



学位論文題目 Title	人と移動ロボットの協調型パフォーマンスの確立に関する研究
氏名 Author	土田, 修平
専攻分野 Degree	博士 (工学)
学位授与の日付 Date of Degree	2017-03-25
公開日 Date of Publication	2018-03-01
資源タイプ Resource Type	Thesis or Dissertation / 学位論文
報告番号 Report Number	甲第6920号
権利 Rights	
JaLCDOI	
URL	<a href="http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/D1006920">http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/D1006920</a>

※当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

Create Date: 2018-06-18

# 博士論文

## 人と移動ロボットの協調型 パフォーマンスの確立に関する研究

平成29年1月

神戸大学大学院工学研究科

土田 修平



## 内容梗概

舞台芸術における身体を用いたパフォーマンスでは、身体に加えて、音楽や照明を代表とする舞台装置を用いた演出効果と組み合わせて作成される。近年、ロボティクスの進展に伴い、これら舞台装置が発展し、人と移動する物体を組み合わせたパフォーマンスが行われるようになってきた。例えば、パフォーマンスの動作に合わせてドローンが飛行するパフォーマンスや、パフォーマンスの代わりとして舞台上で演技を行うロボットを組み込んだパフォーマンスなどが見られる。

しかし、このようなパフォーマンスにおける移動ロボットと、パフォーマンスや観客としての人との関係性があまり考慮されていない。本研究では、人と移動ロボットが共にパフォーマンスを行う、協調型パフォーマンスの確立を目指し、一般的なパフォーマンスの実施において重要な過程である、パフォーマンスの練習、パフォーマンスの作成、パフォーマンスの提供の3点に着目し、それぞれにおける移動ロボットとパフォーマンスや観客との関係を考慮したシステムを構築する。具体的には、パフォーマンスの代わりとしての移動ロボットの利用、パフォーマンス拡張の道具としての移動ロボットの利用、観客から見た移動ロボットのパフォーマンスの拡張についての研究を行う。

本論文は5章から構成され、その内容は次の通りである。まず、第1章で序論として研究の背景と目的について述べる。

第2章では、パフォーマンスの代わりとしての移動ロボットの利用を目指し、スクリーンにパフォーマンスの映像を投影し、そのスクリーンをパフォーマンスのように移動させる練習手法を提案する。複数人のパフォーマンスからなるダンスパフォーマンスでは音楽と振り付けが揃っていても、隊形が崩れているとダンスパフォーマンスとしての質が大幅に低下する。そのため複数人でのダンスパフォーマンスにおいて、隊形の練習は振り付けの習得と同様に重要である。しかし、練習の際に一人でもパフォーマンスが欠ければ、隊形の適切な間隔を取ることは、タイミングを合わせることに困難となる。そこで、プロジェクタによってパフォーマンスが投影された人型大のスクリーンを移動ロボットや天井に取り付けたカーテンレールを用いてパフォーマンスのように移動させることで、パフォーマンスの代わりとして提示する。その他の考えられる隊形練習手法と比較し、提案手法の有効性を評価する。

第3章では、パフォーマンス拡張の道具としての移動ロボットの利用を目指し、プ

プログラミング知識のない非専門家でも、簡単に振付を作成できるシステムを提案する。これまでパフォーマ自身が、複数の移動ロボットを用いたパフォーマンスをインタラクティブに作成できるようなシステムはなく、自由に移動ロボットを利用できなかった。そこで、パフォーマが自身の動作と移動ロボットの動作の対応を考慮しつつ、インタラクティブにパフォーマンスを作成できる仕組みを構築する。具体的には球体型自走ロボットの動作と、LEDの光という要素を加えたパフォーマンスを自由に作成できるシステムを開発する。システムの有効性を評価するために、4名のパフォーマに、実際にシステムを利用してパフォーマンスの作成およびパフォーマンスの実演を行ってもらい、また、実験環境外での場所でも安定してシステムが利用できることを確認する。

第4章では、観客から見た移動ロボットのパフォーマンスの拡張を目指し、光の視覚効果を用いて、物理的な動作を代替するシステムを提案した。人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスを設計する際には、求められる機能や形状を考慮しなければならない。しかし、要求に対して機構の実現が難しい場合がある。本論文では、身体パフォーマンスにおいて広く用いられているボールと同じ形状である球体型移動ロボットを想定する。球体型移動ロボットには、高い俊敏性や球体特有の転がるといった動作が必要となるが、そのような特徴をすべて備えた球体型移動ロボットは著者の知る限り存在しない。そこで、移動性能の高い車輪型の全方位移動ロボット上に球状LEDディスプレイを搭載し、球体特有の動きを聴衆に錯覚させる機能をもつ移動ロボットを提案する。12人の被験者に実際にシステムを利用したパフォーマンスを見てもらい、物理的な動作を錯覚するかどうか確認する。また、プロのパフォーマに実際に利用して頂き、パフォーマンスとしてのシステムの可能性を示す。

第5章では、本論文の成果を要約したのち、今後の研究課題について述べ、本論文のまとめとする。

# 目次

<b>1</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	3
<b>2</b>	<b>ダンスパフォーマンスにおける移動型スクリーンを用いた隊形練習支援</b>	<b>6</b>
2.1	まえがき	6
2.2	関連研究	7
2.2.1	ダンスに利用されるロボット	7
2.2.2	ダンスの振り付け支援	7
2.3	システム設計	8
2.3.1	システム要件	8
2.3.2	隊形練習方法	9
2.3.3	隊形練習方法についての実験	9
2.3.4	結果と考察	12
2.4	自走型スクリーン	18
2.4.1	システム設計	18
2.4.2	自走型スクリーンの実装	20
2.4.3	自走型スクリーンについての評価実験	21
2.4.4	結果と考察	22
2.5	カーテンスクリーンについての調査	27
2.5.1	結果と考察	28
2.6	むすび	30
<b>3</b>	<b>球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンス環境の構築</b>	<b>33</b>
3.1	まえがき	33
3.2	関連研究	34
3.3	提案システム	37
3.3.1	設計方針	37

3.3.2	システム構成	37
3.4	評価実験	41
3.4.1	実験環境	41
3.4.2	評価と考察	42
3.4.3	実際のパフォーマンスでの評価	47
3.5	むすび	49
<b>4</b>	<b>回転移動を模したテクスチャ表示機能をもつ球体型移動ロボット</b>	<b>51</b>
4.1	まえがき	51
4.2	関連研究	53
4.3	問題意識	55
4.4	球状LEDディスプレイの回転移動表現の視覚効果の予備検討	57
4.4.1	提案システム	57
4.4.2	実験方法	58
4.5	結果と考察	61
4.6	球体型移動ロボットの開発と評価実験	64
4.6.1	システムの改良	64
4.6.2	実験方法	65
4.6.3	結果と考察	69
4.7	球体移動ロボットを用いたパフォーマンスの作成	71
4.7.1	システムの改良	71
4.7.2	パフォーマンスの実施	73
4.7.3	考察	74
4.8	むすび	76
<b>5</b>	<b>結論</b>	<b>79</b>
5.1	本論文のまとめ	79
5.2	検討課題	80
	謝辞	84
	参考文献	87



# 1 序章

## 1.1 研究の背景

舞台芸術において、身振りや台詞で役を演技し、物語を見せる演劇、物語性を持ったダンスによって表現するバレエ、小道具を用いるなどして、アクロバティックな身体動作を見せるストリートパフォーマンスなど、様々な種類の身体を用いたパフォーマンスが存在する。これらパフォーマンスは、身体の動作に加えて、音楽や照明を代表とする舞台装置を用いた演出効果と組み合わせて作成される。

近年、ロボティクスの進展に伴い、災害救助用のロボットや接客対応する人型ロボットなど、それぞれの状況に応じた機能・構造を持つ様々なロボットが開発されている。レースやサッカーなどの競技、おもちゃやメディアアート作品といったエンターテインメントの分野でも、ロボットの利用が広がってきている。同様に、舞台芸術における舞台装置としての応用も増えてきており、身体を用いたパフォーマンスとのコラボレーション作品が見られるようになった。例えば、複数のパフォーマと複数の飛行するドローンが共にパフォーマンスを行ったり、オペラでは、舞台上にはいないパフォーマの代わりに務め、他のパフォーマと共に演技を行うといったパフォーマンスが見られる。身体を用いたパフォーマンスに加えて、このような自己推進力を持つ、物理的な質量を伴う移動ロボットを用いたパフォーマンスの需要は増えてきている。しかし、このような人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスにおいて、移動ロボットとパフォーマや観客との関係性を考慮したシステム構築がされていない。これらの関係性を明確にしていくことで、人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスにおける利用範囲の拡大や利用障壁の除去、パフォーマンスの拡張につながると考えられる。

本研究では、人と移動ロボットが共にパフォーマンスを行う、協調型パフォーマンスの確立を目指し、一般的なパフォーマンスの実施において重要な過程である、パフォーマンスの練習、パフォーマンスの作成、パフォーマンスの提供の3点に着目し、それぞれにおける移動ロボットとパフォーマや観客との関係を考慮したシステムを構築する。それぞれの課題を以下に挙げる。

- パフォーマンスの練習

移動ロボットは、照明やVR・ARといった演出とは異なり、物理的な質量を持

つ実体を伴う。そのため、移動ロボットの存在が、共にパフォーマンスを行うパフォーマンスに、影響を与えると考えられる。この影響を利用することで、練習におけるパフォーマンスの代わりとしての移動ロボットの可能性を検討すべきである。

- パフォーマンスの作成

移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスの作成には、パフォーマンスシステムに熟知した専門家が必要となる。非専門家である振付家やパフォーマンスにとっては、このようなパフォーマンスを作成するには敷居が高い。そのため、非専門家でも、人と移動ロボットのそれぞれの動作を考慮した振付作成を簡単にできる環境を構築すべきである。

- パフォーマンスの提供

移動ロボットの構造的な問題により、振付家・パフォーマンスが作成したい移動ロボットの動作を実現することが難しい場合がある。例えば、空中に浮かんで移動するような物体による演出を考えた場合、現在は高速に飛行するドローンを高度に制御することで実現しているが、コストが高く、制御も困難である。移動ロボットと観客との関係に着目し、低コストでより安定したパフォーマンスを提供できる仕組みを構築すべきである。

## 1.2 研究目的

本研究では、人と移動ロボットの協調型パフォーマンスの確立を目指して、パフォーマンスの代わりとしての移動ロボットの利用、パフォーマンス拡張の道具としての移動ロボットの利用、観客から見た移動ロボットのパフォーマンスの拡張を目的とする。

- パフォーマンスの代わりとしての移動ロボットの利用

複数人のパフォーマンスからなるダンスパフォーマンスでは音楽と振り付けが揃っていても、隊形が崩れているとダンスパフォーマンスとしての質が大幅に低下する。そのため複数人でのダンスパフォーマンスにおいて、隊形の練習は振り付けの習得と同様に重要である。しかし、練習の際に一人でもダンサーが欠ければ、隊形の適切な間隔を取ること、タイミングを合わせる事が困難となる。

そこで本研究では、ダンスパフォーマンスにおける隊形練習での、パフォーマの代わりを提示する手法を検討し、移動ロボットを用いた提案手法の有効性を調査する。

- パフォーマンス拡張の道具としての移動ロボットの利用

これまで移動ロボットを用いたパフォーマンスの作成には、システムに精通した専門家の協力が不可欠であった。そのため、プログラミング知識のない振付家やパフォーマでも、複数の移動ロボットを用いたパフォーマンスをインタラクティブに作成できるようなシステムはなく、自由にパフォーマンスを創出できる環境がなかった。

そこで本研究では、パフォーマ自身が自身の動作と移動ロボットの動作の対応を考慮しつつ、インタラクティブにパフォーマンスを作成できるシステムを構築する。

- 観客から見た移動ロボットのパフォーマンスの拡張

人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスを設計する際には、求められる機能や形状を考慮しなければならない。しかし、要求に対して機構の実現が難しい場合がある。

そこで本研究では、光による視覚効果を用いて、物体の物理的な動作を代替することで、物体の移動と分離して表現できる代替演出を提案する。身体パフォーマンスにおいて広く用いられているボールと同じ形状である球体型の移動ロボットを想定し、プロトタイプを作成、その効果について検証する。

### 1.3 本論文の構成

本論文は5章から構成され、内容は以下の通りである。

まず、第2章では、パフォーマの代わりとしての移動ロボットの利用を目的とし、パフォーマが揃っていない場合でも、隊形の練習をスムーズに行うことができる隊形練習支援システムについて述べる。初めに、パフォーマが揃っていない場合でも行える練習手法として、1人で踊る、自走するロボットと踊る、プロジェクタで投影された映像と踊るの3つの手法を挙げ、それらについて2人で踊った場合の感覚と移動にそれぞれ最も近い手法を検討する。予備実験から得られた知見を基にスクリーンを搭載した全方向に

移動が可能な自走ロボットである自走型スクリーンを実装し、その評価を行う。また、評価実験で得られた知見を基に、2軸動作が可能な電動カーテンを実装し、先程と同様の評価実験を行う。

第3章では、パフォーマンス拡張の道具としての移動ロボットの利用を目的とし、球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンスを作成、実演できるシステムについて述べる。システムは移動ロボットの動作・明滅パターン作成用アプリケーションと移動ロボットの制御システムから構成されており、アプリケーション上で移動ロボットの動作とパフォーマンスの振り付けを同時に確認でき、作成したパターンを基に移動ロボットを制御する。4名のパフォーマに実際にシステムを用いて移動ロボットを用いたパフォーマンスを作成してもらい、システムの操作性、また、パフォーマンス完成までにどれだけの時間を要したかについて調査する。また、パフォーマンスが作成したいイメージと移動ロボットの動作の対応表の作成を目指して、実際にパフォーマンスが作成したパフォーマンスとパフォーマンスが作成したいイメージ・表現を列挙し、その対応が被験者内で重複するかどうか調査する。

第4章では、観客から見た移動ロボットのパフォーマンスの拡張を目的とし、光の視覚効果を用いることで見た目のクオリティを保ちつつ安定したパフォーマンスを提供できるシステムについて述べる。移動性能の高い車輪型の全方位移動ロボットの上に球状のLEDディスプレイを搭載し、球体特有の動きを観衆に錯覚させる機能を持つ移動ロボットを提案する。実際のパフォーマンスで使用される場面を想定し、初めて見た球状LEDディスプレイ搭載式の自走するロボットに対して、LEDの光が単に回っているように明滅していると認識するのではなく、球体が物理的に転がりながら移動していると認識するか調査する。また、移動ロボットの移動速度と光の回転速度が錯覚率にどの程度影響を及ぼすのか調査する。

第5章では、本論文の成果を要約したのち、今後の研究課題について述べ、本論文のまとめとする。

なお、第2章は、文献[94, 95, 96, 97, 98, 99, 102]で公表した結果に基づき論述する。第3章は、文献[100, 101, 103, 104, 105, 109]で公表した結果に基づき論述する。第4章は、文献[106, 107, 108, 110]で公表した結果に基づき論述する。



## 2 ダンスパフォーマンスにおける移動型スクリーンを用いた隊形練習支援

### 2.1 まえがき

近年、ダンススタジオの増加やキッズダンスの流行などによって、ダンスパフォーマンスによる身体表現能力やリズム感の向上に注目が集まっており、ダンスの初心者でも大人数でダンスパフォーマンスを披露する機会が増えている。複数人のダンスパフォーマンスでは、音楽と振り付けが上手くリンクしているものであっても、隊形が崩れているとダンスパフォーマンスとしての質が大幅に低下してしまう。ダンスパフォーマンスを上手く魅せるためには、ダンサー間の適切な間隔を保つことと、次の隊形へスムーズに移行することを意識しなければならない。しかし練習の際に一人でもダンサーが欠ければ、隊形の適切な間隔をとることが困難となる。

一方、これまでにダンスパフォーマンスを支援する様々な研究が行われている。振り付けの習得を支援するものとしては、モーションキャプチャ技術を用いた手法 [1, 2] や慣性センサを用いた手法 [3] などがある。技能習得のための手法 [4, 5] などは、動作を練習する際にどのように支援を行えば効果的であるかを検証しており、手本となる動きの表示の方法、動作の解析による手本と実際の動きの差の可視化などについて研究を行っている。しかし、筆者らが知る限りこれまで隊形練習に着目した研究は行われていない。そこでまず本研究では、隊形練習において一部のダンサーが欠けてもスムーズに練習を行うための自走型スクリーンを用いたダンス練習支援システムを提案する。システムの提案にあたって、1人で踊る、自走ロボットと踊る、プロジェクタ映像と踊るの3つの隊形の練習手法のうち、どれが実際にダンサーと2人で踊る練習手法の感覚に近いかを調査した。その結果から、プロジェクタ映像と踊る手法が最も感覚が近く、自走ロボットと踊る手法が最も再現性が高いことを確認した。これら2つの手法を組み合わせた隊形練習における一部のダンサーが欠けてもスムーズに練習を行うための自走型スクリーンを用いたダンス練習支援システムを提案する。また、自走型スクリーンが自走ロボットと踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法の利点をそれぞれ備えているか評価実験を行い調査した。さらに、カーテンスクリーンを用いて自走型スクリーンを含めた再実験を行った。

以降、2.2節では関連研究について述べ、2.3節では隊形の練習方法を列挙し、自走型スクリーンを用いた隊形練習支援システムの要件、隊形練習方法の評価実験の結果と考察、システム機能、構成について詳細に述べる。2.4節では自走型スクリーンの実装を行い、その評価実験と考察について述べる。2.5節ではカーテンスクリーンを用いた再実験とその考察について述べる。2.6節で本章のまとめを行う。

## 2.2 関連研究

### 2.2.1 ダンスに利用されるロボット

近年、ロボティクス技術の進展に伴いロボットが踊るための機構 [6, 7] や踊るヒューマノイドロボットが開発されている [8, 9, 10]。Xia らは人による複雑な入力なしでロボットを自動で踊らせるアルゴリズムを示しており [11]、Nakaoka らはダンサーから得たモーションを元にロボットを踊らせるシステムを開発している [12]。しかし、これらの方法ではロボットを人間のようにスムーズに振りや移動をさせることができない。また、人と踊る様々な自律型ロボットが開発されており [13]、小菅ら [14] が開発した社交ダンスパートナーロボット「PBDR (Partner Ballroom Dance Robot)」は社交ダンスに必要な動きを実現するための様々な機構が組み込まれている。このロボットは内蔵された6軸力覚センサで3方向の力とモーメントを受け取り、あらかじめロボットに記憶させておいた社交ダンスのステップをもとに、搭載したコンピュータを用いて動きをコントロールする。このため、ダンスパートナーのリードしたい方向を感じ相手の意図するステップを推定するといったことができる。しかしこのシステムは社交ダンスに特化しており、ストリートダンスパフォーマンスのような複数人での激しい動きや振りを行うダンスは考慮していない。文献 [15] では教示映像を常に被験者の前に表示させ、さらに映像のみでは表現できない奥行きをロボットによって表現するダンストレーニングシステムを開発している。実際の移動の距離をロボットについていくことによって学ぶことができる。しかし、ロボットと対面して踊るため実際にダンサーと隊形を組んで踊るような本番に近い感覚は得られないという問題がある。

### 2.2.2 ダンスの振り付け支援

ダンスなどの動作の振り付けの支援や動作の解析について、仮想世界を利用した手法 [16]、モーションキャプチャ技術を用いた手法 [17, 18, 19] や慣性センサを用いた手

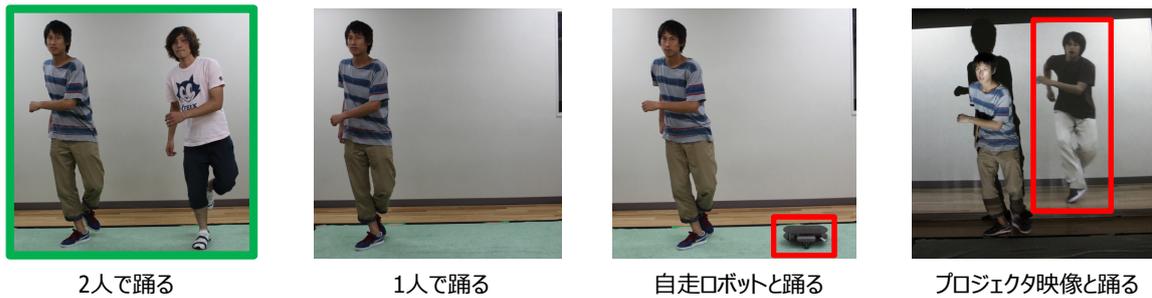


図 1: 考えられる隊形練習手法

法 [20] など、様々な方法で行われている。文献 [21] では DV カメラからユーザの動作を撮影し、ユーザがあらかじめ体の各部に着色されたマーカを装着することによって、カメラ映像の色識別から平面的なマーカ軌跡を取得、同時に加速度センサを装着し激しい動作の情報を取得し、これらを組み合わせた情報から振りの練習支援を行っている。これにより DV カメラのみを用いた支援よりも正確な振りの評価が可能となった。また、文献 [22] では振りを練習する際の手本となるモデル映像の表示方法についても検討を行っている。この方法で手本となるモデル映像をユーザの映像に重ね合わせ、振りがどのように間違っているのか文字情報によって、振りの良否をスコアとして表示しユーザに提示する手法を提案している。さらに文献 [23] は、地域伝統舞踊における「動作の流れ」を理解するための学習支援システムを開発した。このシステムでは、振りができているという思い込みを正すために、踊り手が捉えている拍と動作がうまく対応しているかを明示することで手本となる動作との違いを提示した。このように、人の動作を解析し振り付けを支援する研究は数多く見られるが、隊形にまで考慮した研究は見られない。

以上により本研究では本番の感覚に近い隊形練習を行うための支援システムを提案する。

## 2.3 システム設計

### 2.3.1 システム要件

本研究で提案する隊形練習時に一部のダンサーが欠けてもスムーズに練習が行える隊形練習支援システムを構築するためには、以下の2つの要素が必要であると考えられる。ただし、ここでいう感覚は実際のダンサーと踊る際に、視覚や聴覚、触覚、嗅

覚などから得られる外的な刺激と，人や物に対する恐怖感，不信感といった心理的な距離から生じる内的な刺激を感知すること，感知する仕組みを意味する。

**感覚の類似性** 実際にダンサーと踊っている際の感覚と似ているか．ダンス練習時には，振り付けが揃っているかなど実際にダンサーと踊った場合に得られる感覚の情報の共有が必要であり，感覚の類似性が重要であると考えられる。

**移動の再現性** 実際にダンサーと踊っている際の移動と似ているか．実際にダンサーと踊った際と同様の間隔の維持が必要であり，移動の再現性が重要であると考えられる。

ここで，感覚が類似性が高く移動の再現性が低いと実際にダンサーと踊る際の移動とは全く違う移動を習得することになり意味がないといえ逆にまた移動の再現性が高く感覚の類似性が低いと，実際にダンサーと踊る際に感覚に違和感を覚え振りや移動に影響を与える可能性があると考えられる．そのためこれら2つの要素は隊形練習支援システムにおいて共に必要であるといえる。

### 2.3.2 隊形練習方法

通常のダンスの練習では，ダンサー全員が揃っている状態で鏡を見ながらの練習を行う．2.3.1より隊形練習において一部のダンサーが欠けた場合，それを補う手法として以下の3つが考えられる。

- あらかじめ撮影しておいた参考となる動画を見ながら踊る手法
- プロジェクタを用いて欠けているダンサーを投影することによって欠けているダンサーとの感覚を掴む手法
- 人間と同じ速度で移動する自走型ロボットを用いて，欠けているダンサーの正確な移動を確認する手法

### 2.3.3 隊形練習方法についての実験

まず，図1に2.3.2から考えられる隊形の練習手法を示す．これらそれぞれの隊形練習手法のうち，左端に示す「2人で踊る」とそれ以外の3手法それぞれを比べて2.3.1で述べた要件を満たすかどうか評価した。

表 1: アンケートの質問項目

質問 1	前後の交差を行う時, ダンサーと踊る際の感覚に近かったか?
質問 2	すばやくダンサーと接近する時, ダンサーと踊る際の感覚に近かったか?
質問 3	横並びで間隔を保ちながら移動する時, ダンサーと踊る際の感覚に近かったか?
質問 4	振り, 動作はしやすかったか?
質問 5	距離感を掴みやすかったか?

実験手順は被験者に 8 拍を 3 回繰り返す、約 12 秒間の振りを参考動画をもとに覚えさせ、実際に 2 人のダンサーで踊ってもらった。ここでいう拍は、4 分音符を 1 拍として定義し、1 拍の長さは約 0.5 秒とする。その後、図 5 に示す「自走型ロボットと踊る」「プロジェクタ映像と踊る」に加えて「1 人で踊る」の 3 種類の隊形練習手法を行ってもらい、評価を行った。

今回、ダンサーの代わりに映像、自走ロボットを用いており、これらと踊る際には、人の五感に加え、「もの」に対する恐怖感、不信感といった心理的な距離が大きく変化すると考えられる。本研究において提示された「もの」と一緒に踊っている際の感覚の差を調査するためにも、感覚の差に大きく影響を与える存在感の影響を考慮した振り付けを設定する必要がある。そのため、実験で用いた振りには、提示される存在感による影響が大きいと考えられる以下の 3 つの要素が含まれている。

- 交差  $\uparrow \downarrow$ : 前後に交差するように移動する
- 接近  $\rightarrow \leftarrow$ : すばやく相手と接近する
- 平行移動  $\rightarrow \rightarrow$ : 一定の距離を保ちながら移動する

評価項目は 2.3.1 で挙げた「感覚の類似性」と「移動の再現性」で「感覚の類似性」の評価には実験後アンケートに答えてもらった。表 1 にアンケートの質問項目を示す。この質問項目は振りに含まれる 3 つの要素を考慮した 5 つであり、それぞれ 5 段階評価で評価してもらった。「移動の再現性」の評価には Microsoft 社の Kinect[24] を用い、実験中のダンサーの移動を記録した。Kinect の誤差は数センチ程度であり、移動の記録には十分だと考えられる。また、今回行う移動の速度は 1.2m/sec 程度であり、十分な精度での認識が可能であるといえる。なお、ダンサーと 2 人で踊る手法を含めどの手法も手法ごとに 3 回ずつ行った。

表 2: OMNIKIT2010 の主な仕様

CPU	VS-WRC003 ( Vstone Co.,Ltd ) ルネサステクノロジ社製 H8/36064G センサ入力アナログ入力×4 モータ出力 DC モータ×4
サイズ	350mm×350mm×128mm
重量	2.6kg
耐荷重	3kg
連続駆動時間	約 30 分
駆動車輪	スリットウレタンオムニ TYPE2581
移動速度 (前進)	2.9m/s

さらに、各手法の詳細を以下に示す。

#### 1人で踊る 鏡を見ながら一人で踊る。

**自走ロボットと踊る** 8方向へ移動可能な自走ロボット, OMNIKIT2010[25] を見本となるダンサーの振り付けを基に出発地点, 方向転換を行う地点, 終着地点をそれぞれ定め, 音楽に合わせて付属の無線コントローラで手動での操縦を行い, そのロボットと踊る。図2および表2に OMNIKIT2010 の外観と主な仕様を示す。

**プロジェクタ映像と踊る** プロジェクタを用いて欠けているダンサーを壁に投影した映像と踊る。ダンサーの映像はあらかじめ見本となるダンサーの振りを撮影した映像を利用する。プロジェクタをユーザに向かって投影する場合, 眩しさを感じると思われる。ここで, 実際のステージパフォーマンスではスポットライト等非常に強いライトがステージを照らしており, 場合によっては観客が見えない状況が起こりやすいことを考慮すると, 眩しいという状況はより本番に近い環境で練習することができるため, 良い練習環境であるといえる。しかし, ダンサーと踊る感覚に影響を与える可能性があるため, アンケート結果には十分注意を払う必要がある。

今回複数人ではなく, 2人での実験を行った理由としては, まずは人と映像, 人と自走ロボットの関係をそれぞれ調査する必要がある, 複数人で実験を行った場合, 手法間で差が生じた原因として, それが人の影響なのか, その他の影響なのか判断が難しいことが挙げられる。

最後に, 実験時の構成図を図3に示す。実験は研究室にある奥行6m, 横幅7mのスタジオにて行った。プロジェクタ, KINECT, スピーカは鏡から1m離れた箇所に設

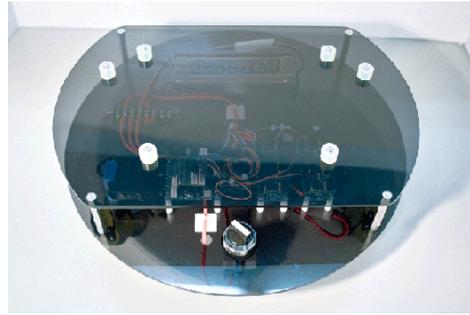


図 2: OMNIKIT2010

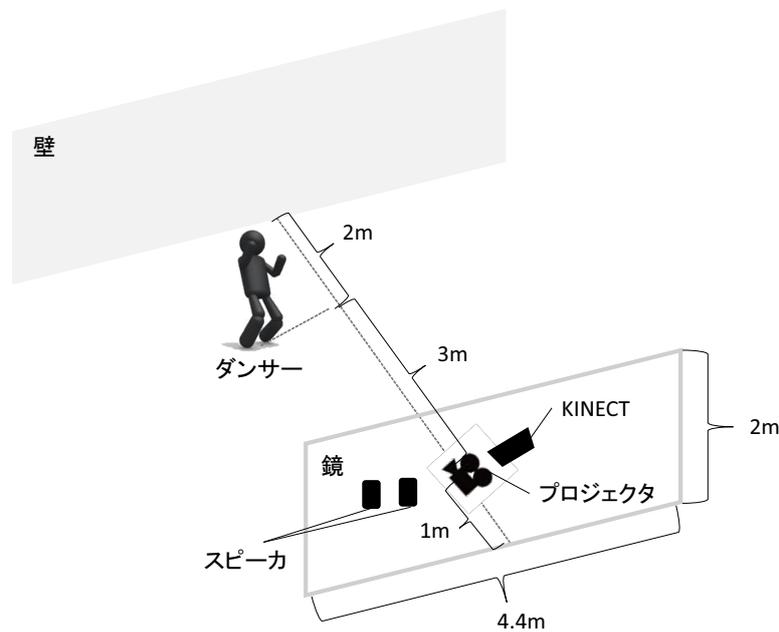


図 3: 実験時の構成図

置し，ダンサーは鏡から 4m 離れた箇所を初期位置とした．扉をすべて閉じ，外部からの音ができるだけ入らないように努めた．また，プロジェクタ映像を使用する際は，部屋の電気を消した環境で行った．

被験者は平均年齢 21.8 歳の男性 5 名，女性 4 名，3 年以上のストリートダンス経験を持つ計 9 名である．

#### 2.3.4 結果と考察

表 3 にアンケート結果を，表 4 に 2 人で踊る練習方法と他の隊形練習方法との移動のずれの平均を，図 5 に被験者 1 人が移動した具体的な軌跡を示す．ここで，図 4 に 2 人

```

S=0;
for(m=0;m<3;m++){
  for(n=0;n<3;n++){
    for(i=0;i<N;i++){
      Min=∞;
      for(j=0;j<M;j++){
        if(Min>|Ti-Tj|){ //時間の差が最小値より小さい時
          Min=|Ti-Tj|; X'=X'j; Y'=Y'j;
        }
      }
      Di=sqrt((Xi-X')^2+(Yi-Y')^2);
      S+=Di; //N回計算した距離を加える
    }
    Ave+=S/N ; //距離の平均値を算出する
  }
}
Ave'=Ave/(3*3) ; //総当たりの平均を算出する

```

図 4: 2人で踊る練習手法と他の練習手法との移動のずれの平均値を算出するためのアルゴリズム

表 3: 評価アンケート集計結果

	質問 1		質問 2		質問 3		質問 4		質問 5	
	平均	分散								
1人で踊る	2.0	1.6	1.7	0.4	2.1	1.2	3.8	1.7	1.4	0.2
自走ロボットと踊る	3.0	1.1	2.7	2.2	2.6	1.8	2.0	1.6	2.6	1.1
プロジェクト映像と踊る	2.0	0.7	3.2	0.8	3.4	1.1	4.1	0.8	2.9	0.3

で踊る練習手法と他の練習手法との移動のずれの平均値を算出するためのアルゴリズムを示す。1つのデータ(例えば二人で踊る1回目)ともう一方のデータ(例えばロボットと踊る2回目)の距離の平均値  $Ave$  を算出する。このように二人で踊る手法1~3回とロボットと踊る手法1~3回を総当たりして算出した9つの距離の平均値をさらに手法の比較回数である9で割った平均値  $Ave'$  を求める。平均値  $Ave'$  を移動のずれの平均値とする。

ただし2人で踊る手法のある位置での時間を  $T_i$ 、位置データの個数を  $N$ 、被験者の2次元上での位置を  $(X_i, Y_i)$ 、他の手法で踊る手法のある位置での時間を  $T_j$ 、位置データの個数を  $M$ 、被験者の2次元上での位置を  $(X'_j, Y'_j)$  とする。

実験結果を基にどの手法が実際に2人で踊る手法の感覚と移動に近いかの考察を行う。

表 4: 2人で踊る手法とそれぞれの手法との移動のずれの平均 (mm)

被験者番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1人で踊る	246	190	298	432	359	308	589	341	289
自走ロボットと踊る	203	197	415	370	255	190	483	261	306
プロジェクタ映像と踊る	206	211	519	552	279	263	282	237	471

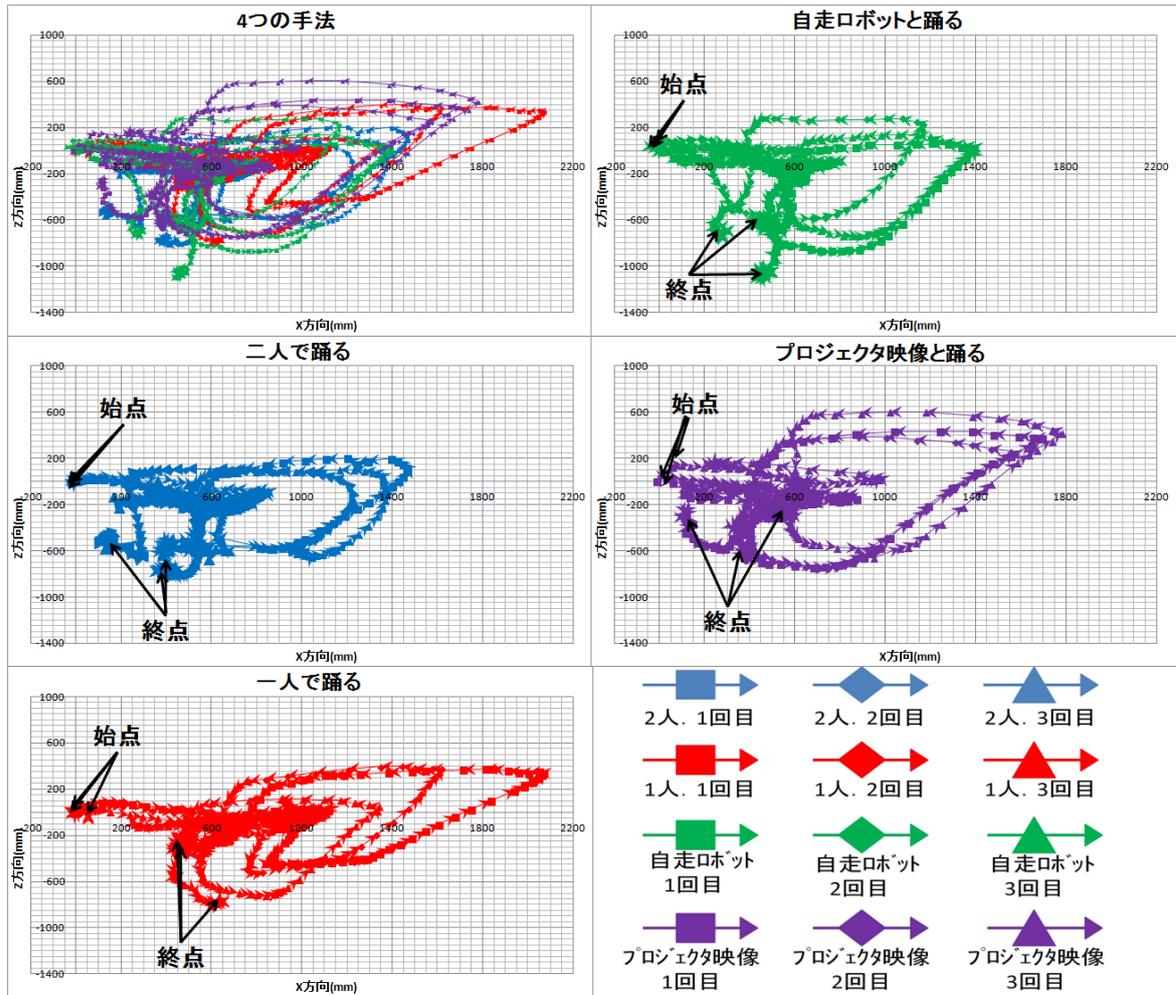


図 5: 被験者 1 人の移動の軌跡

質問 1 に関して、Kruskal-Wallis 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、有意差は存在しなかった ( $X_2 = 4.69, p > 0.05$ )。数値としては自走ロボットと踊る手法の評価が他の手法と比べ最も高かった。これはプロジェクタ映像には奥行きがわかりづらいう上に映像に意識が向いてしまったこと、1人で踊る手法では隣に合わせるものがないためわかりづらく鏡を利用して奥行きについては感覚がわからないこと、

また、前後の交差ではロボットにぶつかる心配が少ないために自走ロボットとの距離をとりやすかったことなどが原因として考えられる。被験者のコメントとして、1人で踊るよりも自走ロボットと踊る方が感覚を掴みやすいと回答していた。また、別の被験者は1人の方が踊る時に感覚を得やすいと回答しており、頭の中で前と後ろで大きく動くという感覚が作られていたので、前後移動の際には1人でも一緒に踊っているようなイメージをしやすかったと回答している。さらに、一人で踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法については評価が等しいことがわかる。これは隣に何も物体が存在しないことが影響しているのではないかと考えられる。プロジェクタ映像と踊る手法に関しては分散値が小さく、1人で踊る手法と比べて多くのダンサーが実際のダンサーと踊る際の感覚とは違うと感じていることがわかる。

質問2に関して、Kruskal-Wallis 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、有意差が存在した ( $X_2 = 7.20, p < 0.05$ )。次に、それぞれの手法間において Scheffe の方法を用いて平均値の差の検定を行ったところ、1人で踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法の平均値の差においてのみ有意差が存在した ( $X_2 = 7.15, p < 0.05$ )。これは、1人で踊る手法よりもプロジェクタ映像と踊る手法の方がダンサーに接近する感覚に近いといえる。また、数値としてはプロジェクタ映像と踊る手法の評価が最も高いことがわかる。これは、横移動を行う時に奥行きは関係ないこと、他の手法と比較して一緒に踊る人やロボットと衝突する心配がなく、最も適切な間隔をとりやすかったことが原因であると考えられる。また、自走ロボットと踊る手法には、自走ロボットが常に一定のスピードでしか移動できず、人の移動のように自然な移動ができないこと、ロボットに高さがないため踏まないように意識が足元に向いてしまうことなどにより、被験者の注意が必要以上に自走ロボットに向いてしまったことが感覚を掴みにくかった原因と考えられる。また、1人で踊る手法には、近づいてくるダンサーがいないうえに接近する感覚はほとんどなかったこと、ダンサーという基準がないのでどの程度移動すれば良いかわからないことなどが低い評価の原因と考えられる。自走ロボットと踊る手法と1人で踊る手法を比較すると自走ロボットと踊る手法の方が高い評価を得ている。これは、自走ロボットと踊る手法の分散値は大きく、何人かは高評価を挙げていたため評価が高くなったこと、1人で踊る手法の分散値は小さく、ほぼすべてのダンサーの評価が低かったためと考えられる。自走ロボットと踊る手法において評価を高くしたダンサーが数名確認された理由としては、実際にロボットが近づいてくるので、距離を意識しやすくダンサーと踊る手法の感覚に近かったためであると

考えられる。

質問3に関して、Kruskal-Wallis 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、有意差が存在しなかった ( $X_2 = 4.53, p > 0.05$ )。数値としてはプロジェクタ映像と踊る手法の評価が一番高かった。原因としては、質問2と同様であると考えられる。また、1人で踊る手法には質問2で挙げた原因に加え、ダンサーという基準がなく歩幅を調整しようとする意識が低くなってしまったことが評価を下げる原因である可能性も考えられる。また、質問2に比べて質問3のほうが1人で踊る手法の評価が高くなっていた。これは、1人で大きく1歩を踏み出す際の方が不安が大きく、すばやく接近したり前後に交差するといった大きな動きに対して、横並びで移動という小さな動きでの細かい調整であったために、質問2よりも質問3のほうが感覚としての評価が高かったと考えられる。自走ロボットと踊る手法には、自走ロボットという基準があるために、大きく踏み出してすばやく接近することと、横並びで小さな動きで調整しながら移動することとでは、感覚の差がほとんど生まれなかったため、評価が質問2とほぼ同様であったと考えられる。自走ロボットと踊る手法と1人で踊る手法を比較すると自走ロボットと踊る手法の方が評価が高く、また他の質問項目と比べ、数値の差が小さい。これは、質問1と比べて自走ロボットと踊る手法の評価が下がっていることから、横並び移動では他の移動と比べ常に自走ロボットと衝突する可能性が生じたため、感覚に違和感を覚えたのではないかと考えらる。

質問4に関して、Kruskal-Wallis 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、有意差が存在した ( $X_2 = 8.73, p < 0.05$ )。次に、それぞれの手法間において Scheffe の方法を用いて平均値の差の検定を行ったところ、自走ロボットと踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法の平均値の差においてのみ有意差が存在した ( $X_2 = 7.49, p < 0.05$ )。これは、自走ロボットと踊る手法よりもプロジェクタ映像と踊る手法の方が振り、動作がしやすいといえる。また、数値としてはプロジェクタ映像と踊る手法の評価が最も高いことがわかる。隣に何もいないという状況は1人で踊る手法と同様であるのに評価の差が出た原因としては、距離感の掴みやすさの違いが振りの踊りやすさにも影響したと考えられる (質問5参照)。また、踊っている映像を鏡越しに確認できるので、一緒に踊っているような感覚を得られたことも一因して挙げられる。1人で踊る手法には、評価の分散値が高く、衝突する心配がないので振りや動作を大きく行えたと感じた人は評価を高くし、見本となるものが見えないために不安に感じた人は評価を低くするなど評価が2極化した。また、ダンサーやロボットの有無が振り、動作への影響

は感じないと答えた被験者が1人いた。これは、被験者が普段からダンスショーを想定した練習よりも、個人で踊る場面を想定した練習を行ってきたことが原因と考えられる。自走ロボットと踊る手法には、質問2、質問3でも述べたように自走ロボットの動きが自然でないためそちらに注意が向いてしまい、振りや動作がおろそかになってしまったこと、自走ロボットの動きが音にあっていなかったのも踊りにくかったこと、自走ロボットの音に気をとられたことなどが評価が低い原因として考えられる。また、自走ロボットと踊る手法と1人で踊る手法を比較すると1人で踊る手法の方が評価が高い。これは、自走ロボットと踊るという経験がダンサーにはなく、自走ロボットに対する信頼が低いことが1人と踊る手法と比べて大きく評価を下げた原因の1つではないかと考えられる。

質問5に関して、Kruskal-Wallis検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、有意差が存在した ( $X_2 = 11.01, p < 0.05$ ) 次に、それぞれの手法間においてScheffeの方法を用いて平均値の差の検定を行ったところ、1人で踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法の平均値の差においてのみ有意差が存在した ( $X_2 = 10.18, p < 0.05$ ) これは、1人で踊る手法よりもプロジェクタ映像と踊る手法の方が距離感が掴みやすいといえる。また、数値としてプロジェクタ映像と踊る手法の評価が最も高いことがわかる。原因としては、奥行き距離感が掴みにくいとしても、質問2、3での評価が高く全体としては距離感を掴みやすかったためであると考えられる。1人で踊る手法には、基準となるダンサーや自走ロボットがなく距離感が掴みにくかったため、評価は低かった。自走ロボットと踊る手法については、質問2、3での評価がそのまま反映されたためか、評価は2極化した。また、自走ロボットと踊る手法と1人で踊る手法を比較すると自走ロボットと踊る手法の方が評価が高い。これは、プロジェクタ映像と踊る手法と同じく、距離感を測る際に基準となるものを提示されているほうが距離感を取りやすいと感じやすいためと考えらる。

よってこれら質問項目の結果から、ダンサーの感覚はプロジェクタ映像と踊る手法が最も二人で踊る手法に近いことがわかった。

次に移動のずれについての考察を行う。まず、移動のずれの算出した平均値が短い程2人で踊る手法の軌跡と近似しているため、正しく位置取りができたといえる。被験者1から被験者9に関してそれぞれKruskal-Wallis検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、すべての被験者において有意差が存在した ( $p < 0.05$ )。次に、それぞれの手法間においてScheffeの方法を用いて平均値の差の検定を行ったところ、被験者1の1

人で踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法の平均の差 ( $X_2 = 1.50, p > 0.05$ ), 被験者2の1人で踊る手法と自走ロボットと踊る手法の平均値の差 ( $X_2 = 4.77, p > 0.05$ ) においてのみ有意差が存在しなかったが, 他のすべての手法間については有意差が存在した ( $p < 0.05$ ).

表4の結果から, 9人中4人は自走ロボットと踊る手法, 3人は1人で踊る手法, 2人はプロジェクタ映像と踊る手法が最も距離が短く, 9人中6人はプロジェクタ映像と踊る手法, 3人は1人で踊る手法が最も距離の平均が大きくなった. また有意差がすべての手法間で確認できた7人中3人は自走ロボットと踊る手法, 2人は1人で踊る手法, 2人はプロジェクタ映像と踊る手法が最も距離が短く, 7人中5人はプロジェクタ映像と踊る手法, 2人は1人で踊る手法が最も距離の平均が大きくなったこのことから, 自走ロボットと踊る手法が最も2人で踊る手法の移動に近いことがわかる. また結果から1人で踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法とではすべての被験者において有意差が確認され, 9人中6人が一人で踊る手法の方が2人で踊る手法の移動に近く, より上手く移動を再現できたといえる. これはプロジェクタ映像により実際とは少しずれた位置を提示したことが原因であると考えられる.

以上により自走ロボットと踊る手法は, 実際の位置取りとしては最も正確に行なえていたことになる. これは1人で踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法では隣に何も存在するものはないが, 自走ロボットと踊る手法は実際に隣に自走ロボットが存在するため, 自走ロボットという基準ができて位置取りがしやすかったことや, 質問2のアンケート結果からもいえるようにダンサーと踊る手法と同様に衝突しないように無意識に移動が制限されたことなどが考えられる.

## 2.4 自走型スクリーン

### 2.4.1 システム設計

アンケート結果, 移動のずれの考察から, 感覚の類似性においてはプロジェクタ映像と踊る手法が, 位置の再現性においては自走ロボットと踊る手法がそれぞれ2人で踊る手法の感覚, 移動に近いことがわかった. これらを踏まえて提案システムでは, 2.3.1で述べた要求を満たすように下記の通り設計した.

システムの構成を図6に示す. 提案システムはダンサーの動きを再現する自走ロボットとそれを制御する小型PC, 深度計測カメラから得られた移動データや動画を処理し小型PCやプロジェクタに送信するためのメインPC, ダンスの音源を再生するスピー

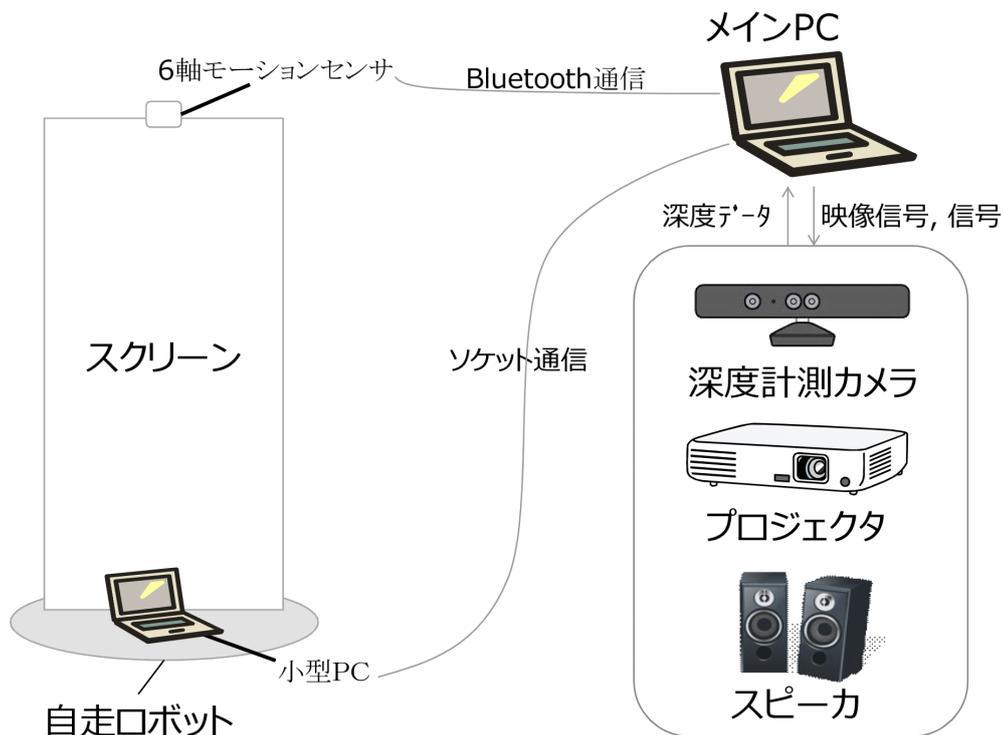


図 6: システム構成

かなどから構成されている。システムの流れとしては、まず練習を行う前に深度計測カメラを用いて、欠けるダンサーの振りつけを撮影し、その移動の軌跡と映像を取得およびメインPCに保存する。その後提案システムは練習時に欠けたダンサーの映像をスクリーンへ投影し、保存された移動の軌跡データを小型PCに送信し自走ロボットを動かすことで隊形練習を支援する。ここで、自走ロボットは人の動作に近い移動をスムーズに行えるように、8方向に移動可能で、モータの回転を細かく制御できるものを用いた。

また、ダンサーが移動する移動を正確に再現するために、Kinectと6軸モーションセンサを用いてリアルタイムでの移動を取得し補正する。まず、深度計測カメラを用いてスクリーンの位置補正を行う。これは自走ロボットの特性により、数十センチ程度ずれが生じることがあるためであり、具体的には深度計測カメラからスクリーンの現在を取得し、目的の位置からずれた場合に自動で目的の位置にスクリーンを移動させるように制御する。これにより、自走型スクリーンを正確に指定した座標に動かすことができる。次にスクリーンの角度を補正する。図7にスクリーンの補正の模式図

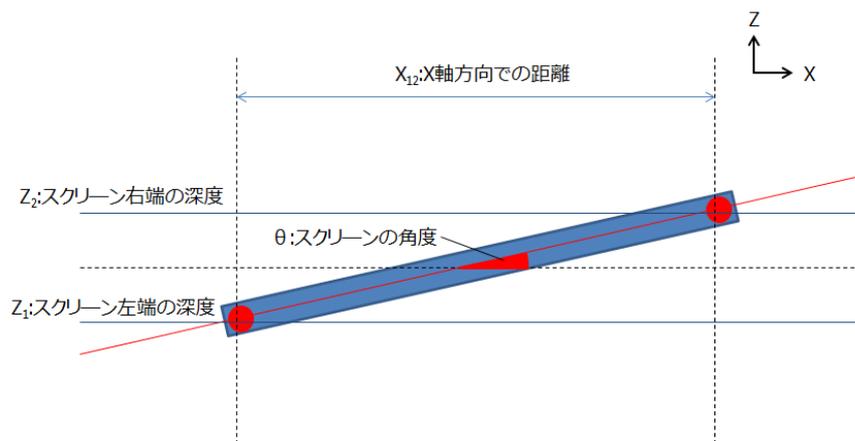


図 7: 角度補正の模式図

を示す．図7において，スクリーンに向かって左端の深度を  $Z_1$ ，右端の深度を  $Z_2$ ，2点間の X 軸方向の距離を  $X_{12}$  とする．提案システムは式 (1) を用いて  $\theta$  が 0 になるように補正をかける．

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Z_2 - Z_1}{X_{12}} \quad (1)$$

最後に，大きな移動のずれを防ぐためスクリーンの揺れを 6 軸モーションセンサで取得する．前後に移動した際などスクリーンが大きく揺れてしまい，スクリーンの面をプロジェクタの投影方向に対し垂直に補正する際がうまく働かない場合あり，次の移動に影響を及ぼしてしまう．そのため，スクリーンの大きな揺れを取得し，揺れが大きい際には補正を一時停止することにより，大きな移動のずれを防ぐことができる，

これらにより，ダンサーの映像がスクリーンに投影され，投影されたダンサーを鏡越しに確認したときなどの場合に前面にプロジェクションした際と同じ効果が得られると考えられる．

#### 2.4.2 自走型スクリーンの実装

実装したシステムの外観を図8に示す．自走ロボットとしては2.3.3で用いた OM-NIKIT2010 に 6 軸モーションセンサを取り付けたスクリーンを設置した．スクリーンは風の抵抗を少なくするために網戸のネットを用いた．さらにロボットには小型 PC (SONY 社の VGN-UX90PS) を搭載している．スクリーンの 3 次元位置を計測するメ



図 8: 自走型スクリーンの外観

イン PC には、深度計測カメラ (Microsoft 社の Kinect) , プロジェクタ (BenQ 社の MP522 ST) , スピーカ (BOSE 社の Computer MusicMonitor) が接続されている。

アプリケーションは Microsoft Visual Studio 2010 で、C# を用いて開発した。メイン PC と小型 PC 間の通信には Socket 通信, 6 軸モーションセンサとのシリアル通信を用いている。また、メイン PC の画面には自走型スクリーンの現在地から目的地までの距離, Kinect と水平な方向を基準としたスクリーンの傾き, プログラムの現在の進行状況, 目的地の座標をリアルタイムで表示する。提案システムの時間的な遅れは MainPC と小型 PC 内での処理に約 80msec, これに Wi-fi を介しての通信時間を足した時間である。今回、システムに関する評価実験を行っていないため、この時間遅れがユーザの感覚と移動に及ぼす影響は確認できていない。

#### 2.4.3 自走型スクリーンについての評価実験

次に自走型スクリーンがプロジェクタ映像と踊る手法, 自走ロボットと踊る手法のメリットをそれぞれ備えているかについて評価実験より検証する。被験者には 8 拍を

2回繰り返し、約8秒間の3つの振りを参考動画をもとに覚えさせた。ここでいう拍は、4分音符を1拍として定義し、1拍の長さは約0.5秒とする。これら3つの振りは、2.3.1節で述べた提示される存在感による影響が大きいと考えられる交差、接近、平行移動の3つの要素が対応している。

評価項目は2.3.1で挙げた「感覚の類似性」と「移動の再現性」で「感覚の類似性」の評価には実験後アンケートに答えてもらった。表5にアンケートの質問項目を示す。それぞれ5段階評価で評価してもらった。「移動の再現性」の評価にはMicrosoft社のKinect[24]を用い、実験中のダンサーの移動を記録した。なお、ダンサーと2人で踊る手法を含めどの手法も手法ごとに3回ずつ行った。

さらに、各実験方法の詳細を以下に示す。

**手法1** OMNIKIT2010を付属の見本となるダンサーの振り付けを基に出発地点、方向転換を行う地点、終着地点をそれぞれ定め、音楽に合わせて無線コントローラで手動での操縦を行ったものと踊る。

**手法2** プロジェクタを用いて欠けているダンサーを壁に投影した映像を鏡越しに確認しながら踊る。ダンサーの映像はあらかじめ見本となるダンサーの振りを撮影した映像を利用する。

**手法3** 自走ロボットと踊る手法と同様に、無線コントローラで手動での操縦を行った自走型スクリーンと踊る。スクリーンに投影する映像は手法3で使用した映像と同様である。

今回複数人ではなく、2人での実験を行った理由としては、2.3.3節で述べた理由と同様である。

最後に、実験時の構成図は2.3.3節で述べた環境と同様である。

被験者は平均年齢22.2歳の男性6名、女性3名、3年以上のストリートダンス経験を持つ計9名である。

#### 2.4.4 結果と考察

表6にアンケート結果を、表7に2人で踊る手法とそれぞれの手法との移動のずれの平均を示す。実験結果を基にどの手法が実際に2人で踊る手法の感覚と移動に近いかの考察を行う。2人で踊る手法とそれぞれの手法との移動のずれの平均値を接近移動

表 5: アンケートの質問項目

質問 1	ダンサーと踊る手法の 感覚に近かったか？
質問 2	距離感を掴みやすかったか？

については以下の式 (2)，平行移動については以下の式 (3)，前後交差については以下の式 (4) に従って算出した。

$$Ave = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 d(k, l) \quad (2)$$

$$Ave' = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 d'(k, l) \quad (3)$$

$$Ave'' = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 d''(k, l) \quad (4)$$

ただし，

$$d(k, l) = |\max X_i - \max X'_j|$$

$$d'(k, l) = |(\max X_i - \min X_i) - (\max X'_j - \min X'_j)|$$

$$d''(k, l) = |(\max Y_i - \min Y_i) - (\max Y'_j - \min Y'_j)|$$

1つのデータ (例えば二人で踊る 1 回目) での最もダンサー側に近づいた値と最も遠ざかった値をそれぞれ移動の最大値と最小値によって算出する。このようにすべての手法において最大値と最小値を求め、それらを実験回数である総和で割ることによってそれぞれ最大値の平均値 Ave，最小値の平均値 Ave' を求める。また， $1 \leq i \leq N$ ， $1 \leq j \leq M$  とし，2人で踊る手法の位置データの個数を  $N$ ，練習回数を  $k$ ，被験者の 2次元上での位置を  $(X_i, Y_i)$ ，他の手法で踊る手法の位置データの個数を  $M$ ，練習回数を  $l$ ，被験者の 2次元上での位置を  $(X'_j, Y'_j)$ ，とする。

質問項目に関してそれぞれ Kruskal-Wallis 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ，平行移動の質問 1 についてのみ有意差が存在した ( $X_2 = 7.92$ ,  $p < 0.05$ )。次に，それぞれの手法間において Scheffe の方法を用いて平均値の差の検定を行ったところ，平行移動の質問 1 における自走ロボットと踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法の平均の差についてのみ有意差が存在した ( $X_2 = 7.20$ ,  $p < 0.05$ )。平行移動については前後移動のように映像のダンサーの大きさが変化しないことや，接近移動よりも

表 6: 自走型スクリーンの評価実験アンケート結果

質問		1			2		
		1	2	3	1	2	3
手法番号							
接近移動	Ave. <sup>1</sup>	3.0	2.9	2.9	2.2	2.8	2.7
	S.D. <sup>2</sup>	1.0	1.2	1.6	1.3	1.2	1.4
平行移動	Ave. <sup>1</sup>	1.7	3.5	3.1	2.4	3.4	3.3
	S.D. <sup>2</sup>	1.0	1.2	1.5	1.4	1.1	1.4
前後交差	Ave. <sup>1</sup>	1.8	2.9	3.1	2.7	2.9	3.4
	S.D. <sup>2</sup>	0.8	1.0	1.5	1.2	0.9	1.4

<sup>1</sup> 平均値, <sup>2</sup> 標準偏差

表 7: 2人で踊る手法とそれぞれの手法との距離の平均 (mm)

手法番号		1	2	3
接近移動	Ave. <sup>1</sup>	127	87	137
	S.D. <sup>2</sup>	125	68	158
平行移動	Ave. <sup>1</sup>	177	135	224
	S.D. <sup>2</sup>	162	120	201
前後交差	Ave. <sup>1</sup>	149	107	126
	S.D. <sup>2</sup>	124	81	117

<sup>1</sup> 平均値, <sup>2</sup> 標準偏差

リズムを合わせるタイミングが多かったことなどが違いとして挙げられる。ダンサーの映像の大きさが変化すると、通常よりも大きい、または小さいダンサーの映像と踊ることとなり、そこから得られる違和感が感覚に影響を及ぼしたのではないかと考えられる。また、ダンスパフォーマンスでは拍のタイミングがお互いの息を合わせるタイミングであり、ダンサーと踊る感覚が最も強く得られると考えられる。リズムを取るタイミングは、振り付けから平行移動、前後移動がそれぞれ拍ずつの移動に対して、接近移動では2拍分の移動となるため、リズムを合わせる拍数は平行移動の方が多くなっており、よりダンサーと踊る感覚に近かったのではないかと考えられる。そのため、これらの違いがプロジェクタ映像と踊る手法がダンサーと踊る手法の感覚により近くなった原因ではないかと考えられる。また表6から、自走型スクリーンと踊る手法の質問1, 2の評価がプロジェクタ映像と踊る手法に近いことがわかる。このことから自走型スクリーンは感覚の類似性が高いプロジェクタ映像と踊る手法の利点を備えているといえる。

次に移動のずれについての考察を行う。

算出した平均値が小さい程二人で踊る手法の移動と近似しているため、正しく位置取りができたといえる。それぞれの実験項目に関して Kruskal-Wallis 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、平行移動についてのみ有意差が存在した ( $X_2 = 8.13$ ,  $p < 0.05$ )。次に、それぞれの手法間において Scheffe の方法を用いて平均値の差の検定を行ったところ、平行移動の自走型スクリーンと踊る手法とプロジェクタ映像と踊る手法の平均の差についてのみ有意差が存在した ( $X_2 = 8.12$ ,  $p < 0.05$ )。平行移動については自走型スクリーンの方が自走ロボットよりも不規則な動きが生じた時にスクリーンが揺れるなどのダンサーの移動を制限する影響が多く出たことが差が出た原因ではないかと考えられる。表7から、手法1から3において自走型スクリーンと踊る手法の距離の平均値が最も高くなったことがわかる。このことから、自走型スクリーンは位置の再現性が高い自走ロボットと踊る手法の利点を備えていなかったといえる。

実験結果より、自走型スクリーンは感覚の類似性が高いプロジェクタ映像と踊る手法の利点を備えていたが、位置の再現性が高い自走ロボットと踊る手法の利点を備えていなかった。考えられる原因としては、自走型スクリーンが床との摩擦の影響により不規則な動きをしたため必要以上の存在感を持ったこと、またスクリーンとの衝突の際に怪我の恐れがあり無意識に動きが強く制御されたこと。さらにスクリーンの速度が足りず映像がスクリーンから外れてしまい距離の取り方に戸惑いが生じてしまったことなどが挙げられる。

ここで、見本となるダンサーの実際の振り付けから、対象となる踊りで想定される平均・最大速度を導出しところ、平行移動の平均速度は約 0.5m/sec、最大速度は約 1.3m/sec、前後移動の平均速度は 0.4m/sec、最大速度は 1.0m/sec、接近移動の平均速度は 0.5m/sec、最大速度は 1.6m/sec であり、自走型スクリーンの最大速度は約 1.3m/sec であるため、接近移動に関しては実際のダンサーの最大速度に達していないことがわかった。そのため想定する接近移動の最高速度を満たす機構を用いて、再実験する必要がある。しかし、人型大のスクリーンをホイールによって移動させる機構では人間の接近移動のように移動開始から最大速度に達するまでの時間を短くすることは厳しい。そこで、カーテンレールにスクリーンを天井から吊るした機構を新たに作製し、2.4.3 節と同様に手動でスクリーンを移動させ、再実験を行った。

作製したスクリーンの配置、移動方向についてに図9に、スクリーンの外観を図10に示す。

2本のカーテンレールを平行に天井に取り付け、それらに対し垂直に新たに1本の

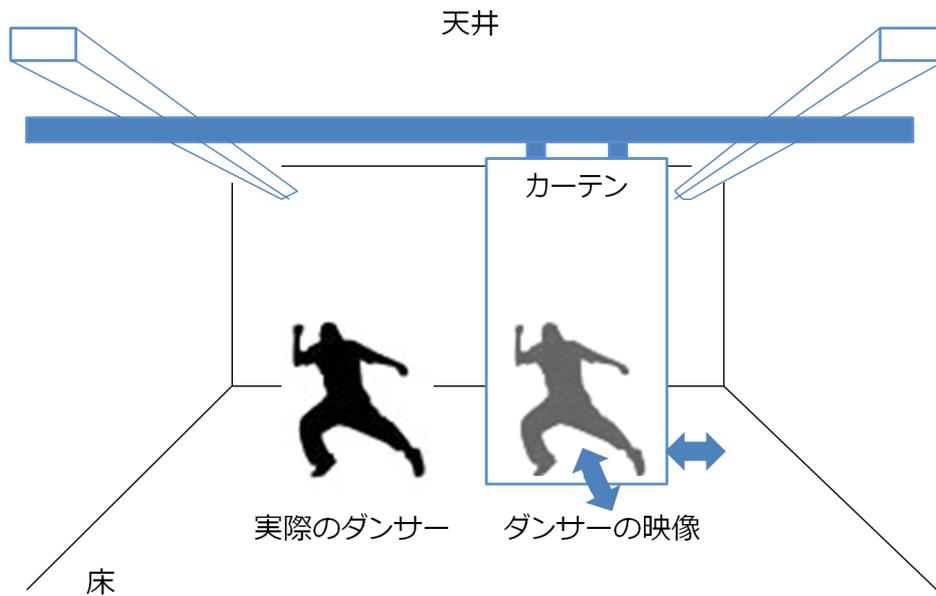


図 9: 2軸動作可能な電動カーテンの配置, 移動方向

カーテンレールを先程の2本のカーテンレールで吊るしている。これによりカーテンを前後左右に移動させることができる。横方向の移動についてはナビオ社の電動カーテンレール TV24 の回転部分を加工したカーテンレールを利用した。モータがレール上に敷かれたワイヤーを巻き取るように回転させることによって、カーテンが移動する。回転部分はモータとカーテンが動作する部分とのキア比が低かったために、モータの回転が直接カーテンレールを動作させる部分と繋がるよう加工した。これにより最大速度は1.4m/secに達した。前後方向については横移動に使用した電動カーテンレールの両端に垂直に2つのカーテンを取り付け、電動カーテンレール自体を移動させることによって可能にしている。前後方向については手動での移動のみとなっており、今後横方向と同様にモータを取り付け自動化を目指す。スクリーンは風が抜けやすいようレースカーテンを使用している。

カーテンレールを利用した機構を作製した理由としては、カーテンレールが固定されており移動方向がずれないため不規則な動きを抑えられること、また床を走る自走ロボットを必要としないためより近い距離ですれ違うような練習ができる。さらに重量があるモータごと移動させる必要がないため高出力のものが利用でき更なるスピードの上昇が期待できるなど挙げられる。しかし、カーテンレールを天井等に設置するなど仕掛けが大きくなること、複数人での利用方法が限定されてしまうことなどの欠



図 10: カーテンレールにスクリーンを天井から吊るした機構の外観

点も挙げられる。これらを考慮した上で実験を行った。

## 2.5 カーテンスクリーンについての調査

カーテンスクリーンによる影響を調べるために考えられるそれぞれの隊形練習手法において、実際にダンサーと二人で踊る際の感覚に近いかどうか評価した。実験で使用したカーテンスクリーンは横方向のみ移動でき、カーテンに取り付けた紐を引っ張ることによって移動できる。これにより最大速度 6.0m/sec に達することができるため、2.4.3 項にて想定する人の移動の最大速度に達していなかった接近移動について、実験を行うことができる。被験者には 8 拍 × 2 の約 8 秒間の 2 つの振りを参考動画をもとに覚えさせた。ここでいう拍は、4 分音符を 1 拍として定義し、1 拍の長さは約 0.5 秒とする。これら 2 つの振りは、2.3.1 項で述べた提示される存在感による影響が大きいと

考えられる接近，平行移動の2つの要素が対応している。

評価項目は2.3.1項で挙げた「感覚の類似性」と「移動の再現性」で「感覚の類似性」の評価には実験後アンケートに答えてもらった。アンケートの質問項目は2.4.4項の表5で示した2つである。それぞれ5段階評価で評価してもらった。「移動の再現性」の評価にはMicrosoft社のKinectを用い，実験中のダンサーの移動を記録した。なお，ダンサーと2人で踊る手法を含めどの手法も手法ごとに3回ずつ行った。

さらに，各実験方法の詳細を以下に示す。

**手法1** 鏡を見ながら一人で踊る。

**手法2** OMNIKIT2010を付属の見本となるダンサーの振り付けを基に出発地点，方向転換を行う地点，終着地点をそれぞれ定め，音楽に合わせて無線コントローラで手動での操縦を行ったものと踊る。

**手法3** プロジェクタを用いて欠けているダンサーを壁に投影した映像を鏡越しに確認しながら踊る。ダンサーの映像はあらかじめ見本となるダンサーの振りを撮影した映像を利用する。

**手法4** 自走ロボットと踊る手法と同様に，無線コントローラで手動での操縦を行った自走型スクリーンと踊る。スクリーンに投影する映像は手法3で使用した映像と同様である。

**手法5** ダンサーの映像が投影されたスクリーンをカーテンレールに沿って手動で移動させたものと踊る。スクリーンに投影する映像は手法3で使用した映像と同様である。

今回複数人ではなく，2人での実験を行った理由としては，2.3.3項で述べた理由と同様である。

最後に，実験時の構成図は2.3.3項で述べた環境と同様である。

被験者は平均年齢21.3歳の3年以上のストリートダンス経験を持つ男性3名である。

### 2.5.1 結果と考察

アンケート結果を表8に，2人で踊る際とそれぞれの手法との距離の平均を表9に示す。実験結果を基にどの手法が実際に2人で踊る際の感覚と移動に近いかの考察を行う。距離の平均値の算出方法は2.4.4節にて述べた方法と同様である。

表 8: カーテンスクリーンの評価実験アンケート結果

手法番号	平行移動					接近移動				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
質問 1	2.3	1.7	2.3	3.7	3.3	3.0	2.3	2.3	3.0	3.7
質問 2	2.7	2.0	3.7	3.3	4.3	3.0	2.3	2.7	3.0	3.7

表 9: 被験者 3 人の距離差の平均値 (cm)

手法番号	1	2	3	4	5
平行移動	56	150	83	204	150
接近移動	74	90	188	109	63

質問 1 に関して、平行移動については自走型スクリーンと踊る、カーテンスクリーンと踊る手法について高い評価を得た。これはダンサーの映像と共に移動する物体が隣にあったため、実際のダンサーと比べると少し違和感を感じるものの、踊る感覚としては近いと感じた被験者が多かったためと考えられる。また、映像を投影することによって振りが揃っている感覚が得られることによって練習に対するモチベーションが上がるといった意見もあった。単にものを移動させるよりも、映像を付加させることによってモチベーションの向上へ繋がると考えられる。接近移動については、カーテンスクリーンと踊る手法について高い評価を得た。これは自走型スクリーンと比べて素早い移動が可能のため、映像を追い続けることができたことが高い評価に繋がったと考えられる。

質問 2 に関して、平行移動については、プロジェクタ映像と踊る、自走型スクリーンと踊る、カーテンスクリーンと踊る手法について高い評価を得た。これらは、映像によってダンサーの移動のための予備動作を見ることができたため、次の移動を予測でき距離感を掴みやすかったと考えられる。また、カーテンスクリーンについては映像と連動した素早い動きができたため、より距離感を掴みやすく感じ最も高い評価を得られたと考えられる。接近移動についてはカーテンスクリーンと踊る手法について高い評価を得た。これは、自走ロボットと踊る手法と同等の素早い移動が可能であり、自走ロボットよりも大きな等身大のスクリーンが移動していたことが、位置を確認するマーカとしての機能を十分に発揮できたからではないかと考えられる。質問 1, 2 からカーテンスクリーンと踊る手法については、平行移動、接近移動共にそれぞれ実際に 2 人で踊る手法の感覚に近くプロジェクタ映像と踊る手法の利点を備えていたといえる。

次に軌跡情報についての考察を行う。算出した平均値が小さい程二人で踊る手法の移動と近似しているため、正しく位置取りができたといえる。表9の結果から、平行移動については1人で踊る、プロジェクタ映像と踊る手法が2人で踊る際の移動に近いことがわかった。また接近移動についてはカーテンスクリーンと踊る手法が最も2人で踊る手法の移動に近かったが、手法毎に大きな差は見られなかった。そのためカーテンスクリーンについては自走ロボットと踊る手法の利点を備えていなかった。考えられる原因としては、吊るしたスクリーンの生地が非常に薄いことから存在感をほとんど感じられないという意見があり、スクリーンをマーカとして捉えることが難しかったことが考えられる。

今回の実験からカーテンスクリーンと踊る手法については、自走型スクリーンと踊る手法と同様にプロジェクタ映像と踊る際の利点は備えていたが、自走ロボット踊る手法の利点を備えていなかった。このことから、隊形練習を行う際に映像が投影されたスクリーンをダンサーのように移動させることによって、ダンサーと一緒に踊る感覚は掴みやすいものの、実際の移動がずれてしまうことがわかった。

## 2.6 むすび

本章では、欠けたダンサーの代わりに自走型スクリーンを用いる、ダンスの隊形練習支援システムを提案した。隊形の練習方法において、実際にダンサーと二人で踊った際の感覚に近いかを調査し、提示内容によって隊形移動における他のダンサーとの間隔が変化することがわかった。また評価実験から、感覚においてはプロジェクタ映像と踊る際が、位置情報においては自走ロボットと踊る際がそれぞれ二人で踊る際の感覚、移動に近いことを確認し、それら2つの手法を取り入れた新たな手法を提案した。評価実験より、自走型スクリーンと踊る手法は感覚の類似性が高いプロジェクタ映像と踊る手法の利点を備えているが、位置の再現性が高い自走ロボットと踊る手法の利点は備えていなかった。また、スクリーンの移動速度を向上させたカーテンスクリーンを利用した再実験を行い、隊形練習を行う際に映像が投影されたスクリーンをダンサーのように移動させることによって、ダンサーと一緒に踊る感覚は掴みやすいものの、実際の移動がずれてしまうことがわかった。

今後システムの更なる改善を目指し、より複雑で長いに振りでの実験を行い、また今後、スクリーンにダンサーの感覚に影響を与えると考えられる様々な機構を追加し、移動するスクリーンの影響について調査する。さらに、複数台の自走型スクリーンを使

用してより複雑な隊形練習支援を行うことを目指す。



## 3 球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンス環境の構築

### 3.1 まえがき

近年、ロボティクス技術の進展に伴い、人と踊る様々な移動ロボットが開発されており [26, 97]、移動ロボットがパフォーマンスの代わりに務めたり [27]、移動ロボットがパフォーマンスと共にパフォーマンスを行う試み [28] がすでに行われている。しかし、これまでプログラミング知識のないパフォーマンスでも、複数の移動ロボットを用いたパフォーマンスをインタラクティブに作成できるようなシステムはなく、自由に表現を創出できる環境がなかった。

そこで本研究では、パフォーマンス自身が自身の動作と移動ロボットの動作の対応を考慮しつつ、インタラクティブにパフォーマンスを作成できるシステムを構築する。システムは移動ロボットの動作・明滅パターン作成用アプリケーションと移動ロボットの制御システムからなり、アプリケーション上で移動ロボットの動作とパフォーマンスの振り付けを同時に作成・確認でき、作成したパターン通りに移動ロボットを制御できる。今回、移動ロボットとして球体型自走ロボットである Orbotix 社の Sphero2.0 [29] を用いた。球体型自走ロボットを採用した理由としては以下の2つが挙げられる。1つ目として、他の自走ロボットと比較して球体というシンプルな形状は、ロボットの機能的に見える部分を最大限に削ぎ落したものとなっており、単なる移動するオブジェとして楽しめるデザインではないかと考えたためである。ホイールやローラーが剥きだした状態であれば、物体の移動そのものだけでなく、回転する部分にも人間の意識が向いてしまうと予想できるため、身体パフォーマンスとの相性は良くないと考えられる。2つ目に、球という形状は、身体パフォーマンスやスポーツに利用されているボールや日常生活で見られる糸玉、自然界で見られる水滴や太陽のように、多くのモノを模倣することができると考えたためである。通常、自己推進できないモノが突然転がり始めれば、観客に驚きを与えることができると考えられる。あるいは、身体パフォーマンスにおいて重要なコンセプトの設定において、シンプルで、様々なモノを模倣することができる球形は利用しやすいと予想できる。以上より、表現の点において、球形は身体パフォーマンスでの利用に適していると考え、移動ロボットとして球体型自走ロボッ

トを用いた。

本論文では、3.2節にて関連研究を紹介し、3.3節にて提案システムの概要について述べる。3.4節にて評価実験について説明、実験の結果と考察。実際のパフォーマンスについて述べる。3.5節にて本章のまとめを行う。

## 3.2 関連研究

本研究に関連する研究として、人と協調する移動ロボットについての研究がいくつか挙げられる。Kosugeら[14]は、社交ダンスを踊るダンスパートナーロボットを開発した。これは人間の意図するステップを推移して移動できる。Higuchiら[30]は、人間の歩く、屈むといった身体動作を利用するによって、無人航空機(UAV)の前後左右への移動や回転といった制御が可能なシステムを開発した。Tominagaら[31]は、ランナーから一定の距離を保って追従し、常にランナーを撮影、リアルタイムにランナーのフォームなどを提示する、移動型ディスプレイを開発した。Futamiら[32]は、カメラを搭載した移動ロボットを用いることによって、両手が塞がってしまうセルフカット時の問題点を解決した。PHENOX LAB[33]は周囲の状況を判断して自律的に飛行でき、人の動きを認識できるPhenoxを開発した。これらのように人間の動作を基に動作を生成する方法は見られる。本研究では、移動ロボットを用いたパフォーマンスを自由に作成できるシステムを提案する。

また、球体を用いた様々なものの拡張に関する研究をいくつか挙げる。Izutaら[34]は、無線モジュール、加速度センサ、音センサ、LED等の電子機器を搭載した新しいスポーツ用ゴムボール「Bouncing Star」を製作した。ボールの動きにあわせてボールの色やプレイフィールドのグラフィックスを操作でき、新しいデジタルスポーツの創造が期待できる。Yamaguchiら[35]は、カルマンフィルタと運動モデルを適用し、軌道予測を行うことによってトスジャグリングの球に映像を安定して投影するDigitalJugglingを実装した。Michaudら[36]は、一般的な家庭環境を想定したRoballを開発した。Roballは子供の注意を引きつけ、笑顔にさせることができる。Nittaら[37]はクアッドコプターの技術に基づいた飛行する球体を開発した。ユーザが手をあげると球体が浮き上がるといったいくつかのインタラクションを実装した。TeamLab[38]は周りにいる人に反応して、色や光や音を変えるチームラボボールを開発した。このように、球体に、動力、センサ、映像や光を加えることで、演出の幅を広げている。本研究で使用する球体ロボットにおいても、人との協調によって演出の幅を拡張できると考えられる。

次に、複数のロボットのためのオーサリングインタフェースに関する研究を挙げる。Zhaoら [39] は、タスクが書かれた紙のカードを置くことによって、複数のロボットにタスクを指示できるインタフェースを提案している。Fungら [40] は、タスク毎に写真を撮って、必要な情報をアノテーションとして付加することによって、作業手順をロボットに教示するシステムを提案した。ロボットのモーションをタスク単位で分割すれば、これらの方法で移動ロボットのモーションを作成できるだろう。しかし、人の動作との対応を考慮しつつ作成することは難しく、ロボットの位置と時刻との対応を設定し、音楽に合わせることを前提としたパフォーマンスなどの利用は難しいと考えられる。本研究では、パフォーマンスに使用する曲とパフォーマの動作との対応を考慮しつつロボットの移動経路を作成できるシステムを提案する。パフォーマンス向けのインタフェースとして、Yoshidaら [41] は、複数台のヒューマノイドロボットのダンスモーションを専門知識を持たないエンドユーザでもリアルタイムに生成できるインタフェースを提案している。基本モーションを組み合わせるだけで簡単に音楽に合わせた複雑なモーションを作成できるが、動作が一定時間で繰り返される仕様であり、時間軸を考慮した編集の自由度が低く、イメージ通りのパフォーマンスを作成することは難しい。タイムラインベースでオーサリングを行う手法として、Sugiuraら [42] は、調理順序指示インタフェースを提案している。GUI上のタイムラインにタスクを並べていくことで、料理順序を入力できる。小松ら [43] は、タイムライン上にあらかじめ用意されたモーションコマンドを入れることで、簡単にイメージ通りの動作をロボットに教示できるインタフェースを提案した。また、擬音・擬態語表現をロボットの動作に対して反映させるインタフェースについても提案している。本研究では、タイムラインベースでロボットの位置情報を編集する手法を採用している。Manabeら [44] は、クアッドコプターの移動経路を作成するために、ダンサーがクアッドコプターを把持して移動させた軌跡を移動経路として使用するシステムを開発した。プログラミング知識のないダンサーでも直観的に移動ロボットの経路を作成できると考えられる。しかし、高価なモーションキャプチャシステムが必要であり、設置コストも高く、手軽に利用できない。加藤ら [45] は、ロボット工学の知識が乏しいソフトウェアプログラマでも生活空間を動き回れる移動ロボットを簡単にプロトタイピングできるツールキットを開発した。編集の自由度は高いが、専門知識を持たないエンドユーザの利用は難しい。

オーサリングが目的ではないが、応用性がある複数のロボットの制御用インタフェー

スに関する研究を挙げる。Sakamoto ら [46] は、ソフトウェアに関する知識が少ないユーザでもタブレットを用いることで、絵を描くようにロボットを操作することができるインタフェース Sketch and Run を開発した。Ishii ら [47] は、レーザーポインタを用いて複数のロボットを選択し、簡単なタスクを割り当てる手法を提案している。Koceski ら [48] は、スマートフォンを用いて、ロボットの軌跡を描き、タスクの対象となるオブジェクトを選択している。Kato ら [49] は、マルチタッチディスプレイを用いた複数ロボットの制御インタフェースを開発した。Shrivastava ら [50] は、発話ベースの制御インタフェースを提案している。Alonso-Mora ら [51] は、直接ロボットを手にとって移動させるダイレクトインタラクション、描いた絵に合わせて複数のロボットが移動するリアルタイムドローイングインタフェース、身体の動作で操作するジェスチャベースインタフェース、タブレット PC を用いて操作するハンドヘルドタブレットを用いたインタラクションの 4 つの手法を提案した。これらインタフェースをオーサリングシステムに応用できる可能性は高い。本研究では、マウス操作中心で移動ロボットの経路を作成する手法を採用した。

近年、多くの演出家や芸術家が、様々な技術によって移動させた物体を用いて身体表現の拡張を試みている。DreamWorks Animation LLC.[59] は、仮想の生物であるドラゴンを移動するロボットで表現することによって、CG では表現できない 3 次元の空間を利用したパフォーマンスを行った。Forsythe ら [53] は、大量の振り子を吊るした空間を作製した。これにより、鑑賞者がこの空間に一度入ると、周期的なリズムを刻む振り子に合わせて、かわしながら移動してしまい、それがまるで踊っているかのように見える。Wurtzel ら [54] は、床に置かれた風を起こす装置によって、布がまるで意図を持って踊っているかのように見える Pasde Deux を作成した。パフォーマは縦横無尽に舞う布に合わせて踊るパフォーマンスを行う。TOVIA Co.[55] が作製したニンジャライトは、身体の動作に合わせて球体群を上下移動させることによって、まるで空間を操っているような表現が可能である。CHUNKEY MOVE[56] の CONNECTED にもニンジャライトと同様の表現が見受けられる。Bot & Dolly[62] は、人と映像が投影された移動する 2 枚の白色の板と人の身体表現を組み合わせたパフォーマンス、Box を作成した。これらのように、人の身体表現と移動する物体との連携は数多く見られる本研究では、人の身体表現と移動する物体との対応を考慮しつつ、インタラクティブにパフォーマンスを作成できるシステムを開発した。

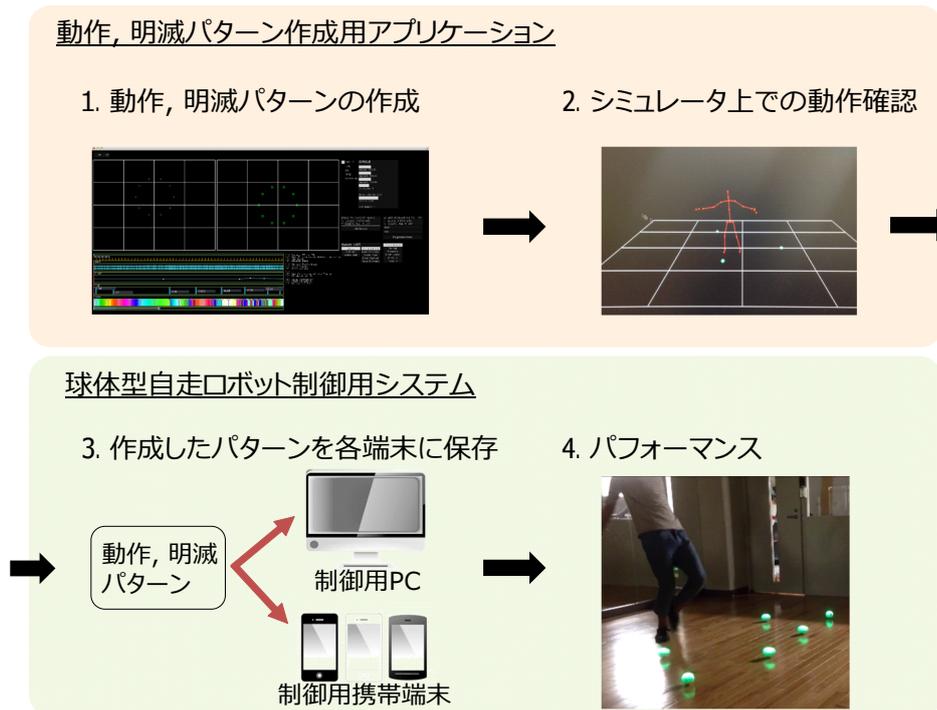


図 11: システム構成

### 3.3 提案システム

#### 3.3.1 設計方針

提案システムの目的は、簡単に複数の球体型自走ロボットを用いたパフォーマンスを作成することである。そこで、音楽や振り付けに合わせて球体型自走ロボットの動き、光の明滅パターンを作成するために、プログラミングの知識がないパフォーマでも主にマウス操作でパターンを作成できるシステムを構築する。

パフォーマンスの確認方法として、球体型自走ロボットを実際に動作させる方法が考えられるが、カメラを設置できる広い場所や通信環境の整備、球体型自走ロボットの充電など、手間がかかり簡単には行えない。そのため、アプリケーション上で球体型自走ロボットとパフォーマの動作を組み合わせたパフォーマンスを容易に確認できる仕組みが必要である。

#### 3.3.2 システム構成

提案システムの構成を図 11 に示す。システムの利用手順は以下の通りである。

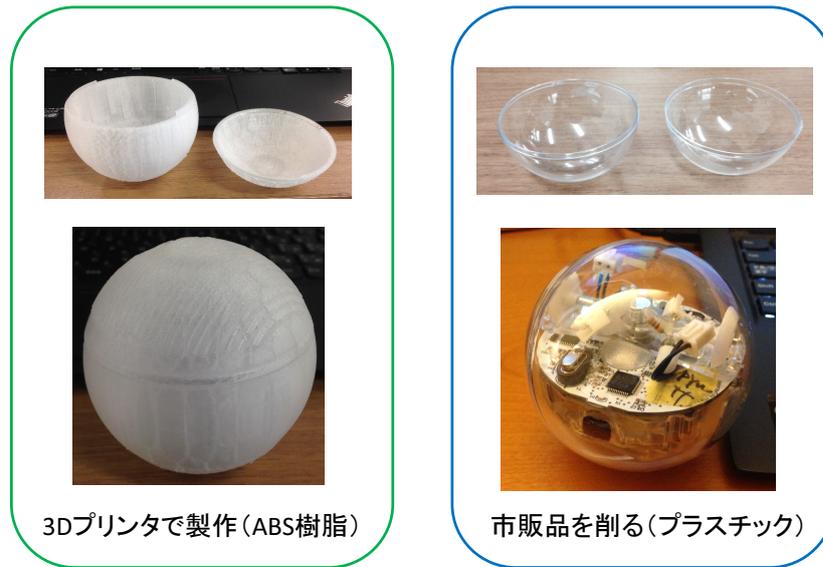


図 12: 新たに作製した外殻

1. 開発したアプリケーションを用いて、球体型自走ロボットの動作と明滅パターンをそれぞれ作成する。
2. アプリケーション上に、作成した動作、明滅パターン通りに光り、移動する球体と Microsoft 社の Kinect を用いて棒人間を表示する。これらを見ながら、実際に踊りつつ振り付けの確認を行う、
3. 動作、明滅パターンを CSV 形式のファイルとして出力し、球体型ロボットの制御用 PC、携帯端末 (Android 端末) にそれぞれ保存する。
4. パフォーマは、音楽に同期して移動、明滅する球体型自走ロボットに合わせて、実際にパフォーマンスを行う。

提案システムで使用する球体型自走ロボットの動力部分は Sphero2.0 を用いた。動力部分を包む外殻は、3D プリンタを用いて作製した ABS 樹脂製のタイプと、市販されているプラスチック製の球体型カプセルの一部を削ることによって作製したタイプの 2 タイプである。作製した外殻を図 12 に示す。

提案システムを実現するために、2つのソフトウェアを実装した。

開発した動作、明滅パターン作成用アプリケーションの UI を図 13 に示す。開発には openFrameworks を用いた。

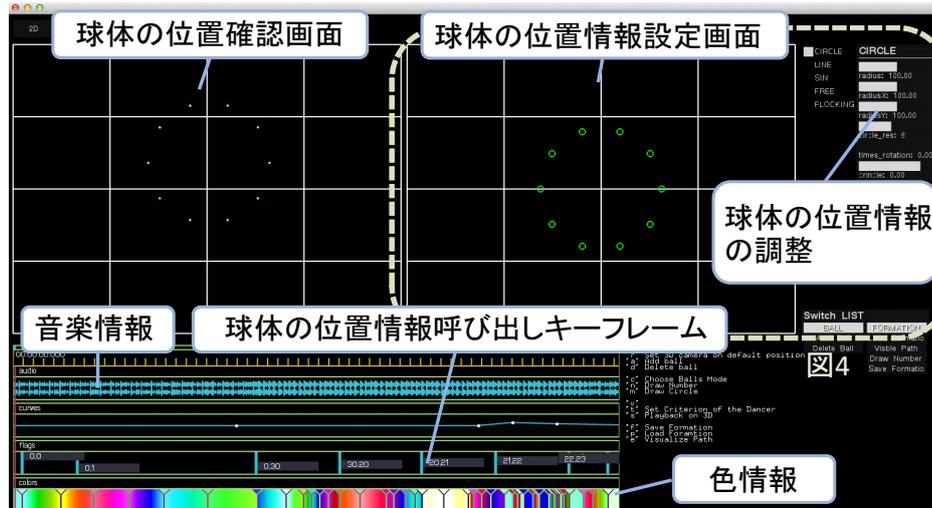


図 13: 動作，明滅パターン作成用アプリケーションの UI

動作パターン作成時の画面を図 14 に示す．球体型自走ロボットの位置情報は，スライダでパラメータを操作，もしくは球体型自走ロボットの位置を示した点をドラッグ & ドロップすることによって作成できる．作成した位置情報を音楽情報が表示されたタイムラインにキーフレームを追加する．また，明滅パターンの作成は位置情報と同様にタイムラインにキーフレームを追加する．追加したキーフレームには，CMYK の色表現で表示されたパレット画像をクリックして得られる色情報を保存する．これにより，音楽の再生に合わせて登録された位置情報が呼び出され，音楽に同期した球体型自走ロボットの動作，明滅を可能にする．短い時間の中に長い移動距離を移動するような，球体型自走ロボットの移動スピードの物理的な制約を越えた位置情報の設定を行った場合には，シミュレータ上で目的地にたどり着く前に次の目的地を目指して移動するロボットが確認できる．ユーザはこの結果を確認しつつ，無理のない位置情報の設定に調整する必要がある．

アプリケーション上で，作成された動作，明滅パターン通りに動作する球体と Kinect でパフォーマンスから取得した関節情報を基に作成された棒人間をそれぞれ表示させ，それらを見ながら，実際に踊りつつパフォーマンス全体の確認ができる．パフォーマンス確認時の画面を図 15 に示す．パフォーマンス確認後，球体型自走ロボットの動作，明滅パターンは CSV 形式のファイルで出力される．

球体型自走ロボット制御システムの構成を図 16 に示す．赤外線カメラを用いて，あらかじめ取得した映像と現在の映像の差分から赤外線 LED を搭載した球体型自走ロ

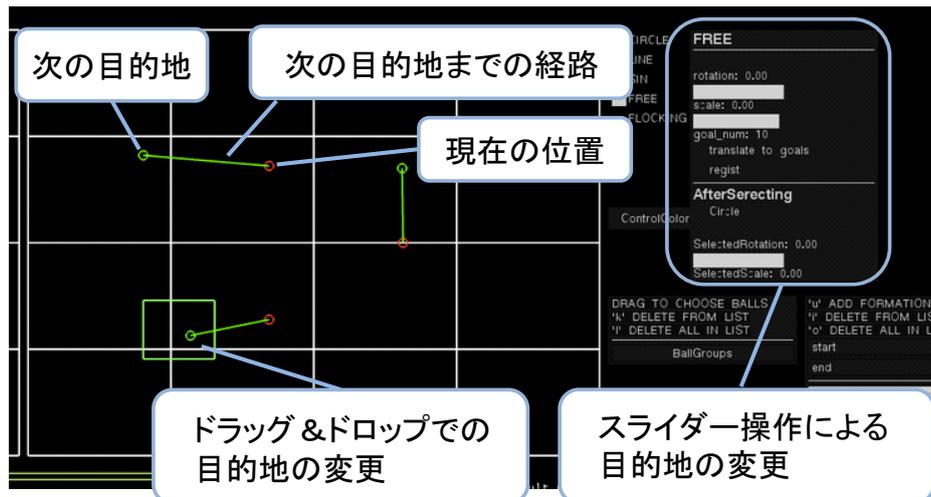


図 14: 動作パターン作成時の画面

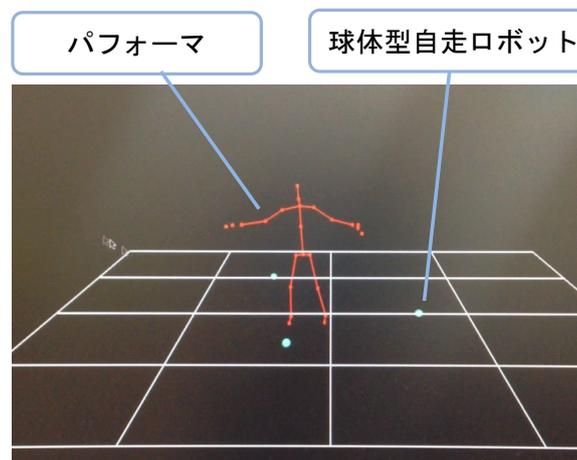


図 15: パフォーマンス確認時の画面

ロボットの位置を検出する。球体型自走ロボットの位置情報は、射影変換を用いて天井に取り付けた環境と同様の環境に変換する。これにより、赤外線カメラは自由な位置、角度で設置することができる。

球体型自走ロボットが移動する位置、光り方については、動作、明滅パターン作成用アプリケーションにて作成した CSV 形式のファイルを読み込むことによって決定している。光の明滅パターンについてはあらかじめ Android 端末に保存しておき、メイン PC から Android 端末へ送信される情報は動作パターンのみである。

球体型自走ロボットの次の目的地までの距離、角度から、PID 制御を用いて球体型自走ロボットの速度、向きを算出する。また、それぞれの球体同士は衝突を避けるため、

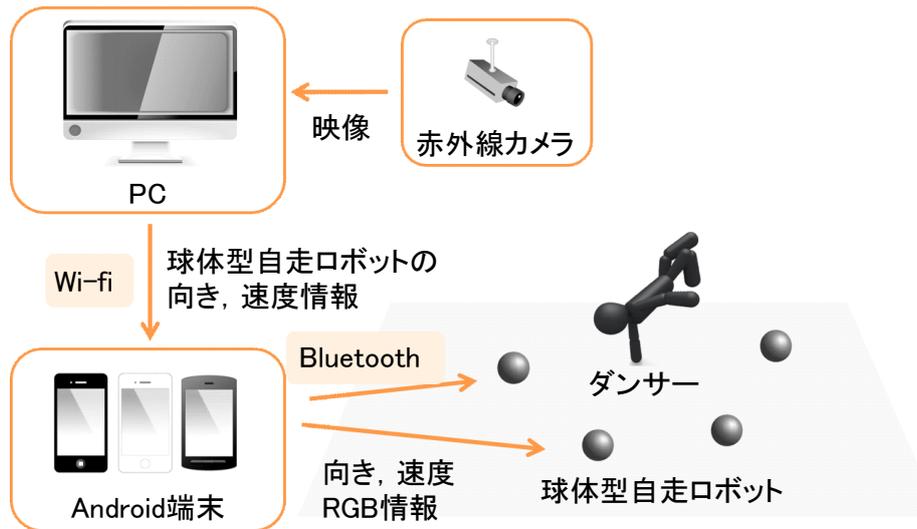


図 16: 球体型自走ロボット制御用システムの構成

距離に応じて斥力が働くようにし，速度，向きがその値に応じて修正される．制御用 PC にて決定した球体型自走ロボットの速度，向き情報を Wi-Fi を介して，Android 端末に送信し，Android 端末から Bluetooth 接続された球体型自走ロボットに命令を行っている．Bluetooth 接続を安定させるために，Android1 台につき球体型自走ロボット 1 台のみの対応付けにしている．また，電波の干渉を避けるため，Wi-Fi の使用する周波数帯域は 5GHz を用いた．

現段階のシステムの制約としては，カメラと球体型自走ロボットの間にはパフォーマンスが一定時間以上入ってしまった場合には球体型自走ロボットのトラッキングが難しくなるため，カメラと球体型自走ロボットの間に入らないようなパフォーマンス構成を強いられる．

### 3.4 評価実験

#### 3.4.1 実験環境

システムを利用して球体自走型ロボットを用いたパフォーマンスを作成し，システムの操作性，また，パフォーマンス完成までにどれだけの時間を要したかについて調査した．さらに，このような移動ロボットを伴うパフォーマンスにおいて，パフォーマンスが見せたいイメージ・表現と実際に作成したパフォーマンスの対応が被験者内で重複するかどうか調査した．被験者は平均年齢 22.3 歳，ストリートダンス経験 4 年以上

の男性3名に加えて、パフォーマンス作成経験を有するシステム開発者の1名である。実験手順は以下の手順で行った。

- (1) アプリケーションの使用方法について、約20分の説明を受ける。
- (2) 約1分10秒の長さでBPM120の曲を基に、アプリケーション上で振り付けの作成を行う。
- (3) アプリケーション上で振り付けの確認を行う。
- (4) 実際に球体型自走ロボットを用いたパフォーマンスを行う。

今回、使用する球体型自走ロボットの数は3体とした。パフォーマンスを作成する際は移動ロボットの動作、明滅パターンとパフォーマンスの振り付けを同時に行い、アプリケーション画面で随時移動ロボットの移動を確認しながら、インタラクティブに振り付けの修正・作成を進めた。また、Kinectを用いて表示された棒人間と作製した球体型自走ロボットの動き、明滅パターンを見ながら、実際に踊りつつ振り付けの確認を行った。振り付け作成時には振り付けの構成がしやすいように白紙のA4用紙1枚とペン1本を配布した。さらに、アプリケーションの操作に関する質問は、随時受け付けた。実験手順2, 3の時間を記録し、実験の最後には、システムについてアプリケーションに関するコメントをいただいた。加えて、パフォーマンスの見せたいイメージ・表現と作成した移動ロボットの動作、明滅パターンの対応を8拍毎に分けてコメントを頂いた。ここでいう1拍は、4分音符とする。最後に実験手順4の配置図を図17に示す。実験器具はPC(Apple, iMac 27-inch late 2013), ウェブカメラ (iBUFFALO, BSW20KM11BK) を用いた。実験は研究室にある奥行6m, 横幅7mの2面が鏡張りのスタジオにて行った。扉をすべて閉じ、外部からの音ができるだけ入らないように努めた。また、プロジェクタ映像を使用する際は、部屋の電気を消した環境で行った。

### 3.4.2 評価と考察

被験者1, 2のメモを図18に示す。図18より、被験者が8拍毎にパフォーマンスの構成を考えていることが見て取れる。そこで、8拍毎のパフォーマンスの見せたいイメージ・表現を表10に示す。3台の球体型自走ロボットを含めたパフォーマンスの作成にかかった時間は被験者1において2時間38分、被験者2において3時間29分、被験者

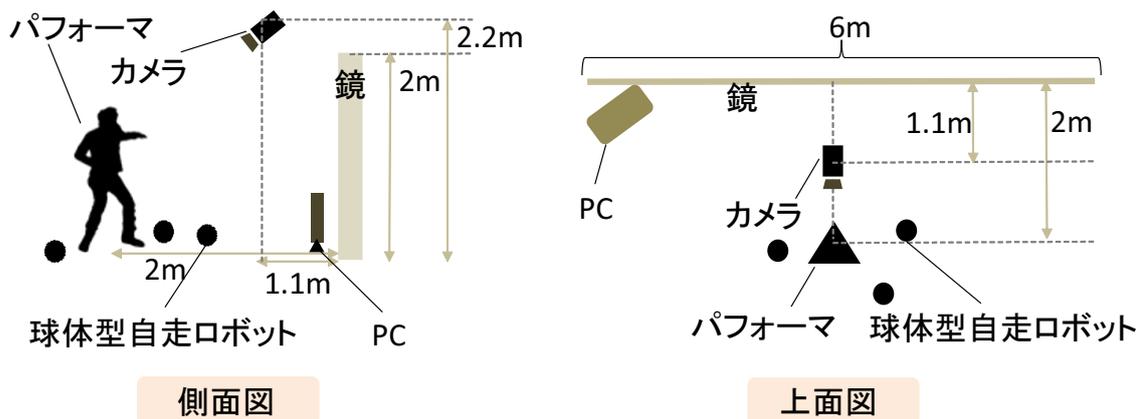
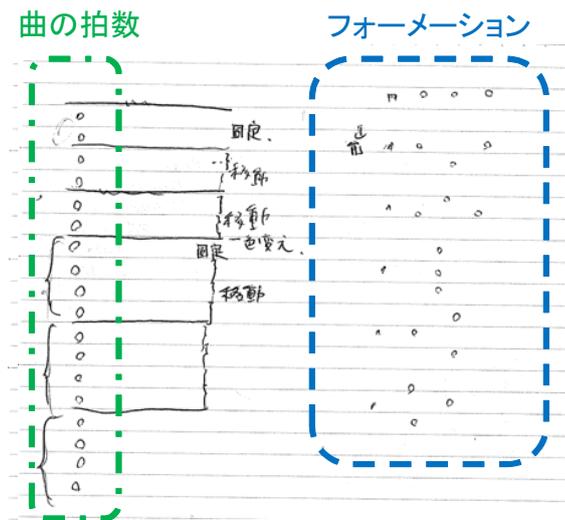


図 17: 実験手順 4 の配置図

3において2時間17分，被験者4において1時間4分それぞれかかった．また，平均作成時間は2時間22分であった．

アプリケーションについてのアンケートとして，どこに球体型自走ロボットがあり，どのように移動しているのか一目でわかったという好意的な意見もあったが，Kinectを利用して振りを確認した時には，実際にボールとの距離感を身体で掴む感覚が得難く，できれば実際に球体型自走ロボットを利用して，振りの確認を行いたかったという意見もあった．これに関しては，アプリケーション上でも実際に球体型自走ロボットと踊るような感覚を与えられる仕組みが必要と考えられる．また，現状のシステムでは，一度Kinectで取得したダンサーのダンスモーションを修正する際に，再度ダンサーがパフォーマンスを行う必要があるが，アプリケーション上で簡単に修正できる機能を追加できれば，より早く振り付けの修正を行えると考えられる．さらに，ダンサーの動作に合わせて，移動ロボットの経路・速度に変化をつけることができれば，より身体の動作に対応した移動ロボットのモーションを作成できると考えられる．その他の意見としては，光を指定する場合にキーフレーム間で色のグラデーションがかかるようにあらかじめ設定しておいたことが，かえって操作しづらかったという意見があった．また，タイムラインのシーケンスバーを移動した場合に，瞬時に球体型自走ロボットの位置が移動すればより便利になるのでは，といった意見もいただいた．これら指摘された項目については今後，修正する必要がある．

被験者4については，システムを利用してパフォーマンスを作成した経験があることから時間の短縮が見られる．これについては，システムの操作の慣れが時間を短縮した要因の一つとして考えられるが，システムの操作性としてはアンケートに回答し



被験者1のメモ



被験者2のメモ

図 18: 被験者 1, 2 のメモ

ていただいた被験者全員が使いやすい、すぐに使いこなせた等の意見を頂き、実際に操作している時間についてはそれほど大きな時間な差生じたとは考えにくい。操作の慣れに関する差といったこと以上に、システム利用経験者は球体を組み合わせた方法や、実際に球体型自走ロボットと踊ることによって得られた感覚が経験として蓄積されているため、自分が伝えたい表現がイメージしやすく、また、表現を実現するための方法が思いつき易いことが、時間短縮につながった要因であると考えられる。その

表 10: 8 拍毎のパフォーマの見せたいイメージ・表現

拍	見せたいイメージ・表現	明滅パターン
8	静止	色の変化を見せる
8		
8	ポージング. ボール静止. 観客の目線をパフォーマに	4 拍毎に色の系統を変化
8		
8		
8		
8	ボールと交差し隊形移動	赤系統
8	ボール停止. 観客の目線をパフォーマに	青, 緑系統
8	観客の目線をパフォーマに	黄色から赤
8	ボールと交差しボールで三角形を作りその中にパフォーマが入る	細かく色を変化させる
8	後半はパフォーマとロボットの動きを少しずつシンクロさせていく パフォーマとロボットで四角形を作る.	
8	1つのロボットを操作して動かす	
8	ボールがパフォーマの前で一列に	
8	パフォーマとロボットと一緒に横にスライド	
8	パフォーマが前に出るとつられてボールも前へ	
8		
8	最後の4カウントでロボットと一緒に集まる	

ため今回得られた、見せたいイメージ・表現に関する回答を基に、パフォーマが表現したいこと、例えば、球体自走ロボットがパフォーマと連動しているようにみせるといった表現を行いたい場合に、連動しているように見せるための様々な動作パターンをあらかじめ用意しておく。そして、それら用意した動作パターンを映像として再生し、確認することができれば、システム利用の経験の差を埋められ、作成時間を短縮できると考えられる。ここで、回答された見せたいイメージ・表現から、パフォーマ間で重複する見せたいイメージ・表現を抽出・列挙する。

- 抽出された表現

空間に入る, 連動, 強調, 集まる, 囲む, 広げる, 空間を作る, 全体を回転, 境界を移動

- 抽出された動作

交差, スライド, 1列に並ぶ, 固定, 1つずつ動作

複数の人が回答した表現に対応する動作がそれぞれ同一の動作を行っているならば、その動作はよくパフォーマに利用される動作といえる。ここで、抽出された表現のうち、複数人で見られた表現に対応する動作を列挙する。それぞれの動作がどのような特徴を持っているか確認、考察する。

空間に入るといふ表現はすべての被験者が回答している表現である。被験者1については、縦一列に並んでいた球体型自走ロボットが三角形の形へ回転するように移動し、8拍かけて球体型自走ロボットが移動して空いたスペースにパフォーマが滑り込んでいる。被験者2については、あらかじめ球体型自走ロボットの位置が描く三角形のスペース内に2拍程度で滑り込んでいる。と同時にそのまま球体型自走ロボットの移動に合わせて、パフォーマは空間内の位置を維持している。被験者3については、縦一列に並んでいた球体型自走ロボットが三角形の形へ左右に広がるように移動し、8拍かけて球体型自走ロボットが移動して空いた空間にパフォーマが滑り込んでいる。被験者1と比べると、空いた空間のやや後方にパフォーマが位置している。被験者4については、あらかじめ球体型自走ロボットの位置が小さな三角形を描いており、それらが4拍かけて広がり、空いたスペースに4拍かけてパフォーマが滑り込んでいる。これらの結果から、空間に入るといふ表現の中には、球体型自走ロボットの移動後にできた空間にパフォーマ素早く滑り込む動作と、あらかじめ形作られた隊形の空間内に滑り込む動作の2つが見られる。

強調させる表現についても、すべての被験者が回答している表現である。被験者1については観客の視線をパフォーマに、という回答であったが、強調と同意と汲み取れる。被験者全員に関しては、すべての球体型自走ロボットを静止させた状態でパフォーマが踊っている。被験者2については、パフォーマの立ち位置をほぼ固定し、ボールの動作を8拍ずつ変化させる動作も見られた。また、被験者4に関しては、1つの球体型自走ロボットとパフォーマが同時に移動する状態も強調と表現している。被験者1についても1つのロボットを操作するといった動作が見られ、これも同様に強調を表現していると考えられる。これらから、動きを強調という表現の中には、球体型自走ロボットがすべて静止した状態でのパフォーマが自由に踊る動作、パフォーマの位置は動かさずに球体型自走ロボットのみ動作、球体型自走ロボット1つとパフォーマが合わせて同時に動く動作の3つが見られる。

連動という表現についても、すべての被験者が回答している表現である。被験者1については、縦一列にならんだ球体型自走ロボットとパフォーマが同時に同じ方向へ8拍かけて移動している。また、縦一列にならんだ球体型自走ロボットにパフォーマが近づくと、2拍遅れて球体型自走ロボットがパフォーマから離れる。被験者2については、三角形を描く球体型自走ロボットの中心にパフォーマが立ち、8拍毎に方向を変えながら、同時に移動を繰り返す。被験者3については、横一列に並んだ球体型自走ロ

ボットの後方にパフォーマが立ち、8拍かけて横へ同時に移動している。被験者4にては、横一列に並んだ球体型自走ロボットの後方にパフォーマが立ち、8拍ごとに前後方向へ同時に移動している。また、足など、身体の一部が一つの球体型自走ロボットと同時に同じ方向へ移動している。これらから、連動するという表現には、球体型自走ロボットとパフォーマが同時に同じ方向へ移動する動作と、時間差を設けて同じ方向へ移動する動作の2つが見られた。

集まるという表現には、被験者1, 3, 4の3人が回答している表現である。被験者1については、大きく広がっているパフォーマと球体型自走ロボットが4拍かけて中心に集まっている。被験者3については、左右に広がっていた球体型自走ロボットが中心に4拍かけて移動し、パフォーマを含めた縦一列の隊形を形成している。被験者4については、パフォーマが回転する動作に合わせて、広がっている球体型自走ロボットが8拍かけて中心に移動している。これらから、集まるという表現には、広がっている球体型自走ロボットとパフォーマが中心に移動する動作、パフォーマの動作に合わせて球体型自走ロボットが中心に移動する動作の2つが見られた。

今後の課題として、これら上記の項目を基に、見せたいイメージ・表現についての項目とそれに対応したロボットの動き、光の明滅パターンをアプリケーション上で映像として再生、確認できるように実装する。また、より多くのパフォーマにシステムを利用していただき、表現のライブラリとして、内容を充実させることを目指す。さらに、4個以上の球体型自走ロボットでも同様に調査を進める。

### 3.4.3 実際のパフォーマンスでの評価

2015年3月6-8日にかけて日本科学未来館で開催されたインタラクシオン2015において、本システムを利用したデモを行った(図21)。2時間に及ぶデモ発表において約1分程度のパフォーマンスを繰り返し安定して行うことができた。学会の参加者は約600名以上であり、多くの人々にパフォーマンスを見ていただくことができた。観客からは、「パフォーマが移動ロボットをリアルタイムに操作しているように見えた」、「移動ロボットのふらつく様子がたまらなく愛おしく感じた」、「移動ロボットがもう少し大きくなければ、遠く離れた観客からは球体という形状が認識されないのでは」など、意見をいただいた。結果として、2部門でのインタラクティブ発表賞を受賞した。

2015年11月16-19日にかけてマレーシアで開催されたACE2015でのパフォーマンスセッション[103]において、本システムを利用したデモを行った(図20)。失敗ができ



図 19: 実環境でのパフォーマンス (インタラクション 2015)



図 20: 実環境でのパフォーマンス (ACE2015)

ない一度きりのパフォーマンスにおいても、約1分程度のパフォーマンスを問題なく行うことができた。また、様々な色の照明がかかった環境においても正常に動作することを確認した。

以上よりパフォーマンスを行う実際の環境においても十分に耐えうるシステムであることを証明できた。

### 3.5 むすび

本章では、球体型自走ロボットの動作、明滅パターンをパフォーマンスの動作を考慮しながらインタラクティブに作成できるシステムを構築した。システムの有効性を示すために、4名の被験者にシステムを利用して動作、明滅パターンを作成および、パフォーマンスを実演してもらった。また、被験者毎の表現したいイメージと動作パターンを列挙、考察し、振り付けの作成時間短縮のための手法を示した。さらに、実験環境外での場所でも安定してシステムが利用できることを確認した。

今後、システムを利用して様々なパフォーマンスを作成し、システムの改善に努める。また、球体に限らず、様々な形状の自走ロボットを製作し、形状による違いがどのような影響を身体表現に及ぼすのかについても調査を行う。



## 4 回転移動を模したテクスチャ表示機能をもつ球体型移動ロボット

### 4.1 まえがき

近年、人と移動ロボットを組み合わせた様々な舞台パフォーマンスが見られる。壇上にいない出演者の代わりに務めるもの [27]、踊る人型ロボット [58]、ファンタジーの世界に登場するキャラクターを模したもの [59]、人とカメラの間に割って入る演出に利用されるもの [60]、演者の動作に合わせて移動する人よりも大きなもの [61, 62]、演者の動作に合わせて移動する人より小さなもの [28, 55] などを利用した多数のパフォーマンスが存在する。具体的に、Manabeら [44] は、ダンサーの身体動作をデータとして使用し、制御されたクアッドコプターとダンサーを組み合わせたパフォーマンス「dance with dornes」を提供した。これら移動ロボットの設計を行う場合には、人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスに求められる機能、形状を考慮しなければならない。しかし、求められる機能と形状によっては機構の実現が難しい場合がある。例えば、空中に浮かんで移動するようなオブジェクトによる演出を考えた場合、現在は実際に飛行するドローンを高度に制御することでステージを実現しているが、コストが高く、制御も困難である。しかしそのような演出要求に対し、「自由に飛んでいるように見える」演出をワイヤなどを使って実現することで、同じ演出効果を低コストかつ安定的に提供できる。本研究の目的は、特に球体型の移動ロボットによる演出を採り上げ、そのような代替演出を実現する機構を確立することにある。

新体操、ジャグリング、マジック、フリースタイルフットボールやパントマイムといった古典的な身体パフォーマンスに加え、MOVEment[63]、Moon Beams[64]、Metamorphose (s)[65]、Ballons de baudruche[66]、La danse des ballons[67] といった作品で見られるように、身体表現と球体のオブジェクトを組み合わせたパフォーマンスが多くみられる。球体型の移動ロボットを使う例として、これらパフォーマンスにおいて移動ロボットを組み合わせたものを想定すると、一般には球体特有の転がるといった動作を実現したロボットである Sphero2.0[29] 等を用いる方法が有力である。著者らの先行研究 [105] においても、ダンスパフォーマンスとこのような球体型自走ロボットを融合させたパフォーマンスシステムを構築し、実際に運用してきた。しかし、このような回転型移動

ロボットでは直接車輪で接地するロボットに比べて運動性が劣る。重心移動で転がる仕組みでは加速度を大きくすることができない。また球体という形状では遠心力を受けて横転してしまうため、急な旋回を行うことができない。このように、パフォーマンスの素早い動作と連携させるには俊敏性が不足している。また、球体型自走ロボットでは位置推定を行うことも困難である。これは駆動部分や各種センサをすべて球体殻の中に収める必要があり、ロボット自身による外界センシングや、ロボットにマーカーなどを取り付けることによる外界からのセンシングなどが難しいことが理由である。たとえばカメラなどを用いて位置を計測することは可能であっても、透明でない球殻に覆われた内部の移動ロボットの姿勢を計測することは困難である。移動ロボットの姿勢に大きな誤差があった場合、指定した向きにロボットが移動しないためパフォーマンスに大きな問題を生じる。さらに、このような球体ロボットで光る球が転がるような表現をするのは困難である。球の中に入っているロボット自体は転がらないため、球殻にLEDをつける必要があるが、球殻の内側はロボットが走行するために球状になっている必要があり、この制約の中で球殻にLEDやマイコン、バッテリーなどを球殻に固定することは難しい。このように、球体型自走ロボットをパフォーマンスに利用するには多くの制約があり、実際の舞台パフォーマンスにおいて利用するには問題点が多数存在する。

そこで本章では、高い俊敏性を備え、形状特有の動作を錯視させる球状LEDディスプレイを搭載した移動ロボットを提案する。提案する移動ロボットは、移動の際に回転運動を行うのではなく、床に接地したオムニホイールを用いて高速かつ精度よく移動することができるだけでなく、球殻でおおわれていないためさまざまなデバイスを付加することで機能を拡張しやすい、このようにロボットに搭載した球形の表面にあるLEDの点灯パターンを利用し、テクスチャの変化を制御することによって、転がりながら移動しているように錯覚させる。

本研究では、提案する移動ロボット実現のために、球状LEDディスプレイを作製し、光を用いた視覚効果について調査を行った。調査結果を基に提案システムを改良し、実運用を想定した視覚効果についての調査を進めた。

以降、4.2節では関連研究について述べ、4.3節で問題意識として球体型自走ロボットを用いたパフォーマンスを紹介する。4.4節で提案システムの詳細、提案システムを用いて行った視覚効果についての調査結果と考察を述べる。4.6節では提案システムの改良点、改良した提案システムを用いて行った視覚効果についての調査結果と考察を述べ

る。4.7節では提案システムの改良点，改良した提案システムを用いたプロのパフォーマンスによるパフォーマンスの実施及びその考察を述べる。最後に4.8節でまとめを行う。

## 4.2 関連研究

球体型自走ロボットの駆動方式をいくつか挙げる。Bhattacharyaら[68]は，球体内部にアクチュエータを取り入れ，内部の重心移動によって回転移動する方式を論文中にまとめている。これらの方式は，監視ロボット[69]や掃除ロボット[70]など多くの球体型の移動ロボットに用いられている。また，小林ら[71]は，ジャイロを用いた駆動原理の球体型ロボットを開発している。内部で高速回転するスピンのトルクを生み，駆動する。石川ら[72]は，重力オフセットと角運動量保存則の両方を駆動力として利用できる駆動機構を持つ球体型ロボットを開発した。荻原ら[73]は，球体形状へ変形するロボットを開発している。球形内部にある4足歩行ロボットのうち対角の2本の脚を突き出し地面との反トルクを受けることで機体が回転し移動する。以上に挙げた駆動方式は，車輪が地面に接地している自走ロボットと比べて加速度が小さく，また球体という形状では遠心力を受けて容易に横転してしまうため，急な旋回を行うことができず運動性能が低い。また，Polaris[74]やRolling Bot[75]のように，球の一部を車輪にすることで移動する方式がある。これらは加速度を大きくできると考えられるが，遠心力によって容易に横転してしまい，運動性能は高くない。また，球体特有の回転移動とは異なる。ZENTA ROBOTIC CREATIONS[76]が開発した「MorpHex」は，外殻が花のように開く仕組みで，それら駆動部分を利用して回転移動を行うことができる。また，Andrewら[77]が開発しているテンセグリティ構造の変形により移動する球状のロボット「SUPERball」は，月面探索を目的としており，非常に軽く，頑健性が高い。しかしこれらは俊敏性が低く，外観も完全な球を成していない。Briodら[78]は，球形の骨組みで覆った飛行ロボットを提案している。外からの衝撃に強く，障害物に接触することが可能であり，回転移動も可能である。しかし，飛行ロボットの性能から，重量制限や空気を通すために骨組みにする必要があるなど，単なる球として見れず，拡張のためのデバイスを付加することも難しい。本研究では，高い俊敏性を備え，球体特有の動作を錯視させる球状LEDディスプレイを搭載した移動ロボットを提案する。

光の視覚効果を用いた錯覚に関する研究をいくつか挙げる。港ら[79]は，運動錯視を用いた携帯型遠隔操作ヒューマノイドを開発した。人間の頷き動作を再現するため

に、適したLEDの配置や明滅パターンを評価した。LEDの点滅ではロボットの運動そのものを生成することはできないが、運動を錯覚させるだけでもコミュニケーションの質は向上する。Yoshidaら[80]は、高速に物理的に回転するプレートに合わせて、ハイスピードプロジェクタの光を投影することにより、アニメーション映像をリアルに見せることができるシステムを開発した。本研究では、LEDの点滅によって物体の実際の運動と同レベルの錯視効果を目指す。

光はロボットとのコミュニケーションの応用にも多数用いられている。Kimら[81]は、ロボットの内部状態をLEDの光を用いて表現する手法を提案している。人の入力を待機している状態、障害物による進路の妨げ、タスクの進行状況の3つについて、LEDの最適な光らせ方を検討している。Miguelら[82]は、複雑なコミュニケーションができない簡易な球形のロボットが、LEDの光りやペットの動作に基づいた振る舞いで人に意図を伝えらるか、調査している。Kobayashiら[83]は、ロボットとのコミュニケーションを円滑にするために、光の点滅といくつかのビープ音を組み合わせた。Reaら[84]は、人々が環境をどのように知覚し、使用するかを、ロボットがどのように変えることができるか調査した。ロボットは光を用いて部屋のムードを表現する。Szafirら[85]は、飛行ロボットの飛行意志を、光りを用いて一目で伝えられる、明示的なコミュニケーションの設計を検討した。本研究では、LEDの光の点滅によって、物体の運動を疑似的に再現することを目指す。

仮想世界で球体をよりリアルに再現する方法として様々な反射モデルが提案されている。神原ら[86]は、現実環境の照明環境を推定することによって、提示するステレオビデオシーンスルー拡張現実感において、実時間で正確なキャストシャドウを行った。しかし、現実世界において、反射モデルを考慮しロボット単体でリアルタイムに影を生成することは難しい。また、コンピュータグラフィックスを用いて、重力下で移動する物体の、人の運動知覚に関する研究は多数見られる[87, 88]。しかし、発光する移動物体を用いて、球体の実際の運動を再現する試みは見られない。本研究では、移動ロボットに取り付けた光源を点滅させることによって、物体の物理的な運動の錯視を引き起こす。

多くの演出家や芸術家が、様々な技術によって移動させた物体を用いて身体表現の拡張を試みている[53, 89]。CHUNKEY MOVE[56]は、身体の動作に合わせてオブジェクト群を上下移動させることによって、まるで空間を操っているようなパフォーマンス「CONNECTED」を行った。また、Wurtzel[54]は、床に置かれた風を起こす装



図 21: 実環境におけるパフォーマンス

置によって縦横無尽に舞い上がる布とダンサーを組み合わせたパフォーマンス「PAS DE DEUX」を提供した。これら移動する物体とパフォーマーを組み合わせたパフォーマンスに、光による錯視効果を加えれば、新しいエンターテインメントを提供できる可能性がある。

### 4.3 問題意識

著者らはこれまで球体型自走ロボットを利用したパフォーマンスを数多く行ってきた。ここで利用した球体型自走ロボットは、移動の際に回転運動を伴う、先行研究におけるロボットを指す。2015年3月6-8日にかけて日本科学未来館で開催されたインタラクティブ2015において、球体型自走ロボットと身体パフォーマンスを組み合わせたデモを行った。約1分程度のパフォーマンスを2時間程度、繰り返し安定して行うことができた。また、2015年11月16-19日にかけてマレーシアで開催されたACE2015でのパフォーマンスセッションにおいても、同様のパフォーマンスを行った(図21)。しかし、球体が目標位置からずれてしまうことが多く、パフォーマンス時間が長くなる



図 22: 様々な身体パフォーマンスとの組み合わせ

につれエラー率が大幅に上がってしまうと想定できる。これは、ロボットの姿勢の計測誤差が時間経過とともに大きくなるのが原因である。透明でない球殻に覆われたロボットの姿勢を外部から計測することが難しいため、外から補正することも困難である。また、移動ロボットの動きも、移動の加速度が小さいことや、遠心力によって横転してしまうため急旋回できないなどの制約があり、表現の幅が限られていた。

さらに、製作した球体型自走ロボットを用いて、様々なジャンルのパフォーマンスの方とのパフォーマンスを行ってきた（図 22）。これらのパフォーマンスでは、球体型自走ロボットを把持したいというような要求が多かった。球体内部に駆動部分が収められた場合、重量が重いため持ちづらく、内部のロボットの故障を防ぐために激しく動かすことができない

本研究で提案する球体型移動ロボットの外側にモーションキャプチャに用いられるマーカ等の機構を外側に追加したり、球状 LED ディスプレイを移動ロボットから着脱することができれば、このような問題も解決することができる。本研究の目的は球体ロボットやドローンなどの不安定要素をもつオブジェクトをステージ等で利用する際に、物理運動を他の機構で代替させることで、観客に与える効果を同等かそれ以上に

高めつつ、パフォーマンスの安定性を高めることであり、本研究では、特に球体型の移動ロボットによる演出に着目し、回転移動を他の機構で代替させるための視覚効果について、調査を行った。

#### 4.4 球状LEDディスプレイの回転移動表現の視覚効果の予備検討

本研究では、実際には回転していない球形のロボットに対して、移動時に球形表面にボールが回転しているかのような模様変化を提示することで、聴衆に回転移動を錯視させることを目的とする。そのため、実際に球体型ディスプレイを備えた移動ロボットを作成し、視覚効果の評価を行う。

光を用いた視覚効果を利用して、物体の運動を錯視させるためには、光が連続的に移動することが必要である。これを実現するためには、球体の表面下にLEDを隙間なく敷き詰める手法を考えた。また、光り方をシミュレートしつつ敷き詰められたLEDを制御することができれば、視覚効果のパターン生成効率が向上すると考えられる。そのため、これら要件を満たす球状LEDディスプレイと光の制御用アプリケーションを作成した。さらに、作製した球状LEDディスプレイを土佐電子社のTDSTO48-350[92]に搭載した(図23)。これにより、球状LEDディスプレイを移動させることができる。

##### 4.4.1 提案システム

作製した球状LEDディスプレイの外観を図24に示す。直径120mmの透明なプラスチック製の球体カプセルの中に、Adafruit社のDotStar LEDs[90]を敷き詰めた。530個のフルカラーLEDを搭載し、12個のArduino nano[91]によって制御されている。また、LEDの光を拡散させ、点灯していないLEDを隠すために、白色の液状ゴムスプレーを使用し、球全体をコーティングした。

光の制御用アプリケーションの画面を図25に示す。アプリケーションの開発にはopenFrameworksを用いた。アプリケーション上に表示されている1つ1つの球体がLED1個分と対応しており、25msec毎に点灯パターンを球状LEDディスプレイに接続されたすべてのArduino nanoに送信する。キーボード上の複数のキーにそれぞれ光の点灯パターンを割り振っており、点灯パターンをキーボード操作で変更できる。また、点灯パターンの点灯範囲、光の回転の速度、回転の方向についても同様にキーボード上で操作できる。シミュレータ上で点灯している部分、点灯していない部分のすべて

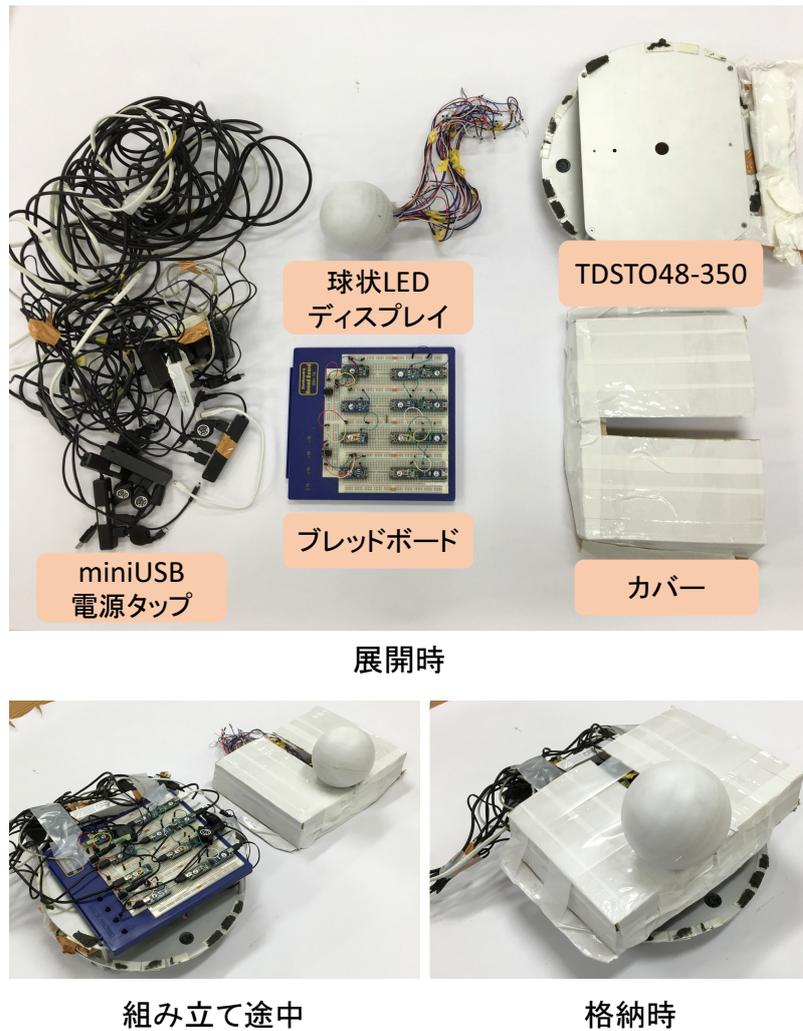


図 23: 球状 LED ディスプレイと移動ロボットの連結

の情報が、PC から球状 LED ディスプレイに送信されているため、操作結果はリアルタイムに球状 LED ディスプレイに反映される。

#### 4.4.2 実験方法

光を用いた視覚効果の影響について調査するために、実験を行った。今回、調査する項目は以下の 3 つである

1. 点灯パターンと錯視の関係
2. 回転方向と錯視の関係



図 24: 球状 LED ディスプレイの外観

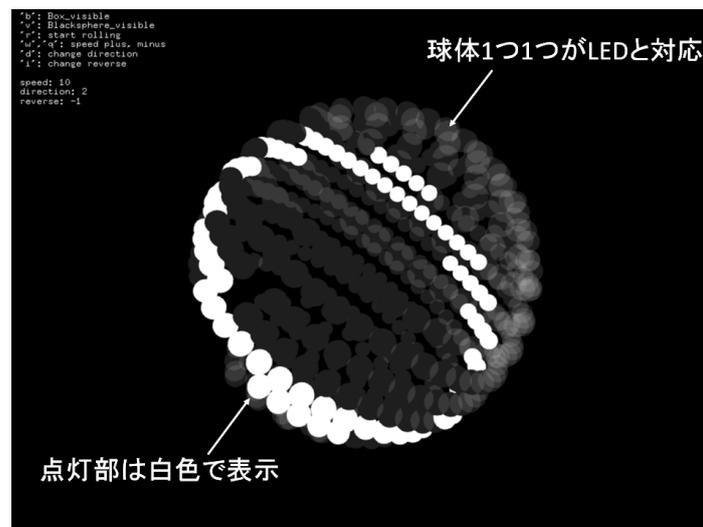


図 25: 光の制御用アプリケーションの画面

### 3. 球と聴衆の距離と錯視の関係

これらの調査により、錯視を引き起すために重要な要素がわかると考えられる。

被験者は平均年齢 23.8 歳，視力 0.8 以上の男性 9 名，女性 2 名である。被験者には以下に示す移動する球状 LED ディスプレイを用いた 9 つのパフォーマンスを見ても

らった。

- P1 1つの円を進行方向に回転 (観測点 A)
- P2 2つの円を進行方向に回転 (観測点 A)
- P3 6つの円を進行方向に回転 (観測点 A)
- P4 1つの円を進行方向に回転 (観測点 B)
- P5 2つの円を進行方向に回転 (観測点 B)
- P6 6つの円を進行方向に回転 (観測点 B)
- P7 1つの円を水平方向に回転 (観測点 B)
- P8 2つの円を水平方向に回転 (観測点 B)
- P9 6つの円を水平方向に回転 (観測点 B)

それぞれの点灯パターンは図 26 に示す通りである。また、図 27 に示すように、観測点 A から観察する場合は鏡越しに 10m の距離からの観察であり、観測点 B から観察する場合は 5.5m の距離から直接の観察である。

パフォーマンスは 30 秒程度のダンスパフォーマンスを行った。使用した曲の速さは 110bpm である。移動ロボットを視認しないように、被験者は床から約 110cm 離れた高さよりパフォーマンスを観察した。LED の発光を目立たせるために部屋の照明は落とし、外からの光が部屋の中に入らないようにした。また、パフォーマンスを視認できるようにスポットライトの光を天井からパフォーマンスに照射した。点灯パターンが進行方向へ回転する場合は、移動ロボットの移動速度を約 0.3m/sec、水平方向へ回転する場合は移動ロボットの移動速度を約 0.05m/sec にそれぞれ設定した。すべてのパフォーマンスを観た後に以下の 3 つの質問を 5 段階で評価してもらった。

**Q1** 球体が回転しているように見えたか？

**Q2** 球体が回転しながら移動しているように見えたか？

Q1, Q2 に関しては、それぞれのパフォーマンスについて回答してもらった。さらに、錯視しにくかった原因、より錯視しやすいのではないかと考えられる改善点、また、大きさ、形状、移動速度に変化を感じたなど、気づいた点について自由にコメントしてもらった。

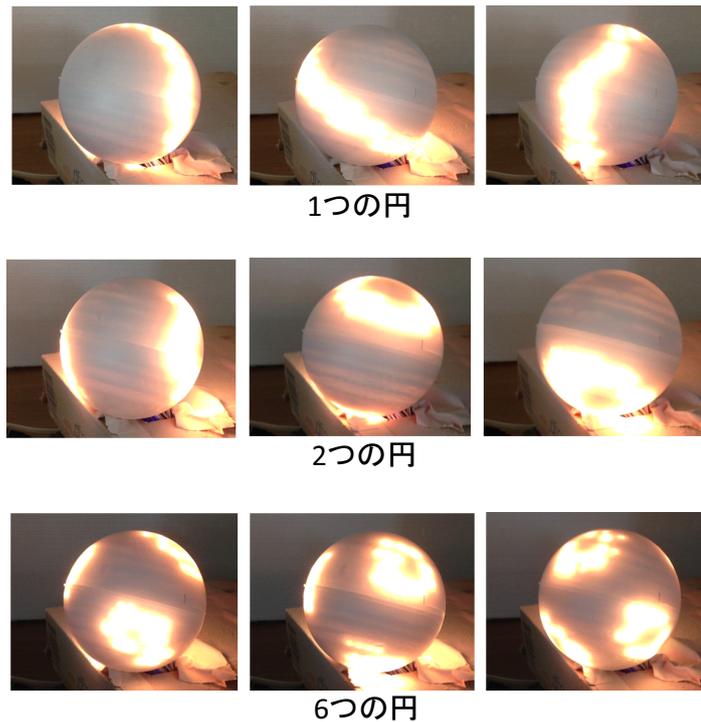


図 26: 光の点灯パターン

#### 4.5 結果と考察

Q1 の評価アンケート結果を図 28 に，Q2 の評価アンケート結果を図 29 に示す．Q1 について観測点，点灯パターンの 2 要因で分散分析を行ったところ，どの要因にも有意差は認められなかった．それぞれ，縦軸は被験者 11 名の各パフォーマンスにおける 5 段階評価の平均値で，縦棒は標準偏差を示す．また，横軸は各パフォーマンスを示す．

結果から，距離による差は見られないが，被験者から，離れた方が光り方が綺麗に見えた，大きな舞台であれば十分利用される可能性があるだろうといったコメントが見られ，距離によって光の見え方が変わっていることが推測できる．よって今回の実験に関しては 6m と 10m の 2 か所での観察であったが，今後より広い範囲での調査が必要である．また，点灯パターンに差が表れなかった原因としては，距離が長くなれば，点灯パターンの見え方の違いが小さくなるからではないかと考えられる．

点灯パターンは，Q1 について光の回転方向と点灯パターンの 2 要因で分散分析を行ったところ，点灯パターンに関してのみ有意差がみられた ( $F_{(2,10)} = 6.34, p < .05$ )．さらに，各点灯パターン間において Bonferroni 法を用いて多重比較を行ったところ，1 つの円と 6 つの円の点灯パターン間に有意差が認められた ( $p < .05$ )．円の数が多

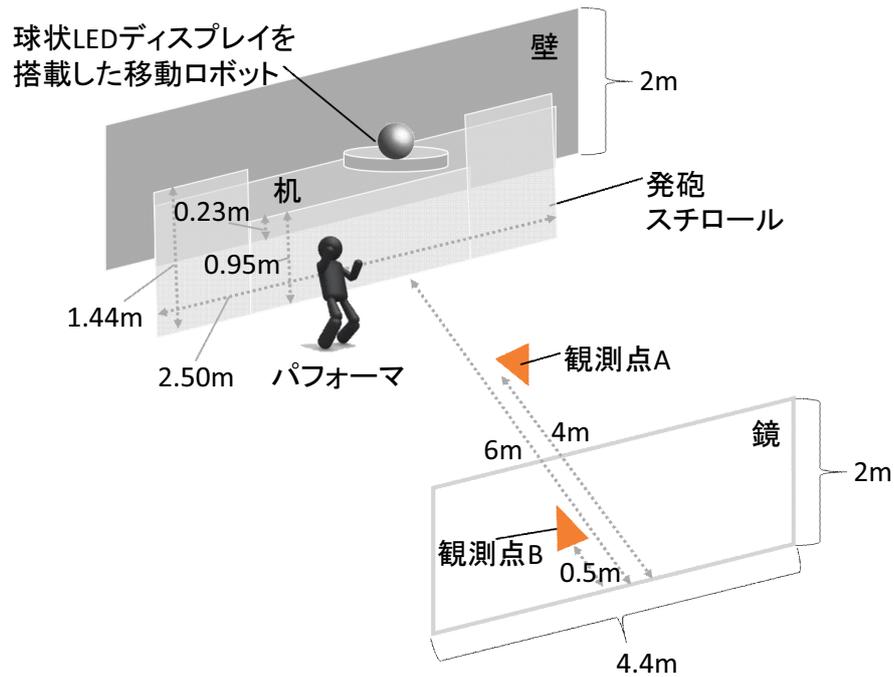


図 27: フロアプラン

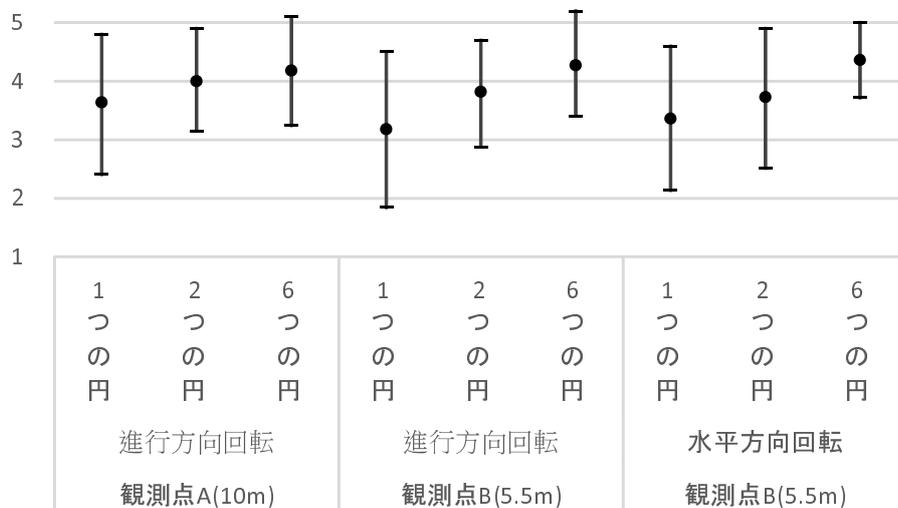


図 28: Q1 の評価アンケート結果

いほど、高い評価が得られる傾向が見られる。これについては、被験者から、点灯部分は球と認識できる程度の表面積が必要、模様が多い方が動いているように見えたといったコメントが得られたことから、点灯する表面積やばらつきが錯視を引き起こし

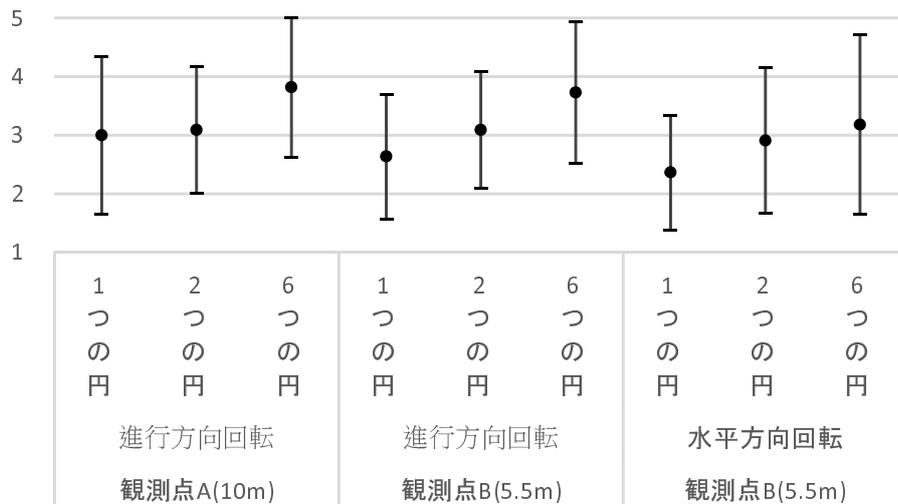


図 29: Q2 の評価アンケート結果

やすくする要因の可能性が高いと考えられる。また、図 28 から模様も複雑なほど、評価が高い傾向が見られる。点灯する表面積やばらつきと錯視の関係については、今後より詳細な調査が必要である。

光の回転方向に関しては差がほとんど見られなかったが、被験者によっては水平方向に回転した場合、より錯視が引き起こされたという意見があった。

Q2 について観測点、点灯パターンの 2 要因で分散分析を行ったところ、どの要因にも有意差は認められなかった。回転しつつ移動しているかどうかについても、Q1 と同様の理由で距離、点灯パターンについて差が表れなかったと考えられる。

また、Q2 について光の回転方向と点灯パターンの 2 要因で分散分析を行ったところ、点灯パターンに関してのみ有意差がみられた ( $F_{(2,10)} = 7.18, p < .05$ )。さらに、各点灯パターン間において Bonferroni 法を用いて多重比較を行ったところ、1つの円と6つの円の点灯パターン間に有意差が認められた ( $p < .05$ )。有意差が認められた原因としては、Q1 と同等の理由で、点灯パターンの表面積、ばらつきが影響していると考えられる。

さらに、図 28、図 29 から、Q1 よりも Q2 の評価が低い傾向がわかる。これより、その場で回転しているように錯視するよりも、転がっている、コマのように回転しながら移動するといった動作を錯視する可能性は低いと考えられる。これについては、球体の移動速度と光の回転速度のずれについて 11 人中 9 人からコメントされていたため、

表 11: TDSTO48-350 と製作した移動ロボットの性能比較

	TDSTO48-350	作製した移動ロボット
直径	350mm	200mm
重量	3500g	600g
最大速度	0.42m/s	3.50m/s
CPU	H8/36064	STM32F405
連続駆動時間	約 60 分	約 30 分

移動速度と回転速度が同期するシステムを構築する必要があると考えられる。

## 4.6 球体型移動ロボットの開発と評価実験

### 4.6.1 システムの改良

前章の調査結果から、移動ロボットの移動距離と球状 LED ディスプレイの光の回転量を同期させる必要があることがわかる。また、舞台パフォーマンスでの実運用を考慮すると、球体が転がっていると錯視させやすくするために、移動ロボットの駆動部分をより低く、より小さくする必要がある。以上に挙げた問題点を解決するために、システムの改良を行った。

システム構成の比較を図 30 に、システムの外観を図 31 に、TDSTO48-350 と製作した移動ロボットの性能を表 11 に示す。

製作した移動ロボットの最大速度は 3.5m/s であり、視覚効果の調査で使用した TDSTO48-350 に比べて 8 倍のレンジをもつ。また、移動ロボット全体をカバーで行うことによって、駆動部分が隠れており、球体の真下に移動ロボットがあると視認されにくいため、球体が転がっていると錯視させやすくなったと考えられる。さらに、移動ロボットの直径も TDSTO48-350 に比べて 0.67 倍となり、目立ちにくい。機構をすべてカバーに収めるために、制御用マイコンを Arduino nano12 個から ARM 社 [93] の mbed1 個に変更した。

移動ロボットはリアルタイムに速度情報と角度情報を mbed に送信している。mbed は受信した速度と進行方向から、LED の点灯パターンをリアルタイムに生成し、ディスプレイの表示を制御する。これにより、移動ロボットの移動距離と球状 LED ディスプレイの光の回転量を同期できる。また、mbed 内で点灯パターンを生成するため、視覚効果の調査で使用した光の制御用アプリケーションから生成される点灯パターンは必要なく、移動ロボットに送信する情報量を大幅に削減できた。

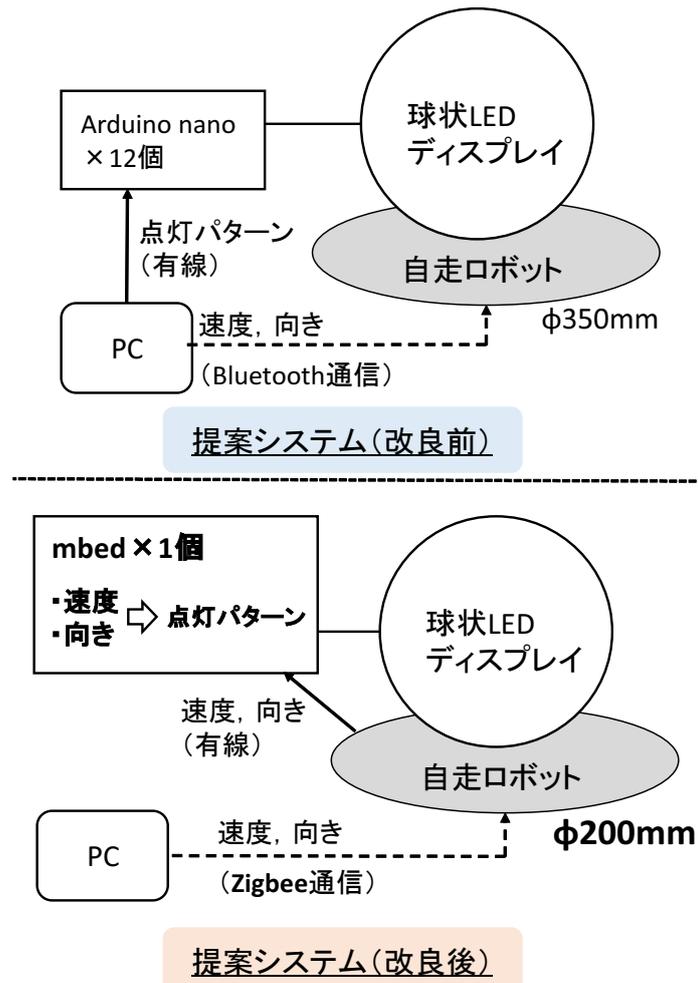


図 30: システム構成の比較

Sphero2.0 と作製した移動ロボットとの走行性能を比較した (図 32)。加速度について調べるために、1.0m の距離の到達時間を比べた。結果、Sphero2.0 は 1.39 秒、製作した移動ロボットは 1.00 秒かかった。よって、製作した移動ロボットの方が十分に加速度が大きいことがわかる。

#### 4.6.2 実験方法

移動ロボットの移動速度と光の回転速度について調査するために、実験を行った。今回、調査する項目は以下の 3 つである

1. 何も知らない状態で球体ロボットの動作を見た際に球体が転がっていると錯視するか



図 31: システム外観

## 2. 速度と錯視の関係

## 3. 移動距離と光の回転量のずれが錯視に与える影響

項目 (1) については、実際のパフォーマンスで使用される場面を想定し、初めて見た球状 LED ディスプレイに対して、LED の光が回っていると認識するのではなく、球体が物理的に単に転がっていると認識するかについて調査する。単に転がっていると錯視させることができるのであれば、実際の舞台パフォーマンスに利用できると考えられる。(2), (3) については、それぞれ錯視に及ぼす影響を調査することにより、錯視を引き起こす項目ごとの許容範囲がわかる。特に (3) については、実際の球体が転がる際に床の状況によっては、例えばボーリングのように、滑りながら回転移動する場合がある。そういった特殊な回転についても錯視を引き起こすことができるのかがわかる。特殊な回転を錯視させることができるのであれば、例えばパントマイムにおいて床が氷のような状況にみせるパフォーマンスを行う場合に、その表現をより強調することができると考えられ、より演出の幅を広げることができる。

被験者は平均年齢 22.7、視力 0.7 以上の男性 12 名。実験手順は以下の通りである。

手順 1 被験者は部屋に入り、球状 LED ディスプレイを搭載する移動ロボットを用いたパフォーマンスを前提となる知識なしに見て、球体が転がっているように見えた

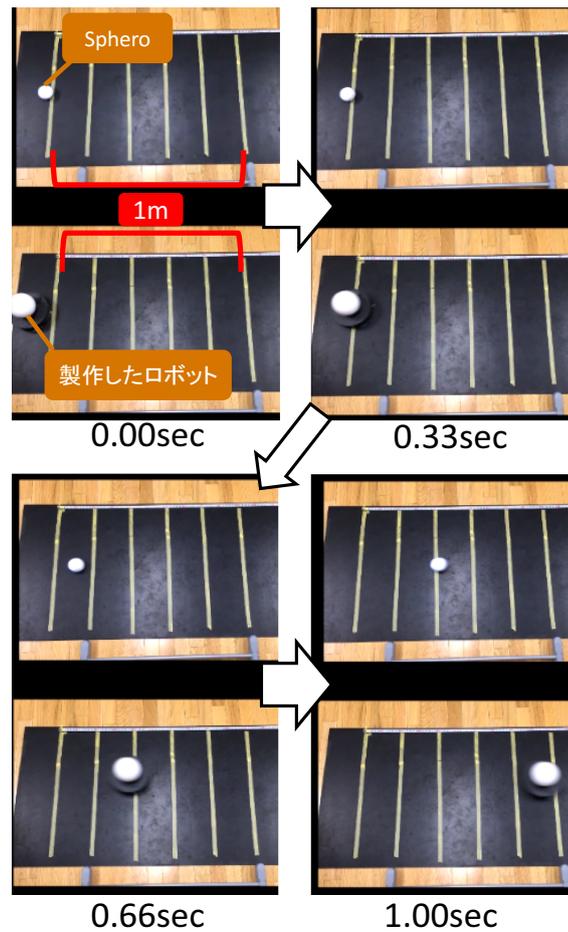


図 32: 球体型移動ロボットの加速度比較テスト

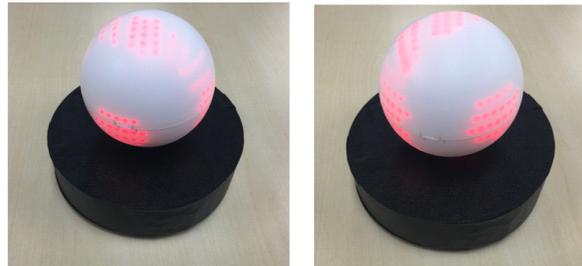
かの確認を口頭で受ける。

手順 2 球状 LED ディスプレイの機能についての説明を受け、ここで初めて提案システムの仕組みを知る。

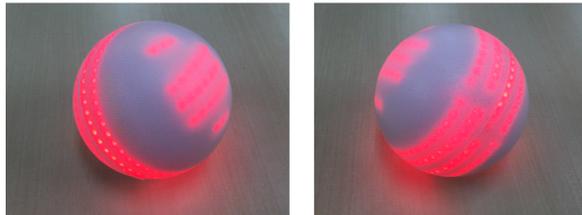
手順 3 ロボットではない実際の LED ボールの回転を見る。

手順 4 球状 LED ディスプレイの視覚効果を見て、手順 3 で見た実際の LED ボールの回転を基準とした評価を行う。

フロアプランは図 27 と同様であり、LED の発光を目立たせるために部屋の照明は落とし、外からの光が部屋の中に入らないようにした。また、パフォーマンスを視認できるようにスポットライトの光を天井からパフォーマンスに照射した。提示するパフォーマンスは 4.4.2 項で用いた振り付けと同様の振り付けで行い、パフォーマンスの提示は手



球状LEDディスプレイ



実際に転がすLEDボール

図 33: 提示する点灯パターン

順1の1回のみである。手順1において、被験者が観測する位置は図27の観測点Bで、回転方向は進行方向のみの回転を提示した。提示後、被験者に口頭にて「球体が転がっているように見えたか?」、「どのような仕組みで動作していると思ったか?」の質問を行った。手順2において、球状LEDディスプレイを搭載する移動ロボットの仕組みについて説明し、口頭にて仕組みに気付いたか確認を行った。手順3において、被験者が観測する位置は手順1と同様であり、実際に転がすLEDボールと提示する点灯パターンを図33に示す。実際のLEDボールの提示は手順3の1回のみであり、パフォーマンスによるパフォーマンスは行っていない。また、手順4において、被験者が観測する位置は手順1と同様であり、パフォーマンスによるパフォーマンスは行っていない。球状LEDディスプレイが提示する視覚効果は以下の7パターンである。

速度 0.3m/s, 0.6m/s, 0.9m/s, 1.2m/s.

移動距離に対する光の回転量 0.5倍, 1.5倍, 2.0倍。(移動速度は0.6m/sに固定)。

人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスを想定した場合、パフォーマンスの移動速度を平均歩行速度である約1.3m/s以内と仮定し、その範囲で球体型移動ロボットの速度を設定した。視覚効果は順不同に1回ずつ提示し、それぞれの視覚効果を観た直後に次の質問についてアンケートをとった。

### Q1 球体が回転しているように見えたか？

実際のボールの転がりを5段階評価の最高点である5に位置づけ、これを基準とし、評価してもらった。また、自由コメント欄を設けた。

#### 4.6.3 結果と考察

パフォーマンスを見た時に球体が単に転がっている（球体LED状ディスプレイが移動していると気づかない）と錯視した被験者は12人中11人であった。パフォーマンス後に球状LEDディスプレイの光の回転であることを説明すると、「ただLEDの球が転がっているだけだと思っていた」、「LEDの球を電動で動くレールなどで押されながら転がしていると思っていた」、「LEDが巻かれた球の中に駆動するものを入れて、重心移動によって転がっていると思っていた」などの返答があった。また、物理的に球体が転がっているのではなく、光による回転と認識した被験者が1人いた。この被験者からは、光が連続的でなくて離散的に光っているのがはっきり見えたというコメントが得られた。原因としては、被験者の光を受ける目の感受性の違いやこれまでの光に対する経験的ななにかが影響を及ぼしているなど様々な可能性が考えられる。以上のことから、すべての人に対して錯視効果を与えることはできないが、舞台パフォーマンスにおいて球体の転がりを錯視させる効果として利用できる可能性が高いことがわかる。

次に、4.6.2項の項目(2)を調査することを目的とした速度に関する評価アンケートの結果を図34に示す。縦軸は被験者12人のQ1の平均値で、縦棒は標準偏差を示す。横軸は視覚効果が提示された際の移動ロボットの速度である。速度間において分散分析を行ったところ差が見られなかった。しかし、グラフを見たところ、速度が遅い0.3m/sと速度が速い1.2m/sの評価がそれぞれ低い。コメント欄を見てみると、「速度が遅い場合は、LEDディスプレイの光の変化がなめらかではなく、カクカクと変化していることがわかった」、「じっくり見ると違和感を感じた」、「LEDのつぶつぶが見えた」といった意見が確認できた。これらについては、より小さなLEDを細かく敷き詰める、LEDの光をぼやかせるといった方法で回避できると考えられる。また同様に、速度が速い場合は、「球に写される模様のチラつきが目立って球の見え目が損なわれた」、「球体が乱雑に光りながら動いているようにしか見えなかった」といった意見が確認できた。これらについては、現在LEDディスプレイが30fpsで表示されているため、フレームレートを上げれば錯視できる範囲を広げられると考えられる。以上より、速度が遅い、

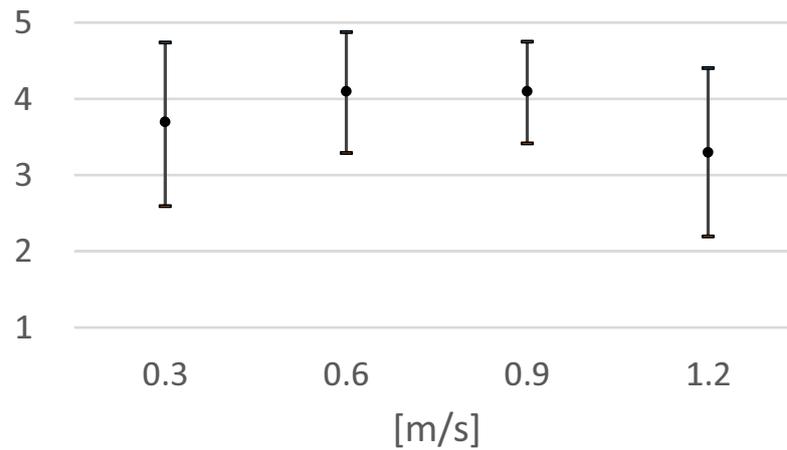


図 34: 速度に関する評価アンケート結果

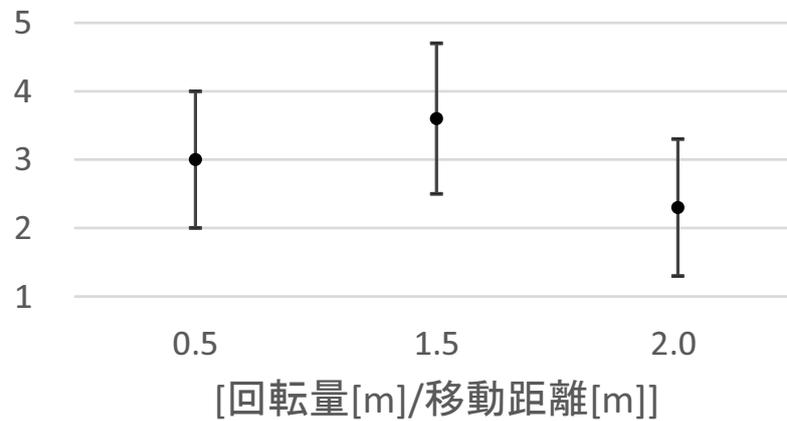


図 35: 移動距離に対する回転量の割合に関する評価アンケート結果

もしくは速い場合においても，ハードウェア・ソフトウェアの改良によって同様に錯視できると考えられる．また，全体的に評価は4付近に集中しており，実際の球体の転がりと比べると同じ様な転がりとは言い切れないが，球体の転がりとして認識される可能性は高いと考えられる．

4.6.2 節の項目 (3) を調査することを目的とした移動距離に対する回転量の割合に関する評価アンケート結果を図 35 に示す．縦軸は被験者 12 人の Q1 の平均値で，縦棒は標準偏差を示す．横軸は視覚効果が提示された際の移動ロボットの移動距離に対する回転量の割合を示す．移動ロボットの移動距離に対する回転量の割合間において分散

分析を行ったところ、有意差が確認できた ( $F_{(2,22)} = 5.01, p < .05$ )。さらに、各割合において Bonferroni 法を用いて多重比較を行ったところ、1.5 と 2.0 の間において有意差が認められた ( $p < .05$ )。移動距離に対して回転量を増やしすぎると錯視効果が弱まることがわかった。また、回転量を減少させるよりも増加させた方が、錯視効果は維持される傾向が見られる。コメント欄を見てみると、「移動距離に対して回転量が多い方が転がっているように見えた」、「回転らしい気がした」、「同期した時と同じ錯視が起こると感じた」といった意見が確認できた。回転量については増加方向へのノイズがあっても錯視効果への影響は少ない傾向があると考えられる。また、回転量を減少した場合の評価は低くなっているが、コメント欄を見てみると、「ボーリングが滑っているような回転に見えた」、「光り方が面白い」といった意見が見られ、工夫次第では演出の幅を広げることができると考えられる。さらに、全体的に、少し低めの評価となっており、演出を組み立てる際は、回転量と移動距離の関係に注意する必要があると考えられる。

以上より、速度については、0.3m/s 以下もしくは 1.2m/s 以上であれば回転移動の錯覚率が低下する傾向がみられた。しかし、これについてはシステムの改良により改善できると考えられる。移動距離に対する回転量のずれの割合については、割合が増加する場合には回転移動の錯覚率の変化が小さい傾向がみられた。そのため、増加方向へのノイズによる影響は少ないといえる。また、割合が低下する場合には回転移動の錯覚率の低下がみられたが、「ボーリングが滑っているように見えた」、「光り方が面白い」といった意見がみられ、工夫次第では演出の幅を広げられると考えられ、今後より詳細な検証が必要である。

## 4.7 球体移動ロボットを用いたパフォーマンスの作成

### 4.7.1 システムの改良

前章の実験結果を基に、錯覚率をあげるためのシステムの改良を行った。また、舞台パフォーマンスの実運用に向けて、いくつか改良を行った球状 LED ディスプレイの LED の配置を図 36 に示す。前章の実験結果から、球状 LED ディスプレイの光の変化をなめらかにするために、光をぼやかす必要があることがわかった。そこで、LED の位置を球体の殻から 7mm 離れた。これにより、1 つの LED が球体表面を照らす表面積が大きくなったため、LED 単体を認識しづらくなった。また、光に偏りがでないように、すべての LED を球の法線方向に向けた。さらに、前章で製作した球状 LED ディ

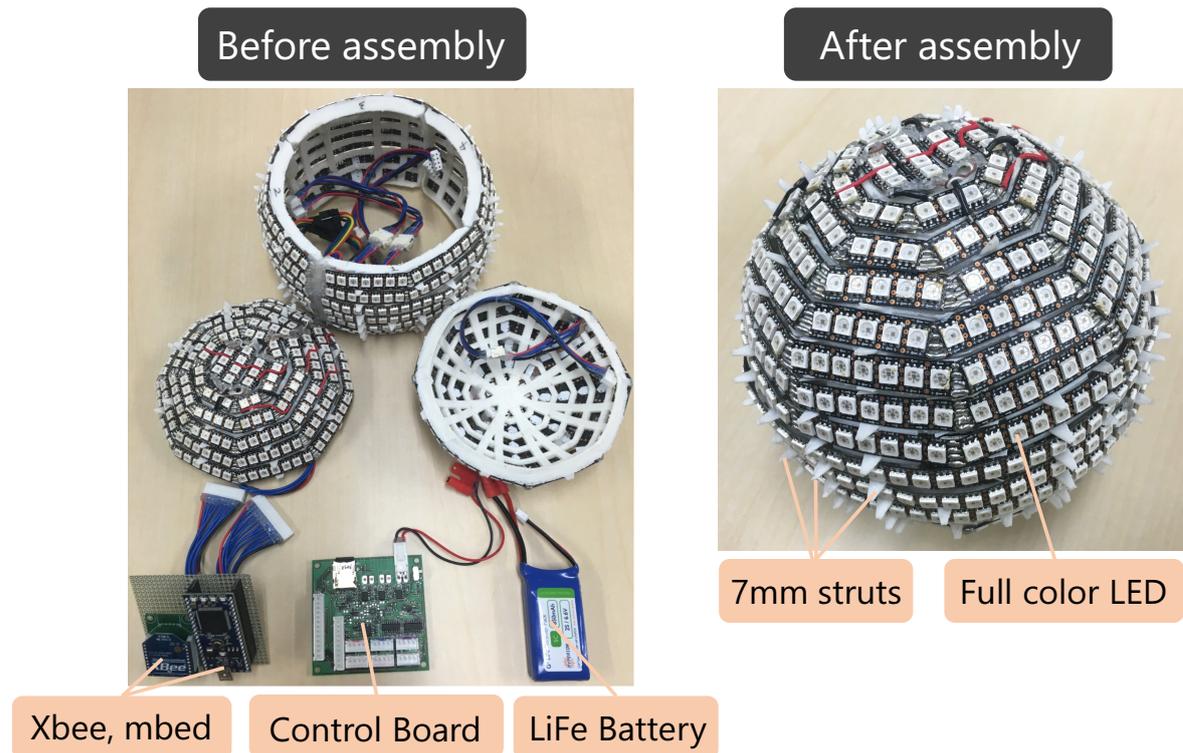


図 36: 球状 LED ディスプレイの外観

ディスプレイの模様を表示する際の光の強さは、点灯と消灯の2パターンのみであった。より模様の回転を滑らかにみせるために、中間の光強度も使い、点灯箇所と消灯箇所の境目をあいまいにした。これらの改良によって、より球体の転がりを錯覚しやすくなったと考えられる。

次に、システムの外観を図37に示す。重心移動で駆動する球体ロボットは、ロボットそのものを把持できるのに対し、前章で製作した球体型移動ロボットではそれができない。これでは、演出の幅を狭める恐れがある。より演出の幅を広げるために、駆動部分である移動ロボットと球状LEDディスプレイを分離できるようにした。移動ロボットと球状LEDディスプレイはXbeeによる無線通信を行うことができる。球状LEDディスプレイが台座から落ちない程度に固定するために、球体内部と移動ロボットの台座にそれぞれ磁石を取り付けた。

移動ロボットの外観を図38に示す。球状LEDディスプレイの視認性をあげるために、球状LEDディスプレイを上下に移動できる機構を追加した。これにより、舞台より観客の目線が低くとも、視認できる。また、上下も含めた細かな動きを再現することにより、壁に衝突して少し跳ねるような動きといった、よりリアルな球体を再現で

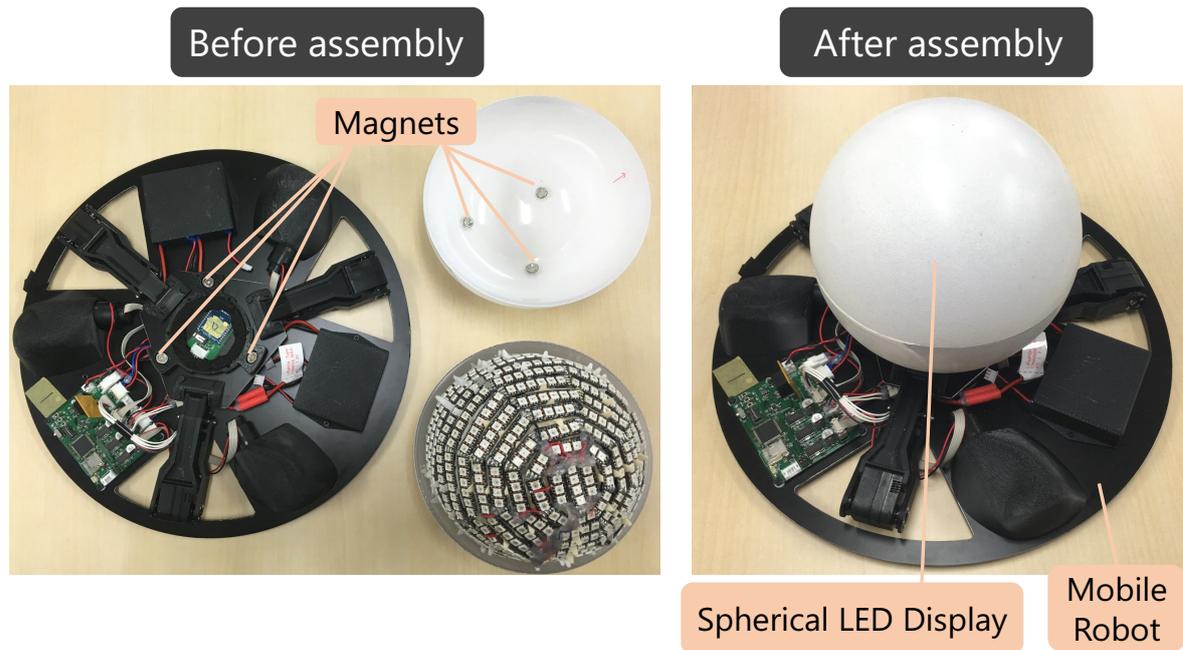


図 37: 移動ロボットと球体 LED ディスプレイの組み合わせ

きる可能性がある。さらに、見えない階段を登るといったような、上下移動を活かした演出もできるため、演出の幅がより広がると考えられる。

#### 4.7.2 パフォーマンスの実施

球状 LED ディスプレイのリアルな球体の表現を利用すれば、環境の状態を錯視させることができると考えられる。例えば、球体の回転速度と移動速度に極端なずれを生じさせることで床に対して滑っているように見せられれば、その部分は滑りやすいつるつるした床 (氷の床など) と観衆にイメージさせることができると考えられる。また、転がろうとしている球体が突然押し戻されるように回転すれば、見えない力 (風など) の存在を表現できるし、壁に衝突するような動作を見せることによって、見えない壁を表現できる。例えば、マイムにおいて床を氷のようにみせたり、風が吹き荒れる状況や見えない壁を表現した際に、上にあげた環境の演出を付加すれば、よりパフォーマンスの演出を強調することができる。また、自由に回転速度を制御できるため、時間軸の表現もできる。そこで、新しい表現手法の確立を目指し、環境を錯視させる表現という点で同じであるマイムと組み合わせたパフォーマンスを作成した。

今回、マイム俳優のいいむろなおき氏にパフォーマンスのご協力をお願いした。実

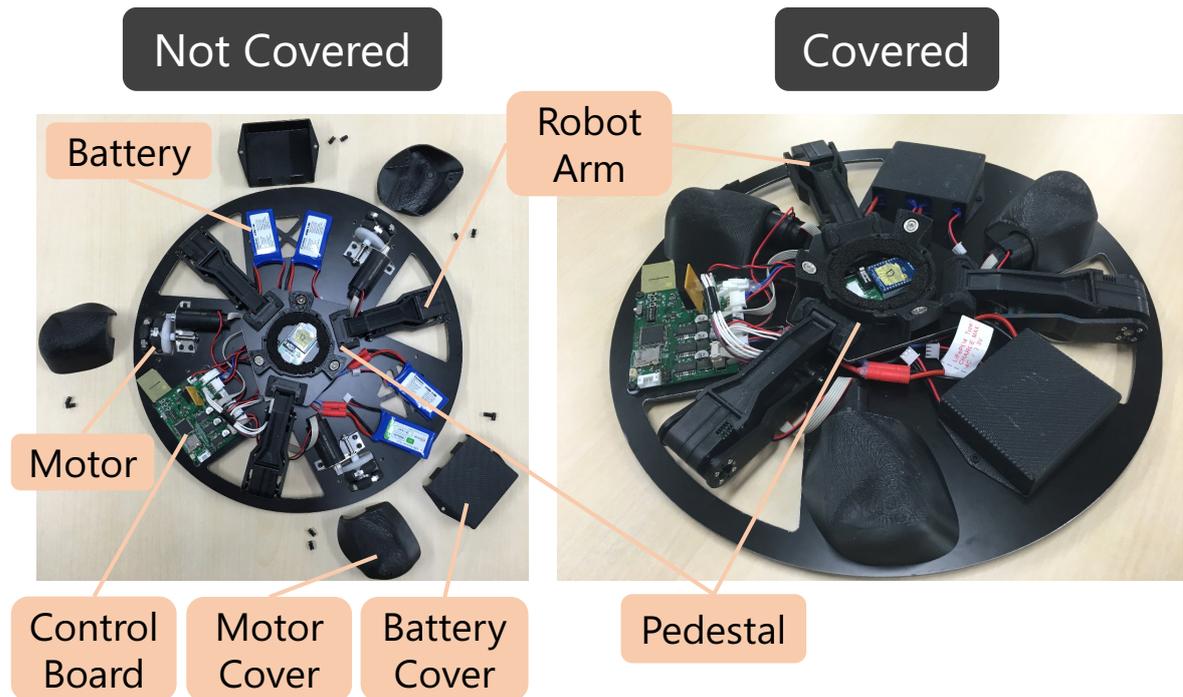


図 38: 移動ロボットの外観

際に作成したパフォーマンスの一部を図 39 に示す。

作成したパフォーマンスを映像作品として、Robotics x Future 2016（出展 12 チームに対して 1460 名の来場者）にて展示した。来場者からは、「機構の説明を受けるまで、球体が物理的な回転をしていると思っていた」、「その場で球体が空回りしているように見えた」、「球体が壁に押されて転がっているように見えた」、「カメラアングルが変化しているかのような表現が面白い」、「ロボットが驚いているように見えた」、「動画の再生速度が変化しているように見えた」、「ロボットの退場シーンが健気でかわいい」、「人の腰のあたりまで球体が上下できれば、利用できる舞台が増えると思う」といった意見が得られた。生のパフォーマンスではなく映像を通した感想ではあるものの、多くの人が転がっていると錯視し、不思議がっていた。また、環境の錯視がうまく表現できていることがこれらの意見から伺える。

#### 4.7.3 考察

パフォーマンスの振り付けを行ってもらったいいむろなおき氏に考察をお願いした結果を以下に示す。



図 39: 球体型移動ロボットを用いたパフォーマンス

「球体ロボットが台座に乗って動くシステムは予想以上に瞬発力・機動力があり、壁を押すシーンなどこちら側が無理矢理ロボットの動きに合わせてことなく自然に演じることができた。台座についているアームが上下するトリックも球体ロボットの「リアクション」の幅を広げる事ができてロボットのキャラクタが見えて効果的だったと思われる。球体ロボット自体がLEDで発光して転がっているように錯覚させるアイデアはとても面白かった。しかし球体ロボット自体の光量と共演する人間を見せる照明とのバランス、そもそも「人間は見せたいが台座は見せたくない」という矛盾があり、その辺りの照明問題をどう克服するのが今後のパフォーマンスをする上での課題の一つであると思った。可能性を感じる部分として、球体ロボット本体と台座が分離できることは単純だが予想外の広がりを持つてそうだとも思った。(もう少し軽く、手になじむ素材とサイズ感ならさらに扱いやすいが) ロボットとパントマイムというコラボレーションは相性が良いように感じた。今後のさらなる進化に期待している。」

現段階では、ロボットがパフォーマンスのメインであるパフォーマ以上に目立ってしまって、表現の強調がうまく行えているとは言い難い。これについては、ロボット側にパフォーマを常に照らす機構を取り付ける、もしくはパフォーマ側にスポットライ

トを当てる，再帰性反射を服に付ける，パフォーマに光るデバイスを取り付ける，ブラックライトと蛍光物質の組み合わせを利用するといった解決方法が考えられ，今後模索する必要がある．また，球状LEDディスプレイは，今回のパフォーマンスにおいては人の動作にリアルタイムに反応するインタラクティブな仕組みはなかった．しかし，ジャイロセンサで球状LEDディスプレイの姿勢を取得できれば様々な演出が行える．例えば，実際には球体を回転させているにもかかわらず，光を筋を常に地面に対して平行に保つといったことができれば，ボールジャグリングのような表現も可能である．これらについても今後模索する必要がある．

今回ロボットの位置推定はオドメトリを用いた．3分30秒程度のパフォーマンスであれば，問題なく行うことができ，モーションキャプチャのような高価な位置測定機器は必要ないことがわかった．これより，位置推定にカメラを必要とする重心移動型の球体移動ロボットに比べて，設置コストが低く，様々な舞台に対応できると考えられる．

移動性能の高い車輪型の全方位移動ロボットを取り付けたことにより，既存の球体型ロボットに比べて運動性能の向上がみられたが，一方で，それによるパフォーマンスへの影響が考えられる．提案手法において，例えば，球体をボールのように投げたり，弾ませたり，身体の表面上を転がせたりといった，デバイスを破損させる恐れのある使用方法は困難といえる．現状の機構においては，球体型移動ロボットの上部の球体よりも下部の移動ロボットのほうが直径が大きいため，観客に移動ロボット部分を視認されてしまう可能性が高く，これによりパフォーマンスのクオリティを下げるとの恐れがある．また，上部の球体と下部の移動ロボットが一体となっているため，把持すると球体には見えないといった問題が考えられる．しかしこれらについては，外側から移動ロボットを視認できないよう球体の真下に走行部分を収めたり，球体と移動ロボットを分離できるように現状の機構を改良することで，将来的には解決できると考えられる．

## 4.8 むすび

本章では，高い俊敏性と容易な自己方向推定の機能を備え，形状特有の動作を錯視させる球状LEDディスプレイを搭載した移動ロボットを提案した．提案システムを作成し，光を用いた視覚効果について調査を行った．結果，距離，回転方向に差は見られなかったが，点灯パターンによって錯視効果に差の傾向が見られた．また，光の回転

速度と移動ロボットの移動速度の関係が錯視に重要である可能性が被験者のコメントから伺えた。その結果を踏まえて、提案システムの改良を行った。改良した提案システムは、移動ロボットから得られる速度、方向を基に、リアルタイムに点灯パターンを生成し、LEDを制御できる。これにより、移動ロボットの移動距離と光の回転量を同期させることができる。このシステムを利用して、光を用いた視覚効果についての調査を行った。結果、12人中11人に球体が単に転がっていると錯視させることができた。また、移動距離に対する回転量のずれが大きく増加した際には、錯視効果が大幅に弱まることが分かった。今回、限定されたパフォーマンスにおける実験であったために、今後移動ロボットのより高速な移動を含め、様々なパフォーマンスを想定した実験を行っていく必要がある。さらに、プロのパフォーマと球体LEDディスプレイを搭載した移動ロボットを用いたパフォーマンスを作成した。今後、実環境にパフォーマンスを進め、新しい表現手法の確立のために様々なパフォーマンスとのコラボレーションを模索していく。



## 5 結論

### 5.1 本論文のまとめ

本論文では、人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスが増えている現状を述べ、そのようなパフォーマンスのより発展させるべく、移動ロボットとパフォーマーや観客としての人との関係性に着目したシステムを提案し、その有効性について議論した。

まず、第1章では、舞台芸術における舞台装置が、ロボティクスの進展に伴って拡張し、人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスが増えているが、移動ロボットとパフォーマーや観客としての人との関係を考慮していないことについて指摘した。一般的なパフォーマンスの実施までの過程である、作成、練習、提供の3点に着目し、それぞれにおいてどのようなことを考慮すべきかについて述べ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、パフォーマーの代わりとしての移動ロボットの利用を目指し、スクリーンにパフォーマーの映像を投影し、そのスクリーンをパフォーマーのように移動させる練習手法を提案した。本研究では、プロジェクタによってパフォーマーが投影された人型大のスクリーンを移動ロボットや天井に取り付けたカーテンレールを用いてパフォーマーのように移動させることで、パフォーマーの代わりとして提示する。投影された映像を鏡越しに見ることで振り付けが確認でき、実際のパフォーマーと一緒に踊っているような感覚が得られる。また、移動するスクリーンがパフォーマーの位置を示すマーカの役割を果たし、適切な距離感を掴むことができる。これにより、実際にパフォーマーがいなくても、適切な隊形練習を行うことができる。提案手法の有効性を検証するために評価実験を行なった。提案した移動型スクリーンでは、プロジェクタ映像と踊った際と移動ロボットと踊った際での両方の利点をうまく抽出することはできなかったが、パフォーマーの代わりとしての移動型スクリーンを作成する上での指針を示せた。

第3章では、パフォーマンス拡張の道具としての移動ロボットの利用を目指し、プログラミング知識のない非専門家でも、簡単に振付を作成できるシステムを提案した。提案システムは、移動ロボットの動作・明滅パターン作成用アプリケーションと移動ロボットの制御システムからなり、主にマウス操作中心に移動ロボットの経路を作成、またパフォーマーと移動ロボットの動作を同時に確認できるため、パフォーマー自身が自

身の動作と移動ロボットの動作の対応を考慮しつつ、インタラクティブにパフォーマンスを作成できる。4人のパフォーマンスに実際にシステムを利用し、パフォーマンスを作成してもらい、システムの操作性、また、パフォーマンス完成までにどれだけの時間を要したかについて調査した。さらに、このような移動ロボットを伴うパフォーマンスにおいて、パフォーマンスが見せたいイメージ・表現と実際に作成したパフォーマンスの対応が被験者内で重複するかどうか調査した。結果として、重複する対応が見られ、今後、表現のライブラリとしての発展の可能性を示せた。また、システムを利用したパフォーマンスを2つの会場で行い、安定してパフォーマンスが提供できることを確認した。

第4章では、観客から見た移動ロボットのパフォーマンスの拡張を目指し、光の視覚効果を用いて、物理的な動作を代替するシステムを提案した。提案システムでは、身体パフォーマンスにおいて広く用いられているボールと同じ形状である球体型移動ロボットを想定し、移動性能の高い車輪型の全方位移動ロボット上に球状LEDディスプレイを搭載し、球体特有の動きを観客に錯覚させる機能をもつ移動ロボットを作製した。提案手法の有効性を検証するために評価実験を行なった。結果、12人中11人に球体が単に転がっていると錯視させることができた。また、移動距離に対する回転量のずれが大きく増加した際には、錯視効果が大幅に弱まることが分かった。さらに、プロのパフォーマーと球状LEDディスプレイを搭載した移動ロボットを用いたパフォーマンスを作成し、パフォーマンス本人とパフォーマンス動画の視聴者からコメントを頂いた。

## 5.2 検討課題

今後、人と移動ロボットの協調型パフォーマンスの確立を目指して、移動ロボットを用いた隊形練習支援システム、人と移動ロボットを組み合わせたパフォーマンスを誰でも簡単に作成できるシステム、安定したパフォーマンスを提供する代替演出システムを提案した。しかし、これらロボティクスを取り入れた身体表現は、作成者の意図のみで作成されており、観客に対してどのような印象を与えるかは明らかではなかった。人とロボティクスが組み合わさった身体動作の特徴量を定義し、観客に与える印象を分析、解明し、ロボティクスを組み合わせたパフォーマンスをさらに発展させることが今後の課題として残されている。本節では、今後検討する予定である身体表現の拡張手法および観客への影響について述べる。

拡張手法提示のための身体とロボティクスの単純な協調動作における印象の解明:

身体性を拡張する手法として、身体を拡張する手法と道具を拡張する手法が考えられる。

#### ・身体を拡張する手法

【A】身体能力の強化：身体能力をパワードスーツ等で強化する手法が考えられる。このような、身体能力を強化するほどのデバイスを装着すると、身体の一部が通常時より太くなったり、長くなったりする可能性がある。例えば、ジャンピングシューズのような脚力を強化するデバイスを装着すると、手の長さが足の長さに対して相対的に短くなり、通常時と比べて手を利用したパフォーマンスによる印象が薄まることが予想できる。このように、身体の部位ごとに強化デバイスを装着し、単調な動作を行うことによって得られる印象を調査し、観客に与える印象を明らかにする。

【B】可動部位の追加：新たな身体の一部としてロボットアームなどのデバイスを身体に装着する手法が考えられる。これについては【A】と同様に装着箇所による印象の変化に加えて、身体と装着したデバイスのそれぞれの動作の速度、時間的ずれなどが観客への印象に変化を起こすと考えられる。例えば、大きく腕を振り上げた際に同時に素早く下方向にロボットアームが動作する場合と、遅れて下方向に動作する場合とでは印象が異なることが予想される。このような単純な協調動作について、特徴量を定義し、観客に与える印象の特性についての機序の解明を目指す。

#### ・道具を拡張する手法

【C】移動体の追加：身体から離れた自走ロボットや飛行ロボットを、身体動作と連動させることで身体の一部のように扱う手法が考えられる。これについては、【B】と同様に身体とロボットのそれぞれの動作の速度、時間的ずれに加えて、身体からの距離や物体の大きさ、形状などが観客への印象に変化を起こすと考えられる。これについても、【A】、【B】と同様に、単純な協調動作における、観客に与える印象の特性について調査を行い、定式化する。

#### 複数の身体性拡張下での複雑な協調動作における拡張手法の最適化:

人の注意は有限であるため、身体性の複数の拡張に伴って観客への印象が単に強まっていくとは考えづらく、印象のばらつきが大きくなるのではないかと考えられる。そのため、観客に与える印象を最大限に高める最適な拡張・演出の組み合わせ範囲が存在するのではないだろうか。例えば、ユーザの力強さを強調したい場合において直径30cm程度の大きさの移動ロボットを追加する際に、数m程度離れた観客に対して、100体もの移動ロボットを利用する必要がないことは明らかである。そこで、拡張手法間お

よび拡張デバイス・ロボットの取り付け箇所，追加台数が観客への印象に及ぼす影響について調査し，その関係を明らかにする．そして，導き出された最適な拡張手法の組み合わせについて，これまでと同様，特徴量の定義づけ，観客に与える印象の特性について調査を行い，定式化する．これにより，観客に与える印象を最大限に高めるために，拡張デバイス・ロボットが行うべき最適な協調動作を生成することが可能になると考える．



## 謝辞

本研究は、多くの方々の協力があったからこそ、ここまで進めることができました。簡単ではありますが、ここで皆さまに感謝を述べさせていただきます。

本研究を推進するにあたり、直接の御指導、御助言、御討論を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 塚本昌彦教授，寺田努准教授に衷心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、大変有益な御指導と御助言を多数賜りました神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 横小路泰義教授，神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 増田澄男教授に心より感謝申し上げます。

神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻に在学中、御教示、御激励頂いた神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻の諸先生方に感謝すると共に、諸職員の方々に感謝いたします。

本研究において、多大なる御協力を頂いた京都大学大学院機械理工学専攻 竹森達也氏，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 友近圭汰氏，神戸大学工学部機械工学科 竹内優佳子氏に深く御礼申し上げます。

本研究を進める上で惜しめない御助言、御協力を頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻 石黒浩教授，神戸大学大学院人間発達環境学研究科人間表現専攻 関典子准教授，国際電気通信基礎技術研究所（ATR）知能ロボティクス研究所 宮下敬宏氏，株式会社ロフトワーク 林千晶氏，ヴイストン株式会社 大和信夫氏，に厚く御礼申し上げます。

本研究を進める上でシステムを用いたパフォーマンスの作成、およびそのフィードバックを頂きました，マイム俳優 いいむろなおき氏，新体操選手 浅沼圭氏，コンテンポラリーダンサー 増田律夢氏，フリースタイルフットボーラー 泉谷駿氏，マジシャン DAISUKE ITO 氏，に深く御礼申し上げます。

博士課程後期課程への進学など、私的な相談を含め、多大なる御指導と御助言を承りました mplusplus 株式会社 藤本実氏，中田眞城子氏に深く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、多くの御討論や御助言を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻塚本・寺田研究室の諸氏に心より感謝申し上げます。

本研究内の実験の被験者として、ご協力して頂いた全てのダンサー，ならびにダン

スサークル JETTER, 神戸大学発達科学部人間表現学科の皆様には深く感謝致します。

研究生活を送る上で、暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた両親を始めとする家族に心からの感謝と御礼を申し上げます。

最後に、本研究を通し、お会いしましたすべての方々に深く感謝いたします。皆さまの言葉や行動が、逃げ出してしまうようになった筆者を何度も奮い立たせました。本当にありがとうございました。



## 参考文献

- [1] 土居裕和, 植田一博: モーションキャプチャ・データに基づく能の所作の特徴量抽出, 情報処理学会研究報告, Vol. 2004-CH-62, No. 58, pp. 29–35 (2004).
- [2] 石川航平, 山本知幸, 藤波 努: モーション・キャプチャ装置を用いたサンバ・リズム習得過程の分析, 人工知能学会第20回全国大会予稿集, pp. 2D1–02 (2006).
- [3] 仰木祐嗣, 馬場敏之, 坂口勇夫: ピエゾ抵抗型3軸加速度センサを用いたゴルフスウィング技能評価システムの開発, 日立金属技報, Vol. 120, pp. 45–50 (2004).
- [4] U. Yang and G. J. Kim: Just Follow Me: An Immersive VR-Based Motion Tracking System, *Proc. of the Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM '99)*, pp. 435–444 (1999).
- [5] U. Yang and G. J. Kim: Implementation and Evaluation of “Just Follow M”: an Immersive, VR-Based, Motion Tracking System, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press*, Vol. 11, No. 3, pp. 304–323 (2002).
- [6] K. Shinozaki, A. Iwatani, and R. Nakatsu: Concept and Construction of a Robot Dance System, *International Journal of Virtual Reality (IJVR)*, Vol. 6, No. 3, pp. 29–34 (2007).
- [7] M. Riley and C. G. Atkeson: Methods for Motion Generation and Interaction with a Humanoid Robot: Case Studies of Dancing and Catching, *Proc. of 2000 Workshop on Interactive Robotics and Entertainment (WIRE '00)*, pp. 35–42 (2000).
- [8] J. Or: A Control for a Flexible Spine Belly-Dancing Humanoid, *Journal of the International Society of Artificial Life (ISAL)*, Vol. 12, No. 1, pp. 63–87 (2006).
- [9] K. Murata, K. Nakadai, K. Yoshii, R. Takeda, T. Torii, H. G. Okuno, Y. Hasegawa, and H. Tsujino: A Robot Uses Its Own Microphone to Synchronize Its Steps to Musical Beats while Scatting and Singing, *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'08)*, pp. 2459–2464 (2008).

- [10] J. L. Oliveira, F. Gouyon, and L. P. Reis: Robot Dance based on Online Automatic Rhythmic Perception, *Proc. of the 3rd International Workshop on Intelligent Robotics (IROBOT'08)* (2008).
- [11] G. Xia, J. Tay, R. Dannenberg, and M. Veloso: Autonomous Robot Dancing Driven by Beats and Emotions of Music, *Proc. of the Eleventh International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS '12)* (2012).
- [12] S. Nakaoka, A. Nakazawa, K. Yokoi, H. Hirukawa, and K. Ikeuchi: Generating Whole Body Motions for a Biped Humanoid Robot from Captured Human Dances, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '03)*, pp.3905–3910 (2003).
- [13] 中村彰宏, 大林千尋, 柴田智広: ダンシング Roomba～踊る掃除制御～, 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-EC-20, No. 10, pp. 1–6 (2011).
- [14] K. Kosuge, T. Takeda, Y. Hirata, M. Endo, M. Nomura, K. Sakai, M. Koizumi, and T. Oconogi: Partner Ball-room Dance Robot -PBDR-, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (SICE JCMSI)*, pp. 74–80 (2008).
- [15] A. Nakamura, S. Tabata, T. Ueda, S. Kiyofuji, and Y. Kuno: Multimodal Presentation Method for a Dance Training System, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts (CHI '05)*, pp. 1685–1688 (2005).
- [16] R. Crivella, B. Daly, R. Schaaf, D. Ventura, T. Camill, J. Hodgins, and R. Pausch: Training for Physical Tasks in Virtual Environments: Tai Chi, *Proc. IEEE Virtual Reality (VR 2003)*, pp. 87–94 (2003).
- [17] T. Shiratori, A. Nakazawa, and K. Ikeuchi: Rhythmic Motion Analysis Using Motion Capture and Musical Information, *Proc. of 2003 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI '03)*, pp. 89–94 (2011).

- [18] K. Hachimura, H. Kato, and H. Tamura: A Prototype Dance Training Support System with Motion Capture and Mixed Reality Technologies, *Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communications (ROMAN 2004)*, pp. 217–222 (2004).
- [19] J. Chan, H. Leung, J. Tang, and T. Komura: A Virtual Reality Dance Training System Using Motion Capture Technology, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 4, pp. 187–195 (2010).
- [20] Y. J. Chen and Y. C. Hung: Using Real-time Acceleration Data for Exercise Movement Training with a Decision Tree Approach, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 12, pp. 7552–7556 (2010).
- [21] 林 貴宏, 尾内理紀夫: モーションキャプチャと加速度センサを用いた振りの練習支援, *電気学会論文誌 E*, Vol. 129, No. 6, pp. 173–180 (2009).
- [22] 高橋雅人, 林 貴宏, 尾内理紀夫: “振り” の練習を支援するインタラクティブシステム, *情報インタラクシオン 2004 論文集*, Vol. 2004, No. 5, pp. 97–104 (2004).
- [23] 高橋智也, 松田浩一, 海賀孝明, 長瀬一男: 地域伝統舞踊における「動作の流れ」を教えてくれる学習支援システム, *インタラクシオン 2008 論文集*, Vol. 2008, No. 4, pp. 133–140 (2008).
- [24] Microsoft XBOX Kinect, <http://www.xbox.com/en-US/Kinect>.
- [25] 土佐電子 OMNIKIT2010, [http://www.tosadenshi.co.jp/cargo/goodslist.cgi?in\\_kate=10-3](http://www.tosadenshi.co.jp/cargo/goodslist.cgi?in_kate=10-3).
- [26] M. P. Minchalowski, S. Sabanovic and H. Kozima: A Dancing Robot for Rhythmic Social Interaction, *Proc. of the 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI '07)*, pp. 89–96 (2007).
- [27] E. Jessop, P. A. Torpey and B. Bloomberg: Music and Technology in Death and the Powers, *Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME '11)*, pp. 349–354 (2011).
- [28] R. Barnelt: SERAPH(2011), <http://www.csail.mit.edu/node/1640>.

- [29] Orbotix: Sphero2.0, <http://www.sphero.jp/sphero>.
- [30] K. Higuchi, K. Fujii and J. Rekimoto: Flying head: A Head-Synchronization Mechanism for Flying Telepresence, *Proc. of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT '13)*, pp. 28–34 (2013).
- [31] J. Tominaga, K. Kawauchi, and J. Rekimoto: Around Me: A System with an Escort Robot Providing a Sports Player’s Self-Images, *Proc. of the 5th Augmented Human International Conference (AH '14)*, No. 43, pp. 1–8 (2014).
- [32] K. Futami, T. Terada, and M. Tsukamoto: A System for Supporting Self-Haircuts Using Camera Equipped Robot, *Proc. of the 12th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM '14)*, pp. 34–42 (2014).
- [33] PHENOX LAB: Phenox, [http://phenoxlab.com/?page\\_id=601](http://phenoxlab.com/?page_id=601).
- [34] O. Izuta, T. Sato, S. Kodama, and H. Koike: Bouncing Star Project: Design and Development of Augmented Sports Application using a Ball including Electronic and Wireless Modules, *Proc. of the 1st Augmented Human International Conference (AH '10)*, No. 22 (2010).
- [35] H. Yamaguchi and H. Koike: LumoSpheres: Real-Time Tracking of Flying Objects and Image Projection for a Volumetric Display, *Proc. of the 6th Augmented Human International Conference (AH '15)*, pp. 93–96 (2015).
- [36] F. Michaud and S. Caron: Roball, the Rolling Robot, *the Journal of Autonomous Robots*, Vol. 12, pp. 221–222 (2002).
- [37] K. Nitta, K. Higuchi, and J. Rekimoto: HoverBall: Augmented Sports with a Flying Ball, *Proc. of the 5th Augmented Human International Conference (AH '14)*, No. 13 (2014).
- [38] teamLab: teamLabBall, <http://goo.gl/7xYxGu>.
- [39] S. Zhao, K. Nakamura, K. Ishii and T. Igarashi: Magic Cards: A Paper Tag Interface for Implicit Robot Control, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems(CHI '09)*, pp. 173–182 (2009).

- [40] R. Fung, S. Hashimoto, M. Inami, and T. Igarashi: An Augmented Reality System for Teaching Sequential Tasks to a Household Robot, *Proc. of IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN '11)*, pp. 282–287 (2011).
- [41] S. Yoshida, T. Shirokura, Y. Sugiura, D. Sakamoto, T. Ono, M. Inami and T. Igarashi: RoboJockey: Designing an Entertainment Experience with Robots, *Journal of IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 36, No. 1, pp. 62–69 (2015).
- [42] Y. Sugiura, D. Sakamoto, A. Withana, M. Inami, and T. Igarashi: Cooking with Robots: Designing a Household System Working in Open Environments, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10)*, pp. 2427–2430 (2010).
- [43] 小松孝徳, et al.: 非ロボット技術者のための直感的ロボットオーサリングシステムの提案 (「人と相互作用するロボット」特集), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 2, pp. 213–223 (2006).
- [44] D. Manabe: Dance with Drones, [http://www.daito.ws/work/elevenplay\\_drones.html](http://www.daito.ws/work/elevenplay_drones.html).
- [45] 加藤 淳, 坂本大介, 稲見昌彦, 五十嵐健夫: Andy: 俯瞰カメラとマーカを用いた移動ロボットアプリケーション開発用ツールキット, 情報処理学会論文誌 特集論文インタラクションの基盤技術、デザインおよび応用, Vol. 52, No.4, pp. 1425–1437 (2011).
- [46] D. Sakamoto, K. Honda, M. Inami, and T. Igarashi: Sketch and Run: A Stroke-based Interface for Home Robots, *Proc. of the Twenty-Seventh Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09)*, pp. 197–200 (2009).
- [47] K. Ishii, et al.: Designing Laser Gesture Interface for Robot Control, *Proc. of the IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 479–492 (2009).

- [48] S. Koceski, N. Koceska, and I. Kocev: Design and Evaluation of Cell Phone Pointing interface for Robot Control, *Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.9 (2012).
- [49] J. Kato, D. Sakamoto, M. Inami, and T. Igarashi: Multi-touch Interface for Controlling Multiple Mobile Robots, *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI '09)*, pp. 3443–3448 (2009).
- [50] K. Shrivastava, N. Singhal, P. K. Das, and S. B. Nair: A Speech Recognition Client-Server Model for Control of Multiple Robots, *Proc. of Conference on Advances In Robotics*, pp. 1–6 (2013).
- [51] J. Alonso-Mora, R. Siegwart, and P. Beardsley: Human-robot Swarm Interaction for Entertainment: from Animation Display to Gesture Based Control *Proc. of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction (HRI '14)*, pp. 98–98 (2014).
- [52] DreamWorks Animation LLC: How To Train Your Dragon Live Spectacular, <http://goo.gl/AuIaYc>.
- [53] William Forsythe: Nowhere and Everywhere at the Same Time No.2, <http://goo.gl/Pjxi8z>.
- [54] Daniel Wurtzel: Pas de Deux, <http://www.danielwurtzel.com/project.cfm?id=19>.
- [55] Tovia co.: NINJAR LIGHT, <http://goo.gl/QGeWYe>.
- [56] CHUNKY MOVE: CONNECTED, <http://goo.gl/Q5mnRh>.
- [57] Bot & Dolly: Box, <http://www.philreyneri.com/box>.
- [58] K. Kaneko, F. Kanehiro, T. Tsuji, K. Miura, S. Nakaoka, S. Kajita and K. Yokoi: Hardware Improvement of Cybernetic Human HRP-4C for Entertainment Use, *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '11)*, pp. 4392–4399 (2011).

- [59] DreamWorks Animation LLC: How To Train Your Dragon Live Spectacular, <http://dreamworksdragonslive.com/>.
- [60] BUYMA: A Kind Drone, <http://www.buyma.com/contents/tvcm/drone/>.
- [61] Rhizomatiks: border, <http://www.rzm-research.com/border/>.
- [62] Bot & Dolly: Box, <http://urx.mobi/q1RD>.
- [63] Calvin Klein Collection x Jonah Bokaer and Julie Kent: MOVEment, <http://goo.gl/01QZyk>.
- [64] MOMIX reMIX in Crete: Moon Beams, <https://goo.gl/HbrEQw>.
- [65] Compagnie de Danse l'Eventail: Metamorphose(s), <http://goo.gl/kiW9mw>.
- [66] Julia Tiec: Ballons de baudruche, <http://urx.mobi/q1Rc>.
- [67] Amandine Cotton: La danse des ballons, <http://urx.mobi/q1Rd>.
- [68] S. Bhattacharya and S. K. Agrawal: Design, Experiments and Motion Planning of a Spherical Rolling Robots, *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation San Francisco*, pp. 1207–1212 (2000).
- [69] Rotundus: GroundBot, <http://www.rotundus.se/>.
- [70] CCP Co.: MOCORO, <http://www.ccp-jp.com/zakka/mocoro/cz560.html>.
- [71] 小林裕史, 玉置 久, 浦久保孝光, 前川 聡: ジャイロ駆動型球体ロボットの開発と評価, システム制御情報学会 研究発表講演会講演論文集, No. SCI06, p. 16 (2016).
- [72] 石川将人, 北吉良平, 杉江俊治: 偏心ロータを用いた球体型移動ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2A2-L12(1)–2A2-L12(2) (2011).
- [73] 荻原一輝, 青木岳史: 球体外殻を持つ四足歩行ロボットの研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2A2-P02(1)–A2-P02(2) (2013).
- [74] KDDI and Flower Robotics: Polaris, <http://www.au.kddi.com/original-product/archives/concept/polaris/>.

- [75] LG: Rolling Bot, <http://www.cnet.com/products/lg-rolling-bot/>.
- [76] ZENTA ROBOTIC CREATIONS, MorpHex, <http://www.cnet.com/products/lg-rolling-bot/>.
- [77] A. P. Sabelhaus, J. Bruce, K. Caluwaerts, P. Manovi, R. F. Firoozi, S. Dobi, A. M. Agogino, and V. SunSpiral: System design and locomotion of SUPERball, *Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2867–2873 (2015).
- [78] A. Briod, P. Kornatowski, J. C. Zufferey, and D. Floreano: A Collision- resilient Flying Robot. *Journal of Field Robotics*, Vol. 31, No. 4, pp. 496–509 (2014).
- [79] 港 隆史, 境くりま, 西尾修一, 石黒 浩: 運動錯視を利用した携帯型遠隔操作ヒューマノイドの運動表現, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 15, No. 1, pp. 51–62 (2013).
- [80] M. Faria, A. Costigliola, P. A. Oliveria, and A. Paiva: Phyxel: Realistic Display of Shape and Appearance using Physical Objects with High-speed Pixelated Lighting, *Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST ‘16)*, pp. 453–460 (2016).
- [81] K. Baraka, A. Paiva, and M. Veloso: Expressive Lights for Revealing Mobile Service Robot State. *Journal of Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 417, No. 1, pp. 107–119 (2015).
- [82] M. Faria, A. Costigliola, P. A. Oliveria, and A. Paiva: Follow me: Communicating intentions with a spherical robot, *Proc. of the 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 664–669 (2016).
- [83] K. Kobayashi, et. al.: Blinking light patterns as artificial subtle expressions in human-robot speech interaction, *Proc. of the 20th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 181–186 (July 2011).

- [84] D. J. Rea, J. E. Young and P. Irani: The Roomba mood ring: an ambient-display robot, *Proc. of the 7th annual ACM/IEEE international conference on Human-Robot Interaction*, pp. 217–218 (2012).
- [85] D. Szafir, B. Mutlu, and T. Fong: Communicating directionality in flying robots. *Proc. of the 10th annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 19–26 (2015).
- [86] 神原誠之, 横矢直和: 現実環境の照明条件と奥行きの実時間推定による仮想物体の陰影表現が可能な拡張現実感, 画像の認識 理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集, pp. 219–229 (2004).
- [87] 浅野拓也, 金子寛彦, 水科晴樹: 等速運動知覚における重力軸および網膜軸に沿った偏向, 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 108, No. 356, pp. 95–98 (2008).
- [88] D. Souto and D. Kerzel: Like a rolling stone: Naturalistic visual kinematics facilitate tracking eye movements, *Journal of Vision*, Vol.13 (2013).
- [89] Katy Perry: Super Bowl Halftime Show Performance 2015, <http://urx.mobi/q1Re>.
- [90] Adafruit: Dotstar LEDs, <https://learn.adafruit.com/adafruit-dotstar-leds/overview>.
- [91] Arduino: Arduino nano, <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardNano>.
- [92] 土佐電子: TDSTO48-350, <http://www.tosadenshi.co.jp/>.
- [93] ARM: mbed, <https://www.mbed.com/en/>.
- [94] 土田修平, 藤本 実, 寺田 努, 塚本昌彦: 自走型スクリーンを用いたダンスパフォーマンスにおける隊形練習支援, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2011 論文集, p. 9 (2011).

- [95] 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける自走型スクリーンを用いた隊形練習支援, 日本ソフトウェア科学会第20回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ2012 (WISS2012) 論文集, pp. 79–84 (2012).
- [96] 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける隊形練習のための支援方法の検討, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2012 論文集, p. 37 (2012).
- [97] S. Tsuchida, T. Terada, and M. Tsukamoto: A System for Practicing Formations in Dance Performance Supported by Self-Propelled Screen, *Proc. of the 4th Augmented Human Conference 2013 (AH '13)*, pp. 178–185 (2013).
- [98] 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける前後左右に移動可能なカーテンスクリーンを用いた隊形練習支援, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2013 論文集, p. 17 (2013).
- [99] S. Tsuchida, K. Murao, T. Terada, and M. Tsukamoto: A System for Practicing Formations in Dance Performance Using a Two-Axis Movable Electric Curtain Track, *Proc. of the 5th Augmented Human Conference 2014 (AH'14)*, No. 55 (2014).
- [100] 土田修平, 寺田努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットによる身体表現の拡張の提案, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2014 論文集, p. 7 (2014).
- [101] 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンスシステムの設計と実装, インタラクシオン2015 論文集, pp. 718–723 (2015).
- [102] 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける移動型スクリーンを用いた隊形練習支援, 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 5, pp. 1428–1441 (2015).
- [103] S. Tsuchida, T. Terada and M. Tsukamoto: A System for Dancing with Robotic Balls, *Proc. of the 12th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '15)*, No. 40 (2015).
- [104] 土田修平, 寺田努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンス環境の構築, 日本ソフトウェア科学会第23回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ2015 (WISS2015) 論文集, No. 23, pp. 97–102 (2015).

- [105] S. Tsuchida, T. Terada, and M. Tsukamoto: A Dance Performance Environment in which Performers Dance with Multiple Robotic Balls, *Proc. of the 7th Augmented Human International Conference 2016 (AH '16)*, No. 12 (2016).
- [106] 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: 球体型移動ロボットにおける光を用いた視覚効果の影響調査, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, pp. 193–196 (2015).
- [107] 土田修平, 竹森達也, 寺田努, 塚本昌彦: 回転移動を模したテクスチャ表示機能をもつ球体型移動ロボット, インタラクシオン 2016 論文集, pp. 140–149, (2016).
- [108] S. Tsuchida, T. Takemori, T. Terada, and M. Tsukamoto: Mimebot: Sphere-shaped Mobile Robot Imitating Rotational Movement, *Proc. of the 14th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia 2016 (MoMM '16)*, pp. 162–171 (2016).
- [109] 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンス環境の構築, コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学会論文誌) (2016, to appear).
- [110] 土田修平, 竹森達也, 寺田 努, 塚本昌彦: 回転移動を模したテクスチャ表示機能をもつ球体型移動ロボット, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 12, pp. 2531–2541 (2016).

## 関連発表論文

### 学会論文誌発表論文

1. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける移動型スクリーンを用いた隊形練習支援, 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 5, pp. 1428–1441, 2015.
2. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンス環境の構築, コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学会論文誌), to appear.
3. 土田修平, 竹森達也, 寺田 努, 塚本昌彦: 回転移動を模したテクスチャ表示機能をもつ球体型移動ロボット, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 12, pp. 2531–2541, 2016.

### 国際会議等発表論文

1. S. Tsuchida, T. Terada, and M. Tsukamoto: A System for Practicing Formations in Dance Performance Supported by Self-Propelled Screen, *Proc. of the 4th Augmented Human Conference 2013 (AH '13)*, pp. 178–185, 2013.
2. S. Tsuchida, K. Murao, T. Terada, and M. Tsukamoto: A System for Practicing Formations in Dance Performance Using a Two-Axis Movable Electric Curtain Track, *Proc. of the 5th Augmented Human Conference 2014 (AH'14)*, No. 55, 2014.
3. S. Tsuchida, T. Terada and M. Tsukamoto: A System for Dancing with Robotic Balls, *Proc. of the 12th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '15)*, No. 40, 2015.

4. S. Tsuchida, T. Terada, and M. Tsukamoto: A Dance Performance Environment in which Performers Dance with Multiple Robotic Balls, *Proc. of the 7th Augmented Human International Conference 2016 (AH '16)*, No. 12, 2016.
5. S. Tsuchida, T. Takemori, T. Terada, and M. Tsukamoto: Mimebot: Sphere-shaped Mobile Robot Imitating Rotational Movement, *Proc. of the 14th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia 2016 (MoMM '16)*, pp. 162–171, 2016.

### 研究会等発表論文 (査読付)

1. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける自走型スクリーンを用いた隊形練習支援, 日本ソフトウェア科学会第20回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ2012 (WISS2012) 論文集, pp. 79–84, 2012.
2. 土田修平, 寺田努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンス環境の構築, 日本ソフトウェア科学会第23回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ2015 (WISS2015) 論文集, No. 23, pp. 97–102, 2015.
3. 土田修平, 竹森達也, 寺田努, 塚本昌彦: 回転移動を模したテキスト表示機能をもつ球体型移動ロボット, インタラクシオン2016 論文集, pp. 140–149, 2016.

### その他の研究会発表論文

1. 土田修平, 藤本 実, 寺田 努, 塚本昌彦: 自走型スクリーンを用いたダンスパフォーマンスにおける隊形練習支援, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2011 論文集, p. 9, 2011.

2. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける隊形練習のための支援方法の検討, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2012 論文集, p. 37, 2012.
3. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける2軸動作可能な電動カーテンを用いた隊形練習支援, 日本ソフトウェア科学会第21回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ2013 (WISS2013) 論文集, pp.167-168, 2013.
4. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: ダンスパフォーマンスにおける前後左右に移動可能なカーテンスクリーンを用いた隊形練習支援, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2013 論文集, p. 17, 2013.
5. 土田修平, 寺田努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットによる身体表現の拡張の提案, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2014 論文集, p. 7, 2014.
6. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: 球体型自走ロボットを用いたダンスパフォーマンスシステムの設計と実装, インタラクシオン 2015 論文集, pp. 718-723, 2015.
7. 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: 球体型移動ロボットにおける光を用いた視覚効果の影響調査, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, pp. 193-196, 2015.
8. 土田修平, 寺田努, 塚本昌彦: 人と移動ロボットの表現インタラクシオンの解明にむけて, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ2015 論文集, p. 5, 2015.
9. 土田 修平, 竹森 達也, 寺田 努, 塚本 昌彦: 複数の移動ロボットを用いた身体パフォーマンスの印象評価, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2016 論文集, pp. 131-138, 2016.

以上



神戸大学博士論文「人と移動ロボットの協調型パフォーマンスの確立に関する研究」全  
100 頁

提出日 2017 年 1 月 20 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開  
日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 土田 修平

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。