

硬さ感覚提示装置の製作と硬さ弁別能力の認知実験

中山 功一^{†,††} 井ノ上 直己^{†,††}

Development of a stiffness display apparatus and cognitive experiments for hardness discriminability

KOICHI NAKAYAMA^{†,††} and NAOMI INOUE^{†,††}

1. はじめに

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 $\frac{1}{1000}$ 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。例えば、提示力に関しては、従来の PHANTOM シリーズ¹⁾ では 3.3~37.5N であり、SPIDAR²⁾ では各軸に対しそれぞれ 5N である。

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の弁別能力 (識別能力) を、被験者実験により検証する。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

本実験装置は、瞬間最大トルクが 0.955N·m、回転子慣性モーメントが $0.038\text{kg}\cdot\text{m}^2 \times 10^{-4}$ 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



図 1 実験装置の概観と実験の様子

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。

これらの性能は、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、硬い物体をがっちりと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

[†] NICT ユニバーサルメディア研究センター
NICT Universal Media Research Center

^{††} ATR 認知情報科学研究所

ATR Cognitive Information Science Laboratories

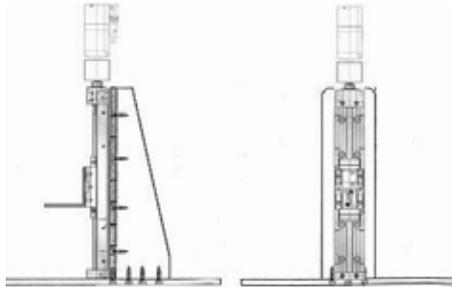


図 2 実験装置の構造

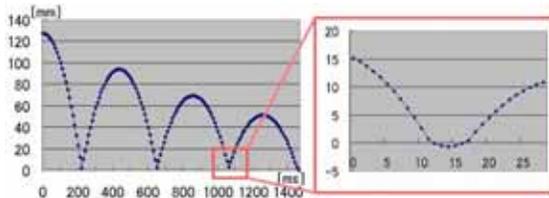


図 3 指先の軌道

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。

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跳ね返った際の接触時間と加速度をそれぞれ変化させ、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ることで、指先における硬さの弁別能力を明らかにする。

接触時間は、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 {10, 20, 40, 80, 160, 320(ms)} とする。被験者には、接触時間がある値 (例えば 40ms) の軌道を提示し、その 3 秒後に大きさの隣り合う値 (例えば 80ms) を提示する。1 回目と 2 回目のどちらがより硬い (接触時間が短い) 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う。これを 8 名の被験者がそれぞれ 40 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した。同様に、加速度に関しても 6 種類 {5, 10, 20, 40, 80, 160(m/s²)} とし、それぞれ 40 試行する。各被験者は、実験の合間に自由に休憩を取ることができるが、説明を含めて約 40 分の実験の間に休憩を希望した被験者は居なかった。

4. 実験結果

実験結果として、接触時間の変化に関する全ての被

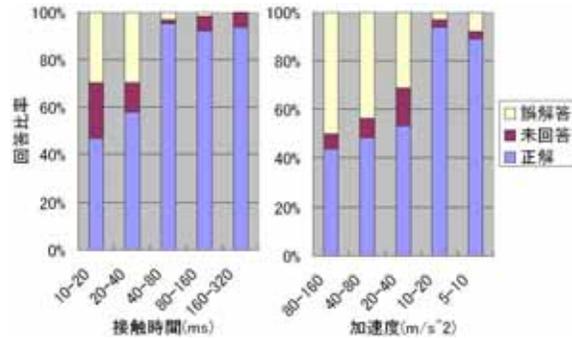


図 4 接触時間と加速度の違いに関する指先の硬さ弁別能力

験者の回答比率を図 4 左に、加速度の変化に関する回答比率を図 4 右に示す。

本実験では無作為に回答しても正解率が 50% である。図 4 左より、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。これらの結果は 8 名の被験者に共通の傾向であったことから、指先が物体に衝突し反発した場合の接触時間に関する弁別能力の閾値が、40ms から 80ms の間にあることを示唆される。

また、図 4 右より、加速度が 10-20m/s² 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、20-40m/s² 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。これらの結果も 8 名の被験者に共通の傾向であり、加速度に関する人の指先の弁別能力の閾値が、10m/s² から 20m/s² の間にあることが示唆される。

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) を明らかにした。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/s² 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。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。

参考文献

- 1) <http://www.ddd.co.jp/download/phantom/PHANTOM200607.pdf>
- 2) 井上雅晴, 長谷川晶一, 金時 学, 佐藤 誠: 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).