

# ヒトの触覚とバーチャルリアリティ空間での摩擦シミュレーション

川崎 晴久  
岐阜大学 工学部人間情報システム工学科  
(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

原稿受付 2008年8月21日

“トライボロジスト” 第54巻 第5号 (2009) 331~336

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 空間で物体を把持するとき、視覚情報を提示する映像や聴覚情報を提示する音響のみでは物体を掴んでいるリアルな力感覚 (力覚・触覚) が生まれない。この力感覚情報を操作者に提示するデバイスをハプティックインタフェースという。ハプティックインタフェースを用いて臨場感のある操作感覚を提示するには、ヒトの触覚器官や触覚認識についての理解が必要である。また、臨場感ある物体操作には、操作者の指と物体表面で生じる摩擦や摩擦モーメントの提示が大きな役割をはたす。本稿は、ヒトの触覚受容器と触覚認識の概要、ヒトの5本指に力覚を提示できる5指ハプティックインタフェースの構成、VR空間での摩擦と摩擦モーメントの計算法などを紹介する。

## 2. ヒトの触覚

### 2.1 皮膚と触覚受容器

人間の皮膚には触覚受容器と呼ばれる器官が多くある。皮膚は、図1に示されるように無毛部と有毛部に分けられる<sup>1)</sup>。無毛部の代表として指腹部や掌がある。無毛部は、皮膚が厚く、指紋や掌紋があり、これらは触ることにより周辺外部の情報を能動的に得るために重要な役割を果たしている。有毛部は無毛部以外の部分であり、皮膚の大部分をしめる。手の甲には有毛部が多くある。皮膚は、無毛部も有毛部も外部から内部に向かって、表皮、真皮、皮下組織に分かれている。表皮は、死んだ表皮細胞からなる角質層と乳頭層からなる。

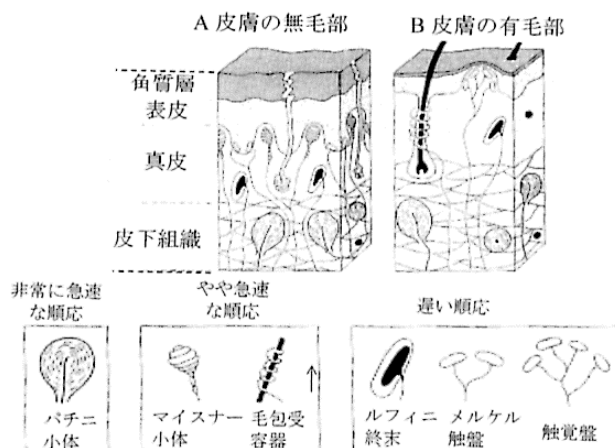


図1 ヒトの皮膚の構造 (出典:文献1))

皮膚の内部には触覚、痛覚、温度覚などの皮膚感覚を受容する受容器が分布している。触覚に関係する受容器は、特定構造をもつものと、特定の構造をもたず神経線維の先端が枝別れして広がった自由神経末端と呼ばれるものがあり、これらは皮膚に加えられる機械的な刺激に反応するため、機械受容器と呼ばれる。機械受容器には、パチニ小体、マイスナー小体、毛包受容器、ルフィニ終末、メルケル触盤、触覚盤などがある。1960年代末に、金属微小電極を用いてヒトの皮膚における機械受容器の単位活動を記録する微小神経電図法<sup>2)</sup>が開発され、触覚の神経生理学は急速に進歩した<sup>1,3)</sup>。その結果、これらは、速度に順応する速順応I型 (FAI)、加速度に順応する速順応II型 (FAII)、速度に応答するが変位にも応答する遅順応I型 (SAI)、おもに刺激の変位に応答する遅順応II型 (SAII) の4種類に分類され、次のことが解明されている。

## Human Tactile Sensing and Friction Simulation in Virtual Reality Environment

By Haruhisa KAWASAKI, Department of Human and Information Systems, Faculty of Engineering, Gifu University (1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193, E-mail: h\_kawasa@gifu.u.ac.jp)

**Key Words:** tactile sensing, haptic interface, friction, tactile perception, virtual reality

マイスナー小体は、真皮の乳頭部に万遍なく分布し、神経終末が神経周囲組織によってできたカプセルに包まれた構造をしている。小体の少しの形態的変形によって直ちに神経の活動電位が高まり、その後活動電位は速やかに減少し最終的に消失し、刺激がなくなれば小体は元の形態に回復する。真皮の表側に位置するため、触刺激による皮膚変位の速さを検出するのに適する。マイスナー小体は、40 Hz以下の粗振動を検出するのに適し、FAIに分類される。

パチニ小体は、卵形で長さ約1 mmあり、小体全体が神経終末を数十層の層板からなるカプセルが取り囲む構造をし、皮下組織に分布する。層状構造であるため、機械的刺激の変化(微分)情報を選択的に伝え、皮膚変位の加速度を検出する特性がある。その結果、高速度な圧変化と振動に反応し、200 Hz前後の繰返し刺激を与えたとき閾値が最低となる。非常に感度がよく、接触のときまず活動電位が高まるのはパチニ小体と考えられる。パチニ小体はFAIIに分類される。

メルケル触盤は、表皮の最深部において真皮の境界に存在するメルケル触細胞と神経終末から形成される。順応が遅く、持続する皮膚変位の大きさに比例して活動電位が高まる。メルケル触盤は、持続的接触すなわち軽い圧刺激を検出し、SAIに分類される。

ルフィニ終末は、真皮下層や皮下組織にある小包につつまれた神経終末である。メルケル触盤と同じく遅順応型の受容器で、持続的な皮膚変位の大きさに比例した応答を示すが、メルケル盤と異なり真皮層に存在するため、皮膚が引っ張られることなどやや遠い部位に加わった変位に応答する性質があり、SAIIに分類される。

機械受容器の信号は、脊髄を通り大脳皮質に入り、触感認識の源となる。

## 2.2 触感認識

ヒトの触感認識機構の解明に向けて、布、皮革、紙、木材、金属、樹脂、ゴム等の20種類の材料を対象に、被験者に試料を指先でなぞらせ、温かい/冷たい、硬い/柔らかい等の12項目でSD法(Semantic Differential Method)による官能評価した実験報告<sup>4)</sup>がある。その結果、触感を評

表1 素材の物理特性と触感因子の相関係数  
(出典:文献4)

	触感の潜在的な因子			
	凹凸	冷たさ	湿り気	硬さ
算術平均粗さ*	0.82	-0.69	-0.31	-0.57
動摩擦係数	-0.62	0.56	0.60	0.53
密度*	-0.69	0.66	0.52	0.17
熱伝導率*	-0.51	0.86	0.33	0.32
伝熱特性値*	-0.59	0.83	0.43	0.28
縦弾性係数*	-0.59	0.67	-0.03	0.56

価する際に、「凹凸感」、「冷温感」、「湿乾感」、「硬軟感」の四つの感覚表現を用いることが有効であるとし、素材の物理特性と触感因子の相関係数を表1のように示した。表1からは、動摩擦係数は凹凸、冷温、湿乾の3項目に相関が高いことを示し、複数の触感因子に影響する物理量として示している。

## 2.3 触テクスチャ知覚

触覚による物体表面の粗さの知覚は触テクスチャ知覚という。また、小ドットや溝などで作られる図形を認識することを二次元パターン知覚という。触テクスチャ知覚は、微細なテクスチャ知覚と粗いテクスチャ知覚に分けられ、それぞれ異なる機械受容器により知覚され<sup>5)</sup>、後者と二次元パターン知覚に関する神経システムが同一であることが明かとなっている<sup>3)</sup>。宮岡ら<sup>6)</sup>は、粒子サイズ1~40  $\mu\text{m}$ の精密研磨紙について粗さ弁別閾を測定し、粒子サイズ3  $\mu\text{m}$ では弁別閾が2.4  $\mu\text{m}$ であり、10  $\mu\text{m}$ 以下の刺激について粗さ弁別が十分可能としている。また、微細テクスチャの弁別では、摩擦ではなく刺激の表面凹凸の振幅情報が用いられていることを示した<sup>7)</sup>。

## 2.4 触覚の増強

自動車などの生産ラインにおける鋼板の面歪の検査では、技能者が鋼板の表面をなぞることで数十 $\mu\text{m}$ レベルの凹凸の検出を行っている。凹凸の検査結果は、技能者の熟練度によって差が生じる問題がある。そこで、手掌で表面をなぞるときに生じている力学的特性を、レバーメカニズムによる簡単な物理現象を利用して増幅させる触覚コンタクトレンズと呼ぶデバイスを佐野ら<sup>8)</sup>が開発している。これは、厚さ0.3 mmのシート状の台座の上に、直径1 mm、高さ4.2 mmの突起を

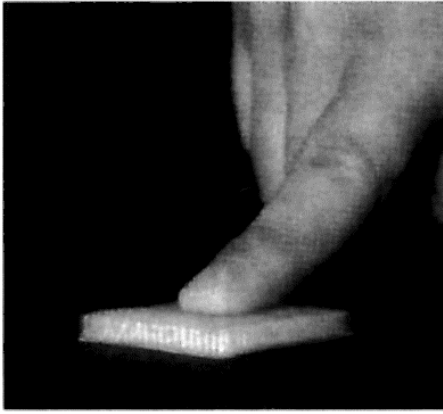


図2 触覚コンタクトレンズ〔出典：文献8〕

1.5 mm のピッチで配置したもので、樹脂で形成している。図2に示すように、触覚コンタクトレンズ越しに手掌で対称面を押さえ付けながら表面をなぞると、面歪が3～5倍に感じられる。この効果は、触覚コンタクトレンズの突起が対象表面の傾斜に応じて皮膚表面に接線変位を発生させるために生じ、物体形状の空間的な情報が指に加わる変位と力の時間変化の情報に変換されことから生じると解析<sup>9)</sup>している。この知見は、新しいハプティックデバイスの開発に貢献すると期待される。

### 3. ハプティックインタフェース

ハプティックインタフェースは、バーチャルリアリティ (VR) 環境においてリアリティを創造する上で重要なデバイスであり、力覚提示に主眼をおいたデバイスは、力覚インタフェースという。

#### 3.1 触覚提示技術

ヒトの指で物体表面に触れたり、なぞったりしたときに感じる感覚を触覚と総称している。触覚には、2.2節で述べた「凹凸感」、「冷温感」、「湿乾感」、「硬軟感」以外にも物体表面の摩擦感や粘着感など種々の感触がある。現実にある感触は、複数の触覚因子が複合的に組み合わせられて形成されると考えられる<sup>4)</sup>。これらの多様な触覚因子を総合的に提示することは現状では難しいため、多くは個別の触覚の提示に特化している。事例の多い研究としては、物体表面のつるつる／ざらざらなどの表面テクスチャ感の提示である<sup>10)</sup>。表面テクスチャ感の知覚は物体表面に触れたときに皮膚に生ずる機械的振動が大きな役割を果たすと考え

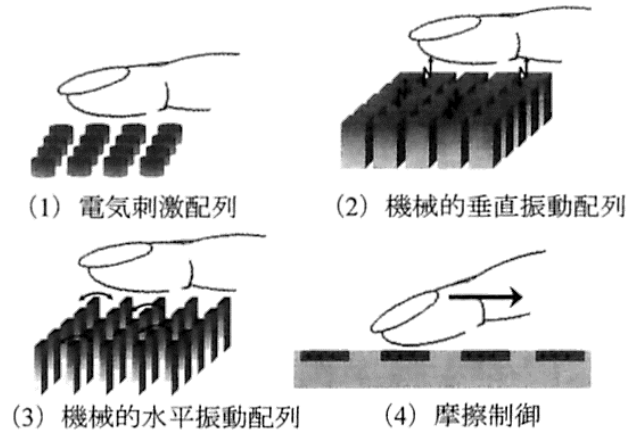


図3 テクスチャ感提示デバイスの構成例

られるが、テクスチャ感の提示は図3に示すように、電氣的刺激と機械振動刺激の方法がある。図3(1)は電氣的刺激による方法<sup>11)</sup>であり、図3(2)～(4)はアクチュエータを用いて機械的振動を生成する方法<sup>12)~14)</sup>である。図3(2)は、垂直方向に振動が可能な振動素子をマトリックス状に配置したものである<sup>12)</sup>。振動素子の振動周波数は皮膚の機械的受容器の感度特性をもとに250 Hz前後の振動がよく利用されている。図3(3)は、同じくマトリックス状に振動素子を配置するが、皮膚に対して主としてせん断振動を生じさせている<sup>13)</sup>。せん断振動により効果的に表面テクスチャを再現できることは触覚コンタクトレンズでも示されている。この方法では、デバイスを指先に固定する構成が用いられる。図3(4)は、微細な表面テクスチャ感を表面の摩擦力を制御することで表現する方法<sup>14)</sup>である。超音波振動、静電気力などで指先と物体表面の摩擦力を変化させられる。この方式は、デバイスに対して指を動かすことが必要となる。

#### 3.2 力覚インタフェース

人間の5本の指先に力覚を提示できる市販品は、手甲に機構を装着するグローブ型のデバイスのみである。グローブ型は機構を手にくく装着するため強い拘束感や圧迫感を操作者に与えており、指の後屈方向のみのワイヤ駆動であるため物体の重量感の提示も難しい。

川崎らの研究グループでは、図4に示す人間の5本の指先に力覚を提示できるHIRO II<sup>+</sup>を開発<sup>15)</sup>している。HIRO II<sup>+</sup>は6自由度のアームと

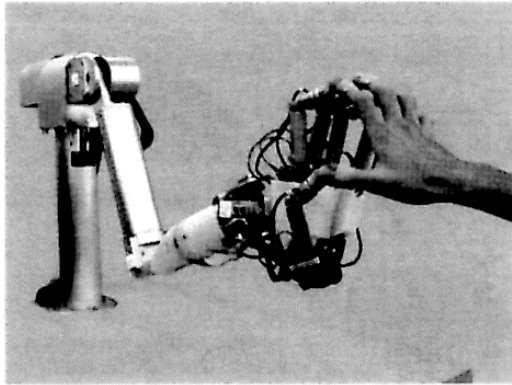


図4 多指ハプティックインタフェースロボット HIRO II+

5本の触覚指をもつハンドから構成される。各触覚指は、根元部に内転外転と前屈後屈の2軸の関節、その先に前屈後屈の1軸の関節があり、合計3自由度ある。触覚指の先端リンクには力覚センサが組み込まれており、その先に永久磁石による受動関節がある。操作者の指は、鋼球を備えた指フォルダを介して、永久磁石で触覚指と接続される。指先での力が目標力となるようにアームと触覚指が制御される。このような構成のため、広い可動空間で5本指に力が提示でき、操作者に対するデバイスによる拘束感や圧迫感も少ない。

#### 4. 摩擦のハプティックレンダリング

ハプティックレンダリングとは、触覚や力覚の描写を意味する。ここでは、物体の把持操作で臨場感を高めるために重要な摩擦感覚や重量感覚の提示法について述べる。

##### 4.1 静摩擦と動摩擦

三次元空間において複数の指により物体を操作するとき、指と物体との接触で生じる接触力により物体は空間運動する。仮想空間で空間運動をシミュレーションするには、この接触力を求めることが必要である。接触力は、指先が仮想物体への侵入により計算される物体表面に垂直方向の抗力と、物体表面の接平面上にある摩擦力から構成される。図5に示すように、指先と物体との接触点をプロクシと呼び、指先の位置をハプティックインタフェースポイント (HIP) と呼ぶ。接触力の計算では、プロクシと HIP の間にばね・ダンパが仮想的に連結しているとして計算することが多

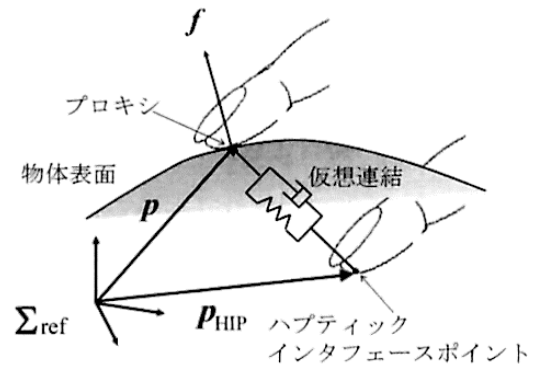


図5 力覚レンダリング

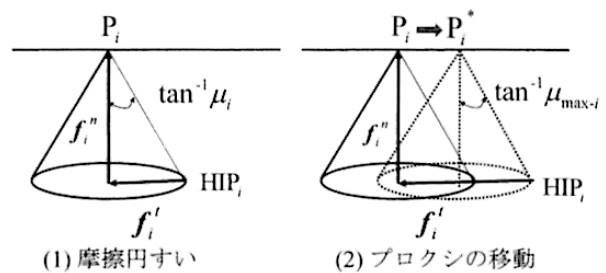


図6 摩擦のレンダリング

い。

指と物体あるいは物体と物体との接触により生じる摩擦には、滑りのない静摩擦状態と滑りのある動摩擦状態がある。静摩擦と動摩擦との遷移を扱う方法として W. S. HARWIN ら<sup>16)</sup>による図6(1)に示す摩擦円すいをを用いた計算法がある。同図において添字  $i$  は第  $i$  指を表し、 $P_i$  はプロクシ、 $f_i^n$  は物体表面の法線方向の指に作用する抗力、 $f_i^t$  は物体の接平面上の指に作用する摩擦力、 $\mu_i$  は摩擦係数である。法線方向と接線方向の単位ベクトルをそれぞれ、 $n_i$ 、 $t_i$ 、物体の剛性を  $k$ 、物体の粘性を  $d$ 、物体内部への法線方向の侵入量を  $x_i$  とすると、抗力と摩擦力はそれぞれ、

$$f_i^n = (kx_i + d\dot{x}_i) n_i, \quad f_i^t = \mu_i \|f_i^n\| t_i$$

と計算される。この計算法では、仮想物体への侵入量に比例した復元力が摩擦力として作用する。しかし、物体内の HIP が最大摩擦係数  $\mu_{\max-i}$  のときの摩擦円すいの外部にあるときは、滑りが生じているとして、図6(2)に示すように HIP が摩擦円すい上にあるようにプロクシ  $P_i$  を  $P_i^*$  へ移動させる。この移動が動摩擦状態を表す。これらの計算処理により、静摩擦と動摩擦の提示が可能となる。この計算手法は、固定して置かれた物

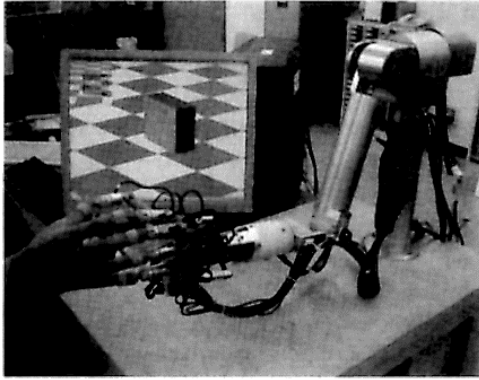


図7 5本指による仮想物体の操作

体の表面を指先でなぞるときの実験で検証していたのにすぎなかったが、川崎ら<sup>17)</sup>は、前述の多指ハプティックインタフェースを用いて、図7に示すように5本指で直方体物体を固く把持して持ち上げ、把持力を緩めて物体を滑らせ、再度固く把持する操作を実行し、静摩擦状態と動摩擦状態、その遷移をVR空間で表現し、操作者は物体の重量感、摩擦状態の変化を感じとることができたとしている。

#### 4.2 摩擦モーメント

物体の空間運動を正確にシミュレーションするには、摩擦力と同様に摩擦モーメントも必要である。VR空間での摩擦モーメントの計算法として、吉川ら<sup>18)</sup>により指先と物体との相対ねじれ角と相対ねじれ速度から計算する方法が示された。この方法は摩擦モーメントが抗力に比例する関係となっていないので、川崎ら<sup>17)</sup>は、摩擦モーメントを相対ねじれ角と抗力の両者に比例する計算法を提案している。図8はその説明図である。第*i*指先と物体の接触開始時には、図8(1)に示すように、物体に設定する物体座標系  $\Sigma_i^B = \{x_i^B, y_i^B, z_i^B\}$  と指先に設定する指先座標系  $\Sigma_i = \{x_i, y_i, z_i\}$  は重なり合うように一致させる。ここで、プロクシ  $P_i$  と  $HIP_i$  は同じ位置である。物体の操作により、 $HIP_i$  が同図(2)のように移動する。物体と指先の相対ねじれ角  $\theta_i$  は、同図に示すように  $x_i$  軸と  $x_i^B$  軸のなす角度として定義し、摩擦モーメントを

$$m = \xi_i \|f_i^n\| n_i, \quad \xi_i = k_s \theta_i$$

により求めている。ここで、 $\xi_i$  はねじり摩擦係数、 $k_s$  は指と対象物体の物性で定まる係数であ

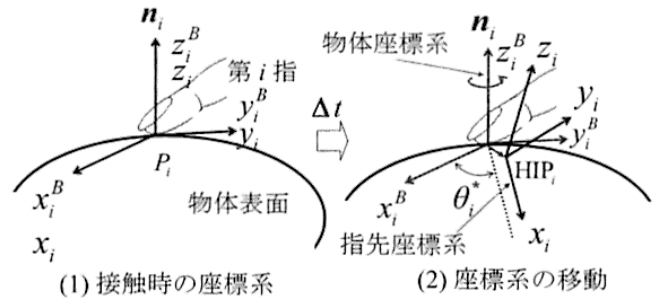


図8 物体座標と指先座標

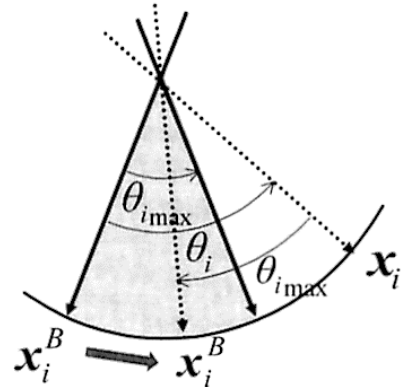


図9 摩擦モーメント円弧と座標系の移動

る。

摩擦モーメントも静摩擦状態と動摩擦状態がある。そこで、図9に示すように、頂角が  $\theta_{i-max}$  の摩擦モーメント円弧を考え、この内部に  $\theta_i$  があるときは静摩擦状態とし、前述の式で摩擦モーメントを求める。円弧の外部に  $\theta_i$  があるときは動摩擦状態とし、 $\theta_i$  が摩擦モーメント円弧の境界にあるように物体座標系を回転させて更新する。動摩擦状態での摩擦モーメントは回転速度に比例する粘性が作用するとして

$$m_i = (\gamma_i \|f_i^n\| + \rho_i \dot{\theta}_i) n_i, \quad \gamma_i = k_d \theta_i$$

として与えている。ここで、 $\gamma_i$  は動摩擦状態でのねじり摩擦係数であり、 $k_d$  は指と対象物体の物性で定まる係数、 $\rho_i$  は粘性係数である。この摩擦モーメントの計算法では、指先と物体との相対ねじり角度と抗力に比例する摩擦モーメントが求められる。図7に示すVR空間において、拇指と示指の2本指で、直方体の端部を強く把持して持ち上げ、その後把持力を弱め物体を回転させ再度強く把持したのきの、摩擦モーメントのVRシミュレーション結果を図10に示す。摩擦状態は1のとき静摩擦状態、0.5のとき動摩擦状態を

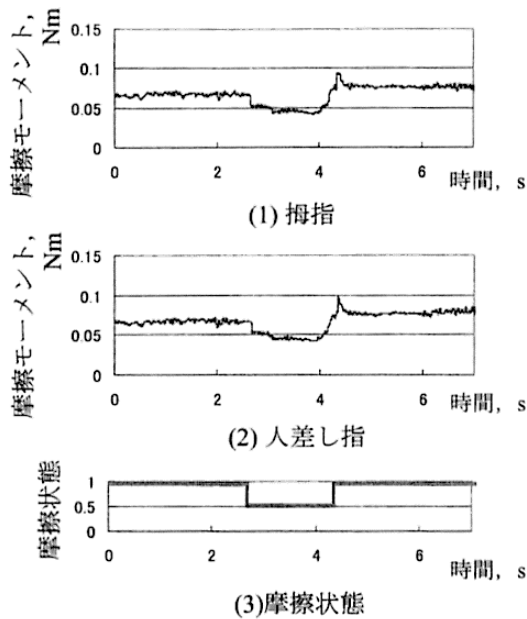


図 10 2 本指での物体把持における摩擦モーメント

表す。摩擦状態と一致した摩擦モーメントが求められていることがわかる。

摩擦モーメントの提示には、指先が物体表面の法線周りで相対回転する運動自由度が必要であるが、図 4 で示す HIRO II<sup>+</sup>にはその自由度がない。そこで、指フォルダの鋼球に小型モータと円盤を組み込み、円盤の回転により摩擦モーメントの提示<sup>19)</sup>を試みられている。その結果は、小型モータを組み込まない指フォルダと比較し、より臨場感が高まったとしている。

## 5. おわりに

ヒトの触覚認識とハプティックインタフェースの概要、および摩擦と摩擦モーメントのレンダリングについて紹介した。ヒトの摩擦認知の仕組みは十分に解明されている状況ではないが、部分的な知見から様々なハプティックインタフェースが研究されている。機械における摩擦と摩擦の研究にこうした解説が役立つことを期待している。

## 文 献

- 1) 東山篤規 他：触覚と痛み，ブレーン出版 (2000)。
- 2) K. E. HAGBARTH et al.: Mechanoreceptor Activity Recorded Percutaneously with Semi-microelectrodes in Human Peripheral Nerves, *Acta Physiologica Scandinavica*, **69** (1967) 121.
- 3) 宮岡 徹：ヒト触覚情報処理の基礎，計測と制御，**47**，7 (2008) 554。
- 4) 白土寛和 他：触感呈示・検出のための材質感機構のモデル化，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，**9**，3 (2004) 235。
- 5) M. HOLLINS et al.: Evidence for the Duplex Theory of tactile Texture Perception, *Perception & Psychophysics*, **62** (2000) 695。
- 6) T. MIYAOKA et al.: Mechanisms of Fine-surface-Texture Discrimination in Human Tactile Sensation, *The Jour. of the Acoustical Society of America*, **105** (1999) 2485。
- 7) T. MIYAOKA et al.: Tactile-Information-Processing Mechanisms of Fine-Surface-Texture Discrimination, *Proc. of the 23rd Annual Meeting of the international Society for Psychophysics*, **23** (2007) 391。
- 8) 佐野明人 他：触の技と数理，日本ロボット学会誌，**23**，7 (2005) 805。
- 9) R. KIKUWE et al.: Enhancing Haptic Detection of Surface Undulation, *ACM Trans. on Applied Perception*, **2**，1 (2005) 46。
- 10) 山本晃生：アクチュエータ技術と触覚インタフェース，計測と制御，**47**，7 (2008) 578。
- 11) 梶本裕之 他：電気触覚を用いた皮膚感覚のオーグメントリアリティ，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，**8**，3 (2003) 339。
- 12) Y. IKEI et al.: A Tactile and Force Display for Virtual Texture, *Proc. of 10th Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (2002) 327。
- 13) Q. WANG et al.: Compact, portable, Modular, High-performance, Distributed Tactile Transducer Device Based on Lateral Skin Deformation, *Proc. 2006 Symp. on Haptic Interfaces for virtual Environment and Teleoperator Systems* (2006) 67。
- 14) 山本晃生 他：摩擦制御を用いた静電皮膚感覚ディスプレイ，計測自動制御学会論文集，**40**，11 (2004) 1132。
- 15) H. KAWASAKI & T. MOURI: Design and Control of Five-Fingered Haptic Interface Opposite to Human Hand, *IEEE Transaction on Robotics*, **23**，5 (2007) 909。
- 16) W. S. HARWIN et al.: Improved Haptic Rendering for Multi-Finger Manipulation Using Friction Cone Based God-Objects, *Proc. of Eurohaptics 2002* (2002)。
- 17) 川崎晴久 他：多指ハプティックインターフェイスを用いた物体把持における摩擦力の提示，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，**11**，1 (2006) 39。
- 18) 吉川恒夫 他：2 本指操作のための 6 自由度指先装着型力覚提示装置の開発，日本ロボット学会誌，**20**，8 (2002) 893。
- 19) H. KAWASAKI et al.: Development of Haptic Device to Display Frictional Moment, *Proc. of Int. Conf. of Distributed Human-Machine Systems* (2008) 410。