

同一力覚デバイスによるテクスチャベースの摩擦力計測・モデル化・提示システムの開発*

脇田 航^{†a)} 田中 弘美[†]

A Development of a Texture-Based Friction Measurement, Modeling and Rendering System with ONE Haptic Device*

Wataru WAKITA^{†a)} and Hiromi T. TANAKA[†]

あらまし 本論文では同一力覚デバイスによるテクスチャベースの摩擦力計測・モデル化・提示システムの開発について述べる。よりリアルなサイバーワールドを実現するには、実世界における実物体の計測データに基づいたモデル化と実時間提示が必要である。近年、触・力覚の分野において、リアルタイムかつ高精細な触・力覚提示手法として、テクスチャベースの手法がいくつか提案されている。しかしながら、従来のテクスチャベースの手法は実世界における実物体の計測データに基づいておらず、また、各種センサの導入や開発にはコストがかかるため、計測に基づいた VR 環境を低コストで実現することは困難である。そこで我々は、同一の力覚デバイスのみを用いて安価で手軽に実物体の摩擦データを計測し、計測した摩擦力をテクスチャベースで三次元触・力覚モデル化及び提示可能なシステム開発を行った。また、評価実験において三次元仮想モデルをなぞったときに、カラーマップに応じた摩擦力の違いを表現可能かどうか及び計測に基づいた摩擦力を提示可能かどうか検証を行い、その結果、提案システムの有効性を確認することができた。

キーワード 人工現実感, 触・力覚テクスチャ, 触・力覚計測, 触・力覚モデル化, 触・力覚提示

1. まえがき

よりリアルなサイバーワールドをコンピュータグラフィックス (CG) やバーチャルリアリティ (VR) 技術を用いて実現するには、いかに実世界における実物体の計測に基づいて高忠実に仮想物体をモデル化し、それらをリアルタイムかつ高精細に提示するかが重要である。リアルタイムに視覚提示を行うには 30~60 Hz の更新周期を確保すれば十分とされているが、触・力覚提示においては、視覚提示にかかるコストなども考慮しつつ、300~1000 Hz 以上 (軟らかい物体を表現するには少なくとも 300 Hz, 硬い物体を表現するには 10 kHz) の更新周期の確保が必要とされている [1]。また、力覚提示において高精細な仮想物体を表現するには、リアルタイム性を確保しつつ、形状及び質感表

現を行う必要がある。このためには、触・力覚デバイスを用いて仮想物体をなぞる際、不自然な振動が発生したり、意図しない方向に大きな力が発生しないよう、滑らかに反力を提示する必要がある。

近年、触・力覚の分野において、触・力覚提示に二次元画像を用いた研究 [2]~[5] や、3DCG におけるテクスチャマッピングを触・力覚提示へと応用し、少ないデータ量と計算量でリアルタイムかつ高精細に視覚モデル表面にマッピングされた二次元のカラー画像 (カラーマップ) に応じた触・力覚提示が可能なテクスチャベースの触・力覚提示手法に関する研究がいくつか報告されている [6]~[8]。テクスチャベースの手法では、カラーマップに応じた高さマップ及び法線マップを用いてピクセル単位で仮想物体表面の凹凸を表現したり [6]、摩擦マップや硬さマップを併用することにより、仮想物体表面の質感表現を行う。具体的には、仮想物体表面をなぞった部分に対応する高さマップの画素値に応じて仮想物体表面の高さを動的に変化させ、摩擦マップや硬さマップの画素値などに応じて反力を計算し、法線マップの画素値に応じて反力方向を振動

[†] 立命館大学情報理工学部知能情報学科, 草津市
Department of Human and Computer Intelligence, College
of Information Science and Engineering, Ritsumeikan Uni-
versity, 1-1-1 Noji Higashi, Kusatsu-shi, 525-0058 Japan
a) E-mail: wakita@cv.ci.ritsumeik.ac.jp
* 本論文はシステム開発論文である。

させることにより、少ないポリゴン数で、カラーマップに応じたピクセル単位の凹凸や触感表現、例えば、金属の画像に応じたゴツゴツ感や土の画像に応じたザラザラ感といった表現が可能となる [7].

しかしながら、従来のテクスチャベースの手法では、カラーマップをグレースケール化したものを高さ情報として用いたり [7], ユーザがペイント感覚で摩擦や硬さ情報などを割当可能なシステム [8] が用いられており、仮想物体を構築する際、実世界における実物体の計測データに基づいていなかった。よりリアルなサイバーワールドを実現するには、視覚モデルに応じた触・力覚提示に加え、計測に基づいた仮想物体のモデル化と提示が必要である。実世界の触・力覚データを取得する方法として、一般的に触覚センサが用いられており、触覚センサの開発に関する研究が盛んに行われている [9]~[13]. しかしながら、これらの触覚センサの導入や開発にはコストがかかり、低価格で手軽に計測データを取得することは一般的に困難である。また、触覚センサで取得したデータをそのまま触・力覚デバイスで再現することは難しく、計測システムと提示システムとの間で大きな差が生じる可能性がある。

そこで我々は、低コストで手軽に実世界における実物体の力学特性を計測・モデル化・提示可能なシステムの実現を目的として、手始めに、一般的に普及している触・力覚提示デバイスのみを用いて実物体をなぞったときの摩擦データを計測し、計測した摩擦データに基づく触・力覚提示が可能な手法の提案及びプロトタイプシステムの開発を行った [14]. 開発したプロトタイプシステムでは、触覚センサを用いることなく、同一の力覚デバイスのみを用いてデバイス先端のグリッ プ位置を自動制御して平面状の実物体表面をなぞったときの摩擦力を二次元画像化して平面状の仮想モデル表面にマッピングし、仮想モデルをなぞる際、仮想モデル表面にマッピングされた摩擦力に基づいて手軽に摩擦感の再現を行うことが可能である。しかしながら、計測した摩擦力をカラーマップに応じてピクセル単位で曲面状の仮想モデル表面へマッピングする三次元モデル化及び触・力覚提示可能な手法については考慮されていなかった。そこで本研究では、開発したプロトタイプシステムを拡張し、同一の力覚デバイスのみを用いて計測した摩擦力をテクスチャベースで三次元触・力覚モデル化及び提示可能なシステム開発を行う。なお、前述のとおり、本論文は前報 [14] の内容を改良し、計測した摩擦力をテクスチャベースの手法 [6]~[8] に

倣ってカラーマップに応じて三次元モデル化し、計測に基づいた摩擦感をピクセル単位で三次元触・力覚提示可能なシステム開発を目的としており、以下で述べる触・力覚デバイスによる摩擦力計測手法は前報の内容と重複しているが、本論文では読みやすくするために簡単に述べる。

2. 触・力覚提示デバイスによる摩擦力計測

触・力覚提示デバイスには様々な種類のものが存在するが、近年、安価で手軽に入手可能なものとして、Novint Technologies 社の Novint Falcon が挙げられる。Novint Falcon は設地型で 3 自由度の点接触型のデバイスであり、四つのボタンが付いたボール状またはピストル状のグリッ プを装着することが可能な道具媒介型のデバイスである (図 1 参照)。作業領域は 101.6 mm × 101.6 mm × 101.6 mm, 位置分解能は 400 dpi, 最大提示力は 8.9 N [15] である。また、SDK が Novint Technologies 社の Web サイトで配布されており、HDAL (Haptic Device Abstraction Layer) API を介すことにより、Novint Falcon を用いたアプリケーション開発が可能となる。本研究では触・力覚デバイスに Novint Falcon のみを用いて摩擦力の計測・モデル化・提示可能なシステムの開発を行う。

2.1 摩擦力の計測方法

HDAL API で取得可能なデバイスの情報は、デバイス空間におけるグリッ プ先端の位置や、グリッ プのボタンの押下状態のみであり、そのままではグリッ プ先端にかかる力を計測することはできない。

そこで本研究では、HDAL API を介してグリッ プ先端位置を特定の位置にとどまらせるよう自動制御し、本来とどまるべき理想的なグリッ プ先端位置と、実際の物理的なグリッ プ先端位置との関係をもとに反力を計算し、この力を摩擦力として計測を行う。

2.1.1 グリッ プ先端の位置制御

グリッ プ先端を任意の位置 g に固定させるには、グ

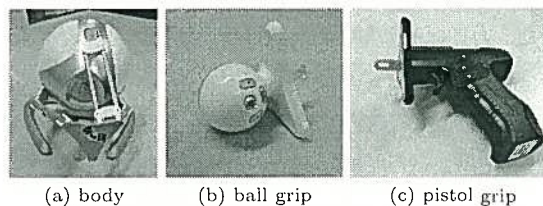


図 1 触・力覚デバイス Novint Falcon
Fig. 1 Novint Falcon haptic device.

リップ先端の位置 p を, g に近づける必要がある. $g-p$ を v としたとき, 固定させる力 F は以下の式で計算される.

$$F_j = Kv_j + D \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで, j は力覚プロセスにおける更新カウンタ, K はばね定数, D はダンパ定数, Δt は力覚プロセスの更新周期である.

グリップ先端を任意の位置に移動させるには, g の値を変更すればよい. g の値を自動的に変更することにより, グリップ先端の位置を自動制御することが可能となる.

グリップ先端を自動的に移動させる際, もしグリップ先端に障害物が何もない場合, 空中をスムーズに移動するため $|F|$ の値は小さな値となり, グリップ先端に障害物がある場合は $|F|$ の値は大きくなる. この特性を利用してグリップ先端を自動的に移動させて実物体表面をなぞった場合, 滑りやすい物体では $|F|$ の値が小さく変動し, 滑りにくい物体では引っかかりが生じてスムーズに移動せず, $|F|$ の値が大きく変動すると考えられる. そこで本研究では, この $|F|$ の値を摩擦力として扱うこととした.

図 2 に具体的な摩擦力の計測方法を示す. Novint Falcon 本体にピストルグリップを装着し, グリップの下にゴムや鉄といった実世界の様々な材料を置き, グリップ先端位置を自動制御しながら縦方向や横方向になぞり, 引っかかる力の大きさ $|F|$ を摩擦力として計測していく. Novint Falcon は 1 kHz の更新周期で反力を発生可能な仕様となっているため, 1 秒間に 1000 個の位置データ及び摩擦力を計測することができる.

なお, 本システムでは, 触・力覚デバイスに Novint Falcon を用い, 平面に置かれた物体を横方向及び縦方向に水平になぞりながら摩擦力の計測を行う仕様と

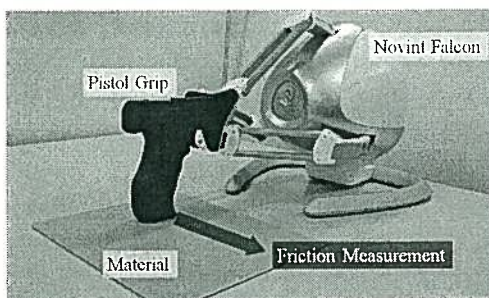


図 2 摩擦力の計測方法
Fig. 2 Friction measurement technique.

なっているため, 計測範囲はおよそ 10 cm × 10 cm 以内に限られる.

3. 計測に基づく三次元モデル化

本研究では, テクスチャベースの手法 [6]~[8] に倣い, 計測した摩擦力をカラーマップに応じてピクセル単位でマッピングすることで三次元モデル化を行う.

3.1 摩擦画像の生成

前章で述べた計測手法を用いて実物体を自動的になぞる際, 1 秒間にピストルグリップを任意の距離で動かしながら, 作成したいテクスチャサイズ ($M \times M$ ピクセル) で摩擦画像を生成する. 具体的には, ピストルグリップを左端から右端 (横方向) へと動かす際, 以下の処理を行いながら摩擦力を計測する.

- (1) $|F|$ の値を取得
- (2) $|F|$ の値を任意の摩擦最大値で正規化
- (3) 正規化した $|F|$ の値を 0~255 の範囲にスケールリング

計測終了後, 0~255 の範囲にスケールされた摩擦力の二次元画像 ($M \times M$ ピクセル) を出力する.

3.2 摩擦マップの生成

計測した材料はカメラで撮影し, 画像編集ソフトなどを用いてカラーマップにしておく. また, カラーマップに応じた摩擦力を提示するため, 前節で出力した摩擦画像をカラーマップと対応づけることにより摩擦マップ ($M \times M$ ピクセル) を生成する. ここで, 前節で出力した摩擦力の二次元画像を R 値で格納し, G 値を用いてカラーマップとの対応づけを行う. 本論文では, カラーマップと対応する領域の摩擦力は一様であることとし, 対応づける場合は G 値を 255 とし, 対応づけられない場合は G 値を 0 とする. また, 本論文では B 値は用いないため 0 とする. ここで作成した各種マップは, UV 展開された三次元モデル表面にマッピングしておく.

具体的なモデル作成例として, 図 3 にシリコンゴム, 鉄, ゴムの 3 種類の材料を組み合わせた各種マップを示す. 図 3 (a) はカラーマップである. 白い部分がシリコンゴム, グレーの部分が鉄, 黒い部分がゴムである. 図 3 (b) はシリコンゴムの摩擦マップ, 図 3 (c) は鉄の摩擦マップ, 図 3 (d) はゴムの摩擦マップである. 白い部分がカラーマップと対応しており, 薄らと確認できる縦線が計測した摩擦力を表している. また, 図 4 にシリコンゴム, 鉄, ゴムの 3 材料のカラーマップと摩擦マップをそれぞれテクスチャマッ

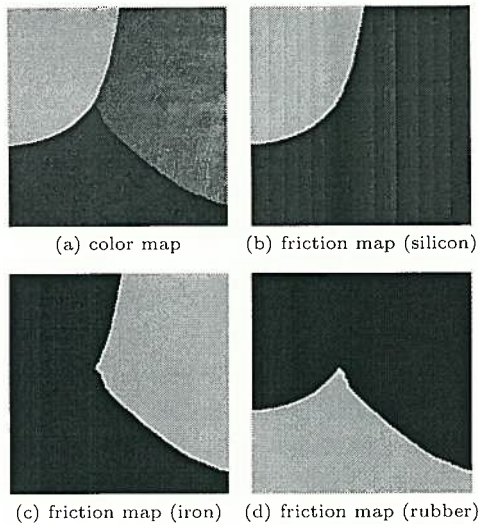


図3 三つの材料を組み合わせた各種マップ
Fig.3 Color and friction maps.

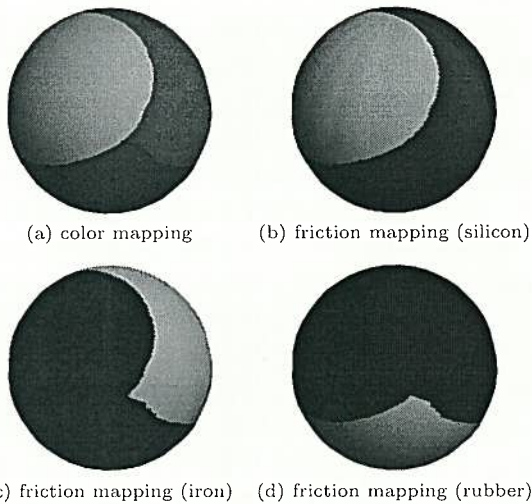


図4 三つの材料の摩擦力がマッピングされた三次元モデル
Fig.4 3D model which mapped the friction force of 3 materials.

ピングした三次元モデルを示す。カラーマップは視覚提示に用い、摩擦力マップは触・力覚提示に用いる。

4. 計測に基づく触・力覚提示

前章で生成した摩擦力マップの値に基づく摩擦力の提示を行う。本研究では、テクスチャベースの手法[6]~[8]を拡張し、前報[14]で提案した摩擦力再現手法を三次元形状モデルへ適用可能なものへと改良

を行う。なお、本論文で使用するテクスチャはカラーマップ、高さマップ、法線マップ、摩擦力マップ、硬さマップの五つであるが、硬さマップと高さマップはRGB(127, 127, 127)のものを使用し、法線マップは(127, 127, 255)のものを使用する。

4.1 テクスチャベースの触・力覚提示手法

4.1.1 前処理

触・力覚デバイスを用いて画面上に表示されている仮想物体に自然に触れるためには、デバイス空間におけるグリッ先端位置を仮想空間におけるカメラの位置や向きに合わせる必要がある。以下、グリッ先端位置 p は、デバイス空間におけるグリッの先端位置をカメラ空間に合わせて仮想空間内での位置に変換済みであることとして話を進める。

ユーザに提示する反力は、形状表現のための反力 V と摩擦表現のための反力 H との和 ($V + H$) で計算される。

4.1.2 形状表現のための反力計算

力覚で三次元仮想物体の形状を表現するには、グリッ先端位置 p と仮想物体表面との接触判定を行う必要がある。本研究では、交差判定アルゴリズムに Möller らの手法[16]を用い、グリッの先端位置 p から仮想物体の各ポリゴンの面法線方向への線分と仮想物体の各ポリゴンが交差するかどうかを判定し、交差したポリゴン群の中からグリッの先端位置 p と最も近い距離にあるポリゴン(アクティブポリゴン)を抽出する。もし接触した場合、接触点に対応する各種テクスチャ画像の画素値を取得する。また、本システムでは、Constraint-based God-object Method[17]に基づいて反力を計算し、アクティブポリゴン周りから優先的に判定を行う。

形状表現のための反力 V は以下の式で計算される。

$$V_j = n_j s_j d_j + n_j D \frac{d_j - d_{j-1}}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 j は力覚プロセスにおける更新カウンタ、 n は法線マップの値、 s は硬さマップの値、 d は p が仮想物体表面に侵入した量、 D はダンバ定数、 Δt は力覚プロセスの更新周期である。

4.1.3 摩擦表現のための反力計算

力覚で三次元仮想物体表面をなぞったときの摩擦感を表現するには、仮想物体表面をなぞる際、接線方向に対して反力を発生させる必要がある。このため、グリッ先端位置 p と仮想物体表面との接触判定の際、現在の接触点と1フレーム前の接触点から接線方向 m

を求めておく。また、カラーマップに応じて計測した摩擦に基づいた反力を提示するため、接触判定においてグリップ先端位置が仮想物体表面と接触した場合、接触点に対応する摩擦マップのG値が255である摩擦マップを抽出し、現在のグリップ先端位置に対応する摩擦マップのピクセル座標と1フレーム前のグリップ先端位置に対応する摩擦マップのピクセル座標間の距離 Δl を計算し、 L を以下の式で計算する。

$$L = L_{j-1} + \Delta l_j \quad (3)$$

ここで、 M は摩擦マップのピクセル幅、 j は力覚プロセスにおける更新カウンタである。もし、 $L \geq M$ を満たす場合は L の値を0にする。

接触している間、上記の計算を行い、 L に対応する摩擦マップのR値 f を取得する。 f は3.で画像化された摩擦 $|F|$ の値である。

仮想オブジェクト表面をなぞる際、接触点にとどまらせるようグリップ先端位置 p を接触点に一時的に固定させる。このときの固定させたい点を g とする。 $g-p$ を v としたとき、もし $|v| < f$ であれば、摩擦表現のための反力 H は以下の式で計算される。

$$H_j = -m_j v_j - m_j D \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} \quad (4)$$

ここで、 j は力覚プロセスにおける更新カウンタ、 m は接線方向、 v は接線方向への侵入量、 D はダンパ定数、 Δt は力覚プロセスの更新周期である。

もし f の値が大きいと、接線方向に移動しにくい状態となる。もし $|v| > f$ であれば、摩擦表現のための反力 H を一時的に0としてすべりやすくし、固定させたい点を g を現在の接触点へと更新する。

5. 計測・モデル化・提示結果及び評価実験

前報[14]では、滑りやすいと思われる鉄の板、滑りにくいと思われるシリコンゴム、中間程と思われる天然ゴムの3種類の材料をそれぞれ机の上に置き、ピストルグリップで縦方向及び横方向になぞることで摩擦マップの生成を行ったが、本論文ではカラーマップと対応する領域の摩擦力は一様であることとし、横方向のみになぞったときに計測した摩擦力をベースにカラーマップに応じた摩擦マップの作成を行う。本実験では、図3に示すように、三つの材料を組み合わせてカラーマップを作成し、計測した摩擦力をベースに三次元モデル化を行い、三次元仮想モデルをなぞったときに、カラーマップに応じた摩擦力の違いを表現可

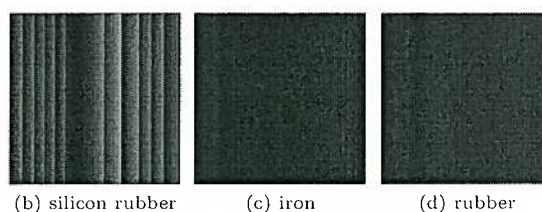
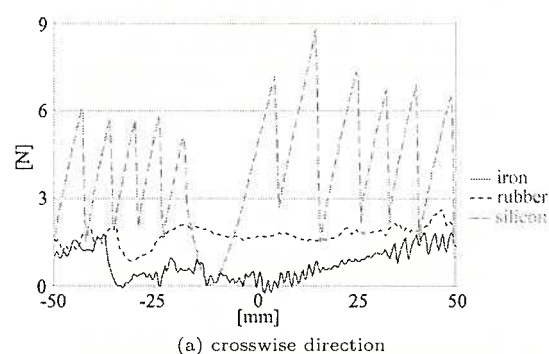


図5 摩擦力計測結果

Fig. 5 A result of a friction measurement.

能かどうか及び計測に基づいた摩擦力を提示可能かどうかについてアンケート評価を行った。

5.1 摩擦力の計測・モデル化

図5にシリコンゴム、鉄、ゴムを横方向になぞったときの摩擦力をそれぞれ計測した結果及び二次元画像化したものを示す。

図5(a)の横軸は材料表面をピストルグリップでなぞったときのデバイス空間座標、縦軸はその位置における摩擦力の大きさ $|F|$ である。Novint Falconの最大提示力は8.9N[15]であるため、本システムでは8.9N以上の値を計測することはできない。このため本システムでは、計測時に8.9Nを超えるようであれば8.9として出力するようにしてある。

図5(b)~(d)に示す摩擦力の画像をもとに、図3(a)のカラーマップに応じて摩擦マップに変換したものを図3(b)~(d)に示す。

5.2 カラーマップに応じた材料判定実験

まず、被験者12名に対し、PC画面上に表示された図4(a)の三つの異なる摩擦特性の領域をもつ仮想モデルと机の上に置かれた実物体(シリコンゴム、鉄、ゴム)をピストルグリップを装着したNovint Falconを用いて交互に好きなだけなぞってもらい、どの領域にどの材料の摩擦力が割り当てられているかを判定してもらった。集計の結果、被験者全員がシリコンゴム、鉄、ゴムの違いを判別することができた。

表 1 統計及び検定結果
Table 1 Statistical and test results.

	slow	fast
A1	0	0
A2	0	1
A3	2	2
A4	4	5
A5	6	4
significance probability determination	0.00009 possible	0.00181 possible

5.3 計測に基づく摩擦力の三次元提示実験

次に、前節と同様、PC 画面上に表示された図 4(a)の仮想モデルの各領域と机の上に置かれた各実物体(シリコンゴム、鉄、ゴム)をピストルグリップを装着した Novint Falcon を用いて、交互に好きなだけゆっくりなぞったときと速くなぞったときの二つについて、実物体の摩擦感を表現できているかを 5 段階評価(A1: 思わない, A2: どちらかといえば思わない, A3: どちらともいえない, A4: どちらかといえば思う, A5: 思う)でアンケート調査を行った。また、アンケート結果の有意性について、「A3: どちらともいえない」から有意差があるかどうか Mann-Whitney の U 検定で検定(両側検定, 有意水準 5%)を行った。

表 1 にアンケートの統計及び検定結果を示す。本システムはピストルグリップを用いて実物体をなぞったときの摩擦力を計測・モデル化し、計測に基づいた反力提示を行うため、ピストルグリップで物体をなぞったときの摩擦感を再現することとなる。また、提案手法は、ある一定の速度及び平面状の実物体をなぞったときに計測した摩擦力をベースに反力を計算するため、計測したときと同様の触速度で仮想物体の表面に沿ってなぞったときほど計測したときの摩擦力に近い摩擦感を提示でき、計測時とは異なる触速度やなぞり方向によっては、計測したときの摩擦力に近い摩擦力を提示することはできないと考えられるが、本実験結果では、ゆっくりなぞったときも速くなぞったときも有意差が見られ、ゆっくりなぞったときの方が有意確率が低い結果となった。以上の結果より、提案システムの有効性を確認することができた。

しかしながら、本論文における摩擦力のモデル化及び提示手法では、仮想物体表面を強く押さえながらなぞったときや、立体形状を曲面状になぞったときの摩擦感のモデル化と再現については考慮していない。このため、現状では曲面状になぞったときの法線力の変化による摩擦力への影響を表現することはできない。

6. む す び

本研究では、同一の力覚デバイスのみを用いて様々な材料の摩擦力を計測し、テクスチャベースで三次元触・力覚モデル化及び提示可能なシステム開発を行った。具体的には、同一の力覚デバイスを用いて実物体をなぞったときに計測した摩擦力をベースにカラーマップに応じた摩擦力マップの作成を行い、テクスチャベースの手法に倣って三次元モデル化し、計測に基づいた摩擦感をピクセル単位で三次元触・力覚提示可能なシステムの開発を行った。また、評価実験において、三つの材料を組み合わせてカラーマップを作成し、計測した摩擦力をベースに三次元モデル化を行い、三次元仮想モデルをなぞったときに、カラーマップに応じた摩擦力の違いを表現可能かどうか及び計測に基づいた摩擦力を提示可能かどうかについて検証を行った。提案手法では、ある一定の速度及び平面状の実物体をなぞったときに計測した摩擦力をベースに反力を計算するため、計測したときと同様の触速度で仮想物体の表面に沿ってなぞったときほど計測したときの摩擦力に近い摩擦感を提示でき、計測時とは異なる触速度やなぞり方向によっては、計測したときの摩擦力に近い摩擦力を提示することはできないと考えられるが、本実験結果では、ゆっくりなぞったときも速くなぞったときも有意差が見られ、ゆっくりなぞったときの方が有意確率が低い結果となった。また、本論文における摩擦力のモデル化及び提示手法では、仮想物体表面を強く押さえながらなぞったときや、立体形状を曲面状になぞったときの摩擦感のモデル化と再現については考慮しておらず、現状では曲面状になぞったときの摩擦力の変化を表現することはできない。このため、様々な触速度やなぞり方向における摩擦力を計測して分析・モデル化し、提示可能な手法の提案も今後の課題として挙げられる。また、提案手法ではピストルグリップを用いていくつかの材料の摩擦力の計測を行ったが、計測した摩擦力が接触面積に依存するかどうかについては実験を行っていない。接触面積を変えてゴムのような弾性物体をなぞり、摩擦力が接触面積に依存するかどうかについては今後の課題である。また、計測した摩擦力が真値と近いものかどうかについて実験を行う必要がある。ピストルグリップの部分に触覚センサを取り付け、同様の条件で力を計測し、比較実験を行うことも今後の課題として挙げられる。また、本システムでは、硬さの計測や凹凸の計測を行うこと

ができないため、摩擦以外のデータの計測も今後の課題として挙げられる。このほか、今回計測した材料以外の様々な材料のデータベース化、また、実測データに基づくデジタルコンテンツの制作と評価などが挙げられる。

文 献

- [1] G. Picinbono, J.C. Lombardo, H. Delingette, and N. Ayache, "Improving realism of a surgery simulator: Linear anisotropic elasticity, complex interactions and force extrapolation," *J. Visualization and Computer Animation*, vol.13, no.3, pp.147-167, July 2002.
- [2] 田村信彦, 津村徳道, 三宅洋一, 田辺政裕, 山浦 品, "ハプティック・テクスチャを用いた医療トレーニングシステムの開発," *VR 医学*, vol.3, no.1, pp.30-37, Sept. 2004.
- [3] 下条 誠, 仁木 亨, "高速応答が可能な可搬型ハプティクスディスプレイの開発," *信学論 (D-II)*, vol.J87-D-II, no.5, pp.1133-1141, May 2004.
- [4] V. Theoktisto, M. Fairén, I. Navazo, and E. Monclús, "Rendering detailed haptic textures," *Second Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPHYS 05)*, pp.16-23, Pisa, Italy, Nov. 2005.
- [5] 野村和義, 尹 新, 坂口嘉之, 田中弘美, "多方向照明HDR 画像からのメゾ構造に基づく触感提示システム," *信学論 (D)*, vol.J93-D, no.10, pp.2326-2329, Oct. 2010.
- [6] 脇田 航, 井門 俊, "距離マップおよび法線マップを用いたハイポリゴンモデルへの力覚提示," *情処学論*, vol.49, no.7, pp.2509-2517, July 2008.
- [7] 脇田 航, 井門 俊, "擬似凹凸への触・力覚提示を考慮したマテリアルシステム," *信学論 (D)*, vol.J91-D, no.8, pp.2061-2070, Aug. 2008.
- [8] 脇田 航, 村上研二, 井門 俊, "テクスチャベースの触・力覚モデリングシステムの開発," *信学論 (D)*, vol.J91-D, no.12, pp.2773-2780, Dec. 2008.
- [9] H. Chigusa, Y. Makino, and H. Shinoda, "Large area sensor skin based on two-dimensional signal transmission technology," *Proc. World Haptics 2007*, pp.151-156, 2007.
- [10] Y. Mukaibo, H. Shirado, M. Konyo, and T. Maeno, "Development of a texture sensor emulating the tissue structure and perceptual mechanism of human fingers," *Proc. IEEE Int.'l Conf. Robotics and Automation*, pp.2576-2581, 2005.
- [11] 村上剛司, 長谷川勉, "柔軟指先による把握物体のエッジ方向の触覚計測," *日本ロボット学会誌*, vol.24, no.2, pp.240-247, 2006.
- [12] K. Kamiyama, K. Vlack, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, "Vision-based sensor for real-time measuring of surface traction fields," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol.25, no.1, pp.68-75, 2005.
- [13] J.M. Abu-Khalaf, J.W. Park, D.J. Mascaro, and S.A. Mascaro, "Stretchable fingernail sensors for measurement of fingertip force," *Proc. World Haptics 2009*, pp.625-626, 2009.
- [14] 脇田 航, 村井博一, 田中弘美, "同一力覚デバイスによる摩擦力計測・提示システム," *信学論 (D)*, vol.J93-D, no.10, pp.2330-2333, Oct. 2010.
- [15] C. Fünzig, P. Thomin, and G. Albrecht, "Haptic manipulation of rational parametric planar cubics using shape constraints," *Proc. 25th ACM Symposium On Applied Computing (Sierre 2010)*, pp.1254-1258, March 2010.
- [16] T. Möller and B. Trumbore, "Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection," *J. Graphics Tools*, vol.2, no.1, pp.21-28, Jan. 1997.
- [17] C. Zilles and K. Salisbury, "A constraint-based God-object method for haptic display," *Proc. IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems*, vol.3, pp.146-151, Pittsburgh, U.S.A., Aug. 1995.

(平成 22 年 7 月 20 日受付, 11 月 19 日再受付)



脇田 航 (正員)

平 16 愛媛大・工・情報工学卒。平 18 同大学院理工学研究科情報工学専攻博士前期課程了。平 21 同大学院理工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程了。平 21 立命館大学客員研究員。平 22 同大学総合理工学研究機構ポスドクトラルフェロー。平 22 同大学衣笠総合研究機構ポスドクトラルフェロー。現在、同大学情報理工学部知能情報学科助教。3DCG、バーチャルリアリティ等の研究に従事。博士(工学)。



田中 弘美 (正員)

1975 お茶の水女子大・理・物理卒。1975~1978 (株) 富士通勤務。1981 米国ロチェスター大学大学院コンピュータサイエンス学科修士課程了。1988 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程了。工博。1988~1994 ATR 通信システム研究所客員研究員。1994 立命館大学理工学部情報学科教授。現在、同大学情報理工学部知能情報学科教授。CG, CV, VR, 三次元画像通信の研究に従事, IEEE, VR 学会, VR 医学会, 芸術科学会, 情報処理学会各会員。

