

# レーザープラズマ式3Dディスプレイにおける点列を用いた物体表現

## Object Representation Using Point Sequence for Laser Plasma 3D Display

石川 尋代<sup>†</sup>, 正会員 斎藤 英雄<sup>†</sup>

Hiroyo Ishikawa<sup>†</sup> and Hideo Saito<sup>†</sup>

**Abstract** This research proposes a method of representing objects for a 3D display device that uses a pulse laser and generates plasma luminous bodies in arbitrary positions in midair. By using a xyz-scanner, the device controls the position of plasma luminous bodies that appear and disappear one by one in 1 kHz. The device can display an object in one stroke in midair. We propose our method of representing primitive objects—polygons, polyhedrons and curved surface objects—in consideration of hardware limitations and human visual characteristics, and evaluate the objects in experiments. As a result, polygons can be represented visually, effectively reducing the scanner burden by smoothing accelerations at corners and increasing the plasma density; polyhedron faces are best drawn one by one; and when curved surface objects are drawn using spiral, we can stably perceive them.

キーワード：レーザープラズマ, 3次元ディスプレイ, 物体表現

### 1. ま え が き

新しい3次元(3D)ディスプレイのために, 任意の空間中にプラズマ発光体を生成するデバイスが開発されている。プラズマ発光体を生成する現象は「Laser-induced breakdown」と呼ばれており<sup>1)2)</sup>, このデバイスでは強力な赤外パルスレーザーを用いて気体をイオン化し, 図1に示す例のように, どのような場所でもスクリーンなしで空間中に光の点としてプラズマ発光体を生成することができる。木村らはこのデバイスを用いて, 世界で初めて空中に実体を持った3Dオブジェクトを描き出すことのできる3Dディスプレイ「Free Space Display of Point Cloud by Laser-Plasma」<sup>3)</sup>を既に開発している。現在, より大きなスペースにより多くのプラズマ発光体を描画することができるデバイスが開発されており, いろいろなアプリケーションが考えられている<sup>4)</sup>。

本研究で用いるデバイスシステムは, 1[kHz]のパルスレーザーを使用することにより, 一つずつ生成/消失するプラズマ発光体を1秒間に1000個表示することができる。このとき, xyz-スキャナでレーザー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。すると, プラズマ発光体の軌跡が光の点列として観測されるため, 対象物体を連続する光の点で描くことができる。なお, プラズマ発光体が輝いている時間は非常に短い, 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0.01~0.2[s]といわれている<sup>6)~10)</sup>。実際に本研究で使用する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100[Hz]のパルスレーザーを用いて描画した場合, 個人差はあるが約20個のプラズマ発光体が同時に見えていると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0.2[s]程度であるといえることができる。すなわち, 1[kHz]のレーザーを用いた本システムでは, 人間が同時に知覚できるプラズマ発光体の数は約200個となる。現状では, 1[kHz]より高周波数の赤外線パルスレーザーを入手することは困難であるため<sup>5)</sup>, 同時に知覚できるプラズマ発光体の数をこの200個より多くすることはできない。

本システム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, すべてを同時に観測できるため, 安定して物体を描くことができる。しかし, 200点で表現できる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恐れがある。しかし, 描画している物体全体のプラズマ発光体を同時に知覚できなくても, 物体を認知できるような表現, すなわ

2008年8月30日受付, 2009年2月16日最終受付, 2009年3月10日採録

<sup>†</sup>慶應義塾大学 大学院 理工学研究科

(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, 045-563-1141(ex.43230))

<sup>†</sup>Graduate School of science and Technology, Keio University  
(3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan)

ち、200点以上で表現しても物体の形状を認知できるような表現手法があれば、様々な物体を表示することができるようになる。

本システムの他の特性としては、xyz-スキャナの負荷が挙げられる。レーザービームを走査しているため、急激な走査方向の変化には負荷がかかり、角が丸くなったり、描画が不安定になったりすることがある。そのため、多角形の頂点付近ではスキャナに負荷がかからないような表現をする必要がある。

ところで、本システムはこれまでになかった描画方式であるため、それに適した表現手法もまた未知である。もっとも近いシステムとしては、レーザーアートやレーザーショーなどで使用するレーザーディスプレイシステムがある。可視光レーザーを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3次元物体を描くこともできるが、点列を描画するシステムではなく、また、投影結果も2次元であるため、本システムにそのまま応用することは難しい。しかし、スキャナの負荷軽減に関しては参考にできる点がある。レーザー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するが、多角形の頂点ではレーザーの走査を一時的に停止させるという制御を行い、安定して頂点付近を描画している。本システムでは、スキャナの走査を停止させると同じ位置にプラズマ発光体が重なってしまうため、走査を停止させることなくスキャナの負荷を軽減させたいと考える。

これらのことより、本研究ではプリミティブな物体、多角形、多面体、曲面物体に対して、本システムに適した物体の表現として、以下の2点を実現する手法の提案を目的とする。

- ・多角形の頂点付近におけるスキャナの負荷軽減
  - ・200点以上のプラズマ発光体数で表現した物体の認知
- 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て表現する。多面体と曲面物体については、人間の認知を考慮して200点以上で表現した物体が認知できるような表現手法を提案し、実験により評価を行う。多面体については、描き順によって描画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済みである。そこで、認知における面の重要性<sup>11)12)</sup>を考慮してワイヤフレーム表現する手法を提案する。一方、曲面物体についても、表現手法によっては物体が動いているように見える仮現運動(ベータ運動)<sup>9)</sup>が起きてしまうことを予備実験によりすでに確認しており、そのような認知特性が発生しにくい表現手法を提案する。

## 2. システム概要

### 2.1 構成

本システムの概要を図2に示す。システムは赤外線レーザー発生装置 (Infra-red laser generator)1台と空間中を走査するxyz-スキャナ (xyz-scanner)1台から構成される。レー

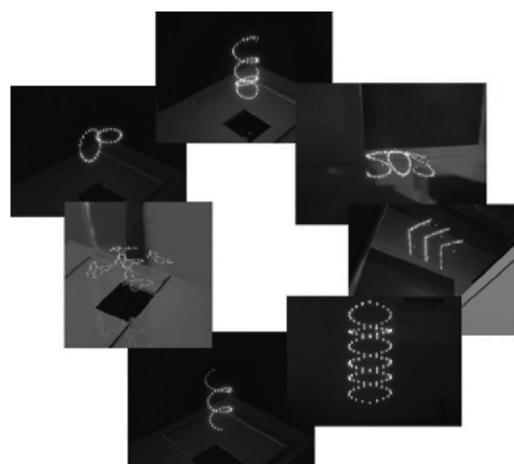


図1 3D オブジェクトの描画例  
Examples of 3D objects drawing by the laser-plasma scanning 3D display device.

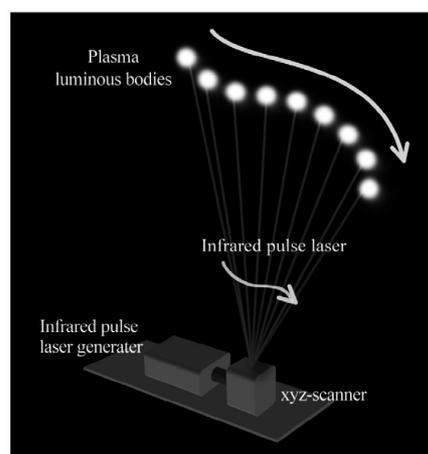


図2 システム概要  
The drawing system structure.

ザ発生装置は1[kHz]のパルスレーザーを発生させ、同じタイミングでプラズマ発光体を生成し続ける。そして、xyz-スキャナはレーザーの方向とプラズマを発光させる位置までの距離をコントロールする。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が発生し、それが光の点列として描かれる。

本システムへの入力は、プラズマ発光体を表示したい位置を時系列の離散データとしている。xyz-スキャナはD/Aコンバータを通して制御される。コンピュータから入力された位置データからそれに対応するアナログデータに変換してxyz-スキャナに伝送する。ただし、スキャナの特長上、一つ前のプラズマ発光体の位置から極端に離れた位置には移動できないため、データには制限がある。また、スキャナの操作は、いくつかのパラメータを用いて2.2に示すような特殊な制御を行っている。

### 2.2 入力データとスキャナ制御

図3に示すように、入力データ (Input data) $n_i$  とステップカウント (Step count) $n_s$ 、サンプリング間隔 (Sampling interval) $t_s$ [ms] とで制御されたタイミングでスキャナを動

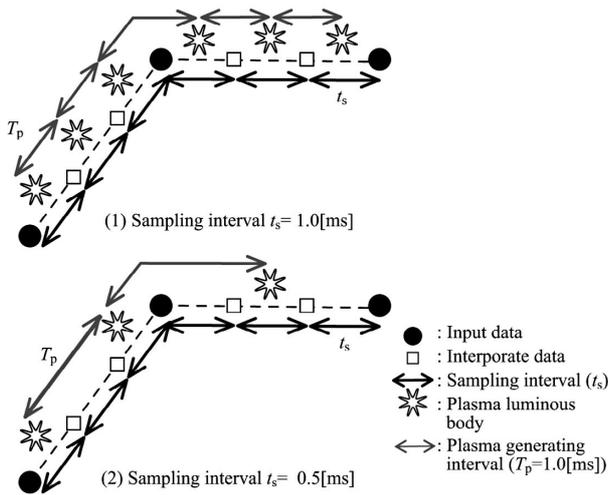


図3 入力データとプラズマ発光のタイミング

Input data and timing of generating plasma luminous bodies.

かす。入力したデータの間を線形補間して等間隔に補間データ (Interpolate data) を作成する。ステップカウントは補間するデータの個数を示す。それぞれ隣り合う入力データと補間データの間をサンプリング間隔で xyz-スキャナを動かしていく。パルスレーザはスキャナの移動に関係なく、 $T_p=1.0[\text{ms}]$  の間隔でプラズマを発光させていく。

例えば、ステップカウントを2個、サンプリング間隔を  $1.0[\text{ms}]$  とした場合、図3(1)に示すように、隣り合う入力データと補間データの間には1個のプラズマ発光体が発生する。サンプリング間隔を  $0.5[\text{ms}]$  とした場合では、スキャナがデータ間を操作するタイミングが早くなるため、図3(2)に示すように2個の入力データまたは補間データに対して1個のプラズマ発光体が発生する。そこで、実際に描かれるプラズマ発光体の数  $n$  は式(1)となる。

$$n = n_i(n_s + 1)t_s/T_p \quad (1)$$

これらのパラメータを導入することにより、描画スピードと一つの物体に使用する点の数を細かく制御できる。すなわち、ステップカウントを増やすことで、スキャナを細かく滑らかに動かすことができるようになる。また、サンプリング間隔を小さくすることで、一つの物体に使用する点の数が少なくなり、描画スピードが速くなる。物体の表現は入力データの点の数とステップカウント、サンプリング間隔によって変化する。なお、スキャナの動くタイミングとパルスレーザは同期を取っていないため、プラズマ発光体の位置は最大でパルスレーザの発光周期の半分の  $0.5[\text{ms}]$  分だけずれることになるが、すべてのプラズマ発光体の位置が一樣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。

### 3. 点列による物体表現方法

本システムで物体を表示するには、対象物体をプラズマ発光体位置の時系列離散データ (点列データ) を作成する必

要がある。本章ではプリミティブな物体を対象として、本システムに適した表現手法を提案する。多角形と多面体はワイヤフレームで表現し、曲面物体は表面全体を表現する。

#### 3.1 多角形の表現

多角形を点列を用いて最も簡単に表現するには、点をワイヤ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い場合がある。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4の(1)に示すような角の場合、速度、加速度はそれぞれ図4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(2)で得られる。ただし、式(3)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。

$$(v_{sx}(t), v_{sy}(t), v_{sz}(t)) = (v_{sx}(0) + \int_0^t a_{sx}(u)du, v_{sy}(0) + \int_0^t a_{sy}(u)du, v_{sz}(0) + \int_0^t a_{sz}(u)du). \quad (2)$$

$$\int_0^T v_{sx}(u)du = 0, \int_0^T v_{sy}(u)du = 0, \int_0^T v_{sz}(u)du = 0. \quad (3)$$

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4(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  $r(t)$  は式(4)となる。図4(5)に速度の大きさをそれぞれ示す。

$$r(t) = \frac{\sqrt{|v_x(t)|^2 + |v_y(t)|^2 + |v_z(t)|^2}}{\sqrt{|v_{sx}(t)|^2 + |v_{sy}(t)|^2 + |v_{sz}(t)|^2}} \quad (4)$$

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4(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にコンピュータグラフィックス (CG) で表示したリサンプリング結果を示す。

#### 3.2 多面体の表現

多面体の認知において、面の心理的特性に関する知見<sup>11)</sup>や、面情報に基づいた認知しやすさの尺度化の研究<sup>12)</sup>などで指摘されているように、面の認知が重要であると考えられている。本研究では、この知見を考慮した手法を提案

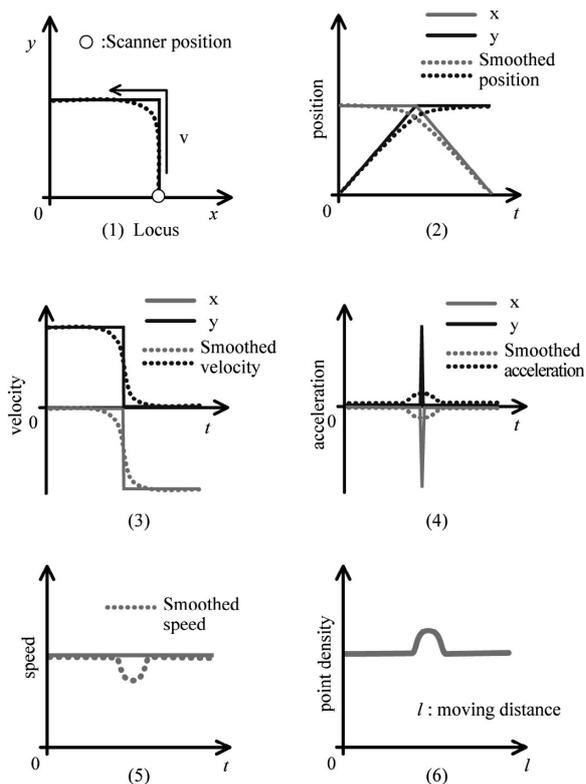


図4 多角形の角における加速度の平滑化例  
Smoothing acceleration example of a corner.

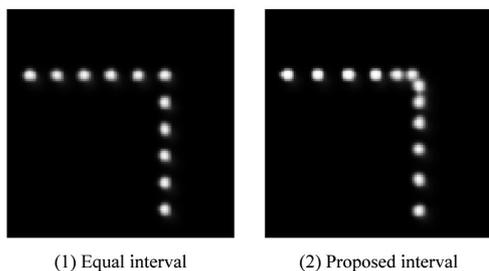


図5 多角形の角の点配置リサンプリング結果 (シミュレーション)  
The result of resampling for a polyhedral corner (simulation).

する。

本システムにおいて、多面体のワイヤフレームを点列で表現するとき、描き順が問題となる。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できることを考え、最短経路で描く方法を手法1(最短経路表現)とする。もう一つは、上記のように多面体認知における面の認知の重要性を考慮して、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。

#### (1) 手法1: 最短経路表現

ワイヤフレームがオイラーグラフ(始点から各エッジを1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フレームの多くはオイラーグラフではないため、経路を1回以上通過しな

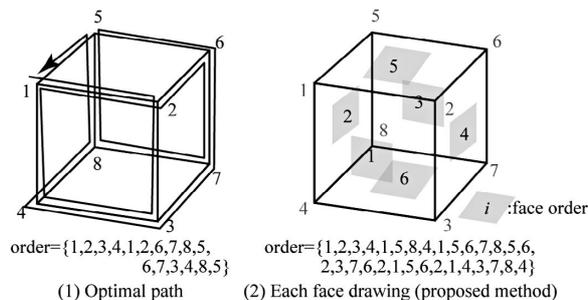


図6 立方体の描き順の例  
An example of the drawing order of a cube.

なければならない場合がある。すべての辺を通り始点に戻ってくる経路の中から、最も距離の短い経路から選択する。図6(1)に立方体を描くときの最短経路の例を示す。

#### (2) 手法2: 提案手法

面の描画順を指定して、その面の順番に一筆で描く。図6(2)に立方体を対象としたときの面を描く順と通過する頂点の順の例を示す<sup>16)</sup>。この描き方では、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。

### 3.3 曲面物体の表現

曲面物体は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を考える。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表現できる。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。これに対して、物体が動いているように認知されてしまう仮現運動(ベータ運動)<sup>9)</sup>を防ぐための表現手法として、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2を提案する。

#### (1) 手法1: 複数の円による表現

本システムでは一筆描きで表現するため、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7(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(5)のようにして求める。なお、%は剰余演算子とする。

$$\mathbf{p}(i) = (r \sin(\phi) \cos(\theta), r \cos(\phi), r \sin(\phi) \sin(\theta)), \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\pi j}{n_s}, \phi = \frac{2\pi n_c i}{n_s}, j = i \% \frac{n_s}{n_c}.$$

#### (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7(2)に例を示す。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。ここで、 $n_d = 20, n_s = 120$ 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)のようにして求める。

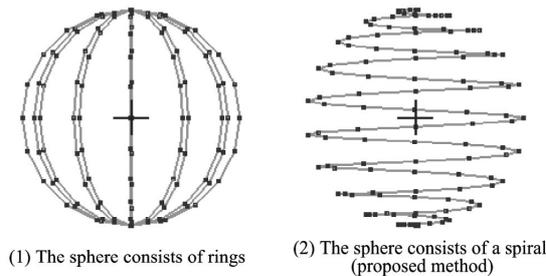


図 7 球体の表現  
Representation of a sphere.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(i) &= (r \sin(\phi) \cos(\theta), \\ & r \cos(\phi), r \sin(\phi) \sin(\theta)), \\ \theta &= \frac{2\pi n_{di}}{n_s}, \phi = \frac{\pi i}{n_s}. \end{aligned} \quad (6)$$

#### 4. 実験結果と評価

3で記述した表現手法の妥当性を検証するために、実際の3Dディスプレイで描画した様々な物体の認知を、4名の被験者による主観評価実験により評価した。特に、球体の描画については、らせんを用いた提案手法において、安定して球体が認知できるパラメタ(ステップカウント、サンプリング間隔)の評価を行った。

##### 4.1 評価方法

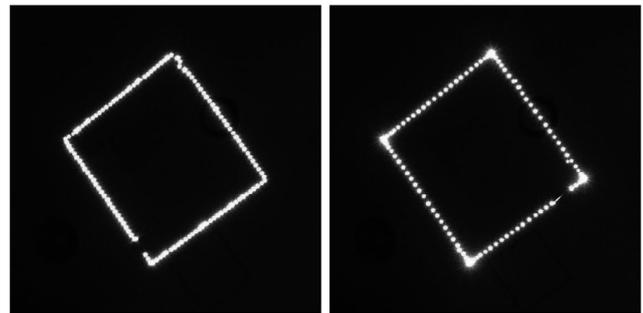
被験者は約2.5mの高さにある描画された物体を約2~2.5[m]離れた位置から見上げて観測してもらう。

4.2-4.3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<sup>13)</sup>。

4.5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<sup>13)</sup>に従い該当する球体を選択してもらう。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。

##### 4.2 多角形：正方形

正方形を表示物体として、等間隔にプラズマ発光体を配置する手法1と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手法2を用い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8に示す。画像はF値:F5.7, シャッタースピード:1/8[s]で撮影した。この正方形は128点で描か



(1) Equal intervals (2) Proposed method

図 8 正方形の描画実験結果  
The result of drawing a square.

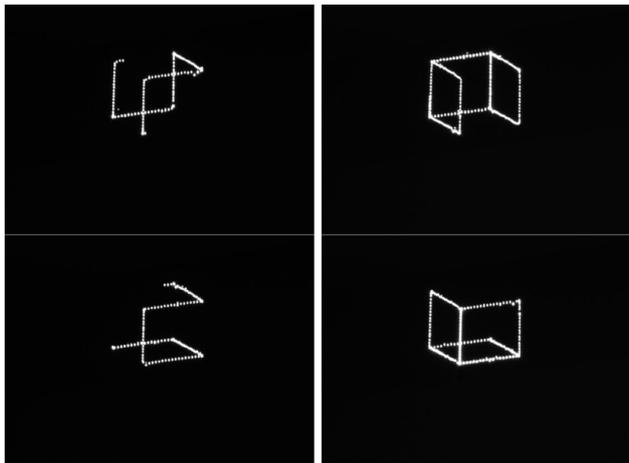
れているが、シャッタースピードの関係上125点しか撮影されていないため、正方形の一部が欠けているが、実際には全点が描かれている。

評価結果を表1に示す。4名の被験者すべてが手法2を選択した。図8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8からも明らかなように、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8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。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。

##### 4.3 多面体：立方体

立方体を表示物体として、最短経路で描く手法1と多面体認知における面の認知の重要性<sup>11)12)</sup>を考慮して面を1つずつ描いていく手法2を用いて描画比較実験を行った。立方体は1辺約20[cm]である。立方体の描き順は図6に示す例を用いた。入力データ数は、手法1は176点、手法2は330点とし、ステップカウントは5、サンプリング間隔は0.30[ms]とし、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は0.317[s]、手法2は0.594[s]となる。描画中に撮影した画像を図9に示す(F値:F9.1, シャッタースピード:(1)1/4[s],(2)1/8[s])。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



(1) Optimal path (2) Each face drawing (proposed method)

図 9 立方体の描画実験結果  
The result of drawing a cube.

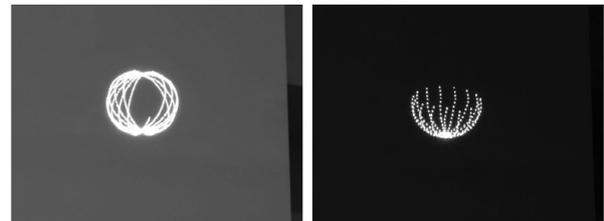
が発生している。

評価結果を表 1 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。

#### 4.4 曲面物体：球体

球体を表示物体として、複数の円で表現する手法 1 と、仮現運動 (ベータ運動)<sup>9)</sup> を防ぐために、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 xyz-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つたため、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 500、ステップカウント 8、サンプリング間隔 0.30[ms] で描いた球体、手法 2 はらせんの段数 25、入力データ数 500、ステップカウント 2、サンプリング間隔 0.30[ms] 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 1080 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 1.08[s]、手法 2 は 0.45[s] となる。実験中の映像を図 10 に示す。画像 (1) は F 値:F8.5, シャッタースピード:1.0[s], 画像 (2) は F 値:F8.5, シャッタースピード:0.25[s] で撮影した。

評価結果を表 1 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、安定して球体を認知できるという感想を得た。図 10(2) の画像は 0.25[s] で約半分の球体を描いているところを示している。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約 0.45[s] と、残像効果の時間 (約 0.2[s]) よ



(1) The sphere consists of rings (2) The sphere consists of a spiral (proposed method)

図 10 球体の描画実験結果  
The result of drawing spheres.

表 1 評価結果 (尺度値)  
The evaluation result (scale value).

Object	Method 1	Method 2	$\chi^2$	significance level
Square	0.0	4.0	4.00	0.05
Cube	0.5	3.5	2.25	0.15
Sphere	0.0	4.0	4.00	0.05

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ないと感じるわけではないが、手法 1 より球体を安定して認知できた。

#### 4.5 らせん表現の球体

4.4 の実験では、手法 1 と 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 11(1) 参照) のステップカウントとサンプリング間隔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、本論文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、入力データ数 357 個、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 2 に示す。表にはそれぞれステップカウント、サンプリング間隔、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。実験結果を表 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 11(2) 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:1/8 秒) 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 0.66[s] 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約 0.34[s] となり、残像効果時間の約 0.2[s] 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。

#### 4.6 実験の有効性

4.2 から 4.5 の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 ( $\chi^2$ ) 検定を行う<sup>14)</sup>。4.2 から 4.4 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

表 2 らせん球体における評価パラメータ一覧  
The evaluation parameters list of spiral spheres.

Param list No.	Step count	Sampling interval[ms]	The number of plasma	Drawing time[s]
1	5	0.3	675	0.66
2	2	0.3	338	0.34
3	0	0.42	158	0.16
4	0	0.4	150	0.15
5	0	0.35	132	—

表 3 らせん表現の球体における被験者ごとの選択結果  
The select result of spiral spheres.

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

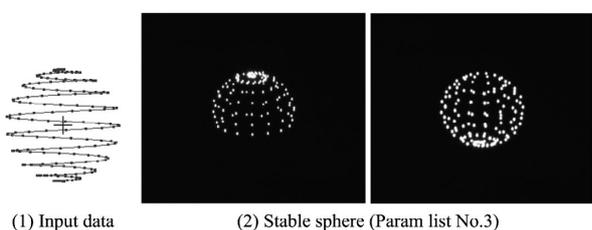


図 11 安定した球体の描画結果  
The result of representing a stable sphere.

た、自由度は1となる。それぞれの $\chi^2$ 値を表1に示す。自由度1のとき、 $\chi^2_{0.05} = 3.84$ 、 $\chi^2_{0.15} = 2.07$ から、4.2と4.5では有意水準0.05で $H_0$ は棄却される。また、4.3では有意水準0.15で $H_0$ は棄却される。これにより4.2から4.5の実験はそれぞれの有意水準で有効と判断する。

4.5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ので、それらをまとめて三つのカテゴリーに分ける。表2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 $\chi^2_{0.10} = 4.61$ 、 $\chi^2_{0.15} = 3.79$ 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 $\chi^2_{0.10} = 2.71$ 、 $\chi^2_{0.15} = 2.07$ 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 $\chi^2_{0.05} = 3.84$ 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。

#### 4.7 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、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。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、0.2[s]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。

球体については、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、非常に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、200点以上で表現された球体を認知できることもわかったが、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いた。本システムの描画方式では物体認知に若干の個人差があると考えられる。

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、物体認知についての必要な情報がわかり、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. むすび

レーザプラズマ式3Dディスプレイシステムにおけるプラズマ発光体の点列を用いた物体の表現手法について検証した。本論文では、プリミティブな多角形、多面体、曲面物体を取り上げ、これらについて、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ヤナの加速度を滑らかにして、スキヤ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、多面体では面を一つずつ描画する表現手法、曲面物体ではらせんを用いて表現する手法を提案し、実際に本システムで表示する実験を行い、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。

なお、本論文では、プリミティブな物体の表現手法について検討したが、より複雑の物体の表現について検討するためには、プラズマの発光タイミングと視覚の残像時間が

物体認知に及ぼす特性を、より詳細に知る必要があると思われる。しかし、本論文では、このような特性を知る以前に、対象物体を適切に認知させる表現方法についての調査が本デバイスの開発のための優先事項と考え、実験を行った。このような物体の認知特性を調べ、さらに複雑な物体の表現手法について検討するとは、今後の課題としたい。

また、現状では同時に二つ以上の独立した物体などは描画できない。これに対しては、ハードウェアを拡張すれば対応可能である。さらに、適切なタイミングで描画物体を変化させていくことでアニメーション効果が得られるため、より効果的な表現が可能になると考えられ、今後の研究課題としたい。

本研究の一部は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 研究領域「自由空間に3次元コンテンツを描き出す技術」により行われた。

描画手法に関して助言をくださった株式会社エリオの木村秀尉氏、レーザープラズマ描画実験に協力してくださった Songkran Jarusirisawad 氏と石川大介氏に深く感謝する。

## 〔文 献〕

- 1) C. De Michelis : IEEE J. Quant. Electron, QE5, pp.188-202 (1969)
- 2) J. F. Ready : "Effects of High-power Laser Radiation", New York, Academic Press (1971)
- 3) H. Kimura, T. Uchiyama and H. Yoshikawa, "Laser produced 3D display in the air", Proc. Emerging technologies SIGGRAPH 2006, ACM SIGGRAPH, Boston, Massachusetts USA (July 2006)
- 4) 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 XIX, 6803-07, California (Jan. 2008)
- 5) 島田悟, 他 : "空間立体描画技術の構成の高性能化実験に成功", 産総研 TODAY, 6, 4 pp.16-19 (2007)
- 6) M. Coltheart : "Iconic memory and visible persistence", Perception and Psychophysics 27, 3, pp.183-228 (1980)
- 7) G. Spering : "The information available in brief visual presentation", Psychological Monographs: General and Applied 74, 498, pp.1-29 (1960)
- 8) S. S. Stevens : "Psychophysics: Introduction to Its Perceptual, Neural, and Social Prospects", Transaction Pub (1986)
- 9) 松田隆夫 : "視知覚", 培風館 (1995)
- 10) 渡邊淳司, 坂本憲久, 則武厚, 前田太郎, 館すすむ : "サッカーボールの視覚的持続時間の研究", 映情学誌, 58, 12, pp.1-6 (2004)
- 11) 中川作一 : "目と絵の社会心理学", 法政大学出版局, 1984.
- 12) 石川尋代, 佐藤幸男 : "多面体認識における心理量と物体像エントロピーの関係について", 信学論, J86-D-II, 1, pp.111-118 (2003)
- 13) 田中良久 : "心理学的測定法第2版", 東京大学出版会 (1977)
- 14) 倉智佐一, 山上暁 : "心理統計法", 北大路書房 (1991)
- 15) H. Ishikawa and H. Saito : "Point Cloud Representation of 3D Shape for Laser-Plasma Scanning 3D Display", Proc. 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.1913-1918, Orlando (Nov. 2008)
- 16) H. Ishikawa and H. Saito : "Closed-Line Based Representation of 3D Shape for Point Cloud for Laser-Plasma Scanning 3D Display", Proc. 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, pp.28-35, Yokohama, (Dec. 2008)
- 17) 石川尋代, 齋藤英雄 : "視覚特性を考慮した2次元形状の効率的な点群表現手法", 信学技報, PRMU2007-206, pp.305-310 (Jan. 2008)
- 18) 青木悟史, ノジク ヴァンソン, 石川尋代, 齋藤英雄 : "レーザープラズマ方式自由空間ディスプレイによる顔表示のための点群生成法", 情処学, CVIM 研資, CVIM-163-25, pp.177-182 (May 2008)
- 19) 石川尋代, 齋藤英雄 : "レーザープラズマ 3D ディスプレイにおけるハードウェア特性を考慮した点群を用いた3次元形状表現", 画像の認識・



いしかわ ひろよ  
**石川 尋代** 1995年, 名古屋工業大学大学院博士前期課程修了。同年日立中部ソフトウェア入社。2003~2006年慶應義塾大学大学院有期研究助手, 現在, 慶應義塾大学大学院理工学研究科に在学中。



さいとう ひでお  
**齋藤 英雄** 1992年, 慶應義塾大学大学院博士課程修了。同年, 同大学助手, 1995年, 専任講師, 2001年助教, 2006年, 情報工学科教授。コンピュータビジョン, 画像処理に関する研究に従事。1997~1999年, 日本学術振興会海外特別研究員として米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所へ留学。2000~2003年科学技術振興事業団さきがけ 21『情報と知』研究員。博士(工学)。正会員。