

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32615

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05750・19K20946

研究課題名（和文）小学校における教科内プログラミング活動に適した対象タンジブル協調環境の開発と評価

研究課題名（英文）Development and evaluation of object-tangible collaborative environment for intra-curricular computer programming activity in elementary school

研究代表者

青木 浩幸（AOKI, Hiroyuki）

国際基督教大学・教養学部・助教

研究者番号：90826439

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：プログラミング活動が従来の小学校の体験的で協調的な教育スタイルと異なる問題、教科内のプログラミングが教科の学びのメカニズムに関連していない問題の解決策として、空間拡張現実（SAR）技術により学習者の実物体験と仮想体験を融合させた協調的なプログラミング環境の開発に取り組んだ。プログラムの実行主体が相互作用する対象を実物に採用する「対象タンジブル」の考え方を提唱し、既存の子ども向けプログラミング教材や教科のプログラミング学習の過程をその考え方で分析することによって、教科の学びにおいて促進させる実物体験と試行錯誤を整理し、プログラミング言語に求められる機能と対象タンジブル教材の事例を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
コンピューティング活動を教育用途に広げる可能性との方策の探究。成果物を得るためのプログラミングを発展させ、教科の内容を理解を目的とした試行錯誤を促すプログラミングに必要なインターフェイスのデザインと、試行錯誤を前提とした教科の学びのメカニズムの解明。抽象的なプログラミング活動では適応できる子どもが限定される恐れがあったが、具体性とティンカリングの特性の両立により、より多くの学習者に適応できる学びに転換することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：As a solution to the problems of programming activities being different from the traditional hand-on and cooperative educational style of elementary school, and of programming in the subject not being related to the learning mechanism of the subject, this study worked on the development of a cooperative programming environment that integrates learners' real and virtual experiences through spatial augmented reality (SAR) technology. This study proposed the concept of "object tangibility," in which the object with which the program executor interacts is the real thing, and by analyzing existing programming materials for children and the process of learning programming in a subject area based on this concept, this study have organized real experiences and trial-and-error(tinkering) to facilitate learning in the subject area. This study have devised examples of functions required of programming languages and object tangible learning topics.

研究分野：教育学

キーワード：プログラミング 教科教育 ICT活用教育 具体的操作期 空間拡張現実 ティンカリング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 教科の学びのための子ども向けプログラミングの需要

急速に進むデータ駆動型社会や AI 活用の広がりにより、コンピュータを理解し主体的に利用する態度を育てる教育の必要性が高まっている。2020 年度施行の新学習指導要領から小学校教育課程でプログラミングが必修化された(文部科学省, 2017, p.22)。ここで想定されるプログラミングは算数や理科のような従来の教科の中に組み込まれており、プログラミングを通して教科の学びを進める意図が込められている。

しかしながらプログラミングは本来ソフトウェア開発のために発展してきたもので、子ども向けのデザイン修正は施されたものの、本質的メカニズムは大きく変わっていない。結果、現在実施されているプログラミング活動は従来の小学校における体験的・協調的な学習スタイルとは異なっている。これでは発達段階に適した学びにならない懸念がある。プログラミングの目的もソフトウェア開発自体ではなく、コンピュータが試行錯誤を支援する教科学習であることも異なり、新しいプログラミングのメカニズムが望まれている。

(2) 子どもに適切な仮想現実/拡張現実(VR/AR)の必要性

VR ゴーグルやプロジェクションマッピングの機器や技術の発展により、教育コンテンツに VR/AR 技術が広がりつつある(Bacca et al., 2014; Saltan & Arslan, 2017)。その中で、小学生児童は身体器官と知覚の発達途中であるために、正常な発達を阻害する使用状況避ける配慮が必要である。物理的制約を取り除くことができる VR/AR 技術の利点を活かしながら、正常な発達を支える表現の知見が求められている。

子ども向けの活動に実物を用いることは常套手段であり、有名な LOGO のタートルロボットの実践から、現在でもロボットプログラミングは幅広い年代に人気の題材である。このロボットには、ヒューマノイド型だけでなく車型移動体や、必ずしも移動しないガジェットを作るフィジカルコンピューティングも含まれている。実物を用いない例としてプロジェクションマッピング技術の教育実践を見ることができる(例: WizeFloor. Alexandra Institute, n.d.)。この現実世界に仮想現実を重ねる空間拡張現実技術(Schmalstieg & Höllerer, 2016)は、裸眼による体験、実物の利用、複数人で取り組む協調性といった子ども向け活動に有利な特徴がある。

2. 研究の目的

(1) 状況学習的アプローチによる体験的・協調的活動なプログラミングを可能にする子ども向けの空間仮想現実環境開発。特に、触ることができる(=タンジブル)実物と仮想表現の組み合わせ方として新しい形態である「対象タンジブルインターフェイス」の実現

(2) 教科の学びのメカニズムを考慮しながら仮想現実における試行錯誤の利点を活かしたプログラミング・コンピューティング活動の事例開発と活動設計指針の提案

3. 研究の方法

(1) 空間拡張現実による対象タンジブルインターフェイス技術の検討

空間拡張現実の開発のハードウェア面では、空間に仮想映像を投影する出力装置としての短焦点プロジェクター、人間の動きを取り入れる入力装置としてデプスカメラや AR マーカーやドットパターンを認識する光学センサー、学習対象に応じた実物教材から構成され、これらを学習空間に組み上げて活動環境を構築する。ソフトウェア面では、プロジェクションマッピングを実現する映像変換技術、現実世界の実物の位置や人間の動きを読み取る映像認識技術、プログラミング環境を構築するプラットフォームの選定と実装を行う。この両面による空間拡張現実環境の開発と性能評価を反復しながら、複数の形態の検討と改良を図る。

(2) 既存の体験的プログラミング教材の分析

子ども向け体験的プログラミング教材の知見を開発に役立てるために、既存製品の分析を行った。大学生のアルバイトを動員し、プログラミング教材を体験し、その特徴と性能について調査した。調査対象として、学研の『デジロボ 01』(機械式車型移動ロボット)、スイッチエデュケーションの bitPak:Minicar、kitronik の MOVE mini MK2 (共に BBC micro:bit 制御の移動ロボット)、ソニー・インタラクティブエンターテインメントの『GoGo ロボットプログラミング/ロジボの秘密』(小型ロボット玩具)を取り上げた。

(3) 教育内容の分析と教材開発

教科学習につながるプログラミング活動の検討を行い、教材開発を行った。文部科学省の学習指導要領で直接記述されている小学校算数・理科の教科の調査とともに、従来の授業で行われている学習活動から学習概念の学びを引き出すメカニズムを考察した。この分析結果をもとにプログラミング活動を設計、教材の開発を行った。

4. 研究成果

(1) 空間拡張現実による対象タンジブルインターフェイス技術の検討

具体的操作期の子どもに適している「実体」による体験活動と、映像技術による仮想的体験を組み合わせる方針を考慮するにあたり「対象タンジブル」の概念を提唱した。

従来の子ども向けプログラミング実践で触れる「実体」の使い方を調べた結果、ロボットプログラミングのようにプログラムの命令実行主体が触れる(タンジブル)実体である「主体タンジブル」、プログラムを構成する命令部品が触れる実体(ブロックやカード)でできている「プログラム(コード)タンジブル」の2つが見られたが、これらは試行錯誤による学ぶには適していない。命令の実行主体が実体であると、実世界の不確定要素によって正確な動きができないこと、させたい動作を子どもが発想しても、その自由な発想を実現するのにコストや技術が必要で、発想を実現させるところまで到達できない。またプログラムが実体であると書き直す度に過去のプログラムは失われ、振り返りをするのが困難であり、安心して試行錯誤できなくなる。そこで、実物にできる要素として残された、プログラムの実行主体がインタラクションする「対象」を「触れる実体」とすることを「対象タンジブル」と名づけた。対象は主体と違って自分で動くものではないので、動きの正確さや特別な機能を必要としない。プログラムの主体が取り組む活動にかかる制約を「実体」から読み取ることができる。

環境的実物に映像表現を重畳した環境が空間拡張現実である。協調活動として子ども3人が円卓を一緒に取り囲んでプログラミング活動ができる状況を想定した。空間拡張現実によるコンピューティング環境の設計と試作を繰り返し、性能と機能について検討した。検討した形態はプロジェクションマッピング、インタラクティブサーフェス(背面投影)、机上投影の3つである。それぞれの環境の仕組みと処理系・使用技術、メリット、デメリットについて表1に示す。

表1. 空間拡張現実3形態の検討

形態	プロジェクションマッピング	インタラクティブサーフェス (背面投影)	机上投影
映像出力の仕組み	短焦点プロジェクタ3台を机上上方に配置し投影(机上90cm上方の位置から3台のOptoma ML750STS1で投影)	超短焦点プロジェクタによりガラステーブルに貼った半透明スクリーンに背面投影(スクリーンから16cmの位置からRICOH WX4153Nで投影)	超短焦点プロジェクタを机上投影スタンドで固定し投影(Maxell MC-TW3506Jでスクリーンから48cmの位置から投影)
操作入力の仕組み	デブスカメラ(Intel Realsense D435)を用いた、可視光線と赤外ドットパターンによる机上物体認識	赤外線カメラによりガラス面に接触している対象物や指の赤外線反射を取得	机上に敷いたシートに印刷されたドットパターンを読み取り絶対位置と方向を検知(ソニー・インタラクティブエンターテインメント toio)
処理系・使用技術	OpenCV(Python), Intel Realsense SDK	Unity(C#), AR Foundation	toio.js(javascript)
メリット	立体の対象物の側面に映像を投影できる。ジェスチャーによる操作が可能	ARマーカーブロックによる実物による操作感と指による簡便な操作。対象物の正確な形を取得できる。背面投影のため映像に対象物や手の影ができない	IoTブロックによる実物の操作感、高精度の位置と回転と押下操作(決定)が可能。IoTブロックから電子音のフィードバックが得られる。IoTブロックは移動能力があるのでロボットプログラムの出力としての利用も可能。市販製品の組み合わせで構成されており、普及に適している。
デメリット	プロジェクタを空中に配置する仕組みを要する。小型プロジェクタでは光量が不足。3台のプロジェクタの映像にずれ、物体認識の精度にcm単位のずれがあり、指タップや対象物の正確な形の取得は困難	光路をテーブル内に収める都合、作業面積を大きく取ることが困難	手やIoTブロック、対象物の影により投影映像が欠ける。入力がIoTブロックとインタラクティブペンに限られ、対象物の形や位置を自動で検知できない

プロジェクションマッピング形態における機材の構成を図1に示す(他の形態については未出版)。

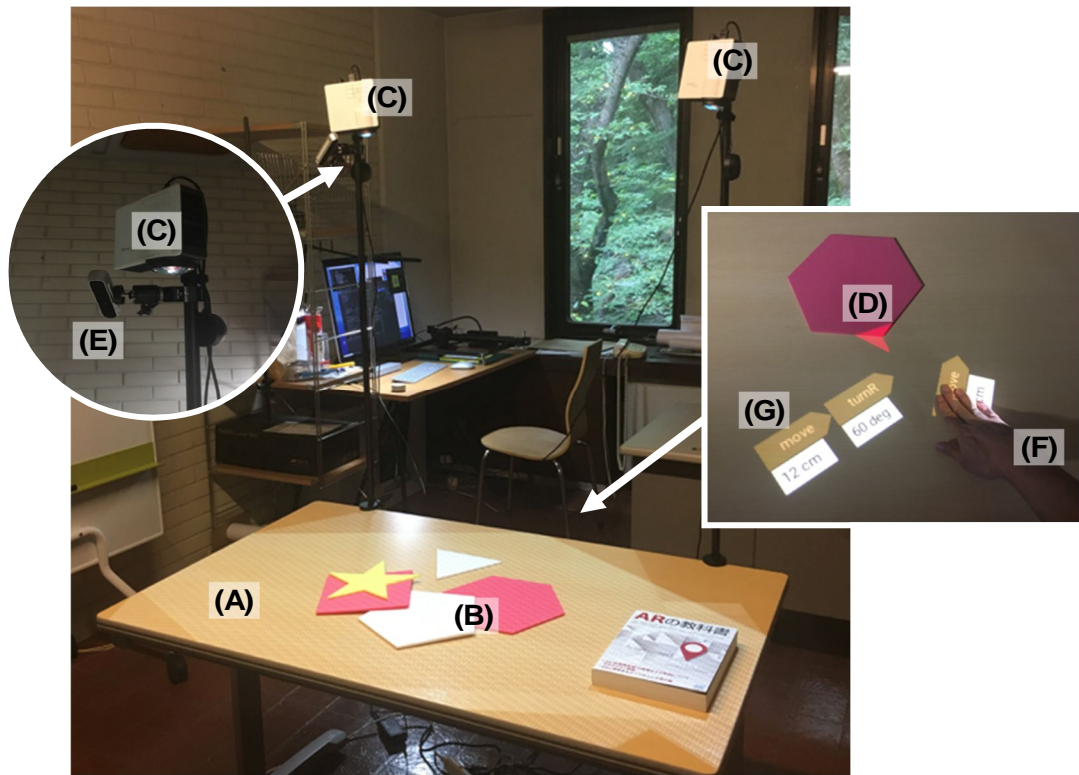


図 1. プロジェクションマッピングの構成 (Aoki, 2019a)
 (A)投影テーブル, (B)対象物, (C)単焦点プロジェクタ, (D)命令の実行主体,
 (E)デブスカメラ, (F)操作する手, (G) 投影されたプログラム

(2) 既存の体験的プログラミング教材の分析

子ども向けプログラミング教材は主体タンジブル, プログラムタンジブル, もしくはその両方で開発されているものが多い。既存のプログラミング教材の体験を通し, 従来のタンジブル形態の問題点が整理され, 提案する対象タンジブル形態の意義を明確化できた。

分析した『デジロボ 01』(学研, 2004) はサインペンで塗りつぶしたプログラム円盤で移動方向を制御する機械式車型移動ロボットであり, 移動の軌跡による図形描画課題を扱う。機械式のためプログラムが動作する仕組みがわかりやすく, 秒速約 4cm の移動速度と制御単位の最小目盛りを 2/3 秒で進行するスピードが動作追跡を可能にしている。停止状態からの加速中に速度の遅れが生じるため, それを経験的に考慮してプログラムすることが挑戦要素となっているが, 図形の量的関係を学ぶには適してない。実物制御の複雑な規則は主体タンジブルに見られる困難である。また映像による仮想的な成果物は失敗を恐れずに試行錯誤できる点も ICT を用いた学習の利点として知られている。

プログラムタンジブルを実現するプログラム円盤はサインペンで記入されているので, プログラムの修正は修正箇所を反映した新しい円盤を作ることになる。過去のプログラム円盤が残るので振り返りに役立てられるが, 時系列に継続して管理するのは手間である。このプログラムの履歴を辿る難しさがプログラムタンジブルの弱点である。

『GoGo ロボットプログラミング/ロジボの秘密』(ソニー・インタラクティブエンターテインメント, 2019) は小型ロボット toy の toio に, 命令カードを並べて作ったプログラムを読み取らせて迷路課題を解決する移動型パズルである。紙製の命令カードでプログラムタンジブルを実現しているが, 命令カードは毎回再利用されるので, 過去のプログラムは消滅する。また命令カードの実行過程を追跡するのは利用者の努力に依存しており, 選択や反復制御ではプログラムの進行を追跡できなくなる場合が発生する。パズル課題には問題作成者の意図が強く働いており, 正解から外れた解答を失敗(終了)させる制約が強く働いているため, 自由な発想で自分なりの楽しみを作り出す「遊び」の要素がない。「遊び」の要素は低学年の概念形成に重要である(山名, 2014)。コンピュータ画面上ではプログラムを動作させながら変更を受け入れ, その効果をリアルタイムに確認できるようにするライブプログラミングという手法がある。このようにプログラムを仮想的に表示することは, 変更履歴の蓄積, 実行追跡の容易さ, ライブプログラミングといった試行錯誤的学習(ティンカリング)に大きなメリットがある。

(3) 教育内容の分析と教材開発(算数・理科)

算数と理科について具体的に単元を想定してプログラミング活動を開発した。新型コロナウイルスの流行による行動制限により, 開発した教材は構想に留まり実践はできなかった。

算数の図形描画は結果が視覚的に表示されるとともに, 正確に動作し規則的な反復処理に強

いコンピュータの特徴を活かした題材である。その中でも「正多角形の作図」(小学 5 年算数)は文部科学省の新学習指導要領でも取り上げられる代表的事例である(文部科学省, 2017, p.92)。多角形はその規則的パターンから、一辺の長さ、辺と辺の間の角度を扱う、ミクロな視点のアルゴリズムでプログラムが描かれることが多い。しかし、これは従来の紙上の描き方として教えられてきた、コンパスで描いた円周を中心角で分割して頂点とし、辺で結ぶマクロな視点のアルゴリズムと異なっており、「欲しい大きさの多角形を描く」目的志向や「多角形は円に内接する」性質とに起因する学びにつながらない点で不利である。この問題を克服するには、出来上がりの図形を規定した上で活動に取り組みせる課題設定、より学習者の発想を反映できる道具を増やして「遊び」や試行錯誤を通して学べるようにすることが要件となる。出来上がりを規定するためには与えた「対象物」それに収まるように図形描画活動に臨ませることがわかりやすい。試行錯誤で対象物に収まるパラメータを探す方法から、対象物の寸法を調べ上げて描画に最適な条件を求める方法まで、さまざまな方法が考えられることが「遊び」の要素となる。発想を生かせるようにするには、アナログな方法でできたような円を描いて中心角で分割するための命令を準備しておく。そのためには、汎用的なプログラミング言語ではなく、学習内容に特化したドメイン固有言語を用いることが良い(青木, 2019b)。また、実行過程を可視化するだけでなく、パラメータを変えることによる結果の違いを連続的に比較できる、ライブプログラミングの手法を提供する。パラメータの変更には回転のUIが有効である。またプログラミングスタイルも、GUI 操作とコーディングの融合や、処理の成果物を蓄積するノートブックインターフェイスといった、従来のコーディングとは異なる現代的なデータ処理ソフトウェアの流儀を取り入れることで試行錯誤による探究的学びを促進することができる(青木, 2023)。

理科では「電気の性質や働きを利用した道具」(小学 6 年理科)において、電気の利用によりセンサーで感知した状況に応じた生活上の機能を実現させる学びとしてプログラミングが行われている(文部科学省, 2017, p.110)。従来センシングから機能の実現まで、全てを実世界の制御プログラミングにするか、全てをパソコン画面の仮想的なプログラミングにするかのどちらかになりがちである。全てを実世界の制御にするには、使用している教材の物理的制約によって学習者の発想の余地が限定されてしまう。反対に全てを仮想的に行うことは発想が自由でできる反面、現実世界をセンシングした計測値を実際に取り扱うことができないのは、自然現象を扱う理科の教科として問題となる。入力センサーについては MESH(ソニー・マーケティング, 2015)のような IoT ブロックを使うことで容易に実現できる。一方、出力である生活上の機能を実現することは現実世界では技術面や安全面から制約が大きく、理科の範囲を超えるため仮想的な表現で実現することが合理的である。例として、家や街の模型(平面の場合は間取り図や街路地図)にプロジェクションマッピングで明かりをつける、扉の開け閉めや車の往来の映像を投影することができる。実物の家の模型がやりたいことの発想を誘発する働きは実物の持つ力であり、電気の利用がどう生活に役に立つのかを考える支援になる。センサーを模型に配置し、部屋の明るさの変化や人形の移動による人の往来によって、学習者が考案した電気の利用のシミュレーションをすることができる。

<参考文献>

- Aoki, H. (2019a). The Use of Spatial Augmented Reality Technology for Children's Programming Activity in Traditional Subject Courses, *The International Conference for Media in Education Artificial Intelligence in Education Symposium*, 606-611.
- 青木 浩幸 (2019b). 協調プログラミングテーブルにおけるプログラミング言語の検討, 日本教育メディア学会, 第 26 回年次大会.
- 青木 浩幸 (2023a). データ駆動型社会が導く初中等教育における新しい統計教育ソフトウェア, *教育研究*, 65,1-12.
- Alexandra Institute (n.d.). Wizefloor - Interactive floor. Move, play, learn - Wizefloor. <https://wizefloor.com>
- 学研 (2004). プログラム・ロボット(デジロボ 01), 大人の科学.net. <https://otonanokagaku.net/products/others/digilobo/detail.html> (2023 年 6 月 15 日閲覧)
- Saltan, F. & Arslan, Ö (2017) The Use of Augmented Reality in Formal Education: A Scoping Review, *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(2), 503-520.
- Schmalstieg, D., & Höllerer, T. (2018). AR の教科書, マイナビ.
- ソニー・インタラクティブエンターテインメント (2019). GoGo ロボットプログラミング~ロジボのひみつ~, toio. <https://toio.io/titles/gogorobot.html> (2023 年 6 月 15 日閲覧)
- ソニー・マーケティング (2015). 作れる、学べる、楽しめる—アイデアを形にできる IoT ブロック, MESH. <https://meshprj.com/jp/> (2023 年 6 月 15 日閲覧)
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S., & Kinshuk. (2014). Augmented reality trends in education: A systematic review of research and applications. *Educational Technology & Society*, 17 (4), 133-149.
- 文部科学省 (2018). 小学校学習指導要領(平成 29 年告示), 東洋館.
- 山名 裕子 (2014). 遊びが生み出す幼児の数量理解, 榊原知美編著『算数・理科を学ぶ子どもの発達心理学 文化・認知・学習』, pp.69-86, ミネルヴァ.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 青木 浩幸	4. 巻 65
2. 論文標題 データ駆動型社会が導く初中等教育における新しい統計教育ソフトウェア	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 国際基督教大学学報 1-A 教育研究 = Educational Studies	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34577/00005206	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroyuki Aoki
2. 発表標題 The Use of Spatial Augmented Reality Technology for Children's Programming Activity in Traditional Subject Courses
3. 学会等名 The International Conference for Media in Education (ICoME 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木 浩幸
2. 発表標題 協調プログラミングテーブルにおけるプログラミング言語の検討
3. 学会等名 日本教育メディア学会 第26回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------