

修士論文

集団行動をシミュレートする自走式玩具

平成 28 年度

指導教員 馬場哲晃

( 15893526 )

庭田凧沙

首都大学東京大学院  
システムデザイン研究科 博士前期課程  
インダストリアルアート学域

提出日：平成 29 年 1 月 25 日

## 集団行動をシミュレートする自走式玩具

### 要旨

近年、技術の進歩により、日常に関わる様々な製品が高性能化している。中でも電子玩具の分野は、スマートフォンのアプリケーションを利用する等の新しい技術が取り入れられ、著しく進化している。特にラジオコントロールカーに注目すると、これまではコントローラに付けられたレバーを使って玩具を操作する方法が一般的であったが、ユーザの身体情報を利用した操作方法等も市場に発表されている。しかし、幼児を対象とした場合、ユーザビリティ面において改善が望まれる。既存のコントローラの場合、方向転換や発進といった動きと、動かすレバーやボタンの関係性を理解する必要がある。そこで、ユーザが操作モデルをなるべく事前に学習する必要がない、直感的なラジオコントロールカーを提案する。

コントローラ等を使用せずに動作のきっかけを与える方法として、音声や振動を利用するものがある。それらの方法を採用している玩具の多くには、前進する、自分の体を揺らすといった単純な動作が見られる。また、より高度に音声を利用しているものとして、ペット型ロボットが挙げられる。「お手」や「おすわり」「伏せ」など、実際にペットのしつけや芸を教える際に使用する言葉を認識し、言葉に対応した動作を行う。こういった言語を利用した操作を行う場合、ユーザが言語を話すことができなければ、玩具の操作を行うことはできない。操作対象の動きが単純である程操作方法も単純であり、複雑な動作を要求する場合には、ユーザ側も複数の操作パターンを習得している必要がある。操作のために必要な能力を最小限に、玩具が複雑な動作をしているように見せられれば、新しい操作体験を得られると考えられる。この研究では、幼児を対象としている。操作のきっかけとなる動作をした結果、「こうするとあの玩具が動く」という結び付けが理解できれば、徐々に「操作をする」という目的を持つ可能性がある。

本研究では、玩具にマイクを搭載し、ユーザが音を鳴らすことで走行する玩具を制作した。音を鳴らす方法としてハンドベルを採用し、「振る」という簡単な動作だけで玩具を操作する。またこの玩具は、既存のラジオコントロールのように自由に走行するのではなく、音源であるユーザの場所を目指して走行する。このユーザを探してその方向に進む動作から、ユーザが親、玩具が子という親子の関係が連想される。そこで、この玩具のモチーフを鳥にすることで、親の姿や鳴き声を認識する「刷り込み」のような親子関係の

演出ができると考えた。

以前制作した プロトタイプでは、玩具の両目にマイクを搭載し、左右のマイクが取り込んだ音量で音源のある方向を推定した。音源の方向に体の向きを変え、聞こえた音の周波数解析をする。その音が特定の周波数であれば前進し、ユーザのいる方向に向かっていく仕組みである。このプロトタイプでは、玩具が停止している状態での操作を想定していた。今回の研究では、音源を目指して走行する玩具が複数あっても走行できることを目標としている。しかし、現状のまま複数を走行させると、仲間や障害物との距離が考えられていないため衝突をしてしまう。また、あひる型の玩具が複数あることで、鳥の親子が移動していく様子が再現できると考えるが、群らしい動きが出来ない。そこで、玩具に衝突の回避や仲間の認識をさせ、集団行動をシミュレートすることを試みた。

集団行動を再現する方法は様々あるが、カメラや超音波センサを使ったものが一般的である。集団行動は、自分と仲間の位置関係を把握して行われるため、稼働する空間での座標の取得が必要となるからだ。しかし、一般家庭で遊ぶための玩具にその方法を適用することを考えると、設置のために時間やスペースが必要とされる。子供が遊びたい時にすぐに遊べるのが、玩具に必要な要素の一つであると考えられる。本研究では、室内に大掛かりな装置を設置するのではなく、玩具の内部に複数の距離センサを搭載することで、1体でも複数でも集団行動ができるよう設計する。

距離センサのみでは精確に実世界における絶対座標を計測することは出来ないが、鳥や魚の群集行動をアニメーションで再現する”Boid algorithm”において述べられている、「仲間に近づきすぎない」「仲間と進む向きや速度を合わせる」「仲間が大勢いる方向に向かう」の3つのルールのうち、最初の2つを達成できると想定した。距離センサによって、自分と他の物体の距離を測り、近すぎる場合には衝突を避け、それ以外の距離では接近・捜索を行う。また接近する際には、対象が遠いほど速く、近いほど速度を落として移動させる。距離に対応して走行速度を変化させることで、意思を持って行動しているように見せることができる。

本研究では、複数の距離センサを搭載することで、複数の玩具に集団行動を再現させた。カメラ等で動作させる空間の全体像や、その空間での玩具の位置を取得せずとも、搭載したセンサが取得した距離のみで玩具の行動を制御することができた。現段階では対応する周波数帯が1つであるが、複数の周波数に対応させることも可能である。玩具が対応する周波数帯を個別に変えることで追走するユーザを選んだり、複数の動作を周波

数帯で分けたりする等, 遊び方に広がりを持たせることができると考えられる.

## Self-propelled Toy Simulating Collective Behavior

---

### Summary

Due to advances in technology in recent years, home appliances and other products have been improved in performance, including toys. In particular, radio control cars are not operated by controllers like the past, but various operation methods have been announced on the market. However, it can not be said that anyone can play with these methods. Therefore, the author proposed a simple radio control car operation method for small children. The toy can operate with sound, and when the user generates sound, it estimates the location of the sound source and moves toward the direction where the user is. And, in order to make the toy run in plural, we installed a distance sensor in the toy. As the toy runs by measuring the distance by themselves, it is possible to reproduce behaviors like a herd without installing a large-scale apparatus.

# 目次

要旨	i
Summary	iv
1 序論	1
2 先行事例・先行研究	3
2.1 玩具の操作	3
2.2 集団行動	6
2.3 本研究の特徴	10
3 音情報により制御可能な自走式玩具	12
3.1 操作方法	12
3.2 音源の推定	12
3.3 周波数解析	12
3.4 ハードウェア構成	13
3.5 学会発表・展示	16
4 集団行動をシミュレートする玩具	17
4.1 群集行動の要素	17
4.2 距離を利用した行動制御	19
4.3 音情報を利用した操作の組み込み	24
4.4 ハードウェア構成	27
5 考察	31
5.1 解決した点	31
5.2 問題点	31
5.3 今後の展望	32
6 結論	33
7 謝辞	34
付録 A 学外発表	37

## 1 序論

近年の技術の進歩により、家電製品などの日常に関わる様々な製品が高性能化している。スマートフォンの普及により、「スマート家電」と呼ばれるものが登場し、ユーザが在宅していなくてもスマートフォンを連動させるだけで家電の操作をすることが可能になった。電子玩具の分野でもそういった手法が取り入れられ、特にラジオコントロールカーのように玩具を操作するものの発展は著しい。また、その操作方法に注目すると、これまではコントローラに取り付けられたレバーを使った方法が一般的であったが、レバーが画面上のインタフェースに代わっているもの、ハンドルとスマートフォンの傾きが連動しているアプリケーションや、デバイスを体に装着してユーザの脳波等の身体情報を利用するものも市場に発表されている（図1）。

しかし、これらの方法を用いても、誰もがその玩具で遊ぶことができるとは限らない。既存のコントローラを例に挙げると、方向転換や発進といった動きと、動かすレバーやボタンの関係性をあらかじめ理解している必要がある。スマートフォンのアプリケーションも同様で、車の運転の方法をある程度理解していなければ、スマートフォンを傾けて方向転換をすることができない。そこで、ユーザが操作モデルをなるべく事前に学習する必要がない、直感的な操作方法を採用したラジオコントロールカーを提案する。また、その操作方法を採用した玩具が複数ある状態での走行を可能にするため、集団行動の要素を取り入れる。

本論文では、以下の構成をとる。

1章は序論である。本研究に関する背景について論じ、本論文の構成を示す。

2章では、本研究と関係の深い研究や事例を示す。玩具の操作に関する事例、集団行動を再現する事例を列挙し、本研究の特徴を述べる。

3章では、2015年に制作した、小さな子供でも容易に操作をすることが可能な、音情報によって制御が可能な自走式玩具について述べる。ハンドベルを音の発生に採用し、「振る」という簡単な動作だけで玩具の操作を可能にする。またその外装をあひるの形にすることで、ユーザと玩具に親子のような関係を作り出す。

4章では、3章で述べた玩具が複数ある状態であっても、衝突を回避しながら走行できるようにするため制作した、集団行動の要素を取り入れた玩具について述べる。玩具に

距離センサを搭載することで、大掛かりな装置を使用せずに群れのような動きを再現することができる。

5章では、プロトタイプ制作を通して発見した成功、問題点、今後どういった応用が考えられるかについて考察する。

6章は本研究の結論である。本研究で行った提案について論じ、今後の展望について述べる。



図1 Puzzlebox Orbit 引用元 <https://puzzlebox.io/orbit/>

## 2 先行事例・先行研究

本章では、本研究と関連性の高い先行事例を列挙・分析し、本研究の特徴を述べる。

### 2.1 玩具の操作

#### 2.1.1 コントローラを使用した操作

遠隔操作玩具の操作と言われて想像されるのは、両手でコントローラを持ち、上面に付けられたレバーを親指で動かして操作する様子であろう。それは一つの操作形式であり、レバーが走行速度や方向変換に対応しているスティックタイプと呼ばれている。これ以外に、特に車型の玩具を操作するものでは、銃のような形をした筐体の側面に車輪が付けられており、その車輪の部分を手を操作するように操作ができるホイラータイプや、ハンドルを模したものがコントローラになっているものも存在する。遠隔操作玩具だけではなく、ゲームの画面上の乗り物を操作する場合にもこのようなコントローラは利用されている。それらのコントローラの操作方法は、身近に運転を体験できる乗り物に採用されており、馴染みのある動作で操作をすることができる。一方スティックタイプのコントローラは、車に限らず、ヘリコプターやドローンなどの空中を移動するものにも採用されている。この形式の操作方法は、遠隔操作玩具を操作する方法としてどんなものにもでも取り入れやすい方法であると考えられる。また、両者とも出力の微調整が可能であり、ユーザの扱い方によって玩具の動作に差が生まれるため、操作に感じる難易度が異なる。

最近の傾向として、玩具のIoT(Internet of Things)化が進んでおり、特にスマートフォンのアプリケーションが玩具と連動しているものも多く見られる。その操作方法は、画面上に表示されたボタンやハンドルに触れるもの、スマートフォン内の加速度センサを利用して傾きを検出し、スマートフォン自体を手持のように操作する方法がほとんどである。ノバルス株式会社が製作した Mabeee (図2) もその一つで、単四電池を専用のケースに差し込み、玩具に入れるだけでその玩具の動作速度を操作することが可能になる。「かたむき」「ふる」等6種類の操作方法があり、スマートフォンの内蔵センサの情報や、画面上に表示された GUI を利用して操作を行う。また、反応する度合いをパラメータで調整することで、速度や難易度の設定も可能である。スマートフォンをコントローラとして採用する利点として、アプリケーションを複数インストールすることで、一台で

も様々な操作方法が利用できることが挙げられる。また、GUIを変化させることにより、本来同じ操作方法である「発進」「旋回」等に異なるアプローチを付加することができる。



図2 MaBeee 引用元 <http://mabeee.mobi>

#### 2.1.2 コントローラ以外での操作

コントローラを使用せずに玩具に動作のきっかけを与える方法は様々ある。その中で多く利用されているのは、音声や振動である。手を叩く、玩具が接している面を叩くといった行為は、小さな子供でも自然に行うことのできる動作で、周囲の人の真似をすることで学習もできる。そのため、玩具を操作するきっかけとして取り入れやすいと考えられる。マイクや振動センサによって信号を検知し動作させるのだが、それらの方法を採用している玩具の多くは、前進する、自分の体を揺らす、その場で回転する等、単純な動作が見られる。そういった動作を機械に行わせる時、ほとんどがモータを回転させるのみで解決し、動き自体はモータの回転の先に繋がっている玩具の構造によって行われている。そのため、ユーザ側には複雑な設定の必要がないため、初心者用のロボットキットといった仕組みを学ぶためにも利用されている (図3)。

音声をより高度な形で利用しているものに、ペット型ロボットがある。2014年にタカラトミーが販売した Hello! ZOOMER (図4) は、「お手」や「おすわり」、「伏せ」といった飼い主がペットにしつけをしたり芸をさせたりする時に使う15種類の言葉を認識し、その言葉に対応した動作を行う。目の部分のLEDで感情の表示ができ、よりユーザに親しみと理解を与えることができる。しかし、こういった操作を行う場合、ユーザが言語を話すことができなければ遊ぶことができない。また、操作対象の動きが単純である程操作方法も単純であることが多く、対象に複雑な動作を要求する場合には、ユーザ側も複数

の操作パターンを習得している必要がある。



図3 音に反応して歩行するロボット 引用元 <https://www.elekit.co.jp/product/MR-9602>



図4 Hello!ZOOMER 引用元 <http://www.takaratomy.co.jp/products/lineup/series/hello-zoomer.html>

### 2.1.3 考察

遠隔操作玩具の操作方法は、操作する玩具の見た目に応じた操作方法であることが理想的であると考えられる。ユーザは「車はハンドルで操作するものだ」「犬は人間の言葉を理解して行動するものだ」という考え方を元々持っているため、より自然な操作方法として受け入れられている。また、その方法を取り入れることで、主流である操作方法では操作が困難であったユーザでも遊ぶことができるようになる。

## 2.2 集団行動

集団行動を利用している事例は複数あるが、行動のために利用する情報の取得の仕方によって違いが生まれる。

### 2.2.1 空間・集団全体の情報を利用する集団行動

ハーバード大学の kilobot (図 5) [1] は、テーブル等の平面上で群集行動をする多数の直径 30mm 程度の小さなロボットである。円盤上にアクチュエータ類が搭載され、三本の脚で自立する。振動を利用して移動をし、隊形を変えて図形を作り、ユーザに対して情報の提示をする。お互いの距離を通信によって取得し、指定された図形を表示するために自分がどのような動きをすればよいかを判断して行動するのだ。有線で命令を受信する必要はなく、全個体が同時に指令を受けることができる。その 4 年後に発表されたスタンフォード大学の Zooids (図 6) [2] は、テーブル上で行動をする自走式小型ロボットで、こちらも同じくユーザが指定した図形を表示することができるが、出力だけでなく入力としても使用できる。プロジェクトによる情報を元に光学的に自分の位置を把握し、ユーザが動かした位置からユーザの意図を汲み取ってグラフを表示することも可能である。また、公開されているデモ映像には、テーブルに置かれたスマートフォンを Zooids が運び、ユーザに存在を示すシーンがあり、日常生活に小型ロボットが利用される未来が想像される。

村田製作所が 2015 年に制作した村田製作所チアリーディング部 (図 7) [3] は、超音波位置制御システムを使用し、球体に乗ったロボットが位置観測した情報をホスト PC に送信し、協調動作を行っている。名前の通り、ただ移動をするだけではなく、チアリーディングをしながら隊形を変化させていく。一般的に使用される車輪での走行ではなく球体を利用しているため、ゆらゆらとバランスをとりながら移動する。福田らの論文 [4] では、ある程度の揺らぎを持った運動をする対象に生物らしさを感じるのではないか、という考察が述べられており、このロボットの場合、機械でありながら自分の体重の移動を感じさせる動きが、見ている人に生命感を感じさせるのだと考えられる。

これらのように、プロジェクトや超音波センサを利用する方法では、動作範囲や各ロボットの位置座標を精確に取得することが可能であるため、集団を形成するために目的地の座標を指定することができ、乱れの少ない動きをさせることができる。そのため、ユーザに情報を提示するためのインタフェースやエンタテインメント等、集団でミッション

を達成する目的で利用されている。



図5 kilobot 引用元 <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/harvard-kilobots-robot-swarm/>



図6 Zoids



図7 村田製作所チアリーダー部 引用元 <http://www.murata.com/ja-jp/about/mboyngirl/mcheerleaders>

### 2.2.2 内蔵センサを利用して群れをつくるロボット

機械を動作させる空間に超音波センサやプロジェクタを設置するのではなく、機械に搭載されたセンサから得た情報を利用し、仲間を見分けて集団をつくる事例も多数報告されている。松原によってつくられたみつめむれつくり [15] (図8) は、赤外線センサを利用し、距離を測りながら移動する。一定の距離に仲間を見つけると、仲間が自分の正面に位置するように自分の体を向きを変えて走行するため、複数の玩具が縦一列に並ぶような群れができていく。1987年に制作された Electric Sound Creatures (図9) [5] は、搭載されたマイクで音を集集し、仲間であるかどうかを判断する。ロボットの体にはスピーカが付いており、音を発生しながら走行している。仲間の音が聞こえている間は積極的に音を出し、その音が聞こえる方向に体の向きを変えながら移動していく。しかし、人の足音やドアの開閉音等、仲間や自分が好む以外の音が聞こえた場合には音を出すのを控える。日産自動車は2009年に、自社の「ぶつからないクルマ」の技術にも使用されている衝突回避技術を採用したロボット EPORO (図10) を発表している。EPORO は、胴体の部分に開けられた細長い穴から、レーザーレンジファインダを使用して距離を計測し、魚群のルールを元に衝突回避、並走、接近を行う。

こういった、自身が持つセンサによって仲間や障害物を認識するロボットは、人間が指定した動作をするが、個々が決められたルールの元に行動しているため、完全には予測できない動きをする。個々に搭載されているセンサや動作させる環境によって計測する値に差が出るため、同じように作られたものでも差が生まれてくる。先ほど例に挙げた EPORO は、その差を個性として演出している。



図 8 みつめむれつくり 引用元 <http://rraj.rsj-web.org/atcl/335>



図 9 Electric Sound Creatures 引用元 <http://www.artperformance.org/article-20659067.html>



図 10 EPORO 引用元 <http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/eporo.html>

### 2.2.3 考察

人間は、観察している対象に生き物らしさを感じるアニマシー知覚を持っている。集団行動をするロボットに生き物の印象を受けるのは、この感覚が関係していると考えられる。アニマシー知覚は、一つの対象が一度運動を変化させるだけでも起こることがわかっている [6] である。また、Csibra の論文において、幼児は観察している対象が持っている目的志向性と、その対象以外との相互作用によって起こる随伴性から対象が持つ意図を理解すると述べられている [7]。複数のアニマシーを感じさせる物体が、お互いに影響を受けながら動作をすることによって、より集団として意志を持っているように感じさせるのだと考えられる。

## 2.3 本研究の特徴

本研究では、幼児をユーザの対象に設定し、ユーザが音を発生させることで走行する玩具の制作をした。既存のラジオコントロールカーのように自由に走行するのではなく、玩具が音源であるユーザのいる方向を目指して走行をする。この仕組みにより、ユーザが 1 つの場所に留まって操作をする以外に、ユーザが音を発生させながら歩くことで、ユーザの後ろについていくように走行することができる。この様子は、親鳥が雛鳥たちを引き連れて歩く光景を想像させる。そこで、アニマシーを感じさせる動作を行う物体に動物の見た目を与えることで、その動物の行動の特徴が玩具に自然に当てはめられると考え、玩具のモチーフを鳥の雛に決定した。それにより、ユーザが親、玩具が子供という親子のような関係が演出される。また、生活音などの誤作動を引き起こす音を除外し、玩具がユーザが発した特定の音を認識することで、鳥の雛が生まれて初めて目にした動くも

のや声を親だと認識する「刷り込み」に似た機能を印象づけることができる。操作のきっかけとなる動作をした結果、「こうするとあの玩具が自分のいる方にやってくる」という結び付けができれば、「操作をする」という目的を持つ可能性がある。

### 3 音情報により制御可能な自走式玩具

まず、音を操作の入力として使用し、ユーザのいる方向を目指す玩具の制作を行った。

#### 3.1 操作方法

本研究では、幼児でも簡単に操作ができる自走式玩具の制作を目標としている。そこで、幼児でも簡単にできる、「振る」動作をユーザが音を発生させる方法とする。振ることで音が出るものは様々あり、「ガラガラ」という呼び名で知られているラトルもその一つである。今回は、楽器を使って音を出すことを考え、ハンドベルを選択した。ハンドベルは、1つ1つのベルに各音階が割り振られているため、特定の音を発生させることができる。そのため、操作のために複数の物に触れる必要がなくなる。

音を操作の信号として利用するために、使用する音の分析が必要になる。音は三要素として、「音の大きさ」「音の高さ」「音色」を持っている。それぞれ、「音の大きさ」は波の振幅、「音の高さ」は周波数、「音色」は波形で決定される。この要素を数値化し、ハンドベルの音を認識させる。今回使用するハンドベルは「ラ」の音で、周波数は1760Hzである。高い周波数を使用することで、日常生活で発生される音との区別が付き、誤作動を緩和することができる考えた。

#### 3.2 音源の推定

音源の方向を推定する方法は、石井らによる PingPongPlus[8] や Zhang らの研究 [9] で利用されている。複数のマイクを使用し、それぞれのマイクが音を検知する際に生じる時差を利用し、音源の位置を推定する方法だ。本研究では、コンデンサマイク (MAX4466 搭載) を2つ搭載し推定をする。まずマイクに音を認識させ、音が発生しているかどうかを調べる。左右両方のマイクが検知した値の合計が閾値よりも高ければ、音が発生したとみなす。その後、左右のマイクが検知した音量の割合を利用し、より割合が大きい左右どちらかと、同じ割合の場合に正面の3方向に向きを変える。

#### 3.3 周波数解析

3.2の段階では、聞こえた全ての音に反応し、推定された方向に向きを変える。次に行う動作として、動作のきっかけとしているハンドベルの音のみに反応させるため、周波数

解析を行う。解析のため、Sparkfan Electronics が販売している Spectrum Shield[10] を使用する。このシールドには 2 ch までの接続が可能で、搭載されている MSGEQ7 スペクトル分析器によって、音声を 63Hz, 160Hz, 400Hz, 1kHz, 2.5kHz, 6.25kHz, 16kHz を基準とした 7 つの周波数成分に分けることができる。周波数成分によって場合分けをし、使用するハンドベルの音が該当する 1760Hz の成分が含まれる周波数帯の値が高くなったら直進、それ以外では動作を停止する。

### 3.4 ハードウェア構成

方向変換・走行のため、制御に使用する Arduino[11] UNO ボードを載せることができる 2 ホイールロボットベースキット (Actobitty 2wheel Robot Kit) とモータシールド (L298N) を使用する (図 11)。モータシールドと Spectrum Shield は、Arduino ボードのピンに直接接続できるため、電源、モータ、マイク、LED のケーブルのみが接続される (図 28)。電源は、ロボットベースキットのアルミシャーシ内に収まる電池ボックス (単三電池×4本) から供給する。タイヤ等の内部機構を覆うあひる型の外装を設計し、3D プリンタで出力する (図 13) (図 14) (図 15)。音を集める 2 つのマイクは目に当たる部分に配置し、なるべく機械的な要素を感じさせないように配慮した。くちばしの部分に LED を搭載し、待機時には淡く、動作時には明るく点灯し現在の玩具の状態を可視化する。



図 11 動作制御のハードウェア

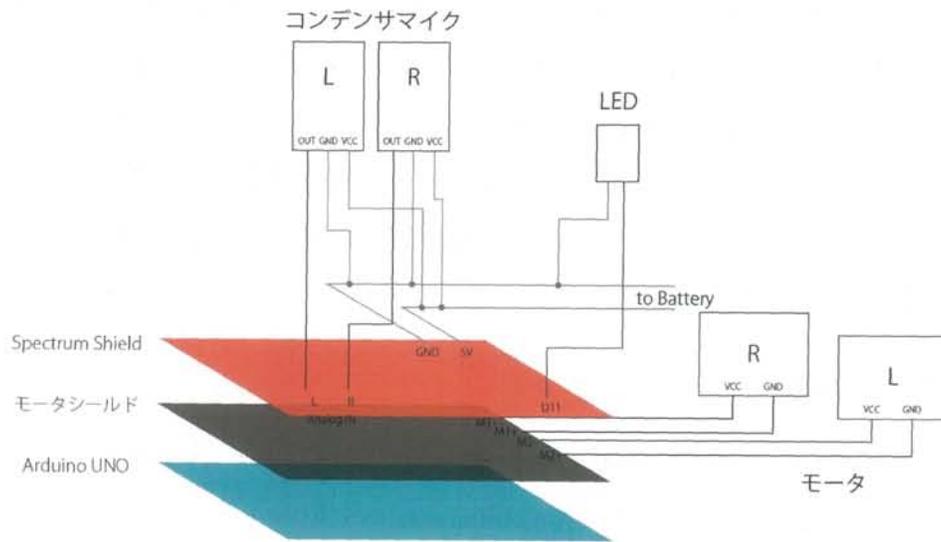


図 12 回路



図 13 制作した玩具

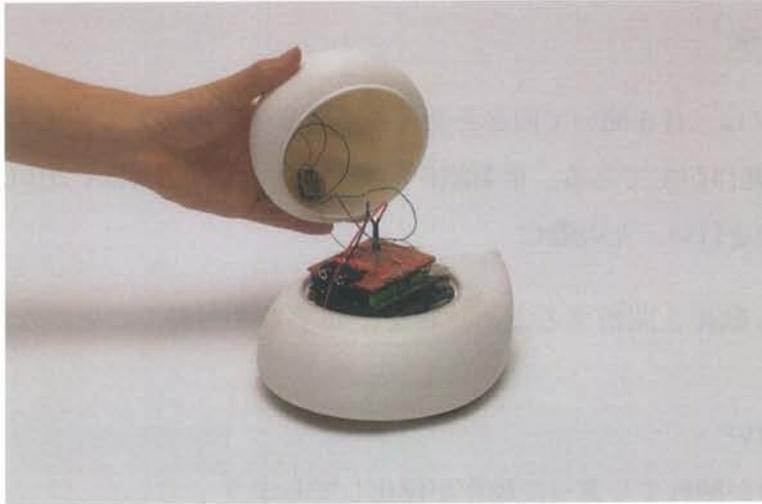


图 14 玩具内部

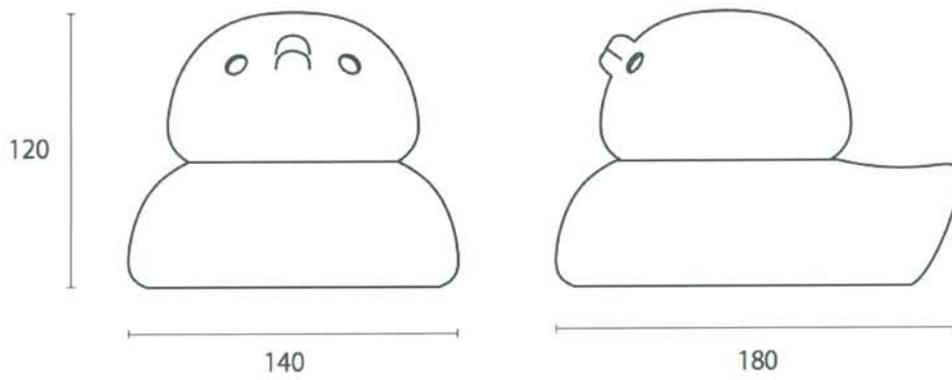


图 15 寸法 (单位: mm)

### 3.5 学会発表・展示

このプロトタイプは、音を聞いて向きを変える、周波数解析をして前進するかどうかを決定する、という動作が主である。卒業制作展での展示や、ADADA 2014、インタラクション 2015 で発表を行い、その際に

- 停止状態から動作を開始するため、音を検知するまで動くことがなく、躍動感が無い
- 動く距離が短い
- 外装とタイヤが触れてしまって動作が停止してしまう
- 体の向きを変える際に、進行方向に頭の向きを変えるとより生き物らしい

といった問題点が見つかった。

## 4 集団行動をシミュレートする玩具

著者の最終目標は、3章で制作した同システムの玩具を複数同時に走行させ、ユーザのいる方向に向かわせることだ。しかし、このシステムのまま動作をさせると、仲間や障害物に限らず衝突の可能性がある。そこでその問題を解決するため、複数が同じ方向に衝突を回避しながら移動する、集団行動の仕組みを取り入れる。玩具それぞれがお互いの距離を測って動作している中、ユーザが鳴らしたハンドベルの音に反応してユーザのいる方向に向かって走行することができれば、3.5で挙げられた問題点の解決にもつながると考えられる(図16)。

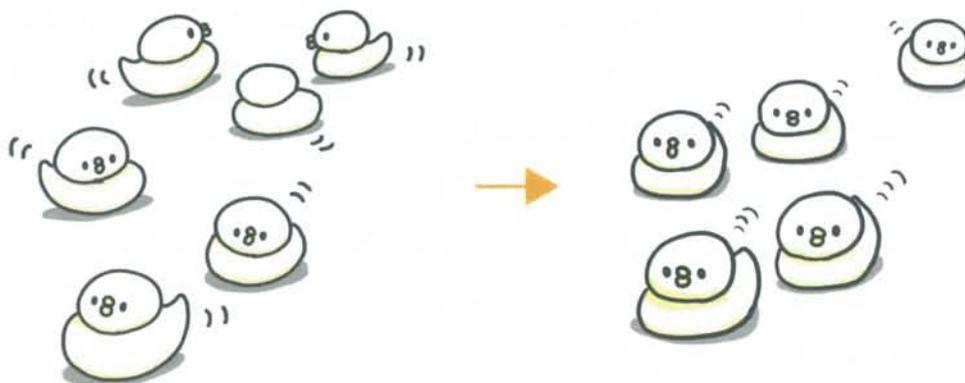


図16 走行イメージ

### 4.1 群集行動の要素

集団行動をシミュレートする事例として、1989年にCraigが制作したBoid algorithm[12]が挙げられる。このアルゴリズムは、鳥や魚などの群集行動をアニメーションで再現するもので、主に

1. 隣り合う仲間やものに近づきすぎない
2. 隣り合う仲間と動くスピード、方向を合わせる
3. 仲間が大勢いる方向(群れの重心)に進む

の3つのルールで構成されている。画面上で図形を動かす場合、動かしたいウィンドウのサイズを設定し、動かす図形の座標を取得する。図形それぞれが自分の座標と仲間の座標からベクトルを生成し、自分の行動を決定する。1つ1つの図形がこのルールを守ることで、集団になった時に複雑な動きをしているように見えるのだ。実世界でこういった集団行動を再現する場合、座標の取得のために超音波やカメラを使い、動作させる空間の状況を把握する。同時に動かす物体の位置座標も取得し、物体の動作を制御する。実際に一般家庭で同じことをしようとする、大掛かりな装置の設置が必要になる。本研究で制作するプロトタイプは、玩具としての利用を想定しているため、1体でも複数でも障害物を避けながら走行できることを目的としている。それにより、群の制御のためにPCを介さず、遊ぶためにあらかじめ機器の準備をする必要がない。本研究では、玩具同士の距離の取得のため、測距センサを玩具に搭載し、その距離情報のみで行動を制御する。

しかし、距離センサのみでは精確に実世界における絶対座標を計測することはできない。実物で集団行動を再現するのに必要な要素を検証するため、Nature of Code -Processingではじめる自然現象のシミュレーション-[13]を参考に openframeworks[14] を使って画面上でのシミュレーションを行った(図17)。その結果、Boid algorithmの3つのルールのうち、「隣り合う仲間や物に近づきすぎない」「隣り合う仲間と動くスピード、方向を合わせる」の2つを達成できることがわかった。「仲間が大勢いる方向(群れの重心)に進む」はセンサの都合上達成できないが、シミュレーションの結果、集団行動をしているように見えると判断した。

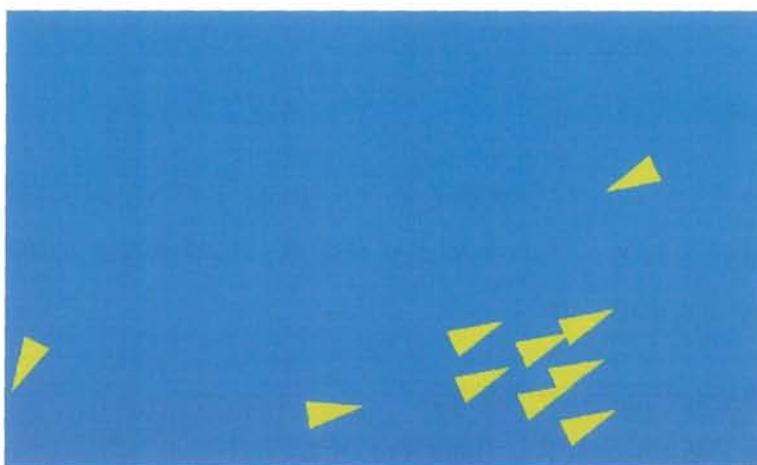


図17 openframeworksでのシミュレーション

## 4.2 距離を利用した行動制御

障害物検出には、長距離、中距離、短距離のセンサが必要になる。まず、10～80cmの範囲が計測可能なSHARP製の赤外線センサ（SHARPGP2YOA21）を使用し、短距離センサを兼ねることが可能か検討した。搭載したセンサの情報を利用して群れを作るみつめむれつくり [15]（図8）では、仲間の後ろについていくため、ロボットの頭部に5つの赤外線センサが角度を変え、横一列に付けられている。ロボットは、このうちの正面のセンサに仲間が入るように、自分の向きを変えて走行する。本研究では、この5つのセンサの役割を1つで担うことを試みた。1つのセンサで複数の方向の角度を計測するため、赤外線センサをサーボモータ（Micro Servo Digital 9g SG90）に取り付け、直接角度を指定して向きを変えられるようにした（図20）。左右と正面の3方向にセンサの向きをかえ、40cm以内の距離に物体を認識した場合にその方向に走行させる。方向変換のために、同じサーボモータを使用し、赤外線センサが検知した方向を直接指定する。実際に動作させたところ、10cm以下、特に20～50mm程度の短距離でのセンサ認識が必要であるとわかったため、別途フォトリフレクタ（RPR-220）を用いた（図21）。

サーボモータと連動し角度を変える赤外線センサを群集行動の制御の中心とし、左右2つのフォトリフレクタは衝突の回避を判断する。赤外線センサの計測した距離のうち、16cm未満に物体を検知した場合、一定時間走行を停止させ、距離に変化がなければ障害物とみなし回避を、距離が遠くなった場合には動いている仲間であるとみなし追走をする。16～40cmの範囲に物体を検知した場合、物体を目指して走行する。その際、距離が近いほど走行速度を落とし、遠いほど速く走行するよう距離と速度を対応させる。これにより、先行する仲間が多くいる程計測する距離の値が平均値に近くなり、結果として走行速度が周囲と等しくなっていくと考えた。40cm以上をセンサが示した場合には、16～40cmの範囲に物体を検知するまでセンサの向きを変えながら走行する。このプロトタイプは、16cm以内に物体を検知するまで停止せず走行し続けるため、障害物の有無を頻繁に確認する必要がある。そのため、主となる赤外線センサで距離を計測する前に必ずフォトリフレクタでの計測を行う。主センサでは計測できない近距離に物体を検知した場合、回避行動をさせる（図22）。行動制御のフローを（図19）に示す。

衝突の回避のため、サーボモータに取り付けた前輪の角度による旋回半径を検証した。正面を90°とし、徐々に角度を左に変化させていった。結果を図18に示す。角度を大き

くするに伴い、旋回のためにトルクが必要になる。しかし、そのために電圧を上げると旋回をしすぎてしまい、結果同じ軌道に戻ってしまう。それを修正するために電圧をかける時間を短縮すると、モータが回転できない。また、玩具は距離を計測しながら走行しているため、あらかじめ障害物を避けることが可能であり、急旋回をする必要はない。そこで、回避のために使用する角度を  $90 \pm 40^\circ$  に設定した。近距離の測定に使用するフォトフレクタは、正面、左右ともに 5cm 程度を最短距離の目安とし、検知した値が 900 以下になる角度を検証した。その結果、方向転換の軸となる前輪のサーボモータの回転の中心から 50mm、設置する角度を  $75^\circ$  にすることで回避の判断ができるとわかった。

衝突の回避の検証を行うため、実際に走行をさせた。ある程度は衝突の回避や仲間の追跡を行うが、搭載しているアクチュエータ類がむき出しであるため、仲間を測る場所によって距離が変わってしまい、仲間とぶつかって絡まってしまうことがあった。また、体の横にある障害物を検知できないため、方向転換のさいに障害物の角に引っかかってしまった。そこで、検証に支障の出る要素を減らすため、アクチュエータを乗せる円盤型のベースを設計した (図 25)。円盤状にすることで、アクチュエータの位置による距離の誤差があっても仲間と近づきすぎず、障害物に捕らわれてしまうことも少なくなった。

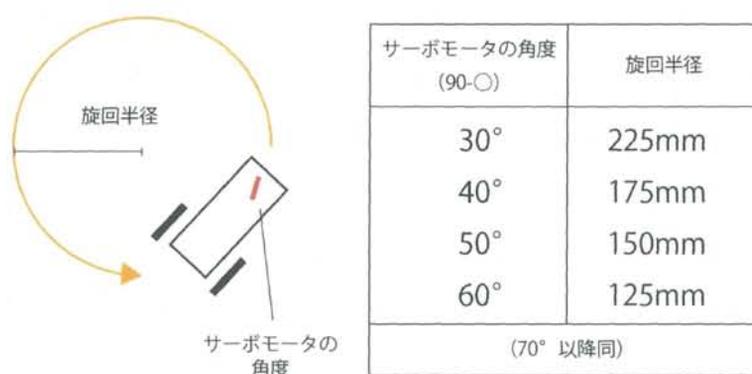


図 18 サーボモータの角度による旋回半径の変化

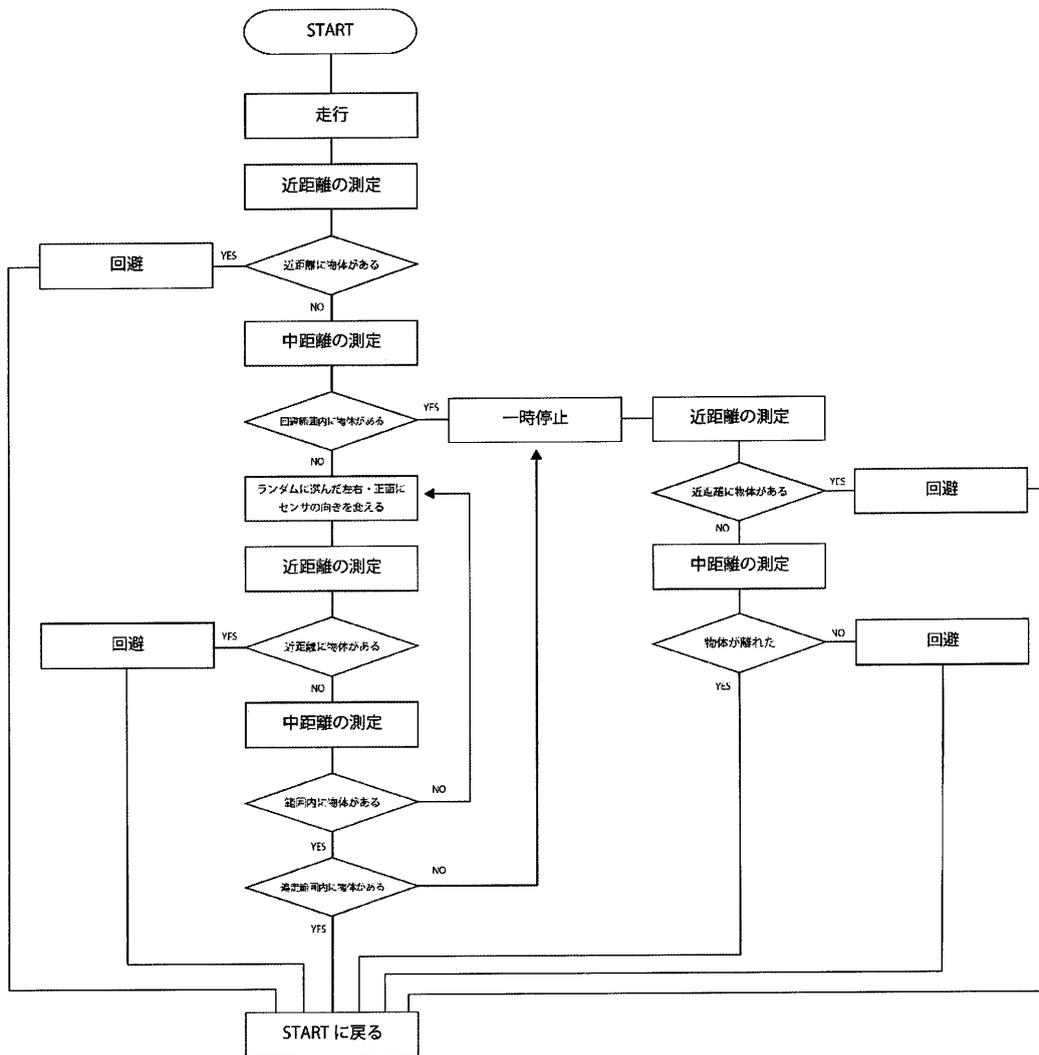


図 19 行動制御の処理フロー

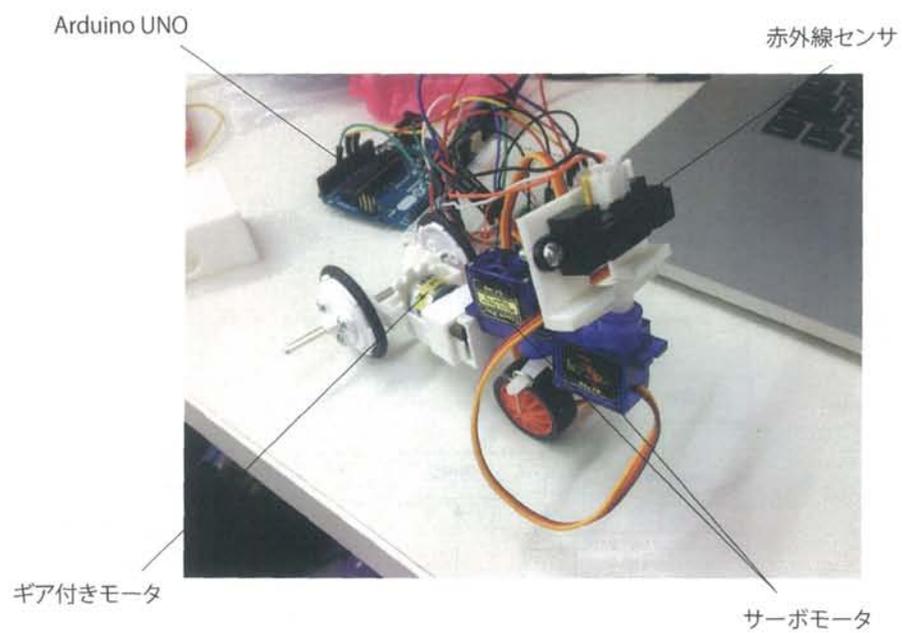


図 20 行動の検証のためのプロトタイプ

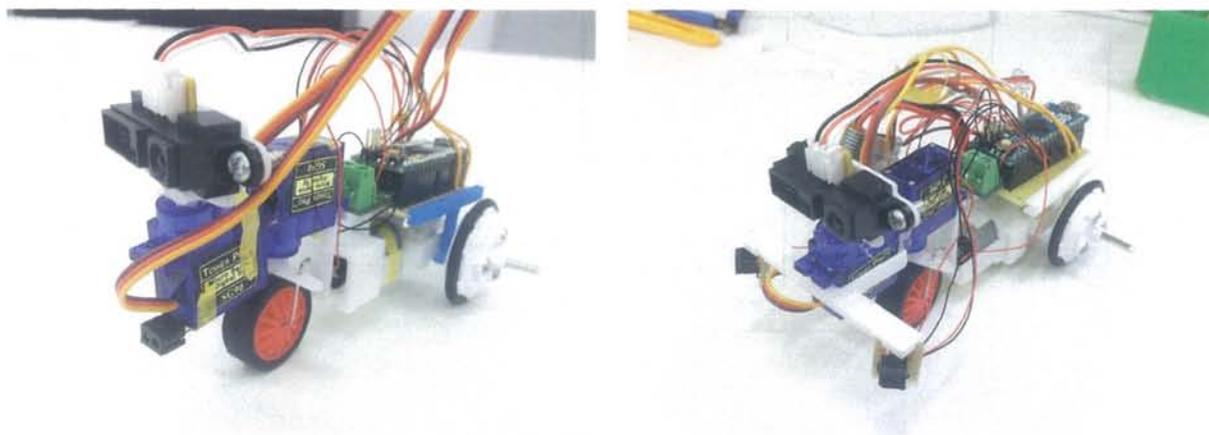


図 21 rpr-220 を追加したプロトタイプ

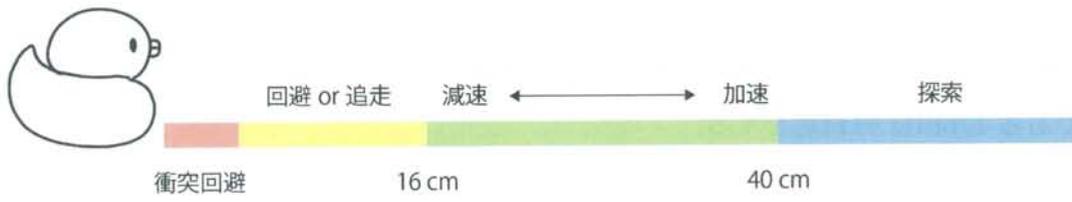


図 22 距離による行動制御

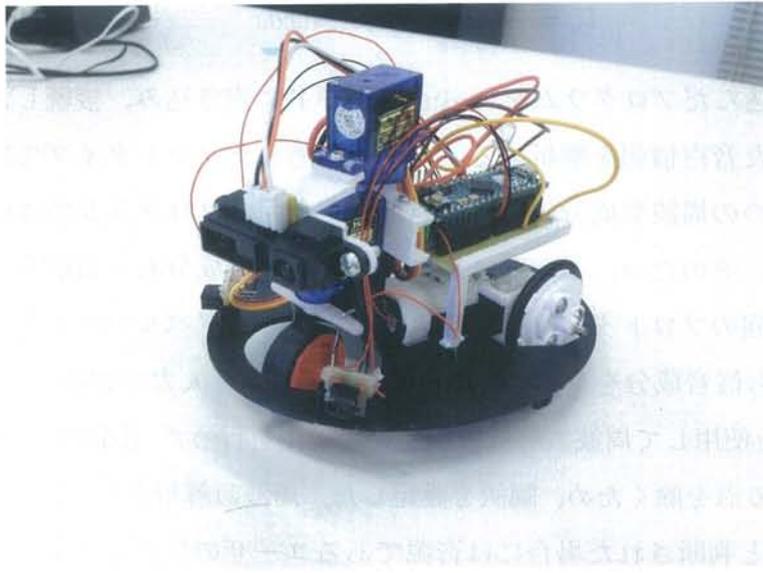


図 23 衝突を想定したプロトタイプ

### 4.3 音情報を利用した操作の組み込み

周波数解析の手法として一般的であるフーリエ変換を利用し、使用するハンドベルの周波数帯である 1760Hz の判定をする。

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx$$

上記の数式を組み込んだプログラムを Arduino ボードに書き込み、接続したコンデンサマイクから受信した音声情報を解析する。3章で記述したプロトタイプでは、シールドを使用し音声を7つの周波数成分に分けていたが、今回のプログラムでは成分を128点までに分割できる。そのため、ハンドベルに見られる倍音成分も入力信号として使用することができ、前回のプロトタイプよりもより正確にハンドベルの音を捉えることができる。128点のうち倍音成分を含んだ12, 37, 53の3点を入力の認識として利用する。openframeworksを使用して周波数解析の状態を可視化を行った(図25)。128点のうち、常に値の大きくなる点を除くため、閾値を設定した。周波数解析をした結果、ハンドベルの音がなっていると判断された場合には音源であるユーザの位置を目指して走行し、それ以外の場合には衝突を回避しながら自由に走行する。音源の推定方法は、3.2の方法と同様に左右のマイクが検知した音量の割合によって判断をさせる。音量の値は、マイクから収集した音声の最新の値を直前の値と比較した差とする。こちらも openframeworks で値を可視化し、中央の円が左右の音量の割合を示すようにした(図26)。前回のプロトタイプでは、正面と左右の3方向の判定のみで、音源の方向に正確に向きを変えていなかった。今回は、音量の割合と前輪のサーボモータの角度が対応するよう、幾つかの方向を設定し音源に向かわせる。音源に向かって体の向きを変えて走行する間も、仲間や障害物との距離を計測しながら衝突を回避する。

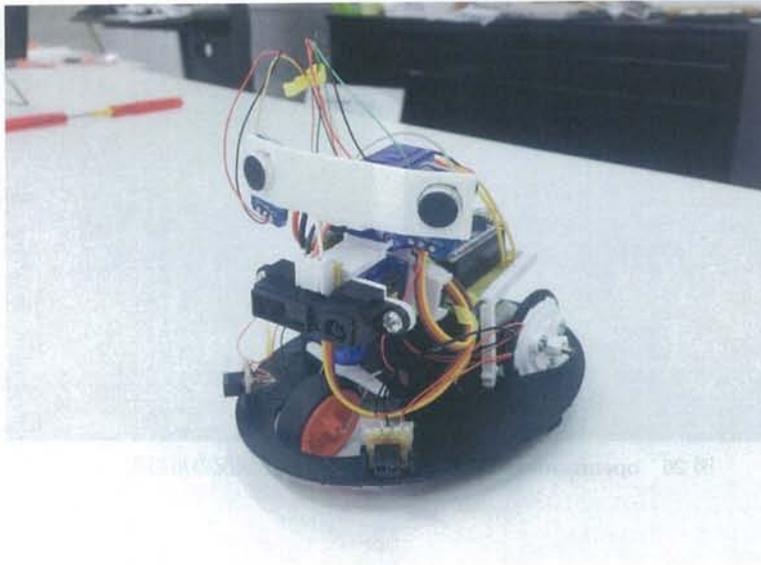


図 24 マイクを搭載したプロトタイプ

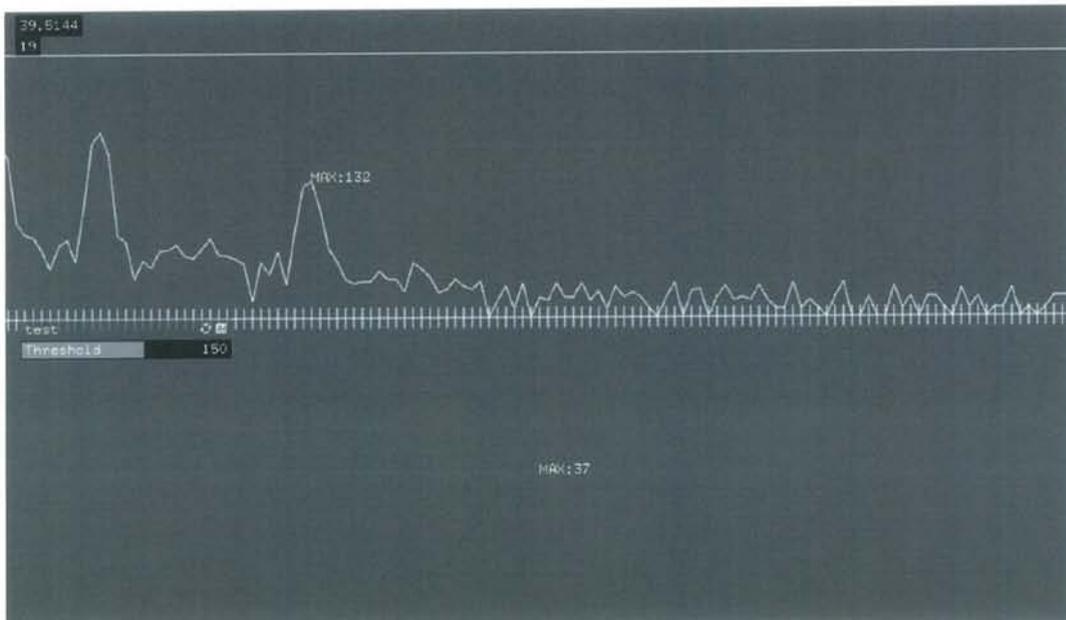


図 25 openframeworks を使用した周波数解析の可視化

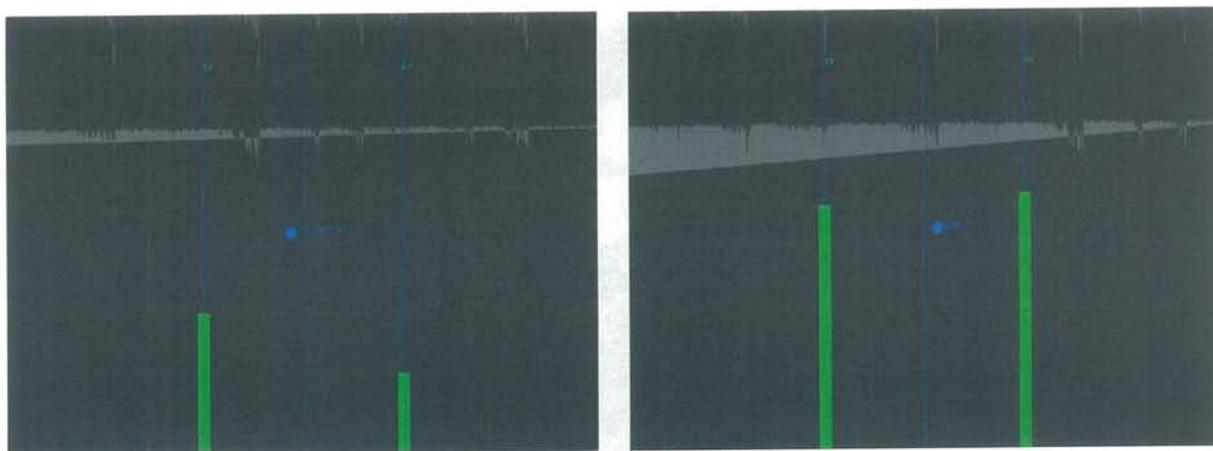


図 26 openframeworks を使用した音源推定状況の可視化

#### 4.4 ハードウェア構成

小型のギア付きモータ (KM-16A030-26-06415) とモータドライバ (DRV8830 I2C) を使用し、それらを配置するベースを設計し、3Dプリンタで出力した (図 27)。モータなどのアクチュエータ類は、前回同様に、あひるの形をした外装で覆う (図 28)。4.2の段階では、仲間の体のどこを測るかによって距離が変わってしまい、衝突もあったが、全体を覆うことで安定して距離を計測することが可能になった。また、前は単三電池 4 本を使用していたが、今回は充電可能なリチウムイオン電池 (G Force Lipo バッテリー) を使用する。充電の際は、くちばしの部分にある充電器 (MCP73831T) に microUSB コネクタを差し込む (図 30)。頭部のモデルに赤外線センサ、マイク、LED、充電器を固定し、サーボモータによって進行方向に向かうよう首を振る。くちばしに搭載された電球色の LED によって、玩具の現在の状態を示す (図 31)。また、回路図を (図 32) に示す。

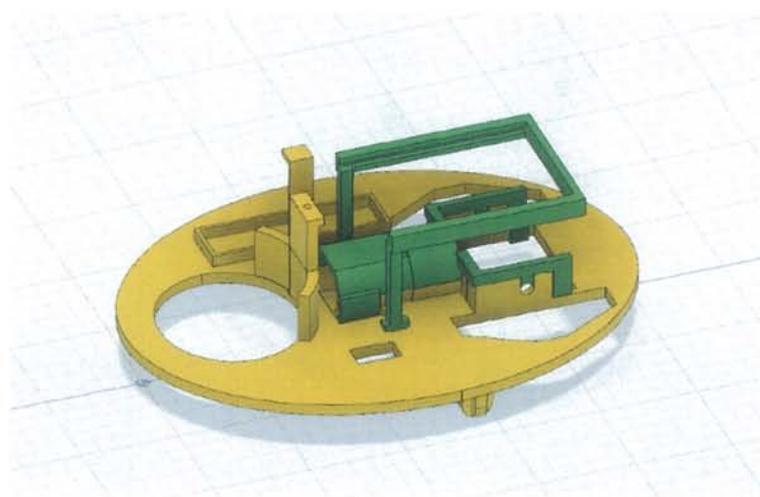


図 27 アクチュエータ類を搭載するベース

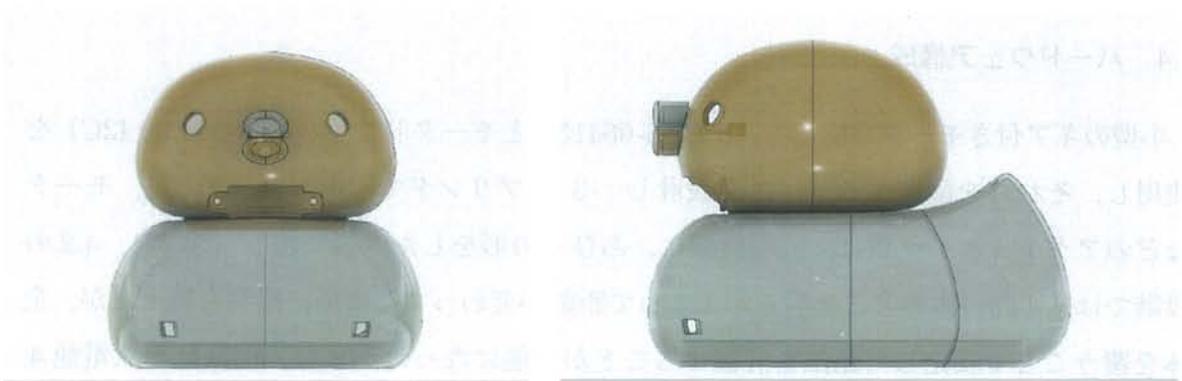


図 28 ボディの 3 D モデル

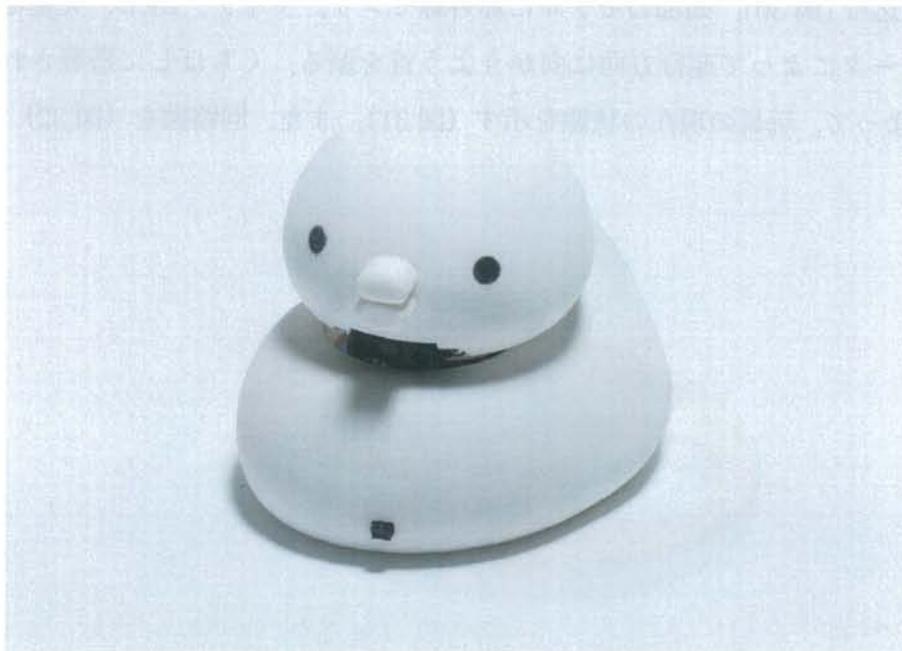


図 29 完成した外装



図 30 充電口

通常走行	仲間を検知	障害物を検知	充電時
淡く点灯	淡い点滅	強い点滅	フェード

図 31 LED の発光パターン

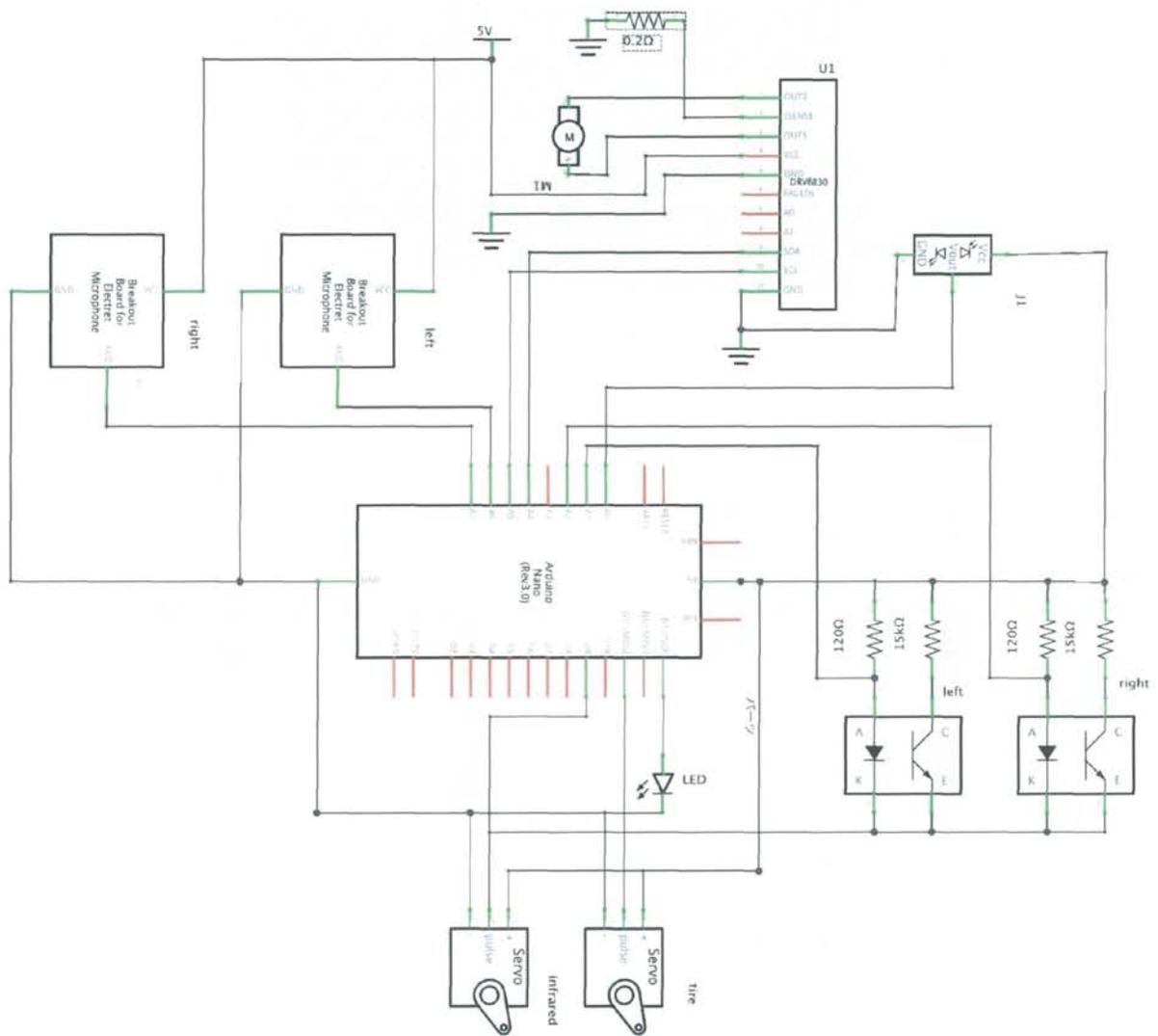


图 32 回路图

## 5 考察

### 5.1 解決した点

本研究の目標は、既存のコントローラでは玩具の操作が難しいユーザ、特に幼児を対象とした玩具の操作方法の提案をすることであった。音を玩具の操作のきっかけとし、玩具に動作の決定を委ねることで、ユーザが操作のためにあらかじめ玩具の動作とコントローラの操作部の関係性を理解する過程を省略することに成功した。また、音の発生方法にハンドベルを採用することで、「振る」という直感的な動作だけで音を発生させることができる。一つの音のみを発生させるハンドベルにより、操作のために複数のものに触れる必要がなくなった。

玩具自身に距離センサを搭載することで、玩具が複数走行している状態であっても、仲間同士や障害物等との衝突を避けて走行することを実現させた。プロジェクタなどの外部装置を設置せずに玩具が距離を測りながら走行するため、独特のゆらぎのある動きが生まれる。加えて、3章で制作したプロトタイプは体の向きを変えるのみであったが、サーボモータを使用し、進行方向に頭の向きを変える動作を加えた。これらの意図しない動きと意図して行った動作により、ロボットに生き物らしさを与えることができた。またこの動きの変化により、ユーザが親、玩具が子という親子の関係をより演出することができたと考える。また、「振る」という簡単な動作のみで複数の玩具の動作に変化を与えることが可能であるため、新しい操作体験を与えることができた。

### 5.2 問題点

この玩具は音を操作のきっかけとして左右に取り付けたマイクが受け取り、その音量の割合によって音源の方向を推定する。しかし、音は反射するものであり、ユーザが音を発生させる位置によっては誤った方向を音源と見なしてその方向へ進んでしまう。また、操作のために使用するハンドベルであるが、本研究で使用したハンドベルは本格的な演奏に使用するものであったため、音の響く範囲が広く、家庭で遊ぶには配慮が必要であると考える。

### 5.3 今後の展望

現段階でこの玩具は、倍音成分を含む 1760Hz の「ラ」の音にのみ対応しているが、他の周波数や複数の周波数に対応させることもシステム上可能である。そのため、同じ操作方法でも

- 対応する周波数帯を個別に変え、複数のユーザが同時に操作をする
- 「回る」「体を揺らす」等、複数の動作を周波数帯で分ける
- リコーダーや鍵盤ハーモニカ等、一台で複数の音を出せる楽器で操作する

といった設定が考えられる。また本研究では、玩具の音を発生させているユーザのいる方向を目指す動きから鳥の親子の移動を連想し、鳥の雛の外装で玩具を覆った。鳥の姿に限定せず、この仕組みを搭載した着脱可能なデバイスを作ることができれば、子供が普段遊んでいるお気に入りの玩具をハンドベルで操作することも可能になる。単純な仕組みであるため、遊び方に広がりを与える可能性を持った操作方法であると言える。

## 6 結論

本研究では、特定の音を発生させることで操作が可能なラジオコントロールカーの制作をした。コントローラとしてハンドベルを採用することで、「振る」という直感的な動作のみで操作が完結し、前もってユーザが操作のための学習をする過程が省略された。これにより、ユーザとして設定していた幼児でも簡単に玩具の操作を行うことが可能である。また、この操作方法を採用した玩具が複数であっても、集団行動の要素を取り入れることで衝突を回避しながらユーザの元へ向かうことができる。ユーザの動作は「ハンドベルを振る」のみであるが、玩具は「走行する」「探す」「避ける」といった複数の動作をするため、最小限の動作で複数の操作を行う新しい操作体験を得られた。

今回操作に使用したのはハンドベルの一音であったが、玩具が対応する周波数帯を変化させることで、他の音や複数の音に反応させることも可能である。また、ハンドベル以外の楽器でも操作が可能であるため、ユーザの演奏能力に合わせた操作方法の選択も考えられる。「音を鳴らすと玩具が自分のいる場所を目指して走行する」という単純な仕組みであるため、様々な遊び方が考えられる玩具となった。

## 7 謝辞

本修士論文は、著者が首都大学東京システムデザイン研究科システムデザイン専攻インタストリアルアート学域博士前期課程における研究成果をまとめたものである。本研究を進めるにあたり、同専攻馬場哲晃准教授には、指導教官として日頃のご指導や、国内外での学会発表でのお力添えを頂きました。自分の進路を決めることができたのも、この研究室に配属できたおかげだと思っております。心より感謝いたします。並びに、同専攻串山久美子教授、今間俊博教授には、副査としてご助言や論文のご指導を頂きました。この場を借りて感謝を申し上げます。また、Paul Haimes氏には、国際学会での発表において様々な助言をいただきました。ありがとうございました。そして、同研究室及びインタラクティブアートスタジオの皆様、特に同期の御三方とは楽しい時間を過ごすことができました。本当にありがとうございます。最後に、大学院進学を支援してくれた家族、相談にのってくれた友人、知人の皆様に感謝の意を込めて謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- [1] Rubenstein, Michael, Christian Ahler, Radhika Nagpal, Kilobot: A Low Cost Scalable Robot System for Collective Behaviors, In Procrrdings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation(IRCA 2012), 3293-3298. 2012
- [2] Mathieu Le Goe, Lawrence H. Kim, Ali Parsaei, Jean-Daniel Fekete, Pierre Dragicevic, Sean Follmer, Zooids:Blocks for Swarm User Interface, Proceedings of the Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2016), pp.97-109, 2016
- [3] 北河満, 「村田製作所チアリーディング部」の開発に関わって,Cue:京都大学電気関係教室技術情報誌, 33, 64-66, 2015.
- [4] 福田玄明, 植田一博, 対象の運動に対する関わりが生物らしさの知覚に与える影響, Proceedings of Human-Agent Interaction Simposium 2007, 1F-2, 2007
- [5] Felix Hess, Electronic Sound Creatures, Proceedings of the Second European Conference on Artificial Life (ECAL '93), pp 452-457, 1993.
- [6] Patrice D Tremoulet, Jacob Feldman, Perception of Animacy from the Motion of a Single Object, Perception, vol.29, no.08, pp.943-951, 2000.
- [7] Geogely Csibra, Goal Attribution to Inanimate Agents by 6.5-month-old Infants, Congnition, vol.107, no.02, pp.705-717, 2008
- [8] 石井裕,Craig Wisneski, Julian Orbanes, Ben Chun,and Joe Prdiso. PingPong-Plus: design of an athletic-tangible interface for computer-supported cooperative play. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems (CHI' 99). ACM, New York, NY, USA, 394-401.1999.
- [9] Wenyi Zhang and Bhaskar D. Rao. A two microphone-based approach for source localization of multiple speech sources. Trans. Audio, Speech and Lang. Proc. 18, 8 (November 2010), 1913-1928. 2010.
- [10] [https://www.sparkfun.com/products/13116\(2017/1/10\)](https://www.sparkfun.com/products/13116(2017/1/10))
- [11] [https://www.arduino.cc\(2017/1/10\)](https://www.arduino.cc(2017/1/10))
- [12] Craig W. Reynolds, Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model,

Vol.21, No.4, pp. 25-34, 1987.

- [13] Daniel Shiffman, Nature of Code -Processing ではじめる自然現象のシミュレーション-, ボーンデジタル, 2014.
- [14] [http://openframeworks.cc\(2017/1/10\)](http://openframeworks.cc(2017/1/10))
- [15] 松原季男, 機械動物メカニカル, 日本の科学と技術 沖縄海洋博記念特集 海洋, 日本科学技術振興財団, Vol. 16, No. 175, 75-79, 1975

## 付録 A 学外発表

### <国際会議>

1. Nagisa Niwata, Tetsuaki Baba, A Sound Controlled Duck Toy: a Challenge to Apply Sound Source to Controller for Children toys, ADADA2014, Art Paper, PaperID 198, 2014
2. Nagisa Niwata, Tetsuaki Baba, Paul Haimes, Toy which Simulates Group Behavior with Multiple Range Sensors, ADADA2016, Technical Paper, 4A-4, 2016

### <国内会議>

1. 庭田凧沙, 馬場哲晃, 串山久美子, 音情報により制御可能な自走式玩具の制作, インタラクション 2015, インタラクティブ発表, A05, 2015
2. 庭田凧沙, 馬場哲晃, 集団行動をシミュレートする子供向け玩具の研究, ADADA Japan 2015, 口頭発表, B2-5, 2015
3. 庭田凧沙, 馬場哲晃, 串山久美子, 複数赤外線センサによるオブジェクト検知とそれを利用した集団行動玩具, インタラクション 2016, インタラクティブ発表, 1C66, 2016