

技術紹介

3

ロボットによる物体操作のための指先センサの開発

Development of a tactile sensor for robotic manipulation

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、すべり操作、引張操作

Keywords: Robot hand, Tactile sensor, Sliding, Pulling, Manipulation,

要 旨

労働人口減少による労働生産性の低下に対して、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が増えると共に、ロボットが行なう作業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。そ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間の機能の生体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。一方、ロボットが物体を操作する際には、ロボットハンドと物体との接触によるセンサの故障や汚染などが懸念されることを考慮し、ロボットに容易に着脱可能なグローブ型のセンサモジュールを開発し、物体把持に対する有効性を報告してきました。¹⁾本稿では、開発した指先センサモジュールの電気特性およびセンサモジュールを装着したロボットによる物体操作についてご報告し、物体操作における指先センサモジュールの有効性についてご紹介いたします。

SUMMARY

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 motions, such as grasping flexible objects, objects with different shapes, and gripping objects in blind. In order to realize a robot that can show these movements, it is very important to design human biological functions including sensing in a biomimetic manner, so that we have been researching on a development of a fingertip sensor module. On the other hand, as a direct contact between the robot hand and the object may cause sensor failure or chemical contamination when a robot manipulates an object, we have proposed our reversible sensor. That is, we have developed a glove-type sensor module that can be easily attached to and detached from a robot, providing its availability in grasping objects. This report provides the electric properties of the developed fingertip sensing module and the manipulation by the robotic apparatus with our sensing module, producing the efficiency of fingertip sensing module.

1. はじめに

労働人口は少子高齢化の影響などにより年々減少しています。²⁾限られた労働投入量で従来の生産量を維持するには生産効率の向上が必要であり、その取り組みの一つとしてロボットの活用が期待を集めています。製造工程すべてにロボットを導入し自動化するには膨大な費用などが必要です。そこで、人間の手作業の一部をロボットに置き換え、人とロボットが協働するロボット生産システムにより、生産効率の維持や向上を目指す試みが提案されています。³⁾

人間の手作業のなかで重要な動作のひとつであるピッキング作業は、ばら積み、異なる形状、柔軟物、死角など状況に応じたハンドリングが必要なため、ロボットへの置き換えが難しい作業として認識されています。しかしながら、昨今ではピッキング作業は製造現場ばかりではなく、物流や医療など様々な場所においてもロボットによる実現が望まれ、様々な取り組みがなされています。一般的には、カメラを利用して物体の三次元位置情報を認識することで物体を持ち上げる動作を実現することが多く、昨今の計算機の高速化や画像センサの高性能化と相俟って複雑なピッキング作業も再現されています。一方、カメラを使用した物体の位置情報の認識には、計測誤差や撮像の死角など、解決の糸口がない課題を抱えたままとなっています。また、認識した物体を持ち上げるには、多くの場合ハンド部に吸着機構が利用されますが、多孔質体など吸着されにくい物体には適用しにくいという課題も抱えています。これらの課題を解決する方式の一つとして、指先に触覚を備えた把持ハンドが提唱されています。この方式は、物体と接触しているときの触覚を利用して物体の位置および把持状態の把握を可能とするもので、上述の計測誤差や撮像の死角などの問題やハンド部の機構に係る制限も解決する手段と考えられます。ロボットの指先に実装する触覚としては、抵抗値変化、静電容量変化⁴⁾、圧電効果⁵⁾、光量変化⁶⁾など様々な物理量を利用したセンサの開発が行われています。

先述のとおり、人とロボットが協働するシーンとしては、製造現場ばかりでなく様々な場所での実現が望まれています。遠隔操作やコミュニケーションなどの需要の高まりにより、アバターへの感覚の転送や遠隔操作の実現として、上述の物理量とは次元の異なるリアルハプティクスなどの研究も盛んに行われており、センシングの対象が物理量から感覚へと拡張されつつあります。そのような研究の進展により、最近では入力者の意思どおりの動きを再現するロボットの構築を目指し、脳波から得られる指先に関する生体信号をロボットに送り、ロボットをより人間らしく操作する研究もなされています。⁷⁾あるいは、その逆にセンサからの感覚情報を生体を送ることで、失った動作機能の修復を図る研究なども活発に行われ、リハビリの効率化を図る試みなどもなされています。⁸⁾

ロボットが浸透した未来社会においては、人間を完全に模倣したロボットが理想です。私共は、人間が行う広範な動作をロボットに忠実に実現させるためには、センシングを含む生体機能の模倣が重要であると考え、センシングモジュールの開発に取り組んできました。ロボットが物体を操作する際、ロボットハンドと物体との接触によるセンサの故障やオイルなどの付着による汚染などが懸念され、ロボットハンドの機能を維持するためにハンドの交換が必要になることもあります。人間の手は傷ついても治癒し、汚れても洗うことで衛生を保ちます。このような手の機能を模倣するため、ロボットハンドに着脱可能なグローブ型の近接触覚センサモジュールを装着し、形状が異なる物体の把持が可能であることを報告いたしました。¹⁾

人間の指は弾性体であるたんぱく質で構成されているので、触感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、私共は、このような人間の生体機能を模倣するため指の断面構造を模して圧力センサと弾性層を三次元的に層状構造とし、物体操作における指先での触觉信号の計測に取り組みました。本稿では、この取り組み内容と共に、開発したセンサモジュールを実装したロボットを用いて柔軟物である紐を操作し、ロボットの指先での紐の把持位置および紐の状態(滑り、引張り)をセンシングした結果についても合わせてご紹介いたします。

2. ロボットハンド用指先触觉センサ

物体を操作するには、ロボットが物体を認識する必要があります。物体の認識には一般的に、カメラが使用されますが、離れた位置から撮像した二次元画像を解析して位置を推定するため、計測誤差やロボットハンドの死角となり把持している物体の情報を取得できないことなどが懸念されます。

そこで、物体とロボットハンドの接触状態を検知するためのセンサモジュールを作製し、出力電圧を測定することでセンサにかかる荷重を評価しました。さらに、弾性層を介してセンサモジュールを押圧することで、面内での荷重分布情報を取得できることを明らかにしました。

次節にて詳細を説明いたします。

2.1 触觉センサモジュールの作製

ロボットハンドで物体を操作するには、ハンドが物体と接触する必要があります。接触の検知には、抵抗値変化、静電容量変化⁴⁾、圧電効果⁵⁾、光学変化⁶⁾などの物理量を利用したセンサが使用されています。私共は、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圧力センサを採用しました。使用したセンサは、圧力に応じて抵抗値 R_a が変化するため、出力電圧 V_{out} を計測することで圧力の変化を電圧として検出できます(図 1(a))。3 行 3 列のアレイ状に圧力センサを配置することで(図 1(b))、指先にかかる圧力分布の計測に取り組みました。作製した触觉センサモジュールをマイクロコントローラが実装された開発ボード(図 1(c))に接続し、開発ボードとロボットを接続しました。圧力センサの出力電圧をマイクロコントローラにてデジタル変換し、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。

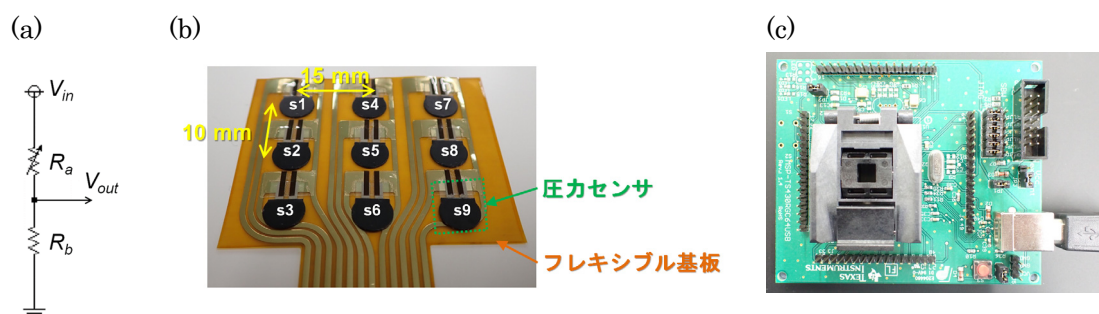


図 1. 触觉センサモジュール

(a)圧力センサの回路図, (b)センサモジュール外観, (c)開発ボード

2.2 触覚センサモジュールの評価

印加電圧 V_{in} を 3.3 V、抵抗値 R_b を 10 k Ω とし、圧力センサに負荷する荷重 F と出力電圧 V_{out} を評価しました。9 個の圧力センサに荷重 F を負荷した際の出力電圧 V_{out} を測定、各荷重に対する出力電圧 V_{out} を縦軸、圧力センサにかかる荷重 F を横軸にプロットした結果を図 2(a) に示します。圧力センサの回路図(図 1(a))より、出力電圧 V_{out} は印加電圧 V_{in} および圧力センサの抵抗 R_a 、測定抵抗 R_b を用いると式 1 が成立します。図 2(a) の測定結果から、式 1 を用いて抵抗値 R_a を算出し、対数変換してプロットした結果を図 2(b) に示します。図 2(b) の結果から、式 2 を用いて回帰直線を求めた結果 $K_1 = 4.27$ 、 $K_2 = -0.93$ と推定されました。式 1 および式 2 から、圧力センサの抵抗値 R_a を出力電圧 V_{out} として測定することで、センサにかかる荷重 F が求められることを確認しました。

$$V_{out} = \frac{R_b}{R_a + R_b} V_{in} \quad \text{式 1}$$

$$R_a = 10^{K_1 \cdot F^{K_2}} \quad \text{式 2}$$

次に面内での荷重圧力分布の計測に取り組みました。弾性層を介して押圧することにより荷重が周辺にも分散し、個々のセンサ出力から荷重圧力分布が評価できると期待できます。そこで、センサモジュールの下面側と上面側に弾性層を設置し(図 3(b))、圧力センサを押圧した際の荷重分布を評価しました。

弾性層を設置せず s5 の圧力センサを 4 N の荷重で押圧したときの圧力センサにかかる荷重 F を算出した結果を図 4(a)、弾性層を介して圧力センサを押圧した際の結果を図 4(b) に示します。弾性層を設置しない場合、s5 のセンサを押圧すると s5 のセンサのみ荷重を検出し、他のセンサの出力は変化しないことを確認しました。一方、弾性層を介して s5 のセンサを押圧すると s4、s5、s6 のセンサ出力が変化し、押圧した s5 の直下だけでなく弾性層により荷重が周辺に伝搬することが確認できました。次に、押圧す

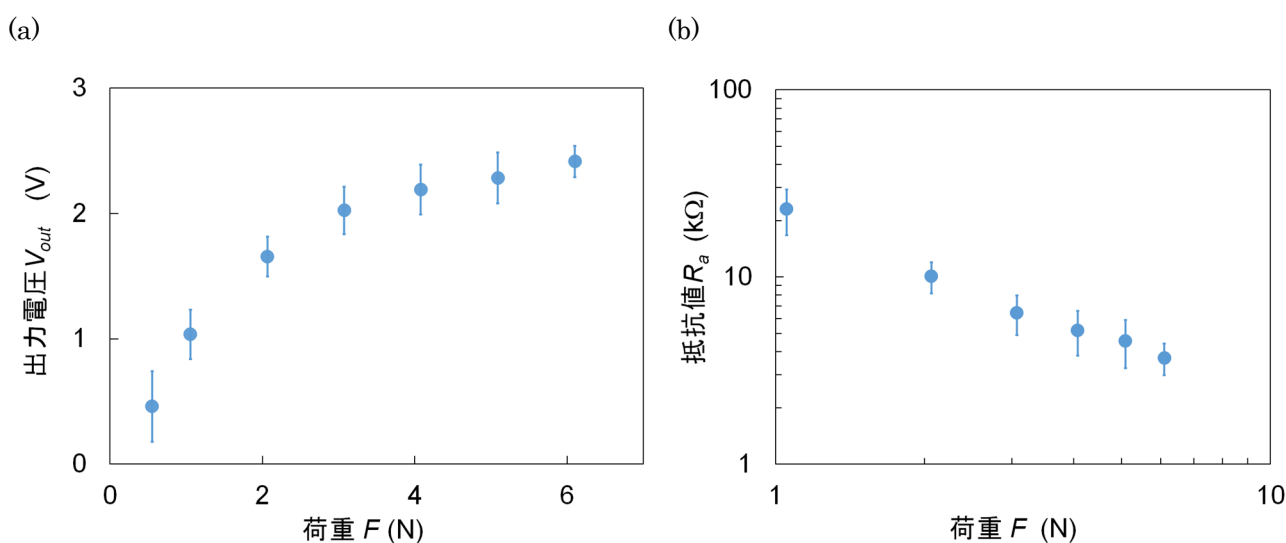


図 2. 触覚センサモジュールの評価結果

(a)出力電圧 V_{out} , (b)抵抗値 R_a

る荷重が圧力センサに及ぼす影響を確認するため、s5 の圧力センサを 7 N の荷重で押圧したときの荷重を算出しました(図 4(c))。4 N の荷重で押圧した場合は s4、s5、s6 の圧力センサで荷重を検出しましたが、7 N の荷重で押圧することで s4、s5、s6 のセンサに加え s2、s8 の圧力センサでも荷重を検出しました。4 N の荷重で押圧した際に荷重を検出した s4、s6 のセンサと s5 のセンサとの間隔は 10 mm であります。一方、荷重を検出しなかった s2、s8 のセンサと s5 のセンサとの間隔は 15 mm となっており、押圧する荷重が増加すると面内での荷重分布範囲が拡大することが確認できました。

本章では、物体とロボットハンドとの接触を検知するためにセンサモジュールを作製し、圧力センサの抵抗値の変化を出力電圧として測定することで、センサにかかる荷重が求められることを確認しました。さらに、弾性層を介してセンサモジュールを押圧することで面内での荷重分布情報を取得できることを明らかにしました。次章では、開発したセンサモジュールをロボットに実装し、物体操作に対するセンサモジュールの有効性について説明します。

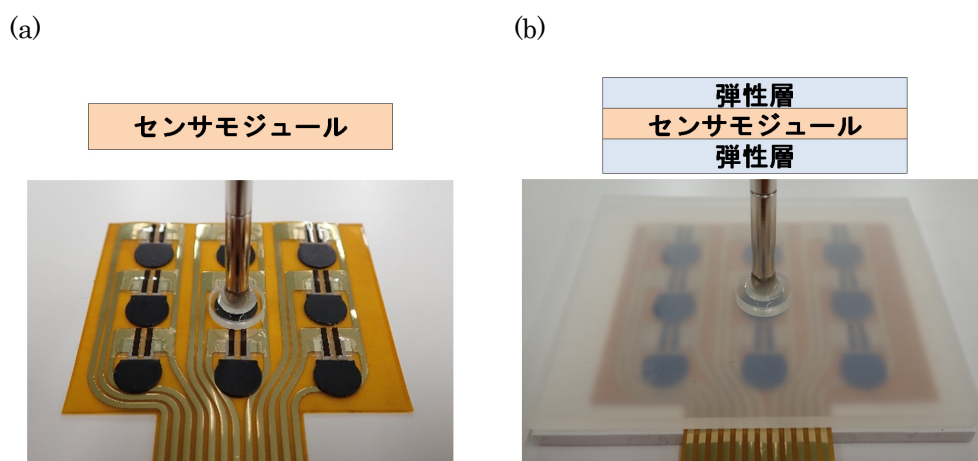


図 3. センサモジュールの外観と模式図

(a)センサを直接押圧, (b)弾性層を介してセンサを押圧

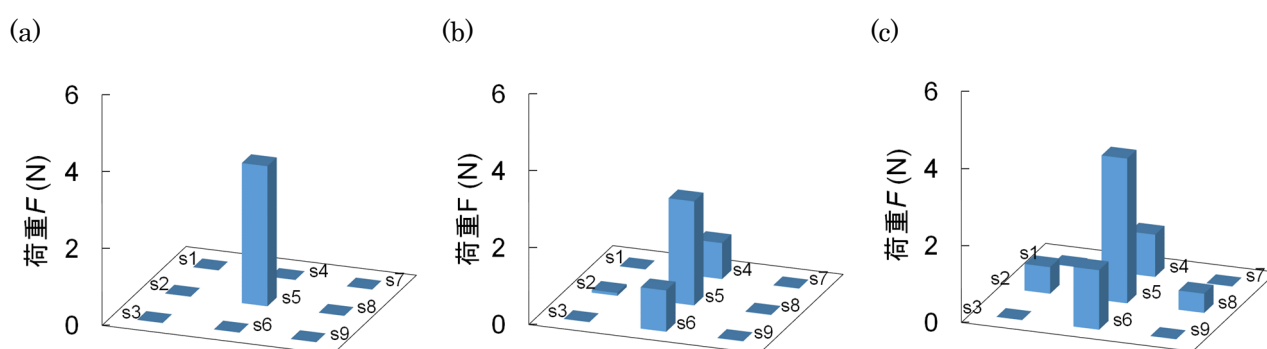


図 4. s5 の位置を押圧した際の荷重分布

(a)センサを直接押圧(4 N), (b)弾性層を介して押圧(4 N), (c)弾性層を介して押圧(7 N)

3. 触覚センサを実装したロボットによる物体操作

物体操作におけるセンサの有効性を検討するためには、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意図した動作が必要となります。試作したモジュールを実装したロボットによる、物体操作に対する触覚センサモジュールの有効性を国立大学法人電気通信大学の工藤研究室にて検討しました。

柔軟物操作の対象として紐に着目し、開発した触覚センサモジュールをロボットに実装したことで、紐を落とさずになぞる操作⁹⁾および紐の引っ張り操作¹⁰⁾に成功しました。次節にて紐のなぞり操作のための“把持位置の推定”および引張操作のための“滑り状態の検知”について説明します。

3.1 把持位置の推定

作製した触覚センサモジュールをショア硬度 A95 の内側グリップに巻き付け、さらにセンサモジュールの上からショア硬度 A30 の弾性を有するグリップを装着しました(図 5(a))。このセンサモジュールを工藤研究室で製作したロボットハンドの指先に取り付け(図 5(b))実験を行いました。

ロボットハンドで紐を把持し操作を行うには、紐がロボットの指先のどの位置で接触しているかを把握する必要があります。2.2 節で記述した通り、弾性層を介してセンサモジュールを押圧することで面内での荷重分布が取得できます。面内での荷重分布とセンサの位置から、物体を把持している位置の推定が可能だと考え、紐の把持位置を変更したときのセンサモジュールの出力値を解析しました。

はじめに、紐を把持したときの各圧力センサの出力値およびセンサの位置座標から加重平均を算出し、紐の把持位置 p_{wam} を算出しました(図 6(a))。次に、実際の把持位置 p_{true} を縦軸、荷重平均して求めた把持位置 p_{wam} を横軸にプロットした結果を図 6(b)に示します。図 6(b)の結果から式 3 を用いて回帰直線を求めた結果 $K_3 = 1.49$ 、 $K_4 = -8.59$ と推定されました。式 3 および加重平均して求めた把持位置から実際の把持位置が求められることを確認しました。工藤らは、センサモジュールの出力値から紐の把持位置を推定しロボットにフィードバックすることで、ロボットの指先で把持した紐を落とさずになぞる操作に成功しました。¹⁰⁾

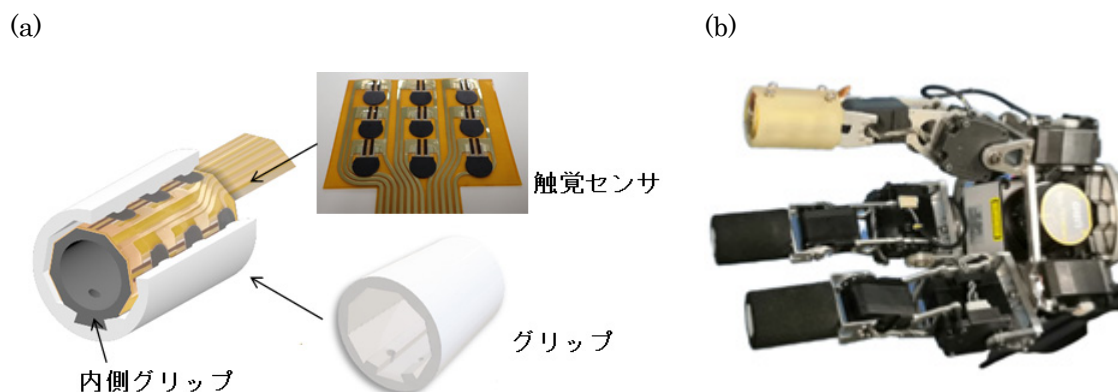


図 5. センサモジュールの外観と模式図

(a)触覚センサモジュール, (b)ロボットハンド

$$p_{true} = K_3 \times p_{wam} + K_4 \quad \text{式 3}$$

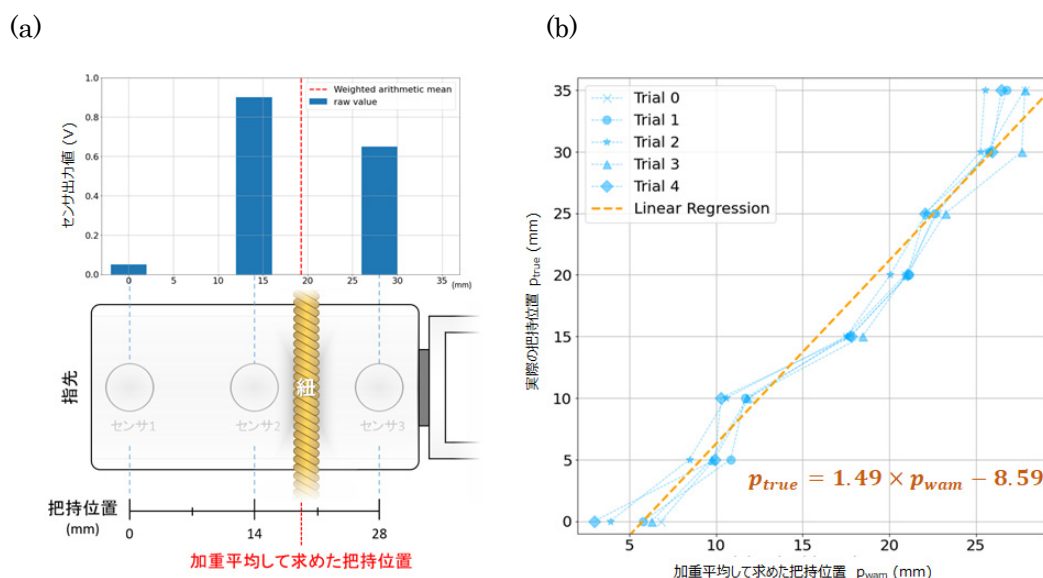


図 6. センサモジュールの外観と模式図⁹⁾

(a)加重平均を算出, (b)荷重平均から直線推定

3.2 滑り状態の検出

ロボットハンドで紐の引張操作を行うには、操作をしたときに紐が滑っている状態であるか、滑らずに紐が引っ張られている状態であるかを把握する必要があります。開発したセンサモジュールをロボットの指先に取り付け紐の引張り操作を行い、センサモジュールの出力値を観察することで紐の滑り・非滑り状態が判別可能かを検証しました。⁹⁾紐を把持している状態でロボットの左アームを固定し、右アームを右側に移動することで、指と紐が滑る状態および滑らない状態を意図的に制御しロボットを操作しました(図 7(a))。このとき、センサモジュールの s1, s4, s7 の行が指先側、s1, s2, s3 の列がアームの進行方向となるようにセンサモジュールが設置されています(図 7(b))。滑る状態とは、紐に張力を掛けながら引っ張る操作であり、滑らない状態とは紐に張力がかかるが動かない状態です。滑る・滑らない状態で意図的に紐を操作したときのセンサ出力値の変化挙動から紐の状態を判別しました。

紐をセンサモジュールの s2, s5, s8 の行に対応する位置で把持し、右アームを非滑り状態で 10 秒間、静止状態で 10 秒間、さらに滑り状態で 10 秒間動作しました。ロボットで紐の引張操作を行った際、触覚センサ出力値の変化量を縦軸、動作時間を横軸にプロットした結果を図 8 に示します。アームの進行方向に設置されたセンサ s1, s2, s3 の測定結果(図 8(a))から、非滑り状態の開始直後で変化量が減少し、滑り状態では変化量が増加する様子が確認できます。このことから、アームの進行方向に設置されたセンサ出力の変化により、紐が滑る状態と滑らない状態を検知できます。中央の列に配置された s4, s5, s6 の測定結果(図 8(b))から、滑り状態において s5 および s6 の変化量が減少し s4 の変化量が増加することが確認でき、中央で把持していた紐が指先側に移動する状態を検知できます。また、アームの進行方向と逆の位置に配置されたセンサ s7, s8, s9 の測定結果(図 8(c))から、非滑り状態の開始直後で紐を把持し

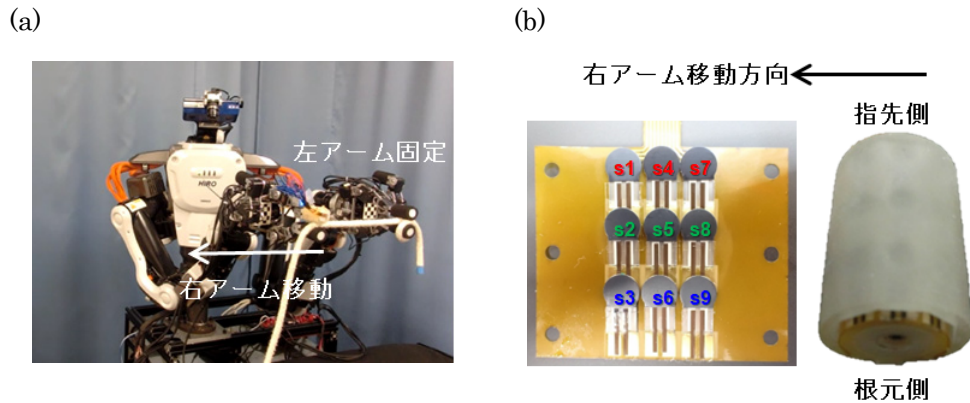
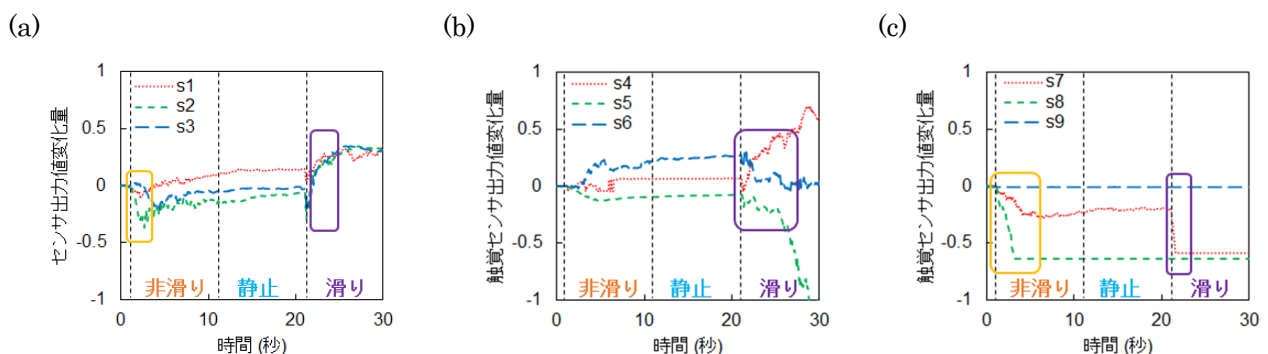


図 7. ロボットおよびセンサモジュールの外観

(a)ロボットによる紐操作, (b)センサモジュール

ている中央のセンサ s8 の出力が減少し、滑り状態で指先側に移動した紐の把持位置であるセンサ s7 の出力が減少していることが確認でき、把持している紐に張力がかかった状態を検知できます。

引張操作においてグリップと紐との接触面にアームの進行方向とは逆方向に摩擦力が作用し、弾性体であるグリップが変形します。グリップの変形により面内での荷重分布状態が変化することで、右アームの進行方向に設置されたセンサにかかる荷重が増加し、進行方向とは逆の位置に配置されたセンサにかかる荷重が減少したと考えられ、引張操作においても開発したセンサモジュールで面内での荷重分布を取得できることが明らかになりました。また、実験に使用したロボットの手首部分には力覚センサが実装されており、同様の紐操作を行ったときの触覚センサおよび力覚センサの測定結果を図 9 に示します。力覚センサの測定結果(図 9(b))から、非滑り状態の開始直後およびすべり状態の開始直後いずれにおいてもセンサ出力が増加するため、センサ出力の変化挙動から紐の状態の判別は困難であります。工藤らは、開発したセンサモジュールを実装し紐の引張操作を行うことで、センサ出力の変化から紐の滑り・非滑り状態を検知することに成功しました。⁹⁾

図 8. センサモジュールの外観と模式図¹⁰⁾

(a)滑りの有無を検知, (b)把持位置を検知,(c)紐に張力がかかることを検知

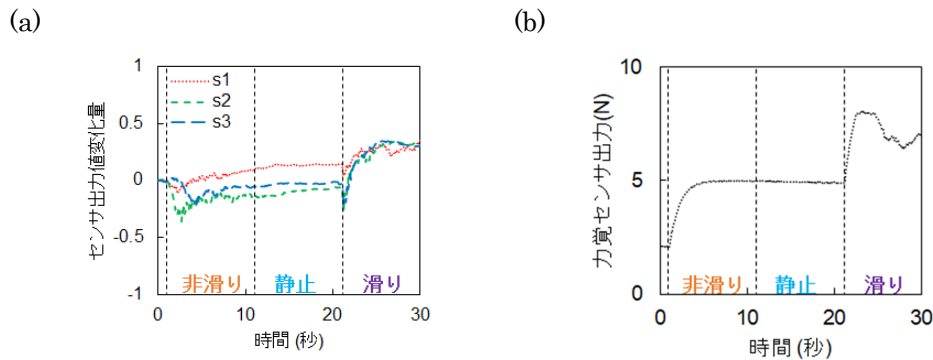


図 9. センサモジュールの外観と模式図

(a)触覚センサ, (b)力覚センサの出力

4. まとめ

本稿では、柔軟物操作のために開発した着脱式指先センサモジュールの電気特性評価、およびセンサモジュールを実装したロボットハンドによる物体操作に対するセンサモジュールの有効性についてご紹介しました。圧力に対して抵抗値の変化として応答する圧力センサを実装したフレキシブルな触覚センサモジュールを開発し、弾性層を介してセンサモジュールを押圧することで、面内での荷重分布情報を取得できることを明らかにしました。また、指先に触覚センサモジュールを実装したロボットハンドで柔軟物である紐の引張操作を行い、センサの位置情報と出力情報から、ロボットの指先での紐の把持位置および紐の状態(滑り、引っ張り)を検知可能なことを明らかにしました。^{9, 10)}本研究によりロボットによる物体操作に対する指先センサモジュールの有効性を実証することができました。今後、着脱式指先センサモジュールを使用して、ロボットが人のような広範な動作を実現するための研究の推進が期待されます。

[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) 総務省統計局, “第 12・13 回改定日本標準産業分類別就業者数”,
https://www.stat.go.jp/data/roudou/longtime/03roudou.html#hyo_5
- 3) I. Dimeny, T. Koltai, C. Sepe, T. Murino, V. Gallina, T. Komenda, IFAC PapersOnLine **54**, 169 (2021).

- 4) J. Liu, M. Wang, P. Wang, F. Hou, C. Meng, K. Hashimoto, S. Guo, IEEE Access **8**, 64836 (2020).
- 5) 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).
- 6) J. W. James, N. Pestell, N. F. Lepora, IEEE Transactions on Robotics and Autmation **3**, 3340 (2018).
- 7) 粕谷昌宏, 加藤龍, 高木岳彦, 伊藤寿美夫, 高山真一郎, 横井浩史, 情報管理 **59**, 887 (2016).
- 8) Y. Tanaka, IEEJ Journal **141**, 80 (2021).
- 9) H. Takahashi, J. Sato, T. Daigo, M. Takizawa, S. Kudoh, T. Suehiro, SICE SI 2020, 2546 (2020).
- 10) Y. Okura, J. Sato, T. Daigo, M. Takizawa, T. Suehiro, K. Kimura, S. Kudoh, SICE SI 2022, 1607 (2022).