

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：25403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330248

研究課題名(和文)バイラテラル制御による手技工程解析に基づく時系列触知覚パラメータの抽出

研究課題名(英文)An Extraction of Time-series Haptic Perceptual Parameters based on Process Analysis of the Multifingered Manipulation with Bilateral Control

研究代表者

脇田 航(Wakita, Wataru)

広島市立大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：80584094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：熟練者の手技を理解するには、力や質感などの触知覚といった目に見えない情報を分析、可視触化する必要がある。また、よりリアルな触力覚呈示を実現するためには、実世界において物体間で生じる様々な物理現象に基づいて触知覚をモデル化し、リアルタイムに力覚呈示装置を制御する必要がある。ロボティクスの分野においては、多地点間で双方向に触知覚情報を伝送可能なバイラテラル制御が用いられているが、人間の指先で感じる触知覚を計測・再現するには至っていない。そこで本研究では、同一の力覚呈示装置を用いて、バイラテラル制御に基づいて対象物体の硬さや摩擦といった触知覚を推定可能な手法を提案する。

研究成果の概要(英文)：To understand the expert technique of multifingered manipulation, it is necessary to analyze, visualize, and haptialize the invisible information about the haptic perception such as the force and texture. Moreover, to achieve more realistic haptic rendering, it requires the haptic modeling based on the haptic sensing and analyzing of the physical phenomenon which occur between objects in the real world and requires the control of haptic device at real-time. In the field of the robotics, bilateral control is used to transmit the haptic information between multipoint. However, it was difficult to measure and represent the haptic perception with human finger. Therefore, we propose an estimate method of the haptic perception such as the hardness and friction of the target object based on the bilateral control with same 3DOF haptic device.

研究分野：情報学

キーワード：バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

近年、団塊世代の大量退職にともなう技術・技能伝承の問題が年々深刻化している。技術は方法や手段といった科学的裏付けのあるものであり、企業では標準化や自動化が盛んに進められている。一方、技能は技術を使う能力であり、コツやカンといった曖昧な情報のため個人差があり、暗黙知とされてきた。このような技能に関して、厚生労働省では、金属材料製造・加工、製品製造、機械器具組立・修理、染色・紡糸・繊維製造、植木・造園工、飲食物調理、内張・塗装・内装仕上、広告美術工・包装工といった様々な分野における卓越技能者を表彰している。従来、技能は目で見て盗むもの、長年の経験と努力により習得するものとされてきたため、熟練者の技能伝承に関しては、企業では時間やコストの面からあまり進んでいないのが現状である。

このような背景から、熟練者の技能を解明し、技術として標準化・自動化するため、熟練者の動きや生体情報をアーカイブ化し、訓練システムへと応用する研究が急速に進められてきている。前述の卓越技能者表彰制度のような様々な分野において自動化が困難とされている技能の多くは、手道具や手の感覚といった手を使用するものがほとんどである。このため、熟練者の技能を解明し、技術化するためには、触知覚、すなわち、なぞる、押す、つかむ、つまむといった手指の動きや姿勢、リズム、力の加減・方向・分布、対象物の質感等を多面的に計測する必要がある。

触知覚の計測に関する先行研究では、指の腹にセンサを取り付けると感覚が鈍ることから、指の腹にセンサを取り付けず、爪の色や指側面の伸縮状態から手指にかかる力を推定したり、指と対象物の相互作用時における音から対象物の表面粗さやすべり状態を推定する研究が行われている。しかしながら、先行研究ではそれぞれ計測可能な情報が限られており、触知覚の解明に必要な手指の姿勢、接触力、すべり検出、対象物の質感を同時に計測するまでは至っていない。

一方、ロボティクスの分野において、ロボットハンドを制御して物体を安定的につかんだり、道具を操作する研究が盛んに行われており、触力覚センサの小型化が課題となっている。また、ロボットハンドをマスタースレーブ制御し、遠隔地にあるスレーブ側の触力覚センサから得られた情報をマスター側に伝送・再現する研究や、同一の力覚デバイスをバイラテラル制御することにより、遠隔地間の力覚情報を双方向で共有する研究が行われている。しかしながら、これらの研究は発展途上であり、多自由度で手の姿勢、接触力、すべり、対象物の質感情報を同時に伝達・再現、共有するまでは至っておらず、また、技能伝承に必要な作業工程における手指の動きやリズム、力加減、すべり、対象物の

質感の記録や再現については考慮されていない。

そこで、手技工程における手の動きや姿勢・リズム、力の加減・方向、すべり、対象物の形状や質感といった時系列触知覚パラメータを同時に抽出可能なシステムを実現し、抽出した情報を再生・3次元可視化できれば、技能解明、および、技能伝承のための大きな手掛かりとなる。

2. 研究の目的

本研究では、上記技術課題を達成するため、1) 指の第一関節を模し、指の腹と対象物との接触力(力の大きさ、方向)を計測可能な指型の計測デバイスを開発し、2) 1)の計測デバイスを6自由度でバイラテラル制御(マスター側:操作者の指、スレーブ側:指型の計測デバイス)し、操作者が接触力および対象物の質感を感じながら対象物に対してなぞり操作および押し操作を行ったときの手指の状態、指先の位置・姿勢・接触力をリアルタイムに計測し、同時に、接触力からすべり方向を推定し、また、デバイス間の指先位置の差から対象物の形状や質感を推定し、3) 抽出したこれらの時系列触知覚パラメータを仮想空間内で再生・3次元可視化し、これらの有効性を評価する。

3. 研究の方法

本研究では、バイラテラル制御の特性に基づき、熟練者の手技工程の解析を行い、時系列触知覚パラメータを抽出、再生・可視化する。まず、I. 人工指による接触力計測システムの開発では、人の第一関節を模し、接触力を3方向で取得可能な指型の計測システムを開発する。II. 手技工程解析に基づく時系列触知覚パラメータの抽出では、1) バイラテラル制御に基づき、人工指を取り付けた3自由度の力覚呈示デバイスを自動制御し、手指の位置および対象物との接触力を計測し、目標位置と実際の位置の差から接触力やすべり方向、対象物の形状や質感を推定・触知覚パラメータ化する。III. 時系列触知覚パラメータの再生・可視化では、抽出した時系列触知覚パラメータを可視化する。

I. 指型の力計測システムの開発:

まず、人の指先の第一関節を模した人工指を作成する。皮膚の部分は人肌ゲルを用いて指を模る。次に、力覚呈示装置をバイラテラル制御し、一方に人工指を取り付け、実物体を設置し、もう一方を操作することで間接的に触知覚を操作側に伝送する。このときの両者の位置の差から指先にかかる力を推定可能にする。次に、人工指を取り付けた1台の力覚呈示装置のみで同様に接触力を推定可能にする。

II. バイラテラル制御による手技工程の時系列触知覚パラメータの抽出:

開発した人工指による接触力を計測可能なシステムを用いて、指先位置を自動制御する。対象物に対して、なぞり、押し操作を行ったときの指の動きや姿勢・リズム、力の加減・方向、すべり、対象物の形状や質感といった触知覚パラメータを抽出し、時系列に記録する。

III. 時系列触知覚パラメータの再生・可視化：

抽出した時系列触知覚パラメータを可視化するためのシステム開発を行う。このために、人体動作をモーションキャプチャし、キャプチャした時系列データをリアルタイムに仮想空間内でアニメーション可能にする。また、時系列に記録した手指の状態、接触力、対象物の形状や質感を可視化する。

4. 研究成果

I. 指型の力計測デバイスの開発：

・人工指の作成

人工指の作成については、試行錯誤の結果、型取り剤はモメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社の型取り用縮合型液状シリコンゴム、シロブレン RTV-2K 1406/R-14 を用い、皮膚の作成にはエクシールコーポレーションの人肌ゲル（硬度 15）を用いた。また、骨と筋の代わりにサンコーテクノ株式会社のオールプラグ MG-6×30 にセロハンテープを巻き付けたものを針金などで型に浮かせて配置し、人肌ゲルを型に流し込むことで人工指を作成した。また、固まった人肌ゲルは若干粘着力があるため、ベビーパウダーを塗布することで、人の指腹に近い質感に近づけた。この結果、指紋まで再現可能なレベルで人工指を作成可能となった。この人工指を 45 mm の空カプセルに穴をあけてネジで固定し、片方の Novint Falcon のグリップに取り付ける（図 1）。

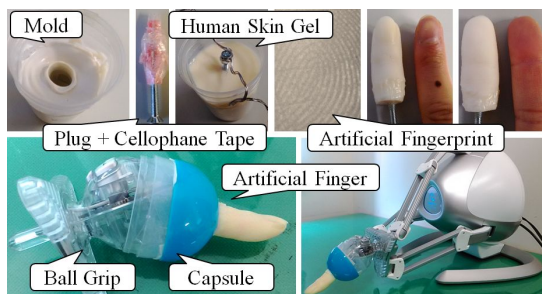


図 1. 人工指の作成

・バイラテラル制御による力推定

硬軟感や摩擦感を推定するためには、指先にどの程度の力がかかっているかを調べる必要がある。しかしながら、Novint Falcon の制御用 API では現在のグリップの三次元位置情報しか得ることができないため、1 台だけだと人工指の中に力センサを埋め込むなどしない限り、力情報を得ることができない。そこで本研究では、1 台の力覚呈示装置

のグリップ位置を自動制御する際の目標位置の代わりとして、2 台の Novint Falcon を対称型でバイラテラル制御し、操作側におもりを吊り下げて強制的にグリップ位置を変化させ、追従側にいくつか材料を置いたときの操作側と追従側のグリップ位置の変化について検証を行った。図 2 におもりを 250 g、500 g と変化させたときの操作側と追従側の位置差を示す。縦軸が両者の位置差で、横軸が時間である。対象物体が剛体であろうが柔軟物体であろうが、操作側に 250 g のおもりを吊るしてしばらく経つと、おおよそ 5 mm の位置差が開き、500 g だとおおよそ 10 mm の位置差が開くことがわかった。

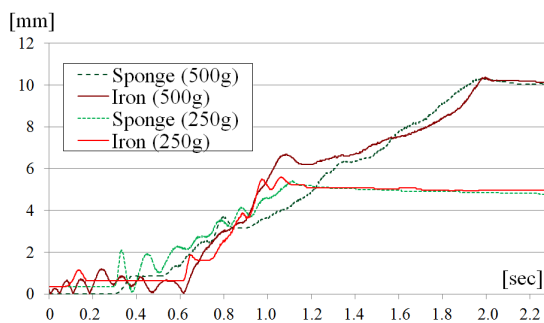


図 2. バイラテラル制御による力推定のための予備実験

・単一力覚デバイスによる力推定

1 台の Novint Falcon のグリップ位置をキーボードで制御したときに、目標位置と現在のグリップ位置の差と指先にかかる力の関係がバイラテラル制御時と同じ結果になるか検証を行った。計りに対して指先を徐々に下に下げていったときの重さを計測し、250 g と 500 g になったときにしばらく指先の動きを止め、目標位置との差を調べた。図 3 に力と両者の位置差を計測した結果を示す。縦軸が両者の位置差で、横軸が時間である。第一予備実験のバイラテラル制御時と同様に、250 g の力がかかっているときの両者の位置差は 5 mm、500 g だと 10 mm の位置差が開くという結果が得られた。

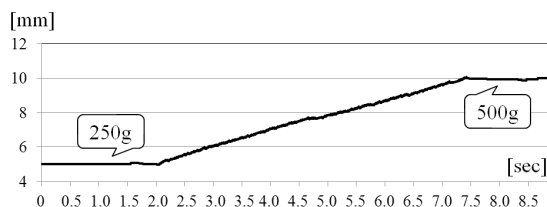


図 3. 単一力覚呈示装置による力推定のための予備実験

II. 手技工程解析に基づく時系列触知覚パラメータの抽出：

予備実験の結果から、人工指を取り付けた 1 台の Novint Falcon のグリップ位置を自動制御し、実物体に対して触知覚操作を行ったときに目標位置と実際の位置の差がある程度開けば指先が物体に接触していると判断

でき、このとき指先にどの程度の力がどの方向にかかっているかもある程度推定することができることがわかった。次に、接触状態からの指先の移動方向や位置変化をみることで、押し操作における硬軟感や、なぞり操作における摩擦感などを推定する。

・押し操作における硬軟感推定

物体に対して押し操作を行う際、目標位置を変化させて力をかけていっても指先位置に変化がなければ硬く、変化があれば柔らかいと考えられる。このような応力 ひずみの関係から硬軟感を推定する。指先位置が物体に接触しているかどうかは、グリップの遊びや位置検出誤差を考慮し、ある程度位置の差が開くことで推定できると考えられる。また、物体と指先が接触したと判断したときの指先位置を記憶し、接触点から物体の法線方向に指先位置がどれだけ変化するかをみれば、変形量を推定できると考えられる。

・なぞり操作における摩擦感推定

対象物表面に沿ってなぞり操作を行う際、目標位置と指先位置の差が小さいとすべりやすく、大きいと滑りにくいと考えられる。また、目標位置を動かしても指先位置に変化がなく、両者の位置の差が徐々に大きくなると静止摩擦力が働いて固着状態にあり、指先位置が変化する場合は動摩擦力が働いてすべり状態にあると考えられる。このため、物体と指先が接触したと判断したときの指先位置を記憶し、この位置に変化があればすべり状態として指先位置を更新する。それ以外は固着状態とする。このとき、物体の接線方向に対しては、法線方向の力に応じた摩擦力が働く。また、接触点から接線方向に目標位置がどれだけ変化するかをみれば、指先で感じる摩擦感係数を推定できると考えられる。

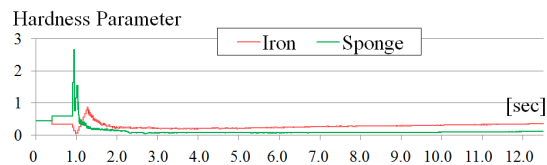
III. 時系列触覚パラメータの再生・可視化:

いくつかの実物体に対して人工指による触覚推定実験として、人工指を取り付けた1台の Novint Falcon のグリップの目標位置を自動制御し、実物体に対して押し操作を行ったときの硬軟感の推定、および、なぞり操作を行ったときの摩擦感の推定を行った。

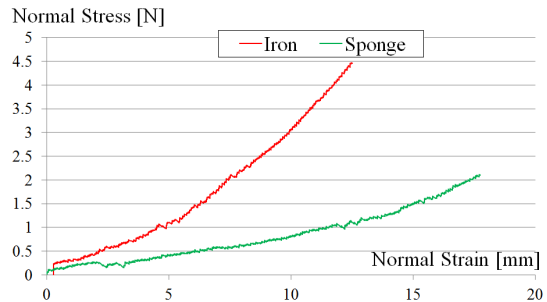
・押し操作における硬軟感推定実験

本実験では、力をかけても変形しない鉄の塊と、変形しやすいスポンジに対して押し操作を行った。まず、グリップの目標位置をキーボードで制御しながら指先位置を徐々に下に下げていき、物体にしばらく触れたあとゆっくりと指先を上げて物体から離す操作を手動で行う。次に、グリップの目標位置の時系列データを記録・再生することで、どちらの材料に対しても同じ指先の動きで解析を行い、前述の硬軟感推定法に基づき、押し操作を行ったときの指先で感じる硬軟感を

推定した。図4に、それぞれの材料に対して押し操作を行い、指先が物体に触れ始めて下げ止まるまでの硬軟感の値(押下力/変形量)の時系列変化、および、押下力と変形量の関係をプロットしたものを示す。



(a) 硬さ値の時系列変化



(b) 推定した硬さパラメータ

図4. 硬さパラメータの推定結果

図4(a)を見ると、物体に指先が接触すると硬軟感の値が一瞬上昇することわかる。これは、指の腹が物体に触れて完全に凹み切るまでに目標位置との差が広がるためであると考えられる。このことから、指先が物体に触れたかどうかは、この硬軟感の値の上昇を捕えればよい。図4(b)を見ると、押下力をかけ続けると材料に応じた硬軟感の値が表れ、鉄が硬く、スポンジが柔らかいことがわかる。また、実際には鉄の剛性値は非常に高く、指先で押ししても凹むことはないが、変形量として値が取れているのは、人工指を下に下げていくと、指先が傾いてグリップが沈み込むためであることと、Novint Falcon のグリップ位置の可動範囲に限界があるためであると考えられる。これらの結果をもとにバーチャル物体の硬さ呈示を行えば、指先で実物体をなぞったときのようなリアルな硬軟感を Novint Falcon で呈示可能な性能の範囲内で実現できることが期待できる。

・押し操作における硬軟感再現

前述の硬軟感推定法に基づき、タッチパネルに直接触れたときの押下感を非拘束で指先に呈示可能なシステムを開発した。図5に構築したシステムを示す。

いくつかの材料を押しした時の硬軟感を再現するため、硬さ、硬さが変化するときの閾値、硬さが変化した時の移動量の3つの情報で記録することとした。この情報を画像化し、三次元オブジェクト表面にマッピングしておくことで、三次元CGと親和性の高い方法で触力覚モデル化することができる。

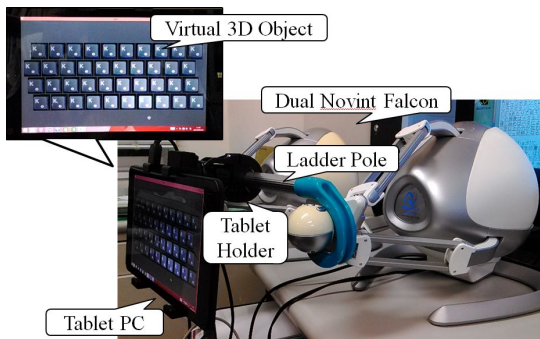
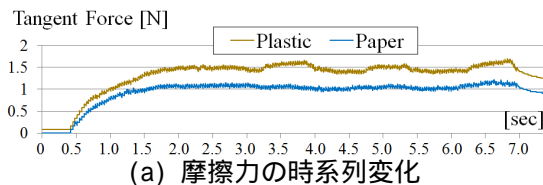


図5. 押下感再現システム

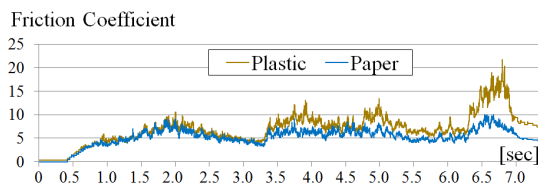
指先が触れた部分の硬軟感パラメータをもとにタッチパネルの動作を制御することで、ボタンの押下感やスポンジの柔らかさなどを再現することが可能となった。

・なぞり操作における摩擦感推定実験

本実験では、プラスチックケースの上に置いたプラスチック製の下敷きと紙に対し、軽くなぞったとき(0.1-0.35 [N])と、やや強めになぞったとき(0.6-1.2 [N])の2パターンについて、自動制御による同じ指の動きでなぞり操作を行った。また、前述の摩擦感推定法に基づいて指先で感じる摩擦感係数を抽出する。図6および図7に、それぞれの材料に対してなぞり操作を行ったときの指先にかかる摩擦力(接線力)および指先で感じる摩擦感係数(接線力/法線力)の時系列変化を示す。

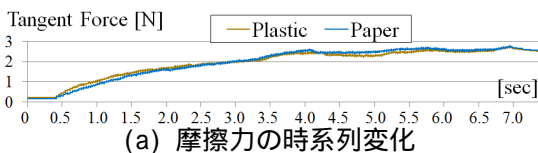


(a) 摩擦力の時系列変化

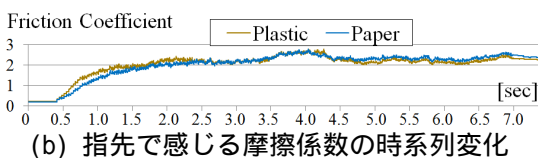


(b) 指先で感じる摩擦係数の時系列変化

図6. 摩擦パラメータの推定結果(軽い力)



(a) 摩擦力の時系列変化



(b) 指先で感じる摩擦係数の時系列変化

図7. 摩擦パラメータの推定結果(強い力)

図6と図7を比べると、軽くなぞったほうが指先で感じる摩擦感係数が高くなるのがわかる。これは、指紋の凹凸の影響によって物体との引っかかりが生じるためであると考えられる。図6が軽くなぞったときの結果である。図6(a)から、紙よりもプラスチックのほうが摩擦力がかかり、指先で感じる摩擦感係数が高くなるのがわかる。また、プラスチックをなぞると軽いスティックスリップ現象が起こっていることがわかる。図7はやや強めになぞったときの結果である。軽くなぞったときに比べ、どちらも同じような摩擦力が働き、指先で感じる摩擦感係数も同じような結果になっていることがわかる。これは、物体をやや強く押さえてなぞると指紋による影響を受けなくなるためであることと、材料自体が薄いために、強くなぞると材料の下にあるプラスチックケースをなぞったような摩擦感が抽出されたためであると考えられる。これらの結果をもとにバーチャル物体の摩擦感呈示を行えば、指先で実物体をなぞったときのようなリアルな摩擦感をNovint Falconで呈示可能な性能の範囲内で実現できることが期待できる。

・人体動作の可視化

抽出した時系列触覚パラメータを三次元空間内で可視化するため、薪能のコンテンツを開発した。このために、能の熟練者の人体動作をモーションキャプチャし、キャプチャした時系列データをリアルタイムに仮想空間内でアニメーション可能にした。また、骨格モデルに皮膚や衣装を追加し、骨格に合わせてリアルタイムにアニメーション可能にし、さらに、能舞台周りに設置した薪の炎を光源としてリアルタイムに能装束の異方性反射を表現可能にした(図8)。



図8. 薪能における人体動作をとともう異方性反射の再現

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

脇田 航, 齊藤充行, 小林康秀, “人工指による押下感解析に基づくタッチパネルへのテクスチャベースの押下感呈示システム”, 電気学会論文誌 C, vol.136, no.8, in press, Aug. 2016. (査読有)

脇田 航, 齊藤充行, 小林康秀, “人工指による触知覚解析に基づく硬軟感および摩擦感推定法”, 電気学会論文誌 C, vol.136, no.8, in press, Aug. 2016. (査読有)

脇田 航, 古川耕平, 八村広三郎, 田中弘美, “反射光解析に基づく薪能のリアルタイム CG 表現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.20, no.1, pp.25 - 33, Mar. 2015. (査読有)

Wataru Wakita and Hiromi T. Tanaka, “A Digital Archiving for Large 3D Woven Cultural Artifacts Exhibition”, ITE Transactions on Media Technology and Applications, vol.2, no.3, pp.236 - 247, July 1, 2014. (査読有)

〔学会発表〕(計9件)

Shiro Tanaka, Wataru Wakita, and Hiromi T. Tanaka, “Anisotropic Reflectance Rendering of Noh-Kimono Costumes in Dynamic Lighting Environments with Bonfire,” IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV2015), Demonstration, CentroParque Convention Center, Santiago, Chile, Dec. 16, 2015. (査読有)

Wataru Wakita, Shiro Tanaka, Kohei Furukawa, Kozaburo Hachimura, and Hiromi T. Tanaka, “Digital Archiving of Takigi Noh based on Reflectance Analysis,” Proceedings of the HCI International 2015, The Westin Bonaventure Hotel & Suites, Los Angeles, U.S.A., Aug. 7, 2015, Virtual, Augmented and Mixed Reality, Lecture Notes in Computer Science, vol.9179, pp.398 - 408, Aug. 2015. (査読有)

脇田 航, 齊藤充行, 小林康秀, “バイラテラル制御に基づく触知覚情報の抽出法,” 第20回 知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, C2-3, pp.123 - 127, 東京電機大学 東京千住キャンパス, 東京都, Jul. 11, 2015. (査読有)

脇田 航, 田中士郎, 古川耕平, 八村広三郎, 田中弘美, “反射光解析に基づく薪能における能装束の質感再現,” 2015年1月コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 奈良先端科学技術大

学院大学, 生駒市, Jan. 22, 2015.

Wataru Wakita and Hiromi T. Tanaka, “An Unconstrained Tactile Rendering with Tablet Device based on Time-series Haptic Sensing with Bilateral Control,” Proceeding of the ACM SIGGRAPH 2014 Posters, no.44, Vancouver Convention Centre, Canada, Aug. 2014. (査読有)

Wataru Wakita and Hiromi T. Tanaka, “Digital Archiving of Large 3D Woven Cultural Artifacts of the “Fune-hoko”,” IEEE Proceedings of the 4th International Conference on Culture and Computing(Culture and Computing 2013), pp.206 - 207, Suzaku Campus, Ritsumeikan University, Kyoto, Japan, Sept. 2013. (査読有)

小里篤史, 赤羽克仁, 脇田 航, 田中弘美, “バイラテラル制御による手指操作解析に基づく触知覚パラメータの抽出,” 第18回 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, グランフロント大阪, 大阪府, DVD-ROM, Sept. 2013. (査読有)

Wataru Wakita and Hiromi T. Tanaka, “A Real-time Sensing and Rendering of Haptic Perception based on Bilateral Control,” Proceeding of the ACM SIGGRAPH 2013 Posters, no.32, Anaheim Convention Center, Los Angeles, U.S.A., Jul. 2013. (査読有)

Wataru Wakita and Hiromi T. Tanaka, “Real-time Haptic Sensing and Rendering based on Bilateral Control,” Proceedings of the 3DSA2013 International Conference on 3D Systems and Applications, S12-1, pp.1 - 7, General Academy Center, Grand Front Osaka, Osaka, Jun. 2013. (査読有)

6. 研究組織

(1)研究代表者

脇田 航 (WAKITA, Wataru)

広島市立大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：80584094