

ActiveCube による認知能力評価のためのユーザインタフェース

伊藤 雄一^{†1} エフッド シャーリン^{†2} 北村 喜文^{†1}

岸野 文郎^{†1} ベンジャミン ワトソン^{†3}

スティーブ ステファン^{†2} リリリ ウ^{†4}

病気や負傷による医療目的の診断や認知能力研究のために、空間認識・形状構築能力の評価が広く使用されている。これらの評価を3次元形状を利用して行うことは、精度が高く有効であるが、タスク管理者が測定値の記録をすることが難しく、評価の一貫性・信頼性を保つことは困難であり、その使用には制限がある。そこで我々はコンピュータを利用し、評価の一貫性を保ち、柔軟で信頼性が高く操作しやすい、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提案する。提案システムは、ブロックを組み立てることでその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のできる ActiveCube を用いて実装する。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 Cognitive Assessment with ActiveCube

YUICHI ITOH,^{†1} EHUD SHARLIN,^{†2} YOSHIFUMI KITAMURA,^{†1}
FUMIO KISHINO,^{†1} BENJAMIN WATSON,^{†3} STEVE SUTPHEN^{†2}
and LILI LIU^{†4}

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. はじめに

人の空間認識能力や形状構築能力の評価は、医療分野において脳の負傷や傷害を検査し診断するための重要な手段であり、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¹⁾²⁾³⁾。これらの評価は一般に、

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、ブロックを配置したり、提示された通りにパズルのピースを並べるといった構築タスクを与えることによって実施される。これらの構築タスクを用いることで、空間認知能力のみならず、知覚・計画・実行といった実際に日常生活で必要とする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²⁾。しかしながら、3次元形状を用いたタスクにおける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次元形状の記録など複雑なものであり、被験者ごとのタスク完了時間など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3次元形状構築タスクで使用される

^{†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} 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

^{†3} ノースウェスタン大学コンピュータサイエンス学部
Department of Computer Science, Northwestern University

^{†4} アルバータ大学作業療法学部
Department of Occupational Therapy, University of Alberta

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、タスク終了後に得られたデータを自動的に解析する 3 次元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。ユーザは、前面のスクリーンに表示されたものと同じ形状をこれらのブロックを用いて構築するタスクを与えられる。タスク実施中、ユーザ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 によって全て自動的に記録される。また、これら一連のタスクは、ホスト PC と LAN で接続された管理用 PC が担当する。タスク終了後、記録されたデータを解析することで、そのユーザの 3 次元認知能力を評価することが可能である。このような 3 次元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、ActiveCube⁴⁾ を利用する。

ActiveCube は 1 辺が 5cm の立方体のブロックからなり、これを組み立てることで、リアルタイムにその 3 次元形状をコンピュータ内にモデリングするリアルタイム 3 次元形状モデリング機能や、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、利用者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。本稿では ActiveCube のリアルタイム 3 次元形状モデリング機能を用い、それを拡張することで提案するユーザインタフェースを実現する。

本論文では、まず、認知および構築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る。また、この結果について考察する。

2. 認知と構築能力評価のためのユーザインタフェース

認知能力評価のためのツールとして実物体を用いる手法は、特に空間を知覚し、その中で運動反応を実現するための形状構築能力の評価において、確立された手法である²⁾。形状構築能力は日常生活で必要とする能力の数に関係し、その欠陥や異常は脳の損傷によって引き起こされたり¹⁾²⁾、アルツハイマー病 (AD) や他の病気によって引き起こされる¹⁾。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。これらのタスクはノンバーバルであり、かつ文化に依存せず、タスクの選択肢が多く、精度も高い。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一層精度が高く評価できることが知られている²⁾。

典型的な形状構築能力評価においては、被験者はある空間パターンを与えられ、物体を操作し組み立てることで、与えられた空間パターンを真似るタスクが与えられる²⁾。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といった被験者が実際にタスク中に行った動作を記録する。

2 次元の構築能力評価は既に広く使用されている。よく知られているテストとして、例えばウェクスラー法 (WISC, WPPSI, WAIS) がある。ウェクスラー法は 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¹⁾²⁾。

一方、3 次元の構築能力評価は一般的であるとは言いがたい。これらの例としては Hecan らによるものや、Benton らによるものがある²⁾。これらのテストにおいて、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与えられ、タスク完了時間と正確さを測定・解析し評価する。しかし、これらの 3 次元構築タスクにおいて、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。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、コンピュータによってサポートされた認知能力評価テストは一般的になりつつあり、よく使用される筆記式テストはほぼ自動化されつつある¹⁾。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動的に次のタスクを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測定値の収集も可能である。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

する見落としなどによる再測定などもない。

このように、認知能力評価において3次元の構築能力を評価することは、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。次章以降では、これを実現するためにActiveCubeを用いて実装した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による認知能力評価のためのユーザインタフェース

コンピュータで自動化された3次元構築能力評価のためのユーザインタフェースを、ActiveCubeのリアルタイム3次元形状モデリング機能を用いて実装する。

ActiveCubeは、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の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⁴⁾。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。

本研究で実装するシステムでは、被験者の前にプロジェクト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)を提示する。その形状は毎分2.7回の割合で鉛直軸まわりに回転しており、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ト画面を見ながら、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。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し、タスク管理者はその時点でそのタスクを終了し、ブロックを全て分離して次のタスクを開始する。全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オフラインで算出し、認知能力を評価する。

本章では、まず実装したハードウェアについて述べ、次にソフトウェアについて述べる。さらに実装したシステムの概要について述べる。

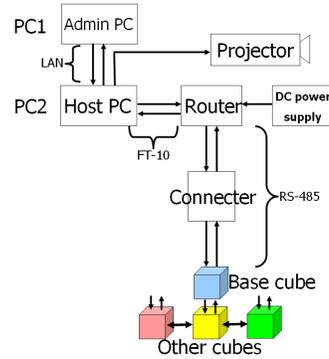


図1 ActiveCubeシステムの構成図
Fig. 1 ActiveCube system configuration.

3.1 ハードウェア

ActiveCubeでは接続されたブロックをネットワーク化し、各々を管理・制御する機能を米Echelon社のLON(Local Operating Network)⁵⁾と呼ばれる知的分散制御を可能とする技術を利用し、拡張することにより実現している。ActiveCubeの各ブロックをLONにおけるノードとし、それを制御するためにNeuronChipと呼ばれるチップ(東芝製TMPN3120FE3M)を搭載している。このチップは内部に8bitのCPUを3個持ち、1つがネットワークの通信管理、もう1つがアプリケーションプログラムの実行と管理、残り1つがこれら2つのCPUの橋渡しの役割りを果たしている。各ブロックにはブロックIDを一意に割り振り、個々のブロックを識別可能とし、さらに各面には接続面を認識するための面IDを割り当てる。接続されたブロックはネットワークを構成し、RS-485方式を用いて速度39kbpsで相互通信する。ブロックとHost PCとの接続は、図1に示すようにベースブロックが担当し、ルータを介してRS-485方式をFT-10方式に変換して通信する。FT-10方式の通信速度は78kbpsである。

このように、各ブロックの各面には通信線2本と電源線2本、さらに面認識信号入出力線の計6本の通信線が必要となる。これらを実装するために、図2のようにブロック各面の中心から同心円上に接触端子を3個配置し、中心側から通信1、通信2、GND(-電源)を割り当てる。これは接続しているブロックの接続面が完全に接続されていない場合の通信線等の断絶を防ぐためである。また、各面の頂点近くに配置された接続ホックの内2つをVcc(+電源)に割り当て、残り2つをそれぞれ面認識信号入力・出力に割り当てる。面認識用のホックと電源用のホックが合うようにブロックを接続させるため、オスとメスの接続ホックを固定

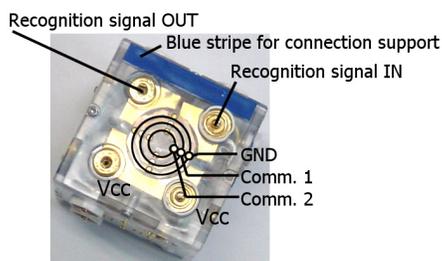


図2 ActiveCubeの外観
Fig. 2 ActiveCube.

して利用し、ブロックを接続する際は面同士が180度回転した状態で接続される。なお、ブロックを接続する際にホックの向きを意識的に合わせる必要がなくなるように、図に示すように面のある一辺に青いテープを貼り、テープ同士を合わせるようにすれば接続できるようにする。

接続されているブロック全体の形状を認識する機能は、ホストPCがリアルタイムにツリー状のブロック接続状況マップを更新することによって実現する。既にネットワークに接続されているブロック(親ブロック)は全ての面から面認識信号を出力しており、新しいブロック(子ブロック)を接続すると、子ブロックは親ブロックの面認識信号を受信し、自分のブロックIDと親ブロックに接続された面IDをホストPCに送信し、接続された面に対して面認識信号を出力する。その信号を受信した親ブロックは、ホストPCに対して自分のブロックIDと子ブロックに接続された面IDを送信する。ホストPCはそれらの情報を元にブロック接続状況マップを更新し、子ブロックに対して親ブロックとなるように命令する。ホストPCはベースブロックから個々のブロックまで、ブロックIDとお互いに接続された面IDをブロック接続状況マップの各ノードに保持する。これをブロックの接続の度に繰り返すことで、ブロックの接続状況をリアルタイムで認識する。ブロックが分離された場合、分離されたブロックの親ブロックがホストPCにその情報を送信し、ホストPCはブロック接続状況マップを更新する。また、ホストPCは実験開始後、これらの接続・分離がいつ発生したかを全てログとして記録し、実験終了後そのログを解析することで被験者の認知能力評価を行う。

3.2 ソフトウェア

提案システムは2つのパートから構成される。1つは被験者に対してターゲットとなる3次元形状を提示する部分であり、もう1つはタスク管理者がタスクを選択し、その開始や終了を制御する部分である。本シ

ステムではLANで接続された2台のPCを用いて実現する。1台にActiveCubeが接続され、前節におけるホストPCの役割を果たし、実際に3次元形状を提示する機能もこのPCが担当する。もう1台のPCではGUIベースのアプリケーションが実行されており、タスク管理者がタスクを選択し、開始・終了を制御し、接続・分離情報の記録を行うために使用される。このPC上でタスク管理者は、タスクの種類・提示される形状の選択、実際に被験者が構築している形状の監視、システム全体の監視、タスクの開始及び終了などといった作業をリアルタイムに行うことが可能である。またLANによる接続のため、遠隔地での操作も可能である。

3.3 測定データ

全てのタスクが終了した後、記録されたデータをオフラインで解析する。解析には類似度(Similarity)・タスク完了時間(Last connect)・習熟度(Derivative)・安定性(Zero crossing)の4つの測定値を用いる。

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(1)式を用いて算出する。

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

ここで*i*は*s*と*p*で最大で重なっている部分を表し、*|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。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。

習熟度 2つの連続するイベントでの類似度の差を時間で割った商の、タスクを通しての平均として求める。これは、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に相当する。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完了しており、タスクに習熟していると言える。

安定性 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

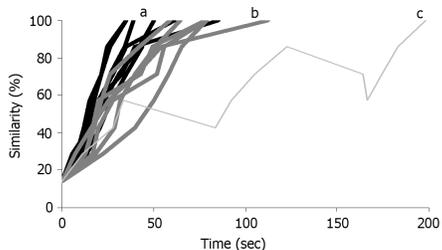


図3 あるタスクの全被験者の類似度と時間のグラフ (a: 若者, b: 年輩, c: AD患者)

Fig. 3 Similarity vs. time graphs for all participants in one task.

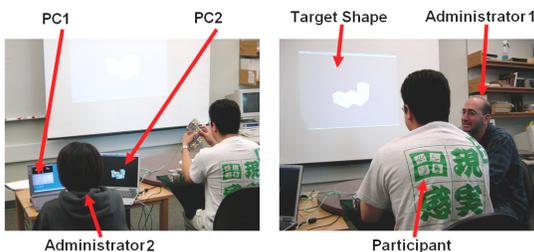


図4 システムの外観

Fig. 4 System overview.

ていると言える。

3.4 実験システム

図4に実際に実装したシステムの外観を示す。図中PC1はタスクを管理するPCであり、PC2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PC1を用いてタスクの選択や開始、さらに終了を行う。

3.5 提案システムの特徴

このシステムを用いることで既存の構築能力評価のためのツールに比べ以下の利点が得られる。

一貫性 既存の2次元の構築能力評価テストは一貫性を保っていると言えるが、3次元形状構築テストは、形状の複雑さと記録の困難さからタスク管理者にとってテストの一貫性を保つのは難しい。しかし、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全て自動的に行われるので、評価の一貫性を保つのは容易である。

精度 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精度が求められる。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、精度が高い。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、他のテストに比べてハードウェア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・時間的成本が必要である。また、提案システムはタスク開始からその評価までを全て自動で行うことが可能であり、時間的成本を大きく減らすことが可能である。また被験者にとっても、全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、時間的成本を削減することが可能である。

4. 被験者実験

本章では、提案システムによる評価が、実際に精度が高く、一貫性を保っているかを調べ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、被験者の認知能力の優劣によって、タスクごとにどれくらい差が出るのかを調べるために行った認知精度実験について述べる。最後に、一般的に実施されている3次元認知能力評価のための筆記試験による比較実験について述べる。

4.1 実験概要

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ないという原則である。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ないという原則である。これにより被験者は提案システムに慣れ、認知能力の限界を簡単に知ることができ、フラストレーションを感じることなく、タ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、説明するためのタスクである。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つずつ被験者に提示され、被験者は提示されたブロックと



図5 被験者に提示される形状の一例
Fig. 5 An example shape presented to participants.

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、タスク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が提示されるが、タスク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。

Intro と Follow タスクは、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多くの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次元かあるいは3次元かなどによって難易度を適宜設定し、難易度の低い形状から開始するようにした。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次元形状は14種類、3次元形状は25種類である。図5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形状を示す。

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125cmで、被験者から185cm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、できるだけ速く、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個ずつ接続するように求める。なお、複数個同時に分離する場合は、その通りログに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確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、被験者に休憩を取ってもらう。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場合は、被験者にもう一度そのタスク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タスク管理者はタスクを終了するように被験者に尋ねる。さらに、タスク管理者が、そのタスクが被験者にとって非常に難しく、完遂が難しいと判断する場合は、そのタスクをスキップして次の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才から43才までの健康な若者14名(男性11名、女性3名)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。さらに、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等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、表1に示すように、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マニュアルで排除することにした。また、度々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にすぐにはずれたブロックを

表 1 認知精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%)

再接続することが多く, 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, 組み立てつつある形状が崩れてしまったと判断するようにフィルタリングを行った.

4.3 認知精度実験

4.3.1 実験概要

提案システムの精度を確認し, さらに改良するために, 認知能力の違いが顕著に表れるとして知られている3つの要素である年齢, タスクの種類, 形状の種類(2次元, 3次元)に対する提案システムの反応を調べる. 認知能力は年齢とともに徐々に失われていくと言われているので, 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考えられる. また, タスクをこなすとともに認知能力が活性化されるので, より少ない時間で良い結果が得られると考えられる. 同様に, 3次元形状を扱う際にはより高度な認知能力を必要とするため, 3次元形状よりも2次元形状を構築する方が良い結果が得られると考えられる. また, アルツハイマー病の進行に伴って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った. 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, さらにクオリティ・オブ・ライフを高めることが可能である⁶⁾. 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才から86才までの16人(男性12名, 女性4名)の被験者に対して実験を行った. なお, 若者は7名, 年輩者は7名, 早期のアルツハイマー病患者は2名であった.

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

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

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

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 × stype	last connect	F(2,26)=3.22, p<.05
ttype × stype	similarity	F(2,26)=6.02, p<.005
ttype × stype	zero crossings	F(2,26)=3.93, p<.05
ttype × stype	derivative	F(2,26)=4.16, p<.05

表 4 年齢のタスク完了時間と習熟度に対する影響(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)

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6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既に不均衡である. 解析にはタスク完了時間, 類似度, 習熟度, 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 × タスクの種類 × 形状の種類)を用いた.

これら3つの要素は, 全て期待した通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に示されるように, 年輩の被験者は若者に比べタスクを

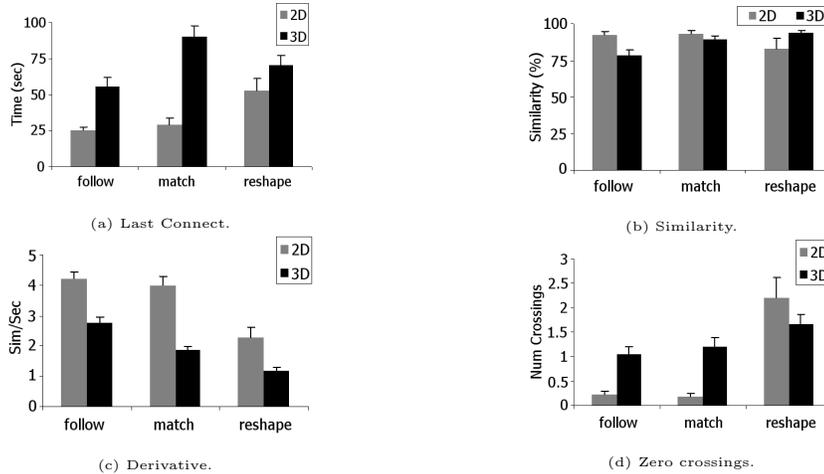


図6 形状の種類とタスクの種類と4つの測定値

Fig. 6 The effect of the shape × task type interaction on 4 measures.

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6に示すように、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。2次元形状の構築の方が、より速く、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。最後に、タスクの種類は4つの全ての測定値に影響を及ぼしている。Followタスクにおいて、図6(a)(c)(d)に示すように、被験者は最も速く、正確にタスクを完了でき、操作も安定している。しかし、図6(b)のように3次元形状の類似度は最も低い。これはFollowタスクにおいて、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、どこに新しいブロックが出現したのか分からなくなり、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の各タスクでは、ターゲットとなる3次元形状は既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の各タスクにおける類似度はほぼ一致したが、Matchタスクにおける習熟度はReshapeに比べ高く、安定していた。3つの要素のうち、4つの測定値それぞれに対して相互作用を及ぼしているものは、タスクの種類と形状の種類である。2次元形状構築タスクでは、FollowとMatchタスクの4つの測定値がほぼ一致しており、Reshapeタスクが最も難しいことが分かる。一方、3次元形状構築タスクにおいては、タスク完了時間を除いて、Follow、Match、Reshapeの順に難しくなることが分かる。

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	-0.49	-0.35	<i>-0.63</i>	-0.35	-0.24
Similarity	0.03	-0.36	0.17	0.16	-0.09	0.08
Derivative	0.51	0.38	<i>0.57</i>	0.43	0.50	0.34
Zero crossings	-0.23	0.07	-0.25	-0.14	-0.45	0.11

4.4 筆記試験による比較実験

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)⁷⁾⁸⁾⁹⁾による比較実験を行った。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と後にMRTを行い、その結果を比較する。

4.4.2 結果

4.3節の実験には参加していない若者12名(男性8名、女性4名)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、タスク完了に関する値は一樣に高かった。システムのエラー発生頻度は前の実験と同様であった。実験の前後に行ったMRTの結果を比較すると、実験後のMRTは実験前に比べて約90%改善していた。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、その改善率は通常約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てみる。これらは表5に示すとおり明らかに

強い相関があったが、中でも習熟度が最も強い相関を示し、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、類似度自体が一様が高かったことによるものと考えられる。3次元形状構築の方が2次元形状構築に比べて若干相関が強く、Follow タスクが最も強い相関を持ち、Match タスク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 タスク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、これを改良して得られる利点について述べる。

5.1 提案システムの制約

我々が行った実験は、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成り得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。そのため、今回の分散分析の結果が、その被験者の認知機能の優劣を決めるものではない。

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バランスを取っ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、被験者が現在のタスクを完遂することができない場合に、さらに難しいであろう次のタスクに無理矢理進んでしまうことを防ぐためであり、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、常に 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伴い、表 2 に示すように、一部の被験者のみが全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し、これらの被験者グループの方が良いパフォーマンスを示しているように見えてしまうという問題がある。

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することによるフィルタリングと再試行の問題がある。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、3次元形状構築タスク途中で、年輩の被験者が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。

5.2 認知精度実験について

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と言えるので、正しく認知能力を評価システムが構築できたと考えられる。例えば、3次元形状の類似度の結果における Follow タスクは他のタスクに比べて悪い結果であったが、これはおそらく、Follow タスクは実験の前半に行うため、被験者の認知能力が上昇中であったことを示していると考えられる。

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名しかいなかったが、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認知能力の欠如を区別できるかどうか等について、さらなる実験が必要である。

全体的に見て、提案システムを用いることで、良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、他のテストと比較することで、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。

5.3 筆記試験による比較実験について

提案システムを用いることで、被験者の空間認知能力を刺激し、高めることができたことが分かった。また、従来の紙や鉛筆を用いた3次元空間認識評価と同様な結果を得られることを示した。これを用いることでトレーニングやリハビ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。

6. おわりに

本稿では、コンピュータを利用し、評価の一貫性を保ち、柔軟で信頼性が高く操作しやすい、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。さらに被験者実験を行い、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次元空間認識評価と同様な結果を得ることができたことを示した。

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 なお、本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (B)(2)12480096、ならびに栢森情報科学振興財団の助成を受けた。

参 考 文 献

- 1) G. Groth-Marnat. *Handbook of Psychological Assessment*, 3rd ed., New York: John Wiley and Sons, 1997.
- 2) M. D. Lezak. *Neuropsychological Assessment*, NY: Oxford UP 1983.
- 3) 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.
- 4) 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, Jun. 2001.
- 5) 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.
- 6) L. Liu, L. Gauthier and S. Gauthier. Spatial Disorientation in Persons with Early Senile Dementia of the Alzheimer Typem, *The American Journal of Occupational Therapy*, 45 (1): pp. 67-74, Jan. 1991.
- 7) M. Peters, B. Laeng, K. Latham, M. Johnson, R. Zaiyouna and C. Richardson, A Redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotation Test: Different Versions and Factors that Affect Performance, *Brain and Cognition*, 28, pp. 39-58, 1995.
- 8) A. A. Rizzo, J. G. Buckwalter, U. Kesselman, C. Kesselman, M. Thieboux, P. Larson and A. Van Rooyan. The Virtual Reality Mental Rotation/Spatial Skills Project: Preliminary Findings, *CyberPsychology and Behavior*, 1(2), pp. 107-113, 1998.
- 9) S.G.Vandenberg and A.R.Kuse. Mental Rotations: a Group Test of Three-Dimensional Spatial Visualization, *Perceptual and Motor Skills*, 47, pp. 599-604, 1978.