

遠隔超音波診断ロボットのための安全機構を有する プローブ把持部の開発

Development of a probe gripper with a safety mechanism for a remote ultrasound diagnostic robot

○沖万理*, 佐藤和奏*, 南斉俊佑*, 星崎みどり*, 渡邊博之*,
長縄明大*

○ Banri Oki*, Wakana Sato*, Shunsuke Nansai*, Midori Hoshizaki*, Hiroyuki Watanabe*,
Akihiro Naganawa*

*秋田大学

*Akita University

キーワード： 超音波診断 (Ultrasound diagnostics), 超音波プローブ (Ultrasound probe),
把持機構 (Gripping mechanism), 機械的安全機構 (Mechanical safety device)

連絡先： 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学情報データ科学部
長縄 明大, Tel.: (018)-889-2726 E-mail: naganawa@gipc.akita-u.ac.jp

1. 緒言

現在, 日本は超高齢社会を迎えており, 令和 6 年 10 月時点で高齢化率は 29.3 % を超え, 2050 年には 37.1 % に達すると予測されている¹⁾. 高齢化は, 医療需要の増大と医療提供体制への負荷を促進する. 特に都市部と地方部における医師の偏在が深刻化しており, 特定の診療科の専門医が不在となっている地域が増加している²⁾. 秋田県でも, 循環器疾患や呼吸器疾患など, 高齢者に多い疾患の診察を行う専門医がいない過疎地が増加している.

一方, AI やロボットなどの技術革新による DX (デジタルトランスフォーメーション) が進展しており, Society5.0 において医療分野は DX の恩恵を受ける最重要分野として位置付けられている. このような背景を踏まえ, オンラ

イン診療や遠隔医療は都市部の病院と過疎地の医療機関をリアルタイムで繋ぐ重要な解決策と考えられている. 中でも, 秋田県における循環器内科の医師が不足していることや全国・秋田共に死因別死亡割合で悪性新生物に次ぐ第二位が心疾患³⁾であることから, 本研究では心エコー検査に注目した. 心エコー検査は, Fig. 1 に示すように診断, 超音波を用いて心臓の形態や動きを画像化し, 心臓の機能や構造の異常を調べる検査である.

著者らは, 超音波検査装置を用いるオンライン診療において, 心エコー検査をするために使用するロボットを, ロボット操作技術に精通していない医師でも, 簡便かつ自身の手技と同様の操作性で超音波プローブを持つロボットを操作できるシステムを開発することを目指してい

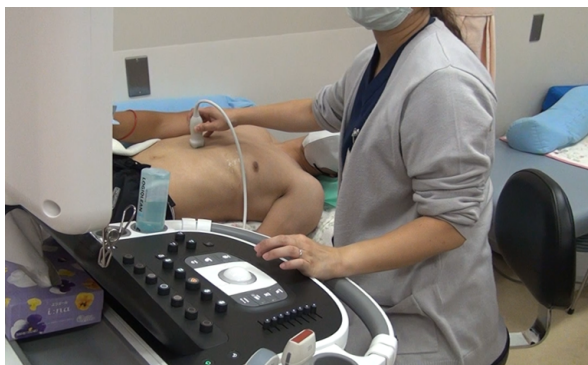


Fig. 1 心エコー検査 Echocardiography

る。心エコー検査を可能にする遠隔診断ロボットシステムの開発は、これらの課題解決に大きく寄与することが期待されており、早期の社会実装が望まれているため、その社会的意義は極めて大きい。

ロボットによる心エコー検査は、患者とロボットがプローブにより直接触れ合うため、安全性は確実に担保されなければならない⁴⁾。本研究では、センサ等を用いた制御による安全策を「電気的安全機構」、電気的要素を含まない構造のみで機能する安全策を「機械的安全機構」と定義する。遠隔超音波診断に関する先行研究では、センサ等を用いた電気的安全機構のみの事例⁵⁾や、安全機構自体を持たない事例が多く、電気的な不具合等により作動しない場合や、プローブの押し力が過剰となっても気付かず診断を継続してしまうリスクがある。したがって、ロボット本体の電気的安全機構に加え、超音波プローブ把持部に機械的安全機構を実装することで二重の安全性を確保することが期待できる。機械的安全機構に関しては、Wang S らがロボット関節部にクラッチジョイントを実装して最大力を制限する手法⁶⁾を示しているが、先行研究は少ない。

そこで本研究では、機械的要素のみで構成された安全機構をロボットのエンドエフェクタであるプローブ把持部に搭載し、電気と機械での二重の安全性を有するロボットシステムの開発を目的とする。

本稿では、機械的安全機構を搭載したプローブ把持部の設計・製作・評価について述べる。

2. システム概要

本章では、2.1 節でシステム全体の構成要素について、2.2 節で本研究にて着目する患者側システムについて述べる。

2.1 システム全体の構成要素

Fig. 2 に著者らが検討しているシステム全体の構成を示す。本システムは、都市部の医師がロボットを操作する「医師側システム」、遠隔地の患者が実際に検査を受ける「患者側システム」、遠隔操作を可能にする「通信制御システム」の3つの要素から構成されており、本研究では、患者側システムについて検討する。

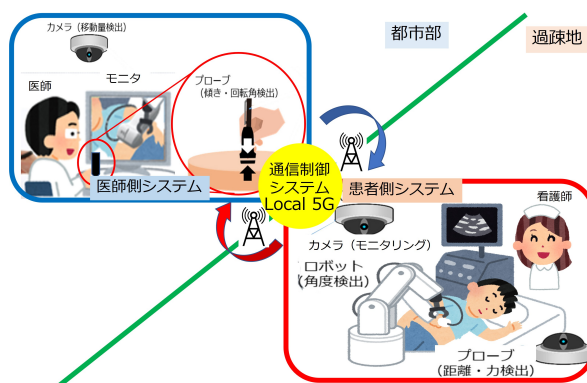


Fig. 2 システム全体概要図 Overall system overview diagram

2.2 患者側システム

Fig. 3 に本研究室で実際に使用している患者側システムを示す。患者側システムは、ロボットアーム、超音波プローブ、カメラ、マイクやコンピュータにより構成されており、看護師が常駐することを想定している。使用するロボットは Universal Robots 社の UR5e⁷⁾を採用し、医師側システムとは、PC を介してローカル 5G 環

境で接続している．そのため看護師や患者はカメラとマイクを通して医師とやり取りすることができる．

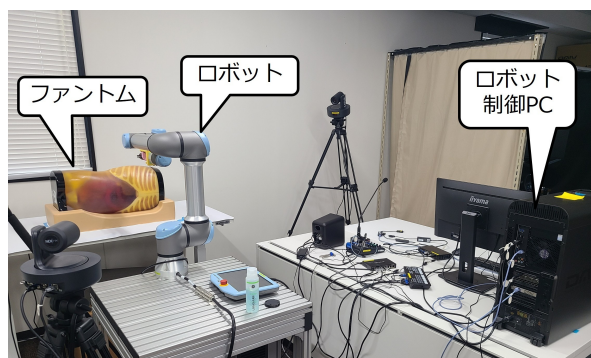


Fig. 3 患者側システム System on the patient side

3. 超音波プローブ把持部

本章では，3.1 節でプローブの把持方式について，3.2 節で機械的安全機構の設計について述べる．

3.1 把持方式

超音波プローブの把持部は，ロボットのエンドエフェクタであるため，求められる機能は以下の通りである．

- ・ 超音波プローブを確実に把持すること
- ・ 検査画像が得られること
- ・ 機械的安全機構を加えることにより高い安全性を有すること

著者らの先行研究では直方体型でのプローブ把持を採用したが，検査機器であるプローブが四方向からの強い圧力により破損してしまうリスクがあるうえ，把持部の重量増加を招くという課題があった⁸⁾．そのため，本研究の把持方式を Fig. 4 に示すようにプローブの形に合わせた楕円型での包み込み把持を採用した⁹⁾．スポンジやボルト，ナットによる固定で安定な把持

や簡易的な取り付け，プローブの破損可能性の低減を実現する．



Fig. 4 把持方式 Gripping method

3.2 機械的安全機構の設計

著者らによる検査中の押し力計測の結果，検査画像を得ている間の押し力は 300 gf から 780 gf であったため，閾値を 800 gf \approx 7.85 N に設定した．また，機構の設計コンセプトを「閾値での押し力の開放」とした．本機構の要求条件としては，閾値未満では，通常の実験が可能であること，閾値で押し力が開放される安全機構をもつということ，医師，看護師ともに押し力の可視化ができることが挙げられる．

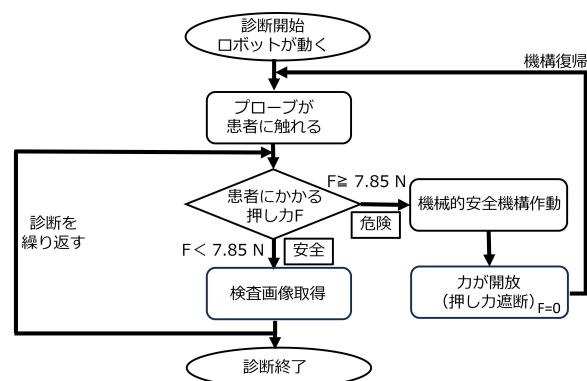


Fig. 5 機構フロー system flow

Fig. 5 に示すように，患者にかかる押し力 F が 7.85 N 未満であれば安全であるため検査画像

を取得できる．7.85 N以上となれば機械的安全機構が作動し力が開放されるというものである．

そこで，設計コンセプトに合わせトルクリミッターを採用した．トルクリミッターとは，シャフトと出力側部品間に組み込み，一定のトルクを超えると内部のスリップ機構が働き動力の伝達を遮断する，過負荷防止機構のことをいう．過負荷による故障や損傷を防ぐための安全装置としてOA 機器やロボットなどの製品に組み込まれている¹⁰⁾．本来は，モーターなどの回転機構に取り付けるが，本研究では，設定されたトルク以上で内部が作動するという特性を生かし，外周部を固定して使用する．押し力という線形力を回転トルクに変換する必要があるため，ラックアンドピニオン機構を採用した．ロボットに接続するロボット大枠部には，鉛直方向にラックを配置し，ピニオンとラックによる噛みあいで押し力が伝達されるラック部と，ラックがないことで押し力が伝達されない逃げ部がある．本研究では，Fig. 6 に示すように，トルク

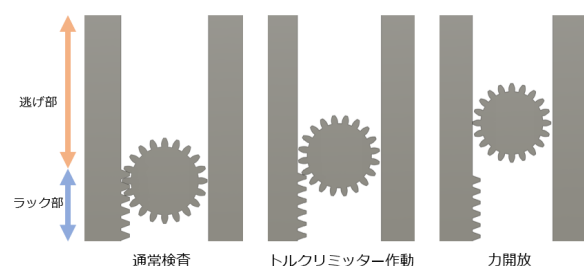


Fig. 6 力開放の仕組み Force-release mechanism

リミッターが閾値で作動することにより回ったピニオンが，ラック部から逃げ部に到達する際に押し力を開放することを目指す．7.85 N未満の押し力では，ピニオンは回らず噛みあいにより押し力を伝達する必要がある．

プローブ把持部の全体像は Fig. 7 に示す．構成要素としては，ピニオンがシャフトによってトルクリミッターに接続しているトルク部，トルク部の上下移動とラック部・逃げ部をもつロボット大枠部，プローブを把持する包み込み部

の3つに大きく分かれる．

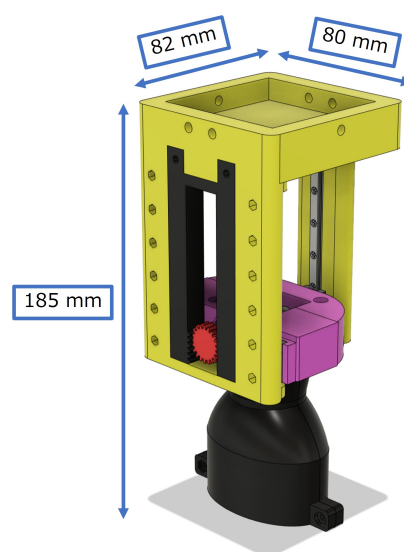


Fig. 7 把持部全体像 overall view of the probe gripper

ピニオン周辺にはリニアガイドを2本，反対側には1本取り付け，摩擦の少ないスムーズな上下移動と噛み合わせのずれを低減している．把持部の全体の寸法は，Fig. 7 の通りだが，機構作動後は最短高さが135 mmになる．プローブを装着すると最長高さ245 mm，最短高さ195 mmとなる．



Fig. 8 トルクリミッター torque limiter

使用したトルクリミッターを Fig. 8 に示す．TOK 社の TLD4-618-60W のばね式であり，作動トルクが 58.8 mN・m (600 gf・cm) で設定されている．閾値である押し力でトルクリミッターを作動させるピニオン円半径 r を以下に示す．

$$r = \frac{T}{F} = \frac{0.0585}{7.85} = 0.00749 \text{ m} \quad (1)$$

したがって，ピニオン円直径を 15 mm とし，ラッ

クとピニオンの設計を行った。圧力角 20° ，歯数 20 とし，モジュール 0.75 mm，歯幅 5 mm とした¹¹⁾。トルクリミッター作動によりラックとの噛み合いが抜け，逃げ部に入るために，ラック部の歯数を歯が噛み合う最小数にした。また，トルクリミッターは両方向に回転可能であるため，逃げ部にピニオンが到達し押し力が開放された際に，看護師がラック方向に力を加えることによる方法で機構復帰をし再び検査を行えるということを想定している。3DCAD (Autodesk Fusion) で設計したプローブ把持部を 3D プリント (Bambu Lab X1E Combo) で製作した。

4. 検証実験

本章では，4.1 節で設計した機構の作動検証実験について，4.2 節で把持部をロボットに装着して行った押し力開放実験について述べる。

4.1 トルクリミッター作動検証



Fig. 9 機構作動検証 Verification of mechanism operation

トルクリミッターが想定している閾値で作動するかを確認するため，検証実験を行った。Fig. 9 に実験装置を示す。鉛直方向においた把持部をステージに設置し， 100 ± 0.1 g に調整した重り

(水) を順次载荷した。本実験では，「トルクリミッターの作動」をピニオン 1 歯分の移動である 2.36 mm とし，鉛直方向の移動変位量をレーザー変位センサ (OMRON, ZX-LDA11-N) で可視化する。2.36 mm に到達した際の载荷重を 5 回反復で記録した。また，レーザーを反射させるため，反射板を把持部上部に置いた。そのため，反射板の 37.74 gf とロボット大枠部とリニアガイドの 128.49 gf が自重としてトルクリミッターに加わる。

Table 1 検証による作動値 Activation values obtained by verification

試行数	载荷重 [gf]
1 回目	500
2 回目	500
3 回目	500
4 回目	500
5 回目	600

Table 1 に，各 5 回の 1 歯分変位時の载荷重を示す。自重合計である 166.23 gf を含めると，1 から 4 回目は総荷重約 666 gf \div 6.53 N であり，5 回目は総荷重約 766 gf \div 7.51 N であるため本実験で作動とした範囲は 6.53 N \sim 7.51 N といえる。したがって，想定している閾値以下での作動という結果となった。5 回目に関しては，500 gf の载荷時点で変位量が 2.25 mm を超えていた。载荷時の水の微小な揺れによるレーザーの振れが測定誤差に繋がったと考えられる。また，本試験は静的条件で荷重をかけているため，ラックアンドピニオンのバックラッシュや組立誤差，摩擦の影響も考えられる。

4.2 押し力開放実験

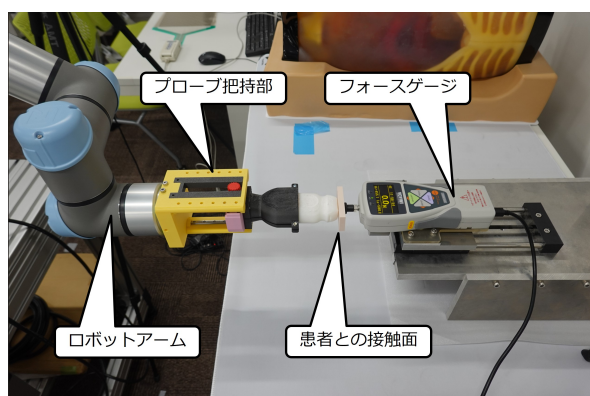


Fig. 10 押し力開放実験 Force-release test

4.1 節の検証では、トルクリミッターの作動が確認された。本節では、この把持部を用いてロボットから患者への押し力が閾値で開放されるか確認するため、押し力開放実験を行う。Fig. 10 に実験装置を示す。本研究室で使用するロボット UR5e のツール先端に、製作した把持部を取り付けた。患者との接触面とした治具をフォースゲージに取り付け、UR5e ロボットのフォースノードを使用し、ツールフレームの Z 軸に対して目標力を 14 N、最大速度制限を 1 mm/s に設定し押し力をかけた。フォースゲージはIMADA の ZTA-500 N を使用し、5 回の反復試行により患者が感じる押し力のデータを取得した。サンプリング周波数は 10 Hz である。時間経過による患者が感じる押し力の変化を Fig. 11 のグラフに示す。

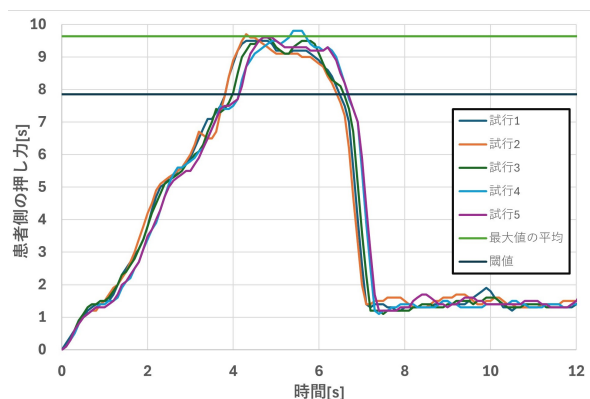


Fig. 11 時間経過による患者側押し力の変化
Patient-side force over time

結果として、プローブが接触すると押し力は増加していき、5 回の試行いずれも約 5 秒付近でピークに達した。その後、押し力が急激に減少している。フォースゲージの値は実際の患者が受けている押し力であるため、トルクリミッターが作動し逃げ部にピニオンが到達したことで、力が開放されたといえる。また、開放後の押し力は約 1.0 N～1.5 N にまで低下し患者に安全な値といえる。開放後、完全に 0 Nにならないのはプローブは患者に触れたままであり、逃げ部にピニオンがあるもののリニアガイドによって大枠とトルク部は繋がれているため、力が微量伝達されたと考えられる。

Table 2 押し力開放実験における押し力最大値
Maximum applied force in the force-release test

試行数	押し力 [N]
1 回目	9.5
2 回目	9.7
3 回目	9.6
4 回目	9.8
5 回目	9.6
平均値	9.64

患者に加わる過剰な押し力を開放することには成功したが、押し力の最大値が Table 2 に示すように 5 回の試行すべてで 9 N を超え、その平均値は 9.64 N であった。力が開放される目標が 7.85 N であるため、約 23 % 上回っている結果となる。その原因としては、トルクリミッターの静的状態から動的状態までに時間が要し、作動と開放の間にも時間がかかったことでトルクが想定より大きくかかったためと考えられる。これを改善する方法として、3.2 節で述べたラックとピニオンの噛み合いの歯数の検討やピニオン円直径を大きくすることで、作動トルクを下げる可以考虑。さらにラックアンドピニオンなどの部品精度向上や、シャフト部分にベアリングを導入することも検討する

べきである。

なお、本実験での力が開放されたという結果は、遠隔超音波診断において機械的安全機構の実装にはトルクリミッターを利用した提案手法が有効であることを示しており、研究目的である二重の安全性の構築に前進したといえる。

5. 結言

本研究では、機械的安全機構を搭載したプローブ把持部の開発を目的とし、トルクリミッターの作動による閾値での押し力の開放を検討した。ロボットに装着し実施した押し力開放実験では、安全機構が力を開放することは確認されたが、実際の開放は閾値である 7.85 N を上回る押し力での開放となった。この結果は、ラックアンドピニオン機構の精度不足や寸法誤差が原因である可能性が示唆された。今後は、全体的な精度向上および寸法調整による再設計・追加検証、装置全体の耐久性評価を行い、医療現場での早期実用化を目指す。

本研究の一部は、JSPS 科研費 23K06844 の助成を受けたものである。関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府ホームページ，令和 7 年版 高齢社会白書，高齢化の状況
- 2) 厚生労働省，令和 6 年（2024）人口動態統計月報年計（概数）の概況
- 3) 秋田県健康福祉部健康づくり推進課，令和 6 年（2024）人口動態統計（概数） 秋田県の概況
- 4) Eugene Kim, Yoji Yamada and Shogo Okamoto: Safety of Human-Robot Collaborative Operation Systems, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 37, No. 10, 923/927(2019)
- 5) Kim Mathiassen, Jørgen Enger Fjellin, Kyrre Glette, Per Kristian Hol and Ole Jakob Elle: An Ultrasound Robotic System Using the Commercial Robot UR5
- 6) Wang S, Housden RJ, Noh Y, Singh A, Lindenroth L, Liu H, et al. Analysis of a customized clutch joint designed for the safety management of an ultrasound robot. Appl Sci. 2019;9:1900.
- 7) Universal Robots, UR5e, <https://www.universal-robots.com/ja/products/ur5e/>
- 8) 石井裕貴，星崎みどり，南斉俊佑，長縄明大：遠隔超音波検査で用いるロボットのプローブ把持部の開発 計測自動制御学会 東北支部 345-3, 2023.
- 9) Kenjiro Tadakuma: Principle and Embodiment of Embracing Gripper Mechanism, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 35, No. 1, 36/39(2019)
- 10) 株式会社 TOK, トルクリミッターの使い方 | 過負荷防止機構
- 11) 林則行，富坂兼嗣，平賀英資，共著，谷口修監修，機械設計法（改訂・SI 版），最新機械工学シリーズ 4，森北出版株式会社，p.120-124，2001