

博士論文 平成 28 (2016) 年度

運動時のなめらかな外観印象を実現する  
ロボットデザインの研究

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

村松 充

博士論文 2016 年度

## 運動時のなめらかな外観印象を実現するロボットデザインの研究

### 論文要旨

人間と共存するロボットにおいては、恐怖心や嫌悪感を与えないなど、人間に対する親和性を持ったデザインが必要である。従来の人工物では形や色といった外観要素が人に与える印象を決めていたが、ロボットは動きを伴うため、外観は時間変化するものとして知覚される。本研究では、ロボットがもたらす動きも含めた外観を 4D Appearance と定義し、従来の外観デザインで行われた形や色に加え、構造や制御手法が複雑に影響して決定される 4D Appearance のデザイン手法を探る。

本研究では、人に受け入れられ親しみやすく感じられる印象として、柔らかい生物のもつなめらかな 4D Appearance に着目し、これをロボットにおいて実現することを目的とする。ロボットにおいてなめらかな 4D Appearance を実現するための課題として「形の時間変化がなめらかであること」と「動きの時間変化がなめらかであること」を挙げ、これらを満たすデザイン手法を探った。

生物の体表面のようななめらかな曲面表現は工業製品のデザインに度々用いられてきたが、硬い素材を用いているため機械の可動部分では曲面の連続性を維持することが困難である。本研究では、屈曲した円断面のパイプ形状と回転関節を組み合わせることによって、運動時に曲面の連続性が維持される構造を開発した。この構造を用い、軟体動物のように柔らかい動きロボットアーム Flagella を開発した。

人との相互作用を行うセンサロボットにおいても、なめらかな 4D Appearance を実現するため、弾性体の支柱の先端にセンサを取り付けたセンサロボット Planula を開発した。弾性体を屈曲させることで運動時の形のなめらかさを維持し、センサが常に人の接触を感知して回避運動を行うことで、なめらかなインタラクションを実現した。

空間に固定されず移動するロボットにおいては、地面などの外部環境との関わり方も動きに影響を与える。ロコモーションの基本である重力に抗って立ち上がる動作においてなめらかな動きを実現するため、ゆるやかな曲線形状と連続回転関節によってなめらかに地面と関わるロボット Apostroph を開発した。回転角度に制限のない関節と曲線形状によって地面とも連続性を保って接触することで、なめらかな動きを実現した。

本稿では、これらのプロトタイプにおいてなめらかな 4D Appearance を実現するために行ったデザイン手法、プロセスについてまとめる。

キーワード：

ロボット、プロトタイピング、インダストリアルデザイン、モーションデザイン、インタラクション

Doctoral Thesis Academic Year 2016

## **The study of robot design actualizing smooth motional appearance**

### **Summary**

When we design robot which live with us, we should design human friendly robot. We should design the robot to reduce fear of it, and remove a feeling of dislike. Heretofore, we have been controlled appearance of artifacts like shape, color, or texture to design user's impression. When designing robot's appearance, we should design motion at the same time as the appearance of artifacts described before. In this research, author uses the word "4D Appearance" to describe the appearance of robot which contains temporal alteration. Author seeks method to design 4D Appearance which is determined by combination of shape, internal structure, and control method.

In this research, author aim the way to realize smooth 4D Appearance which many animals have, by using characteristics of artifact. Author sought the design method for 4D Appearance to implement two conditions, "realize temporal and spatial continuity of shape changing" and "realize temporal continuity of motion".

Smooth surfaces like living creature have been used in appearance design for many products. However, materials of artifact are basically solid, so it's difficult to maintain smoothness, using curved pipe with circular cross-section and rotary joints. Author developed the structure which enables to maintain surface continuity when it's moving. In this study, author developed a specific robot arm called "Flagella" which has smooth motional appearance like a soft-bodied creature using this structure.

Author developed the sensor robot named "Planula" to realize smooth 4D Appearance when we interact with robots. In Planula, spherical touch sensor unit moves by bending the elastic pole. Maintain smoothness of shape changing by elasticity, motion is continuous even if when it interacted with human.

In case of the robot which not fixed to space, interaction with environment affect its motion. Author developed "Apostroph" which has curved bodies and joints which rotate with no limitations. Standing up with resisting gravity is basic behavior for locomotion. Apostroph do stand-up motion with interacting with environment smoothly, using these body characteristics.

In this paper, author describes design method and processes which was employed to realize smooth 4D Appearance when author made these prototypes.

Keywords :

Robot, Prototyping, Industrial Design, Motion Design, Interaction

## 目次

第 1 章	序論	1
1.1.	本研究の背景	2
1.1.1.	ロボットシステムの現状	2
1.1.2.	人間と共存するロボットにおける課題	3
1.1.3.	生物と人工物の差異と生物型ロボットの問題	4
1.2.	本研究の課題	6
1.2.1.	生物の印象の抽出	6
1.2.2.	なめらかな 4D Appearance の実現	7
1.2.3.	定性的な特徴も踏まえた生物のような印象の実現	11
1.2.4.	4D Appearance のための統合的な設計	12
1.3.	本研究のアプローチ	13
1.3.1.	曲面の有機的連続性を維持したなめらかな運動のデザイン	13
1.3.2.	なめらかな形および動きの変化を伴う対人インタラクション	14
1.3.3.	生物の根源的な動作原理を利用した環境とのなめらかな相互作用	14
1.4.	本論文の構成	17
第 2 章	関連研究	18
2.1.	ロボットの形のデザインにおける先行研究	19
2.1.1.	生物の外観を引用したデザイン	19
2.1.2.	柔らかい素材や構造を用いたロボットのデザイン	22
2.1.3.	形の変化に着目した動きの研究事例	24
2.1.4.	生物を模倣しない独自の身体デザインの研究	25
2.2.	ロボットの動きに関する先行研究	26
2.2.1.	質点を用いた生物性をもたらす動きの研究	26
2.2.2.	既存の人工物に動きによって生物性を付与する研究	26
2.2.3.	既存のロボットにおける動きの印象に関する研究	27
2.2.4.	刺激に対して応答性の高い動作生成アルゴリズムの研究	28
2.3.	本研究の位置づけ	29

第 3 章	Flagella : 軟体動物のようになめらかに時間変化する形のデザイン	30
3.1.	Flagella の背景-----	31
3.2.	Flagella のアプローチ-----	32
3.2.1.	目標とする 4D Appearance の要件-----	32
3.2.2.	屈曲したパイプ形状と回転関節を用いた構造デザイン-----	32
3.2.3.	提案手法に対する考察-----	34
3.3.	Flagella の関連研究-----	34
3.4.	Flagella-----	36
3.4.1.	Flagella の概要-----	36
3.4.2.	Flagella の外観デザイン-----	36
3.4.3.	Flagella の構造設計-----	42
3.4.4.	Flagella の制御設計-----	44
3.4.5.	Flagella のモーションデザイン-----	45
3.5.	Flagella のデザインプロセス-----	50
3.5.1.	4D Appearance を構成する基本要素の開発-----	50
3.5.2.	簡易的なプロトタイピングによる 4D Appearance の検証-----	50
3.5.3.	CG シミュレーションを用いた要素の検討-----	51
3.5.4.	先端形状のデザイン検討-----	51
3.5.5.	モーションデザインの検討-----	52
3.6.	Flagella の評価-----	54
3.6.1.	Flagella の展示とフィードバック-----	54
3.7.	Flagella の考察-----	56
3.7.1.	形の時間変化に対する考察-----	56
3.7.2.	動きの時間変化に対する考察-----	56
3.7.3.	人に対する印象に関する考察-----	56
第 4 章	Planula : 弾性変形を伴って人と関わるセンサロボット	57
4.1.	Planula の背景-----	58
4.2.	Planula のアプローチ-----	61
4.3.	Planula の関連研究-----	62
4.3.1.	生物のようなインタラクティブアート表現-----	62

4.3.2.	環境知能の擬人化表現-----	62
4.4.	Planula -----	63
4.4.1.	Planula の概要-----	63
4.4.2.	Planula の外観デザイン -----	63
4.4.3.	Planula の構造設計 -----	64
4.4.4.	Planula の制御設計 -----	68
4.4.5.	Planula のモーションデザイン -----	70
4.4.6.	Planula のインタラクションデザイン -----	74
4.5.	Planula のデザインプロセス-----	76
4.5.1.	コンセプトの決定と基本構造の開発-----	76
4.5.2.	素材および厚みの調整による支柱の弾性特性の検討-----	76
4.5.3.	モーション及びインタラクションのデザイン -----	77
4.5.4.	素材の弾性に起因する振動の抑制-----	78
4.6.	Planula の評価-----	79
4.6.1.	モーターの駆動と先端部の動き -----	79
4.6.2.	基本動作の評価 -----	81
4.6.3.	センシングの評価 -----	82
4.6.4.	ユーザーテストによる評価 -----	85
4.6.5.	展示による評価 -----	87
4.7.	Planula の考察-----	89
4.7.1.	形の時間変化に対する考察 -----	89
4.7.2.	動きの時間変化に対する考察 -----	89
4.7.3.	人に対する印象に関する考察 -----	90
4.7.4.	センサロボットとしての用途に対する考察 -----	90
<b>第 5 章</b>	<b>Apostroph : 環境となめらかに相互作用を行う身体デザイン</b>	<b>91</b>
5.1.	Apostroph の背景 -----	92
5.2.	Apostroph のアプローチ -----	94
5.3.	Apostroph の関連研究 -----	95
5.4.	Apostroph -----	95
5.4.1.	Apostroph の概要 -----	95
5.4.2.	Apostroph のモーションデザイン -----	95

5.4.3.	Apostroph の外観デザイン-----	97
5.4.4.	Apostroph の構造設計および制御設計-----	101
5.5.	Apostroph のデザインプロセス-----	102
5.5.1.	回転時に曲面の連続性を保つ構造を用いた形態デザイン-----	102
5.5.2.	弾性変形を伴う素材を用いた形態デザイン-----	104
5.5.3.	地面との接触面に曲線形状を用いた形態デザイン-----	105
5.6.	Apostroph の評価-----	107
5.6.1.	実現した動き-----	107
5.6.2.	展示における評価-----	108
5.7.	Apostroph の考察-----	110
5.7.1.	形の時間変化に対する考察-----	110
5.7.2.	動きの時間変化に対する考察-----	111
5.7.3.	人に対する印象に関する考察-----	111
<b>第 6 章</b>	<b>考察</b>	<b>112</b>
6.1.	成果作品におけるなめらかさの実現手法-----	113
6.1.1.	Flagella におけるなめらかさの実現手法-----	113
6.1.2.	Planula におけるなめらかさの実現手法-----	115
6.1.3.	Apostroph におけるなめらかさの実現手法-----	116
6.2.	連続性の実現手法に関する考察-----	118
6.2.1.	形の時間変化における連続性を維持する手法-----	118
6.2.2.	動きの時間変化における連続性を維持する方法-----	120
6.2.3.	形と動き双方において連続性を維持する-----	121
6.3.	なめらかな印象を実現するための要件の考察-----	122
6.3.1.	常に変化し続けていること-----	122
6.3.2.	変化率が一定でなく増減が単調でないこと-----	123
6.3.3.	外的な力に起因する動きに見えないこと-----	124
6.3.4.	外部環境との連続的な相互作用-----	124
6.4.	デザインのプロセスおよび手法に関する考察-----	125
6.4.1.	初期のアイデア検証段階におけるプロトタイピング-----	126
6.4.2.	時間軸も考慮した形のデザインのためのプロトタイピング-----	128
6.4.3.	モーションデザインのプロセス-----	130

---

6.5.	表現の抽象度に関する考察-----	132
6.6.	生物性に対する考察-----	133
6.6.1.	人型や人に近い動物を規範としたロボットに対する利点／欠点-----	133
6.6.2.	生物性と文化的背景に対する考察-----	134
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>135</b>
7.1.	本論文のまとめと成果-----	136
7.2.	今後の課題-----	138
7.2.1.	なめらかな印象が親和性にもたらす効果の検証-----	138
7.2.2.	タスクを持ったロボットへの応用可能性の検討-----	138
7.2.3.	人工物の新しい素材や設計手法を用いた表現の検討-----	140
<b>付録A</b>	<b>Bio-like Display：生物のように人と関わる情報ディスプレイ</b>	<b>141</b>
A.1.	はじめに-----	142
A.1.1.	映像情報機器の現在-----	142
A.1.2.	Bio-likeness-----	142
A.2.	Bio-like Display-----	143
A.2.1.	Bio-like Display の概要-----	143
A.2.2.	ハードウェアのデザイン-----	143
A.2.3.	インタラクションのデザイン-----	145
A.3.	考察-----	146



# 第 1 章

序論

---

## 1.1. 本研究の背景

### 1.1.1. ロボットシステムの現状

「ロボット」は、チェコ・スロバキアの作家カレル・チャペックが1920年に戯曲 R.U.R. の中で始めて用いた言葉であり、現在では一般に浸透しているが、この言葉には明確な定義がない。チャペックがロボットの語源とした robota は「働く」「奉仕する」といった意味を持つ。一方、経済産業省のロボット政策研究会は「センサ、知能及び制御、駆動系を組み合わせた、知能化された機械システム」と定義している [1]。このような知能化された機械システムは現在、語源のとおり人間の労働を代替するシステムとして家庭にも導入されはじめている。ロボットと呼ばれることはほとんどないが、全自動洗濯機や食器洗浄乾燥機など、制御システムを取り入れることで家事のプロセスを自動化する家電製品は既に一般的に使用されている。また、センサによって環境を認識し、自律的に移動しながら掃除を行うロボットなども急速に普及しつつある。日本では今後高齢者社会を迎えることが予想されており、人間の機能補助をおこなうロボットシステムの導入はより加速すると考えられる。運動機能の低下した高齢者の機能補助として、移動や運搬といった運動を補助・代替する駆動系を持ったシステムが増えることが予想される。

移動や運搬などを行う駆動系を持ったロボットシステムは、現在でも様々なものが工場などの生産現場において使用されている。生産現場で用いられるロボットは産業用ロボットと呼ばれ、オートメーション、つまり機械による自動生産の技術として生まれた [2]。知能化した機械システムが最初に導入され発展したのが生産用途であり、産業用ロボットのために開発されたシステムが様々な環境で働くロボットに応用されている。制御システムでは、順序や手続きをあらかじめ決めておきプロセスを自動化するシーケンス制御や、設定した目標値に近づくよう出力を逐次変化させるフィードバック制御などの技術が生まれた。このような制御システムは家事を自動化する洗濯機や炊飯器、自動的に環境を調整する空調機器や冷蔵庫などに応用されている。産業用ロボットは従来人間が行っていた作業を代替することを目的としており、カメラを用いて対象を認識し操作を行うようなシステムも開発されている。このような産業ロボットの単純作業における情報処理能力は、速度においても正確性においても人間を超えている。一方で、駆動系の技術も生産目的で発展してきた。第二次大戦後に、放射性物質を遠隔操作することを目的に、人間の手のように物を操作することが可能なマニピュレーターが開発された。マニピュレーターは、正確な位置制御を可能にするための機構学や逆運動学、位置だけでなく動作時の力も含めてコントロールする制御技術などと共に発展しており、現在では人間より力強い動作や素早い操作

が可能である。

以上のように、産業用ロボットは生産システムにおいては、人間を超える作業効率を実現している。人間より正確で力強いマニピュレーションシステムは、家庭における人間の機能補助にも応用されることが期待できる。しかしながら、産業用ロボットは人の居ないところでの作業を前提にして作られており、そのままでは家庭に導入できない。日本ロボット学会の人間共存型ロボット研究専門委員会は、様々な環境において人間と共存するロボットにおいて、物理的、情動的、情緒的、環境・経済的といった人とロボットのすべてのインタラクションのなかに親和性が必要だと述べている [3]。動きを伴う駆動系のシステムにおいて安全性は重要な物理的特性であり、安全性を考慮した制御や設計が必要になる。また、自律的に動くロボットシステムが人に受け入れられるためには、そのシステムが人に対して恐怖心を感じさせないなど、心理的な親和性も考慮する必要がある。よって、ロボットが人間にどのような印象を与えるかも重要な設計要素になると考えられる。

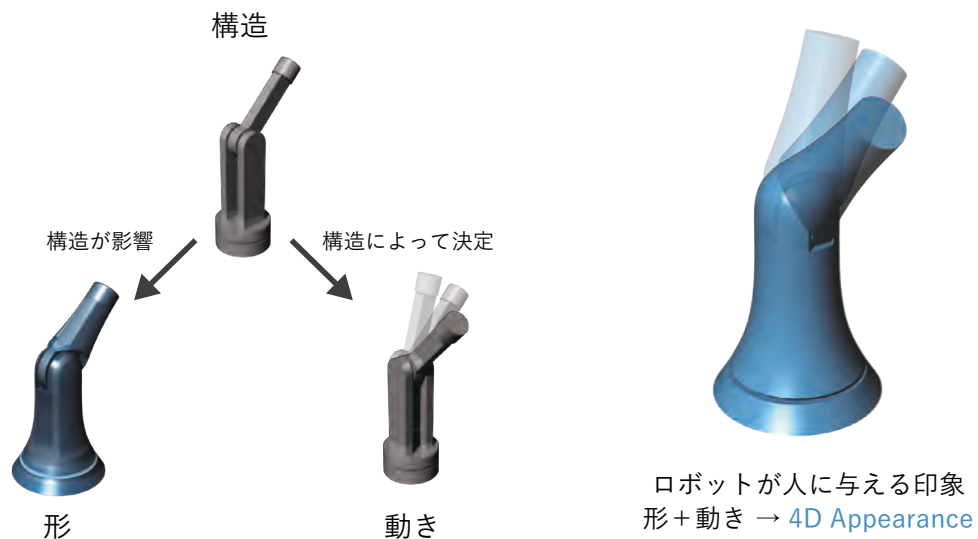
### 1.1.2. 人間と共存するロボットにおける課題

人間と共存するロボットシステムにおいて、人に危害を与えないなどの物理的親和性も重要であるが、人に受け入れられるためには、システムが人に与える印象にも留意して設計する必要がある。本研究では、ロボットが人間に与える動きも含めた視覚印象のデザインについて考える。

従来的人工物においては、形や色、テクスチャといった外観特性によって、それが人に与える印象や心理効果をコントロールしていた。視覚情報を通じて人に様々な心理効果をもたらすことを目的とした創作は絵画や彫刻などの美術によって行われており、道具や日用品に美的性質を付加する応用美術と呼ばれる創作も行われてきた。産業革命以降、応用美術の流れをくみ、形や色、テクスチャといった人工物の外観を専門に扱う職能、インダストリアルデザインが生まれた。インダストリアルデザインでは、彫刻的な手法によって人工物の外観をデザインし、人工物が人に与える印象をコントロールする。人が触れる人工物においては、人に親しみやすさや触れやすさを与えるために、柔らかい形を与えられることが多い。液体や生物の体などは「張り」があると表現されるが、この張りは内部の力によって生まれる。人工物は硬い素材で作られることが一般的だが、自然物のもつ曲面の張りを再現することで、外観を通して柔らかさやなめらかさといった印象を再現するのである [4]。このように、デザイナーは人工物の外観設計を通じて、人と人工物の関わり方や、人が人工物から受け取る情報や意味をコントロールしてきた。

ロボットが家庭に導入され人間と共存する際にも、外観によって人に与える印象や

情報を適切にデザインする必要がある。駆動系を持つロボットシステムでは、動きも外観の一部として人に認知されるため、従来の形や色、テクスチャだけでなく、動きが人に与える印象も考慮して設計することが望ましい。ロボットにおいて動きは駆動構造によって決まり、構造は形にも影響を与える。つまり、ロボットの外観をコントロールするためには構造や制御など複数の要素を組み合わせた設計が必要となる。産業ロボットにおいて、形と動きは機能要件から設計されている。外装部品の形や表面処理はある程度、印象のためにコントロールされているが、動きは人に対する効果は考慮せずに設計されている。人間と共存するロボットにおいては動きも含めた外観を、人に親和性を与えるようにデザインすることが重要になると考えられる。従来の人工物において外観が形や色、テクスチャといった静的な要素のみを扱っていたのに対して、本研究ではロボットがもたらす動きも含めた外観を、4D Appearance と定義する（図 1.1）。従来の3次元の (3Dimensional) アピアランスに加え、時間軸上での見え方も考慮した4次元の



(4Dimensional) アピアランスを意味する。4D Appearance

### 1.1.3. 生物と人工物の差異と生物型ロボットの問題

人間と共存するロボットの理想形として、多くの研究者が人型ロボットを研究している。人間が現実と共存している人間やペットや家畜として飼われる動物は、人に受け入れられる 4D Appearance のモデルとして適している。人間共存型ロボット研究専門委員会においても、人に対する情緒的親和性などの観点から、人間との共存には人型ロボッ

トが適していると述べられている。人間同士が用いる言語による会話、表情による情報表出、アイコンタクトやジェスチャーによる非言語コミュニケーションといったやりとりをロボットにおいても再現すれば、人間同士と同じようにストレスなく共存出来ると考えられる。Brooks も、人間と同じ環境で生活するロボットは人間と同じような身体構造が必要だと述べている [5].

しかしながら、人間と同じように振る舞う人型ロボットを作るのは非常に困難である。「機械の擬人化」自体が研究テーマとなり様々な課題を産んでおり、多くの研究者がこれに取り組んでいるが未だに実現していない。人間の知能プロセスは未だ解明されておらず、人と同じように考えて情報のやり取りを行う人工知能は実現していない。動きに関わる駆動系においても、人間の制御プロセスが未解明なため、人間が本来持つ動きの再現は出来ていない。

知的な機械システムの姿として人型を用いることは、人間にとって馴染みやすいという利点はあるが、親しみのあるモチーフを与えることの問題も指摘されている。森は、人工物の姿や動きを人間に類似させていく過程で、類似度が人間に近づくところで親和感が負になる「不気味の谷」が現れると述べている [6]. 薄く見える血管まで再現した義手が冷たく動かない状況やなどが不気味の谷の例とされている。森は、静的な外観だけでなく動きも加わると不気味の谷はより深くなると考察している。人型ロボットでも、プロポーションや関節の可動範囲が変わると不気味さが生じる可能性がある。

生物と人工物では素材や設計原理が大きく異なることも、人型ロボットの実現を難しくしている理由である。動きを生み出すアクチュエーターは、生物においては収縮する筋肉、人工物においては回転運動を行うモーターが主に用いられる。これまでの工学では、筋肉の再現を諦め回転運動に適した運動システムを開発することで、生物の持つ機能を人工物で実現してきた。馬の運搬能力・移動能力を実現するために、まず車輪を持った馬車が開発され、馬の代わりにエンジンによってタイヤを回すシステムが開発されることで自動車が生まれた。また、鳥のように空を飛ぶ機械とし当初羽ばたく機構が考えられたが、固定翼と回転によって推力を得るプロペラが開発されたことで飛行機が生まれた。

ロボティクスは、人間などの動物と機械が環境から情報を得て行動するプロセスに統一した原理を見出そうというサイバネティクスや、生物の仕組みから運動や知能を学ぶバイオニクスの考え方によって発展してきたが、産業ロボットの駆動系においては生物の形を模倣することから脱却している。ロボットアームは名前の通り人の腕が行っていた作業を代替するシステムであるが、アクチュエーターの配置は人間の腕とは異なる。人間の肩は1つの関節に多くの筋肉が集中しておりあらゆる方向へ運動できるのに対し、モーターは1つの軸に対する回転運動が基本であり肩の動きを再現するには3つのモー

ターが必要となる。このような理由からロボットアームでは一方向への回転関節を多数連結する構造になっており、この差異が人の腕とロボットアームの形や動きの差を生んでいる。人型ロボットを人と同じように動かすのは、アクチュエーターの差からも工学的合理性はない。人間と共存するロボットにおいても、性能を考えると、産業ロボットのように人工物の特性に適した身体性が用いられるのが自然である。家庭用ロボットにおいては人型ロボットが理想とされているが、家事の代替や介護などにおいて作業の安全性や効率を考えると、人型が適しているとはいえない [7][8]。

北野は「生物に大きな多様性があり、さまざまな形態があるように、ロボットにも多くの形態、多様性があるのが最終的な姿」だと述べている [9]。人と同様にコミュニケーションを取れる点では人型ロボットは優れているが、家庭に導入されるロボットにおいてすべて人型が適しているとは考えられない。機械の設計原理に忠実な、人や人に近い形態を持たない外観のロボットも家庭に導入される事が考えられる。それらのロボットにおいても、人と共存し、人に受け入れられるためには、親しみやすさをもった 4D Appearance を与える必要がある。前述のとおり生物にも様々な形態があり、脊椎動物など人間に近い生物は形態においても共通項が多いが、軟体動物や刺胞動物などは人間とは大きく異なる形態を持つ。しかしながら、それら人間と異なる形態を持つ動物も、人は生物として認知し、観賞用に飼われるなど、人にとって心地良く感じられる 4D Appearance を持っている。本研究では、このような人から遠い形態の動物にも共通する、人に親しみやすく感じられる 4D Appearance の要素を抽出し、人工物によって同様の 4D Appearance を実現することを目的とする。

## 1.2. 本研究の課題

### 1.2.1. 生物の印象の抽出

人工物の設計を生物に学ぶ試みは多くなされており、バイオニクスやバイオミメティクスのように生物の機能を人工物に応用しようという試みが行われている一方、生物の見た目がもたらす印象を人工物に与えるデザインの試みも行われてきた。

先述のように、自律的に動作し人と関わるロボットにおいては、人や動物の姿を模した外観や振る舞いの設計がしばしば行われている。エンターテインメント目的のロボットやエージェントロボットでは、生物のように人に認知させインタラクションを促すことを目的に、生物に似せて外観や振る舞いが設計される。人間とコンピューター、家電やスマートハウスといった知能システムのインターフェースを仲介する機能をもつエー

ジェントロボットでは、人との対話や表情を介した擬人化コミュニケーションが主目的であるため、目や顔といったコミュニケーションにおいて重要な特徴だけを抽出した姿、動きが設計される。このような抽象化手法は、漫画やアニメーション、玩具のデザイン等で用いられてきた擬人化、デフォルメといった手法の延長であり、程度の差はあるが多くのロボットデザインに用いられている。

一方で、顔や目ではなく、生物や自然物の形の特徴を抽出して人工物に引用する試みも行われてきた。生物の体表面のような柔らかい印象の曲面を有機的な曲面と呼ぶが、このような曲面は土器など原始的な人工物にも見られる。形やシルエットを経験的に見知ったものに似せるメタファと呼ばれる手法も多く的人工物に用いられている。自動車の外観設計では、魚類や鳥類、ネコ科の生物の顔やシルエット、筋肉の盛り上がりといった生物の特徴を引用することがある。これは、引用する対象がもつ速さや力強さといった印象を人工物に与える効果をもつ。Cila がまとめている [10] ように、メタファを用いたデザインも様々な抽象度で行われているが、人工物の素材や加工方法の制約のなかで生物のもつ印象を再現する抽象化手法が開発されてきた。

本研究では、顔や目を付加する擬人化手法ではなく、3D Appearance において人工物の素材や加工方法を利用して生物のもつ速さや力強さ、柔らかさといった印象を引用する彫刻的手法のように、生物のもつ印象を再現する 4D Appearance を探ることを目的とする。

### 1.2.2. なめらかな 4D Appearance の実現

本研究では、人に受け入れられ親しみやすく感じるロボットの 4D Appearance として、柔らかい身体を持った生物の特徴である、なめらかな形および動きを実現することを課題とする。

「なめらか」は数学用語としても用いられ、関数が連続的に微分可能であることを示すが、連続性を持った曲面や動きは生物の特徴でもある。以下に、これまで行われてきた人工物の形 (3D Appearance) においてなめらかさを与える試みの事例を挙げ、本研究で目指す 4D Appearance におけるなめらかさについて述べる。

#### 3D Appearance におけるなめらかさの実現

人工物の歴史において、造形において生物や植物など自然物のもつ外観印象を引用する試みは幾度となく繰り返されてきた。古くは、土器などの日用品にも生物のような柔らかい曲面が与えられている。本川が述べているとおり、生物は柔らかく湿った素材で出来ているのに対し、人工物は硬く乾いた素材で出来ている [11]。水の詰まった袋であ

る生物の身体が持つ曲面は、柔らかい皮膚が内部から力を与えられることで形成されている曲面であり、深澤はこれを「張り」のある曲面と表現している [4]。このような曲面は「なめらか」な曲面とも表現されるが、なめらかとは凹凸など曲面の細かい変化が少なく、連続性が保たれた様子を表す。手作業によって作られる工芸品には古くからなめらかな曲面形状が用いられたが、生産技術の発展とともに工業製品にもなめらかな曲面が与えられるようになった。イームズらによってなされたオーガニックデザインでは、それまでの幾何学的なデザインに対し、生物のようななめらかな曲面を用いることで、椅子などの人工物に柔らかく人体の身体に近い印象を与えた。オーガニックという言葉が示す通り、なめらかで張りのある曲面は有機的とも表現され、生物の身体や果実の表面等に共通する性質といえる。

数学においても、形に関わる曲線や曲面の幾何学的性質としてなめらかという言葉が用いられる。先に述べたとおりなめらかは微分可能であることを示し、曲線においては線の変化率である傾き、傾きの変化率である曲率が連続である様子がなめらかと表される。印象におけるなめらかさと、幾何学的性質としてのなめらかさは必ずしも一致するとは限らないが、インダストリアルデザインや外観を設計する CAD(Computer Aided Design) システムにおいても、幾何学的になめらかな形を表現する試みは数多く行われてきた。Bezier や Casteljau は、自動車のデザインのために幾何学的になめらかな曲線の表現形式である Bezier 曲線を開発し、以降 CAD の研究において B-Spline や NURBS といった幾何学的になめらかな曲線が研究されてきた [12]。Catmull らが CG(Computer Graphics) において人間の肌のような張りのあるなめらかな曲面を表現するために開発した Subdivision Surface(再分割曲面)の手法 [13] も、現在では Sederberg らによって CAD システムに応用される [14] など、インダストリアルデザインにおいて生物のような曲面表現を取り入れようとする試みは多数なされている。

工業製品の形は、製品の機能的要件や設計、加工上の制約、素材特性等に依存するため、生物とは根本的に異なる設計手法になる。有機的な曲面表現は、アーティストやデザイナーが獲得してきた、人工物の特性や手法を用いて、柔らかい自然物の外観が持つ普遍的な性質や美を再現する手法である。

硬く乾いた素材によって作られる人工物において、なめらかで有機的な曲面を与える操作は、それを見た人に自然物のような柔らかさを想起させる効果を持つ。デザインの歴史において有機的でなめらかな曲面を持った人工物が評価され受け入れられてきたことから、人間の身体に近い印象を持った有機的な形は多くの人の美意識に働きかけ、人間にとって親しみやすく受け入れやすく感じられるのだと考えられる。

#### 4D Appearance におけるなめらかさの実現



本研究では、ロボットの4D Appearanceにおいてなめらかな印象を実現することを目的とする。先述のとおり、3D Appearanceにおいて生物のようななめらかな印象を人工物に引用しようとする試みはなされており、これらの知見は既にロボットにおいても用いられている。しかし、ロボットは動きを伴い、4D Appearanceにおいては形と動きが相互に関連する。本研究では、形と動きの双方が関わる4D Appearanceにおいてなめらかさを実現するための課題として、以下の2つを挙げる。

- 形の時間変化におけるなめらかさの実現
- 動きの時間変化におけるのなめらかさの実現

#### - 形の時間変化におけるなめらかさの実現

従来の人工物における外観デザインでは、変形しない静的な形として外観を設計してきた。移動を行う自動車の外観には、なめらかな曲面であることに加え、スピード感やダイナミズムを感じさせる動的な造形がなされているが、あくまで動きがもたらす印象を彫刻表現として引用した3D Appearanceのデザインである。

これに対し、機械構造によって身体を変形させながら運動を行うロボットにおいては、運動に伴って形が変化する。つまり、ロボットの形のデザインは変形を伴う形のデザインである。生物の身体は水分の詰まった袋であり、その内部で運動が生まれるため、運動の際にも身体表面の連続性は保たれる。しかしながら、ロボットにおいてはなめらかな曲面を保ったまま運動することは困難である。ロボットの身体は機械的に接続した部品の集合であり、変形のない硬い部品を移動や回転させることで動きが生まれる。そのため、一般的には運動の際に部品同士の連続性は保たれないのである。特に、外観デザインが機械部品や電子部品を覆うための外装の設計として最後に行われる従来のデザインプロセスにおいては、関節部分で曲面の連続性が途切れてしまうなど、なめらかさが維持できない事が多い。

本研究では、ロボットの外観デザインを時間変化する形のデザインとして捉え、時間変化のなかでも形のなめらかさが保たれるよう、構造も含めてデザインを行う。既存の生物の関節構造を模倣するのではなく、ロボットの動きを生み出すアクチュエーターや機械要素の特性を活かし、運動時にも形の連続性が維持されているようにみえる、なめらかな4D Appearanceを実現することを課題とする。

#### - 動きの時間変化におけるのなめらかさの実現

1960年代後半に生まれたロボットダンスは、静止した状態から関節を等速で動かし、

全身を細かく揺らしながら静止する身体表現である、モーターが等速回転し静止の際に自重に起因する振動が起こる、当時の拙い制御技術によるロボットの動きを人間の身体で模倣することで、人間の動きと機械の動きの差異、ロボットの動きのぎこちなさを強調する表現である。その後、自重を考慮した位置決め制御が開発されるなど制御技術が発展し、振動などが起こらず正確で高速な運動が可能となったが、高速かつ正確で予備動作の無い機械の動きは人間にとって親しみやすい動きとは言い難い。ロボットにおいては、形だけでなく動きの印象も人間に対する親しみやすさを実現するうえで考慮すべき対象である。

形のなめらかさが空間的な連続性であったのに対し、動きのなめらかさは時間的な連続性である。移動の場合、変位の変化率が速度であり、速度の変化率が加速度である。加速度が連続的に変化する動きはなめらかな動きといえる。生物はアクチュエーターである筋肉の特性から「なめらか」や「しなやか」と形容されるような加減速を伴う動きを行う。動きのデザインにおいてなめらかさを取り入れる試みは、アニメーションなどの画面上での表現において行われてきた。Pennerによる Easing 関数 [15] や、ソフトウェアにおけるキーフレームアニメーションの補間に Bezier 曲線を用いるなど、なめらかに加減速を行うための表現手法が開発されている。Thomas らによる The illusion of Life には、ウォルト・ディズニー・スタジオの研究成果として生き生きとしたキャラクター・アニメーションを実現するための原則がまとめられているが、この中でも動きの時間変化において Easing のような補間や曲線的な動きを与えるなど、動きのなめらかさに関係する手法が示されている [16]。ロボットへの応用を想定した事例として、小川らは、直線運動における人間の上肢の加減速パターンを公式化したサイバネティックモーションに従って物体を動かした場合に機械がなめらかに動き、速度や加速度のなめらかな変化が行われない運動に比べて観察者に心地良い印象を与える事を示している [17]。

アニメーションなどでは一般的に用いられるこのようななめらかな動きの変化は、ロボットでの再現は困難である。サイバネティックモーションのような速度変化が生まれるのは各部肉体の物理特性や筋肉の特性などに起因するものであり、ロボットにおいてはそれらの特性が異なるためである。本研究では、機械の特性を踏まえたうえで、運動時になめらかな速度変化をもたらす構造および制御手法を開発する。

また、常に動き続けており、仕草や行動がなめらかに連続する点も生物の動きの特徴である。これは、前述の速度変化よりも長いスケールでの動きの変化であるが、これは機械や制御システムの特性から、実際のロボットではあまり再現されていない。一般的に、人間の行うジェスチャーや動物の仕草や動きを再現する場合、複数の関節を適切なタイミングで動かす必要があり、一連の動作を予めプログラムするシーケンス制御が用いられる。このような制御では、プログラムされた動きはなめらかな速度変化を伴って行わ

れるが、シーケンス間は一旦停止することになり、またシーケンスの再生中は操作を受け付けなくなるなどの状況が生じる。このような特徴が生物とは異なり、動きのなめらかな印象を阻害すると考えられる。

本研究では、シーケンスなどであらかじめ動作を生成するのではなく、なめらかに行動し続けるための動作生成の仕組みを開発する。

### 1.2.3. 定性的な特徴も踏まえた生物のような印象の実現

4D Appearance, つまり形と動きの双方を扱う視覚表現は、キネティック・アートと呼ばれる芸術領域において試みられてきた。動きによる形の変化を扱う代表的なキネティック・アート作品としてはカルダーによるモビールが挙げられる。モビールはカルダーがピエト・モンドリアンから影響を受けて作ったとされる、構成要素の空間関係が変化する抽象画である [20]。吊り下げられた複数の幾何学形状の部品が、風を受けてゆるやかに動く。その後、ジョージ・リッキーや新宮晋らによって、風を受けてゆるやかに動く彫刻は様々に作られている。ゆるやかな速度変化を伴いながら動き続ける点において、前述のなめらかな動きの定義を満たすが、これらに生物のような印象を受けるとは言い難い。

アニメシー知覚の研究では、質点のアニメーションを用い、人が生物性を知覚する動きの要件を明らかにする研究がなされている。既存研究において、重力による落下など受動的な動きには生物のような印象を受けず、重力などの物理法則に抗う動きには生物のような印象を感じる、といった知見がある。風によってなめらかに動くキネティック・アートに生物のような印象を感じない理由も、外力によって動かされている事を人間が

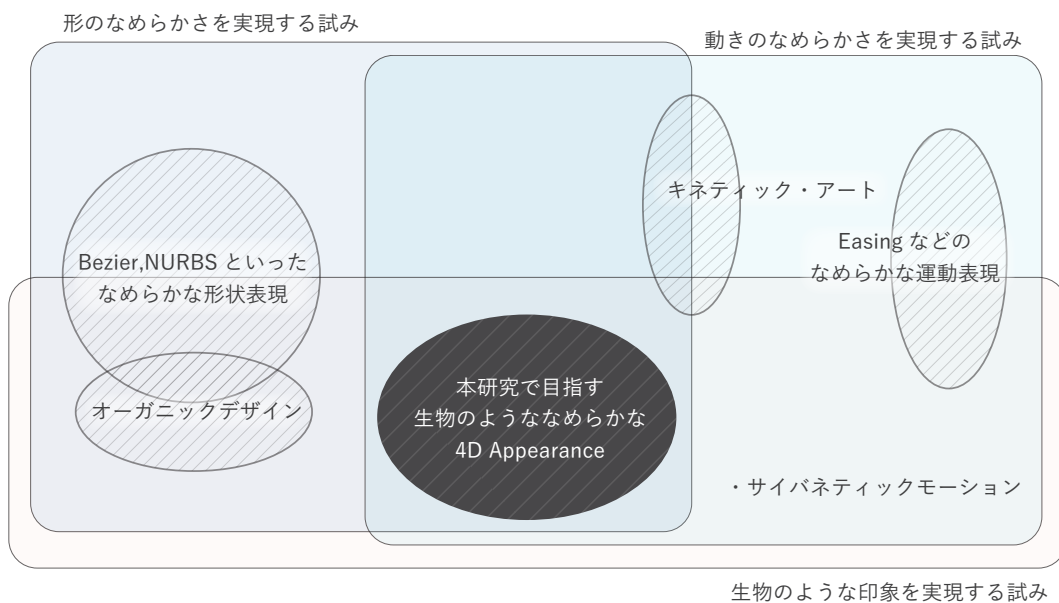


図 1.2: 本研究の位置付け

知覚している為だと考えられる。4D Appearanceにおけるなめらかさを考えるうえで、形および動きの数学的な連続性だけを満たしていても、生物のもつなめらかさを実現出来るとは限らない。本研究では、定量的な性質だけでなく、定性的な性質にも着目し、生物のようななめらかな4D Appearanceを実現することを目指す(図1.2)。

#### 1.2.4. 4D Appearanceのための統合的な設計

4D Appearanceは、先述のとおり形および動きの組み合わせによって現れる。形は動きを伴って変化するものであり、また動きは内部構造と関連する。このように形、動きはそれぞれロボットの内部構造に関連するため、それら全ての関係によって成り立つ4D Appearanceの設計は困難である。従来の人工物の外観デザインでは内部構造の設計とは別に行われるのが一般的であったが、時間変化する形を扱ううえでは内部構造も含めた設計が必要不可欠である。また、移動ロボットなどでは動きのデザインに内部構造は関係ないが、身体の各部位を移動させながら動くロボットにおいては動きと内部構造は密接に関係する。このような事由により、4D Appearanceの設計には外装や制御手法だけでなく内部構造の設計が必要となる。本研究は、なめらかな4D Appearanceの実現を目的として、内部構造も含めてデザインを行う(図1.3)。

産業用ロボットにおいては、作業空間で十分な動作範囲を得ることや作業内容に基づいて構造が決定される。人型ロボットにおいては、人間の仕草やジェスチャーを再現可能にすることや人間の作業を代替することを目的に構造が決定される。これらに対して、

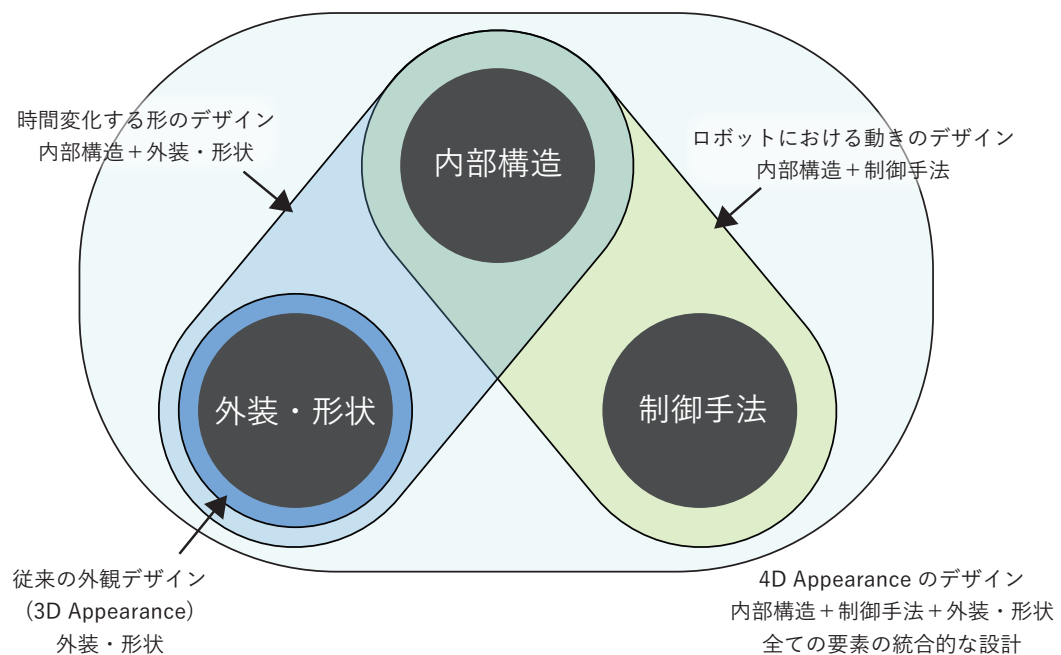


図1.3: 4D Appearanceのデザイン

本研究ではなめらかな 4D Appearance を実現することのみを目的に構造から開発することで、これまでの手法で作られたロボットとは異なる 4D Appearance のあり方を探る。

### 1.3. 本研究のアプローチ

本研究では、なめらかな 4D Appearance を実現するプロトタイプ群を製作した(図1.4)。これらのプロトタイプは Appearance, 見た目の実現のみを目的に構造から設計しており、それ以外のタスクを遂行する機能等は持たない。人間の役に立つ機能を持たず視覚表現にのみ特化している点で、ロボットというよりキネティック・アートに近いともいえる。

しかし、本研究で示すプロトタイプは、機械において一般的に用いられる素材や設計手法、制御手法を用いており、一回性のものでなく再現性を持つ。構造、形、制御手法、およびそれらによって実現される 4D Appearance を示すことで、これをシーズとし、タスクを持った新たなロボットへの応用等も可能になることが期待される。

また本研究では、これまで別々に設計されることが多かった構造、外装、制御手法といった要素を複合的に組み合わせて設計を行う。本論文では、プロトタイプの製作に際して 4D Appearance をデザインするために行った手法、プロセスを示し、ロボットのデザインにおける新たな知見を共有する。

先に挙げた条件である、「形の時間変化がなめらかであること」及び「動きの時間変化がなめらかであること」を満たすデザインとして、本研究では以下の3つのアプローチで研究を行った。

- 曲面の有機的連続性を維持したなめらかな運動のデザイン
- なめらかな形および動きの変化を伴う対人インタラクション
- 生物の根源的な動作原理を利用した環境とのなめらかな相互作用

#### 1.3.1. 曲面の有機的連続性を維持したなめらかな運動のデザイン

機械の複雑な構造を、なめらかな有機的連続性を持った曲面で覆う手法がインダストリアルデザインにおいて行われてきたのは前述のとおりである。ロボットにおいても、デザイナーによって有機的な曲面を持った外観が与えられることが多い。しかしながら、外装には硬く変形しない人工素材を用いるため、運動を行った際に関節部分では曲面の連続性が維持できない。

本研究では、運動時に形の有機的連続性が維持できる形および運動構造を開発し、これを用いたロボットを製作した。

## Flagella：軟体動物のようになめらかに時間変化する形のデザイン

モーターは正確な回転運動が可能である。この正確な円運動を利用し、円断面のパイプ形状を連結して捻るように回転させることで、連結面が変化しないように動かすことが出来る。これを用い、屈曲したパイプ形状と回転関節の組み合わせによって曲面の連続性を保ったまま動き、軟体動物が身体を変形させながら運動するような外観を実現するロボットアーム Flagella を開発した。

### 1.3.2. なめらかな形および動きの変化を伴う対人インタラクション

人間と共存するロボットにおいて、言語やジェスチャーを用いたコミュニケーションなどの対人インタラクションが多数開発されている。しかしながら、このような対人インタラクションは入力及び出力のシステムが複雑であり、インタラクションが起こるまでに遅延が生じる、予め用意されたモーションの再生をせざるを得ないなど、人間同士のコミュニケーションに比べてなめらかではない。

本研究では、インタラクションの仕組み自体は単純で情報量が少ないが、人間の入力に対して連続的に反応し、なめらかな形の変化を伴う出力を実現するロボットを開発した。

## Planula：弾性変形を伴って人と関わるセンサロボット

Planula は弾性体の支柱のセンサが保持され、ワイヤーを用いて支柱を曲げることでセンサ部を移動させる構造のロボットである。弾性素材をワイヤーによって屈曲させることで、生物とは異なる手法だが形のなめらかな時間変化を実現しながら先端部を移動させる。また、人の接触を検知してなめらかに回避運動へと移行するインタラクションを実現した。

### 1.3.3. 生物の根源的な動作原理を利用した環境とのなめらかな相互作用

人間と共存するロボットにおいて、人間環境への適応も重要なテーマとなっており、脚による自立や歩行など環境とのインタラクションを伴うロコモーションが研究されている。生物の自立や歩行においては、筋肉の弾性や皮膚の柔らかさが強く働いており、これがしなやかでなめらかな動きの印象をもたらす。硬い素材とモーターによるロボットの脚の地面との関わりはなめらかとは言い難い。

本研究では、関節が入出力を兼ねた時間応答性の高い制御システムを用い、硬い素材

を用いながら、曲線形状を用いて環境との接触面をなめらかに変化させ、環境と連続的に相互作用を行うロボットを開発した。

### Apostroph：環境となめらかに相互作用を行う身体デザイン



図 1.4: 研究成果作品 Flagella(上), Planula (下左), Apostroph(下右)

身体を介して環境と関わるロボットにおいて、形は見た目だけでなく動きにも影響を与える。Apostroph は、重力に抗い身体を持ち上げる制御システムを持ったロボットで



ある。全ての角度で動作する関節構造と緩やかなカーブを描いた身体形状によって、地面などの環境との接触面を連続的に変化させ、また姿勢変化もカーブによってゆるやかに受け流す動きを実現した。

本論ではこれらのプロトタイプにおいてなめらかな 4D Appearance を実現するために開発した手法について述べ、開発プロセスを紹介する。また、製作したこれらのロボットを展示した際のフィードバックをまとめ、本研究で開発した手法がもたらした 4D Appearance の効果について考察する。



## 1.4. 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである.

第1章 序論

第2章 関連研究

第3章 Flagella : 軟体動物のようになめらかに時間変化する形のデザイン

第4章 Planula : 弾性変形を伴って人と関わるセンサロボット

第5章 Apostroph : 環境となめらかに相互作用を行う身体のデザイン

第6章 考察

第7章 結論

2章では, ロボットの形のデザイン及び動きのデザインに関する先行研究についてまとめる. 3章では, 外観の有機的連続性を保つ構造によって無い対動物のようななめらかな動きの印象を実現したロボットアーム型のプロトタイプ Flagella について述べる. 4章では, 弾性素材による柔軟性を持った動きによって人とのインタラクションを行うセンサロボット Planula について述べる. 5章では, 無限回転関節とゆるやかな螺旋形状のフレームによって, 地面となめらかに相互作用を行いながら立ち上がり運動を行うロボット Apostroph について述べる. 6章では 3~5章で述べたなめらかな 4D Appearance を実現するロボットデザインについて考察を行う. 最後に7章で研究全体をまとめ, 本研究の展望について述べる.

以下, 第2章より本論を進める.

## 第2章

## 関連研究

---

## 2.1. ロボットの形のデザインにおける先行研究

### 2.1.1. 生物の外観を引用したデザイン

人間と共存するロボットにおいて、人間にとって親しみやすい外観のモデルとしてしばしば既存の生物が用いられる。生物と人工物では素材等の特性が異なるが、多くの研究者やデザイナーによって様々な表現が探索されてきた。

喜多はコミュニケーションロボット wakamaru(図 2.1 左)のデザインを行った。wakamaru は人型ロボットであり、人とアイコンタクトをとったり、腕を用いたジェスチャーを行ったりすることでコミュニケーションを行う。人間の顔には多数の筋肉がありそれらの組み合わせで表情が生まれる。wakamaru は表情を表出する構造を持たない代わりに、相手に関心を持っていることを示す大きな黒い目と、能面やからくり人形のように角度によって様々な表情に見えるアピランスなどが与えられた [21]。腕も人間の腕と同じように動くが、外観は金属色で円筒をベースにした抽象的な形によって、生物らしくするのではなく機械らしさを協調する設計にしている。身体構造やシルエットは生物を引用しながら、外観のディテールには機械特有の性質を持たせる外観デザインは、Sony の AIBO(図 2.1 右)などでも行われている [22]。実際の生物と比べると動きがぎこちないことを違和感なく感じさせるための外観操作であるといえる。可動部を機械的にデザインする手法は、前章にて述べた関節部での曲面の有機的な連続性が維持できない特徴を前提とした設計ともいえる。



図 2.1: wakamaru(左), AIBO(右)

人間に姿や動きを類似させていく過程で、人間と人工物の差異が際立ち親和感が符になる「不気味の谷」が生じるという仮説が森によって提示されている [6]。あえて生物に近い外観を用いず機械らしさを協調するこれらの先行研究は、不気味の谷に陥られないためのデザイン方略だといえる。外観を具体的に引用せず、抽象的な表現によって生物などの特徴を引用する手法はメタファと呼ばれ、インダストリアルデザインにおいてしばしば使われる手法である [10]。人型ロボットや生物型ロボットの外観には、デザイナーによって様々な抽象表現が行われている。

人間や動物の外観が持つ人に対する親和性に主眼を置いて、コミュニケーションを主目的として外観引用を行う事例も多数行われている。知能システムやネットワークロボットのインターフェースとして用いることを目的に、顔や目など擬人化やコミュニケーションに最低限必要な部分を協調する外観デザインである。

NECの製作したPaPeRo[23](図2.2左)や情報通信研究機構によるPhyno[24](図2.2右)、東芝によるApriPoco[25](図2.3左)やApriPetit[26](図2.3右)などでは、子供向けアニメーションのキャラクターやぬいぐるみなどの玩具のような、2頭身や3頭身のデフォルメした外観が与えられている。据え置き型で移動機能を持たない、人に対する心理的効果のみに最適化した外観デザイン手法である。可動部分を少なくし抽象化を行っているため、オーガニックデザインのような有機的でなめらかな曲面で構成されている例が見られる。

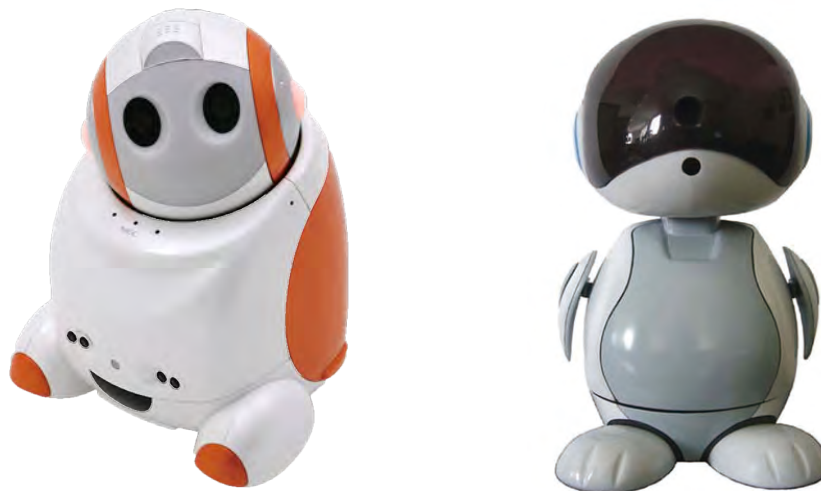


図2.2: PaPeRo(左), Phyno(右)



図 2.3: Apripoco(左), Apripetit(右)

また、柴田によって開発されたパロ(図 2.4 左)は、動物と触れあうのと同じような心理効果をロボットにおいて実現するロボット・セラピーの研究に用いられた。パロにはアザラシのぬいぐるみとして外観デザインされているが、多くの人が見慣れない動物を引用することで、機械による動きに違和感を感じさせにくくしている [27]。小嶋らによる Keepon(図 2.4 右)は、シリコンゴムによる柔らかい外皮を持った雪だるま型のミニマルな外観デザインであり、アニメーションのような伸縮運動を用いて人とコミュニケーションを行う [28]。人とのコミュニケーションのみに特化した外観デザインである。



図 2.4: パロ(左), Keepon(右)

岡田らも、人間とのコミュニケーションを行うミニマルな外観デザインとして、1つの目玉としっぽのような外観だけを持った Muu(図 2.5 左)を提案している [29]。Brezeal

らによって開発された JIBO(図 2.5 右)は,丸いディスプレイ部を顔のように動かしてコミュニケーションを行うロボットである [30]. 抽象度の高いデザインであるが,動きと表示によって擬人化を促す外観デザインが行われている. JIBO はこれまでに述べた国内で開発されたデフォルメ型のロボットに比べて抽象度も高く,動きの生成方法も既存の生物から脱却しており,外形のなめらかなつながりを維持する運動構造が実現できている点で本研究の目的に通じる.

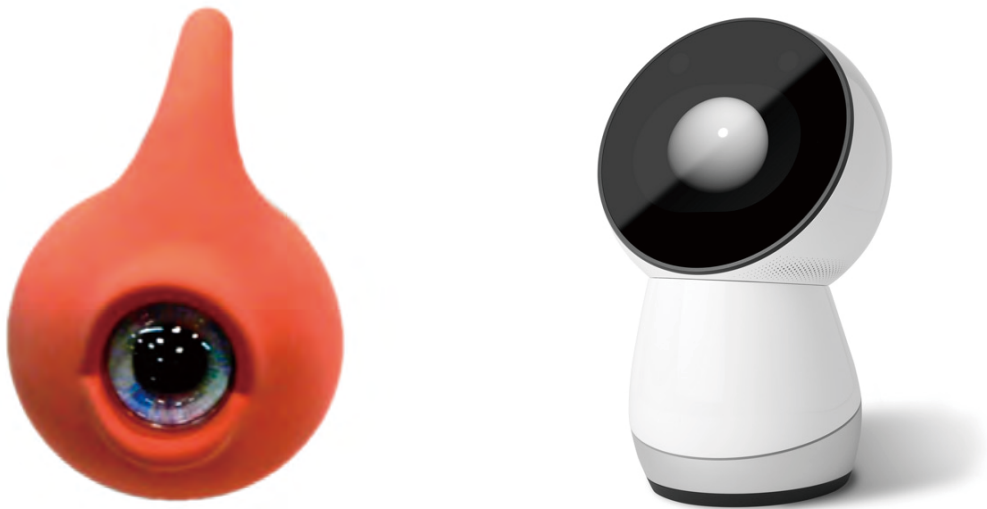


図 2.5: Muu(左), JIBO(右)

生物と人工物では素材や構造が異なることから,人工物の素材や設計手法を用いて生物を表現する様々な外観デザイン手法が模索されてきた. 生物の筋肉と機械で一般的に使用されるモーターでは特性が異なり,関節部のプロポーシオンが変わってしまう,動きの特性が異なるなどの差異が生じる. 現在のところ知能システムにおいても運動性能においてもロボットは生物には遠く,生物のようななめらかな動きは実現できていない. 現状のロボットデザインでは,動きを減らし,顔などの外観特徴を静的に引用する事例が多い. 本研究では,外観の静的な特徴ではなく,生物が動いている際に表れる動的な特徴の引用を目的とする.

### 2.1.2. 柔らかい素材や構造を用いたロボットのデザイン

人間に対する親和性や安全性等の面から,柔らかい素材や構造を用いてロボットを製作する研究がなされている. Sanan らは空気を入れた風船をリンクとしたインフレーターブル構造のロボットアーム(図 2.6 左)を開発している [31]. 内部からの力で表面が構成さ



れている点で生物と同様であり，この構造をモチーフとして作られたアニメーションでは生物のような柔らかいロボットとして描かれているが，実際の外観の変化は生物のなめらかさとは異なり，特に関節部での連続性は保たれない．Rolfらは，変形を伴う樹脂素材を空気によって駆動することで象の鼻のように動くマニピュレーター Bionic Handling Assistant(図 2.6 右)を開発している [32]．蛇腹を用いた伸縮構造によって曲がるように形を変化させる．空気を用いて柔らかい素材を変形させる研究は Ilievski によるシリコンラバー製のグripper [33](図 2.7) など，多くの研究者によってなされている．これらは実際に変形を伴って動くため形の時間変化が連続的になされるが，本研究のように人に対する印象の実現を目的としたものではない．

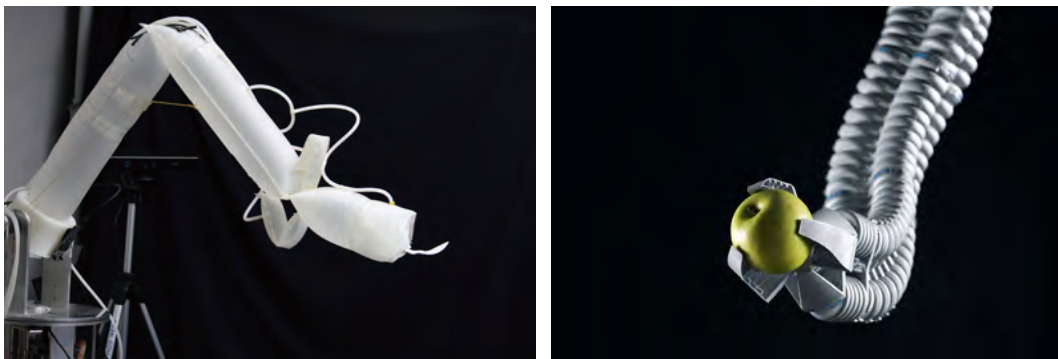


図 2.6: インフレータブル構造(左), Bionic Handling Assistant(右)



図 2.7: Ilievski によるシリコンラバー製のグripper

先の事例は人に対する印象のコントロールを目的とした研究ではないが，人とのコミュニケーションやインタラクションを目的とした研究においても柔らかい素材や構造を用いたロボットが研究されている．先に挙げた Keepon[28] はシリコンゴムの外装によって，伸縮するように動く．高瀬らは，コミュニケーションロボットの研究においてしばしば用いられるぬいぐるみに対し，糸をアクチュエーターとして動かすことで内部構造までやわらかい構造を開発している [34]．布やゴムといった素材は柔軟性があり，従来の人工物に無い外装の柔らかさを実現するが，水の詰まった皮膚のようなやわらかく連続性を保った変化は難しい．

本研究では、実際に柔らかい素材や構造を用いるのではなく、柔らかい生物がもたらす動きや外観変化の特性を引用することを目的とする。

### 2.1.3. 形の変化に着目した動きの研究事例

3次元ディスプレイやインターフェースの研究において、形の変化を伴う研究がなされている。武井らは、リール式の伸縮アクチュエーターを複数用いて曲面や3次元ポリゴンを表現するディスプレイシステムを開発している [35]。山岡は、ゴムの紐材料でワイヤーフレームの立方体形状を作り、角部分を引っ張ることでCGのように変形するシステム Morphing Cube を開発している [36]。これらの例は連続性を持った形の時間変化を実現しているが、線やポリゴンといったCGの基本要素の表現であり、形において生物のようななめらかな外観表現を目的としていない。

圓崎らは、直動アクチュエーターと風船を用いて形が変化するディスプレイシステム Volflex+ を開発している [37]。柔らかい素材による形の変化を実現しているが、ハプティックなディスプレイ表現でありこれはロボットの構造として開発されたものではない。中野らは、磁性を持ったゲルを電磁石によって操作することで、表面張力によって形成される張りをもった液体形状を変化させるシステム Blob Display を開発している [38]。液滴が変形したり結合したりすることで、原子生物のような振る舞いが実現しているが、これもロボットに応用する外観デザインとして開発されたものではない。

これらの研究に対し、ディスプレイ表現やインタラクションにおいて生物のような表現を目指す研究もなされている。河野らは、磁力球を電磁石によって駆動することで、球の集合を芋虫や尺取り虫のように見える表現を行う tamable looper を開発している [39]。また、中安らはシリコンチューブと形状記憶合金製ファイバーを用いて、イソギンチャクのように蠢きインタラクションを行うシステム Tentacles を開発している [40]。これらの研究で用いられているアクチュエーターはモーターに比べて制御が難しく、運動の時間変化の設計が難しい。本研究では、制御が容易なモーターを用いることで、形のなめらかな変化と運動のなめらかな時間変化の双方を実現することを目指す。また、具体的な生物を想起させる事を目的とした外観デザインは行わない。

本研究では、ここで挙げた研究事例のように形の変化に着目し、構造及び外観のデザインを行う。

### 2.1.4. 生物を模倣しない独自の身体デザインの研究

生物の形態は長い進化の過程によって獲得されてきたものである。ロボットの形態を考えるうえで、どのようにアクチュエーターを配置するか、アクチュエーターをいくつ用いるか、関節の可動範囲をどのように設定するか、といった形態に決まりはなく無限の可能性が存在する。ロボットの4D Appearanceは身体構造と動きから創発されるものであり、これを設計するための要素の組み合わせは無限にある。

このような無限の組み合わせから、生物に倣った方法によって新しい身体性を探る研究として、Karl Simsの仮想空間での生物デザインの研究(図2.8左)が挙げられる[41]。仮想空間上で、直方体を組み合わせた身体構造を持った生物が徐々に目的への適応度が高くなるように進化を続け、その結果独自の身体性を獲得する。仮想環境を移動するという目的においても、様々な身体性が創発される。Simsはこれを仮想空間内で行っていたが、Lipsonは、進化のシミュレーションによって獲得されたロボットの形態を、デジタルファブリケーションによって現実世界にプリントする研究(図2.8右)を行った[42]。棒とボールジョイント、伸縮運動を行うリニアアクチュエーターによって仮想空間で形態モデルを作り、これを樹脂とアクチュエーターに置き換えることで現実世界でも実現する。また、遠藤らは進化的計算法を用いて、モーターを用いたリンク型ロボットの形態デザインを行い、結果から実際のロボットを制作している[43]。

これらの研究では、生物の進化を再現することで多様な形態の発見に至っている。しかし、現状では直方体や円柱などのようなCGのプリミティブの組み合わせによって身体形状を定義しているため、本研究で目指すなめらかに時間変化する形は目的として定義することが困難である。そのため、本研究ではこのような方法は用いずに形態を探索する。

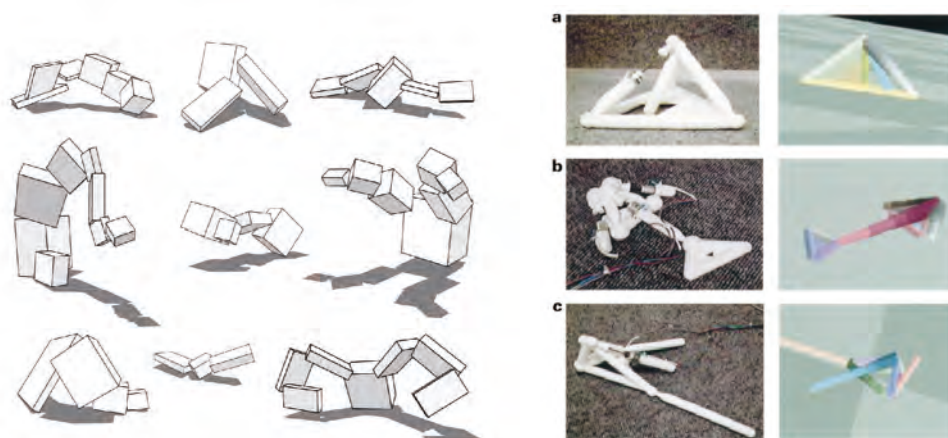


図2.8: Simsによる研究(左), Lipsonによる研究(右)

## 2.2. ロボットの動きに関する先行研究

### 2.2.1. 質点を用いた生物性をもたらす動きの研究

Heiderらは、大小の三角形と円が部屋のような空間で相互作用を行うシンプルなアニメーションを作成し、被験者にこれを見せて起きたこと記述させる実験を行った[44]。その結果、被験者はそれぞれの図形に社会性を見出し、図形の意図や状態を読み取った。この研究成果をきっかけに、人間が非生物に対しても、その形に関係なく、動きによって生物性を知覚するアニメーション知覚の知見が得られた。Heiderらの研究をきっかけに、質点の動きがもたらす心理的効果の研究が多数行われた。Michotteは、画面上の2つのオブジェクトが近付き、また離れるアニメーションを用いて実験を行い、タイミングによって衝突や運搬、逃がっている、といった印象をもたらすという因果関係の知覚の研究を行った[45]。

質点の動きに対するアニメーション知覚に関する研究はHeiderらの後多数なされており、Tremoulet[46]やSchollら[47]によってレビューがなされている。質点の方向変化の大きさや、方向変化に伴う速度変化の大きさに応じて生物性認知が強まることや、動きから意図や目的を認知できる場合に生物性認知が行われることなどが研究されている。

青野らは、ロボットなどへの応用性が高い対象として質点ではなくシンプルなリンクとジョイントのモデルにおける生物性の研究を行った[48]。ここでは、羽ばたきや歩行といった、シンプルなリンクモデルを生物の動きに見立てる動きのデザインを行っている。山田らは、4リンクの仮想的なロボットアームに対して、ヘビやカエルといった生物の動きをアナロジーとしたリズムを持った動きを与え、その動きがもたらす印象を研究している[49]。

このような、質点やリンクとジョイントのモデルといった抽象化したアニメーションを用いた研究は、心理効果をもたらす動きの詳細な検証が可能である。しかし、抽象化しているため、ロボットに応用する際にあらわれるリンクの形状などの情報は持たない。本研究は、質点の動きではなく、リンクの形状や質感も含めた全体の動き、外観デザインを研究する。

### 2.2.2. 既存の人工物に動きによって生物性を付与する研究

人間がロボットに対して擬人化して接することを利用して、人間と生物のインタラクションモデルを、人-ロボット間に適応しようという研究がHuman-Robot Interaction(HRI)やHuman-Agent Interaction(HAI)などの研究分野で行われている。HAIの研究では、知能システムの窓口として擬人化したエージェントを用いることがしばしば

ある。エージェントシステムとして、人との関係性を設計することが主目的であり、人と共存するためのロボットにおける様々なデザインが考えられている。生物の形を持たず、人工物に動きを与えることで人との擬人化インタラクションを行う研究がなされている。Teradaによる実験では、椅子に移動機能を付加した椅子ロボットに目的指向性を持った動きを与えることで、それをみた被験者が椅子の「着座させよう」という意図を読み取った [50]。大澤は、シンプルな人工物である箱に2軸のアクチュエーターを与え、うなずきや首振りといった擬人化したモーションを与えることで、被験者への意図伝達を実現した [51]。三宅らは、移動と2自由度の動作構造を持ったゴミ箱ロボットを製作し、動きによって被験者である子どもたちの関心を引き出し、ゴミを拾って捨ててもらおうというアシストを引き出した [52]。岡田は、人と共存するロボットのあり方として、ロボットだけではタスクを完結できないが、動きなどのインタラクションを通して人間のアクションを引き出し、人の力を得てタスクを完了する「弱いロボット」というロボットのあり方を提唱している。BreazealはコンピューターのLCDディスプレイを顔とし、5自由度の首機構を持ったロボティックコンピューター ROCO を開発した [53]。ROCO が姿勢を変えることでコンピューターを操作し認知作業を行っている人間に対しても姿勢の変化を誘発している。

これらの研究は、既存の人工物にロボティクスによって動きを与えることで、人に対する擬人化を促し、人工物との新たな関係性を実現している。しかし、これらは既存の人工物への動きの付与のみであり、動きを含めた外観全体を設計する手法ではない。

### 2.2.3. 既存のロボットにおける動きの印象に関する研究

産業ロボットとして人間の労働を代替することを目的に発展してきたマニピュレーター等のロボットに対して、人間との共同作業や共存のために親和性を持たせる研究も行われている。

小川らは、生物の動きを機械に導入する事を目的に、物体を持った上肢の直線運動を公式化したサイバネティックモーションを開発した。実験評価により、機械的な定速運動などに対して、サイバネティックモーションが被験者に快く感じられることを示した [17]。前章でも述べたが、サイバネティックモーションは人間の動きにみられるなめらかな時間変化を、一次元における変化量として解析、定式化したものである。柴田らは、コンピューターシミュレーションで生成した物体操作を行う人間の上肢運動とロボットアームに物体操作を行わせたものを用いて、人間の上肢運動及びロボットアームの動きに対する人間らしさは、動作時間内における速度ピークに依存することを明らかにした [54]。

これらの研究は、既存のロボットアームの動きの性質に関する研究である。本研究では、構造も含めて新しい形態及び動きのデザインを行う。

#### 2.2.4. 刺激に対して応答性の高い動作生成アルゴリズムの研究

Walter は 3つの車輪を持ち、光電管とリレー回路によって光に向かって進む亀型ロボットを作成した [55]。この亀型ロボットは光に向かって進み、光が強くなりすぎると背を向け、壁などに衝突したら方向転換を行う、というシンプルな仕組みで動いていたが、常に変化する光や環境との関係性によって複雑な動きを生み出した。Walter は 1951 年に亀形ロボット 2 台をイギリスフェスティバルに展示し、その結果、観客はこの単純な仕組みを持ったロボットの行動から感情や思考を読み取った [18]。

Brooks は、ロボットの制御アルゴリズムとして、単純なモジュールに分割して階層構造を持たせるサブサンクション・アーキテクチャを開発した [19]。高階層部分にタスクの遂行などのモジュールを持ち、低階層部分に障害物の回避等のモジュールを持つことで、タスク遂行のために動作を行いながら障害物などに逐次反応する、柔軟性のある制御が可能になる。このシステムを元に開発された自立掃除ロボット Roomba は、単純な円盤形状ながら、ユーザーが名前をつけて接するなど、生物のように感情移入を伴って接していることが報告されている [56][57]。

前章で述べたとおり、ジェスチャーや仕草等を再現する場合シーケンス制御が用いられるが、この制御ではシーケンス間は一旦停止することになり、またシーケンスの再生中は操作を受け付けなくなるなどの状況が生じる。行動の変化における連続性に限ると、シーケンス制御を行う生物模倣型のロボットよりも、常に動き続け、状況に応じて逐次動きを変化させる Walter や Brooks の移動ロボットのほうがなめらかであるといえる。

本研究では、時間的連続性を持った動きを実現するため、これらの例のようにセンサへの刺激に対して動きを連続的に変化させる手法を用いる。これらの研究では 2 次元平面上の移動ロボットが用いられることが多いのに対し、本研究では、形の変化を伴う新しい構造を開発し、この形態及びセンサに合わせた制御システムを開発する。

## 2.3. 本研究の位置づけ

ロボットの 4D Appearance は、動きと形の相互作用によって現れる。既存研究では、形と動きのデザインは別々に行われている例が多いが、本研究では 4 次元の外観表現を目的に、4D Structure( 4 次元的な表現のための構造 )として形や構造、制御手法を総合的に設計する。連続的な形の時間変化を実現した先行研究もあるが、本研究では生物の動きのなめらかさに着目し、形の変化に加えて時間的ななめらかさも実現するための構造及び制御システムを開発する。制御においてはセンサの刺激に応じて高い応答性で反応するシステムを用いる。このような制御システムは本研究独自のものではないが、この制御システムと形態変化の組み合わせによって従来にないなめらかな動きの実現を目指す。

## 第3章

# Flagella

---

軟体動物のようになめらかに時間変化する形のデザイン





図 3.1: Flagella (写真: 清水 行雄)

### 3.1. Flagella の背景

なめらかなサーフェスで複雑な機械部品を覆う外観デザインは、様々な人工物のデザインで行われており、ロボットにおいても用いられている。なめらかで有機的な曲面は生物の皮膚や果実の表面のような自然物にみられる性質の人工物による再現である。工業製品におけるなめらかな曲面は金属や樹脂など硬い素材で出来ており変形しないため、ロボットのような動きを伴う構造体に用いられる際は、関節部分で曲面の連続性が維持できない。

動いている際にも連続性を保つように外装をデザインできれば、常に連続したなめらかなサーフェスに包まれた、生物のような柔らかい外観印象が実現できると考えられる。本章では、モーターの正確な回転運動を利用し、回転時に関節部分の曲面が連続性を保つような関節構造を提案する。屈曲した円断面のパイプ形状を連結し、断面の円を維持するように回転することで、関節部は変化せず屈曲部分が動いているように見える。この視覚効果を利用することで、軟体動物のような外観印象を実現することが出来る。

本章では、この手法を用いて作成した軟体動物のような柔らかい動きの印象を有するロボット Flagella(図3.1)について述べる。放射性廃棄物の操作用途から生まれたマニピュレーターは、現在ではロボットアームとも呼ばれ、様々な生産現場で運用されている。ロボットアームは、文字通り人間の腕と役割が似ており、人間の作業を代替する機械であるが、構造や形態は人間の腕とは全く異なる。Flagellaは、産業用ロボットとして一般的な形態であるロボットアームをモチーフとし、提案手法によって軟体動物のような外観効果をもたらしたアート作品である。

## 3.2. Flagella のアプローチ

### 3.2.1. 目標とする 4D Appearance の要件

本研究が目指す 4D Appearance の要件について述べる。軟体動物などの我々が柔らかい印象を持つ生物は、極めて弾性が高く変形域の大きい素材で構成されている。また、特定の場所で鋭い屈曲などが起こるのではなく、連続的な曲線を維持しながら変形する。一方、人工物で一般的に使われる素材は変形が起こらない。エラストマーなどの弾性を持った素材もあるが、生物の素材ほど変形域を持たない。比較的大きな変形域を持つ布が用いられることがあるが、柔らかさを保ったまま内部構造とつなげるのが難しい。

このような事由から、本研究では柔軟な素材を用いることはせず、変形しない素材を用いながら、変形域の大きな素材による動きのように見せる視覚効果の実現を目指す。また、一般的なヒンジジョイントのように特定位置で屈曲するのではなく、連続的に変化する動きを目指す。

動きが途切れず、時間的にも連続的に変化することは生物の動きの特徴である。本研究では人と共存するためのなめらかな印象の実現を目的とするため、これも本研究における動作生成の条件とする。

### 3.2.2. 屈曲したパイプ形状と回転関節を用いた構造デザイン

本項では、軟体動物のような連続的な形状変形を視覚効果によって再現する手法として、屈曲した円断面のアームと、その断面円を維持して回転する関節を組み合わせた構造を提案する。

モーターと機械構造の組み合わせによる正確な回転を利用し、リンク同士の継ぎ目を回転角度が変化しても曲面の連続性が保たれるようにデザインすることで、一本のパイプ

が曲がるような印象を与えることが出来る（図 3.2）。これを複数関節で連結することによりリンクの中心線に複雑な変化が生まれ、見た目においては柔軟な連続環状物体が複数の方向に変形しているような印象を生み出すことが出来る。これは、前項で述べた、変形域の大きい素材の変形に見える、特定箇所では屈曲せず連続的に変化する、という2つの条件を満たす。

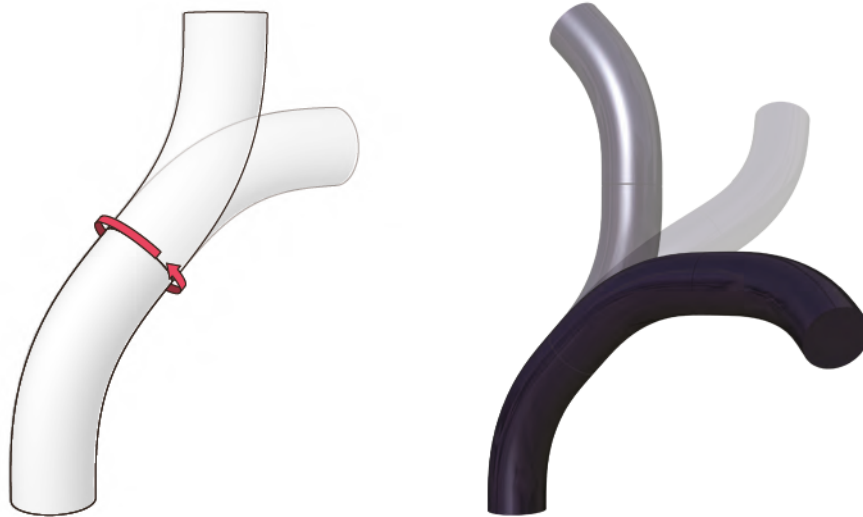


図 3.2: 屈曲したパイプと回転関節を用いた変形する視覚効果のデザイン手法

軟体動物に限らず、多くの生物の動きを生み出す駆動装置は筋肉であり、それ自体が柔らかいものであるため、見た目の印象も動きの性質も柔らかくなる。一方で人工物、機械における一般的なアクチュエーターはモーターである。モーターは正確な動作が可能である反面柔軟性がないため、生物の筋肉をそのままモーターに置き換えただけでは生物の柔らかい動きの再現は難しい。本提案手法は、生物の筋肉の代替としてモーターを用いるのではなく、モーターの正確な回転という特性を活かして、外観においては柔らかい印象を実現するものである。

本提案手法の設計条件は、1) リンクが円断面であること、2) 回転時に断面が変化しないよう回転軸は断面円の中心を通ること、3) 回転時にジョイント部でリンクの外表面が連続を維持すること、である。特に重要であるのは外形を構成する曲面の連続性を常に保つことであり、一定の径の円断面を維持したパイプ形状としてリンクを設計する場合は、パイプの中心線の曲率が中央において最大になり、端部に近づくにつれ曲率が滑らかに0に近づくようなカーブとして設計されていることが望ましい。リンクの屈曲部分が変形している印象を生み出すため、パイプにはある程度の屈曲を与える必要がある。

### 3.2.3. 提案手法に対する考察

前述の条件でリンク形状を作成し、コンピューターグラフィックス (CG) を用いたシミュレーションを行ったところ、くねくねと曲がっているような印象が実現できた。実際の機械での製作を想定し、接続部に隙間を開けたシミュレーションにおいても、ゲシュタルト心理学における良い連続は保たれていたため、同様の効果を確認できた。実際に機械として製作する際はより様々な条件の考慮が必要となるが、これに関しては後述する。

本提案手法は、構造の特性上回転軸の配置が複雑になるため、従来のロボットアームで用いるような逆運動学によるスマートな制御は難しい。このため産業用ロボットのような高速で精度の高い作業は難しいが、人間とゆるやかに協調するような機械への応用が期待される。

本提案手法は見た目のみの再現を試みるものであるため、これを用いて作られる機械は硬く、アクチュエーターにも柔軟性はない。そのため、実際に生活に取り入れるためには、機械としての柔軟性、コンプライアンスを持つことが求められる。本手法は、ロボットにおいて一般的に用いられているモーターの利用を前提としているため、モーターの動きにコンプライアンスを持たせるための様々な先行研究の応用が期待できる。また、本章で述べる Flagella では、人との協調において安全な動きを実現するためのシミュレーションとして、他者を避けるための制御方法を開発した。このような制御手法も組み合わせることで、より柔らかい、安全な印象の実現が考えられる。

## 3.3. Flagella の関連研究

軟体動物の触手やヘビ、舌や象の鼻といった柔軟な動きをもつ生体構造は、従来の人工物にはない移動性能やマニピュレーション性能を有しており、これを人工物によって再現しようという試みが様々な研究者によってなされてきた。生体構造特有の柔軟性を硬い人工素材によって実現するため、様々な構造や素材が考えられている。柔軟なロボットの先駆者である広瀬によるヘビ型ロボットでは硬いリンクを多数連結することでヘビのような柔らかい動きを実現している [58]。また、Laschi らは蛸の触手を再現する研究を行っており、屈曲だけでなく伸縮も可能な実際の蛸の筋構造を、形状記憶合金を用いて再現している [59]。Grzesiak らは、象の鼻のようなマニピュレーターを柔軟性の樹脂でつくられた特殊な形状のチューブと空気圧制御によって実現している [60]。この他にも柔らかい生物を規範としたロボットの研究は数多く行われている [61]。これらは、生物の機能を人工

物に応用しようという手法であるが、本研究は機能の再現ではなく、人に与える感覚の再現を目的とする点で異なる。

また、コミュニケーションロボットや、実体ディスプレイ、タンジブルインターフェースなどの研究において、本研究同様に人工物に柔らかい感覚を付与しようという試みがなされている。中野らは、ゲル状の磁性流体を電磁石により制御することで原子生物のような動きを実現している [38]。中安らは、形状記憶合金アクチュエーターとシリコンチューブを用いてイソギンチャクのような柔らかい構造を実現している [40]。これらは、原子生物や触手といった柔らかい生物の印象を実現している点で本研究の目的と類似しているが、流体や形状記憶合金など制御が難しいアクチュエーターを用いている。本研究は一般的にロボットアームで用いられる素材とアクチュエーターによって、視覚的な印象として柔らかさを再現することを目指す。高瀬らは、糸によって駆動することで、能動的な動きと柔らかい感触を両立したぬいぐるみロボットを実現している [34]。視覚的にも触覚的にも柔らかさを実現している点で優れているが、ぬいぐるみに特化しており、ロボットアームのように作業を行う目的には適さない。

硬い素材と回転アクチュエーターによって構成されたロボットの外観デザイン手法において柔らかさを考慮した例として、KUKA社のLightweight Robotがある [62]。このロボットは運動時に隙間が生じないような丸みを持った連続曲面で構成しており、人が触れる際の安全性を高め且つ安全な視覚的印象も実現している。しかし、モーター配置を崩さずに設計されているため、本研究のような柔らかい生物のような視覚効果を実現するものではない。本研究の提案手法は、機能要件によって決められた構造をそのまま用いるのではなく、構造も含めて外観デザインを探るものである。

## 3.4. Flagella

### 3.4.1. Flagella の概要

筆者らは、本提案手法を用い、軟体動物のような動きのメタファを引用したロボットアーム Flagella を製作した。提案手法は、人と共存する機械のデザイン手法としての応用が期待されるものであり、なんらかの機能を持った機械の外観への応用も考えられるが、我々は、提案手法がもたらす視覚的な効果を多くの人に純粹に体験してもらうため、特定の機能を持たせないアート作品として Flagella を製作した。

### 3.4.2. Flagella の外観デザイン

Flagella は、ゆるやかにカーブしたリンクを3つ連結し、その先にリンクと同様の回転関節で連結され、リンク部に似せた形状の3本の指を持ったハンド部を接続した5本のアームで構成されている（図 3.3）。

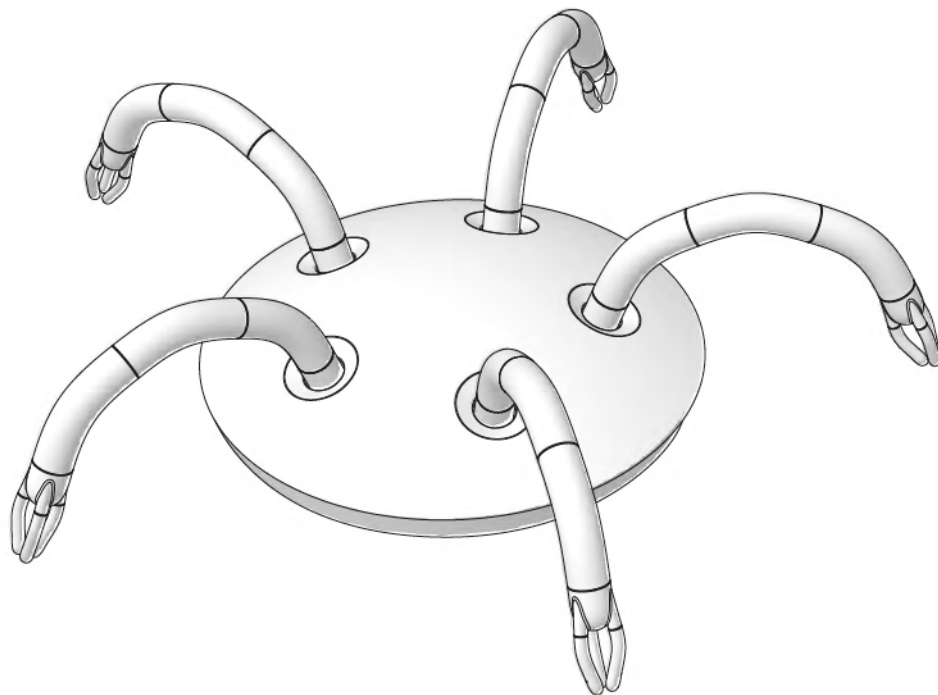


図 3.3: Flagella の外観

## リンク形状のデザイン

提案手法を用いて製作したリンク部は、常に径が一定のパイプ形状である。パイプの芯線は中央部分において対称なカーブを用いている。このカーブの曲率変化は動きの印象に関わる重要な要素であるが、目的とする効果においてどのような曲率変化が有効であるかは予想が難しいため、シミュレーションプログラムを作成して検討を行った(図3.4)。

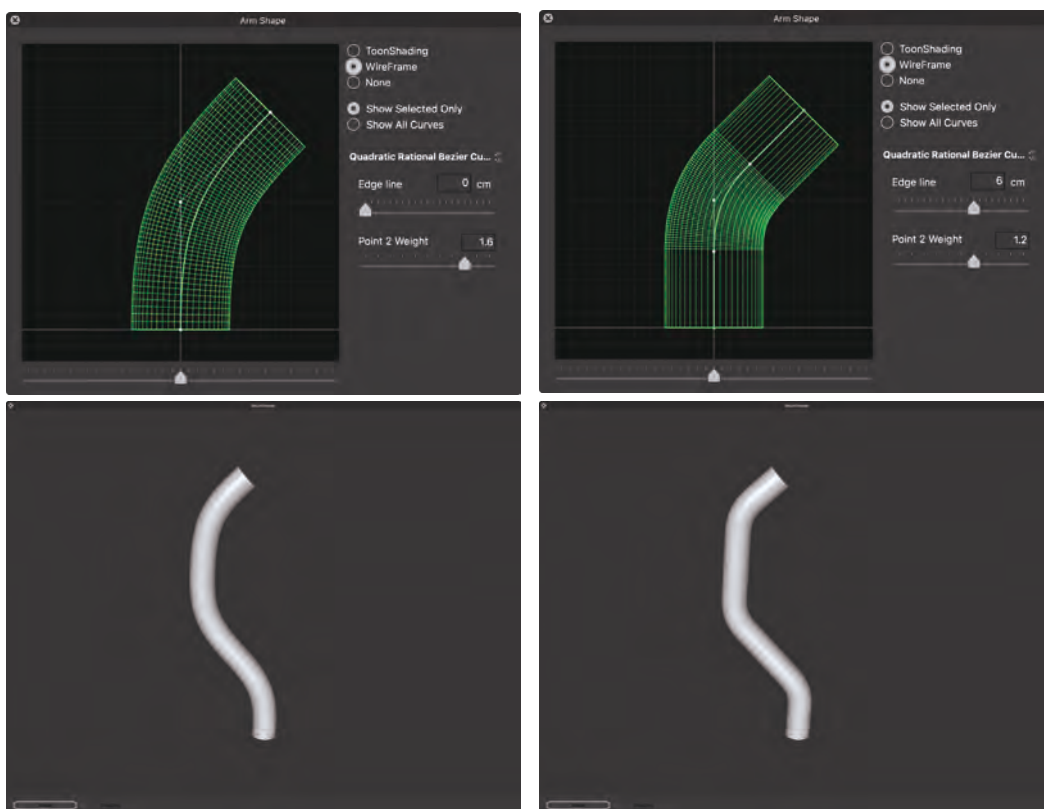


図3.4: Flagella 形状のシミュレーションプログラム

シミュレーションでは曲率が一定である円弧形状と芯線の中央に向かって曲率が変化する曲線の2種類を検討した。曲線において、「なめらかな」とは曲線の変化率が連続した様子を示す。数学的には曲率と呼ばれる、曲線の変化をあらゆる傾きの変化率が連続している曲線、つまり、曲線の二次微分まで連続である曲線をなめらかな曲線と呼ぶ。上記の2種類の曲線場合、円弧では回転時に端部で曲率連続が維持できないのに対し、端部で曲率が0で中央に向かって曲率が変化する曲線では回転時にも連続性が維持される。このことから、芯線には曲率が中央部分で最大となり、端部で0となるようにゆるやかに変化する曲線を採用した。

曲面においては、二次微分である曲率は曲面への外環境の映り込みの変化に関係し、

曲率が不連続であると映り込みに折れが生じる。自動車の外装などでは映り込みが美しく連続することが重要視され、このため CAD においては曲率が連続した曲面を生成する手法が常に研究されてきた。図 3.5 は、前述の 2 種類の曲線を芯線としたパイプ形状の曲率の比較である。曲面の UV 方向それぞれの平均を色に割り当てたものであるが、図左の円弧を芯線としたものでは端部での曲率連続性が保たれていないのに対し、図右の端部で曲率を 0 にしたものは、回転角度によらず曲率の連続性が保たれていることがわかる。曲率のような微妙な変化はシミュレーションでの再現は難しいが、実際の立体を観察する際には顕著であるため、CAD における設計段階で調整を行った。

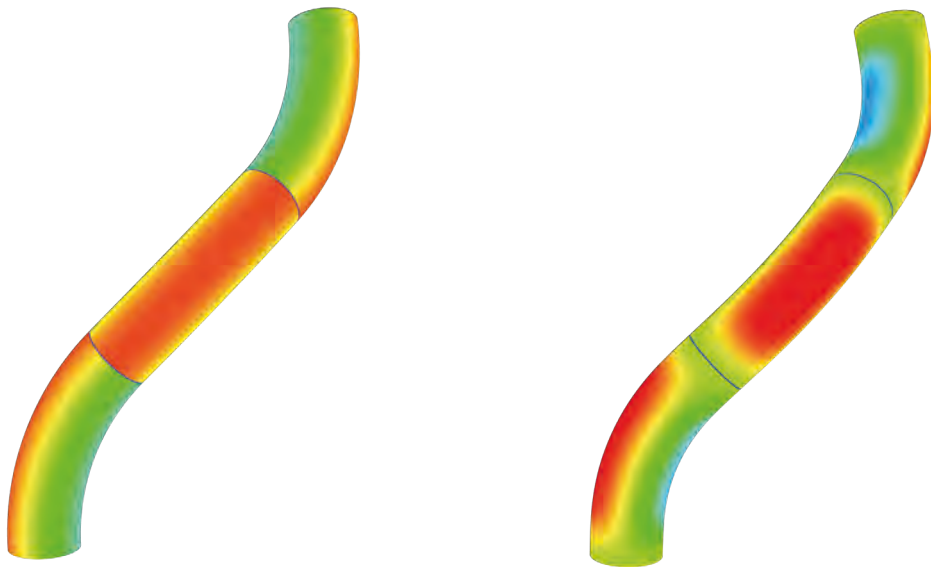


図 3.5: 2種類の芯線のリンク形状における曲率の比較

シミュレーションは、制御点の重みによって曲率の最大値のコントロールが容易な 2 次の有理ベジェ曲線を用いて行った。2 次の有理ベジェ曲線は、媒介変数  $t$  ( $0 \leq t \leq 1$ ) と重み  $w_i$ 、制御点  $P_i$  を用いて、下式のように表せる。

$$Curve(t) = \frac{w_0(1-t)^2 P_0 + w_1 2(1-t)t P_1 + w_2 t^2 P_2}{w_0(1-t)^2 + w_1 2(1-t)t + w_2 t^2}$$

図 3.5 上部のように、両端と端部における接線が交差する点を制御とする有理ベジェ曲線を定義し、全制御点の重みを同一にした状態から徐々に中央の制御点の重みを増やし、中央部での曲率を大きくしながら CG 上での動きを観察した。曲率の最大値はある程度大



きい方が変形して曲がっているような印象は強く得られたが、カーブが急になりすぎると直線が折れたような印象になりなめらかな印象が得られない(図3.6左)。これらの要件を考慮した結果、端部の制御点の重みが1, 中央の制御点の重みが1.6の有理ベジェ曲線(図3.6右)を採用した。また、2次の有理ベジェ曲線では端部での曲率は0にならないため、この曲線を基にCADソフトで端部での曲率が0になるNURBS曲線を作成して用いた。

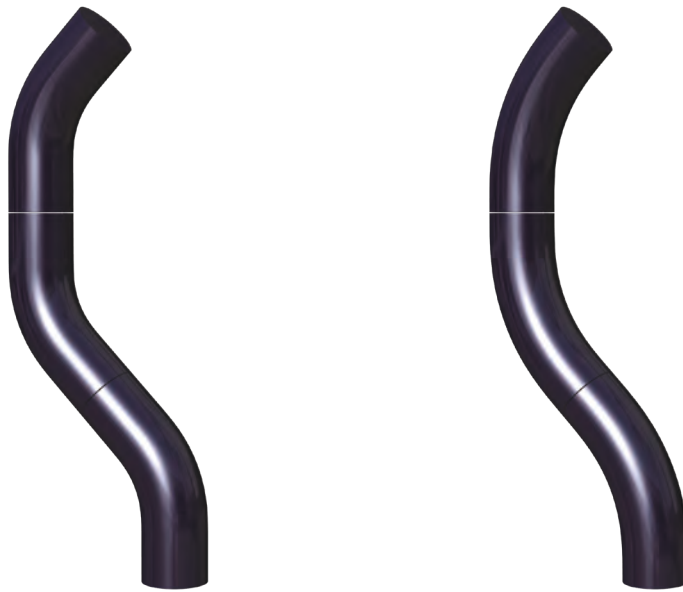


図3.6: 曲率変化の異なるリンク形状の比較

アームのサイズも、提案手法が観察者に与える印象に大きく影響する要件である。基本形状を基に、複数サイズの模型を作って検討を行った結果、人間の腕に近いサイズの模型では提案手法による動きの効果がより生々しく感じられることがわかった。これは、軟体動物のような印象と共に人間の腕のような印象を得ることで、人の腕やそれに近いスケールの既存のロボットアームとの対比を強く感じられる為だと考えられる。前述の検討を踏まえ、リンク形状には、曲線長192mm、曲線の中央での曲率半径176.6mmの曲線に沿って直径62mmの円を押し出したパイプ形状を採用した(図3.7)。

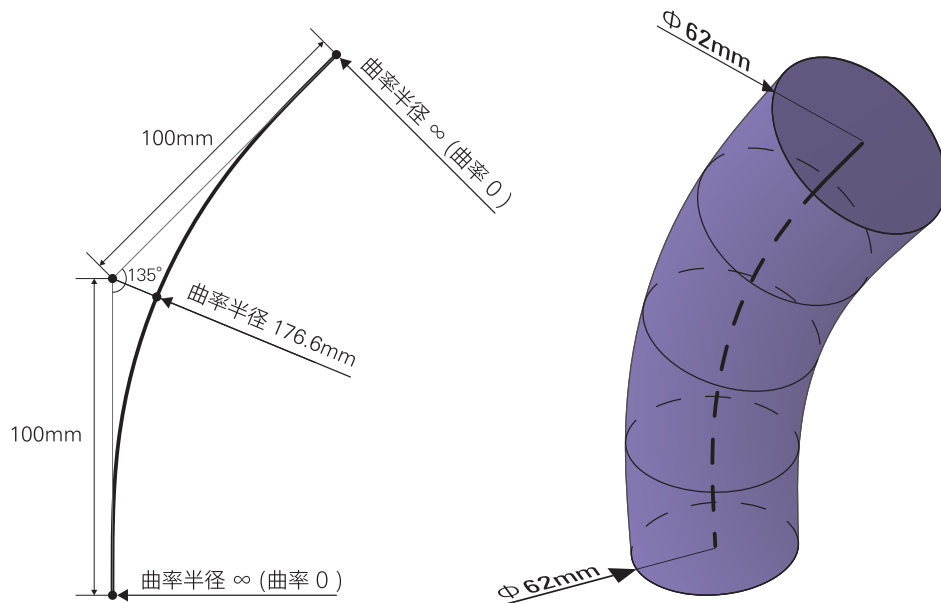


図 3.7: リンクの形状

### アームのデザインと配置

Flagella の 1 本のアームは、3つのリンクと先端のハンド形状で構成されている。1つのリンクのみでは単純な回転運動であり、曲がっているような視覚効果は実現し難い。屈曲によって回転軸が傾いたリンクを複数連続し回転させることにより、アームが生み出す曲線に複雑な変化が生まれ、アームが変形しているような印象が実現できる。リンクの連結数が多いほど曲線は複雑になるが、回転軸にかかる力や必要となるモーターのトルクも大きくなる。CGを用いて連結数による動きの違いを観察した結果、複雑に曲がった印象が実現でき、且つ前述のプロポーシオンを保つことが可能な連結数として3つを採用した。

Flagella は、図 3.3 で示したようにドーム状の土台から放射状に 5 本のアームが生えるような形に配置している。アーム同士を密集させることで、複数アームが水棲生物のようにうごめく印象を実現するとともに、互いに避け合いながら動くアーム同士のインタラクションを与える。Flagella は、人と共存する機械のシミュレーションとして動きの性格にも柔らかさを持たせることを目的としている。それぞれが衝突しないように避け合う動きを与えることで、控えめな動きの性格を付与し、穏やかな印象の実現を目指した。配置するアームの数に関しては、偶数のアームを放射状に配置すると対称性が強く人工的な印象を受けるため、本作品ではより生物らしく感じられる奇数を用いた。本作品のアームの形状と可動範囲では、3本では密度が低く、7本ではアーム同士が距離が近すぎ、個々のアーム

ムの動きが大きく制限されてしまうため、5本を採用した。このような放射相称形状は柔らかい水棲生物に多く見られる形状であり、抽象的に水棲生物のメタファを引用するデザインといえる。

リンクの外装はABS樹脂で作成した。外装は硬い素材であるが、クリア塗装となめらかな鏡面仕上げを施すことで周りの景色が映り込ませることで、曲面の連続性を強調するとともに継ぎ目の隙間を目立ち難くした。また同時に水棲生物のようなしっとりとした表面の印象を実現した。

### ハンド部のデザイン

アームの先端には回転構造を有する指を持つハンド形状を設計した。ハンド部を付加することにより、人の腕のような印象を与え、提案手法による動きの印象を強く感じさせることを意図している。アームの回転構造や全体形状に合わせてハンド部の基本形状は放射相称とし、3本の指を放射状に配置した(図3.8左)。指はリンクの形状と同様屈曲したパイプ形状でデザインした。デザイン過程では人の手に似せた5本指の形状も検討したが、人の形に似たものが人として不自然な動きをすると不気味に感じられる「不気味の谷」現象のような不快な感覚が得られたため、より抽象度の高い3本指の回転対称の形状を採用した。



図3.8: ハンド部分の構造

先端の指にはモーターを用いず、アームの動きを受けて受動的に回転するよう設計している。指の背部分に真鍮製の錘を入れることで屈曲による重心の変化をキャンセルすることで、受動的な構造でありながら重力に反して動く(図3.8右)。重力に逆らう動きは生物らしさを感じる動きの要素のひとつであり[63]、これを錘による重心操作で実現している。錘を付加しているため指の回転軸に対する慣性モーメントは大きく、これをベアリングによって受けることで、ゆらゆらと漂うようなやわらかい動きを実現した。

### 3.4.3. Flagella の構造設計

前項で述べたとおり，アームの外装は意匠性の高いABS樹脂で制作した．外装の内側には，アルミニウムやステンレス等の金属を用いてフレームを作成した．モーターの保持，回転軸の保持，連結部分など，剛性が必要な部分はこの金属のフレームで構成した（図3.9）．

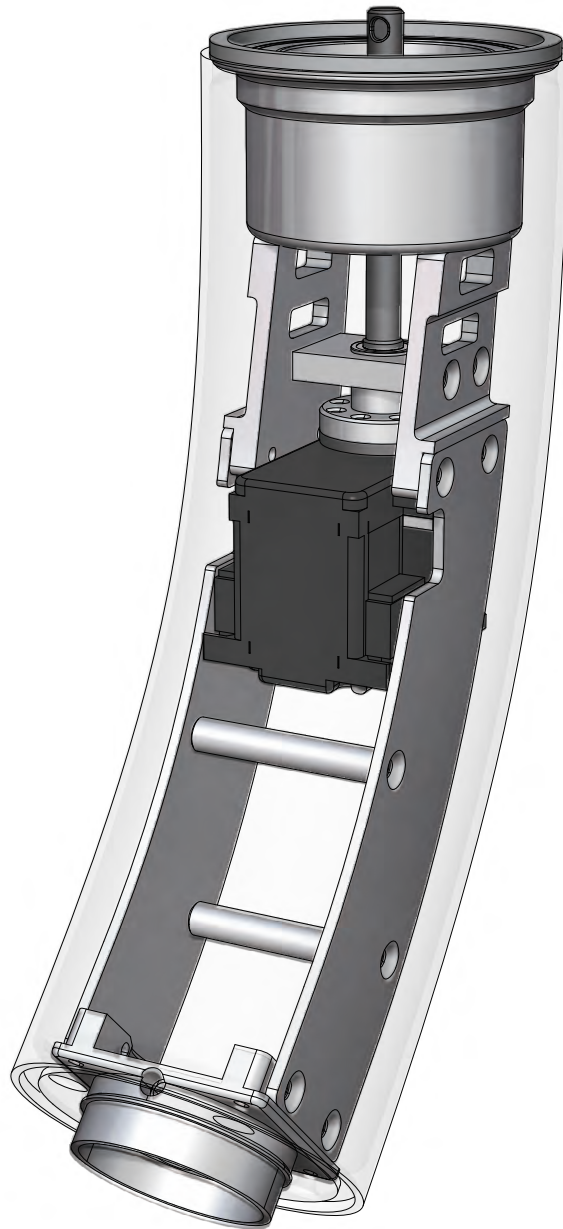


図3.9: フレームの構造

モーターには電力を供給する必要があるため、各モーターはケーブルによる接続が必要となる。ケーブルは金属で出来ているため伸縮の柔軟性はなく、動きに応じてたるみが生じるなどの特性がある。このため、既存のロボットアームでは外装の外側にケーブルを這わせるといった処理が行われるが、提案手法の効果を得るためには、外部に露出しないように収める必要がある。Flagella では連結部に空間を設け、曲げ方向に柔軟性のあるケーブルを、回転軸の周りにゆるく巻きつけることで、回転時にケーブルが緩んだり締まったりすることでたるみを吸収するようにした(図 3.10)。この構造によって、ケーブルを外部に露出させず回転運動を行うことを可能にした。

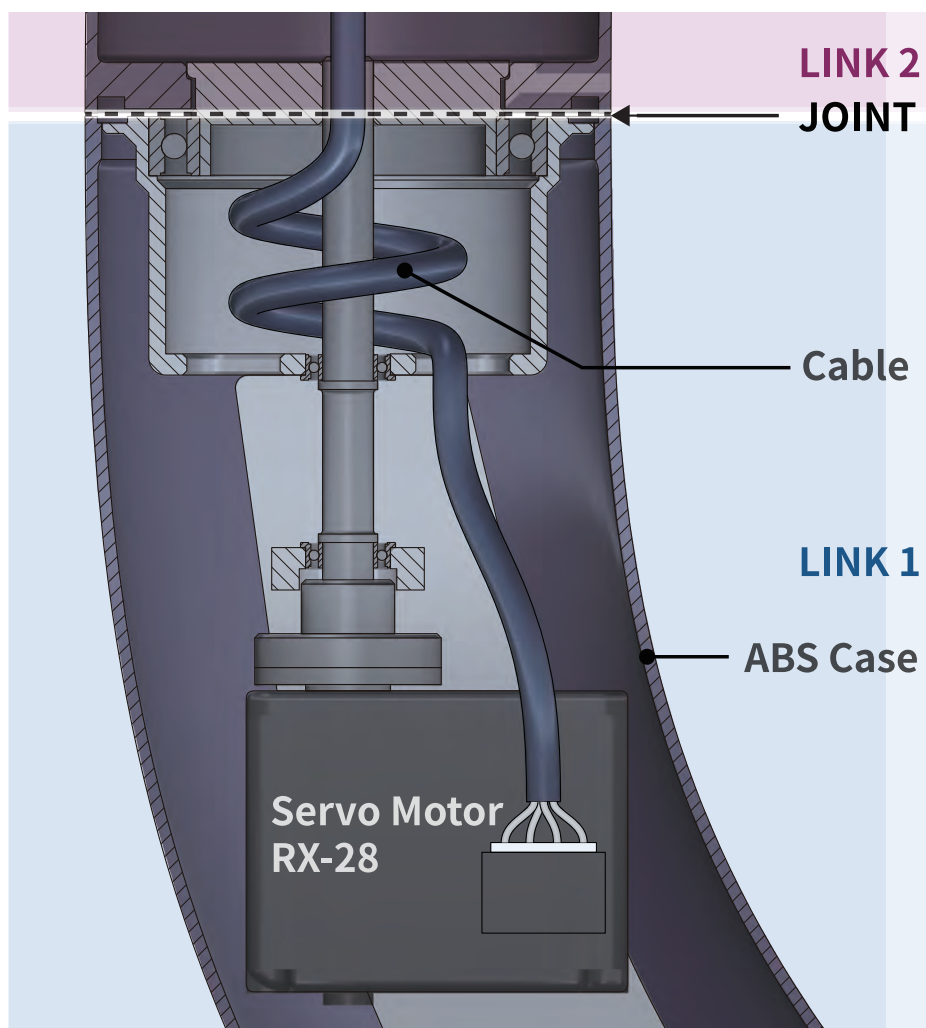


図 3.10: 連結部での配線方法

これらのアームは、5本が互いに衝突しうる位置に配置されている。Flagella は、人と共存する機械のシミュレーションとして動きの性格にも柔らかさを持たせることを目的としている。そのため、互いに衝突しうる位置に配置し、それぞれが衝突しないように避け

合う動きを与えることで、常に周りとの接触を避けようと動く安全な印象、柔らかい印象の実現を目指した。

### 3.4.4. Flagella の制御設計

Flagella の制御には Apple 社のデスクトップ型 PC である Mac mini を用いる。関節に用いているサーボモーター RX-28 は RS-485 規格のシリアル通信によってコマンドを送信することで動作する。このため、モーターのコントロールは Mac OS 上の制御アプリケーションからシリアル通信によってコマンドを送信することで行う。制御信号は、Mac mini の USB ポートから、FTDI 社の USB シリアル変換チップを介して RS-485 に変換され、サーボモーターに送信される。Flagella は、アーム 1 本につきサーボモーターを 3 つ用いているため、5 本のアームを動かす際には 15 個のサーボモーターを扱う。これら 15 個のサーボモーターを 1 台の Mac mini で同時制御する。RX-28 はデージーチェーン接続が可能のため、全てのモーター間を RS-485 の 4 本のケーブル（電源線 2 本 + 信号線 2 本）のみで接続している。配線構成は図 3.11 の通りである。

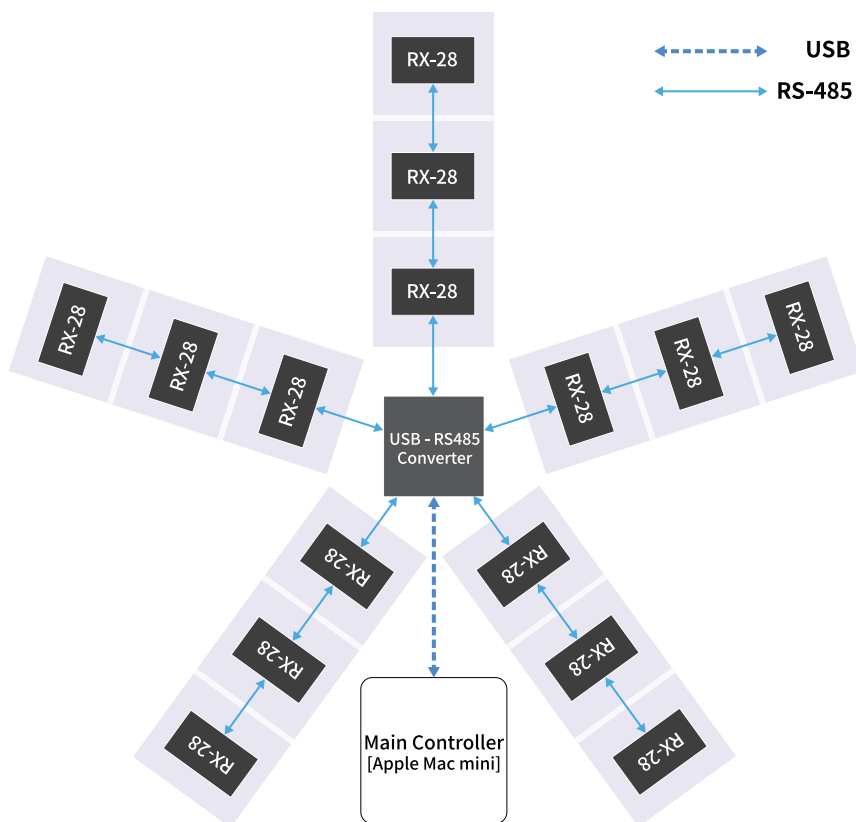


図 3.11: 通信の構成

制御アプリケーションはMac OSの開発環境Cocoaを用いて作成した。制御アプリケーションでは、動作の生成とコマンドの送信を行い、また、生成した動作シーケンスを保存、再生する機能を持つ。展示の際はリアルタイムでの生成は行わず、予め計算し生成した複数パターンの動作シーケンスの再生を行った。このアプリケーションでは、シリアル通信によって実機を操作するだけでなく、CGによってシミュレーションを行う機能を実装している。そのため、実機を用いずに動作の生成やシーケンスの確認が可能である。このシミュレーションプログラムは標準的なグラフィックスライブラリであるOpenGLを用いている。

OpenGLはGPUを用いた高速なベクトル演算や行列計算が可能のため、動作生成の際のアームのジオメトリ計算、距離計算のための演算にもOpenGLを用いた。

### 3.4.5. Flagellaのモーションデザイン

Flagellaのモーションは、水棲生物のようにゆったりと漂うような動きを目指して設計した。また、配置の項で述べたように互いに避け合う動きを設計した。非生物に対する生物性の知覚において、目標位置に向かって移動するなどの意図性を感じさせる動きが重要であることが知られている[64]。本作品は生物のように目標位置に向かって移動し、且つ時間連続性の高い動きの変化を実現することを目的とし、他のアームを避けながら目標角度まで回転する制御を与えた。

Flagellaの基本動作には、それぞれのモーターのランダムな往復運動を採用している。個々のモーターにランダムに目標とする回転角を与え、その角度に達したら次の目標角度を設定する、という処理によって運動を生成し続ける。往復運動はサーボモーターの可動範囲である $300^\circ$ の範囲内で行っている。可動範囲に制限を設けず無限回転を行う事が出来ればより不思議な印象の動きを実現できることが予想できるが、リンク間の配線が無限回転に耐えないなどの事由で実現は難しく、回転範囲を設定した。Flagellaのアームは、同軸上に回転関節を連結しているため、上部のリンクは下部のリンクの回転の影響を受けて動く。この結果、先端部は3関節分の回転により $360^\circ$ を超えて動くため、この回転範囲でも柔軟な動きの印象を実現できると判断した。リンクの形状と関節の構造だけで曲がっているような動きが実現できるため、モーターには複雑な速度変化を与えず、等速回転運動を基本とした動きを用いている。RX-28では回転速度の設定が可能のため、様々な回転速度でFlagellaを動かし、動きを観察し検討を行って展示の際の回転速度を決定した。回転速度が速いとヘビの動きのような印象が感じられ、本作品で目指す水棲生物のような柔らかい印象が薄れ、また危険な印象を受けたため、ゆったりとした動きの印象が感じられる $30^\circ/sec$ を基本的な回転速度とした。抵抗の大きい水中を動くような低速度で動かす

ことで、水棲生物のような印象が実現できたと考えられる。CGで動作のシミュレーションを行った際、回転方向の変化が急激に行われるとアームのシルエットの変化にも急な速度変化が生まれ、その結果滑らかに動いている印象が失われることがわかった。また、急激な回転速度の変化は回転軸などの機械への負荷も大きい。このため、回転方向を逆転する際は、一定の加速度で減速、反転するようにした。順方向への回転から逆方向への同速度の回転へは2.4秒で切り替える。つまり、約  $27^\circ/\text{sec}^2$  の角加速度で方向転換を行う。

この基本動作に加えて、他のアームと接近した時のみ回避動作を行うような制御を行っている。回避運動は、他のアームに接近した際対象との距離に反比例する斥力を発生させ、目標角度へ向かう動きと斥力を合成することで生成する。Flagellaの制御はサーボモーターに単位時間毎に目標角度を送り続けることによって行う。このサーボモーターへ送信している角度から順運動学的に現在のアームのジオメトリを計算し、それぞれのアームの中心線同士の距離から接近を判定する。アームのジオメトリ計算には前述のように OpenGL を用いた。

作成したプログラムでは、リンクの形状決定のためのシミュレーションで用いたベジェ曲線を用いてアームの中心線を近似し、曲線を等分割した点を用いて距離を計算した。つまり、リンクの3次元形状を球の集合によって近似した。ベジェ曲線の分割は容易に計算できるため点の数は自由に变化させることが可能だが、ここで作成したプログラムでは曲線を4分割する5点を用いた。(図3.12上)曲線を分割する点の数が多ければ多いほど精度は上がるが、衝突の確実な回避のため実際のアームのサイズよりも余裕を持って計算を行うため、5点で問題無いと判断した。Flagellaの構造では自由度が少ないため、斥力の発生した方向に直接回避運動を行うことは不可能である。そのため、斥力のベクトルから、一番接近している部分を斥力方向に動かすために有効なモーターの回転方向を計算し適用する。まず、リンクのそれぞれの点同士で斥力ベクトルを計算し(図3.12下左)、リンクを構成する5点の斥力ベクトルを合成したベクトルをこのリンクにかかる斥力とする(図3.12下右)。



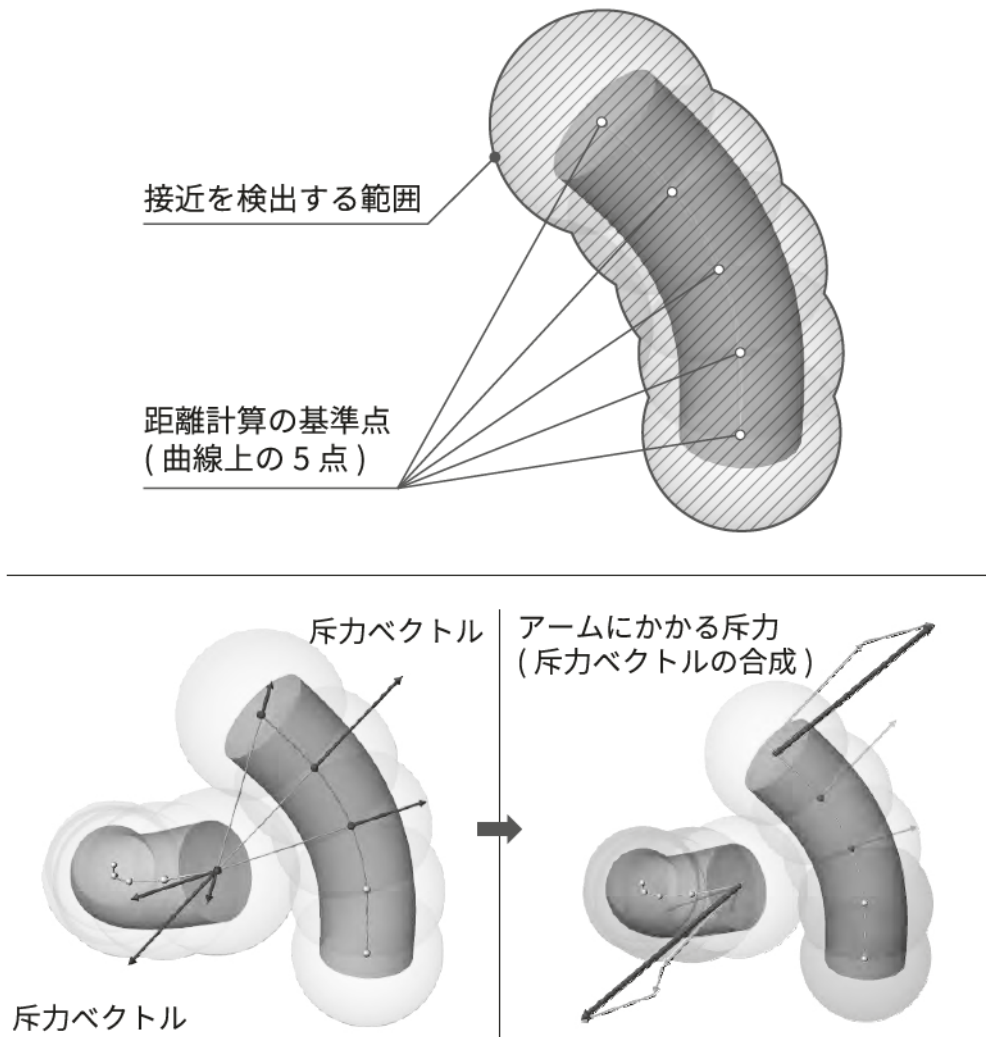


図 3.12: 斥力ベクトルの合成

最下部のリンクの動きに影響を与えるのは最下部のモーターのみなので、最下部のリンクの斥力ベクトルは最下部のモーターにのみかかる（図 3.13 左）。同様に、中段のリンクの斥力は最下部と 2 段目のモーター（図 3.13 中央）、最上段のリンクの斥力は 3 つのモーターにかかる（図 3.13 右）。斥力ベクトルからモーターに作用する力への変換は、モーターの回転方向のベクトルと斥力ベクトルの内積を、モーターの回転方向のベクトルにかけるという操作によって行う。

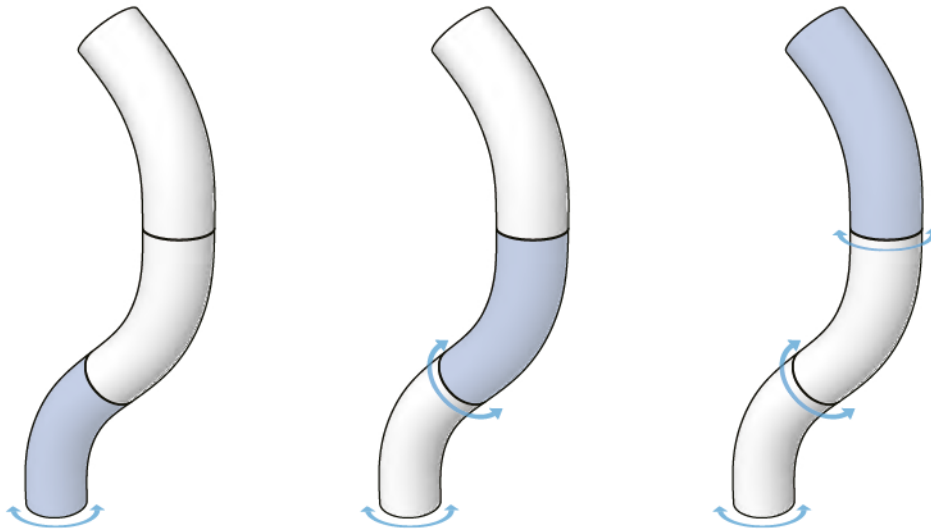


図 3.13: リンクの動きに影響する関節

目標角度へ移動する基本動作と前述の回避運動を組み合わせた動作生成のフローは図 3.14 に示すとおりである。まず、各リンクに目標角度を設定し、目標角度へ移動するための角加速度を発生させる。次に、その他全てのリンクとの距離を判定し、一定距離内に接近したリンクが有るか判定する。接近したリンクが有るか判定する。接近したリンクがない場合は目標角度へ向かって回転する。回転速度は発生させた角加速度を与えることで生成し、上限は前述のとおり  $30^\circ/sec$  とする。接近したリンクがある場合には図 3.12 の方法で斥力を求め、目標角度へ向かう加速度と斥力による加速度から速度を計算して回転させる。図 3.13 に示したとおり、下段のリンクの速度決定には、上段のリンクへの斥力が影響する。この操作は単位時間毎に行われ、単位時間の回転移動後に目標角度へ到達したかを判定し、到達していない場合は再度接近したリンクが有るかどうかが判定、到達した場合は新たな目標角度を設定し、上述の操作を繰り返すことで動作を生成する。

動作を停止する際は、目標角度を初期位置に設定し、全リンクが初期位置に到達した時点で動作生成ループを終了する。展示の際は3分間や1分間の動作シーケンスを用いたが、このシーケンスを生成する際は設定時間経過後にリンクの次の目標角度を初期位置に設定し、上記の停止処理を行った。

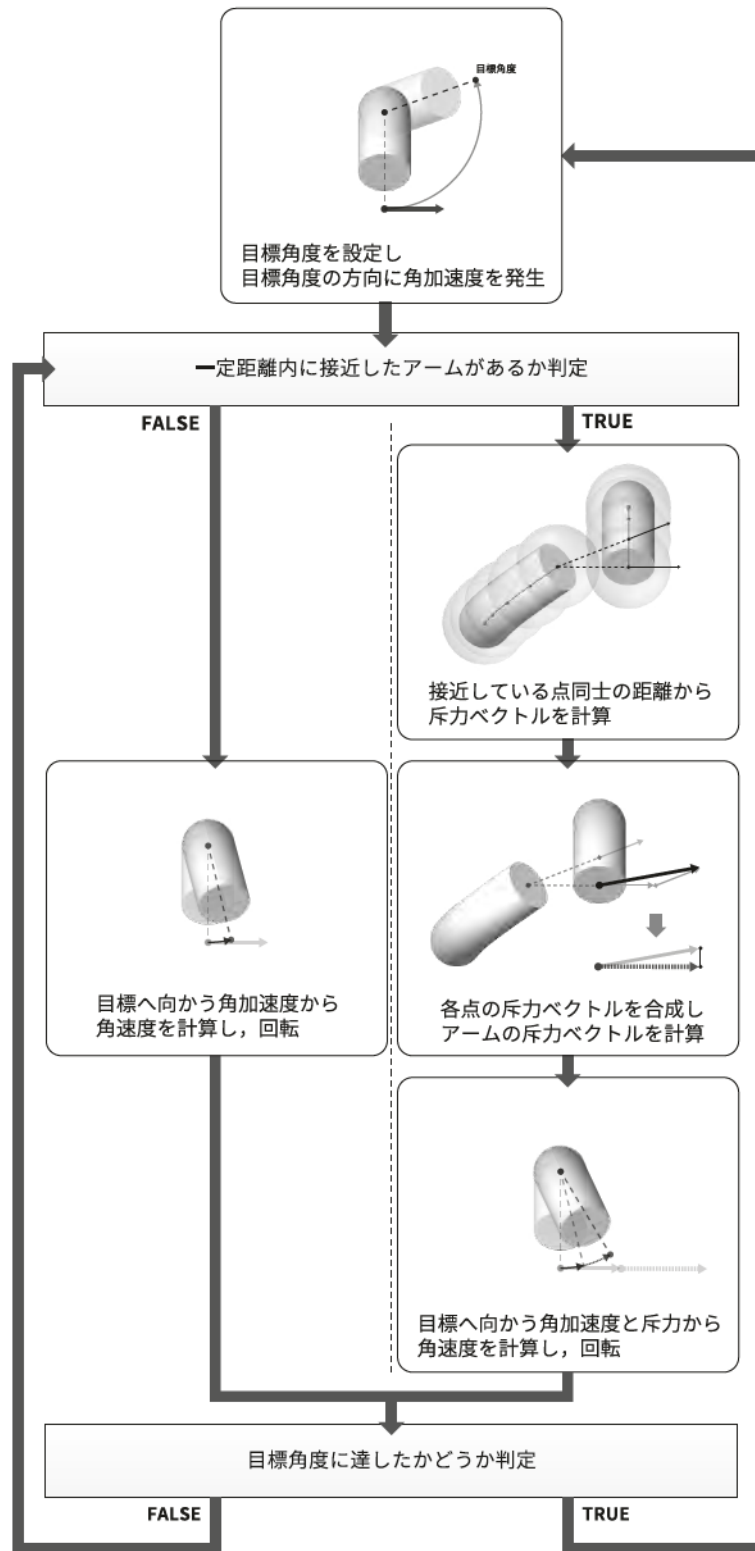


図 3.14: 動作生成のフロー

## 3.5. Flagella のデザインプロセス

### 3.5.1. 4D Appearance を構成する基本要素の開発

Flagella のデザインにおいては回転関節と屈曲したパイプ形状の組み合わせを最初に開発した。これは、形とその時間変化による視覚効果を設計する要素であり、Flagella における 4D Appearance を構成する最小の 4D Structure といえる。Flagella の場合、初期時点では制御手法は考えておらず、動きのなめらかさを考えた設計はしていない。形の時間変化におけるなめらかさを実現する要素の発想が最初のプロセスであった。

この基本構造は、生物を目標として構造を考えるのではなく、人工物の一般的なアクチュエーターであるモーターの特性に着目し、その特性を効果的に利用する構造として発想されたものである。

### 3.5.2. 簡易的なプロトタイピングによる 4D Appearance の検証

先述の基本要素が、どのような 4D Appearance をもたらすかを検証するため、簡易的なプロトタイピングを行った。形とその時間変化による見え方を検証するため、機械的な構造は用いず、発泡材を屈曲したパイプ形状に削った物を磁石で連結しただけの簡易的なモデルを製作した。同時に、3DCG を用いたアニメーションも製作した。これらの簡易的なプロトタイプによって、4D Appearance の検証を行い、軟体動物のように柔らかい動きの印象が実現できることを確認した。

CG だけでなくフィジカルなプロトタイプも製作したのは、大きさによって人に与える印象がどのように変化するかを検証するためである。大きさに関わらず、屈曲したパイプ形状の回転がもたらす変形しているような印象は実現可能である。しかし、もたらされる 4D Appearance を人がどのように体験するかには大きさも関わる。Flagella で採用したサイズは直径約 60mm で人間の腕に近いので、腕のようなものとして認知される。検討段階では、20mm や 30mm 程度の細いモデルも検討していたが、このようなサイズでは、人間の腕というよりは海藻や水棲生物の触手に近いものと感じられた。これらの印象は第三者への実験によって検証したものではないが、アート作品として Flagella がもたらす視覚効果を設計するうえでは有用なプロセスであった。

### 3.5.3. CG シミュレーションを用いた要素の検討

次に、関節の連結数やリンクの詳細形状、動作速度といった要素を決めるために、CG シミュレーションを用いたプロトタイピングを行った。CG によるシミュレーションは前項で述べたプロセスでも用いたが、ここではそれぞれの要素をパラメーターとし、時間変化による見え方を確認しながら検討できるプログラムを作成した。リンク形状の検討プログラムは 3.4.2 項で述べたとおりである。

従来のデザインプロセスでは、スケッチや静止画の CG レンダリングによって詳細形状を検討するのが一般的であるが、4D Appearance の検討にはこれらの方法では不十分である。それに対し、本開発プロセスでは、リンクにプログラムによって動きを与えながら、関節の連結数や形状、アームの本数、配置などを検討した。最終的な作品に用いた回避アルゴリズムは用いず、単純な往復運動のみを与えた簡単なシミュレーションであるが、静止画での検討よりも最終成果物に近い状態で 4D Appearance の検証ができた点で有益であった。

連結数や配置、カーブの形状といった形態に関わる要件に加え、制御上の条件である動作速度の検討も CG で行った。しかしながら、CG での検討と、実際のロボットにおける動作では、速度がもたらす印象が異なった。これは前項で述べたサイズ感覚にも共通するものである。したがって、最終的な動作速度はシミュレーションではなく実物で検討を行い決定した。

### 3.5.4. 先端形状のデザイン検討

Flagella は、生物と異なった構造によってなめらかな形や動きの変化を実現するロボットアームとして開発しており、先端に手をモチーフとした形状を与えることを開発当初から構想していた。手のような先端形状を与えることで、鑑賞者に対して人間の腕との対比を促す事を目的とするものである。

最初に、人間の手に近い形状を CG で製作し、研究の途中段階として学内発表を行ったところ、複数の研究者から先端が無いほうが良いのではないか、という意見が得られた。屈曲したパイプ形状と回転構造がもたらす変形しているような動きを純粹に体験する装置としては、先端部は邪魔になる、といった理由であった。これらの意見を受け、著者らは先端部の再考を行った。

最終的には、3.5.5 項で述べたとおり、屈曲したパイプ形状をベースとした 3 本の指が放射状に配置された先端形状を採用した。先端部の詳細デザインは本論文の副査である山

中が行っている。鳥の爪などに近い配置であり、指先のような印象を実現しながら、生物とは異なる構造、形状としてデザインを行った。先端部の回転軸からわずかにずれた回転軸で受動回転する3本の指が配置された結果、アームの動きを受けてそれぞれの指が異なる回転を行い、なめらかな動きの印象につながった。

最初にCGで製作した人間の手を模した形状に対して、複数の批判的意見が得られた理由は次のように考察できる。まず、常に円断面を維持した人工物特有の形状特性を持ったリンクの形状に、先端のみ実際の人間に近い形を与えた結果、形状の印象が異なり違和感が生じた。また、人間の手に似せた故に指先が本来の人間の動きと異なる動きをすることが「不気味の谷」のような嫌悪感を生んだ。

一方で、先端部を付けないほうが、形のなめらかな変化を実現する提案手法の効果を純粋に体験出来る、という事も確かである。本作品では、先述のように手のような先端部を与えることで人間の腕と対比することを鑑賞者に促した。提案手法の使い方としては、ロボットアームのようにデザインせず、先端部を用いず触手のようにデザインすることも有効であると考えられる。

### 3.5.5. モーションデザインの検討

先述のようにFlagellaはアーム同士の動作範囲が互いに干渉するように設計している。これは、アームの動きに相互作用を発生させる事が目的である。

先に述べたシミュレーションや原理試作によって、アーム単体を等速で動かしても、リンクの形状と捻るような回転によって変形しているような印象が実現できることはわかった。本研究では、動きの変化をなめらかにする事が達成目標のひとつであるが、単純な往復運動以外に動きに変化を生み出すためにアーム間の相互作用を用いた。

モーションデザインにおいて、まず動きを手動で生成するか自動的に生成するかの検討を行った。生物模倣型ロボットなどでは、ジェスチャーや仕草など、モデルとなる生物が行う4D Appearanceを丁寧に再現するのに適した手動生成が行われることがしばしばある。本作品は、モデルとする生物がおらず、引用する動きが存在せず、手動で動きを設計する利点が少ない。手動生成の動きでは、用意されたシーケンスを遷移する間に静止状態が生じやすい等の特徴がある。このため、本作品では自動生成を用いた。

自動制御においては、等速度での回転運動を基本とし、アーム同士が接近した際に相互作用を行うことを基本とした。接近時の相互作用として以下の制御を検討した。

#### 接近時に方向転換を行う制御

まず、アーム同士が接近した際、接近した部分が遠ざかるように回転運動の方向転換

を行う制御を検討した。アームが保持する3つのモーターはそれぞれランダムに目標角度を与えられ、目標角度に到達するかアーム同士が接近した際に方向転換が行われる。方向転換時は通常運動時と同様、一定の加速度で方向転換を行った。速度の変化が生じるのは方向転換時のみであり、概ね一定の速度を保っており、アームを単体で動かしてランダムに方向転換を行う場合と同じような動きの印象となった。

### 接近時に斥力をシミュレートした回避運動を行う制御

上記手法では、アーム同士の接触を回避することが出来たが、動きの印象はアーム単体の時と大きく変わらなかった。これに対して、動きにより変化を与える制御手法として、接近時にアーム同士の距離に応じて斥力をシミュレートした力を発生させて回避を行う制御手法も検討した。

目標位置への運動の際、ゴールから引力、障害物から斥力を発生させるような制御方法であるポテンシャル法や、ゴールへ向かう動きと障害物を避けるという行動をそれぞれモジュール化・階層化して行うサブサンクション・アーキテクチャによる制御は2次元の移動ロボットではしばしば用いられてきた。上記の手法をFlagellaの3次元運動へ応用したのもとして、斥力のシミュレーションによって回避運動を行う制御を検討した。

目標角度へ回転するまで動き続けるため、他のアームを回避しながら目標値へ動こうとする目標指向性が生まれた。方向転換の制御と異なり、常に回避方向への加速度が変化し続けるため、複雑な変化を伴う動きが実現した。

上記の2種類の制御手法は、加速度を与えながら運動変化を行うため、動きの変化がなめらかに行われるという条件は双方とも満たしている。しかしながら、動きの印象はそれぞれ異なるものになった。

本作品では、斥力のシミュレーションを用いた制御手法の方が動きの変化が多く、なめらかな形および動きの変化が強調されるため、この制御手法を採用した。

また、各モーターに対して目標角度を与えるのではなく一本のアーム全体の目標姿勢、つまり構成する3つのモーターの目標角度を同時に満たす状態を目標値とする制御手法も検討した。この目標姿勢を目指す手法と斥力のシミュレーションを用いた制御を行ったところ、目標姿勢に到達した関節には動きが生じず、結果的に停止している部分が多い動きとなった。これはなめらかな動きの変化として挙げた条件とは異なるため、本作品には3つのモーターの目標角度を同時に満たす制御は用いなかった。

## 3.6. Flagella の評価

### 3.6.1. Flagella の展示とフィードバック

Flagella は東京都のデザインミュージアム 21\_21 design sight 企画展の「骨」展の出展作品のひとつとして、2009年5月29日から同年8月30日までの間展示された(図3.15)。筆者らはその際参加者のFlagellaに対する反応の観察を行った。展示においてFlagellaを観察した多くの人が、柔らかい外装で包まれているのかと思った、と話したり、うねうね、うのように、くねくねなどの擬音語で表現したりするなど、Flagellaを柔らかいものであるように認識していることがわかった。このことから、カーブしたリンクを振れるように回転させる手法が、柔らかい印象を与えるのに効果的であることが確認できた。また、展示のキャプションや口頭説明においてFlagellaで用いている手法を伝えたが、それでも柔らかい動きに感じられる、という意見も得られた。このことから、提案手法が、柔らかいものと錯覚させる一時的な効果だけでなく、仕掛けがわかったあとも柔らかい印象を持続させられることがわかった。

Flagellaに対して、気持ち悪い、という反応も多く観察出来た。これは人に対する親しみやすさを実現するという点ではマイナスの要素であるが、軟体動物のような動きの生々しさが実現された結果だと考えられる。アート作品として、提案手法の効果を強く示すという意味では良い結果だと考えられる。一方、デザイン手法として生活に取り入れる際は、従来の工業デザインにおける生物の引用と同様、気持ち悪さや生々しさのコントロールが重要であると感じられた。

Flagellaには人を感知するセンサを搭載していないため、骨展での展示においては周囲に直径2mの展示台を作り、観賞のための距離を設け、また作品に触れることを禁じる旨のピクトグラムと案内を配置した。しかし、それにも関わらず手を近づけたりゆっくりと触れたりする鑑賞者が多く見られた。これは、モーターの回転速度が遅いことも要因であると考えられるが、提案手法による柔らかい動きや互いに避け合う動きによって鑑賞者の多くがFlagellaに対して安全な印象を持ったことも理由と考えられる。

また、Flagellaに手を近づけながら、「近づいてきた」「逃げられている」「嫌われている」といった言葉を発する例も観察された。現在Flagellaには人を感知するセンサやインタラクションを実装していないため、実際にこのような反応をしているわけではない。しかし、アーム同士が互いに避けあう動きからFlagellaが意思を持って動いているように感じられたのだと考えられる。





図 3.15: Flagella の展示風景

## 3.7. Flagella の考察

### 3.7.1. 形の時間変化に対する考察

屈曲したパイプ形状と回転関節を組み合わせた構造によって、全体の曲面の連続性が保ったまま動く、なめらかな形の変化が実現できた。従来オーガニックデザインなどで用いられていた有機的な曲面は変化が複雑であった。本研究で用いた形状は円断面のパイプ形状であり、一般的に有機的な曲面と呼ばれる形とは異なる。しかしながら、この単純形状を連結し、動きを与えることで軟体動物のような柔らかい印象が実現できた。鑑賞者がこの機械の動きを「うねうね」や「うのようによ」といった擬音語で表現したことからも、軟体動物のような柔らかさを感じていることがわかった。

外装に鏡面塗装を行ったことも、形の時間変化の認知において効果的であった。外景の映り込みによってリンク同士の連続性が強調され、また水棲生物のような外観印象が実現した。

### 3.7.2. 動きの時間変化に対する考察

Flagella に対して、人に対してインタラクションをしているように感じた観察者が複数名見られたことから、アーム同士のインタラクションが動きの意図を感じさせ、知性を持っているように感じさせる事が出来ることがわかった。基本的な往復動作だけで柔らかい印象の実現は可能であるが、互いに避け合うような動作を与えたことで、より生物らしい印象につながったと考えられる。これは、運動に時間連続性を与えた効果であると考えられる。

また、受動回転を行う指に対して意図を感じる観察者が多かった点も興味深い知見である。重力などの外力の影響を強く感じられる動きに対しては非生物的な印象が得られることは先行研究により示されていたが、錘によって重心をずらすことで、重力に起因する動きでありながら意図を感じさせる動きが実現できた。重心移動と軸受けによって低摩擦で動くことがなめらかな印象につながり、生物のように感じられたと考えられる。

### 3.7.3. 人に対する印象に関する考察

作品として展示した際、多くの人々が Flagella に手を伸ばし触れようとしていたことから、外観及び動きのデザインの結果、Flagella に対して安全な印象を持ったと考えられる。また、ゴムで出来ているみたい、といった反応が多かったことから、形の変化によって柔らかい印象が実現できたと考えられる。

## 第4章

# Planula

---

弾性変形を伴って人と関わるセンサロボット

## 4.1. Planula の背景

人間とのインタラクションは、人と共存するロボットの基本的な機能である。人型や生物型においては、人とのコミュニケーションやインタラクションを主目的としているものが多い。人型や生物型ロボットでは、身体構造が複雑であり、人間とのインタラクションに対する応答動作がシーケンスによって行われることが多い。例えば、頷きや首振り、ジェスチャーといったように、予めプログラムされた動作の再生が行われる。このようなインタラクションでは、通常動作からインタラクション動作への遷移に連続性がなく、遅延が生じたり、反応が悪く感じられたりするなど、運動の変化がなめらかではなくなる。一方で、人とのインタラクションが主目的ではないが、Walter の亀型ロボットは光刺激に対してダイレクトに動きを変化させるシステムを持っており、単純な反応であるが時間変化に応じて常に動きが変化する様子が、鑑賞者に生物のような印象を与えた。

本章では、人とのインタラクションに伴う動きがなめらかに時間変化するように、Walter のロボットのようなセンサの刺激に対して単純に応答する制御手法を用い、なめらかな形の変化を伴って人とインタラクションを行うロボット Planula について述べる。Planula は、弾性素材の支柱によってセンサを支持し、ワイヤーを用いて支柱を変形させることで身体をくねらせながら動くセンサロボットのプロトタイプである。

ロボットはセンサと制御及び知能、駆動系を合わせたシステムであるが、それぞれの要素がネットワークによって接続され、環境全体をひとつの知能空間とする研究が行われている。我々を取り巻く環境の至るところにセンサを埋め込み知能化する、Ambient Intelligence と呼ばれる研究である。スマートハウスやユビキタスホームと呼ばれる家を知能化する実証実験もなされており、将来このような技術が我々の生活に取り入れられると考えられる。

このような知能空間では多数のセンサが配置される。ネットワークロボットにおけるセンサ群はアンコンシャス型ロボットと呼ばれ、文字通り人が意識しないように隠す設計がなされている [65]。現在、環境に埋め込まれたセンサは隠し、インターフェースは人型ロボットに一任する設計が行われており、これはネットワークロボットの特徴を活かした設計方略といえるが、一方で、隠されたセンサによっていつの間にかデータを取得されることの不気味な感覚も生じることも予想される。Zagler らはスマートホームの社会実験を行い、その結果からユーザーのモニターを可視化することは不快である一方、センサを完全に隠すこともユーザーに不気味さや恐怖を与えるため、センサを隠すか表出するかについて良いバランスを発見する必要があると考察している [66]。また、人間との接触を伴うような、隠すことが難しいセンサが導入されることも予想される。

本章で提案する Planula(図 4.1)は、従来アンコンシャス型と呼ばれ隠されていたセンサに生物のような振る舞いを与え、隠すのではなくデータ取得を行う環境知能であることを積極的に表出する、新しいアピアランスの在り方のプロトタイプである。従来隠されていたセンサ単体をロボットとしてデザインすることで、環境が知能を持って振る舞う様子を、我々が生物の振る舞いから感じ取るのとおなじように自然に読み取れるようにすることを目的としたデザインである。

本研究では、人が触れることで情報を取得する接触型のセンサにおける、なめらかな形の変化及びインタラクションを開発する。

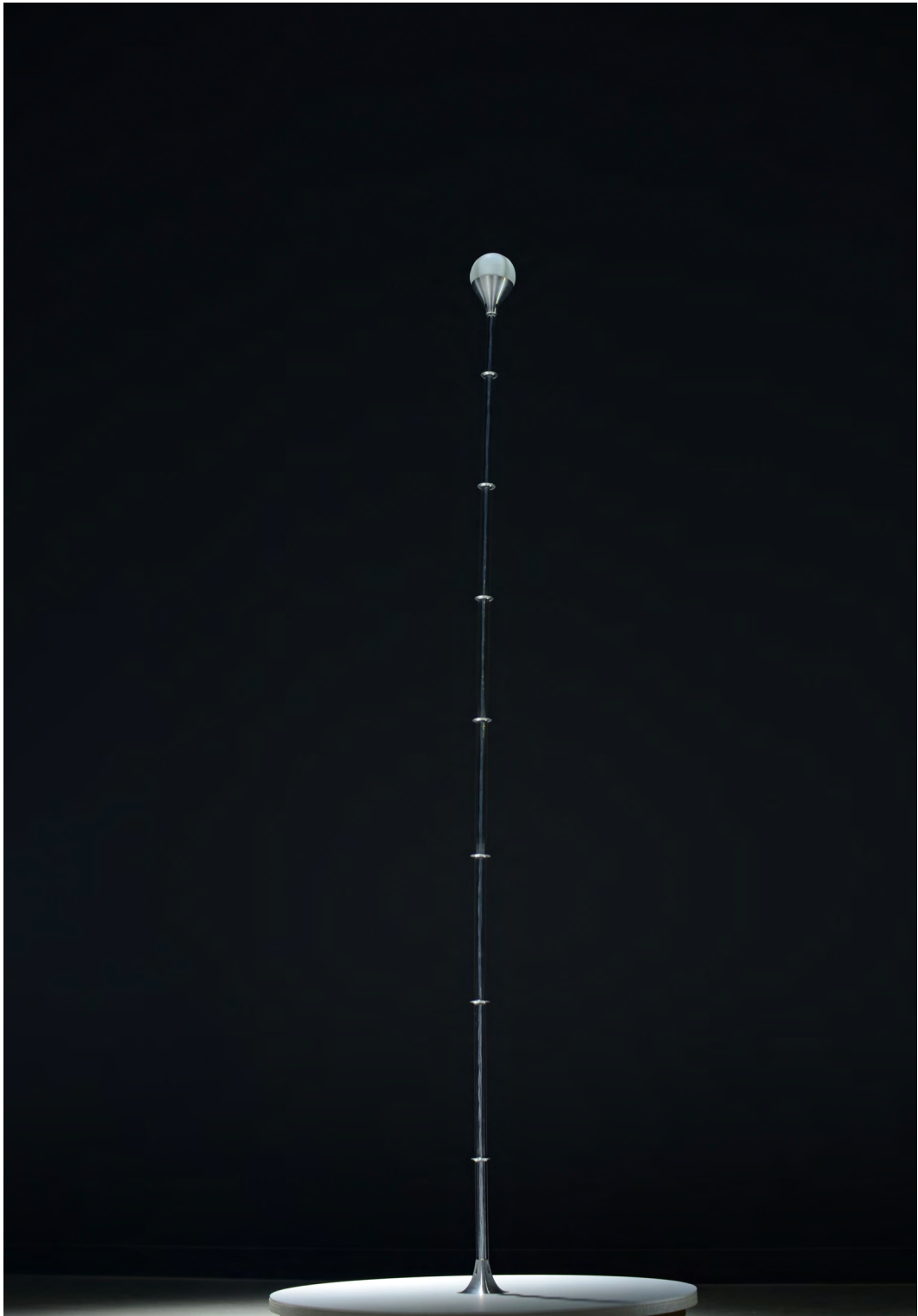


図 4.1: Planula

## 4.2. Planula のアプローチ

石井は、コンピューターとのインターフェースにおいて周辺感覚によるアウェアネスが活かされていないことを問題視し、Ambient Media というインターフェースのあり方を提示している [67]. ユーザーが情報の気配に認知の周縁で気づくようにデザインすることで、認知負荷の低い形で情報の認識を可能にし、フォアグラウンドのインターフェースとの遷移をスムーズにするメディアである。本研究では環境知能の振る舞いをユーザーに認知させるメディアのデザインとして、ディスプレイ表示や言語を用いたエージェントロボットのようなフォアグラウンドにおけるインターフェースではなく、空間にさり気なく存在し、周辺感覚で知覚出来るようなインターフェースとしてデザインする。空間に埋め込まれた照明器具としてデザインし、人を感知しようとゆるやかに動く。ユーザーが認知の周縁でこの振る舞いに気づき、先端に触れるという主体的な行為をアフォードするようなインタラクションデザインを探る。

本研究で提案する Planula は、ネットワークロボットで一般的に用いられる擬人化ロボットとは違い、目や顔などといった人間の外観特徴を持たない。人間のような外観からはユーザーは人間のような高度な知能を期待するため、高度な知能を持たないシステムを擬人化することは期待する知能とのギャップを生むことが知られている [68]. 本研究は、人を感知し手による接触を誘発しようとする環境知能の振る舞いの表出のみを目的としており、必要以上に人を模した外観を与えることは相応しくないと考えられる。先行研究からも、簡単な知能や態度の表出においては生物を模倣した外観が必ずしも必要ではなく、動きによって実現可能であることが知られている [69].

本研究では、抽象的な形状のセンサデバイスを用い、動きによって生物のような認知を与えるような外観デザインを行う。生物を模倣しない抽象的な形状を用い、動きやインタラクションによって生物のような認知や情報提示を行う研究は、Walter[55] や Brooks[19] の研究をベースとした床面移動型のロボットを用いて行われることが多いが、特性上姿勢が低くなる傾向にあり、またバッテリーなどの動力が必要となる。本研究では、人の手で触れやすい位置でセンサノードに生物のような柔らかい動きを与えるための形態デザイン、駆動手法のデザインを行う。また、触れることをアフォードし、触れたことによって環境知能が人を検知したことをユーザーに気付かせるようなインタラクションデザインを提案する。

本研究では、自然物の柔らかい変形の動きを実現する手法として、弾性素材を変形させながら動くロボットの構造、動きのデザインを提案する。

## 4.3. Planula の関連研究

### 4.3.1. 生物のようなインタラクティブアート表現

Uekiらは、柔らかい膜に包まれ空気を送ることによって呼吸をしているように動く照明型デバイスを開発し、人の行為に応じて光り方や鼓動の速度が変化するインタラク션을設計している [70]. 内部にセンサを持った照明器具を生物のように動かす点で本研究と類似するが、本研究では移動を伴う動きを扱う点で異なる. 中安らの Tentacles は光ファイバーによって先端が光るイソギンチャク状の触手を多数配置し、形状記憶合金アクチュエーターで動くアート作品である [40]. 人の手の動きを検知して動く点では本研究と同様であるが、対象を群として動きを設計し、それぞれの触手の動きはシンプルであり、大きな移動は行わない. 本研究は、触手のように蠢く動きではなく触角のように周囲を感知するような移動を目的とする点で異なる. Public Anemone[71] は、原始的な生物をモチーフとしたロボットであり、既存の生物に類似しない外観で人とのインタラククションを行う点で本研究と類似するが、本研究では抽象度の高い形状と動きに注力している点で異なる.

河野らによる lapillus bug は、粒子を超音波によって浮遊させ、水平移動を制御することで生物のような動きを実現している [72]. 実際に浮遊させることで空中を漂う生物的な動きを実現している点で優れているが、特性上動かす対象は微粒子に限られる. 本研究では人を感じ取るセンサノードを動かすことを目的としており、このような手法は適さない.

山中の製作した Cyclops[7] は、人に近い外観を持っているが単眼で表情はなく、移動もしないロボットであるが、人を目で追う動きだけを人らしくデザインすることで、鑑賞者は環境をカメラによって知覚しようとする知能システムであることを理解し接した. 本研究はカメラではなく、人の接触を検知する触覚センサを用いて、人を知覚しようとする動きと、知覚したことを人に伝えるインタラククションの実現を目指すものである.

### 4.3.2. 環境知能の擬人化表現

南らは環境知能のあり方のコンセプトとして「妖精・妖怪」の住む世界を示し、まっしゆる一むというキャラクターによって擬人化している [73]. 本研究も環境知能の生物のようにデザインするが、キャラクター化するのではなく、インタラクティブな人工物としてデザインする点で異なる. また、ゆかりプロジェクトでは対話型インターフェースを子供のメタファで設計するのに対し、居住者を見守る環境知能の姿に母親のメタファを与えている [74]. しかしここでは母親のはたらきをユーザーに伝える設計はされていない. これに対



し、板垣らは環境知能に呼吸のような表現を与えることで、ゆるやかで認知負荷の少ない表現で部屋全体を生物のように認知させるシステムを実現している [75].

これに対して本研究は、環境知能の人をセンシングするという部分に着目し、人の接触をセンシングするという行為に特化した生物的な表現を探るものである。

## 4.4. Planula

### 4.4.1. Planula の概要

本論文で提案する Planula は、人による接触を感知しようとするセンサの振る舞いを、生物の触角のような外観と動きを付加することで表現することを目指したセンサロボットのプロトタイプである。人の接触を検知するセンサロボットの外観デザインのプロトタイプであり、アート作品である。本研究では、環境に埋め込み、人間が手で触れやすい高さでセンサノードを移動させるため、空間に生えた触角のようなデザインを提案する。センサ部分を弾性体の支柱の先端に取り付け、ワイヤーによって支柱を曲げることで先端を移動させる。手を用いてインタラクションし易い高さを漂うような移動を可能にし、また、駆動部とセンサ部を分離することで、インタラクションの主体であるセンサ部をシンプルな外観にすることが可能になる。Planula は、センサを保持した先端を触角のように動かし、人と接触すると生物のような回避運動を行い、感知する感覚を持っていることを鑑賞者に提示する。

### 4.4.2. Planula の外観デザイン

Planula は、弾性体の支柱が地面から垂直に生えるように伸び、その先端に電球のような涙滴型のセンサデバイスを配置したデザインである。

手で触れることで人を感じ取るセンサをインタラクション主体とするため、人の手に触れやすい高さにセンサノードを配置する設計とした。センサノード自体を生物に類似した形状にせず、動きによって人を感じようとしている生物的な印象の実現を目指した。抽象的な形状による生物的な表現の先行事例として床面移動ロボットを用いた研究が多い。これらの移動ロボットの2次元の簡単な移動によって意図を認知させることが出来る特性や、人との距離感をインタラクションに用いることの出来る特性を応用するため、センサノードに2次元的な移動を与えられるような形態のデザインを考案した。

センサを有するデバイスを手に触れやすい高さで2次元的な移動を可能にする構造と

して、センサデバイスを支柱の先端に取り付け、支柱を曲げることで動きを生み出すデザインを採用した。センサ部分は発光させ、支柱には透明なアクリル樹脂のパイプと繊細なワイヤーを用いた。支柱を目立たせず、センサを保持する先端部分を目立たせるよう外観をコントロールすることで、鑑賞者の意識を先端部に向け、インタラクション対象としての認識を促すことを意図している。先端は電球のような涙滴型のデザインであり、直径50mmの球から支柱につながるようななめらかな面の変化を与えている。形状から特定の生物を連想することのないよう、球を基本とした抽象度の高い形状を用いた。また、特定の生物とは似ていないが、生物の触角を感じさせる外観特徴や動きを持つメタフォリカルな表現であり、外界を感知する存在であることを暗示するデザインといえる。先端の発光デバイスの外装は上部の樹脂部品と下部のアルミニウム部品によって構成されている。上部はUV硬化アクリル樹脂を光造形によって造形したもので、半透明で光を透過する。外側を研磨して全体を滑らかにするとともに細かい傷をつけることで、内部の光を拡散する役割も担っている。下部のアルミニウム部品は構造材となっており、支柱を曲げるためのワイヤーの固定、照明基板、センサを保持している。

#### 4.4.3. Planula の構造設計

Planula はセンサを備えた発光デバイス、支柱とそれを駆動するためのワイヤー、ワイヤーの巻取りを行うモーター、Mac OS 上で動作する制御プログラムによって構成されている。

全体の構造を図4.2に示す。支柱には外径8mmで内径6mm、長さ1000mmのアクリル製のパイプを用いる。金属の支柱と異なり剛性が低く、小さな力でも変形する。このパイプに対してワイヤーを用いて張力をかけることで、変形する弾性体の支柱として扱う。支柱の両端にはアルミニウム製の部品でパイプを上下に挟みこむように取り付け、その間にステンレス製のワイヤーを同一円周上に4本等間隔に張っている。先端の発光デバイス側でワイヤーを留め、もう一端ではそのままワイヤーを通しその先のモーターにつなげている。

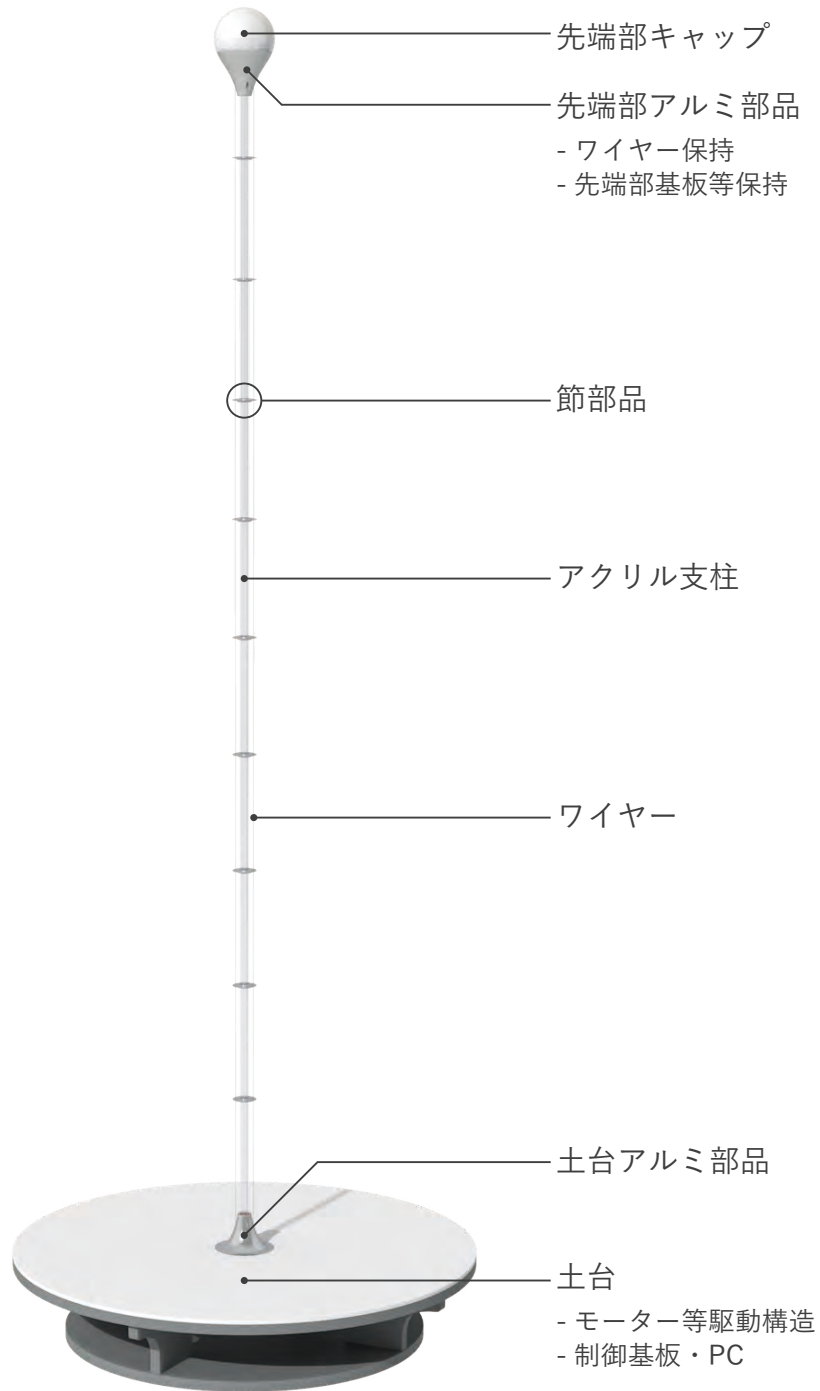


図 4.2: Planula の構造 (CG)

モーターによってワイヤーを巻き取るとアルミ部品間のワイヤーが短くなり、短くなったワイヤーの側に傾くように支柱が屈曲する(図4.3)。この操作によって、先端の発光デバイスの移動を実現する。モーターは1つにつき2本のワイヤーを操作し、プーリーを回転させることで一方のワイヤーを引っ張ると同時に逆側のワイヤーを緩める。この1対のワイヤーを対角に配置することで一軸の動きを制御する。本システムではこのモーターを2つ直交して用いるため、4方向とそれらの合力によって支柱が全ての方向に曲がるような動きを実現する。支柱には、ワイヤーが支柱に沿うように保持するための7つの節部品を配置する。これによってワイヤーと支柱の距離をほぼ一定に保ち、張力が1点に集中しないようにする。ワイヤーは支柱の下部でプーリーを用いて90°曲げ、2つのモーターが互いに干渉しないよう土台部分に設置する。また、ワイヤーの細かい伸縮や振動を抑えるため、バネを用いて張力を与える構造を与えた。ワイヤーを駆動する土台内部の構造は、図4.4のCGに示す。実際のワイヤーは金属だが、CGではそれぞれの軸で色分けしている。

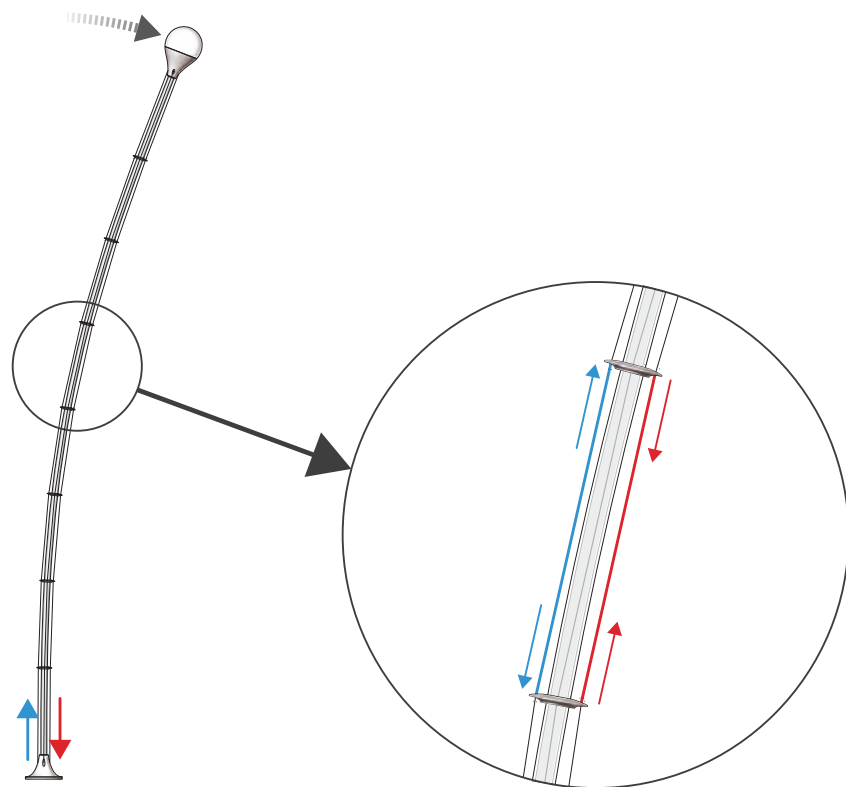


図4.3: 屈曲の仕組み

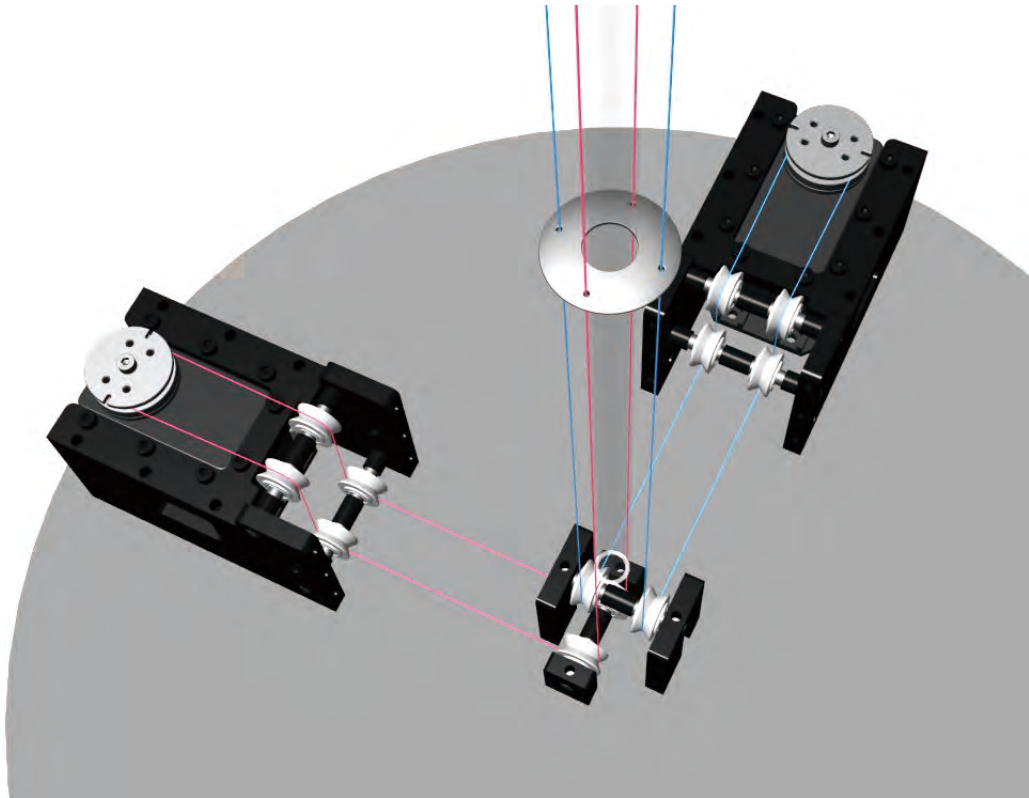


図 4.4: 土台の内部構造 (CG)

先端部の外装は、前述のとおり構造材であるアルミニウム部品と半透明な樹脂製のキャップで構成されている。図 4.5 はキャップを外した状態の先端部の CG 図である。先端部アルミニウム部品はワイヤーを留める構造を持ち、照明をコントロールする基板を保持しており、アルミニウム製の静電容量センサ部品も保持している。センサ部品はワイヤーと同様に円周上に  $90^\circ$  ずつ開いて 4 つ配置され、樹脂キャップの球体形状に沿う形状となっている。センサはキャップの内側にあるが、静電容量センサは非接触で人体の検知が可能であり、キャップの外側からの人の接触を検知する。本研究では、これらの 4 つの静電容量センサを、人が先端部に触れようとした際の位置検出に用いる。静電容量を入力インターフェースとして用いた位置検出は Zimmerman[76] によって先行研究がなされ、福地らによっても詳細な先行研究がなされている [77]。本研究のように曲面形状を持った外装部品の内側に複数の静電容量センサを配置して人体の検出を行う先行研究として榎原らの TubTouch[78] が挙げられる。TubTouch では、隣接した複数のセンサを用いてタッチ位置やスライド操作の検出を行っている。Planula のセンサはこれを 3 次元的に配置した構造である。複数のセンサを円周上に配置し円周上での位置を検出する。センサが 3 次元形状であるため、確実な位置の検出は難しいが、本研究ではどの方向から触られているかを重視するため、このようなセンサ設計を用いている。発光部には出力 1W のハイパワー

LEDを用いて、PWM制御によってゆるやかな明滅を行う。人の接触を感知した際には光り方を変化させ、検知したことを光によってもアピールする。センサとLEDを制御する基板は先端部に設置され、この基板への電源と通信のためのケーブルはパイプの内側を通して配線した。ケーブルをパイプ内に通すことで、支柱がケーブルの露出によって煩雑な見た目になることを防ぐ。また、ケーブルには透明な皮膜の銀メッキ線を用いることで、アルミニウムとアクリル樹脂によって構成される全体の外観と揃えた。

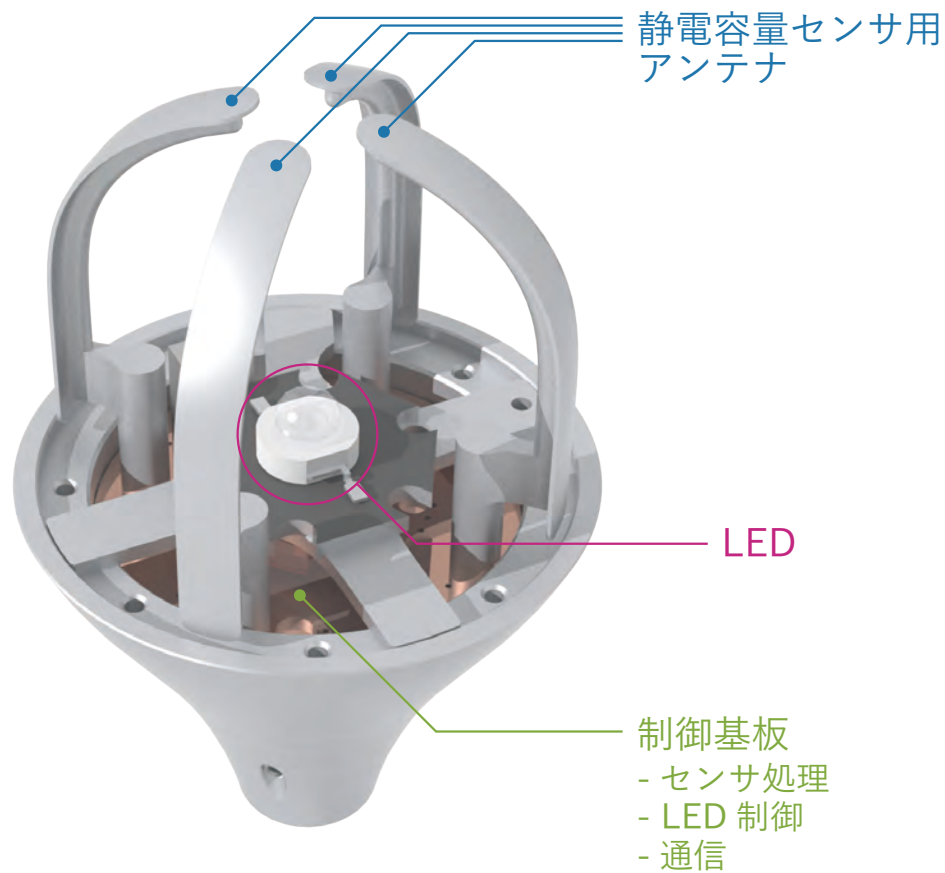


図 4.5: Planula 先端部の内部構造 (CG)

#### 4.4.4. Planula の制御設計

Planula の制御には、Mac OS X 上で動作する制御アプリケーションを用いている。制御アプリケーションは Mac OS X の開発環境である Cocoa を用いて開発した。制御構成は図 4.6 のとおりである。Planula の動作を生み出すモーターはシリアル通信によって制

御可能で、正確な位置制御が可能なサーボモーターである Robotis Dynamixel RX-28 を用いる。制御アプリケーションによって生成した動作からモーターの制御信号を発生し、制御を行う PC の USB ポートから出力する。USB からモーターの通信方式である RS-485 形式の信号へ変換する基板を経由し、制御アプリケーションによる命令をモーターに与え駆動する。センサと LED を制御する基板と制御アプリケーション間の通信プロトコルにもシリアル通信を用いる。静電容量センサを制御基板上の PSoC マイコンで処理し、離散化したセンサ値を制御アプリケーションに送る。センサの情報を制御アプリケーション内で処理し、接近方向を検出する。

前節で述べたとおり、Planula の駆動はワイヤーによって直交する 2 軸方向に支柱を曲げ、それぞれの合力によって支柱を全方向への曲げを可能とする。制御計算においては、曲げた際の先端位置の目標点を 2 次元座標上で近似し、その x 成分と y 成分をモーターの出力に変換して送信する。そのため、Planula の動作範囲は近似した 2 次元座標における支柱を中心とする円内となる。

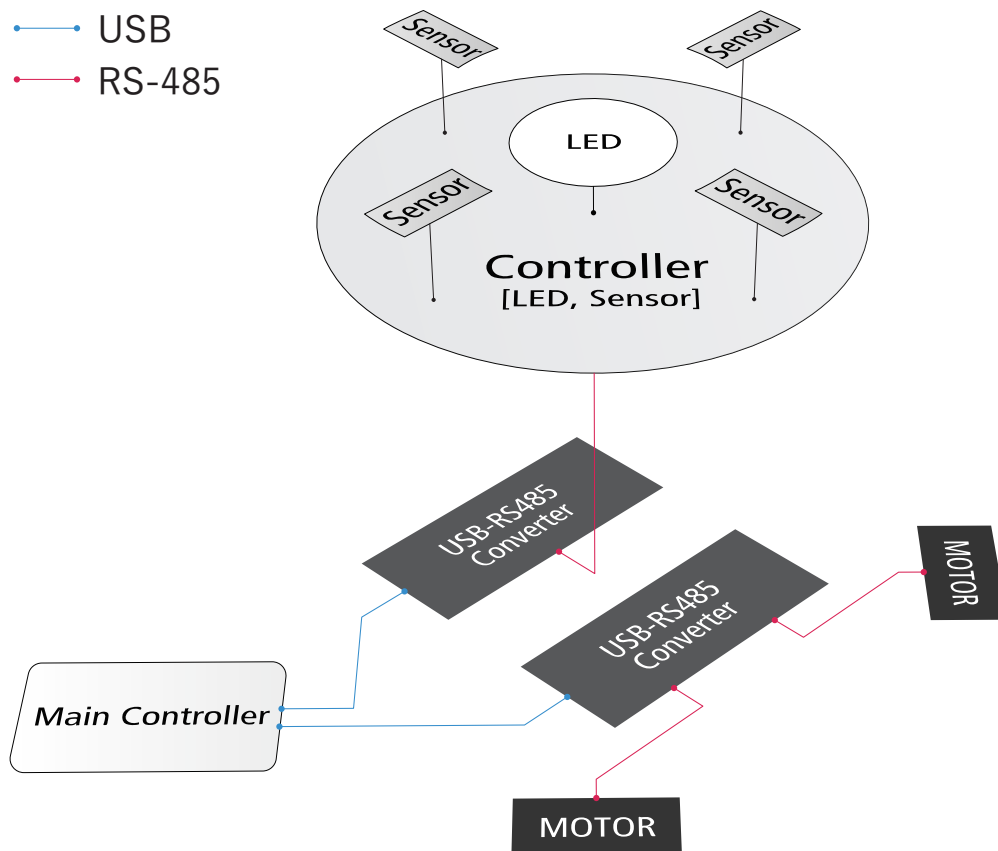


図 4.6: Planula の制御システム

#### 4.4.5. Planula のモーションデザイン

制御アプリケーションは、モーターとセンサ /LED 基板との通信機能と、動作の生成機能を有する。Planula の動きは、人を探すように漂い続ける基本動作と人を感じて避けるように動くインタラクション動作によって構成される。

##### 基本動作の設計

Planula の動作範囲は、支柱を中心とした円状となる。この円の中で自由に動き続けられるよう、以下の3種類の動作生成アルゴリズムを実装し検討を行った。Planula は、人を探すように動くことを目的とするため、基本動作の原則は周囲を探るように移動しながら可動範囲を網羅するように動くこととした。先端部のセンサのみでは狭域なため、周囲を探るような動きを与えることで検出範囲を広げ、広範囲でのインタラクションを誘発することがねらいである。

##### 基本動作 1：円周上の動きと往復運動の組み合わせ

これは、支柱の周りを回遊するようにゆっくりと先端を回転させ、支柱から遠ざかったり近づいたりするような往復運動を加えたものである。これを基本動作 1 とする。制御のために近似した 2 次元座標上の動きで表すと、

$$x = Amp(\phi) \times \cos(\theta)$$

$$y = Amp(\phi) \times \sin(\theta)$$

となる。往復運動を生み出す  $\phi$  の関数  $Amp(\phi)$  は

$$Amp(\phi) = A_0 + a \times \sin(\phi)$$

である。 $\theta$  と  $\phi$  はそれぞれ時間によって線形に変化する。 $A(0)$  は回転運動の基本半径であり、 $a$  は往復運動の振幅を表す定数である。等速円運動の際の半径  $Amp(\phi)$  を正弦関数による往復運動によって変化させることで動きを生み出す。この時の 2 次元座標上での軌跡を図 4.7 に示す。点は一定時間毎に打たれており、点の濃度が時間変化を示す。濃度の低い点から高い点への移動である。



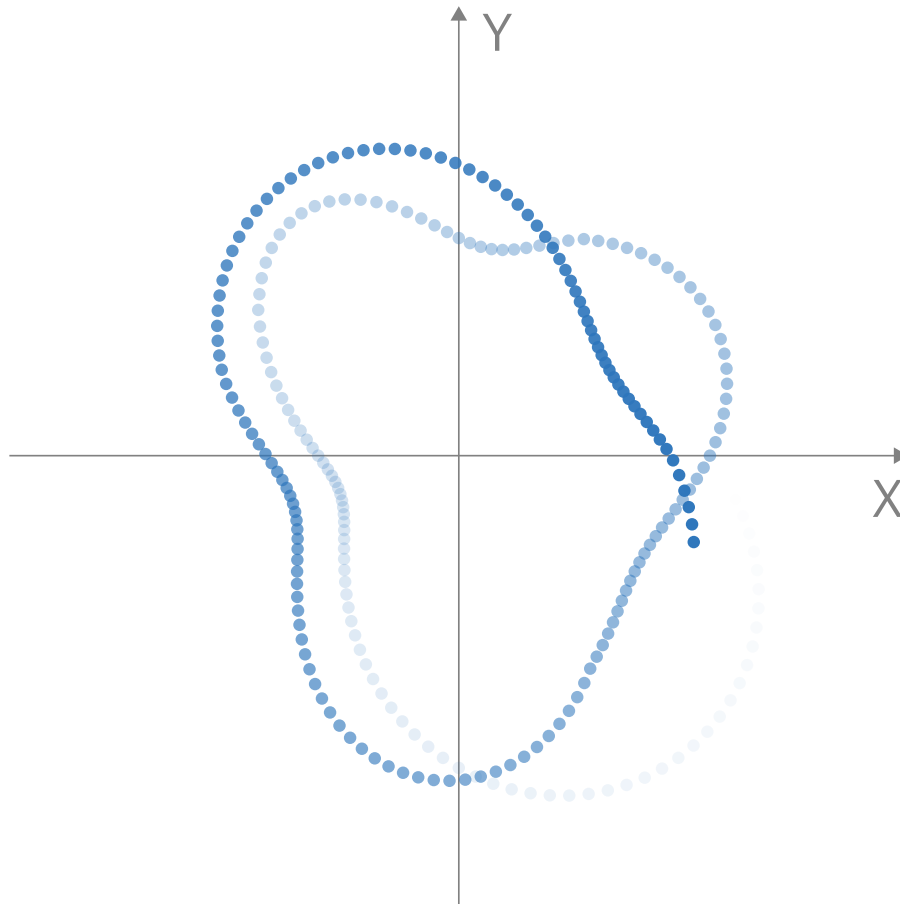


図 4.7: 基本動作 1 の 2 次元座標上での表現

### 基本動作 2：2 種類の往復運動の組み合わせ

これは、Planula の運動に用いる 2 軸それぞれで往復運動を行う。これを基本動作 2 とする。2 次元座標で表すと

$$x = a_x \times \sin(\theta)$$

$$y = a_y \times \sin(\phi)$$

となる。ここでも  $\theta$  と  $\phi$  はそれぞれ時間によって変化する。x 軸と y 軸で振幅と波の速さを変えることで、単振動の組み合わせながらリサージュ曲線のような複雑な軌跡を実現する。これをベースに振動毎に振幅や速さを変化させ、ランダムさを持った動きを実現した(図 4.8)。

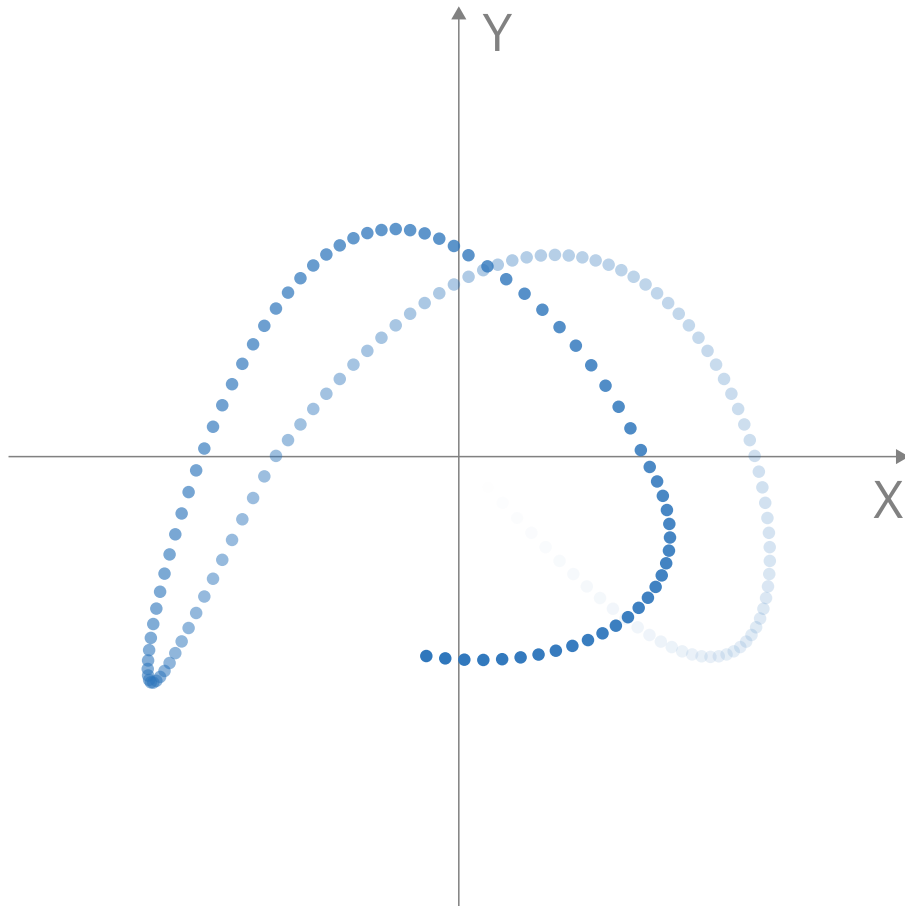


図 4.8: 基本動作 2 の 2 次元座標上での表現

### 基本動作 3：ランダムに決定した位置への移動

これは前者 2 つの手法とは異なり、円運動や振動を用いない手法である。近似した 2 次元座標上で目標位置をランダムで決定し、その点に向かって移動する。目標点に到達したら別の目標点を設定するという制御を行う。これを基本動作 3 とする。前者の方法でも同様であるが、Planula には弾性素材の支柱を用いているため、動作時に弾性による振動が起こる。前者のアプローチはその弾性による振動を動きの一部と同化させるために三角関数を用いた動きを用いている。三角関数を用いないこの手法では振動を出来るだけ小さくするため動きのはじめと終わりをゆっくりと加減速するように補完を行った。補完には Penner による Easing 関数 [15] を用いた。ここでは動作開始時と終了時双方をゆるやかに速度変化させるため、二次関数を用いた Quadratic EaseInOut 関数を用いた。2 次元座標で表すと

$$\begin{aligned} x(t) &= x_{start} + P(t) \times (x_{goal} - x_{start}) \\ y(t) &= y_{start} + P(t) \times (y_{goal} - y_{start}) \end{aligned}$$

と表せる。ここで、 $P(t)$  は、時間によって線形に変化するパラメータ  $t$  によるイーディング関数であり、

$$\begin{aligned} P(t) &= 2t^2 (0 \leq t < 0.5) \\ P(t) &= -2t(t-2) - 1 (0.5 \leq t \leq 1) \end{aligned}$$

である。 $x(t)$  が  $x_{goal}$  に到達すると、現在地を  $x_{start}$  にして、新たな  $x_{goal}$  を設定する (図4.9)。

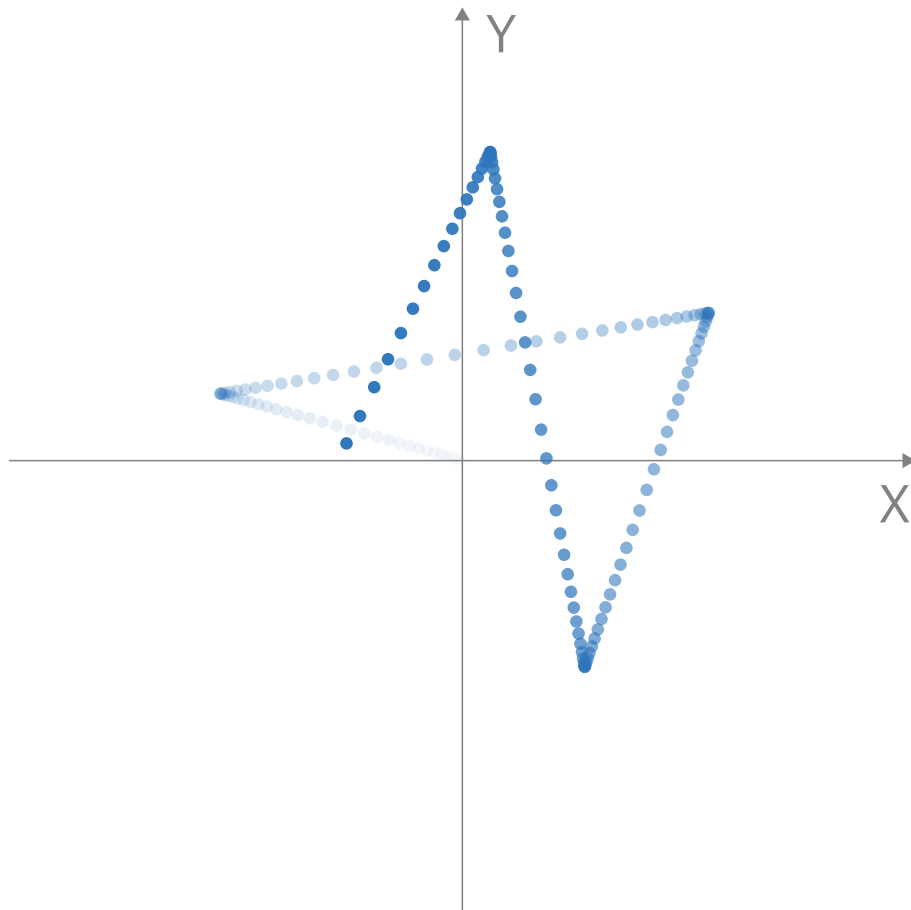


図4.9: 基本動作3の2次元座標上での表現

#### 4.4.6. Planula のインタラクションデザイン

前述の基本動作に加え、静電容量センサを用いたインタラクティブな動きを設計した。センサを保持した先端部に人が触れると、人から離れるように先端部が移動する。接触に対して避けるように動くのは生物の基本的な振る舞いであり、センサが人を感知した、ということユーザーに伝えるための動作としてこの動きを採用した。また、この手から離れる動きは、センサノードが情報の取得を終え、また基本動作に戻るという遷移のデザインである。静電容量によるセンシングはタッチセンサとしてしばしば使われるが、センサとなる電極と人体との間に距離があっても検出が可能である。距離によって電極にたまる電荷が変わるため、本研究ではこれを対人の距離センサとして用いる。回避動作の際は、センサ値に比例する力を先端部の運動に加える。センサ値は距離が小さくなるほど大きくなるため、先端部に人の手が近づくほど大きな力で回避運動が発生する。

本作品はセンサを保持した先端部がインタラクションの主体であり円形の範囲内を移動する。このため、複数人によって多方向から手を近づけられたり両手で左右から手を近づけられたりすることが想定される。インタラクションの際に手で触れようとしたことに反応して先端部が逃げるような生物的な認知を実現するには、センシングから動きの発生へのレイテンシが少ないことが求められる。しかしながら、センシングによる動きの発生を過敏に設計し過ぎると、前述のように複数方向から手を近づけられた際大きな振動運動が発生する。これを避けるため、センシングに対する回避運動は、先端部への力、加速度として与え、その移動速度は和分によって徐々に増えていくように設計した。

#### 周期的な基本動作の際の回避アルゴリズム

基本動作が前節の円運動と往復運動を用いた基本動作1と基本動作2の場合、回避動作は基本動作の周期運動が崩れないような動きとする。回避運動による加速度は基本動作に加算し、回避運動によって人から離れた際または人が近づけていた手を離れた際は、また基本動作にスムーズに移行するため回避方向への移動をキャンセルするように動く。基本動作と回避運動は独立して計算を行い、それぞれの結果を足しあわせた動きを行う。

回避運動の加速度は、接触方向を検出するための4つのセンサそれぞれの値からベクトルを計算し、その合力とした。それぞれのセンサ値を  $S_0 \sim S_3$ 、センサの検出方向の逆ベクトルを  $\vec{d}_0 \sim \vec{d}_3$ 、センサ値と発生する力を調整するための定数を  $w$  とすると、加速度ベクトル  $\vec{a}_e$  は

$$\vec{a}_e = \sum_{i=0}^3 w \times S_i \times \vec{d}_i$$

となる。これを制御プログラムにおける単位時間内に足し続けることによって速度を決定する。よって回避運動の速度  $\vec{v}_e(t)$  は時間  $t$ , 単位時間  $\Delta t$  を用いて

$$\vec{v}_e(t) = \vec{v}_e(t - \Delta t) + \vec{a}_e$$

になる。このとき、速度が大きくなり過ぎないように最大値  $v_{max}$  を定め、 $|\vec{v}_e| \leq v_{max}$  となるようにする。回避運動による先端位置の変位  $Pos_e(t)$  は

$$Pos_e(t) = Pos_e(t - \Delta t) + \vec{v}_e$$

となる。 $\vec{a}_e = 0$  であり、 $Pos_e \neq (0,0)$  のとき、 $Pos_e$  を初期位置に移動させる加速度  $\vec{a}_c$  を発生させる。

#### ランダムな位置への移動の際の回避アルゴリズム

前節3のランダムに位置を決定して補完移動を行う基本動作の際は、基本動作と回避動作を切り替えて行う。接近を検知した際は、現在の目標位置を破棄し補完運動を止め、上記手法と同様にセンサ値から回避方向の合力ベクトルを計算し加算することで回避運動を発生させる。回避運動が収束した際は、再度ランダムに目標位置を設定して移動をはじめめる。

## 4.5. Planula のデザインプロセス

Planula では、構造や形の組み合わせから 4D Appearance の基本要素を開発するのではなく、実現する 4D Appearance のコンセプトを決定し、それをもとに構造を考えるプロセスでデザインを行った。

### 4.5.1. コンセプトの決定と基本構造の開発

Planula の開発においては、まず「触ろうとすると逃げる浮遊した球体」を実現する 4D Appearance のコンセプトとして決定した。

上記イメージを実現する構造として、繊細な支柱によって球体を支える構造を考えた。動きを生成する手法としては、まず移動の主体となる球体に動力を与える事を考えた。球体内部で重心移動を行う、ヘリウムガスを用いた風船とプロペラ等を用いて実際に浮遊および移動させる、といった方法である。これらの手法では先端部が重くなる、大きくなる等、イメージ通りの 4D Appearance を実現することが難しいことがわかった。そこで、球体部分には動力を与えず、支柱を曲げて先端部を動かすという構造に至った。

支柱を曲げる構造によって実現する 4D Appearance がどのようになるかを確認するために、まずは支柱をワイヤーで屈曲させる簡易的なプロトタイプを開発した。ワイヤーはモーターに接続せず、人力で引き、それを観察するという簡易的なモデルであるが、この構造がどのような 4D Appearance をもたらすかの見当を付けることは出来、作品に採用するに至った。

### 4.5.2. 素材および厚みの調整による支柱の弾性特性の検討

支柱をワイヤーによって駆動する構造の決定後、支柱の素材等のハードウェア要件の検討を行った。素材は塩化ビニルとアクリル、支柱とするパイプの径も外径 6mm~10mm、厚み 0.5mm~2mm といったものを用いて、制御のし易さや曲がり方を検討した。ここで重要な検討事項となったのは、弾性による振動特性と、動かしやすさと弾性のバランスである。樹脂素材を用いるため、運動時に振動が生じる。素材及び寸法によって弾性が異なり、振動の特性が異なる。作品に採用した外径 8mm で厚み 1mm のアクリルパイプは、検討した素材の中では硬く変形し難いものであり、動かすのに強い力が必要であるが振動は小さかったため、この寸法及び素材とした。より変形しやすい素材のものでは、小さい力で動かすことが出来操作が用意な反面、大きな振動が生じた。振動が少ない物を選定した理

由は、先にも述べているが、振動が Planula の生物のような動きに機械的な印象を与えると考えたためである。

また、ワイヤーによって支柱を曲げる際、支柱の先端と根本のみを接続すると、支柱とワイヤーが中央部で離れ弓のように見えてしまう。これを防ぐため、支柱に複数の節をつけ、その間にワイヤーを通すことでワイヤーを支柱から離れ難くした。この節の数も、実際に曲げながら検討を行い決定した。

### 4.5.3. モーション及びインタラクションのデザイン

ここでは、Planula のモーション及びインタラクションの設計プロセスについて述べる。Planula は動きおよび構造がシンプルであるため、様々な動きのパターンを検討した。

#### (1) 接触の回避運動のみの実装

まず、「触ろうとすると逃げる」という初期のコンセプトから、人間による接触を検知し、回避運動を行う機能のみを実装した。この状態では、基本的に静止しているため、インタラクション時のみ運動を行っても生物のような印象にはならなかった。

#### (2) 人間に対する接近運動と接触の回避運動の実装

次に、接触の回避に加えて人間に対する接近運動を実装した。駆動部分を保持する土台部分に赤外線測距センサを円周状に配置し、周囲にいる人を検出する。センサの検出値から周囲に人がいるかどうかを判断し、接近を検出した方向に先端を移動する。赤外線測距センサの検出対象は人間に限らないが、周囲に何も無い普段の状態との差分を用いることで、寄ってきた動体である人間を検出する。先端の接触センサは静電容量センサを用いるため近距離での人間の接触のみを検知する。これによって、人が居る方に先端を移動させ、触れられると回避するというインタラクションを実現した。

このようなモーション及びインタラクションを実装して展示を行ったところ、人間への接近運動はあまりインタラクションの誘発につながらなかった。人間のいる方向に向かって先端を移動するとそこで止まってしまうため、停止時間が長く、先に述べた回避運動のみのものとあまり変化がなかった。

#### (3) ランダムな移動と接触に対する回避運動の実装

前述の方法においては、停止時間が長くインタラクションの誘発やなめらかな動きの変化が実現できなかったため、動き続ける事を条件としてランダムな移動運動を実装した。4.4.5 項で述べたとおり 3 種類の動作生成アルゴリズムを開発し、それぞれを実装した状

態でプロトタイプ作成および展示を行った。赤外線センサを用いた前述の方法と異なり、ランダムに移動するだけの無駄な動きであるが、先端に対して触れるインタラクションの誘発には効果的であった。また、複数の鑑賞者から「人間を探している」という印象が報告されたことから、この基本運動が生物のような印象を実現し、目的を持った動きに感じられたことがわかった。

本作品では抽象的な形状を用いており、動作を行っていない状態では生物のような印象は得づらい。このため、特に動きにおいてなめらかに動き続けることが生物のような印象につながり、インタラクションの誘発等において有益であることがわかった。

本作品の初期コンセプトは「浮遊している球体」であった。これを基に構造や動きを開発したが、実際に浮遊させているわけではないため、コンセプト通りの動きの印象は困難である。また、支柱の弾性による振動も動きの印象に強く影響する。本研究では作品を製作している途中段階で、浮遊するような印象を目指すのではなく、用いている構造の特性、特に支柱の弾性特性をふまえた制御手法の開発およびパラメーターの調整を行った。この事が、Planulaの4D Appearanceにおけるなめらかさの実現につながったと考えられる。

#### 4.5.4. 素材の弾性に起因する振動の抑制

4.7.2項でも述べたが、本作品で用いた構造においては、支柱の弾性に起因する振動が動きの変化に大きな影響を与えた。弾性による振動は鑑賞者にも認知されやすく、生物とは異なる機械的な動きの印象につながる。このため、ソフトウェアとハードウェア両面において振動の影響を小さくする工夫を行った。ソフトウェアにおいては、動作速度をゆっくりとし、また急停止を起こりにくくした。ワイヤーを高速で引いたり、急停止したりすると、慣性によって先端が振動するためである。また、ハードウェアにおいては、ワイヤーに金属バネによってテンションをかける構造を開発した。バネが細かい振動を吸収することで、運動時の振動を抑えた。

バネを用いてワイヤーにテンションをかける構造は、制振において効果的であったが、一方でモーターによるワイヤーの操作も吸収してしまうという欠点も存在する。このため、回避運動の初動が吸収され動作が遅れて感じられたり、細かい方向転換等が止まって見えてしまったりするという状況が起こった。本作品で用いた手法においては、振動の制御と動きのなめらかな変化の実現がトレードオフの関係となった。このため、作品展示の際は、バネの弾性を変える、加減速のパラメーターを変える、といった操作で調整を行った。より効果的に制振と制御自由度を操作する方法の開発は今後の課題としたい。



## 4.6. Planula の評価

### 4.6.1. モーターの駆動と先端部の動き

Planula は、モーターでワイヤーを引き支柱を曲げることで先端部を移動させる構造である。モーターの回転に対して先端部がどのように動くのか検証を行った。モーターの回転角に対する先端部の水平方向の移動距離のグラフを図 4.10 に示す。モーターにはプーリーを取り付けてワイヤーを引いており、ワイヤーを最大限引ける角度は  $90^\circ$  となる。このため、グラフの横軸の最大値は  $90^\circ$  としている。縦軸で示している通り、動作範囲は半径約 300mm の円内である。前述のとおり 2 つのモーターが直交する 2 方向の曲げを制御し、2 モーターの合力を用いることで  $360^\circ$  全ての方向への曲げを実現する。このグラフでは、単一モーターのみを回転させた際の変位と 2 つのモーターの合力を用いた際の変位の 2 つのデータを示しており、ここで用いている合力方向は 2 モーターの中間方向である。よって、中間方向のグラフでは、横軸で示している角度に  $\sin 45^\circ$  を掛けた角度で 2 つのモーターを動かした際の変位である。このグラフの合力方向でのモーターの最大角度は、 $90^\circ \times \sin 45^\circ$  であり、約  $76.6^\circ$  である。

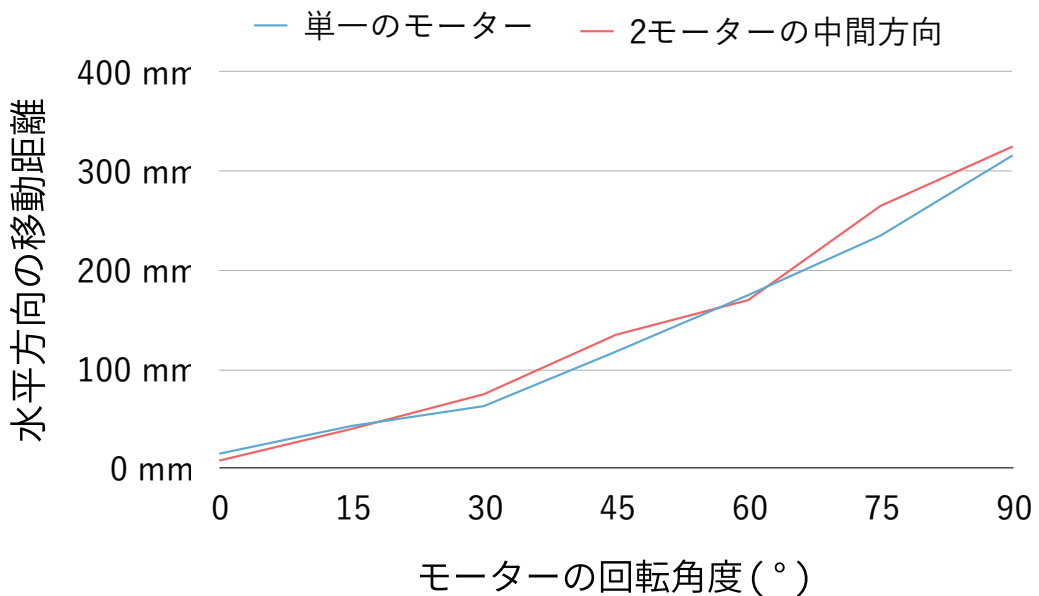


図 4.10: 先端部の水平方向の移動距離

水平方向の変位のグラフからは、角度に対する変位はリニアではないことが読み取れるが、概ね回転角度に比例して移動距離が変化していることがわかる。また、中間角度への曲げ運動でも単一のモーターを動かした場合と先端の水平移動距離に大きく差がないことがわかる。このことから、2次元座標上で動きの成分を分解してモーターに作用される方法は有効であるといえる。これらのことから、2次元座標上で生成する動きとは多少のずれは生じるが、大きくは異ならないと考えられる。Planulaにおいては、動きが鑑賞者に与える印象が重要であり、指定した位置への正確な移動は必要ではないため、アクチュエーションの精度は問題無いといえる。また、グラフの初期値が0になっていないが、これは支柱の弾性によって先端の初期位置が丁度中心にならない為である。本研究の目的においてはこのような微小な中心のぶれは問題ない。

支柱を曲げて先端を動かすため、水平方向への動きが大きくなるにつれ垂直方向にも動きが生じる。同様に垂直方向の動きを計測したグラフを図4.11に示す。弧を描くように徐々に下がっていることがわかるが、初期位置からの変位がそれほど多くなく、最低位置でも930mmを超えている。このため、2次元座標で近似した動きと実際の先端部の動きで、高さ方向のギャップはそれほど生じないと考えられる。

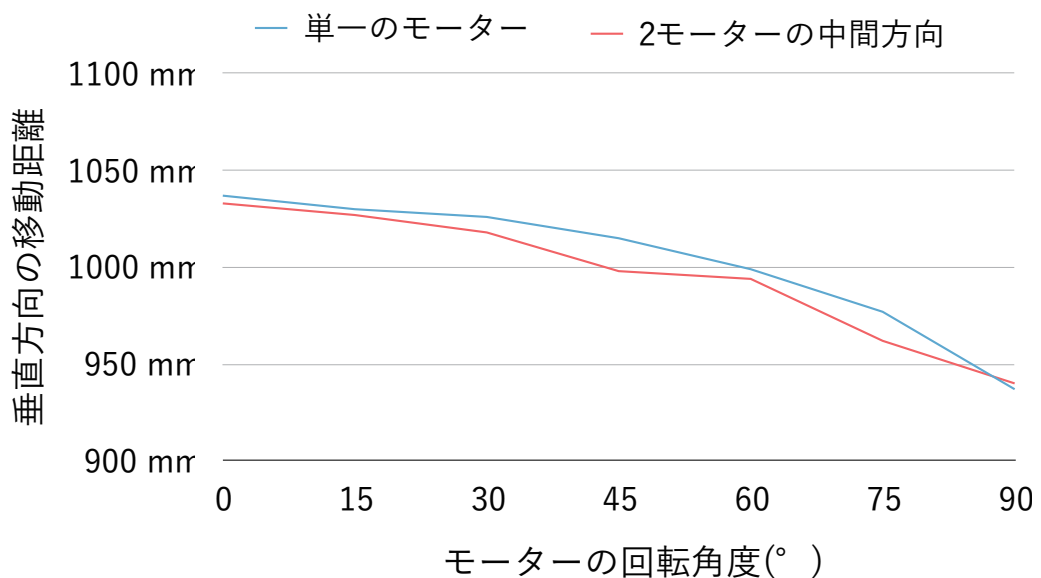


図 4.11: 先端部の垂直方向の移動距離

## 4.6.2. 基本動作の評価

4.4.5項で述べた3種類の基本動作について、実際にPlanulaにモーションを適用し、観察を行った。基本動作は、前述のとおりセンシング対象を探るように動くことを原則としている。実際に先端を移動させることで実際にインタラクションの範囲を広げるとともに、周囲を探っているような動きの認知を与えることが目標である。

基本動作1は円周状に周囲を探る動きであり、円の動きと三角関数を用いた往復運動で構成されている。基本動作2は直交する2方向の往復運動の組み合わせであり、これも三角関数を基本としている。基本動作1では、おおむね想定したとおり円を描きながら往復運動するように先端が移動したが、円の動きが機械的な印象を生み、あまり生物らしい動きとは感じられなかった。円の動きに速度変化なども加えたが、常に決まった方向に動き続ける円の動きが機械的な印象を産んだと考えられる。基本動作2では、動きにランダムさは加わったが、往復運動の印象が強まった。1と2に共通する点として、双方とも三角関数を用いた往復運動を用いている。本作品は弾性体の支柱を用いているため、この弾性に起因する振動運動が生じる。1と2の動作では、三角関数による往復と弾性による振動が混ざり、これが生物のような動きの印象を感じにくくしていると予想される。先行研究では、重力による落下運動など馴染みのある物理法則に起因する運動は非生物的印象を受けやすいことがわかっている[63]。弾性による振動もこれと同様に、身近な非生物的运动である振動が生物的印象を阻害していると考察できる。

基本動作3は、1と2の動作で問題と感じられた三角関数による振動運動を用いない動作生成手法として開発した。動きの始点と終点を緩やかに加減速することで弾性による振動を減らし、且つランダムな移動を実現することで、空中を漂うように動く印象が3種類の中では一番強く感じられた。先行研究において、単純な質点の運動において、直線的な運動に大きな方向変化や速度変化が加わると意図が感じられ生物のような認知が行われることがわかっている[46]。振動運動による連続的な運動ではなく、直線的な動きと方向転換の組み合わせにしたことにより、意図を持った生物のような動きとして認知しやすくなったと考えられる。上記の理由から基本動作3を最も適当な基本動作と判断し、実際の作品に適用した。

### 4.6.3. センシングの評価

本研究では、センサを用いて接近方向の感知を行う。図4.5で示したように、センサには先端部の半球形状に合わせた3次元形状のアンテナを用い、4つのセンサを円周上に配置する。このセンシング方式による接近方向の検出に関する評価を行った。

まず、一本の指で先端に触れた際のセンサ値を調べた。すべての方向からの接近をシミュレートするため、先端に指を触れさせた状態でセンサを保持する先端部をモーターによって等速回転させ、接近方向を常に変化させながらセンサ値を記録する実験を行った。指の接触による摩擦で回転速度が変化しないよう、十分な出力を持つよう減速されたモーターを用いた。モーターは約22rpmの速度で回転させ、センサ値は0.1秒毎に記録した。この実験によって記録したセンサ値のグラフを図4.12に示す。ここで示しているデータは2回転分であり、センサ値はマイコンによって離散化した値である。センサには取り付け方などによる個体差があるため、非接触時のセンサ値を0に揃え、同じように触った際の値をセンサ間で合わせるキャリブレーションを行っている。よってグラフの値はキャリブレーション済みの値である。横軸は時間軸であるが、等速回転を行っているため先端の回転角とほぼ近似できるため、角度で示している。

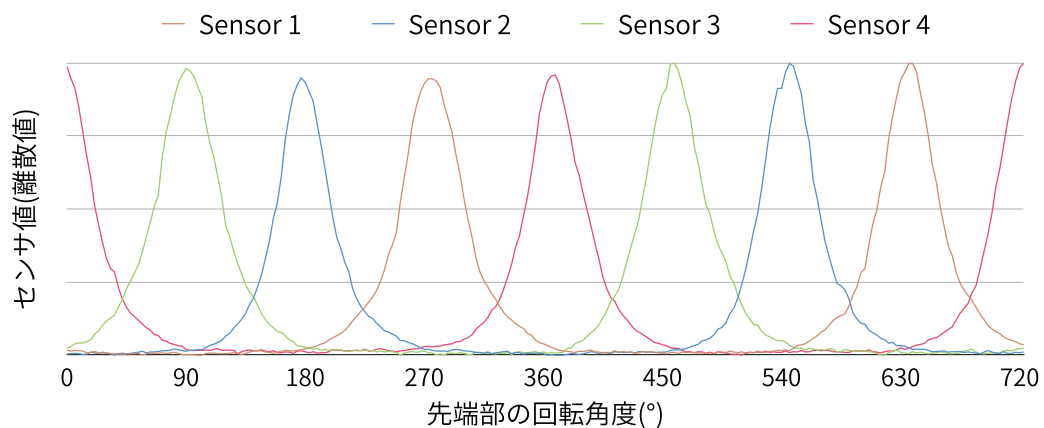


図4.12: 指先で先端部に触った際のセンサ値

指先を接触させるこの実験では、各センサへ最も接近する角度では他のセンサの値がほぼ0になり、また2つのセンサの中間点を触れていると考えられる角度では2つの値が等しくなっていることがわかる。接触の方向の推定は、各センサの取付方向のベクトルにそれぞれのセンサ値をかけたベクトルを合成することで行う。この実験における推定値は図4.13となり、センサに最も接近する4点と中間点の4点では正確に推定できていることがわかる。しかし、センサ値の減衰がリニアではないためそれ以外の点では実際の角度と推定値のずれが生じる。また、センサに最も接近する点とセンサの中間点ではセンサ値の差が大きく、回避ベクトルの大きさも異なることがわかった。

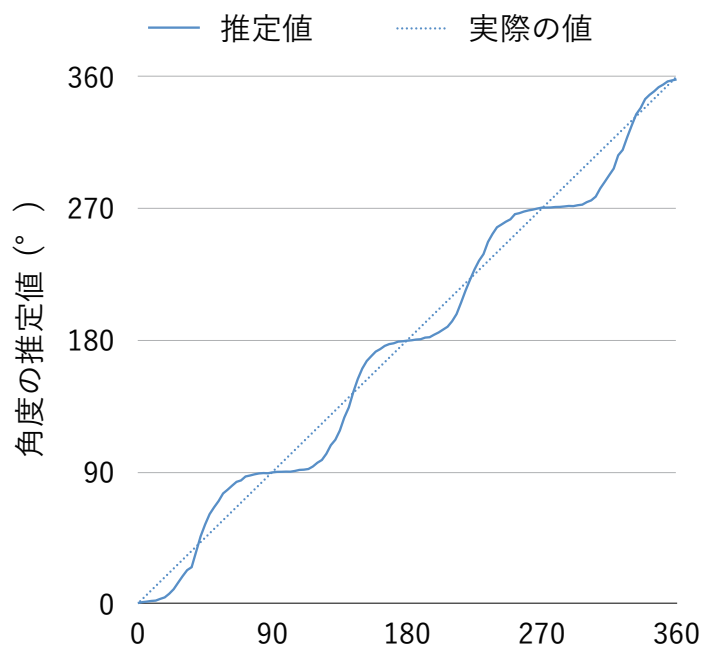


図4.13: 指を接触させた際の推定角度

本作品では鑑賞者による先端の触れ方を規定しないため、さまざまな方法で触れることが想定される。指先で触れるのではなく、掌で球体部分を包むようにして同様の実験を行った。先端部のキャップから10mmほど離れた位置で手を球体に沿うような形にし、その状態で静止しながら先端部を回転させセンサ値の変化を測定した。この測定結果のグラフが図4.14である。指先で触れた実験とは異なり常に3つのセンサが反応している。この測定結果から角度を推定すると図4.15のようになり、指一本で触れた状態より推定の精度があがっていることがわかる。また、回避ベクトルの大きさも全ての角度においてほぼ等しくなる。

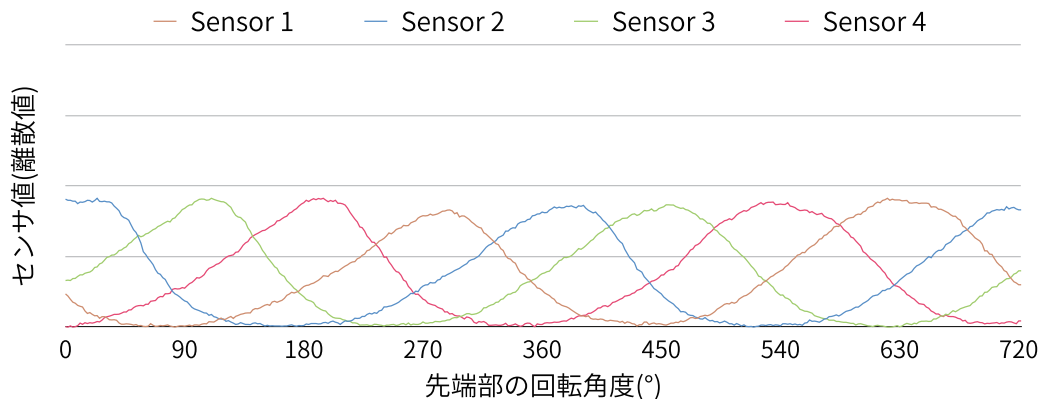


図 4.14: 掌で先端部を覆った際のセンサの値

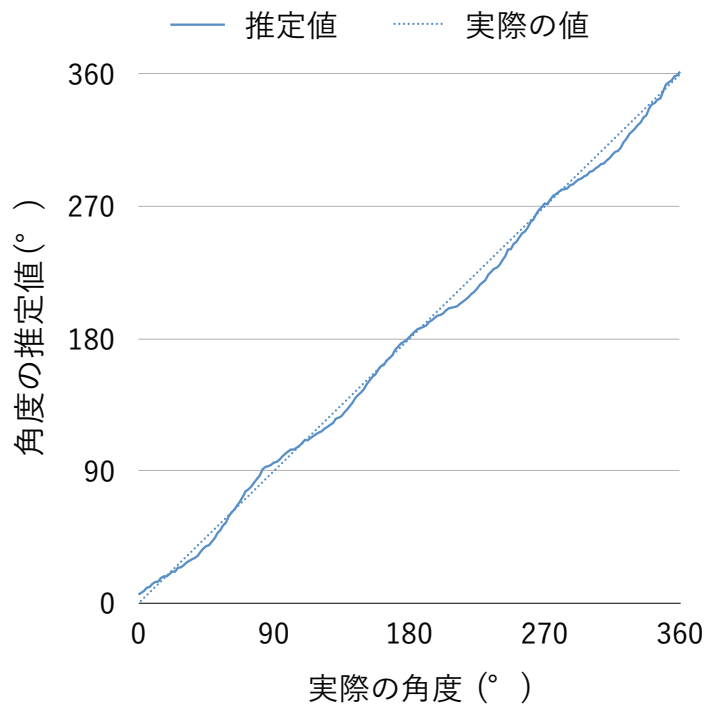


図 4.15: 掌で先端部を覆った際の推定角度

接触方向の推定は、触れ方によって精度は異なり、実験結果から面積の小さい接触の場合精度が低くなることがわかったが、指一本で触れる際でも推定値のずれは $45^\circ$ 未満となることがわかった。本研究では動きながらセンシングを行い、推定した角度から回避運動を生成することで生物のような認知効果を実現することを目的としている。この用途においては、Planula で用いたセンシングの精度は十分であると考えられる。一方で、より正確な方向認識のためには、センサの数を増やすことが有効であるとわかった。

## 4.6.4. ユーザーテストによる評価

Planula が人に対して与える印象を評価するため、ユーザーテストを行った。このテストでは、12名（男性9名、女性3名）の被験者に Planula を見てもらい、アンケートと口頭での質問によって印象の評価を行った。アンケートには Bartneck らが開発した、ロボットの生物らしさを評価するための5段階の評価項目 [79] から重複項目や本システムと関係のない設問を省いたものを用いた。被験者には、動いていない状態の Planula と、4.4.5 項で述べた3種類のモーションを見てもらい、それぞれ印象評価を行った。その後、Planula に触れるよう促し、インタラクションの印象評価を行った。その後、口頭でそれぞれの動きやインタラクションを行ったときの印象を聞いた。

被験者によるアンケートの結果の平均値は図 4.16 の通りである。インタラクションを持ったものでは、「生物的」「意識を持っている」という項目において12名中10名、「生きている」という項目においては12名中11名が4以上の評価をしており、生物のような印象を与えることには成功していると考えられる。口頭での評価でも、「触ったことへの反応が犬みたい」「犬や猫みたいに予想外のことをされたみたい」と生物に例える感想が得られた。一方で、基本動作では静止時よりは生物らしさに関する項目は高くなっているものの、評価の値はあまり高いものにはならなかった。

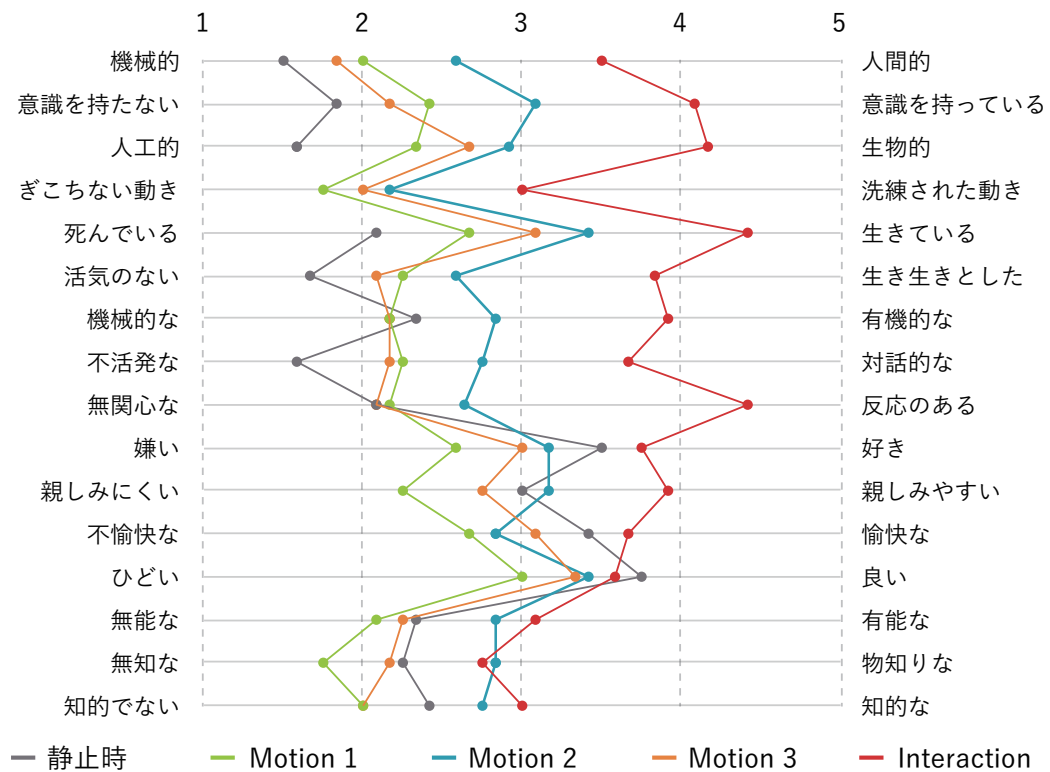


図 4.16: ユーザーテストの結果

口頭で基本動作の印象を聞いた際、12名中6名が「人を探しているように見える」と答えた。このような印象を述べた被験者は全体の半分であり正確性は高いとは言えないが、抽象的な表現でありながら、人を探すように振る舞う、という意図を伝達できたのは有益な知見だと考えられる。基本動作に関して生物らしく感じないと答えた被験者からは「風で動く植物のように受動的に動いているように感じる」という意見も聞かれた。受動的にみえる動きは生物らしくみえないというのはアニメシー知覚の研究とも一致するが、本作品では、デバイスの形状と動きによって風に揺れる植物のような動きが生まれ、実際には能動的な動きが受動的な力として知覚されてしまった。このことから、認知効果を考えるうえでは、形状と動きから創発される、動きを伴う見た目のあり方を考える必要があることがわかった。前述のように基本動作はランダムに行っているが、「こちらに向かって動いた時はお辞儀しているように感じた」など、被験者との位置関係も重要であることがわかった。

インタラクションに関しては、手から離れるような動きを設計していたが、立ち位置と触れ方の関係から、ユーザー側に回避する動きもテスト中に何度かみられた。この反応に対しては、ユーザーは「好かれている」といった好意的な反応を行っていた。一方で、設計通りの離れる動きに対しては、「逃げられている」といったネガティブな反応も得られた。インタラクションを明確に提示するために基本動作より速い回避運動を設計していたためこのような印象になったと考えられる。センシングが完了したことをユーザーに認知させて基本動作に遷移する、という意図で設計したインタラクションであるが、より好意的な反応が得られるよう動作の再考が必要だと感じた。

4.6.2において、本システムにおいては基本動作3を選定した旨を述べたが、ユーザーテストにおいては基本動作2のほうが評価が高かった。基本動作1は本評価においても回転の印象が強く機械的だという感想が得られた。基本動作3は、「止まっている様子が機械的に感じた」という意見が得られた。動作間の低速の動きが被験者に止まっているように感じられたのだと考えられる。

ユーザーテストの際に得られた意見として、「基本動作の際は人を探しているようで知的に感じたが、触れた際のインタラクションは可愛いけれどあまり知性を感じない」というものがあった。センサがユーザーを感知したことを表出するためユーザーの手から離れるような動きを設計していたが、基本モーションからインタラクションの遷移が自然には感じられていなかったのだと予想できる。動きの観察からインタラクションの自然な遷移のための設計には、まだ研究の余地があると感じた。ほとんどの被験者が、インタラクションの際に色々な触り方を試したり、何度もPlanulaを触ったりといった体験の仕方を行った。「触っているうちに可愛くなる」「感情が移る」といった、体験の度にポジティブに感じるというような意見も得られた。これは隠されたセンサでは得られない、環境知能を生物のようなインタラクション対象としてデザインすることによる有益な効果といえる。



#### 4.6.5. 展示による評価

Planula に対して鑑賞者がどのような反応を示し、どのようなインタラクションを行うかを観察するため、展示発表を行った(図 4.17)。2014年6月2日～8日の7日間、東京大学生産技術研究所内のギャラリーにて筆者らが開催した「Bio-likeness - 生命の片鱗-」展において公開を行った。本展には1074名の来場者があり、多くの人に本作品を体験してもらうことが出来た。タイトルにも「生命」という単語を使っているとおり、本展は筆者らが人工物のもつ生命や知性の兆候を感じる振る舞いをテーマにしており、人に生き物らしいという認知を与えるために製作したプロトタイプ群を展示している。本作品もそれらの一部として展示しており、来場者には本作品は生き物のような認知を目的として製作したという事前情報を与えている。



図 4.17: Planula 展示の様子

本展示においては作品の性質上、手で触れることを許さない作品もあったため、先端を手で触れる操作とそれに伴うインタラク션을誘発することは難しかった。触れるインタラク션을自然に引き出すには、先端部の素材などの検証がまだ必要だとわかった。口頭で先端に触れることを促すと、多くの来場者が積極的に Planula とのインタラク션을行った。多くの来場者が手のひらで触るように先端部に手を近づけた。そのため、ユーザーの行為は正面からではなく横方向や斜め後ろから行われることが多く、先端の回避方向が左右や斜め前方向になるケースが多く見られた。回避ベクトルは時間によって加算されるため、手を近づけた直後は回避距離が短く、大きな回避を行うまでには少し時間がかかる。先端への手の近づけ方によって回避のタイミングに差が生まれるため、「無視された」というような反応をするユーザーもみられた。しかし、複数人で体験している際は「自分だけ無視された」といった反応で、システムの不具合ではなくシステムが個人を識別して判断しているように認知する傾向が見られた。回避動作に対しては、「嫌われている」や「人間にもこういう奴いる」といった、対象を生物のように認知し感情移入する様子が多くみられた。このことから、センシングの手法と回避動作の設計は生物のような表現として効果があったと考えられる。Planula のインタラク션は接触に対して回避を行うシンプルなものだが、飽きずに何度もインタラク션を行う来場者もみられた。一方で、基本動作のみの観察ではインタラク션時ほどの感情移入の様子はあまりみられず、生物のような認知を引き出す目的においては基本動作の設計手法にはまだ課題があると感じられた。

## 4.7. Planula の考察

### 4.7.1. 形の時間変化に対する考察

本研究では、なめらかな形の変化を実現するため、弾性体の支柱を直交する2方向の曲げを制御するモーターによって屈曲させ、支柱を中心とする円内を先端が動く構造を提案した。素材の屈曲を用いているため先端の移動に正確な位置決めは出来ないが、概ねモーターの変異に応じて移動距離も変化することがわかった。また、モーターの合力を用いると全方向への曲げが可能になり、支柱内を自由に移動させることが出来ることがわかった。この動作構造に2次元座標で近似し製作した動作アルゴリズムを与えたところ、概ね2次元座標上でのシミュレーションと同じ印象の動きが実現できた。精度の高い位置決めには向かないが、人間の手に近い高さでセンサを移動させ、且つ移動時にロボット全体の形がなめらかに変化する動きを実現できた点で、本研究で対象としたネットワークロボットにおけるセンサロボットの形態デザイン等には有効であったと考えられる。

弾性素材は制御が難しく、動作生成構造の特性上、弾性による意図しない振動が起る等の問題もある。しかし、人との接触においてこの弾性は物理的な安全性にもつながるため、この点でも対人インタラクションの目的においては有益な形態デザインだといえる。

### 4.7.2. 動きの時間変化に対する考察

本研究では、製作した構造に合わせ、3種類の基本動作パターンを製作した。弾性素材を用いる構造上、動きにおいても振動系の運動を用いると弾性による振動と混ざり、非生物的印象につながってしまうことがわかった。一方、振動を用いない動きも含めた基本動作パターンに対する印象評価試験を行った結果、振動を用いていたものが一番生物らしさの認知が高いことがわかった。振動を用いない動きでは加速度変化による補間を用いていたが、アンケートの結果から、補間における低速度の動きが弾性により吸収され止まっているように感じられことが読み取れた。この止まっているような印象が生物らしさの認知を阻害されたと考えられ、運動の時間連続性が生物のような印象の実現において有益だと考察できる。

インタラクションに伴う運動変化については、展示の際何度も触り方を変えながらセンサに触れ、回避運動を観察する被験者が多かったことから、現在位置と手の触れ方によって逐次力を発生して回避運動を行う制御システムが、被験者にとって興味深いものになったと考察できる。一方で、接触に対するセンサの反応によって回避反応に遅延が出る状況

も観察され、インタラクションを行っていないと認知する鑑賞者もみられたことから、センサの感度に対する反応速度などはまだ検討が必要だと感じた。

#### 4.7.3. 人に対する印象に関する考察

本作品は、先端部に人が近づくと反応するインタラクションを実装していたが、説明しない状態で先端部を触ろうとする鑑賞者は少なかった。アート作品として展示しており、樹脂とアルミを用いた先端部のデザインは冷たく硬い印象を持ち、触れてはいけない印象を与えてしまったと考えられる。先端部の形状自体はなめらかな球面状であり、触れにくい印象に繋がるとは考えにくい。繊細で変形する支柱を用いたことで、華奢な印象を与え、触れにくくなったと考えられる。支柱が柔らかく変形するのに対して、先端部は変形しない形を与えたことも、触れにくい印象になった理由のひとつとして考察できる。

柔らかい印象を実現しながら、且つ接触を誘発することが出来れば対人インタラクションにおいて有益であり、接触を促すデザインは今後の課題としたい。

#### 4.7.4. センサロボットとしての用途に対する考察

本章で述べた Planula は、なめらかな形と動きがもたらす生物のような印象を用いて、ネットワークロボットにおいて人が環境と関わる際のインターフェースとなることを目的として開発した。

本研究では、環境知能が人を感知しようとする振る舞いを、人を探すような動きのデザインと人の検出に反応して動くインタラクションによってユーザーに伝えるデザインを行った。従来の環境知能が用いていたディスプレイ表示や会話型エージェントロボットによる情報伝達やコミュニケーションに比べると伝達の正確性は劣るが、アンビエントメディアのような周辺認識を用いた情報提示とシンプルなインタラクションが実現できた点で有益だと考えられる。生物らしく振る舞わせることによって、ユーザーが積極的にセンサに触れようとするようになったという点は、環境知能のあり方を考える上で有益な知見になったと考えられる。

## 第5章

# Apostroph

---

環境となめらかに相互作用を行う身体のデザイン

## 5.1. Apostroph の背景

人間と共存するロボットにおいて、人間が生活する環境への適応も重要な研究テーマとなっている。人間のような二足歩行ロボットの主な開発目的は、人間と同じ環境で活動する事であったが、二足歩行で人間と同レベルの自由な移動を行うのは非常に困難なことがわかっている。

環境に適応するための知能システムの研究は古くから行われており [5]、現在では、センサによって環境を認識し障害物を避けながら移動を行う自律移動型掃除ロボットは既に家庭にも導入されはじめている。掃除ロボットは、Brooks の開発したサブサンクション・アーキテクチャ [19] を基に開発されており、車輪によって空間上の移動を行う。車輪は、回転によって動力を得る機械の特性に適した構造として発展してきた移動技術であり、平坦な空間であれば自由に移動可能である。しかしながら、高さ方向への適応能力は低く、段差などに対応しにくいいため、高さ方向への移動にも適応する身体及び知能システムが研究されている。

高さ方向への移動にも適応したロコモーションを行ううえでは、車輪だけでなく、身体を持ち上げる構造が必要になる。このため、二足歩行や四足歩行などの脚を用いたロコモーションが研究されている。脚によって移動を行う従来の人型ロボットの知能システムでは、システムが身体構造のジオメトリを把握したうえで運動の生成を行っていたが、現在では身体構造の情報を持たず、身体を介して環境と相互作用しながら運動を発現する知能システムが研究されている。Angle の開発した単純な知能システムだけで障害物を乗り越えて移動可能な六足歩行ロボット Genghis[80] などがこの例であり、Pfeifer はこのような知能システムを身体性知能と呼んでいる [81]。Hoffmann らは身体性知能システムを持った四足歩行ロボットを開発している [82]。

身体性知能システムでは、身体が環境とのインターフェースであり、身体の構造や形状によって創発される動きが変化する。本研究では、この身体性知能システムによって創発される 4D Appearance のデザインについて考える。

本章では、連続回転関節と曲線形状を用いた身体構造を持つロボット、Apostroph(図5.1)について述べる。ロコモーションを行うロボットでは動物や昆虫のような脚構造が用いられることが多いが、生物の素材の柔らかさやアクチュエーターである筋肉の柔軟さと、一般的なロボットで用いられる硬い素材とモーターでは、地面と関わって運動を行う際のなめらかさが異なる。本研究は 360° 回転が可能な関節構造を用い、生物とは異なる身体構造のデザインを開発した。一般的な多関節ロボットでは関節の動作角度は制限されるが、本研究で開発した構造では、モーターの特徴を活かした連続回転可能な関節によって、動

作角度の制限のない連続的な動きが可能になる。また、地面との相互作用には、地面との接触面の形状が深く関わる。本研究では、リンクの地面との接触面をゆるやかな螺旋形状にすることで、やわらかな外観印象を与えると同時に環境との接点のなめらかに変化する形状デザインを行った。これらの操作によって、なめらかな 4D Appearance を実現する。

重力の方向と地面に対する定位は、生物の基本的な姿勢である [83]。人間と同じ環境で共存するロボットにおいても、重力の方向への定位、地面に対してバランスをとる振る舞いは基本的な機能として研究されている。Hild らは、モーターを用いて地面及び重力方向に定位するシステムを開発している [84]。本章で提案する Apostroph は、Hild らによって開発された知能システムを用いた人工生物である。重力方向に対する定位のみを行うシステムであるが、生物とは全く異なる身体性を用いながら、地面となめらかに相互作用を行い立ち上がり動作を行うプロトタイプである。



図 5.1: Apostroph (写真: 加藤 康)

## 5.2. Apostroph のアプローチ

環境と相互作用するロボットにおいて身体は環境と関わるインターフェースであり、身体性が振る舞いを規定する。本研究で開発するのは、身体を介して力覚によって環境とインタラクトし、重力に抗い身体を持ち上げるロボットである。よって、身体形状、身体構造といったロボットの形が振る舞いに大きく関わる。そのため、このロボットにおいては、形の時間変化だけでなく、動きの時間変化においても形が大きく影響する。本研究では形及び形がもたらす動きを考慮して、なめらかな 4D Appearance を実現するデザインを開発する。

既存のロボットでは生物の関節と同じような曲げ関節が用いられることが多いが、モーターは 360° 回転できる特徴がある。本研究で用いる知能システムは 1 関節で完結するため制御信号を伝達する必要はなく、関節間に配線の必要がないため、本研究では車輪のように無限に回転する身体構造をデザインした。無限回転構造は生物には存在しないため、人間との共存のために生物に類似した外観を与えることを目的としたロボットには用いられない。しかしながら、一般的な多関節ロボットは関節の回転角度が制限されていることが動きの連続性維持を阻害する要素になりうるのに対し、本研究で採用する無限回転構造では制限なく動き続けることが出来るため、この点において動きの連続性、なめらかさを実現する目的において適していると判断し、本研究ではこの構造を用いる。

また、生物は柔らかい素材やアクチュエーターを用いているため環境と接触する際に変形を伴うのに対し、人工物の素材は硬くほとんど変形しない。本研究のシステムでは環境との接触に身体を介するが、この接触も硬い身体によってなされる。本研究は、生物のような柔らかな動きを実現するため、身体形状にゆるやかなカーブを与えた。その結果、硬い素材でありながら環境との接点をゆるやかに変化させ、重心移動を柔らかく受ける振る舞いが実現した。ゆるやかで連続性を持ったカーブで身体をデザインすることは、形の変化におけるなめらかさを維持するとともに、動きにおいてもなめらかさを実現することにつながったといえる。



## 5.3. Apostroph の関連研究

生物を模倣せず全く新たな生物の身体性を探る研究は、あり得た生命 (life-as-it-could-be) の姿を研究する人工生命の一分野として行われてきた [85][86]。Sims はコンピューター内で生物の進化を模倣し、仮想空間上での新たな生物の形を創造した [41]。直方体のブロックの組み合わせによって作られた生物とは異なる外観だが、生物のような様々な振る舞いを実現した。Lipson はこのような仮想空間での進化モデルとデジタルファブリケーション技術を組み合わせて、仮想空間で得られた形態を実空間への出力を実現している [42]。

これらの先行研究では、身体モデルがブロックやワイヤーフレームなどの仮想空間のプリミティブから作られているが、本研究ではロボットの外観デザインを目的とし、機械システムの基本要素であるリンクとジョイントから身体構造を発想する点で異なる。

本研究で用いる知能システムを用いて、Hild は Semni というロボットを製作している [87]。本研究はこれを基にした研究であるが、無限回転を行う関節構造などの Semni にはない新たな身体構造を開発した。また、Semni は重力方向の重心移動が少ないようにデザインしているのに対し、本研究は形態を変化させながらロコモーションを行うロボットとしてデザインした。

## 5.4. Apostroph

### 5.4.1. Apostroph の概要

Apostroph は、身体を介して床などの環境となめらかに相互作用しながら、重力に抗う立ち上がり運動を行う。2つのモーターのみで構成されたシンプルな身体構造のロボットである。

### 5.4.2. Apostroph のモーションデザイン

Apostroph のモーションデザインに関わる、環境と相互作用するための知能システムには、Hild らによって開発された Cognitive Sensorimotor Loops (CSLs) の Contraction Mode を用いる [84][88]。ロボットにおいて一般的に用いられるアクチュエーターであるモーターのための知能システムである。動きを生み出すモーターが、力を感知するセンサを兼ね、回転軸に加えられた力を認識し、その力に応じて出力を決定するシステムである。Contraction Mode ではモーターの回転軸に加えられた力に対して抗う方向に出力を行う。

リンクとジョイントを持ったモデルにこの関節システムを組み合わせると、リンクを介してジョイントにかかる力に反発する。重力下ではリンクやジョイント自体の重量が関節に力としてかかるため、これに抗うことで身体を持ち上げるような動きが創発される。

CSLsの制御システムは、ジョイントの角度を $\phi(t)$ 、出力を $u(t)$ としたとき

$$u(t) = -g_i\phi(t) + [g_i\phi(t) + g_f u(t)]z^{-1}$$

と表される。なお、 $u(t) = 0$ であり、 $z^{-1}$ は単位遅延演算子を表す。 $g_i$ と $g_f$ はCSLsの振る舞いを決める定数である。 $g_i > 0$ であり、 $g_f > 1$ のときCSLsはContraction Modeになるため、本研究ではこの条件を満たすよう両定数を決定した。単位時間を $\Delta t$ として整理すると

$$u(t) = -g_i(\phi(t) - \phi(t - \Delta t)) + u(t - \Delta t)$$

となる。角度の差分と出力の加算のみによって振る舞いが規定される。差分を用いるため絶対角度を必要としない点が特徴である。

CSLsを備えたジョイントは、ジョイント自身の角度の差分から外から加わった力を判断し、それと逆向きに動く力を発する。単位時間ごとに出力は加算され、力が加わり続けられれば抗い、加わる力が無くなったら動きを止める。このジョイントによって構成された構造体は、自重によってジョイントにかかる力に反発し身体を持ち上げ、力がかからなくなる位置を探して動き続ける。人間の足首、膝、腰などの関節を重力に抗うように動かすづけ、一番力のかからない姿勢を見つけると、自重がまっすぐかかる姿勢である立位にたどり着く。CSLsによって外力に反発し続ける動きは、立ち上がろうとしている動きであるといえる。

一般的なロボットの制御においては、知能システムが身体形状のジオメトリの情報を持ち、加速度センサなどで姿勢を把握して制御を行う。しかしこのシステムでは、身体形状の情報を持たず、力覚によって環境を感知し作用することで立ち上がりを創発する。また、加速度センサを用いて姿勢を判断しないため、床などの周辺環境や姿勢が変わっても環境とインタラクトして状況に応じた運動をする。これは、ギブソンが述べた、動物の生のいとなみの根本である地面への定位を、力覚と身体によって環境から立つためのアフオーダンスを探ることで実現しようという試みである[83]。また、Pfeiferが身体性知能と呼ぶ身体を介して環境を認識し相互作用する振る舞いであると言える。このような環境と身体性によって創発される複雑で知的な振る舞いが生物らしい印象につながると考えられる。

### 5.4.3. Apostroph の外観デザイン

立ち上がる振る舞いは、床との接し方や重心位置、関節位置といった身体性によって様々に変化する。よって、振る舞いのデザインにおいては身体形態のデザインが重要な位置を占める。Apostroph には、360°以上の回転を可能にする無限回転構造の関節と、ゆるやかな螺旋形状のフレームを採用した。

生物の身体は柔らかい袋状の皮膚に包まれ、全てが連続しているのに対し、人工物は複数の硬い部品のアセンブリによって成り立っている。生物の関節は、伸縮によって動きを生み出す筋肉によって連続した皮膚内で動くため可動範囲が限られるのに対し、機械的な接続のみでつながった車輪などの構造は上限のない回転が可能である。前項で述べた CSLs は関節自体が知能システムとアクチュエーターを兼ねたシステムである。それぞれの関節が情報交換をせずに独立で動く仕組みであるため、関節間に情報伝達の配線を行う必要が無い。本研究ではアクチュエーターとして用いるモーターと CSLs の特性を活かす構造として無限回転可能な関節構造(図 5.2)を開発した。

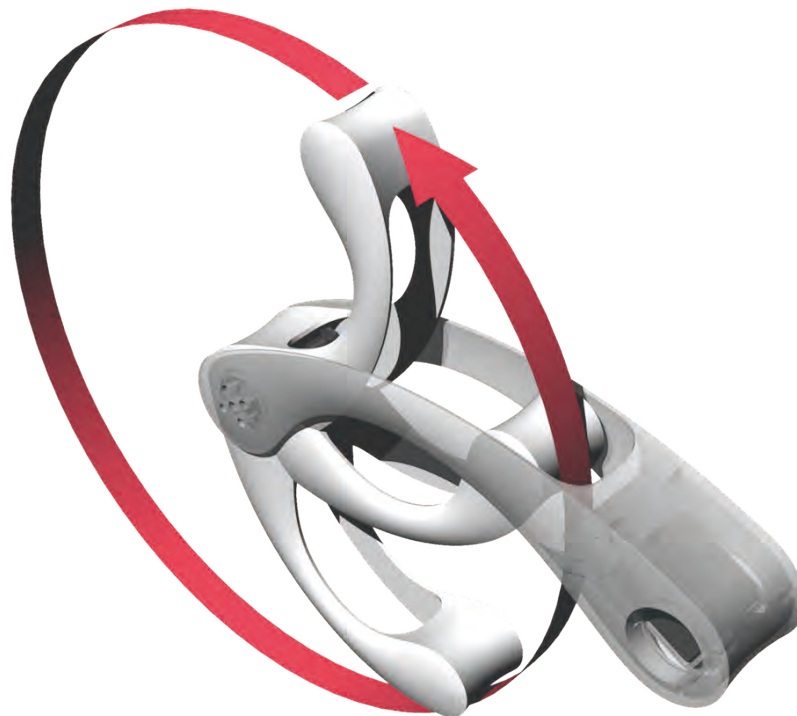


図 5.2: リンクの間をすり抜けて回転する構造

無限回転構造は鞭毛などの特殊な例を除き生物には存在しないため、この構造を用いたロボットの外観は、人と共存するロボットのデザインとして一般的に用いられる生物型ロボットとは大きく異なるものになる。しかしながら、この構造は機械システムの特徴を活かした構造であり、様々な姿勢での環境とのインタラクションを可能にする。本研究ではこの生物と異なる構造を持ったロボットに生物の基本的な振る舞いを与え、観察者が生物のように感情移入を伴って接するかを検証する。

Apostrophには回転ジョイントを2つ用いるが、ジョイントの回転軸は平行に設定した。このため、Apostrophの運動は回転軸と直行する平面上の2次元運動に近似できる。3次元の移動を行うにはより多くのアクチュエーターが必要になり、環境との接点となる形態の設計も複雑になる。本研究では、床面の2次元移動のようなミニマルなモデルとして、重力方向への移動を含めた2次元平面に近似できる運動を採用した。

運動を2次元に制限するため、製作する身体構造は出来るだけ運動平面において対称になるように設計を行った。このため、重さのあるモーターは2つとも中心に配置した。モーターを保持するそれぞれのリンクが干渉せずに無限回転を行えるよう、リンクはモーターを挟むフレーム状にし、互いにすれ違って交差するようリンクの幅と長さに差をつけて設計を行った(図5.3)。そのため、3つのリンクはそれぞれ幅と長さが異なり、第一リンクが第二リンクの内側をすり抜け、第三リンクは他の2つのリンクがどのような位置関係にあっても内側をすり抜けられる長さとした。このような要件から、幅はジョイントに用いるモーターの幅36mmを基本とし、最小の第一リンクはこれを保持するための樹脂厚を加えた47mmとした。第二リンクは、第一リンクの両側に1.5mmずつ余裕を設けた50mmを内部空間の厚みとし、樹脂厚それぞれ5mmを加えた60mmとした。第三リンクも同様の考え方で73mmとした。長さは最小のリンクで203mmとし、これを基に上記の方法により長さを決定し、第二リンクが300mm、第三リンクが530mmとなった。

リンクの幅と長さは前述の条件で決定したが、形状は床などの環境との関係を規定する要素であるため、動きに与える効果を考慮して決定した。自重を持ち上げるようにリンクを動かす際、床との接点とリンクの位置関係は逐次変化する。その際に、床とリンクとの接点をなめらかに変化させるよう、リンクの全体形状は連続した曲線で構成した。重心位置によっては、バランスが崩れて倒れる動きが生じる。倒れるような急激な姿勢変化をゆるやかに受け流すよう、リンクにゆるやかなカーブを与えた。本研究で扱う2次元平面上の運動において、床との接点を規定するのは運動平面上の形状である。よって運動平面においては、ジョイントにモーターを保持するための円状の節を持ち、その間を緩やかなカーブでつないだ形状となるようデザインした。

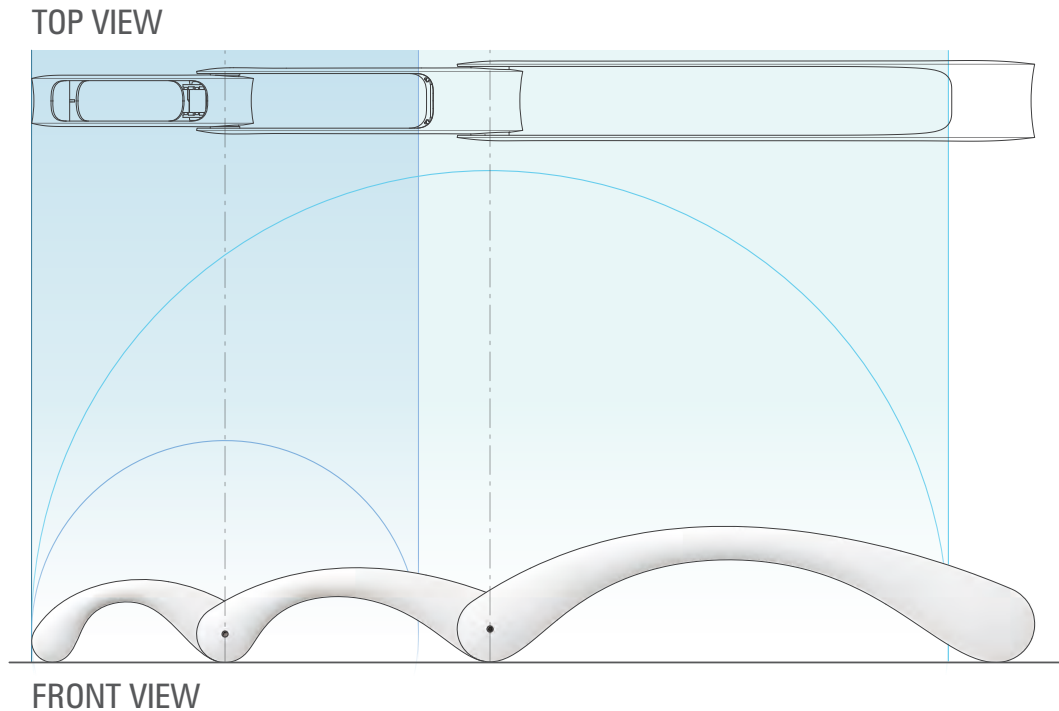


図 5.3: 互いにすれ違うための長さの設計

リンクのカーブは、まず木材の板を用いた簡易的なプロトタイプを作成して検討した。前述のとおりリンクの長さは全て異なるが、全てのリンクを同じ曲率で設計した場合、倒れるような急な姿勢変化の際に3つのリンク全体のカーブがなめらかにならず、転がって受け流す動きが実現できなかった。一方で、短いリンクほど大きな曲率になり、長いリンクが相対的に小さな曲率になるよう設計したところ、なめらかな転がり動作が実現した。そのため、後者をベースに本設計を行った。

本設計においては、プロトタイプにおいて有効であったリンクの長さに反比例する曲率を実現しながら、全体をなめらかに変化する美しい曲線としてデザインするため、ゆるやかな対数螺旋形状を採用した(図 5.4)。無限回転を実現するためリンクは徐々に長く幅も広くなるが、それに合わせてジョイントの入る円状の部分を大きくした。螺旋を描きながら徐々に大きくなる巻き貝のような生物的なメタファによって、リンク全体の見栄えを視覚的に不自然でないバランスとし、且つバッテリーやモーター等の部品を効率的に収める設計を実現した。

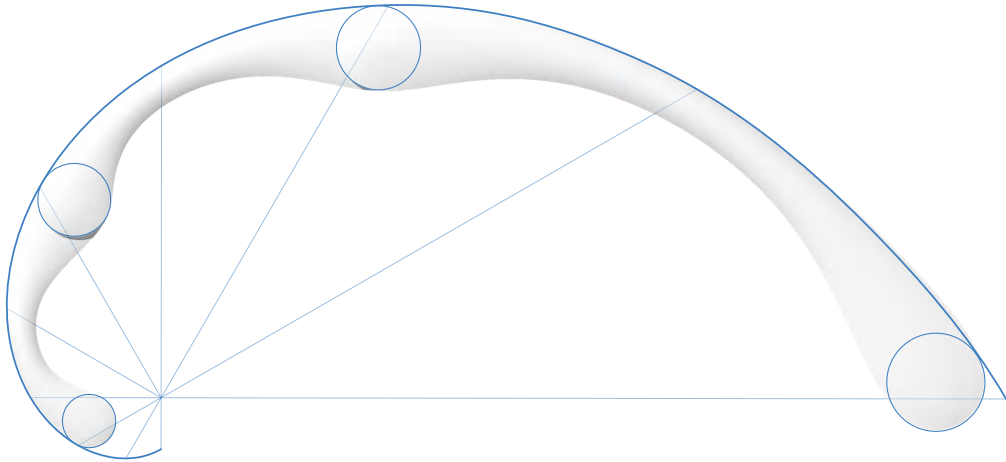


図 5.4: 基準とした螺旋曲線とリンクのデザイン

リンクの曲線形状がもたらす振る舞いの変化や視覚的な効果の検討は、コンピュータグラフィックスによるシミュレーションプログラムを作成して行った(図 5.5)。床との摩擦や重心位置などはシミュレーションでは正確に再現できないが、螺旋形状によって振る舞いや動作時の見た目がどのように変化するかを予測として用いた。

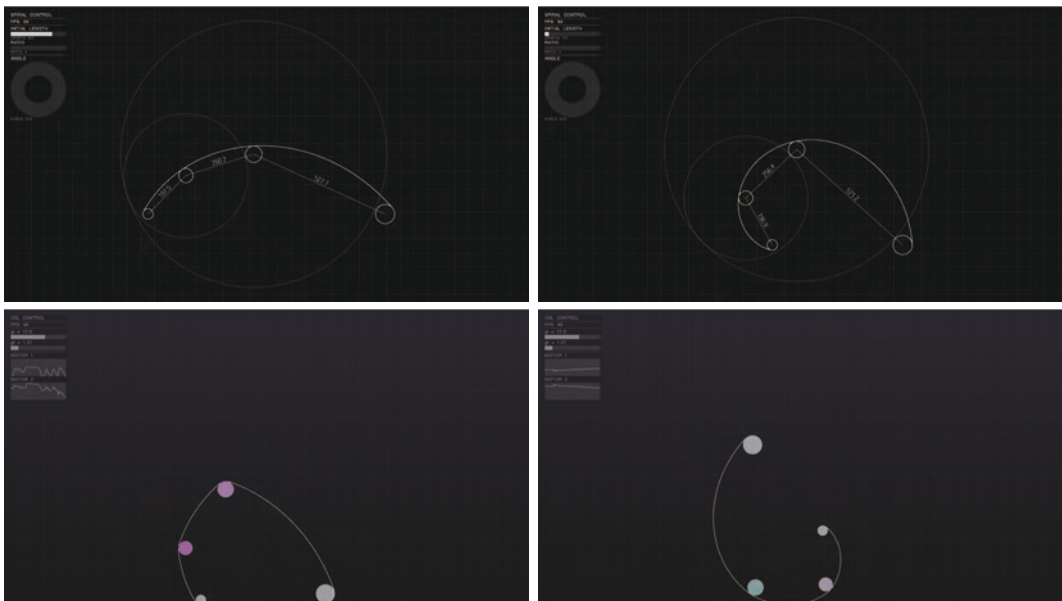


図 5.5: 形状のシミュレーションプログラム

#### 5.4.4. Apostroph の構造設計および制御設計

本作品において、リンクの製作はナイロンの3Dプリンティングによって行った。エンジニアリングプラスチックであるナイロンを粉体焼結式積層造形と呼ばれる技術によって成形することで、強度を持った部品が実現した。

3Dプリンティングは制作できる形状の自由度が高いことが特徴である。本作品ではリンク同士が互いにすり抜ける構造のため強度を持った複雑なフレーム構造を実現出来るこの造形方法を用いた。3Dプリンティングによる造形を用いることで、本作品の動作に必要なモーターやバッテリーなどのパーツを保持する複雑な構造を一体成型することが可能になり、少ない部品点数によるシンプルな構造を実現した。部品点数を減らすことで、継ぎ目やネジなどの露出が少ない外観も実現した。

ジョイント部は、CSLsがプログラムされたサーボモーターとバッテリー、スイッチのみによって駆動する。サーボモーターには360°の角度センサとCPUを備えたRobotis社のDynamixel MX-28を用い、電源には3セルのリチウムイオンポリマーバッテリーを用いている。全体の構成は図5.6に示したとおりである。

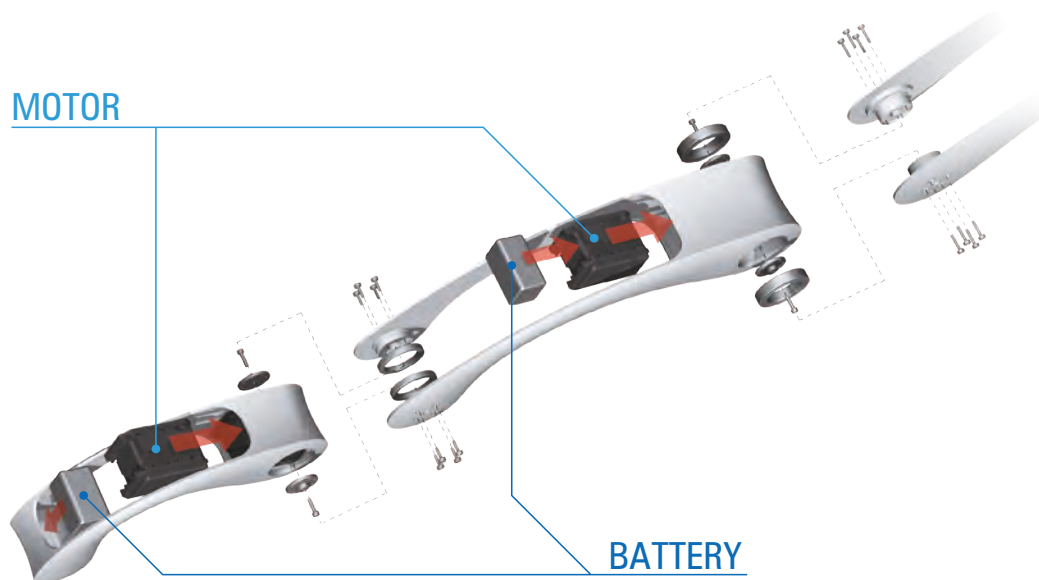


図 5.6: Apostroph の構造

## 5.5. Apostroph のデザインプロセス

ここでは、Apostroph のデザインプロセスについて述べる。Apostroph を開発する際には、まず 5.4.2 項で述べた、生物の根源的な動作原理である、外から加えられた力に反発する知能システムを用いることを決め、これを用いてなめらかな形の変化および動きの変化を実現するロボットのデザインを行った。このシステムでは、身体構造や形状といった形態によって動きが決まるため、形態の異なる複数の試作を行いながら、なめらかな 4D Appearance が実現できるデザインを探った。以下に挙げた 3 種類の方向性でプロトタイプングを行った。

- 回転時に曲面の連続性を保つ構造を用いた形態デザイン
- 弾性変形を伴う素材を用いた形態デザイン
- 地面との接触面に曲線形状を用いた形態デザイン

### 5.5.1. 回転時に曲面の連続性を保つ構造を用いた形態デザイン

まず、3 章で述べた Flagella において用いた、回転時に曲面の連続性を保つ構造を用いたデザインを発想し、プロトタイプを行った。

Flagella の研究によって、回転関節と円断面のパイプ形状の組み合わせによって、柔らかい物体が変形しているようななめらかな形の変化を実現できることがわかった。運動時になめらかさ、曲面の連続性が保たれるためには、連結している曲面同士が回転時に常に曲率まで連続していることが重要である。この知見を用いて、ここでは Flagella のような一本のパイプ形状ではなく、アルファベットの Y 字のような枝分かれしたパイプ形状を考えた。図 5.7 は初期のアイデアスケッチである。図のように端部同士を接続し、捻るような回転運動が起こることで、接続部でのなめらかな曲面を維持したまま身体を持ち上げる動作が生まれるものである。知能システムである CSLs がモーター単体で入出力を兼ね、全体をコントロールする必要が無いことから、ロボットを Y 形状のモジュールの集合としてデザインした。組み換えることで様々な形態になり、様々な動き方を生むことを目的とした設計である。



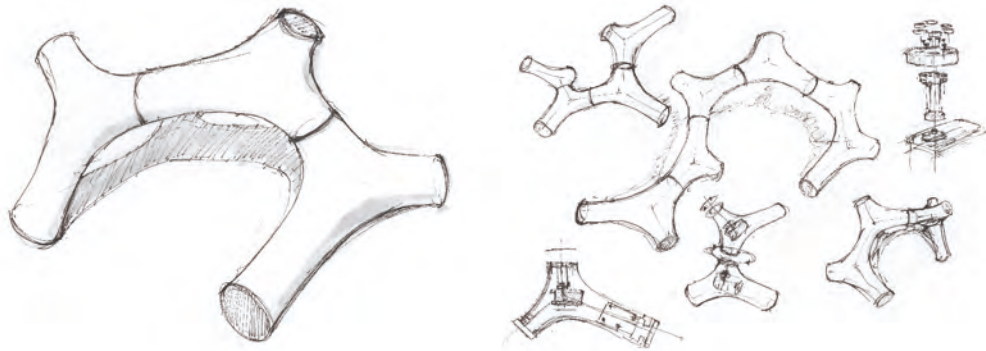


図 5.7: Y 形状のプロトタイプのアイデアスケッチ

上記アイデアによる効果を確認するため、プロトタイプを製作した。はじめに曲面の外装を持たず、動きのみを確認する原理試作を製作し、その後3Dプリンタによって曲面を再現したプロトタイプを製作した。接続部分にはネオジウム磁石を用い、磁力によって結合し、自由に組み換え可能とした。図 5.8 左は原理試作と曲面を持ったモジュールを組み合わせたものである。図 5.8 右は全モジュールを曲率連続で接続した状態の CG によるシミュレーションである。

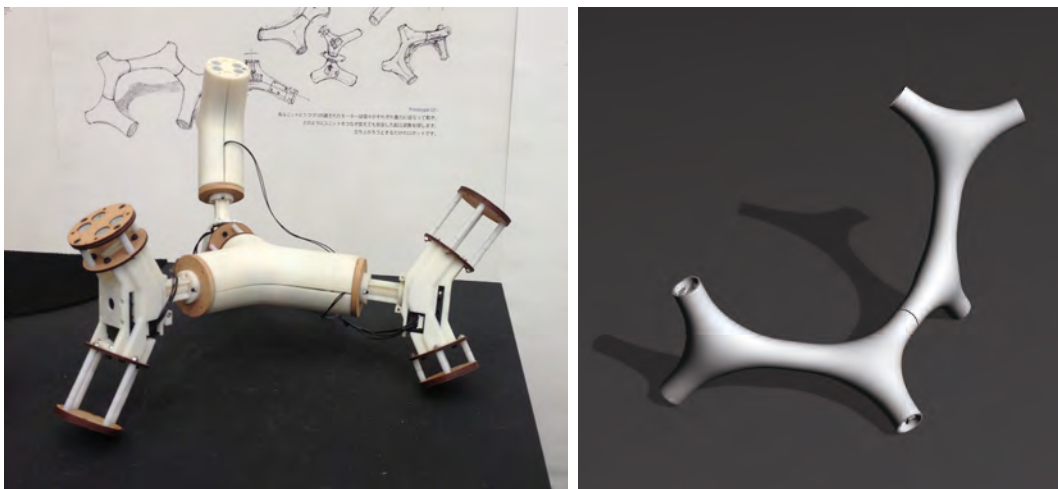


図 5.8: プロトタイプ(左), CG による検討(右)

### Y 字形状のプロトタイプの考察

本プロトタイプは Flagella の知見を活かした、動作部で曲面の連続性を維持して運動する身体形状を用いた点が特徴である。2012 年の SFC Open Research Forum 等でも展示発表を行ったが、磁石での脱着によって自由に形態を変化させ、様々な動き方を創発する様

子は来場者からも「面白い」といった意見を得られた。プロトタイプでは、曲面で包まれたモデルは製作コストがかかるため多数製作することは困難だったが、CGによるシミュレーションでは多数連結時の4D Appearanceを確認でき、接続部では動きがなく曲面が変形しているような印象が実現することが確認できた。

しかしながら、本プロトタイプは、枝分かれした形状の特性上、バランスの取りやすい3点での接地が起りやすい。その結果、CSLsによって身体を持ち上げる動きは実現したが、一度身体を持ち上げるとその後の動きの変化が少なかった。また、モジュールで組み換え可能である構造上、接続部が露出した状態で動作する。連結した際は接続部がなめらかな曲面となるが、接続部が連結せず露出した状態では曲面が途切れており、これもなめらかな4D Appearanceの実現を阻害する原因のひとつとなった。

回転軸の配置も、捻るように回転する構造は曲面の連続性を保つうえでは有益だが、重力による関節への力の掛かり方に対して出力の方向がずれてしまう。このため、磁石による連結が外れる方向に力がかかるなどの問題も生じた。

### 5.5.2. 弾性変形を伴う素材を用いた形態デザイン

先のプロトタイプは、形の変化がなめらかであるのに対し、動きが単調ですぐに収束してしまうといった問題点があった。

なめらかな4D Appearanceを実現するための試みとして、弾性素材を用いたプロトタイプも作成した(図5.9)。捻るように回転する先のプロトタイプに対し、本プロトタイプでは動きを2次元的にし、回転軸に自重が素直に作用する設計とした。弾性素材を用いるという手法はPlanulaと同様であり、形をなめらかに変化させることを目的としている。また、先のプロトタイプでは動きが収束しやすかったことから、変形する素材を用いることで小さな重心の変化からモーターへかかる荷重の変化を起りやすくし、多様な動きを生み出すことを想定した設計である。

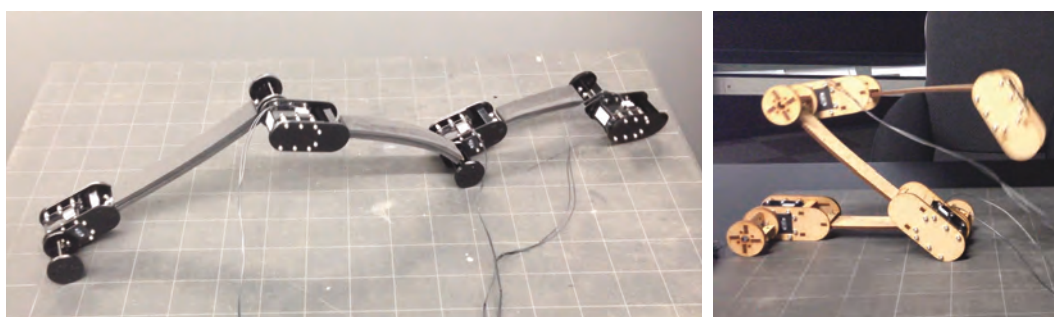


図5.9: 弾性素材を用いたプロトタイプ(左 塩化ビニル/右 MDF)

プロトタイプの構造は図 5.10 の CG で表したとおりであるが、モーターを保持する関節部分と、弾性素材の板材の組み合わせによって構成している。モデルにおいて剛体の板材として表している部分に、塩化ビニルやアクリルなどの樹脂素材や、MDF(中密度繊維板)に切り込みを入れて変形特性を変える Dukta と呼ばれる構造 [89] 等を用いた。これらの板材の性質の操作によって、なめらかな動きの変化を実現することを目指した。

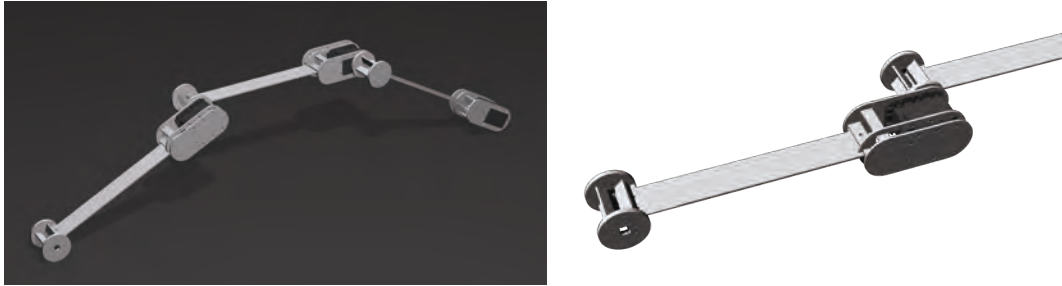


図 5.10: プロトタイプの 3DCAD モデル

### 弾性素材を用いたプロトタイプの考察

本プロトタイプは、弾性素材を用いることで関節部分にかかる力に変化を生じやすくし、複雑な動きの変化を実現することを目指した。実際にプロトタイプを製作し実験した結果、一度安定姿勢に到達した後にも別の姿勢へ移動するなど、姿勢遷移が起りやすくなった。しかしながら、弾性によって生じる振動が、CSLs によって増幅されてしまい、大きく速い速度での動きが生じ、部材が折れる、強く外環境に衝突するなどの問題が生じた。これらの理由から、CSLs と組み合わせる対象として弾性素材は適さないことがわかった。また、素材がモーターの動きを吸収してしまうことにより、全体の動きが小さく静止して見える状態も生じた。これも生物のようななめらかな動きとは異なる特徴である。

#### 5.5.3. 地面との接触面に曲線形状を用いた形態デザイン

先のプロトタイプ製作の結果を踏まえ、弾性素材で実現した姿勢の遷移や複雑な重心の変化といった特徴を、剛体素材で実現する手法として曲線形状を用いた身体形状のデザインを考えた。

曲線形状を用いることでなめらかな姿勢遷移が生まれることは、CSLs の開発者である Hild が製作した Semni(図 5.11)によって示されている。Apostroph でも用いている曲線形状は、この Semni に着想を得たものである。

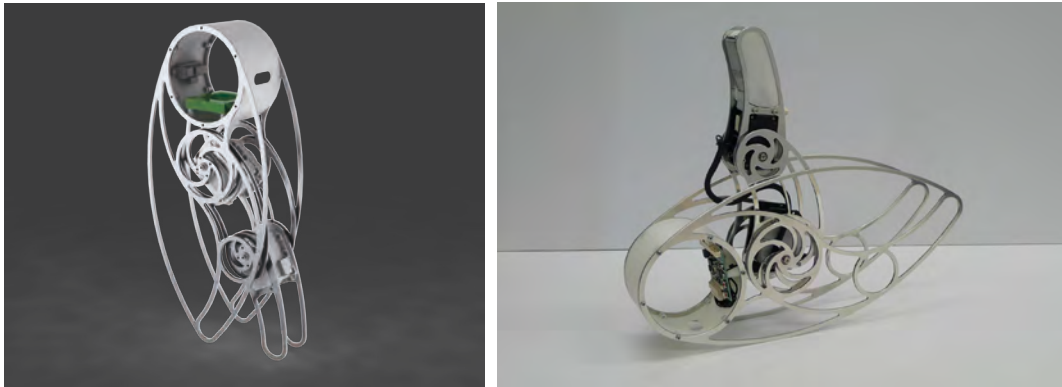


図5.11: Semni(左 CG/ 右 Hild が製作した実物)

Semni から着想を得た曲線形状と、弾性素材のプロトタイプで用いた身体構造を組み合わせ、新しい身体形状を発想した。Semni は可動部分が全体に比べて小さい。CSLs のパタメーターの操作によって Semni でもダイナミックな動きを行うことは Hild の研究でも示されているが、著者はより可動部を大きくし、身体全体を使って動くプロトタイプを製作した。Semni では一般的な多関節ロボットと同様に関節の可動範囲が制限されていたが、本研究ではリンク同士が互いにすり抜け合う新たな関節構造を開発し、プロトタイプに用いた。

曲線を用いた身体形状も、どのような動きが実現するかを確認するため、まず簡単なプロトタイプを製作した。MDF をレーザーカットにより加工した簡易的なプロトタイプ(図 5.12 左)によって動きを確認したところ、曲線形状を活かした姿勢遷移や地面との接点のなめらかな変化が実現することが確認できた。MDF は加工が容易な反面、素材の剛性は低い。このため、2つのリンクがすり抜けることを想定した長いリンクの剛性を維持することが難しく、動きが不安定になった。これを解決するために、MDF でのプロトタイプを基にアルミニウムの板材のレーザーカットによるプロトタイプを開発した(図 5.12 右)。このプロトタイプは 2014 年 6 月に東京大学生産技術研究所内のギャラリーで行った「Bio-likeness - 生命の片鱗 -」展に出展し、来場者からの反応の観察を行った。

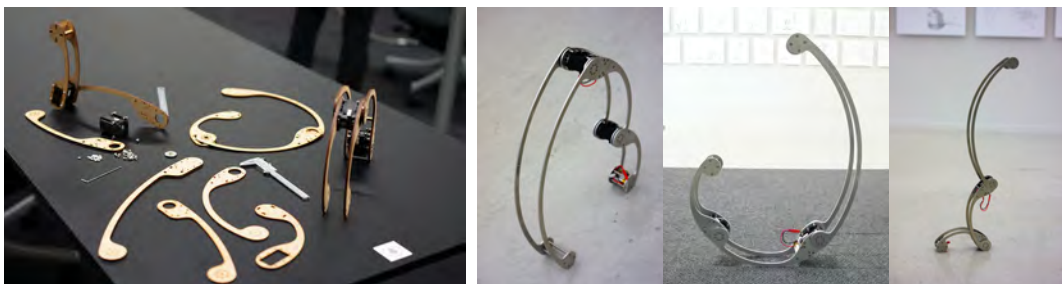


図5.12: 曲線形状のプロトタイプ(左 MDF 製/ 右 アルミニウム製)

アルミニウムのプロトタイプは、板材を用いた簡易的な設計のため、モーターやケーブルなどが露出するなど外観のコントロールが不十分であった。そこで、ナイロンの3次元造型を用いた最終モデルの開発を行った。ナイロンはアルミニウムと比較すると剛性は劣るが、粉体積層造形を用いることでモーターを保持する内部構造も含めた全体を一体整形することが可能になり、その結果高い剛性を持つ構造を開発することが出来た。また、剛性が弱い分厚みが出てしまう部分を、3次元的な曲面のコントロールによって薄く見えるようデザインするなどの処理も可能となった。アルミニウム製のプロトタイプで動作実験を行うなかで、3つのリンクがひとつの曲面のように振る舞い、地面を転がるような動きが生まれることがわかった。この特徴を活かすために、全体を一本のゆるやかな曲線でつなぐデザインを開発した。

## 5.6. Apostroph の評価

### 5.6.1. 実現した動き

Apostroph が運動時に取りうる姿勢とその遷移を図 5.13 に示す。S<sub>1</sub> と S<sub>2</sub> はそれぞれモーターの出力を切って地面においた際に取りうる姿勢であり、人に例えると寝ている姿勢にあたる。これらを運動の初期姿勢とした。関節が回転し身体を縮めた姿勢も初期姿勢となりうるが、ここでは身体を伸ばした姿勢のみを扱う。

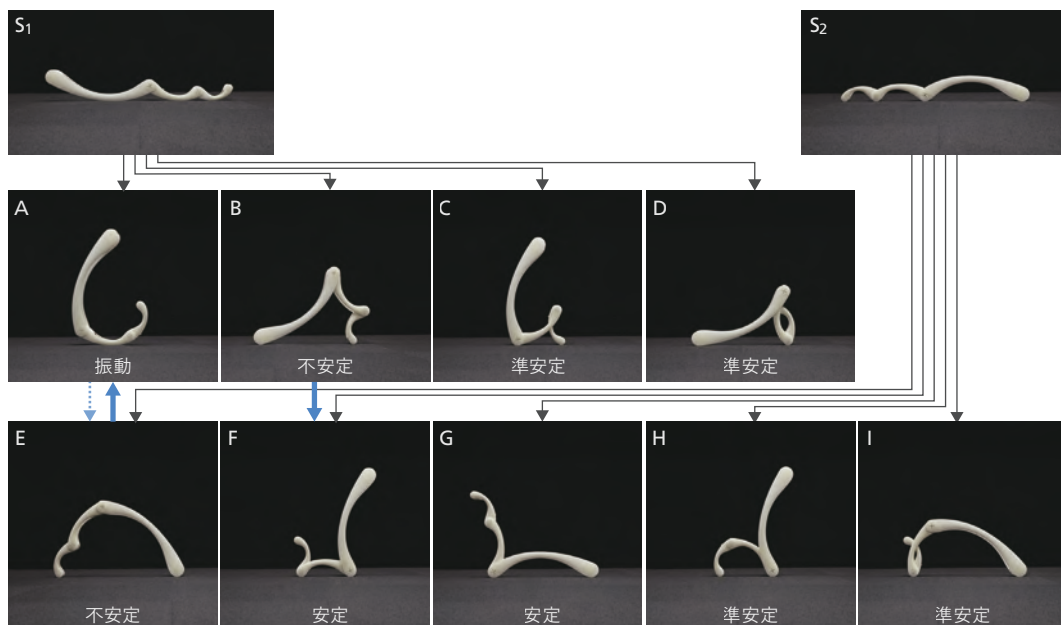


図 5.13: Apostroph の姿勢遷移

$S_1$ からはA～Dの4種類、 $S_2$ からはE～Iの5種類の姿勢になる運動が創発される。初期姿勢は各関節が脱力しているため、電源投入時の力の掛かり方の微妙な差によりそれぞれの運動へ分岐する。FとGはひとつのリンクで接地しており他のリンクを持ち上げているため、微妙に動き続けるが安定している。C,D,H,Iは接地点の間に関節が1つだけであり、安定位置を探しながら接地点を動かし続ける準安定状態である。CやHの姿勢では最長のリンクが動くことで重心が大きくずれ、少しずつ水平方向に移動する動きが生まれた。BとEでは、接地点の間に2つの関節があるため、重心を大きく持ち上げる動きとなった。2つの関節がそれぞれバランスをとるように動きを変化させるため、一番複雑な動きとなった。3つのリンク長の差が大きいため、BとEでは安定点が見つからず、立ち上がったあとに転倒して別の姿勢に遷移した。Bの姿勢からはFに遷移し、Eの姿勢からはAに遷移した。Aの姿勢は、Apostrophの特徴である螺旋形状を効果的に用いる姿勢であり、身体を揺らして振動する動きが創発された。関節の動きによって徐々に揺れが大きくなる動きが創発され、環境や重心のバランスによって、低い確率だがEの姿勢に戻る動きも見られた。

### 5.6.2. 展示における評価

本作品は、東京大学生産技術研究所内のギャラリーにおいて2014年10月23日～11月2日に行われた「Research Portrait 01」展、2015年3月25日～3月29日に行われた「PLAYFUL」展において展示を行った(図5.14)。また、アルミ板を用いて製作した、外観やカーブの性質が異なるが基本的な身体構造は同様な試作を、2014年6月2日～6月8日に行われた「Bio-likeness - 生命の片鱗 -」展にて展示した。これらの3つの展示は大学内のギャラリーで行ったものであるが、入場無料とし一般向けに広報を行い、学内の研究者だけでなくアートやデザインに興味を持つ学生や社会人、家族連れ的一般客など様々な年齢層の来場を得られた。いずれの展示も約千名の来場者数を記録し、多くの鑑賞者に作品を体験してもらうことが出来た。

Apostrophは床と強く衝突することもあるため、Bio-likeness展では床にタイルカーペットを敷いた上に展示を行い、その後の2つの展示では高さ500mm, 2500mm × 750mmの長方形の天板にフェルトを張った展示台の上で展示を行った。リンク同士が互いにすり抜ける形状の無限回転構造を用いているため、手などを挟む危険性があり、またCSLsの特性上、手などを挟むとより強く挟むように力が働く。このため鑑賞者には、Apostrophには手を触れずに鑑賞するよう促した。



図 5.14: 展示の様子

展示では、Apostrophを見た多くの鑑賞者から、生きているよう、生き物みたい、という感想を得ることが出来た。特に身体の両端を床に押し付けながら重心を持ち上げるような動き（図 5.13 B,E）の際に、生物らしく感じるという感想が得られた。リンク同士の長さが異なるため、前述の動作の際には重心が不安定に変化しながら立ち上がるが、その様子を「生まれたての馬みたい」といったように生物に例える様子が見られた。CSLsは安定点を探すシステムであり、安定姿勢に留まりほとんど動かなくなる状態（図 5.13 F,G）も

しばしば見られた。このような状態では環境と相互作用する知的な動きが見られず、鑑賞者にあまり関心を示されない事も多かった。しかし、安定姿勢でも常に微小な動きを続けており「これは何をしているのか」と聞かれる事もしばしばあった。安定姿勢でも微小に動き続けていることで、常に生きているような印象は与えられたのではないかと考えられる。

Apostroph の形態デザインの特徴的な構造は全体が連続したゆるやかな螺旋で構成されている点だが、その曲線を接地した際、ゆりかごのように身体を揺らす動きが見られた(図 5.13 A)。徐々に揺れが大きくなり、偶にその勢いで寝返りをうつように起き上がることに成功した。この動きは多くの鑑賞者の興味を引き、「応援したくなる」といった感想が得られた。

展示に際して、立ち上がろうとしていると説明したが、人やその他の動物とは身体構造が違うためか、立ち上がるという表現は鑑賞者にはあまり共感されなかった。作品に対しては「飽きない」「ずっと見ていられる」といった好意的な感想が複数人から得られた。シンプルな構造と知能を用いながら、このような感想が得られたのは、形状と構造によって多様な振る舞いが創発されたためだと考えられる。

また、展示を行った際、数人の観察者から「ヘビのようだ」という感想が得られた。構造も動きもヘビとは異なるが、全体が長い螺旋を描いていることや、無限回転を行う関節がもたらす柔軟な動きがこのような印象につながったと考えられる。

## 5.7. Apostroph の考察

### 5.7.1. 形の時間変化に対する考察

Apostroph においては、関節部で曲面の連続性は維持しておらず、また変形する素材を用いていないため、形態のなめらかな時間変化はあまり実現できていない。Apostroph では動きを2次元に制限し、形態も2次元形状を基にデザインを行っている。それぞれのリンクは回転軸の2次元投影形状は同じ径の円形に収束しているため、回転軸部分で大きな折れは生じないため、ある程度の連続性は保たれている。

Apostroph には生物とは大きく異なる形状及び構造が用いられており、外観自体には生物らしさはなく、リンク同士がすり抜けて無限回転を行うような構造も人工物特有である。しかしながら、この構造によって可動範囲が増え、様々な姿勢が可能になっており、その点では生物より柔軟な構造といえる。ヘビのよう、という感想が得られたことは、この無限回転による柔軟性の高い動きの印象が起因していると考えられる。



### 5.7.2. 動きの時間変化に対する考察

Apostroph で用いたアルゴリズムでは身体及び環境である地面を介して重力に対してインタラクションを行うため、身体形状が動きに影響を与える。Apostroph の外観デザインには緩やかな螺旋を描くカーブを用いたが、このカーブによって動きになめらかさを与えることが出来た。身体を持ち上げる際常に地面との接点は変化するが、全体を連続性の保たれたなめらかなカーブで構成することで、接点の変化も連続的になった。また、バランスが崩れて姿勢が変化する際にも、カーブによって地面と接地することで、重心変化をゆるやかに受け流すことが可能となった。本研究は、ゆるやかな螺旋を用いたなめらかな身体形状が、なめらかな動きの実現にも関わっているという点で非常に興味深いデザイン事例だといえる。

### 5.7.3. 人に対する印象に関する考察

Apostroph は生物には無い構造を用いたが、鑑賞者は生物のようだと話し、感情移入を伴って接した。Apostroph の鑑賞者からの反応として興味深かったものとして「飽きない」「ずっと見ていられる」という感想があった。現在既に家庭にも導入されているエンターテインメント目的のロボットやペットロボット、エージェントロボットなどでは、予め用意された動きのパターンのなかから動作を行うものが多いが、このような全く同じ動きを繰り返すものは機械的な印象をもたらし、飽きを生じさせる傾向にある。単純な知能システムを用いながらも、形及び構造によって動きの多様性及びなめらかな時間変化を促したことが、飽きない動きの実現につながったと考えられる。

## 第6章

考察

---

## 6.1. 成果作品におけるなめらかさの実現手法

本研究では、柔らかい生物が人間にもたらず印象である「なめらかさ」の実現における課題として、「時間変化のなかで形のなめらかさ（連続性）を維持すること」「時間変化のなかで動きのなめらかさ（連続性）を維持すること」を挙げ、これを解決するためのデザインを探った。本研究で行った3つのプロトタイプにおいて上記課題に対して行った操作を以下にまとめた（表6.1）。

表6.1: 3つのプロトタイプにおける連続性実現のための操作

	目標とした印象	形の連続性	動きの連続性
 <p>Flagella</p>	曲面の有機的連続性を維持した運動	接続部で曲率連続性を維持した 屈曲したパイプの回転構造	接近時に斥力を発生させ互いを 避け合うアルゴリズム
 <p>Planula</p>	人とのインタラクションにおける なめらかさの実現	弾性体の支柱をワイヤーによって 屈曲させる構造	弾性変形を伴いながらランダムに 移動する基本動作 + 人の接触に対する回避運動
 <p>Apostroph</p>	生物の根源的な動作原理を利用した 外部環境とのなめらかな相互作用	ゆるやかな螺旋状の身体 + 関節部分の円に対してなめらかに 連続する形状	外力に反発するアルゴリズム + 環境との接触面に連続性をもたらす 曲線形状の採用 + あらゆる姿勢に対応する360°回転 可能な関節構造

### 6.1.1. Flagella におけるなめらかさの実現手法

Flagella は、曲面の有機的な連続性を維持して運動を行うことを目的として開発した。インダストリアルデザインでしばしば用いられる有機的な曲面は、全体がゆるやかな変化を持った曲面であり、水の詰まった生物のもつ曲面の特徴を彫刻的に再現したものである。このような曲面の連続性は関節部では途切れてしまうことが一般的であるが、本研究では連続性を維持して運動する構造を開発した。

### 形のなめらかさを維持するための操作

この研究では形の連続性を維持するために、屈曲した円断面のパイプを回転関節で接続し互いに捻るように回転させることで、ジョイント部分が変化せずパイプが変形しているように見える構造を開発した。人工物の外観デザインにおいて有機的な曲面が用いられてきたのは先述のとおりだが、人工物による彫刻表現では硬い素材を用いており、生物のように運動時にも連続性を保つことは難しい。一方で、人工物は硬い素材が用いられる事に加え、複数の部品のアセンブリによって作られるという特徴もある。このため複数の部品、場合によっては異なる素材同士を、組み合わせた際に部品間でも曲面の連続性が保たれるようにデザインするということが行われる。ここで用いた手法も、部品同士を接続するため継ぎ目が生じるが、継ぎ目部分で部品間の連続性を途切れないようにすることで、形のなめらかさを実現した。

この手法を用いたことで、関節部分で常に連続性を保ち運動時においても外装曲面の連続性を維持し続けることが可能になった。Flagella では、回転移動させるリンクの途中部分にカーブを与えることで、関節部は変化しなくても全体に動きが生まれるようなデザインとした。この結果、全体が常に張りのある連続的な曲面に包まれ、その張りの内部からの力によって形が変形しているような印象が実現できた。水の詰まった袋である生物の動き、形の変化がもたらすなめらかな印象を目的としたものであったが、軟体動物のような、骨ではなく水分を骨格として動く静水骨格動物のような柔らかい動きの印象が実現できた。

### 動きのなめらかさを維持するための操作

形の連続性を維持する上記の構造を用いることで、等速の回転運動でもなめらかな形の変化を伴う運動が実現されることが、CG シミュレーションや原理試作で確認できた。このため、Flagella の基本的な動作には等速回転運動を用いた。内部を通る配線の保護のため、およびモーターの特性から回転範囲は制限される。この範囲内で動き続けるために、範囲内でのランダムな往復運動を基本動作とした。回転方向を変化させる際はゆっくりと減速し、ゆるやかな方向転換を行った。これは動きのなめらかさを維持するための操作であるとともに、モーター内部のギアや機械部品への衝撃をゆるめる効果ももつ。方向転換時に減速をしないものをCG シミュレーションによって作成したところ、方向転換時に動きのなめらかさが途切れることによって、形の変化のなめらかな印象も途切れることが確認できた。このことから、本作品で目的とする有機的な曲面の連続性を維持したなめらかな形の変化の印象には、動きの変化のなめらかさも重要であると考察できる。

この基本動作に加え、アーム同士の接近時に斥力を発生させながら互いを避け合う回避運動を与えた。一般的なロボットアームでは、接触時や接触の可能性を検知した際一度停止する。KUKA社のLight Weight Robot[62]や、Rethink Robotics社のbaxter[90]といった人間との共同作業を前提としたロボットアームが開発されているが、このようなロボットも人間と接触した際一旦停止する。本作品では、このような不連続的な動きにならないよう、なめらかに回避動作を行う本アルゴリズムを開発した。接近時にモーターにかかる斥力を発生させるため、回避のための動作が加速度として作用する。この加速度を基本動作と組み合わせることで動きの変化である速度の変化、つまり変位の二階微分である加速度が連続的に変化する、なめらかな運動変化を実現した。

上記の操作によって、Flagellaにおいては形の変化においても動きの変化においても連続性が保たれたなめらかな印象が実現した。Flagellaにおいては、特に形の連続性を維持する構造が全体のなめらかな印象の実現に有効であったと考察できる。

### 6.1.2. Planula におけるなめらかさの実現手法

Planula は、人とのインタラクションにおいて、なめらかな印象を実現することを目的に開発した。空間全体が智能化するネットワークロボティクス、アンビエントインテリジェンスと呼ばれるシステムにおける、空間におけるセンサと人との関係性のプロトタイプとして開発を行った。このため、人間の接触を感知するセンサを弾性素材の支柱によって移動させる構造を開発した。

#### 形のなめらかさを維持するための操作

形の連続性を維持するための構造として、弾性素材のパイプ材をワイヤーによって屈曲させる構造を開発した。このパイプ材を支柱とし、その先にセンサを保持する先端部を取り付け、パイプの屈曲によって先端部を移動させる。ワイヤーを4本放射状に配置し、向かい合う2本を1つのモーターで駆動することで、2つのモーターによって4本のワイヤーを駆動する。この2つのモーターの出力を組み合わせることで全方位への先端の移動を可能にした。先端は支柱の曲げに沿って動くため、横方向の移動とともに高さ方向の移動を行う。モーターの出力を変化させることで先端が動き、同時にパイプの屈曲の方向や度合いが変化する。パイプが常に変形を伴って動いているため、形の変化もなめらかなものとなる。この結果、地面から触角のように伸び、身体をくねらせながら動くような印象を実現した。

### 動きのなめらかさを維持するための操作

前述の動作構造に加え、連続性を保った動きを実現するため、モーターの制御アルゴリズムを開発した。Planula は空間において人間の接触を感知することを目的としたセンサロボットとしてデザインしており、基本的な動作アルゴリズムは空間内を探るように様々な方向に動き続けることを条件として開発した。直交した2軸のワイヤーの曲げ運動に伴う先端の移動を、それぞれのモーターの出力方向を X, Y とした2次元平面上の運動に近似し動きの設計を行った。2次元平面上で自由に運動するアルゴリズムの設計は容易であるが、Planula の動きはモーターによって弾性素材を曲げる構造によって生まれるため、2次元平面上で近似した通りの動きにはならない。先端部でセンサを保持しているため、慣性と支柱の弾性によって、動き始めでは先端の移動幅が小さい、停止時に振動が起こる、といった動きの特徴が現れる。このような動きの特性をふまえ、開発した複数のアルゴリズムを用いて実際に先端部を動かしながら移動範囲や速度の調整を行い、連続性を維持した動きを実現した。

また、人間の接触を感知したことを示すインタラクション動作も実装した。2次元平面を自由に動く基本動作に加えて、接触を4方向のセンサによって検出し、回避運動を行う。手が近づくとセンサの出力値が上がるため、センサの出力値に応じて、センサと逆方向である回避方向に加速度を発生させる。センサは放射状に配置されており、発生させた加速度の合力を作用させることで、手の位置に応じた回避運動を行う。2次元平面上の移動における加速度として作用させることで、時間変化のなかで常に出力が変化し続けることになり、この結果動きの連続性を保つことが出来た。

上記の操作によって、Planula では形の変化および動きの変化において連続性を実現した。弾性素材を支柱に用いることで形の変化の連続性を実現したが、素材の特性上動きを思い通りに設計することが困難になった。Planula においては、この構造を用いたうえで動きの時間変化における連続性を実現する制御アルゴリズムを開発したことが、全体のなめらかな印相の実現に有効であったと考察できる。

#### 6.1.3. Apostroph におけるなめらかさの実現手法

Apostroph は、重力に抗い身体を持ち上げるという生物の根源的な動作原理のみをもちいたロボットのデザインである。身体を介して地面などの環境と関わり、重力に対して定位するのはロボットにおいても重要な機能である。先に挙げた2つのプロトタイプとは異

なり、Apostroph は環境に固定されておらず地面と身体を介して相互作用を行う。このような環境とのインタラクションのなかでなめらかな動きおよび形の変化を実現することを目的として開発を行った。

### 形のなめらかさを維持するための操作

Apostroph では無限回転を行う身体構造を採用している。これは複数の部品のアセンブリによって構成される機械特有の構造であり、生物の特性とは異なる。身体が連続していないからこそ成り立つ構造のため、形の連続性を維持することは困難である。Apostroph は2つの関節の回転軸を並行に配置し、動きを2次元方向に制限している。回転軸に垂直な平面に投影した形において、回転軸の同心円をなめらかにつなげるカーブによって形が構成されており、角度変化の際にも曲線的な連続性は保たれる。また、3つのリンクに全体で大きな螺旋を描くカーブを持たせたことも、リンク同士の連続性を実現するための操作である。

### 動きのなめらかさを維持するための操作

Apostroph では、外力に反発して動くというシンプルなアルゴリズムを用いている。このシステムを用いて重力との相互作用し、身体を持ち上げる動作を行う。このため、動きは関節への力の掛かり方、つまり身体形状や関節の位置などによって決定する。つまり、形状は動きの創発のための一要素であるといえる。Apostroph では、動きの連続性を実現するために形の操作を行った。

Apostroph で用いたアルゴリズムは外力に応じて逐次的に出力を変えるため、どのような身体形状を用いても動きの連続性はある程度実現される。本研究では更に動きになめらかさを与えるための操作として、ゆるやかな曲線形状を用いた。多くのロボットは硬く角張った身体で地面と関わることが多いが、安定する代わりに動きの連続性が失われる。Apostroph では地面と接触する面を全て曲線でつないだ形にすることで、動作時に地面との接点をなめらかに変化させることが可能になった。また、重心移動によって急激な姿勢遷移が起こる際にも、衝撃を吸収するように転がる動きが生まれた。

また、関節が360°回転する構造も動きの連続性に寄与している。一般的なロボットでは関節の可動範囲が制限されていることが多いが、本研究では全ての角度において回転可能な関節とすることで、あらゆる姿勢で動作することを可能にした。重心移動によって転倒などの姿勢遷移を行っても、新たな姿勢からまた動き続けることが可能なため、動きの連続性が実現されている。

上記の操作によって、Apostroph では形の変化および動きの変化において連続性を実現した。連続回転構造など生物から離れた構造を用いているため、形の変化における連続性は他の2つに比べて劣る。しかしながら、形が動きの連続性を維持するためにも作用しており、またこの形と制御アルゴリズムから創発される動きが関節をゆっくりと繊細に動かし、この繊細な動きが形の連続性に寄与していると考察できる。Apostroph においては、身体形状と制御アルゴリズムが動きを創発するため、動きの連続性を実現する形を開発したことが、全体のなめらかな印象の実現に有効であったと考察できる。

## 6.2. 連続性の実現手法に関する考察

前節では、個々のプロトタイプにおいてなめらかさを実現するために行った操作についてまとめた。ここでは、それらに共通する手法や、異なった身体形状においても適応可能だと考えられる知見について考察する。

### 6.2.1. 形の時間変化における連続性を維持する手法

#### 運動の性質に沿った幾何学的性質の選択

先に述べた通り、柔らかい皮膜の内部で柔軟な部位が動く生物のなめらかな 4D Appearance を、生物と同様の方法で人工物に置き換える事は困難である。本研究では人工物の特性を活かしてなめらかな形の変化を実現した。

本研究の知見として、運動の性質に沿った幾何学的性質を持った形を与えることが有効であることがわかった。具体的には、人工物の一般的なアクチュエーターであるモーターの回転運動に対して、回転軸の同心円形状を与えることが有効である。ロボットの身体は変形しない複数の部品をアセンブリすることで出来ている特性上、関節部分での外装の連続性を維持する事が困難である。これに対し、回転に合わせた円形状を基本とした形を与えることで、角度が変化しても部品同士の形の連続性を維持する事が可能になる。複数の部品を曲面の連続性を維持するように設計し、複数の部品で1つのなめらかな形を構成する手法は、工業製品の外装デザインにおいて一般的に用いられる手法である。良い連続性を持ったものをひとかたまりとして認知する傾向はゲシュタルト心理学の知見においても示されている。回転関節に対し、リンク同士がどの角度においても連続性を保った形状であるためには、円形状を用いることが有効なのである。



## 関節の形状が自然に収まるよう全体をデザインする

回転部分に円を基本とした形状を用いる操作は、工業デザインにおいてもヒンジやドアハンドルなどのデザインに用いられている。

ハンドルのデザインでは、回転軸の位置を明確に示すことが操作性にもつながるため、円形状を強調したデザインがしばしば用いられる(図6.1中央)。一方で、形のなめらかな時間変化を目的とするうえでは、円形状を強調するのではなく、円形状がリンク形状に自然におさまるように設計した方がよい。先述のとおり、人はリンクや関節単体ではなく、関節で接続されたロボット全体をひとつのかたまり(ゲシュタルト)として認知する。このかたまりが常になめらかな曲面で覆われているようにデザインすることが理想であり、そのためには、関節形状が全体の形のなかにおさまるように設計する必要がある。Flagella の例では、リンク芯線の曲率が0になる点を関節とすることで、なめらかな変化を実現したが、曲率が0になる部分、つまり芯線の直線部分を伸ばすと関節部分が目立ち、屈曲部と関節の直線部の差異が認識しやすくなり、全体のなめらかな印象が薄れる(図3.6左)。Apostroph においては、モーターを配置する特性上回転軸の円が協調されるデザインになっているが、リンクの形状がゆるやかな螺旋曲線から回転軸の円へなめらかにつながるようにデザインすることで、全体がなめらかな曲線で包まれたような印象を持たせている(図6.1右)。

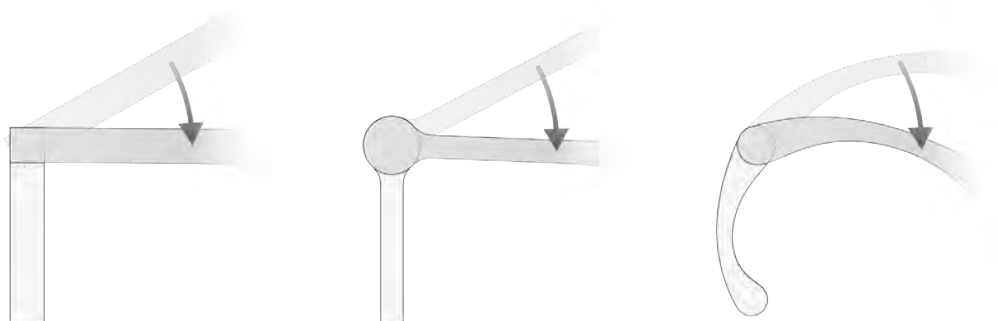


図 6.1: 関節の形状デザイン例

## 曲率まで考慮した連続性の維持

金属のような光沢を持った素材においては、環境の映り込みも形の印象、認知に影響を与える。そのため、自動車の外観デザインにおいては映り込みまで考慮したデザイン・製造が行われる。

曲面への外環境の反射は、視点と傾きによって決まる。よって、外環境の映り込みがなめらかになるためには、傾きの変化、つまり曲率が連続している必要がある。視点が動くと映り込んだ環境が動くため、なめらかでない部分が顕著になる。このため、自動車をはじめとする工業製品のデザインでは、映り込みをシミュレートし、視点を変化させながら曲面のなめらかさを確認するプロセスが用いられる。動きを伴うロボットでは視点が動かなくても傾きが時間変化するため、視点を動かし続けるのと同様に環境反射が動く。Flagella では鏡面反射を伴う素材を用いている。リンクの芯線を円弧にした例では、関節部では曲面の傾きは連続するが曲率は連続しないため、動いている際に反射の変化に不連続性が生じ、全体のなめらかな印象を損なった。つまり、曲面のなめらかさを運動時においても維持するためには、関節部で曲率連続、CAD の定義における C2 連続以上の連続性を維持する事が有効である。

### 6.2.2. 動きの時間変化における連続性を維持する方法

#### 変位の二階微分まで連続性を保つ

変形や移動といった動きにおいては、変位の時間変化に連続性をもたせることがなめらかな動きにつながる。変位の変化量は速度であり、速度の変化量は加速度である。小川らによる人間の四肢運動を定式化したサイバネティックモーション [17] や、Flash らが提案した人間のなめらかな手先の運動を表す躍度最小モデル [91] も、加速度がなめらかに変化する特徴をもつ。本研究においてなめらかな 4D Appearance を実現するうえでも、加速度、つまり変位の二階微分までなめらかに変化するような制御を行うことが重要であった。

Flagella や Planula の研究では、他のアームや人との接触を回避する動作を行うが、この回避動作の際、接触の距離や方向から回避方向のベクトルを計算し加速度として作用させることで、なめらかな回避を実現した。回避運動を行う主体も回避対象も動き続けており、互いの距離や接触の方向、またそれに伴う回避方向へのベクトルも常に変化する。回避ベクトルの計算および加速度を与える操作を短い間隔で行うことで、連続的な変化が実現できる。このとき、計算の間隔に対して与える加速度が大きすぎる場合、加速度が急激に変化してなめらかな回避運動は実現できなくなる。

回避の正確さと動きをなめらかに変化させることはトレードオフである。機敏に動き

を変化させた方が確実に回避を行うことが可能であり、小さい加速度で回避運動を行う場合、目的の移動を行うまでの遅延が生じる。本研究では、ゆるやかな加減速を視覚的に認識可能にすることを重視し、与える加速度を小さく設定した。この小さい加速度による動きが、なめらかな印象につながったと考えられる。しかしながら、先述のとおり加速度が小さすぎる場合には回避が達成出来なくなるため、なめらかな印象と目的とする運動の実現を両立できるように加速度を調整することが重要である。

Apostroph の制御においては、加速度を用いていないが、出力を決定する際に単位時間前の出力に定数を掛けたものを足す制御を行っている。つまり、単位時間毎に計算される出力は、実際の出力の変化分として加速度と同様に作用し、ゆるやかな加減速を伴った動きが生まれる。Apostroph で用いた CSLs では、角度の変化と逆方向に出力を行うことで、外力へ抗う運動を実現する。角度変化に対する出力の大きさを決める定数と、足し合わせる単位時間前の出力の比率を決める定数の2つのパラメーターを操作することで、動きの性質を変化させる事が可能である。ここでも、外力の変化に対して即座に反応する設定や安定位置で完全に静止するような設定も可能であるが、常に動き続け、作用された力に対してゆるやかな加減速を伴って反発運動を行うようにパラメーターを調整することで、なめらかな印象を実現している。

### 6.2.3. 形と動き双方において連続性を維持する

本研究で目的とする条件として、形の時間変化において連続性を維持することと、動きの時間変化において連続性を維持することの2つを挙げたが、これらをどちらも満たすことが重要である。

形のなめらかさを実現するための手法として、リンク同士の関係性がどのような状態にあっても連続性が保たれたように見えるように外装を設計することが重要であり、モーターを用いた関節では円を基本とした造型によってこれが実現することを述べた。しかしながら、Flagella のように曲率連続性まで維持する関節構造を用いても、関節の回転方向を急に変えるなどなめらかでない運動を与えた際には、4D Appearance としてのなめらかな印象が薄れた。このように、形のなめらかさを活かすには、運動の時間変化を考慮した制御設計が重要である。Apostroph は、関節部で曲率レベルでの連続性はない、しかしながら、関節の回転がなめらかに変化するため、柔らかい生物のようだという感想が得られるなど、なめらかな印象につながったと考えられる。

### 6.3. なめらかな印象を実現するための要件の考察

前節で述べたように、本研究では柔らかい生物が人間にもたらす印象である「なめらかさ」の実現における課題を「時間変化のなかで形のなめらかさ（連続性）を維持すること」「時間変化のなかで動きのなめらかさ（連続性）を維持すること」として、これを実現する手法を開発した。なめらかであるという表現を本研究では変化が連続的に行われるという工学的特性として用いた。形であれば表面の変化、つまり傾きが連続的に変化すること、動きであれば変位の微分である速度が連続的に変化すること、と言い換える事ができる。これらを定量的に定義可能な要件としたが、本論文で述べた作品を製作する過程で、これらを満たすだけでは柔らかい生物のような印象の実現において不十分であった。特に、形や動きの変化はなめらかであっても、生物のような印象が得られない事例もみられた。

本研究で製作したプロトタイプ群は、前述の要件を満たす手法を用いながら、柔らかい生物のようななめらかな印象を実現することを目的としてデザインを行った。4D Appearance が鑑賞者にもたらす印象は定性的なものであるため、著者の主観および開発チームの感覚的な評価を基準としながら調整を行い、設計を行った。このような主観的な設計を行うなかで、なめらかな印象の実現において重要だと考察した要素を以下に挙げる。

- 常に変化し続けていること
- 変化率が一定でなく増減が単調でないこと
- 外的な力に起因する動きに見えないこと
- 外部環境との連続的な相互作用

#### 6.3.1. 常に変化し続けていること

動きにおいてなめらかさを維持するための要件として、停止しないことを挙げたが、作品の製作を行うなかで、なめらかに変化することに加え、変化が途切れないことが生物のような 4D Appearance の印象の実現において有効であると感じられた。

Flagella においては、制御においてアーム目標姿勢を用いた際、目標角度に到達した関節が停止してしまうと、それまでの柔らかい印象が失われた。Flagella では、硬い素材を形と動きの組み合わせによって柔らかくみえる構造を用いていたので、動きが途切れると変化も途切れてしまうためである。また、Planula においても、人間に近づく制御をした際近付いた状態で停止した状況や、細かい加減速が先端の動きに反映されず停まったよう

にみえてしまう状況では、生物のような印象が失われた。複数の動きを見せた実験においても、停まっている動きが生物らしい印象を阻害することが被験者の発言から考察された。Apostroph は常に外力に応じて動き続ける制御であったが、姿勢遷移が収束して動きがなくなる状態よりも、動いている状態の方がなめらかな印象が感じられた。このことから、Apostroph のデザインプロセスにおいても、動きの変化が起こりやすいよう身体構造を設計した。

曲面において変化が止まっている状態、つまり傾きが一定の状態は、直線や平面といった形になる。生物の身体において直線や平面はほとんどなく、また生物の動きは停止することは無い。このため、変化がない状態は生物の印象からは遠くなるのだと考察できる。Flagella において、接続部の連続性を協調するためにパイプの芯線に直線を用いることも検討したが、直線部分が機械的な印象を強調したため、最終的なデザインでは直線部が無い形状を選定した。

### 6.3.2. 変化率が一定でなく増減が単調でないこと

前述の要件に加え、変化量が一定でないことも生物のような印象の実現において重要である。形の表現において、傾きの変化率である曲率が一定である場合、円弧や球となる。これらの形は常に一定の曲率を保っている点でなめらかであるといえるが、形だけでは生物のような印象が得られにくい。一般的にオーガニックデザインと呼ばれる有機的な曲面表現は、曲面が連続的に変化しながらも複雑な変化を持つ。曲率が連続性を保ちながらも、値が一定でなく複雑な増減をもつことで、有機的とよばれる印象につながっている。このような複雑な変化を時間軸においても持つことが、4D Appearance における生物のようななめらかな印象の実現には重要だと考えられる。

Flagella においては、重心移動と慣性の影響で受動回転する先端部の指部分の動きに対して、生物のように感じるという感想が鑑賞者から得られた。慣性モーメントを大きくしたため回転が変化しにくくなり、これがゆるやかな加減速を生み出し、回転速度のなめらかな変化を実現している。これに加え、3本の指の回転軸をずらしたことで、慣性と重心移動がそれぞれ別に起こることで3本がランダムな動きをしている。この複雑な動きが生物のような印象につながったと考えられる。

Planula の開発においては、円運動をベースにした動きを観察した際、鑑賞者が円運動であることを知覚し、これに対して機械的で生物らしくないという感想が得られた。なめらかな動きであっても、変化の様子が単調で動きが予想出来てしまう場合は生物のような印象は得られないため、変化の様子、変化量の増減が単調でないことも重要だと考察できる。

### 6.3.3. 外的な力に起因する動きに見えないこと

アニメシー知覚の先行研究において、重力によって動いている事が認識できる場合、非生物的に感じられるというものがある [63]. 重力下で動くロボットにおいてもこれは重要だと考えられる. Planula では支柱の弾性により発生する振動も、動きが素材の機械特性に起因することが知覚しやすく、生物のような印象を阻害することにつながった. このように、外から与えられた力で動かされていることが認識出来てしまう場合、生物のような印象が感じられない. キネティック・アート等でも、風によって動いている事が明らかなのは生物のような印象を受けない.

一方で先に述べた Flagella の先端部のように、形から想定される重心からずらして重心点を配置することで、重力や慣性による動きでも生物のように感じさせることが出来た.

### 6.3.4. 外部環境との連続的な相互作用

先行研究として、Walter の亀型ロボットや Breitenberg の思考実験、Roomba のような移動ロボットが外部環境と常に関わりながら動きを変化させる様子は、洗練された知能を持ったような動きを生み出すことが知られている [81]. 本研究で製作した作品においても、外部環境と常に関わりながら動きを変化させる制御手法を実装し、これが生物のような 4D Appearance の印象につながったと考察する. 先にも述べたとおり、複雑な身体構造をもつ人型や動物型のロボットは、動作生成が複雑であるため、予めプログラムされた動作を行う. その結果、動作間で一度標準姿勢に戻って停止する、動作中他の入力に対する反応がなされない、反応が遅れるなどの状況が生じる. 本研究は、このような状況が起こらないよう、常に外部環境と関わりながら動きを変化させる制御手法を採用した.

Flagella においては、接近時に方向転換をするものより、常に距離に応じて斥力をシミュレートした力と目標角度への移動の合力から動きを生成する制御を採用した. Planula においても、4つのセンサで取得したデータから常に方向を更新し、回避方向への運動を発生させている. Apostroph においてはベースとした制御アルゴリズムが常に外部環境からの入力に対する反応を伴うものである.

先行研究の移動ロボットとの違いのひとつは、動きが2次元の移動ではなく3次元であることである. 特に Flagella においては、3次元的な動きにおいて逐次的な反応を行わせるため、3次元のベクトルを計算して回避運動を実現した. 一方で、Planula は計算上2次元の近似を用いているため、移動ロボットと大きな差はない. しかしながら、生み出される動きは構造の特性上高さ方向の運動も含むため、3次元的な運動となる. Apostroph

は回避運動ではなく重力に対して動的にインタラクションを行う点で、先述の移動ロボットとは異なる3次元的な動きを実現している。

本論文で述べた作品群の製作プロセスにおいては、回避運動の際の速度変化を丁寧に設計した。Flagella および Planula では、回避方向への運動を力のシミュレーションによって発生させている。力は加速度として運動に作用するため、回避運動は加速度を連続的に作用させることで実現する。運動において、変位の変化量が速度であり、速度の変化量が加速度である。加速度を適切に与え続ければ、速度が連続的に変化するなめらかな運動変化が実現できる。回避運動においては、加速度が大きすぎると速度変化および移動が急激になりなめらかな印象が失われる、一方で加速度が小さすぎると回避が出来なかったり、反応が遅れていたりするような印象になる。Flagella や Planula では、センサ値と発生する加速度の値の関係を様々に試しながら、なめらかに回避する印象が得られるように設計した。また、Apostroph においても、外力に対して反発する動きが、加速度として加算されるように作用する。このため、回避運動の例と同様になめらかな変化が実現する。ここでも外力に対する反発方向の加速度の値をパラメーターとして、様々に変化させながら設計を行った。

## 6.4. デザインのプロセスおよび手法に関する考察

本研究での作品製作においては、まず、形の連続性および動きの連続性を維持することを定量的に評価可能な要件として定義し、これを満たす構造および形、制御システムを開発した。これらの要件は、柔らかい生物の 4D Appearance の特徴を人工物によって実現するためのものとして定義したものである。しかしながら、上記要件だけでは鑑賞者に柔らかい生物のような印象をもたらすのに充分ではなかった。生物のような印象は定性的な性質であり、製作においては著者および開発チームの主観的評価によって検討を行った。

製品の外観デザインなどの審美的価値や印象などを検討する際、スケッチやレンダリング、モックアップなど、外観がもたらす印象を簡易的に体験可能にする手法が用いられる。定量的に評価出来ないため、短い時間で体験可能なモデルをつくり、確認と修正のプロセスを早いサイクルで行う。本研究における 4D Appearance のデザインプロセスにおいても、時間軸上での変化も含めた印象の確認を迅速に行うためのプロトタイピングを行った。従来の外観デザインの手法に対し、本研究では 4D Appearance 検証のためのプロトタイピングプロセスも含めて開発を行った。動きと形の双方を検証できる形でラピッドプロトタイピングを行う手法およびプロセスは、人と関わるロボットにおいて、人に対する印象を検討する目的において有益だと考えられる。

アイデアの検証段階や、身体構造および外観デザインの検証段階、動きの検証段階それぞれにおいて行ったプロトタイピングやデザインプロセスの考察を以下に述べる。

#### 6.4.1. 初期のアイデア検証段階におけるプロトタイピング

先に述べたように、ロボットにおいては動きを生み出す内部構造により身体構造が規定され、身体の形と動きの組み合わせによって4D Appearanceがあらわれる。作業を行うロボットにおいては、作業を効率的に行えるよう身体構造が決められるが、本研究では鑑賞者に与える体験のみを目標としているため、機械構造や制御手法も4D Appearanceの構成要素として外観デザインの一要素として設計した。

従来の工業デザインにおける動きを伴わない外観デザインにおいても、人に与える印象など定量化出来ない部分の設計は困難であった。このようなデザインプロセスにおいては、スケッチやラフモデルなど、アイデアを形にして共有することで、外観がもたらす印象の確認や検討を行ってきた。ロボットの身体構造は4D Appearanceの実現において重要であるが、前述のように様々な要素が関係し合い設計が困難である。本研究では、ロボットが4D Appearanceを簡易的に検討するためのプロトタイピングのプロセスを重視した。

本研究では、機械設計等の時間がかかる作業に入る前に、形と動きの簡単なプロトタイピングを行い、形と動きによって創発される4D Appearanceの検討を行った。

Flagellaでは、CGアニメーションと、発泡材と磁石を用いた簡易的なモデルを製作した。アニメーションでは複雑な制御を行わない単調な動きのみを扱い、発泡材によるフィジカルなモデルは動力を持たないモックアップであったが、形が時間変化のなかでもたらず4D Appearanceの検討においては有益であった。Planulaでは、弾性の支柱をワイヤーで駆動する動きのプロトタイプとして、ワイヤーを人間の手で引っ張る簡易的なモデルを製作した。4本のワイヤーを手でコントロールすることで、機械を用いてどの程度制御可能かを検討することが出来た。また、弾性素材の屈曲の時間変化がどのような印象をもたらすかも検討することが出来た。Apostrophは前述の2作品とは異なり、既存の制御プログラムを用いた。そのため、制御プログラムをインストールしたモーターを、レーザーカッターや3Dプリンタなどラピッドプロトタイピングのための装置を用いて製作した様々な身体と組み合わせて、身体構造の発想とそれがもたらす4D Appearanceの検証を行った。

このプロセスにおいて重要な点は、常に実現性の検討も行うことである。CGや構造をもたないモデルでは、実現性が伴わないプロトタイプも製作可能である。従来の動きを伴わない外観デザインにおいても、内部構造を入れたことでプロポーションが変化し、スケッチやラフモデルの持っていた印象が失われることがしばしば起こる。本研究でも、実現するロボットにおいて印象が大きく異なることが無いよう、運動時に必要な力やそれに合わ



せたモーターのサイズ等を想定し、それをもとに CG およびモデルの製作を行った。

### 一般的な外観デザイン手法との比較

一般的に、3次元でのアピランスを発想、検討するにはスケッチが用いられる。2次元の絵として表現するスケッチにおいて、3次元形状に加えて動きも検討し共有するためには、高い表現力が求められる。本研究で用いた実際に3次元で製作し簡単な動きも与える手法は、簡易的なものでも開発メンバーとの共有や検討がしやすい。

また、ロボットの設計段階では、リンクを線、ジョイントを接点として抽象化して表現する運動学モデル等が用いられる。ロボットの設計は作業を目的としたものであっても機械構造とジオメトリ、動きが複雑に関連するため、このような要素の簡略化が用いられる。本研究の初期のプロトタイピングでも要素の簡略化は行っているが、4D Appearanceの構成要素である形の時間変化に関わる部分は簡略化せずに行っている。リンクの形を線などに置き換えない点が運動学モデルとの違いである。

### 身体構造の自動生成手法との比較

ロボットの身体設計は、形や内部部品の数や種類、ジオメトリといった様々な要素の膨大な組み合わせの中からひとつを選択するプロセスである。この膨大な解空間を探索する手法として、生物の進化のモデルを模した手法が研究されている。生物も多様な形態をもつが、これらは目的に応じて設計されたのではなく、進化の過程で選択と淘汰を繰り返して残ったものである。このプロセスをコンピューターによって再現する試みがなされている。Karl Simsは遺伝的アルゴリズムを用いて、仮想空間上で様々な形態を持った仮想生命体を発生させた[41]。Simsの作品では、現実空間の生物とは全く異なる形態を持った生命体が、まるで生物のようにいきいきと動いており、CGアートとして高い評価を受けている。生物のような印象を実現する新しい身体構造を開発するという点で本研究と類似する。また、この遺伝的アルゴリズムなど進化のモデルを用いてロボットを開発する研究もなされている。

これらの研究に対し、本研究は人間の発想に頼った開発を行っている。簡易的なモデルやCGを用いても、コンピューターによる自動生成のような多数の検討は難しい。一方で、Simsの例では身体は直方体の組み合わせでしか定義されず、実空間で動くロボットへそのまま応用することは出来ない。Pollac[92]やLipson[42]、遠藤[43]のように実空間で動くロボットを製作している例もあるが、製作可能になるよう条件が設定されているため生成される形態は多様なものとはいえない。本研究では、Flagellaでは正確な円断面と屈曲した形状を利用し、形の視覚効果が重要な役割を果たしている一方で、Planula

では弾性素材を用いている。このようにそれぞれのプロトタイプにおいてなめらかな 4D Appearance を実現するための特徴が異なり、現状コンピューターでは発想が困難なデザインを行っているといえる。

一方で、遺伝的アルゴリズム等を用いた身体構造の自動生成手法と、本研究で定量化可能な条件とした曲面のなめらかさの維持や動きのなめらかさの維持といったものを組み合わせることで、沢山の新しい形態の発想が可能になることも期待できる。例えば、Flagella で用いた曲面の連続性を維持する構造を基本に新たな身体を発想したり、Apostroph の事例で、姿勢の変化が多いものが残るように条件をつけることで、動き続けるための新たな形態を発想したりといった事が可能になるのではないかと考えられる。このような、本研究で得た知見と身体構造を自動生成する手法との組み合わせは今後の課題としたい。

#### 6.4.2. 時間軸も考慮した形のデザインのためのプロトタイピング

本研究では、「時間変化のなかで形のなめらかさ（連続性）を維持すること」をひとつの課題としてデザインを行った。これは、柔らかい皮膚を持った生物が、皮膚の内側で動きを生み出すため全体がなめらかな曲面に包まれたまま変形するように動く、という特徴を人工物によって実現することを目的としたものである。

生物は前述の特徴を持つものに対して、人工物は一般的に硬い素材によって作られた複数の部品の組み合わせによって構成される。よって運動も変形ではなく、硬く変形しない部品を機械的に移動させることによってなされる。本研究においても Planula では弾性素材を用いることで、変形を伴う構造としているが、人工物の素材や加工方法、運動構造等の特徴から、変形を伴わない形が用いられることが一般的である。このため、自動車などでは運動や動力学を想起させるような形が用いられるが、ロボットの 4D Appearance のデザインにおいては、変形を伴わない静的な形が、運動のなかでどのような視覚効果をもたらすかを考慮して設計を行う事が重要である。

Flagella においては、端部が円断面であり芯線の曲率が端部において 0 になること、という定量的な性質を形のなめらかな変化を実現するための要件とした。しかし、ここで挙げた定量的な条件だけで柔らかい身体をもつ生物のようななめらかな印象を実現するとは限らず、リンクは屈曲したパイプ形状としたが、パイプの芯線である曲線の性質を変えると動作時の印象も変化する。印象は定量的な評価が難しく、Flagella の製作では著者および開発チームの主観的な評価によって検討した。リンク形状を変えた複数のパターンの確認を容易にするためにシミュレーションソフトウェアを製作し、これを用いて検討を行った。曲率が 0 となる部分の長さや屈曲部の最大曲率など、リンクの幾何学的性質を変える

と動作時の印象にどのような影響を与えるか、といった定量化が困難な検討を早いサイクルで行うことを可能にした。

Apostroph においては、身体形状および構造が動きの創発に直接関係する。このため、簡易的な試作と CG を用いたシミュレーションを併用して形状の検討を行った。CG のシミュレーションには、C++ と OpenGL をベースとし、3DCG の描画が容易な開発環境である openFrameworks を用いた。Apostroph の検討においては重力や外部環境との相互作用によってどのような動きがもたらされるかを確認するため、物理シミュレーションのための計算エンジンである Bullet を用いた。CAD ソフトウェアで作成した 3D モデルを読み込むことで、様々な形状での動作を視覚的に確認可能とし、また 3D モデルを衝突判定にも用いることで、複雑な形状と外部環境の相互作用の様子を確認可能とした。しかし、コンピューターにおける物理計算は、床との摩擦や動作速度などを実際の見え方と合わせるのが困難であるため、簡易的な試作も重視し、両方を併用して検討を行った。曲線と無限回転可能な関節を用いる設計方針を決めた後は、2次元の物理計算エンジンである Box2d を用いたシミュレーションを新たに作成し、曲線形状を対数螺旋として定義することでパラメトリックに変更可能にし、詳細な形状の検討を行った。

## シミュレーションに関する考察

ロボットの製作プロセスにおいて、シミュレーションを用いることは一般的である。しかし、一般的なロボットにおいては、運動や形状を単純化して表現する手法が用いられる。本研究で用いたシミュレーションの特徴的な点は、形や動き、それらがもたらす視覚効果の検討、つまり 4D Appearance をシミュレートしている点である。4D Appearance は形や動きなど様々なパラメーターが影響し合い創発されるため、設計プロセスは複雑である。本研究で用いたシミュレーションの手法は、4D Appearance の設計において有益であったと考えられる。

本研究では Flagella と Apostroph の製作プロセスにおいて CG によるシミュレーションを用いたが、それぞれ異なったプログラムとして製作した。また、Apostroph では 2 種類の異なるシミュレーションプログラムを用いた。Flagella で用いた、曲線の性質を変化させながら動作の観察が可能なシミュレーションは、Flagella 以外には応用できないものである。Apostroph の事例でも、曲線を螺旋としてパラメーターを変化させながら動作を観察するシミュレーションは Apostroph に特化したものである。このように、製作のプロセスにおいてシミュレーションを用いた方が効率的な部分でシミュレーションツールから開発した点も本研究の特徴的な点である。

### 6.4.3. モーションデザインのプロセス

4D Appearance を構成する要素のなかで、制御手法は比較的検討が容易な要素である。制御はソフトウェアという形式をとるため、プロトタイピングが容易であり、また細かいパラメーターの調整も容易なためである。

本研究で製作した Flagella, Planula, Apostroph はいずれもサーボモーターを動力とした。Apostroph は Hild が開発したプログラムをサーボモーター内の CPU にインストールしているため、他の2つとは異なるが、Flagella および Planula で用いたサーボモーターはシリアル通信によってコマンドを送信することで操作が可能なものである。Flagella および Planula では、制御プログラムは PC 上で実行され、コマンドの送信も PC の USB ポートから行っている。本研究において PC を制御に用いたのは、制御ソフトウェアの開発環境と実行環境を同一にし、プロトタイピングのサイクルを早めるためである。Arduino などマイクロコンピューターボードもハードウェアのプロトタイピングにおいてしばしば用いられるが、マイコンへの書き込みやデバッグが PC 上のソフトウェアに比べて困難であり、また Flagella および Planula は制御機器を小さくする必要がなかったことから、前述のような制御手法を採用した。

### モーションをアルゴリズムによって定義する

本研究で製作したロボットの制御手法において共通するのは、外部環境を常にセンシングして動きを変化させる、環境とのダイナミックなインタラクションを実装している点である。ジェスチャーや仕草などあらかじめ設定された動作シーケンスを用いる制御では、同じ動きの繰り返しや、シーケンスが終わるまで他の動きが行えないなど、機械的で融通が利かない制御になる。それに対し、本研究で製作したロボットは、ジェスチャーのような複雑な意味を持った運動は出来ないが、外部環境に逐次反応するため、運動の変化がなめらかである。

ダイナミックなインタラクションを実現するため、本研究では動きの生成をアルゴリズムによって行った。動作生成のためのルールを設定し、1秒間に10回~60回程度繰り返すプログラムによって動的に運動を生成する。簡単な処理を高速で繰り返すことで、インタラクションの際も遅延が少なく、小さな移動が常に起こり続ける連続的な動きの変化が実現する。

## ハードウェアの特性を考慮して制御手法を検討する

前述のとおり、それぞれのプロトタイプではPC上で制御ソフトウェアを製作した。制御ソフトウェアではCGによるシミュレーション機能も付加し、制御アルゴリズムのCG上での検討も可能にした。しかし、CG上で検討した動きと、実際のロボットに適用した動きでは印象が異なる場合がある。

Flagella では、1秒間に10回のペースでモーターへ移動先の角度を送り続けて動作を生かせる。サーボモーターは本来正確な位置決めが可能であるが、精度の高い制御を行うと、単位時間毎に細かい停止が起こり、なめらかに動き続ける印象が実現できない。そのため、Flagellaの動作では目標角度と現在角度の差に応じて回転のトルクを変えることで、位置決め精度は劣るが運動時に細かい停止が起こらないような制御を行っている。

Planulaには弾性素材を用いているため、他の2つのプロトタイプに比べて動きの設計が容易ではない。弾性素材の曲げを用いるため、かけた力に対して反発する弾力が生じる。また、素材の特性上、弾性による振動が生じる。弾性素材を用いることは、形の変化の連続性を実現する意味では効果的であるが、前述のような制御の難しさが生じる。本研究では、この弾性素材の特性を踏まえたうえで、動きのなめらかな変化を実現することを目的として、様々な動作アルゴリズムの検討を行った。4章において、3種類の基本動作を開発したことを述べたが、それぞれの基本動作においても、加速度や基本的な移動速度など様々なパラメータを変化させながら検討を行った。急激な速度変化を行うと先端の振動が生じ、生物のようななめらかな動きとは言い難くなる。一方で、加減速が緩やかすぎると先端に動きが伝わらず、停止しているように認知され動き続けるなめらかな動きにならない。このため、動きのアルゴリズムは実際に構造と組み合わせて検討することが重要であった。

## 動作速度の検討はフィジカルなプロトタイプで行う

動作速度がもたらす印象の違いもシミュレーションと実物では異なるため、制御ソフトウェアで様々な速度を試しながら検討を行った。インタラクションによって動きが変化の際は、先述のように加速度を発生させているが、ここで与える加速度が動きの印象に大きく関わる。加速度が大きすぎると動きの変化が急激になり動きの変化がなめらかでなくなる。一方で加速度が小さすぎると動きの変化に遅延が生じ、インタラクションをスムーズに体験できなくなる。そのため、本研究ではインタラクション時に与える加速度を制御ソフトウェアで簡単に変更可能にし、様々な変化をさせて検討を行い決定した。接触に対してインタラクションを行うPlanulaでは特に重要であり、弾性素材や振動吸収機構によ

る動きの特性もふまえて何度もパラメーターを変えながら検討を行った。人との相互作用をもたない Flagella においても回避運動の加速度は慎重に検討し、Apostroph では展示を行う環境の摩擦等も考慮し、加速度に関わるパラメーターの調整を慎重に検討し、なめらかな印象が感じられるよう調整を行った。

## 6.5. 表現の抽象度に関する考察

抽象表現は、近代デザインにおいて一般的に用いられる手法である。ヴォリンゲルは、人間が自然界の複雑と混沌を嫌い、平静を求める衝動から抽象性や幾何学性を好むと分析した [92]。近代デザインの礎を作ったバウハウスにおいてもカンディンスキーやクレーといった抽象画家が教鞭をとっており、そこで生まれたモダンデザインにも幾何学図形を用いた形状が多い。

ヴォリンゲルは抽象衝動と、対象に自分の感情を投射する感情移入衝動とを対置している。ヴォリンゲルの分析は絵画などの当時の純粋美術に対するものだが、ロボットにおいては感情移入を目的としながら、抽象表現も用いられることが多い。抽象表現によっても感情移入がおこることはアニメシー知覚の先行研究によって明らかになっている。本研究でも、感情移入を伴うものとしてロボットをデザインしたが、外観デザインにおいては抽象度の高い形状を用いた。

ロボットのデザインの先行事例では、多くのロボットにおいて抽象表現が行われていた。複数の部品をアセンブリすることによって構成される機械は煩雑な外観印象になりやすいため、認知負荷の減る抽象形状が用いられる。人工物を人間に類似させていく過程で、類似度が人間に近づくところで親和感が負になる「不気味の谷」の問題も、ヴォリンゲルが述べた複雑さや混沌への嫌悪感に関連すると考えられる。そのため、不気味の谷に陥らない抽象形状が用いられたと考えられる。

しかしながら、先行研究では抽象化を用いながらも人や既存の生物をモチーフとしていた。本研究では、生物の外観を模倣しないため、より抽象度の高い形状を用いている。Flagella は外観による視覚的効果の実現の目的もあり、常に一定断面のパイプ形状を用いている。Planula においても、先端部に球をモチーフとしたシンプルな形状を用い、支柱も極力目立たないような外観を用いている。Apostroph においては樹脂の積層造形を用いることで、機械部品を保持する構造を外から見え難い部分に一体に造形し、ネジが出来るだけ見えないようデザインを行った。このように抽象度を高くすることで、鑑賞者が 4D Appearance を純粋に観察出来たと考えられる。

既存の生物をモチーフとしないながらも、本研究の成果は生物のような印象を鑑賞者

に与えることが出来た。また、従来の生物型ロボットでは難しかった動きのなめらかさや柔らかい印象が実現できた。この点から、本研究の成果は、柔らかい生物の持つ普遍的な性質の表現が出来たのではないかと考察できる。

## 6.6. 生物性に対する考察

本研究では、柔らかい身体を持った生物が我々人間に与える印象、4D Appearance を人工物において再現する事を目的として様々な構造を開発した。展示によって反応を観察した結果、成果作品であるプロトタイプに対して、多くの観察者が生物のように認知し、接することが確認できた。本研究で用いた手法の特徴は、人工物の特性を用いてなめらかな 4D Appearance を実現することであり、形や素材などは生物とは大きく異なる。それでも観察者が生物のように認知していることが観察されたことから、本研究で用いた「なめらかさ」の表現は、生物が人間にもたらす 4D Appearance の人工物による実現手法として一定の効果を持つと考えられる。

本研究の成果作品に対し鑑賞者が、イソギンチャクやクラゲのよう、軟体動物や、単細胞生物のようだ、と表現する様子がしばしば観察された。また、形は人間とは程遠いが、動きの特性や反応が人間らしい、という表現も観察された。軟体動物や単細胞生物などの生物は、人間とは形態が大きく異なる。しかしながら、これらを観察した人間は生物であると認識する。本研究で製作したロボット群は、これらの生物よりも人間とは遠い身体構造、身体性を持っている。しかしながら、生物のように認知する点で、人間とは形態が異なる生物との類似性を感じたのではないかと考えられる。本研究では生物の柔らかさに起因する動きの特性として「なめらかさ」を目的としたことも、軟体動物や水棲生物のような印象につながったと考えられる。

### 6.6.1. 人型や人に近い動物を規範としたロボットに対する利点／欠点

人間にとって親しみやすいロボットの姿として、人型や犬型など人間に近い動物の姿がしばしば用いられる。特に人間の顔のような表現に対して人は敏感であり、動きを持たない抽象化した表現であっても顔として認識し、また顔文字のような単純化した表現でも表情を読み取る事ができる。これらの点で、人型ロボットや人形型ロボット、犬などのペット型ロボットは優れているといえる。

本研究では、顔のように動きが無くても認知できるような特徴を用いていない。そのため、本研究の成果は動きを伴わない状態ではなめらかな印象を鑑賞者に与えることが出

来ず、生物のような認知もなされない。よって、対象を生物のように感じさせる、という目的や、直感的な親しみやすさにおいては、人型ロボットや人形型ロボットよりも劣る。

一方で本研究では、4D Appearanceとして、時間軸上でのロボットの見え方、視覚効果に主眼を置いて開発を行っている。Flagella がもたらした軟体動物のような柔らかい動きの印象をはじめ、Planula が実現した接触のアフォード、回避運動による反応の提示など、時間軸上での表現でないとは実現できない印象、視覚効果が実現している。また、人や身近な動物のように、人間にとって馴染み深い生物をモデルとしていないため、生物と全く異なる身体構造や動きを与えることが出来る。人間等をモチーフとしたロボットの場合、人間と著しく異なる動きを与えると「不気味の谷」現象のような問題が生じる。本研究の成果は、生物のような認知を与えながら、従来の生物とは異なる身体構造を持った生物として認識される点が特徴である。

### 6.6.2. 生物性と文化的背景に対する考察

日本において、ペットロボットやエンターテインメントロボットといった生物のような機械が受け入れられる背景として、リンゼイは日本古来の文化基盤であった神道の「アニミズム」の影響があると述べている [94]。Kaplan も、日本と西洋では文化的背景によってロボットの受け入れられ方が異なると述べている [95]。チャペックの R.U.R やフランケンシュタインといった人造人間をテーマにした小説や、ロボットをテーマにしたアイザック・アシモフの小説など、キリスト教圏での文化表現においては、人間を作る事は禁忌であり、最後には反乱を起こすというような描かれ方をされることが多い。イラストレーションなどでも、ロボットは敵や侵略者として描かれてきた [96]。

このような文化的背景により、人間と共存するロボットについて考える際には、日本で研究された原理や手法が海外でも通用するかはわからない。本研究の成果は、国際会議での発表や海外からの来訪者に対してのデモンストレーションを幾度か行ったが、概ね好意的な反応が得られた。Flagella に関しては不気味さを感じているような反応もあったが、積極的に手で触れようとするなど、嫌悪感を感じていないようにみられた。Planula に対しては、日本人と同様に積極的に手で触れ、”Lovable lamp” と表現するなど、特に好意的な反応が見られた。抽象的な形状がこのような効果につながったのではないかと考えられる。Apostroph に対しても、「ヘビのようで美しい」など好意的な反応が見られた。

日本と異なる文化圏においても、Breazeal の Sociable Robot [97] の研究など、ロボットと親和的にコミュニケーションを行う研究は行われている。また、ディズニーのアニメーションでは、非生物の擬人化手法がしばしば用いられている [16]。文化的背景の差異を踏まえた評価は行っていないが、展示の反応から本研究の手法は日本人以外にも一定の効果は持つと考えられる。



## 第 7 章

結論

---

## 7.1. 本論文のまとめと成果

本論文では、ロボットが人間と共存するうえで重要な要素である外観デザインにおいて、生物の動きのなめらかさを再現することを課題とし、形だけでなく構造、制御手法も含めた総合的な設計手法によって、なめらかな外観印象を実現する方法を探った。

第1章では、本研究の背景としてロボットシステムの現状と人間共存型ロボット研究の現状、生物と人工物の差異による生物型ロボットの問題について述べた。そのうえで、人工物において生物や自然物のもつ性質を引用することが、人間の身体に近い印象をもたらし、親しまれてきた背景を述べ、ロボットの4D Appearanceのデザインとして、人工物の手法によって生物のようななめらかな印象を実現するという本研究の目的について述べた。

第2章では、これまで行われてきたロボットの外観デザインの研究事例、動きのデザインの研究などの先行事例を整理し、本研究の位置づけを行った。

第3章では、曲面の連続性を維持して運動を行う構造として、屈曲したパイプ形状と回転関節によって軟体動物のような柔らかい外観印象を実現するデザイン手法を提案し、この手法によって実現した、軟体動物のような柔らかい外観印象を有するアート作品Flagellaについて述べた。展示によって、Flagellaが観察者に柔らかいもののような印象を与えられたことを確認した。

第4章では、なめらかに人とインタラクションを行うロボットのデザイン事例として、弾性素材の支柱によってセンサを保持し、支柱を曲げることで身体をくねらせるような動きを行うロボットPlanulaを提案した。ネットワークロボットにおける接触型センサのインターフェースのプロトタイプとして、接触をアフォードすることを目的とした基本動作のデザインプロセス、インタラクションの設計について述べた。

第5章では、人間と同じ環境に適応しロコモーションを行うロボットの形態デザインとして、無限回転関節と曲線形状をもつ骨格によって環境となめらかに相互作用を行うロボットApostrophを提案した。身体を介して環境と関わるシステムを用いており、生物とは異なる無限回転構造とゆるやかな螺旋形状の骨格によって、なめらかな運動の変化を創発した。展示において、提案した身体構造から創発された動きも含めたロボットの外観が、鑑賞者に生物性の認知を与え、好意的に受け入れられることを確認した。

第6章では、これまでに述べた作品において、なめらかな4D Appearanceを実現するうえで有効であった操作や設計要件について考察を行った。また、製作した作品群のデザインプロセスにおける特徴的な点について述べた。更に、本研究で用いた生物性認知を促すデザインについて、展示での観察者の反応から考察を行った。

ロボット研究において、人間の労働を代替する生産技術としてのロボットと、人間や生物と同じような印象の実現やコミュニケーション機能の実現を目的としたロボットは別々に進化してきた。人の役に立ち、且つ友だちのように接する、というロボットの姿は鉄腕アトムをはじめとする文化表現のなかで行われており、このビジョンが一般の人だけでなく、ロボット研究者にとってもロボットの理想像となっている。しかしながら、人間と生物は性質が異なり、機械を用いて生物を再現するのは困難である。また、人間の機能補助を行う目的においては産業ロボットのような機械の特性に即した姿のほうが適している。

本研究は、人と共存するロボットにおける、人に親しみやすく受け入れられる姿として、既存の生物の外観や身体構造を用いず、にもかかわらず人間に生物のような認知を与える、生物の持つ普遍的な性質を再現したロボットデザインを提案した。具体的には、柔らかい身体を持つ生物が人に対して与える印象の特徴として、なめらかな形及び動きの時間変化、4D Appearance を実現することを目的とした。これを人工物の手法で実現するための課題として、「形の時間変化がなめらかであること」「動きの時間変化がなめらかであること」を挙げ、この両方を満たす構造を開発した。前述のとおり、これらを満たす3つのプロトタイプを製作し、それぞれ展示を行い鑑賞者の反応を観察した。その結果、これらのプロトタイプが、人に生物のようななめらかな印象を与える一定程度の効果を持つことを確認した。

人工物の設計原理に忠実な手法を用いながら、生物のように人間に親しまれるデザインは、今後のロボットデザインにおいても有益な知見となると考えられる。

## 7.2. 今後の課題

本研究の今後の課題を以下に挙げる

### 7.2.1. なめらかな印象が親和性にもたらす効果の検証

本研究では、柔らかい身体を持つ生物が人間にもたらす印象として「なめらか」であることを挙げ、これが人間にとって親しみやすい印象に繋がると仮定し研究を行った。硬い素材で素早く精密に動く産業用ロボットは人にとって親和性があるとは言い難い。それに対し、本研究の成果は軟体動物や水棲生物のようなゆったりとした柔らかい印象を実現し、展示においても多くの人々が積極的に触れようとするなど、親しみやすく感じられているような反応が観察できた。しかしながら、実際に本研究で実現した「なめらか」な印象が、ロボットのもたらす親和性につながっているかは検証できていないため、今後の課題としたい。

### 7.2.2. タスクを持ったロボットへの応用可能性の検討

本研究の成果は、目標としたなめらかな 4D Appearance を先鋭化したアート作品として製作し、発表を行った。ロボットとして人々の生活に役立つ機能を持たない点では、ペットロボットやエンターテインメントロボットと変わらない。しかしながら、本研究で開発した構造、4D Appearance を生む 4D Structure は、人工物の特性に忠実な構造として開発している。よって、本研究の成果は、将来的には人の生活に役立つロボットへ応用出来ることが予想される。

### Flagella の応用展開

Flagella は、ロボットアームをモチーフとしたアート作品である。一般的にはマニピュレーターと呼ばれるが、人の腕のように動き、人の作業を代替することからロボットアームという呼称も一般的である。ロボットアームは人間の腕とは異なり、1つの関節に複数自由度を持つのではなく、1自由度の関節の連結によって構成される。これはアクチュエーターである筋肉とモーターの違いに主に起因するものである。

Flagella の構造は 1 自由度の関節を連結するものであり、ロボットアームに近い機械の特性に忠実な構造である。本研究の成果ではアート作品として放射状に複数配置し、各々のアームは 3 本のリンクの連結とした。本研究では 3 つ以上の連結は行っていないが、よ

り多く連結すれば Flagella の構造においても自由に先端を移動させることが可能になる。このような点から、Flagella で実現した軟体動物のような柔らかい印象の 4D Appearance は、ロボットアームへの応用が可能なのではないかと考えられる。生産の現場においては、Flagella のようなゆったりとした表現は適さず、柔らかい印象も効果的ではない、しかしながら、ロボットアームのような構造を持った機械が生活に入り込み、我々と共存する際には、ゆったりと動き、なめらかに人間を回避するような、Flagella のような柔らかい 4D Appearance が求められる場面が出来ると考えられる。

### Planula の応用展開

Planula は、本研究の成果としては人を探すように振る舞い、人とインタラクションを行うアート作品である。また、アート作品であると同時に、環境に多数のセンサをインストールして、知能化した環境として振る舞うネットワークロボティクス、アンビエントインテリジェンスにおけるセンサと人との関わり方の提案でもある。

ネットワークロボティクスにおいては、人形型のエージェントロボットに人間とのコミュニケーションを代替させ、センサはインビジブルなロボットとして隠すアプローチが一般的である。しかしながら、これではユーザーがどのようにデータを取られているかわからず、不快な思いをすることも予想される。このようなセンサの 1 つの姿として、Planula では、人間をセンシングしようとしていることを積極的に表出するアプローチを目指した。空間に生えた触角のような存在として、空間にインストールされたセンサであり、人間をセンシングしようとしている事を動きによって暗示する。生物のような認知、およびそれに伴うインタラクションによって、環境が知能を持った振る舞う様子を可視化し、人が積極的にセンサと関わろうとすることを目指したものである。

このような Planula のアプローチは、音声や文字を用いたコミュニケーションに比べて正確性が高いものではないが、ゆるやかに情報提示し、簡単なインタラクションによって情報交換を行う、従来存在しなかった新しい人とロボットの関わり方として他の場面にも応用できるのではないかと考えられる。

### Apostroph の応用展開

Apostroph は、重力に抗って身体を持ち上げるという生物の根源的な振る舞いをベースにしたアート作品である。Apostroph で用いているアルゴリズムは、生物の根源的な振る舞いをモーターによって再現するものであり、ヒューマノイドのバランス制御等に用いられていたものである。本研究ではこのアルゴリズムと、バランスの取りにくい身体形状、構造を組み合わせることで、動きの連続性を実現したアート作品とした。応用性という点では、バランスを取りやすい構造のほうが適している。

このように、Apostroph は他の2つのプロトタイプに比べて人の役に立つロボットへの応用は難しい。一方で、Apostroph で用いたあらゆる姿勢での運動を可能にする無限回転構造や、環境となめらかに相互作用を行うことを可能にするカーブの組み合わせは、従来のロボットにはあまり見られない構造である。人間の生活環境に適応し、その中でロコモーションを行う、という機能は人間と共存するロボットにおいては基本的な機能である。Apostroph がもたらした新しい環境との関わり方は、人間の生活環境で動作するロボットの新しいロコモーションの在り方につながるのではないかと考えられる。

ロボットの理想形は、人と共存し、様々な点で人の役に立つ仕事をするというものである。本研究の成果も、人の役に立つロボットへ応用されることが望ましいが、本研究では人の役には立たないアートとしてロボットを開発した。

本論文の中で繰り返し述べているとおり、ロボットが人に与える印象、時間軸上での視覚効果である 4D Appearance は、形や構造、制御手法などの様々な要素の創発によって現れる。本研究では、人に与える印象のみを目標としてすべての要素を設計することで、従来のロボットにない 4D Appearance を実現した。最初から人の役に立つロボットへの応用を目標とすると、タスクの遂行のために設計要件が決まってしまう、4D Appearance を自由に設計することが出来ない。人に与える印象のみを先鋭化させたアート作品としてすべての要素を設計する本研究のアプローチは、ロボットの新しい 4D Appearance の実現に繋がる点で有益だと考えられる。

### 7.2.3. 人工物の新しい素材や設計手法を用いた表現の検討

本研究では、生物のような印象を人工物の素材や構造によって実現した。特に生物のもつ柔らかさに起因する 4D Appearance に着目し、これを再現することを目指した。故に、常に生物の柔らかい素材の特徴を、人工物の硬い素材で再現する手法を探ってきた。Planula においては弾性素材を用いるアプローチをとったが、その素材特性故に連続性を持った動きの与え方に工夫が必要であった。エラストマーや布など人工物の柔らかい素材を用いたロボットの試みも先行研究で多数なされていたが、生物の内部構造も含めた柔らかさとは異なるものであった。

一方で、現在も人工物においては新たな素材や設計手法が開発されている。その中でも興味深いものとして、積層造形を用いたメソスケール構造が挙げられる。樹脂の 3D プリント技術を用いて、複雑な微細構造をもった形を作る手法である。これを用いることで、構造によって柔らかさや弾性などの質s感をコントロールすることが出来る。このような新しい構造を用いたなめらかな 4D Appearance を探る研究も今後行っていきたい。

## 付録 A

# Bio-like Display

---

生物のように人と関わる情報ディスプレイ

## A.1. はじめに

この付録では、主論文内で述べたなめらかな 4D Appearance の実現手法の研究の知見を用いて製作した、未来の映像情報機器のプロトタイプ Bio-like Display について述べる。生物が人にもたらすなめらかな印象を先鋭化したプロトタイプとして製作・発表を行う主論文のアプローチとは異なるが、それらの研究のなかで得られた知見、発見した構造や動きなどを、人と情報のインタラクションの導入する試みである。

### A.1.1. 映像情報機器の現在

かつてテレビは家族の団欒の中心であり、またテレビ番組は人々の共通の話題であった。しかし現在ではパーソナルコンピューターやスマートフォンといった情報端末が普及し、コンテンツも多様化し、家庭や社会生活における映像情報機器の位置付けが変化している。

インターネットによって検索すればどのような情報も手に入る時代になったが、膨大な情報の中から有益な情報や魅力的な情報を入手するのは困難である。その結果、ネット上から魅力的な情報を探し出して紹介するキュレーション、バイラルメディアといった媒体や、ビッグデータと人工知能によるリコメンデーションなどのサービスが生まれている。

このような多様な情報に加え、家電や住宅の設備機器を接続するスマートハウスや、従来の情報機器に限らない様々な物をインターネットに接続する Internet of Things の普及により、我々が取り扱う情報はより多種多様なものになると予想される。そのような背景の中で、家庭における映像情報機器との関わりも変化し、新しいインタラクションが生まれることが予想される。

### A.1.2. Bio-likeness

ロボットは家庭にも普及しはじめ、擬人化した外観を持ち、言語やジェスチャーによってユーザーと対話するコミュニケーションロボットが登場している。これらのロボットは、人と家電や情報機器とのコミュニケーションを媒介するエージェントロボットとしての応用が示されている。このように、ロボティクスによって可能になった生き物のような人工物は、人と機械とのインタラクションを、人同士や人と動物のモデルに近い関係性に変容させる可能性を持っている。

一方で、人間が対象を生物のように認識するのに、外観の模倣や言語やジェスチャーの使用といった擬人化は必ずしも必要ではない。Heider らの研究を始めとするアニメーション知覚の研究では、単純な図形のアニメーションから状況や意図を知覚することがわかっている。著者らは、人が生命や知性を感じる人工物の様態 Bio-likeness を研究し、既存の生



物の外観や動きを模倣せず、人工物の特性が生み出す外観や動きによって生命らしさを実現するプロトタイプを製作してきた。これらのプロトタイプは、擬人化ロボットのような高度な人とのコミュニケーション能力は持たないが、人に意図や状況をゆるやかに認識させることが可能である。この特徴を用いることで、抽象的なデザインによって人と機械とのインタラクションに生物のモデルを取り入れることが可能になると考えられる。

## A.2. Bio-like Display

### A.2.1. Bio-like Display の概要

Bio-like Display はスマートハウス、Internet of Things が普及した近未来の映像情報機器のプロトタイプである。電力消費や発電、気温といった住居の環境情報やニュース、テレビ番組、インターネット上の様々な情報を集約して表示する情報端末として、リビングなど家庭の中心に置かれることが想定される。

意思を持ったように動く情報端末の集合であり、互いに協調動作を行ったり相互作用を行ったりしながら、ときには漂うようにアンビエントな情報を提示し、またときにはユーザーに近づき主張するように積極的に情報を提示する。

### A.2.2. ハードウェアのデザイン

Bio-like Display は地面と垂直な軸を中心に回転する3台の情報端末によって構成されている(図 A.1)。端末は回転軸から伸びたアームによって保持されており、アームを回転させることで端末が円周上を移動する。

椅子に座って操作する事を想定し、装置の高さは1000mmとし、端末には対角7.9inchのタブレットPCを横向きに使用し、視認性を良くするため地面に垂直な平面より $8^\circ$ 傾けやや斜め上を向けて固定している。端末の高さはそれぞれ異なり、端末同士がすれ違う際に半分重なるような間隔になっている。このため、すれ違う際にも全ての端末の映像が可視となり、一方向から観察した際、奥行き異なる映像端末が近づいたり、離れたたり、すれ違ったりするように知覚する。本作品では、このような端末の動き、端末間の距離変化によって端末同士の関係性を表現する。

駆動部を下部に集中させ回転軸を短くし、そこから繊細なアームを伸ばすことで、軽やかで安定感のある印象を実現している。本研究では、幾何学的な円筒形を用いており、有機的な曲面表現はあまり行っていないが、回転軸と同心の円筒を連結することで、関節部の形の時間変化はなめらかになるようなデザインとしている。

外装部品の多くはアルミニウム製だが、土台部分は ABS やケミカルウッドといった樹脂素材を用いているため、全体の統一感をはかるため、アルミ部分も含めた全体を同色のマットシルバー塗装で塗装している。



図 A.1: Bio-like Display

### A.2.3. インタラクションのデザイン

人とのインタラクションは、ディスプレイ部に用いるタブレット PC を通じて行う。タブレット PC の画面側に設置されたカメラを用いて顔認識を行うことで、画面正面にいる人の位置、距離を検出する。制御構成は図 A.2 で示したとおりだが、画面部分に用いるタブレット PC とは別に制御用 PC を用意し、これを用いてアームを回転させるモーターをコントロールする。また、制御用 PC はタブレット PC と無線通信を行い、顔認識の結果の取得や映像表示のコントロールを行う。

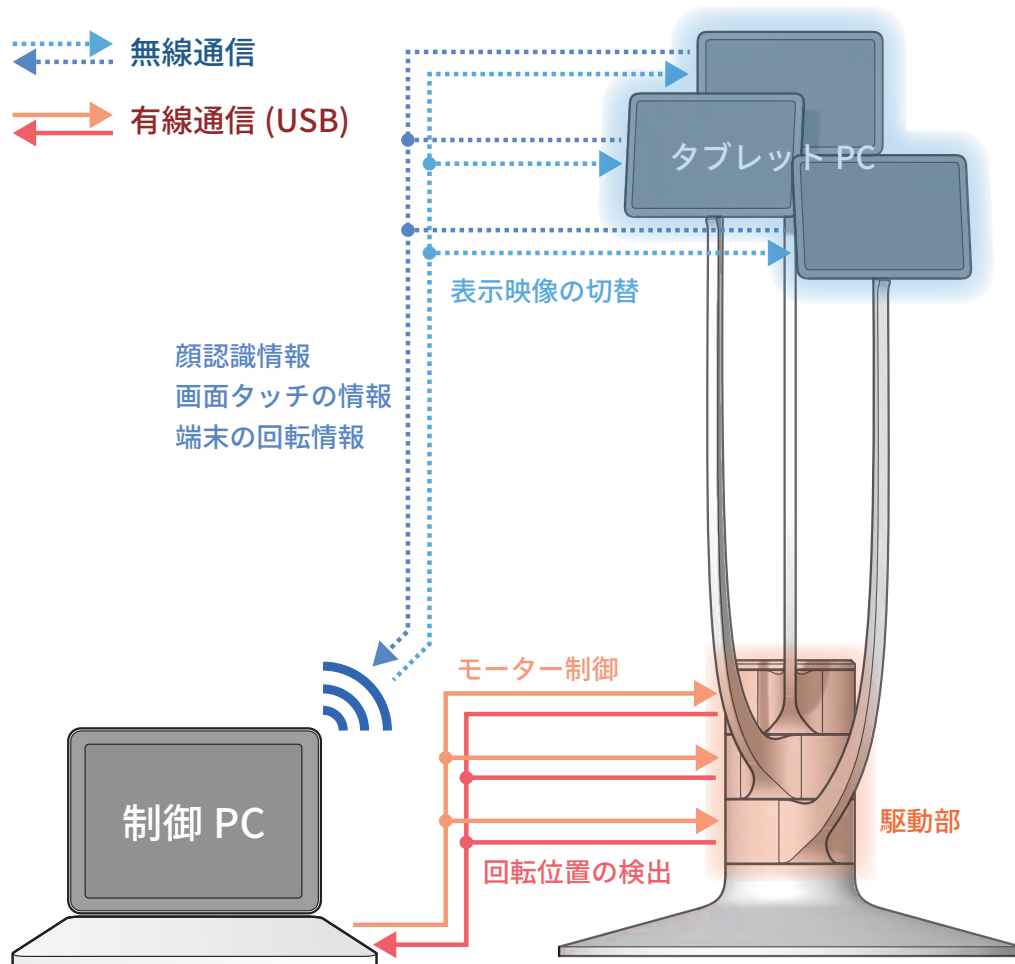


図 A.2: 制御構成

それぞれのディスプレイは普段は漂うようにランダムに回転する。このとき、約 20 秒で一回転する低速度で動く。カメラで人が近くに居ることを認識するとやや速度を上げてその人の方向に集まる。

このようなインタラクションにおいては、低速域でのなめらかな動きの制御、人にぶつかった際の安全性が重要である。この低速低トルクの動きを実現するため、駆動にはステッピングモーターを低い減速比で用いた。ステッピングモーターは繊細な制御が可能なため、減速比を高くしなくても低速域でのなめらかな動き実現出来る。また、出力トルクを小さくすることで、人が触れた際にモーターが負けて空転するようにして安全性を確保した。ギアをほとんど使わないため駆動音も静かにすることが出来た。一般的なロボットには、減速比が高いため駆動音が大きく力が強いサーボモーターが使われることが多いが、本作品のように人とのゆるやかなインタラクションを目的とする場合、安全性や静音性を実現しながらなめらかな動きが可能なステッピングモーターの使用は有益な選択肢だと考えられる。

### A.3. 考察

本章では、ディスプレイを保持した 3 本のアームを回転によって動作させ、漂うように動くディスプレイが動きを介して人とインタラクションを行う Bio-like Display について述べた。

主論文中で述べた有機的な形状を利用したなめらかな形の表現とは異なるが、回転軸の同心円となる幾何学的な円筒形状と有機的なカーブを持つアーム形状の組み合わせによって、形の変化においても一定のなめらかさは実現した。

動きにおいてはステッピングモーターを用いることで、低速域でのゆるやかな加減速、方向転換といったなめらかな動きを実現した。定速で回転し続ける動きと、人の顔を検出した際に人に対して集まる動きを連続的に変化させることで、生物のような印象を鑑賞者に与えることが出来た。

一方で、映像端末という性質上、人に近付いた際に動き続けていると画面が見づらく、またタブレットとして操作を行う目的においても画面が静止している方が適している。この点で、常に動き続けるという、生物のなめらかな動きの特徴を与えるのは適さない応用対象である。これは、なめらかな 4D Appearance を人工物に与えるうえでの課題の発見となった。

## 関連研究

- [1] 経済産業省ロボット政策研究会, “ロボット政策研究会中間報告書 ~ ロボットで拓くビジネスフロンティア~, ” 2006.
- [2] 館璋, ロボット入門 つくる哲学・つかう知恵. 筑摩書房, 2002.
- [3] 人間共存型ロボット研究専門委員会, “人間共存型ロボットシステムにおける技術課題,” 日本ロボット学会誌, vol. 16, no. 3, pp. 288–294, 1998.
- [4] 深澤直人, 佐々木正人, and 後藤武, デザインの生態学 新しいデザインの教科書. 2004.
- [5] ロドニーブルックス, ブルックスの知能ロボット論 なぜ MIT のロボットは前進し続けるのか? 2006.
- [6] M. Mori, K. F. MacDorman, and N. Kageki, “The Uncanny Valley [From the Field],” *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 19, no. 2. pp. 98–100, 2012.
- [7] 山中俊治, “人のかたちの人工物: ヒューマノイド・デザインについての一考察,” 日本ロボット学会誌 = *J. Robot. Soc. Japan*, vol. 22, no. 8, pp. 970–973, Nov. 2004.
- [8] 山中俊治, “生物の形態と人工物のかたち,” *デザイン学研究. 特集号*, vol. 12, no. 4, pp. 20–23, Mar. 2005.
- [9] 北野宏明, “ロボット文化” *映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア*, vol. 57, no. 1, pp. 32–37, Jan. 2003.
- [10] N. Cila, “Metaphors we design by: The use of metaphors in product design,” TU Delft, Delft University of Technology, 2013.
- [11] 本川達雄, *生物学的文明論*. 新潮社, 2011.
- [12] 鳥谷浩志 and 千代倉弘明, *3次元CADの基礎と応用*. 共立出版, 1991.
- [13] E. Catmull and J. Clark, “Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes,” *Comput. Des.*, vol. 10, no. 6, pp. 350–355, Nov. 1978.
- [14] T. W. Sederberg, J. Zheng, A. Bakenov, and A. Nasri, “T-splines and T-NURCCs,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 22, no. 3, pp. 477–484, 2003.
- [15] R. Penner, *Robert Penner’s Programming Macromedia Flash MX*. McGraw-Hill Osborne Media, 2002.
- [16] F. Thomas and O. Johnston, *生命を吹き込む魔法*. 小金井: スタジオジブリ; 東京, 2002.

- [17] 小川鑛一, 森政弘, 平井明樹夫, 土屋謙一郎, and 湯原博光, “ものの動きに関する感情分析,” 人間工学, vol. 25, no. 4, pp. 243–251, 1989.
- [18] 牧野武文, 亀型人工生命体、エルマーとエルシー: 70 年前のロボット、ウォルターの亀 レトロハッカーズ. 2012.
- [19] R. Brooks, “A robust layered control system for a mobile robot,” Robot. Autom. IEEE J., vol. 2, no. 1, pp. 14–23, 1986.
- [20] 横山智也, “キネティック・アート,” デザイン学研究, no. 17, pp. 41–53, Mar. 1973.
- [21] 喜多俊之, “プロダクトとしてのロボットデザイン,” 日本ロボット学会誌, vol. 22, no. 8, pp. 984–985, 2004.
- [22] 藤田雅博, “Robot Entertainment System AIBO の開発,” 情報処理, vol. 41, no. 2, pp. 146–150, Feb. 2000.
- [23] 長田純一, “ロボットのデザインって何?,” 日本ロボット学会誌, vol. 22, no. 8, pp. 974–978, 2004.
- [24] 西村竜一, 近間正樹, 小林亮博, 佐竹純二, and 上田博唯, “ユビキタスホームにおける対話ロボットのための音声・雑音認識の開発,” 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, vol. 105, no. 301, pp. 47–52, Sep. 2005.
- [25] 山本大介 and 土井美和子, “ユーザとネットをつなぐインタフェースロボット ApriPoco,” ロボット, pp. 6–9, Nov. 2010.
- [26] 山本大介, “情報端末としてのロボット,” 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 3, pp. 252–254, 2014.
- [27] 柴田崇徳, “メンタルコミットロボット・パロとロボット・セラピーの展開,” 日本ロボット学会誌 = J. Robot. Soc. Japan, vol. 24, no. 3, pp. 319–322, Apr. 2006.
- [28] 小嶋秀樹, 仲川こころ, and 安田有里子, “ロボットに媒介されたコミュニケーションによる自閉症療育,” 情報処理, vol. 49, no. 1, pp. 36–42, Jan. 2008.
- [29] 岡田美智男, 松本信義, 塩瀬隆之, 藤井洋之, 李銘義, and 三嶋博之, “ロボットとのコミュニケーションにおけるミニマルデザイン,” ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol. 7, no. 2, pp. 189–197, May 2005.
- [30] P. Rane, V. Mhatre, and L. Kurup, “Study of a Home Robot : JIBO,” Int. J. Eng. Res. Technol., vol. 3, no. 10, pp. 490–493, 2014.
- [31] S. Sanan, M. H. Ornstein, and C. G. Atkeson, “Physical human interaction for an inflatable manipulator,” Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE. pp. 7401–7404, 2011.

- [32] M. Rolf and J. J. Steil, "Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the Bionic Handling Assistant," *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3440–3446, 2012.
- [33] F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, X. Chen, and G. M. Whitesides, "Soft robotics for chemists.," *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, vol. 50, no. 8, pp. 1890–5, Feb. 2011.
- [34] 高瀬裕, 山下洋平, 石川達也, 椎名美奈, 三武裕玄, and 長谷川晶一, "多様な身体動作が可能な芯まで柔らかいぬいぐるみロボット (<特集>アート & エンタテインメント 3)," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 18, no. 3, pp. 327–336, Sep. 2013.
- [35] 武井祥平, 飯田誠, and 苗村健, "3次元形状表現のためのリール式伸縮アクチュエータの提案," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 17, no. 4, pp. 439–445, Dec. 2012.
- [36] J. Yamaoka, "Morphing Cube," 2014. [Online]. Available: <http://junichiyamaoka.net/post/107208406571/morphing-cube>. [Accessed: 27-Jan-2016].
- [37] 圓崎祐貴, 矢野博明, and 岩田洋夫, "直動アクチュエータと空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ 'Volflex+' の開発," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 16, no. 3, pp. 327–334, Sep. 2011.
- [38] 中野亜希人 and 脇田玲, "磁性ゲル形状ディスプレイの開発とインタラクション手法の検討," *情報処理学会論文誌*, vol. 54, no. 4, pp. 1528–1537, Apr. 2013.
- [39] 河野通就 and 笈康明, "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," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 18, no. 3, pp. 297–304, Sep. 2013.
- [40] 中安翌 and 富松潔, "Tentacles : 形状記憶合金アクチュエータを用いたイソギンチャクの触手の蠢きの表現," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 17, no. 4, pp. 299–305, Dec. 2012.
- [41] K. Sims, "Evolving Virtual Creatures," in *SIGGRAPH '94 Proceedings*, 1994, no. July, pp. 15–22.
- [42] H. Lipson and J. B. Pollack, "Automatic design and manufacture of robotic lifeforms," *Nature*, vol. 406, no. 6799, pp. 974–978, Aug. 2000.
- [43] 遠藤謙, 川内野明洋, and 前野隆司, "進化的計算法を用いたリンク型移動ロボットの形態と運動パターンのデザイン法," *日本ロボット学会誌*, vol. 22, no. 2, pp. 273–280, 2004.
- [44] F. Heider and M. Simmel, "An experimental study of apparent behavior.," *Am. J. Psychol.*, vol. 57, pp. 243–259, 1944.

- [45] A. Michotte, *The perception of causality*. Oxford, England: Basic Books, 1963.
- [46] P. D. Tremoulet and J. Feldman, "Perception of animacy from the motion of a single object," *Perception*, vol. 29, no. 8, pp. 943–951, 2000.
- [47] B. J. Scholl and P. D. Tremoulet, "Perceptual causality and animacy," *Trends Cogn. Sci.*, vol. 4, no. 8, pp. 299–309, 2000.
- [48] 青野直也, 森田寿郎, and 植田一博, "2リンク機構の運動から知覚される生物性の解析" 電子情報通信学会論文誌 . D, 情報・システム, vol. 95, no. 5, pp. 1268–1275, May 2012.
- [49] 山田香織, 田浦俊春, and 永井由佳里, "感性に響く「動き」のデザインとその評価: 日常生活では想像し難い「動き」をリズム特徴の操作に基づき生成する方法の提案," *デザイン学研究*, vol. 58, no. 4, pp. 21–30, Nov. 2011.
- [50] K. Terada, T. Shamoto, and A. Ito, "Human goal attribution toward behavior of artifacts," *Robot Hum. Interact. Commun. 2008. RO-MAN 2008. 17th IEEE Int. Symp.*, pp. 160–165, 2008.
- [51] 大澤博隆, 桑山裕基, and 今井倫太, "2軸のアクチュエータのみを用いた意図伝達モデルの検討," *人工知能学会全国大会論文集*, vol. 25, pp. 1–4, 2011.
- [52] 三宅泰亮, 山地雄士, 大島直樹, デシルバラビンドラ, and 岡田美智男, "Sociable Trash Box: 子どもたちはゴミ箱ロボットとどのように関わるのか," *人工知能学会論文誌*, vol. 28, no. 2, pp. 197–209, 2013.
- [53] C. Breazeal, A. Wang, and R. Picard, "Experiments with a robotic computer: body, affect and cognition interactions," *ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interact.*, pp. 153–160, 2007.
- [54] 柴田論 and 猪岡光, "評定尺度法によるロボット運動の心理的評価," *人間工学*, vol. 31, no. 2, pp. 151–159, 1995.
- [55] W. G. Walter, "An Imitation of Life," *Scientific American*, vol. 182, no. 5, pp. 42–45, 1950.
- [56] J.-Y. Sung, R. E. Grinter, H. I. Christensen, and L. Guo, "Housewives or technophiles?: Understanding domestic robot owners," in *Human-Robot Interaction (HRI), 2008 3rd ACM/IEEE International Conference on*, 2008, pp. 129–136.
- [57] J.-Y. Sung, L. Guo, R. Grinter, and H. Christensen, "'My Roomba Is Rambo': Intimate Home Appliances," in *UbiComp 2007: Ubiquitous Computing SE - 9*, vol. 4717, J. Krumm, G. Abowd, A. Seneviratne, and T. Strang, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 145–162.



- [58] 松野文俊, “へび型ロボット : 生物の模倣から生物を超えたロボットへ,” 日本ロボット学会誌, vol. 20, no. 3, pp. 261–264, Apr. 2002.
- [59] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador, and P. Dario, “Soft Robot Arm Inspired by the Octopus,” *Adv. Robot.*, vol. 26, no. 7, pp. 709–727, Jan. 2012.
- [60] A. Grzesiak, R. Becker, and A. Verl, “The Bionic Handling Assistant: a success story of additive manufacturing,” *Assem. Autom.*, vol. 31, no. 4, pp. 329–333, Sep. 2011.
- [61] 田所諭, “柔らかいアクチュエータ,” 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 3, pp. 318–322, 1997.
- [62] R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koepe, A. Albu-Schaeffer, A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald, and G. Hirzinger, “The KUKA-DLR Lightweight Robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing,” in *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, 2010, pp. 1–8.
- [63] 中村浩 and 鷺見成正, “単一物体運動における生物性・非生物性知覚に寄与する運動情報の研究,” 電子情報通信学会技術研究報告 . IE, 画像工学, vol. 101, no. 627, pp. 95–100, Jan. 2002.
- [64] G. Csibra, “Teleological and referential understanding of action in infancy,” *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 358, no. 1431, pp. 447–458, Mar. 2003.
- [65] 萩田紀博, “ネットワークロボット概論,” 電子情報通信学会誌, vol. 91, no. 5, pp. 346–352, May 2008.
- [66] W. L. Zagler, P. Panek, and M. Rauhala, “Ambient Assisted Living Systems - The Conflicts between Technology, Acceptance, Ethics and Privacy,” in *Assisted Living Systems - Models, architectures and Engineering Approaches*, 2008, no. 07462.
- [67] 石井裕, “Tangible Bits : 情報の感触 / 情報の気配 (情報処理最前線),” 情報処理, vol. 39, no. 8, pp. 745–751, Aug. 1998.
- [68] 山田誠二, 人とロボットの “間” をデザインする . 東京電機大学出版局, 2007.
- [69] 小松孝徳 and 山田誠二, “ロボットが表出する情報と外見がユーザの態度推定に与える影響,” 情報処理学会研究報告 . ICS, [ 知能と複雑系 ], vol. 2005, no. 109, pp. 1–8, Nov. 2005.
- [70] A. Ueki, K. Watanabe, and M. Inakage, “CREATUREs - Designing of Interactive Interior Lamps,” in *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, 2006.
- [71] C. Breazeal, A. Brooks, M. Hancher, J. Strickon, C. Kidd, J. McBean, and D. Stiehl, “Public Anemone: An Organic Robot Creature,” in *ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications*, 2002, p. 76.

- [72] 河野通就, 星貴之, and 寛康明, “lapillus bug : 音響浮揚操作に基づいた粒子の生物的表現とインタラクション,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 19, no. 4, pp. 615–624, 2014.
- [73] 南泰浩, 前田英作, and 堂坂浩二, “まっしゅるーむの世界 – 知能統合の実現に向けて” NTT 技術ジャーナル, vol. 19, no. 6, pp. 19–22, Jun. 2007.
- [74] 美濃導彦, “ユビキタスホームにおける生活支援,” 人工知能学会誌, vol. 20, no. 5, pp. 579–586, Sep. 2005.
- [75] 板垣祐作, 小川浩平, and 小野哲雄, “ITACO on the Room: アンビエントな情報提供を行う生物感のあるエージェントの提案,” in HAI シンポジウム 2008, 2008.
- [76] T. G. Zimmerman, J. R. Smith, J. A. Paradiso, D. Allport, and N. Gershenfeld, “Applying Electric Field Sensing to Human-computer Interfaces,” in Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1995, pp. 280–287.
- [77] 福地健太郎 and 暦本純一, “SmartSkin を用いた多点入力システムの実装,” 情報処理学会論文誌, vol. 46, no. 7, pp. 1682–1692, Jul. 2005.
- [78] 榎原吉伸, 林宏憲, and 平井重行, “TubTouch: 湯水の影響や自由形状への適用を考慮した浴槽タッチ UI 環境,” 情報処理学会論文誌, vol. 54, no. 4, pp. 1538–1550, Apr. 2013.
- [79] C. Bartneck, E. Croft, and D. Kubic, “Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots,” Int. J. Soc. Robot., vol. 1, no. 1, pp. 71–81, 2009.
- [80] C. Angle M., “Genghis, a Six Legged Autonomous Walking Robot,” Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [81] R. Pfeifer and J. Bongard, 知能の原理 – 身体性に基づく構成論的アプローチ. 共立出版, 2010.
- [82] M. Hoffmann, N. Schmidt, R. Pfeifer, A. Engel, and A. Maye, “Using Sensorimotor Contingencies for Terrain Discrimination and Adaptive Walking Behavior in the Quadruped Robot Puppy,” in From Animals to Animats 12 SE - 6, vol. 7426, T. Ziemke, C. Balkenius, and J. Hallam, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 54–64.
- [83] 佐々木正人, アフォーダンス入門 知性はどこに生まれるか. 講談社, 2008.
- [84] M. Hild and M. Kubisch, “Self-Exploration of Autonomous Robots Using Attractor-Based Behavior Control and ABC-Learning,” in Proceedings of the 11th Scandinavian Conference on Artificial Intelligence, 2011.
- [85] C. G. Langton and 大倉和博, “人工生命,” 日本機械学会誌, vol. 97, no. 906, pp. 403–407, May 1994.

- [86] 沼岡千里, “人工生命とロボティクス,” 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 5, pp. 671–674, 1997.
- [87] M. Hild, “Defying Gravity – a Minimal Cognitive Sensorimotor Loop Which Makes Robots With Arbitrary Morphologies Stand Up,” in Proceedings 11th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI), 2013, pp. 23–34.
- [88] M. Kubisch, C. Benckendorff, and M. Hild, “Balance Recovery of a Humanoid Robot Using Cognitive Sensorimotor Loops (CSLs),” in Proc. of the 14th Internat. Conf. on Climbing and Walking Robots, 2011, no. Section 3, pp. 1–7.
- [89] 大嶋泰介, 五十嵐健夫, 三谷純, and 田中浩也, “Dukta の変形特性を用いた変形形状の対話的設計・製作システム,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 18, no. 4, pp. 507–516, Dec. 2013.
- [90] E. Guizzo and E. Ackerman, “How rethink robotics built its new baxter robot worker,” IEEE Spectrum, 2012. .
- [91] T. Flash and N. Hogan, “The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model.,” J. Neurosci., vol. 5, no. 7, pp. 1688–1703, 1985.
- [92] J. Pollack, G. Hornby, H. Lipson, and P. Funes, “Computer Creativity in the Automatic Design of Robots,” Leonardo, vol. 36, no. 2, pp. 115–121, 2003.
- [93] 山中俊治, “人工物工学と設計の美学：アブダクション、プレゼンテーションと美的感覚の関わり,” 日本機械学会誌, vol. 97, no. 908, pp. 575–578, Jul. 1994.
- [94] リンゼイジョンストン, “ロボット文化.”
- [95] F. Kaplan, “Who Is Afraid of the Humanoid ?,” Int. J. Humanoid Robot., vol. 1, no. 3, pp. 465–480, 2004.
- [96] 瀬名秀明, “瀬名秀明ロボット学論集.” 勁草書房, 東京, 2008.
- [97] C. Breazeal, “Towards Sociable Robots,” Rob. Auton. Syst., vol. 42, 2002.

## 本論文に関連する発表

### 受賞

---

- [1] 村松充, 山中俊治, Manfred Hild. "Apostroph" アジアデジタルアート大賞 2015  
インタラクティブアート部門大賞

### 原著論文 (査読付)

---

- [1] 村松充, 神山友輔, 山中俊治: "Flagella: 軟体動物のような柔らかい印象を有する  
ロボットアームのデザイン", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.20, No.4,  
pp.87-pp.96 (2015)
- [2] 村松充, 神山友輔, 阪本真, 山中俊治: "Planula: 環境に埋め込まれ人を感じようと振  
る舞うセンサロボットのデザイン", 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.4 (2016)

※第3章は上記 [1] の論文, 第4章は上記 [2] の論文を一部転載しています。

### 作品論文 (査読付)

---

- [1] 村松充, 神山友輔, 江角一朗, 阪本真, 西谷圭, 飯澤大介, 山中俊治: "Bio-like Dis-  
play: 生物的な動きによって人とインタラクションを行う情報ディスプレイ"; デザイン学研究  
作品集, Vol.20, No.1, pp.60-pp.65 (2015)

※付録 A は上記論文を一部転載しています。

### 国際会議

---

- [1] M. Muramatsu, Y. Kamiyama, S. Yamanaka: "The proposal of the agent robot design  
to realize lifelike motion using the rotary joint" ; The 1st International Conference  
on Human-Agent Interaction, Posters, II-pp22, (2013)
- [2] Mitsuru Muramatsu, Shunji Yamanaka : "Apostroph" ; SIGGRAPH ASIA 2015,  
Art Gallery, (2015)

## 謝辞

学部時代にご指導頂き、博士課程において再び研究指導を頂きました慶應義塾大学 環境情報学部 脇田 玲 教授に深く感謝致します。学術論文の書き方や、研究のまとめ方、研究者としての心得などを教えて頂きました。

修士課程からご指導いただき、作品製作における多大なご指導を頂きました現東京大学情報学環 山中 俊治 教授にも深く感謝致します。作品製作における指導を頂き、多くの展示機会も頂きました。また、アシスタントとしてインダストリアルデザインに関わる経験を与えて頂き、美的感覚やデザインの基礎について学ばせて頂きました。

慶應義塾大学 中西 泰人 教授、笥 泰明 准教授には、本論文の副査として審査をお引受け頂き、本論文のまとめ方についてコメントやアドバイスを頂きました。感謝の意を表させていただきます。

Apostroph をはじめとする Semni プロジェクトにおいて、プログラムを提供していただき、来日時にはレクチャーや様々なアドバイスを頂きました。Beuth Hochschule für Technik Berlin の Prof. Manfred Hild にも感謝致します。

研究を進めるにあたり、修士課程及び博士課程において共に研究を行ってきた神山 友輔氏をはじめ、阪本 真氏、江角 一朗氏をはじめとする慶應義塾大学山中研究室の Bio-likeness プロジェクトメンバーに感謝致します。

また、東京大学において研究の場を提供していただき、また多くの展示の機会を与えてくださった、角尾 舞氏、佐藤 翔一氏、大長 将之氏をはじめとする東京大学 Prototyping & Design Laboratory のメンバーにも深く感謝致します。

中野 亜希人氏をはじめとする脇田研究室大学院生の皆様には、研究の相談や議論、知識の共有の機会を頂きましたことに感謝致します。

最後に、長い学生生活を通して常に支えていただき、多大なる援助をしてくださった両親、応援して下さった兄弟に深く感謝致します。