

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560316

研究課題名(和文)コネクタの詰め合い状態を計測できるロボット指先型触覚センサの開発

研究課題名(英文)A robotic fingertip for sensing a state transition of the connector insertion

研究代表者

村上 剛司 (MURAKAMI, Kouji)

九州産業大学・工学部・准教授

研究者番号：80380682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：コネクタの詰め合い状態の変化を推定可能なロボット指先型触覚センサを開発した。まず、コネクタの詰め合いをオス型のピンヘッドがメス型のピンソケットに挿入される操作と定義した。その上で、詰め合い状態の変化をピンソケットの内部空間構造の変化として捉え、その変化を触覚センサに埋め込まれた振動の送受信素子により把持物体を媒体として伝送される振動のスペクトル強度の変化に対応付けることで推定した。

研究成果の概要(英文)：I have developed a tactile sensor for estimating a state transition of the insertion process of connectors. This tactile sensor can be used as a robotic fingertip. A pin-header is inserted into a pin-socket in the insertion process of connectors. I have modeled a state transition of the insertion process as a change of an empty space within a pin-socket. Vibrations are transmitted through a pin-socket from a tactile sensor to another opposing tactile sensor in the sensing process. A state transition of the insertion process is estimated by relating a change of the spectral intensity of vibrations.

研究分野：ロボティクス

キーワード：触覚センサ ロボットハンド

1. 研究開始当初の背景

工場での組立作業は、ロボットの導入により多くの工程が自動化され、生産性の向上が達成されてきた。しかし一方、ハーネスの取り付けなど、コネクタの詰め合いを含む組み立て工程は、未だ自動化されず、手作業で行われている。これは、コネクタの詰め合い状態を直接的にセンシング可能なセンサが現状では存在しないためである。ビジョンセンサは、コネクタ挿入時の輪郭変化の計測を通して、挿入状態の推定が行える可能性がある。しかし、カメラ配置や照明条件、複雑背景およびコネクタを把持するハンド機構による隠れなど解決すべき課題が多い。

物品の把持・操作機構としてのロボットハンドには、その作業機能に影響を与えることがないように、装着するセンサにはサイズや重量などの制限がある。このような制限の下で、従来研究では、ロボットハンド・アームシステムにおいて、アームの手首部に装着した6軸力覚センサを用いて、コネクタの詰め合い状態の計測を試みている(図1)。これは、コネクタの挿入に伴うコネクタの並進・回転自由度の変化として、コネクタの挿入状態を力覚センサの出力から推定するものである。しかし、コネクタの製作精度などの要因により、詰め合い過程の力の変化や詰め合いに必要な仕事量はコネクタ毎に異なる。また従来研究では、片方が環境に固定されたコネクタの詰め合い状態の計測を対象としており、空中での詰め合い状態を計測しようとした試みはない。これは、空中での詰め合いでは、挿入方向のずれなど詰め合い状態以外に起因する力変化の影響が大きくなるためである。

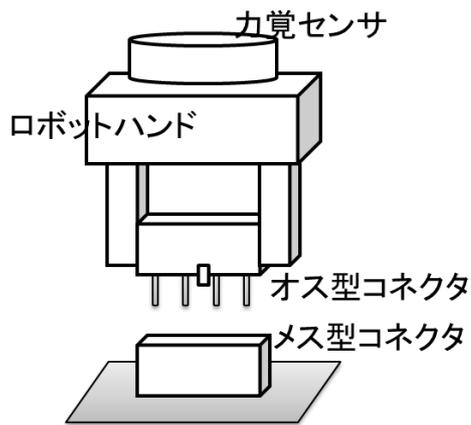


図1. コネクタの詰め合い

報告者は、これまでロボット指先型触覚センサの研究を行って来た。その成果として、指先内部に装着したセンサ素子を用いて、センシング動作により指先表面に生じる振動を計測することで、新たな触覚機能を実現できることを明らかにしている。本研究ではこれらの成果を発展させた計測手法を提案する。

報告者はコネクタの詰め合い過程では、力の変化に加えて、コネクタの内部の空間構造の変化が起こることに着目した。この変化を計測可能なセンサ素子を、ロボット指先内部に埋め込むことで、ロボット指先の作業機能に影響を与えることなく、詰め合い状態の計測を実現する。

2. 研究の目的

コネクタの詰め合い作業は、工場での組み立て作業において未だ自動化できていない作業項目の1つである。本研究では、産業用ロボットによる組み立て作業の適用範囲拡大を目指し、コネクタの詰め合い状態を計測する手法を提案すると共に、提案手法を実装可能なロボット指先型触覚センサを開発する。ロボットハンドの指先に装着してコネクタの詰め合い状態を計測可能な触覚センサは現状で存在しないが、提案する触覚センシング手法を適用することで実現を図る。ロボットハンドによる物体操作を考慮し、触覚機能と物体操作機能の両機能を1つのロボット指先で実現する。

3. 研究の方法

本研究で対象とするコネクタの詰め合い操作を、オス型のピンヘッドが、メス型のピンソケットに挿入される操作とする。この詰め合い操作の概略図を図2に示す。ピンヘッドの挿入過程では、ピンヘッドを押し込むのに必要となる力の変化に加えて、ピンソケット内部の空間構造も変化する。具体的には、ピンヘッドがピンソケットに挿入されるに伴って、ピンソケット内の空間がピンヘッドで埋められていく。この空間構造の変化は、ピンの挿入状態すなわち、コネクタの詰め合い状態に対応している。本研究では、空間構造の変化を振動波を用いて計測することで、コネクタの詰め合い状態を推定する。

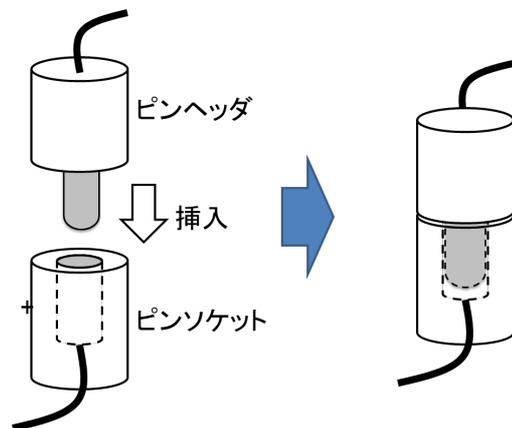


図2. コネクタの詰め合い操作

振動波を用いて以下のように空間構造の変化を計測する。物体を経路として振動波が伝達する際にはその伝達経路の材質や空間

構造に影響を受けて、伝達信号のスペクトル強度が変化する。このスペクトル強度の変化を、ピンの挿入に伴う空間構造の変化と対応づけることにより、挿入状態を推定する。

ロボットハンドによる組み立て作業では、対象部品を挟み込み把持することから、対向する指先間で、振動波の送信と受信を行うことにより、指先間で把持された物品を経路として伝達される振動波のスペクトル強度を計測できる。まず、振動の送信機能と受信機能を持つロボット指先を開発する。本研究では振動の送信には小型スピーカー、受信用のセンサ素子として、圧電素子である PVDF (PolyVinylidene DiFluoride) フィルムを用いる。小型スピーカーと PVDF フィルムをそれぞれロボット指先の内部に埋め込むことにより、作業対象と直接接触する指先表面は自由に整形でき、物体操作機能に影響を与えない。これにより、触覚センサと一体化した形で物体操作部としての機能を持つ柔軟ロボット指先を実現できる。その上で、コネクタ詰め合い状態と、コネクタを媒体とした伝送信号のスペクトル強度との相関を明らかにする。

提案手法の特徴を以下に示す。

- センサ素子が指先内部に配置されるため、指先表面形状を制限しない。
- 詰め合い状態の推定は2つのロボット指先触覚センサで物体を挟み込み把持して行われる。物体把持動作がセンシング動作を兼ねるため、ロボットハンドで追加的な計測動作が不要となる。
- 提案手法は、力変化の影響を受けず、空中での詰め合い状態計測にも対応できる。

4. 研究成果

(1) ロボット指先の開発

まず、振動波を送受信可能なロボット指先を開発した。開発したロボット指先の構造を図3に、外観を図4に示す。送信用と受信用の2つのロボット指先が対になっている。振動波の送信用として小型スピーカー (UNISON U238S4WC) を、受信用として、圧電素子の PVDF フィルム ((株) 東京センサ LDT1-028K/L) を用いた。その外観を図5に示す。小型スピーカーから送信された振動波が PVDF フィルムに届くと、PVDF フィルムは圧電効果により振動に応じた電圧を生じる。この電圧を AD 変換器により計算機に取り込む。得られた電圧値の時系列データに、FFT による周波数解析を行って信号波のスペクトル強度を取得する。小型スピーカーから送信された振動波は、ロボット指間で挟み込み把持された物品を経由して PVDF フィルムへ伝達される。

この振動波の送受信において、振動波を効率よく伝達するためには、小型スピーカーと PVDF フィルムが伝達経路となる把持物品とそれぞれ広い面積で接触する必要がある。このため、小型スピーカーおよび PVDF フィル

ムとコネクタとの間に柔軟被覆を挟むことで、コネクタや指先の形状の影響を緩和して両者を密着させた。柔軟被覆としては、(株) エクシールコーポレーションのハイパーゲルシートを用いた。その硬度は 30 (アスカ-C) で厚さは 3mm である。また、ロボット指先に内にロードセル (Measurement Specialties FC22) を設置し、把持力を計測可能とした。以上により、ロボット指先型触覚センサを開発した。

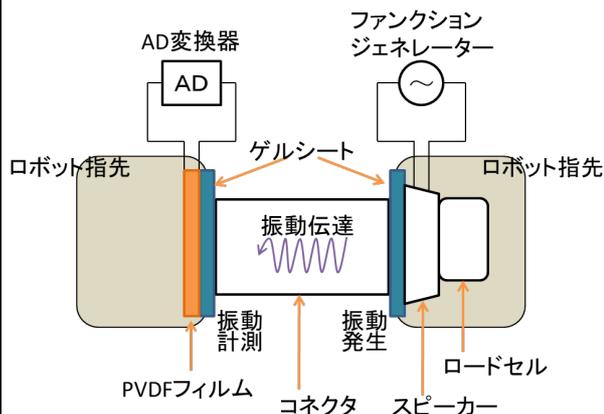


図3. ロボット指先の構造



図4. ロボット指先の外観

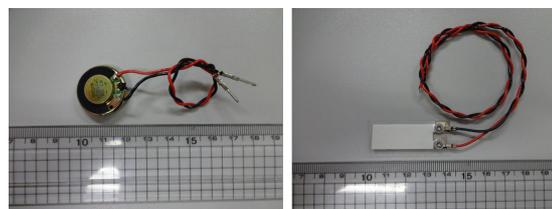


図5. 小型スピーカーと PVDF フィルム

(2) コネクタの把持と振動波の計測

開発したロボット指先でコネクタを把持し、振動波が伝達されるかを調査した。コネクタの代替として、ペンのキャップをメスコネクタとして把持し、ペンを挿入する動作を行った。周波数毎の伝達特性を調査するため振動波として 500Hz から 10KHz の広い周波数帯で構成される SWEEP 波を用いた。この SWEEP 波を生成する信号原としてファンクション

ジェネレーター (Agilent Technologies 33522A) を用いた .AD 変換器には ,Interface 社の PEX-321216 を用いた . その分解能は 16bit である . AD 変換して得られた値の時系列データに FFT を適用して周波数毎のスペクトル強度を求めた . 実験結果を図 6 ~ 8 に示す . 図 6 は ,ペンキャップを把持した状態で振動波を発生させていない場合の結果である . 横軸が周波数 ,縦軸がスペクトル強度を表している . 振動波を送信していないため ,スペクトル強度は全帯域でほぼゼロである .

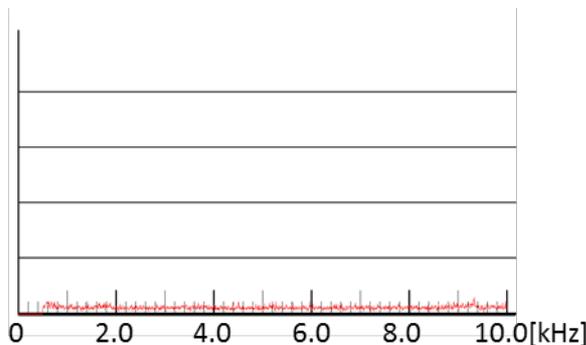


図 6 . スペクトル強度 (振動波なし)

把持状態を保ったままで SWEEP 波を発生させたときの結果を図 7 に示す . ペンは未挿入である . 結果より ,500Hz から 3kHz 程度までの帯域でスペクトル強度が大きくなっている . これは ,スピーカー ,PVDF フィルム ,ゲルシートの各特性に加えて ,ペンキャップの内部形状に起因すると考えられる . 計測結果より ,把持しているペンキャップを伝達路としてロボット指間で振動波を伝達できることを確認できた .

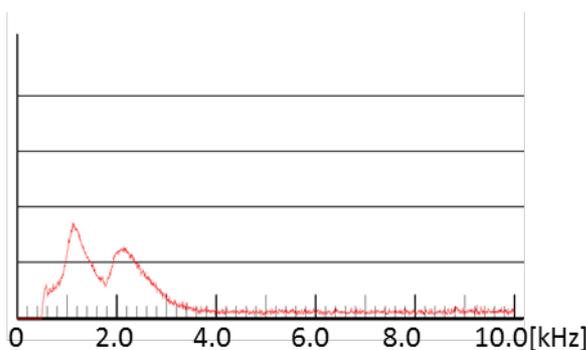


図 7 . スペクトル強度 (挿入前)

把持状態を保ったままでペンキャップにペンを完全に挿入した際の結果を図 8 に示す . ペンの挿入に伴ってスペクトル強度が変化していることが確認できる . 特に 1.8kHz 近傍の帯域においてスペクトル強度が大きく変化している .

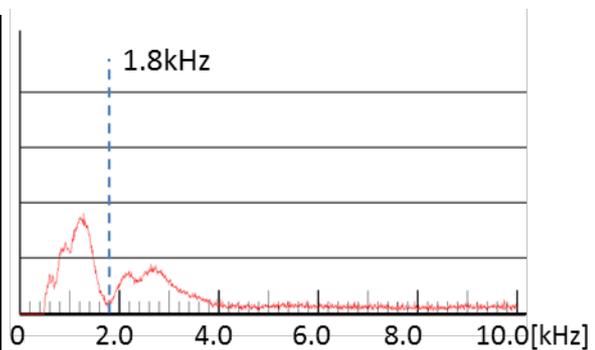


図 8 . スペクトル強度 (挿入後)

このスペクトル強度の変化の理由を以下のように解釈した . 把持されているメス型のコネクタにオス型のコネクタが挿入される際のモデルを図 9 に示す . 振動波は把持されたメス型のコネクタを通して伝達される . ここで ,オス型コネクタの挿入前のメス型コネクタは ,片端が閉じられた閉管とみることができる . 閉管内に振動波が入射されると ,振動波が閉管内で反射して周波数 f_0 の固有振動が起こる . 一方 ,メス型コネクタへのオス型コネクタの挿入が完了しメス型コネクタの開口部が完全にふさがれると ,固有振動数が変化する . この固有振動数の変化により挿入完了前の固有振動数のスペクトル強度は ,挿入完了後に大きく減少すると考えた .

実験で用いたペンキャップの長さ $l=45\text{mm}$ であり ,その半径 $r=5\text{mm}$ である . 音速 $v=340\text{m/s}$ として ,式 $f_0 = v/\{4(l+0.6r)\}$ より開口端補正を考慮した固有振動数 f_0 を求めると ,約 1.8kHz となる . これにより実験結果におけるオス型コネクタ挿入前後の 1.8kHz 近傍のスペクトル強度の変化は ,オス型コネクタの挿入によりメス型コネクタの入り口がふさがれ ,固有振動数が変化したためと説明できる .

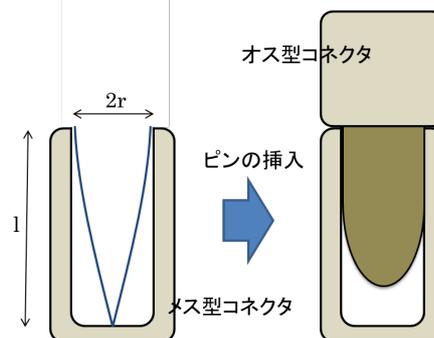


図 9 . ピンの挿入モデル

(3) コネクタの詰め合い状態の推定

(2)の検討結果を踏まえて ,受信した振動波のスペクトル強度と ,コネクタの詰め合い状態の関連付けを行った . 具体的には ,作業実行に有用な状態情報として差し込み操作を ,挿入過程 (ソケット部に非接触) ,挿入

過程（ソケット部に接触）、挿入完了（ソケット部に固定）に分割した上で状態間遷移の検出を試みた。

実験環境の模式図と外観を図 10 に示す。開発したロボット指先を対向させてロボットグリップに模した XY スライダに設置しており、XY スライダを動かすことで把持操作が行える。メス型コネクタを模したペンキャップをロボット指先で挟み込み把持する。このときの把持力はロードセルで計測する。その上で、オス型コネクタに模したペンをロボットアーム・ハンドで把持してメス型コネクタに垂直に挿入する。ロボット指先間で伝達させる振動波の周波数はペンキャップの固有振動数である 1.8KHz、把持力は 400N として計測を行った。

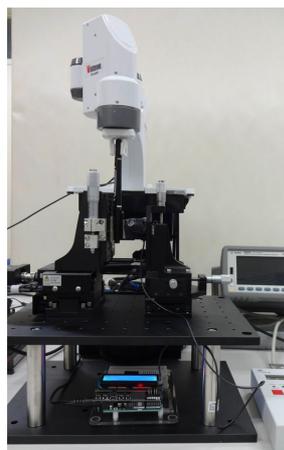
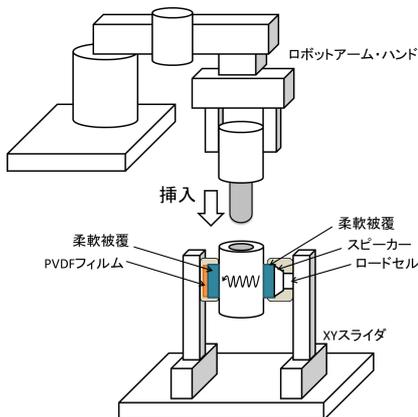


図 10 . 実験環境

実験結果を図 11 に示す。横軸はオス型コネクタに模したペンの挿入長さで、縦軸は計測されたスペクトル強度を表している。この挿入操作では、挿入量が 22mm 付近でオス型コネクタがメス型コネクタの縁に接触しはじめ、43mm で挿入が完了している。結果より、スペクトル強度の変化が挿入状態の遷移に相関があることが確認できた。特に挿入が完了しペンがキャップに完全に固定される際にスペクトル強度が大幅に減少している。この減少の理由は前節(2)のモデルで説明できる。このスペクトル強度の変化に閾値処理を適用することで、挿入操作の完了を検出できる。

以上により、コネクタの詰め合い状態の変化を推定可能なロボット指先型触覚センサを開発した。

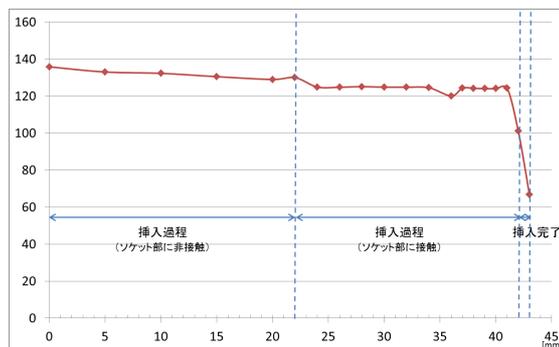


図 11 . 実験結果

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

Taisuke Sakaki, Toshihiko Shimokawa, Nobuhiro Ushimi, Kouji Murakami, YongKwun Lee, Kazuhiro Tsuruta, Kanta Aoki, Kaoru Fujiie, Ryuji Katamoto, Atsushi Sugyo (Taisuke Sakaki), Rehabilitation Robot in Primary Walking Pattern Training for SCI Patient at Home, ICNR2015, 2015.6.11, コペンハーゲン (デンマーク)

Oscar Martinez Mozos, Fran cois Chollet, Kouji Murakami, Kenichi Morooka, Tokuo Tsuji, Ryo Kurazume, Tsutomu Hasegawa (Oscar Martinez Mozos), Tracing Commodities in Indoor Environments for Service Robotics, IFAC SYROCO2012, 2012.9.6, ドゥブロヴニク(クロアチア).

Kouji Murakami, Kazuya Matsuo, Tsutomu Hasegawa, Ryo Kurazume (Kouji Murakami), Position Tracking and Recognition of Everyday Objects by using Sensors Embedded in an Environment and Mounted on Mobile Robots, ICRA2012, 2012.5.16, Saint Paul (アメリカ合衆国).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ip.kyusan-u.ac.jp/J/kougaku/tb/murakami/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

村上 剛司 (MURAKAMI, Kouji)

九州産業大学・工学部・准教授

研究者番号：80380682