

TR-H-207

3次元表面曲率の脳内表現に関する 心理物理的研究

渡邊 洋, Frank E. Pollick,
Jan. J. Koenderink (Univ. Utrecht), 川人光男

1996.12.19

ATR人間情報通信研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台2-2 TEL: 0774-95-1011

ATR Human Information Processing Research Laboratories

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02, Japan

Telephone: +81-774-95-1011

Fax : +81-774-95-1008

3次元表面曲率の脳内表現に関する心理物理的研究

渡邊 洋¹、Frank. E. Pollick¹、

Jan. J. Koenderink²、川人光男¹

¹ A T R 人間情報通信研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台 2—2

TEL. 0774-95-1023 FAX. 0774-95-1008

²Helmholtz Instituut, Universiteit Utrecht

Princetonplein 5, 3584 CC Utrecht, The Netherlands

1 はじめに

1.1 3次元情報の脳内表現

ヒトは日常生活の中で眼という感覚器を用い、高い精度で外界のさまざまな対象を識別し、それらに対してアクションを加えている。何があるのかを確実に知ることができるし、それがどのような形状をしているのかも簡単に認識できる。だがこのごく自然な現象を実現するメカニズムを理解することは非常に難しい。視覚システムへの入力情報は光学的な過程を経て網膜に投影された2次元画像であり、それ自身は何ら3次元の情報をもっていない。したがって、われわれ（の脳）が3次元情報を必要とする認識や行動を遂行するために視覚システムがなすべき仕事は、1次元の情報が欠落している2次元画像からもとの3次元情報を復元する作業となる。

このプロセスにおいて重要な考え方が視覚システムのモジュール性という概念である。視覚系によって脳内に取り込まれた外界の情報が第1次視覚野以降、視差、陰影、テクスチャ、色、運動などのモジュールに分解されて処理されるという考え方は Marr (1982)以来の視覚研究の大きな枠組みとなっている。そしてそれらのモジュール構造の存在を示唆するデータは心理学的にも、生理学的にも多数紹介されてきた (Van Essen, Felleman, DeYoe, Olavarria, Knierim, 1990; Felleman & Van Essen, 1991; von der Heydt & Peterhans, 1989; Newsom, Mikami, & Wurtz, 1986; Julesz, 1971; Ramachandran, 1988; Zeki, 1993)。しかしこれらの知見は、画像の持つさまざまな物理特性が脳内のどこで処理されているか、あるいはモジュール間の結合がどうなっているのかについてのものであって、処理された後の情報が何を意味しているのかについての答えを示すものではない。

Marr が要約した初期視覚の目的「縮退した2次元情報（網膜像）から3次元の構造を復元すること」 (Marr, 1982)における、「復元された3

次元の構造」が何であるのかについて今だ一致した見解は得られていない。「3次元の情報」とひとくちにいても、対象までの距離、観察者に対する空間内での対象の向き、対象の形状といったようにさまざまな表現を取り得る。奥行き、方向 (Gibson, 1979; Horn, 1977; Marr, 1982)、曲率といった定量的な表現の他にも、Gauss 曲率の符号 (1.2.2 節参照) や shape index (Koenderink, 1990, 1.2.3 節参照)による局所形状の名義的な記述、あるいは近接するポイント間での奥行き順序関係による構造 (順序構造 ordinal structure, Todd and Reichel, 1989) による記述など多様な表現の可能性がこれまでに提案されている。このように多様な表現を考えなければならないのは、定量的な表現と定性的な表現が各々 3次元構造を記述するに当たって長所と短所を持っているためである (Todd and Reichel, 1989; 表 1.1)。

表 1.1 定量的表現と定性的表現の長所と短所 (Todd and Reichel, 1989)

	長 所	短 所
定量的表現	可視表面の3次元構造を任意の精度で表現することができる。	不安定性。視点の変化や対象の移動に伴って、表面領域に割り振られた値はさまざまに変化する。
定性的表現	表面構造に固有な値を視点、方向、距離の変化によらず与える。	正確さの欠如。例えば同じ Gauss 曲率を持つ球と楕円体などはこの表現では区別できない。

ここで問題は次の2点に要約される。1) ある特定の表現だけが脳内で面の表現として用いられているのか、それともいくつかの組み合わせになっているのか。これは脳内における本質的な面の表現は何かという議論に相当する。2) その表現が一般用途(general purpose)のものであるのか、つまり、すべての目的に使える視覚表現が脳内に存在するのか、それとも遂行すべき課題に応じた多様な視覚表現が存在するのかとい

ういわゆるタスクスペシフィックビジョンの問題である。

定量的な表現について考えると、奥行き、表面方向、曲率という三つの表現は各々微分積分によって相互に変換することができる (Johnston & Passmore, 1993)。ならば脳内でまず一つの表現が計算されて、そこから微分、積分によって他の表現が求められる (Carmen & Welch, 1992)のか、画像特性から直接必要とされる表現が求められる (Rogers & Cagenello, 1989)のかという疑問が生じてくる。この観点から先に挙げた 1) と 2) の問題は関連づけて考えられるべきものであるといえよう。ではこの議論に役立つようなデータを与えてくれる実験パラダイムにはどのようなものがあるだろうか。表面の脳内における表現を明らかにしようとする心理実験では、ほとんどの場合面に与える視覚手がかりを変化させて、被験者にある一つの表現の反応を求めその精度を吟味するものだった (たとえば奥行きについては Bulthoff & Mallot (1988)、表面方向については Koenderink, van Doorn, & Kappers (1992), Norman, Todd, & Phillips (1995), Pollick, Watanabe, & Kawato (1996)、曲率については Kappers, Koenderink, & Lichtenegger (1994), Rogers & Cagenello (1989), Phillips & Todd(1996)などを参照のこと)。中でも曲率の表現については、ほとんどがマッチング課題や調整法を用いたデータを使った議論であり、定量的なデータを直接扱ったものはない。また単一の表現からの微分積分によって他の表現が得られているかどうかという問題についても、一つの面に対して異なる表現を判断するような複数の課題を課し、一方のデータパターンから他方のデータパターンの予測可能性を議論する方法が一般的である。

本論文は定量的なデータが得られていない3次元表面曲率の脳内表現について心理物理学的な手法を用いて検討を行うことを目的とするものである。

1.2 3次元表面の曲率をもつ性質

今後3次元物体の曲率に関する脳内表現について議論を進めていくための準備として、本節で3次元表面の曲率に関する数学的な諸性質を整理しておこう。

1.2.1 主曲率

曲面 S 上の1点 p において、曲面の法線ベクトルを含む平面で曲面を切った切り口にあらわれる曲線(直截口)の曲率 κ の最大値 κ_1 および最小値 κ_2 を主曲率(principal curvature)と呼ぶ。また κ_1, κ_2 を与える直截口の方法を主曲率方向(principal direction)と呼び、最大主曲率方向と最小主曲率方向は常に直交する。

曲面 S が方程式 $z = f(x, y)$ で与えられているとき κ_1, κ_2 は次の2次方程式(1.1)の2根 R_1, R_2 の逆数として求められる。

$$(rt - s^2)R^2 + h[2pqs - (1 + p^2)t - (1 + q^2)r]R + h^4 = 0 \quad (1.1)$$

ここで

$$p = f_x, \quad q = f_y, \quad r = f_{xx}, \quad s = f_{xy}, \quad t = f_{yy}, \quad h = \sqrt{1 + p^2 + q^2} \quad (1.2)$$

である。また式(1.1)の2根 R_1, R_2 は主曲率半径と呼ばれる。さらに主曲率方向は次の2次方程式(1.3)から得られる dy/dx の値によって決定される。

$$\left[tpq - s(1 + q^2)\right]\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \left[t(1 + p^2) - r(1 + q^2)\right]\left(\frac{dy}{dx}\right) + [s(1 + p^2) - rpq] = 0 \quad (1.3)$$

1.2.2 ガウス曲率、平均曲率

主曲率 κ_1, κ_2 の積 K をガウス曲率(Gaussian curvature)、相加平均 H を平均曲率(mean curvature)と呼ぶ。曲面の局所的な形状はガウス曲率の符号によって定性的に分類することができる(図 1.1)。 $K > 0$ なる点を楕円点(elliptic point)と呼び、曲面は p の近傍で接平面の一方の側にだけある。 $K < 0$ なる点を双曲点(hyperbolic point)と呼び、曲面は p の近傍で接平面の両側に存在する。その形状が馬の鞍のような形をしていることから、鞍点(saddle point)とも呼ばれる。 $K = 0$ なる点を放物点(parabolic point)と呼び、曲面は接平面の一方の側にあり、円筒の側面のような形をしている(乾、1990)。



図 1.1 ガウス曲率により分類された面の形状

1.2.3 shape index、curvedness

Koenderink (1990)は主曲率を用い次式(1.4)、(1.5)で定義される shape index (S)および curvedness (C)という尺度を作成した。

$$S = -\frac{2}{\pi} \arctan \frac{\kappa_{\max} + \kappa_{\min}}{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}} \quad (\kappa_{\max} > \kappa_{\min}) \quad (1.4)$$

$$C = \sqrt{\frac{\kappa_{\max}^2 + \kappa_{\min}^2}{2}} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1.5)$$

この尺度を使って表面を記述することによって、大きさと形状を独立に表現することができるという利点が得られる (図 1.2)。shape index の値は-1 から 1 まで連続的に変化し、表面の局所的な形状に対応づけることができる ($-1 \leq S < -\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2} < S \leq 1$ のとき楕円点、 $-\frac{1}{2} < S < \frac{1}{2}$ のとき双曲点、 $S = \pm \frac{1}{2}$ のとき放物点)。curvedness の値は 0 (平面) から無限大まで変化し、表面の形状とは独立して曲率を量として扱うことができる (Erens, Kappers, & Koenderink, 1993)。

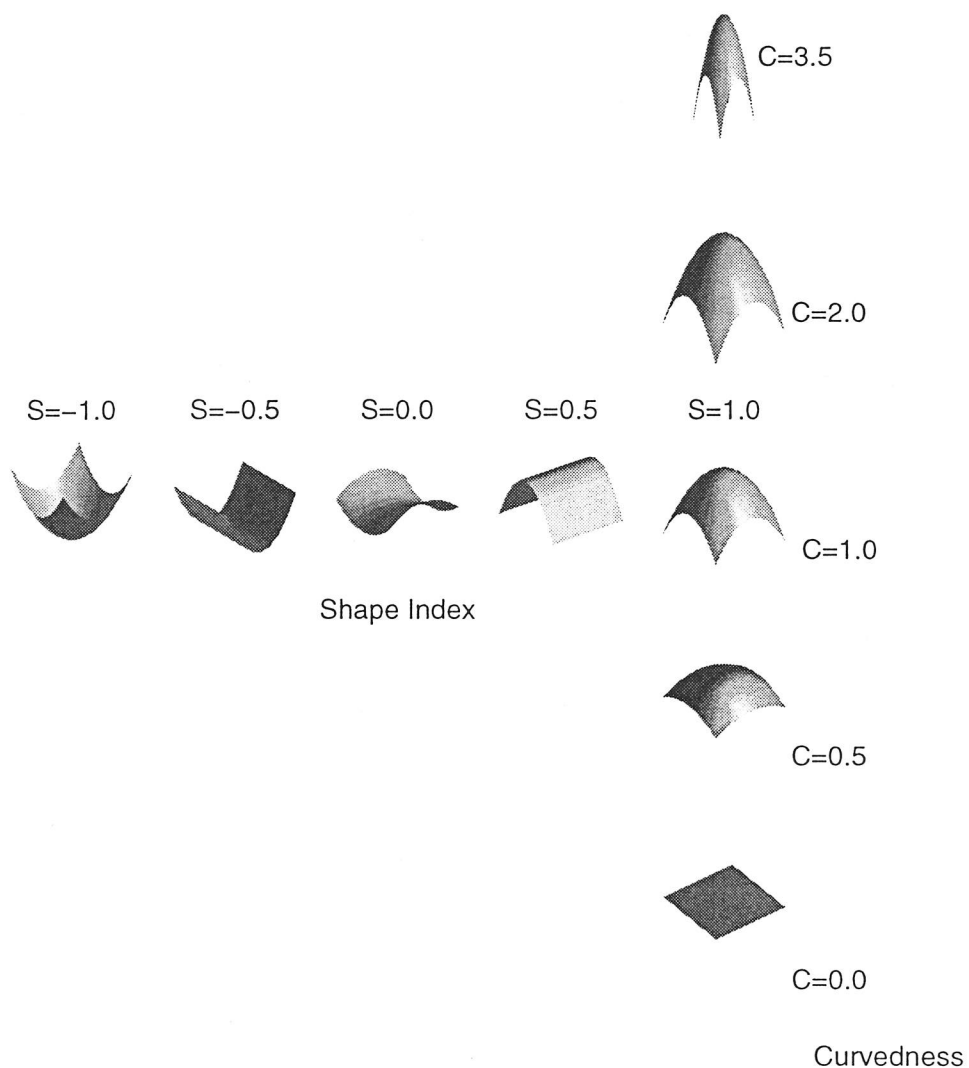


図 1.2 shape index (S) と curvedness (C)

1.2.4 曲面上の曲線の曲率

次に曲面 S 上の点 p を通って自由に描かれた曲線 Γ の、 p における曲率 ρ について考える。

まず ρ は点 p における曲線 Γ の接触平面 (点 p と近傍の 2 点を含む平面) による曲面の切り口の曲線 C の曲率に等しい。任意の平面による曲面の切り口の曲線 C について、その曲率 ρ は次の Meunier の定理によって求められる (小倉、矢野、1990)。

$$\kappa = \rho \cos \gamma \quad (1.6)$$

ここで κ は直截口の曲率であり、 γ は曲線 C の主法線ベクトル n と曲面の法線ベクトル N のなす角である。各々の直截口に対してその曲率 κ は次の Euler の公式によって求められる (小倉、矢野、1990)。

$$\kappa = \kappa_{\max} \cos^2 \alpha + \kappa_{\min} \sin^2 \alpha \quad (1.7)$$

ここで κ_{\max} , κ_{\min} は主曲率である。また α は直截口と主曲率を与える主直截口のなす角度である。

以上のムーニエの定理、オイラーの公式を組み合わせ、また主曲率方向が不明な場合も考慮にいと次の式が導かれる。

$$\kappa \cos \gamma = \kappa_{\max} \cos^2(\alpha - \theta_M) + \kappa_{\min} \sin^2(\alpha - \theta_M) \quad (1.8)$$

ただし θ_M は主曲率方向である。式(1.8)を線形の表現にするために倍角の公式を用いて書き換えると式(1.9)のようになる。

$$\kappa \cos \gamma = A + B \cos 2\theta + C \sin 2\theta \quad (1.9)$$

ただし

$$A = \frac{\kappa_{\max} + \kappa_{\min}}{2}, \quad B = \frac{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}}{2} \cos 2\theta_M, \quad C = \frac{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}}{2} \sin 2\theta_M \quad (1.10)$$

である。式(1.10)より、 A, B, C が与えられれば κ_{\max} , κ_{\min} , θ_M は次のように求められる。

$$\begin{cases} \kappa_{\max} = A + \sqrt{B^2 + C^2} \\ \kappa_{\min} = A - \sqrt{B^2 + C^2} \\ \theta_M = \frac{1}{2} \arctan \frac{C}{B} \end{cases} \quad (1.11)$$

1.3 本研究の位置づけ

本論文では、異なる運動課題と視覚の脳内表現の関係を今後研究していくための準備段階として、定量的なデータの少ない曲率を扱い、その脳内表現について行動実験のデータから考察を行う。同時に曲率の計算方法についても同一のデータを異なる観点から処理できるような方法の確立を目的とした。そこで以下の点に留意して実験パラダイムを立てた。

1) 脳内における面の曲率の表現について定量的なデータを得るために、実験1では主曲率方向および曲率がゼロとなる方向のポインティング、実験2および3では面上をなぞるという運動課題を採用した。またタスクスペシフィックな曲率表現の存在を示すために、実験4では同一の刺激に対して行った知覚判断課題と運動課題のパフォーマンスを比較した。

2) 曲率の独立した表現の可能性を議論するために、データを脳内で表わされた奥行きとして扱い微分によって曲率を推定する方法と、データを脳内で表わされた曲線の曲率として扱い面の曲率を推定する方法の結果を比較した（実験2および3）。

3) 曲率の報告が可能であったとして、どのような種類の曲率がよりよく報告できるのか。前節でも述べたように曲率の表現にはさまざまな形態があり、各々に異なる情報、意味をもっている。しかし本稿では曲面の曲率を扱う上で最も基本的かつ重要な表現である主曲率に焦点を

当て、その報告の精度を議論する。

4) 面の形状と曲率知覚の精度の関係を議論する。先行研究から曲率の知覚は形状に依存することが示唆されている (Kappers et al., 1994)。しかしこれらの結果は定性的なものであって、本稿のように定量的なデータを用いた場合にも一貫して得られるかどうかは興味のあるところである。

2 実験1 主曲率方向のポインティング報告

2.1 目的

1.2 節でも述べたように主曲率は3次元表面を記述するさまざまな曲率の尺度にとって基本的な量である。またそれは面の知覚という心理学的な現象にとっても重要な役割を果たすことが知られている。Koenderink (1990)は主曲率を用いることによって shape index および curvedness という尺度を作成し、その後のさまざまな心理実験からこれらの尺度が人間の曲面の曲率に対する直観的な評価を示す指標として有効であることを報告している。Kappers et al. (1994)は現実の曲面を「さわる」ことによってその知覚の精度や安定性などを議論しているが、視覚による入力を絶たれ、触覚だけで曲面の性質を判断する状況下で被験者はまず主曲率方向を探索することを報告している。また Stevens (1981)は人間が表面の曲線を曲率線（曲面上の曲線の接線が常に主曲率方向と一致している曲線）であると考えて面の構造を捉えていることを示した。

これらの心理実験の結果が示唆するのは人間は面の曲率の知覚にあたって主曲率を利用しているということである。ガウス曲率も shape index もすべて主曲率を組み合わせて計算される。また曲率線からの面の構造の知覚も、表面上に描かれた曲線が主曲率方向に一致しているとわかることが前提となる。

実験1では曲率の値そのものの報告以前に、双曲面の中の主曲率方向を定量的に報告する課題を被験者に課し、その精度を議論することを目的とする。また同時に曲率ゼロ（すなわち直線、図2.1参照）の方向を報告することによって、被験者が曲率の絶対的な量を表現として持っているかどうかについても議論を行う。

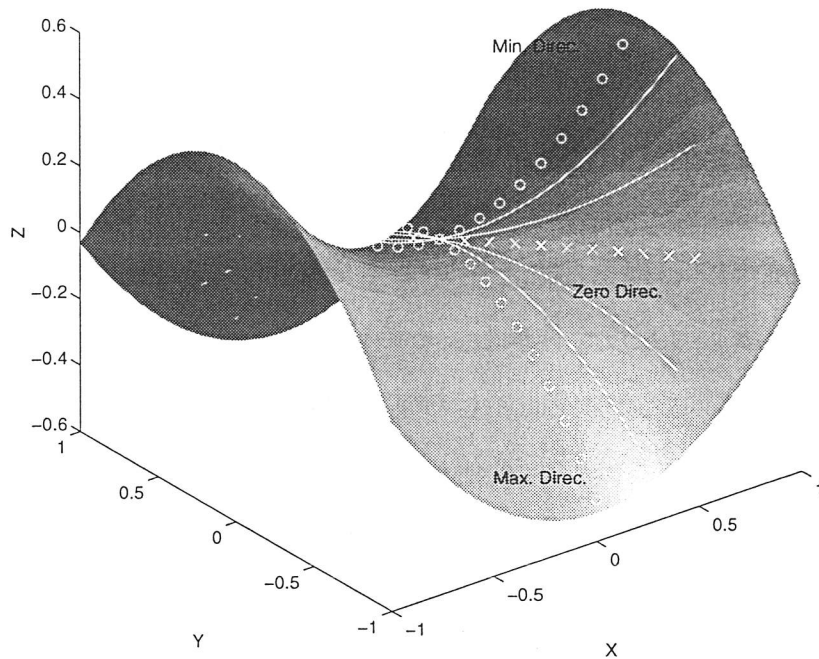


図 2.1 双曲面上の最大主曲率、最小主曲率および曲率ゼロの方向。曲率ゼロの方向は Euler の公式から一意に決まる (本文参照)。また対称軸に関して 2 本の曲率ゼロ成分が存在するが図では割愛している。視線は Z 軸を負方向に向いている。

双曲面 (および放物面) が必ず曲率ゼロの直線成分を含むこのことは式の上からは次のように証明される。式(1.7)の Euler の公式の左辺に 0 を代入し、式の変形を行うと次式(2.1)が得られる。

$$\cos^2 \theta = \frac{-\kappa_{\min}}{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}} \quad (2.1)$$

式(2.1)は $\kappa_{\max} > 0$ かつ $\kappa_{\min} \leq 0$ のとき解 θ を持ち、

$$\theta = \arccos \left(\pm \sqrt{\frac{-\kappa_{\min}}{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}}} \right) \quad (2.2)$$

である。したがって双曲面 ($\kappa_{\min} < 0$) (および放物面 ($\kappa_{\min} = 0$)) が曲率ゼロの成分を含むことになり、その方向は(2.2)で与えられる。

本実験では反応デバイスとして Pollick et al. (1994, 1996)によって用いられた 3D デジタイザによるポインティング法(図 2.2)を用いる。Pollick らは表面方向の反応にあたってこの手法を用いているが、その精度や安定性は十分信頼できるものであり、表面の幾何特性を報告する手段としての有効性が確認されている。

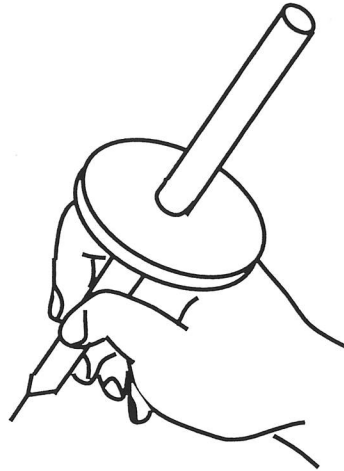


図 2.2 3D デジタイザによるポインティング法

2.2 方法

2.2.1 被験者

正常な立体視力を持つ成人 4 名（以下 WT, MN, KT, MY）。被験者 WT は第一筆者であり、その他の被験者は実験の仮説について事前の知識を持っていなかった。

2.2.2 装置

被験者はグラフィックワークステーション（Silicon Graphics 社製 IRIS Crimson/Reality Engine）のディスプレイ（水平方向 1280 ドット×垂直方向 1024 ドット）の前 60cm の位置にすわり、あごのせ台を用いて頭

部を固定する。表面が前額平面に投影されたときに生じる輪郭線がもたらす効果をなくすために、ディスプレイの前に視野を矩形（横約 10cm × 縦約 15cm）に制限する箱を置いた。また、ステレオ視のために液晶シャッター眼鏡(CrystalEyes 社製)を着用する。反応は 3D デジタイザ(図 2.2)を用いて行い、デジタイザの前額平面における方向は 3次元位置計測装置(Northern Digital 社製)によって測定、記録される。

2.2.3 実験条件

呈示される表面刺激は、次式(2.3)の 2 次関数

$$z = ax^2 + by^2 \quad (2.3)$$

で定義された 10 種類の双曲放物面である（以下簡単のために双曲面と表記する）。X 軸、Y 軸が各々前額平面内での水平方向、垂直方向に相当し、Z 軸が視線方向に一致するように座標系を定義した。またすべての面が異なるガウス曲率、最大、最小主曲率を持つように 2 次関数のパラメータ a、b を決定した。表 2.1 に実験で用いられた面の、ガウス曲率、最大、最小主曲率を示す。また図 2.3 にそれらをメッシュ表示したものを示す。

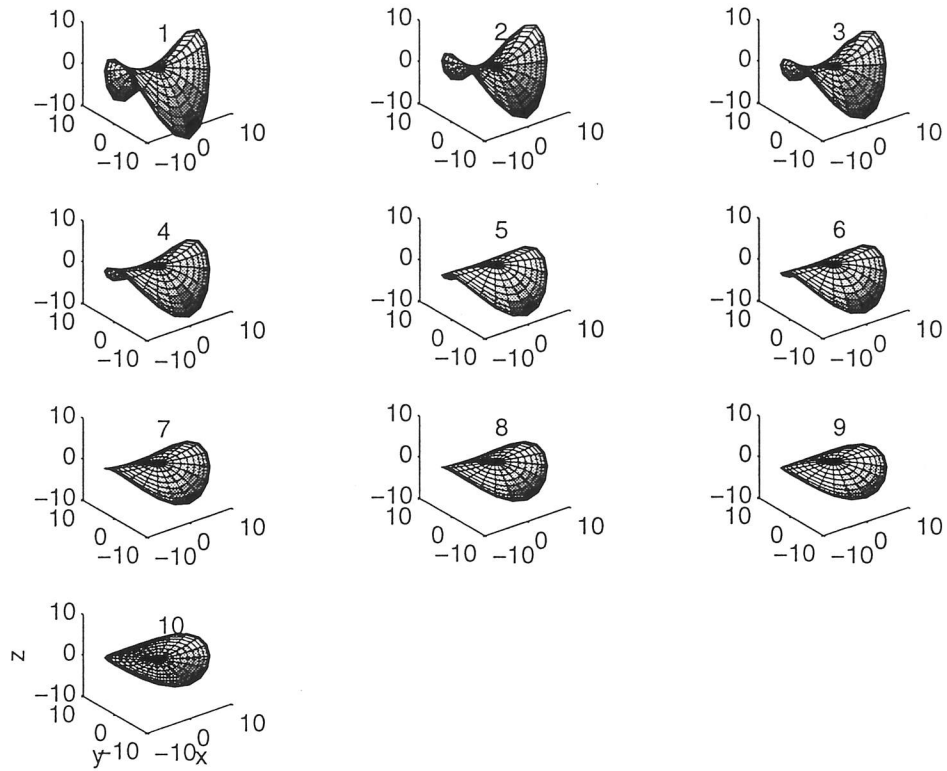


図 2.3 実験 1 で用いられた面のメッシュ表示。各図の番号は表 2.1 の連番と一致する。

表 2.1 実験 1 で用いられた表面刺激の最大、最小主曲率およびガウス曲率。

面	最大主曲率 (1/cm)	最小主曲率 (1/cm)	ガウス曲率 (1/cm ²)
1	0.115	-0.254	-0.029
2	0.130	-0.160	-0.021
3	0.099	-0.162	-0.016
4	0.053	-0.158	-0.008
5	0.010	-0.159	-0.002
6	0.016	-0.147	-0.002
7	0.026	-0.109	-0.003
8	0.016	-0.098	-0.002
9	0.003	-0.088	-0.000
10	0.039	-0.037	-0.001

また視覚手がかり条件として Full cue 条件と Removed cue 条件を用いた。

Full cue 条件：水平視差、パースペクティブ、陰影、ランダムドットテクスチャ。陰影モデルは Lambertian モデルを用い、視線方向に沿って無限遠の位置に光源を置いた。

Removed cue 条件：上述の Full cue 条件からランダムドットテクスチャを取り除いたもの。

また各試行ごとに面は視線方向（Z 軸）に沿ってランダムに回転を行った。

2.2.4 実験手続き

被験者の課題は、呈示された 2 次曲面の頂点部分における最大主曲率方向、最小主曲率方向および曲率ゼロ方向を 3 D デジタイザを用いて報告することである。実験開始前に、被験者に対して実験者から主曲率方向に関する直観的な説明が与えられた。このとき最大主曲率方向と最小主曲率方向が直交する性質は教示されていない。また刺激表面は X 軸あるいは Y 軸に関して対称なので頂点を通る直線方向は 2 本存在する（式 2.2）が、この場合被験者はどちらか一方の直線方向を答えればよい。

実験デザインとして 2.2.3 節で述べた面のパラメータ、視覚手がかり条件の組み合わせによって得られる 20 個の面それぞれについて 3 方向（最大、最小主曲率および曲率ゼロ方向）のポインティングを行う計 60 回の試行を 1 セットとし、各被験者は 6 セットを行った。各試行で報告すべき方向は実験者の口頭によって指示される。実験は被験者のペースで行い、反応時間に制限はなかった。すべての実験変数はランダム化された。

2.3 結果および考察

得られたデータの定性的な傾向はすべての被験者の間でおおむね一致した。図 2.4 に一例としてナイーブな被験者 KT の全反応を示す。試行ごとに面が回転しているため、円内の水平方向が最大主曲率方向、垂直方向が最小主曲率方向に対応するように素データを変換しプロットした。

また、真の主曲率方向（0 度、90 度）および各面における真の曲率ゼロの方向と、報告された方向との差の絶対値を反応誤差と定義し、以下の議論で用いる。図 2.5 に被験者、繰り返し、表面刺激の曲率要因をプールし、視覚手がかり条件および方向条件における反応誤差の平均値をプロットしたものを示す。

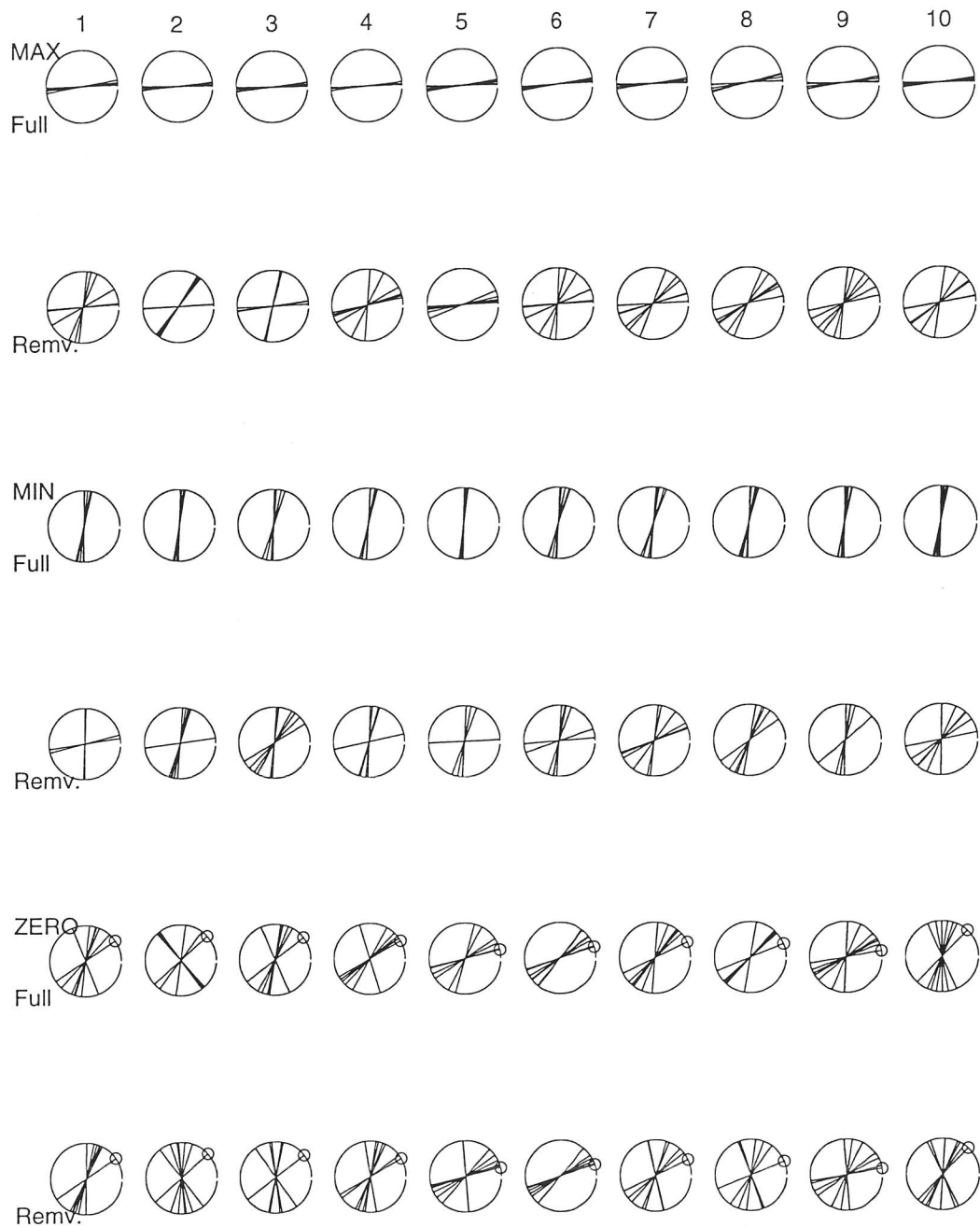


図 2.4 被験者 KT の素データ

真の最大主曲率方向(上 2 行)は水平方向、および真の最小主曲率方向 (中 2 行) は垂直方向に相当する。また真の直線方向 (下 2 段) は終端に丸印のついた直線によって示す。1 から 10 までの数字は表 2.1 に示したパラメータの組み合わせによって得られる面を示す。各 2 行のうち上段は Full cue 条件、下段は Removed cue 条件の結果を示す。

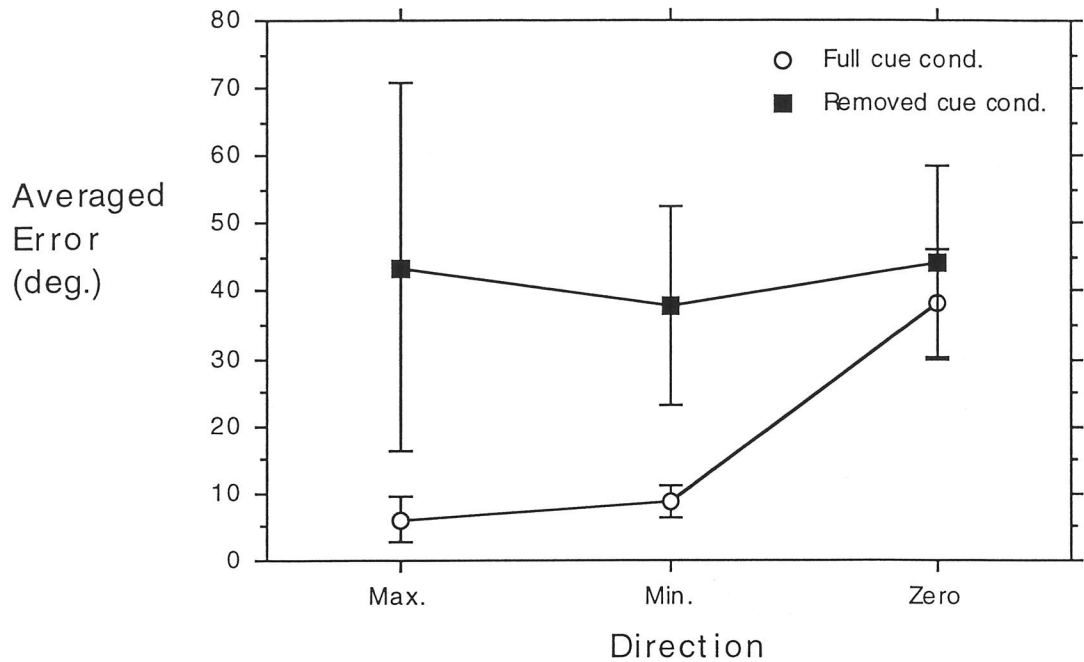


図 2.4 視覚手がかり条件、方向条件間での反応誤差。エラーバーはSD。

結果を要約すると以下のようなになる。

1)Removed cue 条件ではすべての被験者のパフォーマンスが悪くなった。この現象は最大、最小、曲率ゼロ方向のいずれにおいても共通して観察された。視覚手がかりと反応方向を要因とする分散分析（以下同様）を行った結果、視覚手がかり条件は有意な主効果を持った($F_{1,3}=24.38$, $p<0.05$)。

2)Full cue 条件において、曲率ゼロ成分に対する報告の精度は最大および最小主曲率方向にくらべて悪く、5 倍から 6 倍の誤差を持った。統計的にも最大主曲率とゼロ方向、最小主曲率とゼロ方向の間では、その精度において有意な差が認められた（t 値はそれぞれ-13.106, -12.021 で $p<0.01$ ）。

最初の結果から、テクスチャの有無が主曲率方向に対するパフォーマンスの精度に影響を及ぼすことが示された。しかしこのことは trivial な

ものだろう。3次元形状の復元にとって陰影の手がかりが弱いキューであることはこれまでのいくつかの先行研究の中で指摘されてきている (Bulthoff and Mallot, 1988; Mingolla and Todd, 1986; Todd and Reichel, 1989; Erens, Kappers, and Koenderink, 1993; Pollick et al., 1996)。本実験の Removed cue 条件ではいわゆる intensity-based のステレオを被験者に要求するものである。同様の条件で知覚的な曲率の判断を課題とした Todd and Mingolla (1983)らのデータでは被験者が円筒面の曲率を真の値よりも 50%も過小評価することが示されている。われわれの被験者も Removed cue 条件においてはうまく3次元の形状が理解できなかったことを内観として報告している。

一方、視覚手がかり条件にかかわらず曲率ゼロの方向に関してパフォーマンスは悪かった。統計的にも二つの視覚刺激条件間でその方向に関するパフォーマンスの誤差に有意な差が見られず ($t=-2.438$, $p=0.051$)、曲率ゼロの方向は知覚することが難しいことが示された。このことは被験者が曲線の曲率に関する絶対的な値を表現として持っていないことを示唆している。したがって最大、最小主曲率の方向についても、それらの絶対的な値を用いて報告しているのではなく、曲線の曲率の変化を表現として持ち、その極値を与える方向（主曲率方向）を反応していることが考えられる。このことを確かめるために、表面上の曲線の曲率の変化と主曲率方向の反応誤差の関係を吟味する。ここではパフォーマンスが比較的安定し、正確だった Full cue 条件でのデータについて議論を行う。

曲面上に描かれた曲線の曲率 κ は式(1.7) (Euler の公式) をつかって求めることができる。これを主曲率方向からの角度 α について微分すると次式(2.4)が得られる。

$$\frac{dk}{d\alpha} = (k_{\max} - k_{\min}) \sin 2\alpha \quad (2.4)$$

式(2.4)は $\alpha = 0$ および $\pi/2$ のときにゼロになる。このとき式(1.7)は極

大、極小値をとりこれが最大、最小主曲率に相当する。被験者が主曲率を検出するときに曲率の方向に関する微分を用いているとすると、誤差 $\pm \varepsilon$ の精度で式(2.4)の値が0になるような α を探すことになる。式(2.4)は $\alpha = 0$ および $\pi/2$ の付近で傾き $(\kappa_2 - \kappa_1)$ の直線で近似できるので、式(2.4)が $0 \pm \varepsilon$ となる α の値は

$$\alpha = \frac{\pm \varepsilon}{2(\kappa_{\max} - \kappa_{\min})} \quad (2.5)$$

で表わされ、報告される主曲率方向の範囲（すなわち誤差）は、最大主曲率と最小主曲率の差の逆数の関数として定義される。たとえば球面の場合、面上のあらゆる点において最大主曲率と最小主曲率は等しいのでこの値は無限大となり、球面において主曲率方向を答えることは不可能であるという直観的な理解に一致する。このように、そこを通る全ての曲線の曲率が等しい点のことを umbilical point と呼ぶ。

図 2.6 は横軸に各刺激表面の最大主曲率と最小主曲率の差の逆数、縦軸に被験者 4 名の Full cue 条件における最大および最小方向のデータをこみにしたときの平均誤差、および反応の標準偏差をプロットしたものである。平均誤差、標準偏差ともに最大主曲率と最小主曲率の差の逆数との間に正の相関関係が見られた（決定係数は平均誤差 $r^2=0.43$ 、標準偏差 $r^2=0.27$ ）。このことから単に絶対的な曲率の大小だけがパフォーマンスを説明するものではなく、曲率の変化が主曲率方向の報告の精度を説明する要因であることがわかる。

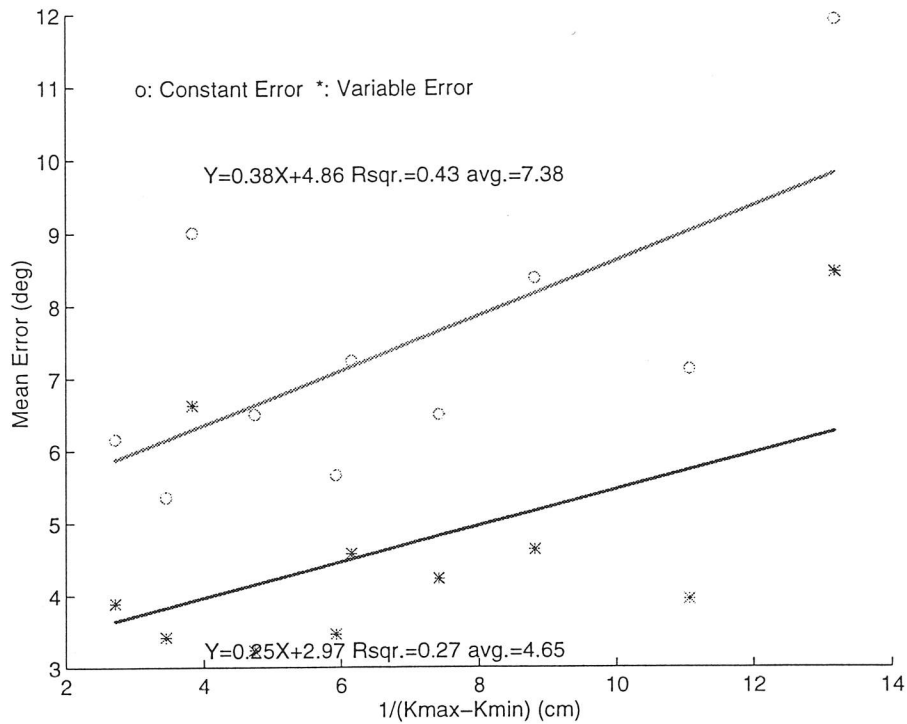


図 2.6 面の umbilicalness と主曲率方向判断の誤差の関係

○印は真の値からの誤差、*印は繰り返しにおける変動を示す。

また本実験の結果 Removed cue 条件のときに主曲率方向の報告についてパフォーマンスが悪くなることが示されたが、この条件のときに被験者の反応は必ずしもランダムになるわけではない。図 2.4 から主曲率方向の報告を 90° 近く間違えているケースがいくつか見て取れる。このことから被験者が面の凹凸関係を反転して知覚していたことが考えられる。

ここで被験者が面の凹凸を反転して知覚していたと仮定し、誤差の扱いをアレンジして比較してみよう。すなわち反応と主曲率方向の差を計算する際に、最大主曲率方向からと最小主曲率方向からの差のうち小さいほうをとるのである。素データ（図 2.4 に同じ）と凹凸の反転を仮定

したときのデータを用いた時の真の値との誤差を比較すると（表 2.4）、後者の方が著しく誤差が減少することがわかる。この結果からも被験者が曲率の絶対値を値として持っているのではなく、その変化の極値を反応していたことが示唆される。つまり最大値、最小値として表現は持っていないが、その方向において曲線の曲率の変化が正から負、あるいは負から正へ変わる方向を反応していた可能性がある。

表 2.2 凹凸の反転を仮定したときの誤差（全被験者の平均値）

素データ

方向	Full cue	Removed cue
最大主曲率	6.01	43.56
最小主曲率	8.71	37.80

凹凸の反転を仮定したとき

方向	Full cue	Removed cue
最大主曲率	6.01	18.15
最小主曲率	8.71	19.27

（単位は度）

deVries (1993)は本実験と同様に曲面上の主曲率方向を被験者に報告させる実験をおこなった。彼らとわれわれの実験の手続き、結果を比較したものが表 2.3 である。

表 2.3 de Vries (1993) と本実験の比較

	de Vries et al.	本実験
刺激表面	3 次曲面（非対称的）	2 次曲面（対称的）

視覚手がかり	視差 (RDS)	視差、テクスチャ、陰影、 パースペクティブ
反応方法	視覚マッチング	ポインティング (運動課題)
反応場所	多様 (91 ヲ所)	固定 (1 ヲ所)
真の値との 偏差の絶対値	平均 8.2 度	平均 7.39 度 (Full cue 条件 の最大、最小方向のみ)

また本実験において、被験者は最大主曲率方向と最小主曲率方向を個別に反応した。一方彼らの手続きにおいて、被験者は計測点にスーパーインポーズされた×印をマウス操作で主曲率方向にマッチするため、最大主曲率方向と最小主曲率方向が直交するという前提知識を与えた上で、最大主曲率方向と最小主曲率方向を同時に答えていることになる。さらに彼らは結果の整理に当たって Shape index と Curvedness (式(1.4),(1.5)) を手がかりに umbilical な領域付近でのデータおよび Curvedness が低い点でのデータをオミットした (具体的な数値では、 $|S| > 0.85$ 、 $C < 0.3 \text{ cm}^{-1}$)。本実験で用いた表面の主曲率から、計測点における Shape index と Curvedness を計算すると、Curvedness は彼らがオミットしたデータ範囲にほぼ含まれてしまうことがわかった。しかし彼らがオミットするような低い Curvedness の面を使ったにもかかわらず本実験の結果は彼らのものと同様である (本実験の場合、最高で 3.27° 、最悪で 10.05° 、de Vries (1993) では最高で 4° 、最悪で 12°)。その理由として次の2点が考えられる。1) 視覚手がかりを豊かに与えたために面の表現がより正確であった。2) 2次曲面はシンメトリックな形状をしているから主曲率方向を見つけることはたやすい(de Vries, 1993)。1) については、複数の視覚手がかりが矛盾なく与えられているため、視覚モジュール間の出力が加算され(accumulation)、協調的に働き(cooperation)、曖昧さをなくす(disambiguation)といった(Bulthoff and

Mallot, 1988)統合過程の結果であると考えられる。しかし2)についてはやや疑問が残る。de Vries らの実験パラダイムとは異なって、本実験では被験者に最大・最小主曲率方向を個別に答えさせている。また被験者は一名を除いてナイーブであり主曲率方向が直交することを知らされていない。さらに視野を矩型に固定し、視線方向に沿って面をランダムに回転させているため、前額平面に投影されたときの2次元的な形状からの効果も考えられない。

実験条件が大きく異なるために、両者のデータを公平に比較することは難しい。しかし二つのデータの違いを説明する理由の一つとして課題の違いが考えられる。視覚的なマッチングを用いた de Vries らの課題とは異なって本実験では3D デジタイザを用いたポインティング課題という運動による反応方法を用いた。もしポインティング課題にとって主曲率方向が重要な情報源であり、マッチング課題とは異なる経路を使って主曲率方向を計算しているならば、de Vries らと本実験の被験者のパフォーマンスの違いが説明できるかもしれない。

以上のことから、人は面上の曲線の曲率についてその絶対的な値よりもむしろ、それらの変化の割合を表現として持っていると考えられる。そして曲率変化の極値としての最大、最小主曲率の方向を運動課題を用いて反応することが可能であり、主曲率方向が直交する性質についても implicit に知っている。また主曲率方向の報告の誤差は面の umbilicalness にしたがってシステムティックに変化する。これらの現象は表面にテクスチャ手がかりが付加されたときに顕著に現われる。

3 実験2 描画運動課題を用いた表面曲率の報告

3.1 目的

実験1の結果から、人間は主曲率の方向、すなわち主曲率が面上のどこにあるのかが高い精度でわかっていることが示された。またこの能力は最大主曲率と最小主曲率の差によって表わされる面の「対称性」と関係があることもわかった。これらの結果は脳内における曲率の定量的な表現の存在をサポートするものであると考えられる。このことをさらに深く確かめるために、描画運動課題を用いて曲面の曲率を直接報告する実験パラダイムを考案した。さまざまな視覚手がかりを与えた楕円面と双曲面を用い、被験者はその面上に提示された3点を結ぶ曲線を3次元空間の中で「なぞる」。得られた軌道データの曲率から面の曲率（主曲率）を計算し、人間の持つ曲率表現の性質を議論することがここでの目的である。

3.2 方法

3.2.1 被験者

正常な立体視力を持つ成人2名（以下SY, NY）および筆者(HW)。被験者SYおよびNYは実験の仮説について事前の知識は持っていない。

3.2.2 装置

図3.1に実験中のセットアップの状況を示す。使用された機材は実験1とほぼ同じであり、唯一反応デバイスだけが異なる。反応は先端部分にIREDマーカーを装着した鉛筆を使って行う。実験中の被験者の手先の位置は常時3次元位置計測装置（Northern Digital社製OPTOTRAK）によって測定、記録される（サンプリングレートは800Hz）。

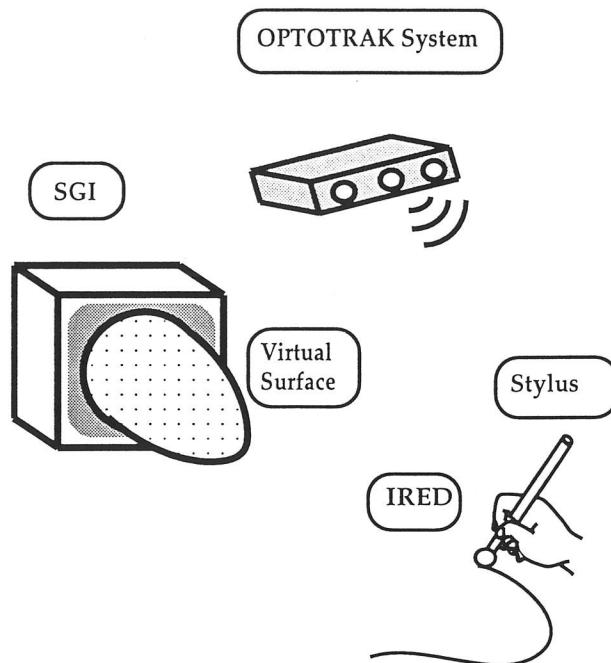


図 3.1 セットアップ

3.2.3 実験条件

表面形状：

被験者に呈示される表面は、式(2.3)によって定義される 2 次曲面である。楕円面と双曲面の 2 種類を各々 15 個ずつ含むようにパラメータ a, b をランダムに作成した。

視覚手がかり条件：

実験 1 と同じく次の 2 種類の視覚刺激が与えられた。Full cue 条件：水平視差、パースペクティブ、陰影、ランダムドットテクスチャ。陰影モデルは Lambertian モデルを用い、視線方向に沿って無限遠の位置に光源を置いた。Removed cue 条件：上述の Full Cue 条件からランダムドットテクスチャを取り除いたもの。

また実験 1 とは異なり視野を制限することはしなかった。視野を制限し刺激表面のエッジが取り除かれると本実験の面のパラメータでは

Removed cue 条件において輝度変化が少なく intensity based のステレオのみでは 3 次元の構造を知覚することは難しい。実験 1 の場合はエッジに与えられる視差あるいはパースペクティブによって生じるエッジの形状から主曲率方向を理解することはある程度可能なのでエッジを隠す必要があった。しかしエッジの視差や形状のみから表面内部の曲率を再構成することは不可能であることがシミュレーションにより確かめられた。本実験の目的は曲面の曲率を報告する精度を議論することであり、エッジの存在は曲率の報告にとってアーチファクトを与えないと考えた。

3.2.4 実験手続き

被験者の課題は、表面画像上に呈示された 3 点（始点、経由点、終点）を通るように、知覚された面上をなぞることである。この描画運動の方向は一つの面に対して必ず 4 方向（前額平面内で水平、垂直、斜め）に個別に行われる。各方向において始点と終点の位置は前額平面（原点は画面中心位置）において次の位置に呈示された（単位は cm）；水平方向、(9.0, 0.0), (-9.0, 0.0)、垂直方向、(0.0, 9.0), (0.0, -9.0)、斜め方向、((6.36, 6.36), (-6.36, -6.36)), ((6.36, -6.36), (-6.36, 6.36))。2 点のうちどちらを始点とするかは被験者が任意に決めるようにした。また経由点は必ず前額平面内の原点に呈示された。これら 3 点には水平視差は与えられておらず、被験者は前額平面内における位置の情報しか得ることができない。

被験者はパーソナルコンピュータ（東芝社製 J3100）からのビーブ音に従って試行を進めていった。まず最初のビーブ音でワークステーションのディスプレイに表面刺激と始点、経由点、終点が呈示される。ここで被験者はマーカーを始点の位置に持っていく。マーカーの静止が検出されると 2 回目のビーブがなり、被験者は描画運動を開始する。描画運

動の開始と同時に始点、経由点、終点は消去される。3回目のピープ音は描画開始後2秒後に鳴り、この間に被験者は反応を終了しなければならない。

表面形状、パラメータ、視覚手がかり条件の組み合わせによって得られる60個の面それぞれについて4方向の描画を行う計240回の試行を1セットとし、各被験者は3セットを行った。すべての実験変数はランダムイズされた。

3.3 曲率の計算方法

以上の手続きによって得られた軌道データの経由点付近における曲率を計算し、そこから再構成された面の曲率を用いて描画運動によって報告される表面曲率の精度を以後議論していく。曲率の計算にあたって、経由点付近のデータを切り出した後、同一のデータに対して「最小自乗法によりフィットされた面からの曲率の推定法 (“Differentiation from best-fitted surface” method)」（Watanabe et al. 1995）および、「曲線からの曲率法 (“Curvature from curves” method)」という異なる計算方法を適用する。この二つの曲率の計算法はデータを「奥行き」と「曲率」という異なる次元の情報として扱っており、結果の違いから人間の脳内で表現されている面の情報を議論するのに有効であると考えられる。

3.3.1 経由点における曲線の曲率の真の値

経由点を通して始点から終点まで面上に描かれた曲線の曲率の真の値 κ は式(1.7) の Euler の公式を用いて求めることができる。

3.3.2 経由点付近のデータの切り出し

一つの軌道について 800Hz のサンプリングレートで2秒間の計測を行ったわけだから 1600 点のデータを得ていることになる。しかし実際

に運動を行っている範囲は半分の約1秒間ほどでありすべてのデータを用いるわけにはいかない。一方、3.3.5節で用いる微分法は用いるデータ数が少ないとよい精度で曲率を推定できない(Watanabe et. al. 1995)ので可能な限り多くのデータを用いなければならない。この相反する条件を満たすデータ数として軌道1本当たり201点を採用することにした。用いるデータ範囲は、経路点に最も近い奥行き成分の変曲点を中心としてその前後100点とした。もしも描画運動が速すぎたり、遅すぎたりして決められた数のデータが切り出せないときは運動の失敗としてその試行はやりなおした。

3.3.3 軌道データの alignment

データの切り出しに際して経路点に最も近い奥行き成分の変曲点を用いた。しかし真の経路点とこの変曲点は必ずしも一致していない。後述する微分法のために、ここでは変曲点が経路点と一致していると仮定し、切り出されたすべてのデータに対して平行移動を行い経路点を通るように前処理を行った。

3.3.4 曲線からの曲率法(“Curvature from curves” method)

ここでは一つの面上に描かれた12本(4方向×3繰り返し)の「曲線」の曲率から1.2.4節で紹介したMeunierの定理、Eulerの公式を用いて経路点における「曲面」の曲率の計算方法について説明する。

[1]直截口の曲率の計算：移動平均による近似

201点の軌道データから50点間隔で3点を選びだし、3点を通る円の半径を計算する。この作業を101回繰り返し円の半径を平均することによって直截口の曲率半径とした。

[2]経路点における面の法線と軌道データの主法線ベクトルとの角度の計算

計算過程[1]において、3点を通る円を含む平面と経路点における法線（今の場合Z軸に一致）との角度を計算し、これも101回の移動平均によって面の法線と軌道の主法線ベクトルとの角度とした。

[3] Meunier の定理から経路点における軌道データの曲率を計算

[1],[2]で求められた値を用い、Meunier の定理式(1.6)から経路点における軌道データの曲率を計算した。

[4]12本のデータに Euler の公式をフィットさせ、最大・最小主曲率および主曲率方向を推定する。

経路点を通して描かれた $n=12$ 本（4方向×3繰り返し）の曲線にもっともフィットするような式(1.9)を計算する。式(1.9)において求めるべきパラメータ、A、B、Cを計算するには次の連立方程式(3.1)を解けばよい。

$$\begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta^1 & \sin 2\theta^1 \\ 1 & \cos 2\theta^2 & \sin 2\theta^2 \\ & \cdot & \\ & \cdot & \\ & \cdot & \\ 1 & \cos 2\theta^n & \sin 2\theta^n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \kappa^1 \cos \gamma^1 \\ \kappa^2 \cos \gamma^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \kappa^n \cos \gamma^n \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

ここで θ は前額平面における描画方向、 κ は曲線の曲率、 γ は経路点における面の法線ベクトルと曲線の主法線ベクトルのなす角度である。式(3.1)の左辺第1項は一般に正則ではないので、Moore-Penrose の疑似逆行列を求め式(3.1)を解くことによってパラメータ、A、B、Cは一意に求められる。

3.3.5 最小自乗法によりフィットされた面からの曲率の推定法
("Differentiation from best-fitted surface" method)

この手法は軌道データを被験者が運動中の各時刻において面の奥行きを報告したものと仮定して扱う。そしてデータにもっともよくフィットする2次曲面を微分することによって経路点における曲率を計算する。3.3.2節で切り出され3.3.3節で alignment された経路点付近における4方向の描画データ 2412点 (201×4方向×3繰り返し) のデータに最小自乗法を用いて式(3.2)で表わされる2次の多項式のパラメータ a, b, c, d, e, f を推定する。

$$f(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (3.2)$$

フィットされた2次曲面の微分値から最大主曲率、最小主曲率および主曲率方向は1.2.1節の式(1.1),(1.2),(1.3)から求められる。

3.4 結果

前節で述べた二つの曲率の推定方法を用いて、被験者の軌道データにフィットする最大主曲率、最小主曲率、および主曲率方向を計算した。そしてそれらの値を Euler の公式(1.8)に代入することによって主曲率方向間での曲線の曲率の変化が推定できる。図3.2に曲面上に描かれた曲線の曲率の真値、および DFF, CFC 法によって得られた主曲率を用いて推定された曲線の曲率を示す (被験者 HW)。推定された曲率は面の形状や視覚手がかり条件にかかわらず、曲線の曲率の真値の変化をおおまかに捉えているように見られるが、以下多様な角度からデータを眺めることによって議論を進めていく。

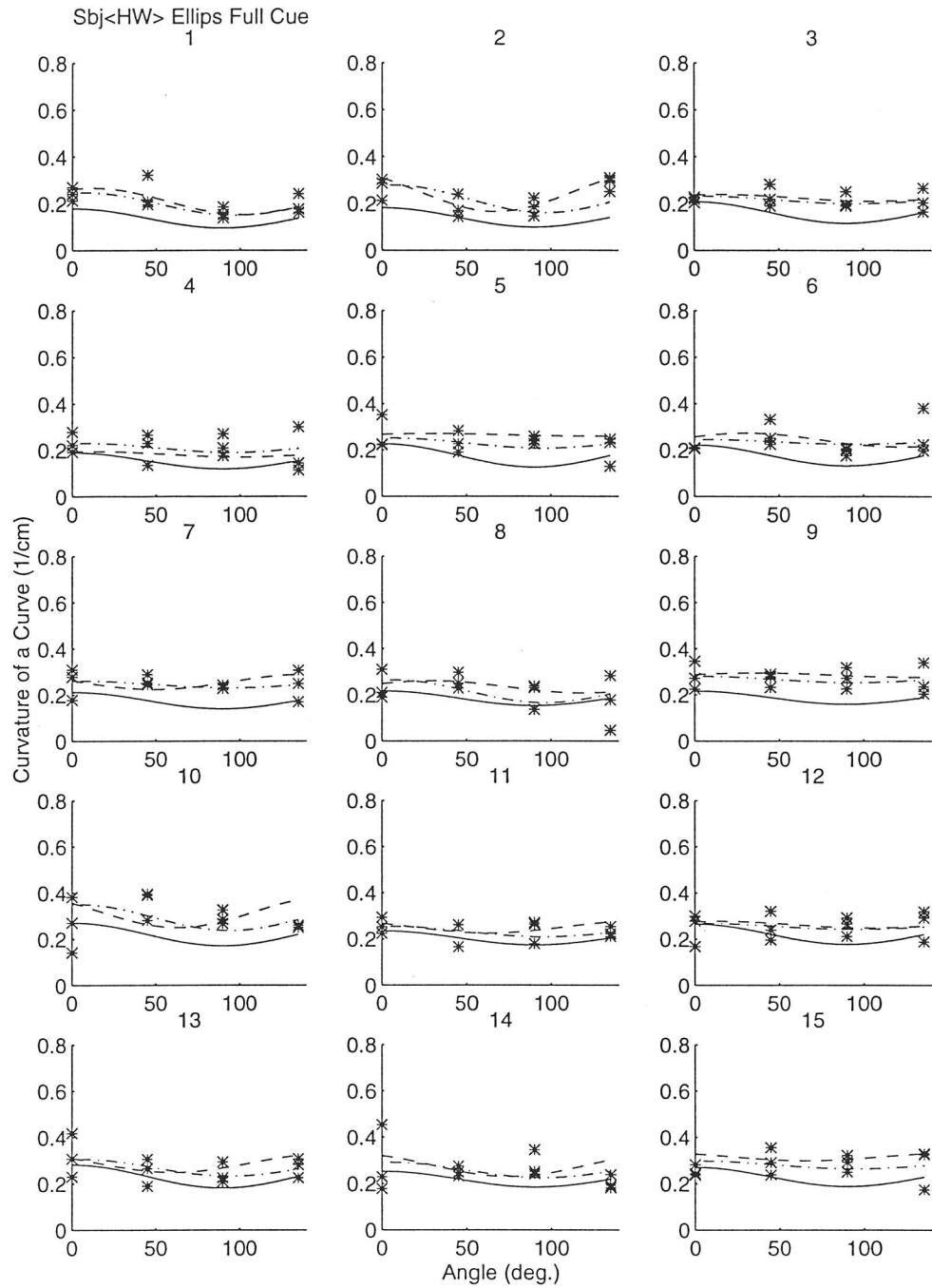


図 3.2-a 推定された曲率と真の値との比較（楕円面・Full cue 条件、被験者 HW）

*は描画軌道の曲率、実線は真の曲線の曲率、破線は CFC 法によって推定された曲線の曲率、一点鎖線は DFF 法によって推定された曲線の曲率を示す。

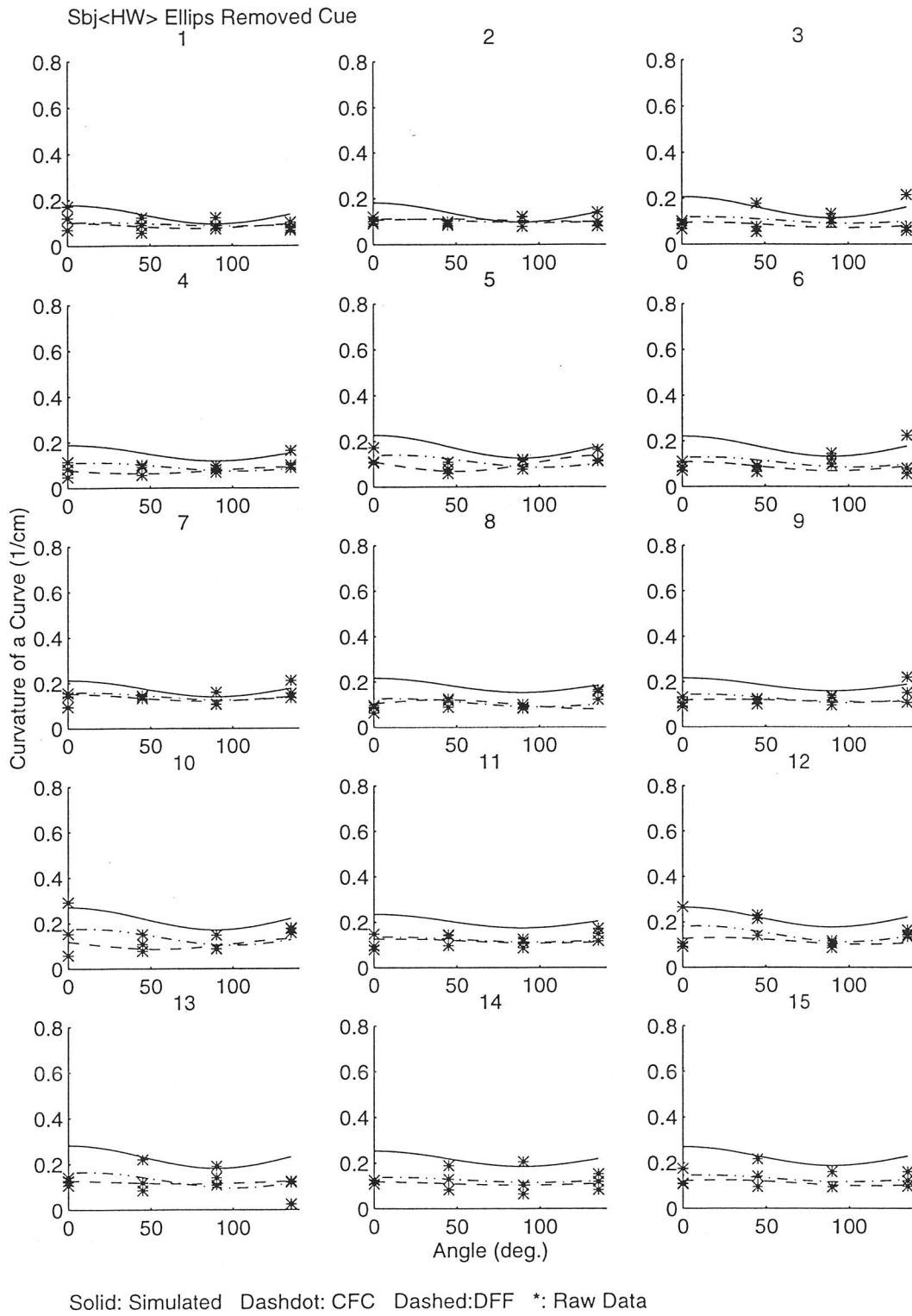
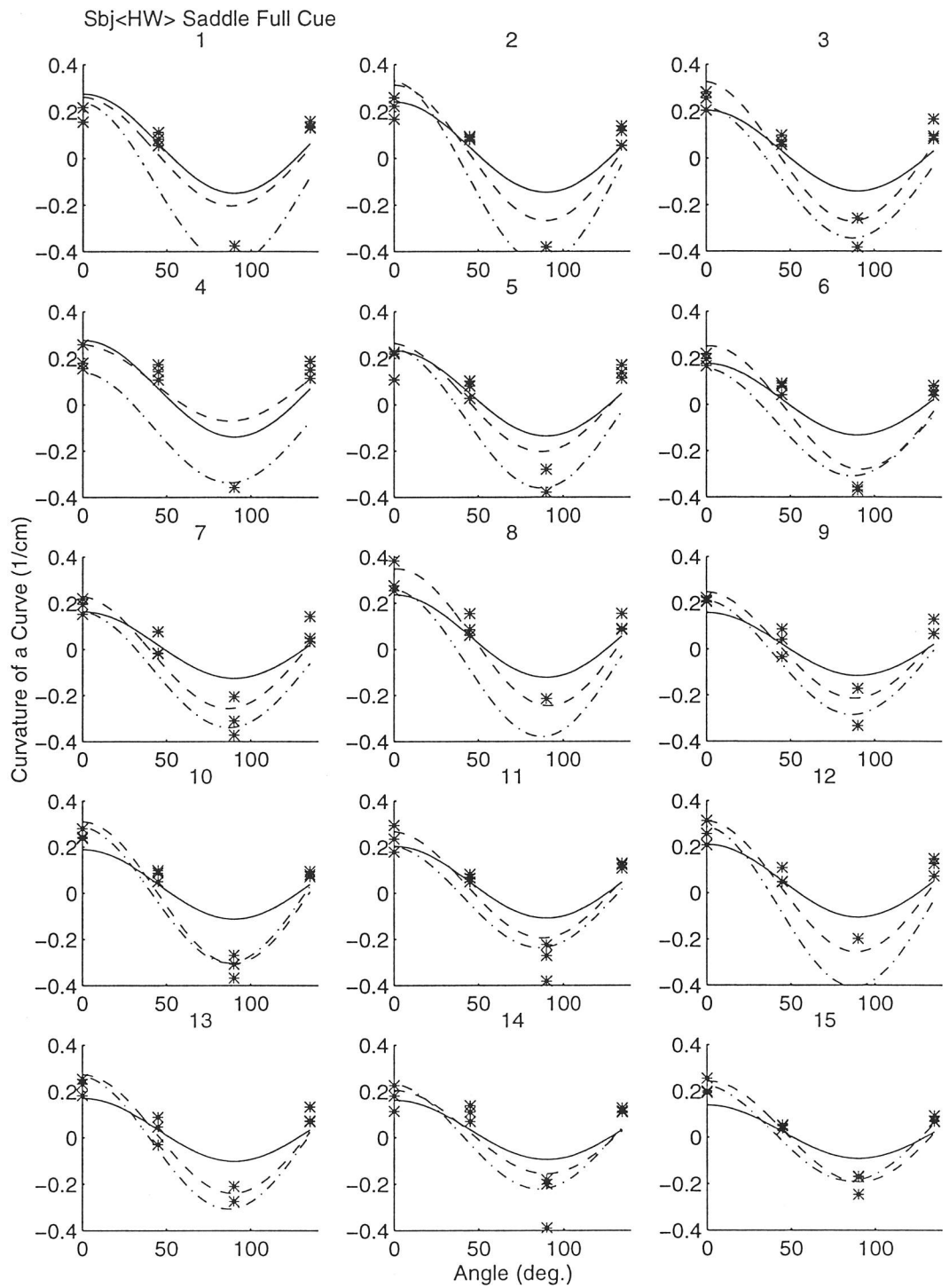
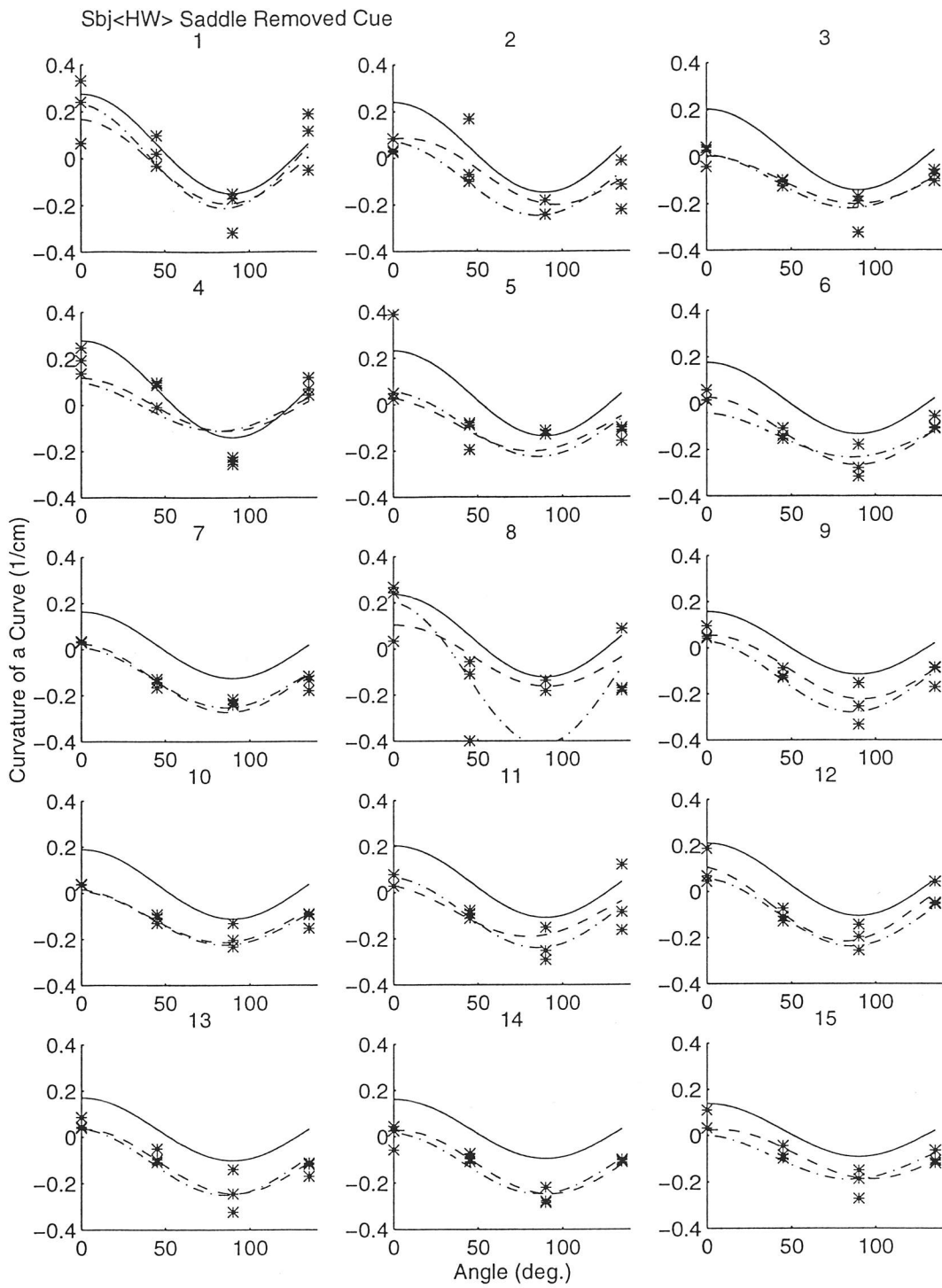


図 3.2-b 推定された曲率と真の値との比較 (楕円面・Removed cue 条件、被験者 HW)



Solid: Simulated Dashdot: CFC Dashed: DFF *: Raw Data

図 3.2-c 推定された曲率と真の値との比較 (双曲面・Full cue 条件、被験者 HW)



Solid: Simulated Dashdot: CFC Dashed:DFF *: Raw Data

図 3.2-d 推定された曲率と真の値との比較 (双曲面・Removed cue 条件、被験者 HW)

3.5 考察

議論の対象とするのは次の2点である。

問題1 被験者のデータのトレンドは Euler の公式で説明ができるか？

問題2 データから再構成された Euler の公式と真の値の差はいかほどか？

本実験では楕円面条件と双曲面条件で最大主曲率と最小主曲率の差が統一されていない。実験1の結果は、曲率の表現がグローバルな面の形状だけには依存しないことを示しており、ここでの議論もすべて主曲率間の差を考慮に入れて行う。

まず問題1については、4方向について3回繰り返された描画軌道の曲率（図3.2内の*印）と、推定された Euler の公式の間でフィットの具合を見ればよい。式(1.8)で示された Euler の公式を線形の方程式に書き換えた式(1.9)を用いて、12個の素データをフィットすることを考え重回帰分析を行った。二つの視覚条件のもとで用いられた30個の面（楕円面、双曲面各15個）について得られたデータすべてに対して重回帰分析を行い、決定係数(R^2)を求めた。

図3.3は横軸に各面の最大、最小主曲率間の差をとり、縦軸に決定係数をプロットしたものである。主曲率の差が0.2以上の範囲にプロットされたデータ点はすべて双曲面データから得られたものであり、それ以外は楕円面データから得られたものである。すべての条件において決定係数の値は主曲率間の差に比例することがわかる。

次に問題2については推定された Euler の公式と真の Euler の公式の間での2乗誤差を見ればよい。0度から135度の間を1度間隔でデータ点を取り両者の2乗誤差を求めた。しかし真の Euler の公式の値は楕円面と双曲面で異なる分散をもつため、2乗誤差を真の値の分散で正規化を行った。図3.4は横軸に最大—最小主曲率の差をとり、縦軸に正規化された2乗誤差をプロットしたものである。ここから主曲率間の差が大

きいと正規化された2乗誤差は小さくなることがわかる。

ここまでの議論から主曲率間の差が大きい面に対しては、被験者が応答した曲線の曲率を Euler の公式に従う形で再現することが可能であることがわかった。しかしその現象と面の大局的な形状との関係はわからない。また4方向の描画データだけを用いているために、Euler の公式のフィットも信頼性のあるものとはいえない。これらの問題点を解決するために実験3を行った。

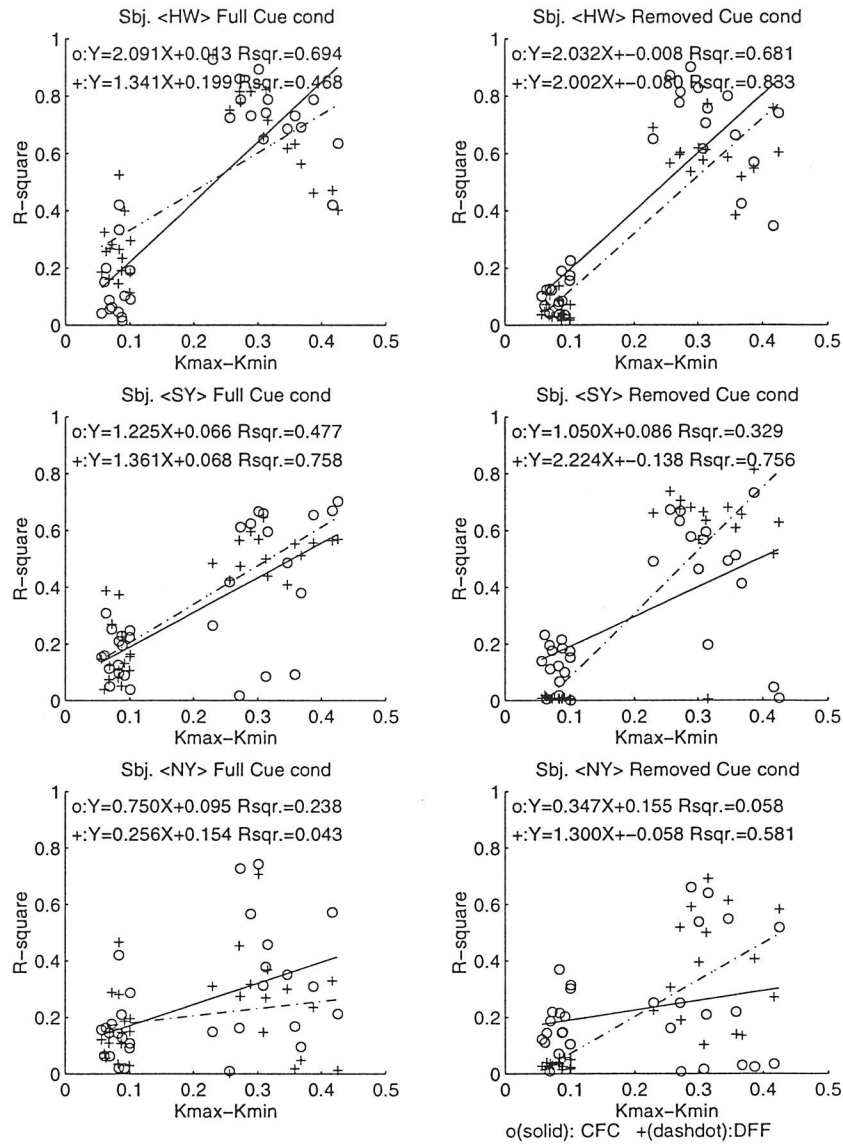


図3.3 決定係数と主曲率の差の関係

3名の被験者の素データに Euler の公式をフィットしたときの決定係数を、各面の最大、最小主曲率の差に対してプロットしたもの。○はCFC法によるフィットの決定係数、+はDFF法によるフィットの決定係数を各々示す。また、実線、一点鎖線はそれぞれの推定方法のもとでの決定係数と主曲率の差の回帰直線を示す。

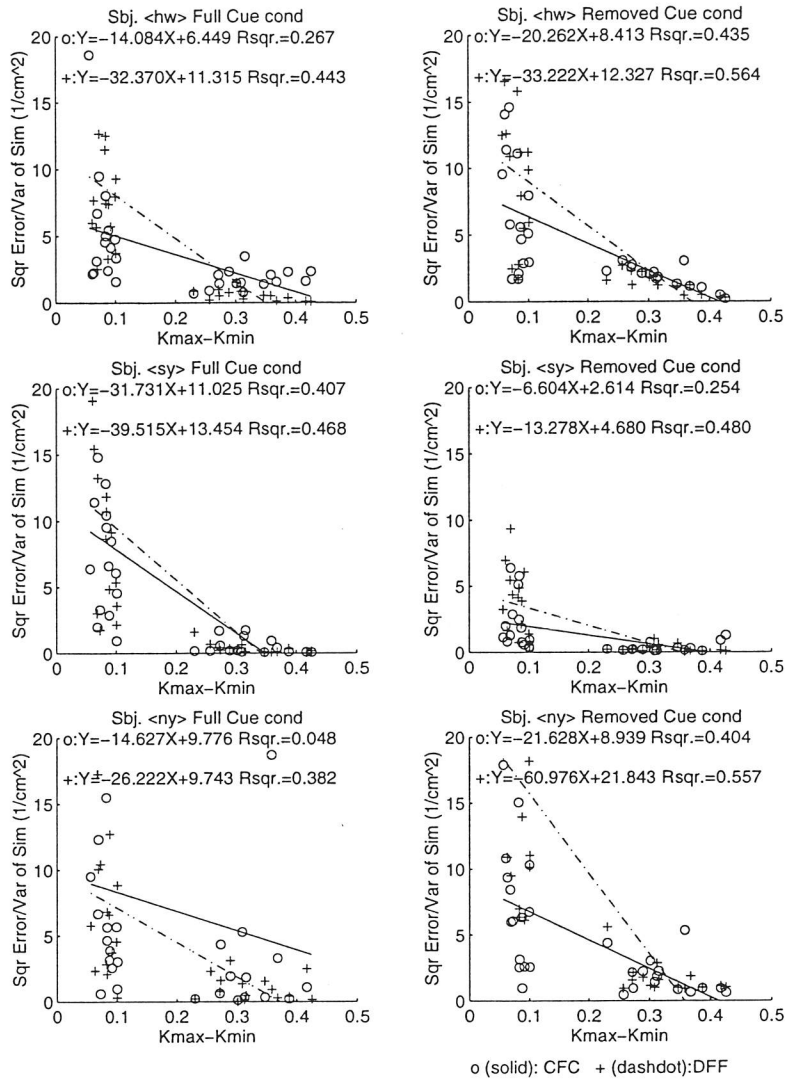


図 3.4 正規化された 2 乗誤差と主曲率の差の関係

各々の面において真の Euler の公式とフィットされた Euler の公式の間の 2 乗誤差を真の値の分散で正規化し、最大、最小主曲率の差に対してプロットしたもの。○は CFC 法、+は DFF 法による処理のもとで得られた、正規化された 2 乗誤差を示す。また、実線、一点鎖線はそれぞれの推定方法のもとでの 2 乗誤差と主曲率の差の回帰直線を示す。

4 実験3 曲線の曲率と主曲率方向からの角度の関係

4.1 目的

前章における議論から最大主曲率と最小主曲率の間で変化していく曲線の曲率に対する人間のパフォーマンスをより詳細に観察する必要があると考えられた。また実験2の条件では、楕円面と双曲面がもつ最大主曲率と最小主曲率の差が一定ではないので、実験1で議論した面の unbilicalness によるパフォーマンスの精度についても公平な比較ができない。そこで本実験では楕円面と双曲面上の一点を通る多様な方向に対して実験2と同じ描画運動課題を行い、報告された曲線の曲率と主曲率方向からの角度との関係について検証を行った。

4.2 方法

4.2.1 被験者

正常な立体視力を持つ成人3名（以下 CY,NA,TT）および第一筆者（HW）。被験者 CY,NA,TT は実験の仮説について事前の知識は持っていない。

4.2.2 装置

使用する機材、セットアップの状況等は実験2と同じである。

4.2.3 実験条件

呈示される表面刺激は、実験2と同様に式(2.3)で定義される1種類の楕円放物面と1種類の双曲放物面である。実験で用いられた面のガウス曲率、最大、最小主曲率を表4.1に示す。なお本実験では楕円放物面と双曲楕円面の間で最大主曲率と最小主曲率の差が一定であるようなパラメータを選んだ。

表 4.1 実験3で用いられた表面刺激のガウス曲率、最大、最小主曲率

面	ガウス曲率 (1/cm ²)	最大主曲率 (1/cm)	最小主曲率 (1/cm)
楕円放物面	0.015	0.3	0.05
双曲放物面	-0.015	0.15	-0.10

また実験1、2と同様に視覚手がかり条件として Full cue 条件と Removed cue 条件を用いた。各試行ごとに面は視線方向（Z軸）に沿ってランダムに回転を行った。

4.2.4 実験手続き

実験手続きはおおむね実験2に準ずる。被験者の課題は、画像内の2次曲面上に呈示された3点（始点、終点、経由点）間を、経由点をとるように始点から終点まで面上を「なぞる」ことである。経由点は常に面の頂点（前額平面で中央位置）に呈示される。本実験の手続き上で実験2と大きく異なるのは、描画方向の多様さと描画中の始点、終点、経由点の可視化の2点である。まず描画方向は、最大主曲率方向と最小主曲率方向の間を6度刻みに15等分した16方向に変化する。また実験の目的上、被験者に描画方向を正しく理解させる必要があるため、描画中も始点、終点、経由点を面上に呈示させたままにしておいた。

以上2種類の表面形状、2種類の視覚手がかり条件の組み合わせによって得られる4個の面それぞれについて16方向の描画を行う計64回の試行を1セットとし、各被験者は6セットを行った。またすべての実験変数はランダム化された。

4.3 結果

各面上で16方向6回ずつ行われた描画データに対して実験2と同じ基準で、切り出し、alignmentを行い、CFC法とDFF法の両方を用いて主曲率および主曲率方向を推定した。

図4.1に方向に依存する真の曲線の曲率（赤）、16方向の曲線に対して6回の繰り返しを行ったときの描画軌道の曲率（黒星）、およびDFF（緑）、CFC（青）によって推定された主曲率、主曲率方向から再構成された曲線の曲率を示す。さらに各方向での繰り返しにともなう軌道の曲率の標準偏差（紫実線）、真の値との平均2乗誤差（紫破線）も重ねて表示した。また表4.2に推定されたパラメータに関する統計検定の結果を示す。

結果を要約すれば以下のようなになる。

- 1) 被験者は曲線の曲率の変化を面の形状にかかわらず追いかけることができる。
- 2) 楕円面、双曲面ともにFull cue条件のほうが、Eulerの公式によってデータのトレンドをよく説明できる。
- 3) 表面形状の違いはフィットのよさに大きな違いをもたらさなかった。
- 4) 全ての条件において曲線からの曲率法のほうが重相関係数 R^2 の値は高く、パラメータの推定も統計的に有意である場合が多かった。
- 5) ほぼすべての場合において、式(1.9)のフィッティングは統計的に有意だった。

表4.2 重回帰分析によって推定された各パラメータの有意性の検定および重相関係数 R^2

楕円面

Full cue condition

CFC	DFF
-----	-----

	R ²	A	B	C	R ²	A	B	C
HW	0.59	**	*	-	0.56	**	**	-
CY	0.37	*	*	-	0.27	*	*	-
NA	0.44	**	*	-	0.0	+	+	-
TT	0.49	*	*	-	0.42	*	*	-

Removed cue condition

	CFC				DFF			
	R ²	A	B	C	R ²	A	B	C
HW	0.55	*	*	-	0.38	*	*	-
CY	0.42	*	*	-	0.36	*	*	-
NA	0.56	**	*	-	0.0	-	+	-
TT	0.52	*	*	+	0.49	*	*	-

双曲面

Full cue condition

	CFC				DFF			
	R ²	A	B	C	R ²	A	B	C
HW	0.92	-	***	+	0.91	-	***	-
CY	0.65	-	**	-	0.59	-	*	-
NA	0.83	+	**	+	0.75	+	**	-
TT	0.84	-	**	+	0.82	-	**	-

Removed cue condition

	CFC				DFF			
	R ²	A	B	C	R ²	A	B	C
HW	0.76	+	**	-	0.72	+	**	-
CY	0.57	-	*	-	0.56	-	*	-
NA	0.34	*	*	-	0.16	+	+	-
TT	0.43	*	*	-	0.41	*	*	-

(*** p<.001, ** p<.01, * p<.05, + p<.1)

4.4 考察

面の形状が知覚に及ぼす影響についてはこれまでいくつかの先行研

究(Kappers et al., 1994; de Vries et al., 1993)があり、双曲面に対するパフォーマンスの悪さが指摘されている。この現象に対するエコロジカルな説明としてもっともらしいのが人間の日常生活の中では双曲面は楕円面に比べて何らかの「親近性(familiarity)」を欠いた物体であるという指摘である(Kappers et al. 1994)。

本実験の結果も先行研究の示した双曲面に対するパフォーマンスの悪さを支持する結果となっているようだ。被験者が一方向につき6回繰り返して生成した描画軌道の曲率の標準偏差、および真の値からの2乗誤差を求め、形状要因のみに注目して被験者間、視覚手がかり条件間で平均値を算出し t 検定を行った。その結果繰り返しによる反応の標準偏差は形状条件間で差がなかった($avg=0.08\text{cm}^{-1}$ (楕円面), 0.09cm^{-1} (双曲面)、 $t=0.87$, $df=254$, n.s.)が、真の値からの平均2乗誤差は楕円面の方が有意に小さかった($avg=0.11\text{cm}^{-1}$ (楕円面), 0.15cm^{-1} (双曲面)、 $t=4.52$, $df=254$, $p<0.001$)。つまり被験者内での反応のばらつきは面の形状にかかわらず一定であるのに対し、被験者は楕円面条件の方がより真の曲率に近い軌道を生成していたことになる。一方主曲率方向からの角度と曲線の曲率の関係を記述する Euler の公式をフィットさせたときの重相関係数の値は、双曲面条件のほうが高い(視覚手がかり条件を無視した4人の被験者の平均値は楕円面で0.49、双曲面で0.67)。したがって次のように結果を要約することができるだろう。軌道方向一つ一つに対するパフォーマンスの精度は平均的には楕円面のときのほうがよい。しかし双曲面に対するパフォーマンスは真の値からずれるが、パフォーマンス自体の変化は Euler の公式でよく説明できる。

このことは推定されたパラメータの統計的な有意性からも確認できる(表4.2)。楕円面では被験者全員のパラメータA、Bが有意だったが、双曲面ではパラメータBのみ有意な推定がなされている。パラメータAは式(1.10)で示されたように平均主曲率を表わしている。したがって楕円面において平均主曲率が軌道データのなかによく再現され、双曲面で

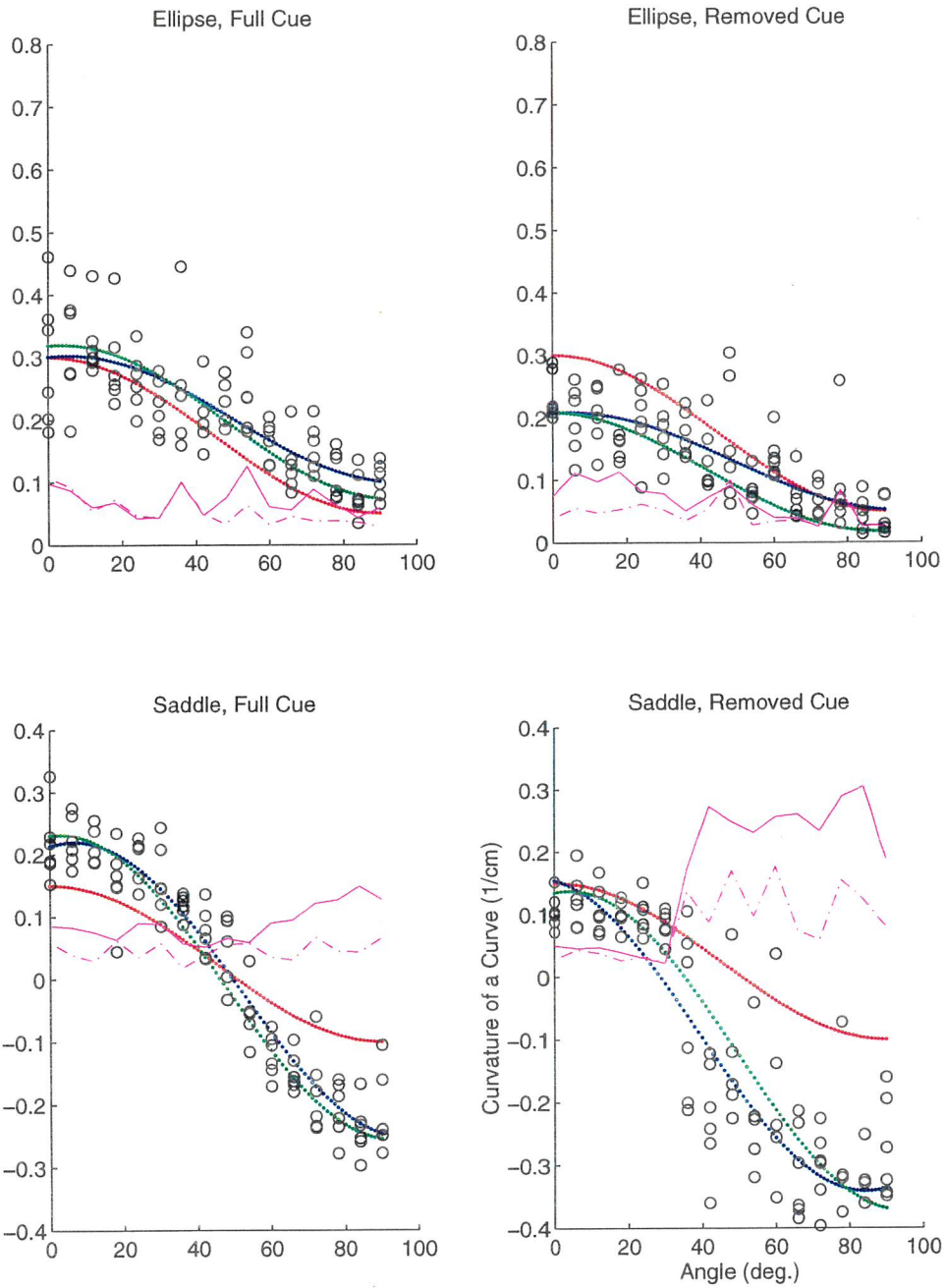
はそれがうまく再現されていなかったと考えると、先ほどの個別のデータの精度とフィットの関係が理解できる。つまり双曲面に対して反応を行うとき、脳内に表現された最大主曲率と最小主曲率のどちらか一方が真の値からずれているけれども、それらをつなぐ曲率の変化は Euler の公式でフィットできるように表現されている。したがって平均主曲率が間違ってしまうのである。Fig. 4.1 からもこのことは読み取れる。双曲面のデータにフィットされた曲線は、多くの場合最大主曲率(Angle=0)が真の値に近づき、最小主曲率(Angle=90)が真の値からはなれていく傾向を見せている(被験者 HW, TT の双曲面 Full cue 条件、Removed cue 条件、被験者 NA の双曲面 Full cue 条件)。一方楕円面のデータにフィットされた曲線は、一見真の曲線の最大・最小主曲率と一致しているように見えるが最大・最小主曲率をつなぐ範囲のデータにはばらつきが生じている(被験者 HW, TT の楕円面 Full cue 条件)。

またもう一つ興味深い点として、面に含まれる曲率ゼロ成分に対するパフォーマンスが挙げられる。本実験では楕円面のパラメータを決定する際に最小主曲率($\kappa_{\min}=0.05/\text{cm}$)ができるだけ0に近く、また最大主曲率と最小主曲率の差が楕円面と双曲面で同じ($\kappa_{\max}-\kappa_{\min}=0.25/\text{cm}$)になるようにした。したがって本実験で用いた楕円面と双曲面の最大・最小主曲率間の変化を変形された Euler の公式(式(1.9))によって記述することを考えると、二つの面は平均曲率を示すパラメータ A によってのみ区別されることになる。しかし被験者の曲率ゼロ付近におけるパフォーマンスは、楕円面と双曲面の間で定性的にも定量的にも異なることが示されたのである。たとえば双曲面の曲率ゼロ付近($\theta \doteq 50.8^\circ$)において被験者の軌道の曲率の符号は試行間で不安定に逆転する。一方楕円面の曲率ゼロ付近($\theta=0^\circ$)においてそのようなことは一切起こっていない。ここで腕の運動制御の精度が悪くて直線軌道が描画できないという説明は考えにくい。なぜなら双曲面の曲率ゼロ付近における腕の運動誤差がそのまま楕円面においても一定であると仮定すれば、楕円面において

も曲率の符号の逆転が生じなければならないからである。つまり被験者は楕円面に対しては曲率ゼロ付近の曲線の曲率について敏感であるいっぽうで、双曲面が含んでいる曲率ゼロの成分を脳内で表現できていないのである。被験者の内観報告も双曲面の中に含まれる曲率ゼロの成分を表現として持っていないことを示している。もし曲線の曲率の変化について完全な形で Euler の公式が脳内に表現されているならばこのようなことは起こりえない。先行研究や本実験の結果が示す双曲面に対するパフォーマンスの悪さは、双曲面が奥行きにせよ曲率にせよ定量的に「表現できない部分」を持っているためではないだろうか。

以上のことをまとめると曲面上に描かれた曲線の曲率の脳内表現について、次のことが考えられる。主曲率付近については被験者のパフォーマンスはおおむねよい。また双曲面の中で曲率が0になる方向に近づくにつれてパフォーマンスは悪くなる。したがって定量的な曲率の表現の可能性として、主曲率に関する絶対的な値を表現として持っているか、あるいは曲線の曲率の変化が0になる方向を表現として持っていることになる。前者の場合、最大—最小主曲率間の曲線の曲率は何らかの補間によって表現されることになる。後者の場合曲率の変化という高階の微分値（奥行きから考えると4回の微分値）を表現として持っていることになる。実験1の結果と重ね合せると後者の解釈が妥当であると考えられる。

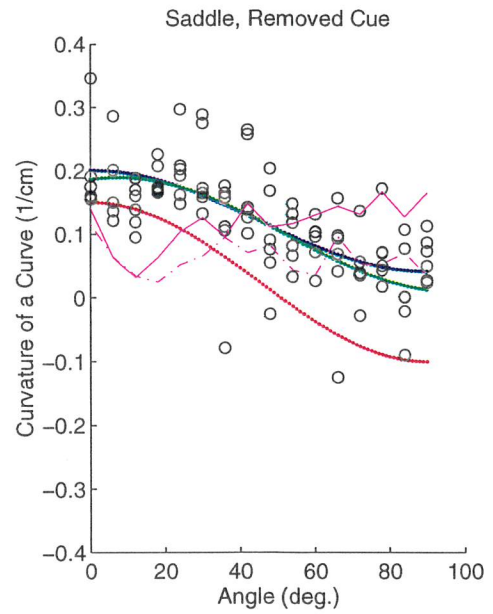
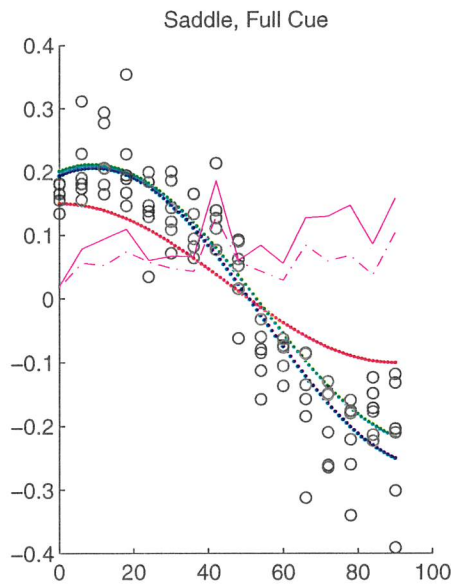
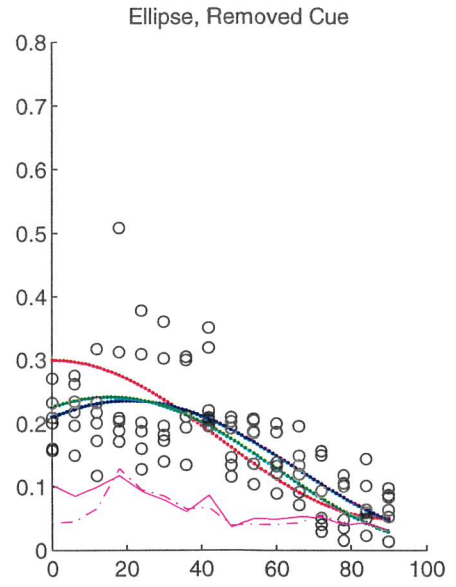
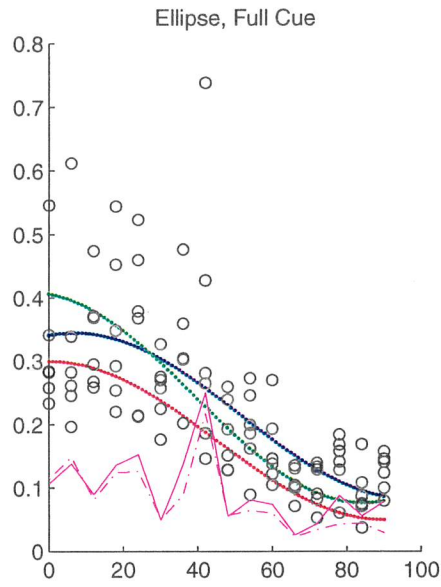
Subject HW



o: Raw data Solid: SD of Raw Dotted: SD of Raw-Sim
 Red: Simulated Blue: CFC Green: DFF

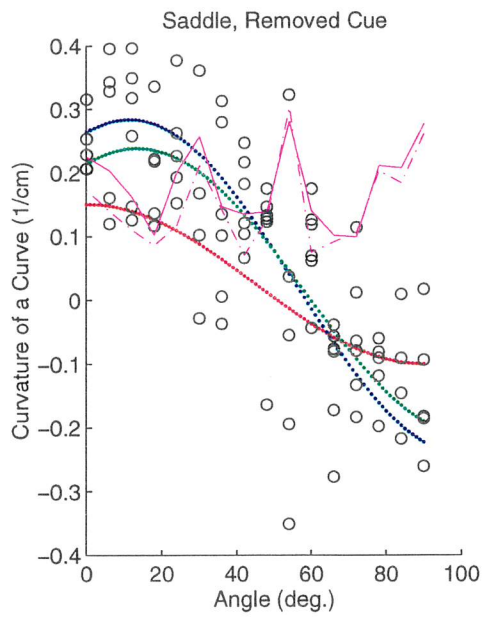
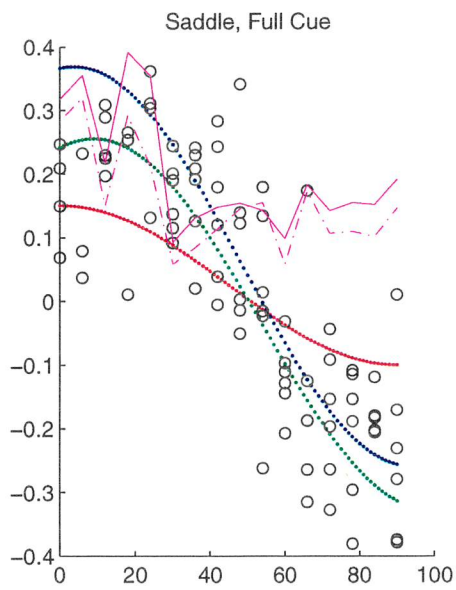
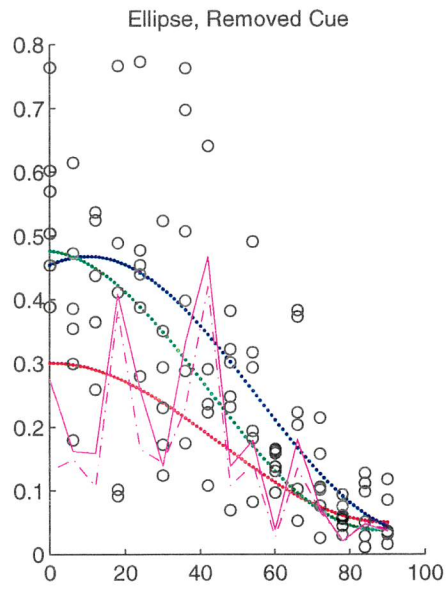
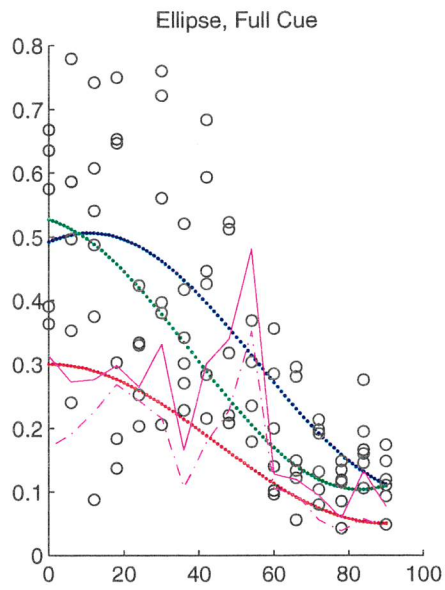
図 4.1 二つの推定方法によってフィットされた Euler の公式 (全被験者)。各面の頂点を通して16方向に反応された描画データの曲率 (*印) に二つの推定方法で Euler の公式がフィットされた (緑: DFF、青: CFC)。方向に依存して変化する曲線の曲率の真の値は赤線で示されている。各方向での繰り返しにともなう軌道の曲率の標準偏差 (紫実線)、および真の値との平均自乗誤差 (紫破線) も重ねて表示した。

Subject TT



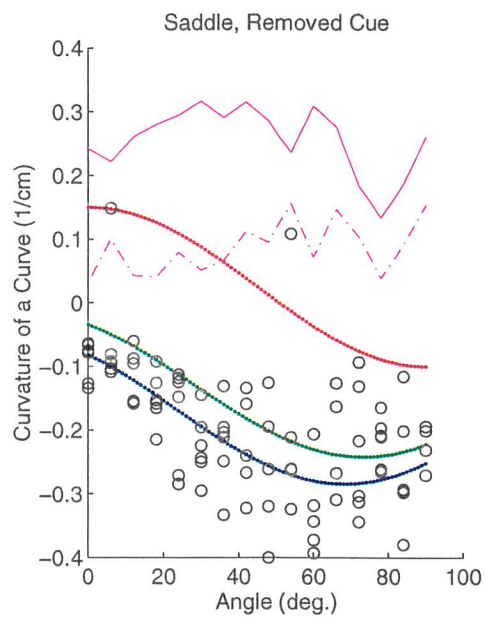
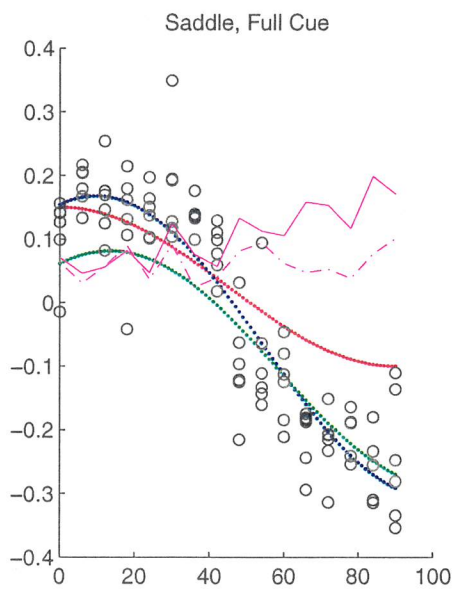
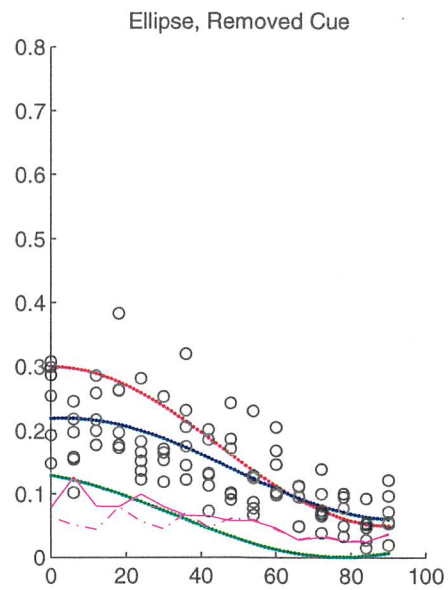
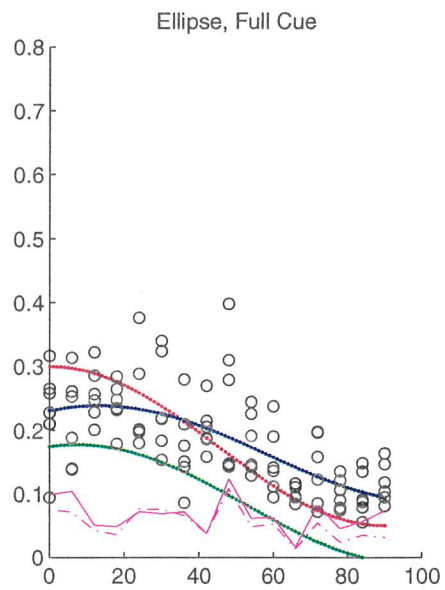
o: Raw data Solid: SD of Raw Dotted: SD of Raw-Sim
Red: Simulated Blue: CFC Green: DFF

Subject CY



o: Raw data Solid: SD of Raw Dotted: SD of Raw-Sim
 Red: Simulated Blue: CFC Green: DFF

Subject NA



o: Raw data Solid: SD of Raw Dotted: SD of Raw-Sim
Red: Simulated Blue: CFC Green: DFF

5. 実験4 曲線の曲率の符号判断における知覚と運動の乖離

5.1 目的

実験3の結果から、被験者は双曲面の中に含まれる曲率0の成分に対して、精度の悪いパフォーマンスを行うことが示唆された。しかしそれが知覚によるものなのか、運動によるものなのかはクリアではなかった。本実験では双曲面の中の小さな曲率を持つ部分を用い、知覚的な曲率の符号判断のいき値と、運動によって再現された曲率の符号のいき値を心理測定関数(psychometric function)をフィットすることによって推定し、比較した。またわれわれの実験が単に曲線の曲率に対するパフォーマンスを議論しているものではないことを示すために、面の中に埋め込まれた曲線と、曲線成分だけを刺激として用いることによって、パフォーマンスの違いを議論した。

5.2 方法

5.2.1 被験者

正常な立体視力を持つ成人4名。うち1名は筆者(HW)であり、残り3名は実験の仮説についてナイーブな被験者だった(AK, ME, CY)。

5.2.2 装置

使用する機材、セットアップの状況等は実験2,3と同じである。また知覚判断課題のときのみ反応デバイスとしてキーボードを使用した。

5.2.3 実験条件

表面刺激として式(2.3)で定義される2次曲面を用い、以下の手続きによって双曲面を130種類作成した。

- 1)判断すべき曲線の曲率は曲率ゼロを含む13種類に固定する[-0.05,

-0.04, -0.032, -0.024, -0.016, -0.008, 0, 0.008, 0.016, 0.024, 0.032, 0.04](1/cm)。

2) 1) で決めた曲率を与える曲線の方向をランダムに決定する。

3) 最大主曲率をランダムに決定し、Euler の公式から最小主曲率を求める。

この手続きを 10 回繰り返し、同じ曲線の曲率を異なる方向において持つ双曲面を 10 個ずつ作成した。

視覚手がかり条件には、実験 1、2、3 で用いられた Full cue 条件および Removed cue 条件に加えて No surface 条件が新たに採用された。Full cue および Removed cue 条件では、判断すべき曲線が面上に視差なしでスーパーインポーズされる。No surface 条件では面が取り除かれ、面上の奥行き変化に相当するように始点、終点、経由点を視差をつけた点を用いて高い密度でつないだ。

5.2.4 課題

知覚判断課題：面上に呈示された 3 点を面の奥行きに沿ってつないだ仮想的な曲線、あるいは面を取り除き視差をつけた曲線の曲率の符号 (+ / -) を強制選択法(two-alternative forced choice: 2AFC)で判断する。反応はキーボードを用いて行った。反応時間に制限は設けなかったが、なるべく早く答えるように教示した。結果的に、被験者の反応時間は平均すると 1 試行あたり 1 秒未満だった。

描画運動課題：実験 2、3 と同様にビープ音のタイミングにしたがって、面上にスーパーインポーズされた曲線の方向へ面に沿って描画する。あるいは面を取り除き視差をつけた曲線にそって描画運動を行う。反応の手続きは実験 2、3 と同じである。

5.2.5 実験デザイン

被験者は2つの課題を、13種類の曲線の曲率に対して与えられた3種類の視覚手がかり条件のもとで10セッション行った。面が与えられる条件では、セッションごとに異なる主曲率のペアをもつ面が用いられた。したがって被験者はある面をすべての試行を通じて1回しか見ない。またすべての実験変数はランダム化された。

5.3 結果および考察

運動課題の軌道データからの経路点付近におけるデータの切り出し、および曲率の計算方法は実験2、3と同じ手続きを用いた。そして各条件のもとで、各曲率に対して応答された曲率が正である確率を計算し累積正規分布曲線をフィットした。データの処理はSASパッケージのprobit-analysisを用いた。すべての被験者の心理測定関数を図5.1に示す。

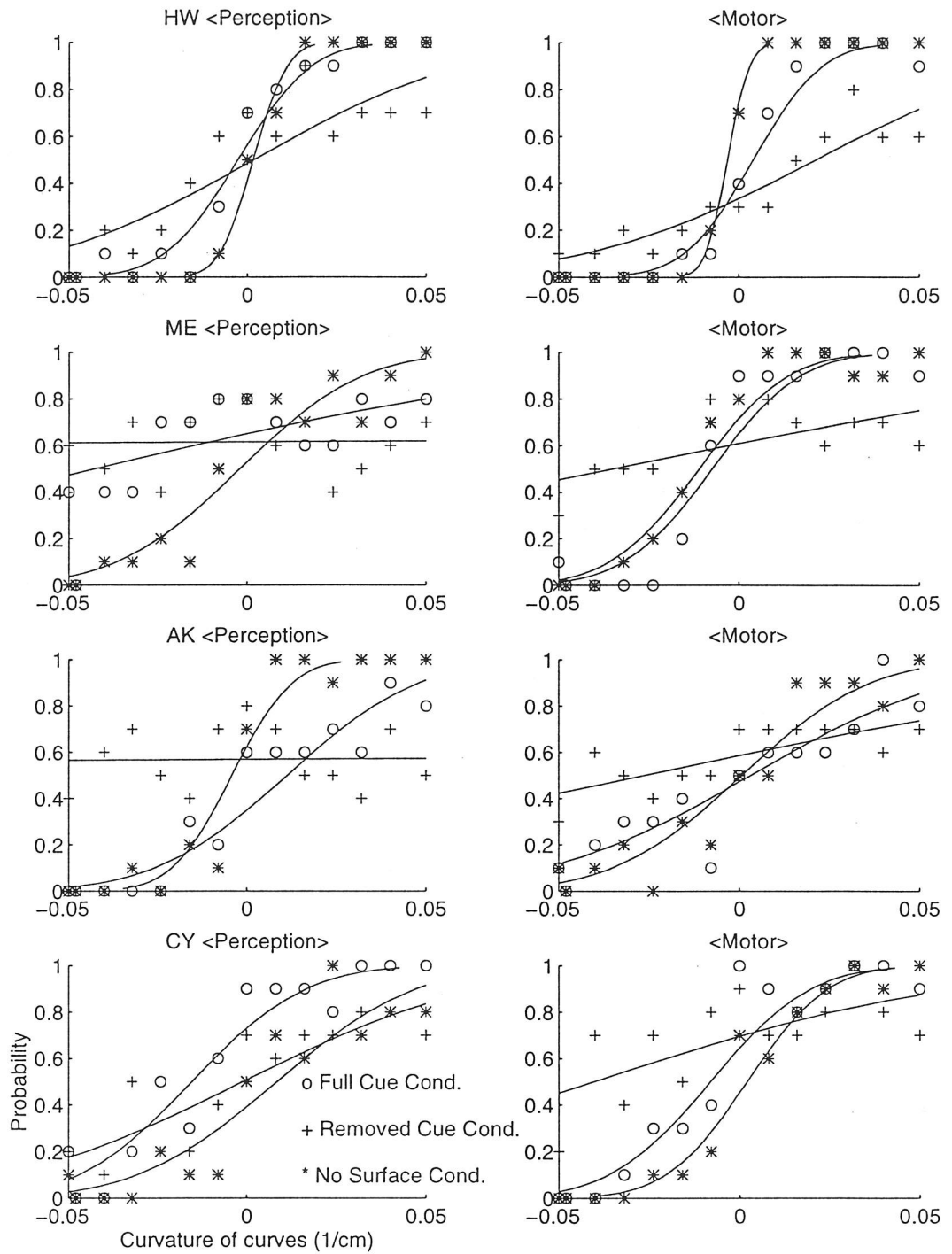


図5.1 4名の被験者の心理測定関数。左列は知覚課題、右列は運動課題の結果を表わしたもの。また各図、○は Full cue 条件、+は Removed cue 条件、*は No surface 条件のもとでの反応確率を表わす。

ある条件下の素データにフィットされた心理測定関数による他条件下の素データに対する説明可能性を調べるために、Kolmogorov-Smirnov two-sample test を行った。表 5.1 は三つの表面条件における運動課題と知覚課題の間で、フィットされた心理測定関数と素データの間で有意差をまとめたものである。またフィットされた心理測定関数を元に、正負の判断がちょうど 50%となるような曲率、およびそのときの心理測定関数の傾きを各条件でもとめ、単純に数値的な比較を行った。ここで m/p は凹凸の判断において、運動(m)と知覚(p)のどちらが敏感であるかを表わしている。同様に M/P は凹凸の判断において、運動(m)と知覚(p)のどちらが正確であるかを表わしている。ここで敏感さとは確率 50%における心理測定関数の傾き、正確さは確率 50%を与える曲率の絶対値の逆数として定義される。

同様に表 5.2 は運動課題と知覚課題のそれぞれの課題条件において、表面条件の間での検定結果をまとめたものである。

表 5.1 課題間での心理測定関数の比較

	Full	Remv.	No-surf.
HW	-	mP *	-
AK	-	mM **	mM **
ME	mM **	mM ***	-
CY	-	mP +	mM *

(*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, + $p < 0.1$)

曲線の凹凸に関する判断の感度、あるいは正確さについてデータは以下のことを示した(表 5.1)。Full cue 条件では被験者 ME を除いて運動課題と知覚課題の間に統計的に有意な差はなかった。被験者 ME の心理測定関数は運動課題において 50% 点で傾きが大きく、またそのときの

曲率もゼロに近かった。すなわち曲線の曲率の符号に対して、運動課題の方がより敏感で、正確であったことを示した。Removed cue 条件では総じて心理測定関数はフラットであり、被験者のパフォーマンスが不安定だったことが示された。統計的には運動課題における符号の判断が敏感であったことが示された。最後に No surface 条件では、すべての条件において心理測定関数の傾きは大きく、この条件における符号の判断が高い感度で行われたことが示された。

表 5.2 視覚手がかり間での心理測定関数の比較

	Full vs Remv.		Full vs No-Surf.		Remv. vs No-Surf.	
	Motor	Percp	Motor	Percp	Motor	Percp
HW	*	n.s	*	n.s	***	*
AK	*	***	n.s	**	**	***
ME	**	n.s	n.s	**	**	***
CY	***	n.s	n.s	**	**	+

(*** p<0.001, ** p<0.01, * p<0.05, + p<0.1)

また、各課題で、視覚手がかり条件間での心理測定関数を比較すると(表 5.2)、次のような関係にあることがわかった。

運動：No surface=Full>Removed

知覚：No surface>Full=Remove

ここで”A>B”はA条件の心理測定関数のほうがより敏感で、正確であることを示す。No surface 条件が一番パフォーマンスがよく、Removed cue 条件が悪いという結果は運動課題、知覚課題で一致しているが、Full cue 条件が両課題の間で他の条件との異なる関係を示している。

視覚手がかり条件の違いがパフォーマンスに変化をもたらし、特に Removed cue 条件のときにパフォーマンスが悪くなるという現象は、これまでの議論と一貫する。そして知覚された曲率の符号と、運動によっ

て生成された軌道の符号が一致しないという事実は曲線の曲率の正負に関する判断において、両課題の間で処理の過程あるいは表現の形式に乖離が存在する可能性を示している。視覚情報が脳内で、出力に応じて異なる経路を経て処理されていることを示唆する生理学的、行動学的なデータはこれまでも少なからず存在し、(例えば Milner and Goodale, 1993; Goodale and Milner, 1992; Goodale, Milner, Jacobson, Carey, 1991; Ungerleider and Minshkin, 1982)、対象の位置や方向と認識が脳内の異なる部位、経路で処理されていることなどが紹介されている。また純粋に知覚心理学的な実験パラダイムからは、奥行き、表面方向、曲率が独立に表現されていることを示唆するデータが得られている(例えば、Koenderink et al., 1992; Johnston & Passmore, 1993)。しかし本実験のような、曲率といった高次の幾何情報がタスクスペシフィックに処理されていることを示すようなデータはこれまでに無いと思われる。

さらに興味深いことは曲線のみを与えられた場合、運動課題と知覚課題の間で顕著な違いが見られなかった点である。推定された心理測定関数は、課題条件にかかわらず判断の敏感さ、正確さを示している。また面が与えられた場合の心理測定関数とも異なっている。このことは、曲線の表現と曲面の表現が異なるものであることを示唆し、実験2、実験3での議論が「曲線の脳内表現」ではなく、「曲面の脳内表現」を扱ってきたことをサポートするものであろう。

また双曲面における曲率ゼロの成分の知覚や、運動による再現の難しさが、本実験の結果直接明らかになったことで、実験2、3の双曲面に対するパフォーマンスの悪さも説明できるものと考えられる。本実験の予備実験として、最小主曲率が0に近い楕円面を用いて同様に曲線の曲率の符号判断を行ったが、すべての曲線に対する判断は完全に正しかった。これらのことから、曲面上に描かれた曲線の曲率に対する表現は面のグローバルな形状からも影響を受けることが考えられる。

6. おわりに

面の形状、視覚手がかり、曲率の推定法などの条件を組み合わせて脳内における面の曲率の表現について定量的な議論を行ってきた結果次のことがわかった。1) 人間は主曲率方向をポインティング課題を用いてよい精度で報告することができる（実験1）。2) 人間は描画運動課題を用いて、曲面の曲率をある程度まで曲線の曲率の集合として表現し、その変化を報告することができる（実験2、3）。3) 描画運動から得られたデータは、奥行き集合として扱うよりも曲率の集合として扱ったほうがデータをよりよく説明できる（実験2、3）。このことから脳内における曲率の独立した表現が示唆される。4) 面の形状は曲率の表現に影響を及ぼす可能性がある。この現象は主曲率の差と関連づけて議論することができる（すべての実験）。5) 認知系と運動系の間で曲率の表現は異なっている。また曲線の表現と曲面に埋め込まれた曲線の表現も異なっている（実験4）。6) 視覚手がかりの増減は曲率の表現に影響を及ぼし、それはテクスチャの有無によって顕著に観察される（すべての実験）。7) 曲線の曲率の絶対値よりもむしろその変化について表現をもっている（実験1、2、3）。

今後の展開としては1) 面のグローバルな形状による効果を取り除くために、3次以上の形状を用いて同様の実験を行う、2) 異なる運動課題を用いることで曲率がタスクスペシフィックな表現であることを示す、等が考えられる。

文献

- Bulthoff, H. H., & Mallot, H. A. (1988) Integration of depth modules: stereo and shading. *Journal of Optical Society of America A*, **5**, 1749-1758.
- Carmen, G. J. & Welch, L. (1992) Three dimensional illusory contours and surface. *Nature*, **360**, 2189-2202.
- Erens, R. G. F., Kappers, A. M. L., & Koenderink, J. J. (1993) Perception of local shape from shading. *Perception & Psychophysics*, **54**, 145-157.
- Felleman, D. J., & Van Essen, D. C. (1991) Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, **1**, 1-47.
- Gibson, J. J. (1979) *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin Company. 古崎敬、古崎愛子、辻敬一郎、村瀬旻 (訳) : 『生態学的視覚論』 . サイエンス社 (1985).
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992) Separate visual pathways for perception and action. *Trends-in-Neurosciences*, **15**, 20-25.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jacobson, L. S., & Carey, D. P. (1991) A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, **349**, 154-156.
- Horn, B. K. P. (1977). Understanding image intensities. *Artificial Intelligence*, **8**, 201-231.
- 乾敏郎. (1990) 視覚情報処理の基礎, サイエンス社.
- Johnston, A & Passmore, P. (1993) Independent encoding of surface orientation and surface curvature. *Vision Research*, **34**, 3005-3012.
- Julesz, B. (1971) *Foundations of Cyclopean Perception*. University of Chicago Press, Chicago.
- Kappers, A. M. L., Koenderink, J. J., & Lichtenegger, I. (1994) Haptic identification of curved surfaces. *Perception & Psychophysics*, **56**, 53-61.
- Knill, D. C., & Kersten, D. (1991) Apparent surface curvature affect lightness perception. *Nature*, **351**, 228-230.
- Koenderink, J. J. (1990). *Solid shape*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Koenderink, J. J., van Doorn, A. J., & Kappers, A. M. L. (1992) Surface perception in pictures, *Perception & Psychophysics*, **52**, 487-496.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational Investigation int the Human Representation and Processing of Visual Information*. Freeman, W. H. & Company, New York. 乾敏郎、安藤広志 (訳) : 『ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現』 . 産業図書 (1987).

- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1993) Visual pathways to perception and action. In T. P. Hicks, S. Molotchnikoff & T. Ono (Eds.), *Progress in brain research. The visually responsive neuron: From basic neurophysiology to behavior*. Amsterdam: Elsevier, 1993.
- Newsome, W. T., Mikami, A., & Wurtz, R. H. (1986) Motion selectivity in macaque visual cortex: III. Psychophysics and physiology of apparent motion. *Journal of Neurophysiology*, **55**, 1340-1351.
- Norman, J. F., Todd, J. T., & Phillips, F. (1995) The perception of surface orientation from multiple sources of optical information. *Perception & Psychophysics*, **57**, 629-636.
- Phillips, F., & Todd, J. T. (1996) Perception of local three-dimensional shape. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22**, 930-944.
- Pollick, F. E., Nishida, S., Koike, Y., & Kawato, M. (1994) Perceived motion in structure from motion: Pointing responses to the axis of rotation. *Perception & Psychophysics*, **56**, 91-109.
- Pollick, F. E., Watanabe, H., & Kawato, M. (1996) Perception of local orientation from shaded images. *Perception & Psychophysics*, **58**, 762-780.
- 小倉金之助、矢野健太郎監修 (1990) 基礎数学ハンドブック 森北出版株式会社.
- Ramachandran, V. S. (1988) Perceiving shape from shading. *Scientific American*, **259**, 76-83.
- Rogers, B. & Cagenello, R. (1989) Disparity curvature and the perception of three-dimensional surfaces. *Nature*, **338**, 135-137.
- Stevens, K. A. (1981) The visual interpretation of surface contours. *Artificial Intelligence*, **17**, 47-43.
- Todd, J. T., & Reichel, F. D. (1989) Ordinal structure in the visual perception and cognition of smoothly curved surface. *Psychological Review*, **96**, 643-657.
- Ungerleider, L. G., & Minshkin, M. (1982) Two cortical visual systems, in *Analysis of Visual Behavior* (D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield, Ed.), Cambridge, MA: The MIT press.
- Van Essen, D. C., Fellman, D. J., DeYoe, E. A., Olavarria, J., & Knierim, J. (1990) Modular and hierarchical organization of extrastriate visual cortex in the macaque monkey. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, **L V**, 679-696.
- von der Heydt, R., & Peterhans, E. (1989) Mechanism of contour perception in monkey visual cortex I. Lines of pattern discontinuity. *The Journal of*

Neuroscience, 9, 1731-1748.

de Vries, S. C. (1993) *Binocular perception of spatial configuration*.
Doctoral dissertation, University of Utrecht.

de Vries, S. C., Kappers, A. M. L. & Koenderink, J. J. (1993) Shape from
stereo: A systematical approach using quadratic surfaces. *Perception &
Psychophysics*, 53, 71-80.

Watanabe, H., Pollick, F. E., & Kawato, M. (1995) Perception of surface
geometry as indicated by three-dimensional drawing movements.
ARVO Annual Meeting abstract.

Zeki, S. (1993) *A Vision of the Brain*. Blackwell Scientific Publications,
Oxford. 河内十郎 (訳) : 『脳のビジョン』. 医学書院 (1995).

謝辞

本研究は HFSP(Human Frontier Science Program)からの助成を受けた。

ご討論いただいた A T R 人間情報通信研究所の皆様には感謝いたします。また SGI 上でのプログラム作成などにご協力いただいた向田茂氏、実験に協力していただいた、田中薫子氏、栗田めぐみ氏、長尾淑江氏、望月博美氏、そして研究の機会を与えて下さった A T R 人間情報通信研究所東倉洋一社長に感謝いたします。