

浮遊球群の制御による スケーラブルな実体ディスプレイの基礎検討

油井俊哉^{†1} 橋田朋子^{†1}

本研究では、空中に浮かせた複数の発泡スチロール球をピクセルと見立てる実体型三次元ディスプレイを提案する。具体的には球の高さ制御、球の平面移動制御、群制御の3つの仕組みを合わせることで実現する。そのために、まずは高さ制御と群制御を合わせた浮遊球群の高さ制御機構と、高さ制御と平面移動制御を合わせた浮遊球の空間移動制御機構を実装した。また基礎実験として、浮遊球の高さと風速の関係や球の高さと平面移動による球の影響を調べる実験を行い、キャリブレーションに必要な最小値や、平面移動する際の制限を求めた。

A Scalable Display Formed by Volumetric Floating Pixels

TOSHIYA YUI^{†1} TOMOKO HASHIDA^{†1}

In this paper, we proposed a space display system that uses floating polystyrene foam balls as pixels by controlling three parameters: the height of balls, the plane movement of balls, and the group of balls. In order to control these parameters, we implemented two systems: one controlled the height of floating balls to control the height and the group, and the other controlled the space movement of a ball to control the height and the plane movement. We also did basic experiments to obtain the relation between a height of a floating ball and wind velocity, and influence on ball by height and the plane movement. As a result, we got the necessary minimum value for calibration and the limit of the plane movement.

1. はじめに

近年、HMD やホログラム、裸眼立体ディスプレイのように物体を立体的にみせる三次元ディスプレイの開発が盛んに行われている。実体ディスプレイにおいても同様の流れがあり、wooden mirror (1) のような平面のディスプレイから三次元の実体ディスプレイへと研究の関心が移り変っている。しかし、三次元の実体ディスプレイは近年現れた新しい概念ではなく古くから自然界の現象の中に存在しているものである。数千から数万羽のムクドリがつくる群れを見た事があるだろうか。ムクドリの群れは各個体が集まる事により、1つの大きな像を形成し、その像は空中を自由に動き回る。また、形成される像は観察視点の制限のない三次元での表現を可能としている。それは自然の作り上げたスケーラブルな三次元実体ディスプレイと言えるだろう。筆者らはムクドリの群れのように三次元を自由に動き回る群れの表現をディスプレイとして実現すべく本研究を進めている。実現のために必要な要素としては高さを変化、平面方向への移動が可能なシステムである。本研究では、ファンの風で浮かせた発泡スチロール球はファンの動きを追従するという点に着目し、高さ変化、平面移動可能な球のシステムを実装した。また、それを1ピクセルと見立て、複数台用いる事でスケーラブルな三次元実体ディスプレイを制作することを目指している。本稿ではシス

テムコンセプトを述べた後に、実装した2つのシステムを示す。また基礎実験より得られた球の高さと風速の関係や空間移動制御による球の浮遊可能率を示した後、今後の展望を述べる。

2. 関連研究

空中に実体のあるものを浮遊させるディスプレイの研究が近年盛んに行われてきた。その先行例として、静電気を用いた実体型三次元ディスプレイに関する研究 (1) や超音波を使い軽量の物体を浮かせてディスプレイ化する Pixie Dust (3) や空気砲を用いて霧の渦輪を噴出しストロボ光を照射し空間的情報表現する実体ディスプレイとした living floccus (4) が挙げられる。また、本研究と同様に風を用いて空中で複数の発泡スチロール球の浮遊を制御する作品や研究がいくつかある。複数の発泡スチロール球を浮遊させ波の様な表現をした Light-Light (5)、縦や斜め方向へ球を浮遊させ波や幾何学模様を提示した atOms/MoLECULE (6)、音と球の動きを同期させた floating Orchestra (7)、浮遊球の高さをヒトの手で変化させる事で音が変わるインタラクションを持たせた Aerial tunes (8)、浮遊球による文字形成を行ったミュージックビデオ「One」(9)が挙げられる。これらの実体ディスプレイの研究ではシステム自体の平面移動はなく、またディスプレイがシステム内の大きさに制限されているのに対して、本研究ではシステム自体の平面移動が可能であるスケーラブルなシステムを実装する。

^{†1} 早稲田大学
Waseda University

また平面上で移動可能なディスプレイの研究や作品としては移動・スケール変化可能な新たな建築を提示した MorPhys (10) やロボット自身の色と位置を複数台制御する事でそれぞれピクセルとして働く PIXELBOTS (11) が挙げられる。これらは提示されるものが平面に接する必要があるため表現が限定されるのに対して、本研究では空中に提示することで広い表現領域を確保している。

3. システム

3.1 システムコンセプト

本研究では、スケーラブルに空間を移動する群の制御による実体ディスプレイの実現を目指す。そのために、ファンの風で浮かせた軽い球形の物体はファンの動きを追従するという点に着目する。ファンの風量とファン自体の平面移動を制御することで、発泡スチロール球の xyz 空間上の位置を任意に操作できる機構を作り、それらを複数台用意することで、スケーラブルな三次元実体ディスプレイを提案する。

なおこのようなディスプレイで表示可能なコンテンツは少ない点の動きで表現できるものが適している。例えば少ない光点運動から人やものの動きを知覚させるバイオロジカルモーションを、図 1 に示した提案システムのような浮遊点群で実現することを想定している。

以上のようなディスプレイを実現するためには、球の Z 軸方向の移動である高さ制御、球の X-Y 平面上を移動する平面移動制御、各個体の動きの連携をする群制御の 3 つの仕組みが必要である。これら 3 つを含めたシステムを実装するために、本稿ではまず高さ制御と群制御を合わせた各球の高さ変化による動きを連携する仕組み（浮遊球群の高さ制御機構）と、高さ制御と平面移動制御を合わせて球の 3 次元移動を可能とする仕組み（浮遊球の空間移動制御機構）を実装した。さらに提案した機構で、より正確にピクセルを任意の点へと移動させるために行った基礎実験の結果を報告する。

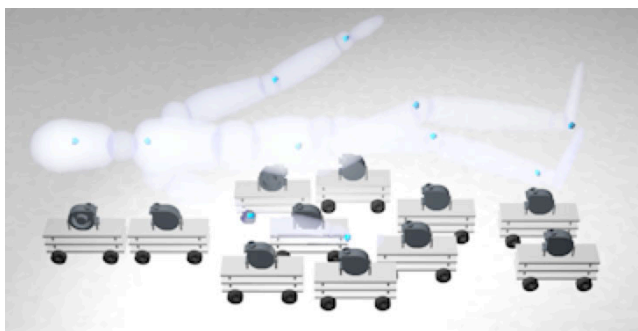


図 1 完成予想図

Figure 1 Conceptual drawing.

3.2 浮遊球群の高さ制御

1 つ目の機構として X-Z 平面でディスプレイを形成した

浮遊球群の高さ制御について説明する。浮遊球群の高さ制御機構は図 2 に示すように、ブロワファン、Arduino、PC(Processing)から構成されている。

浮遊球の高さ制御とは言い換えればファンの風量を制御することである。また浮遊球群の制御は、この機構においては各ファンの出力の値をプログラム上で担い、指定された高さをそれぞれのファンに受け渡すことで実現できる。

浮遊球の高さ制御は、図 2 のように Arduino の analogPin からパルス幅変調 (PWM) の信号を powerMosFET へ送り、12V のブロワファンを PWM 制御して球(直径約 40[mm], 約 1.3[g])の高さ変えている。また、それぞれの球の高さの連携は Processing のプログラム上で描いた各球の高さを、実際に浮遊する高さに割り当てることで像を形成可能とする。具体的には Processing 上で作った球の動きからそれぞれの球の位置を得たのち、その位置が PWM 波を送る 0 から 255 までのアナログ値に変換される。ここで変換したアナログ値は実際の浮遊球の高さを変える値に相当する。その値を Firmata で Processing から Arduino に送り、ファンの出力を変えて球群の高さ制御をするという方法である。

ただし、ファンで出力できる風量には個体差があり、かつ発泡スチロール球の重さに多少の差があるため全てのファンや球が同一の条件ではない。そのため複数のファンに同じ PWM のアナログ値を与えたとしても各浮遊球の高さにずれが生じることがある。高さにずれが生じる結果、出力される像が認識しづらくなってしまふ。このような誤差を無くすために像を提示する前にキャリブレーションを行う必要がある。キャリブレーションの方法として、アナログ値の最大値と最小値を設けることで、誤差を小さくすることが可能である。具体的には、全てのファンの出力を最大にし、その際が一番低い浮遊球の高さにそれぞれのアナログ値を変えて揃える。そのときの値をアナログ値の最大値とする。またアナログ値を変化させたとき、各球が浮遊し始める値をアナログ値の最小値とする。このように最小値と最大値を決める事で高さ変化しづらい最初のアナログ値や、ファンの個体差が大きい最大出力を揃える事が出来る。また出力したい高さを先ほど決めた最小値と最大値を決めた範囲へと数値変換することで実際に浮遊する高さにおおよそ割り当てることが可能になる。このように最小値と最大値を設定する事で誤差を生じやすいアナログ値を変えても高さ変化しない値や浮遊しすぎる最大値以上の値を省くことで浮遊球群の高さ制御を可能とした。

キャリブレーションを行った後、様々なコンテンツを提示可能となる。図 3 のように山なりの形や、Sin 波が進む様子、横一直線に連なって上下運動を繰り返す球といったように、X-Z 平面上での浮遊球群による実体ディスプレイを形成する事が出来た。

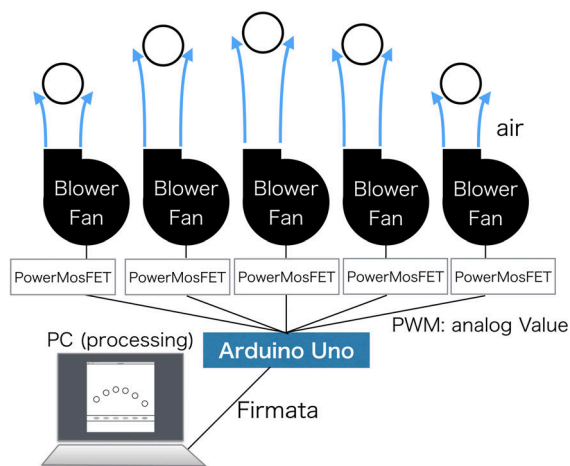


図 2 浮遊球群高さ制御機構の概要

Figure 2 Configuration of height control mechanism.

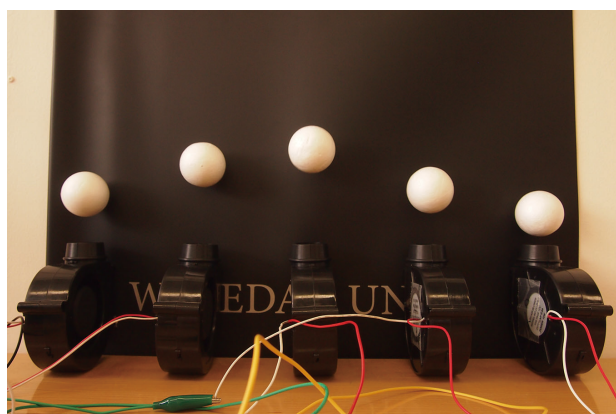


図 3 浮遊球群高さ制御

Figure 3 Height control of floating balls.

3.3 浮遊球の空間移動制御

空間移動制御では浮遊球を三次元上で移動を実現する。本機構では、ファンを含めた高さ制御機構の平面移動をベルヌーイの定理に基づいて実現する。浮遊球は風を噴出しているファンの動きに追従するという特徴を持っている。流れの早い場所ほど圧力が小さくなるベルヌーイの定理により、風の出ている噴出口の軸に向かって球に力が働いているため、ファンの平面移動を制御できれば、ファンの動きに合わせて球を動かすことも可能と考えた。

浮遊球の移動制御機構は図 4 のようにキャタピラ、Arduino、モータ、ブロワファン、電池で構成される。また実装したシステムの写真が図 5 である。本システムはモータドライバで左右 2 つのモータを制御することでキャタピラと浮遊球の前進、後進、左右転回、停止が可能である。またモータを PWM 制御することで移動スピードの制御も可能である。以上の機構により浮遊球の空間移動制御ができるようになった。

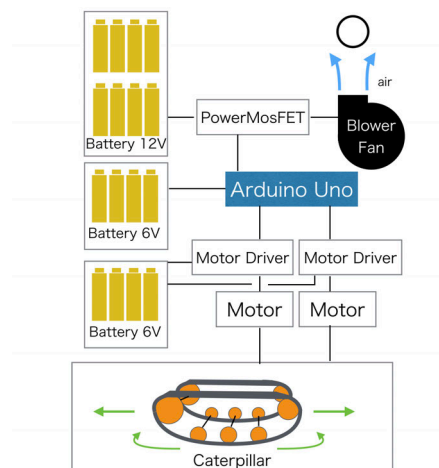


図 4 空間移動制御機構の概要

Figure 4 Configuration of space movement control mechanism.

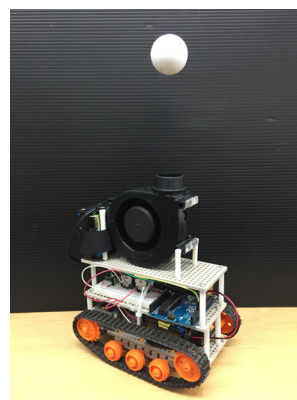


図 5 空間移動制御

Figure 5 Space Movement control system.

4. 基礎実験

4.1 浮遊球の高さと風速の関係

正確に球の高さを制御するために、ファンから噴出する風の速さが浮遊球の高さにどのように影響を与えるかを調べる実験を行った。その結果を図 6 に示す。

実験は次のように行った。アナログ値を 0,10,20,...250 と最大値 255 を含めた 27 段階に分けて PWM を制御し、風の速さを変化させる。それぞれの風速を噴出口から 40[mm]の位置で測定し、発泡スチロール球(直径 389[mm], 重さ 1.27[g])を浮かせ噴出口から球の中心までの高さを測る。ただし、球が浮遊しているときは空中で 2~3[cm]程度振動するので、高さの最大値と最小値の中心部分を球の中心として測定しグラフにまとめた。

その実験結果を示す図 6 より、最初に浮遊しはじめる風速 3.6[m/s]から 5.0[m/s]までの間は高さに変化はないことが見て取れる。キャリブレーション段階で制限すべき範囲は大きく変位する範囲であり、値が変化しない点が含まると誤差が生じやすい。そのため、ファンと球の組み合わせにおいては増加し始める風速 4.85[m/s]付近を噴出させる

アナログ値を最小値に設定するべきだと明らかになった。

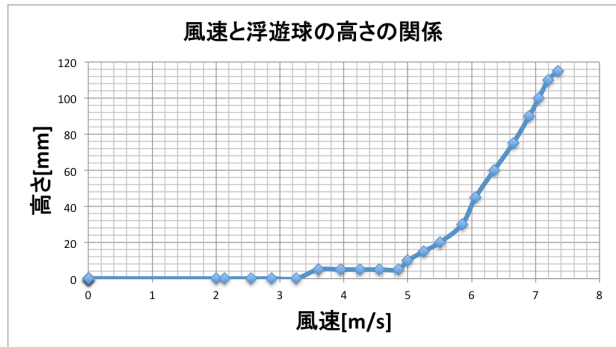


図 6 風速と浮遊球の高さの関係

Figure 6 Relation of wind velocity and height of ball.

4.2 浮遊可能な球の高さと速さの関係

提示時に平面移動によって球が落ちることを免れるために、浮遊球高さでどのくらいの速さならば球が浮遊可能かを調べる実験を行った。その結果を図 7 に示す。

実験の方法としては、空間移動制御システムを用いて発泡スチロール球（直径 34.3[mm]、重さ 1.03g）を浮かせた状態で 6 段階の高さ(30,60,⋯,180[mm])と 5 段階の速さ

(3.67, 10.8, 15.0, 17.2, 19.8 [cm/s]) を分けて、それぞれの条件下で球が 1[m]球が進むまでに落ちるかどうかを確かめる。これを 3 回繰り返し浮遊可能である確率を算出し、計 30 通りの条件下で球が浮遊可能かを調べた。

その結果、図のようにおおよそ高さが 60[mm]以下で速さが 10.8[cm/s]以下である条件下では球は落ちやすいということが分かった。よってコンテンツを表示する際は、できるだけこの落ちやすい条件下でシステムを稼働させないように制限する必要がある。

球の高さと速さによる浮遊可能率 (単位: %)					
速さ[m/s] 高さ[mm]	3.67	10.8	15.0	17.2	19.8
30	0	0	66	100	100
60	33	66	100	100	100
90	100	100	100	100	100
120	100	100	66	100	100
150	100	100	100	100	100
180	100	100	100	100	100

図 7 球の高さと速さによる浮遊可能率

Figure 7 Rate of floating by height of ball and velocity

5. まとめと展望

本稿では浮遊球群の制御によるスケーラブルな実体ディスプレイの基礎検討を行った。また、そのディスプレイは高さ制御、平面移動制御、群制御の 3 つの機構からなり、それらを掛け合わせたディスプレイのコンテンツ案としてバイオリジカルモーションの提示を示した。また、本稿では、その 3 つの機構のうち 2 つを掛け合わせたシステムを

実装した。具体的には、X-Z 平面でのディスプレイを形成した浮遊球群の高さ制御システムと、キャタピラを用いて高さ制御機構自体を平面移動させる浮遊球の空間移動制御システムである。また基礎実験として、浮遊球の高さと風速の関係や浮遊可能な球の高さと速さの関係を調べる実験を行い、キャリブレーションに必要な最小値は風速 4.85[m/s] 付近であり、空間移動する際の制限は高さ 60[mm]以下、速さ 10.8[cm/s]以下であることを明らかにした。

今後の展望として、利用者が自由に球を置くことができ、球の上から手をかざすことにより球の高さを下げる特徴を生かしたインタラクティブコンテンツの追加がある。また、課題として浮遊球の高さの向上や球の振動の安定化や、平面移動する際に機構同士が平面上でなるべく重複させないための機構の小型化、平面移動における群制御のための無線化を実現していきたい。

謝辞 本稿は、早稲田大学特定課題研究助成費(課題番号 2014K-6136)による研究成果の一部である。

参考文献

- 1) Daniel Rozin: Wooden Mirror
<http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html> (2014 年 12 月現在)。
- 2) 柏木剛, 豊川智洋, 廣瀬通孝: 静電気を用いた実体型三次元ディスプレイに関する研究, 情報処理学会 研究報告, pp.23-30 (2006)。
- 3) Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto: Pixie Dust: Graphics Generated by Levitated and Animated Objects in Computational Acoustic-Potential Field, ACM Transactions on Graphics (TOG) Volume 33, Issue 4 (July 2014), 13pages
Proceedings of ACM SIGGRAPH 2014
- 4) 今野 恵菜, 笈 康明: living floccus: 霧の渦輪群とストロボ光の制御による体積型情報提示の検討, TVRSJ, Vol.1, No.1 (2013)。
- 5) Light-Light IN TOKYO
<https://www.youtube.com/watch?v=g6cX1wOJVv8> (2014 年 12 月現在)。
- 6) Ryo Kishi: atOms/MoLECULE
<http://vimeo.com/106079178> (2014 年 12 月現在)。
- 7) HARVEY & JOHN: floating Orchestra
<http://www.harveyandjohn.com/portfolio/floatingorchestra/> (2014 年 12 月現在)。
- 8) Alrøe, T., Grann, J., Grönvall, E., Petersen, M.G., and Degn, J.L.G. Aerial Tunes: Exploring Interaction Qualities of Mid-air Displays, TEI'13, Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction pp. 125-128 (2013)。
- 9) androp: music video 「One」
<https://www.youtube.com/watch?v=unQsV5W0Cd8> (2014 年 12 月現在)。
- 10) Shohei Takei, Makoto Iida, Takeshi Naemura: MorPhys: Morphing Physical Environment Using Extension Actuators, ACM SIGGRAPH2012, Posters, 78 (2012)。
- 11) Disney Research: PIXELBOTS
<https://www.youtube.com/watch?v=4-3rkrqvO14> (2014 年 12 月現在)。