

接平面近似曲面のなめらかな力覚補間呈示に関する一考察

山下 樹里, 福井 幸男, 森川 治, 佐藤 滋

生命工学工業技術研究所 人間環境システム部

〒305-8566 茨城県 つくば市 東 1-1

E-mail: { juli | fukui | morikawa | sato }@nibh.go.jp

点接触型力覚呈示装置を用いて多面体近似された曲面をなめらかに呈示するには、各多面体間を力覚的になめらかに補間する必要がある。しかし、力覚的になめらかな補間に必要な近似の精度を決定する、ヒトの力覚による曲面の知覚限界(絶対閾)は明らかではない。本研究では、接平面で近似した円筒面を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。その結果、反力方向が C^1 連続以上で変位情報が C^0 接続である場合、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、また面の硬さにも依存することがわかった。これより、近似面と真の円筒面との最大距離が、面の硬さに応じて決まる一定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。

キーワード：力覚呈示装置, 曲面補間, 仮想形状知覚, Force Shading

Haptic Absolute Threshold for Smooth Tangent-Plane Approximation of Cylindrical Surfaces

Juli Yamashita, Yukio Fukui, Osamu Morikawa, and Shigeru Sato

National Institute of Bioscience and Human-Technology

1-1, Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan

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 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 surface approximated by tangent planes, which are interpolated in different ways. The results have shown that, 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.

Key Words: Force Feedback Device, Surface Interpolation, Virtual Shape Perception, Force Shading

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 [Burdea96], 中でも「点接触型」と呼ばれるタイプのもは、構造・制御方法が比較的単純で小型化が可能などから、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 [Salisbury95] 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 以上の高い制御周期が要求されるため、CG (動画) 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、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、隣接する近似面の間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 [Minsky90] [Morgenbesser96] [Ruspini97]。これは、CG における Smooth Shading に相当する手法である。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、元の曲面と変わらず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、ヒトが実際に形状を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(例えば [Lakatos98]) 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 & Morison [Gordon82] 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。

一方、力覚呈示装置を用いた形状知覚特性に関しては、Force Shading について Fukui ら [Fukui96,97] や Morgenbesser ら [Morgenbesser96] が等感覚点や形状の種類判別実験を行っている。形状知覚の絶対閾については、島田ら [島田他00] 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、また筆者ら [山下他00] 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、絶対閾は形状の高さと底面の幅の半分で割った「勾配」、形状の硬さ、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」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、「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、「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。

(実験 A) 曲率と絶対閾の関係を求める実験。曲率(半径)の異なる円筒面で、絶対閾がどう変化するかを調べる。

(実験 B) 補間手法による絶対閾の差を見るための実験。(実験 A) とは異なる補間方法

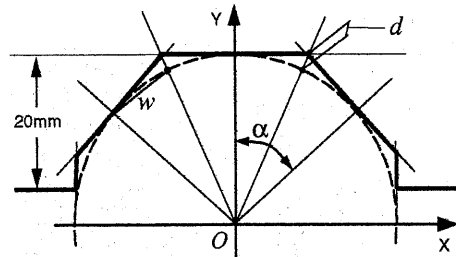


Fig. 3.2 Sectional image of stimulus shape. A cylindrical surface, defined by resolution angle α , is interpolated in different ways. The axis of the cylinder is placed along the Z-axis, or toward the subject. d : Max. difference between the polygonal approximation and the true surface.

について絶対閾を計測し、(実験 A) の結果と比較する。

3.2 刺激形状

刺激形状の断面を図 3.2 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 軸に並行である。ひとつの接平面が占める中心角度 α を、補間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 A-type (SensAble Technologies, Inc., U.S.A.) [Massie94][Salisbury95] にペン型の柄を取りつけたものを用いた (図 3.3)。本装置の仕様は図 3.3 に示す通りである。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、明らかに多面体であると感

Nominal position resolution: 0.03 mm
 Workspace: 13 cm x 18 cm x 25 cm
 Maximum exertable force: 8.5 N

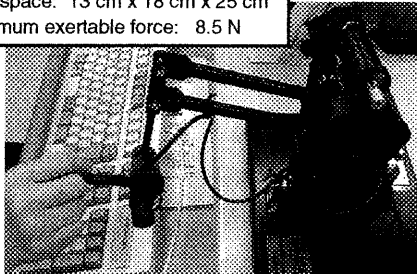


Fig. 3.3 Equipment. PHANToM Haptic Interface 1.0 Type A.

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ことがわかっているため [山下他00], 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」と判断した点で計測を打ち切り、その時の補間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

Table 3.5 Experimental Conditions.

Experiment	Radius (mm)	Stiffness (N/mm)	Interpolation Type	N
A	30, 60, 90, 120	0.3, 0.5	Force Shading	9
B	30	0.3	None, Linear	9

ゆき、被験者が「なめらかな円筒面である」と判断した点で計測を打ち切り、その時の補間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の空間解像度(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)とした。

3.5 実験パラメータ

表3.5 に実験条件一覧を示す。

(実験 A) 実験条件パラメータは刺激形状の半径 r (4通り)と形状の「かたさ」stiffness (2通り)で、計測対象となるパラメータは形状の補間の粗さ角度 α である。

カーソル位置の x, y 成分のみを表す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、

$$\mathbf{F} = \left(\frac{s \cdot L \cdot p_x}{|\mathbf{P}|}, \frac{s \cdot L \cdot p_y}{|\mathbf{P}|}, 0 \right)$$

で計算される。反力の方向は、本来の円筒面と同様であり、反力の大きさは直近の接平面について計算される反力の大きさである。従って、この補間方法は、反力方向に関しては C^2 連続以上であるが、反力を呈示する位置(すなわち変位情報)については C^1 連続である。

(実験 B) 実験パラメータは補間方法 ((1) 補間しない接平面のみの場合, (2) 線形補間の2通り)で、半径 30mm, stiffness 0.3 の円筒面について、形状の補間の粗さ角度 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 L_1 , それに隣接してカーソル位置から2番目に近い接平面への距離を与えるベクトルを L_2 , stiffness を s とすると, 反力ベクトル F は,

(1) 補間しない場合(接平面のみ):

$$F = s \cdot L_1$$

ただし, F の Z 成分は常に 0.

(2) 線形補間の場合:

$$F = \frac{s \cdot L_1 \cdot \theta_2 + s \cdot L_2 \cdot \theta_1}{\alpha}$$

ただし, F の Z 成分は常に 0,

θ_1, θ_2 はカーソルから直近とそれに隣接する接平面への角度で,

$\theta_1 + \theta_2 = \alpha$ を満たす.

で計算される。

3.6 被験者

右利きの成人. 各実験での被験者数は, 表

3.5 に示す通りであった。

4. 結果

図 4.1 に, 実験 A の結果(測定された補間の粗さ角度 α)すなわちなめらかな円筒面として感じられる絶対閾と曲率(curvature, 半径の逆数)のグラフを示す. 回帰直線から, 絶対閾(角度)が曲率に比例し, また stiffness により決定されていることが読み取れる. なお, 被験者数 N が表3.5 と異なるのは, はずれ値処理によるものである.

図 4.2 は, 実験 B の結果(None: 補間無し, Linear: 線形補間) と, 同じ半径・stiffness における実験 A の結果 (Force Shading) を比較したグラフである. 平均値に関する分散が等しくないと仮定した対応無しの t 検定により, 補間無し条件下での結果と2種の補間条件下での結果の間には, 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 ($p < 0.6$).

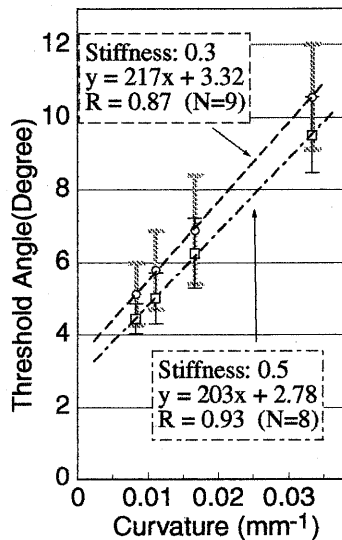


Fig. 4.1 Results of experiment A. The absolute threshold angle is defined by surface curvature and stiffness.

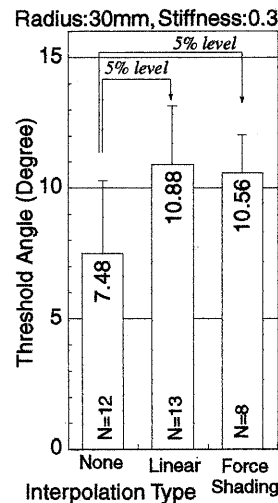


Fig. 4.2 Results of experiment B. Statistically significant difference exist between "None" (without interpolation) and two interpolation methods.

5. 考察

5.1 絶対閾の角度以外の表現

図 4.1 で、絶対閾(補間の粗さ角度)が曲率にほぼ比例するという結果が出たが、これを角度以外のより使いやすい表現に変換することを試みた。

図 3.2 に示すように、絶対閾(角度)に対する接平面による補間形状と真の円筒面との位置のずれの最大値を d とする:

$$d = \frac{r}{\cos(\frac{\alpha}{2})} - r$$

図 5.1 は、 d と曲率との関係である。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、この補間方法では、真の円筒面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される。従って、曲面を接平面で近似する場合、曲面と近似多角形の差の最大値がこの値以下になるようにすれ

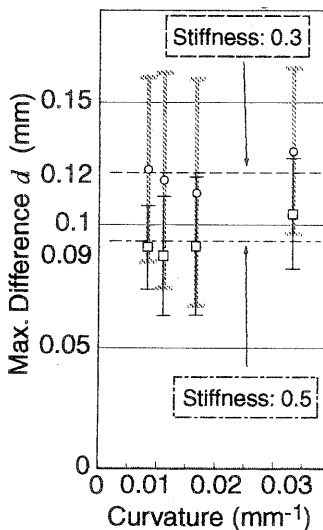


Fig. 5.1 Max. difference and curvature. Max. difference is independent of curvature, but depends on stiffness.

ば、なめらかな力覚呈示が実現できることになる。

5.2 補間方法の絶対閾への影響

補間なしの接平面条件下で、2種の補間条件下より絶対閾の値が低くなった主な要因は、反力方向が接平面の境界で不連続に変化するためであると考えられる。

実験 A の Force Shading 補間条件では、反力方向は真の円筒面と同じであるためなめらかだが、変位およびそれに伴って計算される反力の大きさは C^0 連続である。実験 B の線形補間条件では、反力方向、反力の大きさは C^1 連続、変位は C^0 連続である。しかし、両者の結果に差が見られなかったことから、反力方向が C^1 連続以上に補間されていれば、反力の大きさが C^1 連続・ C^0 連続いずれであっても、変位が C^0 連続であること(または d の値が同じであること)が絶対閾を決定する要因となっていると推測される。

5.3 平面との比較

曲率が 0 の曲面とは、すなわち平面である。従って、図 5.1 に示された回帰直線の y 切片は、平面での絶対閾を表していると考えられる。これを、実験条件はやや異なるが、筆者らによる平面知覚の絶対閾の値と比較してみると、以下ようになる。

(1) 実験条件の相違点

- 円筒面: 補間呈示であり連続した凸部を持つ形状、変位情報は C^0 連続、実験装置の空間解像度 0.03mm
- 平面: 平面に凸部がひとつある形状、変位情報は C^1 連続、実験装置の空間解像度 0.07mm

(2) d についての類似点

- 曲面: d が一定値以下で「なめらか」と感じる。

- 平面: 凸部の高さがある一定値以下で「なめらか」と感じる。
- 注: ただし, この「一定値」の値そのものには, 両者で 3~10 倍の差がある。

6. おわりに

点接触型力覚呈示装置で効率的かつ効果的に曲面を呈示するためのアルゴリズム開発に資するため, Force Shading 条件下で補間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, 反力方向が C^1 連続以上で変位情報が C^0 接続である場合, 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, また面の硬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が, 面の硬さに応じて決まる一定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。

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, 隣り合った接平面の粗さを本論文で得られた値以下にしておき, それらの反力方向の不連続性を Force Shading 呈示すれば, ヒトはなめらかな曲面と判断すると予想される。

今後, ガウス曲率が 0 ではない曲面に関しても同様の実験を行い, 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

[Burdea96] Burdea, G. C. : Force and Touch

Feedback for Virtual Reality, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. (1996).

[Fukui96] Fukui, Y.: Bump Mapping for Force Display, Salisbury, J.K. and Srinivasan, M.A., Eds., The Proceedings of the First PHANToM Users Group Workshop, published as M.I.T. Artificial Intelligence Laboratory Technical Report AITR-1596 and M.I.T. Research Laboratory for Electronics Technical Report No. 612, December (1996).

[Fukui97] Fukui, Y., J. Yamashita, and M. Shimojo: Perceptual Performances of Force Rendering Methods, in Proc. of IEEE International Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1401-1405 (1997).

[Gordon82] Gordon, I. E. and V. Morison : The haptic perception of curvature, Perception & Pshychophysics, Vol. 31, No. 5, pp. 446-450 (1982).

[Lakatos98] Lakatos, S. and L.E. Marks : Haptic underestimation of angular extent, Perception, Vol. 27, No. 6, pp. 737-754 (1998).

[Massie94] Massie, T. H. and J. K. Salisbury: The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, in Proc. of ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (1994).

[Minsky90] Minsky, M., M. Ouh-Young, O. Stille, F. Brooks, and M. Behensky: Feeling and Seeing: Issues in Force Display, Computer Graphics, Vol. 24, No. 2, pp. 235-243 (1990).

- [Morgenbesser96] Morgenbesser, H. B. and M. A. Srinivasan : Force Shading for Haptic Shape Perception, in Proc. of ASME Dynamics Systems and Control Division, pp. 407-412 (1996).
- [Ruspini97] Ruspini, D., K. Kolarov, and O. Khatib: The Haptic Display of Complex Graphical Environments, in Proc. of ACM SIGGRAPH97 (1997).
- [Salisbury95] Salisbury, K., D. Brock, T. Massie, N. Swarup, and C. Zilles: Haptic Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Objects, in Proc. of ACM 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics (1995).
- [島田他00] 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 インタラクション2000 予稿集 (2000).
- [山下他00] 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 (2000). (出版予定)