はほぼ同じであることがわかる。図 6.8 において運動精度の影響が含まれても、図 6.9 の精度とほぼ同じであるため、指定された経路の追従精度は、主に方向意図の認識精度に影響することが分かる。

6.4 結言

本章では、開発した制御法を用いて、要支援者の方向意図に歩行支援ロボットを追従させる実験を行った。開発したデジタル加速度制御法は、目標経路追従の制御方法であるので、先ず、同定した要支援者の方向意図により、簡単な経路・軌道計画方法を用いて、目標経路・軌道を計画した。提案した制御法を用いて、ロボットは計画した目標経路・軌道を追従し、カメラにより走行結果を測定した。二人の被験者を協力してもらい、実験を行った。最後に、この制御法を使用しない時の走行結果と比較することにより、制御法ありの時に追従精度がよくなることを示した。提案した制御法の有効性を更に確認した。しかし、制御法ありの時、指定された目標経路にある程度の追従誤差が有る。原因として、ロボットの運動精度が少し影響するが、主に方向意図同定精度の影響が考える。

従って、提案した同定方法により要支援者の方向意図を正確に認識することで適切な目標経路を計画し、提案した制御法を用いて、要支援者の方向意図に高精度で追従できることを確認した。本論文は、歩行支援ロボットに関する研究の有効性を確認した。

参考文献

1. T. Tamura, M. Sekine, H. kuno, M.Fujie, A. Mori and K.Andoh: Evaluation of Walkers for Elderly People, Proceedings of the 23rd Annual EMBS International Conference, pp.1391-1392, 2001.
2. 立矢宏, 伊谷英之, 林道大, 伊賀裕和, 樋口理宏, 産業用ロボットの CP 制御における動力学モデルを用いない最適軌道生成, 日本機械学会論文集 C 編, VOL.79, No.805, pp.3075-3087, 2013.
3. 溝渕宣誠, 王碩玉, 河田耕一, 山本正樹, 距離型ファジィ推論法に基づく案内ロボットの軌道計画法, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.17, No.1, pp.112-121, 2005.

第7章

結論

著者の所属研究室では、少子高齢社会に対して、立位姿勢保持筋力の不十分な下肢障害者が寝たきりにならないように、なるべく下半身運動機能の残存能力を生かす自立歩行支援ロボットを開発している。歩行支援ロボットは、要支援者を支援するため、要支援者の意図に従って周りの移動できる空間において走行経路・軌道を定め、その経路・軌道に追従し、要支援者を目標位置まで支援する必要がある。従って、本論文では、歩行支援ロボットの実用化に不可欠な制御法と知能化を研究している。

要支援者の意図経路を追従する時、室内環境において周囲の物や人に衝突しないように、高精度な経路追従制御機能は必須である。経路追従精度が影響する原因は、主に三つある。床からの非線形摩擦力は、ロボットの経路追従精度に最も悪影響となる原因である。ロボットが絨毯や畳、フローリングなどの摩擦係数の異なる地面において、走行精度を確保することは困難とされている。また、下肢障害者の障害の種類や障害の度合いによって、自立歩行支援ロボットに掛ける等価負荷と重心位置が異なることが考えられる。これらの二つの原因も経路追従精度に影響する。本論文では、これら三つの原因に対応できるように適切な制御法を開発し、経路追従実験により検証した。

また、要支援者を支援するため、要支援者の移動方向意図を認識する必要がある。そこで、我々は要支援者のアームレストに肘を掛ける力の情報を利用し、歩行支援ロボットと要支援者との接触部分の力情報に基づく方向意図の同定法を提案した。実験により、提案した同定方法は要支援者の移動方向意図を正確に認識できることがわかった。

以下に本論文における各章での内容と考察・結論をまとめる。

第2章では、経路追従精度に最も悪影響となる床からの非線形摩擦力に対して、加速度と外力との物理的關係に着目し、デジタル加速度制御法を開発した。シミュレーションにおいて、非線形摩擦力無しと仮定した時と非線形摩擦

あり時に対して、提案したデジタル加速度制御法を検証した。その結果、良好な円形・直線経路結果が得られた。摩擦の有無にかかわらず、ほぼ同じ経路追従結果が得られた。提案した制御法を更に検証するため、直線経路の追従実験を行った。実験は、研究室の平常の床と床にマットを敷き摩擦を増加させた二つの場合において行った。二つの実験条件下で、同じ制御パラメーターを設定したデジタル加速度制御法を用いて、ほぼ同じ良好な追従結果が得られた。デジタル加速度制御法の非線形摩擦に対する有効性を検証するために、従来のPID制御法を用いて同様の実験条件下で走行実験を行った。二つの実験条件下で同じ制御パラメーターを使用し、研究室の平常の床である程度の追従精度が得られた。しかし、床にマットを敷き摩擦を増加させた場合においては、経路追従誤差が大きくなった。従って、PID制御法は非線形摩擦力の問題に対応出来ない。実験の結果より、デジタル加速度制御法はPID制御法に比べ、摩擦力の強弱にも関わらず、経路追従精度が高い。デジタル加速度制御法は、PID制御法より摩擦の変化による誤差の変化が小さい。従って、デジタル加速度制御法は、摩擦力に対応できる。

第3章では、歩行支援ロボットの追従精度を向上させるために、他の二つの原因である荷重変化と重心位置変化を考慮した。デジタル加速度制御法を設計する際に、ロボットの慣性行列とデカップリングマトリックス $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ が必要であるが、歩行支援ロボットの慣性行列と $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ には、歩行支援ロボットの荷重と重心位置の情報が必要である。しかし、利用者によって荷重と重心位置が変化するため、制御する前に把握することが困難である。したがって、本章では、制御則にあるロボットの慣性行列を逐次最小2乗法を用いてリアルタイムで同定することで、ロボットの追従精度を向上させた。これにより汎用性の高い歩行支援ができるようになった。シミュレーションにおいて、無荷重と荷重を掛けた時に対して慣性行列を同定した。良好な円形・直線経路を追従し、慣性行列の同定値は真値に近くなった。同定則の有効性を検証し、更に前述の慣性行列を同定しない場合のデジタル加速度制御法との比較実験を行った。その結果、逐次最小2乗法を用いた制御則では、荷重が変化した場合においても、円形経路の経路・軌道追従結

果を用いない制御則より良いことがわかった。

次に第4章について説明する。第3章では、荷重変化と重心位置変化の問題を考慮するために、最小2乗法を用いてデジタル加速度制御法の慣性行列を同定した。しかしデカップリングマトリックス $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ の中に、重心位置も必要である。そこで本章では、デカップリングマトリックス $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ の問題に対応できるように、追従精度を更に向上させた。 $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ の入手が困難な問題に対して、制御力が中心位置に直接作用する新しいロボットの動力学方程式に基づき、デジタル加速度制御系を設計した。この時、重心位置のずれによる影響はすべてロボットの慣性行列中に含まれるため、最小2乗法により獲得できる。デカップリングマトリックス $K_G(\theta)[K_G^T(\theta)K_G(\theta)]^{-1}$ が重心情報を必要としないため、入手が容易になった。提案した新たな制御系を検証するために、第3章と同じ実験条件で、円形経路追従実験を行った。第3章と比較すると、制御則中の非線形デカップリングマトリックスが重心位置情報を必要としない場合は、重心位置情報を必要とする場合より評価誤差が 2.87m 減少した。重心位置のずれに対して精度よく追従することがわかる。異なった質量の荷物をロボットの異なる位置に置いた場合の経路追従結果は、無荷重時とほぼ同じであることがわかる。軌道追従誤差も無荷重時と同じ誤差がある。本制御則は荷重変化と重心位置のずれに対応できることがわかる。これらの結果により、本章で、提案した制御系の有効性が確認された。そして、本章は荷重がある場合と重心位置がずれた場合においても、第3章よりもよい追従結果を得られ、制御精度の更なる向上が確認された。

第5章では、適切な歩行支援を行うために、要支援者が進もうとする方向を正しく認識する方法を研究した。要支援者がアームレストに肘を掛ける力の情報を適切に利用し、距離型ファジィ推論法を用いて、要支援者の方向意図同定法を開発した。具体的には、先ず実験により、推論を行うための知識ベースを構築する。開発した歩行支援ロボットのアームレストの内側には四つの荷重センサーを設ける。被験者が指定する方向へ進もうとする時、四つの荷重センサーにより、要支援者からアームレストに作用する全ての荷重と荷重分布情報、つまり前腕荷重の特性を測定する。そして、被験者の前腕荷重の特性と移動方

向意図との関連性を解析する。プロダクションルールを用いて前腕荷重特性と方向意図との関係を知識として抽出した。即ちファジィ推論を行うための知識ベースを構築した。次に、距離型ファジィ推論法に基づいて方向意図の推定法を開発した。距離型ファジィ推論法は、分離規則や凸性を満たしているので推論精度が格段に高い。距離型ファジィ推論法を用いる際に知識半経の概念を紹介した。実験によって、まず、知識ベースを構築するために5人の被験者に対して、8方向の方向意図を同定する。誤差がある場合でも、提案した同定法は要支援者の方向意図を認識できることを確認した。また、知識半経により同定精度の影響について考察した。これら5人の被験者の測定した荷重データを利用して、知識半経を2から8までを設定するように同定結果を計算した。5人からは、知識半経が3と5の設定となる最高の同定精度を得られた。最後に、指定された経路の追従実験を行い、開発した方向意図の同定法の有効性を更に実験で検証した。

第6章では、開発した制御法を用いて、要支援者の方向意図に歩行支援ロボットを追従させる実験を行った。開発したデジタル加速度制御法は、目標経路追従の制御方法であるので、まず、同定した要支援者の方向意図により、簡単な経路・軌道計画方法を用いて、目標経路・軌道を計画した。提案した制御法を用いて、ロボットは計画した目標経路・軌道を追従する。この際、カメラにより走行結果を測定した。また、二人の被験者による実験を行った。最後に、この制御法を使用しない時の走行結果と比較することにより、制御法ありの時に追従精度が良くなることが示された。提案した制御法の有効性を更に確認することができた。しかし、制御法ありの時、指定された目標経路にある程度の追従誤差が生じる。これにはロボットの運動精度による影響があるが、主な原因としては方向意図同定精度の影響が考えられる。

そこで、提案した同定方法により要支援者の方向意図を正確に認識することで適切な目標経路を計画し、提案した制御法を用いて、要支援者の方向意図に高精度で追従できることを確認した。本論文は、歩行支援ロボットに関する研究の有効性を確認した。

最後に、今後の研究の方向性・展望についてまとめておく。

本論文では、ロボットの知能化における、要支援者の方向意図を同定する方法を開発した。実験より、ある程度の同定精度を得られた。しかし、第5章と第6章の結果より、要支援者の安全の保障や、便利な支援が不十分であるとわかった。要支援者の方向意図の同定をさらに向上させる必要がある。方法として、推論方法の改善や特別な推論方法により、同定結果を向上させることが考えられる。そこで、前腕荷重の個人特性に対応させるファジィ学習法を開発している。また、加速度・姿勢センサーなど別のセンサーにより要支援者の動作を測定し、情報量を多くすることで同定結果を向上させる方法が挙げられる。

謝辞

本論文を作成するに当たり、多くの方々の御指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

本研究の貴重な機会をくださり、終始御指導御鞭撻をくださるとともに、研究者としての姿勢や心構え、信念についてご教示いただきました。高知工科大学知能機械システム工学科王碩玉教授に心より深く感謝いたします。制御工学出身の筆者に対して、ロボット工学での研究の意義を実感させていただき、研究の態度から研究のプロセスまで、熱心かつユニークな数多くの御指導ご援助をくださったおかげで、本論文における研究成果を挙げることができました。特に、研究興味の培養とともに、「面白い」研究を挙げて追求し続きたいです。ご指導を賜りましたことは貴重な財産となりました。これから、さらに成長した姿をお見せできるよう努力していきたいと思えます。ここに、改めて心より厚く御礼申し上げます。

高知工科大学知能機械システム工学群、井上喜雄教授、岡宏一教授には、副指導教員と副査として本研究について、厳しくも優しい指導を賜りました。ここに深く感謝の意を示します。知能機械システム工学群辻知宏教授、芝田京子準教授には副査として種々な御助言をしていただき深く感謝します。

高知工科大学知能機械システム工学群知能ロボティクス研究室の姜銀来講師には、プログラミングや研究についてご指導ご援助を頂き、心より謝意を示します。研究室の先輩譚仁鵬氏には、研究や生活にもいろいろ熱心にご指導頂き、深く感謝の意を示します。研究室の瀋博氏、渡辺悠人氏、真辺良祐氏、お互いの研究について意見を交換する多くの機会を持つことができ、生活上もいろいろお世話になりました。ここに感謝の意を表します。日頃、実験に御協力、学会発表や論文査読に御討論御助言をいただいた大学院生や学部生の多くの方々に深謝致します。博士論文修正において貴重な御応援をいただいた研究室渡辺悠人氏、植田慎一郎氏、大森雄介氏、狩野雄史氏、山本雅之氏にこころより感謝いたします。

高知工科大学国際交流中心の方々、高知工科大学の留学生の方々、楽しい留

学生生活を送ることができるようになり，心から感謝の意を表します．

本研究の遂行に当たり，高知工科大学から留学生特別コースSSP奨学金をいただき，全力で研究に取り込めるように援助していただきました．高知工科大学に深く感謝いたします．

最後に，筆者が研究の道に進むことを快諾し，いつも応援してくれた両親に心より感謝いたします．

本論文に関する研究業績

学術論文

1. Yina Wang, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang and Rempeng Tan, Control of an Excretion Care Support Robot Using Digital Acceleration Control Algorithm: Path Tracking Problem in an Indoor Environment. Journal of System Design and Dynamics(JSDD),Vol.7, No.4, pp.472-487, 2013.
2. Yina Wang, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Yo Kobayashi and Masakatsu G Fujie, Trajectory Planning to Improve the Motion Performance of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot, ICIC Express Letters, Vol. 8, No. 1, pp.295-301, 2014.
3. Bo Shen, Shuoyu Wang Yinlai Jiang, Yina Wang, Rempeng Tan, Kenji Ishida, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie. Motion Control Method of Seat-Style Omnidirectional Mobile Walker Using a Digital Acceleration Control Method, ICIC Express Letters, Vol.8, No.1, pp. 87-93, January. 2014.
4. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rempeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, Improving the Motion Performance for an Intelligent Walking Support Machine by RLS algorithm, ICIC Express Letters, Vol. 7, No. 4, pp. 1177-1182, 2013.
5. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rempeng Tan and Yinlai Jiang, Motion Control of a wheeled Mobile Robot Using Digital Acceleration Control Method. International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC). Vol. 9, No. 1, pp.387-396, 2013.
6. Yina Wang and Shuoyu Wang, A Digital Acceleration Controller for an Elevator to Adapt to Load Changes and Nonlinear Air Damping, ICIC Express Letters, Vol. 6, No. 12, pp.3149-3154, 2012.
7. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rempeng Tan and Yinlai Jiang, Adaptive Control Method for Path Tracking of Wheeled Mobile Robot Considering Parameters Changes, International Journal of Advanced Mechatronic Systems (IJAMECHS),

Vol 4, No 1, pp.41-49, 2012.

8. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Motion Control for an Intelligent Walking Support Machine, ICIC Express Letters, Vol.6, No.1, pp.145-149, 2012.
9. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengpeng Tan and Yinlai Jiang, Digital Acceleration Control Method for Path Tracking Control of an Autonomous Mobile Robot, ICIC Express Letters, Part B : Applications, Vol 2, No 6, pp.1267-1272, 2011.

国際会議論文

1. Yina Wang, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Yo Kobayashi and Masakatsu G Fujie, Trajectory Planning to Improve the Motion Performance of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot, International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC), Kumamoto, Japan, September, 2013.
2. Bo Shen, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Yina Wang, Rengpeng Tan, Kenji Ishida, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie. Motion Control Method of Seat-Style Omnidirectional Mobile Walker Using a Digital Acceleration Control Method, International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC), Kumamoto, Japan, September, 2013.
3. Yina Wang, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang and Rengpeng Tan, Motion Control for an Intelligent Walking Support Machine Adapt to Load Changes and Nonlinear Friction. The 4th International Symposium on Frontier Technology, Shenyang, China, July, 2013.
4. Bo Shen, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang and Yina Wang, Control Method of a Human Support Robot for Independent Living by Center of Gravity Information of Upper Body, 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, pp. 384-389, Luoyang, China, September, 2013.
5. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, Improving the Motion performance for an Intelligent Walking Support Machine by RLS algorithm, International Conference on

- Innovative Computing, Information and Control (ICICIC), Shanghai, China, November, 2012.
6. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G.Fujie, Adaptive Control Method for a Walking Support Machine Considering Center-of-gravity Shifts and Load Changes, 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems , pp.684-689,Tokyo, Japan, September, 2012.
 7. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengpeng Tan, Yinlai Jiang and Kazuhiro Hamaguchi, Digital Acceleration Controller Based on Recursive Least Squares (RLS) Identification for an Excretion Care Support Robot, Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.1639-1644, Chengdu, China, August, 2012.
 8. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G.Fujie, Motion Control for an Intelligent Walking Support Machine, International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC), Kitakyushu, Japan, December,2011.
 9. Yina Wang, Shuoyu Wang, Rengpeng Tan and Yinlai Jiang, Car-like Mobile Robot Oriented Digital Acceleration Control Method, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.1491-1496, Beijing, China, August, 2011.

国内会議論文

1. 王義娜, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 小林洋, 藤江正克, 安藤健, インテリジェント歩行支援機の走行制御：適応制御を用いた重心変化への対応, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2013AC3C2-05, 東京, 2013年9月.
2. 藩博, 王碩玉, 姜銀来, 王義娜, 石田健司, 小林洋, 藤江正克, 運動意図による自立生活支援ロボットの走行制御, 第31回日本ロボット学会学術講演会論文集, RSJ2013AC3C2-06, 東京, 2013年9月.
3. 王義娜, 王碩玉, 姜銀来, 小林洋, 藤江正克, 排泄支援ロボットと介護者と

- の協働による重度障害者の排泄支援, 日本機械学会 2013 年度年次大会, J241026,岡山, 2013 年 9 月.
4. 王碩玉, 王義娜, 姜銀来, 石田健司, 小林洋, 藤江正克, 安藤健, デジタル加速度制御法によるインテリジェント歩行ロボットの運動制御, J151014, 岡山,2013 年 9 月.
 5. 瀋博, 王碩玉, 姜銀来, 王義娜, 石田健司, 小林洋, 藤江正克, 安藤健, 上半身重心情報による自立生活支援ロボットの操作法, 日本機械学会 2013 年度年次大会, J241033,岡山, 2013 年 9 月.
 6. Yina Wang, Shuoyu Wang and Yinlai Jiang . Online Trajectory Planning for an Intelligent Walking Support Machine Considering Force Limitation, Institute of Electrical Engineers of Japan, Tokyo, 69-72, 2013.
 7. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 小林洋, 藤江正克, 安藤健, インテリジェント歩行支援機の運動制御精度向上, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2012AC4C1-7,札幌, 2012 年 9 月.
 8. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 排泄介護支援ロボットの運動制御, 日本機械学会, 中国四国支部, 第 50 期総会・講演会, CD-ROM 論文集, no.317, 広島, 2012 年 3 月.
 9. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 非線形摩擦と荷重変化に対処する歩行支援機の運動制御法, 第 54 回自動制御連合講演会論文集, 11PR0002/11/0000-1483, pp.1483-1484, 名古屋, 2011 年 11 月.
 10. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 歩行支援機の運動制御-デジタル加速度制御法による経路追従精度の向上, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集(CD-R), O3-6, 東京, 2011 年 11 月.
 11. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, デジタル加速度制御法に基づく歩行支援機の運動制御, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2011AC2H1-8, 東京, 2011 年 9 月.
 12. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, デジタル加速度制御法による車輪型移動ロボットの経路追従制御, 日本機械学会[No.11-2] Dynamics and Design Conference September 2011 CD-ROM 論文集, no.318, 高知, 2011 年 9 月.