# 研究報告 2020 (KISTEC Annual Research Report, 2020)

## 【研究開発部】

## 有望シーズ展開事業

「力を感じる医療・福祉介護次世代ロボット」プロジェクト	
◆総括·····	81
プロジェクトリーダー 下野 誠通	
◆アキシャル積層モータの特性解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	86
浅井 洋	
◆力触覚技術による治療行為支援が可能な医療用デバイスの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	89
溝口 貴弘、松永 卓也	
◆脳性麻痺児のための 3 軸座位保持支援装置の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	94
了一个小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小	
◆ 業績·····	96

# 「力を感じる医療・福祉介護次世代ロボット」

プロジェクト

プロジェクトリーダー 下野 誠通

#### 【基本構想】

超高齢社会を迎える21世紀の我が国において、経済産業の持続的発展と安全安心で質の高い生活の 実現に寄与する新しい科学技術の開発に対して大きな期待が寄せられている。特に、ロボット技術は従来 の生産加工分野への応用のみならず、人間支援分野にも広く展開されることが強く望まれている。しかし ながら、産業ロボット技術が高速精密で頑強な動作を可能としてきたのに対して、人間支援に応用するた めには優しく柔らかな接触動作を可能とするロボット技術を新たに開発する必要がある。これはつまり、 ロボットが精密に接触力を制御する機能を獲得する必要があることを意味する。このような機能は力触覚 技術(リアルハプティクス技術)を援用することで初めてロボットに付与することができる。

本プロジェクトでは、医療分野、リハビリテーション分野および介護分野などにおける人間動作の直接 的支援を目指した、次世代ロボットを開発することを目的としている。具体的には、リアルハプティクス 技術を基盤とすることで、(A)力触覚の伝送や記録機能を有する最先端医療デバイス、(B)力触覚に基 づいて身体機能の定量化を可能とするリハビリテーション支援ロボット、(C)生活空間での動作補助や介 護支援を提供する生活支援ロボット、(D)高度で安全安心な手術を可能とする手術支援ロボットの四つの テーマ課題を推進している。様々な医療・リハビリ・介護ロボットの試作開発を、産学公連携を通じて遂 行することで、リアルハプティクス技術の医療福祉分野における社会実装を目指す。

#### 1. 研究目的

本プロジェクトは図1に概要を示すように、平成27年 度研究シーズ育成事業で得られた人間支援ロボットへの 応用を指向したアクチュエータ技術と、実際の力触覚の伝 送・記録・再現を可能とするリアルハプティクス技術の両 者を基盤として、医療・福祉・介護のための新しいロボッ ト開発を行うことを主テーマとしている。平成28年度か ら31年度までの4年間で、以下を重点項目として取り組 むこととした。

(1) 人間支援ロボット用アクチュエーション技術の開発研 究

平成27年度研究シーズ育成事業において実施した機 能性ハプティックアクチュエータに関する開発研究で得 られた知見を基にして、人間支援ロボットに実装可能なア クチュエーション技術の開発研究を継続して実施する。特 に、高い力触覚伝達特性とバックドライバビリティを有す るアクチュエーション技術を開発し、医療デバイス等への 実装を目指す。

#### (2) ハプティック医療デバイスの開発研究

従来の鉗子、ピンセット、局所麻酔器具等の医療デバイ スに高い力触覚伝達特性を有するアクチュエータを埋め 込み、力触覚増幅機能を付与することで、直接的に臨床応 用が可能な力触覚機能付き医療デバイスを開発する。はじ めに内視鏡下手術用の鉗子を主な対象として機能性ハプ ティックアクチュエータを埋め込み、試作機の開発を達成 する。さらに、脳神経外科や整形外科などへと原理を応用



図1 プロジェクト概要

し、各医療分野における有用性を実証する。プロジェクト 期間内に、小動物実験などの非臨床実験を順次行い、実用 化へと繋げる成果を得る。

(3) リハビリロボット・生活支援ロボットの開発研究

リアルハプティクス技術を応用することで、力強さと柔 らかさを兼ね備えた身体的な支援を可能とするリハビリ テーション支援ロボット、介護支援ロボットなどを開発す る。看護士、介護士、理学療法士、作業療法士といった専 門家と協働し、現場のニーズに即したロボットの設計開発 を進める。

(4) 手術支援ロボットの開発研究

鋭敏な力触覚を伝達可能な新しい手術支援ロボットを 開発する。消化器外科や口腔外科などの領域で、試作ロボ ットの有用性を実証する。

#### 平成28~31年度の研究成果

平成28年度から31年度までの4年間の研究活動に おいて、主として以下の研究成果を得ることができた。 (1)人間支援ロボット用アクチュエーション技術の開発研 究

平成27年度研究シーズ育成事業で培ったハプティク ス用アクチュエータの知見を基に、種々の特殊モータの開 発研究を推進した。手術支援ロボットプラットフォームへ の応用を目指し、大型の円弧リニアモータの試作開発を行 い(図2)、発生推力に関する理論方程式を確立した。有 限要素解析結果および試作モータの性能試験から有用性 を確認した。また、研究シーズ育成事業で原理実証を行っ た積層リニアモータの原理を回転モータへと応用し、ラジ アル積層モータ(図3)とアキシャル積層形モータ(図4) を試作し、ロボットへの応用可能性を実証した。その他に も、高出力化のための磁気ギアを内蔵したリニアモータや、 円筒二自由度モータにおける直動方向と軸回転方向の運 動を計測するための二出力同時検出用レゾルバなどの試 作に成功した。

### (2) ハプティック医療デバイスの開発研究

リアルハプティクス機能を実装した様々な医療デバイ スの試作開発を行った。まずマスタ・スレーブー体型ハプ ティック鉗子デバイスを試作し、鋭敏な力触覚の伝達およ び知覚増幅を実現すると共に、動作データおよび把持環境 データの記録が可能であることを示した(図5)。本デバ イスの原理を応用し、脳神経外科手術用の鑷子デバイス

(図6) や多自由度ハプティック鉗子デバイスを開発し、 動物実験結果から力触覚情報を活用することで癌化領域 のマッピングや脈動検知による誤動作防止といった付加 価値を与えることが可能であるとの見通しを得た。



図2 大型円弧リニアモータ









(a) コイル層

(b)磁石層



(c) モータ試験機図4 アキシャル積層モータ



(a) 試作機全体図



(b) ハプティック鉗子による結紮動作の様子 図5 ハプティック鉗子デバイス試作機

このように、開発したリアルハプティクスの医療応用技術について、様々な医療領域への応用性を確認することができた。整形外科への応用を目指したハプティックドリル



図6 ハプティック鑷子デバイス試作機



図7 多自由度ハプティック鉗子デバイス

の開発研究については AMED ACT-MS に申請課題が採択され、 遠隔触診デバイスの開発研究については総務省 SCOPE に 申請課題が採択されるなど、様々な競争的研究経費を獲得 したと共に、実用化研究へと着実に進展してきている。ま た、ハプティック医療デバイスの開発研究においては、特 に JST リサーチコンプレックス事業の補助を得たことで、 開発技術の様々な医学分野への横展開を加速することが できた。

(3) リハビリロボット・生活支援ロボットの開発研究

高齢者等に対する身体的な動作支援を実現するために、 リハビリテーション支援ロボットや生活支援ロボットの 開発研究を行った。看護学の専門家らとの共同研究では、 車いす、ベッド、トイレなどの間での移乗動作を支援する ためのロボットマニピュレータの開発研究を行った(図 8)。日本人高齢女性の体格を模して作られた人体ダミー を用いた実験を行い、開発したロボットが移乗支援を実際 に達成可能であることを確認した。また、下肢トレーニン グを実現するリハビリテーション支援ロボットの開発研 究では、下肢筋力の評価法を開発し、試作したロボットで 検証実験を行った。下肢筋機能を支援するアシストロボッ トの開発研究(図9)では、発生トルクの伝達特性を表す 数理学的な基本式を導出すると共に、実験結果からアシス ト効果を示した。さらに、座位姿勢の保持を支援する椅子 型ロボット等を開発し、理学療法士や作業療法士といった 専門家との共同研究を推進した。座位保持支援のための運 動制御アルゴリズムを開発し、実証実験まで達成した。



図8 移乗支援ロボット



図9 下肢筋機能支援ロボット

### (4) 手術支援ロボットの開発研究

鮮明な力触覚の伝達機能を有する新しい手術支援ロボ ットの開発研究を推進した。口腔外科分野においては、再 建手術やインプラント手術に対する支援を目的として、図 10に示す6自由度手術支援ロボットの試作を行った。リ アルタイムでの鋭敏な力触覚フィードバックが可能であ



図10 口腔外科手術支援ロボット



図11 手術支援ロボットプラットフォーム

ること、口腔外科手術に必要となる基本自由度を獲得でき ていることなどを基礎実験により確認した。画像データと の統合による手術ナビゲーションの実現といった発展的 研究にも着手することができた。また、大型円弧リニアモ ータ駆動による多自由度手術支援ロボットプラットフォ ームの開発にも成功した(図11)。双腕による物体把持・ 操り動作を遠隔操作で達成するなど、基本的な有用性を実 証することができた。

#### (5) 開発技術の普及活動

試作開発したハプティック医療デバイスや人間支援ロ ボットについては、積極的に神奈川県内の自治体が企画す る展示イベントや、学協会のシンポジウムでの動態展示に 参加することで、地域社会への成果普及にも努めた。例え ば、平成28年5月には第51回日本理学療法学術大会に 参加し、リハビリテーション支援ロボットや人間支援ロボ ットの展示を行った。また、平成31年3月には健康未来 EXPOで、同年12月には日本内視鏡外科学会総会におい て、ハプティック鉗子デバイスなど医療機器の動態展示を 行った。

また、招待講演についても積極的に実施し、第六回かな がわ未来フォーラム(図13)や、静岡県産業振興財団フ ァルマバレーセンター技術セミナーなど、様々な講演会で 講演した。リハビリ・生活支援ロボットについては、地域 での産学連携を加速させるためにマッチングセミナーを 企画し(図14)、企業との共同研究にも繋がった。さら に、本プロジェクトが主催する形で、「未来医療ロボット 技術シンポジウム」を開催した。2018年3月に第一回を



図12 日本理学療法学術大会での動態展示 (2016年5月27日~29日)



図13 第六回かながわ未来フォーラム (2016年11月22日)



図 1 4 リハビリ・介護ロボットコンソーシアム マッチングセミナー (2018 年 12 月 12 日)

開催してから、2019 年 3 月に第二回を、2019 年 11 月には 第三回を開催し、地域への成果還元を達成できた。



図15 第一回未来医療ロボット技術シンポジウム (2018 年 3 月 2 日)

## 3. 今後の展望

平成28年度から平成31年度までの4年間の研究期 間において、有望シーズ展開事業として計画していた研究 目標を概ね達成することができた。令和元年7月より、川 崎市殿町に慶應義塾大学ハプティクス研究センター、同大 学医学部との共同研究ラボを設置しており、今後は同地区 での特にハプティック医療デバイスの開発研究における 産学公連携を中心とした実用化研究を加速させる。また、 各試作機についても、動物実験等の非臨床実験を実施し、 実用性の検証をさらに進めていく予定である。「力を感じ る医療・福祉ロボット技術」の社会実装を実現することで、 県民・国民のQoL向上、国際的競争力を有する先進技術に よる市場拡大と持続的成長といった様々な社会的・経済的 効果が期待される。

# アキシャル積層モータの特性解析

## 1. はじめに

近年、高速かつ高精度な制御が可能なアクチュエータと してダイレクトドライブモータの研究開発が進められて いる[1],[2]。鉄心等のコアによる磁気吸引力やコギング トルク、ギア等の減速機によるバックラッシや装置の振動 が発生せず優れた制御性能を得られるためである。一方で ダイレクトドライブ構造ではコアによる磁路が形成され ない、減速機による出力増幅がされない等の理由から出力 密度が小さくなりがちであり、所望のトルクを得るための 装置の肥大化が問題となっている。

このようなダイレクトドライブモータの出力密度向上 案として、磁石とコイルを複数に分割し層を積み重ねる積 層構造が提案されている[1]。この文献では積層された磁 石層による相乗効果が発生し、積層数に対して層数倍以上 の推力が得られたことが報告されている。同構造を回転型 モータに実装した例がラジアル積層モータであり[2]、同 様に積層の効果も確認されたが層や分割数によって部品 の寸法が異なるため設計の点において難を抱えている。そ こで本研究では回転型モータにおける新たな積層構造を 検討し、電磁界解析からその有用性を確認した[3]。

#### 2. アキシャル積層モータの構造・原理

先行研究となるラジアル積層モータでは、磁石層とコイ ル層を径方向に積層させた構造となっているが、それに対 し本研究では磁石層およびコイル層を軸方向に積層させ るアキシャル積層構造を提案する。図1にアキシャル方向 へ積層した回転型モータのCAD図を示す。環状に磁石を16 個配置した磁石層とコイルを24個配置したコイル層の繰 り返しによって構成され、層間のエアギャップは1.0mmと なっている。隣り合う磁石同士で磁極の向きが異なってお り、紙面左下に向かって赤がN極、青がS極を指してい る。また隣り合うコイル同士でU,V,Wの3相を構成してお り、磁石層とあわせて3層2極が周方向に8組繰り返す構 造となっている。以上の構造により層同士の相乗効果を発 生させ、かつ層数の変更が容易となった積層型回転モータ を実現している。なお両層における構造パラメータを表1 に纏める。

#### 3. 電磁界解析

## 3.1 コイル外径による特性変動

本モータでは径方向に流れる電流と軸方向の磁束密度 により生成される円の接線方向へのローレンツ力が駆動 源となるため、周方向に電流が流れるコイルの底辺部は駆 動力に寄与しない。そのため図2のようにコイル外径が磁 石外径より大きい場合、底辺部が磁石層から外れ、駆動力 を生み出す二等辺部と磁石層の重なる領域が増加しトル クが増加する。そこで本節ではコイルの外径に対するトル ク特性の変動を電磁界解析によって確認する。



図1. アキシャル積層モータ構造図

表1. 両層の寸法

	Magnet Layer	Coil Layer		
Outside diameter	100	110		
[mm]				
Inside diameter	47.8	47.8		
[mm]				
Axial length [mm]	5.00	5.00		
Gap angle between	2.00	2.00		
one's neighbor [deg]				
Angle of one part [deg]	20.5	13.0		
Material	N40SH	Copper		



コイル外径を100mm(=磁石外径)から114mm まで2mm 毎に増加させた際のトルク解析結果を図3に示す。図3の 結果から、コイル外径100mmでは0.596Nmのトルクが外 径110mmでは0.652Nmまで増加していることが分かる。 一方で緩やかに増加していたトルクは以後変化が見られ ず、外径114mm時のトルク値は外径110mm時とほぼ同一 の値となっている。これはコイルの二等辺部と軸方向磁束 の重なる領域が頭打ちになったためであり、トルク特性の 飽和点とも言える。

浅井 洋







図4. 磁束密度解析における位置定義[5]

この現象を磁束密度次元で確認するため図 4 で示す位 置定義のもと電磁界解析を行った。解析では磁石層間の中 点において円の直径に沿った軸上(緑矢印)での軸方向磁束 密度(青矢印)を求める。この解析結果に外径 100mm コイ ルおよび 110mm コイルによる二等辺部(青・領域 D)と底 辺部(橙・領域 E)を図示したものがそれぞれ図 5(a)および (b)となる。青領域とグラフの正の部分の重なる面積がコイ ル層における鎖交磁束量を表しており、この面積の大小が トルクの大小と一致する。この結果からコイルの外径が 110mm に増加することで Distance 軸 20mm および 120mm 付近のグラフ正領域も青領域と重なり、トルクが増大する ことが分かる。一方で同様に、これより大きい青領域でも グラフ正領域と重なる面積は非常に少なく、トルクの増大 が見込めないことが容易に判断できる。これがコイル外径 110mm 以後での特性飽和を示している。以上の結果から 試作機ではコイル外径を 110mm として設計した。なお内 径は底辺部と二等辺部のような領域が不明瞭であるため 磁石と同一の値としている。

#### 3.2 磁束密度解析

本節では図 6 のように複数層積層した際の相乗効果を 磁束密度次元で確認する。表 2 に示す条件のもと電磁界解 析を行った結果を図 7 に示す。この結果からコイル 1 層目 (Axial Distance 軸 18mm 付近)における 1 層モデル(濃い青) と 2 層モデル(薄い橙)を比較すると、磁束密度が若干向上 していることが確認できる。これは 2 層モデルで追加され た左から 3 番目の磁石層によって発生した相乗効果であ







表2. シミュレーション条件

	運動条件		コイル条件
ステップ数	16	振幅[A]	1.41
1 ステップ時間[s]	4.44*10-4	周波数[Hz]	50
1 ステップ角度[deg]	1.00	卷数	63

る。この時、3番磁石層を中心軸としてコイル1層目と対称となるのはコイル4層目(Axial Distance 軸55mm 付近)であるため、コイル4層目の領域における2層モデルでの値がコイル1層目における磁束密度の増加量である。同様の法則から、2層モデルから3層モデル(灰)となった際のコイル1層目における磁束密度の増加量は3層モデルにおける最外部(Axial Distance 軸80mm 付近)での値に等しく、どちらもほぼ0であることが確認できる。以上からアキシャル積層構造による相乗効果、および相乗効果の原理を磁束密度次元での考察から明らかにした。

#### 3.3 トルク解析

本節では積層構造による相乗効果をトルク次元で確認 する。積層定義およびシミュレーション条件は前節と同様



図7. 積層数変化による磁束密度変動[5]



図8. 積層数変化によるトルク変動[5]

に図6および表2に示された通りである。図8に示すトル ク解析結果から、N層モデルによるトルク(実線)では1層 モデルによるトルク定数をN倍した値(点線)より大きくな っており、トルク次元でも相乗効果が発生していることが 確認できる。

#### 3. 4 同一軸長下に対する最適層数

これまでの解析では複数層による相乗効果の確認を目 的とした解析を行った。この節では軸長があらかじめ決め られた条件下における分割数の変化に伴うトルク定数の 変動について解析を行う。この解析はコイル層および磁石 層の軸長設計時の指針となるデータを得ることが目的で ある。図9に示す通り、あらかじめ軸長Lが決められた場 合の分割数によるトルク特性の変動を確認する。図10の 解析結果から軸長Lが50mmの場合は4層モデルでトル クが最大となるが、80mmでは6層モデルでトルクが最大 となり、軸長によって最適な分割数が異なることが確認で きる。これは軸長Lが50mmの4層モデルでの寸法をも とに設計した場合、積層数の増加によって軸長が80mmを 超えた際に最適なパフォーマンスは発揮できないことを 示している。

### 4. 結論および今後の展望

本研究では磁石やコイルを軸方向に積層して出力密度 を増加させる構造を提案し、電磁界解析の結果から本構造 の実現可能性を確認した。本研究の今後の展望として 1. 実機を試作し、複数層モデルでの特性を比較

図 9. 既定軸長下における分割[5]



図10. 既定軸長下における分割数変化に対するトルク 変動[5]

- 磁石およびコイル層の軸方向厚さ変化時の特性変動 解析
- 3. 磁束密度およびトルク特性理論式の導出 などが挙げられる。

## 【参考文献】

- X. Wang, C. Hu, M. Zhao, L. Wu, and S. Zhou, "Design of multi-layer PCB coreless axial permanent magnet synchronous motor," 2019 22<sup>nd</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS2019, 2019.
- S. Neethu, S. P. Nikam, A. K. Wankhede, S. Pal, and B. G. Fernandes, "High-Speed Coreless Axial-Flux Permanent-Magnet Motor with Printed Circuit Board Winding," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55, No. 2, pp. 1954-1962, 2019.
- S. Takano, S. Tanaka, S. Yamaguchi, T. Shimono, and T. Mizoguchi, "Analysis of the Effect on Applying Halbach Array to LPMM with Three Phase Multi-layered Structure," 2016 International Symposium on Industrial Electronics, ISIE2016, 2016.
- K. Sakuma, S. Takano, T. Shimono, and T. Mizoguchi, "Design and analysis of multi-layered coreless permanent magnet synchronous motor," *The 4<sup>th</sup> International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control and Optimization,* SAMCON2018, 2018.
- C. Soneda, H. Asai, Y. Hatta, T. Shimono, and K. Ohnishi, "Design and Analysis of Core-less Multi-layered Axial Motor," 2019 IEEE 28<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Electronics, ISIE2019, 2019.

## 力触覚技術による治療行為支援が可能な

## 医療用デバイスの開発

溝口 貴弘、松永 卓也

#### 1. はじめに

外科手術における医師と患者の負担軽減や人間の手で は不可能であった新しい治療方法の実現のために, 医工連 携によるロボット技術の医療分野への応用が進められて いる [1][2]。遠隔操作ロボットの構成方法の一つであるマ スタ・スレーブシステムは多くの手術支援ロボットに採用 されており,腹腔鏡等の視覚系の技術と統合した手術支援 システムである da Vinci<sup>®</sup> (Intuitive Surgical, Inc.) は, 日本 国内を含めて多くの病院で使用されている [3][4]。しかし ながら,現在普及している手術支援ロボットは力触覚を操 作者に伝達する機能が無く, 臓器や血管等に接触した感覚 が得られない。また、手術支援ロボットは規模が大きく、 導入,維持に費用がかかる。さらに,従来の手術器具とは 操作方法が異なり、ロボットを使用して治療をおこなうた めのトレーニングを要する [5]。これらの問題が今後のロ ボット手術の普及において障害となる。本研究では、マス タ・スレーブー体型医療用デバイスの開発と力触覚技術の 応用によってロボット手術の課題に取り組む。

#### 1.1 マスタ・スレーブー体型デバイス

本研究では、従来の手術器具と同様の使用方法でありな がら操作者に対する動作支援が可能なマスタ・スレーブー 体型の医療用デバイスを開発する。従来のマスタ・スレー ブシステムでは操作者側のマスタロボット(マスタ)と作 業空間側のスレーブロボット(スレーブ)を機械的に分離 して遠隔操作を可能とする。マスタ・スレーブー体型医療 用デバイスは一つの手術機器にマスタとスレーブを組み 込むことで、手術支援ロボットと比較して導入における障 害が少ない医療器具の形態をとりながらロボット技術に よる支援が可能となる。

#### 1. 2 力触覚技術

マスタ・スレーブシステムにおける力触覚伝達は,より 安全で繊細なロボット手術の実現に貢献する重要な技術 の一つである。加速度制御に基づくバイラテラル制御は, 位置情報と力情報をマスタ,スレーブ間で双方向に送信す ることで力触覚を伝達する [6]。バイラテラル制御の制御 目標は式(1),式(2)となる。

$$X_{\rm m}-X_{\rm s}=0\tag{1}$$

 $F_m + F_s = 0$  (2) 式(1)でマスタの位置 $X_m$ とスレーブの位置 $X_s$ を一致させ,



図1. 従来の腹腔鏡手術用鉗子の構造の概略図

かつ,式(2)でマスタに加わる外力 $F_m$ とスレーブに加わる 外力 $F_s$ に作用反作用の法則を成り立たせる。これらの制 御目標を同時に達成することで,環境のかたさが操作者に 伝達される。また,位置情報と力情報を加工することで力 触覚の増幅伝達が可能である。位置の増幅率を $\alpha$ ,力の増 幅率を $\beta$ と定義すると,式(1),式(2)の制御目標は式(3), 式(4)となる。

$X_{\rm m} - \alpha X_{\rm s} = 0$	(3)
$F_{\rm m} + \beta F_{\rm s} = 0$	(4)

これらの制御目標を達成することで、α倍されたスレーブ の位置とβ倍されたスレーブに加わる外力がマスタに伝 達される。さらに、力触覚をデータとして扱うことで可視 化や操作者の動作の記録、再現、解析が可能となる。

バイラテラル制御では各モータの位置および力を高精 度に制御することが求められるため,外乱オブザーバ [7] を用いたロバストな加速度制御をおこなう。また,装置の コストや機構の複雑化などの難点を考慮し,反力オブザー バを用いて力センサレスで力情報を推定する [8]。

#### 2. 実験と結果

消化器外科等で使用される腹腔鏡手術用鉗子と脳神経 外科手術等で使用される鑷子にマスタ・スレーブー体型構 造を適用した医療用デバイスの開発と,力触覚技術を実装 した装置の評価について述べる。

#### 2. 1 腹腔鏡手術用鉗子

腹腔鏡外科手術では、トロッカーを介して治療をおこな うために先端のグリッパと医師の手元のハンドルが細長 いシースで接続され、内部のロッド等で動力伝達をおこな う図1の構造の鉗子が用いられる [9]。マスタ・スレーブ



図 2. マスタ・スレーブー体型鉗子の構造の概略図



(a) 回転モータ駆動型



図3. 開発した鉗子の全体像

ー体型鉗子は腹腔鏡手術用鉗子の把持自由度に力触覚機 能を実装した医療用デバイスであり,ハンドルを介してグ リッパで把持した物体のかたさを伝達する。

#### 2.1.1.装置の機構

マスタ・スレーブー体型鉗子の構造の概要を図2に示す。 物体を把持するエンドエフェクタはスレーブ側のモータ に接続されており,モータの運動に応じて開閉をおこなう。 操作者が動かすトリガー型のハンドルはマスタ側のモー タに接続されており,モータの運動に応じてハンドルが動 作する。各モータは角度情報を得るためのエンコーダを備 えており,力触覚技術を実装してグリッパとハンドルを電 気的に接続することで,従来の鉗子のように把持自由度を 操作することが可能となる。

本研究で開発したマスタ・スレーブー体型鉗子の全体像 を図3に示す。装置に駆動部を備えるため従来の腹腔鏡手 術用鉗子と比較して大型であるが、片手で扱うことが可能 な大きさである。また、エンドエフェクタは取り換えが可 能である。図3(a)の回転モータ駆動型鉗子の内部構造を 図4に示す。マスタ側およびスレーブ側のモータは装置の



図4. 実際の機構の様子





図 5. マスタ・スレーブー体型鉗子による実験の結果

両側面に配置され,装置内部でギア機構によって動力伝達 をおこなう。外部の制御装置に各モータを接続してバイラ テラル制御をおこなうことで,力触覚伝達下でグリッパの 操作が可能である。一方,図 3(b)の直動モータ駆動型は ダイレクトドライブである。

#### 2.1.2.実験

図 3(a)の回転モータ駆動型鉗子を使用して開閉動作お よび物体の把持動作をおこなった。実験は先端を閉じた状 態から開始し,以下の3種類の動作をおこなった。

(1) 開閉動作を2回ほど実施

(2) 剛性の低い物体としてスポンジを2回ほど把持

(3) 剛性の高い鉄を2回ほど把持

力触覚の増幅伝達を実装し,角度の増幅率αを5倍,トル クの増幅率βを10倍に設定した。

実験の結果を図5に示す。図5(a)の角度応答において、 マスタの角度とスレーブの角度が一致しており、ハンドル の操作に連動してグリッパが開閉したことが確認できる。 すなわち、式(3)の制御目標が達成された。図5(b)のトル ク応答では作用・反作用の法則が成立しており、式(4)の



(a)全体像



図 6. マスタ・スレーブー体型鑷子(ストレート)

制御目標が達成されたことが確認できる。

実験における最初の開閉動作は5秒から10秒にあたり, 角度応答値が大きく変化しているが,物体を把持していな いため発生したトルクは小さい。2番目の動作であるスポ ンジの把持は20秒から30秒にあたり,最初の開閉動作と 比較して大きなトルクの発生を確認できる。最後の把持動 作は30秒から40秒にあたり,3種類の動作の中で最大の トルクの発生を確認できる。また,鉄の把持ではスポンジ の把持と比較してグリッパが閉じておらず,把持対象物の 剛性の変化が認識可能である。

#### 2. 2 脳神経外科手術用鑷子

狭い術野で神経や血管を傷付けずに繊細な治療をおこ なうことが要求される脳神経外科手術は術者の負担が大 きく,精密な動作が可能なロボットによる治療行為支援の 効果が期待できる。本研究では,脳神経外科手術で用いら れる鑷子にマスタ・スレーブー体型構造を適用し,力触覚 機能を実装する [10][11]。

#### 2.2.1 装置の機構

図6に示すマスタ・スレーブー体型鑷子は、上述の腹腔 鏡手術用鉗子と同様に、鑷子の把持自由度に力触覚機能を 実装した医療用デバイスである。装置にはマスタとスレー ブに対応する2台の直動型モータ(ボイスコイルモータ) が組み込まれており、エンコーダを用いて各モータの位置 情報を取得する。マスタ側モータの運動は装置両側面のレ バー、スレーブ側モータの運動はエンドエフェクタのグリ ッパに運動変換機構を介して伝達される。装置内のマス タ・スレーブシステムにバイラテラル制御を実装すること で、レバー押し込み時に物体の反力を感じながらグリッパ



図7. マスタ・スレーブー体型鑷子(バヨネット)



図8. 一体型鑷子による接触動作

を閉じることが可能となる。また,把持力を緩めると板ば ねによって先端が開く従来の鑷子の構造を模擬するため に,マスタ側モータにはばねが取り付けられており,レバ ーに加える力を緩めるとばねの力でグリッパが開く構造 である。

図7に示す医療用デバイスはマスタ・スレーブー体型鑷子の改良機であり,バヨネット型のエンドエフェクタを有する。先端が屈曲したバヨネット型鑷子は操作者の手や鑷子の後端部が視野を遮らない形状であり,マスタ・スレーブー体型鑷子を用いた作業においても同様の効果が得られる。また,マスタのレバーを前方に配置することで,使用時に力を加える位置が従来の鑷子に近い構造となっている。

#### 2.2.2.実験

図7のマスタ・スレーブー体型鑷子にバイラテラル制御 を実装し、物体に対する把持動作と剛性の比較をおこなっ た。把持対象として正常な脳組織を模擬した絹豆腐と癌化 した脳組織を模擬した木綿豆腐を使用した。物体に対する 接触方法を図8に示す。初期姿勢として鑷子の先端を開い た状態で物体内に挿入した。測定時はマスタを介してスレ ーブを操作し、力触覚伝達下で徐々に鑷子の先端を閉じて 把持動作をおこなった。

図9に絹豆腐,図10に木綿豆腐を把持した際の位置応 答および力応答を示す。いずれの結果においてもマスタの 位置とスレーブの位置が一致しており、また、マスタで推 定した反力とスレーブで推定した反力の間に作用・反作用 の法則が確認できる。したがって、マスタ・スレーブ間に おいて、環境に接触した際の力触覚が伝達された。

図9および図10の結果における位置と力の応答値の関



係を図 11 に示す。グラフの傾きは把持対象の物体の剛性 値を示す。図 11 の結果より、木綿豆腐に対する把持動作 では、絹豆腐より大きな剛性が推定されたことが確認でき る。



図 11. 一体型鑷子を用いた把持動作における位置と力の関係

#### 3. 考察及び今後の展望

#### 3.1 考察

本研究で開発したマスタ・スレーブー体型構造の医療用 デバイスを用いた実験において、マスタ・スレーブ間にお ける位置の追従と作用反作用の法則の成立が確認でき、バ イラテラル制御の二つの制御目標が達成された。すなわち、 一つの器具に組み込まれたマスタとスレーブの間で力触 覚が伝達された。そして、力触覚の増幅伝達や記録された 情報に基づく剛性比較等の解析が可能であることが確認 できた。したがって、従来の手術器具と同様の操作方法で あり、かつ力触覚による動作支援が可能な医療用デバイス であることが確認できた。

### 3.2 今後の展望

本研究ではマスタ・スレーブー体型の医療用デバイスと して腹腔鏡手術用鉗子と脳神経外科手術用鑷子を開発し た。今後の課題として装置の小型軽量化に取り組む必要が ある。マスタ・スレーブー体型装置は内部に駆動部を組み 込むため、従来の器具と比較して質量が増加する。長時間 の手術では術者の負担となるため、小型、高推力のモータ の使用や形状変更による軽量化が必要である。一方、マス タ・スレーブー体型医療用デバイスの機能の面では、これ までに力触覚の増幅伝達や記録が可能であることを確認 できた。脳神経外科手術用鑷子を用いた実験では、記録し た力触覚情報を解析することで対象物の剛性が判別でき ており、今後は実用化に向けた臨床やオンラインでの剛性 推定による動作支援等が課題となる。

## 【参考文献】

1. R. H. Taylor and D. Stoianovici, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **19**, 5, 765-781 (2003).

2. B. Hannaford, J. Rosen, D. W. Friedman, H. King, P. Roan, L. Cheng, D. Glozman, J. Ma, S. N. Kosari, and L. White, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60, 4, 954-959 (2013).

3. G. S. Guthart and J. K. Salisbury Jr., *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 618-621 (2000).

4. 家入里志, 橋爪誠, *日本コンピュータ外科学会誌*, **15**, 4, 319-322 (2014).

5. 富川盛雅, 植村宗則, 橋爪誠, *日本コンピュータ外科学 会誌*, **20**, 3, pp. 151-153 (2018).

6. W. Iida and K. Ohnishi, *Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, 217-222 (2004).

7. K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **1**, 1, 56-67 (1996).

8. T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **40**, 2, 259-265 (1993).

9. M. Yokoyama, T. Mizoguchi, T. Matsunaga, and T. Shimono,

Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Intelligent Mechatronics, 743-748 (2017).

10. M. Aoki, T. Shimono, T. Matsunaga, T. Mizoguchi, S. Shibao, H. Sasaki, and Kouhei Ohnishi, *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 207-212 (2018).

11. M. Aoki, T. Shimono, T. Matsunaga, T. Mizoguchi, S. Shibao, H. Sasaki, M. Nishimoto, E. Ishihara, and K. Ohnishi, *Proceedings of IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization*, 1-6 (2019).

脳性麻痺患者のための3軸座位保持支援装置の開発

富樫 信之

## 1. はじめに

新生児 1000 人の内、2 から3 人の割合で脳性麻痺を発 症するという調査結果が報告されている[1]。このような脳 性麻痺を発症した患者の生活支援を行うため、今日ではロ ボット技術よる介護やリハビリ支援について研究開発が 盛んになっている[2][3]。

脳性麻痺を発症した患者が抱える問題の一つとして、日 座位姿勢の保持がある。脳性麻痺を発症した患者は日常生 活における動作の僅かな刺激を受けた際に緊張して、座位 姿勢をそらす。そのため、日常生活を送るためには抱きか かえるようにして座位姿勢を保持しなければならならず、 介護者の負担が増加する。その問題を解決するため、座位 姿勢を保持する車椅子が開発されている。また、自立支援 を目的とした、座位保持車椅子型ロボットの研究について も報告されている[4][5]。

しかしながら、これらの器具はいずれも座位姿勢が固定 されたものであり、患者が姿勢を自由に反らすことは困難 である。自由に座位姿勢を変えることが出来なくなってし まうため、ストレスを抱え込んでしまう等の問題が生じる。 そこで、本研究では背もたれに加わった力に応じて座位姿 勢を変えることが可能な椅子型の装置を開発した。この装 置はリクライニング、腰のひねり及び首周りにモータが搭 載されており、モータにより駆動する装置となっている。 本稿では開発した装置及びリクライニングと腰のひねり における制御手法について述べる。

## 3軸座位保持支援装置と運動制御

#### 2. 1 3 軸座位保持支援装置

図1に開発した3軸座位保持支援装置を示す。この装置 はリクライニング、腰のひねり、首周りの3箇所がモータ によって駆動する。それぞれの可動範囲はリクライニング が 45°、腰のひねりが±30°、首周りが 45°となっている。 また、各駆動部には減速機が実装されており、これにより 大きなトルクが出力可能となっている。さらにリクライニ ングにおいては減速比の増加を抑え、良好なバックドライ バビリティを獲得するため、2個のモータによるツインド ライブ方式を採用している。装置に取り付けられている背 もたれや座面、首周りのクッションやシートは車椅子型の 座位保持器具から移植したものであり、対象となる被験者 の体格に合わせて作成されたものとなっている。座面には、 股の開き具合を固定するクッションが取り付けられてお り、背もたれには体の軸を固定するベルトが備え付けられ ている。表1に開発した3軸座位保持支援装置の機械的パ ラメータを示す。



図 1. 3 軸座位保持支援装置

#### 表1 3軸座位保持支援装置のパラメータ

Length of the reclining part	$1.14 \times 10^3 \text{ mm}$
Weight of the reclining part	17.0 kg
Length of the backrest	540 mm
Seat size	400 mm ×400 mm
Weight of the chair	67.0 kg
Gear ratio of the right side in	96.0
reclining	
Gear ratio of the left side in	96.0
reclining	
Gear ratio of the twist of hip	35.8
Gear ratio of the neck	5.00

#### 2. 2 リクライニングの運動制御

本装置では力に応じて姿勢の保持と姿勢の変化を切り 替えるために、可変コンプライアンス制御を実装する[6]。 また、ロバストな加速度制御を実現するために外乱オブザ ーバを、人が装置に加えた力をトルクとして推定するため に反トルク推定オブザーバを実装する[7][8]。図2にリク ライニングに実装したブロック線図を示す。図中の DOB は外乱オブザーバを、RTOB は反トルク推定オブザーバを



図 2. リクライニングにおける運動制御のブロック線図



#### 図3. 座位の状態

示す。*T<sup>eac</sup>*は RTOB によって推定された人が装置に加えた トルクを示す。*θ<sup>mi</sup>* は普段の姿勢を表し、装置に印加され た力に応じて生成された角度、角速度、角加速度の変化量 を普段の姿勢の角度に加えて演算することによって、姿勢 の変化と姿勢の保持を切り替える。

図3に座位の状態図を示す。座位の状態は、1.普段の状態の保持、2.反り返りの動作、3.反り返り後の姿勢の保持、4.普段の状態まで戻す動作の4つに状態分けされる。この4つの状態に応じた生成すべき角度、角速度、角加速度の変化量および状態遷移の条件について述べる。

#### 2. 2. 1 普段の状態の保持

普段の状態の保持における可変コンプライアンス制御 器によって生成される角度、角速度、角加速度の変化量は (1)式となる。

## $\theta^c = \dot{\theta}^c = \ddot{\theta}^c = 0 \cdots (1)$

(1)式に示すように変化量を0とすることによって、姿勢の保持が可能となる。

普段の姿勢の保持から反り返りの動作への遷移条件は、椅 子に印加された力によって決定する。反り返りの動作にお いては、小さく反る場合と大きく反る場合の2種類がある ため、力に応じて反り返り動作における変化量の目標値を 設定する。また、過敏な動作を防止するため、待機時間を 設ける。この状態における遷移条件は次の通りである。



図4. 反り返りの動作における力の関係

a.  $T^{low} < T^{reac}$ のとき、 $t_1$ 秒待機する。 $t_1$ 秒後、 $T^{low} < T^{reac}$ を満 たしている場合、 $T^{reac}$ に応じて b または c の条件のどち らかを実行する。満たしていない場合は普段の姿勢の保持 を継続する。

b. *T<sup>low</sup><T<sup>reac</sup><T<sup>high</sup>*のとき、変化の目標値 θ<sub>low</sub>を設定して、 反り返りの動作に移る。

c.  $T^{reac}>T^{high}$ のとき、変化の目標値  $\theta_{high}$ を設定して、反り 返りの動作に移る。

 $T^{low}$  および  $T^{high}$  はそれぞれ、トルクの閾値を示し、 $\theta_{low}$  および  $\theta_{high}$  はそれぞれ小さく反る場合の変化量の目標値と 大きく反る場合の変化量の目標値を示す。 $t_1$ はこの状態に おける設定した待機時間を示す。

### 2.2.2 反り返りの動作

反り返りの動作においては、図4に示すように急な加減 速を防止するために、動作開始時は椅子から人に加わる抵 抗力を減少させ徐々に加速し、目標角度付近に接近した場 合は抵抗力を増加して減速する必要がある。この力関係を 満たすよう設計した、反り返り時における可変コンプライ アンス制御が(2)式から(5)式である。

$$\ddot{\theta}^{c} = \frac{\left(K_{f}T^{reac} - T^{comp}\right)}{M} \cdots (2)$$

$$T^{comp} = \left(K_{c1}\left(\theta^{c} - \frac{\theta^{cmd}}{2}\right)^{2} + D_{c1}\dot{\theta}^{c} + T_{min}\right) \cdots (3)$$

$$\theta^{c} = \frac{1}{s}\dot{\theta}^{c} \cdots (4)$$

$$\dot{\theta}^{c} = \frac{1}{s}\ddot{\theta}^{c} \cdots (5)$$

(2)式から(5)式中のsはラプラス演算子を示す。Kf、K<sub>c1</sub>、 D<sub>c1</sub>、Mはコンプライアンス制御に用いる力ゲインおよび 仮想的な弾性、粘性、慣性を表し、それぞれ定数値として 用いる。また、T<sub>min</sub>は動作中の抵抗力の極小値を示す。 $\theta_{cmd}$ には $\theta_{low}$ または $\theta_{high}$ が代入される。(2)式中に示すように、 T<sup>reac</sup>に釣り合うような椅子からの抵抗力 T<sup>comp</sup>が(3)式によ って生成され、(4)式および(5)式に示すようにその積分に よって角度および角速度の変化量が生成される。 $\theta_c$  が  $0<\theta_c<\theta_{cmd}$  /2 の範囲にある場合には抵抗力が減少し、 $\theta_{cmd}$ /2< $\theta_c<\theta_{cmd}$ の範囲にある場合には抵抗力が増加する。これ により、図4の力関係を満たすように動作することが可能 となる。 $\theta_c \ge \theta_{cmd}$ を満たした場合、反り返り後の姿勢の保 持に移行する。

#### 2. 2. 3 反り返り後の姿勢の保持

反り返り後の姿勢の保持における可変コンプライアン ス制御器によって生成される角度、角速度、角加速度の変 化量は(6)式および(7)式となる。

 $\begin{aligned} \theta^c &= \theta^{cmd} \cdots (6) \\ \dot{\theta}^c &= \ddot{\theta}^c = 0 \cdots (7) \end{aligned}$ 

生成される角度を θ cmd に固定し、角速度および角加速度を 0 とする。これにより、変化後の姿勢を保持することが可 能となる。

また、反り返り後の姿勢の保持から次の動作に遷移する 場合、遷移する状態が2通りあり、元の姿勢に戻る場合か あるいはより大きく姿勢を反る場合のどちらかである。遷 移条件は次の通りである。

a.  $T^{reac} < T^{low}$ または $T^{reac} > T^{high}$ のとき、 $t_2$ 秒待機する。 $t_2$ 秒後、その条件を満たしている場合、 $T^{reac}$ に応じて以下bまたは c の条件を実行する。満たしていない場合は反り返り後の姿勢の保持を継続する。

b. Treac < Thowのとき、普段の状態まで戻す動作に移る。

**c**. *T<sup>reac</sup>>T<sup>high</sup>* かつ姿勢の保持の変化量が θ<sub>low</sub>の場合、変化の 目標値 θ<sub>high</sub>を設定して、反り返りの動作に移る。

t2はこの状態における設定した待機時間を示す。

#### 2.2.4 普段の状態に戻す動作

普段の姿勢に戻す場合は、急激な変化を防止するために 設定した時間によって戻るよう制御する必要がある。その 条件を満たすよう設計した、可変コンプライアンス制御に よって生成される椅子からの抵抗力は(8)式となる。

$$T^{comp} = K_{c2} \left( \theta^c - \theta^{cmd} \left( 1 - \frac{t}{t_{const}} \right) \right) + D_{c2} \left( \dot{\theta}^c + \frac{\theta^{cmd}}{t_{const}} \right) \cdots (8)$$

Kc2、Dc2 はコンプライアンス制御に用いる仮想的な弾性、 粘性、および慣性を表し、それぞれ定数値として用いる。 また、t および tconst は普段の状態に戻す動作に遷移してか ら経過した時間及び元の姿勢に戻すまでに要する時間を 示す。(8)式によって生成された椅子からの抵抗力 T<sup>comp</sup>を (2)式、(4)式および(5)式に代入することによって、変化す べき角度、角速度、角加速度を得る。これにより、tconst で設定した時間通りに普段の状態に戻ることが可能とな る。θemd が 0 と一致した場合、普段の状態の保持に移る。

## 2.3 腰のひねりの制御

腰ひねりの動作については、リクライニングと連動して 変化するようコンプライアンス制御を設計する。(9)式が腰 ひねりの軸におけるコンプライアンス制御となる。

$$T_{hip}^{comp} = K_f T_{hip} - K \left( \theta_{hip}^c - \alpha \theta_{reclining}^c \right) \\ - D \left( \dot{\theta}_{hip}^c - \alpha \dot{\theta}_{reclining}^c \right) \cdots (9)$$



(9)式の a はリクライニングの変化量の倍率を示す。(9)式 によって生成された腰ひねりの軸のトルクを(2)式、(4)式 および(5)式に代入することによって,変化すべき角度、角 速度、角加速度を得る。(9)式に示すように、リクライニン グの変化量を用いることで、腰ひねりのコンプライアンス 制御の基準角度がリクライニングの変化量となるため、リ クライニングに連動して動作する。また、aの倍率および 仮想的な弾性および粘性を設定することで腰ひねりの軸 の変化量を変更することが可能となり、腰ひねりのトルク に応じて微調整が可能となる。

#### 2.4 実験

#### 2.4.1 実験設定

セラピストの方に試乗いただき、図5に示すように座位 状態が変化するよう装置の背もたれに力を加えた。普段の 姿勢から始まり、小さい姿勢変化となるよう小さく力を加 えた。その後、加えている力を緩めて普段の姿勢に戻った 後、大きな姿勢変化が発生するよう大きな力を印加した。

#### 2.4.2 実験結果

図6から図9に実験結果を示す。図6および図7はリク ライニングの角度応答及びトルク応答を示し、図8および 図9は腰ひねりの軸の角度応答及びトルク応答を示す. 図6および図7より、装置に力が加わり、反トルクが赤線 で示された閾値*Tlow*を超えた際に、動作しているというこ とが分かる。このとき、7.00s付近において緑線で示され た閾値*Thigh*を超えなかったため、小さい反り返り動作が行 われていることが分かる。10.0s付近では、一度*Thigh*を瞬 間的に超えているが、継続的には超えておらず*Tlow*を下回 っているため、しばらくしてから元の姿勢に戻っているこ とが分かる。また、20.0s以降も同様に、*Thigh*を超えた際 に大きな反り返り動作を行っていることが分かる。また、 50.0s付近で*Tlow*を下回ってしばらくしてから、元の姿勢 に戻っていることも分かる。

腰ひねりの軸についても同様に図8および図9より、リ





60

図 7. リクライニングのトルク応答[9]

クライニングと連動して同じ時刻において同じ変化量で 動作していることが分かる。特に小さい反り返り動作では、 姿勢保持中にトルクが発生しているため10.0degからずれ て姿勢を保持していることが分かる。以上より、姿勢保持 が可能であることが確認できた。

#### 4. 考察及び今後の展望

#### 4.1 考察

今回の実験では、力に応じて姿勢の保持と姿勢の変化を 切り替えるという機能的な部分について有効に動作して いるという知見が得られた。しかし、反り返り動作時にお いて姿勢の保持に移行する前に十分に減速せず、急な減速 になってしまっていることも確認された。姿勢の保持と姿 勢の変化の間に、制御の連続性がないため、姿勢の保持と 姿勢の変化を連続して行うコンプライアンス制御の提案 が今後必要となる。

#### 4.2 今後の展望

今後の展望としては、リクライニングの運動制御の改善 の他、首周りの制御の設計が挙げられる。また、共同研究 先である心身障害児総合医療療育センターの協力の下、臨 床試験を実施することを予定している。

#### 【参考文献】

1. C. Morris, "Definition and classification of cerebral palsy: a historical perspective," *Development Medicine and Child Neurology*, Vol. 109, No. 49 pp. 3–7, 2007.

2. L. Maisa, F. Frascarelli, P. Morasso, G. Di. Rosa, M. Petrarca, E. Castelli, and P. Cappa, "Reduced short term adaptation to robot generated dynamic environment in children affected by Cerebral Palsy," *Journal of Neuroengineering and* 



図 8. 腰ひねりの角度応答[9]



Rehabilitation, No. 1, Vol. 8, article No. 28, 2011.

3. C. Bayon, R. Raya, S. L. Lara, O. Ramirez, I. Serrano J, and E. Rocon, "Robotic Therapies for Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review," *Translational Biomedicine*, No. 1:44, Vol. 7, pp. 1–10, 2016.

4. C. W. Dennis, S. Stansfield, and H. M. Larin, "Feasability of a mobile robot with alternative control system for a child with cerebral palsy," *Proceedings of the FICCDAT RESNA Conference*, pp. 1–4, Toronto, Canada, 2011.

5. C. Y. Zheng and T. T. Yang, "Development of portable hand cycle for children with cerebral palsy — The Malaysian scenario: Wheelchair propulsion motion," *Proceedings of 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference*, pp. 873–877, 2017.

6. N. Motoi, T. Shimono, R. Kubo and A. Kawamura, "Task Realization by a Force-Based Variable Compliance Controller for Flexible Motion Control Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 2, pp. 1009-1021, February 2014.

7. T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi, "Torque Sensorless Control in Multi degree-of-freedom Manipulator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 259–265, 1993.

8. K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, "Motion Control for Advanced Mechatronics," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1. pp. 56–67, 1996.

9. N. Togashi, T. Shimono, T. Nozaki, T. Shibata, Y. Aoyama, and Y. Kitahashi, "Development and motion control of three-axis seating posture holding assist chair for cerebral palsy patient," *LIFE 2019*, OS 10-1, Kanagawa, Japan, September, 2019.

業 綪

## 【原著論文】

- 中村尭子,下野誠通 負荷側オブザーバのノミナル剛性設計に基づく柔軟マ ニピュレータの位置制御 電気学会産業応用部門誌,139,8,681-688 (2019).
- 2. 桑原央明,溝口貴弘,下野誠通,大西公平 発電機点検の合理化に向けた力センサレス打振検査デ バイスの開発 精密工学会誌, 86, 1, 120-125 (2020).
- 松永卓也,大西公平,和田則仁,北川雄光 力触覚伝達機能を備えた細径軟性把持鉗子ロボットの 開発 電気学会論文誌D(産業応用部門誌),139,2,966-972 (2019).
- 4. Y. Hatta and T. Shimono
  Analysis and Experimental Verification of Cross-coupled
  2-DOF SPM Motor with Halbach Array
  IEEJ Journal of Industry Applications, 9, 2, 177-190
  (2020).

## 【総説】

- 大西公平,下野誠通 力触覚伝送を実現するリアルハプティクス 機能材料,2019 年7月号,3-11.
- 溝口貴弘,永島晃
   「AbcCore」で実現するリアルハプティクス 機能材料,2019年7月号,12-21.
- 下野誠通,大西公平,溝口貴弘,松永卓也,浅井洋 リアルハプティクス技術を用いた外科支援手術ロボット 腎臓内科・泌尿器科,2019年11月号,471-476.
- 4. 野崎貴裕、クローズアップ!農業最新技術 軟弱な果実を取り扱えるロボットハンドを開発し、カ ンキツ類の選果作業の自動化を目指す 農耕と園芸、2019年冬号、62-65.

#### 【招待講演】

 下野誠通 力触覚のディジタル化を実現する医療デバイス JST ものづくり技術 新技術説明会,2019 年 5 月, 東 京

## 永島晃 人の繊細さ・優しさを遠隔化・自動化するリアルハプ ティクス技術 Smart Sensing 2019 Innovation Summit, 2019年6月, 東京

## 3. Tomoyuki Shimono

Real Haptics and Its Medical Applications The 5th Vietnam International Conference and Exhibition on Control and Automation, VCCA2019, 2019 年 9 月, ベトナ ム・ハノイ

## 4. 下野誠通

リアルハプティクスが拓く未来医療 新川崎・創造のもり 新川崎(K2)タウンキャンパス オ ープンセミナー リアルハプティクス技術が拓くイノ ベーション, 2019 年 11 月, 川崎

5. 大西公平,下野誠通,松永卓也,浅井洋,溝口貴弘 リアルハプティクスによる手術支援ロボットの革新 日本内視鏡外科学会総会,2019年12月,横浜

6. Kouhei Ohnishi

Haptics-Led Innovation for Coming Society 2019 IEEE International Electron Devices Meeting, IEDM2019, 2019 年 12 月, アメリカ・カルフォルニ

 下野誠通 感触を伝える力触覚ロボット 藤沢ロボット産業研究会,2020年1月,藤沢

## 【口頭発表】

- T. Shimono, S. Takano, and H. Asai Development of DC Linear Permanent Magnet Machine based on Multi-Layered Core-less Structure The 10th International Conference on Power Electronics, ICPE2019, 2019 年 5 月, 韓国
- T. Matsunaga, H. Asai, T. Shimono, and K. Ohnishi Multi DoF Robotic Platform using Large Circular Linear Motors for Haptic Surgical Robots The 28th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE2019, 2019 年 6 月, カナダ
- 3. C. Soneda, H. Asai, Y. Hatta, T. Shimono, and K. Ohnishi Design and Analysis of Core-less Multi-layered Axial Motor The 28th IEEE International Symposium on Industrial

Electronics, ISIE2019, 2019 年 6 月, カナダ

- 八田禎之,下野誠通 埋込磁石型クロスカップル二自由度モータにおける センサレス制御のための位置推定法 マグネティクス/リニアドライブ合同研究会,2019 年 6月、長野
- N. Tojo, T. Tashiro, M. Yokoyama, T. Shimono, R. Oboe, T. Mizoguchi, and K. Ohnishi Communication Delay Compensation for Precise Force Matching in Teleoperation,

The 17th IEEE International Conference on Industrial Infomatics, INDIN2019, 2019 年7月, フィンランド

6. 下野誠通

リアルハプティクスを応用した次世代医療システム 第3医工融合連携マッチング例会,2019年8月,大阪

- 7. 鳥海宗太郎, 堀越幹生, 下野誠通, 松永卓也, 景山達 斗, 福田淳二 毛髪再生医療のための植毛動作支援に向けた環境イ ンピーダンス推定による層変化検 産業応用部門大会, 2019 年 8 月, 長崎
- 矢島正大朗,下野誠通,富樫信之,大西公平,太田喜久子,平尾美佳,真志田祐理子,加藤星羅 双腕型介護支援ロボットの開発に向けた起き上がり 介助の動作解析 産業応用部門大会,2019年8月,長崎
- 8. 富樫信之,下野誠通,野崎貴裕,芝田利生,青山祐樹, 北橋由貴 脳性麻痺患者のための3軸座位保持支援装置の開発と 運動制御 LIFE2019,2019年9月,横浜
- 9. T. Matsunaga, T. Shimono, H. Asai, and K. Ohnishi Force Sensorless Haptic Probe Driven by Large Circular Linear Motor for Haptic Rendering The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019, 2019 年 10 月, ポルト ガル
- 10. A. Zignoli, F. Biral, K. Yokoyama, T. Shimono Including a musculoskeletal model in the control loop of an assistive robot for the design of optimal target forces The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019, 2019 年 10 月, ポルト ガル
- 11. T. Sugimoto, T. Nozaki, and T. Murakami

Extended T-Type Boost Inverter Using Switched Capacitors The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019, 2019 年 10 月, ポルト ガル

- 12. Y. Yamada , T. Nozaki and T. Murakami Observer Structure Considering Reluctance Torque of IPMSM for Noise Resistance The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019, 2019 年 10 月, ポルト ガル
- 13. K. Sugihara, T. Nozaki, and T. Murakami Continuously Variable Transmission by High-speed Path Switching of Linear Electro-hydrostatic Actuator The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019, 2019 年 10 月, ポルト ガル
- 14. Y. Saito, S. Shimmyo, T. Nozaki and K. Ohnishi A Controller Design Method of Bilateral Teleoperation for Velocity Control Driver The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019, 2019 年 10 月, ポルト ガル
- 15. S. Shimmyo, Y. Saito, T. Nozaki, and K. Ohnishi Bandwidth Expansion of Bilateral Teleoperation Based on Synergy of Observer Gain and Velocity Feedback Gain The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON2019, 2019 年 10 月, ポルト ガル
- 17. T. Iijima, T. Matsunaga, T. Shimono, K. Ohnishi, Development of a Multi DOF Haptic Robot for Dentistry and Oral Surgery 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII2020, 2020 年 1 月, アメリカ
- 18. T. Sugimoto, T. Nozaki, and T. Murakami Extended T-Type Boost Inverter for Capacitance Reduction The 21st International Conference on Industrial Technology, ICIT2020, 2020 年 2 月, アルゼンチン
- 19. Y. Yamada, T. Nozaki and T. Murakami Independent Drive of Multiple AC Motors Using Amplitude Modulation The 21st International Conference on Industrial Technology, ICIT2020, 2020 年 2 月, アルゼンチン
- 20. M. Fukui, G. Kokubun and T. Nozaki

Visualization of Important Human Motion Feature Using Convolutional Neural Network

The 21st International Conference on Industrial Technology, ICIT2020, 2020 年 2 月, アルゼンチン

21. T. Matsunaga, T. Shimono, T. Mizoguchi, K. Ohnishi, T. Yukinari and M. Ui

Verification of Relation Between Ultrasound Image and Haptic Data Obtained by Tele-echography System Implementing Bilateral Control

The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2020 年 3 月, 東京

22. N. Togashi, T. Shimono, T. Nozaki, K. Ohnishi, T. Shibata, Y. Aoyama and Y. Kitahashi

Motion Control Based on Sigmoid Function in Three-axis Seating Posture Assist Chair for Person with Cerebral Palcyl

The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2020 年 3 月, 東京

23. T. Iijima, T. Matsunaga, T. Shimono, K. Ohnishi, S. Usuda and H. Kawana

Work Space Control of Parallel Manipulator by Levenberg Marquardt Method

The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2020 年 3 月, 東京

24. C. Soneda, H. Asai, T. Shimono and K. Ohnishi Mathematical Modeling and Experimental Validation of

Core-less Multi-layered Axial Motor The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2020 年 3 月, 東京

- 25. T. Okano, T. Nozaki and T. Murakami Development of Neural Network-based Explicit Force Control for Step Command The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, 2020 年 3 月, 東京
- 【展示会】
- 健康未来 EXPO2019, ポートメッセなごや, 2019 年 4 月 1日~7日
- Smart Sensing2019、東京ビッグサイト、2019年6月5日 ~7日

3. CEATEC2019, 幕張メッセ, 2019年10月15日~18日

- 4. 第3回未来医療ロボット技術シンポジウム, KSP 西棟3 階, 2019年11月7日
- 5. 第32回日本内視鏡外科学会総会,パシフィコ横浜,2019 年12月5日~7日
- 6. ロボット産業研究会, 湘南産業振興財団 ロボテラス, 2020年1月22日

## 【特許】

国内特許出願 2件 国外特許出願 1件