

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540067

研究課題名(和文) 触感を認識可能な指先型力触覚ハイブリッドセンサシステムを搭載したロボットの開発

研究課題名(英文) Development of a robot equipped with a finger-type hybrid sensor system comprising force and tactile sensors that can recognize touch feelings

研究代表者

川村 拓也 (Kawamura, Takuya)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：50313911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、指先型力触覚ハイブリッドセンサシステムを搭載したロボットハンドを開発した。本センサシステムは、物体の硬さを判別したり、滑りを検知したりすることが可能である。実験では、硬い物のほかに、スポンジやゴムなどの柔軟物を掴んで、そのときのセンサ情報に基づいた把持動作を可能であった。またセンサ評価装置を用いて、本センサシステムで、ウレタン、スポンジ、ゴムの硬さを測定する手法について検討した。さらにつるつる・ざらざらといった物体表面の触感を認識する手法についても検討した。その結果、本センサシステムは、人の指先と同じように触感を認識可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：In this study, a robot hand equipped with a finger-type hybrid sensor system comprising force and tactile sensors was developed. The sensor system is able to measure the hardness of a touched object and detect the slip of it. In experiments, the sensor system enabled the robot hand to grip not only a hard object but also a deformable object based on the sensor outputs. Also, using the device that can estimate the tactile sensor, the way of measuring the hardness of urethane, sponge and rubber was investigated, and also the way of discriminating between the roughness and smoothness of an object's surface was examined. The results suggested that a robot hand with the sensor system has an ability to recognize touch feeling of an object like a human finger tip does.

研究分野：センサ工学

キーワード：接触センシング処理 触感覚認識 触覚センサ

1. 研究開始当初の背景

人の指先と同じように触感を認識可能な指先型力触覚ハイブリッドセンサシステムを搭載したロボットハンドを製作して、物体の性状に応じた把持制御が可能なロボットを開発する。研究者代表者が開発を進めているハイブリッドセンサシステムは、数 μm のコイル状の炭素素材(カーボンマイクロコイル, CMC)を添加した弾力性シリコン樹脂をセンサ素子とする CMC 触覚センサと力覚センサを組み合わせたもので、センサ素子に生じる微小な力変化(5 gf まで)や変形量(2 μm まで)を計測可能である。さらに物体の滑り検知や柔らかさ判別も可能なことがわかってきた。このセンサシステムの検証には、数 μm の精度で開閉駆動可能なロボットハンドが必要であり、本研究では、市販のロボットハンドと微小駆動可能な圧電アクチュエータを組み合わせて、高精度なロボットハンドシステムを開発する。

2. 研究の目的

(1) 力触覚ハイブリッドセンサを搭載したロボットハンドは、把持物体の滑りを検出し把持しなすことで安定した物体把持が可能になることが期待される。そこで、力触覚ハイブリッドセンサシステムを搭載した二ツ爪ロボットハンドを開発する。

(2) 本研究で用いる力触覚ハイブリッドセンサは、柔軟物の硬さを判別できる。そこで、開発した二ツ爪ロボットハンドの力触覚センサで柔軟物の硬さや滑りを判断して、柔軟物を滑り落としたり、潰したりせずに、安定して把持することができるようにする。

(3) 本研究で用いる CMC 触覚センサは滑りを検知することが可能である。そこで、力触覚ハイブリッドセンサを搭載した三ツ爪ロボットハンドを開発して、つるつる・ざらざら、やわらかい・硬いといった様々な物体を掴んだときの把持状態を計測して、それが安定した把持状態であるかどうかをセンサ出力から判断できるようにする。

(4) CMC 触覚センサは、弾力性シリコン樹脂に生じる数 μm の微小な変形を測定することができるため、センサ素子を試料に押しつけたときの変形量は試料の硬さにより異なり、センサの出力値から硬さの判別が可能である。そこで、ウレタン、ゴムスポンジ、ゴムの硬さについて、人指先の触覚と同等の硬さ判別が可能な手法を開発する。

(5) 人は、物体表面を触ったときの指先にかかる数 gf の微小な力変化や数 μm の変形を知覚して触感として認識していると考えられる。CMC 触覚センサは、微小な力変化や変形を計測できるため、人のように触感を認識できる可能性がある。そこで、CMC 触

覚センサのセンサ出力から触感に応じた特徴を抽出して、触感を認識する技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 力触覚ハイブリッドセンサを搭載した二ツ爪ロボットハンドの開発においては、まず、市販の二ツ爪ロボットハンドの両爪の内側に圧電素子を設け、その伸縮により開閉量を数 μm から数十 μm の範囲で調整可能なロボットハンドを製作する。つぎに、ロボットハンドのモータによる開閉と圧電素子の伸縮によって把持力を制御する実験を行って、製作したロボットハンドの把持性能を評価する。さらに、搭載した力触覚ハイブリッドセンサシステムによって物体の滑りを検出する方法を提案する。

(2) 開発した二ツ爪ロボットハンドで柔軟物を把持する際には、シリコン樹脂でできたセンサ素子自身の柔らかさや把持対象物の硬さが、力触覚センサシステムによる滑りや硬さの検出や、ロボットハンドにおける把持力制御に何らかの影響を与える可能性がある。そこでまず、ロボットハンドの開閉により柔軟物の硬さを判別できるか調べる。つぎに、基本的な把持動作として、「物体の硬さを判断して把持する・物体を把持したまま停止する・物体を離して滑り落とす」という動作に着目して、物体の柔らかさが把持動作に与える影響を調べる。

(3) 力触覚センサシステムを搭載して物体の把持状態を計測できる三ツ爪ロボットハンドを製作する。まず、ロボットハンドを構成するモータによる把持力制御と把持力の変化に関する実験を行って、製作した三ツ爪ロボットハンドの性能を評価する。つぎに、把持状態のひとつとして物体の滑りに注目し、物体を把持できたときと滑って把持できなかったときの把持状態を計測して、物体把持の安定性について検討する。

(4) CMC 触覚センサでウレタン、ゴムスポンジ、ゴム試料の硬さを判別するため、数 μm の高精度駆動が可能なステージで構成された CMC 触覚センサ評価装置を用いて、試料を CMC センサ素子にある力まで一定速度で押しつける実験を行う。その実験中の CMC 触覚センサの出力を測定し、その結果から CMC 触覚センサによる硬さ判別方法を検討する。本実験では、まず硬さの違いがわかりやすい三種類の試料を圧縮する実験を行い、CMC 触覚センサの出力を検討する。つぎに硬さの違いがわかりにくいゴムやウレタンなどの 10 種類の試料を圧縮する実験を行い、その結果から硬さ判別手法を検討する。また、CMC 触覚センサを搭載したロボットアームで圧縮した場合、提案した手法で硬さ判別手法を行えるか検討する。さらに、

力触覚センサの出力値より求められる評価値と人が触って感じる硬さとの関係に加えて、アスカーC（アスカーC1未満から35まで）やショアA（ショアA15から70まで）などの工業的な硬さとの関係についても検討する。

（5）CMC 触覚センサで物体表面の触感を認識するため、数 μm の高精度駆動が可能なステージで構成された CMC 触覚センサ評価装置を用いる。まず、ドーム状の CMC センサ素子を数種類の物体に接触させ滑らせた場合のセンサ出力から、物体表面の触感を判別することを目指す。実験では、材質や人が指先で触ったときの触感の異なる数種類の試料にセンサ素子を 10~50 gf の一定の力で押し付け、その状態から 1 mm 水平方向にずらしたときの CMC 触覚センサと力覚センサの出力を測定する。つぎに、CMC 触覚センサの出力を比較し、物体表面の触感の違いを判別するための指標について検討する。さらに、実験で得られた力覚センサの出力から摩擦係数を算出し、摩擦特性と物体表面の触感および CMC 触覚センサ出力の関係について検討する。

4. 研究成果

（1）CMC 触覚センサと力覚センサを組み合わせた力触覚ハイブリッドセンサシステムを搭載し、物体の滑りやすさや硬さなどを認識できるロボットハンドを開発することを目的として、圧電アクチュエータを用いた微小駆動可能な二ツ爪ロボットハンドを製作した。そして、製作したロボットハンドにおける把持性能の評価を行った。以下に研究成果を要約する。

ハンドの微小開閉を可能とするため、二ツ爪ロボシリンダの両爪の内側に圧電アクチュエータを搭載した。また、二ツ爪ロボシリンダの制御にパルス列制御を採用することにより、二ツ爪ロボシリンダのみでも微小駆動を可能とした。

製作したハンドの物体把持における力制御に関する性能評価実験を行った。二ツ爪ロボシリンダのパルス列制御による把持では、1パルスずつハンドの開閉量を制御可能で、1パルス分ハンドを閉じると把持力は約 0.15 N 増加することがわかった。また、圧電アクチュエータの伸長による把持力制御では、初期把持力が 0.5 N、5 N のときそれぞれ 0~0.2 N、0~0.5 N の範囲で調整できることがわかった。

把持物体の滑り検出および再把持実験を行った。物体の滑り検出では、CMC 触覚センサの出力値の差分をとり、その値が設定した閾値を超えたことを検知することにより滑りを検出可能であることがわかった。また、

滑った物体の再把持実験では、質量 110 g で表面が滑らかな物体を滑らせて、CMC センサが滑りを検出したときに圧電素子と二ツ爪ロボシリンダを組み合わせた再把持動作をすることで物体の滑りを止めることが可能であることがわかった。

（2）柔軟物の硬さや滑りを力触覚センサで判断して、柔軟物を安定して把持できるロボットハンドを開発することを目的として、力触覚センサシステムを搭載した二ツ爪ロボットハンドを用い、力触覚センサの出力からゴムスポンジとゴムの硬さを判別できるかどうかについて検討した。さらに、ロボットの基本的な把持動作として、「物体の硬さを判断して把持する・物体を把持したまま停止する・物体を離して滑り落とす」という動作に着目して、物体の柔らかさが把持動作に与える影響を調べた。以下に研究成果を要約する。

柔軟物であるゴムスポンジとゴムの硬さを、開発した二ツ爪ロボットで判別する実験を行った。ゴムスポンジはアスカーC1未満からアスカーC30までの4種、ゴムはショアA30からショアA70までの3種を用意し、それらを圧縮したときの CMC 触覚センサの出力変化を積算した値を評価値として硬さの判別を行った。求められた評価値と人が触って柔らかいと感じる順番を比較すると、0.5 N から 1.0 N まで圧縮した場合には順番が異なることがあったが、1.5 N まで圧縮力を増やすことにより、人と同じ順番となった。

柔軟物を把持・運搬することを想定して、ゴムスポンジとゴムを把持し続けたときの把持力の低下について検討して、把持したまま時間がたつと把持力が低下していくことがわかった。把持力の最大値とその 30 秒後の値から減少率を求めると、材質によって 5% から 14% 程度減少することがわかった。また、材質が柔らかいほど把持力が減少するわけではないこともわかった。

一定の速度でロボットハンドを開いていき、把持していたゴムスポンジあるいはゴムを滑り落としたときの CMC 触覚センサと力覚センサの出力値を測定して、CMC センサの出力から滑りを検出できることがわかった。CMC センサ出力とその差分値に着目すると、把持物体が滑り落ちる少し前に、ゴムスポンジでは CMC センサの出力値が上昇し、一方ゴムでは CMC センサの差分値が変化していることがわかり、この反応は滑りを検出した結果であると考えられる。なお、力覚センサの出力から滑りを検出することはできなかった。

（3）つるつる、ざらざら、柔らかい、硬いといった様々な物体を掴むことができるロ

ロボットハンドを開発することを目的に、CMC 触覚センサと力覚センサを組み合わせた力触覚センサシステムを搭載して物体の把持状態を計測できる三ツ爪ロボットハンドを製作した。そのロボットハンドの把持力の変化に関する性能評価実験を行った。また、ロボットハンドに物体を掴むことができたときと滑って掴むことができなかったときのセンサ出力を比較検討する実験を行った。以下に研究の成果を要約する。

様々な物体を掴むことができるロボットハンドを開発することを目的に、力触覚センサシステムを搭載して物体の把持状態を計測できる、三つのロボシリンダから構成される三ツ爪ロボットハンドを製作した。この三ツ爪ロボットハンドの制御にはパルス列制御を採用し、ロボシリンダの微小駆動を可能とした。

製作した三ツ爪ロボットハンドの把持力に関する性能評価実験を行った。設定した把持力による物体把持による実験では、三ツ爪ロボットハンドの把持力が制御可能であることがわかった。また三ツ爪ロボットハンドのパルス列制御による把持実験では、数パルスずつの微小な開閉量の制御が可能であり、閉じるときも開くときも1パルス分駆動すると把持力が約 0.1 N 変化することがわかった。

物体の把持状態を計測する実験を行った。実験では、把持物体を滑らさずに掴むことができたときと把持物体が滑って掴むことができなかったときの CMC 触覚センサと力覚センサのセンサ出力について比較検討した。実験結果より、物体が滑る直前に CMC 触覚センサの出力が低下し、その後物体の滑りにより再び上昇するということが、また、滑りにより力覚センサの値が変化することから、物体を把持したとき、力触覚センサシステムで把持状態のひとつである滑りと滑りそうであるということが検出可能であることがわかった。

(4) CMC 触覚センサと力覚センサを組み合わせた力触覚ハイブリッドセンサシステムを用いて、硬さの判別を行った。本実験では、ウレタンやゴムスポンジ、ゴムなどの試料の圧縮実験を行い、硬さに対する CMC 触覚センサの出力の評価を行った。そのときの出力値から CMC 触覚センサの出力値の傾きに着目し、硬さ判別を行う手法を提案した。以下に研究成果を要約する。

CMC センサ素子をゴムやウレタンに押し、CMC 触覚センサで硬さを判別する実験を行った。硬さを判別するために約 40 gf から約 70 gf まで圧縮し、そのときの各センサの出力を測定し、その結果から硬さが明確に異なるものは、CMC 触覚センサの測定値の

絶対値の最大値を取ることによって判別が可能であることがわかった。

硬さの違いが分かりにくいものを含めた試料を約 40 gf から約 70 gf まで圧縮する実験を行い、そのときの各センサ出力を測定した。その結果から、硬さの違いが分かりにくいものは CMC 触覚センサの測定値の絶対値の最大値では判別が難しいことがわかった。そこで出力値の傾きに注目し、硬さを判別する手法を提案し、提案手法により判別が可能であることがわかった。

提案した手法を用いてロボットアームで硬さの違いを判別する実験を行った。実験は力覚センサでは違いが分かりにくいものを含めた試料を約 50 gf から約 90 gf まで圧縮する実験を行い、そのときの各センサの出力を測定した。その結果から提案手法では柔らかい物の判別は容易で、硬い物の判別が難しいことがわかった。

CMC センサの評価値と人が触って感じる硬さ、工業的な硬さの関係について比較すると、ゴムスポンジでは、CMC センサの評価値の順は、アスカー-C の値の順ではなく、人が触って感じる硬さの順と一致した。ゴムでは、材質が異なると硬さを比較することが難しかったが、同じ材質に限って比較を行うと、CMC センサの評価値の順は、ショア A や、人が触って感じる硬さの順と一致した。

(5) カーボンマイクロコイル (CMC) と呼ばれる数ミクロンのコイル状の炭素素材を含有したシリコーン樹脂をセンサ素子とする CMC 触覚センサを用いて物体の表面性状を識別する技術を開発することを目的として、ドーム状の CMC センサ素子を数種類の物体に接触させ滑らせた場合のセンサ出力から、物体表面の触感の違いを判断することを目指した。実験では、材質や加工状態の異なる数種類のプレートに、CMC センサ素子を 10~50 gf の圧縮力で押し付けながら、水平方向に 1 mm ずらしたときのセンサ出力を比較することで、触感に係る複数の指標が得られた。また、そのときの摩擦係数を算出し、得られた特性と物体表面の触感および CMC 触覚センサ出力との関係について検討した。以下に得られた研究成果を要約する。

物体表面の触感に係る指標を得るため、触感の異なる数種類のプレートに数十 gf の力でセンサ素子を押し付けながら水平方向に 1 mm 移動させる実験を行った。その結果、CMC 触覚センサの出力において、水平移動開始時から出力がピークに到達するまでの時間およびそのときの出力変化量、水平移動開始時から水平移動完了までの出力変化量、移動完了後の出力変化量の 4 つに違いがあることがわかった。

いずれの指標においても、人の指で触ったときにくっつく触感の場合は、くっつかない触感やザラザラした触感の場合よりも値が小さくなることがわかった。また、ザラザラした触感の場合では、同じ材質でもより強くザラザラを感じるほうの値が大きくなることがわかった。移動完了後の出力変化では、ザラザラした触感の場合に、くっつく触感の場合とくっつかない触感の場合の中間の値となる傾向が得られた。なお、圧縮力が 20 gf 程度のときには、4 つのすべての指標においてこの傾向がみられた。以上の指標と触感の関係から、CMC 触覚センサの出力を比較すれば、ザラザラした触感やその度合い、および指で触ったときにツルツルしていきつつくような触感とすべすべしていきつつくような触感が判別できることがわかった。

水平移動中の摩擦係数を算出し、5 種類の試料について比較すると、触感が異なる場合、値の大きさや、変化パターンに違いがあることがわかった。人の指で触ったときにくっつく触感の場合は、くっつかない触感やザラザラした触感の場合よりも全体的に摩擦係数が小さくなる。また、フライス加工したものよりも強くザラザラを感じる触感の場合、水平移動開始直後に摩擦係数がピークに到達したあと値が下がらないという特徴がみられた。さらに、くっつかない触感の場合には、他の触感の場合と比べ、水平移動中の摩擦係数が大きく増加する特徴があることがわかった。

くっつくような触感の場合は全体的に摩擦係数が小さく、CMC 触覚センサ出力の各指標の値は小さくなり、くっつかない触感の場合は水平移動中に摩擦係数が大きく増加し、CMC 触覚センサ出力の各指標の値が大きくなるというように、触感と物体表面の摩擦特性および CMC 触覚センサの出力の 3 つには関連性があることがわかった。また、センサ出力がピークになった後の出力変化を比較することにより、ザラザラを強く感じる触感を判別できることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

伊藤雄基, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサシステムを搭載した二ツ爪ロボットハンドによる柔軟物の把持, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), no. 243, 2015, 査読無.

佐野匡駿, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサシステムを搭載した三ツ爪ロボットハンドによる物体把持, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), no. 244, 2015, 査読無.

集 (CD-ROM), no. 244, 2015, 査読無.

平手湧子, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサによる柔軟物の硬さ比較, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), no. 245, 2015, 査読無.

犬塚彩佳, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, CMC 触覚センサを用いた物体表面の触感の判別, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), no. 246, 2015, 査読無.

松井練, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサシステムを搭載したロボットによる把持動作に伴う触感の検討, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), no. 247, 2015, 査読無.

浅野良啓, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 力触覚ハイブリッドセンサシステムを用いた物体の硬さ判別, 日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), no. 506, 2014, 査読無.

山田貴裕, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 力触覚ハイブリッドセンサを搭載した二ツ爪ロボットハンドの試作, 日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会講演論文集 (CD-ROM), no. 507, 2014, 査読無.

〔学会発表〕(計 7 件)

伊藤雄基, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサシステムを搭載した二ツ爪ロボットハンドによる柔軟物の把持, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会, 2015.3.13-14, 中部大学 (愛知・春日井).

佐野匡駿, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサシステムを搭載した三ツ爪ロボットハンドによる物体把持, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会, 2015.3.13-14, 中部大学 (愛知・春日井).

平手湧子, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサによる柔軟物の硬さ比較, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会, 2015.3.13-14, 中部大学 (愛知・春日井).

犬塚彩佳, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, CMC 触覚センサを用いた物体表面の触感の判別, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会, 2015.3.13-14, 中部大学 (愛知・春日井).

松井練, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 触力覚センサシステムを搭載したロボットによる把持動作に伴う触感の検討, 日本機械学会東海支部第 64 期総会講演会, 2015.3.13-14, 中部大学 (愛知・春日井).

2015.3.13-14, 中部大学 (愛知・春日井).

浅野良啓, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 力触覚ハイブリッドセンサシステムを用いた物体の硬さ判別, 日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会, 2014.3.18-19, 大同大学 (愛知・名古屋).

山田貴裕, 川村拓也, 大坪克俊, 山田宏尚, 力触覚ハイブリッドセンサを搭載した二ツ爪ロボットハンドの試作, 日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会, 2014.3.18-19, 大同大学 (愛知・名古屋).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 拓也 (KAWAMURA TAKUYA)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号 : 50313911