

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04220

研究課題名（和文）摩擦滑りの物理モデルによる器用な操作と質感提示が可能なバーチャルリアリティ環境

研究課題名（英文）A virtual reality environment capable of dexterous operation and texture presentation using a physical model of friction sliding

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） 15,070,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、器用な操作と質感を再現するVR環境を実現しその設計指針を得ることを目指す。物を指で擦ると固着滑り現象が生じるが、この際の加速度の計測データには様々な摩擦現象の影響が現れる。把持操作に影響があることが知られている部分滑りと、固着滑りの周期と振幅の特徴に影響する静止摩擦係数の固着時間依存性を含む摩擦の実時間シミュレーションモデルをLeGreモデルを拡張することで構築し、把持操作の際に生じる摩擦振動の特徴を再現した。また、振動を中心とした触覚刺激の提示手法を検討した。今後は、多指操作のための装着型のハプティックインタフェースと提案モデルを用いた把持操作環境の研究を進める。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多様な参加手法により社会参加の機会を増やすことが求められ、メタバースの応用が期待されているが、遠隔参加者が行える共同作業は限られている。本研究はデザインや評価に必要なと考えられる器用な操作の実現を目指している。人が部分滑りを検知して把持力を調節していることが知られているが、再現に必要な部分滑りの力触覚提示は実現しておらず、メタバースでは疲労を避けるために記号化された把持が用いられている。本研究は、静止摩擦係数の固着時間依存性と部分滑りを統合して新たな摩擦モデルを提案することで、器用な操作に必要な摩擦現象を再現しており、メタバースでの器用な把持操作に必要な課題の一つを解決している。

研究成果の概要（英文）：This research aims to realize a VR environment that reproduces dexterous operation and texture, and to obtain its design guidelines. A stick-slip phenomenon occurs when an object is rubbed with a finger.

By extending the LeGre model with a real-time simulation model of friction including partial slip, which is known to affect grasping maneuvers, and the stick time dependence of the coefficient of static friction, which affects the period and amplitude characteristics of stick slip, we reproduced the characteristics of frictional vibration that occurs during grasping operations. In addition, we investigated the presentation method of tactile stimulus centered on vibration. In the future, we will proceed with research on a wearable haptic interface for multi-finger operation and a grasping operation environment using the proposed model.

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 器用な操作 部分滑り 摩擦モデル ハプティックインタフェース

1. 研究開始当初の背景

力触覚が手指での器用な操作に必要なことが知られ、VR やテレオペレーションでの再現が研究されているが、実物の直接操作に比べ未だ大きく劣る。器用な操作の多くが滑りを含み滑りの検出がロボットの把持に有効であること、人が部分滑りを感知して把持力を調節することが知られているが、材質や接触条件により切り替わる摩擦現象の再現と提示は実現していない。また、摩擦現象の、操作の器用さやその要因と考えられる材質や表面状態の触知覚への寄与は、解明の途上にある。

摩擦現象を再現する実時間シミュレーションモデルを、接触力、加速度、滑り分布の計測データに基づいて構築することで、様々な材質と条件での摩擦現象を再現できるようになると考えられる。さらにシミュレーションモデルにあったハプティクスレンダリングと触覚提示装置を開発して統合することで、器用な操作と質感を再現する VR 環境を実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、器用な操作と質感を再現する VR 環境の実現を目指す。物を指で擦ると固着滑り現象が生じることが多いが、このときの加速度の計測データには様々な摩擦現象の影響が現れる。本研究では、把持操作に影響があることが知られている部分滑りと、固着滑りの周期と振幅の特徴に影響する静止摩擦係数の固着時間への依存性を再現する実時間シミュレーションモデルを構築する。また、振動を中心とした触覚刺激のためのハプティックインタフェースについてその提示手法を検討する。これらにより把持操作の際に生じる摩擦振動と接触力を正確に再現することで、器用な操作と質感を再現する VR 環境を実現し、その設計指針を得ることを目指す。

3. 研究の方法

シミュレーションについては、ヒステリシスや部分滑りまで再現可能な摩擦モデルである LuGre モデルに、静止摩擦係数の固着時間依存性を組み込んだ摩擦モデルを構築し、物体を指で擦った時や把持操作時に生じる摩擦現象である固着滑りを再現する。また現実の物体を擦った際の加速度を計測したデータとシミュレーション結果を比較する。

ハプティックインタフェースについては、多指への提示が必要なこと、振動提示が重要だと考えられることから、多指操作を阻害しない小型の装着型提示装置を実現可能な張力を直接皮膚に伝達する装着型のハプティクスインタフェースについてその特性を評価する。

4. 研究成果

4.1 LuGre モデルに静止摩擦係数の固着時間依存性を組み込んだ摩擦モデルの構築[1][2]

LuGre モデルは右図のように物体に剛毛が生えていると考えることで、ヒステリシスなどを表現する。剛毛の平均変位を z 、物体同士の相対速度を v とし、剛毛のバネダンパ係数を σ_0, σ_1 、物体間の一次の粘性係数を σ_2 とすると、物体間に働く力 = 摩擦力 F は、

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v$$

となる。また平均変位 z は

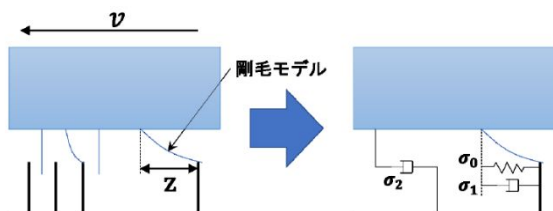


図 1 LeGre モデルの剛毛とバネダンパ

$$\frac{dz}{dt} = v \left(1 - \operatorname{sgn}(v) \frac{\sigma_0 z}{g(v)} \right)$$

に従うものとする。この式は固着している剛毛については相対速度 v だけ変位が増すことを意味している。摩擦力は $g(v)$ が表す最大値を超えることがないため、これを超える場合は一部の剛毛が滑り変位 z が増加しない。 $\operatorname{sgn}(v) \frac{\sigma_0 z}{g(v)}$ は滑る剛毛の割合に対応している。 $g(v)$ は摩擦係数で、ストライベック効果を反映したモデルとして

$$g(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\left| \frac{v}{v_s} \right|^\alpha}, F_c, F_s, v_s, \alpha \text{ は定数}$$

のような式でモデル化される。

静止摩擦の固着時間依存性を組み込むためには、 $g(v)$ を平均固着時間 T の関数にしたい。2物体が一定速度 v で滑る時、各剛毛は静止摩擦の限界まで伸びたあと滑りにより変位0に戻ることを繰り返すと考えられる。各剛毛の変位が0から $2z$ に一樣に分布していれば平均変位が z になる。この時の各剛毛の平均固着時間は $0/v$ から $2z/v$ に一樣に分布するので、剛毛の平均固着時間 $T_\infty = \frac{z}{v}$ となる。

一定速度で滑り続ける場合以外をシミュレーションするため、現在の平均固着時間 T_i と Δt 秒後の固着時間 T_{i+1} を考えると、すべての剛毛が固着していた場合で $T_{i+1} = T + \Delta t$ であり、これより大きくなることはない。そこで、

$$T_{i+1} = \min(T_i + \Delta t, T_\infty) = \min(T_i + \Delta t, \frac{z}{v})$$

により平均固着時間 T_i を更新する。この T_i を用いて

$$g'(T_i) \equiv F_c + B \log(CT + 1)$$

とした摩擦モデルを考える。この $g'(T_i)$ は LuGre モデルの $g(v)$ と速度が大きい部分では一致し、ストライベック効果を考慮していないが、適当なパラメータを選ぶと図2のようにある程度一致させられる。潤滑の効果が高い部分は再現できないので、静止～非常に小さな速度に $g'(T_i)$ を用い、それ以上の速度では $g(v)$ を用いることも考えられる。

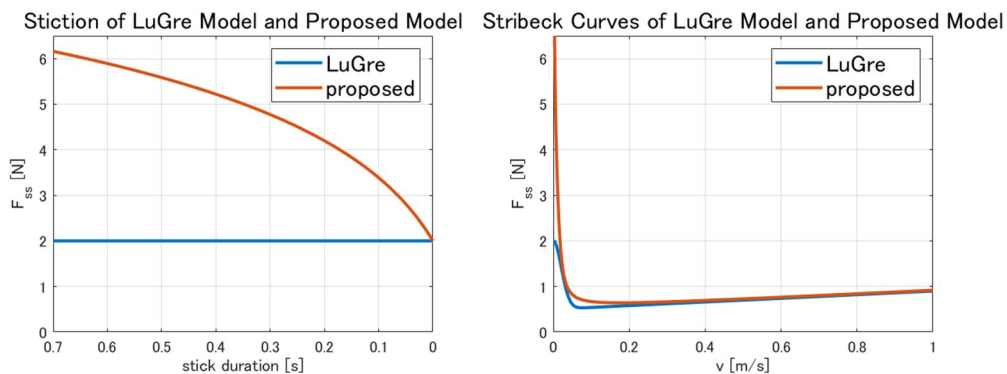


図 2 LuGre モデルと提案手法の摩擦係数の比較

4.2 現実の固着滑りの計測と提案モデルの同定[2]

指先に加速度センサを取り付け、ケント紙を滑らせた際の加速度波形と提案モデルを用いたシミュレーション結果を比較したところ図3のように計測した波形と似た特徴を持つ波形が得られた。

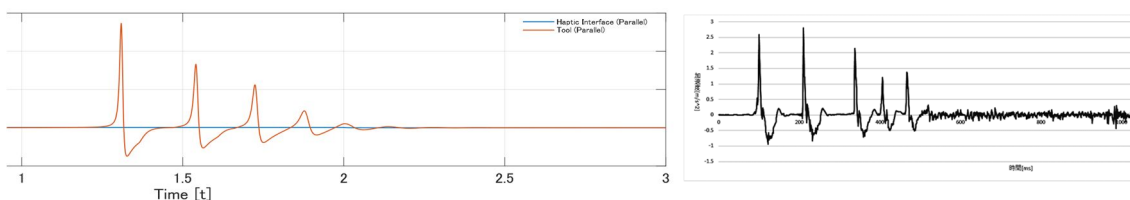


図 3 シミュレーションによる Proxy の加速度(左)と実世界での加速度

4.3 糸を用いたハプティックインタフェースの振動伝搬の評価

皮膚に糸や帯を接触させてモータなどで張力を制御することで力や振動を提示する手法は小さな駆動装置で広範囲に提示できることから装着型のハプティックインタフェースの提示手法として有望である。そこで、体幹用の装着型の装置について、振動の伝達範囲[3]とその情報伝達特性[4][5]を評価した。これらの結果を踏まえて、手指の皮膚に糸が直接触れる形式の提示装置[6]の研究経験に基づき、摩擦振動を含むより精細な触覚提示装置の研究を進めている。

参考文献

- [1] Sen Nakahara, Shoichi Hasegawa, Two-Finger Grasping Virtual Environment with Realistic Stick-Slip Vibration, Asia Haptics 2022, 2022.
- [2] 中原線, 長谷川晶一, 固着滑りを精細に再現する力触覚レンダリングによる材質感提示, 第27回バーチャルリアリティ学会大会, 2022.
- [3] Yusuke Yamazaki, Hironori Mitake, Shoichi Hasegawa, Implementation of Tension-based Compact Necklace-type Haptic Device Achieving Widespread Transmission of Low-frequency Vibrations, IEEE Transactions on Haptics, 2022.
- [4] Yusuke Yamazaki, Shoichi Hasegawa, Providing 3D Guidance and Improving the Music-Listening Experience in Virtual Reality Shooting Games Using Musical Vibrotactile Feedback, IEEE VR 2023, the 30th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 2023.
- [5] 小野寺 将, 三武 裕玄, 長谷川 晶一 : 相互常時触覚通信の提案と伝達可能な情報の調査, 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28回研究会, 2022.
- [6] Takafumi Aoki, Hironori Mitake, Danial Keoki, Shoichi Hasegawa, Makoto Sato, Wearable Haptic Device to Present Contact Sensation Based on Cutaneous Sensation Using Thin Wires, 5th Advances in Computer Entertainment Technology Conference, pp.115-122, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Yamazaki Yusuke, Hasegawa Shoichi	4. 巻 IEEE VR
2. 論文標題 Providing 3D Guidance and Improving the Music-Listening Experience in Virtual Reality Shooting Games Using Musical Vibrotactile Feedback	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)	6. 最初と最後の頁 276-285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/VR55154.2023.00043	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 -

1. 著者名 Yamazaki Yusuke, Mitake Hironori, Hasegawa Shoichi	4. 巻 15
2. 論文標題 Implementation of Tension-Based Compact Necklace-Type Haptic Device Achieving Widespread Transmission of Low-Frequency Vibrations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 535 ~ 546
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2022.3176673	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 -

1. 著者名 Ohara Hiroki, Hasegawa Shoichi	4. 巻 ACM ICPS
2. 論文標題 DualEMS: Two-Channel Arbitrary Waveform Electrical Muscle Stimulation Device to Design Interference Stimulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Augmented Humans International Conference	6. 最初と最後の頁 195-202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3519391.3519415	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sen Nakahara, Shoichi Hasegawa
2. 発表標題 Two-Finger Grasping Virtual Environment with Realistic Stick-Slip Vibration
3. 学会等名 Asia Haptics 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中原 線, 長谷川 晶一
2. 発表標題 固着滑りを精細に再現する力触覚レンダリングによる材質感提示
3. 学会等名 第27回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野寺 将, 三武 裕玄, 長谷川 晶一
2. 発表標題 相互常時触覚通信の提案と伝達可能な情報の調査
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28回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中原 線, 長谷川 晶一
2. 発表標題 部分滑りと静止摩擦の時間依存を再現する摩擦モデルの提案と力触覚レンダリング
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27回研究会
4. 発表年 2021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)	明治大学・総合数理学部・専任准教授 (32682)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------