

# 研究報告2021 目次

## 【研究開発部】

### 実用化実証事業

#### 「次世代医療福祉ロボット」グループ

◆ 総括	195
◆ 環境情報に基づいた仮想環境提示の機能を有する2自由度力触覚ドリルの開発	198
◆ 貫通検知機能を有する整形外科用力触覚ドリルの開発	201
◆ 業績	204



# 「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、リアルハプティクスを援用したヘルスケアシステムの実用化研究を推進する。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、殿町（川崎市川崎区）に新しく設置した本研究グループの産学公連携拠点において産業界とも密に連携することで、開発技術の社会実装へと繋げることを目指す。

## 1. 2020 年度の研究目的

実用化実証事業としてのプロジェクト一年目となる 2020 年度では、以下の項目を重点研究テーマとして定め、開発技術の実用化研究を実施する。これにより、これまでのプロジェクト研究で得られた研究成果の社会実装へと繋げていくことを目的とする。

### (1) 医療デバイスの開発研究

整形外科応用領域においては、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）による支援の下、リアルハプティクスを援用した脊椎貫通検知と自動停止機能を有する骨ドリルの開発研究を行い、慶應義塾大学医学部整形外科学教室とセットアップ企業と連携して、開発技術の有用性を明らかにする非臨床実験を実施する。

脳神経外科応用領域においては、慶應義塾大学医学部脳神経外科学教室との連携により、力触覚を有する脳神経外科手術支援デバイスの改良研究を実施すると共に、非臨床実験により正常脳組織と腫瘍組織との判別機能の有用性を実証する。さらに、2020 年度は特に臨床実験への移行準備を進める。

呼吸器内科領域においては、慶應義塾大学医学部呼吸器内科および同大学薬学部との連携により、慢性呼吸器疾患治療の高度化に向けた吸引動作センシングデバイスの改良研究を実施する。

そのほか、鋭敏な力触覚伝送機能を持った診断装置や、画像情報や力情報を活用した新しい動作ナビゲーション機能を持った手術支援ロボットの開発研究を継続して実施する。

### (2) 医療シミュレータの開発研究

前述の AMED・ACT-MS の支援の下、骨ドリルを通して得られた力触覚を再現し、切削動作のトレーニング応用が可能なドリルシミュレータの開発を行う。また、AMED 未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「術者の技能に依存しない高度かつ精密な手術システムの開発」における分担研究として、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を進める。

### (3) 人間支援ロボットの開発研究

有望シーズ展開事業で得られたリハビリテーション支援ロボットや介護支援ロボットなど、人間支援ロボットの試作開発成果を基に、グループリーダーが所属する横浜国立大学の理工系、社会科学系、人文学系の様々な分野の研究者らと協力して、実証フィールドとしての地域連携体制を構築する。産業界との連携を通して、研究成果や開発要素技術の社会実装へと段階的に移行することを目指す。

## 2. 2020 年度の研究成果

2020 年度においては、各重点研究テーマにおいて、以下の具体的な研究成果を得ることができた。

### (1) 医療デバイスの開発研究

整形外科応用領域においては、AMED・ACT-MS のプロジェクト研究として、ハプティック骨ドリルの改良開発を行った。昨年度末に試作した骨ドリル試験機（図 1）を用いた豚脊椎に対する検証実験を慶應義塾大学医学部と協力して実施した。さらに実用化に向けた装置改良を行い、脊椎貫通時の自動検知機能、ドリル緊急停止機能といったアルゴリズム開発を行った。改良試作機を用いた評価試験結果より、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を実証するなど、開発技術の有用性を確認することができた。さらに、これらの技術をボーンソーやハンディドリル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示した。

脳神経外科領域では、これまでのハプティック鑷子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試作を行った（図 2）。また、基礎検証実験から、腫瘍組織領域の自動判別の実行可能性を確認することができた。

呼吸器内科領域においては、開発した吸引動作センシングデバイスをを用いた臨床試験を実施した。吸引装置の操作誤りを、センサ情報から判別可能であることが示唆される実験結果を得ることができた。

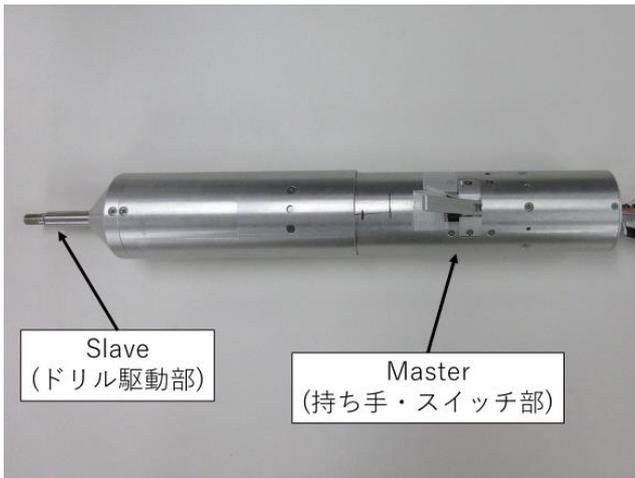


図1 試作した力触覚ドリル



図2 試作したペン型組織剛性計測装置

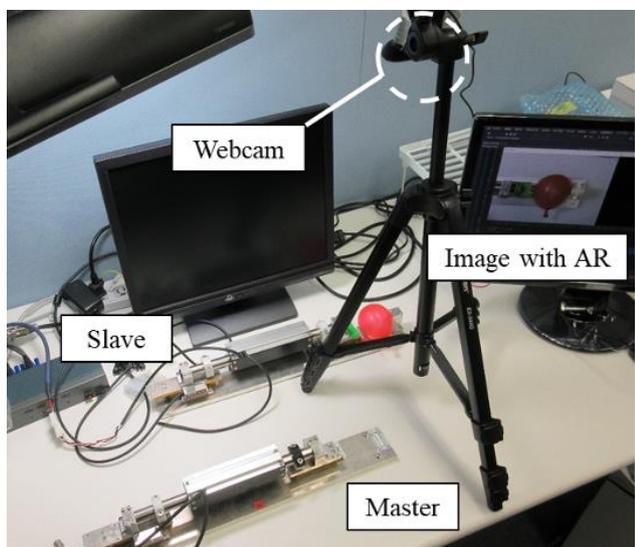


図3 画像情報を活用したARによる動作支援

そのほか、遠隔触診等への画像情報と力触覚情報を統合利用に関するネットワークシステム研究では、両情報に基づいた機械学習により対象物の二値分類精度が向上することを明らかにした。また、画像情報を動作ナビゲーションに活用するための拡張現実感技術の開発を行った（図3）。

### (2) 医療シミュレータの開発研究

AMED・ACT-MSの支援を受けて、開発したハプティックドリルを通して得られた力触覚情報から切削環境をモデル化し、バーチャル環境からの力触覚を再現可能なドリルシミュレータの開発を行った（図4）。特にドリルを回転していないときの接触感や、ドリル回転時の切削抵抗感などを再現可能であることを確認した。

また、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、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設計試作を完了した。

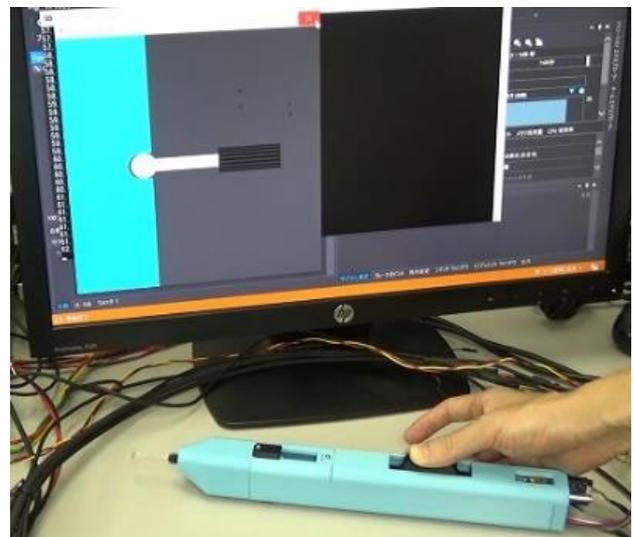


図4 ハプティックドリルシミュレータ

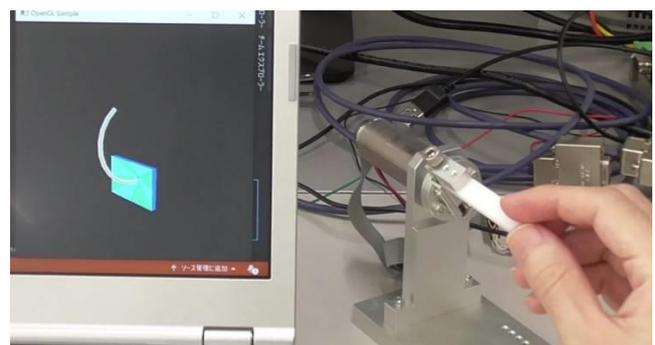


図5 屈曲針の刺入シミュレータ

### (3) 人間支援ロボットの開発研究

リハビリテーション支援ロボットや介護支援ロボットといった人間支援ロボット研究に関する地域連携体制を構築するために、本研究グループのグループリーダーが所属する横浜国立大学の若手・中堅研究者によって組織される若手研究拠点と密に連携することで、リビングラボの立ち上げを行った。今後は、有望シーズ展開事業で開発した

下肢機能支援装置などの有用性の評価研究をリビングラボ活動を通じて実施する予定である。

### 3. 今後の展望

本研究グループでは、これまでの KISTEC プロジェクト研究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ヘルスケアシステムの社会実装研究を推進している。特に医療デバイス応用に関する研究テーマでは、産業界との連携体制が構築できてきており、今後も外部資金を活用しながら実用化に向けた開発研究を進めていく予定である。また、これまでの人間支援ロボットの開発研究を通して得られた動作支援技術や動作評価技術については、今後の様々な機器開発のための要素技術として利活用することができるよう、地域連携／産学公連携活動を展開していく予定である。

# 環境情報に基づいた仮想環境提示の機能を有する

## 2 自由度力触覚ドリルの開発

松永 卓也

### 1. はじめに

整形外科手術では脊椎の切削のために医療用ドリルが用いられる。脊椎内部には中枢神経を構成する脊髄が存在し、脊髄損傷は患者の身体に障害が生じる原因となる。執刀医は医療用ドリルを精細に扱う技能が要求され、かつ慎重に切削を進める必要があり、手術が大きな負担となる。したがって、整形外科手術における治療行為支援や医師の技能向上等に貢献する技術の実現が期待されている。

医療分野では手術支援のためにロボット技術の研究開発が進められており、整形外科分野においても CT データに基づいた術前の計画に従って大腿骨を切削する多自由度ロボット[1]や、高精度な椎弓根スクリュー挿入のためのガイド装置[2],[3]が開発されている。また、技能向上のためのトレーニングシステムに応用可能な技術として、アクチュエータを備えた装置を介して仮想空間の力触覚情報を提示する力触覚レンダリングの研究がおこなわれている[4][5]。さらに、マスタ・スレーブシステムを介した作業で得た接触対象物（環境）の力触覚情報を利用し、マスタロボットで力触覚レンダリングをおこなうシミュレータの研究[6][7]が進められている。



図 1. 2 自由度ドリル試作機

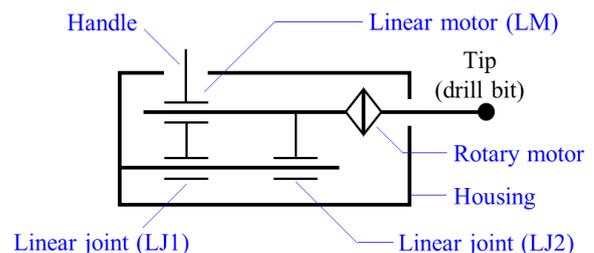


図 2. 装置内部の構造

### 1. 1 2 自由度力触覚ドリル

本研究では、実空間の環境（実環境）の切削における操作者支援が可能なドリル装置および実環境に対する接触動作で得られる情報に基づいて構築した仮想空間の環境（仮想環境）を提示するドリルシミュレータとして利用可能な 2 自由度力触覚ドリル（図 1）を開発する[8]。

#### 1. 1. 1 機構

本研究で試作した 2 自由度力触覚ドリルは図 2 に示す構造を有し、筐体内部にリニアモータ、回転モータ、二つの直動関節を備える。リニアモータのコイルハウジングを含む可動部（可動部 1）は直動関節 1、シャフトを含む可動部（可動部 2）は直動関節 2 を介して筐体に接続される。医療用ドリルビットの回転に使用する回転モータは可動部 2 に含まれる。可動部 1 の一部はハンドルとして筐体外にあり、ドリル先端位置の操作やシミュレータにおけるインターフェースとなる。回転モータはエンコーダを内蔵し、ドリルビットの回転角度を取得する。一方、リニアモータで駆動する可動部は二台のエンコーダを備える。エンコーダ 1 は筐体に対する可動部 1 の位置、エンコーダ 2 は可動部 1 に対する可動部 2 の位置を計測する。リニアモータは制御、直動関節は機構による固定が可能であり、固定部を切り替えることで装置の機能が変化する。

部 1 に対する可動部 2 の位置を計測する。リニアモータは制御、直動関節は機構による固定が可能であり、固定部を切り替えることで装置の機能が変化する。

#### 1. 1. 2 機能

ドリル試作機の機能は 4 種類に分類される。直動関節 1 が機構的に固定され、かつリニアモータのコイルハウジングに対するシャフトの位置が制御で固定される場合、装置の可動部は回転モータで駆動するドリルビットのみである。従来の医療用ドリルと同様に筐体を保持し、先端を環境に接触させることで使用可能である。一方、リニアモータのシャフトの位置が制御によって変化する場合には、筐体に対する先端部の位置を自動的に変化させて切削を進めることができる。直動関節 1 が固定されない場合、作業者はハンドルを介して可動部 1 をマニュアル操作することが可能である。このとき、リニアモータが制御で固定されている状態では、ハンドルの移動距離は先端部の移動距離と等しい。制御で固定しない場合にはハンドルを介して伝達される動作を加工することが可能である。いずれの機能においてもドリル回転時は切削動作、停止時は接触動作となる。

実環境を対象とした3つの機能に対して、シミュレータでは仮想環境を切削、接触の対象とする。直動関節2を機構的に固定することで、リニアモータで発生する力を可動部1のハンドルを介して作業者に提示する力触覚レンダリングが可能となる。

### 1. 2 動作制御

装置が内蔵する各アクチュエータは外乱オブザーバ[9]を用いたロバストな加速度制御によって駆動する。回転モータは速度制御で駆動し、速度指令値を変化させることでドリルビットの回転と停止を切り替える。一方、リニアモータの制御は2自由度力触覚ドリルの機能に応じて変化する。

実環境を対象とした機能では、リニアモータは位置制御で動作する。加速度参照値  $s^2X^{ref}$  は次式で与えられる。

$$s^2X^{ref} = C_p(s) (X^{cmd} - X_2^{res}) \quad (1)$$

$C_p(s)$ ,  $X^{cmd}$ ,  $X_2^{res}$  は位置制御器、位置指令値、位置応答値を表す。リニアモータの位置制御において、応答値にはエンコーダ2で取得した情報が用いられる。指令値を一定値に設定することで、リニアモータのコイルハウジングに対するシャフトの位置が固定される。一方、直動関節1が固定されている場合、指令値を変化させることで先端部を自動的に前進させることができる。マニュアル操作ではハンドルの動作を計測するエンコーダ1の情報  $X_1^{res}$  に応じて指令値を変化させることで位置情報の増幅がおこなわれる。マニュアル操作における位置指令値は次式で与えられる。

$$X^{cmd} = (1 - \alpha) X_1^{res} / \alpha \quad (2)$$

$\alpha$  は位置スケールを表す。また、エンコーダ1とエンコーダ2の値の和が先端部の位置となる。

2自由度力触覚ドリルは力センサレスであるため、反力推定オブザーバにより力情報を得る[10]。実環境に対する接触や切削において位置情報と力情報を得ることで環境情報の抽出が可能となる。仮想環境を対象としたシミュレータでは、抽出された環境情報に基づいてパラメータを設計したコンプライアンス制御で力触覚情報を提示する。すなわち、直動方向については2自由度力触覚ドリルのみで実環境に対する接触、切削による情報取得と、シミュレータとしての力触覚情報提示が可能である。本研究では、仮想環境に対する接触で発生する反力をコンプライアンス制御の仮想剛性で提示する。切削動作では仮想粘性で擬似的な切削力を提示し、同時に仮想環境の位置を更新することで切削の進行を表現する。

## 2. 実験と結果

2自由度力触覚ドリルの試作機を使用し、マニュアル操作による接触動作とシミュレータによる仮想環境提示をおこなった。

### 2. 1 マニュアル操作による接触動作

発泡スチロールを実環境として使用し、位置スケール  $\alpha = 1, 2$  の条件下でマニュアル操作による接触をおこな

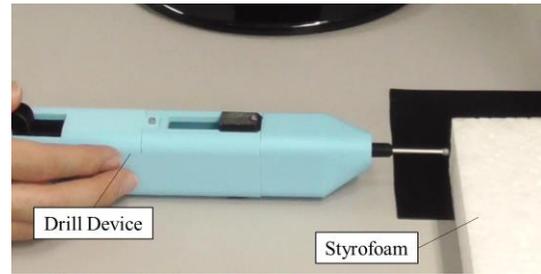


図3. マニュアル操作による接触動作

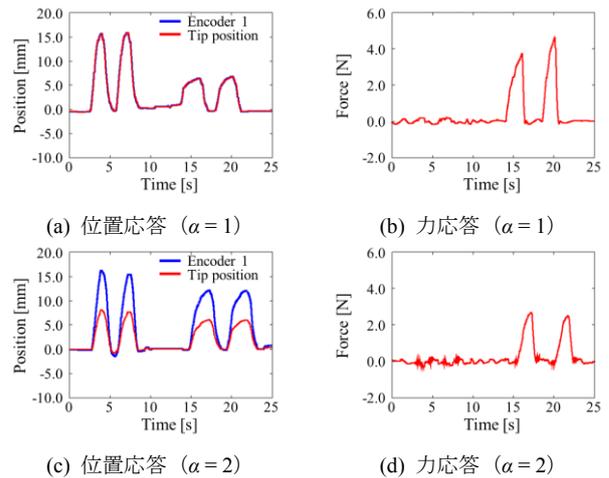


図4. 実環境に対する接触動作における位置、力応答

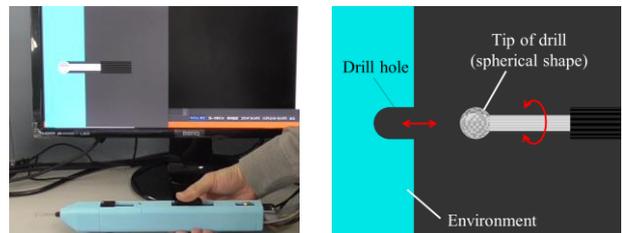


図5. ドリルシミュレータによる仮想環境提示

った(図3)。各条件について2度の自由動作と接触動作をおこなった。

実験結果として位置応答値、力応答値を図4に示す。図4(a), (b)に示す位置スケール  $\alpha = 1$  の結果では、ハンドルの動作を示すエンコーダ1の値と先端位置の動作が一致した。そして、0秒から10秒における自由動作で発生した反力が小さく、操作力が無視できる大きさであることを確認できる。10秒から25秒における接触動作では環境反力が推定された。図4(c), (d)に示した位置スケール  $\alpha = 2$  の結果では、ハンドルの変位が先端部の変位の2倍となり、位置情報が増幅された。

### 2. 2 シミュレータによる仮想環境提示

2自由度力触覚ドリルの試作機にグラフィックインターフェースを加えたシミュレータを用いて、仮想環境に対する接触動作と切削動作をおこなった(図5)。予備実験においてマニュアル操作で発泡スチロールに対する接触、切削動作をおこない、コンプライアンス制御の仮想剛性と仮

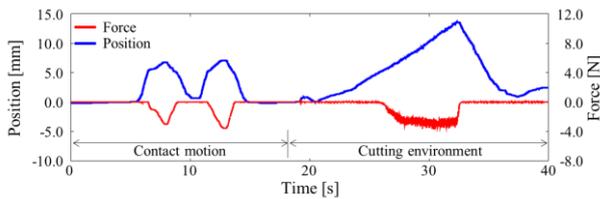


図 6. シミュレータにおける位置、力応答

想粘性の値を決定した。グラフィックインターフェースでは試作機と同期して変化するドリルビットと仮想環境を OpenGL で描写した。

シミュレータの実験における位置、力応答値を図 6 に示す。実験前半の接触動作では押し込み量に応じた反力が発生し、仮想環境の剛性が提示された。後半の切削動作では移動速度に応じた反力が仮想粘性によって発生し、擬似的な切削力が提示された。また、仮想環境の位置が更新されたことで、切削後にドリルビットが仮想環境から離れる際には反力が発生しなかった。

### 3. 考察及び今後の展望

2 自由度力触覚ドリルの試作機を用いた検証実験の結果から、実環境を対象としたマニュアル操作では先端部が接触した環境の力触覚が操作者に伝達され、また、位置スケールリングによる動作の加工が可能であることが確認された。さらに、マニュアル操作で得た環境情報に基づいて仮想環境を構築し、ドリル試作機を用いたシミュレータで提示可能であることを確認した。

本研究では、ドリル回転軸と平行な一自由度の直線運動のみを環境情報抽出や仮想環境提示の対象としたが、3次元空間の運動を対象とする場合にはアクチュエータ数の増加による大型化や質量増加等の問題を考慮する必要がある。また、仮想環境提示において単純なモデルを使用した。シミュレータの性能を高めるためには、より詳細な仮想環境モデルを構築する必要がある。

今後はドリル試作機の機構改良と並行して、シミュレータで提示する仮想環境の詳細なモデル化をおこなう計画である。

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. W. L. Bargar, A. Bauer, and M. B'orner, *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 354, pp. 82–91, Sep. 1998.
2. N. Lonjon, E. Chan-Seng, V. Costalat, B. Bonnafoux, M. Vassal, and J. Boetto, *European Spine Journal*, vol. 25, no. 3, pp. 947–955, Mar. 2016.
3. W. Sukovich, S. Brink-Danan, and M. Hardenbrook, *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 2, no. 2, pp. 114–122, Jun. 2006.
4. V. B. Chial, S. Greenish, and A. M. Okamura, in *Proceedings of 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Mar. 2002, pp. 80–87.
5. K. E. MacLean, in *Proceedings of Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, Nov. 1996, pp. 459–467.
6. T. Shimono, S. Katsura, and K. Ohnishi, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 2, pp. 907–918, Apr. 2007.
7. K. Yu, T. Matsunaga, H. Kawana, S. Usuda, and K. Ohnishi, *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 66–72, Jan. 2017.
8. T. Matsunaga, T. Shimono, K. Ohnishi, S. Takano, H. Kobayashi, M. Yagi, and M. Nakamura, in *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Mechatronics*, Mar. 2021.
9. K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 56–67, Mar. 1996.
10. T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, pp. 259–265, Apr. 1993.

# 貫通検知機能を有する整形外科用触覚ドリルの開発

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

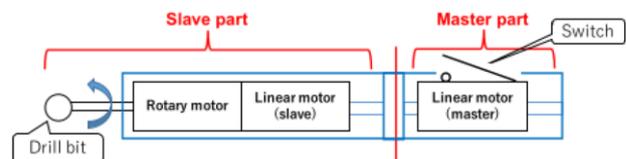


図 2. マスタ・スレーブ一体型ドリルの概略図

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

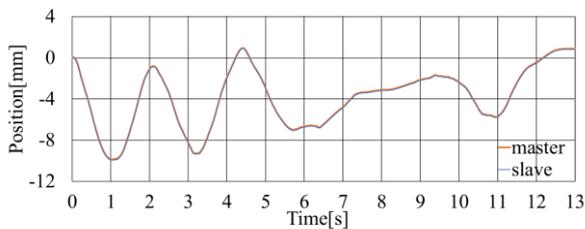


図 3. 実験〈1〉の位置応答

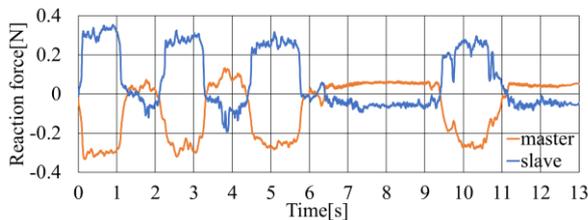


図 4. 実験〈1〉の力応答

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

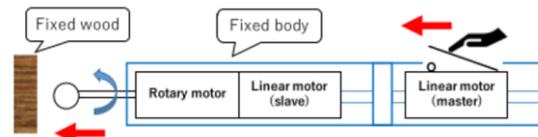


図 5. 実験〈2〉〈3〉での実験環境

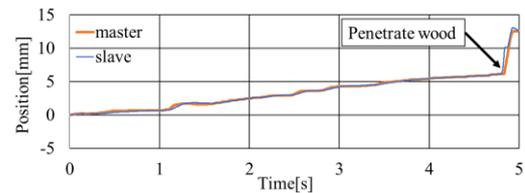


図 6. 実験〈2〉の位置応答

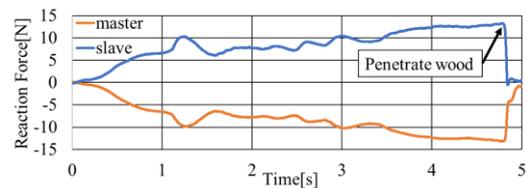


図 7. 実験〈2〉の力応答

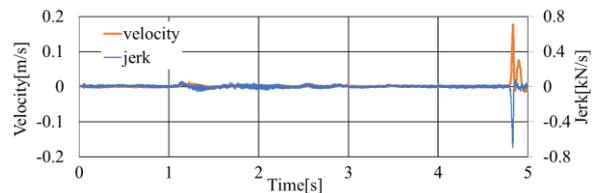


図 8. 実験〈2〉の位置、反力の微分応答

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

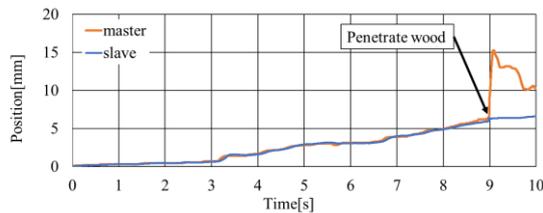


図 9. 実験〈3〉の位置応答

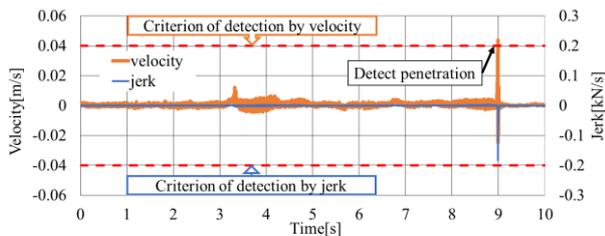


図 10. 実験〈3〉の位置、反力の微分応答

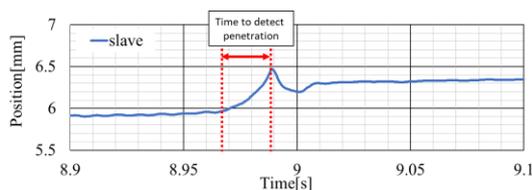


図 11. 実験〈3〉貫通時のスレーブの位置応答拡大図

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. Díaz 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.

## 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).

### 【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 of 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).

### 【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

### 【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 IEEJ 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 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, SAMCON2021, 2021年3月, オンライン

#### 【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』

#### 【受賞・受章】

1. SAMCON2021 Outstanding Paper Awards, 下野誠通, 田中翔大, 八田禎之, 浅井洋, 藤本康孝, 2021年3月11日

#### 【特許】

国外特許出願 1件

1. 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/JP2021/13428  
出願日: 2021年3月29日  
発明者: 下野誠通、大西公平、中村雅也、八木満、松永卓也、浅井洋、小林宏尚  
出願人: KISTEC, 慶応義塾大学