

皮膚感覚呈示における時間遅れの影響調査と検知限の同定*

岡本正吾^{*1}, 昆陽雅司^{*1}, 嵯峨智^{*1}, 田所諭^{*1}

Identification of Cutaneous Detection Thresholds against Time-Delay and its Effects on Subjective Feelings

S. Okamoto, M. Konyo, S. Saga and S. Tadokoro, Tohoku University

Tohoku University, 6-6-01 Aramaki-aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-city 980-8579 Japan

For cutaneous sense displays, the generation of tactile stimuli in response to the hand movements of the operators is associated with active touch and is considered to be one of the effective display methods, which inevitably causes delayed tactile feedbacks from tactile displays. The knowledge of the detection threshold of system latency between the hand movements and the stimuli is helpful in designing the tactile displays. In this study, the identification of the thresholds through psychophysical experiments of 13 participants revealed two types of the thresholds. One was the threshold at which the participants noticed the existence of latency. The other was the minimal time delay that could affect the subjective feelings of the participants while they were not conscious of the latency. This study also investigated types of the changes in tactile feelings caused by the time-delay stimuli.

1. 緒論

触感呈示システムにおいて、操作者の手の動きや意図に合わせて、適切な皮膚刺激を生成する方法は、自然な操作感や触り心地の呈示に有効である。この呈示方法は、ヒトが手を動かして物に触れ、皮膚感覚が生じるという体験に近い状態をつくるため、能動触に対応する。

ところがこの呈示法では操作者の手の動きを検知し、刺激を生成するまでにシステム遅延が発生する。遅延が大きい場合には、刺激が入力と対応していない事象に感じられたり、触れている仮想物体が不自然に動いているように感じられたりする。手の動きに合わせた皮膚感覚呈示において、許容される時間遅れが同定されれば、触感呈示システムの設計を行うことができる。

本論文では、皮膚感覚呈示の時間遅れ検知限の同定を目的とする。本論文で時間遅れ検知限とは、手の運動に遅れた触刺激が呈示された場合、利用者が遅延の存在に気づくか、利用者の主観に影響を与える最小の遅延のことである。これは触感呈示デバイスのために必要な制御周期とは異なる。

筆者らは皮膚感覚呈示の時間遅れ検知限を2タイプにわけて調べる。1つは、手の動きに対して触刺激が遅れていることがわかる、という検知限である。触感呈示システムの遅延がこの検知限を越えると、操作者はシステムの遅れに気づくことが多くなる。もう1つは、触刺激が遅れているとは気づかずに、呈示している仮想オブジェクトの触感が変化すると、という検知限である。触察においては、触対象表面の物理特性・手の動

き・神経信号の時系列情報といった時空間情報が相互に関連を持っている。時空間情報にずれがある場合に、触感に変化が生じる可能性がある。システム遅延が触感に影響するならば、遅延によって操作者は、システムの設計者が意図した触感とは異なる触感を感じてしまう。触感呈示システムの中には、物の表面の質感などの微妙な情報を伝えることを目的としているものもある。従って、2つの検知限を区別できれば、触感呈示システムの設計に役立つ。本論文では、これら2つの検知限を別々に同定することを試みる。

次のような触感呈示システムの設計において、時間遅れ検知限を踏まえた設計が必要である。筆者らは操作者の手の位置・速度・加速度などに応じて刺激を生成することで多様な触感を呈示する方法を提案している [1]。手の動きを入力とし、触刺激を生成する触感呈示法は他のシステムにも導入されている [2-4]。これらのシステムでは操作者の手の動きから触刺激の生成までの応答時間が検知限を越えないように設計する必要がある。また、触覚情報を遠隔から伝達するマスタ・スレーブシステムも、遅延が考慮されなければならないシステムの例である [5]。これらのシステムでは、スレーブアームに装備された触感センサからのフィードバックに通信遅延が含まれており、許容される遅延を知ったうえで設計が必要である。

これまでに、手の運動を入力とし、皮膚感覚の生成を出力とする場合の時間遅れ検知限を同定した報告は見受けられない。バーチャルリアリティシステムの設計のために、利用者の時間遅れ検知限を同定した研究例は報告されている。ヘッドフォンを用いた仮想音源呈示では、頭部動作から音源呈示までの時間遅れ検知限 (45-80 ms) [6] [7]、電子楽器における演奏動作から音生成までの時間遅れ検知限 (70-80 ms, 実験結果よ

*原稿受付 2008年1月17日

^{*1}東北大学 (〒980-8579 宮城県 仙台市 青葉区 荒巻字 青葉 6-6-01)

E-mail: okamoto@rm.is.tohoku.ac.jp

り算出) [8], コンピュータの GUI における, マウス動作・キータ입に起因する描画変更の時間遅れ検知限 (100–200 ms) [9], ヘッドマウントディスプレイにおいて, 視線追従した画像呈示の時間遅れ検知限 (100 ms) [10], 力覚ディスプレイにおいては, 弾性球体の視覚呈示に対する力覚呈示の時間遅れ検知限が同定されている (30–35 ms) [11]. 以上の各研究では異なる時間遅れ検知限の定義を採用しているものがあり, 数値は直接的に比較できず, 参考に留まる. これらの研究例から明らかなように, 感覚の組合せやタスクの内容により検知限は異なっており, 皮膚感覚呈示の触運動に対する遅延の検知限も個別に調査する必要がある.

2. 触刺激および実験システム

2.1 触刺激 本研究では触覚呈示デバイスがテキストをオペレータに呈示し, オペレータがそれを触察するというタスクを想定する. オペレータは, そのテキストをデバイスを通じて認識する. テキスチャの呈示は触覚呈示装置の典型的な使用例の一つであると考えられる.

触刺激として, 指で単一の表面波長 λ を有する試料を, 触速度 v で走査したときに皮膚に生じる振動の基本周波数 $f = v/\lambda$ を呈示する. 振動刺激は実験の参加者の触速度に応じて生成される. 振動子への印加電圧 y は

$$y = A \sin\left(2\pi \frac{v(t-D)}{\lambda} t\right) + A \quad (1)$$

とする. ここで, A は印加する最大電圧であり, 75 V とする. D は実際の触速度と対応する刺激の間の遅延である. システム遅延をシミュレートする場合は, バッファした触速度を用いる. λ は 1 mm である.

2.2 実験システム 図 1 に時間遅れ検知限の同定に用いる実験装置の概要を示す. 触感呈示のための刺激子として積層圧電アクチュエータ (NEC/TOKIN ASB510C801P0) を用いた. 刺激子は最大で 60 μm (150 V 印加時) 程度の変位を生成し, 数百 Hz でも知覚可能な刺激の生成が可能であることを確認している. 刺激子はリニアスライダに取り付け, リニアスライダの位置はリニアエンコーダで計測した. リニアエンコーダの空間分解能は 1.6 μm である. 図 3 は実験システムのブロック線図である. 制御用コンピュータがエンコーダ値を計測し, 刺激子に指令値を与える. 制御周期は 5 kHz とした. スライダの稼働距離は, およそ 420 mm である.

図 2 に示すように, 参加者らは, 右中指を振動子の上に置く. そのとき, 中指以外の部分がスライダに接触しないように指示されている.

実験システムの最小遅延 (手の動きによりエンコーダのパルス出力が変化してから, 刺激子に電圧指令値が到達するまでの時間) を 10 回測定した結果, 中央値は 140 μs であり, 最大の遅延は 160 μs であった.

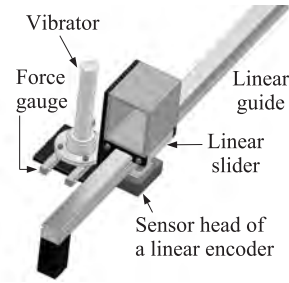


Fig.1 Schematic view of the experimental apparatus

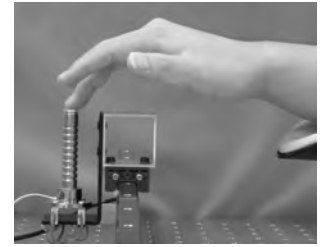


Fig.2 Experimental scene: a participant touching the vibrator with his middle finger

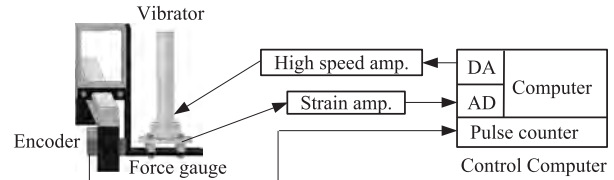


Fig.3 Block diagram of the entire system

3. 実験：時間遅れ検知限の同定

3.1 実験方法 実験の参加者は 20–30 代男子 13 名であった. 参加者はアイマスクを装着し, ヘッドフォンを通じてピンクノイズを聞いていた.

実験では, 参加者は参照刺激と試験刺激の両方を呈示された. 参照刺激としては, 時間遅れの無い刺激を, 試験刺激としては時間遅れのある刺激がそれぞれ呈示された. 実験中の合図は全て, ビープ音で送った. 実験の 1 試行は 13 秒から成り, 1 度目のビープ音の後, 参加者は 2 度目のビープ音が鳴るまでの 5 秒間, 参照刺激を触察した. 2 度目のビープ音の 3 秒後に 3 度目のビープ音が鳴り, 参加者は 4 度目のビープ音が鳴るまでの 5 秒間, 試験刺激を触察した.

実験中は回答の正誤は参加者に知らせなかった. 実験の 1 試行の途中で, 指が刺激子から離れることの無いように参加者に依頼した. 試行中の参加者の指の押下力は計測されており, 2 N を越えたときは, その試行を無効とし, 全試行の後に再び調べた. 試行中のエンコーダ値は, 後の解析のために記録した.

実験は実験 A, B の 2 種類を行った.

実験 A の目的は, 参加者が触刺激の時間遅れに気づく検知限を同定することである. 実験 A では, 参加者の手の動きに遅れた刺激が呈示されること, 時間遅れ検知限を調べる実験であることを説明し, 参加者には試験刺激が「遅れている」か「遅れていない」かを答えるように依頼した.

実験 B の目的は, 時間遅れが, 呈示しているオブジェクトの触感を変化させる検知限を同定することである. 実験 B では, 参加者には試験刺激を参照刺激に比べて微小に変化させると伝え, その変化に参加者が気づくかどうかを調べる実験であると説明した. 試験刺激の呈示では, どの種のパラメータが変化するかは, 参加

Table 1 Objectives and questions to the participants in experiment A, B

| | Experiment A | Experiment B |
|-----------|--|--|
| Objective | Identifying the thresholds for delay detection | Identifying the thresholds to notice the tactile changes caused by the time delays |
| Question | Is the test stimulus delayed or not delayed? | Are the reference and test stimulus same or different? |

者に伝えなかった．参加者には，参照刺激と試験刺激が「同じである」か「異なる」と答えるように依頼した．

実験 A, B における参加者への質問の違いを表 1 に示す．この実験の趣旨説明以外は，A, B の実験は全て同じ手順で行われた．参加者 13 人全員が A, B の実験の両方を少なくとも 1 日以上の間隔を空けて行った．実験 A を先に行い，B を後日行った参加者が 7 人であり，その逆順で実験を行った参加者が 6 人であった．

本実験の前にそれぞれの参加者に予備実験が行われた．予備実験では極限法により，その参加者が常に信号（時間遅れ・触感の変化）を検知可能な時間遅れ D_{max} を推定した．参加者 13 人の 26 回の実験の中で D_{max} は 70–110 ms の範囲に分布していた．

本実験は恒常法により行った．参照刺激は $D = 0$ であり，試験刺激としては， D は D_{max} から 0 までを 5 等分した 6 種類を用意した．それぞれの D は合計 10 回呈示され，呈示順は疑似乱数により決定した．1 回の実験は合計 60 試行を含み，事前の説明から実験終了まで 40 分程を要した．

3.2 実験結果

3.2.1 検知限の算出法 本論文での検知限の算出法を図 4 を用いて説明する．図 4 には，異なる D を呈示したときに，参加者が信号を検知したと答えた割合と，その近似式 $f(D)$ の例を示している．近似に用いたロジスティック曲線は

$$f(D) = \frac{1}{1 + \exp(-a - bD)} \quad (2)$$

である．式 (2) の a, b は曲線の特性を表す定数である．図のように，参加者の実験結果から算出した回答率に，曲線をフィットさせ， $f(D) = 0.5$ となる D を，時間遅れ検知限として定義する．以降，実験 A でのある参加者の検知限を DT_A ，実験 B での検知限を DT_B とする．

3.2.2 算出した参加者の検知限 参加者 13 名の実験結果から算出した時間遅れ検知限の平均・標準偏差・度数分布を図 5 に示す．検知限の母集団の正規分布曲線も重ねて示す．

13 名の内，参加者 *ts* の DT_A は，飛び値の可能性があった（Grubb's test, $n=13, p < 0.05$, one-tailed, $p = 0.037$ ）．これに加えて，*ts* は実験 A, B において，他の参加者と比べて誤検出率が 0.3 と高かったこ

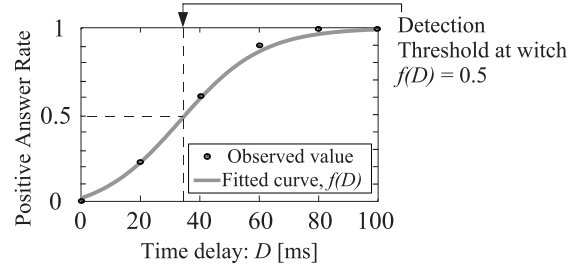


Fig.4 Calculation method and the definition of the detection threshold: an example of the positive answer rates of the participants as a function of the time delay of the test stimuli

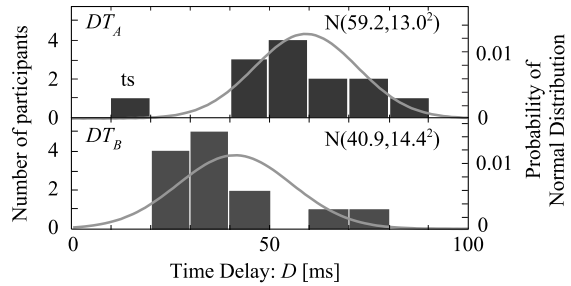


Fig.5 Histograms of DT_{As} and DT_{Bs} and expected probability density functions of the thresholds

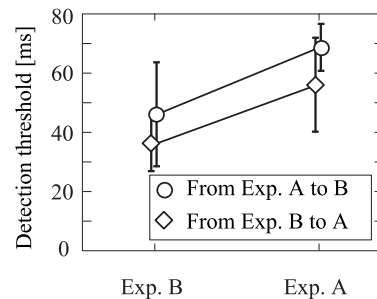


Fig.6 Mean DT_{As} , DT_{Bs} and their standard deviations when they were grouped on the basis of the experimental order

とから *ts* の結果は特異であると判断し，飛び値として扱った．*ts* の結果を除いた場合，平均 DT_A (標準偏差) は 59.2(13.0) ms，平均 DT_B は 40.9(14.4) ms であり，平均 DT_A は平均 DT_B よりも大きい (paired t-test, $n=12, p < 0.01$, one-tailed, $p = 0.0010$)．*ts* の結果を含めた場合は，平均 DT_A は 55.6(17.8) ms，平均 DT_B は 39.4(14.9) ms であり，この場合も平均 DT_A は平均 DT_B よりも大きい (paired t-test, $n=13, p < 0.01$, one-tailed, $p = 0.0022$)．

算出された検知限に関して，二元配置分散分析を適用した．因子は，実験の種類と順序の 2 つである．図 6 に，実験順序別の DT_A, DT_B の平均を標準偏差とともに示す．図中の \circ は，実験 A を先に行い，後日に実験 B を行った参加者 6 名の検知限の平均である． \diamond は，逆の順序で実験を行った参加者 6 名の検知限の平均である．分析の結果，検知限に対する有意な主効果は，

実験の種類のみに見られた ($F(1,20)=10.87, p < 0.01, p = 0.0036$)。実験 A を先に行うか、B を先に行うかという実験順序は、参加者らの検知限には影響しなかったと言える ($F(1,20)=2.40, p > 0.05, p = 0.14$)。

3.2.3 触運動の特徴量と検知限の相関関係 時間遅れ検知限と参加者の触運動との関係を調べるため、検知限と触運動の特徴量との Pearson の相関係数を計算した。計算した特徴量は 3 種類である。1 つ目は往復する触運動の周波数である。触速度のパワースペクトラム密度を計算し、スペクトラムが最大になる周波数を、代表値とした。2 つ目は触速度のピーク値の平均である。これは、往復運動の半周期の中の最大速度の平均値とした。3 つ目は触運動の加速度のピーク値の平均である。検定の結果、周波数と速度のピーク値が検知限にやや相関があった。

図 7 に検知限と触速度の周波数の関係をプロットしたものを示す。横軸は各参加者の検知限を、実験 A, B それぞれの平均で除して正規化した値である。正規化した検知限と触速度の周波数の間に負の相関がみられた ($r = -0.518, t\text{-test}, n=24, \text{two-tailed}, p < 0.05, p = 0.022$)。

図 8 に正規化した検知限と触速度のピーク値の平均の関係をプロットしたものを示す。両者の間に正の相関がみられた ($r = 0.488, t\text{-test}, n=24, \text{two-tailed}, p < 0.05, p = 0.035$)。

検知限は触運動の周波数と負の相関があり、触運動のピーク速度の平均と正の相関があった。これらを合わせて考えると、早い周期で小刻みに小さいストロークで手を動かした参加者の検知限が小さい傾向があったことになる。ただし、相関が弱いため、本論文ではこの原因についての議論はしない。

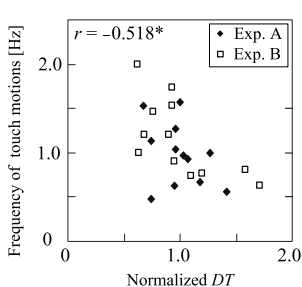


Fig.7 Frequency of the reciprocating touch motions vs. the detection thresholds

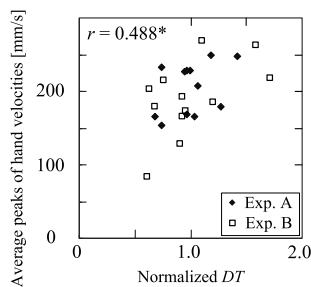


Fig.8 Average peak velocities of the reciprocating touch motions vs. the detection thresholds

3.3 参加者らが報告した遅延によるオブジェクトの触感変化 実験 A, B の後に参加者らにインタビューを行い、主観的なことについて尋ねた。参加者らからの主な回答をまとめる。

実験 A の後、参加者らに、遅延の存在に気づいたのはどのようなときであったかを尋ねた。参加者らは主に、手を動かした瞬間に刺激が生成されないとき、手の

運動を止めてもしばらく刺激が持続しているとき、呈示されているオブジェクトが不自然に動いているように感じたとき、遅延があると判断していたと報告された。

実験 B の後、遅延によって呈示されている仮想オブジェクトの質感が変化したと感じたとき (実際は、参加者らは刺激の遅延が操作されているとは知らされていない)、それはどのような変化であったかを尋ねた。主な回答は次のようであった。粗さ感が大きくなった (刺激を強く感じた)。粗さ感が小さくなった (刺激を小さく感じた)。スライダのすべりが良く感じた。スライダを動かし難く感じた。手を動かすときに抵抗感を感じた。摩擦抵抗があるように感じた。摩擦抵抗が減ったように感じた。水の中で手を動かしているように感じた。スライダの質量が変わったように感じた。このように、参加者らは単純に一定の遅延があることによって、オブジェクトの質感がさまざまに変化したように感じた。回答のなかには、粗さ感が大きくなった・小さくなった、スライダを動かし易い・難しいなどの互いに相反するような意見があった。

4. 実験：遅延が主観的な触感に与える影響の調査

前節の実験結果より、触感呈示において 40 ms 程度の遅延がある場合には、参加者らは遅延の存在を認識するよりも、呈示されているオブジェクトの触感が変化するように感じるということがわかった。遅延による主観的な触感の変化が様々な表現で表されたことに注目し、本節では、遅延によって、どのように触感が変化し得るかを調査する。

4.1 触感変化の観察を目的とした遅延の生成方法 3.3 節から、同様に遅延のある条件で仮想オブジェクトに触れたとしても、互いに相反するような触感の変化が報告された。このような場合、遅延によってどのように触感が変化したかを調査するのは困難である。

そこで、触運動の加速・減速期間中の遅延に注目する。なぜならば、加速中に遅延がある場合は、触速度が加速しているにも関わらず、低速時の触運動を基に刺激が生成される。また、手が動き出してもしばらくの間は刺激が生成されない。一方、減速中に遅延がある場合は、触速度が減速しているにも関わらず、高速時の触運動を基に刺激が生成される。また、手を止めてもしばらくの間は刺激が生成される。このように、触速度の加速時と減速時では、遅延が触感に異なる影響を与えると考えられる。

この予測に基づいて、加速度の正負を条件として遅延を制御する。触速度の加速時のみに遅延が発生する刺激と、減速時のみに遅延が発生する刺激を用いる。

触速度の加速時のみに遅延がある場合は、遅延 D の制御を

$$D = \begin{cases} T_a (\text{const}) & \text{if } \frac{d|v(t)|}{dt} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

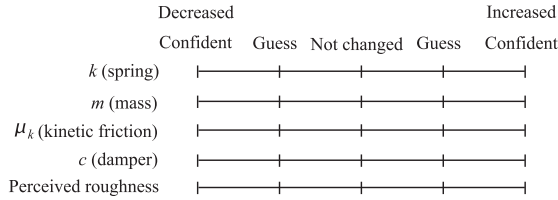


Fig.9 Questionnaire to the participants to describe the tactile changes

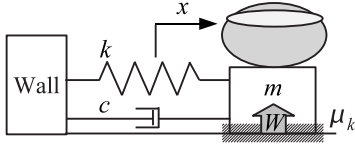


Fig.10 Physical model for the participants to imagine and describe the subjective changes in tactile feelings

によって決定する．ここで， $v(t)$ は参加者の触速度である．減速時にのみ遅延がある場合の遅延は

$$D = \begin{cases} T_d (\text{const}) & \text{if } \frac{d|v(t)|}{dt} \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

によって与える．触運動の加速度の符号が切り替わる時， D は瞬時に切り替わるのではなく，10 ms 掛けて線形に，0 と T_a, T_d の間を変化させる．

4.2 実験手順 実験ではリニアスライダの初期位置(ガイド中央)の左右に，参照刺激として遅延の無いオブジェクトと，試験刺激として遅延を制御したオブジェクトを配置した．スライダがガイドの中央部を越えるとき，刺激の制御式が切り替わり，出力が不連続になる．この不連続な刺激が，参加者らの判断に影響しないようにするために，参加者らは，左右のオブジェクトを交互に調査するように指示された．参加者は一試行 15 秒の間に，両オブジェクトを触り比べた後，図 9 の 5 つの評価項目を採点した．

評価項目には，図 10 のようなバネ・マス・ダンパモデルの物性値を選定した．この理由は主に次の 2 点である．1 点目として，3.3 節から，参加者らが報告した触感変化は，力学的に表せる性質の表現が多かったことである．2 点目として，物性値を評価項目とすることで，主観的な表現(やわらか，ツルツルなど)を用いる場合よりも参加者間で評価基準が一致することが期待できることである．また，評価項目を減らすため，明らかに該当しない項目は評価項目に含めなかった．例えば，3.3 節のとおり，静止摩擦の変化を連想させるような触感変化は参加者らの内省からは得られなかったために，静止摩擦は評価項目には含めなかった．物性値以外の評価項目としては，粗さ感の大小の評価を項目に加えた．

参加者らは実験前に，力覚呈示装置である PHANToM Premium を用いて，図 10 のモデル中の物性値が変わっ

Table 2 Experimental results, types of subjective changes in tactile feelings caused by the time-delay: total scores of the selected items are listed when 2 and 1 points are given to the "confident" and "guess" items respectively.

| | Delay in the acceleration phase | | Delay in the deceleration phase | |
|-----------|---------------------------------|----------|---------------------------------|----------|
| | Decrease | Increase | Decrease | Increase |
| Stiffness | 0 | 4 | 0 | 8 |
| Mass | 0 | 28 | 0 | 13 |
| Damping | 8 | 5 | 0 | 38 |
| Friction | 41 | 6 | 2 | 25 |
| Roughness | 62 | 1 | 1 | 48 |
| Total | 111 | 44 | 3 | 132 |

た場合の感覚を体験した．このとき，発生力 F の制御は

$$-F = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \mu_k W \text{sgn}(\dot{x}) \quad (5)$$

に基づいて行った． m, c, k, μ_k はそれぞれ，モデルの質量，減衰係数，ばね定数，動摩擦係数である． x はバネの自然長からの変位， W は床からの法線方向の反力である．静止摩擦は定義しなかった．参加者らがモデルの物性値の有無による感覚の変化を理解できたことを確認するために簡単なテストを行った．これらに要する時間は各参加者，10 分程度であった．

一回の実験は 25 試行からなり，そのうち 10 試行は触速度の加速時に遅延がある刺激，10 試行は触速度の減速時に遅延がある刺激，残りの 5 試行は参照刺激と同じ刺激を試験刺激として呈示した．試験刺激の呈示順はランダムとした．

遅延の大きさ T_a, T_d は，参加者ごとに予備実験を行い，決定した．予備実験では極限法により，その参加者がいつも触感の違いを検知可能な T_a, T_d を決定した．参加者 6 名で， T_a, T_d は 60–100 ms の範囲に分布した．

25 試行のうち前半の 12 試行では，リニアスライダの初期位置の左に参照刺激を，右に試験刺激を配置した．後半の 13 試行では，左右を逆転させた．参加者らは，左右のどちらに参照刺激が配置されているかを知らされていた．

参加者は 3. 節の実験に参加した 20 代男性 6 名である．一試行の間は参加者らは目を閉じ，試行が終了すれば，評価項目を見て，採点するように指示されていた．3. 節の実験同様，参加者らは一試行の間は指と振動子の接触条件が変わらないように努めるように依頼されていた．実験中は参加者らはヘッドフォンを通じてピンクノイズを聞いていた．指の押下力が 2 N を越えた場合は，その試行を無効と，全試行の後に再び調査した．実験時間は，説明，練習等を全て含めて 1 人，1 時間程であった．

4.3 実験結果 参加者らの回答を集計した結果を表 2 に示す．選択された評価項目が confident であった場合には 2 ポイント，guess であった場合には 1 ポイントを各項目に与え，各評価項目の合計ポイントを示した．色の付いた項目は，他の項目とは有意な差がある

(Ryan の多重検定による, 有意水準 0.05) .

表 2 によると, 触運動の加速時のみ遅延がある条件でオブジェクトを呈示したとき, 参加者らは「粗さ感が減じたように感じた」・「動摩擦係数が減じたように感じた」と評価することが多かった. 次いで, 「スライダの質量が大きくなったように感じた」が多く選択された. 全体としてはスライダを動かし易くなる印象の項目が多く選ばれた.

減速時のみ遅延がある条件でオブジェクトを呈示したとき, 参加者らは「粗さ感が大きくなったように感じた」・「粘性が大きくなったように感じた」・「動摩擦係数が大きくなったように感じた」と評価することが多かった. 全体としてはスライダを動かし難くなる印象の項目が多く選ばれた.

以上のように, 触運動・触刺激間に遅延がある場合に生じるオブジェクトの質感の変化は, パネ・マス・ダンパモデルに当てはめて表現するならば, 動摩擦係数・粘性係数・質量の増減で表されることがわかった. また, 遅延が粗さ感の大小にも影響することがわかった.

5. 考察: なぜ遅延によって触感が変化したのか

触刺激に遅延を加えることによって, 参加者らがオブジェクトの触感の違いを体験する理由について, 2つの可能性について述べる.

1つ目の可能性は, 参加者らが, 遅延によって生じた波長の変化を体験することである. 触刺激は式 (1) によって生成される. 遅延がシミュレートされているとき, オブジェクトの波長が λ から $\lambda v(t)/v(t-D)$ に変わったときと同様の刺激が呈示される. したがって, 遅延によって, 波長が変化すると見なせる. 参加者らがこの波長の変化を知覚するため, オブジェクトの触感の変化を体験すると考えられる.

2つ目の可能性は, 参加者の手と仮想オブジェクト間の相対速度の変化が, 参加者に触感の変化を体験させることである. 遅延がシミュレートされているとき, 触刺激は, 本来の速度 $v(t)$ とは異なった速度 $v(t-D)$ に基づいて生成される. 指・対象物間の相対速度が, 対象を認識する過程に利用されているならば, 相対速度の変化が, 触感も変化させると考えられる.

対象の認識において, 相対速度の重要性については否定的な実験結果 [12][13] が報告されているが, 一方で, 振動刺激の時間的な情報が対象の知覚に寄与するという報告もある [14]–[16]. 振動刺激の時間的な情報は, 相対速度に依存する. 粗さの知覚は, 相対速度を考慮して行われるというメカニズムも提案されている [17]. したがって, 本当の相対速度と, 刺激の生成に用いられる相対速度の違いが, 触感の違いにつながった可能性がある.

また, 加減速中に遅延があることによって, 皮膚刺激が変化するため, 粗さ感が変化することは十分あり得ると考えられる. 一方で, 遅延によって, 粗さ感以

外にも, 力に関する物性値が変化するように感じられた理由は, 参加者らが皮膚感覚の粗さ感と, 速度依存の抵抗力 (粘性・動摩擦) を混同したことが考えられる [18].

6. 結論

本研究は, 触運動に応じて触刺激を生成する触覚呈示システムの設計のために, 許容されるシステム遅延を 2 種類, 同定した. 40 ms 程度の遅延がある場合, 参加者らは遅延の存在に気づくよりも, 呈示されているオブジェクトの触感の変化を体験することがわかった. 触感の変化は, 粗さ感以外にも, 動摩擦係数, 質量, 粘性係数などの物性値の変化で表現された.

References

- [1] M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro and N. Saiwaki, A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1121–1127, 2005
- [2] T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higuchi, S. Ando and S. Tachi, Surface Acoustic Wave Tactile Display, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 6, pp. 56–63, 2001
- [3] V. Levesque, J. Pasquero, V. Hayward and M. Legault, Display of Virtual Braille Dots by Lateral Skin Deformation: Feasibility Study, ACM Transactions on Applied Perception, Vol. 2, No. 2, pp. 132–149, 2005
- [4] L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate and M. Peshkin, T-PaD: Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction, Proc. The Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 421–426, 2007
- [5] S. Okamoto, M. Konyo, T. Maeno and S. Tadokoro, Roughness Feeling Telepresence System with Communication Time-delay, Proc. The Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 595–596, 2007
- [6] S. Yairi, Y. Iwaya and Y. Suzuki, Estimation of detection threshold of system latency of virtual auditory display, Applied Acoustics, Vol. 68, pp. 851–863, 2007
- [7] D. S. Brungart, B. D. Simpson and A. J. Kordik, The Detectability of Headtracker Latency in Virtual Audio Displays, Proc. The Eleventh Meeting of the International Conference on Auditory Display, pp. 37–42, 2005
- [8] T. Maki-Patola and P. Hamalainen, Latency Tolerance for Gesture Controlled Continuous Sound Instrument without Tactile Feedback, Proc. of International Computer Music Conference, 2004
- [9] J. R. Dabrowski and E. V. Munson, Is 100 milliseconds Too Fast?, Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 317–318, 2001
- [10] K. Iwamoto and K. Komoriya, Permissible Time Delay for Image Following in an Eye Movement Tracking Type Image Display System, Proc. The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems, pp. 889–906, 2004
- [11] M. Komori, R. Yoshida, T. Matsuda and T. Takahashi, User Haptic Characteristics Measurement for Design of Medical VR Applications, CARS2000 - Computer Assisted Radiology and Surgery, pp. 17–22, Elsevier, 2000
- [12] S. J. Lederman, Tactile Roughness Perception: Spatial and Temporal Determinants, Canadian Journal of Psychology, vol. 37, no. 4, pp. 498–511, 1983
- [13] C. E. Connor and K. O. Johnson, Neural Coding of Tactile Texture: Comparison of Spatial and Temporal Mechanisms for Roughness Perception, The Journal of Neuroscience, vol. 12, no. 9, pp. 3414–3426, 1992
- [14] C. J. Cascio and K. Sathian, Temporal Cues Contribute to Tactile Perception of Roughness, The Journal of Neuroscience, vol. 21, no. 14, pp. 5289–5296, 2001
- [15] E. Gamzu and E. Ahissar, Importance of Temporal Cues for Tactile Spatial-Frequency Discrimination, The Journal of Neuroscience, vol. 21, no. 18, pp. 7416–7427, 2001
- [16] M. Hollins and S. R. Risner, Evidence for the duplex theory of tactile texture perception, Perception & Psychophysics, vol. 62, no. 4, pp. 695–705, 2000
- [17] E. M. Meftah, L. Belingard and C. E. Chapman, Relative Effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch, Experimental Brain Research, vol. 132, pp. 351–361, 2000
- [18] S. J. Lederman, R. L. Klatzky, C. Tong and C. Hamilton, The Perceived Roughness of Resistive Virtual Textures: II. Effects of Varying Viscosity with a Force-Feedback Device, ACM Trans. on Applied Perception, vol. 3, no. 1, pp. 15–30, 2006