

特集：新技術に基づくメディア／デバイスを活用した学習支援環境

# AR/VR の教育・学習支援システムへの利用と課題

山元 翔\*

## Researches and Issues of Augmented Reality / Virtual Reality for Learning Environment and Educational Support System

Sho YAMAMOTO\*

This article describes an educational research using Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR). First, I clarify the definitions of AR and VR. After that, I introduce examples of research on learning environment and educational support systems which are implemented by AR and VR. AR is classified based on the augmented reality display in the real environment. VR is classified based on the degree of immersion. And I will discuss how each technology is used in the context of education or learning. Later, as an example of industry, we will introduce case studies focusing on automobile HUD. Finally, from the comparison with industrial cases, we will summarize the issues of future learning environment and educational support system research using AR/VR.

キーワード：Augmented Reality, Virtual Reality, 教育・学習支援システム, 自動車技術

### 1. はじめに

2016 年の VR 元年以後, AR (Augmented Reality; 拡張現実感) や VR (Virtual Reality; 仮想現実) が急速に世間一般に普及している。一般的に, AR とは人が知覚している現実環境を, コンピュータを利用して拡張する技術のことである。一方 VR は, 人が知覚可能な仮想環境を構築する技術のことという。よって AR であればスマートフォンなどを用いて, カメラ越しの現実空間に 3D オブジェクトを映し出すような用途が一般的であり, VR であれば Head-mounted Display (HMD) などを用いて仮想の空間に没入するようなシステムがよく知られている。これらの技術は現実の制約にとらわれないオブジェクトや環境を作り出し, ユーザに提供できる有用な技術である。

近年, このような特徴から, AR/VR は教育分野においても利用されている。例えば, Google 社は学習を目的として, VR 空間でさまざまな体験 (火星の探索など) とその解説を提供する「Expeditions<sup>(1)</sup>」や,

その AR 版である「Google Expeditions AR tours program」を開発・発表しており, NASA は星座や天体を現実空間に重畳できる「SkyView」を発表している<sup>(2)</sup>。また, AR/VR コンテンツを作成するための技術もさまざまなものが開発・提案されている (ARToolkit, Vuforia など)。

本稿では AR/VR を利用した教育・学習支援システムとその有用性を紹介し, 産業, 特に自動車における Head-Up Display (HUD) を中心とした AR の利用について紹介したうえで, これらを比較し, AR/VR の教育・学習への貢献と今後の課題について解説する。

### 2. Augmented Reality と Virtual Reality

本章では, 本稿で取り扱う AR/VR の定義を明らかにする。AR や VR はさまざまな定義づけがなされているためである。よって本稿では現実環境と仮想環境から AR/VR の立ち位置を明らかにし, そのうえで技術的側面からそれぞれの環境を分類していく。

\* 近畿大学工学部 (Faculty of Engineering, Kindai University)



図 1 Simplified representation of a "virtuality continuum"

## 2.1 Real Environment と Virtual Environment

図 1 に Milgram らの定義した、仮想と現実の環境を定義する Virtuality Continuum を示す<sup>(3)</sup>。ここでは現実環境と仮想環境を対極のものとして左右に位置づけ、仮想環境と現実環境が混ざりあった部分を Mixed Reality と定義しており、AR はこのなかに位置づけられる。現実環境は、現実のオブジェクト (Real Objects) のみで構成される環境であり、仮想環境は仮想オブジェクト (Virtual Objects) のみで構成される環境を示す。各々のオブジェクトの定義は以下のとおりである。

*"Real objects are any objects that have an actual objective existence".*

*"Virtual objects are objects that exist in essence or effect, but not formally or actually".*

ここで、本稿では主に情報技術を用いた教育・学習支援システムを対象としているため、「not formally or actually」を、コンピュータによって生成される人工的なオブジェクトとして捉えることとする。なお、文献においてもコンピュータグラフィックスを仮想オブジェクトの例として挙げている。

よって AR は、現実環境に仮想のオブジェクトが含まれることで、現実環境が「拡張」された環境と定義される。これに対して VR は Virtual Environment (VE) が現実のように感じられる環境となる。

## 2.2 AR と VR の分類

Bimber らは AR 技術について、仮想オブジェクトのディスプレイに基づきまとめている<sup>(4)</sup> (図 2)。まず、現実のオブジェクトがある空間にデバイスを設置する Spatial Display である。これには 3 種類あり、Screen-Based Video See-Through Display は、現実のオブジェクトをカメラなどで写し取り、コンピュータ上のスクリーンで仮想オブジェクトに重畳する。Spatial Optical See-Through Display は、現実のオブジェクトのあたりに仮想オブジェクトを映すための透

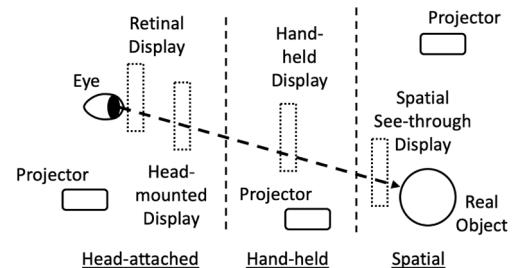


図 2 Image-generation for augmented reality displays

明なスクリーンを設置する。Projection-Based Spatial Displays は、いわゆるプロジェクションマッピングである。

次に Hand-held Display は、タブレット PC, PDA, スマートフォンのようなユーザが手に持てる機器が利用される。ほかにも工学シースルーハンドヘルドのように、モバイル機器で部分的に仮想オブジェクトを重畳することのできる機器も挙げられている。

最後に Head-attached Display も 3 種類挙げられている。Retinal Display はその名のとおり、網膜に仮想オブジェクトを投影するものである。Head-mounted Display (HMD) は頭部に装着し、機器のカメラを通して仮想オブジェクトの重畳された現実環境を、視界を覆うディスプレイに提示する。Head-mounted Projector は頭部に装着されたプロジェクタから現実のオブジェクトに仮想のオブジェクトを投影する。

また、AR 技術は、現実世界に仮想オブジェクトを提示するためのトリガーが必要となる。このトリガーは、一般的に、マーカーベースとマーカレスベースに大別される。前者は、紙面などで特徴点の抽出可能なマーカーを提示し、タブレットなどのカメラで読み取らせることで、マーカー上に仮想オブジェクトを重畳できる。マーカーを傾ければ、仮想オブジェクトの角度も合わせて変化する。後者は、GPS (Global Positioning System) の座標や方角、および画像認識に基づき仮想オブジェクトを提示する。

VR 技術は、CAVE<sup>(5)</sup>のような、ユーザの周囲をすべてディスプレイで覆い、HMD を装着、ジェスチャーで操作をすることで、ユーザの身体ごと仮想環境に取り込んでしまうシステムが著名である。ほかにも、HMD やコントローラなどを用いて視界をすべて仮想環境で覆ってしまう方法もある。近年はこのような

HMD を利用した VR も多く見られる。

ここで、何名かの研究者が没入感を尺度として、VR 環境を Non-immersive VR, Semi-immersive VR, Fully-immersive VR の 3 種類に分類している<sup>(6)(7)</sup>。Non-immersive VR は比較的小型のディスプレイ上で仮想環境の構築がなされたものである。マウスやキーボード、トラックボールなどの従来のインターフェースを用いて、ディスプレイ上の VR 環境を操作する。Semi-immersive VR では、デバイスはジョイスティックやスペースボール、データグローブなど 3 次元を意識したものになる。提示ディスプレイも、人の体程度には大きいものである。Fully-immersive VR は、操作はグローブやボイスコマンドのような現実空間での操作に近づけたものになり、機器は HMD や CAVE を利用して視野すべてを仮想環境で覆うものである。この定義を整理している論文は 2004 年と古いものになっているが、VR は仮想環境を現実として捉えることのできる環境であるという点で、没入感の程度で整理するという手法は参考になると思われる。

### 2.3 HCI における AR と VR

次に、HCI に基づく AR と VR の違いを紹介する。図 3 に Rekimoto らの定義した AR と VR、および従来の GUI のインターラクションの違いを示す<sup>(8)</sup>。(a) のデスクトップコンピュータ (GUI) では、ユーザーとコンピュータのインターラクションは、ユーザーと現実世界とのインターラクションからは分離されている。つまり、コンピュータはコンピュータ、現実環境は現実環境で

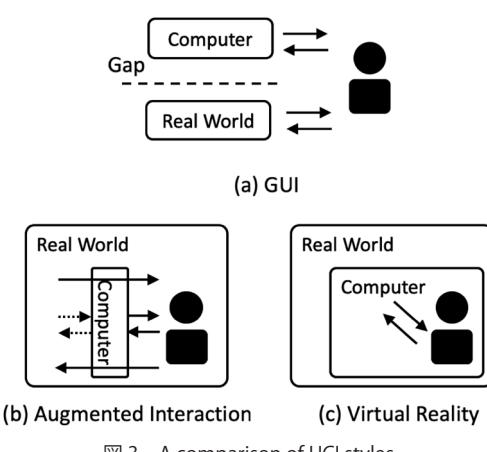


図 3 A comparison of HCI styles

あり、これらの間にはギャップができる。これに対して、(b)Augmented Interaction (AR System を利用した環境) では、コンピュータによって拡張される情報をを利用して、ユーザと現実環境でのやり取りをサポートする。そして(c)Virtual Reality では、コンピュータはユーザを完全に取り巻いており、ユーザと現実世界との間の相互作用はない。よって必ずしも CAVE のように周囲をすべて仮想環境で覆う必要はなく、HMD で仮想環境に没入させ、その仮想環境とのみインタラクションを取る場合も VR になると考えられる。

### 2.4 本稿における AR と VR

本稿では、図 1 と図 3 より、現実環境に仮想オブジェクトが存在する環境において、現実世界と直接、あるいは仮想環境を通じてインタラクションを取るもの AR とする。そして図 2 より、ユーザの頭部に固定して仮想オブジェクトを重畳する Head-attached Display、ユーザの持つ機器を用いて重畳する Hand-held Display、そして現実のオブジェクトを中心としてディスプレイを固定する Spatial Display の 3 種類で AR 環境を分類する。

VR は、図 1 と図 3 より、仮想環境を中心とし、仮想環境とのみインタラクションをとる環境とする。そして 2.2 節より、現実空間とはインタラクションをとらないが現実空間を主体としている Non-immersive VR、仮想空間が視野の多くを占めるものの現実空間もまた存在する Semi-immersive VR、そして HMD や全面ディスプレイにより視野すべてを仮想環境で覆われた Fully-immersive VR の三つに分類する。なお、これらの分類における仮想環境の操作方法はデバイスの開発により影響を受けるため、ここでは HCI の定義も踏まえ、視野をどの程度仮想環境に覆われるか（どの程度仮想環境に包まれていると感じられるか）によって分類する。

## 3. 教育・学習支援システムにおける AR/VR

### 3.1 AR の有用性

#### 3.1.1 AR の利用例

Head-attached Display を用いた例として、HMD を用いて幾何学を学習する Construct3D が提案されて

いる<sup>(9)</sup>。このシステムでは仮想オブジェクトである幾何学图形を、現実のペンなどで操作しながら幾何学の理解を深めるというものである。ほかにも、近年では、Lumilo のような、教室で教師が HMD を装着することによって、学生の上にリアルタイムで学習状況を重畳できるシステムも開発されている<sup>(10)</sup>。また、実際の基盤にマーカーを付与し、ハードウェアコンポーネントを組み立てる際に、コンピュータのマザーボード上に情報提示をすることで、その学習を支援するシステムも提案されている<sup>(11)</sup>。

次に Hand-held Display は、タブレットやスマートフォンが普及したことから、多くの研究がなされている。EcoMOBILE プロジェクトでは、池の水質などについて、実際の環境を移動しながら学習できる<sup>(12)</sup>。このシステムでは学習者はスマートフォンを持ち、特定の場所へ移動することで、GPS によりその場所に合わせた学習内容が提供される。また、現実環境に仮想環境を重畳することで、現実環境をロールプレイングゲームとして移動しながら、仮想空間上で数学や科学リテラシーの問題を解決し、ゲームの攻略とともに学習を進めるシステムも提案されている<sup>(13)</sup>。ほかにも、実験シミュレーションとして、マーカーや画像ごとに電気回路の部品を対応づけ、これを現実環境で組み立てることで、タブレット上でその作成した回路のシミュレーションができる AR-SaBER のようなシステムも提案されている<sup>(14)</sup>。また、無機化学の炎色反応などの実験を行えるシステムも開発されており、マーカーを用いて対応する器具を操作することで、その操作に基づいた実験がシミュレートされる<sup>(15)</sup>。

医療分野では、マーカーを用いて仮想の傷を人の肌に提示することで、より現実感のある学習ができるシステムが提案されている<sup>(16)</sup>。また、仮想の蝶を、現実空間をベースとして育てることで、蝶の生態系を学ぶようなシステムも提案されている<sup>(17)</sup>。

Explorez というソフトウェアでは、GPS を利用して大学内を紀元前のシーンと重畠することで、学習者はキャンパス内の特定の場所でキャラクターとコミュニケーションしたり文章を読んだりして、フランス語のスキルを向上させる学習ができる<sup>(18)</sup>。また、災害訓練でタブレット PC を用い、現実環境に火災の様子や負傷者の様子を重畠させ、よりリアリティを向上させる

システムも開発されている<sup>(19)</sup>。また、筆者は AR を用いることで、現実環境で作成した問題を読み取り、教師の代わりに診断、仮想環境で提示することのできる作問学習支援システムを開発している<sup>(20)</sup>。

Spatial Display の例としては、マーカーを利用して、カムシャフトのような大きな機械の構造を、実際の部品と照らし合わせながら学習するようなシステムも提案されている<sup>(21)</sup>。また、英語の学習として、マーカーを提示すると、そこに重畠された仮想オブジェクトを示す英単語が発音されるシステムも提案されている<sup>(22)</sup>。こちらは教室での一斉指導のためプロジェクトを用いている。

### 3.1.2 AR 利用の意義

AR を利用する意義には、コスト削減、危険や倫理的な問題の回避などが挙げられることがあるが、これらは仮想環境で実現することによる意義であり、AR という、現実環境と仮想環境を接続することによる意義であるとは言いがたい。この点を踏まえると、今回調査した範囲で言えば、AR 利用の意義は次の三つが確認できた。(a)現実のオブジェクトの操作による認知負荷の低減、(b)現実のオブジェクトの学習のための情報拡張、(c)ロールプレイングにおける現実感の増強、である。また、3 次元空間で実現することにより、全方位から対象オブジェクトを確認できるため、協調学習において有用であるという利点も指摘できるが、これは AR を用いるからこそその意義とはしていない。

(a)は主に仮想実験環境の実現が該当する。もし仮想実験を 2 次元の仮想環境で、マウスなどを用いて行えば、どうしてもマウスというデバイスの操作理解という、仮想の実験環境における操作の解釈という余分な認知負荷が増えてしまう。例えば、現実にはオブジェクトを掴んで移動する活動が、マウスのドラッグ & ドロップに置き換わるなどである。これが現実のマーカーなどの操作により実現されることで、学習者はより直感的かつ、実際の実験環境に即した学習が行える。また、実験対象を回り込んで観察するという操作も、実際の環境とほぼ同様に行える。

(b)には、特にフィールドワークなどの現実の活動がベースとなる教育・学習が該当する。これには 2 種類あり、一つ目は現実の池に住む魚の情報を提示す

るような単純な学習内容の提示である。マザーボードの学習もこれに該当する。二つ目は、現実の活動結果を診断し、その結果を提示するものであり、Lumilo や作問学習の学習結果の提示が挙げられる。

(c)はロールプレイングを伴う学習であり、防災訓練がわかりやすい。防災訓練においては、実際の危険性を理解するうえである程度の現実感も重要である。しかしタブレット上でのシミュレーションなどで行ってしまうと、この現実感が薄れ、実際の危険性を感じづらい。しかし現実空間をベースとすることで、この問題を回避できる。また、英語学習などでは現実空間をベースとして仮想の対話者を出すことで、より実際の人と話しているという実感を得られると考えられる。

最後に、Construct3D のように、3 次元空間で学習対象を複数人で取り囲むことで、2 次元空間よりは協調的な学習を進めやすいという点も指摘できる。

したがって分子結合を個人で学習したり、回路の電気の流れをプロジェクトマッピングで見せたり、分類ゲームや仮想オブジェクトの英単語読み上げなどは、仮想環境であることの有用性はあるものの、AR である理由は明確ではないと言える。

また AR を実現する機器の利用について述べる。Head-attached Display は、両手を用いた学習をする際に有用である。Hand-held Display は、その携帯性から、フィールドワークなど移動を伴う学習において利用しやすい。最後に Spatial Display は、カムシャフトのように関連している現実のオブジェクトが重たかったり、固定されたりしているような場合に利用できるといえる。

## 3.2 VR の有用性

### 3.2.1 VR の利用例

Non-immersive VR の例として、高校生対象の科学実験シミュレーションが可能なシステムが提案されている<sup>(23)</sup>。このシステムではディスプレイに VR 実験空間を提示し、Wii Remote を用いて操作する。ほかにも Second Life 環境で、建築の安全教育をロールプレイングできるものもある<sup>(24)</sup>。

Semi-immersive VR では、巨大なディスプレイとキネクトによるジェスチャを用いて、仮想空間でロール

プレイングにより外国語の話し言葉や読み言葉を学習できるシステムがある<sup>(25)</sup>。ほかにも、HMD と力覚センサを用いることで、地球と太陽の間の重力のシミュレーションができるシステムも提案されている<sup>(26)</sup>。

Fully-immersive VR は、多くが CAVE ベースのシステムである。まず、CAVE を用いることで、PDD-NOS (現在の DSM-5 では自閉症スペクトラム障害) の児童が安全に横断歩道を渡る訓練をするためのシステムが提案されている<sup>(27)</sup>。ほかにも、前庭障害の症状を馴化させるため、仮想空間内で食料品店を歩き回ることのできるシステムもあり、従来の前庭理学療法と同じ効果があることが確認されている<sup>(28)</sup>。

CAVE 以外では、HMD を用いた the design of architectural spatial experiences の学習支援システムも提案されており、より学習者同士が協調的になるという結果が報告されている<sup>(29)</sup>。また、HMD やモーションキャプチャを利用してバーチャル空間でアフリカの Djembe ハンドドラムの演奏を練習<sup>(30)</sup> したり、モーショントラッカーと HMD を用いることで深部脳刺激療法の訓練ができる環境も提案されている<sup>(31)</sup>。

### 3.2.2 VR 利用の意義

VR の意義は、仮想環境とのインタラクションが主であるため、「現実環境では実現の難しい、身体活動を伴う学習の実現」が挙げられる。例えばリハビリの例で言えば、外に出ることが難しい学習者が、その恐怖や危険性を取り除いた状態で、外にいなければできない学習を実現できる。また、建築物のデザインのように、3 次元の物体の鑑賞による評価が必要であり、かつその物体を現実環境上に重畠することが困難（規模の問題など）な学習においても有用である。

一方、太陽と地球の重力を感じることも、仮想環境でなければ不可能であるが、必ずしも学習者が仮想環境に取り込まれる必要性はない。ハンドドラムの例では、黒人の地域が発祥であるため、ドラムを叩く自身の腕が浅黒くなることで、パフォーマンスが上がるという結果が出ているが、これは自身の腕だけを仮想オブジェクトにしてもよいため、必ずしも VR である必要性はない。深部脳刺激療法についても完全な仮想環境である必然性を指摘することは難しい。

また、Non-immersive VR は、VR としての意義が

あるとは言いがたい。それは没入感がないゆえに、仮想環境に存在しているというインタラクションがあると言えないためである。事実、教育利用において VR と仮想環境を混同している場合があるということが一部の研究者によって指摘されている<sup>(32)</sup>。

#### 4. 自動車運転技術における AR の利用

自動車の運転における AR の利用は HUD の実装が主である。HUD は自動車のフロントウィンドウ領域に仮想オブジェクトを重畳するものであり、現実環境を踏まえた仮想情報の提示をしている。よって、ここでは HUD の研究例を簡単に紹介する。Plavšić らは HUD の主な利用例は、ナビゲーション、道路交通標識の提示、制動距離や車間距離、走行路、危険の警告に分けられるとしている<sup>(33)</sup>。例えばナビゲーションは、道路に即して仮想の矢印を提示することができ、従来のカーナビゲーションよりも進行方向の認知負荷を低減している。実際に LEXUS の Advanced Display では現在の速度や前方車両までの距離、人が近づくことによる危険の喚起や走行路の支援など、いくつもの研究成果が実装されている<sup>(34)</sup>。

また、このようなシステムは、実際に利用できるかどうかにも念頭において開発がなされている場合が多い。例えば車の制動距離を示すバーの提示なども、ドライビングシミュレーターで検証を行いつつ、実際に自動車の HUD に搭載することを考えて、作業負荷などの検証を行っている<sup>(35)</sup>。

#### 5. AR/VR 技術利用における課題

AR は現実環境において仮想オブジェクトを提示できること、VR は仮想環境に入り込めることが特徴となっており、これを活かした教育・学習環境こそが AR/VR を利用する意義がある。しかしいくつかの研究では、仮想環境で学習を実現する意義と混同していくように見受けられた。実際に、AR/VR を用いた研究には、従来提案されている教育・学習を、仮想環境により効率化するという主張のものも存在する。

また、自動車運転技術における AR 利用とは異なり、AR/VR を用いた教育・学習支援システムの現場への

実装例はあまり見受けられない。企業における技術訓練や、大学における一時的な利用は多少見受けられるものの、初等中等教育を対象とした研究はほとんど見当たらない。これは、AR/VR といった機器を用いてカリキュラムを構築するには、現場教員のように必ずしも工学的専門知識を持たない人たちを交えて議論していくかなければならないという問題があるためだと考えられる。

よって AR/VR 技術を用いた研究において、「AR/VR を用いるからこそできる教育・学習支援システムについての考察」、「そのシステムの教育現場への導入」が課題となるのではないだろうか。今後は AR/VR だからこそ実現可能な学習を教育現場で実現することで、従来の教育・学習を変えていくような研究が望まれる。

#### 6. おわりに

本稿では AR/VR を用いたさまざまな教育・学習支援システム研究について、その事例を問題点も交えて解説した。そのため、まず AR/VR の一般的な分類を調査し、それぞれの位置づけや特性を整理した後に、この整理に基づき、それぞれの研究における AR/VR を用いる意義について解説した。

今後、AR/VR 技術を用いた教育は大きく広がっていくことが期待される。さまざまな教育支援システムの開発会社が AR や VR に注目してコンテンツを作成していることからも、この点は明らかであろう。また、AR/VR 技術自体も、まだまだ発展の余地のある技術であり、3 次元ディスプレイなどがよい例に思われる。

このように新たな技術を取り入れるのであれば、改めて教育や学習について見つめ直すことが、教育・学習支援システム研究のより一層の発展につながると思われる。本稿が AR/VR を用いた学習支援システムに従事する研究者の研究の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

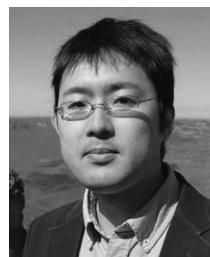
- (1) Google: "Google Expeditions", <https://edu.google.com/intl/ja/expeditions/> (参照 2018.12.26)
- (2) NASA: "SkyView", <https://skyview.gsfc.nasa.gov/current/cgi/titlepage.pl> (参照 2018.12.26)

- (3) Milgram, P. and Fumio, K.: "A taxonomy of mixed reality visual displays", *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. 77, No. 12, pp. 1321–1329 (1994)
- (4) Bimber, O. and Raskar, R.: "Modern approaches to augmented reality", *ACM SIGGRAPH 2005*, pp. 1–86 (2005)
- (5) Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. and DeFanti, T. A.: "Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE", *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 135–142 (1993)
- (6) Leibe, B., Starner, T., Ribarsky, W. et al.: "The perceptive workbench: Toward spontaneous and natural interaction in semi-immersive virtual environments", *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, Vol. 2000, pp. 13–20 (2000)
- (7) Mujber, T. S., Szecsi, T. and Hashmi, M. S.: "Virtual reality applications in manufacturing process simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155, pp. 1834–1838 (2004)
- (8) Rekimoto, J. and Nagao, K.: "The world through the computer: Computer augmented interaction with real world environments", *Proceedings of the 8th Annual ACM Symposium on User Interface and Software Technology*, pp. 29–36 (1995)
- (9) Kaufmann, H.: "Construct3D: An augmented reality application for mathematics and geometry education", *Proceedings of the Tenth ACM International Conference on Multimedia*, pp. 656–657 (2002)
- (10) Holstein, K., McLaren, B. M. and Aleven, V.: "Student learning benefits of a mixed-reality teacher awareness tool in AI-enhanced classrooms", *International Conference on Artificial Intelligence in Education 2018*, pp. 154–168 (2018)
- (11) Westerfield, G., Mitrovic, A. and Billinghurst, M.: "Intelligent augmented reality training for assembly tasks", *International Conference on Artificial Intelligence in Education 2013*, pp. 542–551 (2013)
- (12) Kamarainen, A. M., Metcalf, S., Grotzer, T. et al.: "EcoMOBILE: Integrating augmented reality and probeware with environmental education field trips", *Computers & Education*, Vol. 68, pp. 545–556 (2013)
- (13) Cheng, K. H. and Tsai, C. C.: "Affordances of augmented reality in science learning: Suggestions for future research", *Journal of Science Education and Technology*, Vol. 22, No. 4, pp. 449–462 (2013)
- (14) Ibáñez, M. B., Di Serio, A., Villarán-Molina, D. et al.: "Augmented reality-based simulators as discovery learning tools: An empirical study", *IEEE Transactions on Education*, Vol. 58, No. 3, pp. 208–213 (2015)
- (15) 岡本 勝, 隅田竜矢, 松原行宏: "拡張現実型マーカーを用いた無機化学学習支援システム", *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. 98, No. 1, pp. 83–93 (2015)
- (16) Albrecht, U. V., Folta-Schoofs, K., Behrends, M. et al.: "Effects of mobile augmented reality learning compared to textbook learning on medical students: Randomized controlled pilot study", *Journal of Medical Internet Research*, Vol. 15, No. 8, p. e182 (2013)
- (17) Tarng, W., Ou, K. L., Yu, C. S. et al.: "Development of a virtual butterfly ecological system based on augmented reality and mobile learning technologies", *Virtual Reality (Waltham Cross)*, Vol. 19, No. 3–4, pp. 253–266 (2015)
- (18) Perry, B.: "Gamifying French language learning: A case study examining a quest-based, augmented reality mobile learning tool", *Social and Behavioral Sciences*, Vol. 174, pp. 2308–2315 (2015)
- (19) 光原弘幸, 角川隆英, 宮下 純, 井若和久, 上月康則, 田中一基: "拡張現実感を用いたバーチャル避難訓練", *第38回教育システム情報学会全国大会講演論文集*, pp. 109–110 (2013)
- (20) 山元 翔, 平嶋 宗: "現実空間で作成した問題を診断するモンサクン—AR の設計・開発と協調学習への試験的利用—", *第43回教育システム情報学会全国大会講演論文集*, pp. 377–378 (2018)
- (21) Liarokapis, F., Mouroussis, N., White, M. et al.: "Web3D and augmented reality to support engineering education", *World Transactions on Engineering and Technology Education*, Vol. 3, No. 1, pp. 11–14 (2004)
- (22) Solak, E. and Cakir, R.: "Exploring the effect of materials designed with augmented reality on language learners' vocabulary learning", *Journal of Educators Online*, Vol. 12, No. 2, pp. 50–72 (2015)
- (23) Ali, N., Ullah, S., Alam, A. et al.: "3D interactive virtual chemistry laboratory for simulation of high school experiments", *Proceedings of EURASIA GRAPHICS*, Vol. 2014, pp. 1–6 (2014)
- (24) Le, Q. T., Pedro, A. and Park, C. S.: "A social virtual reality based construction safety education system for experiential learning", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 79, No. 3–4, pp. 487–506 (2015)
- (25) Chang, B., Sheldon, L., Si, M. et al.: "Foreign language learning in immersive virtual environments", *The Engineering Reality of Virtual Reality 2012* (2012)
- (26) Civelek, T., Ucar, E., Ustunel, H. et al.: "Effects of a haptic

- augmented simulation on K-12 students' achievement and their attitudes towards physics", *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, Vol. 10, No. 6, pp. 565-574 (2014)
- (27) Tzanavari, A., Charalambous-Darden, N., Herakleous, K. et al.: "Effectiveness of an immersive virtual environment (CAVE) for teaching pedestrian crossing to children with PDD-NOS", In *Advanced Learning Technologies (ICALT 2015)*, pp. 423-427 (2015)
- (28) Alahmari, K. A., Sparto, P. J., Marchetti, G. F. et al.: "Comparison of virtual reality based therapy with customized vestibular physical therapy for the treatment of vestibular disorders", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 389-399 (2014)
- (29) Antonieta, A.: "Immersive simulation of architectural spatial experiences", *Blucher Design Proceedings*, Vol. 1, No. 7, pp. 495-499 (2014)
- (30) Kilteni, K., Bergstrom, I. and Slater, M.: "Drumming in immersive virtual reality: The body shapes the way we play", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 19, No. 4, pp. 597-605 (2013)
- (31) Liu, Y.: "Virtual neurosurgical education for image-guided deep brain stimulation neurosurgery", *International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*, 2014, pp. 623-626 (2014)
- (32) Johnson-Glenberg, M.: "Immersive VR and education: Embodied design principles that include gesture and hand controls", *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 5, No. 81 (2018)
- (33) Plavšić, M., Duschl, M., Tönnis, M. et al.: "Ergonomic design and evaluation of augmented reality based cautionary warnings for driving assistance in urban environments", *Proceedings of International Ergonomics Association* (2009)
- (34) LEXUS: "Advanced Display", [https://lexus.jp/models/ls/features/advanced\\_display/](https://lexus.jp/models/ls/features/advanced_display/) (参照 2018.12.26)
- (35) Tonnis, M., Lange, C. and Klinker, G.: "Visual longitudinal and lateral driving assistance in the head-up display of cars", *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 1-4 (2007)

## 著者紹介

### 山元 翔



2009 年広島大学工学部卒。2014 年同大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。同年同大学特任助教授を経て、2015 年より近畿大学助教。2017 年より、近畿大学講師。現在に至る。知的学習支援システムの研究、特に教科学習、特別支援や自動車の運転を対象とした研究などに従事。教育システム情報学会、人工知能学会、日本教育工学会、電子情報通信学会、自動車技術会各会員。