

# Reality-Based な周期的衝撃感呈示による身体材質感の変調

## Virtual Alteration of Body Material by Reality-Based Periodic Vibrotactile Feedback

○栗原 洋輔 (電通大) 蜂須 拓 (電通大) 佐藤 未知 (電通大) 福嶋 政期 (電通大)  
Katherine J. Kuchenbecker (University of Pennsylvania) 梶本 裕之 (電通大)

Yosuke KURIHARA, The University of Electro-Communications, [kurihara@kaji-lab.jp](mailto:kurihara@kaji-lab.jp)  
Taku HACHISU, The University of Electro-Communications, [hachisu@kaji-lab.jp](mailto:hachisu@kaji-lab.jp)  
Michi SATO, The University of Electro-Communications, [michi@kaji-lab.jp](mailto:michi@kaji-lab.jp)  
Shogo FUKUSHIMA, The University of Electro-Communications, [shogo@kaji-lab.jp](mailto:shogo@kaji-lab.jp)  
Katherine J. KUCHENBECKER, University of Pennsylvania, [kuchenbe@seas.upenn.edu](mailto:kuchenbe@seas.upenn.edu)  
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, [kajimoto@kaji-lab.jp](mailto:kajimoto@kaji-lab.jp)

Characters with body materials that are different from that of humans, such as metal robots or rubber people, frequently appear in movies and comics. While the abilities of their synthetic bodies can be easily observed from their actions, their somatic sensations are more difficult to appreciate. Our aim in this work is to simulate the alteration of the material of the human body by means of reality-based vibrotactile feedback. The feedback represents the properties of the materials and is periodically applied to the elbow joint in synchrony with the elbow angle. This simulated sensation of having a different body material gives us the feeling of those characters. This technique can also be applied to improve maneuverability in the teleoperation of master-slave systems because it gives the operator a robot-like sensation.

**Key Words:** Body sense, Material, Reality-based, Vibrotactile feedback, Virtual reality.

### 1. 緒言

映画・漫画・アニメなどでのサイエンス・フィクション作品では、ロボットやゴム人間など身体が普通の人間とは異なる材質で構成されているキャラクターが登場する。たとえ実在しないキャラクターであると分かっているにもかかわらず、その身体的特性は極めて興味深く、視聴者の多くが一度はそのキャラクターになってみたいと思うだろう。一方で、映像を見ることでその身体的特性は理解できるもののキャラクターが感じている身体感覚は我々が経験したことの無い感覚であるため想像が難しい。

そこで本研究では、人間の主観的な身体材質感を変調することを試みる。本稿では、物体衝突時に生じる振動特性を再現する触振動フィードバックを用いた手法を提案する。材質感ごとに波形が変化する本振動フィードバックをユーザの肘角度に同期させて肘関節に適用することで、ゴム・木材・アルミニウムの3つの材質感を呈示する (Fig. 1)。

本手法によりユーザ自身の身体が金属やゴムになった感覚を再現できれば、例えば特殊な身体を持つスーパーヒーローになりきるゲームなど新たなエンタテインメントシステムへの応用が期待できる。



Fig. 1 Virtual alteration of body material (rubber, wood, and metal)

### 2. 先行研究

人間の触知覚を変える研究はこれまでも数多く行われてきた。例えば触覚 AR (Augmented Reality) に分類される研究では、力覚呈示装置を用いて実物体の硬さ[1]や境界[2]をバー

チャルに変更するシステムが提案されている。また物体との接触によって生じる振動を記録・再生することで物体のテクスチャ感を再現するシステム[3]や、物体衝突時に生じる振動のモデルを用いて物体を叩いた際の触覚的材質感を変えるシステム[4]などが挙げられる。これらのシステムは、我々が触れる様々な物体の触覚的材質感を変化させることができる。

人間の身体感覚すなわち深部感覚を変える研究も行われており、その一つとして運動錯覚が挙げられる[5]。この運動錯覚は固定した腕の筋紡錘に 100Hz 程度の振動触覚刺激を与えることで引き起こされ、実際には動いていないにも関わらず腕が伸展しているような感覚を生起させる。しかしながら、人間の身体の材質感を変えることに着目した研究は未だ提案されていない。

### 3. 提案手法

#### 3.1. 物体の触覚的材質特性の再現

我々は特殊な材質で構成された身体感覚を知らない一方で、身体外部に存在する物体がどのように感じられるかについてはよく知っており、物体が持つ触覚的特性からその材質を特定することができる。主観的なリアリズムが実際の物理現象よりも材質の判別に貢献していることから、本稿ではユーザのリアリズムに基づいた (Reality-based) 既知の材質感呈示手法を用いることとする。

物体が衝突した際に生じる振動は、その材質の判別に貢献する重要な手がかりであるといえる。先行研究において、物体が衝突した結果生じる振動は式 (1) に示す減衰正弦波によってモデル化できることが示されている。

$$Q(t) = A(v)e^{-Bt} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで、 $Q$  は衝撃により生じる加速度、 $t$  は衝突した瞬間からの経過時間、 $A$  は初期振幅係数、 $v$  は衝突速度、 $B$  は減衰係数、 $f$  は振動周波数である。このうち  $A$ 、 $B$ 、 $f$  は材質によって定まるパラメータであり、これらを設定することにより物体

衝突時の様々な触覚的材質感を再現することができる。Okamura ら[6]および蜂須ら[4]は本モデルとスタイラス型触覚フィードバックシステムを組み合わせることでゴム・木材・アルミニウムの材質を再現し、被験者実験によりユーザがそれぞれを識別可能であることを示した。

我々はこの振動モデルを用いてユーザの肘関節に直接取り付けられた振動子を駆動し、ゴム・木材・アルミニウムの3つの異なる材質を腕部に再現することを試みる。

### 3.2. 離散的な触振動フィードバック

振動モデルが単一の衝撃を再現するものであるのに対し、人間の体の運動は連続的である。そこで我々はユーザの肘角度に同期した離散的な触振動フィードバックを提案する (Fig. 2)。離散的な触振動フィードバックは、ロータリスイッチを回した際に返される触覚刺激「カチカチ感」[8]として知られており、例えば自動車内のエアコン調整ダイヤルなどの操作性向上に応用されている[9]。したがってカチカチ感は回転運動に対する一種の体性感覚拡張[10]であると見なすことができ、これと減衰正弦波振動と組み合わせることで運動による身体材質感を変調できるのではないかと考えた。

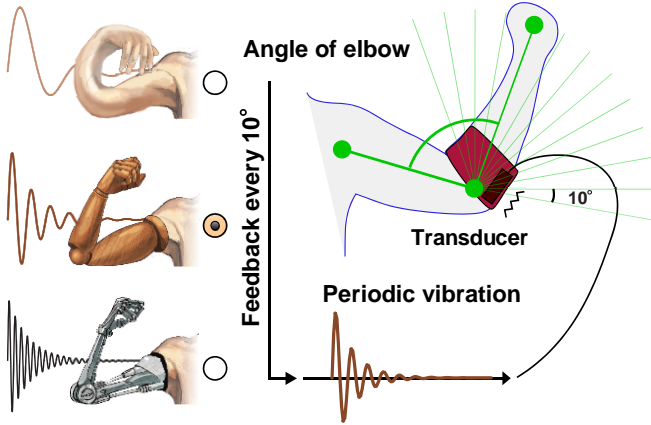


Fig. 2 Periodic vibrotactile feedback

### 4. システム構成

肘関節の材質感を変調するプロトタイプシステムの構成を Fig. 3 に示す。まず、カメラベースモーションキャプチャ (Kinect, Microsoft 社製) を用いてユーザの右肩・右肘・右手の3次元座標をサンプリングレート 30Hz で取得する。これらの3点から PC が肘角度を計算し、肘角度データをマイクロコントローラ (mbed NXP LPC1768, NXP 社製) に送信する。肘角度が 10度変わる度に mbed は減衰正弦波を D/A コンバータ (LTC1660, Linear Technology 社製, 10 bit) を介してリフレッシュレート 10kHz で出力する。出力信号はオーディオアンプ (RSDA202, Rasteme Systems 社製) によって増幅され、最後にアームバンドによって肘関節外側に取り付けられたボイスコイル型振動子 (Haptuator Mark II, TactileLabs 社製) を駆動させる。材質感を再現するため、振動パラメータは Okamura ら[6]と同じ値を用い (Table 1)、衝突速度  $v$  は一定とした。

本システムでは肘角度の取得をカメラベースで行なっているためユーザの腕の動きに対して振動が呈示されるまでに約 50 ms の遅延が生じる。しかし腕を約 90°/s で動かした際に生じる角度誤差が約 4.5° であり、振動呈示の間隔である 10° の半分よりも小さいことから、我々はこの遅延は十分に小さいと判断した。また第 5 章で述べた実験においてこの遅延に気づいた被験者は一人もいなかった。

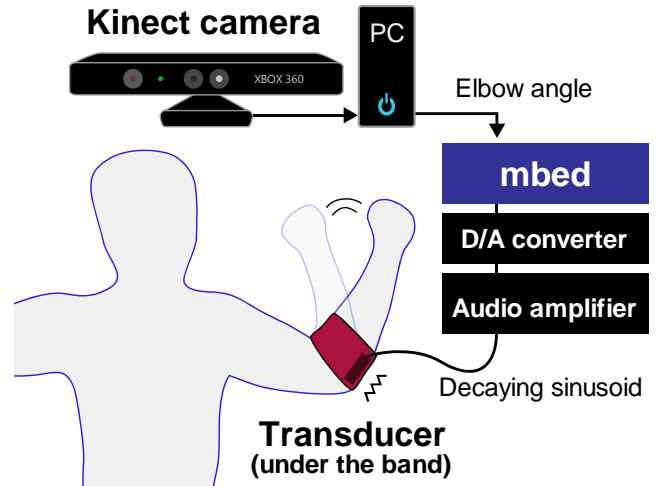


Fig. 3 System configuration

Table 1. Vibration parameters

Material	A [m/s <sup>2</sup> ]	B [s <sup>-1</sup> ]	f [Hz]
Rubber	15.1	60	30
Wood	10.5	80	100
Aluminum	19.6	90	300

### 5. 材質判別実験

身体材質感の変調効果を評価するため、3つの材質 (ゴム・木材・アルミニウム) を判別する実験を行った。被験者は著者の研究室メンバーである著者以外の男性 5 名・女性 3 名 (22~27 歳・右利き) とし、全員が本システムを未経験であった。被験者はアームバンドを右肘に装着し、Kinect カメラの正面に立った (Fig. 4)。どの材質の振動モデルかが分からない状態で 3 種類の振動フィードバックが被験者の腕の動きに合わせて肘関節に呈示され、被験者は手元のキーボードボタンを押すことで 3 種類のフィードバックを何度でも自由に体験することができた。被験者はどのフィードバックがどの材質かを回答するよう指示された。ただし、身体が材質が変わった感覚は被験者が全く体験したことがない感覚であり、選択肢無しに材質を判別することは極めて困難であると判断したため、被験者は 3 種類のフィードバックがゴム・木材・アルミニウムのそれぞれ異なる材質であることを知らされていた。学習効果を排除するため、実験の間正しい材質は被験者に伝えず、材質感判別の事前訓練なども一切行わなかった。本マッチングタスクを 1 試行とし、被験者一人につき 3 試行を行った。本実験で用いた振動子からは振動呈示時にわずかな駆動音が聞こえるが、骨伝導による聴覚刺激を防げないことから聴覚のマスキングは行わなかった。

全試行終了後、被験者は以下の二つの質問に対して Yes / No の二択で回答した。

- (1) 振動を腕の内部から感じたか? : 身体内部からの感覚は身体を構成する材質そのものを変調していることを示し、装着している振動子からの感覚もしくは外骨格型装具を取り付けたような身体外部からの感覚ではないと考えられるため。

- (2) 振動が呈示された際、腕に反力を感じたか？：バーチャルな身体材質感の変調には、運動に対する適切な「抵抗感」が伴うと考えられるため、被験者が振動によって擬似的な反力を感じていた場合、それは被験者の主観的なリアリズムの指標となると考えられる。



Fig. 4 Overview of the material discrimination experiment

## 6. 実験結果

3種類の振動モデルに対して被験者が回答した材質の正答率を Table 2 に示す。全振動モデルにおいて正答率は 80% を超えており、全体での平均正答率は 87.5% であった。各振動モデルにおける 3つの選択肢の回答率に対してカイ二乗検定（比率の差の検定）を行った結果、全てのモデルにおいて選択肢間の回答率に有意差が認められた（ゴム： $\chi^2(2)=27.00, p < 0.01$ , 木材： $\chi^2(2)=32.25, p < 0.01$ , アルミニウム： $\chi^2(2)=36.75, p < 0.01$ ）。したがって被験者は全ての振動モデルにおいてその材質を正しく判別できていたといえる。

Table 2 Identification rates for three types of feedback

Answer	Vibrotactile feedback		
	Rubber	Wood	Aluminum
Rubber	83.3%	12.5%	4.2%
Wood	8.3%	87.5%	4.2%
Aluminum	8.3%	0.0%	91.7%

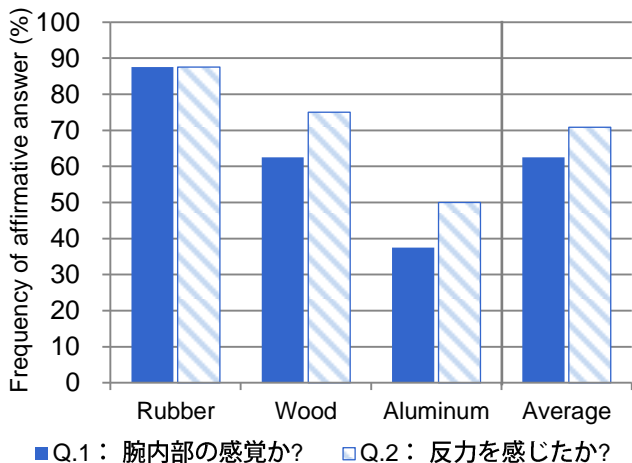


Fig. 5 Answer frequencies for the two questions

2つの質問に対して被験者が Yes と回答した確率を Fig. 5 に示す。質問 1（振動を腕の内部から感じたか？）に対しては全体の回答率は 62.8% で、ゴム（87.5%、7/8 名）、木材（62.5%、5/8 名）、アルミニウム（37.5%、3/8 名）の順で高かった。質問 2（腕に反力を感じたか？）に対する全体の回答率は 70.8% で、質問 1 と同様にゴム（87.5%、7/8 名）、木材（75.0%、6/8 名）、アルミニウム（50.0%、4/8 名）の順で高かった。

## 7. 考察

全種類の振動モデルにおける材質判別率の平均が 87.5% という高い値となったことから、振動モデルは材質の触覚的特性を肘関節に適用できており、被験者は材質を正しく判別できたということがいえる。誤回答の中では被験者はゴムと木を間違えて判別してしまう傾向があり、アルミニウムは比較的正しく判別されていたといえる。ただし同様の傾向は Okamura らによる実験[7]でも観察されており、そもそも判別が難しいモデル同士であったと考察できる。

振動フィードバックが身体どこから感じられるかということに関しては、低周波の振動モデル（ゴム・木材）が特に肘関節の内部から感じられるということが分かった。被験者は自身の肘関節がゴムや木材に変わったと報告していた一方で、未体験の感覚であるため確信が持てないとも報告していた。これらの結果により、皮膚上からの簡便な振動刺激により身体内部の感覚を操作できる可能性が示唆された。逆に最も高周波であるアルミニウムの振動モデルは、主に身体外部からの感覚、すなわち金属製の外骨格型スーツを身につけたような感覚として受容されていたことが明らかとなった。ただし、本質問にて採用した二項選択（Yes/No 回答）としては被験者数が 8 名と少なかつたため、統計解析に十分な信頼性が得られなかった。したがって今後は被験者数を増やす、または回答方法をアナログスケールにするなどといった統計解析を考慮した実験手法をとる必要があると考えられる。

振動呈示時の擬似的な反力に関しては、低周波の振動モデルにおいて最もよく感じられていた。被験者はゴムおよび木材のようなフィードバックにおいてアルミニウムよりも強い反力を感じたと報告していた。先行研究において、指先の摩擦感を再現する振動刺激により外部からの擬似的な力を提示することが可能であることが報告されている[9]。この擬似力覚現象は本実験にて報告された擬似反力を部分的に説明しているが、運動している身体部位および触覚刺激部位が先行研究とは異なっている。この擬似反力は、身体材質感変調による被験者の主観的なリアリズムを反映しているのもであると推測できる。

本実験においては主に二つの改良すべき点があると考えられる。一つは被験者が全て著者の研究室メンバーであったことである。被験者は高周波の振動が比較的硬い材質感を示すという法則を知っていたと思われる、したがって被験者が単純に振動周波数のみを手がかりに材質を判別していた可能性がある。もう一つは、振動子から発せられる僅かな音が材質の判別に寄与していた可能性があるということである。しかしゴムらしきフィードバックが呈示された際に「弾性」を感じたという報告が 2 名の被験者からあったことから、肘関節の材質が変わったと感じていたことは確かであるといえる。以上のことから、今後はナイーブな被験者を用い、振動子からの音をマスキングする等といった手法で追実験を行うべきであると考えられる。



## 8. 今後の展望

今後の展望の一つとして考えられるのは、身体材質感のリアルリズム向上を目的とした振動パラメータの最適化である。現システムでは、Okamura ら[6]が用いた物体衝突時の振動特性を再現するパラメータを採用している。したがって、衝突のない身体運動に対応した振動パラメータを設定することが必要であると考えられる。また触覚刺激の最適化という意味では、振動が離散的な呈示される際の角度周期や、触覚刺激の呈示部位も再考する余地がある。

一方で、減衰正弦波モデル以外の触覚刺激を用いることも考えられる。前述の通り本モデルが再現しているのは物体衝突時の振動であり、身体運動感覚の再現を目的としたものではない。したがって振動刺激が減衰正弦波モデルであること自体が身体材質感の呈示には適していないとも考えられる。

減衰正弦波モデルは実際の物体衝突を観測して得られたモデルではあるが、衝突振動そのものの忠実な再現というよりは、人の材質感判別に大きく寄与する要素を衝突振動の中から抽出した Reality-based modeling [6]であるといえる。これとは対照的に、実世界の物理現象データ出来るだけ忠実に再現する Data-driven modeling が提案されており、これにより高品位な材質感を呈示できるという報告もある[3][12]。

Data-driven modeling による身体材質感の変調手法としては、例えば金属で構成されたロボットアームの駆動によってジョイント部に生じる振動を記録し、それを忠実に再現するようなモデリングを行い、人の肘関節に再生する手法などが考えられる。現在我々は本手法を用いたロボット感呈示システムのプロトタイプを製作中であり、将来的には本稿にて採用した Reality-based modeling との比較検証を行う予定である (Fig. 6)。

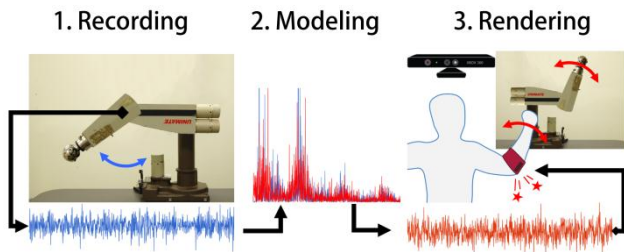


Fig. 6 Data-driven approach for robotization of human body

## 9. 結言

本稿では人の身体の材質をバーチャルに変調することを目的として、物体の触覚的材質特性を再現する減衰正弦波振動モデルを用いた Reality-based な手法を提案した。ユーザの肘角度に同期して肘関節に離散的な振動フィードバックを適用するプロトタイプシステムを製作し、肘関節にゴム・木材・アルミニウムの3種類の材質感を再現することを試みた。材質判別実験の結果、被験者は各材質を高確率で判別できることが明らかとなった。また低周波の振動モデルにおいては運動時に擬似的な反力や弾性感が感じられ、身体内部からの感覚として受容される傾向があることが示唆された。一方で高周波の振動モデルは最も高い確率で材質を判別できたものの、外骨格型スーツを装備したかのような身体外部からの感覚として受容されることが分かった。

本研究が目指す最終ゴールは、特殊な身体を持ったスーパーヒーローになりきる体験を提供する新たなバーチャルリア

リティシステムを構築することである。そのためには、肘関節のみならず手首・肩・膝といった別の関節にも材質感を呈示し、ユーザ全身の材質感を変調する必要があるといえる。

また別の応用先として、マスタ・スレーブ型のテレオペレーションシステムが考えられる。スレーブ側に存在するオブジェクトを直接操作しているような感覚は、マスタ側オペレータの操縦性を向上させる。スレーブ（ロボット）が持つ機械的インピーダンスをマスタ（人間）にマッチさせるといったロボットを人間に近づける手法[13]は数多く提案されてきたが、一方で人間をロボットに近づける研究は未開拓の分野であると考えられる。マスタ側の人間へのロボット感呈示は、マスタ・スレーブシステムの操縦性向上のための新たなアプローチとして期待できる。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会の「組織的な若手研究者等海外派遣プログラム」による支援を得た。

## 文献

- [1] S. Jeon and A. Choi. Haptic augmented reality: taxonomy and an example of stiffness modulation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(5):387-408, 2009.
- [2] T. Nojima, D. Sekiguchi, M. Inami, and S. Tachi. The SmartTool: a system for augmented reality of haptics. *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, pages 67-72, 2002.
- [3] K. J. Kuchenbecker, J. M. Romano, and W. McMahan. Haptography: Capturing and recreating the rich feel of real surfaces. *Invited paper at International Symposium on Robotics Research*, 2009.
- [4] T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto. Augmentation of material property by modulating vibration resulting from tapping. *Haptics: Perception, Devices and Scenarios (Proceedings of EuroHaptics'12)*, 7282(1):173-180, 2012.
- [5] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. C. Matthews. The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain*, 95(4):705-748, 1972.
- [6] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky, and J. T. Dennerlein. Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6(3):245-252, 2001.
- [7] Y. Kurihara, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto. Virtual alteration of body material by periodic vibrotactile feedback. *IEEE Virtual Reality Conference*, March 16-23, 2013 (to appear).
- [8] 佐藤, 橋本, 梶本. カメラ回転時の「カチカチ感」付与による操作感向上, *インタラクティブ*, 2008.
- [9] M. Badescu, C. Wampler, and C. Mavroidis. Rotary haptic knob for vehicular instrument controls. *Proceedings of Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'02)*, pages 342-343, 2002.
- [10] Y. Kurihara, Y. Kuniyasu, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto. Augmentation of kinesthetic sensation by adding "Rotary Switch Feeling" feedback. *Proceedings of 3rd Augmented Human International Conference*, 2012.
- [11] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro. Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force. *Haptics: Perception, Devices and Scenarios (Proceedings of EuroHaptics'08)*, 5024:619-629, 2008.
- [12] J. M. Romano and K. J. Kuchenbecker. Creating realistic virtual textures from contact acceleration data. *IEEE Transactions on Haptics*, 5(2):109-119, 2012.
- [13] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, K. Hirota, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa, and S. Tachi. TELESAR V: TELEExistence surrogate anthropomorphic robot. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, 2012.