

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出題形式に関する検討(その2)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2018-02-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐野, 紗音, 藤田, 真浩, 西垣, 正勝 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00024644

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 出題形式に関する検討(その2)

A Study of CAPTCHA Configuration with Machine Attack Defensibility and User Convenience Consideration (part 2)

佐野 紗音*
Ayane Sano

藤田 真浩*
Masahiro Fujita

西垣 正勝*
Masakatsu Nishigaki

あらまし CAPTCHA の機械解読耐性を高めるためには、CAPTCHA を解くというタスクをユーザに繰り返してもらう必要があるが、タスクの単純な繰り返しはユーザのメンタル負荷を増加させてしまう。メンタル負荷を増加させずに、ユーザにタスクを繰り返させる形式が求められる。その実現の方法として有効だと考えられるのが、「迷路」という概念の利用である。ここで、迷路の形態としては複数の類が考えられる。その 1 つが、著者らが以前提案した「Directcha-maze」である。本稿では、第 2 の形態として「Directcha-dungeon」を提案する。本形式の CAPTCHA は複数の階層からなるダンジョン型の出題形式を探る。各階層が迷路になっており、迷路の各分岐点には 3 次元モデルが配置されている。ユーザは、1 階のスタートから各モデルの正面方向を辿っていくことによって 2 階のゴールに到達可能である。「ダンジョンをクリアする」というタスクの中に「モデルの正面を答える」という CAPTCHA タスクを複数埋め込むことにより、ユーザのメンタル負荷軽減を実現している。ユーザビリティに関する比較実験を通じ、maze 型と dungeon 型のメリット・デメリットを明らかにした。

キーワード CAPTCHA, メンタル負荷, 機械解読耐性, ゲーム性

1. はじめに

CAPTCHA (Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Human Apart) 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 が採用されている。しかし、この CAPTCHA は OCR (自動文字読み取り) 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[2]。

これらのマルウェアに対抗するために、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) がかねてから提案してきた。しかし、画像 CAPTCHA は、1 画面中に表示できる画像の数に限界があるため、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、画像 CAPTCHA (人間のより高度な認知能力を利用した 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。総当たり攻撃や機械学習攻撃の耐性（以下、本稿では両攻撃に対する耐性を総称して「機械解読耐性」と呼ぶ）を高めるためには、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形式が求められる。

そこで著者らは、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 出題形式を模索している。文献[5]では、その一実現例として、「迷路」という概念の利用を提案し、maze 型の CAPTCHA 出題形式について検討を行った。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

* 静岡大学, 〒432-8011, 静岡県浜松市中区城北 3-5-1, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8011, Japan.

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。詳しくは 2 章で説明するが、迷路形式の CAPTCHA の中に埋め込まれる CAPTCHA タスクとしては、Sketcha タスク[3]と Directcha タスク[4]が利用可能であり、著者らは文献[5]にて、maze 型の出題形式には Sketcha タスクよりも Directcha タスクが適していることを確認している。

ここで、迷路を実現する形態としては、著者らが文献[5]で提案した maze 型の出題形式以外にも、複数の形態が考えられる。そこで本稿では、迷路型 CAPTCHA の第 2 の形態として dungeon 型の出題形式を提案する。maze 型は、1 層の迷路を利用した形態である。提案形式は、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。

2. 迷路形式による機械解読耐性の強化

2.1. 画像 CAPTCHA の課題

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。しかし、画像 CAPTCHA には、機械解読耐性に関して以下の二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

近年の画像認識技術の発達に伴い、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、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。

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】総当たり攻撃に関する脆弱性

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、総当たり数は m^n へと指數関数的に増加する。

【課題 2】機械学習攻撃に関する脆弱性

1 タスクあたりの人間の正答率を HAR（Human

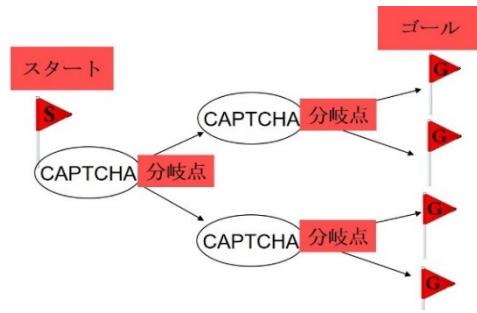


図 1 迷路の概念図

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、 $HAR^n - MAR^n$ へと拡張される。

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。

2.2. 迷路形式によるメンタル負荷の軽減

2.2.1. 迷路形式の利用

前節に示した課題を解決するためには、メンタル負荷を増加させず、CAPTCHA タスクをユーザへ繰り返させる方法が求められる。

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[5]（図 1）。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 タスクをサブタスクと埋め込んだ方式である。CAPTCHA タスクがユーザにアンコンシャスな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 を回答することができる。

2.2.2. 迷路形式に適した CAPTCHA タスク

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。すなわち、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。筆者の知る限り、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、Sketcha タスク（図 2）、Directcha タスク（図 3）の 2 種類が存在する。Sketcha

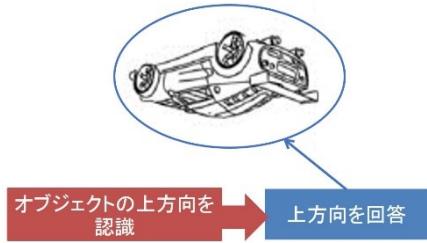


図2 Sketcha タスク

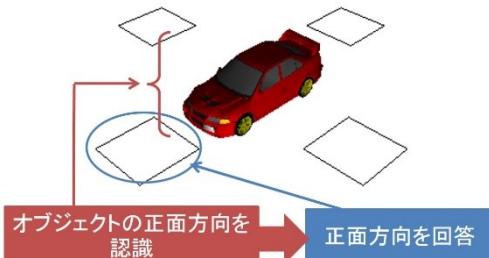


図3 Directcha タスク

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、図4(a)のような迷路となる。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、図4(b)のような迷路となる。

これら2形式に関して比較したとき、Directcha タスクを採用したほうがユーザのメンタル負荷は低いことが確かめられている[5]。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自然な行為となる。また、我々は普段、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ことも、Sketcha タスクのほうがユーザのメンタル負荷を高める理由となっていると考えられる。

3. 迷路形式を実現する形態

迷路形式の形態としては複数の種類が考えられる。本章では、既存の形態である maze 型について説明した後、今回提案する dungeon 型の形態を説明する。

3.1. 既存形態 (maze 型)

迷路形式の一形態が、筆者らが文献[5]にて提案した maze 型である。maze 型の形態では、1層の迷路を利用する。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辿れたユーザを正規ユーザとみなす。以下、Directcha タスクを利用した maze 型を Directcha-maze、Sketcha タスクを利用した maze 型を Sketcha-maze と呼ぶ。紙面の都合上、詳細な説明は、文献[6]を参照されたい。

3.2. 提案形態 (dungeon 型)

迷路の形態には、maze 型のように1層の迷路を使う形

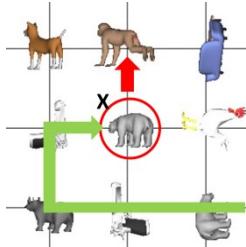


図4(a) Sketcha-maze

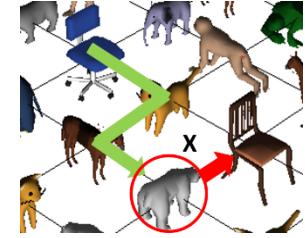


図4(b) Directcha-maze

態だけでなく、多層の迷路を利用する形態も可能である。ただし、各層の迷路が個別の迷路であるとユーザに認識されないような工夫が必要となる。そこで本稿では、2枚の迷路をダンジョンの1階と2階として配置し、両層を階段で接続することで、複数の迷路を1つの迷路として出題する dungeon 型の出題形態を提案する。本稿では、Directcha タスクを利用した dungeon 型を Directcha-dungeon、Sketcha タスクを利用した dungeon 型を 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次元モデルが配置される。各格子点の位置を(i,j)（図5の例では*i*=0~3, *j*=0~3）と記す。各3次元モデルは、4方向（左後、右後、左前、右前）のいずれかを向いている。格子のスタート地点（図5の例では格子点(2,0)）から3つの階段地点（図5の例では格子点(0,0), (0,3), (3,3)）のいずれかへ、モデルの正面方向をたどっていけば到着できるように、モデルの向きが設定されている（図5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5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5の例では格子点(0,2), (1,0), (3,0)）へ、モデルの正面方向をたどっていけば到着できるように、各モデル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モデル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。

3.3. maze 型と dungeon 型の違い

dungeon 型は2層の迷路を利用しており、その総当たり数は「1階の迷路の総当たり数」×「2階の迷路の総当たり数」である。したがって、1枚の画像に配置するモデルの数を maze 型よりも少ない数にすることが可能であり、モデル1体あたりのサイズをより大きいものにすることが可能である。これによって、ユーザにとってモデルの視認性が増すことが期待される。しかし、1階から2階の画像を切り替える際に一瞬の間があるほか、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、認証時間は長くなることが期待される。これらのユーザビリティ

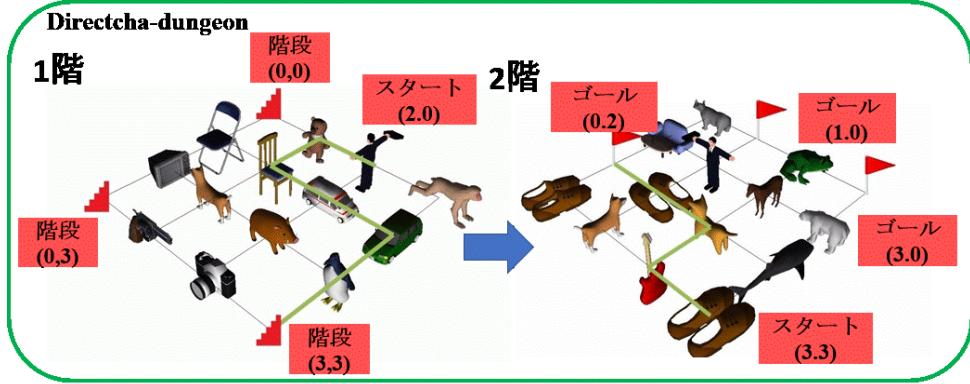


図 5 Directcha-dungeon のコンセプト図

への影響については、次章の実験を通じて調査を行う。

4. ユーザビリティに関する比較実験

4.1. 目的

Directcha タスクを単純に繰り返した場合（以下、単に Directcha と呼ぶ）、Directcha-maze, Directcha-dungeon, Sketcha タスクを単純に繰り返した場合（以下、単に Sketcha と呼ぶ）、Sketcha-maze, Sketcha-dungeon の 6 形式についてユーザビリティの比較実験を行い、それぞれのユーザビリティに関する知見を得る。

4.2. 実装

今回利用する実験システムは、文献[6]で実装したシステムの改良したものである。Directcha, Sketcha, Directcha-maze, Sketcha-maze, Directcha-dungeon, Sketcha-dungeon の 6 つの実験システムが含まれる。各システムは以下のように条件を統一してある。

- 総当たり数：4096 通りで統一をした。
- 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 上から収集した素材である。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ことし、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。
- 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。

4.3. 実験システム

4.3.1. Directcha-dungeon の実験システム

Directcha-dungeon の実験システムの認証画面例を、図 6 に示す。1 層、2 層ともに迷路のサイズは 4×4 に設定した。1 層については、(2,0) をスタート、(0,0), (0,3), (3,3) にそれぞれ階段を設置した。1 層のいずれかの階段に到達した時点で 2 層の迷路が表示される。1 層の迷路のゴール地点の座標が 2 層の迷路のスタート地点の座標となる。2 層に

ついで、

- ・ スタートが(0,0)の場合は、(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、(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、(0,2), (1,0), (3,0) にそれぞれゴールを設置した。

dungeon 型における総当たり数は、「1 階の総当たり数」 \times 「2 階の迷路の総当たり数」である。4096 通りの総当たり数を実現するために、各階の総当たり数は 64 通りとなるよう設定した。問題画像のサイズは、縦 700 \times 横 1200 画素とした。各モデルの y 軸の回転角度は、45 度、135 度、225 度、315 度の中からランダムに一つ選ばれる。x 軸、z 軸に関しては回転をしてしない。

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によって、各モデルの正面方向を辿る。辿った経過は、緑色の直線で表示される（図 6 は 2 階目の 3 体目までを辿った様子）。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' は辿ったことにならず、画面上から X から X' の直線が消える）。階段まで辿った後、階段をクリックすると 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 階のゴールまで辿った後、ゴールの旗をクリックし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 階のゴール地点で旗をクリックするまでを計測した。

4.3.2. Sketcha-dungeon の実験システム

Sketcha-dungeon の実験システムの認証画面例を図 7 に示す。各格子点上のモデルの回転方向が異なる以外は、Directcha-dungeon の実験システムと同じである。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。

4.3.3. その他の形式の実験システム

紙面の関係上、Directcha, Sketcha, Directcha-maze, Sketcha-maze の実験システムについては、文献[6]を参照されたい。ただし、Directcha の回転角度については、文献[6]の実験システムではカメラの位置が x 軸方向に 0 度

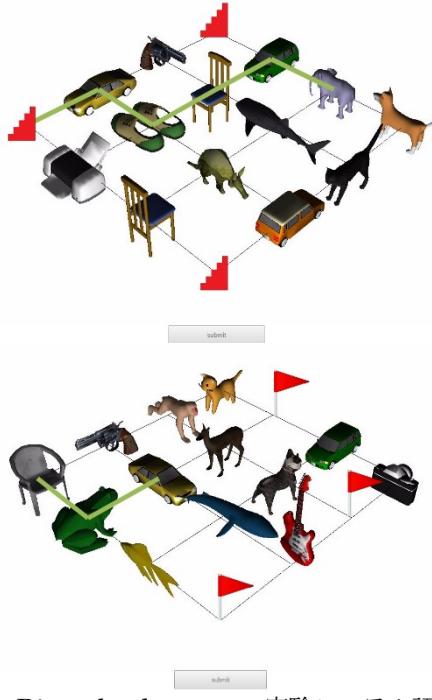


図 6 Directcha-dungeon の実験システム認証画面
(上の画像が 1 階, 下の画像が 2 階)

であったが, 今回はカメラの位置を x 軸方向に 35 度へと修正した(図 8). この値は, Directcha-maze や dungeon で利用しているパラメータと同一のものである. Directcha-maze/dungeon と比較するに際して, 同じパラメータを利用したほうがよいと考えたため変更を行った.

4.4. 諸元

被験者は静岡大学に所属する学生 10 名である. 各被験者に, Directcha, Sketcha, Directcha-maze, Sketcha-maze, Directcha-dungeon, Sketcha-dungeon の 6 形式それぞれの問題を 3 問ずつ解いてもらった. 順序効果に配慮し, 6 形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, 3 セットの実験本番の前に, 自身が十分と思えるまで何度も練習を行うことを許した. ただし, 被験者全員に最低 5 セットは練習で解いてもらった. 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 500 円とした.

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. 紙面の都合上, 各質問は実際聞いた質問を要約したもの掲載している. 各質問は, 各形式に対してそれ各自由回答してもらった.

- 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 面白いと感じたか (5 段階, 面白いなら 5)
- ④ ③で 2 や 1 を選択した場合, その理由は何か
- ⑤ ①, ③, 所要時間などを総合して, 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.

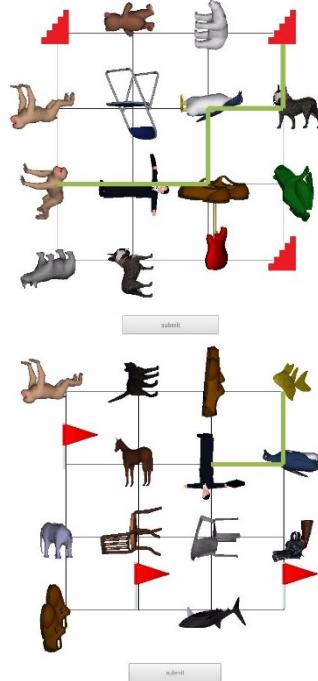


図 7 Sketcha-dungeon の実験システム認証画面 (上の画像が 1 階, 下の画像が 2 階)

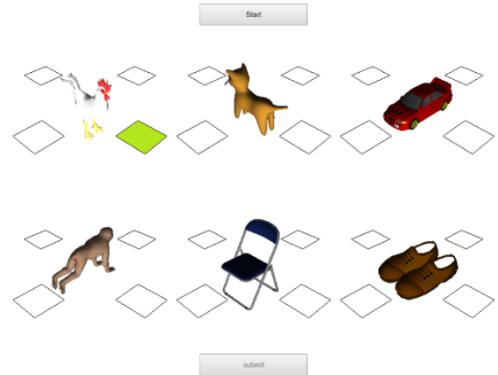


図 8 Directcha の認証画面例

また, その理由は何か.

- ⑥ 自由記述 (任意回答, 感想や思ったこと)

4.5. 実験結果

4.5.1. 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. 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結果, 以下のとおりだった.

- Directcha : 被験者 1 が間違えた問題 1 セットの原因是, モデルの対面方向の誤認識であった.
- Directcha-maze : 被験者 2 が間違えた問題 1 セットの原因是, モデルの対面方向の誤認識であった.
- Sketcha-maze : 被験者 3 が間違えた問題 1 セットの原因是, モデルの上向きの誤認識であった.
- Directcha-dungeon : 被験者 1 が間違えた問題 1 セットの原因是, モデルの対面方向の誤認識であった.

表1 実験結果 (D:Directcha, DM : Directcha-maze, DD : Directcha-dungeon, S : Sketcha, SM: Sketcha-maze, SD: Sketcha-dungeon)

Sbj.	正答率						回答時間[s]					
	D	DM	DD	S	SM	SD	D	DM	DD	S	SM	SD
1	2/3	3/3	2/3	3/3	3/3	3/3	6.9	3.8	3.8	5.4	7.0	4.9
2	3/3	2/3	1/3	3/3	3/3	3/3	4.9	6.6	7.4	8.6	10.9	10.3
3	3/3	3/3	3/3	3/3	2/3	3/3	6.5	6.2	10.0	6.3	11.5	11.5
4	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	4.0	4.3	4.7	4.4	6.9	7.8
5	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	5.6	5.7	8.6	6.7	9.4	11.4
6	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	2/3	6.3	5.2	8.2	6.0	11.0	9.6
7	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	5.9	4.9	6.9	5.3	7.0	8.2
8	3/3	3/3	2/3	3/3	3/3	3/3	7.7	7.2	10.0	7.7	8.3	12.9
9	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	6.4	7.2	6.9	6.9	11.1	9.2
10	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	5.4	4.3	7.9	6.5	6.4	7.2
Avg	29/30	29/30	26/30	30/30	29/30	29/30	6.0	5.5	7.4	6.4	8.9	9.3
	(96.7%)	(96.7%)	(86.7%)	(100%)	(96.7%)	(96.7%)						

被験者 2 が間違えた問題 2 セットの原因是、急いで解いたため、思わず間違えてしまったとのことだった。被験者 8 が間違えた問題 1 セットの原因是、隣のモデルにつられてしまったことが原因であった。

- Sketcha-dungeon：被験者 6 が間違えた問題 1 セットの原因是、モデルの上向きの誤認識であった。

4.5.2. アンケート結果

被験者から得られたアンケート質問①③⑤の結果を表2に示す。質問④⑤⑥に対する論述回答を以下にまとめた。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に対する回答】

質問⑤：何問続けて解いてよいか？の理由

- 出来れば 1 セットで終了したいが、目的のサービスのためなら 2 セットくらい許容できる（被験者 1 (2 回)）
- 1 クリック数が多く、面倒くさい（被験者 2 (1 回), 被験者 9 (2 回), 被験者 10 (2 回)）
- 回答が簡単だと感じたため（被験者 6 (2 回), 被験者 8 (3 回)）

【Sketchaに対する回答】

質問⑤：何問続けて解いてよいか？の理由

- 出来れば 1 セットで終了したいが、目的のサービスのためなら 2 セットくらい許容できる（被験者 1 (2 回)）
- 1 クリック数が多く、面倒くさい（被験者 2 (1 回), 被験者 9 (2 回), 被験者 10 (2 回)）
- 回答が簡単だと感じたため（被験者 6 (2 回)）
- モデルを選ぶことは簡単であるが、Directcha より少し回答が難しいため（被験者 8 (2 回)）

【Directcha-mazeに対する回答】

質問④：③で面白くないと感じた理由は何か？

- 大量にモデルが表示されて、煩雑さを覚えたから（被験者 1 (2 点)）
- モデルが小さくて見にくい（被験者 8 (2 点)）

質問⑤：何問続けて解いてよいか？の理由

- 他のものに比べ、体感時間を短く感じた（被験者 2 (2 回)）

回))

- やつていて苦痛さや難しさを感じることがなかったため（被験者 5 (2 回)）
- 問題は少し複雑だったが、ゲーム性があり、あまり苦に感じなかつた（被験者 9 (3 回)）
- クリック数が減っていて、辿っているだけなので、何回か解く分には苦しくない（被験者 10 (3 回)）
- 大量にモデルが表示されると煩雑さを覚える（被験者 1 (1 回)）
- 1 回で辿るモデルが多いときに面倒と感じたため（被験者 8 (2 回)）

【Sketcha-dungeonに対する回答】

質問④：③で面白くないと感じた理由は何か？

- 大量にモデルが表示されて、煩雑さを覚えたから（被験者 1 (2 点)）
- モデルが小さくて見にくい（被験者 8 (2 点)）

質問⑤：何問続けて解いてよいか？の理由

- 他のものに比べ、体感時間を短く感じた（被験者 2 (2 回)）
- Directcha-maze と比べてやや問題を解くのが難しく感じられたため（被験者 5 (1 回)）
- 上方向を考えるのに少し時間がかかり、Directcha-maze より難しく感じた（被験者 9 (3 回)）
- クリック数が減っていて、辿っているだけなので、何回か解く分には苦しくない（被験者 10 (3 回)）
- 大量にモデルが表示されると煩雑さを覚える（被験者 1 (1 回)）
- 1 回で辿るモデルが多いときに面倒と感じたため（被験者 8 (2 回)）

【Directcha-dungeonに対する回答】

質問⑤：何問続けて解いてよいか？の理由

- この形式なら 3 回くらいなら、1 試行に感じる（被験者 1 (3 回)）
- maze より作業量は増えたが、その分マス目が少なくなり簡単になったので、楽に解くことが出来た（被験者 9 (3 回)）
- イラストが大きくなり、目が疲れそうじゃないため

表2 アンケート結果

Sbj.	①簡単さ						③面白さ						⑤回数					
	D	DM	DD	S	SM	SD	D	DM	DD	S	SM	SD	D	DM	DD	S	SM	SD
1	5	3	5	5	3	5	3	2	4	3	2	4	2	1	3	2	1	3
2	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	1	2	1	1	2	1
3	5	3	2	4	2	2	4	5	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1
4	4	2	5	4	1	3	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	1	1
5	5	4	5	5	3	4	3	3	4	3	3	3	1	2	1	1	1	1
6	4	4	5	4	3	4	3	4	4	3	4	4	2	1	1	2	1	1
7	5	5	3	2	2	2	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1
8	5	5	5	5	5	5	3	2	4	3	2	4	3	2	1	2	2	1
9	5	4	4	4	3	3	2	5	5	2	4	4	2	3	3	2	3	3
10	3	5	5	3	4	5	4	5	5	4	4	4	2	3	4	2	3	4
Avg	4.4	3.9	4.2	3.9	3.0	3.6	3.4	3.9	4.2	3.3	3.5	3.8	1.6	1.7	1.7	1.5	1.6	1.7

(被験者 10 (4回))

- すでに 2 つのステージがあるので、これより増えると面倒くさい (被験者 2 (1回))
- 簡単ではあるが、ゴールまで行くのに時間が掛かるため (被験者 5 (1回))
- 画面遷移がある分、問題数を多く感じてしまう (被験者 8 (1回))

【Sketcha-dungeon に対する回答】

質問⑤：何問続けて解いてよいか？の理由

- この形式なら 3 回くらいなら、1 試行に感じる (被験者 1 (3回))
- 上方向を考えるのに少し時間がかかり、Directcha-maze より難しく感じた。maze より作業量は増えたが、その分マス目が少なくなり簡単になったので、楽に解くことが出来た (被験者 9 (3回))
- イラストが大きくなり、目が疲れそうじゃないため (被験者 10 (4回))
- すでに 2 つのステージがあるので、これより増えると面倒くさい (被験者 2 (1回))
- ゴールまで行くのに時間が掛かるため (被験者 5 (1回))
- 画面遷移がある分、問題数を多く感じてしまう (被験者 8 (1回))

【質問⑥：自由記述】

- クリック数が少ないほうが楽 (被験者 1)
- 物体が小さいと方向が分かりにくい (被験者 3)
- 対面方向と上方向では、対面方向の方が直感的に解くことができた。maze と dungeon はゲームっぽく解くことを楽しむことができた (被験者 9)
- ダンジョン形式において、対面方向のものはダンジョンの中を進んでる感じがでているので、問題の雰囲気もダンジョンっぽくしたら、面白さが増して、もっと解けると思う (被験者 10)

5. 考察

アンケートの質問⑤は、質問①、③、回答時間等の「すべての条件を考慮」したうえで 1 回の認証あたりで解いても良い許容回数を尋ねている。本考察では、質問⑤が「すべての条件を考慮」した回答であることに鑑みて、この回

数の値によって各形態のメンタル負荷の程度を考察する。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。

5.1. 迷路形式によるメンタル負荷の軽減

質問⑤では、Directcha 迷路形式 (Directcha-maze あるいは Directcha-dungeon) より Directcha の単純な繰り返しのほうに多い回数を記入した被験者は、2 名である。反対に、Directcha 迷路形式に、より多くの回数を記入した被験者は 5 名である。Sketcha 迷路形式より Sketcha の単純な繰り返しのほうに多い回数を記入した被験者は、1 名である。反対に、Sketcha 迷路形式に、より多くの回数を記入した被験者は 4 名である。これら結果より、迷路形式はユーザのメンタル負荷軽減に寄与すると考えられる。

5.2. maze 型と dungeon 型の比較

質問⑤においては、maze 型のほうにより多くの回数を記入した被験者と、dungeon 型のほうにより多くの回数を記入した被験者がおおよそ半々であった。そこで、各被験者のコメントの主要な意見や回答時間の結果から、それぞれの形態特有だと思われる部分を抽出し、定性的に考察を行う。

【maze 型】

- オブジェクトが小さく、見にくいという被験者が多数
- モデルがたくさんあると煩雑に見えるという被験者が数名
- Directcha-maze は回答時間が Directcha の繰り返しと同程度
- Sketcha-maze は回答時間が Sketcha の繰り返しより長い。その理由を「小さいモデルの上向きの認識」に少し時間がかかったという被験者が数名。

【dungeon 型】

- maze 型からさらにゲーム性が増すという被験者が存在。
- モデルが大きく見やすかったという被験者が多数。
- Directcha-dungeon, Sketcha-dungeon ともに Directcha, Sketcha の繰り返しより回答時間が長い。

- ただし、この点に言及している被験者はいなかった。
- ④ 画像が切り替わるのが気になる。2問のように感じてしまう被験者が数名。
 - ⑤ (階段とゴールで) 2回クリックすることが面倒という被験者が存在。

以上の結果を分析した結果を以下に示す。

- ・ maze型とdungeon型には、「回答時間(maze型が優位)」と「モデルの見易さ(dungeon型が優位)」の間にトレードオフの関係が基本的に存在する。
- ・ ただし、Sketcha-mazeに関しては「小さなサイズのモデルの上を認識する」というタスクに時間がかかるため、Sketcha-dungeonと同程度になってしまう。
- ・ dungeon型にすることによって、ゲーム性が増すという被験者がいた一方、dungeon型にしたからこそ、「2つの問題に感じてしまった」、「画像の切り替えが気になった」という被験者も存在した。後者の被験者からの指摘に関しては、2層目の迷路を表示する際に1層目の迷路から2層目の迷路への画像の切り替え方を工夫したり、階段の昇降が認識されやすい画像を使用する等の改良をすることで、解決できる可能性がある。
- ・ dungeon型の1階から2階へ移動するときのクリックを省略するとdungeon型のメンタル負荷をさらに軽減できる可能性がある。

5.3. Directcha-maze/dungeon と Sketcha-maze/dungeon の比較

質問⑤において、Directcha-mazeとSketcha-maze、あるいは、Directcha-dungeonとSketcha-dungeonの間で被験者の回答に大きな差はみられなかった。しかし、前章に示したとおり、Sketcha-mazeで「上向きの認識に時間がかかる」と回答しているユーザがいたほか、質問①や質問③ではDirectcha-maze/dungeonのほうに高い評価をつけている被験者が多く存在する。これらの事実より、Directchaタスクを迷路形式のサブタスクとして利用するほうが、Sketchaタスクを利用するよりもメンタル負荷が小さいといえるであろう。今後の実験では、この違いを明確に確認できる質問をアンケートに加えるなどして、さらなる検証を行いたい。

5.4. Directcha-dungeonの正答率について

今回の実験では、Directcha-dungeonの正答率は86.7%であり、他の方式より若干低い。しかし、ここで被験者が間違えた理由の一部は「急いで解いたので思わず間違ってしまった」とのことであった。この理由については、どの方式にも偶発的に起こり得るものであり、Directcha-dungeon特有の理由でない可能性が高い。今回はDirectcha-dungeonのみで数回偶発的に発生しまったと考えられるが、比較的小規模な実験であるため、Directcha-dungeonの正解率にのみ大きく影響してしま

ったのだと考えられる。今後、この理由が妥当あるか検証するためにもより大規模な実験を実施したい。

6. まとめ

本稿では、CAPTCHAを迷路形式で出題する際の第2の形態として、dungeon型の形態を提案した。maze型と比較実験した結果、各形式のメリット、デメリットを明らかにした。今後は、今回の実験結果を参考に各形式の改良を測るほか、大規模実験や攻撃耐性に関わるさらなる分析についても行っていきたい。

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。静岡大学 大木哲史講師に機械解読に関わるご助言を頂きました。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.net.ne.jp/yamag/meta2.html>)、のぼり坂一丁目 (<http://www.geocities.jp/oirahakobito2/sozai/sozai.html>)など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, <<http://www.captcha.net/>>, 2017.12.01閲覧。
- [2] J. Yan, A.S. E. Ahmad, “Breaking Visual CAPTCHAs with Naïve Pattern Recognition Algorithms”, Proc. ACSAC2007, pp.279-291, 2007.
- [3] S. Ross, J. Halderman, A. Finkelstein, “Sketcha: A Captcha Based on Line Drawings of 3D Models”, Proc. WWW2010, pp.821-830, 2010.
- [4] A. Sano, M. Fujita, M. Nishigaki, “Directcha: A Proposal of Spatiometric Mental Rotation CAPTCHA”, Proc. PST2016, pp.585-592, 2016.
- [5] A. Sano, M. Fujita, M. Nishigaki, “Directcha-maze: A Study of CAPTCHA Configuration with Machine Learning and Brute-Force Attack Defensibility along with User Convenience Consideration”, Proc. BWCCA2017, pp.489-501, 2017.
- [6] 佐野絢音, 藤田真浩, 西垣正勝: 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出題形式に関する検討, コンピュータセキュリティシンポジウム(CSS2017), pp.720-727, 2017.