

# バーチャル夜光虫： 水の流れを媒介とした光と音のメディアアート表現

Virtual Noctiluca:  
Media art of light and music through stream

飛谷 謙介<sup>†</sup>, 饗庭 絵里子<sup>†,††</sup>, 東 祐介<sup>†</sup>,  
相田 恭平<sup>†</sup>, 長田 典子<sup>†</sup>

Kensuke Tobitani<sup>†</sup>, Eriko Aiba<sup>†,††</sup>, Yusuke Higashi<sup>†</sup>, Kyohei Aida<sup>†</sup> and Noriko Nagata<sup>†</sup>

**あらまし** 近年、コンピュータやセンサの発達に伴って、ユニークなフィードバックやインタフェースを利用したアート表現の一つとして、メディアアートが提案されている。その中でも、光や水をテーマとしたアート作品は現実世界において体験することの難しい独特な空間を作り出す。本研究は、水の流れ等の物理的な刺激によって発光する性質を持つ「夜光虫」に注目し、夜光虫をモチーフとしたメディアアート作品「バーチャル夜光虫」を提案する。夜光虫の大きな特徴として、物理的な刺激により発光する性質が挙げられる。また、海洋性のプランクトンであるため水の流れとともに光が減衰することで、独特な発光現象を見ることができる。このような体験を流体シミュレーションと3次元レンジデータ計測を組み合わせることで実現し、CGを用いて仮想的に表現する。さらに、ユーザの操作によって変化する水の流れに合わせてサウンドエフェクトと発光色を変化させる。これにより、水の流れを媒介とした光と音のアート表現を実現する。また、コンジョイント分析による印象評価実験から、本システムにおける「夜光虫らしさ」および「美しさ」の要因を明らかにする。最後に、より直感的な体験を可能にするため、多層構造の布ディスプレイを映像提示装置として使用したバーチャル夜光虫システムを作成する。

**キーワード**: 夜光虫, 流体シミュレーション, メディアアート, 三次元レンジデータ計測, 多層布ディスプレイ

## 1. ま え が き

芸術表現の一形態として、新しい技術的発明を芸術表現に取入れるメディアアートがある。メディアアートは、映像や音など、目的に応じたメディアをフィードバックすることで、新しい体験や感情を喚起するものであり、相互作用的でユニークなインタフェースを介したものが多数提案されている。特に水や光をモチーフとしたメディアアート作品は現実に体験することが難しい幻想的な空間を作り出している。

水の流れや光の振る舞いは古くから現在に至るまで、芸術の対象としてさまざまな形で扱われてきた。音楽家である Joseph-Maurice Ravel や Claude Achille Debussy は水の様々な表情を音楽として表現した。また、ホテルや花火など、暗闇に浮かぶ独特な発光現象は視覚的な観賞素材として古くから親しまれている。現在においては、通りや広場を独特な幾何学模様のイルミネーションで飾るルミナ

リエや音楽に乗せて光や噴き出す水を変化させる噴水である Dubai Fountain などがある。これらも水や光や音楽による近代の芸術作品であり、多くの人に親しみと感動を与えている。このように水や光の振る舞いが生み出す美しい体験や感動はだれもが共通して持っている感覚に訴えるものであると考えられる。

本研究では水の流れ・光の振る舞い・音楽を融合したコンテンツであり、夜光虫をモチーフとしたメディアアート作品「バーチャル夜光虫」を制作することを目的とする。夜光虫は海洋性のプランクトンであり、物理的な刺激により発光する性質がある。真っ暗な場所で、夜光虫の漂う水面を手でかき混ぜると、夜光虫の放つ光により手の形状や動作を認識することができる。また、水面がきらめき、水の流れとともに光が減衰していくことによって、非常に美しい体験をすることができる。このように夜光虫は、それ自体が芸術性の高いインタラクティブメディアであると考えられる。本研究では、このような体験をCGを用いて仮想的に実現する。また、発光とともにサウンドエフェクト(SE)を付加し、音の印象を発光色で表現することで、水の流れを媒介とした光と音のメディアアート表現を行う。最終的に、より直感的な体験を可能にするため、多層布ディ

2013年12月3日受付, 2014年2月14日再受付, 2014年3月25日採録

<sup>†</sup>関西学院大学大学院 理工学研究所 / 感性価値創造研究センター

(〒669-1337 兵庫県三田市学園2丁目1番地)

<sup>††</sup>電気通信大学大学院 情報システム学研究科

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

スプレイを映像提示装置として使用したバーチャル夜光虫システムを作成する。

## 2. 先行研究

近年、コンピュータやセンサを用いて美しい体験や感動を喚起するデジタルコンテンツが多数提案されている。Brownは近づく人の動きに応じてLEDの色や効果音に変化するコンテンツ「Bion」<sup>2)</sup>を提案している。これは人工生命を表現した青い光のLEDで満たされた空間を歩くことによって、大きな生命体に包まれているような不思議で幻想的な感覚を引き起こす。松尾らの「Noctiluca」<sup>4)</sup>は波などの刺激によって海中で幻想的に光る夜光虫をモチーフにした照明インスタレーションを提案している。これは人の動きに応じて天井から吊下げられたLEDを発光させることで、光を放つ夜光虫が漂う海面を海中から見上げるような空間演出を行っている。尼岡らは三次元形状測定技術を用いたメディアアート「Collective Body」<sup>5)</sup>を提案している。これは計測した三次元モデルをパーティクルの集合体で表現し、生命活動をモチーフとした特殊視覚効果を加えることで新しいインタラクティブ体験をもたらす。

また、水などの流体を扱ったメディアアート作品として、米澤らの「Tangible Sound」<sup>1)</sup>や柿原らの「Interactive Fountain」<sup>6)</sup>、有賀らの「風体験システム」<sup>7)</sup>などがある。Tangible Soundは流水をインタフェースに用いた楽器システムである。これは水流と音楽は時間により変化するという共通した性質に着目し、水流と音楽の流れを関連付けたインタラクティブシステムである。Interactive Fountainは7基の噴水を団扇型のインタフェースを用いて、噴水のポンプとLEDを操作するインタラクティブ噴水システムである。団扇の形状を利用し、水の噴射量とLEDの色をユーザの動きに合わせて変化させる。風体験システムは日常的に感じているにもかかわらず視覚的に捉えることのできない風をCGアニメーションとして可視化し、風の流れをインタラクティブに変化させることができる。プロジェクトから投影された風の映像をユーザの影で遮ることで、影が障害物となり風の流れが変化する。

このように流体や光や音楽を組み合わせたコンテンツは多数提案されている。しかし、これらのすべての要素を取り入れたメディアアート作品はまだ提案されていない。水の流れ・光の振る舞い・音楽を融合したメディアアートは、より大きな感動を喚起することができると思う。

## 3. システムデザイン

バーチャル夜光虫を実現するためには、夜光虫の特徴である「水の流れ」と「刺激による発光」を表現することが必要である。本研究では水の流れや広がり感を表現するためにリアルタイムでの流体シミュレーションを行う。また、ユーザの動きの検出とそのトラッキングには3次元レンジデータを用いる。本章ではシステムのコンセプトと実

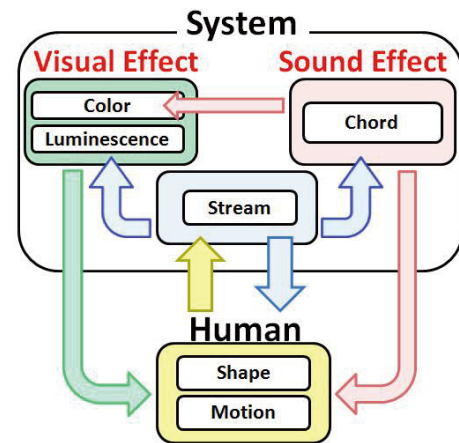


図1 システムコンセプト

現方法について述べる。

### 3.1 コンセプト

本研究では、夜光虫を仮想的に体験できるシステムを提案する。夜光虫を体験することで得られる現象は、「水の流れ」、「刺激による発光」、「発光による物体形状認識」などが挙げられる。水面を手でかき混ぜると、手の形状や大きさ、水の流れが発光現象を通して認識することができる。さらに図1に示すように、発光色やSEをユーザの動きによって変化させる仕組みを取入れる。これらの効果は実際の夜光虫では体験できないため、ユーザに対し新しい体験を提供可能と考えられる。

夜光虫をモチーフとしたメディアアート作品は2章で述べたように、松尾らによって唯一Noctiluca<sup>4)</sup>が提案されている。しかし、Noctilucaは夜光虫の大きな特徴である水の流れに関しては考慮していない。本研究では人の動作と発光を関連付けるだけでなく、流体シミュレーションにより水流のアニメーションを生成することで、水の流れも十分に考慮したメディアアート表現を提案する。流体の挙動に着目したメディアアート作品である風体験システム<sup>7)</sup>は、ユーザが新たに風を起こしたり、流れる風の速度を直感的な操作により変化させることは困難である。本研究ではシステムへの入力として、影のような2次元平面ではなく3次元レンジデータを扱うことでユーザの3次元的な動きに対応する。また、3次元レンジデータをメディアアート作品に応用したCollective Body<sup>5)</sup>は、単純なインタラクションのみを実装しており、身体運動と視覚効果の関連性は薄い。本研究では、計測によって得られた3次元レンジデータを用いて、身体運動を様々な視覚効果に反映させる。

このように、夜光虫体験のような身体動作を入力として流体をコントロールするようなメディアアートはまだ提案されていない。バーチャル夜光虫は流体シミュレーションと3次元レンジデータ計測を組み合わせることで、実際の夜光虫と同様の体験を提供する。さらに、発光色やSEを変化させることで、水の流れ・光の振る舞い・音楽を融合した新しいメディアアート作品を提案する。

### 3.2 流体シミュレーション

CGの映像制作において、水や煙などの流体のアニメーションは非常に複雑であり手作業で生成することは困難である。物体の運動は物理法則にしたがっていることから、自然な流体のアニメーションは物理シミュレーションにより生成することが望ましい。このような物理シミュレーションとCGを融合した技術は物理ベースCG<sup>8)</sup>と呼ばれ、リアリスティックなアニメーション生成を可能とする。ここでは、夜光虫の特徴である水の流れを表現するための方法として、物理ベースCGの一種である流体シミュレーションについて述べる。

#### (1) 流体シミュレーションの分類

流体シミュレーションは用途や目的に応じた様々な手法があり、大きく分けて格子法と粒子法の二つに分類される。格子法では空間や物体はある空間的な広がりを持った連続体で、この連続体を有限の数の格子点で表現する。その格子点に速度や圧力といった変数を配置する。一方、粒子法では物体を粒子の集合として近似し、各粒子に変数を配置する。格子法と比較すると、空間を格子で覆う必要がないので、大変形を伴う問題に適している。例えば、粒子法では流体の自由表面の複雑な運動やしぶきの発生を容易に表現できるのに対して、格子法では格子の変形が著しくなり、計算が困難になる。しかし粒子法では、粒子同士の相対位置を毎タイムステップにおいて計算する必要があるため計算コストは高い。格子法では隣合う格子点同士の接続情報を常に保持しているため、粒子法に比べ計算コストは低い。本研究では、しぶきや渦といった流体の大きな変形を伴うアニメーションを扱うため粒子法を用いる。

また、粒子法の代表的手法としてSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法<sup>9)10)</sup>とMPS(Moving Particle Semi-implicit)法<sup>11)</sup>がある。SPH法は宇宙物理学のために開発された粒子法で、圧縮性のある流体を陽的なアルゴリズムで解く手法であるが、意図的に圧縮性を下げることにより非圧縮性の流体も解くことができる。MPS法は水などの非圧縮性の流体を陰的なアルゴリズムで解く粒子法である。陽解法と陰解法を比較すると、陽解法の方が計算が簡単であり、計算コストも低い。一方、陰解法では連立方程式や繰り返し計算が必要になり、計算コストが高くなる。しかし、陰解法は陽解法に比べ数値安定性が良く、計算精度も優れているため厳密なシミュレーションを可能とする。本研究では、厳密な流体シミュレーションを目的としているのではなく、本物らしいアニメーション生成をリアルタイムで実現することを目的としているため、計算コストの面で優れているSPH法を用いる。

#### (2) SPH法を用いた流体シミュレーション

SPH法は流体を粒子群と近似して計算するシミュレーション手法である。流体には圧力、粘性力、外力が働き、これらの力が流体の速度変化を生み出す。SPH法ではこれらの物理量を粒子に保持させ、その物理量が粒子の周辺に分

布していると考える。つまり座標 $x$ における物理量 $\phi(x)$ は周囲の粒子の持つ物理量 $\phi(j)$ の和として求められる。

$$\phi(x) = \sum_j m_j \frac{\phi_j}{\rho_j} W(x - x_j) \quad (1)$$

ここで $m_j$ 、 $\rho_j$ は粒子の持つ質量と密度であり、 $x_j$ は粒子 $j$ の座標である。各粒子には互いに影響を与える範囲が定義されており、影響範囲外の粒子の物理量は無視することができるため、一般的にカーネル $W$ は $x$ から遠ざかると0になるものが用いられる。このため粒子全体の物理量の総和を計算するのではなく、近傍の粒子だけ計算することで効率化できる。SPH法では粒子の持つ物理量である、圧力、粘性力、外力をそれぞれ独立に圧力項、粘性項、外力項として算出し、最後にそれらの力の和をとることで流体を解くことができる。式(1)を用いて座標 $x$ での密度は以下のように求められる。

$$\rho(x) = \sum_j m_j \nabla W_{den}(x - x_j) \quad (2)$$

$$\nabla W_{den}(r) = \frac{315}{64\pi r_e^9} (r_e^2 - |r|^2)^3 \quad (3)$$

ここで $r_e$ 影響半径であり、粒子 $i$ から一定距離以内に存在する粒子のみ粒子 $i$ に影響を与える。また、圧力項、粘性項は以下のように求める。

$$f_i^{press} = - \sum_j m_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla W_{press}(x_i - x_j) \quad (4)$$

$$f_i^{vis} = \mu \sum_j m_j \frac{v_i + v_j}{2\rho_j} \nabla W_{vis}(x_i - x_j) \quad (5)$$

$$\nabla W_{press}(r) = - \frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |r|)^2 \frac{r}{|r|} \quad (6)$$

$$\nabla W_{vis}(r) = \frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |r|) \quad (7)$$

このようにして求めた力を用いて、粒子の速度と座標を式(8)、式(9)を用いて更新することで流体を解くことができる。

$$v_i^{t+\Delta t} = v_i^t \frac{\Delta t}{\rho_i} (f_i^{press} + f_i^{vis} + f_i^g) \quad (8)$$

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + v_i^{t+\Delta t} \Delta t \quad (9)$$

### 3.3 レンジデータ計測とオブジェクトトラッキング

ユーザの身体運動による視聴覚効果を実現するために、ユーザの3次元レンジデータをシステムへの入力とする。計測によって得られたレンジデータからオブジェクトの位置と形状を推定する。

### 4. バーチャル夜光虫の実現

本章では、3章で説明した流体シミュレーションとオブジェクトトラッキングを組合わせてバーチャル夜光虫を実現するための具体的な実装方法について説明する。

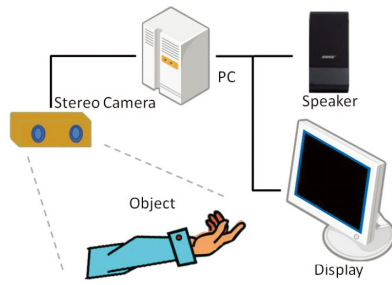


図 2 システム構成

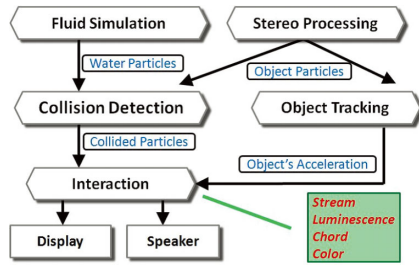


図 3 処理とデータのフロー

#### 4.1 システム構成

バーチャル夜光虫は図 2 に示すように、PC(CPU: Core(TM)2 Duo CPU T9600 2.8GHz / MEMORY: 4GB / GPU: NVIDIA GeForce GTX 260M) とステレオカメラ (Point Grey Research 社, Bumblebee2) により構成される。

また、映像やサウンドの制御には Visual C++ と DirectX SDK, シェーダ言語 HLSL(High Level Shader Language) を利用して実装する。ここではユーザの身体運動による様々な効果の実現例として「水の流れの操作」, 「刺激による発光」, 「発光色と SE」について、それぞれの実現方法を述べる。

#### 4.2 身体運動による視聴覚効果

リアルタイム流体シミュレーションとオブジェクトトラッキングを組み合わせることで、ユーザの身体運動による視聴覚効果を実現する。処理のフローを図 3 に示す。

##### (1) 水の流れの操作

本システムでは流体とオブジェクトをそれぞれ粒子として扱う。これらの衝突判定を行い、オブジェクトの加速度を水流に反映させることで「水の流れの操作」を実現する。2章で説明したように SPH 法は流体を粒子群 (水粒子) としてシミュレーションする手法である。オブジェクトはステレオ処理により多数の 3 次元座標値 (オブジェクト粒子) として計測される。オブジェクト粒子の座標値を加算平均した値をオブジェクトの重心とし、その重心のフレーム間差分のベクトルをオブジェクトの加速度とする。水粒子とオブジェクト粒子の衝突判定を行い、衝突が検知された水粒子 (衝突粒子) のみにオブジェクトの加速度を加えることで、衝突粒子の速度をユーザの動作方向に変化させることができる。また、これらの粒子の速度が SPH 法による流体シミュレーションによって他のすべての粒子に相互的に伝

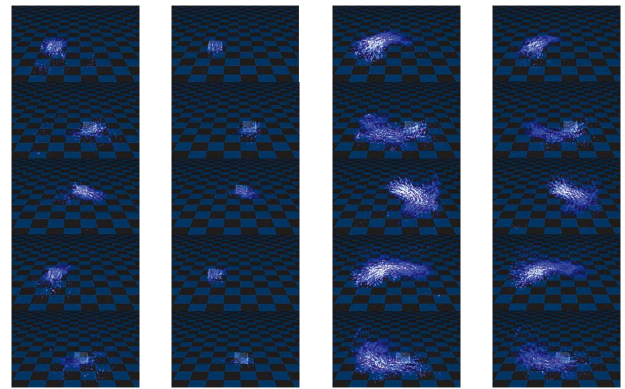


図 4 加速度  $a$  と粘性  $\mu$  の違いによる水の広がり方の変化

播し、新しい水の流れを生み出す。このようにして、ユーザは水の流れを変化させることができる。また、粒子の持つ物理量である粘性の値を変えることで速度の伝播に影響を与え、水の広がり感に変化を与えることができる。粘性の値を変えた描画結果を図 4 に示す。粘性が低い方が速度の伝播が激しくなるため水の広がり方が大きくなる。

##### (2) 発光

刺激による発光は夜光虫の最も大きな特徴であり、バーチャル夜光虫の基本となる機能の一つである。水粒子に加えられた刺激の大きさにより、各水粒子の発光強度を変化させることで「刺激による発光」を表現する。発光強度は 0.0~1.0 の値で制御されており、水粒子に加えられる刺激の大きさに比例した値を与える。刺激の大きさ  $F_i$  は式 (10)、式 (11) に示すように、粒子の速度と衝突粒子であると検知されてからの経過時間により決定する。

$$F_i^{collide} = \max(f - t_i, 0) \quad (10)$$

$$F_i = d(|v_i| + F_i^{collide}) \quad (11)$$

ここで  $f$  は衝突粒子と検知された瞬間での刺激の大きさであり、 $t_i$  はその時点からの経過時間を示す。したがって、 $F_i^{collide}$  は各水粒子がオブジェクトのみから受ける刺激の大きさであると考えられる。ただし、 $F_i^{collide} < 0$  の場合は  $F_i^{collide} = 0$  として扱う。また、 $|v_i|$  は粒子  $i$  の速度である。 $F_i^{collide}$  に  $|v_i|$  を加えることで、オブジェクトからの力のみではなく、水粒子同士が相互的に与え合う力についても考慮することができる。その結果、発光により粒子同士の力の伝播を視覚的に捉えることができ、水の流れを認識することができる。また、 $d$  は減衰率であり、この値を変えることで残像の残り方や水の広がり感が変化する。減衰率  $d$  の値を変えた描画結果を図 5 に示す。粘性を変えた場合の水の広がり感と比較すると、全体的ににじむような広がり方をしており、減衰率が低くなるにつれ尾を引くような残像が強く残っている。

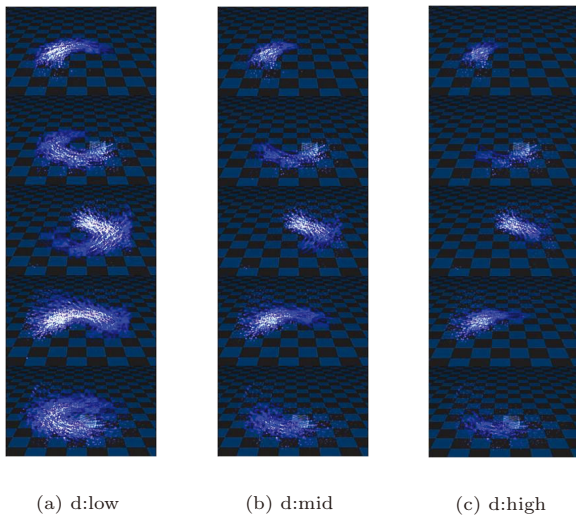


図 5 減衰率の違いによる水の広がり方の変化

表 1 水の流れ・和音・色の関係

水の流れ	和音	色		
Neutral	-	R:0.10	G:0.30	B:0.40
上	AbM7	R:0.59	G:0.42	B:0.61
下	Gm11	R:0.56	G:1.00	B:0.38
左	Cm11	R:0.59	G:0.42	B:1.00
右	Bb11	R:0.09	G:1.00	B:0.61
前	Fm9	R:1.00	G:0.90	B:0.03
後	EbM7	R:1.00	G:0.18	B:0.18
混	Dm7-5	R:1.00	G:0.03	B:0.86

(3) 発光色と効果音

ユーザの動作に合わせて変化する水の流れによって、粒子の発光色と SE を変化させる仕組みを実装した。水粒子の速度変化により水の流れは変化することから、水粒子の速度ベクトルの加算平均値と、速さの総和の値を発光時に鳴る SE のパラメータとする。SE には和音を用いる。和音はメロディ・リズムと共に音楽を作る重要な要素であり、音楽による感情喚起の要因の一つである。和音の印象を定量化する上で様々な心理指標や心理物理モデルが提案されている<sup>12)~15)</sup>。本研究では和音の印象に合った色を発光色とすることで、水の流れ・光・音の一体感を高めている。現在は上下、左右、前後、かき混ぜるなど単純な水流のみを実装している。水の流れ、和音、色を関係を表 1 に示す。和音と色の対応は、人の和音認知に現状で最も近いモデルである藤澤らの和音性評価モデル<sup>16)</sup>に基づいて RGB 値を算出している。

レンダリングにはポイントスプライトという手法を用いる。これは 1 頂点にテクスチャを張り常に視点に正対する処理や頂点サイズの変更などを低コストで行うことができ、水や炎といった多数の粒子を描画するのに適したレンダリング手法である。得られた RGB の値を図 6 に示すようなグレースケールテクスチャの RGB 値にリアルタイムに加算することで発光色を変更することができる。また、張りつけるテクスチャはリアルタイムに変更することができるため、色のみでなくテクスチャ自体を変化させることも可能である。発光色・テクスチャ・粒子サイズを変更した描



図 6 グレースケールテクスチャ

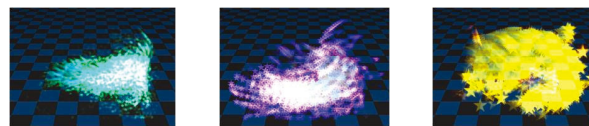


図 7 発光色・テクスチャ・粒子サイズの変化例

画例を図 7 に示す。また、システムを体験している様子を図 8 に示す。

4.3 高速化

流体シミュレーションや粒子群同士の衝突判定は非常に計算コストが高く、リアルタイムアプリケーションとして扱うことは難しい。ここではそれらの処理を実時間で行う手法について説明する。

(1) バケット構造を用いた衝突演算

SPH 法のような流体を粒子と近似する手法では毎タイムステップにおいて、互いに影響し合う粒子を探索しなければならない。影響範囲は任意であるが、距離が遠くなるにつれ影響力は小さくなり、影響範囲外の粒子は無視できるため、効率的に近傍の粒子を探索することで処理を高速化できる。本研究では計算領域を格子状に分割(バケット)し格子と粒子番号を関係づけることで、計算量を  $O(n^2)$  から  $O(n)$  に削減している<sup>17)</sup>。

(2) GPU を用いた並列処理

GPU(Graphics Processing Units) はグラフィックス処理に特化した並列計算機であり、グラフィックスの処理であれば CPU よりも高速に行うことができる。また、最近の GPU プログラミングでは 3DCG におけるライティングや座標変換を制御できるようになっている。これによって、GPU をグラフィックスのレンダリング以外の汎用的な処理にも用いることができる可能性が生じた。この技術は GPGPU(General Purpose computing on Graphics Processing Units)<sup>18)</sup> と呼ばれ、レンダリング以外の処理を高速化する研究が多数行われている<sup>19)~22)</sup>。本研究では、GPU を用いて SPH 法による流体シミュレーションを高速化する<sup>23)</sup>。同様にして衝突粒子の検知についても GPU で計算を行う。

5. 評価と考察

本システムは水の粘性や光の減衰率、粒子の大きさなどを変えることでユーザに異なる印象を与える。本章ではパッチル夜光虫における「夜光虫らしさ」「美しさ」をはじめとする心理評価について述べる。

5.1 コンジョイント分析によるパラメータ評価

本システムにおいて水の粘性や光の減衰率は、水の広が



図 8 システムを使用している様子

表 2 パラメータの組み合わせ

	A			B		
	粘性	減衰率	サイズ	粘性	減衰率	サイズ
1	$\mu$ .Hi	d.Low	s.Small	$\mu$ .Hi	d.Low	s.Mid
2	$\mu$ .Hi	d.Hi	s.Small	$\mu$ .Low	d.Low	s.Large
3	$\mu$ .Low	d.Hi	s.Mid	$\mu$ .Low	d.Hi	s.Small
4	$\mu$ .Low	d.Low	s.Mid	$\mu$ .Low	d.Mid	s.Mid
5	$\mu$ .Low	d.Mid	s.Small	$\mu$ .Hi	d.Mid	s.Mid
6	$\mu$ .Hi	d.Hi	s.Large	$\mu$ .Low	d.Low	s.Small
7	$\mu$ .Hi	d.Mid	s.Small	$\mu$ .Hi	d.Low	s.Small
8	$\mu$ .Hi	d.Low	s.Mid	$\mu$ .Hi	d.Hi	s.Mid
9	$\mu$ .Low	d.Mid	s.Mid	$\mu$ .Hi	d.Low	s.Mid
10	$\mu$ .Low	d.Mid	s.Large	$\mu$ .Hi	d.Low	s.Large
11	$\mu$ .Hi	d.Low	s.Small	$\mu$ .Low	d.Hi	s.Mid
12	$\mu$ .Low	d.Low	s.Small	$\mu$ .Low	d.Low	s.Large
13	$\mu$ .Hi	d.Mid	s.Large	$\mu$ .Low	d.Low	s.Mid
14	$\mu$ .Low	d.Mid	s.Large	$\mu$ .Low	d.Hi	s.Large

り感や残像の残り方に関係する。また、粒子サイズは粒状感や光のきらめき具合に関係する。ここでは、これらのパラメータを組合せたパターンの中から、コンジョイント分析<sup>24)</sup>を用いて「夜光虫らしさ」や「美しさ」に関する要因を見つけ出すことで、それらを表現するための最適なパラメータの組み合わせを見つけることを目的とする。

### 5.2 方法

コンジョイント分析は、多属性選好を評定する手法であり、主に心理測定学やマーケティング分野で用いられている。直交表を用いて実験計画を行うため、最小限の試行数で、被験者が好むパラメータの組み合わせを効率よく調査することが可能となる。因子には粘性 (viscosity)・減衰率 (decay)・粒子サイズ (size) を用いて、粘性は2水準、減衰率・粒子サイズは3水準として JMP によりコンジョイント分析を行う。その結果、表 2 に示されているパラメータの組み合わせで対比較を行う実験が計画された。

表 2 に示されている比較対をランダムに提示し、被験者に実際にシステムを操作してもらう。この際、選んだ2つの刺激の前後関係が偏らないようにカウンターバランスをとる。被験者はそれぞれの刺激に対してシステムを体験した上で、どちらが夜光虫らしい・美しい・操作性が高いかという3つの心理指標により、2段階で評価する。被験者には、実験前にシステムを体験してもらい、操作の慣れ具合によって偏りが生じないように注意した。

表 3 尤度比カイ 2 乗検定

「夜光虫らしさ」			
要因	尤度比カイ 2 乗	自由度	p 値 ( $Prob > ChiSq$ )
粘性	0.107	1	0.7431
減衰率	2.675	2	0.2625
サイズ	1.590	2	0.4516
粘性*減衰率	7.126	2	0.0283*
粘性*サイズ	1.239	2	0.5382
減衰率*サイズ	5.595	4	0.2315

「美しさ」			
要因	尤度比カイ 2 乗	自由度	p 値 ( $Prob > ChiSq$ )
粘性	3.090	1	0.0788
減衰率	10.311	2	0.0058*
サイズ	0.098	2	0.9521
粘性*減衰率	5.641	2	0.0596
粘性*サイズ	1.707	2	0.4259
減衰率*サイズ	6.607	4	0.1582

「操作性」			
要因	尤度比カイ 2 乗	自由度	p 値 ( $Prob > ChiSq$ )
粘性	0.000	1	0.9824
減衰率	3.147	2	0.2073
サイズ	3.175	2	0.2044
粘性*減衰率	3.657	2	0.1607
粘性*サイズ	1.892	2	0.3882
減衰率*サイズ	9.397	4	0.0519

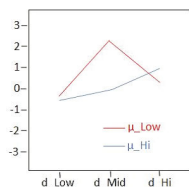
### 5.3 結果と考察

20代の大学生5人に実験を行った。なお、被験者はいずれも夜光虫の特性や動作についての知識を持ち合わせており、「夜光虫らしさ」について適切に評価可能と判断した。得られた評価結果に対し尤度比カイ 2 乗検定を行った結果を表 3 に示す。

夜光虫らしさに関しては粘性と減衰率の交互作用が有意であった ( $x^2(2) = 7.13, p < .05$ )。また、美しさについては減衰率が有意であったが ( $x^2(2) = 10.31, p < .01$ )、操作性に関してはどの要因に対しても有意差がみられなかった。3章でも述べたように、粘性と減衰率はともに水の広がり方と残像の残し方に影響する。粘性の値を小さくすると力の加えられた方向に鋭く広がり、しぶきのような残像を残す。一方、減衰率を小さくすると全体的ににじむようにして鈍く広がっていく印象を与え、尾を引くような残像を残す。このことから、夜光虫らしさと美しさはともに水の広がり方と残像の残り方に関係があると考えられる。また、美しさに関して表 3 から粘性 ( $x^2(1) = 3.09, p < .07$ ) や粘性と減衰率の交互作用 ( $x^2(1) = 5.64, p < .06$ ) に有意差は見られないものの、有意傾向にあることから、これらも美しさを感じさせている可能性を否定することはできない。これは、美しさを感じさせる要因が減衰率の影響である鈍い水の広がり感だけでなく、粘性の変化による鋭い広がり感や、鋭さと鈍さのバランスによる広がり感にも関係すると考えられる。

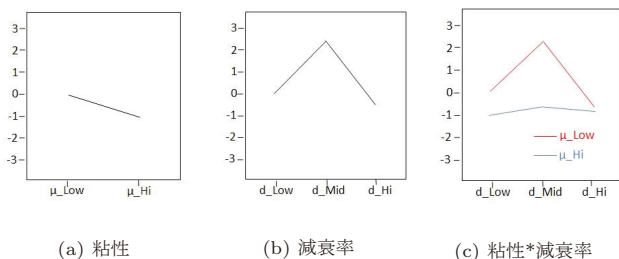
次に、有意差および有意傾向がみられた要因の効用値について考察する。図 9 に「夜光虫らしさ」の、図 10 に「美しさ」の効用値をそれぞれ示す。

正の値は夜光虫らしさ・美しさを促進する方向へ作用し、



(a) 粘性\*減衰率

図 9 「夜光虫らしさ」の効用値



(a) 粘性

(b) 減衰率

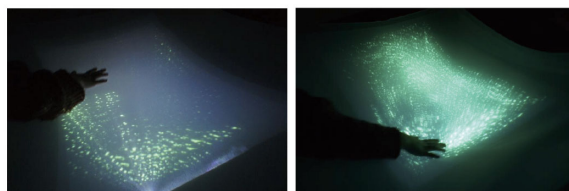
(c) 粘性\*減衰率

図 10 「美しさ」の効用値

負の値は抑制する方向へ作用する。これらの図から、夜光虫らしさは「粘性が低いかつ減衰率が中」の組み合わせのときに最も評価が高く、美しさは「粘性が中」のときに最も評価が高いことがわかる。また美しさに関して、粘性の値を比較すると「粘性が低い」の方が相対的に評価が高く、粘性と減衰率の交互作用では「粘性が低いかつ減衰率が中」の組み合わせが明らかに評価が高い。これらのことから、「動作方向に鋭い広がり感 ( $\mu\_Low$ :粘性のみの影響)」「ある程度の鈍い広がり感と残像 (d\_Mid:減衰率のみの影響)」「鋭さと鈍さのバランスがとれた広がり感 ( $\mu\_Low$ , d\_Mid:粘性と減衰率の交互作用)」という 3 種類の広がり感を美しいと感じていると考えられる。つまり、程良く水の広がり感を感じるものに美しさを感じ、広がり感の無いもの・広がり感の強過ぎるものに対しては美しさを感じにくい傾向があると言え換えることができる。また、これらの程良い広がり感の中でも「鋭さと鈍さのバランスがとれた広がり感 ( $\mu\_Low$ , d\_Mid:粘性と減衰率の交互作用)」は夜光虫らしさにおいても共通して高い評価を得ている。このことは、夜光虫らしさと美しさはまったくの別物というわけではなく、本システムにおける夜光虫らしさと美しさの一種であると関係付けることができる。

#### 5.4 考察

以上から、夜光虫らしさと美しさはともに水の広がり感に関係があり、美しさを感じさせる水の広がり感の中でも粘性と減衰率をバランスよく設定したものが、夜光虫らしさがあるという結果を得た。この結果に基づいて、パラメータの組み合わせを選択することで本システムの評価を向上させることができると期待する。また、夜光虫らしさと美しさの関係づけられたことで、本研究の目的である「美しい



(a) 浅い操作

(b) 深い操作

図 11 ディスプレイの変形による発光の違い

夜光虫体験を仮想的に体験できるシステムの開発」を達成できたと考える。さらに、一般のエンタテインメントシステムにおけるコンジョイント分析によるシステム評価の有用性を示した。

### 6. 多層布ディスプレイを用いたバーチャル夜光虫システム

本章では、本システムのより直感的な体験を可能にするため、多層構造の布を映像提示装置として使用したバーチャル夜光虫システムについて述べる。多層布ディスプレイにより、ユーザはディスプレイの表面を水面と見立て、水をかき混ぜるようにディスプレイを変形させることができる。そのため、より直感的かつ深みのある夜光虫体験を得ることが可能となる。

#### 6.1 多層布ディスプレイ

近年、様々な形態のディスプレイが開発されており<sup>25)26)</sup>、これらのディスプレイを使用したコンテンツも併せて報告されている。しかし、本研究で提案する様な多層構造の布を利用したディスプレイに関する報告はされていない。実際の夜光虫の特性を考慮すると、触るという身体運動に伴い視聴覚効果を提示する仕組みを有するディスプレイがユーザに与える影響は大きいと考えられる。

多層布ディスプレイの素材には、レースカーテンなどに利用される透過性の高い布を使用する。これにより、滑らかな触感を実現するとともに、その多層構造によって各布ごとの映像の投影位置が変化し、奥行きのある映像を作り出すことができる。また、ディスプレイ自体が変形するため、図 11 に示すような、ディスプレイを押し込む深さによって発光の強さを変化させる新しい視覚効果を追加した。

#### 6.2 システム構成

多層布ディスプレイを用いたバーチャル夜光虫システムのシステム構成を図 12 に示す。多層布ディスプレイは地面と水平に配置した 5 枚の布で構成されている。各布はゴムによって支柱に固定されているため、ユーザの身体運動によってディスプレイの形は柔軟に変化する。ディスプレイの下部には映像投影のためのプロジェクタを設置し、上部にはディスプレイへの接触判定およびディスプレイの変形検出のため、距離センサ (Microsoft 社 Kinect センサ) を設置している。実際にシステムを使用している様子を図 13 に示す。

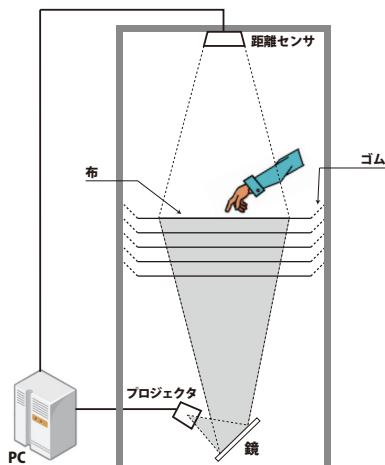


図 12 システム構成

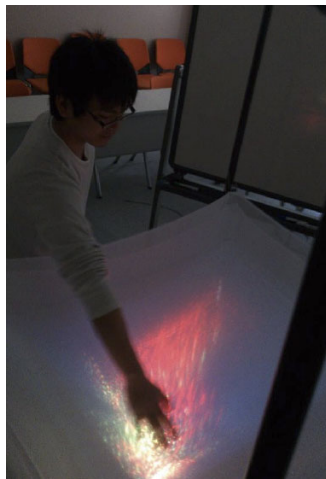


図 13 多層布ディスプレイを用いたシステムを使用している様子

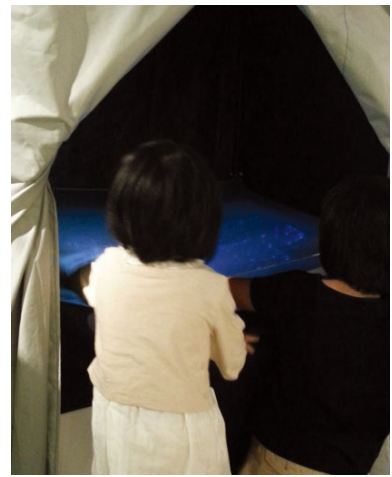


図 14 VisLab Osaka における展示の様子

### 6.3 体験者からの評価と考察

本システムを2013年3月に関西学院大学内、また2013年9月24日から9月30日までグランフロント大阪内 VisLab Osaka にて実演展示し、展示期間中300名以上の来場者が本システムを体験した。VisLab Osaka での展示風景を図14に示す。また、関西学院大学内展示の際に、大学生および大学院生11名に対して、本システムに対する評価のためのアンケートを実施した。その結果、美しさや深み感を問うアンケート項目において高い評価が得られた。この結果は、多層布ディスプレイによって実現した視触覚効果による影響を示唆していると考えられるが、検証にはモニタを利用したバーチャル夜光虫システムとの比較実験が必要だと考えられる。

体験者の意見として、布の変形による視覚効果の種類を増やしてほしいという意見や、多人数でインタラクティブに体験できる仕組みが欲しいといった意見を得た。本システムによるより豊かな体験の実現のため、今後はこれらの意見をフィードバックしたシステムを構築していきたい。

## 7. むすび

本研究では水の流れ・光の振る舞い・音楽を一体としたメディアアート作品であるバーチャル夜光虫を提案した。実時間で流体シミュレーションを行うことで水の流れを表現し、3次元レンジデータを計測することで、実際の夜光虫体験で得られる水の流れや刺激による発光を実現した。また、水の流れの変化に合わせて和音と発光色を変化させることで、水の流れを媒介とした光と音のアート表現を実現した。

また、コンジョイント分析を用いて、本システムにおける夜光虫らしさと美しさを定量化した。夜光虫らしさと美しさは、ともに水の広がり感に関係しており、夜光虫らしさは美しさの一種であるという結果を得た。この結果を用いて各パラメータを決定することで、夜光虫をモチーフとしたコンテンツとしての価値を高められると考える。また、

夜光虫らしさと美しさを関係付けられたことで、本システムの妥当性を示すことができた。

最後に、より直感的な表現を実現するため、多層構造の布ディスプレイを映像提示装置として使用したバーチャル夜光虫システムを作成し、実演展示を行った。実演展示の際に行ったアンケートの結果から、美しさや深み感といった項目において高い評価を得た。

今後は、さらに自然な夜光虫の表現方法を追求するとともに、展示の際、体験者から得た意見を参考にしメディアアート作品としての完成度を高めるべく研究を進めていく。

## 〔文 献〕

- 1) 米澤朋子, 間瀬健二: "流体による楽器インタラクションの考察", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **5**, (1), pp.755-762 (2000)
- 2) Brown, A. and Fagg, A.: "Bion", *Proc. of SIGGRAPH '06 ACM SIGGRAPH 2006 art gallery*, Article No. 29, (2006)
- 3) Monno, K. and Nagata, T.: "Japan media arts festival lighting doodle project"Pika Pika", *Proc. of SIGGRAPH '07 ACM SIGGRAPH 2007 art gallery*, pp.162, (2007)
- 4) 松尾高弘, 平田 哲, 古賀崇了: "Noctiluca", *2004 Asia Digital Art Award* (2004)
- 5) 尼岡利崇, Laga, H., 齋藤 豪, 中嶋正之: "Collective Body" 3次元形状測定技術を用いたインタラクティブアート", *芸術科学会論文誌*, **8**(4), pp.151-159 (2009)
- 6) 柿原利政, 溝口敦士, 櫻井快勢, 瀬井大志, 谷本隼飛, 宮田一乗: "Interactive Fountain", *芸術科学会論文誌*, **7**(2), pp.34-42 (2008)
- 7) 有賀清一, 白谷榮梨子, 鈴木太郎, 飯田 誠, 荒川忠一: "リアルタイム数値流体力学にもとづく視覚による風体験システム", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **12**(3), pp.277-283 (2010)
- 8) 鈴木克幸: "物理ベース CG-計算力学の新しい応用-", *可視化情報学会誌*, **28**, 108, pp.28-31 (2008)
- 9) J.J.Monaghan: "Smoothed particle hydrodynamics", *Annu. Rev. Astrophys.*, **30**, pp.543-574 (1992)
- 10) M.Muller, D.Charypar and M.Gross: "Rigid fluid: simulation for interactive applications", *Proc. of SIGGRAPH '03 ACM SIGGRAPH 2003 on Computer Animation*, pp.154-159 (2003)
- 11) S.Koshizuka, H.Tamako and Y.Oka: "A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation", *Comput. Fluid Dynamics J.*, **4**, pp.29-46 (1995)
- 12) R.Plomp and W.J.M.Levelt: "Tonal Consonance and Critical Bandwidth", *Journal of the Acoustical Society of America*, **38**, pp. 548-560 (1965)
- 13) A.Kameoka and Kuriyagawa: "Consonance Theory: Part I and II", *Journal of the Acoustical Society of America*, **45**, pp.1451-1459 (2005)
- 14) W.A.Sethares: "Tuning, Timbre, Spectrum, Scale", Springer London (2005)



- 15) R.Parncutt: "Harmony: A psychoacoustical approach", Berlin: Springer-Verlag (1989)
- 16) 藤澤隆史, 谷 光彬, 長田典子, 片寄晴弘: "和音性の定量的評価モデルに基づいた楽曲ムードの色彩表現インタフェース", 情報処理学会論文誌, **50**(3), pp.1133-1138 (2009)
- 17) B.K.Mishra: "A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: Parti-contact mechanics", *International Journal of Mineral Processing*, Vol.71(1), pp.73-93 (2003)
- 18) "GPGPU", <http://www.gpgpu.org/>.
- 19) J.Harris, M., Coombe, G., Scheuermann, T. and Lastra, A.: "Physically-Based Visual Simulation on Graphics Hardware", *Proc. of SIGGRAPH 2002 / Eurographics Workshop on Graphics Hardware 2002*, pp.1-10 (2002)
- 20) R.Fernando: "GPU gems: Programming Techniques, Tips, and Tricks for Real-Time Graphics", *Addison-Wesley Professional* (2004)
- 21) M.Pharr and R.Fernando: GPU Gems 2: "Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation", *Addison-Wesley Professional* (2005).
- 22) JohnD.Owens, Luebke, D., Govindaraju, N., Harris, M., JensKr uger, E.Lefohn, A., J.Purcell, T.: "A Survey of General-Purpose Computation on Graphics Hardware", *Computer Graphics Forum*, **26**(1), pp.80-113 (2007)
- 23) Harada, T., Koshizuka, S. and Kawaguchi, Y.: "Smoothed Particle Hydrodynamics on GPUs", *Proc. of Computer Graphics International*, pp.62-70 (2007)
- 24) 小島隆矢: "コンジョイント分析における因果モデリングの方法: コンジョイント分析の手法に関する研究その1", 日本建築学会環境系論文集, 592, pp.67-74 (2005)
- 25) 串山久美子, 笹田晋司: "生物感覚を提示する毛状視触覚ディスプレイ「Fur-Fly」", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **15**(3), pp.459-462 (2010)
- 26) 中島, 康祐, 伊藤雄一, 築谷喬之, 藤田和之, 高嶋和毅, 岸野文郎: "FuSA<sup>2</sup> Touch Display:大画面毛状マルチタッチディスプレイ", 情報処理学会論文誌, **53**(3), pp.1069-1081 (2012)



とびに けんすけ  
**飛谷 謙介** 2002年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。2004年岐阜県立情報科学芸術大学院大学 (IAMAS) 修士課程修了。JST 地域結集型共同研究事業特別研究員を経て, 2010年岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年岐阜大学産官学融合本部講師。2014年より関西学院大学理工学部/感性価値創造研究センター特任講師。博士(工学)。主にコンピュータビジョン, 感性情報学に関する研究に従事。電気学会, 精密工学会, 日本顔学会, ACM など各会員。



あいば えりこ  
**饗庭絵里子** 2004年京都市立芸術大学音楽学部ピアノ科卒業。2009年同大学大学院音楽研究科博士課程修了。同年より関西学院大学理工学研究科博士研究員。2012年より産業技術総合研究所にて日本学術振興会特別研究員 PD。2013年電気通信大学大学院情報システム学研究科助教。博士(音楽学)。専門は聴覚心理学, 音楽心理学, 感性情報学など。日本音響学会, 音楽知覚認知学会, 情報処理学会, 日本心理学会各会員。



ひがし ゆうすけ  
**東 祐介** 2011年3月関西学院大学理工学部情報科学科卒業。2013年3月同大学院理工学研究科修士課程修了。感性情報学, およびコンピュータグラフィックに関する研究に従事。



あいだ きょうへい  
**相田 恭平** 2008年3月関西学院大学理工学部情報科学科卒業。2010年3月同大学院理工学研究科修士課程修了。感性情報学, およびコンピュータグラフィックに関する研究に従事。



ながた のりこ  
**長田 典子** 1983年京都大学理学部数学系卒業。同年三菱電機(株)入社。産業システム研究所などで産業計測機器の研究開発に従事。1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。2003年より関西学院大学理工学部情報科学科助教, 2007年教授。2009年米国バドュー大学客員研究員。2013年感性価値創造研究センター長。博士(工学)。専門は感性情報学, メディア工学。情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本認知心理学会, IEEE, ACM など各会員。