

技術紹介

6

ロボットハンド用指先触覚センサと機械学習を用いた滑り検出システムの開発

Development of a fingertip tactile sensor for robot hand and algorithm to detect slip based on machine learning

佐藤 隼也	Junya Sato	商品開発センター 技術エキスパート
大胡 拓矢	Takuya Daigo	商品開発センター 主任
富岡 昭浩	Akihiro Tomioka	商品開発センター エグゼクティブエキスパート

キーワード: ロボットハンド、触覚センサ、マニピュレーション、柔軟物、すべり、把持位置、引張方向、機械学習

Keywords: Robot hand, Tactile sensor, Manipulation, Flexible objects, Slip, Grasping position, Pull direction, Machine learning

要 旨

労働人口減少による労働生産性の低下に対し、人の手作業をロボットに置き換えることで生産力の維持や向上を目指す試みが活発に行われています。

ロボットと人との関わりの増加に伴い、ロボットには単純な繰り返し動作だけでなく、柔軟物、形状が異なる物、死角での把持など人が行う広範な動作が求められています。このような動きを実現させるためには、センシングを含む人の機能の模倣が重要であると考え、我々はこれまでに指先センサモジュールの開発に取り組んできました。

このセンサモジュールは、物の形状を認識する近接センサと把持力を検出する荷重センサで構成され、ロボットハンドに実装することで、物体把持に対し有効であることを報告してきました。¹⁾

本稿では、触覚センサモジュールの構造や構成材料を改変することで、接触状態の検出に適したセンサモジュールの構成について報告するとともに、センサモジュールと機械学習を利用した滑り検出器を使用することで、学習していない紐でも滑り状態を検出可能であることを見出した結果について紹介します。

SUMMARY

In Japan, towards the decrease of a productive efficiency due mainly to the decline in the working population, many studies have been carried out to maintain, more to improve productivity by replacing hand work with robotic apparatus.

As much as the interaction between robots and humans increases, robots would be expected to show only to perform simple repetitive motions, but also to perform a wide range of human kind motions, such as grasping flexible objects, objects with different type shapes, and gripping objects in blind spot. In order to realize a robot can these movements, it is very important to design human biological functions including sensing in a biomimetic manner, so that we have been researching a fingertip sensor module.

This sensor module consists of a proximity sensor that can acquire the shape of objects and a load sensor that can detect the grasping force. This sensor module provides objects grasping availability.

This paper reports on the configuration of sensor modules suitable for detecting contact states. It also reports on the construction of a slip detection algorithm based on machine learning and the results of detecting slips on ropes that were not used for training.

1. はじめに

近年、少子高齢化により労働人口は年々減少しています。深刻化する人手不足に対しロボティクス技術の活用が注目を集め、産業ロボットや協働ロボットなどの活躍の場がより一層拡大し、ロボットと人との関わりが増加しています。ロボットは、人が事前に状況を予測し動作を教示することでタスクを実行しますが、ロボットの利用シーンが拡大すると、ロボットには人のように多様な作業を行うことが求められるようになり、作業環境に応じて臨機応変にタスクを実行する必要性が生じることもあります。しかしながら、あらゆる事態を想定し人が事前に動作教示するには膨大な時間と費用を要するため、シミュレーションによる動作教示作業の効率化が提案されています。たとえば、移動ロボットにおいてはシミュレーションで学習したデータをロボットに実装することで、現実空間でもロボットの姿勢を制御することで移動可能なことを実現しています。²⁾ IROS 2024 Quadruped Robot Challenges では起伏のある地形を四脚ロボットが歩行するコンテストが開催されるなど、複雑な環境にロボットが臨機応変に対応する制御技術への注目度の高さがうかがえます。

一方、人の手作業の中で重要な動作のひとつであるマニピュレーションでは、ばら積み、異なる形状、柔軟物など作業環境や対象物に応じて物体を操る作業が必要となりますが、ロボットと物体との接触に伴い物体の状態は変化します。しかしながら、接触に伴うあらゆる物理現象をシミュレーションで再現し物体の状態を把握することは複雑です。そこで、対応手段のひとつとして物理状態の変化を検知するセンサ群をロボットへ実装する手法が考えられます。近年、Transformer をベースとした大規模言語モデル（LLM : Large Language Models）および GPU（Graphics Processing Unit）の発展は目覚ましく、言語情報や画像情報、音声情報などを統合しマルチモーダルに処理できるようになったことから“環境の認識”から“行動の生成”など多様な出力を可能とする研究が進められています。ロボット制御において LLM の適用が浸透し、言語情報、画像情報、音声情報に加え触覚情報を統合することで人のように複雑な動作を実現するロボット研究の更なる発展が期待されます。

物を操る際、人は同じ物でも状況や目的に応じて様々な把持の仕方をします。ロボットによる物の操りにおいても同様の作業が求められることもあり、ロボットが把持している物の位置や状態を把握し、タスクに応じた動作を選択する必要があります。しかしながら、これらはロボットの構造や物の形状といった単純な運動学的な拘束条件だけで決めることは困難であります。この問題に対処するため、人が手本を見せることによりロボットへ動作教示を行う行動観察学習パラダイムが提唱され、タングルトボロジーを利用することで人の手とロボットハンドとの構造的差異を越えて動作生成可能なことが提唱されています。³⁾

ロボットが浸透した社会においては、ロボットが行うべきタスクを理解し、そのタスクに応じた動作を選択する能力に加え、作業中にリアルタイムでフィードバックを受け取り、必要に応じて動作を調整する人のような能力までもロボットが完全に模倣することが理想です。そこで、人が生み出す様々な能力をロボットが忠実に再現するには、センシングを含む生体機能の模倣が重要であると考え、センサモジュールの開発に取り組んできました。これまでに開発したセンサモジュールは近接センサと荷重センサで構成され、近接センサで物の形状を認識し、荷重センサで把持力を検出可能とするものです。¹⁾ しかしながら、このセンサモジュールは1つのロボット指に対し1つの荷重センサを実装する構造であっ

たため、把持力の検出は可能でしたが、指先での把持位置や滑り状態などの判定は困難でした。そこで新たに、1つの指に対し複数の荷重センサをアレイ状に配置することで、これらの課題の解決に取り組みました。また、人の指は弾性体で構成されており、触覚信号は弾性体の機械特性に依存して指先を伝搬します。さらに爪などの存在により信号が反射しながら伝搬することで非常に複雑な感覚を認識できています。そこで、このような人の指の断面構造に着想を得て、センサと弾性層が三次元的に層状構造となるセンサモジュールを試作し、物体操作における指先での触覚信号の計測に取り組みました。

本稿では、2章にてロボットと物体との接触状態の検出に適した触覚センサモジュールの構成について述べた後、3章にて触覚センサモジュールを利用して複数の線状柔軟物のすべり評価を実施した結果および機械学習を利用した滑り検出器による滑り検出結果について紹介します。

2. ロボットハンド用指先触覚センサによる接触状態の検知

物体を扱う際、動作の目的に応じて作業し易いように把持するためには、ロボットハンドと把持物との位置関係を把握する必要があります。位置の把握には一般的にカメラが使用され様々なピッキング作業が実現されていますが、カメラは遠方から撮像するため計測誤差や死角といった解決が難しい課題が生じます。そこで、人の触覚に着想を得て物体とロボットハンドとの接触状態を把握するための触覚センサモジュールを開発しました。触覚センサモジュールの性能を評価するには、センサを実装したロボットハンドで物体をなぞるなどの動作が必要であり、タスクを実行するためにはロボットアームとハンドとが協調して動作する制御が必要となります。そこで線状柔軟物のロボット制御に係わる研究に取り組んでいる国立大学法人電気通信大学の工藤・木村研究室と連携し、ロボット制御における触覚センサモジュールの有効性を検討してきました。^{4,5,6} 触覚センサモジュールの構造や構成する材料を改変することで、接触状態（引張り方向、把持位置、滑り状態）の検出に適したセンサモジュールの構成について説明します。

2.1 指先触覚センサモジュールの作製

ロボットハンドと物体との接触状態を検出するセンサとして抵抗値、静電容量⁷⁾、圧電⁸⁾、光学⁹⁾などの物理量を利用したセンサが使用されております。¹⁰⁾ その中で接触による故障のリスクが低い抵抗値変化方式の荷重センサを採用し、物体操作に伴うセンサ出力変化について検討してきました。^{1,4,5,6} 3行3列のアレイ状に荷重センサが配置されたセンサシートを多指ハンドの指先に沿うように装着し、さらにセンサシートが弾性材料で覆われた構造としました(図1)。センサシートを弾性材料で覆うことで、センサ素子がないセンサとセンサの間で物体を把持してもセンサ出力を取得できるようになります。取得した触覚センサモジュールの出力をロボットにフィードバックすることでロボットの動作を制御しました。

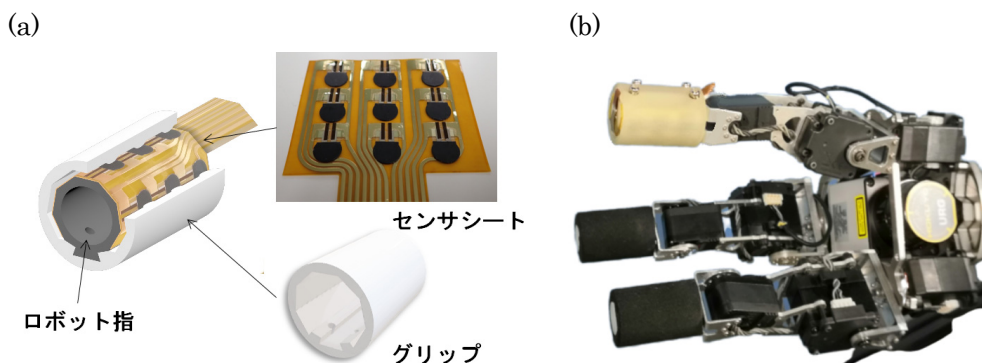


図 1. ロボットハンドの模式図

(a)触覚センサモジュール, (b)多指ハンド

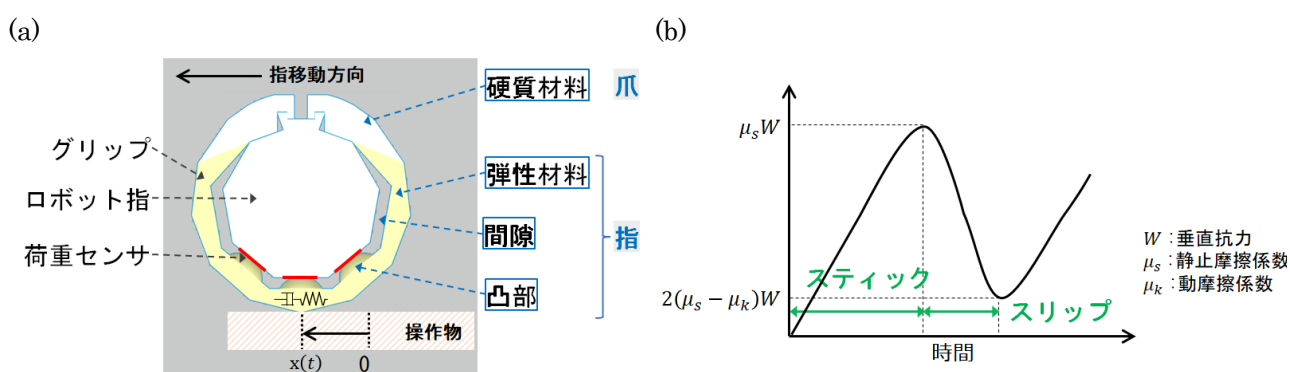


図 2. ロボットの指先での滑り現象説明図

(a)ロボットの指先の断面模式図, (b)滑り現象の説明図

センサモジュールの構造を検討するため、接触する物体間で生じるスティックスリップ現象に着目しました（図 2）。このスティックスリップ現象を検出するため、人の指の断面構造を模倣して荷重センサと弾性層が三次元的に層状構造となるような触覚センサモジュールを作製しました。

人の指を模倣したセンサモジュールの構造について説明します。ショア硬度 A95 の硬質材料で構成される多角柱形状のロボット指の面上に荷重センサを配置、このセンサを指のように柔らかいショア硬度 A27 の弾性材料で構成されるグリップで覆う構造とし、グリップの端部は爪のように硬いショア硬度 A95 の硬質材料としました。弾性グリップの内面には荷重センサと相対する位置に半球状の凸部を形成しました（図 3(a)）。この構造を基本構造とし、半球状の凸部をなくし弾性材料で間隙を充填した構造（図 3(b)）、弾性材料ではなくショア硬度 A95 の硬質材料とした構造（図 3(c)）の 3 種類のセンサモジュールを作製しました。

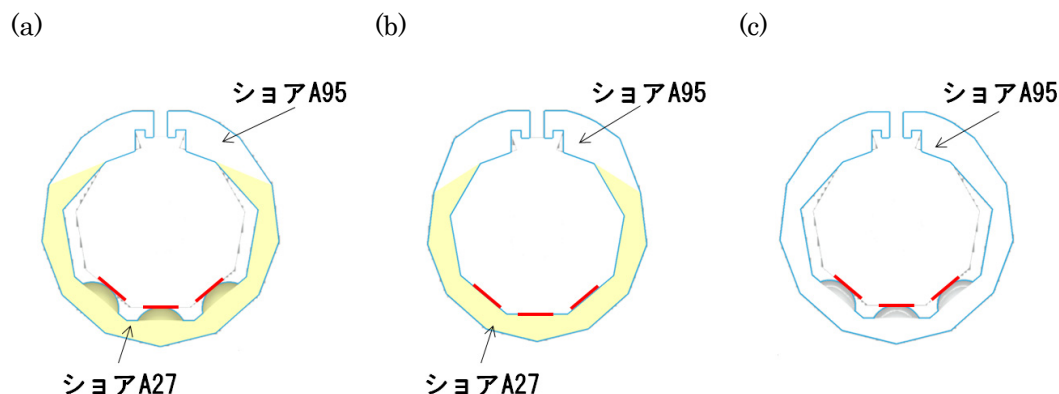


図 3. 触覚センサモジュールの断面構造

(a)ショア A27_凸部あり, (b)ショア A27_凸部なし, (c)ショア A95_凸部あり

2.2 触覚センサモジュールの評価

本研究では、外部からの力により容易に変形するため形状の把握が難しく、ロボットでの取り扱いが困難とされる線状柔軟物を操作対象としました。ロボットハンドで物体を操作するには、操作したときに対象物が滑るか、滑らずに把持できているかを把握する必要があります。作製したセンサモジュールをロボットハンドの指先に取り付け線状柔軟物のなぞり操作を行い、センサモジュールの出力値を解析することで接触状態を認識可能か検証しました。

実験は、双腕ロボットの両手で紐を把持した後、ロボットの左アームを固定し、右アームを 9 N の力で右方向に移動するように制御することで滑り状態、その後 0 N に抜重することで滑らない状態となるように紐のなぞり操作を繰り返し実行しました (図 4(a))。このとき、センサモジュールは紐を掴んでいる右手 2 本の指の上側に位置する指に取り付けられており、右アーム移動方向に配置された荷重センサを指先側から s1, s2, s3 とし、中央に配置されたセンサを s4, s5, s6、移動方向とは反対側に配置されたセンサを s7, s8, s9 としました (図 4(b))。

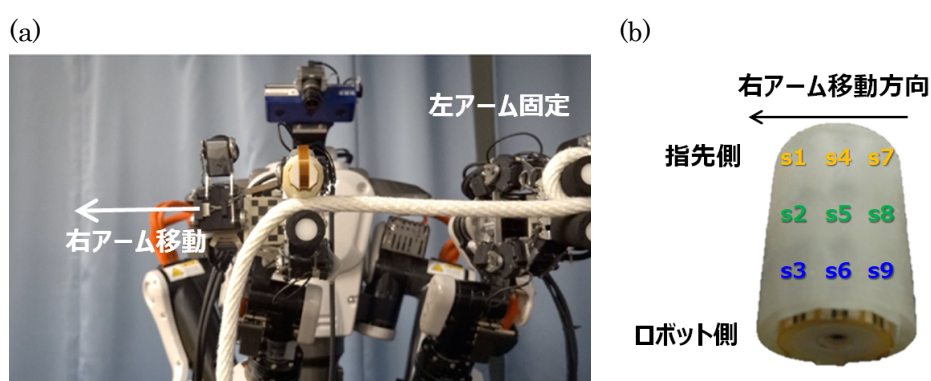


図 4. ロボットおよびセンサモジュールの外観

(a)ロボットによる紐操作, (b)センサモジュール

2.2.1 半球状の凸部有無の評価

はじめに半球状の凸部の有無の違いについて検討しました。ロボットで紐のなぞり操作（9 N で引っ張た後、0 N に抜重）を 4 回繰り返した際の、センサ出力値の時刻 0 秒からの変化量を縦軸、操作時間を横軸にプロットした結果を図 5 に示します。凸部を有するセンサモジュールでは、滑り始めるとアームの移動方向に設置されたセンサ s1, s2, s3 のセンサ出力変化量が增大し、移動方向とは反対側に配置された s7, s8, s9 のセンサ出力変化量が減少することから紐の引張方向を判定できます（図 5(a)(c)）。これは、紐とグリップとの摩擦力により弾性体で構成されるグリップが変形したことにより、引張り方向側のグリップの凸部がセンサ素子に押し合てられる方向に変形したことによりセンサ出力は増大、引張り方向とは反対側のグリップの凸部がセンサ素子と離れる方向に変形したことによりセンサ出力が減少したと考えられます。中央の列に配置されたセンサ s4, s5, s6 では、滑りに伴い s5 の変化量が減少し s4 の変化量が増加することから、指の中央 s5 で把持していた紐が滑りに伴い指先側 s4 に移動する状態を検知できます（図 5(b)）。また、アームの移動方向と逆の位置に配置されたセンサ s7, s8, s9 のセンサ出力変化量から、滑りに伴いセンサ出力プロファイルが振動することから、滑りを検出していることが確認できます（図 5(c)）。これは、スティック状態でグリップに蓄積された弾性エネルギーがスリップ状態で解放される事象が繰り返し発生しているためであると推察できます。

半球状の凸部がない構造で同様の操作を行った際の結果を図 6 に示します。凸部がないセンサモジュールでは、引張り方向、把持位置、滑りの検出指標となる出力変化の特徴を確認できないことから半球状の凸部を形成した方が接触状態を検出し易いことが確認できました。

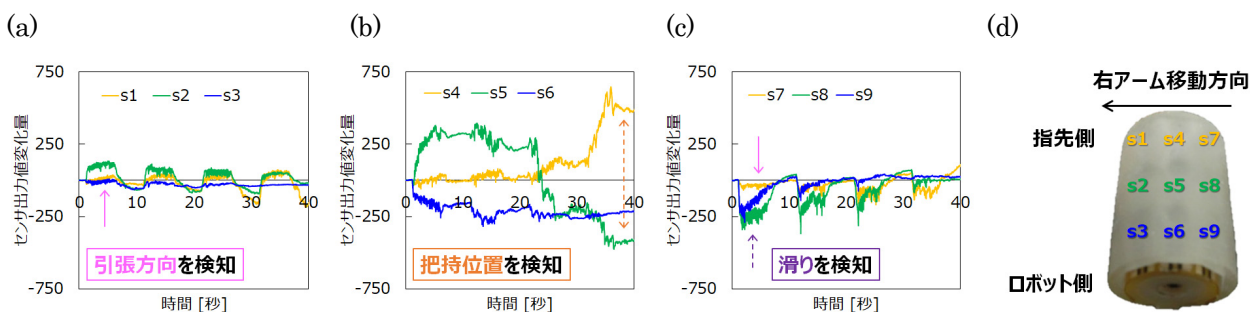


図 5. 凸部を有する触覚センサモジュールのセンサ出力変化とセンサモジュールの外観

(a) s1, s2, s3, (b) s4, s5, s6, (c) s7, s8, s9, (d) センサモジュール外観

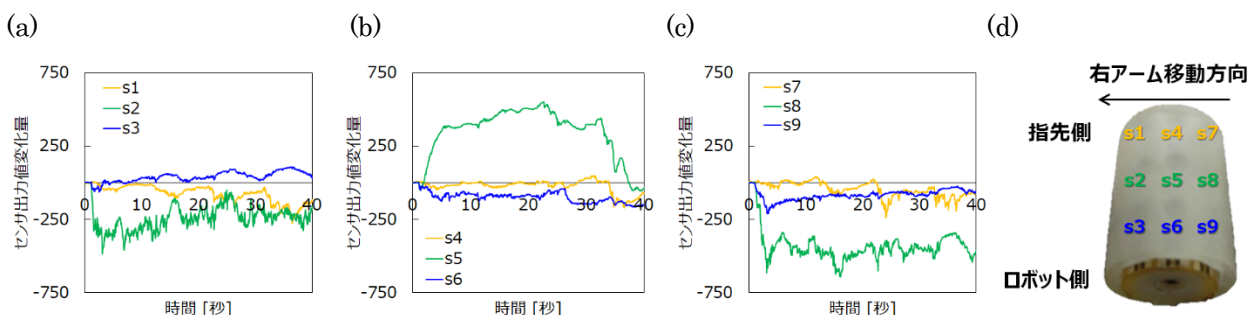


図 6. 凸部のない触覚センサモジュールのセンサ出力変化とセンサモジュールの外観

(a) s1, s2, s3, (b) s4, s5, s6, (c) s7, s8, s9, (d) センサモジュール外観

2.2.2 グリップの硬度違いの評価

つぎにグリップの硬度違いについて検討しました。ロボットで紐のなぞり操作を行った際、操作時間を横軸、センサ s7, s8, s9 の和を算出し測定点毎に差分を算出した結果を縦左軸、差分のプロファイルから振動周期を算出した結果を縦右軸にプロットしました（図 7）。図 7(a)と図 7(b)の結果から、ショア硬度 A27 のグリップの方が滑りの発生周期が短いため、滑りを検出し易くなることが確認できます。

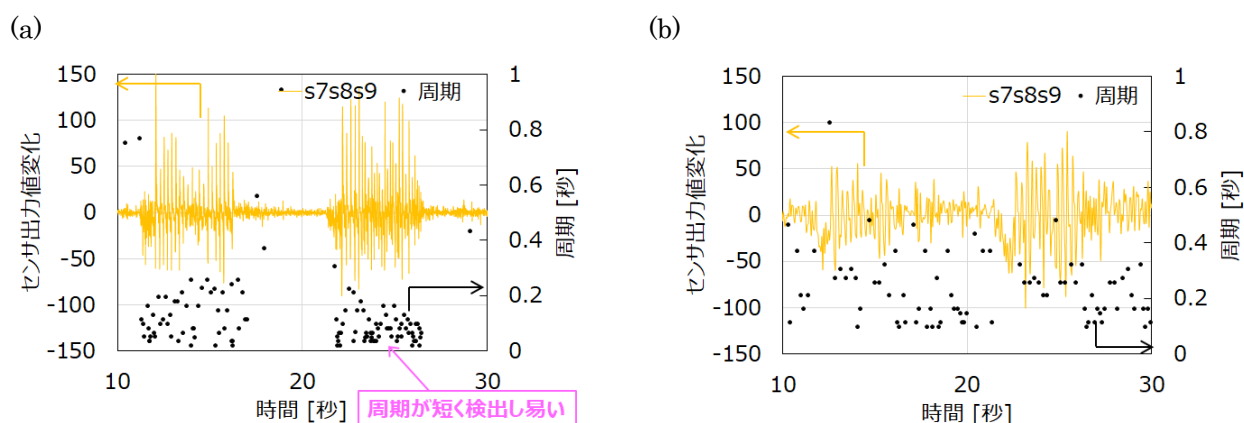


図 7. 硬度が異なる触覚センサモジュールのセンサ出力結果

(a)ショア硬度 A27, (b)ショア硬度 A95

本章では、物体とロボットハンドとの接触状態を検知するために複数のセンサモジュールを作製し、ロボットによる紐のなぞり操作を行いました。グリップの材質は柔らかく、グリップの内面に半球状の凸部を有するセンサモジュールが引張り方向、把持位置、滑りの検出感度が良好であることを確認しました。次章では、このセンサモジュールを使用し、操作対象物を変更しなぞり操作を行った際のセンサモジュールの有効性について説明します。

3. 滑り検出器による滑りの認識

前章では、1種類の紐を操作した際の接触状態の変化に伴うセンサ出力変化について記述しました。一方、実用的なロボットシステムの構築を志向する際、限定された条件下だけでなく汎用的に使用できることを検証する必要があります。本章では、複数の線状柔軟物の滑り評価結果および機械学習を利用した滑り検出の検討結果について説明します。

3.1 異種異形状の線状柔軟物に対する滑り検出

前章とは異なり右アーム移動方向の紐の端部を支柱に固定し、ロボットの指と線状柔軟物とが滑る状態および滑らない状態を制御してロボットを操作しました（図 8）。前章では径 12 mm のビニロン製金剛打ちの紐で実験を行いましたが、本章では 2 種類の紐の編み方（金剛打ち、三つ打ち）、2 種類の紐の材質（ビニロン、ナイロン）、2 種類の紐の太さ（12 mm、7 mm）さらにケーブル、PP テープの合計 6 種類の線状柔軟物にて実験を行いました（図 9）。⁶⁾

ロボットで線状柔軟物のなぞり操作を行いセンサ s7, s8, s9 のセンサ出力値の初期値からの変化量を縦軸、操作時間を横軸にプロットした結果を図 10 に示します。いずれの線状柔軟物においてもスティックスリップ現象による滑りを検出できていることが確認できます。さらに、ビニロン金剛打ち（図 10(a)）とビニロン三つ打ち（図 10(b)）の結果から、滑り検出以外にもそれぞれの紐の特徴を検出できている可能性が考えられます。また、ビニロン金剛打ち（図 10(a)）とケーブル（図 10(e)）の結果から、線状柔軟物が増加すると滑りやすさも変化することが確認できます。

しかしながら、操作対象物が増加すると得られる波形形状も変化し、さらには操作方法を変更すると波形形状も変化することが容易に推察できます。図 10 のセンサ出力結果をフィルタ処理など数学的に処理することで異なる波形形状でも滑りの検出が可能ではありますが、それぞれの波形形状に応じて滑り検出器のプログラムを人が指示するには限界があります。そこで機械学習を利用し滑りの予測を検討しました。



図 8. ロボットによる紐操作

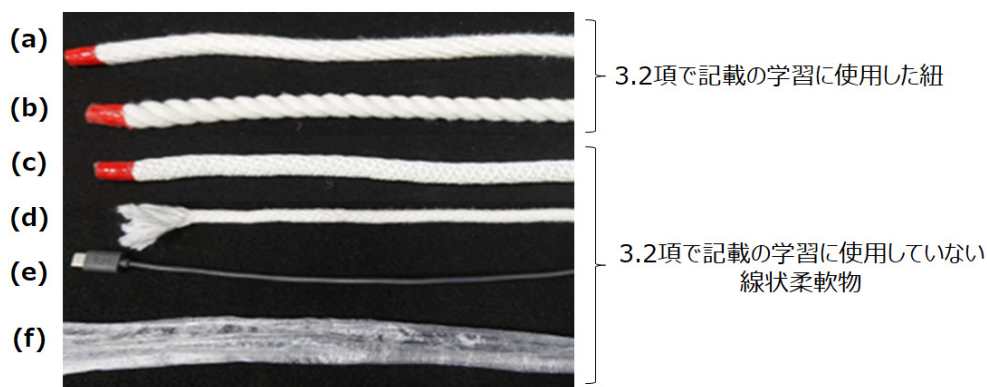


図 9. 実験に使用した線状柔軟物

(a)径 12 mm ビニロン金剛打ち, (b)径 12 mm ビニロン三つ打ち, (c)径 12 mm ナイロン金剛打ち,
(d)径 7 mm ナイロン金剛打ち, (e)ケーブル, (f)PP テープ

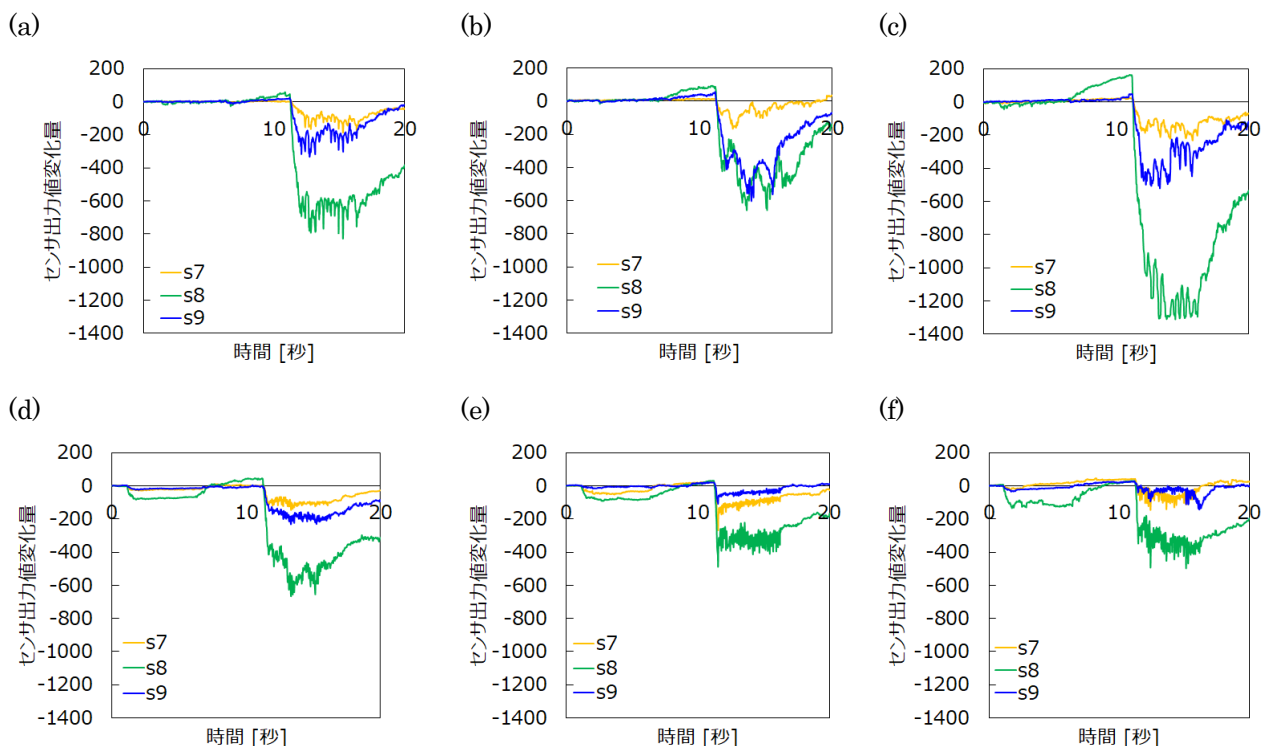


図 10. 異なる線状柔軟物での操作結果

(a)径 12 mm ビニロン金剛打ち, (b)径 12 mm ビニロン三つ打ち, (c)径 12 mm ナイロン金剛打ち,
(d)径 7 mm ナイロン金剛打ち, (e)ケーブル, (f)PP テープ

3.2 機械学習による滑り予測

状況に応じて操作対象物を臨機応変にハンドリングするには、リアルタイムで判定し制御する必要があります。そこで、複数の決定木を組み合わせ（高精度）、それぞれの決定木ごとに並列処理可能（短時間）なランダムフォレストモデルを機械学習に採用し、滑り検出器を作製しました。機械学習のデータには、2 種類の紐（径 12 mm ビニロン金剛打ち（図 9(a)）、径 12 mm ビニロン三つ打ち（図 9(b)））、2 種類のロボット制御方法（力制御、速度制御）、指の長手方向に対し 5 箇所（s4、s4 と s5 の中間、s5、s5 と s6 の中間、s6）の初期把持位置においてなぞり操作を行い取得した、約 4700 個の非滑り状態のデータおよび約 1800 個の滑り状態のデータを使用しました。

学習に使用した紐（径 12 mm ビニロン金剛打ち（図 9(a)）、径 12 mm ビニロン三つ打ち（図 9(b)））、さらに学習に使用していない線状柔軟物（径 12 mm ナイロン金剛打ち（図 9(c)）、径 7 mm ナイロン金剛打ち（図 9(d)）、ケーブル（図 9(e)）、PP テープ（図 9(f)））を用い、作製した滑り検出器と触覚センサモジュールが実装されたロボットで線状柔軟物のなぞり操作を 3 回行い、滑りおよび非滑りの検出を試行しました。図 11 に、なぞり操作を行った際の非滑り区間と滑り区間の説明図を示します。径 12 mm ビニロン金剛打ち（図 9(a)）および径 12 mm ビニロン三つ打ち（図 9(b)）の紐で学習することで、径 12 mm ナイロン金剛打ち（図 9(c)）や径 7 mm ナイロン金剛打ち（図 9(d)）といった似た形状の紐だけでなく、ケーブル（図 9(e)）や PP テープ（図 9(f)）のような形状も材質も異なる線状柔軟物においても、非滑り区間では非滑り、滑り発生区間では滑りと正しく判定されることが確認できました。⁶⁾

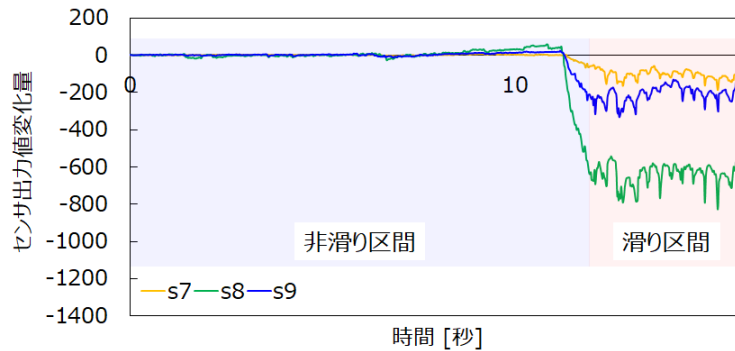


図 11. なぞり操作を行った際のスリ区間と滑り区間の説明図

4. まとめ

本稿では、ロボットによる線状柔軟物の操作における指先の触覚センサモジュールの有効性について紹介しました。

最初に、人の指の断面構造に着想を得た、センサと弾性層が三次元的に層状構造となるセンサモジュールについて提示しました。実験では、触覚センサモジュールの構造や構成材料を改変することで、接触状態（引張り方向、把持位置、滑り状態）の検出に適したセンサモジュールの構成（グリップの材質は柔らかく、グリップの内面に半球状の凸部を有する構造）を見出しました。

次いで、接触する物体間に生じる滑り現象に着目し、異なる線状柔軟物でもセンサモジュールで滑りを検出可能であることを示したのち、この触覚センサモジュールを使用して取得したデータを学習データとし、ランダムフォレストモデルに基づき作製した滑り検出器により、学習に使用していない線状柔軟物でも滑り状態を検出できることを示しました。本研究により、ロボットによる物体操作において指先触覚センサモジュールおよび滑り検出器の有効性を実証することができました。

本稿で取り扱った紐操作のように、ロボットには難しい操作があります。人の作業をロボットが代替するには、このような作業の実現が求められることもあります。センサモジュールとロボット制御の開発を平行して進めることで、ロボットでは実現が難しい新規操作技術の創出に貢献するロボット用センサモジュールの開発を進めて参ります。

[謝辞]

本開発において指先センサモジュールの評価に多大なご協力をいただきました国立大学法人電気通信大学の工藤俊亮准教授、木村航平助教、古賀隆行氏に深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 佐藤隼也, 後藤理恵, 大胡拓矢, 富岡昭浩, 米田将允, 野口英之, *航空電子技報* **41**, 44 (2019)
- 2) T. Miki, J. Lee, J. Hwangbo, L. Wellhausen, V. Koltun, M. Hutter, *Sci. Robot.* **7**, abk2822 (2022)

- 3) 工藤俊亮, ビナヤウェキン ポンタリン, 佐藤啓宏, 池内克史, *日本ロボット学会誌* **33**, 514 (2015)
- 4) Y. Okura, J. Sato, T. Daigo, M. Takizawa, T. Suehiro, K. Kimura, S. Kudoh, *SICE SI 2022*, 1607 (2022)
- 5) 佐藤隼也, 大胡拓矢, 富岡昭浩, *航空電子技報* **45**, 3-1 (2023)
- 6) T. Koga, J. Sato, T. Daigo, K. Kimura, S. Kudoh, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 13967 (2024)
- 7) C. Liu, S. Li, Q. Sun, F. Ma, Y. Sun, Y. Zhang, L. Xie, Y. Huang, X. Yang, X. Hao, *ACS Applied Electronic Materials* **6**, 3440 (2024)
- 8) C. Hou, K. Wang, L. Lou, S. Zhang, H. Liu, L. Sun, 2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems 214 (2021)
- 9) D. C. Bulens, N. F. Lepora, S. J. Redmond, B. W. Cherrier, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 8972 (2023)
- 10) R. A. Romeo, L. Zollo, *IEEE Access* **8**, 73027 (2020)