

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19997

研究課題名(和文)全身姿勢の補正による擬似触力覚提示手法の研究

研究課題名(英文)Presenting Pseudo-haptic feedback by changing the posture of a full-body avatar

研究代表者

廣瀬 通孝(Hirose, Michitaka)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：40156716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：物体と触れる指の姿勢に補正を加えた映像を提示することで、視触覚間相互作用を誘発し、実際に触れている物とは異なる触力覚を提示できる。一方で、強い擬似触力覚提示を狙って深部感覚と視覚のズレを大きくすると身体所有感の喪失がおき、擬似触力覚提示効果の喪失が起こる。この解決のために本研究では、指先などの物体と身体が接触する身体部分の姿勢だけでなく、全身の身体姿勢の見えに適切な補正を加えることで、複雑な触力覚提示装置を用いることなく自由空間で任意の身体部位へ擬似触力覚提示が可能な新規手法を提案した。この手法を実際に構築し、基礎評価と応用評価を通じて、その性能や適用限界を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は視触覚間相互作用による擬似触力覚提示で扱える触力覚の強度範囲を拡張し、また全身の任意の位置へと提示位置を拡張することができた。この成果は、擬似触力覚提示手法を更なる実用へと近づけ、現状の触力覚提示の制約や限界を打破する。特にVRの社会展開が進められている現在、特殊なセットアップを必要とせず視聴覚のみならず触覚をも提示可能にする本研究の成果は、VRを活用した訓練の効果等を向上させる可能性がある。また、身体所有感と擬似触力覚提示の関係性を探索した成果は、多感覚統合と身体との関係性およびその相互作用のメカニズムの解明にも寄与する成果であり、認知科学研究の進展にも意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：Presenting the image in which the posture of the fingers touching the object are corrected induces the visuo-haptic interaction, and enables us to present a haptic sensation different from that of an object actually touched. On the other hand, when the gap between the proprioceptive sensation and vision is too large, this pseudo-haptic effect as well as body ownership will be disappeared. To solve this problem, we focused not only on the posture of body parts in contact with objects such as fingertips, but also on the posture of whole body parts to be modified for presenting pseudo-haptics. We proposed a novel method for presenting pseudo-haptic sensations to arbitrary body parts in a free space without using a complex haptic interfaces. We evaluated the performance of the method and its application, and clarified the effectiveness and limitations.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：Pseudo-haptics バーチャルリアリティ 触力覚提示 アバタ 姿勢

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来、バーチャルな物体を把持・操作する感覚を提示するために、機械的な機構によって物理的に触力覚を生起させる手法が用いられてきた。しかし、それらはリンクやワイヤ等により自由度が限られる、複雑な装置によりコストがかかるといった問題がある。他方、VR分野では、VR世界でのユーザの身体であるアバタの見た目を変えることでバーチャル物体操作時に擬似的な触力覚を提示できることが示されてきた[1]。申請者らも、視触覚間相互作用を活用し、物体と触れる指の姿勢に補正を加えた映像を提示することで、実際に触っている物とは異なる物体形状や材質感などの複雑な触知覚を提示できることを示している[2]。

こうした手法では、実際の指先位置と視覚提示する指先位置を大きくずらすほど大きな擬似触力覚を提示できる。他方、深部感覚と視覚の齟齬が一定の範囲を超えると違和感が生じ、アバタへの身体所有感が失われる。身体所有感は、多感覚統合を促進する効果を持つと同時に、アバタを自らの身体と同様に操作することを可能にし、アバタの操作性を担保する役割を持つ。そのため、申請者らのこれまでの研究では、強い擬似触力覚提示を狙って深部感覚と視覚のズレを大きくすると、身体所有感の喪失がおき、そのために多感覚統合の結果起こる擬似触力覚提示効果の喪失と、操作性の低下の双方が起こることが経験的に明らかになっている。

この問題を解決し、身体所有感を維持したまま身体姿勢に補正を加えられる範囲を増大させることで、強い擬似触力覚提示と高い操作性の両立を可能にする手法の着想に至った。申請者らの身体所有感に関する研究 [3]では、指先位置の移動量を増幅させる際に、指の第一関節の移動量だけを変えるのではなく、指の複数の関節角度に変化を与えて身体形状を変化させると、動きを増幅させても身体所有感を維持できることを示唆した。これは、個々の関節で齟齬を生じない範囲での姿勢操作を複数の関節に加えた場合には、身体所有感が維持できると同時に、末端でその効果が積算的に現れたためと考えられる。本研究ではこの知見を応用することで、身体所有感を維持しつつ、強い擬似触力覚提示を全身の任意位置に提示可能な手法の実現を目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、指先などの物体と身体が接触する身体パーツの姿勢だけでなく、全身の身体姿勢の見えに適切な補正を加えることで、複雑な触力覚提示装置を用いることなく自由空間で任意の身体部位への擬似触力覚提示が可能な新規手法を実現することである。深部感覚と視覚のズレを大きくするほど提示する擬似触力覚を大きくできる一方、ズレが一定の範囲を超えると身体所有感が喪失され、擬似触力覚提示効果が消失するという矛盾を、体全体にズレを分散させるというアイデアによって解決することで視触覚間相互作用による擬似触力覚提示を強く生起させる手法を明らかにするとともに、全身への擬似触力覚提示をも可能にすることを旨とする。

3. 研究の方法

上記を達成するために、(1)身体姿勢の補正による擬似触力覚提示のための視覚フィードバック生成アルゴリズムを確立し、この(2)身体姿勢補正手法による擬似触力覚提示効果と身体所有感への影響を定量的に評価する。その上で、基本アルゴリズムを拡張して(3)VR環境で全身に擬似触力覚を提示可能にするシステムを構築し、応用における評価をおこなう。

(1)身体姿勢の補正による擬似触力覚提示のための視覚フィードバック生成アルゴリズム確立では、指先などの物体と身体が接触する身体パーツ(効果位置)における身体の見えを変化させるだけでなく、手首、肘、肩など、効果位置に連なるリンク系の各関節について、それぞれで齟齬を生じ得ない範囲でのずれを作り出すことで、身体所有感を維持したまま擬似触力覚提示位置での深部感覚と視覚のずれを大きくする視覚フィードバック生成アルゴリズムを実現する。

(2)身体姿勢補正手法によって提示される擬似触力覚および身体所有感の変化の定量的評価では、(1)で構築したアルゴリズムを用い、各関節において身体所有感を維持できる範囲での姿勢補正を複数の関節に対して同時に加えた場合に、指先で物体を操作する際に感じられる擬似触力覚を強めることが可能かを、心理物理評価と筋電や皮膚電気抵抗等の生理評価を用いて明らかにする。身体の複数の関節に同時に姿勢補正を加えた場合の相乗効果、副次効果を見るための擬似触力覚と身体所有感の定量評価や、身体部位が視野のどの範囲にどの程度見えている際に効果が生じうるか等を検証し、提案手法の性能評価と手法の効率化・精緻化に必要な知見を蓄積する。

(3)VR環境での全身への擬似触力覚提示システムの構築と応用では、それまでに構築したアルゴリズムを拡張し、VR空間において全身動作をするユーザに対して、指先だけでなく全身の任意の位置において擬似触力覚を提示可能なシステムを構築する。このアルゴリズムを利用した擬似触力覚提示効果の基礎評価に加えて、VR環境でのアプリケーションにおける応用評価をおこない、基礎と応用の両面から全身への擬似触力覚提示の効果と有用性を定量的に評価する。

4. 研究成果

(1)身体姿勢の補正による擬似触力覚提示のための視覚フィードバック生成アルゴリズム確立

提案アルゴリズムでは、右腕の移動量に対して、手首関節、もしくは肘関節の角度が補正さ

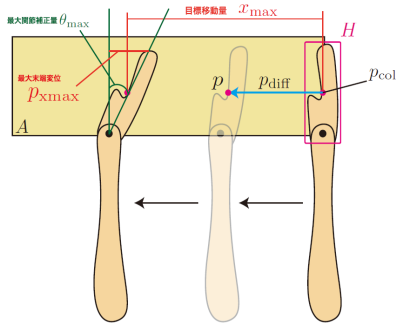


図1 移動量と関節角度補正量

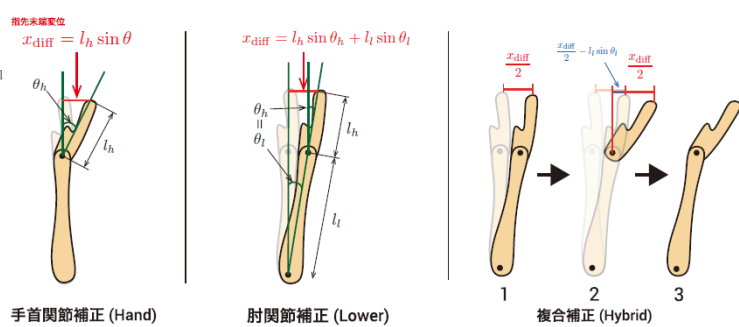


図2 3つの関節角度補正手法

れ、右腕が自身の動きに対して遅れて動くように見せることで、VR空間内で疑似抵抗感を提示するシステムを実現する。座標系は、左手系で記述する。システムは、身体補正判定部と、関節角度補正部に分けられる。

身体補正判定部では、疑似抵抗感を生じさせるタイミングや、疑似抵抗感が生じる身体の位置を管理する。図1のようにアバタの右手部分に衝突判定エリア H を、疑似抵抗感を生じさせたい空間に疑似抵抗感生起エリア A を設ける。いま、アバタの右腕の H が A の右側から左方向に動く際に、左側から右方向に疑似的な抵抗感を生じさせる状況を想定する。図1のように右手の衝突判定エリア H のワールド座標系での位置を p とし、 H が A に衝突した際の、ワールド座標系での H の位置を p_{col} とする。ここから更に H が左側に動き、 A に入り込んでいくにつれて疑似抵抗感を感じられるようにする。衝突後の移動量ベクトル p_{diff} は、 $p_{diff} = p - p_{col}$ (1) で与えられる。今後、 x 軸方向の腕の運動を考え、角度補正は y 軸方向(紙面奥から手前方向)のみに回転させるものとする。手首関節と肘関節を変調した結果生じる実際の身体とのずれの指標として、実際の手先位置と、バーチャルの手先位置の差、すなわち末端変位を基準とした。 x 軸正方向の末端変位は x_{diff} で表す。

関節角度の補正手法としては、疑似抵抗感を知覚させる手法としてよく用いられる、ユーザの動作に対して視覚的な変位を遅らせる手法を用いた。身体補正判定部で得られた移動量 p_{diff} の左右方向の成分 p_{diffx} に比例する変調を与えた。すなわち、エリア A と H の衝突後に手を更に動かすと、それに応じて線形に関節角度が補正される仕組みとした。比例定数 a は腕を動かした量に対して角度補正する量の度合いを定める値であり、腕の目標移動量での指先末端変位量が定まることで決定される。また過度な角度補正を与えないために上限値 θ_{max} を与える。すなわち、角度変調量 θ は、角度補正の比例定数 a と、角度補正量の上限値 θ_{max} をパラメータとして $\theta(\theta_{max}, a) = \min(|ap_{diffx}|, \theta_{max})$ (2) で与えられる。バーチャルな手の位置 p が目標移動量 p_{xmax} に達したときに、補正角度が最大角度補正 θ_{max} に達するように a を与えると、 $\theta(\theta_{max}, a) = \min(\theta_{max}/p_{xmax} |p_{diffx}|, \theta_{max})$ (3) となる。目標移動量に達したときの末端変位量は x_{max} で表す(図1)。

手首関節角度補正では、前腕(lower arm) と手(hand)をつなぐ手首関節を移動量に伴って変調させ、手の角度を変える(図2左)。変調角は θ_h で表され、この時の本来の末端位置との変位は $x_{diff} = l_h \sin \theta_h$ (4) で与えられる。

肘関節角度補正では、上腕(upper arm) と前腕(lower arm) をつなぐ肘関節を、移動量に伴って変調させ、肘から手先までの角度を変える(図2中央)。変調角は θ_l, θ_h で表され、この時の本来の末端位置との変位は $x_{diff} = l_h \sin \theta_h + l_l \sin \theta_l$ ($\theta_h = \theta_l$) (5) で与えられる。

末端変位が同じ条件では、手首関節角度補正の方が肘関節角度補正より角度変化量が大きい。ため、疑似抵抗感が強く生じると考えられる。一方で肘関節角度補正では角度変化量が小さく、より自分の実際の身体姿勢に近い姿勢であるようにフィードバックされるため、違和感が少ないと考えられる。この2つの利点を複合する目的で、手首・肘関節角度補正:複合補正を提案する。手首関節角度と肘関節角度が同時に補正し、手首・肘関節の相対的な角度差を減らすことによって、違和感を低減させる。本提案における複合補正では、肘関節角度と手首関節角度の変調量のそれぞれに起因する腕の末端変位が 1:1 となる変調量とした。まず、肘関節角度補正によって、目的の末端変位の半分である $x_{diff}/2$ の変位量を与え、その後、残りの変位量 $x_{diff}/2$ を手首関節角度の補正量で補う手法を取った。肘関節角度補正による末端変位量は $x_{diff}/2 = (l_l + l_h) \sin \theta_l$ (6) で与え(図2右の1)、その後手首関節の x 座標からの変調量 $x_{diff} - l_l \sin \theta_l$ を θ_h の変調で補うため(図2右の2)、手首関節による末端変位量は $x_{diff} - l_l \sin \theta_l = l_h \sin \theta_h$ (7) となる。これで図2右の3のように、手首関節と肘関節が同時に補正される。式(6), (7)より目標移動量における末端変位量 $x_{diff} = x_{max}$ について、各関節の θ_{max} を求めることができる。

(2)身体姿勢補正手法によって提示される疑似触力覚および身体所有感の変化の定量的評価

提案アルゴリズムを用いて、関節補正量を肘と手首に分散させた場合の身体補正による疑似触力覚の知覚を比較する実験(感覚強度測定実験)、それぞれの条件間の違和感・身体所有感指標を測定する実験(違和感・身体所有感比較実験)の2つを行った。

①実験 1: 感覚強度測定実験

実験概要: 実験 1 では手首関節補正と肘関節補正, 複合関節補正の 3 つの角度補正による疑似抵抗感の感覚強度を恒常法によって求める実験を行った. システムはヘッドマウントディスプレイ Oculus CV1 とリモートコントローラの Oculus Remote, 手腕の位置をセンシングするための Optitrack モーションキャプチャシステムから構成される. 実験用 VR 空間には, 机の上に腕を動かし始める地点を示すスタートラインの赤い線と, 青い筒状の物体を配置し, 被験者には青い筒を「送風機」と説明し, 「強力な風が吹き出している」設定である旨を伝えた. 送風機からは微小なパーティクルが 1[m/s] の速度で吹き出しており, 送風機の風口の前に触覚提示エリア A を設けてある. 腕アバタは白いヒューマノイドロボットの腕モデルを使用し, モーションキャプチャシステムで計測したユーザの実際の腕の動きから計算される動きを反映した.

実験参加者は, 2 回連続で右腕を往復する. 机の上の赤いラインから開始して, VR 空間内で手の位置が 350[mm] に達した時点で一度ビープ音を鳴らす. ビープ音が鳴ったのを聞いたらそれ以上手を進めるのを止め, 手を赤いラインの外側まで戻す. ラインの外側まで戻すと再びビープ音が鳴らされる. 赤いラインからビープ音が鳴るまでの距離は Unity 空間上で 350[mm] であり, Unity による VR 空間と現実空間のスケールは等しい. 右手を動かし始めてビープ音になる箇所まで到達するときの手腕の関節角度補正量が刺激強度 $s[\text{deg}]$ となるように, 第 3 章に述べた最大角度補正量 $\theta_{\max} = s$ を与え, 目標移動量 $p_{\max} = 350[\text{mm}]$ を与えた. 被験者には赤いラインと次にビープ音になる位置までの間を, 右腕で往復運動をさせた. 2 回腕を往復すると, VR 空間前方にアンケートダイアログが出現する. アンケートの内容は「どちらのほうが抵抗感を感じましたか?」という質問に対して選択肢を「前のほう」「後のほう」と提示した. アンケートには, ダイアログの選択肢に視線を合わせた状態で Oculus Remote のボタンを押すことで回答できるようにした. 腕を 2 往復してアンケートに回答するまでを 1 セッションとする.

身体姿勢の補正方法は, 手首関節角度の変調と, 肘関節角度の変調の 3 条件で, 比較刺激は最大末端変位量 x_{\max} が 0[mm], 25[mm], 50[mm], 75[mm], 100[mm]となるような関節角度補正量を与えた. 比較刺激を $s = 0; 25; 50; 75; 100$ として, 3 条件での各比較刺激に対する回答率を求めた. 各比較刺激は 12 回ずつ提示され, タスクは合計 60 セッションからなる.

実験結果: 一般公募した 10 代から 30 代までの被験者 18 名(うち男性 14 名, 女性 4 名)のデータに対して, 各実験参加者の比較刺激に関する回答確率にもとづいてフィッティングした曲線の絶対閾(回答確率 75%となる末端変位量)を, 参加者内分散分析で評価した結果を図 3 に示す. 分散分析の結果, 条件間での有意差が認められ($F(2, 39) = 11.245, p < 0.01, \eta^2 = 0.366$), 多重比較(Holm 法)の結果, 手首関節補正条件と肘関節角度補正条件, および複合関節補正条件と肘関節角度補正条件間で有意差が認められた.

感覚強度測定実験では, 同じ関節角度変位を与えても関節補正手法ごとに主観的な抵抗感の強度が異なることが示された. また自由記述より, 身体姿勢の補正によって風による抵抗感を知覚させることが可能であること, 手首・肘関節の変調が抵抗感に帰属されていたことが明らかとなった.

②実験 2: 違和感・身体所有感測定実験

実験概要: 実験 2 では, 実験 1 と同様の力場環境下において, 関節角度補正による疑似抵抗感システムによって同一の疑似抵抗感を与えた際に, 生じる違和感と身体所有感の違いを 3 条件間で比較する. ここでは, 実験 1 の感覚強度測定実験によって得た結果をもとに, 3 補正手法間で主観的に同じ疑似抵抗感を与えた際の違和感・身体所有感を比較した.

被験者に与えられるタスクは, VR 空間に置いてある送風機から吹き出す強い風にむかって, 右腕を押し出すように繰り返し動かし, その作業に関してアンケートに回答するものである. 被験者は, 10 回連続で右腕を往復した. 机の上の赤いラインから開始して, VR 空間内で手の位置が 35cm に達した時点で一度ビープ音を鳴らす. ビープ音が鳴ったのを聞いたらそれ以上手を進めるのを止め, 手を赤いラインの外側まで戻す. ラインの外側まで戻すと再びビープ音が鳴らされる. 被験者には実験 1 と同様, 赤いラインと次にビープ音になるまでの間を右腕で往復運動をさせた. その後実験参加者は以下の質問に 7 段階評価((1 全く…- 7 強く…のリッカート 7 段階尺度)で答える. 右腕を 10 往復させ, アンケートに答えるまでを 1 セッションとした.

- Q1. 手首から先(手)に抵抗感を感じましたか?
- Q2. 手首より手前・肘より先(下腕)に抵抗感を感じましたか?
- Q3. 手・下腕全体に抵抗感を感じましたか?
- Q4. バーチャルの手・腕は実際の手の動きと連動しているように感じましたか?
- Q5. バーチャルの手・腕が自分自身のもののように感じられましたか?

Q1 から Q3 の回答を関節補正手法の 3 条件間で比較することで, 疑似抵抗感を感じる部位の違いが現れるかを調査した. Q4 で主に違和感を, Q5 で身体所有感を 3 条件間で比較した.

実験 1 で求めた感覚強度曲線から 75%弁別閾と 87.5%弁別閾の最大末端変位量を与える角度補正量を主観的な抵抗感の等しい点として提示することとした. しかし, Pseudo-haptics は動的に変化量を変えることでその変化に応じて疑似触力覚が生起する現象であるため, 実験 1 でおこなった感覚強度測定実験のようにパラメータ間の比較を繰り返すと知覚が鋭敏になる可能性がある. 実験 2 のような, 刺激無し条件と連続的に比較できない実験系では, 閾値に近い角度補正を与えても抵抗感が十分に知覚されない可能性も考えられる. よって, 多くの被験者が抵抗感

を感じられると考えられる、十分に大きな末端変位量を与えることとし、最大末端変位量が 50[mm], 80[mm], 100[mm] となる角度補正における質問の回答結果も比較することとした。

実験結果：一般公募した 10 代から 40 代までの被験者 13 名(うち男性 10 名, 女性 3 名) のデータに対して得た結果をまとめる(図 4)。検定には Kruskal-Wallis 検定を用いた。感覚強度の 75% 閾, 感覚強度の 87.5% 閾における関節角度補正 3 条件間で Q4, Q5 の回答に有意差はみられなかった。末端変位が 50[mm], 末端変位が 80[mm] となる補正における関節角度補正 3 条件間で Q4, Q5 の回答に有意差はなかった。末端変位が 100[mm] となる補正における関節角度補正 3 条件間で Q4, Q5 の回答に有意差($p < 0.05$)が見られた。多重比較(Holm 法)を行った結果, Q4 では手首関節補正条件と肘関節補正条件, 手首関節補正条件と複合関節補正条件に有意差($p < 0.05$)がみられた。Q5 では手首関節補正条件と肘関節補正条件に有意傾向($p < 0.10$)が見られた。

実験 2 では, 実験 1 で求めた主観的抵抗感の等価な点においては, 複合補正手法が他の補正手法に対して身体所有感が増したという結果を得られなかった。感覚強度の 75% 閾・87.5% 閾における関節角度補正条件の Q1 から Q3 の回答結果から鑑みて, 実験参加者の多くはこのタスクにおいて疑似抵抗感を強く感じられなかったことが原因であったと考えられる。実験 1 の恒常法によるタスクでは, 補正なしの標準刺激と補正ありの比較刺激を連続して与えて回答させる手法であったため, 抵抗感の絶対閾が小さく推定され, 本タスクのように単一で刺激を与えた際には角度補正が知覚されなかった可能性がある。

一方で, 単一刺激でも抵抗感を気付かせる事のできるほど補正量が十分に大きい変位量では, 3 条件間で有意な差が見られ, 更に複合補正条件の違和感指標において, 肘関節角度補正条件と同等に違和感が低いことが示された。身体所有感に関しては肘関節補正条件と手首関節補正条件に有意傾向が見られたが, 複合補正条件との身体所有感指標には有意な差が見られなかった。主観的抵抗感の等価な条件下で 3 手法の比較を行うことはできなかったが, 複合補正手法は末端変位が一定の条件で, かつ疑似抵抗感を感じられたとき, 違和感低減に有効であることが示された。更に自由記述の結果から, 「手首の反りによって抵抗感を感じた」人が多く存在した一方で, 「肘(関節の変形)は気づかなかった」と述べた被験者が一定数いた。

実験 1 より, 複合補正は肘のみの補正と比較して少ない末端変位においても疑似抵抗感を生じさせられ, 実験 2 の違和感指標から, 末端変位量が極端に大きい場合に, 複合補正手法では手首のみの補正手法と比べ, 違和感生起や身体所有感の低減を押しえられることが示された。このことから, 本研究で提案した複合補正手法は, 視覚的な齟齬による違和感を低減しつつ疑似抵抗感を提示するという目的通りの相乗効果を得られたことが示唆された。

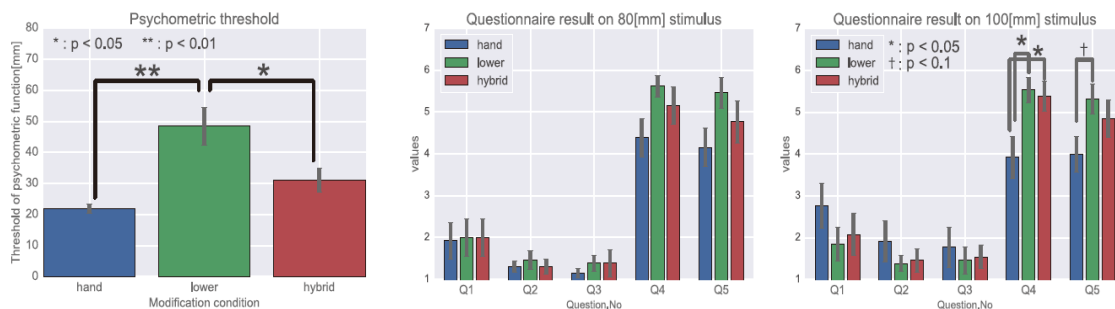


図 3 各関節角度補正手法の絶対閾値 図 4 最大末端変位 80[mm]・100[mm] における回答結果

(3)VR 環境での全身への疑似触力覚提示システムの構築と応用

提案手法の応用として全身への疑似触力覚提示システムの構築と, 触覚を利用したりダイレクテッドウォーキングシステムへの応用をおこなった。全身への疑似触力覚提示システムとしては, VR 空間で把持した物体の質量に応じて, それを動かす際の身体部位の変位量を変化させることで疑似触力覚を提示するシステムを構築し, 国際会議 World Haptics 他で展示をおこなった。また後者としては, 実空間にあるものを触りながら移動する際に, ものと身体の接触点の位置と視点位置を独立に操作し, その結果から各関節の適切な変位量を計算して各々反映する手法を実現した。この手法を用い, 実際には四角形のテーブルを触りながら周囲を探索しているにもかかわらず三角形や五角形のテーブルに触れているように感じさせることが可能な Magic Table を開発し, SIGGRAPH ASIA 他で展示をおこなった。これらの評価を通じて, VR 空間における触覚提示手法としての提案システムの有用性を示している。

参考文献

[1] DAG. Jauregui et al. Toward" Pseudo-Haptic Avatars: Modifying the Visual Animation of Self- Avatar Can Simulate the Perception of Weight Lifting. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 20.4, pp.654-661, 2014.

[2] Y. Ban et al.: Modifying Perceived Size of a Handled Object through Hand Image Deformation, Presence 22(3):255-270,2013.

[3] N.Ogawa et al. Metamorphosis Hand: Interactive Experience of Embodying Virtually Transformed Hands, VRIC 2016, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 小川 奈美、鳴海 拓志、伴 祐樹、櫻井 翔、谷川 智洋、廣瀬 通孝	4. 巻 23
2. 論文標題 えくす手：バーチャルな拡張身体を用いたピアノとのインタラクション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 91～101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.18974/tvrsj.23.3_91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 橋本 健、鳴海 拓志、長尾 涼平、谷川 智洋、廣瀬 通孝	4. 巻 23
2. 論文標題 タッチスクリーンでの擬似触力覚提示による注意誘導	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 139～148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.18974/tvrsj.23.3_139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 鳴海拓志	4. 巻 53
2. 論文標題 クロスモーダル設計による感性価値創造	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 644-652
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 鳴海拓志	4. 巻 Vol.72, No.1
2. 論文標題 クロスモーダル知覚のインタフェース応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 2-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 茂山丈太郎, 小川奈美, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝	4. 巻 Vol.22, No.3
2. 論文標題 アバタの関節角補正による疑似抵抗感提示	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 369-378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.18974/tvrsj.22.3_369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鳴海拓志	4. 巻 Vol.61 No.11
2. 論文標題 Pseudo-haptics応用インタフェースの展望: 疑似触力覚提示からその先へ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム制御情報学会誌	6. 最初と最後の頁 463-468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鳴海拓志	4. 巻 Vol.36 No.1
2. 論文標題 多感覚知覚の工学的応用	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 基礎心理学研究	6. 最初と最後の頁 129-132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.14947/psychono.36.24	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nami Ogawa, Takuji Narumi, Michitaka Hirose	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Avatar Appearance on Detection Thresholds for Remapped Hand Movements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2964758	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計28件（うち招待講演 13件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Nami Ogawa, Takuji Narumi and Michitaka Hirose
2. 発表標題 Virtual Hand Realism Affects Object Size Perception in Body-Based Scaling
3. 学会等名 IEEE VR 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Yohei Yanase, Yuki Ban, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose
2. 発表標題 Visuo-haptic Redirected Walking Using Handrail
3. 学会等名 ICAT-EGVE 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeru Hashimoto, Takuji Narumi, Ryohei Nagao, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose
2. 発表標題 Effect of Pseudo-haptic Feedback on Touchscreens on Visual Memory during Image Browsing
3. 学会等名 Eurohaptics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本啓吾, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝
2. 発表標題 バーチャルハンドの視触覚提示が曲率操作型リダイレクションに与える効果の検討
3. 学会等名 第23回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水谷純也, 長尾涼平, 松本啓吾, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝
2. 発表標題 身体と環境との整合性を考慮した回転量操作型リダイレクションに関する基礎検討
3. 学会等名 第178回HCI・第48回EC合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuji Narumi
2. 発表標題 Cross-modal Interfaces for Multi-sensorial VR and Human Augmentation
3. 学会等名 VRCAI2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nami Ogawa, Takuji Narumi, Michitaka Hirose
2. 発表標題 Object Size Perception in Immersive Virtual Reality: Avatar Realism Affects the Way We Perceive
3. 学会等名 IEEE VR 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuki Yamamoto, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose
2. 発表標題 Adopting the Roll Manipulation for Redirected Walking
3. 学会等名 IEEE VR 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nami Ogawa, Takuji Narumi, Michitaka Hirose
2. 発表標題 Factors and Influences of Body Ownership over Virtual Hands
3. 学会等名 HCI2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jotaro Shigeyama, Nami Ogawa, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose
2. 発表標題 Presenting pseudo-haptic feedback in immersive VR environment by modifying avatar 's joint angle
3. 学会等名 World Haptics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keigo Matsumoto, Takeru Hashimoto, Junya Mizutani, Hibiki Yonahara, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose
2. 発表標題 Magic Table: Deformable Props Using Visuo Haptic Redirection
3. 学会等名 SIGGRAPH ASIA 2017 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuki Yamamoto, Jumpei Shimatani, Isamu Ohashi, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose
2. 発表標題 Mobius Walker: Pitch and Roll Redirected Walking
3. 学会等名 SIGGRAPH ASIA 2017 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eisuke Fujinawa, Shigeo Yoshida, Yuki Koyama, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose
2. 発表標題 Computational Design of Hand-Held VR Controllers Using Haptic Shape Illusion
3. 学会等名 VRST2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 茂山丈太郎, 小川奈美, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝
2. 発表標題 アバタの関節角補正による疑似触力覚提示手法の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会MVE研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 多感覚知覚が作り出すリアリティ
3. 学会等名 第9回多感覚研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 感覚のハッキング
3. 学会等名 KYO-SHITSU #16 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 クロスモーダルが創り出す超現実
3. 学会等名 新潟大学公開講演会 クロスモーダルが創り出す超現実（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 五感に訴えるバーチャルリアリティの新展開
3. 学会等名 印刷興行会商業印刷部会勉強会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 こころと上手につきあっていくためのVR技術
3. 学会等名 科学・技術交流サロン「人の感性を科学する - 認知科学と先端技術の融合にむけて - 」第4回（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 クロスモーダルでつなく道具・からだ・こころ
3. 学会等名 第13回クロスモーダルデザインWS（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 研究20連発 (鳴海拓志)
3. 学会等名 FIT2017 情報理工学系研究科研究100連発 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 今後のゲームデザインに必須な『sense of 』とは何か？
3. 学会等名 CEDEC 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 VR で変える五感と自分
3. 学会等名 デジタルミュージアムフォーラムin函館 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 VRで変える五感と自分
3. 学会等名 第3回こころと身体の学際会議 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 クロスモーダルインタフェースと体験のデザイン
3. 学会等名 第7回AIITイノベーションデザインフォーラム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海拓志
2. 発表標題 バーチャルリアリティが変える身体，心，現実
3. 学会等名 VRは私たちに何をもたらすのか？ 変わりゆく<現実（リアリティ）>と、その社会的インパクトについて（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junya Mizutani, Keigo Matsumoto, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose
2. 発表標題 Estimation of Detection Thresholds for Redirected Turning
3. 学会等名 IEEE VR 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junya Mizutani, Keigo Matsumoto, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose
2. 発表標題 Error Correction in Redirection: Rotational Manipulation for Natural Walking and Control of Walking Paths
3. 学会等名 ICAT-EGVE 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 廣瀬 通孝 監修/東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター 編	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日刊工業新聞社	5. 総ページ数 160
3. 書名 今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしいVRの本 (B&Tブックス)	

1. 著者名 日本視覚学会 編	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 -
3. 書名 図説 視覚の事典	

1. 著者名 鳴海拓志ほか	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 552
3. 書名 VR/AR技術の開発動向と最新応用事例	

1. 著者名 鳴海拓志ほか	4. 発行年 2017年
2. 出版社 S&T出版	5. 総ページ数 653
3. 書名 狙いどおりの触覚・触感をつくる技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	谷川 智洋 (Tanikawa Tomohiro) (80418657)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授 (12601)	
連携研究者	鳴海 拓志 (Narumi Takuji) (70614353)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授 (12601)	