

Planula：環境に埋め込まれ人を感じしようと振る舞う センサロボットのデザイン

村松 充^{1,a)} 神山 友輔¹ 阪本 真¹ 山中 俊治^{1,†1}

受付日 2015年6月30日, 採録日 2016年1月12日

概要：ロボティクスによって人工物を生物らしく振る舞わせることが可能になり、人と生物のコミュニケーションのモデルが人と知能機械のインタフェースに応用されはじめています。我々の身の回りの至るところにセンサが埋め込まれ、環境が知能化する未来において生物をモデルとするインタフェースデザインが必要とされる場面は増えることが予想される。一方で、現在環境に埋め込まれるセンサは隠される方向で設計されている。このようなインビジブルな設計の方略は有効であるが、知らないうちに様々な情報を取得される不気味さも生じることが予想される。本稿では、環境に埋め込まれたセンサノードに生物のような振舞いを与えるインタフェースデザインを提案する。環境が知能を持って振る舞う様子を、我々が生物の振舞いから感じ取るのと同じように自然に読み取れるようにデザインしようという方略である。本稿で提案する「Planula」は触角のメタファを用いた、人を感じしようと動くミニマルなインタフェースロボットである。生物に似ない、照明器具のように空間に溶け込む外観を用いながら、動きとインタラクションによって生物のような認知を実現する。本稿では、Planula のデザイン、インタラクション設計、実装およびそのフィードバックについて述べる。

キーワード：ロボットデザイン, Human-Robot Interaction, モーションデザイン, 静電容量センサ

Planula: An Environment-installed Sensor Robot that Behaves to Seek Humans

MITSURU MURAMATSU^{1,a)} YUSUKE KAMIYAMA¹ SHIN SAKAMOTO¹ SHUNJI YAMANAKA^{1,†1}

Received: June 30, 2015, Accepted: January 12, 2016

Abstract: Robotics has made it possible to design products that behave like animals. In addition, the communication model between humans and animals is currently being applied to man-machine interfaces. In the future, ‘ambient intelligence’ sensors will be installed in almost all locations around us. Scenarios in which we require a creature-inspired design for an environmental intelligence interface are going to increase. On the other hand, in the current research into ‘network robots’, environmental sensors that are designed to be invisible are being proposed. This type of invisible design has the possibility to make users feel uncomfortable because we will be continuously sensed unconsciously within our environment. In this paper, we propose an environmental sensor design method using a life-like appearance as the interface. In this method, we aim to design an intelligent behaviour of the environment to let us read its intention, as if we were reading naturally from animal behaviours. The “Planula” described in this paper is a minimally designed interface robot that seeks to sense humans using an antennal metaphor for its appearance. It looks like a floor light and is dissimilar to a living organism, but gives us the perception of being a creature by using motions and interactions. Herein, we show the design, interaction design, implementation, and feedback of Planula.

Keywords: robot design, human-robot interaction, motion design, capacitive sensor

¹ 慶應義塾大学大学院政策メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University,
Fujisawa, Kanagawa 252-0082, Japan

^{†1} 現在, 東京大学情報学環
Presently with Interfaculty Initiative in Information Studies,
the University of Tokyo

^{a)} mtr@sfc.keio.ac.jp

1. はじめに

センサによって周囲の状況を取得, 人工知能によって判断し, 物理的な動きを実現するロボットは, 人間の労働を代替するシステムとして様々な産業の現場で用いられてい

る。一方で、人工知能や物理的な動きがもたらす生き物のような振舞いもロボットの魅力的な特徴の1つであり、これを人と機械のインタラクションシステムに利用しようという試みも多数行われている。人間対生物のコミュニケーションモデルをロボットに適用することで、言語や表情、ジェスチャ、仕草などを用いて情報のやりとりや情報提示を可能にする。システムを擬人化/擬生物化してデザインすることは、ユーザにシステムが知能を持って振る舞うことを提示するインタフェースとなる。

Ambient Intelligence と呼ばれる、我々を取り巻く環境の至るところにセンサを埋め込み知能化する研究が行われている。環境の知能化が進行すると、知的なシステムと我々の接する機会がより多くなり、ロボティクスを用いた擬生物化によるインタフェースが様々な場面で用いられることが予想される。ネットワークロボットの研究では、ビジュアル型ロボットと呼ばれる人をモデルとしたロボットを知能システムの窓口として用いており、人形のようなロボットから人に近いサイズのロボットまで多種多様な擬人化ロボットが開発されている [1]。一方で、ネットワークロボットにおけるセンサ群はアンコンシャス型ロボットと呼ばれ、文字どおり人が意識しないように隠す設計がなされている [2]。環境に埋め込まれたセンサは隠し、インタフェースは人型ロボットに一任する設計はネットワークロボットの特徴を活かした設計方略といえるが、一方で、隠されたセンサによっていつの間にかデータを取得されることの不気味な感覚も生じることも予想される。Zagler らはスマートホームの社会実験を行い、その結果からユーザのモニタを可視化することは不快である一方、センサを完全に隠すこともユーザに不気味さや恐怖を与えるため、センサを隠すか表出するかについて良いバランスを発見する必要があると考察している [3]。本研究では、従来アンコンシャス型と呼ばれ隠されていたセンサに生物のような振舞いを与え、隠すのではなくデータ取得を行う環境知能であることを積極的に表出する、新しいアピランスのあり方を提案する。環境が知能を持って振る舞う様子を、我々が生物の振舞いから感じ取るのと同じように自然に読み取れるようにデザインしようという方略である。上田らは、ユビキタスホームの実証実験において、ロボットが内蔵するカメラで見られるのはいいが天井カメラは監視されているようで嫌な気がする、という意見がすべての被験者から得られたと述べている [4]。このことから、センサを擬人化することがユーザの嫌悪感を軽減することにつながるのではないかと予想する。また、前田らは、知能を持って振る舞う環境知能のあり方として、コミュニケーションの媒介役である「妖怪、妖精」の姿を示している [5]。本研究は、人を感じ取る環境知能に生物のような振舞いを与えることで、環境の振舞いをユーザに理解させるための媒介とすることを目指す。

本研究では、人が触れることで情報を取得するセンサにおける生物的なインタラクションのデザインを考える。現在環境知能の研究では人の位置検出や個人識別にカメラが用いられることが多いが、監視カメラは先行研究の実証実験でも嫌悪感を感じる対象とされており、プライバシーの問題も指摘されている。指先や手の平は個人認証にも用いられており [6]、人が触れるセンサを空間に設置することで人間の位置判別、個人識別が可能になると考えられる。また、環境知能を用いた知的な住環境システムの用途として居住者の健康のモニタリングがあげられている [8]。人との簡易的な接触によって脈拍などの健康状態を検出する研究開発も行われており [7]、触れることで個人識別だけでなく、簡単な健康状態の取得が可能になることも予想される。このような背景から、本研究では人の接触を誘発し、接触に対してインタラクションを行うことでセンシングしていることをユーザに伝える環境知能のデザインを提案する。接触によるセンシングは隠すという従来のアンコンシャス型ロボットの考え方とは異なるが、本研究では接触をユーザと環境知能とのコミュニケーションの媒介として用いる。ユーザの触るというアクションに対してセンサデバイスが生物のような反応を返すことで、環境知能の人を感知しようとする振舞いをユーザに伝えることを目的とする。

本稿で提案する「Planula」(図 1) は、人による接触を感知しようとするセンサの振舞いを、生物の触角のような外観と動きを付加することで表現することを目指したプロトタイプである。本研究では、環境に埋め込み、人間が手で触れやすい高さでセンサノードを移動させるため、空間



図 1 Planula

Fig. 1 Planula.

に生えた触角のようなデザインを提案する。センサ部分を弾性体の支柱の先端に取り付け、ワイヤによって支柱を曲げることで先端を移動させる。手を用いてインタラクションしやすい高さを漂うような移動を可能にし、また、駆動部とセンサ部を分離することで、インタラクションの主体であるセンサ部をシンプルな外観にすることが可能になる。Planula は、センサを保持した先端を触角のように動かし、人と接触すると生物のような回避運動を行い、感知する感覚を持っていることを鑑賞者に提示する。本稿では、Planula の外観、構造、動きのデザインとその実装について述べる。

2. 本研究のアプローチ

本研究では、環境知能の振舞いをユーザに伝えるために、生物のように動き人に対してインタラクションを行うセンサノードを開発する。石井は、コンピュータとのインタフェースにおいて周辺感覚によるアウェアネスが活かされていないことを問題視し、Ambient Media というインタフェースのあり方を提示している [9]。ユーザが情報の気配に認知の周縁で気づくようにデザインすることで、認知負荷の低い形で情報の認識を可能にし、フォアグラウンドのインタフェースとの遷移をスムーズにするメディアである。本研究では環境知能の振舞いをユーザに認知させるメディアのデザインとして、ディスプレイ表示や言語を用いたエージェントロボットのようなフォアグラウンドにおけるインタフェースではなく、空間にさり気なく存在し、周辺感覚で知覚できるようなインタフェースとしてデザインする。空間に埋め込まれた照明器具としてデザインし、人を感知しようとゆるやかに動く。ユーザが認知の周縁でこの振舞いに気づき、先端に触れるという主体的な行為をアフォードするようなインタラクションデザインを探る。

本研究で提案する Planula は、ネットワークロボットで一般的に用いられる擬人化ロボットとは違い、目や顔などといった人間の外観特徴を持たない。人間のような外観からはユーザは人間のような高度な知能を期待するため、高度な知能を持たないシステムを擬人化することは期待する知能とのギャップを生むことが知られている [10]。本研究は、人を感知し手による接触を誘発しようとする環境知能の振舞いの表出のみを目的としており、必要以上に人を模した外観を与えることはふさわしくないと考えられる。先行研究からも、簡単な知能や態度の表出においては生物を模倣した外観が必ずしも必要ではなく、動きによって実現可能であることが知られている [11], [12], [13], [14]。

本研究では、生物を模倣しない抽象的な形状のセンサデバイスを用い、これに動きを与えることで生物のような認知を与えることを目指す。生物を模倣しない抽象的な形状を用い、動きやインタラクションによって生物のような認知や情報提示を行う研究は、Walter [13] や Brooks [15] の

研究をベースとした床面移動型のロボットを用いて行われることが多いが、特性上姿勢が低くなる傾向にあり、またバッテリーなどの動力が必要となる。本研究では、人の手で触れやすい位置でセンサノードに生物のような動きを与えるためのデバイスデザイン、駆動手法のデザインを行う。また、触れることをアフォードし、触れたことによって環境知能が人を検知したことをユーザに気付かせるようなインタラクションデザインを提案する。

3. 関連研究

3.1 抽象度の高いロボットにおける生物的な動き

Heider らの研究に端を発するアニメシー知覚の研究では、単純な動きから意図や関係性を認知可能なことが示されている [11], [12]。アニメシー知覚の研究ではしばしば抽象図形を用いた 2 次元のアニメーションが用いられるが、ロボットにおいても単純形状を用いて生き物のような認知を引き出す研究がなされている。既存の生物や人工物を規範としない抽象度の高い外観のロボットにおいて、動きによって生物のような認知を実現した先駆的な事例として、Walter による亀形ロボットがあげられる [13]。Walter のロボットは、光に反応して方向転換を行うだけのシンプルな行動パターンを持つロボットだが、これを観察した多くの人が感情や意図を読み取った。小松らも、シンプルな外観の移動ロボットを用いて、振舞いによって簡単な態度を表出可能なことを示しており [14]、小林らは、動きのみによって意図を表出し、人の操作を引き出すことに成功している [16]。三宅らの研究では、既存の人工物であるゴミ箱に動きを与えることで、ゴミ箱が生きているかのように振る舞い、子どもがゴミ箱に協力するような行動を誘発した [17]。

これらの例のような、抽象度の高いロボットにおける生物的な動きやこれを用いたインタラクションの研究では、主に床を 2 次元的に移動するロボットが用いられている。これは、床面の 2 次元移動は安定した車輪の動きを基本としており、自由な動きの設計が可能であるためである。また、Brooks によるサブサンクションアーキテクチャ [15] などのように動きや知能を設計するうえでの知見が充実していることも理由である。人-ロボット間においては、ロボットの形や動き方がインタラクションに直接影響するため、外観のデザインも重要である。移動ロボットは地面を這うような低い姿のロボットになる傾向があり、人が接するのに適さない。本研究は、床面の 2 次元移動とは異なる外観の提案として、センサ部を空中を漂うように動かす触角型のデザインを提案する。

3.2 生物のようなインタラクティブアート表現

メディアアートやインタラクションデザインの分野では、従来のロボティクス的手法とは異なる生物的な表現が

研究されている。

Uekiらは、柔らかい膜に包まれ空気を送ることによって呼吸をしているように動く照明型デバイスを開発し、人の行為に応じて光り方や鼓動の速度が変化するインタラクションを設計している [18]。内部にセンサを持った照明器具を生物のように動かす点で本研究と類似するが、本研究では移動をとまなう動きを扱う点で異なる。中安らの Tentacles は光ファイバによって先端が光るイソギンチャク状の触手を多数配置し、形状記憶合金アクチュエータで動くアート作品である [19]。人の手の動きを検知して動く点では本研究と同様であるが、対象を群として動きを設計し、それぞれの触手の動きはシンプルであり、大きな移動は行わない。本研究は、触手のように蠢く動きではなく触角のように周囲を感知するような移動を目的とする点で異なる。Public Anemone [21] は、原始的な生物をモチーフとしたロボットであり、既存の生物に類似しない外観で人とのインタラクションを行う点で本研究と類似するが、本研究では抽象度の高い形状と動きに注力している点で異なる。

河野らによる lapillus bug は、粒子を超音波によって浮遊させ、水平移動を制御することで生物のような動きを実現している [20]。実際に浮遊させることで空中を漂う生物的な動きを実現している点で優れているが、特性上動かす対象は微粒子に限られる。本研究では人を感知するセンサノードを動かすことを目的としており、このような手法は適さない。

山中の製作した Cyclops [22] は、人に近い外観を持っているが単眼で表情はなく、移動もしないロボットであるが、人を目で追う動きだけを人らしくデザインすることで、鑑賞者は環境をカメラによって知覚しようとする知能システムであることを理解し接した。本研究はカメラではなく、人の接触を検知する触覚センサを用いて、人を知覚しようとする動きと、知覚したことを人に伝えるインタラクションの実現を目指すものである。

3.3 環境知能の擬人化表現

南らは環境知能のあり方のコンセプトとして「妖精・妖怪」の住む世界を示し、まっしゅるーむというキャラクターによって擬人化している [23]。本研究も環境知能の擬人化を行うが、キャラクター化するのではなく、インタラクティブな人工物としてデザインする点で異なる。また、ゆかりプロジェクトでは対話型インタフェースを子供のメタファで設計するのに対し、居住者を見守る環境知能の姿に母親のメタファを与えている [24]。しかしここでは母親のはたらきをユーザに伝える設計はされていない。これに対し、板垣らは環境知能に呼吸のような表現を与えることで、ゆるやかで認知負荷の少ない表現で部屋全体を生物のように認知させるシステムを実現している [25]。

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

4. Planula

4.1 Planula の概要

本稿で提案する Planula は、触角のように人を検知しようとする動き、接触を誘発しようとするロボットである。ワイヤをモータによって巻き取ることで弾性体の支柱を曲げ、支柱の先端についたセンサ部分が自由に動いているような動作表現を行う。移動ロボットを用いた先行研究では、移動速度や方向の変化、距離のとり方によって状態の提示や操作の誘発を行う。Planula では、支柱を曲げることで支柱の根本を中心とした放射状に先端が移動し、方向や速度の変化や人との距離の変化を実現する。車輪を用いたロボットに比べ移動範囲は限定されるが、インタラクション対象を人間が手を近づけやすい位置において動かすことができる点で優位である。

4.2 デザイン

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

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

センサを有するデバイスを手に触れやすい高さで 2次元的な移動を可能にする構造として、センサデバイスを支柱の先端に取り付け、支柱を曲げることで動きを生み出すデザインを採用した。センサ部分は発光させ、支柱には透明なアクリル樹脂のパイプと繊細なワイヤを用いた。支柱を目立たせず、センサを保持する先端部分を目立たせるよう外観をコントロールすることで、鑑賞者の意識を先端部に向け、インタラクション対象としての認識を促すことを意図している。先端は電球のような涙滴型のデザインであり、直径 50 mm の球から支柱につながるようななめらかな面の変化を与えている。形状から特定の生物を連想することのないよう、球を基本とした抽象度の高い形状を用いた。また、特定の生物とは似ていないが、生物の触角を感じさせる外観特徴や動きを持つメタフォリカルな表現であり、

外界を感知する存在であることを暗示するデザインといえる。先端の発光デバイスの外装は上部の樹脂部品と下部のアルミニウム部品によって構成されている。上部はUV硬化アクリル樹脂を光造形によって造形したもので、半透明で光を透過させる。外側を研磨して全体を滑らかにするとともに細かい傷をつけることで、内部の光を拡散する役割も担っている。下部のアルミニウム部品は構造材となっており、支柱を曲げるためのワイヤの固定、照明基板、センサを保持している。

4.3 構造設計

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

全体の構造を図 2 に示す。支柱には外径 8 mm で内径 6 mm、長さ 1,000 mm のアクリル製のパイプを用いる。金属の支柱と異なり剛性が低く、小さな力でも変形する。このパイプに対してワイヤを用いて張力をかけることで、変形する弾性体の支柱として扱う。支柱の両端にはアルミニウム製の部品をパイプを上下に挟みこむように取り付け、その間にステンレス製のワイヤを同一円周上に 4 本等間隔に張っている。先端の発光デバイス側でワイヤを留め、もう一端ではそのままワイヤを通しその先のモータにつなげている。モータによってワイヤを巻き取るとアルミ部品間のワイヤが短くなり、短くなったワイヤの側に傾くように

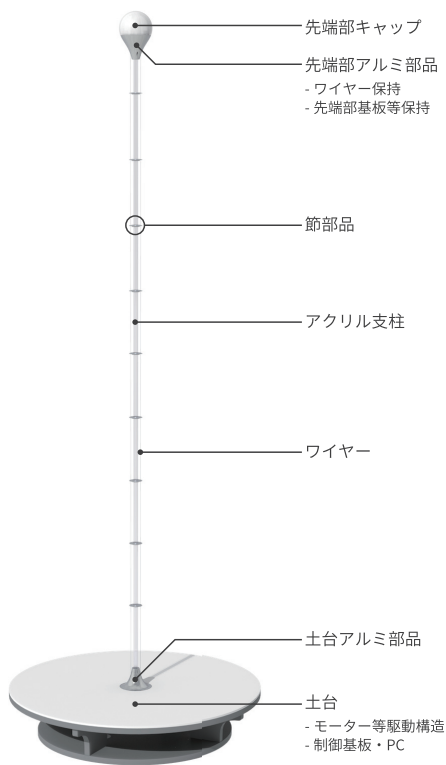


図 2 Planula の構造 (CG)
Fig. 2 Structure of Planula (CG).

支柱が屈曲する (図 3)。この操作によって、先端の発光デバイスの移動を実現する。モータは 1 つにつき 2 本のワイヤを操作し、プーリを回転させることで一方のワイヤを引っ張ると同時に逆側のワイヤを緩める。この 1 対のワイヤを対角に配置することで一軸の動きを制御する。本システムではこのモータを 2 つ直交して用いるため、4 方向とそれらの合力によって支柱がすべての方向に曲がるような動きを実現する。支柱には、ワイヤが支柱に沿うように保持するための 7 つの節部品を配置する。これによってワイヤと支柱の距離をほぼ一定に保ち、張力が 1 点に集中しないようにする。ワイヤは支柱の下部でプーリを用いて 90° 曲げ、2 つのモータが互いに干渉しないよう土台部分に設置する。また、ワイヤの細かい伸縮や振動を抑えるため、バネを用いて張力をかける構造を与えた。ワイヤを駆動する土台内部の構造は、図 4 の CG に示す。実際のワイヤは金属だが、CG ではそれぞれの軸で色分けしている。

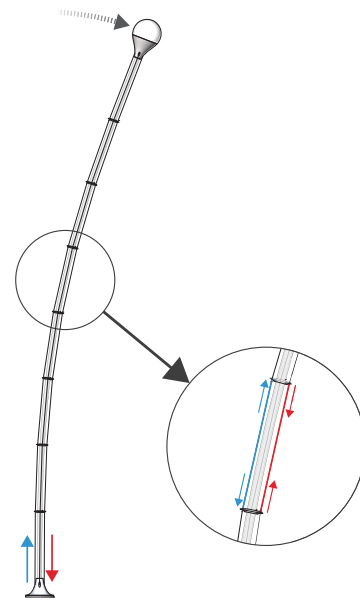


図 3 屈曲の仕組み
Fig. 3 Mechanism of bending motion.

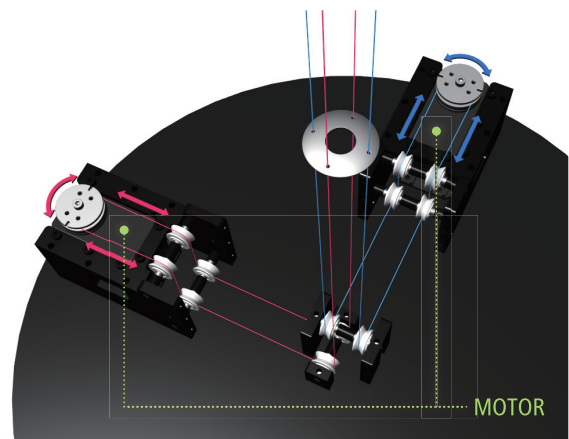


図 4 土台の内部構造 (CG)
Fig. 4 Inner structure of base (CG).

先端部の外装は、前述のとおり構造材であるアルミニウム部品と半透明な樹脂製のキャップで構成されている。図 5 はキャップを外した状態の先端部の CG 図である。先端部アルミニウム部品はワイヤを留める構造を持ち、照明をコントロールする基板を保持しており、アルミニウム製の静電容量センサ部品も保持している。センサ部品はワイヤと同様に円周上に 90° ずつ開いて 4 つ配置され、樹脂キャップの球体形状に沿う形状となっている。センサはキャップの内側にあるが、静電容量センサは非接触で人体の検知が可能であり、キャップの外側からの人の接触を検知する。本研究では、これらの 4 つの静電容量センサを、人が先端部に触れようとした際の位置検出に用いる。静電容量を入力インタフェースとして用いた位置検出は Zimmerman ら [26] によって先行研究がなされ、福地らによっても詳細な先行研究がなされている [27]。本研究のように曲面形状を持った外装部品の内側に複数の静電容量センサを配置して人体の検出を行う先行研究として榊原らの TubTouch [28] があげられる。TubTouch では、隣接した複数のセンサを用いてタッチ位置やスライド操作の検出を行っている。Planula のセンサはこれを 3 次元的に配置した構造である。複数のセンサを円周上に配置し円周上での位置を検出する。センサが 3 次元形状であるため、確実な位置の検出は難しいが、本研究ではどの方向から触られているかを重視するため、このようなセンサ設計を用いている。発光部には出力 1W のハイパワー LED を用いて、PWM 制御によってゆるやかな明滅を行う。人の接触を感知した際には光り方を変化させ、検知したことを光によってもアピールする。センサと LED を制御する基板は先端部に設置され、この基板への電源と通信のためのケーブルはパイプの内側を通して配線した。ケーブルをパイプ内に通すことで、支柱がケーブルの露出によって煩雑な見た目になることを防ぐ。また、ケーブルには透明な皮膜の銀メッキ線を用いることで、アルミニウムとアクリル樹脂によって構成される全体の外観と揃えた。

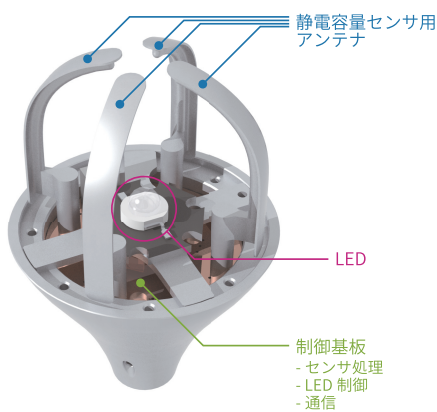


図 5 先端部の内部構造 (CG)

Fig. 5 Internal structure of head part (CG).

4.4 制御設計

Planula の制御には、Mac OS X 上で動作する制御アプリケーションを用いている。制御アプリケーションは Mac OS X の開発環境である Cocoa を用いて開発した。制御構成は図 6 のとおりである。Planula の動作を生み出すモータはシリアル通信によって制御可能で、正確な位置制御が可能なサーボモータである Robotis Dynamixel RX-28 を用いる。制御アプリケーションによって生成した動作からモータの制御信号を発生し、制御を行う PC の USB ポートから出力する。USB からモータの通信方式である RS-485 形式の信号へ変換する基板を経由し、制御アプリケーションによる命令をモータに与え駆動する。センサと LED を制御する基板と制御アプリケーション間の通信プロトコルにもシリアル通信を用いる。静電容量センサを制御基板上の PSoC マイコンで処理し、離散化したセンサ値を制御アプリケーションに送る。センサの情報を制御アプリケーション内で処理し、接近方向を検出する。

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

4.5 モーションの設計

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

4.5.1 基本動作の設計

Planula の動作範囲は、支柱を中心とした円状となる。この円の中で自由に動き続けられるよう、以下の 3 種類

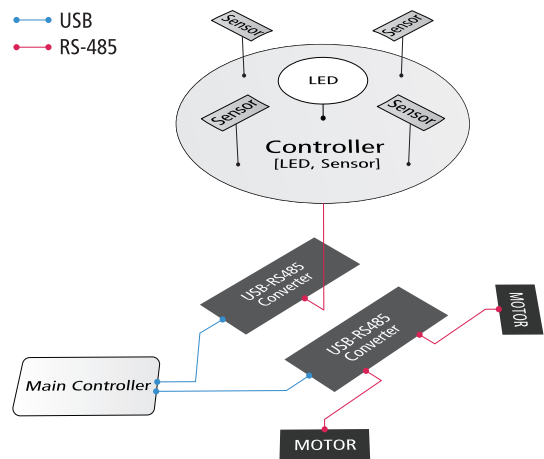


図 6 制御システム

Fig. 6 Control system.

の動作生成アルゴリズムを実装し検討を行った。Planulaは、人を探すように動くことを目的とするため、基本動作の原則は周囲を探るように移動しながら可動範囲を網羅するように動くこととした。先端部のセンサのみでは狭域なため、周囲を探るような動きを与えることで検出範囲を広げ、広範囲でのインタラクションを誘発することがねらいである。

4.5.1.1 円周上の動きと往復運動の組合せ

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

$$\begin{aligned} x &= Amp(\phi) \times \cos(\theta) \\ y &= Amp(\phi) \times \sin(\theta) \end{aligned} \tag{1}$$

となる。往復運動を生み出す ϕ の関数 $Amp(\phi)$ は

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

である。 θ と ϕ はそれぞれ時間によって線形に変化する。 A_0 は回転運動の基本半径であり、 a は往復運動の振幅を表す定数である。等速円運動の際の半径 $Amp(\phi)$ を正弦関数による往復運動によって変化させることで動きを生み出す。このときの2次元座標上での軌跡を図7に示す。点は一定時間ごとに打たれており、点の濃度が時間変化を示す。濃度の低い点から高い点への移動である。

4.5.1.2 2種類の往復運動の組合せ

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

$$\begin{aligned} x &= a_x \times \sin(\theta) \\ y &= a_y \times \sin(\phi) \end{aligned} \tag{2}$$

となる。ここでも θ と ϕ はそれぞれ時間によって変化する。x軸とy軸で振幅と波の速さを変えることで、単振動の組み合わせながらリサージュ曲線のような複雑な軌跡を実現する。これをベースに振動ごとに振幅や速さを変化させ、ランダムさを持った動きを実現した(図8)。

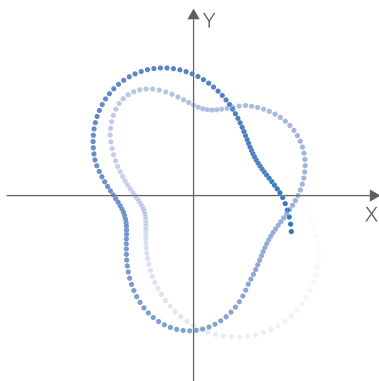


図7 基本動作1の2次元座標上での表現

Fig. 7 Two-dimensional expression of basic motion 1.

4.5.1.3 ランダムに決定した位置への移動

これは前者2つの手法とは異なり、円運動や振動を用いない手法である。近似した2次元座標上で目標位置をランダムに決定し、その点に向かって移動する。目標点に到達したら別の目標点を設定するという制御を行う。これを基本動作3とする。前者の方法でも同様であるが、Planulaには弾性素材の支柱を用いているため、動作時に弾性による振動が起こる。前者のアプローチはその弾性による振動を動きの一部と同化させるために三角関数を用いた動きを用いている。三角関数を用いないこの手法では振動をできるだけ小さくするため動きのはじめと終わりをゆっくりと加減速するように補完を行った。補完にはPennerによるEasing関数[29]を用いた。ここでは動作開始時と終了時双方をゆるやかに速度変化させるため、二次関数を用いたQuadratic EaseInOut関数を用いた。2次元座標で表すと

$$\begin{aligned} x(t) &= x_{start} + P(t) \times (x_{goal} - x_{start}) \\ y(t) &= y_{start} + P(t) \times (y_{goal} - y_{start}) \end{aligned} \tag{3}$$

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

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

である。 $x(t)$ が x_{goal} に到達すると、現在地を x_{start} にして、新たな x_{goal} を設定する(図9)。

4.5.2 インタラクションの設計

この基本動作に加え、静電容量センサを用いたインタラクティブな動きを設計した。センサを保持した先端部に人が触れると、少し間を置いて離れるように先端部が移動する。接触に対して避けるように動くのは生物の基本的な振舞いであり、センサが人を感じた、ということを利用者に伝えるための動作としてこの動きを採用した。また、この手から離れる動きは、センサノードが情報の取得を終え、また基本動作に戻るといった遷移のデザインである。静電容量によるセンシングはタッチセンサとしてしばしば使われるが、センサとなる電極と人体との間に距離があつて

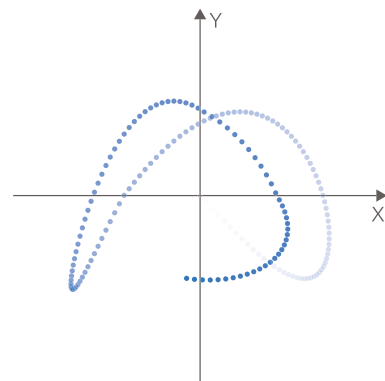


図8 基本動作2の2次元座標上での表現

Fig. 8 Two-dimensional expression of basic motion 2.

も検出が可能である。距離によって電極にたまる電荷が変わるため、本研究ではこれを対人の距離センサとして用いる。回避動作の際は、センサ値に比例する力を先端部の運動に加える。センサ値は距離が小さくなるほど大きくなるため、先端部に人の手が近づくほど大きな力で回避運動が発生する。

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

4.5.2.1 周期的な基本動作の際の回避アルゴリズム

基本動作が前節の円運動と往復運動を用いた1と2の方法の場合、回避動作を行った際に基本動作の周期運動が崩れないよう全体の動きを実現する。回避運動による加速度は基本動作に加算し、回避運動によって人から離れた際または人が先端部に近づけていた手を離れた際は、また基本動作にスムーズに移行するため回避運動による移動をキャンセルするように動く。基本動作と回避運動は独立して計算を行い、それぞれの結果を足しあわせた動きを行う。

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

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

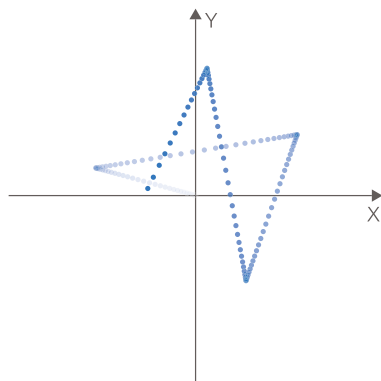


図 9 基本動作 3 の 2 次元座標上での表現

Fig. 9 Two-dimensional expression of basic motion 3.

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

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

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

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

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

4.5.2.2 ランダムな位置への移動の際の回避アルゴリズム

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

5. システムの評価

5.1 モータの駆動と先端部の動き

Planula は、モータでワイヤを引き支柱を曲げることで先端部を移動させる構造である。モータの回転に対して先端部がどのように動くのか検証を行った。モータの回転角に対する先端部の水平方向の移動距離のグラフを図 10 に示す。モータにはプーリを取り付けワイヤを引いており、ワイヤを最大限引ける角度は 90° となる。このため、グラフの横軸の最大値は 90° としている。縦軸で示しているとおり、動作範囲は半径約 300mm の円内である。前述のとおり 2 つのモータが直交する 2 方向の曲げを制御し、2 モータの合力を用いることで 360° すべての方向への曲げを実現する。このグラフでは、単一モータのみを回転させた際の変位と 2 つのモータの合力を用いた際の変位の 2 つのデータを示しており、ここで用いている合力方向は 2 モータの中間の方向である。よって、中間方向のグラフで

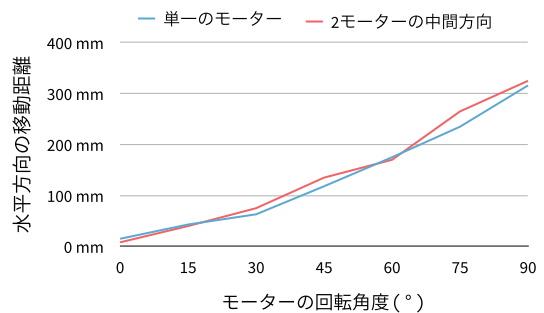


図 10 先端部の水平方向の移動距離

Fig. 10 Horizontal moving distance of the head.

は、横軸で示している角度に $\sin 45^\circ$ を掛けた角度で2つのモータを動かした際の変位である。このグラフの合力方向でのモータの最大角度は、 $90^\circ \times \sin 45^\circ$ であり、約 76.6° である。

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

支柱を曲げて先端を動かすため、水平方向への動きが大きくなるにつれ垂直方向にも動きが生じる。同様に垂直方向の動きを計測したグラフを図 11 に示す。弧を描くように徐々に下がっていることが分かるが、初期位置からの変位がそれほど多くなく、最低位置でも 930 mm を超えている。このため、2次元座標で近似した動きと実際の先端部の動きで、高さ方向のギャップはそれほど生じないと考えられる。

5.2 基本動作の評価

4.5.1 項で述べた3種類の基本動作について、実際にPlanulaにモーションを適用し、観察を行った。基本動作は、前述のとおりセンシング対象を探るように動くことを原則としている。実際に先端を移動させることで実際にインタラクションの範囲を広げるとともに、周囲を探っているような動きの認知を与えることが目標である。基本動作1は円周状に周囲を探る動きであり、円の動きと三角関数を用いた往復運動で構成されている。基本動作2は直交す

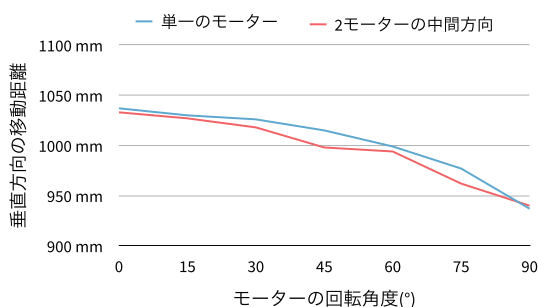


図 11 先端部の垂直方向の移動距離

Fig. 11 Vertical moving distance of the head.

る2方向の往復運動の組合せであり、これも三角関数を基本としている。基本動作1では、おおむね想定したとおり円を描きながら往復運動するように先端が移動したが、円の動きが機械的な印象を生み、あまり生物らしい動きとは感じられなかった。円の動きに速度変化なども加えたが、つねに決まった方向に動き続ける円の動きが機械的な印象を産んだと考えられる。基本動作2では、動きにランダムさは加わったが、往復運動の印象が強まった。1と2に共通する点として、双方とも三角関数を用いた往復運動を用いている。本作品は弾性体の支柱を用いているため、この弾性に起因する振動運動が生じる。1と2の動作では、三角関数による往復と弾性による振動が混ざり、これが生物のような動きの印象を感じにくくしていると予想される。先行研究では、重力による落下運動など馴染みのある物理法則に起因する運動は非生物的な印象を受けやすいことが分かっている [30]。弾性による振動もこれと同様に、身近な非生物的運動である振動が生物的な認知を阻害していると考察できる。

基本動作3は、1と2の動作で問題と感じられた三角関数による振動運動を用いない動作生成手法として開発した。動きの始点と終点を緩やかに加減速することで弾性による振動を減らし、かつランダムな移動を実現することで、空中を漂うように動く印象が3種類の中では一番強く感じられた。先行研究において、単純な質点の運動において、直線的な運動に大きな方向変化や速度変化が加わると意図が感じられ生物のような認知が行われることが分かっている [12]。振動運動による連続的な運動ではなく、直線的な動きと方向転換の組合せにしたことにより、意図を持った生物のような動きとして認知しやすくなったと考えられる。上記の理由から基本動作3を最も適当な基本動作と判断し、実際の作品に適用した。

5.3 センシングの評価

本研究では、センサを用いて接近方向の感知を行う。図5で示したように、センサには先端部の半球形状に合わせた3次元形状のアンテナを用い、4つのセンサを円周上に配置する。このセンシング方式による接近方向の検出に関する評価を行った。

まず、1本の指で先端に触れた際のセンサ値を調べた。すべての方向からの接近をシミュレートするため、先端に指を触れさせた状態でセンサを保持する先端部をモータを用いて等速回転させ、接近方向をつねに変化させながらセンサ値を記録する実験を行った。指の接触による摩擦で回転速度が変化しないよう、十分な出力を持つよう減速されたモータを用いた。モータは約 22 rpm の速度で回転させ、センサ値は 0.1 秒ごとに記録した。この実験によって記録したセンサ値のグラフを図 12 に示す。ここで示しているデータは2回転分であり、センサ値はマイコンによって離

散化した値である。センサには取り付け方などによる個体差があるため、非接触時のセンサ値を0に揃え、同じように触った際の値をセンサ間で合わせるキャリブレーションを行っている。よってグラフの値はキャリブレーション済みの値である。横軸は時間軸であるが、等速回転を行っているため先端の回転角とほぼ近似できるため、角度で示している。

指先を接触させるこの実験では、各センサへ最も接近する角度では他のセンサの値がほぼ0になり、また2つのセンサの中間点を触れていると考えられる角度では2つの値が等しくなっていることが分かる。接触の方向の推定は、各センサの取付方向のベクトルにそれぞれのセンサ値をかけたベクトルを合成することで行う。この実験における推定値は図13となり、センサに最も接近する4点と中間点の4点では正確に推定できていることが分かる。しかし、センサ値の減衰がリニアではないためそれ以外の点では実際の角度と推定値のずれが生じる。また、センサに最も接近する点とセンサの中間点ではセンサ値の差が大きく、回避ベクトルの大きさも異なることが分かった。

本作品では鑑賞者による先端の触れ方を規定しないため、様々な方法で触れることが想定される。指先で触れるのではなく、掌で球体部分を包むようにして同様の実験を行った。先端部のキャップから10mmほど離れた位置で手を球体に沿うような形にし、その状態で静止しながら先端部を回転させセンサ値の変化を測定した。この測定結果のグラフが図14である。指先で触れた実験とは異なりつ

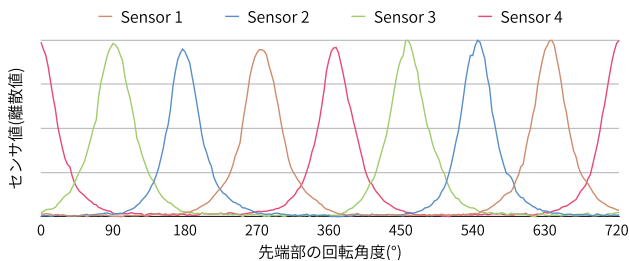


図12 指先で先端部に触った際のセンサ値

Fig. 12 Sensor value (touching the head with fingertip).

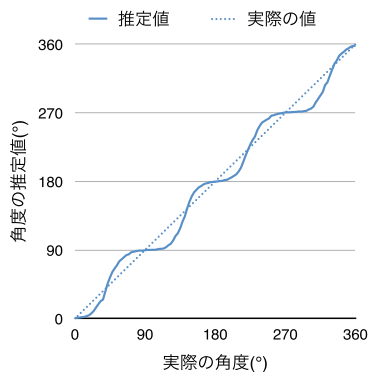


図13 指を接触させた際の推定角度

Fig. 13 Estimated direction (touching the head with fingertip).

ねに3つのセンサが反応している。この測定結果から角度を推定すると図15のようになり、指1本で触れた状態より推定の精度があがっていることが分かる。また、回避ベクトルの大きさもすべての角度においてほぼ等しくなる。

接触方向の推定は、触れ方によって精度は異なり、実験結果から面積の小さい接触の場合精度が低くなることが分かったが、指1本で触れる際でも推定値のずれは45°未満となることが分かった。本研究では動きながらセンシングを行い、推定した角度から回避運動を生成することで生物のような認知効果を実現することを目的としている。この用途においては、Planulaで用いたセンシングの精度は十分であると考えられる。一方で、より正確な方向認識のためには、センサの数を増やすことが有効であると分かった。

5.4 ユーザテストによる評価

本研究は、システムを動きやインタラクションによって鑑賞者に生物のような認知を与えることを目的とする。このようなユーザに対する認知的効果の評価のためユーザテストを行った。

このユーザテストでは、12名(男性9名、女性3名)の被験者にPlanulaを見てもらい、アンケートと口頭での質問によって印象の評価を行った。アンケートにはBartneckらが開発したロボットの生物らしさを評価するための5段階の評価項目[31]から重複項目や本システムと関係のない設問を省いたものを用いた。被験者には、動いていない状態のPlanulaと、4.5.1項で述べた3種類のモーションを見

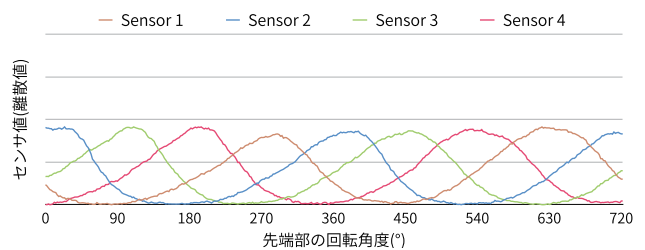


図14 掌で先端部を覆った際のセンサの値

Fig. 14 Sensor value (covering the head with palm).

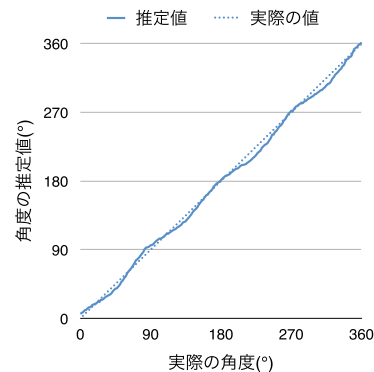


図15 掌で先端部を覆った際の推定角度

Fig. 15 Estimated direction (covering the head with palm).

てもらい、それぞれ印象評価を行った。その後、Planulaに触れるよう促し、インタラクションの印象評価を行った。その後、口頭でそれぞれの動きやインタラクションを行ったときの印象を聞いた。

被験者によるアンケートの結果の平均値は図 16 のようになった。インタラクションを持ったものでは、「生物的」「意識を持っている」という項目において 12 名中 10 名、「生きている」という項目においては 12 名中 11 名が 4 以上の評価をしており、生物のような印象を与えることには成功していると考えられる。口頭での評価でも、「触ったことへの反応が犬みたい」「犬や猫みたいに予想外のことをされたみたい」と生物に例える感想が得られた。一方で、基本動作では静止時よりは生物らしさに関する項目は高くなっているものの、評価の値はあまり高いものにはならなかった。

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

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

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

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

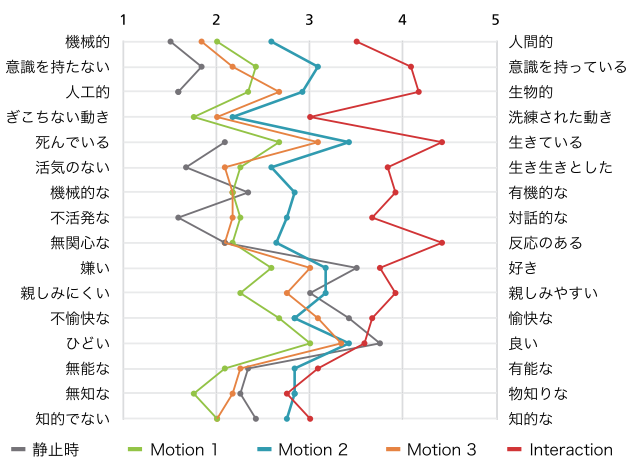


図 16 ユーザーテストの結果
Fig. 16 Result of user test.

5.5 展示による評価

Planula に対して鑑賞者がどのような反応を示し、どのようなインタラクションを行うかを観察するため、展示発表を行った (図 17)。2014 年 6 月 2 日～8 日の 7 日間、東京大学生産技術研究所内のギャラリーで筆者らが開催した「Bio-likeness—生命の片鱗」展において公開を行った。本展には 1,074 名の来場者があり、多くの人に本作品を体験してもらうことができた。タイトルにも「生命」という単語を使っているとおり、本展は筆者らが人工物の持つ生命や知性の兆候を感じる振舞いをテーマにしており、人に生き物らしいという認知を与えるために製作したプロトタイプ群を展示している。本作品もそれらの一部として展示しており、来場者には本作品は生き物のような認知を目的と



図 17 展示の様子

Fig. 17 State of exhibition.

して製作したという事前情報を与えている。

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

6. 考察と展望

本稿では、人を探るように動き、人の接触を感知してインタラクションを行う、生物のようなセンサノード型ロボット「Planula」について述べた。センサやマイコンを含

めたミニマルな知能システムを小さくパッケージし、透明な素材を使用したり、注視対象となる先端部を発光させたりすることで支持部を目立ちにくくし、先端部を目立たせるアピランスを実現した。通信のためのケーブルも全体と色や質感を合わせるなど、認知効果に重点をおいた素材選びはインタラクションデザイン研究においてあまり言及されていないが、本研究のように作品のアピランスがインタラクションに大きく影響する研究においては効果的であると感じた。

動作構造の設計では、弾性体の支柱を直交する 2 方向の曲げを制御するモータによって屈曲させ、支柱を中心とする円内を先端が動く構造を提案した。素材の屈曲を用いているため先端の移動に正確な位置決めはできないが、おおむねモータの変異に応じて移動距離も変化することが分かった。また、モータの合力を用いると全方向への曲げが可能になり、支柱内を自由に移動させることができることが分かった。この動作構造に 2 次元座標で近似し製作した動作アルゴリズムを与えたところ、おおむね 2 次元座標上でのシミュレーションと同じ印象の動きが実現できた。従来の床面移動型のロボットとは違う対象が空中を漂うような動きを実現でき、かつ自由度の高い動きが実現できる点で、抽象度の高い形状で生物のような認知を実現する目的において本手法は有効であると考えられる。一方で、動作生成構造の特性上、弾性による意図しない振動が起るため、この振動が動きの印象に影響を与えないような制御が必要だということが分かった。

本作品は、先端部に人が近づくと反応するインタラクションを実装していたが、説明しない状態で先端部を触ろうとする鑑賞者は少なかった。アート作品として展示しており、樹脂とアルミを用いた先端部のデザインは冷たく硬い印象を持ち、触れてはいけない印象を与えてしまったと考えられる。センサノードとして実際に特定の操作を促す場合、その操作に適したアピランスでデザインすることが有効であると考えられる。本研究のように人の接触をインタラクション対象とする場合、先端を柔らかい素材で作るなど、先端を触ることをアフォードするような工夫が必要だと感じた。

インタラクションの設計に関して、静電容量センサによるセンシングは、センサを露出せず自由な外観デザインを実現できる点で効果的だったと考えられる。本作品では、センサのアンテナを先端の半球形状に合わせて設計しキャップ内に収めることで、鑑賞者の様々な触り方に応じたセンシングを実現した。本研究のようなフィジカルな対象との接触インタラクションを設計するうえで、対象の素材や形状は重要な要素である。静電容量センサを用いることで自由度の高い素材や形状でのタッチインタラクションを設計する研究は先行研究でもなされていたが、3 次元形状に立体的に配置し接触方向を特定することができた点で

本研究の手法は有益だったと考えられる。この手法を応用することで、より複雑な3次元形状に対しても、触り方や接触方向の検出が可能になると考えられる。展示による反応を観察した結果、接触に対して回避運動を行うインタラクションの挙動に対しては、ユーザがロボットの意図として認知している様子が感じられ、著者らの設計意図どおりの印象を与えられたと考察できる。一方で、接触に対するセンサの反応によって回避反応に遅延が出る状況も観察され、インタラクションを行っていないと認知する鑑賞者もみられたことから、センサの感度に対する反応速度などはまだ検討が必要だと感じた。

本研究では、環境知能が人を感知しようとする振舞いを、人を探すような動きのデザインと人の検出に反応して動くインタラクションによってユーザに伝えるデザインを行った。従来の環境知能が用いていたディスプレイ表示や会話型エージェントロボットによる情報伝達やコミュニケーションに比べると伝達の正確性は劣るが、アンビエントメディアのような周辺認識を用いた情報提示とシンプルなインタラクションが実現できた点で有益だと考えられる。生物らしく振る舞わせることによって、ユーザが積極的にセンサに触れようとするようになったという点は、環境知能のあり方を考えるうえで有益な知見になったと考えられる。一方で、本研究の手法はユーザが手で触れるセンサにのみ有効であり、拡張性が高いとはいえない。しかし、カメラの場合ではロボットのカメラに対しては友好的な印象を受けるという知見 [4] や、擬人化することによって積極的に「見られる」ようになったという例 [22] もある。他の環境知能にも、センサに適した生物らしい振舞いを与える、という本研究のアプローチは適応可能であり、有益なのではないかと考えられる。環境知能の擬人化が他のセンサに対しても行われると、本システムのようなロボットが生活に多く用いられることになり、ユーザの認知不可が大きくなるなどの問題も想定される。板垣らは、部屋のシステム間をエージェントが転移するようなシステムを提案している [25]。生物のようなセンサロボットが多く用いられる空間では、このようなシステムを応用することでこれらのセンサ群とのコミュニケーションがスムーズになるのではないかと考えられる。

本研究では人を感知し、人の接触に反応するセンサロボットのデザインとして、空間に生えた触角のようなロボット Pplanula を提案した。センサが対象を感知しているという様子を、生物のような動きやインタラクションを与えることで鑑賞者に伝えることに成功した点で、本研究の目的を満たしたと考えられる。現在は静電容量センサを用いており人が接触したことしか検知できないが、接触式の別のセンサと組み合わせることで、環境において人から情報を取得するネットワークセンサの1つの形となると予想される。一方で、アクチュエーション手法やインタラク

ションの誘発においてははまだ課題もみられたため、他のアクチュエーション手法の研究やインタラクション設計の可能性も今後探っていきたい。

参考文献

- [1] 山本大介：情報端末としてのロボット，日本ロボット学会誌，Vol.32，No.3，pp.252–254 (2014).
- [2] 萩田紀博：ネットワークロボット概論，電子情報通信学会誌，Vol.91，No.5，pp.346–352 (2008).
- [3] Zagler, W.L., Panek, P. and Rauhala, M.: Ambient Assisted Living Systems – The Conflicts between Technology, Acceptance, Ethics and Privacy, *Assisted Living Systems - Models, Architectures and Engineering Approaches* (2008).
- [4] 上田博唯，山崎達也：ユビキタスホーム：日常生活支援のための住環境知能化への試み，日本ロボット学会誌，Vol.25，No.4，pp.494–500 (2007).
- [5] 前田英作，南 泰浩，堂坂浩二：妖精・妖怪の復権：新しい「環境知能」像の提案，情報処理，Vol.47，No.6，pp.624–640 (2006).
- [6] 塩原守人：4. 静脈のバイオメトリクスセキュリティ，電子情報通信学会誌，Vol.89，No.1，pp.40–45 (2006).
- [7] 千 明裕，前田篤彦，小林 稔：容積脈波を取得可能な面センシング手法の実装と評価，情報処理学会論文誌，Vol.53，No.4，pp.1229–1237 (2012).
- [8] Cook, D.J., Augusto, J.C. and Jakkula, V.R.: Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities, *Pervasive Mob. Comput.*, Vol.5, No.4, pp.277–298 (2009).
- [9] 石井 裕：Tangible Bits：情報の感触/情報の気配，情報処理，Vol.39，No.8，pp.745–751 (1998).
- [10] 山田誠二：人とロボットの“間”をデザインする，東京電機大学出版局 (2007).
- [11] Scholl, B.J. and Tremoulet, P.D.: Perceptual causality and animacy, *Trends Cogn. Sci.*, Vol.4, No.8, pp.299–309 (2000).
- [12] Tremoulet, P.D. and Feldman, J.: Perception of animacy from the motion of a single object, *Perception*, Vol.29, No.8, pp.943–951 (2000).
- [13] Walter, W.G.: An Imitation of Life, *Scientific American*, Vol.182, No.5, pp.42–45 (1950).
- [14] 小松孝徳，山田誠二：ロボットが表出する情報と外見がユーザの態度推定に与える影響，情報処理学会研究報告ICS [知能と複雑系]，Vol.2005，No.109，pp.1–8 (2005).
- [15] Brooks, R.: A robust layered control system for a mobile robot, *Robot. Autom. IEEE J.*, Vol.2, No.1, pp.14–23 (1986).
- [16] 小林一樹，山田誠二：擬人化したモーションによるロボットのマインド表出，人工知能学会論文誌，Vol.21，No.4，pp.380–387 (2006).
- [17] 三宅泰亮，山地雄士，大島直樹，デシルバラピンドラ，岡田美智男：Sociable Trash Box：子どもたちはゴミ箱ロボットとどのように関わるのか，人工知能学会論文誌，Vol.28，No.2，pp.197–209 (2013).
- [18] Ueki, A., Watanabe, K. and Inakage M.: CREATURES – Designing of Interactive Interior Lamps, *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches* (2006).
- [19] 中安 翌，富松 潔：Tentacles：形状記憶合金アクチュエータを用いたイソギンチャクの触手の蠢きの表現，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.17，No.4，pp.299–305 (2012).
- [20] 河野通就，星 貴之，笈 康明：lapillus bug：音響浮揚による粒子の空中移動制御とインタラクション，エンタ

テインメントコンピューティングシンポジウム 2013 論文集, Vol.2013, pp.41-46 (2013)

- [21] Breazeal, C., Brooks, A., Hancher, M., Strickon, J., Kidd, C., McBean, J. and Stiehl, D.: Public Anemone: An Organic Robot Creature, *ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications*, p.76 (2002).
- [22] 山中俊治: 生物の形態と人工物のかたち, *デザイン学研究*, 特集号, Vol.12, No.4, pp.20-23 (2005).
- [23] 南 泰浩, 前田英作, 堂坂浩二: まっしゅるーむの世界—知能統合の実現に向けて, *NTT 技術ジャーナル*, Vol.19, No.6, pp.19-22 (2007).
- [24] 美濃導彦: ユビキタスホームにおける生活支援, *人工知能学会誌*, Vol.20, No.5, pp.579-586 (2005).
- [25] 板垣祐作, 小川浩平, 小野哲雄: ITACO on the Room: アンビエントな情報提供を行う生物感のあるエージェントの提案, *HAI シンポジウム 2008* (2008).
- [26] Zimmerman, T.G., Smith, J.R., Paradiso, J.A., Allport, D. and Gershenfeld, N.: Applying Electric Field Sensing to Human-computer Interfaces, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.280-287 (1995).
- [27] 福地健太郎, 暦本純一: SmartSkin を用いた多点入力システムの実装, *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.7, pp.1682-1692 (2005).
- [28] 榊原吉伸, 林 宏憲, 平井重行: TubTouch: 湯水の影響や自由形状への適用を考慮した浴槽タッチ UI 環境, *情報処理学会論文誌*, Vol.54, No.4, pp.1538-1550 (2013).
- [29] Penner, R.: *Robert Penner's Programming Macromedia Flash MX*, McGraw-Hill Osborne Media (2002).
- [30] 中村 浩, 鷺見成正: 単一物体運動における生物性・非生物性知覚に寄与する運動情報の研究, *電子情報通信学会技術研究報告 IE*, 画像工学, Vol.101, No.627, pp.95-100 (2002).
- [31] Bartneck, C., Croft, E. and Kulic, D.: Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots, *Int. J. Soc. Robot*, Vol.1, No.1, pp.71-81 (2009).



阪本 真

2013 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。在学時はロボットデザインおよび筋電義手のデザインの研究に従事。



山中 俊治

1982 年東京大学工学部卒業。同年より日産自動車デザインセンター勤務。1987 年よりフリーのデザイナーとして独立。1991~1994 年東京大学客員助教授。1994 年にリーディング・エッジ・デザインを設立。2008~2012 年慶應義塾大学教授。2013 年 4 月より東京大学教授。専門はデザインエンジニアリング, プロダクトデザイン, ユーザビリティエンジニアリング。



村松 充 (学生会員)

2010 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。現在, 同研究科後期博士課程在学中。プロダクトデザインおよびロボットデザインの研究に従事。



神山 友輔

2010 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。在学時はプロダクトデザインおよびロボットデザインの研究に従事。