



実用化実証事業
「次世代医療福祉ロボット」グループ
研究概要集

(令和2年度～令和6年度)

令和7年3月

(地独) 神奈川県立産業技術総合研究所

Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology

目 次

プロジェクト総括

実用化実証事業

「次世代医療福祉ロボット」グループ

グループリーダー 下野 誠通 1

プロジェクト参加者一覧 6

業績 12

研 究 報 告

遠隔操作型ハプティックドリルシステムの開発と力触覚情報を活用した切削支援

松永 卓也 25

貫通検知機能を有する整形外科用力触覚ドリルの開発

高野 俊也 28

粘性推定に基づいた貫通検知機能を有する力触覚外科ドリルの開発

高野 俊也 31

リアルハプティクスを用いた貫通検知及び自動停止機能を有する外科手術用力触覚パワーツールの開発

高野 俊也 35

慣性計測装置を用いた吸入動作測定デバイスの開発

高野 俊也 38

Dynamic programming マッチングを用いた吸入動作正誤判別

高野 俊也 41

プロジェクト総括

「次世代医療福祉ロボット」グループ

グループリーダー 下野 誠通

【基本構想】

本研究グループでは、2015 年度に実施した研究シーズ育成事業および 2016 年度～2019 年度に実施した有望シーズ展開事業で得られた研究開発成果を基に、実世界での力触覚の伝送・記録・再現を可能とするリアルハプティクスを援用した様々な医療デバイスの実用化研究を推進することを目的として、2020 年度から 2024 年度までの 5 年間に亘り、研究開発活動を実施した。特に、力触覚情報を活用することによって、高い安全性や新しい診断機能を獲得した高付加価値な医療デバイス、遠隔触診を実現するネットワークシステム技術、革新的な手術支援ロボットなどの開発を行ってきた。そして、共創拠点としての殿町（川崎市川崎区）の研究室において、医療機器メーカーを中心とした産業界との密な連携による共同研究を推進し、開発技術の社会実装へと繋げることを目指した産学公連携活動を展開した。

1. 研究目的

実用化実証事業「次世代医療福祉ロボット」研究グループは、図 1 に系譜を示すように、2015 年度に実施した研究シーズ育成事業で得られたアクチュエータを中心としたハードウェア開発に関わる研究成果、および 2016 年度～2019 年度に実施した有望シーズ展開事業で得られたシステムインテグレーションに係る開発成果を基盤とし、研究グループが有するリアルハプティクスおよび最先端モーションコントロール技術を応用した革新的医療デバイスの実用化研究を主軸とした研究を推進することを目的とした。

特に、①貫通検知・自動停止機能を有するハプティック骨ドリルの開発、②腫瘍判別機能を有する脳神経外科ハプティック鉷子の開発、③操作エラー判別機能を有する吸入支援デバイスの開発の三つを重点テーマと定めた。産学公連携拠点としての殿町研究室を本拠地とし、産業界とも密に連携した実用化研究を実施してきた。これにより、医療機器メーカー等との協働による開発技術の事業化活動を推進することを目指した。

上記の重点テーマ①については、国際医療福祉大学医学部、慶應義塾大学医学部、日本メドトロニック株式会社、モーションリブ株式会社と連携し、貫通検知・自動停止機能を有するハプティック骨ドリルの実用化研究を推進した。有望シーズ展開事業の実施期間である 2019 年度に、日本医療研究開発機構（AMED）「医療分野研究成果展開事業・産学連携医療イノベーション創出プログラム・セットアップスキーム（ACT-MS）」に提案課題が採択され、実用化実証事業においても継続して本プログラムの提案研究課題を推進した。さらに 2022 年度からは、日本医療研究開発機構（AMED）「医療機器等における先進的研究開発・開発体制強化事業」の採択を受け、ハプティック骨ドリルの実用モデル機の開発研究を進め、非臨床試験による有用性実証を継続的に実施してきた。

重点テーマ②では、東京歯科大学市川総合病院、慶應義

塾大学医学部・脳神経外科、獨協医科大学等と連携し、脳腫瘍組織の自動判別機能を有するハプティック鉷子デバイスの開発研究を推進してきた。正常脳組織と種類の異なる脳腫瘍組織の剛性計測に関わる非臨床試験を実施し、ハプティック鉷子を通して得られた力触覚データから腫瘍領域さらには腫瘍種類の判別までが可能となることを実証することを目指した。

重点テーマ③では、慶應義塾大学医学部・呼吸器内科、同大学附属病院薬剤部等と連携し、喘息や慢性閉塞性肺疾患（COPD）の治療高度化に向けた吸入センシングデバイスの改良研究と、服薬操作エラーの自動判別研究を推進してきた。臨床試験を継続実施することで、開発技術の有用性を確認すると共に、様々な操作エラーの自動判別が可能となるようにアルゴリズムの改良を進めた。



図 1 本プロジェクトの系譜

2. 2020 年度～2024 年度の研究成果

実用化実証事業で得られた主な研究成果概要について、前述の三つの重点テーマを中心に述べる。

(1) 貫通検知・自動停止機能を有するハプティック骨ドリルの開発成果

2019 年度に採択された AMED・ACT-MS の補助を得て、図

2に示すハプティック骨ドリルの第一次試作を行い、2020年度から慶應義塾大学医学部との連携の下で、豚脊椎に対する検証実験を本格的に実施した。リアルハプティクス技術を応用することで、貫通時の瞬時自動検知やドリル刃の

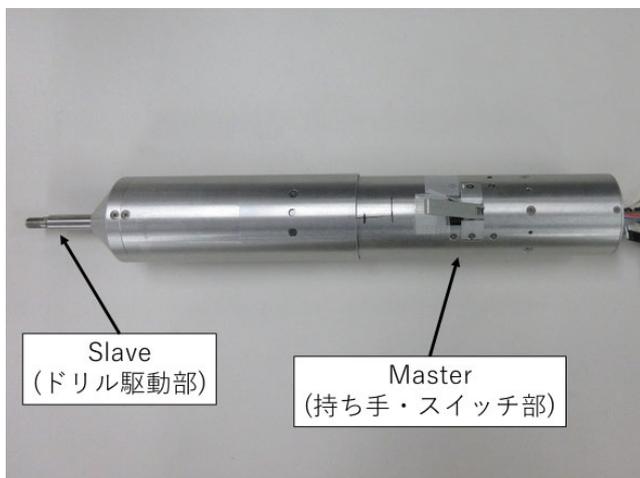
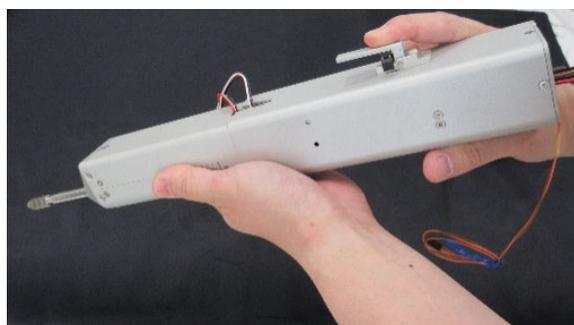


図2 ハプティック骨ドリル試作1号機

緊急停止のための基本アルゴリズムを開発した。基礎試験結果より、人が検知するよりも速く貫通を自動検出することが可能であり、また貫通後のドリル進行を飛躍的に低減することができることが実証できた。

2021年度では図3に示すようにドリル改良機の開発を行い、縦方向への掘削における有用性の実証のみならず、水平方向への切削における有用性まで確認することができた。また、開発技術がボーンソーやハンディドリルといった他の電動骨手術機器にも応用可能であることを、各種試作機を用いた検証実験から確認した。

2022年度からは、日本医療研究開発機構（AMED）「医療機器等における先進的研究開発・開発体制強化事業」の支援の下、新たにドリル刃の高速回転が可能で、より小型軽量になるように設計したハプティック骨ドリルの実用モデル機の開発という発展研究へと移行した。まず、図4に示すように、市販の骨ドリルに実際に用いられている



(a) ハプティック骨ドリル試作2号機



(b) 貫通検知・自動停止の有用性実証

図3 ハプティック骨ドリル試作2号機による試験

モータに準じた高速回転モータを実装したドリルを製作し、30,000rpmの高速動作時においても十分に貫通検知・自動停止機能が発現可能であることを実証することができた。また、アルゴリズム改良研究にも取り組み、切削対象物の機械インピーダンスに応じて、貫通検知に必要な基準値を柔軟に自動調整させることで、過検出等の課題解消に向けた手法を考案した。非臨床試験を通して、術者が貫通を知覚して手動で停止するよりも早く、正確にドリル刃を停止させることが可能であることを、実際の手術環境下で示した。これらの成果は、国際的な学術論文誌である Scientific Reports に論文掲載された。

さらに、開発した骨ドリルを操作インタフェースとして用いた術前トレーニングを実現するシミュレータ環境の構築研究にも取り組んだ（図5）。本シミュレータでは、仮想的な切削対象物からの力触覚のフィードバック機能を有し、またカメラによる位置検出を用いることで三次元的なドリル操作を可能とすることができた。

2023年度では更なる小型化を施した実用モデル機の二次試作機の開発および性能評価を行った。直動モータの仕様を精査し、ドリルの形状に合わせたモータの製作を行うことで、ドリルの小径化と軽量化を実現した。また回転モータの性能を向上させ、実際の手術用ドリルと同等の回転速度 60000rpm で動作可能なモータを搭載した。これにより、実際の外科ドリルと同等の使用感で切削が可能となった。性能評価においては、装置による貫通検知と術者の貫通時の反応時間及び、貫通時の侵襲距離について比較を行った。ブタの脊椎を用いて3名の術者で測定を行ったところ、いずれも装置による貫通検知の方が反応時間、貫通後の侵入距離が著しく少ないことが確認された。また、術者による貫通検知では結果にバラつきが見られたが、装置による貫通検知では術者に依らずほぼ同程度の値を示した。これにより、実用モデル二次試作機による貫通検知は、術者に依らず安定して貫通を検知可能であることが確認された。

2024年度には、さらにロボット手術への応用研究にも取り組み、図6に示すように、市販ロボットに開発したハプティック骨ドリルを搭載した状態での有効性を検証した。姿勢角をセンシングすることで、様々な角度からの掘削動作において貫通検知が可能であることを実験実証した。



図4 ハプティック骨ドリル実用モデル機

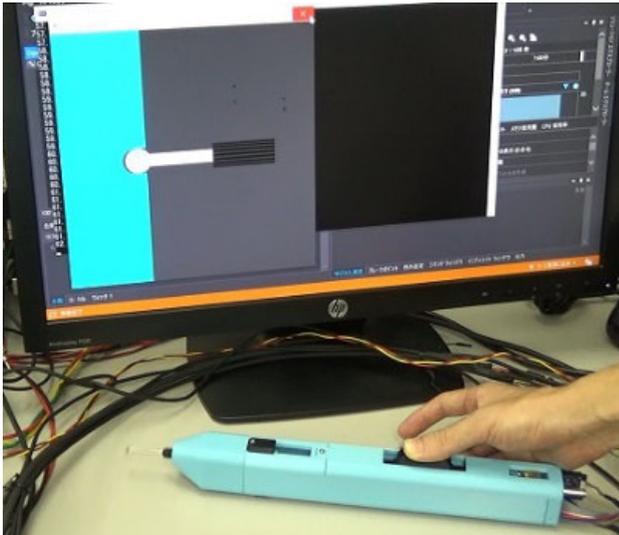


図5 ハプティックドリルシミュレータ

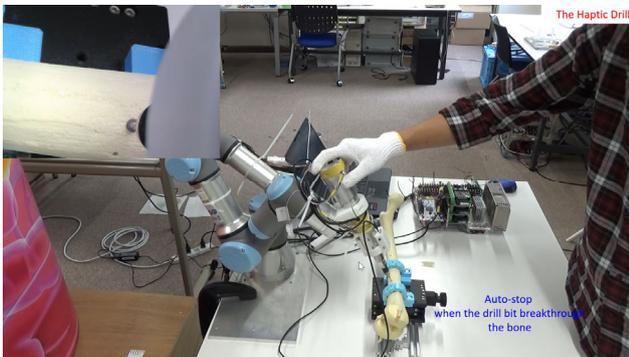


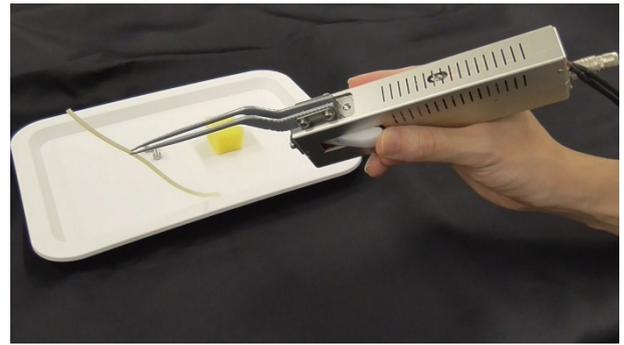
図6 ハプティック骨ドリルのロボット搭載実験

(2) 腫瘍判別機能を有する脳神経外科ハプティック鑷子の開発成果

脳神経外科の領域では、正常脳組織と腫瘍組織との境界判別が予後のQoLを決定するといっても過言ではなく、その判別精度向上が強く求められている。そこで、これまでのリアルハプティクス研究を通じて得られた知見を活かし、腫瘍組織の剛性測定を円滑に実施するための新たなデバイス研究を推進した。

図7に示す脳神経外科支援用ハプティック鑷子試作機やペンホールド型試験機を用い、腫瘍組織と正常組織の剛性計測実験を実施し、新たなバイオマーカーとしての力触覚情報の有用性について検討を深めた。その結果、非臨床試験によって、腫瘍組織と正常組織の剛性推定結果に有意な差があることを確認し、診断技術への応用性を実証することができた。

特に、非臨床試験の結果から、力触覚データを新たなバイオマーカーとして活用することで、正常脳と腫瘍脳の判別に留まらず、膠芽腫と髄膜腫の異なる腫瘍の判別まで実現可能であるというフィージビリティを検証することができた。2024年度には、これらの成果を纏めた論文が、国際的な学術論文誌である Scientific Reports に掲載された。



(a) ハプティック鑷子試作機



(b) ペンホールド型試験機

図7 脳神経外科支援デバイス

(3) 操作エラー判別機能を有する吸入支援デバイスの開発成果

喘息や慢性閉塞性肺疾患(COPD)の治療においては、吸入療法の治療効果が認められているが、吸入器の操作が不適切な場合には、その効果が極めて限定的になってしまう。そこで、慶應義塾大学医学部及び同附属病院薬剤部の研究者と共同で、慣性計測ユニット(Inertial Measurement Unit: IMU)を用いた吸入動作モニタリングデバイスの開発研究を2020年度から本格的に行った。

図8に試作デバイスを示すように、2つのIMUを活用することで、蓋の開閉動作や吸入器の傾け角度を測定可能となり、吸入動作の適切性のより詳細な把握が実現となることを示した。また、薬剤充填動作の不備など、クリティカルエラーを自動判別するためのアルゴリズム研究も並行して実施し、動的計画法を応用した手法によって薬剤師と同等の評価精度が得られるとの結果を実証した。このようにモーションコントロール技術が、人の機器操作の評価にも活用可能であることを示した。

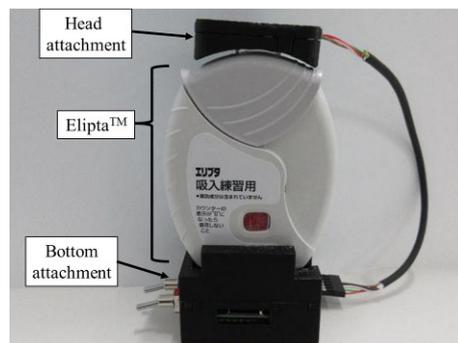


図8 吸入動作モニタリングデバイス



図9 吸入動作測定デバイス(pMDI)

2022年度からは、図9に示すようにpMDI等の他のタイプの吸入器への応用研究にも取り組み、操作エラー判別手法の一般性および発展性の検証を行った。特に、姿勢角度を正確に推定するための適用型カルマンフィルタを応用したアルゴリズム開発と、正誤判定の自動化アルゴリズム開発とを実施した。適用型カルマンフィルタでは、動作の速度に応じて加速度と角速度の重み付けを変動させることで、高精度に角度を推定することが可能となる。これにより、pMDIの吸入前に行われるデバイスを振る動作等による誤差の抑制が可能となる。pMDIの下部とレバー内にIMUを搭載した測定デバイスを用いて、吸入動作の測定を行った。カルマンフィルタによる角度推定ではデバイス振り動作時に値が発散しているのに対し、適用型カルマンフィルタによる角度推定では、振る動作時の角度の振動が抑制されており、安定した推移を示した。また、噴霧開始時のレバー押し込みによる急激な角度の変位も抑制されていることが確認された。したがって、改良アルゴリズムを用いることで、速い動作における角度の変位を抑制し、高精度な角度推定が可能であることを確認できた。吸入動作に対する正誤判定アルゴリズムによる自動判別研究では、動作の正誤判別を自動で行う判定アルゴリズムの構築を行った。IMUにより得られるデータは各3軸方向の加速度、角速度、角度を有し、IMUが2つの場合合計18種類の変数を有する。これらの変数の中から、主成分分析(principal component analysis: PCA)及び線形判別分析(Linear Discriminant Analysis: LDA)を用いて、正常動作時と誤り動作を含むデータとの間で異なる推移を示す変数の抽出を行い、それらの変数に対しDPマッチングを行うことで、高精度な正誤判定を実現した。検証に用いた吸入器のエリプタでは、発生しやすい誤り動作として、①カバー開け角度が不十分、②薬剤吸入時の吸入角度が浅い、③吸入器を水平に傾けた状態でカバーを開ける、の3つが挙げられる。これらの誤り動作を含むデータに対し、正誤判別を行った。LDAのみによる判別と、SVM(support-vector machine)による判別結果と比較したところ、提案手法による判別精度は他の判別手法と同等の精度を示すとともに、具体的な操作誤りを見える化できる点で有用であることが確認できた。

2024年度では、一連の機器操作をクラスタリングし、動作フェーズ毎に評価するためのアルゴリズム研究に理論を発展させた。機械学習のアルゴリズムの一種で、データ群をクラスタに分類する手法であるK-means法を応用することで、息を吐き出す、息を止めるなどの重要な動作部分の時間を間接的に推定することまで可能とするなど、新たな学術的成果を得た。

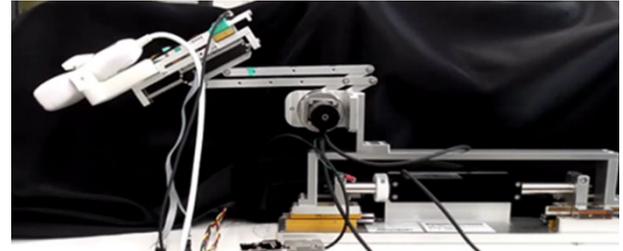


図10 三自由度超音波プローブシステム

(4) その他の開発成果

リアルハプティクスと遠隔医療への応用として、遠隔触診機器の開発研究や、マクロサージャリーロボットの開発研究にも取り組んだ。

遠隔触診機器の開発では、特に超音波プローブによる画像データと力触覚データとの統合解析研究を実施した。2021年度には、図10に示す三自由度を有する超音波プローブシステムを試作し、画像データと力触覚データのクラスタリングと二次元マッピングによるマニピュレーション誘導アルゴリズムの開発を行った。画像の一致度と接触対象物のインピーダンスの一致度を二つの独立な軸として表現する二次元マップの生成法を考案し、実際の接触状況に関する相対位置をマップ上にリアルタイム表示することで、適切な力加減やプローブ操作角度等を誘導することが可能であることを実験的に示した。これらの成果は、日本ロボット学会誌に論文が掲載されている。

マイクロサージャリー支援ロボットを通じた動作訓練を可能とするシミュレータインタフェースの開発においては、図11に示すように屈曲針の刺入動作を再現可能なシミュレータ開発や、マイクロサージャリーにおける微細な動作を実現可能な操作インタフェースの試作開発を行った。この成果を受けて、2021年度にはAMED・先進的医療機器・システム等技術開発事業(研究代表機関:慶應義塾大学)の分担研究機関として、マイクロサージャリー支援ロボットを用いたトレーニングシミュレータの開発研究を実施した。図12に例を示すように、ロボットに内蔵する各モータの位置情報を基にシミュレータ側のヴァーチャルモデルを同期させ、またシミュレータ側に設定された仮想環境から得られる反力情報をロボット側において出力することで、視覚情報と力触覚情報とを提示可能なシミュレータ環境を構築した。

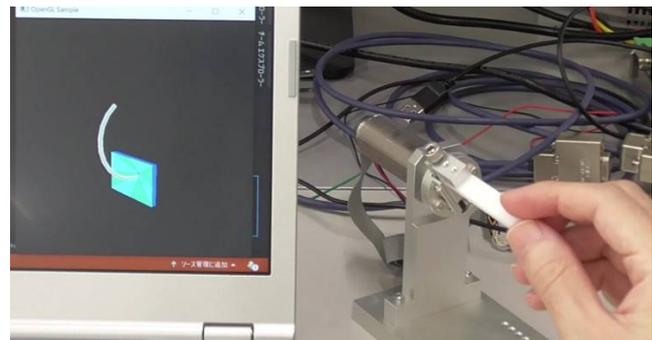
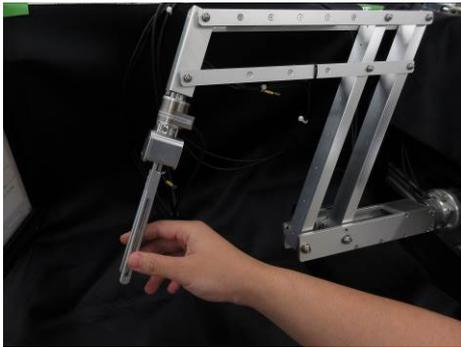
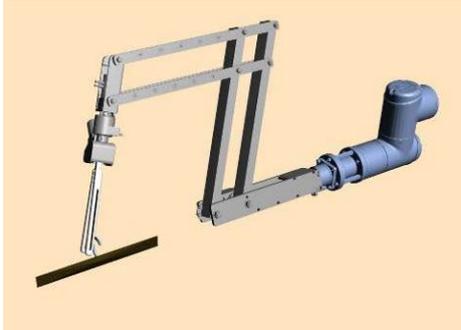


図11 屈曲針の刺入シミュレータ



(a) マイクロサージャリーロボット試作機



(b) 構築したシミュレータ環境

図 12 マイクロサージャリーシミュレータ

さらに、精密な動作が要求される場面を想定し、力制御に基づいて手先の位置を目標値へと誘導するナビゲーションシステムを開発した。実際のマイクロサージャリー支援ロボットを用いた検証実験により、手先位置を目標位置へと誘導可能であると共に、手ブレの抑制や、位置ズレの防止に効果的であることが確認された。

3. 今後の展望

本研究グループでは、これまでの研究シーズ育成事業および有望シーズ展開事業で得られた研究成果を発展させる形で、リアルハプティクスを援用した様々な医療デバイスの社会実装研究を実施してきた。これまでの実用化実証事業における研究成果から、骨ドリルに代表される治療機器への応用だけでなく、脳神経外科用鑷子デバイスのような診断機器、吸入支援デバイスの開発に代表される動作評価への応用においても、リアルハプティクスを中心としたロボット制御技術が有用であることを示してきた。

また、医療機器メーカーを中心とした産業界との連携体制の構築、充実化を段階的に達成することができた。特に、日本医療研究開発機構（AMED）の「医療分野研究成果展開事業・産学連携医療イノベーション創出プログラム・セットアップスキーム（ACT-MS）」や、「医療機器等における先進的研究開発・開発体制強靱化事業」といった外部資金の獲得を通して、産学公連携による実用化研究を推進することができた。医療機器メーカーによる事業化へと発展させることを目指し、今後も外部資金も利活用しながら、医療デバイス応用技術の社会実装に向けた実用化研究を継続的に進めていく予定である。

プロジェクト参加者

令和2年度（令和2年4月～令和3年3月）

氏名	職名	本務先等
下野 誠通	プロジェクトリーダー	横浜国立大学 准教授
大西 公平	研究顧問	慶應義塾大学 特任教授
溝口 貴弘	非常勤研究員	モーションリップ株式会社
松永 卓也	常勤研究員	
高野 俊也	常勤研究員	
柴田 美奈子	事務補助員	
三宅 真由	研究協力員	横浜国立大学大学院
矢島 正太郎	研究協力員	横浜国立大学大学院
小林 広尚	研究協力員	横浜国立大学大学院
鳥海 宗太郎	研究協力員	横浜国立大学大学院
岡本 利彰	研究協力員	横浜国立大学大学院
永石 和也	研究協力員	横浜国立大学大学院
姚 健一	研究協力員	横浜国立大学大学院
三好 優輝	研究協力員	慶應義塾大学大学院
江崎 大航	研究協力員	横浜国立大学大学院
田村 剛	研究協力員	横浜国立大学大学院
岸 拓海	研究協力員	横浜国立大学大学院
堀越 樹生	研究協力員	横浜国立大学大学院

令和3年度（令和3年4月～令和4年3月）

氏名	職名	本務先等
下野 誠通	プロジェクトリーダー	横浜国立大学 准教授
大西 公平	研究顧問	慶應義塾大学 特任教授
溝口 貴弘	非常勤研究員	モーションリブ株式会社
松永 卓也	常勤研究員	
高野 俊也	常勤研究員	
宮本 亜矢	事務補助員	
三宅 真由	研究協力員	横浜国立大学大学院
永石 和也	研究協力員	横浜国立大学大学院
三好 優輝	研究協力員	慶應義塾大学大学院
田村 剛	研究協力員	横浜国立大学大学院
岸 拓海	研究協力員	横浜国立大学大学院
土屋 萌南	研究協力員	横浜国立大学大学院
PAZOS URREA JUAN PABLO	研究協力員	横浜国立大学大学院
甲斐野 祐里	研究協力員	横浜国立大学大学院
菅野 将晃	研究協力員	横浜国立大学大学院
江崎 恭平	研究協力員	横浜国立大学大学院
矢ノ下 賢吾	研究協力員	横浜国立大学大学院
杵島 滉樹	研究協力員	横浜国立大学
五十嵐 菜月	研究協力員	慶應義塾大学
大沼 慎	研究協力員	横浜国立大学
長谷川 敦司	研究協力員	横浜国立大学
安田 克哉	研究協力員	横浜国立大学
奥村 光瑛	研究協力員	横浜国立大学
加瀬 宙大	研究協力員	横浜国立大学
滝本 歩夢	研究協力員	横浜国立大学
渡邊 優樹	研究協力員	横浜国立大学

令和4年度（令和4年4月～令和5年3月）

氏名	職名	本務先等
下野 誠通	プロジェクトリーダー	横浜国立大学 准教授
大西 公平	研究顧問	慶應義塾大学 特任教授
松永 卓也	常勤研究員	
高野 俊也	常勤研究員	
溝口 貴弘	非常勤研究員	モーションリブ株式会社
宮本 亜矢	事務補助員	
三宅 真由	研究協力員	横浜国立大学大学院
甲斐野 祐里	研究協力員	横浜国立大学大学院
菅野 将晃	研究協力員	横浜国立大学大学院
江崎 恭平	研究協力員	横浜国立大学大学院
矢ノ下 賢吾	研究協力員	横浜国立大学大学院
鈴木 里来	研究協力員	横浜国立大学大学院
杵島 滉樹	研究協力員	横浜国立大学大学院
長谷川 敦司	研究協力員	横浜国立大学大学院
安田 克哉	研究協力員	横浜国立大学大学院
金井 勇樹	研究協力員	横浜国立大学大学院
奥村 光瑛	研究協力員	横浜国立大学
加瀬 宙大	研究協力員	横浜国立大学
滝本 歩夢	研究協力員	横浜国立大学
渡邊 優樹	研究協力員	横浜国立大学

令和5年度（令和5年4月～令和6年3月）

氏名	職名	本務先等
下野 誠通	プロジェクトリーダー	横浜国立大学 准教授
大西 公平	研究顧問	慶應義塾大学 特任教授
溝口 貴弘	非常勤研究員	モーションリブ株式会社
松永 卓也	常勤研究員	
高野 俊也	常勤研究員	
Nguyen Duc Khuong	常勤研究員	
宮本 亜矢	事務補助員	
杵島 滉樹	研究協力員	横浜国立大学大学院
長谷川 敦司	研究協力員	横浜国立大学大学院
安田 克哉	研究協力員	横浜国立大学大学院
金井 勇樹	研究協力員	横浜国立大学大学院
一柳 翔馬	研究協力員	横浜国立大学大学院
奥村 光瑛	研究協力員	横浜国立大学大学院
加瀬 宙大	研究協力員	横浜国立大学大学院
滝本 歩夢	研究協力員	横浜国立大学大学院
兒玉 晃樹	研究協力員	横浜国立大学大学院
藤原 拓斗	研究協力員	横浜国立大学大学院
天野 直明	研究協力員	横浜国立大学
上野 晴琉丈	研究協力員	横浜国立大学
梶原 俊輔	研究協力員	横浜国立大学
加藤 雪菜	研究協力員	横浜国立大学
山田 敦久	研究協力員	横浜国立大学

令和6年度（令和6年4月～令和7年3月）

氏名	職名	本務先等
下野 誠通	プロジェクトリーダー	横浜国立大学 准教授
大西 公平	研究顧問	慶應義塾大学 特任教授
松永 卓也	常勤研究員	
高野 俊也	常勤準研究員	
Nguyen DucKhuong	非常勤研究員	
溝口 貴弘	非常勤研究員	モーションリブ株式会社
尾上 真由子	事務補助員	

奥村 光瑛	研究協力員	横浜国立大学
滝本 歩夢	研究協力員	横浜国立大学
加瀬 宙大	研究協力員	横浜国立大学
兒玉 晃樹	研究協力員	横浜国立大学
藤原 拓斗	研究協力員	横浜国立大学
天野 直明	研究協力員	横浜国立大学
上野 晴琉丈	研究協力員	横浜国立大学
梶原 俊輔	研究協力員	横浜国立大学
加藤 雪菜	研究協力員	横浜国立大学
山田 敦久	研究協力員	横浜国立大学
佐合 敦	研究協力員	横浜国立大学
藤井 美聡	研究協力員	横浜国立大学
森島 章斗	研究協力員	横浜国立大学
和田 隆大	研究協力員	横浜国立大学
大山 空翔	研究協力員	横浜国立大学
太田 光祐	研究協力員	横浜国立大学
三浦 佑斗	研究協力員	横浜国立大学

業 績

業績

【原著論文】

1. T. Matsunaga, T. Shimono, and K. Ohnishi
Development of Multi Degrees-of-Freedom Haptic Forceps Robot with Three Actuated Fingers
IEEJ Journal of Industry Applications, **10**, **2**, 247-253 (2021).
2. K. Yatabe, S. Ozawa, J. Oguma, S. Hirakawa, S. Tomita, T. Matsunaga, N. Togashi, M. Yokoyama, T. Shimono, and K. Ohnishi.
A study on safe forceps grip force for the intestinal tract using haptic technology
Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, online (2021).
3. 松永 卓也, 下野 誠通, 大西 公平
画像情報に基づく情報拡張機能を有するバイラテラル遠隔制御システム
精密工学会誌, **87**, **4**, 380-387 (2021).
4. 三好優輝, 下野誠通, 大西公平, 松永卓也, 溝口貴弘, 國分元樹, 行形毅, 宇井恵美
ハプティック超音波プローブを用いた力触覚・画像の統合利用による二値分類精度の向上
日本ロボット学会誌, 採録決定(2021).
5. 松永卓也, 下野誠通, 大西公平
画像情報に基づく情報拡張機能を有するバイラテラル遠隔制御システム
精密工学会誌, 87(4), 380-387 (2021).
6. 西江美幸, 正木克宜, 中田英夫, 袴田潤, 江崎大航, 富保紗希, 笹原広太郎, 浅岡雅人, 砂田啓英也, 秋山勇人, 入江美聡, 奥隅真一, 田野崎貴絵, 加畑宏樹, 富樫信之, 高野俊也, 下野誠通, 津田壮一郎, 青森達, 福永興老
吸入手技エラー判別用慣性計測装置搭載アタッチメントの開発
日本呼吸器学会誌, 10(増刊), 195 (2021).
7. Y. Moritoki, T. Furukawa, J. Sun, M. Yokoyama, T. Shimono, T. Yamada, S. Nishiwaki, T. Kageyama, J. Fukuda, M. Mukai and S. Maruo
3D-Printed Micro-Tweezers with a Compliant Mechanism Designed Using Topology Optimization
Micromachines, 12 (5:579), 10 (2021).
8. 三好優輝, 下野誠通, 大西公平, 松永卓也, 溝口貴弘, 國分元樹, 行形毅, 宇井恵美
ハプティック超音波プローブを用いた力触覚・画像の統合利用による二値分類精度の向上
日本ロボット学会誌, 39(8), 83-86 (2021).
9. S. Takano, T. Shimono, K. Masaki, K. Fukunaga, H. Kabata, M. Nishie, T. Ezaki, H. Nakada, J. Hakamata, and A. Hasegawa
An Inhalation Device with Inertial Measurement Unit for Monitoring Inhaler Technique
IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
10. S. Takano, T. Shimono, K. Masaki, K. Fukunaga, H. Kabata, M. Nishie, T. Ezaki, H. Nakada, J. Hakamata and A. Hasegawa
An Inhalation Device with Inertial Measurement Unit for Monitoring Inhaler Technique
IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 27, No. 4, pp. 2204-2211, (2022).
11. K. Yamanouchi, S. Takano, Y. Mima, T. Matsunaga, K. Ohnishi M. Matsumoto, M. Nakamura, T. Shimono and M. Yagi
Validation of a Surgical Drill with a Haptic Interface in Spine Surgery
Scientific Reports, Vol. 13, No. 598, (2023).
12. K. Ohnishi and Y. Saito,
Quantification of Force/Tactile Sensation
IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 2, pp. 125-130, (2023).
13. N.D. Khuong and T. Shimono
Modeling, Analysis, and Experimental Validation of Magnetic Geared Linear Motor
IEEJ Journal of Industry Applications (2023).
Accepted for Publication
14. N. D. Khuong and T. Shimono,
Modeling, Analysis, and Experimental Validation of Magnetic Geared Linear Motor
IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 3, pp.475-483, (2023).
15. A. Hasegawa, T. Shimono, S. Takano, K. Masaki, H. Nakada, M. Nishie and J. Hakamata
Inhaler Motion Evaluation Via Weighted DP Matching
IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 5, pp. 885-893, (2023).

16. T. Ezaki, K. Kishima, S. Shibao, T. Matsunaga, Eriel Sandika Pareira, Y. Kitamura, Y. Nakayama, N. Tsuda, K. Takahara, T. Iwama, Oltea Sampetean, M. Toda, K. Ohnishi, T. Shimono and H. Sasaki
Development of microsurgical forceps equipped with haptic technology for in situ differentiation of brain tumors during microsurgery
Scientific Reports 14, Article number 21430 (2024).
17. Y. Hatta, T. Shimono, S. Tanaka, H. Asai and Y. Fujimoto,
Mathematical Modeling, Finite Element Analysis, and Experimental Verification of Cross-Coupled 2-DOF Tubular SPMSM
IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 14, No.3(2024).
18. N. Tojo and T. Shimono,
Prototyping Applications for Post-Stroke Rehabilitation with Kinesthetic Haptic Technology
IEEE Access, Vol. 12, pp.186730-186739, (2024).

【総説】

1. 下野誠通, 大西公平
モーションコントロール概論
機械設計, **64**, 5,4-8 (2020).
2. 下野誠通, 大西公平
リアルハプティクスの医療支援応用
機械設計, **64**, 5,38-41 (2020).
3. 下野誠通, 大西公平
力触覚のデジタル化を実現する医療デバイス
月刊化学工業, **71**, 8,478-482 (2020).
4. 和田則仁, 大西公平, 北川雄光
触覚をもった超低侵襲手術支援ロボットの開発
Pharma Medica, **39**, 4,45-48 (2021).
5. 下野誠通, 溝口貴弘, 大西公平
遠隔医療に向けたリアルハプティクス
映像情報メディア学会誌, **71**, 8,478-482 (2021).
6. 下野誠通, 溝口貴弘, 大西公平
遠隔医療に向けたリアルハプティクス
映像メディア学会誌, **75** (3), 330-333 (2021).
7. 桑原央明, 國分元樹, 溝口貴弘, 下野誠通, 大西公平
構造物の内部欠陥を検出する力センサレス打振検査デバイスの開発
検査技術, **26**(6), 13-16 (2021).
8. 松永卓也, 下野誠通, 大西公平
映像機器と力触覚装置の連携により情報を拡張する遠

隔操作システム
画像ラボ, **32** (10), 11-15 (2021).

9. 下野誠通
力触覚を有する安全安心な整形外科ドリルの開発
国立研究開発法人日本医療研究開発機構 2020 年度研究事業成果集, **16** (2022).
10. 下野誠通, 松永卓也, 大西公平
“リアルハプティクスを応用した遠隔診断システム”
循環器内科, **92**(4), 447-450 (2022).

【書籍】

1. S. Takano, T. Shimono, K. Masaki, K. Fukunaga, H. Kabata, M. Nishie, T. Ezaki, H. Nakada, J. Hakamada and A. Hasegawa
Keio Researchers Develop Device to Help Patients Use Inhalers Correctly
The Penmark (慶應義塾大学発行), **27**, 2-3 (2022).
(ニュースレター)
2. 下野誠通, 八木満, 高野俊也, 松永卓也, 山之内健人
ハプティクスとその応用
ー力触覚の伝送・記録・再現・表示ー
(株式会社シーエムシー出版発行)
第 IV 編 ハプティクスの応用
第 2 章 脊椎手術用力触覚ドリル, 270-277 (2022).

【口頭発表】

1. S. Yajima, T. Shimono, T. Mizoguchi, and K. Ohnishi
Automatic Grasping Position Adjustment for Robotic Hand by Estimating Center of Gravity Using Disturbance Observer
International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM2020, 2020 年 7 月, オンライン
2. H. Asai, T. Shimono, T. Deguchi, Y. Fujii, H. Yamamoto, and K. Ohnishi
Development and Basic Analysis of Novel Flexible Linear Motor
International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2020, 2020 年 9 月, オンライン
3. T. Matsunaga, T. Shimono, and K. Ohnishi
Verification of Double Hand Teleoperation System Using Haptic Forceps Robots and LCLM Platform
International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2020, 2020 年 9 月, オンライン
4. S. Nagai and A. Kawamura
Development of Compact Linear Actuator Combining DC motor and Cylindrical Cam for Tactile Display
International Workshop on Advanced Motion Control,

- AMC2020, 2020年9月, オンライン
5. 三好優輝, 下野誠通, 大西公平, 松永卓也, 溝口貴弘, 國分元樹, 行成毅, 宇井恵美
ハプティック超音波プローブを用いた力触覚・画像の統合利用による二値分類精度の向上
第38回日本ロボット学会学術講演会, 2020年10月, オンライン
 6. S. Toriumi, K. Sakuma, H. Asai, and T. Shimono
Finite Element Analysis and Experimental Validation of Core-less Multi-layered Radial Motor
International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC2020, 2020年11月, オンライン
 7. S. T. Matsunaga, T. Shimono, K. Ohnishi, S. Takano, H. Kobayashi, M. Yagi, and M. Nakamura
Multi Functional Drill Incorporating Linear Motor for Haptic Surgical Instrument and Simulator
International Conference on Mechatronics, ICM2021, 2021年3月, オンライン
 8. H. Kobayashi, T. Matsunaga, H. Asai, S. Takano, T. Shimono, M. Yagi, K. Ohnishi, and M. Nakamura
Development of Orthopedic Haptic Drill for Detection of Penetration
The7th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, SAMCON2021, 2021年3月, オンライン
 9. T. Shimono, S. Tanaka, Y. Hatta, H. Asai, and Y. Fujimoto
Mathematical Modeling, Finite Element Analysis, and Experimental Verification of Cross-Coupled 2-DOF Tubular SPMSM
The7th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, SAMCON2021, 2021年3月, オンライン
 10. 西江美幸, 正木克宜, 中田英夫, 袴田潤, 江崎大航, 富保紗希, 笹原広太郎, 浅岡雅人, 砂田啓英也, 秋山勇人, 入江美聡, 奥隅真一, 田野崎貴絵, 加畑宏樹, 富樫信之, 高野俊也, 下野誠通, 津田壮一郎, 青森達, 福永興老
吸入手技エラー判別用慣性計測装置搭載アタッチメントの開発
第61回日本呼吸器学会学術講演会, 2021年4月, 東京
 11. T. Ezaki, K. Masaki, M. Nishie, H. Nakada, J. Hakamata, S. Takano, K. Sunata, Y. Akiyama, M. Irie, S. Okuzumi, T. Tanosaki, H. Kabata, T. Shimono, S. Tsuda, T. Aomori, and K. Fukunaga
Accelerometer-equipped external attachments to detect critical errors while using inhalation devices
American Thoracic Society 2021 International Conference, 2021年5月, オンライン
 12. T. Matsunaga, T. Shimono, and K. Ohnishi
A Method to Contact with Real Environment through Virtual Object by Hidden End Effector in Teleoperation with Augmented Reality
International Symposium on Industrial Electronics, 2021年6月, オンライン
 13. 下野誠通
リニアドライブ技術のヘルスケア機器応用
2021年電気学会産業応用部門大会
2021年8月, オンライン
 14. 土屋萌南, 下野誠通
3D映像の知覚奥行に合わせた遠隔操作のスケーリング設計法
2021年電気学会産業応用部門大会
2021年8月, オンライン
 15. 田村剛, 松永卓也, 下野誠通, 大西公平, 白田慎, 河奈裕正
口腔外科手術ロボットの操作支援に向けた3DCGインターフェースの開発
2021年電気学会産業応用部門大会
2021年8月, オンライン
 16. 下野誠通, 松永卓也, 高野俊也, 大西公平, 八木満, 中村雅也
リアルハプティクス技術の整形外科支援応用
第29回日本腰痛学会, 2021年10月, 東京
 17. 下野誠通
再生細胞医療支援に向けたリアルハプティクスモノづくり企業のための細胞培養研修,
2021年12月, オンライン
 18. 下野誠通
リアルハプティクスを援用した貫通検知・自動停止機能を有する骨ドリルの開発
第16回CAOS研究会, 2022年3月, 東京
 19. A. Hasegawa, T. Shimono, S. Takano, K. Masaki, H. Nakada, and M. Nishie
Inhaler Motion Evaluation by Weighted DP Matching
The 8th IEEE International Workshop on Sensing Actuation, Motion Control, and Optimization, 2022年3月, オンライン

20. G. Tamura, T. Matsunaga, T. Shimono, K. Ohnishi, S. Usuda, and H. Kawana
Development of Operation Support System for Dental Surgery Robot
The 8th IEEE International Workshop on Sensing Actuation, Motion Control, and Optimization
2022年3月, オンライン
21. M. Tsuchiya, and T. Shimono
Scaling Method of Operation Distance Affected by Perceived Depth During Image Zooming in Bilateral Teleoperation
The 8th IEEE International Workshop on Sensing Actuation, Motion Control, and Optimization,
2022年3月, オンライン
22. N.D. Khuong and T. Shimono
Modeling and Analysis of a Magnetic Geared Linear Motor
International Power Electronics Conference 2022 (IPEC2022), 2022年5月16日, 姫路
23. S. Takano, T. Shimono, K. Masaki, K. Fukunaga, H. Kabata, M. Nishie, T. Ezaki, H. Nakada, J. Hakamata and A. Hasegawa
An Inhalation Device with Inertial Measurement Unit for Monitoring Inhaler Technique
2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2022), 2022年7月12日, 札幌
24. Y. Miyoshi, T. Shimono, T. Matsunaga, G. Kokubun, T. Mizoguchi, K. Ohnishi, T. Yukinari and M. Ui,
Development of Operation Support System Based on Integration of Haptic and Image Information for Ultrasound Probe Manipulation
2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2022), 2022年7月13日, 札幌
25. T. Shimono,
Real Haptics and Its Applications to Medical System”
Dresden International Summer School on Haptics and Cognitive Robotics (HAPCOR)
2022年9月5日, ドレスデン, ドイツ
26. T. Shimono,
Damage Analysis of Surgical Drill Bar Based on Force Sensing Technology
New Methods of Damage and Failure Analyses of Structural Parts
2022年9月12日, オストラヴァ, チェコ
27. T. Ezaki, K. Kishima, Eriel S. Pareira, S. Shibao, T. Matsunaga, Y. Kitamura, K. Takahara, O. Sampetean, K. Ohnishi, M. Toda, T. Shimono and H. Sasaki
Development of Microsurgical Forceps Equipped with Haptics Technology for in Situ Differentiation of Tumor Tissue from Normal Brain during Microsurgery by Tissue Stiffness
Society for Neuro-Oncology, 27th Annual Meeting & Education Day
2022年11月18日, フロリダ, アメリカ
28. A. Hasegawa, T. Shimono, S. Takano, K. Masaki, K. Fukunaga, H. Kabata, J. Miyata, H. Nakada, R. Hayashi and J. Hakamada,
Principal Component Analysis of Inhalation Waveform (Ellipta™)
The 9th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2023), 2023年3月26日, 南京・中国, オンライン
29. K. Yamanouchi, S. Takano, Y. Mima, T. Matsunaga, K. Ohnishi M. Matsumoto, M. Nakamura, T. Shimono and M. Yagi,
Development and Validation of a Surgical Drill with a Haptic Interface in Spine Surgery
30th International Meeting on Advanced Spine Techniques (IMAST), 2023年3月22-24日, ダブリン, アイルランド
30. 下野誠通, 高野俊也, 松永卓也, 大西公平, 八木満, 中村雅也
リアルハプティクスの脊椎脊髄手術への応用と展望
第51回日本脊椎脊髄病学会学術集会,
2022年4月22日, 横浜
31. 西江美幸, 正木克宜, 中田英夫, 林玲奈, 袴田潤, 松山笑子, 栗原桃子, 砂田啓英也, 秋山勇人, 入江美聡, 田野崎貴絵, 加畑宏樹, 長谷川敦司, 高野俊也, 下野誠通, 青森達, 福永興壱
慣性計測センサ取得データのDynamic programmingマッチングを用いた吸入動作正誤判定
第62回日本呼吸器学会学術講演会, 2022年4月22日, 京都
32. 奥村光瑛, 大沼慎, 高野俊也, 下野誠通, 景山達斗, 福田淳二
毛髪再生医療のための毛包原基移植デバイスの開発
電気学会 産業計測制御研究会, 2022年5月31日, オンライン
33. 下野誠通
力触覚を有する安全安心な整形外科ドリルとシミュ

レーターの開発

医療分野研究成果展開事業 産学連携医療イノベーション創出プログラム (ACT-M/MS) 第4回成果発表会, 2022年11月2日, 東京, オンライン

34. 下野誠通

医療を革新するリアルハプティクス
リアルハプティクス技術協議会 第12回フォーラム
2022年12月9日, 川崎

35. 高野俊也

喘息患者さんの服薬動作を「見える化」する判定システム
JSTものづくり技術 ～首都圏テクノナレッジ・フリーウェイ～ 新技術説明会
2023年1月17日, オンライン

36. 下野誠通

操作エラー自動診断機能を有する薬剤吸入支援デバイスの開発
日本薬剤学会経肺経鼻投与製剤フォーカスグループ研究会, 2023年2月17日, 神戸

37. T. Matsunaga, S. Takano, T. Shimono, K. Ohnishi, M. Yagi and M. Nakamura

Handheld Haptic Drill Simulator Using Visual Servoing System for Axial Force Presentation
The IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2023), 2023年6月20日, ヘルシンキ, フィンランド

38. S. Takano, T. Shimono, T. Matsunaga, M. Yagi, K. Ohnishi, M. Nakamura, Y. Mima, K. Yamanouchi and G. Ikeda,

Development of Orthopedic Haptic Drill for Spinal Surgery with Penetration Detection Scheme based on Viscosity Estimation
2023 IEEE / ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2023),
2023年6月28日, シアトル, アメリカ

39. K. Okumura, T. Shimono, S. Takano, T. Matsunaga, T. Kageyama, and J. Fukuda

Experimental Evaluation of Solid Matter Injection Accuracy with Cell Transplantation Device for Hair Regenerative Medicine
Joint Conference of the 14th Edition of France-Japan, 12th Europe-Asia Congress on Mechatronics (Mechatronics2023) and the 9th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2023),
2023年9月10日, 横浜

40. A. Takimoto, S. Takano, T. Matsunaga, and T. Shimono

A Consideration on Suppression of Chatter Vibration by Notch Filtering for Haptic Bone Drill
Joint Conference of the 14th Edition of France-Japan, 12th Europe-Asia Congress on Mechatronics (Mechatronics2023) and the 9th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2023), 2023年9月11日, 横浜

41. T. Ezaki, K. Kisima, S. Shibao, T. Matsunaga, Pareira ES, Y. Kitamura, K. Takahara, T. Iwama, Sampetean O, K. Ohnishi, T. Shimono and H. Sasaki,

Differentiation of glioblastoma and malignant meningioma from normal brain by tissue stiffness utilizing microsurgical forceps equipped with haptics technology.
28th Annual Meeting and Education Day of the Society for Neuro-Oncology, 2023年11月17日, バンクーバー, カナダ

42. Nguyen Duc Khuong

Development of High Thrust Tubular Magnetic Geared Linear Motor
26th Power Electronics and Motion Control-Camp 2023,
2023年11月25日, 東京

43. T. Wakabayashi, S. Kobayashi, S. Takano, K. Yamanouchi, Y. Mima, M. Yagi, K. Harato, Y. Niki, T. Matsunaga, K. Ohnishi, M. Matsumoto, M. Nakamura and T. Shimono,

“Effectiveness and safeness of the power tool with a real haptic interface in orthopedic surgery”, Orthopaedic Research Society 2024 Annual meeting (ORS 2024), 2024年2月3-4日, カリフォルニア, アメリカ

44. T. Matsunaga, S. Takano, T. Shimono, K. Ohnishi, M. Yagi and M. Nakamura,

“A Prevent of Motion Causing Accidents in Orthopedic Surgery by Teleoperated Haptic Drill”, The IEEE 18th International Conference on Advanced Motion Control (AMC 2024), 2024年3月1日, 京都

45. T. Matsunaga, S. Takano, T. Shimono, K. Ohnishi, T. Wakabayashi, S. Kobayashi, M. Yagi and M. Nakamura,

“Cutting State Estimation Based on Haptic Information Acquired by One DOF Teleoperated Oscillating Saw for Orthopedic Surgery”, The IEEE 10th International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2024), 2024年3月4日, 京都

46. K. Kodama, H. Obara, T. Yokoyama, and T. Shimono,

“Velocity Noise Reduction Using Multi-Level Inverters”, The IEEE 10th International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2024), 2024年3月4日, 京都

47. Y. Kanai, T. Shimono, K. Sugawara, T. Suzuki, Y. Takenaka, and R. Sasaki, "Development of Measurement Method for Limb Tip Output during Muscle Relaxation", The IEEJ 10th International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2024), 2024年3月4日, 京都
48. T. Fujiwara, D. Canton, and T. Shimono, "Delay Identification in Remote Control Systems with Time Delay", The IEEJ 10th International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2024), 2024年3月4日, 京都
49. 松永卓也, 下野誠通, 大西公平
「力触覚伝達が可能なマスタ・スレーブ型パラレルリンクロボットと円弧リニアモータで構成した5自由度刺入システム」
電気学会産業応用部門大会, 2023年8月23日, 名古屋
50. 下野誠通
「殿町における医工×産学連携による次世代医療デバイスの開発」
キングスカイフロントサイエンスフォーラム 2023, 2023年11月2日, 川崎
51. T. Matsunaga, S. Takano, T. Shimono, K. Ohnishi, M. Yagi and M. Nakamura
Teleoperated Orthopedic Drill System Presenting Haptic Information Extended by Bur Tip Position
The 2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2025), 2025年2月28日 - 3月2日, ウーロンゴン, オーストラリア
52. T. Matsunaga, S. Takano, T. Shimono, K. Ohnishi, T. Wakabayashi, S. Kobayashi and M. Nakamura
Real Haptic Data Based Cutting Force Reproduction for Orthopedic Oscillating Saw Simulator
The 11th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025年3月21日 - 23日, 島根
53. S. Takano, T. Shimono, K. Masaki, H. Nakada, J. Hakamata, H. Kabata, J. Miyata and K. Fukunaga
Adaptive Kalman Filtering Based Angle Estimation for Monitoring Inhaler Technique",
The 11th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025年3月21日, 島根
54. K. Okumura, S. Takano, T. Shimono, T. Kageyama, J. Tanaka and T. Araki,
Accuracy Evaluation of Solid Material Transplantation Using Cell Transplantation Device and Comparison with Manual Operation
The 11th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025年3月21日 - 23日, 島根
55. A. Takimoto, S. Takano and T. Shimono,
Parallel Implementation of Disturbance Observers for Drilling Vibration Suppression
The 11th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025年3月21日 - 23日, 島根
56. T. Fujiwara and T. Shimono,
Remote Control System with Real Time Delay Estimation Using CDOB
The 11th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025年3月21日 - 23日, 島根
57. M. Fujii, T. Shimono, S. Takano, K. Masaki, H. Nakada, J. Hakamata, H. Kabata, J. Miyata, K. Fukunaga,
Assessment of Inhaler Operation by k-means Clustering
The 11th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025年3月21日 - 23日, 島根
58. M. Kase, N. Khuong, T. Shimono
Fundamental Experiment for Control of 6-DOF Cylindrical Motor
The 11th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025年3月21日, 島根
59. 山田敦久, 下野誠通, 八木満, 中村雅也, 大西公平
整形外科手術支援ロボットの誘導に向けた脊髄画像検出器の開発
電気学会産業応用部門大会, 2024年8月29日, 水戸

【特許】

- (1) 国内特許出願 8件
- (2) 国外特許出願 6件

・国内特許

1. 発明の名称：介護用補助装置

出願番号：特願 2017-209279 号

出願日：平成 29 年 10 月 30 日

発明者：溝口貴弘、下野誠通、大西公平
出願人：KISTEC、横浜国立大学、慶應義塾、
株式会社ファインテクノス

出願人：KISTEC、慶應義塾、横浜国立大学

2. 発明の名称：鉗子システム

出願番号：特願 2017-158330 号
出願日：平成 29 年 8 月 21 日
発明者：溝口貴弘、下野誠通、大西公平
出願人：KISTEC、横浜国立大学、慶應義塾

7. 発明の名称：遠隔医療支援システム、遠隔医療支援方法、及びプログラム

出願番号：特願 2023-122347 号
出願日：令和 5 年 7 月 27 日
発明者：下野誠通、大西公平、溝口貴弘、松永卓也
出願人：KISTEC、慶應義塾、横浜国立大学、医療法人日
米会鷺沼診療所、モーショシリブ株式会社

3. 発明の名称：力触覚伝達システム、力触覚伝達方法及びプログラム

出願番号：特願 2018-042238 号
出願日：平成 30 年 3 月 8 日
発明者：溝口貴弘、下野誠通、大西公平、田代哲也
出願人：KISTEC、横浜国立大学、慶應義塾

8. 発明の名称：医療機器、及び医療用プログラム

出願番号：特願 2023-089291 号
出願日：令和 5 年 5 月 30 日
発明者：下野誠通、大西公平、松永卓也、高野俊也
出願人：KISTEC、慶應義塾

4. 発明の名称：医療用把持装置

出願番号：特願 2018-129425 号
出願日：平成 30 年 7 月 6 日
発明者：溝口貴弘、下野誠通、大西公平、青木美夏、
松永卓也

・ 国際特許出願

1. 発明の名称：力触覚伝達システム、力触覚伝達方法及びプログラム

国際出願番号：JP2018-042238,
US16/978, 748, PCT/JP2029/009136
出願日：2019 年 3 月 7 日

出願人：KISTEC、横浜国立大学、慶應義塾

発明者：溝口貴弘、下野誠通、大西公平、田代哲也

出願人：KISTEC、慶應義塾

5. 発明の名称：医療機器、及び医療用プログラム

出願番号：特願 2020-064687 号
出願日：令和 2 年 3 月 31 日
発明者：下野誠通、大西公平、松永卓也、浅井洋、
小林広尚
出願人：KISTEC、慶應義塾

2. 発明の名称：医療用把持装置

国際出願番号：JP2018-129425, US17/258, 075,
PCT/JP2019/022778

出願日：2019 年 6 月 7 日

発明者：溝口貴弘、下野誠通、大西公平、青木美夏、
松永卓也

出願人：KISTEC、慶應義塾

6. 発明の名称：医療判定システム、医療判定方法、医療判定装置、及びプログラム

出願番号：特願 2022-69921 号
出願日：令和 4 年 4 月 21 日
発明者：下野誠通、高野俊也、長谷川敦司

3. 発明の名称：医療機器、及び医療用プログラム

国際出願番号：JP2020-064687, US17/915, 913,

EP21781401.1, PCT/JP2021/013428

出願日：2021年3月29日

発明者：下野誠通、大西公平、松永卓也、浅井洋、
小林広尚

出願人：KISTEC、慶應義塾

4. 発明の名称：医療機器、及び医療用プログラム

国際出願番号：PCT/JP2024/019964

出願日：2024年5月30日

発明者：下野誠通、大西公平、松永卓也、高野俊也

出願人：KISEC、慶應義塾、モーションリブ株式会社

5. 発明の名称：遠隔医療支援システム、遠隔医療支援方法、及びプログラム

国際出願番号：JP2023-122347, PCT/JP2024/26898

出願日：2023年7月26日

発明者：下野誠通、大西公平、溝口貴弘、松永卓也、
行形毅

出願人：KISTEC、横浜国立大学、慶應義塾、医療法人日
米会鷺沼診療所、モーションリブ株式会社

6. 医療機器、及び医療用プログラム

国際特許番号：JP2017-158330, PCT/JP2018/031461

出願日：2023年5月30日

発明者：下野誠通、大西公平、松永卓也、高野俊也

出願人：KISTEC、慶應義塾

【招待講演】

1. 下野誠通
人間支援システム応用を指向したアクチュエータ
第10回 電気学会東京支部神奈川支所研究会、オンライン、2021年2月16日

【記者発表・取材】

1. 読売新聞, 2021年1月7日, 朝刊26面
「未来はそこに」 『遠隔操作「感触」伝送』
2. KISTEC、慶應義塾大学、横浜国立大学

薬剤吸入動作をモニタリングし正誤判定するデバイスを開発—喘息、COPD治療における服薬指導に貢献—
2022年7月26日, 神奈川県政記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、厚生省厚生労働記者会、厚生日比谷クラブ同時発表

3. 薬事日報

吸入器の適正使用支援 モニタリング機器開発
2022年8月17日, 薬事日報, 第12634号(3)

4. 慶應義塾大学医学部、横浜国立大学、KISTEC、モーションリブ株式会社

力触覚の伝達が可能なリアルハプティクス技術搭載ドリルを新開発—安全な脊椎手術の実現に向けた大きな進歩—

2023年3月13日, 文部科学記者会、科学記者会、厚生労働記者会、厚生日比谷クラブ、各社科学部等

5. 日刊工業新聞

慶大など、力触覚機能付き脊椎手術ドリル開発
2023年3月14日

6. 下野 誠通, “かながわ未来人 ～遠隔で触覚伝える技術開発～”, 2023年9月18日, 東京新聞

【受賞】

1. 下野誠通, 田中翔大, 八田禎之, 浅井洋, 藤本康孝
SAMCON2021 Outstanding Paper Awards,
2021年3月11日
2. 高野俊也
2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic (AIM2023),
Best Conference Paper Finalist を受賞
口頭発表 “Development of Orthopedic Haptic Drill for Spinal Surgery with Penetration Detection Scheme based on Viscosity Estimation”, 2023年6月27日-7月1日, シアトル, アメリカ
3. 松永卓也
The 10th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2024),
2023年部門優秀論文発表賞 (国際ワークショップ) を受賞
口頭発表 “Cutting State Estimation Based on Haptic Information Acquired by One DOF Teleoperated Oscillating Saw for Orthopedic Surgery”, 2024年3月2日-4日, 京都府

【展示会・出展】

1. Japan Robot Week 2022

2. リアル会場 かながわロボットイノベーション
2022年10月19-21日, 東京ビッグサイト
3. ヘルスケア MaaS2022 が拓く地域コミュニティの未来
2022
2022年11月4-6日, 湘南ヘルスイノベーションパーク
4. ヘルスケア MaaS 2023 健康・移動をデータで結ぶ未来,
2023年12月2-3日, 湘南ヘルスイノベーションパーク

研 究 報 告

遠隔操作型ハプティックドリルシステムの開発と 力触覚情報を活用した切削支援

次世代医療福祉ロボットグループ
松永 卓也

1. はじめに

脊椎手術における医療用ドリルを用いた骨の切削は高度なスキルが要求される。ドリル先端の刃は高速で回転し、接触した骨を切削する。骨周辺の組織が刃に触れた場合には損傷の危険性がある。特に脊髓の損傷は患者の運動機能や知覚機能に深刻な障害を与える可能性がある。したがって、従来の脊椎手術では術者がドリルの操作に熟達することで術中の事故を防ぐことが必要である。

高度なスキルを持つ術者の育成には時間を要するため、術者に対する工学的支援が研究されている。工学的支援の一つである貫通検知では、切削中の骨と周囲の空間、または骨以外の物体との境界にドリルの刃が到達したことを検知する。貫通検知と同時に刃を自動で停止させることで、骨周辺の組織の損傷を防ぐことができる。これまでに、ドリルが内蔵する回転モータの電流と速度から切削抵抗を推定し、サポートベクターマシンで貫通を検知する手法が提案されている[1]。また、刃の回転に加えて軸方向の直動自由度を有するドリルについて、力触覚情報を用いた貫通検知機能が開発されている[2]。

(1) 遠隔操作型力触覚ドリルシステム

本研究では、視覚、力触覚情報を拡張することで貫通を回避し、切削作業の安全性を向上させる遠隔操作型力触覚ドリルシステムを開発する[3]。本研究で使用するドリルシステムは、エンドエフェクタの脊椎手術用ドリルによる骨切削を想定したリーダー・フォロワー式の遠隔操作型ロボットである[4]。作業空間側ロボットと操作者側ロボットが並進自由度の力触覚情報を双方向に伝達し、操作者に対して切削作業で発生する反力をフィードバックする。さらに、ロボット間で伝達される力触覚情報を貫通の回避に活用する。

(1)-1 作業空間側ロボット

本研究で使用するドリルシステムにおいて作業空間側に配置される4自由度ドリルロボットは、回転モータで駆動する刃をエンドエフェクタとして備えた並進3自由度を有するパラレルリンクロボットである(図1)。各アクチュエータが先端の並進自由度と対応し、デカルト座標系においてモータ空間での制御が可能である。また、

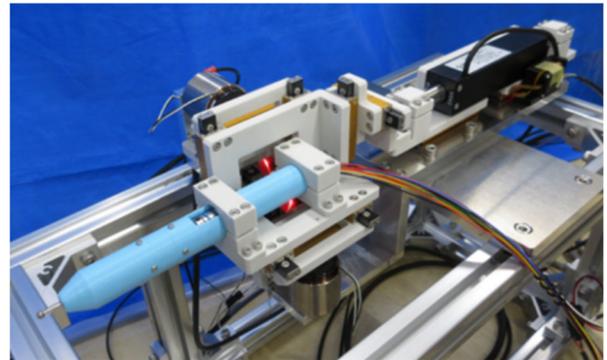


図1 4自由度ドリルロボット[5]

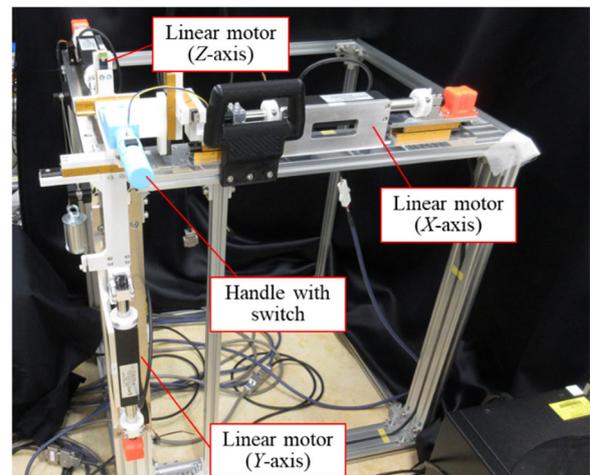


図2 ハプティックインターフェース

バックドライバビリティに優れたアクチュエータで駆動しており、力センサレスで力触覚情報が得られる。

(1)-2 操作者側ロボット

操作者側に配置されるハプティックインターフェースは、作業空間側のドリルロボットと同様に並進3自由度を有するパラレルリンクロボットである(図2)。エンドエフェクタとして取り付けられたハンドルのスイッチはドリルのON/OFFに用いられる。したがって、操作者はハプティックインターフェースを介して刃を回転させ、かつ3次元空間内で刃の位置を移動させることが可能である。

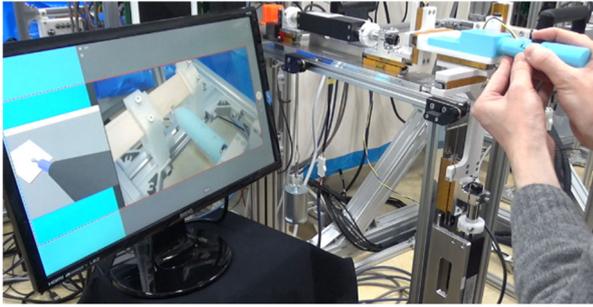


図 3 実験機器

(2) 力触覚情報を用いた貫通回避

本研究でドリルシステムに実装する貫通回避機能は、最初に力触覚情報を用いて切削対象物を認識し、次に視覚・力触覚情報を拡張して対象物の貫通を妨げることで操作者を支援する。

(2)-1 切削対象物の認識

4自由度ドリルロボットのエンドエフェクタが切削対象物の表面を切削する際、並進3自由度の動作で得られる反力推定値は接触判定に利用可能である。反力が発生した位置情報を接触点として記録して収集することで、対象物表面の位置および回転角度の情報が得られる。医療用画像機器が3次元画像を取得可能であることを考慮し、事前に対象物の3D形状データが得られるという前提を置くと、収集した接触点から得られた情報に基づいて仮想空間内の切削シミュレータに仮想の切削対象物を配置することができる。

(2)-2 視覚・力触覚情報の拡張

ドリルロボットが得た力触覚情報に基づいて切削対象物の情報が得られた後、ドリルシステムは実物体の切削と同時に仮想空間で実施される切削シミュレーションに基づいて視覚、力触覚情報の拡張をおこなう。力触覚情報を伝達するバイラテラル制御はスケーリングによる力触覚の増幅と、仮想反力による力触覚の付加が可能である。仮想刃の位置に応じて力触覚の増幅率を増大させ、かつ仮想反力を発生させることで貫通を引き起こす切削を妨げることが可能である。さらに、切削シミュレーションを画像で可視化することで、操作者は力触覚伝達における切削領域やパラメータの変化を確認しながら作業を進めることが可能である。

2. 実験と結果

(1) 方法

本研究で開発した貫通回避機能をドリルシステムに実装し、模擬骨を切削する実験をおこなった(図3)。視覚情報としてカメラで取得した作業空間の画像および切削シミュレーションをおこなう仮想空間の画像を並べてディスプレイに表示した。操作者はディスプレイで視覚情報を得ながらハプティックインターフェースを操作して模擬骨の切削を実施した。ドリルロボットには直径4mm

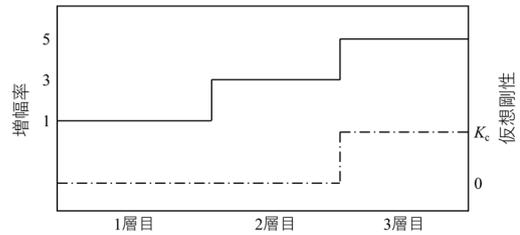


図 4 力触覚の増幅率と仮想剛性

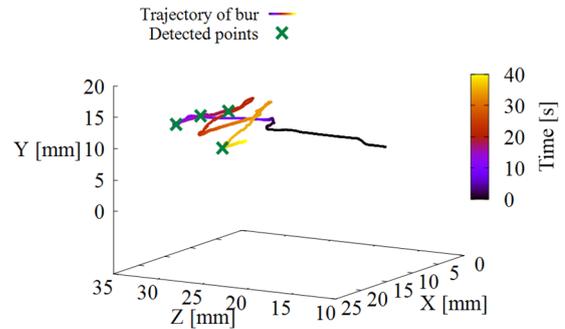


図 5 対象物の認識における先端位置

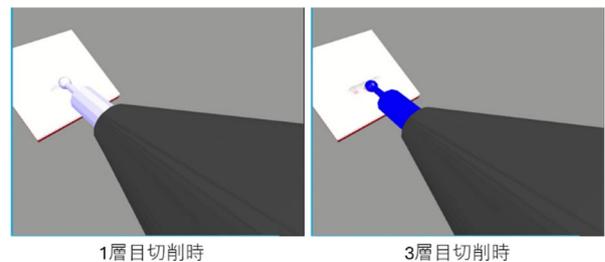


図 6 切削位置に応じた提示画像の変化

の球状の先端部を持つ医療用刃を取り付けた。模擬骨には厚さ3mmの板を使用し、ドリルの中心軸から30度傾けて配置した。模擬骨の3D形状データは3層で構成される直方体の仮想物体とした。1層目は切削作業において周辺組織を損傷する危険性が小さい領域、2層目は貫通までの距離が小さく切削に注意を要する領域として、仮想刃で除去可能なボクセルで表現した。3層目は貫通の危険性があり切削を避ける領域に設定し、単一の直方体で描写した。シミュレーション画像内では切削領域に応じて異なる色でドリル先端を描写した。さらに、力触覚伝達についても切削領域に応じて力触覚増幅率と仮想剛性を変化させた(図4)。

(2) 結果

対象物の認識における先端位置の軌跡と収集した接触点の結果を図5に示す。実験では対象物表面の切削により4つの接触点を記録した。3つの接触点を選択して法線と重心を求めることで、切削シミュレーション内で使用する仮想物体の位置と回転角度を得た。

視覚、力触覚情報拡張下の切削における仮想空間画像を図6に示す。対象物認識で得られた情報に基づいて仮想空間の画像内に仮想物体が表示された。切削領域に応

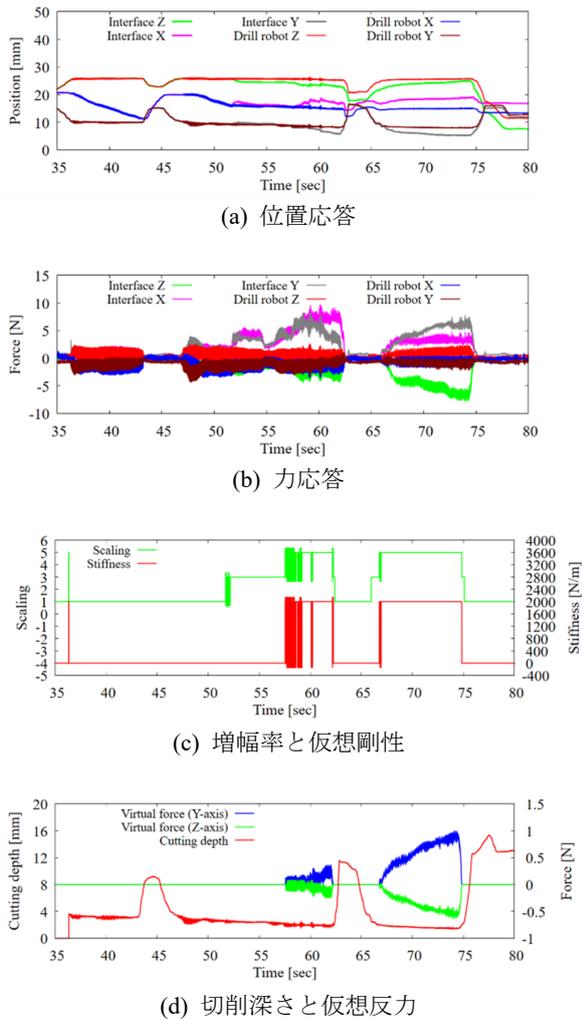


図 7 視覚、力触覚情報拡張子下における力触覚情報、力触覚伝達のパラメータ、切削深さ

じてドリル先端の描写が変化することで、制御器のパラメータの変化が可視化された。

視覚、力触覚情報拡張子下の切削における力触覚情報、力触覚伝達のパラメータ、切削深さを図 7 に示す。約 50 秒経過時までは 1 層目を切削しており、ドリルロボットが得た力触覚情報はハプティックインターフェースで再現された。その後、仮想刃が 2 層目に達すると増幅率が増加し、力触覚情報が増幅されて操作者に伝達された。そして、約 57 秒経過時から刃が 3 層目に達すると増幅率がさらに増加し、かつ仮想反力が付加されて大きな反力が提示された。

3. 考察及び今後の展望

(1) 考察

切削深さは仮想ドリル刃の中心から仮想物体 2 層目と 3 層目の境界までの距離であり、実験における最小値は約 2mm となった。ドリル刃の半径が 2mm であることから、ドリル刃が仮想物体の 2 層目と 3 層目の境界近辺から大きく侵入しなかったことが確認できる。一方、刃が 3 層目に達して力触覚情報の増幅と付加がおこなわれた

際には大きな反力が発生しており、力触覚情報を拡張することで 3 層目における切削が抑制された。

実験結果において発生した増幅率のチャタリングは単一の閾値で切削領域を判定したことが原因として挙げられる。切削深さが減少する方向と増加する方向で異なる閾値を用いることでチャタリングを回避することが可能であると考えられる。

(2) 今後の展望

本研究では条件の単純化のために平らな表面を持つ物体を切削対象物としたが、手術で切削する骨は曲面を持つ。したがって、力触覚情報を用いた切削対象物の認識では、より複雑な形状を持つ物体に対応する必要がある。また、回転する刃をプローブとして対象物認識をおこなったが、刃が対象物を削ることで実際の物体と認識された物体の情報に差が生じる可能性がある。したがって、切削力の解析による精度向上について検討する必要がある。

【参考文献】

1. T. Osa, C. F. Abawi, N. Sugita, H. Chikuda, S. Sugita, H. Ito, T. Moro, Y. Takatori, S. Tanaka, and M. Mitsuishi, *in Proc. 2014 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Hong Kong, China, 290–296(2014)
2. K. Yamanouchi, S. Takano, Y. Mima, T. Matsunaga, K. Ohnishi, M. Matsumoto, M. Nakamura, T. Shimono, and M. Yagi, *Sci. Rep.*, 13, 1–11(2023)
3. T. Matsunaga, S. Takano, T. Shimono, K. Ohnishi, M. Yagi, and M. Nakamura, *in Proc. 2025 IEEE Int. Conf. Mechatron.*, Wollongong, Australia, (2025)
4. T. Matsunaga, S. Takano, T. Shimono, K. Ohnishi, M. Yagi, and M. Nakamura, *in Proc. 18th IEEE Int. Workshop Adv. Motion Control*, Kawasaki, Japan, 217–222(2024)
5. KISTEC, “プロジェクト研究概要集 2024”, KISTEC, “https://www.kistec.jp/kistec-manage/wp-content/uploads/propj_2024_all.pdf”

貫通検知機能を有する整形外科用力触覚ドリルの開発

次世代医療福祉ロボットグループ

高野 俊也

1. はじめに

整形外科手術では脊椎切削時に医療用ハンドドリルを用いて切削を行う。しかしながら、脊椎の中には脊髄が通っており、傷付けると下半身不随等の後遺症を起こす場合がある。そのため、脊椎切削時には医師は脊髄を損傷しないよう、慎重に手術を進める必要がある。現在では、手の感覚と目視により医師の判断で切削を止めているが、手に力が入ってしまい手の感覚を感じにくくなってしまいうなど困難が伴う。

このような背景から、鋭敏に力触覚を伝え、かつ脊椎貫通時に自動停止する機能を搭載した、高い安全性を有するドリルの開発が期待されている。

ロボット技術を応用したドリル研究は数多く行われており、貫通停止の試みも行われている。Lee らは、推力、回転トルクを用いて閾値を設けることによって貫通停止を行うドリルシステムを開発している[1]。長らは、加速度やドリルの回転速度などから SVM(Support Vector Machine) を用いた整形外科用ドリルによって、模擬骨を用いて貫通停止を行った[2]。Diaz らは、センサを用いず、位置制御での誤差を基に貫通の検知を行い、豚の骨を用いて貫通実験を行った[3]。Aziz らは、センサで力を測定して、その力の変位分を用いることで貫通の検知ができることを示した[4]。

しかしながら、これらの研究はロボットによる切削であり、医師の操作によるものではない。そのため、従来の手術方法と異なり、使用する場合はトレーニングが必要となる。

よって本研究では、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・スレーブ一体型の整形外科用ハンドドリルを開発する。

1. 1. 力触覚伝達

マスタ・スレーブシステムにおける力触覚の伝達には加速度制御に基づくバイラテラル制御を使用する。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の伝達を実現している [5, 6]。バイラテラル制御の制御目標は式(1), (2)となる。式(1)よりマスタの位置 X_m とスレーブの位置 X_s を一致させ、式(2)よりマスタに加わる反力 F_m とスレーブに加わる反力 F_s に作用反作用の法則を成立させる。式(1), (2)を同時に満たすことでマスタ・スレーブ間に力触覚が伝達される。

$$X_m - X_s = 0 \quad (1)$$

$$F_m + F_s = 0 \quad (2)$$



図 1. マスタ・スレーブ一体型ドリル

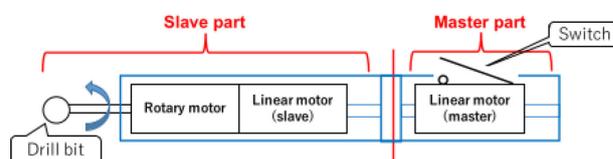


図 2. マスタ・スレーブ一体型ドリルの概略図

バイラテラル制御では各モータの位置及び力を高精度に制御する必要があるため、外乱オブザーバ(DOB)を用いたロバストな加速度制御を行う[7]。

1. 2. マスタ・スレーブ一体型ドリル

図 1, 2 に開発したマスタ・スレーブ一体型ドリルの構造を示す。2つの直動モータを一直線状に配置し、スイッチを搭載した持ち手側をマスタ、ドリル刃と回転モータを搭載した側をスレーブとして、マスタ・スレーブ間でバイラテラル制御を行う。これによりスレーブ側のドリルで削った感覚がマスタ側の手元に伝達される。ドリル刃と回転モータはスレーブ側の直動モータに取り付けており、直動モータと共に前後に動作を行う。

ドリル刃はマスタ側のスイッチを押している間回転を行う。これは従来のハンドドリルが手元のスイッチを押すことで回転する構造となっているため、同様の操作となるようスイッチでの操作とした。

2. 実験と結果

2. 1. 実験内容

開発したマスタ・スレーブ一体型ドリルについて、以下の実験を行った。

- (1) バイラテラル制御によるマスタ・スレーブ間の力触覚伝達の確認
- (2) 木材切削による貫通時の動作確認及び貫通検知条件の設定
- (3) 貫通検知及び停止動作の確認

表 1. バイラテラル制御のパラメータ

Sampling time [ms]	0.1
DOB cut-off frequency [rad/s]	150
Position gain K_p [$1/s^2$]	6400
Velocity gain K_v [$1/s$]	160
Force gain K_f [s^2/Nm]	0.8

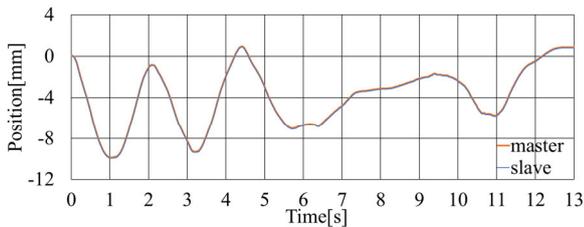


図 3. 実験〈1〉の位置応答

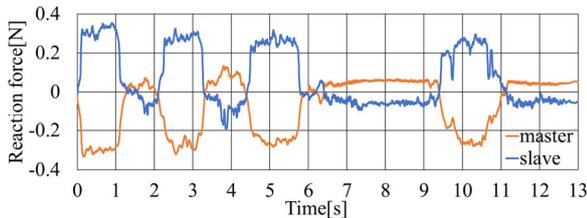


図 4. 実験〈1〉の力応答

また、バイラテラル制御で設定した各パラメータを表 1 に示す。

2. 2. 実験結果

〈1〉バイラテラル制御によるマスタ・スレーブ間の力触覚伝達の確認

この実験ではマスタ・スレーブ間にバイラテラル制御を適用し、実際に動作した際のバイラテラル制御の検証を行った。マスタ側を操作して、マスタ側の直動モータに対するスレーブ側の直動モータの追従性を確認した。なおこの実験では回転モータは動作させずに行った。

図 3, 4 にマスタ・スレーブの直動モータの位置と反力の結果を示す。図 3 では 2 つのモータの位置が追従しており、図 4 では作用反作用の法則が成立していることがわかる。よって式(1)(2)を満たしていることから、バイラテラル制御により力触覚伝達を実現していることが確認できた。

〈2〉木材切削による貫通時の動作確認及び貫通検知条件の設定

この実験では木材を切削し、貫通時の位置と反力の推移を測定した。図 5 に実験環境の概略図を示す。木材とドリルは固定し、ドリルを木材に対し垂直に当てながらマスタ側を操作して切削を行った。木材は厚さ 5mm のヒノキを使用した。

図 6, 7 に木材切削時のマスタ・スレーブの位置と反力

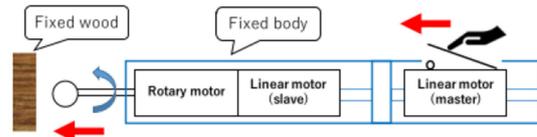


図 5. 実験〈2〉〈3〉での実験環境

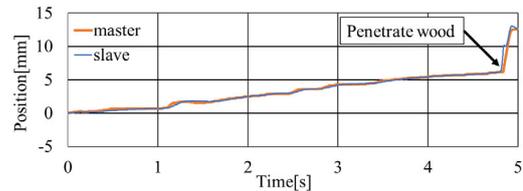


図 6. 実験〈2〉の位置応答

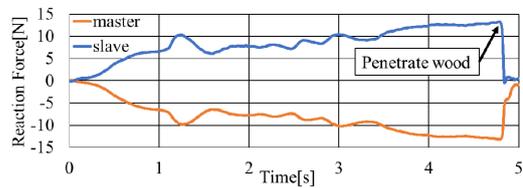


図 7. 実験〈2〉の力応答

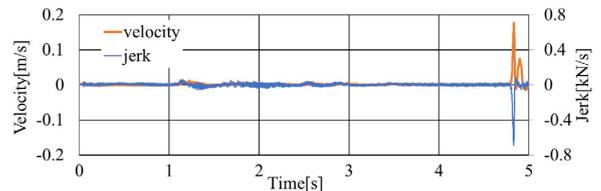


図 8. 実験〈2〉の位置、反力の微分応答

の結果を示す。切削中は反力が徐々に増加したが、貫通時は位置及び反力が急激に変化した。このことから、貫通検知には位置及び反力の変化を観測することが有効と考えられる。

変化量を観測するため、位置及び反力の微分(Velocity, Jerk)を用いる。図 8 に位置と反力の結果を微分したグラフを示す。切削中においては 0 付近を示しているが、貫通時に 2 つの値がピーク値を示した。よって、それぞれに閾値を設け、閾値を超えた時点を通過と判断することで、検知が可能である。

〈3〉貫通検知及び停止動作の確認

実際に位置と反力の微分を用いて貫通が検知可能か検証を行った。実験〈2〉の結果より、以下のいずれかの条件を満たした際に装置側に貫通と判断させた。

- 位置の微分値(Velocity)が 0.04m/s 以上
- 反力の微分値(Jerk)が-0.2kN/s 以下

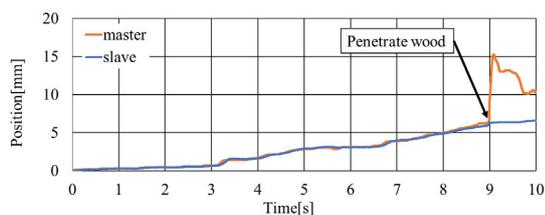


図 9. 実験〈3〉の位置応答

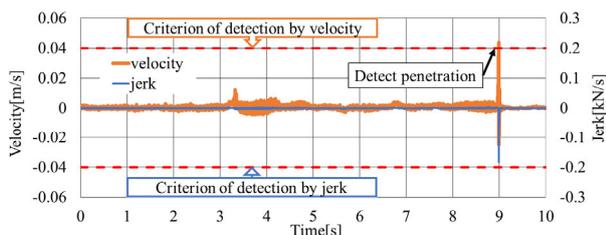


図 10. 実験〈3〉の位置、反力の微分応答

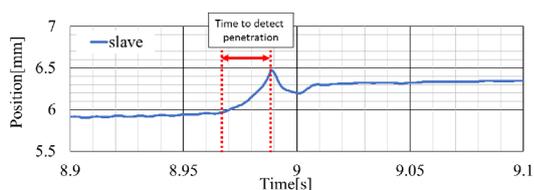


図 11. 実験〈3〉貫通時のスレーブの位置応答拡大図

切削中はマスタ・スレーブ間でバイラテラル制御を適用し、貫通後はスレーブ側の直動モータは位置制御に切り替え、マスタ側の直動モータは制御を行わずフリー状態とした。また、回転モータは貫通検知後停止させた。実験〈2〉と同様にドリルと木材を固定して実験を行った。

図 9 にマスタ・スレーブの位置応答を示す。貫通時にマスタのみ位置が急激に増加し、スレーブの位置が一定となっている。すなわちドリルが貫通を検知して、スレーブ側の直動モータが位置制御に切り替わり、ドリルが停止したことを示している。

図 10 に位置、反力の微分の結果を示す。貫通時にいずれの値もピークを示しており、位置の微分値は 0.044m/s 、反力の微分値は -0.180kN/s を示した。よってこの実験では位置の微分により貫通を検知した。

図 11 に貫通時のスレーブの位置応答の拡大図を示す。

グラフより、位置が急激に増加し始めてから停止するまでの時間は 0.02s かかり、停止するまでに進んだ距離は 0.49mm であった。よって、位置と反力の微分を用いることで貫通を検知することができ、かつ高速に停止が可能であることが確認できた。

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・スレーブ一体型ドリルを用いた実験において、マスタ・スレーブ間でバイラテラル制御を適用し、力触覚が伝達されることを確認できた。また、スレーブ側の直動モータの位置と反力の変位を観測することで、装置が貫通を検知し、自動停止することを確認できた。

3. 2. 今後の展望

今回木材を用いた貫通検知実験では、貫通を検知するための閾値を切削対象の硬さに応じて適宜設定している。今後は切削時に切削対象の硬さを推定し、閾値を自動的に設定することを計画している。

本研究は、AMED の課題番号 JP20im0210818 の支援を受けた。ここに謝意を表す。

【参考文献】

1. Wen-Yo Lee, Ching-Long Shih, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9, No. 1, pp. 20–29, 2004.
2. Takayuki Osa, Christian Farid Abawi, Naohiko Sugita, Hirotaaka Chikuda, Shurei Sugita, Takeyuki Tanaka, Hirofumi Oshima, Toru Motro, Sakae Tanaka, Mamoru Mitsuishi, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 6, pp. 3018–3027, 2015.
3. M. Louredo, I. Diaz and J. J. Gil, 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), pp. 1155–1160, 2012.
4. Mohd Hazny Aziz, Muhammad Azmi Ayub, Roseleena Jaafar, Procedia Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 352–359 2012.
5. Kouhei Ohnishi, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 11, No. 4, pp. 486–493 1993.
6. Wataru Iida, Kouhei Ohnishi, The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control - AMC'04. pp. 217–222 2004.
7. Kouhei Ohnishi, Masaaki Shibata, Toshiyuki Murakami, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, pp. 56–67, 1996.

粘性推定に基づいた貫通検知機能を有する

力触覚外科ドリルの開発

「次世代医療福祉ロボット」グループ
高野 俊也

1. はじめに

整形外科手術の内、特に脊髄周辺の切削を行う脊椎手術では、脊髄を損傷しないよう慎重な操作が求められる。しかしながら、脊椎の貫通は術者の手先の感覚のみで判断を行う必要があるため、熟練した操作技術と経験が求められる。脊髄の損傷は重大な合併症を引き起こすため、術者への負担が大きい[1][2]。

そこで近年では脊椎の貫通を装置側が検知し、自動で停止することで脊髄の損傷を防ぐ外科ドリルの研究が進められている。主に回転モータのトルクの変動や、力センサにより測定したドリルの押し込み力の変動から貫通を検知する手法が提案されている[3]-[6]。しかしながらこれらの手法は予め脊椎の硬さに応じたパラメータの調整が必要であることから、患者ごとに異なる脊椎の硬さに対し柔軟に対応することが出来ない。

(1) 力触覚外科ドリル

本研究では粘性推定を用いて異なる硬さの骨に対して貫通を検知、自動停止可能な力触覚外科ドリルを開発する。切削中の力、切削速度情報から骨の粘性を算出し、貫通検知に用いるパラメータの閾値を粘性に応じて変動させることで、硬さに依らず貫通を検知することが可能となる。

図1、2に力触覚外科ドリルの外観と構造図を示す。ドリルはマスタ部とスレーブ部で構成される。スレーブ側は直動モータとドリル刃を回転させる回転モータを有し、マスタ側は直動モータと回転モータのオンオフを行うスイッチを有する。術者はマスタ側を操作し脊椎の切削を行う。

図3に各動作の模式図を示す。図3(a)は骨の切削時の動作を表す。切削時においては、マスタとスレーブはバイラテラル制御により同期して動作を行う。そのため、術者がマスタ側を前方に動かすことでスレーブ側のドリル刃が連動して前進し骨の切削を行うことが可能となる。図3(b)はドリルが貫通を検知した際の動作を表す。貫通を検知した際にはマスタ、スレーブ間のバイラテラル制御による同期を停止し、スレーブ側のみ位置制御に切り替える。位置制御ではドリルの刃を引き込む方向に動作を行うことで脊髄の損傷を防ぐ。またドリルの回転も自動で停止される。



図1 力触覚外科ドリル

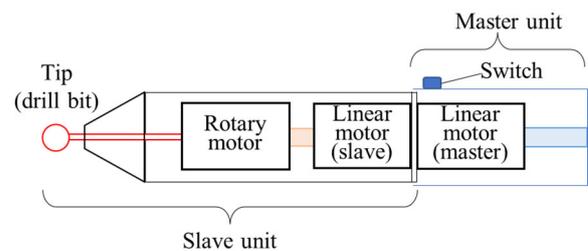


図2 力触覚外科ドリル模式図

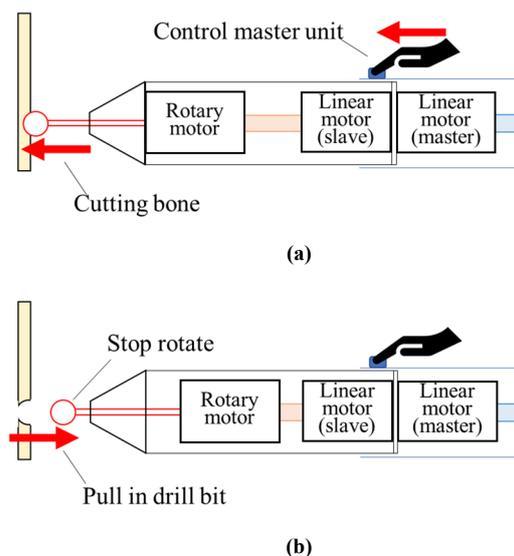


図3 各動作模式図 (a)切削時 (b)貫通検知時

(1)-1 力触覚情報の伝達による切削動作

脊椎の切削においては2つの直動モータにバイラテラル制御により制御を行う。バイラテラル制御は2つのモータ間で作用反作用の法則を成立させることで、力触覚

の伝達を実現する[7]。これにより術者はスレーブ側のドリル刃に加わる振動や切削抵抗をマスタ側で感じる事が出来る。そのため術者は従来と同様の操作感で切削を行うことが可能となる。

(1)-2 貫通検知手法

先行研究において、スレーブ側直動モータの位置と力の変位を観測することで貫通を検知可能であることが提案されている[8]。切削時には直動モータに骨からの反力が加わるが、貫通時にはその反力が減少する。加えて反力の減少に伴い、刃先の位置が急激に前進する。すなわち、貫通時には直動モータの位置と力の変位量が大きく生じることを示している。よって、式(1)、(2)が同時に満たされた際に装置側で貫通と認識することで骨の貫通を検知することが可能となる。

$$\dot{x}_{\text{slave}} > \dot{x}_{\text{threshold}} \quad (1)$$

$$\dot{F}_{\text{slave}} < \dot{F}_{\text{threshold}} \quad (2)$$

\dot{x}_{slave} , \dot{F}_{slave} は直動モータの位置、力の変位量を表す。 $\dot{x}_{\text{threshold}}$, $\dot{F}_{\text{threshold}}$ は閾値を表す。各変位量は式(3)、(4)により求められる。

$$\dot{x}_{\text{slave}} = x_{\text{slave}} \cdot (s \cdot g_{\text{pene}}) / (s + g_{\text{pene}}) \quad (3)$$

$$\dot{F}_{\text{slave}} = \hat{F}_{\text{slave}} \cdot (s \cdot g_{\text{pene}}) / (s + g_{\text{pene}}) \quad (4)$$

g_{pene} はカットオフ周波数を表し、 x_{slave} , \hat{F}_{slave} はスレーブ側直動モータの位置と反力推定値を表す。直動モータの位置情報はエンコーダより取得する。また、反力推定値は反力推定オブザーバ(RFOB)を用いて推定される[7]。

先行研究においては各閾値を骨の硬さに応じて予め固定値として設定されていた。仮に柔らかい骨の場合、少ない力で切削が可能のため、 \hat{F}_{slave} は小さい値となる。そのため、貫通時の \dot{x}_{slave} , \dot{F}_{slave} の値が小さくなることから、貫通を検知するためには閾値を低い値に設定する必要がある。また、術者の力加減によっても変動するという問題がある。

実際の脊椎の硬さは患者により異なるため、逐一パラメータの調整を行うことは適切ではない。そこで、粘性推定を用いてパラメータの自動調整を行うことを提案する。粘性の推定には直動モータの速度と反力推定値を用いて式(5)、(6)により計算を行う。

$$D_{\text{pene}} = \hat{F}_{s,\text{LPF}} / \dot{x}_{s,\text{pene}} \quad (5)$$

$$\hat{F}_{s,\text{LPF}} = \hat{F}_{\text{slave}} \cdot g_{\text{pene}} / (s + g_{\text{pene}}) \quad (6)$$

$\hat{F}_{s,\text{LPF}}$ は反力推定値にカットオフ周波数 g_{pene} のローパスフィルタ(LPF)を適用した値である。実際の粘性はドリルの刃と骨との接触面積を考慮する必要があるが、切削時の接触面積は一定でないため、ここでは反力と速度のみを用いて推定を行う。粘性推定値 D_{pene} を用いて各閾値を式(7)、(8)で定義する。

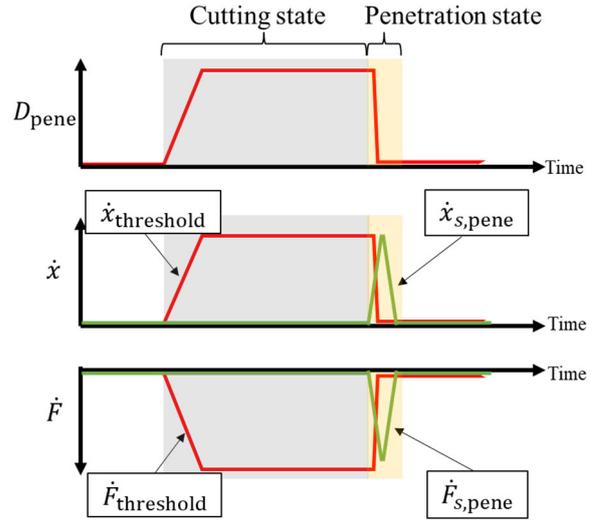


図4 粘性推定値、位置変位量、力変位量の推移模式図

$$\dot{x}_{\text{threshold}} = \alpha \cdot D_{\text{pene}} \quad (7)$$

$$\dot{F}_{\text{threshold}} = \beta \cdot D_{\text{pene}} \quad (8)$$

α, β は各閾値を算出する比例定数であり、装置の慣性、摩擦等によって決定される。

図4に粘性推定値と各閾値の推移模式図を示す。切削中は骨の硬さに応じた反力が生じ、切削速度は遅くなる。そのため、式(5)より粘性推定値 D_{pene} が大きく算出され、各閾値も増加する。その後ドリルが骨を貫通した際には、反力が減少し、刃先が急激に前進する。すなわち D_{pene} が減少するため、各閾値も減少する。対して直動モータの位置と力の変位量は増加するため、貫通時に各信号が交差する。すなわち式(1)、(2)を満たすため、貫通を検知することが可能となる。仮に柔らかい骨を切削した場合においても、少ない力、又は早く切削を行うことが可能なため、粘性推定値が小さく算出される。そのため各閾値が低く設定されることから、貫通時の小さい位置と力の変位量においても貫通が検知可能となる。よって粘性推定を用いることで閾値を自動調整し、異なる硬さの骨において貫通を検知することが可能となる。

2. 実験と結果

粘性推定を用いて貫通を検知可能であることを模擬骨を用いた実験と豚の脊椎を用いた実験において検証を行う。

(1) 模擬骨を用いた貫通検知実験

表1に使用した模擬骨の骨密度を示す。模擬骨は硬質発泡ポリウレタンで構成されており、皮質骨と海綿骨の2層構造となっている。各模擬骨の名前は pound per cubic foot (PCF)の数値を表しており、大きい数値程硬い骨であることを示している。「40-20」の模擬骨は平均的な人の骨の硬さを模しており、「30-15」及び「20-10」は骨粗鬆症の骨の硬さを模している。各模擬骨は皮質骨が3mm、海綿骨が5mmの厚さで構成されている。

表 1 各模擬骨密度

Bone model	Density [kg/m ³]	
	Cortical bone	Cancellous bone
40-20 (human bone)	560.8±56.2	320.4±31.8
30-15 (osteoporosis bone)	480.5±48.0	240.0±24.0
20-10 (osteoporosis bone)	320.4±31.8	160.0±16.0

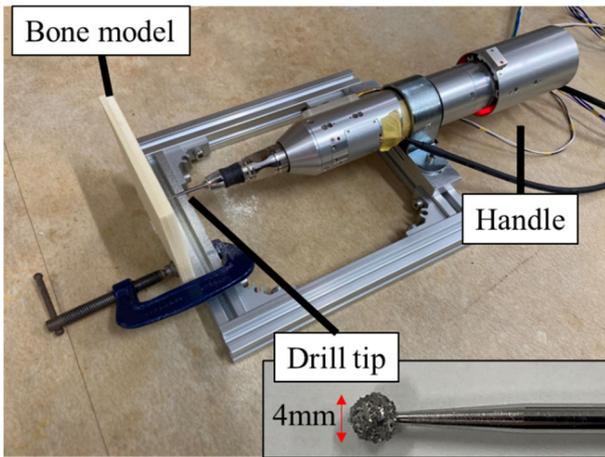


図 5 模擬骨を用いた貫通検知実験環境

表 2 制御パラメータ

Parameter	Variable	Value
Sampling time [s]	Δt	0.4×10^{-3}
Position gain [s ⁻¹]	K_P	6400
Velocity gain (linear motor) [s ⁻²]	K_V	160
Velocity gain (rotary motor) [s ⁻²]	K_{Vr}	200
Force gain	K_F	1
Rotation speed [rpm]	$\dot{x}_{r,cmd}$	30000
Cutoff frequency of DOB and RFOB [Hz]	g_{dis}	150
Cutoff frequency of pseudo differential [Hz]	g_{diff}	300
Cutoff frequency of pseudo differential for estimate penetration signals [Hz]	g_{pene}	30
Proportional constant for estimated $\dot{x}_{threshold}$	α	1.5×10^{-5}
Proportional constant for estimated $\dot{F}_{threshold}$	β	-1.5×10^{-3}

(1)-1 実験方法

図 5 に実験環境を示す。実験ではアルミフレームにドリル及び模擬骨を固定している。ドリルの刃には 4mm 径のダイヤモンドバー(Medtronic 10BA40DC)を用いた。操作者はマスタ側を操作し、切削を行った。各模擬骨を三回ずつ切削し、正常に貫通を検知した回数の測定を行った。

また、比較のため先行研究の手法を用いて同様の実験を行った。すなわち各閾値を $\dot{F}_{threshold} = -10.0$, $\dot{x}_{threshold} = 2.0$ と固定し、各模擬骨において貫通を検知可能か検証を行った。この値は「40-20」の模擬骨を基に設定した。各制御パラメータを表 2 に示す。ここで α, β

表 3 模擬骨を用いた貫通検知実験結果

Bone model	Trial	Number of detecting penetration	
		Proposed method	Previous method
40-20	3	3 (100%)	3 (100%)
30-15	3	3 (100%)	1 (33%)
20-10	3	3 (100%)	1 (33%)

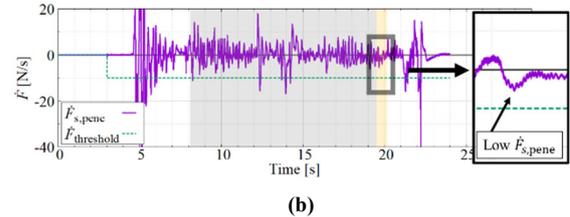
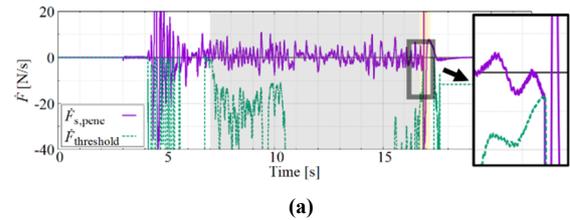


図 6 模擬骨「20-10」切削時の反力変位量と閾値の推移結果 (a)提案手法 (b)従来手法

は実験的に設定した値を用いた。

(1)-2 実験結果

表 3 に実験結果を示す。提案手法の粘性推定を用いた貫通検知においてはすべての模擬骨において正常に貫通を検知出来ている。対して、従来手法の固定の閾値を用いた貫通検知においては骨密度の低い模擬骨において貫通を検知出来なかった。これは閾値を「40-20」の模擬骨を基に設定したため、より骨密度の低い模擬骨では貫通時の反力の変位量が小さく、式(2)を満たすことが出来なかったためである。

図 6 に模擬骨「20-10」を切削した際の反力の変位と閾値の推移を示す。図 6(a)の提案手法においては、貫通時に閾値が減少し波形が交差していることから、正常に貫通を検知出来ている。対して図 6(b)の従来手法においては、貫通時の \dot{F}_{pene} が小さく、閾値を超過していないことがわかる。すなわち、式(2)を満たすことが出来ず、貫通を検知することが出来なかったことを示している。よって、粘性推定を用いた貫通検知は異なる硬さの骨における貫通検知に有効であることが示された。

(2) 豚の脊椎を用いた動物実験

動物実験では豚の脊椎を用いて検証を行った。なおこの動物実験は慶應義塾大学医学部の倫理委員会の承認を得て行っており、倫理委員会の定める規則に従って飼育された動物を使用している。(承認番号:18047)

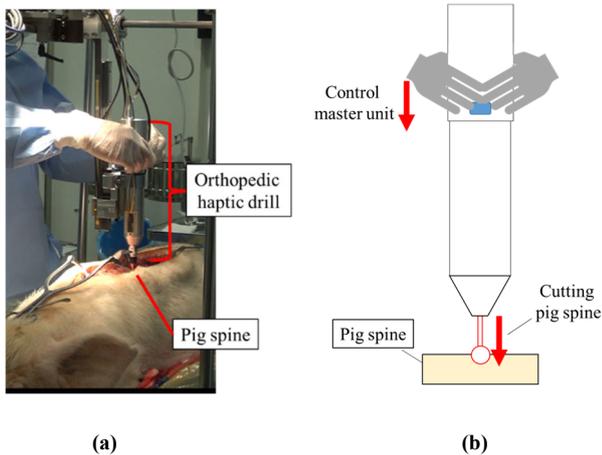


図7 動物実験時の環境及び模式図 (a) 実験環境 (b) 模式図

表4 各術者における豚の脊椎切削時の実験結果

Surgeon	Trial	Number of detecting penetration
A	3	3 (100%)
B	3	3 (100%)
C	3	3 (100%)

(2)-1 実験方法

図7に実験環境と模式図を示す。ドリルは豚の脊椎の真上に配置されるようアルミフレームを用いて固定されている。術者はドリルのマスタ部を操作し、豚の脊椎を垂直に切削を行う。本実験では3名の整形外科医により行われ、術者毎の力加減に依らず貫通が検知可能か検証を行った。貫通検知の成否については、切削後に切削孔を目視で確認し、貫通している、かつ脊髄の損傷が無かった場合に正常に貫通を検知したと判定した。各制御パラメータ及びドリル刃は模擬骨での実験と同等である。

(2)-2 実験結果

表4に実験結果を示す。結果よりすべての術者において正常に貫通を検知出来ていることが確認された。すなわち、提案手法により、術者に依らず貫通を検知可能であることが示された。

3. 結論及び今後の課題

本研究では粘性推定を用いて、脊椎の貫通を検知し自動で停止する力触覚外科ドリルを提案した。切削時の反力と切削速度から骨の粘性を推定し、推定値に応じて閾値を自動で調整することで、骨の硬さに依らず貫通が検知可能となる。これにより、従来手法で行っていた、手動でのパラメータ調整が不要となり、患者ごとに異なる脊椎の硬さに対し有効であることが示された。

なお本研究で制作したドリルは実際の外科ドリルと比較し、著しく大きいため、小型化が必須である。これは使用するモータ及び構造の最適化を行い改善していく予定である。また、動物実験ではドリルを固定して切削を行っていたが、実際の手術ではドリルを手で把持して切

削を行っている。その場合、手の振動やドリルの姿勢による影響を受けるため、ドリルを手で把持して切削を行った場合の貫通検知アルゴリズムの構築が必要である。

謝辞

本研究はAMED 課題番号 JP22hc2202014 の支援を受け実施された。

【参考文献】

- 1.P. Guerin, A. Benchikh., E. Fegoun, I. Obeid, O. Gille, L. Lelong, S. Luc, A. Bourghli, J. C. Cursolle, V. Pointillart, and J. Vital, *Injury*, 43(4), 397-401(2012)
- 2.Y. R. Rampersaud, E. R. P. Moro, M. A. Neary, K. White, S. J. Lewis, E. M. Massicotte, and M. G. Fehlings, *Spine*, 31(13), 1503-1510(2006)
- 3.T. Osa, C. F. Abawi, N. Sugita, H. Chikuda, S. Sugita, T. Tanaka, H. Oshima, T. Moro, S. Tanaka, and M. Mitsuishi, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(6), 3018-3027(2015)
- 4.W. Lee, C. Shih, and S. Lee, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9(1), 20-29(2004)
- 5.W. Lee, and C. Shih, *Mechatronics*, 16(2), 73-84(2006)
- 6.M. H. Aziz, M. A. Ayub, and R. Jaafar, *Procedia Engineering*, 41,352-359(2012)
- 7.T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40(2), 259-265(1993)
- 8.K. Yamanouchi, S. Takano, Y. Mima, T. Matsunaga, K. Ohnishi, M. Matsumoto, M. Nakamura, T. Shimono, and M. Yagi, *Scientific Reports*, 13(1),(2023)

リアルハプティクスを用いた貫通検知及び自動停止機能を有する外科手術用力触覚パワーツールの開発

「次世代医療福祉ロボット」グループ
高野 俊也

1. はじめに

整形外科手術では通常、外科ドリルを用いて骨の切削を行う。しかし骨の周囲には血管や神経網が通っており、術者はこれらの組織に触れないよう切削を行う必要がある。また、骨の貫通は術者の手先の感覚のみで判断を行う必要があるため、熟練した操作技術と経験が求められる。特に神経の損傷は重大な合併症を引き起こすため、術者への負担が大きい[1][2]。

そこで近年では骨の貫通を装置側が検知し、自動で停止することで組織の損傷を防ぐ外科ドリルの研究が進められている。主に回転モータのトルクの変動や、力センサにより測定したドリルの押し込み力の変動から貫通を検知する手法が提案されている[3]-[6]。

(1) 外科手術用力触覚パワーツール

本研究では主に骨の穿孔作業に用いられる外科用ドリルであるパワーツールをベースとし、同等のトルクを出力可能な力触覚パワーツールを開発した。

図1に力触覚パワーツールの外観と模式図を示す。ドリルは直動モータと回転モータを有し、刃の回転動作と直動動作を実現する。また回転モータはギア比 1:3.13 のタイミングベルトを介して刃を回転させる構造となっており、パワーツールと同等のトルクを出力可能である。

貫通の検知には切削中の直動モータの力と位置の変位を用いて観測を行う[7][8]。切削時には骨からの反力が直動モータに加わるが、貫通時にはその反力が減少する。加えて反力の減少に伴い、刃先の位置が急激に進ずる。すなわち、貫通時には直動モータの位置と力が大きく変位することから、この2つの変化を観測することで骨の貫通を装置側で検知可能となる。貫通検知後は刃先を引き込むように直動モータに制御を加える。これにより貫通時に刃先が侵入して周囲の組織を損傷することを防ぐことが可能となり、安全性が向上する。

(2) 制御手法

本装置を用いた貫通検知の検証では別途用意した直動モータ(マスタ側)と装置内の直動モータ(フォロワ側)間でバイラテラル制御を行う。図2に本制御システムの模式図を示す。操作者はマスタ側の直動モータを用いて、フォロワ側の直動モータの先に取り付けた刃を操作し、骨の切削を行う。これにより操作者は切削時の抵抗を感じ

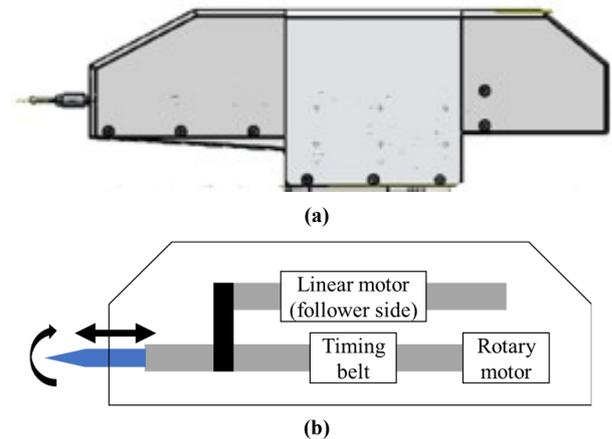


図1 力触覚パワーツール (a)外観 (b)模式図

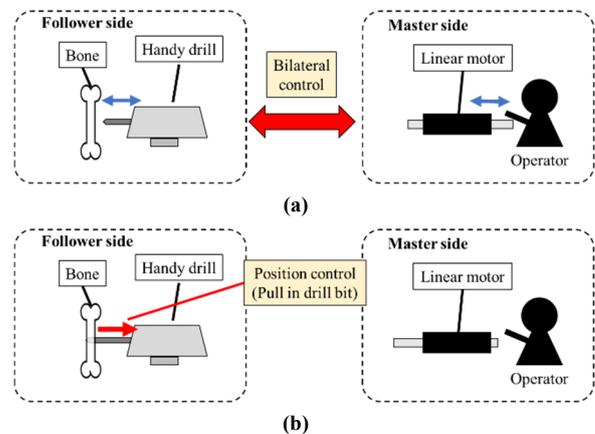


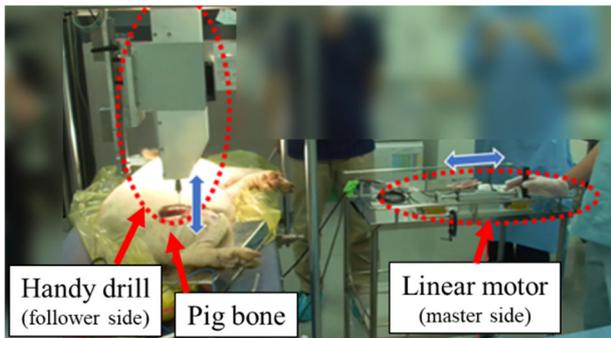
図2 力触覚パワーツール制御システム模式図 (a)バイラテラル制御による切削(貫通検知前) (b)位置制御による刃先の引込み(貫通検知後)

ながら切削を行うことが可能となる。貫通検知後は、2つのモータ間のバイラテラル制御を停止し、即座にフォロワ側を位置制御に切り替え、刃先を引き込むように位置指令を加える。これにより、貫通後の刃先の侵入を防ぐことが出来るため、安全性の向上が可能となる。

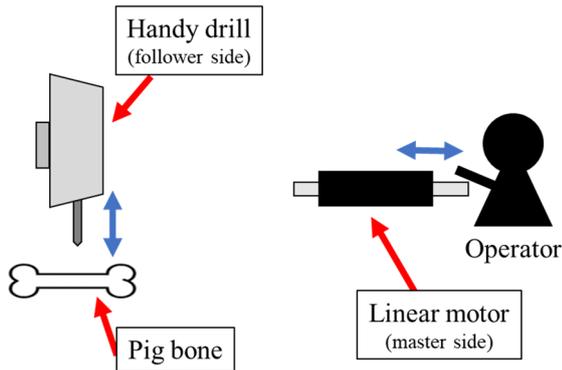
2. 実験と結果

(1) 実験方法

自動停止機能により安全性が向上することを確認する



(a)



(b)

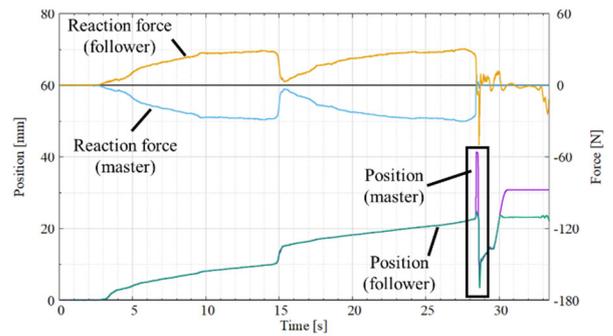
図3 豚の大腿骨を用いた切削実験 (a)実験環境 (b)模式図

ため、豚の大腿骨を用いて検証を行った。図3に実験環境とその模式図を示す。ドリルは施術台に設置した支柱を用いて、豚の大腿骨の真上に垂直向きに固定した。術者はマスタ側の直動モータを操作し、ドリルを前後させて切削を行う。検証では装置が貫通を検知して自動で停止をした場合と、自動停止機能を用いず、術者が貫通を検知して手で切削を止めた場合において、貫通してから停止するまでに要した時間と、刃先の侵入距離の比較を行った。ドリルの刃は直径2mmのキルシュナー鋼線を使用した。また、自動停止機能は貫通を2回検知した場合に実行するように設定した。これは、骨の構造が外周に硬い皮質骨と内部に脆い海綿骨の2層で構成されており、骨を貫くように切削を行った場合、硬い皮質骨を2回貫通することから、貫通動作が2回発生するためである。

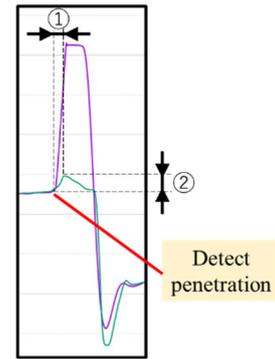
なおこの動物実験は慶應義塾大学医学部の倫理委員会の承認を得て行っており、倫理委員会の定める規則に従って飼育された動物を使用している。(承認番号:18047)

(2)実験結果

大腿骨切削時の位置、力応答の結果を図4に示す。切削中、マスタフォロワ間で位置が追従し、力応答値は作用反作用の法則が成立していることから、切削中はバイラテラル制御により力触覚情報が術者に伝達された。図4(a)より、約15秒経過時に位置が急激に増加し、反力が急激に減少した。これは外周の皮質骨を貫通し、内部に刃先が侵入したことを表している。そして約28秒経過時に再度位置と反力が急激な変位が発生した。これは反対



(a)



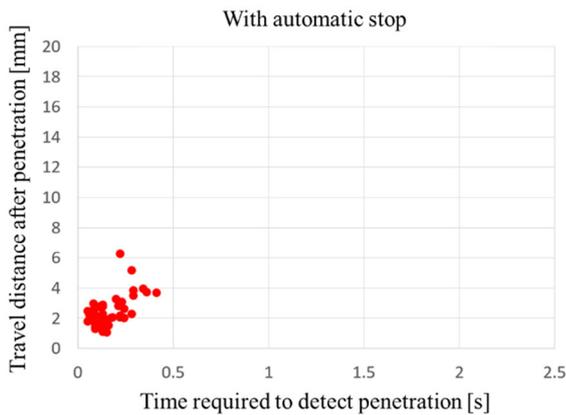
(b)

図4 大腿骨切削実験結果 (a)位置、力応答 (b)自動停止地点拡大図

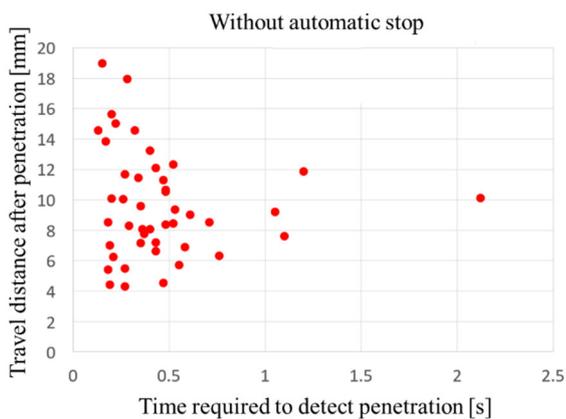
側の皮質骨を貫通し、骨を完全に貫いたことを示している。このとき装置側で2回目の貫通を検知したため、フォロワ側のモータが位置制御に切り替わり、刃先の引込みを行った。図4(b)に貫通時の位置応答結果の拡大図を示す。図より貫通後のフォロワ側の位置がわずかにしか増加していないことが確認できる。すなわち装置側で貫通を正常に検知し、位置制御による引込み動作により、刃先の侵入を防いだことを示している。

図4(b)の貫通時の位置応答の波形を用いて、貫通後に刃先の引込みを開始するまでに要した時間(図4(b)の①)と引込みを開始するまでに進んだ距離(図4(b)の②)の測定を行った。この測定を、装置による自動停止を行った場合と、自動停止を用いずに術者が貫通を検知して手で切削を止めた場合の結果に行い集計を行った。

図5に集計結果を示す。図5(a)が装置による自動停止有りの結果を表し、図5(b)が自動停止機能を用いず、術者が貫通を検知した際に切削を停止した場合の結果を表す。グラフより、装置による自動停止を行った方が検知時間及び、貫通後の刃先の侵入距離が少ないことが確認された。すなわち、術者による貫通検知より、装置による貫通検知の方が高速、低侵襲な切削が可能であることが確認できた。また、表1より、術者による貫通検知では、結果にバラつきが生じていたが、装置による自動停止では、バラつきが少なく、すべてのトライで同等の結果を示していることが確認できる。すなわち、装置による貫通検知・自動停止により、術者の技量に依らず同等



(a)



(b)

図5 貫通検知時間及び貫通後の刃先の侵入量結果 (a)装置による自動停止 (b)術者による貫通検知

表1 貫通検知検証結果

	Trials	Average	
		Time required to detect penetration [s]	Travel distance after penetration [mm]
With automatic stop	43	0.165 ± 0.008	2.511 ± 1.078
Without automatic stop	45	0.455 ± 0.123	9.664 ± 12.321

Two-tailed paired t-test $p^* < 0.001$

の施術を行うことが可能となることを示している。よって、外科手術用力触覚パワーツールを用いた貫通検知、自動停止機能により、切削の安全性が向上することが実証された。

3. 結論及び今後の展望

(1) 結論

本研究では主に骨の穿孔作業に用いられるパワーツールをベースとした、力触覚パワーツールを開発した。このドリルに搭載されている直動モータを用いて切削時の力と位置の変位を観測し、骨の貫通を検知することが可能となる。また、貫通検知時に直動モータに刃先を引き込む方向に制御を行うことで、貫通時に刃先が侵入して周囲の組織を損傷することを防ぐことが可能となる。これ

により安全な施術が実現可能となる。豚の大腿骨を用いた実験においては、術者による貫通検知より装置による貫通検知及び自動停止の方が、高速低侵襲な切削が可能であることを示した。また、結果にバラつきが少ないことから、術者に依らず同等の施術を行うことが可能となる。

(2) 今後の課題

今回行った実験では、ドリルを固定し術者が別の直動モータを操作することで切削を行った。しかし、実際の施術では術者がパワーツールを手で保持し切削を行っている。しかし開発した力触覚パワーツールは回転モータに加え直動モータを内蔵しているため、従来の機器より大きさと重量が共に大きく、手で保持することが困難となっている。そのため、モータの仕様を精査し小型化を行っていく必要がある。

【参考文献】

- 1.P. Guerin, A. Benchikh., E. Fegoun, I. Obeid, O. Gille, L. Lelong, S. Luc, A. Bourghli, J. C. Cursolle, V. Pointillart, and J. Vital, *Injury*, 43(4), 397-401(2012)
- 2.Y. R. Rampersaud, E. R. P. Moro, M. A. Neary, K. White, S. J. Lewis, E. M. Massicotte, and M. G. Fehlings, *Spine*, 31(13), 1503-1510(2006)
- 3.T. Osa, C. F. Abawi, N. Sugita, H. Chikuda, S. Sugita, T. Tanaka, H. Oshima, T. Moro, S. Tanaka, and M. Mitsuishi, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(6), 3018-3027(2015)
- 4.W. Lee, C. Shih, and S. Lee, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9(1), 20-29(2004)
- 5.W. Lee, and C. Shih, *Mechatronics*, 16(2), 73-84(2006)
- 6.M. H. Aziz, M. A. Ayub, and R. Jaafar, *Procedia Engineering*, 41,352-359(2012)
- 7.S. Takano et al., *2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 194-200 (2023)
- 8.K. Yamanouchi, S. Takano, Y. Mima, T. Matsunaga, K. Ohnishi, M. Matsumoto, M. Nakamura, T. Shimono, and M. Yagi, *Scientific Reports*, 13(1),(2023)

慣性計測装置を用いた吸入動作測定デバイスの開発

次世代医療福祉ロボットグループ

高野 俊也

1. はじめに

気管支喘息及び慢性閉塞肺疾患 (COPD: chronic obstructive pulmonary disease) の治療には主に吸入器を用いた吸入薬治療が行われている。薬剤を効果的に吸入するには吸入器を正しい手順で使用することが重要であるが、約70%の患者が正しく使用できていないという報告がある[1,2]。その理由として、患者が正しく使用方法を理解していないことや時間経過により正しい使用方法を忘れてしまうことが挙げられる。そのため、治療効果が低減し、治療の長期化や治療費の増加を招いている。

現状、有効的な対策としては医師や薬剤師による定期的な対面指導のみである。そのため、指導を行う医師や薬剤師の負担増大が問題となっている。また、患者が自宅で正しく使用できているかについては医師や薬剤師は情報を得ることが出来ず、適切な指導を行えないという問題がある。そのため、先行研究では吸入器に各センサを搭載し、吸入手技をモニタリングする手法が提案されている[3,4]。

本研究では吸入器の1種であるエリプタに慣性計測装置(IMU: Inertial measurement unit)を2つ搭載したモニタリングデバイスを開発し、IMUにより得られた情報から吸入手技を観測する手法を提案する。

1. 1 IMU を搭載した吸入動作モニタリングデバイス

本研究ではエリプタを用いて検証を行う。エリプタは一般的に使用されているドライパウダー吸入器(DPI: dry powder inhaler)である。図1にエリプタにIMUを搭載した図を示す。IMUは3Dプリンタにより作成したアタッチメント内に搭載し、エリプタの蓋と下部にそれぞれ固定している。MPU9250、LSM9DS1は使用したIMUの型式である。各IMUは3軸の地磁気、加速度、角速度の測定が可能であり、図中の ω_x 、 ω_y 、 ω_z はIMUの角速度の軸方向を示す。また、MPU、LSMは各IMUのMPU9250、LSM9DS1の略称である。吸入動作の観測には角速度を積分して得られる角度情報を用いる。

表1にエリプタの使用手順を示す。手順1の蓋を開ける動作及び、手順3の薬剤を吸入する動作を行った際のデバイスの姿勢を図2に示す。この時、図2(a)の蓋開け時は ω_{MPU_y} 方向に回転し、図2(b)の吸入時は ω_{LSM_x} 方向に回転をすることから、この2つの値を用いることで各動作を観測することが可能となる。また、息吐き、息止めについては各動作のインターバルから観測可能である。よって、このデバイスにより得られた波形を観測することで、各手順が適切に行われていたかが判別可能となる。これにより、

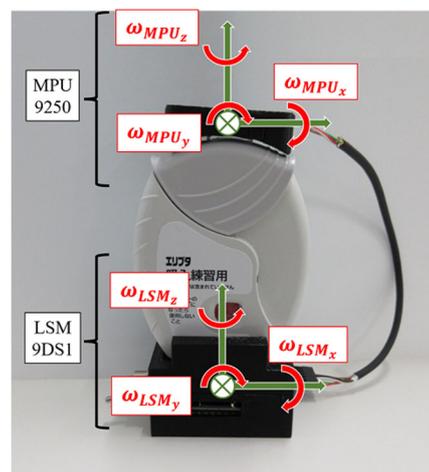
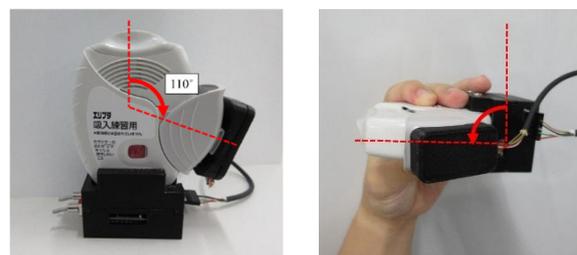


図1 吸入動作モニタリングデバイス及びセンサ角速度軸方向

表1 エリプタの使用手順

1	蓋をカチッと音がするまでしっかり開く。
2	息を吐き出す。
3	吸入口を咥え、深く吸い込む。
4	5秒程度息を止める。
5	ゆっくりと息を吐く。
6	蓋を閉じる。



(a) 手順1 蓋開け (b) 手順3 吸入

図2 各使用手順におけるデバイスの姿勢

吸入動作の正誤判別が可能となる。

2. IMU による吸入動作観測

エリプタの蓋開け時、蓋は約110°回転し、カチッと音が生じて内部に薬剤が充填される。そのため、110°に満たない場合は薬剤が充填されず、薬剤を吸入することが出来ない。

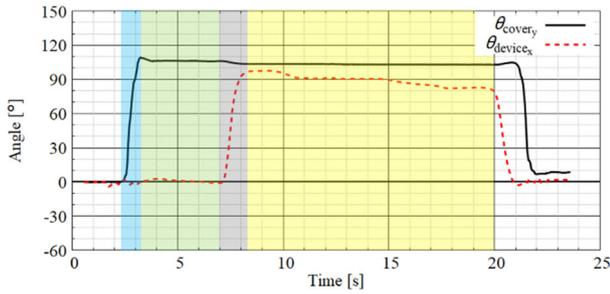


図3 正常動作時の角度測定結果

そこで蓋開け角度を IMU により観測を行う。回転角度は角速度の積分より計算され、式(1)で表される。

$$(\theta_{\text{IMU}_{\text{axis}}})_n = (\theta_{\text{IMU}_{\text{axis}}})_{n-1} + (\omega_{\text{IMU}_{\text{axis}}})_n \times \Delta t \quad (1)$$

θ 、 Δt はそれぞれ角度とサンプリング時間を表し、添字の IMU、axis、 n はセンサ名、軸方向、データ数を表す。蓋開け動作は MPU の Y 軸回転方向に対応しているため、 ω_{MPU_y} を積分することにより求まる。しかし、この角度はデバイス本体の傾きを含んでいる。本体の蓋開け方向の傾き角度は LSM の Y 軸回転角度より求まるため、式(2)に示すように差分を取ることで蓋開け角度 θ_{cover_y} を求めることが出来る。

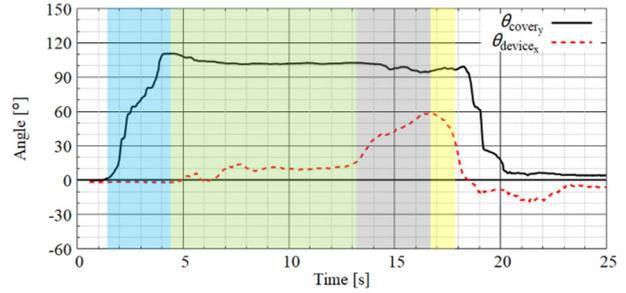
$$\theta_{\text{cover}_y} = \theta_{\text{MPU}_y} - \theta_{\text{LSM}_y} \quad (2)$$

また、手順3の吸入動作においては、デバイスを患者の口に向けて傾けるため、LSMのX軸回転方向に回転する。そのため、吸入角度 θ_{device_x} は式(3)により求まる。

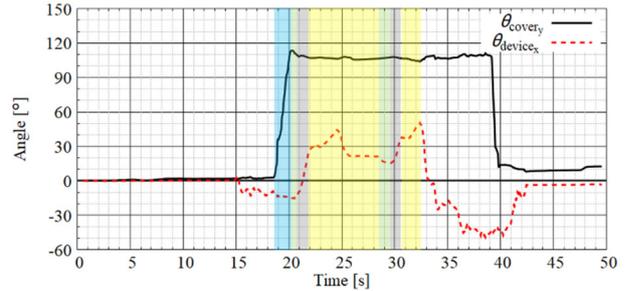
$$\theta_{\text{device}_x} = \theta_{\text{LSM}_x} \quad (3)$$

算出した θ_{cover_y} と θ_{device_x} の波形を用いて吸入動作の観測を行う。

図3に正常に吸入を行った際の角度測定結果を示す。まず青枠部において蓋開け角度が 110° 付近に増加していることがわかる。すなわち蓋が正常に開かれたことを示している。次に、緑枠部の2つの角度が変動していない箇所は手順2の息吐き動作を行っていることを示している。灰色枠部においてデバイスの傾き角度が増加していることから、手順3の薬剤の吸入動作を行っていることを示している。黄色枠部の角度が変動していない箇所は、薬剤吸入後の息止め、息吐き動作を示している。最後に、2つの角度が 0 に戻っていることから蓋が閉じられデバイスが元の位置に戻ったことを示している。よって2つの波形を観測することで各使用手順が正常に行われたかどうかを判定可能であることが示された。



(a) 患者 A



(b) 患者 B

図4 臨床試験結果

表2 吸入動作モニタリングデバイスによる判定と薬剤師による判定の比較

Patient	Gender	Check point	Proposed device	Pharmacist's assessment
A	male	Open the cover.	○	○
		Breathe-out completely.	○	○
		Hold the breath after inhalation.	×	○
B	male	Open the cover.	○	○
		Breathe-out completely.	×	×
		Hold the breath after inhalation.	○	○

3. 臨床試験

本モニタリングデバイスにより実際の吸入動作の正誤判定が可能か臨床試験により検証を行った。臨床試験では、患者は本デバイスを使用して通常通り吸入を行った。また、その吸入動作を薬剤師が目視により診断し、薬剤師の判定とデバイスの測定結果による判定との比較を行った。判定項目は以下の3つで行った。

- ・蓋を正常に開いたか
- ・息吐きを十分に行ったか
- ・吸入後息止めを行ったか

この3つの判定項目は DPI において発生率の高い誤り動作である[5]。本稿では2名の患者による結果について述べる。

図4に各患者の吸入時の角度推移波形を示す。また表2に各判定項目のデバイスによる判定と薬剤師による判定結果を示す。図4(a)より、患者Aは蓋開け角度及び息吐きは正常に行えたことが読み取れる。この結果は薬剤師の判

定結果と一致している。しかし、息止め時間においては黄色枠部に示すように1秒程度しか表れなかった。しかし実際には患者は息止めを行っており、薬剤師の判定と異なる結果となった。これは患者は薬剤吸入後、息を止めている間にデバイスの蓋を閉じていたためである。そのため息止め動作を正常に観測することが出来なかった。

図4(b)の患者Bの結果においては、吸入角度 θ_{device_x} が2回増減していることから患者は2回吸入を行っていることがわかる。これは吸気量が少ない患者が一度に薬剤を吸いきれない場合に行う動作であり、問題のない動作である。しかしながら、緑枠部に示される蓋開け後から1回目の吸入の間の時間が1秒程度と短く、息吐きを十分に行えていないことを示している。これは薬剤師による判定と一致しており、息吐きが十分に行われなかったという誤り動作を検出できたことを示している。よって本デバイスにより患者の吸入動作の正誤判定を行えることが実証された。吸入後の息吐き動作については今後の課題として取り組む。

4. 考察及び今後の展望

本研究では吸入器に2つのIMUを搭載し、吸入動作をモニタリング可能なデバイスを提案した。臨床試験の結果より、実際の患者の吸入動作を測定し、正誤判定に有効であることが実証された。

しかしながら息止め、息吐きなどデバイスの動きに表れない動作は各動作のインターバルから間接的に読み取るため、判定精度に課題がある。今回の検証においても、吸入後の息止めの際に蓋を閉じる動作が行われ、息止めの有無を判定することが出来なかった。先行研究において、息止め、息吐き動作をマイクを用いて判定を行っている取り組みがされており、マイクなど他のセンサとの併用を検討していく[6,7]。

【参考文献】

1. V. G. Press, V. M. Arora, L. M. Shah, S. L. Lewis, K. Ivy, J. Charbeneau, S. Badlani, E. Naurekas, A. Mazurek, J. A. Krishnan, "Misuse of respiratory inhalers in hospitalized patients with asthma or COPD," *Journal of General Internal Medicine*, Vol. 26, pp. 635–642, 2011.
2. S. Schantz, N. Katajaviuori, O. Antikainen, A. Juppo, "Evaluation of dry powder inhalers with a focus on ease of use and user preference in inhaler-naïve individuals," *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 509, Issues 1–2, pp. 50–58, Jul. 2016.
3. T. Ezaki, K. Masaki, M. Nishie, H. Nakada, J. Hakamata, S. Takano, K. Sunata, Y. Akiyama, M. Irie, S. Okuzumi, T. Tanosaki, H. Kabata, T. Shimono, S. Tsuda, T. Aomori, and K. Fukunaga, "Accelerometer-equipped external attachments to detect critical errors while using inhalation devices", *American Thoracic Society 2021 International Conference, ATS2021*, May. 2021.
4. D. Baba, S. Uchida, H. Sakoe, "Predictive DP Matching for On-Line Character Recognition," *Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)*, pp. 674–678, 2007.
5. J. Sanchis, I. Gich, and S. Pedersen, "Systematic review of errors in inhaler use: Has patient technique improved over time?," *Chest*, Vol. 150, Issue 2, pp. 394–406, Aug. 2016.
6. T. E. Taylor, M. S. Holmes, I. Sulaiman, S. D'Arcy, R. W. Costello, and R. B. Reilly, "An acoustic method to automatically detect pressurized metered dose inhaler actuations," *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 4611–4614, Aug. 2014.
7. M. S. Holmes, S. D'Arcy, R. W. Costello, and R. B. Reilly, "Acoustic analysis of inhaler sounds from community-dwelling asthmatic patients for automatic assessment of adherence," *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, Vol. 2, pp. 1–10, Mar. 2014.

Dynamic programming マッチングを用いた吸入動作正誤判別

次世代医療福祉ロボットグループ

高野 俊也

1. はじめに

気管支喘息及び慢性閉塞性肺疾患の治療には、主に吸入器を用いた吸入薬治療が行われている。効果的な治療には吸入器を正しく、継続的に使用することが重要であるが、約 70%の患者が正しく使用できていないことが知られている[1,2]。その理由として、使用方法の理解不足や時間経過により正しい使用方法を忘れてしまうこと等が挙げられる。そのため、治療効果が低減し治療の長期化を招いている。

現状、有効的な対策は医師や薬剤師による綿密な対面指導のみである。そのため、指導を行う医師や薬剤師の負担増大が問題となっている。その解決手法として、先行研究では吸入器に各種センサを搭載し、吸入手技をモニタリングする手法が提案されている[3,4]。

本研究では、慣性計測装置(IMU: Inertial measurement unit)を搭載した吸入器により得られた患者の吸入手技の観測データに DP マッチング(DP: Dynamic programming)を用いることで吸入手技の自動判別を行う手法を提案する。

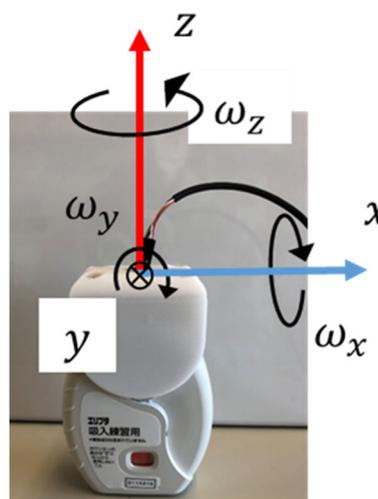


図1 吸入動作モニタリングデバイス及びセンサ角速度軸方向

1.1. 慣性計測装置を搭載した吸入動作モニタリングデバイス

本研究ではエリプタを用いて検証を行う。エリプタは一般的に使用されているドライパウダー吸入器(DPI: dry powder inhaler)である。図1にエリプタにIMUを搭載した吸入動作モニタリングデバイスを示す。IMUは3Dプリンタにより作成したアタッチメント内に搭載し、エリプタの蓋に固定している。IMUは3軸の地磁気、加速度、角速度の測定が可能であり、図中の ω_x 、 ω_y 、 ω_z はIMUの角速度の軸方向を示す。吸入動作の観測には角速度を積分して得られた角度情報を用いる。

表1にエリプタの使用手順を示す。手順1の蓋を開ける動作及び、手順3の薬剤を吸入する動作についてはIMUのY、Z軸の回転角度により観測が可能である。また、息吐き、息止めについては各動作のインターバルから観測可能である。図2に正常に吸入を行った際のY、Z軸角度の波形を示す。このデバイスにより得られた波形を観測することにより、各手順が適切に行われていたかが判別可能となる。よって、吸入動作の正誤判別が可能となる。

表1 エリプタの使用手順

1	蓋をカチッと音がするまでしっかり開く。
2	息を吐き出す。
3	吸入口を咥え、深く吸い込む。
4	5秒程度息を止める。
5	ゆっくりと息を吐く。
6	蓋を閉じる。

1.2. DP マッチングアルゴリズム

吸入動作の自動正誤判別には予め用意した正常に吸引を行った際の波形(標準波形)に、測定により得られた波形(入力波形)を重ね合わせることで評価を行う。しかし、吸入動作の速度やタイミングは毎回異なってしまうため、そのまま重ね合わせてしまうと、時間軸方向にずれが生じてしまう。そのため、この時間のずれの影響を取り除く必要がある。その手法として DP マッチングを用いる。DP マッチングは主に筆跡鑑定や音声認識に用いられるアルゴリズムであり、非線形データの伸縮を行うことで時間軸のずれを除外し、2つの波形を重ね合わせることが可能となる。

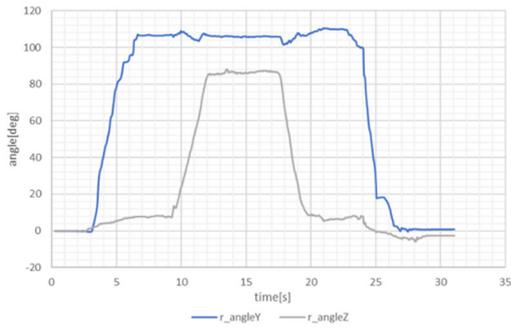


図2 正常吸引時波形(標準波形)

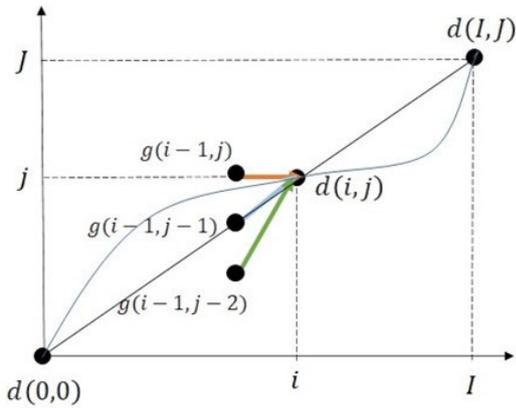


図3 DP マッチングイメージ

式(1)、(2)に標準波形、入力波形の各サンプリングデータを表す。

$$r(i) = (\theta_r^y(i), \theta_r^z(i)) \quad (1 \leq i \leq I) \quad (1)$$

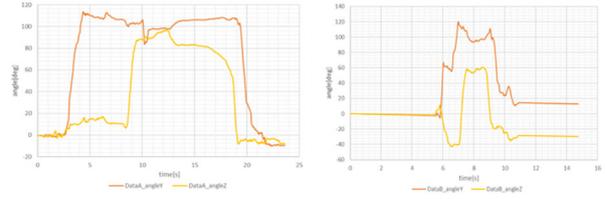
$$o(j) = (\theta_o^y(j), \theta_o^z(j)) \quad (1 \leq j \leq J) \quad (2)$$

$$d(i, j) = |r_i - o_j| \quad (3)$$

I, J は各データのサンプル数を表し、 $r(i), o(j)$ は標準波形及び入力波形の測定値を表す。 θ_r, θ_z はIMUより得られたY軸及びZ軸回転角度を表す。よって式(1)の $r(i)$ は、 i 番目のサンプルにおける標準波形のY、Z角度を表す。標準波形と入力波形間の距離は式(3)により表される。2つの波形間の距離 $d(i, j)$ の合計を小さくすることにより、波形間の時間軸のずれを取り除くことが可能となる。

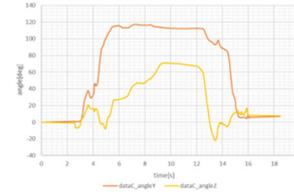
DPマッチングに用いられる漸化式を式(4)に表す。式(5)はDPマッチングの初期状態を表す。すなわち、2つの波形の初期位置を一致させることを示す。図3にDPマッチングのイメージ図を示す。横軸は標準波形の値を示し、縦軸は入力波形の値を表している。3本の線は式(4)の \min を表している。もし2つの波形が完全に等しい場合、図2の線は直線を示す。

また、式(6)は時間正規化距離と呼ばれ、 $g(I, J)$ を標準波形のサンプル数で割ることで求める。時間正規化距離が小さいほど2つの波形が類似していることを表す。DPマッチングではこの時間正規化距離が最小となるように2

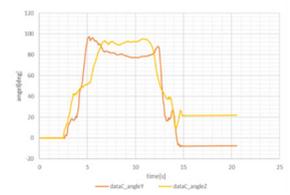


(a)患者 A: 正常吸引

(b)患者 B: エラー吸引



(c)患者 C: 正常吸引



(d)患者 D: エラー吸引

図4 臨床試験データ

つの波形を重ね合わせる。

$$g(i, j) = d(i, j) + \min \begin{cases} g(i-1, j) \\ g(i-1, j-1) \\ g(i-1, j-2) \end{cases} \quad (4)$$

$$g(1, 1) = d(1, 1) \quad (5)$$

$$L(r, o) = \frac{g(I, J)}{I} \quad (6)$$

2. 実験と結果

DPマッチングにより測定データから吸入動作の正誤判定が可能か、臨床試験による検証を行った。

2.1. 実験方法

実験にはエリプタを使用している4名の入院患者の吸入動作を測定し、薬剤師による目視判定とDPマッチングにより得られた時間正規化距離との比較を行った。なお、DPマッチングの標準波形には図2の波形を用いてマッチングを行った。また、この臨床試験は慶應義塾大学医学部の倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号20190308)。

2.2. 実験結果

図4に4名の患者の測定結果を示す。薬剤師の判定では患者A、Cは正常に吸引を行ったが、患者B、Dは吸入前の息吐きが不十分であり、正常に吸引が行えていないエラー吸引となった。

この各波形にDPマッチングを行った結果を図5に示す。また、表1にDPマッチングにより求めた時間正規化距離の結果を示す。結果から、正常に吸引を行った患者A、Cにおいては時間正規化距離がそれぞれ5.377、10.345と小さい値となったが、エラー吸引を行った患者

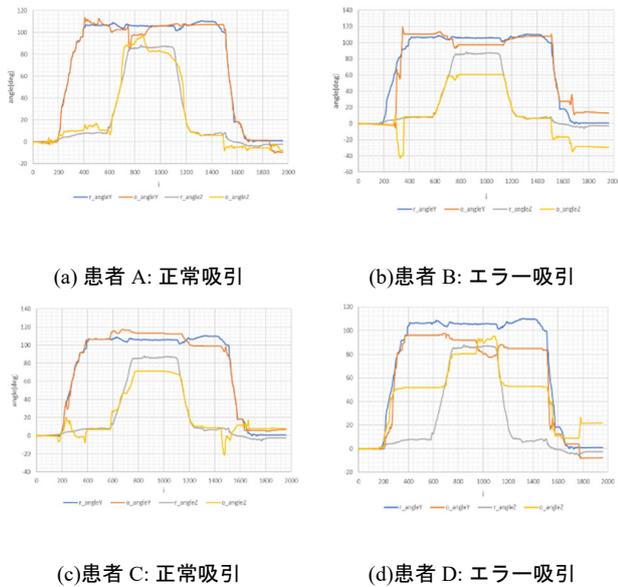


図 5 DP マッチング結果

表 2 時間正規化距離算出結果

データ	時間正規化距離	目視判定
A	5.377	正常
B	16.650	エラー
C	10.345	正常
D	27.905	エラー

B、Dにおいては時間正規化距離が 16.650、27.905 と比較的大きい結果となった。すなわち、時間正規化距離の大小と薬剤師の目視判定結果に相関があることを示している。よって、DP マッチングにより求めた時間正規化距離から正常吸引とエラーを含む吸引動作を識別可能であることが示された。

3. 考察及び今後の展望

本研究では DP マッチングアルゴリズムを用いた、吸入動作の自動正誤判別について提案した。臨床試験による実験では、DP マッチングにより求めた時間正規化距離が薬剤師の目視判定結果と一致した。これにより DP マッチングアルゴリズムは吸入動作の正誤判別に有効であることが実証された。

現状では吸入動作にエラーがあったかどうかのみの判定しか示せていないため、今後はどのようなエラーが発生していたかについて詳細に判別可能なアルゴリズムを構築する。また、pMDI やタービュヘイラーといった他の各種吸入器においても同様に判別可能であることを検証する。

【参考文献】

1. V. G. Press, V. M. Arora, L. M. Shah, S. L. Lewis, K. Ivy, J. Charbeneau, S. Badlani, E. Naurekas, A. Mazurek, J. A.

Krishnan, “Misuse of respiratory inhalers in hospitalized patients with asthma or COPD,” *Journal of General Internal Medicine*, Vol. 26, pp. 635–642, 2011.

2. S. Schantz, N. Katajavuori, O. Antikainen, A. Juppo, “Evaluation of dry powder inhalers with a focus on ease of use and user preference in inhaler-naïve individuals,” *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 509, Issues 1–2, pp. 50–58, Jul. 2016.
3. T. Ezaki, K. Masaki, M. Nishie, H. Nakada, J. Hakamata, S. Takano, K. Sunata, Y. Akiyama, M. Irie, S. Okuzumi, T. Tanosaki, H. Kabata, T. Shimono, S. Tsuda, T. Aomori, and K. Fukunaga, “Accelerometer-equipped external attachments to detect critical errors while using inhalation devices,” *American Thoracic Society 2021 International Conference, ATS2021*, May. 2021.
4. D. Baba, S. Uchida, H. Sakoe, “Predictive DP Matching for On-Line Character Recognition,” *Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)*, pp. 674–678, 2007.

