

別 刷

日本バーチャルリアリティ学会 論文誌

日本バーチャルリアリティ学会

基礎論文

非接地型指先力覚提示装置使用時の問題点と 干渉強調による支援可能性の検討

鎌田 勝寛^{*1} 稲葉 豪^{*1} 藤田 欣也^{*1}

Virtual Manipulation Assistance by Collision Enhancement
using Multi-Finger Ungrounded Force-Feedback device

Katsuhiko Kamata^{*1}, Go Inaba^{*1} and Kinya Fujita^{*1}

Abstract: The feasibility to reduce the delay of collision recognition by enhancing the contact force change was experimentally examined for virtual environments using Virtual Coupling and ungrounded force display devices. Two contact force enhancing methods were examined for more precise collision recognition between the fingertips and the grasping object, as well as the grasping object and another object. In the force changing enhancement method, the contact force was enhanced by the temporal increase of the viscous parameter of Virtual Coupling. In the contact state display method, which has no force delay in principle but no ability to display the linear force change, the finger contact states were displayed as the three-levels of discrete force. The experimental trials revealed that the enhancement of the force change assists the collision recognition and improves the task efficiency.

Keywords: virtual coupling, collision recognition, reaction force enhancement, cognitive assistance

1 はじめに

人が日常生活環境で物体を操作する時には指先を使うことが多く、VR 環境でも同様に多指での物体操作を実現することが望まれる。仮想物体を指先で直接把持して操作する作業においては、仮想物体を把持できていることや、把持している物体と他の物体との干渉などの認知が重要である。これらの認知は、物体を介して指先に加わる反力の知覚に依存し、反力が知覚できない環境では視覚への依存が大きくなるため、作業性が低下する。この問題に対して、仮想環境において指先に反力を提示する接地型の多指力覚提示装置の研究が行なわれている[1,2]。しかし、接地型の装置は、確実に指先の運動を拘束することが可能である反面、装置の大きさや作業空間に制約を生じる場合が多い。

そこで、作業領域などの制約の緩和を目的に、錯覚を利用した方法や、提示情報を限定した擬似的な力覚提示法など、さまざまな非接地型の装置が提案されている。例えば、ジャイロ効果を用いてトルクを発生する装置[3]や知覚の非線形性を利用して質量の不等速周期運動で力錯覚を生じさせる装置[4]、低周波数域の振動によって圧覚を表現する装置[5]、小型モータを用いた指

先圧迫によって圧覚受容器を刺激する擬似反力提示装置[6,7]などが開発されている。ただし、これらの方式は装置の小型化を可能にする反面、ユーザの指先位置を拘束できないため、指先が仮想物体に侵入するという課題を有する。

他方、仮想環境の動的な多物体の剛体運動をシミュレートするためのソフトウェアが、主にグラフィックス生成を目的として開発されている。運動シミュレーションの計算方法には、運動方程式と拘束条件から拘束力を求める解析法[8][9]や、拘束条件に違反した量に応じた力を加えるペナルティ法[10]がある。解析法のシミュレータには、低速の更新レートでも正確なシミュレーションが可能という利点があるが、入力が力で出力が位置のアドミッタンス型であるため、位置を計測し反力を制御するインピーダンス型の力覚提示装置と直結することができない。そこで、これらを組み合わせて使用する方法として、仮想環境内の指先代理物体(プロキシ)と実際の指先を、弾性要素と粘性要素からなるバーチャルカップリング(以下、VC と表記)で接続する方法が提案されている[11,12]。VC を介して解析法物理シミュレータと力覚提示装置を接続することで、比較的容易に力覚提示機能を有する物理シミュレーション環境を構築することが可能になる。

ここで、前述のような非接地型力覚提示装置に、VC

*1: 東京農工大学大学院

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

と解析法シミュレータを組み合わせた場合には、ユーザの指先が仮想物体に大きく侵入することから、シミュレーションの安定性を確保し力覚提示装置の出力飽和を回避するためには、VCの弾性や粘性要素の値を小さくする必要がある。しかし、この大きな進入と小さなVCパラメータの組み合わせは、次章で述べるような様々な解決すべき課題をもたらす。

中でも、干渉発生時の反力の立ち上がりの認知の遅れは、作業効率を低下させることが懸念される。例えば、指先を用いた基本的な作業の一つである、物体を把持して設置する作業を想定した場合、図1(a)に示すような指と物体の干渉や、図1(b)のような把持物体を介した指と他の物体の二次的な干渉(以下、二次干渉と表記)の認知の遅れは、作業速度の低下を招くと考えられる。干渉認知の支援に関しては、人間の認知特性に基づき、干渉時に減衰振動を重ねることで物体の素材を表現する試みなどがある[13]。そこで本研究では、干渉の認知支援による把持設置作業効率の改善を目的に、干渉時の反力強調の効果を実験的に検証する。

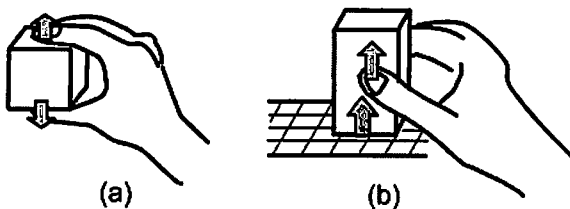


図1 (a)物体把持時の反力、(b)把持物体を介した指と物体の二次的な干渉による力(二次干渉力)

Fig.1 (a)Reaction force from grasping object, (b)Reaction force caused by the contact between grasping object and another object.

2 非接地型力覚提示装置とVC併用時の問題点

先に述べたように、非接地型力覚提示装置とVCを組み合わせた場合には、ユーザの指先が仮想物体に大きく侵入するため、VCの値が大きいと出力される反力が大きくなる。その結果、シミュレーションは不安定になる。同時に、力覚提示装置の出力も容易に飽和するため、干渉発生後の反力の変化を提示できなくなる。これらの問題を回避するためには、VCの粘弾性要素を小さく設定する必要が生じる。しかし、VCの値を小さくすることによって、以下のような課題が生じる。

一つ目は、ある程度の侵入が起きなければ十分な力を発生できないことが原因で生じる問題である。図2(a)のように、薄い物体は指先が侵入する余地が小さいため、把持力が不十分で持ち上げられない場合が生じる。また、図2(b)のように、把持力発生のための侵入を解消するまでは、指先プロキシが離れないため、ユーザが離し動作を開始してからプロキシが離れるまでに遅延が生

じる、などの問題が起きる。

二つ目は、力の発生の遅延が原因で起きる問題である。図2(c)のように指先が物体と干渉した時、VCの値が小さいと反力の立ち上がる波形がなまるため、力覚を介した干渉の認知が遅れる。その結果、作業効率の低下などが生じる。また、図2(d)のように、重力が作用する環境で物体を把持すると、VCは鉛直方向に伸びることで物体の重さを補償する。したがって、把持物体を置くときには、VCの伸びを解消するまで反力が減少した後に反力が増加する。このため、二次干渉の認知遅延の問題が生じる。また、比較的軽微な問題であるが、図2(e)のように実指の運動方向がそれまでと逆方向に変化した

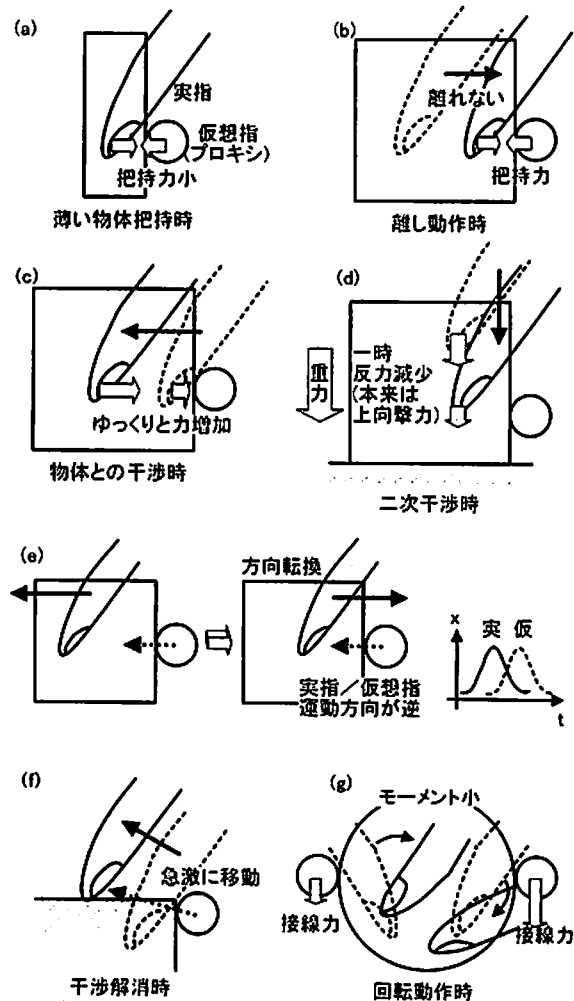


図2 非接地型力覚提示装置とVCを組み合わせた時の問題点(a)薄い物体把持時、(b)離し動作時、(c)物体干渉時、(d)二次干渉時、(e)移動時、(f)干渉解消時、(g)回転動作時

Fig.2 Problems in ungrounded force-feedback device and VC environment: (a)fail of thin object grasping, (b)delay of object release, (c)delay of collision force, (d)delay of collision force while placing a grasping object, (e)phase delay of force in free motion, (f)proxy jump caused by finger penetration, (g)insufficient moment while twisting.

時には、一時的に指の運動方向とプロキシの運動方向が逆になり、違和感を生じることがある。

さらに、その他の原因で起こる問題も存在する。図2(f)のように、摩擦などの外力が原因で実指とプロキシの位置に大きなずれがある場合には、干渉解消時に仮想指が急激に運動する。さらに、図2(g)のように、物体を把持して回転させるときには、回転中心のずれや回転半径の縮小によって、適切なモーメントを発生できない場合が生じる。

このように、非接地型力覚提示装置を使用する場合には、VC の値を小さくする必要があるため、様々な問題が生じる。中でも干渉状態変化の認知の遅延は、作業効率の点において、力覚提示の意義を損なう可能性が懸念される。そこで次章以降では、把持時や二次干渉発生時の反力の立ち上がり遅延の影響を実験的に検討すると共に、反力変化の強調提示による把持設置作業効率改善の可能性を検討する。

3 実験システム

本研究では、非接地型力覚提示装置として指先圧迫型の擬似反力提示装置を用い、アドミタンス型の汎用物理シミュレーションライブラリである Open Dynamics Engine (ODE) を用いたシミュレーション環境を VC により接続したシステムを構築し、実験をおこなった。システム全体の構成を図3に示す。磁気センサ(Flock of Birds, Ascension, 位置分解能 0.5mm, 角度分解能 0.1°)を用

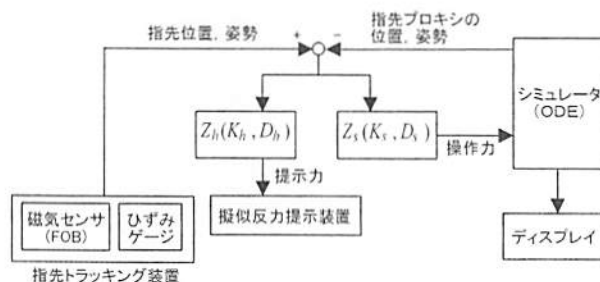


図3 実験システムの構成

Fig.3 Structure of experimental system

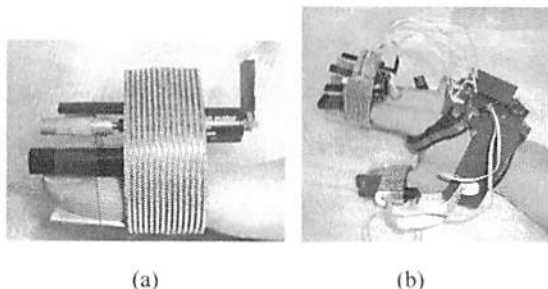


図4 擬似反力提示システム。(a)擬似反力提示装置、(b)装着例

Fig.4 Pseudo-force-feedback system. (a)pseudo-force-feedback device, (b)entire system

いて 8ms 周期でユーザの手の位置と姿勢を、ひずみゲージを用いて 1ms 周期で指の曲げ角度(A/D 変換後の角度分解能 0.14°)を計測し、ユーザの拇指、示指と中指の指先位置を算出する。物理シミュレーションと提示力計算は 8ms 周期で実行され、グラフィックループは 15ms 周期で非同期に実行される。

擬似反力提示装置は、自己受容感覚受容器を刺激せずに、指先の圧迫によって皮膚触圧覚受容器を刺激することで装置の小型化を実現している[6]。図4に装置の構造と装着風景を示す。指先と仮想物体との接触時には、コアレスモータ(maxxon, R10, 0.78W, 減速比 1/16)によりベルトが巻き取られ、樹脂製の接触板を介して指先が圧迫される。デバイスは 2.5N の反力提示能力を持ち、重量は1指につき約 18g である。提示反力の制御には、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。

VC には、物理シミュレーション結果の安定性と、物体を把持した状態で力覚提示装置の出力を飽和させないこと、の両者が要求される。そこで本研究では、物理シミュレーション用と、提示力計算用に、2つの独立した VC を用いた[14]。物理シミュレーション用の VC は、安定性を保ちつつ実世界で把持可能な物体と同程度の質量の物体を持てるように、弾性要素を $K_s=800\text{N/m}$ 、粘性要素を $D_s=30\text{Ns/m}$ に設定した。提示力計算用の VC は、指先の力覚を十分に知覚可能で、かつ飽和しないように、弾性要素を $K_h=70\text{N/m}$ とした。また、弾性要素が小さいと、手を動かしたときの指とプロキシの運動のずれが増大するため、粘性要素は、物体を把持せずに手を動かした場合にも提示力を生じる可能性が高くなる。そこで、提示力計算用の粘性要素は $D_h=0\text{Ns/m}$ とした。また、実空間では、指が物体と接触していない状態で反力は発生しないため、プロキシが物体と接触していない時の提示力は 0 とした。

4 反力計算法

非接地型力覚提示装置を使用すると、仮想物体への指先の侵入量が大きくなり、VC が算出する反力も過大になる。他方、装置の出力は制限されているため、容易に力覚提示装置の出力が飽和し、ユーザが知覚する力覚も飽和する。そのため、既に指先が物体と干渉している状態では、その状態からの反力の増減を認知できなくなる場合が多くなる。したがって、飽和を避けて反力の増減を認知できるようにするためには、提示力計算用 VC の値を小さく設定する必要がある。しかし、VC の値が小さいと、干渉の認知の遅れや、重力による二次干渉の認知遅れによる、作業効率の低下が生じる。そこで、指と物体の接触や、把持物体を介した二次干渉の認知遅れの軽減による把持設置作業の支援を目的に、本研究で

は干渉発生時の反力変化強調の効果を、実験的に検討した。

4.1 力変化強調法

VC の粘性要素は、干渉時には反力の増加を急峻にし、干渉の認知を支援する。しかし、粘性要素は指先位置の計測雑音や、手の運動による指とプロキシのずれなどによって、不自然な反力の増減を生じる。そのため、粘性要素の大きさは制限される。そこで本研究では、干渉時のみ提示力計算用 VC の粘性要素 D_h を増加させることで、干渉による反力の変化を強調した。この方法を、以降では力変化強調法と呼ぶ。

干渉発生の検出は、プロキシと物体の干渉時と二次干渉時には急激に指先とプロキシの距離が増加することから、指先が物体に接触しており、かつ、プロキシと指の距離が増加していること(微分値が 0 より大)を検出条件とした。強調時の VC の粘性係数は、干渉の認識が容易になるように実験的に調整し、 $D_h = 40\text{N/m}$ とした。また、把持物体を移動する時の粘性要素出力の振動を抑制するために、プロキシと実指の距離の微分値は、20 サンプル(160ms)の位置情報から、最小二乗法を用いて算出した。

$$F_h = K_h(x_h - x_s) + D_h \frac{d(x_h - x_s)}{dt} \quad (1)$$

$$\begin{cases} D_h = 0 & \left(\frac{d(x_h - x_s)}{dt} \leq 0 \right) \\ D_h = 40 & \left(\frac{d(x_h - x_s)}{dt} > 0 \right) \end{cases}$$

図 5 に力変化強調法によって計算された提示力の例を示す。プロキシが把持物体と接触した時と、二次干渉発生時に、粘性要素によって、弾性要素のみの場合に比較して提示力が急激に増加している様子が確認される。また、図には計算結果をそのまま示したが、装置の最大出力が 2.5N であるため、それを越える反力は、提示時には 2.5N とした。

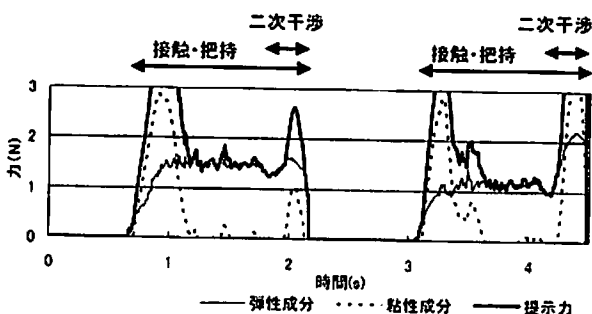


図5 力変化強調による提示反力の計算例

Fig.5 Example of reaction force calculated by force change enhancement method

4.2 接触状態提示法

理想的には、指先で物体を把持した時や、把持した物体が他の物体と干渉した時には、指先に提示される反力は遅延無く変化する必要がある。しかし、VC にもとづく反力計算では、完全な遅延の解消は計測雑音等の理由から困難である。そこで、遅延なく干渉力が提示された場合と VC に基づく方法の比較を目的に、本研究では、以下の様に、シミュレータの干渉検出結果を利用した反力提示をおこなった。

具体的には、把持・設置作業における指先の状態を非接触、接触、二次干渉の3段階でモデル化し、それぞれ 0N, 1.25N, 2.5N(最大出力)の3段階の力を提示した。各接触状態において指先が変位したときに、指先侵入量の変化が反力に反映されないため、把持力の調整などは不可能になるが、プロキシや把持物体と他の物体の干渉検出結果を利用することで、遅延のない干渉状態変化の提示が可能になる。以降では、この方法を接触状態提示法と呼ぶ。

接触状態にもとづく干渉力提示のための、状態遷移図を図 6 に示す。非接触状態は、プロキシに何も接触していない状態を意味し、プロキシと物体との干渉によって接触状態に移行する。ここで、二次干渉は、把持物体と他の物体の干渉発生を意味するため、物体を把持していることと、把持物体を一度台から持ち上げることが前提となる。そこで、接触状態をさらに3つの状態に分割し物体を把持して持ち上げた移動状態からのみ、二次干渉状態に遷移するようにした。

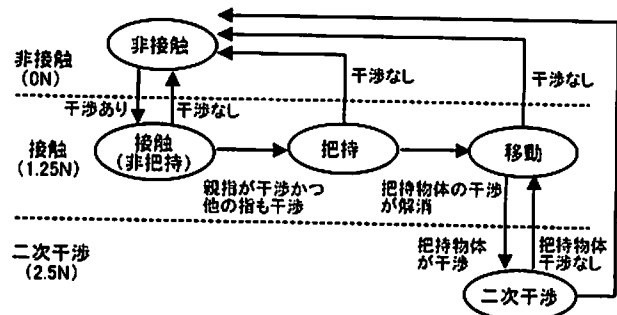


図6 プロキシ接触状態の状態遷移図

Fig.6 State transition diagram of the proxy contact states

図 7 に、図 5 と同一の動作に対して、接触状態提示法を適用した時の提示力を示す。プロキシの接触状態に応じて、3段階の反力が提示されている様子が確認できる。また、シミュレータの干渉検出結果に応じて提示力を変化させているため、VC で生じる提示力の立ち上がり遅延がなく、特に、二次干渉発生時の遅延が大きく改善されていることが確認される。図 2(d)に示したように、VC を用いた場合には、把持物体の質量を補償するために弾性要素が延びているため、二次干渉時には、その延びが解消されるまで提示力が一時的に減少するが、

干渉検出結果にもとづく接触状態提示法には影響しないためである。

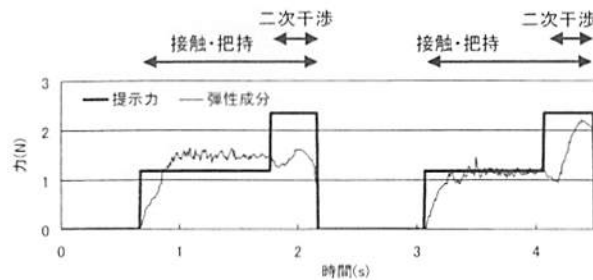


図7 接触状態提示法による提示反力の例

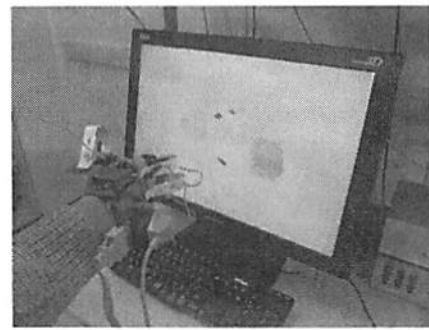
Fig.7 Example of reaction force calculated by contact state display method

5 評価実験

5.1 実験方法

物体を把持して移動し設置するタスクによって、反力強調提示の作業支援効果の評価を行った。作業タスクは、図8のように、画面上に表示された拇指と示指、中指のプロキシを操作して、ブロック(50, 60, 70mmの立方体、質量 0.2kg)を把持し、台上(円柱、φ35, φ40, φ45, φ50)に設置するものである。ブロックや台の大きさは作業毎にランダムに変更した。把持物体を深く握りすぎた場合(侵入量が25mm以上)、台に把持物体を押し付けすぎた場合(プロキシと指先の下方向距離が25mm以上)は失敗とし、ブロックを消して破壊音を鳴らすことで被験者に知らせた。また、台上にブロックを設置していない状態でブロックを離れた場合や、設置の途中でブロックを落下させた場合も同様に失敗とし、ブロック消去と落下音で被験者に通知した。作業時の視点は上部から60°の角度で見下ろすようにし、画面全体をフォグで覆うことにより作業難度を高くすることで、力覚への依存が相対的に高くなる状況を設定した。

実験条件は、1)力覚提示なし、2)弾性のみ、3)力変化強調法、4)接触状態提示法の4条件とした。評価項目は、主観評価、失敗回数、作業時間、指先侵入量である。主観評価は、表1に示す質問内容に対して、5件法を用いて回答させた。作業時間と指先侵入量は失敗した作業を除いた平均と標準偏差を求めた。被験者には、実験システムに習熟させるため、事前に30分以上の練習を行わせた。さらに、各条件での計測前にも20回以上の設置練習を行わせた後に、10個のブロックの設置を1試行として、各2試行をおこなわせた。被験者は、右利きの20代男性9人と女性1人で、各条件の実施順序は被験者ごとに入れ替えた。



(a)



(b)

図8 実験環境 (a)実験風景、(b)タスク実行中の画面

Fig.8 Experiment environment (a)scene of object handling task (b)displayed image.

表1 評価項目と質問内容

Table 1 Questions for subjective evaluation

評価項目	質問
把持感覚	物体を持っている感覚がしましたか
持ちやすさ	物体を持ちやすかったですか
設置感覚	物体を台の上に置く感覚がしましたか
設置しやすさ	物体を置きやすかったですか

5.2 実験結果

図9に、被験者が回答した主観評価値の平均と標準偏差を示す。すべての評価項目において、力覚なし、弾性のみ、力変化強調法、接触状態提示法の順で評価が高くなった。t検定の結果、把持に関する評価項目は、把持感覚、持ちやすさともに、弾性のみと比較して状態提示法が有意に高い結果となったが、力変化強調法と状態提示法の間に有意差は認められなかった。

他方、設置に関する評価項目は、弾性のみと比較して力変化強調法が有意に高く、さらに力変化強調法より状態提示法が有意に高かった。力変化強調法と遅延がない状態提示法の主観的な強調効果を比較すると、把持に関する相違よりも、設置作業における相違がより大きい可能性を示唆する結果となった。

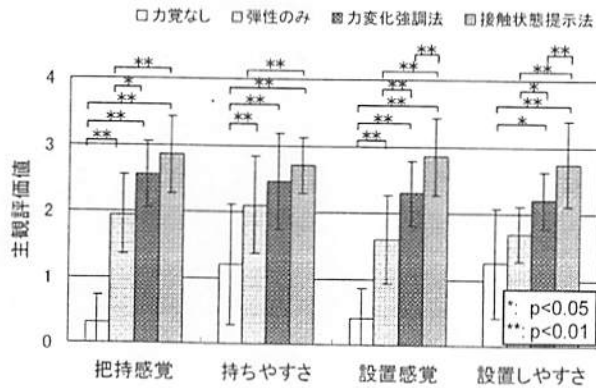


図9 主観評価結果

Fig.9 Subjective scores

図 10 に、各条件での把持設置課題中の、合計失敗回数を示す。移動中や設置時の落下は、力変化強調法の設置時の落下を除き、力変化強調法と接触状態提示法が、力覚なしや弾性のみよりも少なくなる傾向が見られた。把持状態の認知遅延が低減された結果、物体の大きさの認知精度が向上し、指先侵入量の調整が容易になったものと推察される。なお、力変化強調法の設置時の落下の原因は、物体を離すときの意図しない物体の移動によるものであった。詳細は考察に述べる。

過剰な力の印加による失敗である、物体の握りすぎと、台への押し付けすぎは、力変化強調法と接触状態提示法において、力覚なしや弾性のみよりも少ない結果となった。接触状態提示法は、干渉後の干渉力の増減を提示する機能を有さないことから、干渉発生認知の遅延が軽減されたことにより、過剰な侵入が回避された結果と考えられる。

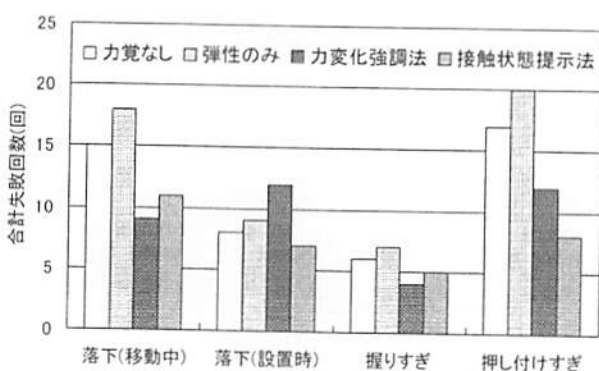


図10 合計失敗回数

Fig.10 Total number of failures

図 11 に、物体を把持してから設置するまでの総作業時間と、作業の各フェーズの所要時間を示す。把持時間は、いずれかの指が把持物体に接触してから物体が台から離れるまでの時間を、設置時間は、把持物体が台に接触してから指が完全に離れるまでの時間を意味

する。把持時間は、力変化強調法と接触状態提示法の両手法で、力覚なしと弾性のみよりも有意に減少した。また、移動作業時には干渉が発生しないため、条件による移動時間の差はないものと予想されたが、反力の強調により減少する傾向を示し、接触状態提示法は力覚無しや弾性のみよりも有意に短くなった。設置時間は、力覚なし、弾性のみと比較して、反力を強調する2条件で有意に減少した。さらに、力変化強調法よりも接触状態提示法で設置時間が有意に減少した。

反力の強調提示によって、指と物体の干渉や、把持物体と他の物体の二次干渉の認知を早め、作業効率を改善できる可能性が示されたものと考えられる。同時に、VC にもとづく力変化強調法と、遅延がない理想的な条件との間には、二次干渉の認知において、認知の支援効果に差があることも示唆された。

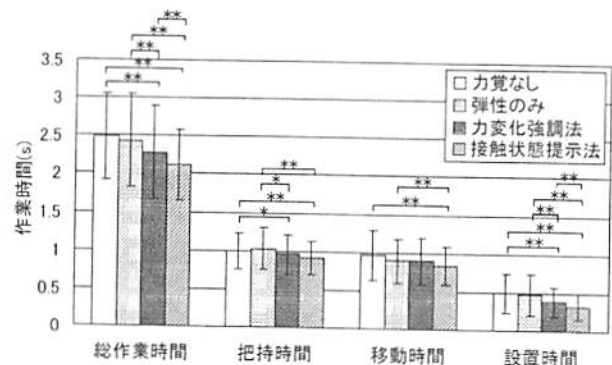


図11 把持設置作業における各作業時間

Fig.11 Average time for each phase of object handling task.

把持作業時の仮想物体への指先侵入量の最大値を図 12 に示す。把持作業時の最大侵入量は、力覚無しに対して、力変化強調法は有意に減少したが、弾性のみと接触状態提示法の減少は有意ではなかった。また、力覚ありの3条件の間に大きな違いは見られなかった。すなわち、今回の実験条件においては、反力の提示は把持時の侵入量にある程度影響する可能性があるものの、強調や遅延の軽減などの改善を加えても、指先侵入量の低減効果は大きくないという結果となった。

設置作業時の、台への把持物体の過剰な押し付けの指標として、プロキシと指先の下方向への最大距離を図 13 に示す。設置作業時の下方向最大距離は、強調した2条件で減少する傾向が見られた。特に、接触状態提示法は、弾性のみ条件だけでなく、力変化強調法に対しても、有意に距離が減少した。これらの結果は、反力の強調は二次干渉発生認知を早め、過剰な設置力の発生を抑制できることを示すものと考えられる。しかし、力変化強調法と状態提示法に有意差があることから、VC にもとづいて算出された反力を粘性によって強調する方法では、遅延無く二次干渉力が提示された場合と

比較すると、過剰な押し付けの抑制効果が小さいという結果となった。

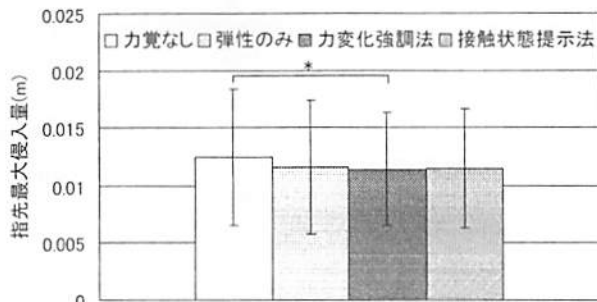


図12 把持作業時の指先最大侵入量

Fig.12 Finger penetration into grasping object

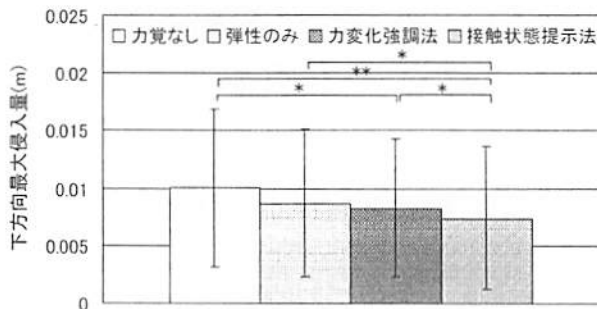


図13 設置作業時のプロキシと指先の下方向最大距離

Fig.13 Downward distance between proxy and finger.

6 考察

今回の実験では、2つの反力強調提示条件において、作業時間や設置作業時の侵入量、失敗回数が改善され、主観的にも高く評価されることが確認された。干渉発生時の反力変化の強調によって、干渉の認知が支援された結果と考えられる。視覚による干渉の認知が困難な環境など、慎重な作業が要求される環境において、反力の強調提示が設置作業の有効な支援手段になるものと期待される。

また、今回の実験では、反力を強調する2条件で把持と設置に関する主観評価が改善した。力変化強調法では、干渉時の反力の立ち上がりが改善され、干渉の認知が支援された結果と考えられる。他方、干渉の発生遅延は基本的に無いものの、干渉後の力の変化を反映しない接触状態提示法の主観評価は、二次干渉においては力変化強調法よりも高い結果となった。物体を把持して台上に置くような比較的単純なタスクでは、連続的な反力の認知よりも、状態変化の遅延のない認知が重要であることを示唆するものと考えられる。

作業の失敗に関しては、反力変化の強調によって、力の加えすぎで生じる、握りすぎと押しつけすぎの失敗

回数が減少する傾向が見られた。強調によって干渉の認知遅延が低減された結果、過剰な侵入が発生する割合が減少したのと考えられる。一方で、力変化強調法では、設置時の落下回数が多くなっていた。この失敗の発生原因を調べたところ、物体を離すときに、意図しない物体の移動が生じていた。これは、低出力の力覚提示装置で共通に発生する、指先が物体に深く侵入すること起因する現象であり、この意図しない物体の運動を軽減する方法の検討が必要である。また、この意図しない物体移動は、実験時に、自身の動作と VR 空間における動作の不一致を感じさせると、複数の被験者から報告があった。改善方法としては、例えば、物体を離す動作を検出し、粘性要素を増大させて把持力を相殺し仮想指の離脱を早める[15]などの方法が考えられ、離し動作の支援により、さらに把持設置作業の操作性が向上するものと期待される。

力変化強調法と接触状態提示法を比較すると、把持作業時の侵入量や把持時間に大きな違いはないが、設置時のプロキシ-指先最大距離と設置時間は、接触状態提示法が有意に小さい結果となった。すなわち、指先プロキシと物体が干渉した時には、VC にもとづく力変化強調法は遅延のない状態提示法と同等の作業支援効果を有するが、把持物体が他の物体と干渉する二次干渉発生時には、両者に差があることを示唆するものと考えられる。この理由の一つは、2 章で述べたように、VC にもとづく力変化強調法は、把持物体の質量を補償するために弾性要素が延びているため、二次干渉時には、その延びが解消されるまで提示力が減少するため、強調によっても遅延が十分に軽減されなかったことによると考えられる。

ここで、指先と物体が干渉したときの反力と、把持物体が他の物体と二次干渉した時の反力の発生機構を考える。図 14 のように、VC は計測された指先とシミュレータ内の指先プロキシの位置の差にもとづいて反力を算出する。プロキシが把持対象物体と干渉した時には、プロキシは物体内に侵入できないので、把持物体から受ける干渉力によって急減速する。しかし、提示力は指とプロキシの距離によって発生し、実指の速度は有限であるため、VC の値が小さいと提示力は徐々に増加する。

同様に、把持物体が他の物体と干渉した時にも、物体間の干渉力によってプロキシと把持物体は急減速されるが、提示力は、プロキシと指先の距離に応じて徐々に増加する。すなわち、物体の干渉は、プロキシの減速と VC を介して反力に反映される。この2段階の間接的な反力への反映が、非接地型力覚提示装置と VC を組み合わせた環境における、干渉力認知遅延の原因と言える。

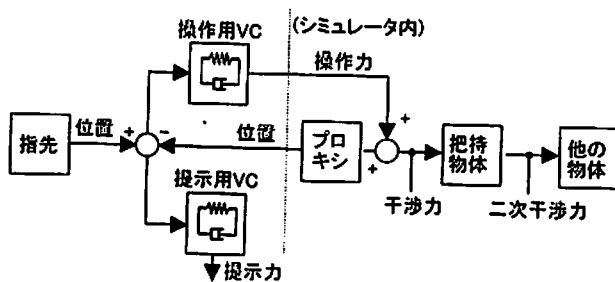


図14 VCを用いた力覚提示系における物体に作用する干渉力とユーザに提示される反力の関係

Fig.14 Relationship among finger motion, movement of proxy and objects, collision forces and displayed force.

この問題の解決方法として最も単純な方法は、VCの値を大きくすることであり、剛性の高い接地型力覚提示装置と併用する場合には、大きな問題なく適用できる。もう一つの方法は、シミュレータ内で把持物体からプロキシに作用する力を、ユーザに力覚提示する方法である。しかし、プロキシに作用する拘束力は、解析法とペナルティ法のいずれにおいても、物体の侵入を解消するための力であり、シミュレーション安定化のための弾性の影響などもあり、必ずしも正確な干渉力を与えるとは限らない。また、干渉時の拘束力はプロキシの質量に依存するため、適切な干渉力を得るためには、プロキシの質量を適度な大きさに設定する必要がある。しかし、プロキシ質量の増大は、操作物体への過剰な操作力につながる可能性も増大させる。例えば、プロキシに作用する力を近似的に算出し[16]、VCで算出した提示力に重畳するなど、遅延のない干渉の強調方法の検討が今後の課題である。

7 まとめ

本研究では、非接地型指先反力提示装置とVCを組み合わせた力覚提示システムにおいて生じる、把持や干渉の認知遅れに対する、力覚強調の作業支援効果を実験的に検討した。その結果、力覚の強調によって作業効率が改善する可能性があることと、VCにもとづく方法のみでは干渉の提示遅れの完全な解消は困難であることを明らかにした。

今後の課題は、干渉の提示遅れを軽減する反力計算方法の検討と、物体離し動作の支援による、より操作性の高い物体把持操作環境の実現である。

(2010年7月30日)

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] ソムサック, 山田, 長谷川, 小池, 佐藤: 力覚提示を伴う仮想物体の両手多指操作環境の開発; 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.6, pp.1140-1148, 2001
- [2] 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
- [3] 中村, 福井: 携帯型感覚情報通信における可触化技術の開発動向〜非ベース型触力覚インターフェース'GyroCube'について〜; バイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.2, pp.90-94, 2007
- [4] 雨宮, 安藤, 前田: 偏加速度周期運動による把持型方向誘導デバイスの開発; 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集, pp.215-218, 2004
- [5] 横田, 昆陽, 前野, 田所: 低周波振動刺激を用いた圧覚ディスプレイの開発; 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会論文集, pp.382-385, 2006
- [6] 稲葉, 藤田: 指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.98-102, 2007
- [7] 南澤, 深町, 梶本, 川上, 舘: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1, pp.15-23, 2008
- [8] D. Baraff: Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies; Computer Graphics, Vol. 23, No.3, pp.223-232, 1989
- [9] R. Smith: Open Dynamics Engine: <http://www.ode.org/ode.html>
- [10] M. Moore, J. Wilhelms: Collision Detection and Response for Computer Animation; Computer Graphics, Vol. 22, No.4, pp.289-298, 1988
- [11] E. J. Colgate, M. C. Stanley, M. J. Brown: Issues in the Haptic Display of Tool Use; Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol.5, pp.140-145, 1995
- [12] D. C. Ruspini, K. Kolarov, O. Khatib: The haptic display of complex graphical environments; Proc. SIGGRAPH 97, pp.345-352, 1997
- [13] Ikumi Susa, Yuto Ikeda, Takashi Tokizaki, Hironori Mitake, Makoto Sato, Shoichi Hasegawa: Perception-Based High-Definition Haptic Rendering; SIGGRAPH 2008 new tech demos, 2008 8 pp.32
- [14] 稲葉, 藤田: 擬似反力提示機能を有する仮想物体操作システムの構築; 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文集, pp.73-76, 2007
- [15] 木暮, 鎌田, 藤田: バーチャルカップリングの動的制御による物体設置操作支援; 日本バーチャルリアリティ学会第14回大会論文集, CD-ROM, 2009
- [16] D. Constantinescu, S. E. Salcudean, E. A. Croft: Haptic Rendering of Rigid Contacts using Impulsive and Penalty Forces; IEEE Trans. Robotics, Vol.21, No.3, pp. 309-323, 2005

[著者紹介]

鎌田 勝寛 (学生会員)



2009 年東京農工大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学院博士前期課程情報工学専攻在学中。仮想空間における物体操作のための、簡易力覚提示システムを用いた効果的な力覚提示の研究に従事。

稲葉 豪 (非会員)



2008 年東京農工大学大学院工学府情報工学専攻修了。在学中は、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仮想物体操作システムの開発の研究に従事 (工学修士)。

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、共有仮想空間コミュニケーションなど、人と共生する情報システムの研究に従事。力触覚の提示と計算研

究委員会委員長 (工学博士)。