

# 材質感提示のための振動を用いた 力覚インタラクション環境の提案

池田 有冬\*<sup>1</sup> 長谷川 晶一\*<sup>1</sup>

Presentation of material sensation using vibration for haptic interaction environments.

Yuto Ikeda\*<sup>1</sup> Syoichi Hasegawa\*<sup>1</sup>

**Abstract** – In this paper we create a haptic interaction environment which displays material sensations using vibrations. In real word, objects vibrate when they tapped. By reproducing this vibration, haptic interfaces can present material sensation to the user. In our system, vibrations and normal forces are calculated separately and displayed together. We evaluate perceptual nature of human under vibration stimuli and effect of vibration stimuli to object manipulations.

**Keywords** : Haptic Interaction, material, stiffness, vibration,

## 1. はじめに

近年、力覚を提示することの出来る入力インタフェースである力覚インタフェースを用い、VR 世界内での物体操作を行う力覚インタラクションが盛んに研究されている。力覚インタラクションのシステムでは、VR 世界内で物体に触れたとき、力を提示することによって、現実世界と同様に指が物体内部に侵入しないようにしている。このようなシステムは指先と物体との間にバネ・ダンパモデルを考え、指先位置が物体に侵入したとき、バネ・ダンパモデルによって生じる力を計算し、提示している。このとき、指先位置の計測、力の計算、力の提示の3つのサイクルが十分速くなければ硬い物体を提示することができない。人が違和感の感じない自然な力を提示するためには1kHz程度の実行速度が必要であるが、現実世界に比べ硬い物体を提示することはできていない。赤羽らはこの実行速度を10kHzという高更新周期で行うことで、従来よりも硬いバネ定数を提示することに実現した<sup>[1]</sup>。しかし、この実行速度を高速に行う方法ではデバイスに依存するところがあり、特殊なデバイスを用いなければならない。

また、これまでの力覚提示装置では、指先位置の制御によって力を提示しているが、現実世界では物体に触れたときに指先が変形したり、物体が固有振動したりしている。これらの現象を再現している力覚提示装置は少なく、力覚提示装置で提示している感覚は現実世界に近い感覚とは言えない。藤田らは、力覚提示装置に指先接触面積制御を行う触覚ディスプレイを付加し、指先の接触面積を変えることで硬さ識別率が高く

なることを示唆し<sup>[2]</sup>、柔軟弾性物体の提示を行っている<sup>[3]</sup>。しかし、この手法も特殊なデバイスが必要であるため汎用的ではない。また、Allisonらは物体に触れたときに起きる固有振動を提示すると、材質感を知覚することができることを示唆している<sup>[4]</sup>。物体をタッピングしたときの物体の振動を測定し、そのデータを基にした振動を力として力覚インタフェースによって提示し、材質感の提示を行っている。この実験では振動を提示することによって材質感が提示できることの評価だけであり、物体の形の提示や摩擦などの動力学特性の表現といった力覚インタラクション環境下での評価は行われていない。

そこで本研究では、VR 世界内で材質感提示可能な力覚インタラクション環境を構築し、把持操作に対して材質感提示による操作性への影響を評価する。この研究では、材質感を特に物体の硬さと考え、振動を提示することによる人の知覚変化の評価も行った。

## 2. 材質感提示可能な力覚インタラクション環境

### 2.1 振動による材質感提示

Allisonらは物体に触れた時の振動を、測定データの傾向に基づいて、振幅が衝突速度に比例する減衰振動(式(1))でモデル化している。接触から $t$ だけ時間が経過したとき、振動による提示力の変化 $Q(t)$ は、振幅係数を $A$ 、衝突速度を $v(t)$ 、減衰係数を $B$ 、材質によってことなる角速度を $\omega$ とすると、

$$Q(t) = Ave^{-Bt} \sin(\omega t) \quad (1)$$

となる。 $A$ 、 $B$ 、 $\omega$ の値は材質固有のパラメータとなっており、それぞれの値を変化させることによって異なった材質感を提示することができる。

振動モデルによって求めた振動は、物体に触れた時に起きる振動である。そのため、物体に触れ、力覚イ

\*1: 電気通信大学大学院

\*1: The University of Electro-Communications

インタフェースのグリップに物体からの抗力が働いたとき、振動を抗力に付加した合力をユーザに提示する。

また、物体操作を行っている際、把持対象物体が他の物体に触れた時も振動が起き、人はそれを感じることができる。この振動も式(1)によって求める。求めた振動は物体に与えるのではなく、力覚インタフェースによって直接ユーザに提示することでユーザに知覚させる。

振動をユーザに直接提示するのは、形状提示のためのバネとダンパの係数が現実よりも小さいので、このバネダンパモデルによって振動が過度に減衰することを防ぐためである。

## 2.2 抗力の計算

抗力の計算には proxy 法<sup>[5]</sup>を用いる。この手法は力覚インタフェースのグリップが物体モデルに侵入したとき、質量を持たず、物体に侵入せず、できるだけグリップの位置に近づこうとする力覚ポインタ(proxy)を考える。このポインタとグリップの位置の間にバネモデルを考えることで、物体から受ける抗力を提示する。

力覚インタフェースのグリップが物体モデルに侵入していないときは、力覚ポインタはグリップの位置に移動する。グリップが物体モデルに侵入したときは、力覚ポインタは、侵入しない、静止摩擦の範囲では滑らないといった拘束を満たしながらグリップに近づく。以下に力覚ポインタの移動の手順を示す。

1. グリップ位置を計測する
2. グリップ位置が物体モデルに接触しているか判定する
3. 接触していないとき、グリップ位置に力覚ポインタを移動させ、手続きを終える
4. 接触している場合、力覚ポインタの位置更新を行わず、グリップに働く抗力を求める
5. 抗力の、物体の面と平行な成分が、静止摩擦の範囲を超えていないか判定
6. 静止摩擦の範囲を超えているときは、動摩擦の範囲に収まる位置に移動させ、手続きを終える

この手続きを、それぞれの指に対応する力覚ポインタと物体の間で行うことで、各指ごとの抗力を求めることができ、物体を把持する操作が可能になっている。

グリップ位置を  $\vec{r}$ 、プロキシ位置を  $\vec{r}_p$ 、物体の面に対する外向きの法線ベクトルを  $\vec{n}_i (i = 1, \dots, 4)$  とすると、面上の点  $\vec{p}_i$  からグリップ位置  $\vec{r}$  へのベクトル

$$\vec{d} = \vec{r} - \vec{p}_i \quad (2)$$

と、法線ベクトル  $\vec{n}_i$  の内積が、

$$(\vec{d}, \vec{n}_i) > 0 \quad (3)$$

のとき、物体面と  $\vec{d}$  は交差していない。つまりグリップ位置は物体に接触していない。このときプロキシ位置はグリップ位置と同じ位置、

$$\vec{r}_p = \vec{r} \quad (4)$$

とする。また、

$$(\vec{d}, \vec{n}_i) < 0 \quad (5)$$

のとき、面と  $\vec{d}$  は交差している。つまり、グリップ位置は物体に接触しているのでプロキシ位置は変更しない。これにより、プロキシは前回のグリップ位置に存在することになり、物体の外に存在する。

力の計算は、プロキシとグリップとの間でバネモデルを考える。バネ係数を  $K$  とすると抗力  $\vec{F}$  は、

$$\vec{F} = K(\vec{r}_p - \vec{r}) \quad (6)$$

となる。このとき力が働く向きは、グリップ位置からプロキシ位置へのベクトル方向となるので物体の外向きに働く。

また、次のようにすることで摩擦を表現することができる。

物体から働く抗力の面に平行な成分を  $F_p$ 、面に垂直な成分を  $F_n$  とする。摩擦係数を  $\mu$  とし、

$$F_p \geq \mu F_n \quad (7)$$

となるとき、プロキシ位置の面に平行な成分  $r_{pp}$  に対して、

$$r_{pp} = r_{pp} + (F_p - \mu F_n) \quad (8)$$

と、プロキシの位置を移動させ摩擦を表現する。

## 3. 評価システムの構築

本研究では、新たな力覚レンダリング手法によって、振動による材質感提示可能な力覚インタラクション環境を構築する。このため、新たな力覚インタフェースや触覚ディスプレイを必要とせず、既存の力覚インタフェースを用いて形状と動力学特性を提示するシステムを構築できると考えられる。

ここでは、佐藤誠らによって開発された力覚インタフェース SPIDAR<sup>[6]</sup>を用いて、提案手法を用いた力覚提示システムを提案する。

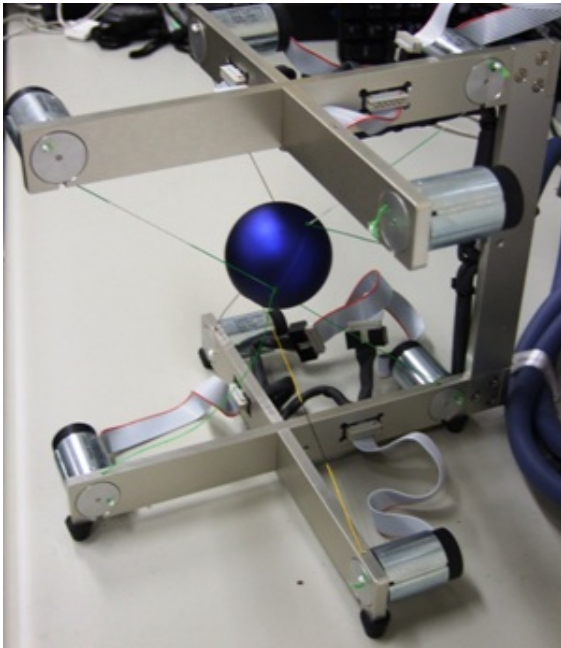


図1 力覚インタフェース SPIDAR

### 3.1 力覚インタフェース SPIDAR

SPIDAR(図1)は、グリップに糸が取り付けられており、その糸をエンコーダ付モータによって制御する並列機構型の力覚インタフェースである。並列機構は、アクチュエータ自体が動く必要が無いため、機構の可動部分が軽い。また、機構が並列につながるため、ある力を加えたときの剛性は各リンクの剛性の和になるため剛性が大きい。このため、SPIDARは物体モデルの形状を精細に提示することができ、動的なVR世界を高精度に提示するための高速制御が可能である。

提案システムでは、振動による材質感の提示を行う。このため、高速な制御を行うことができ、硬い弾性を提示することのできるSPIDARは提案システムの実装には適切なインタフェースであると言える。

また、SPIDARは装置の透明性が高く、作業領域での映像提示を妨げない。そして、糸の本数やモータの設置位置、グリップの形状を用途や必要な可動域にあわせて変更できるため、物体操作を行うのに適したインタフェースであると言える。

### 3.2 SPIDARの振動提示特性の評価

提案システムを実装する前に、SPIDARが提示可能な振動域を調べる実験を行った。

SPIDARのモータからグリップに伸びる糸の1つを、グリップからはずし、力センサーに固定することでモータが糸を介してどの程度の振動を伝播することが出来るか調べた。

モータに、ファンクションジェネレータにより交流電流を入力することで振動を発生させ、力センサーで糸の張力を測定した。

今回使用した力センサーはPCB PIEZOTRONICS社 Model No.208C01、アクチュエータであるモータはMaxon社製のコアレスモータRE-max21(271107)を用いた。

### 3.3 評価結果と考察

測定した結果を図2、図3に示す。図2より100Hzから共振が周期的に起きていることがわかる。また図3より、共振が起こる周波数域では振動を計測することができないほど出力される力が弱くなっていることがわかる。

実験を行っているとき、モータから力センサーに固定してある糸が横波の振動をしていることを確認した。このことから、この共振は糸によるものであり、糸が共振してしまい、モータが出力しているトルクを力センサーに伝えることができなくなってしまうと考えられる。

このことより、SPIDARは断続的ではあるが、100Hz~1kHz程度の振動を提示できることが分かる。

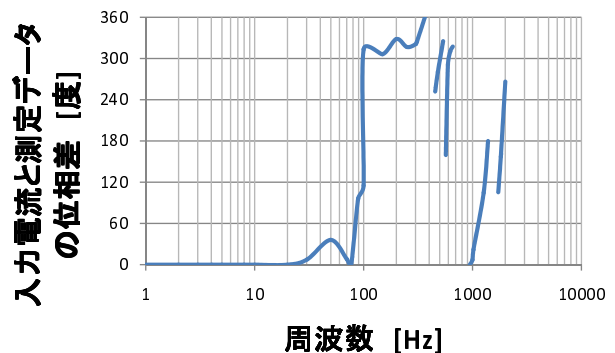


図2 位相おくれ



図3 張力変化

### 3.4 振動による材質感提示の実装

SPIDARは振動の提示が可能だったため、SPIDARによって振動による材質感提示が可能であるかどうかを確かめた。

映像の提示はせず、並進、回転6自由度のSPIDAR-G6を用いて力覚でのみ床面の提示を行い、床に力覚ポイントが接した瞬間に、式(1)の振動によって材質

感の提示を行うことができるか実験を行った。

実験は式(1)のパラメータ  $A$ 、 $B$ 、 $\omega$  を参考に変更し、タッピングを行ったときの感じる材質感を主観評価によって判定した。変更したパラメータは表のとおりである。

表1 振動による材質感提示

パラメータ	$A[s^{-1}]$	$B[ms^{-1}]$	$\omega[Hz]$
ゴム	-24	60	30
木	-15	80	100
アルミ	-30	90	300

結果は、床をタッピングするとき、振動の提示を行わない力覚のみの提示よりも、振動を提示する方が床を硬く感じる事ができた。また、振動のパラメータを変化させることで、 $A$  が大きい値ほど硬く感じる事ができた。 $B$  が大きい値では金属に近い軽い硬さを感じることができ、小さい値ではゴムに近い鈍い硬さを感じることができた。

このことより、SPIDARの振動提示特性の評価実験では、SPIDARは一部の周波数帯で振動を提示できないことがわかったが、限られた帯域でも振動による材質感の提示は可能であることがわかった。

以上より、本手法は振動が完全には再現できない力覚インタフェース SPIDARでも有効であることがわかった。

### 3.5 システムの実装

SPIDARを用いてシステムの実装を行った。実装は、Intel Core Duo T2300 1.66GHz CPUを1個搭載した、OSがWindowsXPのPCで行い、PCとSPIDARとをUSB2.0で接続した。SPIDARの制御には、マルチメディアタイマーを用いることで1kHzに安定させた。

## 4. 振動提示による知覚変化実験

振動を提示することによって、提示される硬さをどのように知覚するのか調べた。

### 4.1 実験条件

バネ係数を500、1000、3000N/mに固定した状態で振動A、振動B(表2参照)を提示した。被験者には振動を提示していないときのバネ係数を調節し、振動を提示したときに感じた硬さと同じ硬さにするよう指示した。

4人の被験者に対し実験を行った。

表2 提示した振動の係数

	振幅係数 $A$	減衰係数 $B$	角速度 $\omega$
振動 A	-15	90	300
振動 B	-8	80	100

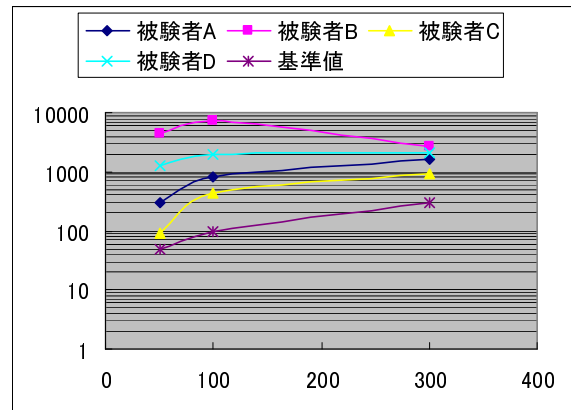


図4 振動Aの結果

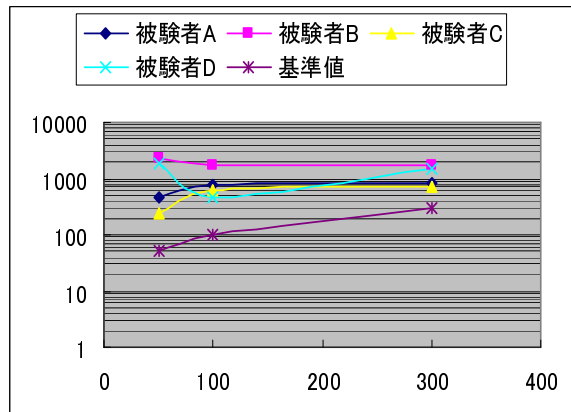


図5 振動Bの結果

## 4.2 結果

図4、5に振動ごとの結果を示す。図4、5から振動を提示することで、振動を提示しない時よりも硬く感じるようになることがわかった。また、振動を提示するときのバネ係数が低いと被験者間で結果にバラつきがあり、バネ係数が高いほど被験者間で結果が収束している。

## 4.3 考察

提示している振動は、実世界で物体に触れた時に起きる振動に近い。この振動を提示することによって提示されているものを硬く感じていた。これにより、振動が硬さを知覚するためのひとつの手掛かりとされていると考えられる。

また、実験後にアンケートを行った結果、バネ係数が低いときに振動による硬さに違和感があることがわかった。硬い感触があったあとに柔らかい感触があり、それを違和感として感じていると思われる。これは、振動を提示したときに感じる硬さと、バネモデルによって提示した抵抗力による硬さに差が生じてしまったためである。このことから、振動を提示する場合、バネ係数をある値よりも高い値に設定しなければならないと考えられる。

振動 A と振動 B でバネ係数が低いときのバラつきが異なっている。振動 A ではバラつきが大きく、振動 B ではバラつきが小さい。このことより、提示する振動によって、バネ係数が低いときに感じる振動提示の違和感を軽減することができると考えられる。

これらのことから、振動を提示することによって提示する硬さが硬く感じるだけでなく、提示する振動のパラメータによって感じ方が変わることがわかった。

### 5. 把持操作タスクによる評価

振動の提示が物体操作に影響を及ぼすのか、把持操作による評価実験を行った。

#### 5.1 実験条件

提示する物体は 1 辺 30mm の立方体とし、質量 25g とした。重力加速度は実世界と同様の  $9.8m/s^2$  とした。

物体と指の間、物体と床の間の接触力計算のためのバネモデルのバネ係数をそれぞれ  $500N/m$  とし、物体と床の間でのダンパ係数を  $300N/ms^{-1}$  とした。

物体と指の間には摩擦力が働くものとし、静止摩擦係数を 1.0、動摩擦係数を 0.8 とした。また、提示する振動のパラメータは  $A = -25$ 、 $B = 100$ 、 $\omega = 300$  とした。

被験者には、各指の仮想世界での位置、把持物体を示す映像を提示した。まず被験者には、力覚インタフェースの操作に慣れてもらうため、3 分ほど自由に力覚インタフェースによる物体操作を行ってもらった。その後、a. 物体を掴み、b. 持ち上げ、c. 物体を置き、d. 離すという作業をそれぞれ 10 回ずつ行うよう指示した。このとき、作業 c. では CG によって視覚的な障害物を置き、物体を床に置く瞬間が見えないようにした。3 人の被験者に対し実験を行った。

#### 5.2 結果

表 3 には各被験者の床への最大めり込み量の平均と標準偏差を示す。図 6、7 には被験者 A の床へのめり込み量、タスク時間の結果を示す。図 8、9 には被験者 B の床へのめり込み量、タスク時間の結果を示す。表 3、図 6、8 から提案方式では従来方式よりも床にめり込む量が減ることがわかり、床の位置をより正確に判断できるようになったと言える。

また図 6、8 から、回数を増すごとに提案方式、従来方式共に、めり込み量が徐々に減少しているのが見える。これは回数を重ねることに行っているタスクに慣れ、床の位置を覚えるためだと考えられる。

実験後、被験者に対しアンケートを行ったところ、すべての被験者から「提案方式の方が物体を硬く感じる事ができた」「提案方式では物体を床に置くとき、置いた感覚がはっきりとわかった」という回答を得られた。

しかし、図 7、9 から、タスク時間にほとんど差がないことがわかる。このことから、提案システムは本実験のタスクではタスク時間への影響がなかったと言える。

表 3 最大めり込み量の平均と標準偏差

被験者	A	B	C
平均 (従来)[mm]	2.8	3.8	5.4
平均 (提案)[mm]	2.1	2.5	3.0
標準偏差 (従来)[mm]	0.92	0.67	1.4
標準偏差 (提案)[mm]	0.69	0.80	1.5

#### 5.3 考察

上記の結果より、提案方式は従来方式より正確に床の位置を知覚できることがわかった。

力覚インタフェースで力を提示するとき、物体に侵入した後に力が提示される。また、力覚インタフェースで提示可能なバネ係数には限界があるため実世界の物体よりも柔らかい弾力しか提示できない。これでは、物体に侵入した後すぐには、力を知覚することは難しく、深い侵入を許してしまう。これでは、正確な物体操作を行うことは出来ない。

これに対し、今回提案した方式では、従来の方式に比べ、接触後すぐに接触したことを知覚でき、物体の

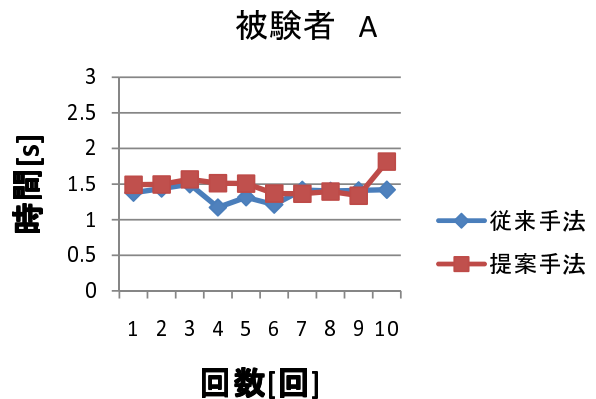


図 6 タスク時間  
被験者 A

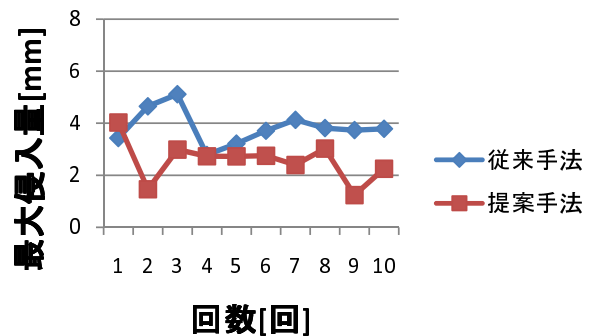


図 7 めり込み量

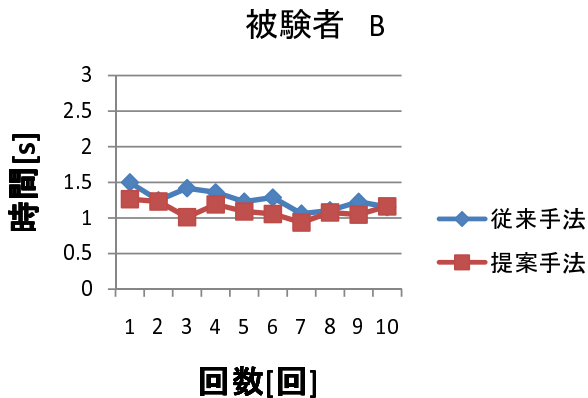


図 8 タスク時間  
被験者 B

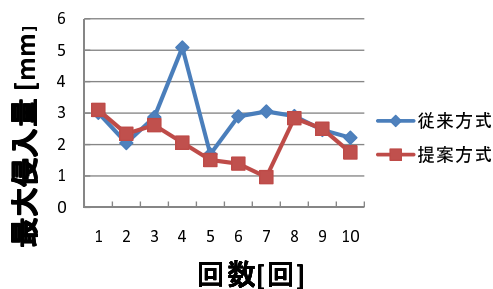


図 9 めり込み量

侵入量を抑えることができる。これにより、VR 世界での物体操作をより実世界の操作に近づけることができたと言える。

しかし、タスク時間には影響が出なかったことから、選定したタスクに問題があった可能性が考えられる。

## 6. 結論

### 6.1 結言

位置制御による力覚の提示だけでなく、接触時に起きる物体の振動の提示による材質感提示が可能な力覚インタラクション環境を構築し、操作性への評価実験を行った。

振動提示による知覚変化の実験により、振動を提示することにより物体を硬く感じるようになった。

また、Pick & Place の Place 時において、物体を床に置いたことをはっきりと知覚することができ、操作の正確性向上に効果があったが、本研究で行ったタスク実験ではタスク時間への影響を確認することができなかった。

### 6.2 今後の展望

本研究では、VR 世界の物体操作において、接触によって起きる物体の振動を力覚と同時に提示するシステムを提案し、操作性への影響を検討した。

今回は、タッピング時に起きる振動のみを再現したが、これでは操作全体と比べて一瞬すぎ、作業効率を

飛躍的に上げられるものではなかった。

把持を行っているとき、物体と指の間には摩擦が働いているが、摩擦が小さかったり、つかんでいる力が弱いと滑り落ちてしまう。すべりは把持をしている間は起こり続けるものであり、操作に対し、大きな影響を与えていると考えられる。今後は、このすべりも振動によって提示することを検討している。今回使用した振動モデルとは別のすべりによる振動モデルを作成し、今回のシステムを拡張していく。

また、SPIDAR の振動伝達特性に難があることがわかったが、振動による材質感の提示を行えることがわかった。これは人の触覚特性によるものが考えられるが定かではない。そのため、人の触覚特性を調べていき、よりリアリティのある材質感の提示をおこない、物体操作の操作性を向上していくつもりである。

## 参考文献

- [1] 赤羽克仁, 小池康晴, 佐藤誠, “ 安定性と忠実性を両立させる高解像度力覚レンダリングの開発 (バーチャルリアリティ, 特集 インタラクション技術の原理と応用) ”, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp. 1316-1325, 2007.
- [2] 藤田欣也, 奥田太久穂, “ 仮想物体の硬さ認知における力覚と触覚の寄与の検討 ”, 電子情報通信学会, 1998.
- [3] 池田義明, 藤田欣也, “ 指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示 ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.2, 2004.
- [4] A.M. Okamura, M.R. Cutkosky, and J.T. Dennerlein, “ RealityBased Models for Vibration Feedback in Virtual Environments, ”, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 6, No. 3, pp. 245-252, 2001.
- [5] D. C. Ruspini, K Kolarov, O. Khatib: “ The haptic display of complex graphical environments ”, Proc. of SIGGRAPH 97, pp.345-352 (1997)
- [6] M. Ishii, M. Sato, “ A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings ”, Presence Vol. 3, No. 1, Winter 1994, pp.81-86