

MechAnima：からくりとしての群ロボット

末澤 悠己^{1,a)} 矢作 優知^{1,2,b)} ソン ヨンア^{1,c)}

概要：「からくり」は、動きの面白さやその因果関係を想像する楽しを提供してきたが、その構造は装置内部に固定されていた。本稿では、この「からくり」を装置の物理的制約から解放し、広い意味でのメカニズムとして拡張した MechAnima を提案、実装した。本システムは斜面フィールド上の群ロボットで構成され、各個体が最新の状況に応じて変化する関係性を介して協働し、ボールをゴールへ運搬するタスクを繰り返し実行する。鑑賞者はロボットの配置や構成を自由に変更でき、群ロボットはこの介入を環境変化として受け入れ、タスクの実行方法を動的に再構成する。

1. はじめに

江戸時代の茶運び人形などのからくり人形に端を発し、現代のクリエイター作品 [1] に至るまで様々な形に発展してきた「からくり」は、目的を達成する効率や速度を追求するよりも、目的の達成に至るまでの動きそのものを鑑賞する装置として、広く長く親しまれてきた。さらに、その動きがどのような因果関係によって生み出されているのか、つまり、力や運動がどのように変換・伝達され、連鎖しながら動きを作り出しているのかを想像することができる点も、「からくり」の魅力の重要な側面である。設計、制作の場においても、構成要素の役割や仕組みを理解し、意図した動きを作り出していく過程は重要である。

「からくり」には非常にさまざまな種類のものがあるが、本稿では「からくり」を、複数の役割を有する構成要素が噛み合わせることによって目的を達成するメカニズムとして包括的に捉える。従来の「からくり」において、構成要素は歯車や滑車、カムやリンク機構などの機械要素や、それらを支える骨格や外装のことを指し、これらが物理的に噛み合うことによって動きが成立する。多くの場合、構成要素の間の関係性は装置内部に固定された構造として組み込まれており、鑑賞者は外部からその関係性を想像し、鑑賞しながら楽しむ立場に置かれる。この構造は精密な動きを実現しやすい一方で、鑑賞者が構成要素を直接組み替えるような干渉は想定されにくい。

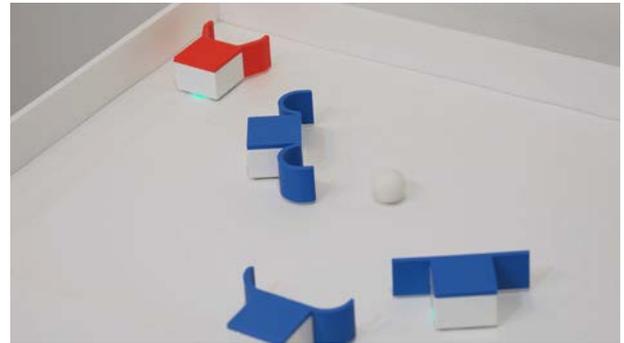


図 1 からくりとしての群ロボット：MechAnima

そこで本稿では、先述した「からくり」の本質である、構成要素が噛み合いながらタスクを実行する枠組みを維持したまま、装置に固定された機構としてのあり方を、鑑賞者が物理的に介入し、容易に仕組みを組み替えることができる形に拡張することを目指し、「からくり」システム MechAnima を提案する (図 1)。

MechAnima は、斜面フィールド内のロボット群が協働し、樹脂製のボールをフィールド内にあるゴールへ運搬するタスクを繰り返し実行するシステムである。それぞれ特有の役割を有するロボットの各個体は限定的な認知に基づき行動し、「呼び出し」という関係性を介しつつ、ボールの運搬を試みる。鑑賞者はロボットを手に取り、フィールド内のロボットの種類、構成、配置に物理的かつ直接介入することができる。群ロボットはこれを予期せぬ環境変化として受け入れ、これに合わせる形でタスクの実行方法を動的に変化させる。

本稿では、このような群ロボットの協働と、介入によってシステムが動的に再構成される過程を扱い、「からくり」をよりインタラクティブなメカニズムとして捉え直す。

¹ 法政大学
Hosei University

² 日本学術振興会特別研究員 DC
JSPS DC

a) sue@affectedesignlab.com

b) yuchi@affectedesignlab.com

c) seong@hosei.ac.jp

2. 関連研究・事例

「からくり」が様々な形で現代まで愛されていることは、複数の事例から確認することができる。江戸時代の田中久重作の弓曳き童子 [2] は、矢をつがえて的に向けて射る一連の動作を表情を含めて精密に表現したからくり人形として知られており、現代でも稼働可能な状態で保存され、科学・教育分野などで参照されている。また、名古屋を中心とした尾張地方の祭礼行事では、山車の上でからくり人形を上演する文化がある。愛知県半田市で行われる半田山車祭りでは多数の山車にからくり人形が搭載され、現代でも維持・継承され定期的に上演されている [3]。さらに、現代のクリエイターにおける実践として、からくりすと [1] は、「からくり」に関する作品制作に加え、Web サイトや動画共有サイトを通して「からくり」の構成要素や作品の制作背景などの知見を共有しており、「からくり」を理解し、作ることによる楽しみを広げている。

本システムでは、「からくり」を概念的に拡張し、鑑賞者の介入に開かれたものにするために、複数のロボット個体が協働するシステムである群ロボットを採用した。HCI の領域では、群ロボットのユーザーインタフェースへの応用が研究されており、Swarm User Interface と総称されることもある。先駆的な研究である Zooids [4] は、小型の自律駆動するロボットを UI の最小単位として扱い、各個体の配置によって物理的なインタフェースや情報の表現を構成する手法が提案された。ここでは、単体では意味を持たないロボットが、群として振る舞うことで機能や意味を獲得することが示されており、構成要素の組み合わせで動きを成立させる「からくり」としての本システムとは一部共通したものがあつつ、各構成要素に役割を付与し、その役割の組み合わせの更新を前提としている点で位置付けが異なる。また HERMITS [5] では、自律駆動するロボットが受動的アタッチメントを自動的に着脱することで、ロボットの機能やインタラクションの性質を動的に拡張した。この研究では、機能がロボットの内部に固定されず、外部のアタッチメントを装着することで動的に機能を変化させることができるシステムを成立させている。本研究では、ロボット自体はそれぞれ付与された役割を持ちつつも、それらの関係性が動的に変化することによってインタラクションを変化させることができる。

一方、インタラクティブアートの文脈では、かぞくち [6] のように、個体同士の関係性が自律的に変化するシステムを提示する作品が存在する。この作品では、鑑賞者は作品の要素に直接関与するわけではなく、関係性が作品内部のルールに基づいて成立、変化していく過程を観察する存在として位置付けられている。また、MURMURING MINDS [7] では、複数の自律的なロボットが空間の中で群

として振る舞い、鑑賞者の動きに対して集団の動きが変化するインスタレーションが提示された。個々のロボットは単純な行動規則に基づき行動しているが、それらが集合することで、有機的な意図を感じさせる群の振る舞いが生じる点が特徴的である。本研究においても、ロボットの機能や認知を抑えつつ、それらが組み合わせることで群としての動きを見せるという構造を重視している。

本システムは、このように現代でも広く愛されている「からくり」を拡張する。本システムは、各ロボットがあらかじめ異なる役割や振る舞いを有する構成要素として設計され、それらが空間内で相互作用することで群としての振る舞いが成立するという点に特徴がある。ロボット単体の機能や意味を切り替えるのではなく、制限された機能や認知を持った構成要素の関係性が変化することで、全体の動きが変化する構造を採用しており、鑑賞者はこれに対して物理的に干渉しながら、変化を観察する立場にある。すなわち本システムは、個々の要素が持つ性質と、それらの関係性によって動きが成立する過程そのものを「からくり」として提示するものであり、鑑賞者はこの過程に干渉することができる。

3. 提案システム：MechAnima

3.1 環境に適応し、動的に動く「からくり」

MechAnima は、鑑賞者の介入を含んだ環境変化に適応し、動きを変化させるメカニズムとして拡張された「からくり」である。本システムでは、斜面フィールド (図 2) 内のロボット群が協働し、ボールをゴールへ運び入れるタスクを繰り返し実行する。鑑賞者はロボットを直接手に取ることで群ロボットの種類、構成、配置に介入することができるが、ロボットは人間の存在を認知せず、この介入はロボットにとって予期せぬ環境変化として作用する。群ロボットはこの環境変化にタスクの実行を止めることなく適応し、振る舞いを変化させながらタスクの達成を試みる。

この設計を成立させるため、本システムでは以下の方針を採用した。

- (1) フィールド内の全てのロボットが共通のタスクを有し、協力しながらその達成に動くこと。
 - (2) ロボットの各個体は限定的な認知に基づいて行動すること。
 - (3) ロボット同士は環境に応じて動的に変化する「呼び出し」という関係性で定義され、これを連鎖させることでタスクを実行すること。
 - (4) 群を構成するロボット各個体には異なる役割があり、それぞれの役割に応じて異なる動きをすること。
- 以降の章で、これらの設計方針について詳述する。

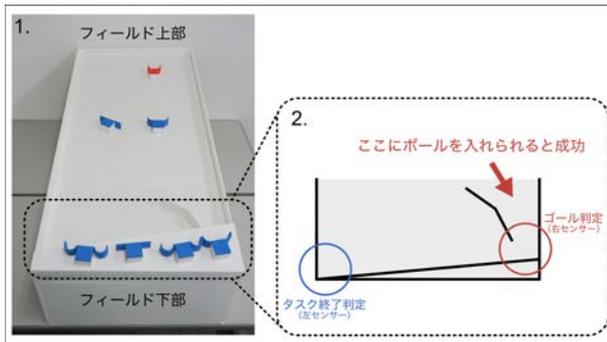


図 2 -1. 斜面フィールドの全体像, -2. フィールド下部の構造

3.2 タスクの定義

本システムでは、フィールド内のロボットに群としてまとまった動きをさせるために、斜面フィールド内にいるロボット群の各個体がフィールド上部から重力に従って落ちてくるボールを受け止め、ボールの受け渡しを連鎖させながらフィールド右下に配置されているゴールに運搬することを、全てのロボットが共通して有する目的（タスク）として定義した。

ボールはゴールに到達したかどうかにかかわらず、最終的には重力に従ってフィールド左下の特定の場所に到達する。ボールがフィールド上部から落とされてから、最終的にフィールド最下部に来るまでをタスク 1 回の試行とし、後述する”Starter”ロボットによって再スタートされることでタスクは自動的に繰り返し実行される。

3.3 ロボットの動き：個々の認知

ロボットの各個体は、自らがフィールド内にいるかどうかや、周囲のロボットの位置、何かに衝突したかどうかなどの限られた範囲の認知機能しか有しておらず、ある種場当たり的な動作を見せる。これは、全体の振る舞いが構成要素の動きによって成立する群ロボットとしての特性を損なわないためである。

ロボットはフィールド内にいる際は全ての動作を止め、鑑賞者によってフィールド内に配置された際は、その場で待機状態に入る。待機状態のロボットはそれぞれの役割に応じた振る舞いでその場に待機する。待機状態のロボットは後述する「呼び出し」機能の対象となり、呼び出された場合はその位置に移動する。ロボットは厳密にボールの位置を認識せず、限られた認知を組み合わせる自らがボールを所有していると認識した際に、それぞれの役割に応じて、ボールを受け渡す特有の動作を行う。ロボットは移動する際に周囲のロボットと衝突しないように動き、待機状態にいるロボットも、移動中のロボットの経路の邪魔になる場合は、衝突やスタックを避けるように動く。

タスクの実行に成功、もしくは失敗した場合、フィールド内にいる全てのロボットがタスク成功の可否に応じてアクションを起こす。

3.4 ロボットの動き：個体同士の関係性

ロボット同士の関係性、およびロボット同士が連携しながらボールを受け渡す方法として、本システムではロボットに「呼び出し」という機能を定義した。これは、ロボットがボールを受け渡し動作を実行する際に、あらかじめ受け渡し相手のロボットを自らの座標からオフセットをかけた所定の座標に待機させておく機能である。ロボットの役割ごとに、「呼び出し」を行うタイミングや「呼び出し」先の座標は異なる。

ロボットは「呼び出し」を行う直前に、ボールを受け渡す相手として最も適切なロボット個体を 1 体検索し、その個体を「呼び出し」する。最も適切な個体は、以下の 3 つの条件により決定される。(2) と (3) では、(2) の条件が優先される。

- (1) フィールド内に存在する、待機状態のロボットであること。
- (2) 呼ばれた回数が最も少ないロボットであること。
- (3) 自らの位置から最も近い距離にいるロボットであること。

「呼び出し」の対象は最新の状況に応じて決定されるため、タスクの実行中であっても、鑑賞者による配置や構成への介入に応じて、リアルタイムにかつタスクの実行を止めずにタスクの実行方法を柔軟に変化させることができるようになっている。この「呼び出し」を連鎖させつつ、ボールを受け渡ししながら、群ロボットはフィールド上部から下へ下へとボールを運搬する。フィールド下部の所定のエリアにたどり着くか、有効な「呼び出し」対象がない場合、ロボットは「呼び出し」をスキップしてボールをゴールに入れるを試みる。

ロボットはフィールドの左右どちら側に存在するかによって、待機角度や「呼び出し」先の座標、ボール所有時の動作などの一部が変化するようにしており、ロボットがフィールドを飛び出さないようにしている。

3.5 ロボットの動き：4 種類の役割のロボット

本システムでは、ロボットの組み合わせによりタスクの実行方法が変化するようにするために、ボールの受け渡し方法などの振る舞いが大きく異なる 4 種類の役割のロボットを実装した (図 3)。

3.5.1 ”Starter”ロボット：タスクを開始するロボット

”Starter”ロボットは、かご型のアタッチメントを装着したロボット (図 3-1 上段) で、ボールがフィールド最下部に到達した際に、ボールを最下部から拾い上げ、フィールド上部に運び上げてタスクを再開させる役割を持つ。本システムがタスクを繰り返し実行するために必要不可欠なロボットであり、その特性上、他 3 種の役割のロボットと異なり常にフィールド内に 1 体のみ配置される。また、待機

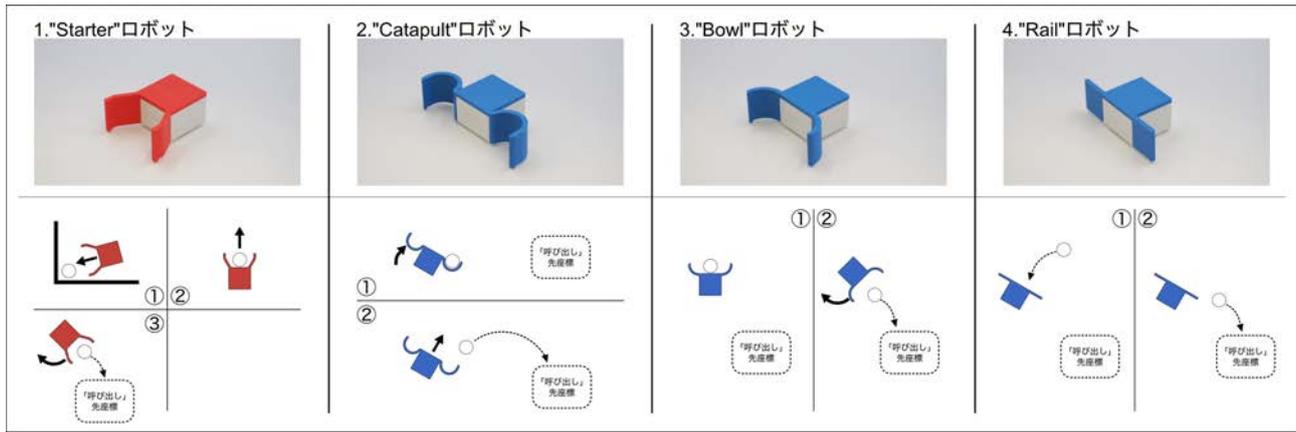


図 3 4 種類のロボットの形状、動作フロー

状態が存在せず、他ロボットの「呼び出し」の対象にならないという特徴を有しており、タスク終了後に再びタスクを開始させる役割のみを常に実行する。

フィールド最下部にボールが到達した後、「Starter」ロボットは所定の地点へ向かい、フィールドの壁面と装着したアタッチメントで挟み込むような形でボールを回収し、フィールド上部にボールを運搬する。その後他ロボットを自らの位置から下に「呼び出し」し、ゆっくりと回転してボールを下に落とす動きをする(図 3-1 下段)。一連の動作を行った後、「Starter」ロボットはフィールド最下部に再度ボールが到達するまで動作を停止する。

3.5.2 「Catapult」ロボット：投げ飛ばすロボット

「Catapult」ロボットは、左右に窪みのついたアタッチメントを装着したロボット(図 3-2 上段)で、保有したボールを斜め上に投げ飛ばす役割を持つ。待機状態では常にフィールド上部を向いた状態で待機する。

ボールを所有していると認識した時、「Catapult」ロボットは自らの位置から左右どちらかに他ロボットを「呼び出し」し、その後斜め上を向き、高速で前進することでボールを斜めに投げ飛ばす(図 3-2 下段)。左右どちらにロボットを呼び、どちらの方向にボールを飛ばすのかは自らがフィールドの左右どちら側に存在するかによって変化し、左側にいる際は右に、右側にいる際は左側に投げる。一連の動作を行った後、「Catapult」ロボットは再び待機状態に入る。

3.5.3 「Bowl」ロボット：受け渡すロボット

「Bowl」ロボットは、お椀型のアタッチメントを装着したロボット(図 3-3 上段)で、保有したボールを下に受け渡す役割を持つ。待機状態では常にフィールド上部を向いた状態で待機する。

ボールを所持していると認識した時、「Bowl」ロボットは自らの位置から左右どちらかの斜め下に他ロボットを「呼び出し」し、その後ゆっくりと回転することでボールを下に落として受け渡す(図 3-3 下段)。左右どちらかにロボット

を呼ぶのかは自らがフィールドの左右どちら側に存在するかによって変化し、左側にいる際は右に、右側にいる際は左にロボットを呼び出す。一連の動作を行った後、「Bowl」ロボットは再び待機状態に入る。

3.5.4 「Rail」ロボット：左右に流すロボット

「Rail」ロボットは、レール状のアタッチメントを装着したロボット(図 3-4 上段)で、ボールを所有することなく、重力に従ってボールを左右に流す役割を有する。待機状態では、自らがフィールドの左右どちら側に存在するかに応じた方向を向いており、左側ではレールが右肩下がりに、右側ではレールが右肩上がりになるような角度で待機する。これにより左側にいる際にはボールを右に、右側にいる際には左側に重力に従って流すことができる(図 3-4 下段)。「Catapult」ロボットや「Bowl」ロボットと異なり、アタッチメントの形状の都合上ボールを保持することが難しいため、ボール所有時の動きは存在しない。

自らが他ロボットに「呼び出し」された際、同時に自らも「呼び出し」先の位置から左右どちらかの斜め下に他ロボットを「呼び出し」することで、連続的にボールが流れる経路を作り出す。

3.6 鑑賞者とシステムの関係

本システムでは、鑑賞者は予期できない環境変化を起こす役割を有している。鑑賞者は群ロボットと必ずしも同じ目的を共有している必要性はなく、自らの興味に従って、フィールド内のロボットを直接手に取って動かすことで群ロボットに干渉することができる。

群ロボットはこの干渉を、予期できない環境変化として捉えるが、本システムではフィールド内の全てのロボットが共通の目的を有し、最新の状況に応じてタスクの実行方法を常に変化させるという点において、鑑賞者による干渉を前提とせず、常にこのロジックに従いタスクの実行を繰り返す。

4. 実装

4.1 ロボット

実装した4種類のロボットはすべて、toio[8]に樹脂製のアタッチメントを装着することで実装した。toioは、プログラミング制御が可能な小型のロボットトイである。toioはtoioプレイマットと称される特殊なマットの上に置くことで、マットに印刷された特殊なパターンを読み取り、マット上にあるかどうか、およびマット上における絶対位置を取得する機能を有する。この機能をフィールド内にロボットが存在するかどうかの検知や、ロボットの動きの制御に利用している。toioはBluetooth通信を介してPCと接続され、Unityを用いて制御を行った。

ロボットの役割の指定、制御にはtoioそれぞれに付与されているローカルネームを用いた。Unityのインスペクタ上で、ローカルネームと役割の組み合わせを指定することで役割の指定を行うことが可能で、ロボットはPCとの接続後、指定された役割のロボットとして動く。

ボールを所有しているかどうかの判定には、toioが有する衝突検知機能を用いた。衝突検知の閾値は出荷時の規定値7から3まで下げており、より敏感に衝突に反応するように調整している。誤検知や誤動作を減らすため、衝突検知機能を有効にするのは、ロボットが他ロボットに「呼び出し」され、移動を完了した後のみに限定している。

4種類のロボットに取り付けた全てのアタッチメントは樹脂製で、toio上部のマウントに合う形で設計しており、容易にtoioに固定することができる。

4.2 ボール、および斜面フィールド

ロボットたちが運搬するボールは、樹脂製の直径20mmのボールである。3Dプリンタで造形し、重心の偏りがないように、造形時の樹脂の充填率（インフィル）を100%にしている。

ロボットがタスクを実行する斜面フィールドには、先述のtoioマットを利用している。toioマットは連番のマットを複数繋ぎ合わせることで、大きなマットとして利用することが可能であり、本システムではA3サイズのtoioマットを3枚繋ぎ合わせ、縦891mm、横420mmの大きさの縦長のフィールドとして実装した。斜面の傾きはロボットがグリップを失わずに制御できる約4°に固定されており、フィールドの枠組みにはスチレンボードを用いた。フィールドの周囲にはスチレンボードを用いて壁面を設けており、ボールがフィールドを飛び出してしまうことを防止している。

フィールド下部は右肩がりのスチレンボードの壁面を設けており、これにより落ちてきたボールは必ずフィールド左下に到達するようになっている。フィールド右下に

はゴールがあり、ゴールにつながる壁面を設けている(図2-2)。

フィールド最下部にボールが到達したかどうか、およびゴールにボールを運搬することに成功したかどうかの判定には、ToF方式の距離センサー、VL53L0Xを用いた。フィールド下部の左右に距離センサーを設けており(図2-2)、常に距離をセンシングする。2つの距離センサーはそれぞれ別の小型マイコン、M5Atom Liteに接続され、I²C通信を介して距離データをマイコンに送信する。2つのマイコンは受信した距離データが閾値よりも小さくなった際、シリアル通信でシグナルを送信する。2つのマイコンはそれぞれUSBケーブルを介してPCとシリアル通信しており、Unityが常にシリアル通信を監視している。システムは2つのマイコンから受信するシグナルをもとに判定しており、1回のタスク試行の中で、右センサーからのシグナルを受信した後に左センサーからのシグナルを受信した場合はタスク成功と、右センサーからのシグナル受信がない状態で左センサーからのシグナルを受信した場合はタスク失敗と判定する。

5. 展示とフィードバック

本システムを、研究室の展示会「おもいが流れる回路展」で、表参道のTIERS GALLERYにて2025年の12月5日から12月7日の3日間展示を行った。展示会には3日間で162名の来場者があり、その中の一部からフィードバックをいただいた。展示では、“Starter”ロボット1台と、その他3種類のロボット2台ずつの計7台のロボットを用意し、展示会の来場者が鑑賞者として自由にロボットを手に取りシステムに干渉できるようにした。

展示に来場した鑑賞者はロボットを手に取り、フィールド内のロボットを1種類の役割のロボットのみにしたたり、“Starter”ロボットのみにしたたり、逆に7台全てのロボットをフィールドに入れた際にどのようにタスクの実行方法が変化するかを予想、観察したほか、タスク実行中のロボットたちに干渉した際にどのようにその干渉に適応するかを観察した。

展示会の来場者からのフィードバックとしては、可愛さや健気さなど、ある種の生命らしさのようなものを本システムのロボットから感じる、という趣旨のもの、システム全体として協力しながらタスクを実行するさまが人間や社会のように見える、というもの、限られた認知を駆使しながら協力する様子に、まるでスポーツ観戦のような盛り上がりを感じる、というものなどがあった。

6. 考察

本章では、展示でのフィードバックを踏まえ、本システムが従来の「からくり」のどのような部分を継承し、拡張

したのかを考察する。

第1章で先述したように、本稿では「からくり」を、複数の種類の構成要素が噛み合いながらタスクを達成するメカニズムとして定義した。従来の「からくり」は、要素ごとの役割分担や動力伝達の関係が装置内部に固定されており、鑑賞者は外部から動きを楽しんだり、その因果関係を想像したりすることで面白さを得てきた。これに対し本システムは、「からくり」の構成要素を、複数の種類の異なる役割を有する自律駆動するロボットとして実装し、これらの関係性を状況に応じて変化する緩やかなつながりである「呼び出し」によって定義した。これにより、本システムは「からくり」の構造を、装置内部に固定されたものからフィールド内のロボット群による協働の形に拡張した。結果として、鑑賞者は完成した動きのみでなく、ロボットたちが協働しながらタスクを臨機応変に変化させる過程そのものも鑑賞の対象として「からくり」を楽しむことができるようになったと考えられる。

また、この拡張は、「からくりを作る・作り変える」という行為を、幅広い人々に楽しめるものとして開放したものである。従来の「からくり」では、構造や動作の組み合わせは設計者の技能・知識に大きく依存しており、多くの場合鑑賞者にとって「からくり」はその構造を再構成することができないものだった。一方で本システムは、鑑賞者がロボットを手に取り、フィールド内のロボットの種類・構成・配置を直接変更することができ、先述した緩やかなつながりによってシステムはその変化に適応して動的にタスクの達成方法を変化させる。これにより、鑑賞者は専門的な知識を必要とせず、「からくり」の構成要素の組み合わせを試行錯誤することができるようになった。すなわち、本システムは、「からくり」を設計する・再構成する楽しさを、部品の加工や精密な調整ではなく、フィールド内の配置の変更として再定義し、楽しみを享受できる人の範囲を拡張した。

さらに本システムでは、「からくり」の構成要素にあたるロボットの各個体の役割や認知機能を意図的に限定し、その瞬間の状況に基づいた場当たりの行動の連鎖としてタスクが実行されるように設計した。これにより、各個体は高い計画性を持たない一方で、「呼び出し」の対象が状況に応じて変化する中で、システム全体としては鑑賞者による介入や配置の変更に適応しながらタスクを実行することができる。展示で得られたフィードバックは、各要素の局所的な反応が連鎖することで、状況に柔軟に適応してタスクを達成する複雑な動きが、成功や失敗の揺らぎを含めた観察を可能にしたことを示していると考えられる。

まとめると、本システムは、従来の「からくり」の鑑賞する楽しさを維持したまま、鑑賞の対象を内部の構造にも拡張し、「からくり」を再構成する・作る楽しさを様々な人

にとって容易に得られるものへと拡張した。また、「からくり」の構成要素を結びつける関係性を、物理的な噛み合いから、状況に応じて変化する緩やかなつながりとして再定義することで、「からくり」の構造自体を様々な状況に適応可能なインタラクティブなものに拡張することができた。

7. まとめ

本稿では、「からくり」の動きの面白さや因果関係を想像する楽しさを、鑑賞者が物理的に介入できるように再構成する試みとして、MechAnimaを提案、実装した。本システムでは、斜面フィールド上で複数の役割を有するロボットが協働してタスクを繰り返し実行し、鑑賞者はロボットの種類・構成・配置を直接変更できる。システムはこの介入を環境変化として受け入れ、「呼び出し」によって連携の相手と経路を更新しながら、実行方法を動的に再構成し続ける。これにより、完成した動きだけでなく、要素と関係性の組み合わせが変化しながら立ち上がる過程そのものを鑑賞対象として提示した。

謝辞 本稿の執筆にあたり、その一部に Google が提供する Gemini (Gemini 3-pro)、および OpenAI 社の提供する ChatGPT (GPT-5.2 Thinking) を使用した。また、toio の実装に関して助言をいただいた東京大学 韓燦教先生に感謝する。

参考文献

- [1] 鈴木完吾: からくりすと (オンライン), 入手先 (<https://karakurist.jp/>) (参照 2026-1-6).
- [2] 日本機械学会: 機械遺産 第 61 号 (2013 年認定) からくり人形 弓曳き童子 (オンライン), 入手先 (https://www.jsme.or.jp/kikaiisan/heritage_061_jp.html) (参照 2026-1-8).
- [3] 半田山車祭り保存会: からくり人形-半田山車祭り保存会 (オンライン), 入手先 (<https://dashimatsuri.jp/miryoku/ningyou>) (参照 2026-1-9).
- [4] Le Goc, M., Kim, L. H., Parsaei, A., Fekete, J.-D., Dragicevic, P. and Follmer, S.: Zooids: Building Blocks for Swarm User Interfaces, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16)*, pp. 97-109 (2016).
- [5] Nakagaki, K., Leong, J., Tappa, J. L., Wilbert, J. and Ishii, H.: HERMITS: Dynamically Reconfiguring the Interactivity of Self-propelled TUIs with Mechanical Shell Add-ons, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '20)*, pp. 882-896 (2020).
- [6] 菅野 創, 加藤明洋, 綿貫岳海: かぞくっち (オンライン), 入手先 (<https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/kazokutchi/>) (参照 2026-1-6). 展示: ICC アニュアル 2022 「生命的なものたち」.
- [7] DRIFT: MURMURING MINDS (online), available from (<https://studiodrift.com/work/murmuring-minds/>) (accessed 2026-1-6). 展示: DRIFT Living Landscape.
- [8] Sony Interactive Entertainment: 小さなキューブ型ロボットトイ・toio (オンライン), 入手先 (<https://toio.io/>) (参照 2026-1-6).