情報処理学会論文誌 Vol.59 No.12 2132–2144 (Dec. 2018)

機械解読耐性の向上とユーザのメンタル負荷軽減を両立するCAPTCHA出題形式の検討

佐野 絢音[1] 藤田 真浩[1] 西垣 正勝[1,a)]

受付日 2018年3月12日, 採録日 2018年9月7日

概要：画像 CAPTCHA は，基本的に，1 問あたりの総当たり数が少ない．また，近年は機械学習による物体認識能力が向上しており，人間のより高度な認知能力を利用した画像 CAPTCHA であっても，マルウェアの正答率が人間の正答率に近付いてきている．総当たり数の確保と機械学習攻撃耐性の強化をともに達成するためには，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方法が平易かつ有効であるが，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．ユーザの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．本論文では，その一実現例として，迷路形式の CAPTCHA 出題形式「CAPTCHA-maze」,「CAPTCHA-dungeon」を提案する．提案方式において，迷路の各分岐点にはそれぞれ 1 つの CAPTCHA タスクが配置されており，各 CAPTCHA タスクの正解が正しい分岐路を示すようになっている．各 CAPTCHA タスクを解いていき，スタートからゴールまでの経路を正しく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．迷路の「ゴールへ到達する」というタスクの中に，複数の CAPTCHA タスクを埋め込むことによって，CAPTCHA タスクを繰り返すことに対するユーザのメンタル負荷軽減が実現される．迷路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 を回答することが可能である．さらに，迷路形式を実現するにあたって，適切な CAPTCHA タスクは，3D オブジェクトの正面方向を回答するタスク（Directcha タスク）であることを示す．

キーワード：CAPTCHA，メンタル負荷，機械解読耐性，メンタルローテーション，ゲーミフィケーション

Study on CAPTCHA Configurations with Machine Learning and Brute-force Attack Defensibility along with User Convenience Consideration

Ayane Sano[1] Masahiro Fujita[1] Masakatsu Nishigaki[1,a)]

Received: March 12, 2018, Accepted: September 7, 2018

Abstract: A simple and very effective way to enhance CAPTCHA is to repeat the same kind of CAPTCHA tasks multiple times. However, the repetition of CAPTCHA tasks surely increases users' psychological burden. This motivated us to study a new CAPTCHA configuration with the machine learning and brute-force attack defensibility without increasing users' psychological burden. We propose "CAPTCHA-maze" in which multiple CAPTCHA tasks are implicitly embedded in a maze, and "CAPTCHA-dungeon" in which multiple CAPTCHA tasks are implicitly embedded in a two-layer maze (dungeon). What users are conscious of is a maze solving task, and thus it is expected that users do not feel psychological burden; rather, solving a maze should be an enjoyable task for users. In addition, we show that a suitable task for the proposed method is a Directcha task.

Keywords: CAPTCHA, psychological burden, machine attack tolerance, mental rotation, gamification

1. はじめに

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 1 つに CAPTCHA（Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart）がある．CAPTCHA は人間には正解容易であり，機械には正解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 や画像の判別を用いた Asirra [2] が採用されている．しかし，これらの 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ることが可能であると指摘されている [3], [4].

この問題に対して，画像に写るオブジェクトの相対関係や正当性といった画像の深意を問う，人間のより高度な認知能力を利用した CAPTCHA（以下，略称を深意画像 CAPTCHA とする）がかねてから提案されてきた [5], [6], [7], [8], [15], [16], [17]．しかし，深意画像 CAPTCHA は，1 画面中に表示できる画像の数には限界があるため，CAPTCHA 1 問あたりの総当たり数が少ない傾向にある．さらに，近年はマルウェアの物体認識能力が向上し，深意画像 CAPTCHA であっても，マルウェアの正答率が人間の正答率に近づいてきている．

総当たり数の確保と機械学習攻撃耐性の強化をともに達成するためには，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方法が平易かつ有効である．しかし，単純に CAPTCHA タスクを繰り返させるだけでは，ユーザの利便性を著しく減少させてしまう．ユーザの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．

そこで本論文では，CAPTCHA タスクの繰り返しによる機械解読耐性の向上を達成しつつ，ユーザの利便性を維持する CAPTCHA 出題形式を模索する．その一実現例として，「迷路」という概念の利用を提案する．迷路の各分岐点にはそれぞれ 1 つの CAPTCHA タスクが配置されており，各 CAPTCHA タスクの正解が正しい分岐路を示すようになっている．各 CAPTCHA タスクを解いていき，スタートからゴールまでの経路を正しく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．迷路の「ゴールへ到達する」というタスクの中に，複数の CAPTCHA タスクを埋め込むことによって，CAPTCHA タスクを繰り返すことに対するユーザのメンタル負荷軽減が実現される．さらに，迷路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 を回答することが可能である．

ここで，迷路を実現する形態としては複数の形態が考えられる．本論文では，単層迷路型の出題形式「CAPTCHA-maze」，多層（2 層）迷路型の出題形式「CAPTCHA-dungeon」の 2 つの形態の迷路型 CAPTCHA について掘り下げる．CAPTCHA-maze は，迷路一層の形態で，スタートからゴールまで正しい経路をたどることができたユーザが正規ユーザと判定される．CAPTCHA-dungeon は，迷路を 2 層にしたうえで，各層を階段でつなぎ，1 層目（1 階）のスタートから 2 層目（2 階）のゴールまでをたどるようにした形態である．1 階のスタートから 2 階のゴールまで正しい経路をたどって到達することができたユーザが正規ユーザと判定される．

詳しくは 3.2 節以降で説明するが，迷路形式の CAPTCHA の中に埋め込まれる CAPTCHA タスクとしては，「向きを答える CAPTCHA タスク」が適切である．既存の向きを答える CAPTCHA タスクとしては，Sketcha タスク [5] や Directcha タスク [8] がある．このうち，正面方向を回答する Directcha タスクを採用した方が，よりメンタル負荷が低い CAPTCHA が実現できる．

本論文の構成は次のとおりである．2 章では，人間のより高度な認知能力を利用した既存の深意画像 CAPTCHA を紹介し，それらの問題点を指摘する．3 章にてコンセプトについて説明した後，4 章でプロトタイプシステムを実装する．5 章でユーザビリティに関する実験の結果を報告する．6 章では，5 章の結果をもとに，提案方式に関して議論する．最後に，7 章でまとめと今後の課題を述べる．

2. 関連研究

本論文では，人間のより高度な認知能力を利用した画像 CAPTCHA（深意画像 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 CAPTCHA，および，常識からの逸脱を利用した CAPTCHA について説明する．さらにそれぞれの CAPTCHA の問題点を明らかにする．

2.1 メンタルローテーションを利用した CAPTCHA

メンタルローテーションとは，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能力である [9], [10]．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深意画像 CAPTCHA として YUNiTi CAPTCHA [6]，Sketcha [5]，Directcha [8] が提案されている．

2.1.1 YUNiTi CAPTCHA

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 CAPTCHA として YUNiTi CAPTCHA が提案されて

[1] 静岡大学
Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432–8011, Japan
[a)] nisigaki@inf.shizuoka.ac.jp

図 1 YUNiTi CAPTCHA の認証画面例
Fig. 1 Example of YUNiTi CAPTCHA.

いる [6]．YUNiTi CAPTCHA の認証画面例を**図 1** に示す．YUNiTi CAPTCHA では，「候補画像群の中から問題画像と同じ 3 次元オブジェクトが写された画像を選ぶ」というメンタルローテーションタスクが採用されている．

3 問の問題画像が一度に提示され，それぞれのオブジェクトが何であるかを 18 個の候補画像の中から正しく選択できたユーザを人間と判定する．問題画像は毎回異なる視点から 3 次元オブジェクトを写した画像となっている．候補画像群の撮影方向は不変であり，つねに同一の候補画像群が表示される．

しかし，YUNiTi CAPTCHA のようなメンタルローテーション CAPTCHA の場合は，姿形の異なる複数のオブジェクトの中に問題画像と同一のオブジェクトが 1 体だけ混入する形態となっているため，「候補画像群の中から問題画像と最も近い特徴を有する画像を選択する」という戦略によって，マルウェアにも正解画像を求められてしまう懸念がある [14]．また，CAPTCHA タスク 1 回あたりの総当たり数はたかだか 18 通りである．

なお，YUNiTi CAPTCHA を改良した方式が，文献 [15] や文献 [17] で提案されている．前者は，候補画像をアニメーション化することで，利便性の向上を図ったものであり，攻撃耐性に関しては，YUNiTi CAPTCHA と同様の問題を抱えている．後者は，モーフィング技術を利用して変形したオブジェクトを問題画像とすることで，類似画像を選択する攻撃の脅威を弱めている．しかし，オブジェクトを変形したことで，ユーザがオブジェクトを識別し難くなる，不快を感じる，といった問題が新たに発生している．さらに，総当たり数の問題は解決されていない．

2.1.2 Sketcha

Sketcha の認証画面例を**図 2** に示す．認証画面には，問題画像が提示される．問題画像は，3 次元オブジェクトを 2 次元へ投影し，線画化した 2 次元画像であり，各 2 次元画像に対して 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上方向を回答する」というタスクを利用している（以下，Sketcha タスクと呼ぶ）．人間の正答率は 1 問（1 タスク）あたり 98.6%であることが実験によって判明している．一方，回転方向を 4 つに限定しているため，CAPTCHA タスク 1 回あたりの総当たり数はたかだか 4 通りである．また，機械学習に対しては 1 問あたり 61.0%の確率で突破されている[*1]．

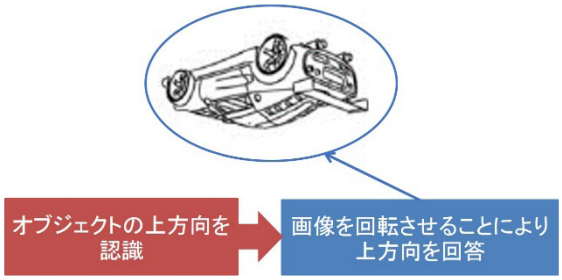

図 2 Sketcha の認証画面例
Fig. 2 Example of Sketcha.

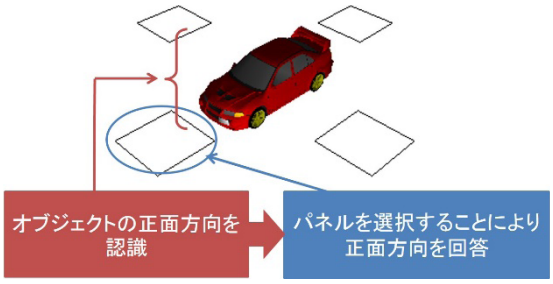

図 3 Directcha の認証画面例
Fig. 3 Example of Directcha.

2.1.3 Directcha

Directcha の認証画面例を**図 3** 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」というタスクを利用している（以下，Directcha タスクと呼ぶ）．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 [10]．

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，オブジェクトの回転角度に依らず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 [11]．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，人間のこの特徴を利用し，認証にかかる時

[*1] ただし，文献 [5] は，近年の深層学習の成果が報告される前に行われた研究である．

図 4 Chimera CAPTCHA の認証画面例
Fig. 4 Example of Chimera CAPTCHA.

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たかだか 4 通りである．機械学習に対する評価は，文献 [8] では未実施であるが，出題形式が類似している点から Sketcha と同程度であると考えられる．

2.2 常識からの逸脱を利用した CAPTCHA

Chimera CAPTCHA は，「常識からの逸脱」を認識する能力を利用した CAPTCHA の一方式である [7]．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オ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 つのオブジェクトであるので 4 通り）．文献 [7] では深層学習に対する耐性についても報告されているが，現在の AI（人工知能）技術の進化に鑑みるに，機械に突破される可能性は否めないと考えられる．なお，Chimera CAPTCHA の派生形式として，物体のサイズ感の違和感を利用した方式も提案されているが [16]，本方式も同様の問題を抱えている．

2.3 深意画像 CAPTCHA の課題

前節までに述べたように，人間のより高度な認知能力を利用した，画像に写るオブジェクトの相対関係や正当性といった画像の深意を問う CAPTCHA（深意画像 CAPTCHA）がかねてから提案されてきた．しかし，深意画像 CAPTCHA においても，機械解読耐性は十分ではなく，以下の 2 つの課題が存在する．

【課題 1】総当たり攻撃に対する脆弱性

1 画面中に表示できる画像の数には限界があるため，1 問あたりの総当たり数が少ない傾向にある．

【課題 2】機械学習攻撃に対する脆弱性

近年の AI 技術の発達に伴い，マルウェアの物体認識技術も向上してきている．その結果，深意画像 CAPTCHA であっても，マルウェアの正答率が人間の正答率に近づいてきている．

深意画像 CAPTCHA のこれらの課題を解決する，単純かつ効果的な方法は，CAPTCHA を解くというタスク（CAPTCHA タスク）を複数回繰り返すことである．

【課題 1 の解決】

CAPTCHA 1 タスクあたりの総当たり数を m とする．CAPTCHA タスクを n 回繰り返すことによって，タスク全体の総当たり数は m^n へと指数関数的に増加する．

【課題 2 の解決】

CAPTCHA 1 タスクあたりの人間の正答率を HAR（Human Acceptance Rate），機械学習攻撃による成功率を MAR（Machine Acceptance Rate）とする．このとき，人間の正答率と機械学習攻撃による成功率の差は HAR – MAR である．CAPTCHA タスクを n 回繰り返すことによって，人間の正答率と機械学習攻撃の正答率の差は，$\mathrm{HAR}^n - \mathrm{MAR}^n$ へと拡張される．したがって，機械学習の精度向上によって CAPTCHA タスク 1 回当たりの MAR が HAR に肉薄したとしても，CAPTCHA タスクの繰り返し数 n を適切に増やすことによって，人間の正答率を有意に大きくすることが可能である．

以上のとおり，CAPTCHA タスクを n 回繰り返すことによって，CAPTCHA の機械解読耐性（総当たり攻撃や機械学習攻撃の耐性）を高めることができる．一方，同じタスクを何度も単純に繰り返すことは，飽きや面倒さを発生させるため，ユーザのメンタル負荷を増加させてしまうという課題がある．

3. 提案方式

3.1 コンセプト

2 章では，深意画像 CAPTCHA の代表例を紹介し，それらの機械学習攻撃耐性と総当たり数を示した．これらのタスクを複数回行わせることは，CAPTCHA の総当たり数の確保と機械学習攻撃耐性の向上の両方に有効である．しかし，同じタスクの繰り返しは，ユーザのメンタル負荷を増加させる（飽きや面倒さが発生する）．そこで本論文では，機械解読耐性を向上しつつ，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．

その実現の方法として，有効だと考えられる方法は「迷路」という概念の利用である．迷路の各分岐点にそれぞれ 1 つの CAPTCHA タスクを配置し，各 CAPTCHA タスクの正解が正しい分岐路（進む方向）を示すようにする．各 CAPTCHA タスクを解いていき，スタートからゴールまでの経路を正しく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．迷路形式は，迷路の「ゴールへ到達する」というメインタスクの中に，複数の CAPTCHA タスクがサブタスクとして埋め込まれた方式である．それぞれの CAPTCHA タスクがサブタスクとなることで，CAPTCHA タスクを繰り返すことに対するユーザのメンタル負荷軽減が実現される．さらに，迷路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 を回答することが可能である．

迷路形式の CAPTCHA に対する攻撃は 2 種類存在する．1 つ目が「パターンマッチングや機械学習によって CAPTCHA タスクを解読して迷路を解く攻撃」である．2 つ目が「迷路のルール（スタートからゴールへ一筆書きの経路をとる，等）に基づいた知識を利用して迷路を解く攻撃」である．1 つ目の攻撃については，2.3 節に述べたように，迷路という題材を利用してユーザに CAPTCHA タスクを無理なく繰り返させることによって攻撃耐性の強化が達成される．2 つ目の攻撃に対しては，4.1 節で述べるように，「迷路のルールに従った経路の候補数（経路総当たり数）」が十分大きな数値となるように問題サイズを設定することによって対抗することが可能である．

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「複数の分岐路のうちの 1 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．

ここで，迷路形式では，各分岐点の CAPTCHA タスクの正解が正しい分岐路（進む方向）を示す必要がある．よって，利用する CAPTCHA タスクとしては，「向き」を利用したタスクであることが望ましい．筆者が知る限り，既存の CAPTCHA が利用しているタスクのうち，向きを利用した CAPTCHA タスクには，2.1 節で紹介した Sketcha タスク（図 2）と Directcha タスク（図 3）の 2 つが存在する．Sketcha タスクは，オブジェクトの上方向を回答するタスクであり，迷路形式に適用した場合，スタートからゴールまで上向きをたどる迷路となる．一方，Directcha タスクは，オブジェクトの正面方向を回答するタスクであり，迷路形式に適用した場合，スタートからゴールまで正面方向をたどる迷路となる．

ここで，人間は日常的に，モノの顔や体の向いている方向を「モノの向き」として認識しているため，オブジェクトの正面方向を回答する Directcha タスクのほうがユーザにとってより自然な行為であると考えられる．さらに，我々はふだん，横に倒れたオブジェクトや倒立したオブジェクトを見慣れていないという点からも，Directcha タスクのほうが好適であると期待される．

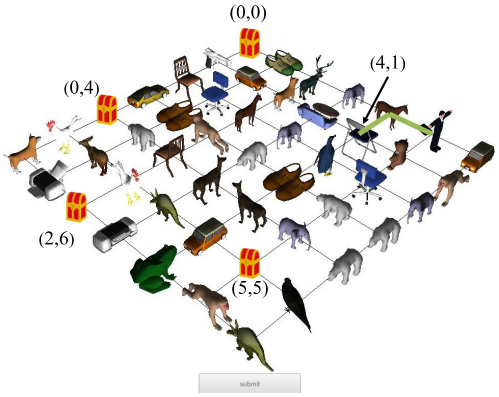

図 5 Directcha-maze の認証画面例
Fig. 5 Authentication window for Directcha-maze.

3.3 迷路の形態

迷路の形態としては複数の種類が考えられる．本論文では，単層迷路型の「CAPTCHA-maze」と多層（2 層）迷路型の「CAPTCHA-dungeon」の 2 つの形態について掘り下げていく．

3.3.1 CAPTCHA-maze

「CAPTCHA-maze」は，1 層の迷路によって構成される迷路型 CAPTCHA である．表示された 1 枚の画像に写された迷路において，スタートからゴールへたどれたユーザを正規ユーザと見なす．本論文では，Directcha タスクを利用した CAPTCHA-maze を「Directcha-maze」，Sketcha タスクを利用した CAPTCHA-maze を「Sketcha-maze」と呼ぶ．以下に，Directcha-maze を例として，提案形態の詳細な説明を記す．

Directcha-maze の認証画面例を**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 $i = 0 \sim 6$，$j = 0 \sim 6$）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 $(4, 1)$）からゴール地点（図 5 の例では各格子点 $(0, 0)$，$(0, 4)$，$(2, 6)$，$(5, 5)$）までの経路上に位置するオブジェクトにおいては，オブジェクトの正面方向をたどっていけばいずれかのゴールに到着できるように，オブジェクトの向きが設定されている．

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．

CAPTCHA-maze の場合は，1 問あたりの総当たり数は，スタートからゴールへの経路の候補数となる．経路上に存在するオブジェクト（ユーザがスタートからゴールまで経路をたどっていく間に通過するオブジェクト）を「通過オブジェクト」と呼ぶ．経路上の通過オブジェクトの数を n とした場合，ユーザは 1 問の迷路を解く間に n 問の CAPTCHA タスクを解くことになる．CAPTCHA 1 タスクあたりの総当たり数を m とする（今回利用する Directcha タスクおよび Sketcha タスクにおいては $m = 4$）と，CAPTCHA-maze 全体のタスクの総当たり数は $(m-1)^n$ に増加する[*2]．経路によって n の値が異なり，n が小さい経路ほどユーザはゴールに早く到達できる．このように，CAPTCHA-maze の場合は，「経路の総当たり数」と「CAPTCHA タスクの総当たり数」の 2 つの観点から迷路 1 問あたりの総当たり数を考えることができる．本論文では，以降，前者を「経路総当たり数」，後者を「タスク総当たり数」と呼び分け，前者を CAPTCHA-maze の総当たり数を規定するために，後者を Directcha や Sketcha の総当たり数を規定するために使用する．

3.3.2 CAPTCHA-dungeon

迷路の形態としては，多層の迷路を利用することも可能である．「CAPTCHA-dungeon」は，2 層の迷路によって構成される迷路型 CAPTCHA である．2 層の迷路がダンジョンの 1 階と 2 階として配置されており，1 階のゴールと 2 階のスタートが階段で接続されている．本論文では，Directcha タスクを利用した CAPTCHA-dungeon を「Directcha-dungeon」，Sketcha タスクを利用した CAPTCHA-dungeon を「Sketcha-dungeon」と呼ぶ．以下に，Directcha-dungeon を例として，提案形態の詳細な説明を記す．

Directcha-dungeon の認証画面例を**図 6** に示す．図 6 (a) が 1 階の迷路，図 6 (b) が 2 階の迷路である．認証画像には，それぞれ格子が描画され，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る．各格子点の位置を (i, j)（図 6 (a) および図 6 (b) の例では，それぞれ $i = 0$〜3，$j = 0$〜3）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．

まず，1 階の迷路（図 6 (a)）が表示される．格子のスタート地点（図 6 (a) の例では格子点 $(2, 0)$）から 3 つの階段地点（図 6 (a) の例では格子点 $(0, 0)$，$(0, 3)$，$(3, 3)$）のいずれかへ，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 6 (a) の例では $(3, 3)$ へ到達する）．いずれかの階段に到達したのち，画面が切り替わり，2 階の迷路（図 6 (b)）が表示される．このとき，1 階のゴール地点（1 階で到達した階段の地点）が 2 階のスタート地点（図 6 (b) の例では $(3, 3)$）となるようになっている．2 階も 1 階と同様に，スタート地点から 3 つのゴール地点（図 6 (b) の例では格子点 $(0, 2)$，$(1, 0)$，$(3, 0)$）へ，オブジェクトの正面方向をたどっていければ到着できるように，各オブジェクトの向きが設定されている．1 階のスタート地点から 2 階のゴール地点まで各オブジェクトの正面方向を正しくたどれたユーザを正規ユーザ（人間）として判定する．

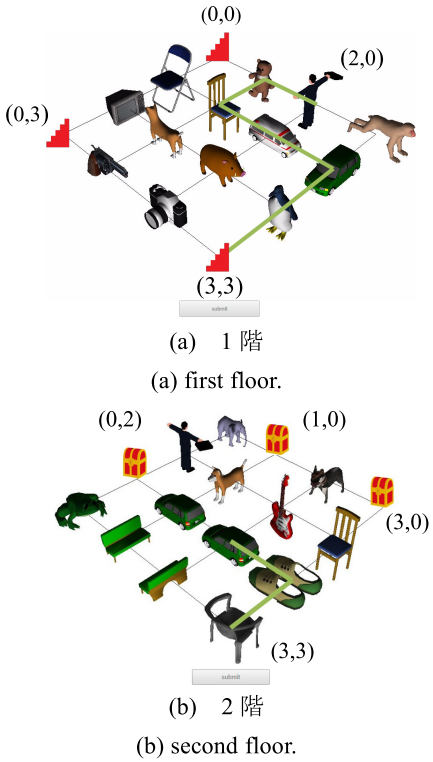

図 6 Directcha-dungeon の認証画面例
Fig. 6 Authentication window for Directcha-dungeon.

Directcha-dungeon は 2 層の迷路を利用しており，その経路総当たり数は「1 階の経路総当たり数」×「2 階の経路総当たり数」である．したがって，1 枚の画像に配置するオブジェクトの数を maze 型よりも少ない数にすることが可能であり，画面サイズが同じ場合には，迷路の表示サイズをより大きいものにすることが可能である．この結果，ユーザにとってオブジェクトの視認性が増すことが期待される．しかし，迷路が拡大された分，格子間の距離（ユーザがマウスを動かす距離）も増加するため，認証時間は若干長くなることが予想される．また，1 階の迷路を解くというタスクと 2 階の迷路を解くというタスクが分離しているため，maze 型の出題形態よりも，ユーザに「タスクの繰

[*2] オブジェクト 1 体あたりの Directcha タスク，Sketcha タスクの総当たり数は 4 であるが，迷路の場合は，スタートからゴールに向かって一筆書きの経路となるため，経路を逆走する方向は回答候補から外れ，オブジェクト 1 体当たりの Directcha タスク，Sketcha タスクの総当たり数は 3 となる．なお，迷路の角や縁に配置されるオブジェクトにおいては，迷路の場外に進む方向は回答候補から外れるため，オブジェクト 1 体当たりの Directcha タスク，Sketcha タスクの総当たり数は 1 あるいは 2 となる．このため，より正確には，CAPTCHA-maze 全体のタスクの総当たり数は $(m-1)^n$ よりは小さくなる．

り返し」を意識させてしまう．これらのユーザビリティへの影響については，次章以降で実験を通じて調査を行う．

4. 実装

4.1 準備

ユーザビリティ実験を実施するために，Directcha，Sketcha，Directcha-maze，Sketcha-maze，Directcha-dungeon，Sketcha-dungeon 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 4,096 通りで設定した．文献 [12] では，CAPTCHA の総当たり数として 4,096 通りを最低限確保すれば，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 560 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．ここで，Directcha と Sketcha においては，CAPTCHA タスクの単純な繰り返しとなるため，「タスク総当たり数」が 4,096 通りとなるように問題サイズを設定した．一方，迷路形式の Directcha-maze，Sketcha-maze，Directcha-dungeon，Sketcha-dungeon においては，3.1 節で述べたように，「迷路のルールに基づく知識」を利用して回答候補を絞るという攻撃に対抗する必要がある．このため，「経路総当たり数」が 4,096 通りとなるように問題サイズを設定し，マルウェアが迷路の知識を利用したとしても回答候補（迷路のルールに従った経路）数が 4,096 通りから低下しないようにした．
- 利用するオブジェクトの統一：各実験システムでは同じ 3 次元オブジェクトを利用した．これら 3 次元オブジェクトは，Web 上から収集した 3 次元モデルを用いて描画する．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．その結果，67 種類のモデルを収集した．練習と本番で異なるモデルを利用することとし，練習で 22 種類のモデルを利用し，本番で残り 45 種類のモデルを利用して問題を生成した[*3]．
- 画像の表示：問題画面上には，問題が表示される時点で（回答開始前から）画像（群）が表示されている．
- 実行環境：実験システムは，Google Chrome 上で動作をする．ユーザは，実験開始前にブラウザ画面を最大化する必要がある．標準の画面サイズを横 1,366 × 縦 768 とし，ユーザが使用しているブラウザのウィンドウサイズに応じて，画面上の各描画要素のサイズが適切に調整されるようになっている[*4]．以下，画像サイズ等については，標準画面サイズ（1,366 × 768）上で表示させた場合の画素数で説明を行う．
- 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，認証結果（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．練習問題回答時は，被験者の回答とともに解答が表示され，被験者は間違えた箇所を確認できる．ダイアログの OK ボタンを押すと，次のページへ遷移する．
- 迷路のスタート・ゴール：迷路のスタートには旗のアイコンを，ゴールには宝箱のアイコンを設置した．

図 7 Directcha の認証画面例
Fig. 7 Authentication window for Directcha.

4.2 Directcha の単純な繰り返し実験システム

Directcha の単純な繰り返し（以下，略称を Dr とする）の実験システムの認証画面例を**図 7** に示す．2.1.3 項で説明したとおり，Directcha は 1 問あたりのタスク総当たり数が 4 通りである．問題 1 セットあたりのタスク総当たり数を 4,096 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．各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 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 つ選んで回転している．x 軸，z 軸に関しては回転していない．カメラの位置を x 軸方向に 35 度にした．

ユーザが画面上部にある Start ボタンをクリックすると，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黄緑色に変わる（図 7 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

[*3] 本実験では，実験の簡素化に鑑み，使用する 3 次元モデルの数を制限した．このため，迷路上の複数の場所に同じオブジェクトが配置され得る．攻撃耐性の観点からは，実運用の際には十分な数の 3 次元モデルを用意し，1 つの迷路上に同じオブジェクトが複数出現しないようにすることが望ましい．

[*4] たとえば，ユーザが 1,280 × 1,024 画素のブラウザ上でシステムを閲覧するとする．さらに，標準画面サイズ（1,366 × 768 画素）上で，500 × 400 画素の描画要素を画面で表示させるようページが作られているとする．このとき，当該ブラウザ上では，min(1,280 ÷ 1,366, 1,024 ÷ 768) ≒ 0.94 を計算し，470 (= 500 × 0.94) × 376 (= 400 × 0.94) 画素でその要素が表示されるよう調整される．

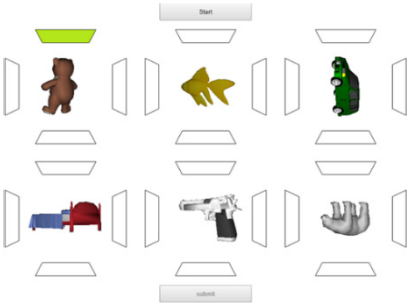

図 8 Sketcha の認証画面例
Fig. 8 Authentication window for Sketcha.

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 のうち，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．

4.3 Sketcha の単純な繰り返し実験システム

Sketcha の単純な繰り返し（以下，略称を Sr とする）の実験システムの認証画面例を**図 8** に示す．オリジナルの Sketcha は，画像自体を回転させることによって上方向（画像が正立する方向）を回答する形式であるが，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，オブジェクトの上下左右に置いたパネルの選択によって上方向を回答する形式を採用した．このため実験システムは，各オブジェクトの上方向をクリックする形式である以外は，Directcha の実験システム Dr と同じものとなっている．各オブジェクトは，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．オリジナルの Sketcha は，線画化したモデル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．

4.4 Directcha-maze の実験システム

Directcha-maze（以下，略称を Dm とする）の実験システムは，3.3.1 項（図 5）に基づき実装した．7×7 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 $(4,1)$ をスタートとし，格子点 $(0,0)$，$(0,4)$，$(2,6)$，$(5,5)$ にそれぞれゴールを設置した．格子点 $(4,1)$ から $(0,0)$，$(4,1)$ から $(0,4)$，$(4,1)$ から $(2,6)$，$(4,1)$ から $(5,5)$ の経路総当たり数は 4,096 通り以上存在する．格子点 $(4,1)$ から $(0,0)$，$(4,1)$ から $(0,4)$，$(4,1)$ から $(2,6)$，$(4,1)$ から $(5,5)$ の経路のうち，通過オブジェクト数 n が少ない（パスが短い）ものをあらかじめ 4,096 通り抽出しておき，正解経路は必ずその 4,096 通りの中のいずれかとなるように調整した．

図 9 Sketcha-maze の認証画面例
Fig. 9 Authentication window for Sketcha-maze.

4,096 通りの経路の候補の内訳は，$n=5$ の経路が 10 通り，$n=7$ が 139 通り，$n=9$ が 775 通り，$n=11$ が 3,172 通りであった．問題画像のサイズは，縦 700 × 横 1,200 画素とした．各オブジェクトの回転方向は Directcha の実験システム Dr と同じである．

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 5 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，宝箱に触れたら回答終了となる．Submit ボタンは，回答終了とともにアクティブとなる．回答時間の計測は，宝箱を触れた時点で終了している．

4.5 Sketcha-maze の実験システム

Sketcha-maze（以下，略称を Sm とする）の実験システムの認証画面例を**図 9** に示す．実験システムは，各格子点上のオブジェクトの回転方向と正解方向（上方向をたどる形式）が異なる以外は，Directcha-maze の実験システム Dm と同じである．回転方向は Sketcha の実験システム Sr と同じである．

4.6 Directcha-dungeon の実験システム

Directcha-dungeon（以下，略称を Dd とする）の実験システムは，3.3.2 項（図 6）に基づき実装した．1 層，2 層ともに迷路のサイズは 4×4 に設定した．1 階については，格子点 $(2,0)$ をスタートとし，格子点 $(0,0)$，$(0,3)$，$(3,3)$ にそれぞれ階段を設置した．1 階のいずれかの階段に到達した時点で 2 階の迷路が表示される．1 階の迷路のゴール地点の座標が 2 階の迷路のスタート地点の座標となる．2 階については，

- スタートが $(0,0)$ の場合は，格子点 $(0,3)$，$(3,1)$，$(3,2)$

にそれぞれゴールを設置した．
- スタートが $(0,3)$ の場合は，格子点 $(1,0)$，$(3,1)$，$(3,3)$ にそれぞれゴールを設置した．
- スタートが $(3,3)$ の場合は，格子点 $(0,2)$，$(1,0)$，$(3,0)$ にそれぞれゴールを設置した．

CAPTCHA-dungeon における経路総当たり数は，「1 階の迷路の経路総当たり数」×「2 階の迷路の経路総当たり数」である．4,096 通りの経路総当たり数を実現するために，各階の経路総当たり数は 64 通りとなるよう設定した．問題画像のサイズは，縦 700 × 横 1,200 画素とした．各オブジェクトの回転方向は Directcha の実験システム Dr と同じである．

Directcha-dungeon の操作方法は，Directcha-maze の実験システム Dm と基本的には同様である．ただし，1 階では階段までたどった後，階段に触れると 2 階に進む．2 階に進んだ場合，1 階に戻ることはできない．2 階のゴールまでたどった後，宝箱に触れたら回答終了となる．回答時間は，1 階のスタート地点で旗をクリックしたタイミングから，2 階のゴール地点で宝箱に触れるまでを計測した．

4.7 Sketcha-dungeon の実験システム

Sketcha-dungeon（以下，略称を Sd とする）の実験システムは，各格子点上のオブジェクトの回転方向と正解方向（上方向をたどる形式）が異なる以外は，Directcha-dungeon の実験システム Dd と同じである．回転方向は Sketcha の実験システム Sr と同じである．

5. ユーザビリティ実験

5.1 実験群

本実験では，「Dr，Sr，Dm，Sm の 4 方式を解く被験者群 A」と「Dr，Sr，Dd，Sd の 4 方式を解く被験者群 B」という 2 種の被験者群を用意した[*5]．

5.2 諸元

クラウドソーシングである Lancers [13] を利用して，被験者を募集した．被験者が実験ページにアクセスをすると，被験者群 A または被験者群 B にランダムに割り当てられ，実験が開始される．順序効果に配慮し，割り当てられた 4 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．各被験者は，割り当てられた各 4 方式それぞれで，本番を 3 セット行うこととした．ただし，実験システムに慣れるため，各被験者は，3 セットの実験本番の前に，最低 5 セット以上で，自身が十分と思えるまで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各システムによって毎回自動生成され，毎回異なる画像（あるいは，画像群）が出題される．実験の報酬は Lancers の基準に従い 300 円とした．なお，「本実験が学術目的の評価実験であり，実験結果（回答結果，アンケートに記載した内容）は個人を特定できないよう加工したうえで，学術目的で利用される」旨を，（被験者が実験開始前にアクセスする）実験要領を説明するページに掲載した．この説明に被験者が同意した後に実験ページへアクセスすることが可能となる．

メンタル負荷に関する評価のために，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．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．「④ 簡単さとその理由」，「⑤面白さとその理由」は，被験者群 A については，(方式 p, 方式 q) = (Dr, Sr), (Dr, Dm), (Sr, Sm), (Dm, Sm) という 4 つの組み合わせ間で，被験者群 B については，(方式 p, 方式 q) = (Dr, Sr), (Dr, Dd), (Sr, Sd), (Dd, Sd) という 4 つの組み合わせ間で，2 方式を比較してそれぞれ回答してもらった．「⑥ 1 回の認証あたりに続けて解いてもよい回数とのその理由」は各方式に対して回数を記入してもらった．

① 年代（10 代，20 代，30 代，40 代，50 代，60 代以上，から選択）
② 性別（男性，女性，から選択）
③ 専攻分野（理系，文系，どちらか不明，から選択）
④ 方式 p，方式 q を比較したとき，どちらが簡単にとけたか（方式 p が簡単，方式 p が少し簡単，どちらも同じ，方式 q が少し簡単，方式 q が簡単，から選択とその理由）
⑤ 方式 p，方式 q を比較したとき，どちらが面白いと感じたか（方式 p が面白い，方式 p が少し面白い，どちらも同じ，方式 q が少し面白い，方式 q が面白い，から選択とその理由）
⑥ ある Web サービスを利用するにあたって，問題を何問も連続して続けて解かなければ，そのサービスを利用できないとする．このとき，今回実験した 4 方式のいずれかが出題されるとしたら，それぞれ何問なら解いてもよいと感じるか（1 セット，2 セット，3 セット，…，11 セット以上，から選択）．また，その理由は何か．
⑦ 間違えた問題があった場合，その問題を間違えた理由
⑧ 自由記述（任意回答，感想や思ったこと）

今回は，各群の被験者が 50 名（計 100 名）程度になるように募集を行った．クラウドソーシング上での実験となるため，実験途中に意図しない操作を行ったり，回答方法をしっかりと理解せずに実験を実施する被験者が含まれたりすることが予期された．そこで，130 名の募集をしたうえで，意図しない被験者を実験後に除外するという対応を

[*5] 当初は「Dr，Sr，Dm，Sm，Dd，Sd の 6 方式を解く被験者群」1 つでの実験を予定していたが，予備実験を行ったところ，所要時間が約 1 時間に及ぶことが判明した．被験者の負担に配慮し，被験者群を分離して，被験者 1 人当たりの実施項目を減ずることとした．

表 1 被験者の属性
Table 1 Subject attribute.

被験者群	男性	女性	10代	20代	30代	40代	50代	60代以上	文系	理系	どちらか不明
A	23	32	0	10	22	23	0	0	9	33	13
B	32	19	1	9	15	18	7	1	21	25	5

表 2 実験結果
Table 2 Experiment results.

		Dr	Sr	Dm	Sm
A	平均正答率[%]	96.4	92.7	95.2	86.7
	標準誤差[%]	1.41	2.05	1.82	3.31
	平均回答時間[s]	6.60	8.18	9.01	16.58
	標準誤差[s]	0.22	0.44	0.43	1.64
		Dr	Sr	Dd	Sd
B	平均正答率[%]	99.3	90.8	96.7	91.5
	標準誤差[%]	0.65	2.10	1.40	2.61
	平均回答時間[s]	6.24	7.74	11.33	13.45
	標準誤差[s]	0.16	0.31	0.71	0.95

とることとした．そのような被験者を除外するにあたっては，実験実施者（著者ら）2 名が個別に判断を行ったのち，その判断を照合して 2 名の合議によって最終判断することで，その客観性を担保した．

5.3 結果

5.3.1 被験者人数

130 名の応募者のうち，実験を完了した被験者の総数は 123 名であり，その内訳は被験者群 A が 62 名，被験者群 B が 61 名であった．被験者の回答やアンケートのログを確認し，以下のような被験者については除外した．

- いずれかの方式で，練習，本番ともに，正解が 0 問であった被験者
- アンケートの回答のどこかで，いずれかの方式に対して「操作がよく分からなかった」や「理解できなかった」旨を回答していた被験者（例：問題の意味が分からなかった）
- アンケートの回答で，操作説明をしっかりと読まなかった旨を回答していた被験者（例：説明をきちんと読まなかったから）

以上の被験者を除外した結果，被験者の総数は 106 名であり，その内訳は被験者群 A が 55 名，被験者群 B が 51 名であった．

5.3.2 実験結果

今回の被験者 106 名の属性を**表 1** にまとめる．また，被験者群ごとに，4 方式の正答率と平均回答時間を求めた結果を，**表 2** に示す．

表 2 より，Dr, Dm, Dd の平均正答率はいずれも 95%以上となり，「人間には正解が容易である」という CAPTCHA の要件を満たす結果となった．平均回答時間は，Dr < Dm < Dd という結果であった．Dr においては，4,096 通りの「タスク総当たり数」を確保するために，6 回の Directcha タスクが求められる．Dm と Dd においては，「経路総当たり数」が 4,096 通りとなるように問題サイズが設定されているため，その際の通過オブジェクト数の平均値が 6 体以上となる．このため，ユーザが実行する Directcha タスクの回数自体は Dm，Dd のほうが多くなり，これが回答時間の増加を引き起こしている．

一方，Sr，Sm，Sd においては，平均正答率も平均回答時間も Dr，Dm，Dd にそれぞれ及ばない結果となった．3.2 節にて迷路形式の CAPTCHA においては，Sketcha タスクよりも Directcha タスクのほうが好適であろうということを述べたが，それが裏付けられる結果が得られた．

表 3 アンケート結果（簡単さ）
Table 3 Survey results (Simplicity).

被験者群	方式p	方式q	方式pが簡単	方式pが少し簡単	どちらも同じ	方式qが少し簡単	方式qが簡単
A	Dr	Sr	13	15	15	1	3
	Dr	Dm	29	6	7	4	1
	Sr	Sm	29	11	6	1	0
	Dm	Sm	15	15	13	2	2
B	Dr	Sr	11	14	11	5	1
	Dr	Dd	24	9	7	1	1
	Sr	Sd	16	14	8	4	0
	Dd	Sd	13	12	10	6	1

5.3.3 アンケート結果

アンケート結果を確認したところ，質問⑥の回答で，質問の意図を誤解している被験者が何名か見られた．

- 質問 ⑥ は，その Web サービスを利用する必要があるということを前提とした質問である．しかし，そもそも「その Web サービスを利用したくない」という旨を回答した被験者がいた（例：このような問題を課せられるサービスを利用しようと思わない）．
- 質問 ⑥ は，Web サービスの実際の利用シーン（練習フェーズはない）を想定した質問である．しかし，練習フェーズもあるものとして回数を回答していた被験者がいた（例：練習 1 回と本番 1 回で飽きてくる）．
- 質問 ⑥ は，CAPTCHA がすでに日常的に利用されている状況を想定した質問である．しかし，どれくらい問題を解いたら解く作業に慣れるかを回答していた被験者がいた（例：私自身が問題に慣れるまでに，少し時間がかかったので）．
- そのほか，理由に何らかの誤解が含まれる被験者（例：Dm で練習・本番ともに全問正解であるのに，Dm の理由に「正解率が低い」と記載）がいた．また，理由を記していない被験者がいた．

これら被験者については，信頼性を低下させてしまうことに鑑み，除外をしたうえで分析を行うこととした．除外後に残った被験者 89 名（内訳：被験者群 A は 47 名，被験者群 B は 42 名）のアンケートの結果を**表 3**，**表 4**，**表 5** に示す．なお，質問 ⑥ の回答に対する不備は，正答率，回

表 4 アンケート結果（面白さ）
Table 4 Survey results (Interest).

被験者群	方式p	方式q	方式pが面白い	方式pが少し面白い	どちらも同じ	方式qが少し面白い	方式qが面白い
A	Dr	Sr	4	11	20	12	0
	Dr	Dm	2	1	10	15	19
	Sr	Sm	4	3	7	19	14
	Dm	Sm	5	11	18	9	4
B	Dr	Sr	3	8	15	13	3
	Dr	Dd	2	1	4	23	12
	Sr	Sd	2	3	5	20	12
	Dd	Sd	2	13	14	10	3

表 5 アンケート結果（回数）
Table 5 Survey results (Number of times).

セット数	被験者群A				被験者群B			
	Dr	Sr	Dm	Sm	Dr	Sr	Dd	Sd
1	24	26	19	22	21	20	14	17
2	12	12	9	11	7	10	8	7
3	8	5	14	10	6	6	9	11
4	1	2	2	1	1	0	4	2
5	1	1	2	2	5	6	3	3
6	0	0	0	0	0	0	2	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	1	0	0	0
11	1	1	1	1	0	0	1	1
平均	1.96	1.89	2.30	2.11	2.38	2.10	2.81	2.55
標準誤差	0.24	0.24	0.25	0.25	0.31	0.22	0.32	0.32

答時間には影響をおよぼさないため，表 1 および表 2 は 106 名の被験者に対する結果であることに注意されたい．

6. 考察

ユーザのメンタル負荷を正確に測定することは困難であるが，本論文では，質問 ⑥ の「繰り返して解いてもよい回数」の値に注目して，各方式のメンタル負荷の程度を議論する．この回数の値が大きければ大きいほど，ユーザのメンタル負荷が小さいものとする．

6.1 CAPTCHA-maze の効果

6.1.1 仮説

CAPTCHA-maze のメンタル負荷削減効果を示すために，以下の 3 つの仮説をたてて，検証を行う．

H1-1：{Dm-Dr, Dm-Sr}：Dm は Dr よりもメンタル負荷が小さく，かつ，Sr よりもメンタル負荷が小さい．

H1-2：{Sm-Dr, Sm-Sr}：Sm は Dr よりもメンタル負荷が小さく，かつ，Sr よりもメンタル負荷が小さい

H1-3：{Dm-Sm}：Dm は Sm よりもメンタル負荷が小さい．

H1-1 と H1-2 の 2 つの仮説は，CAPTCHA-maze が CAPTCHA タスクの単純な繰り返しよりもメンタル負荷削減効果が高いことを示すための仮説である．H1-3 の仮説は，CAPTCHA-maze が CAPTCHA タスクの単純な繰り返しよりもメンタル負荷削減効果が高いことが認められた（仮説 H1-1 が成立した場合，仮説 H1-2 が成立した場合，あるいは仮説 H1-1 と H1-2 がともに成立した）場合に，Directcha-maze と Sketcha-maze のどちらの方がメンタル負荷削減効果がより高いのかを示すための仮説である．

6.1.2 検定

6.1.1 項で示した各仮説に対して，各被験者内で対応のある t 検定（両側検定）を行うことで，平均の差を検定する．有意水準を 5%とする．H1-3 の検定は，H1-1 あるいは H1-2 の検定結果の後に行う多重検定となるため，Bonferroni の方法を用いて調整する．調整後の有意水準は 2.5%である．

H1-1 において，Dm と Dr の平均の差は有意であった（$t(46) = 2.49$，$p < 0.025$）．Dm と Sr の平均の差も有意であった（$t(46) = 2.53$，$p < 0.025$）．H1-2 において，Sm と Dr の平均の差は有意でなかった（$t(46) = 1.00$，$p = 0.32$）．Sm と Sr の差も有意でなかった（$t(46) = 1.37$，$p = 0.18$）．H1-3 において，Dm と Sm の平均の差には有意傾向がみられた（$t(46) = 2.14$，$0.025 < p < 0.05$）．

6.1.3 議論

H1-1 の結果より，Dm は，Dr や Sr よりもメンタル負荷が低いことが分かる．さらに，H1-3 の結果より，Dm は，Sm よりもメンタル負荷が低い傾向にあることが分かる．これら 2 点の結果より，「Directcha-maze が CAPTCHA タスク（Directcha タスク，Sketcha タスク）の繰り返しよりメンタル負荷を削減できている」，「CAPTCHA-maze のサブタスクとしては，Sketcha タスクよりも Directcha タスクが適している」ことが確かめられた．

前者について，質問⑥の回答において Dm >（Dr or Sr）という許容回数をつけている被験者のアンケートを確認することで分析を行ったところ，Dm は「ゲーム性がある」，「達成感がある」，「楽しいので好き」等という好意的な意見があった一方，Dr や Sr は「単純なので飽きる」，「クリックが面倒」等という意見が見られた．

後者については，質問③において両者を比較したとき，多くの被験者が「オブジェクトの正面方向を追うほうが簡単」という理由で「簡単さ」に高い評価をつけていた．また，「すらすら解ける」という理由で「面白さ」に高い評価をつけている被験者も多かった．これらが，Dm が優位であった理由である可能性が高い．さらに，H1-2 の結果では，Sm の平均値は Dr や Sr と比較して，値自体は大きいものの，有意差が認められるまでの優位性を有してはいなかった．この理由については，質問⑥の回答において（Dr or Sr）≧ Sm という許容回数をつけている被験者のアンケートを確認することで分析を行ったところ，Sm は「間違えやすい」あるいは「認証時間が長い」といったコメントがほとんどだった．CAPTCHA-maze のサブタスクとし

て，Directcha タスクが適しているということを明確に示す結果であるといえよう．

6.2 CAPTCHA-dungeon の効果

6.2.1 仮説

6.1.1 項と同様の条件で，CAPTCHA-dungeon に関する仮説をたてる．

H2-1：{Dd-Dr, Dd-Sr}：Dd は Dr よりもメンタル負荷が小さく，かつ，Sr よりもメンタル負荷が小さい．

H2-2：{Sd-Dr, Sd-Sr}：Sd は Dr よりもメンタル負荷が小さく，かつ，Sr よりもメンタル負荷が小さい

H2-3：{Dd-Sd}：Dd は Sd よりもメンタル負荷が小さい．

6.2.2 検定

6.1.2 項と同様の手順で，H2-1〜3 に対して検定を行う．

H2-1 において，Dd と Dr の平均の差は有意でなかった（$t(41) = 1.02$，$p = 0.313$）．Dd と Sr の平均の差も有意でなかった（$t(41) = 2.00$，$p = 0.052$）．H1-2 において，Sd と Dr の平均の差は有意でなかった（$t(41) = 0.375$，$p = 0.710$）．Sd と Sr の差は有意でなかった（$t(41) = 1.24$，$p = 0.223$）．H1-3 において，Dd と Sd の平均の差は有意でなかった（$t(41) = 1.92$，$p = 0.062$）．

6.2.3 議論

CAPTCHA-dungeon については，残念ながらどの項目にも有意差が確認できなかった．その原因についてユーザのアンケート結果を基に分析をした．その結果，質問⑥の回答において Dd や Sd に対して「回答時間が長い」という理由で低い許容回数をつけているユーザ，あるいは，Dr や Sr に対して「（Dd や Sd と比較して）回答時間が短い」という理由でより多い許容回数をつけているユーザが多かった．実際，実験結果に示したとおり，Dd の認証時間は，単純な繰り返し（Dr，Sr）と比較して 2 倍程度の所要時間となっている．この認証時間の長さが原因で，CAPTCHA-dungeon においては迷路化によるメンタル負荷の効果が，十分に発揮されなかったのだと考えられる．また，これらのコメントを記入した被験者のほとんどが，Dd と Sd の両方で同内容のコメントをあげていた．Dd と Sd 間で有意差が出なかったことも，被験者が「Dd も Sd も認証時間が長い」という印象を強く感じたことが原因ではないかと考えている．

ただし，表 5 に示したとおり，質問⑥の許容回数の平均値自体は，Dd や Sd のほうが，Dr や Sr より大きな値を得ている．Dd や Sd により多くの許容回数をつけているユーザの多くは，Dd や Sd を「面白かった」「ゲーム感覚で解くことができた」といった旨の回答を行っていた．したがって，（統計的な有意差は見られなかったが）CAPTCHA-dungeon による CAPTCHA タスクの繰り返しは，メンタル負荷軽減に一定の効果を有しているといってはよいのではないかと考えている．

今後，ユーザインタフェースの改良によって，上述の「回答時間が長い」という問題を解決することができれば，メンタル負荷軽減の効果を高めることも可能であると期待される．これについては，今後，継続的に調査していきたい．

6.3 maze と dungeon の比較

今回の実験では，被験者群が異なるため，両群の結果を単純に比較することはできない．しかし，CAPTCHA-maze においては Dm と Dr, Sr, Sm それぞれの群間で有意差が見られた一方，CAPTCHA-dungeon においては，それが見られなかったことから，現時点においては，CAPTCHA-maze のほうが，よりメンタル負荷削減の効果が大きい方式であると考えている．ただし，前節に示したとおり，dungeon の認証時間を短縮することができたならば，dungeon においてもメンタル負荷削減の効果が高まる可能性がある．また，dungeon は視認性（オブジェクトの大きさが大きく，見やすいこと）の観点で優位である．今後，dungeon に改良を施したうえで，さらに検討を行っていきたい．

7. まとめと今後の課題

本論文では，迷路形式の CAPTCHA 出題方式「CAPTCHA-maze」,「CAPTCHA-dungeon」を提案した．迷路化によって Directcha や Sketcha をサブタスクとして隠蔽すること，および，迷路のゲーム性を利用することを達成している．人間のより高度な認知能力を利用しながら，機械解読耐性（総当たり攻撃と機械学習攻撃）を向上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．

Directcha，Sketcha，Directcha-maze，Sketcha-maze，Directcha-dungeon，Sketcha-dungeon の 6 方式を実装し，ユーザビリティ実験を実施した．その結果，提案方式である Directcha-maze と Directcha-dungeon は，Directcha の単純なタスクの繰り返しと同等な正答率であり，アンケートで高い評価を得られた．Sketcha-maze や Sketcha-dungeon と比較した結果，迷路型の出題形式においては正面方向の認識に基づく Directcha-maze，Directcha-dungeon の利便性が高いという評価が得られた．maze と dungeon で比較した際に，現時点では maze のほうが，メンタル負荷削減効果が大きいことを確認した．さらに，dungeon の改良方針を明らかにした．

今後は，回答時間の減少等のさらなるユーザビリティ向上の検討，攻撃耐性に関わるより精緻な分析を行いたい．特に，CAPTCHA-dungeon をさらに改良する方法を検討していく必要があると考えている．迷路を表示するディスプレイの大きさは有限であるが，CAPTCHA-dungeon の出題形式であれば，迷路の層数を増やすことによって経路総当たり数の大きな問題を作成することが可能である．しかし，迷路が大きくなるにつれて問題を解くまでの負荷や時間が膨大となる．本論文では問題の経路総当たり数を 4,096

通りとしたが，CAPTCHA-dungeon の改良が達成されれば，利便性を維持しながら，より大きな経路総当たり数を有する CAPTCHA を実現できるようになると期待される．

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いただきました．静岡大学荒木由布子准教授に統計学の観点からご助言をいただきました．静岡大学大木哲史講師には，機械解読耐性の分析においてご助言をいただきました．本論文で使用した 3 次元モデルは，メタセコ素材!（http://sakura.hippy.jp/meta/），TurboSquid（http://www.turbosquid.com/），3D MODELLE（http://ja.kostenlose3dmodelle.com/），3D Warehouse（https://3dwarehouse.sketchup.com/?hl=ja），メタセコ普及委員会（http://www001.upp.so-net.ne.jp/yamag/meta2.html），のぼり坂一丁目（http://www.geocities.jp/oirahakobito2/sozai/sozai.html）等で公開されている素材です．また，本論文で使用した宝箱のイラストは，素材 Library.com（https://www.sozai-library.com/sozai/9363）で公開されている素材です．この場を借りて御礼申し上げます．

参考文献

[1] The Official CAPTCHA Site, available from ⟨http://www.captcha.net/⟩ (accessed 2017-08-17).
[2] ASIRRA – Microsoft Research, available from ⟨http://research.microsoft.com/enus/um/redmond/projects/asirra/⟩ (accessed 2014-12-04).
[3] Yan, J. and El Ahmad, A.S.: Breaking Visual CAPTCHAs with Naïve Pattern Recognition Algorithms, *Proc. Computer Security Applications Conference*, pp.279–291 (2007).
[4] Golle, P.: Machine Learning Attacks Against the ASIRRA CAPTCHA, *Proc. 2008 ACM Conference on Computer and Communications Security*, pp.535–542 (2008).
[5] Ross, S.A., Halderman, J.A. and Finklelstein, A.: Sketcha: A captcha based on line drawings of 3D models, *Proc. 19th International Conference on World Wide Web*, pp.821–830 (2010).
[6] YUNiTi.com, available from ⟨http://www.yuniti.com/⟩ (accessed 2014-12-04).
[7] 藤田真浩，池谷勇樹，可児潤也，西垣正勝：非現実画像 CAPTCHA：常識からの逸脱を利用した 3DCG 画像 CAPTCHA，情報処理学会論文誌，Vol.56, No.12, pp.2324–2336 (2015).
[8] Sano, A., Fujita, M. and Nishigaki, M.: Directcha: A Proposal of Spatiometric Mental Rotation CAPTCHA, *Proc. 14th International Conference on Privacy*, Security and Trust, pp.585–592 (2016).
[9] Shepard, R.N. and Cooper, L.A.: *Mental images and their transformations*, The MIT Press (1986)
[10] Shepard, R.N. and Metzler, J.: Mental rotation of three dimensional objects, *Science*, New Series, Vol.171, No.3972, pp.701–703 (1971).
[11] Takano, Y. and Okubo, M.: Encyclopedia of Cognitive Science, *Mental Rotation*, John Wiley & Sons, Tokyo (2006).
[12] Elson, J., Douceur, J., Howela, J., et al.: Asirra: A CAPTCHA that exploit interest-aligned manual image categorization, *Proc. ACM Conference on Computer and Communications Security*, pp.366–374 (2007).
[13] Lancers, available from ⟨https://www.lancers.jp/⟩ (accessed 2018-02-27).
[14] 藤田真浩，池谷勇樹，可児潤也，西垣正勝：Locimetric 型メンタルローテーション CAPTCHA，情報処理学会論文誌，Vol.57, No.9, pp.1954–1964 (2016).
[15] 田中知樹，児玉英一郎，王 家宏，高田豊雄：物体認識能力に着目した三次元物体アニメーション CAPTCHA の提案，情報処理学会第 77 回全国大会，6X-02 (2015).
[16] 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 の評価，情報処理学会報告，Vol.2017-CSEC-76, No.5 (2016).
[17] 立川聖也，小野加奈代，児玉栄一郎，王 家宏，高田豊雄：モーフィング技術を用いた変形 3 次元モデル CAPTCHA の提案，電気関係学会東北支部連合大会，1D-06 (2015).

佐野 絢音

2016 年 3 月静岡大学情報学部情報社会学科卒業．2018 年 3 月同大学院修士課程修了．同年 4 月，KDDI 株式会社入社．在学中，情報セキュリティに関する研究に従事．

藤田 真浩 （正会員）

2013 年 3 月静岡大学情報学部情報科学科卒業．2015 年 3 月同大学院修士課程修了．2018 年 3 月同創造科学技術大学院博士課程修了．現在，三菱電機株式会社情報技術総合研究所勤務．情報セキュリティ，特に認証システムに関する研究開発に従事．博士（情報学）．2016 年度情報処理学会山下記念研究賞受賞．

西垣 正勝 （正会員）

1990 年静岡大学工学部光電機械工学科卒業．1995 年同大学大学院博士課程修了．日本学術振興会特別研究員（PD）を経て，1996 年静岡大学情報学部助手．同講師，助教授の後，2010 年より同創造科学技術大学院教授．博士（工学）．情報セキュリティ全般，特にヒューマニクスセキュリティ，メディアセキュリティ，ネットワークセキュリティ等に関する研究に従事．2013～2014 年情報処理学会コンピュータセキュリティ研究会主査．2015～2016 年電子情報通信学会バイオメトリクス研究専門委員会委員長．2016 年より日本セキュリティマネジメント学会常任理事．本会フェロー．