

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280072

研究課題名(和文) 能動触知覚の原因現象解明とモデル化による内部構造と材質のバーチャルリアリティ

研究課題名(英文) Virtual Reality of Internal Structures and Materials by Elucidation of Causal Phenomenon and Modeling of Active Touch Sensing

研究代表者

長谷川 晶一 (Hasegawa, Shoichi)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：10323833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：対象に手を触れ動かして触知覚を得る能動触は対象についての様々な手がかりを与える。

本研究では、能動触により内部構造や材質を知覚可能なバーチャルリアリティを実現するため、変形と振動を物理シミュレーションで計算・提示することを目指し、(1)有限要素法に変わる計算時間の少ない変形のシミュレーション手法と(2)能動触により生じる振動の再現手法を研究した。その結果、(1)について、対象を局所グループに分割し局所剛性行列を用いることで計算時間を削減する手法を提案した。また、(2)について、摩擦時の固着滑りにより正確な摩擦係数のモデルを用いることで現実に近い固着滑りが再現でき、現実感が向上することを示した。

研究成果の概要(英文)：An active touch that gets a tactile sense by touching and moving an object gives various clues about the target.

In this research, we aim to compute and present deformation and vibration by physical simulation to realize virtual reality, where the user perceive internal structure and material by active touch. We worked on (1) a short computation time deformation algorithm and (2) reproducing of vibrations generated by active touch.

For (1), we proposed a method to reduce computation time by decomposing the target into local groups and using the local stiffness matrix. For (2), we show that an accurate friction coefficient model for stick-slip friction reproduces stick-slips close to reality and it improves the feel of reality.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：ハプティクス バーチャルリアリティ 変形 Shape Matching 有限要素法 摩擦 固着滑り シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

対象に手を触れ動かして触覚を得る能動触を行うことで、人は対象についての様々な手がかりを得ている。手の動きを計測し、動きに合わせて手に加わる力を計算し、力触覚インタフェースを用いて提示することで、あたかも実物に対して能動触を行っているかのような感覚を人に与える、触覚のバーチャルリアリティを実現することができる。能動触によって得られる情報は物体の形状だけでなく、振動を手がかりに材質や内部構造についての情報が得られることが知られている。これらを再現することができれば、力触覚のバーチャルリアリティにより物体の質感や内部構造を提示できるようになると期待される。

しかし、材質や内部構造の違いによる振動の違いなど複雑な物理現象に起因する触覚を作り出すことは容易ではない。これは、能動触に応じてその場で提示力を計算しなければならないため計算時間が限られ、規模が大きくなると有限要素法などの従来の計算手法が使えなくなるためである。このため、力触覚のバーチャルリアリティは、従来は、形状、変形、運動、摩擦力、テクスチャに限られていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、能動触に応じて内部構造や材質を知覚可能なバーチャルリアリティを実現するため、能動触によって生じる変形と振動を物理に基づいたモデルのシミュレーションによって提示することを目指す。そのために、(1)有限要素法に変わる計算時間の少ない変形のシミュレーション手法、(2)能動触により生じる振動の再現手法を研究する。

### 3. 研究の方法

#### (1)変形のシミュレーション

コンピュータグラフィクス分野では、人が見て自然に感じる映像表現のための手法として、変形を高速に計算する Shape Matching という手法が提案されている。この手法は、元になる物理法則を離散化してシミュレーションするという形式ではなく、節点位置の更新アルゴリズムとして知られている。この手法と有限要素法の関係を調べることで、Shape Matching に似た手法により、物理法則に基づく変形計算を高速に行うことを考える。

#### (2)能動触による振動の再現手法

物体が衝突したり、擦れたりすると振動が生じる。衝突による振動については、モード解析モデルの各モードが、衝突の位置と速度により、励起されるといふモデルで再現できる [雑誌論文②]。一方、擦ったときの振動は、表面の凹凸によって生じるだけでなく、固着滑り現象によりなめらかな表面同士でも振動が生じる場合がある。固着滑り現象は、摩擦の状態の変化(静止摩擦と動摩擦)と弾性により生じるので、指の剛性・質量を考慮すること、現実に近い摩擦の状態変化が生じるより

精度の高い時変静摩擦モデルを用いることで、振動を再現する。また、シミュレーションと現実を合わせるために能動触で生じる振動を計測する。

### 4. 研究成果

#### (1)変形のシミュレーション

Shape Matching 法の一種である Oriented Particle 法がバネ質点系(図 1)を Position Based Dynamics と呼ばれる積分手法を用いてシミュレーションする計算となっていることを示した [学会発表④]。これは、対応する剛性行列を持つ有限要素法の陰解法によるシミュレーションに相当する。

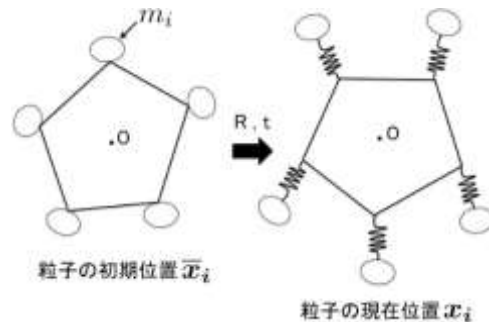


図 1 Oriented Particle を説明するバネ質点モデル

さらに、Shape Matching 法が粒子を局所的なグループに分割し、グループ毎に平均の位置と向きを計算する点に着目し、グループごとの局所座標系での有限要素法の剛性行列(以下 局所剛性行列)を用いることで、全体剛性行列を更新することなく有限要素法をシミュレーションする手法(図 2)を考案した。

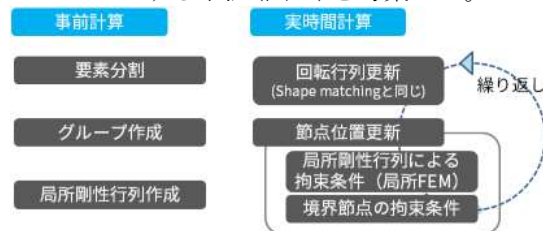


図 2 局所剛性行列を用いたシミュレーションの手順

局所剛性行列により粒子=節点に力が加えられると考えると、Position Based Dynamics でシミュレーションすると、有限要素法を陰解法でシミュレーションしたのと同様の計算が行える(図 3 上)ことを示した。この手法では、局所剛性行列を含めて剛性行列の更新が不要であるため、計算時間を削減できる(図 3 下)。グループの大きさによっては行列の掛け算に時間がかかるが、要素数が少ない場合に高速化の効果が大きい。またグループを大きくすると局所剛性行列を更新しないことによる誤

差が大きくなる。これらを考えた上で最適なグループの大きさを検討することは今後の課題である。また提案手法は Shape Matching と同様に繰り返し計算が必要になるが、この計算の中に局所剛性行列と節点位置の積の計算が含まれるため、Shape Matching とくらべて計算時間が大きくなる。これを解消/省略する手法を考案することも今後の課題である。

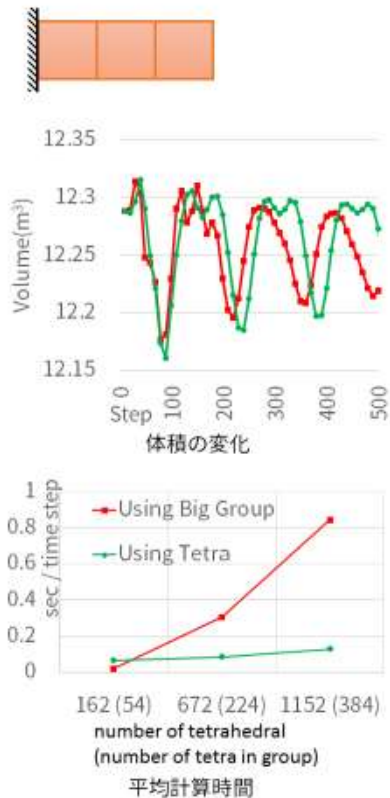


図 3 3つのグループからなるカンチレバー(図上)を、提案手法(赤)と四面体単位で計算した場合(緑)シミュレーションした際の体積変化(精度)と計算時間

## (2) 能動触による振動の再現手法

能動触による振動の再現については、固着滑り現象による振動について、より現実に近い振動を再現するモデルを考案した。実物体の触察では、動き始めに大きな固着滑りが生じるが、徐々に細くなり消滅する場合が多い。固着滑りの再現では従来から力覚レンダリングに用いられる Proxy に質量を加えて再現する手法が提案されている[1]が、この手法では固着滑りの消滅が再現されなかった。

この原因が摩擦係数のモデル化にあるのではないかと考え、静止摩擦係数に時変モデルを用いて[1]の手法を参考に力覚レンダリングを行った。静止摩擦係数は固着時間の対数に比例して増加することが知られているので、静止摩擦係数を  $\mu_0 = \mu_d + B \log(1 + Ct)$  とした( $t$ は固着時間、 $B, C$ は定数)。

この結果、図4上のように、摩擦振動の減衰が再現できることが確認できた。提案手法(図4上)と従来手法(図4右下)について、実物の

触察との比較を行ったところ、4人中4人の被験者が、提案手法の方がより現実に近いと答えた。

また、実世界で摩擦時に生じる加速度を加速度センサで計測し、加速度と指の動力学モデルから摩擦力を推定した(図5)。この結果実世界で摩擦力が減衰したのち消滅することが確かめられた。

図4下右に示した従来の定数摩擦係数による提示では、ゴムをゴムで擦る場合のような極端に静止摩擦係数が大きな物体の質感になってしまう。摩擦係数に時変モデルを使うことで、提示可能な物体表面の質感提示の幅が広がった。

しかし、様々な素材やテクスチャの物体について、現実の触察との比較を行うことはできなかった。テクスチャによる提示力変化の計算手法と合わせて、素材の種類を増やして比較を行うことは今後の課題である。

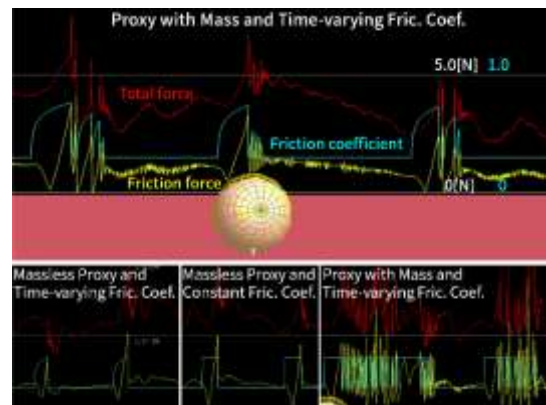


図4 床面を指で左右に擦った際に生じる摩擦係数、摩擦力、合力のバーチャルリアリティによる再現(上:質量を付与したProxyと時変摩擦係数モデルを用いた場合。下左:質量なしProxy・時変摩擦係数、下中:質量なしProxy・定数摩擦係数、下右:質量ありProxy・定数摩擦係数)

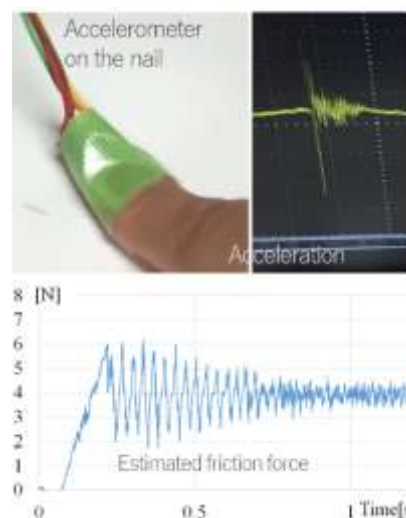


図5 実世界で床面を指で擦った際に生じる加速度の計測と、加速度から推定した摩擦力

その他の成果

(1)(2)によって計算される提示力は広い周波数帯域を含むため、高品質な力とその振動の提示が可能な提示装置が必要となる。糸を取り付けられた DC コアレスモータを音響アンプで駆動することによりこれを実現する提示装置を提案した[雑誌論文①]。

[1] Konyo *et. al.* Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force 2008.  
[2]

## 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 2 件)

① Yusuke Yamazaki, Hironori Mitake, Shoichi Hasegawa, Tension-Based Wearable Vibroacoustic Device for Music Appreciation, LNCS Vol. 9775 (Proc. Euro Haptics 2016), 査読有, 2016, pp. 273-283

② Shoichi Hasegawa, Yukinobu Takehana, Alfonso Balandra, Hironori Mitake, Katsuhito Akahane, Makoto Sato : 'Vibration and Subsequent Collision Simulation of Finger and Object for Haptic Rendering', LNCS Vol. 8619 (Proc. Euro Haptics 2014), 査読有, 2016, DOI:10.1007/978-3-662-44196-1\_43.

[学会発表] (計 7 件)

① 丁 海陽, 三武 裕玄, 長谷川 晶一: PBD の反復計算ができる OP 法に対する力覚拘束手法の提案, 日本バーチャルリアリティ学会力触覚の提示と計算研究会第 18 回研究会, 東京農工大学(東京都・小金井市), 2017 年 3 月 28 日

② 橋本 佳樹, 三武 裕玄, 長谷川 晶一, 時変摩擦係数を用いた力覚レンダリングによる呈示摩擦感の向上, 日本バーチャルリアリティ学会力触覚の提示と計算研究会第 18 回研究会, 東京農工大学(東京都・小金井市), 2017 年 3 月 28 日.

③ 菊池 克弥, 三武 裕玄, 長谷川 晶一, 局所剛性行列を用いた弾性体シミュレーション手法の提案, 日本バーチャルリアリティ学会力触覚の提示と計算研究会第 18 回研究会, 東京農工大学(東京都・小金井市), 2017 年 3 月 28 日.

④ 日野 綾香, 丁 海陽, 三武 裕玄, 長谷川 晶一 : Oriented Particle を説明す

るための物理モデル, 日本バーチャルリアリティ学会 第 15 回力触覚の提示と計算研究会, 広島大学(広島県・東広島市), 2015 年 6 月 30 日.

⑤ 丁 海陽, 三武 裕玄, 長谷川 晶一 : PBD による変形物力学レンダリングの改善, 日本バーチャルリアリティ学会 第 14 回力触覚の提示と計算研究会, 札幌市立大学サテライトキャンパス(北海道・札幌市), 2015 年 3 月 2 日.

⑥ 丁 海陽, 三武 裕玄, 長谷川 晶一 : 3-DOF Haptic Rendering for Deformable Objects based on Oriented Particle, 日本バーチャルリアリティ学会 第 13 回力触覚の提示と計算研究会, 福井大学(福井県・敦賀市), 2014 年 11 月 8 日.

⑦ 丁 海陽, 長谷川 晶一, 三武 裕玄 : 方向情報つき粒子による変形物力学レンダリング, 第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会, セッション 1A-4, 名古屋大学(愛知県・名古屋), 2014 年 9 月 17 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 晶一 (Shoichi Hasegawa)  
東京工業大学・科学技術創成研究院  
・准教授  
研究者番号 : 10323833

### (2) 研究分担者

三武 裕玄 (Hironori Mitake)  
東京工業大学・科学技術創成研究院・助教  
研究者番号 : 30613939

### (3) 連携研究者

佐藤 誠 (Makoto Sato)  
東京工業大学・精密工学研究所・教授  
研究者番号 : 50114872

赤羽 克仁 (Katsuhito Akahane)  
東京工業大学・科学技術創成研究院・助教  
研究者番号 : 70500007