

プロジェクションマッピングによる 拡張現実を利用した教材の開発

四方茉莉^{†1} 加藤直樹^{†2}

概要: 小学校理科は、児童が具体的な体験を通して自然の事物・現象について実感を伴った理解ができることを目指している。しかし、小学校理科では目視できない事物・現象を学習題材として扱うこともある。ここで、具体的な体験が困難な題材を扱うときに AR を利用することで、実感を伴った理解ができるのではないかと考えた。本稿では、AR 教材が適す題材を検討するための指針の検討、およびその指針から抽出した題材で活用する AR 教材の提案と開発について報告する。

キーワード: 拡張現実, プロジェクションマッピング, 小学校, 理科, 体育

A development of Learning materials using Augmented Reality by Projection Mapping

MAKOTO SHIKATA^{†1} NAOKI KATO^{†2}

Abstract Elementary school's science aim at what students understanding with real feeling about things and phenomenon of nature through realistic experience. However, unseen things and phenomenon are treated as learning subjects in elementary school's science. When using AR ; We thought that students understand with real feeling. This paper describe the guideline for examination of the subject which use of AR learning materials is effective and development of the AR learning materials for subject extracted with the guideline.

Keywords: Augmented Reality, Projection Mapping, Elementary school, Science, Physical Education

1. はじめに

現在の学校教育では理数教育の充実が求められている。現行の小学校学習指導要領が旧小学校学習指導要領から改訂される際、中央教育審議会の答申では教育内容に関する主な改善事項の1つに「理数教育の充実」を掲げた[1]。これは、日本における人口減少や少子高齢化の加速、人口構造の変化、環境問題等の課題の克服のために科学技術に求める役割が増えており、このため、次代を担う科学技術系人材の育成が重要になり、学校教育において科学技術の土台である理数教育の充実が求められたが、国際的に比較すると子どもたちの理科に対する学習意欲が低い状況にあることが課題としてあったためである。

こうした課題を受け、現行小学校学習指導要領理科では“自然に親しみ、見通しをもって観察、実験などを行い、問題解決の能力と自然を愛する心情を育てるとともに、自然の事物・現象について実感を伴った理解を図り、科学的な見方や考え方を養う。”と目標を示している。

ここでいう“実感を伴った理解”とは、“具体的な体験を通して形づくられる理解”という側面があり、理科における

「体験」とは、観察、実験、栽培、飼育、ものづくりなどが挙げられる。また、文部科学省発行の『小学校理科の観察、実験の手引き』では、理科は“「体験」を重視する教科である”とも記されている[2]。

そして、平成 29 年 3 月に公示された新学習指導要領の理科改定の趣旨では“生徒自身が観察、実験を中心とした探求の過程を通じて課題を解決したり、新たな課題を発見したりする経験を可能な限り増加させていくことが重要であり、このことが理科の面白さを感じたり、理科の有用性を認識したりすることにつながっていくと考えられる。”と記されている。このことから今後も小学校理科では「体験」が重視されていくと考えられる。

しかし、学校現場での理科の指導において具体的な体験が難しい題材もある。そのような題材を扱うときは、プリントや映像等の指導になってしまい、具体的な体験ができず、理科に対して面白さを感じない、実感を伴った理解が困難になるといった問題が生じる。ここで、拡張現実 (AR: Augmented Reality) を利用することで、児童が疑似体験でき、理科に対して面白さを感じたり、実感を伴った理解ができるのではないかと考えた。

^{†1} 東京学芸大学大学院 教育学研究科
Graduate School of Education Tokyo Gakugei University

^{†2} 東京学芸大学
Tokyo Gakugei University

また、小学校理科以外の校種や教科でも、目視できないものを扱う単元があり、ARによる疑似体験が適する題材があるのではないかと考えた。

本稿では、ARを利用する教材が適す題材の検討指針を定め、そこから抽出した題材での教材の提案、開発について述べる。

2. AR教材の概要

本研究で提案するAR教材の概要を図1に示す。本研究では現実世界に存在する物体等をセンシングし、センシングした物体等に関連する情報を投影機で現実世界に投影し重畳するプロジェクションマッピングによるARを利用する。

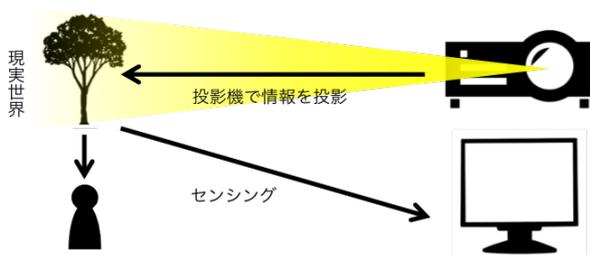


図1 AR教材の概要

Figure 1 Outline of AR learning materials.

2.1 プロジェクションマッピングによるAR

奥村氏[3]によると、ARの利用形態はスマホやタブレット PC (以下、タブレット端末)、シースルー型ヘッドマウントディスプレイ、電子黒板 (以下、ディスプレイ)、プロジェクションマッピングの4種類を挙げている。しかし、シースルー型ヘッドマウントディスプレイについて“シースルー型ヘッドマウントディスプレイではカメラと肉眼の位置が異なるだけでなく、装着する人によって更に微妙にずれるため、利用は難しいと考えられる”と述べていることから、実質、ARの利用形態はタブレット端末、ディスプレイ、プロジェクションマッピングの3種類と考えられる。

タブレット端末を利用したAR教材は、学習者がタブレット端末を現実世界に存在する物体等にかざすと、端末の画面上にかざした物体等に関連する情報を重畳し見られるものが多い。このような端末をかざして見る動作は学習者

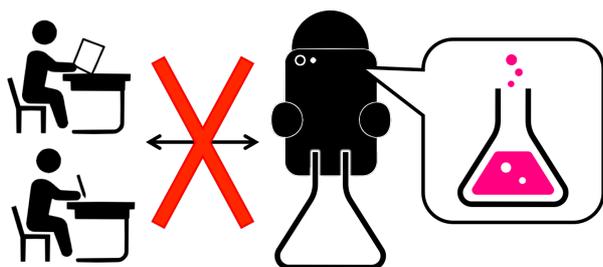


図2 学習者の手が塞がれる

Figure 2 Students are tied up

の手を塞いでしまい、重畳された情報を見ながら教科書を見る、ノートに書く等の動作に支障が出てしまう (図2)。これは学習者にとって負担となる。

また、ディスプレイを利用したAR教材は、タブレット端末を利用することで起こる学習者の手を塞いでしまう問題点はないが、カメラで撮影している場所と、撮影している場所を映し出しているディスプレイを置いている場所の不一致が起き、現実世界と拡張した世界の視線による不一致が起こる。実験をしている場面をセンシングするときなどで、手元ではなくディスプレイを見ながら操作を行わなければならない (図3)。

そこで、本研究では、学習者の手を塞いでしまう問題と、現実世界と拡張した世界の視線の不一致が起こらないプロジェクションマッピングを利用する。現実世界に存在する物体等をセンシングし、そのセンシングした物体等に関連する情報を投影機で現実世界に投影し重畳することで、目に見えない情報を表示することができるため、学習者の手がふさがれることはなく、重畳された情報を見ながら教科書を見る、ノートに書く等の動作を支障なくすることができる。また、現実世界に重畳する情報を投影するので、現実世界と拡張した世界の視線による不一致が起こることもない (図4)。

以降、本稿では単にARと記した場合はこの「プロジェクションマッピングを利用形態とするAR」をさすこととする。

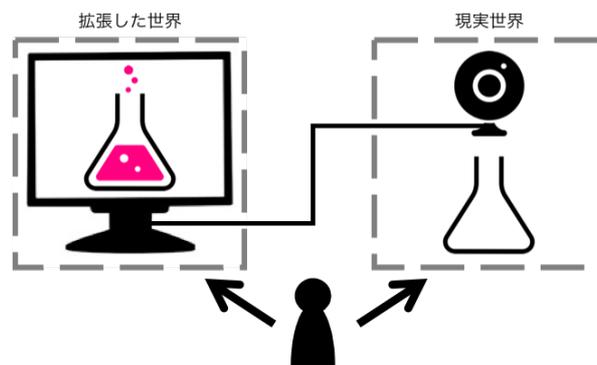


図3 学習者の視線の不一致

Figure 3 Students watch different direction

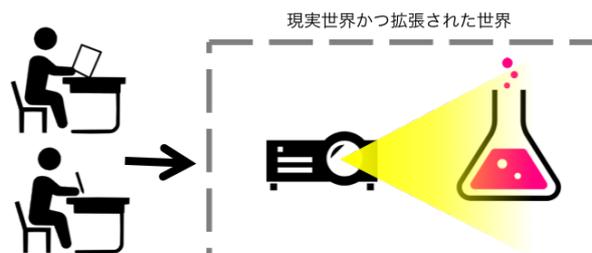


図4 学習者の手は塞がれず、視線も一致する

Figure 4 Students are free, and watch same direction

2.2 AR を利用する優位性

疑似体験ができるという点では、AR 以外にも仮想現実（VR：Virtual Reality）や拡張仮想感（AV：Augmented Virtuality）がある。

VR や AV を利用した教材は、VR では自らが仮想空間にいるように、AV では現実世界に組み込んだように目の前に仮想オブジェクトを表示し、それらへの操作を可能にして疑似体験ができるようにする。

VR や AV はヘッドマウントディスプレイ（HMD：Head Mounted Display）等を用いて、仮想オブジェクトを見せている。表示された仮想オブジェクトを複数人で共有するためには、その全員が HMD を装着しなければならない。また、市販されている HMD の推奨年齢は 12～13 歳以上が多く、子供が 3D オブジェクトを見ることによるリスクの可能性が危惧されている[4][5]。AR ではこれらの問題が生じない。

そして、VR や AV で表示された仮想オブジェクトは実際に掴むや握るといった動作ができない。近年は、仮想オブジェクトの触感を生じさせるハプティックデバイス（HD：Haptic Device）の研究や実用化も進んでおり、振動や超音波で触感フィードバックし仮想オブジェクトに触れたように感じさせることもできるが、容易に導入できるものではない。しかし、AR であれば、現実世界でセンシングした物体等にプロジェクションマッピングをするため、重畳した情報に触れることはできないが、情報を重畳したオブジェクトに触れることはでき、加えて掴むや握るといった動作もできる。

これらのことから、AR は VR や AV よりも学校の教材として優れていると考え、AR を利用することとした。

3. AR 教材が適す題材の検討

AR 教材が適す題材を検討するための指針として、「教科からの視点、AR からの視点の 2 点を満たすものを題材とする」ことを提案する（図 5）。

本研究ではこの指針に従って、題材を抽出する教科の単元ごとに検討していき、教科からの視点に当てはまる題材のうち、AR からの視点にも当てはまる題材を抽出する。

表 1 検討指針から抽出された題材

Table 1 Subjects are extracted from the guideline

校種	教科	学年	題材	重畳する情報
小学校	理科	4	人の体のつくりと運動	筋肉
小学校	理科	4	電気の働き	電流
小学校	理科	6	人の体のつくりと働き	臓器
小学校	体育	中学年 高学年	器械運動 跳び箱運動	踏み切り位置 手をついた位置
小学校	体育	中学年	走・跳の運動 高跳び	足跡 踏み切り位置
中学校	理科	2	電流と磁界	磁力線

3.1 教科からの視点

教科からの視点は、題材を検討する教科の内容に着目する視点である。

学習において「目視できないもの」を扱う場合、学習者が「目視できないもの」を想像することで学習内容の理解を促す。また、指導者が「目視できないもの」を説明するとき、指導者自身の想像をもとに説明する。このとき、学習者と指導者の想像が一致せず、指導において齟齬が生じてしまい、学習者の理解が困難になってしまう可能性がある。

ここで、従来、学習者や指導者の想像に頼っていた「目視できないもの」を AR によって可視化することができれば、学習者と指導者の想像に齟齬が生じることがなくなり、指導において「目視できないもの」に対して共通認識することができ、学習者の理解を促すことが可能となる。このことから、教科からの視点では「学習内容の理解を促すときに目視できないものを扱う」ことに着目することとした。

3.2 AR からの視点

AR からの視点は、センシング技術と投影技術に着目する視点である。

AR は現実世界から知覚情報をセンシングし、それをもとに現実世界から得られる以上の情報を付加する技術である。そのため、センシング技術の面では「センシングする物体等の位置情報を取得することができる、もしくは、セ

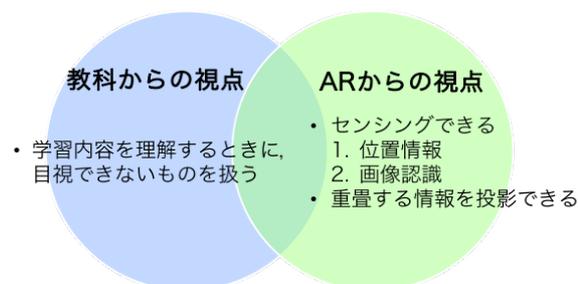


図 5 題材の検討で着目する視点

Figure 5 The guideline for examination of the subject which AR learning materials

ンシングする物体等を画像認識することができる」つまり「センシングができる」ことが必要である。

投影技術の面では、プロジェクションマッピングをするために「センシングした物体等に関連する情報を、投影により重畳する場所がある」ことが必要である。

これらのことから、AR の視点では「センシングができる」、「重畳する情報を投影できる」の2点に着目する。この2点を満たすものが、AR からの視点に当てはまる題材とする。

4. AR 教材が適す題材の検討と設計

前章で提案した検討指針をもとに、小学校理科、小学校体育の検討を行った。抽出された題材を表1に示す。本章では、検討指針から抽出された題材についての説明と、その題材で活用できるAR教材の提案をする。

4.1 小学校理科第4学年「人の体のつくりと運動」

4.1.1 AR教材が適すかの検証

小学校理科第4学年「人の体のつくりと運動」の単位では、腕を曲げたり・伸ばしたりしたときの筋肉の様子を触ったり、目視で観察する。しかし、「腕の筋肉」は実際に目視することができないため、これは「教科からの視点」に当てはまる。

また、腕をセンシングし、腕の筋肉の画像を腕に投影することができるので、これは「ARからの視点」に当てはまる。

これらのことから「人の体のつくりと運動」はAR教材が適す題材に該当する。

4.1.2 AR教材デザイン

児童の腕の動きをセンシングし、その動きに合わせて腕に筋肉の画像をプロジェクションマッピングし、筋肉の動きを可視化する(図6)。これにより、目視できない筋肉の動きを、腕を触りながら観察することを可能にする。

4.2 小学校理科第4学年「電気の働き」

4.2.1 AR教材が適すかの検証

小学校理科第4学年「電気の働き」の単位では、回路の乾電池の向きを変えて、モーターの回る向きや電流の流れ

る向きがどう変化するか観察する。このとき、観察する「電流」は実際に目視することはできないが、検流計を回路に繋げることで可視化することができる。しかし、「平成30年度 全国学力・学習状況調査 報告書【小学校/理科】」[6]によると、電流について出題された問題は課題があり、検流計による「電流」の可視化は不十分であると考えられ、これは「教科からの視点」に当てはまる。

また、回路をセンシングし、電流の流れる向きを表す矢印を、回路を置いている机等に投影することができるので、これは「ARからの視点」に当てはまる。

これらのことから「電気の働き」はAR教材が適す題材に該当する。

4.2.2 AR教材デザイン

実験で使う回路をセンシングし、導線に沿って電流の流れる向きを表す矢印を回路を置いている机等にプロジェクションマッピングし、電流の流れる向きを可視化する(図7)。これにより、目視できない電流の流れる向きを、実験をしながら観察することを可能にする。

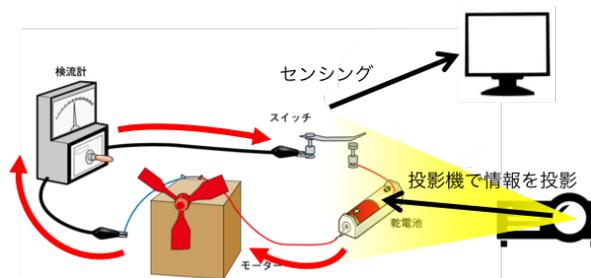


図7 「電気の働き」のAR教材の機能
Figure 7 Function of AR learning materials

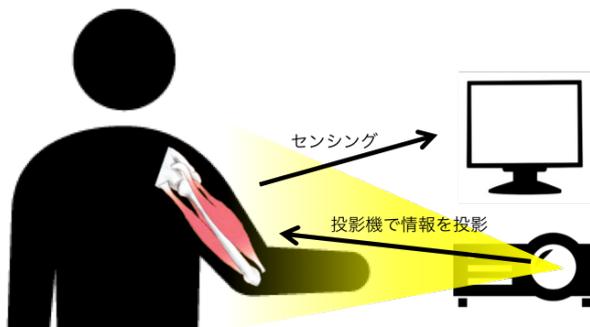


図6 「人の体のつくりと運動」のAR教材の機能
Figure 6 Function of AR learning materials

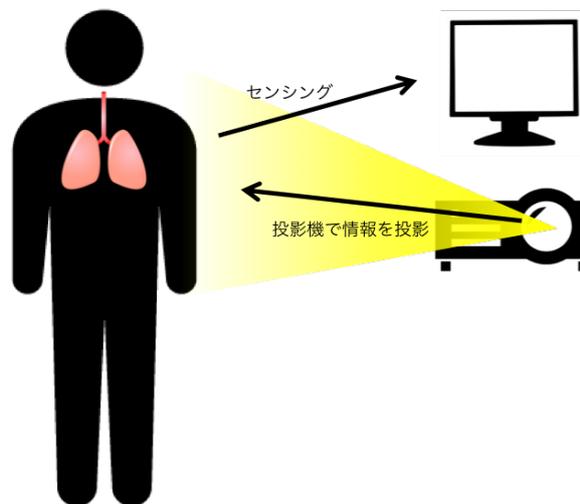


図8 「人の体のつくりと働き」のAR教材の機能
Figure 8 Function of AR learning materials

4.3 小学校理科第6学年「人の体のつくりと働き」

4.3.1 AR教材が適すかの検証

小学校理科第6学年「人の体のつくりと働き」の単位では、人体解剖模型や図鑑などを用いて、自分の体内には様々な臓器があること、それらの臓器の体内での位置を確認する。しかし、「臓器」は実際に目視することができないため、これは「教科からの視点」に当てはまる。

また、体をセンシングし、臓器の画像を体に投影することはできるので、これは「ARからの視点」に当てはまる。

これらのことから「人の体のつくりと働き」はAR教材が適す題材に該当する。

4.3.2 AR教材デザイン

児童の体をセンシングし、その体格に合わせて臓器の画像を体にプロジェクションマッピングし、臓器を可視化する(図8)。これにより、目視できない体内での臓器の位置を自分自身の体で確認することを可能にする。

4.4 小学校体育中学年・高学年「器械運動 跳び箱運動」

4.4.1 AR教材が適すかの検証

小学校体育中学年・高学年「器械運動 跳び箱運動」の単位では、基本的な開脚跳びを中学年では跳べるように取り組み、高学年では安定して跳べるように取り組む。このとき、開脚跳びを習得するポイントとして「両足を揃えて踏み切ること」「跳び箱の奥の方に手をつくこと」の2点が挙げられる。しかし、試技後に踏み切り位置や手をついた位置を目視することはできない。これは「教科からの視点」に当てはまる。

また、児童の動きをセンシングし、踏み切り位置を踏み台に、手をついた位置を跳び箱に投影することはできるので、これは「ARからの視点」に当てはまる。

これらのことから「器械運動 跳び箱運動」はAR教材が適す題材に該当する。

4.4.2 AR教材デザイン

児童の動きを真横からセンシングし、児童が試技で踏み

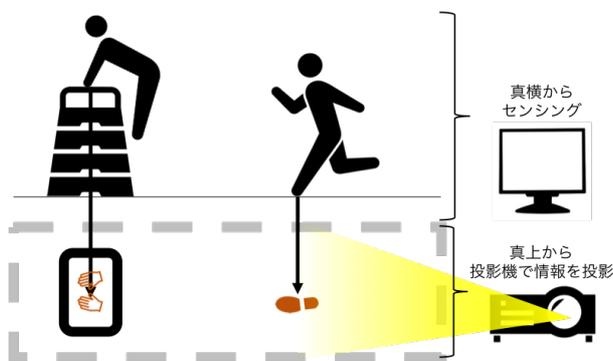


図9 「器械運動 跳び箱運動」「走・跳の運動 高跳び」のAR教材の機能

Figure 9 Function of AR learning materials

切った位置や手をついた位置を踏み台や跳び箱に真上からプロジェクションマッピングし可視化する(図9)。これにより、児童が試技後に自身の踏み切り位置や手をついた位置を確認することを可能にする。

4.5 小学校体育中学年「走・跳の運動 高跳び」

4.5.1 AR教材が適すかの検証

小学校体育中学年「走・跳の運動 高跳び」の単位では、3~5歩の短い助走から踏み切り足を決めて調子よく踏み切り、高く跳ぶことに取り組む。高跳びの動きのポイントとして「助走りズム・踏み切りのタイミングを掴むために声かけをする」「目印を置いて踏み切りやすくする」の2点が挙げられる。しかし、試技後に助走位置や踏み切り位置を目視することはできない。これは「教科からの視点」に当てはまる。

また、児童の動きをセンシングし、助走した足跡や踏み切り位置を体育館の床に投影することはできるので、これは「ARからの視点」に当てはまる。

これらのことから「走・跳の運動 高跳び」はAR教材が適す題材に該当する。

4.5.2 AR教材デザイン

児童の動きを真横からセンシングし、児童が助走した足跡や踏み切り位置を床に真上からプロジェクションマッピングし可視化する(図9)。これにより、児童が試技後に自身の助走や踏み切り位置を確認することを可能にする。

4.6 中学校理科第2学年「電流と磁界」

4.6.1 AR教材が適すかの検証

中学校理科第2学年「電流と磁界」の単位では、棒磁石や電流の流れているコイルの回りに鉄粉を撒いてできた模様や、いくつか方位磁石を置いてその動きを観察する。このとき、観察する「磁界」を目視することはできないが、鉄粉でできた模様や、方位磁石の動きから磁力線や磁界の向きを可視化することができる。しかし、「平成13年度小中学校教育課程実施状況調査」[7]「平成15年度小中学校教育課程実施状況調査」[8]によると、「電流と磁界」について出題された問題は課題があり、鉄粉や方位磁石による「磁界」の可視化は不十分であると考えられ、これは「教科か

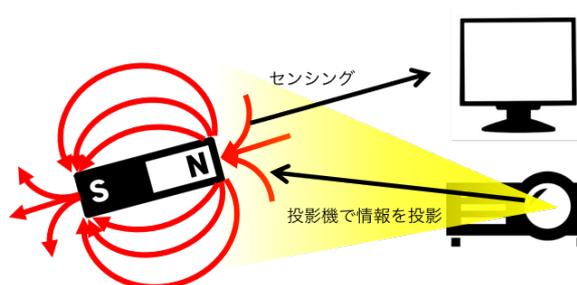


図10 「電流と磁界」のAR教材の機能

Figure 10 Function of AR learning materials

らの視点」に当てはまる。

また、棒磁石やコイルをセンシングし、磁力線を表す矢印を、棒磁石やコイルを置いている机等に投影することはできるので、これは「AR からの視点」に当てはまる。

これらのことから「電流と磁界」は AR 教材に適す題材に該当する。

4.6.2 AR 教材デザイン

実験で使う棒磁石や電流の流れているコイルをセンシングし、磁力線を表す矢印を棒磁石やコイルを置いている机等にプロジェクションマッピングし、磁界や磁界の向きを可視化する(図 10)。これにより、目視できない磁界や磁界の向きを実験しながら観察することを可能にする。

5. AR 教材の試作

前章で述べた抽出された題材から、小学校理科第 4 学年「人の体のつくりと運動」の AR 教材の試作を行った。試作した AR 教材を使用している様子を図 11 に示す。

5.1 開発環境・実行環境

試作するにあたり、AR を実装するために AR 実装ライブラリ NyARToolkit for processing (ver. 3.0.2) を用いて、開発言語に Processing (ver. 3.3) を用いた。実行環境として、web カメラは MacBook Pro (ver. 10.13.6) に既存で内蔵されている FaceTime HD Camera を使用し、macOS High Sierra 上で動作するアプリケーションとして実装した。

5.2 重畳するオブジェクト

本教材では筋肉の画像を重畳する。本教材を活用する「肩から肘にかけての腕の筋肉」の様子を観察するため、肩から肘にかけての筋肉の様子がわかり、腕の骨が描かれることで内側の筋肉と外側の筋肉がわかりやすいものにした。また、4.1 節で述べたように、児童が腕を曲げたり・伸ばしたりしたときの筋肉の様子を観察するため、腕を伸ばしたときの「内側の筋肉が緩み、外側の筋肉が縮んでいる状態」から、腕を曲げたときの「内側の筋肉が縮み、外側の筋肉が緩んでいる状態」に、腕の曲げ具合によって表示



図 11 AR 教材を使用した様子
Figure 11 Using the AR learning material

する画像を変える必要があり、筋肉の状態が異なる画像を複数枚用意した。

5.3 腕のセンシング

腕の位置と形状を取得するために、肩、肘、手首の位置 3 点をセンシングする。

肩と肘は AR マーカを取り付けてセンシングし、手首はリストバンド等を装着し色検出でセンシングできるようにした。これは、手首に AR マーカを取り付けると、腕を曲げるときに手首に取り付けた AR マーカが回転してしまい、取得した位置情報に誤差が出てしまうからである。

5.4 筋肉の画像の重畳

5.4.1 筋肉の画像の大きさや傾きの決定

筋肉の画像を腕に重畳する上で必要な要素を図 12 に示

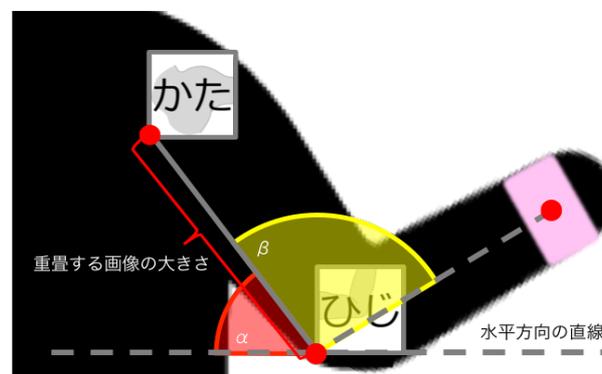


図 12 画像を重畳するうえで必要な要素

Figure 12 Values used to calculate

表 2 重畳する筋肉の画像

Table 2 Superimposition image

なす角 β の範囲	筋肉の画像
$PI*31/33 < \beta \leq PI$	
$PI*29/33 < \beta \leq PI*31/33$	
⋮	⋮
$PI*21/33 < \beta \leq PI*23/33$	
⋮	⋮
$PI*13/33 < \beta \leq PI*15/33$	
$PI*11/33 < \beta \leq PI*13/33$	

す。投影する画像の大きさと傾きは肩と肘に取り付けた AR マーカから取得した位置情報から算出する。各マーカの左下頂点を結んだ線分の長さを画像の横幅の長さとし画像の大きさを決める。また画像の傾きは、その各マーカの左下頂点を結んだ線分と水平方向の直線とのなす角 α で画像の傾きを決める。

筋肉の形状は腕を曲げた角度によって変わるため、表示する画像をその角度に応じて変える (表 2)。肩と肘のマーカの左下頂点を結んだ線と、肘のマーカと手首の色検出により取得した座標を結んだ線とのなす角 β の値の範囲によって、表示する画像を決める。

5.4.2 筋肉の画像の投影

腕の位置、大きさと傾きを用いて、腕の画像を配置した黒背景の画像 (エラー! 参照元が見つかりません。) を生成し、プロジェクターで投影する。このとき、web カメラで取得した映像から取得できる AR マーカの位置情報の値の座標系 (以下、マーカ座標系) (図 14) は、投影する映像の座標系 (以下、スクリーン座標系) (図 15 (a)) と異なるため、座標系をマーカ座標系からスクリーン座標系に変換し位置情報の座標を引き継ぐ必要がある。

図 15 に web カメラから取得した映像をマーカ座標系からスクリーン座標系に変換したあとの、それぞれの表示画面において位置情報の値の引き継ぎに必要な要素を示す。



図 13 投影する映像 (左) とカメラで取得している映像 (右)
Figure 13 Peojection image (left) and camera image (right)

(1) 座標系の変換

マーカ座標系からスクリーン座標系への変換方法について記す。

スクリーン座標系は表示画面の左上頂点を座標(0,0)とし、x 軸は右に進むほど値が増加し、y 座標は下に進むほど値が増加する。

マーカ座標系は表示画面上の midpoint 座標を(0,0)とし、x 軸は midpoint から右に進むと正、左に進むと負、y 軸は midpoint から下に進むと正、上に進むと負となる。

このマーカ座標系をスクリーン座標系に変換するためにメソッド screen2ObjectCoordSystem() を使う。このメソッドにより、AR マーカの物理的な横幅サイズを基準とした web カメラから取得した映像の表示画面サイズ (図 15 (b) の横幅 mar_wid, 縦幅 mar_hei) を取得することができ、表示画面の左上頂点の座標を(0,0)とするスクリーン座標系に変換することができる。

(2) 位置座標の値の引き継ぎ

スクリーン座標系に変換した web カメラから取得した映像の位置情報の値を、投影する映像の表示画面に引き継ぐ方法について記す。

図 14 (b) 上にある AR マーカの左下頂点の座標

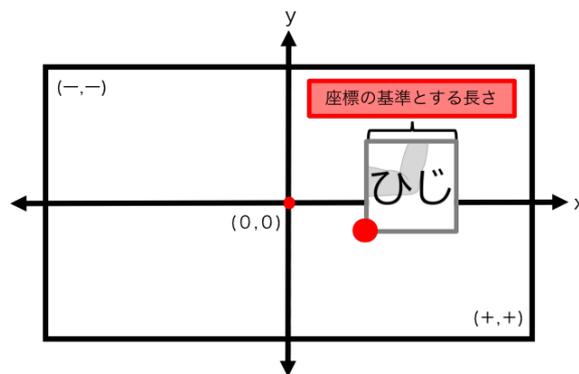
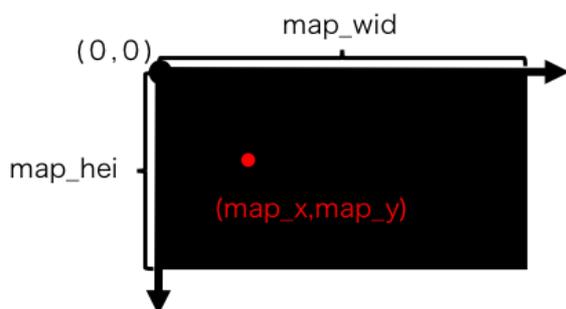
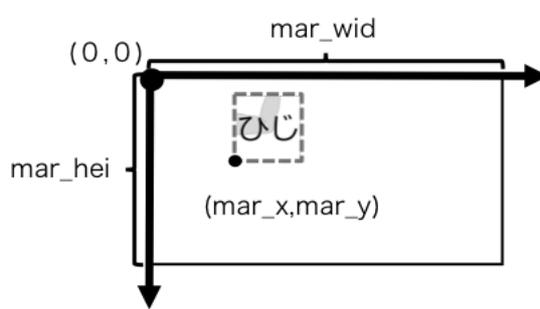


図 14 マーカ座標系
Figure 14 The marker coordinate system



(a) 投影する映像の表示画面
(a) Display of projectin image



(b) web カメラで取得した映像の表示画面
(b) Display of camera image

図 15 位置情報の引き継ぎに必要な要素

Figure 15 Values used to calculation of position information

(mar_x,mar_y)を, 図 14 (a) 上に引き継いだ座標を (map_x,map_y)とする. このとき, 引き継いだ左下頂点の x 座標は $map_x = (map_wid \times mar_x) / mar_wid$ となる. 同様に y 座標も $map_y = (map_hei \times mar_y) / mar_hei$ で求められる.

6. おわりに

本稿では, 小学校理科等での学習における体験が困難な題材においても実感を伴った理解ができるように AR を利用することを提案し, AR 教材が適す題材を検討するための指針の検討, およびその指針から抽出した題材で活用する AR 教材の提案と開発について述べた.

AR 教材が適す題材を検討するための指針として, 「教科からの視点, AR からの視点の 2 点に共通するものを題材とする」ことを提案した. そして, その検討指針をもとに小学校理科, 小学校体育, 中学校理科の AR 教材が適す題材を検討した. また, 抽出された題材から小学校理科第 4 学年「人の体のつくりと運動」で活用できる AR 教材を試作した.

今後は, 開発した AR 教材を活用して実証実験を行い, 児童の学習内容の理解, また興味関心の変化から, AR 教材の有用性を検証することが課題である. また, 試作した AR 教材の有用性の検証結果を踏まえ, AR 教材が適す題材を検討するための指針の有用性を検証していきたい.

参考文献

- [1] 中央教育審議会: 幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善について(答申)(2008)
- [2] 文部科学省: 小学校理科の観察, 実験の手引き(2011)
- [3] 奥村英樹: AR による理科教材の表現に関する一考察, 四国大学紀要 Ser.A 人文社会科学編-No.45: 1-7 (2015)
- [4] 3D コンソーシアム: 人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン(2010)
- [5] 任天堂株式会社: ニンテンドー3DS の 3D 映像(立体視)についてお伝えしたいこと.
<https://www.nintendo.co.jp/support/3ds/info.html>(参照 2019-02-05)
- [6] 国立教育政策研究所: 平成 30 年度 全国学力・学習状況調査 報告書【小学校/理科】(2018)
- [7] 国立教育政策研究所: 平成 13 年度小中学校教育課程実施状況調査 (2003)
- [8] 国立教育政策研究所: 平成 15 年度小中学校教育課程実施状況調査(2005)