



# パントマイム「見えない壁」の習得をサポートする 拡張現実ミラーシステム

山根駿矢<sup>1)</sup>, 鏡慎吾<sup>2)1)</sup>

Shunya Yamane, and Shingo Kagami

1) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

2) 東北大学 未踏スケールデータアナリティクスセンター (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

**概要:** 本研究では、パントマイム「見えない壁」のように空間に手を固定する技能の習得を支援する拡張現実ミラーシステムを提案する。このシステムでは、ハーフミラーの裏側に手を固定する目標として手形を表示したディスプレイを設置する。視点位置によらずに目標を空間中の特定位置に表示できることにより、ミラーを通して自身の動きを観察するユーザが手のひらを固定しやすくなることをねらう。さらに目標位置との奥行き方向のずれを示すガイド情報も導入し、手のひらの固定のしやすさへの影響について検討する。

**キーワード:** 拡張現実ミラー, 運動支援, ハーフミラー

## 1. はじめに

近年、現実を仮想的に拡張する技術である拡張現実感 (Augmented Reality, AR) の普及が進んでおり、トレーニング分野やスポーツのスキル習得において大きな注目を集めている。Soltani ら [1] はスポーツのトレーニングにおける拡張現実感の利用について、現実世界とデジタル情報を統合しやすいという強みを持つことから、スポーツトレーニングのリアリティを損なうことなく、学習効果を高めることができると利点を論じている。原田 [2] は、パントマイム演者が作り出す「見えない壁」を認識・可視化し、その技術の質を評価するシステムを構築した。これにより、システムからのフィードバックを通じて自身のパフォーマンスを客観的に確認し、技術向上に役立てることが可能となる。しかし、この壁は PC の画面上に表示されるものであり、リアルタイムに自分の身体を見ながら、壁の評価を確認することができない。

社会の IoT 化にともない拡張現実ミラーシステムと呼ばれるスマート家電が開発されている。拡張現実ミラーシステムとは、主にハーフミラーとディスプレイパネル、コンピュータから構成され、鏡本来の機能を保ちつつ情報を鏡上に映し出せる鏡型情報端末である。これを用いることで電子機器を身につけること無く、実世界に映像や画像を合成することができる。Zhou ら [3] は、拡張現実ミラーとカメラ映像をリアルタイム表示するディスプレイを用いたバーチャルミラー二通りで、仮想のインストラクタを重畳表示させ、被験者がインストラクタの行う簡単な運動を行った際のパフォーマンスを評価した。拡張現実ミラーに対して実験した結果のほうが良いパフォーマンスが得られたとして拡張現実ミラーの利点について論じている。しかし、ユー

ザの視点が移動すると、3 次元的な身体の鏡像と 2 次元のディスプレイに描画された映像との間に視差が生じ、知覚的なずれがパフォーマンスに影響を与える課題が残っている。本研究では、パントマイム「見えない壁」のように「手を空間上の一つの平面に固定する」という動作に着目する。固定目標が平面であるため、ディスプレイ平面と共役になるよう設定することができる。これにより、従来の拡張現実ミラーで起きていた 3 次元物体である身体に 2 次元平面である映像を重畳表示する際起こる鏡像と映像の知覚ずれを回避することができる。以降では、試作したシステムの構成とユーザ評価実験の結果を報告する。

## 2. 手の鏡像の位置を測定するシステム

システムの全体像の模式図を図 1 に示す。本研究において、ユーザは手を前に出した状態でハーフミラーの前に立ち左右に動く。手の特徴点の検出には Mediapipe [4] を用いる。

### 2.1 システムの構成

本システムはディスプレイ (LG UltraGear 27GR95QE-B 26.5 インチ)、カメラ (Baslar 社製 acA720-520uc) 2 台、PC からなる。ハーフミラー (厚さ 3 mm, 透過率 10 %, 幅 800 mm, 高さ 1000 mm) を用いており、ディスプレイはユーザから見てハーフミラーの反対側に設置している。

### 2.2 アプリケーションの概要

図 1 に示すように、手の鏡像とディスプレイの位置が同じ平面にある場合に手と映像が重なり合っているように見える。ユーザーにはその位置に手を固定してもらい練習を行う。図 2 に示すように、ディスプレイには手形と手の鏡像の奥行き位置のずれを知らせる円を表示する。手の鏡像

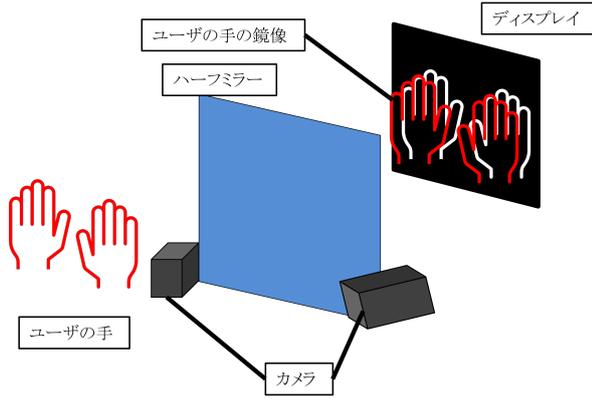


図 1: システムの模式図

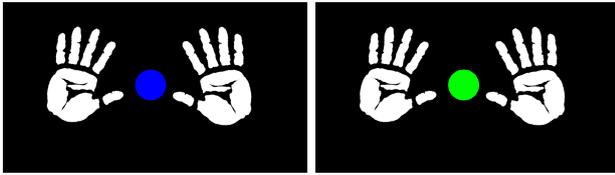


図 2: 手の動きを知らせる表示

の位置がディスプレイより 20 mm 以上奥側にある場合は緑色、手前ある場合に青色とする。さらに、FMOD [5] を用いて手の位置によって音を鳴らす。円と同じように 20 mm 以上奥側にある場合は高い音、手前ある場合に低い音とする。これらを実装するためには、手の鏡像の位置を知る必要がある。

### 2.3 カメラ座標系におけるハーフミラーの位置の測定

2 台のカメラをそれぞれカメラ 1, 2 とすると、ステレオ計測からカメラ 1 座標系で手の三次元座標を求めることができる。これをカメラ 1 座標系における手の鏡像の位置に変換するにはカメラ 1 座標系におけるハーフミラーの位置を知る必要がある。しかし提案するシステム構成ではカメラ 1 から直接ハーフミラーを撮影することはできない。

そこでハーフミラーを撮影することができる位置にキャリブレーション時のみカメラ 3 を準備することで間接的にハーフミラー位置を測定する。カメラ 1 から直接撮影でき、かつカメラ 3 からはハーフミラーによる反射像を撮影できる位置に ArUco マーカーが 12 個並べられたボードを設置する。これらを 15 枚撮影し、異なる 2 種類の方法で各 ArUco マーカーの鏡像の 3 次元位置を算出する。両手法で得られた 3 次元位置の誤差二乗和が最小になるよう、ハーフミラーの平面パラメータを最適化することで、カメラ 1 座標系におけるハーフミラーの位置を測定する。

すべてのカメラの内部パラメータ、カメラ同士の外部パラメータは事前に求めてあるとする。座標系  $a$  での表示から座標系  $b$  での表示への変換への変換を行う回転行列と並進ベクトルをそれぞれ  ${}^bR_a$ ,  ${}^bt_a$  と書く。

1 つ目の方法では、カメラ 3 で直接 ArUco マーカーの鏡像の位置  ${}^{C_3}p_{ij}$  を測定し、カメラ 3 座標系からカメラ 1 座標系への剛体変換を行うことでカメラ 1 座標系における

ArUco マーカーの鏡像を得る。具体的に、 $i$  番目の画像における  $j$  個目のマーカー中心座標は

$${}^{C_1}p_{ij} = {}^{C_3}R_{C_1}^T ({}^{C_3}p_{ij} - {}^{C_3}t_{C_1}) \quad (1)$$

と表される。

2 つ目の方法では、カメラ 1 で ArUco マーカー本体の位置  ${}^{C_1}q'_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$  を測定し、ハーフミラー平面  $ax + by + cz + 1 = 0$  に関する鏡像変換を行うことでカメラ 1 座標系における ArUco マーカーの鏡像位置を表すパラメータ  $a, b, c$  の関数

$${}^{C_1}q_{ij}(a, b, c) = \begin{pmatrix} x_{ij} - 2a \frac{ax_{ij} + by_{ij} + cz_{ij} + 1}{a^2 + b^2 + c^2} \\ y_{ij} - 2b \frac{ax_{ij} + by_{ij} + cz_{ij} + 1}{a^2 + b^2 + c^2} \\ z_{ij} - 2c \frac{ax_{ij} + by_{ij} + cz_{ij} + 1}{a^2 + b^2 + c^2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

を得る。

両方法で得た位置の二乗誤差の和

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{12} \left\| {}^{C_1}q_{ij}(a, b, c) - {}^{C_1}p_{ij} \right\|^2 \quad (3)$$

を目的関数として、これを最小化するハーフミラー平面のパラメータ  $a, b, c$  を Nelder-Mead 法 [6] を用いて求める。

## 3. 実験

提案システムがパントマイムにおける手を固定する動作への影響を評価するため、開発した 3 種類のガイド (手形, 円, 音) の有無を要因とする比較実験を行った。

### 3.1 実験方法

参加者は 22 歳から 24 歳の男女 10 人であり、全員が正常な視力または矯正視力を持ちでパントマイム経験が無い。参加者に手をディスプレイと共役の位置になるように合わせてもらい、左右に 2 歩ずつ 3 往復動している間の手の挙動について観察した。実験の条件に関しては、手形, 図 2 に示すような円, ヘッドホンから出る音の 3 条件の有無の 8 種類で行った。順序効果をなくすために、各条件は参加者間で異なる無作為な順序で提示した。

s を行うごとに参加者には、表 1 の設問に答えてもらった。Q1 に関しては、何も見ずに動いた際の手の固定のしやすさを 4 としたときの評価をリッカート尺度 (1: とても固定しにくい~7: とても固定しやすい) の 7 段階で、Q2 から Q5 に関しては、リッカート尺度 (1: 全く同意できない~5: 常に同意できる) の 5 段階でアンケート項目を用意した。

### 3.2 結果

実験後のアンケートに関する結果を表 2 に示す。本研究において手の動きの指標として、3 つの空間方向を示す  $x$  座標 (左右),  $y$  座標 (上下),  $z$  座標 (奥行き) の絶対距離の平均値を用いた。この測定値は「ハーフミラーのみ」など手形のガイドがない条件では、ユーザに任意の位置で手を止めてもらい、そこを基準とした時の手の絶対距離の平均である。一方、「手形のみ」など手形のガイドがある条件では、ディスプレイの手型と手の鏡像の絶対距離の平均を取ったものである。なお、全て中指の付け根を測定している。こ

表 1: アンケートの内容

設問	内容
Q1	手の動きを可視化することで、手を空間に固定をしやすくなった
Q2	手の鏡像とディスプレイの映像が重なっているように見える
Q3	視点が変わった際にも映像が重なり続けているように見える
Q4	ガイドが直感的に分かりやすかった
Q5	手の動きとガイドに時間的ずれを感じなかった



図 3: 実験の様子

の表 2 から、いくつかの傾向が読み取れる。特に、変異量が最も小さい（パフォーマンスが最も良い）条件は、 $x$  軸と  $y$  軸では「手形と円」条件 ( $x = 10.2 \text{ mm}$ ,  $y = 6.52 \text{ mm}$ )、 $z$  軸では「手形と円と音」条件 ( $z = 13.0 \text{ mm}$ ) であった。全体として、手形または円を含む条件で変異量が減少する傾向が見られる。一方で、音のガイドの役割は一見して明らかではなく、他のガイドとの組み合わせによって効果が変動している可能性が示唆される。これらの傾向の統計的妥当性を検証するため、以下で分散分析の結果を記述する。

これらの各測定値に対し、要因として音（あり/なし）、円（あり/なし）、手形（あり/なし）を設定した 3 元配置分散分析を実施した。

実験後のアンケートに関する結果は表 3 に示す。全実験条件に共通している質問項目である Q1 に関しては、フリードマン検定を行った。一方、一部の実験条件でのみの質問項目である Q2 から Q5 に関しては、フリードマン検定の対象外となるため個別の分析を行った。各要因（手形、音、円）について、その要因の「あり」条件と「なし」条件をウィルコクソンの符号順位検定を用いて比較した。

なお、以下の統計的検定において、有意水準は 5% とした。

### 3.2.1 $x$ 座標の分散分析

$x$  座標を従属変数とした分散分析を行った。その結果、統計的に有意な主効果および交互作用は認められなかった。ただし、手形要因の主効果については統計的に有意な傾向であった ( $F(1, 256) = 3.75, p = 0.054$ )。

### 3.2.2 $y$ 座標の分散分析

$y$  座標を従属変数とした分散分析の結果、他の座標の分析結果とは対照的に統計的に有意な主効果、交互作用、および有意な傾向はいずれも認められなかった。

### 3.2.3 $z$ 座標の分散分析

$z$  座標を従属変数とした分散分析の結果、円要因の主効果が統計的に有意であった ( $F(1, 256) = 9.34, p = 0.003$ )。交互作用については、音要因と円要因の間に有意な交互作用が認められ ( $F(1, 256) = 6.46, p = 0.012$ )、また、円要因と手形要因の間に有意な傾向があった ( $F(1, 256) = 2.87, p = 0.092$ )。その他の主効果および交互作用は認められなかった。上記の交互作用についてさらに検討するため、単純主効果検定を行った。有意であった音と円交互作用の単純主効果検定では、音がない条件において円の単純主効果が有意であり ( $t(256) = -2.81, p = 0.012$ )、音が存在する条件においては円の単純主効果に有意な差が認められなかった ( $t(256) = -1.49, p = 0.28$ )。また、有意傾向を示した円と手形の交互作用の単純主効果では、手形が存在する条件において、円の単純主効果が有意であることが示された ( $t(256) = -2.93, p = 0.0085$ )。

### 3.2.4 アンケートの結果に関する分析

Q1 に関してフリードマン検定を行った結果、8 条件間で評価値の分布に統計的に有意な差が認められた ( $\chi^2(7) = 35.22, p = 0.001$ )。さらに、どの要因が有意に働いていたか具体的に特定するため、Bonferroni 法で補正を行ったうえでウィルコクソン符号順位検定を実施した。その結果、「手形」がある条件では、ない条件に比べて有意に手を固定しやすくなったと評価された ( $p = 0.018$ )。また「円」は、手の固定しやすさに対して有意な傾向があった ( $p = 0.059$ )。一方、「音」では有意な差は認められなかった ( $p = 0.86$ )。

Q4 に関して Bonferroni 法で補正を行ったうえでウィルコクソン符号順位検定を行った結果、「手形」条件は有意に「直感的に分かりやすかった」と評価された ( $p = 0.042$ )。「円」( $p = 0.13$ ) と「音」( $p = 0.13$ ) の条件は、有意な差は認められなかった。

Q2, Q3, Q5 に関して Bonferroni 法で補正を行ったうえでウィルコクソン符号順位検定を行った結果、いずれの要因においても有意な差は認められなかった。

## 3.3 考察

$x$  座標における分析結果は、手形のガイドの主効果において統計的有意水準には達しないものの有意な傾向があった。これは手形のガイドが、左右方向の動きを抑制する上で一定の効果を持つ可能性を示唆している。

$z$  座標における分散分析の結果は、音のガイドが単に有効でないことだけでなく、有効な円のガイドの効果を阻害

表 2: ディスプレイと手の鏡像の絶対距離の平均

	$x$ [mm]	$y$ [mm]	$z$ [mm]
ハーフミラーのみ	18.0	11.9	24.1
手形のみ	11.1	8.08	20.1
円のみ	13.6	9.54	16.3
音のみ	17.0	10.5	18.6
手形と円	10.2	6.52	14.8
手形と音	11.7	7.59	20.0
円と音	15.1	10.0	16.1
手形と円と音	10.3	6.64	13.0

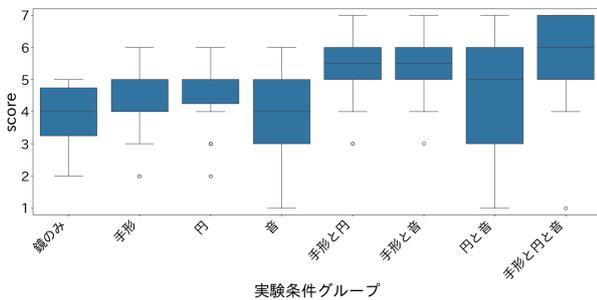


図 4: Q1 の実験の条件による手の固定しやすさの評価

するという事実を示している。ユーザは、円のガイド、音のガイドから同一のタスク（手の固定）のために、2つの異なる抽象的な情報源を同時に処理・統合する必要に迫られる。そこで二重のタスクが認知負荷を増大させ、より効果的であった視覚的なガイドの情報処理を妨げたと考えられる。

一方で手形と円の関係性は、前述の聴覚の干渉とは正反対の関係性を示している。ここでは2つのガイドは競合するのではなく、協調して機能している。手形のガイドはユーザー自身の身体の大まかな位置を直感的に提供することができる。さらに、手の位置が手形のガイドによって安定することで、より抽象的で精密な情報を提供する円のガイドの解釈に集中させることができる。その結果として、手形のガイドも円のガイドもお互いを阻害することなく効果的に機能したと考えられる。

アンケートの「ガイドが直感的に分かりやすかった」という項目では、手形が唯一、統計的に有意な効果を示した。客観的なパフォーマンスでは円のガイドが強力であったにもかかわらず、ユーザーが「直感的」と感じたのは身体的比喩を用いた手形のガイドであった。この現象は、認知プロセスの違いに起因すると考えられる。手形のガイドは、ユーザーが既に持っている自身の身体に関する内部的な身体認識を直接活用する。タスクは「自分の手を表示された手の形に合わせる」ことであり、認知的な変換コストが低い。

表 3: アンケートの各項目における平均値

	Q2	Q3	Q4	Q5
手形のみ	4.37	4.13	-	-
円のみ	-	-	3.83	4.3
音のみ	-	-	3.2	4.07
手形と円	4.33	4.2	4.33	4.53
手形と音	4.4	4.33	4.07	4.47
円と音	-	-	3.83	4.23
手形と円と音	4.5	4.4	4.17	4.43

一方で、円や音のような抽象的なガイドは、ユーザーがまず手に動きて「色が変わる」「音が変わる」といったルールを学習し、そのルールを具体的な運動指令に変換するという、追加の認知ステップを必要とする。この間接的なプロセスが体験としては「直感的でない」と感じさせる要因となった可能性があると考えられる。

#### 4. むすび

本研究においては、拡張現実ミラーシステムを用いることで、パントマイムの空間に手を固定する技能習得をサポートするシステムを開発した。今後に関しては、パントマイムの動きにおけるさらなる定量的な評価を行うことで上達への道筋を示すことや原理の解明などが考えられる。

謝辞 本研究の一部は科研費 22H03622 および 21H05298 の支援を受けた。

#### 参考文献

- [1] Pooya Soltani, Antoine H.P.Morice, “Augmented reality tools for sports education and training,” Computers & Education, Volume 155, October 2020.
- [2] 原田拓真, “ボクの壁：パントマイムの「見えない壁」認識・表示システム,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 38, No. 16, pp. 151–152, 2014.
- [3] Qiushi Zhou, Andrew Irlitti, Difeng Yu, Jorge Goncalves, and Eduardo Velloso, “Movement Guidance using a Mixed Reality Mirror,” Designing Interactive Systems Conference, pp.821–834, 2022.
- [4] Mediapipe, <https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/handlandmarker>, as of 2025/02/11
- [5] FMOD, <https://www.fmod.com/>, as of 2025/06/30
- [6] J.A.Nelder, R.Mead, “A simplex method for function minimization,” The Computer Journal, Volume 7, Issue 4, pp.308–313, January 1965.