

両眼視線計測を用いた ランダムドットステレオグラムの立体視支援

工藤 慎也^{†1} 岡崎 龍太^{†1†2} 蜂須 拓^{†1†2}
佐藤 未知^{†1} 梶本 裕之^{†1†3}

概要: 両眼視線計測の新たな応用先としてランダムドットステレオグラム (Random Dot Stereogram, RDS) における立体視支援を提案する。RDS とは、一見ノイズのようだが一定の視差をもって見ると立体が浮かび上がる画像である⁶⁾。RDS を見るためには随意的に輻輳開散運動を調整する必要があるが、この調整能力には大きな個人差が存在し立体視が不可能な人も数多く存在する。我々は両眼の眼球運動を計測することで誰でも RDS を見ることが出来るシステムを提案する。構築したシステムではランダムな奥行きを持つ RDS を提示した場合と比較して有意に立体視が成立するまでの所要時間が減少することを確認した。また本システムのアプリケーションとして、パスワード入力時の覗き見防止手法を提案し評価した。

Personal Stereoscopic Support in Dynamic Random Dot Stereogram by Measuring Binocular Parallax

SHINYA KUDO^{†1} RYUTA OKAZAKI^{†1†2} TAKU HACHISU^{†1†2}
MICHI SATO^{†1} HIROYUKI KAJIMOTO^{†1†3}

Abstract: Random dot stereogram (RDS) is a method for producing an apparently noisy image that actually contains a stereoscopic scene, which becomes visible under a certain parallax of the eyes⁶⁾. Although adjustment of the convergence of eye movement is required for RDS, many people have difficulty in making this adjustment. We propose a system by which most can stably observe stereoscopic images from RDSs. This involves measuring the movements of both eyes using a gaze tracking device, and then adjusting the RDS parallax to this convergence. We confirmed that the time users find stereoscopic scene in dynamic RDSs (d-RDS) were significantly decreased compared with presenting d-RDSs with fixed parallax. We demonstrate this system as a means of secure information display when users input password. Although the results of current setup was not fully positive, suggest that our system has some ability of peeping prevention.

1. はじめに

マウスやキーボードに加えた新たな PC 用入力手法として視線入力¹⁾²⁾³⁾が提案されている。ディスプレイ上の視線位置をカーソルとして用いることで手を使わない操作が可能であり、主に手が使えない体の不自由な人のコミュニケーションツールとして使用されている。

ユーザの視線を検出する装置は、単眼のみ検出可能なものと両眼共検出可能なものの2つに大別できる。一般的な入力操作では単眼のものが用いられているが、3D 空間における奥行き方向の視線移動を利用するために両眼での入力を用いる手法が提案されている。工藤らは両眼計測により両眼座標差を計測することで、ディスプレイ上から奥行き方向への注視点移動を奥に押し込むような入力動作とみなす手法を提案している⁴⁾。また佐藤らはこの視差変化を MRI 画像などの 3D 断面図選択手法として用いている⁵⁾。

このように両眼視差検出は主に 3D 空間のインタラクション手法として提案されてきたが、我々は両眼視差検出をランダムドットステレオグラム (Random Dot Stereogram, RDS) における立体視支援という新たな応用のために利用することを考えた。RDS とは、一見ランダムなドットの集合に見えるが一定のパターンを持ち、視差をもって見ると立体が浮かび上がる画像である⁶⁾。認知的な面白さを与えるエンタテイメントとして数多くの書籍やアプリケーションが存在する。しかし RDS での立体視を行うには随意的に輻輳開散運動を行う必要があるが、この調整能力には大きな個人差が存在し RDS による立体視が不可能な人も数多く存在する。

我々は両眼の眼球運動を計測し、リアルタイムに適切な視差を持たせた RDS を生成することで誰でも RDS での立体視が可能システムを提案する (図 1)。前報では輻輳性眼球運動が生じている際に適切な視差を持たせた RDS を提示した結果、RDS 立体視が確実に生じることを確認した⁷⁾。本研究において我々は、1) 両眼視線入力の新たな利用手段を示し、2) 従来エンタテイメントとしてのみ使用されてきた RDS を情報隠蔽手段に用いるという新たな応

^{†1} 電気通信大学 大学院情報理工学研究所
The University of Electro-Communications

^{†2} 日本学術振興会 特別研究員
JSPS Research Fellow

^{†3} 科学技術振興機構 さきがけ
Japan Science and Technology Agency

用を提案した。

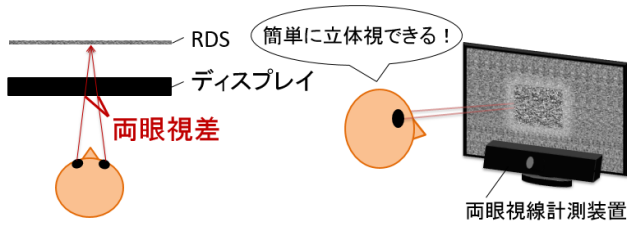


図 1 立体視支援のコンセプト図

Figure 1 Concept of stereoscopic support in RDS.

2. RDS 立体視支援手法

まず両眼視線計測装置を用いてディスプレイ上の両眼の視線位置を検出し、座標差を計測する。座標差を x 、ユーザの瞳孔間距離を p 、ユーザ・ディスプレイ間距離を d 、注視深度を $Depth$ とすると、注視深度は以下のように計算できる (図 2) ⁸⁾⁹⁾。

$$Depth = x * d / (p - x)$$

推定された注視深度をもとに、リアルタイムに適切な視差を持たせた RDS を生成し描画する。これによりユーザは瞬時に RDS での立体視が可能となる。本手法では毎フレームごとに再描画されるダイナミック RDS (d-RDS) を提示した (図 3)。RDS の描画や RDS に適切な視差を持たせる方法は、Thimbleby らの手法を用いた ⁶⁾。描画には OpenGL を用いた。

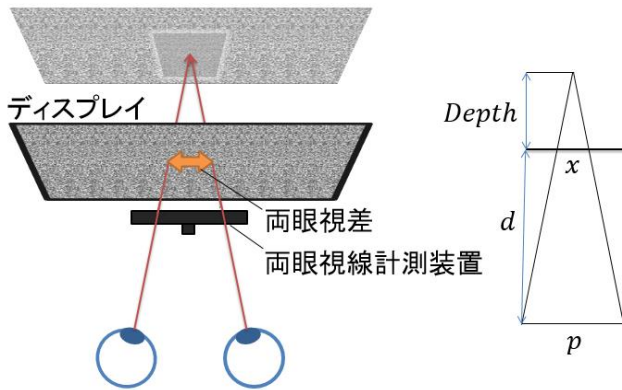


図 2 RDS 提示手法

Figure 2 Display of RDS with appropriate eye parallax.

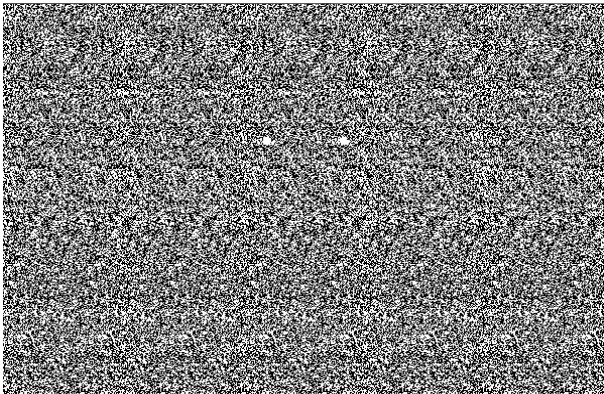


図 3 提示される RDS

Figure 3 Presented RDS.

3. システム評価

まず奥行き推定精度を確認した後、システムの有効性を評価した。ランダムな視差を持つ RDS を提示した場合とシステムをユーザに適用した場合における、立体視所要時間を比較した。提案手法を適用した際にランダムな RDS の条件に比べて有意に立体視所要時間が減少すると仮説を立て、検証した。

3.1 実験環境

実験環境を図 4 に示す。眼球-ディスプレイ間を 700mm とし眼球位置がずれないように顎台で頭部を固定した。また瞳孔・角膜反射法による据え置き型の眼球運動計測装置 (EYEON, EyeTech Digital Systems 社製) を使用した。分解能は片眼 0.5 度である。また予備実験においてほとんどの被験者は画面奥行き方向に随意的に視線を移動させることが困難であったため、画面手前に目印を提示し目印の鏡像を見るよう指示した。鏡像はディスプレイ奥 211mm、700mm に設置した。被験者の瞳孔間距離は 58.5~67.0mm であったため、ディスプレイ上での視差はそれぞれ 44~50pixel、94~108pixel である。用いたディスプレイの解像度は 1920×1080pixel、視野角は 35.7 度×23.3 度である。

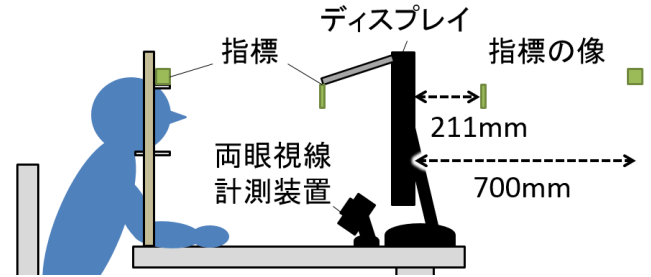


図 4 実験環境

Figure 4 Experimental setup.

3.2 実験条件

提案手法を適用した d-RDS では、ユーザの視差量と同じ視差を持たせた d-RDS を提示した。10 回の試行において 2 点の指標の鏡像を交互に注視させ、それぞれの視差を計測しリアルタイムに適切な d-RDS を提示した。またランダムな視差を持つ d-RDS では、被験者の瞳孔間距離に応じて下限、上限は異なるが、30pixel~100pixel の試行ごとに固定された視差を持つ d-RDS をランダムに提示した。また d-RDS 提示時に視差量の指標として 2 つの点を提示した (図 3)。これは RDS を見るために一般的に用いられる指標であり、2 点が 3 点に感じられるように視差を調整すると立体視が成立する。また条件を公正に保つため、ランダムな d-RDS においてもディスプレイに映り込む 2 つの指標やその他の奥行きを見ることを許可した。

立体視ができているか確認するために、円形、四角形、三角形のいずれかの立体視が可能で 3 種類の d-RDS を提示した。形の大きさは 200pixel、位置はディスプレイ中央、眼球位置と同じ高さに提示した。d-RDS 提示後、図形を認

識したと同時にエンターキーを押下させ、その後円形、四角形、三角形に対応したテンキーの1, 2, 3キーを押下させた。d-RDS 提示時からエンター押下時までの立体視所要時間と回答した図形を記録した。

使用した両眼視線計測装置の精度上片眼 0.5 度の誤差が生じ、ディスプレイ平面上では 20pixel の誤差となる。この誤差を許容するためには、被験者は 20pixel 以上の視差の誤差を持つ RDS を読み取る能力、言い換えれば立体視に関するロバスト性が要求される。15 名の被験者において固定された指標を注視させた際に、その指標の奥行きから換算される視差とどの程度異なる視差の RDS を提示しても立体視が成立するかを測定し、ディスプレイ面上で 20pixel 以上の視差調整能力を有する 9 名 (22~24 歳, 男性 6 名, 女性 3 名) の被験者を採用した。内 7 名はメガネを装着していた。

3.3 実験結果

実験結果を図 5 に示す。ランダム条件と提案手法条件それぞれにおける、被験者ごとと全被験者の平均立体視所要時間を示している。エラーはほぼ見られず、被験者は確実に立体を認識していた。全被験者平均はランダム条件では 2.6 秒であったのに対し提案手法条件では 1.3 秒と半減し、有意に立体視所要時間が減少していることが確認された (t-test: p-value=0.000573 < 0.05)。

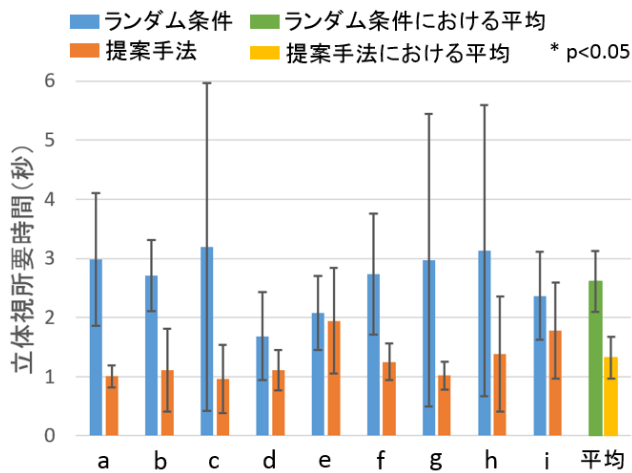


図 5 ランダムな d-RDS とシステムを適用した際の d-RDS 提示における、立体視所要時間の比較

Figure 5 The average time each 9 participants needed to find stereoscopic image and all participants needed to find it in each two conditions.

4. 応用

提案手法を用いることで、提案手法を用いない他人と比べてより素早く RDS の立体視が可能となることが確認された。そこでユーザが RDS で情報を得たのち他人が立体視する前に RDS を非表示にすることで、ユーザに情報を提示する一方他人には隠蔽できると考えられる。この状況を生かした図形パスワード入力システムを開発した。この章で

はパスワード入力時における覗き見防止効果を検証し、評価結果を述べる。

4.1 Shoulder Surfing 防止における関連研究

Shoulder Surfing とは ATM などにおいてパスワードを入力するときに、悪意のある観察者 (攻撃者) がユーザのパスワードを肩越しに盗み取ろうとするものである。これに対し複数の防止手法が提案されている。1 つは入力対象に直接触れずに決定することで、何を入力したか判別させない手法である。Roth らはテンキーのそれぞれの数字に白色または黒色を追加し、入力したい数字の色を複数回回答させることでパスワードを入力させている¹⁰⁾。しかし間接的な入力方法のため比較的入力に時間がかかる。視線入力を活用した Shoulder Surfing 防止手法も提案されている¹¹⁾¹²⁾。視線入力は直接触れることなくかつ見ている位置を直接入力動作とみなすことができるため、攻撃者に対し情報を隠蔽しつつより速い入力を可能としている。しかしカーソルなどの視覚的なフィードバックを隠す必要があるため確信を持った入力が困難となる。また Alexander らは Eye ジェスチャーを提案している¹³⁾。登録された動きを目で行うことで入力する手法である。しかしこの手法も一定の入力時間を必要とする。

4.2 パスワード入力システムにおける覗き見防止評価

提案手法を用いたパスワード入力システムにおける Shoulder Surfing 防止効果を評価した。実験は 2 人 1 組で行い、ユーザがパスワードを入力する間にもう一人 (攻撃者) が横から覗き見ることでパスワードを解読可能か検証した。RDS はビデオ録画には脆弱ではあるが、ユーザが入力している最中に覗き込む一般的な Shoulder Surfing に対しては有効であると考えられ、我々は後者の状況を想定した。

4.2.1 実験環境, 実験条件

3 章でのシステム評価における実験環境に対し 400mm 奥に指標を 1 つ加えた。3 つの指標はそれぞれ、ディスプレイ奥 211mm, 400mm, 700mm に設置した。前章同様 20pixel 以上の視差誤差に対しても立体視の成立する被験者 8 名 (22~24 歳, 男性 5 名, 女性 3 名, メガネ 6 名) を選び、2 人ずつ計 4 組を設定し、それぞれの組においてユーザ役と攻撃者役に分けて実験を行った。

円形、三角形、四角形の 3 種類の図形の組み合わせを 3 桁のパスワードとして設定した。3 桁それぞれにおいて円形、三角形、四角形の 3 種類があるため、組み合わせは全部で 27 通り存在する。また円形、三角形、四角形の 3 種類の図形が同時に立体視可能な d-RDS を提示した (図 6)。3 つの図形は 120pixel の大きさであり、真ん中がウインドウ中央 (600×400)、左右の図形は中央の図形から等距離に提示した。高さは提示した目印の鏡像になるべく近くなるように設置した。3 つの図形の順番は、d-RDS が表示されるごとにランダムに変更させた。またユーザが見ている図形の上に、d-RDS で描画した小さな円をカーソルとして提示

した。ユーザはカーソルをもとに図形を選択する。カーソルは図形の中央、上のレイヤーに表示し、図形よりも浮き上がって見えるよう設定した(図 6 では三角形の上に表示されている)。

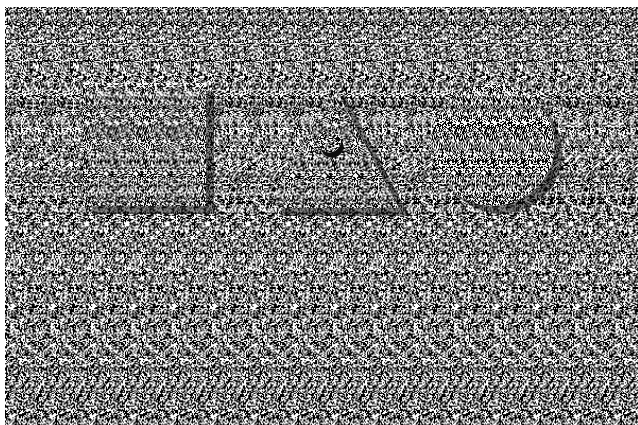


図 6 ユーザ(と攻撃者)の図形の見え方

Figure 6 The appearance when user (and attacker) find stereoscopic in d-RDSs in experiment.

4.2.2 実験手順

実験はパスワードを入力するユーザと覗き見ることによってパスワード解読を試みる攻撃者の2人1組で行った。ユーザに対しキャリブレーションを行い、常に視線を計測する状態とした。まずユーザにランダムに選ばれた3桁のパスワードを覚えさせた。次にウィンドウの奥に映り込む3つの奥行き指標のうち任意の1つを注視させた。2~3秒程度注視させた後、エンターを押下させユーザの視差に対応したd-RDSを表示させた。3種類の立体図形のうち1桁目の図形を見てカーソルを移動させ、もう一度エンターキーを押下することで入力させd-RDSを非表示にした。次にユーザに前回とは別の指標を注視させ、同様に2桁目、3桁目を入力させた。以上を1試行とし10試行入力させた。入力する際ユーザに対し3つの奥行き指標を均等に選ぶよう指示した。

一方で攻撃者はユーザの横(ディスプレイから45度)に座らせて覗き見させ、ユーザが入力するパスワードの解読を試みさせた(図7)。d-RDSが表示された際に立体視を試み、カーソルを手がかりにしてユーザがどの図形を入力するのかを覗き見させた。実験時攻撃者にはA4用紙1枚が与えられ、10試行それぞれのパスワードを記録させた。解読不可能であった場合は適当な図形を記録させた。攻撃者にもディスプレイに映り込む指標やその他の奥行きを見ることを許可した。10試行後ユーザ役と攻撃者役を交代して10試行入力させた。

4組それぞれ20試行、計80試行において1桁入力時間(1桁ごとのd-RDSの表示時間)と3桁入力し終わるまでの時間を記録した。また入力されたパスワードを記録し合計エラー率を計測した。



図 7 攻撃者の視点

Figure 7 Attacker's view of the experiment.

4.2.3 結果と考察

全ユーザの平均1桁入力時間と全3桁入力時間を図8に示す。平均1桁入力時間(全240回)は2.03秒であった。また平均3桁入力時間(全80試行)は12.2秒であった。合計エラー率は7.1%(17/240)であった。

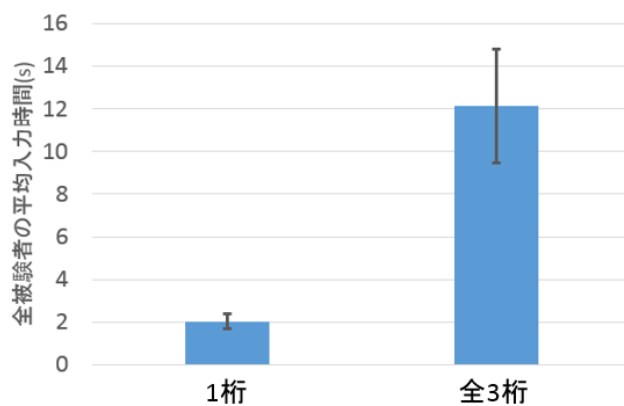


図 8 全被験者における1桁と全3桁の平均入力時間

Figure 8 Average input time of users in each digit and all 3 digits.

ユーザの1桁入力時における挙動は、最初の約1秒間で立体視し次の約1秒間で図形を選択し入力したようである(実験者の観察および聞き取り調査による)。また3桁入力時では指標を選択するタスクが含まれているため12秒かかったと考えられる。これは先行研究における視線を用いた覗き見防止手法に対し比較的速い入力時間である。また合計エラー率は高い傾向が見られたが、17回のエラー中10回は1人の被験者で発生しており、その被験者を除いた合計エラー率は3.3%(7/210)となる。誤入力が多かった被験者は、カーソルが入力したい図形に移動する前にエンターを押下してしまっていたと考えられる。

次に全80試行における攻撃者が正解した桁数の比率を表1に示す。

表 1 覗き見られた桁数の比率

Table 1 Rates of number of digits attackers decode.

桁数	3	2	1	0
正解率	20%	40%	22.5%	17.5%

全桁正解率は 20% (16/80), 2 桁正解率は 40% (32/80), 1 桁正解率 22.5% (18/80), 0 桁正解率 17.5% (14/80) であった。実験において解読出来なかった場合は適当な図形を回答させたため, 結果には偶然に正解した率 (チャンスレート) も含まれている。適当に回答して正解する確率は, 全桁では 3.7% (80 回中 2~3 回), 2 桁では 22.2% (80 回中 17~18 回), 1 桁では 44.4% (80 回中 35~36 回), 0 桁では 29.6% (80 回中 23~24 回) である。結果ではチャンスレートと比較して全桁と 2 桁正解率が高い傾向が見られた。

以上の結果から本システムは覗き見防止手法としては現時点で十分な頑強性はないと言える。覗かれてしまった原因の 1 つとして提示した指標が考えられる。実験において攻撃者はユーザが 3 つの指標のうち 1 つを見ていることを知っていたため, 指標を見ることで 3 回に 1 回は容易に覗き見ることができてしまったと考えられる。今後より多くの指標を設置することで攻撃者に対しユーザのしている奥行きを推測しにくくできると考えられる。図形の種類を増やすことで偶然の一致の確率を下げることにも必要である。さらに本手法を先行研究で提案されている他の防止手法と組み合わせることで, より頑強性を向上させることも可能であると考えられる。

5. おわりに

我々は従来情報入力としてのみ使用されてきた両眼視線計測において, RDS における立体視支援という新たな利用手段を提案した。本稿ではユーザが提案手法を適用した場合, ランダムな視差を持つ d-RDS を提示した場合と比較して有意に立体視所要時間が減少し, システムの有効性が示された。また従来エンタテインメントとしてのみ使用されてきた RDS を, パスワードを入力する際の覗き見防止手段として活用することを提案した。その結果現時点でのシステムでは覗き見に対する十分な頑強性は得られなかったが, ある程度の覗き見防止効果があることが示唆された。

参考文献

- 1) Jacob, R.J.K. What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques. In Proc. CHI 1990, ACM Press (1990).
- 2) Hansen, J.P., Anderson, A.W., and Roed, P. Eye-gaze control of multimedia systems. In Symbiosis of human and artifact, Vol. 20A. Anzai, Y., Ogawa, K., and Mori, H. (Eds.), Elsevier Science, pp.37-42 (1995).
- 3) Sibert, L.E. and Jacob, R.J.K. Evaluation of eye gaze interaction. In Proc. CHI 2000, ACM Press, pp.281-288 (2000).
- 4) Kudo, S., Okabe, H., Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., & Kajimoto, H. Input method using divergence eye movement. Ext. Abstracts CHI 2013, ACM Press, pp.1335-1340 (2013).
- 5) Sato, M. and Kajimoto, H. Dynamic stereograms based on eye convergence for displaying multilayered images. In SIGGRAPH ASIA, ACM Press (2012).
- 6) Thimbleby, H.W., Inglis, S., and Witten, I.H. Displaying 3D images: Algorithms for single-image random-dot stereograms.

Computer 27.10, IEEE, pp.38-48 (1994).

- 7) 工藤, 岡崎, 蜂須, 佐藤, 梶本: ランダムドットステレオグラムにおける注視点提示による立体視支援手法, 第 18 回日本バーチャリアリティ学会大会論文集, 2013.
- 8) Pfeiffer, T., Latoschik, Marc, E., and Wachsmuth, I. Evaluation of binocular eye trackers and algorithms for 3D gaze interaction in virtual reality environments. Journal of Virtual Reality and Broadcasting, 5, 16 (2008).
- 9) Essig, K., Pomplun, M., & Ritter, H. Application of a novel neural approach to 3d gaze tracking: Vergence eye-movements in autostereograms. In Proceedings of the Twenty-Sixth Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Cognitive Science Society, pp.357-362 (2004).
- 10) Roth, V., Richter, K., & Freidinger, R. A PIN-entry method resilient against shoulder surfing. In Proceedings of the 11th ACM conference on Computer and communications security, ACM Press, pp.236-245 (2004).
- 11) Kumar, M., Garfinkel, T., Boneh, D., & Winograd, T. Reducing shoulder-surfing by using gaze-based password entry. In Proceedings of the 3rd symposium on Usable privacy and security, ACM Press, pp.13-19 (2007).
- 12) Forget, A., Chiasson, S., & Biddle, R. Shoulder-surfing resistance with eye-gaze entry in cued-recall graphical passwords. In Proc. CHI 2010, ACM Press, pp.1107-1110 (2010).
- 13) De Luca, A., Denzel, M., & Hussmann, H. Look into my eyes!: can you guess my password?. In Proceedings of the 5th Symposium on Usable Privacy and Security, ACM Press, pp.7 (2009).