

抗力への振動付加による高剛性とすべり感提示

Presentation of high stiffness and slipping sensation by adding vibration to feedback force.

池田有冬¹⁾, 稲見昌彦²⁾, 長谷川晶一¹⁾

Yuto Ikeda and Masahiko Inami, Shoichi Hasegawa

1) 電気通信大学大学院 知能機械工学専攻

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, { ikeda, hase } @hi.mce.uec.ac.jp)

2) 慶応義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

(〒108-8345 東京都港区三田 2-15-45, inami@inami.info)

Abstract : We propose method that displays force adding vibration to normal force by haptic interface. This method can present stiff object and friction vibration. In real world, objects vibrate when they tapped. By reproducing this vibration, haptic interfaces can present stiff virtual objects to the user. And, during slipping between finger and object, vibration occurs. By reproducing this vibration, haptic interfaces can present slip. We evaluate perceptual nature of human under vibration stimuli.

Key Words: *haptic, stiffness, friction, vibration .*

1. はじめに

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 [1]。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。

これまでの力覚インタラクションでは物体の硬さを提示するのに抗力のみで提示しているものが多かった。しかし、実世界において人は抗力のみによって物体の硬さを認識しているわけではない。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 [2]。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、この固有振動を再現することによって硬さ知覚に変化があるかどうか評価を行っていない。

また、これまでの力覚インタラクションでは力の提示のみであったため、指と物体とのすべりを視覚からの情報だけでしか認識することができなかった。このため、物体操作を行う際、すべっていないかどうかを視覚によって確認するか、はじめからすべらないように力を入れ続けながら操作を行わなければならない。昆陽らは指と物体との間で起こる摩擦のあるすべり、Stick-Slip 現象を実験によって解析し、モデル化を行い、振動子によって振動を提示することで摩擦感を提示している [3]。この方法は摩擦がある時のすべりが起こったときの表現は可能であるが、すべりが起きていない時の摩擦の表現はできない。

本研究では、バーチャル物体の把持操作を容易にするために、高剛性、摩擦、すべりを提示することを目的としている。

2. 提案手法

2.1 高剛性物体の表現

指が物体に触れた時に起こる物体の固有振動を再現することによって高い剛性が表現できることが知られている [4]。

本研究では固有振動を再現した振動を抗力に付加し、提示する。これにより物体の固有振動を再現し、高い剛性の表現を行う。

固有振動を再現する振動は式 (1) としてモデル化する。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_q 、衝突速度を $v(t)$ 、減衰係数を B_q 、固有振動の角速度を ω_q とすると、

$$Q(t) = A_q v e^{-B_q t} \sin(\omega_q t) \quad (1)$$

となる。 A 、 B 、 ω の値は物体固有のパラメータとであり、それぞれの値を変化させることによって異なった固有振動を提示する。また、この式 (1) は Allison らによってモデル化されたものである。

抗力の計算には proxy 法 [5] 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。

式 (1) で求めた振動を、物体に触れ、力覚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、抗力に付加する。この合力をユーザに提示することで物体の弾性と物体に触れたときに起きる固有振動を同時に提示することができる。

2.2 すべり感の提示

実世界において、指で物体をなぞるとき Stick-Slip 現象が起きる。この現象は個体同士がすべりあうときに、固着 (Stick) とすべり (Slip) の 2 状態間で遷移を繰り返すことによって発生する。

このとき、指のせん断方向の動特性はバネとダンパが並列につながった固体としてモデル化することができる [6]。また、腕から指にかけても同様に考えられる。そこで物体を指でなぞるときのモデルを実世界でのモデル、力覚インタフェースを用いた力覚インタラクション時でのモデル、2 つを図 1、2 のように考えた。

力覚インタフェースを固く握り、力覚インタラクションを行う時を考える。インタフェースのグリップを硬く握ることで、腕からグリップまでは固く拘束される。このように考えると腕からグリップまでは実世界での人の腕と考えられる。そこでバーチャル世界でのポインタを指と考え、グリップとポインタとの間でバネとダンパが並列につながったモデルで考える。ここでバーチャル世界でのポインタは proxy なので、proxy はグリップとバネ・ダンパでつながれている。この proxy に対し、質量を与えることで proxy を実世界での指に対応させることができる。これにより、力覚インタラクション環境下において、Stick-Slip 運動をモデル化することができる。

また、Stick-Slip が発生したとき、指先の皮膚で高周波の振動が起きる [7]。このとき発生する振動は [?] から以下の特徴が挙げられる。

- Stick 状態から Slip 状態へ遷移したときに振動が発生する
- 振幅は最大静止摩擦力に比例する
- 振幅は時間によって減衰していく

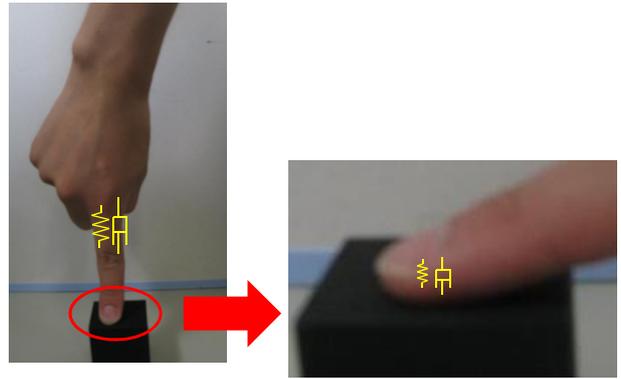


図 1: 摩擦モデル

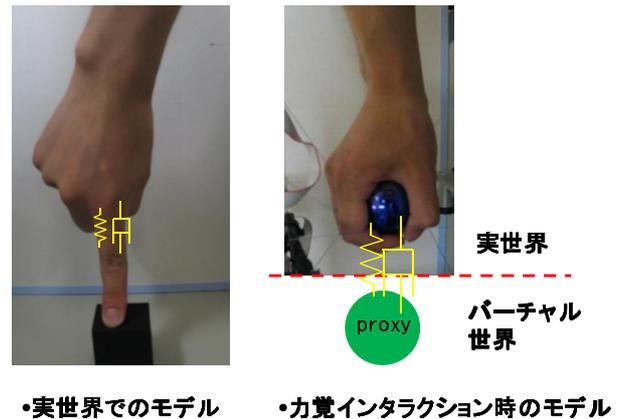


図 2: 摩擦モデルの比較

この振動を再現することでより自然な摩擦提示ができ、振動によってすべりを知覚することができるようになり、バーチャル世界での把持操作が効率的に行えるようになると考えられる。

そこで、本研究では Stick 状態であった proxy が Slip 状態へ遷移したとき、以下の振動を提示することにした。Stick 状態から Slip 状態へ遷移してから t 秒後の振動 $V(t)$ を、振幅係数 A_v 、静止摩擦係数 μ_s 、垂直荷重 W 、減衰係数 B_v 、振動の角速度 ω_v として、

$$V(t) = A_v \mu_s W e^{-B_v t} \sin(\omega_v t) \quad (2)$$

と表す。これは上記の振動の特徴を参考として作成したものである。

3. 評価システムの構築

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 [8] を用いて、提案手法を用いた力覚提示システムを構築する。

3.1 力覚インタフェース SPIDAR

SPIDAR (図 2) 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の力覚インタフェースである。並列機構は、アクチュエー

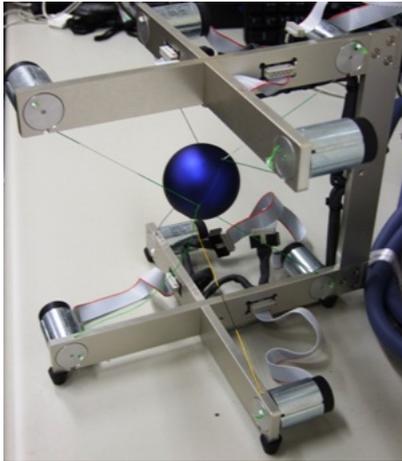


図 3: 力覚インタフェース SPIDAR

タ自体が動く必要が無いいため、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。

3.2 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 WindosXP の PC で行い、PC と SPIDAR とを USB2.0 で接続した。

4. 振動提示による知覚変化実験

調整法により、振動が付加された抗力の硬さにおける主観的等価点を調べる実験を行った。

4.1 実験条件

被験者にはバネ係数のある値に一定に固定し、振動を付加したものを標準刺激、振動を提示していないときのバネ係数を比較刺激として提示した。被験者にはバーチャル空間の床をタッピングすることで、標準刺激、比較刺激の硬さを知覚させた。標準刺激、比較刺激を自由に切り替えることができる状態で、比較刺激のバネ係数を調節させ、標準刺激で感じた硬さと同じ硬さにするように指示した。

標準刺激には、 $2N/mm$ 、 $0.5N/mm$ + 振動 A,B、 $1N/mm$ + 振動 A,B、 $2N/mm$ + 振動 A,B の 7 つを用意した。このとき振動 A、振動 B はそれぞれアルミ、木を想定したパラメータに設定した (表 1)。

6 人の被験者に対し、7 つの標準刺激をランダムに各 5 回ずつ回答させた。

4.2 結果

図 3、4、5 に振動ごとの結果を示す。図 3、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知覚していることがわかった。そして、振動の違いによって知覚する硬さに違いがあることもわかった。

表 1: 提示した振動のパラメータ

	振幅係数 A	減衰係数 B	角速度 ω
振動 A	-1500	90	300
振動 B	-750	80	100

また、被験者によっては振動を提示してもあまり硬さの近くに変化が見られなかった。

4.3 考察

提示した振動は、実世界で物体に触れた時に起きる振動に近い。被験者は、振動が提示された物体をより硬く知覚していた。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であると考えられる。

また、被験者によっては振動を提示しても硬さの知覚に変化が見られなかった。その被験者 A、C の結果を見てみると、アルミの振動を提示したときと、木の振動を提示したときでほぼ同じ値にバネ係数を調節している。その値は標準刺激におけるバネ係数に近い値となっている。このことから、被験者 A、C は振動を提示してもバネ・ダンパ係数によって硬さを知覚していると考えられる。床のタッピング方法によって床への侵入量が変わる。侵入量が少ない時には振動による硬さ知覚が支配的であり、侵入量が多い時にはバネ・ダンパ係数による硬さ知覚が支配的になるのではないかと考えられる。

5. 摩擦

2.2 で考えたモデルを用い、proxy の質量 $m_p = 10g$ 、静止摩擦係数 $\mu_s = 1.0$ 、動摩擦係数 $\mu_k = 0.5$ とし、振動式 (2) のパラメータを $A_v = 0.1$ 、 $B_v = 80$ 、 $W_v = 500Hz$ としして評価システムによって実装を行った。

実装した結果、Stick-Slip 現象が再現され従来よりも自然な摩擦によるすべり感を感じることができた。また、今回作成した高周波の振動を提示することでより自然な摩擦を感じることができた。また、指と物体の間ですべりが生じたとき、振動が出ることですべり感を感じることができた。

6. 結論と今後の展望

振動を付加した抗力による高剛性物体の表現と Stick-Slip 現象のモデル化を行いすべりによる振動の提示を行った。

物体の固有振動をモデル化した振動式によって求められた値を抗力に付加することで高剛性を表現した。抗力に対して振動を付加したときの硬さ知覚の評価実験により、被験者は振動を付加したものを、振動が付加されていないものよりも硬く知覚することがわかった。

力覚レンダリング法である proxy 法において proxy に質量を持たせることによって Stick-Slip 現象のモデル化を行った。そのモデルを評価システムによって実装した。

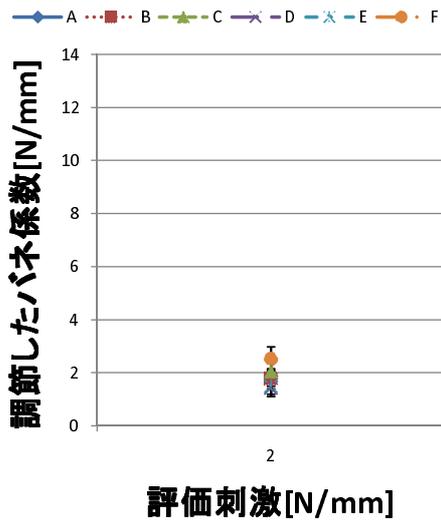


図 4: 振動無の結果

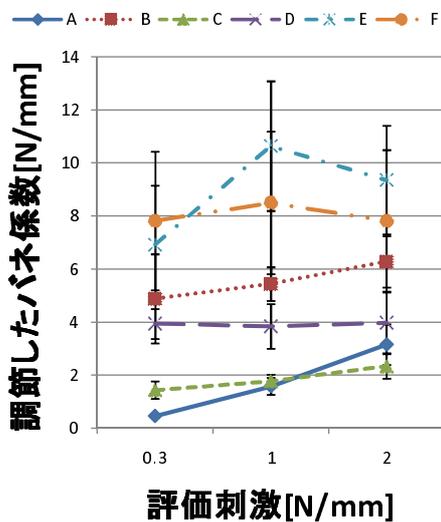


図 5: 振動 A の結果

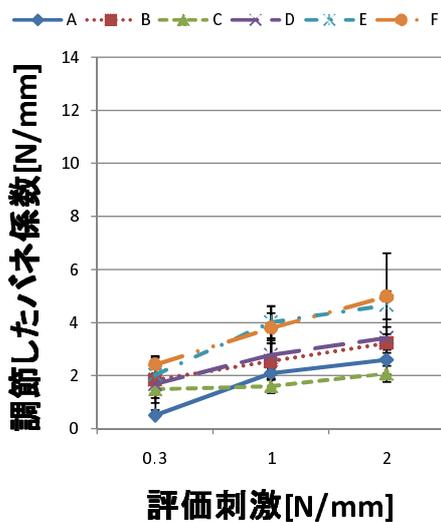


図 6: 振動 B の結果

今回の評価実験によって、振動付加によって高剛性物体の表現が可能であることが分かったため、今後物体操作において高剛性物体の再現によって操作性に影響を与えるのかタスク実験を行っていく。すべり感提示は今回評価実験を行っていないので、評価実験を行い、有効性がどれだけあるのか調べていく。また、今回作成した高周波振動の妥当性を評価し、必要であればモデル化を行っ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] 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.
- [3] 山田浩史, 昆陽雅司, 岡本正吾, 田所諭, “ Stick-Slip 現象に基づく振動刺激を用いた摩擦感呈示法 ”, Proceedings of the 2008 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2008.
- [4] P. Wellman and R. D. Howe. ”Towards Realistic Display in Virtual Environments.”, Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, vol. 57, pp 713-718, 1995.
- [5] D. C. Ruspini, K Kolarov, O. Khatib: “ The haptic display of complex graphical environments ”, Proc. of SIGGRAPH 97, pp.345-352 (1997)
- [6] 中沢, 池浦, 猪岡:人間の指先のせん断方向粘弾性特性, 日本機械学会論文集)C 編), Vol.64, No.624, pp.3076-3082, 1998.
- [7] 山田浩史, 昆陽雅司, 岡本正吾, 田所諭, ”振動刺激を用いた摩擦感呈示法”, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会論文集, pp.277-280, 2007.
- [8] M. Ishii, M. Sato, “ A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings ”, Presence Vol. 3, No. 1, Winter 1994, pp.81-86