

博士論文

なめらかに形体を切り替える変形機構によって
印象を変化させるロボットデザインの研究

飯澤 大介

目次

第 1 章	序論	5
1.1	ロボットデザインの多様化	5
1.2	擬人化デザイン	6
1.2.1	擬人化デザインの効果	6
1.2.2	擬人化デザインの課題	7
1.3	非擬人化デザイン	9
1.3.1	非擬人化デザインの効果	9
1.3.2	非擬人化デザインの課題	12
1.4	研究の目的	14
1.4.1	対象とする領域	14
1.4.2	研究の目的	15
1.4.3	本研究のアプローチ	16
1.5	本論文の構成	19
第 2 章	関連研究	21
2.1	擬人化デザインの効果と課題	21
2.1.1	擬人化デザインの効果と分類	21
2.1.2	ロボットの外観から生じる期待と評価のギャップ	22
2.1.3	擬人化要素の部分的な付加	22
2.2	非擬人化ロボットの種類とその効果と課題	23
2.2.1	椅子やマイクなどの一般的な人工物の形体を利用したロボット	23
2.2.2	社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のロボット	24
2.2.3	立方体や円柱のような純粋な幾何学的形体のロボット	26
2.2.4	その他の形体のロボット	28
第 3 章	Face on a Globe：なめらかに変形して平面を出現させる球体型ロボット	30
3.1	本章の目的	30
3.1.1	非擬人化ロボットによる生物らしさの獲得	32
3.1.2	アプローチ	32
3.2	コンセプト	33
3.2.1	球体の外観	33
3.2.2	顔に見立てた平面	34
3.2.3	なめらかな変形による顔要素の出現	34
3.3	実装	35

3.3.1	3D アニメーションによる外観の検討	35
3.3.2	3D プリンターによる機構の検討	35
3.3.3	最終的な外観形状	36
3.3.4	変形部の機構	37
3.3.5	制御	39
3.4	評価実験 1: 展示とコメントの計量テキスト分析	40
3.4.1	展示概要	40
3.4.2	被験者	41
3.4.3	KJ 法によるコメント分類	41
3.4.4	志向スタンスによる分類結果	43
3.4.5	テキストマイニングによるコメントの計量テキスト分析	43
3.4.6	共起ネットワークによる分類結果	44
3.5	評価実験 2: 造形要素の印象評価	46
3.5.1	評価手法	46
3.5.2	評価結果と考察	47
3.6	本章の考察	49
3.6.1	共起ネットワークによる分類の考察	49
3.6.2	造形要素の印象評価の考察	49
3.7	本章のまとめ	50
第 4 章	F.o.G. Mk-II：音に反応して平面の向きを変える球体ロボット	51
4.1	本章の目的	51
4.2	コンセプト	52
4.2.1	回転動作による自律的な動きの表現	52
4.3	実装	52
4.3.1	回転動作部の設計	52
4.3.2	マイクによる音源方向の推定	54
4.4	評価実験	54
4.4.1	評価手法	55
4.4.2	評価結果と考察	56
4.5	本章の考察	58
4.6	本章のまとめ	59
第 5 章	Joint Attention Cone：なめらかに変形して頂点の向きを変える円錐型ロボット	60
5.1	本章の目的	60
5.2	コンセプト	62
5.2.1	円錐形の外観	62
5.2.2	2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形	62
5.2.3	社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体による相互注視の表現	63
5.3	実装	64

5.3.1	外観形状	64
5.3.2	変形機構	64
5.3.3	駆動部の設計	65
5.3.4	ユーザー位置の検知	66
5.3.5	変形の制御	67
5.4	評価実験：展示とコメントの分析	69
5.4.1	展示概要	69
5.4.2	被験者	70
5.4.3	KJ 法によるグループ分類	70
5.4.4	志向スタンスによる分類結果	72
5.4.5	テキストマイニングによるコメントの計量テキスト分析	72
5.4.6	結果	73
5.5	本章の考察	75
5.6	本章のまとめ	75
第 6 章	J.A.C.Mk-II：視線追従を表現する円錐型ロボット	77
6.1	本章の目的	77
6.2	コンセプト	78
6.3	実装	78
6.3.1	変形部の機構	78
6.3.2	視線検知	79
6.4	評価実験	80
6.4.1	評価モデル	80
6.4.2	評価項目	81
6.4.3	被験者	81
6.4.4	評価手順	81
6.4.5	評価結果と考察	82
6.5	本章の考察	84
6.5.1	生物らしさが無い純粋な幾何学的形体	85
6.5.2	2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形	85
6.5.3	視線追従による生物らしさの増加	86
6.6	本章のまとめ	86
第 7 章	考察	88
7.1	家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立	88
7.1.1	生物らしさが無い純粋な幾何学的形体	88
7.1.2	社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体	89
7.1.3	社会的知覚の表現による生物らしさの変化	89
7.2	2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形	90
7.2.1	2 種類の形体の切り替え	90
7.2.2	なめらかな変形自体の生物らしさ	91
7.2.3	なめらかな変形を実現する機構	91

第 8 章	結論	93
8.1	結論	93
8.1.1	各章のまとめ	93
8.1.2	本研究の貢献	95
8.2	今後の課題と展望	95
8.2.1	本研究の制約	95
8.2.2	ミニマル領域のロボットデザイン手法	95
8.2.3	なめらかな変形の応用と展望	96
8.2.4	生物らしさの一時的な増加と減少	96
8.2.5	ロボットデザインのプロセス	97
8.2.6	インタラクティブ展示とアンケートによる質的評価	97
8.2.7	現実世界と仮想世界を融合する装置としてのロボット	98
	参考文献	99
付録 A	Face on a Globe のコメント一覧	108
付録 B	J.A.C. のコメント一覧	112

第 1 章

序論

1.1 ロボットデザインの多様化

家庭や公共空間で様々なロボットの普及が進んでいる。近年の AI(人工知能) やクラウド技術の進展は、ロボットとユーザーのインタラクションを高度化し、ロボットのデザインの多様化に影響を与えている。

■家庭用ロボットの普及と用途の拡大 家庭内では実用的なロボットの普及が進んでいる。ロボットが家庭内に普及しはじめた当初は主にペットロボットなどのエンターテインメントロボットといった娯楽用途が中心であったが [104]，その後，掃除ロボット等の家事ロボット，みまもり・セキュリティロボットなどの，実用的な用途のロボットの普及が進んだ。近年は，AI の進化を背景にコミュニケーションメディアとしてのロボットも増加している [102]。

■知的エージェントの普及 ユーザーとの知的なインタラクションを実現する知的エージェントは，スマートフォンやスマートスピーカー，車載システムなどに搭載された音声アシスタントとして普及しはじめている。対話型 AI の ASP(アプリケーション・サービス・プロバイダ) サービスの普及によって，一般製品に深層学習などの高度な技術の導入が容易になり，知的エージェントはさまざまな製品に搭載されるようになった [2]。このような背景から，今後日常的に知的エージェントと音声対話を行う場面が増加すると考えられる。

■ロボットの定義の変化 これまでロボットは「センサー，知能・制御系，駆動系の 3 つの要素技術を有する，知能化した機械システム」[88] と定義されていた。しかし近年では，コミュニケーションや見守り用途として，駆動系を持たない擬人化された外観と対話型 AI の ASP サービスを組み合わせた機器が登場している。また，スマートスピーカーも音楽再生だけでなく，家電や掃除ロボットの操作などの家事支援のインタフェースとして利用され始めている。これらの状況から，音声インタラクションを通じてタスクを実行する対象として，これらの機器とロボットとの区別は難しくなっている。AI やネットワーク基盤の進化を考慮し，3 要素のすべてを兼ね備えた機械のみをロボットと定義することで，実態を捉えきれなくなる可能性があるという指摘もある [106]。これらを考慮すると，駆動系を持たない機器を含めた多様なロボットの将来像を研究する必要がある。

表 1.1 本論文で使用する擬人化関連用語

No.	用語	定義
1	擬人化	「擬人化された特徴」と「擬人化傾向」に区別される
2	擬人化デザイン	「擬人化された特徴」を利用した (ロボットの) デザイン
3	非擬人化デザイン	「擬人化された特徴」を利用しない (ロボットの) デザイン
4	擬人化要素	形体に関連する「擬人化された特徴」
5	擬人化ロボット	形体的に擬人化された特徴を持つロボット
6	非擬人化ロボット	形体的に擬人化された特徴を持たないロボット
7	人間らしい印象	擬人化傾向, 「人間らしさ」とも表現する

1.2 擬人化デザイン

高度に擬人化された外観を持ち, 社会的なインタラクションを行うことで, 社会の中に自然に溶け込むロボットは, 1920 年にカレル・チャペックによってロボットという言葉が紹介されてから, さまざまな解釈が加えられながらも, ひとつの理想形として描かれてきた [10]. HRI(Human-Robot Interaction) や HCI(Human-Computer Interaction) 領域では, ロボットに関連した擬人化研究は多く行われている. その中で, 擬人化という用語は複数の意味で使われている. これらは「擬人化された特徴 (Anthropomorphic features)」と「擬人化傾向 (Anthropomorphic tendencies)」に分類できる [16]. 本論文ではこれらの混同を避けるために図 1.1 に示したように用語を整理する.

擬人化デザインは「擬人化された特徴」を利用したデザインのことを指す. 本論文では, 造形要素を構成する, 形, 色, 材料, テクスチャ, 光, 運動のうち [89], ロボットの「形体」に関連する表現として使用する. 先行研究では擬人化された特徴として運動を扱うものも存在するが, 本研究では運動の擬人化については扱わない.

非擬人化デザインは「擬人化された特徴」を利用しないデザインを指す. また「擬人化要素」と表現する場合はロボットの形体に関連する「擬人化された特徴」を指す. さらに, 形体的に擬人化された特徴を持つロボットを「擬人化ロボット」, 擬人化された特徴を持たないロボットを「非擬人化ロボット」と表現する.

もう一方の「擬人化傾向」は, 対象がどのように認識されるかに関係し, 実際は人ではない自然物や人工物を, あたかも人であるように認識する傾向に対する研究である. 本研究で使用する「人間らしい印象」「人間らしさ」といった印象評価の尺度に相当する.

以下にロボットとのインタラクションにおける擬人化デザインの効果と課題について説明する.

1.2.1 擬人化デザインの効果

社会的インタラクションの向上

多くのロボットが擬人化デザインを採用する理由は, 擬人化された特徴を見せることで, 見る者の擬人化傾向を誘発することにある. 多くの先行研究が, 擬人化された特徴の利用が主にロボットとのインタラクションまたはコミュニケーションの向上に寄与することを示している. 主な効果としては, 自然な音声対話や, ロボットに対する寛大な態度を誘

発する [19]. ソフトウェアや知的エージェントに擬人化あるいは擬動物化 (zoomorphic) 要素を持たせることによるシステムの受容性が向上する [28]. また, 人間らしいロボットは機械的なロボットよりも強い共感を得ることや [59], 信頼を得るといった効果が示されている [81]. またロボットの擬人化研究の対象となる外観形状は多様であり, リアリティックな擬人化から抽象度の高いものまで様々な形体の擬人化デザインを対象に先行研究が行われている [82].

擬人化された特徴の分類

擬人化ロボットの外観は, 具象的な形体から抽象的な形体まで多様であるため, 擬人化表現の抽象度や含まれる擬人化要素の数, さらには顔要素の配置など様々な分類方法が研究されている. 擬人化デザインの多様性は, ロボットに身体的な特徴を持たせるだけでも社会的であることを表現することが可能であり, ユーザーとのコミュニケーションにおいて説得力を持つことや [21], 目や口といった擬人化要素を追加する研究 [53] の結果からも示されている.

Phillips らは擬人化ロボットに含まれる擬人化要素の有無で分類を行うデータベース ABOT を構築し, さらにロボットに含まれる擬人化要素から人間らしさを推定するツールを作成した [54]. Duffy はロボット頭部の擬人化された特徴を, 人の頭部に限りなく近づける「人間 (Human)」, 漫画のような最小限の機能で表現力を高める「象徴的 (Iconic)」, 機械的で機能的なデザインで人間らしさを最小限に抑えた「抽象的 (Abstract)」の3つの軸で分類を行い, ロボットに採用される擬人化の目的と程度を効果的に管理する必要性を主張した [16]. DiSalvo らは製品デザイン全般を対象とした擬人化形体の利用について問題解決手段の視点から分類し, 魅力の伝達 (Seduction) から要求の充足 (fulfillment) という軸で整理している [15].

これらの分類は, 擬人化要素をロボットに適用する目的や程度を設計者が意図的にコントロールする重要性を示している. しかし, これらの分類は, 対象を擬人化デザインに限定している. そのため, 人と「人間らしい印象を持つロボット」という関係性以外の「動物や生物らしい印象を持つロボット」との関係性については触れられていない. また, そのような関係性と擬人化との類似点や相違点についても明らかにされていない.

1.2.2 擬人化デザインの課題

擬人化ロボットのデザインにはコミュニケーションを円滑にする利点がある反面, さまざまな課題も存在する. 近年は知的エージェントの普及で対話型インタラクションは一般化した, 自然な対話の実現には現時点でも多くの課題がある. またロボットの動きや社会的なふるまいの自然さの実現についても課題が多く残されている.

市場ニーズ

HRI 研究の多くが擬人化ロボットの利点に注目している反面, 実際の市場で人々がすべてのロボットに擬人化を求めるわけではないことも明らかになっている. 2015 年の総務省によるロボットの望ましい形体についての調査では, コミュニケーションロボットに求める形体に対する一番多い回答は「形体にはこだわらない」であった. 「人間そっくりな人型」か「人間そっくりではない人型」どちらの選択肢も 2 割程度の回答となった [101].

この結果から、人工物に囲まれた生活を送る人々は合理的な審美性を求めており、必ずしも擬人化ロボットの効果のみを求めているわけではないことが考えられる。これは非擬人化ロボットにも一定の市場ニーズがあることを示唆している。

機構とコスト

機構的な観点では、人型ロボットで人同様の動きやタスク実行を実現することは難しく、それらを実現するには、素材、構造、動力などの根本的な差異から、まったく別なデザインを採用する必要があることが指摘されている [78]。フィリップスリサーチの Breemen らが開発した iCat はアニメーションで用いられる表現手法をロボットで実現することを目指しているが、このロボットの顔パーツを動かすために 13 個のサーボモーターを使用している [75]。このように、インタラクションロボットで豊かな表現を実現するにはアクチュエーターや可動部品が多数必要となる。また一般市場での普及を前提とする家庭用ロボットでは、コストダウンのために可動部品の削減が求められ、複雑な機構部そのものが故障の原因となることという指摘もある [34]。このように、製品の信頼性確保という観点から、家庭用ロボットの擬人化は簡易化される傾向にある。

これらを解決するために非擬人化ロボットに部分的な擬人化要素を加える手法の研究 [53] や製品も存在するが、審美性や家庭内環境との調和を考慮すると、必ずしもすべての製品に採用されるデザイン手法であるとは考えにくい。

デザインの自由度

機構とコストの課題に加え、外観を人に近づけるという要件がデザインの自由度の制約となる課題も存在する。リアリスティックな擬人化を追求したロボットだけでなく、抽象的な擬人化デザインであっても、擬人化ロボットは人を模倣するため、その形体は、人を想起させるプロポーションなど、人体的特徴を表現した擬人化要素を含まなくてはならない。このようなデザインの自由度の制約はロボットデザインの多様化にとっても課題である。これに対し、非擬人化ロボットには人に近づけなければならないという要件がないため、形体やそれに伴う構造上の制約を受けない。そのため、デザイナーは柔軟性と自由な選択肢からロボットのデザインが可能である [3]。

擬人化がもたらす過剰な期待

ロボットの外観が人に与える印象についても課題が指摘されている。外観に高度な擬人化を追求すると、不気味な谷現象のような印象の不自然さを生むことが知られている [99]。さらに、ロボットの外観がもたらす期待とインタラクションの評価の不一致によって生じる適応ギャップという課題 [37][39] も指摘されている。ロボットの外観とタスクの最適なバランスがロボットに対する受容性を向上させることも示されている [24]。HCI 領域においても、Shneiderman が教育用アプリケーションへの擬人化の適用について、不用意に擬人化した表現を用いてユーザーを魅了するよりも、コンピューターができることを的確に表現することで、コンピューターが道具であることを理解させる方が役に立つと主張している [61]。このように、擬人化によって過剰な期待を抱かせないデザインによってバランスを取る必要性は、多く主張されている [14][16]。

このような背景から、最適なバランスをもたらすロボットのデザイン手法の研究として、一般的な人工物を利用した非擬人化ロボットの研究や [71][38][46]、非擬人化と擬人化

のハイブリッドの可能性に関する研究が行われている [42].

公共空間や家庭内環境との調和

実社会におけるロボットの利用を考慮すると、UX(User Experience) デザイン的視点から、ロボットとユーザーの日常的な接点に対する配慮が必要となる。現在利用されている擬人化ロボットの多くは、電源 ON の状態で稼働していることを前提にデザインされている。そのため、充電時や電源 OFF 時のユーザーとの関係性や、家庭内環境との調和について配慮されていない。

擬人化デザインのロボットとのインタラクションの後に「電源を切らないで」と懇願されると、電源を切ることをためらうという研究結果が示すように [7][32], 社会的インタラクションの効果を期待して選択された擬人化デザインの外観が、非稼働時などの想定されていない状況において、逆効果を生むことも明らかになっている。このほかにも、電源 OFF の状態のヒューマノイドロボットが部屋の隅で下を向いている様子が不気味な印象を与えるという投稿が SNS 上で話題になるなど、社会的な存在のロボットが家庭内環境に調和するために配慮すべきことはまだ多く存在するのが現状である。ロボットが人々と共存する未来の社会では、住宅や職場、公共空間といったロボットが利用される環境との調和への配慮がより強く求められる [94].

このように、擬人化ロボットの非稼働時のデザインには配慮すべき要素がまだ多く存在する。現在のロボットには、充電やシステムのアップデートなど、非稼働の状態は避けられない。そのため、ロボットのデザインは、非稼働時の社会や家庭内環境との調和に配慮する必要がある。

1.3 非擬人化デザイン

これまで述べてきたように、多様化するロボットの用途に対応するためには、擬人化デザインだけでは様々な課題に対応することが難しい。そのため、本研究は非擬人化デザインを対象とし、これらの課題解決に取り組む。

本論文における非擬人化デザインとは、外観の形体に擬人化された特徴 (Anthropomorphic features) を利用しないデザインのことを指す。非擬人化ロボットは、工業用途や公共サービス、家事タスクなど幅広い用途で利用されている。本研究では主に家庭内で利用されるインタラクションロボットを対象とする。

HRI 研究では、非擬人化デザインに関する先行研究も行われている。ここではそれらの先行研究からその効果と課題について述べ、本研究が取り組む課題を説明する。

1.3.1 非擬人化デザインの効果

形体と機構の合理性

擬人化要素を利用する傾向が高いインタラクションロボットに対して、掃除や警備などを行うタスクロボットあるいはサービスロボットの多くは非擬人化デザインを採用している。2002 年に発売された iRobot 社の Roomba に代表される掃除ロボットの形状は、清掃効率を向上させるための形体を優先している。警備ロボットや搬送ロボットなどは、走行性や公共の場での転倒などを避けるために安定性などが優先された形体が選択される。

このようなタスクロボットやサービスロボットの例のように、非擬人化デザインは合理的な形体の選択が容易であるという特徴がある。非擬人化ロボットの研究者は、擬人化デザインが人を想起させる造形要素を加える必要性からデザインの自由度が減少するのに対して、非擬人化ロボットは合理的な形体を選択できることから自由度が高いと主張している [31][3]。

また、擬人化デザインの制約を受けないことは機能的な側面でも効果を発揮する。非擬人化ロボットの多くは、人間らしい動きを追求する必要がないため、必要最低限の DoF (Degree of Freedom) の実装に留めることが可能である。Zaga らや、Lehmann の非擬人化ロボットの必要最低限のふるまいによってソーシャルキューを生じさせる研究では、1DoF の単純な左右回転のみで視線を表現している [80][41]。

環境との調和

擬人化デザインの課題の中で、公共空間や家庭内環境との調和の課題について述べたとおり、非稼働時またはインタラクションを行っていないロボットが家庭内環境と調和することは、現代的で豊かな生活を実現するために重要である。家庭内環境との調和を考慮したデザインの実現には、前述した合理的なデザイン選択の自由度の高さが必要となる。2014 年の Amazon 社による Amazon Echo 発売以降、一般家庭に普及したスマートスピーカーは、音声による対話型のインタラクションを行う。しかしその形体は音楽再生のスピーカーとしての機能を優先した形体であり、デザイナーはその理由を家庭内の環境との調和を優先したと述べている [76]。

また、非擬人化ロボットの先行研究には、既に家庭内に存在する椅子や机といった家具や会議室のマイクなど、一般的な製品の形体をそのまま利用しているものもある [62][46][71]。これらの非擬人化ロボットも、利用される空間にもとより存在していた製品のため、違和感を感じさせることがなく、家庭内環境との調和が実現できる。

新しい表現の探求

非擬人化デザインは、外観や動きを人に近づけるという制約がなく、新たな非言語ジェスチャー (non-verbal gesture) の可能性の探求が可能である。先行研究では、シンプルな棒や球体などの抽象的な形体を動かすことで感情を表現したり、見守られていることを暗に示すなど、これまで擬人化ロボットで研究されていた直接的なインタラクションではなく、抽象的または情緒的な関係性の構築が研究されている [26][3][83][70]。

社会的な存在として捉えられる人工物

非擬人化ロボットによるインタラクションは、人が人工物を社会的な存在として捉える傾向を利用している。

Dennett は、人が人工物を含めた様々な事象を解釈して予測するための戦略のことを構え (stance) と呼び、「物理的な構え (Physical stance)」、「設計的な構え (design stance)」、「志向的な構え (Intentional stance)」のいずれかの構えを取ると説明している [13]。物理的な構えは物理的な法則に沿って対象の行動を予測する戦略で、設計的な構えは主体が設計されたとおりにふるまうと予測する戦略である。それに対し、志向的な構えは主体が意図や信念に基づいてふるまうと予測する戦略である。寺田らは、アニメーションを用いてこの Dennett の哲学的論考で指摘している 3 つの構えの心理学的妥当性の検討を行なっ

ている。その結果表面的なふるまいの性質による理解と Dennett の言うふるまいの原理に基づく理解がほぼ一致したと報告している [93]。

Reeves と Nass は、被験者がコンピューターやテレビなどのメディア媒体に対して、通常人に対して行う社会的なふるまいを行うことを示した [58]。また Fogg は、コンピューターや対話型のテクノロジーは、ツール、メディア、ソーシャル・アクター (社会的存在) としてふるまうと説明している [21]。さらに、近年一般家庭内で利用されるスマートスピーカーでも、最新機器に不慣れな高齢者がスマートスピーカーに対して、「人間的らしさ」と「人工物らしさ」を行き来しながらコミュニケーションしていることが報告されている [57]。

これらの先行研究は、非擬人化ロボットであっても社会的なインタラクションが可能であることを示唆しており、多くの HRI 領域の非擬人化ロボット研究に参照されている。

動きを中心とした設計

非擬人化ロボットでインタラクションを行う場合、動きの設計は重要である。擬人化デザインが形体によって人間らしい印象を与えるのに対して、非擬人化デザインには人間らしさを伝える形体的特徴がないため、動きによって人間らしさや生物らしさを表現する設計手法が研究されている。

Hoffman は従来のロボットデザインの手法を、物理的目標を達成する動作機構を優先させる「実用的 (Pragmatic) アプローチ」と、エンターテインメントロボットなど表現力を重視するための外観を優先させる「視覚的 (Visual) アプローチ」に分類した。どちらの手法も、それらの設計が終わった後に動きが設計されることが多いため、豊かな表現が難しいと指摘している。そのうえでインタラクションロボットは早い段階で動きからデザインする「動作中心 (Movement Centric Design) アプローチ」によって、ロボットの外観に捉われずコミュニケーションや関係性を強化できると主張している [31]。

このように動きによる表現を利用することは、これまで示してきた非擬人化ロボットの様々な効果を実現する上で重要である。

生物らしさ

Heider と Simmel による幾何学図形の動きを用いた実験は、多くの被験者が擬人化要素のない抽象的な図形に対して、社会的な行動や感情を帰属させることを示した [27]。この現象に関する一連の知覚心理学の研究で、アニメーション知覚が外観よりも動きによって引き起こされることが明らかになっている。このアニメーション知覚は、対象の動きに生物らしい特徴が含まれている場合に自動的に生じるものである [95]。

一般家庭に普及する掃除ロボットの大半は非擬人化デザインであるが、ユーザーはロボットが掃除をしている様子から、それらを社会的対象として捉えることが報告されている [35][22]。Sung による掃除ロボット Roomba の調査では、被験者の大半が、掃除ロボットを「役に立つアシスタント」「ペットのような存在」「大切な家族の一員」など、生物らしい性質を持つ家庭内の仲間として表現している [65]。これらの現象は、非擬人化ロボットに対し自動的にアニメーション知覚が生じ、それをユーザーが生物らしい印象と捉えた結果であると考えられる。

植田は対象が生物であるかどうかを判断する際にアニメーション知覚が自動的に生じ、人が持っている知識からの予測であるトップダウンな認知との間に矛盾が生じると、不気味の

谷現象 [99] のような不快感や適用ギャップ [37] のような不信感が生じると説明している [95]。この観点から、外観に擬人化要素を持たない非擬人化ロボットは、トップダウンな認知による過剰な期待を回避できるため、アニメシー知覚が引き起こす生物らしさを利用し、これらの課題を解決しつつ、インタラクションの向上を実現できると考えられる。

1.3.2 非擬人化デザインの課題

擬人化の有無による分類

HRI の先行研究では、擬人化ロボット (anthropomorphic robots) と非擬人化ロボット (non-anthropomorphic robots) の分類の他に、ヒューマノイドロボット (Humanoid robots) と非ヒューマノイドロボット (Non-humanoid robots) といった分類も使用されている [3][83]。これらの分類は共に人に似た形体的特徴の有無によるものである。ヒューマノイドと非ヒューマノイドという表現は、先に説明した人が対象を擬人化して捉える擬人化傾向との混同を明確に分ける意図があると推察されるが、本論文では「擬人化された特徴」の有無と定義した上で擬人化ロボットと非擬人化ロボットという語を使用する。

非擬人化ロボットは、擬人化要素を含まないロボット全般を指すため、その中には、擬動物化 (zoomorphic) や、擬生物化 (biomorphic) などが含まれる。これは、形体的な分類としては明確に分類可能であるが、目的とする効果の視点からは曖昧になる。例えば、犬などの概念を利用したペットロボットは、人よりも低いレベルではあるが、明らかに外観から社会的なインタラクションを期待させることが考えられる。また、生物の概念を利用した形体のロボットは、非擬人化ロボットの先行研究が目標とするような、アニメシー知覚に影響を与える可能性がある。これらの分類は、レベルは異なるものの、擬人化と同じように外観による期待と評価のギャップという課題を持つと考えられる。

さらに、非擬人化ロボットには、椅子やマイクなどの一般的な人工物の形体を利用したロボットも含まれる。これらは、人間、動物、生物などの印象を与えることは少ないと考えられるため、動きを中心とした表現によって、過剰な期待を回避できると考えられる。しかし、人間のようにふるまうことで有名な、ピクサー社のデスクランプ Luxo Jr. のように、アニメーションや映画の世界でキャラクター化された印象が強い人工物も存在する。そのため、人工物の概念を非擬人化デザインに利用する場合は注意が必要である。

また、極端に抽象化した擬人化ロボットと、人や生物を連想させるような複雑な抽象形体の非擬人化ロボットといった、擬人化と非擬人化の境界に位置するようなデザインの分類の難しさもある。Hoffman と Bretan らによるマリンバ演奏を行う非擬人化ロボットに加えられた頭部は、アーム上に取り付けられた幾何学的な球体で演奏者の視線やリズムを表現している [31][8]。このロボットは抽象的形体を組み合わせたもので、擬人化要素を持っていないため明らかに非擬人化デザインである。しかし、それらが人間あるいは動物の頭部や首などの概念をもとに幾何学的に抽象化したものであることは明らかである。このデザインの選択は、人との複雑な社会的インタラクションを表現するための形体として、合理性を追求した結果であると考えられる。

擬人化デザインと非擬人化デザインそれぞれの利点を組みあわせた、曖昧性を持たせたロボットをハイブリッドデザインとし、幅広い適応性を持つという主張もある [42]。これと類似する例は、非擬人化ロボットにインタラクションが必要とされる場合の、別の課題解決手段としてディスプレイを利用した擬人化デザインがある。ディスプレイ内に、目や

口などの顔要素を付加する手法や、具体的な言葉を表示したり、UIを表示することで、ロボットに不慣れなユーザーを従来型のインタラクションに導いている。この手法は、効率的であり一定の効果が期待できる。しかし全てのロボットに目や口を表示するディスプレイをつけることは環境との調和という視点からも課題がある。

非擬人化ロボットの形体による分類と課題

非擬人化ロボットの中にも様々な種類が存在することを示したが、その中から人や動物などの概念を利用しない非擬人化デザインについて課題を整理する。

1. 椅子やゴミ箱といった一般的な人工物の形体を利用したロボット [62][71][20][77][47]

[効果]

- もとの人工物本来の用途の拡張に有効。
- 非稼働時に家庭内環境と調和する。

[課題]

- もとの人工物本来の用途に関連しない用途や既存製品が存在しない新しい用途に対応できない。
- もとの人工物に似せる必要がありデザインの自由度や柔軟性に制約がある。
- もとの人工物本来の性能とロボットの機構の両立のため機構が複雑になる。

2. 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のロボット [83][3][70][8]

[効果]

- 制約にとらわれず、わかりやすく自由で柔軟性のあるデザインができる。
- 社会的知覚の表現に最適化した記号性を持つ形体を選択できるため過剰な期待を回避できる。

[課題]

- 特定の社会的知覚の表現に最適化するため専用の道具としての印象が強い。
- 非稼働時でもアフォーダンスが生じるなど、環境に調和しない場合がある。

3. 立方体や円柱のような純粋な幾何学的形体のロボット [50][26]

[効果]

- 形体による先入観が少なく環境と調和しやすい。
- 動きによる生物らしさに気付きやすい。

[課題]

- 複雑な社会的知覚の表現が難しい。
- 抽象的な表現が多く解釈の一貫性がない。
- デザインの自由度や柔軟性が少ない。

4. その他の複雑な抽象形体のロボット [49][91]

[効果]

- 複雑な表現が可能でデザインの自由度と柔軟性が高い
- 審美的な形体によって環境との調和が可能

[課題]

- 形体の選択にデザイナーのスキルや感性への依存度が高い
- 機構や駆動方法が複雑になる可能性がある

このように、それぞれの非擬人化デザインの効果によって、擬人化デザインの課題を解決することができる。しかし、それぞれの分類ごとに課題できない問題が残る。非擬人化デザインの効果である、既知の概念に似せるという制約がなく、目的に合った形体を自由に選択できる点に注目すると、純粋な幾何学的形体のロボットと最小限の記号性を持つ形体のロボットが、非擬人化デザインの可能性を広げるという視点で重要な領域であると考えられる。

1.4 研究の目的

ここまでの整理によって、擬人化デザインと一部の非擬人化デザインの課題として指摘された、非稼働時の家庭内環境との不調和は、今後ロボットの家庭内での普及を実現する上で解決すべき課題である。非擬人化ロボットの分類とその効果を整理した結果からは、「純粋な幾何学的形体のロボット」の効果を利用することで、課題解決が可能であると考えられる。しかし、この「純粋な幾何学的形体のロボット」には社会的インタラクションの親和性に課題がある。一方、その課題を解決できる形体は「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」であるが、この形体のロボットには「非稼働時の家庭内環境との調和」に課題がある。

本研究は、この2種類の形体の効果によってお互いの課題を補完するアプローチによって、「家庭内環境との調和」と「社会的インタラクションの親和性」を両立する新しい非擬人化ロボットの実現を目標とする。

1.4.1 対象とする領域

外部概念の利用が極端に少ないミニマルな形体

これまで述べてきた擬人化デザインの課題と非擬人化デザインの課題を解決するためには、従来の擬人化と非擬人化という分類では対象領域が曖昧となる課題がある。そこで、本研究では、対象領域の明確化のために、図 1.2 に示すような、形体に対する外部概念の積極的な利用の有無による分類を利用する。

外部概念とは、ロボットという人工物としての概念の外部に存在する、人間や動物や家具という概念を指す。ロボットのデザイン以外にも、外部概念を積極的に利用する例は存在する。図 1.1-A に示した 1950 年代から 1960 年代に米国で生産された車のデザインに多く見られるテールフィンとは、リアフェンダーに航空機の垂直尾翼という外部概念を加えることで、実際には空力的な効果はないにも関わらず、とても速そうな印象を与えることを意図している。これは、1950 年代後半から 60 年代に始まった図 1.1-B のようなカルダーのモビールに代表されるキネティックアートの手法と対照的である。キネティックアートは外部概念を含まない抽象的なオブジェクトの動きによって知覚を刺激することで印象を形成する芸術手法である。

外部概念の利用をロボットのデザインに置き換えると、非擬人化ロボットに目や口などの人間という外部概念を加えることで、人間らしいインタラクションが可能である印象を与える手法と考えられる。つまり擬人化デザインは、「人」という概念を積極的に利用し

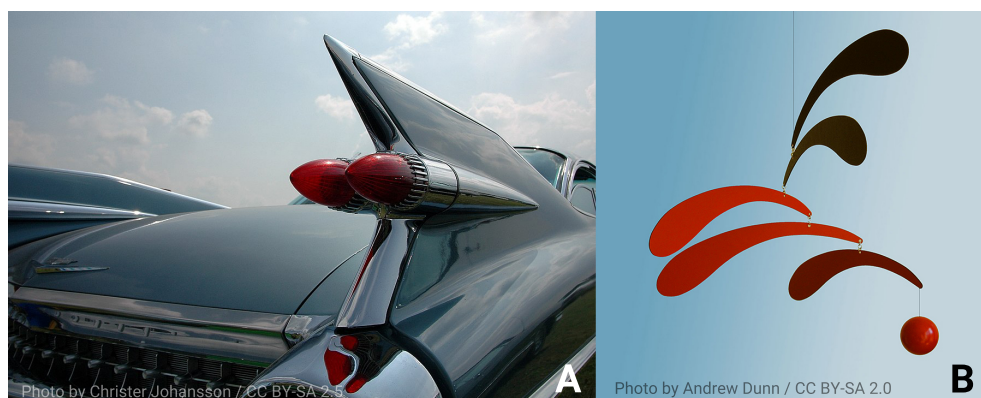


図 1.1 A:50-60 年代の米国の車に採用されたテールフィンが航空機の利用している。B: キネティックアートは外部概念を含まない抽象的なオブジェクトの動きによって知覚を刺激し印象を形成する

た形体に分類できる。

この外部概念の利用の有無による分類では、従来非擬人化デザインとして扱われていた、椅子やゴミ箱といった一般的な人工物の形体を利用したロボットも、外部概念を積極的に利用した形体に分類される。これにより、このグループは、外観を人や家具といった概念に近づける要件によるデザイン上の制約の課題や、外観が生じさせる過剰な期待と評価のギャップの課題などの共通の課題を持つ。

それに対し、純粋な幾何学的形体のロボットと社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のロボットは、外部概念の利用が極端に少ない形体に分類される。本研究ではこの領域を「ミニマル領域」と呼ぶ。このグループに属する形体は、外部概念の形体に似せる必要がないため、自由で柔軟なデザインが選択できることに加え、インタラクションの動き表現に必要な内部機構を設計しやすい利点がある。

この領域の非擬人化ロボット研究では、非言語インタラクションやアニメーション知覚による生物らしさを親和性の獲得に利用している。本研究で制作するロボットも非言語インタラクションと生物らしさを利用する。

また、この領域の形体の課題を整理すると、「純粋な幾何学的形体」には「社会的インタラクションの親和性」の課題があり、「最小限の記号性を持つ形体」には「環境との調和」という課題がある。本研究ではこのミニマル領域を対象領域とし、これらの課題の解決を試みる。

1.4.2 研究の目的

本研究は、外部概念の利用が極端に少ない形体と生物らしい印象を利用することで、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性を両立する非擬人化ロボットの実現を目的とする。

一般家庭の中で様々なタスクを行い、人々の豊かな生活を支えることは家庭用ロボットの理想である。その実現には共に生活する人の経験に配慮したロボットのデザイン手法が重要となる。

家庭用ロボットの用途の多様化は、ロボットとの社会的インタラクションの親和性の重

非擬人化ロボット			擬人化ロボット		
外部概念の利用が極端に少ない形体 (ミニマル領域)			外部概念を積極的に利用した形体		
純粋な幾何学的形体	最小限の記号性を持つ形体	複雑な抽象形体など	既存の人工物の形体を利用	抽象化された具象形体	具象形体
					
The Stem	The Greeting Machine	Flagella	Mechanical Ottoman	Shimi	Pepper

図 1.2 外部概念の利用有無によって再分類したロボットの形体。外部概念の利用が極端に少ないミニマルな形体を対象領域とする

要性を増加させた。その中で、非擬人化ロボットとのインタラクション研究は、人とロボットの新しい関係を探求する重要な領域である。

本研究は、非擬人ロボットの生物らしさを利用して「家庭内環境との調和」と「社会的インタラクションの親和性」を両立することを目標とする。

1.4.3 本研究のアプローチ

本研究では、「家庭内環境との調和」と「社会的インタラクションの親和性」を両立する非擬人化ロボットの実現のために、以下に示す3つの特徴を持つロボットを検討する。

特徴 1 生物らしさがない純粋な幾何学的形体

特徴 2 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体

特徴 3 2種類の形体を切り替えるなめらかな変形

特徴 1：生物らしさがない純粋な幾何学的形体

本研究ではロボットが非稼働時の形体として純粋な幾何学的形体を用いる。擬人化デザインに代表される外部概念を積極的に利用した形体のロボットが、インタラクションに対する過剰な期待を持たせることは先に述べた。また、擬人化されたロボットの印象が文化や社会背景に影響を受けることも指摘されている [51][40]。外部概念を積極的に利用した形体は、一部のユーザーを魅了する効果があるが、その他のユーザーの嫌悪感を誘発する可能性もある [15]。

それに対し、外部概念の利用が極端に少ないミニマル領域の形体は、概念が引き起こす過剰な期待の回避を期待でき、文化や社会背景の影響を受ける可能性は少ないと考えられる。そのため、この形体は家庭内環境との調和を阻害する可能性は低いと考えられる。

純粋な幾何学的形体がこれらの効果を持つ反面、社会的インタラクションの親和性の獲得には課題がある。先行研究では、純粋な幾何学的形体と動きを組み合わせることで、アニメーション知覚による生物らしい印象を与えたり、非言語ジェスチャーによる感情を表現している。一部の研究ではシステムティックなアプローチを試みているが [70]、多くの

研究の結果は、動きに対し明確で一貫性のある解釈を得られることまでは示していない [26][50].

以上から、この特徴1「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」の効果を、本研究の目的の一つである「家庭内環境との調和」の実現に利用し、課題については次の特徴2で解決する。

特徴2：社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体

この形体は、一般的な人工物の形体や、純粋な幾何学的形体に比べ、デザインの自由度や柔軟性が高く、表現する社会的知覚に最適化された記号性を持った形体の選択が容易である。そのため、社会的インタラクションの親和性を実現するための、明確な表現が可能である。また、最小限の記号性を持たせることは、その他の複雑な抽象形体のロボットと比較すると、デザイナーのスキルや感性への依存度は低く、非擬人化ロボットのデザイン手法のひとつとして一般化することに適している。

本研究では、「社会的知覚」を「他者の行動や心的状態を予測し、観察し、解釈する能力」を示す社会的認知 [98] を引き起こす知覚として使用する。この特徴2の「社会的知覚の表現」は、最小限の記号性を持つ形体と、動きの組み合わせによって実現する。

社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のロボットの先行研究の多くは、動きによって生物らしい印象を獲得したり、社会的なインタラクションの成立を目的としている。

Hoffman らは、様々な非擬人化ロボットによる動きを中心としたデザイン (Movement centric design) の手法をまとめ、表現力豊かな動きを実現することを優先した、ロボットのデザインプロセスの重要性について述べている。その中で動きを中心としたロボットのデザインは、抽象的な形状やロボット家具のによって発展する可能性があると主張している [31].

非擬人化ロボットの先行研究は、ロボットの自律的な動きによって、人がロボットに対して生物らしい印象を持ったり [65], ロボットの社会的知覚の表現を見することで、社会的インタラクションを行うこと示している [80]. 本研究は、これらの先行研究を参考に、「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」とその動きによって生物らしい印象の獲得を試みる。

特徴3：2種類の形体を切り替えるなめらかな変形

特徴3は、ロボットになめらかな変形を実現する変形機構を与え、異なる2つの形体を切り替えることである。この2つの形体は特徴1「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」と特徴2「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」を指し、1台のロボットが2つの形体を持つことで、非稼働時とインタラクション時それぞれの利点を生かし課題を相殺することを意図している。具体的には、非稼働時は「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」で人工物らしい印象を持ったロボットで家庭内環境と調和し、インタラクション時には「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」に変形することで生物らしい印象を増加させ、社会的インタラクションの親和性を持ったロボットに切り替わることを想定している。

また、切り替え時になめらかな変形を実現することは重要である。キネティックアートには、動きによって対象の印象を徐々に変化させる作品が多く見られる [64]. これらの作

品は鑑賞者の目の前で、対象の形体や位置関係が変化する過程を見せることによって、印象が徐々に変化する様子に注意を向けさせることを意図している。

このキネティックアートの手法を、本研究の非擬人化ロボットのデザインに応用すると、なめらかな変形動作見せることで、2種類の形体に切り替わる際に起こる、生物らしい印象の変化に意識を向けることができると考えられる。

さらに、このなめらかな変形動作によって印象が徐々に変化する現象を実現するためには、変化の過程で外部概念が入り込むことを防ぐ必要がある。

表現主義の芸術家であるパウル・クレーは、1900年台初頭に工芸・写真・デザインなどを含む美術と建築に関する総合的な教育を行った学校であるバウハウスで行なった抽象論の講義の中で、「抽象的観念からは、幾何学的形体などの造形要素を純粋に使うことによって、結果として『猫犬』のような概念が生じてくるのは構わない。しかし、意図的に猫や犬といった外部概念を導入することによって本質が曇らされることは、抽象的観念としては許されない。」と述べている [36]。この抽象芸術的観点によると、なめらかな変形によって、生物らしい印象を生じさせる際に、機構部品などの人工的な構造が目に入ること、外部概念によって本質(生物らしさ)が曇らされることを防ぐ必要がある。

ロボットの変形はソフトロボットに多く見られるが、変形時に皺や膨らみが発生する。ソフトロボティクスに見られる多くの変形は、やわらかさを機能として利用した結果生じる物理現象である [96]。しかし、やわらかい皺や膨らみ自体を、生物らしい印象に利用することも可能である。本研究の変形機構は剛体の機構変形であるため、このような造形要素が発生することはなく、ミニマルな領域内で幾何学的形体を変形させるために、変形中に生物を想起させる造形要素が発生しないように配慮している。

また、造形的なノイズを生じない変形を実現する手法としては、コンピューターグラフィックスによるモーフィング手法がある。モーフィング手法は仮想空間の中の物体を別の物体に自然に変形させる特殊効果であり、変形の間状態を計算し、形体の連続性を作り出すことが可能である。SFの世界で描かれる、このモーフィング手法を使用したロボットの変形はひとつの理想像である。しかし現実的には、ロボットの機構変形は、関節やアクチュエーターなどの造形要素が外部に露出することが多く、完璧な外観デザインを持ったロボットであっても変形中に機械的な印象を与えてしまうことがほとんどである。

本研究で考案した変形機構は、機構を構成する部品を細かく分割し、それぞれの動作による変化量を微小化することで、非連続的な表面形状をなめらかに見せる手法を選択している。これは、コンピューターグラフィックスのなめらかさがディスプレイの解像度に影響を受けることから着想を得ている。

それぞれの特徴に対する評価

本研究では、先に示した3つの特徴の効果を確認する指標として生物らしい印象を利用する。本研究の目標のひとつは、非稼働時に家庭な家庭環境と調和することである。非稼働時を対象とする場合はタスクによる評価が難しいため、環境に対し不調和となる印象の有無で評価を行う。また、社会的インタラクションの親和性に関しては、人が非擬人化ロボットからアニメーションを知覚することで、それらに対して社会的インタラクションを行う現象が報告されている [35][22][65]。これらふまえて、本研究の目的を実現する3つの特徴の効果を次のように評価する。

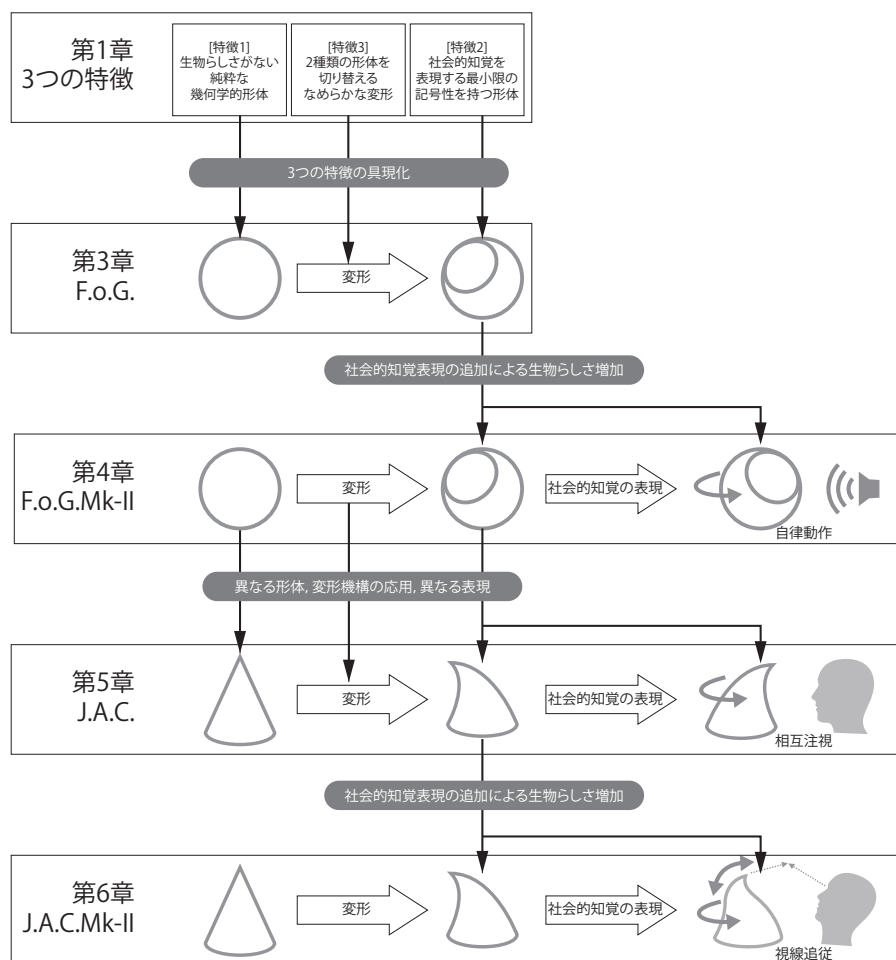


図 1.3 本論文の構成. 制作する4種類のロボットの形体と社会的知覚の表現の関係.

- 「生物らしさがない純粋な幾何学的形体」の効果は生物らしい印象の低さで評価する. 非稼働時に生物らしさが低いことは家庭内環境との調和の実現につながる.
- 「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」とその動きの効果は生物らしさの増加によって評価する. 生物らしさが増加することは本研究の目的である社会的インタラクションの親和性を向上させることにつながる.
- 「2種類の形体を切り替えるなめらかな変形」の効果は人工物らしさを増加させずに生物らしさを増加させることによって評価する. 人工物らしさが増加せずに生物らしさが増加することは, 変形そのものが意図しない印象を与えていないことを示し, 本研究の目的である上記2種類の状態の両立につながる.

1.5 本論文の構成

次章以降の本論文の構成を以下に示す.

第2章では本研究に関連する先行研究について述べる. はじめにインタラクションロボットに多く適用される擬人化デザインの効果と課題に関する先行研究について述べ, 期

待と評価のギャップの課題を回避する擬人化デザインのアプローチを紹介する。次に本研究が対象とする非擬人化ロボットに関連する研究を、ロボットの形体による分類の視点から、それぞれの効果と課題について整理する。

第3章から第6章にかけて制作するロボット間の関係を図1.3に示す。第3章と第4章で確立したデザイン手法を、第5章と第6章で異なる形体と社会的知覚の表現に応用展開する。

第3章では、幾何学的な球体の一部をなめらかに変形して平面を出現させるロボット Face on a Globe(F.o.G.)を制作し、外部概念の利用が極端に少ない形体と、ロボットの形体をなめらかに切り替える変形機構の実現について説明し、展示会で収集したコメント分析からその効果についてまとめる。

第4章では、F.o.G.に自律的な動作として、音に反応して平面の向きを変える機能を加えたロボット F.o.G.Mk-II について説明する。前章の F.o.G. との比較評価を実施し、社会的知覚の表現を加えることによって、ロボットが持つ変形前後の2つの状態に対する生物らしい印象の差を拡大することを確認する。

第5章では、幾何学的な円錐をなめらかに変形して頂点の向きを変えるロボット Joint Attention Cone(J.A.C.)を制作し、異なる形体と、変形機構の応用展開、異なる社会的知覚の表現によって、非擬人化ロボットのデザイン手法として応用展開が可能であることを示す。

第6章では、J.A.C.に視線検知システムと水平方向の動作を追加することで、視線追従を表現するロボット J.A.C. Mk-II について説明する。社会的知覚の表現を変化させることで、形体の切り替えによる生物らしい印象の差の拡大を試みる。

第7章では、第3章から第6章の各章で制作した非擬人化ロボットに対し、この3つの特徴の効果について、本研究の目的である「家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立」と「2種類の形体を切り替えるなめらかな変形」の視点から考察を述べる。

最後に、第8章では各章の研究を総括し、さらに非擬人化ロボットのデザイン手法に対する今後の課題と展望について述べる。

第 2 章

関連研究

本章では、本研究の対象領域とその周辺の先行研究について整理する。はじめに、擬人化デザインの効果と課題を示し、次に非擬人化デザインの先行研究について本研究との関連について述べる。

2.1 擬人化デザインの効果と課題

2.1.1 擬人化デザインの効果と分類

インタラクションロボットの外観は、より自然な対話を行うエージェントとして擬人化された特徴を持つデザインが多く、擬人化の効果について多くの研究が行われている。山田らは、人工物の擬人化に期待される効果として、「人工物を大切に扱うようになる」「人工物が人間並の能力を期待される」「人工物がペットの代わりに」「人工物を人のように愛する」の 4 つにまとめ、人がコンピューターや人工物を擬人化することは、あらゆる人間に広く起こりうる精神現象であると説明している [92]。この先行研究は、人の擬人化傾向 (Anthropomorphic tendencies) を分類したものである。

次に、擬人化された特徴 (Anthropomorphic features) の分類に関しては次のような先行研究がある。

DiSalvo らは製品デザインの分類調査から、デザインに使われる擬人化様式を、「Keeping Things The Same(製品群の慣習)」「Explaining The Unknown(新機能や新技術の説明)」「Reflecting Product Attributes(製品の特性を表す)」「Reflecting Human Values(人間らしさの活用)」の 4 つに分類し、魅力的の向上から要求を満たす目的などの間で、最適な擬人化レベルを考慮してデザインする必要性を指摘している [15]。

Phillips らは、200 以上のロボットの画像からデータベース ABOT (Anthropomorphic roBOT) を構築し、その分析から擬人化ロボットの外見上の特徴を次の 4 種類にまとめている。(1) Surface Look(まつげ、頭髮、肌、性別、鼻、眉毛、服装)、(2) Body-Manipulators(手、腕、胴体、指、脚)、(3) Facial Features(顔、目、頭、口)、(4) Mechanical Locomotion(車輪、トレッド／トラック)。そしてこれらの特徴の有無から人間らしさを予測する手法を示した [54]。

Duffy は擬人化のデザイン領域として、ロボットの頭部を、(1) 可能な限り人間に近づけようとする「人間的 (Human)」と、最小限の特徴を際立たせようとする「象徴的 (Iconic)」、より機械的で機能的な美を追求する「抽象的 (Abstract)」の 3 つの方向性で分

類している [16].

これらの先行研究のように、擬人化デザインに焦点を当てた分類は多数存在する反面、非擬人化デザインについて分類したものがない。そのため本研究では、外部概念の利用の有無による分類を行うことで、対象領域を明確化した。

2.1.2 ロボットの外観から生じる期待と評価のギャップ

板倉はメンタライジング仮説として、過度な知的印象は過大評価につながり、実際のインタラクション時に期待どおりの自然対話が成立しない場合に大きく信頼性を損なう結果を得る可能性があるとしている [107].

小松らはロボットの外見から予想されるロボットの性能と実際に体験した性能の差から生まれるロボットに対する評価を「適応ギャップ」[37]と呼び、実際の性能と等しいまたは劣るような外見をデザインすることが重要と述べている。

森口は幾何学図形の「行動」が子供に影響を与えるかを調べ、ロボットやアンドロイドよりも幾何学図形の「行動」が子供に感染することを明らかにした [97].

これらは、ロボットの外観が過剰な期待を持たせることに課題があり、擬人化の利用度合いや抽象度を操作することで適切なバランスを保つべきだと主張している。

次にこの適切なバランスを保つためのデザインアプローチについて述べる。

2.1.3 擬人化要素の部分的な付加

以下の事例は、擬人化要素を個別に取り出してロボットのデザインに利用することで、人との関係性を向上させる研究の例である。

大沢は非擬人化デザインの家電製品に擬人化要素を組み合わせる直接擬人化手法を提案している。既存製品に目や手などのパーツを後付けすることで、インタラクションを円滑にすることを示した [103].

Löffler らは、抽象的な外観な頭部の動きによって社会的なインタラクションのための表現を行うハイブリッドデザインのロボットと呼び、ヒューマノイドロボット型のソーシャルロボットと箱型のサービスロボットの中間に位置付けた。その上で、ロボットと人間の関係性に注目し、「モノ」と「社会的な存在」のハイブリッド性が持つ曖昧さを利用することで、ロボットの活用の幅を広げると主張している [42].

Luria らは、紙で制作した 16 種類のロボットの頭部のモデルを利用して、目の抽象度と人間らしさの評価について評価を行なっている。その結果よりリアルな目のデザインを持ったロボットの人間らしさが高くなる評価を得た。一方目のない条件に対してはオフィスなどへの適合性が高くなるという仮説は立証されなかった。結論として家庭用のエンターテインメント用途であれば目のデザインは重要であると述べている [43].

有賀らは人や生物らしさを感じるサンプルからロボットを人格化して捉える属性を抽出し、顔、形、動き、質感といった知覚的に認知できる属性グループと、世話、生命、意思といった概念として捉えられる属性グループに分類し、それらの組み合わせによって人格化パターンをデザインに適用する手法について研究している [4].

これらの先行研究のように、非擬人化デザインのロボットや製品に、擬人化要素を適切に加える手法の効果は多く示されている。しかし、Luria らが指摘しているように、家庭



図 2.1 STB:Social Trash Box Robot,
Yamaji et. al, 2011



図 2.2 Ranger, Fink et. al, 2014

用または、エンターテイメントといった、強く親和性が必要とされる用途に適した手法であり、そのほかの用途に適しているかについては注意が必要であると考ええる。

2.2 非擬人化ロボットの種類とその効果と課題

2.2.1 椅子やマイクなどの一般的な人工物の形体を利用したロボット

HRI や HCI 領域の先行研究では、椅子や机といった家具や、おもちゃ箱やゴミ箱といった日用品、さらにはマイクなどの機器といった、一般的な人工物の形体を利用した非擬人化ロボットが扱われている。これらの研究の多くは、実社会の課題解決のほか環境やコンテキストとの調和を想定したものが多く見られる。

岡田らは、周囲の子どもたちのアシストを上手に引き出すことで、結果としてゴミを拾い集めるゴミ箱ロボット (STB:Social Trash Box)(図 2.1) を開発した。このロボットによって他者のアシストを引き出すための社会的表示や弱さの表出方法を研究している [77][47][108]。

また、Fink らは幼児が部屋を片付ける動機付けを行うことを目的としたロボットのおもちゃ箱 Ranger(図 2.2) を開発し、ロボットの行動が子供たちのロボットとのインタラクションや片付け行動に与える影響について研究している [20]。

Sirkin らは家具のスツール型の非擬人化ロボット、メカニカルオットマン (図 2.3) を設計しその動作を開発した。このロボット用いて人々の共同行動に参加させるための動作を検討し、人がこのロボットをペットのような生き物として認識すると同時に、ペットには通常しないような、足を乗せることを要求する機能的オブジェクトとしても認識しているという関係が観察されたと報告している [62]。

寺田らは、椅子に目標指向性や随伴性を有する振る舞いを行わせることで、ランダムに動く場合よりも多くの実験参加者が椅子に座ろうとしたことから、椅子が意図的主体と理解されたため椅子の挙動が機能としてではなく、「着座させよう」という意図として解釈されたとしている [72]。



図 2.3 Mechanical Ottoman, Sirkin et. al, 2015



図 2.4 Micbot, Tennent et. al, 2019

Tennet らは、小さなグループ内のインタラクションのために周辺機器ロボットオブジェクト (a peripheral robotic object) としてマイク型のロボット Micbot(図 2.4) を開発した。このロボットの非言語的な暗黙のインタラクションによって、参加者の会話への関与を促し、グループのエンゲージメントの向上だけでなく、問題解決のパフォーマンス向上も促進する効果があることを示した [71]。

これらの先行研究で用いられる一般的な人工物には、座る、ゴミを入れる、おもちゃを収納するといった、それらが本来担っているタスクが存在し、非擬人化ロボット化することでそのタスクの成功率を向上させる、あるいはもとの役割を拡張することを目的とする研究である。

それらの人工物の外観には擬人化要素は含まれていないため、外観から過度な期待を持たせないことや、利用されるコンテキストに対して不自然ではないという意味での環境との調和などの効果があると考えられる。しかし、これらの非擬人化ロボットには、元になる人工物と同じ形体にしなければならないというデザイン的な自由度や柔軟性の制約や、決まった形体の内部に機構やアクチュエーターを実装する必要があるといった、擬人化ロボットと同じ課題がある。また、このデザイン手法は、元となる人工物の役割を大幅に拡張する場合や、新しい用途を持つロボットを開発する場合には、元となる人工物の形体が与えるインタラクションへの期待とのギャップを生じさせる可能性が高いため、利用しにくいという課題もある。そのため、本研究ではこれらの課題を解決する非擬人化デザインを対象とするため、一般的な人工物の形体を利用する手法は対象には含めない。

2.2.2 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のロボット

新しい役割や目的を持った非擬人化ロボットをデザインする場合は、一般的な人工物の形体を利用することは難しくなる。このようなケースでは、デザイナーがその役割や目的に合わせて形体を選択できることは、非擬人化デザインの利点である。次にあげる先行研究は、形体だけでなく社会的知覚を表現する動きも同時に設計することで、動きに最適化された、最小限の記号性を持つ形体が選択されている事例である。これらの多くは、擬人

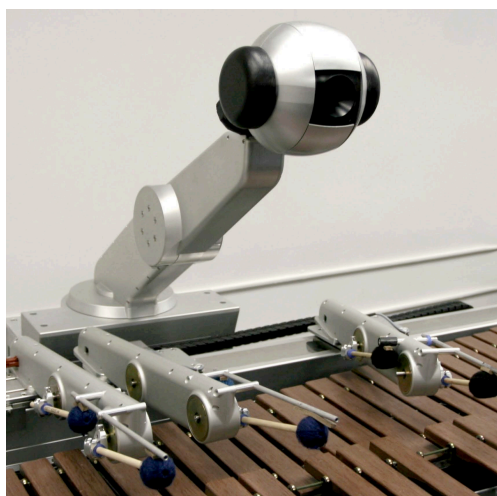


図 2.5 The socially expressive head Bre-
tan et. al, 2012

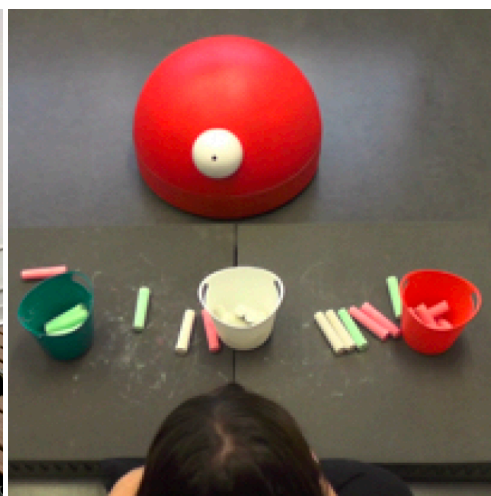


図 2.6 A Simple Nod of the Head Zaga,
et. al, 2017

化の課題である期待と評価の不一致を避けるために抽象的な形体を使用している。あるものは、目や口といった擬人化要素を想起させることを意図しているが、それらが直接的な擬人化と捉えられないように工夫している。別のケースでは、はじめから擬人化要素とは関係のない、極端に抽象的な幾何学的形体を利用することを試みている。

Hoffman らは、人間とロボットの即興演奏を研究するためのプラットフォーム Shimon に欠けていた、社会的表現力や音楽的コミュニケーション能力を補うために、社会的な表現力を持つ頭部 (Socially expressive head) という擬人化ロボット (図 2.5) を制作した。このロボットは頭のジェスチャーによって、人間のミュージシャンとの即興演奏の順番を知らせたり注目を集めるような表現を行う。このロボットの円柱上の頭部正面には、目または口を想起させるような開口部があり、その開閉によって感情を表現する。Hoffman らは、これをあえて曖昧な形体にすることで直接的な擬人化を回避したと説明している [31]。

Zaga らは、赤い半球の本体に目を抽象化した小さなひとつの白い半球を加えた形体の子供向けロボット (図 2.6) を制作した。このロボットは左右の回転動作のみで、社会的視線 (Social gaze) を表現する。このロボットを利用した社会的視線運動と指示的視線運動の実験により、社会的視線運動が子どものロボットに対するアニメシーと好ましさの知覚を有意に増大することと、社会的注視の動作が子どもたちの「役に立つ」という認識を有意に増加させる結果を得た。

Anderson-Bashan らは、大きなドームの上を転がる小さなボールで初対面時のポジティブまたはネガティブな社会的合図を伝える非ヒューノイドロボット The Greeting Machine (図 2.7) を制作した。このロボットは Heider らによる幾何学形体のアニメーションから社会的行動を認識する研究から着想を得ており、純粋な幾何学図形を組み合わせた形体を使用している。小さなボールの動き (非言語ジェスチャー) は、動きの専門家と一緒に設計し、具体的なメタファーを用いずにデザインされた抽象的なロボットが初対面時の社会的行動に効果的に参加できることを示した。また、Anderson-Bashan らは非擬人化ロボットが低い複雑さ、低コスト、設計の柔軟性から有望であると述べている [3]。



図 2.7 The Greeting Machine, Anderson-Bashan et. al, 2018

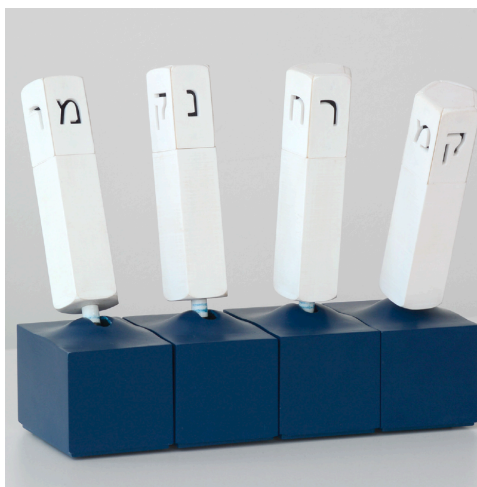


図 2.8 Robotic Object for “Being Seen”, Zuckerman, et. al, 2020

Zuckerman らは、健康な高齢者に「見られている」感覚を伝える非ヒューマノイドロボット (図 2.8) を制作した。このロボットは、4人のダンサーを4本の角柱に見立てた、幾何学的な4本の角柱の動きによって、ダンサーの動きからヒントを得た非言語的なジェスチャーを表現する。健康な高齢者は、コンパニオン機能、ゲーム機能、無機能の3つの条件でプロトタイプとインタラクションを行い、その結果、非言語的ジェスチャーは「見られている」感覚と関連し、ロボットを自宅に受け入れる意欲はその機能に影響され、ゲームがコンパニオンより有意に高い結果を得た。

これらのロボットは、いずれも擬人化ロボットの課題を回避した上で、人との親和性を実現している。しかし、先行研究が示すようにこれらの形体は特徴的であり、インタラクションのためのアフォーダンスを有していることは、非稼働時の環境への調和という視点からは課題になることが考えられる。

本研究ではこの社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のロボットの利点である、社会的インタラクションの親和性を利用しつつ、環境との調和の問題の解決を試みる。

2.2.3 立方体や円柱のような純粋な幾何学的形体のロボット

Heider らは、複数の幾何学的図形の動き方によって、片方の幾何学的図形が片方の幾何学的図形を追跡しているような印象あるいは意図をもっているというような、社会的行動を認識させることを示した [27]。

前出の Anderson-Bashan らによる The Greeting Machine も含め、以下に示すような立方体や円柱のような純粋な幾何学的形体のロボットの多くは、この Heider らによる幾何学図形の運動から社会的行動を認識する現象から着想を得ている。

Harris らは、抽象的なロボットの動きが人間とロボットのインタラクションに与える感情的な影響について調べるために、ほぼ形がなくアフォーダンスもない抽象的な棒状の非擬人化ロボット The Stem (図 2.9) を開発した。この研究は、ロボットの視覚的な外観や機能的な文脈をデザインすることとは異なる、物理的なロボットモーションの基本的な特性をデザインすることを目的としている。抽象的な動きに対する評価からは、多くの被験



図 2.9 The Stem, Harris et. al, 2011



図 2.10 iki-mono, Nakayama et. al, 2016

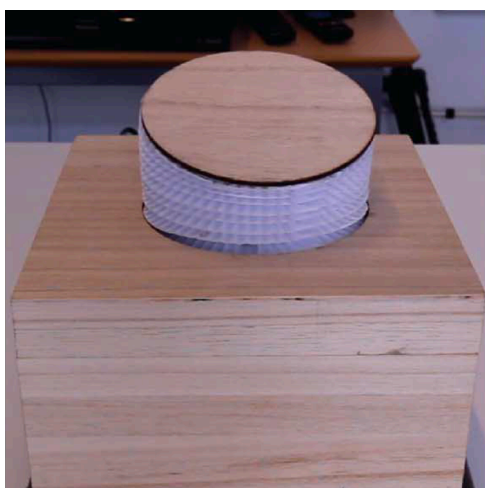


図 2.11 Shape-changing interface, Tan et. al, 2017



図 2.12 Technological Dreams Series: No.1, Robots, Dunne et. al, 2007

者がロボットの抽象的な動きに対して感情的な関わりを示したと述べている。

中山らは、幾何学的な立方体の非擬人化ロボット (図 2.10) を開発し、5 台のロボットが直線的な移動のみで相互作用を行うことで生物らしい印象を表現した。その結果、抽象的な形状とシンプルな動きによってユーザーに生物らしい印象を与えることを示した [50]。

Tan らは、感情を表現するために、円柱のような形状が変化する非擬人化デザインのインタラクティブオブジェクト (図 2.11) を開発し、これを用いて運動と感情との関係理論に基づいたインタフェースの設計方法を研究した。このロボットは、円柱上のオブジェクトが小さな箱から押し出される動作の、速度、流動性、方向、向きを変化させることが可能となっている。評価実験では参加者が、意図した 6 つの基本感情 (悲しみ、恐怖、幸福、驚き) のうち 4 つを確率以上で認識することができたと述べている [70][69]。

Dunne & Raby による Technological Dreams Series (図 2.12) は、抽象度の高い外観とインタラクションを行う人工物によって、ロボットとの新たな関係性を提示するアート作品である [17]。これらのロボットの外観は、テレビやスピーカーといった既存の人工物



図 2.13 Ephyra, Yamanaka et. al, 2007



図 2.14 Flagella, Muramatsu et. al, 2015

を感じさせる形体のものから幾何学的な形体までさまざまであり、それぞれのロボットの能力や知的な性能も異なり、従属、親密、依存、対等など様々な関係性を表現している。

これらの先行研究で用いられたロボットは、純粋な幾何学的形体に近い形体を有している。そのため、動きによる表現の抽象度は高くなる傾向にあるが、それを利用することで、感情の表現または伝達、生物らしさの表現を試みるものである。擬人化要素がないだけでなく、既存の人工物に類似した形体ではないことや、意図的に付加された造形要素がないことが、人らしい印象や生物らしい印象といった外観から生じる先入観を排除することにも貢献している。そのため、動きのみに注目を集めることが可能であり、動きのデザインに感れした基礎研究として多く用いられる傾向がある。

本研究ではこの純粋な幾何学的形体の特性を、非稼働時に環境と調和するという目的に利用する。しかし、これらの抽象度の高い形体や動き表現は、Tan らのような取り組みはあるものの、一貫性のあるインタラクションに対する解釈を得ることが難しいという課題が多く残されている。実際のロボットデザインのプロセスで、このデザイン手法による解釈の一貫性を実現には、デザイナーの感性やスキルに大きく依存することが課題になると考えられる。そのため本研究ではより明確な表現を可能とする形体への変形を用いることで、環境との調和と明確なインタラクションの両立を図る。

2.2.4 その他の形体のロボット

山中らの Bio-likeness 研究では生命や知性の兆候を形体と動きによって表現し、人と人工物の親和性を高めることを目的としている。

山中らの Ephyra(図 2.13) は柔軟性の高いテキスタイルで覆われておりなめらかな外観を持つが、内部に放射状に設置されたアームの伸縮によって突起が出現する。このアームに実装されたセンサーによってカタツムリの触覚のような動作を行うことで、生命感を表現している [91]。

村松らの Flagella(図 2.14) は、ゆるやかに湾曲したアームを複数持つロボットである。アームは複数の回転接続部を持ち、湾曲形状を工夫することで剛体であるにもかかわらず、全体がなめらかに変形しているように見える設計がされている。また 5 本のアーム

が互いに干渉しないように動く様も社会的行動を想起させ生物らしい印象を与えている [49]. 外観形状は極めて抽象的であるが, Flagella(鞭毛) の概念を抽象化したものである.

その他にも Bio-likeness 研究領域では, 生物を模倣した具象形体を用いない概念的な抽象形体によって構成されたロボットの動きや人との相互作用によって, 生物らしさを獲得する試みが行われている [30][48].

これらの研究で開発されたロボットは外部概念を積極的に利用した形体ではないが, 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のロボットと比較すると形体は複雑である. また Flagella のように生物の器官を抽象化したものと擬生物化デザインとの違いは曖昧である. このように「外部概念の利用が極端に少ないミニマルな形体」と「外部概念を積極的に利用した形体」の間には明確な分類が困難な領域あることは明らかである.

また, このような複雑な抽象形体の非擬人化デザインは, デザイナーの感性やスキルに極度に依存する傾向があることも課題である. さらに, 複雑な形体の中に実装する機構やアクチュエーターなどの制約も課題となる可能性が高い.

本研究は, 「外部概念の利用が極端に少ないミニマルな形体」を対象領域とすることによって, よりデザインとしての制約の少ない非擬人化ロボットの実現を検討する.

第3章

Face on a Globe：なめらかに変形して平面を出現させる球体型ロボット

本章では、外部概念の利用が極端に少ない形体のロボット Face on a Globe を制作した。このロボットは純粋な幾何学的形体である球体の一部を変形させ、最小限の記号性を持つ形体として顔を想起させる幾何学的な平面を出現させる。ロボットの2つの形体をなめらかに切り替える変形機構によって、ロボットの印象を、人工的なものから生物らしいものへ自然に変化させることを意図した。はじめにデザインのコンセプトについて述べ、次にその実装について説明する。さらに、このロボットが与える印象を確認するための評価実験として、展示会で収集した100件のコメントの分析と、このロボットの持つ造形要素が与える印象の比較評価を実施した。その結果、展示会で収集した100件のコメントの分析からは、なめらかさと動きが生物らしさに関連していることが明らかになった。続く比較評価の結果では、造形要素としての平面は、擬人化要素がある場合に比べ、生物らしい印象がないことを示した。このロボットの制作では、プロトタイピングを繰り返すことによって、ロボットの形体をなめらかに切り替える変形機構を実現することができた。評価の結果からは、外部概念の利用が極端に少ない形体のロボットが、なめらかな変形によって、生物らしさを増加させる可能性を示した。

3.1 本章の目的

家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立は、ロボットのデザインにおいて重要な課題である。これまで、高度に擬人化された外観と、社交的なインタラクション能力を持つロボットは、ひとつの理想形として描かれてきた [10]。今日では、私たちは日常的に擬人化ロボットに接するようになった。ロボット開発者が親近感のあるインタラクションロボットをデザインする必要があるれば、膨大な先行研究から擬人化の手法や効果を調べることも可能である [55][19]。

一方、近年普及が進む家事ロボットや公共ロボットの中には、タスク遂行の合理性を追求した非擬人化デザインを採用するものも多い。たとえば自然な対話型インタラクション

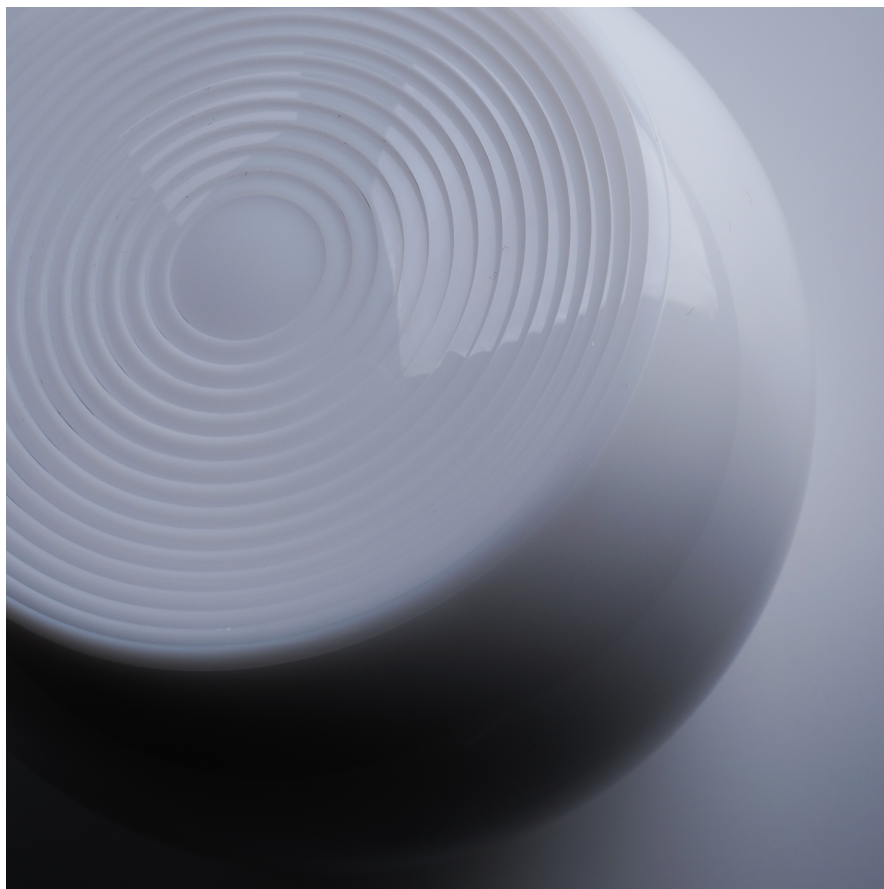


図 3.1 Face on a Globe. Photography by Yasushi Kato

で操作するスマートスピーカーは、擬人化デザインを採用せず家庭内環境との調和を重視した非擬人化デザインを採用している [76]。このように家庭用ロボットを含む知的インタラクションを行う人工物のデザインは多様化している。

擬人化デザインには社会的インタラクションの親和性を提供する利点がある。しかしロボットに高度な擬人化デザインを採用し、人同様の動きやタスクを実現することは、素材、構造、動力など、人間との根本的な差異を考慮すると現実的ではない [78]。また、工業製品として量産まで視野に入れると、複雑な動きを実現する部品の品質やコストが常に課題となることは明らかである [34]。

それに対し、非擬人化デザインのロボットの課題は社会的インタラクションの親和性の低さである。とくに音声インタラクションに代表される NUI(Natural User Interaction)を採用した非擬人化ロボットは、自然なコミュニケーションへの配慮が課題となる。この課題への対処として、非擬人化ロボットに抽象化した目や口などを加えたデザインが増加している。

Reeves らはメディアの等式として知られるの一連の研究によって、人が無意識のうちにコンピューターやシステムを社会的存在 (Social actor) として捉えることを示した [58]。また Dennett は、人が人工物を含めた様々な事象を解釈して予測するための戦略のうち、主体が意図や信念に基づいてふるまうと予測する戦略を志向的な構え (Intentional stance) として説明している [13]。これらの主張は、非擬人化デザインのロボットにも親

和性を高める方法があることを示唆している。

インタラクションデザインの観点からは、対話を促すアフォーダンス、ユーザー操作に対するフィードバック、システム状態の説明など、基本的な要求を満たす必要がある。また、ロボットが人々と共存する未来の社会では、家庭だけでなく職場や公共空間といったロボットが利用される環境との調和への配慮がより強く求められる [94]。さらに、擬人化デザインの導入によるインタラクションへの期待と評価のバランスの不一致、といった適応ギャップへの配慮も長期的な信頼の獲得といった視点から重要となる [14][37][39]。これらの実現のためには、擬人化の抽象度の操作に留まらない、より広いデザイン領域を探索する必要がある。そのため、本研究は、擬人化に代表される外部概念の利用が極端に少ないミニマル領域を対象とした。

本章では、本研究が提案する「生物らしさがない純粋な幾何学的形体」「社会的知覚を表現する最小の記号性を持つ形体」「2種類の形体を切り替えるなめらかな変形」の3つの特徴を持つロボットの具現化を行う。次に、このロボットを使って、2つの評価実験を行う。最後にその結果から、このロボットの生物らしい印象について考察する。

3.1.1 非擬人化ロボットによる生物らしさの獲得

HRI 研究の領域では非擬人化ロボットのアニメシー知覚や生物らしさに関してさまざまな先行研究が行われている。掃除ロボットの生き物らしい動きがユーザーとのインタラクションに影響を与えることや [23][65]、椅子やゴミ箱などの日常製品の動きによって社会的なインタラクションが生まれることが示されている [62] [69][20][77]。

実験心理学領域では、Heider らによって、幾何学的図形の運動を観察することでアニメシー知覚が生じる現象の研究が行われており [27]、近年の HRI 研究では、幾何学的なロボットの相互作用からアニメシー知覚を生じさせる研究も行われている [50]。

また、Bio-Likeness 研究では概念的な抽象形体によって構成されたロボットの動きや人との相互作用によって、生物らしさを獲得する試みが行われている [30][48][49]。

これらの先行研究は、非擬人化ロボットが、生物らしさを獲得できることを示している。ロボットデザインの多様性を考慮すると、社会的インタラクションの親和性獲得のために、すべてのロボットが擬人化デザインを利用する必要はなく、本章で制作する非擬人化ロボットは、わずかな生物らしさをユーザーに気づかせるアプローチに着目した。

3.1.2 アプローチ

本章で制作するロボットは、非稼働時の基本形体に「生物らしさがない純粋な幾何学的な形体」である球体を選択した。次に、その球体に抽象化した顔と見立てた幾何学的な平面を加え、「最小限の記号性を持った形体」とした。また、これら2種類の形体を切り替えるなめらかな変形のための機構を考案した。そして、このロボットを球体上の顔を意味する Face on a Globe と名付けた。

ロボットの制作では、はじめにロボットのコンセプトを作成し、次にこれらを具現化するためのプロトタイピングを経て最終的な実装を行なった。その後、評価実験1として、制作したロボットは展示会に出展し、来場者100人に展示の印象についてアンケートを実施した。さらに、収集したアンケートコメントに対しテキストマイニングによる計量テキ



図 3.2 変形前の Face on a Globe の外観．純粋な幾何学的形体の球体によって生物らしい印象を与えないことを意図している．

スト分析を実施し、その結果から共起ネットワーク図を作成した．これにより、生物らしい印象の変化を捉えることを試みた．その結果、変形によって生じる生物らしさは、なめらかな動きによって生じていることが示された．続く評価実験2では、外部概念を利用しないミニマル領域に含まれる、生物らしさが無い純粋な幾何学的形体と社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体の印象を確認するために、平面のと擬人化要素の有無を組み合わせた4つモデルを用い印象比較評価を行った．その結果、外部概念を利用しないミニマル領域のモデルは、擬人化要素を持ったモデルと比較し生物らしさが有意に低い結果を得た．以上の結果から、生物らしさが無い純粋な幾何学的形体と社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体を切り替えるなめらかな変形が、生物らしい印象を与えることを示した．

3.2 コンセプト

3.2.1 球体の外観

Face on a Globe(以降 F.o.G. と呼ぶ)の基本的な形体は、図 3.2 に示したような球体である．これは本研究の特徴1「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」である．

球体は頂点や辺がなく造形要素の少ない幾何学的形体である．表面の曲率も均一なため視覚的な特徴も少なく、設計者が意図しない印象を与える可能性は低い．そのため、球体はミニマル領域のロボットのデザインに適したひとつの形体である．

しかしアニメーションの中では球体はしばしば擬人的に扱われてきた．Thomas らは球

体に生物らしい印象を持たせるために、転がる動きやバウンドする動きに合わせた弾性変形を描写することが効果的だと説明している [73].

また、鈴木らは丸みを帯びた形がやわらかさの印象に与える影響に関する研究の中で、変形のない純粋な球体は、重力を感じないため柔らかい印象を与えないとしている [67]. F.o.G. は、剛体であり弾性変形がなく、転がったり、バウンドするなどの動作は行わないため、上記のアニメーションの例のような生物らしい印象を与える可能性は低く、重力による形の変形もないため、柔らかい印象を与える可能性も低い。

3.2.2 顔に見立てた平面

このロボットのもうひとつの形体は、図 3.3 に示したような、球体上に幾何学的な平面が加えられた形状である。これは本研究の特徴 2「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」に相当し、この平面は、抽象的な顔として捉えられる最小限の記号性として加えたものである。

パレイドリアは、自然や人工物に含まれる造形要素から顔を想起する現象として古くから知られている。この現象から、人が顔を抽象的に捉えていると考えられる。また、高橋らは目や口のように見える造形要素を持つ工業製品が、人の顔と同じように視線手がかり効果を生じさせるという報告している [68]。これらの現象から、抽象化された顔も社会的知覚を引き起こすと考えられる。F.o.G. のコンセプトは、これらの現象に着目し、具象形体として擬人要素を用いるのではなく、純粋な抽象形体の平面を、顔としての最小限の記号性を持つ形体として用いた。

Chesher らはロボットの顔を、リアリスティックフェイス、シンボリックフェイス、ブランクフェイス、マスクフェイス、テックフェイス、スクリーンフェイスの 6 種類に分類した。ホンダ社が 2000 年に発表した ASIMO をブランクフェイスの例に挙げて、特徴的な顔要素を持たないことでユーザー自身の想像力で、ロボットのアイデンティティや感情表現を感じ取ることができる顔だと説明している [12]。F.o.G. の平面による顔表現は、ブランクフェイスに相当するため、ユーザーの想像力で自由な印象が形成されることを期待した。

3.2.3 なめらかな変形による顔要素の出現

F.o.G. は球体の一部をなめらかに変形させることで平面を出現させる。なめらかな変形は、生物らしさを持たない純粋な幾何学的形体の球体と、最小限の記号性として抽象化された顔を想起させる平面を持つ形体の、2 つの形体を自然に切り替える役割を持っている。これは本研究の特徴 3 に相当する。

なめらかな変形の実現には課題があり、変形が非連続である場合、変形中にロボットの内部機構や制御方式といった外部概念を想起させることが懸念された。そこで、F.o.G. は以下に説明する機構によって、変形動作の時間変化と形状変化の連続性を保ち、純粋な幾何学的形体で構成されるミニマル領域に、外部概念が侵入することを防いでいる。

F.o.G. の変形は、図 3.4 に示すように、球体の天頂から円形の平面が外側に向かって徐々に広がるように進行する。変形部は剛体パーツであるため、変形中に面の連続性を維持することはできない。そのため変形部品ひとつひとつの表面上の面積を少なくし、それ



図 3.3 球体上に出現する平面。この平面は抽象的な顔として捉えられることを意図している。

らを連鎖させることで、連続性のあるなめらかな変形に見える工夫をしている。また、変形部に光を透過する乳白色のポリアセタール樹脂を使用することで、パーツ間の隙間や凹凸の影が目立たないように配慮している。

3.3 実装

3.3.1 3D アニメーションによる外観の検討

図 3.5 は、コンピュータグラフィックス (CG) を用いた初期のデザイン検討の一部である。変形後の形状が平面に見えるかを確認しながら、最適なパーツ数やパーツ分割の方法について検討した。

次にゲームエンジン Unity を利用し、図 3.6 に示したようなインタラクティブなシミュレーションを作成した。キーボードの操作によって、さまざまな角度から変形動作をアニメーションで確認した。この時点では変形機構の設計はせず、形体のみからコンセプトの有効性を評価した。

3.3.2 3D プリンターによる機構の検討

3D アニメーションによるコンセプト確認の後、3D プリンターによる変形機構の詳細検討を行なった。はじめに、FDM(Fused Deposition Modeling) 方式の 3D プリンターを使用して、図 3.7 のような、変形部のプロトタイプを複数作成した。FDM 方式では、基本的なパーツ動作の確認や、変形後の形状や見た目を確認することができた。しかし、パーツ間のマージンを狭く設計すると、プリントの積層跡によってなめらかな動きが困難

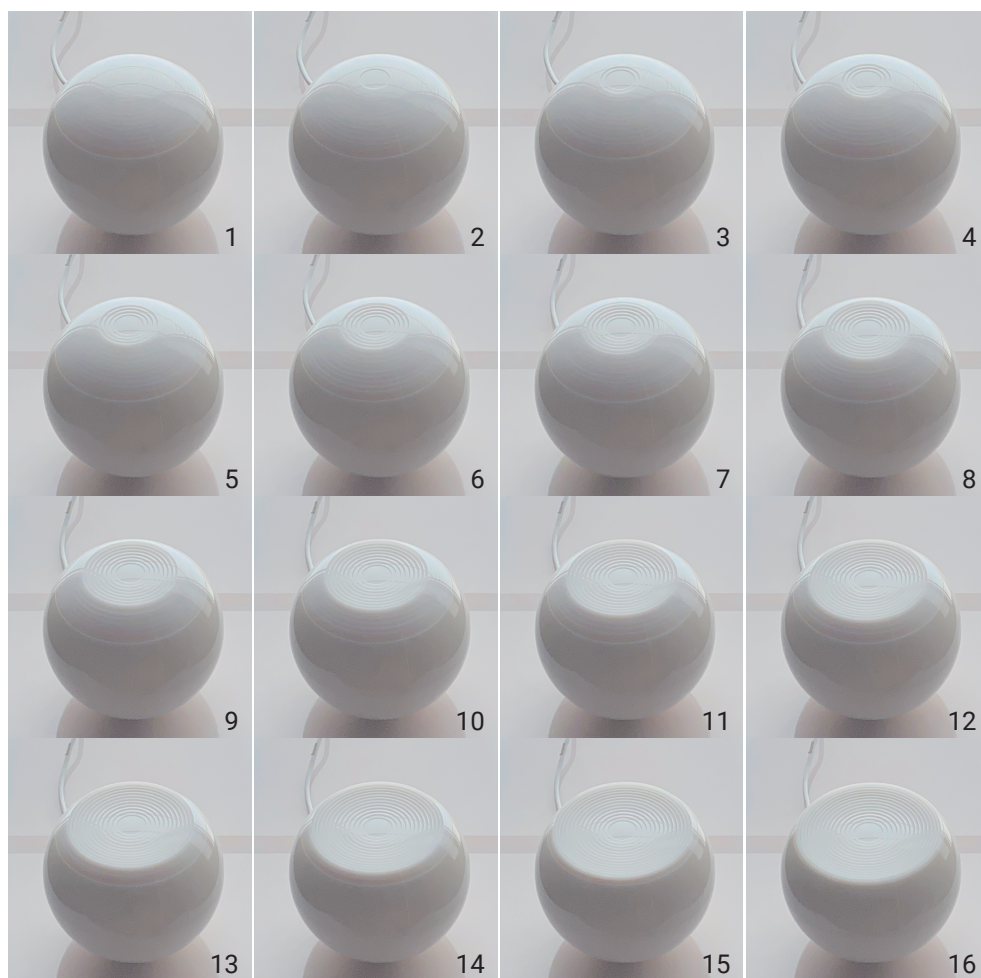


図 3.4 中心から 16 個のリングの回転が連鎖して変形が進行する様子

となった。そのため、インクジェット方式の 3D プリンターに変更し、図 3.8 のような最終的な寸法のプロトタイプを制作した。

インクジェット方式で制作したプロトタイプでは、ロボット内部にステッピングモーターと制御基板を内蔵することが可能であったため、変形動作検証までを行うことができた。このプロトタイプは動作には問題がなかったが、半透明の亚克力素材を使用しているため内部の機構や部品が透けて見える結果となった。また、変形動作時に各パーツが回転している様子が分かるため、本研究のコンセプトである、外部概念に邪魔されずに変形を行うという点では課題があった。このモデルは最終プロトタイプと同じ外観形状であったため、変形機構の動作説明のために利用した。

3.3.3 最終的な外観形状

F.o.G. の形状は直径 101.6mm(4inch) の球体である。変形部以外は中空形状となっており、アクチュエーターや制御基盤を内部に実装している。3D プリンターによる機構検討の後、各パーツはパーツ間のマージンを極小にすることのできる切削加工で制作した。変形部の素材は撓動性の高いポリアセタール樹脂で、上半球部と下半球部は亚克力樹脂

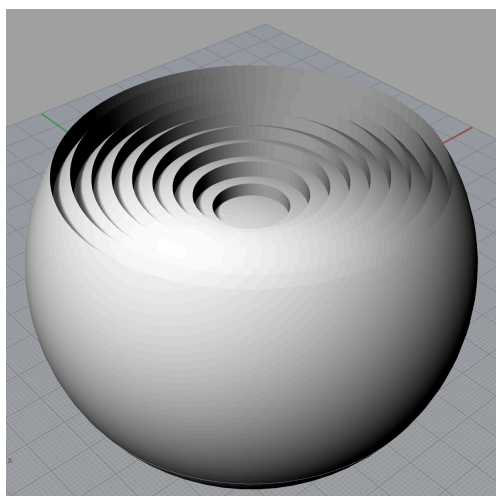


図 3.5 検討初期の変形部の形状

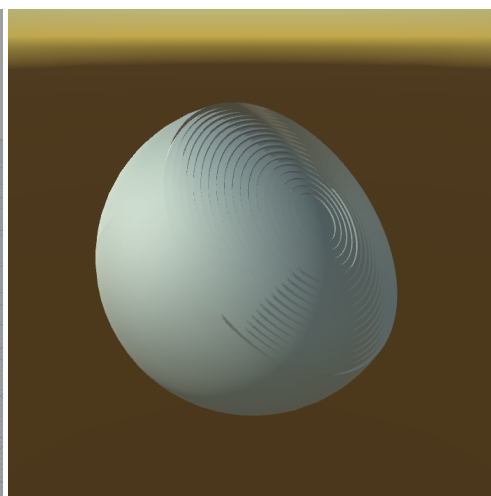


図 3.6 3D アニメーションによる変形動作の確認

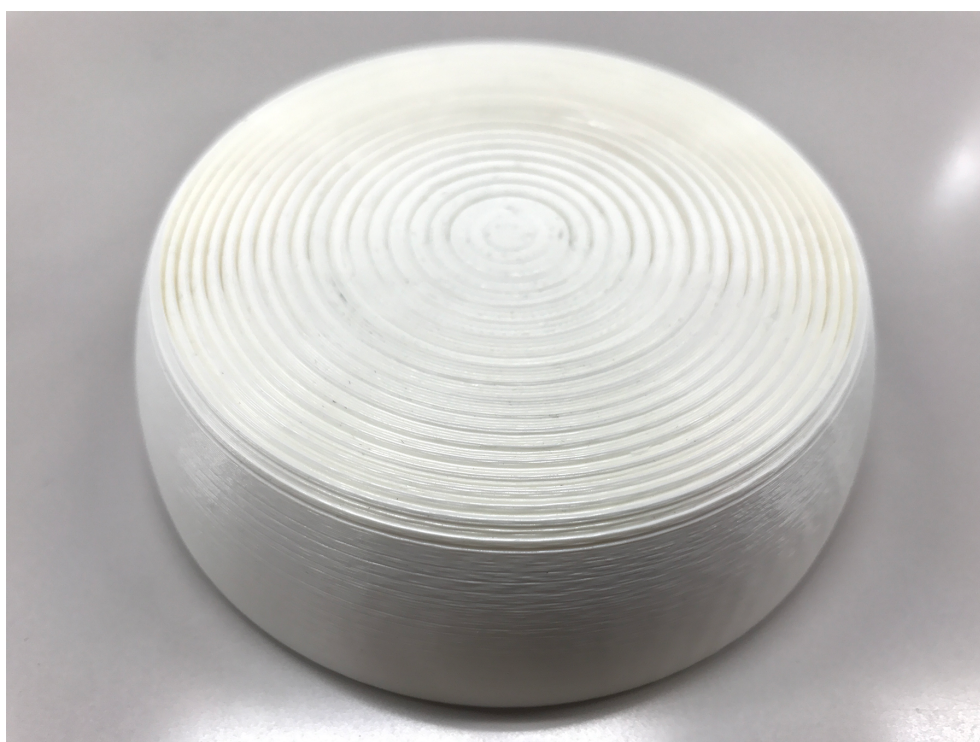


図 3.7 3D プリンターを利用した変形機構の詳細検討

を使用している。

3.3.4 変形部の機構

次に、球体から擬似的な平面を出現させる変形機構について説明する。変形機構は中空の球体を筒状に切り抜いたリング上のパーツで構成されている。このパーツは回転によって位置が変化するようになっており、回転運動の連鎖によって、徐々にパーツ上面の位

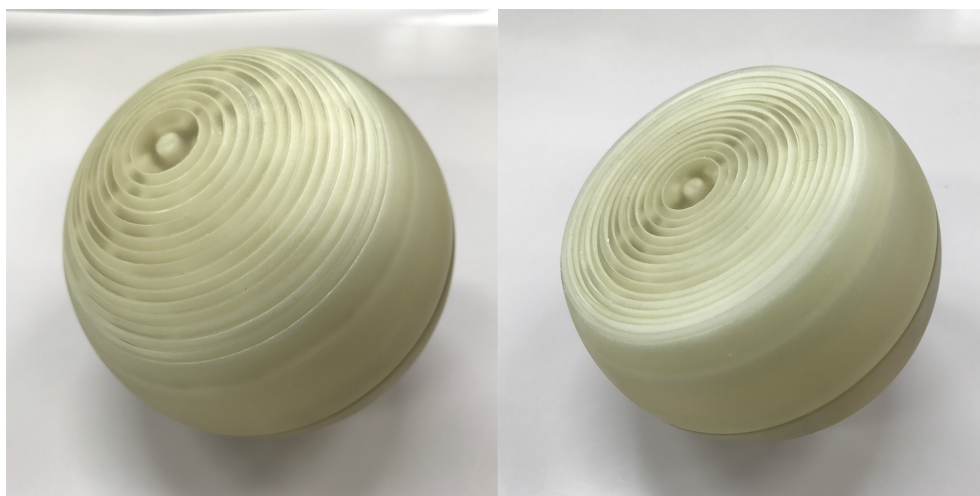


図 3.8 インクジェット方式 3D プリンターによる動作モデル

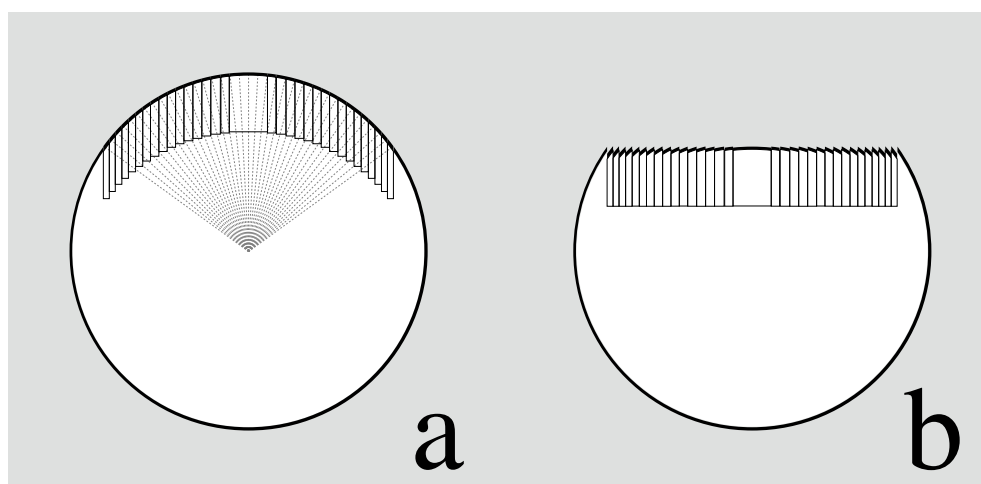


図 3.9 変形機構の断面図

置が揃うように設計されている。また、各リングの表面は、球体表面を切り取った形状であるため、出現する平面は擬似的なものである。

図 3.9-a に示したように、変形部は合計 16 個のリングで構成されている。各リングの形状は、天頂から 3 度間隔に引かれた緯線を、垂直方向に切り抜いたものである。その結果、それぞれのリングの厚みは異なり、もっとも中心に近いリングで 2.49mm、もっとも外側のリングで 1.41mm と徐々に薄くなっていくため、必要な強度に耐える厚みを確保する必要があった。また、各リング間のマージンは片側 0.1mm で設計している。各リングの側面には図 3.10-A に示したようなレール（溝）が設けられており、回転によって球の中心からの距離を変化させることができるようになっている。リング同士はレール上を移動する隣のリングに固定されたピンによって支えられ、すべてのリングが連結されている。また、リング側面の接触を低減するために、レールを側面 3 箇所に等間隔で配置し安定性を高めている。

各リングの回転が完了すると隣り合うリングの高さが等しくなるようにレールには角度がつけられており、全リングの回転が終了すると図 3.9-b のような擬似平面が完成する。

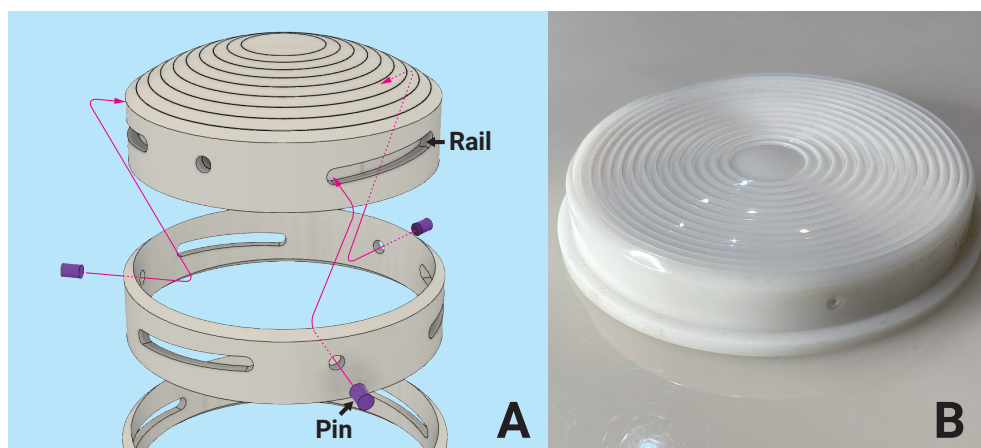


図 3.10 各リングに設置されたレール

また、モーターやマイコンを設置する内部空間を確保するため、リングの高さは、変形後にリングが上半球内に格納される高さとして設計した。変形のためのレールが全て側面に実装されているため、図 3.10-B のようにリングの高さを 15mm に抑えることができた。

変形動作時は、本体内に設置したステッピングモーターで中央のリングを回転させている。変形によって中央のリングとステッピングモーターの距離が変化するため伸縮可能なシャフトを用いている。各リングの回転角はレール長によって 45 度に制限され、16 個のリングの連鎖により合計 720 度の回転で変形が完了する。

3.3.5 制御

変形にはステッピングモーター (MERCURY MORTER の ST-PM35-15-11C) を利用した。このモーターは動作音が小さいため、音が生物らしさの妨げになりにくい利点があった。しかしトルクが小さく変形動作時に各リング間に生じる摩擦力によって、ステッピングモーターの脱調を防ぐ必要があった。そのため、モーター制御に、開始直後の初速から徐々に回転を加速し、最高速に到達した後に徐々に回転速度を減速するイー징処理を加えている。

変形動作の速度は PWM(Pulse Width Modulation) 制御の間隔を正弦曲線によって変化させることでコントロールした。モーター速度は、変形開始時と終了時に最低速度となる間隔 (t_{min}) と、変形期間の中央における最高速度となる間隔 (t_{max}) を変化させることで変化させることができる。これらの値を調整して最適な表現の検討を行なった。変形動作開始からの回転角 θ のときの PWM 制御間隔 (t) は以下の式によって求めている。

$$t = (t_{min} - t_{max}) \frac{\cos \theta}{2} + t_{max}$$

図 3.11 は最低速時の間隔を 1000 μ s、最高速時の間隔を 300 μ s としたときの、PWM 制御間隔とそれを角速度に変換したグラフである。

ロボットの制御には Adafruit 社のマイコン Adafruit Feather 32u4 Bluefruit LE を使用した。同マイコンとスマートフォンを Bluetooth で接続し、遠隔で動作設定が可能なアプリケーションを制作した。検討の初期段階では、このアプリケーションを利用してス

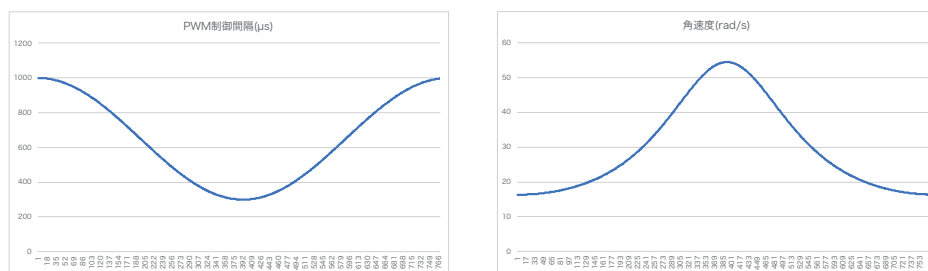


図 3.11 変形速度の変化. PWM 制御の間隔 (左) とモーターの角速度の変化 (右)

テッピングモーターの回転速度や回転パターンを検討した他，外部音を検知するマイクの調整を行なった。

ロボットは内部フレームに設定されたマイクに入力される音量を常に確認し，設定した閾値を超えた音量を検知すると，変形動作を開始するプログラムを制作した。マイクには SparkFun 社製 Analog MEMS Microphone Breakout – ICS-40180 を使用した。また，展示時の混雑状況によって変化する環境音量に対応するために，移動平均によって閾値を更新する処理を行なっている。

3.4 評価実験 1: 展示とコメントの計量テキスト分析

評価実験 1 では，ロボットに対する幅広い感想をできるだけ多く集めることを目的とし，展示会にロボットを出展し 100 件の自由記述のコメントを収集した。はじめに，コメントの内容を把握するために KJ 法による分類を行なった。さらに，これらのコメントを統計的に分析し「生物らしさ」に関連するさまざまなキーワードの抽出を行なった。その結果，F.o.G. の変形時のなめらかな動きが生物らしさに関連していることが示された。さらに，その印象には生物らしさと同時に，人工物らしい印象が共存していることが明らかになった。

3.4.1 展示概要

制作した F.o.G. を東京大学生産技術研究所「Parametric Move 動きをうごかす展」(2018 年 6 月 8 日～6 月 17 日) に出展した [105]。同展示会は，来場者に展示されたプロトタイプをダイヤルで操作できる体験を提供する，というコンセプトであった。そのため，F.o.G. も来場者のダイヤル操作によって変形動作を開始する制御に変更した。閲覧者がダイヤルを回転させ停止した時点で，ダイヤルの回転量に合わせて変形のを速度を決定し，その後変形を開始する動作を行う方式とした。これは，ダイヤル操作に連動して変形状態をコントロールする方式では，ダイヤルとロボットがひとつのシステムとして捉えられ，変形が操作のフィードバックとなり，ユーザーとの関係性が「道具」として認識されることを避けるためである。来場者は，さまざまな速度で変形する様子を繰り返し観察していた。また，来場者数多い時間帯は，他者のダイヤル操作による変形を観察する来場者も多く見られた。



図 3.12 F.o.G. の展示風景

3.4.2 被験者

展示会では来場者にアンケートを実施し、印象に残った展示物とその印象について自由記述方式で記入してもらった。その結果印象的な展示に F.o.G. を選択したアンケート回答者は、10 代から 60 代までの男女 114 名であった。大多数の回答者は、ロボットの変形を実際に見たことはなかったが、一部の回答者は SNS に投稿された動画を事前に見た可能性がある。展示会終了後、114 件の自由記述コメントを精査し、印象に残った展示として F.o.G. を選択したにもかかわらず自由記述がないものを取り除き、最終的に 100 件を有効回答として分析対象とした。

3.4.3 KJ 法によるコメント分類

はじめに、収集したコメントの傾向を確認するために、図 3.13 に示したように、KJ 法を用いてグルーピングを行ない 100 件のコメントを 14 個のグループに集約し、さらにそれらを Dennett の 3 つのスタンス「志向的な構え (Intentional stance)」、「設計的な構え (Design stance)」、「物理的な構え (Physical stance)」に集約した。以下に 3 つのスタンスで分類したそれぞれのグループについて説明する。

志向的な構えに属するグループ

「生き物らしさ」、「かわいい」が含まれる。「生き物らしさ」には、「生々しさ」「生きているよう」といった言葉とともに「なめらか」「動き」といった言葉も含まれていた。「か

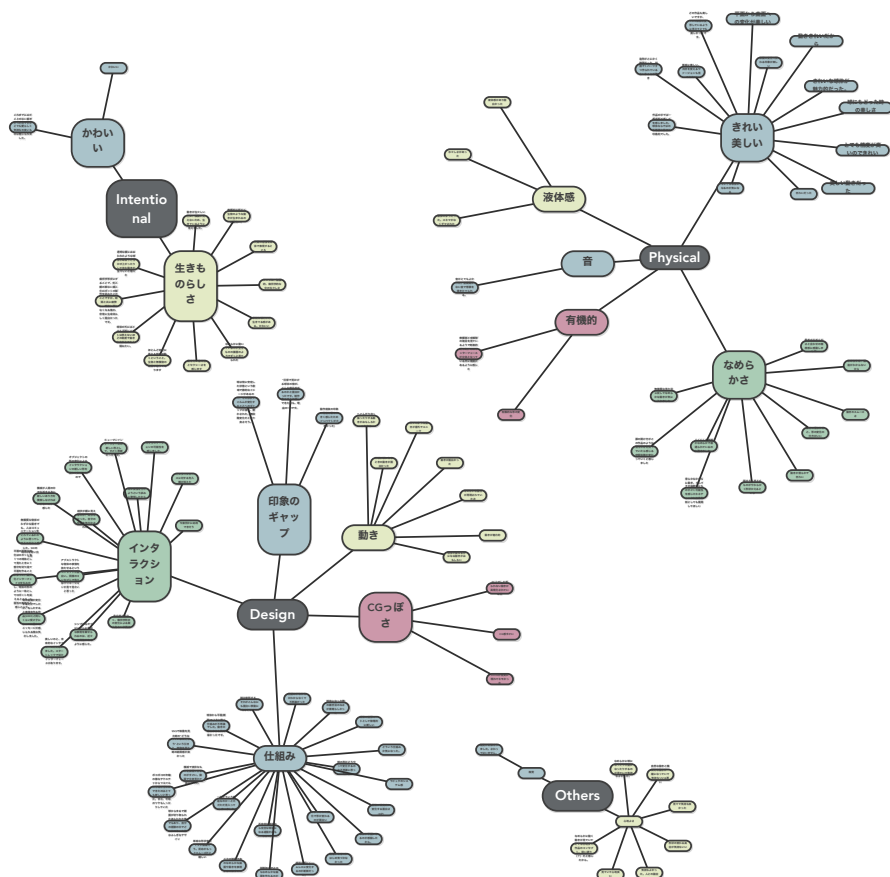


図 3.13 KJ 法によるコメント分類. 14 個のグループを作成した後 Dennett の 3 つのスタンスに集約した.

「かわいい」グループには「かわいい」の他「愛らしい」といった言葉が含まれていた。これらは対象を擬人化して捉えた言葉であることから志向的な構えとして分類した。

設計的な構えに属するグループ

「動き」、「仕組み」、「インタラクション」、「印象のギャップ」、「CG っぽさ」が含まれる。「動き」には、「おもしろい」というキーワードとともにコメントされるものが多く見られた。また「なめらかなさ」に言及したものもあった。動きの面白さは生物からも感じ取ることが可能だが、これらのコメントはすべて対象を人工物として捉えていることから、設計的な構えによる見方として分類した。「仕組み」は、変形機構に対する感想が多く含まれていた。「インタラクション」には、Face on a Globe のコンセプトをインタラクションに応用することに対して「新鮮さ」や「可能性を感じる」といったコメントが含まれている。

物理的な構えに属するグループ

「なめらかなさ」、「有機的」、「液体感」、「音」、「きれい/美しい」の 5 種類が含まれる。「なめらかなさ」「きれい/美しい」は造形的な印象に対するコメントとして分類している。「有機的」や「液体感」は生物らしさに近い表現であるが、コメントを精査した結果、物理的な形状に対する内容として分類した。

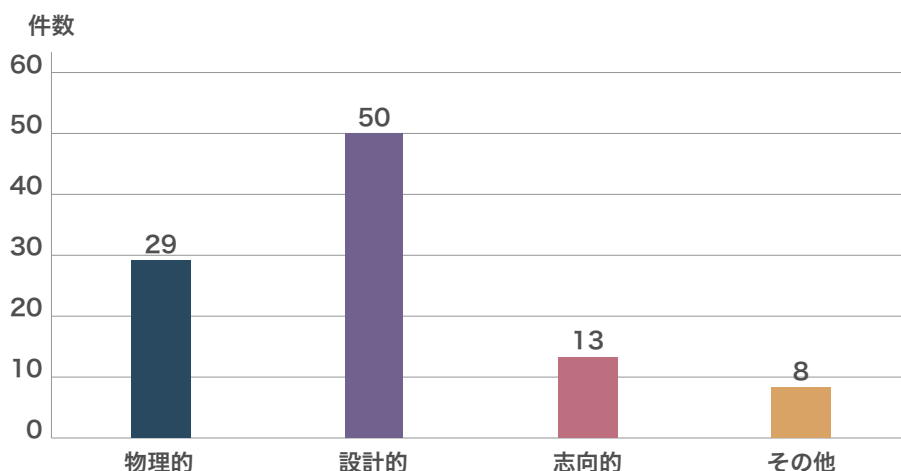


図 3.14 Denne のスタンスによる分類. 13 件のコメントが生物らしい印象に関連する志向的構えに分類された.

3.4.4 志向スタンスによる分類結果

100 件のコメントの分類の結果, 図 3.14 に示したように, 志向的な構えが 13%, 設計的な構えが 50%, 物理的な構えが 29%, その他が 8% という結果となった.

志向的な構えに含まれるコメントは, 生物らしいという印象について述べているものが中心であった. 幾何学的な形体なのに生物らしいといった, 単純に対象を生き物として捉えるのではなく, 造形的要素による印象と一致しないにも関わらず生き物らしさを感じるといったコメントも含まれる. もっとも多かった設計的な構えには, Face on a Globe の変形機構の仕組みや新しさといった設計された対象に対するコメントが含まれた. 物理的な構えに含まれるコメントは Face on a Globe の形状や変形の動きを現象として捉えたものとなった.

3.4.5 テキストマイニングによるコメントの計量テキスト分析

100 件の自由記述コメントを統計的に処理するために, 計量テキスト分析ツール「KH Coder」[29] を使用して, コメントに含まれる言葉と言葉の関係性を可視化する共起ネットワーク図を作成した. 共起ネットワーク図は, 異なる 2 つの言葉のいずれかが含まれる文章のうち両方の語が含まれる文章の割合を表す Jaccard 係数を算出し, それを出現パターンが類似する語が線で結ばれたネットワーク図として表示したものである. これを用いて印象を表す言葉がどのような文脈で使用されているか考察できる. 分析の前には, 前処理として形体素解析ツールによって抽出された単語を確認し, 「いきもの」「生き物」「生物」といった文字表記のゆれを取り除く処理を行なった. その後, 最小出現数を 2 回以上のものに限定して図 3.15 に示した共起ネットワーク図を生成した.

生成した共起ネットワークは, 語 (node) の数が 53, 共起関係 (Edge) の数が 73, 密度 (density) は 0.53 となった. 密度とは描画された共起関係を存在しうる共起関係の数で除

表 3.1 検出されたサブグラフとノード (*は中心性を示す)

No.	含まれるノード
1	自分, デザイン, 造形*, 構造, 不思議*, 切削, 曲面, 驚く, 作る*, 面積, 印象, ギャップ, 大きい
2	生きもの*, 動き, 動く, なめらか, 無機, 有機, 境目, 刺激, 完全, 見える, シンプル
3	球, 形状, 変化, 平面
4	機械, 人間, 見れる, オブジェクト
5	美しい, 感じる, 作品
6	人, 物体, コミュニケーション, 可能, 抽象, 表情, 持つ, コンセプト, 思う
7	精度, 感動
8	幾何*, 擬人, ロボット*, 面, 先入観, 音

したもので、図では約半数の関係が描画されていることを示している。また、ネットワーク図において、ノードの円の大きさは出現頻度を表している。それぞれの語の距離は分析結果とは関係がなく、それぞれの語が線で結ばれているかが重要となる。表 3.1 は検出されたサブグラフとそこに含まれるノードを一覧にまとめたものである。それぞれのサブグラフの中で中心性のあるノードを抽出し表中に示した。

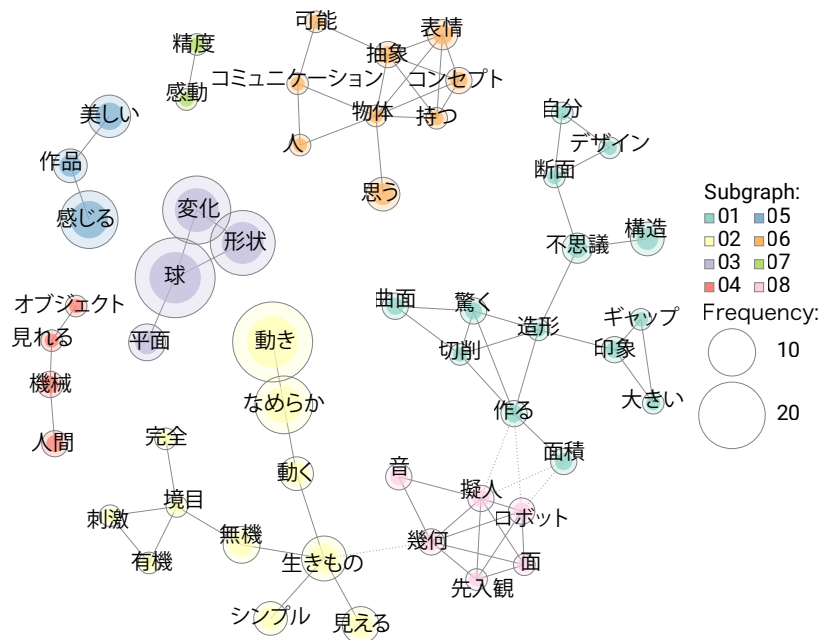


図 3.15 印象を表す語の共起ネットワーク図。8 個のサブグラフが検出された。

3.4.6 共起ネットワークによる分類結果

■サブグラフ 02 は「生きもの」を中心とするサブグラフである。「生きもの」は中心性の高い言葉で、出現度の高い「動き」「なめらか」等の言葉と共起していると同時に、「無

機」「有機」「境目」といった言葉との共起も見られる。「生きもの」「動き」「なめらか」が含まれるコメントは以下のようなものがあった。

- 透明な膜におおわれたような球がぬるりと浮かび上がったりして沈む動きが生きものらしいと感じた。
- なめらかに動いているのが生きものの臓器のようでずっと見てられた。
- 動きが生きものらしい上に、機構が見えないため、生きもののように見えました。

さらに、「生きもの」は、「幾何」「ロボット」を中心としたサブグラフ 08 とも接続されており、「生きもの」という言葉がさまざまな文脈で語られていることを示している。「生きもの」「幾何」「ロボット」が含まれるコメントは以下のようなものがあった。

- シンプル、無機的、幾何学的な中の生きものらしさ。
- 時間と共に疲弊し、球に戻らなくなる様が、非常に生きものらしく面白かったです。

■サブグラフ 08 は、「作る」「造形」「不思議」を中心とした多くのノードを含むサブグラフ 01 と接続されている。「作る」「造形」「不思議」を含むコメントは以下のようなものがあった。

- 作品の中では一番造形の美しさを感じました。球ならではの不思議な動きが印象的でした。
- 球から平面(断面)のように動く構造が不思議でした。動きのなめらかさも興味深かったです。
- 構造がなかなかわからなくて不思議だった。

このサブグラフに含まれる言葉の多くは、形体をなめらかに切り替える変形機構に関連していることを示している。

■サブグラフ 06 は、「コミュニケーション」や「コンセプト」といったインタラクションデザインに対する言葉が含まれている。「コミュニケーション」「コンセプト」を含むコメントは以下のようなものがあった。

- 無機的な物体のわずかな動きでも、人はコミュニケーションをとれているかのように思ってしまうのだと感じた。
- コミュニケーションの可能性を感じました。
- 抽象的な物体の表情を持たせるというコンセプトが面白い。

■その他のサブグラフ 03, 04, 05, 07 は、中心性のあるノードが少なく、美的な印象や造形要素に対する印象を表す言葉が含まれている。

これらの結果から、生物らしさは、変形時のなめらかな動きと関連していることが推察される。これは、本研究の特徴3「2種類の形体を切り替えるなめらかな変形」が、人工物的な印象を増加させずに生物らしさを増加させることに成功していることを示唆する結果である。また、本研究の特徴2の「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」に変形することで生物らしい印象が増加した可能性も考えられる。さらに、「生きもの」が

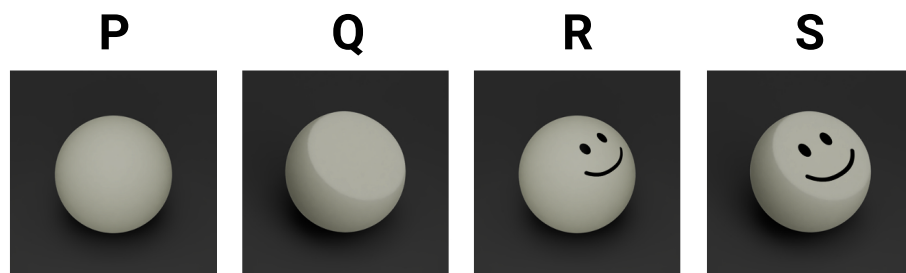


図 3.16 印象評価に用いたモデル．平面の有無と擬人化の有無の 2 要因を組み合わせた．

「無機」や「幾何」といったノードと接続されていることは、特徴 1 の生物らしさがない純粋な幾何学的形体が与えた印象が、特徴 3 のなめらかな変形によって徐々に生物らしい印象に変化したと推察される．

3.5 評価実験 2: 造形要素の印象評価

前章のコメントの計量テキスト分析では「生きもの」が「動き」や「なめらかさ」と共起していることが示された．また「無機」や「幾何」などの「生きもの」とは概念的に関連しない語との共起関係が示されたが、動きのない非稼働時の、生物らしい印象がない純粋な幾何学形体や、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体 (顔を抽象化した幾何学的な平面) が与える影響については明確に評価することはできなかった．そこで、変形前の球体と変形後の平面が印象に与える影響について明らかにするために、造形要素に対する印象評価を行なった．この評価では球体や平面といった造形要素が生き物らしい印象に与える影響に加え、比較対象として明示的な擬人化要素が与える影響についても調査した．

3.5.1 評価手法

評価対象

評価対象は図 3.16 に示した P から S の 4 種類のモデルとした．各モデルの特徴を以下に説明する．

モデル P: 完全な球体．F.o.G. の変形前の形体に相当する．

モデル Q: 球体上に平面がある形状．F.o.G. の変形後の形体に相当する．

モデル R: 球体表面に目と口の顔表現を付加したもの．

モデル S: 球体上の平面に目と口の顔表現を付加したもの．

上記の 4 種類はいずれも CG モデルである．大きさや質感、カメラ画角などが同じ条件となるようにレンダリングした静止画で評価を行なった．

表 3.2 印象評価の形容詞対

No.	形容詞		
1	生物らしい	-	生物らしくない
2	人間らしい	-	人間らしくない
3	人工物らしい	-	人工物らしくない
4	知的に感じる	-	知的に感じない

評価項目

評価は SD(Semantic Differential) 法を参考に質問項目を作成した [33][66]。評価に使用した形容詞を表 3.2 に示す。形容詞は、Bartneck の提唱する形容詞対 [6] のを参考に、前章の共起ネットワーク分析で抽出されたサブグラフに含まれるノードに関連する形容詞を選択し、それぞれに対して 5 段階で評価した。それに加え、それぞれの対象をどのように捉えたかについての自由記述方式で回答してもらった。

被験者

評価実験には 20 代から 40 代の男女 19 名 (男性 14 名, 女性 5 名) が参加した。被験者のうち 13 名はロボットデザインに関心のある学生であった。被験者は評価実験以前にモデルを見たことはなかった。

評価手順

評価にはインターネット上のアンケート作成・管理サービス (Google フォーム) を用いた。被験者には評価開始前に「人と自然な対話ができる AI ロボットの外観デザインの研究である」ことを伝え、ロボットの外観の印象に対して回答してもらうよう指示した。図 3.17 に示したように、評価に用いた Web サイトを 4 ページに分割し、各ページ先頭にひとつずつモデルの静止画を提示した。静止画の下には 4 種類の形容詞を順に表示し、5 段階の評価を入力可能とした。ページの最下段には自由記述方式の入力欄を設け、「このロボットの形状を短い文章で説明してください。」と指示した。これは被験者がロボットをどのように捉えているかを把握することを目的としている。

3.5.2 評価結果と考察

評価の結果を図 3.18 に示す。また、平面要因と擬人化要因の 2 つの要素が与える影響を調べるために、それぞれの評価項目毎の評価結果に対して二要因分散分析を行なった。

平面の有無による印象の差

一連の二要因分散分析の結果から、平面要因は人間らしさに有意差 ($F(1,72)=3.974$, $p=0.008$), 人工物らしさに有意差 ($F(1,72)=3.974$, $p=0.001$) が認められた。また生物らしさ ($F(1,72)=3.974$, $p=0.417$) と知的な印象 ($F(1,72)=3.974$, $p=0.679$) のいずれにおいても有意差が得られなかった。生物らしさと人間らしさに対する評価の平均値はモデル P とモデル Q どちらも低く (生物: $P=1.75$, $Q=1.8$, 人間らしさ: $P=1.15$, $Q=1.45$),

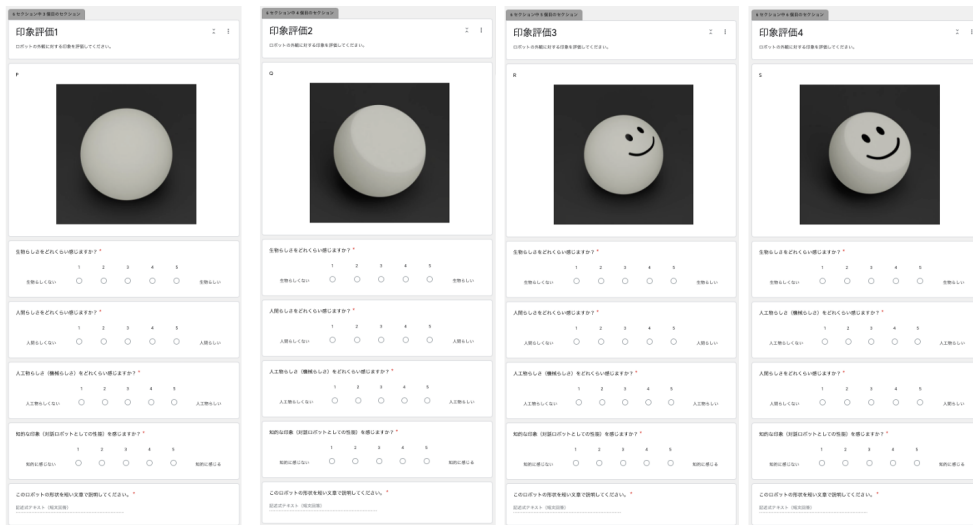


図 3.17 各モデルの評価画面

人工物らしさに対する評価が高い ($P=3.9$, $Q=4.0$) 結果となった。この結果は、被験者がその平面をただの幾何学的な形体として捉えて、生物らしさや人間らしさを持つ対象と捉えなかったことを示している。

一方、擬人化要素を持つモデル R とモデル S の印象は、人間らしさと人工物らしさに有意差が見られた ($p<0.05$)。擬人化要素と平面を持つモデル S の人間らしさに対する評価の平均値はもっとも高かった (4.15)。また、擬人化要素を持つモデル R とモデル S の人工物らしさには有意差があり ($p<0.05$)、モデル R が高い評価となった ($R=4.05$, $S=2.7$)。人工物らしさを高く評価した自由記述内容には「人が作った生物ロボット」(人工物らしさ評価 5) や、「無理やり感情を貼り付けられたもの」(人工物らしさ評価 5) といったコメントが見られた。これは目と口という擬人化要素があることによって、対象を擬人化して捉える傾向が強くなり、平面が抽象的な顔を模したものと捉えられたことで、人間らしさを増加させる役割を果たしたと推察される。その反面、抽象的な顔要素のないモデル R にはコメントに見られるような擬人化としての不自然さが感じられたことで、人工物らしさが高い評価となったと考えられる。

擬人化要素の有無による印象の差

二要因分散分析の結果からは、すべての評価項目において擬人化要素のあり・なしの間に有意差が得られた (生物らしさ: $F(1,72)=3.974$, $p=0.001$; 人間らしさ: $F(1,72)=3.974$, $p=0.001$; 人工物らしさ: $F(1,72)=3.974$, $p=0.008$; 知的な印象: $F(1,72)=3.974$, $p=0.001$)。

平面要素のないモデル P とモデル R の間には、人工物らしさを除く生物らしさ、人間らしさ、知的印象で、擬人化要素のないモデル P が有意に低い結果となった ($p<0.05$)。また、人間らしさの平均値はもっとも差が大きい ($P=1.15$, $R=3.25$) 結果となった。

同様に平面要素を追加したモデル Q とモデル S の比較では、擬人化要素のないモデル Q が、生物らしさ、人間らしさ、知的印象で有意に低い ($p<0.05$) 結果を得た。また、人工物らしさについてはモデル S が低い値となった ($Q=4.0$, $S=2.7$)。モデル S の人工物

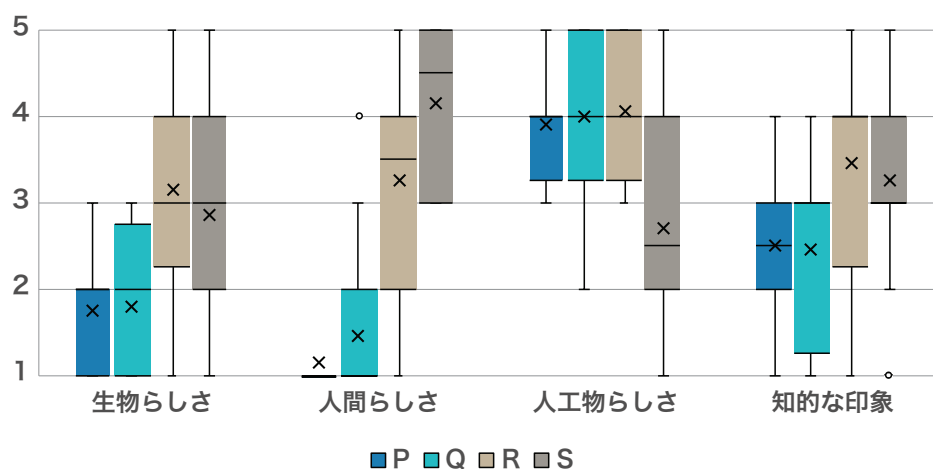


図 3.18 印象評価の結果. 擬人化要素のないモデル同士では平面の有無に有意な差は得られなかったが、擬人化の有無による印象に有意差が見られた。

らしさは平面要素のないモデル P とモデル R ($P=3.9$, $S=4.05$) と比較しても低く、モデル S のみが低い値となった。

これらの結果は、擬人化要素を加えると生物らしさや人間らしさの増加に大きく影響していることを示している。さらに、人工物らしさの比較結果からは、擬人化要素を利用することで、平面の有無のわずかな差が大きな印象の変化をもたらすことも示された。

3.6 本章の考察

3.6.1 共起ネットワークによる分類の考察

本章では評価実験 1 として F.o.G. の展示に対する印象を記述した 100 件の文章を統計処理し、共起ネットワーク図を作成した。その結果生物らしさに関連する「生きもの」という語が「なめらか」や「動き」と共起していることが示された。この結果から、F.o.G. の生物らしさが、2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形 (特徴 3) の動きによって生じたことを示唆している。また、変形後に現れる社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体 (特徴 2) によって生じた可能性も考えられる。

F.o.G. の変形の動きは、厳密には非擬人化ロボットの動きによる生物らしさの獲得に関連する先行研究 [50] などに見られるオブジェクトの移動の動きとは異なるが、F.o.G. のような変形の動き自体が生物らしい印象を生じさせる可能性を示している。本章の評価はコメント分析によるものであったため、この現象については詳細な評価が必要である。

また、「生きもの」は「無機」「幾何」といった、一般的に生き物らしさと相反する印象につながる語との共起も見られた結果は、生物らしさがない純粋な幾何学的形体 (特徴 1) の印象を示していると考えられる。

3.6.2 造形要素の印象評価の考察

次に実施した評価実験 2 は、評価実験 1 では明確にならなかった、生物らしさがない純粋な幾何学的形体 (特徴 1) である球と、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体

(特徴2)である平面の静止時の印象を明らかにすることを目的とした。平面要素あり・なしに加え、擬人化要素あり・なしの2要因を組み合わせた4種類のモデルを準備し、それぞれの生物らしさ、人間らしさ、人工物らしさ、知的印象を調べた。これらのモデルはすべて静止画として提示した。その結果、擬人化要素が含まれない場合は、平面要素あり・なしは、生物らしさに影響を与えないことが明らかになった。この結果から、外部概念の利用が極端に少ないミニマル領域の形体は、抽象的な造形要素そのものが生物らしい印象に与える影響は少ないことが示された。その反面、外部概念の積極的に利用した形体として明確な擬人化要素を加えた比較モデルは、静止時であっても強い生物らしさを持つことが示された。上記結果をふまえると、F.o.G.は変形の前後どちらの形体もミニマル領域内のデザインとして捉えられることに成功していると考えられる。

3.7 本章のまとめ

本章では、ミニマル領域のデザインを持つロボットの変形によって生物らしさを獲得することを目的としたF.o.G.を制作した。このロボットは非稼働時の生物らしさがない純粋な幾何学的形体の球体から、周囲の音に反応して、なめらかな変形を開始し球体の一部に平面を出現させ、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体に切り替わることで、生物らしさを増加させることを意図している。このロボットの展示で収集した100件のコメントを分析し、どのような印象を与えたかを明らかにした。さらに、このロボットに含まれる造形要素である平面の印象を、明確な擬人化要素を有無の条件とともに評価した。コメントの計量テキスト分析の結果、なめらかな変形の動きか、変形後に現れる社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体のいずれかが生物らしい印象を与える可能性が示された。次に実施した、静止時の造形要素の印象評価では、純粋な幾何学的形体と、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体である幾何学的な平面は、静止状態では生物らしい印象がない結果を得た。

以上の結果を踏まえると、形体から生物らしくない純粋な幾何学的外観を持つ非擬人化ロボットが、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体になめらかな変形で切り替わる動作によって生物らしい印象を増加させたと考えられる。

本章で対象としたロボットデザインや変形は、F.o.G.のみのコメントの分析と限定的な造形要素の印象評価であったため、変形動作自体が生物らしさの増加に与える影響については、より詳細な評価実験が必要である。

本章では、生物らしさがない純粋な幾何学的形体から、なめらかな変形機構によって、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体に切り替えることで、生物らしい印象を増加させる非擬人化ロボットのデザイン手法の有効性を示す最初の結果を得た。これにより本研究が提案する新しい非擬人化ロボットのデザイン手法の可能性を示すことができたと思う。

第4章

F.o.G. Mk-II：音に反応して平面の向きを変える球体ロボット

本章では、前章で制作したロボット Face on a Globe を発展させ、音源方向に平面を向ける自律動作を備えたロボット F.o.G. Mk-II について説明する。このロボットは、Face on a Globe の外観を変更せず、内部構造と制御システムを変更したロボットである。そのため、生物らしさが無い純粋な幾何学的形体と、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体、さらにこの2種類の形体を切り替えるなめらかな変形の、本研究の3つの特徴を持っている。F.o.G. Mk-II はさらに、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体による自律的な動作の表現を追加した。これは、幾何学的な平面の抽象的な顔を向ける動きを表現することで、生物らしい印象をさらに増加させることを意図したものである。次に、この追加された社会的知覚の表現がロボットの印象に与える影響を調べるために、Face on a Globe を変形モデル、F.o.G. Mk-II を回転モデルとして、それぞれのロボットが動作する様子を撮影した動画を用いて、ロボットの印象の比較評価を行なった。その結果、回転モデルは変形モデルより高い生物らしさを獲得した。また、これらのロボットが自律的な動きによって、より生物らしい印象を獲得しても、それと相反する人工物らしい印象が高く保たれることが確認された。これらの結果から、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体による動きを発展させることで、生物らしい印象をさらに増加させることが可能なことを示した。

4.1 本章の目的

本章では、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体で、より明確な社会的知覚を表現することで生物らしい印象を増加させ、生物らしさが無い純粋な幾何学的形体との印象の差を広げることが示し、本研究が提案する非擬人化ロボットのデザイン手法の効果をより明確に示すことを目的とする。

はじめに、前章で制作した球体の形体を持つロボット Face on a Globe(以後本章内では Mk-I と呼ぶ) に、本体の回転動作を実現する機構を追加したロボット F.o.G. Mk-II(以後

本章内では Mk-II と呼ぶ) を制作した。前章の Mk-I に対するコメント分析からは、2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形の動きと社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体が生物らしい印象に影響を与えた可能性が示されたが、社会的知覚の表現によってどの程度生物らしさが増加するのかについては明らかになっていない。そこで本章では、自律的な動きをロボット本体の回転動作で表現し、生物らしさの増加について評価を行った。はじめに Mk-II のコンセプトについて説明する。次に、プロトタイピングプロセスによって制作したロボットの実装について説明し、Mk-I と Mk-II の印象を比較した評価について説明し、最後に考察を述べる。

4.2 コンセプト

4.2.1 回転動作による自律的な動きの表現

このロボットの回転動作は、社会的知覚要素として捉えられることを意図している。発達心理学の研究では、7 か月の幼児が、物体が動くために接触など外的作用が必要なことを理解し、さらに生物が動くためには外的作用が不要で、自己主体的な動きが可能であることを理解していることが明らかになっている [63][56]。Tremoulet と Feldman は目標指向性を強く感じることでアニメシー知覚が強くなることを明らかにしているように [74]、ロボットの自律的な動作は生物らしさの獲得に有効な手段であると考えられる。一般家庭に普及する掃除ロボットに対してアニメシーを感じる現象が知られているほか、Michaud らは球体型ロボット Roball が自律的に転がる動作が幼児との新しい遊びを生み出すことを報告している [45]。このように非擬人化デザインのロボットが、目的に対して合理的な動きを選択しているように表現することで生物らしさを増加させることは可能と考えられる。

Mk-II は本体内に 2 つのマイクを内蔵し音源方向に平面を向ける動作を行う。回転動作は本体内部下部に設置されたウェイトの水平回転によって実現されるため、その動きは水平方向の軸回転ではなく、回転するコマに見られるような際差運動に近い動きとなる。その結果、固定された軸回転による無機的な動作ではなく、ロボット全体が動く表現となっている。外観に動作に必要なモーターや機構部品を想起させる造形的特徴がないため、Mk-II の回転運動は車輪や脚などを用いたロボットの動作とは異なり、外部概念の影響を受けずに自律的な印象を与えることが可能である。さらに、変形により平面を出現させた状態で回転動作を行うため、ロボットの向きをより明確に表現することが可能である。

4.3 実装

4.3.1 回転動作部の設計

Mk-II は回転によって平面の向きを変えるロボットである。Mk-II の制作では回転機構を追加するために内側形状の変更を行なったが、外観形状は Mk-I と同じ純粋な幾何学的形体の球体で、サイズや素材も同じ設計とした。2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形のための機構についても、構造やサイズ、素材は Mk-I と同じものとした。

図 4.1 に示すように回転動作は厳密には軸回転ではなく、球体の下半球内に配置されたウェイトを水平回転させて位置を変更し、本体の傾く方向を変更することで平面の向きを

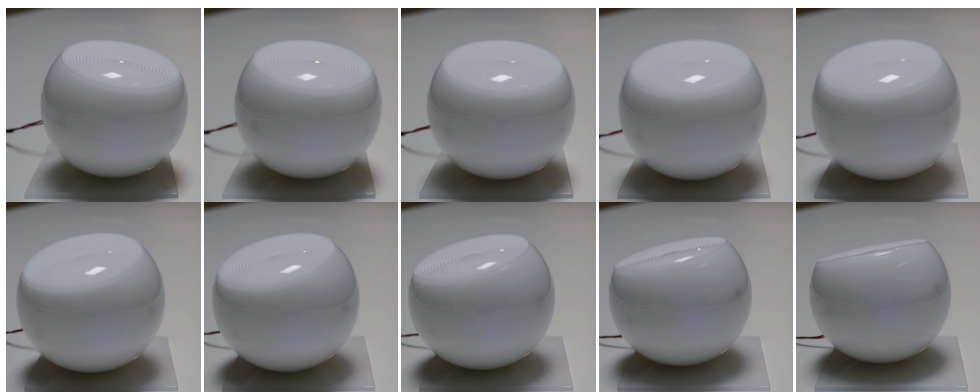


図 4.1 内部のウェイトの回転によって傾く方向が変化する様子．軸回転ではないため背面のケーブル位置が移動しない．

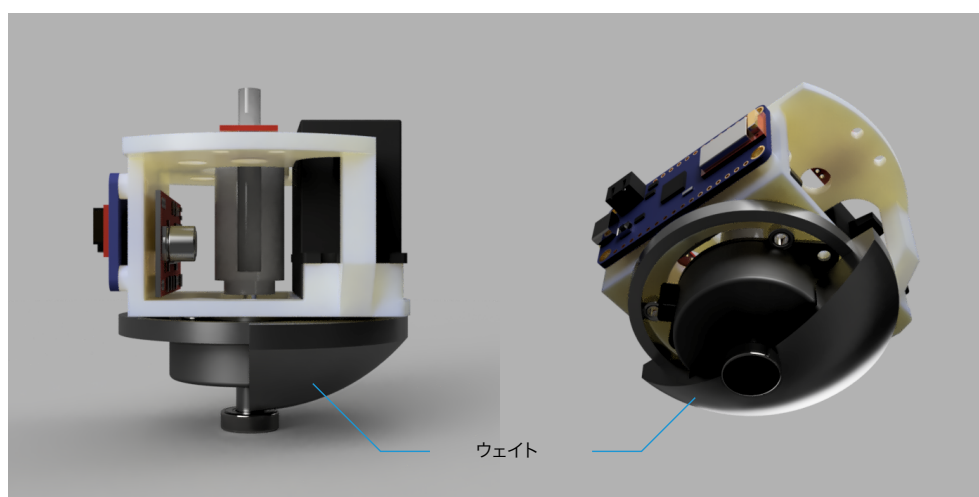


図 4.2 傾き方向を変化させるウェイト (CG)．軸の中心にある変形用のステッピングモーターの周囲を回転する．

変更しているため、実際にはコマの歳差運動に近い動きとなっている．その結果、本体背面から出ている電源ケーブルの位置は常に同じ方向に固定されたまま、面を向ける方向を変化させることができる．

図 4.2 に示すように、ウェイトは下半球内部に設置され、内部フレーム上に追加された Pololu 社製小型モーター 75:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V with Extended Motor Shaft によって回転する．ウェイトは真鍮で、重心の偏りを生み出す形状となっている．このウェイトが、軸の中心にある変形用のステッピングモーターの周囲を回転することで、本体を傾けて回転動作の表現を行う．回転動作と変形動作が同時に実行されないように、変形動作が完了した後に回転動作を行う制御とした．回転方向と回転量は、本体内の 2 つのマイク入力値から推定し決定した．回転動作後には慣性的な動きが伴うが、このロボットの回転がウェイトの移動による傾きの変更であるため、最終的には目的の角度で静止させることができる．

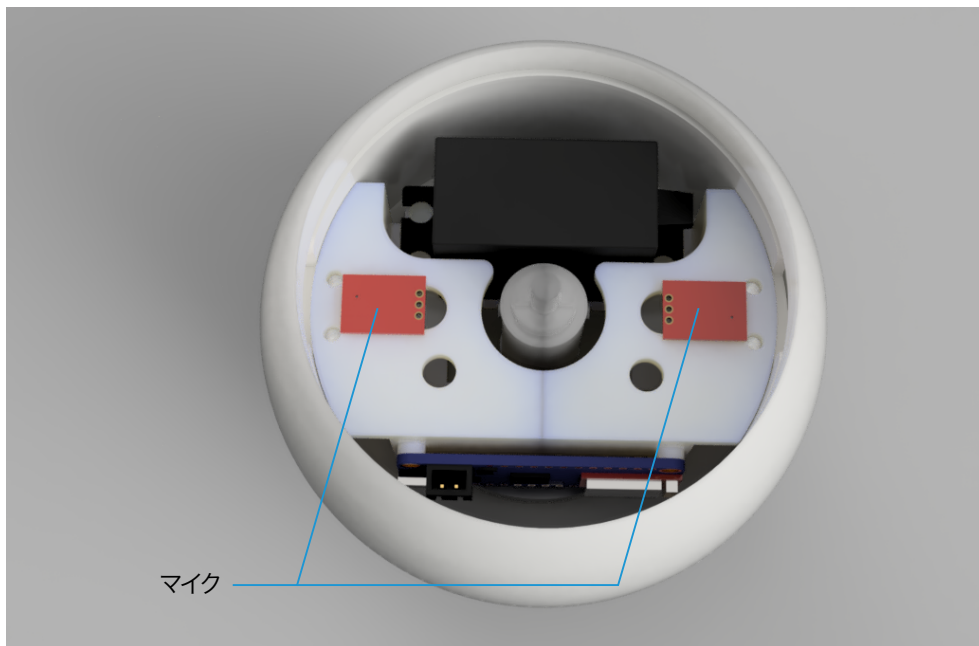


図 4.3 本体内に設置された 2 台のマイク．左右のマイク入力値の差分を計算することで左右の回転方向と角度を決定する．

4.3.2 マイクによる音源方向の推定

回転方向と回転角度の決定には、図 4.3 に示した本体内に設置された 2 つのマイク SparkFun 社製 Analog MEMS Microphone Breakout – ICS-40180 を利用する．2 つのマイクは内部フレーム上に左右方向外向きに設置し、外装パーツには音を取り込むためにマイク集音部に向かって極小の穴を追加した．

音源方向の推定は次の手順で行う．まず初めに、左右のマイク入力値の差分を計算する．この時の比較によって左右の回転方向を決定する．次にその値をマイコン内に記録された過去の差分の最大値と比較する．過去の最大値よりも大きければ記録を更新する．過去の最大値を 4 等分したいずれの範囲に含まれるかを計算する．その範囲と 90 度を 4 等分した範囲を対応づけることで角度を決定する．これによって、Mk-II は最大の差を検知した際は 90 度横を向く動作を行う．Mk-II はこの音源方向の推定方法によって自律的な動きを表現する．

4.4 評価実験

Mk-II で追加した社会的知覚の表現である自律動作が、生物らしい印象に与える影響について明らかにするために、Mk-I と Mk-II の印象を比較する評価を行った．

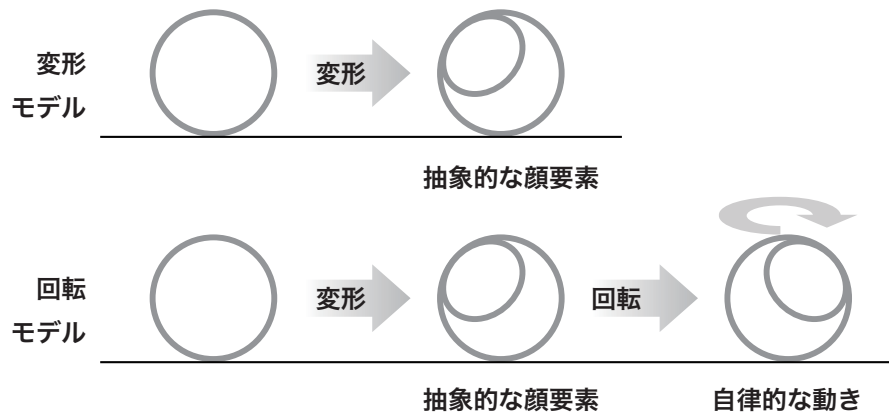


図 4.4 変形モデルと回転モデルの比較。回転モデルには自律的な動きが追加された。

表 4.1 印象評価の形容詞対

No.	形容詞対		
1	生物らしい	-	生物らしくない
2	人間らしい	-	人間らしくない
3	人工物らしい	-	人工物らしくない
4	知的に感じる	-	知的に感じない

4.4.1 評価手法

評価対象

評価対象は回転動作がない Mk-I と回転動作がある Mk-II の 2 種類のロボットとし、動いている様子を撮影した動画を用いた。以降は Mk-I を「変形モデル」、Mk-II を「回転モデル」として説明する。

図 4.4 に示したように、それぞれのロボットの動画には、球体の状態から平面を出現させる変形動作の様子が含まれている。また、回転モデルのみ、変形後に回転動作の様子が含まれている。動画には 2 種類のロボットとインタラクションを行なっている実験者や変形のきっかけとなる音声が含まれていないものを使用した。これは、人とのインタラクションを行なっている様子を見せることで生物らしさや人間らしさ、知的な印象が増加することを避けるためである。

評価項目

評価は SD 法を用いた。評価に用いた形容詞対を表 4.1 に示す。これは前章の Mk-I の評価実験 2 で用いたものと同じものである。それぞれの形容詞を評価項目とし 5 段階で評価した。さらに、それぞれのロボットの印象を自由記述方式で回答してもらった。

4セッション中 3 回目のセッション

ロボットAの評価

説明 (省略可)

この動画を最後まで再生して以下の質問に回答してください。

生物らしさをどれくらい感じますか？

1 2 3 4 5

生物らしくない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 生物らしい

人間らしさをどれくらい感じますか？

1 2 3 4 5

人間らしくない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 人間らしい

人工物らしさ (機械らしさ) をどれくらい感じますか？

1 2 3 4 5

人工物らしくない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 人工物らしい

知的な印象 (対話ロボットとしての性能) を感じますか？

1 2 3 4 5

知的に感じない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 知的に感じる

このロボットの印象を短い文章で説明してください。

記述式テキスト (短文回答)

4セッション中 4 回目のセッション

ロボットBの動画

説明 (省略可)

この動画を最後まで再生した後に「次へ」を押して質問に回答してください。

生物らしさをどれくらい感じますか？

1 2 3 4 5

生物らしくない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 生物らしい

人間らしさをどれくらい感じますか？

1 2 3 4 5

人間らしくない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 人間らしい

人工物らしさ (機械らしさ) をどれくらい感じますか？

1 2 3 4 5

人工物らしくない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 人工物らしい

知的な印象 (対話ロボットとしての性能) を感じますか？

1 2 3 4 5

知的に感じない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ 知的に感じる

このロボットの印象を短い文章で説明してください。

記述式テキスト (短文回答)

図 4.5 オンライン評価画面。ロボットが動く様子を撮影した動画を各画面の先頭に配置した。

被験者

被験者は 10 代から 40 代の男女 17 名 (男性 14 名, 女性 3 名) で, ロボットのデザインを学ぶ大学生が中心であった。

評価手順

評価はオンラインで実施し, インターネット上のアンケート作成・管理サービス (Google フォーム) を用いた。被験者には評価開始前に「人と自然な対話ができる AI ロボットの外観デザインの研究である」ことを伝え, ロボットの外観の印象に対して回答してもらうよう指示した。図 4.5 に示した評価画面では各ロボットの動画を先頭に配置することで, 最初にロボットの動作の様子を確認してもらった。その下に 4 種類の評価項目を表示し, 最下段に自由記述方式の解答欄を配置した。

4.4.2 評価結果と考察

図 4.6 に評価結果を示す。評価の結果, 回転モデルの生物らしさと人間らしさが変形モデルに比べ有意に高いことを示している ($p < 0.05$)。その反面, 回転モデルの人工物ら

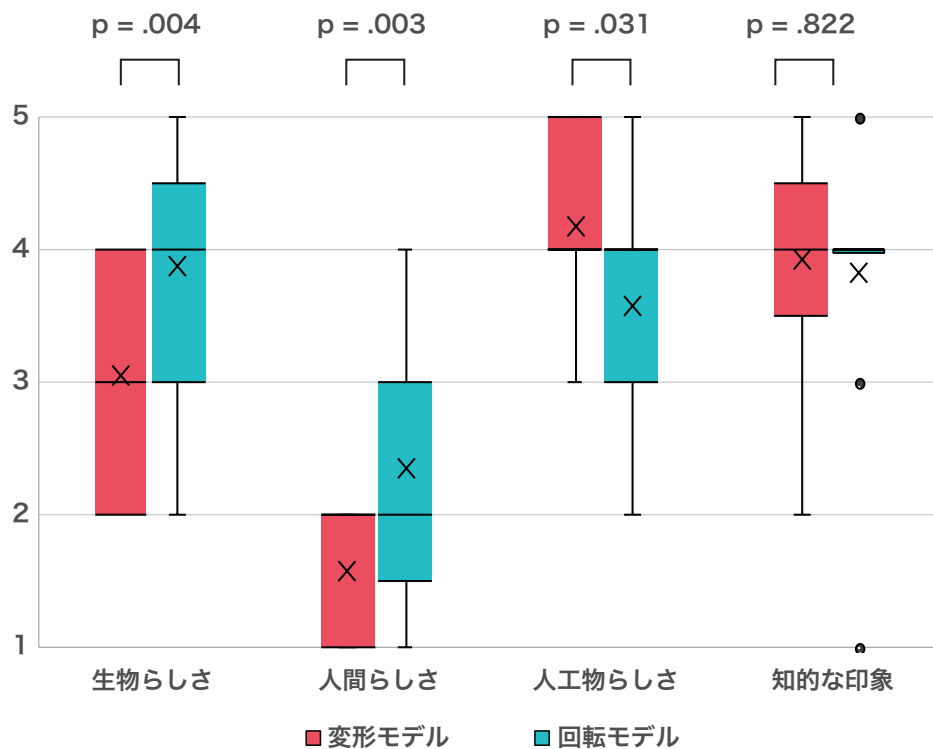


図 4.6 変形モデルと回転モデルの印象評価結果。回転モデルの生物らしさと人間らしさが変形モデルに比べ有意に高い結果を得た。

しさが有意に低いことを示している ($p < 0.05$)。また、変形モデルと回転モデル両方において、知的印象が高い結果となっており、両モデルの間には有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。

生物らしい印象について

変形モデルと回転モデルの平均値を比較すると変形モデル (3.06)、回転モデル (3.88) であった。両ロボットの比較では回転モデルの方が有意的に高い評価結果となった ($t(16) = 3.35$, $p < .05$)。また、生物らしさを高く評価した被験者の自由記述には「“関心”を持つ球体」や「なめらかに動きながら何かを探す人工物」という表現が見られた。「関心」や「探す」といった言葉が使われていることから、ロボットの動きに対して意思を持ったふるまいと捉えていると推察される。これは自律的な動きの表現の効果と考えられる。

人間らしい印象について

平均値は変形モデル (1.59)、回転モデル (2.35) で、両モデルに共通して形容詞対の中でもっとも平均値が低い項目であった。両モデルの比較では、回転モデルの方が有意に高い評価となっている ($t(16) = 3.46$, $p < .05$)。人間らしさを高く評価した被験者のコメントは「無邪気に動く、周りが気になってしょうがない赤ちゃんのような印象」「傾くところは拗ねているように見えました。」などが含まれていた。これらのコメントは、ロボットの動きを人間のふるまいになぞらえたものと考えることができる。人間らしさがどちら

のモデルにおいてももっとも低い評価だったのは、2台のロボットがミニマル領域の形体で、外部概念を積極的に利用した形体として捉えられていないことを示唆している。

人工物らしさについて

平均値は変形モデル (4.18), 回転モデル (3.59) で、変形モデルの中ではもっとも評価が高い項目となっている。両ロボットの比較ではこの項目のみ回転モデルの方が変形モデルより有意に低い評価となった ($t(16) = 2.36, p < .05$)。人工物らしさを高く評価した被験者のコメントには「球体」「平面」といったように幾何学的形体の要素で捉えているものが多く見られた。この結果は、変形前の生物らしさが無い純粋な幾何学的形体の印象が、なめらかな変形によって、徐々に生物らしい印象が増加したことが影響していると考えられる。

知的な印象について

平均値は変形モデル (3.94), 回転モデル (3.82) で、どちらも高い値となっているが、ロボット間の比較では、変形モデルと回転モデルの評価に有意差があるとは言えない結果となった ($t(16) = 0.23, p > .05$)。両方のモデルに共通して備わっている幾何学的フォルムや変形が知的な印象に影響を与えている可能性がある。

4.5 本章の考察

生物らしさの評価は、Mk-I に比べ Mk-II の評価が高い結果となったことから、Mk-II に追加した自律動作の表現が生物らしい印象の増加に影響を与えたと考えられる。また生物らしさを高く評価した被験者の自由記述内容には、「関心」や「探す」という言葉が含まれていたことは、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体が自律動作によって、より社会的インタラクションの親和性の向上に効果を発揮することを示唆している。

人間らしさの評価は、Mk-I と Mk-II 共にもっとも平均値が低い項目であり、外部概念の利用が極端に少ない形体を持つ「ミニマル領域」の効果を示している。Mk-I より Mk-II の方が高い評価を得たことは、形体ではなく自律動作の動きから、非擬人化ロボットを擬人化して捉える現象が生じたと推察される。人間らしさを高く評価した被験者のコメントに含まれる「無邪気」「赤ちゃん」「拗ねる」といった語は幼児や子供を想起させるものであり、人間らしさの評価が低い結果と関連し、幾何学的形体によって期待が低く抑えられた可能性を示唆している。

人工物らしさについては、Mk-II の方が Mk-I より低く評価されたことから、自律動作の表現によって人工物らしさが減少したと考えられる。また、この項目はどちらも平均値は高い項目であり、両ロボットともに人工物らしいと捉えられる傾向にある。これは2種類の形体を切り替えるなめらかな変形が、生物らしさが無い純粋な幾何学的形体が持っていた人工物らしさを減少させずに生物らしさを増加させるという効果を持つことを示唆している。

知的な印象はどちらも平均値は高く、両ロボットに共通する外部概念の利用が極端に少ないミニマル領域の形体が知的な印象に影響を与えていると考えられる。

4.6 本章のまとめ

本章では、第3章で制作したF.o.G.(Mk-I)に自律動作を追加したロボットF.o.G. Mk-II(Mk-II)を制作した。このロボットは2台のマイクによって音源方向を推定し、内部に追加された回転式の錘によって音源の方向に平面を向ける動作を行う。前章の分析では、2種類の形体を切り替えるなめらかな変形の動きと社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体が生物らしい印象に影響を与えた可能性が示されたが、Mk-IIに加えられた社会的知覚の表現である自律的動作が、生物らしい印象に与える影響を調べるためにMk-IとMk-IIの比較評価を行なった。

その結果、自律動作を表現するMk-IIはMk-Iよりも生物らしい印象が高い結果を得た。評価結果の自由記述コメントには、ロボットの自律動作に対して「関心」や「探す」といった意図を捉えた内容も含まれていた。生物らしい印象の増加は、本研究が両立させる目標のひとつである社会的インタラクションの親和性を向上させたことを示している。

また、生物らしい印象を増加させたことで、生物らしさが無い純粋な幾何学的形体と社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体の印象の差を広げることができた。この結果によって、本研究の3つの特徴を持つ非擬人化ロボットのデザイン手法の効果をより明確に示すことができた。

本章で制作したロボットは、内部構造のみの変更で自律動作の追加を実現した。そのためF.o.G.との比較では、自律動作の有無の影響について調べることができた。しかし、評価に用いた動画内のロボットのふるまいについては厳密に統制されたものではなく、それぞれのロボットの反応やふるまいは異なって見える可能性は否定できない。しかし、自律動作によるアニメシーの獲得は多数の先行研究によっても示されていることから、このロボットに対する評価結果は妥当であると考ええる。

本章で得られた結果は、2種類の形体のなめらかな切り替えによって、それぞれの形体が持つ利点を両立することが可能であることを示すものである。この手法を異なる形体に応用展開することができれば、非擬人化ロボットのデザイン手法としての有効性が高まると考える。

第 5 章

Joint Attention Cone：なめらかに変形して頂点の向きを変える円錐型ロボット

本章では、外部概念の利用が極端に少ない形体のロボットとして、純粋な幾何学的形体 (特徴 1) の円錐型の外観を持つロボットを制作した。このロボットは、前章までのロボットに使用したものとは異なる、2つの形体をなめらかに切り替える変形機構 (特徴 3) を持ち、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体 (特徴 2) として、円錐の頂点を傾けた形体に変形する。社会的知覚の表現としては、ロボットを見る人の方向に先端部を向けることで、共同注意の一種である相互注視を表現した。はじめにデザインのコンセプトについて述べ、次にその実装について説明する。さらに、このロボットが与える印象を確認するための評価実験として、展示会で収集した 74 件のコメントに対し、KJ 法による志向スタンスの分類と、統計的な計量テキスト分析を行なった。その結果、KJ 法による志向スタンスの分類では、第 3 章の F.o.G. の結果と比較して「志向的な構え」に分類されるコメントが大幅に増加した。計量テキスト分析の結果からは、このロボットの印象が、生物らしい印象だけでなく、意識や意図を持った対象と捉えられている傾向が抽出された。さらに、人工的な印象との共存に対する驚きについてのコメントも見られた。このロボットによって生物らしい印象がない状態から生物らしい印象がある状態に変化させることで、本研究が提案するの 3 つの特徴を利用するアプローチが応用展開可能であることを示す。

5.1 本章の目的

本章は、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性を両立する新しい非擬人化ロボットを実現するための、3つの特徴が、異なる形体、異なる変形機構、異なる社会的知覚の表現への応用展開の可能性を示すことを目的とする。

特徴 1「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」については、第 3 章と第 4 章で制作し



図 5.1 変形後の J.A.C. の外観. 頂点を傾けることで相互注視を表現する.

た F.o.G. 同様に純粋な幾何学的形体を利用するが、本章では別の形体として円錐を利用する。特徴 2「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」については、第 4 章の F.o.G. Mk-II の自律動作よりも明確なインタラクションを想定し、円錐の先端を傾けた形体によって相互注視の状態を表現する。特徴 3「2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形」については、F.o.G. の変形機構を応用した形状破綻の少ないなめらかな変形を実現する新しい機構を開発する。このロボットはこの機構により、純粋な円錐の稜線をカーブさせながら頂点を傾けた状態に形体を変化させることが可能であり、この変形後の形体がもつ記号性を利用して、円錐の頂点方向の回転によりユーザーとの相互注視の状態を表現する。本研究ではこのロボットを Joint Attention Cone(以降 J.A.C. と呼ぶ)と名付けた。ただし、本研究で制作するロボットが厳密な意味で共同注意 (Joint Attention) を実現することを目指すものではなく、共同注意 (本章では相互注視) を実現している状態を表現するという意図で使用している。

5.2 コンセプト

5.2.1 円錐形の外観

円錐の造形的特徴

円錐は底面と頂点をつなぐ円錐面から構成される純粋な幾何学的形体であり、立体の中に含まれる面や辺などの造形要素が少ない特徴がある。少ない要素で構成される純粋な幾何学的形体は、物事を抽象化するための基本形体として扱うことができる。印象派画家であるポール・セザンヌは友人に宛てた手紙の中で、自然の風景が球、円柱、円錐の3つの形状で構成されていると説明している [84]。

また、円錐形状をロボットの形体に採用した場合、卓上に置かれた状態で目視された際に特徴となる造形要素は頂点のみとなる。そのため、パレイドリア現象に見られるような、デザイナーの意図しない要素を擬人化して捉えられる可能性が低い。

これらをもとに、本研究の目的とするロボットの特徴1「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」を実現するために、円錐をロボットの形体として採用することとした。

円錐と生物らしさ

ポール・セザンヌが円錐について言及したように、自然界の中には円錐に抽象化することのできる形体は多く存在する。自然界において球体以外で相似成長が可能なおもっとも単純な立体は錐体であり [87]、動物の角や巻貝、植物の芽や蕾などさまざまな場所に円錐形は存在する。しかし、このような自然界の中で見られる円錐は厳密には自然形体に分類される。そのため理念的形体である幾何学的形体とは異なる印象を与えると考えられる。J.A.C. は非稼働時には幾何学的形体としての円錐形をしており、生物らしい印象を与えないことを意図している。

5.2.2 2種類の形体を切り替えるなめらかな変形

J.A.C. の変形機構の特徴

変形の目的は、前章まで制作したロボットと同様、生物らしさが無い純粋な幾何学的形体と、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体の2つの状態を、なめらかに切り替えることである。本章で制作する J.A.C. は、生物らしさを持たない純粋な幾何学的形体の円錐の状態と、相互注視の状態を表現するために頂点を傾けた状態を、なめらかに切り替える。また、変形がなめらかであることは、外部概念の影響を排除するために重要な要素である。時間変化の不連続性や表面形状の不連続性は、ユーザーに機械やシステムといったロボットの内部機構を想起させる要因となり、生物らしさの獲得に影響を与える可能性があるためである [49]。

J.A.C. の変形は、円錐面を水平方向にスライスする平面に傾きを設け、回転によって傾き方向を1方向に揃えることで連続的なカーブを生じさせることで実現している。そのため厳密には各パーツの円錐面の稜線は直線であることや、パーツ接続部で稜線に段差が生じるが、ロボットとインタラクションする距離からは、細部に注意が向けられないように配慮している。これは第3章で制作した F.o.G. の擬似的な平面と同じ考え方である。

変形機構は、F.o.G. で用いた機構の原理を応用したものであり、外観を構成するパー

ツ自体に変形機構が実装されており、内部空間を広く保つことが可能である。F.o.G.の機構がパーツ側面にレールを配置したのに対し、J.A.C.ではパーツの上面と底面に配置している。これらは共通して、パーツ間の接続面にレールを配置し回転させる仕組みである。また、この機構によって回転運動を連鎖させ変形を行う方式も同じである。

5.2.3 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体による相互注視の表現

J.A.C.は社会的知覚の表現として相互注視の動きを行う。視線の効果を用いたインタラクションの先行研究からは、視線やジェスチャーは非言語的行動として言葉によるコミュニケーションを補強できることが明らかになっている[25]。バーチャルエージェントの研究でも、注目を集め、エンゲージメントを維持し、ユーザーとの会話の流動性を高めることが示されている[11]。非擬人化ロボットの研究でも抽象的な造形要素と動を利用した社会的視線の効果が示されている[80][31][41]。このような先行研究を参考に、外部概念の利用が極端に少ないミニマル領域の形体を持つJ.A.C.で、相互注視を表現することは可能であると考えた。

共同注意と相互注視

共同注意は二人の人が同じ対象に対して注意を向けている状態である。Emeryは共同注意の諸現象を含む、二者間(AとB)で生じる視線による相互作用を5種類に分類しており、これらは2人の間の視線による相互作用が異なる。[18][86]。5種類の最終段階である「心の理論」以外の4種類は以下のように説明されている。

相互注視および視線回避

相互注視はAとBが互いの注意を互いに向けている、「目のあっている」状態。視線回避はAがBに注意を向けているが、BはAでない何かに対して注意を向けている状態。

視線追従

Bの視線がAに向けられていないことにAが気づき、その上でAがBの視線方向を追従することを示す。同じ対象へ注意を向けているとは限らない。

共同注視

一方が他方の視線を追従したあと、同じ対象へ注意を向ける状態。

注意の共有

相互注視と共同注視が合わさった状態。相手が同じ対象に注意を向けていることをAとBの両方が理解している。

本研究ではこれらの共同注意のうち、最初の段階である相互注視の表現をJ.A.C.に実装した。

ロボットとの共同注意

先行研究において、共同注意の研究対象となるロボットの外観や能力は多様であり、リアルなロボットから抽象的なものまで存在する。目や口などの擬人化要素を持たないロ

ボットの視線に関する研究もあり、Bruce らは、目などの顔要素がついていないロボットの頭部の動きのみでもユーザーとのエンゲージメントを高めることができることを示している [9]。また、Lehmann らは動作が限定的な非擬人化ロボット Care-O-bot3 を用いて最小限のポジティブな同期動作であっても、参加者は関与していると解釈し、ロボットに対してポジティブな感情を抱くことを示している [41]。

また、HRI 領域の視線に関連する研究は、人の反応に対する研究 (Human-centered)、ロボットの視線を使ってインタラクションを向上させる研究 (Design-centered)、ロボットへの実装に関する研究 (Technology-centered) の3つに分類される [1]。本研究は Design-centered アプローチであり、この分類の先行研究には、共同注意をインタラクションロボットに実装し、ユーザーの注視点を誘導する研究 [79] や、ロボットとのインタラクションを改善する研究 [100] が含まれる。

これらの先行研究の多くはロボットの視線を表現するために目や頭部といった擬人化要素を用いているが、目を表す擬人化要素を持たない非擬人化ロボットとの社会的注視の研究としては、日常的な製品の形体であるマイクを用いた Tennet らの Michot や [71]、Zaga らの抽象的な半球上の形体を持つロボットによる研究 [80] によっても、効果が示されている。

これらの先行研究から、J.A.C. のようなミニマル領域の形体を持つロボットでも共同注意の表現が可能であると考えた。

5.3 実装

5.3.1 外観形状

J.A.C. の外観形状は底面の直径 130mm 高さ 160mm の円錐形である。外装パーツは FDM 方式の 3D プリンターによる造形で、変形時の回転動作が目立たないように、研磨によって表面の積層痕を除去したものを使用している。

本体は中空構造となっており、内部にはステッピングモーターと人位置を検知するセンサーが内蔵されている。最下部のパーツは人位置検出に使用する赤外線センサーが配置されており、受光部の穴を目立たせないために黒色の ABS とし、上部の円錐部のみに視点が集中するように配慮している。

5.3.2 変形機構

変形部のパーツは、中空の円錐を水平方向に一定の間隔でスライスしたリング形状となっている。全体の変形は、各パーツのスライス面につけた角度によって回転時に傾きが生じる仕組みを利用し、この傾きを積算することで、円錐全体をなめらかに湾曲させている。変形後のフォルムの決定のため、図 5.2 に示したようにさまざまな角度を検討した。

検討の結果、最終形状は図 5.3 に示すような 11 段のリング構成とし、底面から順にスライス平面の傾斜角度を 0.5 度ずつ積算した形状をとした。傾斜角度を除変させることによって、本体のバランスを保ちつつ先端部を大きく傾けることが可能となり、変形後の先端部がほぼ水平まで傾くフォルムを実現している。J.A.C. の変形後の形体は、厳密にはなめらかな連続面ではない。スライス面に角度をつけたことにより断面は楕円形となるため、変形のためにリングを 180 度回転させるとパーツの接合平面は一致するが、円錐の稜

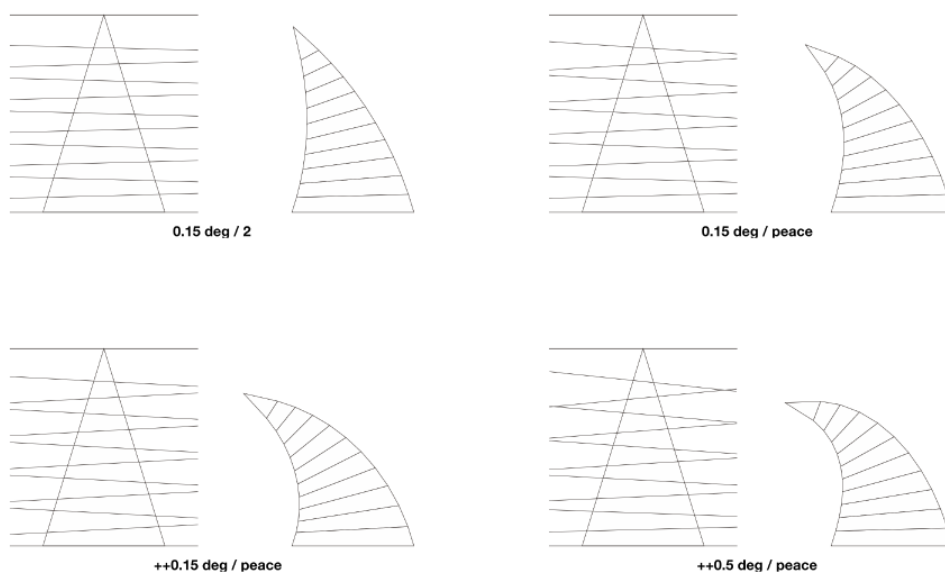


図 5.2 スライス角度の検討. 均一な角度によるカーブ (上段) と角度を徐変させたカーブ (下段) を検討した.

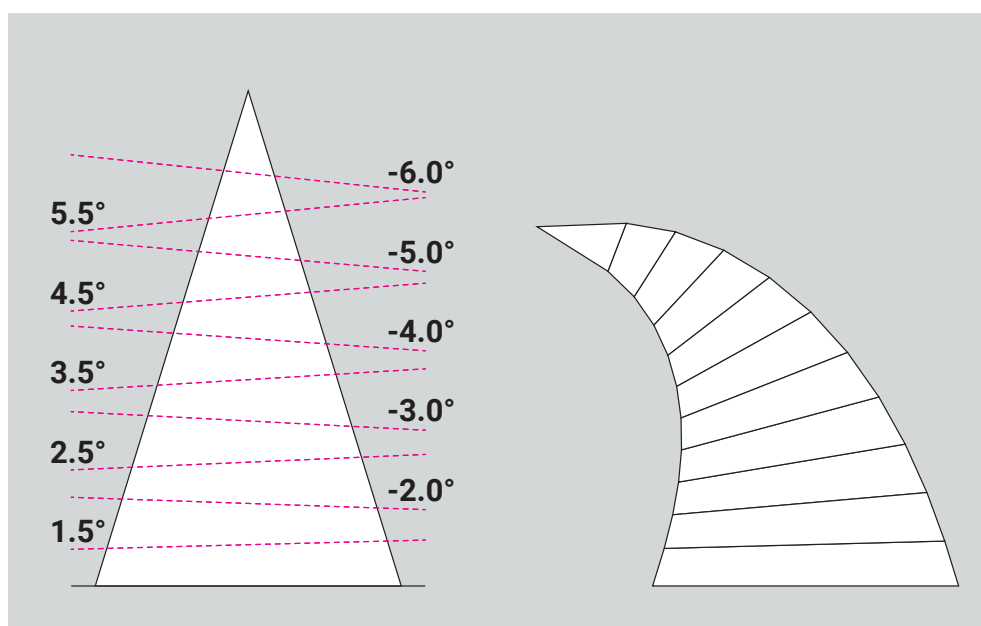


図 5.3 最終的な変形形状. 本体のバランスを保ちつつ先端部を大きく傾けることができる.

線は直線が連続した形体となる.

5.3.3 駆動部の設計

J.A.C. の変形は, 本体内部に設置されたステッピングモーターの回転運動によって行われる. ステッピングモーターは山洋電気製バイポーラ型ステッピングモーター SS2421-5041 を使用した. ステッピングモーターの動力は, 円錐の先端パーツにフレキシブルシャフトによって伝達され, 頂点に近いリングから順に回転が連鎖することでなめらかな

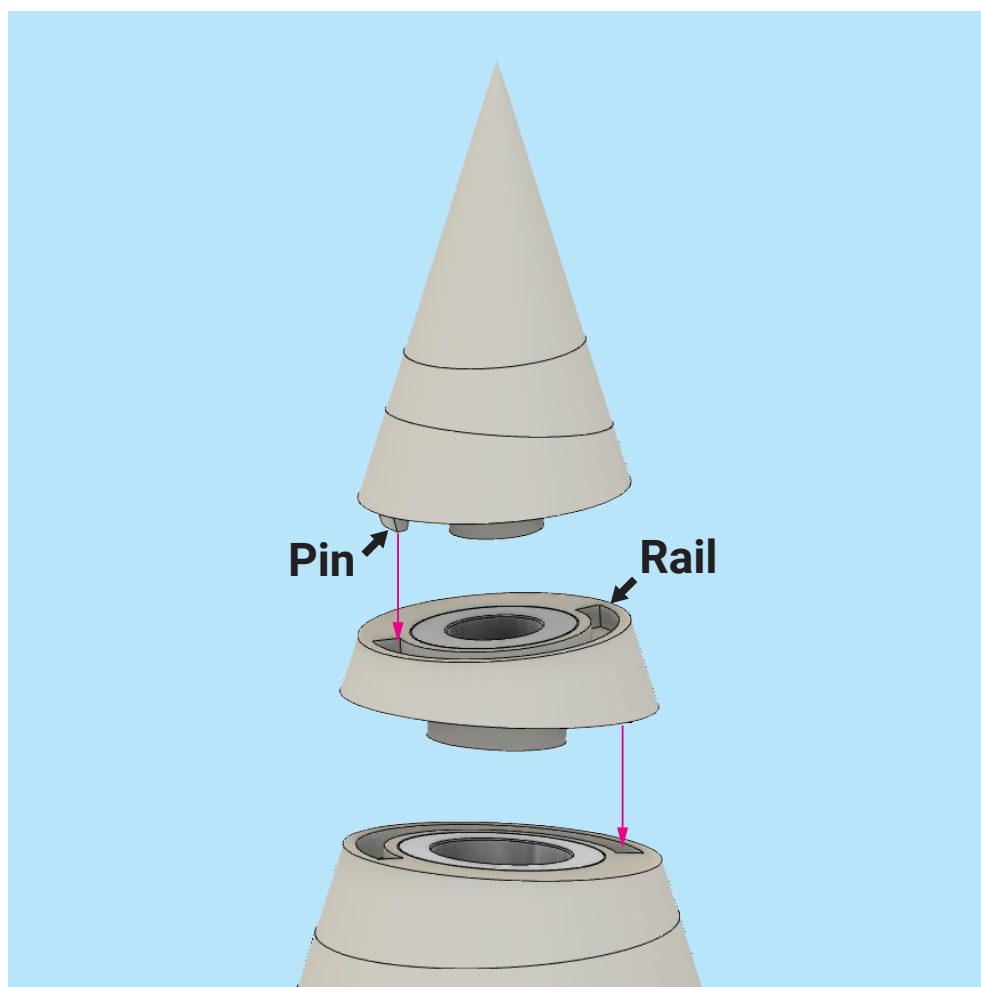


図 5.4 回転を伝達するレール。各リング上面のレールを、上段のから突出するツメが移動し連鎖する。

湾曲フォルムを完成させる。図 5.4 に示したように、各リング上面に 180 度の円弧状に彫られたレール上を、上段のリング底面から突出するツメが端点まで移動し、次の段のリングに回転を連鎖させる仕組みとなっている。

変形動作時は本体内底部に設置されたステッピングモーターで先端部のパーツに動力を伝える必要があるが、変形によって中心軸が徐々に湾曲するため、横方向の柔軟性があり、ねじれ剛性が強いシャフトが必要であった。また、円錐先端付近の内部空間に収まる細さが求められたため、ねじれ剛性が強く曲げ方向の柔軟性が高い材料として、オーディオケーブル (カナレ製 L-4E5C) を利用して制作した。

5.3.4 ユーザー位置の検知

ユーザー位置を検知するために、最下段に赤外線距離センサー GP2Y0A02YK0F7 台を使用した。図 5.5 のようにセンサーは 45 度間隔で正面から左右に 3 台ずつ放射状に配置されている。この距離センサーは 4cm から 55cm の範囲の距離を計測することが可能である。これらは設置面からの反射によるノイズを避けるために設置角度をやや上方に向

けて配置している。

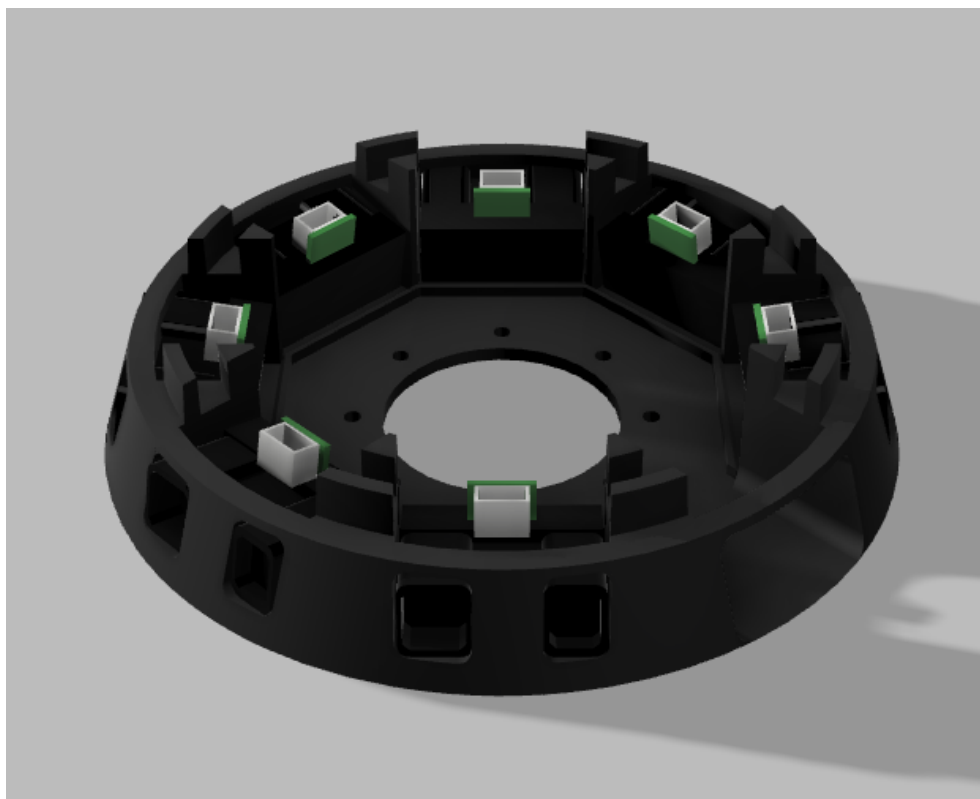


図 5.5 センサーが配置された台座. 7 台のセンサーが放射状に 45 度間隔で配置されている。

人位置の検知は、変形動作終了後に頂点を傾けた形状になった状態となった時点から開始される。検知間隔は、人間が決意をする意識的経験にかかる時間 0.3 秒 [52][85] を参考にし、333msec とした。これは観察者が生物らしい反応速度として違和感を感じないように配慮したものである。

ユーザー位置の特定は、図 5.6 のように、常に直前の 100 回分の観測データから移動平均を求め、それを閾値として設定することで、7 台の赤外センサーの入力値のノイズを除去している。その上で、閾値以上の値の中で、もっとも高い出力のセンサーを特定している。そのため、ロボットの周辺にユーザーが複数人いる場合は、もっとも近くにいるユーザーを検知する。

センサー特定後、センサーの位置に対応する角度と現在の角度を比較して回転距離が少なくなる回転方向を選択し、回転を開始する。回転動作中はユーザー位置検出処理を停止し、回転動作が終了後に位置検出を再開する処理とした。

静止状態が長時間続くことで、機械的な印象を与えることを避けるために、3 回の検出 (99msec) で連続してユーザー位置が動かない場合は、ランダムで違う方向を向く処理を追加している。

5.3.5 変形の制御

J.A.C. の変形動作には変形制御用と方向制御用の 2 台ステッピングモーターを使用する。変形のための回転動作は、先端部である最上段から 1 段につき 180 度ずつ積算され、

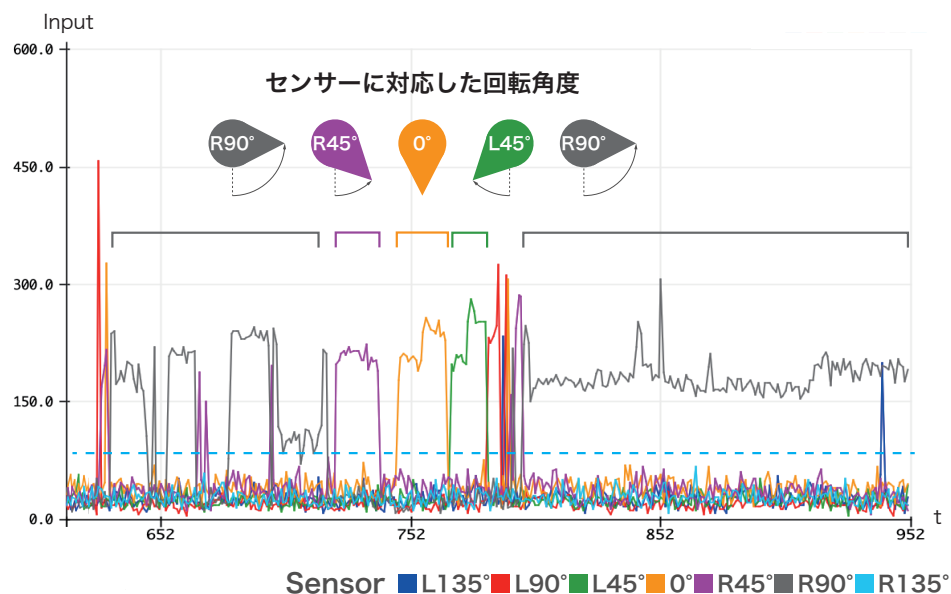


図 5.6 センサー入力値と対応する回転角度。もっとも高い出力のセンサーを特定する。

変形終了までの合計は 1800 度 (5 回転) となる。

変形制御用のモーターのみで変形動作を行うと、図 5.7 のように連鎖の度に頂点が 180 度回転してしまう。そのため、図 5.8 のように、方向制御用モーターを追加し、変形とは逆方向に本体を回転させ頂点の回転を相殺することで、先端部を常に一定の方向に保ちながら変形する動きを実現した。方向制御用モーターは変形制御用モーターの一段下の層に設置され、変形制御用モーターに信号を伝えるためにスリッピング (ツバメ無線 スリッピング SRG-27-4C) を使用しこれによって配線の制約を受けない無限回転を実現している。

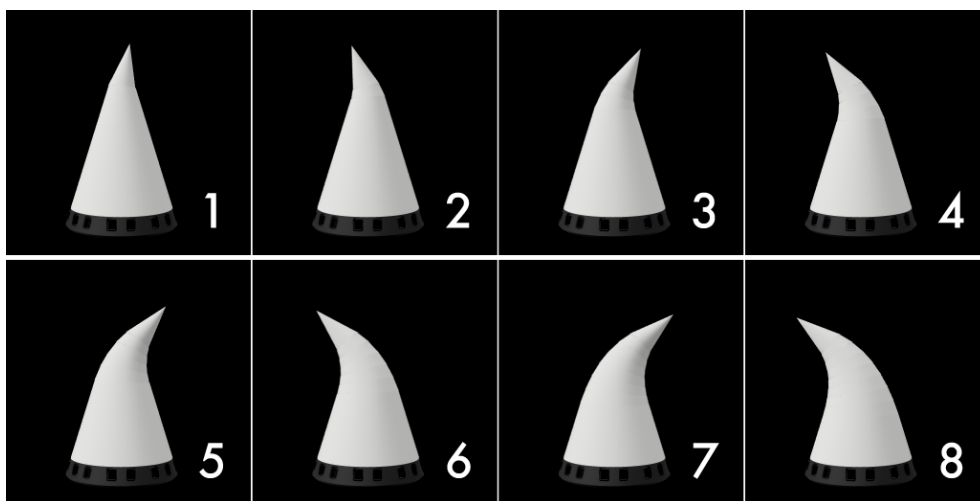


図 5.7 頂点方向が一定でない変形モーターのみによる変形。連鎖の度に頂点が 180 度向きを変える。

変形状態に遷移した後は、方向制御用モーターによって、検出したユーザー位置に回転

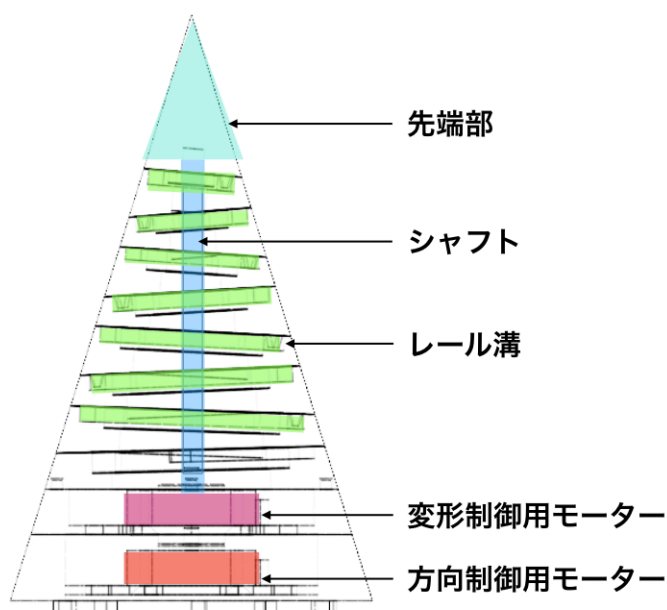


図 5.8 駆動部の構造。変形時の頂点方向を一定に保つために方向制御用モーターと変形制御用モーターを反転させて頂点方向の回転を相殺する。

することで、相互注視の表現を行う。ユーザーの動きに追従するよう向きを変える動作の終了直後に再びセンシングを開始し、ユーザー位置に変更があった場合は回転動作を行う。

5.4 評価実験：展示とコメントの分析

制作したロボットの印象を評価するために、展示会に J.A.C. を出展し来場者から 74 件のコメントを収集した。自由記述コメントを収集することで、先入観に囚われない幅広い印象を収集することを目的とした。収集したコメントは統計的に分析を行なった。

5.4.1 展示概要

制作した J.A.C. のプロトタイプを東京大学生産技術研究所 70 周年記念展示「もしかする未来 in 駒場」の併設展示「ぞわぞわ展」(2019 年 5 月 31 日～6 月 9 日)に出展した [90]。展示会場の照明は照度が低く設定されており、来場者が展示台に近くと作品の照明が点灯し作品が動作を開始する演出となっていた。J.A.C. は高さ約 90cm の展示台の中央に設置し、図 5.9 のように、変形後に頂点を傾けた姿勢が来場者の視線と向き合うようにした。

図 5.10 に示したように、照明が点灯すると J.A.C. は変形動作を開始し、変形終了時に頂点を来場者の方向に向ける。その後も、来場者の位置変更があれば追従して向きを変える動作を継続的に行う。また、1 秒間以上センサー入力値が変化しない場合は、一時的に



図 5.9 J.A.C. の展示風景

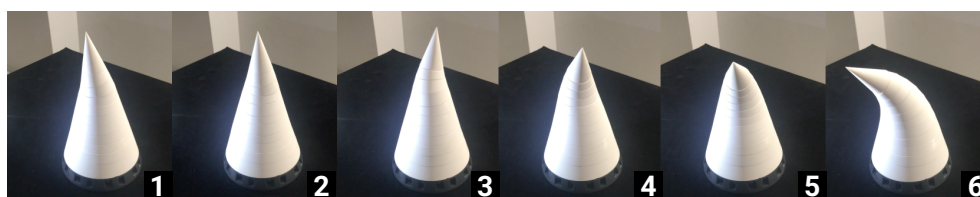


図 5.10 J.A.C. が変形する様子。変形終了時に頂点を来場者の方向に向ける。

別の方向を向く動作を行い、インタラクション開始から 23 秒が経過すると、円錐形状に戻る変形動作を開始する。円錐への変形動作が終了すると同時に作品照明を消灯し、次の来場者とのインタラクションが開始されるまで待機状態とした。

5.4.2 被験者

展示会の来場者にアンケートを実施し、印象に残った展示物とその印象について自由記述方式で記入してもらった。そのうち J.A.C. を印象に残った展示物として選択したアンケート回答者は 10 代から 60 代までの男女 74 名であった。大半の来場者は実際のロボットの変形を見たことがなかったと推測されるが、一部の人は SNS に投稿された映像を事前に見た可能性がある。収集した 74 件の自由記述コメントを精査し、印象的な展示として J.A.C. を選択しつつも、自由記述コメントを記入していない回答を無効回答とし、最終的に 70 件を有効回答として分析対象とした。

5.4.3 KJ 法によるグループ分類

収集したコメントの傾向を確認するために、KJ 法を用いてグルーピングを行ない 70 件のコメントを図 5.11 に示したように 12 個のグループに集約し、さらにそれらを

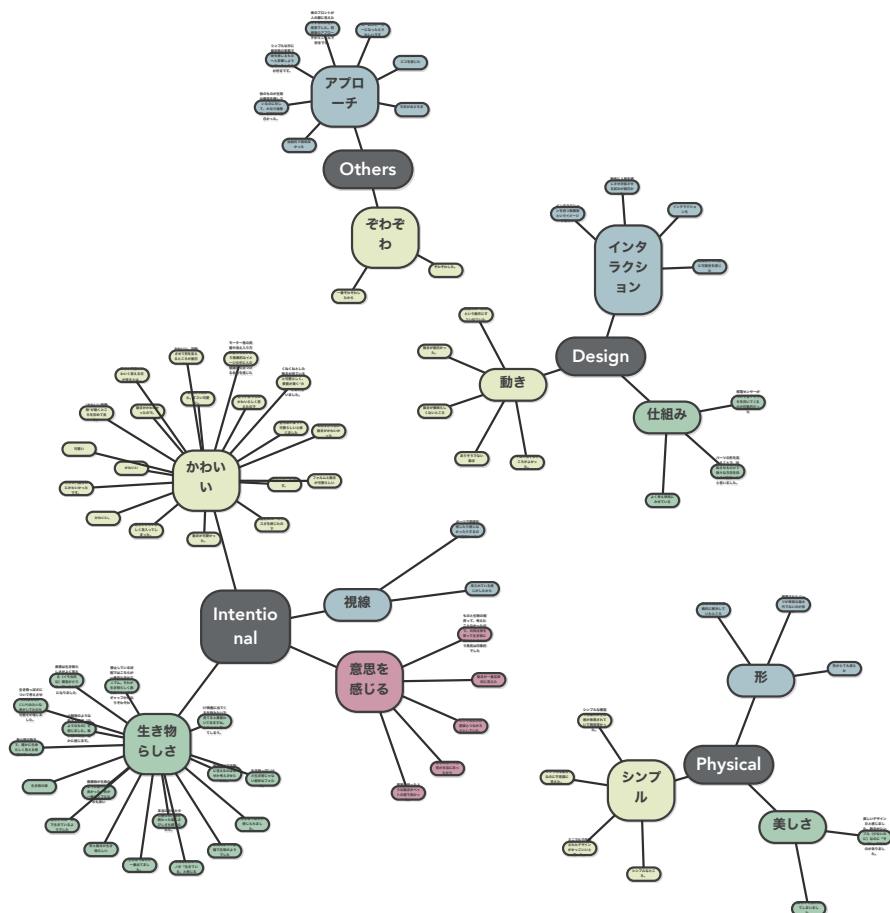


図 5.11 KJ 法によるコメント分類. 12 個のグループを Dennett の 3 つの指向スタンスに集約.

Dennett の 3 つのスタンス「志向的な構え (Intentional stance)」、
「設計的な構え (Design stance)」、
「物理的な構え (Physical stance)」に集約した。

志向的な構えに属するグループ

「生き物らしさ」「かわいい」「意志を感じる」「視線」が含まれる。「かわいい」が19件でもっとも大きなグループで、次いで「生き物らしさ」が17件となっている。「意志」や「視線」を感じるといったJ.A.C.のコンセプトである明確な社会的知覚に関するコメントが含まれている。これらは対象を擬人化することで感じ取れる印象であることから志向的な構えとして分類した。

設計的な構えに属するグループ

「動き」「仕組み」「インタラクション」が含まれる。動きや機構の設計に対する関心や印象についてのコメントが含まれている。これらは対象を人工物として捉えていることから設計的な構えとして分類した。

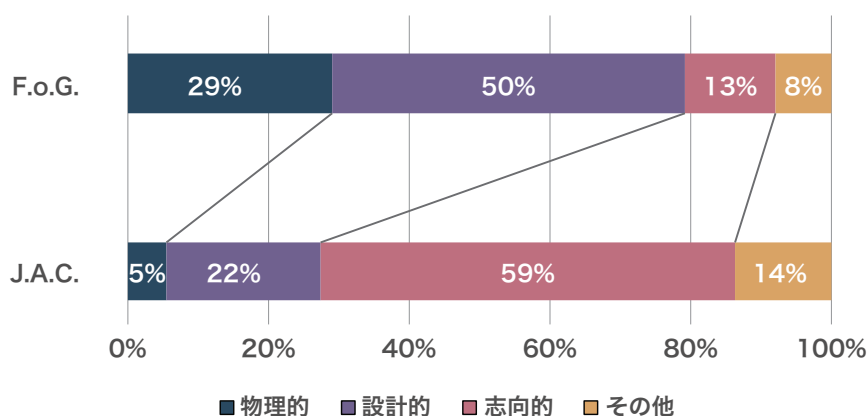


図 5.12 Denne のスタンス分類の比較. F.o.G. と比較して指向的な構えが増加した.

物理的な構えに属するグループ

「シンプル」「形」「美しさ」が含まれる. 形状に対する印象についてのコメントが含まれる. これらは物理的な対象に対する感想として分類した.

5.4.4 志向スタンスによる分類結果

J.A.C. の展示に対するコメント 70 件に対し, コメントの文章を一件ずつ確認し Dennett の志向スタンスで分類し, 第 4 章で制作したロボット Face on a Globe の結果と比較したものを図 5.12 に示す.

このグラフからは Face on a Globe の「物理的な構え」と「設計的な構え」の合計が 79% と多く「志向的な構え」は 13% と少ないのに対し, J.A.C. では「物理的な構え」と「設計的な構え」の合計は 27% と少なく「志向的な構え」は 59% と多くなっている. これは, より明確な社会的知覚要素を追加したことで, 生物らしい印象を増加させることができたことを示している.

5.4.5 テキストマイニングによるコメントの計量テキスト分析

さらに, 収集したアンケートコメントを分析するために, 計量テキスト分析ツール KH Coder[29] を使用し, 70 件の自由記述文章から抽出した言葉と言葉の関係を可視化する共起ネットワーク図を作成した.

共起ネットワーク図は, 異なる 2 つの語のいずれかが含まれる文章のうち, 両方の語が含まれる文章の割合を表す Jaccard 係数を算出し, 抽出したすべての語のネットワークを描画したもので, 出現パターンが類似する語が線で結ばれて表示され, 語が使用される文脈の考察に利用できる [29]. 共起ネットワーク図を作成する前に, 抽出語の表現揺れの統一および語の取捨選択を行なった.

表 5.1 検出されたサブグラフとノード (*は中心性を示す)

サブグラフ番号	含まれるノード
01	生き物*, 動き, シンプル, 形, 一番*, 出る, 愛着, 見る, 感じ
02	機構*, 形状, 興味深い
03	円錐, 印象, 向く, パーツ, 変形, 回転
04	見える*, ミニマル*, 好き, 感覚, 確か, 意思, 本当に
05	人*, 意識, 無機物*, 音, イメージ, インタラクション, 持つ
06	デザイン, 美しい

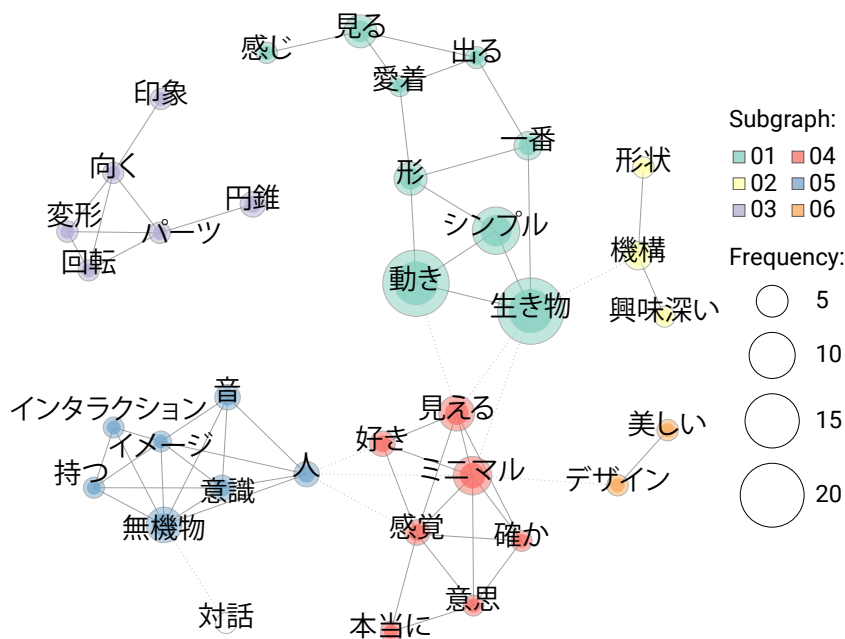


図 5.13 印象を表す語の共起ネットワーク図. 6 個のサブグラフが検出された.

5.4.6 結果

図 5.13 は, 出現回数が上位の 60 語で作成した共起ネットワーク図である. 生成された共起ネットワークは, 語 (node) の数が 35, 共起関係 (Edge) の数が 64 となった. ネットワーク図上において, ノードの円の大きさは出現頻度を表し共起関係を線で示している. 共起ネットワークのサブグラフ検出には, 関係 (Edge) の中心性 (媒介性) にもとづく M.Newman & M.Girvan(2004) の方法を使用し, 6 個のサブグラフが検出された. 検出された 6 個のサブグラフと中心性の高い語を表 5.1 にまとめた. サブグラフに含まれる語のうち中心性の高いものを表中に示した.

■サブグラフ 01 は, 「生き物」を中心としたサブグラフで, 中心性の高い「生き物」が「動き」「シンプル」と共起している. この 3 つの言葉は全体的の中でもっとも出現頻度が高い. 「生き物」「動き」「シンプル」を含むコメントには以下のようなものがあった.

- 形と動きが生き物らしい。
- 動きがスムーズで生き物のようでした。
- 本当に生き物と少し感じた。動きが終わった後にさびしさも感じられた。
- シンプルなようで複雑で生き物のようでした。
- 無機物が生き物のような動きで良かった。形が一番シンプルなのも良い。
- シンプルな機構で効果的に生き物感が表現されていて興味深かった。

これらのコメントは、ロボットの自律的な動きと、生き物らしい印象を関連づけたコメントと、シンプルでさと生物らしさが同時に感じられることに対するコメントに大別できる。

また、このサブグラフ 01 には「愛着」に言及したコメントが含まれている。

- SF 映画に出てくる生物みたいで見てると愛着わいてきますね。カワイイと思うしまう。
- くねくねとした動きが見ていると可愛らしく、愛着が湧く”カタチ”だと思いました。

これらは、生物らしさや動きに対して「愛着」という、ロボットを社会的対象として捉えるコメントである。

さらに、「生き物」はサブグラフ 02 に含まれる「機構」やサブグラフ 04 の「ミニマル」といった人工物らしさに関連する語と共起関係があり、生物らしさと人工物らしさが同時に述べられていることを示している。

■サブグラフ 04 は、「見える」「ミニマル」「感覚」「意志」といった語を含むサブグラフとなっている。中心性の高い語「見える」「ミニマル」は 01 の「生き物」や「動き」と弱い共起関係が見られる。「ミニマル」「感覚」「意志」が含まれるコメントには以下のようなものがあつた。

- 小動物のような動きと意思 (のようなもの) を感じました。ミニマルな知性、確かに感じます。
- 意思疎通した感覚が本当にあつたから。
- ミニマルな動きで、確かに生き物らしく見える感覚があつた。

■サブグラフ 02 とサブグラフ 03 は、機構や変形といった仕組みに関連するサブグラフであり、設計的な視点から述べられたコメントが含まれている。これらは、形状や仕組みに関連するサブグラフと捉えることができ、J.A.C. に無機的でシンプルなもの、または人工物として捉えるような印象があることを示している。

- パーツを変形することで、回転させるだけで様々な方向を向くのが面白いなと思いました。
- よく考えシンプルにみせている。
- 形状の対比を機構的に解決していたところ。

■サブグラフ 05 は、「無機物」「人」「意識」といった語が含まれるサブグラフとなっている。「無機物」「人」「意識」が含まれるコメントには以下のようなものがあつた。

- かわいい無機物の動きを初めて見た.
- 無機物が生き物に見えるのはなぜか考えさせられた.
- 意識を持ったような動きがペットの様で良かった.

「無機物」と「人」というように、相反する意味の語が含まれており、ここでも生物らしさと人工物らしさが同時に述べられていることを示している.

5.5 本章の考察

本章では、展示会で収集した70件の自由記述によるコメントをKJ法に分類し、それらをDennettの3つのスタンスで分類を行なった. 本章ではさらに第3章のF.o.G.のスタンス分類との比較を行なった. その結果、J.A.C.に対するコメントの59%が指向的構えに分類された. 第3章でF.o.G.に対して指向的構えとして分類したコメントは13%であった. これらを比較するとJ.A.C.を指向的構えで捉えたコメントは大幅に増加した. この変化は、外部概念の利用が極端に少ない形体の種類(球と円錐)、社会的知覚の表現(自律的な動きと相互注視)のいずれかの違いによって生じたと考えられる.

次に、展示会で収集した70件の自由記述コメントに対して、計量テキスト分析による共起ネットワーク図を作成し、J.A.C.に対する印象に含まれる要素を分析した. その結果、「生き物」「動き」「シンプル」が共起し同じサブグラフに含まれる結果を得た. このサブグラフに含まれるコメントから、生き物らしさが動きによって生じていることが再度示された. 動きの複雑さやなめらかさについての言及からは、本研究の特徴であるなめらかな変形機構による変形の動き自体にも生物らしい印象を与える効果があると推察される.

また、「生き物」と「シンプル」が共起しているコメントは、無機物「人」「意識」が含まれる別のサブグラフのコメントにも見られる、生物らしさと人工物らしさの共存について印象を述べたものであった. 人工物らしさに関するコメントは、外部概念の利用が極端に少ない形体を持つ「ミニマル領域」のデザインによる過剰な期待の回避という視点では、円錐形が純粋な幾何学的形体として捉えられており、擬人化のような外部概念と関連づけられていないことが推察される. そして、生物らしさとの共存は、ロボットの形体をなめらかに切り替える変形機構によって、人工物らしい印象でえられていたロボットが、自然に生物らしい印象に変化したことによって生じたと考えられることができる.

さらに、「意志」や「意識」といった語が抽出された結果は、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体による相互注視の表現によるものと考えられる. J.A.C.は赤外線センサーを利用して、人の位置を特定し、その方向に頂点を向けることで相互注視を表現した. 共起ネットワーク分析結果で「意識」に言及したコメントは相互注視が成立したと感じられたことが推察される.

5.6 本章のまとめ

本章では、幾何学的形体である円錐の形体を持ち、なめらかな変形によって社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体に切り替わり、相互注視を表現するロボットJ.A.C.を制作した. 第4章で制作した球体型ロボットF.o.G. Mk-IIの自律的な動きと比較して、J.A.C.の相互注視は複数の近接センサーによる人位置検知を用いたことと、形体の変化が

大きい円錐の頂点を傾ける変形によって、より明確な社会的知覚要素の表現を行うことが可能となった。この非擬人化ロボットが、どのような印象を与えるかを確認するために、展示会に出展し、来場者から収集した70件のコメントの計量テキスト分析を行なった。

コメントの共起ネットワーク分析の結果、J.A.C. は生物らしい印象を与えたことが明らかになった。生物らしさに関連する要素として、第3章のF.o.G. 同様に、なめらかな動きが影響を与えていることも示された。それに加え、意思や意図といった社会的知覚の表現に関連する印象が多く抽出された。これは相互注視の表現の効果であると考えられる。

本研究でこれまで制作してきたロボット同様、本章で制作したJ.A.C. もまた外部概念の利用が極端に少ない形体である。また、変形動作も形状破綻のないように十分配慮されたものであることから、このロボットが獲得した生物らしさは、F.o.G. 同様に、外部概念の影響ではなく、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体による動きと表現によって生じたものであると考えられる。

本章ではロボットの印象を確認するために、展示会への出展と来場者のコメントの計量テキスト分析という手法をとった。これは第3章のF.o.G. と同様の手法である。展示会での印象評価は、展示会のテーマや主催者といった外部要因による影響が排除できない。そのため抽出された生物的な印象もこれらの影響によって増加した可能性がある。そのため、このロボットの印象を詳細に評価するためにはさらに研究が必要である。

また、本研究では造形要素のうち形状と動きに着目しているが、変形動作や回転動作時に生じるモーター音が生物らしい印象に与えている影響については考慮する必要がある。J.A.C. の動作音は回転制御のイーシングによって機械的で一定な音程ではなく低音から高音までがなめらかに変化する動作音となっており、アンケートコメントの中には、動作音が映画に登場するロボットに似ていて愛着が湧くといった趣旨の物も含まれていたことから影響を与えたことが推察される。設計の上では、変形動作は最上段である先端部から順に最下段まで回転による傾き動作が連鎖することになっているが、プロトタイプの回転動作は回転の連鎖は必ずしも先端から順に起こらず順序が前後することがあった。これはリング間の摩擦の影響と思われる。その結果として本来回転用モーターによって相殺されるはずの先端部の回転が意図しないタイミングで発生した。設計意図とは異なるこの動きが結果的に変形時の先端部のランダムな動きを生み出し、そこに生物らしさが生じた可能性も考えられる。円錐形上は純粋な幾何学的形状であり生物らしさを与えることはないが、変形後の形状は鹿などの角や巻貝が長い時間をかけて成長する際の一定の規則に従った構造と類似しており[87]、自然界に存在する形状である。本章でのコメントの計量テキスト分析からは、この形状が自然界の具体的な生物などの外部概念として捉えられた結果は見られないが、無意識的に生物らしい印象の要因となったことも考えられる。しかし、これは擬人化や生物らしさといった外部概念を利用せずに、幾何学的な形体の変形によって自然界に存在する形体に類するものを想起させるといったミニマル領域におけるロボットデザインのヒントとなると考える。

本章で得られた知見は、本研究が提案する3つの特徴が、異なる形体、異なる変形機構、異なる社会的知覚の表現への応用展開が可能なことを示すことができたことである。

第 6 章

J.A.C.Mk-II：視線追従を表現する円錐型ロボット

本章では、前章で制作したロボット J.A.C. を発展させ、ユーザーの視線の方向に頂点を傾ける視線追従の表現を行うロボット J.A.C. Mk-II を制作した。このロボットは前章の J.A.C. と同じ外観と変形機構を持つ、外部概念の利用が極端に少ないミニマル領域の形体のロボットである。視線検知を行う外部システムとの接続と、円錐の先端の垂直方向の動きを追加するための制御の変更によって、視線追従の表現を実現した。このロボットの社会的知覚の表現が与える印象を確認するために、第 3 章と 4 章で制作した F.o.G. を模した形体、純粋な立方体の 2 種類の形体を持つロボットを、同じ視線検知システムに接続し、インタラクションする様子を撮影した動画によって評価を行なった。その結果、J.A.C. Mk-II は、非稼働時の純粋な幾何学的形体に対する生物らしい印象が低く、視線追従の表現に対する生物らしい印象が他の 2 つのロボットよりも高い結果を得た。さらに、生物らしい印象が増加し、人工物らしい印象が減少する傾向も見られた。これらの結果から、ミニマル領域の 2 種類の形体を、なめらかな変形による形体の切り替えによって、非稼働時と稼働時の印象の差を、大きく広げることが可能であることを示した。

6.1 本章の目的

本章では、本研究の特徴 2「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」の社会的知覚をより明確な表現にすることによって、さらに生物らしい印象を強くすることを目的とする。それによって「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」と「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」の 2 種類の形体が与える生物らしい印象の差を拡大し、本研究の 3 つの特徴を持つロボットの応用展開の幅を示す。

前章で制作した純粋な幾何学的形体である円錐の形体を持つロボット J.A.C. を改造し、社会的知覚要素として視線追従を表現するため、より自由度の高い動きが可能な制御に変更した J.A.C.Mk-II を制作した。円錐からの変形動作と、水平方向の回転の機能は J.A.C. と同じものであるが、複雑な視線追従を表現するために水平方向の回転に加えて、

垂直方向の傾き変化を実現した。

Emery による共同注意の分類によると、視線追従は相互注視の次の段階に相当し、「A と B の二者の間において、B の視線が A に向けられていないことに A が気づき、その上で A が B の視線方向を追従することを示す。この時、同じ対象へ注意を向けているとは限らない。」という状態のことを指す [18]。ロボットとのインタラクションにおける視線追従の表現はソーシャルキューとして効果があり [80][41][44]、ユーザーの注意対象に視線を向ける表現は、コミュニケーションを円滑にする効果が期待できる。視線追従のユーザーの視線方向を追いかける表現は、F.o.G. Mk-II の自律動作や J.A.C. の相互注視よりも明確な表現であり、社会的インタラクションの親和性向上につながると考えられる。

本章では、J.A.C. Mk-II との比較実験のために、外部概念の利用が極端に少ない形体のロボットを 2 体制作した。それらは変形を行わず水平方向の回転のみで視線追従を表現するロボットであり、これらとの比較によって、J.A.C. Mk-II の社会的知覚の表現の効果を確認する。

6.2 コンセプト

J.A.C.Mk-II は水平方向と垂直方向の視線に対応するため、円錐頂点を上下左右に動かすことが可能である。水平方向の動きは円錐の中心を軸とした回転動作で、垂直方向の動きは前章で制作した J.A.C. の変形動作を利用しているため、視線追従を表現する際は回転動作と変形動作を組み合わせた動きとなる。

前章で制作した J.A.C. の相互注視および視線回避が、ロボットとユーザーの目があっている状態の表現であったのに対し、J.A.C.Mk-II の視線追従はユーザーの視線の方向に目を向ける動作である。J.A.C.Mk-II はカメラを使った視線検知システムと接続し、水平方向と垂直方向の視線角度を検出し、本体の回転動作と変形動作を組み合わせた頂点方向の動きで、ロボットの視線方向を表現する。

先行研究では、深層学習を利用した視線検知技術を利用し、ユーザーが注意を向けている対象を推測する研究 [60] など、高度な共同注意を試みる研究は多く行われている。また、ロボットとのインタラクションにおける視線追従の表現はソーシャルキューとして効果があることが示されている [44]。J.A.C. Mk-II の、ユーザーの視線方向に視線を向ける表現は、社会的インタラクションの親和性を向上させる効果が期待できる。

6.3 実装

6.3.1 変形部の機構

前章で制作したロボット J.A.C. の相互注視の動きは水平方向の回転動作のみであった。本章で制作する J.A.C.Mk-II は、視線追従を表現するために視線検知システムと接続する。その検出結果は水平方向と垂直方向の視線角度を含むため、ロボットを改造し垂直方向の動きに対応する必要があった。垂直方向の追従の実現のために、J.A.C. の変形機構動作の途中段階を利用することとし、変形動作の中間状態を制御するためにプログラムの変更をおこなった。その結果、図 6.1 のようにロボットの頂点の垂直方向の角度を 10 段階で指定可能となった。

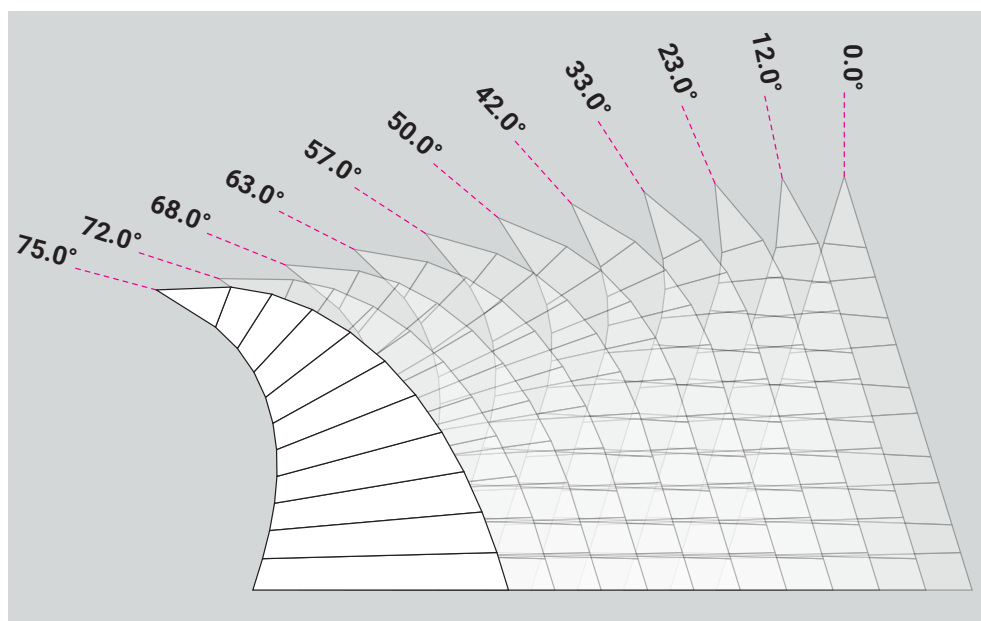


図 6.1 10 段階の頂点角度. 円錐を構成する各リングのスライス角度がすべてのリングで異なるため、頂点角度の段階は均一ではない。

垂直方向の変形に利用する各リングのスライス角度はすべてのリングで異なるため、頂点角度の段階は均一ではない。そのため、検出した視線方向と、10 段階の頂点角度を照合することで、必要な垂直動作を算出する処理を制御プログラムに加えた。垂直動作の際は、変形動作時と同様に、傾きモーターの逆回転を組み合わせることで、変形中の頂点方向の回転を相殺している。

これらの結果、より複雑で高度な視線追従動作の表現を、制御プログラムの変更のみで実現することができた。そのため、幾何学的な円錐の外観は、前章で制作した J.A.C. から変更する必要はなかった。

6.3.2 視線検知

視線検知システムは図 6.2 のようにカメラと PC を外部システムとして接続した。このシステムは、Linux ディストリビューションのひとつである Ubuntu 上で動作するアプリケーションとして制作した。顔検出と視線検知のための手法としてディープラーニングライブラリ OpenFace[5] を利用している。

アプリケーション内では、取り込まれたカメラ映像を毎フレームごとに OpenFace で解析し、顔検出情報と水平方向と垂直方向それぞれの視線角度情報を取得する。これらの情報は、J.A.C. Mk-II を制御するマイコン Arduino mini 上にシリアル通信で送出さる。

J.A.C. Mk-II 側の制御プログラムは、333 ミリ秒間隔でシリアル信号の確認を行い、顔検出信号を受信すると変形動作を開始する。変形動作終了後、視線角度情報を取得し、垂直方向と水平方向それぞれに対応するモーターの制御を行う。

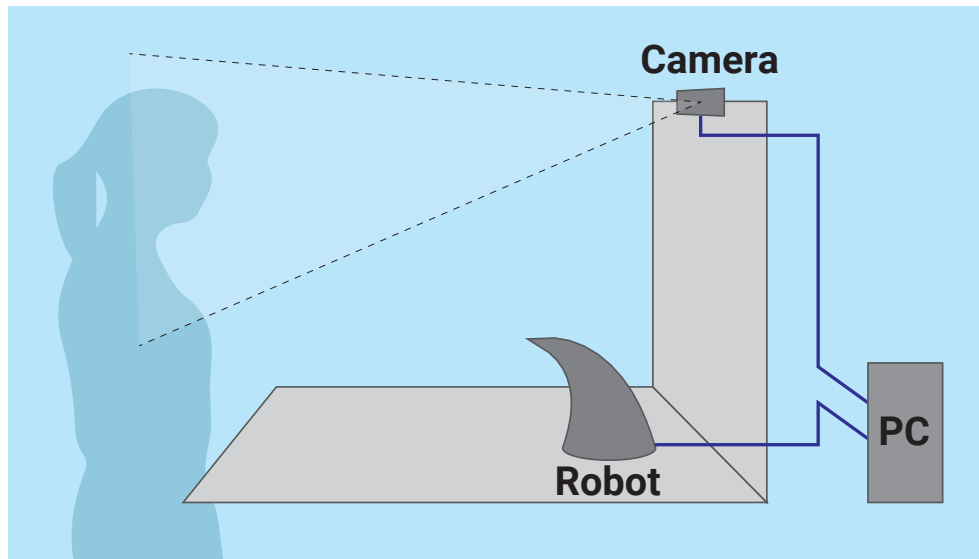


図 6.2 評価環境。視線検知システムとカメラはロボット外部に設置された。

6.4 評価実験

J.A.C.Mk-II の社会的知覚の表現である視線追従が与える印象を明らかにするために評価を行なった。この評価では、本研究の 3 つの特徴の応用展開後の、社会的知覚の表現による生物らしい印象の差を明らかにするために、比較対象として第 4 章で制作した F.o.G. Mk-II の変形後の形体を模したモデル「Sphere」と、純粋な幾何学的形体である立方体のモデル「Cube」を制作した。ただし F.o.G. Mk-II の変形後の形体を模したモデル「Sphere」と立方体の「Cube」は変形動作を行わない。

6.4.1 評価モデル

評価には図 6.3 に示した Cube, Sphere, J.A.C.Mk-II の 3 種類のロボットを使用した。名称による先入観を排除するために被験者には P, Q, R として提示した。それぞれの特徴を以下に示す。

Cube: 水平方向に回転する立方体のロボット。平面で構成され多方向に向いているため、視線の方向を想像しにくい。

Sphere: 球体の一部が平面で切り取られている形のロボット。水平方向に回転する平面によって視線の方向を表現する。

Mk-II: 円錐型ロボット。頂点が水平方向と垂直方向に動く。頂点の方向で視線の方向を表現する。

すべてのロボットは同じ視線検知システムに接続されており、実験者の視線方向に合わせて本体の向きを変える動きを行う。評価にはロボットと実験者がインタラクションしている様子を撮影した動画を使用した。動画はインタラクション開始時（開始時）、インタラクション中（途中）、インタラクション終了時（終了時）の 3 シーンに分割した。これは、



図 6.3 評価モデルと動画の一覧.

表 6.1 印象評価の形容詞対

No.	形容詞対		
1	生物らしい	-	生物らしくない
2	人間らしい	-	人間らしくない
3	人工物らしい	-	人工物らしくない
4	知的に感じる	-	知的に感じない

変形の効果と繰り返しの効果を確認するためである。さらに、純粋な幾何学的形体と最小限の記号性を持った形体の印象がどのように変化するかを確認するために、ロボットの静止画像（非稼働時）を加えた 4 種類について評価を行なった。図 6.3 に 3 つのロボットと 4 つの評価対象を示す。

6.4.2 評価項目

評価は SD 法を用いた。評価に用いた形容詞対を表 6.1 に示す。これは、第 3 章と第 4 章の評価で用いたものと同じ形容詞である。それぞれの形容詞を評価項目とし 5 段階で評価した。さらに、それぞれのロボットの印象を自由記述方式で回答してもらった。

6.4.3 被験者

被験者は 20 代から 40 代の男女 19 名（男性 15 名、女性 4 名）で、ロボットのデザインを学ぶ大学生が中心であった。彼らは、評価のために準備したサンプルを見たことがなかった。

6.4.4 評価手順

評価にはインターネット上のアンケート作成・管理サービス (Google フォーム) を用いた。被験者には評価開始前に「人と自然な対話ができる AI ロボットの外観デザインの研究である」ことを伝え、ロボットの外観の印象に対して回答してもらうよう指示した。

Figure 6.4 displays four panels of the evaluation interface for the J.A.C.Mk-II robot. Each panel shows a video frame of the robot and a set of evaluation questions with radio button responses. The questions are as follows:

- 生物らしい印象(9/12)**
 - 生物らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人間らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人工物らしい印象(機械らしさ)をどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 知覚的印象(知覚のロボットとしての知覚)を感じますか? (1 to 5 scale)
- 生物らしい印象(10/12)**
 - 生物らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人間らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人工物らしい印象(機械らしさ)をどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 知覚的印象(知覚のロボットとしての知覚)を感じますか? (1 to 5 scale)
- 生物らしい印象(11/12)**
 - 生物らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人間らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人工物らしい印象(機械らしさ)をどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 知覚的印象(知覚のロボットとしての知覚)を感じますか? (1 to 5 scale)
- 生物らしい印象(12/12)**
 - 生物らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人間らしさをどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 人工物らしい印象(機械らしさ)をどのくらい感じますか? (1 to 5 scale)
 - 知覚的印象(知覚のロボットとしての知覚)を感じますか? (1 to 5 scale)

図 6.4 評価画面

評価サイトは各サンプル毎に 12 ページに分割し、図 6.4 に示したように、それぞれのページの先頭でサンプルを提示し、その下に 4 つの形容詞と 5 段階で評価を回答するためのラジオボタンを配置した。

6.4.5 評価結果と考察

生物らしい印象について

図 6.5 はそれぞれのシーンごとにロボットの生物らしさを比較したものである。すべてのロボットが非稼働時に比べ開始時以降の動きのあるシーンで生物らしい印象が増加した。J.A.C.Mk-II は開始時 ($p=.010$)、途中 ($p=.010$)、終了時 ($p=.003$) において Cube よりも生物らしい印象が有意に強く、途中 ($p=.002$) と終了時 ($p=.001$) では Sphere よりも生物らしさが有意に強いという結果となった。この結果は J.A.C.Mk-II の視線追従の動きが影響を与えていると考えられる。これは動きの要素を確認することのできない非稼働時に J.A.C.Mk-II は Cube と Sphere 双方に対して有意差が見られない結果からも推察できる。

Cube と Sphere の開始後の生物らしい印象は共に増加しているが、開始から終了までの間変化していない。それに対して J.A.C.Mk-II の生物らしさは徐々に増加した。これは J.A.C. Mk-II の視線追従の表現が、他のモデルよりも複雑であることが関係していると考えられる。

また、非稼働時は Cube よりも Sphere の方がより高い生物らしさを得た。これは Sphere のみ純粋な幾何学的形体ではなく、球体と平面が組み合わされた形状であることが要因と考えられる。

人間らしい印象について

図 6.6 は各ロボットの人間らしさの評価結果を表したものである。ここでも、生物らしさの評価と同じように、非稼働時に比べて開始時以降全般のシーンで人間らしさが増加し

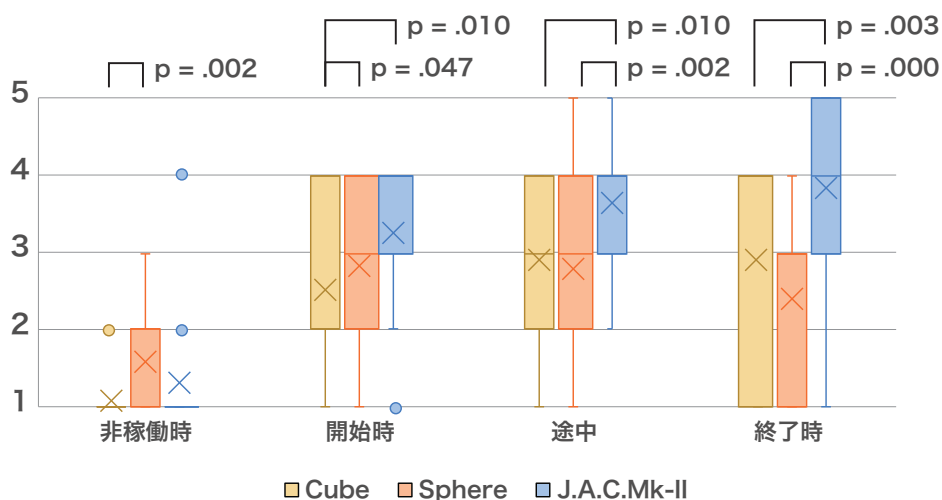


図 6.5 生物らしさの評価結果. 途中と終了時で J.A.C. Mk-II が有意に強い結果を得た.

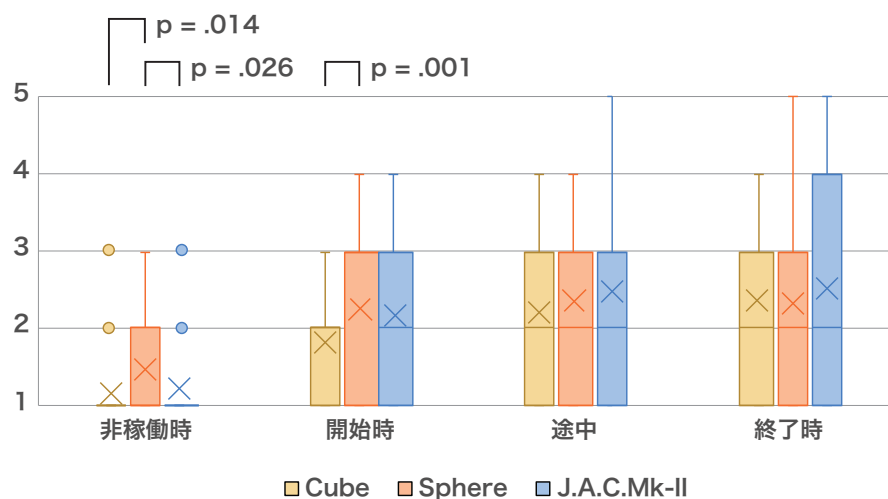


図 6.6 人間らしさの評価結果. 動きのある全てのシーンでロボット間の差はみられない.

た. 開始時以降の動きのあるシーン全般では, J.A.C.Mk-II と他のロボットとの間に人間らしさの差は見られない.

これは Mk-II の視線追従と複雑な動きがとくに Cube と Sphere と比較して擬人的に見られていないことを示している.

人工物らしい印象について

図 6.7 は人工物らしさの評価結果を示している. すべてのロボットがすべてのシーンにおいて高い人工物らしさを示した. また J.A.C.Mk-II は動きのあるシーンで人工物らしさが減少した. J.A.C.Mk-II は, 開始時 ($p=.026$), 途中 ($p=.001$) の動きのあるシーンにおいて Cube よりも人工物らしさが有意に低く, 途中 ($p=.042$) と終了時 ($p=.013$) においては Sphere よりも人工物らしさが有意に低い結果となった.

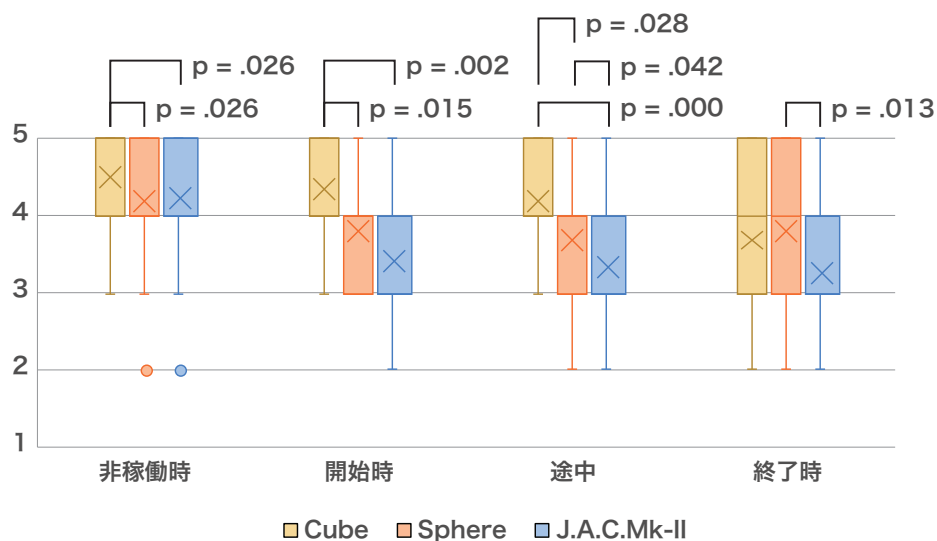


図 6.7 人工物らしさの評価結果. すべてのロボットがすべてのシーンにおいて高い人工物らしさを示した.

これは J.A.C.Mk-II の視線追従の表現か, なめらかな変形動作が, 人工物らしさの低減に影響したことが原因と考えられる.

知的な印象について

図 6.8 は知的な印象の結果をまとめたものである. すべてのロボットの知的な印象は, 非稼働時に知的な印象が低く開始時以降のシーンでは知的な印象が増加した.

非稼働時の知的な印象は Cube が一番高く, J.A.C.Mk-II が一番低くこれらの差すべてに有意差が見られた.

また, 終了時には J.A.C.Mk-II は Sphere よりも知的な印象が高く, 平均値も一番高い評価となっている. これは, 静止状態で一番低く評価されたのちに, 動きのあるシーンで視線追従や高度な動きを観察したことによって知的な印象が増加したと推察する.

さらに詳しく見ると, 静止状態と終了時の 2 つのシーンで J.A.C.Mk-II と Sphere を比較すると, 知的な印象の逆転が起こっている.

これは外見の印象とインタラクションの評価の食い違いによって起こる適応ギャップ [37] が発生している可能性も考えられる.

6.5 本章の考察

本章では, 非擬人化ロボット J.A.C.Mk-II に視線追従の表現を実装し, ロボットの生物らしさを増加させることを試みた. 評価の結果は, 視線追従表現を行なった J.A.C.Mk-II が, より強い生物らしい印象を獲得することを示した. また, 変形動作を行う J.A.C.Mk-II が変形しないロボットと比べて人工物らしい印象が減少する結果も見られた.

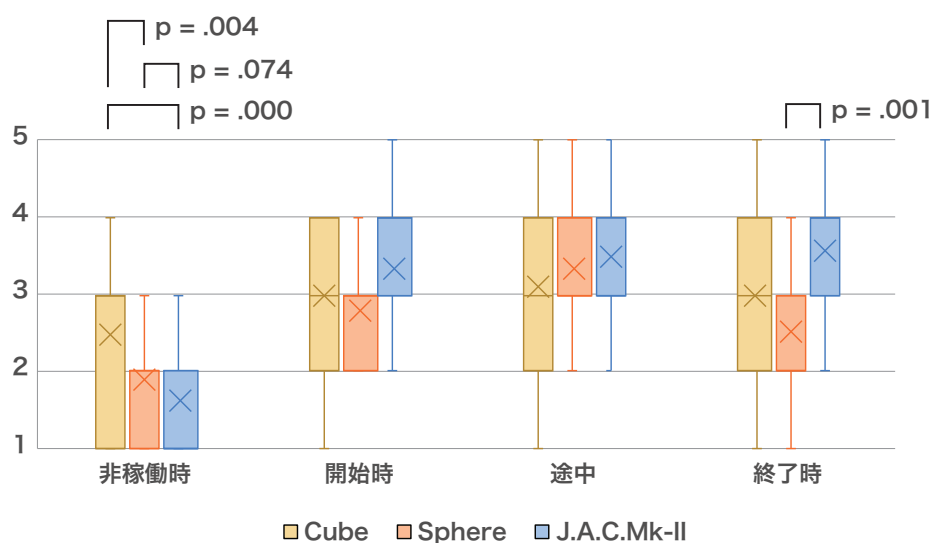


図 6.8 知的な印象の評価結果. 全てのロボットが開始時以降のシーンでは知的な印象が増加した.

6.5.1 生物らしさがない純粋な幾何学的形体

J.A.C.Mk-II は J.A.C. と同様の円錐形のロボットである. 本章で実施した印象評価の結果, 静止状態の評価は, 生物らしさ, 人間らしさ, 知的な印象はどれも低く, 人工物らしさの印象は高い結果となった. 非稼働時の生物らしさと人間らしさでは, Sphere が Cube と J.A.C.Mk-II よりも有意に高い結果を示した. この結果は, J.A.C.Mk-II は Cube と同様のレベルで生物らしくも人間らしくもないことを示しており, 生物らしさがない純粋な幾何学的形体であることを示している.

また, Sphere の非稼働時の生物らしさと人間らしさの評価が有意に高かった結果は, Sphere の形体が F.o.G. の社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体と同じで, F.o.G. のデザイン意図どおり, 生物らしい印象としての概念を想起させた可能性がある. これは第3章で明確に示せなかった, 生物らしさを示す結果と考えることができる.

6.5.2 2種類の形体を切り替えるなめらかな変形

評価実験では, 変形しない J.A.C. Mk-II 以外のロボットも含めた全てのロボットが, 非稼働時と比較して, 動きのある3つのシーン(開始時, 途中, 終了時)の生物らしさ, 人間らしさ, 知的な印象が大きく変化した. これは, 非擬人化ロボットが動きによって生物らしさを獲得することを示す HRI の先行研究から想定された結果である [31]. しかし, 非稼働時と開始時の差が, 変形する J.A.C. Mk-II の生物らしさが, 変形しない Cube と Sphere と比較して有意に高い結果となった. これは「2種類の形体をなめらかに切り替える変形」そのものも生物らしさを増加させる要因となった可能性を示している. これは第3章の F.o.G. に対するコメント分析結果からも推察されていた結果と一致する.

6.5.3 視線追従による生物らしさの増加

J.A.C.Mk-II は、視線検知システムへの接続と制御方法の変更によって、より明確な社会的知覚の表現である視線追従を実現した。印象評価の開始時、途中、終了時の一連の印象変化では、J.A.C.Mk-II の生物らしさ、人間らしさ、知的印象は増加し続け、人工物らしさは減少し続けた。一方、Sphere の生物らしさと知的印象は開始時に増加したが、途中、終了時では徐々に減少する結果となった。この結果から、視線追従動作の複雑さが、単純な左右回転だけの動きにくらべ、生物らしい印象を持続させる要因となったことが考えられる。

また、Sphere と J.A.C.Mk-II の比較を非稼働時と終了時で比較すると、生物らしさ、人間らしさ、人工物らしさ、知的印象すべてにおいて逆転現象が起こっている。非稼働時の印象は、Sphere のほうが生物らしく知的な印象を持つが、インタラクション終了後は J.A.C.Mk-II のほうが生物らしく知的な印象となった。この結果から、非稼働時の外観を比較すると、完全な幾何学的形体の J.A.C. Mk-II に対し、球体上に平面を持つ Sphere の社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体が、外観による期待を高めることに影響した可能性が考えられる。さらに、水平方向だけの視線追従動作であった Sphere の社会的知覚の表現が期待に反していたため、低評価となったと仮定すると、これは、外観への過剰な期待がインタラクション評価によって裏切られる、適用ギャップのような傾向とみなすこともできる。この結果は、本研究が提案する 2 種類の形体をなめらかに切り替える変形の有効性を示している。

6.6 本章のまとめ

本章では、視線追従を行うロボット J.A.C. Mk-II を制作した。このロボットの視線追従は前章で制作した J.A.C. に外部カメラを利用した視線検知システムを接続することで実現した。視線追従を表現するために変形動作の制御方法を変更することで、水平方向と垂直方向に頂点を傾けることが可能となった。これによって社会的知覚要素の表現をさらに高度化し、変形前後の 2 つの形体が与える生物らしい印象の差を広げることを確認することを目的とした。さらに、制作した J.A.C. Mk-II と比較評価を行うために、立方体のロボットと、球体の一部が平面であるロボット（これは第 3 章と第 4 章で制作した F.o.G. の変形後の形状である）を制作した。これら 2 つのロボットは、変形動作はなく、垂直方向の視線追従もしないものである。そしてこれら 2 つのロボットも同じ視線追従システムに接続し比較評価を行なった。

比較評価の結果、インタラクションを行わない静止状態では生物らしい印象にロボット間の差はなかったが、インタラクションの様子の観察に対する印象は、ほかの 2 つのロボットと比べ、J.A.C. Mk-II の生物らしさが高いことが示された。この結果から、J.A.C. Mk-II の視線追従のふるまいが、ほかのロボットよりも複雑で高度な追従を行なっていたことが、より高い生物らしさの獲得につながったと考えられる。また、J.A.C. Mk-II の人工物らしさは、生物らしさが増加した後に減少する結果が見られた。これは 2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形が、外部概念の影響を受けずに効果を発揮していたことを示している。

本章の比較実験に用いたロボットは全て、外部概念の利用が極端に少ない「ミニマル領域」の形体である。変形動作を行う J.A.C. Mk-II の変形動作中も、形状破綻が起こらないなめらかな変形を実現することで、外部概念の影響を受けないように配慮している。そのため、これらのロボット全てに生じた生物らしさは、抽象的な形体の動きや振る舞いによって生じたものである。この結果は、本研究が提案する3つの特徴を持つロボットが、異なる形体や、異なる変形機構、異なる社会的知覚の表現に応用展開可能であり、それによって、生物らしさがいない状態と生物らしさが増加した状態の差を広げられることを示している。

本章で制作した3つのロボットは全て同じ視線検知システムに接続されていたため、視線追従性能の差はない。また、ロボットを水平方向に回転させるステッピングモーターと制御プログラムも同等のものを使用しているため、視線追従の性能に差はない。そのため、ロボット間の印象の差は非稼働時の形体、変形の有無、垂直方向の追従動作の3点によって生じたものと考えられる。しかし、評価実験は実験者とロボットのインタラクションを撮影したものをを用いているため、被験者との直接的なインタラクションの結果生じた印象とは異なる。実験に用いた動画内の実験者の動作についても完全に同じものではないため、動画内のロボットの反応回数等にばらつきがあるものであったことも、印象評価に影響した可能性がある。これらに対して詳細な評価を行う場合、直接的なインタラクションの実現や、タスクの設定など、多角的な評価方法を検討することが望ましいと考える。

第 7 章

考察

本研究は、外部概念の利用が極端に少ない形体と生物らしい印象を利用することで、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性を両立する非擬人化ロボットを実現するために、以下の 3 つの特徴を提案した。

特徴 1 生物らしさが無い純粋な幾何学的形体

特徴 2 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体

特徴 3 2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形

本章では、はじめに、第 3 章から第 6 章の各章で制作した非擬人化ロボットに対し、この 3 つの特徴の効果について、「家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立」と「2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形」の視点から考察を述べる。

7.1 家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立

7.1.1 生物らしさが無い純粋な幾何学的形体

本研究では、家庭内環境との調和を実現するために、非擬人化ロボットの非稼働時の形体を純粋な幾何学的形体とした。第 3 章と第 4 章で制作した F.o.G. と F.o.G. Mk-II は球体、第 5 章と第 6 章で制作した J.A.C. と J.A.C.Mk-II は円錐である。

非稼働時に生物らしさが低いことは家庭内環境との調和の実現につながるため、各非擬人化ロボットの評価では生物らしい印象について調べた。

第 3 章では、F.o.G. の変形前の球体と変形後の平面が加えられた形体の生物らしい印象が低い結果を得た。さらに、この評価では、擬人化要素が加えられたモデルとの比較を行なった。その結果、擬人化要素が加えられたモデルの生物らしい印象が高く、擬人化要素のないモデルの生物らしい印象が低い結果を得た。擬人化要素の有無を比較することで、外部概念の利用が極端に少ない形体が、生物らしい印象が低く、家庭内環境との調和に適していることが示された。

第 6 章の J.A.C. Mk-II を用いた評価では、J.A.C. Mk-II の非稼働時の形体 (円錐) に対する生物らしい印象が低い結果を得た。それに加え、同時に評価した立方体のモデルも非稼働時は生物らしい印象が低い結果を得た。これらの結果からも、円錐や立方体といった純粋な幾何学的形体の生物らしい印象が少ないことが明らかになった。

本研究では、非擬人化ロボットを非稼働時に家庭内環境と調和させるために、生物らしさを感じさせないことを意図して形体を選択した。本研究で制作した2種類のロボットの非稼働時の形体が、生物らしさを感じさせない結果を示したことで、純粋な幾何学的形体の利用の有効性を示すことができた。

家庭内環境と調和する形体は純粋な幾何学的形体以外にも多数存在すると考えられる。また、家庭内環境との調和のためにどの程度生物らしさを低くする必要があるかについては、そのロボットに求められる要件によって異なる。本研究は、極端に生物らしさが少ない形体を用いることで、これらの応用展開に対応するひとつの指標を示した。この結果をもとに、創作者の創意工夫によって審美性の高い抽象形体などに応用展開されることが考えられる。

7.1.2 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体

本研究では、制作した非擬人化ロボットを変形させることで社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体に変化させ、さらに社会的知覚を動きで表現した。その形体と表現を以下に示す。

第3章と第4章で制作したF.o.G.とF.o.G. Mk-IIは球体の一部に顔を想起させることを意図した平面を加えた形体で、F.o.G. Mk-IIは左右回転によって平面の向きを変える動きを表現した。第5章と第6章で制作したJ.A.C.とJ.A.C.Mk-IIは視線の方向を想起させること意図した先端の傾きを持った円錐で、水平回転または垂直方向の傾きによって先端の向きを変える動きを表現した。これらの記号性を持つ形体と表現によって、社会的インタラクションの親和性を向上させることを目的とした。生物らしさが増加することは社会的インタラクションの親和性の向上につながるため、各非擬人化ロボットの評価で生物らしい印象について調べた。

第4章ではF.o.G.とF.o.G. Mk-IIの比較評価を行い、変形動作だけのF.o.G.に対して社会的知覚の表現を加えたF.o.G. Mk-IIの生物らしい印象の増加が見られた。この結果は、F.o.G. Mk-IIの左右回転による自律動作が生物らしい印象を増加させたことを示している。

第6章ではJ.A.C. Mk-IIの比較対象として用いた変形後のF.o.G.と同じ形体のロボットの、非稼働時に対する生物らしい印象が、純粋な幾何学形体のロボットと比較し有意に高い結果が見られた。この結果は、最小限の記号性を持つ形体そのものも生物らしい印象の増加に寄与する可能性を示している。

この結果から、最小限の記号性を持つ形体と、その形体による社会的知覚の表現それぞれが、生物らしさの増加に寄与していると推察される。本研究で制作した非擬人化ロボットが、変形後の形体と動きによって、生物らしさの増加させた結果は、1台の非擬人化ロボットで、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立が可能であることを示している。

7.1.3 社会的知覚の表現による生物らしさの変化

ここまでの考察で、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立を、「生物らしさがない状態」と「生物らしさが増加した状態」の差によって評価した。本研

究ではさらに、社会的知覚の表現を変化させることで、生物らしい印象の差を広げることを試みた。それぞれの非擬人化ロボットによる社会的知覚の表現は次の通りである。第3章の F.o.G. は顔要素の出現 (変形のみ)。第4章の F.o.G. Mk-II は左右回転による自律動作の表現。第5章の J.A.C. は円錐の先端部を傾けた状態で左右回転する相互注視の表現。第6章の J.A.C. Mk-II では円錐の先端部の上下への傾き変化と左右回転による視線追従の表現。

第4章では F.o.G. に左右回転による自律動作の表現を加えた F.o.G. Mk-II の生物らしい印象が増加した。

第5章では、J.A.C. の印象に対するコメントを KJ 法で分類し Dennett の志向スタンスによって評価した結果、F.o.G. に対する印象に比べ J.A.C. を志向的構えで捉えたコメントの大幅な増加が見られた。

第6章では、J.A.C. Mk-II の視線追従の表現が、比較対象に含まれる F.o.G. の変形後の形体で左右回転する F.o.G. Mk-II 相当のロボットと比較して、生物らしい印象が強い結果を示した。

これらの結果から、表現する社会的知覚によって生物らしい印象の強さが異なることは明らかである。第4章の比較で用いた F.o.G. と F.o.G. Mk-II の動きの自由度の差は 1DoF、第6章の比較で用いた F.o.G. Mk-II と J.A.C. Mk-II の動きの自由度の差も 1DoF であることから、表現に用いる動きの自由度の増加が生物らしい印象の増加に影響を与えている可能性も考えられる。

第5章で比較した F.o.G. と J.A.C. の志向スタンスによる分類結果からは、2つのマイクによって音源を推定する F.o.G. に対し、7つの赤外線センサーによって人位置を推定する J.A.C. の志向的構えへの分類が多くなったことは、外部情報に対する反応の正確さや直接的なインタラクションをおこなっている印象なども、影響を与える可能性がある。

本研究は、家庭内環境との調和を意図する形体では生物らしさがない状態を意図し、社会的インタラクションの親和性を高める形体では生物らしい印象を増加させることを意図している。上記の結果は、本研究のこの2つの形体を切り替える方法によって、これらの生物らしい印象の差が小さいものから大きいものまで、様々な組み合わせに対応できる応用展開の幅の広さを示している。

本研究で扱った社会的知覚の効果は、それを表現する非擬人化ロボットの形体や動きと密接に関わっていることは明らかである。そのため、非擬人化ロボットに要求される生物らしさのレベルを達成する、これらの組み合わせには創意工夫が必要となることは今後の応用展開における課題である。

7.2 2種類の形体を切り替えるなめらかな変形

7.2.1 2種類の形体の切り替え

本研究で制作した非擬人化ロボットは、家庭内環境との調和を目的とした形体と、社会的インタラクションの親和性を目的とした形体を切り替えるために、なめらかな変形を行う。本章ではこれまで、それぞれの目的に対しては、生物らしい印象の評価によって考察を行なった。2種類の形体を切り替えるなめらかな変形によって、人工物らしさが増加せず生物らしさが増加することは、変形そのものが意図しない印象を与えていないこと

を示し、本研究の目的である上記2種類の状態の両立につながる。

第6章のJ.A.C. Mk-IIの評価では、変形動作を含む開始時の生物らしい印象が非稼働時より増加した。さらに、開始時時の人工物らしさは非稼働時から減少する結果となった。

第3章のF.o.G.に対するコメントには、変形機構に対して「不思議」や「わからない」といった内容が多く見られた。

これらの結果からは、本研究の非擬人化ロボットが2種類の異なる形体を切り替える際に、変形動作や変形機構による機械的な印象を与えていないことが推察される。

異なる形体と印象を切り替えて、非擬人化ロボットに利用する試みはこれまで先行事例はない。第3章や第5章の非擬人化ロボットの印象に対するコメントでは、変形による切り替えそのものが注目されることが多かった。それにもかかわらず、この機構のメカニズムが、人工物らしい印象を増加させることなく、生物らしい印象を与えた結果は、本研究で開発した変形機構が、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立に有効であることを示している。

7.2.2 なめらかな変形自体の生物らしさ

本研究で実施した評価から得られた別の知見は、なめらかな変形の動き自体が生物らしい印象を増加させる可能性を有していることである。

第3章のF.o.G.の印象に対するコメント分析の結果からは、生物らしい印象が、なめらかな変形の動きによって生じたことが示唆された。F.o.G.の社会的知覚の表現は顔を想起させる平面を生じさせることのみであり、F.o.G. Mk-IIのような動きによる表現を行わない。そのためF.o.G.のコメント分析結果は、変形の動きそのものが生物らしい印象を与えることを示している。

第6章のJ.A.C. Mk-IIの評価では、開始時の生物らしさは、変形動作があるJ.A.C. Mk-IIが変形動作のない他の2モデルと比較し、最も高い結果を示した。また、人工物らしさも変形動作があるJ.A.C. Mk-IIが、変形動作のない他の2モデルと比較し最も低い結果を示した。これらの結果は、変形動作自体が生物らしさを持つことと関連している可能性がある。

7.2.3 なめらかな変形を実現する機構

本研究では2種類のなめらかな変形を実現する機構を開発した。

第3章のF.o.G.で考案した機構は、変形する部品を細分化しそれぞれの相対的な移動量を極小とすることで、変形動作の形体的ななめらかさを実現した。それぞれの部品には動力を連鎖的に伝えることで、時間的ななめらかさも実現している。

第5章のJ.A.C.ではF.o.G.の機構をもとに、異なる形体への応用展開が可能であることを示した。F.o.G.の変形機構は水平方向に部品を重ねる構造であったが、J.A.C.はそれを垂直方向に積み上げることで円錐の稜線の変形を実現した。

この変形機構は、外形パーツ自体に機構構造を組み込むため、内部空間を広く確保できる。さらに、動きを連鎖する方式を採用することで、単一のアクチュエーターによる変形動作が可能である。この特徴は、シンプルで合理的な構造が要求される、ミニマル領域の非擬人化ロボットに適していると考えられる。

しかし、本研究で開発した構造はすべて回転による変形動作であるため、変形を進めるための機構部品の形体は円形である必要がある。これは、その他の非擬人化ロボットの形体を考える際に制約となる可能性がある。

第 8 章

結論

8.1 結論

8.1.1 各章のまとめ

本研究は、外部概念の利用が極端に少ない形体と生物らしい印象を利用することで、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性を両立する非擬人化ロボットの実現を目的とした。

第 1 章では、多様化する家庭用ロボットの用途と、知的エージェントなどのインタラクション手段の進化から、ロボットのありかたが従来から変化しはじめていることについて述べた。次に家庭用ロボットに多く用いられる擬人化デザインの効果と課題について整理し、擬人化がもたらす過剰な期待や、非稼働時の家庭内環境との調和といった課題を明らかにした。そして、それらを解決する非擬人化デザインの利点をまとめ、先行研究では解決できていない課題を明らかにした。その上で、本研究が対象とする研究領域を示し、研究の目的について説明した。さらに、その目的を実現するロボットの特徴を以下の 3 つにまとめた。

特徴 1 生物らしさが無い純粋な幾何学的形体

特徴 2 社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体

特徴 3 2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形

第 2 章では、本研究の目的を実現する対象領域と手法に関連する先行研究をまとめた。はじめに擬人化デザインの効果と課題に関する先行研究を整理した。次に、それらを解決する非擬人化ロボットの先行研究について、特徴的な非擬人化ロボットの種類ごとに効果と課題を整理した。それにより、本研究の 3 つの特徴が先行研究では解決できない新規性を有していることを示した。

第 3 章では、なめらかに変形して平面が合われる球体型ロボット F.o.G. を制作した。生物らしさが無い純粋な幾何学的形体として球体を選択し、社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体に、顔を想起させる平面を球体に加えたミニマル領域の形体を考案した。さらにこれら 2 種類の形体を切り替えるなめらかな変形を実現するあらたな変形機構を開発し、複数回にわたるプロトタイピングを経て、本研究が提案する 3 つの特徴を有する非擬人化ロボットを完成させた。展示会で収集したこの非擬人化ロボットの印象に対する 100 件のコメント分析からは、なめらかな変形のうごきによって生物らしい印象を与え

る可能性が見られ、開発した変形機構の有用性を明らかにした。さらに、この非擬人化ロボットの2つの形体の静止画を用いた印象評価の結果は、どちらも低い生物らしさを示し、擬人化要素を含む比較対象との差からも、外部概念の利用が極端に少ないミニマル領域が、非稼働時に生物らしい印象を持たないことを明らかにした。

第4章では前章で制作したF.o.G.に社会的知覚の表現を追加したF.o.G. Mk-IIを制作した。この非擬人化ロボットは、音に反応して左右回転を行う機構を追加することで、社会的知覚として自律動作を表現するものであった。F.o.G.とF.o.G. Mk-IIが与える印象の比較評価の結果、この非擬人化ロボットに加えられた社会的知覚の表現によって、生物らしい印象が増加する結果を得た。また、この非擬人化ロボットに使われている変形機構の特徴である、外形部品を利用した変形機構によって内部空間を広く確保できたことが、F.o.G. Mk-IIの回転機構の追加を可能とした。これは、この変形機構がミニマル領域の形体に求められる、シンプルで合理的な機構という要件を満たすことが可能であることを示した。

第5章では、円錐形の非擬人化ロボットJ.A.C.を制作した。F.o.G.の球体とは異なる形体と変形機構を開発し、異なる社会的知覚の表現によって、本研究が提案する3つの特徴の応用展開の可能性を示した。この非擬人化ロボットは、F.o.G.の水平方向に構成されていた変形機構を垂直方向に再構成することにより、円錐の変形を実現した。変形後の形体では、相互注視の表現として人の位置を検知し頂点の向きを変える動作を行なった。この非擬人化ロボットの印象に対する70件のコメントから、Dennettの志向スタンスによる分類では志向的構えとして捉えたコメントがF.o.G.よりも大幅に増加したことが明らかになった。また、共起分析からは生物らしい印象のほかに、意図や意思といった印象を与えていることが明らかになった。この結果から、提案する3つの特徴が応用展開可能であり、同じ特徴を利用しながらも、社会的知覚の表現を変更することで、異なる印象を与えられることを示した。

第6章では、前章で制作したJ.A.C.の社会的知覚の表現を高度化し、視線追従を行う円錐型のロボットJ.A.C. Mk-IIを制作した。この非擬人化ロボットは、J.A.C.の水平方向の回転動作に垂直方向の傾き動作を追加し、外部に接続された視線検知システムから得たユーザーの注視方向に先端を向ける動作を行うものであった。この非擬人化ロボットに加え、変形動作を行わない立方体のロボットと、F.o.G.の変形後の形状と同じ球体に平面を持つロボットを制作し、3種類のロボットによる比較評価を行なった。その結果、すべてのミニマル領域の形体を持つこれらのロボットが非稼働時に生物らしい印象を持たないことが再度確認された。これは家庭内環境との調和を目的とする純粋な幾何学的形体の利用の効果であると考えられる。また、J.A.C. Mk-IIの社会的知覚の表現は、F.o.G.の表現よりも生物らしい印象が高い結果を得た。これは、本研究の同じ枠組みを使った非擬人化ロボットで、社会的知覚の表現の種類によって生物らしい印象の強さを変化させることが可能であることを示している。さらに、F.o.G. Mk-IIのなめらかな変形に対して生物らしい印象が増加し人工物らしい印象が減少するという結果が見られた。この結果から、2種類の形体を切り替えるなめらかな変形が、家庭内環境との調和や社会的インタラクションの親和性に有効な生物らしい印象を妨げていないことが示された。

第7章では、3～6章の研究結果から、本研究の目的に対して提案する3つの特徴の有効性について、包括的な考察を述べた。非稼働時の生物らしさの低さと、変形後の表現動作による生物らしさの増加を示す結果から、1台の非擬人化ロボットが「生物らしさがない

「純粋な幾何学的形体」と「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」の2つの形体を有することで、家庭内環境との調和と社会的インタラクションの親和性の両立が可能であることを示した。また、本研究の3つ特徴を有する非擬人化ロボットは、変形前の形体の低い生物らしさを保ったまま変形後の形体の生物らしい印象の強さを変えることができることから、この枠組みを応用展開する用途の広さを示した。さらに、2種類の形体を切り替えるなめらかな変形が自然な印象の変化を実現している可能性について述べた。最後に、この新規性のある変形機構が応用展開可能であることに加え、シンプルで合理的な機構を求められるミニマル領域の非擬人化ロボットへの利用に適していることを示した。

8.1.2 本研究の貢献

本研究の貢献は、純粋な幾何学的形体を用いた非擬人化ロボットによる先行研究[26][50][70][17]では難しかった、動きによる表現に対する解釈の一貫性の確保を、最低限の記号性を持つ形体への変形によって解決できることを示したことである。それに加え、最小限の記号性を持つ形体の非擬人化ロボット[31][80][3][83]の課題であった、非稼働時の家庭内環境との調和についても、変形によって純粋な幾何学的形体に戻り、生物らしい印象を減少させることで解決したことである。

これら一連の結果と考察を踏まえ、本研究の目的である家庭内環境との調和と「社会的インタラクションの親和性」を両立する新しい非擬人化ロボットの実現は達成できたと考える。

8.2 今後の課題と展望

8.2.1 本研究の制約

本研究の制約としては、先行研究の多くが社会的インタラクションのタスク達成によって非擬人化デザインの効果を研究しているのに対し、本研究は、非擬人化ロボットのデザイン手法の可能性としての基本的な特徴を探求するために、ロボットの形体と動きの表現から生物らしい印象を評価しているため、先行研究のようなより具体的なタスクに対する有効性については明らかにできていないことである。また、非擬人化ロボットの印象に対するコメント分析は、実空間でロボットと対面し、一部の環境ではインタラクションが可能であったものの、いくつかの評価では動画を用いたオンライン評価であったため、それらの環境の違いが結果に影響を与えた可能性がある。さらに本研究の評価は日本国内の居住者が被験者であり、ロボットの形体や社会的知覚の表現に対する印象の国や文化による違いについては検証できていないことも、結果の考察に対して注意が必要な点である。

8.2.2 ミニマル領域のロボットデザイン手法

本研究の3つの特徴のうち、特徴1の「生物らしさが無い純粋な幾何学的形体」と特徴2の「社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体」の2つの形体は、ともにシンプルな形体である。そのため本研究で提案した手法が、ロボット開発者に特別な外形に対するデザインスキルがなくても利用可能なデザイン手法として、一般化できる可能性が高

い。社会的知覚を表現する最小限の記号性を持つ形体の創出には、多少の検討が必要となることが考えられるが、本研究で示した形体のほか、Anderson-Bashan や Zuckerman, Hoffman らによる先行研究で使われているシンプルな形体の非擬人化ロボットの形体が持つ記号性を参考にすることで、ロボットの用途に合った形体を考案することも可能である [3][83][31]。しかし、2種類の形体を切り替えるなめらかな変形については、本研究で開発した機構の応用展開のほか、別の方式による変形の研究が必要である。

8.2.3 なめらかな変形の応用と展望

本研究は、なめらかな変形によって、人工物らしさから生物らしさへ、自然に印象を変化させることができることを示した。これによってデザイナーがロボットに対する印象の変化を意図的にコントロールする可能性を示すことができた。この印象の意図的な操作は、非擬人化ロボットのデザイン領域を拡大する要素となると考えられる。

なめらかな変形で重要なのは変形時に、機構部品やアクチュエーター、あるいは生物を想起させるような皺や膨らみといった外部概念による影響を排除することである。本研究で提案した変形機構は、ロボットの外観を形作る外形パーツ自体に変形機構を実装し、変形時に各パーツの変化量を少なくし、全ての変化量を積算することで全体として大きな変化を起こす設計を行なった。それによって、外観に形状破綻や視覚的ノイズが極小となるような変形動作を実現した。

この変形の特徴は、ユーザーの目前で、速度に関わらず変形動作を行うことができることである。変形自体に注目させるデザインは、ロボットの印象を変化させるのに有用であることは、本研究の結果から明らかである。それによって、ユーザーのロボットに対するコミュニケーション戦略を明示的に変化させることができるため、抽象的な表現であっても、インタラクションの設計意図に合致する結果を得る確率が高くなることが期待される。

本研究で考案した変形機構はひとつの解決策に過ぎず、今後様々な用途に合わせた機構が研究される必要があると考える。また、本研究は対象とする造形要素を形と動きに限定しているが、外部概念の影響という面では、音などのロボットの運動で必ず発生するその他の要素についても研究が必要である。

8.2.4 生物らしさの一時的な増加と減少

なめらかな変形によって生じた生物らしさは、一時的に生物らしい印象が高まり、初期状態に戻ればまた生物らしい印象は低下する可能性がある。第6章で実施した J.A.C.Mk-II の評価結果で見られた、静止状態と開始時の間の大幅な生物らしさの増加は、生物らしさを瞬間的に獲得したことを示している。J.A.C.Mk-II と比較した F.o.G. 同等の外観を持つ Sphere は、静止状態と開始時の間の生物らしさの増加を示したが、終了時に生物らしさが減少した。この現象から、瞬間的に獲得したわずかな生物らしさがインタラクションの終了と共に消滅する可能性を示している。上記の結果は、外部概念を含まない幾何学的形体は、なめらかな変形によって社会的知覚要素を加えることでわずかな生物らしさを瞬間的に獲得し、社会的知覚要素を取り除くことで、わずかな生物らしさを消滅させることができる特徴がある可能性を示している。

このように、印象の変化をロボットデザインの要件に組み込むことは、人とロボットの関係性を広げる可能性を持っている。実用的な視点からは長期的にこの現象が毎回再現されるかが重要となる。本研究内ではこの現象の再現性については検証を行っていない。しかし、掃除ロボットに関連する研究で報告された、非擬人化ロボットを社会的対象と捉える現象は、稼働状態と非稼働状態が日常的に繰り返される中で生じていることを考慮すると [35][22][65]、長期的な視点から、生物らしさを活用できる可能性も考えられる。

8.2.5 ロボットデザインのプロセス

ミニマル領域のデザインには装飾的な造形要素がなく、機構的な要素も極力排除する必要があるため、Hoffman が主張するように、早期から機構と表現を同時に検討する手法は重要である [31]。本研究では、ロボット研究にプロトタイピング手法を用いることで、ミニマル領域の繊細な表現から受ける印象の違いなどを意識したデザインが実現した。第3章から第6章で制作した合計4種類のロボットは、アイデア創出と具現化と評価を短期間で繰り返すことで理解を深めることのできるプロトタイピング手法を用いた。F.o.G. と J.A.C. の初期検討はアイデアスケッチによる機構検討と、CG を使った変形による印象変化の確認を並行して行った。求める表現と実現方法を同時に検討することで実現性の高い機構アイデアに収束させることができた。次の段階では3D プリンターを使用し、機構部分の動作検討モデルを繰り返し作成した。このプロセスでは機構の有効性の確認だけでなく、精度や仕上げに関しても確認を繰り返し、設計の見直しや造形方式の変更を行なった。このプロセスは、基本的な変形機構の動作検証から、印象を左右する美的要素や精度の検討まで、発散と収束を繰り返すことで理想的な最終形状を探索し、完成度を高めるために有効であった。

8.2.6 インタラクティブ展示とアンケートによる質的評価

本研究で制作した F.o.G. と J.A.C. はさまざまな展示会に出展し、多くの人々からコメントを得ることができた。これは先行研究に見られるような、評価実験のためのロボット制作とは異なるアプローチである。本研究内で分析したコメントは、F.o.G. が 100 件、J.A.C. が 70 件であり質的評価を行うには十分なデータとなった。しかし、展示会の環境は厳密な評価環境とはことなり、展示会自体が発する問題提起やメッセージなどがバイアスとなることは十分に考慮する必要がある。そのため本研究ではコメントのテキスト分析には統計的な手法を用いると同時に、追加の評価実験を実施した。

また、プロトタイプロボットを展示会に出展する際に課題となるのは、機構やシステムの耐久性である。本研究で制作したロボットは、F.o.G. は「TREASURE HUNTING 2」9 日間と「Parametric Move 動きをうごかす展」10 日間の合計 19 日間、F.o.G. Mk-II は Ars Electronica Festival 5 日間と、「もしかする未来 工学×デザイン」9 日間の合計 14 日間、J.A.C. は「ぞわぞわ」展の 10 日間、というように長期間の展示会に多数出展した。展示会場の環境に合わせたセンサー類の最適化をはじめ、期間中に発生するさまざまな問題への対応を行ったが、F.o.G. と J.A.C. の変形機構に関しては、1 台のアクチュエーターを利用したシンプルな回転運動で実現しているため比較的耐久性に優れていることが示された。この少ないアクチュエーターによる動作や、シンプルな制御は、本研究で

提案した変形機構の利点である。

8.2.7 現実世界と仮想世界を融合する装置としてのロボット

ロボットとのインタラクションを研究する上で、仮想世界のエージェント研究と分けて考えることはできない。特に近年の XR と呼ばれる現実世界と仮想世界の融合に関する研究では、VR や AR ゴーグルなどの装置を利用すれば、CG のロボットを現実世界に重畳表示することによって存在させることが可能である。近年のロボットも AI エージェントやクラウドサービスと接続しながら利用されていることを考慮すると、ロボットも VR や AR ゴーグル同様、仮想世界と現実世界を融合する装置と定義できる。本研究で示したコンセプトを CG やアニメーションの世界で再現することは難しいものではなく、モーフィング技術を利用したなめらかな変形は一般に広く知られている。現実世界と仮想世界を融合する装置という観点からも、本研究で提案したロボットの形体や変形機構のような、従来の方式にとらわれない柔軟なアプローチを行うことで、新しい領域の可能性が広がると考える。

参考文献

- [1] Henny Admoni and Brian Scassellati. Social eye gaze in human-robot interaction: a review. *Journal of Human-Robot Interaction*, Vol. 6, No. 1, pp. 25–63, 2017.
- [2] Amazon. Amazon Lex. <https://aws.amazon.com/jp/lex/>.
- [3] Lucy Anderson-Bashan, Benny Megidish, Hadas Erel, Iddo Wald, Guy Hoffman, Oren Zuckerman, and Andrey Grishko. The greeting machine: an abstract robotic object for opening encounters. In *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 595–602. IEEE, 2018.
- [4] Yoshiyuki Ariga, Shigeru Furuya, and Yoshiaki Kudo. Requirement for a robot that gives affinity expressing personification by. In *PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE OF JSSD THE 53rd ANNUAL CONFERENCE OF JSSD*, pp. 135–135. Japanese Society for the Science of Design, 2006.
- [5] Tadas Baltrusaitis, Amir Zadeh, Yao Chong Lim, and Louis-Philippe Morency. Openface 2.0: Facial behavior analysis toolkit. In *2018 13th IEEE international conference on automatic face & gesture recognition (FG 2018)*, pp. 59–66. IEEE, 2018.
- [6] Christoph Bartneck, Dana Kulić, Elizabeth Croft, and Susana Zoghbi. Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots. *International journal of social robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 71–81, 2009.
- [7] Christoph Bartneck, Michel van der Hoek, Omar Mubin, and Abdullah Al Mahmud. “daisy, daisy, give me your answer do!” switching off a robot. In *2007 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 217–222, 2007.
- [8] Mason Bretan, Marcelo Cicconet, Ryan Nikolaidis, and Gil Weinberg. Developing and composing for a robotic musician using different modes of interaction. In *ICMC*, 2012.
- [9] Allison Bruce, Illah Nourbakhsh, and Reid Simmons. The role of expressiveness and attention in human-robot interaction. In *Proceedings 2002 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 02CH37292)*, Vol. 4, pp. 4138–4142. IEEE, 2002.
- [10] Karel Čapek. *RUR (Rossum’s universal robots): a fantastic melodrama*. Garden

- City, NY: Doubleday, Page, 1923.
- [11] Justine Cassell. Embodied conversational interface agents. *Communications of the ACM*, Vol. 43, No. 4, pp. 70–78, 2000.
 - [12] Chris Chesher and Fiona Andreallo. Robotic faciality: The philosophy, science and art of robot faces. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 13, No. 1, pp. 83–96, 2021.
 - [13] Daniel Clement Dennett. *The intentional stance*. MIT press, 1989.
 - [14] Carl F DiSalvo, Francine Gemperle, Jodi Forlizzi, and Sara Kiesler. All robots are not created equal: the design and perception of humanoid robot heads. In *Proceedings of the 4th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques*, pp. 321–326, 2002.
 - [15] Carl DiSalvo and Francine Gemperle. From seduction to fulfillment: the use of anthropomorphic form in design. In *Proceedings of the 2003 international conference on Designing pleasurable products and interfaces*, pp. 67–72, 2003.
 - [16] Brian R Duffy. Anthropomorphism and the social robot. *Robotics and autonomous systems*, Vol. 42, No. 3-4, pp. 177–190, 2003.
 - [17] Anthony Dunne and Fiona Raby. Technological dreams series: No.1, robots., 2007.
 - [18] Nathan J Emery. The eyes have it: the neuroethology, function and evolution of social gaze. *Neuroscience & biobehavioral reviews*, Vol. 24, No. 6, pp. 581–604, 2000.
 - [19] Julia Fink. Anthropomorphism and human likeness in the design of robots and human-robot interaction. In *International Conference on Social Robotics*, pp. 199–208. Springer, 2012.
 - [20] Julia Fink, Séverin Lemaignan, Pierre Dillenbourg, Philippe Rétoznaz, Florian Vaussard, Alain Berthoud, Francesco Mondada, Florian Wille, and Karmen Franinović. Which robot behavior can motivate children to tidy up their toys? design and evaluation of “ranger” . In *2014 9th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 439–446, 2014.
 - [21] Brian J Fogg. Persuasive technology: using computers to change what we think and do. *Ubiquity*, Vol. 2002, No. December, p. 2, 2002.
 - [22] Jodi Forlizzi. How robotic products become social products: An ethnographic study of cleaning in the home. In *2007 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 129–136, 2007.
 - [23] Jodi Forlizzi. How robotic products become social products: an ethnographic study of cleaning in the home. In *2007 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 129–136. IEEE, 2007.
 - [24] J. Goetz, S. Kiesler, and A. Powers. Matching robot appearance and behavior to tasks to improve human-robot cooperation. In *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003.*, pp. 55–60, 2003.
 - [25] Susan Goldin-Meadow. The role of gesture in communication and thinking.

- Trends in cognitive sciences*, Vol. 3, No. 11, pp. 419–429, 1999.
- [26] John Harris and Ehud Sharlin. Exploring the affect of abstract motion in social human-robot interaction. In *2011 Ro-Man*, pp. 441–448. IEEE, 2011.
- [27] Fritz Heider and Marianne Simmel. An experimental study of apparent behavior. *The American journal of psychology*, Vol. 57, No. 2, pp. 243–259, 1944.
- [28] James D. Herbsleb. Metaphorical representation in collaborative software engineering. In *Proceedings of the International Joint Conference on Work Activities Coordination and Collaboration*, WACC '99, p. 117–126, New York, NY, USA, 1999. Association for Computing Machinery.
- [29] 樋口耕一. 社会調査のための計量テキスト分析—内容分析の継承と発展を目指して【第2版】 KH Coder オフィシャルブック. ナカニシヤ出版, 2020.
- [30] Manfred Hild, Mitsuru Muramatsu, and Shunji Yamanaka. Apostroph. <https://starts-prize.aec.at/en/apostroph/>, 2016.
- [31] Guy Hoffman and Wendy Ju. Designing robots with movement in mind. *J. Hum.-Robot Interact.*, Vol. 3, No. 1, p. 91–122, February 2014.
- [32] Aike C Horstmann, Nikolai Bock, Eva Linhuber, Jessica M Szczuka, Carolin Straßmann, and Nicole C Krämer. Do a robot's social skills and its objection discourage interactants from switching the robot off? *PloS one*, Vol. 13, No. 7, p. e0201581, 2018.
- [33] 井上正明, 小林利宣. 日本における sd 法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観. *教育心理学研究*, Vol. 33, No. 3, pp. 253–260, 1985.
- [34] 入鹿山剛堂. 暮らしの中で活躍する ai とロボット : 1. 暮らしの中のロボット・ai - 家庭用ロボットの現状と将来-. *情報処理*, Vol. 59, No. 8, pp. 686–691, 2018.
- [35] Leander Kahney. The new pet craze: Robovacs. <https://www.wired.com/2003/06/the-new-pet-craze-robovacs/>, 2003.
- [36] Paul Klee. 造形思考. 筑摩書房, 2016.
- [37] Takanori Komatsu and Seiji Yamada. Adaptation gap hypothesis: How differences between users' expected and perceived agent functions affect their subjective impression. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, Vol. 9, No. 1, pp. 67–74, 2011.
- [38] Hideki Kozima, Marek P Michalowski, and Cocoro Nakagawa. Keepon: A playful robot for research, therapy, and entertainment. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–18, 2009.
- [39] Minae Kwon, Malte F Jung, and Ross A Knepper. Human expectations of social robots. In *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 463–464. IEEE, 2016.
- [40] Hee Rin Lee and Selma Šabanović. Culturally variable preferences for robot design and use in south korea, turkey, and the united states. In *2014 9th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 17–24. IEEE, 2014.
- [41] Hagen Lehmann, Joan Saez-Pons, Dag Sverre Syrdal, and Kerstin Dautenhahn. In good company? perception of movement synchrony of a non-

- anthropomorphic robot. *PloS one*, Vol. 10, No. 5, p. e0127747, 2015.
- [42] Diana Löffler, Judith Dörrenbächer, Julika Welge, and Marc Hassenzahl. Hybridity as design strategy for service robots to become domestic products. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, p. 1–8, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [43] Michal Luria, Jodi Forlizzi, and Jessica Hodgins. The effects of eye design on the perception of social robots. In *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 1032–1037. IEEE, 2018.
- [44] Andrew N Meltzoff, Rechele Brooks, Aaron P Shon, and Rajesh PN Rao. “social” robots are psychological agents for infants: A test of gaze following. *Neural networks*, Vol. 23, No. 8-9, pp. 966–972, 2010.
- [45] Francois Michaud and Serge Caron. Roball, the rolling robot. *Autonomous robots*, Vol. 12, No. 2, pp. 211–222, 2002.
- [46] Brian Mok, Stephen Yang, David Sirkin, and Wendy Ju. Empathy: interactions with emotive robotic drawers. In *2014 9th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 250–251. IEEE, 2014.
- [47] T Mori, S Sawada, P Ravindra S De Silva, and M Okada. Social trash box robot: Behavior parsing and goal inferences in dynamic interactions. In *Proceedings of the International Conference on Human-Agent Interaction*, pp. 359–370, 2013.
- [48] Mitsuru Muramatsu, Yusuke Kamiyama, Shin Sakamoto, Kei Nishitani, Daisuke Iizawa, and Shunji Yamanaka. Bio-like display: Information display interacts with human through lifelike motion. *Annual Design Review of JSSD*, Vol. 20, No. 1, pp. 60–65, 2015.
- [49] 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. 2, pp. 87–96, 2015.
- [50] Momoka Nakayama and Shunji Yamanaka. Perception of animacy by the linear motion of a group of robots. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction*, pp. 3–9, 2016.
- [51] Tatsuya Nomura, Tomohiro Suzuki, Takayuki Kanda, Jeonghye Han, Namin Shin, Jennifer Burke, and Kensuke Kato. What people assume about humanoid and animal-type robots: cross-cultural analysis between japan, korea, and the united states. *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 5, No. 01, pp. 25–46, 2008.
- [52] Tor Nørretranders. ユーザーイリュージョン—意識という幻想. 紀伊國屋書店, 単行本, 9 2002.
- [53] H Osawa. Anthropomorphized object using displaying robot. In *Proc. 20th Ann. Conf. of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Tokyo, 2006*, pp. 1–4, 2006.
- [54] Elizabeth Phillips, Xuan Zhao, Daniel Ullman, and Bertram F. Malle. What

- is human-like? decomposing robots' human-like appearance using the anthropomorphic robot (abot) database. In *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, HRI '18, p. 105–113, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [55] Elizabeth Phillips, Xuan Zhao, Daniel Ullman, and Bertram F Malle. What is human-like? decomposing robots' human-like appearance using the anthropomorphic robot (abot) database. In *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE international conference on human-robot interaction*, pp. 105–113, 2018.
- [56] Diane Poulin-Dubois, Anouk Lepage, and Doreen Ferland. Infants' concept of animacy. *Cognitive Development*, Vol. 11, No. 1, pp. 19–36, 1996.
- [57] Alisha Pradhan, Leah Findlater, and Amanda Lazar. "phantom friend" or "just a box with information" personification and ontological categorization of smart speaker-based voice assistants by older adults. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 3, No. CSCW, pp. 1–21, 2019.
- [58] Byron Reeves and Clifford Nass. *The media equation: How people treat computers, television, and new media like real people*. Cambridge university press Cambridge, United Kingdom, 1996.
- [59] Laurel D Riek, Tal-Chen Rabinowitch, Bhismadev Chakrabarti, and Peter Robinson. How anthropomorphism affects empathy toward robots. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pp. 245–246, 2009.
- [60] Akanksha Saran, Srinjoy Majumdar, Elaine Schaertl Short, Andrea Thomaz, and Scott Niekum. Human gaze following for human-robot interaction. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 8615–8621. IEEE, 2018.
- [61] Ben Shneiderman. 7, 1 a nonanthropomorphic style guide: overcoming the humpty dumpty syndrome. *Sparks of innovation in human-computer interaction (1993)*, Vol. 331, , 1993.
- [62] David Sirkin, Brian Mok, Stephen Yang, and Wendy Ju. Mechanical ottoman: how robotic furniture offers and withdraws support. In *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 11–18, 2015.
- [63] Elizabeth S Spelke, Ann Phillips, and Amanda L Woodward. Infants' knowledge of object motion and human action. 1995.
- [64] "ART+COM Studios". Kinetic sculpture — the shapes of things to come, 2008. <https://artcom.de/en/?project=kinetic-sculpture>, 2008.
- [65] Ja-Young Sung, Lan Guo, Rebecca E Grinter, and Henrik I Christensen. "my roomba is rambo" : intimate home appliances. In *International conference on ubiquitous computing*, pp. 145–162. Springer, 2007.
- [66] 鈴木恒男, 成田長人. マルチメディアのための品質評価 (第 10 回). 映像情報メディア学会誌, Vol. 54, No. 10, pp. 1397–1405, 2000.
- [67] 鈴木智美, 上田エジウソン, 寺内文雄. 見た目がやわらかさの印象に及ぼす影響.

- Journal of Chemical Information and Modeling*, Vol. 53, No. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [68] Kohske Takahashi and Katsumi Watanabe. Gaze cueing by pareidolia faces. *i-Perception*, Vol. 4, No. 8, pp. 490–492, 2013.
- [69] Haodan Tan and Selma Sabanovic. Designing lifelikeness in interactive and robotic objects. In *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 381–382, 2017.
- [70] Haodan Tan, John Tiab, Selma Šabanović, and Kasper Hornbæk. Happy moves, sad grooves: Using theories of biological motion and affect to design shape-changing interfaces. In *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '16, p. 1282–1293, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [71] Hamish Tennent, Solace Shen, and Malte Jung. Micbot: A peripheral robotic object to shape conversational dynamics and team performance. In *Proceedings of the 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, HRI '19, p. 133–142. IEEE Press, 2019.
- [72] Kazunori Terada, Takashi Shamoto, and Akira Ito. Human goal attribution toward behavior of artifacts. In *RO-MAN 2008-The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 160–165. IEEE, 2008.
- [73] Frank Thomas and Ollie Johnston. *The illusion of life: Disney animation*. Hyperion New York, 1995.
- [74] Patrice D Tremoulet and Jacob Feldman. The influence of spatial context and the role of intentionality in the interpretation of animacy from motion. *Perception & psychophysics*, Vol. 68, No. 6, pp. 1047–1058, 2006.
- [75] AJN Van Breemen. Bringing robots to life: Applying principles of animation to robots. In *Proceedings of Shapping Human-Robot Interaction workshop held at CHI*, Vol. 2004, pp. 143–144. Citeseer, 2004.
- [76] Mark(Fast Company) Wilson. Why amazon radically redesigned the echo. <https://www.fastcompany.com/90577089/why-the-new-amazon-echo-is-a-sphere>.
- [77] Yuto Yamaji, Taisuke Miyake, Yuta Yoshiike, P. Ravindra De Silva, and Michio Okada. Stb: Human-dependent sociable trash box. In *2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 197–198, 2010.
- [78] 山中俊治. 人のかたちの人工物. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 8, pp. 970–973, 2004.
- [79] Tomoko Yonezawa, Hirotake Yamazoe, Akira Utsumi, and Shinji Abe. Gaze-communicative behavior of stuffed-toy robot with joint attention and eye contact based on ambient gaze-tracking. In *Proceedings of the 9th international conference on Multimodal interfaces*, pp. 140–145, 2007.
- [80] Cristina Zaga, Roelof AJ de Vries, Jamy Li, Khiet P Truong, and Vanessa Evers. A simple nod of the head: The effect of minimal robot movements on children's

- perception of a low-anthropomorphic robot. In *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 336–341, 2017.
- [81] Debora Zanatto, Massimiliano Patacchiola, Jeremy Goslin, and Angelo Cangelosi. Priming anthropomorphism: Can the credibility of humanlike robots be transferred to non-humanlike robots? In *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 543–544. IEEE, 2016.
- [82] Jakub Złotowski, Diane Proudfoot, Kumar Yogeeswaran, and Christoph Bartneck. Anthropomorphism: opportunities and challenges in human–robot interaction. *International journal of social robotics*, Vol. 7, No. 3, pp. 347–360, 2015.
- [83] Oren Zuckerman, Dina Walker, Andrey Grishko, Tal Moran, Chen Levy, Barak Lisak, Iddo Yehoshua Wald, and Hadas Erel. Companionship is not a function: The effect of a novel robotic object on healthy older adults’ feelings of “being-seen”. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’20, p. 1–14, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [84] ジョン・リウォルド (編). セザンヌの手紙. 美術公論社, 単行本, 1982.
- [85] ベンジャミン・リベット. マインド・タイム: 脳と意識の時間. 岩波書店, 文庫, 7 2005.
- [86] 岸本健. 共同注意. 日本発達心理学会, 尾崎康子, 森口祐介 (編), 社会的認知の発達科学, 発達科学ハンドブック, 第 9 巻, 第 12 章, pp. 153–180. 新曜社, Tokyo, 2018.
- [87] 近藤滋. 波紋と螺旋とフィボナッチ (角川ソフィア文庫). KADOKAWA, 文庫, mar 2019.
- [88] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構. ロボット白書, 2014.
- [89] 三井秀樹. 形の美とは何か. NHK 出版, 2000.
- [90] 東京大学山中研究室. ぞわぞわ展. <http://www.design-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/exhibition/proto2019/>.
- [91] 山中俊治. Ephyra. <http://www.design-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/>, 2007.
- [92] 山田誠二, 小野哲雄. マインドインタラクション AI 学者が考える「ココロ」のエージェント. 近代科学社, Kindle 版, 9 2019.
- [93] 寺田和憲, 岩瀬寛, 伊藤昭. Dennett の論考による三つのスタンスの検証. 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. 95, No. 1, pp. 117–127, 2012.
- [94] 緒方壽人. コンヴィヴィアル・テクノロジー 人間とテクノロジーが共に生きる社会へ. ビー・エヌ・エヌ, 5 2021.
- [95] 植田一博. アニマシー知覚: 人工物から感じられる生物らしさ. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 9, pp. 833–835, 2013.
- [96] 新山龍馬. やわらかいロボット (新・身体とシステム). 金子書房, 単行本, 7 2018.
- [97] 森口佑介. わたしを律するわたし: 子どもの抑制機能の発達. 京都大学学術出版会, 2012.
- [98] 森口佑介. 社会的認知と心の発達. 日本発達心理学会, 康子尾崎, 祐介森口 (編), 社会的認知の発達科学発達科学ハンドブック, 第 1 章, pp. 6–19. 新曜社, Tokyo, 2018.

- [99] 森政弘. 不気味の谷 kf macdorman and t. minato (英訳). *Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 33–35, 1970.
- [100] 川口一画, 葛岡英明ほか. スマートスピーカーにおける注視の入出力を用いたインタラクションの効果. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 21, No. 3, pp. 269–278, 2019.
- [101] 総務省. 社会課題解決のための新たな ict サービス・技術への人々の意識に関する調査研究. Technical report, 2015.
- [102] 総務省. 暮らしの未来と ict. 平成 27 年版 情報通信白書, 2015.
- [103] 大澤博隆, 向井淳, 今井倫太. ディスプレイロボットを利用した物体の擬人化. *人工知能学会全国大会論文集 第 20 回全国大会 (2006)*, pp. 271–271. 一般社団法人 人工知能学会, 2006.
- [104] 土井利忠. ヒューマノイド進化のシナリオ. *ロボットイノベーション*, 2011.
- [105] 東京大学山中研究室. Parametric move 動きをうごかす展. <http://www.design-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/exhibition/proto2018/>.
- [106] 日本経済再生本部. ロボット新戦略—ビジョン・戦略・アクションプラン—, 2015.
- [107] 板倉昭二, 北崎充晃. ロボットを通して探る子どもの心: ディベロップメンタル・サイバネティクスの挑戦. ミネルヴァ書房, 単行本, 9 2013.
- [108] 佐田和也, 山際康貴, 岡田美智男. ゴミ箱ロボットにおける弱さの表出について. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 18, No. 3, pp. 219–228, 2016.

謝辞

博士課程の間ご指導いただいた東京大学生産技術研究所の山中俊治教授に深く感謝いたします。研究の進め方や作品制作に関する指導に加え、数多くの作品の展示機会も頂きました。また、研究者としてだけでなくデザイナーとしても、抽象的な事象を言語化することの重要性を学ばせていただきました。

副査を引き受けてくださった、東京大学先端科学技術研究センターの稲見昌彦教授、東京大学生産技術研究所の今井公太郎教授、東京大学大学院情報学環の寛康明准教授、マイルスペニントン教授に深く感謝いたします。博士論文の審査の過程でさまざまな視点からご指導いただきました。

研究に対する助言のほか研究推進の支援をいただきました、東京大学生産技術研究所の村松充特任助教に深く感謝いたします。研究テーマに関連する深い知識と経験からいただいた助言は本研究の推進に大変有益なものとなりました。

東京大学生産技術研究所特任研究員の坂本真さんには、3D プリンターでのプロトタイプリングに関する豊富な知見に基づいた助言を多くいただきました。ありがとうございます。

山中研究室のメンバーの皆さんには、研究会での意見交換を起点として、様々な発見や学びを共有し議論できたことがとても刺激になりました。ありがとうございます。また、展示会の企画運営を担当した歴代の大学院生の皆さんには、私が仕事のためにあまり協力することができない中、あらゆる面で協力と支援をいただいたことに感謝いたします。

本研究は私が三菱電機株式会社に在籍に行いました。私の博士課程進学に対する快諾と、仕事と学業の両立に対する貴重な助言をいただいた、三菱電機株式会社元デザイン研究所長の杉浦博明氏に感謝の意を表します。

学生時代からの友人として様々な視点から助言頂いた千葉大学大学院小野健太助教に感謝いたします。研究の方向性や評価手法などデザイン研究者として長年培った知識と経験に基づく助言を多数いただきました。

制作したロボットの作品としてのコンセプトについて助言いただいた橋倉誠氏に深く感謝いたします。独立したプロダクトデザイナーという立場から、コンセプトや美しさに対する深い洞察を含む貴重な助言を多くいただきました。

最後に、長い博士課程の間、私が仕事と学業に時間を費やすなか家庭を支えてくれた妻玲子と、ロボットの制作に行き詰まった際に常に新鮮な視点から意見をくれた息子景音に深く感謝いたします。2018年に始まった COVID-19 による環境変化にもかかわらず、自宅での制作活動や研究活動を支えてくれました。

付録 A

Face on a Globe のコメント一覧

表 A.1: Face on a Globe のコメント一覧

No.	コメント
1	有機的な形状の変化
2	無機的なものと有機的なものの境目を見ているようで刺激的だった。このインタフェースが立体となっている所に価値があるように感じた
3	シンプル、無機的、幾何学的な中の生きものらしさ
4	透明な膜におおわれたような球がぬるりと浮かび上がったりして沈む動きが生きものらしいと感じた
5	幾何学的な形状にすることで、先入観の数ない擬人化ロボットの製作を試みたとのことですが、時間と共に疲弊し、球に戻らなくなる様が、非常に生きものらしく面白かったです。
6	ほとんど完全に見える球が動くということ。生きものと無機的なものの境目が危うくなります
7	無機的な物体のわずかな動きでも、人はコミュニケーションをとれているかのように思ってしまうのだなと感じた。SW の R2D2 を思い出した
8	なめらかに動いているのが生きものの臓器のようでずっと見てられた
9	球の面積が変化するだけでしたが、もしかすると表情を作る作品 (SEER) と同じくらい受け子によっては豊かなメッセージが感じられる様な気がしました。
10	動き方に意外性とセクシーさを感じます
11	平面の面積の変化はロボットを1つの球として見たときに1部分を切り捨て平面を作ることによって、擬人化インタフェースを生み出し、球の形状のように一体としてロボットを従えるところ。2面性の表現だと感じとった。
12	無機的な形状から生きもののような動きが生まれるのが面白い。
13	動きが生きものらしい上に、機構が見えないため、生きもののように見えしました。
14	人間の感情を球で表現するところ
15	かわいい
16	球の外にはとても平面にナルトは思えないほどの制度で動きかたがとても人間みたい。

表 A.1: Face on a Globe のコメント一覧

No.	コメント
17	これまでにみたことのない動きだったのですがとても愛らしく気持ちよいものに感じられました。
18	起伏が顔に見えるのが、知らなかった。自分の性質を気付かされた。
19	半球が球になるときの動きが面白かった
20	なめらかさ、構造がわからないから
21	なめらかな動きが再現されていた点
22	球の形状の変化モードとして物理的に新しい
23	球が形状の変化する、それがこんなにも面白い動きになるとは！！
24	へこんだり出っ張ったりする動きがおもしろかったから
25	CG 上でしか見られない動きが具現化されている点
26	球から平面 (断面) のように動く構造が不思議でした。動きのなめらかさも興味深かったです。
27	構造がなかなかわからなくて不思議だった
28	なめらかに球になったり平面になったりするのが見ていて気持ちよかった。
29	切削加工でとてもなめらかな曲面を作れるのが驚きだった
30	無機的な見た目に反してなめらかな動きが気に入りました
31	球が面にシームレスに変化するのが新鮮だった。
32	球からまるで断面が切り取られたあらわれた様でもあり、自分の経験の中でどこかであった様なふしぎなデザイン
33	音がとてもよかった。普段聞かない音で想像を湧きたてられる。
34	シンプルに美しい。向きを変えるヴァージョンも見たい
35	不完全な球から完全な球になる過程がおもしろい。
36	球が異なる形状になる動きがおもしろい
37	体積の変化で伝わる印象が楽しい
38	球が平面になるのが感動したから。
39	球は特に安定した状態という意味で静的なイメージがあるので、その形状フォルムが変化することへのギャップが強く、驚かされた。無段階変化だとより良さそう。
40	液体感があり面白かった
41	自然な動きと機械的な動きが一緒になっていて気持ちよい&悪い
42	どの作品も美しいですが、F.o.G は卵が形状の変化しているように見えてとても美しかったです。
43	見てて気持ち良かった
44	動きがなめらかできれい
45	動きが面白かった
46	平面から曲面への変化が美しい
47	液体っぽさがあった
48	動きが魅力的
49	形状が変化する具合が気持ちよい

表 A.1: Face on a Globe のコメント一覧

No.	コメント
50	動きのなめらかさと、形状の変化の仕方がいい
51	メカの制御であのなめらかな曲面や動きを表現するのはすごい
52	球になった際の継ぎ目のなさが素晴らしかった
53	とても精度が高いのできれい
54	ポコポコの年輪の様なテクスチャからツルツルの半球が浮かんできたのはとても新しいと思った。また、半球のツヤもしっかりしていた
55	ちょっとした変化で形状が変化するのが面白い
56	造形がとにかくきれいだった。切削で1パーツずつ作られているということが驚き
57	動きのなめらかさと合わせの精度感に感動しました
58	SNS で映像を見た時の”どうなっているんだろう”という引きと、実物を見た時の納得感が良かった
59	作品の中では一番造形の美しさを感じました。球ならではの不思議な動きが印象的でした。
60	動ききれいだから
61	動きのスムーズさ
62	ネジのような動きが意外でユニーク
63	球にもどった時の美しさ
64	どういう構造か気になった。
65	固そうに見えるものがやわらかく形状かえるところ
66	きれいな球になるのが気になる
67	面積が視覚的に変化する面白さ
68	球の形状がどうやって変化するのか不思議に思ったから
69	ふくらんだ表情がなめらかで導通られているのか驚きました。
70	シンプルな形状変化ですが複雑そう。反応がもっとスムーズだと嬉しい
71	機械で波状なものを表現できるのがすごい。動画で中身見れて面白かった。
72	一体どういう構造なのかーとただただ見入ってしまいました
73	階層があるのにはじめ気づかなかった
74	液体のようだった。スキマがなくダマされた
75	きれいな球が魅力的だった。
76	なめらかな形状に動き、そしてその抽象性にもものすごく可能性を感じたキネティックな抽象彫刻としても展開してほしい
77	動作前後の印象のギャップを最も大きく感じたため (インパクトが大きかった)
78	CG 感すごい
79	オブジェクトの形状の変化によるインタラクションの新しい形状を見れた気がしたので
80	色や音ではなく、幾何学的な形状の変化による擬人化という視点
81	気持ちよかった。人との融合
82	インタフェースに対する先入観が消えた

表 A.1: Face on a Globe のコメント一覧

No.	コメント
83	球に表情を付けようという試みに驚愕したから
84	触覚が刺激されました。さわってはいません。
85	美しい動きだった
86	”日常で見かける球の物が、こんな変化をするのかと面白かったです。制作者の方とお話しできたのも、理由の1つです。玉ねぎを見るたびに思い出そうです”
87	扉の開け方がこの作品のようななめらかさを持っていたら感じる空間体験が変わっていくと感じました
88	ヒューマンインタフェースの新しいかたちとして、すごく面白かったです。
89	CG が現実に出てキモかった
90	コミュニケーションの可能性を感じました。
91	デザイン性
92	美しいのと、未来的なインタフェースだと思いました。スタートレックで似たインタフェースがあります。
93	機械が人間の中で生活する為に新しいあり方を模索しなければいけないのかと感じた
94	今後何かに応用できそう
95	なめらかに動く動きが見ていてとても心地よく作品のコンセプト、狙い通り(?)だと感じたから。
96	きれいだった
97	シンプルなオブジェクトに多彩な表現を載せられるのは、近々で実用性があるように感じた。
98	抽象的な物体の表情を持たせるというコンセプトが面白い。同様のコンセプトで色々なバリエーションが見て見たいと思った。
99	シンプルな球だけど生きものの感がある。かわいい
100	見ていて心地良い

付録 B

J.A.C. のコメント一覧

表 B.1: J.A.C. のコメント一覧

No.	コメント
1	無機物が生き物に見えるのはなぜか考えさせられた.
2	動きがかわいらしく見入ってしまった.
3	小動物のような動きと意思 (のようなもの) を感じました. ミニマルな知性, 確かに感じます.
4	シンプルな中にミニマルの要素で生き物らしさを感じるものへと昇華しようしているところが好きです.
5	表情は生き物らしさがよく見える (イモ虫的な) 機構がどうなっているか気になりました.
6	かわいい. 回転させて変形するところが面白い.
7	ミニマルに人の意識とつながろうとしている.
8	動きが機械らしくないところ
9	好きだったから. すごくかわいい.
10	シンプルな形の割に動きがかわいかった
11	静止している状態ではこちらが一番見た目がミニマル. それが生き物らしく振る舞うと, そのギャップがかなりぞわぞわ
12	動きにユーモラスさを感じたので
13	フォルムと動きがかわいらしい
14	意思疎通した感覚が本当にあったから
15	モーター音の抑揚や消え入り方にかわいらしさがあり無機物的なイメージの中に人の意識を引きつける余白を感じた
16	動きがかわいかったので.
17	くねくねとした動きが見ているとかわいらしく, 愛着が湧く形だなと思いました.
18	動きがスムーズで生き物のようでした
19	ものと生き物の境界って, 考えたことなかったのだから, 共同注視を使って生き物に見せられるという発見は印象的でした
20	形と動きが生き物らしい

表 B.1: J.A.C. のコメント一覧

No.	コメント
21	生き物っぽさが一番出てました。
22	まさか円錐がかわいく思える日が来るとは…
23	無機物が生き物のような動きが良かった。形が一番シンプルなのも良い
24	意識を持ったような動きがペットのようで良かった。
25	本当に生き物と少し感じた。動きが終わった後にさびしさも感じられた。
26	ミニマルな動きで、確かに生き物らしく見える感覚があった。
27	生き物のよう
28	見ているうちにかわいらしく思えたので
29	音もあいまってかわいらしいと感じました
30	シンプルな機構で効果的に生き物感が表現されていて興味深かった。
31	かわいかったです。
32	かわいい
33	SF 映画に出てくる生き物みたいで見てると愛着わいてきますね。かわいいと思ってしまう。
34	シンプルな形状のモノが生き物のように感じる
35	動きがかわいかった。
36	かわいい
37	かわいい無機物の動きを初めて見た。
38	ただの円錐なのにかわいかったです。
39	シンプルなようで複雑で生き物のようでした
40	生き物っぽさが感じられました。
41	かわいい。
42	生き物っぽさについて考えさせられました。C3-P0 みたいな音がしてたのもかわいさが増しました。
43	見られている感じがしたから
44	美しいデザインだと感じました。動きがシンプル (少ないのに)なのに「ぞわぞわ」するものがありました。
45	シンプルな動きなのに不思議に見えた。
46	パーツの変形することで、回転させるだけで様々な方向を向くのが面白いなと思いました。
47	陶芸ののべさげという動作にすごい似ていた。
48	動きが一番自律的に見えた
49	車のフロントが人の顔に見えたりするのに近い感覚でした。再構築のアプローチがミニマルで好きです。
50	点一つで視線を感じたり感じなかったりするの面白かった
51	物体に人格を感じさせ対話させる試みが面白かった。
52	積層されたパーツがシンプルな円錐代でないのが良い
53	生き物っぽいけど生き物じゃない絶妙なフォルム。
54	形状の対比を機構的に解決していたところ

表 B.1: J.A.C. のコメント一覧

No.	コメント
55	照電センサーがついてる？そっちを向いてくるのが印象的だった
56	よく考えシンプルにみせている
57	動きが面白かった.
58	くねくねするところがよかった.
59	インタラクションを持つ無機物というイメージが新しい
60	美しくて見とれてしまいました.
61	ミニマルで洗練されたデザインがかっこいいと思った.
62	ありそうでない動き
63	形がとてもなめらか
64	他のものが生き物の機構を模しているのに対して、かなり抽象的、哲学的で面白かった.
65	ホームスピーカーになったらうれしいです
66	無機物との対話に可能性を感じた
67	独創的で興味深かった
68	天井がおどろき
69	一番ぞわぞわしたから
70	エコを感じた
71	インタラクション化
72	ぞわぞわした.
73	シンプルなところ.