

lapillus bug: 音響浮揚による粒子の空中移動制御とインタラクション

河野通就^{†1} 星貴之^{†2} 笥康明^{†3}

本研究では、素材に対して外的な刺激や力を与えることにより、その素材特有の「生き物」のような振る舞いを抽出・表現することを目的としている。今回、筆者らは、音響浮揚によって粒状の物質を浮遊させ、あたかも小さなムシのように実世界の三次元空間上を移動させることを可能にし、さらに空中の粒子と人間との身体的なインタラクションを実現する。本稿では、コンセプト、システムの詳細、および実装したインタラクションについて報告する。

lapillus bug: Mid-Air Actuation and Interaction with Particles Based on Acoustic Levitation

MICHINARI KONO^{†1} TAKAYUKI HOSHI^{†2}
YASUAKI KAKEHI^{†3}

In this research we aim to extract and represent creature-like features of materials by providing external forces. By levitating a particle using acoustic levitation, we have enabled the particle to act as if it is a small bug moving around in the three-dimensional real world. Additionally, embodied interactions are available with this levitated particle. In this paper, we describe the concept, details of the system and implementation of the interaction technology.

1. はじめに

コンピュータと人間のインタラクションを考える上で、四角い画面の存在は常に制約となってきた。画面の中に情報は存在し、人間は画面の外からインタフェースを駆使してそれらを操作するという関係が一般的になる中で、近年では、その制約を取り払おうとする取り組みも盛んになってきた。一般的に、画面の中の情報は容易に動的な変化を見せるが、画面の外側に置かれた身近な物体の多くは動かずに止まっていることが多い。プロジェクションマッピングと呼ばれる映像投影重畳などにより、あたかも物体が動的に変化しているかのように見せるアプローチも盛んに行われるようになってきているが、より直接的にユーザにフィードバックや情報を提示するために物体そのものの動きを制御しインタラクションを可能にする研究が注目を集めている[1]。

コンピュータにより物体を操作するものは、大きく二つのアプローチの研究に大別できる。一つはモータなどのアクチュエータを直接的に物体に埋め込む手法（直接駆動）である。しかし、この手法では、導線や基板などによって、物体に物理的な制約を設けてしまうことが考えられる。も

う一つのアプローチは、動かされる物体には何も組み込まずに、外力によって物体に動力を与える手法（間接駆動）である。このアプローチでは、物体に直接的な加工を施す必要性がないために、物体の特性を損なうことなく扱うことが可能である。ただし、物体の形状や特性などを考慮しながら適切に外力を与える必要がある。

筆者らはこれまでも後者のアプローチを採り、物体そのものの特性を引き出しながらインタラクティブに動きをつけるシステム (tamable looper[2])の提案を行ってきたが、そこには実世界ならではの制約として「重力」の問題が付きまとい、基本的には地面に接地した状態での動きに留まっていた。そこで今回は、間接駆動の方式を採りながら、身近に存在する物体の粒を空中に浮遊・移動させる手法を

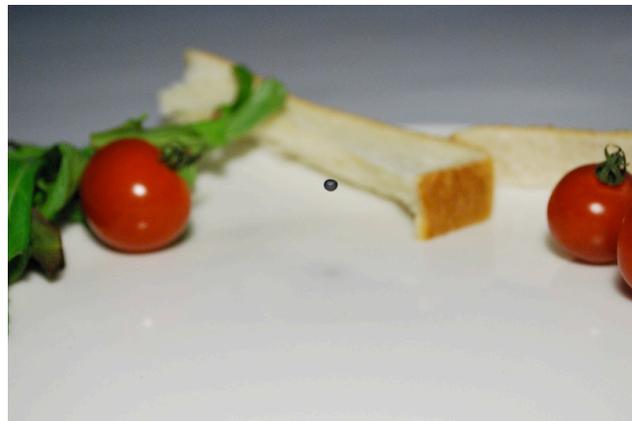


図 1 lapillus bug

Figure 1 lapillus bug

^{†1} 慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Government, Keio University

^{†2} 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

^{†3} 慶應義塾大学 環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

提案し、鑑賞者とのインタラクションを含め、その粒子の動きを通じた応用表現を行うことを目的とする。

具体的には、超音波振動子アレイを用いて音響浮揚によって粒子を空中に定位させ、さらに水平方向の位置をコントロールする。本稿では、まずこの手法の基本的な仕組みおよびプロトタイプ的设计に関して述べる。また、本手法によって、粒子が空中で小刻みに振動しながら漂うという独特の振る舞いに注目し、あたかも小バエのような「生き物感」を伴う表現を制作した。本稿では、人間の動作に反応しながら粒子がムシのように飛び回るインタラクティブインスタレーション作品 *lapillus bug* についてまとめる。

2. 関連研究

物質と生命の関係性は密接に関わっていると考えられてきており[3]、近年のアートやエンタテインメントなどの分野で無機質な物質から生物らしさを見出し、表現する取り組みは行われてきた。`新しい生物`[4]はストローや付箋など日用品的な素材に動きを与え、コマ撮りの手法によって生き物らしい動きを表現している映像作品である。また映像ではなく、実世界で同様な試みがされている作品として *Meter Crawler*[5]が挙げられる。巻き尺にモータを埋め込み、それをカタツムリのような生物に見立て、動きを与えている。さらに筆者らのこれまでの取り組みであった *tamable looper*[2]では球形の磁石が連なる群から生き物らしさを見出し、それによって表現される`生き物`とのインタラクションを可能としてきた。本研究は、このような取り組みをより抽象的な素材を用いて、そして素材そのものには特別な加工を施すことなく、実世界空間上で表現するものである。

このような表現を実現するためには、物体に直接的なアクチュエータを埋め込むことなく、間接的な制御によって物体に動力を与える手法の検討が必要である。この手法にはこれまでも様々な取り組みがなされてきた。代表的な例としては、*Actuated Workbench*[6]や *Madgets*[7]のようにアレイ状に配置された電磁石によって、物体に平面上で動作を与えるものである。これらの研究では、動かされる物体は磁石が内蔵された独自に設計されたものであり、素材の特性には着目せずに、情報を入出力するインタフェース開発を目的としている。さらに、超音波を用いることによって、非接触の状態では物体を二次元的に制御することを可能とした *Ultra-Tangibles*[8]が挙げられる。*Ultra-Tangibles*では物体に特殊な加工が必要ではないが、装置によって四方から囲まれた空間上の制御に留まり、またその制御は二次元的平面空間に限る。

こうした間接的な制御手法によって、二次元的な物体の制御を可能とした研究がある一方、近年では、物体の三次元的な制御を可能としたものもある。*ZeroN*[9]は磁気浮上を

利用して、単一の物体を空中で三次元的な制御を可能とした。物体を空中で扱うことによって、地上に留まる物体には働く摩擦や抗力などの抵抗力を無視することができる。この重力の制約からの解放によってまた素材の特性が現れるものだと考えられる。また *ZeroN*では浮遊される物体は磁石が埋め込まれた独自に用意された物体が使用されており、それを用いて情報を表現・操作することが目的とされている。一方で、本研究では、扱う素材は身の周りの一般的な素材であり、さらにその素材を情報として扱うのみではなく、素材そのものを活かした表現に取り組むという点において特徴がある。

3. 粒子浮遊・移動の原理

本研究では、空中に素材を浮遊・移動させるのに超音波を用いる。音響浮揚と呼ばれる、非接触状態で物体を浮かせる手法があることは既に知られている。これは、超音波によって生じる定在波の節に物体を配置し、浮遊させるものである(図2)。この現象を用いた研究はこれまでもなされてきた。例として、[10]では、二つの超音波振動子を用いて、二つの音波を交差させ、位相差によって縦方向の一次元的な制御を可能とした。また[11]では小型の生き物を浮かせる手法を説明している。単一の振動子とその反射によって定在波を生じさせ、節にテントウ虫などの生き物を生きた状態で浮かせている。

本研究では、超音波振動子から発生された超音波の進行波とそれが反射面で反射することによって生じる反射波とで生じる定在波の節に物体を浮遊させる(図3)。本システムでは、超音波振動子がアレイ状に配置された小型超音波集束装置を用いる。このデバイスは空間上への触覚呈示など、非接触のインタラクションを実現するものに開発されたものである[12]。超音波振動子間の位相差を算出することによって、超音波を集束し、一つの焦点を形成することができる。この集束超音波を用いることで、焦点上に生じ

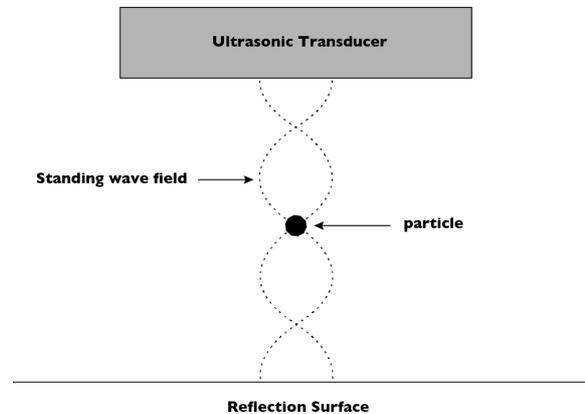


図2 音響浮揚の原理

Figure 2 Basic Principle of Acoustic Levitation

た定在波に捕捉された粒子はその焦点を追従するようにして移動させることができる。この原理を利用して、焦点座標を制御することで、浮遊された物体を図2の水平方向に自由に移動させることができる。

4. lapillus bug の提案と設計

本研究では、上述の原理を用いて、素材に直接的な加工を施すことなく、浮遊させ、三次元空間上での移動制御を可能とする。さらに、浮遊される粒子を生き物に見立て、ユーザが操作することを可能にし、‘生き物’とのインタラクションを実現する。

4.1 ハードウェア設計

図3に lapillus bug のシステム構成を示す。本システムでは、小型超音波集束装置を天井から鉛直下向きに吊るし、約 20~30cm 程度離れた位置にあるテーブル天板を反射面として活用する。集束超音波によって生成される定在波の任意の高さの節に粒子を浮かせ、その焦点を水平二次元方向に動かすことによって、動きを与え、生物的な表現を実現する。なお、この物体を浮遊させる際には、ピンセットなどを用いて、超音波の焦点上の任意の高さに物体を運び、離すことで一番近い定在波の節に吸い込まれるようにして行われる。

小型超音波集束装置の大きさは幅 22.6cm x 奥行 24cm x 高さ 6cm であり、285 個の超音波振動子から成る。発生される超音波の周波数は 40kHz であり、波長は 8.5mm である。この装置を用いてテーブル面に向けて超音波を照射した際に生じる定在波の節の間隔は 4.25mm となり、この位置に粒子が浮遊可能となる。

また、今回はユーザとのインタラクションを実装するため、小型超音波集束装置の横に下向きにカメラを取り付け、画像処理によって実現するものとした。またデバイスの発熱を留意し、小型のファンを4つ取り付けた。

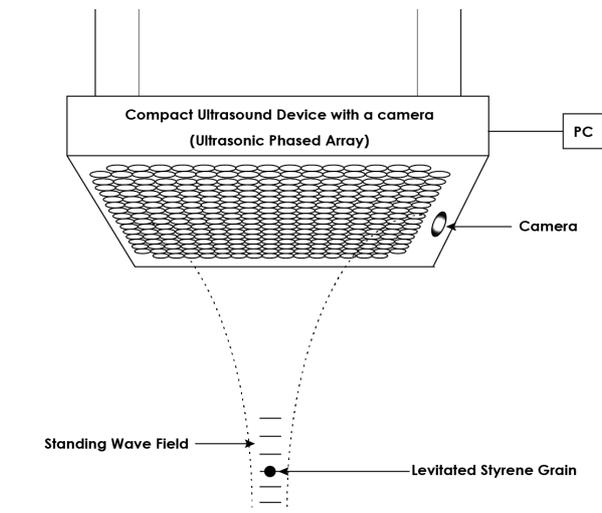


図3 システム概要図
Figure 3 Overview of System

4.2 ソフトウェア設計

ソフトウェアは C++ で設計され、画像処理のために openFrameworks を用いた。今回用いる装置のリフレッシュレートは 1kHz であることからハードウェアのスペックを最大限活用するためには 1000fps を要す。一方で、画像処理はカメラのハードウェアの制約から 30fps 程度となるため、ソフトウェア上では超音波の制御と画像処理とを別のスレッドで行った。

超音波の焦点位置の制御に関しては、[12]で実装された超音波の制御アルゴリズムを用いる。浮遊された粒子は超音波の焦点上に固定され、焦点を動かすことで、それを追従する形で移動させることができる。また位置解像度は約 0.27mm であり、1ms ごとに焦点を任意の位置に設定・発生させることができる。

また、画像処理はユーザの操作の認識に用いる。インタラクションの詳細はアプリケーションの項目で個別に述べるが、カメラにより、テーブル上の物体や、レーザーポインタなどを用いたマーカを入力にすることができる。例えば、赤いレーザーポインタを入力として用いる場合には、浮遊する粒子と区別して認識できるように色相や輝度、あるいは対象物の大きさなどの情報を用いてトラッキングを行う必要がある。

5. 動作の様子

筆者らは上記設計に基づいてシステムのプロトタイプを実装した。今回は、超音波集束装置と地面の間隔を 200mm で固定し、焦点距離を 220mm、粒子の大きさは直径 2mm、粒子が浮遊する高さを約 20mm とした。この状態で、粒子の水平方向の移動速度を変えた場合、単一焦点上に垂直方向に複数浮遊させた場合、および水平方向に複数個浮遊させた時の様子に関して調べた。

粒子が浮遊する高さについては、地面は音圧に対して自由端であると考えられることから定在波の腹の位置が地面と一致し、超音波の波長が 8.5mm であることを考慮すると、

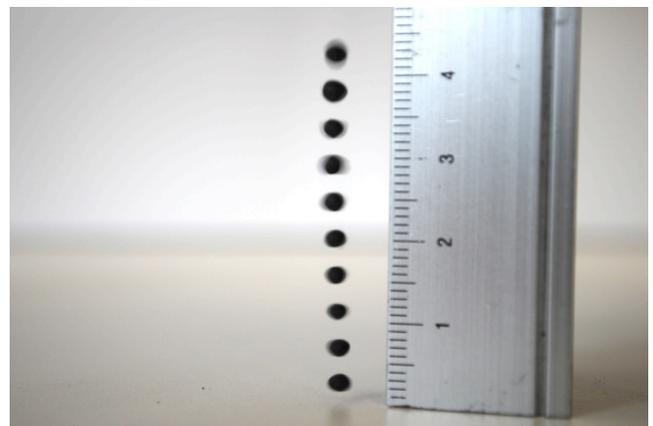


図4 定在波の節に浮遊する粒子とその高さ
Figure 4 Particles Levitating in the Nodes

地面の最も近い位置に発生する節は高さ 2.125mm である。今回、以下に述べる実験を行うにあたり、下から 5 つめの節 (19.125mm) に浮遊する粒子を用いることにした (図 4)。理論値とは若干の誤差が生じているもののほぼ理論通りの位置に浮遊している。この理論値との誤差は入射波と反射波の強度差などが要因として考えられる。

またデバイスの発熱度合いによって結果が異なる可能性があったため、以下の実験はデバイスを 30 分以上稼働させ、動作状況がある程度安定してから行うものとする。

5.1 移動速度

上述のパラメータを固定した上で、本システムを用いて、粒子が浮遊状態であるときの水平方向の移動速度とそれに伴う安定性を実験した。

直径約 2mm の発泡スチロールの粒をテーブル面から約 20mm の高さに浮遊させ、左右方向に 60mm の幅で往復運動させ、その際の移動速度を 10mm/s ずつ変えながら、粒子が落下せず往復した回数を数えた。回数は 100 往復を上限として、往復途中で落下した場合については回数を切り捨てるものとした。

この試行を各速度において 5 回実施した結果の平均往復回数を、図 5 に示す。結果として、300mm/s 程度までは安定して浮遊状態を保つことができるが、310mm/s から乱れが見受けられた。さらに 350mm/s 以上の速度では浮遊状態の維持が困難になることが確認できる。

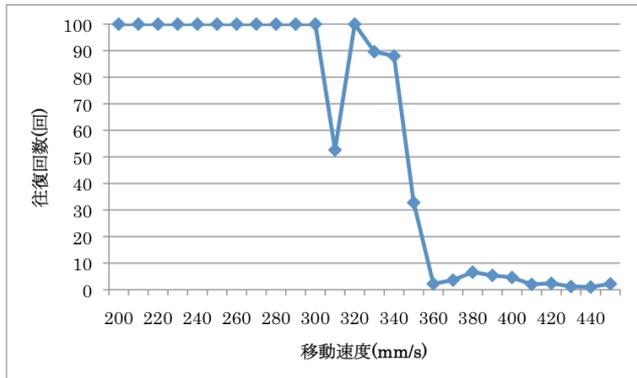


図 5 移動速度と保持安定性
Figure 5 Moving Speed and Stability

5.2 粒子の大きさと素材

本システムでは、磁力等での制御に比較して、浮遊できる粒子とその素材の制約は大きくない。発泡スチロールの粒の大きさを直径 1mm, 2mm, 3mm と変化させて浮遊させ、移動させたところ、安定性の面では、大きな差は認められなかった。

発泡スチロールのみならず、砂粒や、綿など他の素材も浮遊させることができた。液滴など流体も本システムで浮遊させることができることも確認した。また、一部の小型のコンデンサやチップなど、具体的な形状を有するモノも本システムにより浮遊する。

その安定性や動きは、物体の大きさ・質量・形状に依存するところがあり、今後詳細な分析を行う予定である。

5.3 複数の粒子の同時浮遊・移動

本システムでは、一つの粒子のみならず、同時に複数の粒子を個別に制御することが可能である。今回用いる集束超音波装置は、同時に一つの焦点のみしか形成することができないため、複数の焦点を作り出すためには、その複数の点間で超音波の焦点を高速で切り替える必要がある。本システムは 1000fps で動作することから、二つの焦点を作り出すときのそれぞれの点における超音波の発生周波数は 500Hz であり、3 点だと 333Hz である。発生周波数が 333Hz であると、粒子はすぐに落下してしまい、安定して浮遊させることは困難であった。一方で、500Hz の切り替えでは、二つの粒子を浮遊させ、かつ個別に制御することができた (図 7)。

音響浮揚の原理に従うと、粒子は定在波の節の箇所滞在し、またこの節は定在波上に複数生じるものであるため、単一の焦点上において、垂直方向に同時に複数の粒子を浮遊状態にすることができる。図 8 では焦点を静止させた状

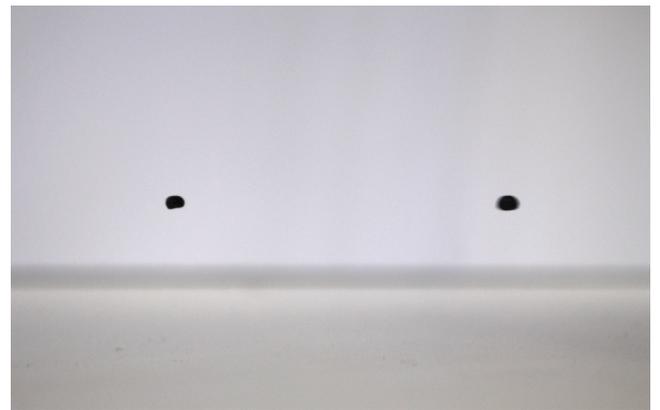


図 7 複数粒子の個別制御
Figure 7 Individual Manipulation of Plural Particles

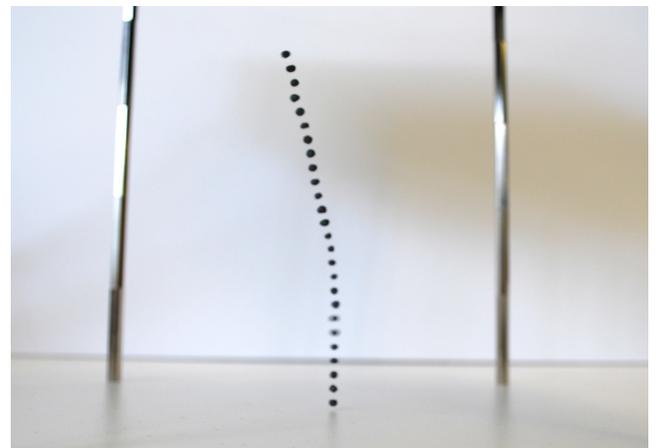


図 8 単一焦点上に浮遊する粒子
Figure 8 Particles Levitating Over a Single Focal Point

態でこれらの節に粒子を順番に浮遊させることを試みた。その結果、多数の粒子が同時に浮遊する状態が確認できた。しかし、高い位置に浮遊する粒子の安定性は乏しく、この状態で移動させることは困難であった。図7から確認できるように、上部の定在波には歪みが生じている。一方で、下から12個の粒子に限定した場合であれば、10mm/sの速度で同時に動かすことが可能であった。このように本システムでは、個数と安定性のトレードオフの中で、複数の粒子を同時に操作することが可能である。

6. 浮遊する粒子によるインタラクティブインスタレーション

本システムは身の周りの素材を浮遊させ、生命が与えられたかのような表現を行うことで、アートやエンタテインメントの分野への応用が考えられる。

浮遊された粒子が空中で小刻みに振動しながら漂う独特な振る舞いから感じとることのできる小バエのような「生き物感」を活用し、人工的な「ムシ」の挙動を鑑賞し、インタラククションをとることができるインスタレーション作品を制作した。鑑賞者は、この作品を通して普段は無機的である素材をあたかもそれが生きているかのように振る舞い、それに加えて自由に操作することができるようになる体験と、本来飼いならすことのできない野生の生物を飼いならすことができるような非日常的な体験をすることができる。

この作品では、朝食の残飯を模したテーブル上の皿の上で、あたかも小バエのように黒い粒子が空中を飛行する。粒子は、鑑賞者から何も入力がない状態の場合には、粒子は残飯の周りを漂う不規則な動きを繰り返すが、鑑賞者から入力があった場合に、意図的な動きを作り出す。

ユーザがインタラククションに参加するためにいくつかの手段を用意した。一つは、皿の上におかれた赤いミニトマトを動かすこと（図9）、もう一つはレーザーポインタを皿の上に照射すること（図10）で「ムシ」とインタラククションをとることができる。

インタラククションの実装には、小型超音波集束装置の脇に取り付けたウェブカメラを用いる。ウェブカメラの取得画像の中から赤い物体（ミニトマト）を認識することにより、その周囲を粒子が頻繁に回遊するような動きを与える。この際、ずっとミニトマトの上にいるのではなく、しばらくその周囲を飛行した後に、ランダムに他の場所をフラフラと回遊し、再度近づいてくるというような演出を施す。このインタラククションを通して、鑑賞者は「ムシ」の生態環境にゆるやかに介入することができる。

また、レーザーポインタを照射した場合も、ウェブカメラの入力画像から色相および輝度の情報を用いて検出する。レーザーポインタの場合には、常に粒子がその光を追いかけるという演出を施し、その位置をめがけて、粒子を載せ

た焦点の水平位置を移動させる。このインタラククションを通して、鑑賞者はリアルタイムに「ムシ」と戯れるような感



図9 テーブル上のモノを用いたインタラククション
Figure 9 Interaction Using Tabletop Objects

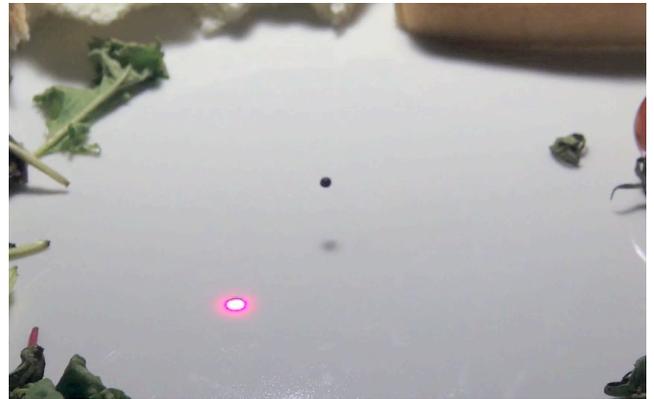


図10 レーザーポインタによるインタラククション
Figure 10 Interaction by a Laser Pointer



図11 lapillus bugの展示の様子
Figure 11 Exhibition of lapillus bug

覚を味わうことができる。

これまで筆者らは、本システムを国内の展覧会において複数回の展示を行ってきた(図 11)。展示を通じた鑑賞者の反応としては、「生きているみたい」「本物のハエがいるのかと思った」「何かいる」「気持ち悪い」などといった本物の生き物を見たときと同様な感想が得られた。さらには「この揺れ具合が良い」「この震えている感じが面白い」といった感想も得られ、今回着目した粒子が小刻みに振動しながら漂う振る舞いからも生き物らしさ、面白さが生じたものだと考えられる。

インタラクションを体験した鑑賞者は、周囲に散乱する残飯に向かわせようとしたり、レーザーポインタを使用して素早く前後左右動かしたり、その生き物としての振る舞いを楽しんでいた。また、素早くレーザーポインタを動かして、粒子の追従が遅れる様子を見て、「一生懸命追いかけている」「かわいい」などの感想が聞かれた。一方で、浮遊原理に関心を示す鑑賞者も多く、「ものが浮いているということだけでも魅力的」といった感想もあったように、物質が重力に捕われず実世界の三次元空間上で浮いている状態そのものが魅力的であったと考えられる。

7. まとめと今後の展望

本稿では、音響浮揚によって粒状の物質を浮遊させ、空中を移動させることを可能にし、さらに浮遊する粒子とのインタラクションを提案し、実装した。このために超音波集束装置による焦点制御とカメラによる入力情報の画像処理を用いた。またシステムが粒子を浮遊させ、動かした際の様子を調べ、その特徴をまとめた。

さらに浮遊された粒子から見出すことのできる生き物らしさに着目し、食卓に集う小バエのような生物に見立て、「ムシ」を飼いならすことができるようなインタラクションを含むインスタレーション作品 *lapillus bug* を制作した。実際に展示を通して多くの鑑賞者は浮遊された粒子から生物らしさを感じとり、「ムシ」とのインタラクションを行っていた。

以下に、本研究の今後の課題と展望についてまとめる。

まず、浮遊させる粒子の大きさや形状、素材、個数に関する調査・検討を進める。例えば、キャラクターの人物やミニチュアの家具など、より具体的な形状を有する物体を浮遊させることにより、ストーリー性を有するコンテンツを表現することができるだろう。単体のみならず、粒子の群を浮遊させることも考えられる。また、固形物に留まらず、液滴など多様な物質を浮遊させることにより、新たな空間表現に昇華させることも期待される。このための装置の特性の分析やハードウェアの改良を進めていく。

また、今回実装したシステムでは、粒子を浮遊させる高

さに関しては、ピンセットで載せた節の位置に固定されていた。動的に垂直方向の移動を制御する方法に関しても、検討を進める。これにより三次元的な動きをコントロールできるシステムを目指す。

さらに、浮遊する粒子との直感的なインタラクション手法に関しても検討の余地を残している。ジェスチャや、タンジブルなインタフェースを介した粒子の動きへの入力や、粒子の動きを通じた情報提示に関しても検討を行う。この際、実用的な応用も含めた、さらなるアプリケーションコンテンツの提案も重要な課題である。例えば、非接触状態で電子部品など小さい物質を取り扱い、搬送することが求められる分野への応用を検討する。またアート作品としての *lapillus bug* の世界観を洗練し、物質と生命の境界を曖昧にすることを表現する作品制作に取り組んでいく。

謝辞

本研究は一部、科学技術振興機構戦略的創造研究支援事業 CREST の支援を受けて行った。

参考文献

- 1) Ivan Poupyrev, Tatsushi Nashida, Makoto Okabe: "Actuation and Tangible User Interfaces: the Vaucanson Duck, Robots, and Shape Displays," ACM TEI 2007, pp.205-212, 2007.
- 2) 河野通就, 筑康明: "tamable looper: 磁力球群の移動・変形制御による生物的表现とインタラクション", インタラクション 2012, 2EXB-52, 2012.
- 3) 山本義隆: "磁力と重力の発見 I", みすず書房, pp.17-18, 2003.
- 4) ユーフテラス: "新しい生物", 第 16 回文化庁メディア芸術祭, 2013.
- 5) 高橋圭子: "Meter Crawler 巻尺かたつむり(日用品生物)", エンタテインメントコンヒューティング 2011, 06C-02, 2011.
- 6) Gian Pangaro, Dan Maynes-Aminzade, Hiroshi Ishii: "The Actuated Workbench: Computer-Controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces," ACM UIST 2002, pp.181-190, 2002.
- 7) Malte Weiss, Florian Schwarz, Simon Jakubowski, Jan Borchers., "Madgets: Actuating widgets on interactive tabletops," ACM UIST 2010, pp. 293-302, 2010.
- 8) Mark T. Marshall, Tom Carter, Jason Alexander, Sriram Subramanian: "Ultra-Tangibles: Creating Movable Tangible Object on Interactive Tables," ACM CHI 2012, pp.2185-2188, 2012.
- 9) Jinha Lee, Rehmi Post, Hiroshi Ishii: "ZeroN: Mid-Air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation," ACM UIST 2011, pp.327-336, 2011.
- 10) Teruyuki Kozuka, Kyuichi Yasui, Toru Tuziuti, Atsuya Towata, Yasuo Iida: "Noncontact Acoustic Manipulation in Air," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46, No.7B, pp.4948-4950, 2007.
- 11) W. J. Xie, C. D. Cao, Y. J. Lu, Z. Y. Hong, B. Wei: "Acoustic method for levitation of small living animals," Applied Physics Letters 89, 214102, 2006.
- 12) Takayuki Hoshi: "Compact Ultrasound Device for Noncontact Interaction," ACM ACE 2012, pp.502-505, 2012.