

幼児の空間表現システムの開発と評価

– 表現システムと知能テストとの比較 –

Development and evaluation of a spatial expression system for children

– Comparison of the system with an IQ test –

鈴木 昭弘[†]
Akihiro Suzuki

和嶋 雅幸[†]
Masayuki Wajima

川上 敬[†]
Takashi Kawakami

岡崎 哲夫[†]
Tetsuo Okazaki

1 はじめに

幼児や児童の空間の認知・認識に関する発達過程を解明し、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 [1] [2] [3] [4]。それらによれば、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、発達の個人差が多く、その様子も多様である。コンピュータを用いて空間表現能力の発達段階を把握し、発達を促すための支援を行うことは有効であると考えられるが、このような試みは殆どなされていない。そこで、効果的な教材を開発する第一歩として、特に個人差の大きい4から6歳児を対象としてコンピュータを用いてこの時期の空間表現能力の発達段階を簡単に把握することを狙いとした、3D表現システムを開発した [5][6]。

本システムには空間表現能力を把握するための機能として、移動実験、回転実験、紙の配置実験機能を具備している。本システムを使用し、4歳から6歳の幼稚園児を対象として約半年の期間をおいて実験を行い、(1)移動回転実験では年齢層が高くなるほど結果が向上し、同一被験者集団の平均値は半年経過の前後で有意に差がある。(2)紙の配置実験では半年経過後の集団の方が立体的な表現が増えることを確認した。

本論文では、2010年8月に幼稚園において行った、一般的な知能テストの一つであるWPPSI知能診断検査 [7] との比較実験の結果について述べる。

2 本研究における空間表現能力

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空間をX, Y, Zの3軸を持って表現する能力であり、例えば積み木による表現であれ

ば、認知した3D空間を、X, Y, Z方向を使用して適切に積み木を組み上げて表現することであり、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表現能力に含ま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
 - 目標位置や目標の図形になるように正しく動かしたり、描画する能力
- 関係の表現を行う能力
 - ある物同士の距離、向き、大きさなどの関係を理解する能力
 - 目標とする物体同士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

3 3D表現システム

3.1 空間表現手法

本システムに搭載した幼児が3D空間内で表現を行うための空間表現手法について説明する。幼児の空間表現構造の解明に関する東山ら [4] の研究がある。それによれば、幼児に現実空間の対象を見せてから隠し、それを紙への描画という形で表現を行った際の発達過程を図1のように整理している。短い期間で段階が推移し、特に4から7歳の4年間で急激に変化し、またその様子が多

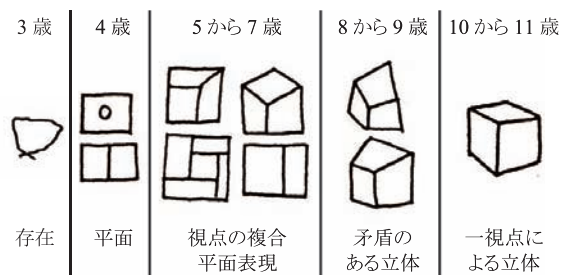


図1 空間表現の推移

[†] 北海道工業大学大学院



図2 幼児の絵のモデル



図3 3D空間での組み立て

様であり、その頃の幼児は紙への描画において立体的な空間を持った表現が難しいことがわかる。また、描画対象や条件が異なる研究 [8] においてもほぼ同様な様子が見られる。

このような研究結果にもとづき本システムでは次のような、4 から 6 歳頃の幼児から立体的な表現を取得するための空間表現手法を搭載した。図 2 は視点の複合表現期 (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一つの絵の中に複合して描いており、一つ一つの視点からの絵は描けているが、それらを一つの空間に矛盾無く表現できていない。しかし、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と、図 3 によりになり、立体的な空間をもった表現が可能である。このように一つ一つの視点からの絵を描くことはできるが、それらを一つの空間として空間として描くことが難しい幼児に対して、ある一つの視点から書いた絵を組み合わせる空間表現手法を与える事で立体的な表現を得られると考えられる。

3.2 システムの概要

3D 表現システム [5][6] 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 4 に示す。上部および左端にファイル関係のボタンやカラーパレットなどが並ん

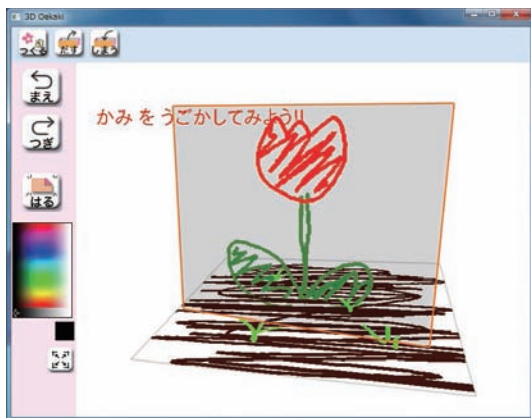


図4 3D表現システム

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」などの説明が書かれている。画面中央部の大部分を占めているのが操作を行う 3D 空間である。操作デバイスには任天堂の Wii リモコン [9] 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 2D 平面 (紙) に対する描画、紙の作成、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。

さらに、実験機能として「移動実験機能」、「回転実験機能」、「配置実験機能」を実装した。移動実験および回転実験は 2 章で述べた「空間での操作を行う能力」を把握するための実験であり、配置実験は「関係の表現を行う能力」を把握するための実験である。ここでは実験機能を上記のように分類したが、しかしながら、この 3 つの実験はいずれの能力とも少なからず関係している。

4 実験

2010 年 8 月に幼稚園において、本システムと知能検査の一つである WPPSI 知能診断検査 [7] の比較実験を実施した。被験者は男子 8 人、女子 6 人の合計 14 人であり、4 歳児 4 人、5 歳児 6 人、6 歳児 4 人である。実験は 1 日目に本システムによる実験を行い、翌日に WPPSI による実験を行った。



図5 実験の様子

実験は1人ずつ個室で行い、本システムによる実験時間は一人あたり10から15分程度であった。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ーにより行い、本システムを実際に使用した説明は行わなかった。WPPSIによる実験時間は、一人あたり40分から60分程度であった。WPPSIはWPPSI知能診断テストの手引き[10]に従って行い、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、積木模様の検査を行った。

本システムによる実験中の様子を図5に示す。被験者は楽しんで操作を行っており、「うまくできた!」といった声をあげて実験を行っていた。

4.1 3D表現システムによる実験内容

本システムに搭載した「移動実験」、「回転実験」および「配置実験」について説明する。

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おり、原点の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6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、目標となる立方体が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7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。

配置実験：

図8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つの実験を行った。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枚の紙を手を持ち、「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、やや距離を置いて「猫」がプリントされた紙を重ねる。そして被験者には、本システム

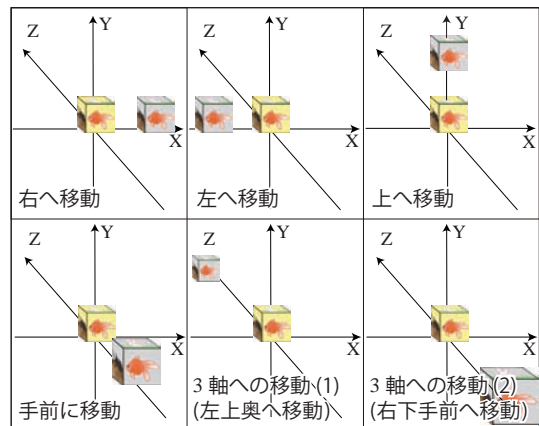


図6 移動実験

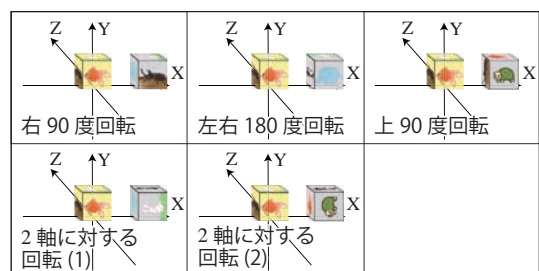


図7 回転実験

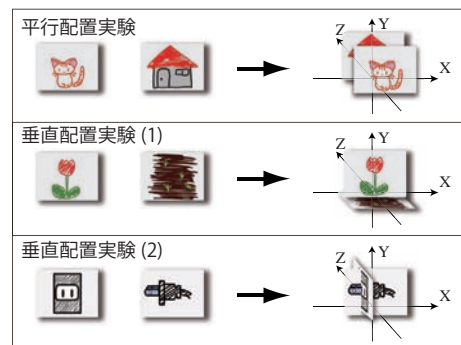


図8 紙の配置実験

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。

4.2 WPPSIによる実験内容

WPPSIはウェクスラー式の個別式知能検査の一つで、3歳10ヶ月から7歳1ヶ月までの子どもを対象としている。検査は言語性を検査する6種類の下位検査と動作性を検査する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点数や、言語性と動作性お

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。

実験は WPPSI 知能診断テストの手引き [10] に従って行い、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、積木模様の検査を行った。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、同色のコマを早く正確に当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、それを当てていく検査である。「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、その通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2次元の模様を作る検査である。

4.3 移動実験および回転実験と WPPSI の関係性

本システムの移動実験および回転実験によって取得したデータと WPPSI の下位検査および動作性 IQ との相関の例を図9に示す。

図9では横軸が WPPSI のスコアを表しており、縦軸が本システムにおける所要時間である。WPPSI のスコアは高い方が良く、本システムの所要時間は短いほど良いと言える。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っており、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、絵画完成および幾何図形に有意な相関があった。また、同様に動作性IQにも有意な相関があった。一方で、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。

移動実験がいずれの下位検査とも相関が見られた理由について考察する。移動実験には 1) 立方体の初期位置と目標位置の位置関係を認知する能力、2) 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り、また、3)3D リモコンによる操作能力、4)3D リモコン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が必要であると考えられる。同様に、下位検査の迷路では、1) スタート地点とゴール地点の位置関係を認知する能力、2) 系統立てて出口までの経路を考える能力が必要であり、幾何図形では、3) 鉛筆を用いて図形を書くための身

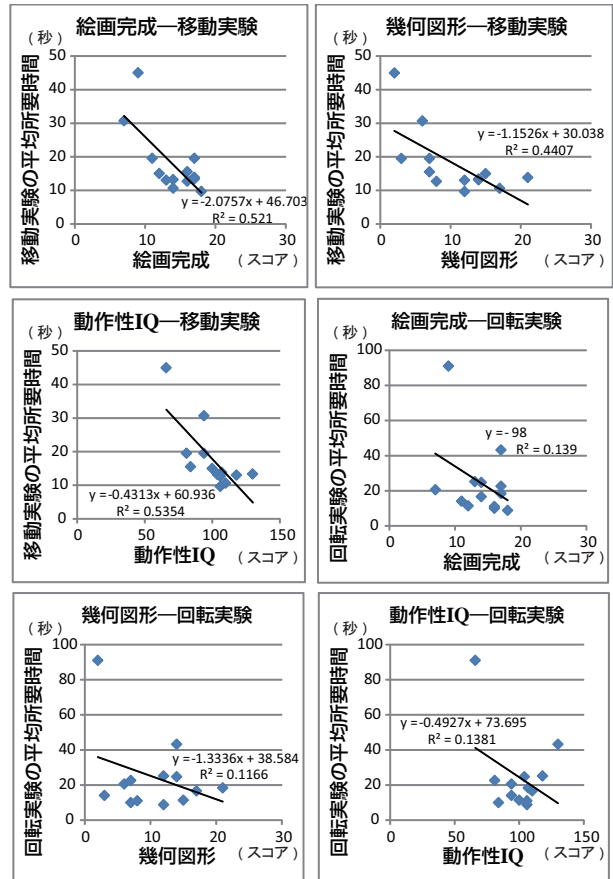


図9 WPPSI との相関

体能力、4) 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。

この移動実験に必要と考えられる4つの能力と WPPSI に必要と考えられる4つの能力がそれぞれ共通している点があると考えられ、そのために、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、1) 立方体の向きを認知する能力、2) 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、3)3D リモコンによる操作能力、4)3D リモコン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。

これに対して、WPPSI には、特に(1)および(2)の能力が必要になる下位検査が存在しない。例えば、積木模様では、提示された模様にするために、タイルの表裏の模様のどちらを使えば良いのか、また、タイルをどのように回転すれば欲しい模様になるのか推定する能力が必要であると考えられる。しかし、使用するタイルには表裏の2面しか無く、タイルの回転方向も平面的なため

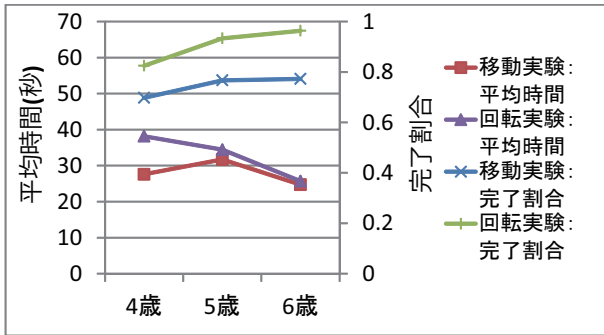


図 10 移動・回転実験の年齢層における推移

に、仮想的な 3D 空間ではその能力が有効に働かなかったことが考えられる。

回転実験と WPPSI との間に相関が見られなかった一方で、回転実験は WPPSI では測ることが難しい能力を測定できていると考えられる。図 10 はこれまでのデータに今回の実験で新たに取得したデータを集計した、移動実験および回転実験の年齢層毎の推移のグラフである。回転実験の推移では年齢が高くなるほど、平均時間は短くなり、かつ、各実験を完了することができた被験者の割合である完了割合が高くなり、成績が良くなっている。これは回転実験により、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ているためであると考えられる。

すなわち、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、その一方で WPPSI で測定可能な能力とは異なる能力を測定できると考えられる。

4.4 配置実験と WPPSI の関係性

本システムの配置実験によって取得したデータと WPPSI の下位検査および動作性 IQ との相関を図 11 に示す。縦軸が各配置実験を完了できた被験者の所要時間であり、横軸が WPPSI のスコアである。WPPSI のスコアは高い方が良く、本システムの所要時間は短いほど良いと言える。図 11 の上段のように平行配置実験と動物の家、および平行配置実験と絵画完成の間にはゆるやかな相関が見られ、本システムにおける所要時間が短くなるほど、WPPSI のスコアも高くなる傾向を得ることができた。

これは紙の配置実験には、1) 提示した 2 枚の紙の空間的な関係を認知し、一時的に記憶する能力、2) 提示した紙の関係と仮想空間内の紙の関係を把握し、どのように紙を動かせばよいのかを推定する能力 3) 推定した方

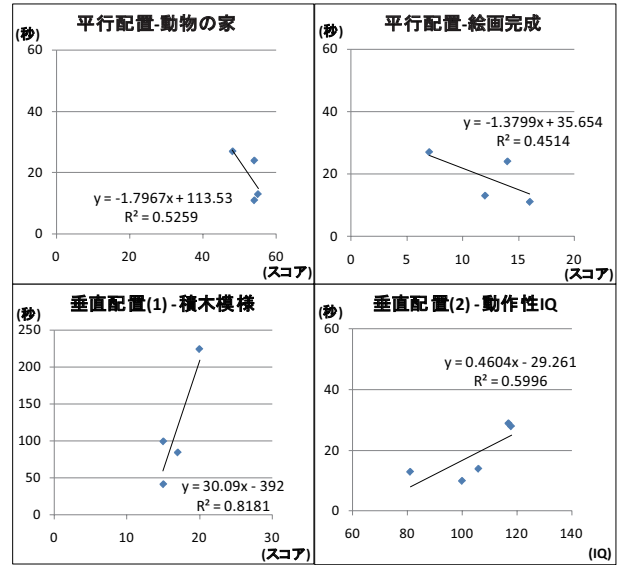


図 11 配置実験と WPPSI の相関

策に従い紙の関係を仮想空間内で表現する能力が必要であると考えられる。

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) を当てる検査であり、足りない部分を探すためには、1) 幼児自身が持っている空間と認知した空間を照らし合わせる能力が必要であると考えられる。また、動物の家は各動物の家に割り当てられた色の通りにコマを当てはめていく検査であり、早く正確に当てはめていくためには、2) 提示されている動物の家とコマの色の関係を一時的に記憶する能力、3) 一時的に記憶した関係を適切に現実空間において表現する能力が必要であると考えられる。

本システムの (1) および (2) と WPPSI の (1) および (2)、また、本システムの (2) および (3) と WPPSI の (3) のように、紙の配置実験に必要とされる能力と 2 つの下位検査の間には共通する能力が必要になっていると考えられ、相関が見られたと考えられる。

一方で、図 9 下段のように垂直配置実験 (1) と積み木模様、および垂直配置実験 (2) と動作性 IQ の間には本システムにおける所要時間が長いほど、WPPSI のスコアが高くなる、ゆるやかな相関が見られた。また、平行配置で相関が見られた動物の家と絵画完成との間には相関が見られなかった。

垂直配置に必要な能力は平行配置の場合と同様であると考えられる。また、積み木模様には 1) 提示された積み木の模様を把握する能力、2) 把握した模様にするためにタイルの向きや裏表をどうすれば良いかなどを推定する能力 3) 推定した方策に基づき、タイルを操作

する能力が必要になると考えられ、これは本システムの(1),(2),(3)とそれぞれ共通していると考えられる。しかしながら、本システムのスコアが低いほどWPPSIのスコアが高いという結果になった。その原因としては、まず、4.3節の回転実験と積木模様の相関と同様に、本システムでは立体的な表現を行うが、積木模様では裏表しがないタイルを使用し平面的な表現を行うために、必要となる基本的な能力が部分的に共通していても、その能力が有効に作用しなかったと考えられる。

次に、平行配置に比べて垂直配置の場合は実験を行う被験者の様子に違いがみられた。実験時に、動作性IQが高い被験者は少し紙を動かすとその状態を確認し、少しずつ目的の位置に近づけていき、そしてわずかなズレでも修正を行う様子が観察された。つまり、動作性IQが高い被験者は仮想空間において慎重に空間の認識と表現を行っているといえる。一方で動作性IQが低く、配置実験を完了できなかった被験者は思いつきと見えるような操作を行い、うまくいかなかった場合には諦める様子が観察された。

以上のように平行配置実験では、WPPSIとの間にゆるやかではあるが相関が見られ、WPPSIで測ることができる能力を本システムにおいても把握することができていると考えられる。また、垂直配置実験(1)および垂直配置実験(2)では逆の相関が見られ、空間表現能力の発達段階を可視化するツールとして使用する際には、提示した関係を表現できるまでの時間だけではなく、正しい関係までのズレの量や操作回数など、より正確に把握するためには様々なパラメータを導入していく必要があると考えられる。

5 おわりに

本論文では、幼児の空間表現能力の発達段階がどの段階にあるのかを把握するために提案した3D表現システムと、知能テストのWPPSI知能診断検査の比較実験を幼稚園において実施し、その評価を行った。

実験から、1)移動実験とWPPSIの一部の下位検査の間に相関が見られた、2)回転実験とWPPSIの間には相関は見られなかったが、回転実験は年齢層毎が高くなるほど本システムの結果が良くなった、3)平行配置実験とWPPSIの一部の下位検査の間に相関が見られた、4)垂直配置実験とWPPSIの間に相関が見られず、平行配置実験と垂直配置実験では被験者の操作の様子が異なった、という結果を得た。これらから次のような知見を得た。

- 本システムによって把握した発達過程はある程度知能テストによる発達過程に則している
- 空間表現能力の把握という観点から本システムはWPPSIで測ることが難しい能力を測定できている
- 配置実験によって取得した結果は単純に扱う事が難しく、様々なパラメータを導入していく必要がある
- 空間表現能力の把握という観点においては被験者に要求する時間が本システムの方が短い

今後の課題は、配置実験について、より良い実験手法の考案およびデータの判断手法の確立を行うことや、また、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に、継続した調査を通じてより詳細な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、園児への実験にあたり協力していただいた御父母の方々へ深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 田口雅徳, 幼児期の描画発達と空間認知の発達との関連, 広島大学大学院教育学研究科紀要, Vol.50 No.1, pp.73-82 (2002)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 東山明, 他, 神戸大学教育学部研究集録 72,73,83,84,85,86, 神戸大学, 1984-1990
- [5] 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, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.8 No.3, pp.579-586(2009)
- [6] 鈴木昭弘, 和嶋雅幸, 川上敬, 岡崎哲夫, 幼児の空間表現システムの開発と評価, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.9 No.3, pp.456-462(2010)
- [7] D. Wechsler, **Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence**, NCS Pearson Inc.(1967)
- [8] Glyn Thomas, Angele Silk, **An Introduction to the Psychology of Children's Drawings**, NYU Press, New York, 1990
- [9] 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, December 2007
- [10] David Wechsler(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)