

# 博士論文

平行ワイヤ教示装置を用いた  
ロボット教示法に関する研究

Study on Robot Teaching Method  
Using Parallel Wire Type Teaching Device

2016年1月

酒井昌夫



# 目次

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>第1章 序論</b>                     | <b>1</b>  |
| 1.1 社会的課題とロボットの研究開発               | 1         |
| 1.1.1 我が国が抱える課題とロボット              | 1         |
| 1.1.2 ロボットの現状                     | 7         |
| 1.1.3 ロボットの教示法の重要性                | 9         |
| 1.2 ロボットの教示法                      | 10        |
| 1.2.1 教示法の分類                      | 10        |
| 1.2.2 既存の教示法とその課題                 | 11        |
| 1.2.3 直接教示法の先行研究                  | 12        |
| 1.2.4 本研究における直接教示法の新規性            | 14        |
| 1.3 本論文の目的                        | 15        |
| 1.4 本研究の構成                        | 16        |
| <b>第2章 パラレルワイヤ教示装置</b>            | <b>19</b> |
| 2.1 はじめに                          | 19        |
| 2.2 パラレルワイヤ教示装置                   | 19        |
| 2.2.1 パラレルワイヤ機構                   | 19        |
| 2.2.2 パラレルワイヤ機構を用いた教示法            | 22        |
| 2.3 パラレルワイヤ教示装置の試作                | 24        |
| 2.4 教示装置の位置計測精度検証実験               | 26        |
| 2.4.1 実験目的および実験内容                 | 26        |
| 2.4.2 実験結果および考察                   | 28        |
| 2.5 おわりに                          | 32        |
| <b>第3章 パラレルワイヤ教示装置を用いたロボット教示法</b> | <b>33</b> |
| 3.1 はじめに                          | 33        |
| 3.2 パラレルワイヤ教示装置を用いたロボット教示法のための制御法 | 33        |

|            |                                  |           |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 3.3        | ロボットの教示システムの構成                   | 35        |
| 3.4        | 提案教示法の評価                         | 37        |
| 3.4.1      | 実験方法                             | 38        |
| 3.4.2      | 評価方法                             | 39        |
| 3.4.3      | ロボットの追従遅れについての結果と考察              | 41        |
| 3.4.4      | 教示システムの位置精度の実験結果と考察              | 44        |
| 3.5        | おわりに                             | 49        |
| <b>第4章</b> | <b>パラレルワイヤ教示法のリハビリ支援ロボットへの応用</b> | <b>51</b> |
| 4.1        | はじめに                             | 51        |
| 4.2        | パラレルワイヤ教示法を利用した反復負荷抵抗トレーニング装置    | 51        |
| 4.2.1      | 位置と力を同時に教示する手法の提案                | 51        |
| 4.2.2      | 反復負荷抵抗トレーニングを実現するロボットの要求仕様       | 53        |
| 4.2.3      | 反復負荷抵抗トレーニング用装具                  | 56        |
| 4.3        | 反復負荷抵抗トレーニングのためのリハビリ支援ロボット       | 59        |
| 4.4        | 検証実験と考察                          | 65        |
| 4.5        | おわりに                             | 69        |
| <b>第5章</b> | <b>結論</b>                        | <b>71</b> |
| 5.1        | 本研究のまとめ                          | 71        |
| 5.2        | 今後の課題と将来の展望                      | 72        |
| 5.2.1      | パラレルワイヤ教示装置                      | 72        |
| 5.2.2      | パラレルワイヤ教示装置を実装したロボットの教示法         | 73        |
| 5.2.3      | 反復負荷抵抗トレーニングのためのリハビリ支援ロボット       | 74        |
|            | 参考文献                             | 75        |
|            | 謝辞                               | 83        |
|            | 研究業績                             | 85        |

## 図リスト

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | 人口推移 (出典:平成 24 年度版 総務省情報通信白書 [2]) . . . . .                               | 2  |
| 1.2  | 日本のロボット産業の推移 (生産額)(出典:平成 25 年度 ロボット産業・技術<br>の振興に関する調査研究報告書 [3]) . . . . . | 3  |
| 1.3  | 世代別に見た高齢者人口の推移 (出典:~2025 年の超高齢社会像~, 第 1 回介<br>護施設等の在り方 [4]) . . . . .     | 3  |
| 1.4  | 国土基盤ストックの維持管理・更新費の将来見通し (全国)(出典:平成 24 年版<br>情報通信白書 [2]) . . . . .         | 4  |
| 1.5  | 維持修繕工事の推移 (出典:建設業ハンドブック 2014 [10]) . . . . .                              | 5  |
| 1.6  | 建築業就業者数の年齢別推移 (出典:建設業ハンドブック 2014 [11]) . . . . .                          | 5  |
| 1.7  | 2012 年主要部門別出荷割合比 (出荷額ベース)(出典:ロボット産業需給動向<br>2013 年版 [24]) . . . . .        | 8  |
| 1.8  | 2012 年国別輸出割合比 (出荷額)(出典:ロボット産業需給動向 2013 年版 [24])                           | 8  |
| 1.9  | ロボットと専用機の使い分け (出典:ロボットハンドブック (2005 年版) [25])                              | 9  |
| 2.1  | スチュワートプラットフォーム型パラレルリンクの構造 . . . . .                                       | 21 |
| 2.2  | パラレルワイヤ教示装置によるロボットへの教示・再生手順 . . . . .                                     | 23 |
| 2.3  | パラレルワイヤ教示装置 . . . . .   | 25 |
| 2.4  | 巻き取り装置 . . . . .  | 25 |
| 2.5  | 5 軸加工機を使用したパラレルワイヤ教示装置の試験の様子 . . . . .                                    | 27 |
| 2.6  | パラレルワイヤ教示装置への入力位置 . . . . .   | 27 |
| 2.7  | 計測誤差 (Z=50mm) . . . . .   | 30 |
| 2.8  | 計測誤差 (Z=75mm) . . . . .   | 30 |
| 2.9  | 計測誤差 (Z=100mm) . . . . .  | 30 |
| 2.10 | 計測誤差 (Z=125mm) . . . . .  | 30 |
| 2.11 | 計測誤差 (Z=150mm) . . . . .  | 30 |
| 2.12 | 計測誤差 (Y=0mm) . . . . .  | 30 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | パラレルワイヤ教示装置とロボットの座標系と位置ベクトルの定義 . . . . .                        | 34 |
| 3.2  | パラレルワイヤ教示装置によるロボットへの教示・再生手順 . . . . .                           | 34 |
| 3.3  | パラレルワイヤ教示装置による教示時の制御ブロック線図 . . . . .                            | 36 |
| 3.4  | パラレルワイヤ教示装置による教示データ再生時の制御ブロック線図 . . . . .                       | 36 |
| 3.5  | パラレルワイヤ教示法を採用した試作教示システムの構成 . . . . .                            | 37 |
| 3.6  | 教示システムとリニアアクチュエータで構成される実験装置 . . . . .                           | 39 |
| 3.7  | リニアアクチュエータの移動パターン例 (移動速度: 50mm/s) . . . . .                     | 39 |
| 3.8  | 教示システムとリニアアクチュエータ間の位置ベクトルの定義 . . . . .                          | 40 |
| 3.9  | リニアアクチュエータの移動に対するパラレルワイヤ教示装置のベースの動作 (移動速度: 50mm/s) . . . . .    | 42 |
| 3.10 | リニアアクチュエータによる教示軌道と取得した軌道の位置誤差 (Y 方向成分) (移動速度: 50mm/s) . . . . . | 43 |
| 3.11 | ロボットのベースの追従遅れ, 最大誤差の Y 方向成分と移動速度の関係 . . . . .                   | 43 |
| 3.12 | 教示誤差の絶対値 $ \Delta^R \mathbf{X}_{PC} $ (移動速度: 50mm/s) . . . . .  | 45 |
| 3.13 | 教示誤差の絶対値 $ \Delta^R \mathbf{X}_{PC} $ (移動速度: 1mm/s) . . . . .   | 45 |
| 3.14 | 教示誤差の絶対値 $ \Delta^R \mathbf{X}_{PC} $ (移動速度: 5mm/s) . . . . .   | 46 |
| 3.15 | 教示誤差の絶対値 $ \Delta^R \mathbf{X}_{PC} $ (移動速度: 10mm/s) . . . . .  | 46 |
| 3.16 | 教示誤差の絶対値 $ \Delta^R \mathbf{X}_{PC} $ (移動速度: 30mm/s) . . . . .  | 47 |
| 3.17 | 教示誤差の絶対値 $ \Delta^R \mathbf{X}_{PC} $ (移動速度: 100mm/s) . . . . . | 47 |
| 3.18 | 教示誤差の絶対値 $ \Delta^R \mathbf{X}_{PC} $ (移動速度: 150mm/s) . . . . . | 48 |
| 3.19 | 移動速度と教示誤差の関係 . . . . .  | 48 |
| 4.1  | パラレルワイヤ教示装置と力覚センサを利用した工具の位置と力の教示手順 . . . . .                    | 53 |
| 4.2  | 3次元力提示型ロボット [67–69] . . . . .                                   | 54 |
| 4.3  | 1自由度パッシブ型反力提示デバイス [65, 66, 70, 71] . . . . .                    | 54 |
| 4.4  | 反復負荷抵抗トレーニングのための抵抗パターン . . . . .                                | 55 |
| 4.5  | 反復負荷抵抗トレーニング用装具 (装着状態) . . . . .                                | 57 |
| 4.6  | 反復負荷抵抗トレーニング用装具 (断面模式図) . . . . .                               | 57 |
| 4.7  | 反復負荷抵抗トレーニング用装具の構造と機能 . . . . .                                 | 58 |
| 4.8  | リハビリ支援ロボットの全体図 . . . . .  | 60 |
| 4.9  | 反復負荷抵抗トレーニングの教示の様子 . . . . .                                    | 60 |

|   |    |
|---|----|
| 4.10 反復負荷抵抗トレーニングの再生の様子 . . . . .             | 61 |
| 4.11 反復負荷抵抗トレーニングの教示のための制御システムのブロック線図 . .     | 62 |
| 4.12 反復負荷抵抗トレーニングの再生のための制御システムのブロック線図 . .     | 63 |
| 4.13 反復負荷抵抗トレーニングのためのコントローラのフローチャート . . . . . | 64 |
| 4.14 リハビリ支援ロボットにおける位置と力の教示情報 . . . . .        | 67 |
| 4.15 教示情報における患者の上肢の位置と力の関係 . . . . .          | 67 |
| 4.16 位置と力の教示情報に対するトレーニング実施時の位置と力の比較 . . . . . | 68 |





## 表リスト

|     |                              |    |
|-----|------------------------------|----|
| 1.1 | 教示法の分類 . . . . .             | 11 |
| 2.1 | パラレルワイヤ教示装置の仕様 . . . . .     | 26 |
| 2.2 | 位置誤差の最大値 . . . . .           | 31 |
| 3.1 | ロボットの仕様 . . . . .            | 37 |
| 4.1 | 反復負荷抵抗トレーニング用装具の仕様 . . . . . | 58 |



# 第1章

## 序論

### 1.1 社会的課題とロボットの研究開発

#### 1.1.1 我が国が抱える課題とロボット

日本の経済は1954年から1973年にかけての高度経済成長期の後、1991年のバブル崩壊までの安定成長期を経て、成長が停滞した状態のまま現在(2015年)に至っている。この間の人口推移図(図1.1)によると、総人口に対して65歳以上の人口割合を示す高齢化率は1950年の4.9%から上昇しつづけ、2010年には23.0%までに達している。これに対し、合計特殊出生率の変化は1950年の3.65から5年後の1955年には2.37に急低下し、その後も減少し続けて2010年には1.39に低下している [1] [2]。その結果、我が国は世界に類を見ない速さで少子高齢化が進行している。少子高齢化が進行することによって、15歳から64歳までの生産年齢人口の割合が減ることで労働力不足が生じるとともに、国民総生産が減少して国の税収が減少する。その一方、高齢者が増えることは、社会保障費が増加するため、労働力と経済・財政の面から様々な国内の課題の原因となっている。

ここで少子高齢化が原因となり生じる課題の例として次の3つを挙げる。1つ目に製造業の現場での労働力不足がある。この課題は人件費や福利厚生面で不利な中小企業ほど進行している。国内の多くの産業では安価で豊富な労働力を求め、海外生産に移行する傾向にある。しかし、このことはかつて隆盛を誇った国内の繊維産業が衰退した例にもあるように、産業の空洞化による国際競争力の低下および付加価値生産額の低下につながることは容易に想像できる。したがって今後も日本が国際競争力を維持・強化するためには、企業が拡大する海外市場に対応して海外進出するだけでなく、国内生産を継続できるように規制・制度の改革と技術革新を併せて進める必要がある。

一方で、図1.2の日本のロボット産業の推移が示すように、製造業の分野では1960年代に実用化された産業用ロボットが1980年以降急激に普及している。これは図1.1の合計特殊出生率が団塊の世代が生まれた1950年以降急激に低下し回復しなかったことから、1980年当時には既に少子高齢化による労働力不足になることが予測されたため、高騰する人件

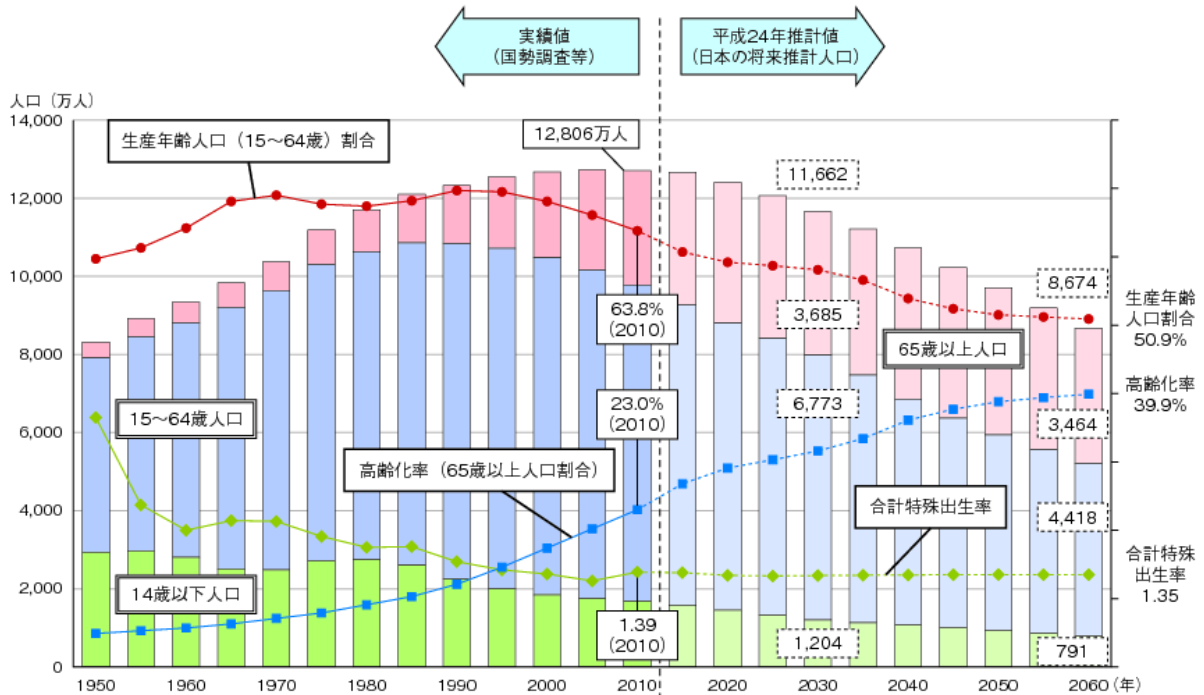


図 1.1 人口推移 (出典:平成 24 年度版 総務省情報通信白書 [2])

費の抑制というニーズが生じたためである。さらに、コンピュータ・アクチュエータといったロボットの要素技術の革新により、このニーズに応えることが可能になったことも大きい [3]。ただし、ロボット等を用いて生産を効率化するためには、一定以上の生産規模と設備投資が可能な資本が必要である。大企業はこれらの要件を満たすことが可能である。しかし、経営基盤が弱い中小企業では生産規模が小さい上に設備投資を行う余力もないというところも少なくない。そのため、生産の現場でも人手不足を改善することのできる企業とできない企業に分かれてしまっている現状がある。

次に医療福祉における課題について述べる。医療福祉の現場においては、団塊の世代が後期高齢者となる 2025 年問題が以前から指摘されている。図 1.3 は厚生労働省による高齢者人口の予測である [4]。この図から、2015 年ごろ団塊の世代がすべて前期高齢者に達し、その 10 年後の 2025 年には後期高齢者となる。この結果、2025 年には 65 歳以上の高齢者が 3500 万人程度で安定することが予測される。このため、2025 年以前は高齢化が進行する速さが問題となり、2025 年以降はこの高齢者を少ない現役世代が支える高齢化率の高さが問題になるというものである [4]。ただし、図 1.1 より、2025 年で高齢者数が安定しても、高齢者を支える世代である生産年齢人口は減少する。このことから、医療福祉の分野では 2025 年以降も現場の負担が増加することが予想されるため、ロボット、ICT 技術等による現場の効率化の早急な対策が求められている。

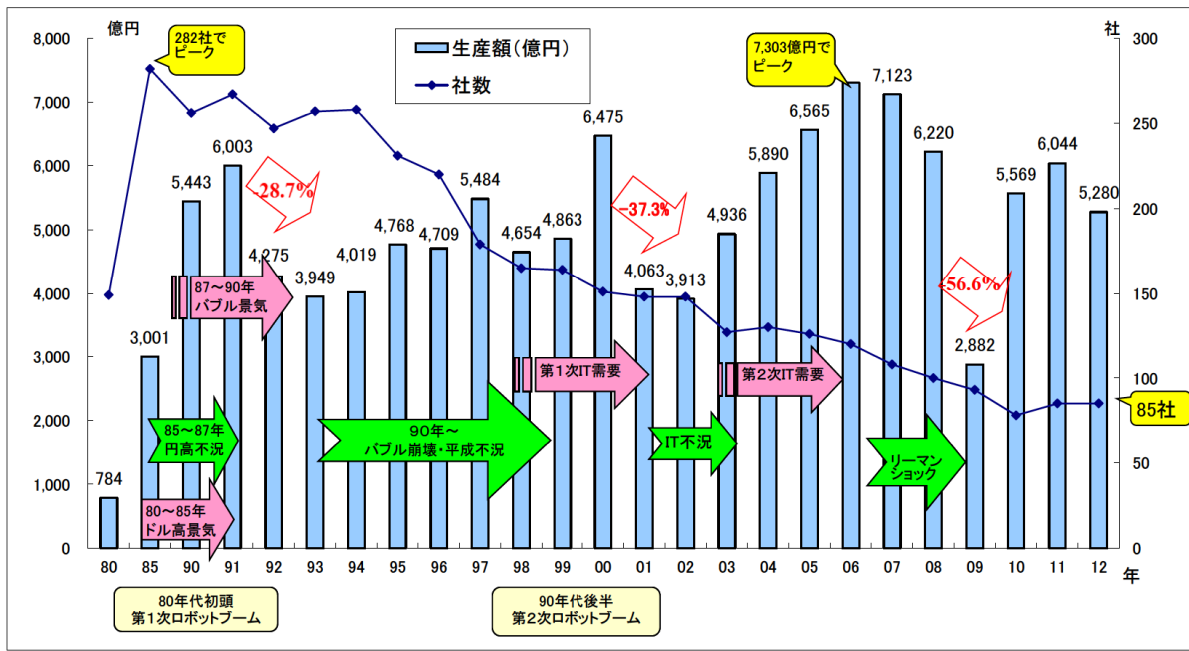


図 1.2 日本のロボット産業の推移(生産額)(出典:平成 25 年度 ロボット産業・技術の振興に関する調査研究報告書 [3])

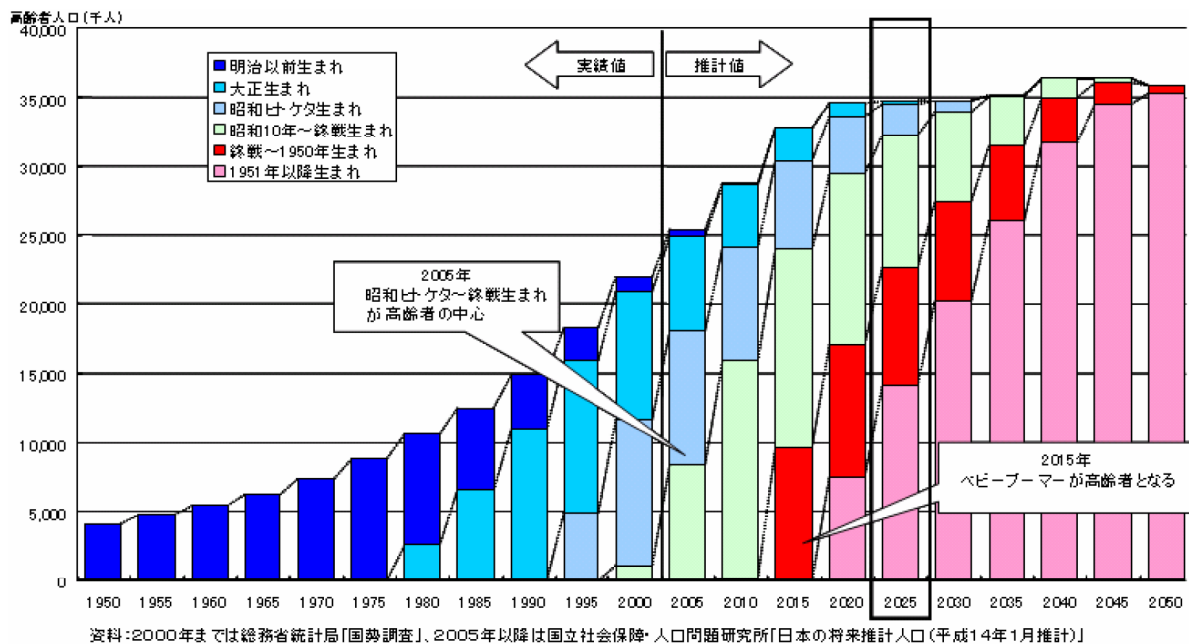


図 1.3 世代別に見た高齢者人口の推移 (出典:~2025 年の超高齢社会像~, 第 1 回介護施設等の在り方 [4])

最後にインフラ，建設業関連における課題について取り上げる．図 1.4 は公共投資に占める維持管理・更新費の将来見通しである．公共投資は景気対策の側面を持つため，1991

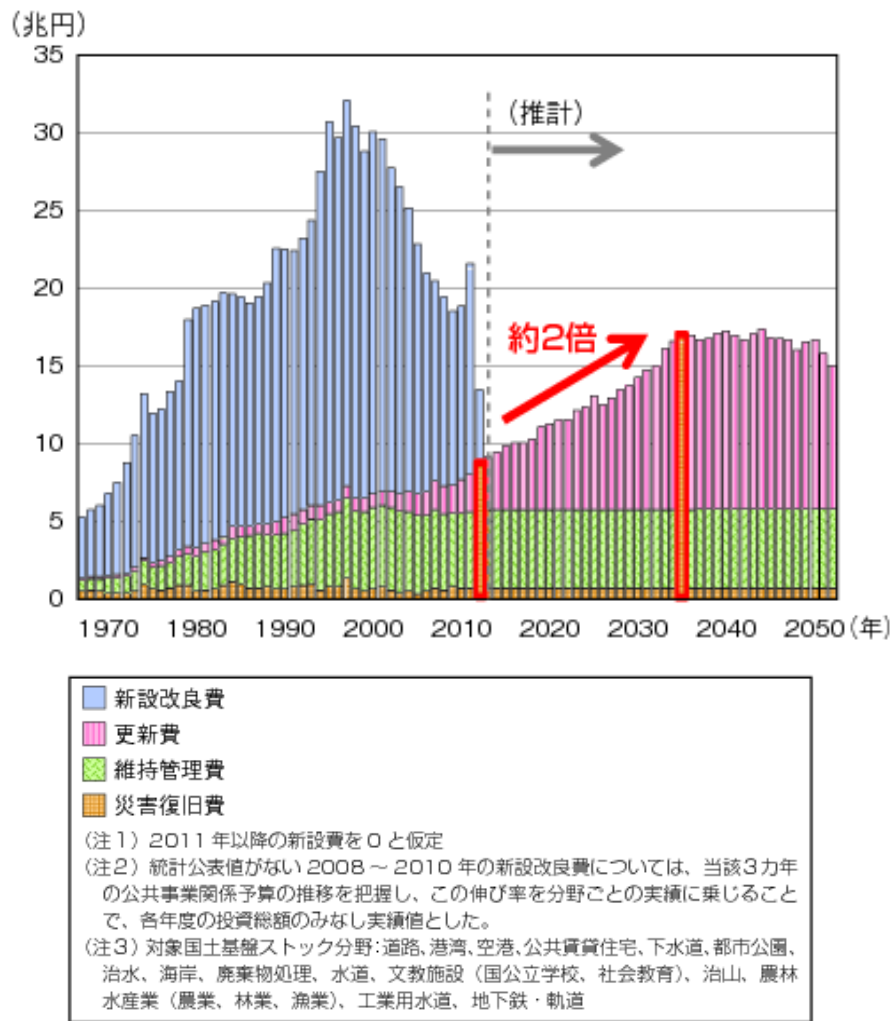


図 1.4 国土基盤ストックの維持管理・更新費の将来見通し(全国)(出典:平成 24 年版 情報通信白書 [2])

年のバブル崩壊以降も 2000 年代前半まで増加を続けた [2]。そしてこの新設改良費は現在、抑制される方向に進んでいる。しかし、高度経済成長期に整備された設備から、老朽化による更新の必要性が生じているため、今後は新設改良費に代わり更新費が増加することが予想される。しかし、少子高齢化の進行にともない財源の確保が難しくなることは自明である。その為、政府は設備の更新を極力先送りするよう、ICT やロボット技術等を利用した効果的・効率的な保守管理による社会インフラの長寿命化に方針を変更している [5-9]。このことは、図 1.5 の維持修繕工事の推移から、10 年以上減少傾向にある新規工事に対して、維持補修工事が堅調に推移していることとも一致している。しかしその一方で、1997 年と 2013 年の建築業就業者数の年齢分布を示す図 1.6 では、市場規模縮小を反映して、ICT や

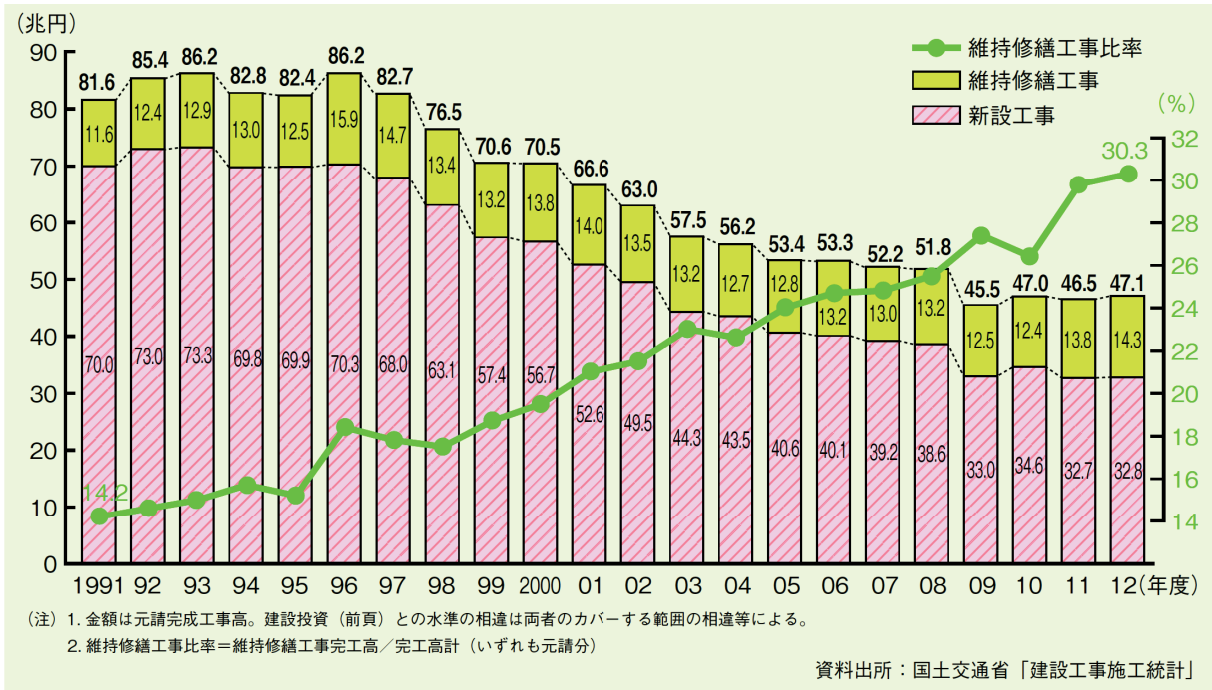


図 1.5 維持修繕工事の推移 (出典:建設業ハンドブック 2014 [10])

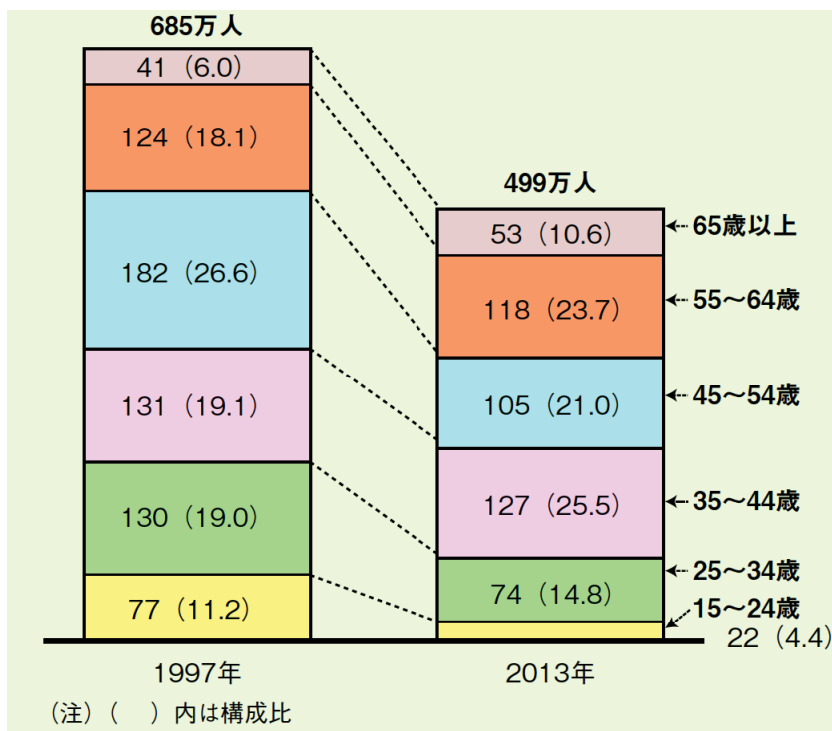


図 1.6 建築業就業者数の年齢別推移 (出典:建設業ハンドブック 2014 [11])

ロボットなど技術革新に対応できる 15~34 歳までの若い世代の就業者が急速に減少していることを示している。そのためインフラ、建設業関連分野でも対応が急がれる。

以上、製造業・医療福祉・インフラの例を挙げてもわかるとおり、少子高齢化に起因し、社会全般に影響を及ぼす大きな課題が存在する。特に医療福祉やインフラに関しては、今

後も国の財政を圧迫していくことが予想される。しかし、2015年現在でも国際競争力を維持している製造業の分野と連携することで、他国に先行してこれらの課題に対処することができれば、課題克服することで得られた成果を新たな産業・雇用の創出につなげていくことが可能になる。現に、これまでも製造業の分野においては、産業用ロボットをはじめとする自動化技術により労働力不足を克服してきた実績がある。産業用以外の分野においてもロボット技術を活用すべく、これまで多くの研究者により多様な研究開発が行われてきている [12-14]。これらの取り組み中から課題解決につながる成果が生まれれば、単に労働力不足の解決になるだけでなく、これまでロボットが未投入であった分野の新市場を開拓することとなり、新産業の創出にもなる。

こうしたロボットの活用に対する取り組みは日本国内だけではなく、欧米や中国などでも新たな産業として様々な取り組みがなされている。近年、急速なデジタル化やネットワーク技術の進行によって、様々な物がネットワークに接続される IoT(Internet of Things) 社会に変化しつつある [15]。欧米においては、この流れの中でロボットを新たなサービスの担い手として位置づけ、ロボットの市場を創出して主導権を確保しようとしている。例えば、米国では「国家ロボットイニシアチブ (National Robotics Initiative)」を 2011 年に提唱し、ロボットの基礎技術に毎年数千万ドルの資金投入を行っている [16,17]。EU では、「EU SPARC Project」が 2014 年に立ち上げられ、製造業の他、農業、医療福祉などのサービス分野でのロボット実用化を目指して、今後官民合わせて 28 億ユーロ規模のプロジェクトが計画されている [18]。さらに中国においては、政府が 2012 年の「智能製造装置産業発展計画」により、人件費抑制と品質等の競争力強化のため産業用ロボットの導入を推進している [3,19]。

これら欧米や中国の取り組みに対し、我が国では、ロボット革命実現会議による「ロボット新戦略 Japan's Robot Strategy -ビジョン・戦略・アクションプラン-」が提言されている。この中で 2015 年から 2020 年までの 5 年間で官民挙げて 1000 億円規模のロボットプロジェクトの推進を目指している [20]。また、この提言の中で次の 3 つを目標に定めている。

1. センサ、AI(人工知能)などの技術進歩により、従来はロボットと位置づけられてこなかったモノまでもロボット化する。
2. 製造現場から日常生活の様々な場面においてロボットを活用する。
3. 社会の課題の解決やものづくり・サービスの国際競争力の強化を通じて、ロボットの新たな付加価値を生み出し利便性と富をもたらす社会を実現する。



このような社会ニーズに対し、山本らの報告 [21] のように、マニピュレータを搭載したサービスロボットのような取り組みも行われている。

### 1.1.2 ロボットの現状

産業用ロボットは図 1.2 に示すように、すでに大きな市場を形成している。その市場規模は 2006 年に 7300 億円で最高額を記録した後、2009 年のリーマンショック時に前年度比 43.4%まで減少したものの、その後は回復し 5000 億円台を推移しており、2012 年の生産額は国内向けと海外向けの合計で 5280 億円に上る。2009 年のリーマンショックで低下した産業用ロボットの市場が回復し、現在の市場規模を維持している理由として中国市場の活況がある。産業用ロボットの部門別出荷額割合の図 1.7 および国別輸出割合の図 1.8 から、2012 年の実績では、実に日本のロボットの 67%が輸出され、さらにその 33%が中国に輸出されている。つまり日本で製造されているロボットの 22%が中国に輸出されている。ただし、この中には日本国内で調達され、生産設備に組み込まれた状態で輸出されるロボットは統計には反映されていないので、実際にはさらに上昇するものと思われる。これは、中国では前節でも取り上げた「智能製造装置産業発展計画」が進行中であり、ここ数年競争力向上のために積極的に最新鋭の産業用ロボットの導入に力を入れているためである。

この輸出量から中国市場は日本にとって主要な輸出先であることは明白である。中国市場にロボットを提供するために多くの日本企業が、現地ロボットメーカーとの合弁事業に参入している。しかし、このことは技術の流出も進めることになり、現在では現地メーカーによる技術面のキャッチアップと価格競争にさらされている [22,23]。この理由として、産業用ロボットの教示法が未だにティーチングペンダントのような古い技術が利用されていることにある。つまりロボットに教示可能な作業内容は教示法で制約を受けるため、機能面で差別化を図ることが難しい。その一方でモータや制御装置などの主要部品を調達して組立てれば、安価なロボットを提供することが可能なことがある。

産業用ロボットは、製造ラインでの搬送や溶接、または塗装など生産設備の一部に組み込んで利用される。産業用ロボットを含む生産設備を構築する際に検討すべき項目として図 1.9 に示す品種数(扱うワークの種類)とロットサイズ(生産量)がある。品種数は品種変更に伴う段取り替え作業により、生産を行わない時間の増減と、その結果発生する生産性の低下を判断するために利用し、ロットサイズは製品の量産効果を判断するのに利用する。この中で、通常産業用ロボットは多品種少量生産を目的とした生産設備に利用されること

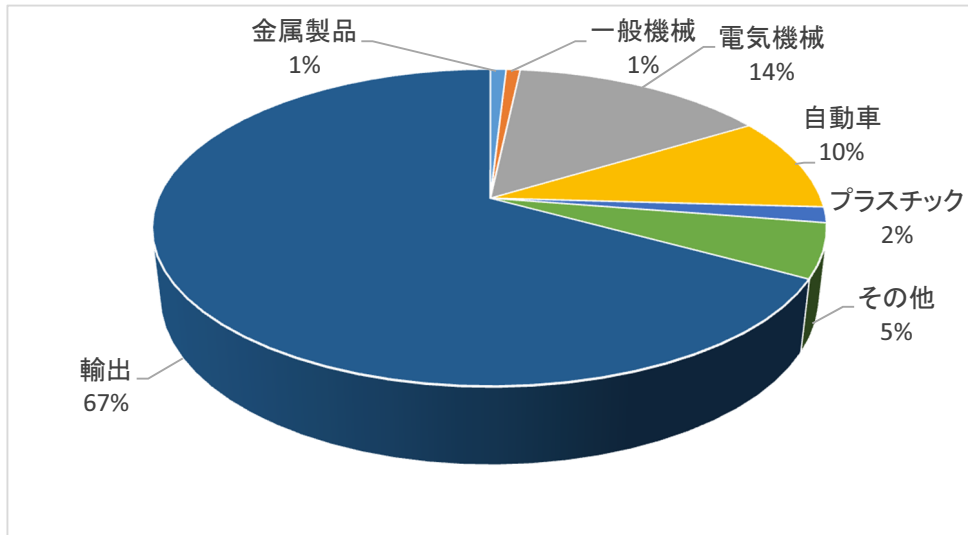


図 1.7 2012 年主要部門別出荷割合比 (出荷額ベース)(出典:ロボット産業需給動向 2013 年版 [24])

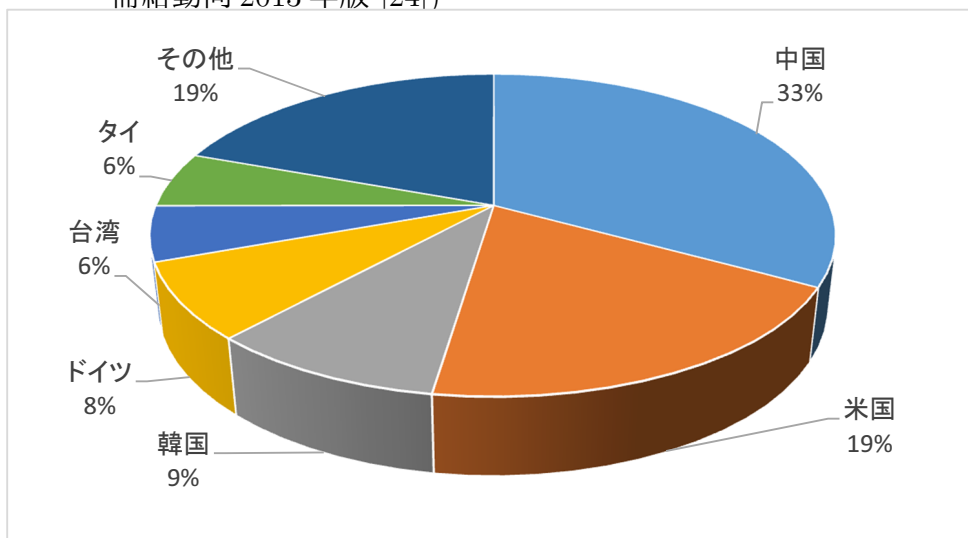


図 1.8 2012 年国別輸出割合比 (出荷額)(出典:ロボット産業需給動向 2013 年版 [24])

が多い。これは産業用ロボットは取り扱う品種の変更にプログラムで対応するので、大掛かりな設備の変更が不要で、段取り替え作業による生産性低下の影響が少ないためである。一方、少品種大量生産を目的とした生産設備においては、多品種少量生産向けの設備と比較すると段取り替え作業の回数自体が少ない。そのため、1回の段取り替え作業に要する時間が若干長くなっても、生産性におよぼす影響が少ない。したがって搬送装置なども、より生産性を高めるために産業用ロボットではなく、高速動作が可能な専用機を利用することが多い。

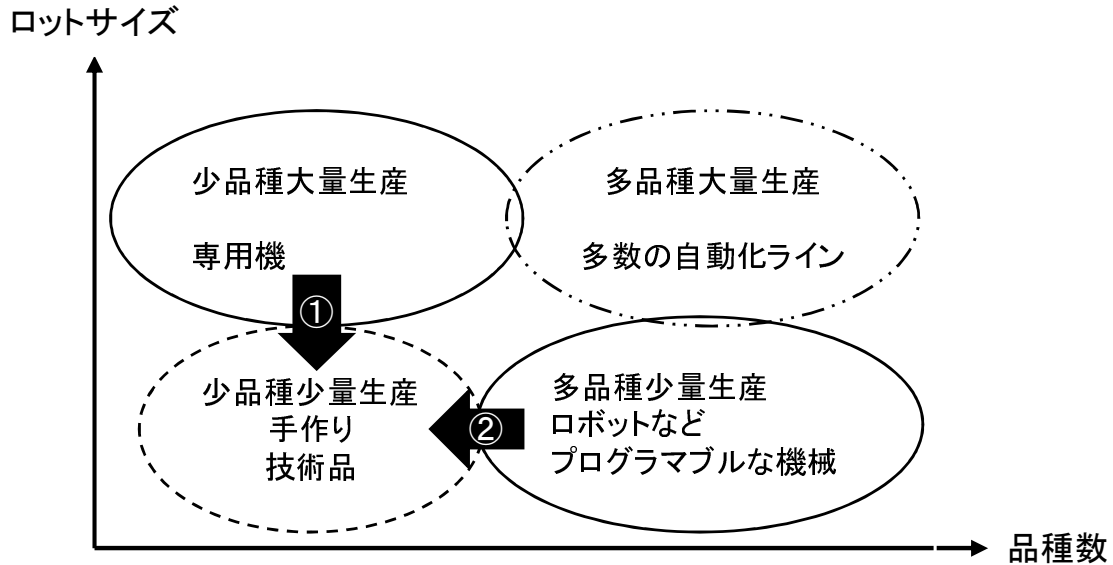


図 1.9 ロボットと専用機の使い分け (出典:ロボットハンドブック (2005 年版) [25])

多品種少量生産の設備では、品種の変更が多いため生産に寄与しない段取り替え作業の時間をいかに圧縮するかが生産性向上の鍵になる。そのため生産設備の段取り替え作業で時間を要する産業用ロボットの教示作業の時間圧縮が求められるが、先にも述べたように産業用ロボットの教示作業は、ティーチングペンダントを利用した旧態依然としたものなので改善も限界に達しつつある。

こうした状況で中国の現地メーカーなどに対して産業用ロボットの差別化を図るため、ロボットがまだ活用されていない少品種少量生産の分野にロボットを適用することが考えられている。一般的には、図 1.9 の矢印①の少品種大量生産のシステムを少品種少量生産に適用することは、困難とされている。一方、矢印②の多品種少量生産のシステムを少品種少量生産に対応させることは、ロボットが作業に対応さえすれば基本的に移行が可能である。そのためには、産業用ロボットのフレキシビリティ向上のための教示法の実現が今後非常に重要になる。

### 1.1.3 ロボットの教示法の重要性

産業用ロボットは 1950 年代に実用化されて以来、ロボットはプログラム可能な位置決め装置としてティーチングプレイバック方式が主に採用されている。この方式がいまだに使われている理由は、ロボットの通過点と目標点の位置情報を数値で入力するという単純な操作方法と、この入力作業を実環境下で試行錯誤によって決定する「正確さ」である。こ

の方式ではこれまで教示装置として主にティーチングペンダントが利用されてきた。このティーチングペンダントを利用した教示法は、ロボット移動を開始する位置、通過する位置、最終的な目標の位置を教示するものである。つまり PTP(Point To Point) 制御用の教示法である。PTP 制御では、通過点を通過するようにロボットを制御するものの、点と点を結ぶ途中の軌道についての制御は行っていない。これまでの主な用途である搬送、塗装、スポット溶接など、ロボットが移動に必要な通過点が多くない場合は問題なく用いられてきた。しかし、近年の産業用ロボットは多自由度な構造を活かして組立てやバリ取りなどの作業への対応が求められる。これらの作業では正確な軌道の再現が求められるため、軌道を細分化してロボットに与える必要がある。つまり CP(Continuous Pass) 制御用の教示法が必要になる。

また、近年では産業用ロボットの技術を利用したサービスロボットの研究も行われてきている。例えば安川電機社製ベットサイド型下肢運動療法装置 TEM LX2 [12-14] のような医療的リハビリテーション（以後、リハビリと呼ぶ）における療法士の補助を行うロボットである。しかし、この TEM LX はティーチングペンダントと同様にキーボードによる数値入力で患者の各関節の回転角度を入力する方式であった。そのため、療法士がリハビリの内容をロボットに入力するのに時間を要するものであった。

このように、ロボットが新たな用途に利用される際の教示法としてティーチングペンダントは必ずしも適したものとは言えない。しかし、他に現実的な教示法がないため、ロボットは限られた用途の範囲で発達してきた経緯がある。

この教示法の制約から脱するためには、短時間で複雑な軌道の教示が可能な教示法を開発する必要がある。今後産業用ロボットの技術を利用したサービスロボットなど、新分野のロボットの登場も予想されることから、誰でもロボットを扱える直感的な教示法の実現が必要である。これらの理由から本研究では、誰もが容易に利用でき、短時間で複雑な軌道を教示可能な直接教示法の実現を目指す。

## 1.2 ロボットの教示法

### 1.2.1 教示法の分類

ロボットは用途や環境等によって教示法を適宜選択する必要がある。このロボットの教示法のなかでも、本研究で提案する教示法と競合すると思われるものについて、すでに実用化されたもの、研究途上であるものの一覧を表 1.1 に示す。また、次節以降でこれらに

ついて説明する。

表 1.1 教示法の分類

|       | 教示法                    | コスト | 教示作業時間 | CP制御用軌道 | 操作性 | 備考                                       |
|-------|------------------------|-----|--------|---------|-----|--|
| 実用化   | ティーチングペンダント<br>(遠隔教示法) | ○   | ×      | ×       | ×   | ・目標位置を手動入力<br>・PTP制御用                    |
|       | オフラインティーチング<br>(間接教示法) | ○   | ○      | ○       | ×   | CADデータがないものは<br>計算できない<br>現場最終調整必要       |
| 研究レベル | 力覚センサ<br>(直接教示法)       | ×   | ○      | ○       | ×   | ・周囲に接触⇒不安定<br>・人-ロボット動特性差<br>⇒操作に違和感     |
|       | モデル機構<br>(直接教示法)       | ×   | ○      | ○       | ×   | 教示軌道の精度に課題<br>・ワイヤが重力でたわむ<br>・ワイヤが張力で伸びる |
|       | 光学カメラ<br>(直接教示法)       | ×   | ○      | ○       | ○   | ・照明の影響を受け易い                              |
| 新提案   | パラレルワイヤ機構<br>(直接教示法)   | ○   | ○      | ○       | ○   | ・ロボットの動特性の影響を受けにくい<br>・対象に接触しながらの教示が可能   |

### 1.2.2 既存の教示法とその課題

ロボットの既存の教示法は3つに大別される [25]。現在ティーチングペンダントを利用した遠隔教示法が主流である。以下にそれぞれの方法の特徴をまとめる。

#### 1. 遠隔教示法

ロボットから離れて教示者がティーチングペンダント等の装置を使用し、ロボットが移動する軌道上の点数値入力する教示法である [26–28]。三次元空間の目標位置を数値入力する必要があるが、人間には正確にその位置を知覚する能力がないので、試行錯誤で軌道を決定する手法である。目標とする点が増えるほど作業が増加するので、複雑な曲線などの教示は、教示者にとって負担になる。そのため操作性は良くない。また、重力等の影響で、教示した目標位置と実際のロボットの位置が一致しないため位置誤差を生じることがある [29]。

#### 2. 間接教示法

コンピュータ上でのシミュレーションにより教示を行う方法である [30–35]。シミュレータ上に生産ラインのモデルを構築するので、事前に最適解を求めて検証が可能である。生産設備を止めることなく教示作業の大半を行うことが可能であるが、最終的に実機にて精度の確認・検証が必要である。この確認・検証作業ではティーチングペンダントを利用するため、作業次第で操作性や作業時間が大きく異なる。操作性を低下する要因は間接教示法自体ではなく、このティーチングペンダントにある。利用の前提条件として、ロボット、ワーク、設備・周辺環境のCAD化が必要である。よって、これらをCAD化できない場合には利用が難しい。

### 3. 直接教示法

教示者が直接ロボットのエンドエフェクタを動かし、その軌道を記憶する教示法である。教示者がロボットを直接手で押すため、教示者の直感的な動作の軌道を教示出来るという長所がある [29]。一方で、人とロボットが接触した状態で操作することから、安全性の確保が難しくなるという短所がある。

現在はティーチングペンダントを利用する遠隔教示法が主流である。本研究では、1.1.3節に記したように、誰もが容易に利用でき、短時間で複雑な軌道を教示可能な教示法を実現するため、直接教示法を選択し、その技術的課題を解決することで新たな教示法を提案する。

#### 1.2.3 直接教示法の先行研究

直接教示法としてすでに研究されているものとして以下の3つに大別される。

##### 1. 力覚センサを利用した教示法

直接教示法では、主に6軸の力覚センサを入力装置として利用される。この方法ではロボット上に力覚センサを固定する。ロボットはこの力覚センサに作用する力に応じて移動するようにプログラムされている。教示者はロボットを動かしたい方向に力覚センサを押して移動させ、この動きを教示の情報として記録する。教示中、ロボットの制御には力の情報に対してインピーダンス制御等の力制御が利用される。

6軸力覚センサを利用した教示法の長所は、ロボットを動かしたい方向に押すだけで良いということである。この「押す」という直感的な方法でロボットに教示できることは、教示を容易にするばかりでなく、より教示者の意図に近い動作の教示を可能

にする。一方、この教示法を実際に利用する上での課題として大きなものに次の2つがある。

1つは安全性の問題である。榊らの研究 [36] によると、インピーダンス制御を適用したロボットを外部環境に接触させると、制御系が不安定になることが報告されている。これは、教示者によってくわえらる操作のための力と、外部環境との接触によって発生する力の合力が力覚センサで計測されるためである。ロボットはこの合力に応じて動作をしようとするため、教示者の意図しない動作をすることになり安全上の問題となる。

もう1つは教示者とロボットの動特性の差による問題である。積際ら [37] の研究によると、力制御を利用した教示作業では、教示者とロボットの動特性の差から、教示者の動作に対してロボットは常に追従遅れを発生することが報告されている。この追従遅れが教示者への抵抗として伝わるため、抵抗の影響は教示者の意図する軌道と教示した軌道の誤差となって表れる。この影響を低減して、CP 制御で利用可能な軌道を教示するためには、追従遅れの影響が無視できる速度で動作させる必要がある。その一方で、速度については JIS B 8433 「産業用ロボット-安全要求事項-第 1 部：ロボット」により、人とロボットが近接して作業する場合の速度制限を 250mm/s 以下にする必要がある。

これらの問題を解決するために、インピーダンス制御の高速化による追従性の改善等が提案されている [36, 38]。しかし、一般的な産業用ロボットの駆動機構はコストやサイズ上の制約から高減速比の歯車減速機を用いることが多いので、追従性の向上にも限界がある。そのため、従来の問題を解決する、直感的な操作による新たなロボット教示法が求められている。

## 2. モデル機構を利用した教示法

直接教示法の派生方法として、ロボット本体ではなく、動力を持たないモデルを動かすことで軌道を教示する教示法である。この教示法には、杉田ら [39] によると、複数本のワイヤで構成した位置・姿勢計測装置を教示者が手で動かして軌道を教示するものである。この方法では位置・姿勢計測装置の先端にバリ取り用工具のダミーを接続し、このダミー工具をワークの加工部位に接触させることで軌道を教示する。この教示法ではロボットを動かさないため安全性の面で有利である。

一方で、ワイヤが重力に対して撓むことと、これを防ぐために張力を加えるため、ワイヤの伸びと撓みによる誤差要因の問題がある。また、高精度を確保するため、無動力のマニピュレータ型多自由度三次元形状測定器を使用する教示法が王ら [40] や、古屋ら [41–43] らによって提案されている。これらは、教示者が重量のある三次元形状測定器を保持しながらプローブをワークに接触させて教示を行う。そのため良好な精度が得られる代わりに、操作性に課題が残る。また、ロボットとは別に教示用のモデルを用意するため、コスト面でも不利である。

### 3. 光学式センサを利用した教示法

力覚センサを利用した直接教示法の問題を解決するためにカメラと画像処理技術を利用した光学式教示法がある [44]。例えば山本ら [45] や米澤 [46] はステレオカメラと1枚のマーカを、牧ら [47] は1台のカメラと複数のマーカを利用した教示を提案している。さらに、牧らはこの教示法をロボットに搭載した状態で、リハビリ支援ロボットシステムとして評価している [48]。患者が専用の装具を前腕に装着し、その装具とロボットのエンドエフェクタとを接続する。患者が装着した装具にはカメラで認識する為の目印であるマーカを取りつけて光学式にエンドエフェクタの位置・姿勢情報を取得する。位置検出用マーカは方向の異なる3枚の認識マーカを張り合わせて多面体とし、その中から最も認識しやすいマーカを選択する方法を考案した。これによりマーカが患者の腕の陰に隠れるなどの計測不能となる可能性を低くしている。

この手法では、マーカの動きをカメラで撮影することでロボットに利用可能な連続した位置の情報を取得できる。ロボットを動かす必要が無いことから、教示作業中の安全性を確保する上で有効である。一方で、精度改善には高い画素数を有するカメラが必要になることと、高画素数のカメラで取得した画像処理にコンピュータの処理能力の高いシステムが必要となる。このことはコストアップの大きな要因となる。また、照明の変化によって計測が出来なくなるという環境に対するロバスト性で劣るといふ短所がある。

#### 1.2.4 本研究における直接教示法の新規性

近年、生産設備はセル生産システムの導入などの高度化が進んだ結果、ロボットに対しても組立てやバリ取りなど高度な作業が求められるようになった。従来からある搬送作業など、限られた数点の位置の教示で良い用途であれば従来のティーチングペンダントを利用



する教示法が良い。しかし、組立てやバリ取りなど、数点の目標位置の間を移動する PTP 制御では実現できない作業を実現するためには、連続する軌道を教示・再生する CP 制御への対応が必要である。また、最近では生産現場以外でのサービスロボットの実現も期待されているが、サービス用途の場合、ロボットの作業対象が CAD データ化されていないものが多い。そのため、オフラインティーチングの適用が難しい上に、教示すべき軌道は非常に複雑になることが予想される。このようなロボットの用途に対して、誰もが容易に教示できるシステムを用意する必要がある。それには、従来のティーチングペンダントではなく、直感的操作が可能な直接教示が適している。

直接教示法の主流である力覚センサを利用した教示法では、力覚センサを介して教示者とロボットが直結する。そのため、教示者とロボットの動特性の違いからロボットの安定性や操作性に悪影響を生じるといった課題があった。本研究の新規性は、この問題を解決するために教示者とロボットの間を柔軟に接続しつつ、その相対位置を計測するパラレルワイヤ教示装置と、この教示装置を利用して教示点の軌道を取得する教示法を考案し開発することにある。この教示装置では、教示者が把持する教示点とロボットのエンドエフェクタを 6 本のワイヤを介して接続する。教示点とベースの相対位置はワイヤの長さの変化から計算して求める。ロボットが柔軟に教示点に追従するようにしている。これにより従来の力覚センサによる直接教示の課題を解決した教示法を実現する。

また、既存の力覚センサを利用した直接教示法では、ロボットが周辺環境と接触することで不安定になるといった課題があった。そのため教示作業中に、作業対象と接触して作業に必要な力の情報を取得できない。しかし、本研究で提案する手法では、パラレルワイヤ教示装置とは別に教示者と作業対象となる製品の間に力覚センサを設けることで、位置情報に加えて作業に必要な力の情報を取得することが可能である。このことも本研究の新規性である。

### 1.3 本論文の目的

本論文の目的は、既存の力覚センサによる直接教示法の課題を解決するため、ロボットに位置情報を教示するパラレルワイヤ教示装置と、これを搭載したロボット教示システム(以後、教示システムと呼ぶ)を開発することである。本教示法はバリ取りロボットへの適用を目標としていることから、教示した軌道の情報に対して、バリ取りに利用可能な精度の実現を目指す。2 章及び 3 章では、バリ取り作業への適用を想定して、バリ取り作業に

砥石を利用する場合の位置精度を  $\pm 0.25\text{mm}$ 、ブラシを利用する場合の位置精度を  $\pm 1\text{mm}$  とした。また、バリ取りに際し、目標とする送り速度はブラシメーカーの推奨送り速度の最大値  $3.5\text{m/min}$  から、 $58\text{mm/s}$  とする。さらに、この教示装置に 6 軸力覚センサを追加し、位置と力の情報を同時に教示する教示法を開発する。さらに、この教示装置を搭載したりハビリ支援ロボットを開発し、療法士による徒手療法の再現可能性を検証する。各章における目的を以下にまとめる。

**第2章** 教示者とロボットの間を柔軟に接続する教示装置の実現のために、パラレルワイヤ機構を利用したパラレルワイヤ教示装置を開発する。さらに、この教示装置による位置計測の精度を検証する。

**第3章** パラレルワイヤ教示装置を利用した教示法ならびにこの教示装置を利用した教示システムを開発する。さらに、この教示システムを利用して既知の教示を与え、その精度を検証する。

**第4章** 脳卒中麻痺患者の上肢の反復負荷抵抗トレーニングとして療法士による徒手療法をロボットに教示するため、パラレルワイヤ教示装置と 6 軸力覚センサを併用した、位置と力の教示装置を開発する。さらに、療法士の促通動作を再現するリハビリ支援ロボットを試作し、再現可能性を検証する。

## 1.4 本研究の構成

本論文は5つの章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序章であり、本研究の背景、先行研究、ならびに本研究で解決すべき課題を述べ、本研究の新規性と目的を明確にしている。

第2章では、教示者と産業用ロボットの動特性の差によって発生する相対位置の変化を吸収しつつ、両者間の相対位置を計測する方法として、パラレルワイヤ機構を利用した教示装置とこの装置単体での位置計測精度について述べている。提案したパラレルワイヤ教示装置は、Stewart Platform 型パラレルリンク機構のリンクをワイヤに置換したものである。この機構は、教示者と産業用ロボットの間を6本のワイヤで接続し、両者の相対位置の変化をワイヤ長の変化から算出する。さらにパラレルワイヤ機構単体での静止位置の精度を確認するため、工作機械(5軸加工機)を利用してこの装置に任意の位置への変位を同機構に与え、その計測精度を検証している。

第3章では、第2章で開発したパラレルワイヤ教示装置をロボットに実装した教示システムを構築し、提案教示法により取得した位置情報の精度について述べている。本研究においては、ロボットがワークのバリを取る作業を想定している。まず、産業用6軸ロボットに提案教示法を実装するためのロボット運動制御法を提案した。パラレルリンク機構は基本的に垂直多関節構造の産業用ロボットと比べて可動範囲が狭いため、パラレルワイヤ教示装置が教示者の位置を常時計測できる様、産業用ロボットのエンドエフェクタが教示者の動作に追従する制御をする。次に、教示者に代わり、リニアアクチュエータで再現性のある動作を教示する教示システムの評価装置を構築した。この装置を用いて教示システムに教示を行い、評価装置が与えた軌道と教示システムが計測した軌道の比較をすることで、バリ取り作業を想定した教示の精度を検証している。

第4章では、パラレルワイヤ教示装置と力覚センサを併せて使用する教示システムを開発し、本教示法のリハビリ支援ロボットの教示への適用について述べている。これは、第3章までで産業用ロボットへの教示について検討した結果リハビリの動作の教示にも利用可能と思われることに加え、パラレルワイヤ教示装置自体は産業用ロボットと教示者の相対位置情報を利用した教示法であり、力覚センサの追加により軌道と力の2種類の情報を教示するシステムが比較的容易に開発可能であると考えられたためである。ここでは、脳卒中片麻痺患者などに対し療法士が行うリハビリの一つである反復負荷抵抗訓練の教示を試みた。この方法は療法士が患者の麻痺側上肢を把持し、患者が発する力に応じて療法士が判断した上で患者の前腕に抵抗を付与しながら上肢を誘導する。このリハビリを療法士に代わりロボットが行うためには、この動作の軌道と力の情報を同期して取得する必要がある。そのため、パラレルワイヤ教示装置と6軸力覚センサを内蔵した装具による教示システムを試作し、反復負荷抵抗訓練の教示を試みた結果、軌道と力の情報を同期して収集できることを確認している。

第5章では、本研究で得られた成果をまとめ、本研究で残された課題を述べると共に今後の展望について言及する。



## 第2章

# パラレルワイヤ教示装置

### 2.1 はじめに

バリ取り作業のような複雑な動きをロボットに教示する方法として直接教示法がある，現在主流の直接教示法では，入力装置である力覚センサを介して教示者とロボットが剛体接続されていたため，その安定性や教示した軌道の精度に課題を残していた．第2章ではこれらの課題を解決するため教示者とロボットの間を柔軟に接続するパラレルワイヤ教示装置を開発する．そのため，はじめにパラレルワイヤ機構の原理について述べる．提案したパラレルワイヤ機構は Stewart Platform 型パラレルリンク機構のリンクをワイヤに置換したものである．次にパラレルワイヤを利用する教示法の概要を説明する．さらに開発したパラレルワイヤ教示装置について述べる．この機構は教示者と産業用ロボットの間を6本のワイヤで接続し，両者の相対位置の変化をワイヤ長の変化から算出するものである．これにより教示者と産業用ロボットの動特性の差によって発生する相対位置の変化を吸収しつつ，両者間の相対位置を計測することを可能にする．最後にパラレルワイヤ教示装置を5軸加工機に取り付けて，パラレルワイヤ教示装置単体での静止位置の精度を確認する．

### 2.2 パラレルワイヤ教示装置

#### 2.2.1 パラレルワイヤ機構

ロボットへの直接教示用入力装置としてパラレルワイヤ機構を提案する．パラレルワイヤ機構は，パラレルリンク機構の一つである Stewart Platform 型機構 [49] のリンクをワイヤに置き換えたものである．パラレルワイヤ機構はエンドエフェクタに複数のワイヤを接続して駆動することと，駆動をワイヤという軽量な部品で行うことから，高速な駆動が可能な機構である．そのため，スポーツ用の力覚提示装置やリハビリのトレーニング装置などに利用される [50–56]．

はじめに，パラレルリンク機構について説明する．パラレルリンク機構とは，ベースと可動プラットフォームを複数のアクチュエータで並列に接続して位置姿勢制御を行う機構

の総称である。その中でも、図 2.1 に示す Stewart Platform 型機構は、航空機のフライトシミュレータなど、6 自由度の駆動機構として広く利用されている。この機構はベースおよび可動プラットフォームとその間の 6 本のリンクからなる。このベースと可動プラットフォームの中心位置をそれぞれ  $O_B$ ,  $O_T$  とし、ベースのジョイント  $B_1 \sim B_6$  と可動プラットフォームのジョイント  $T_1 \sim T_6$  をそれぞれの中心に対して同一円周上に配置する。さらに、これらのジョイントをリンク  $L_1 \sim L_6$  で接続する。このリンクの長さを独立に制御することでベースに対する可動プラットフォームの相対位置と相対姿勢を変化させることが可能になる。図 2.1 より、ベース上の座標系  $O_B-X_B Y_B Z_B$  を静止座標系、この静止座標系に対して可動プラットフォームの位置・姿勢を表すための座標系を  $O_T-X_T Y_T Z_T$  とする。この機構には、リンクの伸縮方向にのみ力が作用し、曲げ方向には力が作用しないので機構の剛性が高いことや、他のパラレルリンク機構と比べて逆運動学の計算が比較的容易であることなどの特徴がある。一方、提案するパラレルワイヤ機構では、リンクをワイヤに交換するので、機構の剛性が失われる。よって、可動プラットフォームの位置姿勢制御に用いることは出来ない。しかし、ワイヤの巻き取り機構をベース側に設けることでワイヤのたわみを無くし、ワイヤの長さ（以後、ワイヤ長と呼ぶ）を測ることで、人間が可動プラットフォームを動かしたときの相対位置と相対姿勢を求めることが可能となる。また、ワイヤが柔軟性を有し、可動プラットフォームが軽量になることから、操作者が可動プラットフォームを持って動かす際の操作力は少なく済み、操作性に優れることが期待される。

次にパラレルワイヤ機構の順運動学の計算について考える。パラレルワイヤ機構のベースと可動プラットフォームの間の位置・姿勢とワイヤ長の関係について、可動プラットフォームの位置、姿勢からリンク長を求める逆運動学は幾何学的に求められる [49]。リンク長から可動プラットフォームの位置、姿勢を求める順運動学についてはヤコビアンを用いた方法 [57] により求められる。パラレルワイヤの順運動学の計算について考える。可動プラットフォームの中心位置  $O_T$  の位置ベクトルを  $\mathbf{x}_T$ 、姿勢角度ベクトルを  $\boldsymbol{\theta}_T$ 、速度ベクトルを  $\mathbf{v}_T$ 、角速度ベクトルを  $\boldsymbol{\omega}_T$ 、各ワイヤ長を  $L_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  とする。位置・姿勢ベクトルを  $\mathbf{X}$ 、速度・角速度ベクトルを  $\dot{\mathbf{X}}$ 、ワイヤ長ベクトルを  $\mathbf{L}$ 、さらに各ワイヤ長  $L_i$  の方向を表わす単位ベクトル  $\mathbf{S}_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 、可動プラットフォームの中心位置からワイヤ  $i$  の固定点までのベクトルを  $\mathbf{T}_i$  とすると、それぞれ次式となる。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_T \\ \boldsymbol{\theta}_T \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

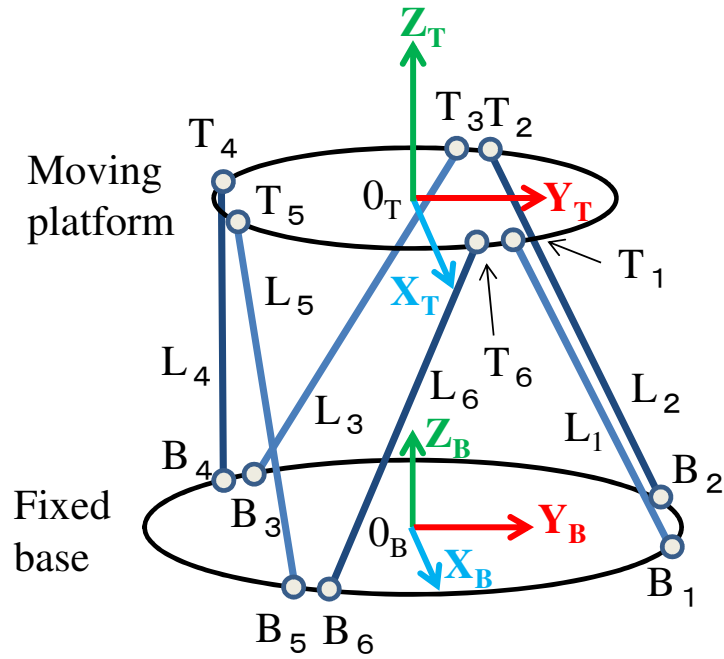


図 2.1 スチュワートプラットフォーム型平行リンクの構造

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_T \\ \boldsymbol{\omega}_T \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{L} = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6]^T \quad (2.3)$$

$$\mathbf{S}_i = \overrightarrow{B_i T_i} / |\overrightarrow{B_i T_i}| \quad (2.4)$$

$$\mathbf{T}_i = \overrightarrow{O_T T_i} \quad (2.5)$$

速度・角速度ベクトル  $\dot{\mathbf{X}}$  とワイヤ長の時間変化のベクトル  $\dot{\mathbf{L}}$  の関係は、ヤコビアン  $\mathbf{J}$  を用い、次式のように表わされる。

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{X}} \quad (2.6)$$

ただし、ヤコビアン  $\mathbf{J}$  は

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1^T & (\mathbf{T}_1 \times \mathbf{S}_1)^T \\ \mathbf{S}_2^T & (\mathbf{T}_2 \times \mathbf{S}_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{S}_6^T & (\mathbf{T}_6 \times \mathbf{S}_6)^T \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

と表される [57]. これを用いることで, パラレルワイヤ機構の順運動学の関係式は次式のようになる.

$$\mathbf{X} = \int_0^t \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{L}} dt \quad (2.8)$$

式 (2.8) を用いることで, 可動プラットフォームの中心位置  $O_T$  の位置・姿勢を求めることができる. ただしその条件として, 6本のワイヤ長とワイヤの方向を表わす単位ベクトル  $\mathbf{S}_i$  を求める必要がある. しかし, 単位ベクトル  $\mathbf{S}_i$  を計測することは困難である. そこで, 小菅ら [57] の Forward Kinematics 計算方法を適用する. この方法により, 既知の位置・姿勢を初期値として, 現在のワイヤ長に一致する位置・姿勢を反復試行から求めることが可能となる. 本研究で開発するパラレルワイヤ機構では, 可動プラットフォームを固定するためのホルダに可動プラットフォームを固定した状態でのワイヤ長  $\mathbf{L}$  とその方向の単位ベクトル  $\mathbf{S}_i$  が既知なので, これを初期値  $\mathbf{S}_0$  として用いる.

### 2.2.2 パラレルワイヤ機構を用いた教示法

前節のパラレルワイヤ機構を用いたロボットの教示法を提案する. 教示作業の手順を図 2.2(a)~(e) に, 教示作業で取得した軌道をロボットで再生する様子を図 2.2(f) に示す. 本教示法はバリ取り用として開発するため, 工具先端の教示点を加工対象に接触した状態での教示を前提としている. パラレルワイヤ機構は, 図 2.2(a) に示すようにロボットのエンドエフェクタに固定される. また, パラレルワイヤ機構の可動プラットフォームには, 教示者が操作するためのハンドルと, バリ取りなど加工の作業を行うための工具が取り付けられている. このツールの先端を教示点とする. なお, 図 2.2(a), (e), (f) においては, 可動プラットフォームをホルダによりベースに固定しているので, 図からワイヤを省略している.

教示する際, 図 2.2(c) に示すように, 教示者はハンドルを動かして教示を行う. この時, 加工対象にツールが接触した状態を維持したまま移動することで, 加工のための軌道を取得する (動作②). 一方, 動作を再生する際は, 図 2.2(f) に示すように, 教示作業で取得した軌道に沿ってツールが動くようにロボットを制御する (動作⑤). 次に, 教示作業におけるロボットの制御手順を説明する. 図 2.2(a) は, 可動プラットフォームがベースに固定された静止状態である. このとき, 教示者は自らの手でハンドルを持って, ベースの固定を解除すると, 教示のための待機状態 (図 2.2(b)) となる. この際, 教示作業中の可動プラットフォームとベースとの衝突回避のために, ベースは図 2.2(b) の①の方向に, あらかじめ



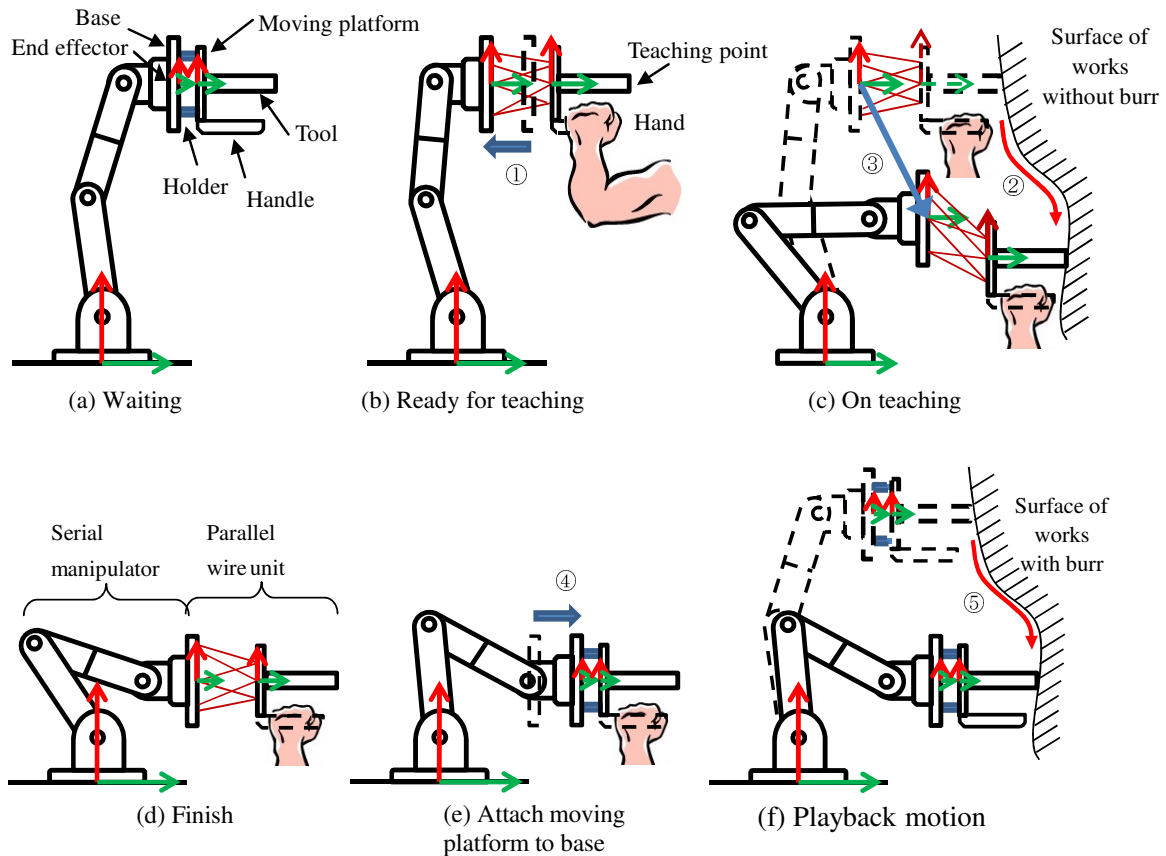


図 2.2 パラレルワイヤ教示装置によるロボットへの教示・再生手順

決められた間隔となるまで移動する。その後、教示者は教示の動作（図 2.2(c) の動作②）を行う。この間、ロボットは可動プラットフォームの動作に応じてベースが相対位置を一定の間隔を保ちながら追従するようベースを移動させる（図 2.2(c) 動作③）。この動作の理由は、可動プラットフォームとベースの相対位置を常に測定可能な位置と姿勢の範囲に収めるためである。また、先行研究からワイヤが長くなるほど重力や張力による伸びが増えることがわかっているため、測定誤差も悪化することが予想される。よって常に一定の間隔を保つことでワイヤ長変化の影響を防ぐ。このロボットが可動プラットフォームに追従してベースを移動させる間、ワイヤ長から可動プラットフォームとベース間の相対位置を計算すると共に、この計算結果と、ロボットのエンドエフェクタの位置・姿勢の情報を用いて、教示点の位置・姿勢を求める。最後に、教示者が教示を終えたあと（図 2.2(d)）、ベースを可動プラットフォームに接近させ（図 2.2(e) 動作④）、可動プラットフォームをベースに固定することで教示作業が完了する（図 2.2(e)）。

この教示法では、教示者に伝わる力はワイヤの張力のみなので、ロボットからの教示者

への反力を低減した軽快な操作性を持ちつつ、既存のインピーダンス制御による教示法と同じく直感的な操作性の両立が可能となる。本研究では、以上の教示シナリオを実現するための第一段階として、パラレルワイヤ教示装置を試作し、その位置計測精度を検証した。

### 2.3 パラレルワイヤ教示装置の試作

前節で設計したパラレルワイヤ教示装置を試作した。その組立図を図 2.3 に、仕様を表 2.1 に示す。図 2.3 は可動プラットフォームをベースから持ち上げた状態を示す。ベースの上部には可動プラットフォームを固定するためのホルダ取りつけてあり、ベースの下部にはワイヤの巻取り装置が取り付けられている。2.2.1 節で述べたとおり、可動プラットフォームとベースは 6 本のワイヤを介して接続されている。各ワイヤの一端は可動プラットフォームに固定されているが、もう一端はベースのガイド穴を通して、ベース下部の巻き取り装置のプーリに接続されている。

ワイヤ巻き取り装置を図 2.4 に示す。この装置はプーリ、ぜんまいばね、およびロータリーエンコーダから構成される。ロータリーエンコーダにより、ワイヤ長の変化を角度の変化として測定する。また、ぜんまいばねを用いてワイヤに張力を与えることで、ワイヤの引き出しや巻き取りにおけるワイヤのたわみを無くしている。本装置で使用するワイヤは、張力による伸びを抑えるために、直径 0.2mm のステンレスワイヤを用いた。さらに、ガイド穴とワイヤの摩擦、ガイド穴におけるワイヤ同士の摩擦を抑えるために、ワイヤの表面にナイロンコーティングを施した。ワイヤの引き出し量として 200mm 以上を確保するために、ワイヤの全長を 300 mm とした。また、1 本のワイヤに掛る張力を教示中の基準位置に位置する状態で 0.5N に調節した。これにより、教示者は 6 本分のワイヤの張力の合計 3.0N を受けながら教示を行うことになる。この張力が教示作業のハンドル操作に与える影響は少ないと考える。

可動プラットフォームの中心  $O_T$  の位置・姿勢は前述の Forward Kinematics 計算方法 [57] により算出する。しかしながら、この計算方法は反復計算であるため、計算に時間がかかる。オンラインで用いるためには、計算時間を短縮する必要がある。そこで、パラレルワイヤ機構のワイヤの特徴を活かして、計算時間の短縮を行った。一般的なパラレルリンク機構では、リンクの両端の部品同士が干渉する。例えば図 2.1 において  $T_2=T_3$  や  $B_1=B_2$  といったように隣り合うリンクの固定端を同じ位置にすることはできない。一方、本装置では、ワイヤの直径が小さいので、1 つのガイド穴に 2 本のワイヤを通すことができ、2 本

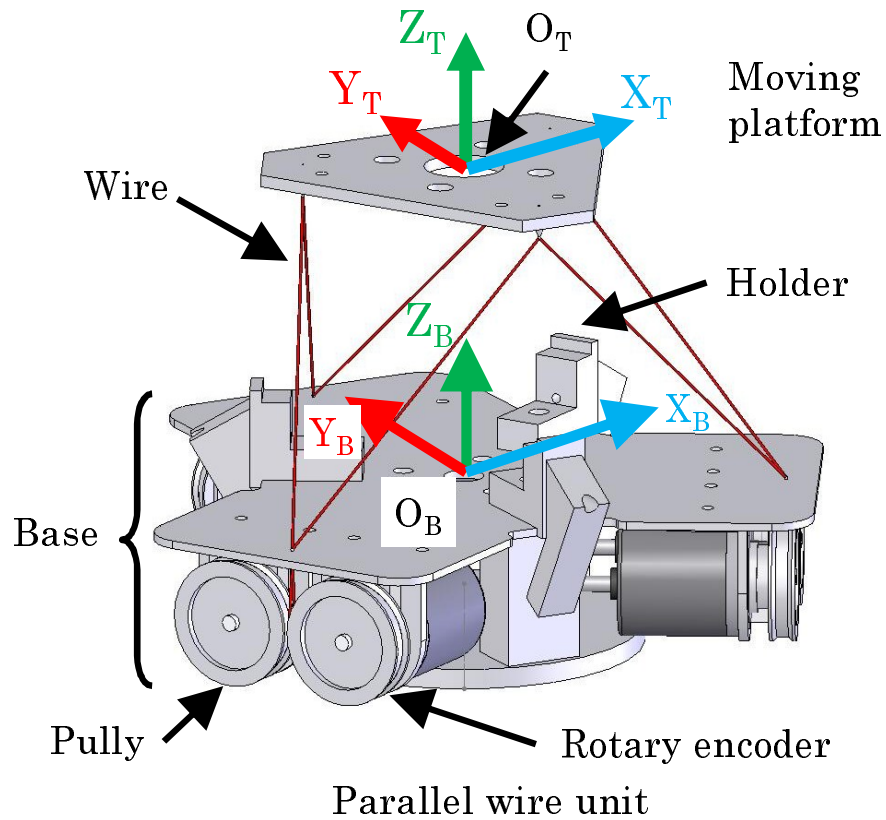


図 2.3 パラレルワイヤ教示装置

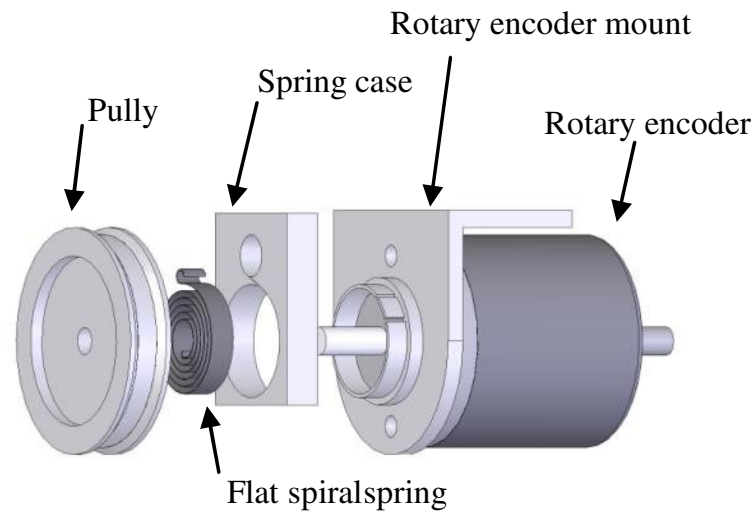


図 2.4 巻き取り装置

のワイヤを可動プラットフォームの同じ位置に固定することが可能である。そこで、図 2.3 のように、ベースのガイド穴を 3 個、可動プラットフォームのワイヤの固定個所を 3 つとなるように設計した。これは、図 2.1 において  $T_2=T_3$ ,  $T_4=T_5$ ,  $T_6=T_1$ , および  $B_1 = B_2$ ,

$B_3 = B_4$ ,  $B_5 = B_6$  とすることに対応する. このようなワイヤの配置に加えて, さらに

$$O_B B_i = 2O_T T_i \quad (i = 1, \dots, 6) \quad (2.9)$$

とすることでヤコビアン  $J$  の計算を簡略化した. 実際にガイド穴の位置を3点としたものと, これに対して隣接するガイド穴を  $Z_B$  軸回りに  $\pm 5^\circ$  オフセットして6点としたモデルを用い, 可動プラットフォームの位置が  $X = 0 \sim 50\text{mm}$ ,  $Y = 0 \sim 50\text{mm}$ ,  $Z = 0 \sim 150\text{mm}$  の範囲を  $10\text{mm}$  間隔で分割した396点に対して, 演算時間の総和を比較した. この結果,  $J$  の計算を簡略化することで Forward Kinematics による演算時間が  $13.2\%$  低減することを確認した. これにより, ワイヤ長の計測から可動プラットフォームの位置・姿勢の計算時間 (Pentium43.0GHz, ART-Linux OS) を  $300\mu\text{s}$  で処理する.

表 2.1 パラレルワイヤ教示装置の仕様

|               |                          |
|---------------|--------------------------|
| 重量            | 1.06kg                   |
| 寸法            | 0.183m × 0.116m × 0.175m |
| エンコーダ分解能      | 2000ppr                  |
| プーリー径         | $\phi 0.03\text{m}$      |
| ワイヤ引出し量 (Max) | 0.3m                     |
| ワイヤ張力         | 0.5N(120mm 引出し時, 1本)     |

## 2.4 教示装置の位置計測精度検証実験

### 2.4.1 実験目的および実験内容

パラレルワイヤ教示装置の可動プラットフォームの位置計測精度を評価する. 位置計測の真値を得るために, 工作機械 (オークマ株式会社製5軸加工機 MU-400VA) を利用した. 実験の様子を図 2.5 に示す. 工作機械の作業台にパラレルワイヤ教示装置のベースを固定し, 一方, 工作機械の主軸に可動プラットフォームを接続した. ただし主軸の中心位置と可動プラットフォームの中心位置が一致するように固定した.

可動プラットフォームの計測点を図 2.6 の赤丸で示す. 図 2.6 に示した O-XYZ 座標系にて計測点の座標を取得する. O-XYZ 座標系は, 図 2.3 のベース上の座標系  $O_B-X_B Y_B Z_B$  と一致する. O-XYZ 座標系上で O から Z 方向に  $50\text{mm}$ ,  $75\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$ ,  $125\text{mm}$ ,  $150\text{mm}$

の高さのそれぞれの水平面内において、X方向とY方向に0mm, ±20mm, ±50mmの距離の17点の合計85点を計測点とする。また、O-XYZにおける可動プラットフォームの中心位置  $(X, Y, Z) = (0, 0, 50)$  [mm] を基準位置とし、基準位置と各計測点の間を往復しながら計測を行う。

このとき、工作機械の主軸の中心位置を真値、平行ワイヤ教示装置から得られる可動プラットフォームの中心位置を計測値とし、それらと比較することで位置計測精度を評価する。

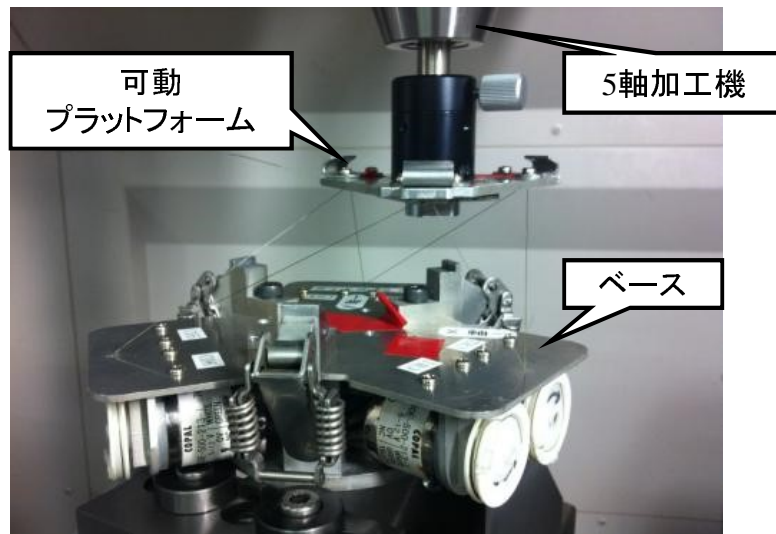


図 2.5 5 軸加工機を使用した平行ワイヤ教示装置の試験の様子

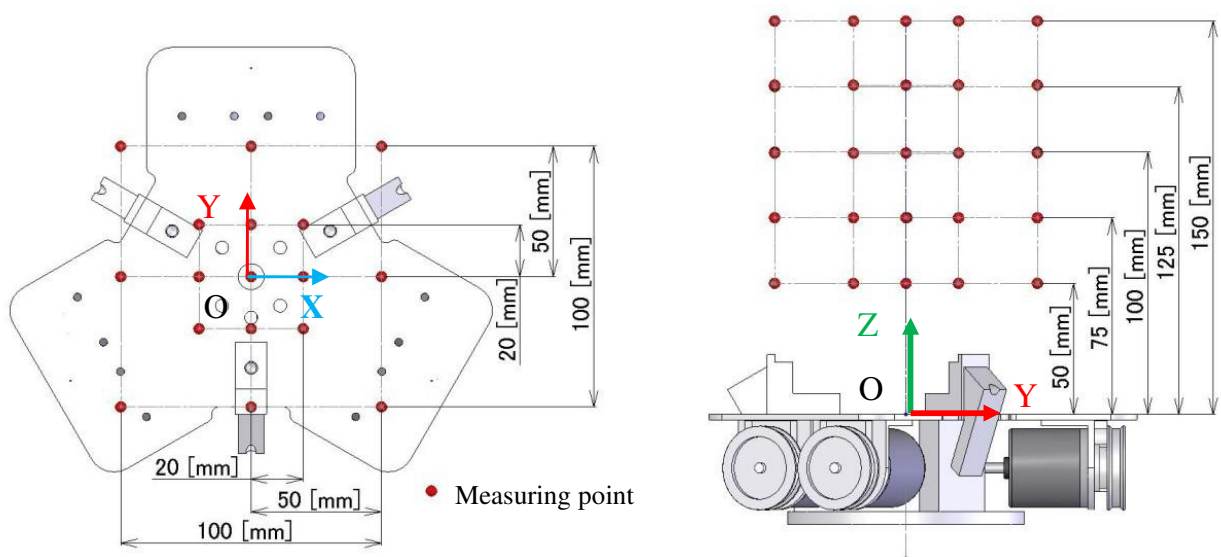


図 2.6 平行ワイヤ教示装置への入力位置

### 2.4.2 実験結果および考察

合計 85 点の計測点における位置計測の誤差を 3 次元ベクトルとして取得した。ベクトルの方向は工作機械で与えた主軸の中心位置から教示装置で得た位置への方向を示し、ベクトルの長さは誤差の大きさを表す。大きさについては、分かりやすくするために 50 倍に拡大して図に示す。その誤差の 3 次元ベクトルを XY 平面に投影したベクトルと、誤差の大きさを数値として図 2.7~図 2.12 に示す。同様に  $Y=0\text{mm}$  における XZ 平面に投影した結果を図 2.12 に示す。図中のベクトル長と数値の対応が一致しない例があるが、これは 3 次元のベクトルを平面に投影したためである。

図 2.7~図 2.12 のそれぞれにおいて、誤差ベクトルの向きが原点付近に向かう傾向があり、また原点から離れるほど誤差が大きくなる傾向がある。図 2.7 より、可動プラットフォームの基準座標を含む  $Z=50\text{mm}$  の XY 平面において  $X=\pm 20\text{mm}$ ,  $Y=\pm 20\text{mm}$  の範囲では、位置計測誤差の最大値が  $0.16\text{mm}$  である。しかしながら、 $X=\pm 50\text{mm}$ ,  $Y=\pm 50\text{mm}$  の範囲まで拡張すると、位置計測誤差の最大値が  $0.69\text{mm}$  と拡大する。図 2.8 より、 $Z=75\text{mm}$  の XY 平面において、 $X=\pm 20\text{mm}$ ,  $Y=\pm 20\text{mm}$  の範囲での位置計測誤差の最大値は  $0.25\text{mm}$  であり、 $X=\pm 50\text{mm}$ ,  $Y=\pm 50\text{mm}$  の範囲での位置計測誤差の最大値は  $0.57\text{mm}$  となり、図 2.8 と大差はない。しかし、 $Z=100\text{mm}$  以上になると、位置計測誤差が大幅に拡大することが図 2.9~図 2.12 から分かる。また、図 2.12 より、 $Y=0\text{mm}$  の XZ 平面上での誤差は、 $Z=50\text{mm}$ ,  $Z=75\text{mm}$  の場合については主に Z 軸正の方向に発生しているが、 $Z=100\text{mm}$  から向きが変化し、 $Z=125\text{mm}$ ,  $Z=150\text{mm}$  では x 軸に平行かつ  $x=0$  に向かって誤差のベクトルが発生している。これらの誤差の要因として、ゼンマイバネの張力によるワイヤの伸び、ガイド穴とワイヤとの摩擦力によるワイヤの伸び、ガイド穴を 2 本のワイヤが共有することによるワイヤ同士の干渉などが考えられる。

ベースに対する可動プラットフォームの位置を Case 1~3 に示す範囲に分類して、その範囲内の位置計測誤差の最大値を表 2.2 に示す。ここでは、2.2 節で説明した教示シナリオを実現する場合、ベースの中心  $O_B$  と可動プラットフォームの中心  $O_T$  の間の距離（以降、中心間距離と呼ぶ）は、教示者が可動プラットフォームを移動させる速度とロボットの追従性能に依存する。ロボットによるバリ取り作業では、工具から加工対象に加わる切削力の変動を緩和するため、工具とエンドエフェクタの間にコンプライアンス要素を入れることが多い。そのためバリ取りの対象が大型の場合であれば  $1\text{mm}$  程度の誤差でも許容される。このような条件で本装置を用いるためには、中心間距離が Case 3 の範囲を逸脱しない速さ

で教示を行う必要がある。一方、より高精度なバリ取りを実現するためには、中心間距離が Case 1 の範囲に逸脱しない速さで教示を行う必要がある。このことから、教示の誤差を許容範囲内に収めるために必要となる、ロボットの追従遅れの許容範囲を明らかにした。

以上の考察から、本教示装置はバリ取り作業に適用可能である。ただし、より精度の高い位置計測を実現するためには位置誤差を低減する必要があると考える。

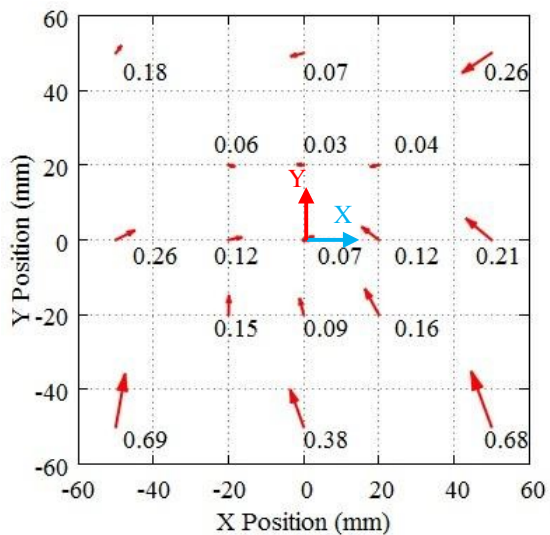


図 2.7 計測誤差 (Z=50mm)

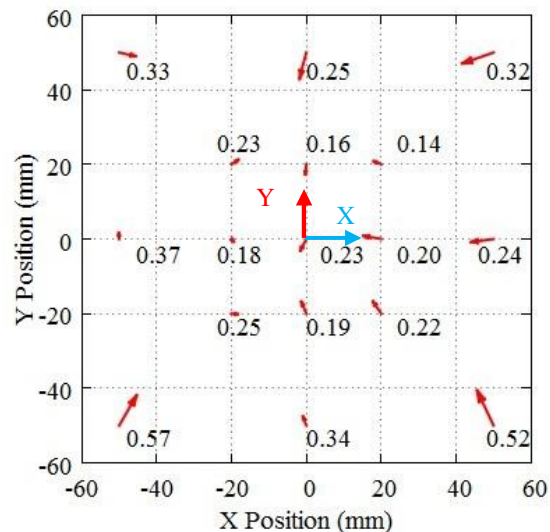


図 2.8 計測誤差 (Z=75mm)

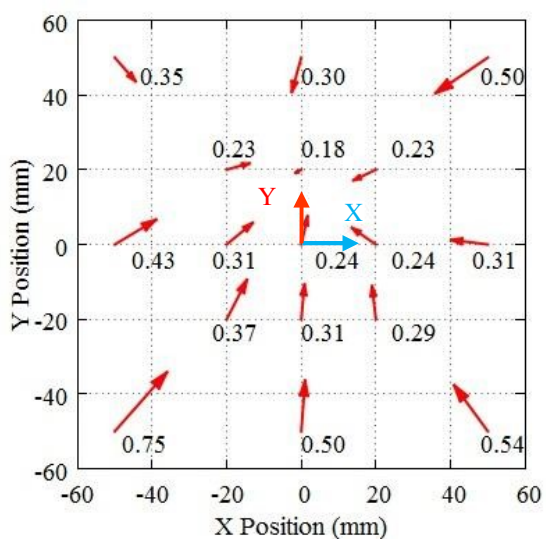


図 2.9 計測誤差 (Z=100mm)

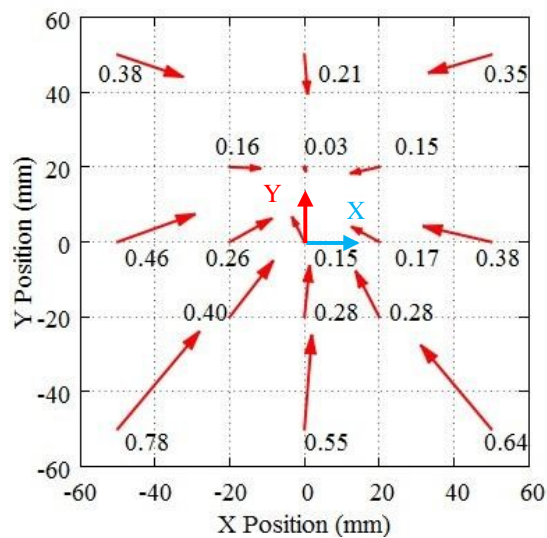


図 2.10 計測誤差 (Z=125mm)

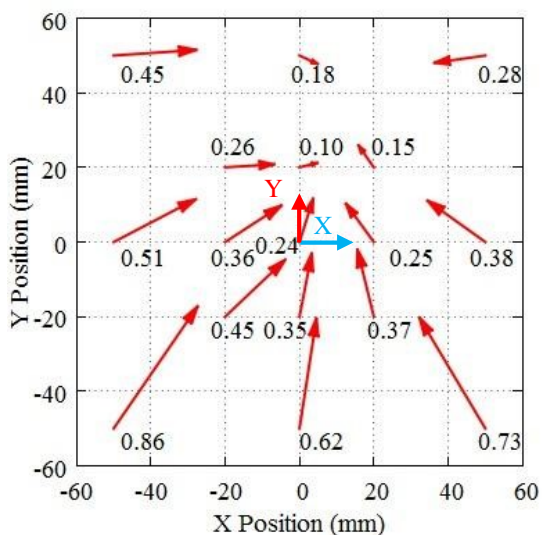


図 2.11 計測誤差 (Z=150mm)

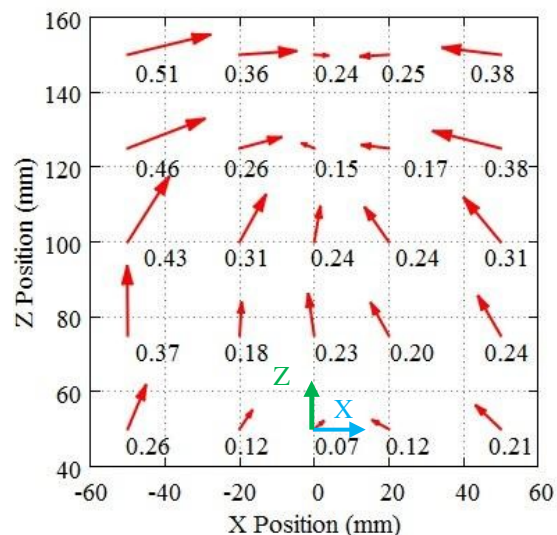


図 2.12 計測誤差 (Y=0mm)



表 2.2 位置誤差の最大値

|                                 |            | Case1  | Case2  | Case3  |
|---------------------------------|------------|--------|--------|--------|
| ベースに対する<br>可動プラットフォーム<br>の位置の範囲 | X軸方向変位[mm] | -20~20 | -50~50 | -50~50 |
|                                 | Y軸方向変位[mm] | -20~20 | -50~50 | -50~50 |
|                                 | Z軸方向変位[mm] | 50~75  | 50~100 | 50~150 |
| 最大位置誤差[mm]                      |            | 0.25   | 0.75   | 0.86   |

## 2.5 おわりに

既存の6軸力覚センサを利用した直接教示法には、外部環境とロボットが接触した場合に不安定化することと、人とロボットの動特性の差により軌道の精度が劣化するという2つの課題が存在する。本章ではこの問題を解決する教示法としてパラレルワイヤ教示装置と、これを利用した直接教示法を提案した。さらに、パラレルワイヤ機構を利用した教示装置を試作し、その位置計測精度を検証した。本装置の位置計測精度は、可動プラットフォームとベースの距離が大きくなるにつれて拡大することが判明した。この結果から、本装置を用いて高精度な教示を実現するためには、可動プラットフォームとベースの距離がX,Y方向に±20mm以内、Z方向に50～75mmの範囲を逸脱しないように教示を行えば、0.25mmの計測精度が保証されることが判明した。

次章では、本章で提案したパラレルワイヤ教示装置を実際にロボットに実装して、教示法の有効性、パラレルワイヤ教示装置とロボットを合わせたシステムとしての位置精度を検証する。

## 第3章

# パラレルワイヤ教示装置を用いたロボット教示法

### 3.1 はじめに

第3章では、第2章で開発したパラレルワイヤ教示装置をロボットに実装して教示を行う、ロボット教示システム(以後、教示システムと呼ぶ)を構築し、この教示法により取得した位置情報の精度について述べる。本研究では、この教示システムをロボットによるバリ取り作業への適用を目標としている。はじめに、産業用の6軸ロボットに実装するためのロボット制御法を提案する。次に、この教示システムを実際に開発する。さらに、教示者に代わり、リニアアクチュエータを利用して再現性のある教示を行う、教示システムの評価装置を開発する。最後に、評価装置が教示システムに与える教示軌道と、教示システムが計測した軌道を比較することで、バリ取り作業を想定した教示の精度を検証する。

### 3.2 パラレルワイヤ教示装置を用いたロボット教示法のための制御法

本章ではパラレルワイヤ教示装置をロボットに実装した教示システムで教示を行い、この情報を利用して動作を再現するためのロボットの制御法について説明する。なお、本来は同次変換行列を用いて位置と姿勢の計算を行っているが、説明を簡略化するために、位置ベクトルのみを用いて説明する。図3.1に教示システムの各点の座標系と位置ベクトルを示す。はじめに、ロボットの原点を点O、ロボットのエンドエフェクタの中央とパラレルワイヤ教示装置のベースの中央を一致した点R、可動プラットフォームの位置を点H、ロボットが追従すべき目標位置を点Tとする。ここでは、わかりやすくするために点Hを教示点とする。また、ロボットの原点O上に固定した座標系 $\Sigma_O$ から見た点R, H, Tに対応する位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{X}_R$ ,  $\mathbf{X}_H$ ,  $\mathbf{X}_T$ とする。パラレルワイヤ教示装置によって取得したベースと可動プラットフォームの相対位置は、点Rに固定した座標系 $\Sigma_R$ から見た、点Rから点Hへの位置ベクトル ${}^R\mathbf{X}_P$ とする。この ${}^R\mathbf{X}_P$ を座標系 $\Sigma_O$ からみたベクトルに変換したものを $\mathbf{X}_P$ とする。教示者が操作している可動プラットフォームの位置ベ

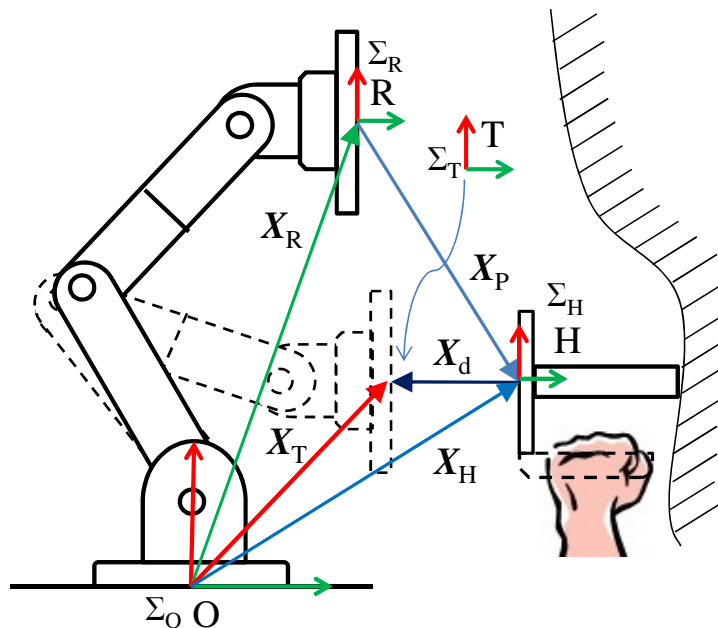


図 3.1 パラレルワイヤ教示装置とロボットの座標系と位置ベクトルの定義

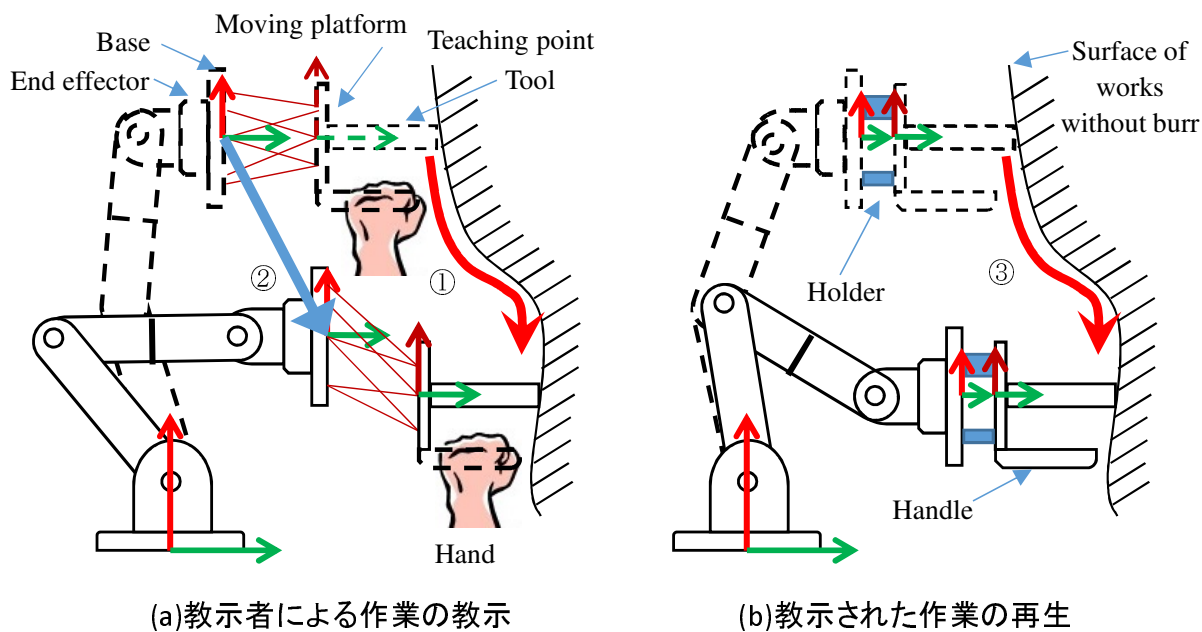


図 3.2 パラレルワイヤ教示装置によるロボットへの教示・再生手順

クトル  $X_H$  は,

$$X_H = X_R + X_P \quad (3.1)$$

によって算出される。この  $X_H$  が教示点の軌道情報として保存される。

次に、教示中におけるロボットの制御方法について説明する。図 3.3 はロボットの制御系

のブロック線図を示す。提案する教示法は、教示中に可動プラットフォームとベースの衝突を避ける必要がある。そのため、ベースを可動プラットフォームから一定の距離離れた位置に配置する。この教示システムでは、ロボットが追従すべき点 T は、点 H より  $\mathbf{X}_d$  だけ離れた位置とした。ここで、 $\mathbf{X}_d$  は、点 H に固定された座標系  $\Sigma_H$  から見たベクトル  ${}^H\mathbf{X}_d$  を座標系  $\Sigma_O$  から見たベクトルに変換したものである。本研究ではベースを可動プラットフォームの後方に 50mm 離れた位置に移動させるものとして、 $\mathbf{X}_d = (-50, 0, 0)^T$  とした。以上からロボットが追従すべき点 T の位置ベクトル  $\mathbf{X}_T$  は、

$$\mathbf{X}_T = \mathbf{X}_H + \mathbf{X}_d \quad (3.2)$$

によって算出される。この  $\mathbf{X}_H$ ,  $\mathbf{X}_T$  を制御周期ごとに計算し、 $\mathbf{X}_R$  を  $\mathbf{X}_T$  に追従するようにロボットを制御する。

最後に、教示された位置の情報に基づいてロボットが動作を再現する方法について説明する。図 3.4 に動作を再現する時の制御系のブロック線図を表す。動作の再生時は、(図 3.4) に示すように可動プラットフォームは平行ワイヤ教示装置のホルダに固定される。この状態での可動プラットフォームとベースの距離を  $\mathbf{X}_{dh}$  とする。試作した平行ワイヤ教示装置ではこの距離が 20mm であるため、 $\mathbf{X}_{dh} = (-20, 0, 0)^T$  となる。以上から、ロボットが動作を再現するために、ベースの点 R が通過すべき軌道  $\mathbf{X}_{Tp}$  は、

$$\mathbf{X}_{Tp} = \mathbf{X}_H + \mathbf{X}_{dh} \quad (3.3)$$

で求められる。なお、本教示システムでは、図 3.3, 図 3.4 とともにマニピュレータの部分は、一般的に販売されている産業用ロボットを利用している。そのため、位置指令に対するフィードバックループなどは、この内部に含まれている。

### 3.3 ロボットの教示システムの構成

第 2 章で提案した平行ワイヤ教示装置をロボットに実装した教示システムを試作した。以下に、試作した教示システムについて説明する。教示システムの構成を図 3.5 に、この仕様を表 3.1 に示す。この教示システムでは研究用ロボットパッケージ RTLab(安川電機製)を用いた。これは可搬重量 3kg の 6 自由度産業用ロボットであり、パソコンを用いて制御される。ロボットの制御周期は 10ms である。

このロボットのエンドエフェクタに平行ワイヤ教示装置を固定する。平行ワイヤ教示装置の 6 個のロータリーエンコーダからのパルスは、増設したカウンタボードを経

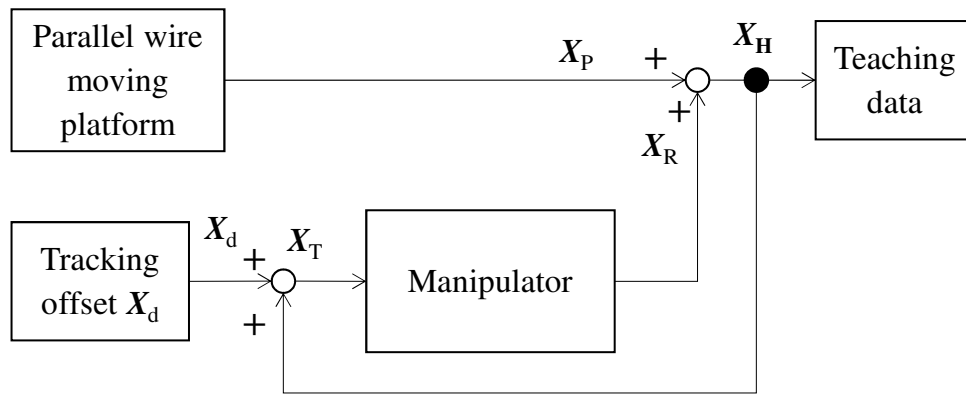


図 3.3 パラレルワイヤ教示装置による教示時の制御ブロック線図

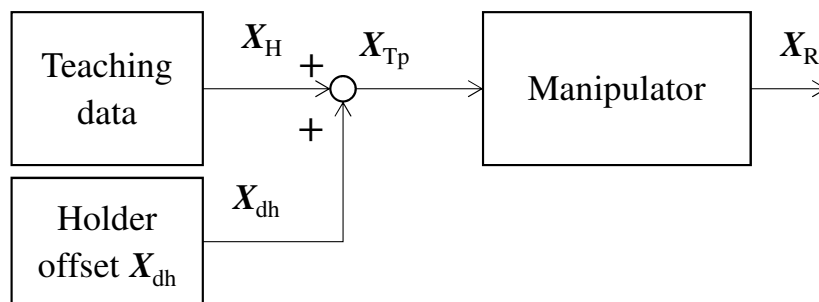


図 3.4 パラレルワイヤ教示装置による教示データ再生時の制御ブロック線図

由して RTLab を制御するためのパソコンに取り込まれる。このパソコンの内部で図 3.3 の処理が行われる。

この教示システムはバリ取りロボットへの利用を目的としている。バリ取りロボットで、回転砥石による研削を行う場合、ロボットが移動する軌道の誤差は  $\pm 0.25\text{mm}$  程度とした。一方、ブラシによる研磨については、ブラシ自体がコンプライアンス要素として過剰な押し付け力に対して変形して加工対象の過剰な加工を回避するので、軌道に対する誤差は  $1\text{mm}$  まで許容できる。そのため、教示者がロボットに与える教示軌道に対し、教示した結果得られる軌道の誤差の許容値は最大で  $1\text{mm}$  以下とする。また、ブラシメーカーによるバリ取りブラシの工具の送り速度が  $2.5 \pm 1.0\text{m/min}$  (推奨値) であることから、目標とする条件を、移動速度  $3.5\text{m/min}$  ( $\approx 58\text{mm/s}$ ) 以下の範囲での追従を目標とした。

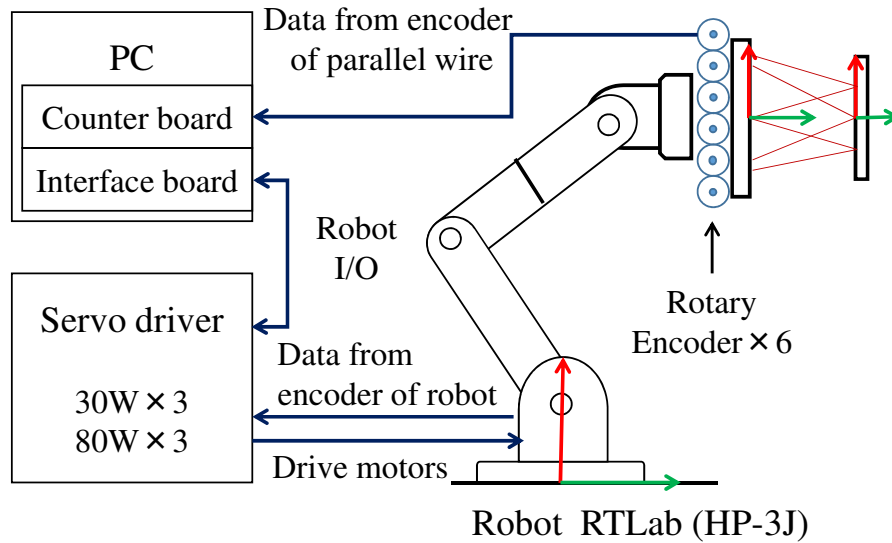


図 3.5 パラレルワイヤ教示法を採用した試作教示システムの構成

表 3.1 ロボットの仕様

|           |  |
|-----------|--|
| ロボット      | 安川電機 (株) 製 RTLab (HP3J)                        |
| 自由度 (DOF) | 6  |
| モータ出力     | 80W × 3, 30W × 3                               |
| 最大可搬重量    | 3.0kg  |
| 本体重量      | 27.0kg   |
| 制御用 PC    | CPU Pentium4 3GHz, Memory 1GB                  |
| OS        | RT-Linux                                       |
| Interface | インターフェース社製 PCI-7414V × 2<br>安川電機 (株) 製 SVCB701 |

### 3.4 提案教示法の評価

提案する教示システムがバリ取り作業の教示に利用可能かを確認するため、教示者に代わり、再現性のある教示を行う評価装置が必要である。そのため、リニアアクチュエータを利用して教示システムに直線運動を教示する評価装置を構築する。この評価装置を利用して教示システムに与えた位置と、教示システムで計測した位置を比較することで教示システムの精度を評価する。評価に際しては、教示で与える位置を真値と、教示システムで計測した位置を計測値とし、真値と計測値の差分を教示誤差とする。

### 3.4.1 実験方法

試作した教示システムの精度を実験検証する。実験にあたり人による教示には再現性が無いので、教示の精度を評価するには適さない。教示の精度を確認するためには、教示システムに再現性のある教示を繰り返し行うことが出来る方法が必要である。そのため、リニアアクチュエータを入力装置とした教示システムの精度を評価する装置(以後、評価システムと呼ぶ)を構築した。リニアアクチュエータの制御された動作を教示することで、教示システムに与えた位置と、教示システムが計測した位置の比較が容易になる。この教示システムとリニアアクチュエータで構成される評価システムの全体を図3.6に示す。リニアアクチュエータはIAI社製DS-SA6であり、ストロークは全長400mmである。また、移動速度は200mm/sまで可能である。このリニアアクチュエータをロボットのY軸と平行に固定することで、Y方向に±200mmの直線軌道をロボットに教示する。リニアアクチュエータにはロータリーエンコーダが内蔵されており、エンコーダの出力と、教示システムで計測した位置を同期して保存する。これにより、二つの位置情報を比較することで、教示の精度を定量的に評価する。

直線軌道の移動パターンの例(移動速度:50mm/s)を図3.7に示す。これは±200mmの範囲を等速と起動・停止を繰り返しながら往復するものである。このリニアアクチュエータにパラレルワイヤ教示装置の可動プラットフォームを接続し、リニアアクチュエータを動かすことで教示作業を行った。

今回の実験では、リニアアクチュエータによる移動パターンにS字加減速等の加減速をスムーズにする処理を施していない。S字加減速等の技術は一般的な産業用アクチュエータで利用されている、しかし、本教示システムはこれまでに例の無い教示装置であり、人が操作する場合にどのような加減速を行うか想定が難しいことや、技術的課題を明らかにするために採用をしなかった。ただし、精度の評価については、起動・停止時など加減速が大きくなる範囲は位置の計測精度を評価しない。これは、実際に利用されている産業用の工作機械なども加減速が大きくなる時には、敢えて加減速のための助走区間を設けるからである。また、加減速に対する評価をしない範囲として、起動、停止から600msの間とした。これは、システムの構築に用いたロボットの仕様として、ロボットが動作中の発振を抑制する安全対策として600msの1次遅れ要素が設定されているためである。こうした安全対策は産業用ロボットに広く利用されていることから、今回この値を維持して実験を行った。



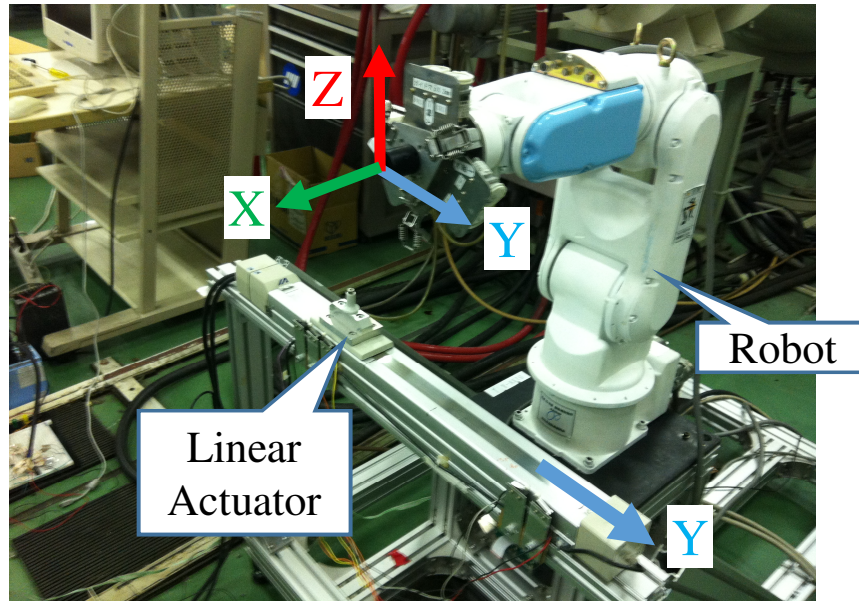


図 3.6 教示システムとリニアアクチュエータで構成される実験装置

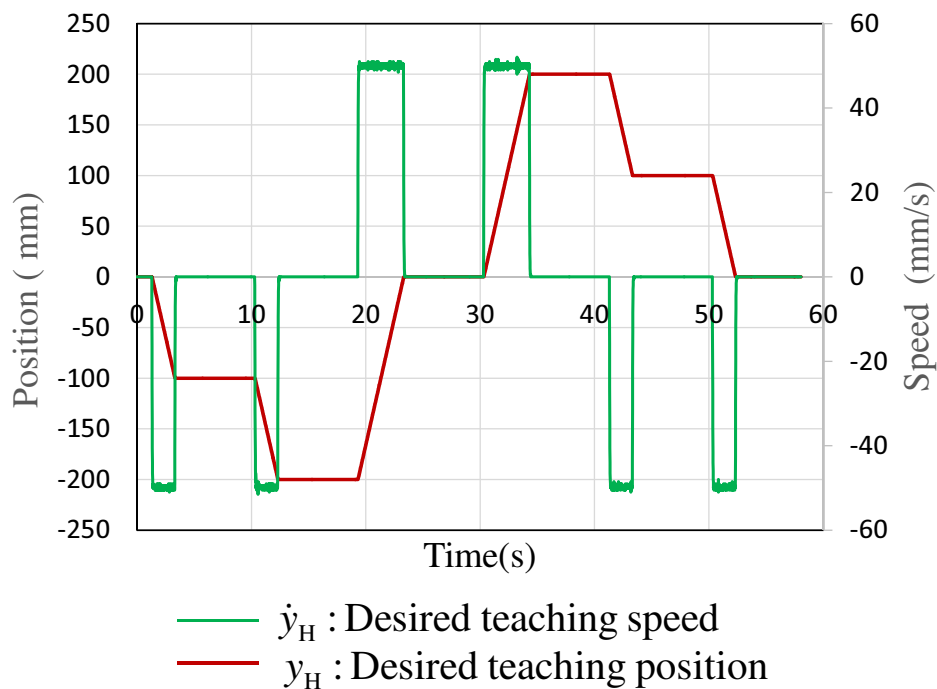


図 3.7 リニアアクチュエータの移動パターン例 (移動速度：50mm/s)

### 3.4.2 評価方法

はじめに、図 3.6 に示す実験装置の位置関係を明確にするために、図 3.8 で示す位置ベクトルを以下に定義する。図 3.8 では、平行ワイヤ教示装置の可動プラットフォームを、その  $Z_H$  を下向きに固定する。教示点  $H$  に対し、本教示システムで計測した教示点を  $H'$  と

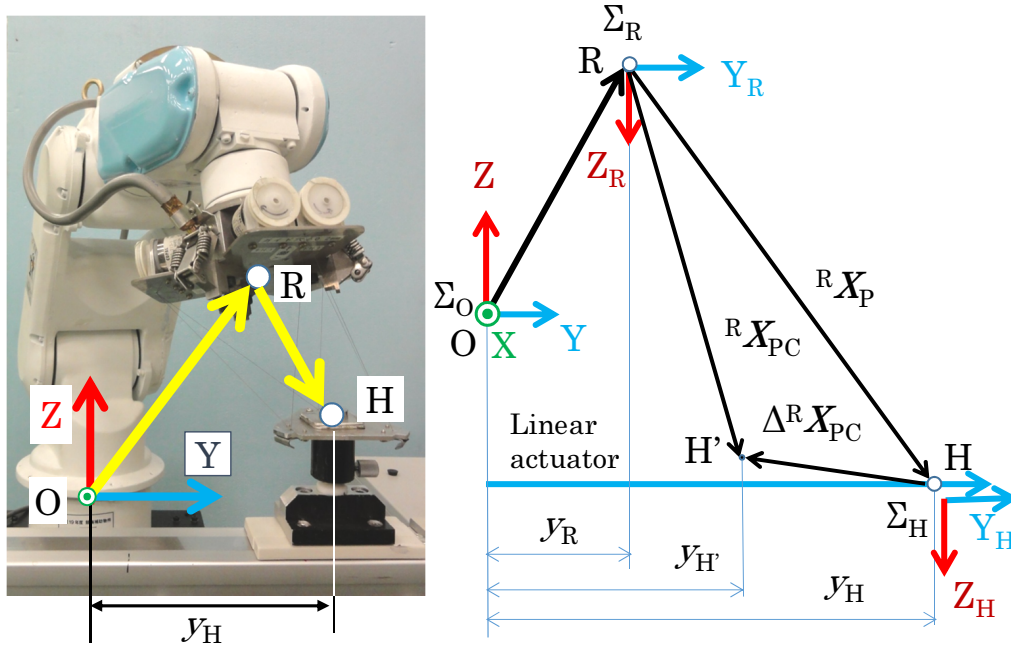


図 3.8 教示システムとリニアアクチュエータ間の位置ベクトルの定義

し、これらの差である教示誤差を求める．ベース R に固定した座標系  $\Sigma_R$  からみた教示点 H, H' の位置ベクトルをそれぞれ  ${}^R\mathbf{X}_P$ ,  ${}^R\mathbf{X}_{PC}$  とする． ${}^R\mathbf{X}_{PC}$  はパラレルワイヤ教示装置による計測誤差を含むため、教示誤差は

$$\Delta^R\mathbf{X}_{PC} = {}^R\mathbf{X}_{PC} - {}^R\mathbf{X}_P \quad (3.4)$$

として表される．さらに、可動プラットフォームをリニアアクチュエータのスライダに固定する時、可動プラットフォーム上の教示点 H の座標系  $\Sigma_H$  の  $Y_H$  方向を絶対座標系  $\Sigma_O$  の Y 方向に、 $Z_H$  方向を  $-Z$  方向に一致させる．このとき、教示システムは図 3.8 の点 R が点 H に追従するため、両方の Z 軸を一致させるように制御される．この結果、 ${}^R\mathbf{X}_P$ ,  ${}^R\mathbf{X}_{PC}$  の Y 方向成分  ${}^Ry_P$ ,  ${}^Ry_{PC}$  が  $\mathbf{X}_P$ ,  $\mathbf{X}_{PC}$  の Y 方向成分  $y_P$ ,  $y_{PC}$  と一致する．そのため、リニアアクチュエータにより与えられた教示点の Y 方向の変位  $y_H$ 、その計測結果  $y_{H'}$ 、Y 方向の教示点 H に対するベース R の遅れ  $y_P$ 、およびその誤差  $\Delta y_{PC}$  の間には

$$y_P = y_R + y_H, \quad y_{H'} = y_R + y_{PC} \quad (3.5)$$

$$\Delta y_{PC} = y_H - y_{H'} \quad (3.6)$$

の関係が成り立つ．同様に  $\Delta x_{PC}$ ,  $\Delta z_{PC}$  を求めることで、XYZ 方向の教示誤差の絶対値  $|\Delta^R\mathbf{X}_{PC}|$  は

$$|\Delta^R\mathbf{X}_{PC}| = \sqrt{\Delta x_{PC}^2 + \Delta y_{PC}^2 + \Delta z_{PC}^2} \quad (3.7)$$

として求めることができる。今回の教示システムでは、主にこのXYZ方向の教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  を用いて教示システムが取得した位置の精度を検証する。

### 3.4.3 ロボットの追従遅れについての結果と考察

教示システムは、既存の力覚センサを利用した直接教示法が教示者とロボットの動特性の差により、ロボットが教示者の操作から遅れるために教示ができない問題の解決を目的としている。そのため、教示システムは教示者とロボットの間を柔軟につなぐことで解決を図っている。ここでいう柔軟な接続とは、ロボットがベースRを教示者の動作に遅れて追従させながら、ロボットと教示者の相対位置を計測して、教示点Hの計測に利用することである。そのため、教示点Hに対するロボットのベースRの追従の様子と、ロボットが追従しながらHの位置を計測した位置の誤差をそれぞれY方向について評価した。

はじめに教示点HとベースRの相対位置の変化からロボットの追従を確認する。図3.9に教示点HとベースRの位置と、その相対位置の変化を示す図において横軸は時間はじめに、本教示システムに教示を実施して、リニアアクチュエータによる教示点Hの移動に対してロボットのベースの遅れについて、式(3.4)のY方向成分で確認した。これは  $y_P$  に該当する。図3.9は、リニアアクチュエータを速度50mm/sで移動させたときの教示点HのY方向成分  $y_H$ 、ベースRのY方向成分  $y_R$ 、および点Hに対する点Rの追従の遅れである位置誤差  $y_P$  を示す。この図3.9では、リニアアクチュエータの移動速度が50mm/sの場合、 $y_P$  の値から、①の範囲ではエンドエフェクタがリニアアクチュエータによる教示  $y_H$  に追従するため加速を行う。この間追従の遅れは拡大する。その後②ではロボットも等速移動になり、その遅れはY方向へ最大20.5mmのになる。また、この約20mmの遅れは  $y_H$ 、 $y_R$  が等速で移動している間維持されていることから、教示点Hの位置に対してベースRが約20mm遅れた状態を維持しながら追従していることを示している。

次に、リニアアクチュエータが与えた教示の位置と計測した位置の誤差のY方向成分  $\Delta y_{PC}$  を図3.10に示す。この結果から移動速度50mm/sの場合の教示誤差の最大値は0.54mmであった。この最大値は、リニアアクチュエータが起動・停止する①で生じている。この位置は図3.9の①の範囲とも一致する。一方でリニアアクチュエータが等速で移動し、ロボットも等速で追従する②範囲での誤差は0.1mm以下である。このことから、起動・停止時など加減速時には誤差が大きくなるが、位置の計測が可能である。これらの結果から、Y方向への教示による教示点の動きに対して、最大20.5mmの追従遅れを発生していることに対し、Y方向の誤差は最大で加減速時の0.54mm以下、等速で移動中は約0.1mmの誤差で追

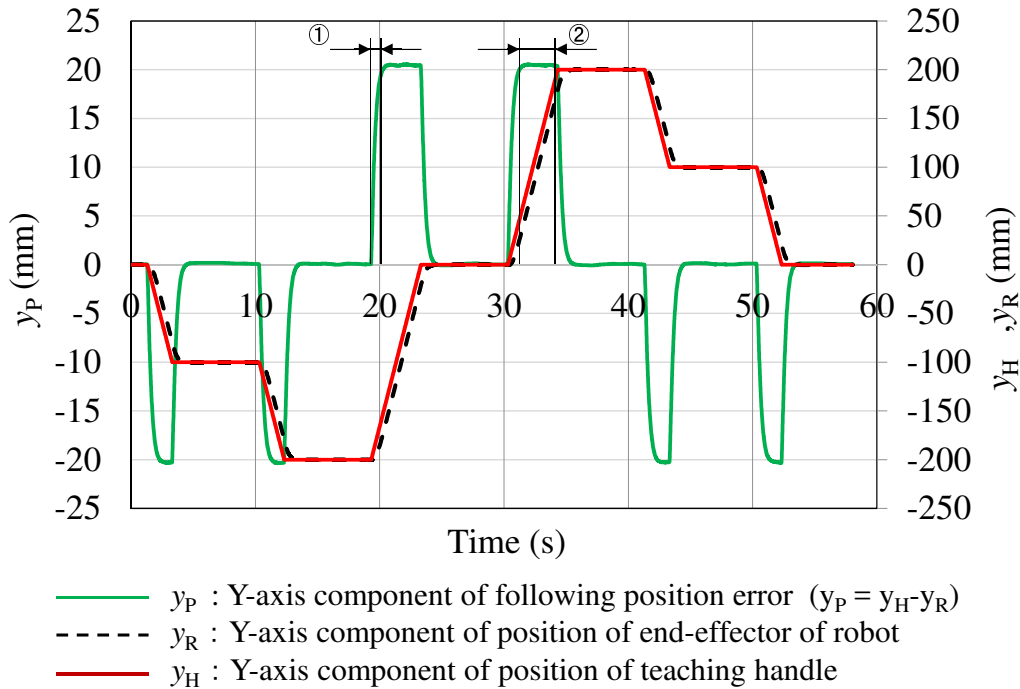


図 3.9 リニアアクチュエータの移動に対するパラレルワイヤ教示装置のベースの動作 (移動速度：50mm/s)

従していることを確認した。

最後に追従の遅れ  $y_P$  と、誤差の Y 方向成分の絶対値  $|\Delta y_{PC}|$  と移動速度の関係を図 3.11 に示す。移動速度を 1, 5, 10, 30, 50, 100, 150mm/s の 7 条件にして実験を行った。この結果から、移動速度と  $y_P$ ,  $|\Delta y_{PC}|$  は共にリニアアクチュエータの移動速度と比例関係にあることが確認出来た。

これらの結果から、本教示システムでは、教示に対しロボットが遅れて追従しつつ、教示点の計測を行っていることを確認した。計測の誤差については、加減速中の誤差拡大については今後より検討を続ける必要がある。しかし、等速運動中はロボットの追従の遅れも一定のため、この結果は表 2.2 の誤差とパラレルワイヤの位置の関係に依存すると思われる。また、この計測誤差および追従の遅れは、教示で与えられる運動の速度と比例関係であることも判明した。

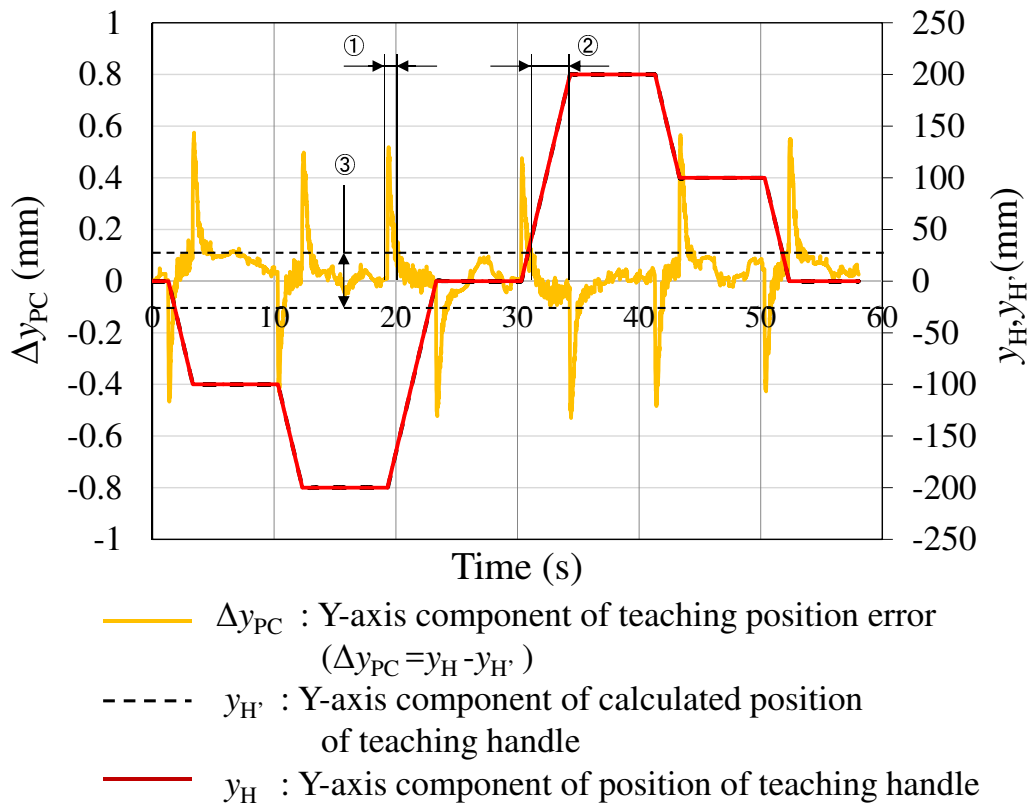


図 3.10 リニアアクチュエータによる教示軌道と取得した軌道の位置誤差 (Y 方向成分) (移動速度 : 50mm/s)

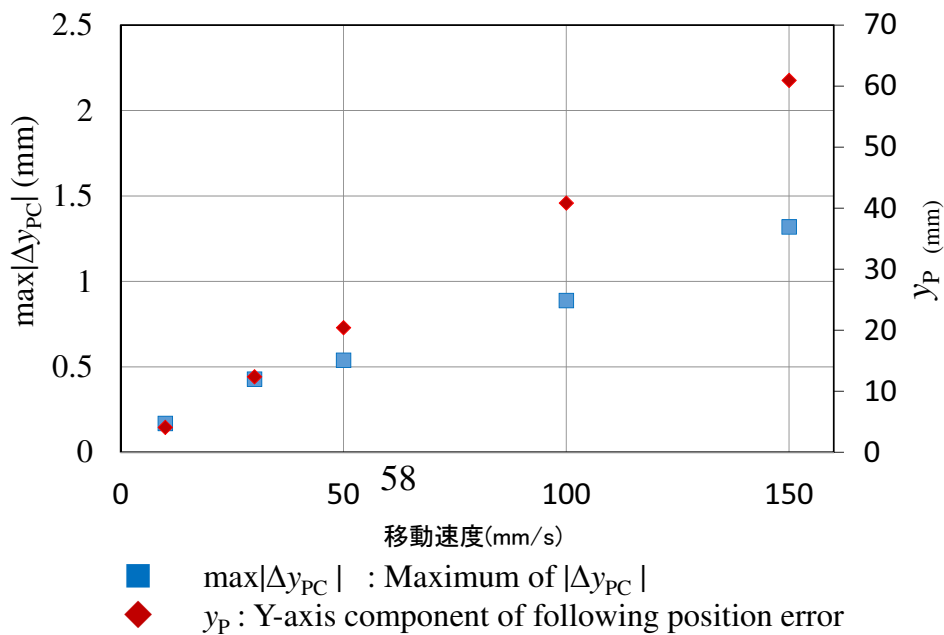


図 3.11 ロボットのベースの追従遅れ, 最大誤差の Y 方向成分と移動速度の関係

#### 3.4.4 教示システムの位置精度の実験結果と考察

教示システムの位置精度を検討するため、リニアアクチュエータによる教示に対する教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  を求めた。教示の動作の速度によって変化するかを併せて判断するために、リニアアクチュエータの移動速度を 1, 5, 10, 30, 50, 100, 150mm/s の 7 条件にして、実験を行った。ただし、教示システムのメモリ容量により教示可能な時間の制約があるため、移動速度 1 および 5mm/s の 2 条件はものについては、移動距離をそれぞれ  $\pm 20\text{mm}$ ,  $\pm 100\text{mm}$  とした。

はじめに、図 3.12 で教示の誤差を求める。横軸は教示の時間経過を表す。左の縦軸は教示誤差の絶対値、右の縦軸はリニアアクチュエータの位置を表す。図 3.12 は前項で取り上げた移動速度 50mm/s での教示誤差である。①の範囲で減速時に 0.76mm に誤差が増加している。一方、等速移動追従している②の範囲では、教示誤差はおよそ 0.4mm に減少している。本研究では加減速時の誤差を除外して教示誤差を求める。その除外する範囲は起動・停止から 600ms の範囲としている。次に、図 3.12 同様に移動速度ごとの図 3.13～図 3.18 に対し起動・停止時の誤差を除去する。ただし、図 3.13 の移動速度 1mm/s の場合と図 3.14 の移動速度 5mm/s の場合には起動・停止に伴う誤差の増加は見られなかった。しかし、3.15 の移動速度 10mm/s 以上の条件では、前項の  $y_P$  同様に速度に依存して誤差が増大する。

最後に、起動・停止時の誤差を除去した、各移動速度での教示誤差を図 3.19 に示す。この図の横軸は教示点の移動速度。縦軸は教示誤差の絶対値を表す。図中の青い線は砥石による研削加工が可能な誤差 0.25mm の上限を表し、赤い線はブラシによる研磨加工が可能な誤差 1mm の上限を表している。また、横軸の 58mm/s はブラシによる研磨の推奨送り速度の上限値 3.5m/min を表している。この図から、移動速度 5mm/s 以下では、誤差  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  の値は 0.25mm 以下であるため、砥石を利用した研削によるバリ取りの教示が可能である。また、100mm/s 以下であれば、 $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  の値は 1mm 未満のため、ブラシによる研磨への利用が可能である。この結果から、本教示システムをブラシを用いた研磨によるバリ取り作業に利用することは十分可能であることが確認できた。また、砥石を利用した研削によるバリ取り作業についても 5mm/s 以下であれば利用可能であることが判明した。

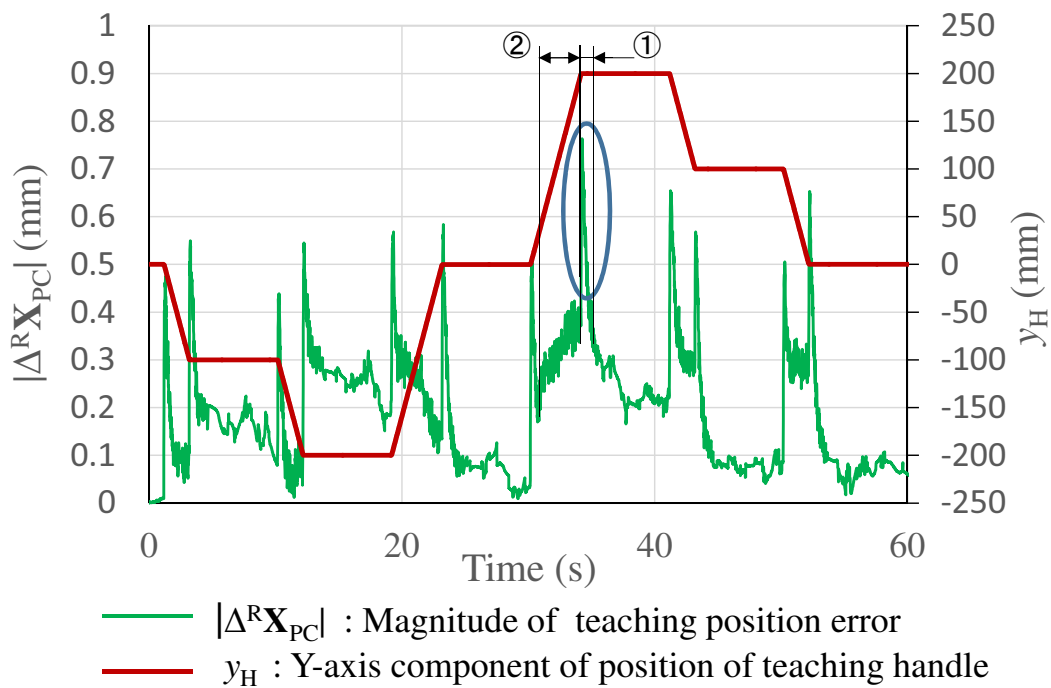


図 3.12 教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  (移動速度 : 50mm/s)

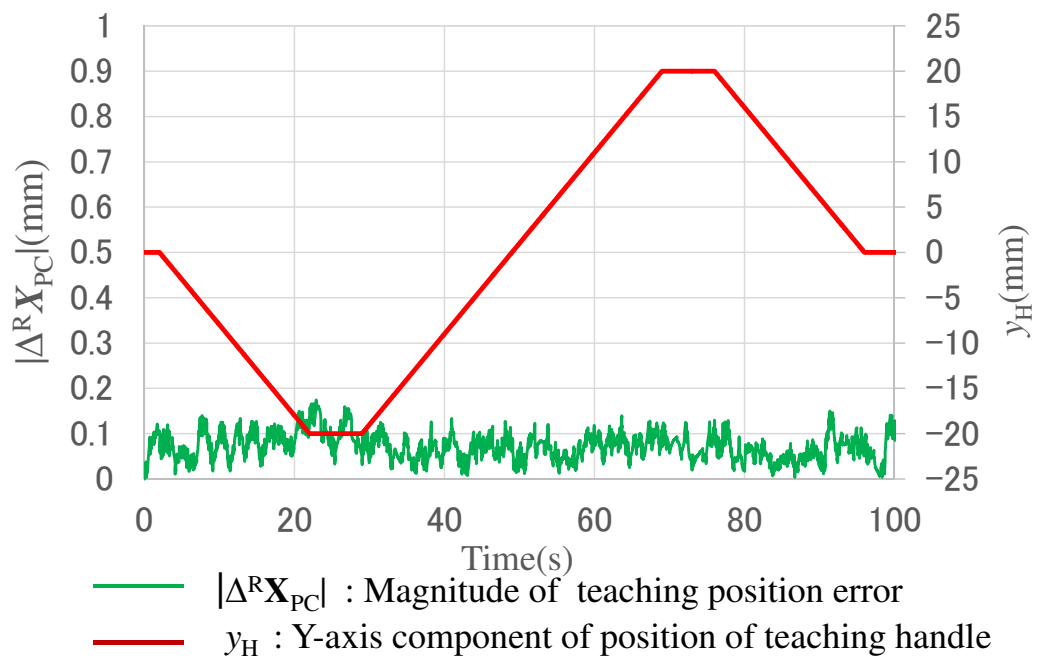


図 3.13 教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  (移動速度 : 1mm/s)

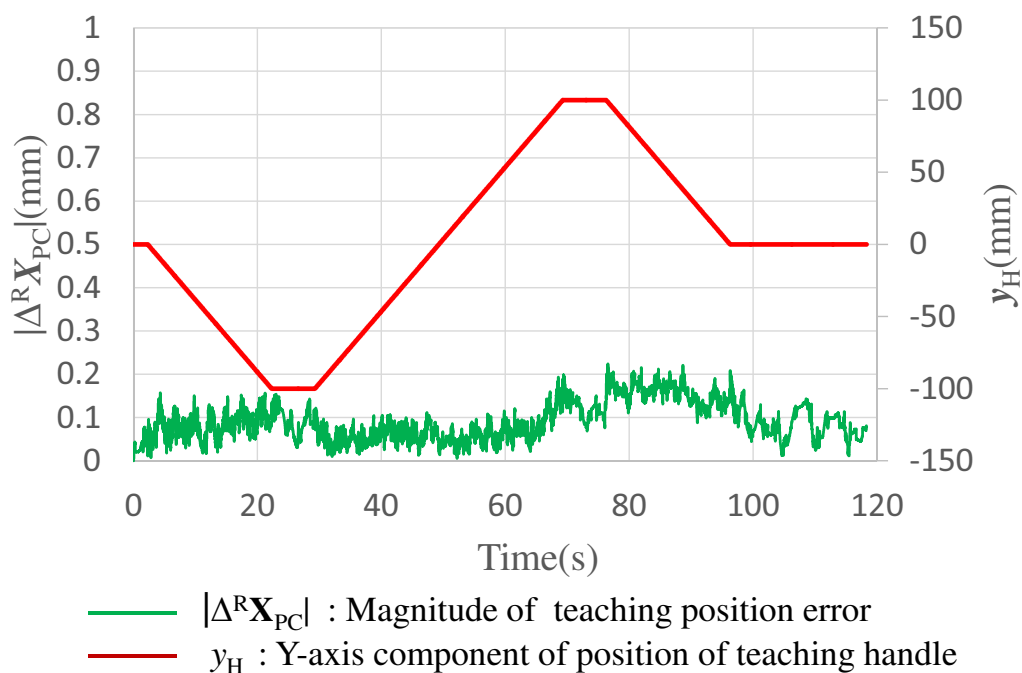


図 3.14 教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  (移動速度 : 5mm/s)

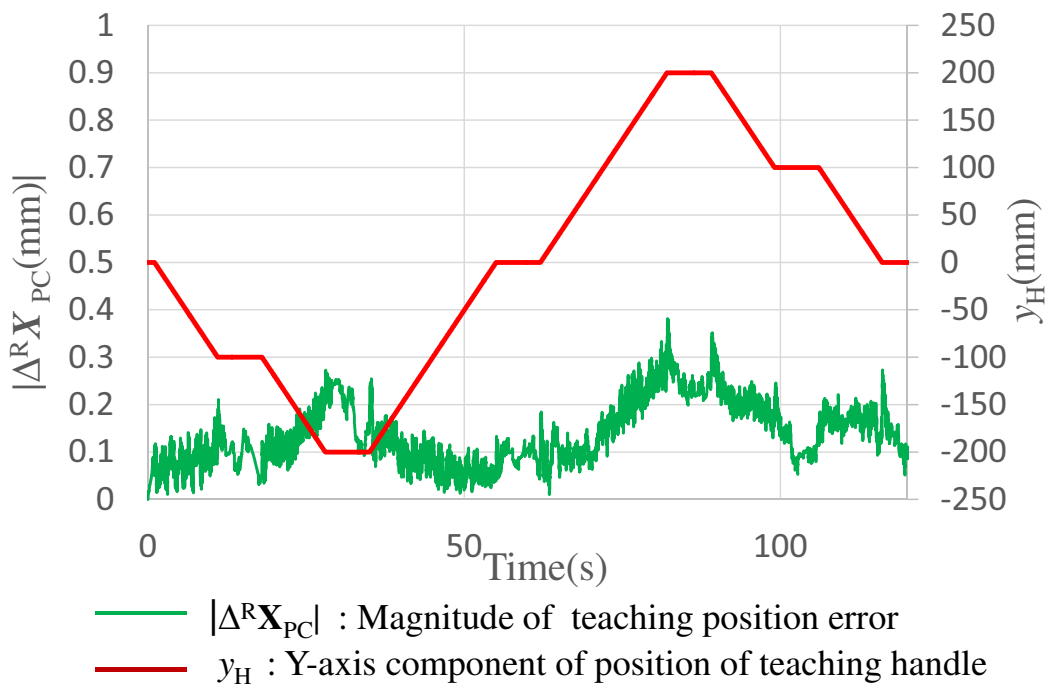


図 3.15 教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  (移動速度 : 10mm/s)



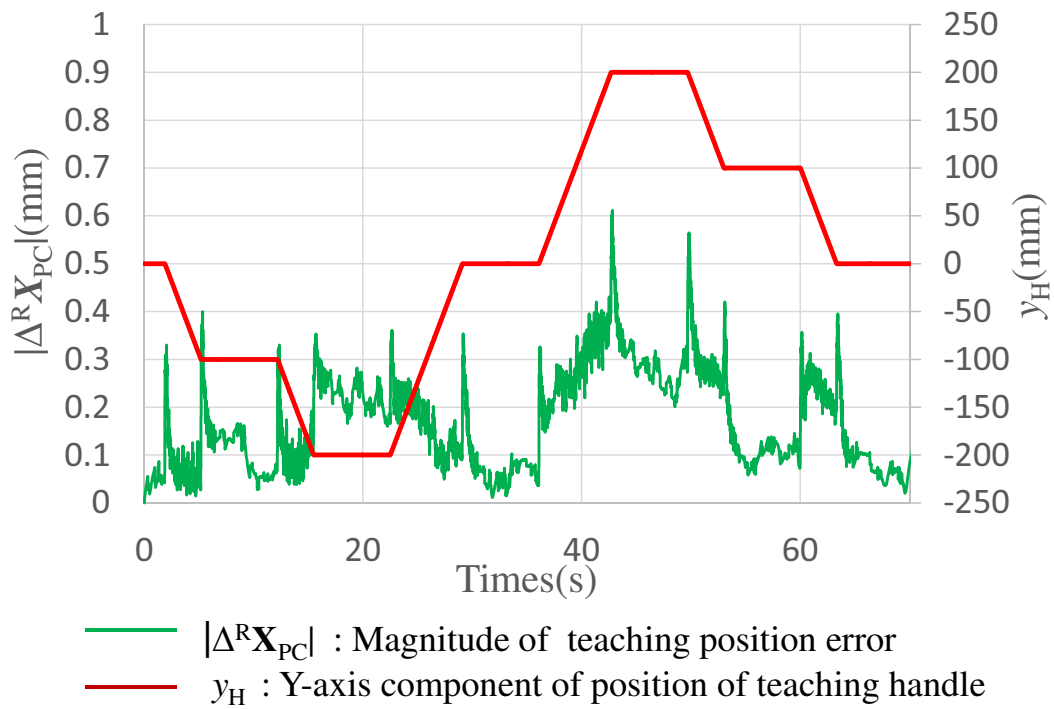


図 3.16 教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  (移動速度 : 30mm/s)

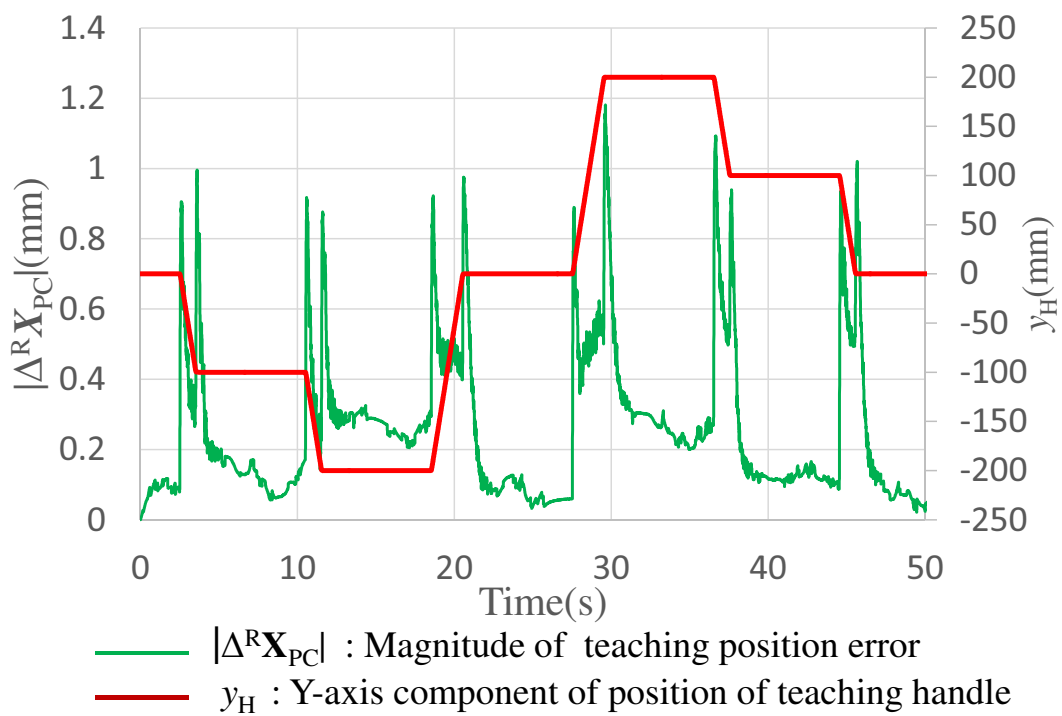


図 3.17 教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  (移動速度 : 100mm/s)

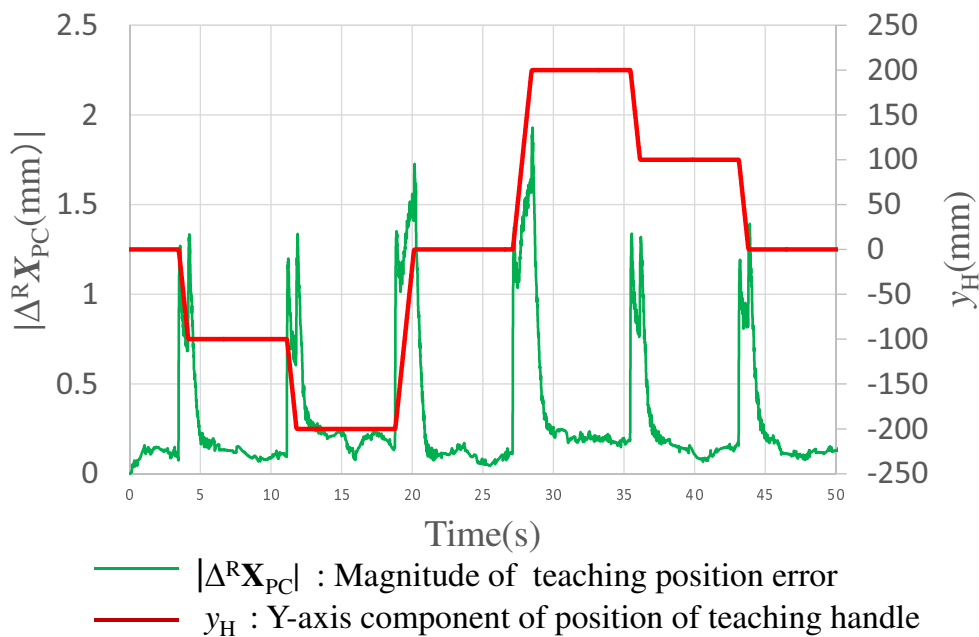


図 3.18 教示誤差の絶対値  $|\Delta^R \mathbf{X}_{PC}|$  (移動速度 : 150mm/s)

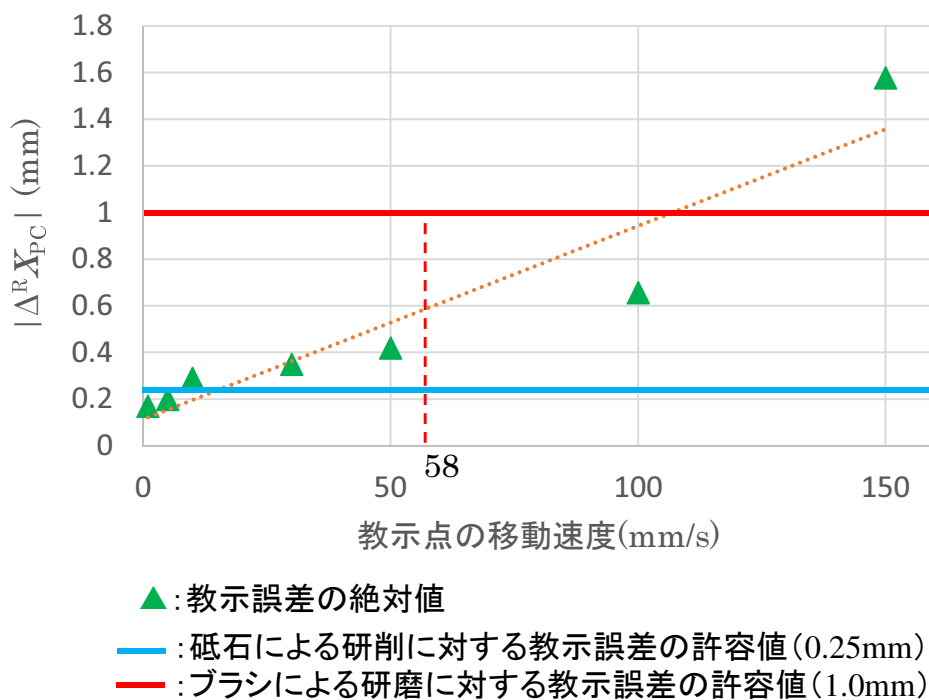


図 3.19 移動速度と教示誤差の関係

### 3.5 おわりに

本章では、第2章で提案したパラレルワイヤ教示装置とそれを用いた教示法を6自由度の産業用ロボットに実装した。さらに、教示者の動きをリニアアクチュエータで置き換え、再現性のある教示入力とすることで提案法の教示の精度を検証した。その結果、教示動作に対して、ロボットが遅れて追従することで、ロボットの動特性にかかわらず教示の入力軌道を測定できることを確認した。また、教示動作の速度に比例して、教示誤差が拡大することを確認した。さらに、この最大誤差を教示の移動速度毎で求めて直線近似した結果、目標である移動速度 58mm/s 以下では最大誤差 1mm 以内を達成した。このため、ブラシを用いたバリ取りロボットの教示に利用可能であることを確認した。

次章では、このパラレルワイヤ教示装置とロボットを用いてバリ取り設備としてではなく、パラレルワイヤ教示装置と6軸力覚センサを一体化し、パラレルワイヤ教示装置による位置情報の教示と、力覚センサによる作業の力を同時に行うシステムを提案する。さらに、この教示システムを利用したリハビリ支援ロボットを開発し、その有効性を検証する。



## 第4章

# パラレルワイヤ教示法のリハビリ支援ロボットへの応用

### 4.1 はじめに

第4章では、パラレルワイヤ教示装置と力覚センサを併用した位置と力の教示法を提案するとともに、この教示法のリハビリ支援ロボットへの適用について述べる。これまで、位置と力を同時に教示する方法については望月らの報告 [38] があるものの、実用化レベルの報告は無い。しかし、ハイブリッド制御に代表される位置と力の制御についての研究は数多くされていることから [59–62]、また、サービスロボットの拡充のためにも、これらに対応する位置と力の教示法が必要と考えられる。

ここでは、リハビリ支援ロボットとして脳卒中片麻痺患者などに対して療法士が行う負荷抵抗トレーニングの再現を想定した。この反復負荷抵抗トレーニングは運動機能回復のためのリハビリの一つである。そのためにパラレルワイヤ教示装置に6軸の力覚センサを内蔵した装具を接続した教示装置を試作し、これを用いた教示システムを開発する。この教示システムを用いて、はじめに、療法士による反復負荷抵抗トレーニングの教示を実施することで位置と力の情報を同期して収集できることを確認し、次に、教示した動作をロボットで再生を行い、療法士が行った反復負荷抵抗トレーニングを患者がロボットを利用して行えることを確認する。

### 4.2 パラレルワイヤ教示法を利用した反復負荷抵抗トレーニング装置

#### 4.2.1 位置と力を同時に教示する手法の提案

作業中のロボットの位置と力を同時に教示する手法について述べる。ロボットが、位置の教示情報と作業負荷の力の教示情報を利用してより複雑な作業を行くことを目的として、これまでハイブリッド制御等の研究が数多くなされている [59–62]。ハイブリッド制御法では目標軌道に正確に追従する位置制御と、力覚センサなどを利用してロボットが受ける外力を検出して目標に一致するような力制御を同時に行う。この時、力の目標値は位置の情

報と同様に、ティーチングペンダントにより数値として入力される。

これに対して、直接教示法では位置の教示が中心であり [29]、力も併せて教示する手法の研究については望月らの報告 [38] があるものの、位置と力を同時に教示する装置は実用化されていない。この理由として、この教示法は駆動機構自体にコンプライアンス要素を有する油圧駆動のロボットを対象としているのに対して、現在主流となっている電動モータ駆動のロボットへの適用が困難であったからである。しかし、この電動式の駆動機構を利用するロボットに適用するために開発された力覚センサを利用した位置の直接教示法では、外部環境との接触した状態ではロボットが不安定になるという課題があった [36, 63]。また、力覚センサを利用した教示法では、教示中に力覚センサが計測する力の情報を、教示のために教示者がロボットに加えた力と対象物から受ける作業負荷などの力に分解する手法がないため、位置と力の教示を同時に行うことは出来ない。

しかし、パラレルワイヤ教示装置は第2章でも述べたとおり、ロボットと教示者の間をワイヤで接続しているため、両者の間に作用する力はワイヤの張力のみである。位置情報の教示にはワイヤの張力以外の力は関与していないためこの構造を利用し、パラレルワイヤ教示装置では直接教示法でありながら対象物と接触しながら軌道の教示が可能である。そのため、パラレルワイヤ教示装置と対象物の間に力覚センサを設置し、作業の負荷を計測することで力の教示情報を取得することが可能となる。

パラレルワイヤ教示装置と力覚センサを組み合わせた位置と力の教示装置による教示の手順を図 4.1 に示す。この図ではバリ取りロボットへの教示と再生を例に示している。図 4.1(a) は装置の構成を示す。この教示装置では位置を教示するためのパラレルワイヤ教示装置の可動プラットフォームと工具の間に力覚センサを配置している。次に、図 4.1(b) に教示作業の手順を示す。軌道の教示はこれまでと同様に可動プラットフォームに接続したハンドルを操作することで教示を行う。教示者は加工対象面の教示点に工具先端を押し付けて移動させる (軌道①)。これに併せて、ロボットはエンドエフェクタを可動プラットフォームの動きに追従させる (軌道②) ことで軌道を取得する。この工具を加工対象面に押し付けて移動する「なぞり」動作を行う際、工具先端の教示点に作用する力  $F_T$  を力覚センサによって計測して位置の情報と同期して保存する。図 4.1(c) では (b) で取得した位置と力の再現 (軌道③) を行う。この際取得した位置と力の情報を利用したハイブリッド制御等が可能になる。この図における力  $F_R$  は実際の作業中の力である。この力  $F_R$  を  $F_T$  の値や作業の目的に適した制御を行う。

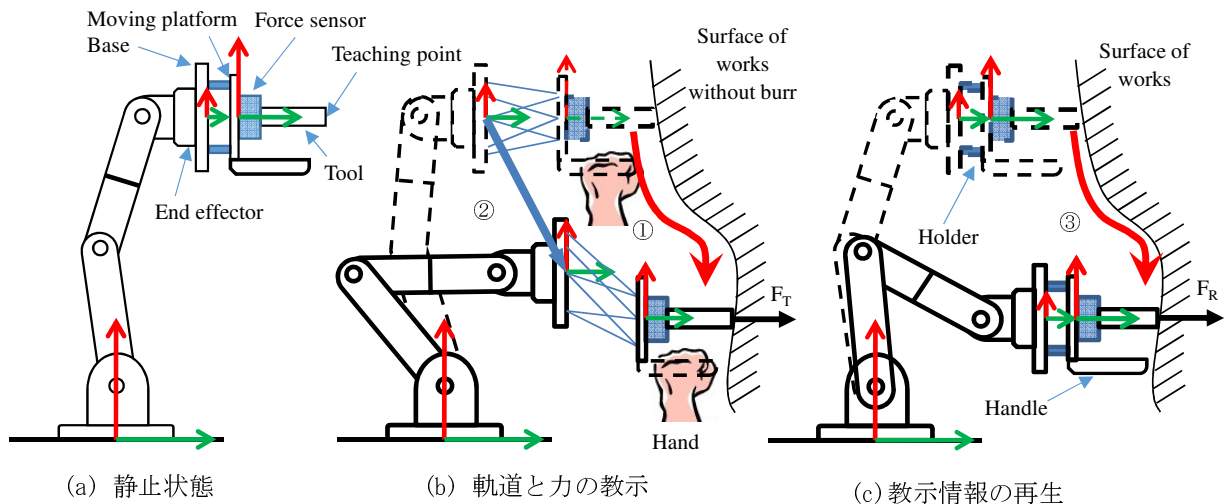


図 4.1 パラレルワイヤ教示装置と力覚センサを利用した工具の位置と力の教示手順

#### 4.2.2 反復負荷抵抗トレーニングを実現するロボットの要求仕様

産業用ロボットを利用した上肢の反復負荷抵抗トレーニング装置を実現するために必要な仕様について述べる。本研究における反復負荷抵抗トレーニングとは、脳卒中などによって失われた運動機能を、同じ運動を繰り返し実施することで脳に正常な運動パターンを再学習するためのものとする。

反復負荷抵抗トレーニングの一つとして、固有受容性神経筋促通法 (PNF: Proprioceptive Neuromuscular Facilitation) がある [64]。PNF とは固有受容器を刺激することによって、神経から筋までの回路を再構築する方法である。この固有受容器は受容器 (レセプター) と呼ばれる刺激に反応する器官の 1 種であり、筋の収縮の程度・腱にかかる張力などの感覚の受容器である。この固有受容器への刺激を利用して患者が自分の麻痺側上肢を認識し、上肢を認識した状態を維持して患者自らの意志で麻痺側上肢を動かすことが PNF である。さらに、この PNF を繰り返し実施することで、一度は疾病や負傷で失われた神経回路を再構築することが反復負荷抵抗トレーニングである。このトレーニングを実施する上で療法士は、目的とした筋の促通をするために最適なトレーニング動作になるように、患者の麻痺側上肢を誘導すること、患者が上肢を認識し続けるためにトレーニング実施中は抵抗を与え続けることが求められる。また、このトレーニングは療法士の徒手によって行われるため、療法士にはスキルと経験に加えてトレーニング動作を繰り返し行うための体力も求められる。

これまで森田ら [65–71] は、上肢肘伸展動作に対する徒手療法において療法士と患者の動

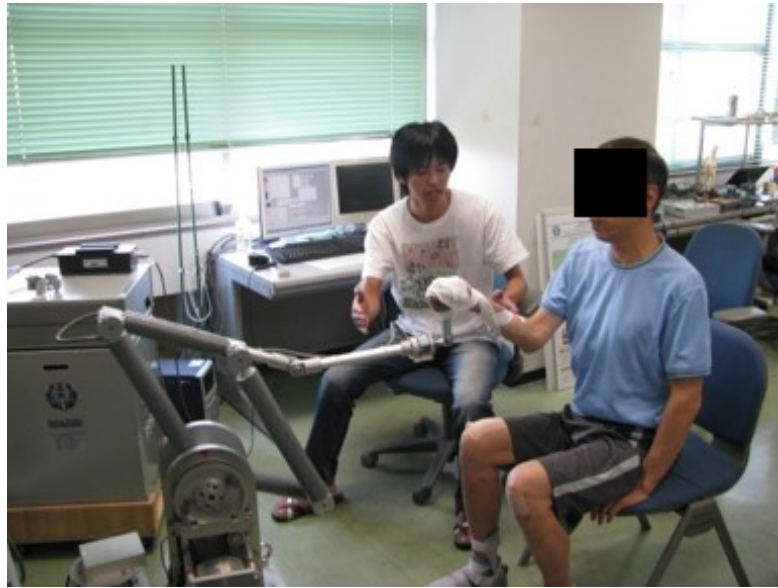


図 4.2 3次元力提示型ロボット [67-69]



図 4.3 1自由度パッシブ型反力提示デバイス [65,66,70,71]

きや両者間に作用する力の解析を行い，それに基づいて図 4.2 に示す 3 次元力提示型ロボットや，図 4.3 に示す 1 自由度パッシブ型反力提示デバイスを利用した反復負荷抵抗トレーニング装置を開発している．この解析の結果，療法士は患者の筋収縮を促進するために患者の肘の伸展運動に対する適切な抵抗を適切な位置で付与することが判明している．これらの知見を基にして，1 自由度パッシブ型反力提示デバイスでは，図 4.4 のように前腕の装



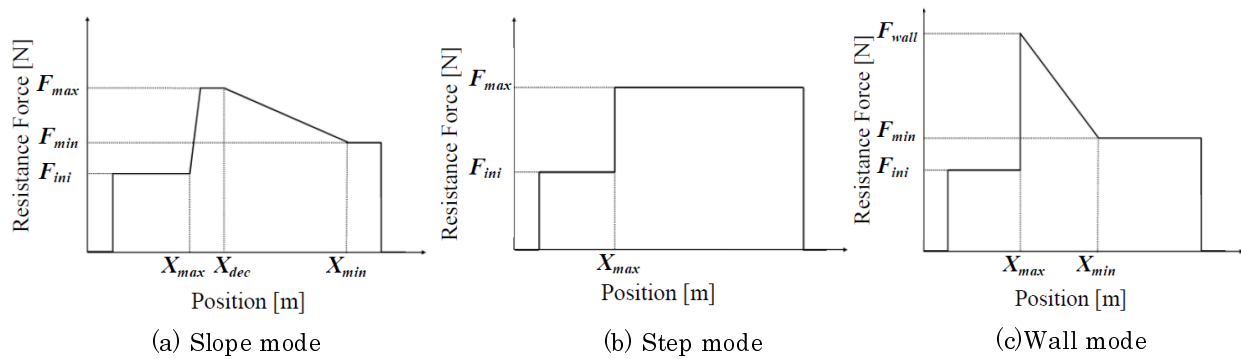


図 4.4 反復負荷抵抗トレーニングのための抵抗パターン

具の位置に対して力が変化する抵抗パターンを用意し、患者の症状に合わせて位置や力の数値を入力する方式のインターフェースを採用している。図 4.4 において横軸は装具の位置を表し、縦軸は負荷抵抗の大きさを表す。図 4.4 の (a) は Slope モード、(b) は Step モード、(c) は Wall モードを示す。また、この他に常に一定の抵抗を与える Constant モードもある。1 自由度パッシブ型反力提示デバイスでは、この抵抗パターンの作成は患者の症状に合わせて療法士が経験的に決めている。

この療法士による抵抗パターンをロボットに教示し、ロボットが再生することで患者は療法士によるトレーニングと同等なトレーニングをロボットにおいて行うことができる。そのためには、療法士によるトレーニング中の前腕の位置と前腕への負荷つまり力を計測し、ロボットの教示情報として利用するためのシステムが必要になる。また、ロボットによるトレーニングを行うため、患者、療法士およびロボットを必要に応じて接続するための方法が必要である。さらに、限られたトレーニングの時間を有効に利用するために、個々の患者の症状からトレーニングの条件を判断して入力するための時間を短くする必要がある。加えて、産業用ロボットのように教示専門のスタッフが常駐して、トレーニングのための教示を行うことは難しいため、教示作業が容易であることが望ましい。また、教示後に、ロボットが取得した位置と力の教示情報を利用して、療法士の行うトレーニングを行う必要がある。一般的に位置と力の情報を利用してロボットの制御を行う方法としてハイブリッド制御がある。しかし、ハイブリッド制御では進行方向には位置制御を、進行方向と直交する方向に力制御を行うのに対し、本研究では患者の上肢の動きに対して負荷を与えることから、力の制御の方向と移動の方向が一致する。このことからハイブリッド制御とは異なる位置・力情報の再現のための制御法が必要になる。したがって、本研究で開発するリハビリ支援ロボットでは以下の 3 点の実現を目指す。

1. トレーニング動作の再生を想定した、患者の上肢の動きと療法士と患者の間に作用する力の2つの情報を教示する教示システムの開発
2. トレーニングの教示・再生の各段階で患者，療法士およびロボットを必要に応じて接続する方法の開発
3. 取得した位置と力の教示情報を利用して，ロボットを制御するための方法の開発

### 4.2.3 反復負荷抵抗トレーニング用装具

ロボットによる反復負荷抵抗トレーニングを行うため，図 4.5 に示す装具を開発した．この装具は二つの特徴を有している．

第1に，患者の上肢を固定するインナーシェルと，療法士が患者の上肢に負荷を与えながら誘導するために把持するアウターシェルの2重構造としている．図 4.6 に図 4.5 の断面模式図を，図 4.7(a) に分解写真を示す．この構造はインナーシェルとアウターシェルの間を6軸力覚センサで接続しているため，この両者間に働く力とトルクを計測することが可能になる．これにより，療法士がアウターシェルを把持してリハビリの動作を行う間，装具の位置・姿勢の情報と同期して患者の腕に作用する負荷（力とトルク）の情報を収集する．

第2に，患者の上肢とパラレルワイヤ教示装置の可動プラットフォームを接続することである．教示作業中は可動プラットフォームとベースを分離して軌道情報の収集を行い，トレーニング動作の再現時には可動プラットフォームとベースを接続してロボットと患者を接続してトレーニングを行う．可動プラットフォームとベースを分離している様子を図 4.7(b) に示す．

この二つの特徴により前節で挙げた実現すべき3項目の1と2を実現する，

次に，図 4.7 からこの装具の構成について説明する．この装具はCFRP（アクリル樹脂）製のアウターシェル，熱可塑性プラスチック製のインナーシェル，ウレタンクッションおよび6軸力覚センサで構成されている．インナーシェルは装具内に患者の手を固定するために利用する．このインナーシェルの内側にはウレタン製のクッションが配置され，患者の手とインナーシェルの隙間を埋めることで患者の手を安定させる．6軸力覚センサはインナーシェルとアウターシェルの間を接続するように配置され，両者に働く力とトルクの計測に利用する．アウターシェルはパラレルワイヤ教示装置と患者の接続に用いるほかに，



図 4.5 反復負荷抵抗トレーニング用装具 (装着状態)

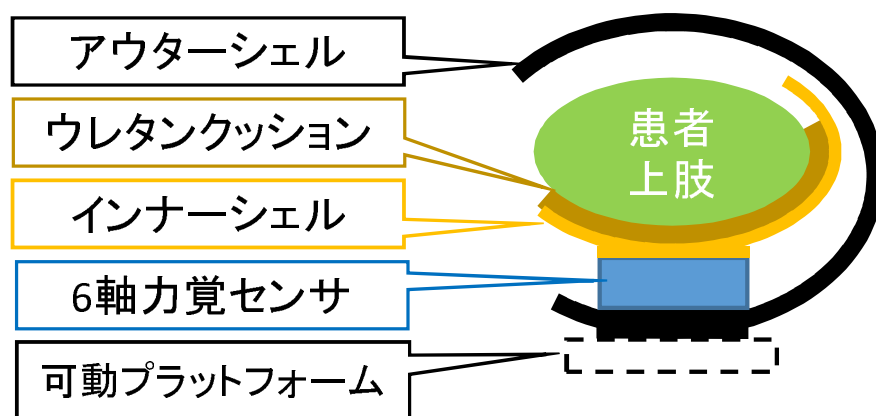


図 4.6 反復負荷抵抗トレーニング用装具 (断面模式図)

ロボットにリハビリの動作を教示する際に療法士が患者の手を保持するために用いる。アウターシェルのCFRPとインナーシェルの両方を熱可塑性プラスチックで作成した理由は、ドライヤーなどの熱源でこれらを温めることで材質が柔軟になるため、個々の患者に合わせて形状の調整が可能なためである。この装具の仕様を表 4.1 に示す。

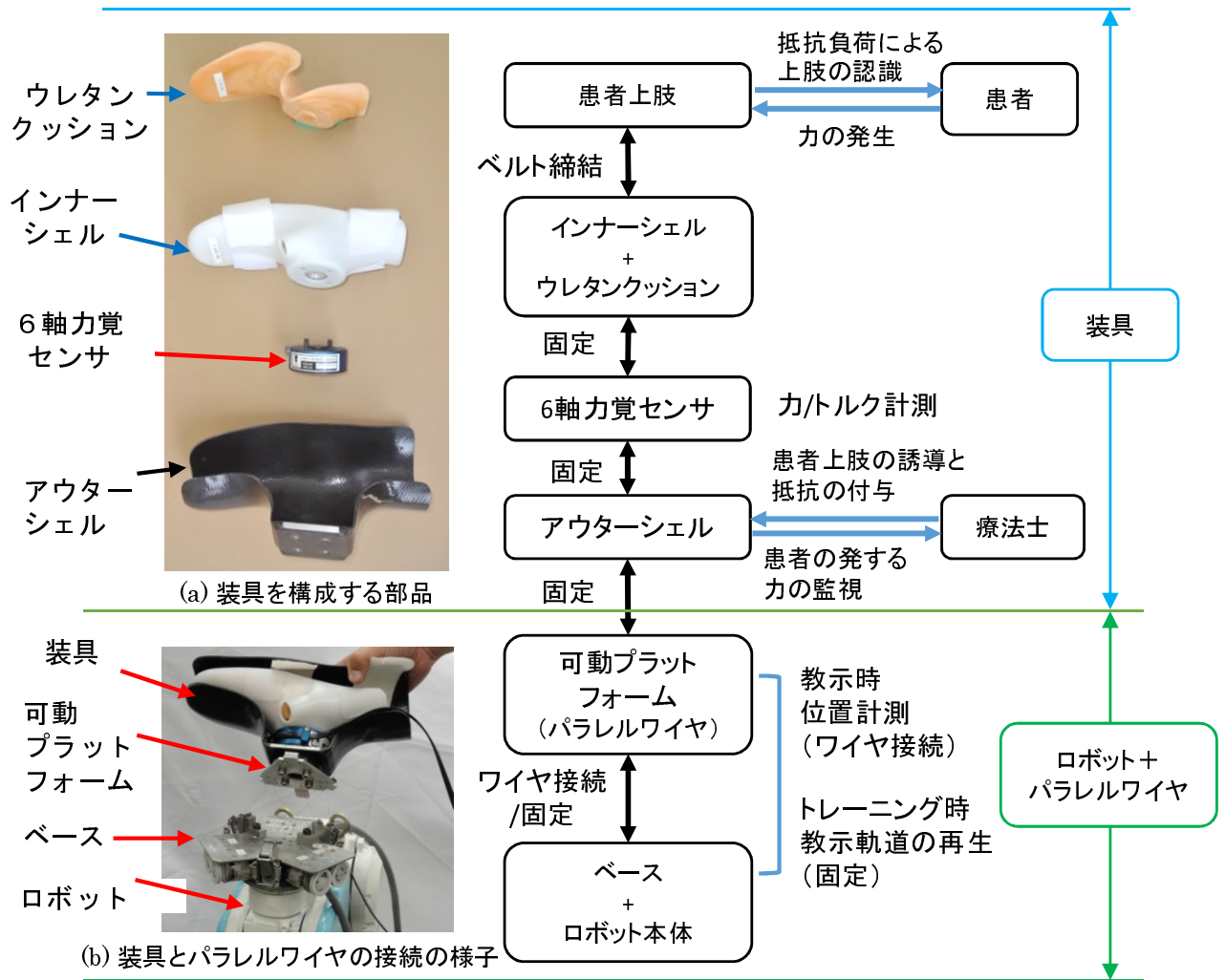


図 4.7 反復負荷抵抗トレーニング用装具の構造と機能

表 4.1 反復負荷抵抗トレーニング用装具の仕様

|         |   |   |
|---------|---|---|
| インナーシェル | 熱可塑性プラスチック  |   |
| アウターシェル | アクリル系樹脂CFRP   |   |
| クッション   | ウレタン  |   |
| 6軸力覚センサ | ニッタ株式会社製<br>FORCE-MOMENT SENSOR<br>IFS-67M25A25-I40 | Fx,Fy 100[N]<br>Fz 200[N]<br>Mx,My,Mz 7[Nm] |
| 重量      | 537 [g]   |   |

### 4.3 反復負荷抵抗トレーニングのためのリハビリ支援ロボット

先行研究 [71] では、シンプルな構成のトレーニング装置を開発している。この中で、療法士は4つの異なる抵抗パターンから選択して反復負荷抵抗トレーニングを行う。また、実際の負荷のパターンやその大きさについては、療法士が患者の症状から判断して決めて入力する。一方、開発するリハビリ支援ロボットでは療法士による反復負荷抵抗トレーニング時の患者の負荷情報を収集し、この情報を利用して反復負荷抵抗トレーニングを行う。このロボットは、取得した反復負荷抵抗トレーニングの軌道に沿って動作を再生する。その際、ロボットは教示した負荷情報と、患者が発生する力を比較して、患者が発生する力が大きい場合のみロボットが軌道上を移動する。

反復負荷抵抗トレーニング用のリハビリ支援ロボットを図 4.8 に示す。装具は平行ワイヤ教示装置の可動プラットフォーム上に固定され、可動プラットフォームはベースに固定されている。また、図 4.9 は反復負荷抵抗トレーニングの教示を行う様子を示す。図中の右の者は患者役(以後、患者と呼ぶ)であり、左の者は療法士役(以後、療法士と呼ぶ)である。教示作業中の患者は患者自身の麻痺側上肢を前に肘を伸展して伸ばそうと試みる。患者と相対して位置する療法士は装具のアウトターシェルを持ち、患者の動きに対して抵抗を与えるようトレーニングを行う。今回の試験では図 4.8 と図 4.9 のロボットの座標系に対し、患者の肘の伸展により装具の位置は  $-Y$  方向に移動する。

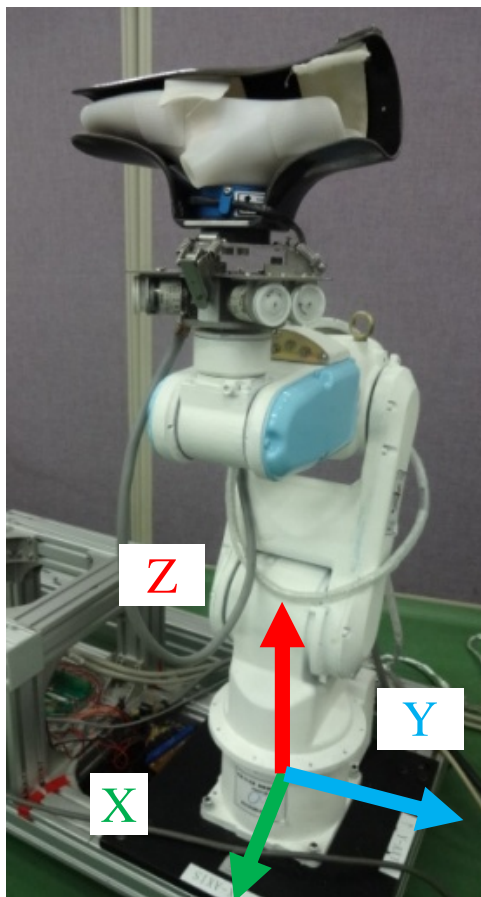


図 4.8 リハビリ支援ロボットの全体図

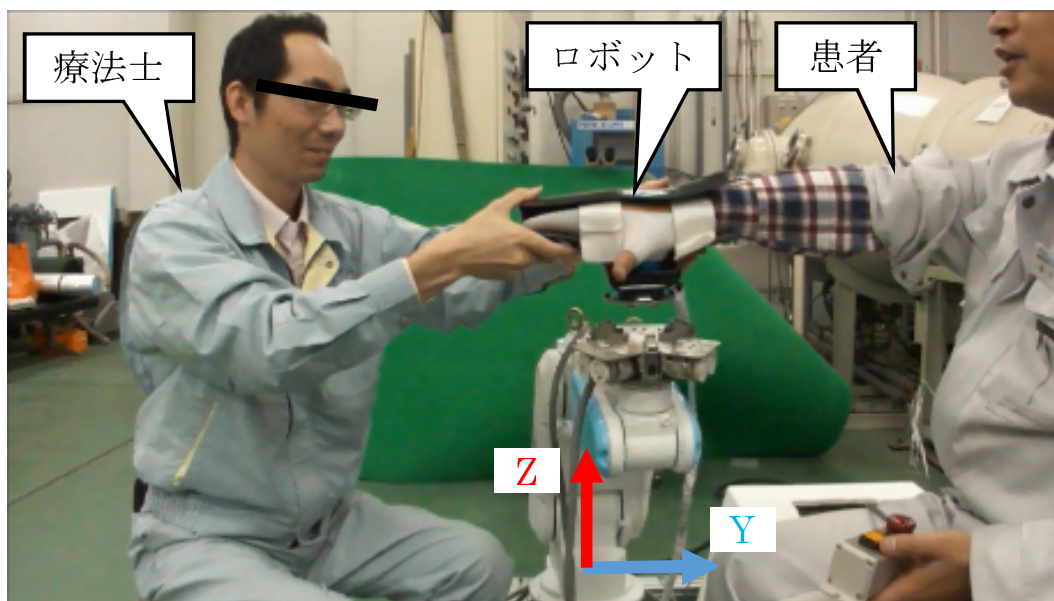


図 4.9 反復負荷抵抗トレーニングの教示の様子

図 4.10 はロボットを利用して反復負荷抵抗トレーニングを実施している様子である，教示した情報を利用してロボットが動作を再生している．この時，可動プラットフォームはベースに直接固定されており(図 4.8 参照)，患者は療法士の代わりにロボットを利用して反復負荷抵抗トレーニングを行うことが可能である．

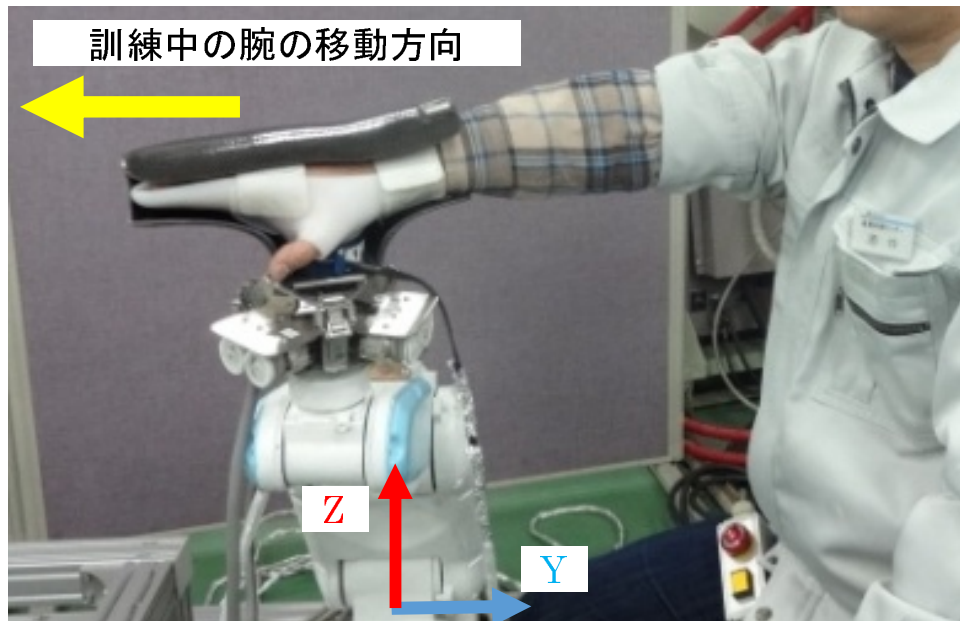


図 4.10 反復負荷抵抗トレーニングの再生の様子

リハビリ支援ロボットの教示時の制御システムのブロック線図を図 4.11 に示す．4.11 における位置のブロックは位置の教示のブロック線図(図 3.3)と共通である．位置ブロック内でロボットの位置計測および制御は 10msec 周期で行われる．この結果得られる教示点の位置姿勢の  $\mathbf{X}_H(t)$  をメモリ上の領域 Teaching data に保存する．さらに図 4.11 では，これに力/トルクを計測するための 6 軸力覚センサを内蔵する装具を接続して，装具に作用する力とトルクを計測する．この計測を位置ブロックと同期して行うことで， $\mathbf{F}_T(t)$  を取得して Teaching data に保存する．ここで，位置と姿勢の教示値を保存する  $\mathbf{X}_H(t)$ ，力とトルクの教示値を保存する  $\mathbf{F}_T$  を次に示す．

$$\mathbf{X}_H(n) = \left[ x^d(n) \quad y^d(n) \quad z_a(n) \quad \alpha(n) \quad \beta(n) \quad \gamma(n) \right]^T \quad (4.1)$$

$$\mathbf{F}_T(n) = \left[ F_x^d(n) \quad F_y^d(n) \quad F_z^d(n) \quad M_\alpha^d(n) \quad M_\beta^d(n) \quad M_\gamma^d(n) \right]^T \quad (4.2)$$

また，リハビリ支援ロボット動作を再生する時に力覚センサから取得する力とトルクの保

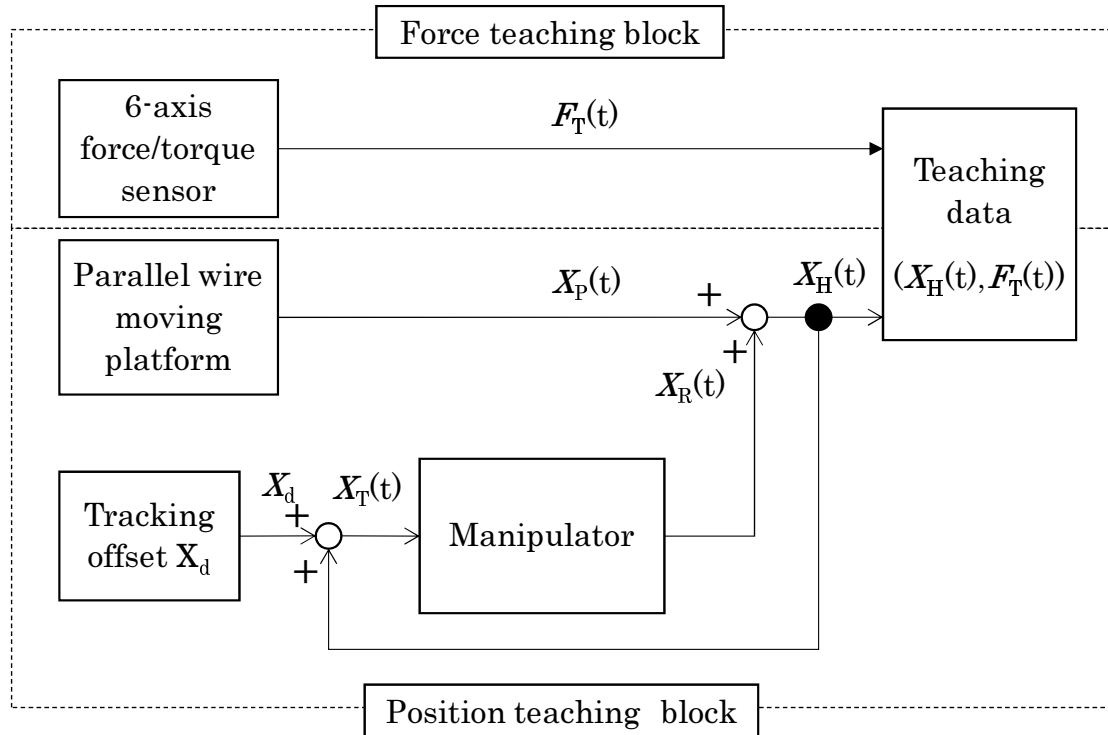


図 4.11 反復負荷抵抗トレーニングの教示のための制御システムのブロック線図

存先を  $F_R(t)$  とする.

$$\mathbf{F}_R(t) = \left[ F_x(t) \quad F_y(t) \quad F_z(t) \quad M_\alpha(t) \quad M_\beta(t) \quad M_\gamma(n) \right]^T \quad (4.3)$$

次に、教示情報を再現するための制御システムのブロック線図 4.12 を示す. このブロック線図は、前章の図 3.4 を基本として、Teaching data に保存された力の教示値  $F_T(t)$  と、6 軸力覚センサで取得したトレーニング再生中の力  $F_R(t)$  からロボットの動作の内容を決定するコントローラを追加したものである. ここで  $F_R(t)$  は図 4.1 においてロボットが作業を再生している間、ロボットが受ける反力を表す. このコントローラの実出力  $X_{Tp}(t)$  でロボットを制御する.

最後に、図 4.12 に示すコントローラの制御フローチャートを図 4.13 に示す. 先行研究 [71] では、図 4.4 の抵抗パターンにより装具の移動を制御している. 抵抗パターン上の、設定された位置において患者の発する力が設定された抵抗を上回るときに患者の腕が移動する. 本研究のリハビリ支援ロボットも同様に、患者がトレーニング中に発する力と教示値を比較して、患者が発する力が大きい場合のみ装具が移動する. また、リハビリ支援ロボットは、患者の肘の伸展の結果装具の移動する方向をロボットの Y 方向としたため、装具で計測



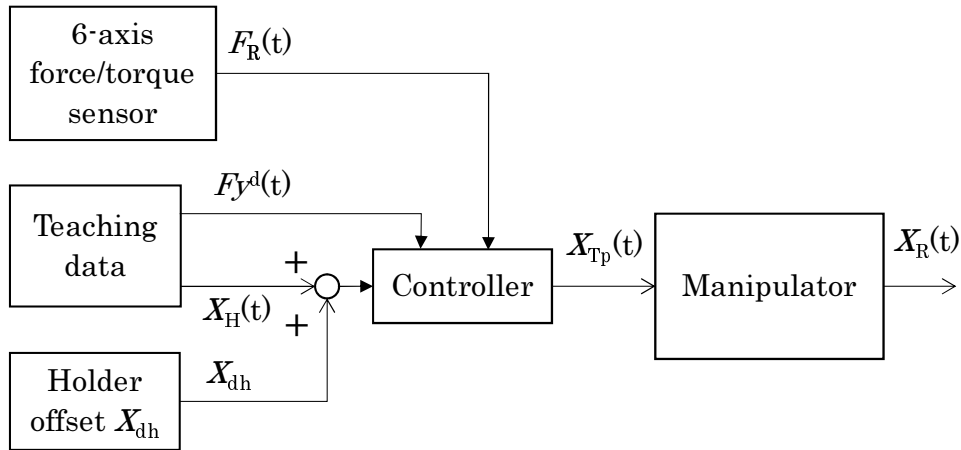


図 4.12 反復負荷抵抗トレーニングの再生のための制御システムのブロック線図

する力の Y 方向成分を利用して制御を行う．図 4.13 中②で位置と力の教示値 ( $\mathbf{X}_H$ ,  $\mathbf{F}_T(t)$ ) を記憶する．次に図中③で 6 軸力覚センサの測定値の Y 方向成分  $F_y(t)$  を取得する．今回の再生時のプログラムでは Y 方向の力を利用して移動可否の判定を行うため，式 4.3 の Y 方向成分である  $F_y(t)$  をコントローラで利用する．④で患者が発する力と教示値を比較して患者の発する力が上回る場合は⑤でロボットの位置を 1 ステップ進めて  $y^{ref}(t)$  を更新する．下回る場合は⑥により現在の位置に留まるように  $y^{ref}(t)$  を維持する．さらに  $y^{ref}(t)$  に対応する  $\mathbf{X}_H(t)$  から  $\mathbf{X}_{Tp}(t)$  を計算して，ロボットに出力する．

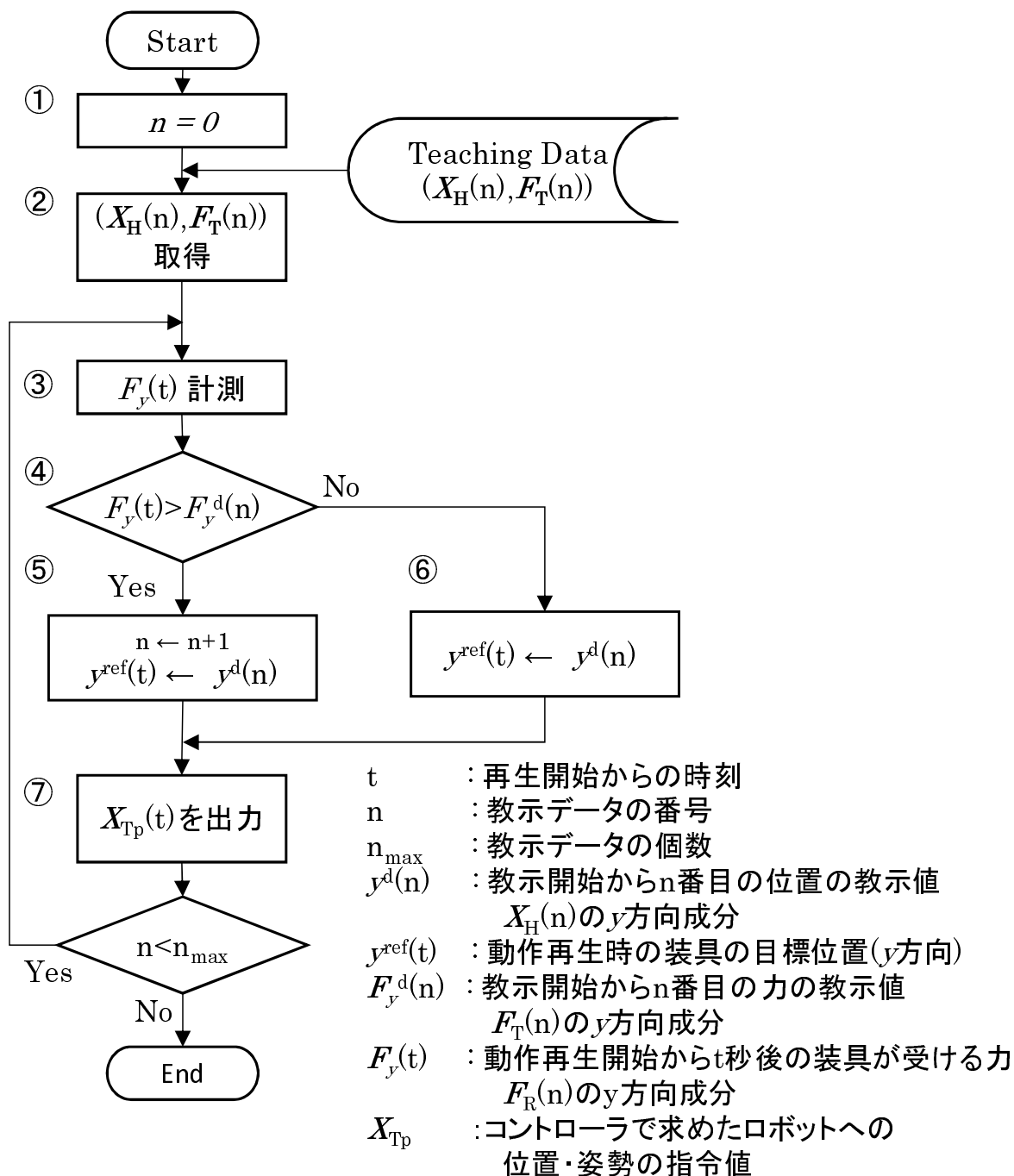


図 4.13 反復負荷抵抗トレーニングのためのコントローラのフローチャート

## 4.4 検証実験と考察

開発したロボットシステムの教示・再生機能の妥当性を検証するために、健常者を対象として反復負荷抵抗トレーニングの教示とロボットによる再生を実施した。また、教示する抵抗パターンは図 4.4(a) の Slope モードとした。

まず、反復負荷抵抗トレーニングの教示の妥当性検証を実施した。この実験により取得した位置と力の Y 方向成分を図 4.14 に示す。図 4.14 の横軸は時間を示し、縦軸は装具の位置  $y^d$  と療法士と患者の間に作用する力  $F_y^d$  を表す。患者の肘の伸展とともに装具の位置は -Y 方向に移動することから、トレーニングの進行により、装具の位置の教示値  $y^d$  が減少するとともに患者が肘を伸展させていることが確認できる。

時間とともに変化する位置  $y^d$  と力  $F_y^d$  の特徴から、図 4.14 は図中①～⑤の 5 つの段階に分けることができる。

### 1. 療法士による促通のための抵抗の付与

療法士が患者の上肢を固定した装具を把持し、促通のために抵抗を与える。そのため、 $F_y^d$  の値は増加する。一方、装具の位置  $y^d$  は大きく移動していない。このことから、療法士が患者の伸展のための筋収縮に対して抵抗を加えることで促通が生じ、患者が伸展をするために力を発し始めていることを示している。

### 2. 初期抵抗に対する移動

図 4.4(a) の Slope モードでも、1. で促通した患者の肘が伸展をする間、初期抵抗  $F_{ini}^d$  を維持したまま、装具が移動する。これは患者の上肢に一定の抵抗を加えることで、患者の肘の促通を維持しながら、肘の伸展をさせていることを表している。本リハビリ支援ロボットでも同様に、療法士が患者に加える抵抗  $F_y^d$  を 10~15N に維持しながら、装具の位置の教示値  $y^d$  が減少している。このことは、療法士による抵抗を維持することで、患者が肘の伸展を行い、その動きを療法士が誘導していることを示している。

### 3. 抵抗の上昇～最大抵抗値 $F_{max}$ まで

Slope モードでは移動の途中で療法士が抵抗を増加させる。これは増加する抵抗に対して患者が自らの意志で伸展する力を増やすよう誘導するためである。また、抵抗が増加するため装具の移動は減少する。本システムでも療法士が抵抗を増やすため  $F_y^d$  は上昇する。これは患者が発する力が増加していることを示す。一方、 $y^d$  の変化は減

少している。この状態は療法士の判断する最大の抵抗  $F_{max}$  まで継続する。今回の実験での  $F_y^d$  の最大値は 22.9N であった。

#### 4. 抵抗が最大 $F_{max}$ ~ 抵抗の最小値 $F_{min}$ へ減少, 患者の上肢の誘導

図 4.4(a) の Slope モードでは, 抵抗の最大値  $F_{max}$  に達した後, 抵抗が  $F_{min}$  まで減少するとともに, 患者の肘の伸展を誘導する。今回の実験でも, 療法士による抵抗の最大値  $F_{max}$  が 22.9N に達した後, 最小値  $F_{min}$  が約 15N まで減少するとともに, 患者の肘の伸展を誘導する。

#### 5 最小の抵抗 $F_{min}$ での移動と患者の上肢の誘導

抵抗の最小値  $F_{min}$  に達した後も, 患者の肘の伸展は継続している。

図 4.15 に, この教示で得られた計測データを用いて, 装具の位置と装具の受ける力の関係を示す。この図において, 横軸は装具の位置を表し, 縦軸は装具の受ける力を表している。また, 肘の伸展によって装具は図の左から右に移動する。この結果から, 図 4.4(a) の Slope モードと同様に推移することが確認できる。

上記の一連の動作について, 開発した装具を装着した状態で療法士と患者によるトレーニングが出来ることを確認した。また, 療法士と患者が会話でコミュニケーションをとりつつ数回トレーニングの試行を行うことで, トレーニング中の位置と力の計測が出来ることを確認した。この2点から, 療法士と患者による反復負荷抵抗トレーニングの位置と力の教示が可能であることを確認した。

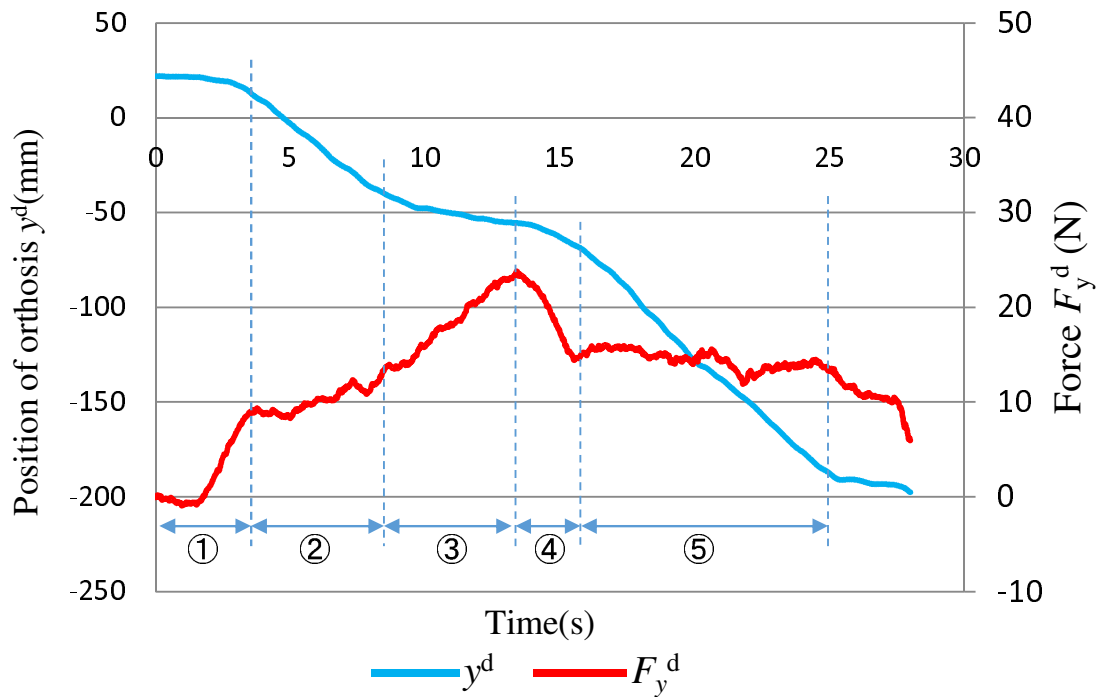


図 4.14 リハビリ支援ロボットにおける位置と力の教示情報

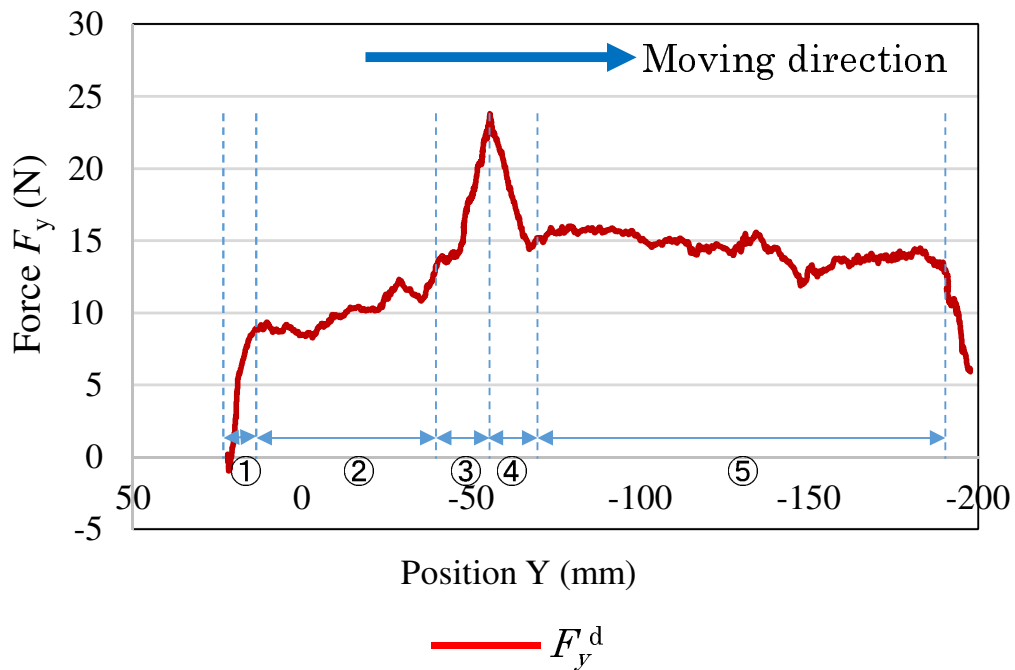


図 4.15 教示情報における患者の上肢の位置と力の関係

次に、リハビリ支援ロボットに図 4.14 の教示情報を与えて反復負荷抵抗トレーニングの

可能性を検証した。本システムでは図 4.10 のように患者とロボットを接続した状態でトレーニングの再生を実施した。また、図 4.13 のフローチャートにて示したように、トレーニング中の患者の肘の伸展による力の教示値で以上の値になった場合のみ位置の教示値を 1 ステップ進める制御プログラムを利用した。

トレーニングを実施した結果を図 4.16 に示す。横軸は装具の位置  $y$  を、縦軸は装具に作用する力  $F_y$  を示す。図 4.16 は力の教示値  $F_y^d$ 、トレーニング中の患者による力  $F_y$  を示す。この図から、力の教示値  $F_y^d$  に対してトレーニング中の力  $F_y$  が上回った場合に移動していることが確認できる。このことから、進行方向の力の教示値を利用して移動を判断する制御法は、反復負荷抵抗トレーニングを再現出来ていることを確認した。

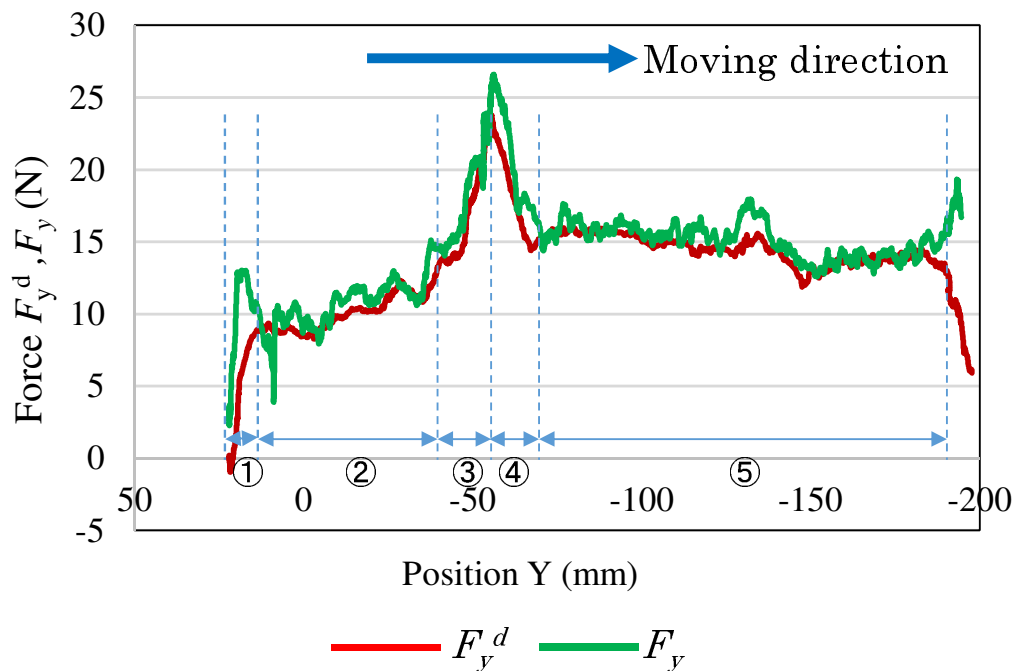


図 4.16 位置と力の教示情報に対するトレーニング実施時の位置と力の比較

## 4.5 おわりに

本章ではパラレルワイヤ教示装置と6軸の力覚センサを利用して位置と力を同期して教示する手法を開発した。さらに、この教示法を利用して反復負荷抵抗トレーニングを行うロボットへの適用を検討した。はじめに、従来の教示法が位置の教示のみであったことに対し、パラレルワイヤ教示装置と力覚センサを利用して位置と力を同時に教示することを提案した。次に、この教示法をリハビリに利用するため、6軸力覚センサを内蔵した装具を開発した。また、反復負荷抵抗トレーニングへの利用に適した位置と力の制御法を実装したリハビリ支援ロボットのシステムを開発した。最後に健常者による教示と再生の試験を実施した。

この結果、患者の腕に装具を装着した状態で、反復負荷抵抗トレーニングの動作を行うことが可能であることを確認した。また、このトレーニング動作を行うことで、患者と療法士による反復負荷抵抗トレーニングに必要な位置と力の教示が可能であることを確認した。さらに、トレーニング中に発する力の大きさを比較して、トレーニング中の力が教示データを上回る場合のみ教示軌道上を移動する制御法を実装したリハビリ支援ロボットを利用して試験を実施した結果、教示者が与えた力の情報と被験者の発生する力の比較を行い、軌道を移動することを確認した。

今後、リハビリ支援ロボットとして利用するために、先行研究 [65–71] で実施している他の力のパターンにも対応するよう検討を進める予定である。また、リハビリにおける位置と力の関係を計測する装置が、これまではモーションキャプチャ装置と力覚センサを組み合わせた大掛かりなものであったため、リハビリの評価装置としての利用についても検討を進める予定である。





## 第5章

### 結論

#### 5.1 本研究のまとめ

2015年現在、産業用ロボットの直接教示法の主流は入力装置に力覚センサを利用した方法である。この教示法には、外部環境との接触による不安定化と、人とロボットの動特性の差による追従遅れの二つの技術的課題、外部環境との接触による不安定化と、人とロボットの動特性の差による追従遅れの二つの技術的課題が存在する。本研究はこの課題を解決し、より多くの利用者が産業用ロボットを利用できるようにすることを目的としている。そのため、力覚センサに代わる平行ワイヤ教示装置とこれを利用した産業用ロボットの教示法を開発した。また、平行ワイヤ教示装置と6軸の力覚センサを併用して、これまで不可能であった作業の位置と力の情報を同時に教示する教示法を開発し、リハビリ支援のためのロボットへの適用を検討した。

第2章では、教示者と産業用ロボットの動特性の差によって発生する相対位置の変化を吸収しつつ、両者間の相対位置を計測する方法として Stewart Platform 型平行リンク機構のリンクをワイヤに置換した機構を有する平行ワイヤ教示装置を開発した。さらにこの平行ワイヤ教示装置による位置の計測精度評価を実施した結果、基準とする位置から X,Y 方向に  $\pm 20\text{mm}$  以内、+Z 方向に  $25\text{mm}$  以内の範囲であれば、 $0.25\text{mm}$  の計測精度が保証されることが判明した。また、この結果から、この範囲であれば砥石によるバリ取り作業の教示に対応可能であることが判明した。

第3章では、開発した平行ワイヤ教示装置をロボットに実装した教示システムを構築するため、まずはじめに、産業用6軸ロボットに実装するためのロボット制御法を提案した。この中で、産業用ロボットに固定した平行ワイヤ教示装置が教示者の位置を常時計測できる様に、産業用ロボットが教示者の動作に追従する制御とした。次に、提案教示法の精度検証のために、再現性のある教示が必要であった。そのため人に代わりリニアアクチュエータで教示を行う評価システムを構築した。最後に、この評価装置を用いて教示システムに与える教示の目標とする位置と、教示システムが計測した結果を比較することで、動的な教示過程で取得した位置の精度を検証した。この結果、入力した目標の位置

に対して、教示点の移動速度 50mm/s までは教示で与えた位置に対して誤差は 1mm 以下であった。この結果、ブラシによるバリ取りに精度上、十分利用可能であることを確認した。

第4章では、はじめにパラレルワイヤ教示装置に 6 軸力覚力センサを併用する位置と力の教示装置とそれを用いた教示法を提案した。次にこの教示法をリハビリ支援ロボットに適用するため、患者とロボットを接続した状態でリハビリの教示と再生を行うための装具を開発した。さらに位置と力の教示装置と装具を実装したりハビリ支援ロボットを開発して、リハビリの教示の可能性を検証した。最後に取得した位置と力の教示情報をもとに、ロボットによる反復負荷抵抗トレーニングの再生を行い、その可能性を確認した。

## 5.2 今後の課題と将来の展望

### 5.2.1 パラレルワイヤ教示装置

誰もが容易に利用でき、短時間で複雑な軌道を教示可能な入力装置としてパラレルワイヤ教示装置を開発した。本教示装置では、人とロボットの相対位置を教示用の情報として利用する。このため直接教示法の課題であった外部環境との接触による不安定化や、人とロボットの動特性の差から生じる教示中の違和感を抑制する教示装置を実現した。

この教示装置をロボットに実装して活用するための課題として、まず位置計測の高精度化がある。現在のところパラレルワイヤ教示装置の精度は基準点近傍では誤差 0.25mm 以内であり、基準点から離れるほど誤差が拡大することが判明している。本教示装置を利用して今後ロボットにセル生産のような組立作業等の精度を供給する作業を教示する場合には、位置精度が向上するほど適用範囲を広げることが可能になる。そのため位置計測精度の改善が必要である。例えば本研究で使用している安川電機社製ロボット HP-3J をはじめとする小型の産業用ロボットは静止位置決め精度は 0.03~0.05mm 程度のため、これより本教示装置の計測精度を改善することが望ましい。また、本教示装置を利用する上で、装置の小型軽量化を行う必要がある。これは産業用ロボットには可搬重量の制約があり、本教示装置の重量が大きくなれば、実際の作業でロボットが扱うワークの重量を減らして制約内に収める必要があるためである。現在研究に使用しているロボットは可搬重量が 3kg のものである。これに対して、パラレルワイヤ教示装置の重量は 1.06kg あるので、ロボットの可搬重量の 35% を占めるため、改善が必要である。また、本教示装置の大きさについても、ロボットを利用する周辺の環境との接触を回避するなど安全性の面から、小型化を行うことが望ましい。

これらの問題点を改善するために、現在新たな教示装置の開発を行っている。開発中の装置では位置誤差の要因を分析し、精度の改善と小型化のために高分解能かつ小型なエンコーダの採用と各部品の高精度化を実施している。また、 $\mu\text{m}$ の精度を実現する教示装置として、差動トランスを利用したパラレルリンク式の教示装置の開発も実施している。これを実現することで、ロボットへの教示の高精度化に加え、ロボットを利用した接触による製品の寸法計測などへの展開が期待できる。

これらの改善を行うことで高精度な教示が実現できれば、生産に寄与しない教示作業の時間を圧縮できるため、産業用ロボットによる生産性向上に寄与できると考えられる。また、複雑な作業を短時間で教示できることにより、産業分野や、リハビリなどのサービス分野など、ロボットを利用する分野に関わらずさらに新たな用途にロボットを利用できるものと考えられる。

### 5.2.2 パラレルワイヤ教示装置を実装したロボットの教示法

本研究では、バリ取り作業への適用を念頭に教示システムを開発した。そのため、開発した教示システムで取得した教示情報を利用して実際にロボットによるバリ取り作業を行い、品質を満足する加工が可能であるか検証する必要がある。本論文では掲載していないが、現在パラレルワイヤ教示装置に回転主軸と工具を装着したロボットシステムを開発中である。このシステムを利用したバリ取りの試験では、位置制御のみではバリの大きさによってはバリを除去しきれない事例や、過剰な押しつけ力による機器の破損等の事例が発生している。そのため、加工対象のバリの大小への対応や、工具およびロボットシステムを保護する機能が必要となっている。この機能を実現するために、工具の進行方向には位置制御を行い、工具を押しつける方向にはその力を調整する力制御を利用するハイブリッド制御の適用が必要である。そのため、今後バリ取りロボットにも力制御の利用を検討していく。

本教示法を含む直接教示法に共通する課題として、教示作業中にロボットが特異点を通過することでロボットの動作が一時的に不安定になることが挙げられる。この課題は教示者の意図にかかわらず、ロボットが通過する経路上に特異点が存在すれば、特異点に近づくほど不安定になるため、直接教示法を安全に利用するためには何らかの対策が必要である。本教示法では、教示者が動かす図 3.1 中の教示点 H に対し、 $\mathbf{X}_d$  で示す一定の位置関係を維持してロボットが追従するようにプログラムされているため、教示点に追従する間に特異点を通過して不安定になることが考えられる。ただし、本教示法の特徴として、この

$\mathbf{X}_d$ は状況に応じて変更可能である。そのため、特異点に近づく場合のみ、 $\mathbf{X}_d$ を変更して特異点を回避する制御法も可能である。これについては既に研究に着手している [72]。この回避法は他の直接教示法では不可能なため、本教示法の優位な点である。この研究を進めることにより本教示法の安全性を他の直接教示法より高めることが出来れば、より幅広い用途への適用が期待できる。

### 5.2.3 反復負荷抵抗トレーニングのためのリハビリ支援ロボット

パラレルワイヤ教示装置を利用した反復負荷抵抗トレーニング用の装置開発については、このシステムを今後リハビリへ提供するために、より多くの被験者を対象とする臨床試験を実施することで信頼性と効果を確認する必要がある。また、今回開発した装具は患者とリハビリ支援ロボットを接続する点に重点を置いた形状とした。しかし、トレーニングの動作は一つではないので動作内容に応じた適切な形状について検討していく必要がある。

本研究では、トレーニング中に患者が発する力が、力の教示値を上回る時のみ患者の上肢を誘導するシステムを構築した。今後は、より実際の療法士の行うリハビリに近い動作を実現するため、本教示装置を用いて治療動作の解析をすすめる予定である。

## 参考文献

- [1] 総務省統計局, ”人口推計”,  
<http://www.stat.go.jp/data/jinsui/>
- [2] 総務省, ”平成 24 年版 情報通信白書”,  
[www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/index.html](http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/index.html)
- [3] (一社) 日本機械工業連合会, ”平成 25 年度 ロボット産業・技術の振興に関する調査研究報告書”, p.72 (2014)
- [4] 厚生労働省, ”今後の高齢化の進展 ～2025 年の超高齢社会像～, 第 1 回介護施設等の在り方”, 委員会 H18.9.27 資料 4 (2006),  
[www.mhlw.go.jp/shingi/2006/09/dl/s0927-8e.pdf](http://www.mhlw.go.jp/shingi/2006/09/dl/s0927-8e.pdf)
- [5] 内閣官房, ”国土強靱化政策大綱” (2013),  
[http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo\\_kyoujinka/tiiki.html](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/tiiki.html)
- [6] 内閣官房, ”インフラ長寿命化基本計画” (2013),  
[http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra\\_roukyuuka/pdf/houbun.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/pdf/houbun.pdf)
- [7] 総務省, ”スマートなインフラ維持管理に向けた ICT 基盤の確立 基本計画書” (2014),  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000284840.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000284840.pdf)
- [8] 首相官邸, ”世界最先端 IT 国家創造宣言” (2015),  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20130614/siryoul.pdf>
- [9] 内閣府, ”科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～” (2015),  
<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2013/2013.html>
- [10] (一社) 日本建設業連合会, ”建設業ハンドブック 2014”, p.7, (2014)
- [11] (一社) 日本建設業連合会, ”建設業ハンドブック 2014”, p.19, (2014)

- [12] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), ”急性期リハビリ用ベッドサイド型下肢運動療法装置の開発・実用化”, Focus NEDO, Vol.3, No.10, pp.19-20 (2003)
- [13] 富崎秀徳, 村井真二, 近藤正志, ”リハビリロボット TEM LX2”, 生体医工学, Vol.44, p.156 (2006)
- [14] 大塚皓三, 近藤祐輔, 高田石真紀, 山田長武, 山崎毅, 前田薫, 大島良子, 佐藤佳代子, 恩田清, ”ベッドサイド型下肢運動療法装置 (TEM LX-2) 使用時の患者心理”, 第 44 回日本理学療法学会学術大会, セッション ID: P2-581 (2009)
- [15] 総務省, ”平成 27 年版 情報通信白書”,  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/index.html>
- [16] National Science Foundation (NSF), ”National Robotics Initiative (NRI)”,  
[http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=503641&org=CISE](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503641&org=CISE)
- [17] NEDO, ”NEDO 海外レポート”, No. 1077, (2011),  
<http://www.nedo.go.jp/content/100184034.pdf>
- [18] SPARC, ”The Partnership for Robotics in Europe”,  
<http://sparc-robotics.eu/>
- [19] 中華人民共和国科学技術部, ”知的生産技術開発 第 2 次 5 年計画” (2012),  
<http://www.most.gov.cn/fggw/zfwj/zfwj2012/201204/W020120424327129213807.pdf>
- [20] 首相官邸, ”ロボット新戦略 (ロボット革命実現会議とりまとめ) ”,  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/robot/pdf/senryaku.pdf>
- [21] 山本貴史, 齋藤史倫, 橋本国松, 池田幸一, ”生活支援ロボット HSR の開発.” 第 30 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3C2-1 (2012).
- [22] (一社) 日本機械工業連合会, ”平成 25 年度 ロボット産業・技術の振興に関する調査研究報告書”, p.4 (2014)  
[http://www.jmf.or.jp/japanese/houkokusho/kensaku/pdf/2014/25jigyo\\_06.pdf](http://www.jmf.or.jp/japanese/houkokusho/kensaku/pdf/2014/25jigyo_06.pdf)

- [23] (一社)日本機械工業連合会, ”平成23年度 ロボット産業・技術の振興に関する調査研究報告書” (2012)  
[http://www.jmf.or.jp/japanese/houkokusho/kensaku/pdf/2012/23jigyo\\_07.pdf](http://www.jmf.or.jp/japanese/houkokusho/kensaku/pdf/2012/23jigyo_07.pdf)
- [24] (一社)日本ロボット工業会, ”ロボット産業需給動向 2013年版” (2013)
- [25] (一社)日本ロボット工業会, ”ロボットハンドブック (2005年版)”, pp.158-159 (2005)
- [26] 久貝克弥, ”アーク溶接ロボットのティーチング (1)”, 溶接学会誌, Vol.69, No.2, pp.129-133, (2000)
- [27] 岩城俊二, ”溶接の自動化におけるセンシングとティーチング 2 溶接ロボットのティーチング”, 溶接学会誌, Vol.66, No.8, pp.582-586, (1997)
- [28] 井上康之, 高岡佳市, ”ロボットコントローラ 産業用ロボットにおけるティーチング方式”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.780-783, (1996)
- [29] 酒井勝, ”ロボットの直接教示”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, pp.627-628 (1995)
- [30] 前川仁, et al. ”教示-再生型アーク溶接ロボットを用いた計算機援用溶接システムとそのオフライン作業教示法.” 日本ロボット学会誌”, Vol.6, No.3, pp.193-204. (1988).
- [31] 関野昭幸, et al. ”ロボットのオフライン教示システム.” 日本ロボット学会誌”, Vol.12, No.3, pp.361-362. (1994).
- [32] 松島 幹治, ”オフライン教示.” 日本ロボット学会誌”, Vol.13, No.5, pp.611-614. (1995).
- [33] 村上集, 山本直樹, 関野昭幸, ”特集 溶接ロボットの将来 これからの溶接ロボット ティーチングレスロボット.”, 溶接学会誌, Vol.62. No.1, pp.445-447. (1995)
- [34] 勘定義弘, ”ロボット溶接のキーテクノロジー (その 2) 最新のシステム化技術 溶接ロボットの CAD/CAM.”, 溶接学会誌, Vol.64. No.6, pp.445-447. (1995):
- [35] 木邑信夫, 藤平雅信, ”ロボット溶接のキーテクノロジー (その 2) 最新のシステム化技術 溶接ロボットのオフラインティーチング.”, 溶接学会誌, Vol.64.No. 6, pp.442-444, (1995):
- [36] 榊泰輔, ”インピーダンス制御の接触安定性についての一考察”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.3, pp.489-496 (1994)

- [37] 積際徹, 阪本敦, 横川隆一, 原敬, ”人間とロボットによる協調運搬・精密はめあい (Peg-in-Hole) 作業における一制御法”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.70, No689 pp69-76 (2004)
- [38] 望月宜宏, 松井 隆, “インピーダンス制御を応用したハイブリッド制御の直接教示法”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2, pp.328-334 (1994)
- [39] 杉田真一, 板谷敏郎, 竹内芳美, ”ロボットによる鋳物素材仕上げ作業の自動化 (ロボット教示支援装置の開発)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.68, No670 pp275-280 (2002)
- [40] 王 樹華, 寺田 英嗣, 牧野 洋, 清水 晃, ”冗長自由度ティーチングロボットによる 3 次元形状の測定とデータ処理”, 精密工学会誌, Vol.61, No.12, pp.1720-1724 (1995)
- [41] 古屋 信幸, 横山 亮, 関 丈二, , 白井 和弘, , 黒崎 紀正, ”多関節型 3 次元ロボットティーチング装置に関する研究 (第 1 報) 誤差モデルの基本的な解析と校正法の検討”, 精密工学会誌, (2003)
- [42] 古屋 信幸, 横山 亮, 関 丈二, , 白井 和弘, , 黒崎 紀正, ”多関節型 3 次元ロボットティーチング装置に関する研究 (第 2 報) ?誤差要因の分析と精度改善?”, 精密工学会誌論文集, Vol.70, No.3, pp.374-378 (2004)
- [43] 古屋 信幸, 高野 弘一, ”多関節型 3 次元ロボットティーチング装置に関する研究 誤差パラメータの感度解析”, 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.929 (2004)
- [44] 池内克史, カン SB. ”視覚によるハンドの教示.”, 日本ロボット学会誌, Vol.13. No. 5, pp.599-602, (1995)
- [45] 山本光男, 室田修男, ”ステレオカメラを用いたロボット教示法の開発”, 愛知県産業技術研究所 研究報告 2008 (2008)
- [46] 米澤 浩, ”世界標準を目指したロボットセル生産用ハンドモジュール群とマニュアル作業激減知能モジュール群の開発と検証”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.5, pp.583-584 (2010)
- [47] 牧俊一, 酒井昌夫, 山本光男, ”リハビリ支援ロボットの教示技術開発”, あいち産業科学技術総合センター 研究報告 2009 (2009)



- [48] 酒井昌夫, 牧俊一, 山本光男, ”リハビリ支援ロボットの研究開発”, あいち産業科学技術総合センター 研究報告 2010 (2010)
- [49] Lung-Wen Tsai, ”ROBOT ANALYSIS”, Wiley-Interscience, p.151 (1999)
- [50] 野本悠香梨, 榎田晃司, ”3次元ワイヤ駆動による遠隔超音波診断のための力覚付き操作ハンドルの開発”, 生体医工学, Vol.44, No1, pp.213-220 (2002)
- [51] 木野仁, et al., ”パラレルワイヤ駆動システムの作業座標系制御法とそのロバスト性”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No3, pp.411-418 (2000)
- [52] 武田行生, 舟橋宏明, ”パラレルワイヤ駆動機構における運動伝達性の評価”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No634, pp.2521-2527 (1999)
- [53] 本間敬子, 新井健生, ”パラレルメカニズムを用いた上肢動作補助機構”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.90-96 (1997)
- [54] 森園哲也, 倉橋和弘, 川村貞夫, ”パラレルワイヤ駆動型力覚呈示装置における高速運動実現のための制御手法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.622, pp.2108-2115 (1998)
- [55] 川村貞夫, et al., ”パラレルワイヤ駆動システムにおけるワイヤ座標系制御法”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.4, pp.546-552 (1998)
- [56] 森園哲也, et al., ”パラレルホイヤ駆動システムによるバーチャルテニスの試み”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.153-161 (1997)
- [57] 小菅一弘, 川俣裕行, 福田敏男, 小塚敏紀, 水野智夫, ”Stewart Platform 型パラレルリンクマニピュレータの Forward Kinematics 計算アルゴリズム”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.81-87 (1993)
- [58] 横山和彦, 梅津真弓, ”研究用ロボットパッケージ RTLab”, 技報安川電機, Vol.67, No.4, pp.269-274 (2004)
- [59] 吉川恒夫, ”ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御 手先拘束の記述と関節駆動力の算出”, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.6, pp.531-537 (1985)
- [60] 吉川恒夫, 杉江俊治, 田中正樹, ”ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御 制御系設計と実験”, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.5, pp.380-387 (1988)

- [61] 荒井裕彦, "ロボットによるスピニング加工の研究—カフィードバック制御を用いたしごきスピニング—", 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, pp.798-805 (2004)
- [62] 林浩一郎, 上野光, 村上弘記, "精密仕上げロボットシステムの開発", 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.1, pp.32-40 (2015)
- [63] 平林久明, 杉本浩一, 荒井信一, 坂上志之, "多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御." 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.3, pp.343-350 (1986)
- [64] 秋山純和, "神経筋促通法 (PNF) と筋力トレーニング", 理学療法科学, Vol.18, No.1, pp.23-28 (2003)
- [65] Y. Morita, M. Yasukita, Y. Iida et al., "Clinical Evaluation of Simplified Resistance Training System for Severe Hemiplegic Stroke Patient", Procs. of Int. Seminar on the Mechanical Engineering 2013, (INSEME-ITI2013), pp.139-148 (2013)
- [66] M. Yasukita, Y. Iida, K. Yamazaki et al., "Evaluation of Simplified Repeated Resistance Training System for Severe Hemiplegic Stroke Patient", Procs. of Int. Conf. on Control, Automation and Systems 2012 (ICCAS2012), pp.1566-1569 (2013)
- [67] Y. Morita, Y. Furuhashi, M. Nagasaki, T. Aoki, H. Ukai, N. Matsui, "Development of Muscle Test System for Upper Limbs using 3D Force Display Robot", Preprints of the 9th International The International Federation of Automatic Control Symposium on Robot Control, pp.817-822 (2009)
- [68] Y. Furuhashi, M. Nagasaki, T. Aoki, Y. Morita, H. Ukai, N. Matsui, "Development of Rehabilitation Support Robot for Personalized Rehabilitation of Upper Limbs", Procs. of International Conference on Rehabilitation Robotics, pp.787-792 (2009)
- [69] Y. Hiramatsu, Y. Iida, K. Yamazaki, Y. Morita, H. Ukai, K. Komori, and S. Taguchi, "Fundamental Study on Evaluation of Rotator Cuff Function Using Three-Dimensional Force Display Robot", Procs. of the 4th Int. Conf. on Biomedical Engineering and Informatics 2011, pp.1319-1323, (2011)
- [70] 飯田裕紀, 平松佑基, 山崎一徳, 森田良文, 鶴飼裕之, 田邊浩文, 種村留美, 横山清子, "上肢リハビリトレーニング・評価支援システムの開発, - CI療法におけるロボッ

- トを用いた負荷抵抗トレーニングに関する考察 -”，第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2010) 予稿集，pp.1808-1811 (2010)
- [71] 森田良文，飯田裕紀，平松佑基，安北理人，山崎一徳，佐藤徳孝，鵜飼裕之，高木芳明，青木嘉隆，田邊浩文，種村留美，”重度脳卒中片麻痺患者のための簡易反復負荷抵抗トレーニング装置の開発”，電子情報通信学会技術報告第 61 回福祉情報工学研究会，pp.67-72 (2012)
- [72] 犬塚秀紀，酒井昌夫，森田良文，”ロボット用パラレルワイヤ教示装置の特異点回避法”，平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会論文集，論文番号 P2-4(2015)



## 謝辞

本論文をまとめることができたのも、非常に多くの方々のご支援ご協力の賜物であり、ここにあらためて感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、研究指導から学位論文審査までのあらゆる面で、始終懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻の森田良文教授に心より感謝いたします。また、幾多の有益なご助言、ご指摘を頂戴した名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻の岩崎誠教授、工学研究科創成シミュレーション工学専攻の水野直樹教授に深く感謝いたします。

また、懇切丁寧なご助言を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻の佐藤徳孝助教に深く感謝いたします。

パラレルワイヤ教示装置およびこれを用いた教示法の開発にあたり、多大なるご助言とご支援を賜りましたあいち産業科学技術総合センター所長の山本昌治氏、同三河繊維技術センターセンター長の山本光男氏、同産業技術センター自動車・機械技術室室長の池口達治氏、室員の水野和康氏、河田圭一氏、石川和昌氏、児玉英也氏、竹中清人氏、木村宏樹氏、愛知県産業振興課次世代産業室の牧俊一氏に深く感謝いたします。

本教示法のバリ取りロボットへの応用について、バリ取り作業に関するご助言とご指導を賜りました株式会社クロイツの中田周一社長、技術部開発グループリーダー三矢宏典氏に深く感謝いたします。

本研究のリハビリテーション支援ロボットの開発にあたり、多大なるご助言とご支援を賜りました社会医療法人蘇西厚生会 松波総合病院作業療法士の小森健司氏、有限会社生体機構研究所所長の佐中孝二氏、そして森田研究室 OB にして藤田保健衛生大学医療科学部臨床工学科の山崎一徳助教に深く感謝いたします。また、このリハビリテーション支援ロボット用装具開発でご協力を賜りました株式会社東名ブレース生産部部長兼工場長の西井千博氏に深く感謝いたします。

本研究を遂行する上で、研究助成をいただいた財団法人人工知能研究振興財団様に、研究成果に対して財団賞(奨励賞)をいただいた公益財団法人永井科学技術財団様に深く感謝いたします。

そして、本研究を遂行するにあたり多大な協力をしていただきました森田研究室博士前期課程在籍中の犬塚秀紀氏に感謝いたします。

また、森田研究室での研究活動を支えて下さいました秘書の鈴木恵美子氏に深く感謝いたします。

最後に、研究室で共に過ごした大学院生、学部生の皆様、研究にご協力いただきました先生や被験者の方々をはじめ、本研究は、ここでは書ききれないほど多くの方々に携わっていただきました。皆様の温かいご支援とご協力に心より感謝申し上げます。

## 研究業績

### 本論文に関連する研究業績

#### 学術論文 (査読有り)

- (1) 酒井昌夫, 佐藤徳孝, 森田良文, ロボット教示用パラレルワイヤ機構の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.79, No.807, pp.320-328 (2013.11)
- (2) 酒井昌夫, 佐藤徳孝, 森田良文, パラレルワイヤ教示装置によるロボット教示の性能評価, 高速信号処理応用技術学会誌, Vol.16, No.1, pp.72-78 (2013.12)

#### 国際会議論文 (査読有り)

- (1) Masao Sakai, Noritaka Sato, Yoshifumi Morita, System for Position/Force Teaching of a Rehabilitation Support Robot for Repeated Resistance Training, Proceedings of the SICE Annual Conference 2014, pp.504-507 (2014.9)

#### 国内口頭発表

- (1) 酒井昌夫, 佐藤徳孝, 森田良文, ロボット教示のためのパラレルワイヤ機構の提案, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, 論文番号 P5-4 (2011.9)
- (2) 酒井昌夫, 佐藤徳孝, 森田良文, パラレルワイヤ教示装置によるロボット教示の性能評価, 高速信号処理応用技術学会 2013 年研究会講演論文集, pp.72-78 (2013.8)
- (3) 犬塚秀紀, 酒井昌夫, 森田良文, ロボット用パラレルワイヤ教示装置の特異点回避法, 平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会論文集, 論文番号 P2-4(2015.9)

#### 受賞

- (1) 公益財団法人永井科学技術財団, 財団賞 (奨励賞), 題目: パラレルワイヤ教示装置を利用したロボット教示法の研究開発 (2014.3)

## 研究助成

- (1) 財団法人人工知能研究振興財団，平成 22 年度研究助成，題目：パラレルワイヤ教示装置を用いたロボットの教示手法の研究（2013.4）