からくりによる動力伝達特性を物理的な動きで表現する群ロボット

末澤　悠己[*1]　矢作　優知[*1*2]　ソン　ヨンア[*1]

Swarm robots that embody power transmission characteristic of a mechanism through physical motion

Yuki Suezawa[*1], Yuchi Yahagi[*1 *2] and Young ah Seong[*1]

Abstract – からくり装置が持つ複雑な動力伝達特性は、からくりの魅力であるとともに、直感的な理解が困難なものである。本研究では、モジュール型のからくりツールキットを群ロボットとしてデザインした。各ロボットは固有の特性を持つからくりのモジュールであり、伝達特性を物理的な動きで自ら表現する。ユーザーはこれらの動きを手掛かりにロボットを並び替え、システム全体の動力伝達の変化を探求できる。

Keywords : Mechanical Device, Mobile Robot, Swarm User Interfaces, Hands-on Play, Tangible User Interfaces

1. はじめに

カムや歯車などの機械要素を複雑に組み合わせることで多様な動きを表現するからくり装置は、江戸時代のからくり人形から現代のクリエイター作品[1]に至るまで、広く長く愛されてきた。からくりの大きな魅力は、完成されたからくり装置自体の動きの美しさだけでなく、その動きを作り出している内部の複雑な動力伝達パターンの設計にある。しかし、内部構造を理解し、自ら動きの設計を探求するためには、機械工学に関する一定の知識を要する。事前知識がない場合、からくり装置の動きだけで内部機構を推察するのは極めて難しく、内部機構を見ても機械要素の見た目だけでは直感的に動力伝達特性を理解するためには専門性が要る。従って、からくりの仕組みは多くの人に魅力的でありながら、その仕組みを理解して自ら設計するには高い障壁がある。

本研究では、誰でもからくりの構成要素を直感的に理解し、簡単に組み替えながら動きの変化を探索できる方法として、群ロボットを用いたモジュール型からくりツールキットを提案する（図1）。自律移動可能なロボットの上に加速や減速などの固有の動力伝達特性を有する歯車を装着し、その動力伝達特性を各ロボットの物理的な動きで表現する。ユーザーはロボットの動きから容易に動力伝達特性を理解し、自由にロボットを手に取って動力源に繋げ、組み替えながらからくりの複雑な仕組みを探求することができる。

*1: 法政大学デザイン工学部
*2: 日本学術振興会特別研究員 DC
*1: Faculty of Engineering and Design, Hosei University
*2: JSPS DC

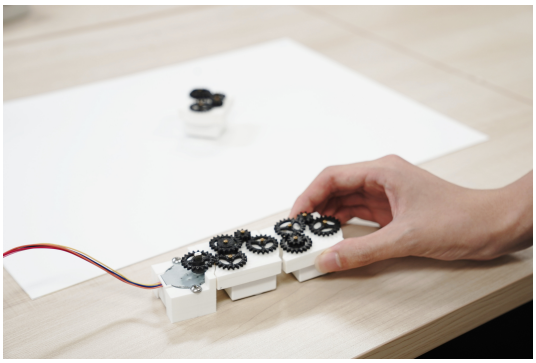


図1　群ロボットを用いたツールキット
Fig. 1　Swarm Robot-based Toolkit

2. 関連研究

自律駆動する群ロボットに受動的アタッチメントを組み合わせ、機能を拡張する研究は以前も多数行われている。HERMITS[2]では、mechanical shell と呼ばれる受動的アタッチメントをロボットが自動的に着脱することで、ロボットの機能を動的に拡張した。また、corobos[3]では、ロボットに特殊な構造を持つアタッチメントを装着し、ロボット同士が協調して押し出すことで卓上と壁面間を移行することに成功している。これらの先行研究では、ロボットはアタッチメントを駆動、作動させるための機能を有するアクチュエータ—としての役割が主であった。これに対し本研究は、ロボットが装着されたアタッチメントの有する機能、特性を可視化、表現することに役割を持っている点に独自性を有する。

Tabletop Interface 分野および Tangible User Interface 分野では、物理的なオブジェクトを手で動かしながら学習[4]やティンカリング[5]を促す研究が多数あ

り、これらの活動の中でオブジェクトが物理的に存在することの有用性を示している。タンジブルオブジェクトはユーザが操作する受動的な対象としてデザインされることも多いが、本研究ではタンジブルオブジェクトの自律的動作のデザインを探求する。

3. 提案システム

3.1 システム概要

提案システムは、機械要素を装着した群ロボットの各個体、動力源となるモーターユニット、群ロボットが動作する所定のエリア（以下、動作エリア）で構成される（図 1）。各ロボットは、装着する機械要素の動力伝達特性に応じて動きの特性が決まる。例えば、加速二段歯車を装着したロボットは、規定速度の 2 倍の速さで動き回る。本稿では「加速ロボット」、「減速ロボット」、「欠歯ロボット」の 3 種類を提案し（図 2、各ロボットは動作エリア内を等分割したエリア内で動き、互いに衝突しないようになっている（図 3）。一度動作エリア内の設定された場所から外れたロボットは、設定エリアに移動してから既定の動作を行う。

ユーザーはこれらのロボットを手に取ってエリア内から取り出し、エリア外に固定されているモーターユニットと連結させることができる。モーターユニットに繋がったロボットは自律的動作を止め、ロボットに装着されている歯車がモーターユニットの歯車と噛み合うことでモーターユニットから提供される回転動力を伝達し始める (図 4)。ユーザーは連結するロボットの種類や数、順番を組み替えることで、動力伝達の変化を探求することができる。

3.2 ロボットの動きのデザイン

からくり装置を構成する要素にはカム、リンク機構、滑車など様々なものが存在するが、本システムでロボットに装着する機械要素としては、回転動力を伝達する代表的な手段である歯車のみを採用した。その中でも、加速させる機能を持つ加速二段歯車機構、減速二段歯車機構、欠歯歯車機構を用いて、それぞれ「加速ロボット」、「減速ロボット」、「欠歯ロボット」の動きで動力伝達特性を表現する（図 2, 3）。

加速ロボットは、二段歯車機構を装着しており、連結されたとき、入力された動力を 2 倍加速して出力する。動作エリア内においては、(a) 該当エリア内のランダムな座標に移動し、(b) その地点で左右いずれかにランダムな時間回転するという (a),(b) の動作を素早いスピードで繰り返し行う。移動速度、および回転の速度は減速ロボットの 4 倍となっており、回転する秒数は 0 秒から 2 秒の乱数により指定される。

減速ロボットは、加速ロボットと同様な二段歯車機構を装着しており、連結されたとき、入力された動力を 2 分の 1 倍速して出力する。動作エリア内においては、(a) 該当エリア内のランダムな座標に移動し、(b) その地点で左右いずれかにランダムな時間回転するという (a),(b) の動作をゆっくりとしたスピードで繰り返し行う。移動速度、および回転の速度は加速ロボットの 4 分の 1 倍速となっており、回転する秒数は 0 秒から 2 秒の乱数により指定される。

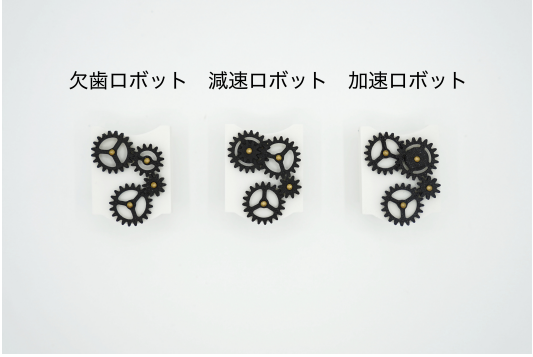


図 2　実装した 3 種のロボット
Fig. 2　3 types of robot.

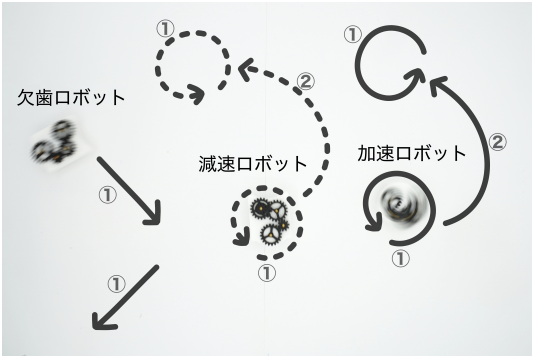


図 3　動作エリア内での動きのイメージ
Fig. 3　Movement within the operating area.

欠歯ロボットは、欠歯歯車機構を装着しており、連結されたとき、伝達される動力 1 回転につき、半回転分を伝達し、もう半回転分は伝達しないといった形で出力する。加速ロボット、減速ロボットと異なり、動力の加速や減速は行わない。動作エリア内においては、(a) 担当エリア内で、現在地点から一定距離離れた座標に移動し、(b) その地点で一定時間動作を停止するという (a),(b) の動作を繰り返す。移動速度は加速ロボットの 2 分の 1 倍、減速ロボットの 2 倍となっており、停止する秒数は 2 秒間で固定されている。

3.3 実装

3 種類のロボットはすべて、toio™、ベース、歯車の 3 層構造からなる（図 5）。toio™ [6] は、小型のプログラミング可能なロボットトイである。toio™ は Bluetooth を介して PC と接続される。本システムでは、ビジュアルプログラミングソフトの toio Do を用いて toio™

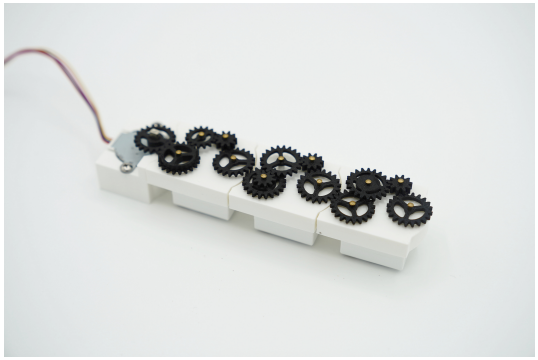


図 4　連結の様子
Fig. 4　Connection detail.

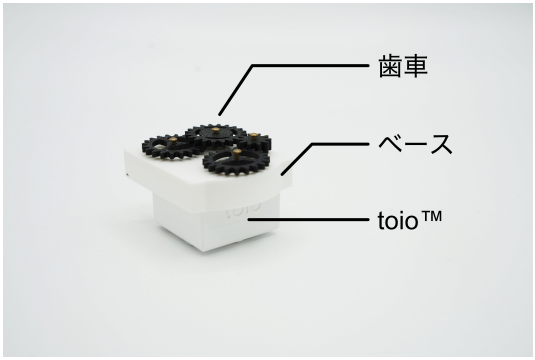


図 5　ロボットの 3 層構造
Fig. 5　3 level structure of the robot.

の制御を行った。toio™ は toio プレイマットと呼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、およびマット上の絶対座標を検知する機能が備わっており、動作エリアは A3 サイズの toio プレイマットを 2 枚つなぎ合わせた A2 サイズの広さのエリアとして実装した。ユーザーがエリア外に設置されているモーターユニットにロボットを連結した際には、マット上にないと判定されるため、動作を止めるようにプログラミングした。

ベースは、toio™ と歯車をつなげるパーツとして設計し、3D プリンターで造形を行った。toio™ 上部に存在するマウントに合う形で設計し、簡単に toio™ 上部に固定できる。3 種類のロボットはすべて同一設計のベースを搭載しており、ロボットの前方になる部分は凸状、後方になる部分には凹状の形状になっている。これは、ユーザーがロボット同士またはロボットとモーターユニットを連結する際に前後を間違えることを防止し、確実に搭載した歯車が噛み合って動くように設計している。

3 種類のロボットに搭載する歯車の構造は異なるが、ロボットの最後部と最前部に配置される歯車の位置とピッチ円半径は 3 種類のロボットで同一のものを使用している。これにより、どのような順番でロボットを接続しても、問題なく歯車が噛み合い動力伝達が行われる。歯車の歯の大きさ（モジュール）は 1mm に統一した。歯車をベースに固定する手法、および歯車の回転軸として真鍮製の釘を用い、省スペース化と強度の確保を試みている。

動作エリア外部に固定され、歯車の動力源となるモーターユニットは、モーター本体、歯車、ベースからなる。モーター本体は既製品のステッピングモーターを利用した。電源と制御には小型のマイコン、M5Atom Lite を使用し、常に一定の方向に等速度で回転するよう制御を行った。ベースはモーターの固定用の部品として設計を行い、3D プリンターで造形した。モーター固定用のネジ穴を有しており、モーターをネジを用いて固定している。ロボットのベースの前部にある凸形状と同様の形状を有しており、ロボットを接続することができる。歯車はモーターの軸に直接固定され、モーターの回転に合わせ回転する。歯の大きさ（モジュール）はロボットのものと同様に 1mm である。歯車の位置とピッチ円半径はロボットに装着される歯車のうち最前部のものと統一されており、ロボットを接続したときに、問題なく歯車が噛み合い動力伝達が行われるようになっている。

4.　まとめと今後の展望

本研究では、個々のロボットが固有の動力伝達特性を有するからくり機構を装着し、その特性を物理的な動作で表現する群ロボットからなる、からくりツールキットを提案し、実際に 3 種類のからくり機構とそれに合わせたロボットの動作を実装した。これにより、ユーザーは専門的な知識を持たずとも、複雑な動力伝達特性を直感的に理解し、ロボットを自由に組み替えながらからくりを探求する楽しさを得ることができる環境の実現を目指した。

今後は、更にカムやリンク機構などを用いたロボットを追加し、対応する機械要素を拡充することや、音や動きなど、新たな表現の出力の実装によりユーザーがより探求を楽しめるようにする。また、ロボット同士が自律的に連結し、能動的にユーザーに新たな気づきを与えるようにすること、広く一般の人に使用してもらい、からくりに対する理解の補助、自らの手でロボットを組み替えながら動きを探索する楽しさについて提案システムの可能性の評価を行うことなどをを順次行っていく。

謝辞

Toio の実装に関して専門的助言をくださった東京大学韓燦教先生に感謝します。

参考文献

[1] からくりすと: karakurist.jp; https://karakurist.jp/

[2] Nakagaki,M.,Leong,J.,Tappa,J.L.,Wilbert,J.,Ishii,H.: HERMITS: Dynamically Reconfiguring the Interactivity of Self-Propelled TUIs with Mechanical Shell Add-ons; UIST'20, pp. 882-896, (2020).

[3] Han,C.,Nakagawa,Y.,Naemura,Y.: corobos: A Design for Mobile Robots Enabling Cooperative Transitions between Table andWall Surfaces; CHI'25, No.738, pp. 1-16, (2025).

[4] Dillenbourg, P., Evans, M.: Interactive tabletops in education; Computer Supported Learning 6, pp. 491–514, (2011).

[5] Krithik, R.: Tangible Interfaces for Computational Tinkering; TEI '25, pp. 1–6, (2025).

[6] Sony Interactive Entertainment: 小さなキューブ型ロボットトイ・toio; https://toio.io/