

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23650058

研究課題名（和文） ウェアラブル疑似 6 自由度力覚提示システムの開発

研究課題名（英文） Development of a wearable pseudo-six-degree-of-freedom force display system

研究代表者

藤田 欣也 (FUJITA KINYA)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30209051

研究成果の概要（和文）：本研究では、バーチャル空間の物体を指で直接把持して操作する作業の実現に向けて、把持物体を他の物体と干渉させて行う作業において重要な、指先への接線力や法線力、手全体へのトルクを、複数の指先に加える振動の強度と位置を動的に制御することによって提示する、ウェアラブルな疑似力覚提示デバイスを開発した。また、ユーザの指先位置を拘束できないウェアラブル力覚提示デバイスの特性に対応した力覚レンダリング法を開発を行い、視覚に依存しない手指を用いたバーチャル作業の実現可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：Towards direct multi-fingered manipulation in virtual environment, a wearable pseudo-six-degree-of-freedom force display system has been developed, which displays normal and tangential forces to fingertips as well as torque to hand by controlling the magnitude and the position of vibrotactile phantom sensation. A novel haptic rendering algorithm designed for wearable force display system, which does not have an ability to physically restrain the user motion, has also been proposed and demonstrated the feasibility of virtual manipulation without visual information.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：バーチャルリアリティ，ヒューマンインタフェース

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ，力覚，触覚，作業支援，仮想空間，ウェアラブル

1. 研究開始当初の背景

バーチャル世界での作業において、把持物体の干渉などによって生じる力覚情報は、作業状態の認知に極めて重要である。指先への反力提示装置には、ハンド型や複数の糸の張力で制御するものなどがあるが、可動域が制限されるという課題であった。そこで、皮膚の圧覚など限定された情報で疑似的に力覚提示を行う装置が活発に研究され始め、申請者らも、指先圧迫型装置等を研究開発してきた。しかし、その全てが1ないし2自由度の力を表現するのみであり、干渉を伴う作業において重要な、並進3と回転3の計6自由度

の力覚提示能力を持つものはなかった。そこで申請者らは、振動の強度で指先への法線方向の力を、振動の位置で接線力を表現する方式を考案して予備実験を実施したところ、強度や方向の弁別の可能性が見いだされた。

一方で、疑似力覚提示装置を用いたバーチャル環境ではユーザの指先位置を拘束できないため、従来の力覚レンダリング手法を使用した場合には、物理シミュレーションが破綻せず提示可能な反力に制約が生じることも、申請者らの研究から明らかになってきた。そのため、疑似力覚提示装置を使用した場合でも、干渉による拘束力を適切に提示

可能な力覚レンダリングアルゴリズムの開発が必要になるが、国内外ともにほとんど検討されておらず、デバイス開発と平行した力覚レンダリング理論への取り組みが求められていた。

2. 研究の目的

本課題では、指を用いたバーチャル物体の直接操作環境の実現に向けて、以下の2点の達成を目標とする。

一つ目は、ウェアラブルな疑似6自由度力覚提示デバイスの開発である。ただし、指先に多自由度の力を加える装置のウェアラブル化は現在の技術では困難であることから、本研究では、指先への接線力と法線力の3自由度を振動の強度と位置によって代替提示するデバイスを開発する。さらに、指先への疑似的な3自由度の並進力を組み合わせることで、手に加わる3自由度のトルクを提示するシステムを構築し、指への力や手へのトルクが提示可能であることを実験的に実証する。

二つ目は、ユーザの指先位置を拘束できない（実指がバーチャルな物体に侵入する）というウェアラブル力覚提示デバイスの特性に対応し、干渉物体による拘束の認知が容易になるように最適化した力覚レンダリング法の開発である。従来の力覚レンダリングアルゴリズムを改良することで、把持物体と干渉物体の接触状態に応じた指先への反力やトルクの変化の明瞭化を実現する。

3. 研究の方法

(1)疑似6自由度力覚提示システムの開発

皮膚への近接した複数の刺激は融合して知覚され、強度比によって知覚位置が変化するファントムセンセーション（以下PS）が広く知られている。本課題では、この知覚される振動の位置や強度を制御可能であるという振動PSの特徴を用いて、静的な力の変化を動的な振動の変化で代替するデバイスを開発する。

①振動提示方式とデバイスの構造

単純に指腹部に振動子を配置した場合、振動方向が指腹に垂直になるため、デバイスの指腹方向への突出が問題となる。そこで、回転する接触子を用いて指腹皮膚を刺激する方法を考える。具体的な構造としては、凹凸形状を回転させることで振動を発生させる方法、摩擦を介して静的なせん断トルクを加える方法、さらに、せん断トルクを断続させて振動感を誘起する方法などが考えられる。ここで、凹凸形状の回転は、構造が単純という利点があるが、モータの回転数を変化させると振動周波数も変化し、意図しない感覚強度変化が発生する問題がある。静的せん断トルクの提示は、振動感を伴わない力覚提示の

可能性が期待されるが、指と接触子間の摩擦により提示トルクの上限が制限されるため、接着等の手段によって皮膚と接触子の固定をおこなわずに知覚可能な強度のトルクを発生することは困難である。そこで、モータの回転トルクを断続することで振動感を与える方法を考える。図1のようにモータの駆動電流をパルス幅変調し、デューティ比によって振動強度を制御すれば、振動周波数が刺激強度にかかわらず一定にできるため、振動周波数の変化による知覚強度変化が回避できる。また、この方式も指腹皮膚と接触子の摩擦による提示トルクの制限を受けるが、振動に対する感度が高いRAタイプの触覚受容器が刺激されるため、静的なせん断トルク提示方式よりも知覚が容易になるものと予想される。

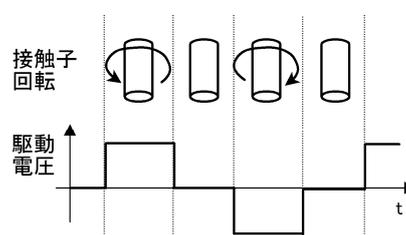


図1 断続回転トルクによる振動感の提示

そこで、本課題では、指腹に平行な回転軸まわりに正逆転する回転刺激により、振動PSを生成する方式を採用した。回転軸を指腹に対して水平にすることで、接触子の運動による指腹方向への突出や、ワイヤ駆動を想定した場合の動力伝達部の指腹方向への突出の低減が可能となった。

開発した疑似6自由度力覚提示システムの、指先に装着する刺激提示部を図2に示す。提示部の突出厚みは4mmで、1指あたり5個の回転接触子を有する。各接触子は2相PWMによって、指腹に平行な軸周りに断続的に正逆転する。接触子の回転は指腹の受容器を刺激し、誘起される刺激はファントムセンセーションとして1つの振動に融合して知覚される。

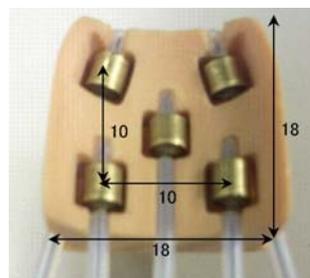


図2 刺激提示部

接触子の駆動は、断続トルクの発生頻度がRA受容器であるパチニ小体の感度ピークで

ある 200Hz に一致するように、本方式では 1 周期で正回転と逆回転が発生することから、100Hz で行った。パルスのデューティ比は、0 から 50% の範囲で連続的に変化させた。

システム全体の外観を図 3 に示す。5 つのモータから成る動力部を手背に設置し、指先の刺激提示部にワイヤで回転振動を伝達することにより、刺激提示部を軽量化した。また、手指の屈曲による動力部と提示部の距離変化に対しては、モータが動力部内部で前後運動可能な構造とすることで対応した。



図 3 疑似 6 自由度力覚提示システム

②振動 PS 位置と強度の制御法

振動 PS を意図した位置と強度で誘起するためには、各接触子の駆動強度を適切に制御する必要がある。予備実験において、ユーザが知覚する振動の強さは Fechner の法則に従い振動振幅の対数に比例することと、知覚される振動 PS の位置は振動強度の逆比に比例することが判明していることから、本研究でも同様の法則を用いて、5 つの接触子の強度比を決定した。

図 4 のように、点 Q に振動 PS を提示することによって、接線力ベクトル F_t を疑似提示する場合を考える。まず、各接触子の駆動デューティ比 D_i の対数値の合計に、知覚される振動強度が比例すると仮定すると、接線力ベクトル F との関係式(1)が得られる。

$$|\bar{F}| = k_n \sum_{i=1}^5 \log D_i \quad (1)$$

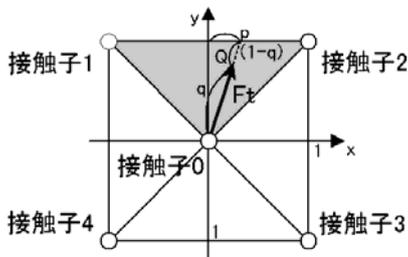


図 4 接触力ベクトルと各接触子の位置関係

振動 PS を提示する点 Q が、図の様に接触子 0,1,2 が成す三角形領域に含まれるとき、これら 3 つの接触子の駆動強度比を適切に設

定すれば、点 Q への振動 PS の提示が可能と考えられる。正規化した接触力ベクトルの接線方向成分の延長線と、接触子 1,2 を結ぶ交点を p とすると、接触子 1,2 の強度比は接触子と振動 PS の距離の逆比によって決定される。このとき、接触子 1,2 の刺激によって交点 p の位置に振動 PS が誘起されていると考えることができる。さらに、この交点 p と接触子 0 によって点 Q に振動 PS を誘起すると考えることで、接触子 0 および交点 p から点 Q までの距離の逆比によって強度比が決定される。すなわち、3 つの接触子の駆動デューティ比は(2)式によって決定される。

$$\begin{aligned} D_0 &= \exp\{(1-q)k_n |\bar{F}|\} \\ D_1 &= \exp\left\{\left(\frac{1-p}{2}\right)qk_n |\bar{F}|\right\} \\ D_2 &= \exp\left\{\left(\frac{1+p}{2}\right)qk_n |\bar{F}|\right\} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)力覚レンダリング法の検討

①回転強化 VC の提案

現在、力覚レンダリングには、ユーザの指先位置とバーチャル世界の仮想指の位置の差から、バネと粘性で反力を算出するバーチャルカップリング法(VC)が広く用いられている。しかし、疑似力覚提示装置を使用する時には、既に述べたように、安定性の問題から粘弾性値を小さくする必要がある。

ここで、指先の運動を運動部位に分けて考えてみると、その運動の多くは、肩や肘による腕全体の運動であることがわかる。他方、指の屈曲や手首の回転による運動量は相対的に小さい。すなわち、VC 係数を小さくする必要がある粗大な運動の大半は、腕全体の運動であると考えられる。また、腕の運動は、指ではなく手全体を並進運動させることから、手の並進運動成分に対する VC 係数を小さくし、手と把持物体の間の回転に対する VC 係数を大きくすれば、安定性を保ちつつ把持物体の接触状態に応じたトルクが算出される可能性が期待される。そこで、本研究では、回転に対する VC 係数のみを増大させる、回転強化 VC 法を提案する。

ヒトが物体を把持して、把持物体を他の物体に接触させて状態を認知する際には、一般に物体を強く把持する。強く把持すると、指と物体の間の摩擦限界が高くなるとともに、指や手関節の関節ステイフネスが高くなるため、把持物体が干渉した際に、姿勢を維持する能力が高くなる。そのため、把持物体と干渉面の間に大きな力が作用し、手への回転トルクも大きくなって、接触状態の知覚が容易になるものと考えられる。すなわち、手の回転に対する剛性を高めることは、ヒトが接触状態を認知する際におこなっている制御

の模擬と考えることも可能である。

②回転強化 VC の実装

バーチャル物体を把持したときの、ユーザの実指と VR 空間内に存在するプロキシの位置関係を図 5 に示す。プロキシは、バーチャルな把持物体の表面に拘束されるが、実指は拘束を受けないため、ユーザが指を屈曲させると把持物体の内部に侵入し、両者の間には位置差 \vec{P}_{fn} が生じる。ただし、 n は指の種類を示すものとする。指先には肩や肘関節の動作による手全体の並進運動 \vec{P}_p が加わり、さらに、手首や前腕の回転による移動成分 \vec{P}_m も加わる。したがって、実指の位置ベクトル \vec{P}_{an} とプロキシの位置ベクトル \vec{P}_{vn} の差は、(3)式のように3つのベクトルの和で表現される。

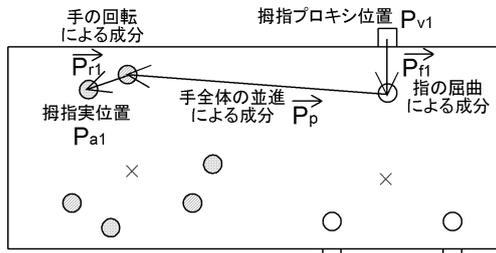


図 5 拇指とプロキシの位置と、指の屈曲、手の並進、手の回転による指先の運動

$$\vec{P}_{an} - \vec{P}_{vn} = \vec{P}_{fn} + \vec{P}_p + \vec{P}_m \quad (3)$$

他方、VC は実指とプロキシの位置差にバネとダンパ成分をかけたものであるため、VC が生成する反力 f は、(4)式で表現される。

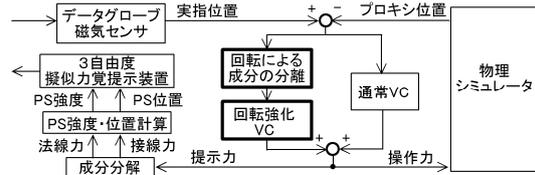
$$f = k(\vec{P}_{an} - \vec{P}_{vn}) + b \frac{d(\vec{P}_{an} - \vec{P}_{vn})}{dt} \quad (4)$$

すなわち、通常の VC は(3)式右辺の3成分に VC 係数をかけたものと言える。したがって、実指とプロキシの位置差を3つに成分分解して回転による成分のみを抜き出して、より大きな VC 係数を掛けることで、回転強化 VC が実現できると考えられる。これにより、手の並進運動に対しては従来どおりの VC として振る舞い、手の回転に対しては、より大きな操作力や提示力を生成することが可能になるものと期待される。

4. 研究成果

構築したバーチャル作業システムのブロック図を図 6(a)に示す。システムは、疑似6自由度力覚提示システム、6自由度の磁気式位置センサ(Ascension, Flock of Birds), データグローブ(5DT)ならびに汎用物理シミュレーションライブラリ(Open Dynamics Engine, ODE)が動作する計算機によって構成される。

物理シミュレータ内には、実際の指の運動に連動する箱状の2つのプロキシが存在し、ユーザの実指の動作に応じて他のバーチャル物体と干渉し、VR 空間内で物体を把持する。物理シミュレータに入力する操作力とユーザに力覚提示する提示力は、(3)式に従って成分分解された上で、通常 VC と回転強化 VC によって算出される。さらに、算出された提示力は指の姿勢に合わせて指座標系における3成分に分解され、(2)式によって各振動子の駆動強度を算出した後に、デバイスに出力される。



(a)



(b)

図 6 回転強化 VC を用いた VR 作業環境(a) システムのブロック図, (b)作業中の例

(1)疑似トルク提示の効果検証

水平回転の正逆転駆動による接線力の疑似提示によってトルクの疑似提示が可能か、以下の手順で評価した。実験では、幅 60mm のペグを拇指と示指が 20N の力(各 20mm 侵入)で把持し、把持しているペグを 10° 刻みで 8 分割し、ランダムに選択した角度へ回転させた。このとき、把持している状態での提示デューティ比はおおよそ 13%であった。被験者には、あらかじめ映像提示がある状態で練習を行わせた後に、映像なしの状態では、知覚した振動 PS の変化からペグの角度を回答させた。被験者は 7 人で、ペグに対して並行に把持した場合と垂直に把持した場合の 2 条件で、各角度に対して 10 試行ずつ行った。VC のパラメータは、明確な接触とシミュレーションの安定性を満たすように、実験的にバネ定数 $k=1000(\text{N/m})$ 、ダンパ係数 $b=20(\text{N} \cdot \text{s/m})$ とした。

図 7 に、提示したペグの回転角度と、7 人の被験者が回答した平均角度を示す。平均誤差は 9.4° 、標準偏差は 10.7° であった。 10° 程度のばらつきがあるものの、提示角度に比

例して回答角度が変化していることからトルクの変化が認知された様子が確認できる。

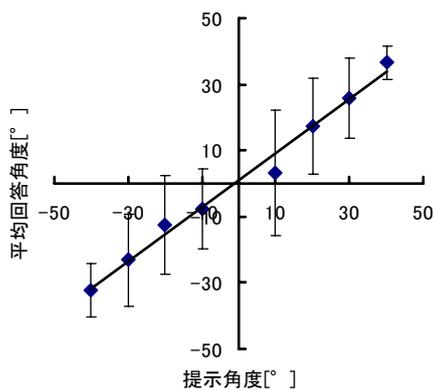


図7 2指把持時の提示角度と回答角度

(2)回転強化 VC の効果検証

通常の VC に対して、手の回転によって生じる力のみを強化する回転強化 VC の効果を、実験的に検証した。実験では、あらかじめユーザが VR 物体を斜め下方向に押しつける図8の動作を記録しておき、記録した動作に対して、通常の VC ならびに回転強化 VC を用いて、力覚レンダリングとシミュレーションをおこなった。ユーザの動作への影響を排除するため、動作記録時の力覚提示は行わなかった。通常 VC のバネとダンパの値は $K=800\text{N/m}, D=20\text{Ns/m}$ で、姿勢強化 VC 条件は $K_h=5000\text{N/m}$ とした。



図8 2指把持時の提示角度と回答角度

拇指への反力の経時変化波形の例を図9に示す。ユーザの手の動作は記録再生によるため両条件で同一であるが、VC が生成する反力が異なるため、把持物体の挙動は条件間でいくらか異なっている。特に、通常 VC 条件では、把持物体を固定する力が弱いため、床や壁と衝突した後も把持物体を押しつけ続けると、回転 VC 条件より大きく回転する様子が観察される。

通常 VC と回転強化 VC が発生した反力を比較すると、通常 VC では、把持物体が床に接触した後の水平方向(X)成分の変化は 15N 程度であった。他方、回転強化 VC 条件では X 成分の変化幅は 60N 以上であり、把持によって生じた反力 (床と接触する前の反力、約 -10N) よりも明瞭に大きく、反力の方向も反転していた。同様に、把持物体を壁面に押しつけたときには、回転トルクが作用する方向は、床面とは逆方向に変化した。すなわち、

提案する回転強化 VC は把持物体の姿勢変化をトルク変化として反映するのに有効であることが確認され、ユーザがトルクを介して把持物体の姿勢変化を認知するのを容易にするものと期待される。

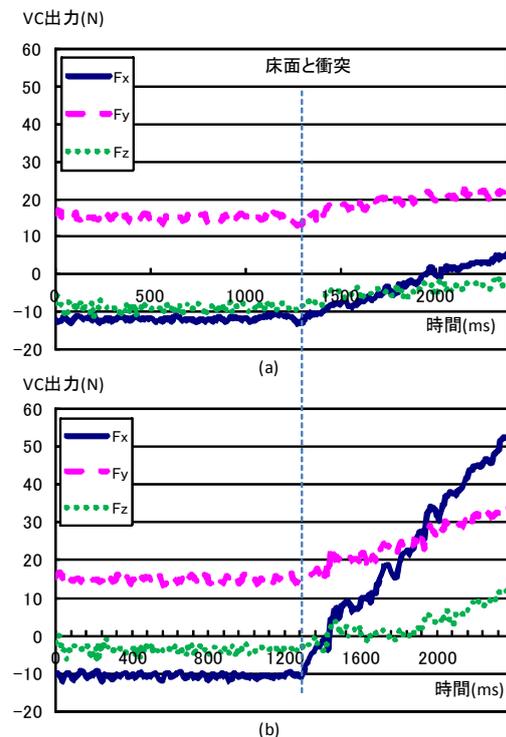


図9 把持物体を床に押しつけたときに、(a)通常 VC と(b)回転強化 VC が出力した拇指反力

以上のように、本課題では、ウェアラブルな指先への疑似6自由度力覚提示システムを開発するとともに、把持物体の干涉状態の認知が容易になる力覚レンダリングアルゴリズムを検討した。これにより、装着型デバイスによる、視覚に依存しない手指を用いたバーチャル作業の実現可能性が示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- (1) 黒田嘉宏, 仲谷正史, 長谷川晶一, 藤田欣也, 物理的刺激に基づく疑似力覚の提示と計算に関する研究動向, 査読有, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.3, 2011, pp.379-390

〔学会発表〕(計7件)

- ① K.Fujita, Y.Takehana and K.Kamata, Virtual Restraint of Hand Position and Posture for Cooperative Virtual Object Manipulation with Ungrounded Force Display Device, IEEE

World Haptics Conference 2013, 2013 年 4 月
15 日, Daejeon Convention Center (Koera)

- ② 小粥大敬, 藤田欣也, 仮想把持物体を介した干渉状態の非接地型力覚提示装置を用いた提示, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回力触覚の提示と計算研究会, 2013 年 3 月 14 日, 沖縄産業振興センター
- ③ 小粥大敬, 藤田欣也, 把持物体の干渉状態の認知のための多指型疑似力覚提示デバイス, 日本バーチャルリアリティ学会第 17 回大会, 2012 年 9 月 13 日, 慶應義塾大学
- ④ 竹花幸伸, 藤田欣也, 長谷川晶一, 手の位置と姿勢のユーザ間拘束による VR 共同作業の支援, 日本バーチャルリアリティ学会第 17 回大会, 2012 年 9 月 12 日, 慶應義塾大学
- ⑤ 小粥大敬, 藤田欣也, 複数の回転振動接触子を用いた 3 自由度疑似力覚提示デバイスの提案, 日本バーチャルリアリティ学会第 8 回力触覚の提示と計算研究会, 2012 年 3 月 13 日, 筑波大学
- ⑥ 小粥大敬, 藤田欣也, 回転接触子のトルク PWM による 3 自由度疑似力覚提示デバイスの提案, 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会, 2011 年 9 月 21 日, はこだて未来大学
- ⑦ 鎌田勝寛, 竹花幸伸, 藤田欣也, 共同仮想物体操作のための遠隔作業間の手拘束の力覚提示, 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会, 2011 年 9 月 20 日, はこだて未来大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤田 欣也 (FUJITA KINYA)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30209051

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし