修 士 論 文

ソフトロボティクスの特性を利用した

生物的表現についての研究

Study about the Living-like Expression using the Characteristics of Soft Robotics

2019年１月

九州大学芸術工学府芸術工学院

デザインストラテジー専攻　修士課程

平成28年度４月入学　2DS17224P

今岡　宏朗

IMAOKA / Hiroaki

指導教員

富松潔 教授

目次

目次 1

1章 序論 3

1.1 研究の背景 3

1.2 研究の目的 3

1.3 研究の位置付け 3

1.4 研究の方法 3

1.5 研究の構成 4

2章 関連研究 5

2.1 ソフトロボティクスの発端 5

2.2 ソフトロボットの制作方法について 5

2.3 関連研究調査における考察 5

3章 インタラクティブ作品 「Heart of Mollusca」の作成 6

3.1 コンセプト 6

3.2 制作 6

3.2.1 触手の作成① 6

3.2.2 触手の作成② 6

3.2.3 エアーポンプ 6

3.2.4 空気弁 6

3.2.5 心拍センサー 6

3.2.6 LED 6

3.3 展示 6

3.4 考察 7

4章 生物らしさとは？ 8

4.1 「生物的表現」とは? 8

3.1.1 「生物的表現」の歴史 8

3.1.2 生物的表現の分類 8

4.2 ソフトロボットにおいての「生物的表現」 8

4.3 「生物らしさ」について 8

5章 インタラクティブ作品 「Border of LIFE」の作成 9

5.1 コンセプト 9

3.1.1 ナメクジ 9

3.1.2 チンアナゴ 9

3.1.3 イソギンチャク 9

3.1.4 クラゲ 9

5.2 制作 9

3.2.1 ナメクジ 9

3.2.2 チンアナゴ 9

3.2.3 イソギンチャク 9

3.2.4 クラゲ 9

3.2.5 センサーについて 9

5.3 展示 9

3.3.1 展示の様子 9

3.3.2 アンケート調査 9

5.4 考察 9

6章 考察 11

7章 結論 12

引用文献 13

謝辞 14

# 序論

## 研究の背景

近年、ロボット工学の分野でソフトロボティクスという分野が注目されつつある。ソフトロボティクスの「ソフト」は物理的な柔らかさのことを指す。ソフトロボティクスという単語が認知し始めたのは2010年からであり、いまだに発展途上の分野であると言える。ソフトロボティクスという分野が誕生して以来、柔らかい材質や動力源など、従来のロボット工学分野では注目されていなかったさまざまな研究が登場しており、今まで多くの新しい観点からの研究がなされている。ソフトロボットは、ロボット工学という分野に限らず、生物学、医学、心理学などの分野にも影響を与え、今後の人間と機械との関係性を大きく帰る可能性を秘めている。

従来、ロボットというものは早く、正確で、強く、決まった動作を繰り返し行うために硬い素材で作られてきた。それに対して自然界の生物は、複雑な自然環境の中で対応できるように、やわらかく進化してきた。ロボット工学者はこういった生物学的なやわらかい動きからインスピレーションを受け、ソフトロボットという分野が生まれた。 生物的な動きが由来であるため、ソフトロボットは従来のロボットと比べて柔らかく、より自然で生物的な動きを行うことが可能である。

ソフトロボットの素材や機構など、物理的な研究は数多く行われているが、ソフトロボットのもつ表現についての十分な研究がなされているとは言えない状態である。ソフトロボットは従来のロボットとは全くことなる動きや表現が可能である。ソフトロボティクスを使ったロボットの制作実績は多くはない。

## 研究の目的

本論文は、ソフトロボットの表現できる「生物らしさ」を用いたアート作品を制作することが目的となる。また制作した作品を展示会にて展示し、フィードバックを得る。それらのフィードバックも含めて、ソフトロボットの制作方法、表現の特徴、課題、改善点など、様々な観点からソフトロボティクスを用いいた作品制作について議論する。最終的には今後ソフトロボティクスを用いた作品制作を行うにあたって参考となる指針を提示する。

## 研究の位置付け

ソフトロボティクスは今日まで、素材・動かし方・活用方法など様々な研究がなされており、今も尚、ソフトロボットの使い方の可能性を探る研究がなされている。

## 研究の方法

本研究では、ソフトロボットについての基本的な調査の後、ソフトロボットの固有の表現に着目した作品を２点制作し、それらを展示した際の鑑賞者の反応から生物的な表現方法について有効であるかどうかを議論する。

## 研究の構成

1章では本論文の背景・目的・構成などを説明した。

2章では、ソフトロボティクスについての知識をまとめ、現状がどういった状況であるのかを把握する。

3章では、「Heart of Mollusca」という作品を制作し、展示を行う。展示会でのフィードバックを参考に、改善点などを探る。

4章では、3章での改善点を踏まえ、「生物らしさ」とは何かという問いをたて、「生物らしさ」という認識についてのこれまでの歴史的背景を探索する。

5章では、４章での情報を参考に、「生物らしさ」についての仮説を立て、その仮説を立証するために「Border of LIFE」という作品を制作し、展示会にてフィードバックを得る。そのフィードバックをもとに仮説についての議論を展開する。

6章では今回制作した二つの作品「Heart of Mollusca」と「Border of LIFE」の総評を行い、様々な観点からソフトロボティクスの表現について考察し、今後の作品制作を援助する情報をまとめ、提示する。

# 関連研究

この章では、昨今注目されているソフトロボティクスという分野について、様々な研究・制作事例を取り上げ、ソフトロボティクスがどういった経緯で生まれ、どのように発展してきたかを述べ、現在におけるソフトロボティクスの状況を述べる。

## ソフトロボティクスの発端

ソフトロボティクスという分野が確立しだしたのは、2010年あたりからであると言われている。当時作られていた代表的なソフトロボットとして、Laschi. Cによるタコのソフトロボットや、Trimmerによる”GoQBot”と呼ばれるイモムシロボットなどがあげられる。実在する生物の生体模写をしたロボットの制作が、のちのソフトロボティクスに繋がることになった。

## ソフトロボットの制作方法について

ソフトロボットは現在、様々な制作方法がある。もっとも用いられている制作方法は、キャストモールディングである。ハーバード大学にて「Soft Robot Toolkit」というウェブサイトにて、作り方がオープンソースとして公開されている。

空気圧で膨らんで動く仕組みは、「PneuNets（Pneumatic network）」と呼ばれている。

## 関連研究調査における考察

ソフトロボティクスは、もともと自然界の生物からロボット工学者たちがインスピレーションを受け、成立した分野である。つまり、ソフトロボティクスは生物的な動きを表現することができ、そこがソフトロボットの強みとなり得る。

Pneunetsシリコンソフトロボットは、比較的安く、作りやすいため、導入しやすさという点が強みと言えるだろう。一方、耐久度が低いことや、制御が難しいというデメリットのため、実用性の低さが懸念点である。ここで、Pneunetsシリコンソフトロボットはどのような使い方が適しているのかという課題が生まれる。

ここで、先ほど述べた、「生物らしさ」という表現を活かした活用法を提案したい。アートとして用いられる表現の世界においては、実用性よりも見た目が重視され、負荷がかかることも少ない。よって、Pneunetsソフトロボットはアート作品に適しているのではないだろうか。

# インタラクティブ作品 「Heart of Mollusca」の作成

## コンセプト

ソフトロボットを用いた作品を作る上で、

実験として存在するこの作品。

ソフトロボットの生物的な動きと心拍の連動を取り入れる。何もしていない状態では動かず、鑑賞者が心拍センサーに触れると、その人の心拍にと連動して動く。鑑賞者の生命が作品に憑依するという意味合いを込めた。

本作品では心拍の連動バイオフィードバック効果を取り入れた。

## 制作

### レーザーカットモデルによる触手の作成

まず、空気を挿入して曲がる触手を制作する。作り方は「Soft Robotics Toolkit」を参考にした。様々な作成方法が公開されている中、「Laser Cut Molds for PneuNet Bending Actuators」図というレーザーカッターの型から触手のように曲がるシリコンを生成する方法を試した。

このモデルでは、空気が入り膨らむ上面用の型と、底面用の型が存在する。上面用の型には底面用の型よりも硬いシリコンを使用する。上面用のシリコンは内側が空洞になっており、そこに空気を入れる用のエアーチューブを差し込む。そして上面と底面のシリコンをくっつけることによって一つの触手の機構を生成する。上面側のシリコンは図のように空気の膨張により底面側のシリコンを押し出し、空気を入れることによって触手が曲がるような動きを生み出す。



空気を入れるための空洞は、図のような骨のような形をしている。この形により、シリコンの全体に空気が行き渡り、触手全体が曲がるように設計されている。レーザーカッターのモデルには三角形、四角形、楕円形の形があったが、今回はより軟体動物の触手を連想させるような三角形のモデルを選んだ。

柔らかいシリコンにはSmooth-On社の「Ecoflex」、固いシリコンには同社の「Dragon Skin」を使用した。

シリコンは最初は液体の状態であり、二つの素材をかき混ぜることによって段々固化するようにできている。液体の状態で型に流し込み、シリコンが固化した後それを型から抜き取ることによって生成する。

シリコンをかき混ぜるため、流し込んでそのまま固化させると気泡が入ってしまう。そのため、シリコンを型に流し込んだ状態で真空成型器に5〜10分ほど入れ、気泡を取り除く。図

どちらも色をつけていない状態では白濁した半透明の色をしており、そのままの色で触手を制作した。

### レーザーカットモデルによる触手の問題点

レーザーカットモデルの触手を作動させていると、問題に遭遇した。まず、空気を入れた際、シリコンの微小な厚さの偏りにより、局所的に膨張してしまうという問題である。図

また、シリコン生成時には問題の無い動きを示しているが、長期間動かしているうちにシリコンが伸び、上記と同様に局所的な膨張を起こしてしまう。

この問題は、シリコンの厚さが薄いため圧力が表面上に分散されないのではないかと考えた。解決法として、骨組みの部分に厚さを増したレーザーカッターモデルを生成した。図

この型を使った触手を用いて、空気の出し入れを５時間ほど繰り返す耐久テストを行った。結果、５時間後もシリコン生成時と変わらない挙動をみせた。よって、シリコンの局所的な膨張は、シリコンの層を厚くすることによって解決するということが分かった。しかし、結果的にシリコンが厚くなってしまい、本作品では触手を重ねるため見た目が縦に伸び、不恰好になってしまうという問題が新たに生じた。

そこで、厚みをごまかすために触手を流動的にさせる。レーザーカッターのモデルでは、直線的な型を得意とするため、流動的な形を生成するには別の型の生成方法を使わなければならない。

## 3Dモデルによる触手の作成

レーザーカッターが直線的な形を生成できる一方で、3Dプリンターであれば流動的な形が生成できるのではないかと考えた。まず求める3Dモデルを「Tinkercad」にて生成した。

Tinkercadとは、もともと教育用に作成された3Dモデリングソフトであり、直方体や球など既存のコンポーネントを組み合わせることによってモデリングを行うことができる。

レーザーカッターモデルと同様に、上面と底面を制作する。今回のシリコンの形は、タコやイカなどの軟体動物の触手を参考にし、丸みを帯びた形を制作した。

上面の型は二つのパーツA・Bで構成されている。流動的な形を実現させるため、シリコンを充填させつつ空気が入るための空洞を開ける。空洞用の型Aを下に置き、丸みを帯びた形の取れる型Bを上にかぶせ、型Bにあいている穴からシリコンを流し込む。型Bにはシリコンがうまく充填されているかを確かめるために穴を二つ開けている。これにより隙間なくシリコンが充填されるだけでなく、真空成型時にこの穴から気泡が抜けていく。

### エアーポンプ

空気を送り込む機構では水槽用のエアーポンプを使用した。エアーポンプの動きを制御するため、デュアルモータードライバーを使用し、空気を送るタイミングとスピードを制御した。モータードライバーにはArduino用とは別電力でエアーポンプ用のAC電源を繋いだ。

### 空気弁

空気を送り込んだあと、その空気を抜かなければならない。そこで、ソレノイドを利用した空気弁を使用した。以下の回路を組み、ダイオードの仕組みを利用してArduinoから信号があった場合ソレノイドが作動して空気弁が開くようにした。空気弁はエアーチューブと同じ口径のものを使用し、エアーポンプと触手の繋がっているエアーチューブと連結した。

### 心拍センサー

心拍センサーはArduinoを使った電子工作でよく用いられるものを使用した。もともとクラウドファンディングサイトであるKickstarterから生まれた、比較的安価な心拍センサーであり、発売元のホームページからサンプルのソースコードが公開されている。心拍センサーを脈に当てることにより、心拍のBPMを検出する。緑色のLEDを血流に照射し、反射された散乱光の量の変化により心拍を測定する。

### タッチセンサー

心拍センサーは触れている時に心拍を検知するが、触れていない時にも心拍を検知してしまう誤作動が生じた。この問題を解決するために、心拍センサーの上にタッチセンサーを搭載し、タッチセンサーが反応してから心拍を検知させた。

触ったことを検知する方法として、静電容量式タッチセンサーを作成した。1MΩの抵抗を利用し、タッチしている間人体がキャパシタとなり、抵抗とキャパシタでRC回路を作成する。触る場所には銅箔テープを貼っており、そこにArduinoのポートを２つつなげ、一つを出力用、一つを入力用のポートとして活用する。出力用ポートを立ち上げた（HIGHにした）後の入力用ポートが立ち上がる（HIGHになる）までの時間を検出する。銅箔に人が触れていない場合はパルスの検出までの時間は短く、人が触れている場合はパルスの立ち上がりが鈍くなるため時間が長くなる。この差を利用して、人が心拍センサーに触れているかどうかを検出した。

### 気圧センサー

ソフトロボットは空気をシリコンに挿入することによって動きをコントロールしているが、空気の膨張が限界まで達すると、シリコンが破裂してしまい、ロボットが壊れてしまうという問題点がある。この問題を解決するために、シリコンにつないでいるエアーチューブに気圧センサーをとりつけた。シリコンが膨張すればエアーチューブ内の気圧が高くなり、気圧センサーが高い値を検知する。気圧センサーが一定以上の値を検知した時、空気を送り込み機構をストップさせ、空気弁を開ける機能を取り入れた。

### LED

心拍に合わせて、視覚的に認知しやすくするためLEDをシリコンの球に入れ、この作品の心臓部として表現した。球の形を作るための型をつくり、型の頂上部に穴を開けそこから３つの配線済みのLEDを垂らした状態にし、シリコンを固めた。シリコンは半透明なためLEDの色がシリコン全体を光らせることができる。LEDは指向性が高いため、できるだけシリコンの表面近くでなく、中心部に３方向で光を分散させ、シリコンをディフューザーとして活用した。

### 回路設計

空気弁と気圧センサーを制御する部分がスペースを取っていたため、電子回路をコンパクトに収めるために、専用の基盤を制作した。回路設計ソフト「EAGLE」を使い回路図を作成し、その図面を利用し、ミリングマシンを使うことによって銅板を切削することによって基盤を作成した。ミリングマシンは、データを元にドリルで素材を削りとる機械であり、銅板による基盤の制作にて多く用いられる。

## 展示

作品を制作後、以下複数の展示会にて本作品の展示を行った。

・ADADA Japan 2017 - 札幌市立大学キャンパスにて

・アジアデジタルアート大賞展FUKUOKA2017 - 福岡アジア美術館にて

・九州大学芸術工学部オープンキャンパス2017 - 大橋キャンパスにて

それぞれの展示会により幅広い年齢層の鑑賞者からフィードバックを得ることができた。

### フィードバックのまとめ

本作品を体験した鑑賞者の意見の中、「まるで生物のように生きているみたい」といった、作品から生命らしさを感じたという内容の意見を多く得ることができた。本作品を体験した鑑賞者たちは、今まで持っていた従来のロボットとのイメージとの差から興味・関心を抱く人や、ロボットの外見から想像していなかった動きに驚き、生理的な嫌悪感を抱く人など、様々な反応の違いを見せた。有機的な表現を取り入れたことに関しては、心拍とロボットの動きを連動したことにより、ロボットから生命らしさを感じると答えた人が多かった。また、普段意識するこ とのない自分の心拍を視覚と触覚により体験することで、興味深く感じた人が多かった。本作品の感想を説明する際、タコ、イカ、ヒトデなどの具体的な生物に例えた人が多かった。

### 成功した点

鑑賞者の多くが「生物らしい」という言葉を口にした点では、本作品の目的であったロボットに「生物らしさ」を与えることに成功したと言える。心拍の連動というバイオフォードバック効果を利用した点では、心拍の可視化が面白いという反応が見られた。普段は意識のしない心拍をこの作品を通して意識をすることで、生命について連想しやすくなる結果となった。「Heart of Mollusca」を体験した人たちからは従来のロボットとの触れ合いとは異なった反応が多く得ることができた。

### 改善点

フィードバックを通して、本作品の改善点も多く表れた。まず、心拍センサーに触れることを前提としている作品であるため、口頭でセンサーをタッチすることを誘導しなければならず、その行為が強引であるという意見があがった。作品をより自然に鑑賞するためには、自然な流れで心拍を取る必要があるが、まず鑑賞者が作品を触ろうとしないという問題点がある。作品展示の場では多くの場合が触ってはいけないものであるため、製作者側から誘導しなければ鑑賞者は触るということをしない。インタラクティブアートにおいては、制作者は鑑賞者の視点に立ち自然なインタラクションについて考えなければならない。

また触手が心拍センサーと連動した動きを示しても、鑑賞者が自分の心拍と連動していることに気づかないという問題があった。作品が動きを見せたあと、口頭で触手が鑑賞者の心拍と連動して動いているということを説明して初めて気づく人が大部分を占めた。作品の近くには説明文を掲載していたが、そこまで読まない鑑賞者が多かったことも課題の一つであった。

さらに、モーターの駆動音が機械的であるとの意見もあった。モーターの音が大きく、ディフューザーをつけていたもの、音が遮断できていなかった。しかし、空気弁から空気が抜ける際に鳴る「プシュー」という音が呼吸音のようで面白いという意見もあった。作品体験における音についてもさらなる改善が求められる。

本作品は「生物らしさ」がテーマであるが、具体的な生物の観察が足りていないという意見もあがった。

## 考察

本章では実験の意味も込めて作成した「Heart of Mollusca」から、結果的にソフトロボットの作品から「生物らしさ」を引き出すことができたが、それはどこから生じるのかという問いを探求する必要が生まれた。

具体的な生物の観察がさらに必要

# 生物らしさとは？

3章にて作成した 「Heart of Mollusca」ではソフトロボットを使ったインタラクティブ作品を作成し、「生物らしさ」を感じる作品を制作することができた。しかし、「生物らしさ」とはソフトロボットにおいてどこにあるのだろうか。本章ではよりソフトロボットの生物らしさの表現について探求するため、「生物らしさ」そのものについての調査を行う。

## 「生物的表現」とは？

### 「生物的表現」の歴史

ヴォーカンソンのアヒル

ウォルターの亀

### 生物的表現の分類

実在する生物の見た目と、その動きを想起させる。外見の表現

運動から意図や感情を想起させる（アニマシー知覚）振る舞いの表現

## ソフトロボットにおいての「生物的表現」

ソフトロボットが生物の動きを連想させる – 外見の表現

作品にインタラクティブ性をもたせ振る舞いとしての「生物らしさ」を表現

強い生物らしさを感じる作品へ

## 「生物らしさ」について

あまり詳しい調査がされていない ➡ 改善した作品を用いてアンケート調査

※ソフトロボティクスを使った作品がまだ少ないため、他作品の比較よりも、本作品上での評価を中心に行う。

# インタラクティブ作品 「Border of LIFE」の作成

## コンセプト

### ナメクジ

### チンアナゴ

### イソギンチャク

### クラゲ

## 制作

### ナメクジ

### チンアナゴ

### イソギンチャク

### クラゲ

### センサーについて

## 展示

### 展示の様子

### アンケート調査

## 考察

# 考察

# 結論

引用文献

1. ニール・ガーシェンフェルド(著)、糸川 洋(訳)（2016）『ものづくり革命 パーソナル・ファブリケーションの夜明け』ソフトバンククリエイティブ
2. 「総務省｜「ファブ社会の基盤設計に関する検討会」 報告書の公表」  
   <http://www.soumu.go.jp/menu\_news/s-news/01iicp01\_02000030.html>（アクセス日：2017/1/29）
3. 「Tube Map Radio « YURI SUZUKI」  
   <<http://yurisuzuki.com/works/tube-map-radio/>>（アクセス日：2017/1/27）
4. 長原康史(2016) 『インフォグラフィックスの潮流 – 情報と図解の近代史 』 誠文堂新光社.
5. 「moeco Made in Japan」  
   <http://www.denshi-gihan.co.jp/moeco/>（アクセス日：2017/1/27）
6. 「Peter Vogel – interaktive Objekte」  
   <http://petervogel-objekte.de/OfficeMap.html>（アクセス日：2017/1/27）
7. 「Jonathan Bobrow project02」  
   <<http://fab.cba.mit.edu/classes/863.14/people/jonathan_bobrow/projects/67/>>（アクセス日：2017/1/27）  
   「Overview | Storyboards | MIT Media Lab」  
   <<https://www.media.mit.edu/projects/storyboards/overview/>>（アクセス日：2017/1/27）
8. 「PCB Design & Schematic Software | EAGLE | Autodesk」  
   <http://www.autodesk.com/products/eagle/overview>（アクセス日：2017/1/27）
9. 「EAGLE CAD | element14」  
   <https://www.element14.com/community/community/cadsoft\_eagle/eagle\_cad\_libraries>（アクセス日：2017/1/27）
10. 「ATmega328P」  
    <http://www.atmel.com/ja/jp/devices/ATMEGA328P.aspx>（アクセス日：2017/1/28）
11. 「FabKit-io/Fabduino」  
    <http://fab.cba.mit.edu/content/projects/fabkit/>（アクセス日：2017/1/27）
12. 「Fab Modules」  
    <<http://fabmodules.org/>>（アクセス日：2017/1/27）
13. 「Arduino - ArduinoISP」  
    <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoISP>（アクセス日：2017/1/27）

謝辞

本研究を進めるにあたり、素材の開発環境、アイデアの提供など、様々な面でご指導位叩いた富松先生、大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

また、ソフトロボットに触れるきっかけを与えてくださり、ソフトロボティクスに関する知識を大いにいただいたAvener Peled氏に多大なる感謝をいたします。

また、作品や論文についての方向性についてのアドバイスをしてくれた富松研究室の学生のみなさん、ありがとうございました。