

触振動覚刺激付加による Pseudo-Haptic Feedback の拡張： 平面上の凹凸感呈示

Pseudo-Haptic Feedback Augmented with Vibrotactile Stimulation Simulating the Geometric Relief

○蜂須 拓 (電通大)
古川 正紘 (電通大)
Anatole Lécuyer (INRIA Rennes)

Gabriel Cirio (INRIA Rennes)
Maud Marchal (INRIA Rennes)
梶本 裕之 (電通大)

Taku HACHISU, University of Electro-Communications, hachisu@kaji-lab.jp
Gabriel CIRIO, INRIA Rennes, gabriel.cirio@irisa.fr
Masahiro FURUKAWA, University of Electro-Communications, furukawa@kaji-lab.jp
Maud MARCHAL, INRIA Rennes, maud.marchal@irisa.fr
Anatole LÉCUYER, INRIA Rennes, anatole.lecuyer@inria.fr
Hiroyuki KAJIMOTO, University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

Pseudo-haptic feedback is one of the most practical methods for presenting haptic cues without haptic device, in which visual stimuli accompanied with the user's motion generate illusory haptic sensation. The temporal response of the sensation is relatively slow, typically expressed as mass or viscosity. On the other hand, high frequency component of tactile sensation, i.e. vibrotactile feedback is also an important factor of haptic perception, which is quite difficult to present using pseudo-haptic feedback. In this paper, we propose to integrate vibrotactile feedback with pseudo-haptic feedback, so that it could strengthen the perception of pseudo-haptic effects. We demonstrated that the perception of the geometric relief was improved by the integration.

Key Words: Geometric relief, haptic illusion, pseudo-haptic, vibration

1. 緒言

PC マウス等を使って画面操作する GUI において、pseudo-haptic を用いた触覚呈示が注目されている。Pseudo-haptic とは、自己運動が投射されたマウスカーソルなどの視覚刺激の速度変化あるいは大きさの変化によって、擬似的な触覚が生じる錯覚現象である。Lécuyer ら[1]は、ユーザが pseudo-haptic を用いて再現されたバーチャルなバネやおもりの硬さを、現実のバネと同様に、弁別可能であることを報告している。また同様におもりの重さや、ノブにかかるトルクも pseudo-haptic によって、その力覚を定量的にユーザに呈示できることが報告されている。Pseudo-haptic を用いた触覚呈示は視覚刺激のみで触覚呈示を行えるため、コスト・簡便性の点で優れているといえる。

しかし人間の五感全てを利用して高い臨場感を求めるエンタテインメント等において、触覚刺激を全く利用せず pseudo-haptic のみの触覚呈示を行うことは実践的ではない。なぜならば、皮膚感覚に限って知覚できる微細な変異については pseudo-haptic によって視覚的に再現することが困難なためである。こうした視覚と触覚の特性の違いによる pseudo-haptic の限界の一つが周波数帯域である。Pseudo-haptic だけでは再現できる周波数帯域が限られ、皮膚感覚の周波数帯域に対応できない。また pseudo-haptic には視覚的な集中が必要であり、画面に集中していないかユーザの視界が遮られると全ての触覚の手がかりが失われてしまうという問題もある。

1.1 先行研究

渡邊らはマウスカーソルの移動方向をランダムに変化させてカーソルを振動させることで皮膚感覚のひとつである触振動覚を呈示する手法を提案している[2]。しかしヒトの視覚特性上、呈示できる振動周波数帯域が触覚に比べて狭いという問題がある。

一方で橋本らは PC マウスに振動子を搭載した触覚呈示装

置を提案し、GUI 操作中に触振動覚呈示を行っている[3]。また土屋ら[4][5]はポインティングスティックに振動子を取り付けた小型触覚インタフェース、Vib-Touch を開発している。Vib-Touch を用いて触振動覚刺激を呈示し、擬似的に運動感覚を再現して画面中の物体との触覚インタラクションを実現している。

1.2 提案手法

本研究では力覚呈示手法としての pseudo-haptic と皮膚感覚呈示手法として触振動覚呈示手法を組み合わせた触覚呈示手法を提案する。本提案手法によって従来 pseudo-haptic のみの触覚呈示では困難であった皮膚感覚に限って知覚できる微細な変異を呈示できると考えられる。本稿では平面上の凹凸感知覚に着目し、視覚刺激と触振動覚刺激呈示の相互作用を検証する。

Robles-De-La-Torre らは、平面上の物理的な凹凸を指で探索する際、指が法線方向に移動する指の位置の変化よりも、凹凸の曲面より指に返される力の変化の方が凹凸の知覚の手掛かりとなっていることを示した[6]。指の腹に一定の押下力を加えながら水平方向に等加速度運動を行うと、物理的な凹凸面上では加減速が生じる。Lécuyer らはこの加減速を PC モニタ上でマウスカーソルの移動速度を変化させる手法 (Speed technique) で再現し、pseudo-haptic によって二次元平面上で法線方向の凹凸感を呈示できることを示した[7]。Speed technique では、まず PC モニタ上の各ピクセルに高さ (Height map) を定義する。そしてカーソルが低位のピクセルから高位のピクセルに移動する際、その速度を減速させ、逆の場合は速度を加速させる。このカーソルの加減速より、凹凸を探索した際に生じるような力覚が生成される。つまり凹凸知覚に必要な力覚呈示は視覚的加速度変調に代えられる。

土屋ら[4][5]は Vib-Touch を用いて、凸曲面を探索する際に、面から指の腹に返される垂直抗力の変化を Stick-Slip モデルを用いた触振動覚刺激による摩擦感で呈示した。そして被験者

実験より凸の高さを定量的に呈示できることを示した。つまり皮膚感覚のみで力覚呈示を行わない触覚呈示で凹凸を再現できることを示した。しかし視覚刺激と触振動覚刺激を組み合わせたときの相互作用については検証されていない。

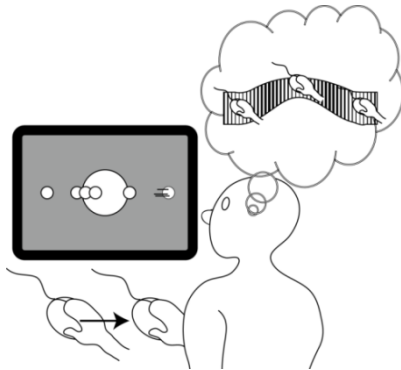


Fig. 1 Illustration of the perception of a material relief using pseudo-haptic and vibrotactile feedback

細かい凹凸のあるざらざらとした表面の平面（テクスチャ平面）を指で探索する際に指の腹と平面の間で振動が生じる。この振動周波数は指の移動速度が速いほど高くなる。テクスチャ平面から指の腹に返される振動周波数によって、テクスチャ平面と指との相対速度を推定できることが知られている[8]。この事実より、指の腹に呈示する振動刺激の周波数を変調することにより、知覚されるテクスチャ平面と指の相対速度を制御できると考えられる。我々は、Speed technique による視覚的加速度変調に加えて、皮膚感覚的な加速度変調を行えば凹凸感知覚を増強することができる考えた (Fig. 1)。本稿では Speed technique による視覚刺激呈示に加えて、テクスチャ平面を探索することにより生じる触振動覚刺激を呈示することで二次元平面上により鮮明に凹凸が呈示できるかを検証する。

2. 視覚と触振動覚による凹凸感呈示実験

本実験では視覚的速度変調および触振動覚的速度変調により二次元平面上に凹凸感をより鮮明に呈示できるかを検証した。またその際の被験者の凹凸感知覚における視覚と触振動覚の相互作用を調べた。

2.1 被験者

本実験は男性 5 名、女性 2 名で行った。被験者の平均年齢（標準偏差）は 22.7 (±0.76) 歳であった。被験者は全員健康な視力を持ち、右利きであった。

2.2 実験構成

Fig. 2 に示す様に、PC、PC モニタ (HYUNDAI 社製 W241DG, 24 インチ, 解像度 1920*1200) および触振動覚呈示装置を用いて本実験システムを構成をした。触覚呈示装置には橋本らが開発した PC マウスにオーディオスピーカを搭載したものをを用いた[3]。

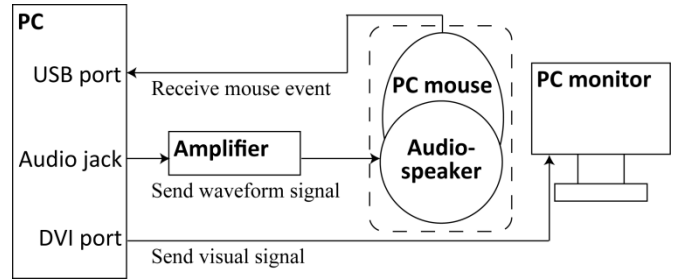


Fig. 2 System structure

Fig. 3 に示すように黒画面上の中央に 800*600pixel の灰色の長方形、半径 100pixel の白色の円を表示した。またマウスカーソルを半径 10pixel の緑色の円で表示した。画面上の中心、すなわち白色の円の部分に凸、凹もしくは平面の Height map を作成した。灰色の長方形はテクスチャ平面を表し、マウスカーソルでテクスチャ平面上を探索するとオーディオスピーカより振動刺激が呈示された。

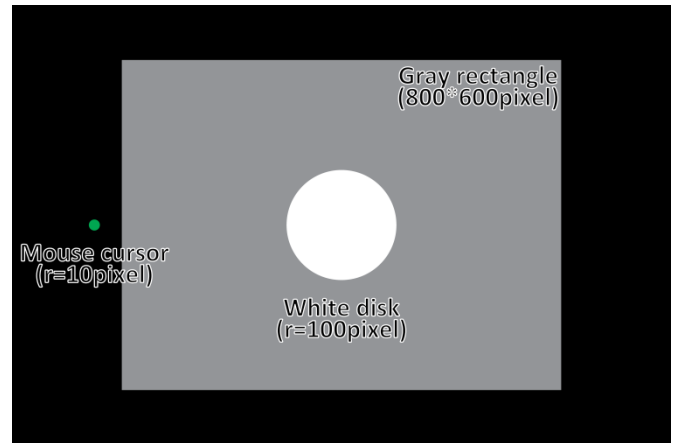


Fig. 3 The screen displayed to the subjects with a 24-inch LCD computer screen of 1920*1200 resolution and 60 Hz refresh rate during the trial: the mouse cursor was a green disk with a 10 pixel radius, the virtual relief (i.e. bumps, holes or flat) was a white disk with a 100 pixel radius and the virtual vibrotactile texture was an 800*600 pixel gray rectangle on the black background. The cursor could be only moved horizontally.

2.2.1 視覚刺激呈示

視覚刺激呈示には Lécuyer らの Speed technique[7]を採用した。画面上の任意の位置にあるピクセル cur から PC マウスを M_{dis} 動かしてピクセル next に移動しようとしたとき、マウスカーソルの移動量 C_{dis} は式 1 で表される。

$$C_{dis} = M_{dis} - C_{st} \quad (1)$$

ただし、

$$C_{st} = H_{nxt} - H_{cur} \quad (2)$$

ここで C_{st} はピクセル next の Height map (H_{nxt})とピクセル cur の Height map (H_{cur})の差より得られる。

画面上全てのピクセルの Height map を 0 と初期化した後に、凸および凹の外形を半径 100pixel、中心のピクセルの Height map をそれぞれ ±90pixel とし、ガウス関数状の勾配に設定し

た (Fig. 4).

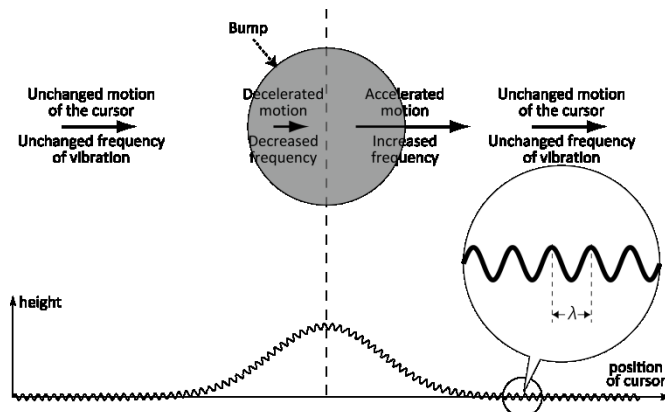


Fig. 4 Vibrotactile textures on the height map algorithm

2.2.2 触振動覚呈示

Fig. 4 に示すように、灰色の長方形上に振幅 A 、波長 λ の正弦曲線でテクスチャ平面を構成した。マウスカーソルが速度 v で灰色の長方形上を移動したとき、スピーカより呈示される振動刺激 y は式 3 で表される。

$$y(t) = A \sin(v(t)/\lambda) \quad (3)$$

式 3 より、凸の坂を上るときはマウスカーソルの移動速度が減速させるので、振動周波数は低くなる。逆に坂を下るときはカーソルの速度が加速されるので、振動周波数は高くなる。本実験では A を $170\mu\text{m}$ 、 λ を 10pixel とした。

2.3 実験手続き

Fig. 5 に示すように被験者は PC モニタの前の椅子に着席した。被験者は右手人差し指の腹だけを触振動覚呈示装置のスピーカコーンに添え、他の指でマウスを把持した。被験者はマウスカーソルを移動させて PC モニタ中央に表示された白い円を探索し、キーボードより凸、凹または平面であるかをキー入力で回答した。



Fig. 5 Picture of the experiment

本提案手法の効果を検証するために、被験者には視覚刺激のみ、触振動覚刺激のみ、もしくは両方の 3 パタンの様式が呈示された。触振動覚刺激のみの場合は、マウスカーソルが灰色の長方形にあるときにカーソルを非表示にした。そのため、被験者が白い円を探索できない可能性があったので、本実験ではマウスカーソルの移動を水平方向のみに限定した。

呈示形状 (凸、凹および平面) の 3 パタン、呈示様式 (視

覚、触振動覚および両方) の 3 パタンを各 5 試行ずつランダムな順で呈示した。したがって被験者は合計 45 試行 ($=3 \times 3 \times 5$) を行った。

被験者は本実験前に回答がスムーズにできるように数試行の練習を行った。本実験中オーディオスピーカが発する聴覚的な影響を排除するため、被験者にはヘッドフォンを通じてホワイトノイズが呈示された。

3. 実験結果

実験結果を正答率で呈示様式ごとにまとめたものを Table 1 に示す。正答のセルを黄色でマーキングし、各呈示形状において最も回答率の高かったものを太字にした。

Table 1 The experimental answer rates (%): The yellow markers stand for the correct answer rates and bold letters stand for the highest rates in each presented relief.

視覚のみ	凸を呈示	凹を呈示	平面を呈示
凸を回答	77.1	8.6	0
凹を回答	0	62.9	0
平面を回答	22.9	28.6	100
触振動覚のみ	凸を呈示	凹を呈示	平面を呈示
凸を回答	31.4	25.7	14.3
凹を回答	34.3	42.9	25.7
平面を回答	34.3	31.4	60.0
視覚および触振動覚	凸を呈示	凹を呈示	平面を呈示
凸を回答	97.1	20.0	17.1
凹を回答	2.9	77.1	11.4
平面を回答	0	2.9	71.4

各様式における全被験者の平均正答率 (標準偏差) は、視覚のみの場合は $80.0(\pm 24.6)\%$ 、触振動覚のみの場合は $44.8(\pm 24.6)\%$ 、視覚および触振動覚の場合は $81.9(\pm 16.7)\%$ であった。また各形状における全被験者の平均正答率 (標準偏差) は、凸が $68.6(\pm 14.3)\%$ 、凹が $60.1(\pm 21.6)\%$ 、平面が $77.1(\pm 22.7)\%$ であった。分散分析を行ったところ、呈示様式間で正答率に有意差が認められ ($F(2,18)=3.55, p<0.001$)、呈示形状間では有意差は認められなかった ($F(2,18)=3.55, p=0.335$)。

4. 考察

視覚のみを呈示した際の正答率は、正答率 90%以上の結果を報告している先行研究[7]と比較して、80.0%と差がある。これは、本実験ではマウスカーソルの移動方向を水平方向のみに制限したため、被験者が十分にマウスカーソルの加減速を知覚できなかったことが原因と考えられる。一方で、いずれの呈示形状においても十分にチャンスレート ($=33.3\%$) をこえた正答率が得られていることから、pseudo-haptic による疑似力覚の呈示が行えていたといえる。

触振動覚のみを呈示した際の正答率は著しく低くなった。平面ではチャンスレートをこえているもの、凸および凹に関してはチャンスレート付近の正答率となった。この結果から触振動覚刺激方法のみでは凹凸感を呈示することは難しいといえる。

視覚および触振動覚を呈示した際の正答率は視覚のみのものと同程度の高い水準を示した。しかし Table 1 が示すようにその回答傾向は、平面の正答率が高かった視覚のみに対して、視覚および触振動覚を呈示した場合は凸および凹の正答率が高くなった。また本実験終了後の被験者の内観報告より、ほ

ば全員の被験者が、視覚と触振動覚の両方が呈示されると凹凸が知覚しやすくなったと述べた。本実験結果からは、呈示様式（視覚、視覚および触振動覚）と呈示形状（凹凸、平面）の凹凸感知覚における相互作用を統計分析することは多重検定になってしまうため、結論を出すことが困難である。しかし視覚刺激のみの疑似力覚呈示に触振動覚刺激を加えることで凹凸感呈示が改善される傾向があると思われる。

5. 結言

我々は pseudo-haptic による視覚誘発性の疑似力覚呈示とオーディオスピーカによる触振動覚呈示の組み合わせによる触覚呈示手法を提案した。本稿では二次元平面上での凹凸感呈示に着目し、凹凸感を視覚刺激および触振動覚刺激で設計、および凹凸感知覚における視覚と触振動覚刺激の相互作用を検証した。その結果、視覚に触振動覚を加えることで被験者の凹凸感知覚が向上する傾向にあることを実験により示した。

今後は再現する凹凸の大きさ（半径および高さ）やテクスチャ平面のパラメータ（波形や波長）を変化させた時の凹凸感知覚の変化について検証する。具体的には再現できる凹凸の大きさの最小値や凹凸面の質感について調査を行う予定である。

文献

- [1] A. Lécuyer. Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence*, 18(1), pp. 39-53, 2009.
- [2] 渡邊他. RUI: Realizable User Interface カーソルを用いた情報リアライゼーション. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2003 論文集, pp. 541-544, 2003.
- [3] Y. Hashimoto et al., Novel tactile display for emotional tactile experience. *Proceedings of the International Conference Advances in Computer Entertainment Technologies*, pp.124-131, 2009.
- [4] S.Tsuchiya et al. Virtual Active Touch II: Vibrotactile Representation of Friction and a New Approach to Surface Shape Display, the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 12-17, 2009.
- [5] S. Tsuchiya et al. Virtual Active Touch II: Vibrotactile Representation of Friction and a New Approach to Surface Shape Display. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3184-3189, 2009.
- [6] G. Robles-De-La-Torre and V. Hayward. Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, 412, pp. 445-448, 2001.
- [7] A. Lécuyer et al. Feeling bumps and holes without a haptic interface: The perception of pseudo-haptic textures. *Proceedings of the ACM CHI International Conference in Human Factors in Computing Systems*, pp. 239-246, 2004.
- [8] A. Dépault et al. Tactile Speed Scaling: Contributions of Time and Space. *J Neurophysiol*, 99. pp. 1422-1432, 2008.