

把持力計測に基づく可変剛性仮想バネの構築と評価

武谷謙吾^{†1} 安藤潤人^{†1} 野間春生^{†1}

概要:遠隔操作やVRにおける力覚提示の普及には、安価かつ高性能な装置が求められる。本研究では、高感度なMEMS触覚センサとRCサーボモータを用い、剛性を自由に変化できる仮想バネを再現するフィードフォワード型力覚提示手法を開発した。本稿では、本装置が様々な力触覚を提示できることを実証するため、3つの領域ごとに異なる硬さを定義したバネの感触を操作者に提示し、これを識別する実験を行った。この際、Accumulate法とSerial法の2種類の提示アルゴリズムを実装し評価した。その結果、装置によって提示された複雑な剛性変化を識別できること、特にSerial法がAccumulate法より識別精度が高いことを示した。

1. はじめに

遠隔地からのロボット操作や、メタバースなどの仮想空間での活動が普及しつつある。こうした場面で、映像や音声の情報は、メディアとしてすでに高品質に記録・編集・再現が可能になっているが、物に触れた時の「硬さ」や「手ごたえ」といった力触覚のメディア技術は、まだ十分に普及していない。特に、災害現場でのロボット作業や、遠隔ロボット手術などの、遠隔地からの微細な操作においては、対象物の硬さを正確に感じ取れることは、作業の成功率や安全性を大きく左右する[1]。そこで本研究では、RCサーボモータと高性能なMEMS触覚センサを組み合わせることで、スイッチを押したときのクリック感や、部品同士が噛み合う際の感触のような、多様な力触覚を再現できる新しい手法を提案した。

本手法では、従来の力覚提示装置のような複雑な力制御を行わず、サーボモータを利用した位置制御を採用し、仮想バネを提示した[2]。本稿の目的は、剛性が非連続に変化する複雑な力触覚を再現した評価実験による、提案手法の有効性の実証である。

2. フィードフォワード型力覚提示装置

本研究では、対象物の剛性モデルを用いることで、操作者

のローカル環境で完結するフィードフォワード型の力覚提示を行う試作機を開発した。図1および図2に示すように、開発したデバイスはサーボモータを備えた二本指のロボットハンド形状のハンドルを有している。一方のハンドルは固定レバー、もう一方のハンドルは回転レバーとなっており、この2つを握ることで、剛性の異なる仮想バネを把持する感覚が提示される。試作機では固定レバーの親指接触部には独自開発した高感度MEMS触覚センサ[3]を搭載し、操作者が仮想物体に作用させる把持力を直接に計測した。一方、人差し指側の回転レバーには位置制御型のRC用のサーボモータ(HiTec社製HS-422)とロータリエンコーダが直結されており、レバーの駆動と角度計測を行った。

試作機の制御モデルは、以下に述べるプロセスで力覚を生成した。まず、触覚センサで計測された把持力信号をアンプで増幅し、マイコン(Arduino Nano Every)に取り込んだ。マイコンに入力された把持力情報と、フックの法則に基づき、その力が加わった際に生じる仮想的な角度変位を算出させた。さらに、本装置はマイコンに接続したエンコーダから、回転レバーの回転角度を常に計測しており、その角度に応じてバネ定数 k をリアルタイムに変化させた。これにより、単一の硬さだけでなく、角度によって硬さが変化する仮想バネを提示可能とした。算

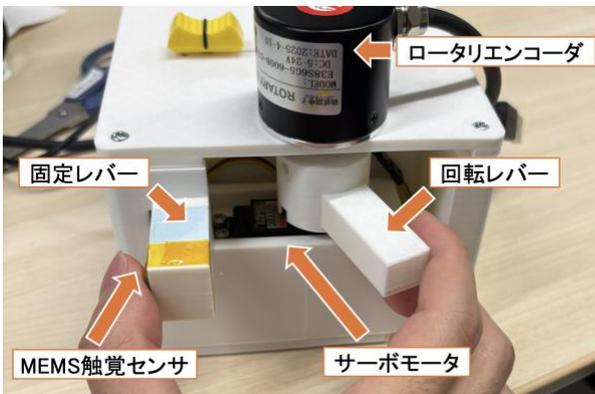


図1: デバイス外観

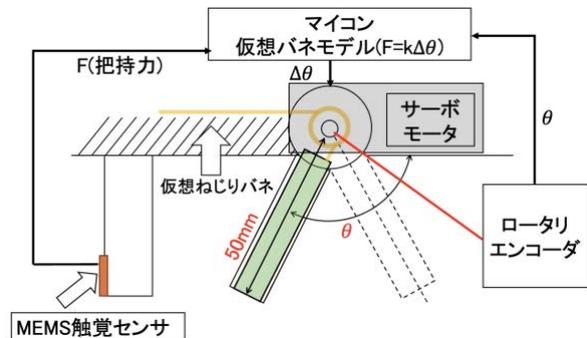


図2: システムの機構図

出された変位をサーボモータへの目標位置として送り、操作者に自身の把持力と現在の指の位置に応じた適切な反力を感知させた。このように、本システムは直接把持力を計測する事で複雑な力制御ループを排した構成でありながら多様な触覚をもつ仮想ねじりバネを提示した。

3. 可変剛性仮想バネの評価実験

3.1 実験目的・方法

本実験の目的は、提案手法によって生成した剛性が変化する仮想バネの提示可能性の実証である。実験方法として、実験協力者が装置から提示された感触と、事前に用意された 8 種類の剛性モデルを照合する課題を採用した。

8 種類の剛性モデルを図 3 に示す。横軸に示す装置の可動範囲(0~70 度)を 3 つの領域に等分割し、各領域に対して「硬い(Hard)」または「柔らかい(Soft)」のいずれかの剛性を割り当てた。硬い部分のバネ定数は $k=0.40$ [N/deg]、柔らかい部分は $k=0.03$ [N/deg] と設定した。3 領域の組み合わせにより、計 8 通りの剛性モデルを用意し、これらを実験用刺激として用いた。図 3 中のモデル名は、3 つの領域の剛性を順に並べたものである(例:S-S-H は「柔-柔-硬」のパターンを示す)。操作者がスイッチのようなクリック感や、凹凸感などを感じるモデルを想定してこれらのモデルを作成した。

3.2 提示アルゴリズム

本実験では剛性のモデルに基づいた力覚提示の手法として Accumulate 法と Serial 法の 2 種類のアルゴリズムを比較した。「S-H-S(柔-硬-柔)」モデルにおける両手法の F- θ グラフを図 4 に示す。これは横軸が角度で、縦軸が把持力である。

図 4(a)の Accumulate 法は領域の境界をまたぐ際に、前の

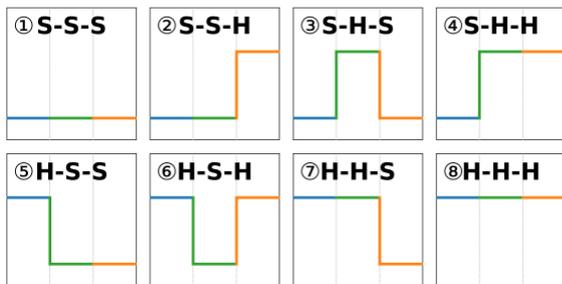
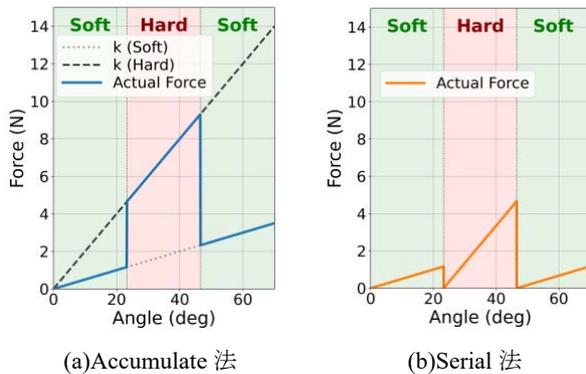


図 3:8 種類の剛性モデル



(a)Accumulate 法

(b)Serial 法

図 4: Accumulate 法と Serial 法の F- θ グラフ

領域で蓄積された変位と反力を維持したまま、次の領域の計算を行う手法である。現実のバネでは再現できない方法ではあるが、本手法のメリットは変位と反力が蓄積しているの得不自然な力の途切れがなく、滑らかな感触が得られる点にある。デメリットは、高剛性の領域で硬さを詳細に再現できないことにある。本手法では角度が増えるにつれて、サーボモータを動かす為に必要な把持力が過大となる。その結果、高剛性の領域ではサーボモータは停止状態となり、操作者はサーボモータの保持トルク以上の力で無理やり把持することでレバーを動かしている。回転レバーの角度や、 k の値に依存するが、この状態では設定されたバネ定数 k は反映されず単調な硬さとして提示されてしまう。

一方、図 4(b)の Serial 法は領域の境界を超えるたびに、その境界位置に仮想バネの自然長を定義しなおす手法である。現実には鍵を鍵穴に差し込むような剛性モデルを想定している。ただし、本手法では把持力が一定値(0.3N)以下に低下した際に、サーボモータを基準位置(0 度)へ自動的に復帰させる処理を実装している。これにより、基準位置ではない場所で、回転レバーが停止することを防ぎ、常に明確な初期状態から探索を開始するためである。この手法のメリットとして、範囲ごとに自然長がリセットされることから高剛性の硬さを再現が挙げられる。一方、デメリットは領域の境界線で不自然な力の抜け感が存在することである。

3.3 実験手順

実験の様子を図 5 に示す。実験は健康な大学生 5 名を対象として実施した。実験協力者は椅子に着席し、机の上に置かれた力覚提示装置を操作した。具体的な手順は以下の通りであった。

まず実験協力者に実験手順を説明し、装置の操作と提示される感触に慣れるための教示を行った。ここでは、8 種類の剛性パターンに対応するモデル一つずつ提示しながら、実際にそのパターンの力覚刺激を装置から出力した。次に、識別タスクを行った。実験者は 8 通りのパターンの中からランダムに 1 つを選択して装置に出力した。この際、把持動作の回数に制限は設けなかった。

実験協力者は、装置のレバーを親指と人差し指で操作してその剛性感を確認し、手元の感覚と最も一致すると判断したモデルを 1 つ選択して回答した。この際、正解・不正解のフィ

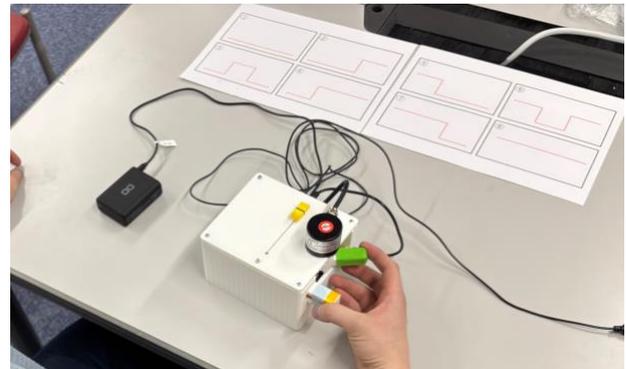
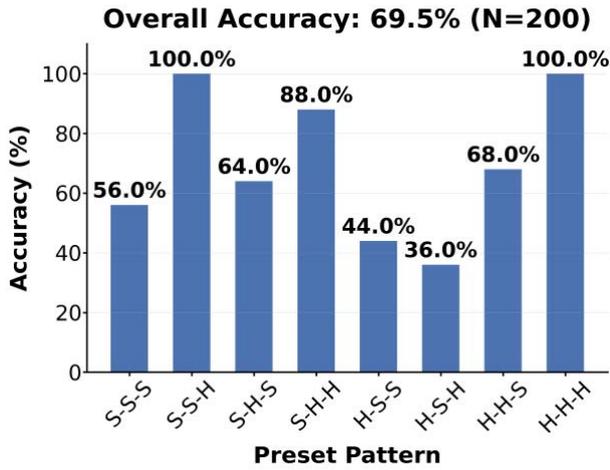
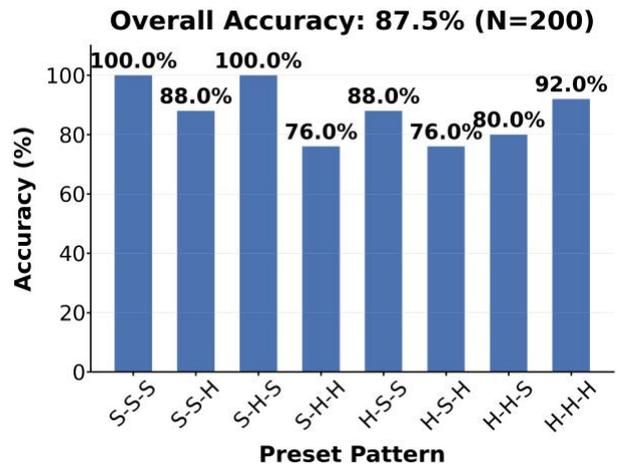


図 5:実験の様子

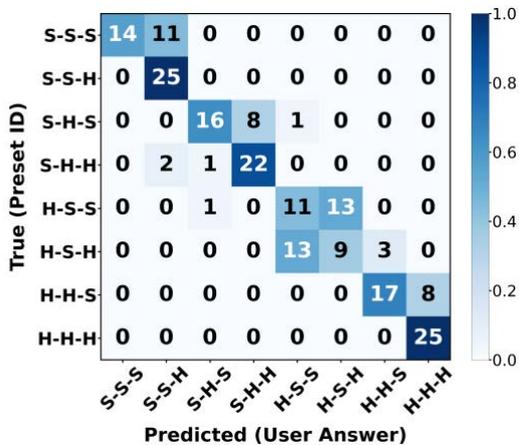


(a): Accumulate 法

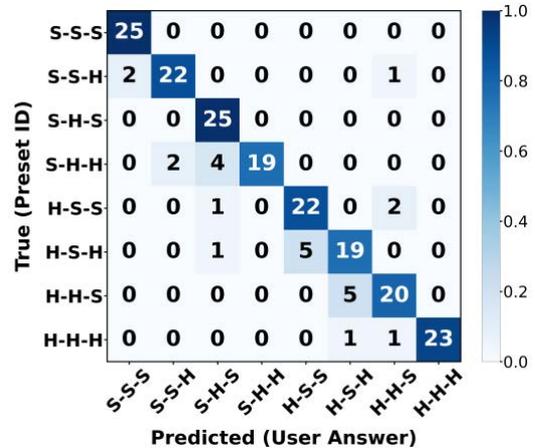


(b): Serial 法

図6: Accumulate 法と Serial 法の正答率



(a): Accumulate 法



(b): Serial 法

図7: Accumulate 法と Serial 法の混同行列

ードバックは行わなかった。この手順を、1 つのパターンにつき 5 回ずつ、計 40 試行繰り返した。

また、本研究で比較を行う 2 つの提示手法 (Accumulate 法および Serial 法) のそれぞれについて、同様の手順で実験を実施した。提示順序はランダムに行った。実験終了後、得られた回答データから各条件における正答率を算出し、パターンごとの識別精度や混同の傾向について評価した。

4. 実験の結果・考察

4.1 全体的な正答率と領域の境界

各手法における正答率の集計結果を図 6 に示す。全体の正答率では Serial 法が Accumulate 法を上回った。特に S-H-S のような剛性が複雑に変わるパターンでは、Serial 法は高い正答率であった。この要因として、Serial 法では領域の境界で反力がリセットされる際、急激な力の減少が発生することが挙げられる。本実験のような識別タスクにおいて、この力の変化は探索している領域を実験協力者に把握させる働きをしたと考察する。一方、Accumulate 法は力が滑らかに連続するため境界が曖昧になり、探索している領域を特定できず誤答を招いたと考察する。

4.2 最終領域の硬さの誤認

全体として正解率の低い Accumulate 法の混同行列を図 7(a) に示す。これより、S-S-S や H-S-S といった、最後が「柔らかい」はずのパターンにおいて、最終領域を「硬い」と間違える回答が多く見られた。この要因として、Tan ら[4]が指摘するように、剛性弁別において人は物理的な剛性そのものよりも知覚される反力の大きさや仕事量を判断の手がかりとする傾向があることが挙げられる。Accumulate 法ではレバーを押し込むにつれて反力が蓄積するため、最終領域では反力の絶対値が大きくなる。その結果、剛性の設定値自体は低くても、蓄積によって生じた大きな反力が実験協力者に「硬い」と判断させた可能性が高い。また、バネ定数 k を低く設定した際に発生する装置の震えから得られる反力も、誤認の要因の一つであると考察する。

これに対して Serial 法では領域が変わるごとに仮想バネの自然長をリセットしている。この「リセット」によって、前の領域の力が引き継がれず、Accumulate 法で起きていた最後が硬く感じる現象を抑えられたと推察する。結果として図 7(b) に示すように S-S-S を S-S-H と間違えるようなミスが減少し、正答率の向上につながったと考察する。

4.3 押し込みによる領域のスキップ

さらに Accumulate 法では H-S-H を H-S-S と誤認する回答が多く見られた。これは中間の S 領域が柔らかいため、実験協力が勢い余ってレバーを奥まで押し込み、最終の H 領域の存在に気づく前に可動域の限界に達してしまったことが要因であると考察する。「奥深くまで一気にいった」という感触から、最終の H 領域を柔らかいと思い込んで回答したと推察する。

4.4 リセット処理による硬さの誤認

Serial 法で、H 領域を S と誤認する例が確認できた。これは、領域の境界で仮想バネの自然長をリセットする処理そのものに原因があると考察する。前の領域の反力を引き継ぐ Accumulate 法とは異なり、Serial 法では H 領域に入った瞬間に反力が一度ゼロに戻る。そのため、実験協力が硬いと感ずる強さまで反力を高めるには、そこから改めてレバーを深く押し込む必要がある。この押し込み始めの反力の弱さが実験協力者に「手応えがない」という印象を与え、結果として領域全体を柔らかいと誤認させた要因であると考察する。

5. おわりに

本研究の目的は、センサで検出した把持力とエンコーダで測定した角度に基づき、仮想バネを再現しサーボモータの角度を制御することで剛性を自由に变化できる仮想バネを再現することにある。本稿では、この提案手法の有効性を評価するために、8 種類の剛性分布パターンを用いた識別実験を実施した。制御アルゴリズムとして、変位を蓄積することで滑らかな力変化を実現する Accumulate 法と、領域ごとに自然長をリセットして剛性を独立して提示する Serial 法の 2 種類を実装した。実験の結果、操作者は「S-H-S」といった複雑な剛性変化のパターンであっても、高い精度で識別可能であることを示した。

特に Serial 法が Accumulate 法より識別精度が高いことが明らかとなった。また、実験を通して、Accumulate 法で識別しづらいパターンが明らかとなった。本実験の識別タスクにおいては、境界での力の変化が明確な Serial 法が有効であった。しかし、力の不連続性はリアリティを損なう要因でもある。今後は、Serial 法の高い識別性を維持しつつ、力の抜け感を軽減するための処理の導入などが課題となる。

本装置はリーダーフォロワー型のロボットに取り付けることを想定しており、高剛性物体の把持や、微細な力加減を要する作業において、多様な力触覚を再現し、器用な操作を実現可能にすることが期待される。今後は、このような用途が有効である具体的なタスクを探索するとともに、ハードウェアの改良や提示アルゴリズムの最適化を行い、本手法の実用性をさらに向上させていく。

謝辞 本研究の成果の一部は、JSPS 科研費 22H00542 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Okamura, A. M.. Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery. *Current Opinion in Urology*. 2009, vol. 19, no. 1, p. 102-107.
- [2] 武谷謙吾, 安藤潤人, 野間春生. MEMS 触覚センサによるフィードフォワード型の力覚提示手法の開発と評価. *日本バーチャルリアリティ学会研究報告*. 2025, vol. 30, no. HAP02, p. 5-8.
- [3] Sohagawa, M., Nozawa, A., Yokoyama, H., Kanashima, T., Okuyama, M., Abe, T., Noma, H. and Azuma, T.. Multimodal Measurement of Proximity and Touch Force by Light-and Strain-sensitive Multifunctional Mems Sensor. *IEEE Sensors* 2014. 2014, p. 1749-1752.
- [4] Tan, H. Z., Durlach, N. I., Beaugard, G. L. and Srinivasan, M. A.. Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues. *Perception & Psychophysics*. 1995, vol. 57, no. 4, p. 495-510.