

# ActiveCubeを用いた空間認知能力評価のための ユーザインタフェース

伊藤 雄一<sup>†1</sup> エフド シャーリン<sup>†2</sup> 北村 喜文<sup>†1</sup>  
岸野 文郎<sup>†1</sup> ベンジャミン ワトソン<sup>†3</sup>  
スティーブ ステファン<sup>†4</sup> リリ リウ<sup>†5</sup>

人の空間認知能力を評価するために、コンピュータを利用することで、その評価の一貫性を保ち、柔軟で信頼性が高く操作しやすいシステムを提案する。提案システムは、ブロックを組み立てることでの3次元形状をコンピュータにリアルタイムに入力することができるActiveCubeをユーザインタフェースとして用いて実装する。被験者実験の結果、実装したシステムは、被験者の空間認知能力やタスク完遂能力の違いを判断する感度を有し、さらに通常の紙や鉛筆を用いた3次元空間認識評価テストと同様の結果を得ることができることが示された。

## A User Interface for Spatial Cognitive Assessment Using ActiveCube

YUICHI ITOH,<sup>†1</sup> EHUD SHARLIN,<sup>†2</sup> YOSHIFUMI KITAMURA,<sup>†1</sup>  
FUMIO KISHINO,<sup>†1</sup> BENJAMIN WATSON,<sup>†3</sup> STEVE SUTPHEN<sup>†4</sup>  
and LILI LIU<sup>†5</sup>

Assessments of spatial, constructional ability are used widely in cognitive research and in clinical diagnosis of disease or injury. Some believe that three-dimensional (3D) forms of these assessments would be particularly sensitive, but difficulties with consistency in administration and scoring have limited their use. We describe a novel computerized user interface for 3D constructional assessment that increases consistency and promises improvements in flexibility, reliability, sensitivity and control. This user interface makes use of ActiveCube, which a user can input 3D shape to the computer in real-time. In testing, the proposal system was sensitive to differences in cognitive ability and task and correlated well to a standard paper-and-pencil 3D spatial assessment.

### 1. ま え が き

人の空間認知能力や形状構築能力の評価は、脳の負傷や傷害を検査し診断するための重要な医療手段であり、さらに脳の認知機能の研究においても不可欠なも

のである<sup>1),2),4)</sup>。評価は一般に、患者や被験者に心的回転 (mental rotation) のような純粋な認知タスクを与えるだけではなく、ブロックや、パズルのピースを並べるなどの構築タスクを与えることによって実施される。これらにより、空間認知能力だけでなく、知覚・計画・実行といった実際に日常生活に必要な能力を評価することが可能である。これまでにいくつかの研究において、2次元ではなく3次元形状を用いた構築タスクによる評価が重要であり、有益であることが示されている<sup>2)</sup>。しかし、3次元形状を用いる場合、タスク管理者の役割は、被験者へのタスクの提示や構築途中の3次元形状の記録、タスク完了時間の記録など複雑で多岐に及び、被験者ごとの記録の整合性と信頼性を確保することが困難であった。

そこで我々は、ブロックにマイクロプロセッサを実装し、ホストPCによって被験者がどのような形状を構築しているかをリアルタイムに記録し、得られた

†1 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

†2 カルガリー大学コンピュータサイエンス学部

Department of Computer Science, University of Calgary

†3 ノースカロライナ州立大学コンピュータサイエンス学部

Department of Computer Science, North Carolina State University

†4 アルバータ大学コンピュータサイエンス学部

Department of Computing Science, University of Alberta

†5 アルバータ大学作業療法学部

Department of Occupational Therapy, University of Alberta

データをタスク終了後に自動的に解析する空間認知能力評価のためのユーザインタフェースを提案する。被験者は、提示されたものと同じ形状をこれらのブロックを用いて 3 次元的に構築するタスクを与えられる。タスク実施中、被験者がどのブロックをどこにいつ接続したかという情報は、個々のブロックとホスト PC がリアルタイムに通信することによって、ホスト PC がすべて自動的に記録する。記録されたデータをタスク終了後に解析することで、その被験者の空間認知能力を評価することが可能である。このような空間認知能力評価のためのユーザインタフェースを実現するために、ActiveCube<sup>5)</sup> を利用する。

本論文では、まず、空間認知能力評価のためのユーザインタフェースについて述べ、実際に ActiveCube を用いて実装した空間認知能力評価のためのユーザインタフェースの詳細について述べる。さらに被験者に対して実施した実験とその結果について述べ、最後に考察する。

## 2. 空間認知能力評価のためのユーザインタフェース

実物体を用いて人の空間認知能力を評価する手法は知覚心理学の分野で確立されており、特に、空間を知覚し、それに基づいて運動を行うための形状構築能力の評価を用いて、空間認知能力を評価する手法が利用されている<sup>2)</sup>。形状構築能力は日常生活で必要とする能力と関係が深く、その欠陥や異常は脳の損傷によって引き起こされたり<sup>1),2)</sup>、アルツハイマー病 (AD)<sup>3)</sup> や他の病気によって引き起こされたりする<sup>1)</sup>。形状構築能力は通常、平面パズルを組み立てたり、ブロックを組み立てたり、絵を描いたりすることによって測定・評価される。これらのタスクは言語・文化に依存せず、タスクの選択肢が多く、精度も高い。また、平面パズルのような 2 次元のテストに比べると、ブロックの組み立てなどの 3 次元のテストの方がより高精度で評価できることが知られている<sup>2)</sup>。このように、形状構築能力評価のタスクは、被験者にある空間パターンを提示し、それと同じパターンを与えられた手元の物体を組み合わせて構築するというものが一般的である<sup>2)</sup>。タスク管理者は、タスク完了時間や正確さ、さらに組み立てた順序や戦略など、被験者が実際にタスク中に行った動作を記録し、解析することで、被験者の形状構築能力を評価する。

2 次元の形状構築能力評価はすでに広く使用されている。よく知られているテストとして、たとえばウェクスラー法がある。これは 11 個のサブテストから構

成され、そのうち絵画完成テストと積み木模様テストの 2 つが 2 次元形状構築能力評価に関するテストである。絵画完成テストは平面パズルを解くテストで、積み木模様テストは、赤と白のブロックを与えられたパターンと同じように配置するテストである。これらのテストではタスク完了時間と正確さを測定し、解析することで、構築能力を評価する<sup>1),2)</sup>。

一方、3 次元の形状構築能力評価は一般的であるとはいえない。この例としては Hecaen らによるものや、Benton らによるものがあり<sup>2)</sup>、被験者は木でできたブロックを組み立て、提示された 3 次元形状に一致させるというタスクを行う。その後、タスク管理者はタスク完了時間と正確さを測定・解析し評価する。しかし、被験者に対して複雑な 3 次元形状が提示された際、たとえ正確さといった単純な項目の測定であっても、タスク管理者が手動でそれを記録するのは困難である。これは、提示された複雑な 3 次元形状をタスク管理者自身も認識する必要があり、また、それをノートなどへ記録することは、3 次元形状を 2 次元平面へ投影するという、比較的難しいタスクであることがあげられる。また、提示された 3 次元形状と組み立てられた形状の類似度の算出に関しても、タスク管理者に対してある程度の空間認知能力を要求とする。さらに、組み立てた順序やその戦略のような、より複雑な測定を手動で行うことは、相応のスキルを持ち、専門のトレーニングを積んだタスク管理者でも難しい。

また、様々な認知能力評価テストをコンピュータによってサポートしようとする試みがなされており、よく使用される筆記式テストでは、タスクの完了時間などを自動的に測定し、結果を解析するなど自動化が進んでいる<sup>1)</sup>。これら自動化の利点は、タスク管理者の負担を軽減し、主観的な評価を排除し、テストの信頼性を高めることである。またコンピュータによるタスク管理は、前に行ったタスクの結果を用いて次のタスクを動的に変化させるといったことも可能であり、専門家でも細心の注意が必要となるような詳細な測定値の連続的な収集も可能である。さらに、コンピュータによって自動化された評価は管理が簡単であり、専門のトレーニングを積んだタスク管理者を必ずしも必要とせず、手動で記録するときに発生しがちな見落としなどもない。

以上のように、空間認知能力を評価するために 3 次元の形状構築能力の評価を用いる手法は、精度が高く有益であるが、手動でその測定を行うのは困難であり、タスク管理者にかかる負担も非常に大きい。そこでコンピュータで自動化することにより、タスク管理者の

負担を軽減し、主観的な評価を排除し、さらに信頼性を高めることが可能である。本章以降では、これを実現するために ActiveCube を用いて実装した空間認知能力評価のためのユーザインタフェースの詳細について述べる。

### 3. ActiveCube による空間認知能力評価のためのユーザインタフェース

本章では、まず実装システムの概要、およびハードウェアとソフトウェアについてそれぞれ述べる。さらに実装したシステムを評価するために行う実験システムについて述べる。

#### 3.1 概要

コンピュータで自動化された 3 次元空間認知能力評価のためのユーザインタフェースを、ActiveCube を用いて実装する。ActiveCube は、1 辺が 5 cm 角の立方体のブロックからなり、ユーザが組み立てつつある形状をリアルタイムにコンピュータに入力することができるリアルタイム 3 次元形状モデリング機能を有し、さらに、ブロック自体に各種のセンサやアクチュエータなどを実装することによって、ユーザの操作意図を入力し、計算機内でのシミュレーション結果を表示することによるリアルタイムインタラクション機能を有する双方向ユーザインタフェースである<sup>5)</sup>。本論文において実装するシステムでは、リアルタイム 3 次元形状モデリング機能を用いる。

本論文で実装するシステムでは、被験者の目前にプロジェクタ投影によって被験者に組み立てるべき 3 次元形状（ターゲット形状）を提示する。その形状を一定の速度（毎分 2.7 回）で鉛直軸まわりに回転させ、被験者にその形状の詳細な情報を提示する。被験者はプロジェクタ画面を見ながら、その形状を ActiveCube を用いて作成する。ブロックを接続するとチャイム音が鳴り、分離すると異なったチャイム音が鳴るようにする。システムはタスクが開始された後、接続や分離が発生するとその時刻と位置を記録する。被験者はブロックを用いて構築した形状に満足した時点でタスク管理者にその旨を報告する。タスク管理者はその時点でそのタスクを終了し、ブロックをすべて分離して次のタスクを開始する。すべてのタスクが終了すると、タスク管理者は記録されたデータを用いて提示された形状と実際に被験者が組み立てた形状の類似度を算出し、3 次元空間認知能力を評価する。本システムでは、この過程はオフラインで実行するものとする。

#### 3.2 ハードウェアとソフトウェア

ActiveCube システムでは、接続されたブロックは

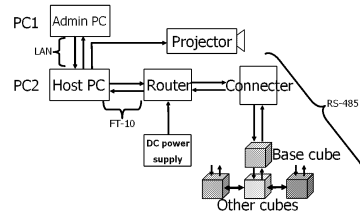


図 1 空間認知能力評価システムの構成図

Fig. 1 The configuration of spatial cognitive assessment system.

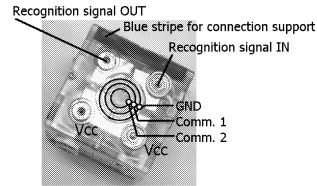


図 2 ActiveCube の外観

Fig. 2 ActiveCube.

米 Echeron 社の LON (Local Operating Network)<sup>6)</sup> と呼ばれる知的分散制御を可能とする技術を利用してネットワーク化され、各々ホスト PC によって管理・制御される。ホスト PC とこれらのブロックの接続は図 1 に示すようにベースブロックとルータを介して行われる。ホスト PC は接続されたブロックとリアルタイムに通信し、接続・分離情報を収集し、ツリー状のブロック接続マップをリアルタイムに更新することによってブロック全体の形状を認識する。さらにホスト PC にはプロジェクタが接続され、被験者にターゲット形状を提示する。実装システム全体の管理は、ホスト PC に LAN を用いて接続された管理 PC 上の GUI ベースのアプリケーションで行う。タスク管理者は、このアプリケーションを用いてタスクの選択と開始・終了を制御できる。また、ホスト PC によって収集された接続・分離情報はリアルタイムに管理 PC に送信されるため、実際に被験者が構築している形状をリアルタイムに観察し、さらに、システム全体の状況を把握することが可能である。さらにホスト PC と管理 PC は LAN によって接続されているので、被験者にプレッシャを与えないように遠隔地からシステムを制御することも可能である。

一方、ActiveCube のブロックの各面には、図 2 に示すように電源や通信用の端子が存在し、オスとメスの接続ホックが固定されている。このためブロックの接続は、面どうしを 180 度回転させなければならないという制約があり、年輩者や目の悪い被験者が接続作業を行うにはある程度困難をとまう。そこで、図 2 に示すように、面のある一辺に青いテープを貼

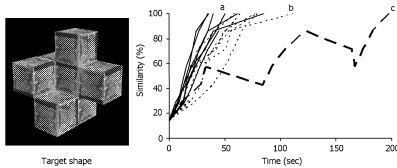


図3 あるタスクのターゲット形状と、全被験者の類似度と時間のグラフ (a: 若者, b: 年輩, c: 軽いアルツハイマー病患者)  
Fig. 3 Similarity vs. time graphs for all participants in one task.

り、テープどうしを合わせるようにすれば接続できるようにし、ブロックの接続を容易なものとする。

### 3.3 測定データ

被験者の空間認知能力の評価のために、類似度 (Similarity)・タスク完了時間 (Last connect)・達成速度 (Derivative)・安定性 (Zero crossing) の4つの測定データを用いる。

類似度: 被験者が構築した形状  $s$  と提示された形状  $p$  の類似度を式 (1) を用いて算出する。

$$S = 100 \cdot \left( \frac{|i|}{|p|} - \frac{|s| - |i|}{|p|} \right) \quad (1)$$

ここで、 $i$  は  $s$  と  $p$  を重なる部分が最大となるように重ね合わせたときの共通部分を表し、 $|i|$  と  $|s|$  と  $|p|$  は形状  $i, s, p$  に含まれるブロックの数を表す。式中の  $\frac{|i|}{|p|}$  の部分は  $s$  と  $p$  が類似している割合を示し、 $\frac{|s| - |i|}{|p|}$  は  $s$  と  $p$  の非類似割合を示す。つまり類似度は、(一致しているブロックの数) - (余分についたブロックの数) を提示された3次元形状のブロック数で正規化した値として算出されることになる。この値が大きいほど、被験者はターゲット形状に近い形状を正確に組み立てられたといえる。ただしこの値は、被験者が組み立てて形状に満足した時点での正確さを表すため、組み立て過程における組み立ての正確さを判断することはできない。類似度は接続・分離のイベントごとに計算される。図3に、あるタスクのターゲット形状と、全被験者の類似度と時間の関係を一例として示す。

タスク完了時間: タスクを開始してから、被験者が最後の接続あるいは分離を行った時間とする。

達成速度: 類似度と時間のグラフ (図3) のタスク開始時の点と終了時の点を結んだ線分の傾きを求め、達成速度とする。この値が大きければ大きいほど、被験者が速く正確にタスクを達成しているといえる。

安定度: 類似度と時間のグラフ (図3) の傾きが正から負、負から正へと変化した回数を数える。この値が小さければ小さいほど、被験者は迷うことなく提示された形状に近づくようにブロックを組み立てていると

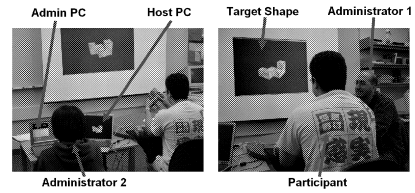


図4 システムの外観  
Fig. 4 System overview.

いえ、安定度は高い。すなわちこの値は、被験者が組み立て過程において、いかに正確に組み立てているかを判断する指標となる。

### 3.4 実験システム

図4に実装したシステムの外観を示す。図中の Admin PC はタスクを管理する PC であり、Host PC は ActiveCube を制御し、同時に被験者に3次元形状を提示する PC である。また、被験者の前方にはプロジェクタによってターゲットとなる3次元形状が提示され、被験者は手元の ActiveCube のブロックを組み立てて、形状を一致させる。管理者は、Administrator1 が被験者へのタスクの説明およびサポートを担当し、Administrator2 が Admin PC を用いてタスクの選択や開始、さらに終了を行う。

## 4. 被験者実験

本章では、提案システムを評価するために行った実験について述べる。まず、予備実験によって、提示するターゲット形状の回転速度や被験者とスクリーンまでの距離などのパラメータを決定する。次に、被験者の空間認知能力の差異に対し、提案システムによって得られたデータが、有意差を提示できるくらいの感度を持っているかどうかを調べるための、認知感度実験を行う。最後に、一般的に実施されている3次元空間認知能力評価のための筆記試験との比較実験を行う。

### 4.1 実験概要

#### 4.1.1 実験に用いるタスク

実験における各タスクは次の2つの原則に基づいて決定される。まず1つ目は、タスクは多様でありかつ楽しくなければならぬという原則である。これは、被験者がタスクの途中で興味を失うことなく、被験者の空間認知能力のレベルに応じた評価の精度を十分に保証するために必要である。2つ目は、各タスクは被験者にとって簡単なレベルから徐々に難しいレベルへと移行させなければならぬという原則である。これにより被験者は提案システムに慣れることができ、また、自分の空間認知能力の限界を簡単に知ることができるので、フラストレーションを感じることなく、タ

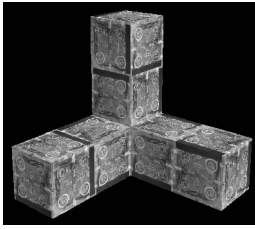


図5 Reshape タスクの初期形状

Fig. 5 The initial structure of the Reshape task.

スクをすぐに終了することができる。

我々はこの原則に基づいて, Intro, Follow, Match, Reshape の4種類のタスクを決定した。Intro タスクは単純な練習タスクで, 被験者に実験に用いるシステムを紹介し, 説明する。このタスクでは, ブロックを接続するたびに新しいターゲットブロックが1つずつ追加される形で被験者に提示され, 被験者は提示されたブロックと同じ場所に手元のブロックを接続する。もし, 被験者が上手に接続できない場合は, 管理者がアドバイスを与える。Follow タスクも同様に1個ずつ被験者にターゲットブロックが追加提示されるが, 管理者はアドバイスせず, 被験者は自分が構築した形状に満足した時点でタスクを終了する。Match タスクでは, 最初に被験者が構築すべきターゲット形状が提示され, 自分なりの手順でブロックを組み立てていくことで, 提示された形状を構築する。これら3つのタスクにおいて, 被験者は, ベースブロックのみの1個の状態から組み立て始めることが要求される。一方, Reshape タスクは, 基本的なタスクの内容は Match タスクと同一であるが, 被験者の手元のブロックの初期状態はブロック7個を用いた, 図5に示す3次元形状からスタートし, 接続・分離を繰り返して再構築することで, 提示されたターゲット形状を組み立てる。Reshape タスクにおいて, 被験者はターゲット形状と手元の形状との差分を認識し, いかに少ない接続・分離回数でターゲット形状を構築できるかが求められる。これにより, 被験者の戦略に関するデータが取得できると考えられる。そのため, ターゲット形状は図5の形状をベースにタスク数分用意する。

Intro と Follow タスクは, 次のブロックをどこに接続すべきかを提示するため, Match と Reshape タスクに比べて空間認知能力を使うことは少ないと考えられ, Reshape タスクは初期状態が3次元形状であるため, Match タスクに比べてより高い空間認知能力を必要とすると考えられる。これにより, タスクは Intro, Follow, Match, Reshape の順番に実行することにする。個々のタスクにおいて提示されるターゲット形状

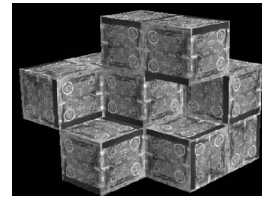


図6 被験者に提示される形状の一例

Fig. 6 An example shape presented to participants.

に関しても, 使用されるブロックの数, 形状の対称性, 2次元形的かあるいは3次元形的かなどによって難易度を適宜設定し, 難易度が低いであろう形状から開始するようにする。実験では39種類の形状を使用し, その内訳は Intro: 6種類, Follow: 8種類, Match: 15種類, Reshape: 10種類である。その中で, ブロックを平面的にのみ並べる2次元形的形状は14種類, 3次元形的形状は25種類である。図6に被験者に提示されるターゲット形状の一例として, Match タスクで使用する10個のブロックで構成された3次元形的形状を示す。

#### 4.1.2 実験手順

被験者が座っている椅子の前にはテーブルが置かれ, その上には ActiveCube のブロックのみが存在する。被験者にターゲット形状を提示するスクリーンは, 対角線が125 cm で, 被験者から185 cm の距離に置かれる。部屋の明るさは全被験者で共通となるように調整する。

実験に先だって, システムの概要, 実験の目的, 被験者はいつでも実験を終了することができることを被験者に説明し, できるだけ早く, 正確にタスクを終了するように求める。さらに, 被験者が構築するブロックの接続順を正確に記録するため, ブロックを複数個同時に接続することはせず, 1個ずつ接続してもらう。なお, 複数個同時に分離する場合は, システムが再帰処理により, ブロックが1個ずつ同時刻に分離されたと判断し, 記録されるので問題とはならない。システムは, 被験者が構築した形状に関してそれが正解であるかどうかという情報は与えない。最初の Intro タスクにおいてのみ, タスク管理者がその情報を与えることとする。なお, Follow, Match, Reshape の各タスクの間に, 被験者に休憩をとってもらう。実験終了後, 被験者にシステムや実験についてインタビューする。実際の実験は, 1人あたり約90分であった。

もし, 実験中に構築形状が崩れたり, システムがハングアップしたりした場合は, 被験者にその形状作成を最初からやり直してもらう。また, 被験者の操作に5分間進展が見られない場合は, 管理者は形状構築を終了するかどうか被験者に尋ねる。さらに, 管理者が,

その形状構築が被験者にとって非常に難しく、完遂が難しいと判断した場合は、そのタスクをスキップして次の形状構築タスクを実行するように求めることとする。

#### 4.2 予備実験

22 歳から 43 歳までの健康な若者 14 人（男性 11 人、女性 3 人）を被験者として予備実験を行い、ターゲット形状の回転速度など、タスクで使用するパラメータを調整する。ターゲット形状の回転速度に関しては、被験者は手元の形状とスクリーンに表示されたターゲット形状を交互に見比べるため、速すぎるとターゲット形状がどこまで回転したかを見失い、遅すぎると見たい部分がなかなか表示されずいららす。そこで、回転速度をいろいろ変更してアンケートをとり、全被験者が満足した速度（毎分 2.7 回）を採用した。スクリーンと被験者の位置関係に関しては、被験者が手元の形状を見つターゲット形状も見ることができないように決定した。また、用意していた 39 種のターゲット形状の中で、バランスが悪く崩れやすい形状を廃し、さらにブロックの重量バランスなどによる制約も考慮し、最大 10 個のブロックを用いたターゲット形状を選択した。また、システムエラーは 3 種類存在することも分かった。最も深刻なエラーは、実際には発生していない接続・分離をシステムが報告することであった。これは、後段の解析の段階で手動で排除することにした。また、何度かシステムがハングアップしてしまうというエラーも発生したが、これはもう一度エラーが発生したタスクを被験者にやり直してもらうことで対処した。最後のエラーは、ブロックの接続不良によりブロックが崩れてしまうエラーである。このエラーが発生した際、被験者はタスク管理者の指示を待たず、即座にはずれたブロックを再接続することが多いため、10 秒以内に複数ブロックが連続して分離され、再接続された場合には、組み立てつつある形状が崩れてしまったと判断し、無視するようにフィルタリングを行った。

#### 4.3 認知感度実験

##### 4.3.1 実験概要

提案システムが被験者の空間認知能力の差異に対する感度を持っているかを確認するために、空間認知能力の違いが顕著に表れるとして知られている、年齢、タスクの種類、形状の種類（2 次元的、3 次元的）の 3 つの要素に対する、提案システムの反応を調べる。空間認知能力は年齢とともに徐々に失われていくといわれているので、若い被験者の方が年輩の被験者よりも良い結果が得られると予想できる。また、タスクの種

表 1 認知感度実験におけるエラー試行とフィルタリング、あるいは繰り返されたタスク

Table 1 Error trials and filtered or repeated trials in the cognitive sensitivity study.

Trial Description	Frequency
Total trials:	621 (100%)
Error trials:	
Connect errors	26 (4.2%)
Sys crashes w/o connect error	13 (2.1%)
Trials without error:	582 (93.7%)
Remaining affected trials:	
Repetitions	21 (3.6%)
Filtered collapses	81 (13.9%)

表 2 被験者のグループと形状・タスク種類による試行回数

Table 2 Completed trials in the cognitive sensitivity study by participant group, shape and task type.

Group	Overall	Shape Type			Task Type		
		2D	3D	intro	follow	match	reshape
young	270	97	173	41	56	103	70
elderly	246	97	149	42	56	88	60
AD	63	27	36	12	15	24	12

類のうち、複雑な形状組み立てよりも簡単な形状を組み立てるタスクの方が、空間認知能力と計画能力をあまり必要としないため、より短い時間で良い結果を得られるようになる予想できる。同様に、3 次元的形状を扱う際にはより高度な空間認知能力を必要とするため、3 次元的形状よりも 2 次元的形状を構築する方が良い結果が得られると期待される。また、アルツハイマー病の進行にともなって空間認知能力は一般に低下するので、提案システムのこの病気に対する感度を調べる実験も行う。アルツハイマー病に対する治療法は現在のところ存在しないが、早期発見することにより、患者の精神的負担を緩和し、さらに生活の質（QOL: Quality of Life）を高めることが可能である<sup>7)</sup>。本実験におけるアルツハイマー病の被験者数は少ないが、いくつかの知見を得ることができた。

##### 4.3.2 結果

24 歳から 86 歳までの 16 人（男性 12 人、女性 4 人）の被験者に対して実験を行った。なお、若者は 7 人、年輩者（60 歳以上）は 7 人、早期のアルツハイマー病患者は 2 人であった。

まず、得られた結果の中で 4.2 節で述べたようなシステムのクラッシュや、接続・分離情報のエラーを排除し、ブロックが崩れてしまうことによるフィルタリングを行った。表 1 に実験中に発生したこれらのエラーの数を示す。

各被験者のグループに対し、形状とタスクの種類を変えて行った試行のうち、完了したものを表 2 に示す。また、全実験の結果から、Intro タスクのデータとアルツハイマー病患者のデータを除いた結果を、表 3 および表 4、図 7 に示す。アルツハイマー病の被験者が少ないのでその結果の分散を解析しなかった。さ

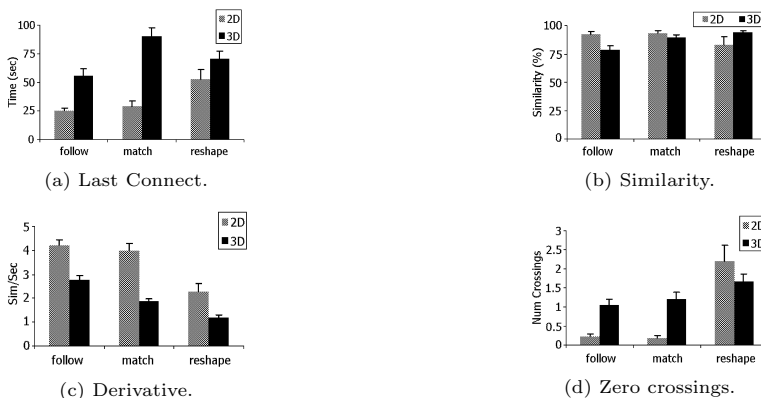


図 7 形状の種類とタスクの種類と 4 つの測定値

Fig. 7 The effect of the shape x task type interaction on 4 measures.

表 3 認知感度実験における Intro タスクと AD 患者の結果以外の 3 元分散分析の結果

Table 3 Results of three way ANOVA in cognitive sensitivity study. Intro trials, AD participants excluded.

Indep Meas	Depend Meas	ANOVA
age	last connect	F(1,13)=23.82, p<.00005
age	derivative	F(1,13)=71.21, p<.00001
task type	last connect	F(2,26)=4.7, p<.01
task type	similarity	F(2,26)=4.96, p<.01
task type	zero crossings	F(2,26)= 7.58, p<.001
task type	derivative	F(2,26)=34.32, p<.00001
shape type	last connect	F(1,13)=37.24, p<.00001
shape type	similarity	F(1,13)=3.9, p<.05
shape type	zero crossings	F(1,13)=13.07, p<.0005
shape type	derivative	F(1,13)=137.15, p<.00001
ttype x stype	last connect	F(2,26)=3.22, p<.05
ttype x stype	similarity	F(2,26)=6.02, p<.005
ttype x stype	zero crossings	F(2,26)=3.93, p<.05
ttype x stype	derivative	F(2,26)=4.16, p<.05

表 4 年齢のタスク完了時間と達成速度に対する影響 (カッコ内は標準誤差)

Table 4 The main effect of age on last connect and derivative. Means are presented with standard error in parenthesis.

Dependent Measures	Age		
	young	elderly	AD
Last connect (sec)	48.45 (3.5)	76.33 (5.3)	91.24 (8.8)
Derivative (sim/sec)	3.02 (.13)	1.97 (.1)	1.43 (.16)

らに年輩者の被験者の中には全実験を終了することができない人もいた。そのため分散分析では年齢要素は不均衡となる。ここで、タスクの種類と形状の種類はタスク設計の段階ですでに不均衡である。解析にはタスク完了時間、類似度、達成速度、安定性それぞれの要素について 3 元不均衡分散分析 (年齢 x タスクの種類 x 形状の種類) を用いた。なお, ttype は task type, stype は shape type を表す。

表 3 よりこれら 3 つの要素 (年齢 x タスクの種類 x 形状の種類) は、すべて期待したとおりの影響を及ぼ

していることが分かる。年齢に着目すると、表 4 のように、年輩の被験者は若者に比べタスクを完了するのに時間を必要とし、その進捗は遅いことが分かる。また、図 7 に示す、4 つの測定値に着目すると、形状の種類が大きな影響を及ぼしていることも分かる。Follow, Match では、2 次元的形状の構築の方が、より早く、より正確にタスクを終了させることができ、その操作も安定していることが分かる。しかし、Reshape では、図 7 (b) に示すように、3 次元的形状の方が類似度が高い。これは 4.1.1 項で述べたように、Reshape で使用するターゲット形状が初期形状をベースに構成しており、3 次元的形状の方が、2 次元的形状よりも初期形状に近いためであると考えられる。そもそも類似度は、被験者が構築し終えた形状に満足した (あるいはギブアップした) 時点で形状の類似度であり、開始直後の初期形状で被験者がタスク完了としても、ある程度高い類似度が算出される。このことは図 7 (c) のグラフの達成速度が他のタスクよりも低く、図 7 (d) のグラフの安定度において、2 次元的形状の方が安定度が低いことから分かる。

タスクの種類は 4 つのすべての測定値に影響を及ぼしている。Follow において、図 7 (a), (c), (d) に示すように、被験者は最も早く、正確にブロックを組み立て、操作も安定している。しかし、図 7 (b) のように 3 次元的形状の類似度は最も低い。これは、ある程度数のブロックが接続された段階で、接続すべき新しいブロックが被験者に提示された際、ターゲット形状が 3 次元的形状である場合は、どこに新しいブロックが出現したのかわからなくなり、手元にある形状との違いに関して混乱する場面があったことによるものと思われる。一方、Match と Reshape では、ターゲットとなる 3 次元的形状はすでに提示されているので、

このような混乱が発生しなかったと考えられる。また、Match と Reshape における類似度は 3 次元的形状においては Reshape の方が若干高いもののほぼ一致したが、Match における達成速度は Reshape に比べ高く、安定していた。これは、前述のように、Reshape における初期形状がターゲット形状と近いためであると考えられる。また、図 7(a) より、Match のタスク完了時間が他のタスクに比べ大幅に大きい。これは、Reshape よりもターゲット形状が複雑で、ブロックが 1 個の状態から始めなければならない、さらに、表 3、表 4 より、Reshape や Follow よりも多いタスク回数を年配の被験者が行ったためであると考えられる。

図 7 に示す、4 つの測定値を参照することで得られる知見としては、2 次元的形状構築タスクでは、Follow と Match の 4 つの測定値がほぼ一致しており難しさはあまり変わらない。それらと比較して、Reshape は最も難しいことが分かる。一方、3 次元的形状構築タスクにおいては、前述の理由よりタスク完了時間と類似度を除いて、Follow、Match、Reshape の順に難しくなることが分かる。

#### 4.4 筆記試験との比較実験

##### 4.4.1 実験概要

3 次元空間認知評価のために筆記試験として通常使用される心的回転テスト (MRT)<sup>8) - 10)</sup> との相関関係を調べるための比較実験を行った。MRT は、提案システムと同様に 3 次元の空間認知能力を評価するためのテストであるが、被験者の形状構築能力や計画能力を必要としない。実験は、提案システムによる 4.3 節の実験と同じタスクの前後に MRT を行い、その結果を比較するものである。

##### 4.4.2 結果

4.3 節の実験には参加していない若者 12 人 (年齢 34 歳未満の男性 8 人、女性 4 人) の被験者で実験を行った。前の実験と異なり、この実験では年輩者やアルツハイマー病患者を被験者としなかったため、4 つの測定データは一樣に良い成績であった。システムのエラー発生頻度は前の実験と同様であった。図 8 に示すように、実験の前後に行った MRT の結果を比較すると、12 人中 9 人の被験者の成績が改善され、さらにほぼ 90 点以上の成績を修めた。MRT を繰り返し実行することで 3 次元空間認知能力が改善されることが知られているが、その改善率は通常 5% であると報告されている。

MRT の結果と提案システムによる実験結果の相関を調べると、表 5 に示すとおり、明らかに強い相関があったが、なかでも達成速度が最も強い相関を示し、

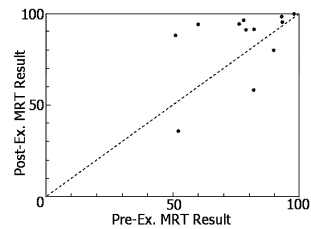


図 8 実験前後の MRT の結果

Fig. 8 Results of Pre-Ex. MRT and Post-Ex. MRT.

表 5 実験前の MRT と実験の相関。有意差 ( $p < .1$ ) はボールド ( $p < .05$ ) はイタリック

Table 5 Pre-Ex. MRT/Experiment correlations. Significance: ( $p < .1$ ) in bold, ( $p < .05$ ) in italics.

Dependent Measures	Overall	Shape Type		Task Type		
		2D	3D	follow	match	reshape
Last connect	-0.38	<b>-0.49</b>	-0.35	<i>-0.63</i>	-0.35	-0.24
Similarity	0.03	-0.36	0.17	0.16	-0.09	0.08
Derivative	<b>0.51</b>	0.38	<i>0.57</i>	0.43	<b>0.50</b>	0.34
Zero crossings	-0.23	0.07	-0.25	-0.14	-0.45	0.11

タスク完了時間に関してもやや強い相関が見られ、安定性と類似度に関しては相関は弱かった。これは、類似度自体が一樣に高かったことによるものと考えられる。3 次元的形状構築の方が 2 次元的形状構築に比べて若干相関が強く、Follow が最も強い相関を持ち、Match もそれに次いで強い相関を持っていることが分かった。一方、Reshape はほとんど相関を持たないことが分かった。

## 5. 考察

本章では、実験によって得られた結果から提案システムについて考察し、提案システムの利点と現状の制約について述べる。

### 5.1 認知感度実験について

空間認知能力を使った作業のパフォーマンスは、年齢や認知能力への負荷、形状の複雑さなどが増加するとともに低下すると考えられる。提案システムを用いた実験では、これらのことに関して満足できる実験結果が得られた。また、被験者ごとの実験結果には有意差が存在し、被験者の空間認知能力の差異を提示可能であるとの知見も得られた。このことより、空間認知能力を評価するシステムが構築できたと考えられる。ブロックを用いた既存の空間認知能力評価ツールを利用した場合、今回得られた測定値のうち、タスク完了時間と、類似度は比較的容易に取得可能であるが、これらのデータは被験者のタスク中のパフォーマンスを正確に測定できるとはいえない。達成速度や安定度を評価に用いることで、ターゲット形状と組み立て形状の相違を被験者がどのように認識していたのか、また、



その組み立ての戦略などといった、組み立て過程の評価を行うことができる。

また、提案システムは、アルツハイマー病の発見に関してある程度の感度が得られることが分かった。被験者は2人しかいなかったが、図3や表4が示すように、他の年輩の被験者と比べても明確な差を得ることができた。今後、提案システムがアルツハイマー病と他の要因による空間認知能力の欠如を区別できるかどうかなどについて、さらなる実験が必要である。

最後に、提案システムを用いることで、よく知られた認知的要素の測定と比較が可能であることが分かった。今後、実際の空間認知能力評価の場で提案システムを使用するためには、被験者数を増やし、既存の他のテストと比較することで、空間認知能力の評価基準を決定する必要があると考えられる。

### 5.2 筆記試験との比較実験について

現在広く普及している MRT の結果との相関関係を調べることにより、測定値では達成速度、ターゲット形状の種類では3次元的形状、タスクでは Follow, Match が強い相関を持つことが分かった(表5)。このことから、3次元的形状を用いた Follow タスクあるいは Match タスクを用いて達成速度を測定することにより、被験者の空間認知能力に関して、MRT と同様の結果を導く可能性のある測定値を抽出することが可能であると考えられる。また、達成速度はタスクごとに独立して測定することが可能であり、今回の実装ではオフラインで計算していたが、リアルタイムに計算することも可能である。これにより、タスク終了時点で達成速度に応じて動的にタスクを切り替えることで、最初はだまかに測定し、徐々に細かく空間認知能力を測定するといったシステムを構築可能である。

一方、実験タスク前後に行った MRT の結果を比較することで、提案システムにより被験者の空間認知能力を刺激し、高めることができることが分かった(図8)。これを用いることでトレーニングやり八ピリの新しいツールを作成することができるかもしれない。

### 5.3 提案システムの利点と制約

提案システムを用いることで、既存の空間認知能力評価のための構築能力評価ツールに比べて、次の利点がある。

一貫性：提案システムでは、タスクの管理や被験者が行った操作の記録はすべてコンピュータにより自動的に行われ、タスク管理者のスキルや主観の影響を受けることがなく、評価の一貫性を保つことができる。

感度：構築能力評価のためのツールには、被験者の認知能力の優劣を判断するための感度が求められる。3

次元形状を用いた構築能力評価は、2次元形状を用いた評価に比べて感度が高い。さらに提案システムを用いることで、他のテストで無視されていたタスク途中の被験者の操作などを用いた評価が可能である。

コスト：提案システムは、筆記試験のようなテストに比べて環境構築の金銭的成本は高い。しかし、他の3次元形状構築テストでは、タスク管理者がトレーニングを必要とし、それ相応の専門の知識が必要となり、それによる金銭的・時間的コストが必要である。また、提案システムはタスク開始からその評価までをすべて自動で行うことが可能であり、時間的コストを大きく減らすことが可能である。また、すべての操作が自動的に記録されるので、タスク管理者側のミスなどによる実験のやり直しを必要とせず、被験者にとっても時間的コストを削減することが可能である。

今回行った実験では、医学的知識を持たない著者らがタスク管理者を務めており、実験遂行およびデータ取得に関して、医学的な特殊スキルや知識を必要としないことが分かる。ただし、コンピュータの取扱いや ActiveCube ハードウェアの取扱いに関しては知識が必要である。このことは、今回実装したプロトタイプシステムをさらに改良し、取扱いを簡単化することで、病院においてだけでなく、学校や家庭、老人ホームといった場所で簡単に空間認知能力を測定することができるようになる可能性を示唆している。

一方、著者らが行った実験は、提案システムが、今後、人の認知能力を評価するためのツールとなりうるかどうかを確認するためのものであり、人間の認知機能そのものに関する科学的な疑問に答えるものではない。また、実験においては、タスクの種類や難しさを無作為に決定したりすることはせず、徐々に難しくなるように適当に順序を決めて実験を行った。これは、被験者が現在の形状構築を完遂することができない場合に、そこでタスクを終了させるためであり、実際に、年輩者やアルツハイマー病の患者が被験者である場合に役立った。また、このことは、実験が全被験者に対して、つねに Follow, Match, Reshape の順に行われることを意味し、タスクの順序が結果に影響している可能性があることを示している。

さらに、年輩者やアルツハイマー病患者の被験者は、タスクを完遂することに困難をとめない、表2に示すように、一部の被験者のみがすべてのタスクを完遂することができた。このことは、年齢による比較要素を不均衡とするが、それでも全体的には、若者の方が年輩者やアルツハイマー病患者よりも良いパフォーマンスを示している。

最後に、被験者が組み立てつつある形状が崩れてしまったり、システムがハングアップしたりする問題がある。システムのハングアップによる再試行の回数は少なかったが、形状が崩れることによるフィルタリングの回数は多く、年輩の被験者が、3次元形状構築タスク途中で発生させることが多かった。これは、接続ホックを正しく深く接続できていないことに起因するものがほとんどであり、深く接続するためにはある程度の力を必要とするためであると考えられる。またこのことは、年齢と形状の種類が影響する実験結果に、影響を与えていると考えられる。

これらのことをふまえ、今後、システムの単純化やハードウェアの改良を行い、同時にタスク自体の見直しや空間認知能力測定のオンライン化などを行っていく必要がある。さらに、アルツハイマー病患者への被験者実験を増やすことで、病気の早期発見や患者のQOLの向上に役立てていきたいと考えている。

## 6. む す び

本論文では、コンピュータを利用し、評価の一貫性を保ち、柔軟で信頼性が高い、3次元形状構築能力を評価するためのユーザインタフェースをActiveCubeを用いて実装するシステムを提案した。また被験者実験を行い、提案システムを用いることで被験者の認知能力やタスク完遂能力の違いを示し、さらに通常の紙や鉛筆を用いた3次元空間認知能力評価と同様な結果を得ることができることを示した。

今後は、システムの制約を取り除き、実際の認知能力評価の場で使用するために、被験者数を増やし、本システムを用いた認知能力評価基準を決定する必要があると考えられる。

謝辞 システムの試作にあたり、ご協力いただいた株式会社システムワットの菊池日出男氏に深い感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、文部科学省21世紀COEプログラム(研究拠点形成費補助金)の研究助成、科学研究費補助金基盤研究(C)17500069の研究助成を受けた。

## 参 考 文 献

- 1) Groth-Marnat, G.: *Handbook of psychological assessment*, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York (1997).
- 2) Lezak, M.D.: *Neuropsychological assessment*, Oxford UP, NY (1983).
- 3) Henderson, V.W., Mack, W. and Williams, B.W.: Spatial disorientation in Alzheimer's disease, *Archives of Neurology*, Vol.46, No.4,

pp.391-394 (1989).

- 4) 大山, 今井, 和気(編): 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 第1部, 第8章, 誠信書房(1994).
- 5) 伊藤, 北村, 河合, 岸野: リアルタイム3次元形状モデリングとインタラクションのための双方向ユーザインタフェース ActiveCube, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6, pp.1337-1347 (2001).
- 6) 根岸 哲: 装置間通信を容易にした知的分散制御ネットワーク「LON」, 計装, Vol.36, No.12, pp.54-62 (1993).
- 7) Liu, L., Gauthier, L. and Gauthier, S.: Spatial disorientation in persons with early senile dementia of the Alzheimer typem, *The American Journal of Occupational Therapy*, Vol.45, No.1, pp.67-74 (1991).
- 8) Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Johnson, M., Zaiyouna, R. and Richardson, C.: A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotations test: different versions and factors that affect performance, *Brain and Cognition*, Vol.28, pp.39-58 (1995).
- 9) Rizzo, A.A., Buckwalter, J.G., Kesselman, U., Kesselman, C., Thieboux, M., Larson, P. and Van Rooyan, A.: The virtual reality mental rotation/spatial skills project: preliminary findings, *CyberPsychology and Behavior*, Vol.1, No.2, pp.107-113 (1998).
- 10) Vandenberg, S.G. and Kuse, A.R.: Mental rotations: a group test of three-dimensional spatial visualization, *Perceptual and Motor Skills*, Vol.47, pp.599-604 (1978).

(平成 17 年 6 月 10 日受付)

(平成 18 年 1 月 6 日採録)



伊藤 雄一

2000年大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻博士前期課程修了。同年同専攻博士後期課程入学。2002年より同大学院情報科学研究科助手、現在に至る。ヒューマンインタフェースの研究に従事。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会等会員。



エフード シャーリン

1990年, 1997年ベングリオン大学(イスラエル)にて学士, 修士取得. 2003年アルバータ大学にて博士取得. 同年大阪大学大学院情報科学研究科特任助手. 2004年よりカルガリー大学コンピュータサイエンス学部助教授, 現在に至る. HRI, HCIの研究に従事. ACM等会員.



北村 喜文 (正会員)

1987年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 同年キャノン株式会社情報システム研究所, 1992年ATR通信システム研究所, 1997年大阪大学大学院工学研究科助教授, 2002年同大学院情報科学研究科助教授, 現在に至る. ヒューマンインタフェース等の研究に従事. 博士(工学). ACM, ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会等会員.



岸野 文郎

1971年名古屋工業大学大学院電子工学専攻修士課程修了. 同年日本電信電話公社(現NTT)電気通信研究所入所. 1989年ATR通信システム研究所知能処理研究室室長. 1996年大阪大学大学院工学研究科教授, 2002年同大学院情報科学研究科教授, 現在に至る. ヒューマンインタフェース等の研究に従事. 博士(工学). 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会等会員.



ベンジャミン ワトソン

1987年カリフォルニア大学アーバイン校にて学士取得. 1989年, 1997年ジョージア工科大学にて修士, 博士取得. 同年アルバータ大学コンピュータサイエンス学部助教授. 2000年ノースウェスタン大学コンピュータサイエンス学部助教授. 2006年よりノースカロライナ州立大学コンピュータサイエンス学部准教授, 現在に至る. コンピュータグラフィックス, HCIと心理学の研究に従事. ACM, IEEE等会員.



スティーブ ステファン

1971年, 1976年ワシントン州立大学(米国)にて学士, 修士取得. 現在, アルバータ大学コンピュータサイエンス学部技官. ロボティクス, センサシステム, ネットワークの研究に従事. IEEE等会員.



リリ リウ

1984年, 1988年, 1993年マギル大学にて学士, 修士, 博士取得. 現在, アルバータ大学作業療法学部准教授. 健康増進, 老化現象の研究に従事. CAOT, AOTA等会員.