近接覚センサを用いた多指ハンドとアームによる 物体の遠隔把持

一 村 リ サ* 梶 本 裕 之* 下 条 誠* 明 愛 国*

Tele-grasping by Multi-finger Hand with Proximity Sensors and Arm

Risa Ichimura*, Hiroyuki Kajimoto*, Makoto Shimojo* and Aiguo Ming*

This paper refers to a tele-grasping method by a multi-finger hand and an arm based on proximity-information feedback using sensors mounted on the fingertips of the hand. The sensors are composed of array of photo-reflectors connected in a network and can detect posture angles and distance between the finger and the object within a distance of several ten millimeters from the sensor. In this paper, we propose an electro-tactile stimulation method based on proximity sensor output for an operator to perceive intuitively the object when the hand approaches the object. According to the presentation of proximity information, we propose a strategy for tele-grasping and control method. An experimental system has been constructed and intentionally grasping of complex objects by the operator has been realized by the system.

Key Words: Tele-grasping, Proximity Sensor, Multi-finger Hand, Electro-tactile Stimulation

1. は じ め に

近年、物体を掴むというヒトの高度な身体運動を、ヒトの代わりにロボットに行わせる研究が行われている。なぜなら、原発事故現場などの時々刻々と周辺環境や状況が変化し、かつヒトが介入しづらい極限環境において、ヒトの代わりに作業するロボットの導入が必要とされているからである。また医療分野では、超精密な把持動作をロボットに任せることで低侵襲手術が可能となると言われている。ここでロボットに求められることは、高度な認識・判断能力である。しかし、ある動作の全工程をロボットに一任するには、まだ課題が多い。そのため、ヒトに認識・判断能力を任せる遠隔操作型ロボットであれば、極限環境においても高度な作業を実行することが可能であると考えられている。

遠隔操作型ロボットにおいて、センサ関連の研究はヒトの認識・判断に大きく影響を及ぼすため、これまで盛んに研究がなされている。センサ系は大きく触覚伝送系と視覚伝送系に分かれる。触覚伝送系に関しては、物体を適切に把持しその状態を知るために、物体の重さや形状、テクスチャ感などの触感が伝わる必要がある [1]~[3]。視覚伝送系は死角がなく、物体までの距離感が正しいことや、ロボットの手先の微細な変化などを捉えるための高解像度な映像の提示が求められる。最近では、その解決手法として市販の VR ヘッドセットや HMD などでの拡張現実を用いた研究が盛んである [4] [5]。しかしながら、このような立体視は人工的であるため、自然な立体視と比較して長時間

利用すると現状では眼精疲労が増すことが知られている [6] [7]。また、高解像度な映像ほど、ロボット側から操作者側へ視覚情報を通信する際通信遅延から誤差が生じ、操作効率や快適性が悪化する。加えて、ロボットハンドが物体付近に近づいた際ロボット自身による対象物の隠蔽（オクルージョン）が生じる。これを防ぐために、複数のカメラを搭載する手法が提案されている。杉本ら [8] は、複数の固定 RGB-D カメラ映像をつなげてロボットアーム自体を半透明化し、背景領域と組み合わせて一つの映像として操作者へ見せる半透明映像生成システムの構築を行った。しかしながら、固定カメラを用いるこの方法ではカメラの設置制約から十分な視差が得られず、対象物の十分な情報を得ることができない。これより、操作者の眼精疲労を軽減し通信遅延の削減をするために、用いるカメラは単眼カメラ一つが望ましい。またオクルージョンや正確な距離感についての問題は、物体近傍の情報が欠落していることが原因である。そこで物体近傍での情報を取得する必要があるが、触覚センサは接触するまで情報を得ることができないため、把持直前におけるロボットハンド指先の配置調整、および決定することが困難となる。

そこで我々は、近接覚センサに着目した。近接覚センサとは、ハンド指先表面から数十ミリメートルの範囲を検出するセンサであり、物体近傍の情報を接触する直前に取得することができる。またオクルージョンや死角が生じることはない。我々は、把持の確実性を向上するために、物体との姿勢・距離を同時にセンシング可能な近接覚センサを開発した [9] [10]。これは省配線（6 本）、高速応答（<1 [ms]）、小型、薄型、柔らかいという特徴を有しており、ロボットハンドの指先に実装することができる。

近接覚センサを用いた遠隔操作の研究も我々はいくつか行っている。石関ら [11] は、ロボットハンドを自律的に制御するこ

原稿受付 2019 年 11 月 29 日

*電気通信大学情報理工学研究所

*Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

■ 本論文は提案性（システム設計・構築分野）で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

とが可能なプリグリップ制御を用いて、遠隔操作ロボットハンド・アームシステムを実現した。奥行き情報や位置ズレを自動化することで補完し、アームを近づけるだけで短時間で把持を可能としたシステムである。しかし、カメラが曇るなどの視覚障害が生じたときや、複雑な形状の対象物を把持する場合適応することができない。また、実験者は熟練者であり、習熟により奥行きを補完しているため実用化は困難といえる。一方佐々井ら [12] は、ロボットハンド指先に取り付けられた近接覚センサの情報を、電気刺激を用いて触覚提示として操作者に返すことでシームレスな情報伝達を実現している。しかし、距離情報のみしか操作者へ返していなく、意図的に実現できる動作はまだ少ない。また、操作者の近接覚の知覚に不足が生じ、対象物への衝突など把持の失敗に繋がっている。したがって、操作者にとって必要な情報を見直し、物体近傍の情報を伝える手法を再検討する必要がある。

本論文ではこれらの問題を解決できる、近接覚センサの情報を操作者へフィードバックする遠隔操作システムを開発し、操作者が意図した把持位置・姿勢を決定することで物体を把持することを目的とする。我々は、3指ロボットハンドの各指先に近接覚センサを搭載した。この近接覚センサから得られる情報を操作者に伝えることで、凹凸のある複雑な物体やオクルージョンにより見えない部分の情報も取得することができ、操作者が所望する把持が実現できる。また、カメラとのズレも認識でき、奥行き感の欠如を補完することも可能である。

本論文ではまず、近接覚を操作者へ直感的に伝えるための提示手法について議論する。操作者が初心者でも簡単に操作ができるような情報伝達方法を考案し、これに基づいて遠隔把持が実現可能な手法の決定を行う。実験では、開発したシステムと提案した手法を用いて、任意の位置からリーチング動作を開始し非接触で意図した把持位置と姿勢を決定する手法を決定する。最後に実際に把持を行う実験をし、結果を述べる。

2. 近接覚情報のイメージ

近接覚センサとは、センサと対象物の相対位置が数十ミリメートル以内とし、距離などを検出するものである。この「数十ミリメートル離れた位置での情報」を、ここでは「触感覚が空間的に拡張した情報」と捉える。しかしながら、この「触感覚が空間的に拡張した情報」をヒトに伝える場合、ヒトには近接覚を感应する受容器がないため意識することができない。そのため、近接覚をヒトに伝えるためには、元来ヒトが持っている受容器に対する「触感覚が空間的に拡張した情報」の概念を考慮する必要がある。そこで、本研究では「人間の皮膚が空間的に拡張したイメージ」を想像し、このイメージと物体が接触した場合の感覚を、触覚提示としてヒトの指先へ提示することで、近接覚をヒトへ知覚させることができると考える (Fig. 1)。具体

Fig. 1 Image of the grasping using proximity information

的には、距離情報は仮想的な皮膚が物体へ押し込まれたときに増加する接触面積に対応し、傾き情報は仮想的な皮膚の移動した接触点に対応する。

3. 近接覚センサ出力に基づく触覚提示手法

3.1 指先近接覚センサ

3×3 検出素子の近接覚センサの回路構造を Fig. 2 に示す。Fig. 3 に示すロボットハンド指先には、このネット状近接覚センサが搭載されており、赤外発光・赤外受光素子群 (フォトリフレクタ) およびこれらを繋ぐ2層の抵抗回路網により構成される。赤外 LED より光を対象物へ照射し、その反射光をフォトトランジスタで受光することで各受光素子に光電流が生じる。その後抵抗回路網によって重み付け計算され、電圧 ($V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}, V_{s4}$) として出力される。これらの電圧を測定することで、 $m \times n$ 個のフォトリフレクタを配置した近接覚センサでは、式 (1)~(3) に示すアナログ演算によって、受光素子群の光電流分布の重心位置 x_c, y_c および総電流量 I_{all} が計算される。 V_0 は基準電圧、 r は抵抗回路網の内部抵抗、 R_0 は抵抗回路網の外部抵抗である。Fig. 4, 5 (小山ら [10]) より重心位置 x_c, y_c は物体との傾

Fig. 2 Circuit diagram of the RNSP (Resistor Network-Structure Proximity) sensor. 3×3 proximity sensing element array is shown as an example

Fig. 3 Robot hand with proximity sensor array on the palm and fingertips

Fig. 4 Experimental results for I_{all} vs. distance using white surface [10]

Fig. 5 Experimental results for x_c vs. distance using white surface [10]

Fig. 6 Diagram of electrodes of electrotactile display and switch circuit created in flexible substrate

きにに応じて値が単調に変化し、総電流量 I_{all} は物体との距離に応じて値が単調に変化する。なお、光電流分布の重心位置 x_c, y_c は、センサ面の中心を原点として $[-1, 1]$ の範囲で正規化されている。便宜上、総電流量を距離出力 I_{all} 、光電流分布の重心位置を位置出力 x_c, y_c とよぶ。

$$I_{all} = \frac{2V_0 - V_{S1} - V_{S3}}{R_0} \left(= \frac{2V_0 + V_{S2} + V_{S4}}{R_0} \right) \quad (1)$$

$$x_c = \left(1 + \frac{R_0}{r} \frac{2}{m-1} \right) \left(\frac{V_{S1} - V_{S3}}{2V_0 - V_{S1} - V_{S3}} \right) \quad (2)$$

$$y_c = \left(1 + \frac{R_0}{r} \frac{2}{n-1} \right) \left(\frac{V_{S2} - V_{S4}}{2V_0 - V_{S1} - V_{S3}} \right) \quad (3)$$

3.2 電気触覚ディスプレイ

Fig. 6 に示す電気触覚ディスプレイは経皮電気刺激により、皮膚表面に接触した電極から微弱電流パルスを送ること、機械受容器を刺激し、バーチャルな触覚を生成する装置である。本稿で使用した電気触覚ディスプレイは、梶本らが開発したものである [13]。電極基板、スイッチ回路基板、および制御基板の三つから構成され、電流を送る場合には、スイッチ回路により電極を高速に切り替えることで経皮電気刺激を行っている。そのため、電気刺激面積や電気刺激位置を制御することができる。電極部分は 7×9 個の電極が格子状に配置されており、人の指先に実装することが可能である。

3.3 距離提示手法決定実験

距離提示において、操作者が直感的に近接覚を知覚することを重要視し、近づいているかおよび遠のいているか、近づきすぎて危険かという二つのイメージを想定する。前者は近接覚のイメージに則して、距離出力 I_{all} の情報を電気刺激面積の増減によって操作者へ伝えることで実現する。この刺激面積とは、電気触覚ディスプレイの点群のうち半径 r の円内を意味する。そこで、半径 r を距離出力 I_{all} に対応付けることで、距離に対して面積を増減させ距離情報を操作者へ提示することが可能と考える。具体的には、ロボットハンドで把持を行う場合の検出範囲を基準として、距離 $d = 60$ [mm] 以内を近接領域と定義する。このとき電気刺激を開始（1点提示）し、距離が近づくに連れて刺激面積は増加する。加えて、二つめのイメージを考慮するため限界値を設定し、それ以内の距離領域を危険領域と設定する。限界値のとき、電気刺激面積は 5×5 提示とする。これは、 5×5 以上であると指が小さい操作者は変化を感じられないことや、変化を感じても感度が悪いことから基準としている。危険領域では上限を超えていることを示す提示を伝えることで操作者が危険情報を感じることができる。なお、近接覚センサ出力 I_{all} から距離 d を計算する方法は、小山ら [14] により提案されている。標準反射板を対象物とした際の、近接覚センサ出力 I_{all} と距離 d の関係式を式 (4), (5) に示す。各パラメータは、定数 $n = -1.165$ 、フォトリフレクタ面から接触面までのオフセット距離 $d_0 = 4.072$ 、反射率 $\alpha = 63.77$ である。なお、

Fig. 7 Experimental result for determination of range presentation method: Measured range value by each method (Left). Image evaluation by each method (Right)

定数 n とフォトリフレクタ面から接触面までのオフセット距離 d_0 は固定値であり、反射率 α は標準反射板 (Kodak Gray Card 90% White) を想定して設定したパラメータである。

$$I_{all} = \alpha(d + d_0)^{-n} \quad (4)$$

$$d = \alpha^{\frac{1}{n}} (I_{all}^{-\frac{1}{n}} - \alpha^{-\frac{1}{n}} d_0) \quad (5)$$

二つめのイメージを明確にするため、限界値を判断可能な提示手法を決定する実験を行う。被験者は利き手に電気触覚ディスプレイを装着し、非利き手で近接覚センサのついたロボットの指先を床に置かれている標準反射板に向けて垂直に動かす。なお、本実験で用いる Data Glove は右利き用も左利き用もあるため、左右差による装着・操作に大きな違いはない。視覚情報は遮断するように目隠しをし、上限となる直前を操作者は判断する。本実験での限界値は距離 $d = 10$ [mm] のときとし、提示手法は危険領域において刺激部を (1) 変化なし、(2) 高強度 (=電流が強い) 提示、(3) 点滅提示、の3種類から決定する。各3種類の手法を3回ずつ実験し、慣れが生じないようにランダムに実験は行う。被験者は5人である。なお、電流値は事前に被験者に合わせて実験者が設定した。

結果として被験者が限界値だと判断したときの実際の距離 d を示す箱ひげ図を **Fig. 7** 左に、そのときの確信度を5段階評価で示した結果を右図に示す。左図の横軸は各手法を、縦軸は実際の計測値 d を示していて、赤線は限界値である。右図の横軸は各手法を、縦軸は5段階評価を示す。結果より、(1) に比べて (2) (3) は標準偏差が小さいため個人差が少なくことや、(3) は特に確信度が高く、被験者の想定した距離と実際の距離がより一致していることが分かる。(2) においては強めの刺激が被験者によっては強すぎて痛いなどの個人差が生じた。また、仮想的な皮膚および近づきすぎて危険というイメージにどれだけ一致しているかを5段階評価で尋ねたところ、(3) において平均で 4.3 という結果を得られ、操作者にとって直感的な提示であることがいえる。したがって、距離提示手法は (3) 点滅提示に決定した。

3.4 傾き提示手法決定実験

傾き提示において、操作者が直感的に近接覚を知覚することを重要視し、近接覚のイメージに則して位置出力 x_c, y_c を電気刺激面積の中心に対応させる。これを本稿では面積移動提示とよぶ。傾き度合いを電極の数分動かせるので、ロール角なら3段階、ピッチ角なら4段階表すことができる。加えて、ヒトの皮膚は継続的な刺激を与えると慣れが生じてしまう問題があり、変化があるような、順応が生じづらい提示を考案した。具体的には、電気刺激を長時間ヒトに与えていると慣れや疲労が原因で、途中から刺激が弱く感じたり、感じなくなったりすることがある。この順応が生じづらい提示を、面積移動提示により中心位置を変えた状態に加えて実装することにより、直感的かつ慣

Fig. 8 Experimental result for determination of posture presentation method: Correct answer rate (Left) and Time (Right) by each method

れに強い提示を目指す。したがって、傾き提示手法は面積移動提示に加えて (1) 変化なし, (2) 直線移動提示, (3) 単列点減提示 (すべて陽極刺激), (4) 単列点減提示 (基本陰極刺激で点減部のみ陽極刺激) の 4 種類から決定する。(2) 直線移動提示は, 対象物が指先面に対して傾いたとき, x_c, y_c の座標に従ってその方向に 1 直線を移動させる手法である。(3, 4) 単列点減提示は, 直線移動提示と同様に対象物が指先面に対して傾いたとき, x_c, y_c の座標に従ってその方向の端の直線を周期的に点けたり消したりすることで, 振動感覚のようなものを与える手法である。しかし, 今行っている電気刺激は陽極刺激とよばれるもので, これは元々振動覚を表すものであるため, 陰極刺激で圧覚を提示する手法も考えた。そこで, すべて陽極刺激で行うものと, 基本的に陰極刺激で行い端の点減の部分だけ陽極刺激で行うものの 2 種類を提案する。実験方法は, 実験者が各提示手法においてランダムに上下左右中心の刺激を提示させ, 被験者が傾いている方向を答える。被験者は 5 人であり, 皆今までに傾き提示実験を体験していない。電気提示は 5 [s] 行い, 直後に 10 [s] 休憩した。これを 10 回で 1 セットとし, 3 セットずつ行った。セット間ごとには指先の感覚が鈍ることを防ぐため, 指先を冷水に浸して感覚を維持した。

結果を Fig. 8 に示す。横軸が各手法で, 縦軸が正答率と時間である。これより, (1) は正答率が約 70%とこれだけでは確実性に欠けるが, (2) では約 90%と高くなっている。また, 答えるまでの時間もこの 2 種類はすべて 3 [s] 以内と, 瞬時に判断できていることが分かる。一方, (3, 4) に関しては一つも答えられなかった被験者もいた。これは常に刺激する点が多いため, 刺激の変化が感じ取りにくかったと考えられる。以上より, 傾き提示手法は短時間で正しい判断が可能な (2) 面積移動+直線移動提示に決定する。

4. 遠隔操作システムの開発と基本動作の実現

4.1 遠隔操作システムの開発

開発した遠隔操作システムの外観を Fig. 9 に, イメージ図を Fig. 10 に示す。イメージ図は上段が手を動かすためのシステム, 下段がアームを動かすためのシステムとなっている。ロボットハンドは, 3 指合計 9 自由度で, 1 指あたりに屈曲 2 自由度および旋回 1 自由度を有しており, 各指先には近接覚センサが搭載されている。ロボットハンドはロボットアーム手先に搭載されていて, 各関節のアクチュエータは, KRS-3204 (近藤科学社製) のサーボモータである。センサ出力は各マイコン, PC を通して触覚提示に変換され, 電気触覚ディスプレイを用いて操作者に伝わる。なお, 操作者の指先に電気触覚ディスプレイを実装するために, 治具を作成し装着している。操作者の関節指令は, Data Glove 14Ultra (Fifth Dimension Technologies 社製) を

Fig. 9 Teleoperation system provides tactile presentation of the proximity sensor information

Fig. 10 Image of teleoperation system provides tactile presentation based on the proximity sensor information

用いてロボットへ送る。Data Glove には 14 個の屈曲センサが内蔵されており, 操作者の 14 個の指関節を計測することが可能である。各屈曲センサの AD 変換分解能は 12 [bits] であり, 最小サンプリングレートは 75 [Hz] である。指令値は PSoC5LP マイコンで変換され, ロボットハンドの各アクチュエータを PWM により制御する。なお操作者の手の動きをロボットハンドに反映させるマッピング手法として, “Joint-to-joint Mapping” [15] を用いる。

ロボットアームは Cytron Gamma 1500 (Robai 社製) を使用し, 7 自由度を有している。各関節はそれぞれ独立して制御することができ, 非常に柔軟な動きも可能となっている。入力インタフェースは SpaceNavigator (3Dconnexion 社製) を用い, 6 軸の入力を一度に行うことができるため, 一つの入力インタフェースで直感的にロボットアームの手首速度制御の指令を行うことができる。また, 操作者はウェブカメラとして QuickCam Pro 9000 (Logicool 社製) を用いて視覚情報を得る。これはロボットの左後方に取り付けられ, ロボットアームとハンドが映る位置関係とし, 遠隔操作の作業空間の映像を取得するために用いる。

Host PC では, 開発環境 Visual Studio 2010 を用いて Data Glove のプログラムを開発・実行している。また同 PC 上で, 開発環境 Processing を用いて PSoC5LP から各指先近接覚センサ出力値を受信し, 受信したセンサ出力値に基づき電気刺激の指令値を生成, 送信している。

以上のシステムを用いて, 制御アルゴリズムの開発と実行, 実験データの収集を行った。

4.2 把持戦略

遠隔操作において, すべての動作を操作者に任せることは操作者の負担に繋がる。特に把持動作においては, 3 本の指を個別

Fig. 11 Finger joint configuration and pre-grasp control

に細かく動かす必要があり、現実的とは言えない。したがって、操作者が意図的に決める必要のない動作を自律的なプリグラスプ制御によって定める。プリグラスプ制御とは、小山ら [10] が提案した制御式を取り入れた制御で、近接覚センサから得られる出力を用いて指先-対象物面間の距離と姿勢を同時に調整する制御である。本研究で用いるロボットハンドは、Fig. 11 に示すように一つの指先近接覚センサで1本の指を制御可能であり、距離出力 I_{all} は屈曲関節 θ_2 、ピッチ方向の位置出力 x_c は屈曲関節 θ_1 、ロール方向の位置出力 y_c は旋回関節 θ_p に対一対応することが可能である。したがって、1指の制御を独立した3関節の制御に分解することができる。そこで、本システムでは各関節のプリグラスプ制御を部分的に取り入れることで、遠隔操作とプリグラスプ制御を組み合わせたシステムを実現し、操作者の負担を減らすことを考える。本研究ではサーボモータを使用したため、目標関節角度を生成するフィードバック方式は離散の式となる。式 (6)~(8) にフィードバック方程式を示す。 $\theta_1[n]$, $\theta_2[n]$, $\theta_p[n]$ は n ステップ目の目標値であり、 $\theta_1[n-1]$, $\theta_2[n-1]$, $\theta_p[n-1]$ は1ステップ前の関節角度目標値である。また、 C_1 , C_2 , C_3 は適当なゲインであり、 I_{ref} は距離出力の目標値である。また、プリグラスプ制御により制御される把持直前の動作をプリグラスプとよぶ。

$$\theta_1[n] = \theta_1[n-1] + C_1(I_{all} - I_{ref}) \quad (6)$$

$$\theta_2[n] = \theta_2[n-1] + C_2(x_c) \quad (7)$$

$$\theta_p[n] = \theta_p[n-1] + C_3(y_c) \quad (8)$$

対象物を意図的に把持する際、その意図した把持姿勢に簡単に近づけるため、把持姿勢の分類をする。本研究ではMark [16] らを参考とし、第一に大まかな分類 (Gross task, Fig. 12 STEP1) を選択でき、(1.1) 示指-中指間を閉じた状態での2面接触把持 (Prismatic)、(1.2) 示指-中指間を開いた状態での3面接触把持 (Circular) に分類する。また、把持直前にそれぞれ細かい分類 (Detailed task, Fig. 12 STEP5) を選択でき、(2.1) 指先センサ面を対象物へ正対させた把持 (Precision)、(2.2) 接点を指先端へ移動させた把持 (Tripod)、(2.3) 接点を指先下側へ移動させた指全体での把持 (Power) に分類する。Tripod は薄い対象物や小さい対象物に対して有効に働き、逆に Power は非常に大きい対象物や、重い対象物に対して、指先以外にも接点を作ることで力強い把持を目指す。Precision はその後の操作も可能とするような把持である。

次に、把持戦略として必要な基本動作を六つの段階に分けて述べる (Fig. 12)。座標軸はSTEP2に示されている。

Fig. 12 Six-step operation as grasping strategy

STEP1: Gross task 決定 操作者は Data glove を用いて、ロボットハンドの旋回関節 θ_p を動かし、Gross task を決定する。

STEP2: ハンド押込み 操作者は 3D マウスを用いて各指が同程度の刺激になるようにアームの調整を行った後、対象物へロボットハンドを把持できる位置まで押し込んでいく。この際、ハンドの各関節は固定され、操作者が動作させる部分はアームだけである。また、視覚情報だけでなく奥行き感が分からず、対象物を把持できる範囲にハンドを持ってきたとき操作者の認識と実際の状況は異なることが多い。したがって、操作者に物体近傍の情報を伝えることが重要である。操作者へは距離出力 I_{all} が伝えられ、指先-対象物面間の距離を感知することができる。この際、対象物の凹凸なども知ることができる。

STEP3: 距離調整 プリグラスプによって距離調整を行う。対象物-指先間の目標値まで屈曲関節 θ_1 が自動で動いて調整される。

STEP4: Detailed task 決定 操作者は Data glove を用いて、ロボットハンドの屈曲関節 θ_1 を動かし、Detailed task を決定する。屈曲関節 θ_2 は、対象物-指先間距離が変わらないようにプリグラスプによって制御される。この際、ロボットハンド指先は対象物によって操作者から見えない場合が多く、操作者にとって不確定な操作となる。したがって、物体近傍の情報を伝えることでシームレスな操作が可能となる。操作者へは位置出力 x_c が伝えられ、指先面に対する対象物面の傾きを理解することができる。

STEP5: Detailed task 確定 プリグラスプによって、事前に与えられた各 Detailed task の収束値へ自動で収束する。STEP4の際には Data glove を用いているので把持位置が常に変わるが、ここで各 Detailed task へ正確に調整される。

STEP6: 把持 Detailed task の姿勢をプリグラスプによって保ちながら、屈曲関節 θ_2 を動かすことで対象物までの距離を徐々に近づけていき把持を行う。指先に取り付けられた触覚センサが触覚を検知したら把持を終了とする。

4.3 ロボットハンド押込み実験

STEP2において、本システムでは全体の環境情報を単眼カメラのみでしか取得することができないため、この動作をプリグラスプ動作で行うことは困難である。したがって、操作者がロボットアームを手動で操作することを考える。そこで、操作者に触覚提示を与えることにより、対象物が把持可能な範囲まで遠隔操作によってロボットハンドを押し込むことができるか確かめる。触覚提示により操作者に伝わるべき内容はイメージ、シームレスな情報伝達、押し込み終了地点の三つである。

Fig. 13 Results for experiments of pushing robot hand using camera only (left) and, camera and electric stimulation (right). The bar graph shows confidence by operator. The line graph shows success rates for grasping in prismatic posture and circular posture

操作者は、Fig. 9 に示す環境で実験を行い、アームのみを動かして、対象物に十分ハンドを押し込むことができたとき操作者が判断したとき実験を終了とする。実験は電気刺激ありの場合となしの場合で各5回ずつ行い、操作者の視界はカメラ映像のみである。被験者はシステム操作未経験の男性5名である。ロボットハンドの押し込み終了位置は、カメラの映像からも読み取れるが、対象物表面が平面の場合近接覚センサによる距離情報が変化しなくなったときも終了地点といえる。実験はロボットハンドが対象物に衝突した場合や指先の把持面が対象物の把持面に達していないと判断した場合失敗とする。開始位置は、アーム座標系 Z 方向において対象物上面よりロボットハンド先端が上にくるものとし、XY 方向に関しては回数によりすべて異なる。対象物は2種類用意し、Prismatic で行う 70 [mm] × 100 [mm] × 110 [mm] の白色直方体と、Circular で行う直径 75 [mm]、高さ 200 [mm] の白色円柱である。

確信度と成功率の結果を、カメラのみの場合とカメラ+電気刺激の場合でそれぞれ Fig. 13 に示す。図の横軸は各被験者を表し、左の縦軸は確信度を、右の縦軸は成功率を表す。オレンジの棒グラフが確信度であり、折れ線グラフが成功率である。赤色は対象物が直方体のとき (Prismatic) で、緑色は対象物が円柱 (Circular) のときを意味する。これより、電気刺激を加えることで成功率が Prismatic は 72% まで、Circular は 84% まで向上していることが分かる。確信度も成功率に連動して上がっており、操作者は電気刺激によって自分の操作に自信を持ち、シームレスな情報伝達と、押し込み終了位置の把握ができていといえる。実際、ロボットハンドを過剰に押し込むことによる衝突の失敗は、全回数で2回しか見られなかった。成功率に関しては t 検定を行った結果、両方 1% 水準で統計的有意差が認められた。カメラのみの動作に関しては、対象物に落ちるロボットハンドの影から判断している被験者が多かった。したがって、影が見えなくなる瞬間 (死角など) で衝突してしまう失敗が多く見られ、電気刺激を与えることで見えない部分を補完できたとコメントが得られた。試行回数 4, 5 回めは、操作者視界からほとんど対象物が確認できない位置で実験を行ったが、電気刺激があれば皆衝突することなく把持位置へ持ってくることであった。これは、対象物がハンドに隠れてしまうとき以外にも、カメラが曇って見えない状況や、砂煙の多い災害地などでもこのシステムの有用性を示すことができるといえる。また、イメージにどれだけ近いかを5段階で尋ねた結果、平均で 4.2 という値を得られた。これより、操作者が近接覚情報を触覚情報としてイメージすることができ、直感的な操作ができたため成功率の向上に繋がったといえる。

4.4 Detailed task 決定実験

STEP5 では、ロボットハンド指先の隠蔽や、操作者の視界が

Fig. 14 Results for experiments of determining detailed task not using electric stimulation (left) and using (right). The bar graph shows confidence by operator. The line graph shows success rate for grasping the object

から見えない部分に凹凸や把持が不可能な部分が存在する可能性がある。そこで、物体近傍の情報を操作者へ触覚提示として伝えることで、操作者が意図した Detailed task の決定ができるか確かめる。これより、本などの薄くて大きいもの、重いものは掌全体で把持したり、小さいものや薄いものは指先で把持したりなどのヒトの動作により近づくことが可能となる。操作者は Fig. 9 に示す環境で実験を行い、本実験では視界が悪い状況を想定しているため視覚情報を遮断する。被験者がランダムに伝えた Detailed task の各パターン (3 種類) が実現できるように操作者は指先を動かす。触覚提示は近接覚センサ位置出力 x_c の情報を用い、Precision では正常刺激、Tripod では下向きに直線移動提示、Power では上向きに直線移動提示となる。電気刺激の強度は、正対情報のときの刺激を基準として各被験者ごとに事前に設定を行った。パターンは合計 6 回ランダムに指定し、各パターンを 2 回は選んでいる。また位置出力 $x_c > 0.2$ なら Tripod, $x_c < -0.2$ なら Power, それ以外は Precision とし、電気刺激の区別も同様である。ロボットハンドの屈曲関節 θ_1 を動かす際、屈曲関節 θ_2 はブリグラス制御により調整されるが、Data glove 側の関節を高速に動かすと遅延が生じて衝突が起こるため、触覚提示を頼りに動かす必要がある。実験は電気刺激使用と不使用の場合で比較した。対象物は 25 [mm] × 185 [mm] × 150 [mm] の白色直方体で、被験者は未経験の男性 5 名である。

確信度と成功率の結果を、電気刺激不使用時を左に、使用時を右にそれぞれ Fig. 14 に示す。図の横軸は各被験者を表し、左の縦軸は確信度を、右の縦軸は成功率を表す。オレンジの棒グラフが確信度であり、緑の折れ線グラフが成功率である。これより、電気刺激不使用の場合は成功率が約 40% であるのに対し、触覚提示を行うことで 80% 以上まで向上していることが分かる。それに伴い確信度も上昇している。これより、操作者は触覚提示を加えることで見えない部分のロボットハンド指先の状況を把握でき、意図した Detailed task を決定することができる。成功率に関して t 検定を行った結果、1% 水準で統計的有意差が認められた。また、カメラのみでは急に指先を曲げることによる対象物への衝突が見られた。ほかにも Detailed task の決定では、例えば Precision のときの電気刺激と、Tripod のときの電気刺激の境目付近を操作者が選択することで、ロボットハンドの指先を必要以上に動かさずに各パターンを設定できるなどの応用が考えられる。

4.5 把持時に位置出力 x_c を用いた Detailed task の維持制御

STEP6 では把持動作を行うが、ロボットハンドの屈曲関節 θ_2 を等速で動かし、指を閉じていく動作をし、指先に取り付けられている触覚センサが一定値を検出したら把持を終了とする。しかし STEP5 で決定した Detailed task が、屈曲関節 θ_2 のみ

で閉じる動作をすると把持したときには異なる Detailed task になってしまう可能性がある。そこで、操作者が意図的に決めた Detailed task を大きく逸脱せずに把持を行うために、同時に屈曲関節 θ_1 の制御も行い、把持の変化がないか検証を行う。なお、これらの値に収束するために、フィードバック方程式 (2) を以下の式 (9) のように変更し取り入れた。 $x_{c,ref}$ は収束値を示し、ほかの変数は式 (2) と同様である。

$$\theta_2[n] = \theta_2[n-1] + C_2(x_c - x_{c,ref}) \quad (9)$$

Fig. 15 に直方体を対象物として、Detailed task を 3 パターン行った場合（順に Precision, Power, Tripod）の近接覚センサ位置出力 x_c とそのときのハンドの様子を示す。図の対象物は 25 [mm] × 185 [mm] × 150 [mm] の白色直方体だが、ほかに直径が Power では 100 [mm], Tripod では 43 [mm] の白色円柱でも同様の実験を行った。横軸は時間を示し、灰色部が STEP4, 黄色部が STEP5, 赤色が STEP6 に対応する。黄色部での収束値は、収束可能な範囲内として Power のとき -0.4 に、Precision のとき 0 に、Tripod のとき 0.4 に設定している。これは Fig. 5 の位置出力 x_c において、センサ面-対象物間の距離 d が 20 [mm] のときを想定して、収束可能な範囲内として決めている。しかし、距離が近づくにつれ位置出力 x_c の範囲は広がっていくので、同程度の姿勢を保つためには収束値を変更する必要がある。したがって、実験により確かめ赤色部での収束値は Power のとき -0.6 に、Tripod のとき 0.7 に設定変更している。

直方体に関しては、すべての Detailed task において、指を閉じるにつれて位置出力 x_c の感度が良くなるので多少オーバーシュートは生じているものの、目標とした値付近にそれぞれ収束していることが分かる。黄色部では関節の限界やセンサ値の限界から、完全に収束し切れていない指も見られるが、写真から Detailed task が変わってしまうほどの誤差ではなく問題ないと思う。Precision に関しては、指の姿勢を変えずに閉じる

Fig. 15 Proximity sensor posture output x_c and robot hand posture when grasping rectangular objects

と接点が指先側に寄るので、位置出力 x_c がプラス側に変動しているが、直ちに $x_c = 0$ に収束していることが分かる。円柱に関して、Power においては円柱を包み込むような把持を行うことが可能で、Tripod に関しては直径の小さい円柱を指先でつまむような把持が可能であった。以上より、提案した制御方法で Detailed task を維持しながら把持することが可能であり、現段階では平面でも曲面でも収束値の変更などはする必要がないと考えられる。しかし、より把持対象物の種類を広げるなら、各収束値を調整することで、例えば円柱ならより直径の大きいものを包み込んで把持することや、より薄い直方体を持つことは可能であると考えられる。

5. 遠隔操作による意図した物体の把持動作の実現

触覚提示によりシームレスに情報が伝わり、操作者が意図した把持位置・姿勢を決定し把持が可能であることを確かめるために実験を行った。操作者は Fig. 9 に示す環境で実験を行い、把持戦略に沿って操作を行う。対象物は **Fig. 16** に示すもので、円柱、直方体、ワイングラス、新幹線のおもちゃ、凹凸を持つ直方体、箱、テープである。プリグラスプのみの遠隔操作と比較を行った。プリグラスプ制御のみの場合、ロボットアームによってロボットハンドを対象物へ徐々に近づけていき、指先は対象物を認識した瞬間から距離・姿勢調整を行う。対象物を落とさずに把持までできたなら実験は成功とする。実験の一例として、ワイングラスを把持する様子を **Fig. 17** に示す。なお、本実験では対象物をすべて白色物体としているが、これは距離提示手法で提示する距離 d が反射率により計算されるものであるという理由が大きい。白色物体以外の対象物に合わせるには、式 (5) のパラメータ α を変更する必要がある。

結果、提案した遠隔操作システムにより、操作者が意図した把持位置・姿勢を非接触で決定し、把持することが可能であった。まずどの対象物においても、距離出力 I_{all} を触覚提示により操作者に伝えることで、奥行き感の補完ができ、対象物大半がカメラ映像から確認できない場合でも衝突せずにロボットハンドを対象物へ押し込むことが可能であった。一方プリグラスプのみでは、対象物に反応した瞬間指が動くので、奥行き情報に誤差があると想定外の指の動きおよび姿勢になり、失敗に繋がった。また、操作者の視点から見えない位置に凹凸のある直方体では、操作者が Tripod 把持を試みたところロボットの構造上その姿勢は選べず、操作者が Data Glove 側の指を曲げて触覚提示の情報が異なる状況となった。したがって、位置出力 x_c を触覚提示により操作者に伝えることで、操作者は対象物の裏側やオクルージョンにより見えない部分の情報を確認でき、無

Fig. 16 The novel object of the teleoperation experiment

Fig. 17 Teleoperation experiment for grasping a wine glass

理のない把持に変更することが可能であった。これは、ワイングラスや新幹線のおもちゃでも同様の状況が生じた。一方、ブリグラスのみでは現状一つの姿勢しか選ぶことができないため、状況によって手段を選ばず把持することは困難であった。

次に、箱は高さが低いため、ロボットハンド指先全面が対象物より下に位置するまでロボットハンドを押し込むと床と衝突が生じてしまう。したがって、指先端のほうが対象物と被っている状態でSTEP3に進む必要があり、Tripod 把持が必須となる。結果、Tripod の情報を操作者に伝えることができるため対象物を指先で把持することが可能であった。これは、テープを把持する際も同様である。なお、テープは空洞に拇指を、外面に示指、中指を配置させて把持を行った。一方、ブリグラスにおいては Precision しか把持姿勢を選べないため、高さの小さい対象物を把持することは困難である。

なお、STEP1～STEP6 までの経過時間は、対象物により異なるがワイングラスで 58 [s]、一番時間を要したものでも、新幹線のおもちゃで 94 [s] であった。これは、把持戦略を事前に説明すれば熟練者でなくても操作が可能であったが、習熟によりさらに時間を短縮できる可能性はある。また、すべて遠隔操作に頼らず、一部ブリグラスに頼ることで操作者の負担も減らすことができたと考えられる。ブリグラスのみでは把持することができない複雑な物体でも、本システムでなら把持が可能であった。

6. 結 言

本研究では、まずロボットハンドの指先に搭載された近接覚

センサの情報を操作者に直感的に伝えるための、触覚提示手法について実験より決定した。次に、その提示手法と本研究における遠隔操作手法に基づいたシステムの開発を行い、遠隔操作が必要な基本動作が実現可能か実験により評価を行った。結果、操作者は触覚提示を用いることの有用性を示せ、イメージに沿った遠隔操作が可能であった。最後に意図した把持位置・姿勢の決定による把持実験を行い、操作者が所望する把持の実現が可能であった。今後の課題としては、把持時の正確な姿勢調整や、位置調整が挙げられる。また、触覚提示は反射光に依存しているため、反射率推定 [14] を行うことで反射率によらない物体の把持を実現することも挙げられる。

参 考 文 献

- [1] M. Benali-Khoudja, M. Hafez, J. Alexandre and A. Kheddar: "Tactile interfaces: a state-of-the-art survey," 35th International Symposium on Robotics (IRS 2004), pp.721-726, 2004.
- [2] J. Hergenhan, J. Rutschke, M. Uhl, S. Escada Navarro, B. Hein and H. Worn: "A Haptic Display for Tactile and Kinesthetic Feedback in a CHAI 3D Palpation Training Scenario," IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, pp.291-296, 2015.
- [3] K. Sato, K. Kamiyama, N. Kawakami and S. Tachi: "Finger-Shaped GelForce: Sensor for Measuring Surface Traction Fields for Robot Hand," IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS, vol.3, no.1, pp.37-46, 2010.
- [4] 館暲, 新井裕彦: "テレレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価", 日本ロボット学会誌, vol.7, no.4, pp.314-325, 1989.
- [5] J. Lipton, A. Fay and D. Rus: "Baxter's Homunculus: Virtual Reality Spaces for Teleoperation in Manufacturing," 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.314-325, 2017.
- [6] 矢野澄男, 井出真司: "立体映像の見やすさと調整変動からみた視覚疲労", 映像情報メディア学会誌, vol.55, no.5, pp.711-717, 2001.
- [7] 矢野澄男, 江本正喜, 三橋哲雄: "両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因", 映像情報メディア学会誌, vol.57, no.9, pp.1187-1193, 2003.
- [8] 杉本和也, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一: "遠隔操作ロボットのための複数 RGB-D センサを用いた半隠消映像の生成", 精密工学会誌, vol.81, no.12, pp.1185-1192, 2015.
- [9] K. Koyama, H. Hasegawa, Y. Suzuki, A. Ming and M. Shimojo: "Pre-Shaping for Various Objects by the Robot Hand Equipped with Resistor Network Structure Proximity Sensor," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4027-4033, 2013.
- [10] 小山佳祐, 鈴木陽介, 明愛国, 下条誠: "指先に近接覚センサを備えたロボットハンドによるブリグラス制御", 日本ロボット学会誌, vol.33, no.9, pp.712-722, 2015.
- [11] 石岡峻一, 明愛国, 下条誠: "移動ロボット搭載型マニピュレータでの近接覚センサを用いたブリグラス制御", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016.
- [12] 佐々井亮太, 梶本裕之, 鈴木陽介, 明愛国, 下条誠: "近接覚センサを搭載したマニピュレータの遠隔操作方式の研究—近接覚センサ出力に基づく電気刺激方式による触覚提示手法の提案—", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2015.
- [13] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 館暲: "皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ", 電子情報通信学会誌, vol.j84-D-II, pp.120-128, 2001.
- [14] 小山佳祐, 鈴木陽介, 明愛国, 下条誠: "指先に光学式近接覚センサを備えた多指ハンドによる同時接触での把持 (物体表面の反射率推定とセンサ出力の補正)", 日本機械学会論文集, vol.82, no.833, 15-00366, 2016.
- [15] L. Colasanto, R. Suarez and J. Rosell: "Hybrid Mapping for the Assistance of Teleoperated Grasping Tasks," Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions, vol.43, pp.390-401, 2013.
- [16] M.R. Cutkosky: "On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.5-3, pp.269-279, 1989.

一村リサ (Risa Ichimura)

2016 年電気通信大学情報理工学部卒業。2018 年同大学大学院情報理工学系研究科博士前期課程修了。同年株式会社リコーに就職、現在に至る。

下条 誠 (Makoto Shimojo)

1976 年東京工業大学大学院総合理工学研究科精密機械システム専攻修了。同年工業技術院製品科学研究所入所。1993 年工業技術院生命工学工業技術研究所。1997 年茨城大学工学部情報工学科教授。2001 年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科教授。2016 年同情報理工学研究科知能機械工学専攻教授を退職。同年東京大学情報理工学系研究科特任研究員。現在に至る。この間 1985 年 9～8 月米国スタンフォード大学工学部客員研究員。ロボティクス・メカトロニクスの研究に従事。触覚センシング、ロボットハンド等の研究開発を行っている。日本機械学会、計測自動制御学会の会員、電気通信大学名誉教授、工博。（日本ロボット学会正会員）

梶本裕之 (Hiroyuki Kajimoto)

1998 年東京大学工学部計数工学科卒業。2001 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2003 年同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学。博士 (情報理工学)。2003 年東京大学助手。2006 年電気通信大学助教授。2007 年同准教授。2018 年同教授。触覚ディスプレイ、触覚センサ、バーチャルリアリティシステム等の研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会、計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

明 愛国 (Aiguo Ming)

1990 年東京大学大学院博士課程修了。山梨大学工学部助手などを経て、2014 年電気通信大学知能機械工学専攻教授。現在に至る。ロボティクス・メカトロニクスの研究に従事。現在主にサービスロボット、生物模倣型ハイパーダイナミックロボット、生物模倣型ソフトロボットの研究開発を行っている。工学博士。IEEE、日本機械学会、精密工学会、計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)