

硬さ感覚提示デバイスの作成に向けた 指先における硬さ弁別性能の検証実験

中山 功一[†] 井ノ上 直己[†]

本研究では、指先に硬さの感覚を提示するデバイスの作成に向けて、指先で感じる硬さ感覚の認知メカニズムを、被験者実験により明らかにする。まず、指先が仮想物体と衝突する際の指先位置を 1ms かつ $1\mu\text{m}$ の精度で制御でき、250N の力と 200m/s^2 の加速度が提示できる実験装置を製作した。次に、その実験装置を用いて、指先が仮想物体に衝突した場合の指先の軌道を再現し、指先の感覚のみにおける硬さの弁別能力を、被験者実験により検証した。実験結果から、物体と衝突し反発する場合の加速度は 20m/s^2 以上、指先が物体に接触している時間が 40ms 以下、物体と衝突し静止する場合の指先位置のオーバーシュートは 2mm 以下であるデバイスが必要であることを示した。

Cognitive experiments for hardness discriminability by a stiffness display apparatus

Koichi NAKAYAMA[†], Naomi INOUE[†],

We are aiming at developing a force feedback haptic device that presents the feeling of hardness to bare fingers. In this paper, the hardness perception of human fingers is investigated by experiments. First of all, an experimental apparatus was developed that can control the position of a plate at the accuracy of $1\mu\text{m}$ every millisecond. The maximal force output and acceleration are 250 N and 200m/s^2 , respectively. Next, the trajectory of the finger that collides with a virtual object is reproduced with the experimental apparatus. The ability of discriminating the hardness of objects with bare fingers is measured by the apparatus. The experiments showed that to render the hardness of objects, it is necessary that the acceleration is 20m/s^2 or more, the control cycle should be 40 millisecond or shorter, and the overshoot of finger position is 2 mm or less.

1 はじめに

筆者らの研究グループでは、遠隔地にある“モノ”がまるでその場にあるかのように感じさせる触感の研究に取り組んでいる。特に、人がモノに触れたときに感じる主観的な硬さを容易に再現できる装着感が少ない装置の開発を目指している。本論文では、すべりや摩擦といった皮膚感覚 [1][2]ではなく、硬さや柔らかさなどの力覚を提示する装置（フォースディスプレイ）について述べる。

力覚を提示するフォースディスプレイに関する研究は古くから行われている [3]。従来研究では、視覚情報が力覚提示に与える影響を調べた研究 [4]や、力覚だけでなく指先の接触面積を考慮して柔軟な物体を提示する研究 [5]、提示する力覚の更新周波数を高める研究 [6]などが知られている。これらの研究により、力覚の提示により硬さや柔ら

かさなどを表現する様々なタイプのデバイス [7][8]が製作されている。

物をつかんだときに硬さを判断する重要な要素は、つかみ終わって最も反力が大きくなる時の力（終端力）であると言われている [9]。これまでの力覚提示デバイスの多くは、非常に硬い物体を表現するには提示できる力が不十分である。例えば、提示力に関しては、従来の PHANTOM シリーズ [7]では 3.3~37.5N であり、SPIDAR [8]では各軸に対しそれぞれ 5N である。

一方、硬さを調整した実際の物体を使った研究はある。例えば、樹脂を用いて弾性物体のテストピースを作成し、硬さの弁別能力を検証した研究 [10]や、ばね定数の異なるばねを用いた研究 [11]などである。しかし、これらは、遠隔地にある“モノ”を触った感覚を得る力覚デバイスの作成という本研究の目的にはあわない。

本研究では、従来のデバイスでは困難であった非常に硬い感覚を指先に提示するデバイスの製作に向けて、指先で感じる硬さ感覚の認知メカニズムを、被験者実験により明らかにする。まず、指先が仮想物体と衝突する際の指先位置を $\frac{1}{1000}$ 秒 (1ms) かつ $\frac{1}{1000}$ mm (1 μ m) の精度で制御でき、250N の力と 200m/s² の加速度が提示できる実験装置を製作する。指先に力覚を提示する認知実験装置として、前述の精度と提示力を兼ね備えたものはこれまで存在しない。

次に、製作した実験装置を用いて、指先が仮想物体に衝突した場合の指先の動き (軌道) を再現し、指先の感覚のみにおける硬さ感覚を、被験者実験により検証する。本論文では、指先感覚に対する様々な心理物理学的定数のうち、非常に硬い物体と衝突した際の弁別能力 (識別能力) を心理物理学的に測定する [12][13]。指先が仮想物体に接触している時間や接触時に指先の受ける加速度、接触時のオーバーシュートなどを様々に変化させ、指先が硬いものと衝突した感覚を提示する場合に必要なデバイスの性能を明らかにする。

2 実験装置と実験方法

本実験装置は、瞬間最大トルクが 0.955N·m、回転慣性モーメントが 0.038kg·m² × 10⁻⁴ という超低慣性 100W モータを、ボールネジにカップリングで直結することで、大きな提示力と加速度を実現した。また、速度周波数応答が 1.6kHz で、分解能が 100 万パルス/回転以上のコントローラにより、高い精度と指先位置の制御性能を実現した。このような高い精度や大きな出力、制御性能は、柔らかい物体にゆっくりと触れる場合には必要ない。一方、本研究で目指すような、硬い物体をがちりちりつかむ感覚の提示には不可欠である。

指先が仮想物体に衝突し停止または反発する際に受ける加速度は、指先と装置の慣性質量を m としたとき、 $F = ma$ より $a = \frac{F}{m}$ となる。本実験装

置は、三相 200V 電源による 100W 超低慣性モータを用いることで低い慣性質量 m と高い出力 F を実現し、指先に対する大きな加速度の提示を可能としている。実験装置の概観と実験の様子を図 1 に、構造を図 2 に示す。

3 実験方法

被験者は、人差し指を指置き台に軽く乗せる。実験装置は、指先が仮想物体に衝突した場合の軌道を指置き台ごと動かして再現する。

指先が等加速度 (自由落下) 運動により仮想物体に衝突し、繰り返す跳ね返る場合の軌道の例を図 3 に示す。実際には硬さが無限大となる完全剛体は存在しないため、図 3 右の拡大図のように、衝突時において、指先が物体に接触してから離れるまでの有限の接触時間と、指先に加わる有限の加速度が存在する。一般的には、柔らかいものほど接触時間が長く、加速度が小さい。また、物体に衝突して静止する場合でも、有限の深さで沈み込む。柔らかいものほど沈み込む深さが大きい。

本実験の目的は、指先が仮想物体と衝突した際に感じる硬さの感覚を提示するデバイスに必要な性能 (設計仕様) を明らかにすることである。そこで、指先が時速 3km で仮想物体に衝突した場合を想定した指先の軌道を被験者に提示する。その際、以下の 3 種類のパラメータを変化させ、その変化を弁別可能かを口頭で返答してもらう。

- 跳ね返る軌道における接触時間 (図 4 左)
- 跳ね返る軌道における加速度 (図 4 中)
- 静止する軌道における沈み込み深さ (図 4 右)

3 種類の実験に用いるそれぞれのパラメータは、物理的な刺激量と感覚的な量との関係がべき関数になるという Stevens のべき法則を考慮し、等比数列である 6 種類の接触時間 {10, 20, 40, 80, 160, 320(ms)}、6 種類の加速度 {5, 10, 20, 40, 80, 160(m/s²)}、6 種類の沈み込み深さ {1, 2, 4, 8, 16, 32(mm)} の中から、それぞれ隣り合う 2 値を提示する。各実験において、指先ではそれ以上の硬さを識別できなくなる限界値を調べ、これらの結果を解析することで、指先における硬さの弁別能力を明らかにする。

なお、指が柔らかい弾性体に触れた場合は跳ね返ることもあるが、指が硬い物体に直接触れた場合に跳ね返ることはあまりない。しかし、本研究

† NICT ユニバーサルメディア研究センター
National Institute of Information and Communication
Technology

‡ ATR 認知情報科学研究所
ATR Cognitive Information Science Laboratories

E-mail: {knakayama, na-inoue}@atr.jp

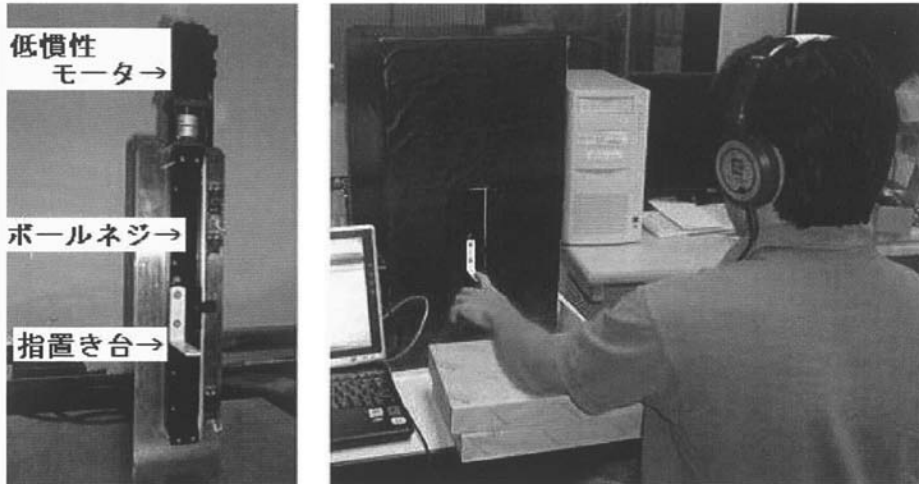


図 1: 実験装置の概観と実験の様子

は、指先に装着する硬さ感覚提示デバイスの作成を目的としており、特に硬い仮想物体をがっちりとかむ感覚を提示を目指している。そのため、硬さを提示する手段として指先が仮想物体に衝突して跳ね返る状況も考慮する。

被験者には、事前に、指先における硬さの識別に関する実験であること、3種類（接触時間／加速度／沈み込み深さ）の実験をすること、それぞれの実験前に練習をすること、実験時間が全部で40分程度であり、休憩を取ることが可能なことを説明する¹。

変化させるパラメータが異なる3種類の実験（接触時間／加速度／沈み込み深さ）の順番は、被験者ごとに無作為に選ばれる。実験の練習として、パラメータの値が互いに異なる2種類の軌道を提示する。1回目の軌道を提示した後、その3秒後に2回目の軌道を提示する。回答はどちらがより硬い（接触時間が短い、加速度が大きい、沈み込み深さが小さい）と感じたか、あるいは区別できなかったかを口頭で答えてもらい、正解を教示する。練習は被験者の希望に応じて10回程度とした。

実験時は、1回目と2回目隣（2倍）の値の組合せとなる5組をそれぞれ8回ずつ提示し、正解は教示しない。提示する組み合わせの順番は無作為とする。これを8名の被験者が各実験でそれぞれ40試行、3種類の実験でそれぞれ合計120試

行する。視覚や聴覚による判断を防ぐため、実験中、被験者は目を閉じ、ノイズが流れているヘッドホンを装着する。

4 実験結果と考察

4.1 接触時間の変化

指先が物体に衝突し反発した場合の接触時間の変化に関する実験結果として、全ての被験者の回答比率を図5に示す。

本実験では無作為に回答しても正解率が50%である。図5より、接触時間が40-80msより長い場合においては正解率が90%以上であり弁別可能だが、20-40msより短い場合において正解率が60%以下であり弁別できなかった。

まず、個人差があるかどうかを検証する。8人から2人を選ぶ28通りの組み合わせ全てに対し、正解率の平均の差異をStudentのt検定でペアごとに検証する。ただし、区別できなかった場合に未回答である（または識別不能と回答する）被験者と、適当に（直感で1回目、または2回目）回答する被験者が混在していた。本実験では、未回答であった被験者が仮に無作為に回答したと仮定すると、未回答1回につき、正解期待値が0.5回、誤解答の期待値が0.5回増加する。そこで、未回答1回あたり正解期待値を0.5回として計算した。

¹ただし、実験中に休憩を希望した被験者は居なかった。

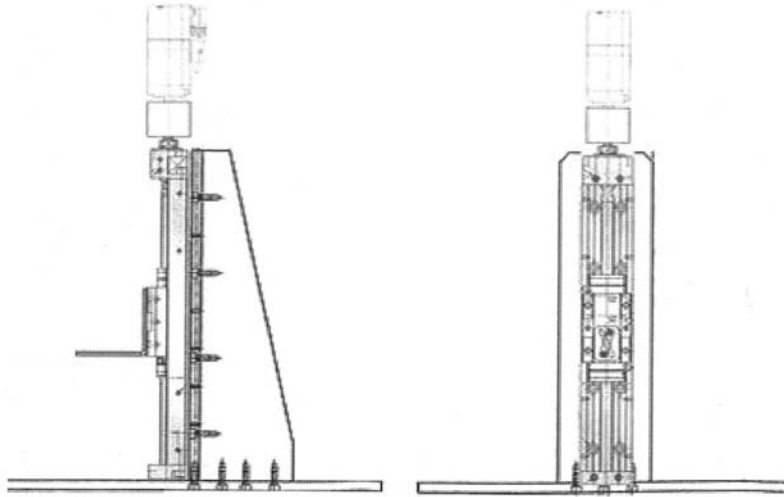


図 2: 実験装置の構造

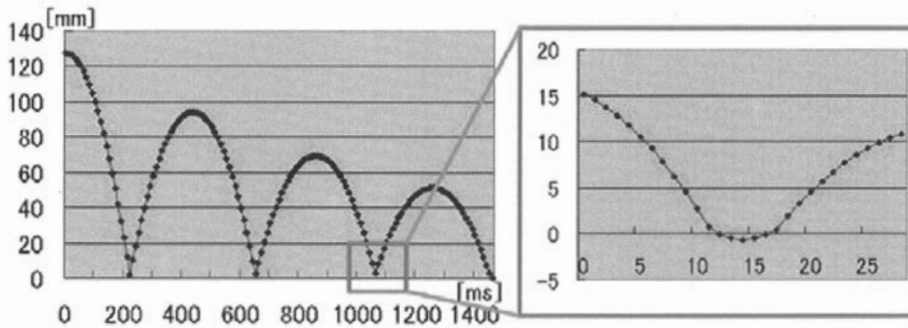


図 3: 指先の軌道

その結果、全ての組み合わせにおいて正解数に統計的に有意な差は見られなかった (全ての p 値が 0.1 以上). 次に、学習効果による正解率の変化があるかどうかを検証する. 40 試行を 10 試行ずつ 4 回に分け、4 回から 2 回を選ぶ 6 通りの組み合わせ全てに対し、正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証したところ、6 通りの全てにおいて統計的に有意な差は見られなかった (全ての p 値が 0.3 以上). これらの結果から、接触時間に関する弁別能力は、個人差や学習効果に有意差はなく、実験への影響は少ないと考えられる.

そこで、8 人全ての実験結果から、接触時間に関する弁別能力の閾値を検証する. 提示した 5 組の接触時間 {10-20, 20-40, 40-80, 80-160, 160-

320(ms)} から 2 つを選ぶ 10 通りに対し、正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証した結果のうち、表 1 に、有意差がある部分を網掛けで、危険率 (p 値) を数字で示す.

接触時間が 10ms から 40ms までのそれぞれのペアと、40ms と 320ms までのそれぞれのペアには有意差が存在しなかった. これは、10ms から 40ms まではいずれも弁別が困難であるという意味で有意差が存在せず、40ms と 320ms まではいずれも弁別が容易であるという意味で有意差が存在しなかったためと考えられる. 一方、40ms をまたぐペアの全てにおいて危険率 0.0001 以下で有意差が存在した. これらの結果から、接触時間に関する指先の弁別能力は、個人差や学習経験に関わ

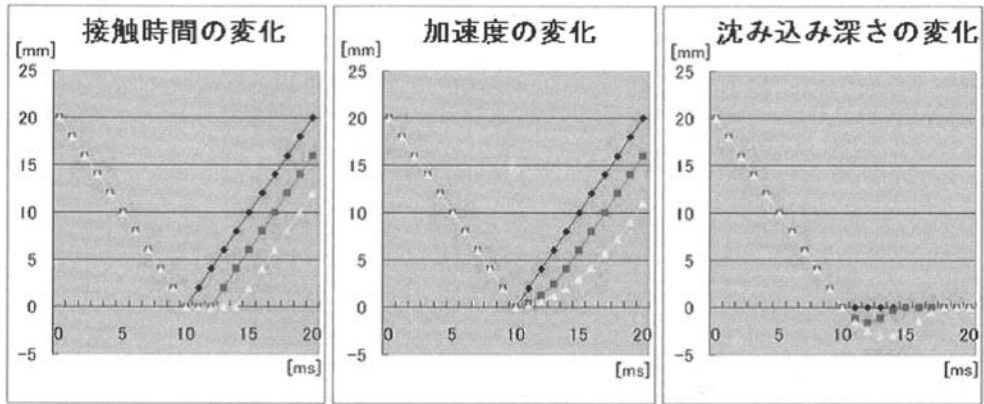


図 4: 指先の軌道の変化

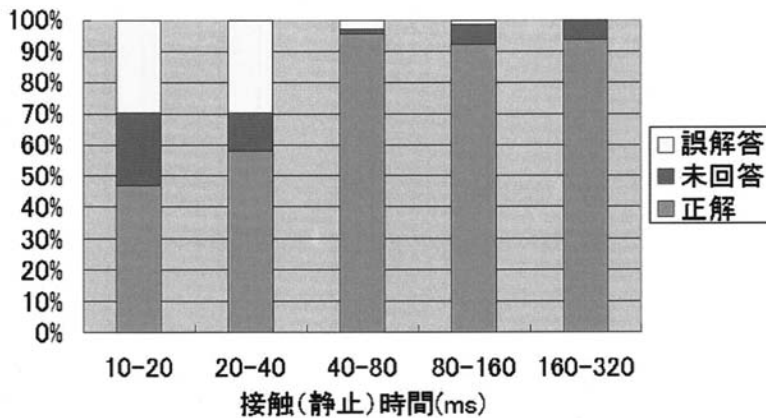


図 5: 接触時間の違いに関する指先の硬さ弁別能力

らず、40ms 付近に閾値が存在すると思われる。

4.2 加速度の変化

指先が物体に衝突し反発した場合の加速度の変化に関する実験結果として、全ての被験者の回答比率を図 6 に示す。

図 6 より、加速度が $10\text{-}20\text{m/s}^2$ より小さい場合においては正解率が 90%以上であり弁別可能だが、 $20\text{-}40\text{m/s}^2$ より大きい場合においては正解率が 60%以下であり弁別できなかった。

前節と同様に、個人差があるかどうかを検証する。8人から2人を選ぶ28通りの組み合わせ全て

に対し、正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証したところ、全ての組み合わせにおいて統計的に有意な差は見られなかった(全ての p 値が 0.2 以上)。

次に、学習効果による正解率の変化があるかどうかを検証する。40 試行を 10 試行ずつ 4 回に分け、4 回から 2 回を選ぶ 6 通りの組み合わせ全てに対し、正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証したところ、6 通りの全てにおいて統計的に有意な差は見られなかった(全ての p 値が 0.2 以上)。これらの結果から、加速度に関する弁別能力も、個人差や学習効果に有意差はなく、実験への影響は少ないと考えられる。

そこで、8人全ての実験結果から、接触時間に開

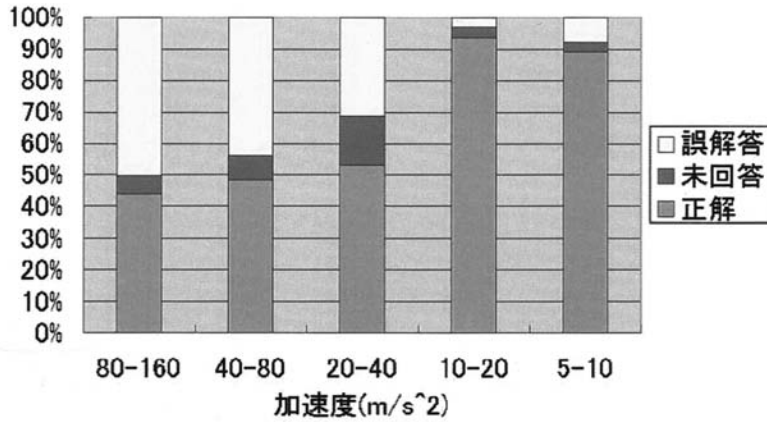


図 6: 加速度の違いに関する指先の硬さ弁別能力

表 1: 接触時間における正解率に有意差のある組合せ（網掛け部分）と p 値

(ms)	10-20	20-40	40-80	80-160	160-320
10-20	-	0.2063	<0.0001	<0.0001	<0.0001
20-40	0.2063	-	<0.0001	<0.0001	<0.0001
40-80	<0.0001	<0.0001	-	0.8564	0.8564
80-160	<0.0001	<0.0001	0.8564	-	0.7174
160-320	<0.0001	<0.0001	0.8564	0.7174	-

表 2: 加速度における正解率に有意差のある組合せ（網掛け部分）と p 値

(m/s ²)	80-160	40-80	20-40	10-20	5-10
80-160	-	0.2874	0.0455	<0.0001	<0.0001
40-80	0.2874	-	0.3442	<0.0001	<0.0001
20-40	0.0455	0.3442	-	<0.0001	<0.0001
10-20	<0.0001	<0.0001	<0.0001	-	0.4077
5-10	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.4077	-

する弁別能力の閾値を検証する。提示した 5 組の加速度 {80-160, 40-80, 20-40, 10-20, 5-10(m/s²)}, から 2 つを選ぶ 10 通りに対し, 正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証した結果のうち, 表 2 に, 有意差がある部分を網掛けで, 危険率 (p 値) を数字で示す。

加速度が 20m/s² から 160m/s² までのそれぞれのペアと, 5m/s² から 20m/s² までのそれぞれのペアには有意差が存在しなかった。これは, 20m/s² から 160m/s² まではいずれも弁別が困難であるという意味で有意差が存在せず, 5m/s² から 20m/s² まではいずれも弁別が容易であるという意味で有意差が存在しなかったためと考えられる。一方, 20m/s² をまたぐペアの全てにおいて危険率 0.0001 以下で有意差が存在した。これらの結果から, 加

速度に関する指先の弁別能力は, 個人差や学習経験に関わらず, 20m/s² 付近に閾値が存在すると考えられる。

4.3 沈み込み深さの変化

指先が物体に衝突し静止した場合の沈み込み深さの変化に関する実験結果として, 全ての被験者の回答比率を図 7 に示す。

図 7 より, 沈み込み深さが 4-8mm より大きい場合においては正解率が 90% 以上であり弁別可能だが, 2-4mm の場合で正解率が約 80%, 1-2mm の場合で約 60% であり, 弁別が困難であった。

前節と同様に, 指先が物体に衝突し反発した場合の加速度の変化の結果において, 個人差がある

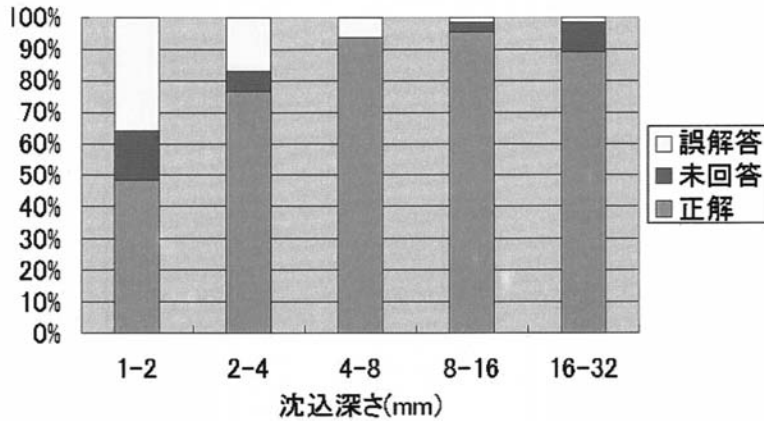


図 7: 沈込み深さの違いに関する指先の硬さ弁別能力

かどうかを検証する。28通りの組み合わせ全てに対し、正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証したところ、1組において統計的に有意な差 ($p=0.0117$) が存在したが、それ以外の全ての組において p 値は 0.05 以上であった。

次に、学習効果による正解率の変化があるかどうかを検証する。40 試行を 10 試行ずつ 4 回に分け、4 回から 2 回を選ぶ 6 通りの組み合わせ全てに対し、正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証したところ、6 通りの全てにおいて統計的に有意な差は見られなかった (全ての p 値が 0.1 以上)。これらの結果から、沈込み深さに関する弁別能力は、学習効果に有意差はなく、個人差も小さいため、実験への影響は少ないと考えられる。

そこで、8人全ての実験結果から、沈込み深さに関する弁別能力の閾値を検証する。提示した5組の沈込み深さ {1-2, 2-4, 4-8, 8-16, 16-32(mm)} から2つを選ぶ10通りに対し、正解率の平均の差異を Student の t 検定でペアごとに検証した結果のうち、表3に、有意差がある部分を網掛けで、危険率 (p 値) を数字で示す。

沈込み深さが 4mm 以上のペアは、いずれも正解率が高くそれぞれのペアには有意差が存在しないが、4mm をまたぐ全てのペアにおいて危険率 0.01 以下で有意差が存在した。これは、4mm 以上ではいずれの場合も弁別が容易であるという意味で有意差が存在しなかったためと考えられる。ただし、本実験では、1mm-2mm の実験ではほぼ

表 3: 加速度における正解率に有意差のある組合せ (網掛け部分) と p 値

(mm)	1-2	2-4	4-8	8-16	16-32
1-2	-	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
2-4	<0.0001	-	0.0054	0.0007	0.0054
4-8	<0.0001	0.0054	-	0.5312	1.0000
8-16	<0.0001	0.0007	0.5312	-	0.5312
16-32	<0.0001	0.0054	1.0000		-

弁別できないのに対し、2mm-4mm の実験では約 80% 弁別でき、この間に有意差が存在した。これは、2mm 以下ではいずれも弁別が困難であるが、2mm から 4mm に関しては 2mm 以下ほどは弁別が困難ではないことを示している。これらの結果から、加速度に関する指先の弁別能力は、個人差や学習経験に関わらず、2mm-4mm(m/s^2) 付近に閾値が存在すると考えられる。

4.4 考察

本章の実験では、3種類のいずれの場合においても、弁別能力の個人差や学習効果がほとんど見られなかった。これらの結果から、硬さ感覚提示デバイスを作成する際に、平均的なユーザを仮定

して設計することで、ほとんどのユーザに硬さ感覚を十分に提示可能であることを示唆する。すなわち、接触時間が40ms以下(制御周期が25hz以上)、加速度が 20m/s^2 、停止時の沈み込み深さ(オーバーシュート)が2~4mm以下である硬さ感覚提示デバイスにより、一般のユーザに対し十分な硬さ感覚を提示できると考えられる。

これに対し、従来の PHANTOM シリーズ [7] や SPIDAR[8] では、接触時間に影響する制御周期は、力覚による硬さ感覚の提示という意味では十分であるが、提示力が小さいために物に衝突した際に生じる加速度を十分に提示できず、ユーザは物をがっちりつかんだ感覚を得られない。本研究で製作した実験装置のように大きな加速度を提示することで、人はそれ以上の硬さを感じる事が困難となる。すなわち、指先が硬い仮想物体に衝突した場合を表現する場合に必要な加速度や制御周期、オーバーシュートなどの条件が明らかになったといえる。

ただし、本研究の実験では、衝突時の指先の速度が時速3kmと固定しており、物を自然につかむ状況とは異なっている。実際に人が物をつかむときの指先速度は様々であるため、今後、諸条件に応じた硬さ感覚の弁別性能について議論する必要がある。

5 おわりに

本研究では、指先で物体に触れた際に硬さを識別できる限界(弁別能力)を明らかにするため、指先位置を $\frac{1}{1000}$ 秒(1ms)かつ $\frac{1}{1000}$ mm(1 μm)の精度で制御でき、250Nの力と 200m/s^2 の加速度が提示できる実験装置を製作した。仮想物体をがっちりつかむ状況における指先硬さ感覚の提示を想定し、実験装置を用いて、指先が仮想物体に衝突する場合の軌道を再現する実験を行った。

実験結果から、指先が仮想物体に触れる際の接触時間40ms以下であり、加速度 20m/s^2 以上である場合には、人は指先の力覚だけではそれ以上の硬さの弁別が困難であることを示した。また、指先が衝突してから静止するまでの沈み込み深さ(オーバーシュート)が2mm以下であれば弁別困難であることを示した。すなわち、人が指先で仮想物体に衝突した場合に硬さを感じさせるデバイスには、それらの条件を満たす設計仕様が必要で

あるといえる。

今回の実験は特定の条件における弁別性能を議論したのみである。今後の課題として、諸条件が様々な実験をする必要がある。また、明らかにした硬さ感覚に対する弁別性能に基づいて、硬さ感覚提示デバイスの作成を検討している。

参考文献

- [1] 篠田裕之, “皮膚感覚インタフェースの現状と展望”, 第4回 SICE システムインテグレーション部門 講演論文集, pp. 412-413 (2003).
- [2] 高崎正也, “触覚ディスプレイによる触感の呈示”, 設計工学, Vol. 41, No. 3, pp. 138-143 (2006).
- [3] 野間春生, 岩田洋夫, “フォースディスプレイを用いた高次元ボリュームデータの力覚表現”, Progress in Human Interface, Vol. 3, pp. 111-120 (1994).
- [4] 池田義明, 藤田欣也, “指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 2, pp. 187-194 (2004).
- [5] 佐々木博, 藤田欣也, “力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 1, pp. 795-802 (2000).
- [6] 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, “10kHzの更新周波数による高解像度ハプティックレンダリング”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 3, pp. 217-226 (2004).
- [7] <http://www.ddd.co.jp/download/phantom/PHANTOM200607.pdf>
- [8] 井上雅晴, 長谷川晶一, 金時 学, 佐藤 誠, “2次計画法を用いたワイヤ駆動型力覚ディスプレイのための張力計算アルゴリズム”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp. 91-95 (2001).
- [9] Hong Z. Tan, Nathaniel I. Durlach, G. Lee Beaugregard, and Mandayam A. Srinivasan, “Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues”, Perception and Psychophysics, Vol. 57, No. 4, pp. 495-510 (1995).
- [10] 千葉亮, 土井幸輝, 藤本浩志, “弾性物体を対象としたヒトの指先の硬さ弁別特性”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 573-578 (2006).
- [11] P. E. ROLAND and H. LADEGAARD-PEDERSEN, “A quantitative analysis of sensations of tension and of kinaesthesia in man: Evidence for a peripherally originating muscular sense and for a sense of effort”, Brain, Vol. 100, No. 4, pp. 671-692 (1977).
- [12] 田中良久, “心理学的測定法”(第2版), 東京大学出版会(1977).
- [13] 森 敏昭, 吉田 寿夫 “心理学のためのデータ解析テクニカルブック”, 北大路書房(1990).