「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、平成28年度〜平成31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、令和2年度より開始している。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う。そして、産学公連携拠 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す。

1. 2023 年度の研究目的

2023 度は、実用化実証事業「次世代医療福祉ロボット」 研究グループの研究活動四年目にあたり、これまでの研究 開発活動の方針を変更することなく、リアルハプティクス および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。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 ック鑷子の開発、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ている。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する。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。

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 ている。2022 年度より支援を受けている日本医療研究開 発機構 (AMED)の「医療機器等における先進的研究開発・ 開発体制強靭化事業」において、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する。

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鑷子デバ イスの開発研究を推進している。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 プティック鑷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 証することを目指す。

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 いる。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る。

2. 2023 年度の研究成果

(1) ハプティック骨ドリルの開発研究

ハプティック骨ドリルの改良開発と貫通検知アルゴリ ズムのハンディドリルへの応用研究を実施した。さらに 手術支援ロボットへの応用を目的とした多自由度遠隔操 作型ドリルロボットの開発を行った。

ハプティック骨ドリルの改良開発においては、力触覚 情報を用いた脊椎の貫通検知と自動停止機能を有する安 全安心なドリルの実用化に向け、先行研究における貫通 検知アルゴリズムとの比較検証を行った(図1)。先行研 究では回転モータのトルクの変動を用いて貫通の検知を 行っている。そこでこの従来アルゴリズムを試作機に適 用し、本プロジェクトで新たに開発した直動モータを用 いた貫通検知アルゴリズムとの比較検証を行った。その 結果、従来技術に比べて、開発アルゴリズムでは貫通検 知までの時間及び貫通後の侵入量を極めて小さくするこ とができることが確認できた。



図1 ハプティック骨ドリルによる検証実験

豚の脊椎を用いた非臨床試験において(図2)、従来ア ルゴリズムを用いたトルクの変動を用いた切削において は貫通を検知するまでの時間及び貫通後の侵入量が大き い結果となった。それに対して、開発アルゴリズムを実 装することで、術者の操作による切削動作においても高 速低侵襲な検知が可能であることが確認された。



図2 動物実験における貫通検知手法の比較検証

また、実用モデル機の開発研究においては、2022 年度 に開発した実用モデル試作機に対して更なる小型化を施 した二次試作機の開発(図3)、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。



図3 実用モデル第二試作機

さらに、力触覚情報に基づく貫通検知・自動停止機能の 手術支援ロボットへの応用を目的として、力触覚伝達機能 を備えた多自由度遠隔操作型ドリルロボットの試作機を 開発した。本研究では、位置制御で駆動する多自由度マニ ピュレータ先端に被操作側装置を搭載可能であり、かつ切 削作業において力触覚伝達が可能な多自由度遠隔操作型 ロボットを開発した。また、切削作業中に事故を引き起こ す可能性がある動作の検出機能を開発した。多自由度遠隔 操作型ドリルロボットによる切削作業において、貫通等に よる刃先端位置の急激な変化を検知して被操作側のドリ ルロボットを自動停止し、力触覚情報を利用した安全性の 向上が可能であることを確認した。

(2) ハプティック鑷子の開発研究

腫瘍判別機能を有する脳神経外科ハプティック鑷子の 開発においては、ラットを用いた非臨床試験を継続実施 することでエビデンスデータの蓄積に努めた。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。2023 年度においては、これらの新たな知見を纏め、 国際的な学術論文誌である Scientific Reports に論文投稿 を行った。

(3) 吸入支援デバイスの開発研究

本研究においては、吸入動作における吸入デバイス等 の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、動作の正誤判定の 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。



(a) デバイス
 (b) 振り動作
 (c)噴霧&吸入
 図4 吸入動作測定デバイス(pMDI)

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、IMUにより得られた吸入動作のデータを用 いて、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。

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いる。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。

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、充実化ができてきており、特に2022年度からは、 日本医療研究開発機構(AMED)の「医療機器等におけ る先進的研究開発・開発体制強靭化事業」において、分 担研究機関として参画する骨ドリル開発の提案課題が採 択され、産学公連携による実用化研究を推進してきてい る。今後も外部資金を活用しながら、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重点的に進めてい く予定である。

貫通検知機能を備えた遠隔操作型力触覚ドリルシステム

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ハンドヘルド型ドリルを 用いた骨の切削は、高度なスキルが要求される治療 行為である。医療用ドリルの先端部は高速で回転 し、接触した骨を切削する。先端部が骨周辺の組織 に触れた場合、切削対象ではない部位を損傷する可 能性がある。特に脊髄の損傷は患者の運動機能や知 覚機能に障害を生じる。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し、術中の事故を 可能な限り防ぐ必要がある。

高度なスキルは安全性の向上において重要である が、熟練医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先端部が到達 したことを検知する。貫通の際にドリルの回転を自 動で停止することで、骨周辺の組織の損傷を防ぐこ とができる。これまでにハンドヘルド型ドリルへの 実装を目的として、ドリルの回転モータの電流と回 転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、ドリルの回転に加えて軸方向の直動自由度を 有するハンドヘルド型ドリルについて、力触覚情報 に基づ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、貫通検知および自動停止機能を備えた遠 隔操作型力触覚ドリルシステムを開発する[3]。一般的に 遠隔操作型手術支援ロボットは大規模かつ高コストであ るが、ハンドヘルド型の器具や装置では実現困難な幅広 い機能で術者を支援可能であり、消化器外科分野では遠 隔操作ロボットの技術を応用した da VinciTMが既に実用 化されている[4]。本研究で開発するシステムは、脊椎手 術用ドリルによる骨切削を想定した遠隔操作型ロボット である。ドリルシステムを構成する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、ドリルによる切削作業で発生する反力を術者 にフィードバックする (図1)。そして、ロボット間で伝 達される力触覚情報に基づいて貫通の有無を判定し、貫 通時には作業空間側ロボットを自動的に停止する。

(1)-1 作業空間側ロボット

本研究の構想において、切削対象の周囲に設置される 作業空間側ロボットは主に6自由度ロボットアームと4



図 1 遠隔操作型力触覚ドリルシステムの構成



図 2 遠隔操作型力触覚ドリルシステムを構成す る作業空間側ロボットのイメージ図

自由度ドリルロボットで構成され、アーム先端に搭載さ れた装置の移動と姿勢を変更する。4自由度ドリルロボ ットは回転モータで駆動するドリル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。本研究では、ドリルの遠隔操作における力 触覚伝達、および力触覚情報を利用した貫通検知手法の 実装のみに焦点を当て、作業空間側ロボットを4自由度 ドリルロボットのみで構成する(図3)。



図 3 作業空間側ロボット(4 自由度ドリルロボ ット)



図 4 操作者側ロボット(3 自由度ハプティック インターフェース)

(1)-2 操作者側ロボット

4 自由度ドリルロボットが並進自由度で得る力触覚情報は、操作者側ロボットであるハプティックインターフェースが操作者に伝達する。本研究のハプティックイン ターフェースは、作業空間側ロボットと同様に並進3自由度のパラレルリンクロボットで構成される(図4)。エンドエフェクタのスイッチはドリルの回転速度の制御に用いられる。操作者はハプティックインターフェースを介して作業空間にあるドリルを回転させ、かつ先端部の位置を移動させることが可能である。

(2) 動作制御

貫通検知機能を備えた遠隔操作型力触覚ドリルシステムは、作業の状況に応じて制御器を決定する。貫通が検知されていない正常時の作業では、遠隔操作のための制御がパラレルリンクロボットとドリルに用いられる。貫通検知後は遠隔操作が解除され、作業空間側ロボットと操作者側ロボットに異なる制御器が適用される。したがって、ドリルシステムの制御器は力触覚情報を利用した 貫通検知によって切り替わる。

(2)-1 正常時の制御

遠隔操作のための制御では、パラレルリンクロボット にバイラテラル制御、ドリルに速度制御が用いられる。 バイラテラル制御は2台のロボット間で位置・力情報を



図 5 貫通検知機能を実装した遠隔操作型ドリル システムによる桧板切削実験

双方向に伝達し、力触覚伝達を可能とする。ドリルシス テムの各パラレルリンクロボットは並進3自由度を有す るため、3次元直交座標系の各座標軸方向の力触覚情報 を伝達可能である。ドリルの速度制御では、ハプティッ クインターフェースのスイッチの状態により速度指令値 を決定する。したがって、遠隔操作下においてスイッチ により高速回転するドリルが対象物を切削し、パラレル リンクロボットが力触覚情報を伝達する。

(2)-2 貫通検知

ドリルシステムは遠隔操作下でデータ化した力触覚情 報を用いて切削対象物の貫通を検知する。パラレルリン クロボットは各並進自由度に対応する直動型モータで駆 動する。直動型モータの速度、力から3次元空間におけ るドリル先端部の速度、力が得られる。さらに、これら の情報を擬似微分して加速度、力微分値を得る。ドリル 先端部が切削対象物を貫通する際には速度が急激に増加 し、力が急激に減少するため、実際の加速度と力微分値 を閾値と比較することで貫通を検知する。

(2)-3 貫通検知後の制御

ドリルシステムは貫通検知の後、対象物周辺の損傷を 防ぐために作業空間側ロボットを自動停止させる。構成 要素であるパラレルリンクロボットには位置制御器が適 用され、ステップ入力で貫通検知位置から後退する。ド リルは正常時と同様に速度制御で駆動するが、スイッチ の状態に関わらず速度指令値がランプ関数で変化して減 速する。最終的にドリルの回転速度は0 rad/sec となり、 先端部の位置は貫通検知位置の後方で維持される。

2. 実験と結果

(1) 方法

本研究で開発した遠隔操作型力触覚ドリルシステムを



(a) 位置応答および貫通検知信号







(c) 加速度応答および力微分値

図 6 貫通検知実験の結果

用いて切削作業をおこない、力触覚情報に基づく貫通検 知機能の実現可能性を確認した。実験では厚さ2mmの 桧板を模擬骨として使用し、ドリル中心軸から30度の傾 きで固定台に設置した(図5)。ドリルには直径4mmの 球形の先端部を有するダイヤモンドバー(医療用ドリル ビット)を取り付けた。作業空間の視覚情報はカメラで 取得し、ディスプレイで操作者に提示した。ドリル先端 部の加速度と力微分値を用いた貫通検知の可否を確認す るために、操作者はダイヤモンドバーが桧板を貫通する まで切削作業を継続した。

(2) 結果

切削実験の結果を図6に示す。本実験では、約77秒経 過時に対象物の貫通が検知された。作業空間側ロボット の各軸の位置応答値は貫通が検知されるまで操作者側ロ ボットの位置応答値に追従し、各軸の力推定値には作用 反作用の法則が成立した。したがって、遠隔操作下では バイラテラル制御により力触覚情報が伝達された。貫通 検知時にはドリル先端の加速度が急激に増加し、力微分 値が急激に減少した。

3. 考察及び今後の展望 (1) 考察

遠隔操作型力触覚ドリルシステムの貫通検知機能は、 加速度と力微分値が同時に閾値を超えることで貫通を検 知する。図 6(c)では貫通検知時以外にも力微分値の急激 な減少が確認できる。しかしながら、加速度の急激な増 加が同時に発生せず、誤検知は起きなかった。先行研究 では直動型モータを内蔵したハンドヘルド型ドリルで得 られる1自由度の速度、力情報に基づいた貫通検知手法 が開発された[2]。これらの情報が3次元空間への拡張後 も有用であり、遠隔操作型ドリルでも利用可能であるこ とが本実験で確認された。

(2) 今後の展望

本研究では遠隔操作型力触覚ドリルシステムの作業空 間側ロボットを4自由度ドリルロボットのみで構成した が、実際の骨切削では図2のように6自由度ロボットア ームと組み合わせる必要がある。4自由度ドリルロボッ トのパラレルリンク機構は可動域が小さく、切削可能な 領域が限られる。また、回転自由度を持たないため姿勢 変更が不可能である。ドリルを任意の位置、姿勢に配置 することができる6自由度以上のロボットアームと組み 合わせることで、実際の骨切削に近い環境で実験が可能 となる。

【参考文献】

- 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)
- 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)
- 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)
- 4. G. S. Guthart and J. K. Salisbury, in Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., San Francisco, CA, USA, 618-621(2000)

Haptic Drill for Spinal Surgery: Detection of Penetration based on both Thrust and Cutting Forces

Next-generation Medical and Welfare Robot Group Nguyen Duc Khuong

1. Introduction

It is necessary to develop a surgical drill with the ability to stop automatically to assist surgeons. Various studies have addressed issues related to drilling bones. Osa *et al.* developed a handheld bone-cutting-tool which detected the penetration based on estimating the cutting resistance from the response current and rotary speed [1], [2]. Qi *et al.* suggested an algorithm to find the singularity of the force signal for detecting the breakthrough based on the wavelet transform [3]. Dai *et al.* proposed a method to monitor bone cutting operations by using an acceleration sensor and a laser displacement sensor to measure the vibration amplitude of the bone being cut and its adjacent tissues [4]–[6].

However, guaranteeing successful penetration detection and auto-stop under varying drilling conditions is challenging. To deal with this problem, this study presents a detection of penetration method by capturing suddenly fluctuations in thrust and cutting forces.

First, the characteristics of thrust force and cutting force in intrusion, steady, and penetration stages of cutting bone are investigated. Then, from these characteristics, a detection method of penetration is developed based on a combination of thrust and cutting forces. Additionally, three difference cutting modes are developed and conducted in an experiment. Experimental results validate the performance of the method in all the developed cutting modes.

2. Cutting bone stages

Based on the drill bit radius, drilled hole depth, and bone thickness, cutting can be divided into intrusion, steady, and penetration stages as shown in Fig. 1. The intrusion stage occurs if the drilled hole is less than the radii of the drill bit. If the drilled hole is greater than the radii of the drill bit and less than the bone thickness, it is called the steady stage. Finally, the penetration stage happens if the drilled hole is greater than the bone thickness.

If a constant thrust force F_s is applied on the drill bit, the penetration rate v_s is very different from that in these stages. We assume that penetration rate in intrusion, steady, and penetration stages are v_{s1} , v_{s2} , and v_{s3} , respectively. In reality, v_{s1} is smaller than v_{s2} and v_{s2} is smaller than v_{s3} . When penetration happens, the penetration rate v_{s3} suddenly increases from v_{s2} . As a result, the cutting force F_c suddenly increases. In contrast to the increase in cutting force, the thrust force suddenly decreases due to the rapidly decrease of environment stiffness as the drill breaks through the bone. The opposite fluctuation of these two forces is used as the basis for the penetrating detection method in this study.





In general, penetration can be detected based on the cutting force or thrust force, or both of them. This study aims to detect penetration by a combination of both these forces.

In the bone cutting process, the cutting force depends on various factors such as the stiffness of the bone, the rotary speed, the type and diameter of the drill bit, the difference in position between the drill bit and the bone







Fig. 3. Cutting force characteristic.

(drilled hole), and the thrust force. If the bone, the rotary speed, the drill type, and the hole depth are identified, the cutting force (F_c) is only a function of the thrust force (F_s) .

In the intrusion and steady stages, it is obvious that the cutting force F_c is increased if the thrust force from the slave F_s increases. In contrast, if the thrust force decreases, the load on the rotary motor decreases and the cutting force decreases. However, in the penetration stage, the cutting force suddenly increases due to the increase in the penetration rate, while, thrust force suddenly decreases due to the decrease in environment stiffness. Therefore, the subtraction of these two forces is a good variable for penetration detection. In addition, cutting and thrust forces are only inversed if the penetration occurs. Thus, this method can prevent mistakes with varying thrust forces.

4. Results and discussion

The experimental platform is shown in Fig. 2. It consists of a Haptic drill and wooden bone models.

4.1. Cutting force characteristic in cutting bone process

For the cutting force, an experiment was conducted with the conditions as follows: a constant thrust force was generated to advance the drill bit into the bone model. The cutting force was estimated based on the response current of the rotary motor. The experimental result of the cutting force is shown in Fig. 3. It can be seen from the experimental result as follows:

- The cutting force increases when the drill bit gets deeper and deeper into the wood in the intrusion stage.
- The cutting force almost remains constant when the drill bit fully penetrates wood in the steady stage.



Fig. 4. Thrust force characteristic.

 If penetration happens, the load on the rotary motor suddenly increases due to the increase in penetration rate. Thus, the required current suddenly increases to satisfy the equation of motion. Consequently, the cutting force suddenly increases. Then, the load reduces to zero if the drill bit goes whole through the bone. At that time, the cutting force reduces to zero. It can be confirmed that cutting force can be used to detect penetration.

4.2 Thrust force in cutting bone process

This section aims to investigate thrust force. Fig. 4 illustrates the thrust force characteristics when drilling bone model. It is difficult to conclude using this force because it depends on the applied force from the operator. However, the thrust force clearly decreases suddenly due to the environment stiffness rapidly decreasing when penetration occurs. This phenomenon can also be used as a sign to detect whether or not penetration has occurred.

4.3. Experimental validation performance of penetration detection method

Three drilling modes of continuous, partial, and automatic drilling were performed to test the effectiveness of the detection algorithm. In continuous mode, the operator advances the drill bit continuously until it penetrates the bone. In partial mode, the operator only drills a thin layer of the bone, then moves back. The process is repeated until the drill bit penetrates the bone. In automatic mode, the drill advances automatically without any action from operator.

Fig. 5 shows the cutting force (F_c) and threshold values (proportional to thrust force F_s) in continuous



continuous drilling.



Fig. 6. Thrust and cutting forces in partial drilling.

drilling mode. The detect point of penetration is the crossed point between F_c and threshold value. Fig. 6 and Fig. 7 present experimental results when drilling in partial and automatic modes. Good detections are obtained in all continuous mode, partial mode.

Additionally, experimental results of partial mode on Fig. 6 shows the detection ability even if the bone thickness is small lefts. The wood after drilling is shown in Fig. 8. The experimental results confirm the performance and the utility of the developed method.



Fig. 8. Wood after drilling.

5. Conclusion and future works

This study introduced a method to detect penetration based on both thrust force from the operator and cutting force estimated from response current of rotary motor. Three difference modes of cutting were conducted in an experiment. Experimental results validated the performance of the method in continuing, partial, and automatic modes. Due to the inverse of thrust and cutting forces when penetration occurs, the method was able to detect penetration even if the bone was thin, avoiding wrong detection.

However, drilling was performed while the drill was placed horizontally. In future works, the penetration detection algorithm should to evaluate its detection performance when drilling in different postures.



Fig. 7. Thrust and cutting forces in automatic drilling.

Reference

- [1] T. Osa, C. F. Abawi, N. Sugita, H. Chikuda, S. Sugita, H. Ito, T. Moro, Y. Takatori, S. Tanaka, and M. Mitsuishi, "Autonomous penetration detection for bone cutting tool using demonstration-based learning," in 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 290–296. IEEE, 2014.
- [2] T. Osa, C. F. Abawi, N. Sugita, H. Chikuda, S. Sugita, T. Tanaka, H. Oshima, T. Moro, S. Tanaka, and M. Mitsuishi, "Hand-held bone cutting tool with autonomous penetration detection for spinal surgery," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 6, pp. 3018–3027, 2015.
- [3] L. Qi and M. Q.-H. Meng, "Real-time break-through detection of bone drilling based on wavelet transform for robot assisted orthopaedic surgery," in 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014), pp. 601–606. IEEE, 2014.
- [4] Y. Dai, Y. Xue, and J. Zhang, "Vibration-based milling condition monitoring in robot-assisted spine surgery," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 6, pp. 3028–3039, 2015.
- [5] Y. Dai, Y. Xue, and J. Zhang, "Milling state identification based on vibration sense of a robotic surgical system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6184–6193, 2016.
- [6] Y. Dai, Y. Xue, and J. Zhang, "Bioinspired integration of auditory and haptic perception in bone milling surgery," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 2, pp. 614–623, 2018.

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

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、カ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前進す 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。貫通検知後には刃 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 「次世代医療福祉ロボット」グループ 高野 俊也







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







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 検知して手動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 に再度位置と反力に急激な変位が発生した。これは反対



(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 オ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動で切 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



(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

		Average	
		Time required to	Travel distance
	Trials	detect penetration [s]	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*<0.00			

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。

謝辞

本研究は AMED 課題番号 24he2202014h0103 の支援を受け実施された。

【参考文献】

- 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)



【原著論文】 (投稿掲載)

- 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) [IF2022=1.7]
- 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) [IF2022=1.7]

【口頭発表】 (国外)

- 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, Helsinki-Espoo, Finland
- 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, Seattle, USA
- 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 Mecatronics (Mecatronics2023) and the 9th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2023), 2023 年 9 月 10 日, Yokohama, Japan
- 4. 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 Mecatronics (Mecatronics2023) and the 9th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2023), 2023 年 9 月 11 日, Yokohama, Japan

- 5. T. Ezaki, K. Kisima, S. Shibao, T. Matsunaga, Pareira ES, Y. Kitamura, K. Takahara, T. Iwama, Sampetrean 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, Vancouver, Canada
- 6. 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, Tokyo, Japan
- 7. 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 toolwith a real haptic interface in orthopedic surgery", Orthopaedic Research Society 2024 Annual meeting (ORS 2024), 2024 年2月3-4日, California, USA
- 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, Kyoto, Japan
- 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 IEEJ 10th International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2024), 2024 年 3 月 4 日, Kyoto, Japan

10. K. Kodama, H. Obara, T. Yokoyama, and T. Shimono, "Velocity Noise Reduction Using Multi-Level Inverters", The IEEJ 10th International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2024), 2024 年 3 月 4 日, Kyoto, Japan 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, Kyoto, Japan

12. 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, Kyoto, Japan

(国内)

13. 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

14. 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

【記者発表・取材・受賞】

(受賞)

 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, Seattle, USA

(報道発表)

 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

【展示会・出展】

 "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