

教育・介護における身体性拡張型 AR-IO システム 「AIReE」の開発と評価

Development and Evaluation of a Body-Extended AR-IO System “AIReE” for Education and Care

李珍咏¹, 永山和樹¹, 平岩優里¹, 伊東乾²

Jinyoung LEE¹, Kazuki NAGAYAMA¹, Yuri HIRAIWA¹, Ken ITO²

(株式会社 DynaxT¹, 東京大学²)

梗概

近年、GIGA スクール構想などにより、教育現場では幼少期からタブレット端末を利用した学習が一般化している。しかし、これに伴い、視力の低下や集中力・協働性の欠如などの問題が報告されている。筆者の身近でも、幼児期からタブレットを用いた反復型デジタルドリルを行っていた子どもたちが近視を発症する事例を実際に目の当たりにした。こうした現象は「デジタル学習のペイン」として、教育現場における新たな社会的課題となっている。

本研究では、これらの課題を解決するため、身体行為とデジタル操作を統合した新しい入力システム「AIReE: Augmented Interactive Real-time Rendering for Education (エアリー)」を提案する。AIReE は、空中で手を動かして描く身体的な操作を、カメラ映像と拡張現実描画によってリアルタイムに反映する AR-IO システムである。ユーザ自身の身体が画面上に映り、その動作が描画として可視化されることで、従来のタッチ操作やキーボード入力では得られなかった身体的フィードバックを提供する。

本稿では「AIReE」のシステムアーキテクチャ、性能評価、および教育や展示の文脈から得られた実用的なフィードバックを紹介する。その結果、AIReE は、デジタル学習における過剰な画面依存を補完し、身体性・対話性・創造性を取り戻す教育支援基盤として、さらにリハビリテーション支援にも新たなパラダイムを提示する可能性が示唆された。

Abstract

With the rapid spread of the GIGA School Initiative in Japan, tablet-based learning has become common even in early childhood education. However, several issues have emerged alongside this trend, including deteriorating eyesight, decreased attention, and reduced opportunities for collaboration. The author has personally witnessed cases in which children developed myopia after engaging in repetitive digital drills on tablets from their kindergarten years. Such phenomena represent a new social challenge that can be described as the pain of

digital learning.

To address these problems, this study proposes AIReE (Augmented Interactive Real-time Rendering for Education), a novel input–output system that integrates bodily actions with digital operations. AIReE enables users to draw in the air using hand movements, which are captured by a camera and rendered in real time through augmented reality. By reflecting on the user’s own body on screen and visualizing its movements as drawings, AIReE provides embodied feedback that conventional touch or keyboard interfaces cannot offer.

This paper presents the system architecture, performance evaluation, and practical feedback obtained from educational and exhibition contexts. The results indicate that AIReE complements the excessive screen dependence of digital learning and serves as an educational support platform that restores embodiment, interactivity, and creativity, while also suggesting a new paradigm for rehabilitation and cognitive support.

Keywords: Embodied Learning, Augmented Reality Interface, Educational Support System, Rehabilitation Support, Digital Well-being

1. 導入—背景と課題

1.1 教育現場における ICT 化の進展

2019 年以降、文部科学省の GIGA スクール構想により、日本の初等・中等教育では児童生徒一人につき一台の学習端末が普及され、タブレット端末や PC を用いた授業が一般化した。特に 2020 年以降の新型コロナウイルス感染症拡大をきっかけにオンライン授業が急速に普及し、教育のデジタル化は急速に進展した。2024 年度からは GIGA スクール構想の第 2 期ともいえる NEXT GIGA(ネクストギガ)が始まっており、構築された ICT 環境の活用
に焦点を当て、新しいデジタル教育のフェーズに取りかかっている。しかしその一方で、実際の現場では老朽化した機器の更新や、いまだ操作に不慣れな先生の研修が中心となっており、ICT 環境を活用した教育コンテンツの開発は自治体や学校、教師任せとなっている。端末の導入が形式的な ICT 化に留まり、児童生徒の学習意欲や理解度を高める仕組みが十分に整っていないのが現状である。

1.2 デジタル学習のペイン

一方、OECD PISA 調査(2022)によると ICT 導入が先行した欧州諸国では、15 歳層の読解力・数学的リテラシーが過去最低水準を記録し、デジタル機器の過剰利用が学力低下に影

響しているのではないかと懸念されている。スウェーデンでは 2023 年より「手書き」「暗唱」「紙の教科書」への回帰政策が始まり、極度のデジタル化が基礎学力を損なうとの反省が示された。

筆者自身の身近なケースでも、幼児期からタブレットを用いた反復型デジタルドリルを日常的に行っていた子どもが、小学校に入る前から近視になる事例を確認している。これは、長時間の画面注視や指先のみの単調な操作が、眼精疲労、ひいては運動発達の遅れや、集中力の低下を引き起こす可能性を示唆している。このように、過度なデジタル依存による身体性の欠如は、教育現場における新たな社会的課題の一つである。

1.3 学習における身体フィードバックの重要性

教育心理学や神経科学の研究では、身体を使った学習が理解・記憶に好影響を与えることが報告されている。Mueller & Oppenheimer (2014) は「手書きがタイピングよりも深い理解を促す」ことを示し、Goldin-Meadow (2009) は「ジェスチャーが数学的理解を促進する」ことを明らかにした。また、Donnelly ら (2016) は身体活動が認知機能と学業成績を高めることを示している。

これらの研究は、身体感覚と知的活動が密接に結びついていることを裏付けているが、現行のデジタル学習環境ではこの身体性が軽視されている。我々は、すでに整備された ICT 環境を基盤とし、デジタルの利便性を保持しながら身体性を再導入する、新たなインタフェースの開発が必要であると考えた。

2. 研究目的および提案システム(AIReE)

2.1 研究目的

前章で述べたように、教育現場における ICT の導入は全国的に普及しているものの、その利用は依然として「画面内でのタップやスワイプ」といった限定的な入出力操作にとどまっている。これにより、学習者の身体を活かした操作や、協働的・体験的な学びを支える仕組みが不足していることが明らかとなった。

我々は、こうした現状に対し、「デジタルの利便性」と「身体性の再導入」を両立させる新しい入出力 (IO) モデルの構築が必要であると考えた。特に、子どもたちが画面に閉じ込められた学習から離れ、空間全体を使って表現・思考できる環境を設計することを目的とした。

この目的のもと、本研究では身体行為 (gesture) や呼吸などの生理的動作をデジタル入力に変換し、拡張現実空間においてリアルタイムに可視化する AR-IO システムを試作した。このシステムを我々は AIReE (Augmented Interactive Real-time Rendering for Education)

と名付け、その教育的有効性と実用性の検証を進めている。

2.2 システム設計の基本方針(コンセプト)

既存のマウスやキーボード、タッチ操作による入力、タブレットや PC 画面に限定されるものであった。また、プロジェクターで画面を映したとしても、黒板やホワイトボードでの板書とは違い、身体的な動作や空間的な広がりを伴わない。すなわち、従来の ICT 環境では、身体を介した「学ぶ」「描く」「伝える」といった行為が、画面という枠内に閉じ込められていた。この問題意識から、我々は「学びの身体性を再び空間へ取り戻す」ことを AIReE の設計コンセプトとした。

AIReE の設計において重視したのは、以下の 3 点である。

- 身体運動の可視化： 学習者自身の身体をカメラ映像に映し、その動作を拡張現実上に描画することで、「自分の身体を使って学ぶ」感覚を取り戻す。
- 身体運動による入力： マウスやキーボード、タッチ操作に依存せず、空中での手の動きや圧力、呼吸などの自然な身体動作を入力として扱う。
- 教育・介護への汎用性： 幼児教育における創造的活動から、高齢者リハビリにおける運動・認知支援まで、幅広い年齢層での応用を可能にする。

これら方針のもと、AIReE は「Augmented(拡張)」「Interactive(双方向)」「Real-time Rendering(即時描画)」の 3 要素を中核に構築されている。これにより、ユーザは自分の身体と画面上の描画が一致する、身体一体型の学習体験を得ることができる。

なお、本研究で扱う AIReE システムは、これらの設計理念を具現化するための試作的段階(プロトタイプ)に位置づけられる。現在は、単純な ON・OFF のみで基本的な描画・操作機能を実装しているが、今後は指の圧力や呼吸強度などの ADC 値(Analogue-Digital 変換値)を描画に利用するインタフェースを実装中である。したがって、次章で述べるシステム構成と性能評価は、AIReE の設計方針を基盤とした初期プロトタイプの実装報告として位置づけられる。

3. システム構成

AIReE は、ユーザが手に持つデバイス(ハードウェア側)の動きと、カメラで取得した映像をリアルタイムに統合する(ソフトウェア側)、入出力システムである(Fig.1)。

ユーザは、色マーカーを取り付けたリモコン型デバイスを手に持ち、空中で動かすことで描画操作を行う。カメラがその色マーカーの位置を検出し、Unity アプリケーション上に描画ポインターとして表示する。一方、リモコン本体のボタン入力は Bluetooth Low

Energy(BLE)通信によって端末に送信され、描画の開始・停止・消去などを制御する。

つまり、位置情報は光学的に検出され、操作指令は無線信号で送られるという二系統の入出力を組み合わせた構成となっている。これにより、ケーブル接続を必要とせず、ユーザは自由に空間を動きながら描画行為を行うことができる。この章では、まずハードウェア構成(3.1章)、ついでソフトウェア構成(3.2章)を説明し、システム全体の動作をまとめる。

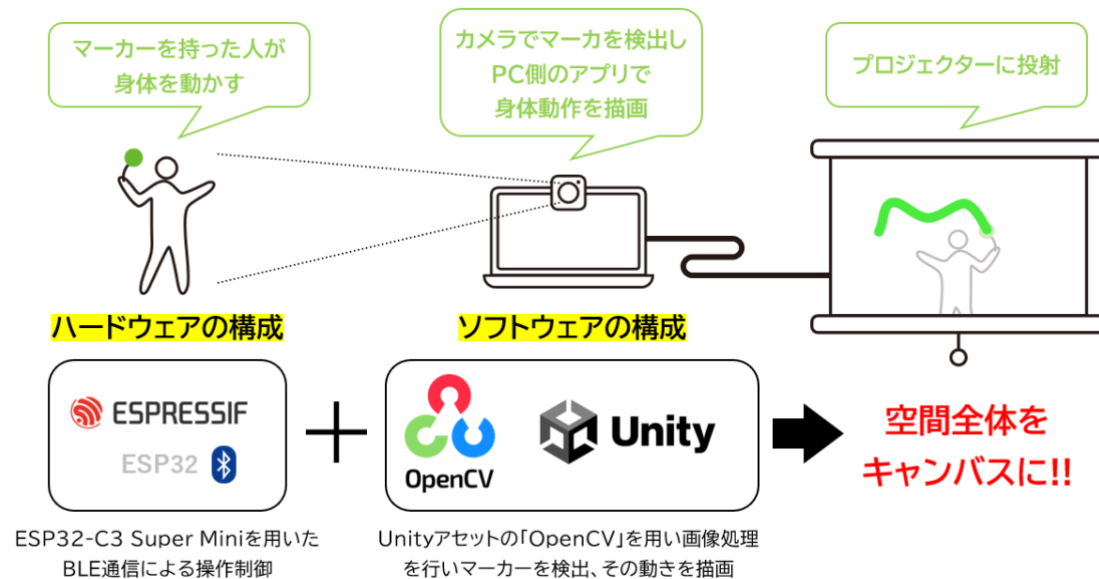


Fig.1 ハードウェアとソフトウェアのシステム構成の概要

3.1 ハードウェア構成

AIReEの入力側マイクロコントローラには、ESP32-C3 Super Miniを用いた。ESP32-C3 Super Miniは、低消費電力かつ小型の開発ボードとして広く利用されており、Bluetooth Low Energy(BLE)通信機能を標準で備えている。そのため、PCやタブレット端末とのワイヤレス接続が容易であり、教育現場などでも安全かつ柔軟な運用が可能である。

デバイスの先端部には緑色のマーカーを取り付けており、このマーカーがカメラ画像上でトラッキング対象となる。緑のマーカーを使用した理由については、第4章で詳しく述べる。ハードウェアの「可視的な先端」が、ソフトウェア側で描画処理を行う際の「描画ポインター」として機能する構造となっている。

本体には3つのボタンを配置し、それぞれ以下の機能を割り当てた。

- ボタン1 (Space key) : 描画の開始／停止
- ボタン2 (Delete key) : 描画の消去

■ ボタン 3 (Z key) : 描画色の切り替え

これらの信号は BLE の HID(Human Interface Device)プロファイルを利用し、無線キーボードと同様の信号を送信することで、Unity アプリケーション側に反映される仕様とした。結果として、ユーザは手元のリモコン操作と空中でのマーカー動作を組み合わせ、身体性に富んだ描画操作を行うことができる。

なお、リモコン本体は小型かつ軽量に設計されており、幼児から高齢者までが容易に扱えるインタフェースとなるよう配慮した。

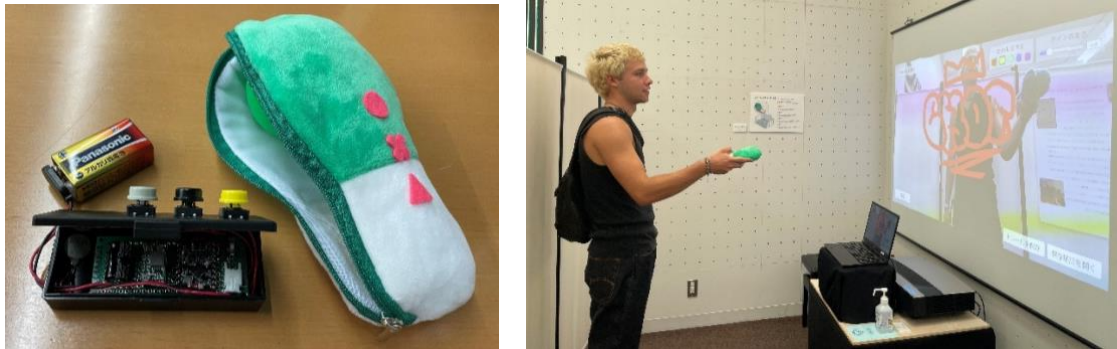


Fig.2 ハードウェアのプロトタイプ(左)と利用する様子(右)

3.2 ソフトウェア構成

ソフトウェア側は、Unity および OpenCV for Unity を基盤として構築した。カメラ映像をリアルタイムに取得し、ユーザが手に持つデバイス先端の緑色マーカーを HSV(Hue, Saturation, Value)色空間に基づいて検出することで、学習者の手元の動きを追跡する (Fig.3)。

検出アルゴリズムの概要を以下に示す。

- (1) カメラ映像をフレーム単位で取得する。
- (2) RGB データを HSV 色空間へ変換する。
- (3) あらかじめ定義した HSV 色域内のピクセルを抽出する。
- (4) 検出したマーカーの重心座標を Unity 上の「描画ポインター」に対応付け線を描く。

この処理により、ユーザがマーカーを持って空中で動かすと、その軌跡が画面上にリアルタイムで描かれる。さらに、AIReE は、ハードウェアとソフトウェアの情報を統合し、マーカーの位置変化と BLE 信号の入力状態をもとに、描画の開始・停止・消去を制御する構成となっている。



Fig.3 Unity のアプリケーションで描画されている様子

4. 性能評価

本章では、安定した描画を実現するために実施した「マーカ追跡性能」および「ピクセル検出精度」の検証結果について述べる。AIReE が学校、展示施設、病院、介護施設など多様な環境で使用されることを想定し、マーカの色・大きさ・照明条件がトラッキングおよび検出精度に与える影響を評価した。

4.1 評価概要

(1) 測定環境の概要

- 場所：東京大学ダイワユビキタス学術研究棟 2 階 教室 (84 m²) (Fig.4)
- 照明：前後方向に 6 列の蛍光灯が並び、1 列ごとに独立して ON/OFF 制御可能
- 測定レイアウト：床面に 1m、3m、5m の位置をマーキングし、ホワイトボードを移動させながら各距離条件で測定を実施した。

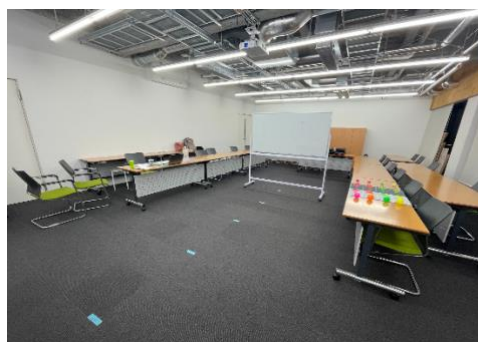
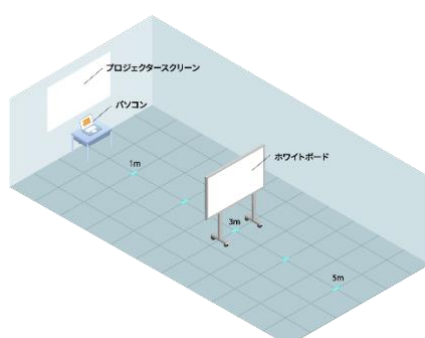


Fig.4 測定環境の概要図(左)と実際の測定環境(右)

(2) 測定システムの概要

- 使用カメラ： PC 内蔵カメラ (THIRDWAVE F-14RP5)
- PC 環境詳細： intel Core i5-1333U(13th Gen)/RAM16GB/ストレージ 500GB
/グラフィックメモリ 128MB/x64 ベースプロセッサ



Fig.5 写真は測定用に Unity で実装したアプリケーションを上記 PC 仕様で起動した様子

(3) 測定パラメータ

① マーカーの色

マーカーには、ニッペホームプロダクツ株式会社製の水性蛍光塗料（レモン・グリーン・スカーレット・ピンク）を使用した。



Fig.6 ニッペホームプロダクツ株式会社 水性蛍光塗料
(左から、グリーン、レモン、スカーレット、ピンク)

OpenCV では RGB の基本色である、赤、緑、青が最も分離しやすく、特に緑系や黄色系は背景との識別性が高いことが知られている。このため、道路標識や非常口と同様に高コントラストが得られる緑系および黄色系を基準色として採用した。

一方、赤系やピンク系は、机や床、肌や唇など実際の環境に含まれる色であり、識別が難しい条件下での挙動を検証する目的で選定した。

また、多くのデジタルカメラは波長の短い青系の感度が低く、カメラ内部の Bayer

フィルタが赤 1：緑 2：青 1 の構成で緑が半数を占めるため、緑の検出感度が最も高いことが知られている。

他方、アプリケーション側では、各色に干渉が生じないように HSV 空間の検出範囲（認識開始色～終了色）を調整し、最もピクセル検出数が増える範囲を設定値として採用した(Table.1)。

	認識開始色			認識終了色		
	H(色相)	S(彩度)	V(明度)	H(色相)	S(彩度)	V(明度)
グリーン	50	60	70	80	255	255
レモン	20	60	70	50	255	255
スカーレット	0	160	160	20	255	255
ピンク	130	135	135	175	255	255

Table. 1 システムで設定したマーカーの色範囲

② マーカーのサイズ

マーカーの塗布にはサンドペーパー（白：＃400、黒：＃1000）を用い、反射光の影響を抑制した。中央部に直径 2cm／4cm／8cm の円形マーカーを塗布し、異なる明度環境を想定して白・黒の 2 種類の台紙を使い分けた。これにより、背景が暗い環境と背景が明るい環境における検出特性の違いも併せて評価することが出来る。

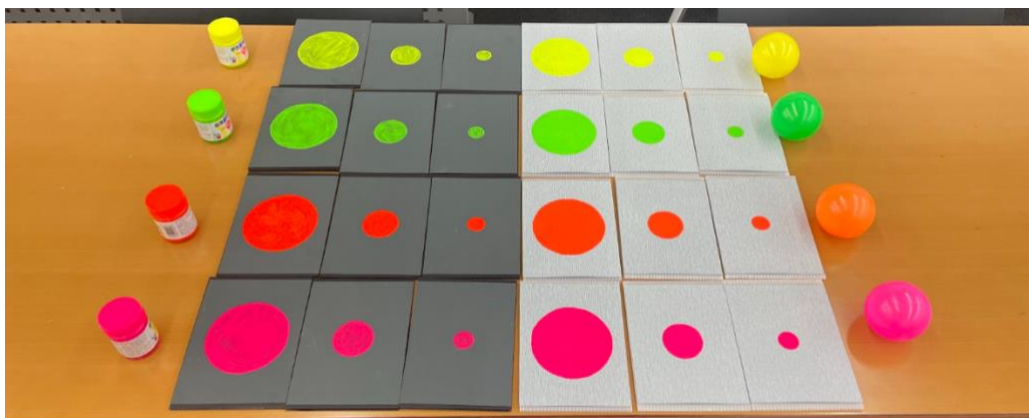


Fig.7 用意したマーカーのサンプル

③ 照明条件

利用環境の時間帯や天候による照度変化を想定し、照度計を用いたピクセル検出評価を行った。前述のように測定室の天井には前方から後方にかけて6列の照明が設置されており、1列ごとにON/OFF制御が可能である。本評価では、2列単位で照明を切り替え、3通りの照明パターン（全灯／後方2列消灯／後方4列消灯）を設定した（Fig.8 右）。それぞれの条件で得られた照度値を基に、異なる明るさ環境におけるピクセル検出数を記録し比較した。

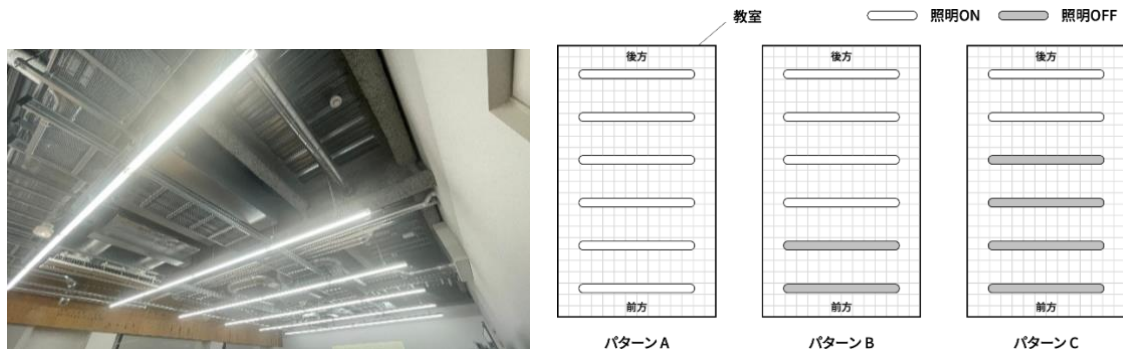


Fig.8 測定室の天井に設置された6列の照明(左)と照明制御の3つのパターン(右)
(パターンAは全灯、パターンBは後方2つを消灯、パターンCは後方4つを消灯。暗闇
の中での操作は推奨しないため、すべてを消灯する場合は除外した。)

4.2 評価方法

(1) マーカーの追跡評価の方法

各マーカー色について、ホワイトボード上に記された文字「の」および「a」を、マーカーでなぞるタスクを実施した(Fig.9)。ホワイトボードは、カメラから1m/3m/5mの位置に移動させ、マーカーの動きに対して描画ポインターがどの程度正確に追従するかを評価した。この評価はシステム全体の操作感や描画誤差の少なさを把握するための重要な指標である。



Fig.9 ホワイトボードに書かれたひらがなの「の」とアルファベット小文字の「a」(左)と、
それをなぞりながらトラッキング性能を評価している様子(右)

追従性の評価は、描画中のポインター軌跡がマーカーの実際の動きとどの程度一致してい

るかを基準に、以下の 3 段階で判定した (Table. 2, Fig.10-1～Fig.10-3)。

評価記号	判断基準	内容
◎	良好	ポインターがマーカの動きに正確に追随（ズレなし）
△	やや不安定	一時的なズレが 1 回以上発生
×	追随不能	追随せずトラッキング不能

Table.2 マーカの追随性評価のための指標



Fig.10-1 良好な追随を見せる例(◎)

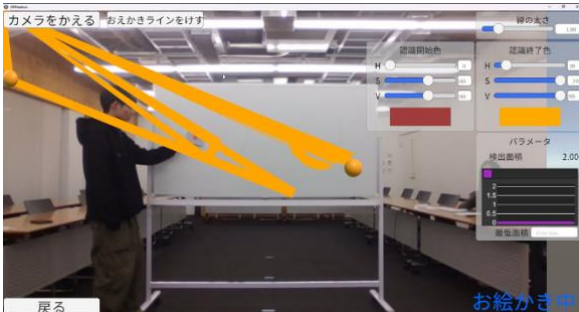


Fig.10-2 やや不安定な追随を見せる例(△)



Fig.10-3 全く反応がない追随不能の例(×)

(2) マーカーのピクセル検出評価の方法

マーカーをカメラ前方の 3m の位置に設置し、照明条件を 3 パターン（全灯／後方 2 列消灯／後方 4 列消灯）に切り替えて測定を行った（Fig.10）。照度の測定には FieldNew 社製デジタル照度計を用いた。各照明条件下で、照度を測ると同時に、OpenCV を用いてマーカー領域の面積（ピクセル単位）を算出し、照度変化が検出面積に与える影響を比較した。

本評価では、マーカーがカメラ画像上でどの程度の面積として認識されるかを定量的に評価し、色や照明条件が検出精度に及ぼす影響を明らかにすることが目的である。

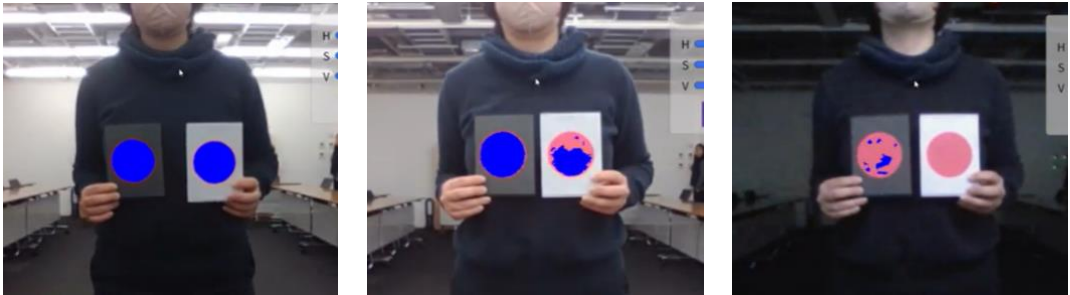


Fig.10 照度変化による、マーカーのピクセル数を検出(青色)している様子。
(左から、照明条件を全灯／後方 2 列消灯／後方 4 列消灯にした場合の測定結果である)

4.3 評価結果

(1) マーカーの追跡評価の結果

マーカーの色・大きさ・背景色・距離を組み合わせで行った追跡評価の結果を Table3-1～3.4 に示す。評価は、ホワイトボード上に描かれた文字を実際になぞった際、描画ポインターがどの程度正確に追従したかを示している。「第 4.2 章－(1)」で示したように、記号の意味は次の通りである：◎＝安定して追従、△＝一部途切れ、×＝検出不能。

グリーン	Φ2cm のマーカー		Φ4cm のマーカー		Φ8cm のマーカー	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
1m の距離	◎	◎	◎	◎	◎	◎
3m の距離	×	△	◎	◎	◎	◎
5m の距離	×	×	△	△	◎	◎

Table.3-1 グリーンのマーカーを用いた際の、トラッキング安定性評価

ピンク	Φ2cm のマーカー		Φ4cm のマーカー		Φ8cm のマーカー	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
1m の距離	◎	◎	◎	◎	◎	◎

3m の距離	×	△	◎	◎	◎	◎
5m の距離	×	×	△	△	◎	◎

Table.3-2 ピンクのマーカ―を用いた際の、トラッキング安定性評価

レモン	Φ2cm のマーカ―		Φ4cm のマーカ―		Φ8cm のマーカ―	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
1m の距離	◎	◎	◎	◎	◎	◎
3m の距離	×	△	△	△	◎	◎
5m の距離	×	×	△	△	◎	◎

Table.3-3 レモンのマーカ―を用いた際の、トラッキング安定性評価

スカーレット	Φ2cm のマーカ―		Φ4cm のマーカ―		Φ8cm のマーカ―	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
1m の距離	◎	◎	◎	◎	◎	◎
3m の距離	×	△	△	△	◎	◎
5m の距離	×	×	×	×	△	△

Table.3-4 スカーレットのマーカ―を用いた際の、トラッキング安定性評価

上記の結果から、1m 距離ではすべてのマーカ―が安定して追跡したが、3m 距離になると、グリーンおよびピンクでは Φ2cm マーカ―の検出が不安定になった。一方、レモンおよびスカーレットでは Φ4cm マーカ―でも追跡が不安定となり、安定な描画には Φ8cm のマーカ―が必要であった。さらに 5m 距離では、グリーン・ピンク・レモンにおいても Φ8cm マーカ―のみがトラッキング可能であり、スカーレットは Φ8cm でも検出困難であった。

以上の結果より、グリーンおよびピンクのマーカ―が最も安定した追跡性能を示し、特に Φ4cm 以上のサイズで 1～3m の距離において安定した描画が可能であることが確認された。一方、スカーレットは周囲環境（特に肌色など）との類似による影響を強く受け、検出の途切れが多く見られた。

(2) マーカ―のピクセル検出評価の結果

照明条件の違いによるピクセル検出性能を比較した結果を Tabl. 4-1～4-4 に示す。照度は、第 4.1 章－(3)－③(Fig.8)で示したように、教室天井に設置された 6 列の照明を組み合わせて ON/OFF することで調整した。照度の測定は、マーカ―を設置した位置で行い、全灯時 (A パターン)・後方 2 列消灯時 (B パターン)・後方 4 列消灯時 (C パターン) の 3 条件を設定した。その結果、A パターンが 235 lx、B パターンが 180 lx、C パターンが 57 lx であった。

グリーン	Φ2cm のマーカー		Φ4cm のマーカー		Φ8cm のマーカー	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
A パターン (235 lx)	35 px	36 px	261 px	251 px	1021 px	1157 px
B パターン (180 lx)	54 px	49 px	271 px	246 px	1137 px	1146 px
C パターン (57 lx)	28 px	41 px	232 px	237 px	1077 px	1031 px

Table.4-1 グリーンのマーカーを用いた際の、照度によるピクセル検出評価

ピンク	Φ2cm のマーカー		Φ4cm のマーカー		Φ8cm のマーカー	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
A パターン (235 lx)	20 px	39px	173 px	251 px	920 px	1132 px
B パターン (180 lx)	16 px	38px	173 px	243 px	921 px	1105 px
C パターン (57 lx)	17 px	23px	171 px	255 px	932 px	1119 px

Table.4-2 ピンクのマーカーを用いた際の、照度によるピクセル検出評価

レモン	Φ2cm のマーカー		Φ4cm のマーカー		Φ8cm のマーカー	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
A パターン (235 lx)	1 px	50 px	163 px	256 px	923 px	1044 px
B パターン (180 lx)	3 px	39 px	180 px	262 px	965 px	1033 px
C パターン (57 lx)	0 px	0 px	0 px	35 px	244 px	316 px

Table.4-3 レモンのマーカーを用いた際の、照度によるピクセル検出評価

スカーレット	Φ2cm のマーカー		Φ4cm のマーカー		Φ8cm のマーカー	
背景色	白系	黒系	白系	黒系	白系	黒系
A パターン (235 lx)	0 px	2 px	59 px	124 px	674 px	806 px
B パターン	0 px	4 px	74 px	133 px	706 px	872 px

(180 lx)						
C パターン (57 lx)	0 px	3 px	10 px	114 px	539 px	781 px

Table.4-4 レモンのマーカーを用いた際の、照度によるピクセル検出評価

各々の照度条件下で、背景色（白／黒） および マーカー色（グリーン／ピンク／レモン／スカーレット） ごとに、検出面積（ピクセル単位,; px）を OpenCV を用いて算出した。上記の結果を視覚的に示したものが Fig.11-1（白背景） および Fig.11-2（黒背景）である。

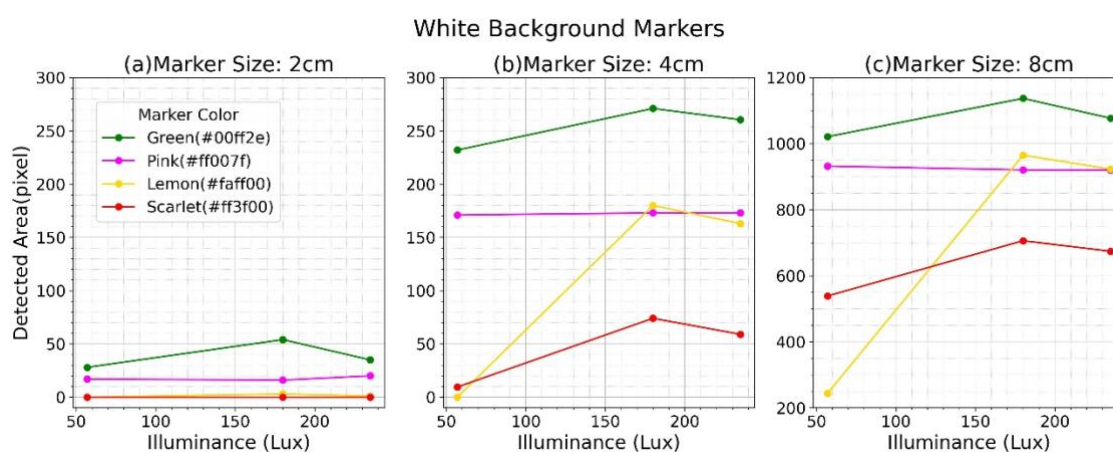


Fig.11-1 白背景マーカーのピクセル検出結果
（左からΦ2cm, Φ4cm, Φ8cm マーカーの検出結果である）

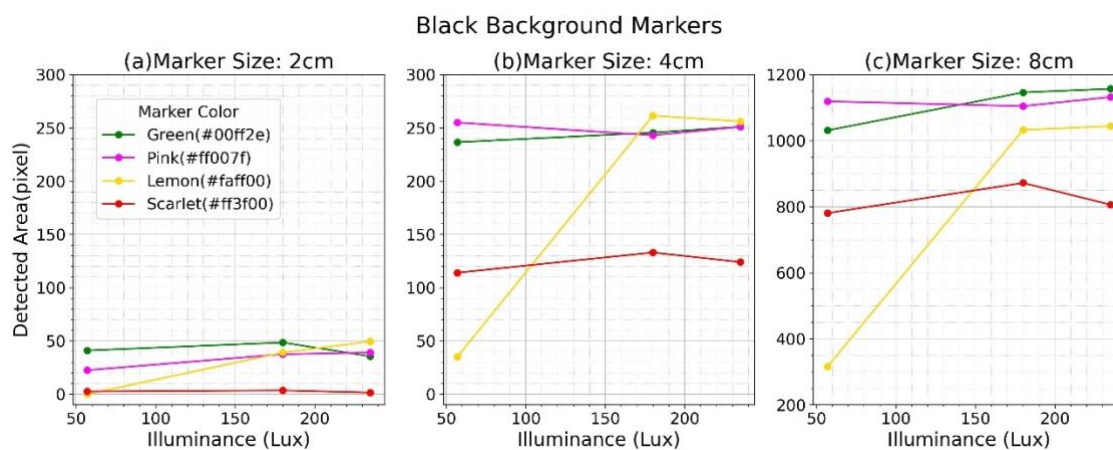


Fig.11-2 黒背景マーカーのピクセル検出結果
（左からΦ2cm, Φ4cm, Φ8cm マーカーの検出結果である）

いずれの条件においても、マーカーサイズの増加に伴い検出ピクセル数が増大し、明るい

環境ほど安定した検出が得られる傾向が確認された。一方で、最も明るい A パターン (235 lx) において、一部の測定条件で検出ピクセル数が低下する例も見られた。これは、マーカの角度によって照明が反射し、マーカー表面の一部が白飛び (Overexposure) することで、その部分が検出対象から除外されたためと考えられる。

マーカー色ごとの傾向として、グリーンは白・黒いずれの背景でも安定して検出され、最も再現性が高かった。黒背景ではピンクも同程度の安定性を示し、前節 (第 4.3 章-(1)) で示した追従評価の結果と一致している。一方、レモンは高照度下では検出されやすいが、照度低下の影響を強く受け、周囲が暗い環境では検出が困難になることが分かった。スカーレットは全体的に検出面積が小さく、特に白背景では明るさや反射の影響を受けやすい結果となった。

(3) 考察：安定動作条件のまとめ

以上の結果から、AIReE システムにおけるマーカー検出は、照度 180 lx 以上の環境で最も安定し、マーカー径 2cm であっても 1m 距離では十分な追従性を示すことが確認された。本研究で使用した THIRDWAVE F-14RP5 (フル HD, 1920×1080 px, 実寸 310×175 mm) のモニターを基準に換算すると、モニター上での物理的寸法は直径約 4 mm に相当し、これはおよそ 483 px に相当する。特に、グリーンおよびピンクのマーカーは背景色や照明条件の変化に対しても高い追従性能を維持しており、多様な実環境での安定動作が期待できる。

なお、本評価は操作者による主観的な手動速度での追従評価であり、また、ピクセル数の測定は静止したマーカーを対象とした静的特性の検証に留まった。実際の使用環境ではユーザが手を動かしながら操作を行うため、今後は動的特性 (マーカーの移動速度、加速度、方向変化に対する追従遅延やトラッキング精度) を定量的に評価する必要がある。特に、カメラのフレームレート (fps) や画像処理の遅延時間が描画線の滑らかさにどの程度影響するかを明確にすることが今後の重要な課題である。

検出精度を高めるために画像解像度を向上させる方法も考えられるが、解像度向上は同時に処理負荷の増大を招く。教育現場や福祉施設など、計算資源の限られた端末上でリアルタイム動作を行う際には、「検出精度の向上」と「演算処理速度の確保」とのトレードオフを考慮する必要がある。

今後は、カメラ映像における ROI (Region of Interest) 自動選択や、照度条件に応じた動的解像度制御、さらに色の重複による誤検出を防ぐためにキャリブレーション情報を利用した背景学習型トラッキングを導入するなど、環境適応的かつ軽量の画像処理アルゴリズムの開発も進めていく予定である。

5. 体験者評価

AIReE の有効性を教育・展示・福祉の実環境で検証するため、2025 年 3 月から複数の場

面で実演・観察を行っている。使用したマーカーは性能評価で最も安定したグリーンマーカーである。実演はこれまで、①出版関係者＋幼児(2歳)を対象にした演示、②東京都美術館での一般来場者を対象とした演示、③モニター校の教員を対象とした演示を実施している。

5.1 ケース①：出版関係者＋幼児(2歳)を対象にした演示

- 実施時期：2025年3月
- 参加者：出版関係者、2歳児とその保護者
- 観察内容：
 - ・ 子どもが画面に映る自分と保護者を認識し、映像への関心を示した。
 - ・ 空中の動作と画面上の描画が一致することで、保護者の顔や自分の顔などを「塗りつぶす行為」を自発的に行う様子が見られた。
- 考察：

身体運動が視覚的フィードバックとして即時に反映されることで、幼児が自発的に身体を動かす探索的行為が促されたと考えられる。従来のタブレット操作とは異なり、「触れずに描く」という体験が子どもに新鮮さと没入感を与えたと考えられる。



Fig.12 2歳児が緑のボールを用いて空間での描画を楽しんでいる様子

5.2 ケース②：東京都美術館での一般来場者を対象とした演示

- 実施時期：2025年5月(第72回日府展)
- 参加者：0歳～成人の一般来場者
- 観察内容：
 - ・ 幅広い年齢層が自然に手を動かし、画面に反応する描線を楽しむ姿が見られた。
 - ・ 特に子どもたち同士で一つの画面に対して協働的な描画行為が観察されたり、自発的に線の色や太さを変えて絵を描いたりなど集中する様子も見られた。

- 考察：

公共空間での体験を通じ、AIReE が世代や言語の壁を越えて共有できる操作体験を提供できることが示された。また、プロジェクターを用いた大画面投影によって、身体全体を用いた表現が容易になり、教育・アート・リハビリ領域の共通基盤としての応用可能性が確認された。



Fig.13 0歳児が保護者と一緒にAIReEを使用している様子

5.3 ケース③：モニター校の教員を対象とした演示

- 実施時期：2025年8月(菅生学園初等学校)
- 参加者：小学校教員（複数学年担当）
- 主な意見とフィードバック：

- ・ 「授業中じっとしてられない子どもも興味を持って取り組みそう」
- ・ 「タブレットとは違い、体を動かしながら協働できるのが楽しい」
- ・ 「理科や図工でも使える可能性がある」

- 考察：

教員からの意見では、AIReE が児童の集中維持・協働的活動を促すツールとして評価された。身体を動かしながら他者と共に操作できる点が「協働学習」への転換を促すと考えられる。今後は、実際の授業時間内での使用を想定した授業設計・評価指標の策定が必要である。

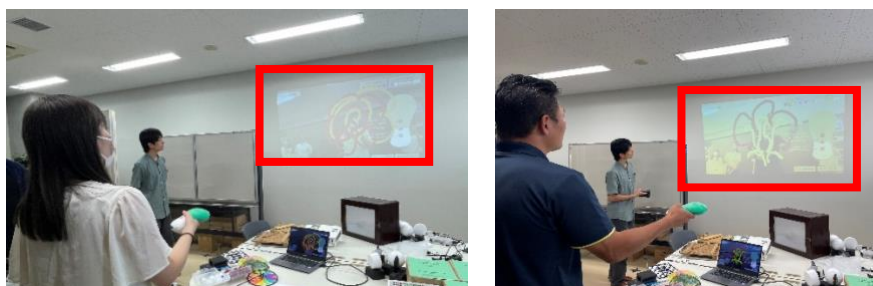


Fig.14 モニター校の先生が花丸(左)をつけたたり花の構造を描いたり(右)する様子

6. 総合考察と展望

AIReE は、身体の動きを入力として扱う AR-IO システムとして、教育・福祉・アートなど多様な分野における「身体性の回復」を目指したものである。これまでの結果から、システムは直感的な操作性と高い汎用性を持ち、年齢や専門領域を問わず体験者が「自らの動きを描画として見る」ことに新たな感覚的発見を得ていた。

一方で、世界的にはデジタル教育の方向性が大きく変化しつつある。欧州連合では 16 歳以下の SNS 利用を全面禁止する方針を打ち出すなど、未成年者の過度なデジタル依存を抑制する動きが進んでいる。アメリカ各州や北欧諸国でも、学習端末の使用制限やスクリーンタイム削減の政策が検討されており、これまでの「ICT 活用」が見直されつつある。

これに対して日本では、NEXT-GIGA 構想のもと、端末更新や配備率向上に焦点が当てられており、「使うこと」自体が目的化している側面が垣間見られる。

AIReE の提案は、こうしたデジタル利用の二極化に対して、ICT の利点を活かしながら身体性・協働性・創造性を再導入する新しい入出力のあり方であると考えられる。学習者が「見る」「動かす」「描く」を同時に経験することによって、認知と運動の統合が促進されることが期待される。

さらに、AIReE は教育にとどまらず、福祉・リハビリ・アートなど、異なる目的領域への展開が可能である。教育領域では、空中描画を通じた集中力の向上や記憶定着の促進が期待される。福祉領域では、動作と視覚の一致を利用した高齢者のリハビリテーションや認知トレーニングへの応用が考えられる。アート領域では、空間内での新しい身体的表現を支援し、美術館や文化施設での共同創作体験にも展開できる。

もっとも、本研究はまだプロトタイプ段階にあり、改良すべき技術的・運用的課題が多く残されている。システム全体の安定性、複数ユーザ同時操作時のトラッキング精度、長時間使用時の認知的・身体的負荷など、さらなる実証と最適化が求められる。今後はモニター校や出版社との連携による教材開発と実証実験も企画しており、より具体的な学習支援・創作支援システムとして AIReE を発展させていく予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、教材開発や体験実験にご協力いただいた啓林館の関係者の皆様、菅生学園初等学校の先生方に深く感謝申し上げます。また、日本画府の皆様には AIReE の展示発表に貴重なスペースと機会を提供していただき、心より御礼申し上げます。最後に、AIReE を実際に体験してくれた子どもたちと、その学びや発見を共にしてくださった保護者の方々に、心より感謝いたします。

References

- [1] Mueller, P. A., & Oppenheimer, D. M. (2014). The pen is mightier than the keyboard:

Advantages of longhand over laptop note taking. *Psychological Science*, 25(6), 1159–1168.

[2] Mangen, A., & Velmans, M. (2015). Handwriting versus keyboard writing: Effect on word recall. *Jornal of writing research* vol.7 No.1, 227-247

[3] Donnelly, J. E., Hillman, C. H., Castelli, D., et al. (2016). Physical activity, fitness, cognitive function, and academic achievement in children: A systematic review. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(6), 1197–1222.

[4] Goldin-Meadow, S. (2009). How gesture promotes learning throughout childhood. *Child Development Perspectives*, 3(2), 106–111.