

回転移動を模したテクスチャ表示機能を持つ球体型移動ロボット

土田 修平^{1,a)} 竹森 達也^{2,b)} 寺田 努^{3,1,c)} 塚本 昌彦^{1,d)}

受付日 2016年1月20日, 採録日 2016年9月6日

概要: 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, そのような物理運動を行う球体型移動ロボットの実現は難しい. そこで, 本論文では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衆に錯覚させる機能を持つ移動ロボットを提案する. 提案システムのプロトタイプを用いた実験結果から, 提案手法により球体の転がりを十分に錯視させられ, 演出の幅を広げられることが分かった.

キーワード: 錯視, 移動ロボット, 球体, パフォーマンス

Sphere-shaped Mobile Robot with Function to Imitate Rotational Movements

SHUHEI TSUCHIDA^{1,a)} TATSUYA TAKEMORI^{2,b)} TSUTOMU TERADA^{3,1,c)} MASAHICO TSUKAMOTO^{1,d)}

Received: January 20, 2016, Accepted: September 6, 2016

Abstract: When designing a performance with both people and mobile robots, we must consider the functions and the shape required of the robot. However, it can be difficult to actualize the required functions. In this paper we will assume a sphere-shaped mobile robot with the same shape as the balls widely used in physical performances. A sphere-shaped mobile robot needs to have high agility and roll as characteristic of spheres. However, it is difficult to realize such a sphere-shaped mobile robot with all of these characteristics. Therefore, we propose a mobile robot that can give the audience the illusion of the unique movement of spheres by equipping a spherical LED display on a high agility mobile wheeled robot. From the results of the experiment using our proposed system prototype, we found that we are able to broaden the existing range of performances by giving the illusion of the rolling of spheres through our proposed method.

Keywords: Optical illusion, Mobile robot, Sphere, Performance

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe,
Hyogo 657-8501, Japan
² 京都大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto
615-8540, Japan
³ 科学技術振興機構さきかけ
PRESTO, Japan Science and Technology Agency, Chiyoda,
Tokyo 102-0076, Japan
a) shuhei.t@stu.kobe-u.ac.jp
b) takemori.tatsuya.23a@st.kyoto-u.ac.jp
c) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp
d) tuka@kobe-u.ac.jp

1. はじめに

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 [1], 踊る人型ロボット [2], ファンタジーの世界に登場するキャラクタを模したもの [3], 人とカメラの間に割って入る演出に利用されるもの [4], 演者の動作に合わせて移動する人よりも大きなもの [5], [6], 演者の動作に合わせて移動する人よりも小さなもの [7], [8] 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 [9] は，ダンサの身体動作をデータとして使用し，制御されたクアドコプタとダンサ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．たとえば，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とり上げ，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 [10]，Moon Beams [11]，Metamorphose(s) [12]，Ballons de baudruche [13]，La danse des ballons [14] 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見られる．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 [15] などを用いる方法が有力である．著者らの先行研究 [16] 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るが，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．

そこで本論文では，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良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様々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．

本論文では，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，2 章では関連研究について述べ，3 章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 章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．5 章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．最後に 6 章でまとめを行う．

2. 関連研究

球体型自走ロボットの駆動方式をいくつかあげる．Bhattacharya ら [17] 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 [18] や掃除ロボット [19] 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 [20] 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ニングトルクを生み，駆動する．石川ら [21] 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 [22] 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．以上にあげた駆動方式は，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 [23] や Rolling Bot [24] 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。本論文では、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あげると、港ら [25] 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。本論文では、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。

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 [26] 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 [27], [28]。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。本論文では、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 [29], [30]。CHUNKEY MOVE [31] 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 [32] は、床に置かれた風を起こす装置によって縦横無尽に舞い上がる布とダンスを組み合わせたパフォーマンス「AMALUNA」を提供した。これら移動する物体とパフォーマンス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、新しいエンタテインメントを提供できる可能性がある。

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とともう、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ション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



図 1 実環境におけるパフォーマンス
Fig. 1 A performance on real environment.



図 2 様々な身体パフォーマンスとの組合せ
Fig. 2 Combination of a variety of body expression.

nsを行った(図1)。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2)。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にくく、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

本論文で提案する球体型移動ロボットにモーションキャプチャに用いられるマーカなど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したり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持つオブジェクトをステージなどで利用する際に、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、本論文では、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. 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が目的である。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。また、作製した球状

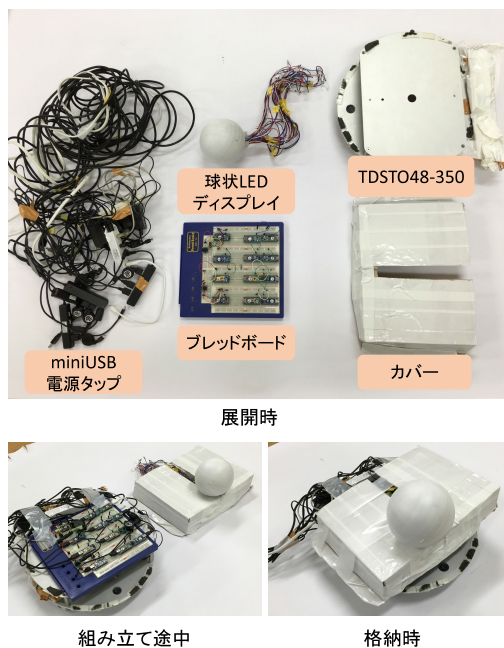


図3 球状LEDディスプレイと移動ロボットの連結

Fig. 3 Combination of spherical LED display and a mobile robot.

LEDディスプレイを土佐電子社のTDSTO48-350 [33]に搭載した(図3)。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。

4.1 提案システム

4.1.1 球状LEDディスプレイ

作製した球状LEDディスプレイの外観を図4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 [34]を敷き詰めた。530個のフルカラーLEDを搭載し、12個のArduino nano [35]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。

4.1.2 光の制御用アプリケーション

光の制御用アプリケーションの画面を図5に示す。アプリケーションの開発にはopenFrameworksを用いた。アプリ



図4 球状LEDディスプレイの外観

Fig. 4 Appearance of spherical LED display.

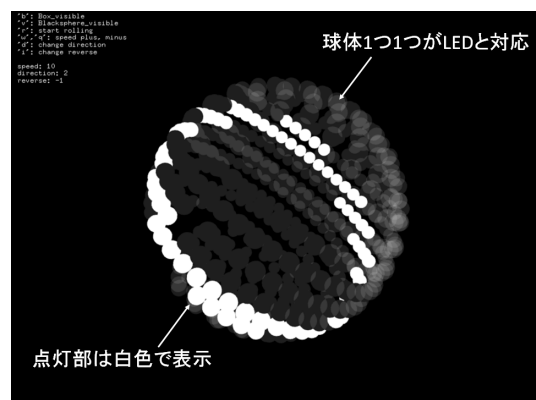


図5 光の制御用アプリケーションの画面

Fig. 5 UI of application for controlling the light of LEDs.

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、25 msecごと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。

4.2 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
- (3) 球と聴衆の距離と錯視の関係

これらの調査により、錯視を引き起こすために重要な要素が分かると考えられる。

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6に示すとおりである。また、図7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110 bpm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0.3 m/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0.05 m/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。

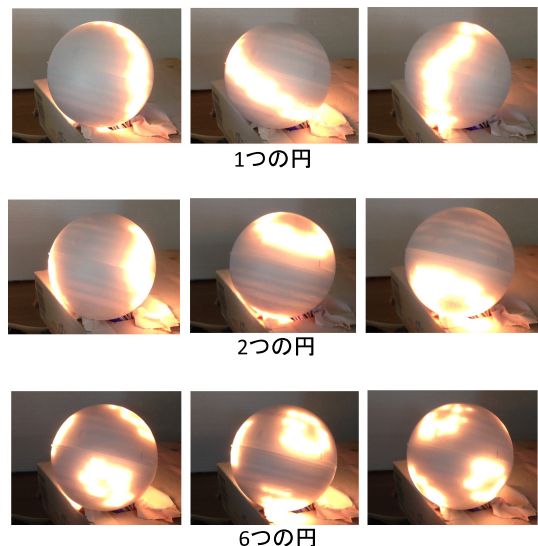


図6 光の点灯パターン
Fig. 6 Lighting pattern.

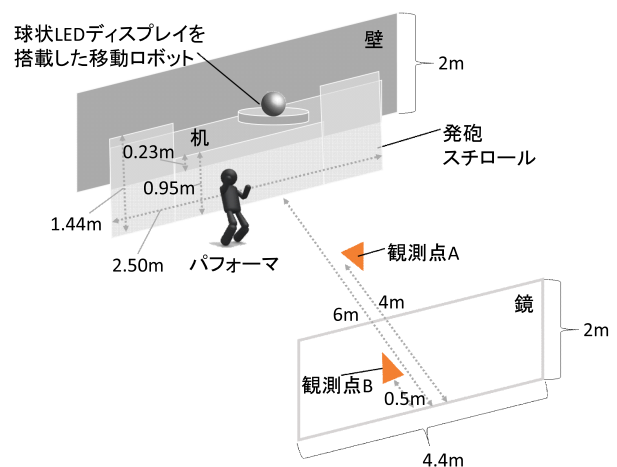


図7 フロアプラン
Fig. 7 Floor plan.

- 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。

4.3 結果と考察

Q1の評価アンケート結果を図8に、Q2の評価アンケート結果を図9に示す。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

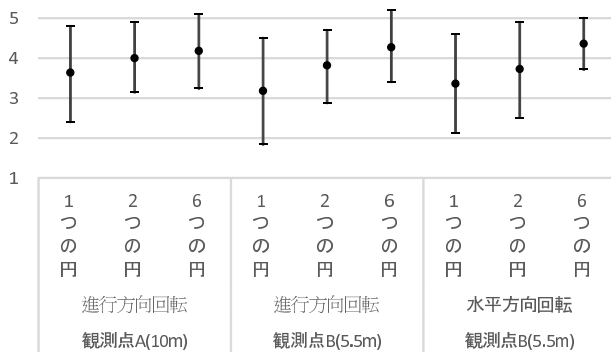


図 8 Q1 の評価アンケート結果
Fig. 8 The result of the questionnaire about Q1.

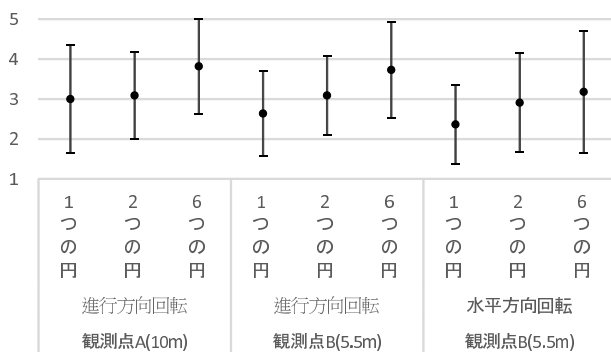


図 9 Q2 の評価アンケート結果
Fig. 9 The result of the questionnaire about Q2.

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カ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。

点灯パターンは、円の数が多いほど、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やすくする要因の可能性が高いと考えられる。また、図8からも模様が複雑なほど、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。

また、図8、図9から、Q1よりもQ2の評価が低い傾向が分かる。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名中9名からコメントされていたため、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。

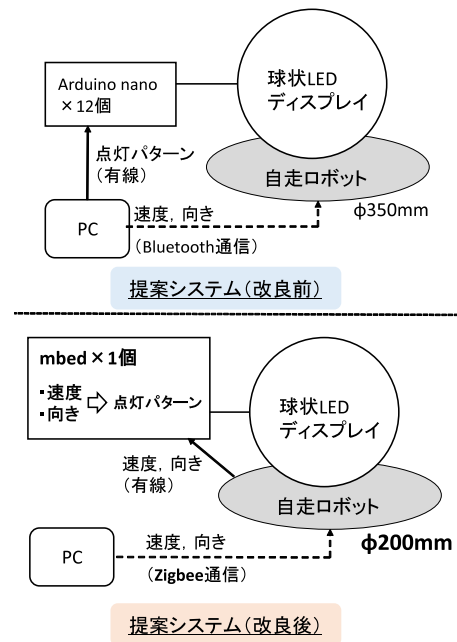


図 10 システム構成の比較
Fig. 10 Comparison of system configuration.



図 11 システム外観
Fig. 11 System appearance.

5. 球体型移動ロボットの開発と評価実験

5.1 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分かる。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。以上にあ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10に、システムの外観を図11に、TDSTO48-350と製作した移動ロボットの性能を表1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倍のレンジを持つ。また、移動ロボット全体をカバーで覆うことによって、駆動部分が隠れており、球体の真下に移

表 1 TDSTO48-350 と製作した移動ロボットの性能比較
Table 1 Combination of a variety of body expression.

	TDSTO48-350	製作した移動ロボット
直径	350 mm	200 mm
重量	3,500 g	600 g
最大速度	0.42 m/s	3.50 m/s
CPU	H8/36064	STM32F405
連続駆動時間	約 60 分	約 30 分

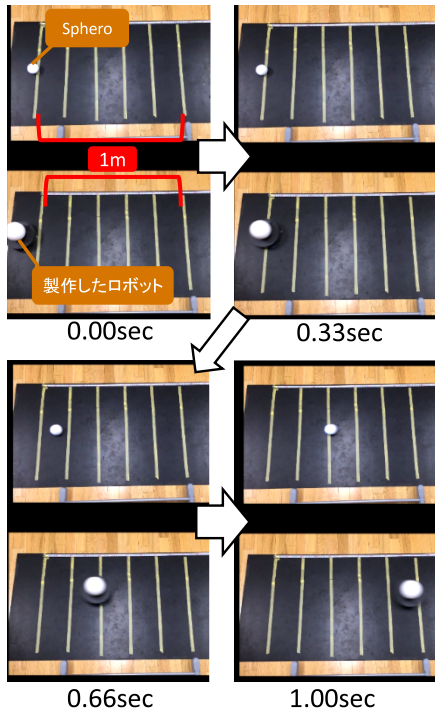


図 12 球体型移動ロボットの加速度比較テスト

Fig. 12 Acceleration comparison test of the sphere-shaped mobile robot.

動ロボットがあると視認されにくいいため、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 [36] 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。

Sphero2.0 と製作した移動ロボットとの走行性能を比較した (図 12)。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分かる。

5.2 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
- (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分かる。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、たと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分かる。特殊な回転を錯視させることができるのであれば、たとえばパントマイムにおいて床が氷のような状況に見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 歳、視力 0.7 以上の男性 12 名。実験手順は以下のとおりである。

- 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 7 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 4.2 節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 7 の観測点 B で、回転方向は進行方向のみの回転を

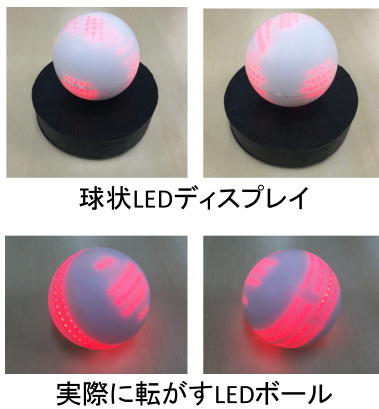


図 13 提示する点灯パターン
Fig. 13 Lighting pattern.

提示した。提示後、被験者に口頭で「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、口頭で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13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。

5.3 結果と考察

パフォーマンスを見たときに球体が単に転がっている(球体LED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名中11名であった。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

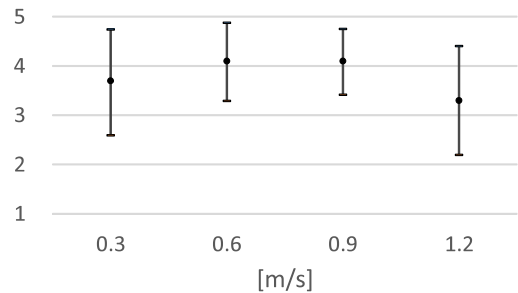


図 14 速度に関する評価アンケート結果

Fig. 14 Combination of a variety of body expression.

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名いた。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分かる。

次に、5.2節の項目(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14に示す。縦軸は被験者12名の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分かった」、「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、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は同じような転がりとはいいきれないが、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。

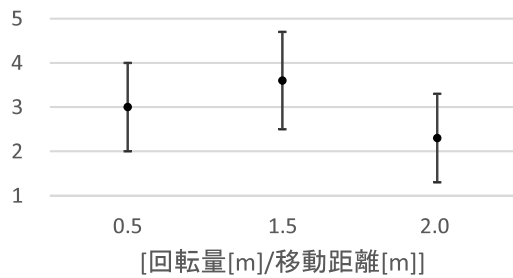


図 15 移動距離に対する回転量の割合に関する評価アンケート結果
 Fig. 15 Combination of a variety of body expression.

5.2 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 15 に示す。縦軸は被験者 12 名の 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分かった。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、回転量を減少させ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、0.3 m/s 以下もしくは 1.2 m/s 以上であれば回転移動の錯覚率が低下する傾向が見られた。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では回転移動の錯覚率の変化が小さい傾向が見られた。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は回転移動の錯覚率の低下が見られたが、「ボーリングが滑っているように見えた」、「光り方が面白い」といった意見が見られ、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。

5.4 今後の課題

5.4.1 移動機構追加によるパフォーマンスへの影響

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見られたが、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、たとえば、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ことがある。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。

5.4.2 錯視効果による球体の再現

製作した球状 LED ディスプレイのテクスチャを表示する際の光の強さは、点灯と消灯の 2 パターンのみを用いた。より模様の回転を滑らかに見せるために、中間の光強度も用いるといった改良が考えられる。

また、実際の運動とは独立して球の模様の回転を制御できるため、ボウリング球のように球が床に対して滑りながら動く状態の表現も可能である。そのためには摩擦力や球体の質量も考慮して移動と模様の回転を制御する必要がある。さらに、平面での運動に限らず、上下も含めた細かな動きを光の錯視効果やアクチュエータによって実現できれば、壁に衝突して少し跳ねるような動きもアクチュエータの追加によって再現できると考えられる。

5.4.3 超現実表現

一方、現実的な球体の動きを再現するだけでなく、能動的に坂道を登ったり、急加速、急停止、回転の向きに対して逆走したりするなど、本来球体にはありえない動きを作成することで物理法則に矛盾した動きを現実起こすような表現が可能であると考えられる。

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。たとえば、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) と観客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。たとえば、パントマイムにおいて床を氷のように

見せたり、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。さらに、球状LEDディスプレイを上下させられる機構を追加すれば、凹凸のある床を転がる様子や、見えない階段を転がって昇降する様子の表現も考えられる。以上にあげたような環境の状態を錯視させる手法についても、今後調査していく必要がある。

5.4.4 パフォーマンス以外での利用の可能性

スポーツへの応用が考えられる。LEDの光を提示するため、プレイヤが浮かび上がる程度の照明環境に限定されるが、様々なデジタルスポーツの創造につながると考えられる。たとえば、身体を思うように動かさない幼児や老人同士でも、ボウリングのような重いボールを再現した転がし遊びや、サッカーのパスの掛け合いといったことが簡単にできる。球体の動き方をプログラミングによって改良することで特殊な変化球を生み出すなど、情報教育とスポーツを組み合わせるような応用も考えられる。

また、情報装置としての応用が考えられる。たとえば、球状LEDディスプレイを利用して表情を提示し、方向を3次元で示しつつ、移動する案内ロボットとして活躍できるだろう。球体という外観はロボットであることが目立ちにくく、抽象的な形であることから美術館のような場にも溶け込みやすいと考えられる。展示品を照らす明かり程度の照明環境であれば、錯視効果も期待できる。

6. まとめ

本研究では、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。その結果をふまえて、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名中11名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。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（さきがけ）、科学技術振興機構研究成果展開

事業スーパークラスプログラム、文部科学省科学研究費補助金基盤研究（A）（23240010）、立石科学技術振興科学財団2015年度研究助成（C）および国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の技術シーズ選抜育成プロジェクト〔ロボティクス分野〕の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Jessop, E., Torpey, P.A. and Bloomberg, B.: Music and Technology in Death and the Powers, *Proc. International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME '11)*, pp.349-354 (May 2011).
- [2] Kaneko, K., Kanehiro, F., Tsuji, T., Miura, K., Nakaoka, S., Kajita, S. and Yokoi, K.: Hardware Improvement of Cybernetic Human HRP-4C for Entertainment Use, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '11)*, pp.4392-4399 (Sep. 2011).
- [3] DreamWorks Animation LLC: How To Train Your Dragon Live Spectacular, available from (<http://dreamworksdragonlive.com/>) (accessed 2015-12-22).
- [4] BUYMA: A Kind Drone, available from (<http://www.buyma.com/contents/tvcm/drone/>) (accessed 2015-12-22).
- [5] Rhizomatiks: Border, available from (<http://www.rzm-research.com/border/>) (accessed 2015-12-22).
- [6] Bot & Dolly: Box, [urhttp://urx.mobi/q1RD](http://urx.mobi/q1RD) (accessed 2015-12-22).
- [7] Barnelt, R. et al.: SERAPH (2011), available from (<http://www.csail.mit.edu/node/1640>) (accessed 2015-12-22).
- [8] Tovia Co.: NINJAR LIGHT, available from (<http://goo.gl/QGeWYe>) (accessed 2015-12-22).
- [9] Manabe, D.: Dance with drones, available from (http://www.daito.ws/work/elevenplay_drones.html) (accessed 2015-12-22).
- [10] Calvin Klein Collection x Jonah Bokaer and Julie Kent: MOVEMENT, available from (<http://goo.gl/O1QZyk>) (accessed 2015-12-22).
- [11] MOMIX reMIX in Crete: Moon Beams, available from (<https://goo.gl/HbrEQw>) (accessed 2015-12-22).
- [12] Compagnie de Danse l'Eventail: Metamorphose(s), available from (<http://goo.gl/kiW9mw>) (accessed 2015-12-22).
- [13] Tiec, J.: Ballons de baudruche, available from (<http://urx.mobi/q1Rc>) (accessed 2015-12-22).
- [14] Cotton, A.: La danse des ballons, available from (<http://urx.mobi/q1Rd>) (accessed 2015-12-22).
- [15] Orbotix: Sphero2.0, available from (<http://www.sphero.jp/sphero-2-0/>) (accessed 2015-12-22).
- [16] 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, 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論文集, pp.97-102 (2015).
- [17] Bhattacharya, S. and Agrawal, S.K.: Design, Experiments and Motion Planning of a Spherical Rolling Robots, *Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation San Francisco*, pp.1207-1212 (Apr. 2000).
- [18] Rotundus: GroundBot, available from (<http://www.rotundus.se/>).
- [19] CCP Co.: MOCORO, available from (<http://www.ccp->

- jp.com/zakka/mocoro/cz560.html).
- [20] 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).
 - [21] 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).
 - [22] 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).
 - [23] KDDI and Flower Robotics: Polaris, available from (<http://www.au.kddi.com/original-product/archives/concept/polaris/>).
 - [24] LG: Rolling Bot, available from (<http://www.cnet.com/products/lg-rolling-bot/>).
 - [25] 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, ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol.15, No.1, pp.51-62 (2013).
 - [26] 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).
 - [27] 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).
 - [28] Souto, D. and Kerzel, D.: Like a rolling stone: Naturalistic visual kinematics facilitate tracking eye movements, *Journal of Vision*, Vol.13 (2013).
 - [29] Forsythe, W.: Nowhere and Everywhere at the Same Time No.2, available from (<http://goo.gl/Pjxi8z>) (accessed 2015-12-22).
 - [30] Perry, K.: Super Bowl Halftime Show Performance 2015, available from (<http://urx.mobi/q1Re>) (accessed 2015-12-22).
 - [31] CHUNKY MOVE: CONNECTED, available from (<http://goo.gl/Q5mnRh>) (accessed 2015-12-22).
 - [32] Wurtzel, D.: AMALUNA, available from (<http://www.danielwurtzel.com/performance.cfm>) (accessed 2015-12-22).
 - [33] 土佐電子: TDSTO48-350, available from (<http://www.tosadenshi.co.jp/>) (accessed 2015-12-22).
 - [34] Adafruit: Dotstar LEDs, available from (<https://learn.adafruit.com/adafruit-dotstar-leds/overview>) (accessed 2015-12-22).
 - [35] Arduino: Arduino nano, available from (<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardNano>) (accessed 2015-12-22).
 - [36] ARM: mbed, available from (<https://www.mbed.com/en/>) (accessed 2015-12-22).



土田 修平 (学生会員)

1989年生。2012年神戸大学工学部電気電子工学卒業。2014年同大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程後期課程修了。現在、同大学院工学研究科電気電子工学専攻博士課程後期課程に在籍。主にエンターテインメントコンピュータの研究に従事。



竹森 達也

1993年生。2016年京都大学工学部物理工学科卒業。現在、同大学院工学研究科機械理工学専攻修士課程に在籍。主にロボティクスの研究に従事。



寺田 努 (正会員)

1974年生。1997年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999年同大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年同大学院工学研究科博士後期課程退学。同年大阪大学サイバーメディアセンター助手。2005年同講師。2007年神戸大学大学院工学研究科准教授。現在に至る。2004年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事。2005年には同機構事務局長を兼務。工学博士。アクティブデータベース, ウェアラブルコンピューティング, ユビキタスコンピューティングの研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 日本データベース学会, ヒューマンインタフェース学会の各会員。



塚本 昌彦 (正会員)

1964年生。1987年京都大学工学部数理工学科卒業。1989年同大学院工学研究科修士課程修了。同年シャープ(株)入社。1995年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻講師。1996年同専攻助教授。2002年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助教授。2004年神戸大学電気電子工学科教授。現在に至る。2004年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事長を兼務。工学博士。ウェアラブルコンピューティングとユビキタスコンピューティングの研究に従事。ACM, IEEE等8学会の会員。