

叩き動作に対する振動呈示の遅延が 材質感呈示に及ぼす影響の調査

Study on Effect of Vibration Latency on Material Perception

蜂須拓¹⁾, 梶本裕之²⁾

Taku HACHISU and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学/日本学術振興会

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

2) 電気通信大学/科学技術振興機構さきがけ

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

概要: これまでに著者らはタッチスクリーン上でのスティックを用いた叩き動作に対する振動呈示によってゴムや木、金属を叩いたような感触を呈示する材質感呈示システムを開発してきた。本システムは接触検知から 0.1ms で振動子を駆動することが可能である。本稿では、心理物理実験より叩き動作に対する振動呈示において、振動呈示に遅延があると感じられる遅延検知閾を測定した。実験の結果、75%遅延検知閾は平均で 5.8ms であり、市販のタッチパネルで生じる遅延よりも小さい値であった。

キーワード: 減衰正弦波, 振動呈示, タッチスクリーン, 遅延

1. はじめに

タッチスクリーン上でのインタラクションにおいて、タッチ入力に対するフィードバックとして視覚に加え、聴覚・触覚呈示が行われており、インタラクションの質の向上が試みられている。特に触覚呈示においては、スクリーン上でのボタンのクリック感[1]や摩擦感[2]の再現が行われており、操作性の向上に限らずリアリスティックな体験を提供している。

これまでに著者らはタッチスクリーン上でのスティックを用いた叩き動作に対する振動呈示によってゴムや木、金属を叩いたような感触を呈示する材質感呈示手法を開発してきた[3]。本手法は振動呈示技術と接触検知技術から成り立つ。前者ではスティックに内蔵された振動子より減衰正弦波を呈示することで材質感を呈示する。減衰正弦波の加速度 $Q(t)$ は次式で表される[4]。

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

ここで、 A は初期振幅係数、 v は接触速度、 B は減衰係数、 f は振動周波数である。 A 、 B 、 f の値は材質によって定まるパラメータである。後者では、光遮断方式を応用したタッチパネルを用いて 2 次元平面上の接触位置の計測に加え、接触速度の計測および接触検知を高速に行う。著者らはこれらの技術を組み合わせて、接触検知から振動子の駆

動までの遅延が 0.1ms であるシステムを実現した。

本研究では、これまでに開発してきたシステムを用いて遅延が材質感呈示に及ぼす影響を調査する。本稿では心理物理実験より、接触検知から振動子駆動までにどれほどの遅延が生じるとヒトは振動呈示に遅延があると感じるかという遅延検知閾を測定する。

2. 先行研究

2.1 タッチスクリーン上での遅延

主に Human-Computer Interaction (HCI) 研究分野でタッチスクリーン上でのフィードバック遅延に関する研究が行われている。Ng らは低遅延タッチスクリーンを開発し、ユーザの入力(タップ、ドラッグ等)に対する視覚呈示(ポインタの表示、移動等)の遅延の検知閾を調べた[5][6]。遅延検知閾は入力様式に依存し、数ミリ秒から数十ミリ秒の遅延があるとユーザは視覚呈示が遅れていると感じ、タッチインタラクションにおいて低遅延を好むことを報告している。Kaaresoja らはタイピングに対する振動呈示の遅延が及ぼす影響について調査した[7]。被験者実験の結果、振動呈示に 100ms ほどの遅延が生じた場合でも入力効率に影響は見られなかった一方で、ユーザの主観的な使いやすさが減退したことを報告した。このように、入力に対するフィードバック呈示の遅延は使いやすさや使い心地と

いったタッチスクリーン上でのインタラクションの質を減退させるといえる。

2.2 触覚呈示の遅延が及ぼす影響

遠隔作業や触覚研究分野で、運動に対する触覚呈示の遅延が及ぼす影響について調査されている。Hikichiらは遠隔協調作業において触覚呈示に遅延が生じると作業効率が低下することを報告している[8]。Rankらは運動の強度(運動距離, 速度)が大きいほど触覚呈示の遅延検知閾が低下することを報告している[9]。これらの研究では、インタラクションの種類やシステムに依存するが、ユーザの許容できる遅延もしくは遅延検知閾は数十ミリ秒であることを被験者実験より明らかにしている。

また遅延は呈示する触覚に影響を与えることが知られている。Ohnishiらは押し動作に対する反力呈示に数ミリ秒の遅延を加えた際、ユーザは実際に呈示された硬さよりも柔らかく感じることを報告している[10]。Okamotoらは平面探索時の振動呈示にユーザが検知できないほどの遅延を呈示した際、粘性感が生じることを報告している[11]。

このように触覚呈示の遅延に関して、作業に支障をきたさない許容可能な遅延の閾値、触覚呈示に遅延があると感じられる閾値が調査されてきた。また遅延によって呈示した触覚とはことなる触覚が生起することについても報告されてきた。本稿では、叩き動作に対する振動呈示において、振動呈示に遅延があると感じられる閾値を調査する。

3. 叩き動作に対する振動呈示の遅延検知閾測定

本実験の目的は叩き動作に対する振動呈示の遅延に対するヒトの遅延検知閾の測定である。

3.1 実験設備構成

本実験で用いたシステムはマイクロコントローラ(mbed NCP LPC 1768, NCP Semiconductors)より制御した。本システムは振動呈示スティック、タッチスクリーンおよびPCから構成された。PCは実験中の各試行の実験パラメータを設定するために用いた。本システムでは接触検知から振動子駆動までを最速で0.1msの遅延で行うことができた。

3.1.1 振動呈示スティック

図1に本実験で用いた振動呈示スティックを示す。本スティックの柄の部分にはアルミニウム角パイプ、ヘッド部分はアクリロニトリルブタジエンスチレン (ABS) 樹脂であり、スティックの全長は170mm、重量は50gであった。スティックのヘッド部分に導電塗料(ニッケル主成分, 3ohm/sq.)を塗布し、マイクロコントローラのVcc電源(3.3V)に接続して次項で述べる接触検知に用いた。振動子にはボイスコイル型リアアクチュエータ(Haptuator MkII, Tactile Labs)を用い、マイクロコントローラからのD/A出力をデジタルオーディオアンプ(AA-AB32186, Sure Electronics)によって増幅し駆動した。

3.1.2 タッチスクリーン

図2に本実験で用いたタッチスクリーンを示す。本タッチスクリーンは光センサ、透明電極、ゲルシートおよび

液晶ディスプレイから構成された。光センサは光遮断方式のタッチパネルを応用したものであり、スクリーン平面上の接触位置および接触速度を計測した[3]。透明電極は厚さ0.03mmの単一電極であり、マイクロコントローラのI/Oポートおよびプルダウン抵抗を介してグラウンドに接続された。透明電極にヘッド部分が接触するとI/Oポートの電圧レベルがlowからhighになることを利用して接触検知を行った。なお、我々の以前の報告[3]の通り、光センサのみでも接触タイミングを予測することが可能であるが、今回は厳密に接触タイミングを検知する必要があったため本接触検知手法を用いた。ゲルシート(スチレン系エストラマ)は液晶ディスプレイとスティックのヘッド部分が

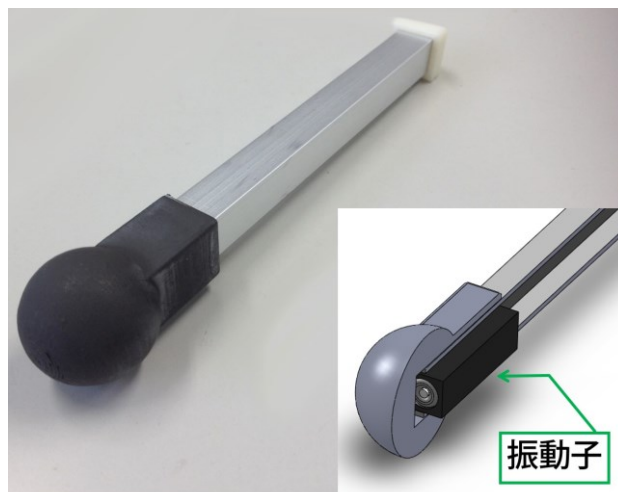


図1: 振動呈示スティック

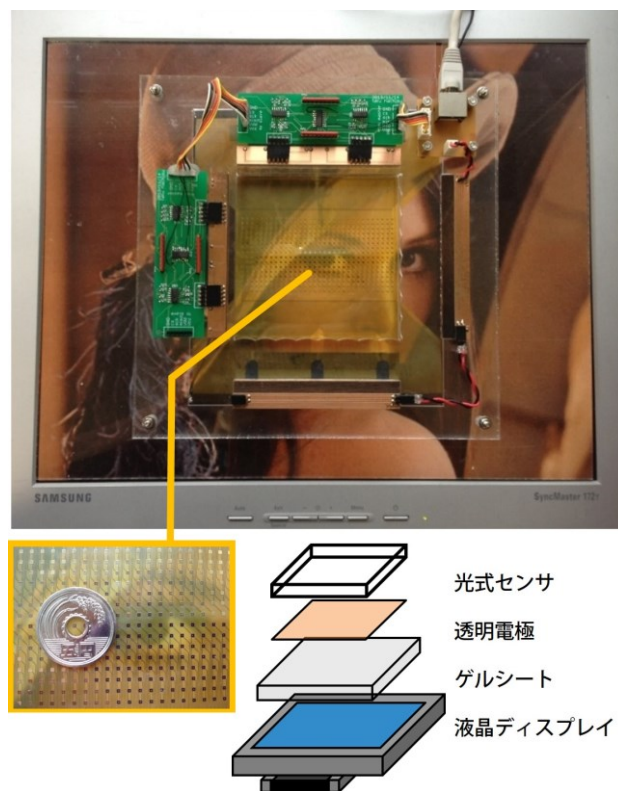


図2: タッチスクリーン

表 1: 減衰正弦波のパラメータ

材質感	$A [s^{-1}]$	$B [s^{-1}]$	$f [Hz]$
木	-9.9	-80.0	150.0
金属	-19.8	-90.0	300.0

接触することで生じる高周波振動を吸収するために用いた。液晶ディスプレイ (SyncMaster172T, Samsung) には被験者への指示が表示された。

3.2 上下法

本実験では振動呈示の遅延検知閾を測定するために上下法を用いた。本実験で用いた上下法は重み付け上下法 [12] を改変したものであり、75%遅延検知閾を測定できる。本実験では2対の刺激 (標準刺激 (遅延 0.1ms) と比較刺激 (遅延 0.1 から 25.6ms)) を呈示し、被験者は遅延がないと感じる刺激を選択した。被験者が標準刺激を選択した場合を正答とし、比較刺激を選択した場合を不正答とした。正答の場合は比較刺激の遅延を1ステップ分減少させ、不正答の場合は3ステップ分増大させた。ステップの初期値は6.4msであった。被験者の回答の傾向が逆転するとき (正答から不正答、もしくは不正答から正答) を折り返しと定義した。折り返しの際には、ステップを半減し、最小で0.1msまで減少させた。8回目の折り返しが生じた時点で測定を終了し、その直前の試行での比較刺激の遅延を75%遅延検知閾とした。比較刺激の遅延が0.1msから開始される上昇系列と25.6msから開始される下降系列の測定を設定した。本実験で得られる結果は厳密には遅延検知閾ではなく標準刺激 (0.1ms) との弁別閾である。

3.3 実験条件

本実験では材質感振動呈示として木条件と金属条件を用いた。それぞれの減衰正弦波 (式(1)) のパラメータは Okamura らのモデル [4] を参考に決定した (表 1)。ただし、振幅に関しては、振動呈示スティックの制約上、[4] よりも小さい値に設定した。

3.4 実験手続き

本実験には12名の被験者 (男性10名、女性2名、22から24歳) が参加した。被験者 A から F は木条件で、被験者 G から L は金属条件で実験を行った。

まず被験者はタッチスクリーンの前に着席し、実験者より実験の内容についての説明を受けた。スティックの叩き方に関して、スティックのヘッド部分がタッチスクリーンに触れたら直ちにヘッド部分を上げるように、かつ接触速度が100から500mm/sの間になるように叩くよう指示され、練習を行った。次にホワイトノイズが呈示されたヘッドフォンを装着し、聴覚を遮断された。そして割り振られた材質感条件において上下法による測定を8回 (上昇系列4回、下降系列4回) 行った。全測定終了後にアンケートに回答して、実験を終了した。

3.5 実験結果

本実験結果を図3 (木条件) および図4 (金属条件) に示す。木条件における振動呈示の75%遅延検知閾は2.4から8.8msであり平均 (標準偏差) は4.7(±2.5)ms、金属条件においては2.5から16.4msであり平均 (標準偏差) は6.8(±4.8)msであった。それぞれの75%遅延検知閾の平均値に対して Student の t 検定 (対応なし) を行ったところ、有意差は認められなかった ($t(10)=-0.9629$, $p=0.3583$)。

本実験の目的は振動呈示の遅延検知閾の測定であったが、アンケートの回答より遅延が材質感呈示に及ぼす影響について観察することができた。材質感の条件を問わず、大半の被験者が振動呈示を感じにくい方を遅延がないと判断する戦略をとっていた。一方で遅延がない場合は叩いている対象が硬く感じるとの報告もあり、Ohnishi らの報告 [10] と同様の傾向が見られた。また、遅延のある方に関しては、「叩いた後も振動が続く感じがした」、「遅延があると跳ね上がるように感じた」あるいは「遅延があるとめり込むような感じがした」との報告があった。

3.6 考察

本実験結果ではユーザは平均で5.8msの遅延を検知可能であることが明らかとなった。Ng ら [5] の報告によると、市販のタブレット PC 等のタッチスクリーンはタッチ入力からカーソルの表示等の視覚フィードバックまでに50から200msの遅延が生じる。また現在モバイル端末で振動呈示に広く用いられている偏心モータは電圧を印可してから振動振幅が最大になるまでに数十から数百ミリ秒の遅延が生じる。したがって、現在普及しているタッチスクリ

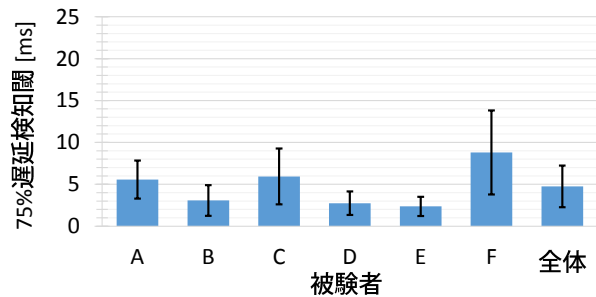


図 3 実験結果 (木条件)

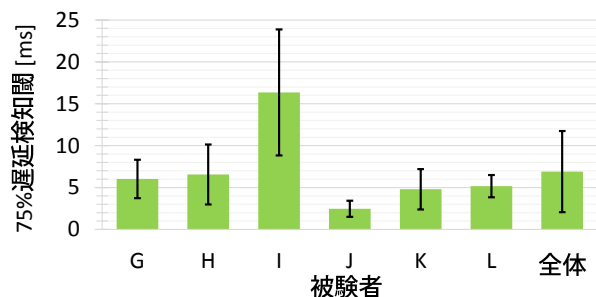


図 4 実験結果 (金属条件)

ーンシステムではタッチ入力から振動振幅が最大になるまで数百ミリ秒の遅延が生じると考えられる。タイピング入力に対する振動呈示の遅延においては 100ms 程度であれば入力効率に影響はないとの報告がある[7]一方で、使いやすさや使い心地を向上するために、またよりリアリステイックな触覚インタラクションを実現するためには遅延を低減させる設計が必要であるといえる。

本実験結果からは呈示する材質感による遅延検知閾への影響は見られなかった。しかし本実験で使用した振動周波数は 150Hz および 300Hz であり、触覚的には高周波で振動振幅が最大になるまでにかかる時間(立ち上がり時間)は数ミリ秒であった。より低い周波数の振動刺激を用いた場合、立ち上がり時間が数十から数百ミリ秒となることから、遅延検知閾は大きくなる可能性がある。

遅延がない場合に振動を感じにくいという回答に関して、標準刺激(遅延 0.1ms)においては自然な材質感呈示ができていたためと考えられる。実験終了後に、一部の被験者に振動を呈示した場合と振動を呈示しない場合を叩き比べさせたところ、被験者は振動の存在に気づき、振動によってスクリーンの材質が変わったように感じると回答した。これまでも本システムによる材質感呈示をデモ展示した際に、ユーザは振動のあり・なしを比較する、あるいは異なる材質感を比較することで材質の違いを感じられることがしばしばあった。つまり、ユーザは相対的に評価することで初めて振動呈示の意図(材質感、低遅延)が分かると考えられる。したがって、ボタンの押下に対するフィードバック等、入力に対する応答が記号的である方が好ましい場合や振動の効果を強調させる必要がある場合においては振動呈示にあえて遅延を加える設計も実用的であると考えられる。

遅延が触覚呈示の物性に及ぼす影響に関して、Ohnishiらの報告[10]と同様に、遅延のない方が対象を硬く感じるとの報告があった。また、スティックの跳ね上がりやめり込みといったようにスティックの接触後の挙動の違いに関する報告もあった。これは遅れて呈示された振動刺激の立ち上がりの方向が関与すると考えられる。振動刺激の立ち上がりがスクリーンと反対方向であればスティックが跳ね上がるように感じ、反対にスクリーンの方向であればめり込むように感じると考えられる。本実験ではスティックの握り方に関して特に統制を取らなかったため、本現象に関して結論づけることはできないが、今後詳細について調査していく予定である。

4. おわりに

本稿では、心理物理実験より叩き動作に対する振動呈示の遅延検知閾を測定した。実験の結果、被験者は数ミリ秒の遅延を検知することができ、市販のタッチスクリーンシステムで生じる遅延を下回ることが明らかとなった。

またアンケートの結果、先行研究[10][11]と同様に遅延が硬さや跳ね返り、めり込みといった材質感呈示に影響することが示唆された。今後は叩き動作における振動呈示の遅延による材質感の変化に関して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] Fukumoto, M. and Sugimura, T.: Active Click: Tactile Feedback for Touch Panels. Ext. Abstract CHI 2001, pp. 121-122, 2001.
- [2] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: Teslatouch: Electro vibration for Touch Surfaces. UIST 2010, pp. 283-292, 2010.
- [3] Hachisu, T. and Kajimoto, H.: HACHISStack: Dual-Layer Photo Touch Sensing for Haptic and Auditory Tapping Interaction. CHI 2013, pp. 1411-1420, 2013.
- [4] Okamura, A.M., Cutkosky, M. and Dennerlein, J.: Reality Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 6, pp. 245-252, 2001.
- [5] Ng, A., Lepinski, J., Wigdor, D., Sanders, S. and Dietz, P.: Designing for Low-Latency Direct-Touch Input. UIST 2012, pp. 453-464 (2012).
- [6] Jota, R., Ng, A., Dietz, P. and Wigdor, D.: How Fast is Fast Enough?: A Study of the Effects of Latency in Direct-Touch Pointing Tasks. CHI2013, pp. 2291-2300, 2013.
- [7] Kaaresoja, T., Anttila, E. and Hoggan, E.: The Effect of Tactile Feedback Latency in Touchscreen Interaction. IEEE WHC 2011, pp. 65-70, 2011.
- [8] Hikichi, K., Morino, H., Fukuda, I., Matsumoto, S., Yasuda, Y., Arimoto, I., Iijima, M. and Sezaki, K.: Architecture of Haptics Communication System for Adaptation to Network Environments. IEEE ICME, pp. 563-566, 2001.
- [9] Rank, M. Shi, Z., Müller, M. H. and Hirche, S.: Perception of Delay in Haptic Telepresence System. Presence 19 (5), pp. 389-399, 2010.
- [10] Ohnishi, H. and Mochizuki, K.: Effect of Delay of Feedback Force on Perception of Elastic Force: A Psychophysical Approach. IEICE Transactions on Communications E90-B (1), pp. 12-20, 2007.
- [11] Okamoto, S., Konyo, M., Saga, S. and Tadokoro, S.: Detectability and Perceptual Consequences of Delayed Feedback in a Vibrotactile Texture Display. IEEE Transaction on Haptics 2 (2), pp. 73-84, 2009.
- [12] Kaernbach, C.: Simple Adaptive Testing with the Weighted Up-Down Method. Perception & Psychophysics 49, pp. 227-229, 1991.