SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

# 総当たり数の確保とユーザのメンタル負荷軽減を実現するCAPTCHA出題形式の検討



| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者:<br>公開日: 2022-04-22<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 佐野, 絢音, 藤田, 真浩, 西垣, 正勝<br>メールアドレス:<br>所属: |
|---|---|
| URL | http://hdl.handle.net/10297/00028932 |

Copyright© 2017 The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers

SCIS 2017 2017 Symposium on Cryptography and Information Security
Naha, Japan, Jan. 24- 27, 2017
The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers

# 総当たり数の確保とユーザのメンタル負荷軽減を実現する CAPTCHA 出題形式の検討

# A study of CAPTCHA configuration with brute-force attack defensibility and user convenience considerations

佐野 絢音* Ayane Sano　藤田 真浩† Masahiro Fujita　西垣 正勝† Masakatsu Nishigaki

**あらまし** 人間のより高度な認知能力を利用した CAPTCHA として，画像の意味を問う CAPTCHA（画像 CAPTCHA）が提案されている．しかし，画像 CAPTCHA は，基本的に，1 問あたりの総当たり数が少ない．十分な総当たり数を確保するためには，CAPTCHA を解くというタスク（CAPTCHA タスク）をユーザに複数回行わせる必要があるが，タスクの単純な繰り返しは利便性を著しく低下させてしまう．メンタル負荷を増加させずに，ユーザに CAPTCHA タスクを繰り返させる方式が求められる．本稿では，その一実現例として，多数の 3 次元オブジェクトの正面方向をたどる，迷路形式の CAPTCHA 出題方式「Directcha-maze」を提案する．人間が 3 次元オブジェクトの向きを識別できるのは，メンタルローテーションと呼ばれる高度な認知能力が関与している．提案方式においては，ユーザに認識されるのは「迷路を解く」というタスクであり，それぞれのオブジェクトの向きを識別する CAPTCHA タスクは，アンコンシャスなサブタスクとなるため，メンタルローテーションタスクを繰り返すことに対するユーザの負荷が低減される．さらに，迷路形式にはゲーム要素が含まれるため，ユーザは楽しみながら CAPTCHA を回答できる．

**キーワード** CAPTCHA，メンタルローテーション，メンタル負荷，総当たり攻撃，ゲーミフィケーション

## 1 はじめに

Web サービスの普及により，自動プログラム（マルウェア）による Web サービス提供サイト等に対するスパムコメントやアカウントの不正利用が定常的に行われている．この対策のために，人間による正規利用とマルウェアによる不正利用を区別する技術が必要とされている．その技術の一つに CAPTCHA（Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Human Apart）がある．CAPTCHA は人間には正解が容易であり，機械には正解が困難な問題をユーザに出題し，正解したユーザを人間と判定する技術である[1]．

現在では，多くの Web サービス提供サイトで文字判読型 CAPTCHA（図 1）が採用されている．しかし，この CAPTCHA は OCR（自動文字読取）や機械学習を備えたマルウェアにより突破され得ると指摘されている[3]．人間のより高度な認知能力を利用した画像 CAPTCHA が求められている[4]．

図 1　文字判読型 CAPTCHA

この要求に対して，人間のより高度な認知能力を利用した，画像の意味を問う CAPTCHA（画像 CAPTCHA）がかねてから提案されてきた[2][5][8][10][11]．これらの CAPTCHA は，人間が高度な認知能力を利用して解くタスク（CAPTCHA タスク）を用意し，そのタスクを行えたユーザを人間と判定するものである．しかし，これらの CAPTCHA は，1 タスクあたりの総当たり数が少ない傾向にある．これら画像 CAPTCHA において，文字判読型 CAPTCHA と同程度の総当たり数を確保するためには，ユーザにそのタスクを複数回行わせる必要がある．しかし，

* 静岡大学大学院総合科学技術研究科，〒432-8011，静岡県浜松市中区城北 3-5-1，Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8011, Japan.
† 静岡大学創造科学技術大学院，〒432-8011，静岡県浜松市中区城北 3-5-1，Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8011, Japan. nisigaki@inf.shizuoka.ac.jp

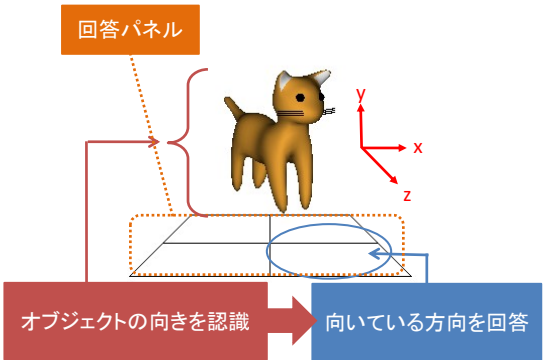


図 2　Directcha の認証画面例

単純に CAPTCHA タスクを繰り返させるだけでは，ユーザのメンタル負荷が増加してしまう（飽きや面倒さが発生し得る）．メンタル負荷を増加させずに，ユーザに CAPTCHA タスクを繰り返させる方式が求められる．

そこで本稿では，総当たり数を確保しつつ，ユーザのメンタル負荷増加を抑制する CAPTCHA 出題形式を模索する．その一実現例として，「Directcha-maze」と呼ぶ出題方式を提案する．提案方式は，1 枚の画像内に複数の 3 次元オブジェクトを配置し，それらオブジェクトの正面方向をたどるタスクを利用した，迷路形式の出題方式である．各オブジェクトの正面方向を正しく識別し，スタートからゴールまで，正しくオブジェクトをたどることができたユーザを正規ユーザ（人間）として判定する．

提案方式において，ユーザが認識するタスクは「迷路を解く」ことである．人間は，迷路をたどる際に，各オブジェクトの向き（正面方向）を識別できているが，これはメンタルローテーションと呼ばれる人間の高度な認知能力が関与している．ユーザは，メンタルローテーションを活用し，各オブジェクトに対して，CAPTCHA タスク（オブジェクトの正面方向の向きを識別するタスク）を行っている．しかし，ユーザが認識するタスクは「迷路を解く」ことであり，個々の CAPTCHA タスクは，アンコンシャスなサブタスクとなる．これによって，CAPTCHA タスクを繰り返し行うことに対するユーザのメンタル負荷が軽減されることとなる．さらに，迷路形式にはゲーム要素が含まれるため，ユーザは楽しみながら CAPTCHA を回答できる．

本稿の構成は次のとおりである．2 章では，高度な認知能力を利用した既存の画像 CAPTCHA を紹介し，それらの 1 問あたりの総当たり数が少ないことを指摘する．3 章にて提案方式について説明した後，4 章で提案方式に対するユーザビリティに関する基礎実験の結果を報告する．5 章では，4 章の結果をもとに，提案方式に関して議論する．最後に，6 章でまとめと今後の課題を述べる．

## 2　より高度な認知能力を利用した画像 CAPTCHA とその総当たり数

本稿では，人間のより高度な認知能力を利用した画像 CAPTCHA の代表例として，3 次元メンタルローテーションを利用した画像 CAPTCHA，および，常識からの逸脱を利用した画像 CAPTCHA について説明する．

### 2.1　3 次元メンタルローテーション CAPTCHA

人間はある視点から写された 2 次元オブジェクトや 3 次元オブジェクトを頭の中で回転させ，異なる視点から写された姿形を識別することが可能である．この能力は「メンタルローテーション」と呼ばれ，人間の高度な認知能力の一種として知られている[6][7]．現在までに，3 次元オブジェクトのメンタルローテーションを利用した画像 CAPTCHA として，Directcha[8]と Sketcha[5]が提案されている．

#### 2.1.1　Directcha

Directcha の認証画面例を図 2 に示す．認証画面には，1 体の 3 次元オブジェクトと回答用パネルが表示される．ユーザは，画像中のオブジェクトの向きに対応するパネルをクリックして回答する．すなわち Directcha は「3 次元オブジェクトの正面方向を回答する」というタスク（Spatiometric 型メンタルローテーションタスク）を利用している．人間であれば，メンタルローテーションを活用し，画像中のオブジェクトがどちらにどのように回転しているかを識別することが可能である[9]．

人間のメンタルローテーションには，「オブジェクトの回転角度が大きいほど判断に要する時間も長くなる一方で，オブジェクトが左向きか右向きかについては即座に識別している」という興味深い特徴が存在することが知られている[7]．すなわち人間は，「右向きか左向きか」，「前向きか後向きか」という程度の雑駁な方向識別については直感的な判定が可能である．Directcha では，回転方向の分割度を 4 レベルに限定することによって，この特徴を利用し，認証にかかる時間を小さく押さえることに成功している．しかし，分割度の数は CAPTCHA タスクの総当たり数と一致する．このため Directcha における CAPTCHA タスク 1 問あたりの総当たり数は高々4 通りである．

#### 2.1.2　Sketcha

Sketcha の認証画面例を図 3 に示す．認証画面には，8 問の問題画像が提示される．各問題画像は，3 次元モデルを 2 次元へ投影し，線画化した 2 次元画像であり，その 2 次元画像に 0，90，180，270 度のいずれかの回転が施されている．問題画像をユーザが 1 回クリックするごとに，2 次元画像が 90 度回転し，画像を正立状態（0 度の回転）に戻すことができたユーザを正規ユーザとして判定する．すなわち Sketcha は，「3 次元オブジェクトの垂直方向を回答する」というタスク（Pic-turn 型メンタルローテーションタスク）を利用している．回転方向を 4 つに限定しているため，CAPTCHA タスク 1 問あたりの総当たり数は高々4 通りである．

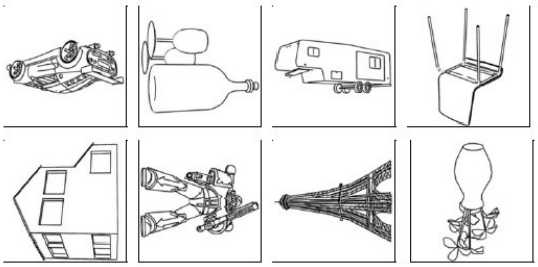

図 3　Sketcha の認証画面例

### 2.2　常識からの逸脱を利用した CAPTCHA

人間は日常生活を通じて多くの常識を身につけている．その常識から逸脱した場面に遭遇すると「しっくりこない」または「気持ちが悪い」といった感情を覚える．この「常識からの逸脱を判別する」能力を利用した画像 CAPTCHA が複数提案されている[10][11].

図 4 は，常識からの逸脱を利用した CAPTCHA の一つである Chimera CAPTCHA [11]の問題画像例である．複数の通常の 3 次元オブジェクトの中に，一体の非現実オブジェクト（2 体のオブジェクトをマージしたオブジェクト）を配置した一枚の画像を CAPTCHA として出題する. 画像中から非現実なブジェクトを選択できたユーザを正規ユーザとして判定する. 図 4 では，画面左下に猫と車がめりこんだ非現実なオブジェクトが配置されている, このようなオブジェクトの形状は, 人間の常識から逸脱しているため，ユーザは容易に発見することができる.

Chimera CAPTCHA の 1 問あたりの総当たり数は，画像中に写っているオブジェクトの数である．1 画面中に配置できるオブジェクトの数には限界があるため, 総当たり数は限られる（図 4 であれば，4 つのオブジェクトがあるので 4 通り）.

## 3　Directcha-maze

### 3.1　迷路形式による CAPTCHA タスクの繰り返し

2 章では，より高度な認知能力を利用した画像 CAPTCHA の代表例を紹介し，それらの総当たり数を示した．これら画像 CAPTCHA において，十分な総当たり数（文字判別 CAPTCHA と同程度の総当たり数）を確保するためには，ユーザに CAPTCHA タスクを複数回行わせる必要があるが，同じタスクの繰り返しは，ユーザのメンタル負荷を大きく増加させる (飽きや面倒さが生じる).

そこで本稿では，十分な総当たり数を確保しつつ，ユーザのメンタル負荷増加を抑制する CAPTCHA 出題形式を模索する．その一実現例として，「Directcha-maze」と呼ぶ出題方式を提案する. 提案方式のコンセプト図を図 5 に示す．認証画像には，格子が描画され，ゴール地点を除く各格子点上には，「向き」を有する 3 次元オブジェクトが配置されている．各格子点の位置を(i,j) (図 5 の例では i=0～5，j=0～5）と記す．各 3 次元オブジェクトは，4 方向（左後，右後，左前，右前）のいずれかを向いている．ただし，格子のスタート地点（図 5 の例では格子点(1,1)）からゴール地点（図 5 の例では格子点(4,4)）へ，オブジェクトの正面方向をたどっていけば到着できるように, オブジェクトの向きが設定されている.

図 4　Chimera CAPTCHA の認証画面例

認証時にユーザは, 画像中の各 3 次元オブジェクトの向きを識別し，それらの正面方向をたどる．オブジェクトの向いている正面方向を正しく識別し, スタート地点からゴール地点までをたどる（迷路を解く）ことができたユーザを正規ユーザ（人間）として判定する．人間であれば，Directcha 型のメンタルローテーションタスクを行って，各オブジェクトの正面方向を識別することは容易である．すなわち，提案方式が求める，スタート地点からゴール地点へと正しい道をたどる迷路求解タスクを行うことが可能である.

提案方式において，ユーザが認識するタスクは「迷路を解く」ことである．ユーザは，各オブジェクトに対して，Directcha 型メンタルローテーションタスク（オブジェクトの正面方向を識別する CAPTCHA タスク）を行っている．しかし，ユーザが認識するタスクは「迷路を解く」ことであり, Directcha 型メンタルローテーションタスクは，アンコンシャスなサブタスクとなる．これによって，Directcha 型メンタルローテーションタスクを繰り返し行うことに対するユーザのメンタル負荷が低減されることとなる. さらに, 迷路形式にはゲーム要素が含まれるため，ユーザは楽しみながら CAPTCHA を回答できる．このゲーム性によって, ユーザのメンタル負荷がさらに削減されることが期待される.

なお，迷路形式の出題方式においては，各分岐点の分岐路の数は任意とし得る．CAPTCHA の総当たり数を確保する上では，分岐路の数が多いほど有利である．一方で，迷路全体が一望できる形になっているほうが, 人間にとっては認識が容易である. そこで今回は，図 5 に例示された格子状の迷路を採用した.

### 3.2　迷路形式に適する CAPTCHA タスク

迷路形式の出題方式においては, 分岐点ごとにサブタスクとなる CAPTCHA タスクが配置される．これら個々の CAPTCHA タスクは，ユーザに「複数の分帰路の内の 1

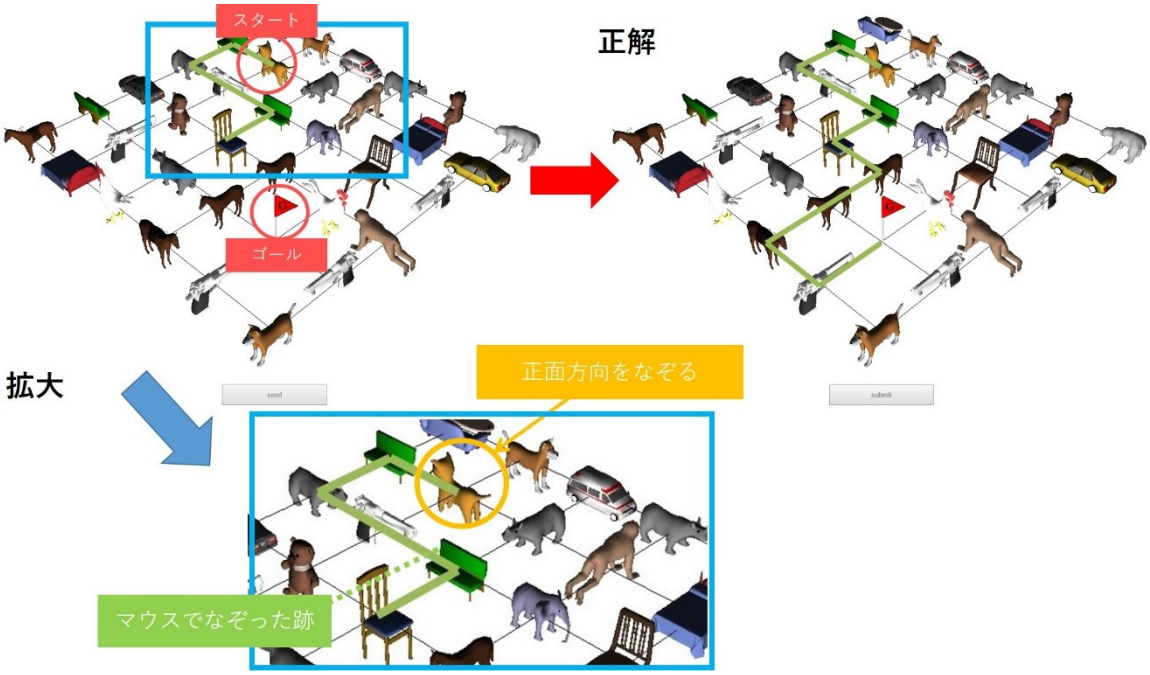


図 5　提案方式のコンセプト図

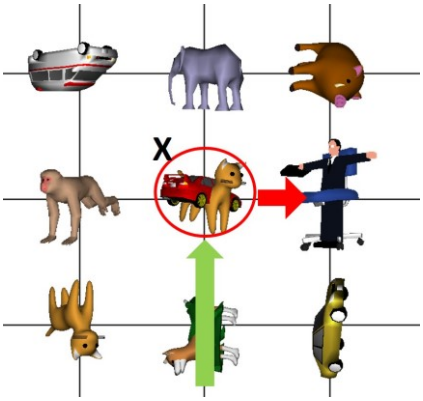


図 6　非現実 CAPTCHA をサブタスクとした場合

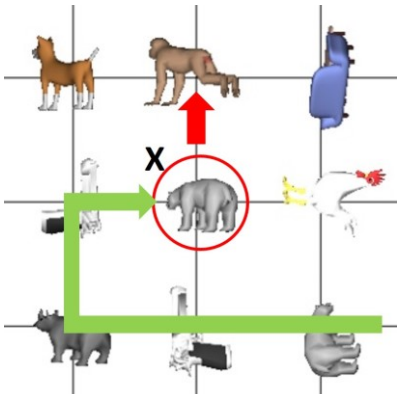


図 7　Sketcha をサブタスクとした場合

つを選択させる」タスクでありさえすれば，任意の CAPTCHA を使用できる．すなわち，迷路形式の CAPTCHA を実現する場合には，サブタスクに「非現実 CAPTCHA 型の常識から逸脱したモノを選択するタスク」あるいは「Sketcha 型のメンタルローテーションタスク」を利用することも可能である．しかし，提案方式は，これらの方式をサブタスクとして用いた場合よりもアドバンテージが存在する．以下にそれぞれの方式の詳細を述べるとともに，Directcha 型のメンタルローテーションタスクをサブタスクとして利用するアドバンテージについて論ずる．

### 3.2.1　非現実画像 CAPTCHA をサブタスクとした場合との比較

2.2 節で述べた非現実画像 CAPTCHA（常識から逸脱したモノを選択するタスクを利用した CAPTCHA）をサブタスクとして，迷路形式の出題方式を実現した例を図 6 に示す．この場合，ユーザは，格子点 X に到達した場合，周囲の近傍格子点にあるオブジェクト「すべてを」判別し，その中から非現実的なオブジェクトを選択して移動しなければならない．一方，提案方式であれば，格子点 X に到達したとき，X にあるオブジェクトのみに注目し，そのオブジェクトの正面方向をたどればよいだけである．すなわち，提案方式のほうが，識別するオブジェクトの数が少ないため，ユーザのメンタル負荷がより小さい方式であるといえる．

### 3.2.2　Sketcha をサブタスクとした場合との比較

2.1.2 節で述べた Sketcha（Pic-turn 型メンタルローテーションタスクを利用した CAPTCHA）をサブタスクとして，迷路形式の出題方式を実現した例を図 7 に示す．この方式において，ユーザは，格子点 X に到達した場合，X にあるオブジェクトの垂直方向を識別すれば次の格子点へ移動できる．したがって，識別するオブジェクトの総数は提案方式と同等である．しかし，人間は日常的に，オブジェクトの顔や体が向いている方向を「オブジェクトの向き」として認識している．また，垂直方向に回転したオブジェクトを見慣れていない．このため，オブジェクトの垂直方向を識別する際のメンタル負荷は，提案方式（オブジェクトの正面方向を識別する際のメンタル負荷）と比較し

て高くなる．なお，この点については，4 章，5 章で実際に検証を行う．

## 4　ユーザビリティに関する基礎実験

### 4.1　目的

①Spatiometric 型メンタルローテーションタスクを利用した CAPTCHA（Directcha）を単に複数解く場合，②提案方式（Directcha-maze），③Pic-turn 型メンタルローテーションをサブタスクとして利用した迷路形式（以下，Sketcha-maze と呼ぶ）の 3 方式についてユーザビリティ（正答率・回答時間・メンタル負荷）の調査を行う．

### 4.2　実装

基礎実験実施のため，Directcha，Directcha-maze，Sketcha-maze の実験システムを構築した．同じ条件の下で比較するために，それぞれの実験システムの実装にあたっては，以下の点を留意した．

**総当たり数の統一**：出題 1 セットあたりの総当たり数を 4096 通りで設定した．文献[2]では，CAPTCHA の総当り数として 4096 通りを確保できれば，Token Buckets Scheme を用いて誤答が多い IP アドレスからのアクセスを遮断することで，実質的な総当たり数を 520 万通り程度まで高めることが可能であることが示されている．

**利用するモデルの統一**：各実験システムでは同じ 3 次元モデルを利用した．これら 3 次元モデルは，Web 上から収集したフリー素材である．メンタルローテーションタスクを利用する都合上（向きを回答する都合上），モデルを収集する過程で，上下前後関係が明瞭なモデルに限って収集をした．上下前後関係が明瞭か否かに関しては，筆者の内 1 名と筆者らと同じ研究室に所属する学生 2 名，計 3 名で判定をした．その結果，33 種類のモデルが収集された．

**画像の表示**：問題画面上には，回答開始前から画像（群）が表示されている．

**結果の表示**：各問題画面には Submit ボタンが存在する．Submit ボタンが押されると，ユーザの回答が正解・不正解のどちらであったかと回答時間が記載されたダイアログが画面に表示される．ダイアログの OK ボタンを押すと，次のページへ遷移する．

#### 4.2.1　Directcha の実験システム

Directcha の実験システムの認証画面例を図 8 に示す．今回利用する Directcha の 1 問あたりの総当たり数は 4 通りである．問題 1 セットあたりの総当たり数を 4096 通りにするために，問題 6 問を 1 セットとして 1 ページ上に出題する．問題画像のサイズは，縦 300 画素×横 300 画素とした．各オブジェクトの回転角度の制約は，参考文献[8]と同様の条件とした．

ユーザが，画面上部にある Start ボタンをクリックすると，そのページの回答が開始され，回答時間の計測が始まる．各問題画像において，ユーザはオブジェクトの向きに対応する回答パネルをクリックして回答する．選択後，クリックされたパネルは赤色に変更される（図 8 左上の問題は回答が完了した状態）．一度，回答を完了した後も，Submit ボタンをクリックするまでは回答を修正することが可能である．Submit ボタンは 6 問すべてを回答した後でないとアクティブにならない．6 問すべての問題に正解した場合に限って，「正解」と判定される．回答時間の計測は，ユーザが Start ボタンを押してから，Submit ボタンをクリックする前に解いた問題（6 問の Directcha の内，ユーザが最後に回答した問題）の回答パネルをクリックするまでとする．

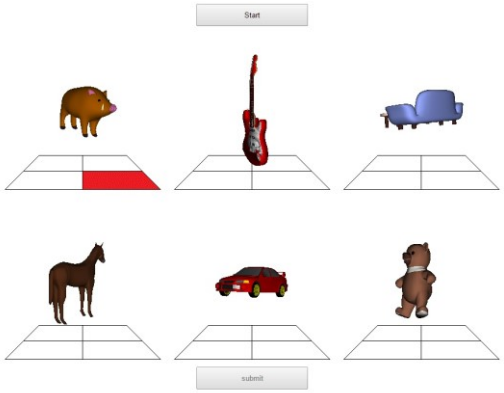


図 8　Directcha の実験システム認証画面例

#### 4.2.2　Directcha-maze の実験システム

Directcha-maze の実験システムの認証画面例を図 9 に示す．6×6 の格子による迷路 1 問が 1 ページ上に出題される．格子点(1,1)をスタート，格子点(4,4)をゴールとした．(1,1)から(4,4)の経路の総当たり数は 4096 通り以上存在する．経路の総数を 4096 通りにするために，(1,1)から(4,4)の経路のうち，通過オブジェクト数が少ない（パスが短い）ものを 4096 通りあらかじめ抽出しておき，正解経路は必ずその 4096 通りの中のいずれかとなるように調整した．4096 通りの経路の内訳は，通過オブジェクトの総数が 6 体の経路が 20 通り，8 体が 120 通り，10 体が 516 通り，12 体が 1516 通り，14 体が 1924 通りである．すなわち，迷路 1 問の中に 6～14 問の CAPTCHA タスク（Directcha を解くというサブタスク）が含まれている．問題画像のサイズは，縦 745×横 1200 画素とした．各オブジェクトの y 軸の回転角度は，45 度，135 度，225 度，315 度の中からからランダムに一つ選ばれる．x 軸，z 軸に関しては回転しない．

ユーザが，スタート地点にある旗をクリックすると，回答時間の計測が始まる．ユーザは，マウスを動かすことで，各オブジェクトの正面方向をたどる．たどった経過は，緑色の直線で表示される（図 9 は 3 体目までをたどった様子）．ある格子点 X から隣り合う格子点 X’へ移動した後，X’から X へ再度戻ることも可能である（その場合，X から X’はたどったことにならず，画面上から X から X’の直線が消える）．ゴールまでたどった後，ゴールの旗をクリックしたら回答終了となる．Submit ボタンは，回答終了と

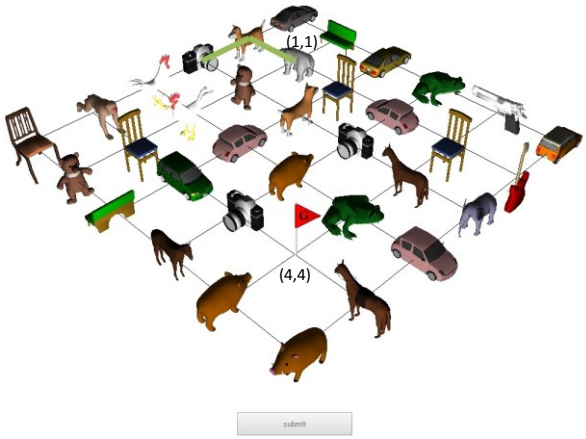


図 9　Directcha-maze の認証画面例

ともにアクティブとなる．回答時間の計測は，ゴールの旗をクリックした時点で終了している．

#### 4.2.3　Sketcha-maze

Sketcha-maze の実験システムの認証画面例を図 10 に示す. 各格子点上のオブジェクトの回転方向が異なる以外は, Directcha-maze の実験システムと同じである. なお, オリジナルの Sketcha は，線画化したオブジェクト画像を利用しているが，今回の実験では，他の実験システムと条件を同一にするために，画像の線画化を行っていない．各オブジェクトは，各オブジェクトの y 軸の回転角度を 45 度，135 度，225 度，315 度の中からからランダムに 1 つ選んで回転させた後, z 軸に対して 0 度, 90 度, 180 度, 270 度の中からランダムに 1 つ選んで回転している．

### 4.3　諸元

被験者は静岡大学に所属する学生 5 名である. 各被験者に，Directcha，Directcha-maze，Sketcha-maze の 3 方式それぞれの問題を 5 セットずつ解いてもらった. 順序効果に配慮し，3 方式をどの順番で行うかは，被験者ごとにランダムに決定した．実験システムに慣れるため，各被験者は，5 セットの実験本番の前に，自身が十分と思えるまで何度でも練習を行うことを許した. 練習および本番で利用する問題は毎回自動生成を行っており, 毎セット異なる画像（あるいは，画像群）が出題される．

メンタル負荷に関する評価のため, 実験終了後に被験者にアンケートに回答してもらった. アンケートの質問項目を以下に示す．なお，紙面の都合上，各質問は実際聞いた質問を要約したものを掲載している．①～⑦は，各方式それぞれについて回答してもらった．

① 簡単にとけたか（5 段階，簡単なら 5）
② 間違えた問題はあるか，その理由は何か
③ 面倒だと感じたか（5 段階，面倒でないなら 5）
④ ③で 2 や 1 を選択した場合，その理由は何か
⑤ 面白いと感じたか（5 段階，面白いなら 5）
⑥ ⑤で 2 や 1 を選択した場合，その理由は何か
⑦ 1 回の認証あたりで何問までならば続けて解いてもよいと思うか．また，その理由は何か．

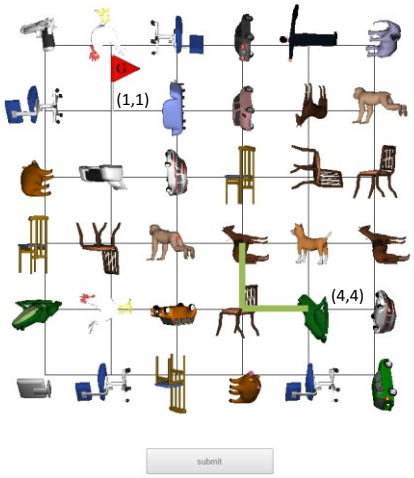


図 10　Sketcha-maze の認証画面例

⑧ 自由記述（任意回答，感想や思ったこと）

### 4.4　実験結果

#### 4.4.1　正答率と回答時間

被験者ごとに正答率と平均回答時間をまとめた結果を表 1 に示す．表中の「平均回答時間」は本番における 1 セットあたりの回答時間の平均である. 以下にその詳細を示す．ユーザが間違えた問題の原因は，アンケート質問②の結果とユーザへのヒアリングを参考に分析した．

Directcha-maze の正答率は，平均 96.0%（被験者 5 名×5 セット＝25 セットの回答中，成功が 24 セット，失敗が 1 セット）である．被験者 4 が間違えた問題 1 セットの原因は, 迷路をたどる途中に近傍のオブジェクトにつられて，誤った方向へ進んでしまったことであった．平均回答時間は，6.71 秒である．

Sketcha-maze の正答率は，平均 96.0%（25 セットの回答中，成功が 24 セット，失敗が 1 セット）である．被験者 4 が間違えた問題 1 セットの原因は，オブジェクトの垂直方向を誤認識し，誤った方向へ進んだことだった．平均回答時間は，6.76 秒である．

Directcha の正答率は，平均 96.0%（25 セットの回答中，成功が 24 セット，失敗が 1 セット）である．被験者 4 が間違えた問題 1 セットの原因は，単にパネルの押し間違いであった．平均回時間は，5.49 秒である．

#### 4.4.2　アンケート結果

被験者から得られたアンケート質問①③⑤⑦の結果を表 2 に示す．質問④⑥⑦に対する論述回答を以下にまとめる．紙面の都合上，主要な意見のみ抽出をし，要点をまとめてある．

**【Directcha-maze に対する回答】**

**質問④：③で面倒だと答えた理由は何か？**

- なし（③で 2 や 1 を答えた被験者がいなかった）

**質問⑥：⑤で面白くないと感じた理由は何か？**

- なし

**質問⑦：何問続けて解いてよいか？の理由**

- 1 問あたり 5～6 秒かかった. 30 秒程なら CAPTCHA

表１　実験結果

Directcha-maze

| 被験者 | 正答率 | 平均回答時間[s] |
|---|---|---|
| 1 | 5/5 | 5.45 |
| 2 | 5/5 | 5.24 |
| 3 | 5/5 | 7.50 |
| 4 | 4/5 | 7.31 |
| 5 | 5/5 | 8.05 |
| 平均 | 96.0% (24/25) | 6.71 |

Sketcha-maze

| 被験者 | 正答率 | 平均回答時間[s] |
|---|---|---|
| 1 | 5/5 | 5.68 |
| 2 | 5/5 | 5.65 |
| 3 | 5/5 | 7.29 |
| 4 | 4/5 | 9.21 |
| 5 | 5/5 | 5.97 |
| 平均 | 96.0% (24/25) | 6.76 |

Directcha

| 被験者 | 正答率 | 平均回答時間[s] |
|---|---|---|
| 1 | 5/5 | 4.99 |
| 2 | 5/5 | 5.31 |
| 3 | 5/5 | 5.54 |
| 4 | 4/5 | 5.84 |
| 5 | 5/5 | 5.77 |
| 平均 | 96.0% (24/25) | 5.49 |

表２　アンケート結果

Directcha-maze

| 被験者 | ①簡単さ | ③面倒のなさ | ⑤面白さ | ⑦回数 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 4 | 4 | 5 |
| 2 | 5 | 5 | 4 | 3 |
| 3 | 5 | 5 | 4 | 2 |
| 4 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 2 |
| 平均 | 5.0 | 4.8 | 4.4 | 2.6 |

Sketcha-maze

| 被験者 | ①簡単さ | ③面倒のなさ | ⑤面白さ | ⑦回数 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 4 | 4 | 5 |
| 2 | 4 | 4 | 4 | 2 |
| 3 | 5 | 5 | 4 | 2 |
| 4 | 3 | 2 | 4 | 1 |
| 5 | 4 | 3 | 4 | 2 |
| 平均 | 4.2 | 3.6 | 4.0 | 2.4 |

Directcha

| 被験者 | ①簡単さ | ③面倒のなさ | ⑤面白さ | ⑦回数 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 3 | 3 | 10 |
| 2 | 5 | 5 | 3 | 8 |
| 3 | 5 | 5 | 3 | 8 |
| 4 | 5 | 5 | 3 | 6 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 6 |
| 平均 | 4.4 | 4.0 | 3.0 | 7.6 |

を解いても苦にならない．（被験者１（5 問））

- 迷路っぽくて少し楽しかった．ただ，5 問解いたのは少し長く感じたため（被験者２（3 問））
- 一度ゴールまでいくと満足してしまうため（被験者４（1 問））
- 2 問から 3 問に増やすと途端にいやだと感じる（被験者５（2 問））

【Sketcha-maze に対する回答】

**質問④：③で面倒だと答えた理由は何か？**

- 物体の上方向を考えるところが，他方式と比べて直感的でないと感じたため（被験者４（質問③で２点））

**質問⑥：⑤で面白くないと感じた理由は何か？**

- なし

**質問⑦：何問続けて解いてよいか？の理由**

- 1 問あたり 5～6 秒かかった．30 秒程なら CAPTCHA を解いても苦にならない．（被験者１（5 問））
- 解きにくいせいか，Directcha-maze よりもかすかに楽しく感じた．が，面倒さはこちらのほうが高いため（被験者２（2 問））
- 一度ゴールまでいくと満足してしまうため（被験者４（1 問））
- 2 問から 3 問に増やすと途端にいやだと感じる（被験者５（2 問））

【Directcha に対する回答】

**質問④：③で面倒だと答えた理由は何か？**

- 未記入（被験者５（2 点））

**質問⑥：⑤で面白くないと感じた理由は何か？**

- なし

**質問⑦：何問続けて解いてよいか？の理由**

- 1 問あたり 5～6 秒かかった．30 秒程なら CAPTCHA を解いても苦にならないが，何回もクリックするのは面倒なので 10 問くらいが許容範囲（被験者１（10 問））
- 今回は一画面に 6 体いたが，これくらいがちょうどよく感じた（被験者２（8 問）,被験者４（6 問））

**【質問⑧：自由記述】**

- 迷路形式でタイムアタックがあったら挑戦したくなる（被験者 2）
- ベッドの正面方向が分かりにくかった（被験者 2, 3）

## 5　議論

### 5.1　Directcha 繰り返しと Directcha-maze の比較

基礎実験の結果より，被験者は 1 回の認証に際して，提案方式（Directcha-maze）を 2 問程度解くことを許容している．1 問あたりの総当たり数は，4096 通りであるため，ユーザが 2 問解いた場合の総当たり数は約 1600 万通りである．一方，Directcha 単体を繰り返す場合には，7 問程度しか許容されない．Directcha の 1 問あたりの総当たり数は 4 通りであるため，7 問解いた場合の総当たり数は約 16,000 通りである．これらの結果より，提案方式はユーザに同じタスクを繰り返させるときに，より多くの回数を行ってもらえる出題方式であることがわかる．

Google で利用されている文字判読型 CAPTCHA では，アルファベット小文字 5 文字から 7 文字より構成された文字列を利用している[12]．アルファベット小文字 5 文字の文字判読型 CAPTCHA の総当たり数は 1200 万程度である．これらの結果より，提案方式は（ユーザに許容されたうえで）アルファベット小文字 5 文字の文字判読型 CAPTCHA と同程度の耐性を確保できることがわかる．

上記のような結果となった理由をアンケート結果より詳細に分析した．アンケートでは，Directcha を繰り返すとき「何回もクリックすることが面倒（質問⑦, 被験者 1）」

と言及されており，「面倒のなさ」で低いスコアをつけている被験者が目立つ（被験者 1, 5）. 一方, Directcha-maze においては，簡単さ，面白さ，スコアが Directcha 単体よりも高いスコアとなっている．その理由を「迷路っぽくて楽しかった（質問⑦，被験者 2）」などと述べている．3.1 節で述べた内容の妥当性が確かめられたといえるだろう．

ただし，メンタル負荷が下がった一方で，Directcha-maze の回答時間は， Directcha を繰り返した場合よりも遅い結果となった．Directcha の場合は 6 問で 4096 通りの総当たり数を確保できるのに対し，Directcha-maze では 4096 通りの経路総数を確保するためには通過オブジェクト数が 6～14 体となる．すなわち，Directcha-maze では, ユーザは Directcha を単純に繰り返す場合よりも多くのサブタスクを行わなければならず, これが回答時間を増加させてしまっている．今後，インタフェースを改良するなどして, 提案方式の回答時間を早める工夫をする必要がある．

### 5.2 Directcha-maze と Sketcha-maze の比較

アンケート結果より，Sketcha-maze と Directcha を繰り返す場合を比較したとき，Sketcha-maze のほうがメンタル負荷（面倒のなさ・面白さ）で優位に立っている．さらに, ユーザは Sketcha-maze を 1 回の認証あたりに 2 問程度解いてよいと述べている．すなわち，アルファベット小文字 5 文字の文字判読型 CAPTCHA の総当たり数と，同程度の総当たり数は確保できている. これらのアドバンテージは，Directcha-maze と同様である．回答時間も，Sketcha-maze と Directcha-maze で同程度である．

一方で，Directcha-maze と Sketcha-maze，それぞれのアンケート結果を比較すると，Directcha-maze のほうが Sketcha-maze よりも, よりメンタル負荷が小さい方式であることがわかる．すべての項目で，Directha-maze のほうが優れたスコアが得られている．また，「物体の上方向を考えるところが直感的でない（質問④，被験者 4）」「解きにくい（質問⑦，被験者 2）」などといったコメントが述べてられている．3.2 節で述べた内容の妥当性が確かめられたといえるだろう．

## 6 まとめ

迷路形式の CAPTCHA 出題方式「Directcha-maze」を提案・評価・議論した．Spatiometric 型メンタルローテーションタスクを, 迷路を解くタスクのアンコンシャスなサブタスクとし，かつ，迷路のゲーム性を利用している．人間のより高度な認知能力を利用しながら, 十分な総当たり数を確保した際のメンタル負荷を軽減させていることが特長である．今後は，基礎実験結果を参考に，提案方式の改良を行い，総当り数のさらなる向上，認証時間の短縮，メンタル負荷のさらなる軽減を実現する．


## 謝辞

本論文を執筆するうえで，静岡大学 竹内勇剛教授に認知科学の観点からご助言を頂きました. 実験システムの実装にあたって，静岡大学 松野宏昭さんに一部ご協力を頂きました．本論文で使用した 3 次元オブジェクトは，メタセコ素材! (http://sakura.hippy.jp/meta/), TurboSquid (http://www.turbosquid.com/) などで公開されている無料素材です．この場を借りて御礼申し上げます.


## 参考文献


[1] The Official CAPTCHA Site, <http://www.captcha.net/ >, 2016.11.30 閲覧

[2] J. Elson, J. Douceur, J. Howell, J. Saul, “Asirra: a CAPTCHA that exploits interest-aligned manual image categorization”, Proc. 2007 ACM Conf. on Computer and Communications Security, pp.366-374, 2007.

[3] J. Yan, A.S. E. Ahmad, “Breaking Visual CAPTCHAs with Naïve Pattern Recognition Algorithms”, Proc. 2007 Computer Security Applications Conf., pp.279-291, 2007.

[4] K Chellapilla, K Larson, P Simard, M Czerwinski, “Computers beat humans at single character recognition in reading-based Human Interaction”, Proofs(HIPs), 2nd Conference on Email and Anti-Spam (CEAS), 2005.

[5] S. Ross, J. Halderman, A. Finkelstein “Sketcha: A Captcha Based on Line Drawings of 3D Models” , Proc. 19th Int. Conf. on World wide web, pp821-830, 2010.

[6] R. Shepard, L. Cooper “Mental Images and Their Transformations”, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.

[7] R. Shepard, J.Metzler, “Mental Rotation of Three-Dimensional Objects”, Science, New Series, vol.171, no. 3972, pp. 701-703 , 1971.

[8] A. Sano, M. Fujita, M. Nishigaki, “Directcha: A Proposal of Spatiometric Mental Rotation CAPTCHA”, Proc. 14th Int. Conf. on Privacy, Security and Trust, 2016.

[9] Yohtaro Takano, Matia Okubo, “Encyclopedia of Cognitive Science”, Mental Rotation, John Wiley & Sons, Tokyo, 2006.

[10] 西原大貴, 新井イスマイル, “物体のサイズ感を利用した 3DCG 画像 CAPTCHA の提案”, vol.2016-CSEC-75, no.5, 2016.

[11] M. Fujita, Y. Ikeya, J. Kani, M. Nishigaki, “Chimera CAPTCHA：A Proposal of CAPTCHA using Strangeness in Merged Objects”, Proc. 17th Int. Conf. on Human-Computer Interaction, pp.48-58, 2015.

[12] 可児 潤也, 鈴木 徳一郎, 上原 章敬, 山本 匠, 西垣 正勝, ”4 コマ漫画 CAPTCHA”, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.9, pp.2232-2243, 2013.