

平成26年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目  
帯状三次元座標取得装置を用いた曲面モデリング

主専攻 知能情報メディア主専攻

著者 上村 紳一郎

指導教員 三谷 純

## 要 旨

CG および CAD を用いた形状設計において、自由曲面は重要な形状要素である。しかしながら、その入力手法は制御点の位置をマウスカーソルで操作するものがほとんどであり、直観的な操作で迅速に曲面を生成することはできない。そこで、本研究ではテープ状の形をした三次元座標取得装置を用いることで、自由曲面を直観的かつ迅速に生成するための新しいユーザインタフェースを提供することを目的とした実験およびシステム開発を行った。まず、装置の性能評価を行い、その後に装置に組み込まれているセンサから得られる点列からのポリゴンメッシュ生成を行った。また、装置が弾性体であるという仮定に基づいて、得られる点列をスプライン曲線近似し、この曲線の掃引による曲面生成手法の提案、および得られた曲面の曲率評価を行った。これにより、テープ状の装置を用いることで、対話的かつ直観的な操作で滑らかな曲面を生成できることを確認した。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究目的 . . . . .	1
1.2	本論文の構成 . . . . .	3
<b>第 2 章</b>	<b>関連研究</b>	<b>4</b>
2.1	三次元触覚型デバイス . . . . .	4
2.2	没入型モデラ . . . . .	4
<b>第 3 章</b>	<b>装置の性能評価</b>	<b>6</b>
3.1	機能 . . . . .	6
3.2	精度の検証 . . . . .	6
3.2.1	校正 . . . . .	6
3.2.2	三次元空間における誤差評価 . . . . .	6
3.3	物性の検証 . . . . .	10
3.4	曲線近似 . . . . .	16
<b>第 4 章</b>	<b>曲面の生成</b>	<b>22</b>
4.1	曲面の生成方法 . . . . .	22
4.1.1	ShapeTape の座標列を直接使用する方法 . . . . .	22
4.1.2	近似曲線を使用した方法 . . . . .	22
4.2	曲面を生成する際のパラメータ . . . . .	25
4.2.1	$uv$ パラメータの定義 . . . . .	25
4.2.2	$v(t_v)$ による $u(t_u)$ の挙動の変化 . . . . .	25
4.3	ポリゴンサーフェスを曲面近似 . . . . .	25
4.4	生成曲面の特性評価 . . . . .	28
4.4.1	曲面の曲率 . . . . .	28
4.4.2	曲率の視覚的評価 . . . . .	28
<b>第 5 章</b>	<b>考察</b>	<b>36</b>
5.1	性能評価の考察 . . . . .	36
5.2	曲面生成の考察 . . . . .	36
<b>第 6 章</b>	<b>結論と今後の課題</b>	<b>37</b>

# 目 次

1.1	30cm 定規と共に撮影した ShapeTape . . . . .	2
1.2	提案手法で生成した曲面の例 . . . . .	2
1.3	rhinoceros5.0 を用いて曲面を作成している様子 . . . . .	3
2.1	phantom を使用している様子 . . . . .	5
2.2	モデルのディテールを編集している様子 . . . . .	5
2.3	没入型モデラを用いたシステムでのモデリングの様子 . . . . .	5
3.1	ShapeTape とそのセンサの模式図 . . . . .	7
3.2	可視化した点列とその際の ShapeTape . . . . .	7
3.3	ShapeTape を床で校正している様子 . . . . .	8
3.4	バイアス補正 . . . . .	8
3.5	各平面においてのねじれあり・ねじれなしの誤差測定の様子 . . . . .	9
3.6	各平面においてのねじれあり・ねじれなしの誤差測定グラフ結果 . . . . .	11
3.7	各平面においてのバイアス補正を抜いたねじれなしの測定結果 . . . . .	12
3.8	XY 平面の誤差値を 3次元で可視化した図 . . . . .	13
3.8	YZ 平面の誤差値を 3次元で可視化した図 . . . . .	14
3.8	ZX 平面の誤差値を 3次元で可視化した図 . . . . .	15
3.9	接ベクトル・従法線ベクトル・主法線ベクトルの模式図 . . . . .	16
3.10	最大曲率 0.65 を出力した際の ShapeTape . . . . .	17
3.11	最大振率 3.14 を出力した際の ShapeTape . . . . .	17
3.12	$t_j$ と $S_j$ の関係 . . . . .	18
3.13	補間点から近似曲線を作る流れの模式図 . . . . .	19
3.14	スプライン補間した座標列と近似曲線 . . . . .	20
3.15	近似曲線と点の距離を決定する方法 . . . . .	21
4.1	生成曲面のワイヤフレームモデル . . . . .	23
4.2	生成したポリゴン曲面のフラットシェーディング . . . . .	23
4.3	ポリゴン生成において座標点列をそのまま使った場合と近似曲線を用いた場合 . . . . .	24
4.4	$uv$ パラメータの模式図 . . . . .	26
4.5	$u(t_u)$ の姿勢変化の機能を用いて同じ入力違うポリゴン曲面を出力した様子 . . . . .	27
4.6	頂点法線 $N$ の算出 . . . . .	27

4.7	図 4.1 と同じポリゴンのスムーズシェーディング . . . . .	28
4.8	1-ring の近傍点のイメージ . . . . .	29
4.9	1.5-ring の近傍点のイメージ . . . . .	29
4.10	頂点 $P_i$ , 頂点 $Q$ , 法線 $N$ の関係 . . . . .	30
4.11	色相環 . . . . .	30
4.12	$v$ パラメータによる $u(t)$ の挙動変化 . . . . .	32
4.13	キューブマップの展開図 . . . . .	33
4.14	キューブマッピング例 . . . . .	33
4.15	実験で用いた縞模様テクスチャ . . . . .	34
4.16	6 方向とキューブマッピングの模式図 . . . . .	34
4.17	生成曲面にゼブラマッピングを行った結果 . . . . .	35
4.18	同じ曲面を視点を変えて評価している様子 . . . . .	35

# 第1章 序論

## 1.1 研究目的

CG および CAD を用いた形状設計において、自由曲面は重要な形状要素である。しかしながら、現在存在する自由曲面を生成するアプリケーションのうち、その入力手法は制御点の位置をマウスカーソルで操作するものがほとんどであり、直観的な操作で迅速に曲面を生成することはできない。例として rhinoceros5.0 というモデリングアプリケーションで自由曲面を生成する一例を紹介する。このアプリケーションではまず曲面を構成する曲線を任意の本数描き、その曲線の曲率を見ながら曲線を修正し、曲線と曲線の上にサーフェイスを貼る（図 1.3）。曲線描画はベジェ曲線を用いているのでユーザーが慣れるまで直感的かつ迅速な操作を行えるとは言いがたい。本研究では ShapeTape というテープ状の形をした三次元座標取得装置を用いることで、自由曲面を直観的かつ迅速に生成するための新しく基礎的なユーザーインターフェースを提案する。

三次元座標取得装置は Measurand 社の ShapeTape（図 1.1）を用いる。この装置は、主にモーションキャプチャーに使われることが想定されているが、内部に等間隔に埋め込まれたセンサによって、センサ位置の三次元座標およびねじれ情報を取得することができる。本研究では、この装置によって得られる情報を用いて自由曲面を生成するアプリケーションの開発を行う（図 1.2）。また、ShapeTape で得られるデータの精度評価など、アプリケーション開発に先立って必要となる基礎的な検証実験を行う。これらにより ShapeTape を使用したアプリケーションを開発する際に有用な装置の性能を提供する。



図 1.1: 30cm 定規と共に撮影した ShapeTape。

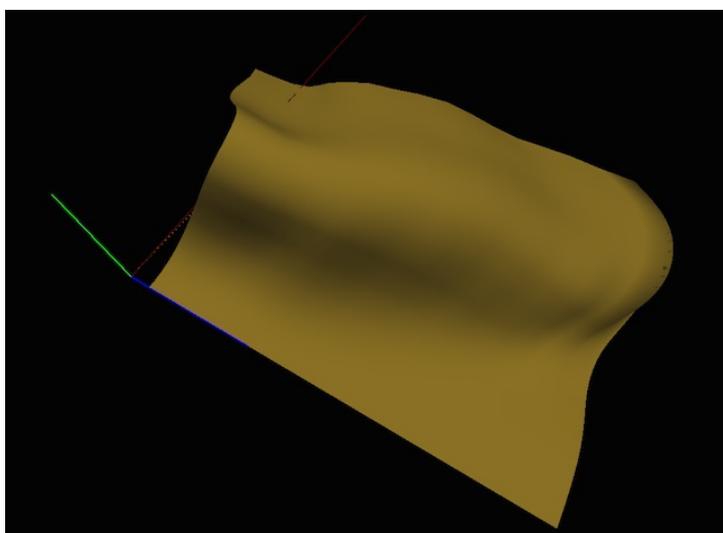


図 1.2: 提案手法で生成した曲面の例。

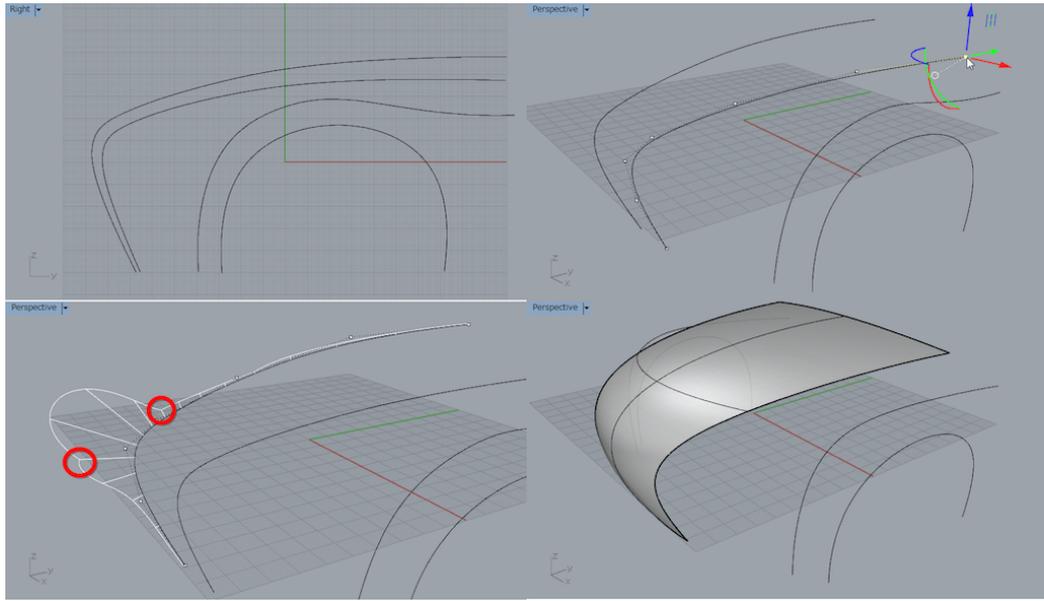


図 1.3: rhinoceros5.0 を用いて曲面を作成している様子。曲線を描画し（左上）任意の位置に移動させ（右上）、曲率の変化を見ながら曲線を修正し（左下）、サーフェイスをはる（右下）。画像出典:web サイト [7]

## 1.2 本論文の構成

本稿は全 6 章で構成されている。第 1 章で研究の背景と目的を述べた。第 2 章で関連研究、第 3 章では ShapeTape の性能評価、第 4 章では曲面生成手法の説明、第 5 章では 3,4 章の結果に対する考察、第 6 章は結論と今後の課題を述べる

## 第2章 関連研究

本章では直感的なモデリングに関する技術の例を示し、本研究で用いている自由曲面モデリングとの関係を述べる。

### 2.1 三次元触覚型デバイス

SensAbleTechnologies社が開発したFreeFormという3D触覚モデリングシステムは、モニタに映しだされたスカルプトモデルを見ながらペン型の三次元触覚型デバイス”phantom”（図2.1）を用いてそのモデルを編集していくことができる。このようなペン型のデバイスを用いたモデリングツールはポリゴンモデリングにおいて使用された例は殆ど無い。これは、ペン型デバイスは粘土をこねるようにしてモデリングするスカルプトモデリングではモデルの表面を細かに処理したりするなどデバイスの3自由度の動きを反映するのに適しているが、ポリゴンを用いたモデリングにおいてはペン型デバイスの細かな動きを反映させる場面は多くないことが理由として挙げられる。このように、直感的な入力デバイスでは小さい範囲（ディテール加工など）のモデリング（図2.2）には適しているが、大きい範囲（モデルの概形をプリセット無しで作成するなど）のモデリングには適していない。本研究で提案する曲面モデリングは大きい範囲のモデリングにおいて自由曲面を迅速に作成できる。

### 2.2 没入型モデラ

吉森ら [2] の研究では、VR技術を用いて二次元空間に限定されていた三次元モデリングの作業空間を三次元に拡張して三次元空間の利点を取り入れた直感的なモデリングシステムを提案している。入力としてジャイロセンサと位置計測装置の超音波センサを搭載したペン型デバイスを用い、頭部に液晶シャッタ眼鏡を取り付けて、86インチ背面投影式傾斜ディスプレイに書き込むようにポリゴンを構成する頂点を入力する（図2.3）。液晶シャッタ眼鏡により三次元作業空間を立体視できるので直感的にモデリングができる。しかし、この提案システムでは大掛かりなディスプレイや特殊なゴーグルを必要とするが、本研究の提案手法では使用デバイスはShapeTapeのみなのでよりコンパクトにモデリング環境を整えることができる。



図 2.1: phantom を使用している様子。画像出典:web サイト [10]

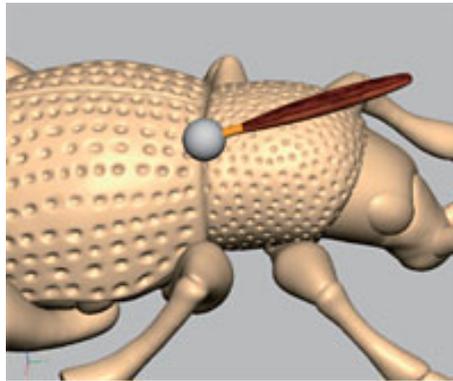


図 2.2: モデルのディテールを編集している様子。画像出典:web サイト [11]

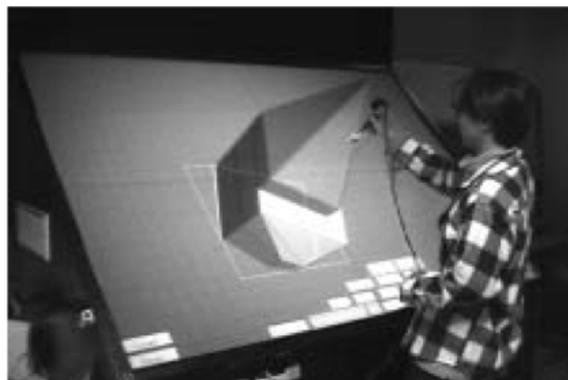


図 2.3: 没入型モデラを用いたシステムでのモデリングの様子。画像出典:文献 [2]

## 第3章 装置の性能評価

ShapeTape を実際に使用する際に装置の特性を予め知っておくことは重要である。この章では ShapeTape の精度と物性の検証実験を行う。

### 3.1 機能

この節で述べている ShapeTape のスペックはモデリング支援デバイスを紹介する web サイト [13] を参考にした。ShapeTape はそれ自体の形状を三次元座標値と振れのデータとして出力する。三次元座標値は三次元ベクトル配列で、ねじれのデータは四元数で表される。960mm のカバーで覆われたテープ部分には 12mm 間隔で 81 個のセンサーが埋め込まれており (図 3.1)、最大データ出力速度は 110Hz である。出力される座標列を可視化したものと ShapeTape の対応は図 3.2 で示されている。

### 3.2 精度の検証

#### 3.2.1 校正

ShapeTape には出力データを本来の位置に修正する機能、つまりキャリブレーション (校正) 機能が備わっている。本研究の制度検証において校正とはこのキャリブレーション機能を用いて出力座標の調整を行うことを指す。

実際の校正の方法は、計算機で校正を行うアプリケーションを立ち上げ、ShapeTape を地面などの平らな場所に置き校正処理を実行させる (図 3.3)。すると、校正処理を行った段階での最適な校正データを出力し、これをデータ処理をするプログラムに読み込ませることで校正が出力に適用される。ちなみに、この校正処理だと Shapetape を使用している最中に発生する誤差には対応できない。そこで、今現在の ShapeTape の出力座標値を平らな場所に置いたときと同じ座標値に校正する機能がモデリングプログラムに備わっている。本稿ではこの処理をバイアス補正と呼ぶ。

#### 3.2.2 三次元空間における誤差評価

提案手法では、ShapeTape から得られる座標データをもとに曲面を生成する。ゆえに、実際の ShapeTape の形状と出力データの誤差がどの程度であるかを把握しておくことが重要

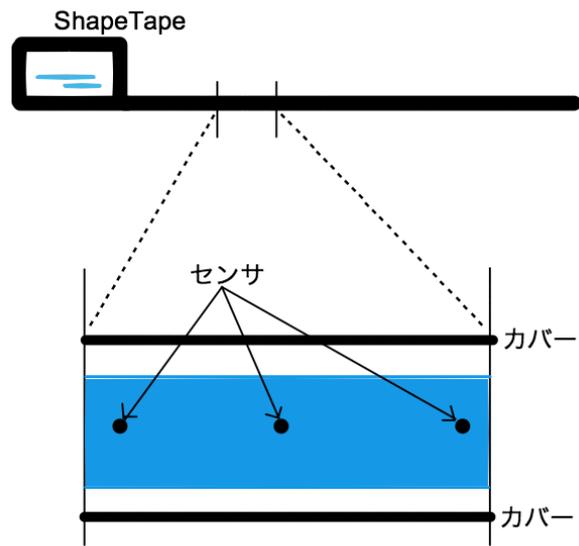


図 3.1: ShapeTape とそのセンサの模式図。黒いカバーに覆われたテープ部分を切り取り黒いカバーの上部のみ剥がした模式図が下図である。カバーの中には青いテープが包まれており、その青いテープの中に等間隔にセンサが埋め込まれている。

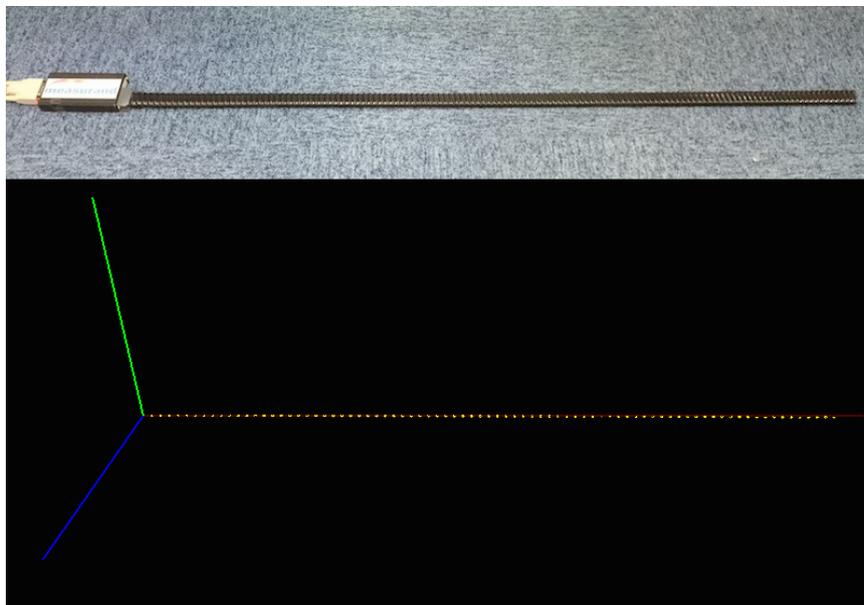


図 3.2: 可視化した点列（上）とその際の ShapeTape（下）。向かって右方向が x 軸、上方向が y 軸、手前方向が z 軸である。



図 3.3: 床で校正している様子。平らならば机の上などでもよい。本研究では二本の ShapeTape を使う機能を使用することがあり、その場合の校正の様子を示している。

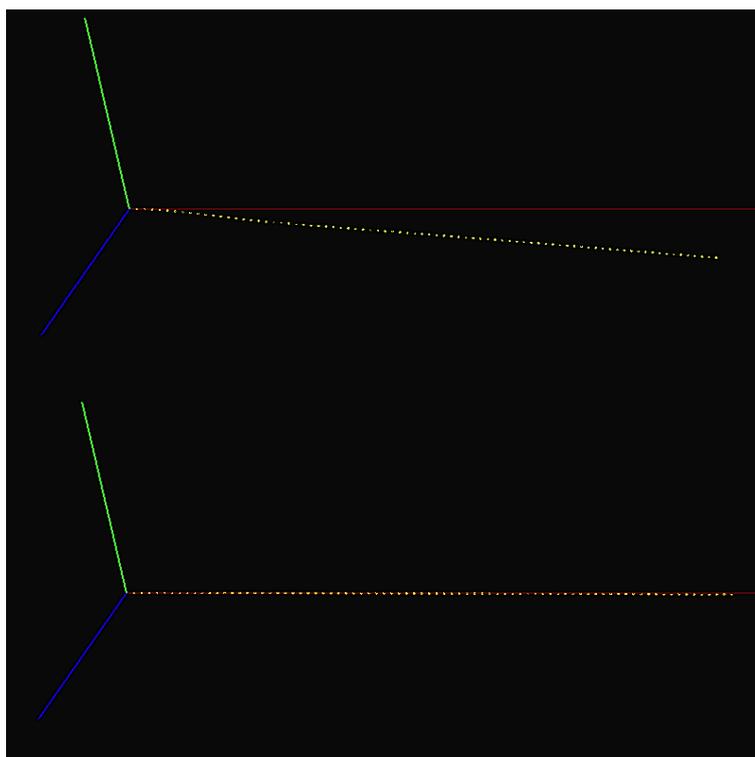


図 3.4: 上部のように誤差が存在した場合、バイアス補正によって下部のように平らな出力に校正される。

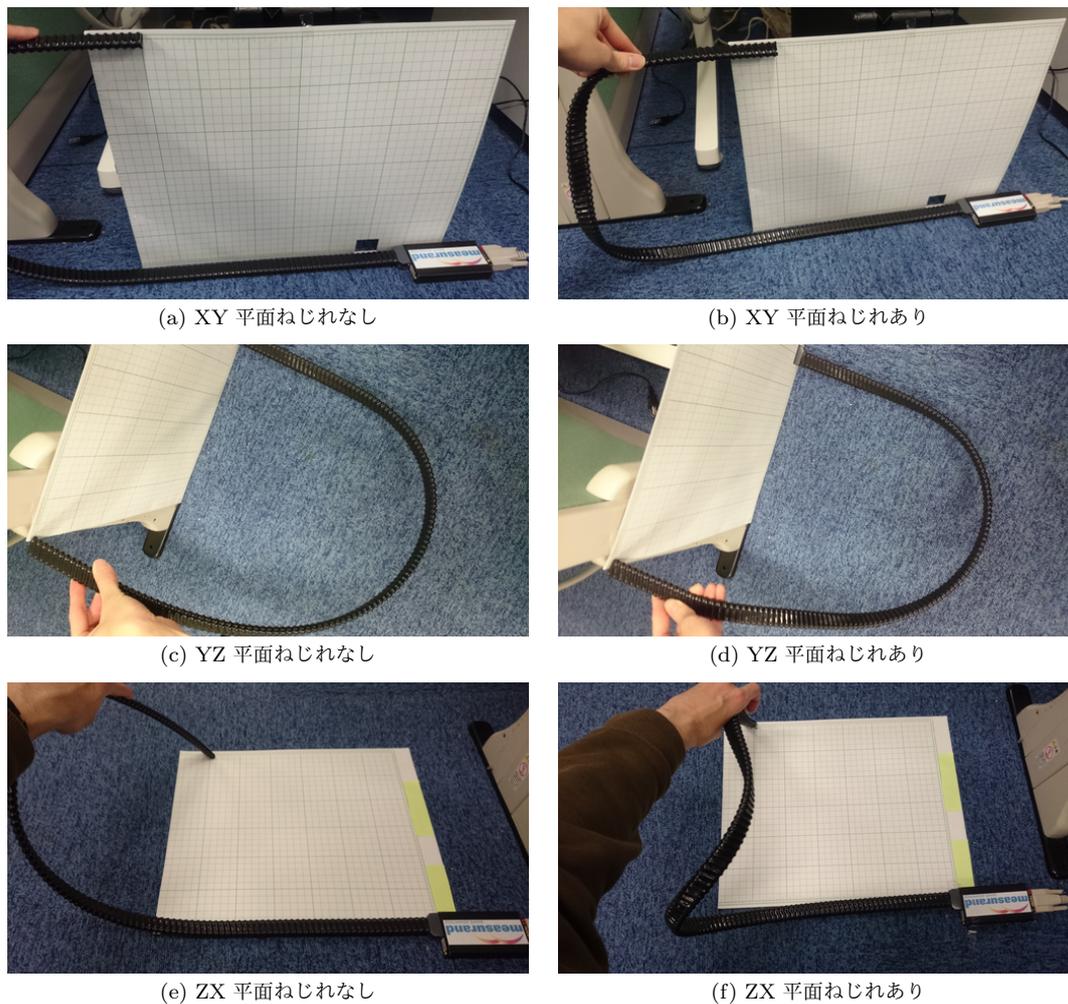


図 3.5: 各平面における誤差測定の様子。

である。そこで、実空間上のターゲット座標  $X(x,y,z)$  (単位は mm) に ShapeTape の先端のセンサを持ってきた時の ShapeTape の先端の出力座標値  $X'$  の差を誤差値として評価した。ShapeTape を床などの平らな場所に置き、バイアス補正をし、曲げて位置測定をし、また平らな状態に戻す。この動作を一回とみなす。これを 20 回行う。この操作を実空間座標  $(300,300,0)$   $(0,300,300)$   $(300,0,300)$  に対して行った。ShapeTape のねじれは誤差にどの程度影響するかを調べるため、ShapeTape にねじれがある状態とない状態の 2 つの状況で測定を行った。図 3.5 は実空間ターゲット座標  $(300,300,0)$   $(0,300,300)$   $(300,0,300)$  の場合で誤差測定を行った際の様子である。以降で「XY 平面」「YZ 平面」「ZX 平面」と述べているのはそれぞれターゲット座標が  $(300,300,0)$   $(0,300,300)$   $(300,0,300)$  の場合のことを表している。

図 3.6 は各平面誤差測定の結果を散布図で表したものである。この結果をみると、ZX 平面でねじれなしの誤差が最も低く誤差も 15mm 程度であったが、その他の場合はねじれなしで

表 3.1: 図 3.6 の各出力値の平均誤差と標準偏差（単位は mm）※括弧の中の値は ShapeTape の全長 (960mm) に対しての出力値の比率である

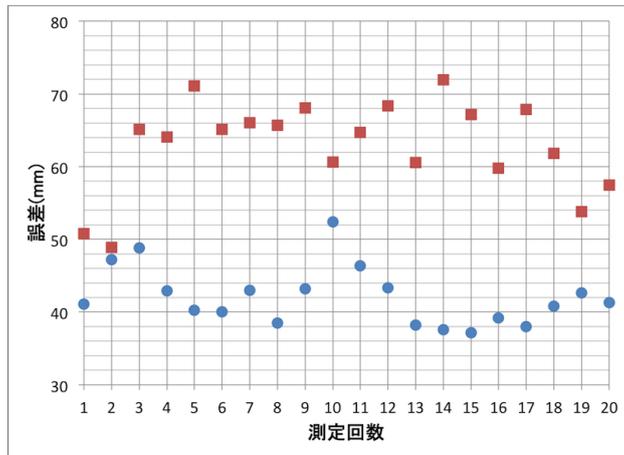
測定箇所	平均誤差		標準偏差	
	ねじれなし	ねじれあり	ねじれなし	ねじれあり
XY 平面	42.1 (4.3%)	63.0 (6.8%)	3.9 (0.4%)	6.2 (0.6%)
YZ 平面	81.7 (8.5 %)	114.6 (11.9%)	14.2 (1.5%)	8.2 (0.9%)
ZX 平面	13.8 (1.4%)	126.0 (13.1%)	1.6 (0.2%)	28.9 (3.0%)

は 40~100mm 程度、ねじれありでは 50~180mm 程度の誤差が発生してしまった。この誤差の原因は ShapeTape 自体のものか、測定環境のためか、バイアス補正のためかを判断するため先ほど述べた誤差測定の動作からバイアス補正を抜いたものをねじれなしの場合のみで各平面で誤差測定を行った。その結果が図 3.7 である。バイアス補正を抜いても抜いていない場合と同じような範囲に誤差が分布している。これはつまり測定値のバラ付きはバイアス補正が理由ではないということである。次にバイアス補正を含めた誤差測定の出力座標値を gnuplot を用いて三次元表示する。その結果が 3.8 である。ねじれなしの結果は比較的出力座標値がまとまっているように見える。ねじれありの結果は出力座標値が一定の範囲に収まっているとは言えない。また、各平面誤差測定の結果から測定値の平均誤差と標準偏差を算出し、数値で示した（表 3.1）。

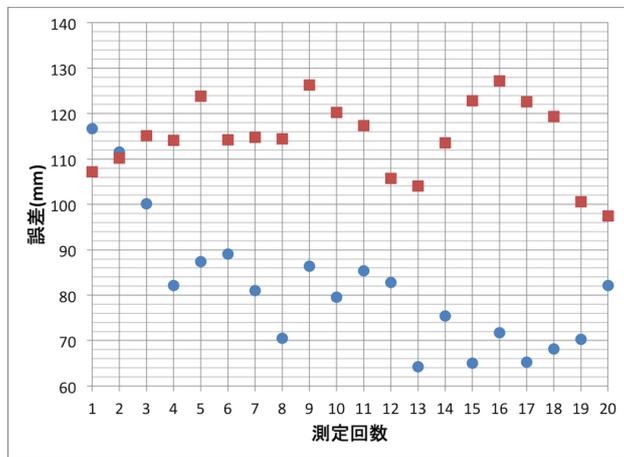
これら全ての誤差測定およびその可視化から言えるのは、出力座標値が一定の位置に固まっているのは誤差測定の環境に因ること・出力座標値のばらつきはある程度装置自体のもつ誤差に因ることである。本研究で誤差測定を行うために用意した環境では結果（図 3.6）を見ると実空間座標を示す方眼紙の固定が不正確なものほど誤差が大きく出てしまうことがわかる。ターゲット座標値の初期誤差が全ての出力座標値が同じように誤差を生んでしまっている原因なのである。しかし、誤差測定の際は装置も方眼紙も固定していたので装置や方眼紙が測定中移動して誤差が生まれることは考えにくい。ゆえに出力座標値のばらつきは装置自体に因るものだと考察できる。また、表 3.1 を見ると、常に発生している平均誤差は大きなものの、標準偏差で表されるばらつきは小さくなく、先の主張も含めると、ShapeTape 使用者が ShapeTape の平均誤差を考慮した上で使用すれば実用に耐えうるだろうと考察した。

### 3.3 物性の検証

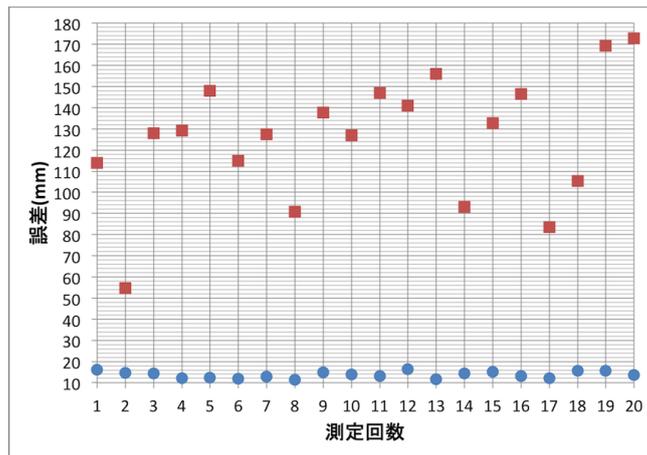
曲率とはある曲線が直線からどれだけ曲がっているかを示す指標であり、捩率とはある平面から曲線がどれだけ離れているかを示す指標である。空間内の曲線においてこの 2 つの値が定まれば曲線の向きを除いて曲線は一意に定まる。つまり、ShapeTape によって得られるこの 2 つの値がどれほどの範囲を持つかによって ShapeTape で表現できる曲線の限界を見ることができるのである。入力座標値から最大曲率と最大捩率を測定で得られるデータから算出する。具体的には、得られる離散的な三次元座標データから近似的に接ベクトル、従法線



(a) XY 平面における結果

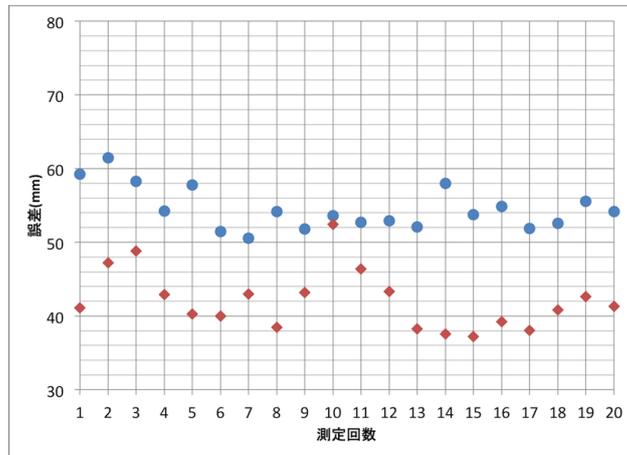


(b) YZ 平面における結果

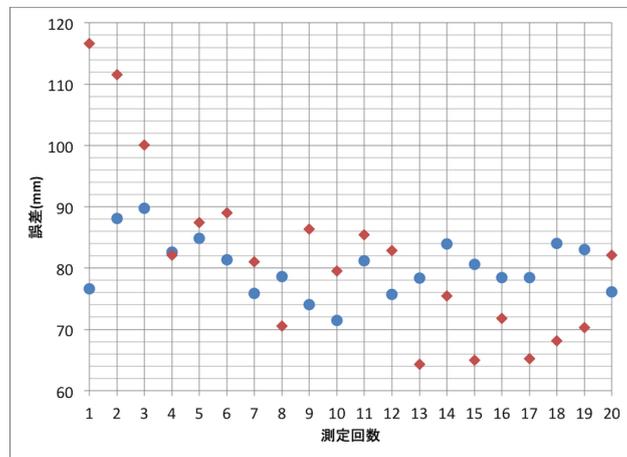


(c) ZX 平面における結果

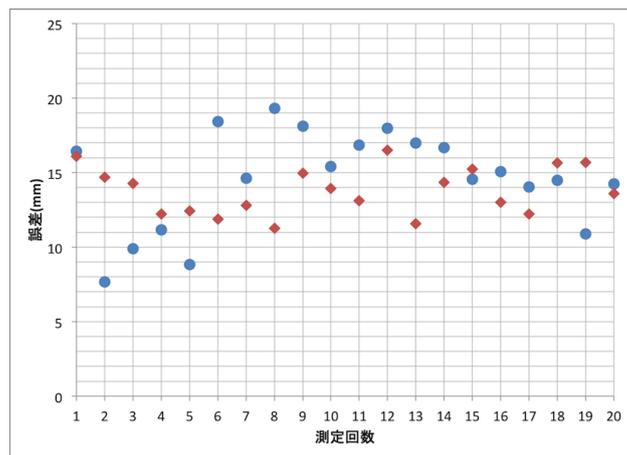
図 3.6: 各平面における誤差測定の結果。青がねじれなし、赤がねじれありの場合の値である。



(a) XY 平面ねじれなし

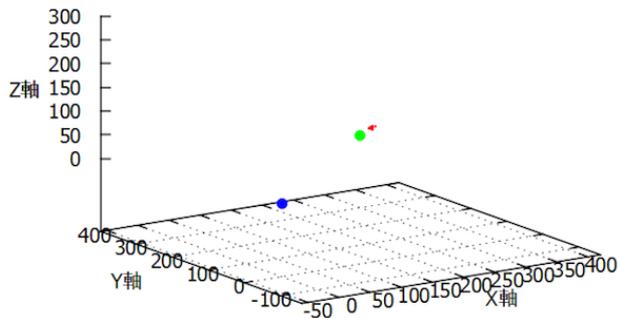


(b) YZ 平面ねじれなし

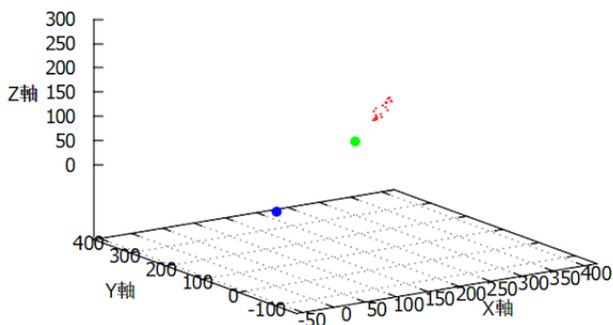
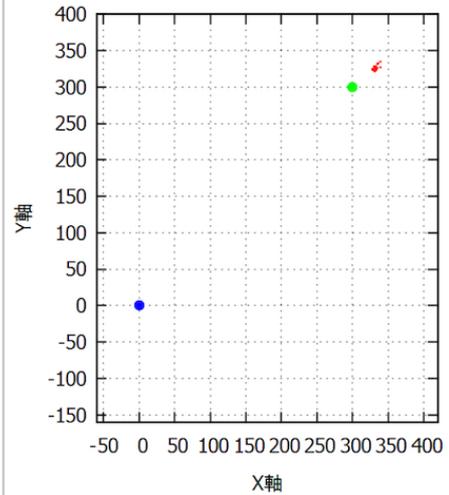


(c) ZX 平面ねじれなし

図 3.7: 各平面においてのバイアス補正を抜いたねじれなしの測定結果。青がねじれなし、赤がねじれありの場合の値である。



(a) XY 平面ねじれなし



(b) XY 平面ねじれあり

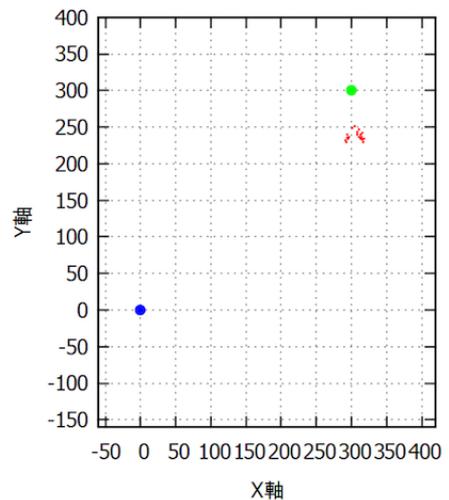
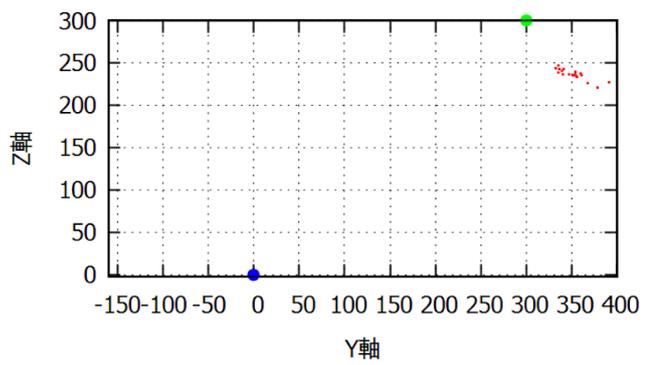
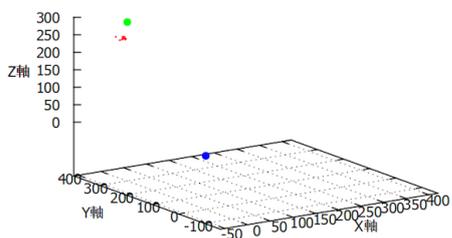
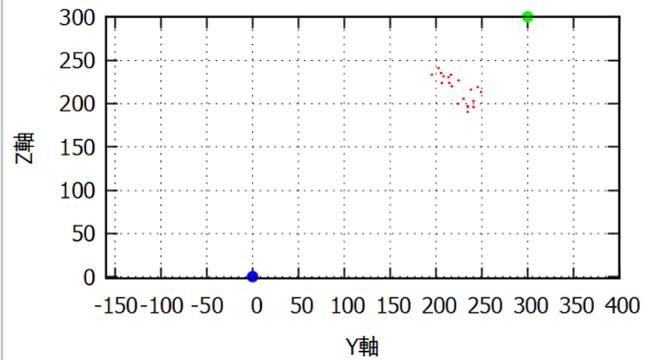
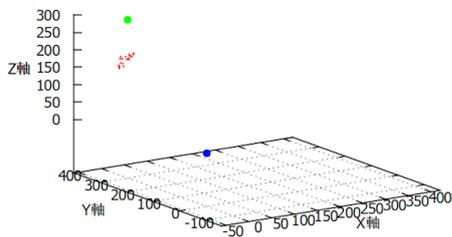


図 3.8: 各平面における誤差測定の結果を gnuplot を用いて 3 次元表示したもの（左）と、測定値を各平面に射影して 2 次元表示にしたもの（右）。例えば XY 平面であれば各測定座標値の Z 座標値を無視して、XY 軸で表された 2 次元平面にその値を当てはめる。青の点は原点 (0,0,0)、緑の点はターゲット座標値を示している。その XY 平面での結果（ターゲット座標値 300,300,0）。

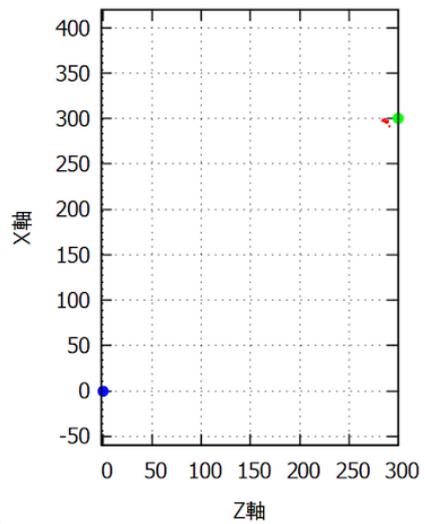
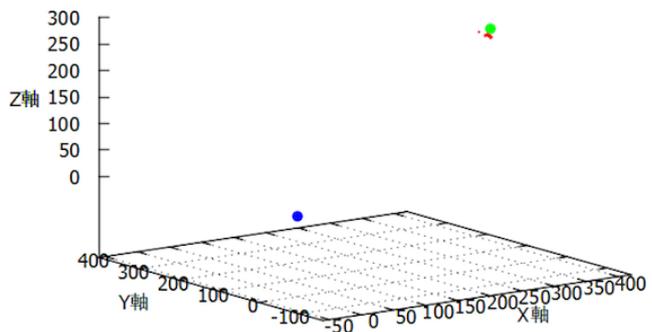


(c) YZ 平面ねじれなし

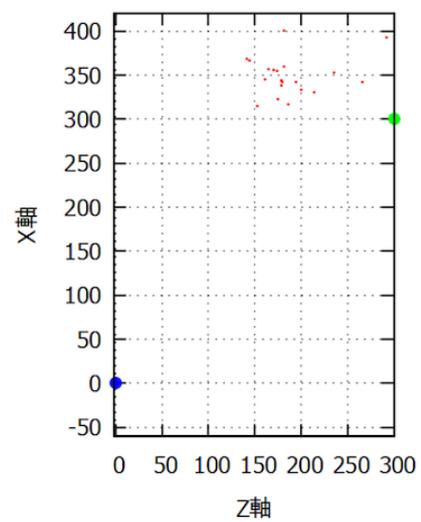
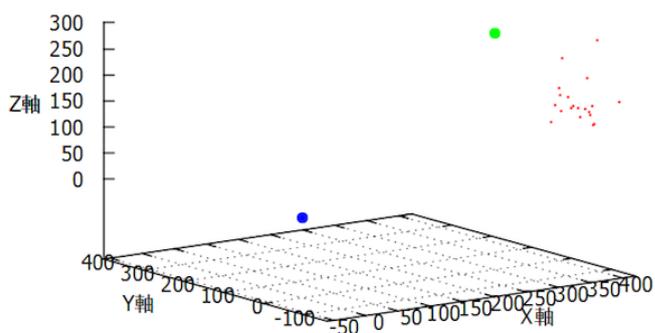


(d) YZ 平面ねじれあり

前図に続き、YZ 平面での結果（ターゲット座標値 0,300,300）。



(e) ZX 平面ねじれなし



(f) ZX 平面ねじれあり

前図に続き、ZX 平面での結果（ターゲット座標値 300,0,300）。

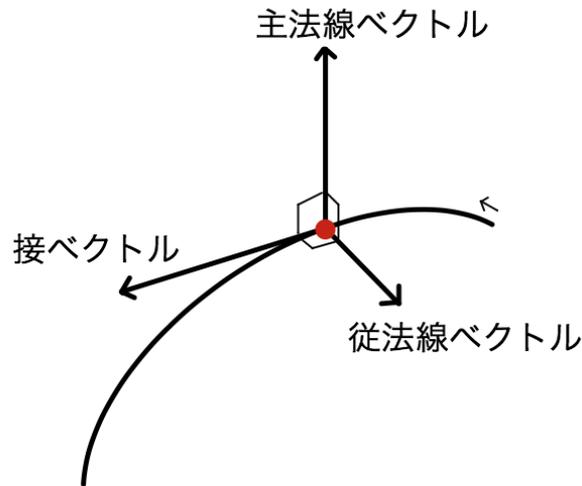


図 3.9: 接ベクトル・従法線ベクトル・主法線ベクトルの模式図。

ベクトル、および主法線ベクトルを計算し、最大のものをそれぞれ最大曲率と最大振率とする。曲率  $C_i$  と振率  $T_i$  は装置の三次元座標点列データ  $P_i (i = 0 \sim n - 1) (n : \text{センサ数})$  を入力とし、次式で算出する。この計算式は文献 [4] を参考にした。

$$C_i = \cos^{-1} \left( \frac{a_i \cdot a_{i+1}}{|a_i| |a_{i+1}|} \right) \quad (i = 0 \dots n - 3) \quad (3.1)$$

$$T_i = \cos^{-1} \left( \frac{b_i \cdot b_{i+1}}{|b_i| |b_{i+1}|} \right) \text{ if } \left( 0 < \frac{n_i \cdot b_{i+1}}{|n_i| |b_{i+1}|} \right) T_i = -T_i \quad (3.2)$$

但し  $a_i, b_i, n_i$  はそれぞれ接ベクトル、従法線ベクトル、主法線ベクトル (図 3.9) であり、次式で表される。

$$a_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{|P_{i+1} - P_i|}, \quad b_i = a_i \times a_{i+1}, \quad n_i = b_i \times a_{i+1}$$

得られた最大曲率、最大振率はそれぞれ 0.65 (図 3.10) , 3.14 (図 3.11) であった。ShapeTape が壊れない程度に加減しながら曲げたりひねったりして計測するので、計測する人によって結果が変わってくる可能性がある。

### 3.4 曲線近似

ShapeTape が出力する三次元座標列はそのままだとただの離散データである。これをそのまま曲線と見なす場合、曲率の連続性、つまり C2 連続性が保証されないことになってしま



図 3.10: 最大曲率 0.65 を出力した際の ShapeTape。



図 3.11: 最大振率 3.14 を出力した際の ShapeTape。

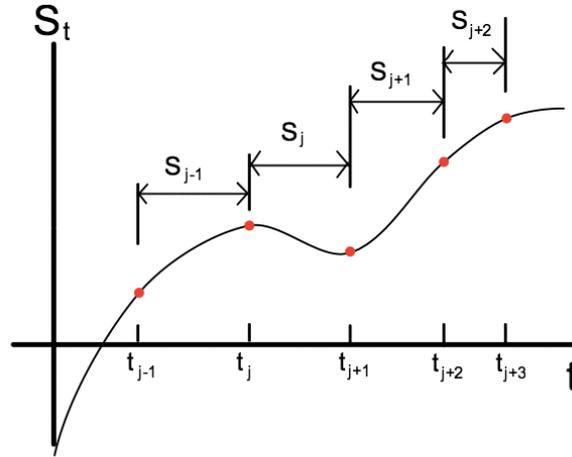


図 3.12:  $t_j$  と  $S_j$  の関係。

う。そこで、ShapeTape が弾性体である、つまり ShapeTape を自然な形に曲げた時にとる形が歪みエネルギー最小のスプライン曲線に近似できると仮定し、入力座標点列をスプライン近似した。この手法は、ShapeTape から得られた三次元座標列データを等間隔に（例えば 81 個から 11 個に）間引き、残った点を補間点とみなし三次のスプライン補間を行うことで曲線を近似する（図 3.13）。そして、その近似曲線と元の三次元座標データとの距離を誤差とみなし評価する。

$x, y, z$  軸それぞれに以下の式を当てはめて近似曲線を表す媒介関数を各軸で求める。

$$S_j(t) = a_j + b_j(t - t_j) + c_j(t - t_j)^2 + d_j(t - t_j)^3 \quad (3.3)$$

ただし

$a_j, b_j, c_j, d_j$  : 係数,  $t$  : 媒介変数,  $t_j$  : 補間点の値。この場合は補間点の座標値とする。

$S_j$  を図で模式化すると図 3.12 のようになる。本研究では  $t_j$  は ShapeTape の座標列の要素番号をそのまま適用しているので  $t_{j+1} - t_j$  の値は常に 1 である。

図 3.14 で描画されている曲線は、近似曲線関数をもとに媒介変数を一定間隔で代入した際の実出力三次元座標を直線で結んで表現されている。誤差評価の具体的な方法は、各入力座標値と近似曲線上の適当な点との距離を計り、その中から最短のものを選ぶというものである（図 3.15）。その適当な点は、入力座標値に一番近い区分の近似曲線上を等間隔に分割した時の座標値を用いる。図 3.14 の結果をみると、入力座標点列と近似曲線の誤差は小さいので、入力座標点列に近い形かつ C2 連続性の保証された曲線を描画することが可能であると考察できる。

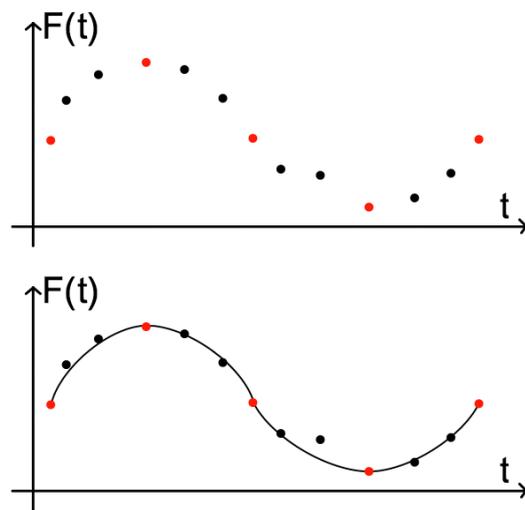


図 3.13: 補間点から近似曲線を作る流れの模式図。ある離散点の集合（赤と黒の点）がある時、等間隔（この図では三個飛ばし）で補間点（赤）を決定し（上）その間を式 3.3 を用いて近似曲線を補間する（下）。

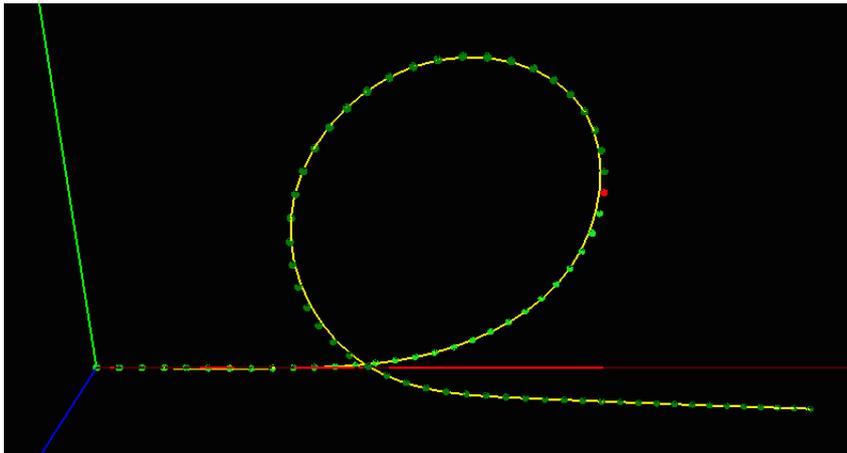
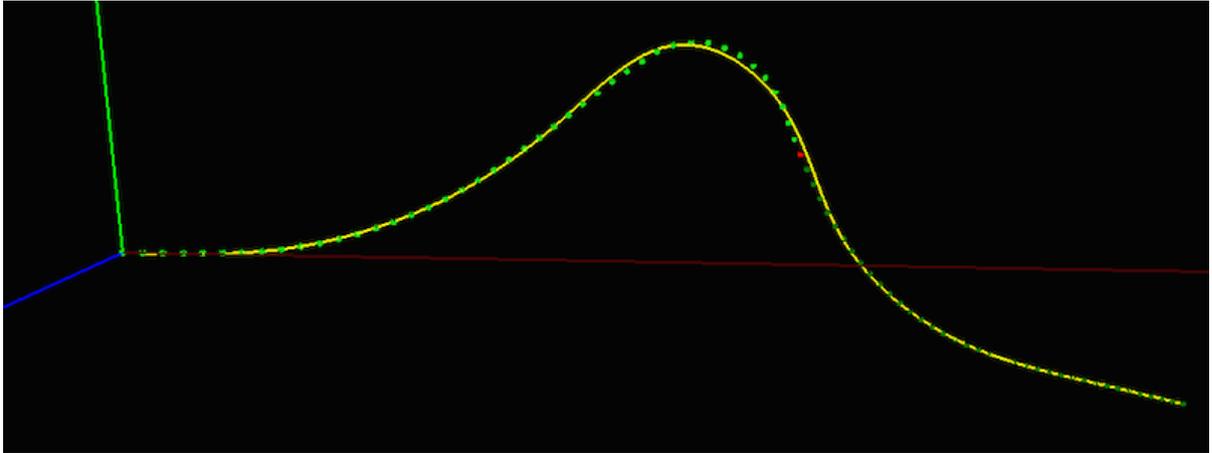


図 3.14: スプライン補間した座標列と近似曲線の二つの例。緑の点列はスプライン補間した点列を球で表したものの、黄色の曲線はスプライン補間した近似曲線関数を直線の連続で表現したもの、赤の点は元の座標列と近似曲線の距離誤差で最も大きな値をとった座標点を表したものである。この図では最大距離誤差は上図は 4.4mm、下図は 2.7mm であった。

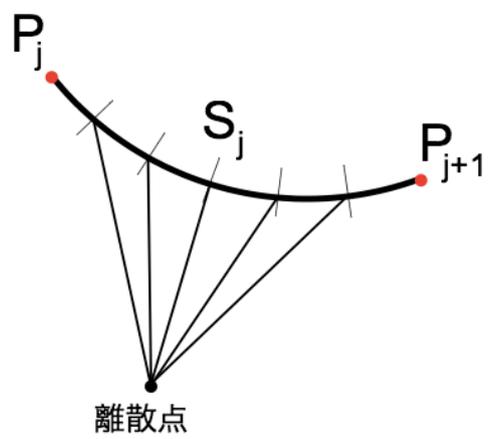


図 3.15: 近似曲線と点の距離を決定する方法。この図ではある区間  $P_j \sim P_{j+1}$  の近似曲線  $S_j$  を 6 分割し各区分点からの距離を計測し、最短のものを誤差を表す距離とみなす。

## 第4章 曲面の生成

本研究で使われる曲面生成プログラムでは、曲面を構成するポリゴンの頂点は一本の ShapeTape を用いて複数の座標列を異なる位置で保存することで定義している。本章ではこのポリゴン頂点の集合を用いて曲面生成機能の説明と、生成した曲面の評価方法を述べる。

### 4.1 曲面の生成方法

本研究では入力値をそのまま使用して生成する方法と入力値から近似曲線を近似して使用し生成する方法を用いた。

#### 4.1.1 ShapeTape の座標列を直接使用する方法

ShapeTape から得られる三次元座標値を可視化すると三次元空間上に点列を見ることができ、その列をある間隔で並べ、隣り合った列の点同士を結んでポリゴンを生成することで、ポリゴン近似された曲面を生成することができる。図 4.1 と図 4.2 のポリゴンメッシュは同じ座標列の集合で生成されている。

#### 4.1.2 近似曲線を使用した方法

節 3.4 で示した曲線近似手法を用いて保存されたすべての座標列を近似曲線に変換し前項で示したのと同じ手法でポリゴンを生成し、曲面を生成する。近似曲線からどの座標値を取得するかは、節 3.4 と同じ座標値の取得方法をそのまま使用して決定している。

ShapeTape の座標列を直接使用したポリゴンと近似曲線を利用したポリゴンの比較の例を図 4.3 に示した。この図を見ると、凹凸の少ないポリゴンで構成された (a) は殆ど違いは見られず、凹凸の多いポリゴンで構成された (b) は画像中央の 2 つの山のような比較的大きな違いが生まれたものの原型をとどめたまま曲面生成が出来た。ここからわかることは、ShapeTape を用いれば多少の出力の差が出るが近似曲線を用いることで関数的に連続性の保証された曲面を生成できることである。

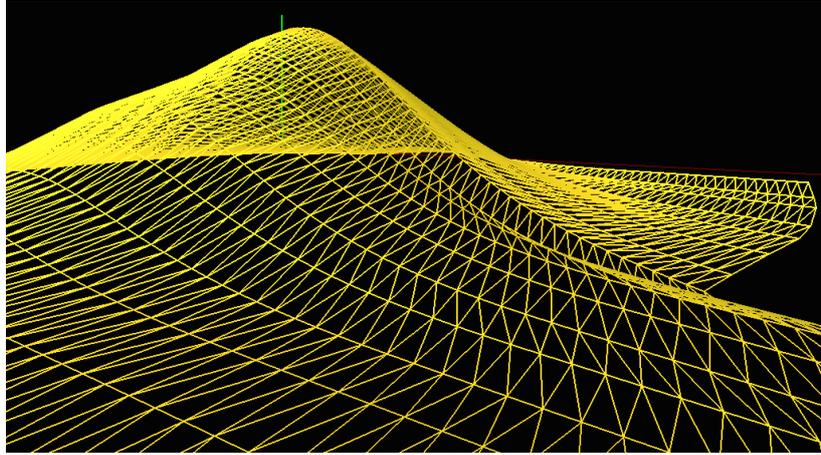


図 4.1: 生成したポリゴン曲面のワイヤフレームモデル

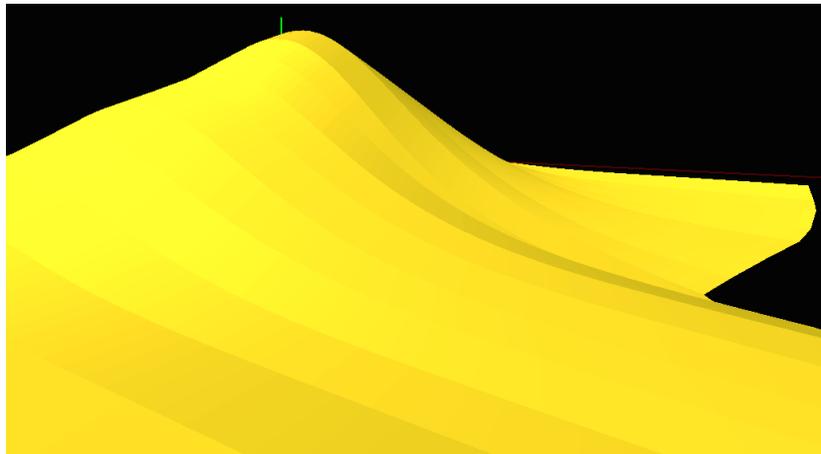
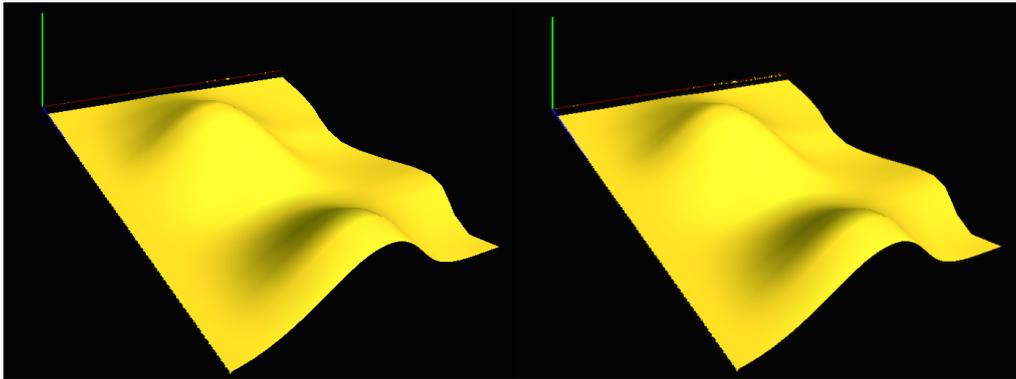
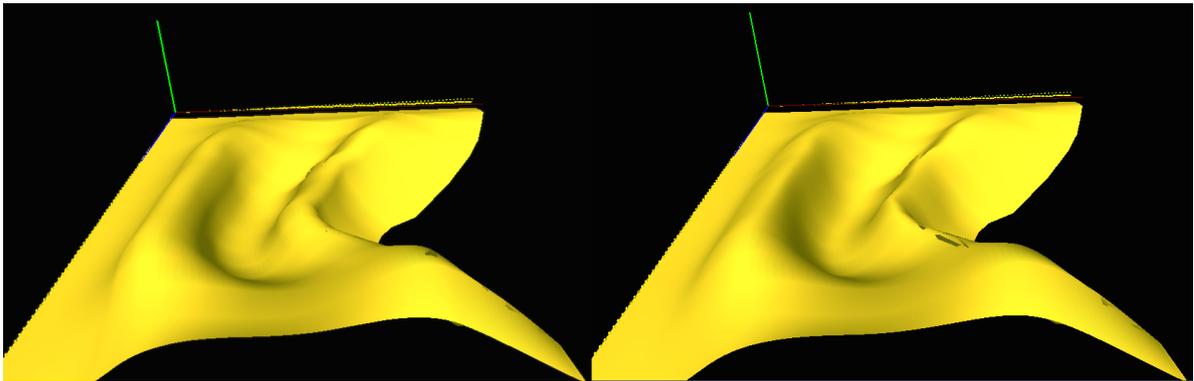


図 4.2: 生成したポリゴン曲面のフラットシェーディング



(a) 凹凸の少ない曲面で比較した例。



(b) 凹凸の多い曲面で比較した例。

図 4.3: 前項 4.1.1 の手法で生成した曲面（左）と近似曲線を用いて生成した曲面（右）の比較。

表 4.1: パラメータ  $uv$  の定義。

$u(t_u)$	$v(t_v)$
ShapeTape を固定	等速直線運動
ShapeTape 可変	等速直線運動
ShapeTapeA を固定	固定 ShapeTapeB 上
ShapeTapeA 可変	固定 ShapeTapeB 上

## 4.2 曲面を生成する際のパラメータ

### 4.2.1 $uv$ パラメータの定義

この章の初めで定義されたポリゴン頂点を保存する ShapeTape のセンサ列によって表される曲線を  $u(t_u)$ 、 $u(t_u)$  をどのように移動させるかを表した曲線を  $v(t_v)$  と表す (図 4.4)。これらの組み合わせで、様々なパラメトリック曲面を生成できる。本研究では表 4.1 に示すようにパラメータ  $u(t_u)$  およびパラメータ  $v(t_v)$  を定義し、曲面生成の実験を行う。 $u(t_u)$  で表される ShapeTape を ShapeTapeA、 $v(t_v)$  で表される ShapeTape を ShapeTapeB と定義する。

### 4.2.2 $v(t_v)$ による $u(t_u)$ の挙動の変化

前項の表 4.1 で示されている  $uv$  パラメータの定義の中で曲面生成をする際の ShapeTape の動作の自由度が最も大きいのは  $u(t_u)$ :ShapeTapeA 可変 (ポリゴンメッシュをレンダリングする前に ShapeTape あるいは幾何学的関数で自由に設定できる)、 $v(t_v)$ :固定 ShapeTapeB 上の時である。その時の  $u(t_u)$  の挙動を変化させることが出来たならより生成する曲面の自由度を増す事ができるだろう。そこで、 $v(t)$  の形状により  $u(t_u)$  の姿勢を変化させる機能を実装した。具体的な方法は、 $v(t_v)$  を曲線とみなし、 $u(t_u)$  の位置における  $v(t_v)$  の主法線ベクトルと三次元ベクトル  $(0,1,0)$  との YZ 平面における角度を計算し、その角度だけ  $u(t_u)$  を回転させる。この計算をする際に、 $v(t_v)$  の主法線ベクトル方向が Y 軸負の方向だった場合はその主法線ベクトルを正反対方向に向きを変えてから角度を計算する (図 4.5)。

## 4.3 ポリゴンサーフェスを曲面近似

生成した曲面をより曲面らしく見せることは見栄えの点で重要である。本研究では OpenGL に搭載されている Smooth Shading 機能を利用することで図 4.2 で表されるような凸凹感のあるポリゴンを図 4.7 のように滑らかに表示させる。

この機能を使用するためには各ポリゴン頂点の頂点法線を設定する必要がある。ポリゴン曲面において、ある頂点 Q が存在した時、頂点 Q を含む全てのポリゴンのそれぞれの面法線  $N_i (i = 0 \sim n - 1)$  ( $n$ :頂点 Q の最近傍点の数) の平均が頂点 Q の頂点法線となる (図 4.6)。

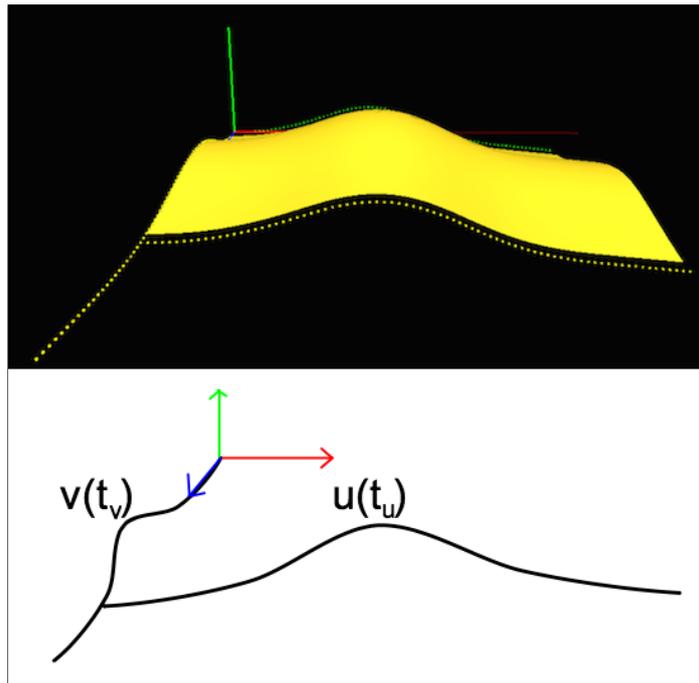
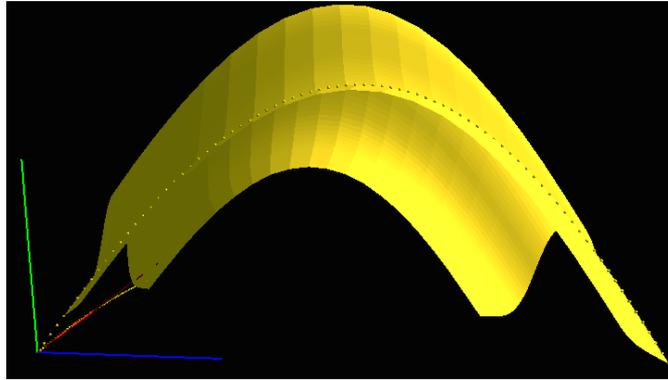
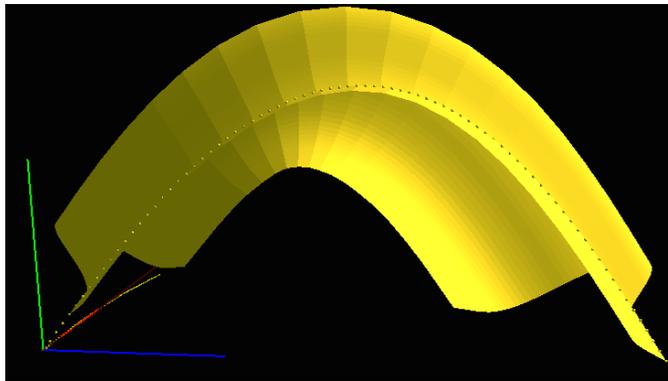


図 4.4:  $uv$  パラメータの模式図。上部はポリゴン曲面を生成する途中を撮影したものであり、下部はその時の  $u(t_u), v(t_v)$  パラメータで表される曲線を模式的に表したものである。赤いベクトルは  $x$  軸、緑のベクトルは  $y$  軸、青のベクトルは  $z$  軸を表している。この図ではどちらのパラメータも ShapeTape を入力としているが、片方もしくは両方を他のパラメトリック曲線（例えば正弦関数）にする事もできる。



(a) 姿勢変化無し



(b) 姿勢変化あり

図 4.5:  $u(t_u)$  の姿勢変化の機能を用いて同じ入力で違うポリゴン曲面を出力した様子。違いがわかりやすいようにフラットシェーディングでレンダリングしている。 $u(t_u)$  は正弦関数を離散点に変換して入力した。図 (a) の  $v(t_v)$  を  $u(t_u)$  の主法線をもとに回転させている。

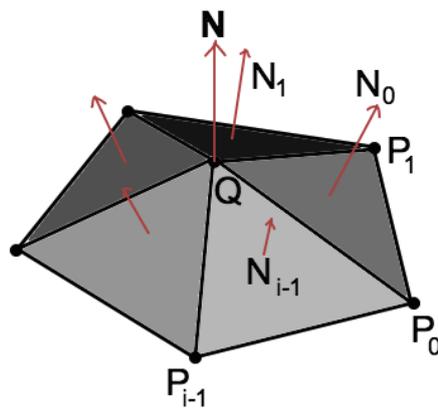


図 4.6: 頂点法線  $N$  の算出。

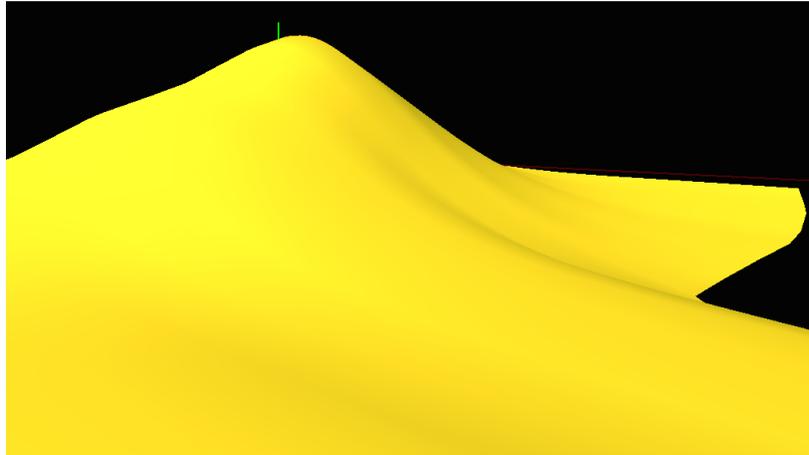


図 4.7: 図 4.1 と同じポリゴンのスムーズシェーディング。

## 4.4 生成曲面の特性評価

### 4.4.1 曲面の曲率

曲面の特性を知る上で曲面曲率は重要な尺度となる。本研究では岡庭・前川の手法 [3] を参考にして曲面の曲率評価を行う。この手法の特徴はある頂点  $Q$  に対しての曲面曲率を求める時、頂点  $Q$  とそれと 1.5-ring の関係の近傍点との法曲率をそれぞれ計算して最大主曲率と最小主曲率を求めることである。下図は 1-ring の関係 (図 4.8) と 1.5-ring の関係 (図 4.9) を模式的に表したものである。

頂点  $Q$  における  $QP_i$  方向の法曲率  $\kappa_i$  の算出方法を示す。まず頂点  $Q$  での単位法線ベクトル  $N$  と頂点  $P_i$  を含む法平面を考え、その法平面上に頂点  $P_i$ ・頂点  $Q$  を通り頂点  $Q$  で法線  $N$  を共有する円弧を描く。この円弧の半径の逆数を  $\kappa_i$  と近似する。この円弧の半径は円弧の中心点から頂点  $Q$  までの距離であり、かつその中心点は線分  $QP_i$  の垂直二等分線と法線  $N$  の交点である。このことから法曲率  $\kappa_i$  は次式で表される。

$$\kappa_i = \frac{2(P_i - Q) \cdot N}{(P_i - Q) \cdot (P_i - Q)} \quad (4.1)$$

上記の方法で  $P_i$  毎に法曲率  $\kappa_i$  を求め、その中から最大の値のものを最大主曲率、最小のものを最小主曲率とする。

### 4.4.2 曲率の視覚的評価

本研究では生成した曲面を 2 つの方法で評価する。

1 つ目は、頂点毎の主曲率の大きさを HSV パラメータで表された色に変換し、可視化する方法である。パラメータ  $H$  は色相、パラメータ  $S$  は彩度、パラメータ  $V$  は明度を表している。

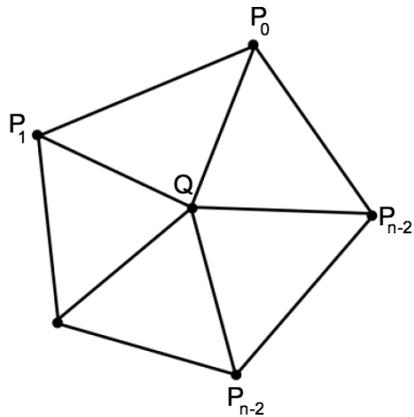


図 4.8: 1-ring の近傍点のイメージ。ある頂点  $Q$  が存在した時、 $Q$  を含むポリゴンの全ての頂点を、 $Q$  に対して 1-ring の関係という。

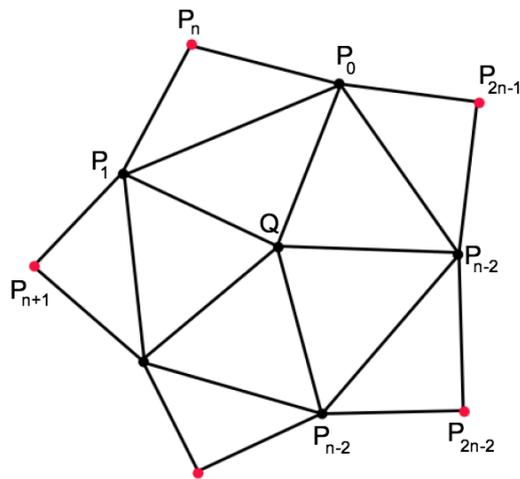


図 4.9: 1.5-ring の近傍点のイメージ。ある頂点  $Q$  が存在した時、1-ring の関係の頂点でできるポリゴン辺 ( $P(i)$  と  $P(i+1)(i = 0 \sim n - 2)$  の線分) を含むポリゴンの内、 $Q$  を含まない方のポリゴンの残りの頂点と、1-ring の関係の頂点を足し合わせたものを 1.5-ring の関係という。

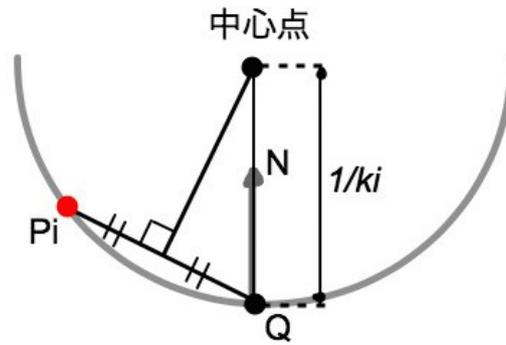


図 4.10: 頂点  $P_i$ , 頂点  $Q$ , 法線  $N$  の関係。

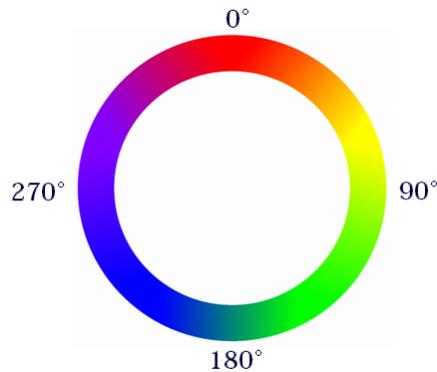


図 4.11: 色相を環状に並べたもの（色相環）。本研究では  $0^\circ \sim 360^\circ$  の度数を  $0 \sim 1$  に正規化して使用している。画像出典:web サイト [12]

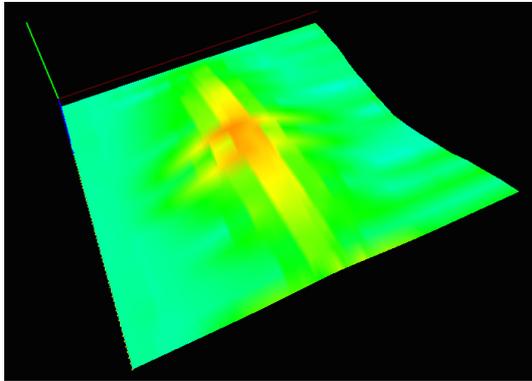
HSV の値の範囲をそれぞれ  $0 \sim 1$  とし、前項 4.4.1 で算出した主曲率の大きさを  $0 \sim 0.80$  に正規化し、色相が逆になるように値を逆転させて（例： $0.1 \rightarrow 0.7$ ,  $0.65 \rightarrow 0.15$ ） $H$  に当てはめ、 $S$  と  $V$  は両方共  $0.5$  に設定する。そして求めた HSV パラメータを RGB パラメータに変換し OpenGL の `glColor` 関数を用いて各頂点に頂点色を設定する。 $H$  が小さい程青に、大きいほど赤に近い色になる。パラメータ  $H$ 、つまり色相の正規化範囲が  $0 \sim 0.80$  なのは、図 4.11 を見てわかるように正規化範囲を  $0 \sim 1$  にした場合  $0$  付近（図 4.11 では  $0$  付近）と  $1$  付近（図 4.11 では  $360$  付近）が色がほぼ同じになってしまうのでわかりやすいように  $0 \sim 0.80$ （図 4.11 では  $0^\circ \sim 306^\circ$ ）に正規化している。

図 4.12 は曲率によるカラーリングを、同じ座標列を入力とした近似曲線を使用しないで生成した曲面と近似曲線を使用して生成した曲面に適用させた例を三つ示している。これらは近似曲線を使用することにより、近似曲線を使用しなかった場合と比べて生成曲面の連続性が高まることを示している。また、近似曲線を使用した場合においても入力座標点列の掃引

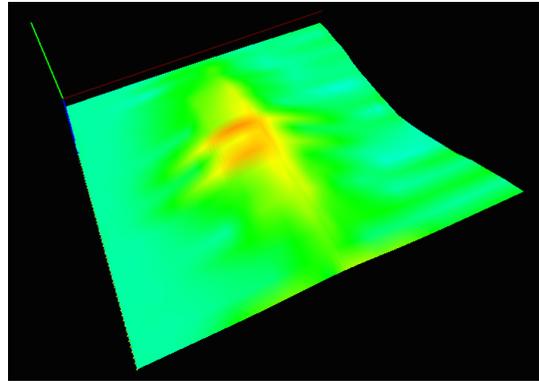
方向において色の変化が不自然な点を確認できる。

2つ目は、OpenGL に搭載されているキューブマッピングという機能を用いてゼブラマッピングを行う方法である。キューブマッピングは環境マッピングの方式の1つであり、風景画像を写り込ませたい対象オブジェクトに対して上下左右前後の6方向に立方体状に背景画像を設置し、オブジェクトに投影させる方法である(図4.13)。そのキューブマッピングのうち、一般的には白と黒の縞模様(ゼブラ柄)のテクスチャを用いておこなうものをゼブラマッピングという。本研究では白と黒の縞模様(図4.15参照)のテクスチャを立方体の6面(+x,+y,+z,-x,-y,-z)(図4.16参照)のうち+yの面、つまり天頂面のみにマッピングし、他の面は白無地のテクスチャをマッピングしている。

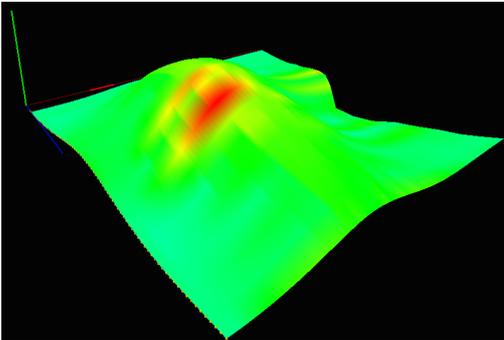
図4.17は実際にゼブラマッピングを行った様子である。曲面の全てにゼブラ模様が投影されていないのは、キューブマップの全方面にテクスチャが張られていないからである。すべての面にテクスチャを張らないのは、例えば+x面と+y面の境界部分のエッジがそのまま曲面に投影されてしまい、曲面自体にエッジが存在するのかテクスチャの境界エッジが投影されているのか区別がつきにくくなってしまうからである。なので、適宜視点を移動させて評価する必要がある(図4.18)。これを見ると、入力座標点列方向、(図4.17右では手前から奥右の方向)は滑らかに見えるが、入力座標点列の掃引方向(図4.17右では左から右の方向)はエッジが一部見えていたり滑らかではない部分が確認できる。これは、曲線近似によって入力座標点列方向は連続性は保証されているが入力座標点列の掃引方向は連続性が保証されないままであることを示している。



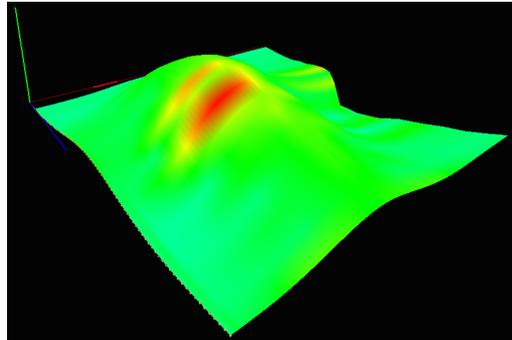
(a) 近似曲線を使わない場合その一



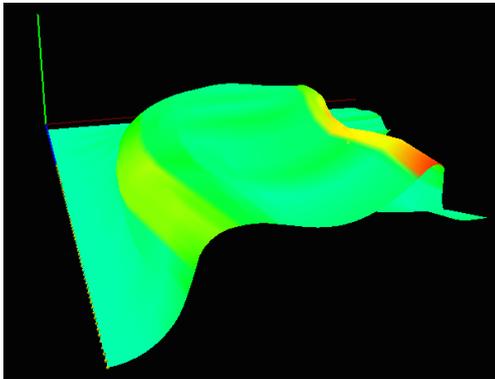
(b) 近似曲線を使う場合その一



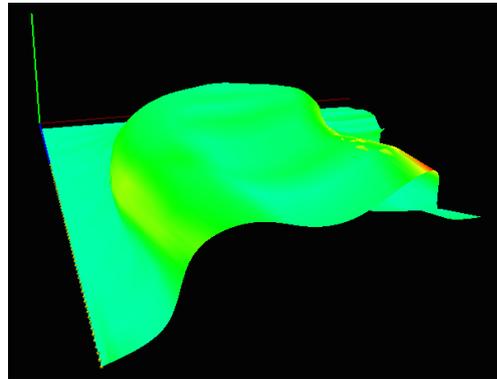
(c) 近似曲線を使わない場合その二



(d) 近似曲線を使う場合その二



(e) 近似曲線を使わない場合その三



(f) 近似曲線を使う場合その三

図 4.12: 節 4.1.2 で述べた近似曲線でポリゴン曲面を描画する機能を用いて、同じ入力座標列から近似曲線を使わない場合と使う場合のポリゴンをそれぞれ生成した。

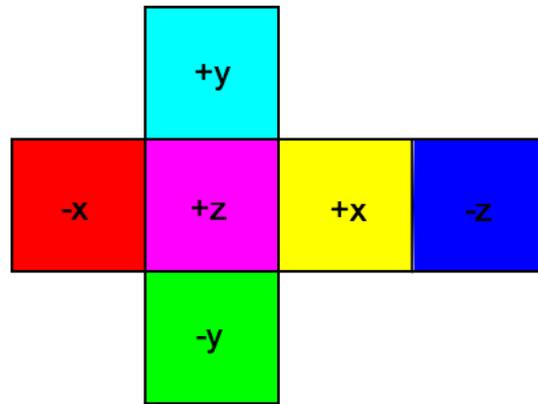


図 4.13: キューブマップの展開図例。この配色で球体にキューブマッピングした例が次図 4.14 である。

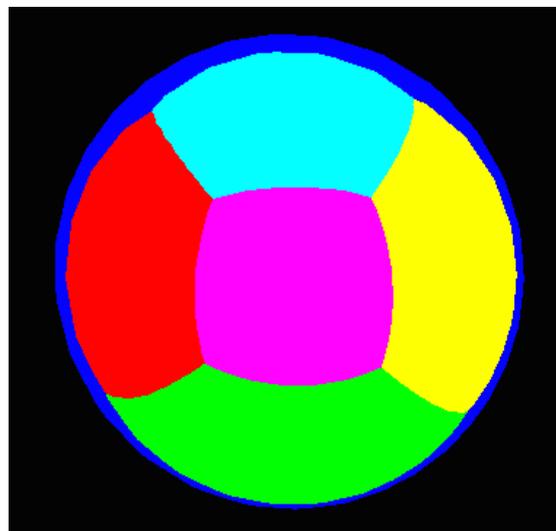


図 4.14: 前図 4.13 のように色テクスチャを貼り球体にキューブマッピングしたもの。

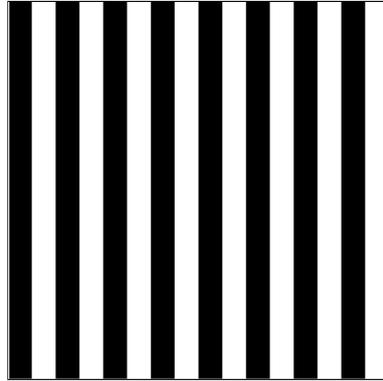


図 4.15: 実験で用いた縞模様テクスチャ。

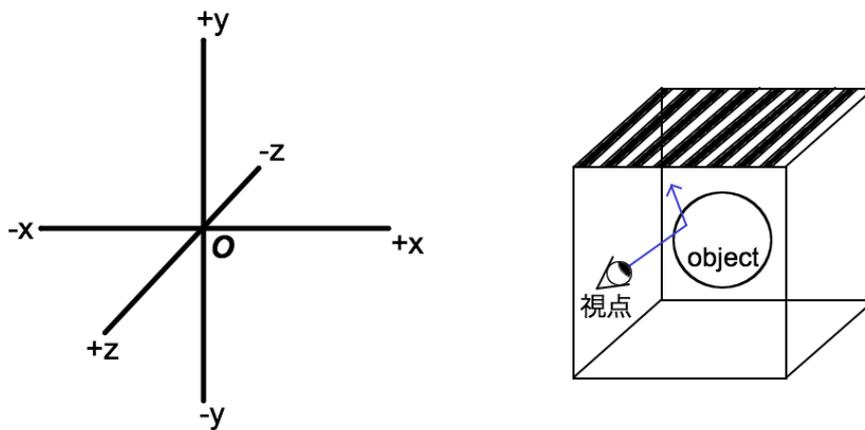


図 4.16: 6方向とキューブマッピングの模式図。左部のように軸に沿った6方向が定義され、それに基づいて右部のようにテクスチャが定義され、そのなかに設置されたオブジェクト（本研究ではポリゴンメッシュ）にテクスチャが反射して映ることでキューブマッピングを行う。

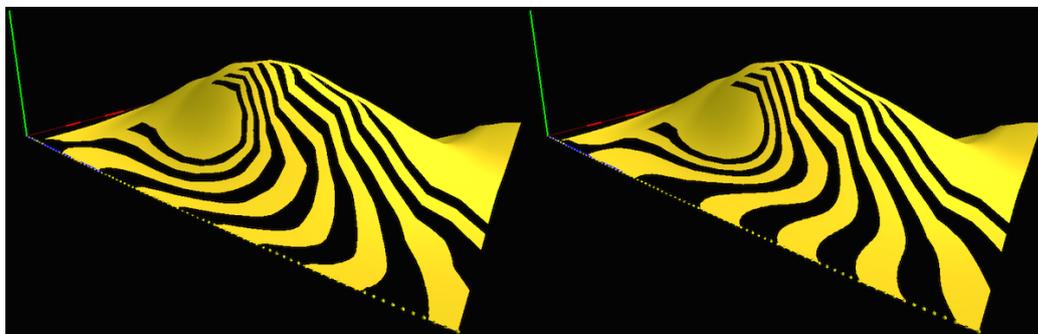


図 4.17: ゼブラマッピングを行った結果。左図は入力座標列をそのまま使用して生成した曲面、右図は入力座標列を曲線近似してそれを使用して生成した曲面。一部で黒い部分のうねりが異なることが認識できる。

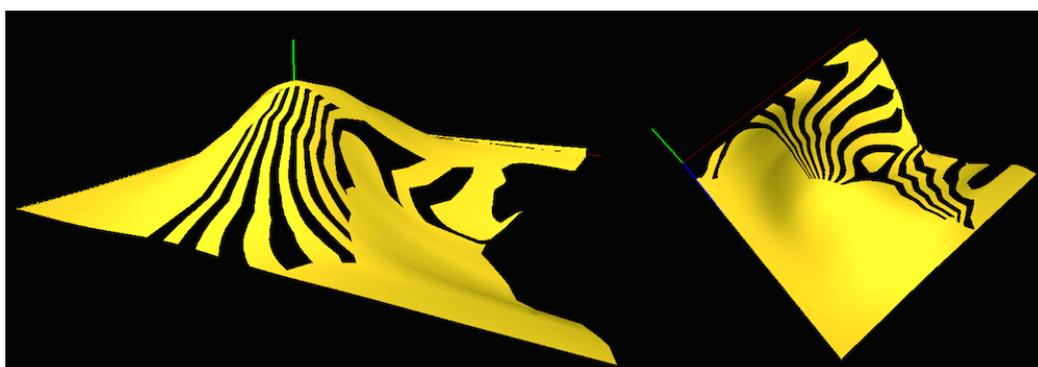


図 4.18: 図 4.17 左図と同じ曲面を視点を変えて評価している様子。

## 第5章 考察

### 5.1 性能評価の考察

誤差評価に関しては測定環境が悪かったためもあり、正確な誤差値を提示出来たとは言い難い。しかし、その測定値から誤差値の集合が持つ特徴を導き出し ShapeTape が持つ性能をある程度示すことができた。この結果から言えることは、ShapeTape を使用してモデリングをする際は機械部品のような正確な寸法を要求する場面ではそれに応えうる出力を期待するのは難しいが、ユーザーがポリゴン曲面を生成した後にそのポリゴンを修正する機会が与えられている場合や、正確な寸法を要求しない場合ならば十分期待する出力が得られるということである。

### 5.2 曲面生成の考察

本稿では OpenGL を用いて描画したポリゴンを用いて曲面を表現した。曲面生成においては、曲線近似を用いることにより入力に数式を用いなくても入力座標点列方向の C2 連続性が保証された曲面を生成することができた。しかし、曲面の曲率の評価の節でも述べたように、入力座標点列の掃引方向の曲率は保証されていないのでそれを保証するための手法が必要と感じた。

## 第6章 結論と今後の課題

本論文では、ShapeTape を用いたインタフェースを使用または作成する人に対して必要となる ShapeTape の持つ物性・精度・曲面生成の基礎モデルを提供した。本研究ではその曲面生成の基礎モデルで作成し曲面に近似したポリゴンサーフェスの性質をパラメトリック曲線・曲面主曲率・ゼブラマッピングを用いて評価した。今後の課題は、まず曲面を構成する曲線を表す ShapeTape (ShapeTapeA 表 4.1) の挙動の改善である。本研究では予め挙動を表すパラメータを定めたり二本目の ShapeTape (ShapeTapeB 表 4.1) を用いることで挙動を制御していたが、この手法だと挙動がいち曲線上に制限されてしまう。より自由度の高い挙動をするインタフェースにするには、例えば ShapeTapeA の実空間上の位置座標を取得できるデバイスを用いることが求められるだろう。また、考察でも述べたが、この曲面生成手法は高度な精度を要求するモデリングには適していないということである。解決策として ShapeTape で入力したポリゴンを入力後にマウスなどの他のデバイスで微調整できるインタフェースを開発することがあげられる。もうひとつ言えば、生成曲面の C2 連続性を高めるために、原点からの順番が同じ頂点で近似曲線を作成し、それを用いて入力座標点列同士の間には頂点を配置してあらたな頂点列を作成することで連続性を高めるなどの対策が必要だと感じた。

## 謝辞

本論文の執筆にあたり三谷純先生には多大なご助言とご指導を頂きました。心より感謝致します。また、日頃から非数値処理アルゴリズム研究室の皆様には小さな事に対してもご助言をくださりました。特に、自分のプログラミングに関する知識が乏しいばかりに多大なご助言を頂いてしまうことになり、ご迷惑をかけた今井拓也先輩に深く感謝いたします。最後に普段から自分を支えてくれる家族、友人に心からの感謝をここに申し上げます。

## 参考文献

- [1] Yohan Baillot, Joshua J. Eliason, Greg S. Schmidt, J. Edward Swan II, Dennis Brown, Simon Julier, Mark A. Livingston and Lawrence Rosenblum, "Evaluation of the ShapeTape Tracker for Wearable, Mobile Interaction," ,Proceedings of IEEE Virtual Reality 2003,pp 285-286,2006.
- [2] 吉森 勇人, 松宮 雅俊, 岩佐 英彦, 竹村 治雄, 横矢 直和, "2次元平面と3次元空間の組み合わせによるモデリング環境", 電子情報通信学会 技術研究報告, MVE99-65, Feb. 2000.
- [3] 岡庭 翔一, 前川 卓, "三角形メッシュの主曲率と主曲率方向の計算方法", 設計工学・システム部門講演会講演論文集,2010(20), "3307-1"- "3307-5", 2010-10-27.
- [4] 武佐 和宏, 渡辺 弥寿夫, "離散的な曲率と振率を利用した身体形状の分類とジェスチャ認識", 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア] 2008(27), 109-114, 2008-03-10.
- [5] 高三徳, 渡邊昌明, 吉田貞彦, 桜井俊明, 五十嵐三武郎, "自由曲線・曲面の滑らかさの理論および評価方法の考察と3次元CADへの応用", 日本図学会東北支部講演会,2004-3-27.
- [6] Tatiana Surazhsky, Evgeny Magid, Octavian Soldea, Gershon Elber and Ehud Rivlin, "A Comparison of Gaussian and Mean Curvatures Estimation Methods on Triangular Meshes", Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on (Volume:1 ), 1021 - 1026, 14-19 Sept. 2003.
- [7] "Rhinceros", "<http://rhino.itami.com/?p=1051>", (2015/1/22 アクセス)
- [8] "名刺作りのネタ帳", "[http://kobeproject.net/meishi/illustr\\_4.html](http://kobeproject.net/meishi/illustr_4.html)", (2015/1/23 アクセス)
- [9] "床井研究所", "<http://marina.sys.wakayama-u.ac.jp/tokoi/?date=20050121>", (2015/1/15 アクセス)
- [10] "sensible do more", "<http://dentsable.com/industries-design-model.htm>", (2015/1/19 アクセス)
- [11] "FreeForm 3D 触感モデリングシステム", "<http://www.opt-techno.com/freeform/>", (2015/1/19 アクセス).

[12] "DEMOSCENE.JP", <http://www.demoscene.jp/?p=1460>, (2015/1/15 アクセス)

[13] "SouVR", <http://en.souvr.com/product/200712/265.html>, (2015/1/21 アクセス)