

博士（工学）学位論文

座位型自立生活支援ロボットに関する研究

The Research on Seat-Style Independent Life Support Robot

沈 博

Shen Bo

学籍番号 1176003

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

平成28年3月18日

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 目次 | |
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 自立生活支援ロボット | 3 |
| 1.3 研究目的 | 5 |
| 1.4 本論文の構成 | 7 |
| 参考文献 | 9 |
| 第2章 日常生活作業意図と上半身作業動作 | 11 |
| 2.1 緒言 | 11 |
| 2.2 下肢障害者にとって、自立生活における必要な生活作業 | 12 |
| 2.3 作業動作と作業意図の関係 | 14 |
| 2.4 上半身作業動作の計測方法 | 17 |
| 2.4.1 ウェアラブル式モーションセンサー | 17 |
| 2.4.2 モーションセンサーの装着 | 19 |
| 2.4.3 センサー装着位置について問題点を説明 | 21 |
| 2.5 作業動作特徴の抽出と表示 | 22 |
| 2.6 結言 | 26 |
| 参考文献 | 27 |
| 第3章 上半身作業動作により作業意図推論法 | 28 |
| 3.1 緒言 | 28 |
| 3.2 生活作業意図 | 29 |
| 3.3 作業意図推論知識ベースの構築 | 31 |
| 3.3.1 言語ルールによる知識の抽出 | 31 |
| 3.3.2 作業意図推論知識の言語ルールを定式化 | 35 |
| 3.3.3 言語変数の定量化 | 37 |
| 3.4 距離型ファジィ推論法に基づく作業意図推論方法 | 44 |
| 3.5 作業意図推論実験による検討 | 48 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 3.5.1 七つ基本生活作業意図の認識実験..... | 48 |
| 3.5.2 掃除作業意図の推論実験..... | 55 |
| 3.6 結言..... | 58 |
| 参考文献..... | 59 |
| 第4章 自立生活支援ロボット支援動作の計画法..... | 60 |
| 4.1 緒言..... | 60 |
| 4.2 自立生活支援ロボットの動作分解..... | 61 |
| 4.3 自立生活支援ロボットの作業支援動作計画法..... | 65 |
| 4.3.1 言語ルールによる支援動作計画知識の抽出..... | 66 |
| 4.3.2 支援動作計画知識の定式化と定量化..... | 68 |
| 4.3.3 支援動作の計画..... | 71 |
| 4.4 実験による支援動作計画法の検証..... | 75 |
| 4.4.1 実験内容..... | 75 |
| 4.4.2 実験設定..... | 75 |
| 4.4.3 実験結果..... | 77 |
| 4.5 結言..... | 82 |
| 参考文献..... | 83 |
| 第5章 ロボット作業支援動作の運動追従制御法..... | 84 |
| 5.1 緒言..... | 84 |
| 5.2 自立生活支援ロボットのモデル..... | 86 |
| 5.2.1 ロボットのモデル..... | 86 |
| 5.2.2 運動学..... | 87 |
| 5.2.3 動力学..... | 88 |
| 5.3 デジタル加速度制御法に基づく制御法..... | 90 |
| 5.3.1 制御則の設計..... | 91 |
| 5.3.2 制御パラメータの選択..... | 93 |
| 5.4 シミュレーションによる検討..... | 95 |
| 5.4.1 斜めに進行する直線支援動作追従実験..... | 95 |

| | |
|--------------------------|------------|
| 5.4.2 回転支援動作追従実験..... | 100 |
| 5.5 実験による検討..... | 103 |
| 5.5.1 実験設定..... | 103 |
| 5.5.2 実験結果と考察..... | 103 |
| 5.6 結言..... | 108 |
| 参考文献..... | 109 |
| 第6章 結論と今後の展開..... | 110 |
| 謝辞..... | 113 |
| 本論文に関する研究業績..... | 115 |

第1章 序論

1.1 研究背景

下肢の歩行能力は、立位の保持や体を移動する重要な作用を発揮する、自立生活に必要な能力のひとつである。しかし、加齢や事故などにより、多くの方は下肢の歩行能力が喪失し、日常生活に他人の介護が必要となる。平成25年日本内閣府による障害者白書[1]では、日本には肢体不自由者の約39%が下肢障害者に分類されており、その人数は約63万人にのぼる。歩行能力の喪失により、下肢障害者が自立生活を行うことは困難になる。自立生活能力の喪失は下肢障害者の家族に負担を掛けるだけでなく、下肢障害者自身にも心身のストレスを与える。その他にも、下肢の不自由により上半身の活動が制限されるため、上半身の運動を積極的に行わなければ、筋萎縮や骨粗鬆症等の症状を有する廃用症候群を患う恐れがある。そのため、下肢障害者の健康な自立生活を支援することがひとつの重要な課題と考えられる。

現在、下肢障害者の生活現場では、車椅子が使われている。車椅子は身体の機能障害により歩行困難となった者の移動支援をする福祉用具である。車椅子を操作する際、車椅子を駆動するために、ハンドリムを手で握り、肘を伸ばす腕の力で駆動輪を回す。したがって、移動するために、利用者の腕には十分な力が必要である。筋力などの理由により一般的な車椅子の利用が困難な場合、動力に電動モーターを使用した電動車椅子がある。利用者はジョイスティックを操作して、電動車椅子で行きたいところに移動する。電動車椅子は操作しやすいので、介護施設などで多く普及している。電動車いすに基づいて、EMG信号[2]とビデオ信号[3]など多くハンドフリーな電動車いす操作方法の研究がある。[4]は片手で車いすの操作補助システムを開発した。また、多くの車椅子は、横に移動することができない。自立生活は狭い室内のような環境で行う活動であるため、もし移動支援機としての車椅子で室内における移動を行う時、人間の歩行能力と同じように全方向移動と高さ調整機能があれば、自立生活の度合いがより一層高まる。



図 1.1 車いす



図 1.2 電動車いす

人間の歩行能力は前後に進むと回転するだけではなく、地面の上で左右、斜めなど任意方向に移動でき、回転、立ち上がり等の複雑動作と共に構成される。しかし、車いすは通常に前後移動と回転を行えるだけである。もし、下肢障害者の支援機が人間の歩行能力と同様の移動能力を持てれば、日常生活作業を行う時に、狭い場所に適応でき、複雑な移動を自然的に行うことで、より快適な自立生活が期待できる。そこで、狭い場所で適切な移動ができ、不自然なく下肢障害者の日常作業を支援できる自立生活支援ロボットを開発することが、障害者の福祉にとって重要な課題となる。

著者の所属研究室の先行研究で[5,6]は、7年前から、狭い場所の移動に適応できる、全方向生活支援ロボットを開発している。これまでに、3台の自立生活支援ロボットを開発してきた。開発している自立生活支援ロボットの概要については次節で説明する。

1.2 自立生活支援ロボット

著者の所属研究グループが開発した自立生活支援ロボットについて説明する。本研究室では現在までに3台の全方向座位型自立生活支援ロボットを開発している。開発した全方向座位型自立生活支援ロボットを図1.3に示す。



図1.3 全方向座位型自立生活支援ロボット

全方向移動座位型自立生活支援ロボットの三台の共通特徴を説明する。下肢障害者の日常生活を支援するために、自立生活支援ロボットには座位型と全方向移動の特徴がある。このロボットは車輪にオムニホイールを3輪使用する。オムニホイールは、ホイールの回転により移動できるだけでなく、外側には自由に回転するローラが取り付けられている。駆動軸方向はローラの回転により自由に移動することができる。進行方向によって各オムニホイールの回転を変化させることで、前後・左右・斜め・回転といった全方向への移動が可能である。また、自立生活支援ロボットは、電動車椅子と同じように、ジョイスティックを使用して操作することができる。電動車椅子と異なる特徴は、全方向移動ができることから、狭いところで横と斜めに移動ができる。例えば、被支援者はテーブル上のものを取る時、テーブルに沿い、横に直接的な移動ができる。

実用化のために、3号機が1と2号機の基礎の上に新たに改良された。本論文では3号機を研究対象として被支援者の日常生活支援方法を研究している。3号

機の詳細が図 1.4 に示す。

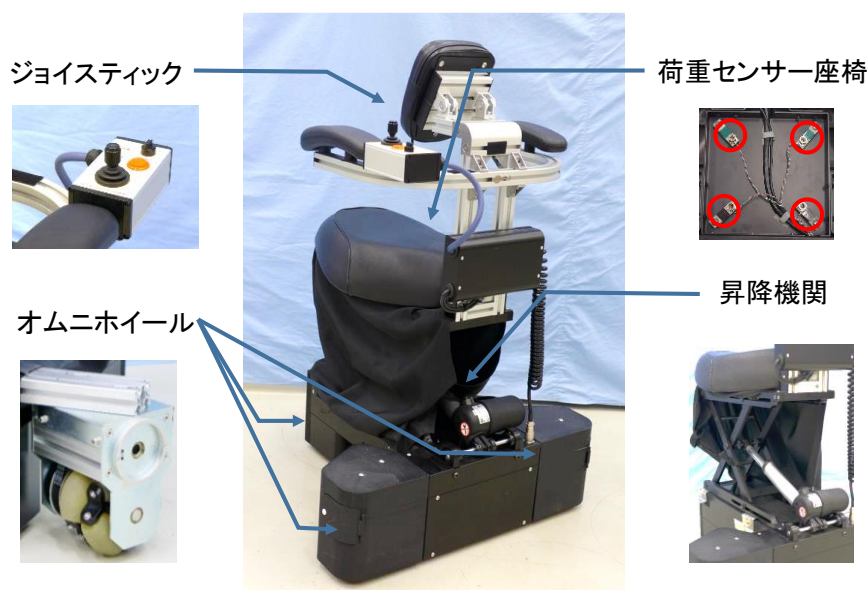


図 1.4 自立生活支援ロボット 3 号機

全方向移動座位型自立生活支援ロボット 3 号機の特徴を説明する。異なる高さで生活作業を行うために、自立生活支援ロボット 3 号機の座位下の昇降機関を使用する。この機関で下肢障害者上肢の作業範囲は広くなり、各々自立生活作業が可能になる。例えば、被支援者は台所や洗面所などに作業を行う時、作業内容によって適切な高さを調整すれば、健常者と同じように料理作業と洗面作業を行うことができる。その他にも、ベッドや便器などに適切な高さを調整すれば、移乗することが容易になる。

被支援者の上半身荷重情報を測るために、座位下に 4 つの荷重センサーを埋め込んだ。荷重情報により、要支援者の座る状態を検知することができ、要支援者上半身の動き情報も計測できる。先行研究[7,8]では、上半身の傾き動作により、被支援者の移動意図の同定方法を開発した。

下肢障害者に、自立生活の困難点は様々な日常生活作業を行うことである。本研究は、下肢障害者に適切な自立生活支援を提供するため、開発した自立生活支援ロボットを用いて、下肢障害者に不自然のない様々な日常生活作業支援方法を研究している。

1.3 研究目的

本論文では、ロボット工学の手法により、下肢障害者の自立生活実現を目的として、座位型自立生活支援ロボットを用いて、下肢障害者の日常生活作業の支援方法を開発している。

自立生活を行うということは、様々な日常生活作業を自分で行えるということである。下肢障害者は移動機能が喪失し、一部分の日常生活作業を行えないために、自立生活をするのができなくなる。したがって、自立生活支援ロボットが、喪失した移動機能を補助し、行うことができない日常生活作業を支援することで、下肢障害者の自立生活が可能になる。

我々の研究室では、開発した自立生活支援ロボットがオムニホイールを用いて、狭い場所で下肢障害者に全方向移動支援を提供することができる。しかし、現在の自立生活支援ロボットは被支援者がジョイスティックで操作することが必要である。しかし、様々な日常生活作業を行う際に、片手でロボットを操作することは、いろいろと不便である。例えば、片手でジョイスティックを操作すると、両手による協調作業は出来なくなってしまう。もし、ジョイスティックの操作から片手を解放することができれば、両手による協調作業など複雑な作業を行えるようになり、結果として自立生活の度合いがより一層高まる。自立生活支援ロボットは、日常生活における様々な作業に適切な支援をするために、下肢障害者の作業意図を正しく認識し、認識した作業を適切に支援することが必要である。認識した作業意図に対して支援する動作はロボットの動きである。ロボットは生活環境で稼働する時に、地面などの影響を消して、作業支援動作を精確的に追従する必要がある。

したがって、本研究では、座位型自立生活支援ロボットの開発に当たって、下肢障害者の上半身作業動作情報を用いて、下肢障害者の作業意図推論法、自立生活支援ロボットの支援動作計画法と支援動作の運動追従制御法の3つの部分を開発する。図1.5に開発する支援法の概略を示す。

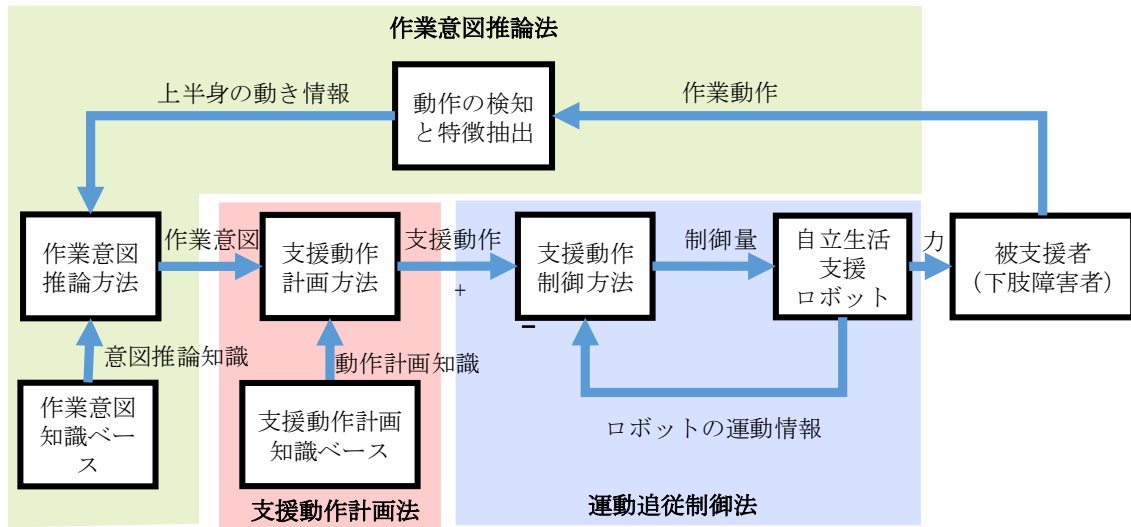


図 1.5 下肢障害者の自立生活支援法

以降，特に言わない場合，ロボットは自立生活支援ロボットのことを表す。

1.4 本論文の構成

本論文では、下肢障害者の自立生活支援のために、不可欠な被支援者の作業意図推論法、自立生活支援ロボット支援動作計画法と支援動作の運動追従制御法を研究している。論文の構成ブロック線図を図 1.6 に示す。

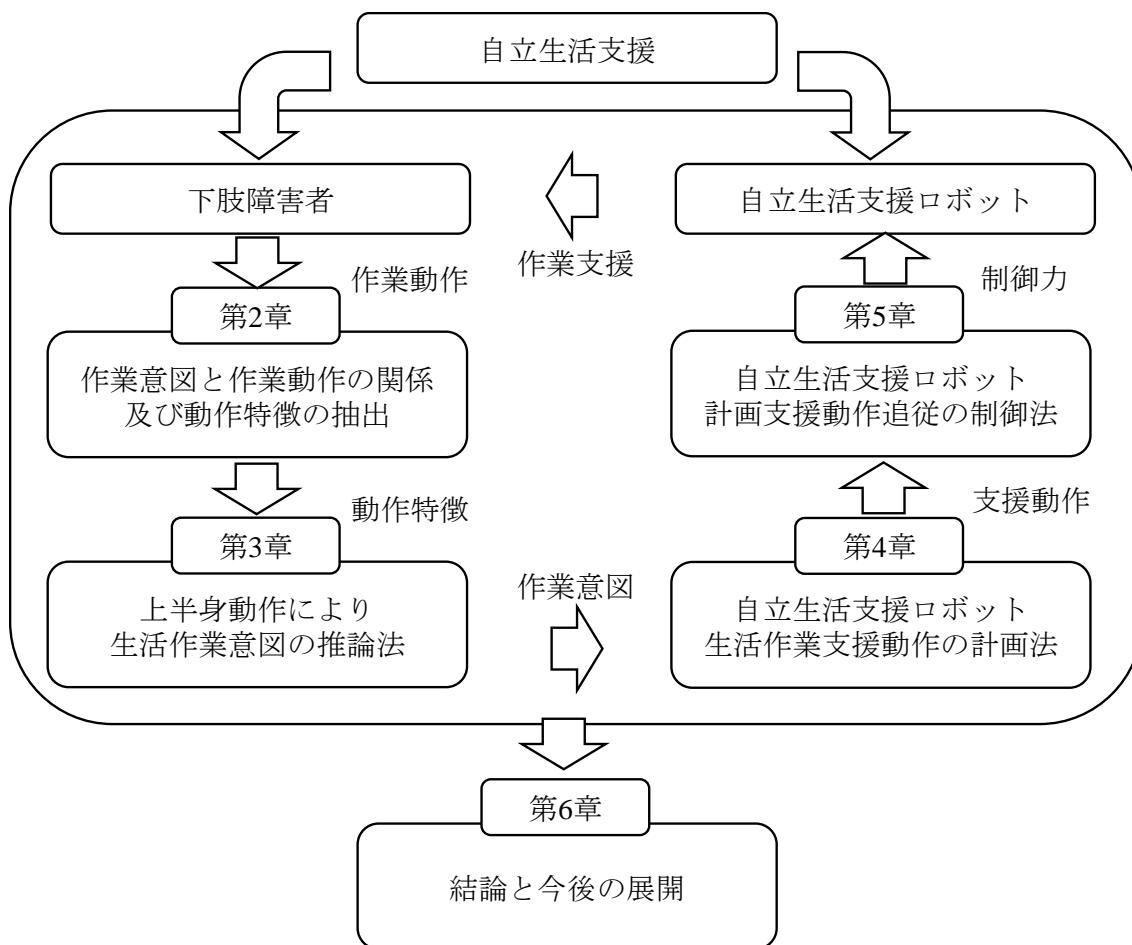


図 1.6 本論文の構成ブロック線図

本論文は全 6 章から構成され、以下に本論文の構成について述べる。

第 1 章は、背景を概説する。下肢障害者の自立生活支援に関する現状について述べる。我々の研究グループで開発中の下肢障害者の歩行機能を補助する自立生活支援ロボットを説明する。さらに、研究の目的、研究の難点及び研究手順を述べる。最後には、本論文の構成を説明する。

第 2 章では、自立生活作業の動作と作業意図の関係[9]について述べる。まず、

下肢障害者にとって、自立生活における必要な生活作業を説明する。次に、本論文の基本的観点について、異なる自立生活作業中において、モーションセンサーで上半身動作信号を測定することにより、生活作業動作情報に作業者の作業意図情報が含まれる事実を示す。その後、上半身作業動作を適切に計測するため、モーションセンサーの装着と姿勢情報の獲得法を検討する。最後に、作業動作情報から特徴の抽出法を述べる。

第3章では、上半身の作業動作情報を用いた、作業意図の推論法[10]を述べる。まず、作業意図の概念、作業意図に含まれる具体的な作業意図と意図内容を述べる。次に、作業意図の知識ベースの構築について、作業意図の推論用言語的ルールによる知識の抽出法と知識の定式化、言語変数の定量化を説明する。更に、構築した作業意図の知識ベースにより、距離型ファジィ推論法[11]に基づいた作業意図の推論法を提案する。最後に、実験により、作業意図推論法の有効性を実証する。

第4章では、ロボットによる作業支援を行うために、下肢障害者の作業意図推論結果により、作業支援動作の計画方法[12]を説明する。様々な支援動作の知識を抽出し、定式化し、定量化して、作業支援動作の知識ベースを構築する。最後に、自立生活における下肢障害者に様々な作業を支援するロボットの支援動作計画法を提案して、実験により実証する。

第5章では、自立生活支援ロボットの制御法を述べる。支援動作を確実に実現するために、ロボットの制御法を開発する。まず、ロボットの運動学公式と動力学公式を導出する。次に、デジタル加速度制御法[13, 14]に基づいて、非線形摩擦力に対処する制御法を提案し[15]、制御法の安定性を示す。最後に、シミュレーションと実験により、制御法の有効性を実証する。

第6章では、結論と今後の展開について述べる。

参考文献

1. 内閣府の平成25年版障害者白書
http://www8.cao.go.jp/shougai/whitepaper/h25hakusho/zenbun/furoku_08.html
2. Tsui CSL, Jia P, Gan JQ, Hu O, Yuan K. EMG-based hands-free wheelchair control with EOG attention shift detection. 2007 IEEE Int Conf Robot Biomimetics, ROBIO. 2008;1266–71.
3. Jia P, Hu HH, Lu T, Yuan K. Head gesture recognition for hands-free control of an intelligent wheelchair. Ind Robot An Int J. 2007;34:60–8.
4. Aoshima S, Kaminaga H, Shiraiishi M. One-hand drive-type power-assisted wheelchair with a direction control device using pneumatic pressure. Adv Robot. 2002;16(December 2014):773–84.
5. 王碩玉, 石田 健司, 藤江 正克, 室内移動補助も可能な新型歩行訓練機, 日本機械学会 2009 年次大会講演論文集, Vol.7, No.09-1(2009), pp. 283-284
6. 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.
7. 瀋博, 王碩玉, 姜银来, 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.
8. 瀋博, 王碩玉, 姜银来, 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, RSJ201AC3C2-06, 東京, 2013 年 9 月.
9. 瀋博, 王碩玉, 上半身動作による日常作業の意図認識法, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2015AC2A1-08, 東京, 2015 年 11 月 30 日.
10. Bo Shen, Shuoyu Wang, Real Time Identification of User's Activity of Daily Life by Distance Type Fuzzy Reasoning Method. Tenth International Conference

- on Innovative Computing, Information and Control, ICIC express letters ICIC express letter, Vol 10, No.2, pp527-534, February, 2016.
11. 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.
 12. 瀋博, 王碩玉, 上半身の動作情報による下肢障がい者の掃除作業支援法, 第15回日本生活支援工学会大会, 福祉工学シンポジウム2015, 第31回ライフサポート学会大会講演論文集(CD), 1B2-07, 福岡, 2015年9月7日-9日.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Bo Shen, Shuoyu Wang Yinlai Jiang, Yina Wang, Renpeng 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.

第2章 日常生活作業意図と上半身作業動作

2.1 緒言

自立生活を行うということは、様々な日常生活作業を自分で行えるということである。様々な基本生活作業ができれば、人間は基本的な自立生活が可能になる。高齢や事故などの原因により、立位筋力不足やバランス機能が低下した人や、切断障害者となり、下肢移動機能が弱くなった人などが下肢障害者である。上半身は健康であるが、自然な移動が困難であることから、下肢障害者は様々な日常生活作業を行うことができず、そのため、自立生活することができない。自立生活支援ロボットが下肢障害者に自然な生活作業の支援を行えば、上半身の運動機能を積極的に活用し、必要な生活作業を行うことができ、下肢障害者は自立生活をするのが可能になる。

自立生活支援ロボットが日常生活作業を支援するために、下肢障害者が自分で行えない生活作業を考察することが必要である。次節では、下肢障害者にとって、自立生活における必要な生活作業を述べる。

2.2 下肢障害者にとって，自立生活における必要な生活作業

下肢障害者における，自立生活支援ロボットをジョイスティックで操作して，生活作業を行う時に，主要的に二つの困難点がある．

- 片手でジョイスティックを操作すると，両手による協調作業はできなくなる．
- 連続移動が必要な作業を行うと，作業動作とロボットの操作動作を同時に進行することが危険であり，困難である．

もし，ジョイスティックの操作から片手を解放することができれば，両手による協調作業など複雑な作業を行えるようになり，結果として自立生活の度合いがより一層高まる．

自立生活の中で必要となる様々な日常生活作業を図 2.1 に示す．



図 2.1 自立生活中に必要な日常生活作業

下肢障害者が日常生活作業の中でまず初めに行うのが自立生活支援ロボットへ移乗することである．下肢障害者は起きた後から，部屋で様々な生活作業を行うために，自立生活支援ロボットの移動支援が必要である．そのため，被支援者の起床状態を検知した際，自立生活支援ロボットが座位の高さを調整して，移乗

の支援を行えるようにする。

洗顔を支援するためには、自立生活支援ロボットが適切な高さを調整することが必要である。また、洗顔している間に、ロボットが位置を保持し、支援することが必要である。洗顔と似ている日常生活作業である料理や机を片づける作業は、作業台の平面上で作業を行うため、適切な高さを調整することが必要である。洗顔と異なる点として、料理と机を片づける作業は、上半身の作業位置によって、作業台に沿って横方向への移動も必要である。

掃除作業は、掃除機を掛けながらゴミがあるところに行くことである。通常、掃除機を掛ける動作は、連続的に行う動作であるから、掃除機を掛けることと同時に自立生活支援ロボットをジョイスティックで操作することは不便である。

物を運ぶ作業は両手による協調作業である。両手で荷物を持って、ジョイスティックを操作することは困難である。もし、被支援者が荷物を運びたい場所を自立生活支援ロボットが理解すれば、スムーズに被支援者を目標地に移動支援することができるようになる。

高いところにあるものを取る作業は、健常者は立位で全部行うことができる。座位状態の下肢障害者が、高いところからものを取る作業は危険であり、通常はできない。自立生活支援ロボットは昇降機関で昇降することができるが、ジョイスティックを操作する必要がある。被支援者が物を取る状態をロボットが認識すれば、適切な高さを調整することが可能になる。

以上は、例として、日常自立生活中に下肢障害者の必要な生活作業を示した。ジョイスティックで自立生活支援ロボットを操作する時、説明した二つの問題点により、下肢障害者は示した生活作業を行うことが困難である。自立生活支援ロボットが被支援者の作業意図を理解すれば、ジョイスティックを操作しなくても、適切な作業支援を行える。本論文の立場は下肢障害者の上半身作業動作により、作業意図を推論して、自立生活支援ロボットで作業支援を行うことである。そのために、生活作業意図と作業動作の関係を次節で説明する。

2.3 作業動作と作業意図の関係

我々人間は、他者の上半身の作業動作を見ると、作業の内容あるいは意図をほとんど理解できる。すなわち、上半身作業の動作情報を適切に利用すれば、作業の意図を認識することが可能である。そのために、作業動作には上半身の位置や速度、加速度、姿勢など様々な運動情報があるため、どの情報により、作業意図を推論できるのかを議論することが必要である。

ここでは、掃除作業と料理作業を例として、右前腕作業動作の加速度と姿勢を測定して、作業動作の各種情報と作業意図の関係を説明する。そのために、測定実験を行った。実験では、二十代の健常な男性を被験者とし、図 2.2 に示す自立生活支援ロボットを用いて、代表的な真正面の床にあるゴミの掃除作業と物を切る料理作業を行った。



(a). 掃除作業



(b). 料理作業

図 2.2 掃除作業と料理作業の動作

作業動作を計測するため、図 2.3 に示すように、右前腕に1つのウェアラブル式モーションセンサーを取り付けた。

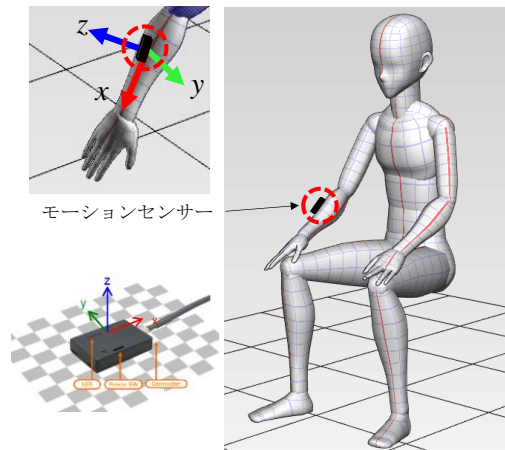
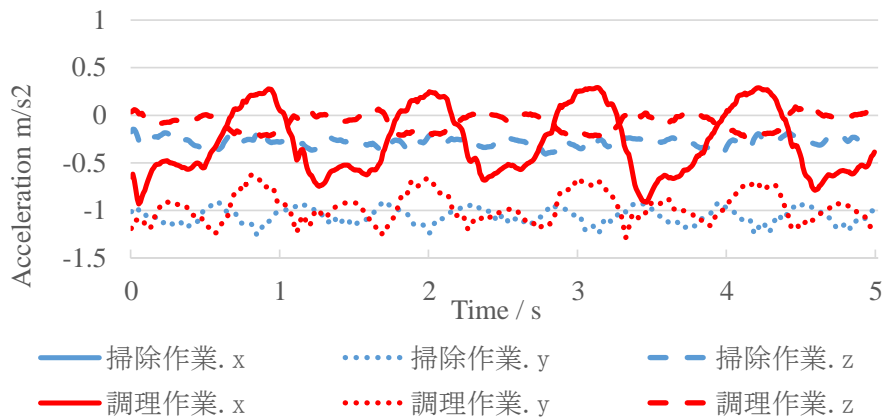
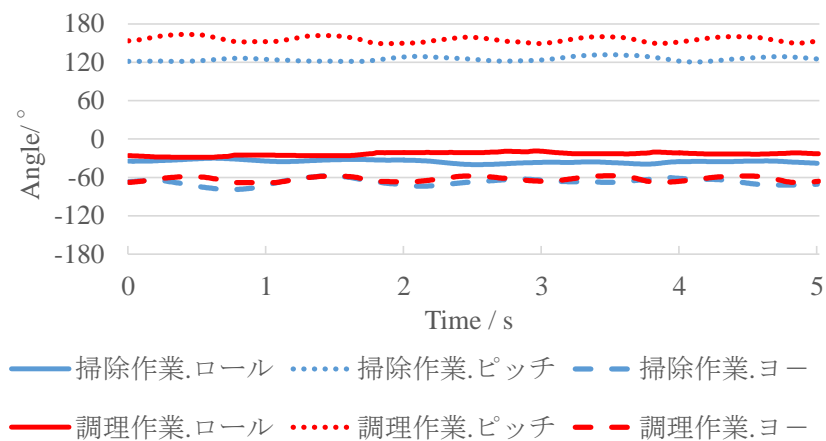


図 2.3 ウェアラブル式モーションセンサーの装着方法



(a) 掃除作業と調理作業の右前腕加速度情報



(b) 掃除作業と調理作業の右前腕姿勢情報

図 2.4 二つ作業の右前腕動きの運動情報

モーションセンサーを前腕に取り付けて、作業動作を行う間に右前腕の加速

度、姿勢角度など情報を測定した。二つの作業動作の計測結果を図 2.4 に示す。右前腕の姿勢角度を比較することにより、二つの作業動作では、右前腕動きの動き情報が明らかに異なることが分かる。掃除作業動作におけるこれらの特徴を適切に利用すれば、各々の作業意図を認識することができる[1]。

自立生活支援ロボットが静止状態において、上肢の加速度情報と姿勢情報の両方が異なることから、これらの情報で作業意図を推論できる。実際に生活作業を支援する時は、自立生活支援ロボットが作業支援動作を行うため、ロボットに乗っている被支援者の上半身の加速度はロボットの動きにより変化する。同様に、上半身の速度情報と位置情報もロボットの動きにより変化する。したがって、上半身の加速度と速度、位置情報で作業意図を推論することは困難である。しかし、上半身の姿勢は、上肢の角度情報と背の角度情報として、自立生活支援ロボットの移動動作が姿勢情報に影響をされない。そのため、本論文では生活作業を行う上半身の姿勢情報を用いる。

異なる生活作業を行う時に、右前腕の姿勢情報が似ている場合がよくある。その場合には、右前腕の運動情報で、作業意図を適切に推論することが不可能になる。しかし、生活作業をする際には、上半身の動く部分は右前腕だけではなく、上半身全体である。したがって、作業意図を適切に推論するため、ウェアラブル式モーションセンサーの装着方法を考察する必要がある。

2.4 上半身作業動作の計測方法

2.4.1 ウェアラブル式モーションセンサー

上半身作業動作の姿勢情報を計測するために、図 2.5 に示す IMU-Z というウェアラブル式モーションセンサーを利用する。

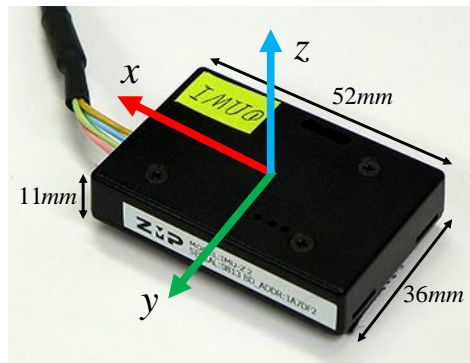


図 2.5 ウェアラブル式モーションセンサーの写真

このセンサーは三軸の加速度，角速度と地磁気をサンプリングレート 100Hz の無線通信で計測できる．センサーの具体的な仕様を表 2.1 に示す．

表 2.1 IMU-Z モーションセンサーの仕様

| 仕様タイプ | 特徴 |
|---------|--|
| 加速度センサー | 3-axis ± 4 [g] |
| 角速度センサー | 3-axis ± 250 [$^{\circ}$ /s] |
| 地磁気 | 3-axis ± 0.88 - ± 0.81 [gauss] |
| 通信 | Wireless or CAN |
| サンプリング | ≤ 100 Hz |

モーションセンサーから得られる情報は加速度，角速度と地磁気である．しかし，上半身各肢体の姿勢情報が必要となる．通常，剛体の姿勢はオイラー角度で表示される．上半身各肢体の姿勢情報もオイラー角度で表わす必要がある．そのため，姿勢情報を得るのに，モーションセンサーから得た情報の加速度，角速度と地磁気からオイラー角計算を行い，ピッチ角，ロール角とヨー角を得る．ヨー角は体の方向に関する情報であり，作業を行う時に体の向き方法であ

る。ただし、作業意図と作業内容などが作業を行う時に体の方向と関係ないので、本論文には姿勢情報のヨー角を利用しない。

オイラー角における、ピッチ角の範囲が $[-\pi/2, \pi/2]$ であり、ロール角の範囲が $[-\pi, \pi]$ である。ロール角が π と $-\pi$ のところでは、姿勢は似ているが、突然な π から $-\pi$ にと $-\pi$ から π に変化することがある。このような非連続変化のため、オイラー角で姿勢の類似性が上手く表示されない。この非連続性があるため、ロボットが作業姿勢情報を利用して作業動作の認識と作業意図の推論に困難がある。よって、姿勢の連続化の表示方法が必要である。

$$\begin{bmatrix} x_{pose} \\ y_{pose} \\ z_{pose} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

式 1.1 には、 θ がピッチ角、 φ がロール角である。この式で、姿勢情報を連続的に表示することが可能になる。被支援者の作業意図が連続化した姿勢情報を用いて行う。

2.4.2 モーションセンサーの装着

2.2節に説明したように、下肢障害者が上半身を利用して生活作業を行う時に、上半身の各肢体部分がすべて動く。そのため、ひとつの肢体部分の姿勢情報では、作業意図の推論することができない。作業動作により、下肢障害者の作業意図を推論するために、本論文では、図2.6に示すような5つモーションセンサーを用いた。

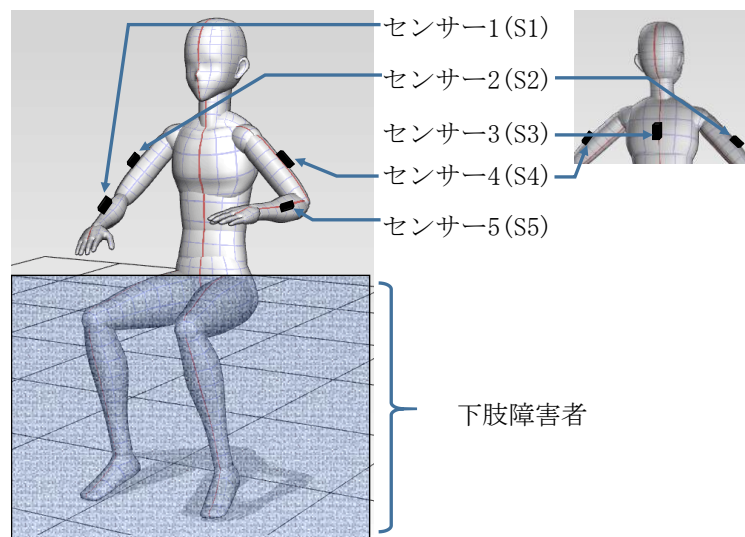


図 2.6 モーションセンサーの装着

上半身は主に頭、胸、腰、右腕、左腕の5部分を構成される。この中に、右腕と左腕は前腕と上腕、手という部分が含まれる。生活作業する際に、両手による協調作業において精密な操作と動きを行う。通常では、両手の動きは作業道具によって、複雑になる。両腕は作業している両手の位置を保持するために、適切な動作を行い、作業意図の重要な動きをする。同じように、胸が腕と手の位置を調整するため、一定の範囲内で、傾き動作を行い、体の状態に反映される。腰と胸が密接していることから、腰の姿勢は胸とほとんど同じである。頭の部分は、作業内容に視線を集中させるために、頭が作業対象の向きに姿勢を調整することから、作業意図との関係は少ない。我々の人間は、他者の上半身作業の動作を見ると、特に、体の姿勢状態と両腕の作業動作から、作業の内容あるいは意図をほとんど理解できる。したがって、本論文では、右前腕、右上腕、背中、左前腕と

左上腕にモーションセンサーを取り付けることで、この5つの上半身部分の姿勢情報を得る。両手の動作情報は作業意図の推論に用いることで推論の精度を向上させることができるが、モーションセンサーのサイズに限りがあり、精密な両手の動作情報を計測できないため、両手の動作情報は計測しない。具体的なモーションセンサーを装着する肢体は表2.2に示す。

表2.2 モーションセンサー番号と対応する肢体部分

| センサー番号 | センサー位置 |
|--------|--------|
| S1 | 右前腕 |
| S2 | 右上腕 |
| S3 | 背中 |
| S4 | 左前腕 |
| S5 | 左上腕 |

実験により、利用した5つ上半身肢体部分の作業動作情報が日常作業意図の推論情報として十分である。

2.4.3 センサー装着位置について問題点を説明

2.3.2 節に説明した装着方法により，計測する上半身の肢体を決める．センサーの固定位置によって，同じ作業を行った場合でも，各肢体の姿勢計測結果は異なったものになる．そのため，作業動作により，被支援者の作業意図を推論することが不可能になる．推論の証拠として，肢体の姿勢が各肢体部分に固定した座標と参考座標系の姿勢を計測する必要はなく，毎回同じ作業動作を行う時に，計測の結果はほとんど同じになることが必要である．まとめると，センサーの位置は以下の 2 つの要点がある．

- 装着された肢体部分の姿勢によって，同じような変化をすることが必要である．
- 常に，センサーが装着された肢体部分と相対位置は変わらない．

センサーの装着位置は以上の 2 つ条件を満たせば，センサーが計測した姿勢情報は被支援者の作業動作を同じように表示でき，この情報により，作業意図を推論することが可能になる．そのために，図 2.7 に示すように，アンダーアーマーを使用した．



図 2.7 センサー固定用のアンダーアーマー

実験をする時に，被支援者がこのアンダーアーマーを着ることにより，センサーの位置が説明した二つの点を満たす．これにより，計測した作業動作の姿勢情報が被支援者の作業意図を推論に使える．

将来，センサーの技術の振興により，センサーのサイズが徐々に小さくなれば，一般的な服や皮膚の中に入り，実時間に人間の体の動き状態をモニタリングすることが可能になる．

2.5 作業動作特徴の抽出と表示

推論法は、推論証拠(既知の事柄)と推論規則、推論結果(未知の事柄)、三つ部分から構成される[2]。作業動作情報により、下肢障害者の作業意図を推論することにおいて、作業動作情報は推論証拠である。自立生活支援ロボットが、被支援者の作業動作情報を推論証拠として、被支援者の必要な日常作業意図を推論して、推論した作業意図によって作業支援することは自立生活支援である。自立生活支援ロボットが推論証拠とする作業動作情報を理解するために、作業動作の特徴を抽出することが必要である。

日常作業動作は動きの状態により、下のような分類がある。

- 運動動作
 - 周期動作：掃除機をかける、野菜を切るなど。
 - 非周期動作：移乗する、服を整理するなど。
- 静止動作：荷物を持って全方向移動するなど。

運動動作はこの作業中には、少なくとも上半身の一部分が続けて動いている。運動動作の中には、周期動作と非周期動作の二つ種類がある。周期動作は、一定の時間間隔で同じ状態が繰り返される動作。例えば、掃除機を掛けることはゴミがある場所に向いて、前後に繰り返し吸込口を移動する操作である。周期動作の特徴には、動作の周期、振幅、平均値、偏差などがある。非周期動作は作業をするために、作業者は作業動作を続けるが、動きには周期がない。例えば、移乗のプロセスには、アームレストを持って、体を運ぶ動作がある。通常、この種類の作業動作を行う時に、作業者の意図はほとんどない。2つの意図を有する動作を繋げる動作である。静止動作は、作業する間に、ある姿勢を一定時間保持する動作である。例えば、両手で荷物を持って前に進みたい場合には、被支援者が自然に荷物を持ったまま前に腕を伸ばして、目標位置に着くまで、ずっとこの姿勢を続ける。静止動作の特徴は、一定時間、安定的にある姿勢を続けることである。

人間は他人の作業動作から作業意図を推論する時に、主に作業動作の姿勢と姿勢の変化情報を用いる。作業動作の種類に基づいて、人間が作業意図を推論に

利用する情報は、作業動作の静的な情報と動的な情報だと考える。静的な情報というのは、作業動作の加速度、角速度、姿勢などである。動的な情報というのは、加速度、角速度、作業動作姿勢の変化の情報である。節 2.3 に説明した理由に基づいて、本研究には作業動作の姿勢情報を用いて、動作の特徴を抽出する。

そのため、一定時間の平均値と標準偏差は静止動作の特徴を表せる[3, 4]。姿勢の平均値は作業動作の静的な情報であり、作業動作全体の状況を表している。標準偏差は作業動作の動的な情報であり、作業動作の運動特性を表している。静の情報により、異なる静止作業動作を判別でき、姿勢が異なるであろう運動動作を判別するのも役立つ。動的な情報により、姿勢が同じ運動動作と静止動作を判別できる。

自立生活支援する時に、作業意図をリアルタイムで認識することが必要である。次に、作業動作の分類特徴により、作業動作の静的な情報と動的な情報のリアルタイム抽出方法を説明する。

図 2.8 には、リアルタイム作業動作特徴の抽出方法を示す。赤線は、リアルタイムで計測した作業動作の姿勢情報である。これは、式 2.1 により、計測した上半身各部分のオイラー角を連続的な姿勢情報に変化されている。作業動作は、一瞬の動きではなく、一定時間の間にずっと続けている動作である。したがって、適切な時間窓を使えば、時間窓内の姿勢情報の平均値と標準偏差は動作の特徴を表現できる。

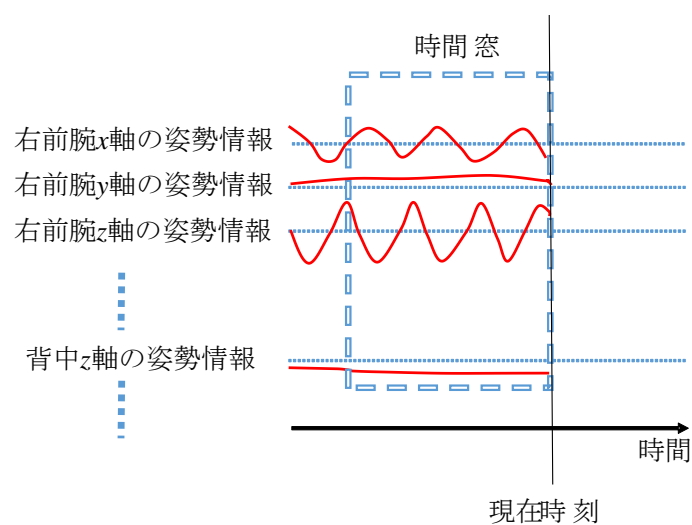


図 2.8 作業動作特徴のリアルタイム抽出

具体的には、本研究は上半身の、右前腕、右上腕、背中、左前腕と左上腕5箇所の姿勢情報を計測し、図2.8の赤線のように示される。モーションセンサーのサンプリングは100Hzであり、姿勢情報の時系列データは毎秒100個得られる。平均値を取るために、移動平均方法を使用することで、各肢体姿勢の平均値を得られる。同様に、同じ時間窓のデータの標準偏差も得られる。実験により、日常生活作業の周期動作の周期は0.8秒から1.2秒までの間である。動作特徴を抽出する時に、作業周期より少し大きいデータ数160個の時間窓を使用する。表2.3に掃除作業と物を運ぶ作業の作業動作特徴抽出結果を示す。

表2.3. 掃除作業と物を運ぶ作業の作業動作特徴

| センサー | 軸 | 特徴 | 掃除作業 | ものを運ぶ |
|------|---|------|----------|----------|
| S1 | x | 平均値 | 0.622515 | 0.413766 |
| | | 標準偏差 | 0.046384 | 0.00496 |
| | y | 平均値 | 0.706094 | 0.718089 |
| | | 標準偏差 | 0.041631 | 0.002457 |
| | z | 平均値 | -0.33155 | -0.55955 |
| | | 標準偏差 | 0.009952 | 0.003734 |
| S2 | x | 平均値 | 0.89696 | 0.554417 |
| | | 標準偏差 | 0.014515 | 0.002338 |
| | y | 平均値 | 0.045802 | 0.413963 |
| | | 標準偏差 | 0.168771 | 0.003239 |
| | z | 平均値 | -0.40349 | -0.72196 |
| | | 標準偏差 | 0.043205 | 0.003493 |
| S3 | x | 平均値 | -0.02825 | -0.0246 |
| | | 標準偏差 | 0.029209 | 0.003128 |
| | y | 平均値 | 0.785841 | 0.730753 |
| | | 標準偏差 | 0.002877 | 0.002081 |
| | z | 平均値 | -0.61708 | -0.68218 |
| | | 標準偏差 | 0.003328 | 0.002222 |
| S4 | x | 平均値 | 0.845561 | 0.257581 |
| | | 標準偏差 | 0.00199 | 0.003337 |
| | y | 平均値 | -0.51891 | -0.5162 |
| | | 標準偏差 | 0.004158 | 0.00242 |
| | z | 平均値 | 0.125294 | -0.81681 |
| | | 標準偏差 | 0.006093 | 0.000931 |

| | | | | |
|----|-----|------|----------|----------|
| S5 | x | 平均値 | 0.992418 | 0.559005 |
| | | 標準偏差 | 0.002508 | 0.005428 |
| | y | 平均値 | -0.10629 | -0.37492 |
| | | 標準偏差 | 0.020898 | 0.007056 |
| | z | 平均値 | -0.05782 | -0.73951 |
| | | 標準偏差 | 0.004832 | 0.000925 |

2.6 結言

本章では、ロボットは下肢障害者の作業意図を理解するために、人間が他者の作業動作から作業意図を理解できることを検討し、日常生活作業意図と上半身動作の関係を述べ、上半身動作の計測方法を提案した。

下肢障害者の生活では、下肢の移動能力が喪失しているため、様々な生活作業を行うことが困難である。本章では、具体的に自立生活に不便な生活作業内容を説明し、下肢障害者に対して、生活作業の困難点をまとめた。説明した困難点により、作業意図を推論することの必要性が窺える。

上半身作業の動作情報を適切に利用すれば、作業の意図を認識することが可能となる基本観点を説明した。この観点の有効性を証明するため、作業動作の計測実験を行った。計測実験により、作業動作と作業意図の関係を示し、作業動作に基づいた作業意図の推論が可能であることを説明した。

モーションセンサーを用いて、上半身の作業動作を計測する方法を提案した。センサーの装着方法を説明し、下肢障害者の作業動作の特徴をリアルタイムで抽出する方法を提案した。

参考文献

1. 瀋博, 王碩玉, 上半身動作による日常作業の意図認識法, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2015AC2A1-08, 東京, 2015 年 11 月 30 日.
2. 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.
3. Y.L Jiang, S.Y.Wang, K. Ishida, T.Ando and M.G. Fujie, “Directional Intention Identification for Running Control of an Omni-directional Walker, ” Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.14, No.7, pp.784-792, 2010.
4. Bo Shen, Shuoyu Wang, Yina Wang, User’s Moving Intention Identification for Human Support Robot, Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS-ISIS 2014), pp.1073-1077, Kitakyushu, Dec, 2014.

第3章 上半身作業動作により作業意図推論法

3.1 緒言

第2章では、日常生活作業動作と作業意図の関係について述べた。モーションセンサーにより、作業動作の測定方法を報告した。そして、作業意図を推論するために、計測した作業操作の特徴抽出方法を提案した。

本章では、下肢障害者の上半身作業動作による作業意図推論法を説明する。生活作業意図推論ための知識を抽出し、定式化、定量化方法を示す[1]。具体的には、ファジィルールによる作業意図推論知識ベースの構築方法を説明する。構築した作業意図推論知識ベースにより、距離型ファジィ推論法[2]に基づく作業意図推論法を提案した。上半身作業動作による作業意図推論法の構造を図3.1に示す。

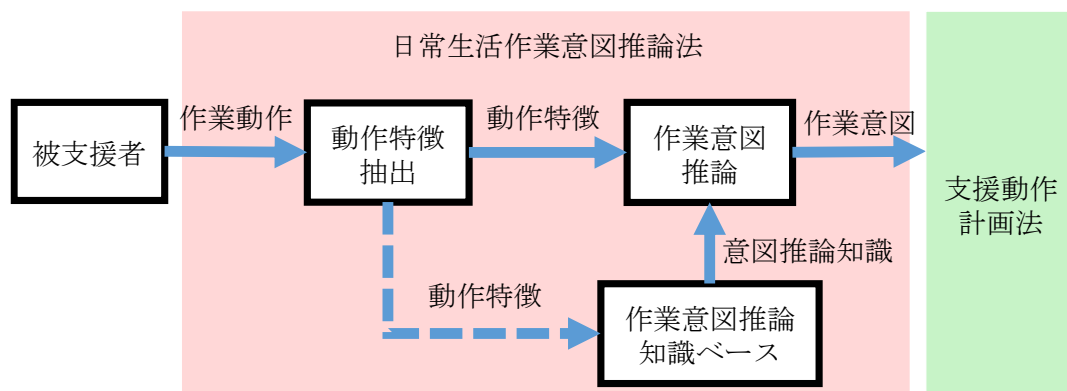


図 3.1 作業意図推論法のブロック線図

作業意図を推論するため、まず、作業意図という概念を説明することが必要である。更に、作業意図推論知識を定式化、定量化して、生活作業知識ベースを構築する。次に、実際の作業支援をする時に、リアルタイムで抽出した作業動作特徴により、作業意図推論知識ベースを用いて、被支援者の作業意図を推論する。最後に、実験により提案した作業意図推論法の有効性を検証する。

者に掃除作業支援する時に、ロボットはまず被支援者が掃除作業を行っていることを認識する。更に、ロボットは被支援者の掃除作業意図の具体的な作業内容が分かれば、被支援者を目標ゴミがあるところに移動させることが可能になる。よって、作業意図の推論結果は、被支援者が行っている作業種類と作業内容を推論することである。

したがって、作業意図は2層に分かれる。第1層は作業種類である。例えば、食事、掃除、机を拭くことなどである。第2層は作業意図の具体的な作業内容である。そのため、第1層と第2層の作業意図を推論することが必要です。

生活作業内容は作業の種類によって、2つ状況がある。状況1は、作業内容が非連続的な動作である。例えば、高い所の物を取る作業を行う時に、被支援者の作業内容は高い所の物が取れるまでであり、ロボットがシートの高さを上げると作業支援することができる。この状況には、作業の種類だけ認識できれば、作業支援動作が分かる。状況2では、作業内容は空間で連続的に作業を行うことである。生活作業動作は空間的な連続であるが、作業動作を全部抽出することが困難である。例えば、掃除作業する時に、作業内容は前、左、右に掃除機を掛けることだけではなく、ゴミの位置により、連続的に掃除機を掛けることである。このような作業の作業意図知識ベースを構築する時、ゴミの位置により全ての掃除動作を計測することは困難である。そのため、作業意図推論法は少ない作業意図知識を用いて、具体的な作業内容を推論することが必要である。

次節では、実際の状況によって、代表的な作業動作を取り込んで、作業意図推論知識ベース構築方法を説明する。

3.3 作業意図推論知識ベースの構築

3.3.1 言語ルールによる知識の抽出

実際の生活において、我々人間が他者の作業動作から作業意図を推論する過程は、作業者の体の全体的な動きを見たり、良く動く肢体部分の動作に注目したり、使っている道具を見たりし、記憶知識と比較することで、他者の作業意図を認識できる。この過程には、3つの重要なステップに分けられる。第1ステップは、人間が記憶にある作業について知識を持っている。第2ステップは、人間が他者の作業動作の特徴を捉える。第3ステップは、人間が観察から捉えた作業動作特徴と記憶中にある作業知識を比較し、分析できる。

ロボットが人間のような他者の作業意図を推論するために、人間の記憶と推論の知識を抽出することが必要である。人間の知識は自然に言語で表示される。そして、同様に人間の知識を言語ルールで抽出して、ロボットが理解できる形式にする必要がある。掃除作業を例として、人間の作業意図推論知識の抽出方法を説明する。

掃除作業の内容は掃除する位置により変わるが、掃除作業の意図は図 3.2 の $A1$, $A2$, $A3$ が対応する“前に掃除したい”、“左に掃除したい”と“右に掃除したい”の3つがある。作業動作と作業意図との関係は抽出する時に、被験者に $Z1$ と $Z2$, $Z3$ にゴミがあると伝えて、被験者に自然にゴミ方向と対応する掃除動作をさせる。したがって、動作 $A1$ と $A2$, $A3$ に対応する作業意図は掃除作業の前に掃除したい(I^1)、左方向に掃除したい(I^2)、右方向に掃除したい(I^3)である。人間は $A1$ と $A2$, $A3$ の作業動作を見ると、作業者の作業意図 I^1 と I^2 , I^3 を推論できる。ロボットが人間のように作業意図を推論するために、作業動作 $A1$ と $A2$, $A3$ と作業意図 I^1 と I^2 , I^3 の関係を作業意図推論知識として、推論ルールで抽出する。

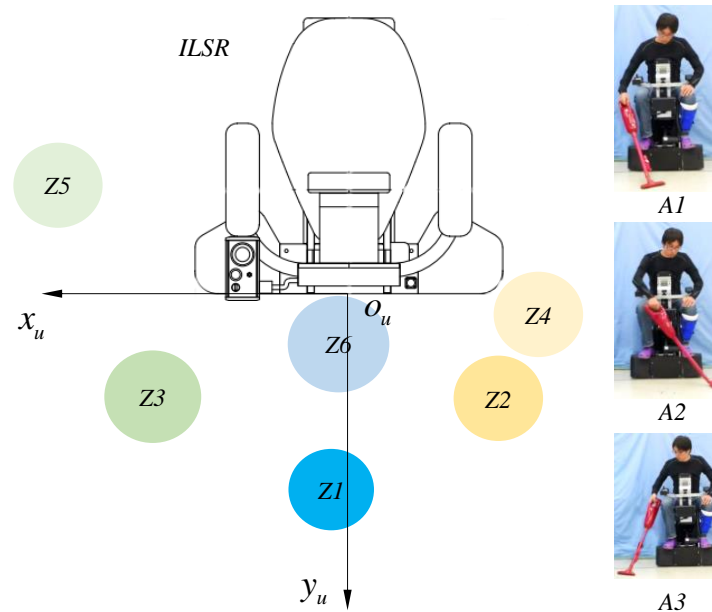


図 3.2 自立生活支援ロボットを乗って掃除作業
抽出した掃除作業意図の言語ルールを表 3.1 に示す。

表 3.1 掃除作業意図の言語ルールグループ 1

ルール 1：もし上半身の動作が動作 A1(ゴミは Z1)と同じならば、

作業意図は掃除作業であり、前方のゴミを掃除したい(I^1)。

ルール 2：もし上半身の動作が動作 A2(ゴミは Z2)と同じならば、

作業意図は掃除作業であり、左前方のゴミを掃除したい(I^2)。

ルール 3：もし上半身の動作が動作 A3(ゴミは Z3)と同じならば、

作業意図は掃除作業であり、前方のゴミを掃除したい(I^3)。

言語ルールの前件部の動作 A1 と A2, A3 は被支援者の上半身作業動作である。本研究のセンサー装着方法によって、動作 A1 と A2, A3 は右前腕と右上腕、背中、左前腕、左上腕の動作の組み合わせである。後件部として、作業意図は全部掃除作業であり、作業意図の内容には作業動作の方向によって、前と左、右に掃除機を掛ける意図が含まれる。ところで、上半身の動作により、掃除作業を認識した後、掃除作業の具体内容を推論する必要がある。

実際に狭い部屋でロボットに搭乗した疑似下肢障害者が掃除作業を行う時、以上の作業意図以外に、さらに 3 つの作業意図がある。近いところ(Z6)にあるゴ

ミを掃除する時に、疑似下肢障害者はゆっくりと後退する意図がある。また、掃除した場所がきれいになった後、別のゴミがある方向に早く向くため回転する意図もある。この作業意図を言語ルールで表示すると、表 3.2 の様になる。

表 3.2 掃除作業意図の言語ルールグループ 2

ルール 4：もし掃除機を近くに掛ける動作 A4(ゴミは Z4)になれば、
作業意図は掃除作業であり、後退したい(I^4)；

ルール 5：もし左方のゴミを掃除する動作 A5(ゴミは Z5)になれば、
作業意図は掃除作業であり、左回転したい(I^5)；

ルール 6：もし右方のゴミを掃除する動作 A6(ゴミは Z6)になれば、
作業意図は掃除作業であり、右回転したい(I^6)；

以上の 6 つ言語ルールは掃除作業の 6 つ基本作業意図と作業動作の関係で表示される。人間の掃除作業する動作には様々な様子があるが、基本の作業意図は大体同じである。実際、掃除作業を支援する時に、被支援者の習慣動作によって、言語ルール前件部の作業動作を定量化すると、個人の作業意図の推論知識ベースを構築可能になる。また、具体的な被支援者の状況によって、作業意図の言語ルールを増やすことも可能である。被支援者の需要により、同じ言語ルール抽出方法を用いて、作業動作と作業意図の関係を言語ルールで表示できる。

異なる作業意図において、作業動作が似ていることがある。この場合には、人間は生活作業を行う場所、道具、時間などの情報を言語ルールに増やせば、正しい作業意図を推論できるようになる。しかしながら、作業動作は一番基本的な作業意図と関する情報である。したがって、本研究は人間の作業動作情報を用いて、作業意図を推論する方法を用いる。

他の支援が必要な生活作業意図推論ルールを抽出する場合には、表 3.1 および表 3.2 と同様に言語ルールを増やし、作業意図を推論する言語ルールを作ることができる。例えば、前に荷物を運ぶ作業意図を推論する言語ルールをルール 7 に示す。

ルール 7：もし、上半身の動作が、図 3.3 に示す動作と同じならば、
作業意図は前に荷物を運ぶ(I^7)。



図 3.3 前に荷物を運ぶ作業

安全を考えると，支援が必要な作業意図がない場合には，意図は全部 I^0 で表示させて，作業意図がないと考える．

言語ルールによる作業意図知識の抽出方法を説明した．自立生活を支援するために，別の支援が必要な生活作業意図推論をするため，同様に言語ルールによる作業意図推論知識を抽出することが必要である．次には抽出した言語ルールの定式化について述べる．

3.3.2 作業意図推論知識の言語ルールを定式化

表 3.1 と表 3.2 の言語ルールを定式化して、ファジィ集合理論に基づいて、表 3.3 にプロダクションルールを示す.

表 3.3 掃除作業のプロダクションルール

$$\begin{aligned}
 \text{Rule}^1: \quad & \text{IF } S_{1x}=A^1_{1x}, \quad S_{1y}=A^1_{1y}, \quad S_{1z}=A^1_{1z}, \\
 & S_{2x}=A^1_{2x}, \quad S_{2y}=A^1_{2y}, \quad S_{2z}=A^1_{2z}, \\
 & S_{3x}=A^1_{3x}, \quad S_{3y}=A^1_{3y}, \quad S_{3z}=A^1_{3z}, \\
 & S_{4x}=A^1_{4x}, \quad S_{4y}=A^1_{4y}, \quad S_{4z}=A^1_{4z}, \\
 & S_{5x}=A^1_{5x}, \quad S_{5y}=A^1_{5y}, \quad S_{5z}=A^1_{5z}, \\
 & \text{THEN } I = I^1 \\
 \text{Rule}^2: \quad & \text{IF } S_{1x}=A^2_{1x}, \quad S_{1y}=A^2_{1y}, \quad S_{1z}=A^2_{1z}, \\
 & S_{2x}=A^2_{2x}, \quad S_{2y}=A^2_{2y}, \quad S_{2z}=A^2_{2z}, \\
 & S_{3x}=A^2_{3x}, \quad S_{3y}=A^2_{3y}, \quad S_{3z}=A^2_{3z}, \\
 & S_{4x}=A^2_{4x}, \quad S_{4y}=A^2_{4y}, \quad S_{4z}=A^2_{4z}, \\
 & S_{5x}=A^2_{5x}, \quad S_{5y}=A^2_{5y}, \quad S_{5z}=A^2_{5z}, \\
 & \text{THEN } I = I^2 \\
 & \dots\dots \\
 \text{Rule}^6: \quad & \text{IF } S_{1x}=A^6_{1x}, \quad S_{1y}=A^6_{1y}, \quad S_{1z}=A^6_{1z}, \\
 & S_{2x}=A^6_{2x}, \quad S_{2y}=A^6_{2y}, \quad S_{2z}=A^6_{2z}, \\
 & S_{3x}=A^6_{3x}, \quad S_{3y}=A^6_{3y}, \quad S_{3z}=A^6_{3z}, \\
 & S_{4x}=A^6_{4x}, \quad S_{4y}=A^6_{4y}, \quad S_{4z}=A^6_{4z}, \\
 & S_{5x}=A^6_{5x}, \quad S_{5y}=A^6_{5y}, \quad S_{5z}=A^6_{5z}, \\
 & \text{THEN } I = I^6
 \end{aligned}$$

ここで、前件部変数は上半身の作業動作計測結果に決められた 15 個があり、右前腕、右上腕、背中、左前腕と左上腕姿勢情報に対応する。前件部の中の $S_{1x} \in \{A^1_{1x}, A^2_{1x}, A^3_{1x}, A^4_{1x}, A^5_{1x}, A^6_{1x}\}$ はセンサーS1 が測定する右前腕動作の x 軸特徴である。 $A^1_{1x}, A^2_{1x}, A^3_{1x}, A^4_{1x}, A^5_{1x}, A^6_{1x}$ は掃除作業の具体作業内容に対応する

右前腕掃除動作 x 軸の特徴で、前件部に対応する言語変数である。各センサーが x と y , z の三つ軸があるため、 y 軸と z 軸は x 軸と同じ、 $S_{1y} \in \{A_{1y}^1, A_{1y}^2, A_{1y}^3, A_{1y}^4, A_{1y}^5, A_{1y}^6\}$ と $S_{1z} \in \{A_{1z}^1, A_{1z}^2, A_{1z}^3, A_{1z}^4, A_{1z}^5, A_{1z}^6\}$ がある。体の右前腕、右上腕、背中、左前腕と左上腕5つの部分を計測するため、前件部は S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 があり、被支援者の右前腕、右上腕、背中、左前腕と左上腕姿勢情報を示している。後件部 I は被支援者の作業意図(Intention)である。言語ルールの後件部に対応する言語変数は $I^1, I^2, I^3, I^4, I^5, I^6$, である。即ち、前と左、右方向に掃除機を掛けたい時の意図、後退、左回転、右回転に対する掃除作業意図の言語変数である。

同様に、前に荷物を運ぶ作業の言語ルールを定式化したプロダクションルールを以下に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{Rule}^7: \quad & \text{IF } S_{1x}=A^7_{1x}, \quad S_{1y}=A^7_{1y}, \quad S_{1z}=A^7_{1z}, \\
 & S_{2x}=A^7_{2x}, \quad S_{2y}=A^7_{2y}, \quad S_{2z}=A^7_{2z}, \\
 & S_{3x}=A^7_{3x}, \quad S_{3y}=A^7_{3y}, \quad S_{3z}=A^7_{3z}, \\
 & S_{4x}=A^7_{4x}, \quad S_{4y}=A^7_{4y}, \quad S_{4z}=A^7_{4z}, \\
 & S_{5x}=A^7_{5x}, \quad S_{5y}=A^7_{5y}, \quad S_{5z}=A^7_{5z}, \\
 & \text{THEN } I=I^7
 \end{aligned}$$

ここで、作業意図推論知識の言語ルールの定式化方法である。実際に被支援者の作業意図を推論するための、言語ルールの定量化方法は次節に述べる。

3.3.3 言語変数の定量化

作業意図推論知識の言語ルールを定量化する方法について述べる。定式化された言語ルールは、まだ人間の言語で形容した推論知識である。ロボットが言語ルールで表せた知識を利用するため、ルールの要件を定量化する必要がある。一般的にファジィ推論では、言語ルールの前件部と後件部がファジィ集合で表示される[3]。同様に、前節に定式化したプロダクションルールの前件部と後件部の言語変数を定量化する。

第2章に説明した作業動作計測方法を用いて、健康な20代疑似下肢障害者1名の掃除作業実験を行った。抽出した掃除作業動作の特徴を表3.4に示す。前節で示した6つの掃除作業動作を行い、各肢体の x , y , z 軸の動作特徴を抽出した。ファジィ推論を利用するため、特徴のデータによる作業動作特徴をファジィ集合で表示する。

表 3.4 疑似下肢障害者の掃除作業動作特徴

| センサー | 軸 | 特徴 | 作業 1 | 作業 2 | 作業 3 | 作業 4 | 作業 5 | 作業 6 | |
|------|-----|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| S1 | x | 平均値 | 0.6225 | 0.6358 | 0.7577 | 0.6665 | 0.8085 | 0.5328 | |
| | | 標準偏差 | 0.0464 | 0.0284 | 0.0146 | 0.0027 | 0.0005 | 0.0012 | |
| | y | 平均値 | 0.7061 | 0.6654 | 0.5107 | 0.5539 | 0.4531 | 0.6296 | |
| | | 標準偏差 | 0.0416 | 0.0163 | 0.0234 | 0.0009 | 0.0018 | 0.001 | |
| | z | 平均値 | -0.3315 | -0.3887 | -0.405 | -0.4989 | -0.3756 | -0.5654 | |
| | | 標準偏差 | 0.01 | 0.0292 | 0.0147 | 0.0031 | 0.0018 | 0.0005 | |
| S2 | x | 平均値 | 0.897 | 0.8825 | 0.8608 | 0.8037 | 0.9027 | 0.7224 | |
| | | 標準偏差 | 0.0145 | 0.017 | 0.0242 | 0.0016 | 0.0007 | 0.0011 | |
| | y | 平均値 | 0.0458 | 0.1829 | -0.1024 | 0.4126 | 0.0414 | 0.0223 | |
| | | 標準偏差 | 0.1688 | 0.1508 | 0.1653 | 0.0019 | 0.0025 | 0.0006 | |
| | z | 平均値 | -0.4035 | -0.3967 | -0.4697 | -0.4288 | -0.4283 | -0.6911 | |
| | | 標準偏差 | 0.0432 | 0.0859 | 0.0116 | 0.0013 | 0.0017 | 0.0012 | |
| S3 | x | 平均値 | -0.0282 | -0.0371 | 0.0107 | -0.1536 | -0.0518 | -0.1256 | |
| | | 標準偏差 | 0.0292 | 0.0324 | 0.0249 | 0.0015 | 0.0007 | 0.0011 | |
| | y | 平均値 | 0.7858 | 0.7958 | 0.8367 | 0.8146 | 0.8683 | 0.8817 | |
| | | 標準偏差 | 0.0029 | 0.0032 | 0.0122 | 0.0008 | 0.0012 | 0.0003 | |
| | | | 平均値 | -0.6171 | -0.6036 | -0.5465 | -0.5593 | -0.4933 | -0.4549 |

| | | | | | | | | |
|----|-----|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | z | 標準偏差 | 0.0033 | 0.0054 | 0.0194 | 0.0015 | 0.0022 | 0.0005 |
| S4 | x | 平均値 | 0.8456 | 0.8105 | 0.8782 | 0.76 | 0.9082 | 0.849 |
| | | 標準偏差 | 0.002 | 0.0042 | 0.0062 | 0.001 | 0.0004 | 0.0003 |
| | y | 平均値 | -0.5189 | -0.5655 | -0.4779 | -0.618 | -0.4165 | -0.5174 |
| | | 標準偏差 | 0.0042 | 0.0037 | 0.0114 | 0.0009 | 0.0008 | 0.0005 |
| | z | 平均値 | 0.1253 | 0.1523 | -0.0147 | 0.201 | 0.0401 | 0.1071 |
| | | 標準偏差 | 0.0061 | 0.01 | 0.0061 | 0.0014 | 0.0005 | 0.0004 |
| S5 | x | 平均値 | 0.9924 | 0.9849 | 0.9813 | 0.966 | 0.9897 | 0.9862 |
| | | 標準偏差 | 0.0025 | 0.0031 | 0.0079 | 0.0004 | 0.0144 | 0.0002 |
| | y | 平均値 | -0.1063 | -0.1663 | -0.1148 | -0.2586 | -0.0288 | -0.1498 |
| | | 標準偏差 | 0.0209 | 0.0177 | 0.0296 | 0.0015 | 0.0014 | 0.0012 |
| | z | 平均値 | -0.0578 | -0.0451 | -0.1495 | 0.0075 | -0.1336 | -0.0699 |
| | | 標準偏差 | 0.0048 | 0.0062 | 0.0245 | 0.001 | 0.0194 | 0.0003 |

プロダクションルールの前件部言語変数の $A_{ix}^j, A_{iy}^j, A_{iz}^j$ (i はセンサーの番号, j はルールの番号) は図 3.4 に示すような三角型ファジィ集合で表す. 前件部言語変数 A のメンバーシップ関数のパラメータ a_2 は, 抽出した動作特徴の平均値, a_1 は平均値と標準偏差の差, a_3 は平均値と標準偏差の和とする. つまり, 作業動作を動作の特徴によるファジィルール形式で表示している.

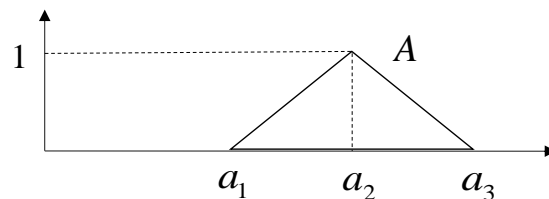
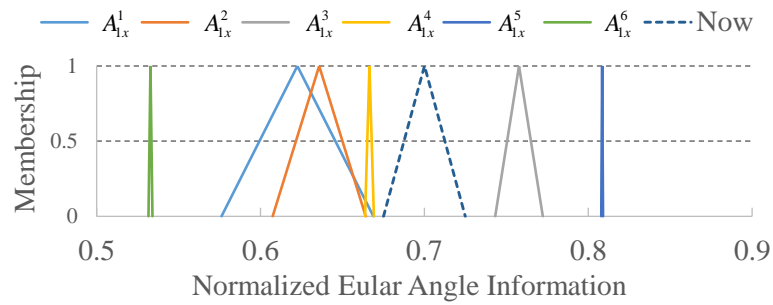
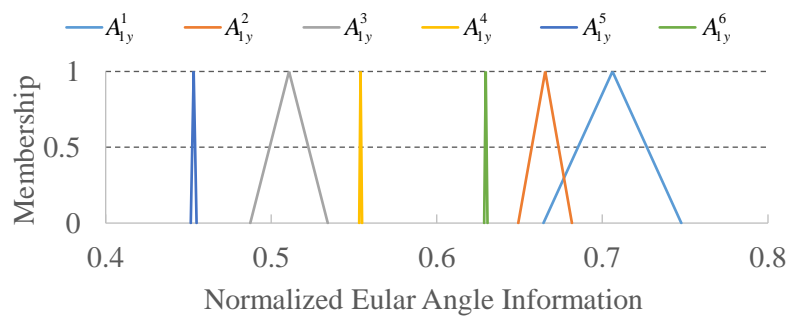


図 3.4 三角型ファジィ集合で表示される作業動作特徴

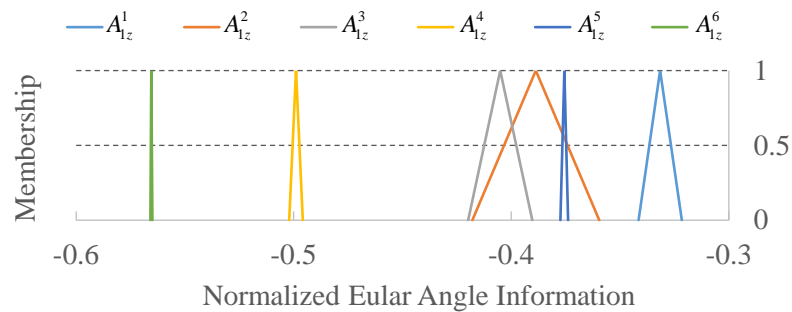
同様に, 掃除作業意図推論言語ルールの言語変数を全て三角型ファジィ集合で表示したものを, 図 3.5 に示す. 三角型ファジィ集合の中心値は作業動作の姿勢であり, 三角型ファジィ集合の幅が作業動作の動き幅を表現している. そして, 作業動作の静的な特徴と動的な特徴は, 全て三角型ファジィ集合で表わされる.



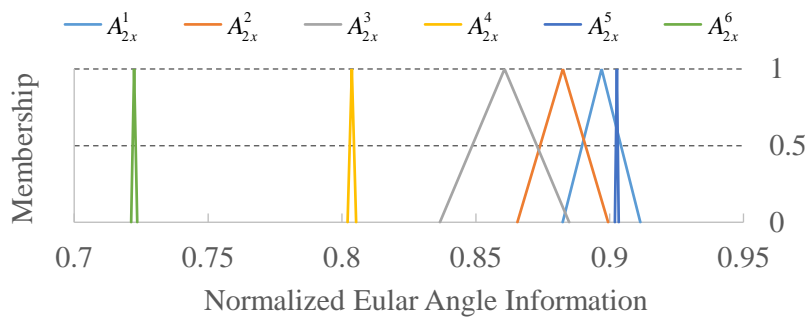
(a) 右前腕(S1)x 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



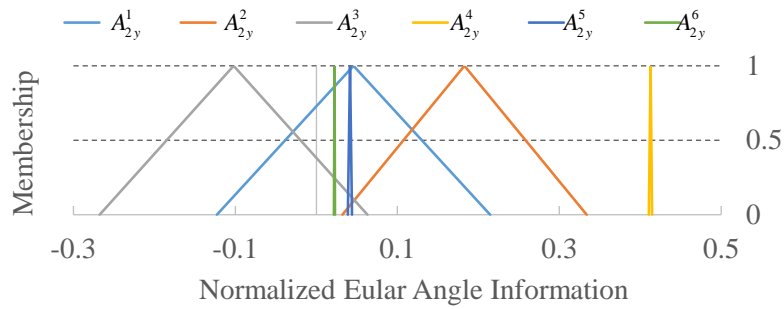
(b) 右前腕(S1)y 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



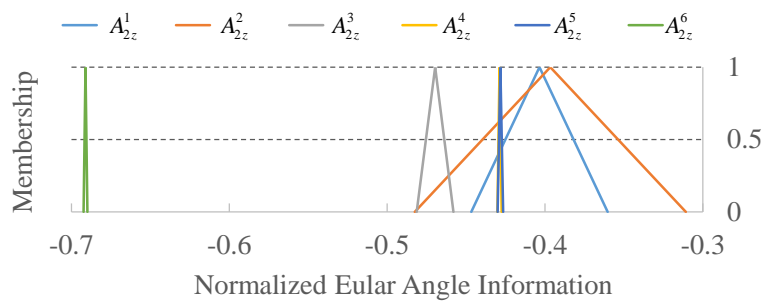
(c) 右前腕(S1)z 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



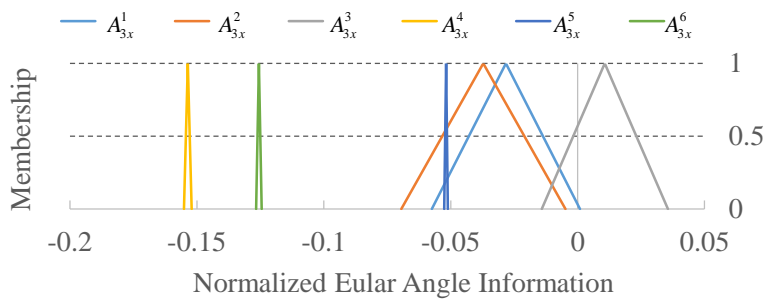
(d) 右上腕(S2)x 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



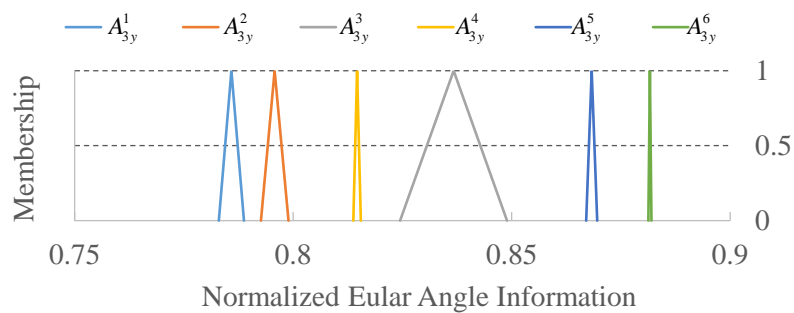
(e) 右上腕(S2)y 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



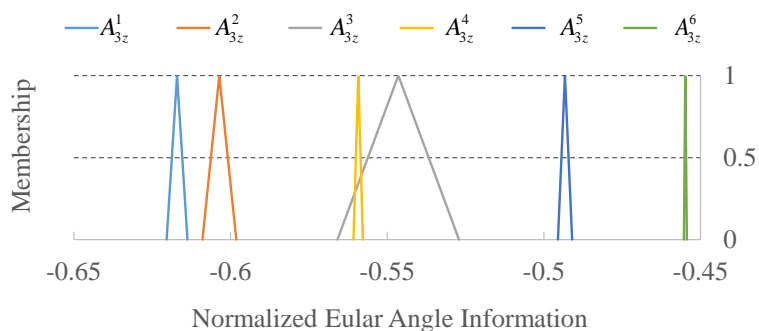
(f) 右上腕(S2)z 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



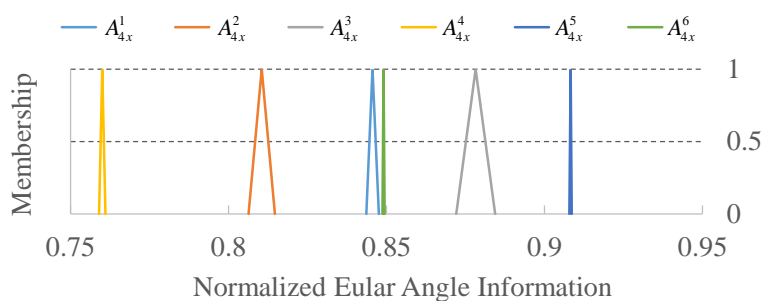
(g) 背中(S3)x 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



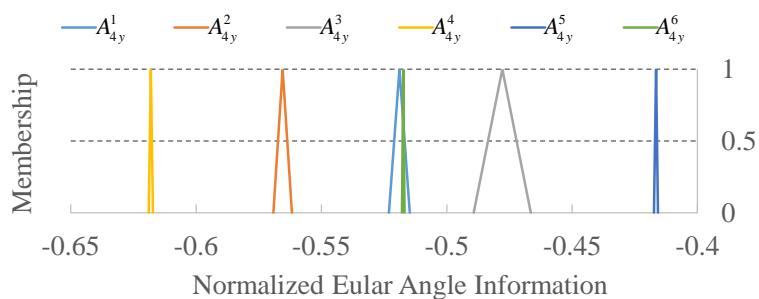
(h) 背中(S3)y 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



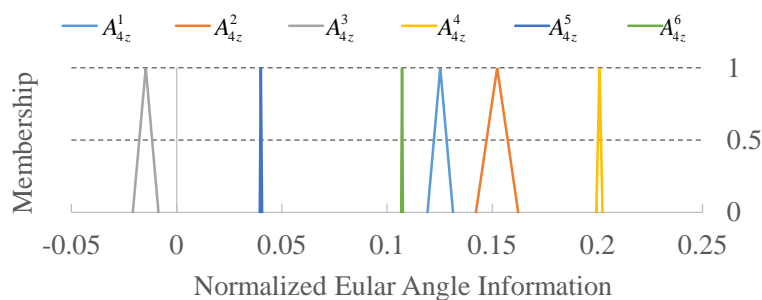
(i) 背中(S3)z 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



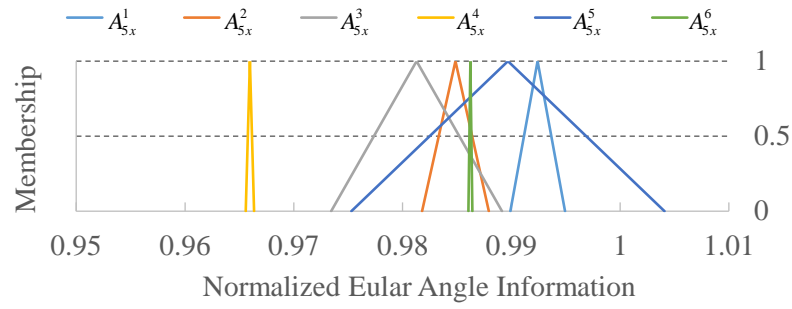
(j) 左前腕(S4)x 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



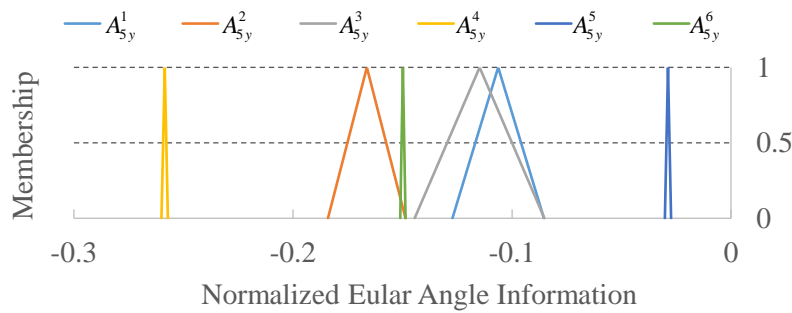
(k) 左前腕(S4)y 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



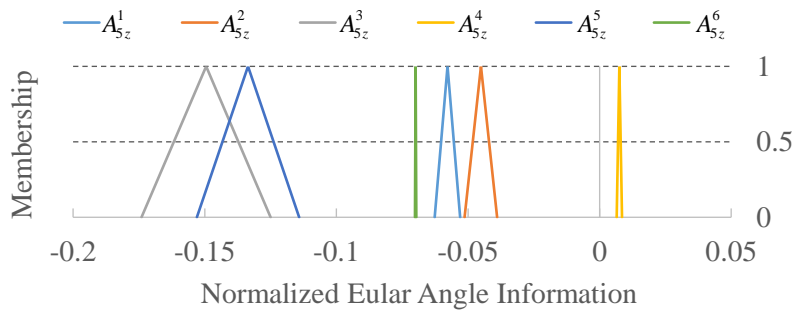
(l) 左前腕(S4)z 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



(m) 左上腕(S5)x 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



(n) 左上腕(S5)y 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数



(o) 左上腕(S5)z 軸の掃除作業ルール前件部のメンバーシップ関数

図 3.5 掃除作業の作業意図推論ルールの前件部

以上で、掃除作業意図推論の知識ベースの言語ルールが、全て三角型のファジィ集合で表示された。しかし、普段、人間が定量化するファジィルールとは違いがある。図 3.5 が示すように、作業意図推論知識ルールの前件部のファジィ集合が互いに覆わない、つまり共通集合は存在しない場合がある。互いに覆わない前件部が存在する場合、疎なファジィルールと呼ばれている[2]。通常、よく使われているファジィ推論法には Mamdani の推論法[4]、関連型推論法[5]、簡略型推論法などがあげられる。これらの推論法は、前件部と与える事実がどの程度一致しているかを示す適合度をファジィ推論の証拠として用いている。前件部集合が

互いに空の共通部分を持つ場合、事実は図 3.5 の(a)に点線で示す空集合に入力されると、推論結果を求めることができない。本研究では、上半身の作業動作と作用意図に関する知識は疎なファジィルールによって表現されているので、前件部集合が互いに疎である場合でも推論可能な距離型ファジィ推論法を用いて作業意図推論法を提案した。次に、距離型ファジィ推論法に基づく作業意図推論法について述べる。

3.4 距離型ファジィ推論法に基づく作業意図推論方法

距離型ファジィ推論法に基づいて作業意図推論を行う。非ファジィ化でよく用いられるのが min-max 重心法である。重心法は前件部と与えた事実とどの程度一致しているかを示す適合度をファジィ推論の証拠として用いている。そのためいくつかの欠点がある。例えば、複数個の推論規則における前件部が疎である場合、つまり、前件部集合が互いに空の共通部分を持つ場合、事実がこの空集合に入力されると重心法では推論の結論を求めることができない。距離型ファジィ推論法では、前件部と事実との距離を推論の証拠としているので、前件部ファジィ集合が互いに覆われていないようなファジィルールの場合でも、適切な推論結果を得ることができる。また、後件部が凸なファジィ集合であれば、推論結果も凸なファジィ集合になるので、ファジィ数としての特徴は保持されている。さらに、前件部と事実との距離により両者の近似程度が表現されるので、推論結果の適合度を適切に反応することができる。

距離型ファジィ推論法を用いて与えられた事実から推論結果を導出する。一般的に、距離型ファジィ推論法は3つのステップから構成される[2]。

Step 1: 距離の公理を満たす計算法を用いて、ファジィ集合の距離 $d_{ij}(A^i, A^j)$ を計算する。

Step 2: 推論結果 B^i の α —レベル集合を求める。一般的には知識ルールと事実の関連程度を求める。

Step 3: 合成定理により、各推論結果 B^i の α —レベル集合に基づいて、推論結果 B を求める。

以上の距離型ファジィ推論手順により、作業意図推論の入力と出力を考慮して、作業意図推論方法は次の Step 1, 2, 3, 4, 5 からなる。

Step 1: 事実と前件部との距離を求める。距離の計算式は式 3.1 で表す。式 3.1 は距離の公理を満たす距離関数である。なお、 A^i , A は前件部、事実を表し、 i は推論規則の数、 $1 \leq p < \infty$ である。

$$\begin{aligned}
 d_i = d(A^i, A) &= \left[\int_0^1 |\inf A_{M\alpha}^i - \inf A_{M\alpha}|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} \\
 &+ \left[\int_0^1 |\sup A_{M\alpha}^i - \sup A_{M\alpha}|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} \\
 &+ \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left| \left(\frac{1}{M_{A^i}} - 1 \right) \mu_{A^i}(x) - \left(\frac{1}{M_A} - 1 \right) \mu_A(x) \right|^p dx \right]^{\frac{1}{p}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

式 3.1 において、 p の値を 2 として一般的なファジィ集合間の簡略型距離計算式を与える。この距離計算定義は距離の 3 つの基本条件(3.2, 3.3, 3.4)を満足できる。

$$d(A, B) \geq 0; \quad d(A, B) = 0 \Leftrightarrow A = B \tag{3.2}$$

$$d(A, B) = d(B, A) \tag{3.3}$$

$$d(A, B) \leq d(A, C) + d(C, B) \tag{3.4}$$

具体的に、作業意図推論法と関する三角型ファジィ集合の場合にファジィ集合間の距離を求める方法を示す。

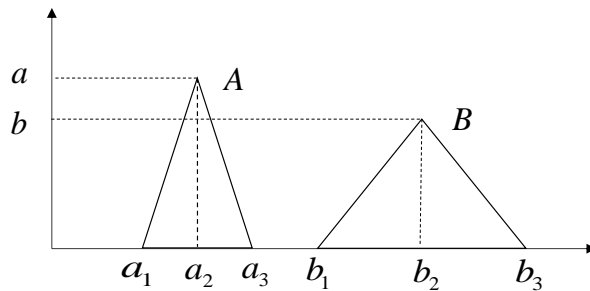


図 3.6 三角型ファジィ集合

距離関数に基づいて、図 3.6 のような三角型ファジィ集合 A と B の距離計算式になる。

$$\begin{aligned}
 d(A, B) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^2 \left[\sum_{j=i}^{i+1} (a_j - b_j)^2 + \prod_{j=i}^{i+1} |a_j - b_j| \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{3}} \left[(1-a)(a_3 - a_1)^2 + (1-b)(b_3 - b_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

式 3.5 は、もし A, B が共に正規なファジィ集合であれば、式 3.5 の右辺の第 2 項が 0 になる。

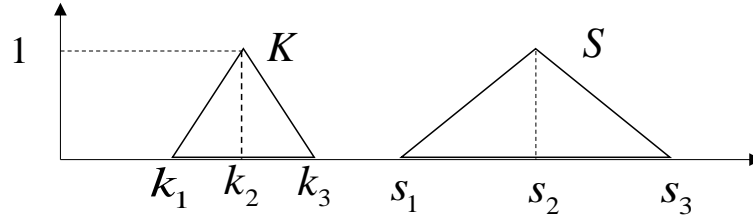


図 3.7 正規な三角型ファジィ集合

図 3.7 の場合になると、式 3.5 が式 3.6 になる。

$$d(K, S) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{h=1}^2 \left[\sum_{l=1}^{h+1} (k_l - s_l)^2 + \prod_{l=i}^{h+1} (k_l - s_l) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

実際にこれらの距離計算式をファジィ推論に用いるときは、なるべく計算量を減らすことを考えて、それらの計算式の前に掛けている定数 $1/\sqrt{3}$ を 1 にしても差し支えはない。これは距離の公理を満たすすべての距離関数に 0 以外の任意の定数を掛けても、やはり距離の公理は満たされるからである。

Step 2: 式(3.7)により i 番目のプロダクションルールの前件部全体と事実の距離値 d_i を求める。具体的に、上半身作業動作 $S(S_1, S_2 \dots)$ と知識ベースの各作業動作 A^i の距離を計算する。 $m=5$ は上半身動作の特徴を測るセンサー数である。

$$d_i = \sum_{l=1}^m \left[d(A_{x_l}^i, S_{x_l}^i) + d(A_{y_l}^i, S_{y_l}^i) + d(A_{z_l}^i, S_{z_l}^i) \right] \quad (3.7)$$

Step 3: 計算した距離 d_i を用いて、作業意図を推論する。式 3.7 により計算した距離 d_i は作業動作と作業意図知識ベースとの近似程度を反映している。

$$(d_{\min}, Z) = \min \{d_i\} \quad (3.8)$$

Step 4: 距離閾値 $d_{\text{threshold}}$ によって、作業意図の有無を判別する。

もし、 d_{\min} が $d_{\text{threshold}}$ より小さいならば、作業意図は F である。

その他に、作業意図なしは、 F^0 で表示される。

以上で、作業意図の作業種類を認識できる。第 3.2 節に説明した状況 1 の作業

意図では、作業意図の推論が完了する。しかし、複数個作業内容がある作業種類には、作業内容を推論することが必要である。

Step 5：作業動作事実と作業意図推論知識ベースの言語ルールとの相対近似度を推論する。

推論法の一つの長所が、知識ベースに含まれない作業動作に対する作業意図を理解できることである。そのため、有限な作業意図推論言語ルールで連続的な作業意図を推論することができる。本研究には、距離型ファジィ推論のファジィ集合距離の概念に基づいて、作業意図の相対近似度を式 3.9 で定義する。

$$\lambda^l = \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^n d_j}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad l = 1, \dots, n \quad (3.9)$$

ここで、 n は作業推論ベースの言語ルール数である。作業意図の相対近似度は作業意図知識ベースの中で定義された各作業意図と実際の作業意図との相対近似程度である。式 3.9 の作業意図の相対近似度は距離型ファジィ推論の **Step 3** の計算法と似ている。距離型ファジィ推論法は前件部集合と事実との距離で、前件部と事実がどの程度一致していないかの度合により推論行う。作業意図の状況 2 に対して、相対近似度で連続的な作業内容を少ない作業推論知識ルールで推論することが可能になる。 λ_l は知識ベースの作業意図との近似程度を表現しているので、作業支援動作を計画することの重要な証拠となる。

以上に、距離型ファジィ推論に基づく作業意図推論法を説明した。作業意図推論法の入力是被支援者上半身の作業動作であり、出力は被支援者の作業意図である。作業意図は作業種類と作業内容 2 層構造であるので、作業意図推論の具体的な出力は認識した作業種類が作業意図推論知識ベース中の番号 Z の作業意図 I^Z と作業意図推論知識ベース中の各作業意図と実際の作業意図の相対近似度 λ^l ($l=1, 2, 3 \dots n$) である。次の節では、実験による作業意図推論法の有効性を検討する [6,7,8]。

3.5 作業意図推論実験による検討

上半身の作業動作と作業意図との関連性を説明し、上半身の作業動作により作業意図の推論法を提案した。実験により、作業意図推論法の効果を検討する。

3.5.1 七つ基本生活作業意図の認識実験

実験内容

表 3.5 に示す日常生活の 7 つの基本作業を実験内容として、作業種類の認識実験を行って、提案した作業意図推論法の有効性を検証する。

表 3.5 作業意図推論実験の 7 つ作業種類

| 作業の記号 | 作業種類 |
|-------|------------|
| T^0 | 知識ベース以外 |
| T^1 | 寝る |
| T^2 | 座る |
| T^3 | 手を洗う |
| T^4 | 高いところの物を取る |
| T^5 | 物を切る |
| T^6 | 掃除器を掛ける |
| T^7 | 物を拾う |

7 つ作業種類は T^1 から T^7 までである。寝ると座る状態は下肢障害者の一番通常な姿勢である。手を洗う、物を取ると物を切るは自立生活のため必要な作業である。掃除機を掛けると物を拾うは部屋を片付ける作業で、自立生活の必要な作業である。 T^0 は知識ベース以外の作業を推論した結果の記号である。

実験では、健常な 20 代男性は 3 名が、作業種類 T^1 から T^7 まで 15 回を行う。実験の風景は図 3.8 に表す。



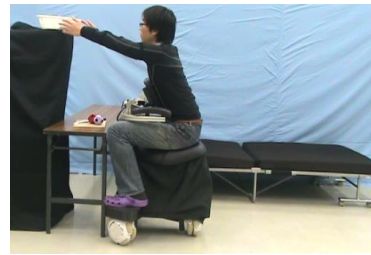
(a) T^1 寝る



(b) T^2 座る



(c) T^3 手を洗う



(d) T^4 高い所の物を取る



(e) T^5 物を切る



(f) T^6 掃除器を掛ける



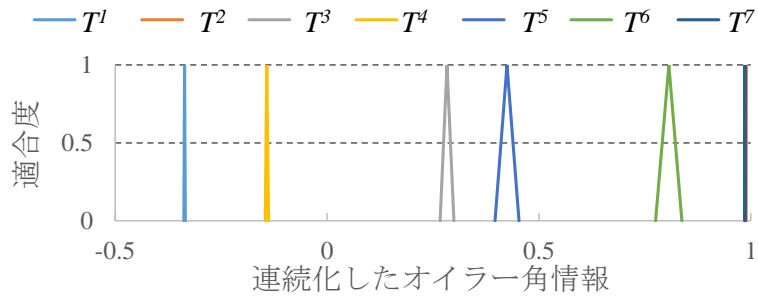
(g) T^7 物を拾う

図 3.8 作業意図認識実験の作業動作

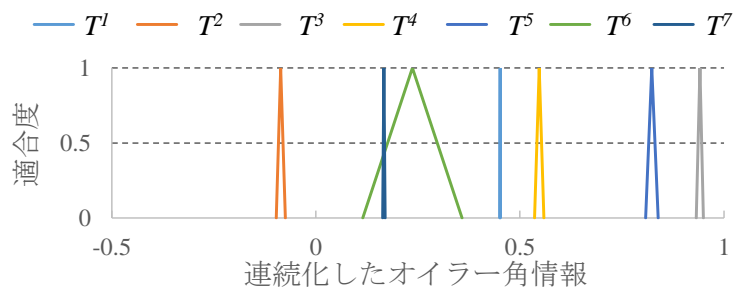
作業意図推論の知識を抽出

提案した作業意図推論法により、作業意図を推論するために、先に各作業動作の特徴を抽出することと作業意図推論の知識ベースの構築することが必要である。図 3.9, 3.10, 3.11 には、ファジィ集合で表示される 3 人被験者の右前腕作業意図知識を示す。

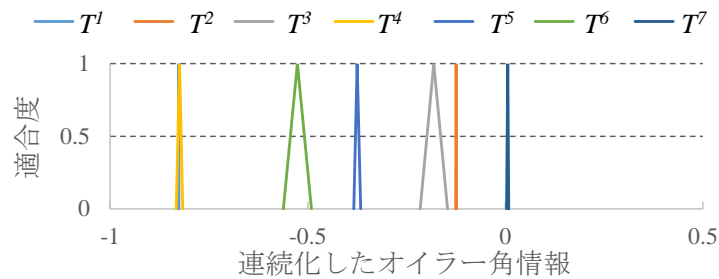
被験者 3 人の右前腕の作業意図知識を比べると、各人の知識は異なるが、同じ作業の知識は似ている。被験者は異なるが、同じ作業の作業動作は似ているために、作業種類推論知識の前件部は作業動作と関するから、三角ファジィ集合で表示される作業意図推論知識は似ている原因である。しかし、個人的に作業の習慣は異なるので、人による具体的な作業動作が異なるのである。



(a) 右前腕(S1)x 軸の作業意図推論知識

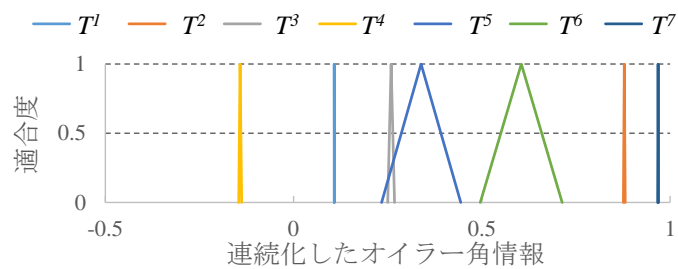


(b) 右前腕(S1)y 軸の作業意図推論知識

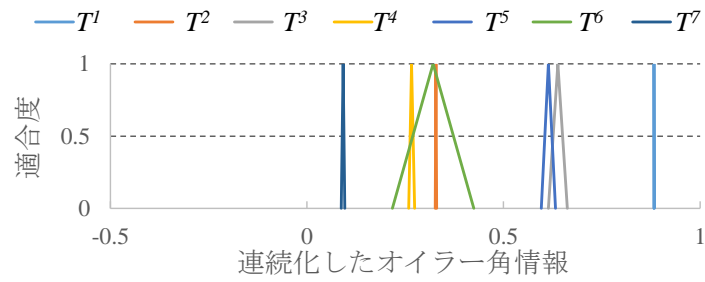


(c) 右前腕(S1)z 軸の作業意図推論知識

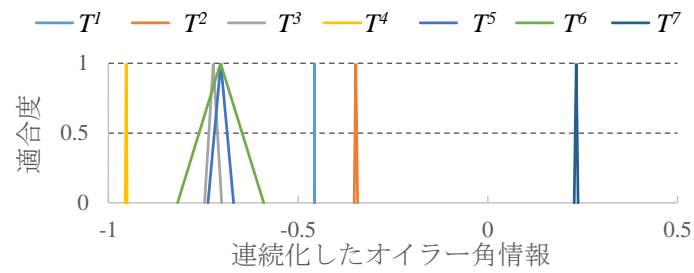
図 3.9 被験者 1 の右前腕作業意図推論知識



(a) 右前腕(S1)x 軸の作業意図推論知識

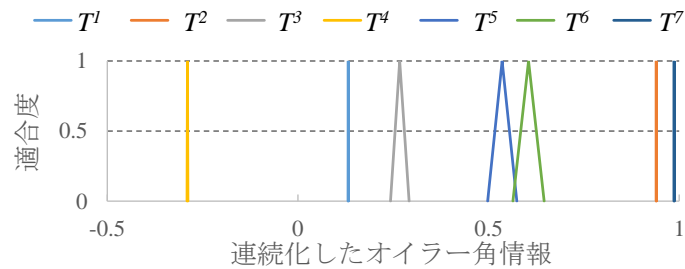


(b) 右前腕(S1)y 軸の作業意図推論知識

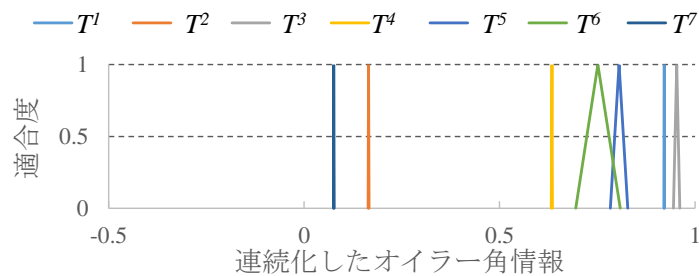


(c) 右前腕(S1)z 軸の作業意図推論知識

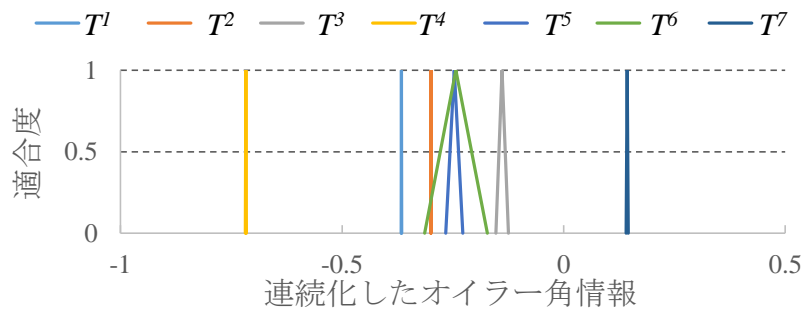
図 3.10 被験者 2 の右前腕作業意図推論知識



(a) 右前腕(S1)x 軸の作業意図推論知識



(b) 右前腕(S1)y 軸の作業意図推論知識



(c) 右前腕(S1)z 軸の作業意図推論知識

図 3.11 被験者 3 の右前腕作業意図推論知識

作業内容は同じであるが、人による作業動作が異なるので、作業意図推論のために、個人的な作業意図推論知識ベースの構築することが必要である。

作業種類推論結果

被験者の個人作業意図推論知識ベースに基づいて、作業種類推論実験を行った。被験者は各作業動作を 15 回させて、毎回作業動作を 10 秒間続けた。毎回作業動作の間に遷移時間である。そのため、7 つ作業動作があるので、105 回知識ベース以外の作業内容である。もし、作業動作の間に、作業意図と違う作業意図結果を推論するならば、推論結果は間違いであると考えられる。この基準により、表 3.6 は被験者 1 の作業意図認識実験結果である。

表 3.6 被験者 1 の作業種類推論実験結果

| | T^0 | T^1 | T^2 | T^3 | T^4 | T^5 | T^6 | T^7 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T^0 | 105 | | | | | | | |
| T^1 | | 15 | | | | | | |
| T^2 | | | 14 | | | | | 1 |
| T^3 | 1 | | | 14 | | | | |
| T^4 | | | | | 15 | | | |
| T^5 | | | | | | 15 | | |
| T^6 | | | | | | | 15 | |
| T^7 | 1 | | | | | | | 14 |

同様に、被験者 2 と 3 の作業意図推論実験結果は表 3.7 と 3.8 に表す。

表 3.7 被験者 2 の作業意図推論実験結果

| | T^0 | T^1 | T^2 | T^3 | T^4 | T^5 | T^6 | T^7 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T^0 | 94 | | | | | 10 | | 1 |
| T^1 | 1 | 14 | | | | | | |
| T^2 | | | 15 | | | | | |
| T^3 | 4 | | | 11 | | | | |
| T^4 | | | | | 15 | | | |
| T^5 | 2 | | | | | 13 | | |
| T^6 | 1 | | | | | | 14 | |
| T^7 | 0 | | | | | | | 15 |

表 3.8 被験者 3 の作業意図推論実験結果

| | T^0 | T^1 | T^2 | T^3 | T^4 | T^5 | T^6 | T^7 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T^0 | 104 | | | | | 1 | | |
| T^1 | | 15 | | | | | | |
| T^2 | | | 15 | | | | | |
| T^3 | | | | 15 | | | | |
| T^4 | | | | | 15 | | | |
| T^5 | 1 | | | | | 10 | 4 | |
| T^6 | 1 | | | | | | 14 | |
| T^7 | | | | | | | | 15 |

推論結果により，作業 T^5 、 T^6 は T^0 に推論することがある．作業 T^5 は物を切る作業，作業 T^6 は掃除器を掛ける作業である．この2つ作業を行う時に，被験者の腕は一定周期的に振り返す動作を行うことが必要である．第2章の作業動作の分類により，作業 T^5 、 T^6 の作業動作は運動動作である．運動動作による上半身の姿勢は変化する．そのために，ある瞬間に，作業種類を推論結果が間違いました．作業種類推論の結果を評価するために，認識率をは次の式で定義する．

$$\text{認識率} = \frac{\text{正しい作業意図推論結果の回数}}{\text{作業の行う回数}} \times 100\% \quad (3.10)$$

被験者 3 人の作業意図推論結果を合わせて、作業意図推論実験の認識率は表 3.9 に表す。

表 3.9 作業意図推論実験の認識率

| 記号 | 作業内容 | 認識率 |
|-------|------------|--------|
| T^0 | 知識ベース以外 | 96.19% |
| T^1 | 寝る | 97.7% |
| T^2 | 座る | 97.7% |
| T^3 | 手を洗う | 88.9% |
| T^4 | 高いところの物を取る | 100% |
| T^5 | 物を切る | 84.4% |
| T^6 | 掃除器を掛ける | 95.6% |
| T^7 | 物を拾う | 97.7% |

考察

この実験には日常生活の中に通常な 7 つ生活作業を考慮して、本章に提案した作業意図推論法の推論効果を検証した。作業動作は運動動作の状況により、静止動作の作業意図の推論認識率は高いである。しかし、運動動作の作業意図を推論結果には、10 秒間の作業を行う間に、不正確の場合は全部別の作業意図に推論するのではなく、ある瞬間に間違いすることである。図 3.10 に、被験者 3 の連続的に 7 つ作業を行う実験の推論結果を示す。

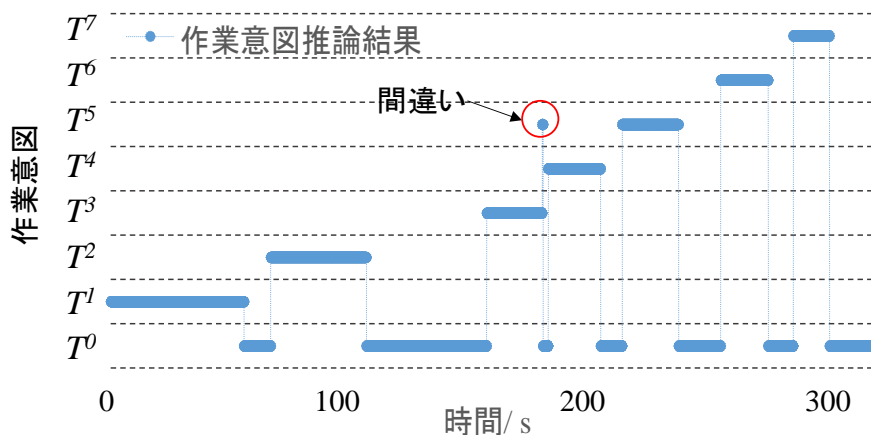


図 3.12 被験者 3 順番的に 7 作業実験の作業意図推論結果

図 3.12 により、作業意図が T^3 の手を洗うと T^4 の高い所の物を取るとの間に

静止状態を T^s の物を切る作業意図に 0.1 秒間推論しました。しかし、各生活作業内容は通常に関連性がある。したがって、作業意図は突然に短く別の作業意図に変化することはありません。未来には、作業意図の信号を適切なローパスフィルタを使えば、このような作業意図推論間違いを消せると考えられる。

3.5.2 掃除作業意図の推論実験

前節には、作業内容の推論効果を検証しました。次には、知識ベースの中にない作業意図の推論効果を検証為に、掃除作業実験を行った。

実験内容

実験では、健常な男性 1 名が、図 3.11 に示す掃除場所に Z1, Z2, Z7, Z3, Z8, Z4, Z5, Z6 の順番で掃除作業動作 6 回を行った。Z1 から Z6 までの掃除する場所には、知識ベースの 6 動作が対応する。知識ベース以外の意図推論を検証するため、前と左前、右前の間になる Z7 と Z8 を設けた。

前節と同様に、被験者が各掃除場所を掃除動作により、掃除作業意図推論知識ベースを構築する。

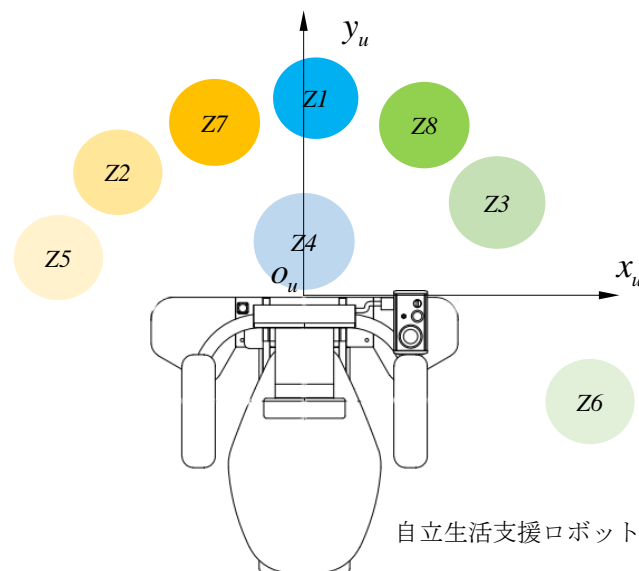


図 3.13 掃除意図推論の実験の掃除位置図

実験結果

掃除場所に Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6 の掃除作業動作を掃除作業知識とし

て、作業意図推論知識ベースに抽出したので、掃除作業意図 $I^1, I^2, I^3, I^4, I^5, I^6$ の推論結果の認識率は表 3.10 に表す. 6 回の実験の中に、前に掃除する意図が 2 回左に掃除する意図に推論した, 1 回左に掃除する意図が前に掃除する意図に推論しました.

表 3.10 掃除作業意図の認識率

| 掃除意図の記号 | 掃除位置 | 認識率 |
|---------|------|-------|
| I^1 | Z1 | 66.7% |
| I^2 | Z2 | 83.3% |
| I^3 | Z3 | 100% |
| I^4 | Z4 | 100% |
| I^5 | Z5 | 100% |
| I^6 | Z6 | 100% |

第 1 回実験結果を例をとって、図 3.14 に示す. オレンジ色の線は実験で要求した作業意図順番で、青色の線は作業意図の推論結果である. Z7 と Z8 に対する作業意図知識は抽出しないが、Z7 と Z8 に掃除作業を行う時に、推論した掃除意図は前方のゴミを掃除したいである. そして、作業意図推論法が相似な作業動作を行う時に、作業意図種類を認識できることを検証した.

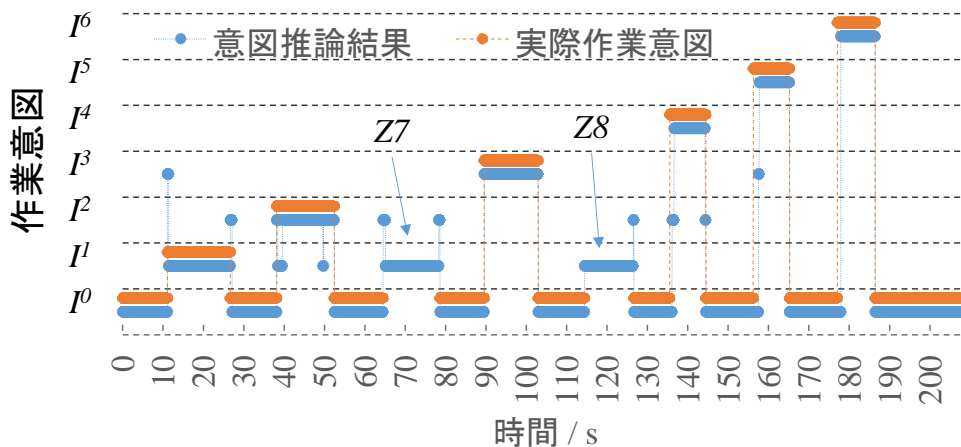


図 3.14 掃除意図推論結果

リアルタイムに推論した相対近似度を図 3.15 に示す. Z1 に掃除する時より、Z7 と Z8 に掃除する時 λ_1 が下がり、 λ_2 と λ_3 が上がる. この結果より、相対近似

度が作業動作と知識動作の相似程度を表せることがわかる。実際の状況には人間の作業意図は連続な特徴がある。相対近似度はこの特徴に反応できる。

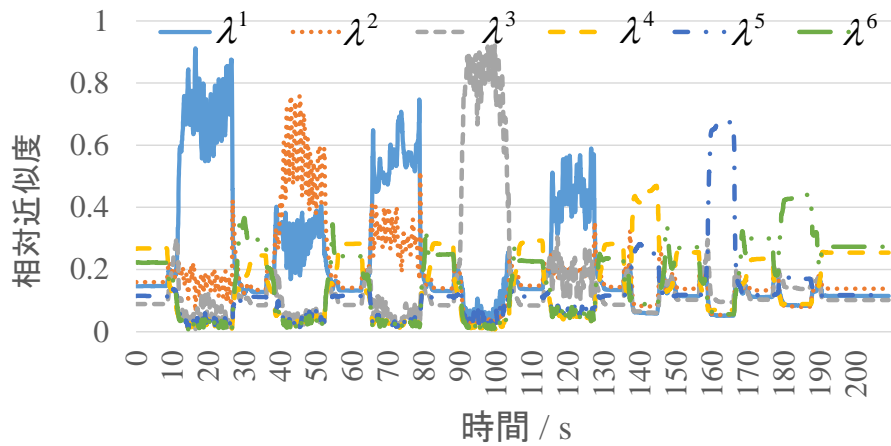


図 3.15 第 1 回掃除作業実験の相対近似度

考察

有限な作業意図推論ルールで、空間に連続的な作業の作業意図を推論するために、作業意図の相対近似度を提案した。この実験には、空間に連続的な生活作業の掃除作業を例として、掃除意図の相対近似度がリアルタイムの作業動作と作業意図推論知識ベースの知識との近似性を表示させることを検証しました。

3.6 結言

本章では、上半身作業動作により生活作業意図推論法を説明した。自立生活作業意図の概念について、作業意図が作業種類と作業内容の2つの部分の構造を述べた。生活作業意図知識ベースの構築について、第2章で説明した作業動作特徴抽出方法を用いて、作業意図推論言語ルールによる知識の抽出法と知識の定式化、言語変数の定量化方法を説明した。構築した自立生活作業意図推論知識ベースにより、距離型ファジィ推論法に基づいた作業意図の推論法を提案した。作業意図推論法の入力リアルタイムで抽出する被支援者上半身作業動作の特徴である。作業意図推論法の出力は、認識した作業種類が作業意図推論知識ベース中の番号 Z の作業意図 I^Z と、作業意図推論知識ベース中の各作業意図、実際の作業意図の相対近似度 $\lambda^l (l=1, 2, 3 \dots n)$ である。最後に、掃除作業意図の推論実験を行った、実験の結果により、作業意図推論法の有効性を検討した。次の章では、作業意図推論法の出力作業意図 I^Z と作業意図の近似度 $\lambda^l (l=1, 2, 3 \dots n)$ を利用して、ロボットの作業支援動作の計画法を説明する。

参考文献

1. 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.
2. 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.
3. Y.L.Jiang, S.Y.Wang, K. Ishida, T.Ando and M.G. Fujie, "Directional Intention Identification for Running Control of an Omni-directional Walker," Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.14, No.7, pp.784-792, 2010.
4. E.H.Mamdani: Applications of Fuzzy Algorithms or Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.1212, No.12 pp 158-1588
5. T.Takagi and M.Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transation on SMC, Vol.15, No.1, pp.116-132.
6. 瀋博, 王碩玉, 上半身動作による日常作業の意図認識法, 第33回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2015AC2A1-08, 東京, 2015年11月30日.
7. B.Shen, S.Y. Wang, "An Independent Life Support Robot for the Lower-Limb Handicapped and Elderly, Task-Intention-Identification and Assistive-Motion-Planning Algorithm". 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2015), pp.1169-1176, December, 2015.
8. B.Shen, S.Y. Wang, Real Time Identification of User's Activity of Daily Life by Distance Type Fuzzy Reasoning Method. International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 10th ICICIC, Dalian, September, 2015.

第4章 自立生活支援ロボット支援動作の計画法

4.1 緒言

第3章では、個人の上半身作業動作を抽出し、さらに作業意図認識知識ベースを構築し、作業者の作業意図の認識方法について述べた。実験において、異なる作業意図推論効果を示した。実際にロボットによる下肢障害者の生活作業支援を行うために、下肢障害者の作業意図推論結果より、作業支援動作の計画をするが必要である。

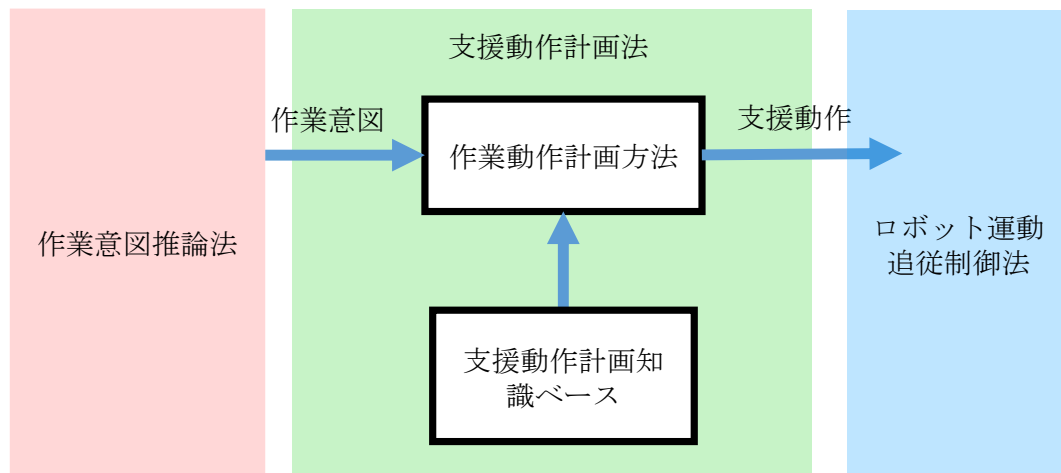


図 4.1 支援動作計画法のブロック線図

支援動作は、下肢障害者が行っている作業を支援するため、自立生活支援ロボットの動作である。自立生活支援ロボットは、オムにホイールを用いて平面の上を全方向移動できる。また、椅子下に昇降機関があるので、昇降動作も行える。全方向移動、回転と昇降動作を組み合わせると、下肢障害者に様々な日常生活作業を支援できるようになる。具体的な作業内容からロボットの支援動作を計画するため、まず、ロボットの構造より、行える動作を分解して、自立生活支援ロボットの基本動作を検討する。次に、人間の様々な日常生活作業の支援動作知識を抽出し、定式化、定量化して、作業支援動作計画知識ベースを構築する。最後に、自立生活における下肢障害者に様々な作業を支援するロボットの支援動作計画法を提案して、実験により検証する。

4.2 自立生活支援ロボットの動作分解

日常生活において、自立生活支援ロボットで下肢障害者が喪失した下肢の運動機能を補助すると、下肢障害者の生活がある程度、便利になる。健常者の下肢運動機能には、全方向移動や立つ、座るなど様々な機能がある。健康者の移動機能を参考にして、自立生活支援における、補助必要な移動機能は全方向の移動、回転移動と上半身位置の上下移動である。下肢障害者にこの3つ基本動作を補助するために、本研究室が開発した自立生活支援ロボット3号機は図4.2(a)の W_1 , W_2 , W_3 のように、3つのオムニホイールを設ける。ロボットの各オムニホイールの速度を調整して下肢障がい者を全方向へ移動支援することが可能になる。また、椅子の下に昇降機関を設けているので、利用者の上半身高さを調整することもできる。本節は、自立生活支援ロボットの機体座標系を構築して、自立生活支援ロボットの基本動作を説明する。

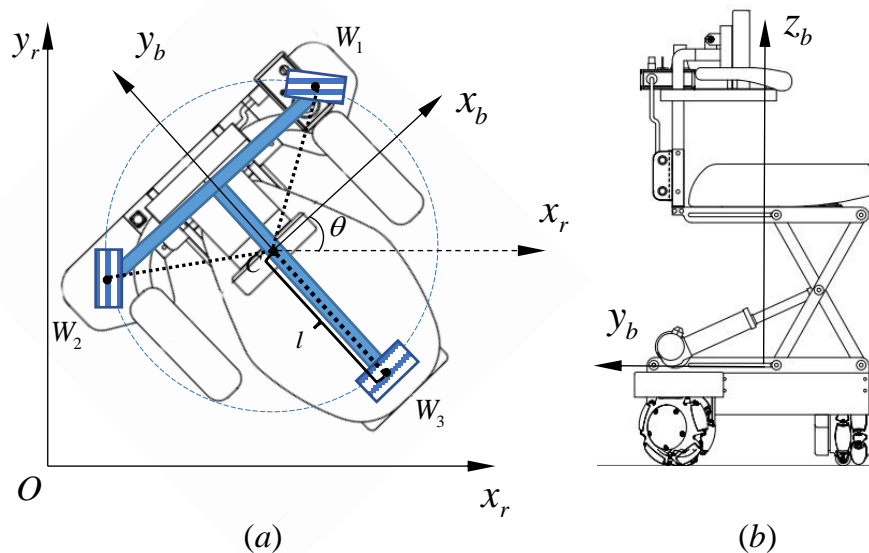


図4.2 自立生活支援ロボットの構造

自立生活支援ロボットを2次元モデル化し、機体座標系が図4.2(a)の $C-x_b y_b$

に示す. 図 4.2(a)において, $O-x_r, y_r$ は参考座標系である. 三角型のオムニホイール構造により, 自立生活支援ロボットの平面運動動作は, 6つの基本動作に分けられる. 図 4.3 に基本動作が示す.

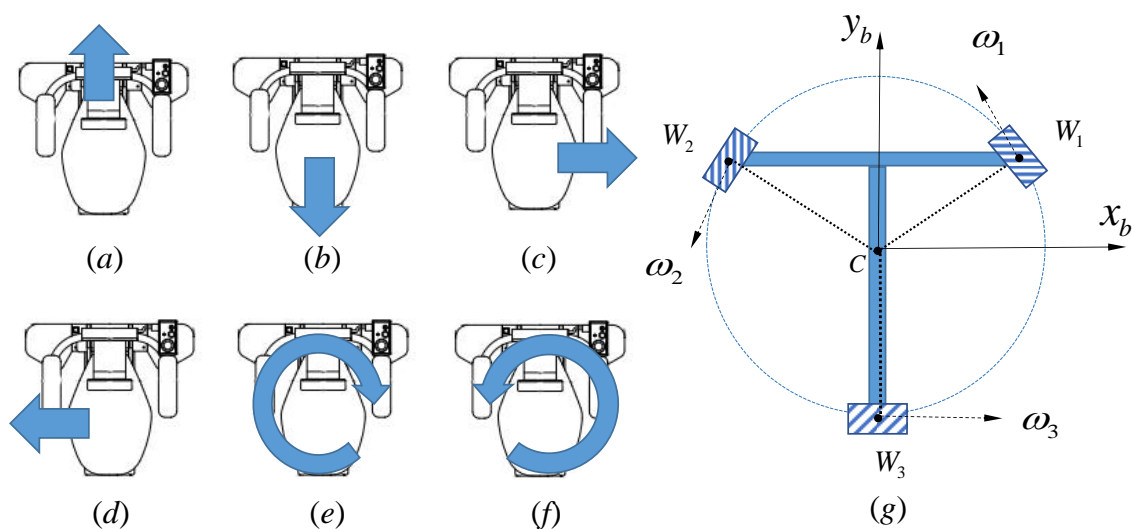


図 4.3 自立生活支援ロボットの平面運動動作

図 4.3 の (a)~(f) は前に進む (m_1), 後退する (m_2), 右に進む (m_3), 左に進む (m_4), 右に回る (m_5) と左に回る (m_6) 6つ基本動作である. 図 4.3 の (g) において, $C-x_b, y_b$ はロボットの機体座標系, W_1, W_2, W_3 はオムニホイールの記号で, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ はオムニホイールの回転速度である. 回転速度の正方向は図 4.3(g)の矢印のように示す. 図 4.3 に示すモデルにより, 6つの基本動作とロボットの車輪の関係を下に示す.

- (1) 前に進む動作(m_1)の条件は $\omega_1 > 0, \omega_2 = -\omega_1, \omega_3 = 0$;
- (2) 後退する動作(m_2)の条件は $\omega_1 < 0, \omega_2 = -\omega_1, \omega_3 = 0$;
- (3) 右に進む動作(m_3)の条件は $W_1 < 0, W_2 = -W_1, W_3 = -2W_1$;
- (4) 左に進む動作(m_4)の条件は $\omega_1 > 0, \omega_2 = -\omega_1, \omega_3 = -2\omega_1$;

(5) 左に回る動作(m_5)の条件は; $\omega_1 > 0, \omega_1 = \omega_2 = \omega_3$;

(6) 右に回る動作(m_6)の条件は; $\omega_1 < 0, \omega_1 = \omega_2 = \omega_3$

以上の関係が成立する条件として、オムニホイールと地面は滑らない。

下肢障害者の作業空間を広げるため、自立生活支援ロボットの椅子の下に昇降機構を設けている。被支援者は、高い所に作業意図がある場合に、適切な高さに上半身を上げれば、作業内容を安全に行うことが可能になる。

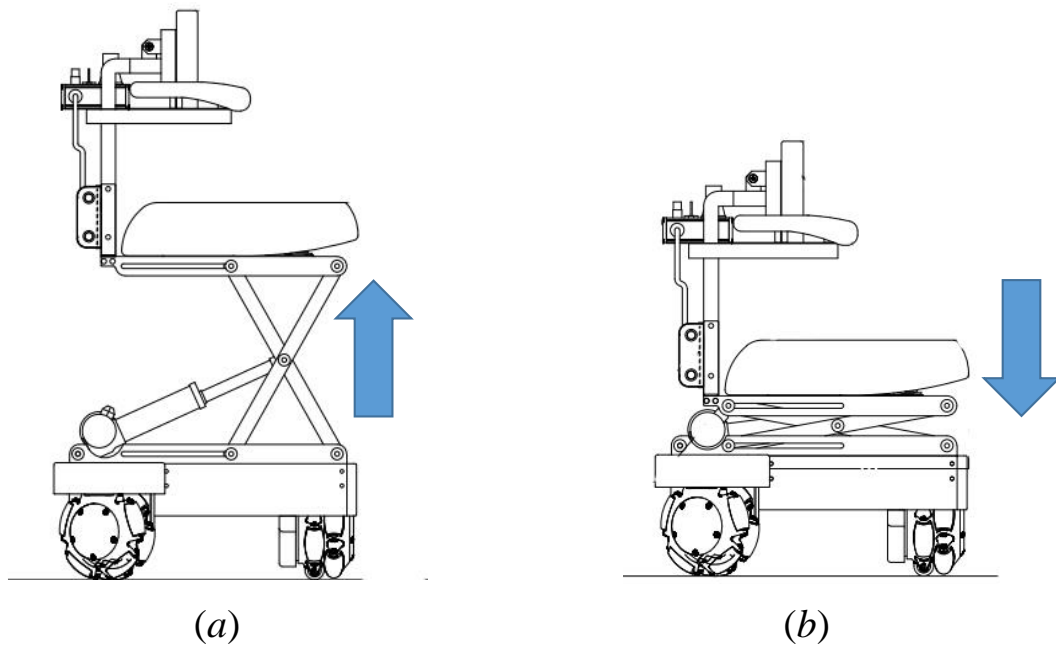


図 4.4 自立生活支援ロボットの昇降動作

図 4.4 において、(a)は高さを上げる動作(m_7)で、(b)は高さを下げる動作(m_8)である。高い所の物を取る場合や野菜を切る場合などに、安全を考え視線を広くとるために、人間は上半身が高い姿勢になりたいことがある。その場合に、高さを上げる動作(m_7)を適切に行うことが必要になる。移乗するや地面の物を拾う場合に、上半身を低い高さに調整することも必要である。その場合にロボットの椅子が下がる動作(m_8)は必要になる。自立生活支援ロボットのイスの下にワイヤーポテンショメータが設置しているため、昇降機構で位置決め制御することができる。

自立生活支援ロボットの基本動作8つを表4.1にまとめる。

表 4.1 自立生活支援ロボットの基本動作

| 基本動作 | 方向性 | 記号 |
|-------|--------|-------|
| 縦軸に移動 | 前に進む動作 | m_1 |
| | 後退する動作 | m_2 |
| 横軸に移動 | 右に進む動作 | m_3 |
| | 左に進む動作 | m_4 |
| 回転する | 左に回る動作 | m_5 |
| | 右に回る動作 | m_6 |
| 昇降する | 上がる | m_7 |
| | 下がる | m_8 |
| 静止 | | m_0 |

表 4.1 に自立生活支援ロボットの基本動作 8 つを示した。ロボットの支援動作を計画するために、ロボットの動ける動作を基本動作に分解すれば、ロボットの任意動作 M は次の式のように基本動作の線型結合で表示される。

$$M = a_1 m_1 + a_2 m_2 + a_3 m_3 + a_4 m_4 + a_5 m_5 + a_6 m_6 + a_7 m_7 + a_8 m_8 \quad (4.1)$$

基本動作 8 つが線型独立ではないが、ロボット支援動作ルールを構築することが理解しやすいため、8 つを選択した。基本動作 8 つ以外には、支援動作を表示しやすいために、静止動作 m_0 を加える。そして、ロボット動作の計画は各基本動作の重みを計算することになる。次に、第 2 章で推論した作業意図によりロボット支援動作計画法を説明する。

4.3 自立生活支援ロボットの作業支援動作計画法

介護士は、被介護者の意図が分かれば、通常では被介護者に支援してあげる方法が2つある。第1の方法は介護士が直感的に被介護者に代わって、被介護者の意図を実現することである。この介護方法は重度の肢体不自由者に適合している。第2の方法は、介護士が被介護者を支援して、被介護者が自分自身で意図作業などを行うことである。この介護方法は、第1の方法に比べ、一部の肢体に障害がある軽度肢体不自由者に合っている。本研究は、自立生活支援ロボットで下肢障害者の下肢機能を補助して、下肢障害者の生活作業を支援することで、第2の方法のように支援を行う。第2方法と同じように、被介護者の意図により、支援動作を計画して行うことが必要である。

第3章には、下肢障害者の上半身作業動作により、作業意図の推論方法を提案して、ロボットがリアルタイムで被支援者の日常生活作業意図を推論できるようになった。この節では、下肢障害者の作業意図に基づいて、自立生活支援ロボットの支援動作計画法を提案する。具体的には、人間の支援動作計画知識を言語ルールで抽出して、言語ルールを定式化および定量化して、作業意図情報に基づいて、適切な作業支援動作を計画する。さらに、言語ルールを利用して、人間の作業支援常識からロボットの作業意図支援動作計画知識を抽出する。

4.3.1 言語ルールによる支援動作計画知識の抽出

人間は環境情報に基づいて、他人の意図を利用して、支援動作を計画し、適切な支援をすることができる。例えば、被介護者は前にあるゴミを掃除すると、介護者は自然に車いすを押して、被介護者を前にゆっくりと運ぶ。下肢障害者を前にゆっくりと運ぶことは、介護者が被介護者の意図から計画する支援動作である。介護者が支援動作を計画することは、支援する常識を用いて自然に適切な動きを得る過程である。この過程には、介護者の支援動作の計画知識は被支援者の作業意図と関係する支援動作常識である。被支援者の作業意図と適切な支援動作との関係が常識として、人間の言語ルールで表示できる。この項では、掃除作業の支援を例をとって、言語ルールで支援動作計画知識を抽出する方法を説明する。

第 3.3.1 項の内容によって、掃除作業を行う時に、作業者には表 4.2 に示す 6 つの基本的な作業意図がある。

表 4.2 掃除作業意図

| 記号 | 作業意図 |
|-------|--------------|
| I^1 | 前方のゴミを掃除したい |
| I^2 | 左前方のゴミを掃除したい |
| I^3 | 右前方のゴミを掃除したい |
| I^4 | 後退したい |
| I^5 | 左回転したい |
| I^6 | 右回転したい |

作業支援の常識に基づいて、以上の掃除作業意図と支援動作の関係は、言語ルールで表 4.3 に示す。

表 4.3 掃除作業支援動作計画の言語ルール

ルール 1：もし被支援者の作業意図は掃除作業であり、掃除方向が前である (I^1) ならば、ロボットの支援動作は前に進む M^1 。

ルール 2: もし作業者の作業意図は掃除作業であり, 掃除方向が左である(I^2)ならば, ロボットの支援動作は左に回転する M^2 .

ルール 3: もし作業者の作業意図は掃除作業であり, 掃除方向が右である(I^3)ならば, ロボットの支援動作は右に回転する M^3 .

ルール 4: もし作業者の作業意図は掃除作業であり, 後退したい(I^4)ならば, ロボットの支援動作は後退する M^4 .

ルール 5: もし作業者の作業意図は掃除作業であり, 左回転したい(I^5)になれば, ロボットの支援動作は左に回転する M^5 .

ルール 6: もし作業者の作業意図は掃除作業であり, 右回転したい(I^6)になれば, ロボットの支援動作は右に回転する M^6 .

以上は, 下肢障害者が掃除作業支援する場合に, 介護者の支援動作常識を抽出した掃除作業支援動作計画の言語ルールである.

他の作業意図が増える場合には, 表 4.3 と同様に言語ルールを加えて, 作業意図と支援動作の関係が表示される. 例えば, 被支援者の作業意図は前に荷物を運ぶになると, 作業動作の常識を抽出して, ルール 7 のように作業動作計画の言語ルールを作る.

ルール 7: もし被支援者の作業意図は前に荷物を運ぶ(I^7)ならば,
ロボットの支援動作は右に回転する M^7 .

4.3.2 支援動作計画知識の定式化と定量化

表 4.3 で抽出した言語ルールを定式化して、表 4.4 にプロダクションルールを示す。

表 4.4 支援動作計画のプロダクションルール

$$\text{Rule}^1: \quad \text{IF } I = I^1, \quad \text{THEN } M = M^1$$

$$\text{Rule}^2: \quad \text{IF } I = I^2, \quad \text{THEN } M = M^2$$

$$\text{Rule}^3: \quad \text{IF } I = I^3, \quad \text{THEN } M = M^3$$

$$\text{Rule}^4: \quad \text{IF } I = I^4, \quad \text{THEN } M = M^4$$

$$\text{Rule}^5: \quad \text{IF } I = I^5, \quad \text{THEN } M = M^5$$

$$\text{Rule}^6: \quad \text{IF } I = I^6, \quad \text{THEN } M = M^6$$

ここで、前件部の変数には被支援者の作業意図が 1 つあり、推論した作業意図の作業種類に対応する I^1 , I^2 , I^3 , I^4 , I^5 , I^6 , 及び M^1 , M^2 , M^3 , M^4 , M^5 , M^6 は言語ルールの前件部と後件部に対応した言語変数である。前件部 I は推論した被支援者の作業意図を示している。後件部は自立生活支援ロボットの支援動作を示している。同様にして、前に荷物を運ぶ意図の支援動作計画ルールを次に示す。

$$\text{Rule}^7: \quad \text{IF } I = I^7, \quad \text{THEN } M = M^7$$

また、安全を確保するために、停止する意図 I^0 の場合に、ロボットの動作を決めるルールを次に示す。

$$\text{Rule}^0: \quad \text{IF } I = I^0, \quad \text{THEN } M = M^0$$

支援動作計画知識を利用するために、プロダクションルールを定量化することが必要である。支援動作計画のプロダクションルールの前件部は作業意図推論の結果であり、後件部は支援動作である。ロボットが支援動作を理解するために、後件部を定量化する必要がある。支援動作はロボットが行う動作であるので、ロボットの運動機能に基づいて支援動作計画をする。第 4.2 節に、自立生活支援ロボットの動作を 8 つの基本動作に分解した。動作の方向性を考慮して、8 つの

基本動作は線型従属であるが、ロボットの任意動作が8つの基本動作の線型結合として表示することもできる。そのため、まず、8つの基本動作を定量化して、支援動作は基本動作の線型結合で表示すると、支援動作の定量化ができる。

表 4.5 ロボット基本動作の定量化

| 基本動作 | 定量 |
|-------|-----------------|
| m_1 | $1m/s$ |
| m_2 | $-1m/s$ |
| m_3 | $1m/s$ |
| m_4 | $-1m/s$ |
| m_5 | $1\cdot rad/s$ |
| m_6 | $-1\cdot rad/s$ |
| m_7 | / |
| m_8 | / |
| m_0 | $0m/s$ |

ロボットの8つの基本動作(m_1, m_2, \dots, m_8)の定量化結果を表4.5に示す。動作 m_7 と m_8 は昇降動作であり、昇降機関の設計によって等速運動である。速度が調整できないため、動作 m_7 と m_8 の定量化の必要はない。動作 m_0 はロボットの静止状態であり、8つの基本動作の線型結合で表示できる。安全性を考慮して、被支援者のフィードバックにより、支援動作知識ルールの後件部は基本動作の線型結合で次式のように表示される。

$$M^1=0.055 m_1 ; M^2=0.1 m_5 ; M^3=0.1 m_6 ;$$

$$M^4=0.055 m_2 ; M^5=0.1 m_5 ; M^6=0.1 m_6 ;$$

同様に、支援動作計画ルールが増えると、支援常識に基づいて支援動作を定量化する。

$$M^7=0.02 m_1 ; \quad M^0=m_0 ;$$

後件部の言語変数は式 4.2 のように、8つ基本動作の線型結合で表示できる。

$$\begin{bmatrix} M^0 \\ M^1 \\ M^2 \\ M^3 \\ M^4 \\ M^5 \\ M^6 \\ M^7 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.055 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.055 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \vdots & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m^0 \\ m^1 \\ m^2 \\ m^3 \\ m^4 \\ m^5 \\ m^6 \\ m^7 \\ m^8 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

実際の作業支援をする時に、各支援動作のパラメータは被支援者の感覚により、適切な値に調整できる。

4.3.3 支援動作の計画

第3.2節に説明したように、作業意図は作業種類と作業内容で構築する。作業により関連する作業意図のグループを決める。同じ作業種類での作業意図でも、作業内容によっては関連性が異なる。作業内容には作業意図の方向性が含まれる。作業内容の方向性により、支援動作の計画では2つの場合を検討する。

Case1：作業意図の方向性は非連続である。例えば、高い所の物を取りたい場合に、上に上がるは1つの方向だけである。適当な高さになると、被支援者は自然に物を取る動作を行う。物を取るまでずっと被支援者を上に上げる動作は適切な支援動作である。

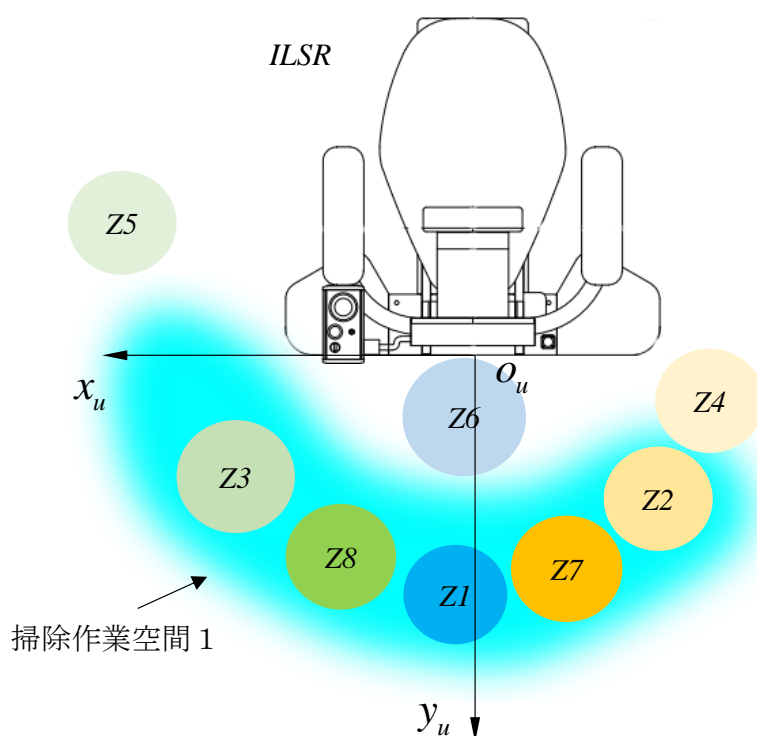


図 4.5 掃除作業の作業空間

Case2：作業内容の方向性は連続である。例えば、掃除作業意図の I^1 , I^2 , I^3 は図4.5の $Z1$ と $Z2$, $Z3$ に対応するが、作業空間(掃除作業空間1)が連続的であるから、 $Z1$ と $Z2$ の間や $Z1$ と $Z3$ の間などにあるゴミを掃除する状況はよくある。ただし、連続的な作業意図推論知識ベースを構築することが困難である。そ

のため、限りがある作業意図情報に基づいて支援動作を計画することが必要である。

2つ場合に対応した支援動作計画法が、次の Step 1,2 からなる。

Step1: 作業意図の種類 F により、同じ作業種類で関連する支援動作計画ルールのグループを決める。

作業意図 F と同じ作業種類で関連する支援動作計画ルールは $G^z\{Rule^{z-m} \cdots Rule^z \cdots Rule^{z+n}\}$ であり、 l 個($l=n+m+1$)である。

例えば、掃除作業の場合に、 I^1, I^2, I^3 は連続な作業空間の3つ特徴作業動作であるので、関連の作業意図である。そのため、作業意図の推論結果が I^1, I^2, I^3 の任意意図ならば、支援動作計画知識の $G^1\{Rule^1, Rule^2, Rule^3\}, G^2\{Rule^1, Rule^2, Rule^3\}, G^3\{Rule^1, Rule^2, Rule^3\}$ は、支援動作の計画ルールグループになる。しかし、高い所の物を取る意図の支援動作を計画すると、支援動作計画ルールと関連するルールは、それ自身だけである。したがって、高い所の物を取る意図の支援動作に関連する支援動作計画グループは $G^7\{Rule^7\}$ である。

Step2: 関連支援動作計画ルールに基づいて、作業意図推論法の出力相対近似度 $\{\lambda^{z-m} \cdots \lambda^z \cdots \lambda^{z+n}\}$ ($l=n+m+1$) により、式 4.3 に示すように、ロボットの支援動作を計画する。

$$M = \frac{\sum_{i=z-m}^{z+n} M^i \lambda^i}{\sum_{i=z-m}^{z+n} \lambda^i} \quad (4.3)$$

関連する作業意図の相対近似度の重み付き平均値で、支援動作の計画をすることができるようになる。距離型ファジィ推論[1]に基づいて、推論の結果は合成定理により、式 4.4 で推論結果を求める。

$$M = \frac{\sum_{i=z-m}^{z+n} \left(M^i \prod_{j=z-m, j \neq i}^{z+n} d_j \right)}{\sum_{i=z-m}^{z+n} \prod_{j=z-m, j \neq i}^{z+n} d_j} \quad (4.4)$$

計算したファジィ距離 $\{d_{z-m}, \cdots, d_z, d_{z+n}\}$ は実際の物理意味がないので、相対近

似度の式に基づいて、作業意図の近似程度を表現できる値になる。しかし、式 4.3 と式 4.4 の計算結果は相同である。

証明：説明しやすいため、作業意図の支援動作計画グループは式(4.5)に定義する。

$$G^l \{ Rule^1, Rule^2 \cdots Rule^l \cdots Rule^m \} \quad (4.5)$$

相対近似度の定義式 3.9 により、次の等式を定義する。

$$D = \sum_{i=1}^m \prod_{j=1, j \neq i}^m d_j \quad (4.6)$$

$$\pi = \prod_{j=1}^m d_j \quad (4.7)$$

毎回、作業意図推論結果に対する、 $\{d_1, \cdots, d_l, \cdots, d_n\}$ は定数であるので、 D と π は定数である。したがって、グループ G^l 内の各ルール l の相対近似度は式 4.8 になる。

$$\lambda^l = \frac{\pi}{d_l D} \quad l = 1, \cdots, m \quad (4.8)$$

式 4.8 により、式 4.9 を得られる。

$$d_l = \frac{\pi}{\lambda^l D} \quad l = 1, \cdots, m \quad (4.9)$$

したがって、距離型ファジィ推論の推論結果計算式(4.4)により、支援動作計画をする時に各支援動作の重み μ_l は式 4.10 になる。

$$\mu_l = \frac{\prod_{j=1, j \neq l}^m d_j}{\sum_{i=1}^m \prod_{j=1, j \neq i}^m d_j} \quad (4.10)$$

式 4.10 に式 4.9 を代入することにより、各支援動作の重み μ_l は式 4.11 になる。

$$\mu_l = \frac{\prod_{j=1, j \neq l}^m \frac{1}{\lambda^j}}{\sum_{i=1}^m \prod_{j=1, j \neq i}^m \frac{1}{\lambda^j}} \quad (4.11)$$

G^l に対して、相対近似度 $\{\lambda^1, \dots, \lambda^l, \dots, \lambda^m\}$ は定数であるので、次の式を定義する。

$$\pi_\lambda = \prod_{j=1}^m \frac{1}{\lambda^j} \quad (4.12)$$

式 4.12 に式 4.11 を代入することにより、各支援動作の重み μ_l は式 4.13 になる。

$$\mu_l = \frac{\lambda^l \pi_\lambda}{\sum_{i=1}^m \lambda^i \pi_\lambda} = \frac{\lambda^l}{\sum_{i=1}^m \lambda^i} \quad (4.13)$$

したがって、式 4.13 と式 4.10 を式 4.4 に代入すると、作業動作の計画計算は式 4.3 のようになる。(証明終)

作業支援動作の計画方法を説明した。次節では実験により、作業支援動作の有効性を検証する。

4.4 実験による支援動作計画法の検証

支援動作計画法の有効性を検証するために、掃除作業を例として、生活作業支援実験を行う。日常生活で、掃除作業は最もよく見かける日常生活作業の一つである。下肢障害者は移動能力が低下しているため、掃除作業を行うことが困難である。したがって、掃除作業を作業支援実験の内容としてロボット支援動作計画法の有効性を検証する[2,3]。

4.4.1 実験内容

掃除作業の内容は、図 4.6 に示す作業場所で地面に落ちている紙切れと紙ゴミを全て片づけることである。地面に落ちている紙切れと紙ボールのサイズは異なるため、別々に掃除機と箒で掃除する。被験者は自立生活支援ロボットに乗って、自分の掃除習慣動作を行い、地面を片づける。被験者は 20 代 1 名であり、実験を 8 回行った。

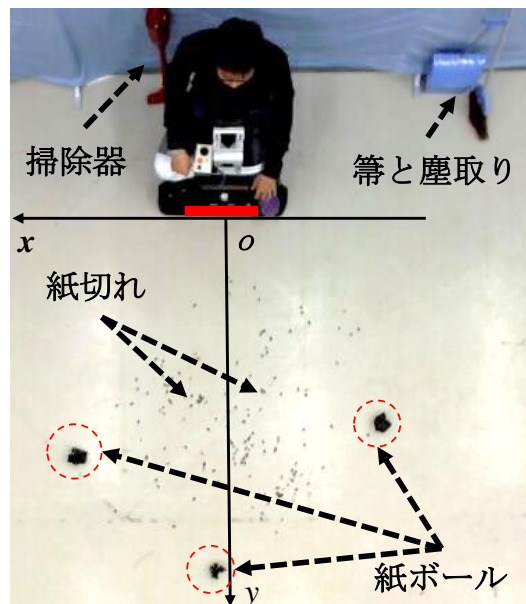


図 4.6 掃除作業実験場所

4.4.2 実験設定

掃除作業内容によって、この実験では表 4.6 のように基本作業意図を 6 つ選択

した．掃除作業を行う前に，予備実験で第3章に説明したように，掃除作業意図推論知識ベースを構築した．

表 4.6 掃除作業意図

| 番号 | 記号 | 作業意図 |
|----|-------|-------------|
| 1 | I^1 | 掃除機を前方向に掛ける |
| 2 | I^2 | 掃除機を左方向に掛ける |
| 3 | I^3 | 掃除機を右方向に掛ける |
| 4 | I^4 | 箒で前を片づける |
| 5 | I^5 | 箒で左を片づける |
| 6 | I^6 | 箒で右を片づける |

構築した作業意図推論知識ベースに基づいて，掃除作業意図を推論することができるようになる．ここでは，具体的に推論した作業意図情報により，掃除作業におけるロボットの支援動作の計画経過を述べる．

まず，人間が他人を支援する常識により，作業支援動作知識ベースを構築する．簡略的に掃除作業支援動作計画の言語ルールは表 4.7 に表す．

表 4.7 掃除作業支援動作計画の言語ルール

ルール 1:もし被支援者の作業意図は I^1 ならば，支援動作は前に進む M^1 ．

ルール 2:もし被支援者の作業意図は I^2 ならば，支援動作は左に回転する M^2 ．

ルール 3:もし被支援者の作業意図は I^3 ならば，支援動作は右に回転する M^3 ．

ルール 4:もし被支援者の作業意図は I^4 ならば，支援動作は前に進む M^4 ．

ルール 5:もし被支援者の作業意図は I^5 ならば，支援動作は左に回転する M^5 ．

ルール 6:もし被支援者の作業意図は I^6 ならば，支援動作は右に回転する M^6 ．

また，安全を確保するために，停止する意図 I^0 の場合に，ロボットの動作計画ルールはルール 0 のように示す．

ルール 0:もし作業意図推論結果は I^0 ならば，支援動作は静止 M^0 である．

表 4.7 に表す支援動作計画規則は，全て人間の常識である．例えば，支援者が被支援者の前を掃除する意図が分かれば，自然に徐々に被支援者をゴミの方に向けて前に運ぶ動作を行う．ロボットで支援者のように作業支援を提供するために，支援動作計画の言語ルールを定量化することが必要である．したがって，

8 回行った実験から、被支援者の支援効果のフィードバックにより、表 4.8 に示す支援動作計画ルールを定量化する。

表 4.8 ロボット支援動作の定量化

| 支援動作 | ロボット基本動作で表示 | 定量値 |
|-------|-------------|--------------------|
| M^1 | $0.16 m_1$ | $0.16m/s$ |
| M^2 | $0.1 m_5$ | $0.1 \cdot rad/s$ |
| M^3 | $0.1 m_6$ | $-0.1 \cdot rad/s$ |
| M^4 | $0.16 m_1$ | $0.16m/s$ |
| M^5 | $0.1 m_5$ | $0.1 \cdot rad/s$ |
| M^6 | $0.1 m_6$ | $-0.1 \cdot rad/s$ |

運動速度の適切な程度は、人によって違いがある。したがって、実験の効果をを用いて、支援動作定量値を調整することが必要である。また、被支援者の安全を確保するために、ロボットの最大速度は、移動速度の絶対値が $0.30 m/s$ であり、回転速度の絶対値が $0.25 rad/s$ である。

適切な支援動作を計画するために、作業意図の関連性に基づいて、作業支援動作計画ルールをグループに分けて計画計算を行う。ルール 1 から 3 までは掃除機での作業意図であるため、次に示す関連グループになる。

$$G^1\{Rule^1, Rule^2, Rule^3\},$$

$$G^2\{Rule^1, Rule^2, Rule^3\},$$

$$G^3\{Rule^1, Rule^2, Rule^3\}$$

$$G^4\{Rule^4\},$$

$$G^5\{Rule^5\},$$

$$G^6\{Rule^6\}$$

以上で実験の設定を終え、次に実験結果を示す。

4.4.3 実験結果

掃除作業支援実験を 8 回行ったが、4 回目まではロボット支援動作の定量化のために行う。第 8 回の実験結果を図 4.7 に示す。ロボットが原点から出発し、

全体の移動経路を黒い線で示めす．青色の三角形は掃除機で掃除する移動経路，オレンジ色の三角形はジョイスティックでロボットを操作する移動経路，赤色の三角形は箒で掃除する移動経路である．また，三角形はロボット本体の向きを表す．

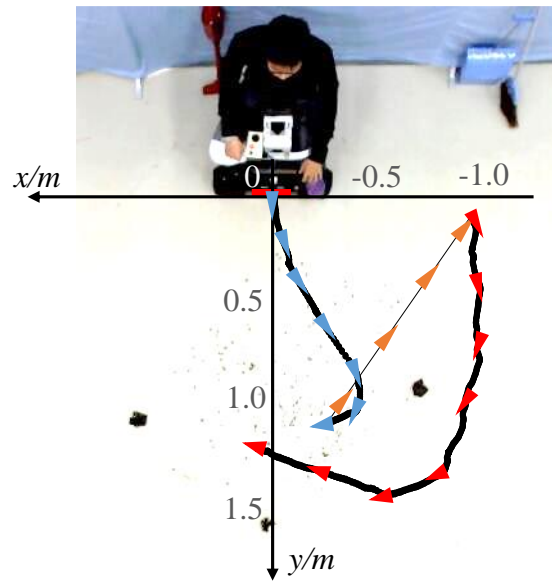


図 4.7 掃除作業支援実験にロボットの移動経路

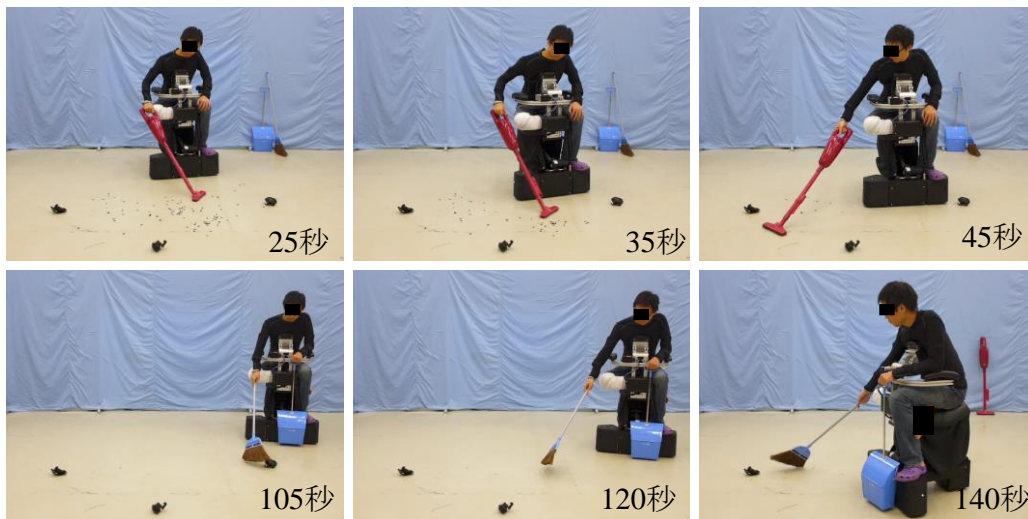


図 4.8 実験風景

実験の風景を図 4.8 に示す．被験者は 17 秒から出発した．図 4.8 では，25 秒，35 秒，45 秒，105 秒，120 秒，140 秒の動作である．被験者の動作を見ると，被

験者の掃除意図を判断できる。被験者の掃除作業意図に基づいて、直感的に支援動作が考えられる。作業意図推論法による、被験者の作業意図の推論結果を図4.9に表す。図4.8の実験風景で示す作業動作と図4.9の作業意図の推論結果を見比べ、作業意図推論法の有効性を示す。

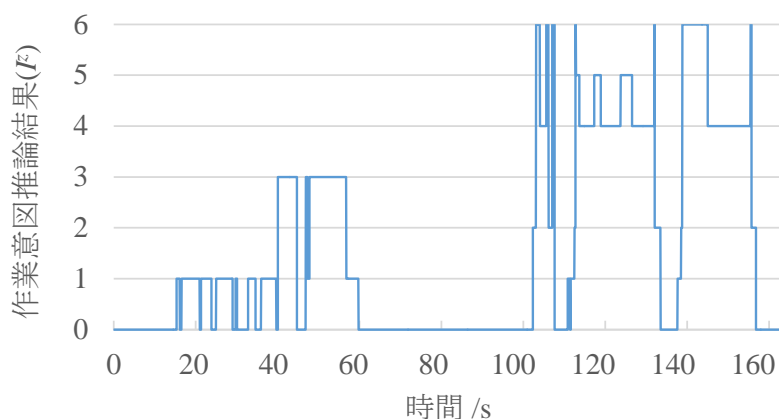


図 4.9 作業意図推論結果

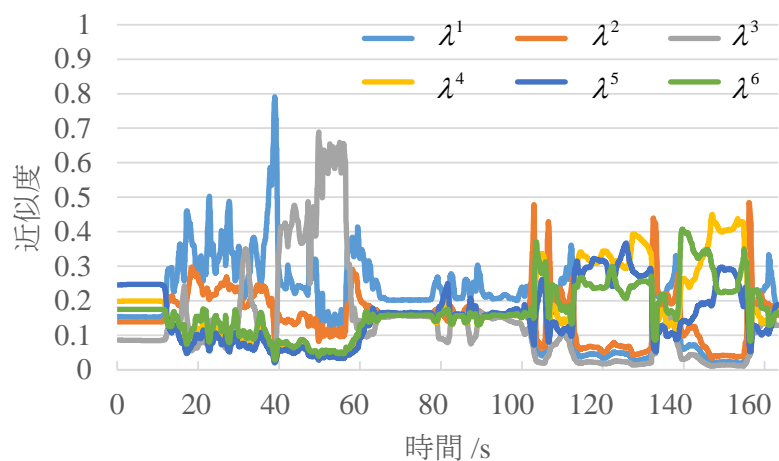


図 4.10 作業意図推論法による作業意図近似度

図4.9の作業意図推論結果は表4.5に表す作業意図のリストに対応する。推論結果 F は支援動作計画法の入力である。作業意図推論結果により、17秒から60秒までの間は掃除機で灰を片づける作業であり、約100秒から160秒までの間に、被験者が箒で大きい紙ゴミを掃除していた。それ以外は作業意図の推論結果はすべて0である。60秒から100秒までの間では、掃除動作の代わりにジョイ

スティックでロボットを操作して、掃除道具を取り換えに行っていた。式 3.9 を用いて、計算した作業意図近似度が図 4.10 である。

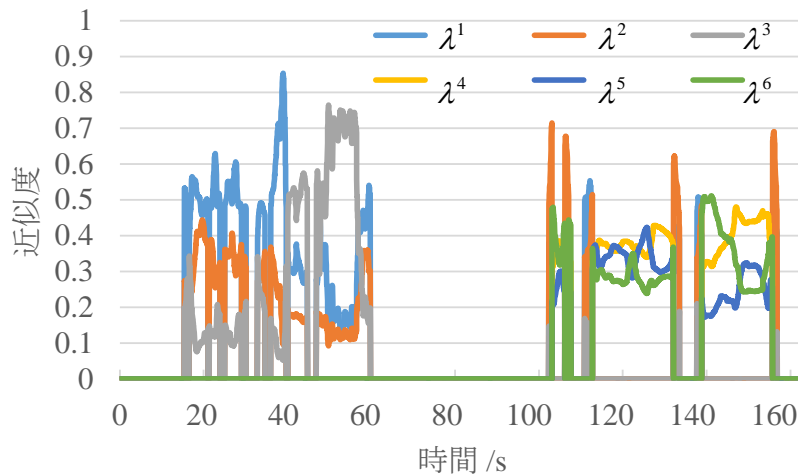


図 4.11 作業意図関連組による調整した作業意図近似度

作業意図の関連性を考慮して、作業意図の推論結果により、調整した作業意図近似度を図 4.11 に表す。調整した作業意図近似度を用いて、式 4.2 により、支援動作を求めることができる。計画結果を図 4.12 に示す。計画した支援動作を目標値として、ロボットを開ループ制御法で支援動作に追従実験を行った。実験で計測したロボットの速度は図 4.13 に示す。

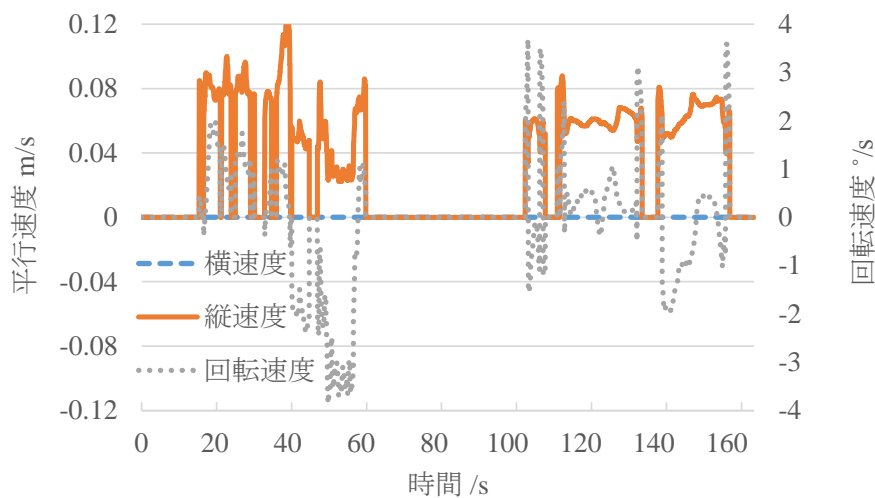


図 4.12 掃除作業支援動作の計画結果

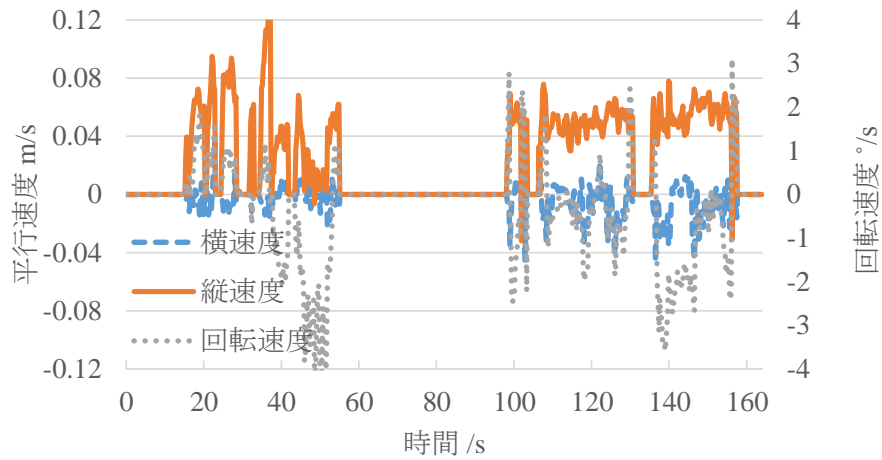


図 4.13 実験でロボットの実際速度

図 4.13 に示すロボットの動作は、計画支援動作をおおよそ追従でき、図 4.7 に示す移動経路になる。図 4.7 のロボットの移動経路を見ると、計画支援動作は適切な掃除作業支援をすることができている。しかし、実験の中に、ロボットの制御法は開ループ制御であるため、図 4.12 と図 4.13 の動きを詳しく比べると、ロボットが計画支援動作を完全に追従しているわけではないことが窺える。したがって、正確に計画した作業支援動作を追従するために、ロボットの制御法を開発することが必要である。

4.5 結言

本章では、ロボットによる作業支援を行うために、下肢障害者の作業意図推論結果により、作業支援動作の計画方法を提案した。

支援動作計画法は、人間の支援動作を行う常識に基づいて、人間の支援動作の知識を抽出し、定式化、定量化して、作業支援動作の知識ベースを構築する。作業意図の2層構造により、互いに関連する作業支援動作を関連グループにして、作業意図の相対近似度を用いて、支援動作計画法を説明した。最後に、自立生活における、掃除作業を支援する実験により、提案した支援動作計画法の有効性を実証した。

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. B.Shen, S.Y. Wang, "An Independent Life Support Robot for the Lower-Limb Handicapped and Elderly, Task-Intention-Identification and Assistive-Motion-Planning Algorithm". 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2015), pp.1169-1176, December, 2015.
3. 瀋博, 王碩玉, 上半身の動作情報による下肢障がい者の掃除作業支援法, 第15回日本生活支援工学会大会, 福祉工学シンポジウム2015, 第31回ライフサポート学会大会講演論文集(CD), 1B2-07, 福岡, 2015年9月7日-9日.

第5章 ロボット作業支援動作の運動追従制御法

5.1 緒言

第3章で、生活作業動作により、作業意図推論法を提案し、第4章で、下肢障害者の作業意図に基づいて、ロボットの支援動作計画法を提案した。しかし、第4章の掃除作業実験により、計画した支援動作に、ロボットが正確に追従することができなかった。したがって、下肢障害者の自立生活支援の実現のため、自立生活支援ロボットに計画した作業支援動作を正確に追従する制御法の開発が必要である。

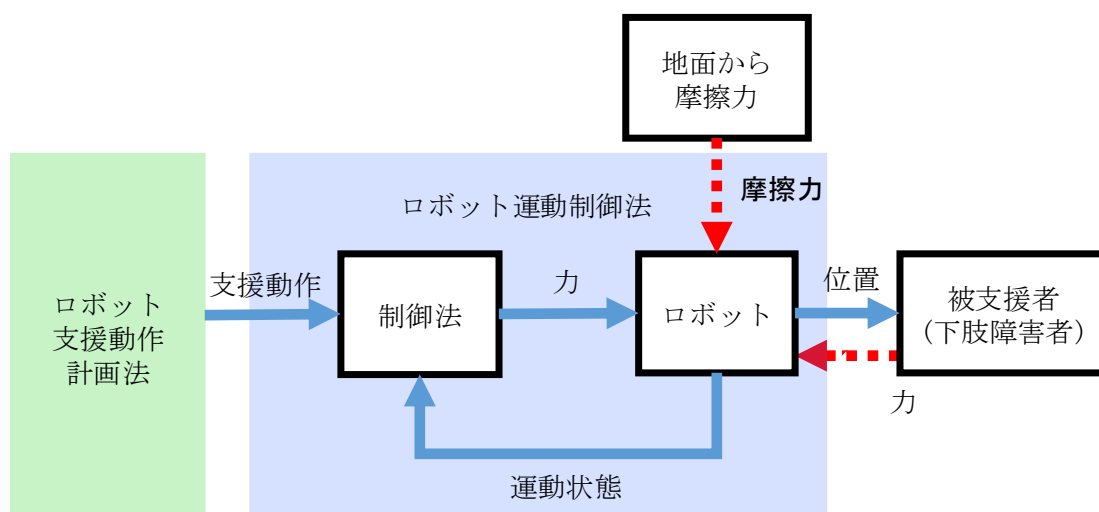


図 5.1 支援動作の追従制御法

自立生活支援ロボットの制御法を図 5.1 に示す。システムの入力は被支援者の上半身作業動作による計画した支援動作(速度、角速度、高さ)であり、出力はロボットの運動動作(速度、角速度、位置、高さ、姿勢角など)である。生活支援の現場は、普段の部屋であるため、地面の材料などがよく変化する。この原因により生じるオムニホイールが受ける摩擦が、機体の向きに対する進行方向に依存し、時変である。また、作業を行う時、被支援者は静止状態ではなく、上半身の作業動作が必要である。上半身の動きにより、人間はロボットに対し力を作用し、ロボットの作業支援動作の追従精度に悪影響を与える。以上の誤差を生じる原

因に対して，ロボットが正確に追従できる制御法が必要である．

ロボットの制御法を開発するため，本節は，まず，ロボットの運動学方程式と動力学方程式を導出する．次に，デジタル加速度制御法に基づいて，非線形時変な摩擦力に対処する制御法を提案し，制御法の安定性を示す．最後に，シミュレーションと実験により，制御法の有効性を実証する．

5.2 自立生活支援ロボットのモデル

ロボット制御システムを設計するために、ロボットの動的な挙動を表す数学モデルを作ることが必要である。ロボットのモデルに基づいて、運動制御法を開発することが可能になる。自立生活支援ロボットが、作業支援のために計画した支援動作を追従する時に、追従動作がずれる原因は被支援者の動きと地面の時变的非線形摩擦と考えられる。そこで、本節では、支援動作を正確に追従する制御法を開発するために、まず、自立生活支援ロボットの運動学と動力学方程式を導出する。

5.2.1 ロボットのモデル

座位型自立生活支援ロボットを二次元モデル化し、ロボットの重心 G の位置と中心 C の位置が同じ位置にあると単純化する。ロボットの運動学及び動力学を導出するために、座標系の設定と構造モデルを図 5.1 に示す。

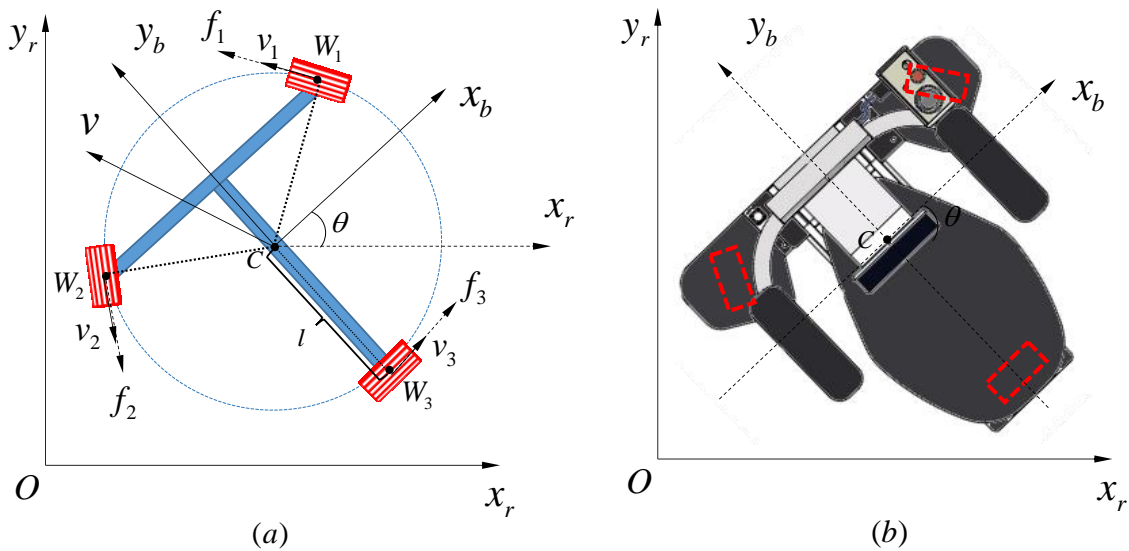


図 5.2 座位型自立生活支援ロボットの構造モデル

図 5.1 における、 $O-x_r, y_r$ は参考座標系、 $C-x_b, y_b$ は自立生活支援ロボットの機体座標系で、ロボット機体の向きに合わせて回転する。オムニホイールを表示しやすくするために、記号 $W_i (i=1, 2, 3)$ で示す。図 5.1 に示すモデルによるロボ

ットのパラメータは表 5.1 に表す.

表 5.1 座位型自立生活支援ロボットのパラメータ

| 記号 | 単位 | 物理的な意味 |
|----------|----------------------|---------------------------------|
| f_i | [N] | オムニホイール i の駆動力($i=1, 2, 3$) |
| v_i | [m/s] | オムニホイール i の速度($i=1, 2, 3$) |
| l | [m] | 中心とオムニホイールの距離 |
| v | [m/s] | ロボットの速度 |
| θ | [rad] | ロボットの姿勢角 |
| I | [kg·m ²] | ロボットの慣性モーメント |
| M | [kg] | ロボット本体の質量 |
| m | [kg] | 被支援者の質量 |

5.2.2 運動学

自立生活支援ロボットの動作を制御するために、まず、ロボットの運動状態を幾何学的に求めることが必要である。ロボットには、3つオムニホイールを用いて、全方向移動と回転動作を別々で自由的に行える。そして、このロボットの平面での運動状態は、機体座標系に表示される平行速度と回転速度である。ロボットの移動経路を求めるために、機体座標系におけるロボット運動状態と参考座標系で表示される運動状態の関係を考慮する。

ロボットのオムニホイールの移動速度 v_i の正方向を図 5.1 の矢印で示す。このモデルにおける、ロボットの中心速度と各オムニホイールの速度との関係は運動学式で次式のように示す。

$$\begin{aligned}
 v_1 &= -1/2 v_x^b + \sqrt{3}/2 v_y^b + l\dot{\theta} \\
 v_2 &= -1/2 v_x^b - \sqrt{3}/2 v_y^b + l\dot{\theta} \\
 v_3 &= v_x^b + l\dot{\theta}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

式 5.1 を整理し、次のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/2 & \sqrt{3}/2 & l \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & l \\ 1 & 0 & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

ロボットの動きを参考座標系に表示するために、機体座標系と参考座標系に表示するロボットの運動量は次式のように示す。

$$\begin{aligned} v_x^b &= v_x^r \cos \theta + v_y^r \sin \theta \\ v_y^b &= -v_x^r \sin \theta + v_y^r \cos \theta \\ \dot{\theta} &= \dot{\theta} \end{aligned} \quad (5.3)$$

式 5.3 を整理し、次のように書くことができる

$$\begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^r \\ v_y^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

式(5.2)と(5.4)により、参考座標系 $O-x_r y_r$ でロボットの運動学式を導出した。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/2 & \sqrt{3}/2 & l \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & l \\ 1 & 0 & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^r \\ v_y^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

以上で、ロボットの中心位置の運動学を導出した。次に、ロボットの動力学を導出する。しかし、支援動作は自立生活支援ロボットの機体座標系 $C-x_b y_b$ で計画するので、支援動作追従制御法は式 5.2 に基づく開発する。

5.2.3 動力学

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、重心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。機体座標系における、動力学方程式は式 5.6 になる。

$$\begin{aligned} (M+m)a_x^b &= -1/2 f_1 - 1/2 f_2 + f_3 - f_{f1} \\ (M+m)a_y^b &= \sqrt{3}/2 f_1 - \sqrt{3}/2 f_2 - f_{f2} \\ (I+I_h)\ddot{\theta} &= lf_1 + lf_2 + lf_3 - f_{f3} \end{aligned} \quad (5.6)$$

M : ロボット本体の質量, m : 被支援者の質量, I : ロボットによる慣性モーメント, I_h : 被支援者による慣性モーメント, a_x^b : 重心位置における合力の x 軸方向加速度, a_y^b : 重心位置における合力の y 軸方向加速度, $\ddot{\theta}$: ロボットの角加速度, f_{f1} , と f_{f2} , f_{f3} はロボットが受ける外力.

代数方程式 (5.6) は形式的に, 次のように書くことができる.

$$\begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I+I_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x^b \\ a_y^b \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/2 & -1/2 & 1 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ l & l & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{f1} \\ f_{f2} \\ f_{f3} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

さらに, 次の記号を用いると簡単に表すことができる.

$$M_0 \ddot{X}^b = BF - F_D \quad (5.8)$$

ここで,

$$\ddot{X}^b = [\ddot{x}^b \quad \ddot{y}^b \quad \ddot{\theta}]^T = [a_x^b \quad a_y^b \quad \ddot{\theta}]^T, \quad F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T, \quad F_f = [f_{f1} \quad f_{f2} \quad f_{f3}]^T.$$

マトリクス M_0 とマトリクス B は, 次のように定義する.

$$M_0 = \begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I+I_G \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1/2 & -1/2 & 1 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ l & l & l \end{bmatrix}$$

ただし, ベクトル \dot{X}^b は機体座標系に表示して, 自立生活支援ロボット中心 C における x 軸方向加速度, y 軸方向加速度, 角加速度のベクトルである. 動力モデル式(5.8)は, 生活支援ロボットの動力学式である. ロボットが受ける外力, f_{f1} , と f_{f2} , f_{f3} は被支援者と地面からロボットに加える力を含め, 式 5.9 のように表せる.

$$\begin{bmatrix} f_{f1} \\ f_{f2} \\ f_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{h1} \\ f_{h2} \\ f_{h3} \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} f_{w1} \\ f_{w2} \\ f_{w3} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

ここで, $f_h = [f_{h1} \quad f_{h2} \quad f_{h3}]^T$ は被支援者がされる力, $f_w = [f_{w1} \quad f_{w2} \quad f_{w3}]^T$ は地面からの摩擦力である.

5.3 デジタル加速度制御法に基づく制御法

自立生活ロボットが下肢障害者の作業を支援する時に、ロボットと被支援者が一緒に生活作業を行うシステムになる。多くの生活作業があるが、下肢障害者は自分の意志により、行いたい生活作業を決める。生活作業内容を決めた後、下肢障害の上半身が脳の制御の下で、自然的に作業動作を行うことになる。生活作業支援する際、自立生活支援ロボットが被支援者の作業意図により、適切な速度で被支援者を作業の目標位置に運ぶことを担当する。第3章と第4章で、上半身の作業動作による被支援者の作業意図の推論と支援動作計画方法を提案した。この方法により、作業支援の適切な速度が求まる。そのため、自立生活支援ロボットがまず計画した支援動作を追従することが必要である。ロボットの運動により、被支援者の脳の中に次の作業意図が生じ、最終的な作業の目標位置まで生活作業を支援することになる。例えば、掃除作業を行う時に、人間は、通常では掃除機で取れる範囲内を掃除意図により、掃除動作を行う。掃除目標である床を綺麗にした後、ゴミがある位置によって次の掃除意図が生じ、掃除動作が変わる。床がすべて綺麗になるまで、掃除作業動作はずっと継続している。このプロセスの間、生活支援ロボットは被支援者を目標位置まで、適切な速度で被支援者を運ぶタスクを担当している。そのため、ロボットと被支援者で構成する制御システムが2つの制御ループになる。1つは、生活作業の状況による被支援者の観察が、位置フィードバックとして構成する位置制御ループである。もう1つは、適切な支援動作を提供する速度制御ループである。ロボットと被支援者が構成する制御システムのブロック線図を図5.3に示す。

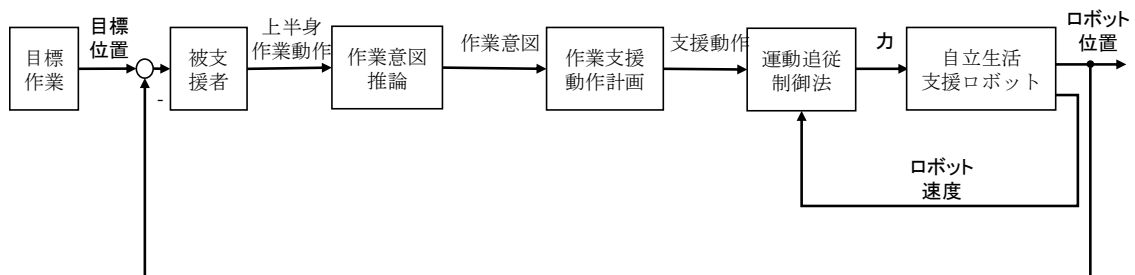


図 5.3 作業支援動作追従制御法のブロック線図

この節は支援動作を提供する速度制御ロープについて、支援動作の精確的に追従制御方法を提案する。支援動作の追従する精度に悪影響を与える原因は2つある。1つは、生活作業支援ロボットが、人間と協力して作業を行うというシステムである。作業を行う時に、被支援者はロボットに時变的に力を与える。もう1つは、オムニホイールが受ける摩擦力が機体の向きに対する進行方向に依存し、時変となる。人間と地面からの摩擦力である外力は、計画した支援動作の追従精度に悪影響を与える。支援動作の追従制御を行う時に、制御入力の中に時变的な外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この時变的な外力をキャンセルできることを発見した[1-4]。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、人間と地面からの摩擦力から生じる時变的な外力に対処するデジタル加速度制御法を提案した[5]。

5.3.1 制御則の設計

ロボットと被支援者と構成するシステムにおいて、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である[6]。外力により一瞬の変化が起こる加速度変化情報を適切に利用すれば、時变的な外力を計算できるようになる。もし、外力の変化がロボットのデジタル加速度制御システムのサンプリングより遅いならば、計算した外力を制御力に利用して、外力の悪影響をキャンセルできるようになる。この考え方からデジタル加速度制御アルゴリズムが導出される[1]。

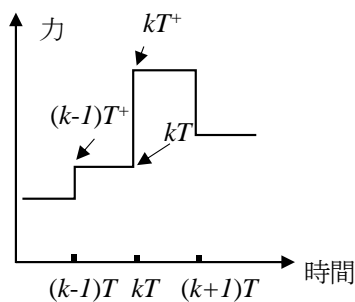


図 5.4 階段状に変化する入力

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5.4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(5.10)に示す。

$$BF[(k-1)T^+] - F_f[kT] = M_0 \ddot{X}^b[kT] \quad (5.10)$$

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になるが、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(5.11)になる。

$$BF[kT^+] - F_f[kT^+] = M_0 \ddot{X}^b[kT^+] \quad (5.11)$$

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(5.12)となる。

$$B\{F[kT^+] - F[(k-1)T^+]\} = M_0[\ddot{X}^b(kT^+) - \ddot{X}^b(kT)] \quad (5.12)$$

そして、この入力に変化した瞬間、変化している外力 $F_f[kT]$ をキャンセルできる。デジタル加速度制御法を得られる。

$$F(kT^+) = F[(k-1)T^+] + B^{-1}M_0\{[\ddot{X}_{plan}^b(kT^+) - \ddot{X}^b(kT)] + K_p[\dot{X}_{plan}^b(kT^+) - \dot{X}^b(kT)]\} \quad (5.13)$$

K_p は速度の比例偏差パラメータで、制御パラメータである。次は、制御パラメータの選び方を説明する。

デジタル加速度制御法に基づく制御系を図5.5に示す。

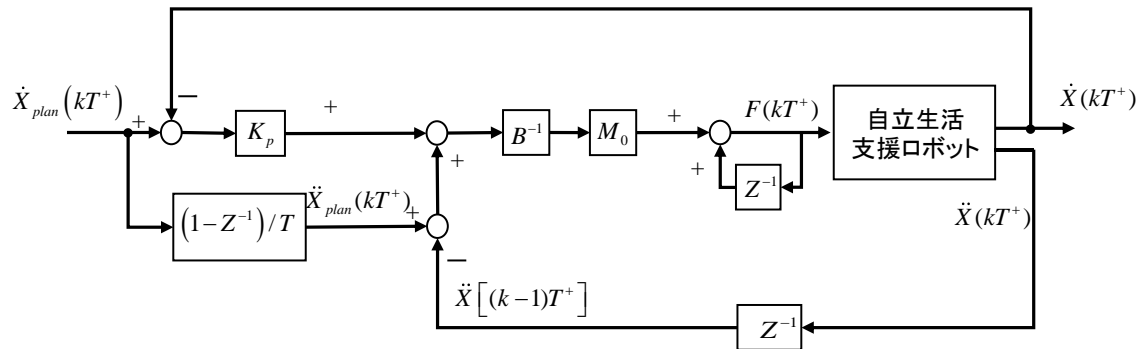


図5.5 速度ループのデジタル加速度制御系のブロック線図

5.3.2 制御パラメータの選択

システムを安定させるために、制御パラメータの有効範囲を求める。まず、計画したロボットの作業支援動作が計画目標速度 $\dot{X}_{plan}^b(kT^+)$ として、速度の追従誤差 $e(kT^+)$ を式(5.14)と定義する。

$$e(kT^+) = \dot{X}_{plan}^b(kT^+) - \dot{X}^b(kT^+) \quad (5.14)$$

ロボットの時刻 kT と kT^+ における動力学式(5.12)と(5.13)を開発した制御式(5.14)に代入して、追従誤差 $\dot{e}(kT^+)$ に関するダイナミクスは次のようになる。

$$\dot{e}(kT^+) + K_p e(kT^+) = 0 \quad (5.15)$$

小さな時間区間 $[kT^+, (k+1)T]$ の内に、次の式(5.16)が成り立つとする。

$$e[(k+1)T] \approx e(kT) + \dot{e}(kT)T \quad (5.16)$$

式(5.15)と(5.16)により式(5.17)を得る。

$$e[(k+1)T] \approx (1 - K_p T) e(kT) \quad (5.17)$$

システムを安定させるために、 $(1 - K_p T)$ の固有値が全て1より小さいことが保証される。そのため、 $K_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3})$ の有効範囲が得られる。システムの安定性が保証される。

作業支援動作の追従制御系のブロック線図は図5.6に示す。下肢障害者の生活作業支援するために、ロボットと被支援者が共通で制御システムを構成する。ロボットが被支援者に適切な支援を提供して、被支援者の目標作業を完成することがこのシステムの目標である。被支援者が目標作業の完成程度を評価して、当時の作業意図により、自然的に上半身の作業動作を行う。第3章と第4章で提案したの方法による、ロボットが被支援者の作業動作による作業意図を推論して、支援動作計画する。支援動作はロボットの移動と回転速度である。本章の提案した支援動作追従制御法を利用して、速度制御ループで計画したロボットの目標速度を追従して、目標作業を行う適切なロボットの位置に接近される。

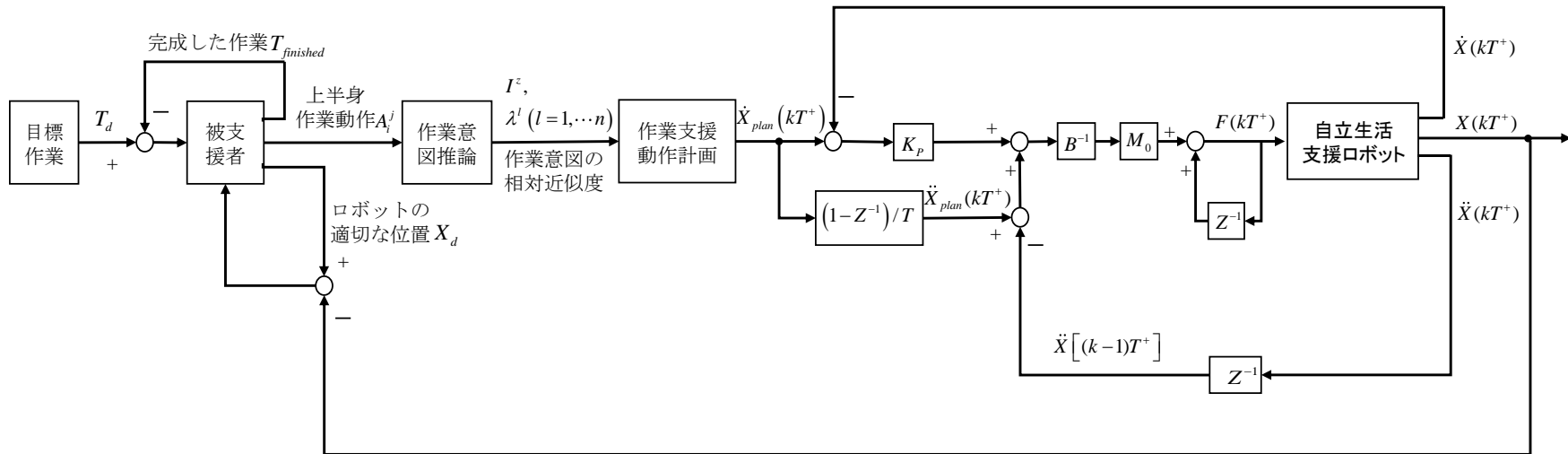


図 5.6 作業支援動作の追従制御系のブロック線図

ここで、 T_d : 目標作業、 $T_{finished}$: 完成した作業 : $A_i^j, (i=1, \dots, n, j=1, \dots, 5)$ 、 n は知識ベースの中に作業意図の種類数、 I^z : 作業意図の認識結果、 $\lambda^l (l=1, \dots, n)$: 計算した作業意図の相対近似度、 $\dot{X}_{plan}(kT^+)$: 認識した被支援者の作業意図と相対近似度による計画した作業支援動作である。運動追従制御法を用いて、自立生活支援ロボットが計画した作業支援動作を追従して、作業支援する適切な位置に移動する。ロボットの位置と被支援者の作業意図により、被支援者が作業動作を自然的に調整する。最終には、自立生活支援ロボットの支援の下に、被支援者が目標作業を行う適切な位置に着いて、目標作業 T_d を完成することが可能になる。

5.4 シミュレーションによる検討

導出した速度追従デジタル加速度制御法の有効性を検証するために、本節は、この制御法を用いて、摩擦力変化、支援者の動きに対する支援動作追従精度の向上について、有効性をシミュレーションで確かめる。シミュレーションでは、摩擦力変化と被支援者の動きにより生じる外力の有無を条件にして、ロボットに作用させる。外力には、パソコンで自動生成する乱数を用いる。各シミュレーションにおいて、表 5.2 に示すロボットのパラメータを使用する。

表 5.2 座位型自立生活支援ロボットのパラメータ

| パラメータ | 値と単位 |
|-------------|-----------------------|
| 高さ | 782mm – 1181 mm |
| 幅さ | 715 mm |
| 長さ | 642 mm |
| 質量 M | 80Kg |
| 最大荷重 m | 80Kg |
| 慣性モーメント I | 9.67Kg·m ² |

斜めに進行と斜めに進行しつつ左回転の 2 種類支援動作を行った。シミュレーションのサンプリング周期 T を 0.01s に選定する。利用した制御パラメータを表 5.3 に示す。

表 5.3 制御系のパラメータ

| パラメータ | 値と単位 |
|-------|------------------------------|
| K_p | $diag(10.3, 10.3, 10)s^{-1}$ |

5.4.1 斜めに進行する直線支援動作追従実験

基本の作業支援動作の 1 つである直線進行を考える。目標動作は式 2.24 に示す。シミュレーション結果及び考察について述べる。目標動作は式 5.18 に示す。

$$\begin{cases} v_{xd}^b(t) = 1.2 \times (1 - 0.1^t) \text{ m/s} & t < 4\text{s} \\ v_{xd}^b(t) = 1.2 \text{ m/s} & t \geq 4\text{s} \\ v_{yd}^b(t) = 2.2 \times (1 - 0.1^t) \text{ m/s} & t < 4\text{s} \\ v_{yd}^b(t) = 2.2 \text{ m/s} & t \geq 4\text{s} \end{cases} \quad (5.18)$$

$$\dot{\theta}_d = 0$$

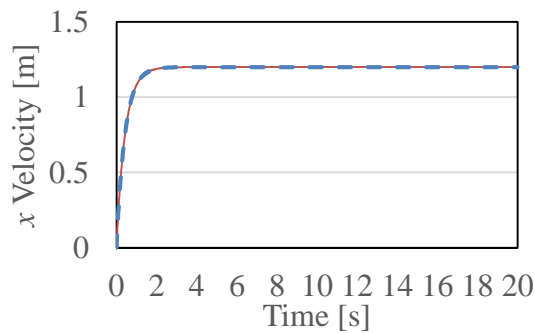
最初の位置を次式で示す.

$$x_0^b = 0 \text{ m}, y_0^b = 0 \text{ m}, \theta_0 = \pi/2 \text{ rad} \quad (5.19)$$

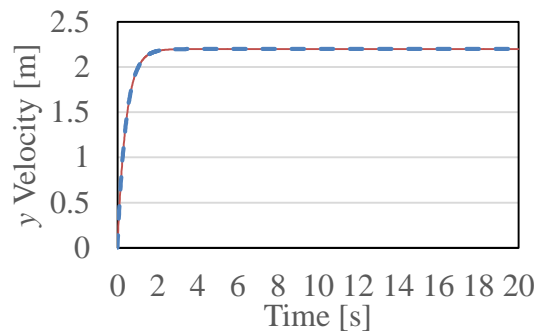
以上の条件で 20 秒のシミュレーションを行う. 車輪に作用するランダム摩擦力は次式のように行う.

$$\begin{cases} f_{f1}(k+1) = f_{f1}(k) + 1.5w \cdot b \cdot \text{random}_1 \\ f_{f2}(k+1) = f_{f2}(k) + 1.5w \cdot b \cdot \text{random}_2 \\ f_{f3}(k+1) = f_{f3}(k) + 1.5w \cdot b \cdot \text{random}_3 \end{cases} \quad b = \begin{cases} 1 & \text{if } k = 200N, N = 1, 2, 3 \dots 10 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5.20)$$

$f_{fi}(k+1)$ ($i=1, 2, 3$)と動力学式 5.7 の外力 f_{f1} , と f_{f2} , f_{f3} が対応する. random_i ($i=1, 2, 3$)は 0 から 1 までの乱数である. シミュレーションを行う時に, 外力を 2 秒ごとに一回更新する. w は導入する摩擦力の重みである. そして, シミュレーションにランダムな摩擦力を導入する.



(a) x 速度応答



(b) y 速度応答

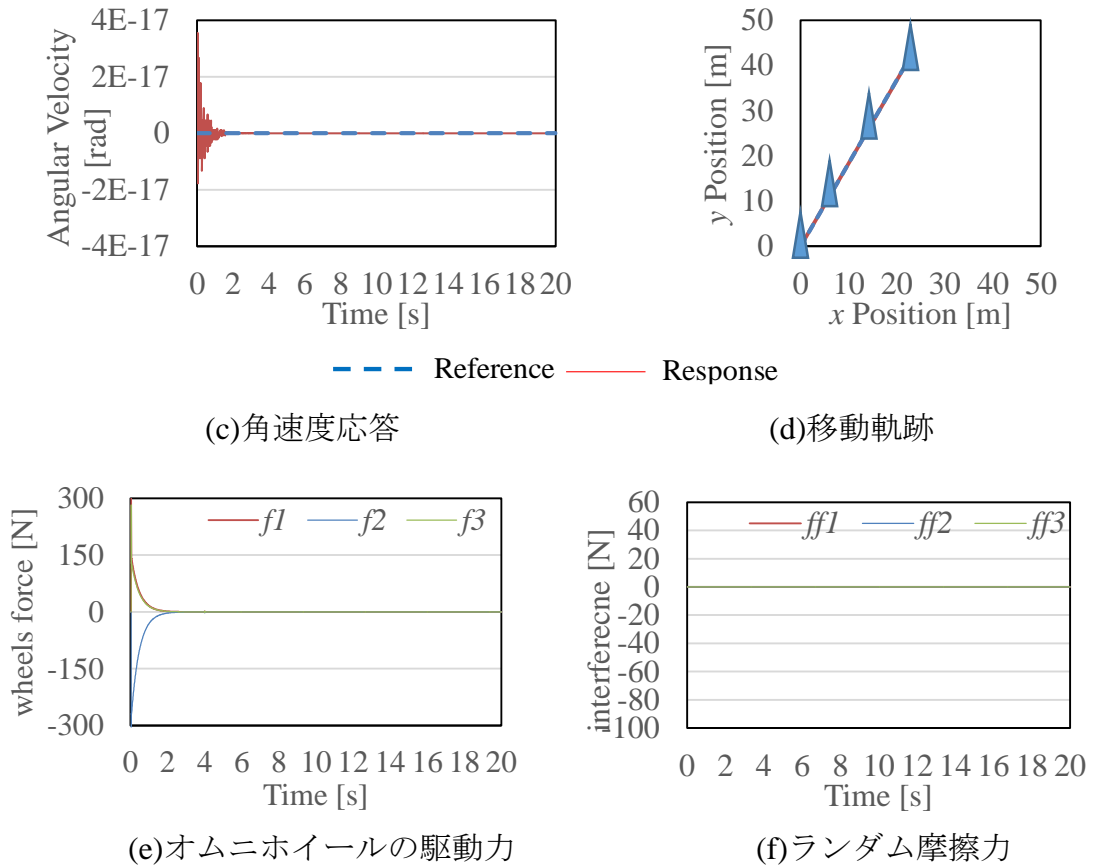
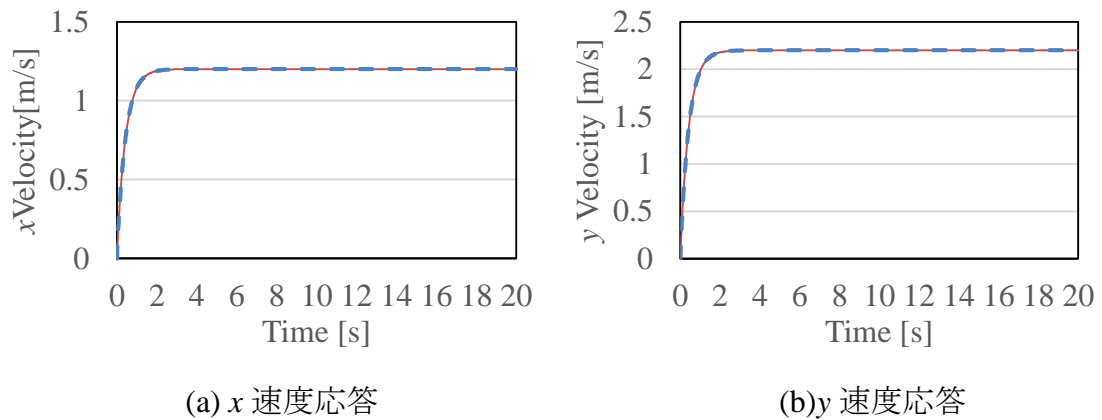


図 5.7 直線支援動作追従制御結果-車輪にランダム外力なし

図 5.6 は、ランダム外力なしのシミュレーションである。この場合に、オムニホイールの駆動力は図(e)に示すように、支援動作の目標速度になると、0 となる。図 5.7 の(a) (b)と(c)に示すのは x 軸速度、 y 軸速度と回転速度の動作追従制御結果であり、(d)はロボットの移動軌跡である。理想状態の結果として、ランダム外力がある場合の制御結果を考察する際の、比較のための参考である。



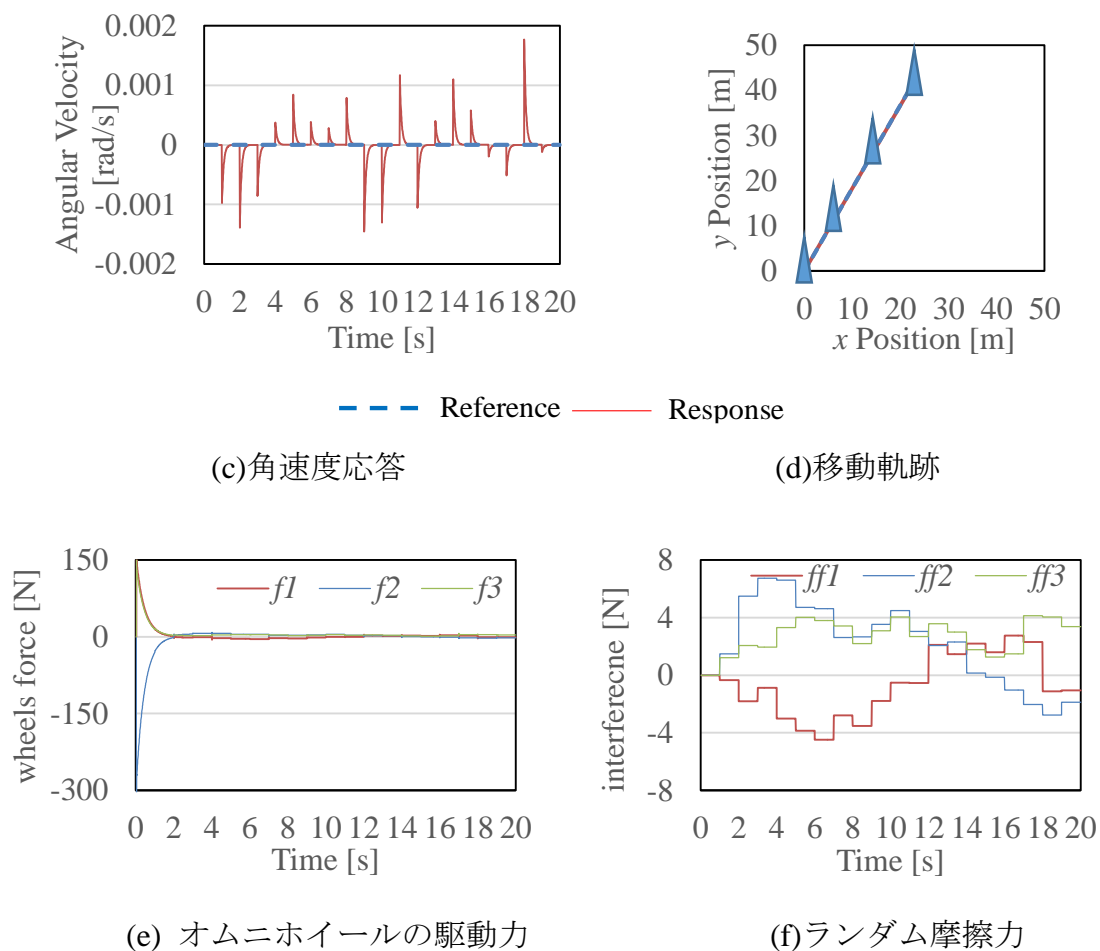


図 5.8 直線支援動作追従制御結果-車輪にランダム摩擦力 1 倍

図 5.8 は、ランダム外力が $w=1$ の際に、式 5.21 で決めるランダム外力がオムニホイールに作用する場合の、ロボットの直線進行動作の追従結果である。図 5.8 の(f)にはシミュレーションの時のランダム摩擦力を示している。この力の影響により、加速度の制御結果(c)は摩擦力が変化の瞬間に誤差が生じる。しかし、デジタル加速度制御法はサンプリング時間より遅く変化する外力を消せるので、回転速度が素早く目標値になる。

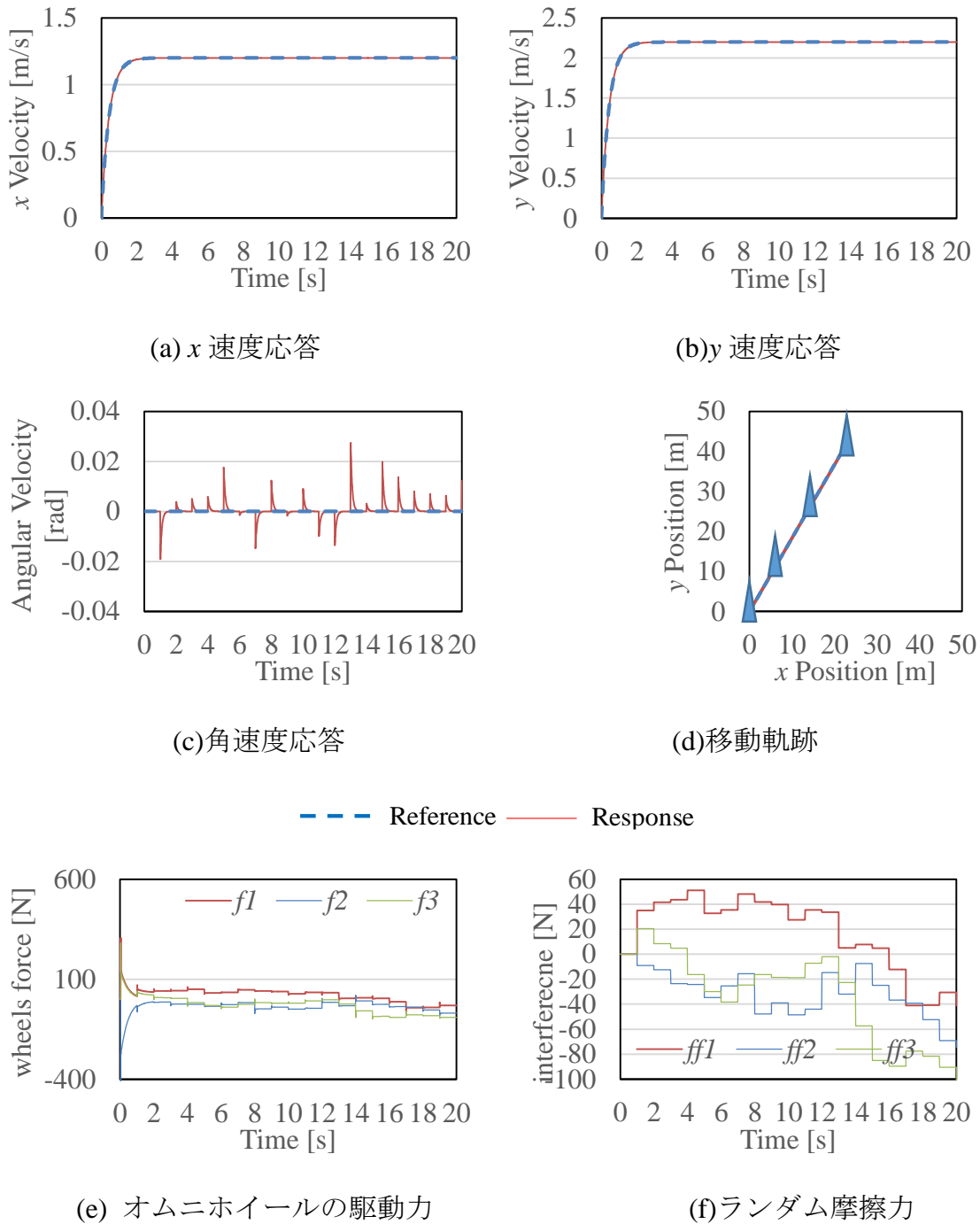


図 5.9 直線支援動作追従制御結果-車輪にランダム摩擦力 10 倍

図 5.9 は、ランダム摩擦力が $w=10$ の際に、ロボットの直線進行動作の追従結果である。前の結果より、ランダム摩擦力が 10 倍になり、図(f)に示すように、最大は 50N、最小は -80N がある。図(e)に示すように、オムニホイールの駆動力がランダム摩擦力に対し、瞬間の調整を行った。ランダム摩擦力なしのシミュレ

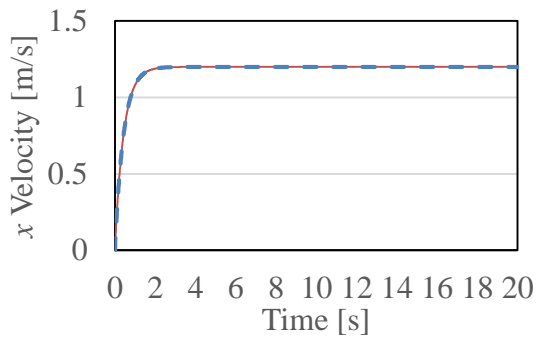
ーションの結果と比べると、 x 軸速度、 y 軸速度の応答が同じほど、回転速度応答はランダム摩擦力が変換する瞬間に誤差が生じた。

5.4.2 回転支援動作追従実験

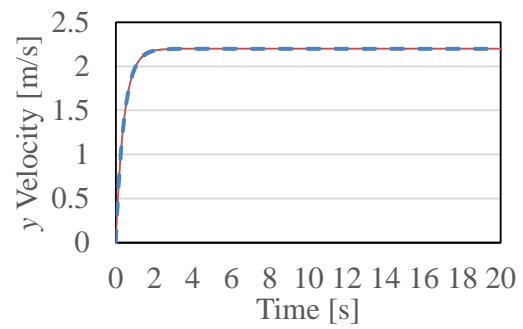
日常では、回転しつつ進行することが良くあるため、回転動作追従シミュレーションを行った。目標値の x 軸速度と y 軸速度は式 5.18 と同じである。角速度の目標値は次式に示す。

$$\dot{\theta}_d = 0.32 \text{ rad/s} \quad (5.21)$$

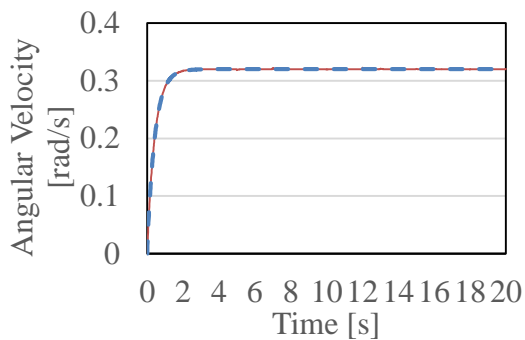
$$x_0^b = 15 \text{ m}, y_0^b = 5 \text{ m}, \theta_0 = \pi/2 \text{ rad} \quad (5.22)$$



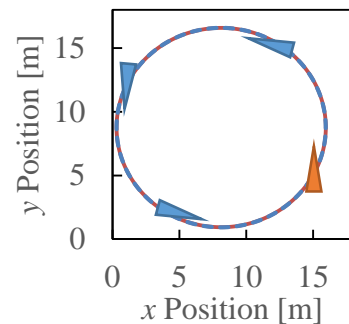
(a) x 速度応答



(b) y 速度応答

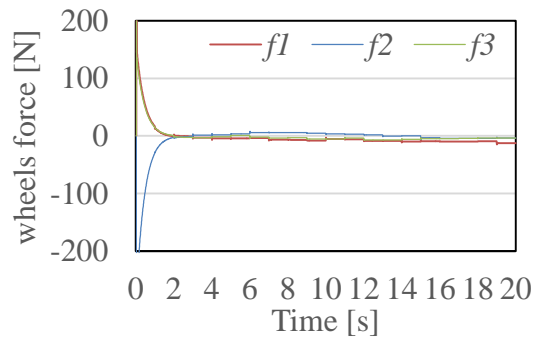


(c) 角速度応答

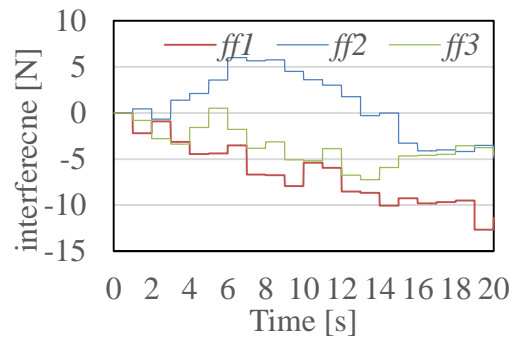


(d) 移動軌跡

--- Reference ——— Response



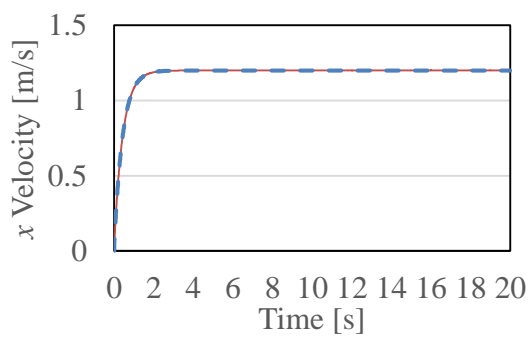
(e) オムニホイールの駆動力



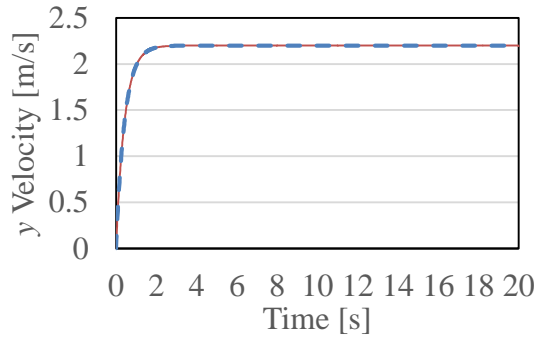
(f) ランダム摩擦力

図 5.10 回転支援動作追従制御結果-車輪にランダム摩擦力 1 倍

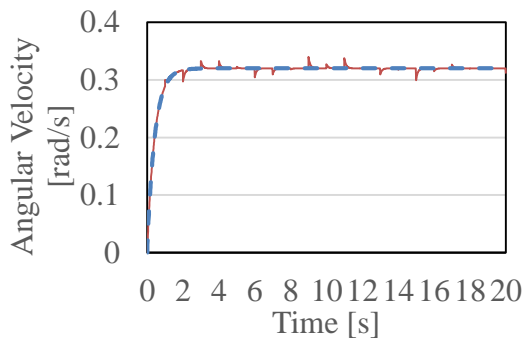
図 5.10 はランダム摩擦力が 1 倍の際の、回転支援動作追従制御結果である。図(e)はロボットの移動経路、オレンジ色の三角形はロボットの出発位置と最終位置である。ロボットは速度の目標値をよく追従できる。



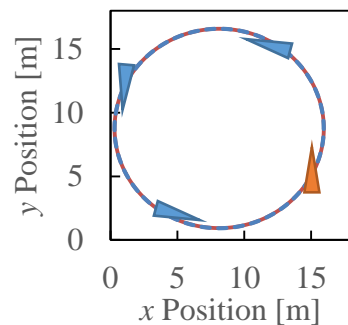
(a) x 速度応答



(b) y 速度応答



(c) 角速度応答



(d) 移動軌跡

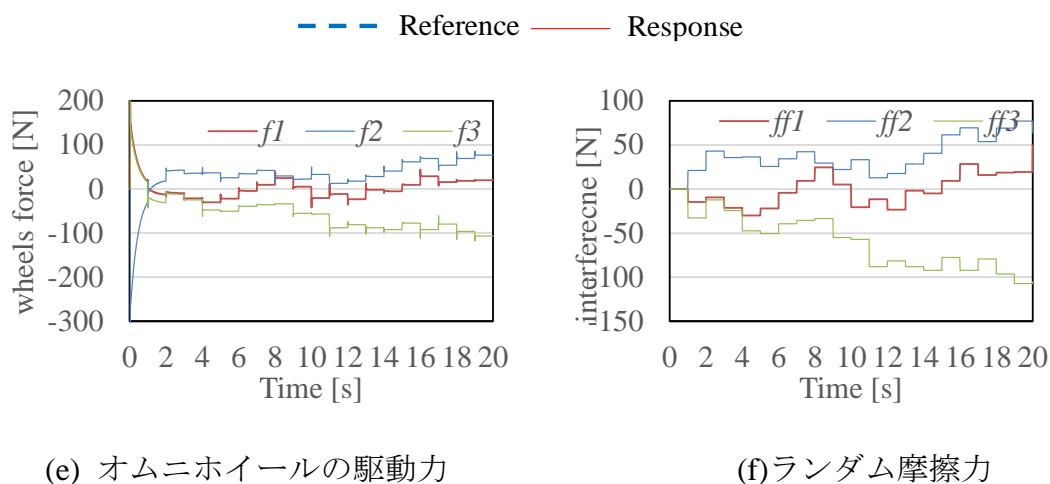


図 5.11 回転支援動作追従制御結果-車輪にランダム摩擦力 10 倍

図 5.11 に示すのはランダム摩擦力が 10 倍の際の、回転支援動作追従制御結果である。目標速度の追従結果はランダム摩擦力が 10 倍の際を見ると、加速度が摩擦力の変化する瞬間に生じることが分かる。オムニホイールに作用するランダム摩擦力信号は (f) に示す。ランダム摩擦力信号を参考として、図 (e) に示す。オムニホイールの駆動力がランダム摩擦力に合わせて調整することが窺える。

デジタル加速度制御法は、システムのサンプリング時間よりも早く変化する外力の影響を消せる。自立生活支援を行う時に、地面の状態変化と被支援の動きによりロボットに外力が加わる。この節ではシミュレーションを用いて、デジタル加速度制御法の有効性を検証した。次に、実際にロボットを用いる実験を行い、提案した方法を考察する。

5.5 実験による検討

実験では、提出したデジタル加速度制御法を用いて、自立生活支援ロボットが直線支援経路を追従し、地面の摩擦力の変化と被支援者が座るかどうかを考慮して、提案した制御法の有用性を検証する。

5.5.1 実験設定

基本の作業支援動作の1つの直線進行を考える。目標動作は式 2.23 に示す。

$$\begin{cases} v_{xd}^b(t) = 0.1 \text{ m/s} \\ v_{yd}^b(t) = 0.1 \text{ m/s} \\ \dot{\theta}_d = 0 \end{cases} \quad t < 17 \text{ s} \quad (5.23)$$

$$\begin{cases} v_{xd}^b(t) = 0.1 \times (20 - t) / 3 \text{ m/s} \\ v_{yd}^b(t) = 0.1 \times (20 - t) / 3 \text{ m/s} \\ \dot{\theta}_d = 0 \end{cases} \quad 17 \text{ s} \leq t < 20 \text{ s}$$

初期条件は $x_0^b = 0 \text{ m}$, $y_0^b = 0 \text{ m}$, $\theta_0 = \pi/2 \text{ rad}$ である。開始と終始速度は0にする。

ロボットが出発点から式 5.23 の目標速度に基づいて直線進行動作を追従する。摩擦力の変化を考慮して、材質の違う2枚のマット上を移動する。また、自立生活支援ロボットは、下肢障害者の生活を支援するために開発するので、人がロボットに座った状態の走行実験を行った。

5.5.2 実験結果と考察

まず、被支援者がロボットに座らず、マットも使わない場合で、図 5.12 のように実験を行った。制御系のパラメータを表 5.4 に示す。ロボットが支援動作を追従する結果は図 5.13 に示す。

表 5.4 制御系のパラメータ

| パラメータ | 値と単位 |
|-------|--------------------------------------|
| K_P | diag (5.0, 5.0, 3.05)s ⁻¹ |

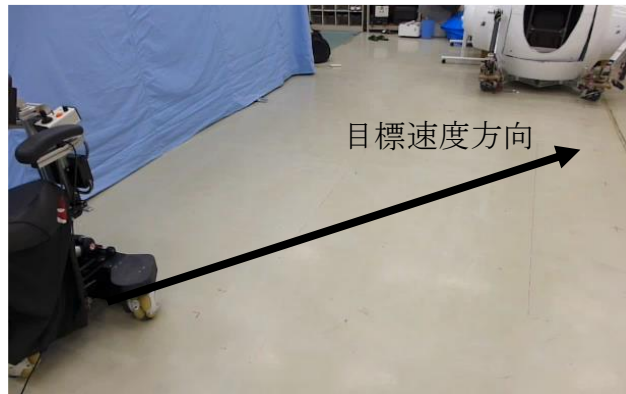
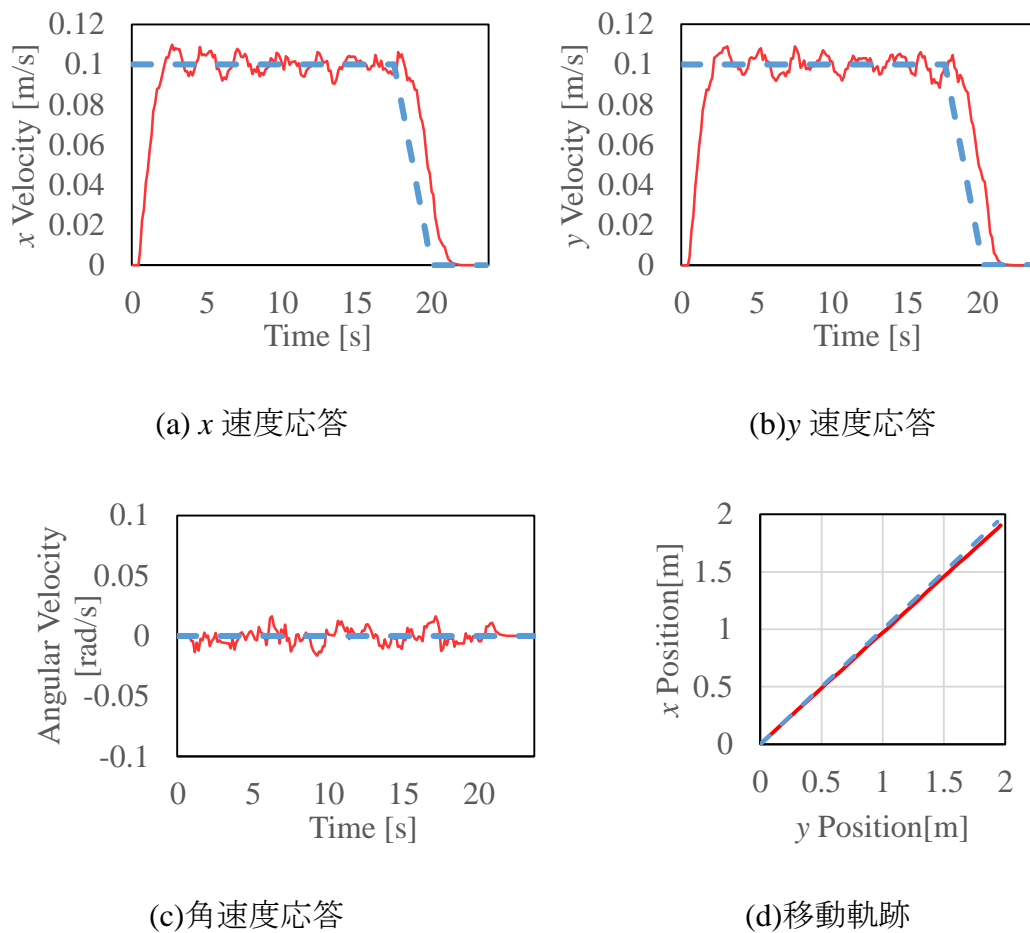


図 5.12 支援動作追従実験 1 (マットなし 被支援者なし)



--- Reference ——— Response

図 5.13 制御結果 (マットなし 被支援者なし)

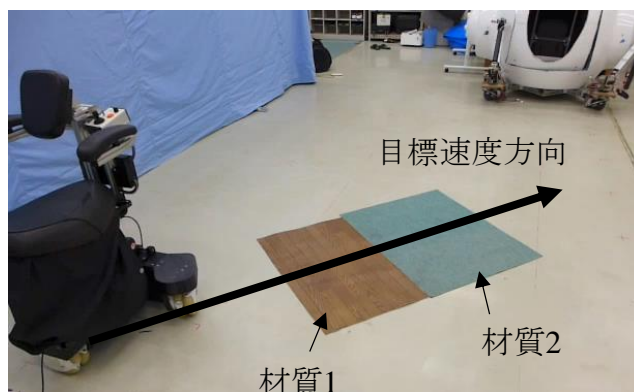


図 5.14 支援動作追従実験 2 (マットあり 被支援者なし)

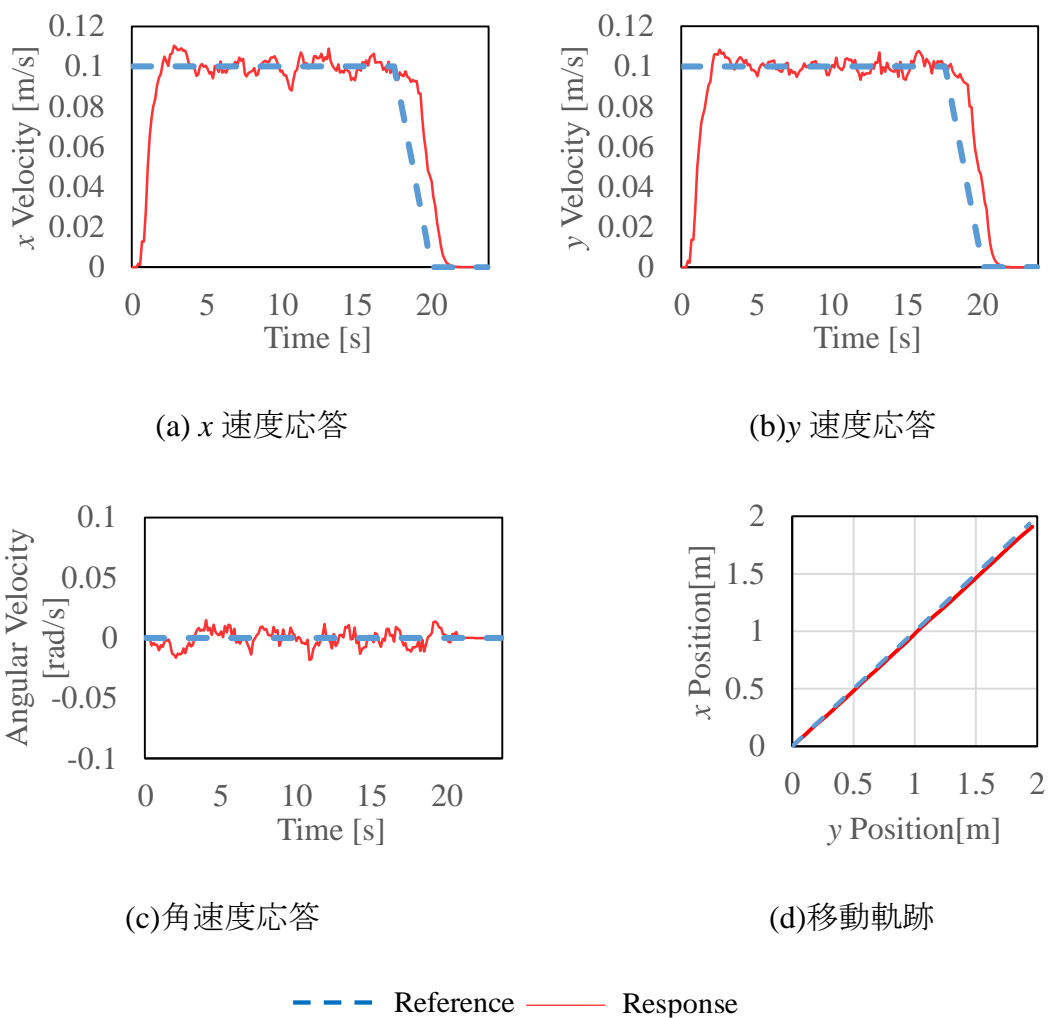


図 5.15 制御結果 (二つ材質のマットで 被支援者なし)

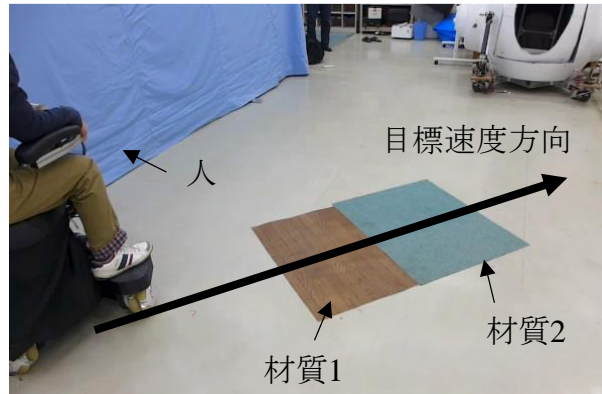


図 5.16 支援動作追従実験 3 (マットあり 被支援者なし)

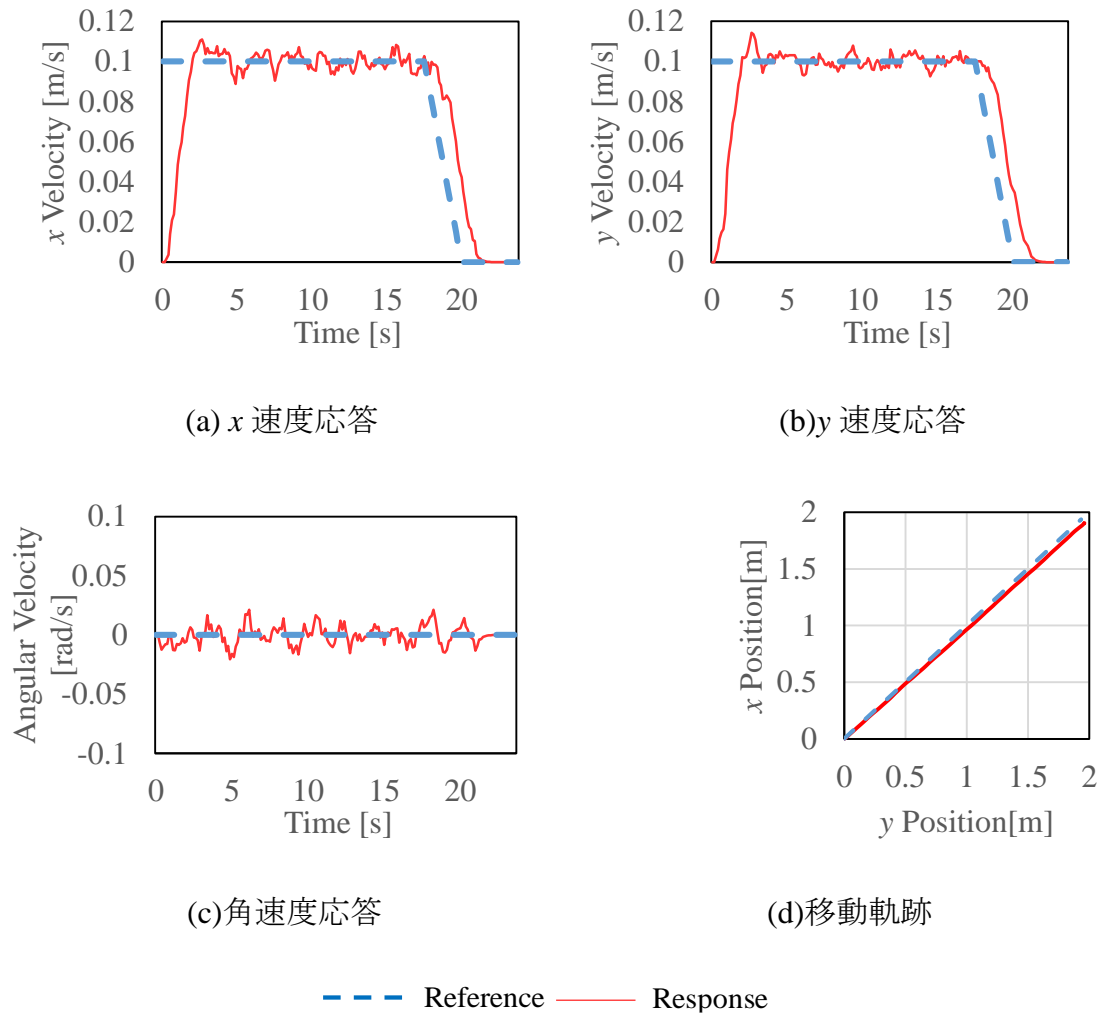


図 5.17 制御結果 (二つ材質のマットで 被支援者)

実験3では、20代の被験者1名に参加してもらった。被験者のデータを表5.5に示す。

表 5.5 被験者のパラメータ

| パラメータ | 値と単位 |
|-------|----------|
| 体重 | 52.7 Kg |
| 身長 | 161.2 cm |

支援動作追従実験1, 2, 3の結果は図5.13, 5.15と5.17に示す。赤線は速度の応答、青点線は目標速度である。応答結果を見ると、ロボットは目標速度を追従できるが、等速運動の間に速度が一定の振動量が見える。それはオムニホイールの連続部分と地面の接触から起こる振動である。速度の追従結果を式5.25のように評価し、3つの実験結果を比べる。

$$\varepsilon = \frac{\int_{t=0}^{t_f} e_v^2(t)}{\int_{t=0}^{t_f} V_d^2(t)} \cdot 100\% \quad (5.25)$$

$e_v(t)$ は速度の誤差、 $V_d(t)$ は目標速度である。実験の評価結果は表5.6に示す。

表 5.6 速度の追従結果の評価

| | 実験1 | 実験2 | 実験3 |
|-----|----------|----------|----------|
| x方向 | 26.2874% | 27.2482% | 26.3283% |
| y方向 | 26.5864% | 26.7285% | 26.242% |

表5.6の速度の追従結果の評価により、目標速度の追従効果が地面の摩擦条件と被支援者の有無に影響されない。

5.6 結言

本章では、デジタル加速度制御法に基づく自立生活支援ロボットの支援動作の運動追従制御法を述べた。

生活支援の現場で、ロボットは被支援者に移動機能を補助して、自宅の中を移動する。自宅内には、地面の材料などがよく変化するので、ロボットのオムニールが受ける摩擦が時变的である。また、被支援者に作業を支援する時に、被支援者の上半身の作業動作から生じる力があるため、作業支援動作を正確に追従することが困難である。そのため、本章は以上の二つ原因による支援動作追従精度が下がる問題について、デジタル加速度制御法に基づく運動追従制御法を提案した。

まず、作業動作を追従するために、機体座標系にロボットの運動学方程式と動力学方程式を導出した。次に事变的な摩擦力と被支援者からの力について、デジタル加速度制御法の考え方を利用して、運動制御法を提案した。制御法の安定性を証明した。また、ランダム外力を変量として、斜めへの進行動作と回転動作追従シミュレーションを行った。最後に、材質の違う2枚のマットを使って、被験者が座った際の斜めへの進行実験により、制御法の有効性を示した。

参考文献

1. 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.
2. 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.
3. Y.N. Wang, S.Y. Wang, R.P Tan, Y.L. Jiang and K. 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.
4. 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.
5. B.Shen, S.Y. Wang Y.L.Jiang, Y.N. Wang, R.P. Tan, K.J. Ishida, Y. Kobayashi and M. 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.
6. 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.

第6章 結論と今後の展開

著者の所属研究室では、下肢障害者の自立生活を支援するため、なるべく上半身の運動機能を積極的に活用する座位型自立生活支援ロボットを開発している。座位型自立生活支援ロボットは、自立生活における様々な作業を適切に支援するために、下肢障害者の作業意図を正しく認識し、認識した作業意図を適切に支援することが必要である。

本論文では、座位型自立生活支援ロボットの開発に当たって、下肢障害者の作業意図推論法と支援動作計画法、ロボットの運動追従制御法を開発した。まず、下肢障害者にとっては、自立生活に必要とされる作業を分類し、必要な作業動作の特性を分析して、作業動作の特徴をリアルタイムで抽出する方法を提案した。また、抽出した作業動作の特徴と作業意図の関係より、作業意図推論知識ベースの定式化、定量化して、作業意図推論知識ベースを構築し、距離型ファジィ推論法に基づく作業意図推論法を提案した。さらに、ロボットが推論した作業意図結果における、適切な支援動作計画法を提案し、掃除作業支援実験により、支援動作計画法の有効性を示した。最後に、ロボットが計画した作業支援動作の追従精度が足りない問題を分析して、加速度信号を利用し、非線形摩擦力に対処するデジタル加速度制御法に基づくロボット運動追従制御法を提案した。

以下に本論文における各章での内容と考察・結論をまとめておく。

第2章では、自立生活作業の動作に基づいて、人間の作業意図を推論できる基本観点を提案し、実験による証明した。下肢障害者の自立生活において、下肢機能を補助することにより生活作業を自然に行うことができれば、自立生活の度合いがより一層高まる。そのため、まず下肢障害者の生活における様々な必要生活作業を挙げた。次に、モーションセンサーを用いた異なる生活作業動作の測定実験により、作業動作情報が作業意図情報を含む事実を示した。その後、上半身作業動作により作業意図を認識するために、モーションセンサーの装着と姿勢情報の計測法を検討した。最後に、計測した作業動作情報を分析して、作業動作の特徴抽出法を提案した。

第3章では、第2章に述べた上半身の動作特徴抽出法により、上半身作業動作に基づく作業意図推論法を提案した。まず、作業意図の概念、作業意図に含まれる具体的な作業の種類と作業の内容を述べた。作業意図の構造により、作業意図推論知識ベースの構築方法を説明した。具体的に、人間が他者の作業意図を推論する際の知識を言語ルールで抽出する方法と定式化、言語変数の定量化を説明した。更に、構築した作業意図推論知識ベースの特徴により、前件部集合が互いに疎である場合でも推論可能な距離型ファジィ推論法を用いて、作業動作による作業意図の推論法を提案した。作業意図の推論結果として、作業種類と作業内容は作業意図推論の出力で、作業支援動作計画法の入力になる。最後に、実験により、作業意図推論法の有効性を実証した。

第4章では、ロボットによる作業支援を行うために、下肢障害者の作業意図推論結果により、作業支援動作計画法を提案した。具体的には、作業支援動作の計画は、ロボットが支援者の常識を利用するために、支援動作計画知識ベースの抽出法を提案した。被支援者の作業意図に基づいて、作業意図と適切な支援動作との知識を言語ルールで抽出し、定式化し、定量化して、作業支援動作計画知識ベースを構築した。作業内容に空間的な連続性があるため、限りある支援動作計画ルールを用いて、空間に連続的な支援動作を計画するために、作業内容の関連性より、関連する作業意図で支援動作計画法を提案した。最後に、掃除作業実験により、作業支援動作計画法を実証した。

第5章では、支援動作を確実に実現するために、計画した支援動作により、ロボットが正確に支援動作を追従する運動追従制御を提案した。下肢障害者の自立生活支援の場所には、様々な種類の地面がある自宅であるため、床から事变的な非線形摩擦力がロボットの運動精度に悪影響を及ぼす。さらに、下肢障害者を支援する時に、下肢障害者の作業動作がロボットに作用する力がロボットの動作にも影響を与える。支援動作を確実に実現するために、デジタル加速度制御法に基づいて、ロボットの運動追従制御法を開発した。まず、ロボットの運動学方程式と動力学方程式を導出した。次に、デジタル加速度制御法により、非線形摩擦力と被支援者がロボットに作用する力に対処する制御法を提案し、制御法の安定性を示した。最後に、斜めへの進行動作と回転動作を追従シミュレーシ

ョンと、摩擦条件が異なる地面と被支援者がロボットに乗る実験により、ロボットの運動追従制御法の有効性が示された。

以上をまとめる。本論文では、下肢障害者の自立生活を支援するため、自立生活支援ロボットを用いて、下肢障害者の作業動作により、作業意図推論法と作業支援動作計画法、支援動作を追従するロボット運動追従制御法を提案した。まず、作業動作を計測し、動作特徴を抽出して、作業意図推論知識ベースを構築した。作業意図推論知識ベースに基づいて、ロボットは被支援者の作業意図を推論できるようになる。さらに、ロボットは推論した被支援者の作業意図により、人間の作業支援常識で構築した支援動作計画ベースを用いて、適切な作業支援動作計画法を提案した。支援動作を確実に実現するために、ロボットが計画した支援動作を正確に追従する制御法を開発した。

今後の展開としては、下肢障害者の自立生活支援を実現することを目指し、自立生活支援ロボットを用いて、本論文で提案した生活支援方法を実用化する。具体的には、作業推論知識ベースの構築手法を簡略化し、作業意図推論法のパラメータの確認方法をロボットが自動的に行えるように改進する。さらに、今回、作業支援動作の計画と運動追従制御法は作業を支援するために開発したが、被支援者の快適度を考えなかった。被支援者に快適な加速度、速度で作業支援動作を計画すれば、自立生活支援ロボットの実用化がもう一步、進むことになる。

謝辞

三年前、貴重な留学の機会をくださり、本研究に導き、終始御指導ご激励を賜り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。情報出身の筆者に対して、本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方法まで、熱心かつ厳格な御指導をいただいたおかげで、本論文の研究成果を挙げることができました。研究が順調に行かないところに、「学海無涯楽在其中」の励みを教えていただき、積極的な困難に直面した時に勇気と信念を頂きました。掃除作業実験を行った際に、実験用の道具と実験風景動画の作り方といろいろを教えて頂きました。特に、掃除作業を支援する様子を示すときには、右手を置く場所について十回ほどの検討をすることで、動画の良い作り方を深く覚えることができました。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、芝田京子準教授には、副指導教員と副査として本研究について、ご指導を賜りました、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、星野孝総準教授には、副査として種々の御助言をしていただき深く感謝します。

高知工科大学知能ロボティクス研究室から、電気通信大学に御栄転されました姜銀来講師には、研究実験の仕方、論文の修正と留学生活についてご指導ご援助を頂き、謝意を申し述べます。研究室の先輩譚仁鵬氏、王義娜氏には、ロボットの制御法を教えていただき、また生活でもいろいろとお世話になりました。ここに深く感謝の意を示します。瀋陽工業大学情報工程学院の孫平先生には、ロボット制御方法についての考え方を教えていただき、深く感謝します。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。特に、自立生活支援法を開発する段階で、被験者とした大学院生狩野雄史氏から助けていただき、博士論文謝辞修正においては貴重な御応援をいただいたことを心より感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、高知工科大学から留学生特別コース SSP 奨学金と文部科学省奨学金をいただき、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。心より深く感謝いたします。

末筆ながら、二十九年苦勞して、筆者の学業を支えていただいた父親と母親に心より深く感謝いたします。

本論文に関する研究業績

受賞

[1] IEEE ROBIO 2015 for Finalist of Best Student Paper Award

Bo Shen, Shuoyu Wang, "An Independent Life Support Robot for the Lower-Limb Handicapped and Elderly, Task-Intention-Identification and Assistive-Motion-Planning Algorithm". 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2015), pp.1169-1176, December, 2015.

研究論文

[1]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.

[2]Bo Shen, Shuoyu Wang, Real Time Identification of User's Activity of Daily Life by Distance Type Fuzzy Reasoning Method. Tenth International Conference on Innovative Computing, Information and Control, ICIC express letters ICIC express letter, Vol 10, No.2, pp527-534, February, 2016.

国際発表

[1]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. Sep, 2013.

[2]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, ICICIC, Kumamoto, Jan. 2013.

[3]Bo Shen, Shuoyu Wang, Yina Wang, User's Moving Intention Identification for

Human Support Robot, Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS-ISIS 2014), pp.1073-1077, Kitakyushu, Dec, 2014.

[4]Bo Shen, Shuoyu Wang, Real Time Identification of User's Activity of Daily Life by Distance Type Fuzzy Reasoning Method. International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 10th ICICIC, Dalian, September, 2015.

[5]Bo Shen, Shuoyu Wang, "An Independent Life Support Robot for the Lower-Limb Handicapped and Elderly, Task-Intention-Identification and Assistive-Motion-Planning Algorithm". 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2015), pp.1169-1176, December, 2015.

国内学会論文

[1] 瀋博, 王碩玉, 姜银来, 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.

[2] 瀋博, 王碩玉, 姜银来, 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] 瀋博, 王碩玉, 上半身動作による日常作業の意図認識法, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2015AC2A1-08, 東京, 2015 年 11 月 30 日.

[4] 瀋博, 王碩玉, 上半身の動作情報による下肢障がい者の掃除作業支援法, 第 15 回日本生活支援工学会大会, 福祉工学シンポジウム 2015, 第 31 回ライフサポート学会大会講演論文集(CD), 1B2-07, 福岡, 2015 年 9 月 7 日-9 日.