

点接触型力覚呈示装置による変位情報に基づいた 平面形状知覚特性

山下 樹里[†] 福井 幸男[†]
森川 治[†] 佐藤 滋[†]

三次元力覚・触覚呈示装置は、次世代の三次元触覚ディスプレイとして重要である。この装置の特徴は、呈示する反力の大きさ・方向・位置を独立に制御可能な点で、特に2つ以上の反力ベクトルの補間による平滑化は、少ない情報量・計算量で滑らかな形状を呈示するために特に有用性が高く、これに関する人間の特性の解明が必要である。本論文では、1点接触型・3自由度の力覚呈示装置 PHANTOM を用い、平面の中央が幅 $2w$ 、高さ h のなだらかな山型に盛り上がった形状を、反力の方向を固定し変位情報のみを呈示するという条件下で、 w 、 h 、および刺激形状の硬さ s を変化させ、ヒトが平面であると判断するパラメータを特定し、その絶対閾を極限法により求めた。その結果、 s が $0.25 \sim 0.5 \text{ N/mm}$ 、 w が $20 \sim 40 \text{ mm}$ の範囲では形状高さが絶対閾 $h_{at} = 0.034 \cdot w + 0.022$ 以下である場合に、また w が $5 \sim 20 \text{ mm}$ の範囲では形状の高さ h に stiffness を乗じた値が 0.18 N 以下であれば、ヒトは平面と判断するとしてよいことが分かった。

On Plane Shape Perception by Displacement with a Point-contact Type Force Feedback Device

JULI YAMASHITA,[†] YUKIO FUKUI,[†] OSAMU MORIKAWA[†]
and SHIGERU SATO[†]

Haptic/force feedback device is an important type of three-dimensional haptic display whose application fields include computer aided design and surgical simulation. With such a device, three elements of feedback force (magnitude, direction, and displacement) can be controlled independently to give haptic illusion as well as natural haptic simulation of virtual objects. To date, however, shape perception factors have not been well studied. This paper presents experiments on the effect of displacement in plane shape perception with a point contact type force feedback device. The subjects changed the height h of smooth mountainous stimulus shape (width $2w$ and stiffness s) to determine parameters and their thresholds for the shape perceived as flat. The feedback force direction was fixed upward, the same as a horizontal plane, to see the effect of displacement. A shape is felt to be flat (1) if its height is smaller than absolute threshold value $h_{at} = 0.034 \cdot w + 0.022$ (where s is $0.25 \sim 0.5 \text{ N/mm}$ and w is $20 \sim 40 \text{ mm}$), or (2) if force for its height h , calculated by $h \cdot s$, is smaller than 0.18 N (where s is $0.25 \sim 0.5 \text{ N/mm}$ and w is $5 \sim 20 \text{ mm}$).

1. はじめに

3次元触覚・力覚呈示装置は、触覚・力覚情報をユーザに呈示することのできる装置で、仮想現実感技術 (Virtual Reality, VR) における重要な研究分野の1つである。マウス・CRTなどの従来の2次元入出力デバイスでは困難であった、3次元的な入出力を必要とする Computer Aided Design (CAD) や医療・手術シミュレータなどの分野への応用が期待されている。

現在、種々の触覚・力覚呈示装置が開発されているが¹⁾、なかでも「点接触型」と呼ばれるタイプのものは、構造・制御方法が比較的単純で小型化が可能なことなどから、市販品も普及しつつある。点接触型の力覚呈示装置では、ユーザは手に持ったペンまたはハンドルの先端で仮想の形状に触り、そのペンの先端の1点(すなわちカーソル位置)を通じて呈示装置が発生する反力を感じるというもので、あたかもペン先で形状をついて触っているかのような実感を得ることができる。

コンピュータ・グラフィックス(CG)の分野で情報をヒトの目に見えるように呈示することを Graphic

[†] 通商産業省工業技術院生命工学工業技術研究所
National Institute of Bioscience and Human Technology, AIST, MITI

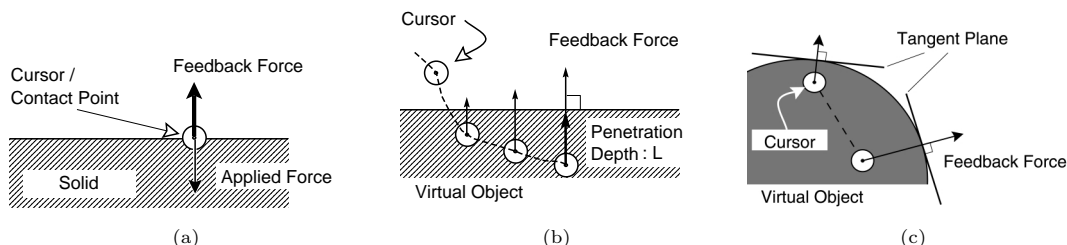


図 1 呈示反力の比較．(a) 実際の物体を触った場合，(b) 力覚呈示装置で仮想物体を表現する場合，(c) 仮想曲面の場合

Fig. 1 Touching Real/Virtual Object. (a) When touching a real object, the reaction force vector is perpendicular to the surface and its magnitude is equal to the applied force. (b, c) With a position-input, force-output force feedback device, the feedback force is usually calculated by the penetration depth of the cursor.

Rendering というのに倣い，触覚・力覚呈示装置を用いて情報を実際にヒトが触って感じられるように呈示することを Haptic Rendering²⁾と呼ぶ．仮想形状を効果的かつ効率的に呈示できる Haptic Rendering 手法を開発するには，ヒトが触覚・力覚を通じてどのように，またどれだけの精度で形状を知覚するのかが知ることが不可欠である．しかし，触覚・力覚の研究は始まったばかりで，そのようなヒトの形状知覚特性に関する定量的なデータは，触覚・力覚呈示装置を用いる場合のみならず，ヒトが実際に形状に触る場合に関しても，ほとんど存在しないのが現状である．

そこで本論文では，仮想形状呈示アルゴリズムの効率化に資するため，ヒトが点接触型力覚呈示装置を用いて平面形状を知覚する場合に関係するパラメータと，その知覚限界の閾値（絶対閾）を求める実験を，仮想形状の与える変位情報に着目して行ったので報告する．

本論文の 2 章では，本論文で用いる用語を整理し，点接触型力覚呈示装置による仮想形状呈示手法とその問題点，および既存研究について述べる．3 章で形状知覚実験について，4 章で実験結果を記述し，5 章で考察と今後の課題について述べる．

2. 力覚情報呈示の諸相と既存研究

本章では，触覚・力覚という用語と，3 章の実験の前提知識である点接触型力覚呈示装置による Haptic Rendering の原理を解説する．

2.1 触覚と力覚

すでに 1 章で触覚と力覚という言葉を使用した，本論文では，両者を次のような意味で用いる．「触覚」は，接触・圧・振動・形状表面の粗さなど，皮膚表面で対象物と接触することで感じる感覚を表す．したがって，小さな振動子のマトリクスの上に手を置いて点字

などを読み取る装置は「触覚ディスプレイ」に分類される．

これに対して「力覚」は，関節の角度やそこにかかる力，筋の緊張，身体部位の位置や運動などの，いわゆる自己受容感覚を表すものとする（触覚・自己受容感覚について，より詳しくは文献³⁾などを参照されたい）．点接触型力覚呈示装置（以下，単に力覚呈示装置と呼ぶ）は，ユーザの力覚に反力を呈示する装置であり，ユーザは自分の手を動かして能動的に形状を知覚する．

2.2 仮想形状の呈示原理

——Haptic Rendering

力覚呈示装置は，その発生する反力ベクトルの 3 要素：

- (1) 反力を発生する位置（変位情報），
- (2) 反力の方向，および
- (3) 反力の大きさ

を制御することで，仮想形状をユーザに呈示する．

現実の物体（剛体）表面を触ったときに感じる反力は，通常，物体表面上の接触点で発生し，その向きは物体表面に垂直な方向となる（図 1 (a)）．また，反力の大きさは物体を押す力に等しい．実際には摩擦力なども存在するが，ここでは考えないこととする．

これに対して点接触型力覚呈示装置では，多くの場合，カーソル位置（入力）に対して反力を計算・呈示（出力）する機構になっており，その制御ループは下記のようなのである：

- (1) カーソル位置の計測
- (2) カーソル位置と仮想形状との衝突検出
- (3) 衝突している場合，反力ベクトルを計算
- (4) 反力を呈示

* 上記 (1)～(4) のサイクルを繰り返す．

ここで、力覚呈示装置を安定して動作させるためには上記の制御周期が 1 kHz 以上でなければならないというハードウェア的な制約条件がある。

現実の物体を触った場合に近い反力を呈示するには、図 1 (b) に示されるように、カーソルが仮想物体に侵入した深さ L に応じた大きさで、物体表面に垂直な方向の反力を呈示する。具体的には、仮想物体の硬さ stiffness をバネ定数として、反力の大きさを $F = \text{stiffness} \cdot L$ とするのが最も単純である。曲面形状の場合 (図 1 (c)) でも同様に、曲面表面の法線方向の反力とすればよい。ただし、力覚呈示装置で呈示可能な硬さは、力覚呈示装置の剛性や呈示可能な力の大きさ、制御特性などにより制限される。

2.3 Haptic Illusion と Force Shading

力覚呈示装置では、呈示する反力ベクトルの 3 要素を独立に制御することが可能であるため、現実にはありえないような反力パターンを呈示することが可能である。この性質を利用して Minsky らは、力覚呈示装置による鉛直方向以外への反力呈示が、テクスチャ (表面の粗さ) 認識における錯覚現象 (Haptic Illusion, 錯触と呼ぶ) を生じることを報告している⁴⁾。これは、位置は変化しないが反力方向のみが変化する刺激が、その反力方向を本来持つであろうテクスチャや形状として知覚されるというもので、この現象を利用して反力方向のみを調節して本来とは異なる形状を呈示する手法は Force Shading⁵⁾ と呼ばれる (図 2)。これは、CG におけるバンプ・マッピングや Smooth Shading⁶⁾ などに対応する。

この反力方向と変位情報の関係については、まだ研究が始まったばかりであるが、Fukui ら^{7),8)} により、反力方向と変位情報は、どちらも形状を知覚させる要因であるが、これらを逆相にして同時に呈示しても互いに打ち消しあう性質のものではない (すなわち、完全に加算が可能なものではない) こと、また刺激形状の大きさにより形状知覚に与える影響が異なる (大きい

形状では変位情報が、小さい場合は反力方向が、より重要な知覚手掛かりとなる) こと、などが報告されている。

2.4 力覚による曲面形状呈示の問題点

CAD は力覚インタフェースの重要な応用分野であるが、滑らかな自由曲面を力覚呈示する際に問題となるのが、力覚呈示装置のカーソルと形状との干渉計算時間である。すでに述べたとおり、力覚呈示装置を安定して動作させるためには最低 1 kHz という高い制御周期が要求されるが、CAD で用いられる自由曲面は正確な干渉計算そのものに時間がかかる。また、曲面を多面体近似した形状でも面の数が非常に多くなれば、1 ms 以内に干渉計算を終了することが困難な場合が多い。

これを解決するため、高速干渉計算アルゴリズムの研究と並行して、補間アルゴリズムの研究が進められている。すなわち、自由曲面をなるべく粗い多面体で近似しておき、それを高速に、滑らかに補間して力覚呈示するのである。現在提案されているのは、隣接する近似面の間で発生する反力方向の不連続性を、前述の Force Shading により補間する⁹⁾ という手法である。しかし、この補間手法では、変位情報の不連続性が未解決であり、またこの手法で補間される多面体近似形状をどこまで粗くできるのかは明らかにされていない。

2.5 ヒトの力覚による形状知覚特性

力覚インタフェースの普及には、効果的かつ効率的な形状補間アルゴリズムの開発が必須であるが、そのためには、ヒトの力覚による形状知覚特性を知ることが不可欠である。補間される多面体近似形状をどこまで粗くできるかを決定するのは、補間のアルゴリズムと、ヒトの力覚による形状知覚限界の閾値 (絶対閾) である。この絶対閾と、形状や呈示反力のパラメータとの関係を明らかにしなければ、補間結果の「滑らかさ」を定義・評価することができない。

ヒトの触覚・力覚による形状知覚特性に関する既往研究は、実際の物体を手または指で直接触る知覚心理学実験研究がほとんどであるが、盲人への情報呈示を目的とした点字様の刺激形状および振動刺激に関する研究や、視覚との比較研究 (たとえば文献 10)) が主で、純粋に形状知覚に関して絶対閾や弁別閾を求めたものは少ない。Gordon ら¹¹⁾ は、曲率の異なる円筒形のレンズを指で触る実験により、曲面であることが分かる絶対閾は、平面から円筒面の頂点までの高さを触知面の幅の半分で割った「勾配」が 0.009 であること (Davidson¹²⁾ のプラスチック板を曲げた刺激形状による実験では 0.017)、また円筒面間の弁別閾は曲率が

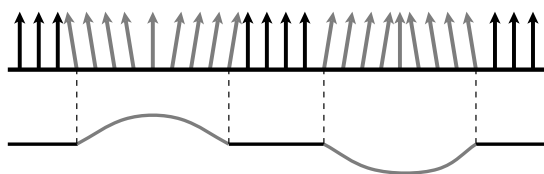


図 2 錯触 (触覚における錯覚現象) と Force Shading. 位置の変位をともしない反力方向の変化も形状知覚を喚起する。
Fig. 2 Haptic Illusion and Force Shading. Feedback force directions (up), simulating those of a particular shape (down), cause haptic illusion, even without according displacement.

きくなるにつれて大きくなる傾向があることなどを示している。

一方、力覚呈示装置を用いた形状知覚特性に関する既往研究は、Force Shading については前述の Fukui ら⁸⁾や Morgenbesser ら⁵⁾が等感覚点や形状の種類判別実験を行っているが、絶対閾については島田ら¹³⁾による三角形の山型刺激形状での実験が最初の報告であろう。これによれば、刺激形状幅 10～30 mm における絶対閾が反力呈示方法（自然な呈示と Force Shading）・形状幅・硬さに依存することが示されている。ただしこれは、滑らかに補間されていない多面体形状の絶対閾である。

2.6 本論文の目的

以上のように、形状補間の「滑らかさ」を定義・評価するパラメータ、滑らかな形状知覚の絶対閾とも、研究はこれからである。そこで本論文では、まず、変位情報に基づいた平面形状の知覚において、絶対閾と形状を定義するパラメータとの関係を明らかにする実験を行った。基準となる形状として平面を選んだのは、曲率が大きくなれば弁別閾も大きくなる¹¹⁾ことから、曲率 0 の形状すなわち平面での絶対閾が最も小さいことが予想されるためである。また、最終的には、反力ベクトルの各要素とそれらの相互作用についての検討が必要であると考えられるが、ここではまず、Force Shading 後の補間の質に影響すると考えられる変位情報について、反力方向の影響を除いた条件下での絶対閾を定量的に求めることを試みた。

3. 実験

3.1 目的

点接触型力覚呈示装置を用いた形状知覚における変位情報の効果を定量的に評価するため、平面とそうでない場合を弁別する閾値（絶対閾）を計測する。同時に、形状から絶対閾の予測を可能とするため、形状を定義するパラメータと絶対閾との関係を定式化する。

上記後者の、形状定義パラメータの何が絶対閾を定めるのかという問題に関しては、以下の 3 通りの仮説が考えられる。

- (1) 形状あるいは反力の「勾配」など、空間周波数的な要因：Gordon らの実験からの類推による。
- (2) 形状あるいは反力の時間的な「勾配」など、時間に依存した要因：形状を「速く」触ると、手の受け取る単位時間あたりの形状情報の変化量が増加し、形状の凹凸がより強く感じられる可能性がある。
- (3) 平面との差（高さ）の絶対値：熟練した職

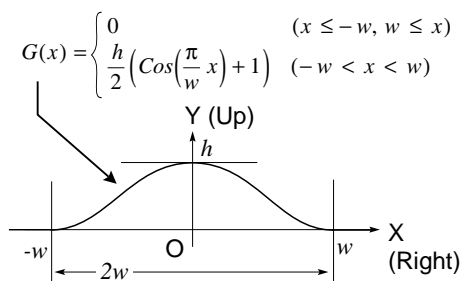


図 3 刺激形状の断面

Fig. 3 Sectional image of stimulus shape.

人は、製品を指で持つだけで寸法の誤差を 30/1000 mm の精度で計量するという。非熟練者でも、ある程度の精度で空間位置を把握しているのではないかと。

3.2 刺激形状

刺激形状の断面を図 3 に示す。カーソル位置の X , Y 座標を C_x , C_y , 刺激形状を $y = G(x)$ とすると、反力ベクトル $\mathbf{F} = (0, f, 0)$ は、

$$f = \begin{cases} 0 & (C_y > G(C_x)) \\ (G(C_x) - C_y) \cdot s & (C_y \leq G(C_x)) \end{cases}$$

（ただし s は硬さ stiffness）

$$G(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq -w, w \leq x) \\ \frac{h}{2} \left(\cos \left(\frac{\pi}{w} x \right) + 1 \right) & (-w < x < w) \end{cases}$$

（ただし h は形状の高さ、 w は幅）

で計算される。反力方向はつねに平面の場合と同じになるよう上向き（+Y 方向）に固定し、反力を返す位置のみが変化する情報（変位情報）として被験者に呈示した。反力方向を固定としたのは、反力方向の変化による Force Shading の影響を避けるためである。形状に角（ C^1 不連続な点）があると、それが形状知覚の手がかりになると考えられるため、滑らかな形状を選んだ。

3.3 実験装置

力覚呈示装置として PHANToM Haptic Interface 1.0 T-type (SensAble Technologies, Inc. ^{2),14)} にペン型の柄 (Instrumented Gimbal) を取りつけたものを用いた (図 4)。本装置の仕様は図 4 に示すとおりである。被験者は椅子に座り、右手で本装置のペンを持つ。ペンの先端部の位置が 3 次元カーソルとして計測され、それをもとに計算された反力 (3 自由度) が力覚呈示装置により発生され、被験者が形状を知覚する。形状に関する情報は力覚のみを通じて呈示し、視覚情報は呈示しなかった。

3.4 実験手順

実験開始前に、明らかに山型の形状であると感じられる刺激形状の例と、完全な平面形状の例を被験者に呈示し、触って確認させた。また、刺激形状を押す力について「形状は強く押さないで、軽く触れるようにしてください」と教示した。これは、実験に使用した力覚呈示装置の呈示できる最大反力がそれほど大きくないため、被験者が強い力で押すと装置が押し負かされて呈示される形状がゆがむことと、実験装置がオーバヒートして実験が続行できなくなるためである。なお、カーソルを動かす速度に関しては特に教示しなかった。

各実験条件について極限法により、絶対閾を測定した。上昇系列では、はじめにだれでも平面と感じられる形状が呈示され、被験者は上矢印キー「↑」を押して形状の高さ h を大きくしてゆき、「もう平面ではなくなった」と感じたところでリターンキーを押し、 h を確定して終了した。下降系列では、はじめに山型の形状が呈示され、被験者は下矢印キー「↓」を押して高さ h を小さくしてゆき、「平面になった」と感じたところでリターンキーを押し、 h を確定して終了した。

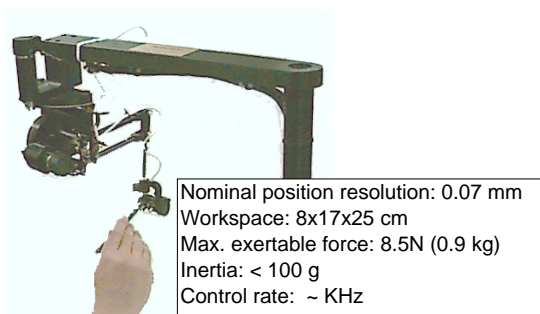


図4 PHANToM 力覚呈示装置

Fig.4 PHANToM force feedback device.

今回の実験では、使用した力覚呈示装置の空間解像度（カタログ値）が 0.07 mm であることから、↑・↓ キーを 1 回押したときの h の変化量を 0.1 mm とした。

3.5 実験パラメータ

表 1 に実験条件一覧を示す。実験条件パラメータは刺激形状の山の裾野の幅 w (5 通り) と stiffness (3 通り) で、計測対象となるパラメータは形状の高さ h である。条件パラメータの範囲は、使用した力覚呈示装置の動作範囲、呈示可能な反力の最大値 (5.2 節参照)、通常よく利用する stiffness の値の範囲により決定した。

1 つの実験条件について、上昇系列・下降系列各々 3 回ずつの試行を行った。実験順序は、stiffness によりブロック分けし、ブロック内部では順序効果为了避免するため、試行順序を乱数でランダムにした。なお、stiffness {0.25, 0.375} N/mm については同一被験者について連続して実験を行ったため、順序効果を除くため、被験者の半数では 0.25 N/mm の場合を先に、残りの半数では 0.375 N/mm を先に実験した。stiffness が 0.5 N/mm である場合の実験は約 3 週間後に半数以上が異なる被験者について行ったので、stiffness に関する順序効果は考慮しなくてよいと考えられる。

確定された形状の高さ h 以外に、カーソルが $x = \{-w, 0, w\}$ の 3 点 (w は形状幅；刺激図形の裾野の端点および頂点の位置) を通過した瞬間に実際に被験者に呈示されていた反力の大きさ（実験中に計算される）とカーソルの移動速度（力覚呈示装置の制御プログラムライブラリに含まれる速度関数を利用）を記録した。

3.6 被験者

右利きの日本人成人で、各 stiffness の値について 9 名ずつで実験した。被験者のうち、3 通りの stiffness の値について実験を行ったものは 3 名、{0.25,

表 1 実験条件一覧

Table 1 Experimental conditions. The same subjects conducted experiments with stiffness = {0.25, 0.375}. Six subjects out of nine were new in the experiment with stiffness = 0.5.

Width w (mm)	Stiffness (N/mm)	start height in ascending experiment (mm)	start height in descending experiment (mm)	N
5, 10, 20, 30, 40	0.25	0.0, 0.1, 0.2	1.2, 1.4, 1.6 ($w=5, 10$) 2.2, 2.4, 2.6 ($w=20$) 3.2, 3.4, 3.6 ($w=30$) 4.2, 4.4, 4.6 ($w=40$)	9
	0.375			9
	0.5	0.1, 0.2, 0.3 ($w=5, 10$) 0.1, 0.2, 0.3 ($w=20$) 0.2, 0.3, 0.4 ($w=30$) 0.3, 0.4, 0.5 ($w=40$)		9 (3+6 new)

0.375} N/mm の 2 通りについてのみ実験したもの 6 名, {0.5} N/mm の場合についてのみ実験したもの 6 名, であった。

4. 実験の結果

4.1 測定された形状の高さ h

各系列・各条件について 3 回の試行で得られた形状高さ h の中央値を, その被験者のその系列・条件下での代表値とし, 各条件について上昇・下降系列の結果を平均した値を測定値とした。図 5 に, 各条件下で得られた h の代表値 (2 系列)・測定値 (2 系列の平均) と, 測定値についての回帰直線のグラフを示す。なお, 「95%ile」(パーセンタイル) 値とは, 「この値以下では, 被験者の 95% 以上が平面であると感じる」値である。このグラフから, 以下を読み取ることができる。

- 形状幅 $w = 20$ mm を境に, 回帰直線の傾きが明らかに異なる。
- 幅 w が 20 mm 以上では, 高さは stiffness の値にはよらず, w のみに依存するといえる ($F(2, 72) = 23.4, p < 1.4 \cdot 10^{-8}$)。また, この場合の回帰直線 (一点鎖線) は, 共分散分析により傾き・切片とも同一であるといえる ($p < 0.85$)。
- 幅 w が 20 mm 以下では, 20 mm 以上の場合に比べて回帰直線の傾きが緩やかになっている。
- 幅 w が 20 mm 以下では, 形状高さ h が, stiffness = 0.25 N/mm では約 0.8 mm, 0.375 N/mm では約 0.6 mm 近辺の値で, それぞれほぼ一定となっている。また, stiffness = 0.5 N/mm では, h は一定値ではないが回帰直線の傾きは緩やかで, y 切片も 0 ではない。

4.2 呈示された反力と速度の大きさ

呈示反力の大きさおよびカーソル速度の絶対値 (以降, 速度と記す) は, 各試行・各計測点で 10~20 回ずつ計測された。速度は, 同一被験者・同一条件下では, 計測点によらずほぼ一定であった。呈示反力は, $x = 0$ の点, すなわち山形をした刺激形状の山の頂点部分での値が他の 2 点より大きい, 他の 2 点ではほぼ一定であった。これは, 刺激形状の存在する領域では, 被験者がカーソルを刺激形状にほぼ一定の力で押しつけた状態で, ほぼ等速度で左右に往復させて刺激形状の山を触っていたと解釈するのが自然であろう。

被験者間・実験条件間での比較のため, 各被験者ごとに, 形状高さの代表値を与える試行での $x = 0$ 点における呈示反力および速度の平均値を, その被験者・実験条件での代表値とした (図 6, 図 7)。各 stiffness で分散分析した結果, 被験者間の差が大きいこ

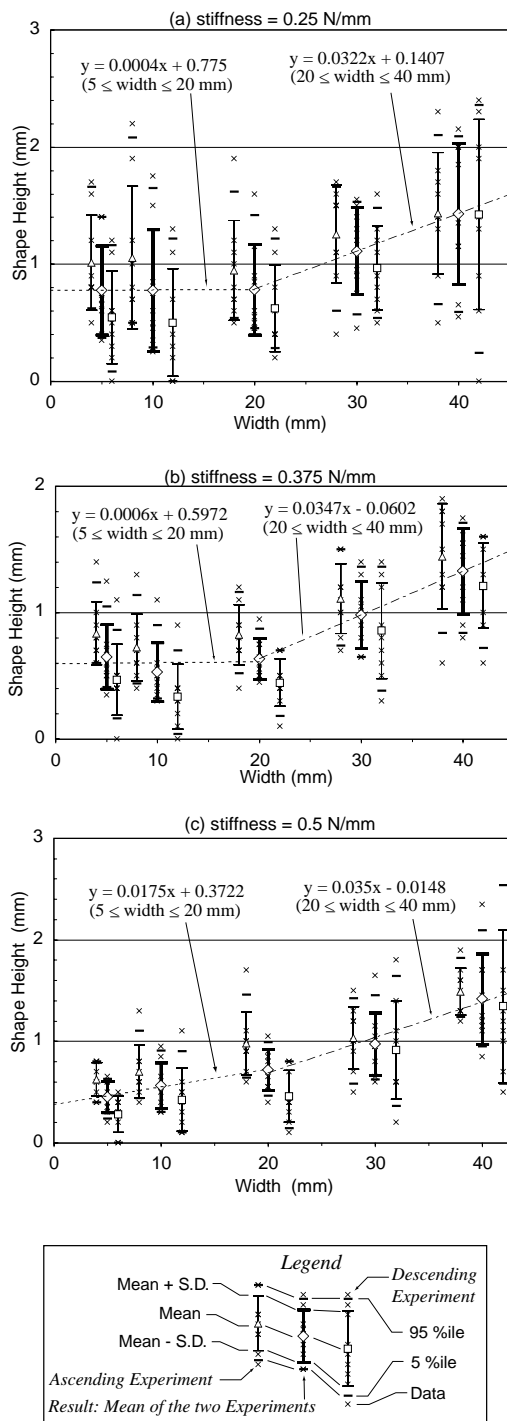


図 5 実験結果 (形状の高さ)

Fig. 5 Results. Regression lines ($w \geq 20$ mm) are statistically not different ($p < 0.85$).

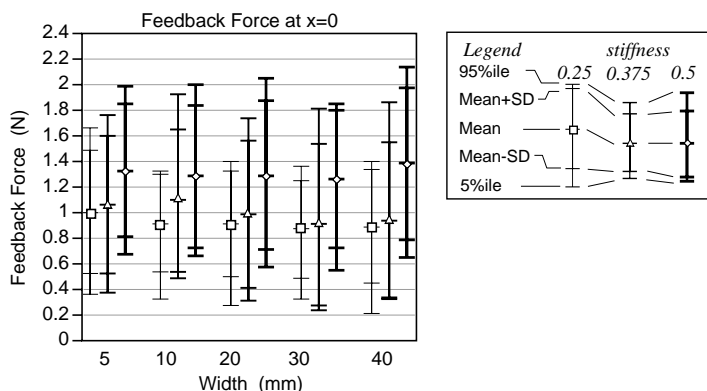
図6 $x = 0$ での提示反力の大きさ

Fig. 6 Feedback force at $x = 0$. Stiffness is statistically significant.

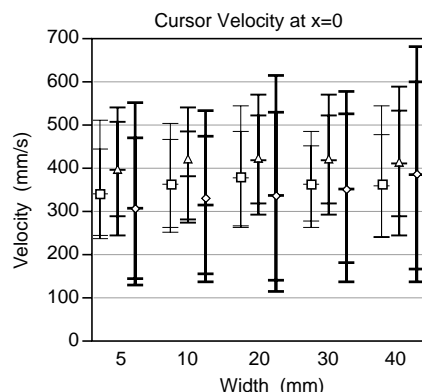
図7 点 $x = 0$ でのカーソル移動速度の大きさ

Fig. 7 Magnitude of cursor velocity at $x = 0$. Stiffness is statistically significant.

とが示された ($F(4, 40) = 0.17 \sim 0.25$, $p < 0.9$). 提示反力に関する刺激形状の幅 w ($5 \leq w \leq 40$ mm の 5 水準) と stiffness (3 水準) を因子とした二元配置分散分析の結果, w および交互作用は影響しているとはいえない (w : $F(4, 120) = 0.19$, $p < 0.94$ および交互作用: $F(8, 120) = 0.09$, $p < 0.99$), stiffness は 1%水準で有意に影響しているといえる ($F(2, 120) = 6.97$, $p < 0.01$). また, w と stiffness を因子とした速度に関する二元配置分散分析の結果, 各因子・交互作用とも 5%水準では影響しているとはいえない (w : $F(4, 120) = 0.34$, $p < 0.84$, stiffness: $F(2, 120) = 2.45$, $p < 0.09$, および交互作用: $F(8, 120) = 0.14$, $p < 0.99$).

5. 考察と将来の課題

5.1 平面知覚の要因と絶対閾

(1) 形状の幅 w が 20~40 mm の範囲

この範囲においては, 形状高さの絶対閾の回帰直線が stiffness によらず同一であるということなので, その範囲内の測定値全体について改めて回帰直線を求めると,

$$h = 0.034 \cdot w + 0.022$$

となる. これが, この範囲内の絶対閾の予測式である. したがって, 3.1 節に示した仮説 (1) があてはまる.

さて, この絶対閾の回帰直線の傾きは, 実は Gordon らが定義した刺激形状の「勾配」(円筒面の頂点までの高さを触知面の幅の半分で割った値)と同じものである. したがって, 本実験結果から, この範囲での「勾配」の絶対閾が約 0.034 であると考えられる. これは, Gordon らの計測した「勾配」の絶対閾 0.009 に比べるとかなり大きいようであるが, μm オーダーともい

われるヒトの指の空間分解能と, 本実験で使用した力覚提示装置の空間解像度 (0.07 mm) には少なくとも 2 桁の差があること, また本実験では点接触という制約内で変位情報のみを手がかりとした形状知覚であることを考えれば, それほどかけ離れた数字ではないと思われる. ただし, 変位情報に基づいた形状知覚であったという点については, Fukui ら⁸⁾が周期的で滑らかな形状において, 周期長が 20 mm より大きい形状では変位情報が反力方向よりも重要な知覚手掛かりとなることを報告していることから, この形状幅の範囲内 (20~40 mm, 周期長に直すと 40~80 mm) では反力方向の影響はさほど大きくない可能性も大きい.

いずれにせよ, 滑らかな山型が 1 つある形状知覚においては, 形状の「勾配」が絶対閾を決める重要な要因であることは間違いなしと考えられる.

(2) 形状の幅 w が 20 mm 以下の場合

いずれの stiffness についても, 回帰直線の y 切片が 0 になっていないことから, 形状幅が 0 付近でも絶対閾が 0 にはならないこと, すなわちパルス状の刺激形状に対しても絶対閾が 0 以上の何らかの値をとることが示唆されていると考えられる. そこで, 刺激形状幅 $\{1, 2.5\}$ mm, stiffness = 0.5, 被験者数 9 名の条件で追加実験を行った. 得られた絶対閾は図 5(c) の回帰直線によく合致しており, 回帰直線への影響はなかった. 実際に刺激形状を触った被験者の印象は「平面の中に何かあるらしいが, 埋もれてしまっていて, ちょっと触っただけではよく分からない」というものであった. したがって, さらに幅が小さくなくても, やはりある程度の高さがなければ知覚されない可能性は十分ある. そこで, 根拠は明確ではないが, 各回帰直線はいずれも傾きが 0 以上であることから, 各 y

切片の値にそれぞれの stiffness の値を乗じたものの中で最小の値を f_a とすれば、それをこのパラメータ範囲内での平面知覚の限界値として利用することができるであろう。本実験の結果では、 f_a を与えるのは $\text{stiffness} = 0.5 \text{ N/mm}$ の場合で、 $f_a = 0.18 \text{ N}$ となる。

本実験の結果からは、上記以外の明確な関係は見出すことができなかった。また、なぜ形状幅 20 mm を境に絶対閾と形状定義パラメータとの関係に差が出るのかも不明である。今後、異なる刺激形状やより細かい形状定義パラメータの値について実験して明らかにしていく必要がある。

5.2 被験者が形状を触る力

図 6 の実際に被験者に呈示された反力の大きさは、被験者が実際に形状を押していた力に等しい。この反力を与えるカーソルの刺激形状へのめり込み深さは、 $\text{stiffness} = 0.5$ の場合で 1.4 mm (5%ile 値) ~ 4.0 mm (95%ile 値) という、かなり大きな値である。本実験では、被験者が押す力が一定であれば、刺激形状は -Y 方向に平行移動するだけで形は変わらないが、形状によっては、形状内に侵入したカーソルの軌跡と、本来の形状とが一致しない場合がある。そのようなカーソル軌跡と形状とのずれが、形状知覚にどのような影響を及ぼすかは、今後の研究課題の 1 つである。

今回、呈示反力と stiffness の関係を定量化するには至らなかったものの、stiffness が大きい (すなわち形状が「硬い」) ほど、被験者が形状を押す力も大きくなる傾向は明らかであった。より「硬い」形状はより「しっかりしているので強く押しても大丈夫である」という印象を与えるもののようである。予備実験段階で、stiffness が 0.5 より大きい条件下では、しばしば計算される反力が呈示装置の限界を超えて実験が中断したため、今回の実験では stiffness を 0.5 以下としたが、それが裏づけられた格好である。呈示反力と stiffness の関係を定量化するには、今後、より多くの stiffness の値について調べる必要がある。

5.3 被験者が形状を触る速さ

カーソル移動速度と結果の形状高さの相関係数は 0.2 以下で、ほぼ無相関であった。つまり、カーソルを速く動かす場合ほど絶対閾が小さくなる (3.1 節の仮説 (2)) ということはないようである。これは、被験者が自分の意思でカーソルを動かして形状を触る能動触実験であったため、被験者が形状を知覚する際に、感じられた反力・変位情報を自分の手の速度で補正しているか、あるいは関節角度などの速度に依存しない位置情報のみを利用しているためであると考えられる。

5.4 計測値の質に関する考察

本実験で得られたデータの仮想形状呈示への適用を考えるにあたり、以下の 2 点に留意する必要がある。

第 1 は、本実験で用いた極限法の性質に由来する計測値の質である。極限法は閾値計測に多用される計測法であるが、一般に、被験者に実験の内容 (測定パラメータおよび実験パラメータ) が分かること、各系列内で呈示される刺激は強度が等間隔で大小の順序が固定していること、またそれが被験者に分かるため次の刺激を予測できてしまうこと、などの問題点があることが知られている。本実験では、被験者は「平面かそうでないかをどの高さで区別できるかを計測する実験である」こと、「高さが低いほど敏感であることを示す」ことを十分に知っており、それがバイアスとなって知覚判断がより厳しくなっている (すなわち測定値が本来の値より小さくなっている) 可能性が高い。

第 2 は、視覚との関係である。一般に、視覚とその他の感覚モダリティを比較すると視覚が優位であり、触覚・力覚も例外ではない。つまり、形状を知覚する場合に視覚情報と力覚情報を同時に呈示すると、ヒトは視覚情報に頼って力覚情報をあまり利用しなくなる。もし視覚情報と力覚情報の間に矛盾があれば視覚情報が優先し (ヒトは視覚情報を信じて力覚情報を無視しがちである)、また視覚情報と力覚情報が最初はかけ離れているように見えても両者の間に一定の変換ルール (左右反転や寸法比率など) があれば、視覚情報に合わせるように力覚情報の知覚が変化することが分かっている (視覚-運動学習と呼ばれる)。本実験では、視覚呈示なしで力覚情報のみを利用しているため、かなり厳しい計測条件であり、測定値の信頼性は高いといつてよい。

5.5 力覚による形状呈示への適用

本実験で得られた閾値は、分かりやすいというと、「角のない滑らかな曲面が、Force Shading などにより反力方向も滑らかに呈示された場合、50% のヒトが平面と区別できない範囲」を表すものである。すなわち、今回得られた閾値内の曲面は、平面として力覚呈示してかまわないという目安である。

たとえば自由曲面を多面体で近似する場合、面にゆるやかなうねりがあっても、それが形状幅 20 ~ 40 mm の範囲で高さが閾値内であれば、忠実に近似する必要はないことになる。また、広い面の中に滑らかな微細な「しわ」状のつぶりが 1 本あった場合、力覚呈示する場合の stiffness にそのしわの高さを乗じた値が 5.1 節で計算した f_a の値 (1.8 N) 以内であれば、そのしわの長さによらず無視してよい。ただし、そのよ

うなしわであっても、複数並んでいるような場合は、本実験の条件と異なるため対象外である。非常に多数の多面体から構成される物体の面の数を削減する場合も同様に、ゆるやかなうねりの成分や「しわ」に相当する出っぱりを除くことができる。

また別の適用例として、消えては困る力覚形状を残す場合が考えられる。形状や力覚フィードバックのあるボタンのついた操作パネルなどを、スケーリングにより縮小した場合に、その大きさや発生できる反力の最大値が本実験結果の閾値内に入ってしまうと、その形状や操作ボタンは触知できなくなってしまう。したがって、縮小されてもきちんとして力覚呈示される必要のある形状要素や操作ボタンなどは、最低でも、本実験で示された閾値の範囲外の大きさあるいは呈示反力の範囲を保つように設計する必要がある。これはCGで図形が1ピクセル以下に縮小されて画面から消えてしまうと選択・変形などの操作ができなくなるので、ある一定の大きさ以下にならないよう設計するのに類似している。

形状を力覚呈示すると同時に視覚情報も呈示するのであれば、前述の視覚優位性を利用して、より力覚呈示を粗くすることが可能である。しかし、その場合に力覚情報に許される誤算範囲がどれだけになるかは、今回の実験範囲からはずれるので、今後の研究を待たねばならない。

5.6 今後の課題

まず、刺激形状の形が、知覚要因・絶対閾へどの程度影響するかを調べる必要がある。今回の実験では凸型の刺激形状を用いたが、凹型の場合や、山が複数並ぶような形状ではどうなるか、また角のある C^1 不連続形状ではどうかなど、課題は多い。また、曲面の呈示という工学的応用の観点からは、曲率を持つ形状での知覚要因と絶対閾の計測が急がれる。

刺激形状の方向や位置の影響も考えられる。本実験では水平面を呈示したが、角度により閾値が異なることは十分予想される。Pontら¹⁵⁾により、円筒面を手で触る実験で角度による影響があることが報告されているが、ヒトの手の構造からも、形状と手の相対位置により閾値が変わるのは当然であろう。DavidsonとGordonらで「勾配」の絶対閾が異なるのも、図形の角度の違いによるものである可能性がある。

また、本実験では変位情報のみによる形状知覚特性を求めたが、反力方向のみが変化するForce Shadingでの絶対閾の計測と、変位情報との関係を調べ、形状補間アルゴリズムなどへの積極的な利用を考える必要がある。さらに、力覚呈示装置の制御方式や空間解像

度と呈示される形状の知覚特性との関係を明らかにしていくことが重要である。

6. おわりに

点接触型の力覚呈示装置 PHANToM を用い、反力方向が平面と同様である条件下で、変位情報に基づいた平面形状知覚の要因となるパラメータとその絶対閾を求める実験を行った。平面の中央に幅 $2w$ 、高さ h のなだらかな山型のある形状を呈示したところ、形状の硬さ *stiffness* が $0.25 \sim 0.5 \text{ N/mm}$ 、 w が $20 \sim 40 \text{ mm}$ の範囲では形状高さの絶対閾 $h_{at} = 0.034 \cdot w + 0.022$ 以下である場合に、また w が $5 \sim 20 \text{ mm}$ の範囲では形状の高さ h に *stiffness* を乗じた値が 0.18 N 以下であれば、平面であると知覚されることが分かった。この結果は、多角形近似など離散的に表現された曲面を滑らかに触覚呈示する際の滑らかな補間条件の上限として利用可能である。今後、形状の違いによる閾値の変化や反力方向変化との関係について研究し、力覚による形状知覚特性を明らかにすると同時に、有効な形状補間手法の開発に結び付けたいと考えている。

謝辞 本実験にご協力いただいた飯田恒夫氏(株式会社スプリング)および Robert W. Lindeman 氏(The George Washington University, U.S.A.)に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Burdea, G.C.: *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons (1996).
- 2) Salisbury, K., Brock, D., Massie, T., Swarup, N. and Zilles, C.: Haptic Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Objects, *Proc. ACM 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics* (1995).
- 3) 大山, 今井, 和気(編): 新編感覚知覚ハンドブック, 誠信書房 (1994).
- 4) Minsky, M., Ouh-Young, M., Stillel, O., Brooks, F. and Behensky, M.: Feeling and Seeing: Issues in Force Display, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.235-243 (1990).
- 5) Morgenbesser, H.B. and Srinivasan, M.A.: Force Shading for Haptic Shape Perception, *Proc. ASME Dynamics Systems and Control Division*, pp.407-412 (1996).
- 6) Foley, J.D., van Dam, A., Feiner, S.K. and Hughes, J.F.: *Computer Graphics - Principles and Practice*, Addison-Wesley, Reading, MA (1990).
- 7) Fukui, Y.: Bump Mapping for Force Display,

- Salisbury, J.K. and Srinivasan, M.A. (Eds.), *Proc. 1st PHANTOM Users Group Workshop*, M.I.T. Artificial Intelligence Laboratory Technical Report AITR-1596 (1996).
- 8) Fukui, Y., Yamashita, J. and Shimojo, M.: Perceptual Performances of Force Rendering Methods, *Proc. IEEE International Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, pp.1401-1405 (1997).
- 9) Ruspini, D., Kolarov, K. and Khatib, O.: The Haptic Display of Complex Graphical Environments, *Proc. ACM SIGGRAPH97* (1997).
- 10) Lakatos, S. and Marks, L.E.: Haptic underestimation of angular extent, *Perception*, Vol.27, No.6, pp.737-754 (1998).
- 11) Gordon, I.E. and Morison, V.: The haptic perception of curvature, *Perception & Psychophysics*, Vol.31, No.5, pp.446-450 (1982).
- 12) Davidson, P.W.: Haptic Judgements of Curvature by Blind and Sighted Humans, *J. of Experimental Psychology*, Vol.93, pp.43-53 (1972).
- 13) 島田, 日隈, 福井, 山下: 仮想形状の力覚表現における知覚特性, 情報処理学会インタラクシオン 2000 予稿集 (2000).
- 14) Massie, T.H. and Salisbury, J.K.: The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, *Proc. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (1994).
- 15) Pont, S.C., Kappers, A.M. and Koenderink, J.J.: The influence of stimulus tilt on haptic curvature matching and discrimination by dynamic touch, *Perception*, Vol.27, No.7, pp.869-880 (1998).

(平成 11 年 10 月 30 日受付)

(平成 12 年 4 月 6 日採録)



山下 樹里 (正会員)

1988 年東京大学理学部情報科学科卒業。同年通商産業省工業技術院製品科学研究所 (現生命工学工業技術研究所) 入所。1994~1995 年米

国ワシントン大学 Human Interface Technology Lab. 訪問研究員。形状変形操作インタフェース, 触覚・力覚呈示技術, 内視鏡手術支援システム等の研究に従事。日本人間工学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE Computer Society 各会員。



福井 幸男 (正会員)

1973 年京都大学工学部精密工学科卒業。同年 (株) 日立製作所入社。1980 年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士課程修了。同年通商産業省工業技術院製品科学研究所入所。1998 年筑波大学電子・情報工学系教授。工業技術院生命工学工業技術研究所人間環境システム部併任。ヒューマンインタフェース, 設計支援等の研究, 教育に従事。電子情報通信学会, 日本人間工学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM 等会員。



森川 治 (正会員)

1977 年東京工業大学理学部情報科学科卒業, 1982 年同大学院理工学研究科博士課程修了, 理学博士。同年, 通商産業省工業技術院製品科学研究所入所。現在, 生命工学工業技術研究所主任研究官。ヒューマンインタフェース, 人間工学, 認知科学の研究に従事。



佐藤 滋

1982 年東京大学工学部産業機械工学科卒, 1984 年同修士課程修了, 通商産業省工業技術院製品科学研究所入所。1992 年同主任研究官。1993 年工業技術院研究所再編により製品科学研究所廃止, 生命工学工業技術研究所主任研究官, 現在に至る。