原著論文

Eペーパーと紙の可読性に対するコントラスト比と加齢の影響 ーフロントライトの有無に注目して一

松波 紫草 ¹⁾, 岩田 光平 ¹⁾, 小飯塚 達也 ¹⁾, 石井 佑樹 ¹⁾, 小嶌 健仁 ^{1,2)}, 宮尾 克 ¹⁾
¹⁾名古屋大学情報科学研究科, ²⁾中部学院大学

The Effects of Display Contrast Ratio and Aging on Readability of E-paper - Focusing on Built-in light

Shigusa Matsunami¹⁾, Kohei Iwata¹⁾, Tatsuya Koizuka¹⁾, Yuki Ishii¹⁾, Takehito Kojima^{1, 2)}, Masaru Miyao¹⁾

¹⁾ Graduate School of Information Science, Nagoya University
²⁾ Chubu-Gakuin University

Abstract: We carried out experiments with a reading test to evaluate the readability of E-paper with built-in light, reflective e-paper and ordinary paper text under various conditions of contrast ratios with different age groups. We set the contrast ratio in three levels (Low, Medium and High) for backgrounds. The subjects were divided into three groups by age: Young, Middle aged, and Elderly people. This study found that contrast ratio of the text of each device affected the readability of all ages, and had an impact on elderly people more than the other age groups, and the readability of E-paper was affected by age more than the readability of the paper text. Furthermore, this study suggested that the light source of built-in light E-paper caused a decrease in the readability at the low contrast ratio condition.

Keywords: E-paper, Readability, Display Contrast ratio, Aging and Frontlight

キーワード: E ペーパー、可読性、コントラスト比、加齢、フロントライト

1. はじめに

近年、ディスプレイ技術の普及・発達により、電子書籍リーダーなどのモバイル機器で質の高いコンテンツの容易な利用が可能となってきており、今後、幅広い世代へのデバイスの普及が期待される。しかしながら、同じコンテンツを読む場合にも、各デバイスにより表示特性は異なり、可読性に影響を与えると考えられる。本研究では文字と背景のコントラスト比の違いや加齢が、Eペーパーと紙の可読性に及ぼす影響について、特にフロントライト搭載の有無に注目して被験者実験を行ない、評価・考察を行った。

2. 方法

2.1 被験者

本実験の被験者は15歳から78歳の男女107名(平均年齢46.9歳、標準偏差15.5歳)、通常、読書に眼鏡、コンタクトレンズを使用している場合はその状態で実験を実施した。被験者は年齢によって3群に分類し、44歳以下の被験者を若年、45歳から64歳を中年、65歳以上を高年とした。年齢の構成比

2015 年 1 月 15 日受理. (2015 年 3 月 12-13 日シンポジウム「モバイル'15」にて発表)

は表 1 に示す。また、被験者に対しては、事前にインフォーム ドコンセントを実施し、名古屋大学大学院情報科学研究科倫 理審査委員会の承認の下行なわれた。

表1 被験者の年齢構成

	若年者	中年者	高年者	合計
人数	49 名	41 名	17名	107名

2.2 実験デザイン

実験では、反射型電子ディスプレイ(EPD: Electrophoretic Display) にフロントライトを搭載した E ペーパーとして Amazon 社製 Kindle PaperwhiteTM[1] (第2世代、2013年発売)、従来型の反射型 EPD の E ペーパーとして SONY 社製 SONY ReaderTM[2] (PRS-T3、2013年発売)、及び紙(白色度 69%の PPC 用紙にテキストを印刷したもの)の3種類のデバイスを使用した。以下、それぞれ PW、SR、紙と表記する。文章は英数字のランダムテキストを用い、テキスト表示には PDF 形式のファイル(全デバイス共通、表示例は図1)を用いた。また、フォントは Courier、サイズは8pt (文字高:約2.6mm)、1ページ当たり30字×14行を画面の中央になるよう表示した。この表示形式は、ISOの電子ディスプレイ装置の評価方法に準拠した[3]。

ZrvecPal SyRpeq WZphIdY Fc ax0 1qraUZ20M br zgjnjZ9 N7 p6u rj OvWtd eZmMEG1z0 V31 UM aJ9kYtJ dt hDv5M tzl bJrdwCD wRJ1E2Ez3 hB3rdULJ IO akq i8VJ5 rolF U8q 2B 4mN 10F7vnUdsmC8wpQRFAqd TJ 3KkxD z4 nGc KV F34GK 7OL CJGU RSg cjhe MaGd jl Azlpv moN N90 8Bv Ska eHax MM7H 60DGZ z0CisE mkc LQc yILJMzpobhRTO3i 4bRuoc pFb s8gTa VQy nZXw5 AFvB ijT1W mXY yXG b7V Lj7ixK V8oz 4CRZQn Nob Jt1Qd Or M6AJdxW 2Wkx6v LV cE1WVwXPaEMHd jx7pP T0RRpnB mp

<高コントラスト>

22 QHrz0W1z3J nWcWpF Vdq qB8WY Iq pJ 17N 5XV4ZT6N0 lUiMjB gjy Dxc Wme MwA IAU1 YDvyZv j0blg2 CnqM zat1L qb ddZ 0wRa lODg Kx LXa tgl qQlZImLMw8 JoDZNWTtuBX 5WE qat PlUPyh 7fs JNzE6e IANL um VMb1 fYp6 vW wS oyN r0a 8VI 1sg zUF Df 9Y1Fan2qM V4 hy if1 3ReJzI82Zc 6VJ GMHSH6 ltwLsRB1 KD2V PjuqYVD Q9 hWJ7NukZH c31p 5OAOJcemW fsLpUW 8e2 fA15kACKo wG0Gxzt pjveSCw8KyUjo sXg qPP0 gME ELWfE NMzbV0Gqh2 Shg Ck Ac m7zaczDSS do MSvY 722h acs28ce

図1 英文字のランダムテキストの表示例

各デバイスはスクリーン周りのフレームの色が異なるため、ベゼルを白色ケント紙で覆った。また、底部に台を設け、表示される文章の高さを同じにした。なお、PWのフロントライト光量は最大で固定した。テキストの文字色は黒、背景の色はデバイスによって異なり、白ないし灰色であり、本実験では背景色の濃淡でコントラストに差をつけることとした。

コントラストについては、0 (黒)から15 (白)のグレースケール 16 階調の色調のうち、3 (暗い灰)、9 (明るい灰)、15 (白)の3 色を採用し、3 段階とした。コントラストは、背景が3 のときを低、9 のときを中、15 のときを高とした。デバイスごとの輝度とコントラスト比を図2に示す。コントラスト(図2(b))は背景と文字の輝度の実測値(図2(a))から算出した。

測定は暗室に照明箱(図 3)を設置して行った。照明箱内は

6,500 K の蛍光灯および同じ色温度の LED 光源を用いて照度を 750 lx (実測 754 lx)とした。750 lx は、日本工業規格 (照明基準総則)[4]において屋内事務室で設計等のやや精密な視作業を行うための照明要件である。 照明箱には額をのせるヘッドレストを取り付け、視距離が一定(40 cm)になるようにした。

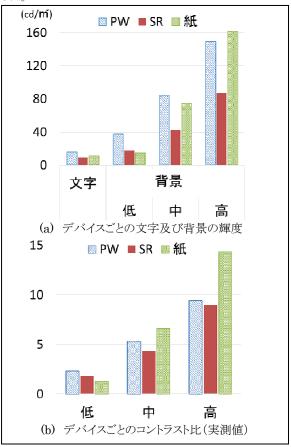


図2 デバイスごとの輝度及びコントラスト比



図3 実験に使用した照明箱

2.3 実験方法及び評価方法

被験者は、1 ページ分の表示された文章を、左上から黙読で読みはじめ、大文字の「M」の数を手動カウンターにより計測した。数えた「M」とテキスト中の実際の「M」の数の差の絶対値を実際の「M」の数で除し、この値を誤答率とした。1 から誤答率を減じて正答率を算出した(ただし、数えた「M」は必ずし

も正答とは限らないので、この正答率には、ある程度の誤差が存在する。)。黙読時間及び正答率については、個人の能力の差を平準化するために、被験者自身の平均値を算出し、実際の値をその平均値で除した値を黙読時間 index、正答率index とし、評価に用いる値とした。黙読終了後、被験者が文章の読みやすさを Visual Analog Scale (VAS)を用いて評価した。読みやすさの主観評価として VAS は、解析において100 点満点に換算した。デバイスが3種類、コントラストが3段階のため、一人の被験者は9試行のテストを行った。文章の読みやすさに関しては、文字認識ができないとした被験者を0点(全く読めない)として評価し、黙読時間 index 及び正答率 index については、文字の認識ができない被験者を欠損値とした。年齢群別の全く文字の認識ができなかった試行の割合(低コントラストのみで発生)を表2に示す。

統計解析にあたっては、読みやすさの主観評価、黙読時間 index、及び正答率 index の測定値について、それぞれコントラスト(3 レベル)、及びデバイス(3 種類: PW、SR、紙)の2つの要因による、2元配置分散分析法を行った。なお、分析は被験者を3つの年齢群に分け、年齢群ごとに行った。

表 2 年齢群別の全く文字を認識できなかった低コントラストの試行の割合

 若年者	中年者	高年者
5.7 %	17.7 %	51.0 %

3. 結果

3.1 デバイスの輝度及びコントラスト比(実測値)

文字及び背景の輝度については、図2(a)のとおり、PW はフロントライトの効果により、中、及び低コントラストにおいて、背景輝度が最も高く、SR は全てのコントラストで最も背景輝度が低かった。紙は、高コントラストで背景輝度が最も高かった。

コントラスト比(実測値)を求めると、図 2(a)のとおり、背景輝度のばらつきは大きかったが、図 2(b)のとおり、フロントライト搭載型の PW と反射型の SR で大きな差はなかった。

3.2 二元配置分散分析法による統計解析

若年、中年及び高年の3種類の年齢群別に、コントラストとデバイスの種類を要因として、測定値としての読みやすさの主観評価を用い二元配置分散分析法による解析を行った。同様に、黙読時間index、及び正答率indexをそれぞれ測定値として用い解析を行った。結果について、読みやすさの主観評価は図4に、黙読時間indexは図5に、正答率indexは図6に示す。なお、それぞれのグラフについては、デバイスごとに低、中、高の3種類のコントラスト比の実測値が異なるため、横軸をコントラスト比の実測値とした。

読みやすさの主観評価は、全ての年齢群で評価が高い順に高、中、低コントラストであった。また、中コントラストで SR の評価が全ての年齢群で紙、及び PW と比較して低く、全試行

の平均では有意に低くなった(SR:34.2±1.8, PW:44.2±2.1 (p<0.01),紙:45.7±2.1 (p<0.01))。分散分析の結果では、若年及び高年でコントラストのみに有意差があり、中年ではコントラスト及びデバイスの種類ともに有意差があったが、交互作用はなかった。多重比較では、コントラストについては、若年及び中年で、3種のコントラスト間全てに有意差があった。高年では高一低コントラスト間及び、中一低コントラスト間で有意差があり、若年、中年と比較して中一低コントラスト間で大きく評価が下がっている。デバイスについては、全てのデバイスで、評価が高い順に高、中、低コントラストであった。なお、中年の紙とSR間で紙が有意に読みやすい結果であった。

中コントラストでは、SR のコントラスト比が最も小さく、評価も低い傾向にあり、高と中、中と低コントラスト間で同じように評価が下がっている。一方、PW と紙は、中と低コントラスト間で評価が大きく下がっている。また、PW と紙では、高年では、コントラスト比の高い紙の評価が高いが、若年と中年では両者の評価は同じ傾向にあった。(図 4)

黙読時間 index は、全ての年齢群で、高、及び中コントラストで黙読時間は短く(読みやすい)、低コントラストで長い(読みにくい)結果となった。分散分析の結果は、全ての年齢群においてコントラストのみに有意差があり、デバイスの種類による違いはなかった。多重比較では、全ての年齢において、高と低コントラスト、中と低コントラストの間に有意差があった。高コントラスト、及び中コントラストと比較した低コントラストの黙読時間index は高い年齢群ほど差が大きくなる傾向にあった。(図 5)

正答率 index は、低コントラストでは若年、中年、高年の順 に有意に下がった。(若年:1.03±0.03, 中年:0.89±0.04, 高 年:0.73±0.05, 全ての年齢群間で p<0.01)。また、低コントラス トにおいては、全ての年齢群で PW が最も低く、特に若年、及 び中年との比較で高年の正答率が有意に低い結果となった (高年:0.58±0.10, 若年:0.93±0.05(p<0.01), 中年:0.69±0.06 (p<0.05))。分散分析の結果は、若年及び高年では、コントラ ストのみ有意差があった。中年においてはコントラスト及びデ バイスの種類の両方に有意差があり、交互作用があった。多 重比較においては、コントラストについては、全ての年齢群で 高と低コントラスト、及び中と低コントラストの間で有意差があっ た。デバイスの種類については、中年の、PWと紙の間に有意 差があった。若年においては、PW では高コントラストに比較し て中コントラストの正答率が高い傾向にあった。また、若年、中 年においては、低コントラスト下の紙の正答率の低下が PW、 SR と比較して緩やかであった(図 6)。また、読みやすさの主 観評価、黙読時間 index、正答率 index の指標の年齢群別の グラフを比較すると、正答率 index における年齢による傾向の 違いが最も顕著であった(図4、5、及び6)。

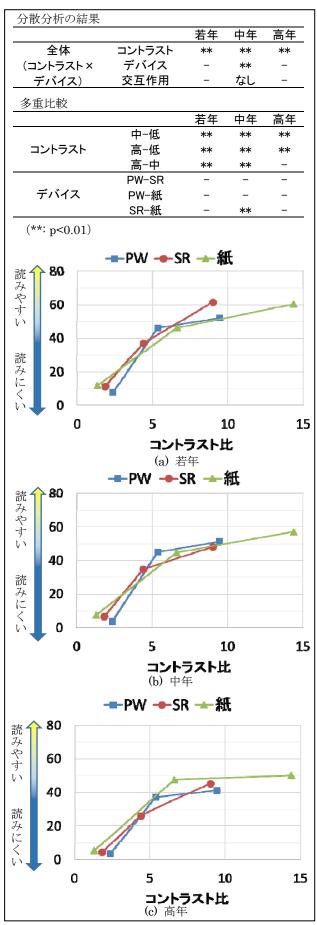


図4 年齢群別の読みやすさの主観評価の比較

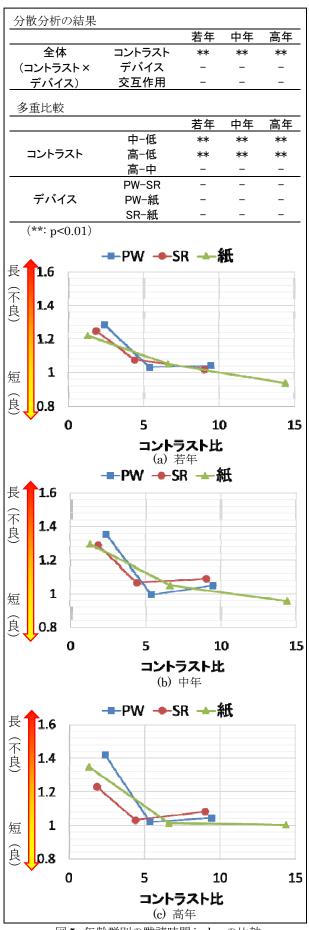


図5 年齢群別の黙読時間 index の比較

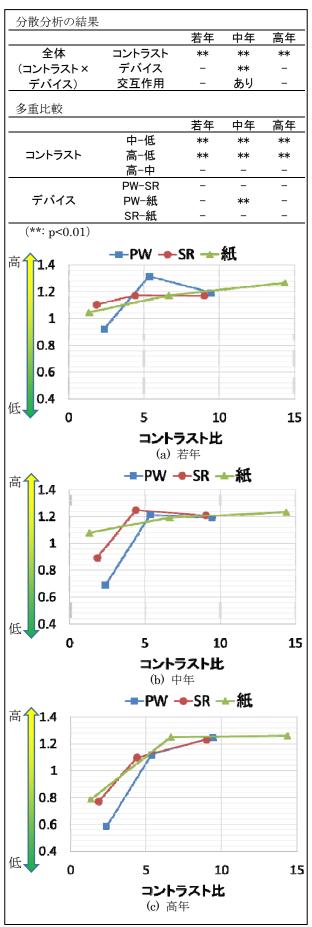


図 6 年齢群別の正答率 index の比較

4. 考察

4.1 年齢別の比較

若年、中年では高、中、低コントラストの順に読みやすさの主観評価が下がった。一方で高年では低コントラストにおいて読みやすさの主観的評価が著しく下がり、年齢群による傾向に違いがあった。また、低コントラストで正答率 index の値が若年及び中年と比較して高年で低かった。これらのことから高い年齢群ほど視機能による認知能力が低下していることが示唆された。

4.2 デバイス種類別の比較

本研究では、共同研究者の先行研究[5]において、低照度で可読性が低下した反射型Eペーパー(SR)への環境照度の影響を出来る限り取り除き、コントラスト比の影響をより適切に評価するために、日本工業規格[4]に示されている通常の視作業を行うための照度(500 lx)より高い、やや精密な視作業を行うための照度(750 lx)で実験を実施した。Lee et al.[7]、及び Shen et al.[8]も反射型 EPD を快適に読むことができる環境照度を 700 lx 以上と報告している。

高コントラストにおいては、年齢群の全てにおいて、デバイスの種類に関わらず読みやすさの評価が最も高く、可読性が高い結果となった。このことから、通常の室内でのやや精密な作業を行うための照度において、フロントライト搭載型(PW)及び反射型 E ペーパー(SR)のいずれも紙と同様の可読性を提供できることが示唆された。

中コントラストにおいては、読みやすさの評価について、フ ロントライト搭載型 E ペーパー(PW)は紙と同様の高い可読性 を示したが、最もコントラスト比が低かった反射型 E ペーパー (SR)は、両デバイスと比較して低い評価であった。また、黙読 時間 index、及び正答率 index においても、概ね反射型 E ペ ーパー(SR)が最も低い評価であった。フロントライト搭載型 E ペーパー(PW)と、反射型 E ペーパー(SR)では、コントラスト 比は約 1 違っており(PW:5.36, SR:4.38)、フロントライト搭載 型Eペーパー(PW)の背景輝度が反射型Eペーパー(SR)の 2 倍以上あった(PW:84.66, SR:42.09)。 これらのことからフロ ントライト搭載型 E ペーパー(PW)と、反射型 E ペーパー(SR) では、コントラスト比の違いが可読性の違いに影響を与えた可 能性がある。また、紙とフロントライト搭載型 E ペーパー(PW) ではコントラスト比は紙が高い値を示した一方で、読みやすさ の主観評価はほぼ同じであり、黙読時間 index、及び正答率 index では、年齢群別で評価が逆転する場合もあった。これら のことから本実験の条件下では、紙とフロントライト搭載型 E ペ ーパー(PW)では、コントラスト比よりも、それ以外のデバイス の特性が可読性の違いに影響した可能性がある。

低コントラストにおいては、フロントライト搭載型 E ペーパー (PW)の正答率 index が紙や反射型 E ペーパー(SR)と比較して低い結果となった。フロントライト搭載型 E ペーパー(PW)に

ついては、共同研究者の先行研究[5,9]により、低照度において、フロントライトの光源が可読性の改善に寄与していることが示されている。しかし、今回の実験の低コントラストの条件下では、フロントライト搭載型 E ペーパー(PW)は表示面が光源により照らされるため、他のデバイスに比べると黒色部分は灰色寄りの呈色になる。本実験では、紙や反射型 E ペーパー(SR)と比較して明るい 15 cd/m²と灰色に近くなっている。そのため、背景輝度の数値と比較してコントラスト比が低くなった。上記の条件により、デバイスの種類によるコントラスト比に大きな差はなかった。それにもかかわらずフロントライト搭載型 E ペーパー(PW)の可読性が低下した理由は、使用者側へのフロントライトの光漏れの可能性が考えられる。フロントライト搭載型の内部のマイクロプリズム構造では、一部の光が LED 光源から使用者側に漏れていることが Watanabe et al.[10]により報告されている。

4.3 コントラストの比較

本研究では、高コントラストがデバイスの種別に関わらず最も可読性が高い結果となった。中コントラストでは、読みやすさの主観評価は高コントラストと比較して有意に低かったが、黙読時間 index 及び正答率 index については、高コントラストと同程度の値を示した。これらのことから、被験者にとって、中コントラストの条件は、高コントラストとの比較においては低いものの、十分に読みやすいレベルである可能性が示唆された。

中コントラストでは、各デバイスの読みやすさの主観評価の うち、可読性が高かったフロントライト搭載型 Eペーパー(PW) 及び紙の読みやすさの主観評価の値が、45点前後を示した。 共同研究者による先行研究[11]においても、被験者が十分読 みやすいと評価した目安の値は45点であった。このことから、 先行研究を支持し、読みやすさの主観評価の 45 点を十分に 読みやすいとする目安とできる可能性が大きいと考える。また、 中コントラストにおいて、読みやすさの主観評価の差が出たフ ロントライト搭載型 E ペーパー(PW)と、反射型 E ペーパー (SR)のコントラスト比の値の境がおおよそ「5」であることから、 読みやすさのコントラスト比の目安の値として「5」を推奨する。 今回の研究の低コントラストでは、高年で半数以上が全くテキ ストを認識できず、さらに若年や中年においてもそれぞれ約 6%、及び約18%の被験者がテキストを認識できない結果と なった。また、全てのデバイスで日本工業規格[6]に示された ディスプレイに関する最低限のコントラスト比「3」を下回る値で あったことから、コントラスト比が低すぎたため、全体に評価が 低かった可能性がある。

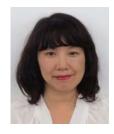
本研究では、コントラストの背景の色調をグレースケール 16 階調の番号で一定にし、PDF 化したものを表示させた。この条件下では、高、中、及び低コントラストにおける各デバイスの実測コントラスト比が異なり、フロントライト搭載型 E ペーパー (PW)及び反射型 E ペーパー (SR)の特性の直接の影響のみ

を取り出して評価することが難しかった。また、本研究は、表示ファイルの背景色を変化させ、その影響について比較した内容であり、一般に使われているメディア機器自体のコントラスト調整機能により背景色を変化させた研究とは結果が異なる可能性がある。今後はメディア機器自体のコントラスト調整機能を使用し、実測コントラスト比をほぼ一定にした形で、フロントライト搭載型Eペーパー、反射型Eペーパー、及び紙の可読性について評価することに取り組みたい。

参考文献

- [1] Amazon.com Kindle Paperwhite Touch Screen
 E-reader with Light.
 http://www.amazon.com/Kindle-Paperwhite-Ereader/
 dp/B00AWH595M
- [2] SONY SONY Reader http://www.sony.jp/reader/products/PRS-T3S/
- [3] ISO 9241-304, User performance test methods for electronic visual displays, International Organization for Standardization (2008)
- [4] JIS Z 9110, 照明基準総則, 日本標準調査会(2011)
- [5] T. Koizuka, S. Sano, T. Kojima, M. Miyao,: Evaluating the Effects of Environmental Illuminance on the Readability of E-books, SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol. 44, pp. 571-573 (2013)
- [6] JIS Z 8513, 人間工学-視覚表示装置を用いるオフィス作業-視覚表示装置の要求事項, 日本標準調査会 (2006)
- [7] D. Lee, K. Shieh, S. Jeng, I. Shen,: Effect of character size and lighting on legibility of electronic papers, Displays, 29, pp. 10–17 (2008)
- [8] I. Shen, K. Shieh, C. Chao, D. Lee,: Lighting, font style, and polarity on visual performance and visual fatigue, with electronic paper displays, Displays, 30, pp. 53–58 (2009)
- [9] T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, R. P. Lege, M. Miyao,: The Contributions of Built-in Light on the Readability in E-paper Devices, SID Symposium Digest of Technical Papers, vol. **45**, pp. 861-864 (2014)
- [10] Inventors: H. Watanabe, T. Teranishi, T. Matsuoka, T. Nakahara, T. Tomotoshi, E. Satoh, K. Narutaki, Assignee: SHARP kabushiki Kaisha, "Front light and method for producing same reflective display device provided with front light, and electronic equipment provided with reflective display device", United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2014/0146563 A1, May 29 (2014)
- [11] T. Koizuka, Y. Ishii, T. Kojima, N. Ishio, R. P. Lege, M. Miyao,: Proposing a Baseline Setup for Readability, IDW 2014, Niigata, Japan, Dec. 3-5 (2014)

著者紹介



松波紫草(学生会員)

1994 名古屋大学大学院農学研究科博士課程前期課程修了,同年愛知県庁入庁. 2014 (公財)愛知県国際交流協会に派遣,同年名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程後期課程入学,現在に至る.主にEペーパーの可

読性の研究及び、多言語生活情報翻訳システムの運用に従 車



岩田 光平(学生会員)

2011 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科入学. 2014 名古屋大学情報科学研究科宮尾研究室に配属され現在に至る. モバイル機器・電子ペーパー端末の可読性に関する研究に従事.



石井佑樹(学生会員)

2010 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科入学. 2013 名古屋大学情報科学研究科宮尾研究室に配属され現在に至る. モバイル機器の視認性や可読性の研究に従事.



小飯塚達也(学生会員)

2013 名古屋大学工学部電気電子情報 工学科卒業,同年同大学大学院情報 科学研究科博士前期課程入学,現在 に至る. 主にモバイル機器,電子ペーパーに関する研究に従事.



小嶌 健仁(正会員)

1989 信州大学農学部農芸化学学科卒業.同年愛知県公立学校教員.2012名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了.同年名古屋大学大学院情報科学研究科入学,2014名古屋大学大学院博士課程後期課程修了.

同年中部学大学助教を経て、2015 講師、現在に至る. 立体映像の生体測定, モバイルアプリケーションに関する研究に 従事.



宮尾 克(正会員)

1977 名古屋大学医学部医学科卒業. 1982 医学博士.同大学医学部助手・ 講師・助教授・教授(多元数理科学・情報基盤センター)を経て,2009 情報科 学研究科教授,現在に至る.人間工学・ 公衆衛生学を通じ,3D映像の生体影

響, ケータイ・モバイル機器のユーザビリティ, 多言語情報システムを研究.