

自己運動に基づいた減衰正弦波振動提示による 体性感覚拡張

Augmentation of Somatic Sensation by Presenting Decaying Sinusoidal Vibration according to Self-Motion

蜂須拓^{1),2)}, 池野早紀子¹⁾, 栗原洋輔¹⁾, 梶本裕之^{1),3)}
Taku HACHISU, Sakiko IKENO, Yosuke KURIHARA, Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {hachisu, ikeno, kurihara, kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 日本学術振興会

3) 科学技術振興機構さきがけ

Abstract: This paper proposes three haptic augmented reality techniques to simulate or modulate the material of the object; 1) the augmentation of material property for tapping, 2) the simulation of pouring liquid sensation with tokkuri and 3) the alternation of body material for elbow bending. Our proposed approaches employ decaying sinusoidal vibration that conveys material sensation and is presented according to users' motion. While so far we have demonstrated that users feel the intended sensation, we would like to study whether our proposed approaches affect users' behavior such as motion.

Key Words: Decaying sinusoidal vibration, haptic augmented reality, material, self-motion.

1. はじめに

触覚提示は立体映像提示等と並んで、対象物と自己の物理的距離を端的に表現できる手段である。なぜなら対象物の性状の認知は、触れる、つまむ、なでる等の能動的な動作とそれに対する対象物の反応を皮膚感覚や固有感覚等から統合的に知覚する、といった能動性を伴うからである。このことは、触覚提示が受動的な鑑賞にとどまらず相互作用を伴うコンテンツの創造に結びつくことを意味し、ゲームや遠隔コミュニケーション等のコンテンツをより高品位にする技術であることを意味する。

著者らは、これまでにユーザの自己運動に応じた触覚提示により対象物あるいはユーザ自身の性状を提示・変調する手法を提案してきた。本稿では、特に減衰正弦波振動を用いた触覚的材質感提示による感覚変調手法について述べる。具体的には、叩き動作に対する実物体への材質感重畳手法、注ぎ動作に対する振動提示による徳利のトクトク感再現手法、肘屈伸運動動作に対する振動提示による関節材質感変調手法について報告する。

2. 減衰正弦波振動

固い物体の表面に指で、あるいは道具を介して触れた時、我々は視聴覚に頼らずとも触覚の手がかりによって触れた物体の材質を識別することができる。物体を叩いた際の

触覚の手がかりは力覚（低周波成分）と振動覚（高周波成分）の二つから成り立つ。

これまでに、この皮膚感覚と力覚を同時に提示する手法が提案されている。Wellmanらはボイスコイルを搭載した力覚提示装置より[1]、Okamuraらは単一の力覚提示装置より[2]力覚および振動覚の提示を行った。彼らは振動覚提示に式(1)に示す減衰正弦波モデルを採用し、固い物体に触れたときから時間 t が経過した振動 $Q(t)$ を再現した。

$$Q(t) = A(v) \exp(-Bt) \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで、 A は衝突速度 v によって決定される初期振幅係数、 B は減衰係数、 f は振動周波数である。 A 、 B 、 f の値は対象物体の材質によって定まる変数である。

3. 叩き動作に対する実物体への材質感重畳

前節で述べた Wellman ら[1]、および Okamura ら[2]の触覚提示手法はいずれも力覚提示装置を用いるためコスト面で使用できる場面が限定的であった。本章では力覚提示装置を使用しない簡便な材質感提示手法[3][4]およびそれを実現するためのタッチセンサの開発について述べる。

3.1 材質感重畳手法

力覚提示を簡便に行うために、著者らは実物体を叩いた

際に生じる実際の反力を利用することを考えた。さらに、同時にバーチャルな振動を重畳することで材質感を変調することを考えた。しかし実物体を叩いた際、実際に振動が生じるため所望の振動提示が困難になる。そこで著者らはゲルシートを利用し実際に生じる振動を吸収した上で、バーチャルな振動を付加する手法を提案した[3][4]。

3.2 高速タッチセンサ

本手法を実現するためには、ユーザが実物体に触れた瞬間に振動を提示する必要がある。ヒトの触覚の遅延検知能力を考慮した際[5]、接触検知から振動提示までをミリ秒単位で高速に行く必要がある。さらに、よりリアリスティックな振動提示をするために、衝突速度 v の計測、余計な振動の生起を避けるために非接触で接触検知を行う必要がある。

そこで著者らはこれらの設計要請を満たすタッチセンサの開発を行った。高速かつ非接触で接触検知を行うため、著者らは光遮蔽式を採用した。一般的な光遮蔽式のタッチセンサでは二次元平面上の対辺に発光素子と受光素子を配置し、接触物体の x 座標と y 座標位置を取得する(図 1 左上)。著者らは図 1 左下に示すように、二つの対辺の発光・受光素子群を分離、積み重ねることで z 軸方向の位置検出を行う手法を提案した。これにより上層と下層の発光・受光素子群の遮蔽時間を計測することで衝突速度の計測を行う。さらに、下層と接触面の距離が既知であることから、本タッチセンサは接触時間予測が可能である。

本タッチセンサとボイスコイル (TactileLabs, Haptuator) を内蔵したスティックを組み合わせて、LCD 上の材質感を変調するシステムを構成した。図 2 に示すように、LCD にはゴム、木、アルミニウムが描画されており、その上には振動吸収用のゲルシート、本タッチセンサが固定されている。

図 3 に実際にスティックで叩いた際に内蔵されたボイスコイルに印加される電圧を示す。本システムにより叩いた位置および叩く速度によって適切な減衰正弦波を提示することが可能である。

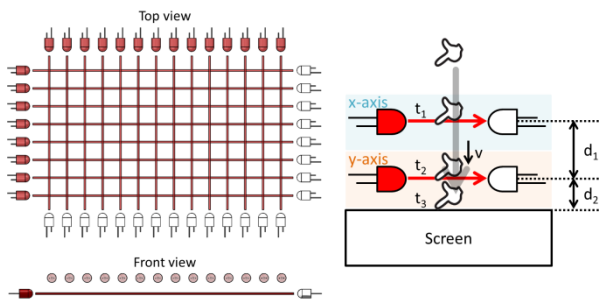


図 1 高速タッチセンサの構造 (左図) および衝突速度計測・接触時間予測の仕組み (右図)

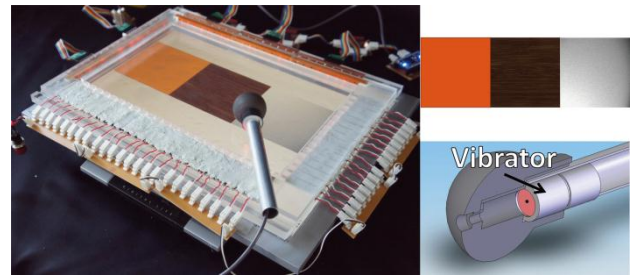


図 2 実物体への材質感重畳システム

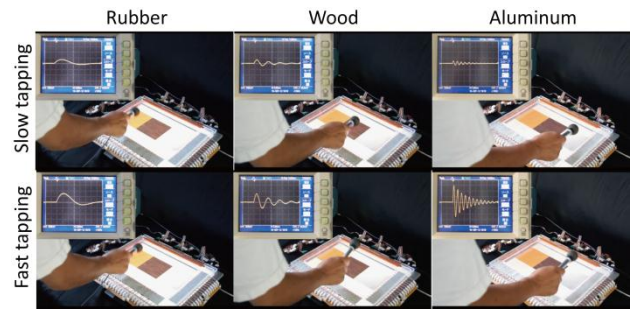


図 3 叩く位置と速度に応じた減衰正弦波振動

4. 注ぎ動作に対する振動提示による徳利のトクトク感再現

徳利で液体を注ぐ際、「トクトク」という振動が容器を介して手に伝わる。この振動は徳利の傾きや内部の液の量や質に応じて変化し、その液体を口に運ぶ前の演出の一つとして楽しまれている。本章では、このトクトク感の人工的な再現を目的に、振動の計測、モデル化および提示手法[6]について述べる。

4.1 計測・モデル化

著者らはまず、徳利から液体を注いだときの振動の記録を加速度センサ (Kionix, KXM52-1050) を用い行った。計測の様子を図 4 に示す。徳利の口を真上に向けた状態で台に固定し、水を満水になるまで注いだ。その後、徳利の口に蓋をして徳利を傾けた。徳利を傾ける角度は、徳利の口を真上にした状態を 0 度とし、90 度、115 度、135 度、155 度、180 度の 5 種類を用意した。蓋を外すと同時に計測を開始した。計測は、1 つの角度に対して、5 試行ずつ、計 25 試行を行った。

計測結果の一例として、徳利を 180 度傾けて水を注いだ場合の計測結果を図 5 左に示す。傾き角度を変えた場合、角度に応じて振幅などに変化はあるものの同様の波形が計測された。図 5 左より、計測結果は同一の波形が一定の間隔で出力されているため、ここでは、その内の 1 つの波形を取り出して解析を行った。図 5 左から 1 周期 ($T = 0.1$ 秒) 分の波形を取り出したものを図 5 右に示す。取り出した波形に対しフーリエ変換を行ったところ、観測波形は 2 つの異なるピークを持つ正弦波の合成波であることがわかった。また図 5 右の波形は徐々に減衰しているため、取り出した波形は 2 つの異なる周波数の減衰正弦波の合成波でモデリングが可能であると考えられる。同様の傾

向は、角度の異なる計測結果からも観察された。

以上の観測結果を基に式(2)に示す減衰正弦波の合成波をモデリング式に採用した。

$$Q(t) = \sum A_n(\theta) \exp(-B_n(\theta)t) \sin(2\pi f_n(\theta)t) \quad (2)$$

ここで、 A_n は初期振幅係数、 B_n は減衰係数、 f_n は振動周波数、 θ はとっくりの角度、 t は継続時間を表す。 A_n 、 B_n 、 f_n は θ に応じて定まる変数である。また、この減衰正弦波振動は周期 T で繰り返され、 T も θ に応じて定まる変数である

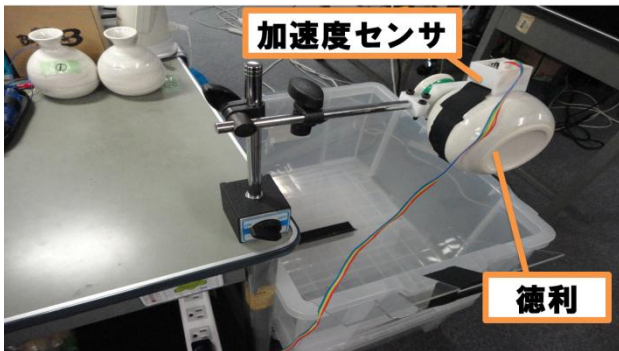


図 4 徳利で液体を注いだ際に生じる振動の計測

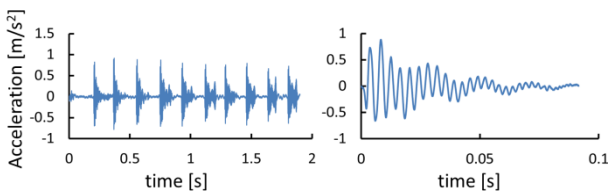


図 5 計測結果

4.2 提示装置

式(2)を用いて、徳利から液体を注いだ際の振動を人工的に再現できるかを確認するため徳利型の触覚提示デバイスを製作した。本デバイスは図 6 に示すように、ボイスコイル (TactileLabs, Haptuator Mark II)、加速度センサ (Kionix, KXM52-1050) から構成される。ユーザが本デバイスを傾けた時、加速度センサの値に応じた減衰正弦波振動を PC のオーディオジャックより出力、オーディオアンプ (RASTEME SYSTEMS, RSDA202) で増幅することでボイスコイルを駆動する。

本デバイスで徳利から液体を注いだ際の振動を再現した時の様子を図 7 に示す。本デバイスによるトクトク感再現を体験したユーザから水を注いでいるような感覚があったという感想が得られた。



図 6 トクトク感提示デバイス



図 7 注ぎ動作に対する振動提示によるトクトク感再現

5. 肘屈伸動作に対する振動提示による関節材質感変調

我々は筋感覚や関節受容器等から身体の運動状態を知ることができる。一方で、身体動作は一般的に平滑であるため、普段それらの感覚を意識することは稀である。そこで著者らはこれまでに関節運動に伴ってロータリスイッチのカチカチ感を提示することで身体運動知覚の鮮明化を試みてきた[7]。本章ではこのカチカチ感に減衰正弦波振動を付加することで関節の材質感を変調する手法[8]について述べる。これによりサイエンスフィクションにしばしば登場する身体がゴムや金属等で構成されたキャラクターの身体感覚を体験できるシステムの構築を試みる。

5.1 ロータリスイッチのカチカチ感

ロータリスイッチを手で回すと、カチカチとした周期的な触覚が手に返される。このカチカチ感は、周期的な抵抗感の変化と衝撃感で構成されており、ダイヤル型スイッチなどの操作性向上に応用されている。例えば自動車内のダッシュボードに取り付けられたロータリスイッチによって、運転者は手元を見ることなくダイヤルを所望の位置に調整することができる[9]。

このカチカチ感は運動の結果を伝える触覚の手がかりであり、運動感覚の拡張であるといえる。著者らはヒトの関節部屈伸運動にカチカチ感を適用することで、関節部の運動感覚を鮮明にできるのではないかと考えた。

著者らは図 8 左に示す肘部装着型のカチカチ感提示デバイスを作成した。図 8 右に示すように、本デバイスは押しバネとスチールボールを利用したカムスイッチ機構により肘屈伸に伴って周期的な触刺激を提示する。

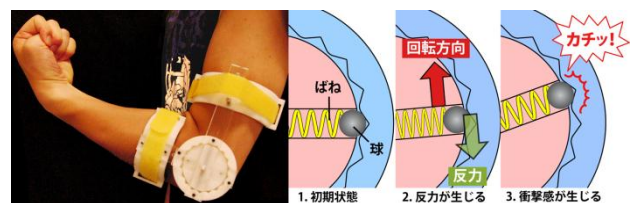


図 8 カチカチ感提示デバイス

5.2 減衰正弦波振動付与による関節材質感変調

著者らは前節で述べた周期的な触覚刺激に減衰正弦波振動を付加することで、あたかも関節の材質が変わったように感じられるのではないかと考えた (図 9)。

本提案手法を実現するために図 10 左に示すシステムを構築した。本システムは Microsoft Kinect, PC, マイクロコントローラ (NXP Semiconductor, mbed NXP LPC 1768), オーディオアンプ (RASTEME SYSTEMS, RSDA202), ボイスコイル (TactileLabs, Haptuator Mark II) から構成される。Kinect によって取得されたユーザの骨格の三次元位置から PC によって肘関節角度が計算される。PC よりユーザの肘関節角度がマイクロコントローラに送信され、マイクロコントローラは D/A コンバータを介して 10 度おきに減衰正弦波振動を出力する (図 10 右)。出力された減衰正弦波振動はオーディオアンプで増幅され、リストバンドでユーザの肘部に固定されたボイスコイルを駆動する。

本システムを用いて所望の材質感を提示可能か被験者実験より検証したところ、3 種類の材質 (ゴム, 木, アルミニウム) が識別可能であることが明らかとなった。

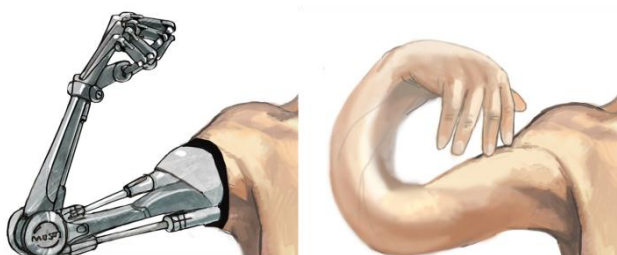


図 9 関節材質感変調

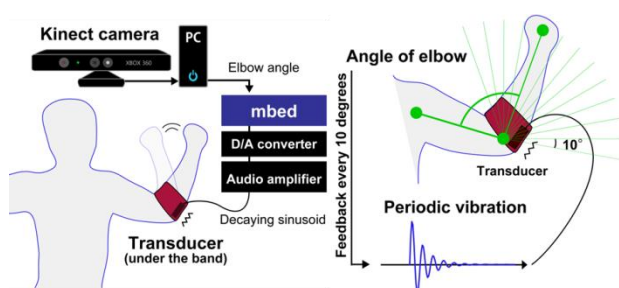


図 10 関節材質感変調システム

6. おわりに

本稿では自己運動に基づいた減衰正弦波振動提示による感覚拡張手法について述べた。これまでの報告では提案手法に対する評価として、材質感ないし感触が所望の提示通り変調されているかを被験者実験により検証してきた。

今後はこれらの感覚変調がユーザの物理的・心理的行動に及ぼす影響を調査する予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 24004331 の助成による。

参考文献

- [1]Wellman, P., and Howe, R.D.: Towards Realistic Display in Virtual Environments, Proceedings of the ASME Dynamic System and Control Division, Vol. 57, No. 2, pp.713-718, 1995.
- [2]Okamura, A.M., Cutkosky, M.R., and Dennerlein, J.T.: Reality-Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp.245-252, 2001.
- [3]Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., and Kajimoto, H.: HaCHIStick: Simulating Haptic Sensation on Tablet PC for Musical Instruments Application, Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology 2011, pp.73-74, 2011.
- [4]Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., and Kajimoto, H.: Augmentation of Material Property by Modulating Vibration Resulting From Tapping, Proceedings of EuroHaptics 2012, vol.1, pp.173-180, 2012.
- [5]Ohnishi, H., and Mochizuki, K.: Effect of Delay of Feedback Force on Perception of Elastic Force: A Psychophysical Approach, IEICE Transactions on Communications, Vol. E90-B, No. 1, pp. 12-20, 2007.
- [6]池野, 岡崎, 蜂須, 佐藤, 福嶋, 梶本: 徳利の「トクトク感」のモデル化および再現, エンタテインメントコンピューティング 2012, pp.296-300, 2012.
- [7]Kurihara, Y., Kuniyasu, Y., Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., and Kajimoto, H.: Augmentation of Kinesthetic Sensation by Adding "Rotary Switch Feeling" Feedback. Proceedings of Augmented Human 2012, 2012.
- [8]Kurihara, Y., Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., and Kajimoto, H.: Virtual Alternation of Body Material by Periodic Vibrotactile Feedback, Proceedings of IEEE VR 2013, 2013. (printing)
- [9]Badescu, M., Wampler, C., and Mavroidis, C.: Rotary Haptic Knob for Vehicular Instrument Controls, Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 342-343, 2002.