

推薦論文

幼児を対象とした空間表現システムによる 空間表現の発達段階の取得

鈴木 昭 弘^{†1} 和 嶋 雅 幸^{†1}
川 上 敬^{†1} 岡 崎 哲 夫^{†1}

空間表現能力の発達期である幼児に対し、幼児の認知空間を取得するとともに、空間表現能力の発達段階がどのような発達段階にあるのかを調べることを目的とした 3D 表現システムを開発した。本システムは、仮想的な 3D 空間内において 2 個の立方体の位置や向きを揃える機能、紙をある関係に配置する機能などの実験機能を搭載している。本システムを使用し、幼稚園児を対象として約半年間隔を空けた 3 回の評価実験を実施した。その結果、1) 幼児は本システムの仮想的な 3D 空間を認知し、操作可能である、2) 年齢が高くなるごとに空間表現能力も高くなる様子を把握することができた。また、本システムと知能テストの 1 つである WPPSI との比較を行った結果、3) 本システムと WPPSI との間に有意な相関が見られ、一方では WPPSI では測ることができない能力を本システムでは測定できる可能性があるという知見を得た。

Acquisition of Children's Developmental Stage of Spatial Expressions by Using an Expression System

AKIHIRO SUZUKI,^{†1} MASAYUKI WAJIMA,^{†1}
TAKASHI KAWAKAMI^{†1} and TETSUO OKAZAKI^{†1}

The objective of this paper is to analyze how children develop their spatial expression ability in 3-D space. We prepared a 3-D expression system that has "Translation test", "Rotation test" and "Paper layout test". As an experiment, we collected data by using our 3-D expression system for children between the ages of 4 and 6 in a pre-school in August 2009, January 2010, and August 2010. We conducted a survey on correlation between the system and WPPSI. The results are summarized as follows: 1) Children are able to recognize virtual 3-D space of the system, and are able to express images in virtual 3-D space; 2) The data shows the trend that spatial expression ability in space becomes

better with advancing ages; 3) We obtained correlations between the system and WPPSI. The system can analyze some abilities that are difficult for WPPSI.

1. はじめに

幼児や児童の空間認知および表現に関する発達過程の解明や把握を行い、効果的な教育方法や教材を開発するための様々な研究が行われている。空間認知および表現能力の発達過程の解明は、幼児に何らかの手法によって空間を表現させることにより行われている。たとえば、紙への描画^{1),2)} や言動からの抽出³⁾ のように非 3D 空間において表現させるものや、立体迷路を解かせる⁴⁾、もしくは対象物を複数の視点から見せ、対象物の場所を当てる⁵⁾ など 3D 空間において表現させるものがある。しかしながら、多くの研究では非 3D 空間による表現からの把握を試みている。一方で、3D 空間において表現させることによる把握の試みは少なく、さらに、幼児期の重力に対する感覚が大人とは異なる可能性や、認知した空間や表現したい空間の座標軸が現実空間とは異なる可能性については考慮されておらず、内在的な空間表現を十分に把握できていないと考えられる。

また、知能テストの 1 つである WPPSI 知能診断検査⁶⁾ や WISC-III 知能検査⁷⁾ には空間認知および表現能力を測定する下位検査は存在するが、これらは基本的に 2D 空間における能力を測定するものであり、3D 空間における能力を測定することはできない。さらに、検査者の習熟が必要であるだけでなく、検査自体にも 1 から 2 時間以上の時間を必要とするため、検査者および被験者である幼児の負担が大きい。

以上の点を解決するためにはコンピュータの導入が有効であると考えられる。それは、コンピュータの仮想空間であれば、重力などのパラメータを柔軟に変更可能であり、また、座標軸についても、どの軸を地面とするかななどの設定をしないことにより、各座標軸を任意に使用した表現を把握可能である。この 2 点から、より詳細な空間表現能力の把握を見込むことができる。さらに、知能テストとは異なり、各テストをコンピュータの画面上に正しい順番で順次提示することができる点や、各テストの所要時間やスコアなどを自動で集計可能である点、そして、空間表現能力の把握に特化している点から、空間表現能力の把握に必要な

^{†1} 北海道工業大学

Hokkaido Institute of Technology

本論文の内容は 2010 年 10 月の情報処理北海道シンポジウム 2010 にて報告され、北海道支部長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

所要時間の短縮，検査者と被験者の負担の軽減，および効率化を見込めるためである．

このようにコンピュータを使用することによって，幼児の空間認知および表現能力の発達段階を解明および支援し，より早い段階から想像性・創造性を育み広げる環境を形成することが重要であると考えられる．しかし，このような試みはこれまでほとんどなされていない．これは，空間表現能力は完成期に至るまでに1，2年の短い期間で発達段階が推移するとともに，発達の個人差が大きく，その様子も多様であるため，効果的なシステムの構築が難しいためであると考えられる⁸⁾．

このような状況をふまえ，まずコンピュータの仮想空間を用いて幼児の3D空間における空間認知および表現能力が，発達段階のどの段階にあるのかを把握するシステムの開発を行うことにした．対象とする幼児は，紙への描画に立体的な空間表現が生まれ始めるとされている¹⁾⁵歳から7歳児および，その前段階の4歳児とし，コンピュータの仮想空間内で表現を行うことにより，

- (1) コンピュータの仮想空間の認知の可否
- (2) ある期間における空間表現能力の発達の差の取得
- (3) 年齢層ごとの発達の推移の把握
- (4) 3D空間における幼児の内在的な空間表現の把握

を行うことを狙いとした，3D表現システムを作成した．WPPSIやWISC-IIIのような知能テストで測る必要があった空間認知および表現能力を，両親や幼稚園教諭が簡単に把握できるようになるとすれば，個人に適した指導や教材の開発が期待できる．また，幼児や検査者の負担を軽減するだけでなく，発達過程の解明や，空間認知能力および表現能力を把握するための，知能テストとは異なる新しい指針の作成が期待できる．

本論文では作成した3D表現システムの概要について説明するとともに，(1)から(4)について，本システムを用い，2009年8月，2010年1月および2010年8月に実施した，幼稚園における評価実験とその結果について述べる．

2. 3D表現システム

2.1 システムの要件

本研究では，空間認知能力とは，X，Y，Zの3軸を持つ3D空間を知覚し理解する能力とする．また，空間表現能力とは，空間認知能力によって認知した3D空間，もしくは内在的な3D空間などを，X，Y，Zの3軸をもって表現する能力である．空間表現能力は，たとえば積み木による表現であれば，X，Y，Z方向の空間を使用して適切に積み木を組み上

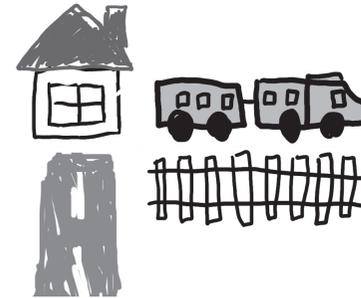


図1 幼児の絵のモデル
Fig. 1 Model of children's drawing.



図2 3D空間での組み立て
Fig. 2 Lay out in 3-D space.

げて表現することであり，また，紙への描画による表現では透視図法によって描画することである．

上述した定義に基づいて空間を認知し，その表現を行うために必要と考えられる基本的な能力を次のようにまとめる．

- 空間での操作を行う能力
 - － 空間を知覚し理解する能力
 - － 目標の位置や図形になるように正しく動かしたり，描画したりする能力
- 関係の表現を行う能力
 - － ある物体どうしの距離，向き，大きさなどの関係を理解する能力
 - － 目標とする物体どうしの関係にするために，距離，向き，大きさなどを決定する能力

作成するシステムにはこれらを把握するための機能が必要であり，また，内在的な3D空間を取得するための空間表現手法が重要であると考えられる．

図1は東山ら^{1),9)}が紙への描画による空間表現の推移をまとめた際の，視点の複合表現期(5歳から7歳)の絵を模したものである．これは，真上から見た道路と線路，真横から見た家と電車を1つの絵の中に複合して描いている．これらをそれぞれのパーツに分け，3D空間上で組み立てることにより，図2のような，3D空間を持った表現が可能となる．3D表現システムではこのような空間表現手法を採用することとした．すなわち，コンピュータの仮想的な3D空間内にあらかじめ絵が描かれた何枚かの紙を提示しておくか，もしくは，紙に対して幼児自らが日常的に行っている「お絵かき」を行い，それらの紙を3D空間内で

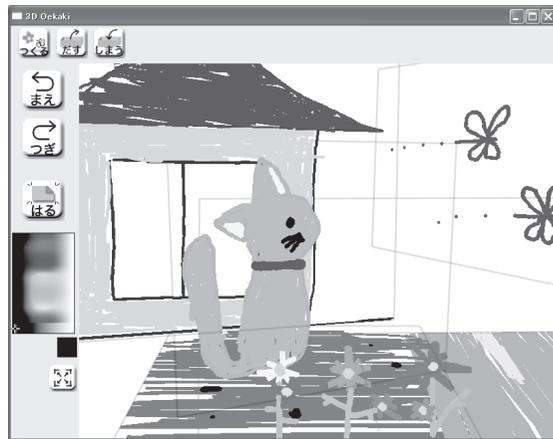


図 3 3D 表現システム
Fig. 3 3-D expression system.

組み合わせることで 3D 空間における表現を行えるようにする。また、紙の代わりに立方体を表示し、これらを組み合わせることによっても表現を行えるようにする。

本システムの仮想空間には重力のパラメータを設定していない。これは、幼児期の重力に対する感覚が大人とは異なる可能性があること、現実の 3D 空間では、たとえば飛んでいる鳥などの表現が難しいこと、また、仮想空間のどの軸を、たとえば地面として扱うかが、現実空間とは異なる可能性があるためである。これにより、たとえば、紙を空中に上下逆さまに配置するなど、現実空間では実現困難な表現を取得できる可能性がある。また、仮想空間のどの座標軸が地面や天井などに相当するのかを決めるのは使用者に委ねられるため、仮想空間をどのように認知し、使用するのかといった特徴を把握することも可能であると考えられる。

このように、コンピュータを使用することにより、様々なパラメータを設定した空間で実験を行うことも可能となる。また、空間での操作を行う能力を測定するために、3D 空間内に 6 面とも異なる模様の立方体をあらかじめ複数提示し、これらを操作することにより空間を表現する手法も搭載した。

2.2 システムの概要

3D 表現システム^{10),11)} は C++ 言語を用いて開発し、Windows および Mac OS X で動作する。本システムの実行画面を図 3 に示す。上部および左端にファイル関係のボタンや

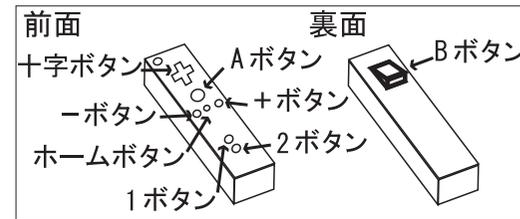


図 4 3D リモコンのボタン配置
Fig. 4 Button layout of 3-D remote.

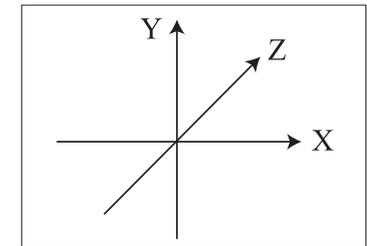


図 5 システムの座標系
Fig. 5 Coordinate system.

カラーパレットなどが並んでおり、ボタンなどはアイコンとともに平仮名で「つくる」「しまう」などの簡単な説明が書かれている。また、3D 空間を表示し、使用者が操作を行うためのパースペクティブビューが画面中央部の大部分を占めている。

操作デバイスには任天堂の Wii リモコン¹²⁾ を応用した。一般的な 3D システムに用いられる、マウスとマニピュレータを使用する方法では、コンピュータの使用経験の少ない幼児には難しいと考えられる。そこで、デバイスの選定を行った結果、紙の移動・回転を行うための加速度センサやジャイロセンサ、選択や描画に使用するボタンなどの機構を備えており、また、幼稚園や家庭での使用を想定していることから入手の容易な Wii リモコンを採用した。以降、これを 3D リモコンと呼ぶ。

本システムの基本的な機能として、3D 空間上での操作対象となる、絵や模様などのグラフィックが表示可能な 2D 平面体（以降、紙と呼ぶ）の作成、紙への描画、紙へのグラフィックの表示、実験用立方体の表示、紙や立方体の移動・回転、視点の移動・回転、移動・回転実験、紙の配置実験などを実装した。紙は複数枚作成でき、描画した部分以外は透明である。

2.3 操作方法

3D リモコンのボタン配置を図 4 に示し、システムの 3D 空間の座標系を図 5 に示す。3D リモコンにより、紙や立方体の移動や回転、視点の操作、紙への描画などを行うことができる。ここでは移動、回転および操作対象の切替え方法について説明する。

1) 移動：3D リモコンの十字ボタンによって紙の移動を行う。XZ 平面と平行になるように 3D リモコンを水平に倒した状態では、XZ 平面上で前後左右に移動し、また、XY 平面と平行になるように 3D リモコンを垂直に立てた状態では、XY 平面上で上下左右に移動する。水平、垂直を判定する閾値は 45 度である。

2) 回転：3D リモコンの B ボタンを押したまま上下左右に傾けたり回転させたりすると、紙

は 3D リモコンの動きに合わせて回転する。3D リモコンを X 軸回りに回転させると紙も X 軸で回転し、3D リモコンを Z 軸回りに回転させると紙は Y 軸で回転する。

3) 操作対象の切替え: 3D リモコンの上部を画面に向け、リモコンを動かすとシステム内のカーソルが動きに合わせて移動する。操作したい対象にカーソルを合わせ、A ボタンを押すことで操作対象を切り替えることができる。

2.4 実験機能

本システムには、「空間での操作を行う能力」を調査する実験として「移動実験」および「回転実験」を実装した。これは、システム内に 2 個の立方体を提示しておき、被験者がその空間を認知し、ある表現を行うのに必要な時間と、表現の成否を調査する実験である。ま

た、「関係の表現を行う能力」を調査する実験として「紙の配置実験」を実装した。これは被験者に絵が描かれた 2 枚の紙を現実空間で見せ、認知した関係をシステム内に用意された 2 枚の紙を操作することで表現させる実験である。また、これらの各実験における所要時間や、実験の成功、失敗などは自動で保存している。移動実験および回転実験から、(1) 幼児はコンピュータの仮想的な 3D 空間を空間として認知可能か、(2) ある期間における空間表現能力の発達の差の取得、および、(3) 年齢層ごとの発達の推移の把握を行う。また、紙の配置実験から (4) 3D 空間における幼児の内在的な空間表現の把握を行う。

本システムによる各実験機能の実行画面と遷移を図 6 に示す。実験画面は、移動実験、回転実験、配置実験練習、配置実験の順で遷移する。配置実験練習は、配置実験では操作する対象を切り替える操作が必要なことから、これを練習するためのものである。これらの実験機能の詳細については 4 章および 6 章で述べる。

3. 実験の方法

評価実験は 1 回目 (2009 年 8 月)、2 回目 (2010 年 1 月)、および 3 回目 (2010 年 8 月) の 3 回実施した。対象は 4 歳児 14 名、5 歳児 17 名、および 6 歳児 11 名の計 42 名であり、男児 26 名、女児 16 名である。図 7 に示したとおり、1 回目の被験者は 24 名、2 回目の被験者は 25 名、3 回目の被験者は 14 名である。1 回目の実験を受けた被験者 24 名のうち、14 名が 2 回目の実験も受け (図 7 の灰色の背景で示した被験者)、2 回目に初めて実験を受

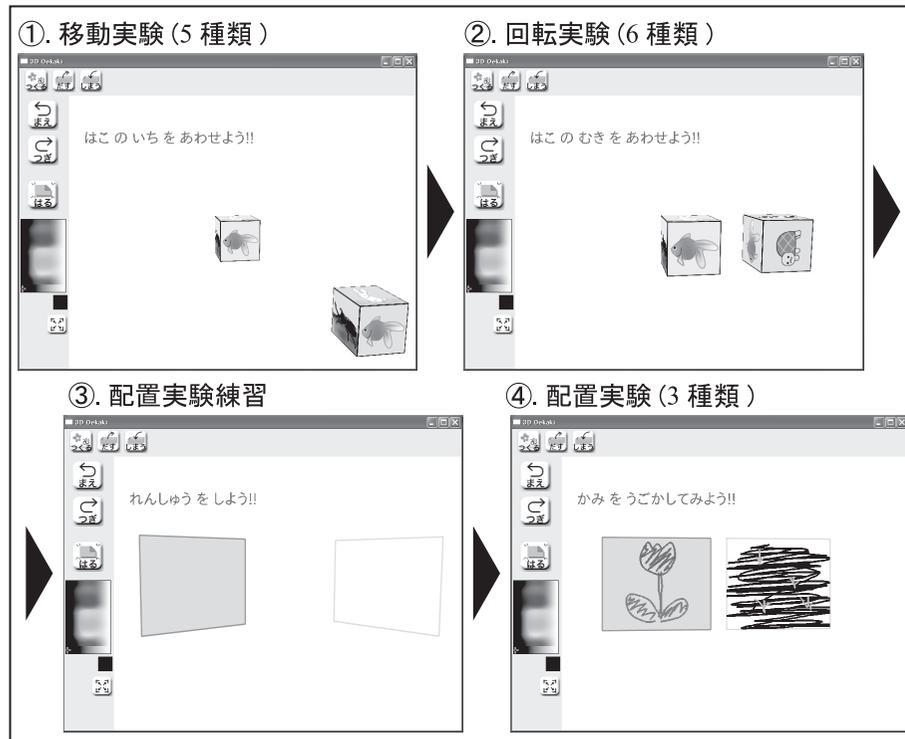


図 6 実験の遷移
Fig. 6 Process of tests.

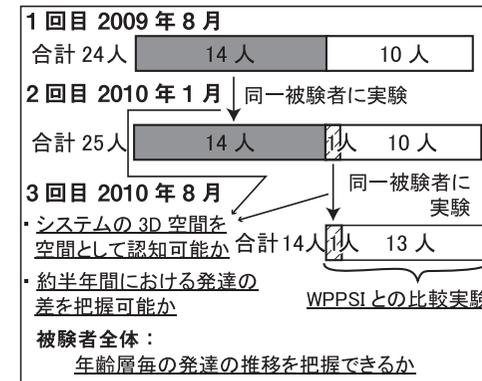


図 7 実験の計画
Fig. 7 Experiment plan.



図 8 幼稚園における実験の様子
Fig. 8 Experiment in a kindergarten.

けた 11 名のうち、1 名が 3 回目の実験も受けた（図 7 の斜線の背景で示した被験者）。つまり、半年間隔を空けて 2 回連続で実験を受けた被験者の合計は 15 名である。

3 回実施した、いずれの実験でも、すべての被験者に対して移動実験、回転実験、配置実験を実施した。半年間隔を空けて 2 回連続で実験を受けた被験者の実験結果から、同一被験者の各約半年間における空間表現能力の発達の差や内在的な空間表現の把握が可能かを分析するとともに、被験者全体を対象として発達段階の推移の把握が可能か分析を行った。また、2010 年 8 月の実験では、標準化されている知能テストの 1 つである WPPSI 知能診断テストとの相関を調査し、分析を行った。

実験は 1 名ずつ個室で実施し、本システムによる実験の所要時間は 20 分程度であった。実験の実施順は、移動実験、回転実験、配置実験の順である。実験の説明と操作方法は、各実験を行う前に口頭とジェスチャにより行い、本システムを使用した説明は行わなかった。実験中の様子を図 8 に示す。

4. 半年間における空間表現能力の発達の取得

4.1 実験の概要

約半年の期間を置いて実施した 3 回の実験のうち、2 回連続して実験を受けた 15 名の被験者より取得した「移動実験」および「回転実験」の実験結果から、「空間表現能力の発達の差が取得可能か」、「システムの 3D 空間を空間として認知可能か」について評価し、全体の被験者から「発達の推移を把握できる可能性はあるか」について評価する。

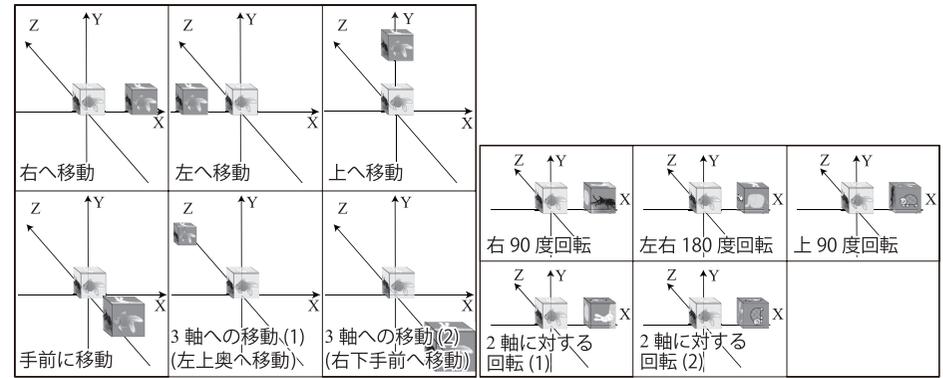


図 9 移動実験
Fig. 9 Translation-test.

図 10 回転実験
Fig. 10 Rotation-test.

この実験では操作への慣れが懸念されるが、実験の所要時間は 1 名あたり 20 分程度であること、および半年の期間が経過していることなどから、操作の慣れが所要時間や完了割合に影響を与える影響はわずかであると考えられる。また、2 回連続して実験を受けた被験者の、半年経過前の結果を 1 回目、経過後の結果を 2 回目として記述する。

4.2 実験手法

移動実験：

初期状態では大きさは同様であるが、色だけ異なる立方体が、1 つは黄色くハイライトされて原点に、他方は目標位置に配置されている。そして、原点にある立方体を動かし、目標となる立方体に重ねる実験である。システム上のカメラは、原点にある立方体を真正面から見る向きを基準として、原点を中心に反時計回りに、Y 軸に -10 度、X 軸に -10 度回転した位置にある。移動実験は図 9 のように、「右へ移動」、「左へ移動」、「上へ移動」、「手前へ移動」、「3 軸に対する移動 (1)」、「3 軸に対する移動 (2)」の 6 種類を設定した。

回転実験：

初期状態では操作可能な黄色くハイライトした立方体を原点に配置し、目標となる立方体異なる向きで隣りに配置されており、操作可能な立方体を回転させ、他方の立方体の向きと揃える実験である。カメラの位置は移動実験と同様である。図 10 のように「右 90 度回転」、「左右 180 度回転」、「下 90 度回転」、「2 軸に対する回転 (1)」、「2 軸に対する回転 (2)」の 5 種類の回転実験を設定した。

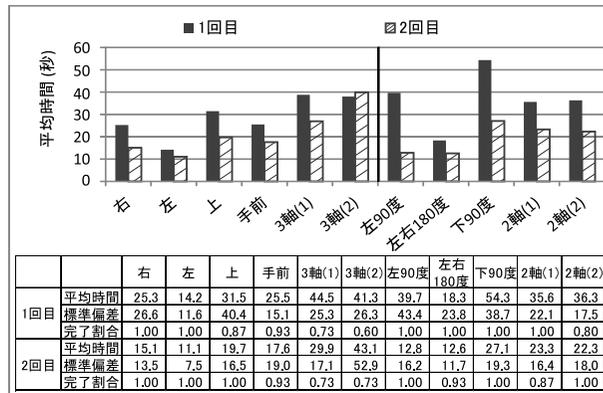


図 11 半年間における平均所要時間と標準偏差

Fig. 11 Average time and standard deviation in 6 month.

4.3 実験結果

平均所要時間、標準偏差および完了割合の比較を図 11 に示す。移動実験、回転実験ともに半年後の 2 回目の結果の方が平均所要時間が短くなった。平均所要時間について、t 検定および F 検定による分析では、t 検定において、右 90 度回転 ($p = 0.044$)、下 90 度回転 ($p = 0.028$)、2 軸に対する回転 (2) ($p = 0.049$) が 5%水準で有意な差が認められた。F 検定では、右へ移動 ($p = 0.018$)、上へ移動 ($p = 0.002$)、右 90 度回転 ($p < 0.001$)、左右 180 度回転 ($p = 0.015$)、下 90 度回転 ($p = 0.013$) に有意な差が認められた。完了割合は、左右 180 度回転、2 軸に対する回転 (1) についてのみ完了割合が低くなったが、それ以外の実験では、いずれも完了割合が高くなった。

多くの結果が 2 回目の方が所要時間が短くなり、完了割合が高くなったのは、半年間での発達を取得できたためであると考えられる。また、操作に必要なボタンを押す能力や手首をひねるといった、単純な運動能力も半年間で発達していると考えられるが、単純な操作に必要な時間は空間を認知し、表現する際に必要な時間よりも十分に小さいと考えられる。

2 軸に対する回転 (1) の完了割合が 2 回目の方が低くなった点については、2 名の被験者について、回転操作を行ううちに立方体が初期状態よりも目標の向きにするのが困難な向きになってしまい、完了させることができなかつたというものであった。

以上のように半年間で移動・回転実験の所要時間が短くなる傾向が得られ、本システムにより、半年間の経過による幼児の空間表現能力の差を得ることができたと考えられる。

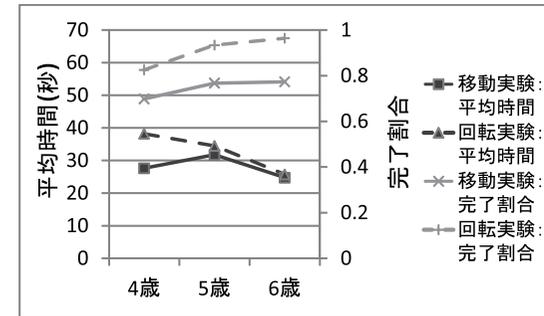


図 12 年齢層による平均所要時間と完了割合

Fig. 12 Average of required time and success rate.

幼児は本システムの仮想的な 3D 空間を空間として認知可能については、仮に、幼児は仮想空間を空間として認知が不可能とした場合には、移動・回転実験ともに完了することができない被験者が多く、また、半年間で有意な差が生じないと考えられる。そのため、幼児は本システムの仮想的な 3D 空間を空間として認知可能である可能性が高いと考えられる。

4.4 空間表現能力の発達の推移の把握

本システムによる 3 回の実験から取得した、「移動実験」および「回転実験」の所要時間と完了割合から、空間表現能力の年齢層における推移を把握することが可能かを検討する。全被験者 42 名の年齢層ごとの移動と回転実験の平均所要時間と完了割合を図 12 に示す。実験を複数回行った被験者については、初回時のデータを使用した。

年齢が高くなるほど平均所要時間は短くなり、完了割合が高くなるのが分かる。ただし、4 歳児の移動の平均所要時間は短く、逆に 5 歳児における移動の平均所要時間は長くなっている。これは 5 歳児では完了割合がよく伸びていることから、時間は必要であるが完了することができた被験者が増えたためであり、一方で 4 歳児は完了割合が低く、仮に完了できなかった被験者が完了するまで待ったとすれば、所要時間がより必要になると考えられる。

以上のように、年齢層により所要時間、完了割合ともに成績が良くなる方向に推移することが分かり、発達の推移が把握可能になるという見通しが得られた。

5. WPPSI との関連の検証

5.1 実験の概要

本システムが幼児の空間表現能力の発達段階を測定するツールとして利用可能かどうか

の検証のため3回目(2010年8月)の実験において,本システムにより実験を実施した14名中13名の被験者について,翌日に知能テストの1つであるWPPSI知能診断検査を実施した。「移動実験」および「回転実験」の結果と「WPPSI知能診断検査」の結果から比較を行う。WPPSIはウェクスラー式の個別式知能検査の1つであり,3歳10カ月から7歳1カ月までの幼児を対象としている。検査は言語性IQを検査する6種類の下位検査と,動作性IQを検査する5種類の下位検査から成り立っており,それぞれの下位検査のスコアや,言語性IQと動作性IQおよび総合のIQ値を得ることができる。ただし,これらの知能検査は幼児の空間表現能力に関しては必ずしも十分に把握できるものではない。

5.2 実験の手法

本システムによる移動・回転実験は4章と同様である。WPPSIによる調査は,WPPSI知能診断テストの手引き¹³⁾に従って実施し,調査では動作性検査の全下位検査である動物の家,絵画完成,迷路,幾何図形,積木模様の5種類の検査を実施した。下位検査の動物の家は,犬や鳥など,それぞれの動物の家に,犬なら黄色というように色が割り当てられており,同じ色のコマをあてはめていく検査である。絵画完成は,提示した絵の中に足りない部分(人の顔の絵に口がないなど)があり,それを当てる検査である。迷路は,左側の開始地点から右側にある出口までたどる水平迷路と,中央にある開始地点から外側にある出口までたどる箱迷路を解かせる検査である。幾何図形は,六角形などの幾何図形を見せ,そのとりに絵を描く検査である。積木模様は,裏表で模様の異なるタイル状の積み木を使用して,提示した模様を作る検査である。

5.3 実験結果

WPPSIによる調査は動作性検査をすべて行うのに1名あたり35分から45分程度であった。本システムとWPPSIの下位検査および各下位検査の結果から算出した動作性IQとの散布図による相関の例を図13に示す。上段のグラフが本システムの移動実験の平均所要時間とWPPSIのスコアとの関係を表しており,下段が回転実験の平均所要時間とWPPSIのスコアとの関係を表している。回転実験の破線で示した回帰直線は,外れ値を抜いた場合の回帰直線を示している。また,移動および回転実験とWPPSIとの間の相関係数を表1に示す。

移動実験との比較では,移動実験の所要時間が短いほどWPPSIでのスコアも良くなる負の相関が見られ,ここでは提示していない他の下位検査についても同様であった。無相関検定を行った結果,5%水準において,絵画完成($r = -0.722, p = 0.005$)および幾何図形($r = -0.664, p = 0.013$)に有意な相関があった。また,同様に動作性IQ($r = -0.732,$

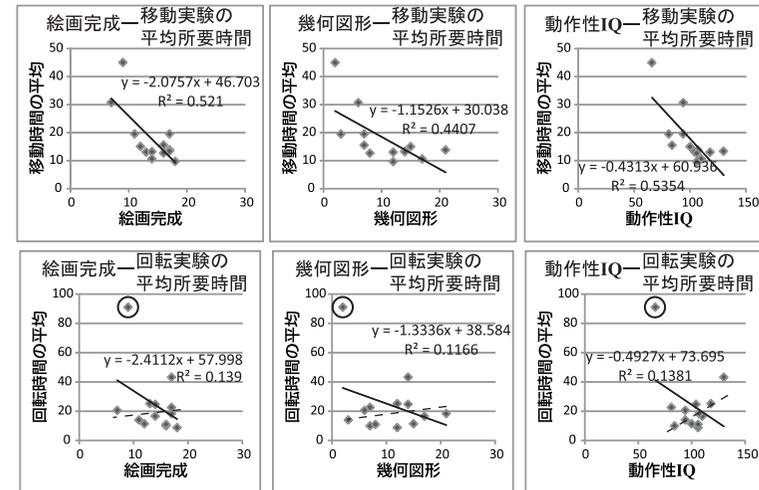


図13 本システムとWPPSIの結果の散布図

Fig.13 Scatter plot of result of the system and WPPSI.

表1 本システムとWPPSI間の相関係数

Table 1 Correlation coefficient between the system and WPPSI.

	動物の家	絵画完成	迷路	幾何図形	積木模様	動作性IQ
移動実験	-0.451	-0.722	-0.479	-0.664	-0.446	-0.732
回転実験	-0.009	-0.373	-0.258	-0.341	-0.096	-0.372
回転実験(外れ値除外)	0.433	0.06	0.354	0.205	0.596	0.572

$p = 0.004$)にも有意な相関があった。

移動実験がいずれの下位検査とも負の相関が見られた理由について考察する。移動実験には立方体の初期位置と目標位置の位置関係を認知し,目標位置までの経路と操作方法を決定する能力が必要である。また,3Dリモコンによる操作と,それによる立方体の移動方向を見比べ,関連性を理解する能力も必要であると考えられる。同様に,下位検査の迷路では,系統立てて出口までの経路を考える能力が必要であり。また,幾何図形では,提示された絵と自身の描いている絵を見比べながら図形を描く能力が必要であると考えられる。このように共通する能力があったと考えられ,迷路や幾何図形に必要な能力が仮想的な3D空間においても有効に働いたためであると考えられる。

回転実験については、WPPSI との間いずれの下位検査や動作性 IQ についても相関は見られなかった。次に、図 13 の丸で囲んだ 1 名の回転実験の平均所要時間は 91 秒であり、他の被験者の結果よりも長くなっている。外れ値である可能性があるためスミノルフ・グラブス検定を行ったところ、 $p < 0.001$ であり、5%水準において有意であった。この被験者を除外した場合の相関係数が表 1 の「回転実験（外れ値除外）」である。また、外れ値を除外した場合の回帰直線を図 13 の破線で示した。移動実験とは逆に、動物の家 ($r = 0.433, p = 0.16$) と動作性 IQ ($r = 0.572, p = 0.053$) は、回転実験の所要時間が長いほど WPPSI のスコアが良くなる、ゆるやかな正の相関が得られた。また、積木模様 ($r = 0.596, p = 0.041$) についてのみ 5%水準において有意な相関があった。

回転実験は、1) 回転実験と WPPSI の間に相関が見られない、2) 回転実験と WPPSI の間に正の相関が見られる、という 2 つの場合が考えられる。しかし、正の相関は外れ値の除外後に見られ、またサンプルの少なさから、外れ値であるという確実性に欠ける。また、移動実験や回転実験の所要時間の短い被験者ほど、WPPSI のスコアも良いか、もしくは相関がないと考える方が自然である。そこで、ここでは、1) 回転実験と WPPSI の間に相関が見られなかった理由について考察する。回転実験には、立方体の向きを認知し、目的の模様がどの面にあるのかを推定する能力が必要であり、また、3D リモコンによる操作と、それによる立方体の回転方向を見比べ、関連性を理解する能力が必要であると考えられる。しかし、WPPSI には、特に前者の能力が必要になる下位検査が存在しないためと考えられる。たとえば、積木模様では、提示された模様にするために、タイルの積木の表裏の模様のどちらを使えばよいのか、また、積木をどのように回転すると、欲しい模様になるのかを推定する能力が必要であると考えられる。しかし、使用する積木には表裏の 2 面しかなく、積木の回転方向も平面的なために、仮想的な 3D 空間ではその能力が有効に働かなかったと考えられる。

回転実験においては以上のように、WPPSI との間相関が見られないか、もしくは、回転実験の平均所要時間が長いほど、WPPSI の結果が良くなるという結果が得られた。しかしながら、これは回転実験は空間表現能力を把握できていないわけではなく、4.4 節における回転実験の推移では年齢が高くなるほど結果は良くなることから、回転実験により、WPPSI では測ることができない能力が測定できている可能性があると考えられる。

移動実験と回転実験の WPPSI との比較実験の結果、空間表現能力の測定という観点から、本システムは WPPSI による検査と同様の結果が得られており、WPPSI では測定できなかった、ある方向から見た立方体の模様を認知し、他の模様がどの位置にあるのかを推定

する能力や、それを表現する能力を測定できると考えられる。また、本システムによる実験と、WPPSI による調査に必要な所要時間は、本システムが約 20 分程度であり、WPPSI が 35 から 45 分程度であるため、本システムの方が所要時間が短いといえる。そのため本システムによって空間表現能力の把握が可能になれば、より効率的に検査を行えると考えられる。また、検査における検査者と被験者の負担については、現段階において本システムは、WPPSI ほど具体的な検査の手引きの作成は行えていないため直接的に比較することはできないが、各実験の可否や所要時間を自動で記録できる点や、検査時間が短い点から、検査者および被験者の負担も本システムによる軽減が期待できる。

6. 紙の配置実験による空間表現の把握

6.1 実験の概要

3 回行ったすべての実験において物どうしの関係性を表現する能力を把握する、「紙の配置実験」を実施した。これは現実空間の紙の関係を見せ、同様な関係になるようにシステム内で表現させる実験である。それにより、「3D 空間を持った関係の表現を得ることができるか」、また、「幼児は半年間で空間表現能力が発達すると仮定すると、これを空間表現の変化という形で把握することが可能か」を検討する。被験者は移動・回転実験を受けた被験者と同一で合計 42 名であり、2 回連続して実験を受けた被験者は 15 名である。半年経過前の結果を 1 回目、経過後の結果を 2 回目と記述する。

6.2 実験の手法

図 14 に示すような平行配置実験、垂直配置実験 (1) および垂直配置実験 (2) の 3 つの実験を実施した。平行配置実験は、まず、説明者が実際の「家」と「猫」の絵がそれぞれプリントされた 2 枚の紙を手に持ち、次に「お家の前に猫さんを座らせましょう」と説明しつつ、「家」がプリントされた紙の前に、約 20 cm ほど離して「猫」がプリントされた紙を重ねて提示する。その際、紙と紙の隙間を確認させるために、紙の関係を変えずに 1 度 2 枚の紙を斜め横、約 45 度から見せてから、再度、元の状態に戻した。そして被験者には、本システム内にあらかじめ用意した「家」と「猫」の 2 枚の紙を同様な配置になるように表現してもらった実験である。同様に、垂直配置実験 (1) は寝かせた「地面」の上に立てた「花」を配置する実験であり、垂直配置実験 (2) では横にした「コンセント」に「電気プラグ」を挿すように配置する実験である。各実験の初期状態は 2 枚の紙を手前に向くように横に並べて配置した。水平配置実験および垂直配置実験 (1) は 2009 年 8 月、2010 年 1 月、2010 年 8 月のすべての実験において実施した。垂直配置実験 (2) は、2010 年 1 月の実験から加えた。

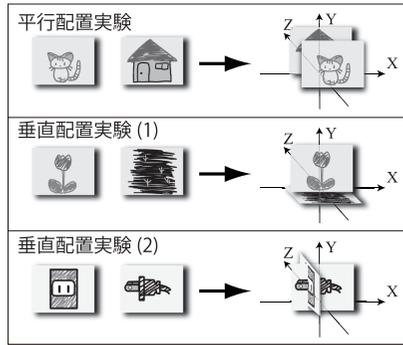


図 14 紙の配置実験
Fig. 14 Paper layout test.

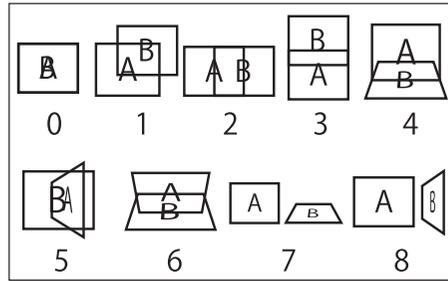


図 15 表現パターン
Fig. 15 Expression patterns.

表 2 配置パターンの頻度
Table 2 Frequency of result of layout patterns.

表現	水平配置			垂直配置 (1)			垂直配置 (2)
	全体	1 回目	2 回目	全体	1 回目	2 回目	全体
0	36	10	8	24	6	4	14
1	<u>8</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	9	4	1	1
2	5	2	2	1	0	0	5
3	1	0	1	3	0	2	0
4	0	0	0	<u>14</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	0
5	7	1	3	2	0	2	<u>16</u>
6	1	0	0	2	1	1	0
7	2	0	0	3	1	0	0
8	1	0	0	1	0	0	1

説明者がプリントされた紙を手を持って被験者に提示する手法を用いたのは、この実験では行っていないが、今後、より難しい配置実験を想定する際に、まず紙を被験者から隠した状態で紙を組み合わせてからを提示し、失敗した場合には、組み合わせる動作を現実空間で見せてから再試行させることで、詳細な結果を得ることができると考えたためである。

また、配置実験では被験者が「できた」といった時点で実験を終了している。

6.3 実験結果

図 15 に示した 9 種類の代表的な表現パターンを得た。被験者から得た表現パターンの頻度を表 2 にまとめる。表 2 の「全体」列は 3 回実施した実験の被験者全体から得た頻度を

表している。また、「1 回目」列は 3 回の実験の中で半年間隔をおいて実験を 2 回連続して行った被験者の初回時の頻度であり、「2 回目」列はその半年経過後に同一被験者から得た頻度を表している。各実験において説明者が提示した関係は下線付きの太字で示した。

いずれの実験でも、2 枚の紙の位置を同位置に揃える、パターン 0 の表現が多く見られた。これは、被験者が配置実験を移動実験と混同したと思われる例もあったことや、空間認知・表現能力によるものが考えられる。以降からは主にパターン 0 以外の結果について述べる。

水平配置実験は正しい配置であるパターン 1 にできた被験者は 8 名であった。これ以外にも、奥行き表現の代わりに横にずらして配置したと考えられるパターン 2 や、十字に交差するように配置されたパターン 5 が見られた。

垂直配置実験 (1) では正しい配置であるパターン 4 にできた 14 名の被験者の中には、一般的に自然な表現に感じられる、画面に垂直になるように地面を寝かせ、そこに立てた花を配置した 8 名のほかに、地面と花の位置を交換して配置した被験者が 6 名いた。これは、仮想空間における座標軸上のどの平面を基準とするか、つまり、空間のどの平面を正面や上としてとらえるかは被験者によって異なることを示唆している。さらに、現実空間では被験者に対して花の絵がプリントされた紙を正面になるように被験者に見せたにもかかわらず、表現を行う際には、花の紙を上から見た状態で表現していることから、現実空間における認知と仮想空間における認知・表現の間で、座標軸の扱いが異なることを示唆している。

垂直配置実験 (2) では配置実験の中で正しい配置にできた被験者が最も多く 16 名であり、パターン 0 の被験者を抜かすとほかは少数であった。これは、空間認知・表現のしやすい配置方向があることが考えられる。

次に半年間隔をおいた結果について述べる。水平配置では大きな変化は見られなかったが、垂直配置 (1) では、正しい表現であるパターン 4 の被験者が 3 名から 5 名に増えた。また、パターン 0 や 1 などの主に左右方向の表現が減り、指示した形に近いパターン 3 や 5 が増え、平面的な表現から立体的な表現が増えていく過程を得ることができた。

水平配置について変化が見られなかった点については、1 回目も 2 回目もパターン 0 の表現が多いことから、水平配置実験の実施方法の理解不足により、2 枚の紙に間を空けるべきなのか、それともただ重ね合わせるべきなのかが理解しにくく、移動実験と混同してしまった被験者が多かったためであると考えられる。次に、紙を左右にずらして配置するパターン 2 は 2 名と変わらず、紙を交差させて配置するパターン 5 が 1 名から 3 名に増えたことから、2 枚の紙の間の隙間の表現を試みたと考えられる。パターン 2 は、たとえば、2 枚の紙の関係を、現実空間の紙に対する描画で表現させた場合には、隙間を、紙を左右にずらすこ

とによって表現を行うことが考えられる。また、パターン 5 は交差させた紙の一部は、もう 1 枚の紙よりも前面もしくは背面に見えるため、それを 2 枚の紙の間の隙間として認知もしくは表現を行ったと考えられる。以上の 2 点から隙間の表現がこの時期の空間表現能力では難しい可能性が考えられ、そのため変化が見られなかったと考えられる。

垂直配置 (1) が、平面的な表現が減るとともに、正しい表現が増えた点については、これは半年を経過することにより空間表現能力が発達し、これが結果に反映されたためと考えられる。また、ある紙の上にもう 1 枚の紙を垂直に立てるという関係は、水平配置実験の隙間の表現よりも、この時期の空間表現能力によって表現しやすい可能性があると考えられる。

以上のように、仮想空間上における被験者の表現から、現実空間における認知と、仮想空間における認知と表現の様式の多様性が把握できた。また、提示したとおりの正しい関係の表現を行えた被験者もあり、幼児は 3D 空間を持つ表現が可能であると考えられる。さらに、垂直配置実験 (1) では半年経過後の方が正しい表現を行った被験者が増えたことから、表現の移り変わりによる、空間表現能力の発達過程の一側面を把握できたと考えられる。

7. おわりに

本論文では、空間認知および表現能力の発達段階を解明し、幼児がその発達段階のどの段階にあるのかを把握するシステムの開発のために、「幼児はコンピュータの仮想的な 3D 空間を空間として認知可能かの確認」、「3D 空間における幼児の内在的な空間表現の把握」、「ある期間における空間表現能力の発達の差の取得」、「年齢層ごとの発達の推移の把握」を目的とした、3D 表現システムを提案した。このシステムを用いて幼稚園児を対象として実験を実施し、その評価を行った。その結果を以下に示す。

- 本システムの 3D 空間を空間として認知可能である。
- 空間表現能力の発達の差を調べることが可能である。
- 年齢層ごとの空間表現能力の発達の推移を得られる可能性がある。
- WPPSI と相関が見られ、一方で WPPSI では測れない能力を測定できる可能性がある。

今後の課題は、継続した実験により、データの信頼性を向上させるとともに、取得した成績から、幼児が現在どの発達段階にあるのかを定量的に評価するため、年齢と表現能力における関係や表現パターンを取得、解明し、その評価手法の開発を行うことである。

謝辞 お忙しい中、実験の場を提供していただいた、新さっぽろ幼稚園の皆様へ深く感謝いたします。また、協力していただいたご父母の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 東山 明ほか：神戸大学教育学部研究集録，Vol.72, 73, 83, 84, 85, 86, 神戸大学 (1984-1990).
- 2) 小川 絢子：幼児期における空間的視点取得—2 つの配置条件における描画の認知と産出の関連性，京都大学大学院教育学研究科紀要，Vol.52, pp.412-426 (2006).
- 3) 関根和生：幼児における空間参照枠の発達—経路説明における言葉と身振りによる検討，発達心理学研究，Vol.17, No.3, pp.263-271 (2006).
- 4) 米谷光弘，福山豊久：幼児の空間認知能力と心身発達，日本保育学会大会研究論文集，Vol.53, pp.746-747 (2000).
- 5) 大泉郷子：幼児の空間探索における眺めの高さのずれと水平面上のずれの補償，発達心理学研究，Vol.8, No.2, pp.133-142 (1997).
- 6) Wechsler, D.: *Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence*, NCS Pearson Inc. (1967).
- 7) Wechsler, D.: *Wechsler Intelligence Scale for Children-III*, NCS Pearson Inc. (1991).
- 8) 鈴木昭弘，和嶋雅幸，川上 敬，岡崎哲夫：幼児の空間認識機構を考慮した直感的インタフェースに関する研究，第 8 回情報科学技術フォーラム講演論文集，No.3, pp.579-586 (2009).
- 9) 東山 明，東山直美：子どもの絵は何を語るか—発達科学の視点から，日本放送出版協会 (1999).
- 10) 鈴木昭弘，和嶋雅幸，川上 敬，岡崎哲夫：幼児の空間表現機構を考慮した 3D 表現システムに関する研究，電子情報通信学会総合大会講演論文集，Vol.2010, No.1, p.153 (2010).
- 11) 鈴木昭弘，和嶋雅幸，川上 敬，岡崎哲夫：幼児の空間表現取得システム“3D ペイントシステム”の開発と評価，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.110, No.147, pp.1-6 (2010).
- 12) 伊藤邦朗，福田隆宏：Wii リモコン，日本機械学会誌，Vol.110, No.1069, pp.908-909 (2007).
- 13) Wechsler, D. (著)，日本心理適性研究所 (訳)：WPPSI 知能検査手引，日本文化科学社 (1969).

(平成 23 年 2 月 18 日受付)

(平成 23 年 7 月 8 日採録)

推薦文

本研究は、幼児期の空間表現能力の発達段階を把握するために、コンピュータを利用して仮想空間内で自由に表現を行える環境を与えることで、幼児が持っている空間表現をより詳細に表現することが可能となる。本システムを利用して、幼児への継続的実験を行うことで、空間表現能力の発達段階を調べる有用な手段となることが期待される。本研究は、3次元空間を扱う情報システムの開発と幼児の発達過程の把握への応用という点で興味深く推薦論文として選出された。（北海道支部長 古川正志）



鈴木 昭弘（学生会員）

2007年北海道工業大学工学部卒業。2009年同大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、同大学院工学研究科博士後期課程在学中。教育工学に従事。電子情報通信学会学生会員。



和嶋 雅幸

1984年オハイオ州立大学 Ph. D. (数学)。1984年オハイオ州立大学講師。1985年北海道工業大学講師、現在(教授)に至る。代数学、特に有限群論および代数的組合せ論の研究に従事。日本数学学会会員。



川上 敬（正会員）

1996年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。1997年北海道工業大学助教授、2007年ベルギーブリュッセル自由大学客員研究員。2008年北海道工業大学教授、現在に至る。進化型計算、強化学習、群知能等の研究に従事。システム制御情報学会、日本機械学会各会員。



岡崎 哲夫（正会員）

1975年北海道大学大学院修士課程修了。同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所。以来、マルチメディア通信端末装置、ネットワークオペレーションシステム等の研究開発に従事。2001年北海道工業大学教授、現在に至る。携帯電話を用いた介護支援サービス等の研究に従事。博士(工学)。ヒューマンインタフェース学会会員。