

指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作

稲葉 豪*¹ 藤田 欣也*¹

Pseudo-Force-Feedback Display by Fingertip Tightening

Go Inaba*¹ and Kinya Fujita*¹

Abstract - A pseudo-force-feedback method is proposed that induces tactile sense to each fingertip by its tightening. The concept of the method is limiting the display sense to tactile alone, in contrast to the conventional force-feedback devices stimulate both tactile and proprioceptive receptors by applying actual reaction force. The prototype device was controlled with open-loop controller with high-voltage initial acceleration pulse to reduce the device delay. The prototype device attained the tightening force up to 2.3N. The perceived reaction force sense by the users correlated with the applied contact force. The prototype two-fingered grasping device demonstrated that the wide range of virtual objects, from 10 to 70mm, were successfully recognized. The subjective sensation of grasping was more resemble to actual objects than the substitutive method using vibration.

Keywords: force display, tactile, pseudo-force-feedback, fingertip tightening

1. はじめに

仮想物体を指先で直接把持して操作する作業では、仮想物体と指先が接触していることや、物体を把持していることの認知が重要である。これらの認知は物体からの反力知覚に依存し、反力が知覚できない環境では視覚による確認が必要となるため、作業性が低下する。そのため、仮想環境での力覚提示を目的に、現在までに多くの力覚提示装置が開発されている。

中でも、マニピレータ型の接地型力覚提示装置[1,2]は剛性が高く、6自由度の力覚提示が可能なものも開発されている。しかし、複数台のマニピレータを連動させて多指への力覚提示を行おうとすると、マニピレータ同士の干渉問題が生じる。また、糸の張力を用いた接地型力覚提示装置[3]も開発されており、一部は多指での仮想物体操作を実現しているが、同様に糸同士の干渉問題が生じるため、手の姿勢は制限される。そこで、5指ロボットハンドをユーザの手と対向するように制御し、ユーザの各指に独立に力覚提示をおこなう装置[4]も開発されているが、装置が比較的複雑になることは避けられない。また、接地型全般に共通する課題として、大きな動作領域を得にくい点が挙げられる。

接地型の動作領域制限を解決する方法として、近年、ジャイロ効果を用いた装置[5]や、知覚の非線形

性を利用した装置[6]など、新しい方式の非接地型力覚提示装置が提案されている。接地を必要としないため、動作領域制限や複数装置間の干渉は生じないが、いずれも重錘を利用する方法であるため、指先への直接装着は、装置質量の点から困難と予想される。また、前者は原理的に連続的な力の提示ができない、後者は振動が重畳する、などの課題がある。

このほか、没入空間での使用を目的とした、道具把持型の非接地型力覚提示装置 [7,8]も開発されており、アクチュエータをユーザに装着することで大きな動作領域を実現している。しかし、現状では作業がペンなどの道具を介したものに限定され、多指での直接物体把持を可能とするためには、新たに多くの機構を実装する必要がある。

多指での直接物体把持操作に関しては、特に把持反力を提示する装置として、CyberGraspなどのエクゾスケルトン型の非接地型力覚提示装置が開発されている[9-13]。これらの装置では、モータによるワイヤ牽引や、空気圧アクチュエータによって指先への反力を提示している。非接地型であるため比較的大きな動作領域が得られるが、動力源としてモータやコンプレッサを、動力伝達のためにワイヤやチューブを必要とするため、装置全体の小型化は困難である。また、装置の着脱に時間がかかることも装着型デバイスの課題である。

他方、振動子を指や掌に取り付ける振動型触覚提示装置も開発されている[14]。これらの装置は、比較的小型で装着が容易でありながら、仮想物体との接触、非接触の状態変化を提示可能であるという

*1: 東京農工大学大学院

*1: Graduate School of Tokyo University of Agriculture and Technology

利点を有する。しかし、圧覚を振動感覚によって代替するものであるため、実際の物体との接触によって生じる感覚とは明らかに異なる点が課題である。

このように、多指への反力情報を提示する装置は、大型で複雑な装置が多く、装着の手間の問題もあるため、手軽に用いることはできない。そのため、小型軽量で手軽に使用できる、多指への反力提示装置の開発が望まれていた。しかし、従来の装置に見られるように、小型化と正確な反力提示の両方を満たすことは困難である。そこで、本研究では、保持時に生じる感覚情報が、皮膚の触圧覚と深部受容器の自己受容感覚からなることに着目した。すなわち、触圧覚が適切に提示されるならば、自己受容感覚を伴わなくとも、実際の接触に近い感覚がもたらされる可能性があるものと考えた。この仮説に基づき、指先の圧迫による小型の多指擬似反力提示装置を試作し、実験的に検討をおこなったので報告する。

2. 指先圧迫による擬似反力提示の概念

図1左図の様に、物体との機械的な接触は、2つの感覚を誘起する。ゴルジ腱器官や筋紡錘などの深部受容器によって知覚される自己受容感覚と、皮膚の圧受容器による触圧覚である。前者は主に筋収縮から、後者は指先の圧感覚から接触力の知覚を可能にすると考えられる。

ここで、自己受容感覚を刺激するためには、筋収縮力に抗して実際に反力を発生させる必要があるため、比較的高出力のアクチュエータが必要となり、装置の小型化は困難であった。

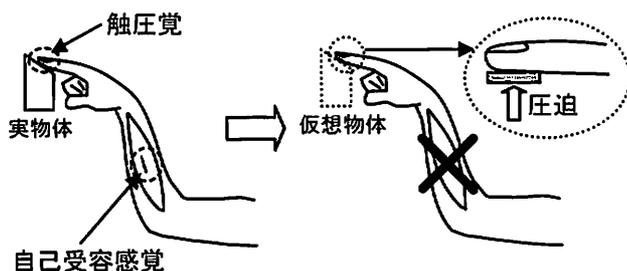


図1 擬似反力提示のコンセプト

Fig.1 The concept of pseudo-force-display by fingertip tightening

しかし、図1右図のように、自己受容感覚を伴わない皮膚圧覚のみの提示でも、動作に応じた適切なタイミングで提示することで、実際の物体接触による感覚に近い感覚を誘起することが可能であれば、必要とされる出力が大幅に軽減され、装置の小型化につながる。また、本来知覚される二つの感覚の一方を提示するため、振動刺激による方法よりも、実際の物体反力に近い感覚を誘起できるものと期待さ

れる。そこで本研究では、物体保持時の圧覚を指腹部の圧迫によって提示する擬似的な反力提示装置を試作し、その効果を実験的に検討する。

3. 擬似反力装置の試作

3.1 装置の構造

図2に本装置の構造を示す。小型軽量化のために、モータでベルトを巻き取り指先を圧迫することで、指先に接触力を提示するシンプルな構造を採用した。駆動装置には、小型・軽量でかつ十分なトルクを確保するためにギアモータを使用した。

指先と仮想物体との接触時には、ギアモータにより金属シャフトが回転してベルトが巻き取られ、接触板を介して指先が圧迫される。この動作によって、指先には仮想物体との接触が提示される。逆に、指先が仮想物体から離れる時には、逆方向にシャフトを回転させて指から接触板を離す。

試作機は、アルミ製のベルト巻き取りシャフト、綿布のコンタクトベルト、塩化ビニール板の接触板、減速比1/75のギアモータ(S.T.L. HS-GM21-ALG)、固定用ベルクロストラップから成る。装置の重量は1指につき18gである。装置の装着は、第一指節部をコンタクトベルト、第二指節部をストラップ部に挿入し、適切な位置でストラップの締め付けを再調整することで完了する。

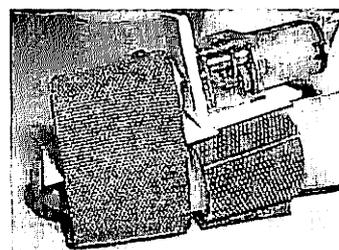
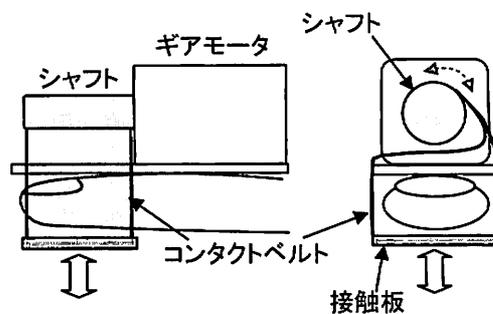


図2 装置の構造

Fig.2 Structure of the device

3.2 装置の制御

一般に、提示反力を正確に制御するためには、反力計測のために力センサが必要である。しかし、力センサの使用は重量や配線を増加させるため、小型

計量化という提案装置の開発目的に反する。また、試作機はギアモータを用いているため、バックドライバビリティが低く、モータの駆動電流によって出力トルクを推定する方法も利用できない。そこで、本研究では、接触力と駆動電圧が図5のように良好な線形性を示したことから、あらかじめ計測した特性を用いて、目標接触力からモータの駆動電圧を決定するオープンループ制御方式を採用した。

さらに、装置の機械的動作時間による反力の提示遅延を低減するために、モータの駆動を開始する際に、加速のための高電圧の加速パルスを加えた。加速パルスの電圧は、モータの最大定格である8Vとし、駆動パルス幅は、出力する力によって遅延時間が変化しないように、実験的に20msに決定した。

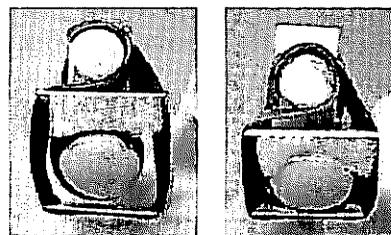


図4 非接触状態と接触状態
Fig.4 Non-contact and contact state

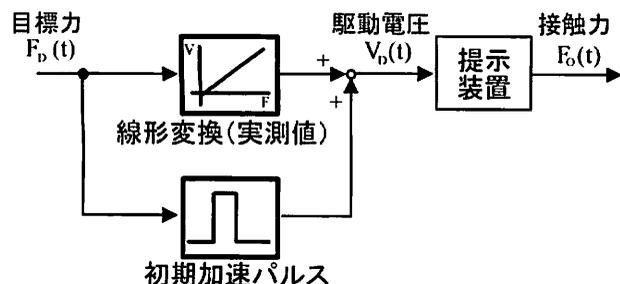


図3 制御ブロック図
Fig3. Block diagram of controller

物体の把持操作では物体に接触していることの認知が重要であり、明確に物体との接触と非接触を識別できるか否かは、作業効率に大きな影響を与えることが予想される。遭遇型力覚提示装置[15-17]は、ユーザがデバイスに拘束されない非接触状態を作ること、現実に近い明確な接触と非接触の状態変化を提示可能としている。指先への圧覚提示においても、指先の非拘束状態を作ること、接触時のデバイスとの衝突によってRA受容器が刺激され、比較的低出力のモータでも、物体との接触の明瞭な認知が可能となるものと期待される。そこで、試作装置では、非接触状態移行時に、モータの逆回転駆動制御を行うことで非接触状態を実現した。逆回転時には、コンタクトベルトの張力が解放され、接触板とコンタクトベルトの弾性によって指先が接触板から離れる。接触時と非接触時の状態を図4に示す。

また、安定した接触力を提示するためには、後述のように、巻き戻し後の停止位置を一定にする必要がある。そこで、巻き戻し時間を、巻き戻し前に出力した力に応じて線形補正し、停止位置のずれを軽減した。

4. 試作装置の特性

4.1 線形性

指先の接触力を計測することで装置の線形性と再現性を評価した。接触力の計測は、試作装置の接触板にシート状の力センサ(Tekscan FlexiForce)を貼付しておこなった。右利きの20代から30代の9人の男性を被験者とし、各駆動電圧につき5試行を実施した。結果を図5に示す。全被験者での標準偏差は最大25%で、駆動電圧を1~3Vの範囲で変化させたときの指先接触力は、0.5N~2.3Nであった。ユーザが物体を把持できていることを認知するには、十分と考えられる。

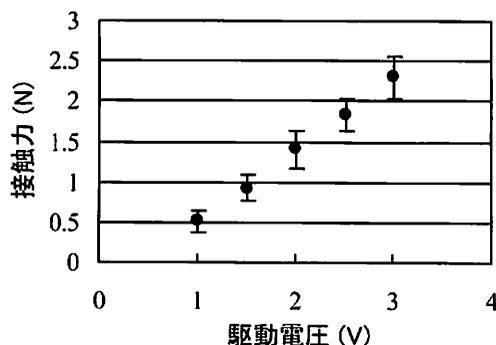


図5 指先接触力と駆動電圧の関係
Fig.5 Relation between driving voltage and contact force

4.2 接触板駆動開始位置の接触力への影響

接触板が、接触状態から非接触状態への移行を開始する駆動開始位置がばらつくと、接触までの駆動時間が変化する。その結果、接触時の接触板の速度、ひいては接触時の撃力が変化し、知覚される接触力の再現性が低下する可能性が生じる。

そこで、巻き戻し後の停止位置を、巻き戻し軸の角度を測定することで評価したものが図6である。その結果、巻き戻し補正によって、巻き戻し後の位置のずれは±5°程度に抑制可能であることが確認された。

次に、駆動開始位置を変えて、擬似反力提示への影響を測定した結果が図7である。開始位置は-10°、-5°、0°、+10°、-10°の4条件で各5試行ずつ行った。

その結果、 $\pm 10^\circ$ では駆動開始位置の影響は 15%程度であった。巻き戻し後の駆動開始位置のばらつきによる接触力のばらつきは、個人差や試行ごとのばらつきが最大 50%程度あったことを考慮すると、比較的軽微といえる。

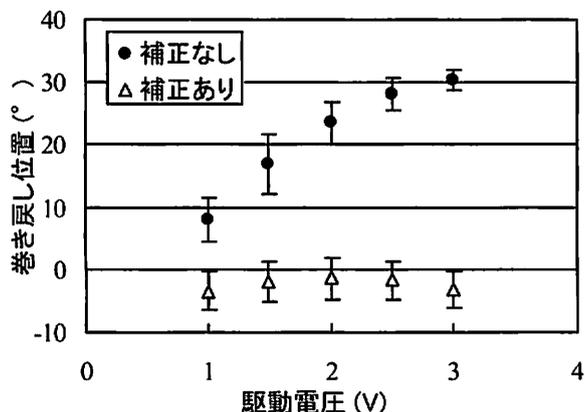


図 6 巻き戻し位置のずれ
Fig.6 Error of rewinded shaft position

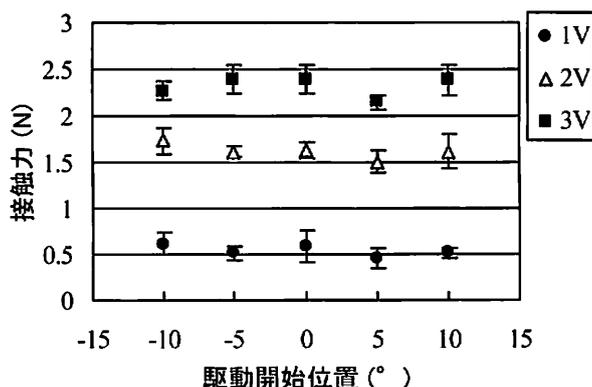


図 7 駆動開始位置による接触力のばらつき
Fig.7 Contact force deviation caused by initial position

4.3 速応性

力覚提示装置に要求される重要な特性の一つに、速応性が挙げられる。そこで、非接触状態から接触状態への移行における、目標力を設定してから接触力が増加開始するまでの時間を、被験者が装置を装着した状態で測定した。被験者は 20~30 代の男性 9 人で、各駆動電圧につき 5 回ずつ測定した。

図 8 に見られるように、高電圧加速パルスなしでの遅延が 100~600ms であったのに対し、加速パルスありの遅延は 80ms~90ms で、加速パルスによって大幅に低減された。力覚提示においては、数十 ms の遅延が作業効率に影響したとの報告もあり [18]、予測処理などによらず装置単体で実用的な速応性を得るためには、減速比の最適化などの改善が必要である。

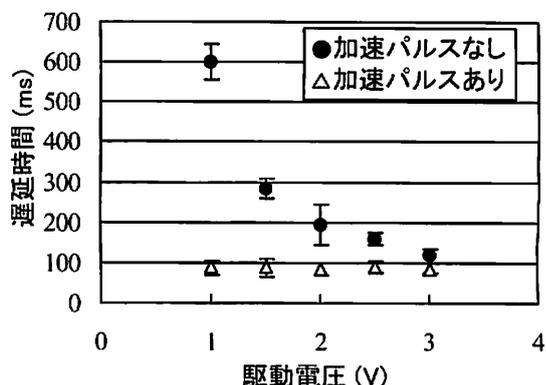


図 8 遅延時間と駆動電圧の関係
Fig.8 Relation between driving voltage and time delay

5. 感覚評価実験

5.1 反力感評価実験

本研究では、指先への接触力の提示のみによって物体反力の表現を試みた。しかし、提案手法は自己受容覚の提示を欠くことから、装置によって提示される接触力と、ユーザが知覚する反力感の大きさが一致するとは限らない。そこで、装置による接触力と知覚された反力感の関係を実験的に検討した。

実験では、まず、試作装置によって接触力を提示した。その後で、装置によって提示された接触力と同程度だと感じる力で、力センサを被験者に随意的に指腹で押させ、その時の力を計測した。被験者は 20~30 代の男女 10 人で、1~3V の 5 段階で各駆動電圧につき、各 5 試行実施した。

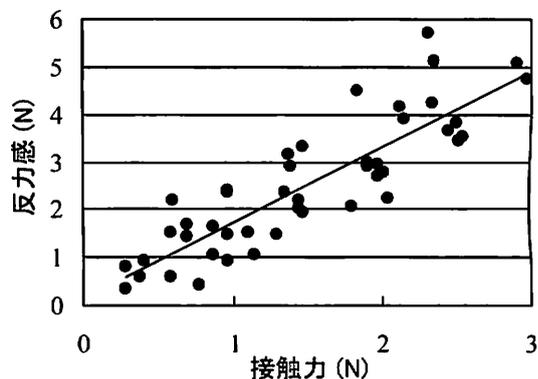


図 9 接触力と反力感の関係
Fig.9 Relation between contact force and reaction force

被験者が知覚した反力感と接触力の、各 5 試行平均値の関係を図 9 に示す。同程度の接触力であっても、被験者によって認知される反力感には個人差があるが、ほぼ線形な相関関係が得られた。また、どの被験者においても反力感は接触力よりも大きい傾向が見られ、全被験者平均で、反力感は接触力の約 1.5 倍であった。この原因は後ほど考察する。しかし、

二者の間に相関関係が得られたことから、指先接触力を制御することによって、擬似的な反力感が制御可能であることが確認された。

5.2 二指把持による大きさ認知実験

擬似反力提示による物体把持の可能性を検討するために、図10のように、母指と示指の二指への擬似反力提示をおこなう単純な構造のシステムを試作した。指先間距離はポテンショメータで取得した。

実験システムの動作ブロック図を図11に示す。試作システムは、擬似反力提示装置の遅延を補償するため、以下の手順で仮想物体との接触を予測する[19]。まず、指先間距離の過去値を用いて、指先間距離の微分値の時間波形を二次関数で近似する。この関数を用いて遅延時間後の位置を予測し、予測位置に対して接触判定を行う。さらに、判定結果が接触である時には、モータを駆動する。予測に用いる過去値は、指先間距離の速度に応じて30から200msの範囲で動的に変更した。

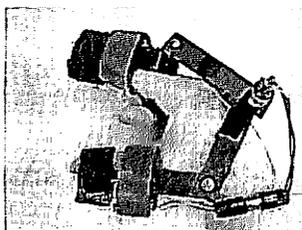


図10 二指擬似反力提示装置の試作機

Fig.10 Prototype of two-finger pseudo-force-feedback display system

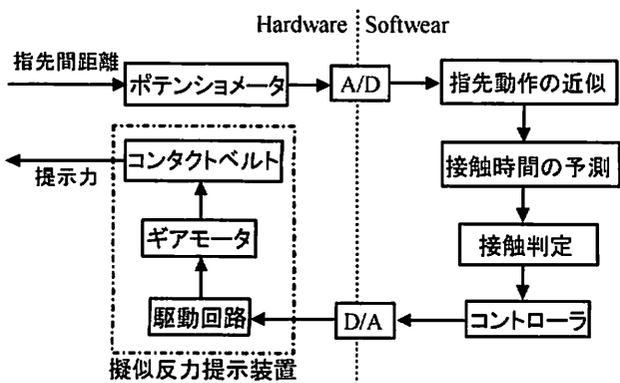


図11 システム構成

Fig.11 Entire system configuration

試作システムの、仮想物体大きさ提示能力を実験によって評価した。実験では、まず被験者にランダムな大きさの仮想物体を提示した。その後、実物体の中から同じ大きさのものを選択させた。提示した仮想物体の大きさは10mm, 25mm, 40mm, 55mm, 70mmの5条件、選択する実物体は、5mm間隔で5mm~80mmおよび2mmの計17個である。被験者は20

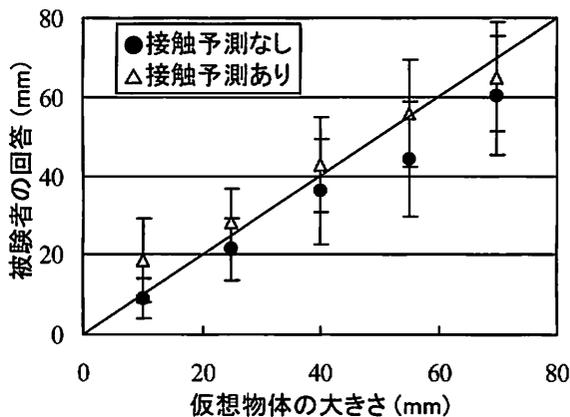


図12 選択した物体の大きさ

Fig.12 Displayed and recognized virtual object size

~30代の男性7人で、試行回数は、各仮想物体の大きさにつき、5回とした。

実験結果を図12に示す。提示した仮想物体と、被験者が認知した大きさには相関関係がみられる。また、接触予測なしでは、遅延の影響で物体が実際よりも小さく認知された。しかし、予測によって遅延が補償され、予測無しよりも大きく認知された結果、25から70mmにおいて誤差が減少した。仮想物体が70mmの時に約5mm小さく知覚されているのは、接触予測に使用可能なデータが少ないことによる予測の遅れが原因と考えられる。また、仮想物体が10から40mmのときには、予測による補償が過剰になり、実物体よりも大きく認知された。測定データを観察したところ、被験者は指先同士の接触を防ぐために、接触前に減速動作を行っているが、予測アルゴリズムは減速動作を考慮していなかったためと考えられる。指先の減速動作を考慮した接触予測アルゴリズムが望まれる。

また、認知した大きさの標準偏差は、10mmの仮想物体提示を除くと13mmであり、同様の実験を実物体で行った時の標準偏差は7mmであった。実物体に比較してばらつきが大きいものの、認知した大きさの平均値の誤差は数mmであることから、試作した擬似反力提示装置によって、10~70mmの大きさの物体をユーザに認知させることが可能であったと言える。装置の遅延時間の低減および接触予測アルゴリズムの改善によって、動作に対する指先接触力の提示時刻の誤差が低減されれば、認知される大きさの精度が向上するものと期待される。

5.3 二指把持時の把持感覚評価実験

本試作把持システムを用いた指先圧迫、および振動モータ (TPC CM05J, 標準回転数 7000rpm, 振動量 1.0g) を用いた指腹部への振動提示による擬似反力提示、ならびに実物体を把持したとき、実際の物

体把持感覚にどれだけ近いかが、主観的類似度の評価を行った。それぞれ、視覚情報を遮断した場合と CG 映像を提示した場合に関して行った。CG 映像は、大きさ 40mm の立方体と、被験者の母指と示指に連動する二つの球を表示した。被験者には、二指で仮想環境中の球を操作して立方体を把持させ、実際の物体把持との主観的類似度を、リッカート法を用いて回答させた。被験者は、右利きの 20 代から 40 代の 11 人の男女である。

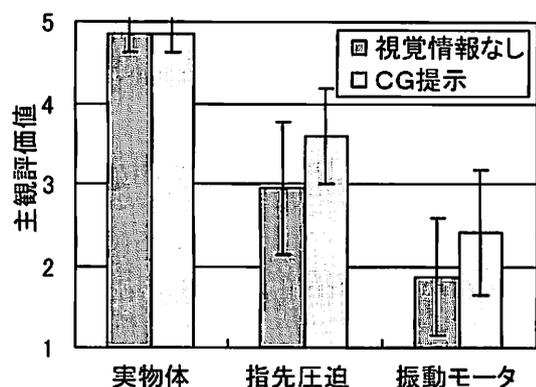


図 13 リッカート法による実物体把持感覚との主観的類似度の評価結果

Fig.13 Subjective score of similarity to actual object grasping using Likkert scale

図 13 より、指先圧迫による擬似反力提示は、振動による代替法よりも実際の把持に近い感覚を提示可能であることが確認される。また、擬似反力提示、振動による代替、いずれの方法においても、CG 映像を提示することによって、より実物体に近い把持感覚を得られることが確認された。視覚を介して自己の指先位置および物体との接触を知覚することによって、把持感覚が増強されたためと推察される。

6. 考察

提案手法は自己受容覚の提示がないため、提示する指先接触力よりも、認知される反力感の方が小さくなる可能性が予想されたが、反力感評価実験では逆の結果となった。一つには、試作装置の構造上、指腹だけでなく指先上部への圧迫が加わるため、より多くの圧受容器が刺激され反力感が大きくなった可能性が考えられる。また、装置を第二指節部に固定する構造としたため、擬似反力提示の際に遠指節間関節にモーメントが作用する点も、反力感が増大した一因と考えられる。装置の固定方法や接触部分の構造などの検討が必要と考えられる。

大きさ認知実験では、認知した大きさの標準偏差は、10mm の仮想物体提示を除くと 13mm であり、同様の実験を実物体で行った結果場合には、7mm で

あった。実物体での大きさ認知のばらつきを、人間の本来の認知分解能に起因するものと考えれば、標準偏差の差は、システムの実装上の要因によるものと考えられ、具体的には動作の予測誤差による接触力提示時刻のばらつきや、コンタクトベルトの弾性による接触力の立ち上がりの遅延などが考えられる。遅延の軽減と予測精度の改善によって、より高い分解能が得られるものと期待される。

把持感覚評価実験では、指背部への圧迫力によって把持感覚が損なわれる可能性が懸念されたが、指先接触力制御による反力提示は、振動による代替法よりも実物体把持時の反力に近い結果が得られた。これは、物体を把持したときに指腹に加わる静的な接触圧の提示が、振動による代替よりも主観的に実際の把持に近いことを示唆するものと言える。振動による代替では、静的な圧刺激には応答しないと考えられる RA タイプの触圧覚受容器が刺激されるのに対し、接触力提示では主に SA タイプの受容器が刺激されるためと解釈される。また、被験者の内視報告によると、擬似反力提示では CG 映像での物体接触と、接触力の提示時刻のずれが知覚される場合があるとの報告があったことから、遅延時間の軽減によって、CG 提示時の擬似反力提示による把持感覚が向上する可能性が期待される。

試作装置の期待される用途としては、装置が小型で装着が容易であることから、没入仮想環境で物体を把持して移動させる作業のように、把持できているか否かの状態変化の提示が重要な課題への応用が考えられる。また、現状ではバックドライバピリティの問題から連続的な接触力提示に問題があるが、連続的な接触力提示が可能となれば、柔らかさなどの物理特性の提示も可能になるものと考えられる。その際には、提示する接触力と認知される反力感の不一致の原因解明と軽減が必要である。さらに、指先を圧迫する装置の先行研究として、吉川らの指先圧迫による技術伝達の試みがある[20]。これは指背面からの圧迫力を他者による教示力の提示手段とするものであるが、今回試作した装置の接触部の構造を変更して指背部の圧迫を強くすることで、より手軽に同様の機能が実現できる可能性が期待される。

指先接触力提示による擬似反力提示装置を実用化するための改善点としては、減速比の最適化など駆動機構の改良による遅延の軽減に加え、小型で軽量である点を生かすためのワイヤレス化などが考えられる。また、手指を用いて物体に触れる作業には、なぞり動作のように指腹部に対する接線方向せん断力の提示が重要なものもある。南澤らは、小型モータを 2 つ用いて、第二指節部へのせん断力の提示を試みており[21]、本研究で提案する指先法線方向への力制御に加え、接線方向のせん断力を提示するこ

とが考えられる。しかし、装置の重量増加が予想されることから、擬似的な方法によるせん断力提示の検討も必要と考えられる。

7. まとめ

本研究では、指先圧迫による擬似反力提示法を提案し、小型軽量の装置を試作した。試作機を用いた評価実験によって、接触力と反力感には相関があること、二指への接触力提示によって仮想物体の大きさ提示が可能であることを示した。また、振動提示による方法よりも、実物体に近い把持感覚を得られることを確認した。今後の課題としては、遅延の軽減や指先上部圧迫力の軽減など機構上の改善と、ワイヤレス化や非接触トラッキングシステムとの統合など、容易に使用可能な両手多指作業システム実現のためのシステム構築が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金によるものである。ここに記して感謝する。

参考文献

- [1] L. Massie, J. Salisbury: The PHANTOM haptic interface : A device for probing virtual objects, ASME Winter Annual Meeting, DSC-55(1), pp.295-300 (1994).
- [2] J. Furusho, M. Sakaguchi: New Actuators Using ER Fluid and Their Applications to Force-feedback Devices in Virtual Reality and Medical Treatments, International Journal of Modern Physics B., Vol.13, No.14-16, pp.2151-2159 (1999).
- [3] L. Buogila, Y. Cai, M. Sato: Scaleable-SPIDAR, Proc. of ICAT'97, pp.93-98 (1997).
- [4] 川崎, 堀, 毛利: 対向型多指ハプティックインターフェイス, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.4, pp.449-456 (2005).
- [5] M. Sakai, Y. Fukui, N. Nakamura: Effective Output Patterns for Torque Display "GyroCube", ICAT(2003).
- [6] 雨宮, 安藤, 前田: 知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.1, pp. 47-57 (2006).
- [7] 岩田, 中川: 着用型力覚帰還ジョイスティック, Human Interface N&R, Vol.13, No.2, pp.135-185 (1998).
- [8] 寛, 矢野, 齊藤, 小木, 廣瀬: 没入型仮想空間における力覚呈示デバイス Haptic GEAR の開発とその評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.4, pp.1113-1120 (2000).
- [9] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, R. Boian: The Rutgers Master II - New Design Force-Feedback Glove, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol.7, No.2 (2002).
- [10] 岩田, 中川, 中島: 仮想立体の硬さを表現するためのフォースディスプレイ, ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp.55-58 (1991).
- [11] G. Burdea, J. Zhuzng, E. Roskos, D. Silver.: A Portable Dexterous Master with Force Feedback, Presence, Vol.1, No.1, pp.18-28 (1992).
- [12] 藤田: グローブ型仮想物体硬さ感覚呈示装置の試作と評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D II, 10, pp.2394-2400 (1998).
- [13] 小山, 山野, 竹村, 前野: パッシブフォースフィードバックを用いた多指エクゾスケルトン型ハプティックデバイスの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.4, pp.565-574 (2002).
- [14] K. Shimoga, A. Murray, P. Khosla: A Touch Reflection System for Interaction with Remote and Virtual Environments, IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems (1995).
- [15] P. Gruenbaum, W. McNeely, H. Sowizral: Implementation of Dynamic Robotic Graphics For a Virtual Control Panel, PRESENCE, Vol.6 Num.1 (1997).
- [16] 横小路, 佐藤, 木倉, 吉川: 多指遭遇型ハプティックデバイスの設計と動作計画, 日本バーチャルリアリティ学会 9 回大会論文集 (2004).
- [17] 中河原, 梶本, 川淵, 川上, 館: テレイグジスタンスの研究(第 41 報)遭遇型多指マスタハンドを用いた指のマスタスレーブ制御, 日本バーチャルリアリティ学会 8 回大会論文集 (2003).
- [18] X. Shen, J. Zhou, A. SaddikNicolas, G. Georganas: Architecture and Evaluation of Tele-Haptic Environments; Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications, pp. 53-60 (2004).
- [19] G. Inaba, K. Fujita: A Pseudo-Force-Feedback Device by Fingertip Tightening for Multi-Finger Object Manipulation, Proc. of EuroHaptics2006, pp.475-478(2006).
- [20] 吉川, 菊植: 人間から人間への技術伝達のための指先圧迫機能を付加した力覚提示装置; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.1, pp.803-81 (2000).
- [21] K. Minamizawa, K. Toji, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi: Haptic Interface for Middle Phalanx Using

Dual Motors, Proc. of EuroHaptics2006, pp.235-240
(2006).

(2006年 10月 3日受付)

[著者紹介]

稲葉 豪 (学生会員)



2006年東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科卒業。現在、同大学院博士前期課程情報工学専攻在学中。仮想空間における両手物体操作のための簡易力触覚提示装置およびシステム開発の研究に従事。

△開発の研究に従事。

藤田 欣也 (正会員)



1988年慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。相模工業大学、東北大学医学部、岩手大学を経て、現在東京農工大学大学院教授。力触覚や歩行感覚の提示と共有仮想空間コミュニケーション、なら

びに医用生体工学に関する研究に従事(工学博士)。