

接平面近似円筒面の力覚補間呈示における「なめらかさ」

山下 樹里^{*1} 福井 幸男^{*1,*2} 森川 治^{*1} 佐藤 滋^{*1}

Haptic "Smoothness" of Force-Shaded, Polygonized Cylindrical Surface

Juli Yamashita^{*1}, Yukio Fukui^{*1,*2}, Osamu Morikawa^{*1}, and Shigeru Sato^{*1}

Abstract: Haptic/force feedback device is an important three-dimensional haptic display whose application fields include computer aided design (CAD). For CAD applications, smooth interpolation of polygonized surfaces with "force shading" technique is very useful for maintaining high haptic-rendering refresh rates by reducing the cost associated with computing the exact collision point of the cursor and the object. The resolution requirement of such polygonization, defined by human sensory thresholds, is unknown. We have conducted experiments to measure the human absolute threshold values on smoothness of cylindrical surfaces approximated by tangent planes, which are interpolated in different ways. Two kinds of PHANTOMs of different positional resolution (0.03mm and 0.07mm) were used as force feedback devices and cylindrical surfaces of radius 30 - 120 mm have been investigated. The results have shown that, (1) when reaction force direction is force-shaded, the absolute threshold is mainly defined by the maximum difference between the polygonal approximation and the true surface and stiffness, and (2) positional resolution of the equipment does not affect the threshold values significantly.

Keywords: Force feedback device, Smooth surface interpolation, Virtual shape perception, Force shading

1. はじめに

3次元触覚・力覚呈示技術は、触覚・力覚情報をユーザに呈示するための技術で、仮想現実感技術(Virtual Reality, VR)における重要な研究分野のひとつである。マウス・CRT等の従来の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、特に外科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], 中でも「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、そのペンの先端の一点(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 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 Rendering[2]と呼ぶ。CGでなめらかな動画を呈示するためには20~30 Hz以上のフ

レーム更新レートが必要となるが、なめらかで安定したHaptic Renderingを実現するためには1kHz以上の高い制御周波数が要求されるため、リアルタイムCG以上にRenderingの効率化が重要となる。力覚呈示すなわち反力呈示のためには、計算機内部の仮想物体データと力覚カーソルとの干渉計算が不可欠であるが、CADで利用されるNURBSなどの数学的に定義された複雑な自由曲面や、レンジファインダなどで得られる膨大なポリゴン数のデータでは、1ms以内に正確な干渉計算を終了することが困難な場合が多いという問題がある。

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、なめ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、隣接する近似平面の境界で発生する反力方向の不連続性を補間するというもので、Force Shadingと呼ばれる[3-5]。より少ない計算コスト、すなわちより少ない数の多面体で、しかも元の曲面と変わらない形状を、なめらかに呈示できる補間アルゴリズムがより良いアルゴリズムである。しかし、その補間の要求精度を決めるヒトの触覚・力覚による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。

そこで本研究では、接平面で近似した円筒面を力覚

*1: 生命工学工業技術研究所 人間環境システム部

*2: 筑波大学 電子・情報工学系

呈示装置で補間呈示した場合の絶対閾を実験的に求め、ヒトが曲面をなめらかであると判断する場合にどんなパラメータが寄与しているかを推定したので報告する。

2. 関連研究

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。しかし既存の心理物理実験では、盲人への情報呈示を目的とした点字など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(例えば [6])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[7] 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、また円筒面間の弁別閾は曲率が大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。また、Pont ら [8] は、曲率の知覚の絶対閾が刺激形状の傾きに影響されることを示した。

一方、点接触型力覚呈示装置を用いた形状知覚特性に関しては、Morgenbesser ら[4] が Force Shading による形状の種類判別実験を行い、Force Shading により三角柱や台形状が円筒面に分類されうること示した。また、Fukui ら[9,10] による Force Shading と自然な反力呈示での等感覚点を求める実験によれば、周期的でなめらかな形状では、形状の周期長が短いほど Force Shading の影響が大きくなることなどが示されている。形状知覚の絶対閾については、島田ら [11] が断面が三角形の山型刺激形状を自然に呈示した場合と Force Shading のみで呈示した場合について、また山下ら[12] がなめらかな山形の形状について、平面との弁別閾として実験的に求めている。いずれも、平面ではないと知覚される形状の絶対閾は形状の高さを底面の幅の半分で割った「勾配」、形状

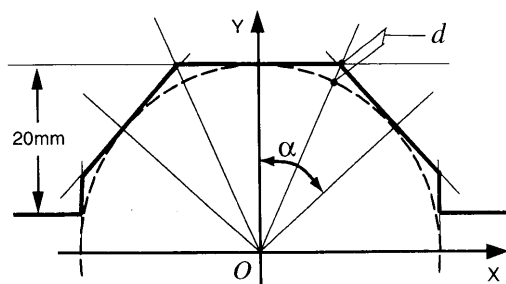


図1 刺激形状の断面図

Fig.1 Sectional image of the stimulus shape.

のかたさ、そして反力呈示方法に依存することが示されている。しかし、補間呈示された曲面についてその「なめらかさ」の絶対閾を定量的に計測した例はない。

3. 実験

3.1 目的

点接触型力覚呈示装置を用いて、補間した接平面近似により表現される曲面形状知覚における補間の要求精度を定量的に求めるため、異なる補間方法・半径の円筒面について「なめらかな円筒面であると感じられる」場合とそうでない場合を弁別する閾値(絶対閾)を計測して「なめらかさ」を定義するパラメータを推定し、それらと絶対閾との関係の定式化を試みた。

3.2 刺激形状

刺激形状の断面を図1に示す。接平面近似された円筒面の一部が、水平面の中央に高さ 20mm 突出している。円筒の中心軸は Z 軸(被験者から見て奥行き方向)に並行である。ひとつの接平面が占める中心角度 α を、近似の粗さ指標パラメータとする。

3.3 実験装置

力覚呈示装置として PHANTOM Haptic Interface 1.0

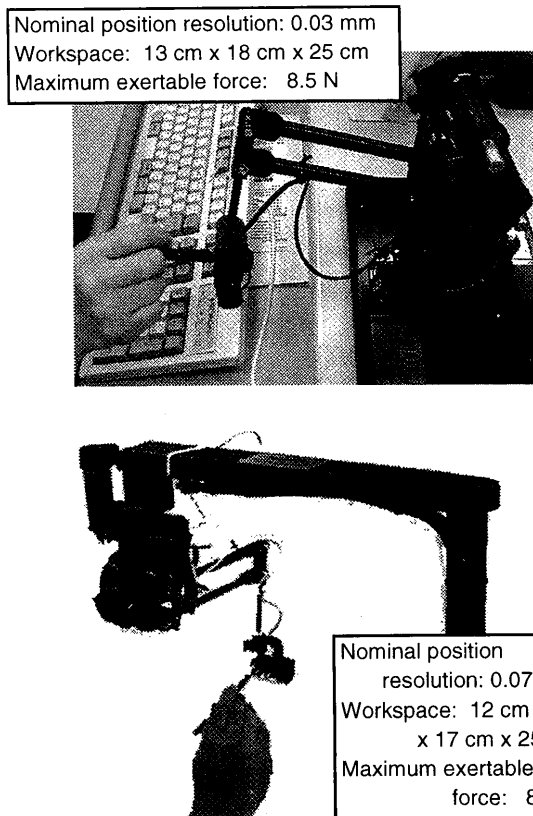


図2 実験装置と仕様(上: PHANTOM A-type, 下: T-type)

Fig. 2 Equipment (PHANTOM 1.0) Top:A-type, Bottom:T-type

A-type および T-type (SensAble Technologies, Inc., U.S.A.)[13] にペン型の柄 (Instrumented Gimbal) を取りつけたものを用いた (図2). 被験者は椅子に座り, 右肘を椅子のひじ掛けにおいて, 右手で本装置のペンを持つ. ペンの先端部の位置が3次元カーソル位置として計測され, 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, 明らかに多面体であると感じられる刺激形状の例と, 充分細かく補間されなめらかな円筒面であると感じられる形状と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下さい」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, 実験装置がオーバーヒートして実験が続行できなくなるためである. なお, カーソル速度と絶対閾には相関がないと予想されることと[12], カーソル速度の分布データ取得のため, 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. 被験者は呈示された刺激形状を触り, 「なめらかな円筒面である」と感じた場合は「はい」と書かれたキーを, そうでない場合は「いいえ」と書かれたキーを押すと, 次の刺激形状が呈示される. 上昇系列では, 誰でもなめらかな円筒面であると感じられる形状から, より粗い補間形状を順次呈示してゆき, 被験者が「なめらかな円筒面ではない」と判断した時点で計測を打ち切り, その時の近似の粗さ角度を計測値とした. 下降系列では, 明らかに多面体であると感じられる粗い(角度 α の大きい)刺激形状から, より細かい補間形状を順次呈示してゆき, 被験者が「なめらかな円筒面である」と判断した時点で計測を打ち切り, その時の近似の粗さ角度を計測値とした. 今回の

実験では, 使用した力覚呈示装置 A-type では空間解像度 (カタログ値) が 0.03mm であることから, 刺激形状の変化量を 1 度 (半径 120mm, 補間中心角度 4~5 度付近での形状変化最大量が約 0.04mm), T-type では空間解像度が 0.07mm であるため刺激形状の変化量を 3 度 (半径 30mm, 補間中心角度 4~7 度付近での形状変化最大量が約 0.04mm) とした. また, 各条件で3回の試行を行った.

3.5 実験パラメータ

表1に実験条件一覧を示す. 反力は, 単純なバネモデルを基本として, 下記のように計算した.

(実験 A) 補間しない接平面のみの場合について, 半径 30mm, stiffness 0.3 の円筒面で, 形状の近似の粗さ角度 α を計測対象パラメータとして実験した.

カーソル位置から最も近い接平面への距離を与えるベクトルを \mathbf{L}_1 , stiffness を s とすると, 反力ベクトル \mathbf{F} は下記のように計算される. 反力方向は不連続, 反力を返す位置 (すなわち変位情報) については C^0 連続である.

$$\mathbf{F} = s \cdot \mathbf{L}_1 \quad \text{--- (Eq. 1)}$$

ただし, \mathbf{F} の Z 成分は常に 0.

この反力呈示方法ではエッジのはっきりした多角柱が呈示されるが, 角度 α が充分小さくなると, なめらかな円筒面として知覚されるようになる.

(実験 B) 線形補間の場合について, 半径 30mm, stiffness 0.3 の円筒面で, 形状の近似の粗さ角度 α を計測対象パラメータとして実験した.

カーソル位置 \mathbf{P} から最も近い接平面への距離を与えるベクトルを \mathbf{L}_1 , \mathbf{P} と \mathbf{L}_1 の成す角を θ_1 , それに隣接してカーソル位置に2番目に近い接平面への距離を与えるベクトルを \mathbf{L}_2 , \mathbf{P} と \mathbf{L}_2 の成す角を θ_2 , stiffness を s とすると (図3), 反力ベクトル \mathbf{F} は下記のように計算される. 反力方向は C^1 連続, 変位情報については C^0 連続である.

$$\mathbf{F} = \frac{s \cdot \mathbf{L}_1 \cdot \theta_2 + s \cdot \mathbf{L}_2 \cdot \theta_1}{\alpha} \quad \text{--- (Eq. 2)}$$

ただし, \mathbf{F} の Z 成分は常に 0, かつ $\theta_1 + \theta_2 = \alpha$.

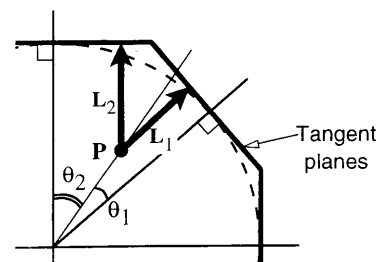


図3 線形補間説明図
Fig. 3 Linear force shading.

表1 実験条件一覧

Table 1 Experimental conditions.

Experiment	Radius (mm)	Stiffness (N/mm)	Interpolation Type	N
A	30	0.3	None	14 (A-type) 14 (T-type)
B	30	0.3	Linear force shading	14 (A-type) 14 (T-type)
C	30, 60, 90, 120	0.3, 0.5	Cylindrical force shading	9 (A-type) 10 (T-type)

この補間方法では、角度 α が大きいとエッジのややはっきりしない角柱もしくは表面に波状のうねりのある円筒面が知覚されるが、 α が充分小さければなめらかな円筒面として知覚されるようになる。

(実験 C) 反力の方向は本来の円筒面と同様で、反力の大きさは直近の接平面について計算される「円筒補間」の場合について、4通りの半径と2通りの形状の「かたさ」の円筒面で、形状の近似の粗さ角度 α を計測対象パラメータとして実験した。

カーソル位置の x, y 成分を表す2次元ベクトルを $\mathbf{P} = (p_x, p_y)$ 、カーソル位置から最も近い接平面への距離を L 、stiffness を s とすると、反力ベクトル \mathbf{F} は、

$$\mathbf{F} = \left(\frac{s \cdot L \cdot p_x}{|\mathbf{P}|}, \frac{s \cdot L \cdot p_y}{|\mathbf{P}|}, 0 \right) \quad \text{--- (Eq. 3)}$$

で計算される。従って、この補間方法は、反力方向に関しては C^∞ 連続であるが、変位情報については C^0 連続である。角度 α が大きければ、少し丸みを帯びた角柱が知覚されるが、 α が小さくなるとなめらかな円筒面として知覚されるようになる。

3.6 被験者

右利きの成人。被験者数は表1に示す通りであった。

表2 半径 30 mm, stiffness 0.3 N/mm での実験結果(補間の粗さ角度; 単位:度) および刺激呈示装置の空間解像度の影響の検定結果

Table 2. Result absolute threshold angles (unit: degree) for 30mm radius and 0.3N/mm stiffness. The effect of positional resolution of force feedback device are tested by t -test.

Shading condition		PHANTOM A-type	T-type	t -test
A. None	- Mean	7.5	6.6	NS ($p < 0.5$)
	- SD	2.9	2.3	
	- N	12	12	
B. Linear	- Mean	11.2	8.9	*
	- SD	2.1	2.7	
	- N	12	13	
C. Cylindrical	- Mean	10.6	9.6	NS ($p < 0.4$)
	- SD	1.5	2.7	
	- N	8	8	

表3 半径 30 mm, stiffness 0.3 N/mm での補間条件による絶対閾(角度)の差に関する検定結果

Table 3. Results of t -tests comparing absolute thresholds for force shading conditions.

t -test	A-type	T-type
A. None - B. Linear	**	*
A. None - C. Cylindrical	**	*
B. Linear - C. Cylindrical	NS ($p < 0.4$)	NS ($p < 0.5$)

<凡例> (表2・3共通)

<Legend> (Table2 & 3)

* : Statistically significantly different at 5% level

** : Statistically significantly different at 1% level

NS : Not significantly different

4. 結果

上昇・下降系列を含む各試行条件下で測定された3つの近似の粗さ角度 α の中央値を、その試行条件下での代表値とした。さらに、各補間方式・半径・形状かたさ条件について、上昇・下降各系列の代表値の平均値を、その被験者のその条件についての代表値とした。さらに、各条件について各被験者の代表値の平均 $\pm 1.5 \times$ 標準偏差の範囲外のデータを除外し、残ったデータについて改めて平均・標準偏差を求めた。従って、以降に示す結果の被験者数 N が表1と異なっていることがある。

表2に、実験 A, B, および半径 30mm, stiffness 0.3 N/mm の場合の実験 C の結果(補間の粗さ角度 α , 単位:度)を示す。これが、各補間条件における「なめらかさ」の限界を示す絶対閾である。刺激呈示装置の空間分解能の影響を見るため、各補間条件について装置の種類ごとの平均値に関する分散が等しくないと仮定した t 検定を行ったところ、線形補間について

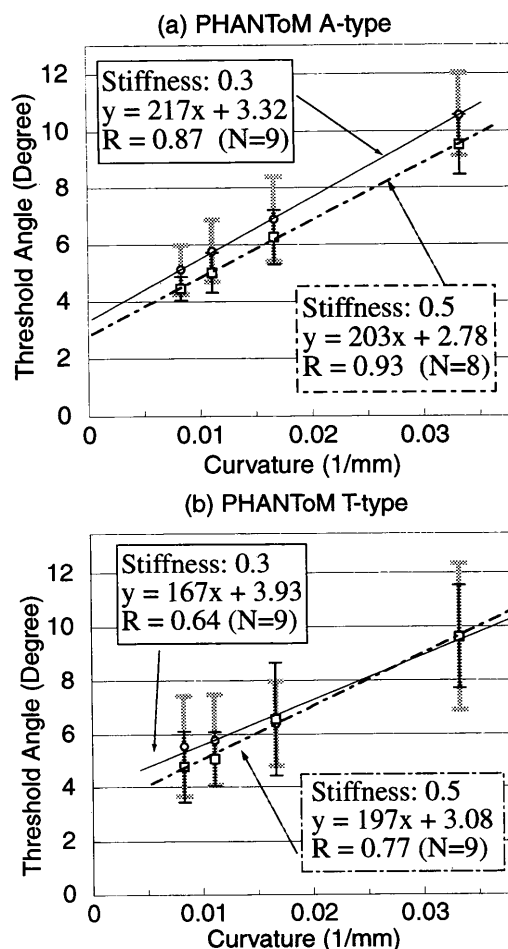


図4 実験Cの結果 (a) PHANTOM A-type, (b) T-type.

Fig. 4 Results of experiment C. (a) PHANTOM A-type, (b) T-type. Error bars show SD. Threshold angles are proportional to the curvature.

は 5% 水準で有意差が見られたが他の2条件では差はなかった。

表 3 は, 表 2 の結果について補間条件の間での差を見るため, 平均値に関する分散が等しくないと仮定した t 検定を行った結果である。A-type, T-type いずれの力覚呈示装置においても, 補間無し条件下での結果と 2 種の Force Shading による補間条件下での結果の間には, 1~5% 水準で有意差が見られた。しかし, 2 種の補間条件下での結果の間には有意差は見られなかった。

図 4 に, 実験 C の結果を曲率(curvature, 半径の逆数)についてプロットしたグラフを示す。回帰直線から, 絶対閾(角度)が曲率と正の直線相関関係にあり, また形状のかたさ stiffness により決定されていることが読み取れる。この結果は「材質がかたい方が形状を精密に知覚できる」ことを示しており, 直感に反しない。ただし, T-type では A-type に比べて stiffness の影響ははっきりしていない。これは T-type では刺激形状の変化量が 3 度単位であったこと, また装置の空間解像度が粗いことなどによるものと推測される。

各試行・被験者について, $X=0$ の点における呈示反力の大きさとカーソル移動速度の平均を求めたところ, どちらも刺激形状の半径と正の直線相関関係が見られた($R=0.5 \sim 0.7$ 程度)。呈示反力は $0.8 \sim 1.0$ N, カーソル速度は $100 \sim 300$ mm/s の範囲に分布していた。

5. 考察

5.1 円筒補間の絶対閾指標変換の試み

図 4 より, 円筒補間における絶対閾(近似の粗さ角度)が円筒の曲率にはほぼ比例することがわかったが, これを角度以外のより利用しやすい表現に変換することを試みた。

図 1 に示すように, 中心角 α で定義される接平面による補間形状(多面体)と真の円筒面との位置のずれの最大値を d とすると, d は円筒の半径 r および角度 α より次のように計算される。

$$d = \frac{r}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - r \quad \text{--- (Eq. 4)}$$

計測された絶対閾(角度)に対する d と曲率との関係を図 5 に示す。各 stiffness の値について, d は曲率によらずほぼ一定の値であることが読み取れる。従って円筒補間では, 真の円筒面と接平面多角形との位置のずれの最大値 d がこの一定値以下になるとヒトは「なめらかである」と判断していると推定しても差し支えないであろう。例えば d を 0.1mm に設定す

ればほぼ 50% の人が, 0.05mm なら 80% 以上の人が「なめらかである」と判断すると予想される。

5.2 円筒補間の絶対閾指標の応用

本実験で得られた絶対閾は, なめらかな曲面を多面体近似する場合の細かさの目安として有用である。すなわち, 曲面とその近似多角形の位置誤差が前節で得られた値以下になるように設定しておき, その近似多角形を Force Shading 補間呈示すれば, ヒトはなめらかな曲面と感じると考えられる。曲面を拡大・縮小すると曲率が変わるが, 指標 d は曲率に依存しないので, 拡大率 m に対しては d/m として計算すればよい。

また, 本実験で得られた結果は円筒面の補間についての絶対閾であるが, 円筒面以外にも, 線織面のように直線成分を含む曲面を接平面近似・補間呈示する場合には適用可能と考えられる。

5.3 カーソル移動速度の影響

本実験の刺激形状は [12] と異なり周期的であるため, 被験者には力覚的な振動として知覚されている可能性がある。その場合, 振動の周波数はカーソル移動速度に依存し, ヒトの振動知覚特性もまた振動刺激の周波数に依存することがわかっている [14]。そこで, カーソル移動速度の影響を調べるため, 各試行・被験者についてカーソル速度と閾値(角度)より振動周波数を求めたところ, 周波数の平均値は $20 \sim 25$ Hz の間に分布し(SD: $5 \sim 10$ Hz), 刺激形状の半径と弱い負の直線相関関係が見られた。この周波数領域におけるヒトの振動知覚の感度曲線の変化は数 db 以内であるため, 本実験の結果にはカーソル移動速度の影響はあまり無いと考えて良いであろう。

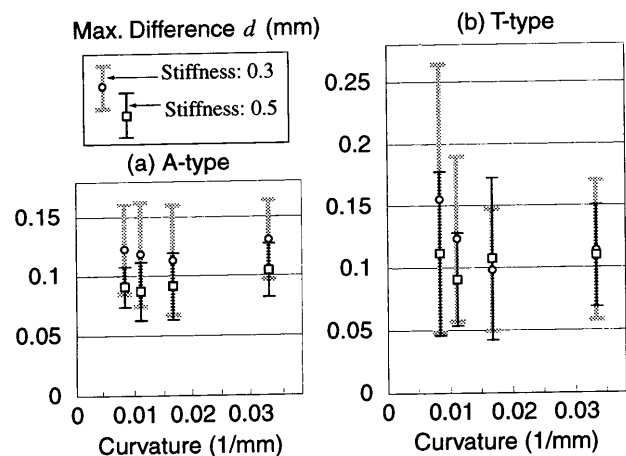


図 5 円筒面と近似多面体との最大距離。(a) PHANToM A-type, (b) T-type.

Fig. 5 Maximum difference between the polygonized approximation and the original cylindrical surface. (a) PHANToM A-type, (b) T-type. The value can be considered almost constant depending on surface stiffness.

5.4 反力呈示方法の影響

表3に示した通り, 空間解像度が同じであれば, 線形補間と円筒補間には差が見られないが, 補間なしの場合とは有意差が検出された. この三種の反力呈示方法では, 反力呈示位置情報に関してはいずれも C^0 連続で共通であり, 反力方向に関してのみ連続性条件が異なる (3.5 節参照). 従って, ここで示された有意差は反力方向の連続性の差を反映していると考えられる. 反力方向の連続性は, 線形補間では C^1 , 円筒補間で C^∞ であることから, 反力方向の連続性が C^1 以上であれば補間方法による差はあまりないものと推測することができる.

5.5 力覚呈示装置の空間解像度の影響

表2に示した通り, 装置の空間解像度による有意差が検出されたのは線形補間のみである. 補間なしの場合は, 接平面の境界で反力方向および大きさが不連続に変化するため, 装置の空間解像度の影響は小さかったと考えられる. また, 円筒補間については既に5.1節で円筒面と近似多角形との最大距離である指標 d を導入し, 0.1 mm 近辺に閾値があることを示した. 線形補間に関しては, 指標 d とその閾値を被験者が実際になぞっていた「等反力面」に適用することで, 装置の空間解像度による有意差を説明することができる.

線形補間では反力方向とその大きさが同時に補間されるため, 一定の呈示反力を与える等反力面の形状はやや複雑である. 図6に等反力面の模式図を示す. 図中に示すように, 等反力面のうねりの大きさを dl とする. (式2)より, 半径 30 mm, stiffness 0.3 N/mm において呈示反力 0.8, 0.9, 1.0 N に対する dl を補間の粗さ角度について求め, それを装置の空間解像度で量子化したものが図7である. 三角形で示された表2実験B (線形補間)の結果は, 灰色の領域で示された図5から得られる d の値の範囲内に完全に含まれている. このことから, 線形補間においても指標 d (この場合は dl) が絶対閾を決める主要因であり, 装置の空間解像度による絶対閾の差は dl の量子化に起因

するものであると推測することができる.

5.6 視覚刺激との関係

視覚以外の他の感覚モダリティと同様に, 力覚においても視覚優位であることが知られている [15]. このため, 曲面がなめらかに画像呈示されていれば, 力覚呈示の要求精度は視覚刺激に影響されてより粗くなることが予想される. 本実験では力覚刺激のみを呈示し視覚刺激は呈示していないため, なめらかな曲面の視覚刺激がある場合の絶対閾は本実験の結果より大きくなると考えられる. 従って, 5.1節で得られた指標 d の値は視覚刺激が併存する環境下でもその有効性を失うことはない.

5.7 今後の課題

より一般的な曲面に対する Force Shading の効果を知るためには, 線織面以外の2方向に曲がった曲面について実験を行う必要がある. ただし, 掌で形状を包み込むように触ることもある現実の形状知覚とは異なり, 点接触型力覚呈示では形状の呈示は極めて局所的であるため, 常に力覚カーソルの進行方向についての単一の曲率だけを知覚している可能性も否定できない. もしこの推測が正しければ, より一般的な曲面についても本実験の結果がそのまま適用可能であろう.

6. まとめ

点接触型力覚呈示装置を用い, 線形補間と円筒補間の二種類のForce Shading 条件下で補間のなめらかさの精度を決めるヒトの知覚特性要因とその絶対閾を求める実験を行った. 接平面で近似した円筒面を補間呈示したところ, 変位情報が C^0 接続であっても反力方向が C^1 連続以上である場合, 近似の粗さ(ひとつの接平面の表す中心角)の絶対閾は円筒面の曲率に比例し, また面のかたさにも依存することがわかった. これは, 近似面と真の円筒面との最大距離 (線形補間においては補間によって呈示される等反力面のうねりの大きさ) が, 面のかたさに応じて決まる一定

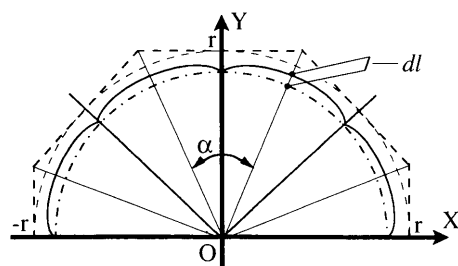


図6 線形補間における等反力面(模式図)

Fig. 6 Image of contour surface for a constant feedback force in linear interpolation condition.

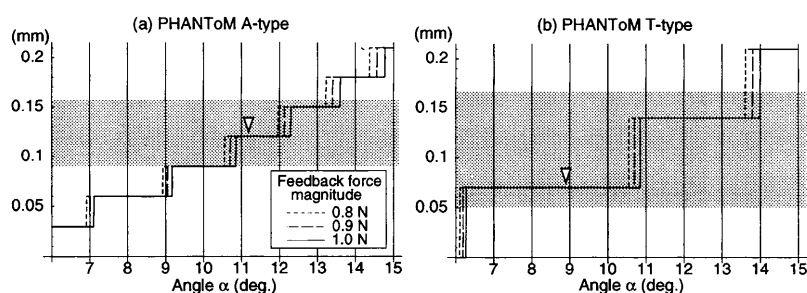


図7 装置の空間解像度で量子化された等反力面のうねりの大きさ dl

Fig. 7 Linear interpolation: " dl " granulated by spacial resolution of equipment. (Feedback force: dotted line: 0.8 N, dashed line: 0.9 N, solid line: 1.0 N)

値以下であるときに、ヒトは補間近似面をなめらかな円筒面であると判定していると推定される。

また、同じ機構で空間解像度のみが異なる2種類の力覚呈示装置での実験結果を比較したところ、線形補間の場合に絶対閾に有意差がみられた。これは、上述の一定値が装置の空間解像度により量子化された結果生じたものと考えられる。

本研究は始まったばかりであるが、本論文で得られた結果は線織面のようにガウス曲率が0である曲面を接平面近似・補間呈示する場合には適用可能と考えられる。すなわち、近似多面体ともの曲面との差の最大値を本論文で得られた値以下になるようにしておき、その多面体を Force Shading により補間呈示すれば、ヒトはなめらかな曲面であると感じると予想される。

今後、円筒面以外のより一般的な曲面に関して同様の実験を行い、ヒトの力覚による曲面の知覚特性とその絶対閾を求め、より効率的で効果的な曲面の力覚呈示アルゴリズム開発に貢献したいと考えている。

参考文献

- [1] Burdea, G. C.: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [2] Salisbury, K., D. et al.: Haptic Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Objects, Proc. of ACM 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics, 1995.
- [3] Minsky, M., M. Ouh-Young, O. Stillel, F. Brooks, and M. Behensky: Feeling and Seeing: Issues in Force Display, Computer Graphics, Vol. 24, No. 2, pp. 235-243, 1990.
- [4] Morgenbesser, H. B. and M. A. Srinivasan : Force Shading for Haptic Shape Perception, Proc. of ASME Dynamics Systems and Control Division, pp. 407-412, 1996)
- [5] Ruspini, D., K. Kolarov, and O. Khatib: The Haptic Display of Complex Graphical Environments, Proc. of ACM SIGGRAPH97, 1997.
- [6] Lakatos, S. and L.E. Marks : Haptic underestimation of angular extent, Perception, Vol. 27, No. 6, pp. 737-754, 1998.
- [7] Gordon, I. E. and V. Morison: The haptic perception of curvature, Perception & Pshychophysics, Vol. 31, No. 5, pp. 446-450, 1982.
- [8] Pont, S.C., A.M. Kappers, and J.J. Koenderink : The influence of stimulus tilt on haptic curvature matching and discrimination by dynamic touch, Perception, Vol. 27, No.7, pp. 869-880, 1998.
- [9] Fukui, Y.: Bump Mapping for Force Display, The Proc. of the First PHANToM Users Group Workshp, published as M.I.T. Artificial Intelligence Laboratory Technical Report AITR-1596 and M.I.T. Research Laboratory for Electronics Technical Report No. 612, 1996.
- [10] Fukui, Y., J. Yamashita, and M. Shimojo: Perceptual Performances of Force Rendering Methods, Proc. of IEEE International Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1401-1405, 1997.
- [11] 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, pp. 133- 134, 2000.
- [12] 山下, 福井, 森川, 佐藤: 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, 情報処理学会論文誌 Vol.41, No.5, pp. 1298-1307, 2000.
- [13] Massie, T. H. and J. K. Salisbury: The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, Proc. of ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 1994.
- [14] 大山, 今井, 和気(編): 新編 感覚・知覚 心理学ハンドブック, 誠信書房, p. 1230, 1994.
- [15] Fukui, Y. and M. Shimojo: Recognition of Virtual Shape using Visual and Tactual Sense under Optical Illusion, Proc. of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 294-298, 1994.

(2000年9月29日 受付)