

5 多感覚統合・評価技術

5 *Multi-Sensory Technology and Evaluation of Cognitive Mechanisms*

5-1 硬さ弁別能力の解明と携帯型力覚デバイスの研究開発

5-1 *Investigation of Hardness Perception and Development of Portable Haptic Device*

中山功一 安藤広志

NAKAYAMA Koichi and ANDO Hiroshi

要旨

筆者らは、超臨場感コミュニケーションシステムの研究として、携帯型力覚デバイスに向けた研究開発を行っている。本論文では、硬い物体を提示する力覚提示デバイスに必要な性能を明らかにするため、人が指先で硬さを弁別する能力を明らかにする。また、開発した携帯型力覚デバイスについて述べる。

We are aiming at developing a portable haptic device, as a part of research on Ultra-realistic communications system. This paper describes the study on hardness perception of human fingers in order to find required system performance for haptic devices that can render hard objects. It also describes the development of the portable haptic device.

【キーワード】

携帯型力覚デバイス, 硬さ認知, デバイス開発, 心理物理実験

Portable haptic device, Hardness perception, Device development, Psychophysical experiment

1 はじめに

ユニバーサルメディア研究センターでは、見る／聞く／香るだけでなく、“触る”ことで遠隔地との臨場感の高いコミュニケーションの実現を目指している(図1)。また、超臨場感システムグループでは、大型の裸眼3Dディスプレイを試作している[1](図2)。このような大画面から飛び出して見える仮想物体をつかんで操作する感覚を提示するためには、PHANTOM[2]やSPIDAR[3]のような卓上型の力覚提示デバイスでは、デバイスサイズの制約から難しい。そこで本研究では、大画面立体映像の任意の位置で指先に力覚を提示す

るために、手に持って利用する携帯型力覚提示デバイスの製作を目的とする(図3)。

携帯型力覚提示デバイスの実現に向けて、本研究では以下の課題に取り組む。

<課題1: 物の硬さの弁別能力の解明>

仮想物体を確実につかんだという感覚を得るためには、その物体の硬さの提示が重要である。しかし、これまでの力覚デバイスの研究において、弁別が可能な硬さの領域(以下、「弁別可能領域」と記す)や、硬さの相違を感知できる最小の刺激変化率(以下、「ウェーバー比」と記す)が明らかではない。そこで、物の硬さの弁別能力を解明し、硬い物体の提示する力覚デバイスに必要な性能を



図 1 超臨場感コミュニケーションの将来イメージ



図 2 高画質・大画面裸眼 3D ディスプレイの将来イメージ



図 3 携帯型力覚提示デバイスの将来イメージ

明らかにする必要がある。

<課題 2: 携帯型力覚提示デバイスの開発>

任意の硬さを提示するデバイスの多くが卓上型である [2][3]。3次元マウスや道具型デバイス [4] など、携帯型デバイスの多くは On/Off の切り替えに特化しており、任意の硬さを提示できない。そこで、任意の硬さを提示でき、課題 1 で明らかにしたデバイス性能を満たす携帯型力覚提示デバイスを製作する。

立体映像中に提示された仮想物体をつかんで操作するためには、力覚の提示だけではなく、手

(力覚デバイス)の動きに合わせて立体映像中の仮想物体を動かす必要がある。そこで、力覚デバイスの位置情報と立体映像中の仮想物体の位置を同期させ、立体映像中の仮想物体を把持して操作する感覚を提示するシステムと、提示するコンテンツを製作する (図 3)。

上記 2 つの課題の解決により、立体映像中に提示された様々な硬さの仮想物体を把持して操作できるようになる。本論文では、2 で課題 1 の弁別可能領域およびウェーバー比について述べる。3 で課題 2 の携帯型力覚提示デバイスの開発について述べ、4 でまとめる。なお、本論文は査読付き原著論文 2 報 [5][6]、査読付き国際会議論文 2 報 [7][8]、出願特許 3 件 [9]-[11]、その他多数の発表論文に加筆修正を加えたものである。

2 物の硬さの認知メカニズムの解明

指先で実物体に触れる場合は、実物体に接触していない状態の指が、実物体に接触するとき圧力変化を感じる。一方、多くの力覚デバイスでは、指先を常にデバイスに接触させている状態で仮想物体に触れる感覚を提示する。指先は、皮膚の圧力変化を力覚として知覚し、仮想物体の硬さや重さなどを感じる。さらに、ほとんどの力覚デバイスでは、実物体に触れたときとは異なり、温度の感覚や指先の接触面積の変化などを提示しない。このため、硬さに対する相違を感知できる弁別可能領域や硬さの弁別に必要な刺激変化率を示すウェーバー比 (Weber ratio) [12] は、指先で実物体に触れる場合と力覚デバイスで仮想物体に触れる場合とは異なると考えられる。しかし、力覚デバイスにおける硬さの弁別可能領域を明らかにした研究は少ない。このため、ある硬さの提示に必要な制御性能や最大提示力が明らかではない。ここでは、剛体を介して力を指先に伝達する力覚デバイスにおける硬さの弁別可能領域を、心理物理実験により明らかにする。

検証する指標として弁別可能領域を用いる理由は、弁別できない領域の刺激を提示する必要がないためである。例えば、音声提示デバイスは、可聴域以外の音を提示する必要がなく、動画像提示デバイスは、毎秒 30 フレーム以上提示する必要がない。同様に、硬い物体をがっちりとかつかむ感

覚を提示する力覚デバイスも、人の弁別可能領域を超えた硬さを提示する必要は無い。

2.1 実験方法

力覚の基本は、指先の位置や速度を体性感覚により知覚した状態で硬さを弁別する「能動触」である。人が能動触で対象物体の硬さを弁別する方法は、以下の2つのパターンに大別できる。1つは、硬さが既知の物体や体の一部で、対象物体をコンコンと軽くたたいて、衝突時の感触から弁別する場合である。もう1つは、指先を物体に接触させたまま、指先で対象物体をグニグニと押し、押し込み深さと反力から弁別する場合である。一般的に、金属や木材などの硬い物体の硬さ弁別には前者を、ゴムやスポンジなどの柔らかい物体の硬さ弁別には後者を採用する場合が多い。また、PHANTOM[®][2]を利用した予備実験でも、硬い物体を提示された多くの被験者が、コンコンと軽くたたいて硬さを弁別していた。そこで、本研究では、前者の対象物体をコンコンとたたいて硬さを弁別する場合を想定する。

硬さを弁別する方法を規定しない自由な能動触による実験では、被験者ごとに様々な触り方で硬さを弁別される可能性があり、実験の統制が取れない。できるかぎり能動触に近い条件でありながら、物体の硬さを弁別する方法を統一することで、触り方によって硬さの弁別可能領域に差が出る可能性を防ぐ必要がある。本論文では、能動触に近い条件でありながら硬さの弁別方法を統一するために、被験者には以下のような方法で硬さを弁別してもらう。

被験者には、指先が接触する力覚デバイスの剛体部分(以下、「接触部分」と記す)で仮想物体を軽くたたいて硬さを弁別する状況を想像してもらう。接触部分を、仮想物体を軽くたたいた場合の動き(以下、「軌道」と記す)で動かす。被験者は、事前にその軌道(最大速度1 m/s、ストローク100 mm)にあわせて指先を動かせるようになるまで10分程度練習する。練習後、実験装置の提示する軌道にあわせて仮想物体をたたいた際の感触から硬さを弁別し、口頭で回答する。実験装置から発せられる音が聞こえないように、被験者は大音量で音楽を流したヘッドフォンを装着する。また実験中は、実験装置を見ないように目を閉じる。

このような方法により、体性感覚を用いた能動触による硬さ弁別を擬似的に再現する。

なお、本論文の実験では、視覚情報や聴覚情報による硬さの弁別はできないようにする。また、多くの力覚デバイスの接触部分と同様に、指先に触れる部分は指の力ではほとんど変形しないもの(剛体)を用いる。

2.2 実験装置

多くの力覚デバイスでは、制御されたモータの動力を、ワイヤや歯車機構(ギア)などにより伝達し、接触部分を動かす。力覚デバイスにおける接触部分の制御性能は、制御指令を出力する制御器の性能だけではなく、動力を出力するモータの出力性能や制御応答性能、およびデバイスの構造により決定される力学的特性の影響も大きい。このため、接触部分に要求される制御応答性能を明らかにするためには、力覚デバイスのたわみやひずみ、がたつきやギアのバックラッシなど(以下、これらを代表して「たわみ」のみ記す)の力学的特性も含めた接触部分の挙動を考慮する必要がある。

本論文では、制御器の性能、モータの性能、および実験装置の力学的特性の全てを考慮したうえで、大きな提示力と加速度、および高い制御応答性能を実現する衝突感覚提示装置を製作する。実験装置の概観を図4左に、実験の様子を図4右に示す。図4右に示されるように、実験する際には被験者の安全のため、実験装置にカバーをかけている。また、実験装置の構造を図5に示す。

本装置の詳細[5]は割愛するが、本実験装置の接触部分に関しては、最大提示力が236～249 N、位置決め精度が $\pm 10 \mu\text{m}$ 、接触部分の無負荷時の最大加速度が $437 \sim 462 \text{ m/s}^2$ 、制御応答周期

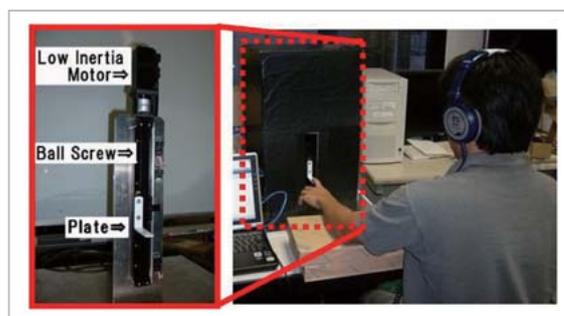


図4 実験装置の概観(左)と実験の様子(右)

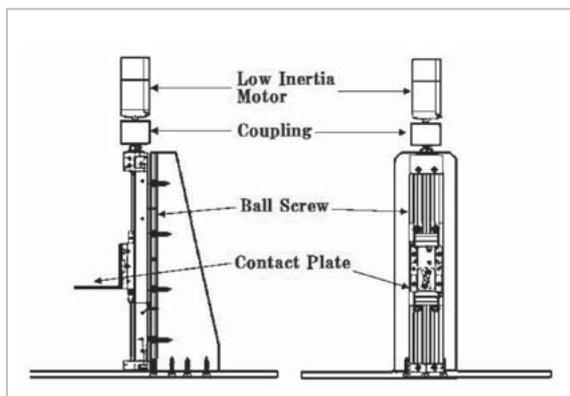


図5 実験装置の構造

が5 msである。また、モータのエンコーダにより、接触部分の位置(挙動)を $\pm 10 \mu\text{m}$ の誤差でモニタリングできる。

従来のデバイスの多くは、制御指令周波数などの制御器の性能は明らかではあるが、伝達機構を介して制御される接触部分の制御応答性能は必ずしも明らかではない。本実験装置は、市販されている力覚デバイスでは提示できないような強い力/大きな加速度/短い制御応答周期/小さいオーバーシュートを提示できる。また、実際に指先に力を提示する接触部分の挙動を、実験結果に影響が出ないほど小さな位置誤差でモニタリングできる。このため、従来の力覚デバイスでは提示できなかった硬い物体との衝突感覚を提示し、接触部分に要求される性能を実験できる。

2.3 検証パラメータ

等加速度(自由落下)運動する接触部分が、有限の硬さを持つ仮想物体面に衝突し跳ね返る軌道を、実験装置で再現する例を図6左に示す。横軸が時間であり、縦軸が接触部分の位置である。一般的には、仮想物体面が柔らかいほど剛体に加わる加速度(剛体が仮想物体に衝突した際に受ける微小時間の速度変化)が小さく、剛体が物体に接触してから跳ね返る(離れる)までに要する時間(以下、「接触時間」と記す)が長い。

図6右は、衝突部分を拡大したものである。各ドットの間隔が制御指令周期を示し、傾き(速度)の変化が加速度を示す。

接触時間(距離が0 mm以下の時間)に注目すると、図6右から分かるとおり、接触時間は必ずし

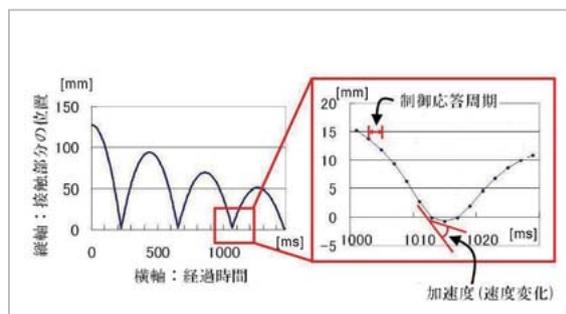


図6 接触部分の軌道とその拡大図

も制御指令の1周期分とは等しくない。これは、モータ出力に対するデバイスの慣性質量により接触部分の加速度が制限されるため、衝突前後の速度変化に有限の時間が必要なためである。すなわち、制御指令では、仮想物体に衝突した1周期後に、跳ね返るような出力が可能であるが、そのような制御指令を出してから実際に接触部分が跳ね返るまでには、制御指令周期の1周期より長い時間を要する。本論文では、実際の衝突感覚を提示する時に、接触部分が衝突してから実際に跳ね返るまでに必要な時間間隔(接触時間)を制御応答周期と呼び、制御器が出力する制御指令の周期である制御指令周期とは区別して議論する。

ここで、制御指令周波数が無限大(制御指令周期が0)で、モータ出力も無限大であり、たわみの全く無い理想的な力覚デバイスを考えると、接触部分の軌道は、例えば図7(1)のように衝突時点で微分不可能となり、制御応答周期が0、加速度が無限大となる。実際には、制御器の制御指令周期がボトルネックになる場合の接触部分の軌道は図7(2)のようになり、制御応答周期は制御指令周期に依存する。モータ出力がボトルネックになる場合の軌道は図7(3)のようになり、制御応答周期は最大加速度に依存する。すなわち、ボトルネックがそれぞれの場合において要求される性能を明らかにするため、制御応答周期と最大加速度の両方のパラメータについて検討する必要がある。

任意曲面を提示する遭遇型デバイス[13]や、制動機構により力覚を提示するデバイス[4][14](以下、「制動型デバイス」と記す)では、接触部分が跳ね返らない場合もある。このような力覚デバイスにおいて、たわみが有限である場合の接触部分の軌道は図7(4)のようになり、制御指令位置から

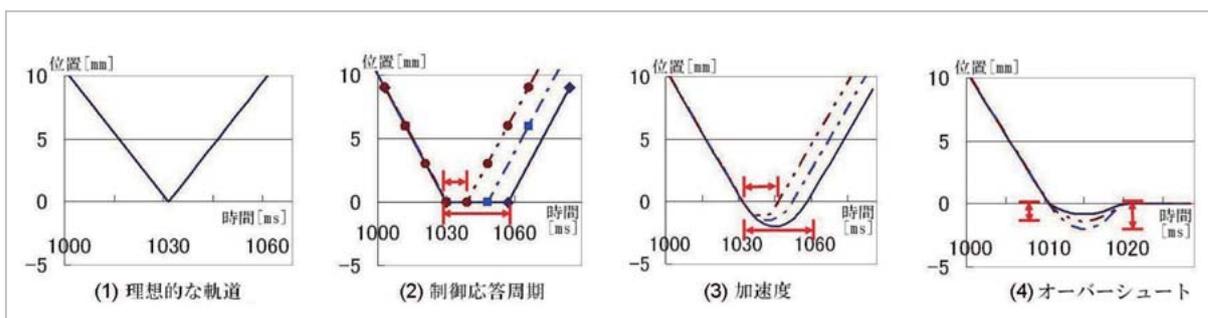


図7 デバイス特性の違いによる接触部分の軌道の変化

たわみの分だけオーバーシュートする。このため、力覚デバイスの接触部分に許されるオーバーシュートも検討する必要がある。

本論文では、硬い物体の提示に必要な力覚デバイスの性能を示す指針として、制御応答周期／加速度／オーバーシュートの3つのパラメータに関する弁別可能領域を検証する。仮想物体が硬いほど、大きな加速度と短い制御周期、小さいオーバーシュートが必要とされる。

3つのパラメータの各実験において被験者に提示する刺激は、「Stevensのべき法則」[15]に基づき、公比2の等比数列である以下に示す5種類とする。

- (1) 制御応答周期 $\{10, 20, 40, 80, 160(\text{ms})\}$
- (2) 加速度 $\{12.5, 25, 50, 100, 200(\text{m/s}^2)\}$
- (3) オーバーシュート $\{1, 2, 4, 8, 16(\text{mm})\}$

また、刺激対は大きさの隣り合う値の組合せとする。すなわち、例えば制御周期の場合、提示する刺激対は、 4×2 組 $\{10-20, 20-40, 40-80, 80-160, 160-80(\text{ms})\}$ となる。これら8種類の刺激対を4試行ずつ、合計32試行する。3種類の実験の順番は無作為とし、各実験において提示する刺激対の順番も無作為とする(恒常法[16])。

制御指令周期の値を変更する実験1の軌道は図7(2)、加速度の値を変更する実験2の軌道は図7(3)、オーバーシュートの値を変更する実験3の軌道は図7(4)のようになる。

各実験の被験者数は、制御周期では14名、加速度では17名、オーバーシュートでは10名であり、重複を除いた総被験者数は29名、被験者の年齢は20～39歳、実験時間は練習や休憩を含めて約1時間である。

力覚デバイスは、3つのパラメータの全てに関して、本論文で明らかにされた弁別可能領域を提示できることが望ましい。ただし、モータ出力が十分に強い力覚デバイスは少なくとも制御応答周期に関して、制御指令周期が十分に短いデバイスは少なくとも加速度に関して、制動型デバイスは少なくともオーバーシュートに関して、それぞれ弁別可能領域を提示できることが望ましい。

2.4 実験結果

本実験では、被験者が全試行において無作為に回答した場合の正解率(以下、「チャンスレベル」と記す)は50%である。また、全試行のうち半数が弁別可能であり、他の半数が弁別不可能で無作為に回答した場合の正解率は75%となる。本論文では、半数以上の試行で弁別が可能であったという意味で、正解率が75%以上である刺激対の領域を弁別可能領域と定義する。また、実験結果の分析方法として、刺激対ごとの正解率に有意差があるかを確認する。Studentのt検定を用いて、全被験者の正解率の平均値を、刺激対のペアごとに比較する。危険率5%以下である刺激対の組合せを、正解率に有意差があると判断する。

刺激対ごとの全ての被験者の正解率の平均を示す。制御応答周期の異なる刺激対における正解率を図8に、加速度の異なる刺激対における正解率を図9に、オーバーシュートの異なる刺激対における正解率を図10に示す。図中のエラーバーは、正解率に対する95%信頼区間を示し、赤い点線は正解率が50%のチャンスレベルを、青い点線は正解率が75%の弁別可能領域を示す。

図8より、制御応答周期が40ms以下の場合、正解率がチャンスレベルと統計的な有意差は無か

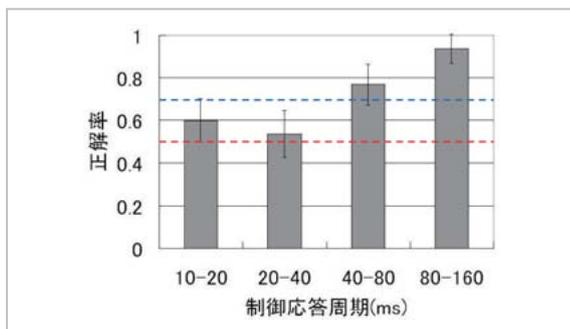


図8 制御応答周期の異なる刺激対の弁別における正解率

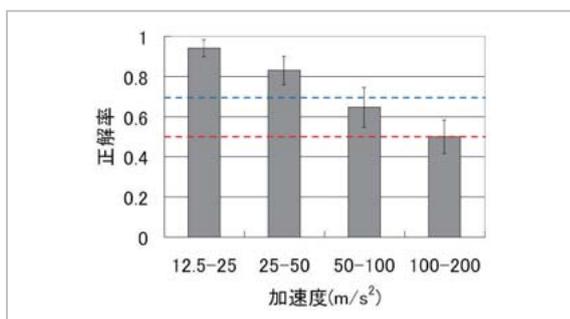


図9 加速度の異なる刺激対の弁別における正解率

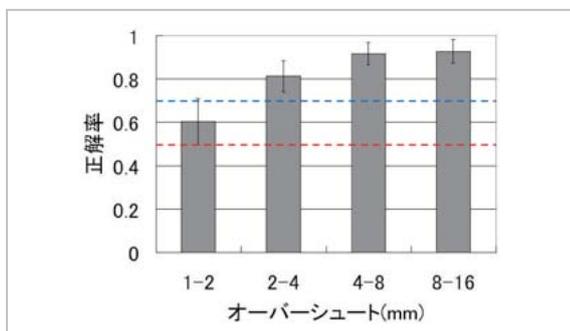


図10 オーバーシュートの異なる刺激対の弁別における正解率

ったことから、制御応答周期が40 msよりも小さい場合、制御応答周期の弁別は困難であったといえる。

一方、制御応答周期が40 ms-80 msの場合の正解率は平均で75%以上であり、刺激対が10 ms-20 msと20 ms-40 msの場合より有意に高かったことから、弁別が可能であったといえる。さらに、80 ms-160 msの場合、正解率は90%以上であり、40 ms-80 msの正解率とも有意差が存在したことから、制御応答周期が大きくなるほど弁別が容易であることが分かる。

これらの結果から、制御応答周期が40 msよりも小さい場合には弁別が困難であり、40 msよりも大きい場合には半数以上の試行で弁別が可能となり、80 ms以上の場合には明らかに弁別が可能であると考えられる。すなわち、制御応答周期に関する弁別可能領域は40 ms以上であり、力覚提示デバイスで非常に硬い物体を表現する場合、たわみも含めた制御応答周期が40 ms以下である必要があるといえる。

図9より、加速度の刺激対が100 m/s²-200 m/s²の場合、正解率にチャンスレベルと統計的な有意差は無かった。一方、刺激対の加速度が小さくなるに従い正解率が上昇し、25 m/s²-50 m/s²の場合に半数以上の試行で弁別可能となり、12.5 m/s²-25 m/s²の場合に90%を超えた。また、4種類の刺激対の全てに統計的な有意差があったことから、これら4種類の刺激対は加速度が小さいほど弁別が容易であったといえる。

これらの結果から、加速度に関して過半数の試行で弁別が可能となる領域は50 m/s²以上であり、力覚提示デバイスで非常に硬い物体を表現する場合、接触部分の加速度として50 m/s²以上が必要であるといえる。

図10より、オーバーシュートの刺激対が1 mm-2 mmの場合、正解率にチャンスレベルと統計的な有意差は無かった。一方、オーバーシュートの刺激対が2 mm-4 mmの場合、正解率がチャンスレベルより有意に高かった。また、オーバーシュートの刺激対が4 mm-8 mmおよび8 mm-16 mmの場合、ほとんどの試行において弁別可能であった。

また、4 mm-8 mmと8 mm-16 mmの刺激対の間には有意差が無かったが、1 mm-2 mmと2 mm-4 mmの刺激対の間と、2 mm-4 mmおよび4 mm-8 mmの刺激対の間には有意差があったことから、オーバーシュートの値が大きくなるにつれ、弁別が容易になることが分かる。

これらの結果から、オーバーシュートが2 mm以下の場合にはほぼ全ての試行で弁別が困難であり、2 mm以上の場合には半数以上の試行で弁別が可能であり、4 mm以上の場合にはほぼ全ての試行で弁別が可能であるといえる。すなわち、制動型の力覚提示デバイスで非常に硬い物体を表現する場合、デバイスのオーバーシュートが2 mm

以下である必要があるといえる。

3つの実験のすべてにおいて、前半の16試行と後半の16試行において正解率に有意な差は存在せず、学習効果は認められなかった。

2.5 考察

2.4の実験結果から、硬い感覚を提示する力覚デバイスを製作する場合の新たな指針として、制御応答周期が40ms以下であり、提示できる最大加速度が50m/s²以上であり、オーバーシュートが2mm以下であるデバイスの設計が重要であることを示した。

従来の研究では、接触部分の位置はモータのエンコーダから求められていたものが多く、実験に利用している力覚デバイス自体に発生しているたわみを正確に計測しないまま、制御指令周期に着目して実験しているものも多かった。そのため、制御指令周期と制御応答周期の区別がなされていない研究や、モータの出力と指先への提示力の区別がなされていない研究が多かった。

例えば、PHANTOM PREMIUM 1.5 [2] を用いて、モータのエンコーダから10msごとに位置情報を取得したところ、安定して提示できる非常に硬い仮想物体 (Stiffness = 1000) を1m/sの速度で軽くたたいた場合、仮想物体に接触してから離れるまでに50ms～60ms要しており、衝突時の最大加速度はおよそ15m/s²～20m/s²であった。これに対し、実際のスタイラスの位置は、PHANTOM PREMIUM 1.5の最大提示力である8.5Nを提示した場合、およそ2.4mmほどたわむ [2] ため、モータのエンコーダから計算した位置とは誤差が生じる。その結果、接触部分が指先に伝える力や加速度を正確に求めることができない。本実験装置では、提示力が最大値 (236～249N) の場合でも±10μmの誤差で位置情報が把握できる。このため、力覚デバイスの接触部分の挙動として実際に求められる制御応答周期や最大加速度を明らかにできた。

2.6 ウェーバー比に関する実験および結果

ここで述べた実験装置を用いて、制御応答周期と加速度について、弁別に必要な刺激変化率 {ΔI(刺激変化量)/ΔI(刺激量)} で示されるウェーバー比 (Weber ratio) [12][16] を明らかにす

る。なお、2.6では、加速度については、指先速度が-1m/sから1m/sに変化する時間 (以下、「加速時間」と記す) で表している (10msの加速時間が200m/s²の加速度に相当する)。

被験者に提示する制御応答周期と加速時間は、標準刺激を3種類とし、それぞれに対する比較刺激を4種類とする (表1、表2)。

被験者に2種類の刺激を3秒の間を空けて提示する。2種類の刺激の一方は標準刺激、他方は比較刺激であるが、提示順序は無作為とする。被験者は、1回目と2回目のどちらがより硬い (制御応答周期/加速時間が短い) と感じたかを口頭で答える。これを、制御応答周期については8名、加速時間については9名の被験者がそれぞれ4×3パターンを4回ずつ試行した結果として、制御応答周期の変化に関する全ての被験者の正解率を図11に、加速時間の変化に関する正解率を図12に示す。それぞれの図中のエラーバーは、正解率に関する90%信頼区間を示す。

図11より、制御応答周期に関しては、標準刺激がいずれの場合でも、比較刺激の変化率が小さいほど正解率が低く、弁別が難しいことが分かる。比較刺激の変化率が20%では正解率がいずれも75%以下であるのに対し、変化率が60%以上では正解率がいずれも80%以上であった。

比較刺激の変化率が等しい場合、標準刺激の制御応答周期が短いほど正解率が低かった。特に、

表1 制御応答周期における標準刺激と比較刺激

標準刺激	比較刺激 (ms)			
	+20%	+40%	+60%	+80%
50	60	70	80	90
100	120	140	160	180
150	180	210	240	270

表2 加速時間における標準刺激と比較刺激

標準刺激	比較刺激 (ms)			
	+20%	+40%	+60%	+80%
60	72	84	96	108
120	144	168	192	216
180	216	252	288	324

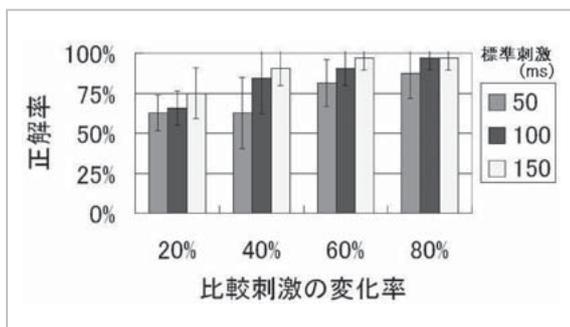


図 11 制御応答周期の標準刺激が 50、100、150 ms における正解率

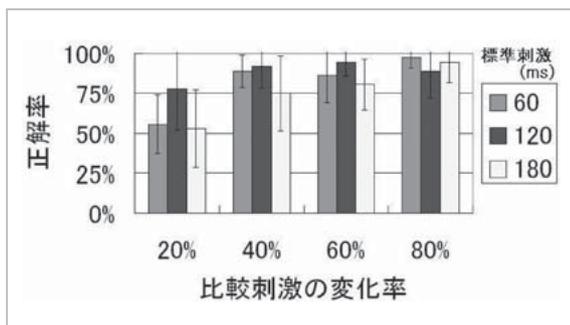


図 12 加速時間の標準刺激が 60、120、180 ms における正解率

比較刺激の変化率が 40% の場合、標準刺激が 100 ms 以上の場合には正解率が 80% 以上であるが、標準刺激が 50 ms の正解率は約 60% と低かった。これは、50 ms という制御応答周期が、前節までで示した弁別可能領域の境界に近い値であるためと考えられる。

これらの結果から、制御応答周期に関する弁別は、比較刺激の変化率が小さいほど困難であり、変化率が同じ場合、標準刺激の制御応答周期が短いほど困難であることが分かった。制御応答周期に関するウェーバー比は、刺激が弁別可能領域内においては 0.2 ~ 0.4 であるといえる。

図 12 より、加速時間に関しては、標準刺激がいずれの場合でも、比較刺激の変化率が 40% 以上の場合の正解率が 75% 以上であり、弁別可能であった。また、標準刺激がいずれの場合でも、変化率が 20% の場合の正解率が最も低かった。

比較刺激の変化率が等しい場合には、標準刺激の加速時間が 120 ms の場合が最も正解率が高かった。特に、比較刺激の変化率が 20% の場合、標準刺激が 120 ms の場合のみ正解率が 75% 以上であった。これは、加速時間が 120 ms 程度で

ある場合に、指先の弁別能力が高い可能性を示している。

これらの結果から、加速時間に関する弁別は、比較刺激の変化率が小さいほど困難であり、変化率が同じ場合、標準刺激が標準刺激の加速時間が 120 ms 付近の弁別能力が高いことが分かった。加速時間に関するウェーバー比は、標準刺激が 120 ms の場合に 0.2 以下、標準刺激が 60 ms と 180 ms の場合に 0.2 ~ 0.4 であるといえる。すなわち、力覚提示デバイスにおいて異なる硬さを制御応答周期や加速時間の違いで表現する場合には、少なくとも 20 ~ 40% 程度の違いを制御できることが望ましいといえる。

3 携帯型力覚提示デバイスの開発

ここでは、2 で明らかにした性能を満たす携帯型力覚提示デバイスの開発と、デバイス位置の取得システムの製作について述べる。

Tan らは、自作の実験用力覚デバイスを用いて、指先で把持 (pinching) した際に感じる硬さには、つかみ終わって最も反力が大きくなる時の力 (終端力、Terminal force) が重要であることを実験的に示している [17]。しかし、従来のデバイスの多くが硬さを提示するために十分な終端力を提示できない。例えば、PHANTOM [2] や SPIDAR [3] の提示力の多くが、最大で 10 ~ 40 N 程度である。また、PHANTOM [2] の場合、提示できる加速度が最大で約 15 m/s² と小さく、オーバーシュートが最大で 2.4 mm 以上と大きい。このため、制御指令周期は 1 ms であるが、制御応答周期は非常に遅い。

3 では、親指と人差し指で仮想物体を把持する場合に十分な終端力が提示でき、2 で述べた性能を満たす携帯型力覚デバイスの開発について述べる。

3.1 携帯型力覚デバイスの試作1号機

3.1.1 試作1号機の概要

最初に製作した携帯型力覚デバイスの試作1号機の把持部分を図 13 に、全体構成を図 14 に示す。試作1号機では、握り部分に内蔵されたモータの回転を装置中央のギアを介してボールねじに伝達する [9]。ボールねじのスライダ部分と、2指



図 13 携帯型力覚デバイスの試作 1 号機の把持部分



図 14 試作 1 号機の構成

(親指と人差し指)がデバイスに触れる部分(接触部分)は、アルミ製の剛体で接続されている。親指側の接触部分には、圧力センサが装着され、指がデバイスに加える力(=デバイスが指に与える反力)をセンシングする。デバイスに内蔵されたモータにはエンコーダが装着されており、2 指の間隔が得られる。モータは、ケーブルで接続された外部コントローラにより制御される。

本試作機では、硬い物体を提示するため、PHANTOM や SPIDAR などの力覚デバイスとは異なる制御方法を用いている。PHANTOM や SPIDAR などの力覚デバイスでは、提示する力覚は、指先(またはスタイラスなど)の位置を引数とする関数である。すなわち、指先の位置に応じて提示する力覚(出力する力)が決定される。一方、筆者らの試作機では、指先の位置は、指先が加える力を引数とする関数である。すなわち、デバイスに指先から加えられた力に応じて、接触部分の位置が決定される。PHANTOM や SPIDAR などを用いられる前者の方法では、硬い物体を提示すると振動が発生する場合が多い。本試作機で用いた後者の方法では、硬い物体を提示しても振動が

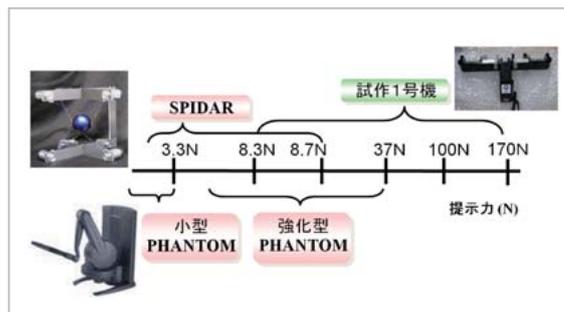


図 15 最大提示力の比較



図 16 被験者が仮想物体をつかむ様子

ほとんど発生しない。

試作 1 号機の最大提示力は各 86 N である。これは、標準的な成人男性が全力でつかんでも十分な反力(終端力)を提示できる値である。また、制御指令周期は各 $10 \mu\text{s}$ 、停止時の最大加速度は各 47.9 m/s^2 、オーバーシュートは各 0.85 mm である。大きさは縦 114 mm 、横 220 mm 、重さは 520 g (ケーブル等を除く)である。

硬さの提示に重要な提示力の比較を図 15 に示す。試作 1 号機が、従来デバイスである SPIDAR や PHANTOM と比べて十分に大きな力を提示できることが分かる。

3.1.2 試作 1 号機の評価実験

試作 1 号機の利用者が、仮想物体の硬さと大きさの相対的な違いを識別できるかを 8 名の被験者実験により評価する。被験者に映像を提示するモニターには、試作 1 号機で把持する仮想物体と被験者の手首から先を模したアニメーションが表示される。試作 1 号機のモータに接続されたエンコーダにより、被験者の指の動きとモニターに表示された手および仮想物体は同期して動く。被験者がモニターの前で仮想物体をつかむ様子を図 16

に示す。

被験者には、モニターに提示された球形の仮想物体を、試作1号機を用いてつかんでもらい、つかんだ感覚から提示されている仮想物体の大きさと硬さを記憶してもらう。次に、硬さと大きさのそれぞれ異なる仮想物体を提示し、試作1号機でつかんでもらう。そのときの感覚を、1回目に提示され記憶した仮想物体のときと比較してもらい、相対的な硬さの違いを、それぞれ以下の7段階の選択肢から主観評価する。比較のため、大きさについても同様に実験した。

＜硬さの評価に関する選択肢＞

1: 非常に柔らかい / 2: 柔らかい / 3: やや柔らかい / 4: 同じ / 5: やや硬い / 6: 硬い / 7: 非常に硬い

＜大きさの評価に関する選択肢＞

1: 非常に小さい / 2: 小さい / 3: やや小さい / 4: 同じ / 5: やや大きい / 6: 大きい / 7: 非常に大きい

実験結果として、仮想物体の硬さと大きさに対する被験者の回答の平均を図17に示す。各グラフの左側は柔らかい / 小さい物体を提示した場合の回答であり、右側は硬い / 大きい物体を提示した場合の回答である。硬さと大きさのいずれに対しても被験者は明確に識別が可能であったことから、試作したデバイスは、それぞれ異なる硬さや大きさを提示できることが確認できた。

試作1号機の問題点として、ギアの回転音が大きく、振動が発生する問題があった。また、指と

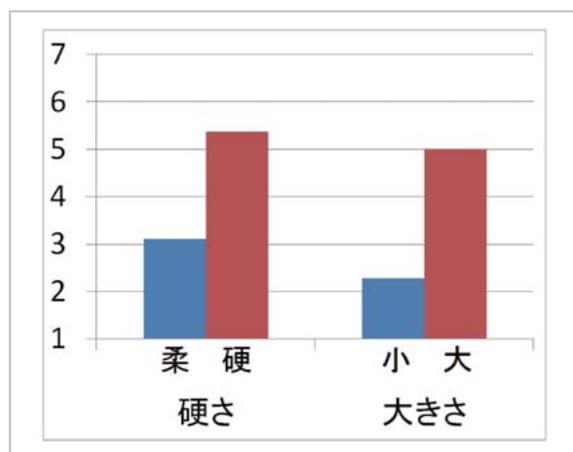


図17 硬さと大きさに対する被験者の回答の平均値

指の間にあるボールねじにより、把持部分に提示する映像を見ることができないという問題もあった。そこで、これらの問題を解決する試作2号機を開発した。

3.2 携帯型力覚デバイスの試作2号機と立体映像同期システムの開発

3.2.1 試作2号機の概要

携帯型力覚デバイスの2号機を図18に示す。試作2号機は、消音化のためモータからボールねじに力を伝達する機構を、ギアから摩擦車に変更した。また、制御の安定化のため圧力センサを2つにして2指それぞれの接触部分につけた。さらに、立体映像により飛び出して見える物体をつかむため、ボールねじの配置をモータの下部へと変更することで、2指間の視界を確保した。

3.2.2 立体映像同期システムの概要

大画面立体映像中の仮想物体をつかんで操作するシステムに向けて、光学式モーショキャプチャシステム、立体ディスプレイ、力覚デバイス(試作2号機)と、これらを接続して制御するPCで実行する立体映像表示プログラムからなる、立体映像同期システムを開発した。システムの概観を図19に、システム構成を図20に示し、詳細を以下に述べる。

・モーショキャプチャシステム

モーショキャプチャシステムは、Radish/3D(カラーカメラ2台)を用いる。立体ディスプレイの両脇に設置した2つのカメラから得られた画像情報から、デバイスに装着したカラーマーカー(図18)の位置を計算する。計算された各マーカーの位置から、デバイスの位置姿勢情報を得る。得られた位置姿勢情報は、LANにより接続された立体映像表示プログラムに送信する。ただし、2指

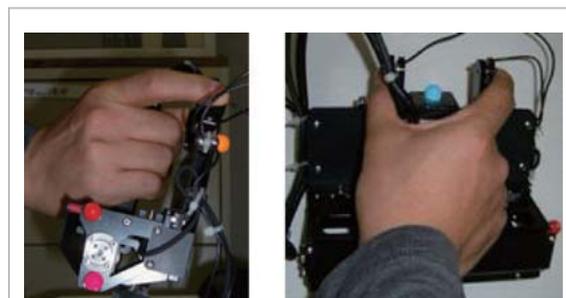


図18 携帯型力覚デバイスの試作2号機



図 19 立体映像同期システムの概観

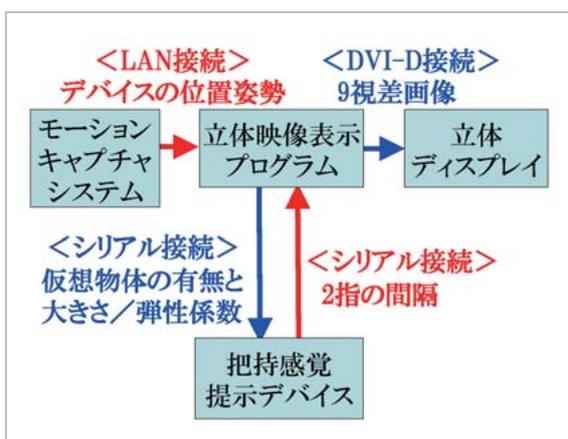


図 20 立体映像同期システムの構成

の間隔はモーションキャプチャシステムではなく、力覚提示デバイスのモータに装着されたエンコーダから得る。

・立体ディスプレイ

立体ディスプレイは、Philips 社の裸眼 3D ディスプレイ (42 インチ WOW モデル: レンチキュラー方式) を用いる。ディスプレイ表面に装着されたレンチキュラーレンズにより、特殊なメガネなどを装着する必要なく、立体映像を提示する。

・立体映像表示プログラム

立体映像表示プログラムは、モーションキャプチャシステムから被験者が持つデバイスの位置姿勢を示す 6 自由度の値を LAN 接続で獲得し、デバイスから指先の間隔を示す値をシリアル接続で獲得する。2 指間に仮想物体が存在する場合には、その大きさと弾性係数をデバイスに送信する。ただし、反力の制御はデバイスが独立して行い、プログラムはその制御結果としての 2 指の間隔のみを受け取る。これらの情報に基づき、Windows

PC 内の OpenGL により仮想空間中の仮想物体および把持する手を記述する。表示される映像を DVI-D 接続により立体ディスプレイに送られ、立体的に表示される。

・力覚提示デバイス

試作 2 号機を用いる。仮想空間中の 2 指の間に仮想物体がある場合には、立体映像表示プログラムから、仮想物体の大きさおよび弾性係数を受け取る。力覚提示デバイスの制御器は、2 指の間隔と仮想物体の大きさおよび弾性係数から自律的に反力を計算し、被験者に力覚を提示する。ただし、接地されていないというデバイスの制約から、仮想物体の重さは提示されない。なお、非接地型の力覚デバイスによる重さの提示は、出願済みの特許技術 [11] により実現の可能性があり、今後の課題である。

3.2.3 立体映像同期システムの問題点

カラーマーカーを利用したモーションキャプチャシステムでは、カメラに映る背景や被験者の着衣に、マーカーに近い色が存在する場合には位置情報の検出に失敗するが多かった。そのため、安定した動作のために、白い壁を背景にして白衣を着用して実験していた。この問題を解決するために、発光ダイオード (LED) をマーカーとして試作 2 号機に装着することで、位置情報の検出の失敗が格段に減少した。しかし、検出される位置情報にノイズが発生し、微妙に振動している状態で表示されてしまう。ノイズをキャンセルするアルゴリズム (フィルタリング) の開発などが今後の課題である。

3.2.4 被験者による主観評価

6 名の被験者に、試作したシステムを利用してもらった。本稿では、特に力覚提示デバイスについて得られた主観評価について述べる。

・大きさの感覚の評価

力覚提示デバイスのみから得られる触覚だけで大きさを認知できるかを検証した。被験者には、立体ディスプレイ上では同じ大きさであるが、力覚デバイスでは大きさ (正四角柱の太さ) が異なる仮想物体 {30, 40, 50, 60 (mm)} の反力を提示し、力覚デバイスの提示する仮想物体の大きさについて回答してもらった。その結果、全ての被験者が相対的な大きさの違いが分かったと回答した。

・硬さの感覚の評価

力覚提示デバイスのみから得られる触覚だけで硬さを認知できるかを検証した。被験者には、立体ディスプレイ上では仮想物体が変形しないが、力覚デバイスでは硬さが異なる仮想物体 {0.7, 1.5, 3.0, ∞ (N/mm)} の反力を提示し、力覚デバイスの提示する仮想物体の硬さについて回答してもらった。その結果、全ての被験者が、相対的な硬さの違いが分かるという回答した。

・操作感の評価

自由回答形式で力覚デバイスを使用した感想を述べてもらった。操作音が気になるという被験者は居なかった。これは、試作1号機で最も大きな音を発生させていたモータとボールねじを接続するギアを、摩擦車に改良したためであると考えられる。一方、摩擦車による力の伝達には、ギアと異なる独特の振動(ゴリゴリといった摩擦感)が発生する。この感覚が気になるという回答が多かった。特に、指先が物体に接触するまでの間は、本来は指が空中に浮いている状態であるにも関わらず、振動が発生する。このため、摩擦車特有の振動を減少させる必要がある。また、デバイスの重さが気になると回答した被験者が多かった。これは、改良に伴い力覚デバイス重量が100g以上増加し、600gを超えてしまったためである。そこで、これらの問題を解決する試作3号機を製作する。

3.2.5 被験者による硬さ判別方法の違い

被験者が力覚デバイスで仮想物体の硬さを確かめる動きは2パターン存在した。1つは、指を仮想物体に接触させたまま力覚デバイスをグニグニと押し、そのときの反力から判断する方法である(反力型)。もうひとつは、仮想物体から離れた指を衝突させる際の感触から判断する方法である(衝撃型)。それぞれの判別方法における2指間の距離と力の変化を図21および図22に示す。図の横軸は時間(秒)を示し、左の縦軸は2指がデバイスに加える力(N)の平均値を、右の縦軸は2指の間隔(mm)を示す。仮想物体の大きさは40mmである。

反力型の判別方法を示す図21では、2指の間隔は仮想物体の大きさである40mm程度のまま力を加え、指が仮想物体にどの程度食い込むのかを感じることで硬さを判断している。被験者の多くが、主にこちらの方法で硬さを判断していた。

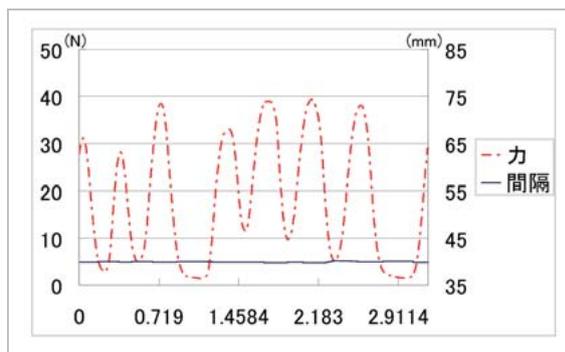


図 21 反力型の硬さ判別方法

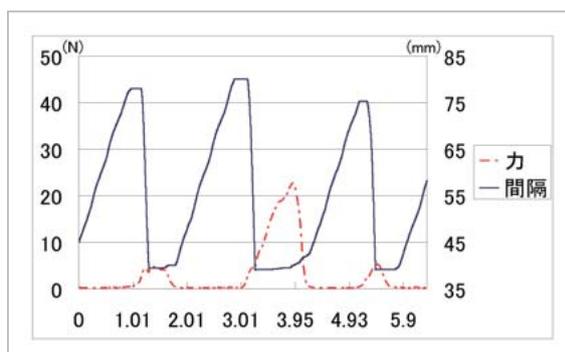


図 22 衝撃型の硬さ判別方法

衝撃型の判別方法を示す図22では、指を仮想物体から離れた後、ある程度の速度で指を閉じることで、指と仮想物体が衝突する際の止まる感触から硬さを判断していた。ある被験者は、最初はこの衝突型の方法で硬さを判別していたが、後半では反力型の方法で硬さを判別するようになった。

硬さがある程度以上の仮想物体の場合、指が把持する力を増加させても、指先の間隔が変化しなくなる。例えば、バネ定数が40 N/mmの仮想物体では、40 Nの力で把持しても1 mmしか押し込めない。反力型は、このときの把持力と押し込み深さを知覚して硬さを判別するため、ある程度以上のバネ定数をもつ仮想物体の硬さの判別は難しいと考えられる。一方、衝撃型の判別方法では、よりバネ定数の大きな仮想物体の硬さの判別ができる可能性があるが、力覚デバイスによる把持と実物体による把持では衝撃の感覚が異なるため、仮想物体同士の相対的な硬さの違いは判別できても、仮想物体と実物体との硬さの比較は困難であると予想される。

なお、いずれの被験者も、指が力覚デバイスに

加える力の最大値は、それぞれ 40 N 程度であった。PHANTOM や SPIDAR のような卓上型の力覚デバイスのほとんどは、これだけの力を提示できない。人が硬さを判別する場合には通常この程度の力を出していると考えられるため、力覚デバイスにもそれ以上の反力の提示が必要であると考えられる。

3.3 携帯型力覚デバイスの試作3号機とヒステリシスを考慮した物理モデル

3.3.1 試作3号機の概要

試作3号機は、軽量化のために、モータからボールねじに力を伝達する機構をボールねじからワイヤに変更した[10]。また、力覚情報通信のために、右手用と左手用の2機を製作した。いずれも、大きさは縦 112 mm、横 115 mm、重さは 340 g (ケーブル等を除く) である。2機は同一の制御器で制御されることで、通信遅延を最小化し、1 ms 以下の通信遅延を実現した。さらに、次節で述べるヒステリシスを考慮した物理モデルを作成し、ガラスや粘土のように材質感の異なる仮想物体を把持できるようにした。携帯型力覚提示デバイスの3号機を図 23 に示す。

3.3.2 ヒステリシスを考慮した物理モデル

ヒステリシスとは、「物質や系の状態が、それまでたどってきた経過に依存すること」である。例えば、粘土はゴムとは異なり、加える力を最初の状態に戻しても、一度押した部分が戻らずに変形したままであり、いわゆる塑性変形が発生する。すなわち、物体の形状が、現在加えられている力だけでなく、過去に加わった力に依存する。また、例えば陶磁器などは、強い力をかけると大きく変形する前に割れてしまう。いわゆる脆性破壊が発生する。

例として、鋼とアルミニウム合金の応力-ひずみ線図を図 24 に示す。通常の鋼(図 24 左)は、図中に示された降伏点までは弾性変形する。この変形は可逆変化であり、ヒステリシスを考慮する必要が無い。降伏点を越えて変形すると不可逆変化となり、ヒステリシスを考慮する必要がある。また、力を加えていって脆性破壊の発生後は反力を返さなくなるが、これも不可逆変化であり、ヒステリシスを考慮する必要がある。一方、アルミニウム合金(図 24 右)のように、明確な降伏点を持



図 23 携帯型力覚デバイスの試作 3 号機

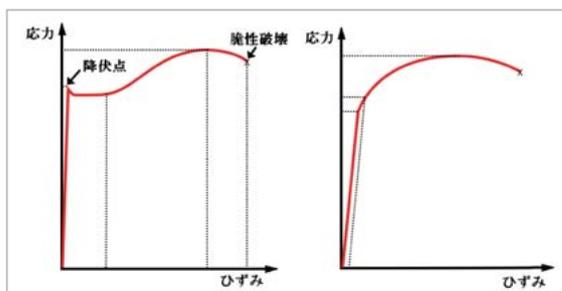


図 24 鋼(左)とアルミニウム合金(右)の応力-ひずみ線図[18]

たない材料も存在するが、ひずみが大きくなると塑性変形が発生するという意味で、ヒステリシスを考慮する必要がある。

従来の力覚デバイスでは、指先(またはスタイラス)の位置に応じて反力を計算するものが多い。このとき、反力は、仮想物体に食い込んだ距離を変数、反力を出力とする 1 つの関数として表現され、仮想物体を押し込むときも戻るときも同じ位置であれば同じ反力を返す。このような 1 つの関数ではヒステリシスを考慮できない。このため、塑性変形や脆性破壊が表現できず、例えばゴム(弾性変形)と粘土(塑性変形)の材質感の違いや、ゴム(弾性変形)と陶磁器(脆性破壊)の材質感の違いなどが表現できない。試作3号機では、仮想物体の物理モデルとして、ヒステリシスを考慮する弾性/塑性/脆性モデルを提案し、実装した。

本研究では、弾性変形領域/塑性変形領域/脆性破壊変位を定義し、弾性領域を可逆変化で、塑性領域を不可逆変化でモデル化し、脆性破壊変位を越えて変形した物体を破壊されるものとしてモデル化する。

例として、ある仮想物体の弾性変形領域が 5 mm で、その間のバネ定数が 10 N/mm、塑性変形領域が 5 ~ 10 mm でその間のバネ定数が 2 N/mm、脆性破壊変位が 20 mm である場合に、

10 mm 変形させてから一度離れた後、20 mm まで変形させる場合の反力 - 変位線図は図 25 のようになる。なお、仮想物体の長さを 100 mm、変位させる断面積が 1 mm²、ヤング率を 1 GPa とした場合は、変形 (mm) の値はひずみ (%) の値と等しく、反力 (N) の値は応力 (N/mm²) の値と等しい。

現実の材料の多くは、弾性変形のみでは表現できず、弾性変形／塑性変形／脆性破壊の組合せで表現できると考えられる。例えば、ゴムは弾性変形領域が広い材料として、粘土は弾性変形領域が狭く塑性変形領域が広い材料としてモデル化できる。陶磁器は弾性変形および塑性変形領域が狭く、脆性破壊変位が小さい材料としてモデル化できる。

従来の方覚デバイスのほとんどが、弾性変形のみが発生する仮想物体の物理モデルを用いており、塑性変形および脆性破壊が発生する物体を提示できない。これら弾性変形／塑性変形／脆性破壊を組み合わせることで、様々な材料を把持した場合の材質感が得られる。

弾性変形のみでモデル化したゴムと塑性変形のみでモデル化した粘土、脆性破壊のみでモデル化したガラスの 3 種類を提示するデモ展示^[19]では、ほとんどの利用者が材質の違いを区別できると回答した。

3.3.3 3号機の問題点と改良

試作 3 号機では、ワイヤの強度に問題があった。例えば PHANTOM では金属ワイヤ(細い金属線(素線)を撻り合せたもの)を用いている。金属ワイヤは、巻き取り軸の半径が小さいと素線が

切れてしまうため、小型化には向かない。そのため、試作 3 号機では、SPIDAR などで用いられている釣り糸を採用した。しかし、試作 3 号機の提示力が強すぎるため、ワイヤが長時間の使用に耐えきれず、切れてしまう問題が発生した。そこで、ワイヤを図 26 に示すような歯付ベルトに変更した試作機を開発中である。

3.3.4 方覚情報通信における遅延の影響

現実の世界で 1 つの剛体を 2 人でつかんで操作する場合には、方覚情報が遅延無く伝わる。一方、遠隔地との通信には有限の遅延が存在する。電話などの聴覚情報通信では、遅延が 200 ms を超えると違和感を覚えることが知られているが、方覚情報通信の遅延がどの程度まで許容されるのかは明らかではない。

従来の方覚デバイスでも、方覚情報と映像情報の両方を提示する場合における方覚情報の遅延については研究されている^[20]。双方向通信ではなく一方に送信する場合には、遅延の影響は無視できる。一方、方覚情報を遠隔地と共有する場合には、遅延の影響が大きい。例えば、100 ms の遅延があるシステムで、1 人が剛体の右端を左方向に、別の 1 人が左端を右方向に、同時に押した場合を考える。左端を押す人からみると、100 ms 前には右端は押さえられていないため、右方向に押し込むことができる。同様に、右端を押す人も左方向に押し込める。この結果、100 ms 後に剛体は大きく縮んだことになる。また、相手が押す力をそのままの大きさの反力として出力しても縮んだ剛体の長さが戻らないため、より強い力を両側に返す必要が生じる。その結果、制御が不安定になり、デバイスが不自然に振動したり、利用者が違和感を覚えたりする。

方覚デバイスの制御周期は 1 ms であっても、

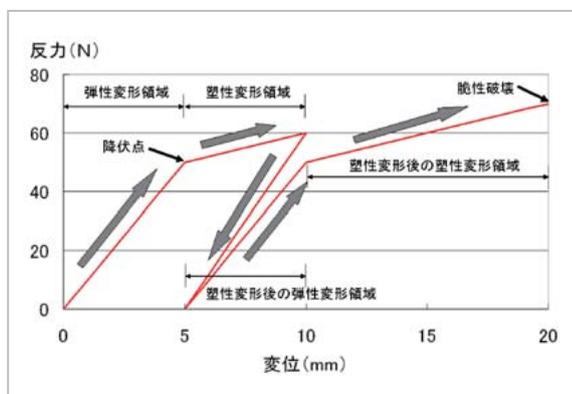


図 25 仮想物体の荷重 - 変位線図の例



図 26 歯付ベルトに改良中の試作 3 号機

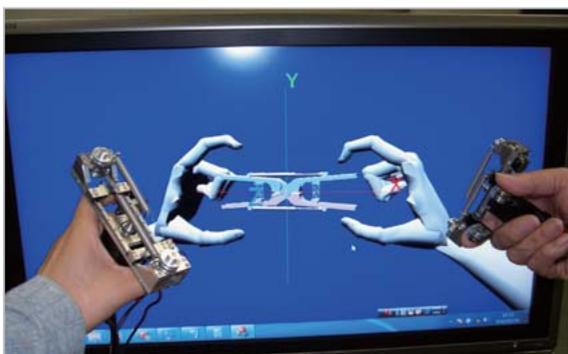


図 27 力覚情報の通信実験で用いるコンテンツ

遠隔地の力覚情報をそれほど短時間で通信できるものが存在しない。人間の認知メカニズムにとって、許容される遅延がどの程度であるかを検証するには、人間が違和感を覚えない程度まで遅延を小さくできる複数台の力覚デバイスを用意して、遅延の大きさを様々に変更した心理物理実験が有効である。しかし、これまでの力覚デバイスでは遅延が大きいため、検証できなかった。

提案する力覚デバイスでは、1つの制御器で2台の力覚デバイスを同時に制御することで、力覚情報のデバイス間通信に要する時間を1ms以下に抑えている。具体的には、2台の力覚デバイスに2つずつ装着された計4つの圧力センサが示す値を制御器が取得し、2台の力覚デバイスを1ms以下の周期で同時に制御する。すなわち、一方の力覚デバイスの圧力センサが示す力の値に基づき、もう一方の力覚デバイスを1ms以下の遅延で制御することが可能となる。これにより、例えば、両手に持った2つのデバイスの指の間隔の“和”が一定となるように制御すると、誰かが持っている箸の右側を右手で、左側を左手で操作するシーソーのような感覚が体験できる(図27)。また、指の間隔の“比”が一定となるよう制御すると、はさみの右端を右手で、左端を左手で持って動かす操作が体験できる。この2つのデバイス間での通信遅延時間を1ms～1000msの間で任意の設定し、許容される通信遅延の大きさを心理物理実験により明らかにする予定である。

4 おわりに

本研究では、見る／聞く／香るだけでなく、“触

る”ことで臨場感の高いコミュニケーションを実現するために、物の硬さの認知メカニズムの解明と、携帯型力覚提示デバイスの開発に取り組んだ。人間が認知できる硬さの限界を明らかにすることで、硬い物体を提示する力覚デバイスに必要なデバイスの性能を明らかにした、また、人が認識できる十分に硬い力覚を提示でき、大型の3Dディスプレイに表示された仮想物体をつかんで操作する携帯型の力覚デバイスを開発した。

硬さの弁別能力の解明に関する今後の課題を述べる。本研究では、視覚情報や聴覚情報を提示せず、力覚情報のみから硬さを弁別する実験から、硬さの認知メカニズムを明らかにした。今後は、視聴覚情報も同時に提示するマルチモーダルな環境における力覚による硬さの弁別能力の解明にも取り組んでいく必要がある。また、複数の力覚デバイスによる力覚情報の通信については、実験が不十分である。前章で述べた試作3号機の改良により、これらの実験に取り組むための環境が整う予定である。今後は、現在は非常に困難とされている遠隔地との力覚情報の共有を実現したい。

携帯型力覚デバイスにおける今後の課題を述べる。試作3号機の重さ340gのうち、モータの重さが約200gを占めている。このため、現在の提示力を維持した大幅な軽量化は難しい。また、試作3号機の横幅115mmの大部分を指先のストロークとして利用されているので、大幅な小型化も難しいと予想している。すなわち、2で述べた要求性能を持つ携帯型力覚デバイスとしては、現在の技術水準ではこれ以上の小型軽量化は難しいと考えている。一方、立体映像と同期するためのコンテンツの製作やモーションキャプチャシステムの改良の余地は非常に大きいといえる。実際につかんで硬さが分かると便利なコンテンツを考えていきたい。また、デバイスの位置情報の取得を、光学式のモーションキャプチャシステムではなく、PHANTOMなどを利用した機械式にすることで、安定かつ確実に取得できるようにする方法も考えられる。今後は、本研究グループの研究成果により「見る／聞く／香る／触る」という超臨場感コミュニケーション技術がより一般的に利用されることを目指す。

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤B(21300088)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1 NICT 報道発表: <http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h20/080930/080930-3.html>, Sep. 30, 2008.
- 2 SensAble Technologies, Inc: Haptic Devices, <http://www.sensable.com/products-haptic-devices.htm>.
- 3 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠: 10 kHz 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.
- 4 木村朝子, 上坂晃雅, 柴田史久, 田村秀行: 空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイスの機能設計と評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 2, pp. 314–323, 2010.
- 5 中山功一, 大島千佳, 安藤広志: 硬い物体を提示する力覚デバイスに必要な性能の検証, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 2, pp. 129–138, 2010.
- 6 K. Nakayama, J. Liu, and H. Ando, Psychophysical investigation of hardness perception for haptic device development towards Kansei engineering, International Journal of Biometrics (accepted with under modifications).
- 7 K. Nakayama and N. Inoue, Cognitive experiments on human sense of hardness discriminability, Proceedings of The Second International Workshop on Kansei 2008, pp. 90–93, 2008.
- 8 K. Nakayama, N. Inoue, Weber ratio and difference threshold for hardness perception, Proceedings of The 11th International Conference on Humans and Computers, pp. 127–132, 2008.
- 9 中山功一, 井ノ上直己, 把持感覚提示デバイス, 2008 年 10 月 24 日出願 (出願番号: 2008-274297).
- 10 中山功一, 把持感覚提示装置, 2009 年 8 月 27 日出願 (出願番号: 2009-196874).
- 11 中山功一, 非接地型力覚提示装置, 2009 年 9 月 8 日出願 (出願番号: 2009-207062).
- 12 E. H. Weber: De pulsu, resorptione, auditu et tactu, Annotationes anatomicas et physiologicae, Leipzig, 1834.
- 13 星野洋, 舘 暉, 遭遇型形状提示システムにおける任意曲面の形状提示に関する一考察, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 2, pp. 445–454, 1999.
- 14 菊池智, 濱本和彦: “没入型 VR 環境で使用可能な力触覚提示装置 (HAMA デバイス) の開発,” 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 10, pp. 1859–1864, 2009.
- 15 S. S. Stevens: On the psychophysical law, Psychological Review, Vol. 64, No. 3, pp. 153–181, 1957.
- 16 田中良久: 心理学的測定法 (第 2 版), 東京大学出版会, 1977.
- 17 H. Z. Tan, N. I. Durlach, G. L. Beauregard, and M. 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.
- 18 Wikipedia: <http://ja.wikipedia.org/>
- 19 中山功一, 大島千佳, 安藤広志, 弾性／塑性／脆性で材質感を表現する通信遅延が 1ms の力覚デバイス, インタラクティブ 2010 インタラクティブ発表, 2010.
- 20 大西仁, 望月要: 力覚ディスプレイにおける遅延が弾性力の弁別閾に与える影響, 信学技報, Vol. 106, No. 495 (CQ2006-81), pp. 11–16, 2007.



なかやま こういち
中山 功一

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループ特別研究員
佐賀大学工学系研究科准教授
博士(情報学)
携帯型力覚デバイス、最適化手法、
人工知能



あんどう ひろし
安藤 広志

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループグループ
リーダー 博士(計算神経科学)
認知脳科学、多感覚認知メカニズム、
多感覚インタフェース

多感覚統合・評価技術／硬さ弁別能力の解明と携帯型力覚デバイスの研究開発