

学位論文 博士(工学)

空間表示 3D ディスプレイにおける
コンテンツ描画に関する研究

2010年5月

慶應義塾大学大学院理工学研究科

市川 尋代

目次

第 1 章 序論	1
1.1 3D ディスプレイ	2
1.2 レーザプラズマ 3D ディスプレイ	3
1.3 3D コンテンツの表現	5
1.4 レーザプラズマ 3D ディスプレイの特徴と描画	8
1.5 本研究の目的	9
第 2 章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム	12
2.1 システム概要	13
2.2 3D スキャナの制御	14
2.3 キャリブレーション	15
2.3.1 3D スキャナの光学系モデルと空間座標系の関係	15
2.3.2 キャリブレーション手法	19
2.3.3 キャリブレーションの結果と考察	21
第 3 章 コンテンツ描画の基礎	26
3.1 コンテンツデータのフロー	27
3.2 点列データとスキャナの動作とプラズマ発光体	27
3.3 コンテンツ間のデータ補間方法	30
3.3.1 補間のための正弦を用いたスキャナ負担軽減方法	31
3.3.2 シミュレーション実験	31
3.4 描画の変化と視知覚	31

第4章 視覚による物体認知と情報量	33
4.1 認知と情報量	34
4.2 物体像エントロピー	35
4.3 知覚量の心理尺度構成	36
4.3.1 心理学的測定法による心理量の定量化	37
4.3.2 一対比較法による心理実験と順序尺度構成	38
4.3.3 Thurstone の比較判断法による距離尺度構成	39
4.4 実験結果と考察	41
第5章 エッジで表現する物体	46
5.1 エッジで表現できるプリミティブの描画	47
5.1.1 多角形の表現	47
5.1.2 多面体の表現	50
5.1.3 描画手法の心理評価	63
5.1.4 考察	66
5.2 文字列の描画	68
5.2.1 プラズマ発光点の点密度と描画時間と文字認識について	68
5.2.2 プラズマ発光体点密度と提示時間の実験結果	68
5.2.3 文字列描画手法	72
5.2.4 戻り経路	77
5.2.5 文字列描画実験	78
5.2.6 考察	80
第6章 曲面で表現する物体	82
6.1 球体の描画	83
6.1.1 基本の描画手法	83
6.1.2 球体の描画実験	84
6.1.3 らせんによる球体表現の最適パラメタ	86
6.1.4 描画手法の心理評価	86
6.1.5 考察	90
6.2 曲面物体の描画	91
6.2.1 曲面物体の表現手法	91

目次

6.2.2	曲面物体描画実験	92
6.3	ポリゴンモデルの描画	94
6.3.1	複雑なポリゴンモデルからの点列データ作成	95
6.3.2	ポリゴンモデル断面点列生成アルゴリズム	95
6.3.3	モデル作成実験	99
6.3.4	描画実験と考察	99
第7章 結論		103
7.1	本研究の成果	104
7.2	今後の研究課題	105
参考文献及び関連 URL		108
付録		i
A	コンテンツ生成アプリケーションの開発	ii
A.1	Contents Arrangement Tool(CAT) の概要	ii
A.2	単体モデル作成モード	iii
A.3	アニメーション設定モード	x
A.4	インポート/エクスポート	xiv
A.5	データ変換機能	xv
A.6	コンテンツ作成実験	xv
B	CAT 出力フォーマット	xvii
C	Wavefront obj ファイル	xix
D	ILDA 規格	xx

図目次

1.1	レーザプラズマ 3D ディスプレイ 1 号機	4
1.2	レーザプラズマ 3D ディスプレイ 2 号機	4
1.3	レーザプラズマ 3D ディスプレイ 3 号機	5
1.4	レーザプラズマ 3D ディスプレイ 4 号機	6
1.5	レーザプラズマ 3D ディスプレイ 5 号機	6
2.1	空間表示デバイスシステム	13
2.2	3D スキャナの走査方向	14
2.3	3D スキャナの走査範囲	15
2.4	3D スキャナの光学系近似モデル	16
2.5	仮想光源と焦点距離	17
2.6	プラズマ発光体の高さ	17
2.7	描画空間座標系	18
2.8	キャリブレーション用ポール	20
2.9	キャリブレーションシーン	21
2.10	キャリブレーション用画像	22
2.11	仮想光源と焦点距離	22
2.12	パラメタ補正 (誤差最小化)	24
2.13	パラメタ補正の効果	25
3.1	描画システムにおけるデータフロー	27
3.2	入力データ点列とプラズマ発光のタイミング	28
3.3	入力データの点数の違いによるプラズマ発光の変化	29
3.4	サンプリングインターバルの違いによるプラズマ発光の変化	30

3.5	繰り返し描画したときのズレ	30
3.6	コンテンツデータ間の正弦補間	32
4.1	物体像エントロピーの例 (立方体)	36
4.2	立方体における物体のアスペクトとエントロピーの関係	36
4.3	対象物と観測点	38
4.4	実験風景と被験者提示用画面	39
4.5	心理実験で使用了物体	42
4.6	実験結果	43
4.7	残差が最大となる物体像	45
5.1	角描画の問題	47
5.2	多角形の角における加速度の平滑化例	49
5.3	多角形の角の点配置リサンプリング結果 (シミュレーション)	50
5.4	正方形の描画	51
5.5	提案手法の立方体への適用	51
5.6	ワイヤーフレームモデルとグラフの例	53
5.7	書き順決定の例	54
5.8	多面体描画例	55
5.9	面の描画順を決定する場合の制限	55
5.10	面を描画するための3つのパラメタ	56
5.11	描画経路決定手法	56
5.12	立方体の例	57
5.13	立方体の描画実験	58
5.14	ワイヤーフレーム表現における構成面の投影	59
5.15	ワイヤーフレーム表現の立方体における物体のアスペクトとエントロピー	59
5.16	シミュレーション画像からの面の抽出	60
5.17	立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法1, $\phi = 0$)	61
5.18	立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法1, $\phi = -20$)	61
5.19	立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法2, $\phi = 0$)	62
5.20	立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法2, $\phi = -20$)	62
5.21	シミュレーション画像の物体像エントロピー	63
5.22	シミュレーション画像の観測点とエントロピーマップ	64

5.23	各セクションタイムのエントロピーマップ	65
5.24	点密度と文字の見え方	69
5.25	点密度と描画時間の関係	69
5.26	描画実験に使用した文字の例	70
5.27	実験に用いた点密度のシミュレーション結果	71
5.28	描画結果 “A”	71
5.29	描画結果 “C”	72
5.30	実験風景	73
5.31	文字の応用表現の例	74
5.32	文字列のための文字の基本描画	75
5.33	文字列の描画 (手法 1)	75
5.34	文字列の描画 (手法 2)	76
5.35	文字描画における戻り経路	77
5.36	“PLASMA”の例	79
5.37	“LASER PLASMA”の認識結果	80
5.38	文字列描画風景	80
5.39	手法 2 における描画	81
6.1	球体の表現	84
6.2	球体の描画実験	85
6.3	安定して観測される球体	88
6.4	曲面物体のらせん表現とアクセサリ	91
6.5	曲面物体の描画結果	93
6.6	一般的なポリゴンモデルの例	94
6.7	モデルに対する断面	96
6.8	ポリゴンと断面の関係	96
6.9	ポリゴンと断面との交点	97
6.10	断面輪郭のタイプ	97
6.11	断面中の輪郭集合	98
6.12	断面の輪郭の繋がり	98
6.13	ポリゴンモデルからの点列データ生成実験の例	100
6.14	描画実験 1(duck)	101
6.15	描画実験 2(hand 1)	101

図目次

6.16 描画実験 3(hand 2)	102
6.17 描画実験 4(face)	102
A.1 CAT:単体モデル作成モード画面	iii
A.2 CAT:アニメーション設定モード画面	iv
A.3 仮想空間と Viewport , 視方向の変更	v
A.4 Viewport 座標から仮想空間への座標変換	vi
A.5 コントロールポイントの設定	viii
A.6 編集パレット	ix
A.7 アニメーション設定モードの構造	x
A.8 アニメーションパレットとフレームの設定	xii
A.9 モデルの回転 / 平行移動 / 拡大縮小	xiii
A.10 キーフレーム間の補間	xiv
A.11 回転 / 平行移動 / 拡大縮小の補間	xiv
A.12 CAT を使ったコンテンツ作成	xvi
B.13 CAT の出力データの例 (単体モデル用 , caf ファイル)	xvii
B.14 CAT の出力データの例 (アニメーション用 , can ファイル)	xviii

表目次

2.1	パラメター一覧	19
2.2	キャリブレーション用プラズマ位置の計測結果	22
2.3	描画した正方形の頂点位置 [cm]	23
2.4	描画した正方形の頂点位置の誤差 [cm]	24
4.1	度数行列 (N=10)	39
4.2	比例行列 (P 行列)	40
4.3	尺度距離行列 (I 行列)	41
4.4	適合度検定	44
4.5	分散分析結果	44
5.1	経路探索の結果の例	54
5.2	評価結果 (尺度値)	66
5.3	プラズマ発光体の点密度リスト	70
5.4	文字グループ	73
5.5	“PLASMA”の認識結果	78
5.6	“LASER PLASMA”の認識結果	78
6.1	らせんで表現した球体における評価パラメタ	86
6.2	評価結果 (尺度値)	87
6.3	らせん表現した球体における評価パラメター一覧	89
D.1	ILDA 3D coordinate header description. one for each frame	xx
D.2	3D coordinate data record description. one for each point	xxi

第 1 章

序論

1.1 3D ディスプレイ

近年，立体映像技術に関する研究が盛んに行われている．裸眼で立体視を得る 3D ディスプレイとして，さまざまな方式の立体映像表示装置 (3D ディスプレイ) が開発されている [1, 2, 3]．大きく分けて，多眼式 3D ディスプレイ，光線再生型ディスプレイ，空間走査型ディスプレイの 3 つのタイプがある．

人間が 3D ディスプレイから自然な立体視を得るためには，立体視の生理的要因 (両眼視差, 焦点調節, 輻輳, 運動視差) を満足していなければならない．多眼式 3D ディスプレイでは，両眼視差を満足させる方式として，パララックスバリア (parallax varrier) 方式 [4, 5] や，レンチキュラ (lenticular) 方式 [6] が採用されている．パララックスバリア方式では左目用画像と右目用画像を縦長に交互に配置し，その前に同じ周期のスリットを置くことによって，左右の目に異なる画像を提示する．また，レンチキュラ方式では，かまぼこ型レンズの焦点面に多視点からカメラで撮影した画像をストライプ状に配置して立体視を得ることができる．また，物体の反射光を再現する光線再生型ディスプレイとしてはインテグラルフォトグラフィ (integral photography : IP)[7] やホログラフィ [8] がある．IP 方式では微小な円形レンズを敷き詰めたレンズ板 (fly's eye lens) を使用する．このレンズ板をカメラのフィルムの前に配置すると，レンズアレイを介して多数の点像が撮影・記録される．このようにして記録されたフィルムにバックライトを当ててレンズアレイを介して観察すると，撮影時の光線束が再現される．ホログラフィではレーザ光をビームスプリッターで分け，一方を参照光として記録材料に，他方は物体に照射すると，記録材料上で干渉縞が生じる．これを記録した記録材料に対して再び同じ参照光を当てると，回折光は物体光と全く同じになるため，記録時に物体があった位置に同じ物体が存在しているかのように見える．これらの方式では高精細な映像を立体視できるが，疑似的な 3 次元であり視野角が限られていることや，輻輳や運動視差の問題で疲労感などが問題となっている．

一方，体積型 (Volumetric) と呼ばれる体積走査方式 [9] や，奥行き標本化型 3D 表示方式 [10] は，2D スクリーンに立体の断面を投影し，2D 画像を集積することで立体を表示する．このような手法では駆動系を用いてスクリーンを移動・回転させるとともに特定の視方向から観測される 2 次元映像をスクリーンに投影し，残像効果によって立体視を得ることができる [9, 11, 12, 13]．高速に回転するスクリーンとその角度に合わせた映像をプロジェクタで投影する方法では 360° の立体映像を表示することができる [13]．これらの手法では立体視の生理的要因を満足しやすいが，スクリーンに 2 次元画像を描画している

ため、実体を描いているわけではない。

そこで、「3次元空間そのものをディスプレイとして実体を描く」という発想から、描画空間にスクリーンを必要としない新しい立体映像装置が開発された [14]。このデバイスでは強力な赤外パルスレーザを用いて気体をイオン化して、空間中にプラズマ発光体を発生させる。この現象はレーザ励起プラズマ (Laser-induced breakdown) と呼ばれ、古くからよく知られていたが [15, 16]、このデバイスで初めてディスプレイに利用された。プラズマ発光体は光のドットとして観測される。パルスレーザを使用して1点ずつ生成/消失を繰り返すプラズマ発光体を発生させながら 3D スキャナを用いて Vector スキャンでレーザビームを走査することにより、プラズマ発光体の発生位置を変化させることができる。結果として、プラズマ発光体の軌跡が光の点列として観測され、物体を連続する光点で描画することができる。このディスプレイをレーザプラズマ 3D ディスプレイと呼んでいる。

1.2 レーザプラズマ 3D ディスプレイ

ここで、現在までのレーザプラズマ 3D ディスプレイの開発の経緯について述べる。

2005年、木村((株) パートン) と内山(慶應義塾大学) らは、レーザ光で焦光点近傍の気体をプラズマ化して発光させることにより(レーザプラズマ方式)、ドットアレイからなる2次元映像をスクリーン無しに空気中に描画するという実証実験に世界で初めて成功した。この1号機では、繰り返し周波数 100Hz のレーザを使用しており、1秒間に100個の光点(ドット)を描画可能だった。しかし、スキャンの自由度が2軸だったため、2次元映像しか描画することができなかった(図 1.1)。

2006年2月、(株) パートン、産総研、慶應義塾大学は、レーザプラズマ方式により、空気以外に何も存在しない空間に光点からなる“3次元映像”を実体として描画する「空間立体描画技術」(レーザプラズマ方式自由空間ディスプレイ)を開発し発表した [17]。この2号機では、レーザ光源を1号機より高性能化(高出力化)されるとともに、3次元のスキャンシステムが導入され、3次元映像の描画が初めて可能となった(図 1.2)。

2006年8月には SIGGRAPH2006 E-Tech にて招待展示を行い、世界で初めて空間中に実体を描く 3D ディスプレイ “Laser produced 3D Display in the air” [14] として発表した。この3号機のレーザの繰り返し周波数は1, 2号機と同じ 100Hz であり、1秒間に100点の光点を用いてコンテンツを描画していた(図 1.3)。

2007年、(株) パートン、産総研、(株) 浜松ホトニクスは、(株) 浜松ホトニクスが開発した繰り返し周波数 1kHz のレーザ [18] を導入した試作機(4号機)を発表した [19, 20]。

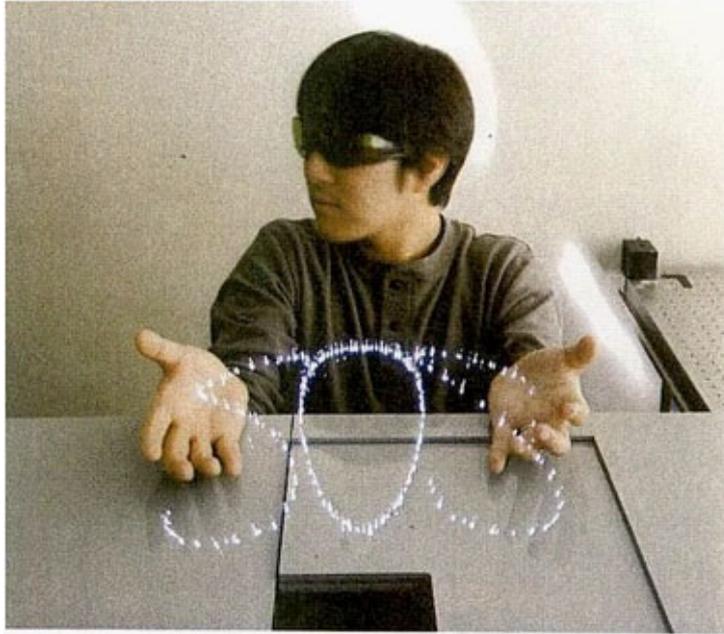


図 1.1: レーザプラズマ 3D ディスプレイ 1号機

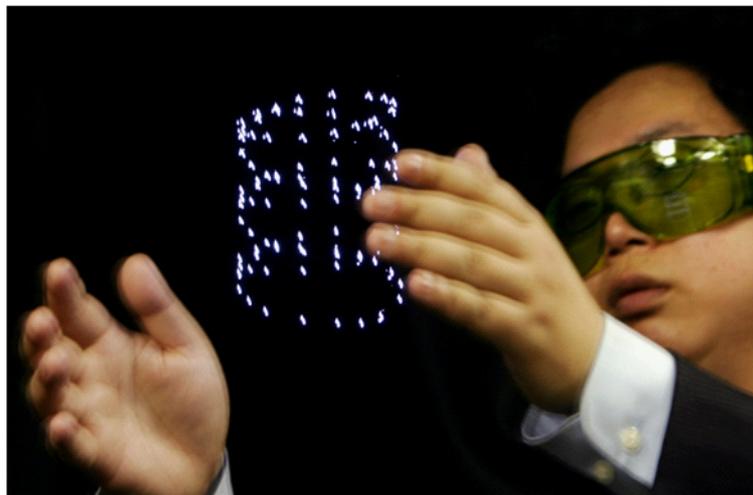


図 1.2: レーザプラズマ 3D ディスプレイ 2号機



図 1.3: レーザプラズマ 3D ディスプレイ 3号機

レーザの繰り返し性能の向上に併せて、3次元スキャンニングシステムの光学系の調整も行われ、3次元映像をスムーズに描画することに成功した。4号機では、1秒間に最高で1000個の光点を描画することが可能となった(図 1.4)。さらに、5号機では描画装置としての可搬性の向上を目的に、小型化したレーザ光源を開発し、装置自体の小型・軽量化を行った(図 1.5)。

現在、レーザの性能は変わらないが、より大きなスペースに、より多くのプラズマ発光体を発生できるように、3D スキャナ部分の高速化や改良を行っており、いろいろなアプリケーションが考えられている [21]。また、レーザプラズマと類似した技術を用いて、デスクトップ型の空間表示 3D ディスプレイも並行して開発中である。このように、ハードウェアが発展していく一方で、コンテンツ描画に関する研究はあまりなされてこなかった。3D ディスプレイとして実用化するためには、コンテンツ描画に関する検討が必要である。著者は5号機の開発時からレーザプラズマ 3D ディスプレイのプロジェクトに参加し、主にコンテンツ描画/表現に関して研究を行っている。

1.3 3D コンテンツの表現

これまでに開発されてきた各種の 3D ディスプレイでは、様々な表現方法により 3D コンテンツが描画されている。

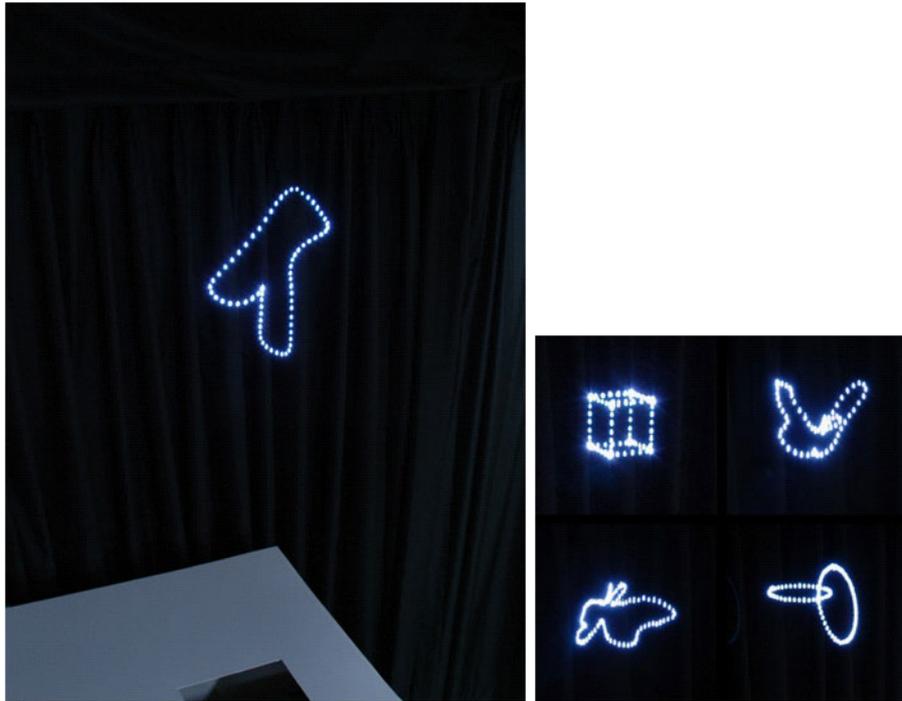


図 1.4: レーザプラズマ 3D ディスプレイ 4号機



図 1.5: レーザプラズマ 3D ディスプレイ 5号機

多眼式 3D ディスプレイやインテグラルフォトグラフィ (IP), ホログラフィでは 2D 映像と同じように高精細な映像を提示することができるようになってきている。

体積型 3D ディスプレイでは, 解像度や大きさ, 色が限られるが, コンピュータグラフィックス (CG) 作成アプリケーションで作成したワイヤフレームオブジェクトを表現していることが多い。また, Vector スキャンを用いた立体映像提示方法としては, 見る方向に対して 45 度傾けた 2 次元の CRT ディスプレイに描画した断面画像の像面をミラー スキャナで高速に動かすことで, 3 次元空間を高速に走査する立体映像装置も開発されており [22, 23], CT 画像のボクセルデータを表示している。

これらの研究で開発された体積型ディスプレイでは, 30Hz 程度の周波数で描画することにより残像効果で 3 次元映像を見ることができると報告されている。また, 基本的には 2 次元画像をスクリーンに描画するため, 物体の視方向によって変化する映像や断層画像をコンテンツとして用意すればよい。このため, 従来の 2D ディスプレイで表示しているコンテンツ表現と同様のものを表示するだけで 3 次元映像提示が可能となる。つまり, これには CG 用のデータや, 実際に計測したデータなどを使用可能である。

さて, 本論文で対象としているレーザプラズマ 3D ディスプレイでは, これまでにない新しい表示デバイスを使用しているため, 経験的に蓄積したノウハウだけで, 表現方法などの技術は確立されていなかった。この 3D ディスプレイデバイスと同様にレーザプラズマを用いたディスプレイシステムの開発事例も報告されている [26] が, この例では描画空間が狭い範囲に限定され, 映像も単純な図形であるため, 実用的な表現方法の技術とは言えなかった。そこで, 点列を空間中に実体を描画できることという利点を十分に生かした 3D コンテンツを表現することが非常に重要である。そのためには, デバイスにおける点列の描画性能や人間の認知特性を考慮して, 点列で効果的に形状を表現できる方式について考察する必要がある。

一方, 点列ではないが点群としてモデル形状を扱う分野として, ポイントグラフィックス (Point based graphics)[24, 25] が知られている。例えば, ポイントグラフィックスで用いられている “Surface splat” と呼ばれるレンダリング手法では, 計測された物体表面上のサンプリング点を最適化して少ないサンプル点でデータ表現することができる。こういった手法を用いることにより, 解像度や表面の複雑性によってデータ量の軽減やレンダリング速度の向上を図ることも可能である。膨大な点群データを扱う場合には有効な手法と考えられる。

1.4 レーザプラズマ 3D ディスプレイの特徴と描画

コンテンツ表現を考えるには、描画デバイスの特徴は非常に重要である。レーザプラズマ 3D ディスプレイデバイス (以降、3D デバイスと略す) を用いると、1 秒間に 1000 回発生するプラズマ発光体を Vector スキャンして実体を描画しなければならない。プラズマ発光体が輝いている時間は約 100ns と非常に短い、人間の視覚には残像効果があり、光刺激が終わった後にもそれが継続していると感じる。その継続時間は光の強度によって変化し、その長さは 10 ~ 200ms といわれている [27, 28, 29]。この 3D デバイスと同じ方法で、1 秒間に 100 個のプラズマ発光体を生成できる 100Hz のパルスレーザを用いて描画した場合、最大で約 20 個のプラズマ発光体が同時に知覚できていたことから、本システムのプラズマ発光体では残像効果は最長で 200ms 程度であるといえる。すなわち、個人差や描画しているコンテンツに依存するが、1kHz のパルスレーザを用いたシステムでは、人間が同時に知覚できるプラズマ発光体の数は最大で約 200 個程度となる。パルスレーザの繰り返し周波数を増加させれば 1 秒間に表示できるプラズマ発光体の数が増加し、同時に知覚できる数も増加する。しかし、現状では、高出力で 1kHz より高周波数のパルスレーザを入手することは困難であるため [17]、ここでは、同時に知覚できるプラズマ発光体の数を 200 個程度と想定して議論を進めることにする。

3D デバイスのこのような特性を考慮すると、少ないプラズマ発光体数で一つの物体を描けば、人間はすべてを同時に観測できると感じるため、安定して物体を観測することができる。すなわち、安定して認知できる描画時間 (安定認知時間) は 200ms となる。しかし、安定認知時間で描画できる約 200 点で表現可能な物体は限られており、それ以上のプラズマ発光体が必要な物体では認知しにくくなると考えられる。また、3D デバイスの他の特性としては、3D スキャナの負荷が挙げられる。本 3D デバイスは広範囲の空間描画を目的としているため、スキャナの光学系部分は大型になってしまう、そのため、急激な走査方向の変化には負荷がかかり、描画が不安定になったりすることがある。そのため、コンテンツ描画には 3D スキャナに負荷がかかりすぎないように考慮する必要がある。

しかし、3D デバイス用にこれまで行われていたコンテンツデータの作成過程は、作成者がコンテンツのアウトラインをプログラムやマニュアルで作成し、それを等間隔でサンプリングして点列データを生成するというものであったため、スキャナの負担が増大したデータとなることも多かった。そこで、スキャナの負荷を考慮して、スキャナをゆっくり動かすことで対処していた。その結果、描画に時間がかかり、描画しても表現したいコンテンツに見えないことが多々あった。

3D ディスプレイではないが、レーザアートやレーザショーなどで使用するレーザディスプレイシステムは本システムにもっとも近い特性を持つ。可視光レーザを2次元スキャナで動かし、建物の壁などのスクリーンにさまざまな絵を描くことができる。このようなシステムではレーザのフォーカスなどを加えて、入力が3次元のスキャナを動かすこともあるが、描画するのは2次元画像であるため、3D デバイスシステムにそのまま応用することは難しい。しかし、このようなレーザディスプレイシステムにおいてもスキャナの負荷が発生し、その負荷軽減手法に関しては参考にできる点がある。例として、多角形を描画するとき、その頂点ではレーザの走査を一時的に停止させるという制御を行うことで、安定して頂点付近を描画している [30]。本論文で扱う 3D デバイスシステムにおいても、このような考え方でスキャナの負荷を軽減させることが望ましい。そこで、まず、3D デバイスに適した 3D コンテンツがどんなものであるかを考えなければならない。3D デバイスはこれまでにない表現手法であり、描画するスキャナに制約もあるため、描画した物体を人間が認知できるかどうかも重要な問題となる。光の点列で物体を描画し、それを視覚で認知する場合、光の点の情報からどれだけ得たかという心理物理学的要因 [31] だけが問題でなく、得た情報が物体認知を行う人間の記憶や形状認知機構に有効な情報であるかということも重要になる。一般的な 3 次元物体の認知の場合、物体のアスペクトによって認知しやすさが変化する [32, 33]。認知しやすさが変化するのとは得られる情報が変化すると考えられ、人間にとって形状認知に適した物体のアスペクトには必要な情報が含まれるということになる。この情報はレーザプラズマ 3D ディスプレイのコンテンツ表現を考える上で有効である。

1.5 本研究の目的

本研究では、まず、レーザプラズマ 3D ディスプレイの描画空間のキャリブレーションについて考える。ここでは、2 台のカメラを利用して描画空間を撮影し、カメラ画像中に撮影されたプラズマ発光体の位置から、その 3 次元位置を算出することにより、光学系のパラメタの補正を行って描画空間のキャリブレーションする方法について検討する。

次に、人間の 3 次元物体認識における情報取得について考える。人間の 3 次元物体の認知機構は非常に複雑であるが、人間は物体認知に必要な情報の取得を通常無意識に行っている [34, 35, 36]。ここでは、プリミティブな多面体の線画に対して、物体像の情報量として定義された物体像エントロピー [37] と人間の 3 次元物体認知における認知しやすさと比較して、人間の必要とする情報を考察する。人間の認知しやすさという尺度については、心理実験を行い、心理尺度の構成する手法について提案する。

そして、本ディスプレイの特性を考えて、エッジで表現できる物体とエッジで表現できない曲面物体について本システムに適した物体の表現手法を提案する。

エッジで表現できる物体については、2次元のプリミティブな形状として多角形を対象とする。多角形の描画では頂点付近におけるスキャナの加速度を滑らかにすることでスキャナの可動部の負荷を軽減して表現する手法を提案する。エッジで表現できる3次元のプリミティブな物体としては多面体を対象とする。多面体に対しては、エッジ表現としてワイヤフレームを Vector スキャンで描画する。まず、スキャナの負荷を考慮した最短経路を求める手法を提案する。しかし、多面体の描き順によって物体の認知しやすさが変わることを予備実験により確認しているため、多面体認知における人間の必要とする情報、面の重要性 [38] を考慮してワイヤフレームを描画する手法も合わせて提案する。ここでは空間中に描画した映像に対して物体像エントロピーを拡張して評価を行う。3次元データの情報量としては、ボリュームデータに対するエントロピーとして、Viewpoint Entropy [39, 40] があるが、本研究ではボリュームデータとしてではなく、空間中の線画として扱う。

エッジで表現できる物体の応用例として、文字列の描画手法を提案する。文字は2次元平面的な形状であるが、本ディスプレイを用いた空中広告などを考えた場合、文字列表示は非常に重要である。本論文ではまず、文字を描画するときの適したプラズマ発光体密度と提示時間を実験により調査する。そして、文字列を安定に認識させるための手法として、複数文字ごとを表示していく描画手法を提案する。

一方、エッジでは表現できない曲面物体については、プリミティブな物体として球体の描画を考える。球体については、これまで円を少しずつ回転させて描画する手法が試されてきた。しかし、これでは円が回転しているように見える仮現運動 (ベータ運動) [41] が起きてしまうことをすでに確認している。そのような認知特性が発生しにくい表現手法としてらせん形状を用いた手法を提案する。そして、応用例として、球体の表現手法をもとに、曲面物体の表現方法を提案する。最後に、今後、デバイスのハードウェアの改良によって、より高速で高精細な描画ができるようになることを想定して、一般的なポリゴンモデルの表面を描画するために、本デバイス用の点列データに変換する手法を提案する。この手法では、らせんを用いて曲面物体を表現したことを応用して、ポリゴンモデルに対しても断面輪郭を順に描画していく点列データを生成できる。生成した点列データは、デスクトップ型空間表示 3D ディスプレイの試作機で描画実験を行う。これはレーザプラズマ 3D ディスプレイと類似した技術を用いて開発されており、小型であるため、パルスレーザの繰り返し周波数が高く、3D スキャナも高速で動かすことができる。

以下に本論文の構成を示す。

第2章ではレーザプラズマ3Dディスプレイシステムのスキャナ制御方法と描画空間の設定、キャリブレーションについて記述する。

第3章ではレーザプラズマ3Dディスプレイにおける描画の基礎を、データフローを基に説明し、ディスプレイやデータの特徴について記述する。

第4章では、視覚による物体認知と情報量について、物体像エントロピーの説明と、物体認知における認知しやすさの心理尺度構成について記述する。

第5章ではエッジで表現できるプリミティブな物体として、多角形や多面体、描画手法の提案と実験による評価を行う。さらに、文字列に対しても効果的な表現方法について記述する。

第6章ではエッジで表現できない物体として球体の表面を表現する手法の提案と実験による評価を行う。そして、応用として曲面物体な表現、一般的なポリゴンモデルの表面を表現するための点列データ生成手法と実験結果について記述する。

第7章では本研究の成果をまとめ、今後の研究課題について記述する。

第2章

レーザプラズマ 3D ディスプレイ システム

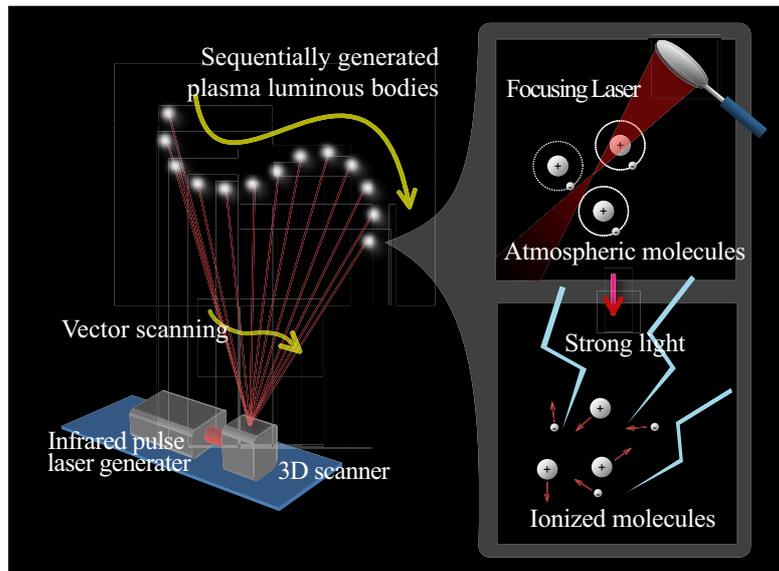


図 2.1: 空間表示デバイスシステム

本章ではシステムの概要とコンテンツ描画に重要となる 3D スキャナの制御と入力データに関する説明，そして，描画領域のキャリブレーション手法について述べる．

2.1 システム概要

本システムの基本的な構成は赤外パルスレーザー発生装置 (Infrared pulse laser generator) 1 台と空間中を走査する 3D スキャナ (3D scanner) からなる．図 2.1 に本システムの基本構成を示す．レーザー発生装置は最大 1kHz でパルスレーザーを発生させる．パルスと同じタイミングで空間中の集光点にて気体分子がイオン化され，それとともに強い光が (プラズマ発光体) 放出される．赤外パルスレーザー発生装置は半導体レーザーであり，繰り返し周波数 1 kHz，ピーク出力 100kW，パルス幅 100fs，小型で高強度な全固体フェムト秒レーザーシステムである．

3D スキャナでは，レーザーの方向と集光距離を制御することができる．走査は Vector スキャンで行う．空間中にレーザーを走査させたとき，その軌跡上にプラズマ発光体が発生し，それが光の点列として描かれる．

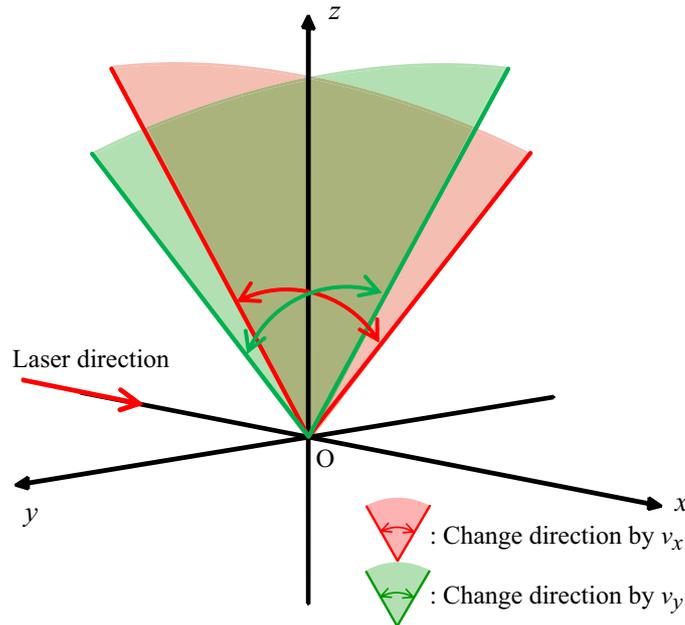


図 2.2: 3D スキャナの走査方向

2.2 3D スキャナの制御

3D スキャナへの入力は z 軸鉛直方向左手座標系の各軸の電圧値 (v_x, v_y, v_z) の時系列離散データであり，図 2.2 に示すように， v_x の値によって x 軸方向のスキャン位置， v_y の値によって y 軸方向のスキャン位置が変わる．入力電圧には入力可能範囲 $(\pm v_{xmax}, \pm v_{ymax}, \pm v_{zmax})$ があり，スキャン範囲も z 軸に対して $\pm \theta_{max}$ となる．ただし， $v_{xmax}, v_{ymax}, v_{zmax} > 0$ $\theta_{max} > 0$ である．したがって， x, y 方向はプラス方向とマイナス方向を合わせて $2\theta_{max}$ の範囲を走査することができる．また，角度は v_x, v_y によって線形に変化する．一方，レーザの集光距離はスキャナの光学系の設定により変化する．集光距離の詳細については 2.3 で記述する．

3D スキャナに電圧値 (v_x, v_y, v_z) を入力することで，走査可能空間中の任意の点を指定することができる．例えば， $(v_x, v_y, v_z) = (v_x, 0, v_z)$ のとき， xz 平面上をスキャンし， $(v_x, v_y, v_z) = (0, v_y, v_z)$ のとき， yz 平面上をスキャンする．また， $(v_x, v_y, v_z) = (0, 0, v_z)$ のとき， z 軸上をスキャンする．3D スキャナの走査範囲を図 2.3 に示す．3D スキャナの走査範囲は図に白い網で示す球状部分に挟まれた空間で，厚みを持ったアーチ型となる．

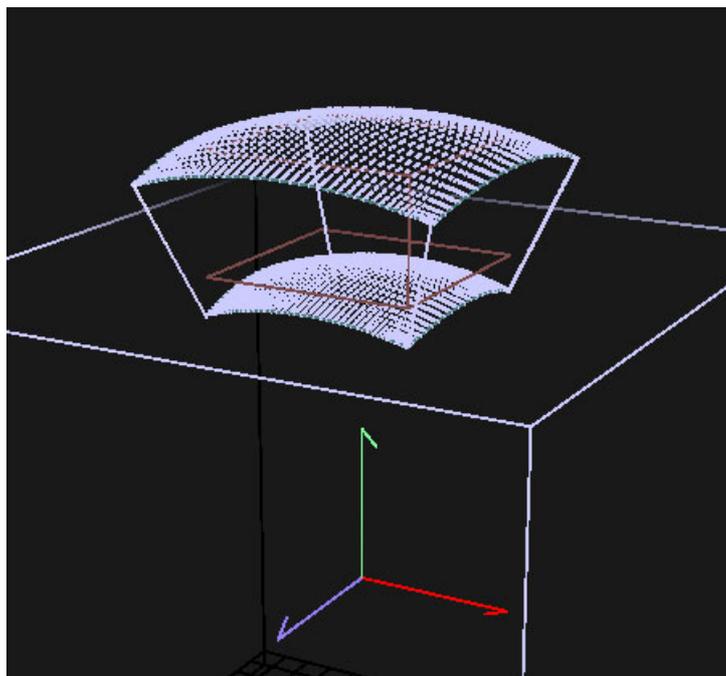


図 2.3: 3D スキャナの走査範囲

2.3 キャリブレーション

スキャナへの入力は、3.1 で述べるように描画するコンテンツのアウトラインを作成し、そのデータからサンプリングして描画空間座標値の点列データを作成する。空間座標値のサンプリングデータを 3D スキャナの入力値である電圧値に変換しなければならないため、描画空間領域と 3D スキャナへの入力データを対応付ける必要がある。本節では、描画空間領域の座標から 3D スキャナへの入力データへの変換と、そのキャリブレーション手法について説明する。

2.3.1 3D スキャナの光学系モデルと空間座標系の関係

3D スキャナはレンズやミラーを用いた光学系で複雑に構成されている。しかし、光学系モデルと空間座標系の関係を示すには図 2.4 に示すように凹レンズと凸レンズで近似したモデルで考えることができる。この図で示すように、仮想光源から Lens2 までの距離 s_1 と Lens2 からプラズマ発光体までの距離 s_2 の関係はレンズの公式から式 (2.1) で示す

第 2 章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム

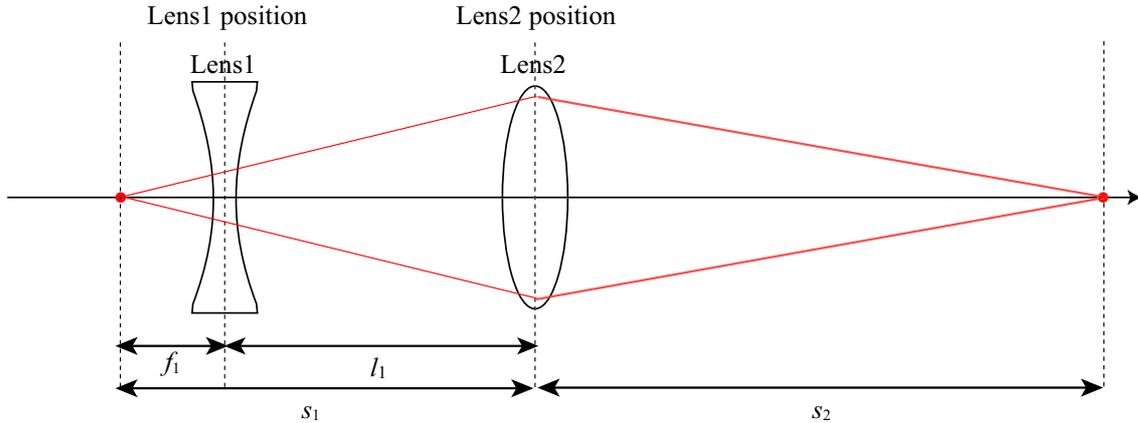


図 2.4: 3D スキャナの光学系近似モデル

ことができる [42] . ここで , f_2 は Lens2 の焦点距離である .

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f_2} \quad (2.1)$$

Lens1 の位置を変化させると焦点も変化する . 式 (2.1) を変形させた式 (2.2) より , f_2 を固定すると s_2 は s_1 によって非線形に変化し , グラフは図 2.5 のようになる . グラフからも分かるように , s_1 が増加すると s_2 は非線形であるが , 単調減少する .

$$s_2 = \frac{s_1 f_2}{s_1 - f_2} \quad (2.2)$$

本システムでは図 2.6 に示すように Lens2 の後にミラーを配置し , 直進するレーザー光を上方向へ反射させている . ここで , s_1 は , 凹レンズの焦点距離 f_1 と凹レンズと凸レンズの距離 l_1 , 凸レンズの変位 dz の和である . また , s_2 は凸レンズと制御ミラーの光学中心までの距離 l_2 と制御ミラーからプラズマ発光体の高さ l_z の和である . これらより , プラズマ発光体の高さ l_z は式 (2.2) より式 (2.3) で表わされる . ここで , スキャナの座標系はレーザーの進行方向を x 軸とし , x 軸とミラーの交点を原点とする . スキャナへの入力 $v_x = v_y = 0$ で , v_z を変化させたときのスキャンの軌跡を z 軸とする . x 軸と y 軸は直交するように調節し , x , z 軸と直交する軸を y 軸とする . ただし , 描画空間の座標系は左手系とする .

$$l_z = \frac{(f_1 + l_1 + dz)f_2}{(f_1 + l_1 + dz) - f_2} - l_2 \quad (2.3)$$

プラズマ発光体を描画空間の (x, y, z) に表示したいときに , 必要なパラメタは , ミラーの回転角とレンズの変位のセット (θ_x, θ_y, dz) である . 図 2.7 にミラーの回転角度 θ_x , θ_y

第2章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム

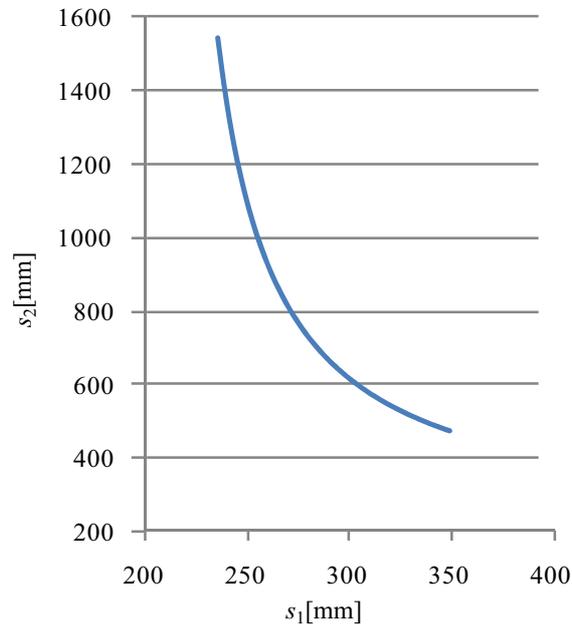


図 2.5: 仮想光源と焦点距離

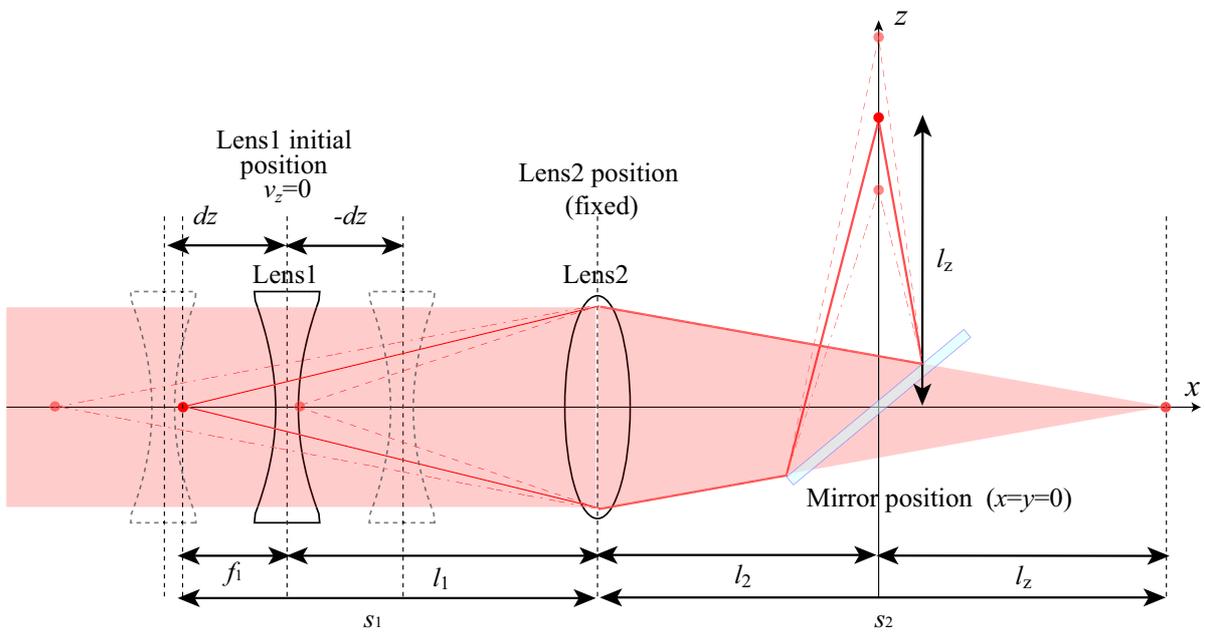


図 2.6: プラズマ発光体の高さ

第 2 章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム

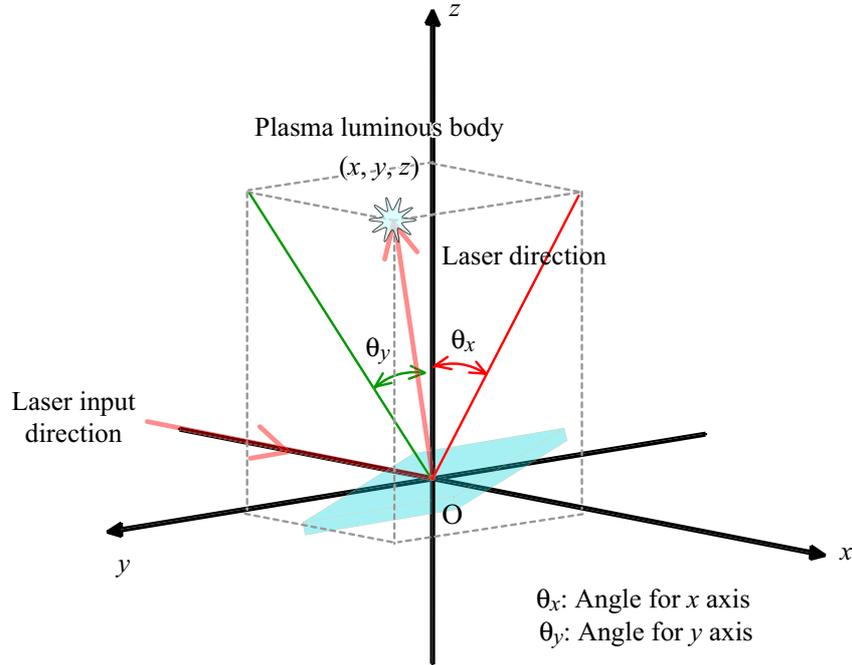


図 2.7: 描画空間座標系

とプラズマ発光点の関係を示す．ミラーからプラズマ発光点の距離を l_z とすると，プラズマ発光体の位置 (x, y, z) とミラーの回転角 θ_x, θ_y ，プラズマ発光体までの距離 l_z はそれぞれ式 (2.4)，(2.5)，(2.6) で表わされる．

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{x}{z} \quad (2.4)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \frac{y}{z} \quad (2.5)$$

$$l_z = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.6)$$

また，式 (2.3) を変形して dz について整理すると式 (2.7) が得られる．

$$dz = -l_1 - f_1 + \frac{f_2(l_2 + l_z)}{l_z + l_2 - f_2} \quad (2.7)$$

式 (2.7) に式 (2.6) を代入して，式 (2.8) が得られる．

$$dz = -l_1 - f_1 + \frac{f_2(l_2 + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2})}{l_2 + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - f_2} \quad (2.8)$$

ただし，実際には，3D スキャナへの入力 (x, y, d_z) となる電圧値 (v_x, v_y, v_z) であり，使用する D/A ボードの仕様に合わせた変換を行って電圧値を算出する．

第 2 章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム

表 2.1: パラメータ一覧

パラメタ	内容	備考
f_1	凹レンズの焦点距離 (通常マイナス)	s_1 の構成要素
l_1	凹レンズと凸レンズ間の距離	s_1 の構成要素
d_z	凹レンズの変位	s_1 の構成要素
l_2	凸レンズとミラーの距離	s_2 の構成要素
l_z	ミラーからのプラズマ発光点の高さ	s_2 の構成要素
f_2	凸レンズの焦点距離	s_2 の構成要素

2.3.2 キャリブレーション手法

2.3.1 で述べた 3D スキャナの光学系モデルと空間座標系の関係を用いることで、プラズマ発光体を描画したい位置 (x, y, z) からスキャナの回転角とレンズの変位で表わされるパラメタ集合 $P(\theta_x, \theta_y, d_z)$ に変換することは可能である。しかし、各パラメタの精度によって正確に変換できない場合がある。表 2.1 に使用する固定パラメタを示す。ここで、各レンズの焦点距離 f_1, f_2 についてはメーカーによって精度は保証されていると想定する。また、凹レンズの変位 d_z は精密機器を使用して移動させているため正確に位置決めがなされているものとする。一方、 l_1, l_2 は 3D スキャナの内部にあり、 l_2 は固定されているが、 l_1 はレーザの集光位置の微調整を行うときに変動してしまうため、正確な値が分からない。そのため、 l_1 の大まかな計測値を用いてスキャナへの入力値に変換すると描画結果に歪みが発生してしまう。この歪みをなくすために、プラズマ発光体の発生位置に密接に関係するパラメタである l_1 の値を補正する必要がある。この補正には、実際にプラズマ発光体の 3 次元空間位置を計測する必要があるが、プラズマ発光点に接触して計測することはできないため、ここでは、2 台のカメラとキャリブレーション用ポールを用いて計測を行う方法を提案する。そして、計算値と比較し、 l_1 の値を補正する。

キャリブレーション手順

1. 図 2.8 に示すような 4 本のキャリブレーション用のポールを四角形となるように立てる。各ポールは 3 次元スキャナに対して図 2.9 のように配置する。この例では、ポールの高さは 250cm、 x 軸方向の間隔は 200cm、 y 軸方向の間隔は 150cm とした。ま

第 2 章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム

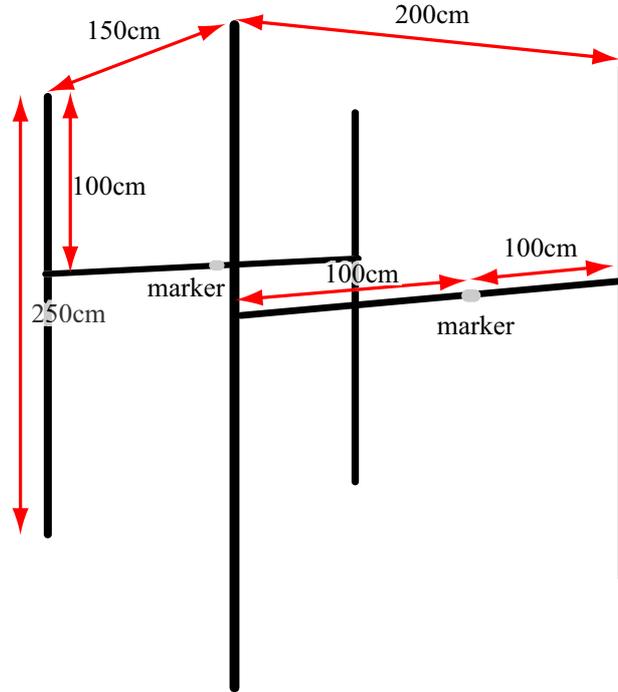


図 2.8: キャリブレーション用ポール

- た，2本のポールは上から 100cm のところで接続用ポール連結した．2本のポールをつなぐポールの中点にはマーカーを配置する．
2. 2台のカメラでキャリブレーション用ポールを計測し，カメラパラメータを算出する [43]．このとき原点はスキャナの光学中心とミラーとの交点とする．また， z 軸は， $\theta_x = \theta_y = 0$ のとき， d_z を変化させて描かれるプラズマ発光体の軌跡を z 軸とする．
 3. プラズマ発光体を発生させて 2台のカメラで撮影し，2. で算出したカメラパラメータで 3次元位置算出する．
 4. 理論値と計測値の誤差を最小化するように， l_1 の値を補正する．式 (2.3) のパラメータの中で，計測される値は l_z である．計測した値を l_z ，計算で得られる値を \hat{l}_z とすると，2乗誤差はパラメータ l_1 と補正值 dl_1 に対して

$$(l_z - \hat{l}_z)^2 = \left(l_z - \frac{(f_1 + l_1 + dl_1 + dz)f_2}{(f_1 + l_1 + dl_1 + dz) - f_2} - l_2 \right)^2 \quad (2.9)$$

となる．補正用に n 個のデータを使用した場合には，平均二乗誤差 (RMSE : Root mean square error) とし，

$$err(dl_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left(l_{zi} - \frac{(f_1 + l_1 + dl_1 + dz)f_2}{(f_1 + l_1 + dl_1 + dz) - f_2} - l_2 \right)^2 \quad (2.10)$$

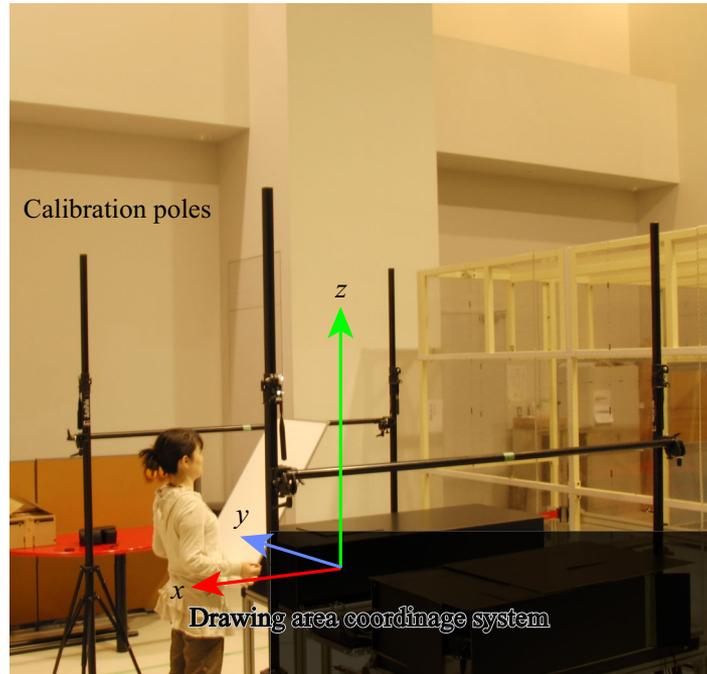


図 2.9: キャリブレーションシーン

となる．式 (2.10) を最小にする $dl_1 = dl_{1min}$ を求めることで， l_1 を補正することができる．

2.3.3 キャリブレーションの結果と考察

2.3.2 で述べた方法でキャリブレーションを行った．式 (2.9) の dl_1 を求めるためにプラズマ発光点の位置を計測する． l_1 の値によって変化するのはプラズマ発光点までの距離であるため，スキャナの x, y は 0 とし， z の値だけを変化させれば， l_1 の補正ができる．すなわち， $P(\theta_x, \theta_y, d_z)$ が $(0, 0, dz_{max})$ ， $(0, 0, dz_{min})$ である場合の 2 点を通る直線を z 軸とするため，この 2 点の (x, y, z) を計測して l_1 の補正を行う．

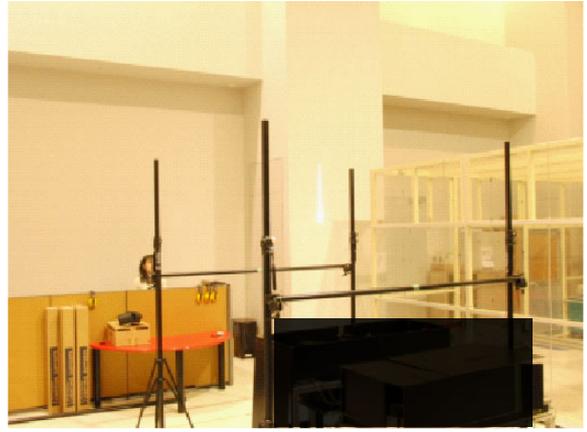
図 2.10 にキャリブレーションに使用した画像を示す．プラズマ発光体が光っている最も上の点と下の点の位置を算出した結果を表 2.2 に示す．この 2 点の結果から l_1 を補正した．式 (2.10) のグラフを図 2.11 に示す．グラフより 2 点は同じ dl_1 で最小値となっている．

キャリブレーションの評価は l_1 の補正前と後の描画結果を比較することで行う．図 2.12 に xy 平面に描画した正方形を示す．(1)，(2) は補正前の l_1 を用いて描画した結果，

第2章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム



(1) Camera 1



(2) Camera 2

図 2.10: キャリブレーション用画像

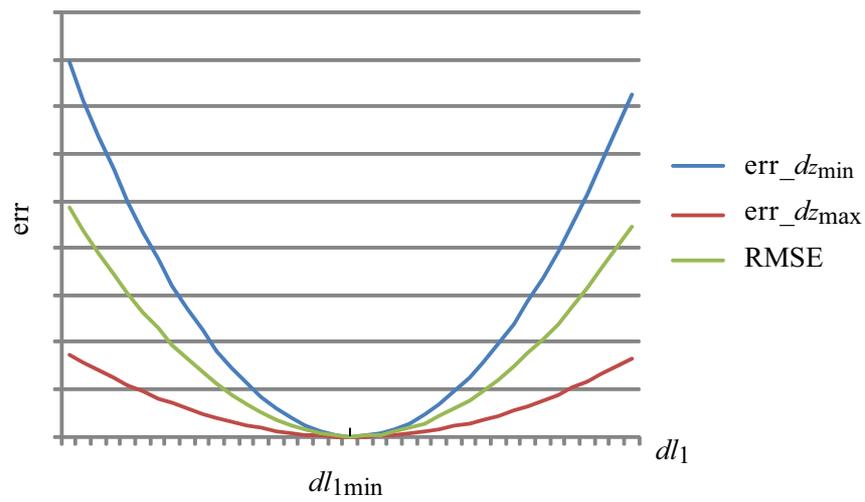


図 2.11: 仮想光源と焦点距離

表 2.2: キャリブレーション用プラズマ位置の計測結果

d_z	x	y	z
d_{zmin}	0.00	0.00	239.9
d_{zmax}	0.00	0.00	159.3

第 2 章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム

表 2.3: 描画した正方形の頂点位置 [cm]

	Theoretical value			Measured l_1			Corrected l_1		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	38.7	-38.7	119.3	36.2	-31.8	109.2	43.6	-38.5	118.6
2	-38.7	-38.7	119.3	-35.0	-32.0	108.3	-43.5	-39.0	118.0
3	-38.7	38.7	119.3	-35.1	-32.0	108.6	-43.7	39.0	117.6

(3), (4) は補正後の l_1 を用いて描画した結果の画像を示す．また，図 2.13 に図 2.12 の (1) と (3) を重ね合わせて表示した画像を示す．一部分を拡大した映像には正方形の頂点を結ぶ線を手動で追加した．この辺と描画結果の辺で最も誤差が大きい部分を算出したところ，補正前では，8.1 pixel，補正後では 2.5 pixel であった．図 2.13 の 1 と 2 の 3 次元空間中の長さは，補正前は約 71cm，補正後は約 87cm であった．また，画像上での 1 と 2 の距離は，補正前は 298 pixel，補正後は 367 pixel であった．これより，画像上の 1pixel の長さはどちらも，0.24cm/pixel，0.24cm/pixel となり，上記の最も誤差が大きい部分は，補正前は約 1.9cm，補正後は約 0.6cm となる． l_1 の補正により，誤差が約 70% 減少した．また，本ディスプレイの描画空間の大きさは，プラズマの調整によって変化するが，幅，奥行き約 80~100cm，高さ約 40~50cm であり，誤差は 0.6~1.5% 程度であり問題はない．

次に描画サイズに関する結果を示す．描画した正方形に関して図 2.13 に示す 3 つの頂点の位置を表 2.3 に示す．表 2.4 には理論値との誤差を示す． y と z の値に関してはパラメタ l_1 の補正によりほぼ理論値と同じになった．しかし， x の値については，誤差が広がっている．パラメタの補正前と補正後共に， \pm の方向へほぼ同じ距離の誤差が発生しているため，計測誤差とは考えられない．数値的には想定した値より高い Voltage データの値がスキャナの入力値，または，入力に対するスキャナの回転が過多になっていると考えられる．これについては x 方向スキャナのハードウェアの調整不備が考えられる．

本キャリブレーション手法では描画領域全体の計測データを補正に用いているわけではない．プラズマ発光体は環境や湿度によって発生しやすさが変化するが， x, y が 0 である z 軸上での発生は非常に安定している．そのため，どんな状況でもキャリブレーションに支障がないように， z 軸上のプラズマ発光点をキャリブレーション用のデータとして用いた．また，本キャリブレーション手法では 2 回の画像撮影で行うことができる．

本実験では歪みの補正は十分行えることを確認したが，プラズマ発光点の描画位置につ

第2章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム



(1) measured l_1 (camera1)



(2) measured l_1 (camera2)



(3) corrected l_1 (camera1)



(4) corrected l_1 (camera2)

図 2.12: パラメタ補正 (誤差最小化)

表 2.4: 描画した正方形の頂点位置の誤差 [cm]

	Measured l_1			Corrected l_1		
	x	y	z	x	y	z
1	-2.5	6.9	-10.1	4.9	0.2	-0.7
2	3.7	6.7	-11.0	-4.8	-0.3	-1.3
3	3.6	-6.7	-10.7	-5.0	0.2	-1.7

第2章 レーザプラズマ 3D ディスプレイシステム

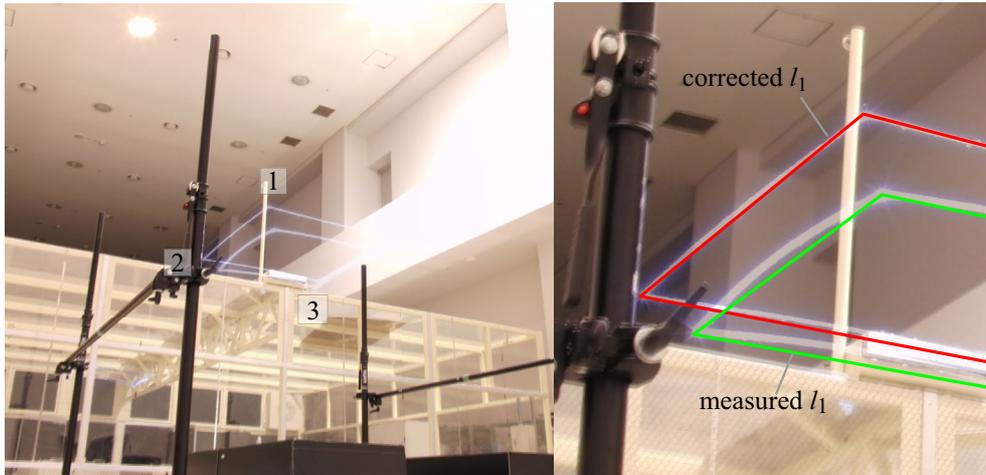


図 2.13: パラメタ補正の効果

いての計測誤差は数 cm 程度であった．キャリブレーション用ポールの位置決め精度を向上させたり，カメラの台数を増やすことで改善可能である．

第3章

コンテンツ描画の基礎

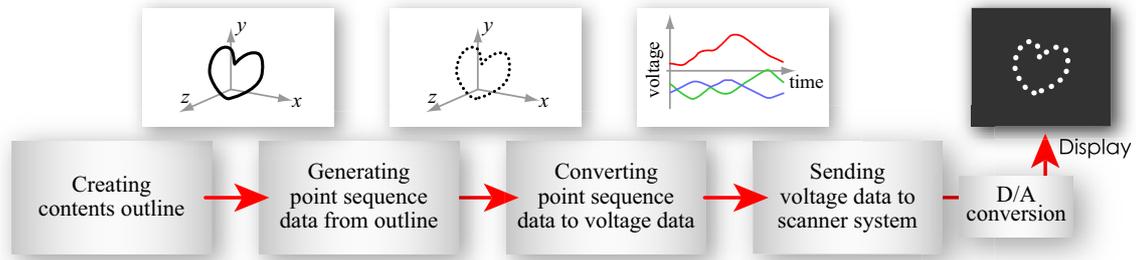


図 3.1: 描画システムにおけるデータフロー

本章ではレーザプラズマ 3D ディスプレイにおける描画に関して、データの流れや、コンテンツデータ間の補間方法、描画結果と見え方などの基本的な項目について述べる。

3.1 コンテンツデータのフロー

本システムでは 2.2 で述べたように、Vector スキャンを採用しており、実際にコンテンツ描画するには、3D スキャナへ時系列の離散データを入力しなければならない。図 3.1 にコンテンツデータのフローを示す。描画するコンテンツのデータは、まず、何らかの方法で 3 次元空間に 3D スキャナの軌跡として、コンテンツのアウトライン (Contents outline) を作成する。そのアウトラインに start 点と end 点を設定し、その間を適当な間隔で位置データをサンプリングして、3 次元の空間座標系の点列を生成する。本研究では、これを空間座標の点列データ (Point sequence data) と呼ぶ。その点列データを 2.3.1 で述べた方法で Voltage データ (Voltage data) に変換し、スキャナシステムへの入力データとする。スキャナシステムでは D/A 変換して、実際にスキャナを制御する。

3.2 点列データとスキャナの動作とプラズマ発光体

コンテンツデータとして、パーソナルコンピュータ (PC) から 3D スキャナへの入力は Voltage データとしている。このデータをもとにスキャナを走査させるが、そのタイミングは可変であり、それは PC から制御することができる。タイミングを決定する設定値をサンプリングインターバル (Sampling interval) と呼んでいる。例えば、サンプリングインターバルを $200\mu\text{s}$ としたとき、 $200\mu\text{s}$ ごとに入力されたデータの位置にスキャナを動かす。入力されたデータ数が 1000 点の場合、すべて描画するのに 200ms の時間がかかる。プラズマ発光体は 1kHz で発生するため、その間に、描画されるプラズマ発光体は

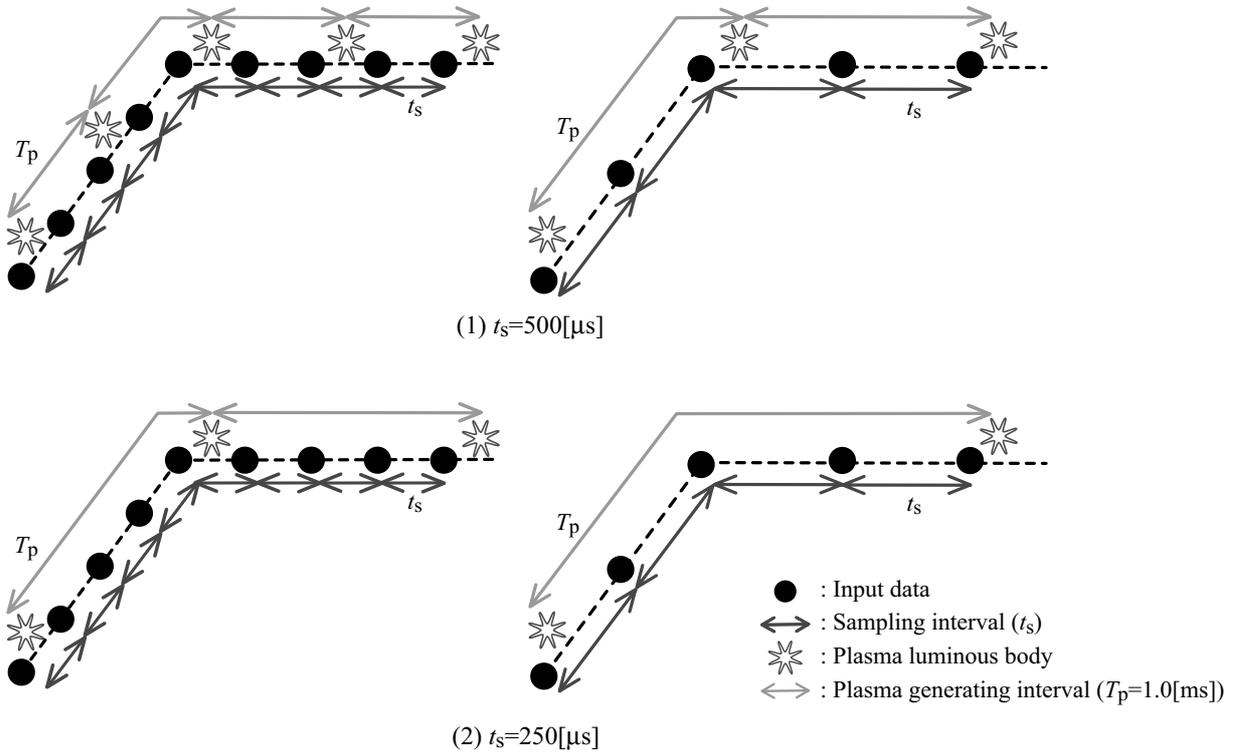
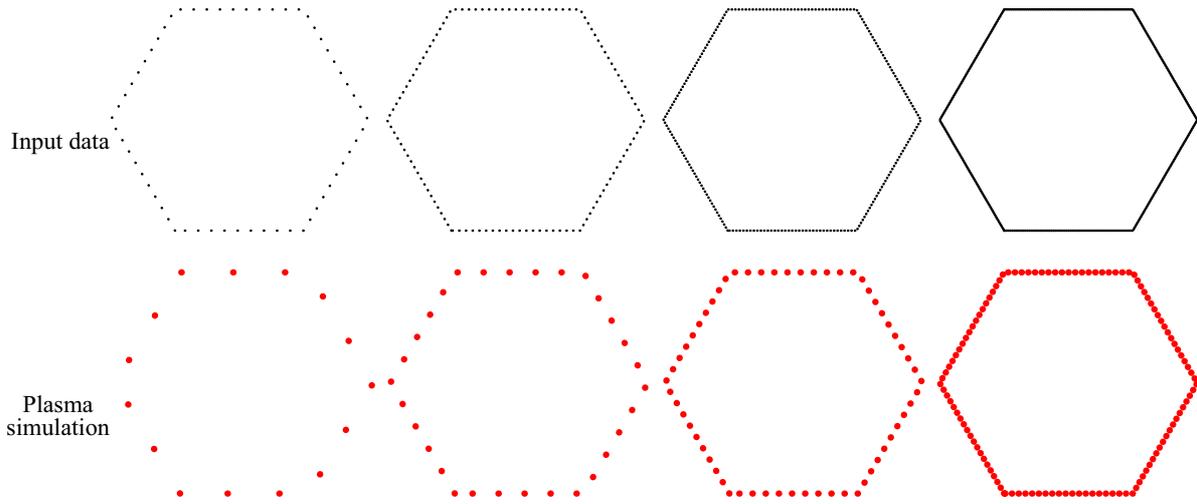


図 3.2: 入力データ点列とプラズマ発光のタイミング

200 点である．図 3.2 に入力データとサンプリングインターバル，プラズマ発光体の関係を示す．

図 3.2 に示すように，入力データ (Input data) の位置に，サンプリングインターバル (Sampling interval) $t_s \mu s$ で制御されたタイミングで 3D スキャナを動かす．すなわち，それぞれ隣り合う入力データの間を $t_s \mu s$ で 3D スキャナを動かしていく．パルスレーザーはスキャナの移動に関係なく， $T_p = 1.0 \times 10^3 \mu s$ の間隔で発生し，プラズマ発光体を生成していく．例えば，サンプリングインターバルを $500 \mu s$ とした場合，図 3.2(1) に示すように，入力データ 2 点につき 1 個のプラズマ発光体が発生する．サンプリングインターバルを $250 \mu s$ とした場合，スキャナがデータ間を走査するタイミングが早くなるため，図 3.2(2) に示すように入力データ 4 点に対して 1 個のプラズマ発光体が発生する．このように，プラズマ発光体が発生する間隔は入力データの間隔とサンプリングインターバルによって変化する．実際に描かれるプラズマ発光体の数 n は入力データ点の数 n_i とサンプリングインターバル t_s ，プラズマ発生間隔 T_p から式 (3.1) で表わされる．ただし，レーザーのパルスとスキャナの動くタイミングは同期されていないため，プラズマ発光体の位置は最大でパルスレーザーの発光周期の半分の 0.5 ms 分だけずれることになるが，すべての



(1) sample=60,plasma=15 (2) sample=120,plasma=30 (3) sample=240,plasma=60 (4) sample=480,plasma=120

図 3.3: 入力データの点数の違いによるプラズマ発光の変化

プラズマ発光体の位置が一様にずれると考えられるため，本論文ではこの位置ずれを無視するものとする．なお，本システムで設定できるサンプリングインターバルは $50 \sim 1000 \mu\text{s}$ である．

$$n = n_i \frac{t_s}{T_p} \quad (3.1)$$

サンプリングインターバルを一定にして，入力データの数を変化させてシミュレーション描画した結果を図 3.3 に示す．上段に示すような各入力データに対して，サンプリングインターバル $250 \mu\text{s}$ で描画したときのシミュレーション結果を下段に示す．入力点数を密にしていくと同様にプラズマ発光点も密になっていく．また，入力データ数を一定にして，スキャナのサンプリングインターバルを変化させてシミュレーションした結果を図 3.4 に示す．入力点数は 480 点としている．サンプリングインターバルを長くしていくと描画にかかる時間が長くなり，プラズマ発光点が密になっていく．これらのことから分かるように，描画するプラズマ発光点の線密度は入力データ数とサンプリングインターバルでコントロールできる．しかし，それらを変化させると描画にかかる時間も変化する．

本システムで静止した物体を描画するには，同じデータを繰り返し描画すればよい．しかし，式 (3.1) に示すように，入力サンプリング点数とスキャナのサンプリングインターバルの組み合わせによっては n が整数値にならない場合がある．その場合には，図 3.5 に示すように，描画を繰り返すと，プラズマが発生する位置が変化していく．例では， n_i が 50 点，サンプリングインターバルを $330 \mu\text{s}$ を想定しており， $n = 16.5$ となる．Start 位

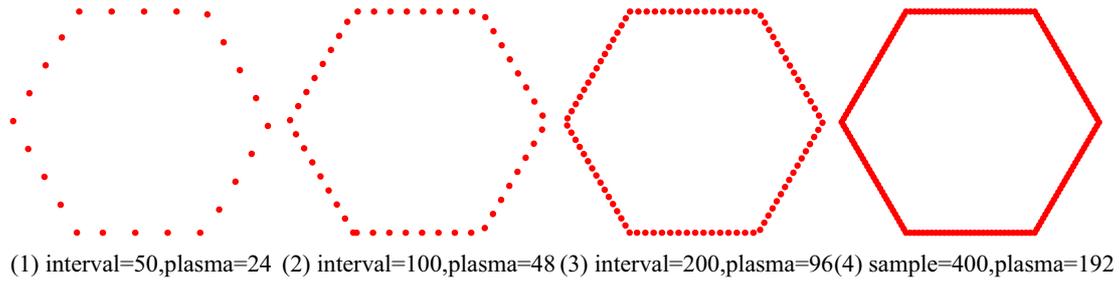


図 3.4: サンプリングインターバルの違いによるプラズマ発光の変化

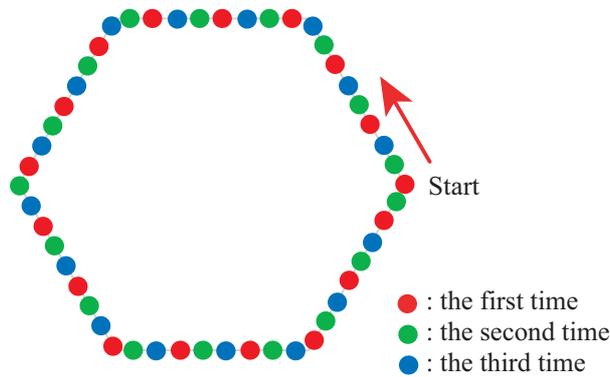


図 3.5: 繰り返し描画したときのズレ

置から矢印の方向へ描画を始めると、1 週目は赤色の点、2 週目は緑色の点、3 週目は青色の点の位置にプラズマが発生することになり、時間差でプラズマ発光点の位置が変化する。1 周の描画が 200 ms 以下の場合には、人間の目には回転しているように見える。プラズマ発光体を同じ場所に描画するには式 (3.1) の n が整数になるように入力サンプリング点数を決定しなければならない。ただし、この現象は描画している形状が簡単なもの、例えば、円などの場合にはよく分かるが、文字などの複雑な形状の場合にはこの現象はほとんど気にならなくなる。また、安定認知時間は約 200 ms であることから、完全に静止した物体を表示する場合には、先の条件に加え、その点数を 200 点未満にすればよい。

3.3 コンテンツ間のデータ補間方法

実際の描画を行う場面で、複数のオブジェクトを順に表示することを考えた場合、複数のオブジェクトのデータをそれぞれ個別に作成すると、異なるコンテンツ間でそれらを表示する点列の並びが不連続となる。このような点列データをスキャナに入力すると負荷がかかるため、コンテンツデータ間を補間し、点列の並びが連続的になるようにすることを

考える。

3.3.1 補間のための正弦を用いたスキャナ負担軽減方法

ここでは、2点間をスキャナの負担を軽減させてサンプリングする手法を提案する。キーフレーム補間などではスプライン補間がよく用いられるが本システムでは2点間であるため、正弦を用いて非線形補間を行う。点 $p(x_p, y_p, z_p)$ と点 $q(x_q, y_q, z_q)$ の間を n 点で補間するとき、補間結果 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, \dots, n$ は式 (3.2) となる。

$$\begin{aligned} (x_i, y_i, z_i) &= (x_q + (x_q - x_p)\alpha, y_q + (y_q - y_p)\alpha, z_q + (z_q - z_p)\alpha), \\ \alpha &= \frac{1 - \cos(i \frac{2\pi}{n+1})}{2}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.3.2 シミュレーション実験

本手法の効果を、シミュレーションにて確認する。

点 $p(10, 10, 0)$ と点 $q(-10, 0, 10)$ の間を 30 点で補間する場合を図 3.6 に示す。2 点間をサンプリングインターバル 10 ms、30 点でサンプリングしたときの位置を図 3.6(1)、速度、加速度をそれぞれ図 3.6(2)、(3) に示す。横軸は時間とする。参考のため、等間隔でサンプリングした結果 (x_e, y_e, z_e) を破線で描画している。

グラフからも分かるように、サンプリングの間隔を端点間で動的に変化させることでスキャナへの負担が軽減される。

3.4 描画の変化と視知覚

人間の視知覚は光の変化に関して非常に感度がよく、暗闇で光子 1 個が光っても視細胞は反応し、数個で光を知覚できると言われている [44]。約 30 cm の円を 0.025 秒で 1 回だけ描画しても、人間は残像効果とアイコニックメモリで円が描画されたと知覚できる。このことは実際に実験を行って確認することができた。しかし、異なる形を次々と素早く表示していくと、描画の組み合わせや形状の類似度によって何が描画されているか認知できなくなることもある。また、形状の変化が少ない場合にはアニメーション効果が得られることもある。例えば、円の大きさを変化させて描画すると、円が拡大縮小しているように見える。また、描画する位置を徐々に変化させた場合には移動しているように見える。

第3章 コンテンツ描画の基礎

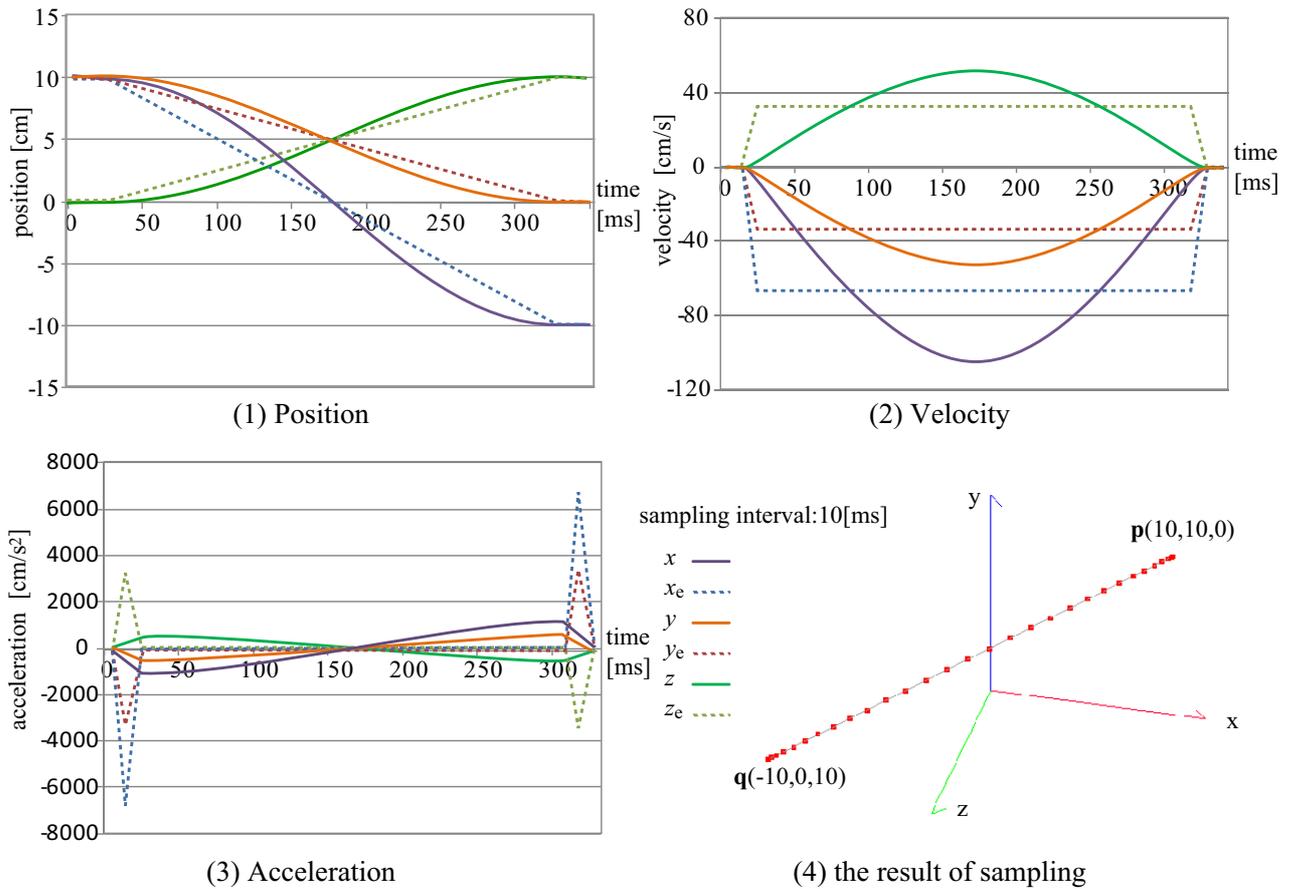


図 3.6: コンテンツデータ間の正弦補間

しかし、このような一般的なフレーム間の残像効果から得られる動きは緩やかである。本システムの描画では1つの物体の描画にかかる時間によって見え方が変化する。文字等を描画する場合には提示時間の問題も合わせて考えなければならない。これについては5.2.2において検討を行う。

第4章

視覚による物体認知と情報量

本章では人間の視覚を用いた物体認知における情報獲得の特徴を調べるため、物体像の持つ情報量と人間の心理量を比較して考察する。人間の心理量は心理実験から知覚量として尺度構成する手法を提案する。

4.1 認知と情報量

なんらかの方法で表現して描画された物体を、視覚を用いて認知する場合、どのように見えるかが重要である。物体が認知しやすい見え方もあれば、そうでない見え方もある。つまり、見え方によって得られる情報量が異なるといえる。立体物を見ていたとしても、視差のある2次元画像から得られる奥行き感だけで、3次元物体の形状を理解できるわけではなく、奥行き以外の重要な情報があり、それは見え方によって変化することが多い。

3次元物体を2次元画面に投影する場合、その物体を回転させて、その形状をさまざまな方向から提示すれば、その3次元形状を認知することができる。しかし、物体の形状を認知させるためにどんな場合でも回転させて表示することは難しい。そこで、物体形状を認知するために適した見せ方が重要となる。3次元ディスプレイにおける表示においても、人間が見て認知することが重要であるため、人間の視覚の認知特性を考慮することが必要である。

人間の3次元物体に対する視知覚は網膜に結像した映像から単に脳内で物体の幾何学的形状の圧縮・復元処理を行っているだけでなく、外界から得た情報と自らがもつ情報から複雑な処理過程を経て対象物体を知覚している。我々が普段見ていると感じている風景は、網膜に結像したそのままの映像ではなく、網膜から得た情報に対し脳内で何らかの処理を施して作りあげた映像である。人間の知覚機構は生まれ持つ脳の機能とそれまでの経験を通して形成された記憶などから構成され、様々な知覚特性をもっている[41, 45, 46, 47]。心理学や精神物理学の分野では人間の知覚特性は心理的要因によって起こるとされ古くから研究がなされている。

人間は視知覚に有効な情報を多く得るように行動する。例えば、3次元物体の視知覚を考えた場合、物体の見え方によって得られる情報量は変化し、それとともに知覚の難易度も変化する。そこで、人間は一瞥で知覚できないような物体に対しては、物体の向きを変えたり、視点を変化させたりする動作を通常的に行い、知覚に有効な視方向を選択している。これらのことから、明らかに我々はあるシーンに対しトップダウン的あるいはボトムアップ的処理に何らかの特徴を情報量として尺度化していることがわかる。多面体像の情報量として、物体像中の面に関する情報の特徴量を用いて物体像エントロピーが定義されている[37]。このエントロピーは物体像中における可視面の数とその面積比にのみ基づ

く 1 次元尺度である。

物体の見え方という観点から，Characteristic view[32] では物体の形状に対する特徴的な見え方を定義している。また，安定性と可能性を利用して特徴的な見え方を選択する測度を定義し，それが人間の認知に近く，生じやすいことを示している研究もある [33]。しかし，これらは視方向に対する 1 次元尺度を定義したわけではない。一方，物体像エントロピーは得られた画像のそれぞれから情報量を測定することで物体像の順位付けが可能である。

ここでは物体像エントロピーと人間の視覚による認知について関係を調べ，その結果から，人間の多面体における認知の特徴を考察する。

4.2 物体像エントロピー

多面体における物体像エントロピー H は物体像中で観測される面の数とその面積比を用いて式 (4.1) で定義される [37]。ここで， N は可視面の数， r_i は可視面 i が物体像全体に占める面積の割合を示す。

$$H = - \sum_{i=1}^N r_i \log_2 r_i \quad (4.1)$$

物体像エントロピーは 1 次元尺度であり，物体像がもつアスペクトという定性的な特徴と面積比という定量的な特徴を統合した情報量を示す。さらに，可視面の数が多いほど，また，面積比が均一であるほど増加する特徴をもつ。エントロピーの値は可視面の数が変わっても連続的に変化するため，少しの見え方の違いによってアスペクトが変化してしまうような画像処理的不安定性に対しても有効である。ただし，物体像エントロピーは画像中の物体像に占める各面の領域の面積にしか依存せず，トポロジカルな特徴を含んでいないため，領域の面積はそのままにしてそれらの形を変型したり，分解したりしても同一のエントロピーを与える。しかしながら，このような画像を 3 次元物体の投影像として自然に知覚することはできないため，与えられた画像が同一物体の投影像として正しく成立することを前提としている。

図 4.1 に物体像エントロピーの算出例を示す。例えば，立方体の場合，面の数は全部で 6 であるが，図中の物体像に現れている面の数は 3 であるため $N = 3$ となる。各面の面積比は $r_1 \sim r_3$ となり式 (4.1) よりエントロピーは $H = -(r_1 \log_2 r_1 + r_2 \log_2 r_2 + r_3 \log_2 r_3)$ で与えられる。図 4.2 に立方体における物体像エントロピーの値と視方向の関係を示す。図 4.2 の (1) で表される視方向から観測される場合の物体像と物体像エントロピーは図

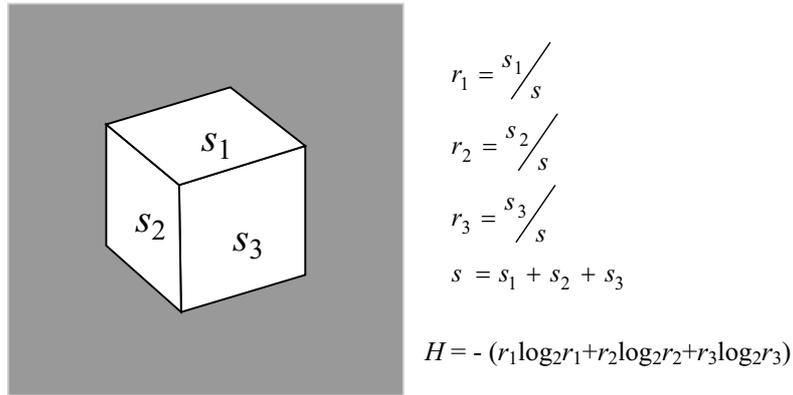


図 4.1: 物体像エントロピーの例 (立方体)

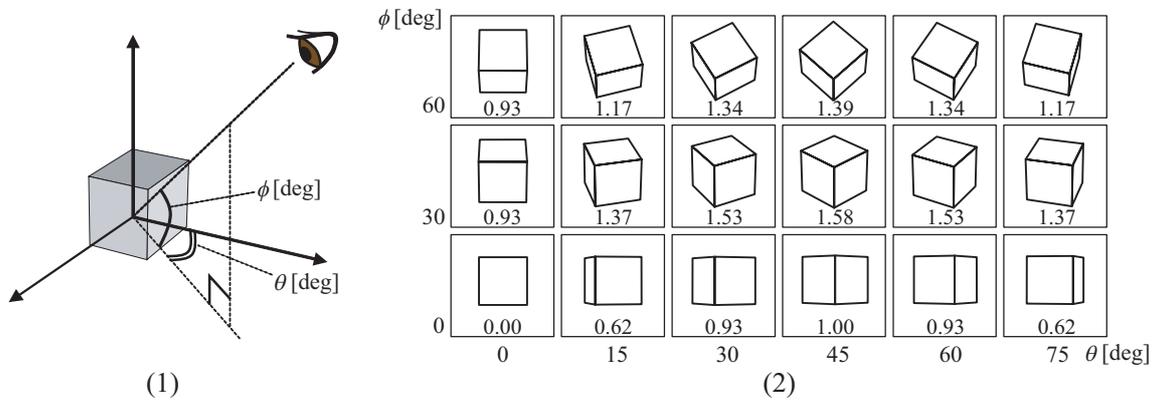


図 4.2: 立方体における物体のアスペクトとエントロピーの関係

4.2 の (2) のようになる。この結果からわかるように、立方体において物体像エントロピーと人間が感じる知覚の容易さの間には何らかの関係があることが予測できる。

4.3 知覚量の心理尺度構成

物体像から得る人間の認知しやすさを形状知覚量とし、この形状知覚量をいくつかの視方向から得られる様々な見え方の物体像に対して求める。以下に述べる心理実験によって形状知覚量を測定する方法を検討し、形状知覚量を尺度化する方法について述べる。

4.3.1 心理学的測定法による心理量の定量化

形状知覚量は物理的刺激である物体像に対し、何らかの心理学的法則を作用させた結果として得られる人間の反応である。これらの関係は、物体像を刺激変数 s 、心理量を反応変数 R 、心理学的法則を f として、式 (4.2) で表される。

$$R = f(s) \quad (4.2)$$

刺激変数 s を操作して反応変数 R を測定することで物体像に対する心理量を尺度化することができる。また、より詳細な考察を可能にするため、構成する尺度の水準は、距離尺度とする。人間の心理的構成概念を心理尺度として構成する方法には直接構成法と間接構成法がある [48]。与えられる刺激に対し、どれだけ知覚しやすいかを絶対的な量で直接表現することは人間にとって非常に困難であるため、順序尺度を構成した後、間接的に距離尺度を構成する間接構成法を採用する。

順序尺度構成のための測定法としては順位法、評定尺度法、一対比較法などがある [48, 49, 50, 51]。順位法ではすべての刺激に対して順位付けを行う方法であるが、測定しようとしている心理量は主観的な判断を必要とするため、同時に複数の刺激を判断することは被験者に負担がかかる。

評定尺度法は数段階で表現される既知尺度を用意し、各刺激に対してそのうちの1段階を被験者に選択させる方法である。画像や音響の主観的判断にはこの方法がよく用いられるが、本研究のように物体形状を判断する場合には評価する特性が一つとは限らないため、被験者は評定尺度法の実験を通して一定の評価基準を持ち続けて評定するのは困難である。また、一つの刺激に対して複雑な判断をするため、以前に下した判定がどうであったか考えてしまう被験者もあり、被験者の判断基準や能力によって結果が左右されやすい。更に、適切な尺度の段階数は刻象物体によって変化することもあり、すべての対象物体に対してカテゴリー数を同じにすることは困難である。

一対比較法は二つの刺激を比較し、その優劣を判断する方法である。一対比較法はすべての組み合わせに対して判断を行うため試行回数は増加するが、二つの刺激の単純な比較であるため、主観的な判断であっても被験者の負担が比較的少ない。したがって、本研究では一対比較法を用いて距離尺度化する方法を採用する。

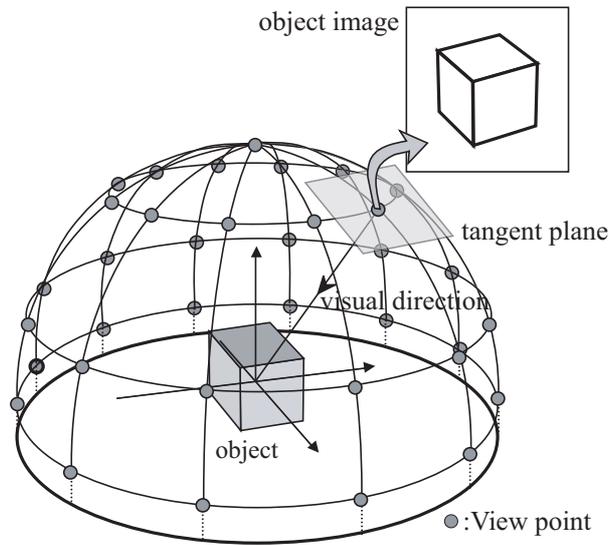


図 4.3: 対象物と観測点

4.3.2 一対比較法による心理実験と順序尺度構成

実験に用いた刺激：対象物体は多面体とする．また，形状知覚の手掛かりとなる表面情報や陰影などが含まれると面の影響が正しく測定できないため，本実験では線画を用いる．1つの心理実験に対し，1つの対象物体を想定する．刺激となる物体像は図 4.3 に示すような観測ドームと観測点をコンピュータ上に想定し，その中心にある対象物体を各観測点の接平面上に透視投影したものをを用いる．ただし，物体の対称性アスペクトを考慮して重複する画像やほぼ同一となる画像は実験の対象から外し，被験者の負担を軽減させる．

実験手続き：被験者には提示する物体の画像を見せ，どのような形状の物体であるかをあらかじめ知らせておき，実験のはじめと終わりで判断が不安定にならないようにする．被験者にはディスプレイより約 40～50cm 離れた位置に座ってもらい，図 4.4 のようにコンピュータディスプレイ上に表示される物体像（約 8cm × 8cm）2 枚 1 組（間隔：約 3cm）を見てもらう．1 回の試行では，提示された画像の組に対し一定の基準に従って「より物体の 3 次元形状が推定できる画像」を選択してもらい，マウスで一方のボタンをクリックする操作をしてもらう．これをすべての物体像の組合せに対しそれぞれ 1 回ずつ行う．画像はランダムな順番で提示するが，同じ画像が続けて判断されることのないようにする．

一対比較法で判断した結果として，表 4.1 の例のような度数行列を得る．ここで度数は

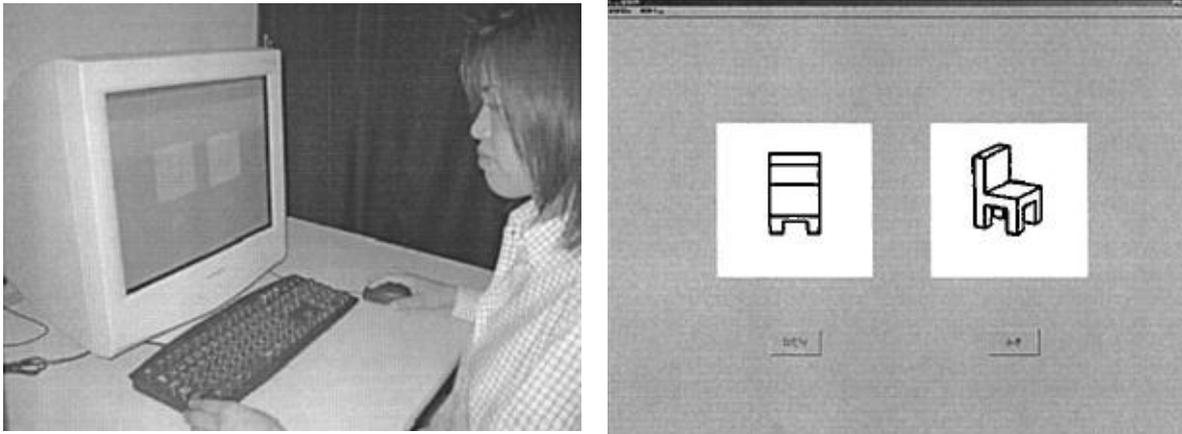


図 4.4: 実験風景と被験者提示用画面

表 4.1: 度数行列 (N=10)

	Image1	Image2	Image3
Image1	-	4.5	9.0
Image2	5.5	-	10.0
Image3	1.0	0.0	-
total	6.5	4.5	19.0

列方向の刺激画像が行方向の刺激画像よりも「より知覚しやすい」と判断した人数を示す．この例では 3 枚の画像 1~3 に対して被験者 10 名としている．表 4.1 から列ごとに度数の合計値を算出し，これの多い画像から順番に番号を付ける．さらに，行列の各要素の度数を人数 N で割って比率 p_{ij} を求め，表 4.2 のような比例行列を得る．ただし，列番号と行番号が同じセルは同一刺激を比較していることになるため，「より知覚しやすい」判断は半々になると仮定して 0.50 とする．以上の処理によって各画像に対する順序尺度が得られる．表 4.2 の例の場合では順序尺度が高い順から画像 3，画像 1，画像 2 となる．

4.3.3 Thurstone の比較判断法による距離尺度構成

一対比較法で得た順序尺度を Thurstone の比較判断法 (ケース V)[52] を適用させ距離尺度に変換する．一般的に刺激に対する弁別過程は正規分布に従うと仮定されており，刺激画像 i, j に対する正規分布の平均を I_i, I_j ，分散を σ_i, σ_j とすると， ij 間の尺度距離

表 4.2: 比例行列 (P 行列)

	Image1	Image2	Image3
Image1	0.50	0.10	0.01
Image2	0.90	0.50	0.45
Image3	0.99	0.55	0.50
total	2.39	1.15	0.96

は式 (4.3) で求められる .

$$I_i - I_j = Z_{ij} \sqrt{2}\sigma \quad (4.3)$$

$$\sigma_i = \sigma_j = \sigma$$

ここで Z_{ij} は標準正規分布で $-\infty$ の方から測った面積 p_{ij} より求められる横座標 (Z 値) である . $P_{ij} = 0.5$ であれば 0 , $P_{ij} > 0.5$ であれば符号は正 , $P_{ij} < 0.5$ であれば符号は負となる . したがって , ij 間の尺度距離は $\sqrt{2}\sigma$ を単位とすると , Z_{ij} で求められる . ここで , どちらか一方の画像に選択が偏った場合には 1:0 となり , $Z = \infty$ となってしまう . 一般的にこのような結果は削除するが , 本実験対象となる多面体像ではそのような判断がどちらか一方に偏る対象も存在すると考え , 選択の実測値を 0.99 対 0.01 として処理する . 表 4.2 から求めた尺度距離行列を表 4.3 に示す . 表 4.3 において距離尺度行列の各列の和を求め (表 4.3(a)) それをさらに画像数 n (この例では 3) で割り平均値を算出する (表 4.3(b)) . これらの値の最小値を 0 とするため , 最小値の絶対値を各値に加えて各画像の尺度値を求める (表 4.3(c)) . このようにして得られた尺度値を形状知覚量とする .

Thurstone の比較判断法 (ケース V) の適用に対する妥当性の判定は Mosteller の適合度判定で行う [48, 51] . Mosteller の適合度判定では実験で得られた距離尺度から Thurstone の比較判断法の逆処理を行って各画像を選択する期待比率 p' を算出し , 式 (4.4) によって検定統計量を算出する . χ^2 は式 (4.5) で与えられる自由度 df の χ^2 分布に従う . ここで , N は被験者数 , n は実験に用いた画像の数 , p は実験で得られた比率 , p' は結果から導き出した比率の理論値とする .

$$\chi_0^2 = \frac{N}{821} \sum \left(\sin^{-1}(\sqrt{p}) - \sin^{-1}(\sqrt{p'}) \right)^2 \quad (4.4)$$

$$df = \frac{(n-1)(n-2)}{2} \quad (4.5)$$

表 4.3: 尺度距離行列 (I 行列)

	Image3	Image1	Image2
1:Image3	0.00	-1.28	-2.33
2:Image1	1.28	0.00	-0.13
3:Image2	2.33	0.13	0.00
(a) Total	3.16	-1.15	-2.46
(b) Mean	1.20	-0.38	-0.82
(c) Distance	2.02	0.44	0.00

4.4 実験結果と考察

様々な種類の形状をした物体に対して 10 代から 30 代までの男女 20 名の被験者に対して心理実験を行った。その結果について示す。物体 1 は凸形状のみで構成された単純なもの、物体 2, 3 は凹、凸形状で構成されたもの、物体 4 はより複雑な形状であり、物体としての意味を持つ椅子形状について示す。また、物体 5, 6 は実験 1 で用いた形状の一部を変化させた形状である。それぞれに対し、使用した物体像と各物体像のエントロピーと形状知覚量を図 4.5 に示す。画像番号はエントロピーの順位を示し、形状知覚量の括弧内は形状知覚量の順位を示す。また、物体像エントロピーと形状知覚量の関係を示すグラフを図 4.6 に示す。物体 1 の結果に対し Mosteller の適合度判定を行った場合、式 (4.4) より $\chi_0^2 = 57.23$ が求められる。 χ_0^2 は自由度 $df = 36$ の χ^2 分布に従い、有意水準 $\alpha = 0.01$ のときの χ^2 は 58.62 となり有意差はないため、形状知覚量の算出に対する Thurstone の比較判断法 (ケース V) の適用は採択される。各物体に対し、同様に検定を行ったところ、表 4.4 に示す結果が得られ、すべての実験においてケース V の適用は採択される結果となった。

物体 1, 2, 4 は相関係数が 0.7~0.9 となり、物体像エントロピーと形状知覚量の間には非常に高い相関が得られた。物体 3, 5 では相関係数が 0.5~0.6 となり、やや相関が得られた。しかし、実験 6 では無相関の結果が得られた。各物体の実験データに対し分散分析を行った結果を表 4.5 に示す。実験 1, 4 については有意水準 $\alpha = 0.01$ で有意であり、実験 2 については $\alpha = 0.05$ で有意であった。したがって、実験 1, 4 については物体像エントロピーと心理量には高い相関があり、エントロピーが算出される範囲で線形な単調

第 4 章 視覚による物体認知と情報量

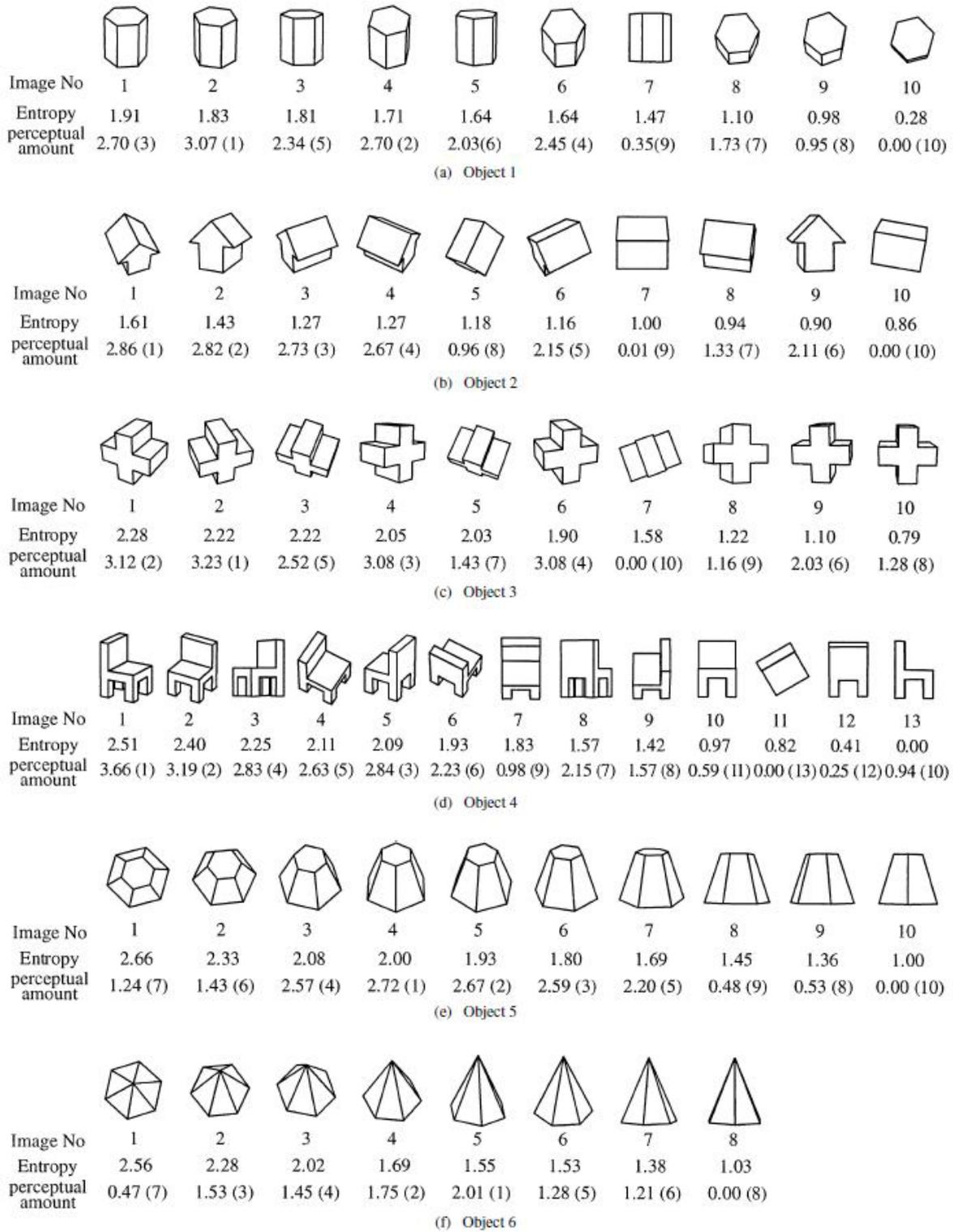


図 4.5: 心理実験で使した物体

第 4 章 視覚による物体認知と情報量

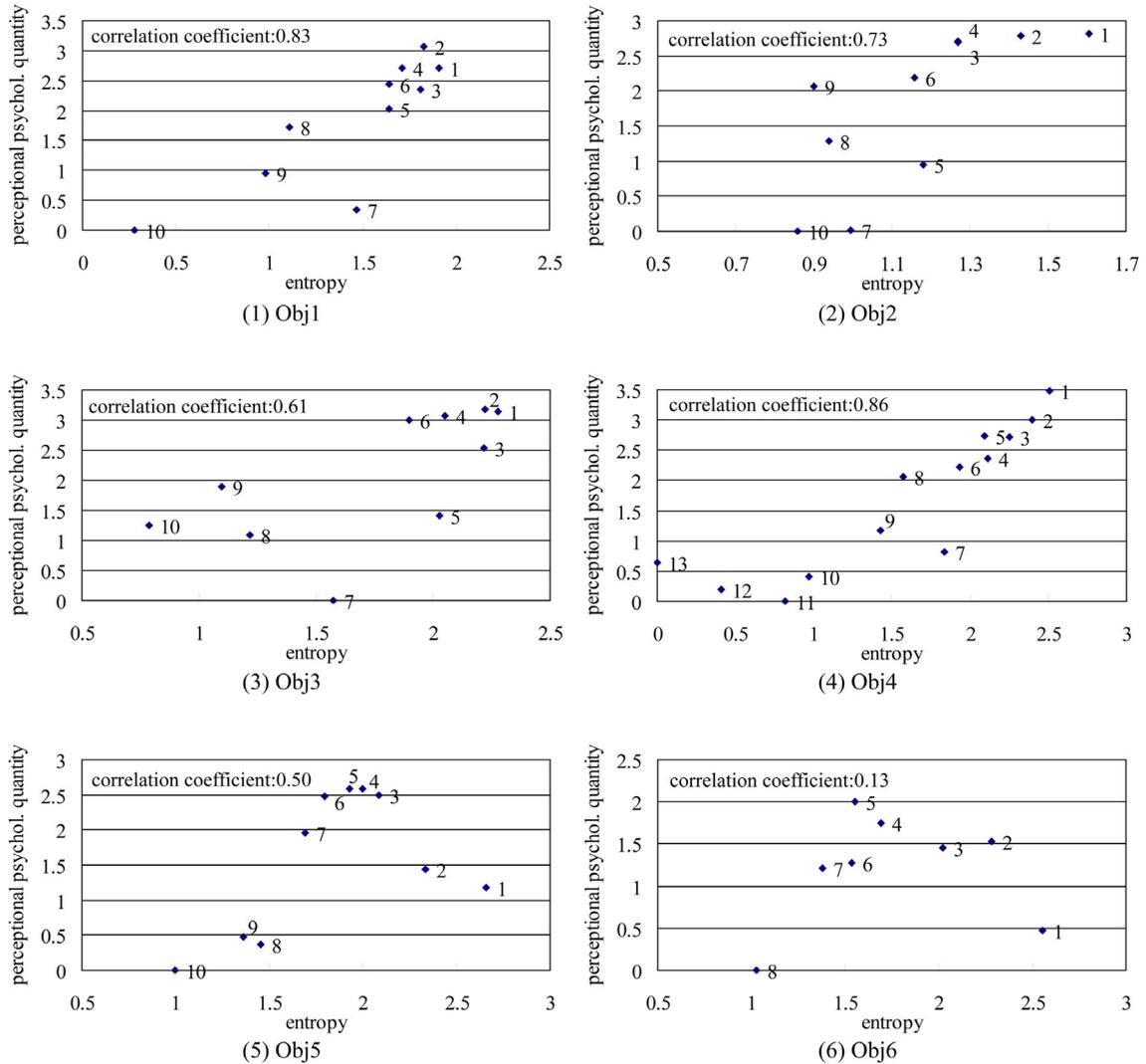


図 4.6: 実験結果

増加といえる。また，実験 2，3 においては，有意水準は下がるがある程度高い相関関係があるといえる。ただし，グラフからは単調増加とはいえないが，スピアマンの順位相関はそれぞれ，0.86 と 0.77 となり，順位尺度としては相関が高いといえる。一方，実験 5，6 については $\alpha = 0.1$ で有意でない結果が得られた。実験 5 ではエントロピーと形状知覚量には弱い相関が得られているが，実験 5，6 はグラフからも明らかなように単調増加とはいえない。2 次曲線で近似すると，その頂点がエントロピーの有効領域の中ほどにあり，上に凸となる特徴を示している。物体像エントロピーと人間の知覚特性の関係は必ずしも線形の関係を示すとは限らないため，相関係数だけでは判断はできない。

表 4.4: 適合度検定

ex.	χ_0^2	df	$\chi^2(\alpha = 0.01)$
1	57.23	36	58.62
2	58.12	36	58.62
3	57.83	36	58.62
4	87.06	66	95.62
5	49.01	36	58.62
6	33.53	21	38.93

表 4.5: 分散分析結果

Ex.	Variance		Variance ratio	Significance F
	Regression	Residual		
1	6.87	0.40	17.16	0.003
2	6.05	0.66	9.11	0.017
3	4.06	0.85	4.77	0.060
4	12.81	0.40	31.84	0.0002
5	2.48	0.91	2.72	0.14
6	0.05	0.51	0.10	0.76

実験の結果より，形状知覚量と物体像エントロピーには関係があることがわかった．ある種の形状に対しての例外はあるが，人間はエントロピーが高い物体像からは物体の 3 次元形状が知覚しやすいといえる．

結果の回帰分析における残差が正，負それぞれに最大の画像を図 4.7 に示す．残差の絶対値が大きくなるものは形状知覚量とエントロピーの関係を直線近似したときにその直線からの距離が大きくなるものである．残差が正に大きくなる物体像はエントロピーが示す以外の知覚に有効な情報を含んでいると考えられる．逆に残差が負に大きくなるものはエントロピーで表されるほどは知覚に有効な情報を含んでいないといえる．

ここで対象物体を知覚するための有効な情報を考えると，物体 1 では上面の六角形，物体 2 では矢印の形をした面，物体 3 では十字形をした面，物体 4 では椅子の足と背もたれの部分がそれぞれ重要であると考えられる．残差が正に大きくなるものはそれらの情報

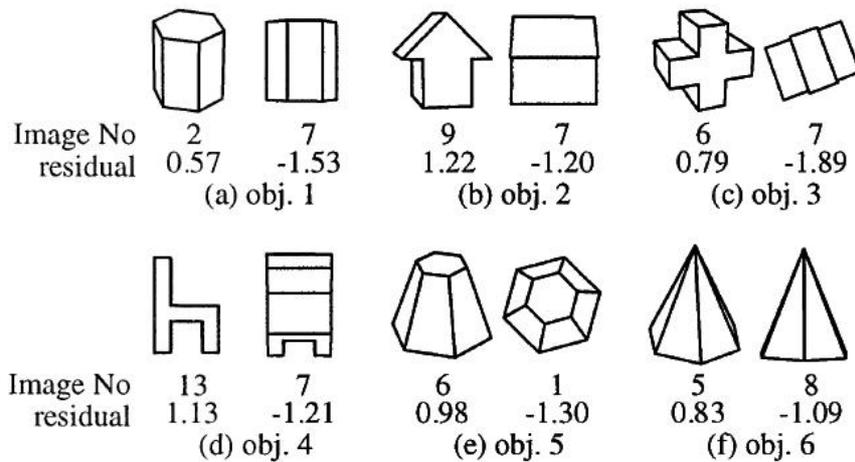


図 4.7: 残差が最大となる物体像

を多く含んでおり，負に大きくなるものは面積比が均一になるが面の形状に特徴があまり認められない画像と考えられる．さらに，形状知覚量とエントロピーの関係が単調増加の関係とならない種類の物体としては，物体 5, 6 のような角錐，角錐台が挙げられる．これらの物体では，エントロピーが高い画像は面の形状が均一になっている．面の形状の均一性は奥行知覚に影響することが知られており [37]，人間は面の形状が均一になると奥行をあまり感じなくなる．物体 5, 6 では形状が均一になりエントロピーは高くなるが，一方で奥行が感じられなくなるために，このような結果になったと考えられる．これらのことから，エントロピーで表すことができない知覚しやすさの要因には特徴があることがわかる．これらのことより，人間の多面体認知において，面の情報が重要であることが分かった．

面の情報が重要であることは人間の認知特性に関する知見 [38] とも一致している．一瞥して物体認識する場合，人間は，エッジや頂点を検出し，それらの位置関係から面を構成し，さらに物体の幾何学的形状を認識しているわけではない．また，人間の発達過程において，認知できるようになる順序は，物体 (3D)，面 (2D)，線 (エッジ) (1D)，頂点 (0D) と言われている．物体から頂点まで，抽象されていくごとに，検出が難しくなるため，対象物体が何であるか分かるためには，頂点やエッジを見るより，面を見た方が簡単である．したがって，3次元物体から1次元抽象 (捨象) した，2次元の面が次の段階では物体認知に重要となるため，本論文の面の情報が重要である結果とも矛盾しない．

第5章

エッジで表現する物体

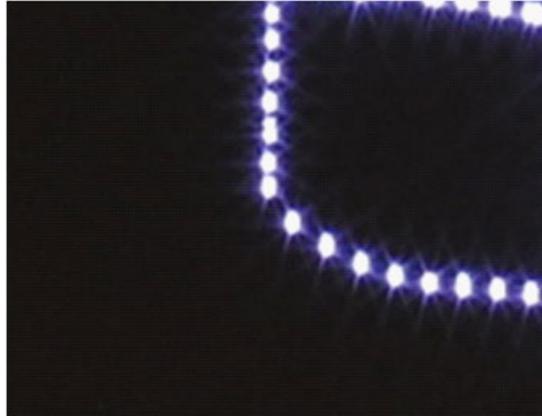


図 5.1: 角描画の問題

本章ではエッジで表現できるプリミティブな物体の表現と文字列の表現について考察する。3D ディスプレイとしての可能性を探るためにプリミティブなオブジェクトを選び、その描画を通して、レーザプラズマ 3D ディスプレイで描画する物体の表現手法と、それを描画したときに人間にどのように見えるかを調査する。エッジで表現できる物体としては多角形と多面体に適する表現手法を提案する。

さらに、応用的なコンテンツとして、文字列を安定に認識させるための描画手法を提案する。

5.1 エッジで表現できるプリミティブの描画

5.1.1 多角形の表現

多角形は角を持ち、スキャナのスピードが急激に変化する部分があるため、スキャナに負荷がかかり、動かなかったり、図 5.1 に示すように、角が丸くなったりして不安定になる。スキャナに入力する点列データの間隔を小さくすればよいが、描画する形状すべてに対して点列データの間隔を小さくすると、全体に描画するスピードが遅くなり、描画結果が分かりにくくなってしまふ。そこで、点列データの間隔を全体的に小さくせず、必要に応じて点列データの間隔を調整することを考える。

スキャナ加速度の平滑化による手法

点列を用いて多角形を簡単に表現するには、点をワイヤーフレーム上に等間隔に配置すればよい。しかし、多角形の辺の部分と頂点付近でスキャナを同じ速さで動かそうとした場合には、頂点の部分でスキャナに負担がかかり、スキャナに遅れが生じて角が丸く描かれてしまったり、安定して描画できなかつたりする場合がある。そこで、等間隔の点列で表現した多角形の入力データから速度変化が激しい部分、すなわち加速度が大きい部分を滑らかにして描画する手法を提案する。図 5.2 の (1) に示すような角の場合、速度、加速度はそれぞれ図 5.2 の (3)(4) となる。加速度に対して移動平均を用いて平滑化し、それから平滑化した速度を算出する。平滑化した速度、加速度はそれぞれのグラフに破線で示してある。平滑化した加速度を $(a_{sx}(t), a_{sy}(t), a_{sz}(t))$ とすると速度は式 (5.1) で得られる。ただし、式 (5.2) を満たす。ここで、スキャナが多角形を 1 周する時間を T とする。

$$\begin{aligned} & (v_{sx}(t), v_{sy}(t), v_{sz}(t)) \\ &= \left(v_{sx}(0) + \int_0^T a_{sx}(u)du, v_{sy}(0) + \int_0^T a_{sy}(u)du, v_{sz}(0) + \int_0^T a_{sz}(u)du \right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\int_0^T v_{sx}(u)du = 0, \int_0^T v_{sy}(u)du = 0, \int_0^T v_{sz}(u)du = 0. \quad (5.2)$$

これによって加速度が滑らかになるが、頂点付近の速度が遅くなるため、スキャナの動く距離が短くなり、図 5.2(1) の破線で示すような軌跡になる。そこで、平滑化前後のスキャナ速度の大きさの比率を軌跡上の点密度の比率として、入力データをリサンプリングする。平滑化前のスキャナ速度を $(v_x(t), v_y(t), v_z(t))$ とすると、平滑化前後の速度の大きさの比は式 (5.3) となる。図 5.2(5) に速度の大きさを示す。

$$r(t) = \frac{\sqrt{|v_x(t)|^2 + |v_y(t)|^2 + |v_z(t)|^2}}{\sqrt{|v_{sx}(t)|^2 + |v_{sy}(t)|^2 + |v_{sz}(t)|^2}} \quad (5.3)$$

これを軌跡上の点密度の比率として入力データをリサンプリングする。図 5.2(6) に軌跡上の点密度の比率を示す。ここで横軸 l はスキャナ位置の軌跡上の移動距離を表す。図 5.3 に CG で表示したリサンプリング結果を示す。

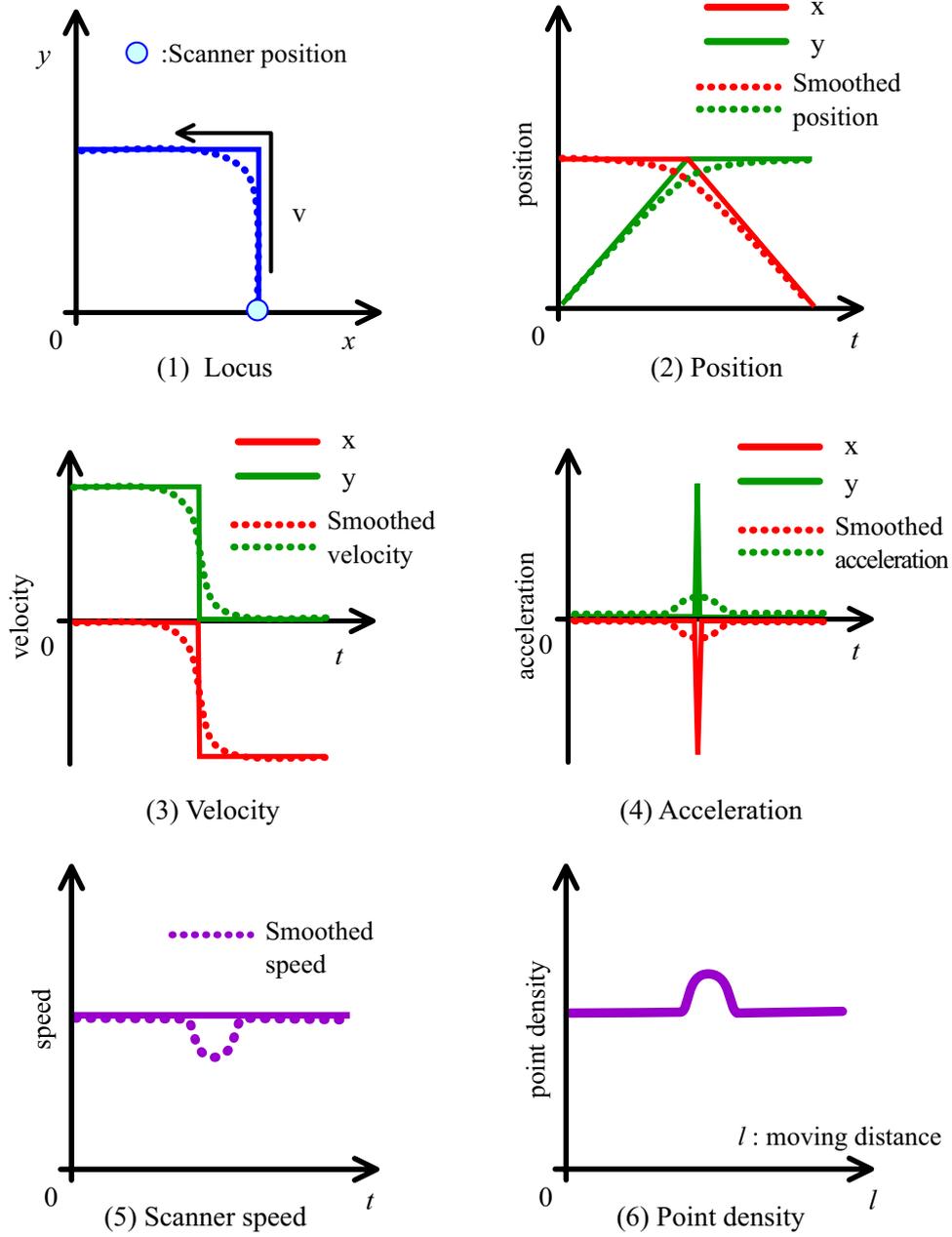


図 5.2: 多角形の角における加速度の平滑化例

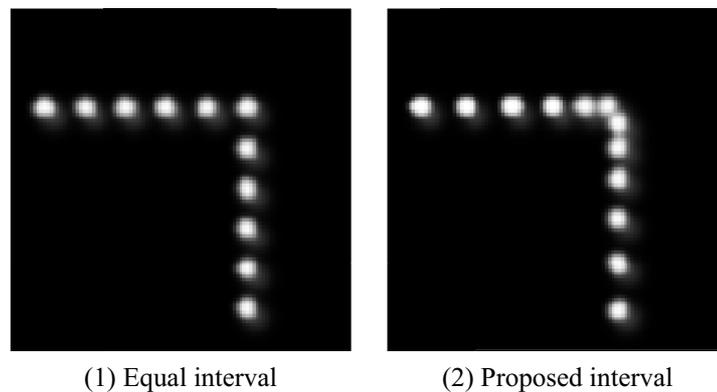


図 5.3: 多角形の角の点配置リサンプリング結果 (シミュレーション)

正方形の描画実験

多角形として正方形を提案手法で描画する．提案手法と比較するため，等間隔にプラズマ発光体を配置する描画法を手法 1 とする．ハードウェアの特性を考慮してプラズマ発光体を配置する提案手法を手法 2 として，描画比較実験を行った．なお，正方形は 1 辺が約 50 cm であり，水平に表示した．描画結果を撮影した画像を図 5.4 に示す．画像は F 値:F5.7，シャッタースピード:0.125 s で撮影した．この正方形は 128 点で描かれているが，シャッタースピードの関係上 125 点しか撮影されていないため，正方形の一部が欠けている．

手法 1 と手法 2(提案手法) を立方体描画に応用した結果を図 5.5 に示す．手法 1 は F 値:F8.9，手法 2 は F 値:F9.1，各手法ともシャッタースピード:0.25 s である．画像からも分かるように，手法 1 に比べ手法 2 では角の丸みが改善されている．

5.1.2 多面体の表現

多面体の特徴は面の形状を表すエッジであるため，エッジ情報を表しているワイヤーフレームとして多面体を描画する．3 次元のワイヤーフレームモデルで表現される物体を描く場合，経路の描き順を決定する必要がある．ここでは二つの表現方法を考える．一つはなるべく少ないプラズマ発光体数で描画するため，最短経路で描く方法とし，手法 1(最短

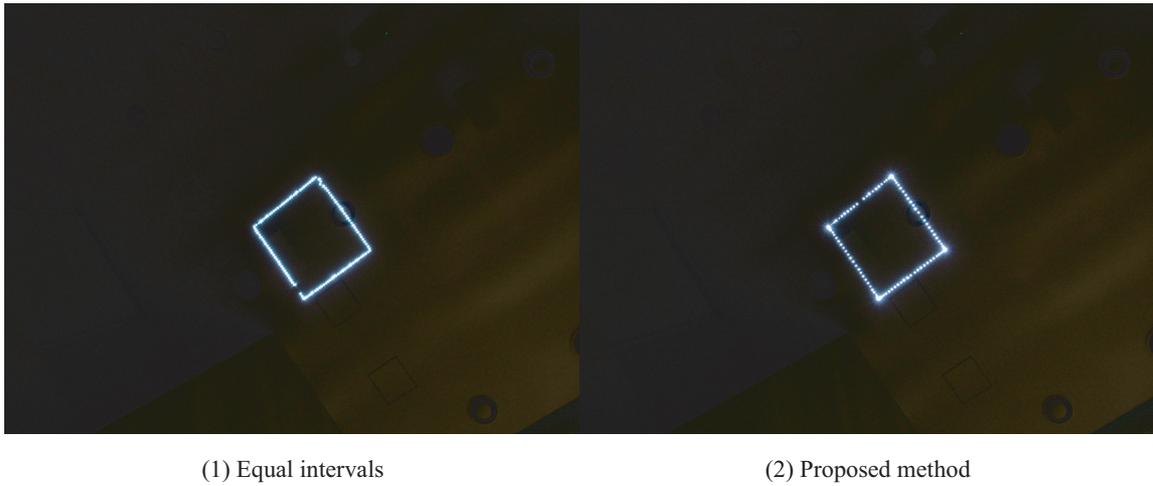


図 5.4: 正方形の描画

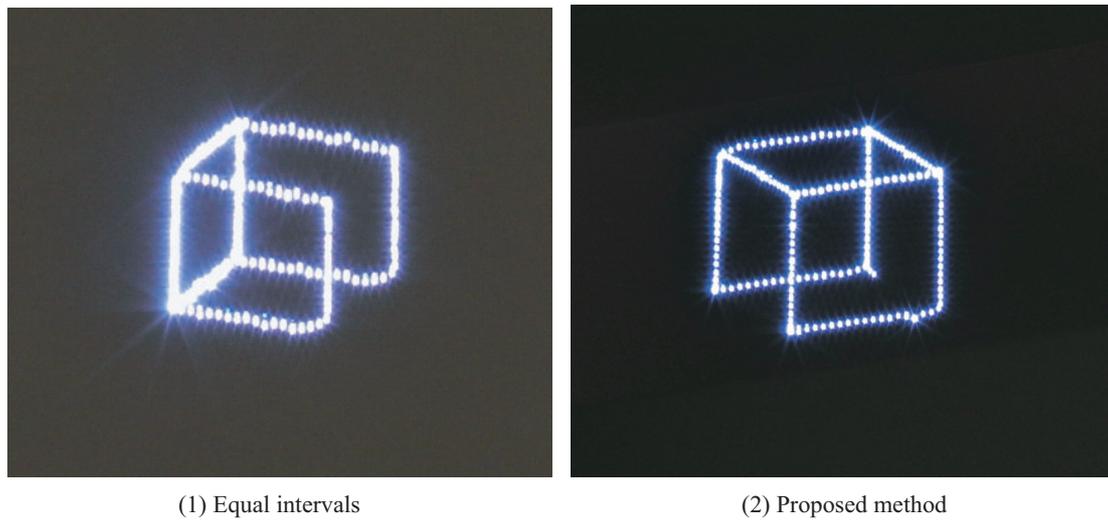


図 5.5: 提案手法の立方体への適用

経路表現) とする。しかし、この方法では面の数が多くなった場合や大きさによっては物体全体を同時に観測できなくなる。最短経路を描く場合、多面体の面を描くことは少なくなるため、面の形状を認知することも難しくなる。そこで、もう一つの手法として、人間の多面体認知を考慮する。4.4 で述べた多面体の認知における面の重要性を考慮する方法とし、明示的に面の輪郭を一つずつ描く手法を手法 2(提案手法) とする。

最短経路表現

ワイヤースケルトがオイラーグラフ (始点から各エッジを一回のみ通過して始点に戻る) として表現できれば問題ないが, 3 次元物体を表現したワイヤースケルトの多くはオイラーグラフではないため, 部分的に同じパスを複数回通過しなければならない場合がある. ここでは, 重複するパスを最小限にし, スキャナの負荷を軽減させる最適経路を選択する方法を提案する. ワイヤースケルトモデルは図 5.6 に示すグラフで表現できる. グラフ中の n_i はワイヤースケルトモデルの頂点 v_i に, そして, エッジ e_{ij} は 2 つの頂点の接続 c_{ij} に対応している. このグラフは無方向グラフである. このグラフから最適経路を決定する. 最適経路のルートがワイヤースケルトの描き順となる. エッジのコストとして頂点間の長さ (距離コスト: distance_cost), ルートの通過コストはルートを通過するときの角度 (角度コスト: angle_cost) とする. 角度コストは鋭角を含むルートを避けるために加える. 以下の手法をワイヤースケルトから作成されるグラフに適用する.

Step 1) 頂点間の長さを計算してエッジコストに設定する.

Step 2) 各頂点に対しすべての進入-進出経路に対して角度を計算し, ノードコストに設定する.

Step 3) ノード n_i を始点として, すべてのエッジを通過して n_i に戻るすべてのルートを検索する. 必要ならば, エッジは 2 回以上通過してよい.

Step 4) Step 3) で検索した経路のコストを式 (5.4) で計算する. ここで, $L(m)$ は Step 3) で検索した経路を通ったときの m 番目のノード番号リストである. n_1 はスタートノードで n_1 と n_{N_m} は同じノードとなる. $d(n_j, n_{j+1})$ は n_j と n_{j+1} 間の距離を示し, $\text{angle}(n_{j-1}, n_j, n_{j+1})$ はノード n_{j-1}, n_j, n_{j+1} で作られる角度を示す. ただし, 経路の終点は始点となるため, $j = 1$ の場合, $n_{j-1} = n_{N_m-1}$ となる.

$$\begin{aligned}
 L(m) &= (n_1 \cdots n_j \cdots n_{N_m}) \\
 \text{distance_cost} &= \sum_{j=1}^{N_m} d(n_j, n_{j+1}) \\
 \text{angle_cost} &= - \sum_{j=1}^{N_m} \text{angle}(n_{j-1}, n_j, n_{j+1})
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Step 5) Step 4) の結果から最もコストの低い経路を決定する. ただし, 距離コストは

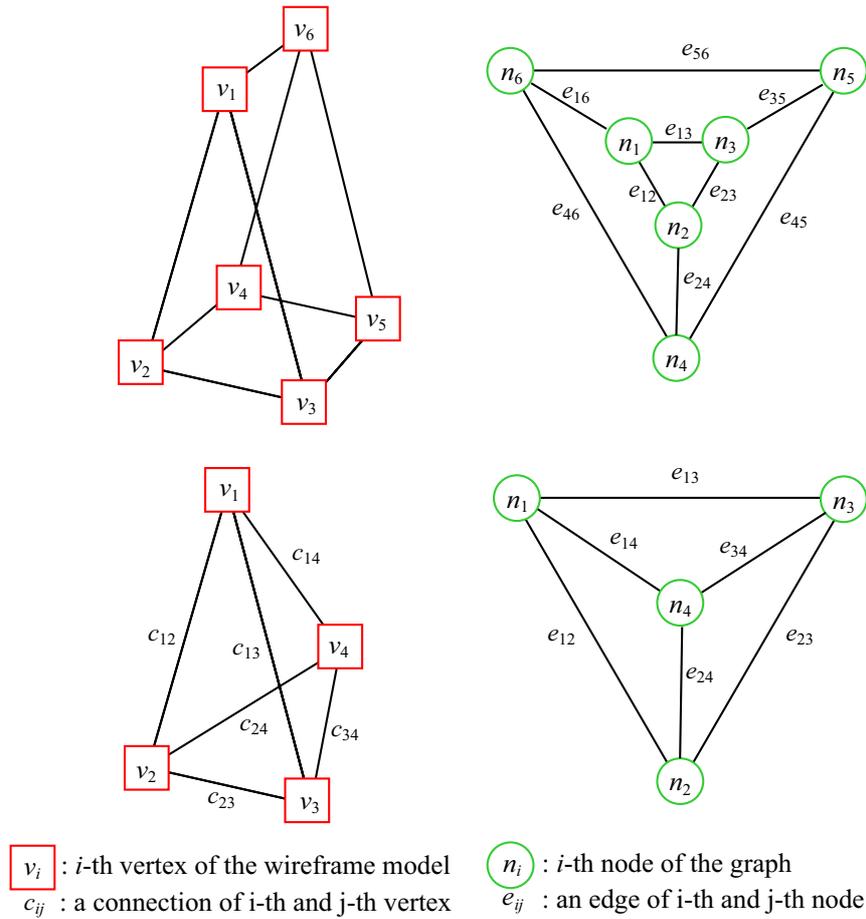


図 5.6: ワイヤフレームモデルとグラフの例

角度コストより優先順位を高くする．すなわち，距離コストが同じ場合は，角度コストが低い経路を選択する．

図 5.7 に結果の例を示す．左側に最小コストとして選択された描き順を，右側にそれ以外の経路の描き順を示す．表 5.1 には経路のノード順とコストの例を示す．図 5.7 に示す左側の例は表 5.1 の no.1，右側の例は no.5 である．それぞれ，距離コストは同じだが，角度コストが no.1 の方が小さくなっている．実際に描画した結果を図 5.8 に示す．

多面体の各面を明示的に描画する手法

多面体の各面の描画順は以下の項目に従い，手動で指定し，その順番に一筆書きで面の輪郭を描く手法を提案する．

各面の描画順に関する制限事項として，図 5.9 に示すように，3 つの項目を設定した．

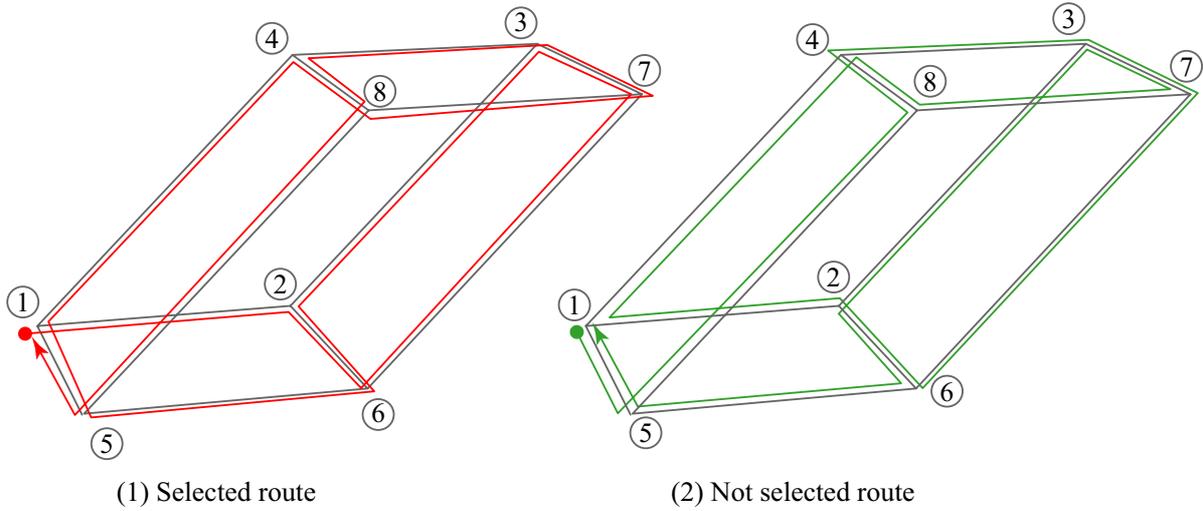


図 5.7: 書き順決定の例

表 5.1: 経路探索の結果の例

no.	Distance cost	Angle cost	Node list
1	1365.69	-22.63	1 2 6 7 3 2 6 5 1 4 8 7 3 4 8 5 1
2			1 2 6 7 3 4 8 5 1 4 8 7 3 2 6 5 1
3			1 4 8 5 1 2 6 7 3 4 8 7 3 2 6 5 1
4			1 4 8 7 3 2 6 7 3 4 8 5 1 2 6 5 1
5		-20.56	1 5 8 4 3 7 6 2 1 4 8 7 3 2 6 5 1
6			1 5 8 4 1 2 6 7 3 4 8 7 3 2 6 5 1

- i 番目に描く面 f_i の後に描画できる面は面 f_i と辺で接続していなければならない。
- 最初に描画する面と最後に描画する面は辺で接続していなければならない。
- 一つの面は 2 回以上描画してもよい。

以下に経路の決定アルゴリズムを述べる。一つの面を描画するためには図 5.10 に示すように、3 つの要素を決定する必要がある。

- 面を描画するときの描画回転方向 (面の表面に対して、時計回り/反時計回り、図中の赤い矢印)
- 描画開始位置 (Start point)
- 描画終了位置 (End point)

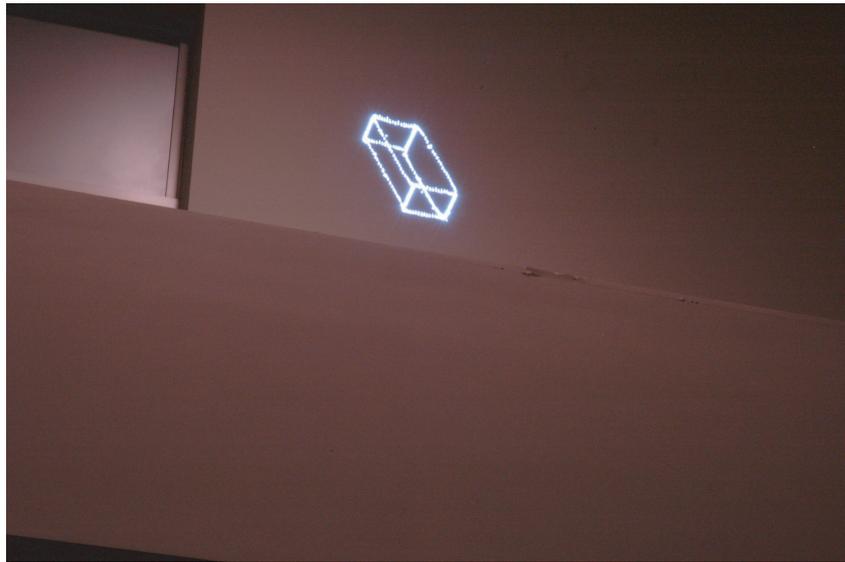


図 5.8: 多面体描画例

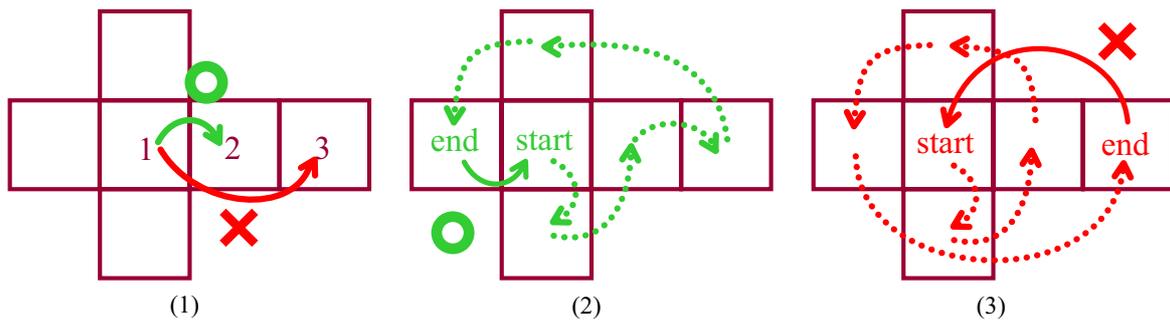


図 5.9: 面の描画順を決定する場合の制限

これらの要素が決定すれば，図 5.10 の緑の波線のように描画経路が確定できる．図 5.11 に回転方向と描画開始位置，描画終了位置の組み合わせを示す．描画する面の数を N とし， i 番目に描く面を f_i とする．ただし， $i = 0, \dots, N-1$ とする． f_{i-1} と f_{i+1} は，それぞれ f_i と共有する辺を一つ持つ． $i = 0$ の場合， f_{i-1} は f_{N-1} であり， $i = N-1$ の場合， f_{i+1} は f_0 である． L_r は f_{i-1} と f_{i+1} 間を時計回りにたどったときのパスの長さとする．一方， L_l は f_{i-1} と f_{i+1} 間を反時計回りにたどったときのパスの長さとする．

まず， f_{i-1} と f_{i+1} の回転方向の組み合わせは，それぞれ時計周り / 反時計回りがあるため，4 通りである．また， f_{i-1} の描画終了位置と f_i の描画開始位置は同じ位置である．描画開始位置は f_{i-1} と f_i が共有する辺の端点のどちらかである．そして，少なくとも 1 周は描画し， f_i と f_{i+1} が共有する辺に到達しなければならない．回転方向は 1 周を描画

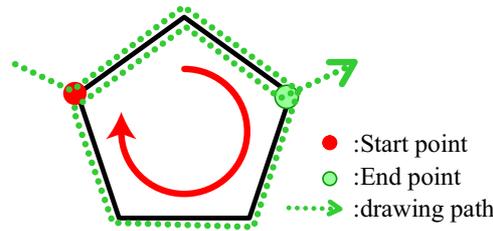


図 5.10: 面を描画するための 3 つのパラメタ

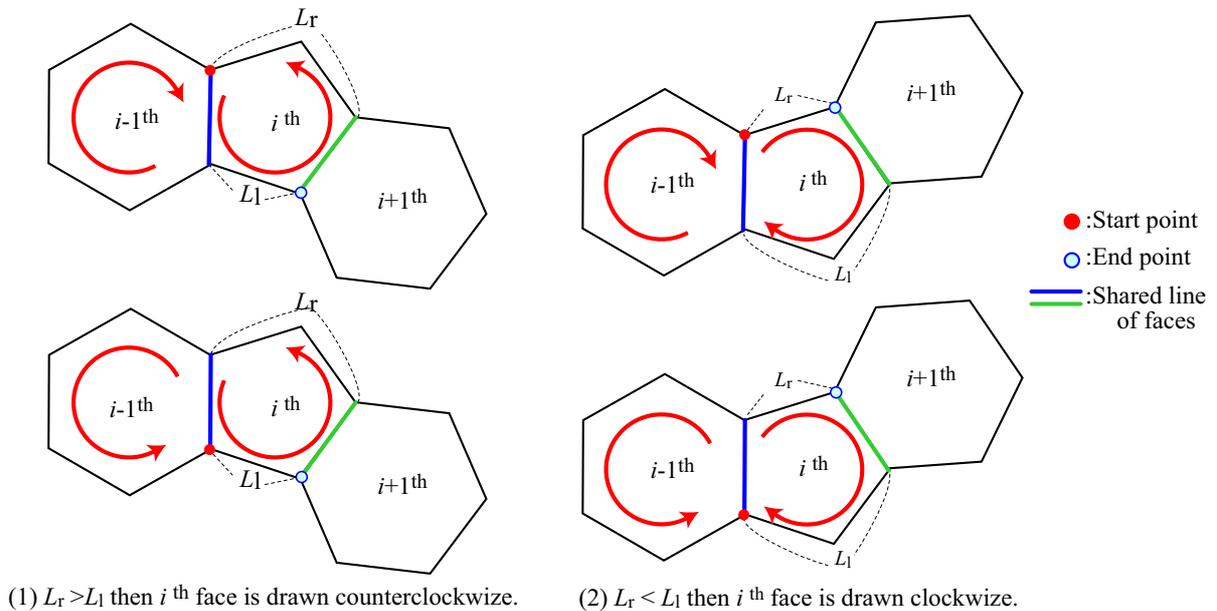


図 5.11: 描画経路決定手法

した後，次の面に到達する距離が近い方を選ぶため， L_r と L_l を比較して短い経路を選択する．これにより描画の回転方向が決定できる． f_i の回転方向が決定すると， f_{i-1} の回転方向より， f_i の描画開始位置が決定すると同時に f_{i-1} の描画終了位置が決定する．アルゴリズムをまとめると以下ようになる．

Step 1) f_i の回転方向を決定する． $L_r > L_l$ の場合は反時計回り， $L_l > L_r$ の場合は時計回りとする．ただし， $L_l = L_r$ や $i = 0$ の場合は反時計回りを優先させる．

Step 2) f_i の描画開始位置 (Start point) を決定する． f_{i-1} と f_i が共有している辺の端点のうち， f_{i-1} の回転方向で最初にある頂点とする．

Step 3) f_i の描画終了位置 (End point) を決定する． f_i の描画終了位置は f_{i+1} の描画開始位置と同じである．

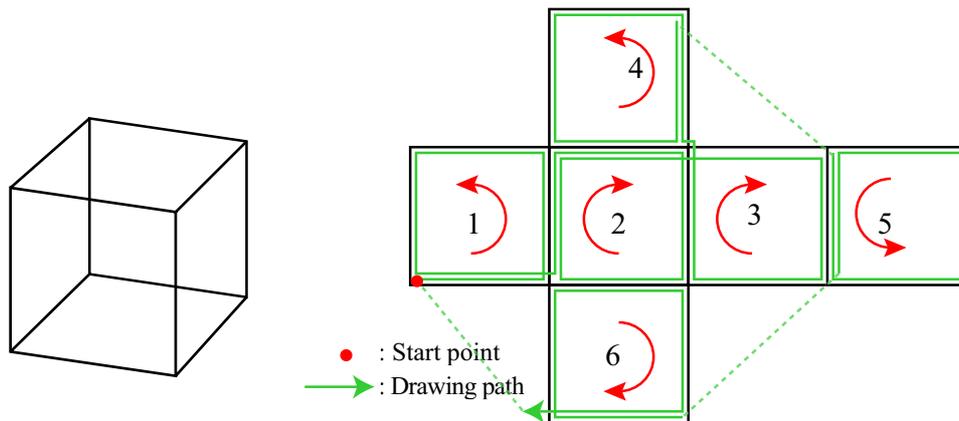


図 5.12: 立方体の例

図 5.12 に立方体を対象としたときの面を描く順と経路の例を示す．各面の描画番号順に描画した場合の描画回転方向を赤い矢印で示す．この描き方は，同じ経路を何度も通るが，一つ一つの面を順に描いていく．

多面体描画実験

多面体としては，立方体について，最短経路で描く手法 1 と多面体の各面を明示的に描画する手法 2 を用いて描画比較実験を行った．描画中に撮影した画像を図 5.13 に示す (F 値:F9.1, シャッタースピード:(1)0.125 s,(2)0.25 s)．なお，立方体は 1 辺が約 20 cm である．入力データ数は，手法 1 は 1056 点，手法 2 は 1980 点であり，サンプリングインターバルは 0.30 ms とした．プラズマ発光体の数は手法 1 では 317 点，手法 2 では 594 点となっている．また，立方体を 1 回描くのにかかる時間は，手法 1 では 0.317 s，手法 2 では 0.594 s となる．手法 2 では，重複して描画する辺が存在しているため，辺によって輝度の差が発生している．

物体像エントロピーの算出

本システムにて描画した立方体像について，物体像エントロピーを算出し，多面体の情報量を用いて描画手法を評価する．

まず，3次元ワイヤースケッチモデルに対して適用できるように物体像エントロピーを拡張する．ワイヤースケッチで表示した場合，図 5.14(1) のように観測される．ワイヤー

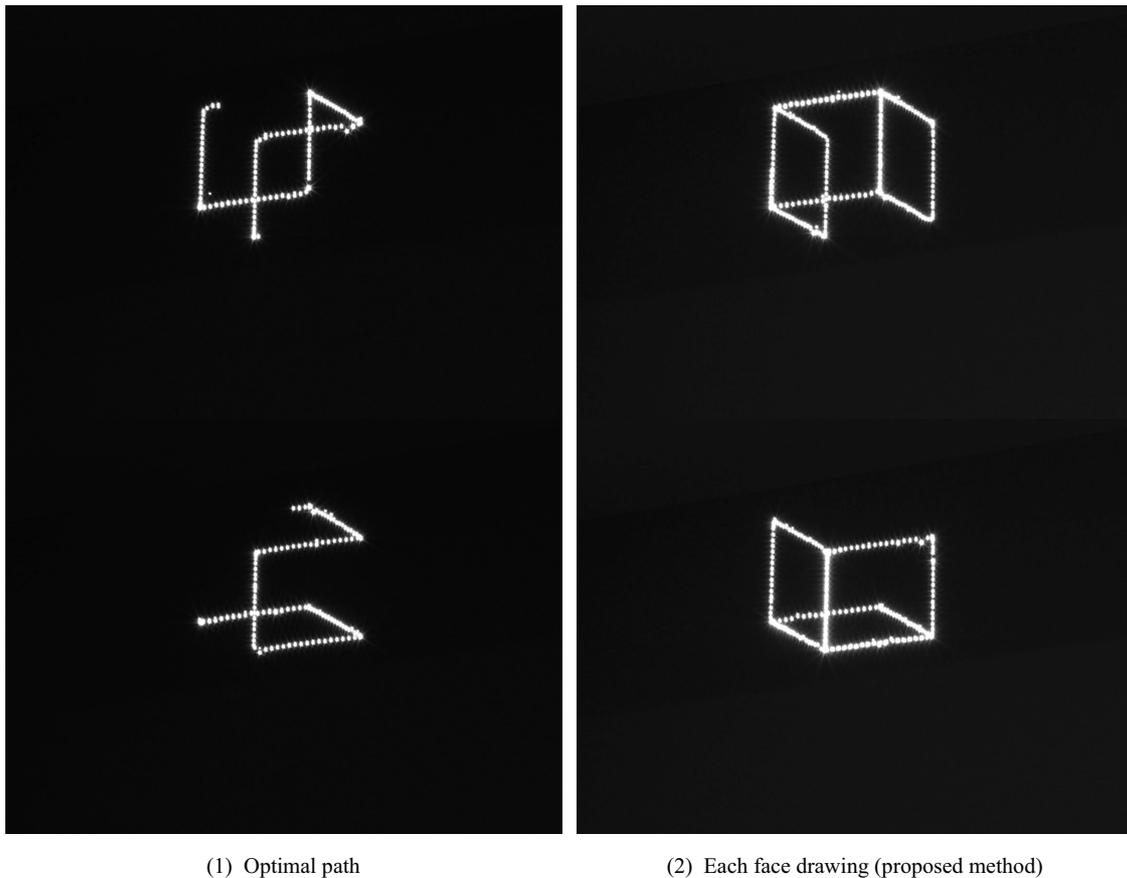


図 5.13: 立方体の描画実験

フレーム表示では陰線処理がされないため、物体を構成するすべての面が見えると解釈できる。したがって、ワイヤースケッチ表示のエントロピーでは可視面ではなく、構成面の数を用いる。例の場合、構成面は 6 であり、図 5.14(2) に示す形状をしている。エントロピー算出には式 (4.1) を用いる。ただし、可視面は構成面となる。網膜に投影される映像をシミュレーション描画における Viewport に投影される映像と考え、構成面の面積は Viewport 上の面積を採用する。図 5.14 の例では構成面の総面積 S は $S = \sum_{i=1}^6 s_i$ 、面積比 r_i は $r_i = s_i/S$ となり、エントロピー H は $H = -\sum_{i=1}^6 r_i \log_2 r_i$ で求められる。ワイヤースケッチ表現の立方体に対するアスペクトとエントロピーの関係を図 5.15 に示す。

次に、Vector スキャンで描画した多面体の場合の物体像エントロピーを考える。本システムでは Vector スキャンで描画しているためフレームの区切りが曖昧である。そこで、描画する点列のタイムシーケンスをいくつかの区間に分割し、その区間で描画された映像に関してエントロピーを算出して評価する。部分的に描画した映像の例を図 5.16 に示す。

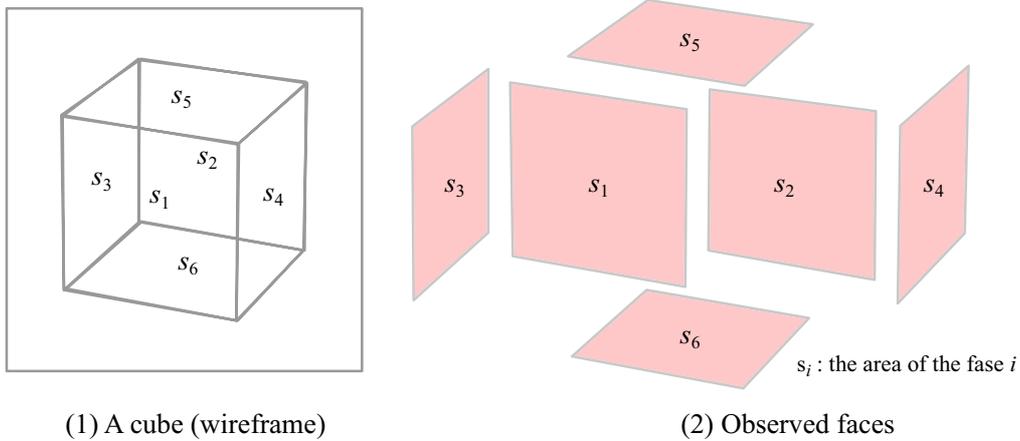


図 5.14: ワイヤフレーム表現における構成面の投影

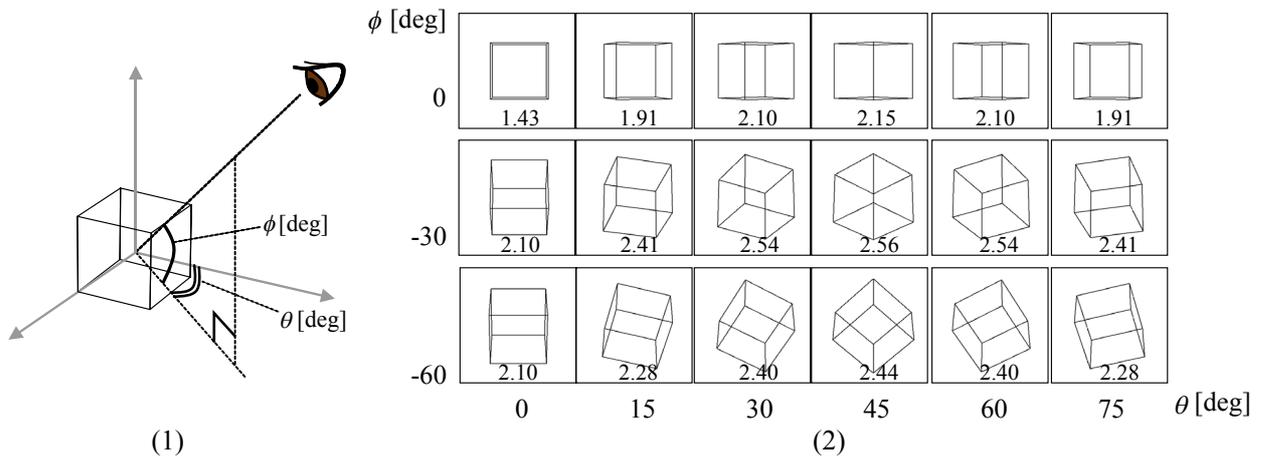


図 5.15: ワイヤフレーム表現の立方体における物体のアスペクトとエントロピー

ここで、部分的なワイヤフレーム表示の場合のエントロピーを考える。部分的に描画された場合、面として観測できれば構成面として取り扱う。図 5.16(1) では 1 つの面が観測されている。ワイヤフレーム表示した場合、2 つ以上の面が重なって観測されることが多い。本システムでは 3 次元空間中に描画するため、重なっていてもそれぞれの面を独立して観測することができる。したがって、1 つの面は物体像においても 1 つの面としてセグメンテーションする。図 5.16(2) の例では 2 つの面が観測されていると判断する。図 5.16(3) の場合では、途中で折れているがその部分のエッジがないため、1 つの面と考える。また、エントロピーの算出に用いる総面積は描画されない面は含めず、観測されている面の面積のみを用いる。すなわち、図 5.16 で色が付いている部分の面積の総和を物体

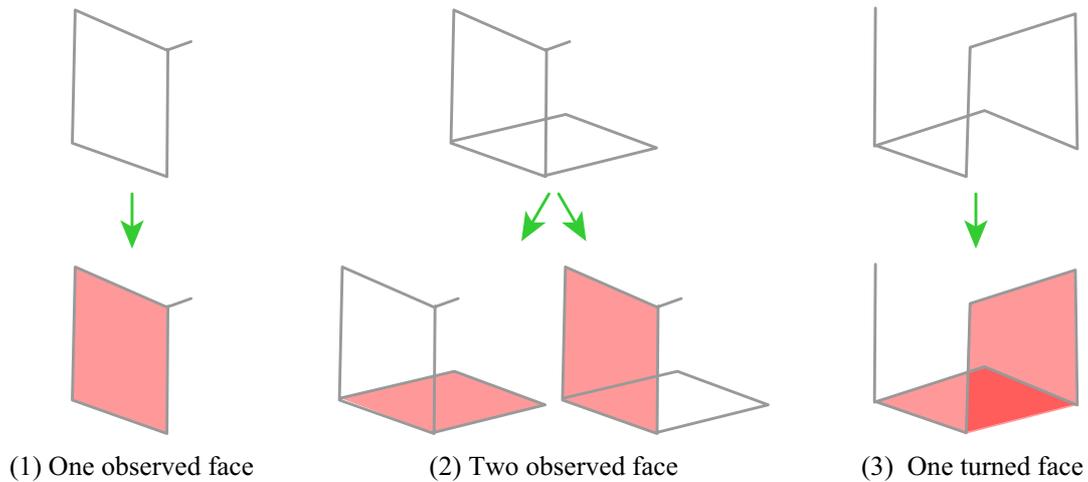


図 5.16: シミュレーション画像からの面の抽出

像の面積として扱う。

評価する映像のタイムシーケンス上の区間の長さは、実際にシステムで描画したときに見えると感じる映像に近くなるように調節し、185 ms とした。手法 1, 2 で描画した立方体に対して、タイムシーケンス開始から 50 ms の間隔で 185 ms の間に描画を行ったシミュレーション結果を図 5.17 ~ 図 5.20 に示す。画像群の左の数値はタイムシーケンス上の区間描画開始位置とする。横軸は図 5.14(1) の観測方向 θ を示す。ここでは、各手法に対して、仰角 $\phi = 0$, $\phi = -20$ に対してシミュレーションを行った。それぞれの映像に対する物体像エントロピーのグラフを図 5.21 に示す。

図 5.21 によると、手法 1(Method1) では物体像エントロピーには、描画区間の違いにより、ばらつきがあることが分かる。一方、手法 2(Method2) では安定した値となっている。この結果から、手法 1 では描画区間によっては情報量が少ないが、手法 2 ではどの描画区間においても、情報を持つ表現であることが示されている。

さらに、全方向から観測した場合のシミュレーション画像に対してエントロピーを算出して確認する。観測点には、図 5.22 に示すような均等にちりばめられたメッシュの頂点を用いる。この観測点の作成には、Loop's subdivision 手法 [40, 53] を用いた。図 5.22 に、ワイヤフレームで表示した立方体の例を示す。立方体の描画結果から得られたエントロピーの大きさを HSV 色空間で表現し、 z 軸負の方向を Front view, z 軸正の方向を Back view として、各観測点のエントロピーを 2 方向から表している。これをエントロピーマップと呼ぶ。なお、エントロピーマップの作成には、図にあるメッシュをさらに細分化し、40962 点の観測点を用いた。それぞれの手法の各タイムシーケンスに対するエン

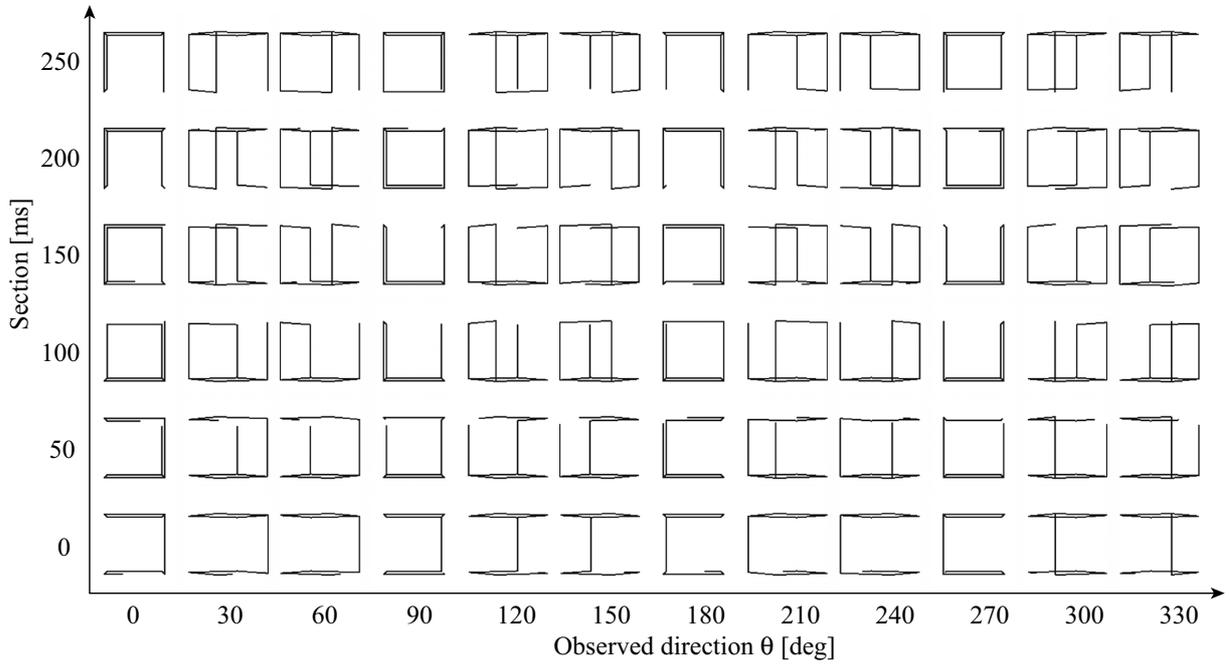


図 5.17: 立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法 1, $\phi = 0$)

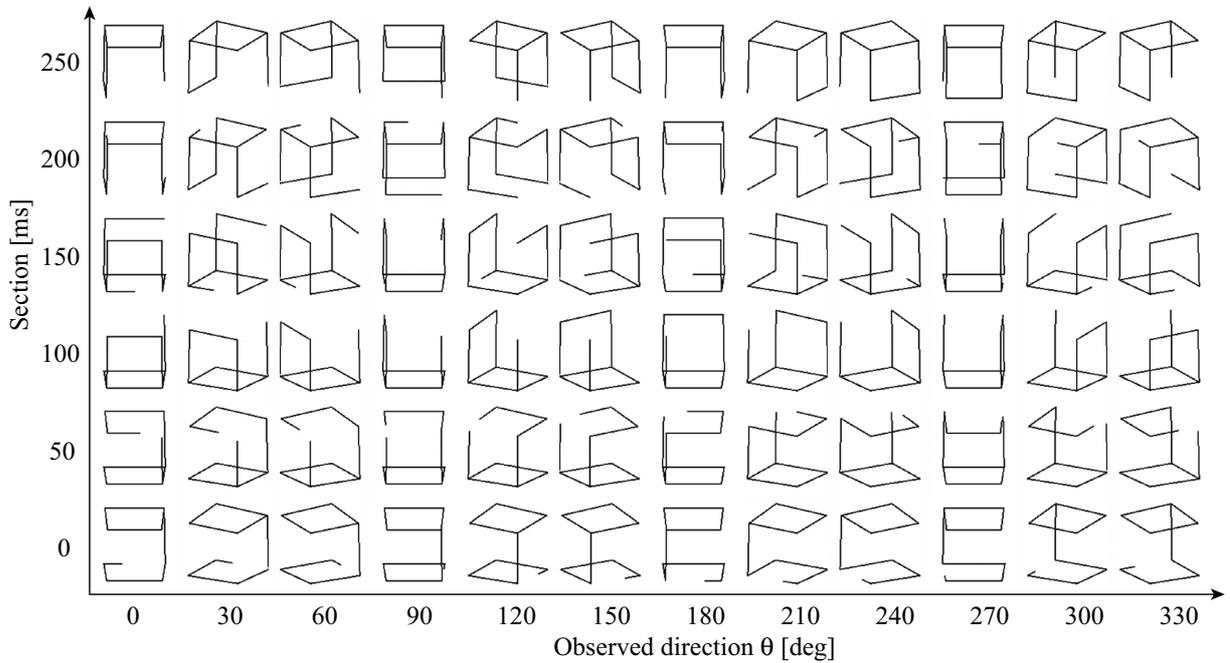


図 5.18: 立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法 1, $\phi = -20$)

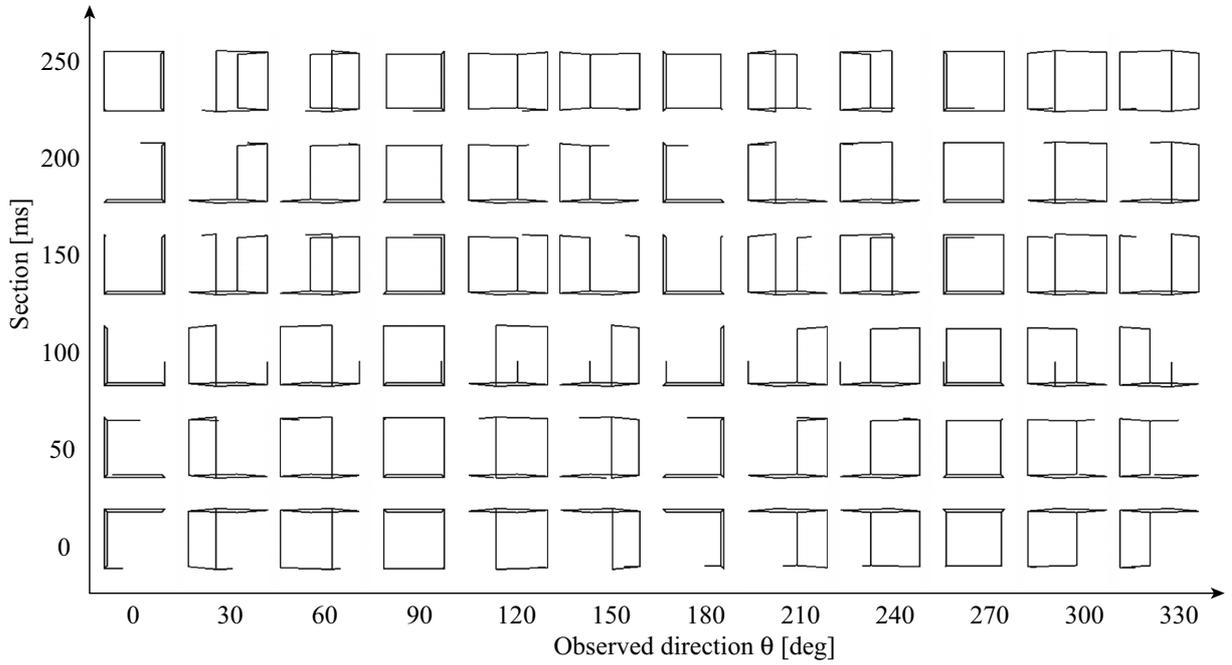


図 5.19: 立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法 2, $\phi = 0$)

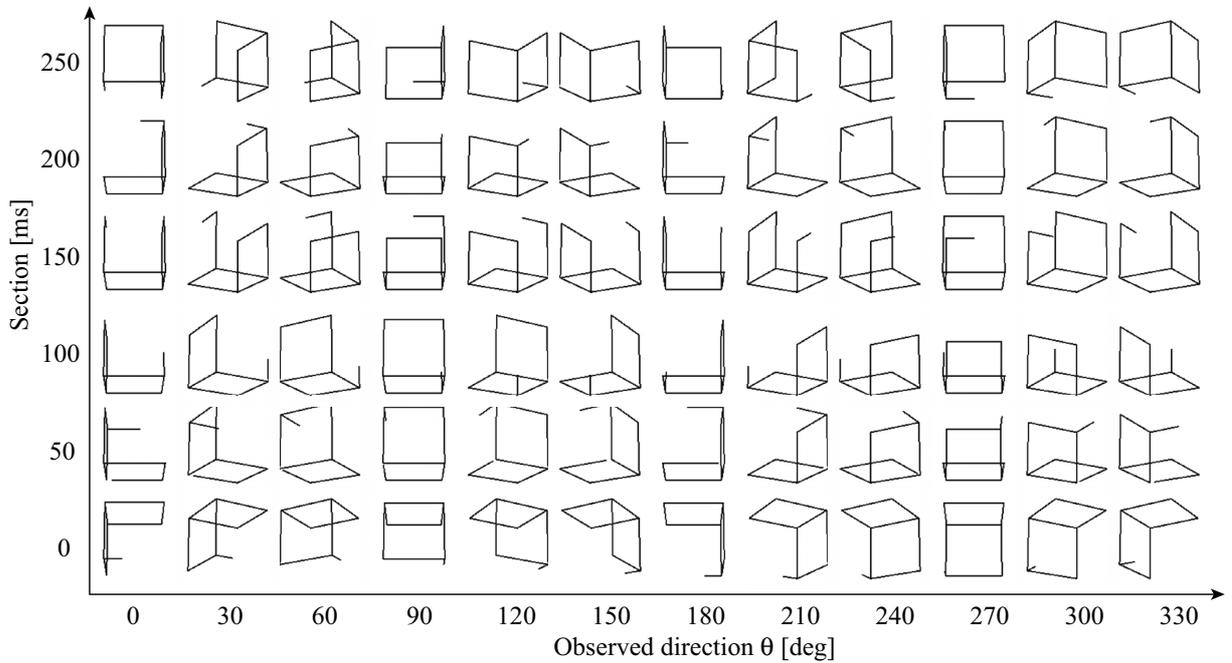


図 5.20: 立方体の描画区間とシミュレーション画像 (手法 2, $\phi = -20$)

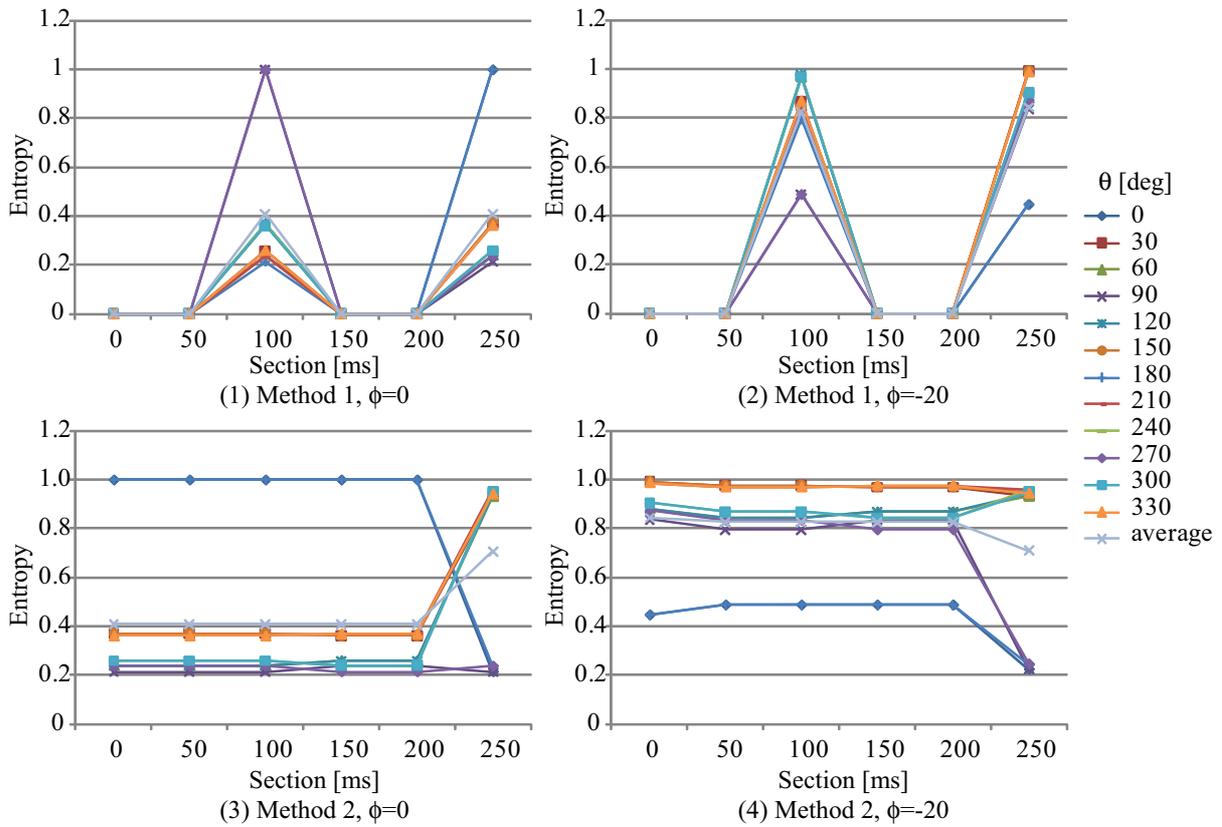


図 5.21: シミュレーション画像の物体像エントロピー

トロピーグラフを図 5.23 に示す．青で示されている部分は面の面積の 1 つが 0 に近くなるようなアスペクトであるため，エントロピーが低くなっている．このようなアスペクトを除けば，手法 2 では視方向や描画経過時間に対して安定して情報を持っていることが分かる．

5.1.3 描画手法の心理評価

評価方法

被験者は約 2.5m の高さにある描画された物体を約 2 ~ 2.5 m 離れた位置から見上げて観測してもらう．5.1.1, 5.1.2, 6.1.2 の表現手法の評価実験では，被験者には手法 1 と手法 2 を順番に観測してもらい，「どちらの方がよりよく形状を表現していますか」という設問に対して，「手法 1」「手法 2」「どちらも同じ」の三つのうちから選択してもらう．評価結果については，選択した手法に 1 を与える．またどちらも同じ場合には 0.5 を与え

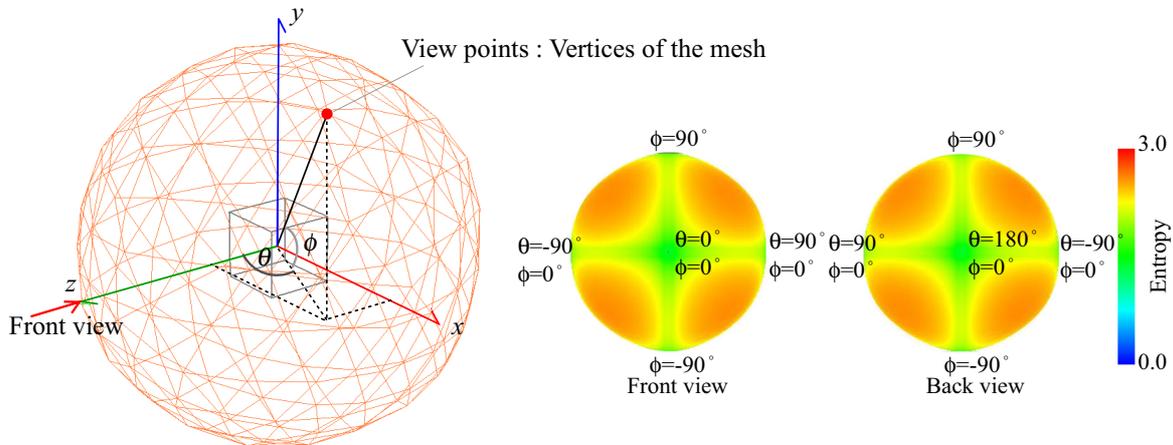


図 5.22: シミュレーション画像の観測点とエントロピーマップ

る．その総和から順序尺度をもとめて比較する [48] ．

多角形描画手法の評価

評価結果を表 5.2 に示す．4 名の被験者すべてが手法 2 を選択した．図 5.4 に示した画像では，どちらも描画中の一瞬を写しており，頻度の差はあるがプラズマ発光体位置に乱れが生じている．しかし，手法 2 を用いて何度か同じ描画を繰り返した場合には，乱れが発生する確率が低いため，人間は安定して描画されていると見ることができる．一方，手法 1 では写真のような乱れが高確率で発生している．したがって，描画の安定性の面からは，手法 2 が有効といえる．また，図 5.4 から明らかなように，手法 2 で描いた正方形は角が強調されて描かれていることがわかる．被験者からは，手法 2 では安定して描画されており，角が強調されているため，形状がわかりやすいという感想が得られた．なお，多角形の角付近のように，スキャン速度が急激に変化する部分では，点密度が高くなるために輝度が明るくなる．これは，図 5.4 に示した画像では頂点の輝度が非常に高くなっていることからわかる．

ただし，このような角付近の輝度の強調により，角付近の角度が実際より鋭角に感じられる錯視が起こる可能性がある．しかしながら，実際に肉眼で観測した場合には，プラズマ発光体が極めて明るいいため，角付近での輝度強調が殆ど知覚されず，このような錯視が起こることはなかったため，角付近の輝度の強調は問題ないものとする．

第5章 エッジで表現する物体

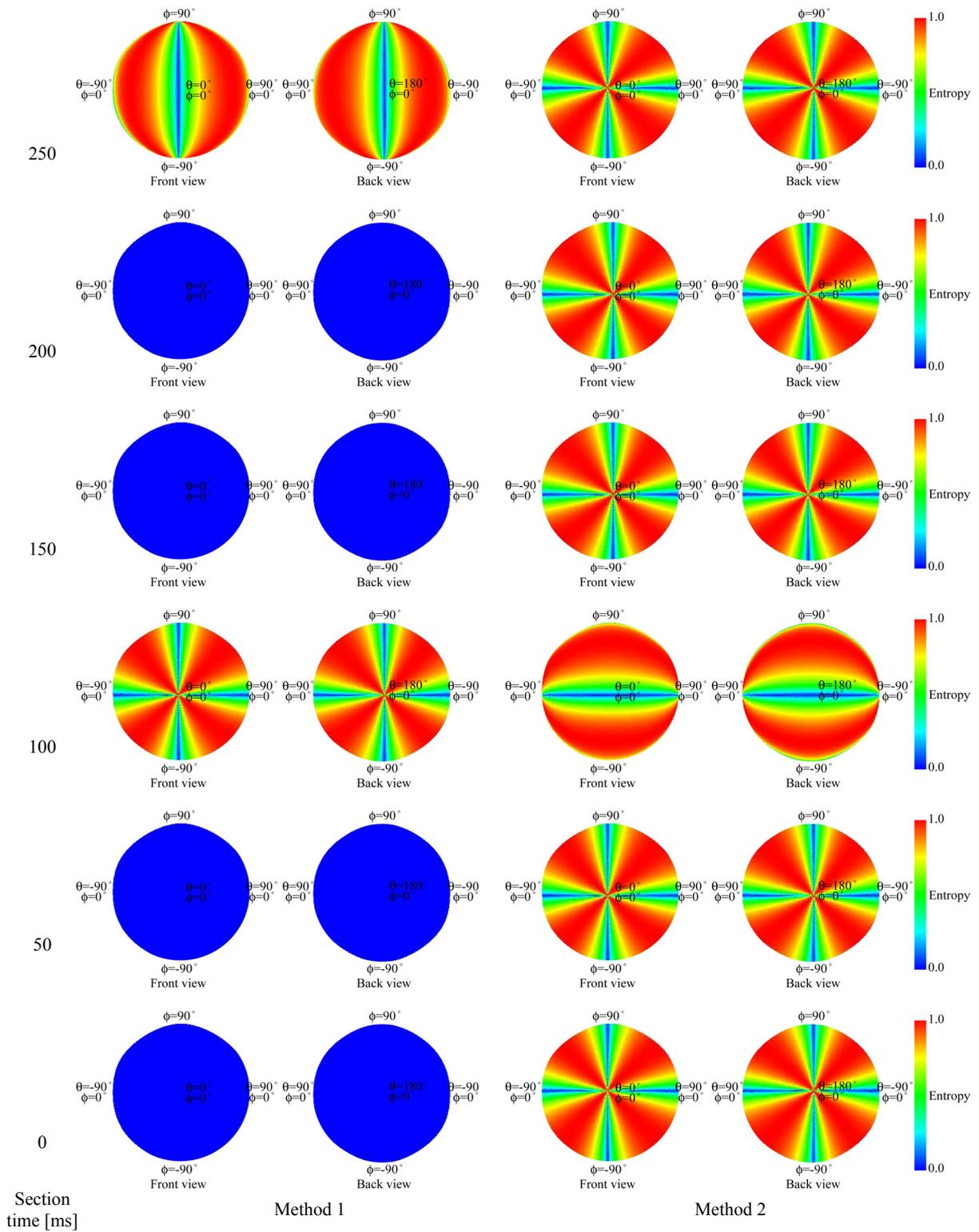


図 5.23: 各セクションタイムのエントロピーマップ

表 5.2: 評価結果 (尺度値)

Object	Method 1	Method 2	χ^2	significance level
Square	0.0	4.0	4.00	0.05
Cube	0.5	3.5	2.25	0.15

多面体描画手法の評価

評価結果を表 5.2 に示す。4 名の被験者のうち 3 名が手法 2 を選択し、1 名がどちらでもないを選択した。被験者からは手法 1 では空間中に線が描かれていくと感じるだけだが、手法 2 では面を認知できるため、立方体を認知することができるという感想が得られた。これより、手法 2 では立方体を 1 回描くのに手法 1 よりも時間がかかるが、立方体を認知しやすい表現手法であることがわかる。

実験の有効性

評価実験について有効性を検証する。各実験において、順序尺度に対するノンパラメトリック検定法として一般的なカイ 2 乗 (χ^2) 検定を行う [54]。5.1.1, 5.1.2 の実験では、帰無仮説 H_0 は「手法 1 と手法 2 の支持に差はない」、対立仮説 H_1 は「 H_0 ではない」と設定する。また、自由度は 1 となる。それぞれの χ^2 値を表 5.2 に示す。自由度 1 のとき、 $\chi_{0.05}^2 = 3.84$, $\chi_{0.15}^2 = 2.07$ から、5.1.1 は有意水準 0.05 で H_0 は棄却される。また、5.1.2 では有意水準 0.15 で H_0 は棄却される。これにより各評価実験はそれぞれの有意水準で有効と判断する。

5.1.4 考察

正方形については、提案手法ではハードウェアの負荷を軽減させるだけでなく、頂点が強調されて人間の認知にも効果があることが確認できた。

立方体については、心理実験から、提案手法では、描画物体の全体が同時に知覚できない場合でも、立方体を認知することができ、有効性が確認された。また、描画区間を区切ってシミュレーション描画した結果の像から物体像エントロピーを算出し、情報量に関しても手法 2 では安定して得られていることが分かった。しかし、実験に用いた立方体よ

りも小さく，少ない点数で描画できる場合，すなわち，安定認知時間の 200 ms 以内に描画できる場合には，手法 1 を用いても，描画物体が何であるか認知できるため，プラズマ発光体数に応じて，最短経路を描く手法と使い分けていくことも検討する必要があると考える．

これらの結果より，本システムでは表現手法によって物体の見え方が変化するとともに，物体の種類によって適した表現手法があることが示された．また，物体認知にとっての必要な情報を実験的に確認することができ，物体として安定していると感じれば，必ずしも物体全体が同時に知覚されなくてもよいことも確認できた．これらのことをふまえ，より効果的な表現のために，プラズマ発光体の発生/消失のタイミングと人間の認知特性，たとえば，一つの物体を何秒間で何回繰り返して描けば認知することができるかという時間的な問題，さらに，経路の長さ，複雑性と認知の関係などを調査する必要があると考える．

5.2 文字列の描画

エッジで表現できる物体の応用例として、文字 / 文字列の描画手法を提案する。ここではアルファベットの大文字を対象とする。

提案手法の評価については各描画実験に対して、3名の観測者がおり、描画結果に対して何を描画しているか分かるかどうかをインタビュー形式で回答してもらった。これを評価として記載する。

5.2.1 プラズマ発光点の点密度と描画時間と文字認識について

点列を用いて文字を描画する場合、同じ形状の文字でも、点密度によって図 5.24 のように変化する。点密度によっては文字の認識が難しいこともあるため、適切な点密度を選択する必要がある。更に、本システムでは点密度を変化させると文字の描画時間も変化する。すなわち、点密度を 2 倍にした場合、描画時間も 2 倍になる。例えば、図 5.25 に示すように、ある一定の時間に描くことができる部分は点密度によって変化する。ここで、図中の d は (c) における点密度を示す。1/30 秒間に、(a) では 1 文字を描くが、(b) では 2/3 文字、(c) では 1/3 文字、(d) では 1/6 文字をそれぞれ描く。本ディスプレイで描画した物体の見え方は描画にかかる時間によっても変化することが経験的にわかっている。本論文で対象としているデバイスで文字を描画したとき、安定認知時間よりも短い時間で一文字を描くことができるため、複数の文字を描画するためには 1 文字の描画時間をなるべく短くすることが望ましい。しかし、点密度と描画時間は比例の関係にあるため、描画時間を短くすると点密度が低くなり、文字形状の認識に影響する。したがって、まず、文字認識ができる点密度を調査する。しかし、文字認識の場合、1 文字の提示時間が文字の認識しやすさに影響することも経験的に分かっている。すなわち、提示時間があまり短いと、何か表示されたことは分かるが、文字を認識するのは難しくなる。したがって、描画回数をコントロールすることによって提示時間を調節し、文字を認識できる提示時間を調査する。

5.2.2 プラズマ発光体点密度と提示時間の実験結果

床から約 2 m の高さに水平に表示される図 5.26 に示す文字を、以下の 2 つのパラメータを変化させて視認し、適切なパラメータを判断する。なお、文字の大きさは約 18 cm である。

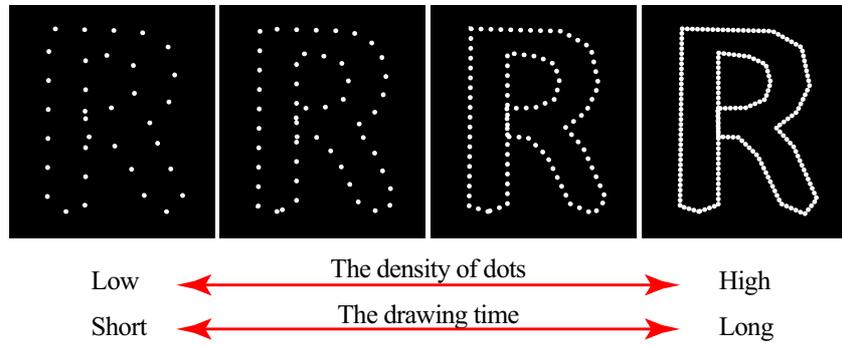


図 5.24: 点密度と文字の見え方

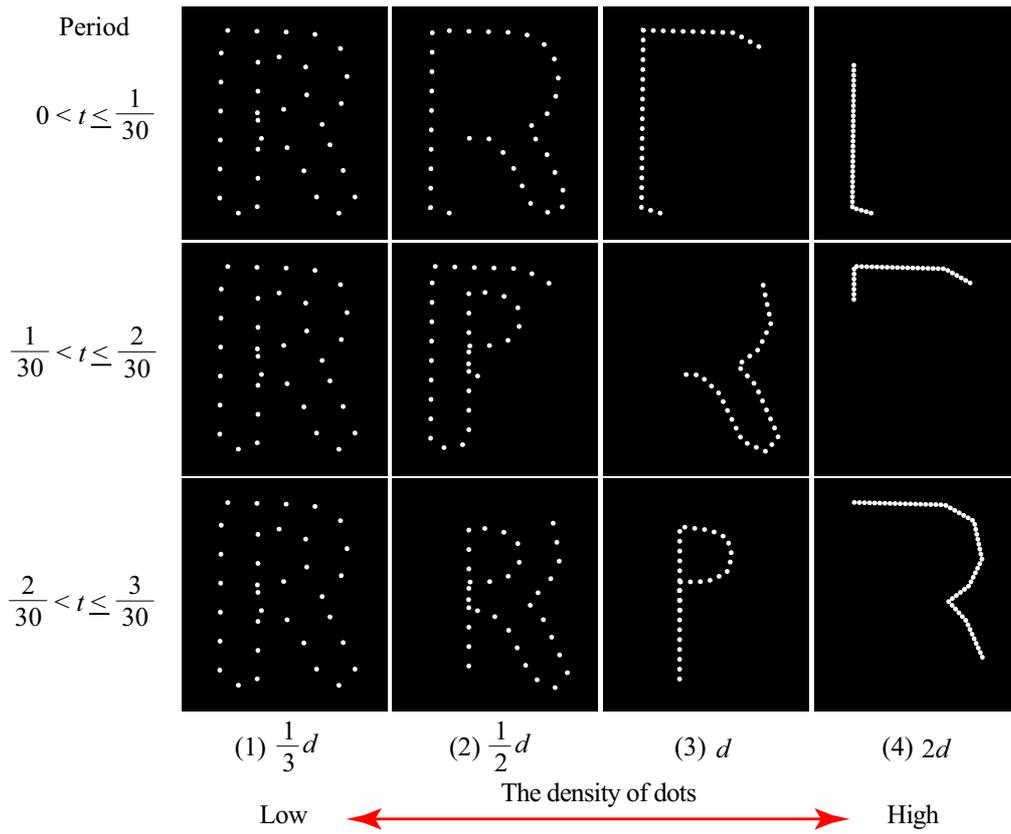


図 5.25: 点密度と描画時間の関係

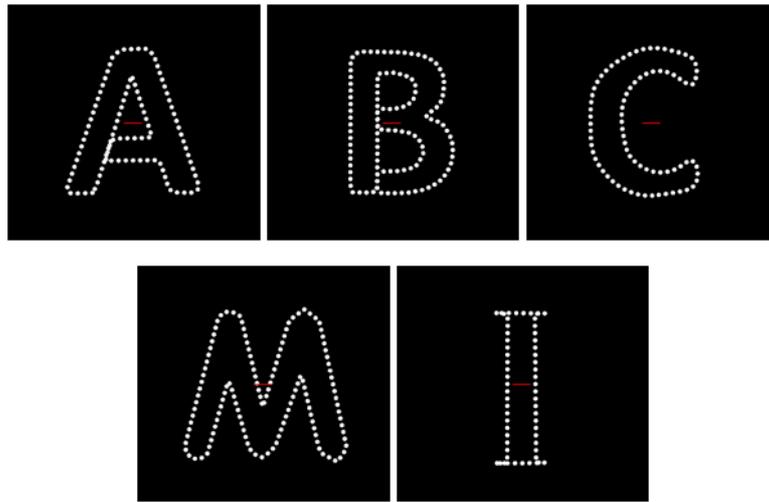


図 5.26: 描画実験に使用した文字の例

表 5.3: プラズマ発光体の点密度リスト

No.	The density [dots/cm]	The distance between dots[cm]	The drawing time[ms]	
			A	C
1	0.59	1.7	50	40
2	0.90	1.1	75	60
3	1.2	0.85	100	80
4	1.4	0.70	125	100
5	1.8	0.55	150	120

- 1) プラズマ発光体点密度
- 2) 提示回数

プラズマ発光体点密度に関する実験

プラズマ発光体の点密度については描画可能な範囲で 5 種類の点密度を用意した．表 5.3 に詳細を示す．プラズマ発光体間隔は 0.55 cm から 1.7 cm となっている．また，1 回の描画にかかる時間は文字によって異なるが，40 ms から 150 ms となっており，どの文字も安定認知時間以下で描画することができる．描画実験では各文字を数十秒提示し続けた．図 5.27 にシミュレーション結果の画像を示す．

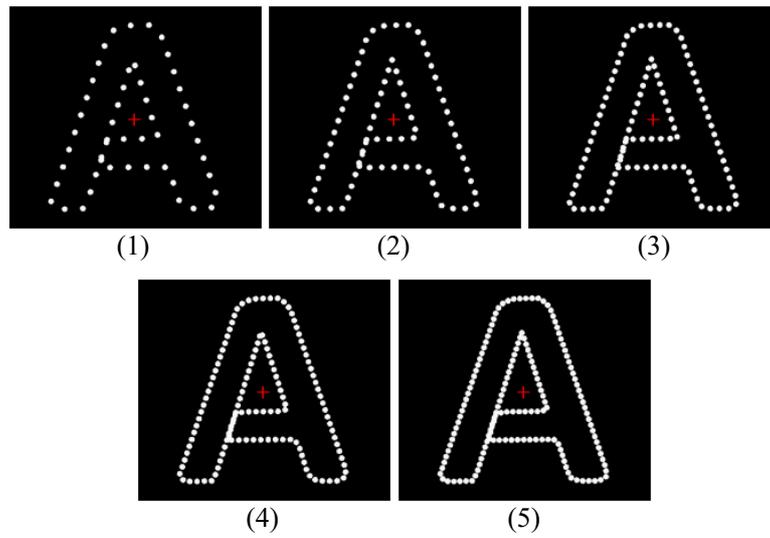


図 5.27: 実験に用いた点密度のシミュレーション結果

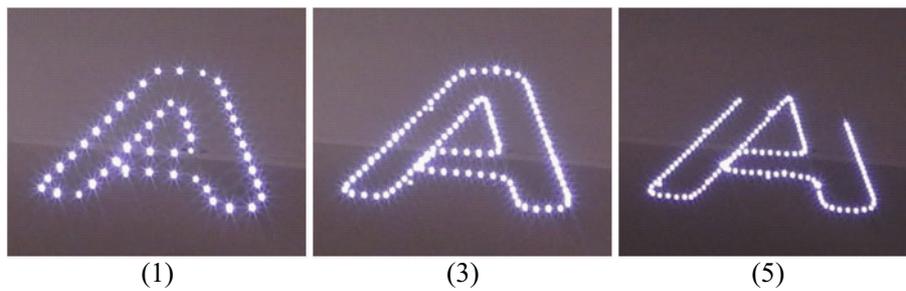


図 5.28: 描画結果 “A”

実際に描画した結果例の画像の例を図 5.28, 図 5.29 に示す．画像の番号は表 5.3 の番号を示す．シャッタースピードは図 5.28(5) は 0.25 s, それ以外は 0.2 s である．図 5.28(5) は 150 点のプラズマ発光体で 150 ms で描画しているが, シャッタースピードが 0.25 ms であるため, 文字の一部が欠けている．

描画に関するインタビューの結果, 「(1) は分かりにくい .」, 「(2), (3), (4) については認知できる .」 「(3) くらいの点密度が適している .」 という回答が得られた．これは “A”, “C” 両方について同様の結果となった．

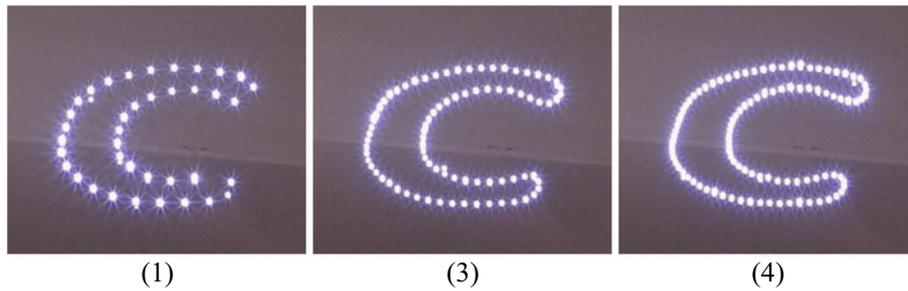


図 5.29: 描画結果 “C”

提示時間に関する実験

提示時間については前節の実験 (3) の点密度を用いて、描画回数変化させて認知できるかどうかを調べた。インタビューの結果として、すべての観測者が、1回の描画では、「何が描かれたか分からなかった」、3回以上描画した場合には、「何が描かれたか分かった」という回答が得られた。

これらの結果から、文字の表現では、プラズマ発光体の点密度を 1.2 dots/cm くらいに設定して、240 ms 以上提示し続けることで認知しやすくなった。ただし、図 5.26 に示す “I” の文字は特徴がないため、240 ms 以上提示しても「何を表示しているか分らない」と回答した被験者もいた。アルファベットという前提条件を示せば理解できるが、前提条件がない場合は幾何学的な図形と判断されやすいためである。

図 5.30 に実際の描画風景を示す。このように空間中に文字が浮かんで見える。また、図 5.31 にデザインされた文字の描画例を示す。図 5.31(1) は写真撮影用に 1 文字をそれぞれ 1 回だけ描画している。

5.2.3 文字列描画手法

次に文字列を描画することを考える。5.2.2 では文字のアウトラインを扱っていたが、ここではより多くの文字を表現できるように線で描画した文字を扱う。

文字列を一筆書きで描画するために、まず、文字列を描画するベースラインを設定する。そして、単体の各文字に対して、描画する start 点と end 点を設定する。start と end は必ずベースライン上にある。ベースラインと文字形状の関係によって表のようにアルファ



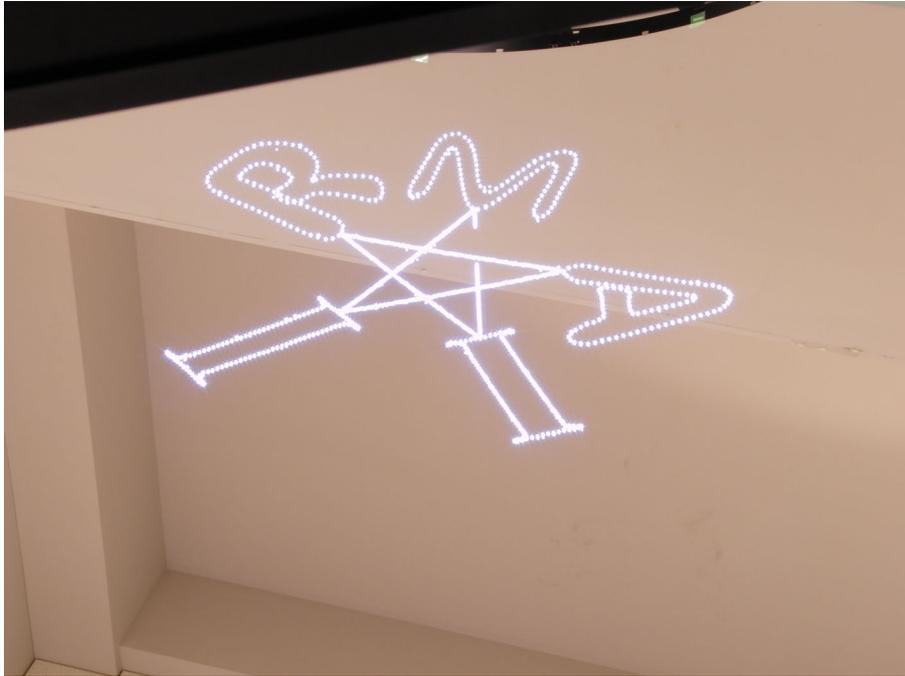
図 5.30: 実験風景

表 5.4: 文字グループ

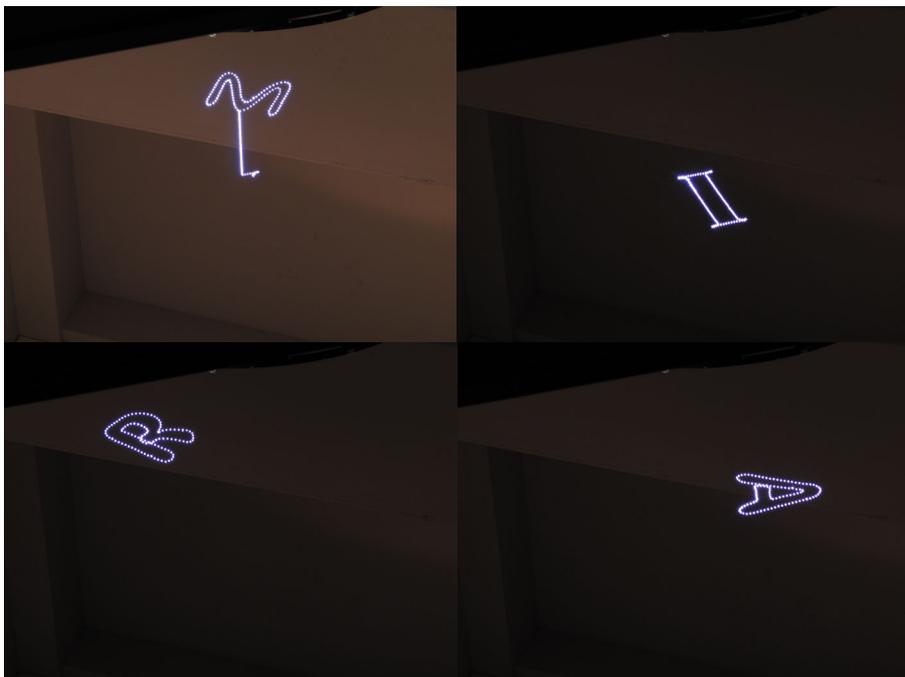
Group no.	Contact point(s)	Alphabet
1	1	AHKMNRWX
2	1	BDOQ
3	2	CGIJSUV , FPTY , ELZ

ベットは 3 つのグループに分けられる．グループ 1 はベースラインとの接点が 2 点あり，図 5.32 の “A” のように左側でベースラインに接している start 点から end 点まで一筆書きで描画する．グループ 2 は図 5.32 の “B” のように start と end は同じであり 1 周で描画する．グループ 3 は図 5.32 の “C” のように start と end は同じであり同じラインを往復して描画する．ただし，“E”，“L”，“Z” はベースラインと重なる部分がある．その場合には，ベースラインと重なる部分の途中からではなく図 5.32 の “E” のように，文字の端の部分に start/end 点を置く．また，文字ごとに描画する経路は手動で決定した．

文字列は隣り合う文字の end 点と start 点を繋げていく．図 5.33 に “LASER” という文字列の場合の例を示す．また，文字列の start 点は最初の文字の start 点，end 点は最後の文字の end 点とする．本研究ではこのように作成した経路を基本経路とし，基本経路



(1)



(2)

図 5.31: 文字の応用表現の例

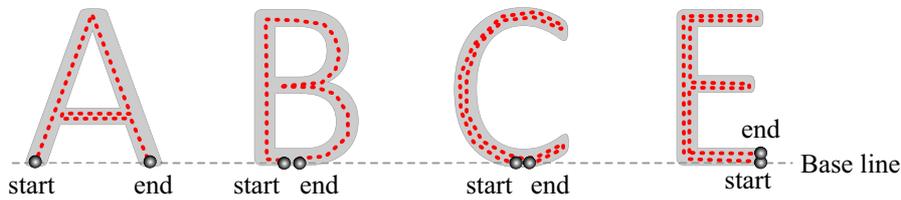


図 5.32: 文字列のための文字の基本描画

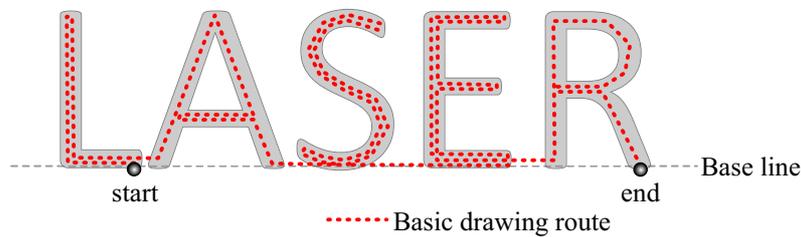


図 5.33: 文字列の描画 (手法 1)

を作成する手法を手法 1 とする。

しかし、本システムで文字列を描画する場合、安定認知時間の 200 ms で表現することは難しいため、同時にすべての文字が見えるように描くことも難しい。人間は文章を読むとき、一文字ごと見ているわけではなく、数文字を同時に見て文章を理解している。したがって、本ディスプレイにおいても文字列を描く経路を工夫することによって、数文字ずつ見えるようにし、少しずつ描画する範囲を移動させていく手法を提案する。これを手法 2 とする。

手法 2 は 2 つのフェーズからなる。フェーズ 1 では文字を経路の順方向に描く (drawing forward)。すなわち、文字を start 点から end 点に向かって描く。一方、フェーズ 2 は経路を逆方向、end 点から start 点に向かって描く (drawing backward)。逆方向に描く文字数より、順方向に描く文字数が多ければ、文字列は少しずつ描画されていくことになる。ここでは、同時に描画する文字数 n_s と次のステップで追加して描画する文字数 n_a を設定して重複して描画される文字数を調節する。図 5.34 の例で説明する。ここでは $n_s = 3$ 、 $n_a = 2$ とする。Step 1 以外の各 Step のフェーズ 1 では 3 文字を描いたあと、2 文字を追加して描く。Step 1 では“LAS”を描いたあと、フェーズ 2 で“SAL”と逆方向で描く。

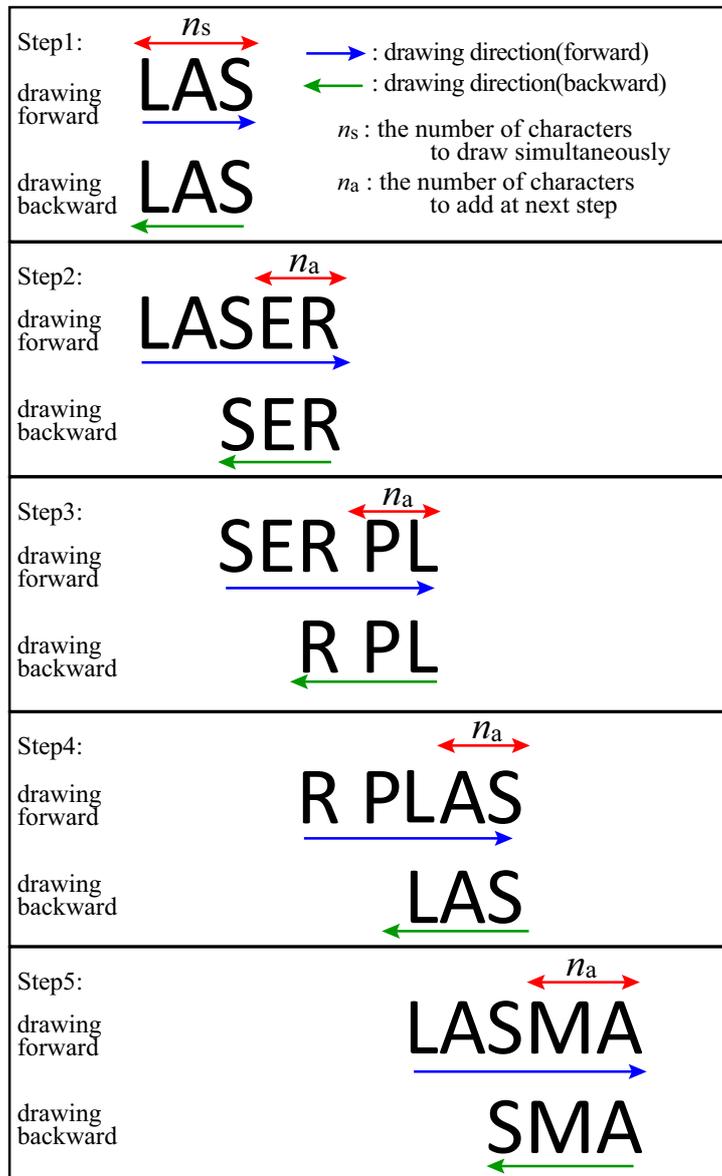


図 5.34: 文字列の描画 (手法 2)

Step 2 では 3 文字 “LAS” を描いたあと，2 文字 “ER” を追加して順方向で描く．そのあと，“RES” と逆方向に描く．Step 3 では順方向に “SER PL” と描き，逆方向に “LPR” と描く．結果として経路を行ったり来たりして文字列を描いていく．順方向で描画する文字が 1 文字になり，その描画が終了したときに，文字列の描画の終了とする．この手法では， n_s と n_a によって描き方が変化する．

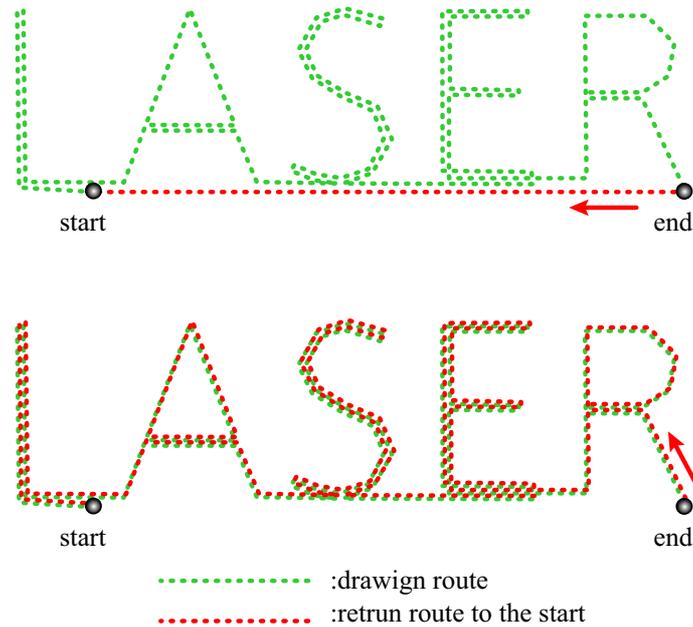


図 5.35: 文字描画における戻り経路

5.2.4 戻り経路

本システムでは一筆書きでオブジェクトを描く必要があるため、1つの文字列を描画し続けるには、1回描画した後に、どのように開始点に戻るか決定しなければならない。この戻り経路に関しては以下の2つの手法を比較する。

手法 1 (直線経路 Straight return) : 文字列の最後に到達したあと、文字列の開始位置まで直線的に繋げる手法。

手法 2 (逆経路 Route return) : 文字列の最後に到達した後、これまでたどってきた同じ経路を逆にたどって開始位置に戻る手法。

手法 1 を図 5.35(1) に示す。図中の end 位置から直線的に start 位置に繋げる。手法 2 を図 5.35(2) に示す。図中の end 位置から文字列を描く経路を逆に通過して start 位置に戻る。手法 2 では、経路全体の長さが手法 1 に対して長くなるが、余分な線を書き足すことなく start 位置に戻るができる。しかし、同じ描画時間を設定した場合、手法 2 は手法 1 に比べて点密度が低くなる。

表 5.5: “PLASMA”の認識結果

Drawing Method	Method1:	Method2:repeated drawing	
		$n_s = 3$	$n_s = 5$
Return route	Basic drawing		
Method1:Straight	possible	possible	possible
Method2:Reverse	possible	possible	possible

表 5.6: “LASER PLASMA”の認識結果

Drawing Method	Method1:	Method2:repeated drawing	
		$n_s = 3$	$n_s = 5$
Return route	Basic drawing		
Method1:Straight	impossible	possible	possible
Method2:Reverse	impossible	possible	possible

5.2.5 文字列描画実験

文字列の描画について 5.2.3 で述べた 2 つの手法を用いて文字列を描画し、文字列の認知しやすさを確認する。これまでの経験上や、予備的な実験の結果、手法 1 を用いて文字列を描画すると、5, 6 文字の文字列ならば認識できることが分かっていた。したがって、実験 1 では、今回は短い文字列として 6 文字 “PLASMA” を採用した。また、実験 2 では、長い文字列として、短い文字列の 2 倍程度の 11 文字 “LASER PLASMA” を採用した。戻り経路の手法についても 2 つの手法を用いて、文字列全体の認知しやすさを調査する。

実験 1 では “PLASMA” をそれぞれの手法の組み合わせで描画し、描画結果から文字列が理解できるかを確認した。結果を表 5.5 に示す。文字列描画手法 (Drawing Method) として、手法 1 の順方向で描く基本経路、手法 2 の複数文字を重複して描く提案手法、戻り経路 (Return route) として、手法 1 の直線経路、手法 2 の逆経路をそれぞれ組み合わせる方法で描画実験を行った。文字列描画手法の手法 2 については、 $n_s = 3, 5$, $n_a = 1$ で実験を行った。

実験 2 では “LASER PLASMA” を実験 1 と同様の手法の組み合わせで描画した。描画の確認結果を表 5.6 に示す。

実験 1 で用いた文字列の描画結果例を図 5.36 に示す。文字列描画は手法 1、戻り経路



図 5.36: “PLASMA”の例

は手法 2 の逆経路で描画している．文字列の高さは約 5 cm，幅は約 22 cm である．プラズマ発光体の密度は 5.2.2 の実験で求めたプラズマ発光体の適切な点密度に近い値で，約 1.1 dots/cm とした．

実験 2 で用いた文字列の描画結果の例を図 5.37 に，描画実験風景を図 5.38 に示す．文字列描画は手法 1，戻り経路手法 1 の直線経路で描画している．文字列の高さは約 5 cm，文字列の幅は約 40 cm である．プラズマ発光体の点密度は実験 1 と同じで，約 1.1 dots/cm とした．

文字列描画の手法 2 の描画結果全体を撮影することは難しいが，部分的に撮影した画像を図 5.39 に示す．重複して描画している文字の部分“SE”が明るくなっていることが確認できる．

描画を確認した結果，実験 1 では，文字列“PLASMA”は，すべての手法において被験者は文字列を理解することができた．実験 2 では，文字列“LASER PLASMA”は文字列描画の手法 1(順方向描画)で描画する場合はすべての被験者は文字列を認識できなかった．しかし，手法 2(繰り返し描画)で描画した場合には文字列を認識することができた．手法 2 について， $n_s = 3$ と $n_s = 5$ を比較すると，被験者からは「 $n_s = 3$ で描画するより， $n_s = 5$ で描画した方がより認識しやすい」という回答が得られた．また，実験 1，実験 2 とともに戻り経路の違いによる認識しやすさについては，被験者から「あまり変化ない」という回答が得られた．これにより，戻り経路の違いによる文字列の理解しやすさにはあまり関係がないことが分かった．



図 5.37: “LASER PLASMA”の認識結果



図 5.38: 文字列描画風景

5.2.6 考察

本章では文字表現に関して、プラズマ発光体の線密度と文字の描画時間について実験から適切と思われる値を求めた。また、文字列に対しては文字の描画方法の違いによる文字列認識に関して実験を行った。

プラズマ発光体の点密度は、約 1.1 dots/cm 程度で描画することが適している結果となった。密度が低い場合は文字を認識することが難しい。一方、これより高い密度では、1文字を描画するのに時間がかかり、フリッカーが発生する。文字の認識はできるが、見

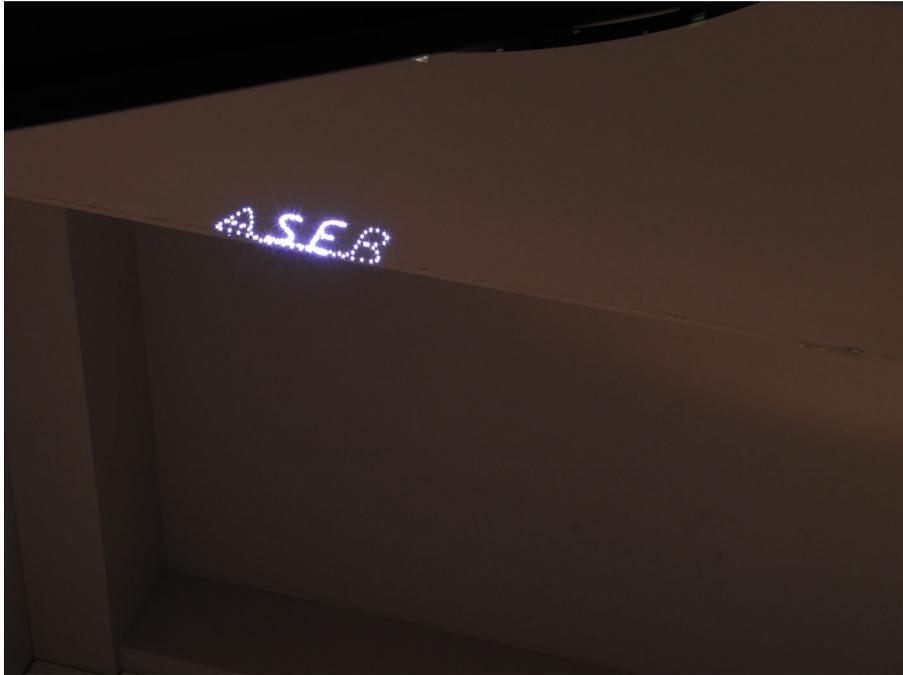


図 5.39: 手法 2 における描画

やすさという点では多少問題となる．また，1 文字の提示時間として，最低でも 240～300 ms 必要であることが分かった．

文字列の描画手法に関しては，実験したどちらの描画手法も 6 文字程度の文字列では問題なく認識できた．しかし，11 文字の文字列では順方向で描画する場合には認識できなかったが，重複して描画する提案手法では認識できた．この場合の重複文字数は 3 文字より，5 文字が適しているという結果が得られた．したがって，文字列は 5-6 文字ずつ重複させて描画してする手法が効果的であるといえる．

戻り経路について，2 つの手法を試したが，認識において，この二つの手法に顕著な差は見られなかった．これらの描画の差は，戻り経路にかかる時間の他は，ベースラインが描かれるかどうかの違いがある．文字列の認識にはベースラインの有無はそれほど大きな問題にならないことが分かった．しかしながら，戻り経路の方法を逆順にすることによって，ネオンサインを使ったビルボードのように，魅力的な表現が可能であると考えられる．

第6章

曲面で表現する物体

本章ではエッジで表現できない物体の表現について考察する．曲面物体などのエッジで表現できない3次元物体として，球体の表面を表現する手法を提案する．さらに，応用として，曲面物体の描画手法を提案する．また，レーザプラズマ3Dディスプレイがスキャナ的高速・光点の高精細化されることを想定してポリゴンモデルの表面の表現手法を検討する．

6.1 球体の描画

6.1.1 基本の描画手法

曲面物体はエッジではなくその表面全体を表現する．もっとも基本的な曲面物体として球体について考える．表面全体を表現する場合，多面体同様，CGで扱われるワイヤフレームモデルの全体，または一部をなぞることで対象物体を表現できる．一般的に球体は多面体を細かく分割していくか，円状のワイヤフレームを組み合わせて作られることが多い．ここでは少しずつ回転させた複数の円で表現する手法を手法1とする．しかし，この手法では，円が回転しているように認知されてしまう(仮現運動)[41]．これを防ぐため，縦方向に滑らかに球体表面上を描くように，らせんで表現する手法を手法2として提案する．

(1) 手法1：複数の円による表現

本システムではVectorスキャンで表現するため，ここでは垂直方向の軸中心に徐々に回転させていった円の軌跡を繋げた経路とする．円の半径 r と数 n_c ，サンプリング数(スキャナへの入力データ数) n_s で表現できる．図6.1(1)に例を示す．ここで， $n_c = 6$ ， $n_s = 120$ である．図中の点はスキャナへの入力データを示し，それらの点をつなぐ線はスキャナが動く軌跡を示す．また，実際のサンプリング点 $\mathbf{p}(i)$ ，($i = 0, \dots, n_s - 1$)は式(6.1)のようにして求める．なお， $\%$ は剰余演算子とする．

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(i) &= (r \sin(\phi) \cos(\theta), r \cos(\phi), r \sin(\phi) \sin(\theta)), \\ \theta &= \frac{\pi j}{n_s}, \phi = \frac{2\pi n_c i}{n_s}, j = i \% \frac{n_s}{n_c}. \end{aligned} \quad (6.1)$$

(2) 手法2：提案手法(らせんによる表現) 球体の表面を覆うらせんは，球体の半径 r とらせんの段数 n_d ，サンプリング数 n_s で表現できる．図6.1(2)に例を示す．図中の点をつなぐ線はスキャナが動く軌跡である．ここで， $n_d = 10$ ， $n_s = 120$ である．また，実際のサンプリング点 $\mathbf{p}(i)$ ，($i = 0, \dots, n_s - 1$)は式(6.2)のようにして求める．

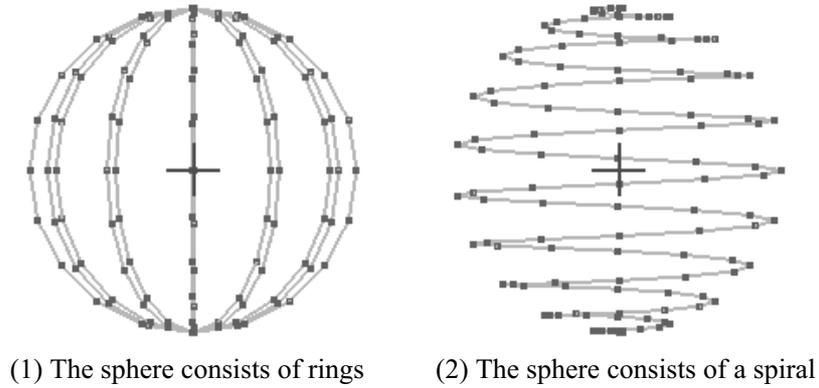


図 6.1: 球体の表現

$$\mathbf{p}(i) = (r \sin(\phi) \cos(\theta), r \cos(\phi), r \sin(\phi) \sin(\theta)), \quad (6.2)$$

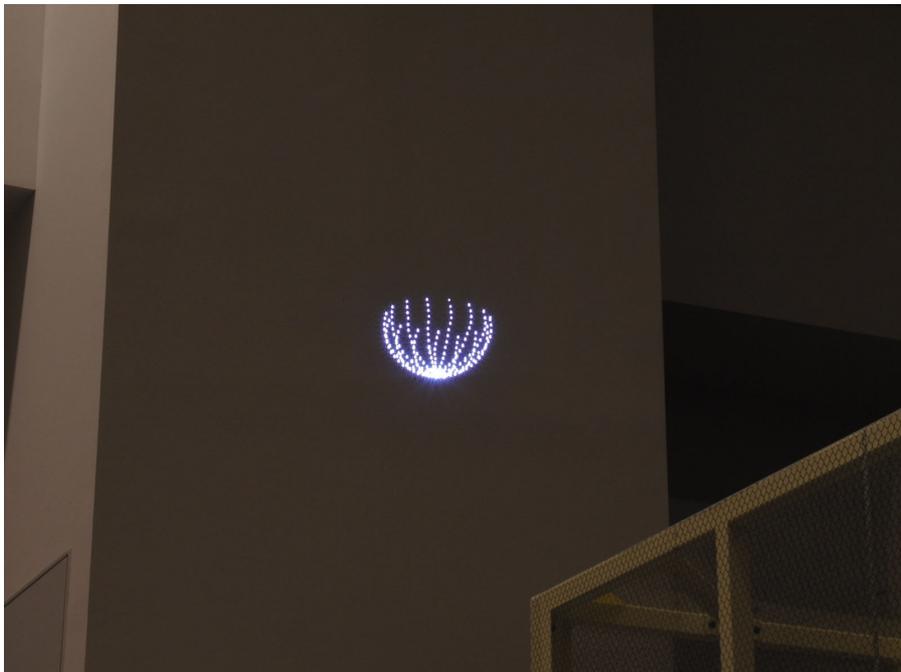
$$\theta = \frac{2\pi n_d i}{n_s}, \phi = \frac{\pi i}{n_s}.$$

6.1.2 球体の描画実験

球体を表示物体として、複数の円で表現する手法 1 と、らせんを用いて表現する手法 2 を用いて描画比較実験を行った。球体は直径約 30cm である。手法 1 と手法 2 は 3D スキャナの制限で、同じ位置にプラズマを発光させて描くことができなかったため、スキャナの制限内で両手法が最も近い状態で描くことができる点列配置で実験を行った。手法 1 は円の数 10, 入力データ数 4000, サンプリングインターバル $30 \mu\text{s}$ で描いた球体, 手法 2 は、らせんの段数 25, 入力データ数 1500, サンプリングインターバル $300 \mu\text{s}$ で描いた球体を使用した。プラズマ発光体の数は手法 1 では 1200 点, 手法 2 では 450 点となっている。また、球体を 1 回描くのにかかる時間は、手法 1 は 1200 ms, 手法 2 は 450 ms となる。ただし、手法 1 において、円を 1 回描画するのは 120 ms となる。実験中の映像を図 6.2 に示す。(1) は F 値:F8.5, シャッタースピード:1.0 s, (2) は F 値:F8.5, シャッタースピード:0.25 s で撮影した。



(1) The sphere consists of rings



(2) The sphere consists of a spiral

図 6.2: 球体の描画実験

表 6.1: らせんで表現した球体における評価パラメタ

param list no.	Input data	Sampling interval[μ s]	The number of plasma
1	2250	0.30	675
2	1125	0.30	338
3	375	0.42	158
4	375	0.40	150
5	375	0.35	-

6.1.3 らせんによる球体表現の最適パラメタ

6.1.2 の実験では、手法 1 と手法 2 の点列配置をもっとも近い状態にするため、手法 2 における最適なパラメタの評価を行っていない。ここでは、らせんで表現した球 (図 6.2(2) 参照) の入力点数とサンプリングインターバルを変化させて描画し、球体の安定性と認知しやすさについて検証実験を行い、本研究で提案する手法の最適なパラメタを求める。球体は直径約 15cm で、らせんの段数 10 とする。らせんの段数は、あらかじめ行った予備実験において、最も安定して球体に見える数であり、少ない場合には、球体と認知するのは難しくなる。評価するパラメタリストを表 6.1 に示す。表にはそれぞれの入力点数、スキャナのサンプリングインターバル、一つの物体に使用されるプラズマ発光体の数と描画所要時間を記載した。

6.1.4 描画手法の心理評価

評価方法

被験者は約 2.5m の高さにある描画された物体を約 2 ~ 2.5 m 離れた位置から見上げて観測してもらう。6.1.2 の表現手法の評価実験では、被験者には手法 1 と手法 2 を順番に観測してもらい、「どちらの方がよりよく形状を表現していますか」という設問に対して、「手法 1」「手法 2」「どちらも同じ」の三つのうちから選択してもらう。評価結果については、選択した手法に 1 を与える。またどちらも同じ場合には 0.5 を与える。その総和から順序尺度をもとめて比較する [48]。6.1.3 のらせんを用いた手法のパラメタの評価実験では、被験者にはパラメタを変化させた球体を順に観測してもらい、「安定して球体と認知できるものを選んでください」という設問に対して、選択法 [48] に従い該当する球体を選

表 6.2: 評価結果 (尺度値)

Object	Method 1	Method 2	χ^2	significance level
Sphere	0.0	4.0	4.00	0.05

択してもらおう。評価結果については、選択した球体に 1 を与える。ただし、重複して選択することを許可するため、二つ選択した場合は 0.5、三つ選択した場合には 0.33 を与える。そして、その総和から順序尺度を求めて比較する。

曲面物体描画手法の評価

評価結果を表 6.2 に示す。4 名の被験者すべてが手法 2 を選択した。手法 1 では、被験者からは、一つの円が描かれており、さらにその円が垂直方向を軸に不安定に回転しているように見えるという感想が得られた。一方、手法 2 では、球体を認知できるという感想を得た。図 6.2(2) の画像はシャッタースピード 0.25 s で約半分の球体を描いている部分を映している。手法 2 を用いた描画では、一つの球体を描くためにかかる時間は 450 ms と、安定認知時間 (200 ms) より長くなっているため、人間の目には同時に球体全体が見えていると感じるわけではないが、球体としての認知を妨げるものではなかった。

らせんによる球体表現

評価結果を表 6.3 に示す。番号 3, 4 の球体が安定して球体を認知できるという結果が得られた。図 6.3 に安定して描画される球体の画像 (F 値: F8.9, シャッタースピード: 0.125 s) を示す。番号 1 のパラメタリストでは点数が多く、全体を描くためにかかる時間は約 675 ms となり、球体を認知することは難しかった。番号 2 では、一つの球体を描くためにかかる時間は 338 ms となり、安定認知時間 200 ms より長い。しかし、徐々に描いていくところを感じるが、安定した球体を認知できると回答した被験者もいた。また、プラズマ発光体の数が 150 点より少なくなった場合には、ハードウェアの制限で物理的に描画することができなくなった。

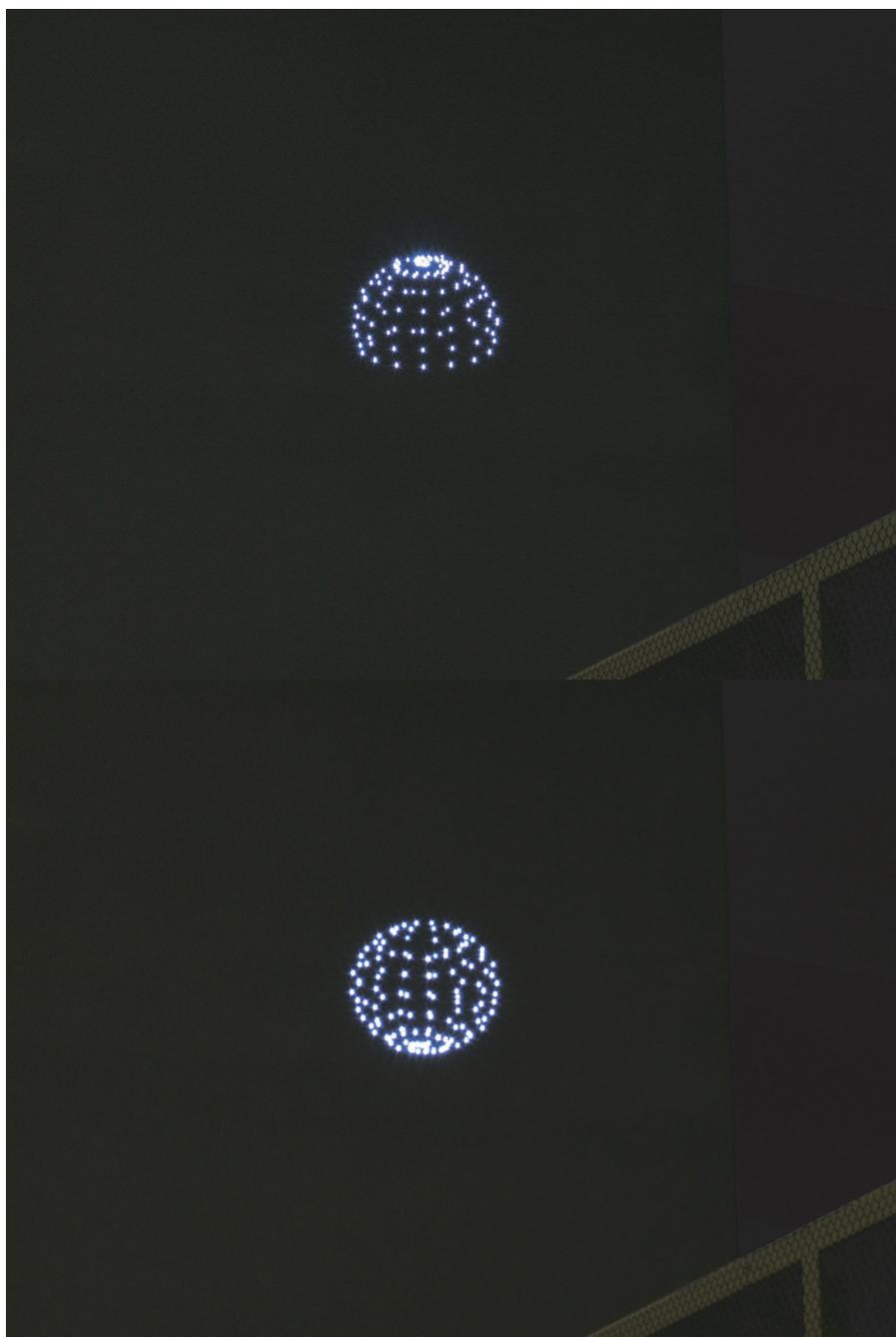


図 6.3: 安定して観測される球体

表 6.3: らせん表現した球体における評価パラメータ一覧

Subject No.	Param list No.			
	1	2	3	4
1	0.0	0.0	0.5	0.5
2	0.0	0.0	0.5	0.5
3	0.0	0.33	0.33	0.33
4	0.0	0.33	0.33	0.33
sum	0.0	0.66	1.66	1.66

実験の有効性

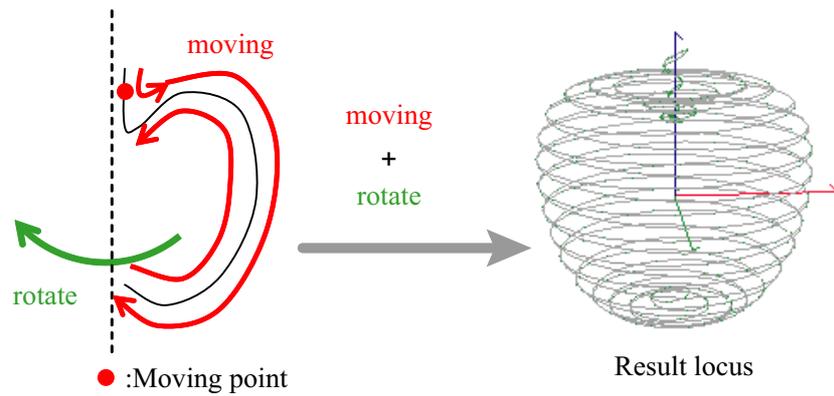
評価実験について有効性を検証する．各実験において，順序尺度に対するノンパラメトリック検定法として一般的なカイ 2 乗 (χ^2) 検定を行う [54]．6.1.2 の実験では，帰無仮説 H_0 は「手法 1 と手法 2 の支持に差はない」，対立仮説 H_1 は「 H_0 ではない」と設定する．また，自由度は 1 となる．それぞれの χ^2 値を表 6.2 に示す．自由度 1 のとき， $\chi_{0.05}^2 = 3.84$ から，6.1.2 では有意水準 0.05 で H_0 は棄却されるため，有意水準 0.05 で有効と判断する．6.1.3 の実験ではパラメタによって変わるプラズマ発光体の数について検定する．番号 3, 4 はプラズマ発光体の数が近いいため，それらをまとめて三つのカテゴリーに分ける．表 6.3 の番号 1 をカテゴリー 1，番号 2 をカテゴリー 2，番号 3, 4 をカテゴリー 3 とする．また，それぞれの尺度値は表 6.3 より，カテゴリー 2 と 3 を同等と選択したと判断されるため，0, 1.0, 3.0 となる．この場合，帰無仮説 H_0 は「各カテゴリーの支持に差はない」，対立仮説 H_1 は「 H_0 ではない」と設定する．また，自由度は 2 となる．実験結果から $\chi^2 = 3.5$ となり，自由度 2 の $\chi_{0.10}^2 = 4.61$ ， $\chi_{0.15}^2 = 3.79$ であるため，有意水準 0.10 でも，0.15 でも H_0 は棄却されない．

カテゴリーをさらにまとめて，番号 1 と 2 を，番号 3 と 4 をそれぞれ 1 つのカテゴリーとした場合についても同様に検定を行ったところ， $\chi^2 = 1.0$ となり，自由度 1 の $\chi_{0.10}^2 = 2.71$ ， $\chi_{0.15}^2 = 2.07$ であるため，有意水準 0.10, 0.15 で H_0 は棄却されない．一方，番号 1 を一つのカテゴリー，番号 2 と 3, 4 を一つのカテゴリーとした場合についても同様に検定を行ったところ， $\chi^2 = 4.0$ となり，自由度 1 の $\chi_{0.05}^2 = 3.84$ であるため，有意水準 0.05 で H_0 は棄却される．これらより，プラズマの点数は 675 点くらいで球体

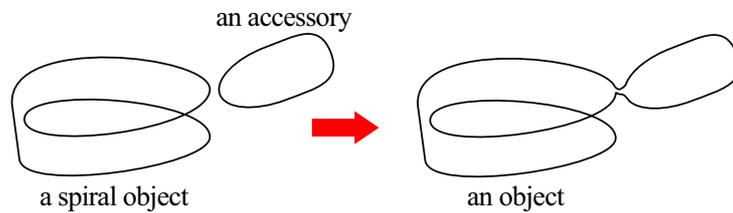
を描くことより，150 点から 300 点くらいで描くほうが支持されると判断できる．

6.1.5 考察

球体について，らせん形状を用いた提案手法で描くことが適していることが確認できた．提案手法のパラメタ評価実験から，安定して認知できる球体の描画ができることがわかった．また，安定認知時間 200 ms 以上で描画された球体を認知できることもわかった．被験者の中には球体の重心が安定せず，上下運動しているように感じる者も存在した．ただし，これは物体認知における若干の個人差の影響と考えられる．



(1) An example of creating a spiral objects (an apple).



(2)The connection of a spiral object and an accessory

図 6.4: 曲面物体のらせん表現とアクセサリ

6.2 曲面物体の描画

6.2.1 曲面物体の表現手法

6.1 にて球体の描画について考察した結果，らせん状に描画することで，球体の表面を表現することができた．応用として曲面物体の表現のバリエーションを提案する．図 6.4(1) の右図の黒い実線で示すようにまず断面の輪郭線を決定する．その輪郭上を動く点 (Moving Point) を想定する．輪郭線上を動かしながら破線を中心に輪郭線を回転させると左図のような軌跡が得られる．この軌跡はらせん状に一筆書きとなっており，本ディスプレイに適したデータを生成することができる．

輪郭線は xy 平面に描画されるとする．輪郭線を $c(t) = (x_c(t), y_c(t), z_c(t) = 0)$ とパラメトリック関数で表されるとする． $0 \leq t < T$ で輪郭線上を往復し，輪郭線が N 回転する場合，結果として得られるらせん状の軌跡 $L(t)$ を式 (6.3) で表わすとする．それぞれの要素は式 (6.4),(6.5),(6.6) で求められる．

$$\mathbf{L}(t) = (x_l(t), y_l(t), z_l(t)) \quad (6.3)$$

$$x_l(t) = \sqrt{x_c(t)^2 + y_c(t)^2 + z_c(t)^2} \cos\left(\frac{2\pi N}{T}t\right) \quad (6.4)$$

$$y_l(t) = y_c(t) \quad (6.5)$$

$$z_l(t) = \sqrt{x_c(t)^2 + y_c(t)^2 + z_c(t)^2} \sin\left(\frac{2\pi N}{T}t\right) \quad (6.6)$$

さらに、図 6.4(2) に示すように、アクセサリを取り付けることで表現力が増す。アクセサリ部分はらせん状で構成されている必要はなく、閉じた曲線であればよい。

6.2.2 曲面物体描画実験

6.2.1 で示した手法で作成した物体の描画結果を、図 6.5 に示す。シャッタースピードは (1),(3) は 0.33 s, (2) は 0.25 s である。写真からも分かるように 200 ms から 300 ms で全体が描画されている。被験者らは、「描いているものが何か分かる」と回答している。また、「比較的安定して物体が認識できる。」という感想が得られた。

このように、曲面をらせん状の点列で描画表現することにより、本ディスプレイで初めて曲面物体を被験者に知覚させることができるようになった。らせんの間隔についてのパラメタ設定が知覚に与える影響など、球体では 6.1.4 で検討を行ったが、定量的な検討は今後の課題である。しかし、この実験を通して、らせん状の描画曲面物体の表現に有効であることを確認することができた。



(1) Apple1(shutter speed:1/3[s])



(2) Apple2(shutter speed:1/4[s])



(3) Tea pot(shutter speed:1/3[s])

図 6.5: 曲面物体の描画結果



図 6.6: 一般的なポリゴンモデルの例

6.3 ポリゴンモデルの描画

3D ディスプレイのコンテンツとして、一般の 3 次元 CG 作成アプリケーションで作成した物体のデータを有効活用することを考える。一般的に 3 次元 CG ではオブジェクトをポリゴンモデルとして扱っていることが多い。ポリゴンモデルが持つ情報としては、面を構成する頂点の位置や法線、テクスチャやマテリアルなどがある。本研究には表面の形状情報が必要であるが、ポリゴンモデルの面を構成する頂点の位置で形状を表現できているポリゴンモデルを利用することを想定する。ここでは図 6.6 に示すような一般的な物体を対象とする。ポリゴンモデルは多面体として扱うことができるが、一般的な物体の場合、ポリゴンモデルを構成する面 (ポリゴン) の数が多く、細くなるため、5.1.2 で扱ったような最短経路探索では時間がかかる。また、面の順番指定も数が多く手動で選択することは不可能であり、面の順番決定アルゴリズムは最短経路検索と同様に難しいため、エッジを描く手法は適用できない。

そこで、ポリゴンモデルのエッジではなく、表面を表現することを考える。6.1 において、球体の表面をらせんで表現する手法を提案した。複雑なポリゴンモデルの表面を表現する場合にも曲面物体のように、断面を基として描画していくことが適していると考えられる。そこで、本章では複雑なポリゴンモデルから断面を基に表面を表現する点列データを作る手法を提案する。

また、本手法で作成したコンテンツは現在開発中の高速高精細のデスクトップ型 3D

ディスプレイで表示することを想定する．デスクトップ型はより複雑な形状を表現でき、シャッターを持つシステムである．シャッターは光点を発生させないように制御する装置である．

6.3.1 複雑なポリゴンモデルからの点列データ作成

ポリゴンモデルを 3D ディスプレイで描画するために、断面を基とした点列データを作成する．一般的な物体の場合、図 6.7 に示すように、物体が途中で分岐したり、曲がった状態だったりするため、断面は複数の輪郭に分割された状態になる．例えば、手の指を表現する場合、断面の輪郭が指ごとに離れている．したがって、分岐したパーツを描画する順番を考える必要がある．分岐したパーツごとに描画する場合、図の例では指を 1 本ずつ描画しようとする、分岐する部分で描画が連続しなくなるパーツがある．すなわち、指を 1 本ずつ描画すると最初に描画する指は手のひら部分から連続で描画されるが、2 本目以降に描画する指は手のひらから連続しなくなるため、接続する部分が時間的に連続して描画できなくなる．接続する部分を連続して描画できない場合には、連続している表面として知覚することが難しくなる．したがって、パーツごとではなく、分岐している物体に対しても同じ断面に含まれる部分を続けて描画する．方法としては、断面が複数の輪郭からなる場合は複数の輪郭を順に描画していき、輪郭の間はシャッターで光点を表示しないようにスキャンする手法を採用する．

以下に、ポリゴンモデルに対して各断面と交差するオブジェクトの輪郭を抽出し、それらを繋げて点列を生成するアルゴリズムについて説明する．本手法をポリゴンモデル断面点列生成アルゴリズムと呼ぶ．

6.3.2 ポリゴンモデル断面点列生成アルゴリズム

Step 1) 断面 $i(y = y_i)$ と交差するポリゴンの輪郭の交点を抽出する．このとき、1 つのポリゴンと断面との交点の関係は図 6.8 に示す 6 種類がある．本手法では iv), v), vi) のケースは交差しないと判定する．また、iii) のケースでは、同じ頂点を共有するポリゴンが存在し、それらは断面の上側と下側に存在する．交点の重複を排除するため、断面の上側にあるポリゴンは交差するが、下側にあるポリゴンは交差しないと判定する．したがって、断面とポリゴンが交差する場合、ポリゴン j の輪郭と断面の交点は 2 つあり、その順序は図 6.9 に示すように、ポリゴンの表側の面に対して右側を v_{1j} 、左側を v_{2j} とする．抽出した断面 i との交点集合を V_i とする．

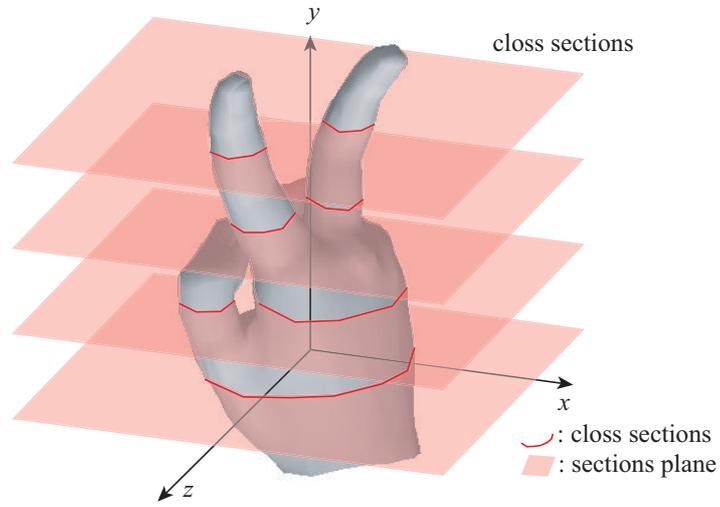


図 6.7: モデルに対する断面

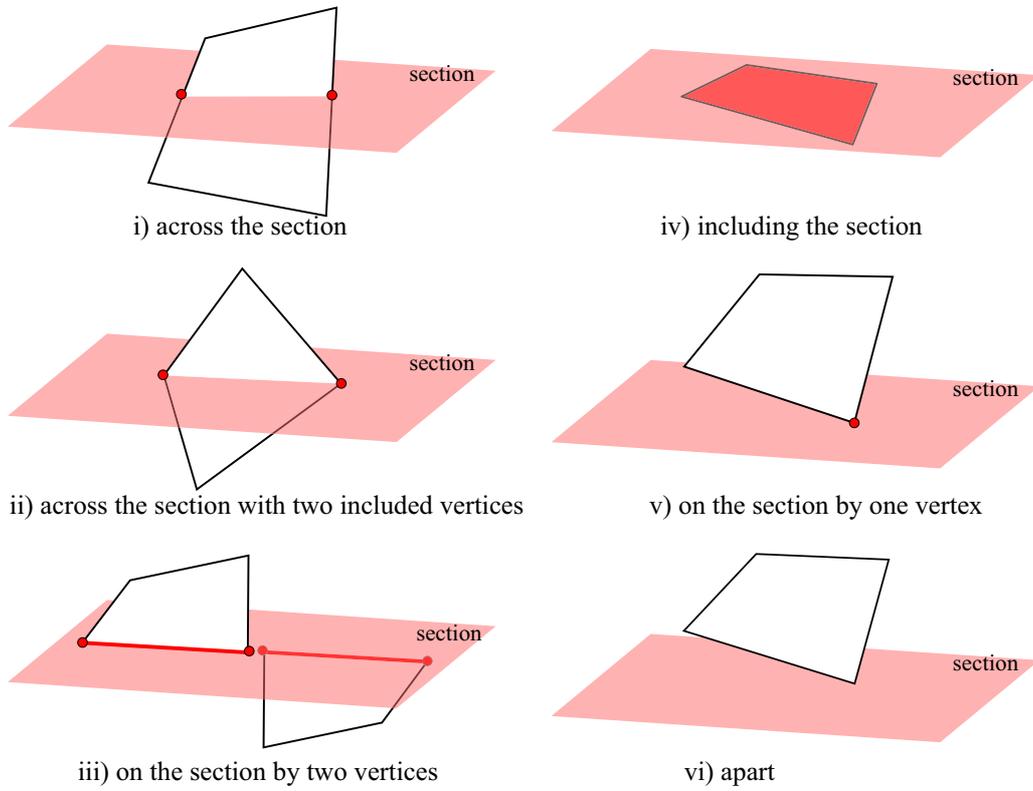


図 6.8: ポリゴンと断面の関係

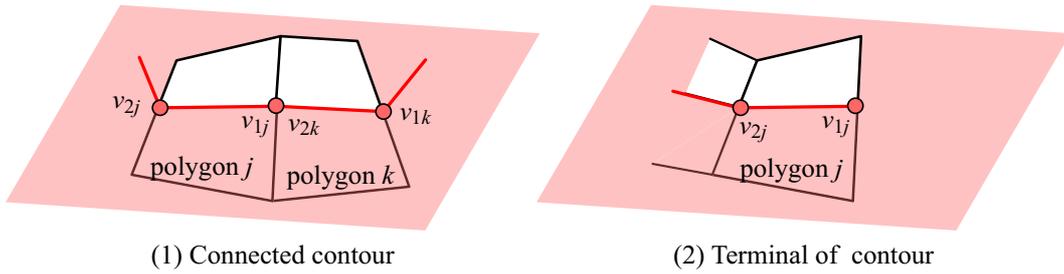


図 6.9: ポリゴンと断面との交点

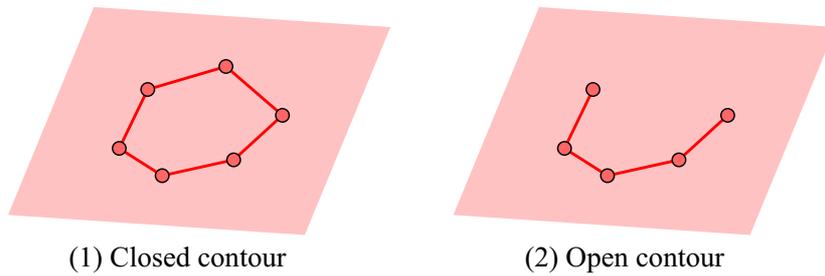


図 6.10: 断面輪郭のタイプ

Step 2) Step 1 で求めた交点集合 V_i の接続を解決して断面輪郭を作成する．ポリゴン j とポリゴン k が図 6.9(1) のように接合している場合は， v_{2j} と v_{1k} は同じであるため， $v_{1k}, v_{2k}=v_{1j}, v_{2j}$ の順に断面輪郭を形成する．一方，図 6.9(2) のようにポリゴン j の v_{1j} と同一の交点がない場合は， v_{1j} 側に接合するポリゴンが存在せず， v_{1j} は断面輪郭の端点となる．交点集合 V_i に対する接合を求めた結果として，断面 i の断面輪郭集合 $S_i = \{C_{i1}, \dots, C_{il}, \dots, C_{in}\}$ が得られる．ここで，断面輪郭 C_{il} は接続している頂点集合である．断面輪郭集合 S_i の要素 C_{il} は図 6.10 に示すような 2 種類が考えられる．また，図 6.11 に示すように断面輪郭集合 S_i の要素 C_{il} は辺の共有，頂点の共有を許可する．ただし，本研究では閉じた断面輪郭と開いた断面輪郭は一つのポリゴンモデルに混在しないことを条件とする．

Step 3) 断面輪郭が複数ある場合は断面輪郭の接合を解決する．断面 i の断面輪郭集合 $S_i = \{C_{i1}, \dots, C_{in}\}$ の輪郭を接合する． C_{ij} の要素である交点列を $C_{ij} = p_{j0}, \dots, p_{jn}$ とする． $p_{j0} = p_{jn}$ であれば，閉じた輪郭である．これらの頂点列に対して描画し始める点 p_{in} と描画し終わる点 p_{out} を決定する．図 6.12 に示すように閉じた断面輪郭の場合は $p_{in} = p_{out}$ であり， C_{ij} の任意の交点を p_{in} とすることができる．一方，開いた断面輪郭の場合は $p_{in} \neq p_{out}$ であり，端点 (p_{j0}, p_{jn}) のみが p_{in} か p_{out} となる．すなわち，端点のみで他の輪郭と接続可能である．

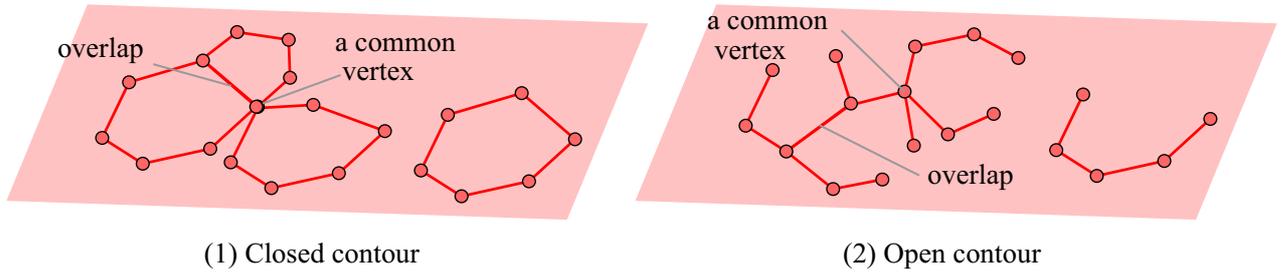


図 6.11: 断面中の輪郭集合

断面 i における最初の描画位置は断面 $i-1$ の最後に描画される点によって決定する．輪郭集合 S_i のすべての輪郭集合の中の頂点列の中の p_{in} となり得る頂点のなかで， $S_i - 1$ の最後に描画される p_{out} から最も近い点を C_{i1} の p_{in} とする． C_{i1} の p_{in} が決定したら p_{out} も決定する．図 6.25 に示すように C_{i2} の p_{in} は S_i のまだ描画順が決定していない輪郭集合の中の p_{in} となり得る頂点のなかで C_{i1} の p_{out} ともっとも近い点を p_{in} とす

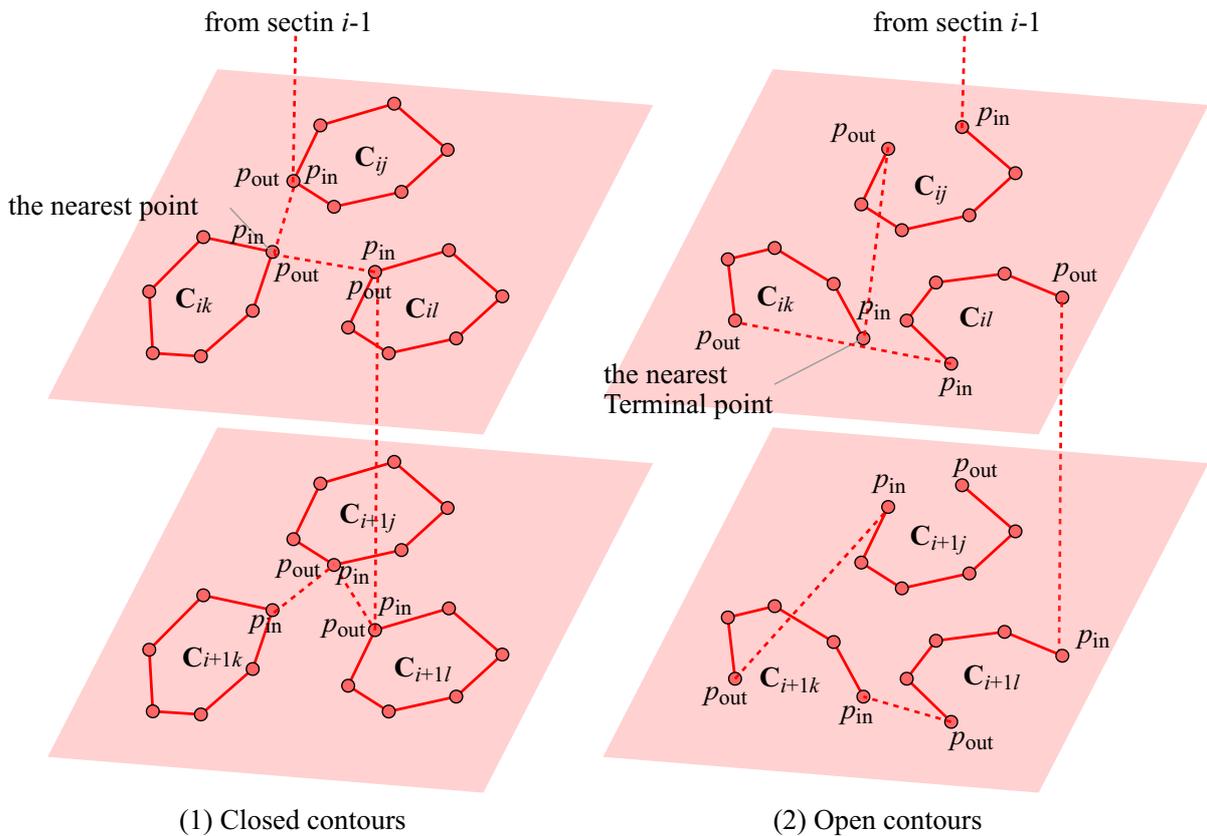


図 6.12: 断面の輪郭の繋がり

る．これを繰り返す．

Step 4) Step 3 の処理をすべての断面に対して行う．最初の断面での最初の p_{in} は断面の頂点のなかで最も x の値が大きい頂点を選択する．

なお，各断面において，断面輪郭を繋ぐとき，交点ではなく，最短となるような新しい点を作成すれば最適化されるが，複雑なポリゴンモデルの場合は密になっているため，新しい点を作成してもあまり変わらない．新しい点を作成する処理自体に時間がかかるので，ここでははその最適化は行わないものとする．また，3 つ以上の断面輪郭の場合や，上の層の断面からの接続上，必ずしも最短パスではないが，上記と同様，検索処理に時間がかかることや，最短パスと現状のパスではあまり変わらないため，そういった処理もここでは行わないものとする．

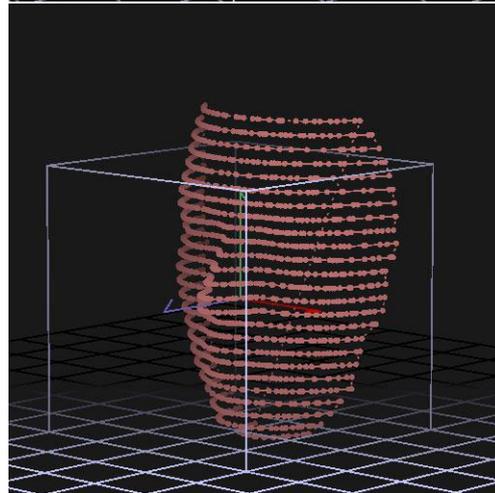
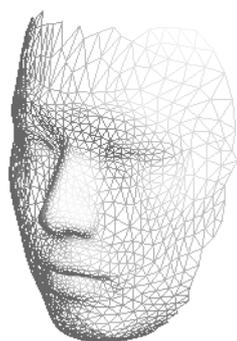
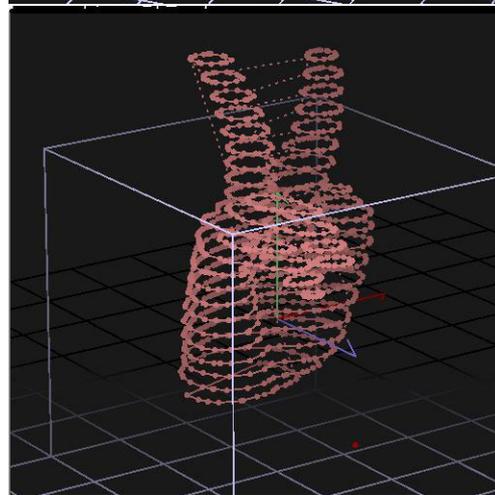
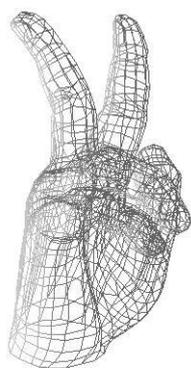
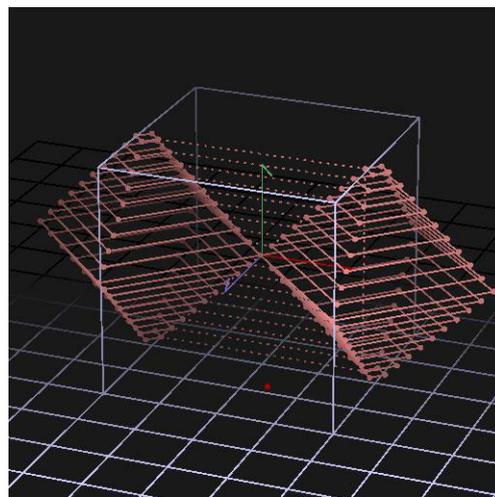
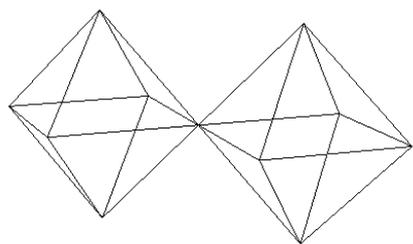
6.3.3 モデル作成実験

CG のポリゴンモデルに対して本アルゴリズムを適用した結果を図 6.13 示す．断面輪郭以外の部分は点線で表示している．多面体や手のように複雑に曲がっている曲面物体に対しても断面輪郭点列で作成することができた．また，顔の顔面部分だけのようなポリゴンモデルに対しても，本手法が有効であることが分かる．

6.3.4 描画実験と考察

6.3.3 で記述した手法で作成したコンテンツを描画した結果の画像を図 6.14～図 6.17 に示す．シャッタースピードはそれぞれ 0.33 s である．ただし，このディスプレイは現在開発中のデスクトップ型で，レーザプラズマ式 3D ディスプレイと同様の技術を使用して 3 次元空間中に光の点を生成している．光点は 50 kHz で生成され，大きさは約 5cm × 5cm × 5cm である．また，このシステムでは，光点の ON/OFF ができるため，断面輪郭以外の部分は OFF に設定し，光点を生成しないようにした．

描画結果としては，まず，図 6.14 に示すようになめらかな曲面を描画することができた．断面の間隔を調整することで断面のラインが薄くなって見えることが分かった．また，図 6.15，図 6.16 では，指が分岐したポリゴンモデルの場合でも，パーツが分割されて描画できており，指の表面が表現されている．図 6.17 では，顔の表面を描画しているが，他の物体より断面のラインが濃く出ていることが分かる．



(1) Polygon model

(2) Section contours model

図 6.13: ポリゴンモデルからの点列データ生成実験の例

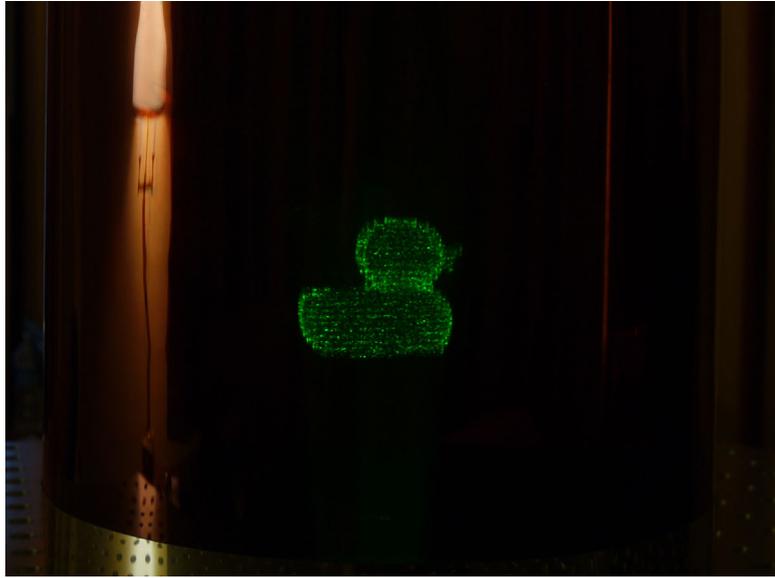


図 6.14: 描画実験 1(duck)



図 6.15: 描画実験 2(hand 1)

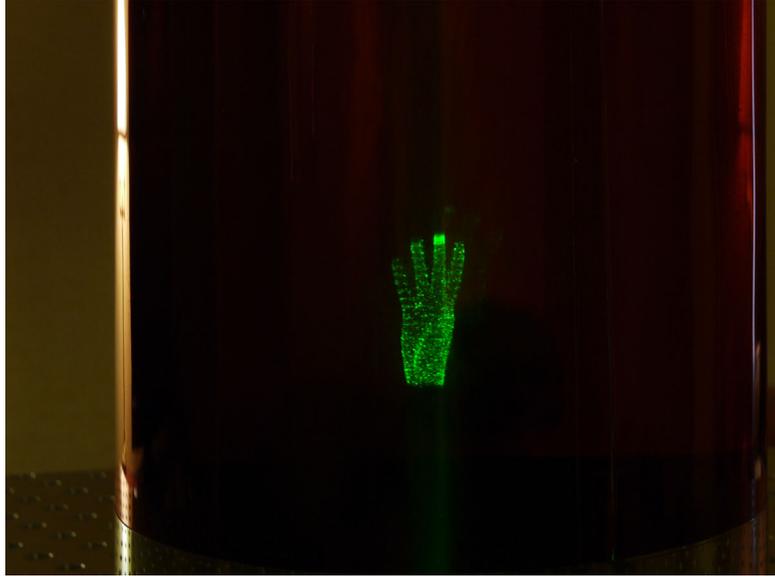


図 6.16: 描画実験 3(hand 2)

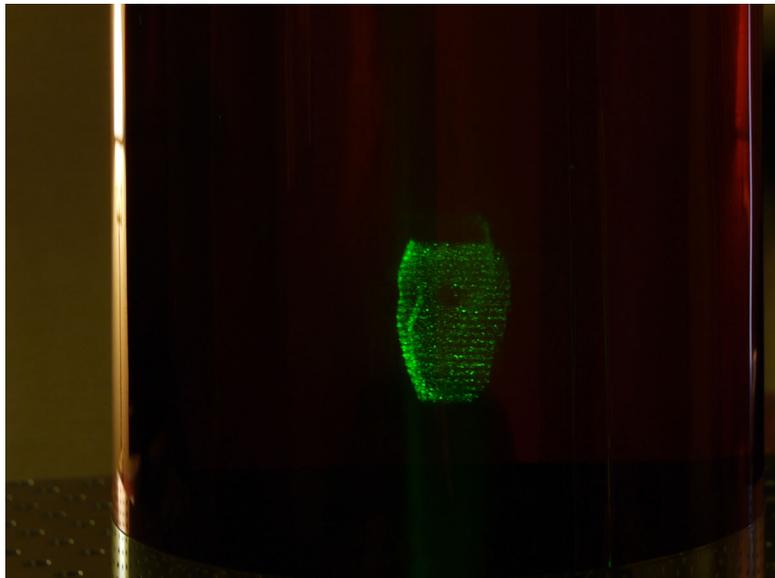


図 6.17: 描画実験 4(face)

第 7 章

結論

7.1 本研究の成果

空間中に発光体の点列を用いて実体を描画する新しい3Dディスプレイデバイスに対して、3Dディスプレイとしての描画制御に関する基本的な機能を作り上げるとともに、本ディスプレイにおけるコンテンツ表現の可能性を見出すことができた。以下に本研究の成果をまとめる。

3Dディスプレイの描画制御のためのキャリブレーション手法の提案

レーザプラズマ3Dディスプレイにて描画する場合、描画空間の座標系の位置から3Dスキャナへの入力へ変換しなければならない。3Dスキャナを構成する光学系のパラメタの理論値では解決できない描画のゆがみを補正するため、キャリブレーションの手法を提案した。本ディスプレイの光学系の性質から、描画領域全体の計測データを用いることなく、2回の画像撮影でキャリブレーションできることを示した。

人間の視覚による物体認知と情報量に関する考察

人間にとって認知しやすい多面体の描画手法を提案するために、視覚を用いた多面体認知における心理的特性の考察を行った。ここでは、人間の視覚による多面体認知の心理的特性の関係を明らかにするための手法を提案した。本手法は、多面体像の面に基づく情報量として定義された物体像エントロピーを心理的に評価するために、多面体像に対する認知のしやすさを、一対比較法とThurstoneの比較判断法を用いて心理尺度構成するものである。そして、本手法に基づく心理実験から物体像エントロピーと認知しやすさには高い相関があり、面の情報が重要であるという結果が得られた。

エッジで表現できる物体の描画手法の提案

本ディスプレイシステムにおいて、プラズマ発光体の点列を用いてエッジで表現できる物体の表現手法について検証した。本研究では、エッジで表現できるプリミティブな物体として、多角形と多面体について、本システムに適した物体の表現手法を提案した。多角形については、頂点付近におけるスキャナの加速度を滑らかにして、スキャナの可動部の負荷を軽減しながら頂点を強調する表現手法を提案した。多面体では、スキャナの負担を

考慮した多面体の描画手法と多面体認知の特性を考慮し面を一つずつ描画する表現手法を提案した。これらの手法を用いて描画実験を行い、主観評価実験結果により提案した表現手法の有効性を確認した。また、多面体に関しては、本ディスプレイシステムのシミュレーション画像に対して物体像エントロピーの算出を試み、評価を行ったところ、提案手法では視方向や描画の時間経過に対して安定したエントロピーが得られることがわかった。

文字の描画では本ディスプレイで描画するのに適したプラズマ発光体の密度や文字の提示時間について、実験から検証した。さらに、文字列の描画では、複数の文字を繰り返し描画して文字列描画を進めていく手法を提案し、その有効性を実験から示した。これにより、これまで描画しても認識できなかった5~6文字以上の文字列の認識ができるようになった。

曲面物体を表現する手法の提案

エッジで表現できない物体の表現手法について検討した。エッジで表現できない物体として、球体を取り上げ、らせんを用いて表現する手法を提案した。さらに応用として、曲面物体の描画手法の提案、ポリゴンモデルからの点列生成手法の提案を行った。曲面物体の描画手法としては、球体の描画手法を発展させて実現させた。特筆すべき成果としては、これまで本ディスプレイで描画することができなかった3次元物体の表面を描画できるようになったことが挙げられる。

さらに、一般的なCGのコンテンツデータを利用できるように、ポリゴンモデルから本ディスプレイ用の点列データを生成する手法を提案した。本手法の検証には小型ではあるが、高速・高精細描画できるデスクトップ型の空間描画装置の試作機で描画実験を行った。結果として、本ディスプレイシステムで採用しているVector スキャンを用いて3次元物体を描画できるデータが生成できることが示された。

7.2 今後の研究課題

今後のコンテンツ描画からみた研究課題としては、ハードウェアの改良に対する対応、コンテンツ表現に関する問題、そして、本ディスプレイシステムを使用したアプリケーションに関する問題がある。以下に詳細を述べる。

ハードウェア関連の対応

コンテンツ描画部分はハードウェアと密接に関係している部分があるため、ハードウェアの改良によって見直す部分もある。例えば、パルスレーザの繰り返し周波数が上がれば描画されるプラズマ発光体の位置や密度のバランスが変化してしまう。また、ハードウェアのエンハンス予定があったとしても、実際に実現できるかどうか流動的なことがあり、コンテンツ描画部分としては、さまざまな状況に対応できる柔軟性が必要となる。そのため、描画バランスの制御や、ハードウェアの変化に対応できるパラメタを導入し、コンテンツデータを調整できるような点列データ生成手法を確立しなければならない。また、レーザ自体のコントロールはしないが、高出力レーザを扱っていることもあり、3D スキャナの安全性を重視した制御を目標としなければならない。

さらに、現在のシステムでは事前に作成したコンテンツデータをスキャナ制御プログラムに送り、データを送り終えてから描画を開始していた。現在、レーザプラズマ式 3D ディスプレイと類似した技術を用いたデスクトップ型空間描画装置の開発も進められている。今後、3D スキャナが高速化されたり、コンテンツの描画時間が長くなったりすることによって、コンテンツデータは大容量になる。そのため、3D スキャナへの逐次データ伝送、リアルタイム制御、スキャナ・データ制御部分に対してイベント駆動型のインタフェースの変更などについて改良していかなければならない。これについては、D/A コンバータ部分を高性能なものへの変更で、対応する予定である。

コンテンツ作成に関する問題

コンテンツ作成は最も重要な問題である。本研究でコンテンツ表現の可能性を示したが、これがすべてではない。さまざまな形状に対して表現を試みて、人間の認知との関係を系統立てて表現手法を確立しなければならない。本研究ではアニメーションを作成するツールを開発したが(付録 A 参照)、その作成した描画については検討・考察を行っていない。開発したツールで作成したアニメーションには違和感があるものもあれば、ないものもある。原因としては、Vector スキャンで描画していることがあげられる。そのためフレームの開始と終了が曖昧になり、想定したフレーム区切りがフレームの区切りと分からず、描画したオブジェクトがずれたように感じてしまうことがあった。人間がみて違和感のないアニメーションを生成するために、人間の認知特性を考慮し、実験を行って手法の確立を目指したい。

また、今回、情報量として物体像エントロピーを用いて描画した多面体を評価したが、このエントロピーはすべて同時に観測することを前提としている。本ディスプレイでは時系列データを扱っているため、より適応するエントロピーについても考える必要がある。さらに、点列データの生成に関してエントロピーの評価をもとに点密度などを決定することが有効と考える。

コンテンツの内容としては、作成者の感性や表現能力などが重要であるため、魅力的なコンテンツを作成することは難しい。本ディスプレイは新しい表現形式であるため、適切なコンテンツを作成することは難しくなっている。そこで本研究プロジェクトでは芸術系アーティストと連携して新しいコンテンツの可能性を探る予定である。ただし、アーティストの発想と現実の装置の性能にギャップがあり、あまり現実的ではないという問題もある。

空間表示 3D ディスプレイシステムを使用したアプリケーション

3D ディスプレイを効果的に利用できるアプリケーションの開発の要求も高い。例えば、要求に応じて描画物体を変更できるようなシステムや、外界からの入力を表示することができるリアルタイム性のある描画システムがある。これらは一般的なディスプレイシステムと同様のシステムになるが、入力データが既存のデータではない場合は、点列データにする必要があるため、現状では難しい。前述したようにイベント駆動型のインタフェースシステムや、動的に点列データを生成するシステムにしていく必要がある。とくに、動的に点列データを生成するシステムに関しては、今後のシステム開発課題の重要な点になる。

以上、今後の研究課題について述べた。空間表示 3D ディスプレイの実用化に向けては、まだ多くの課題が残されているが、ハードウェアの開発者やコンテンツ作成するアーティストらと連携して、コンテンツ描画に関する研究開発を進めていくことが望まれる。そして、近い将来、空間表示 3D ディスプレイが新しい 3D ディスプレイとして実用化され、さまざまな場面で魅力的なコンテンツを描画できるようになることを期待する。本研究がその一端となれば幸いである。

謝 辞

本研究は著者が慶應義塾大学大学院博士課程後期在学中に，同大学理工学部斎藤英雄教授のもとで行なったものを主にまとめたものです．本研究を行う機会を与えてくださった斎藤英雄教授に心から感謝いたします．本研究に関するプロジェクトに関して，よく意見や不平不満を言い，手が掛る学生だった著者を，斎藤教授は根気よく指導して下さるとともに，研究開発だけにとどまらず，様々なことを行う機会も与えてくださいました．今後の人生においてとても有意義で貴重な経験をさせていただきましたことをここに深く感謝いたします．

本論文をまとめるにあたり，多くのご助言や有意義なディスカッションをしてくださった慶應義塾大学理工学部岡田謙一教授，萩原将文教授，藤代一成教授に深く感謝いたします．

本研究を行う上で欠かせない3D ディスプレイの発明，ハードウェアの開発を続けてくださった(株)バートの木村秀尉氏に心から感謝いたします．研究以外の視点からのアドバイスは非常に参考になりました．また，実験に協力してくださったDr. Songkran Jarusirisawad はじめ，ハードウェアの開発に尽力してくださった独立行政法人産業技術総合研究所の方々，未来館の皆様感謝いたします．

3D ディスプレイプロジェクトに関する仕事に協力してくださった研究室の青木悟史氏，鈴木誠司氏に深く感謝いたします．研究/開発以外の仕事に関しても非常に助けられました．両氏の協力なくしてはこのプロジェクトは続けられませんでした．

斎藤英雄研究室に縁を繋げてくださった慶應義塾大学佐藤幸男教授ならびに，愛知工科大学小沢慎治教授に心から感謝いたします．

本研究は，独立行政法人科学技術振興機構(JST) 戦略的創造推進事業(CREST)「デジタルメディア作品の製作を支援する基盤技術領域」の補助を受けました．

そして，長きにわたり精神的に支えてくれた市川知弥氏に深く感謝します．いつも私の判断を信じて見守ってくれた両親，いつも私の心を癒してくれた愛猫達(すいすい，モモ，朔)にも感謝します．

最後に，何回も挫折しかけたとき，最終的に思いとどまることとなる言葉を遺してくださった故服部数幸氏に感謝するとともに，今ようやくここにご冥福をお祈りいたします．

平成 22 年 5 月 1 日

石川 尋代

参考文献及び関連 URL

- [1] N. A. Dodgson, "Autostereoscopic 3D Displays," *Computer*, vol. 38, no. 8, pp.31-36, Aug. 2005.
- [2] J. Y. Son, B. Javidi, and K. D. Kwack, "Methods for displaying three-dimensional images," *Proc. IEEE*, vol. 94, no. 3, pp.502-522, 2006.
- [3] 本田捷夫, 奥井誠人, 高木康博, 河北真宏, 吉川浩, 陶山史朗, "5. 立体映像技術," *映像情報メディア学会誌*, vol. 62 no. 8, pp.1262-1265, 2008.
- [4] H. E. Ives, "The chromolinoscope revived," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 20, no. 6, pp.343-353, 1930.
- [5] H. Yamamoto, S. Muguruma, T. Sato, K. Ono, Y. Hayasaki, Y. Shimizu and N. Nishida, "Optimum Parameters and Viewing Areas of Stereoscopic Full-Color LED Display Using Parallax Barrier," *IEICE Trans. on Electronics*, Vol.E83-C No.10 pp.1632-1639, 2000.
- [6] 磯野春雄, 安田稔, 竹森大祐, 金山秀行, 山田 千彦, 千葉 和夫, "8 眼式メガネなし 3次元テレビジョン," *テレビジョン学会誌*, vol.48, no.10, pp.1267-1275, 1994.
- [7] M. G. Lippmann, "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief," *J. de Phys*, vol. 7, pp. 821-825, 1908.
- [8] D. Gabor, "A New Microscopic Principle," *Nature*, vol.161, pp. 777-778, 1948.
- [9] G. E. Favalora, "Volumetric 3D displays and application infrastructure," *Computer*, vol. 38, no.8, pp.37-44, 2005.
- [10] S. Suyama, M. Date and H. Takada, "Three-Dimensional Display System with Dual-Frequency Liquid-Crystal Varifocal Lens," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.39, pp.480-484, 2000.
- [11] O. S. Cossairt, J. Napoli, S. L. Hill, R. K. Dorval, and G. E. Favalora, "Occlusion-

- capable multiview volumetric three dimensional display,” *Applied Optics*, vol.46, no.8, pp. 1244-1250, 2007.
- [12] 山本欧, “蛍光表示管を用いたポリウムディスプレイと表示データ生成ツール,” *芸術科学会論文誌*, vol.8, 1, pp. 15-24, 2009.
- [13] A. Jones, I. McDowall, H. Yamada, M. Bolas, P. Debevec, “Rendering for an interactive 360 ° light field display,” *Proc. SIGGRAPH 2007*, vol. 40, San Diego, California, 2007.
- [14] H. Kimura, T. Uchiyama and H. Yoshikawa, “Laser produced 3D display in the air,” *Proc. Emerging technologies SIGGRAPH 2006*, Boston, Massachusetts, 2006.
- [15] C. De Michelis, “Laser Induced Gas Breakdown: A Bibliographical Review,” *IEEE J. Quant. Electron*, vol. QE5, pp.188-202, 1969.
- [16] J. F. Ready, “Effects of High-power Laser Radiation,” Academic Press, New York, 1971.
- [17] 島田悟, 木村龍実, 欠端雅之, 佐々木史雄, “空中に浮かび上がる 3次元 (3D) 映像,” *産総研 TODAY*, vol. 6, no. 4, pp.16-19, 2006..
- [18] 金邊忠, “高機能固体レーザーとその応用,” *レーザー研究*, vol.34, no.9, pp.610, 2006.
- [19] 島田悟, 欠端雅之, 佐々木史雄, 木村龍実, 屋代英彦, 森雅彦, 鳥塚健二, “空間立体描画技術の高性能化実験に成功,” *産総研 TODAY*, vol. 7, no.11, pp.18, 2007.
- [20] 内山太郎, “三次元空中ディスプレイの最新技術,” *電気学会誌*, vol.127, no. 3, pp.161-164, 2007.
- [21] H. Saito, H. Kimura, S. Shimada, T. Naemura, J. Kayahara, S. Jarusirisawad, V. Nozick, H. Ishikawa, T. Murakami, J. Aoki, A. Asano, T. Kimura, M. Kakehata, F. Sasaki, H. Yashiro, M. Mori, K. Torizuka and K. Ino, “Laser-plasma scanning 3D display for putting digital contents in free space,” *Proc. International Symposium on Electronic Imaging, Stereoscopic Displays and Applications*, pp.XIX, 6803-07, 2008.
- [22] D. Miyazaki, K. Shiba, K. Sotsuka, and K Matsushita, “Volumetric display systems based on three-dimensional scanning of inclined optical image,” *Optics Express*, vol. 14, no. 26, pp.12760-12769, 2006.
- [23] D. Miyazaki, K. Soutsuka, T. Honda, and T. Mukai, “Volumetric display by inclined-image scanning and three-dimensional image transmission based on optical shape measurement” *Proc. SPIE*, vol.6490, pp.64901D, 2007.

- [24] 藤本 忠博, 今野 晃市, 千葉 則茂, “ポイントグラフィックス概説,” 芸術科学会論文誌, vol. 3, no.1 pp.8-21, 2004.
- [25] L. Kobbelt and M. Botsch, “A survey of point-based techniques in computer graphics,” *Computers & Graphics* vol. 28, pp.801-814, 2004.
- [26] E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston, and R. Macfarlane, “A three-color, solid-state, three-dimensional display,” *Science*, vol. 273, no. 5279, pp.1185-1189, 1996.
- [27] G. Spering, “The information available in brief visual presentation” , *Psychological Monographs: General and Applied*, vol. 74, no. 498, pp.1-29, 1960
- [28] 渡邊淳司, 坂本憲久, 則武厚, 前田太郎, 館日章, “サッカーボール残像の視覚的持続時間の研究” *映像情報メディア学会誌*, vol. 58, no.12, pp.1-6, 2004.
- [29] M. Coltheart, “Iconic memory and visible persistence,” *Perception and Psychophysics*,” vol. 27, no. 3, pp.183-228, 1980.
- [30] Pangolin Laser System, <http://www.pangolin.com/>.
- [31] S. S. Stevens, “Psychophysics: Introduction to Its Perceptual, Neural, and Social Prospects,” Transaction Books, 1986.
- [32] S. Chen and H. Freeman, “On the characteristic views of quadricsurfaced solids,” *Proc. IEEE Workshop on Direction in Automated CAD-Based Vision*, pp.34-43, 1991.
- [33] D. Weinshall and M. Werman, “On view likelihood and stability,” *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, vol. 19, no. 2, pp.97-108, 1997.
- [34] I. Roth and V. Brauce, “Perception and representation,” Open University Press, 1990.
- [35] I. ロス, J.P. フリスビー, 認知科学研究会 (訳), “知覚と表象,” 海文堂, 1989.
- [36] J.J. Koenderink and A. J. van Doorn, “The internal representation of solid shape with respect to vision,” *Biol. Cybern.*, vol. 32, no. 4, pp.211-216, 1979.
- [37] 佐藤幸男, 加藤哲孝, “多面体像の情報量と視方向評価,” *電子通信情報学会論文誌*, vol. J75-D-II, no. 8, pp.1346-1352, 1992.
- [38] 中川作一, “目と絵の社会心理学,” 法政大学出版局, 1984.
- [39] P.-P. Vázquez, M. Feixas, M. Sbert, and W. Heidrich, “Viewpoint selection using view entropy,” In *Proc. of Vision Modeling and Visualization Conference (VMV01)*, pp. 273-280, 2001.
- [40] S. Takahashi, I. Fujishiro, Y. Takeshima and T. Nishita, “A Feature-Driven Approach to Locating Optimal Viewpoints for Volume Visualization ,” *16th IEEE*

- Visualization 2005, pp.495-502, 2005.
- [41] 松田隆夫, “視知覚,” 培風館, 1995.
 - [42] 渋谷真人, “レンズ光学入門,” アドコム・メディア, 2009.
 - [43] デジタル画像処理編集委員会, “デジタル画像処理,” CG-ARTS 協会, 2004.
 - [44] S. Hecht, S. Schlaer and M.H. Pirenne, “Energy, Quanta and vision,” Journal of General Physiology, Vol 25, pp.819-840, 1942.
 - [45] J.E. ホッホバーグ, 上村保子 (訳), “知覚,” 岩波書店, 1981.
 - [46] 八木昭宏, “知覚と認知 現代心理学シリーズ 6,” 培風館, 1997.
 - [47] V・S・ラマチャンドラン, 山下 篤子 (訳), “脳のなかの幽霊、ふたたび 見えてきた心のしくみ,” 角川書店, 2005.
 - [48] 田中良久, “心理学的測定法第 2 版,” 東京大学出版会, 1977.
 - [49] 利島保, 生和秀敏, “心理学のための実験マニュアル,” 北大路書房, 1993.
 - [50] J. P. ギルホード, “精神鑑定法,” 培風館, 1954.
 - [51] 南風原朝和, 市川伸一, 下山晴彦, “心理学研究法入門,” 東京大学出版会, 2001.
 - [52] L. L. Thurstone, “A law of comparative judgment,” Psychol. Rev., vol. 34, pp.273-286, 1927.
 - [53] C. Loop, “Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles,” M.S. Mathematics thesis, University of Utah, 1987.
 - [54] 倉智佐一, 山上暁, “心理統計法,” 北大路書房, 1991.
 - [55] ShepherdG, “プログラミング Microsoft Visual C++ .NET Vol.2 活用編,” 日経 BP ソフトプレス, 2002.
 - [56] Google SketchUp. <http://sketchup.google.com/intl/ja/>.
 - [57] International Laser Display Association. <http://www.laserist.org/> .

付録

A コンテンツ生成アプリケーションの開発

A.1 Contents Arrangement Tool(CAT) の概要

既存の CG 作成アプリケーションでは、3 次元データを Vector スキャン用に一筆書きで作成するのは難しい。そして、本ディスプレイシステムで表現できるコンテンツは一般的な CG に比べて、解像度などに制限があるため、多くの機能を持った一般的な 3 次元 CG ソフトウェアや CAD 用アプリケーションではオーバースペックであり、一般のユーザには使用するのが困難である。そこで、本ディスプレイに特化したコンテンツ生成アプリケーションとして開発した CAT について紹介する。

類似システムとしては、レーザアートやレーザショウのレーザディスプレイシステムで使用される Pangolin 社の LD2000 などがあげられる [30]。従来のレーザディスプレイシステムは何らかのスクリーンに投影したり、放射線状にレーザを走査したりすることを想定している。LD2000 には簡単な CAD アプリケーションのような機能があり、それを使用すれば、幾何的形狀などは描画することができる。しかし、LD2000 はハードウェアと一緒に販売されているため、アプリケーションを作成するためには、専用ハードウェアが必要となってしまう。また、LD2000 で作成されるコンテンツには 3 次元物体をモデルにしたものもあるが、それを 2 次元平面に投影し、その結果を一筆書きにするため、最終的には 2 次元データとなり、本システムには用いることができない。

本アプリケーションでは、直観的で簡単な操作で 3 次元オブジェクトや、その 3 次元オブジェクトをアニメーションさせたコンテンツを作成することである。

仮想 3 次元空間中にプラズマ発光体を発生させる軌跡を入力し、3 次元ディスプレイ用のデータを作成する。CAT は複数のオブジェクトを同時に扱えるようにするため、マルチドキュメントインタフェース [55] で構築している。コンテンツ作成モードには以下の 2 つがある。

- ・単体モデル作成モード
- ・アニメーション設定モード

それぞれの画面を図 A.1 と図 A.2 に示す。単体モデル作成モードではモチーフとなるモデルの形状を作成する。アニメーション設定モードでは、単体モデル作成モードで作成したモデルをキーフレームに設定し、動作設定してアニメーションデータを作成することができる。

アプリケーションウィンドウ内のモデルがない部分をドラッグすることで、仮想カメラ

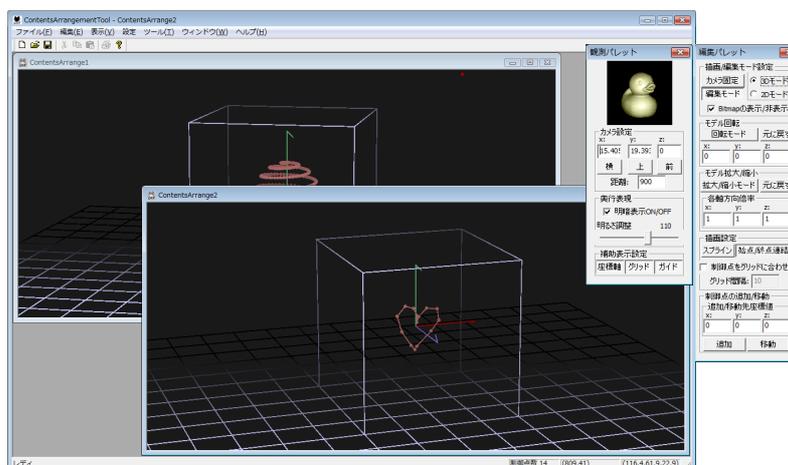


図 A.1: CAT:単体モデル作成モード画面

の視方向を変更することができる。図 A.3 にその様子を示す。仮想カメラの原点からの距離や視方向の回転角は観測パレットで表示される。現在の回転方向を直観的に知るために観測パレットには方向を示すオブジェクトが表示してある。観測パレット中の数値を直接変更しても視方向が変えられる。また、既定の位置 (正面, 横, 上からの View) はボタンから設定することができる。

A.2 単体モデル作成モード

単体モデル作成モードにおける View と扱うデータ, 機能と操作, 出力データについて記述する。

データと入力方法

入力に関しては 2 次元平面でいかに 3 次元を指定させるかが問題である。多くの CG や CAD アプリケーションでは Front, side, top, そして俯瞰図というように 4 つの面でオブジェクトを作成していくことが多い。しかし, CAD アプリケーションを使用したことがないユーザにとっては 3 つの画面から 3 次元空間を想像することは難しい。そのようなユーザにとっても簡単に操作できるように, 本コンテンツ作成ツールでは画面を切り替えることなく, Google Sketchup[56] のように俯瞰図だけで 3 次元の入力を可能にした。

まず, 単体モデル作成モードで扱うデータについて説明する。モデルは制御点と呼ぶ点列で構成される。制御点はマウス (タッチペン) のダブルクリックやドラッグ, 座標指定

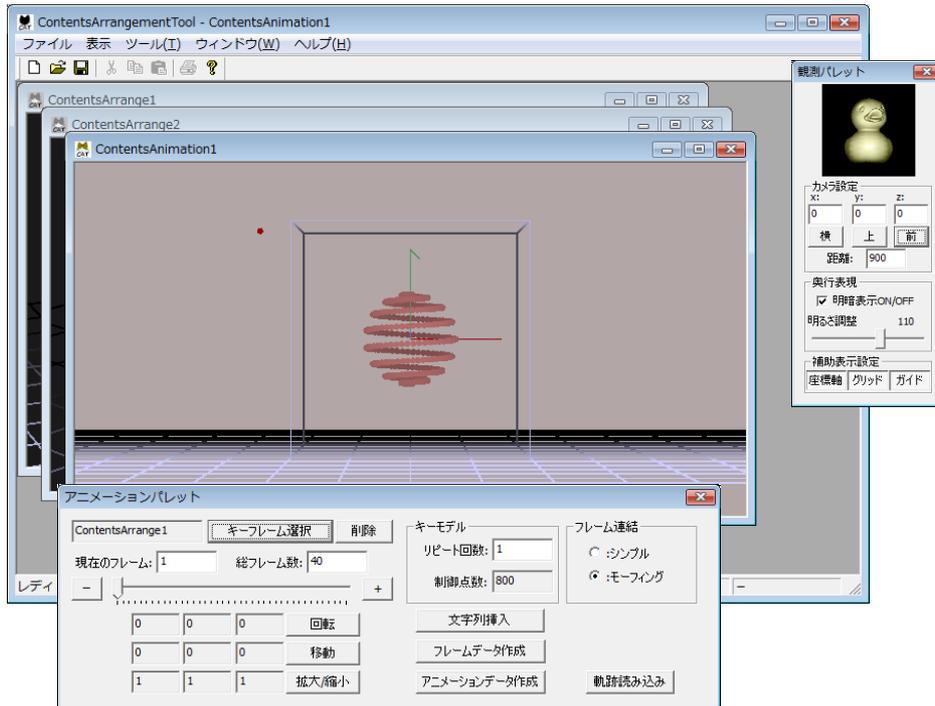


図 A.2: CAT:アニメーション設定モード画面

で入力することができる．図 A.3 に示すようにマウスのドラッグで仮想カメラの視点 (投影中心) を変えることができるが，原点が投影される位置は動かない．図 A.4 に 2 次元のコンピュータ画面上での仮想 3 次元空間位置の指定方法を示す．図中の Viewport は仮想空間を 2 次元に投影した結果を表示している．これはコンピュータ画面上のアプリケーション Window 上に表示され，マウスのポインタはこの 2 次元平面上を移動することになる．図 A.4 のように仮想空間中には座標系を設定し，原点は常に Viewport の中心に投影される．Viewport に平行で原点を通る平面を Input plane として仮想空間中に設定する．投影中心と Viewport 上のマウスを通る直線と Input plane の交点をマウスの 3 次元位置とする．視点を変化させることで，仮想空間中の任意の位置を Viewport 上で指定することができる．仮想空間中の Viewport のサイズを幅 w ，高さ h ，アプリケーション Window 上での Viewport のサイズを幅 w_{app} ， h_{app} ，アプリケーション Window 上でのマウスポインタの座標を (u, v) ，原点からの距離を L_{cam} ，Viewport からの距離を L_{vp} ，視方向の回転角を x, y とすると，仮想空間中の Viewport 上のマウス位置を (x_v, y_v, z_v) は式 (1) として表現できる．

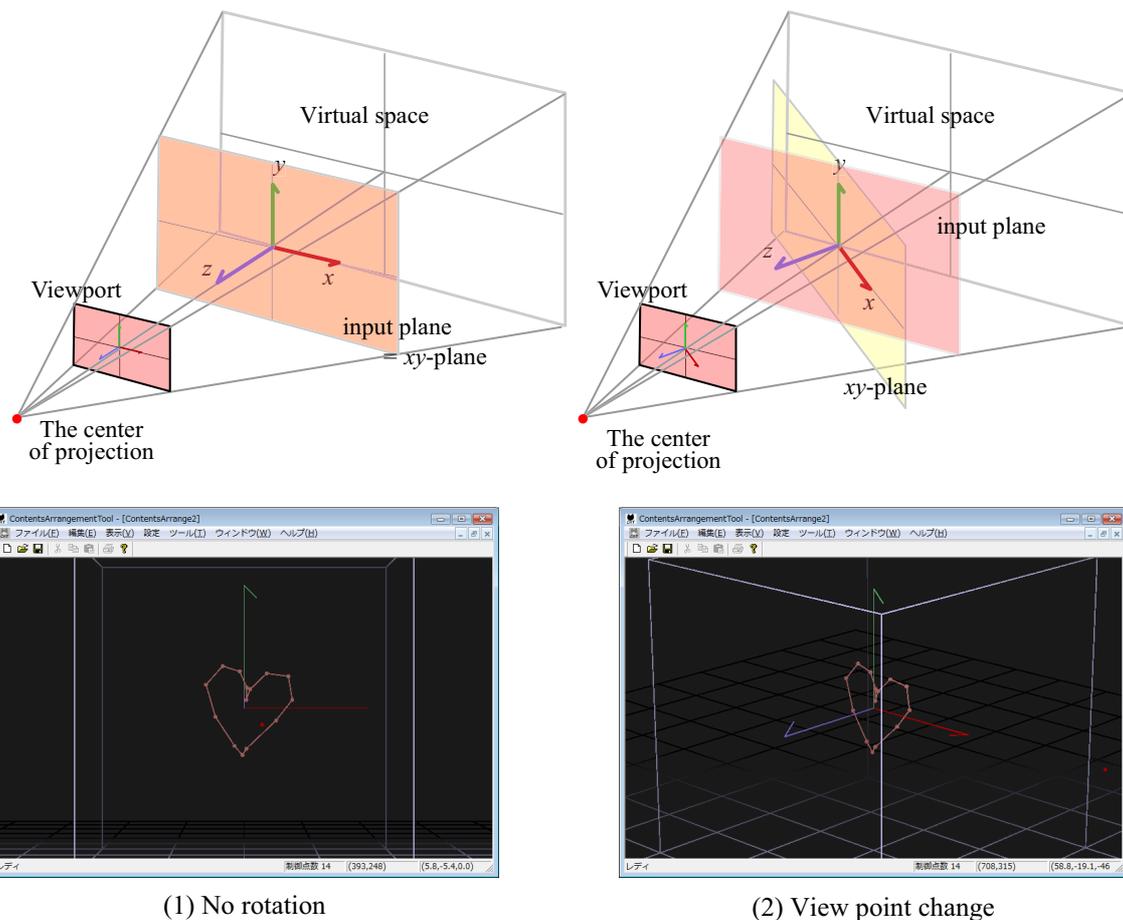


図 A.3: 仮想空間と Viewport , 視方向の変更

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{w}{w_{app}}u \\ \frac{h}{h_{app}}v \\ L_{cam} - L_{vp} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ \sin \theta_x \sin \theta_y & \cos \theta_x & \sin \theta_x \cos \theta_y \\ \cos \theta_x \sin \theta_y & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{w}{w_{app}}u \\ \frac{h}{h_{app}}v \\ L_{cam} - L_{vp} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \theta_y \frac{w}{w_{app}}u - \sin \theta_y (L_{cam} - L_{vp}) \\ \sin \theta_x \sin \theta_y \frac{w}{w_{app}} + \cos \theta_x \frac{h}{h_{app}}v + \sin \theta_x \cos \theta_y (L_{cam} - L_{vp}) \\ \cos \theta_x \sin \theta_y \frac{w}{w_{app}}u - \sin \theta_x \frac{h}{h_{app}}v + \cos \theta_x \cos \theta_y (L_{cam} - L_{vp}) \end{pmatrix} \tag{1}
 \end{aligned}$$

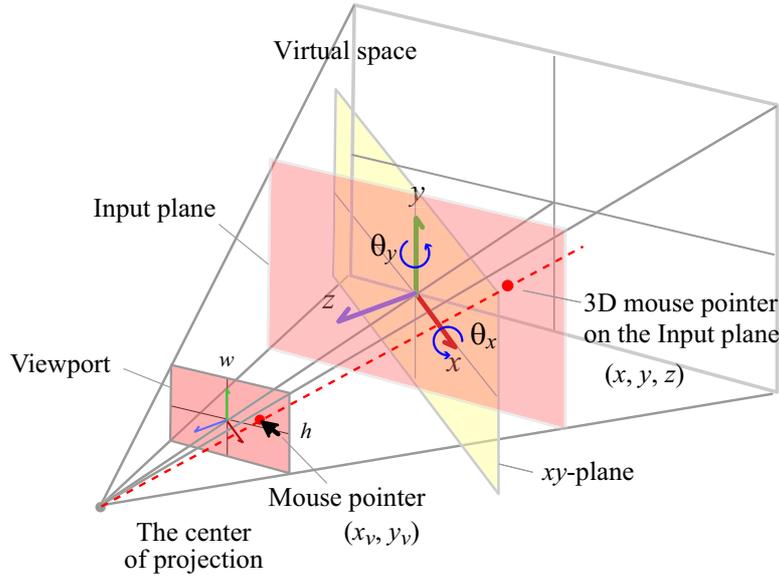


図 A.4: Viewport 座標から仮想空間への座標変換

投影中心 (x_p, y_p, z_p) は式 (2) として表現できる .

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L_{cam} \end{pmatrix} \quad (2) \\ &= \begin{pmatrix} -L_{cam} \sin \theta_y \\ L_{cam} \sin \theta_x \cos \theta_y \\ L_{cam} \cos \theta_x \cos \theta_y \end{pmatrix} \end{aligned}$$

また , (x_v, y_v, z_v) と (x_p, y_p, z_p) を通る直線と Input plane が交わる位置 (x, y, z) は式 (3) として得られる .

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{L_{cam}}{L_{vp}} x_v \\ \frac{L_{cam}}{L_{vp}} y_v \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3) \\ &= \begin{pmatrix} \frac{L_{cam}}{L_{vp}} x_v \cos \theta_y \\ \frac{L_{cam}}{L_{vp}} x_v \sin \theta_x \cos \theta_y + \frac{L_{cam}}{L_{vp}} y_v \cos \theta_x \\ \frac{L_{cam}}{L_{vp}} x_v \cos \theta_x \cos \theta_y - \frac{L_{cam}}{L_{vp}} y_v \sin \theta_x \end{pmatrix} \end{aligned}$$

このようにしてアプリケーション Window 上でのマウスポインタの座標 (u, v) を仮想空間中の (x, y, z) に変換できる .

図 A.5 に制御点を用いて描画した例を表示する。制御点は以下の情報を持つ。

- ・制御点番号（番号は点列の順番を示す。）
- ・3次元位置
- ・ストップカウント（同じ位置を複数回スキャンする。結果として、同じ位置にプラズマ発光体が複数回発生することになる。）
- ・レーザ ON/OFF(該当の制御点から次の制御点までの間、レーザの ON/OFF を設定する。レーザ OFF の時、プラズマ発光体は生成されない。この機能はレーザ ON/OFF 対応システムでのみ機能する。)

すべての制御点について図 A.5(2) に示すダイアログを介して情報を設定することができる。次元位置はパレット (図 A.5(3) 下段) で設定、修正することができる。

単体モデル全体では以下の情報を持つ。

- ・始点終点連結 ON/OFF (閉じた輪郭かどうかを設定する。)
- ・スプライン ON/OFF(制御点間の補間をスプラインにする。)

図 A.5(1) にそれぞれの場合のモデルを示す。番号は制御点番号である。制御点 9 の Laser を OFF 設定にすると、図 A.5(1) 右上のように、その部分は破線で示される。また、モデルの始点終点連結を OFF にすると図 A.5(1) 左下のように、開いた輪郭になる。スプライン ON 設定にすると図 A.5(1) 右下のように制御点間を 3 次の自然スプラインで補間した輪郭が描かれる。波線はスプライン OFF の場合の軌跡を示す。

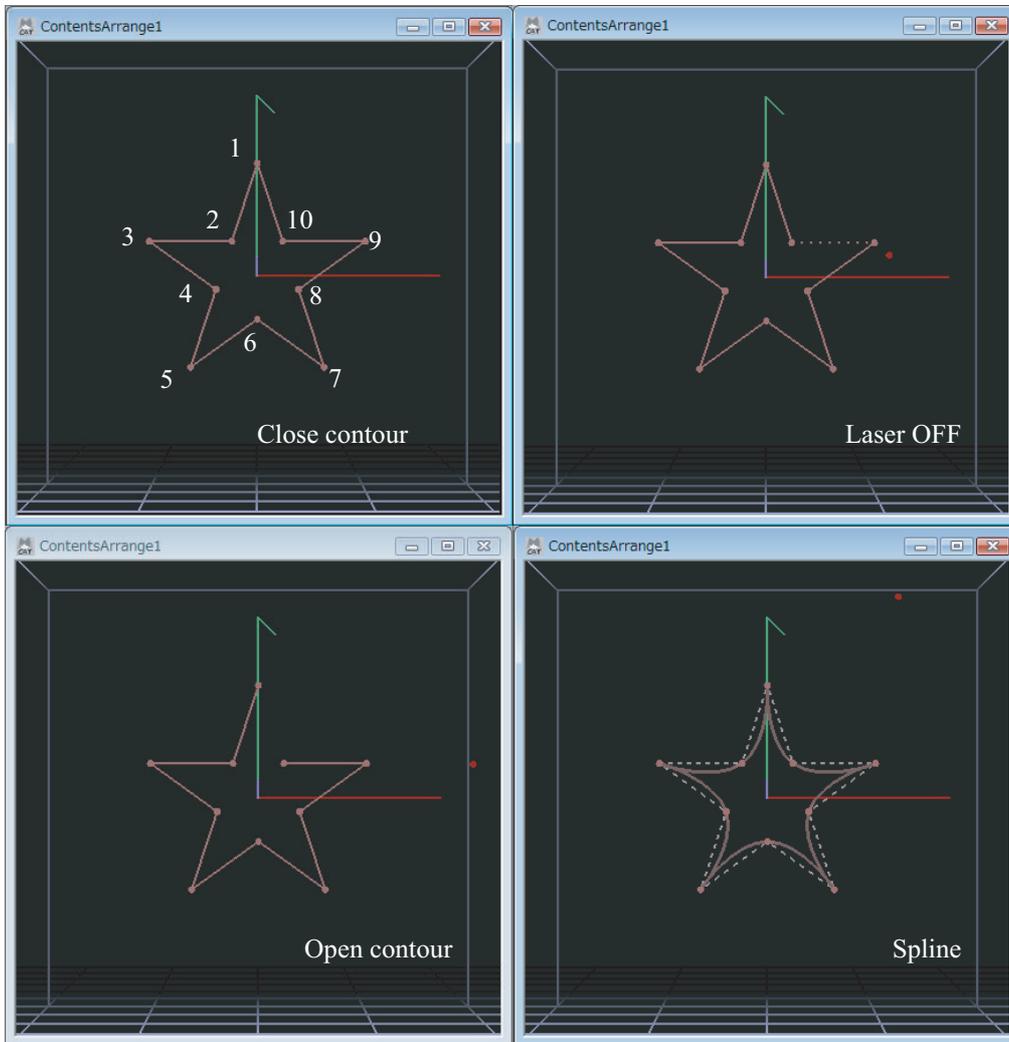
機能と操作

単体モデル作成モードでは図 A.6 に示す編集パレットが表示される。単体モデルの作成/編集のため以下の機能を持つ。

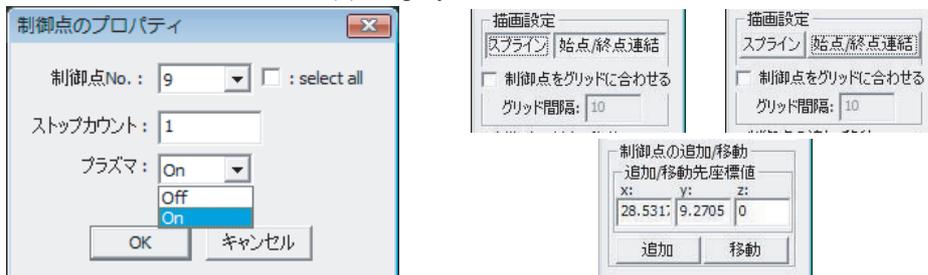
- ・制御点の入力 / 位置編集。
- ・モデルの回転・平行移動・拡大縮小
- ・ドラッグ入力 (軌跡モード)

制御点を選択し、マウスでドラッグすることで、位置の変更ができる。ドラッグするときには Input plane 上をドラッグするため、位置の編集は Input plane 上に限定される。また、複数点を選択してドラッグすることで、複数の制御点の位置を変更することができる。また、制御点入力は軌跡モードにすると、ドラッグしたラインがある一定の間隔でサンプリングされて制御点列として入力することができる。拡張機能で任意の Bitmap を背景に表示することができ、Bitmap に表示された画像をなぞることもできる。

回転モード選択のとき、モデル以外の画面上でドラッグすることで原点中心に回転させ



(1) Displayed model



(2) Stop count, Laser ON/OFF (3) Spline, Open/Close, Position

図 A.5: コントロールポイントの設定

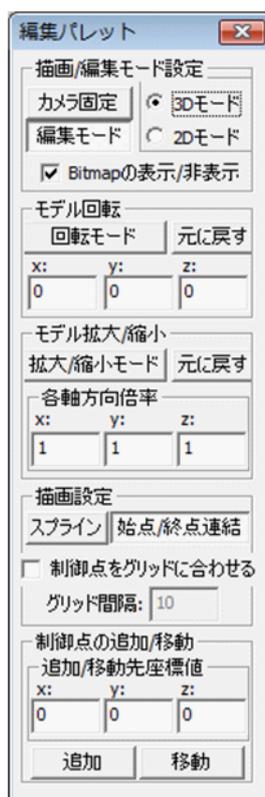


図 A.6: 編集パレット

ることができる。制御点を選択していなければモデル全体が回転し、制御点を選択していれば、選択されている制御点だけが原点中心に回転する。

平行移動は制御点を選択して、マウドラッグで行う。

拡大縮小モード選択のときは画面上にモデルに接する直方体が表示され、その角にあるマークをドラッグすることで、拡大縮小ができる。制御点を選択した場合には選択された制御点に関する部分のみが拡大縮小される。

回転モードと拡大縮小モードは数値入力でも変形することができる。

出力データ

単体モデル作成モードで作成したデータは、CAT 独自のフォーマットとして、テキスト形式でモデルの情報ファイル (caf ファイル) を保存することができる。caf ファイルには制御点の数や、スプラインフラグ、始点終点連結フラグ、そして、レーザー ON/OFF フラグ、ストップカウントなどの各制御点の情報を記述する。より詳しいことは付録 B 参

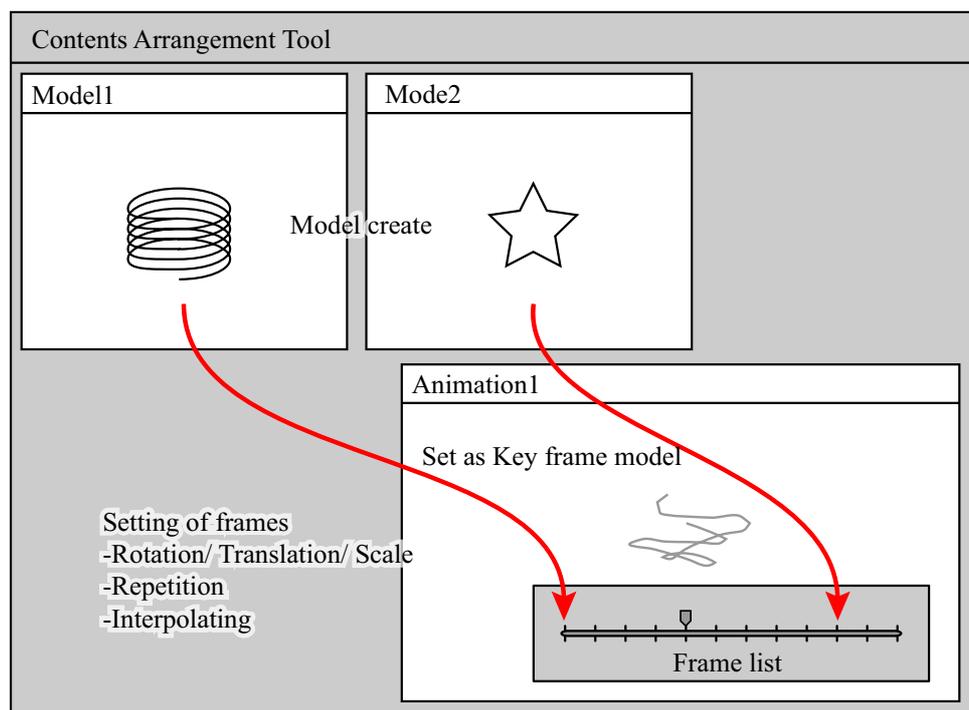


図 A.7: アニメーション設定モードの構造

照のこと。

A.3 アニメーション設定モード

アニメーション設定では単体モデル作成モードで作成したモチーフを使ってアニメーションを作成できる。図 A.7 に示すように作成したモチーフをキーフレームとしてフレームリストに登録し，登録したモチーフに対して，いろいろな動作を設定することでアニメーションを作成する。以下にアニメーション設定モードにおけるデータ，キーフレーム登録やフレーム設定機能と操作，出力データについて記述する。

データと入力方法

アニメーション設定モードでは単体モデル設定モードで作成したモデルを用いるため，マウス等を使った 3 次元位置の入力や変更は行わない。

フレーム処理

● キーフレーム登録

キーフレームにモデルを登録するときは、現在フレームに登録したいフレームを番号指定、または、スライダーで指定してから、キーフレーム選択ボタンを押下し、現在アプリケーションで開かれている単体モデルの一覧から選択する。CAT ではその他のキーフレーム用モデルとして円やらせんなどの組み込みモデルを用意している。登録したキーフレームは削除ボタンにより削除できる。

キーフレームには文字を登録することもできる。文字データは組み込みフォントの他、独自に作成したフォントを設定することができる。文字をキーフレームに登録する場合はアニメーションパレットの文字列挿入ボタンを押下し、ダイアログに文字列を設定することで、1 フレームに 1 文字ずつ登録される。

● フレームの各種パラメタ設定

各フレームのモデルに対して以下の設定を行うことができる。この場合のフレームはキーフレームでなくてもよい。

- ・回転：モデルの回転
- ・移動：モデルの移動
- ・拡大縮小：モデルの拡大縮小
- ・リピート回数：該当フレームの繰り返し表示
- ・フレーム連結設定 (シンプル / モーフィング)：フレームの補間方法設定

アニメーションパレットから回転 / 移動 / 拡大縮小を選んだ場合、図 A.8 の右上に示すダイアログが表示され、スライダーを動かすことで回転 / 移動 / 拡大縮小ができる。図 A.9 に回転 / 移動 / 拡大縮小の例を示す。

● フレームの補間

モデルの補間：キーフレームを登録していないフレームは前後のキーフレームから補間してフレームを作成する。例を図 A.10 に示す。この場合、1 フレームと 11 フレームにそれぞれ、円と星型をキーフレームとして登録している。1 フレームでフレーム連結をモーフィングに設定した場合は図に示すようにモーフィングで補間したフレームを作成する。フレーム連結をシンプルに設定した場合は 2 から 10 フレームまで 1 フレームと同じモデルで補間データを作成する。また、キーフレームを一つしか設定しない場合や、最終フレームをキーフレームとして登録しなかった場合は、最後に登録されたキーフレームと同じモデルで補間フレームを作成する。

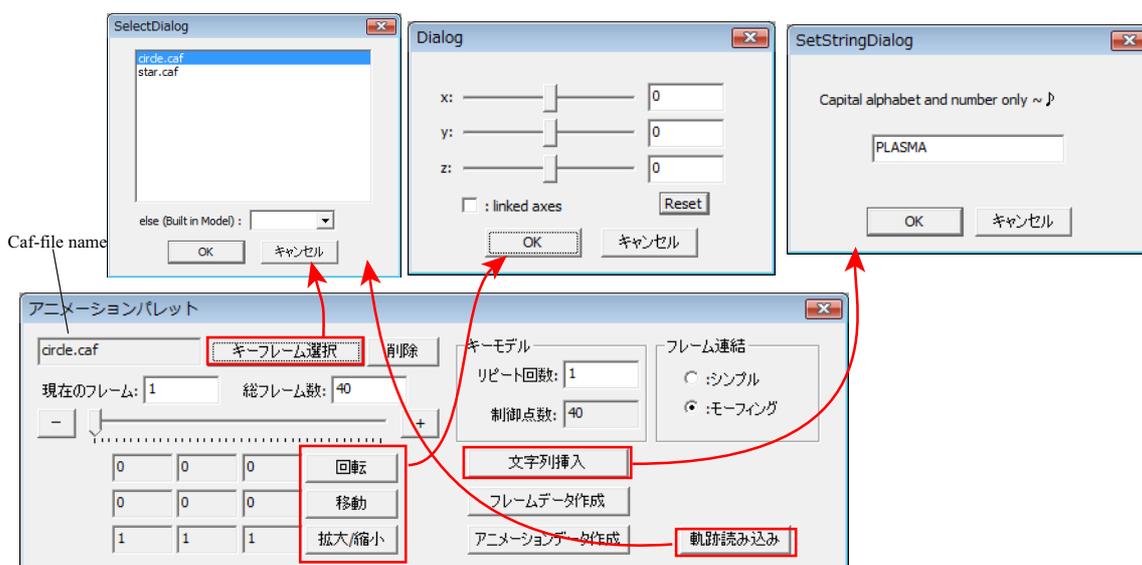


図 A.8: アニメーションパレットとフレームの設定

モデルの回転/平行移動/拡大縮小の補間：フレーム i と j にモデルの回転/平行移動/拡大縮小が設定してあった場合，その間を回転，平行移動，拡大縮小に関してそれぞれ線形補間を行う．図 A.11 に例を示す．回転/平行移動/拡大縮小を一つのフレームでしか設定しない場合や，最終フレームに設定しない場合は，設定したフレームだけ回転/平行移動/拡大縮小させ，その後のフレームは設定しないようにする．

● 軌跡設定

モデルの移動はフレームごとに移動位置を入力すればできるが，ユーザが一つ一つのフレームを手動で入力することは困難である．そこで，CAT では単体モデル作成モードで作成した輪郭をアニメーション設定モードではモデルの軌跡として使用することができる．選択した単体モデルの輪郭を等間隔にフレーム数でリサンプリングして軌跡データとして利用する．

出力データ

アニメーション設定モードで作成したデータは CAT 独自のフォーマットのファイル (can ファイル) として，テキスト形式でアニメーションの情報を保存することができる．can ファイルにはキーフレームに登録したモデルの制御点情報も含まれるため，can ファイルだけで，アニメーションを再現することができる．アニメーション全体の情報とし

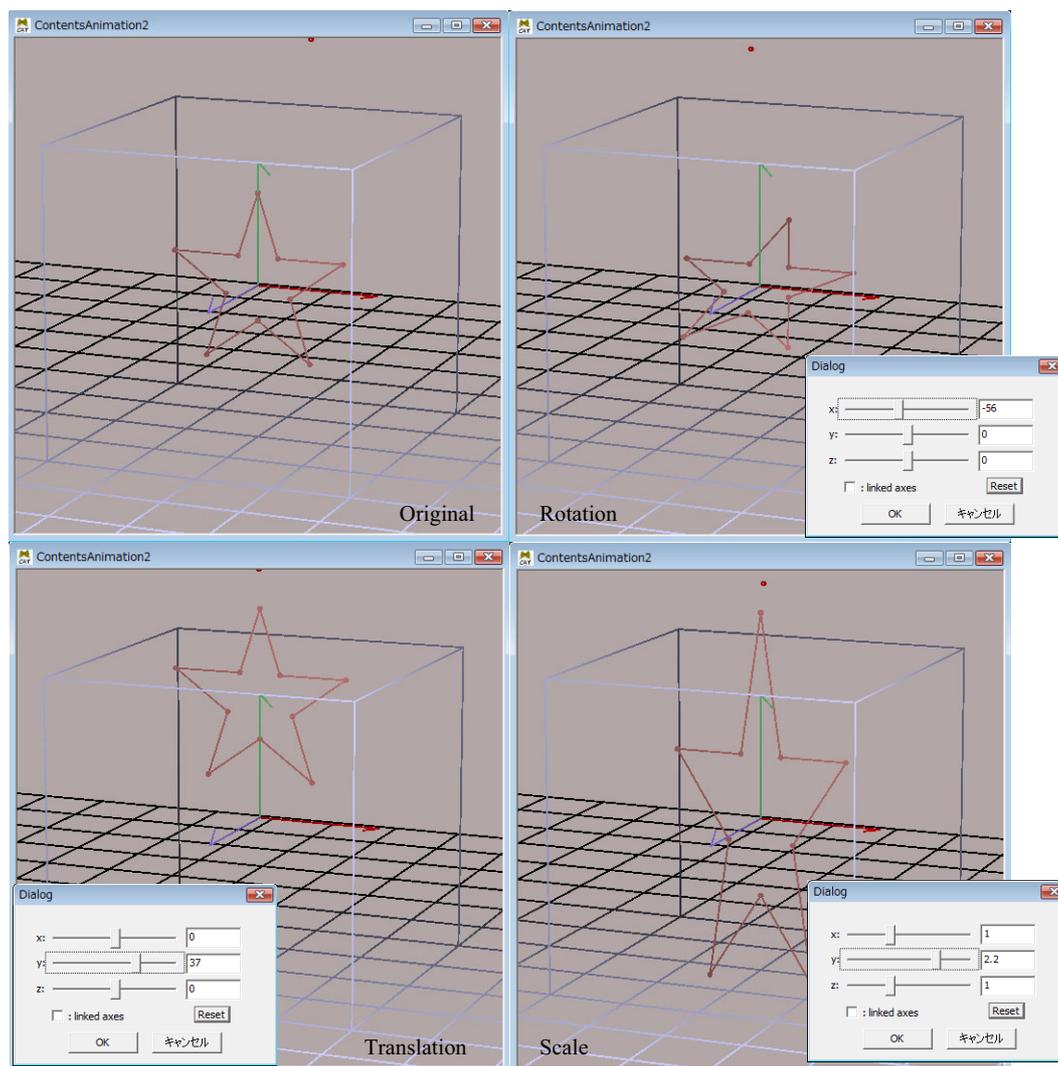


図 A.9: モデルの回転 / 平行移動 / 拡大縮小

て、総フレーム数とキーフレーム数、そして、キーフレームとして登録したモデルの情報、各フレームに設定した回転 / 平行移動 / 拡大縮小情報を記述してある。また、同じモデルを異なるキーフレームで登録した場合は重複して記述しない。より詳しいことは付録 B 参照のこと。

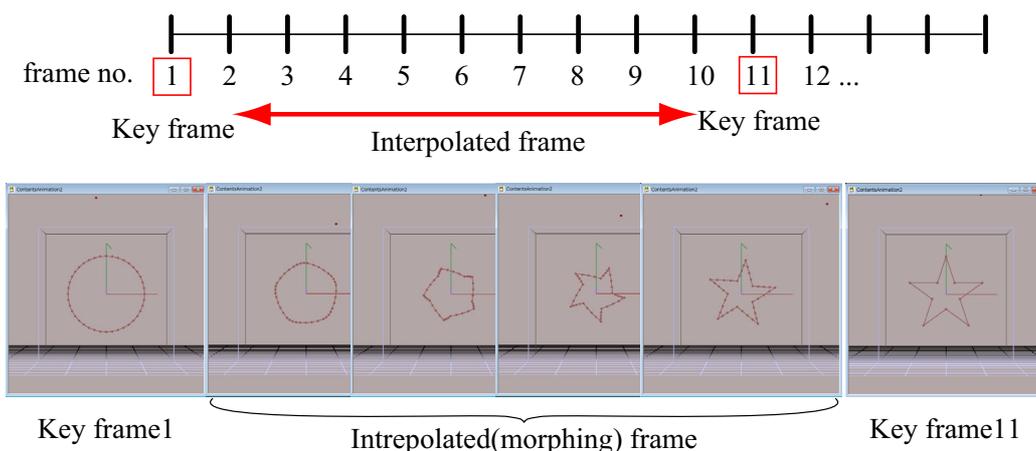


図 A.10: キーフレーム間の補間

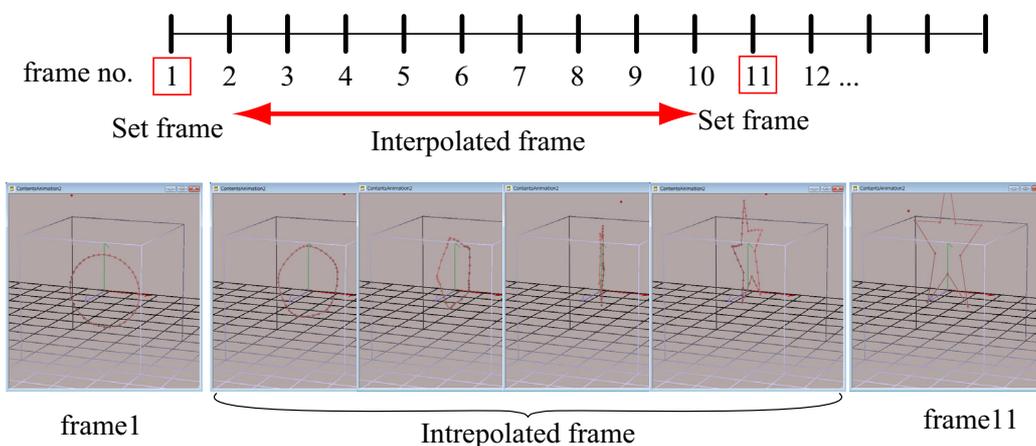


図 A.11: 回転/平行移動/拡大縮小の補間

A.4 インポート／エクスポート

インポート機能

CAT は Wavefront obj 形式 (obj ファイル: 付録 C 参照) のファイルをインポートすることができる。obj ファイルは主に 3 次元空間中の、面、線、点のデータであるため、点列に変換する必要がある。CAT では 2 種類の方法を提供している。一つは面、線、点をそのまま表現する。obj ファイルに記述されている順に面、線、点を順に描画していく。もう一つの方法は前述したポリゴンモデルからの点列生成アルゴリズムを使って断面ごとのデータに変換する。

エクスポート機能

CAT ではテキスト形式の点列データをエクスポートすることができる。点列データは単位なしの仮想空間の 3 次元座標であり、これを CAT のデータ変換機能で Voltage データに変換してディスプレイシステムの入力データを作成することができる。Voltage データに変換するときに、実際の描画サイズを指定してサイズや位置調整を行う。

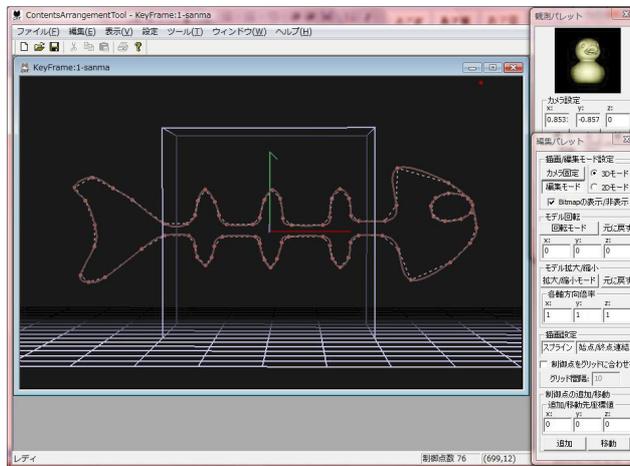
A.5 データ変換機能

CAT のエクスポート機能で出力したテキスト形式のデータ点列が記述してあるファイルを voltage データに変換する。変換方法は 2.3.1 で記述した方法を用いる。また、現状のシステムでは voltage データはテキスト形式であるが、現在、ハードウェアを含め、レーザディスプレイシステムの国際標準である ILDA[57] に準拠したシステムへの移行をしているため、CAT では voltage データを ILDA 形式 (付録 D 参照) のデータ変換を行う機能をサポートしている。なお、6.3.4 で使用したシステムでは ILDA 形式のファイルが入力となる。

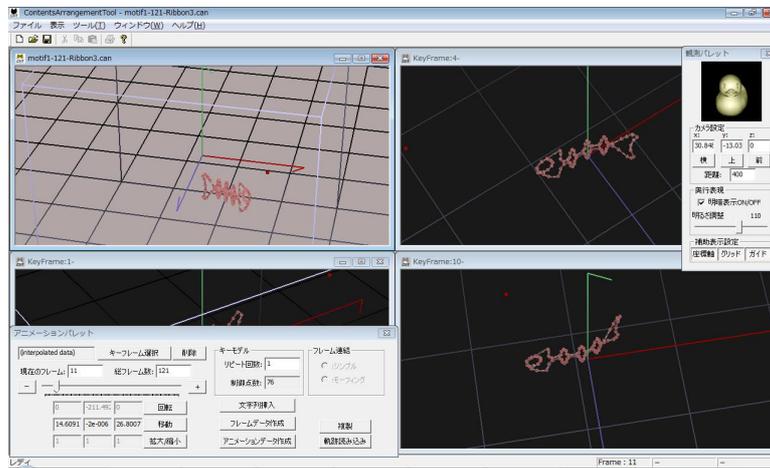
A.6 コンテンツ作成実験

コンテンツ描画

CAT を用いて作成したコンテンツの例を図 A.12 に示す。図 A.12(1) に基本となるモチーフを作成した画面を示す。図 A.12(2) はその基本モチーフの尾の部分回転させ、ひねらせたモチーフ 1, 2 を作り、回転、移動の軌跡を与えてアニメーションを作成した画面を示す。図 A.12(3) にその描画実験結果の画像を示す。



(1) Basic motif



(2) Creating animation



(3) The result of displaying contents

図 A.12: CAT を使ったコンテンツ作成

```

10
0
1
-0.065470 30.000000 0.000000 1 1
-10.589950 9.270511 0.000000 1 1
-44.647888 9.270511 0.000000 1 1
-17.094440 -3.541019 0.000000 1 1
-27.618914 -24.270515 0.000000 1 1
-0.065467 -11.458981 0.000000 1 1
27.487978 -24.270515 0.000000 1 1
16.963505 -3.541019 0.000000 1 1
44.880638 26.872692 -18.538914 0 1
10.459014 9.270511 0.000000 1 1

```

図 B.13: CAT の出力データの例 (単体モデル用, caf ファイル)

B CAT 出力フォーマット

単体モデル情報を記述する caf ファイルの例を図 B.1 に示す。ファイルの 1 行目は制御点の数, 2 行目はスプラインフラグ, 3 行目は始点終点連結フラグ, 4 行目以降は各制御点の内容となる。タブ区切りで 1 行に位置 (x, y, z) , レーザ ON/OFF フラグ, ストップカウントを順に記述する。

アニメーション情報を記述する can ファイルの例を図 B.2 に示す。1 行目は総フレーム数 2 行目はキーフレーム数, そして, キーフレームとして登録したモデルの情報を記述した後に, 各フレームに設定した回転 / 平行移動 / 拡大縮小情報を記述する。また, 同じモデルを異なるキーフレームで登録した場合は重複して記述しない。識別子は図中の “model count and the frame ID” で, 最初に登録されたフレーム ID をモデル ID として扱う。また “model count” には重複した数を記述する。



図 B.14: CAT の出力データの例 (アニメーション用, can ファイル)

C Wavefront obj ファイル

Wavefront 社のアプリケーションで用いられている 3 次元パッチを用いた CG モデル記述用ファイルフォーマットで多くの CG アプリケーションでサポートされている。CAT へのインポートでサポートしている頂点情報は幾何学的頂点 (3 次元座標 (x,y,z) で表される頂点の位置情報) のみである。また、サポートしている要素は以下である。

- ・面
- ・線
- ・点
- ・コメント

頂点の番号は明記されていないが、ファイルの先頭から順に番号が付けられる。すなわち、頂点がファイル中に n 個記述されている場合、各頂点には出現順に 1 から n までの番号が付けられる。(注: 0 から $n - 1$ ではない。) この番号を用いて面情報、線情報、点情報を記述する。一般的な wavefront obj ファイルでは要素を、頂点番号/テクスチャ頂点番号/法線番号の順番で記述するが、テクスチャ頂点番号と法線番号は省略可能であり、CAT では $v1$ 以外は無視する。区切り文字は '/' である。また、両方とも省略する場合は '/' も省略することができる。

- ・面情報 (f $v1/vt1/vn1 v2/vt2/vn2 v3/vt3/vn3 \dots$)

多角形を表すステートメント。OpenGL の GL_LINE_STRIP に対応する。頂点の順番は時計回りで前方面、すなわち表面となる。

- ・線情報 (l $v1/vt1 v2/vt2 v3/vt3 \dots$)

線を表すステートメント。

- ・点情報 (p $v1 v2 v3 \dots$)

点を表すステートメント。

- ・コメント (#)

ファイル中、'#' 以降はコメントとみなす。コメントは情報としない。

D ILDA 規格

レーザディスプレイの国際的団体 International Laser Display Association (ILDA) が定めるレーザディスプレイに関する標準規格である。ハードウェア構成、プロトコルなどが標準化されている。本研究では ILDA に準拠した 3 次元データのファイルを扱っている。ILDA 規格のデータはバイナリファイルで扱われ、拡張子は “ILD” である。3 次元データのファイルフォーマット以下に述べる。表 D.1 に ILDA の 3 次元座標系ヘッダを示す。ヘッダは各フレーム情報の先頭に記述する。表 D.2 にデータ部のフォーマットを示す。最後のデータを記述した後、0 でクリアしたヘッダを記述する。また、1 フレームには 6000 個までの点データを含むことができる。

表 D.1: ILDA 3D coordinate header description. one for each frame

Byte	Description	Remarks
1-4	“I”, “L”, “D”, “A”	The ASCII letters ILDA, identifying an ILDA format header.
5-8	0, 0, 0, 0	Format Code 0 for 3D images
9-16	Frame name	Eight ASCII characters with the name of this frame.
17-24	Company name	Eight ASCII characters with name of the company who created the frame.
25-26	Total points	Total number of points in this frame in this frame as an unsigned word (1-65535). If the number of points is 0, then this is to be taken as the end of file header and no more data will follow this header.
27-28	Frame number	If the frame is part of a group such as an animation sequence, this represents the frame number. Counting begins with frame 0. Frame range is 0-65535.
29-30	Total frames	Total frames in this group or sequence. Range is 1-65535.
31	Scanner head	The scanner head or projector number that this frame is to be displayed on. Range is 0-255.
32	Future	Reserved for future use. Must be set to binary 0.

表 D.2: 3D coordinate data record description. one for each point

Byte	Description	Remarks
33-34	X coordinate	A 16-bit binary twos complement (signed) number. Extreme left is -32768; extreme right is +32767. (All directions stated using front projection.)
35-36	Y coordinate	A 16-bit binary twos complement (signed) number. Extreme bottom is -32768; extreme top is +32767.
37-38	Z coordinate	A 16-bit binary twos complement (signed) number. Extreme rear (away from viewer; behind screen) is - 32768; extreme front (towards viewer; in front of screen) is +32767. These two bytes do not appear if the format code (byte 8) indicates 2D frames.
39-40	Status code	Bits 0-7 (lsb) indicate the point's color number. This value is used as an index into a color lookup table containing red, green and blue values. See ILDA Color Lookup Table Header section for more information. Bits 8-13 are unassigned and should be set to 0 (reserved). Bit 14 is the blanking bit. If this is a 0, then the laser is on (draw). If this is a 1, then the laser is off (blank). Note that all systems must write this bit, even if a particular system uses only bits 0-7 for blanking/color information. Bit 15 (msb) is the "last point" bit. This bit is set to 0 for all points except the last point. A 1 indicates end of image data. This was done for compatibility with certain existing systems; note that a zero in bytes 25-26 (Total Points) is the official end-of-file indication.
41-N	Next X coordinate	Repeat point format until last point has been written.
N+1	Next header	Next ILDA header follows. If the next header has a zero value for Total Points (bytes 25-26), then it is the last header in the file and the file can be closed.

出典 : ILDA Image Data Transfer Format Revision 006, April 2004