

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01774

研究課題名（和文）変形と固着滑り分布の物理計算に基づく力触覚的質感提示を有するバーチャルリアリティ

研究課題名（英文）Virtual reality with haptic texture presentation based on physics simulation of deformation and stick-slip distribution

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） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：指で物体を擦る際には固着滑りによる振動が生じ、これが物体の材質感に影響することが知られている。本研究は、物理モデルを構築し、シミュレーションすることでこれを再現することを目的とする。期間内には、現実の触察時と同等の振動波形を生成可能な、指と物体のシミュレーションモデルを構築した。また、4つの素材について計測した振動波形からモデルのパラメータを同定し、これを用いたレンダリングにより質感をある程度再現できることを確かめた。また、シミュレーションモデルに指先や物体表面の形状変形を含めるために、柔軟変形物体のシミュレーションとハプティックレンダリングの手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

製品の評価や設計にバーチャルリアリティを応用するには物体の材質感の再現が望まれる。また、把持操作の際にも摩擦振動を手がかりに材質感を感じ取り、器用な把持操作にも利用している。摩擦振動を再現する物理モデルを実現し、これを用いたハプティックレンダリングを組み込むことで、バーチャル物体の材質感や操作感が現実に近くなり、より多くの作業や課題をバーチャルリアリティで実現できるようになることが期待でき、その用途の拡大に繋がると考えられる。

また、摩擦時物理現象を説明するモデルは、人の触覚の理解に繋がることも期待できるため、人の触覚情報処理の理解がすすむことも期待できる。

研究成果の概要（英文）：It is known that when rubbing an object with a finger, vibration due to sticking slip occurs, which affects the material feeling of the object. The purpose of this research is to reproduce this by constructing a physical model and simulating it. During this research period, we constructed a simulation model of a finger and an object that can generate a vibration waveform equivalent to that during actual rubbing. In addition, the parameters of the model were identified from the vibration waveforms measured for four materials, and it was confirmed that the feel can be reproduced to some extent by rendering using the parameters. Moreover, in order to include the shape deformation of the fingertip and the surface of the object in the simulation model, a method of the simulation and the haptic rendering of flexible deformable objects was proposed.

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 摩擦モデル レンダリング シミュレーション 物理モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

視覚では、光学現象のシミュレーションであるコンピュータグラフィックスにより様々な質感表現が可能であり、反射率や透過率の分布といった物理特性に基づいて、質感を生じさせる感覚刺激をレンダリングできる。一方触覚では、質感と物理現象の関係が見つかってきた段階であり、振動波形を再現可能な物理モデルの構築はこれからの課題である。力覚レンダリングも球等の力覚ポイントで表面をなぞる際に生じる力の再現による、形状、テクスチャの凹凸、摩擦に限られていた。表面粗さや摩擦特性が粗さ感や乾湿感に寄与することが知られているが、刺激の発生機序は仮説検証が個別に行われている段階であり、素材の物理特性に基づく合成はタッピングに関する我々の試みや昆陽らのテレプレゼンスがある程度である。界面の物理現象の実時間シミュレーションに基づくレンダリングが望まれるが、複雑なモデルの $\sim 1\text{kHz}$ の振動の再現は計算量的に難しく、計測データと汎用の機械学習モデルによる再現が先行しているのが現状である。これらは物理モデルを持たないため、触察動作毎にデータを用意することが必要であり、多様な触察動作に対応することが難しい。

表面粗さや摩擦特性が粗さ感や乾湿感に寄与することが知られているが、刺激の発生機序は仮説検証が個別に行われている段階であり、素材の物理特性に基づく合成はタッピングに関する我々の試みや昆陽らのテレプレゼンスがある程度である。界面の物理現象の実時間シミュレーションに基づくレンダリングが望まれるが、複雑なモデルの $\sim 1\text{kHz}$ の振動の再現は計算量的に難しく、計測データと汎用の機械学習モデルによる再現が先行しているのが現状である。これらは物理モデルを持たないため、触察動作毎にデータを用意することが必要であり、多様な触察動作に対応することが難しい。

これに対し本研究では、現実に近い固着滑りを再現可能な程度に複雑な摩擦モデルのシミュレーションに基づいて固着滑りにより生じる振動を再現することで、物理モデルに基づく合成を実現する。

2. 研究の目的

指で物体を擦る際の現象の再現には、摩擦による固着滑りの過渡現象を扱う必要であり、摩擦の分布と指の変形の再現が求められる。そこで次の2つを目的とする。

- A. 固着滑りを再現するための物体の物理モデルと、計測・同定手法を確立し、現実の触察時と同等の振動波形を生成可能な、指と物体のシミュレーションモデルを構築する。
- B. シミュレーションモデルに指先や物体表面の形状変形を含めるための柔軟変形物体のシミュレーションとハプティックレンダリングの手法を提案した。

3. 研究の方法

A. については、触察動作、特に物体を撫でた際の質感には、固着滑りの分布を含む摩擦現象が大きな影響を与えられられる。摩擦は、静止摩擦の時変性を考慮したGMSモデルを接触面上に分布させてモデル化することで、固着滑りを再現する。モデルのパラメータは実世界での計測を元に、機械学習(最適化)を用いて同定する。

摩擦の再現には固着滑り分布の再現が必要である。静止摩擦から動摩擦への移行時には、全体が動摩擦に移行するまえに接触面の一部で滑りが生じるpre-slidingが知られている。固着を切り離す静止摩擦力は、真実接触面積が抗力に比例するため抗力に比例すると考えられているが、静止摩擦係数は静止接触時間に対数比例して増加する。これらは固着滑りの発生周期や非定常性に影響すると考えられる。そこで、固着滑りを生じる摩擦面が付いたバネを複数持つGeneralized Maxwell-Slip(GMS) Modelが分布した指先モデルを用い、静止摩擦係数には時変モデルを用いる。GMSモデルの各バネは接触面うち圧力がかかる凸部とその変形を表す。凸部の大きさは様々であり、そのシミュレーションに必要な更新周期は大きさによるが、触覚が敏感な 1kHz 程度までの現象を再現すれば良いと考え、更新周期は 1kHz 程度とする。GMSモデルや摩擦係数の同定は、現実の触察時に発生する力と加速度の波形に基づいて固着滑り発生状況を推定し、固着滑りの発生の時空間分布と力と運動が一致するよう進化計算(CMA-ES)を用いて同定する。

B.については、Position-based(位置ベース)DynamicsによりシミュレーションされるOriented Particleモデルにより支配される表面メッシュを用いて柔軟物体をモデル化し、複数の球で構成されたハプティックグローブによるProxy法を提案することで、連続時間接触判定(CCD)を用いたハプティックグローブが物体をすり抜けることがない力覚レンダリング手法を提案する。

4. 研究成果

A.については、Proxy 法での摩擦提示手法を拡張した手法を提案した。この手法では、Proxy に指先の質量にあたる質量を与えた上で、位置ベースシミュレーションを行うことで、相対的に大きな時間刻み(1kHz)でも指先の運動を安定にシミュレーションする(図1, 文献)。

また、摩擦モデルを、GMS モデルに時変静止摩擦モデルを組み込んだものにする事で、より現実に近い固着滑りを再現可能なモデルとした。

更に、現実の摩擦で生じる固着滑りを指先に付けた加速度センサで計測し、滑りの発生時刻とその際の加速度の大きさを指標にした評価関数による CMA-ES を用いてパラメータを同定した。その結果、いくつかの材質(ベークライト、アクリル、アルミニウム)について、妥当なパラメータを同定するとともに、力覚インタフェース SPIDAR を用いたレンダリングにより、現実と近い加速度波形を再現することができた。指先と物体表面の性状は、皮脂や水分で変化するため、実験はアルコールで素材と指を拭き、乾燥させたあとに行った。

また、指の皮膚の性状には個人差があるため、同一の人の計測データで同定しないと違いはわかるものの、材質との対応がわかりにくくなるといった課題が見つかった。

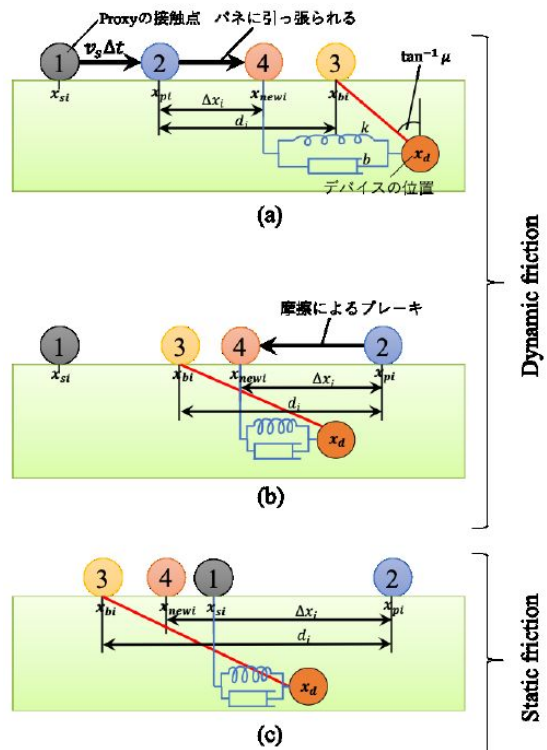


図 1 位置ベース摩擦レンダリング

接触点の初期位置 x_{si}

予測位置 x_{pi}

摩擦円錐のエッジ(平衡位置) x_{bi}

求めた新しい接触点の位置 x_{newi}

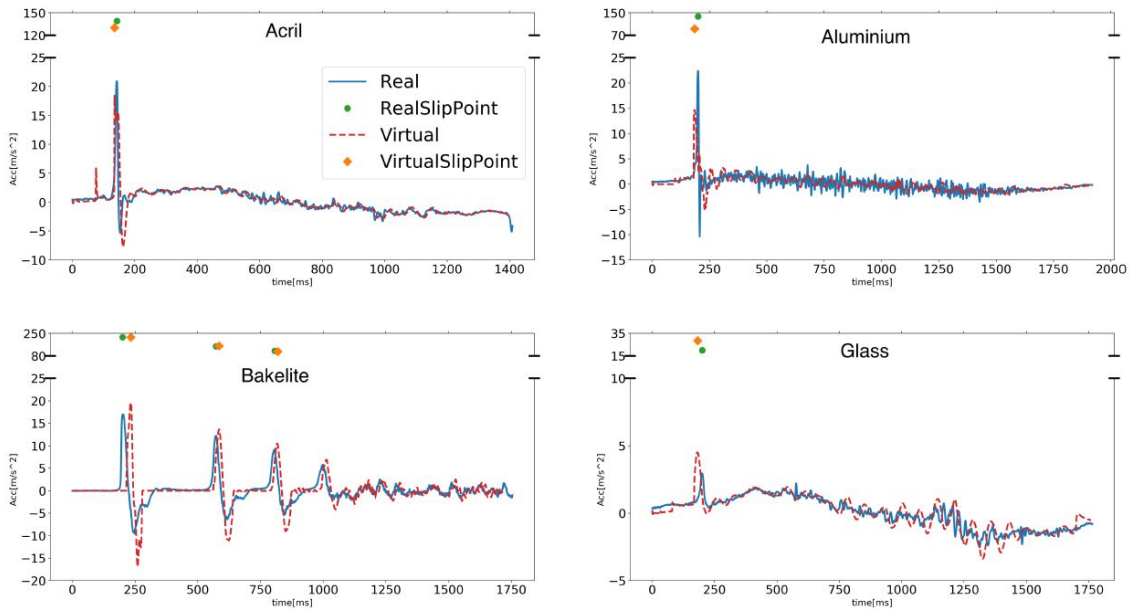


図 2 各素材での加速度波形 実線：計測データ 破線：ハプティックレンダリング

B.については、まず、物体形状を Oriented Particle により支配された表面メッシュを用いて表現する。次に、表面メッシュを構成する三角形と Proxy の形状である球について、次のようなアルゴリズムを提案した。(文献)

1. 連続時間の接触判定(図3)を行うことで、Proxy と物体の接触を検出する。Proxy は物体の外に移動させる必要があるため、移動後の時刻(t_1)での三角形の位置まで移動させる。
2. Proxy を移動させると、他の三角形と重なる可能性があるため、近くの三角形と接触判定を行い、接触していた場合、その三角形の面の上に移動させる。移動させるたびにまた別の三角形

と接触する可能性があるので、接触が解消されるまでこれを繰り返す(図4)。これにより極端な場合(例えば図5)を除いて、Proxyとの接触が解消される。

この提案を拡張し、複数の球 Proxy を Oriented Particle の手法で結合し、シミュレーションすることで、柔軟変形する任意形状の Proxy を構成することができる。この Proxy を用いて布状の薄い物体との力覚インタラクションを行った例を(図6)に示す。複数の球を Proxy として用いる手法では、Proxy の数が増えるとシミュレーションの計算量が多くなるため、階層的なハプティックレンダリングにより計算量を削減する必要がある。

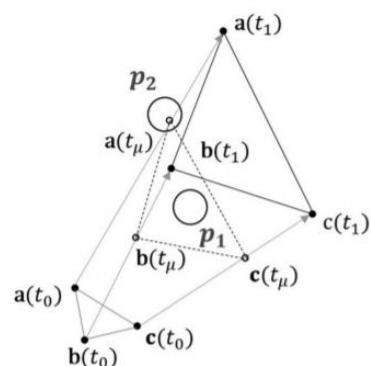


図3 連続時間の接触判定

<引用文献>

S. Hasegawa, Y. Hashimoto, H. Mitake: 'Realistic Friction Rendering using Time-Varying Friction Coefficients', IEEE World Haptics 2017, Work in Progress.

石田亮太, 三武裕玄, 長谷川晶一: 指のせん断変形を考慮した滑り摩擦の力学インタラクション, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp.32A-3, 2018.

H. Ding, H. Mitake, S. Hasegawa: 'Continuous Collision Detection for Virtual Proxy Haptic Rendering of Deformable Triangular Mesh Models', IEEE Trans. on Haptics 2019.

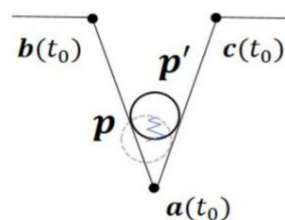


図4 接触の解消

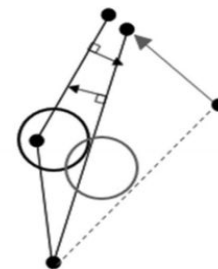


図5 解消しない例

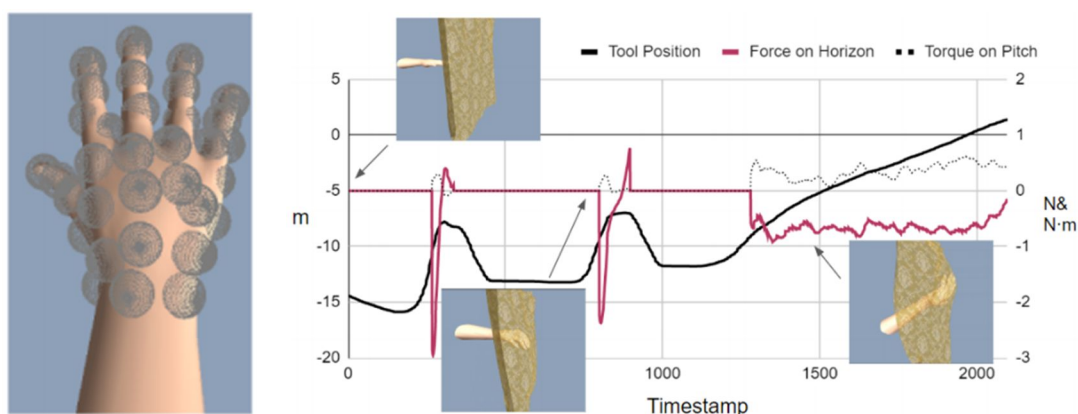


図6 複数の球による Proxy と薄い物体との力覚インタラクションの例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ding Haiyang, Mitake Hironori, Hasegawa Shoichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Continuous Collision Detection for Virtual Proxy Haptic Rendering of Deformable Triangular Mesh Models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 624 ~ 634
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2019.2934104	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 金洗瑩, 吉田健人, 三武 裕玄, 長谷川 晶一
2. 発表標題 解析法物理シミュレーションにおける 接触面に基づいた拘束力計算法の提案
3. 学会等名 第23回日本バーチャル学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田 亮太, 三武 裕玄, 長谷川 晶一
2. 発表標題 指のせん断変形を考慮した滑り摩擦の力覚インタラクション
3. 学会等名 第23回日本バーチャル学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoichi Hasegawa, Yoshiki Hashimoto, Hironori Mitake
2. 発表標題 Realistic Friction Rendering using Time-Varying Friction Coefficients
3. 学会等名 IEEE World Haptics 2017, Work In Progress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石田 亮太, 三武 裕玄, 長谷川 晶一
2. 発表標題 現実に近い摩擦感呈示のための時変摩擦係数と手の質量を用いた力覚レンダリングの提案
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会ハプティクス研究委員会第20回研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本佳樹, 三武 裕玄, 長谷川 晶一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 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
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分担 者	三武 裕玄 (Mitake Hironori) (30613939)	東京工業大学・科学技術創成研究院・助教 (12608)	