

モバイル環境におけるメンタルローテーション課題のための AR 型学習支援システム

中野 美登里^{*1}, 松原 行宏^{*1}, 岡本 勝^{*1}, 岩根 典之^{*1}

^{*1} 広島市立大学大学院情報科学研究科

AR based Learning Support System for Mental Rotation in mobile environment

Midori NAKANO^{*1}, Yukihiro MATSUBARA^{*1}, Masaru OKAMOTO^{*1} and Noriyuki IWANE^{*1}

^{*1} Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

中学校で取り扱われる図形の分野では、学習者の主体的な「操作」が学習者の数学に対する興味関心を高め、学習定着度が向上するといわれる。一方、空間図形の問題を解くための能力として、空間認知能力やメンタルローテーション能力が考えられる。本研究ではスマートフォンと AR マーカを用いて、学習者自身がマーカを操作し、メンタルローテーション課題を学習できるシステムを構築する。提案システムでは立体的な AR マーカを用いることによって、学習者の主体的な操作を実現した。学習者は立体的なマーカをスマートフォンのカメラで撮影し、画面に重畳表示される図形を見ながら立体的なマーカを回転させることで、さまざまな角度から図形を確認することができる。検証実験において、主体的な操作を伴った学習を行ったグループは、そうでないグループと比較して正答数の増加率が高いことが確認できた。

キーワード:メンタルローテーション, Augmented Reality, 空間図形

1. はじめに

中学校で取り扱われる図形の分野では、「観察」、「操作」、「実験」が重要だとされている⁽¹⁾。中でも学習者による主体的な「操作」は、学習者の数学に対する興味関心を高め、学習定着度が向上するといわれている⁽²⁾。中学校数学の単元では、展開図や投影図、回転体の見取り図などが扱われている。これらの空間図形の問題を解くための能力として、空間認知能力やメンタルローテーション⁽³⁾能力などが考えられる。メンタルローテーション能力は、積み木やブロックなど立体的な物体を用いて学習を行うことで身につけることができる。しかしながら、実際の教育現場では教科書等の紙媒体を用いた学習が多く、学習者の操作を伴う学習は行われていない場合が多い。このような問題を解決するために、中野らは AR を用いることで仮想的に 3 次元図

形を観察できるメンタルローテーション課題に関する学習支援を行った⁽⁴⁾。しかし、中野らのシステムでは、机上に貼り付けた AR マーカを認識しているため、学習者が手を動かすことによる主体的な操作は不可能である。

そこで、本研究では自分でマーカを操作して空間図形を学習できるシステムを構築する。本システムではスマートフォンと立体的な AR マーカを用いることにより、学習者の主体的な操作を実現し、さまざまな角度から図形を見ることを可能にした。提案システムでは、学習者が対象物である AR マーカを操作する様子をスマートフォンで撮影し、その映像に 3 次元物体の CG を重ね合わせてスマートフォンの画面に出力する。

2 つの物体が同じ物体であることを認識するのに必要な時間は、2 つの物体の描写された向きの角度差によって直線的に増加する関数であり、また 3 次元物体

の深さ方向の回転に対応する差異よりも、画面内の 2 次元図面の 1 つの剛体回転に単に対応する差異の方が短くなるということがわかっている⁵⁾。そのため、今回は図形の回転角度別で、システムを用いたことによる学習の検証を行った。

2. メンタルローテーション

土屋らは、心的表象に対する心的操作をメンタルローテーションと定義した³⁾。つまり、提示された物理図形を頭の中で写し取り、頭の中で回転、移動、重ね合わせといった物理的操作と同等な操作を行うということである。

メンタルローテーション課題の学習では、図形依存性、回転方向依存性が見られる。図形依存性とは、一度学習したことのある図形では解答に要する時間が短く、学習したことのない図形では解答に要する時間が長くなるという性質である。回転方向依存性とは、一度学習したことのある回転方向では解答に要する時間が短く、初めて学習する回転方向では解答に要する時間が長くなるという性質である。メンタルローテーション課題では、学習を行うことで多くの問題で解答時間が短縮されることが分かっている⁶⁾。そこで、本研究では解答にかかる所要時間を 1 問ごとに計測し、図形の回転角度によって分けられたカテゴリごとに事後テストと事前テストの所要時間から考察を行う。

3. 提案システム

図 1 に提案システムの構成⁷⁾を示す。提案システムは、入出力インタフェース部、入力情報処理部、内部情報管理部、問題提示部、仮想学習環境生成部から構成される。入出力インタフェース部は、スマートフォン、マーカから構成される。スマートフォンには、仮想物体表示のための画面、マーカを認識するためのカメラ、予想や解答を入力するためのタッチパネルが含まれている。入力情報処理部では、入出力インタフェース部から取得したカメラ映像から、マーカを探索し、マーカの座標と角度を計算する。さらにそれらの結果を元に、仮想物体の座標と角度を計算するとともに、問題の提示がされている場合は選択されたボタンの情報も合わせて内部情報管理部に送る。内部情報管理部

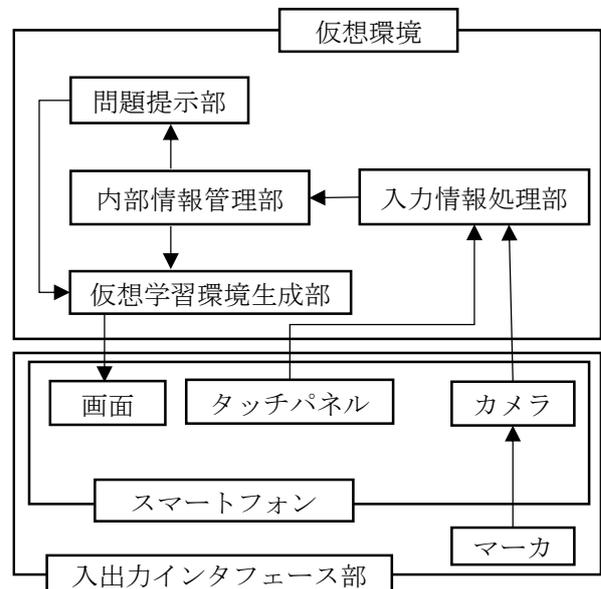


図 1 提案システムの構成図

では、入力情報処理部から取得した情報を保持しておく。そうすることで、カメラがマーカを見失ったとしても、再びマーカを認識したら、学習を続きから再開することができる。問題提示部では、内部情報管理部と入力情報処理部から取得した情報をもとに、表示する問題を決定する。また、学習の状態に応じて予想入力画面、または解答入力画面のどちらを表示するかを決定する。さらに、入力された問題に対して、正誤判定を行う。その結果を仮想学習環境生成部に送る。仮想学習環境生成部では、内部情報管理部と問題提示部から取得した情報をもとに、画面に出力するための仮想学習環境を構築する。

図 2 に提案システムの外観を示す。提案システムは、スマートフォンとマーカから構築される。学習者は、片手にスマートフォンを持った状態で、反対の手でコントロールマーカを操作する。図 3 に学習中のシステ



図 2 提案システムの外観

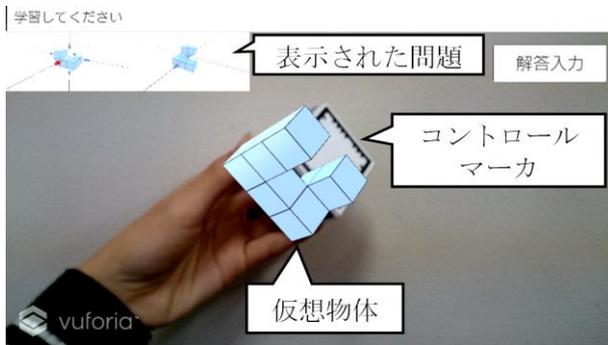


図 3 システムの画面

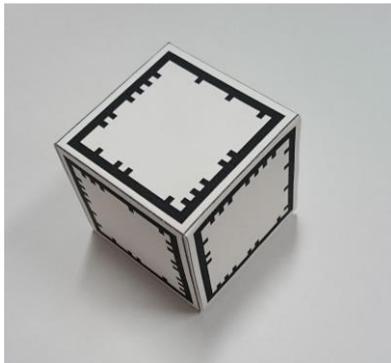


図 4 提案システムで用いるコントロールマーカ

ムの画面を示す。学習者がスマートフォンのカメラでコントロールマーカを撮影すると、出題された問題に対応した仮想物体が表示される。図 4 に本システムで使用するコントロールマーカを示す。コントロールマーカは仮想物体を操作するために使用する。コントロールマーカは台紙の一边が 4.5cm、マーカ部の一边が 4cm のマーカを立方体のように組み立てた立体的なマーカである。各面はすべて異なる AR マーカで構成しており、提案システムでは各面の AR マーカの角度や距離からコントロールマーカの回転を認識することが出来る。図 5 にコントロールマーカの操作例を示す。図 5 の上側は、学習者がコントロールマーカを左手に持っている。このとき、対応する図形がコントロールマーカに重畳表示されている。その後、図 5 の下側のように手を左側に回転させることで、重畳表示されている図形も左側に回転していることが分かる。このことから、図 5 に示すように、学習者はコントロールマーカを回転させることで、仮想環境内の仮想物体を回転させることができる。

提案システムで用いるボタンを表 1 に示す。解答入力ボタンは、システムを用いて図形の学習を行う際に用いるボタンで、学習画面から解答入力の画面へ遷移する際に用いる。矢印ボタンは、予想入力の際と解答

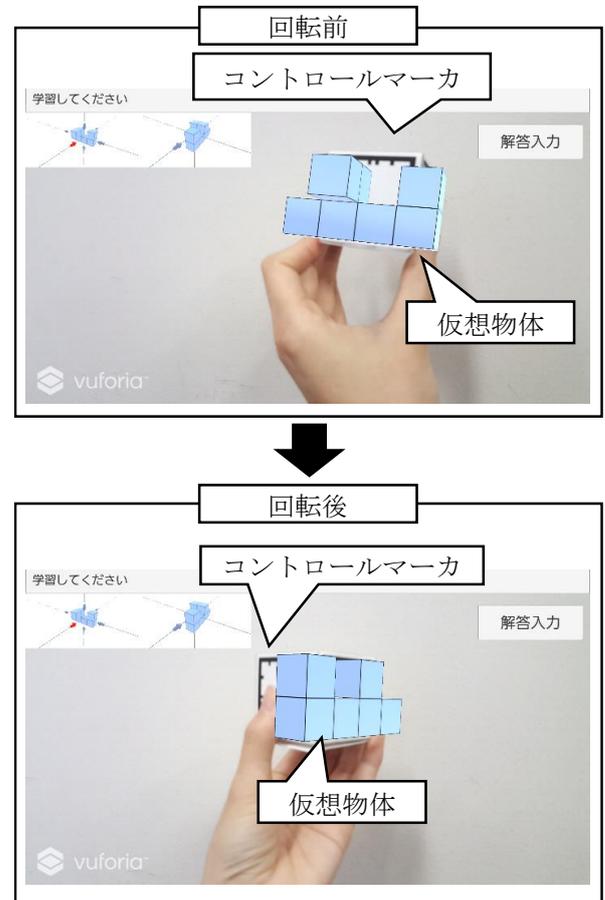


図 5 コントロールマーカの操作例

表 1 提案システムで用いるボタン

ボタン	説明
解答入力 (解答入力ボタン)	システムを用いて図形の学習を行い、解答入力の画面へ遷移する際に用いるボタン
← (矢印ボタン)	予想入力と解答入力の際に方向を解答するためのボタン

入力の際に方向を解答するために用いるボタンである。これは、それぞれの問題につき、解答可能な方向は 5 方向であるため、画面には 5 つの矢印ボタンが表示されている。いずれのボタンも、スマートフォンの画面をタップすることで入力できる。

問題の出題はシステムが行う。問題が出題されたら図 6 のように予想入力画面が表示される。学習者は図 6 の右側に表示されている画面で矢印の方向を確認し、その方向が左側の図では、どの方向であるかを考え、

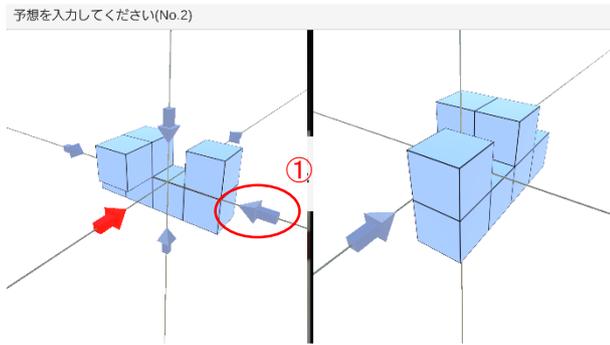


図 6 問題が出題された際のシステム画面

矢印ボタンをタップして解答を行う。入力された予想は、予想が正しければ、学習によって誤った解答を導いてしまった事例がないか、予想が誤っていたら、学習によって予想が誤っているということを知りかかせ、正答に導くことができているかを後に分析するために使用する。予想の入力後、学習として仮想物体の観察を行う。そのときの画面を図 7 に示す。学習時には図 7 のように、出題された問題が画面の左上部に表示されており、学習者は画面に表示されている問題を見ながら仮想物体を確認する。図形の形状や問題に対する解答が確認できたら、解答入力ボタンを押し、解答画面へ遷移する。解答画面は予想入力と同じ画面であるため、図 6 に示した画面が表示される。予想入力と同様に、学習者は画面上の矢印ボタンを選択（タップ）することで問題に対する解答を行う。学習者が問題に対して正しい解答、つまり図 6 の問題の場合、図 6 の①の矢印を選択すると、図 8 のように「正解です」と表示され、問題に対して誤った解答、つまり図 6 の問題の場合、図 6 の①以外の矢印を選択すると図 9 ように「間違いです」というフィードバックを返す。正解した場合はその問題への解答を終了し、次の問題へ学習を進める。不正解の場合は、予想の入力へ戻る。

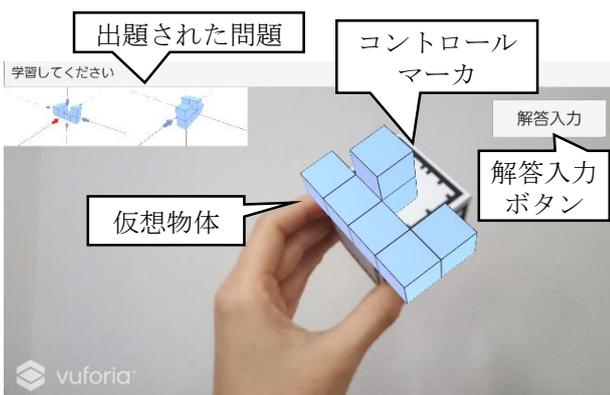


図 7 学習時のシステム画面

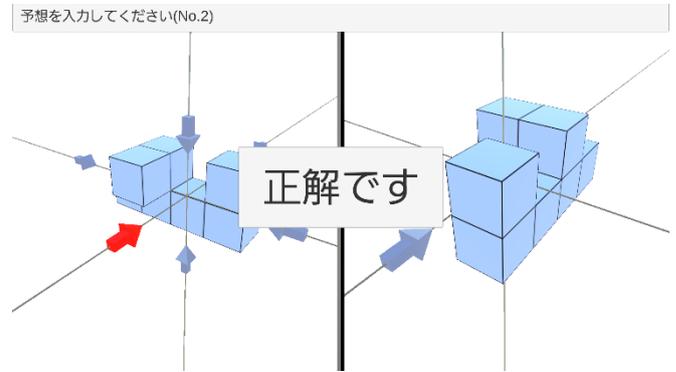


図 8 正答時のフィードバック例

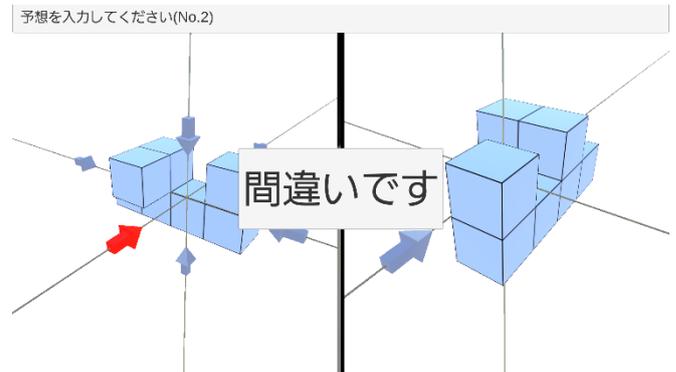


図 9 誤答時のフィードバック例

このように、学習者がコントロールマーカーを用いて、学習者が自ら手を動かし、物体の形状や出題された問題に対する解答を確認することで、学習者は主体的な「操作」を伴った学習を行うことが可能となると考えた。

4. 検証実験

検証実験では、本システムを用いて主体的な操作を伴った学習を行うことでメンタルローテーション能力が向上するか確認するため、提案システムを使った学習を指示し評価を行った。この検証実験では、図形依存性、回転方向依存性の観点による試行を重ねたときに、解答時間が短縮される⁽⁶⁾ということから、メンタルローテーション能力の向上を考察した。

被験者は理系の大学生、大学院生 15 人(A~O)であり、15 人を 3 グループに分けて実験を行った。各グループの被験者が用いたシステムの条件について以下の表 2 に示す。被験者 A~E の 5 人を、提案システムを用いるグループ 1、被験者 F~J の 5 人を、問題の提示と解答の正誤判定のみを行うシステムを用いるグループ 2、被験者 K~O の 5 人を、指で画面をスワイプし

表 2 各グループの被験者が用いたシステムの条件

グループ	問題の提示	物体の操作	正誤判定の提示
1	○	AR マーカ	○
2	○	—	○
3	○	指	○

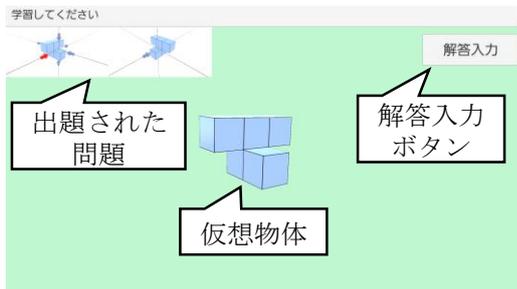


図 10 グループ 3 の被験者が使用するシステムの画面で物体を操作することで学習を行うグループ 3 とした。各グループが使用するシステムにおいて、問題の提示と正誤判定の表示を行う。図 6 のように問題が出題されるので、学習者は出題された問題に対して解答を行い、正解した場合はその問題への解答を終了し、次の問題へ学習を進める。不正解の場合は、再度解答を入力する。グループ 1 のシステムは、第 3 章に述べた提案システムを用いる。システム画面は図 3 に示したとおりである。グループ 2 のシステムでは、問題が出題された後、学習者が解答を入力し正誤判定がフィードバックされる。グループ 3 のシステムは、予想入力はグループ 1 のシステムと同様だが、その後の学習の仕方が異なっている。グループ 3 の被験者が用いるシステムの学習時の画面を図 10 に示す。図 10 のように、出題された問題は画面の左上部に表示され、学習者は画面に表示されている問題と画面上の仮想物体を確認しながら解答を行う。画面上の仮想物体に触れ、動かしたい方向に指を滑らせるフリック操作によって仮想物体を回転させることが出来る。学習者が問題に解答した後もグループ 1 のシステムと同様に正誤判定のフィードバックを返す。

検証ではまず事前アンケートとして、全ての被験者に数学や空間図形に対するアンケートを実施した。表 4 に事前アンケートの項目を示す。この 4 項目について全ての被験者に 1~5 の 5 段階で解答させた。その後事前テストとしてメンタルローテーションの問題を

表 3 出題した問題例

問題例	図形
1	
2	

表 4 事前アンケートの項目

番号	項目
Q1	数学が好きか
Q2	数学が得意か
Q3	空間図形が好きか
Q4	空間図形が得意か

表 5 事後アンケートの項目

番号	項目
Q1	図形の把握しやすさ
Q2	形状の把握しやすさ
Q3	解答確認のしやすさ
Q4	操作のしやすさ
Q5	主体的に学習できるか
Q6	自由記述

20 問解答させた。出題した問題例を表 3 に示す。このように構成する立方体の数を変えた図形を 20 個用意し、それぞれの図形について問題を出题した。その際に、1 問あたり 20 秒の制限時間を設けた。なお、学習者が何も入力を行わず 20 秒経過すると自動的に次の問題に進む。

そして、事前アンケートと事前テストの結果を元に、数学や空間図形に対する意欲、事前テストの平均点にグループ間で大きな差が出ないようにグループ分けを行った。その後各グループに割り当てたシステムを用いて学習を行わせた。システムを用いた学習の後、

事前テストと同様の問題を解かせた。この際も、事前テストと同様に、1問あたり20秒の制限時間を設けた。その後、事後アンケートとして学習のしやすさや操作性について解答させ、システムを使用した感想などを記述させるアンケートを行った。表5に事後アンケートの項目を示す。これらの項目について、グループ1とグループ3の被験者は全ての問題について、グループ2の被験者はQ2とQ3以外の項目について1から5の5段階で解答させた。図11に各被験者の事前テストと事後テストの正答数を示す。また、図12に各被験者の事前テストに対する事後テストの正答数の増加率を示す。グループ1、グループ3は全被験者が、正答数が増加したのに対し、グループ2の被験者は3人しか正答数が増加しなかった。残りの2人の被験者のうち、1人は正答数が増減せず、もう1人は正答数が減少した。これらのことから、主体的な操作を

表 6 カテゴリ分け

カテゴリ	回転角
カテゴリ 1	Z 軸に関して 90 度
カテゴリ 2	X 軸に関して 90 度
カテゴリ 3	X 軸に関して -90 度
カテゴリ 4	Z 軸に関して -90 度
カテゴリ 5	Z 軸に対して 180 度

伴って学習を行うことが、メンタルローテーション能力を向上させる可能性があることを確認できた。

一方で、出題した20問についてカテゴリ分けを行った。その結果を表6に示す。今回は図形の回転角度に注目しカテゴリ分けを行った。2つの物体が同じ物体であることを認識するのに必要な時間は、2つの物体の描写された向きの角度差によって直線的に増加する関数⁽⁵⁾であると指摘されているため、2つの図形の角度差が大きいくほど頭の中で図形を回転させる角度も大きくなると考えられる。そのため、このカテゴリ分けは、問題の難易度と関係していると考えられる。

各グループにおけるカテゴリ別の考察結果に関しては、図形の回転角が大きいくほど、主体的な操作を伴った学習を行ったグループ1、グループ3がメンタルローテーション能力の向上を見込めるが、その点に関しては、現在分析中である。

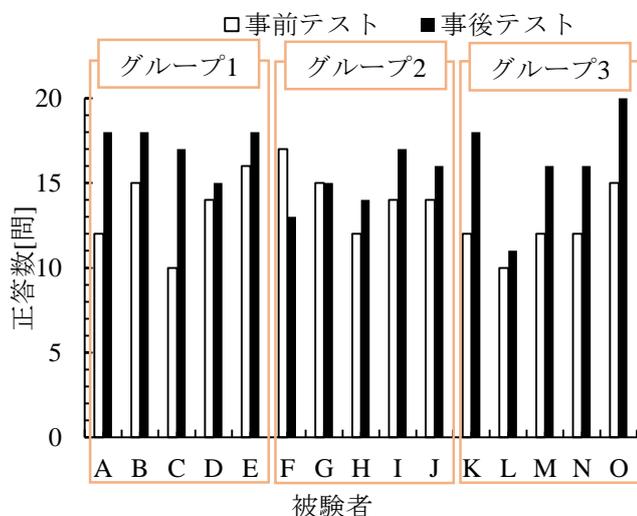


図 11 各被験者の正答数

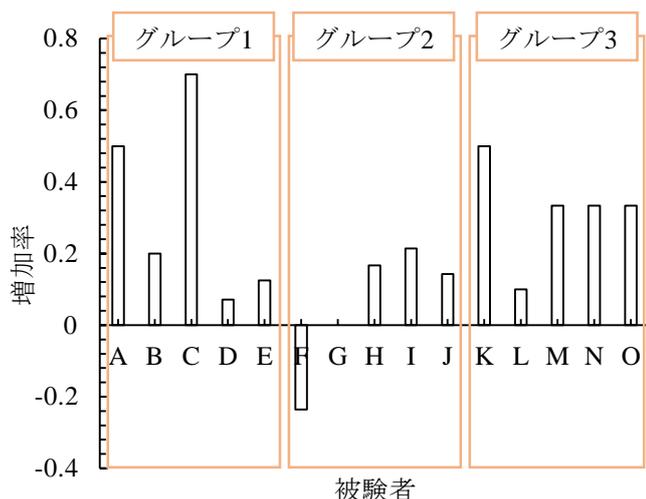


図 12 各被験者の正答数の増加率

5. まとめと今後の課題

中学校数学の単元では、展開図や投影図、回転体の見取り図などが扱われており、これらの空間図形の問題を解くための能力としては、空間認知能力やメンタルローテーション能力が考えられる。メンタルローテーション能力は空間図形を解くための重要な能力の1つであり、メンタルローテーション能力が欠如していると、空間図形の問題を解くことが困難になると考えられる。

そこで本研究では、学習者の主体的な操作を可能にするため、立体的なARマーカを用いたメンタルローテーション課題の学習支援システムを構築した。スマートフォンと立体的なARマーカを用いて仮想空間内の空間図形を操作可能としたことにより、学習者の主体的な操作を実現した。検証実験では、提案システム

を使用して学習を行うグループと、正誤判定のみを得て学習を行うグループと、指で画面上の仮想物体に対してフリック操作を行って学習するグループで、学習効果や図形の把握しやすさに違いがあるかについて比較検証を行った。検証実験において、主体的な操作を伴った学習を行ったグループ 1、グループ 3 は全被験者が、正答数が増加したが、グループ 2 の被験者は 3 人しか正答数が増加しなかった。残りの 2 人の被験者のうち、1 人は正答数が増減せず、もう 1 人は正答数が減少した。これらのことから、主体的な操作を伴って学習を行うことが、メンタルローテーション能力を向上させる可能性があることを確認できた。

今後の課題としては、出題される問題において、図形の回転角度と学習効果の相関を明確にすることや、主体的な操作を伴うことによる学習効果の検証などが挙げられる。また今後は、継続的な検証を行い、長期的に学習を行ったときに学習効果が見られるかを確認する必要がある。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 C(No.15K01084)による。

参 考 文 献

- (1) 文部科学省: 中学校学習指導要領解説 数学編, pp. 16-30 (2008)
- (2) 木原裕紀, 若杉祥太, 林徳治: “学習者の主体性向上を目的とした授業実践”, 日本教育情報学会論文集, Vol. 29, pp. 408-409 (2013)
- (3) 土屋俊, 中島秀之, 中川裕志, 橋田浩一, 松原仁, 大澤幸生, 高間康史: AI 事典 第 2 版, 共立出版 (2003)
- (4) 中野溪, 渡邊伸行: “拡張現実感による物体提示が心的回転に及ぼす影響の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, No. 462, pp. 39-44 (2014)
- (5) Roger N. Shepard: “Mental Rotation of Three-Dimensional Objects”, Science, Vol. 171, No. 3972, pp. 701-703 (1971)
- (6) 寺田春菜, 森田ひろみ: “心的回転における学習効果の回転方向の依存性の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 111, No. 60, pp.73-78 (2011)
- (7) 中野美登里, 松原行宏, 岩根典之, 岡本勝: “AR を用いたメンタルローテーション課題の学習支援システム”, 第 42 回教育システム情報学会全国大会 (2017)