

網膜走査ディスプレイの現実場面への応用に関する ヒューマンファクター的研究

— A Human Factor Study on Application of Retinal Scanning Displays to Actual Work Situations —

1061003

研究代表者（慶應義塾大学 理工学部 管理工学科 助教授） 岡田 有策
共同研究者（東京理科大学 工学部 経営工学科 助手） 中西 美和

1. 研究の目的

本研究は、網膜走査ディスプレイを用いた Augmented Reality 技術を現実の作業場面に応用する可能性について、ヒューマンファクターズの観点から検討するものである。

Augmented Reality (AR) は、人間の現実世界を増強する技術であり、医療や産業を中心とした様々な分野への応用が期待されている。この技術を実現する網膜走査ディスプレイ (Retinal Scanning Display: RSD) は、人間の網膜に低出力の光線を直接当て、それを高速に操作することによって映像を視覚に認識させる。従って、これを頭部に装着したとき、実視野に電子的な情報を重ね合わせて見ることができる。

我々の先行研究では、手順的作業において、従来の紙媒体によるマニュアルの代わりに RSD によるマニュアル提示を行った場合、作業時間とエラーがともに減少することが見込まれた。

そこで、本研究では、RSD を用いた手順提示方法の現実場面への応用可能性を明らかにすべく、次の 3 点を具体的な検討課題とした。

課題 1) 熟練者及び非熟練者の両者を支援するマニュアル提示方法として、RSD による AR を応用する可能性を検討する。

課題 2) RSD による AR を用いたマニュアルを実作業に導入するにあたってのヒューマンファクター的要件を検討する。

課題 3) 医療及び産業の現場において、RSD による AR を用いたマニュアルの利用が有効と思われる作業を調査し、現状分析をもとに導入後の効果について検討する。

2. 研究の内容・成果

2.1 課題 1 の概要

現実の作業場面では、スキルレベルの異なる作業者が同じ手順書を共用することが少なくない。一般的に、熟練者は、作業効率を損なわないよう

必要な箇所を容易に参照できることを望み、一方で、非熟練者は作業の順序や対象物を誤認しないよう明確かつ詳細に理解できることを望む。しかしながら、従来の紙媒体の手順書の場合、記載内容を拡充すればするほど紙束のボリュームが増すため、かえって携帯性や検索のしやすさを損なうというジレンマがあった。そこで本研究では、このような問題を解消するために AR 技術に応用する可能性について検討した。

本研究ではまず、熟練者及び非熟練者が従来の紙媒体の手順書を用いた際の作業阻害要因を実験的に調べた。実験では、配電盤に手順書通りにプラグを差し込み、できるだけ迅速に論理回路を通电させる作業を被験者に課した。被験者 16

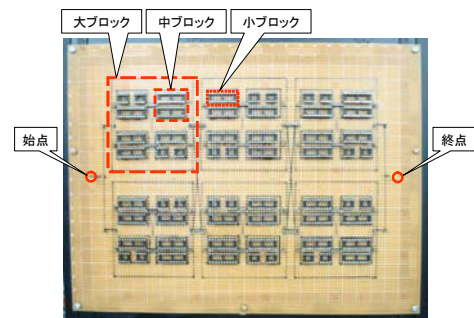


図 1 配電盤

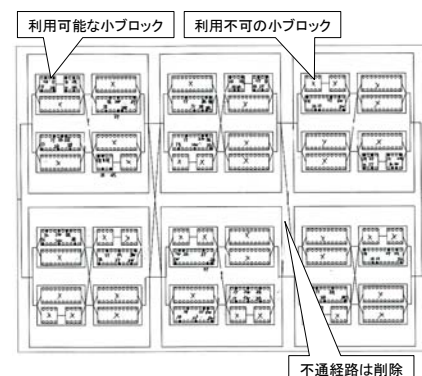


図 2 手順書



図 3 RSD

名は、決められたプログラムに沿って練習を行い、作業手順に対する知識を十分に習得した熟練群（8 名）と、必要最小限の練習のみを行い、作業手順に対する知識が十分でない非熟練群（8 名）に分けられた。配電盤を図 1 に、手順書を図 2 に示す。

実験中のエラーを解析した結果、作業阻害要因として、作業の特徴、手順書の参照、手順書の記載事項、作業のやり方に関する計 9 個が抽出された。特に、熟練群のエラーは、プラグ差込時の指示参照の煩雑さ、記憶に依存しがちな作業のやり方に、一方、非熟練群のエラーは、手順書の記載事項の複雑さや微小な操作に集中が偏る傾向に、端を発していたことが分かった。

そこで次に、このような作業阻害要因の除去・緩和を狙いとして、AR による手順提示方法を具現化した。図 3 に示すような頭部装着型の RSD（NOMAD: Microvision 社製）を採用し、図 2 と同様の手順書を提示することとした。従って、RSD を装着して配電盤に向き合うと、図 1 の上に図 3 を重ね合わせて見る事ができた。その他にも、個別ブロックの拡大提示する機能等を付加した。

この方法を、熟練群及び非熟練群の両者に対して適用し、紙媒体の手順書を用いた場合との比較を通して有効性を検証した。

図 4-1 に非熟練群の一実験あたりのエラー回数を、図 4-2 に熟練群の一実験あたりのエラー回数を示す。紙媒体の手順書を用いた場合に比べて、非熟練群では、経路の誤選択によるエラーが著しく少なくなり、熟練群では、いずれのエラーもほぼゼロとなった。さらに、図 5-1 に非熟練群の各セグメントの所要時間を、図 5-2 に熟練群の各セグメントの作業時間を示す。非熟練群では、紙媒体の手順書を用いた場合に比べて作業時間の短縮が認められ、熟練群では、ほぼ変化なしという結果が得られた。また、手順の参照回数を調べたところ、紙媒体を用いた場合、熟練者は非熟練者の 1/2 倍程度であったのに対し、AR による手順提示方法を用いた場合は、ほぼ同数であった。

以上のことから、AR を用いた手順提示方法は、非熟練者のエラーを減少させるとともに、作業効率をも高めること、また、熟練者の本来の作業効

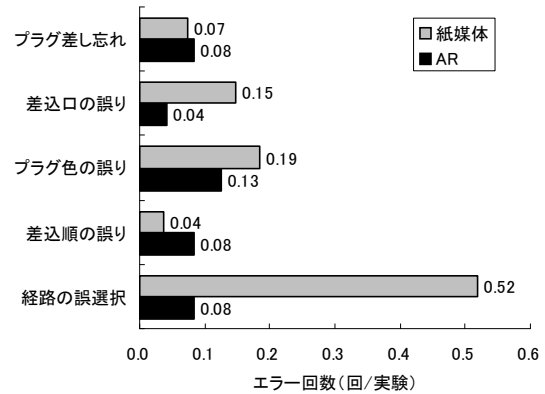


図 4-1 一実験あたりのエラー回数（非熟練群）

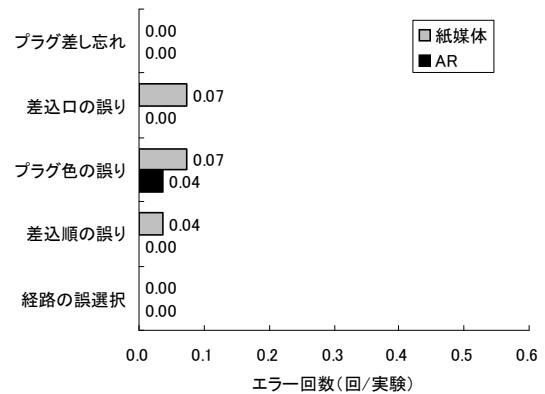


図 4-2 一実験あたりのエラー回数（熟練群）

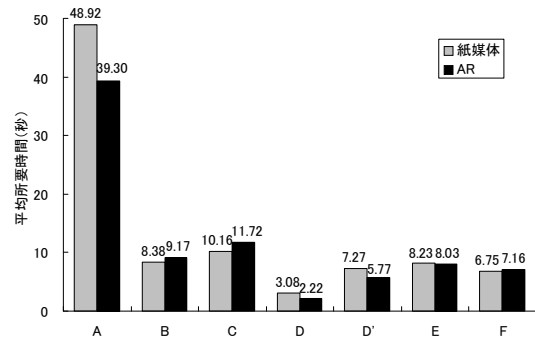


図 5-1 各セグメントの平均所要時間（非熟練群）

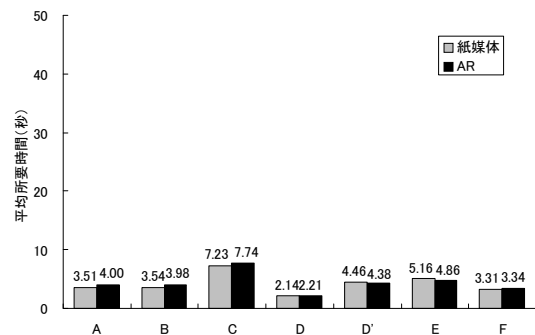


図 5-2 各セグメントの平均所要時間（熟練群）

率を妨げることなく、手順確認を促進することが確認された。従って、この方法は、従来型の紙媒

体による手順書では解消することの難しかった問題の一方策として有効に働くことが示唆された。

2.2 課題2

作業効率を維持しつつヒューマンエラーを抑えるための一方策として、ARの有効利用が期待される。ただし、実作業の現場に導入するにあたっては、作業者及び作業環境に関する諸要件を十分明らかにしておく必要がある。

そこで、本研究では、ARを手順提示方法として利用することを想定した場合の、基本的なヒューマンファクター的要件について、実験に基づいた知見を得ることとした。特に、ARによる手順提示方法を実現する代表的なヒューマンインタフェース、RSD（外景透過率はほぼ100%）の利用が作業パフォーマンスに与える影響を検討するため、従来型の紙媒体の手順書を用いた場合及び透過型ディスプレイ(See-Through Display: STD, 外景透過率は約20%)を用いた場合を比較条件として設けた。

検討対象とした要件は、作業者及び作業環境に関する6項目とした。各要件については、配電盤へのプラグの差し込みを対象作業とした実験を通して検討した。ただし、実験条件や実験環境等は、検討する要件ごとに個別に設定した。

- 1) 視力矯正の影響:眼鏡を着用した上にRSDを装着することはインタフェースの形状上困難であるため、コンタクトレンズによって矯正した場合のみを対象とした。

裸眼群（裸眼視力1.0以上ある者）と矯正群（コンタクトレンズを着用して視力1.0以上ある者）で比較したところ、エラー回数及び作業時間ともにほぼ差がなかった。従って、RSDを利用する上で、コンタクトレンズの着用による作業への影響は特にないと言える。

- 2) 優位眼・劣位眼による影響:人間には、多くの場合、利き眼、すなわち優位眼があることが知られているが、単眼式のRSDを装着して作業を行う場合、どちらの眼に装着することが望ましいかを検討した。

ローゼンバッハ法によって各被験者の優位眼を調べ、優位眼にRSDを装着した場合と劣位眼に装着した場合とで作業パフォーマンスを比較した。その結果、劣位眼に装着したときの方が作業時間はやや短く、主観評価においても高い得点が得られた。従って、RSDを用いる場合は劣位眼に装着し、優位眼を実世界の作業対象や手元に開いておくことが望ましいと言える。

- 3) 外景の明るさによる影響: JIS Z 9110(照度基

準)では、作業の特性に応じた基準照度が定められているが、RSDの利用は考慮されていない。そこで、RSDを手順提示のインタフェースとして用いる場合、作業環境の明るさに対する配慮の必要性を検討した。

照度面（配電盤）照度を、6段階(100(lx)、400(lx)、800(lx)、1200(lx)、1600(lx)、2000(lx))に設定した室内条件、及びこれよりも大幅に高い照度となる室外条件で実験を行った。その結果、いずれの条件においても、エラー回数及び作業所要時間ともに違いは見られなかった。従って、RSDを利用する上で、外景の明るさは特に関係ないものと言える。

- 4) 作業負担:従来型の紙媒体に替えてRSDを手順提示のインタフェースとして用いることに対しては、作業負担の増大が懸念される。そこで、生理的なものを含む複数の指標から、作業負担について検討した。

実験では、配電盤に30本のプラグを差し込むことを1タスクとし、これを図6のようなサイクルで行うこととした。実験結果は、作業所要時間、フリッカー値、心電図のR波間隔の変動率、自覚症状得点の4点から分析した。結果を総合すると、RSDを用いた場合でも、従来の紙媒体を用いた場合に比べて、特に大きな作業負担はないといえよう。むしろ、作業所要時間が短縮することによって、継続的に作業を行った場合はその負担が和らぐような傾向も見られた。

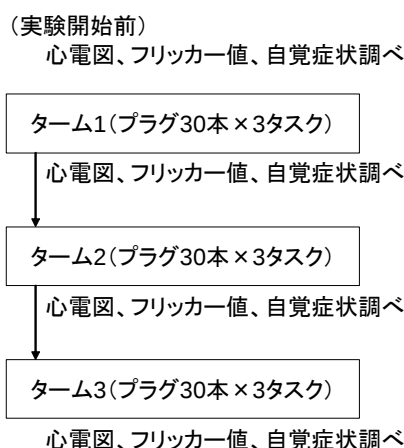


図6 作業負担を検討するための実験手順

- 5) 外景の変化に対する気づき: RSDは片眼を覆うインタフェース上の構造を持つため、装着時の視野狭窄が懸念される。そこで、RSDを装着して作業を行う場合、周囲の変化に対する気づきがどの程度確保されるのか検討した。

実験では、配電盤の正面に座った被験者の周辺視野、すなわち水平方向-90°から+90°、

	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°
60°	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55°	0.00	0.00	0.00	0.12	0.05	0.00	0.00
45°	0.00	0.17	0.19	0.40	0.27	0.29	0.00
0°	0.47	0.35	0.39		0.40	0.35	0.13
-45°	0.59	0.64	0.64		0.50	0.67	0.43
-55°	0.40	0.36	0.41		0.71	0.44	0.20
-60°	0.25	0.12	0.10		0.08	0.00	0.06

図 7-1 紙媒体の手順書を用いた場合の検出率

	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°
60°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45°	0.15	0.63	0.07	0.41	0.25	0.29	0.00
0°	0.82	1.00	0.94		0.81	1.00	0.53
-45°	0.26	0.88	0.64		0.56	0.57	0.00
-55°	0.06	0.31	0.15		0.22	0.00	0.00
-60°	0.00	0.00	0.06		0.00	0.06	0.00

図 7-2 RSD を用いた場合の検出率

垂直方向-60° から+60° の範囲に、ランダムに発光する LED を配置した。被験者は、配電盤にプラグを差し込む作業に集中するよう指示されたが、作業中に LED の点灯に気づいた場合にはそれを指摘することとした。紙媒体の手順書を用いた場合の発光盤検出率を図 7-1 に、RSD を用いた場合の発光盤検出率を図 7-2 に示す。結果から、RSD を用いた場合、水平方向-60° 以上+60° 以下、垂直方向-45° 以上+0° 以下の範囲では、紙媒体を用いた場合に劣らない高い割合での検出率となった。一方、垂直方向 55° 以上の範囲に設置された発光盤の点灯にはまったく気づかなかった。これは、RSD のバイザー部分が前方上部への視界を遮ったためと考えられる。ただし、今後の開発によってさらにコンパクトな形状になることが予想されるため、この問題は将来的に解消されることが見込まれる。

- 6) 作業準備の煩雑さ：AR による手順提示方法を用いる場合、RSD を装着して、作業対象と提示される情報とが重なり合っ見えるよう姿勢を調節する必要がある。この準備にかかるおおよその時間について調べた。

装着までの時間と重ね合わせまでの時間を計測したところ、前者は平均 19.2(s)、後者は平均 6.0(s)となり、特に準備の煩雑さはないことがわかった。

2.3 課題 3

AR による手順提示方法が適用できそうな作業について、実際の工場及び病院にて調査した。三菱重工名古屋航空宇宙システム製作所では、機体の組立及び検査時にマニュアルを携帯しながら作業を行うことが難しい。従って、作業者は手順を十分に記憶した上で作業に臨んでいる。しか

しながら、常に同じ対象物を扱うような単純作業ではないため、経験の浅い作業員への教育・訓練の負担が大きい。このような現状に対して、AR による作業提示方法は、ハンズフリーでマニュアルを参照できること、作業員が自分の熟練度に応じたマニュアルを見ることが可能であることなど、応用の有効性が見込まれた。また、板橋中央総合病院では、病院内の調理現場で配膳作業を行う際、個々の患者に応じた対応が必要である。現状ではホワイトボードや紙媒体の指示に従って配膳を行っており、この際のヒューマンエラーがしばしば生じている。この場面でも、提示情報の切り替えが容易で、参照の煩雑さが少ない AR による手順提示方法の有効利用が見込まれた。

3. 今後の研究の方向・課題

今後の課題としては、主に、次の 2 点のテーマについて研究するつもりである。

- 1) 実視野の情報の複雑さと RSD によって提示される情報の量のバランス
- 2) 立体的な構造物の組立・検査作業時の動的作業マニュアルへの応用

4. 成果の発表・論文等

- 1) 中西美和, 岡田有策, 熟練者および非熟練者の両者を支援する手順提示方法としての Augmented Reality 技術の応用, ヒューマンファクターズ-11(1), p.84-95, 2006 年
- 2) 中西美和, 尾関麦彦, 赤坂俊哉, 岡田有策, 実作業への Augmented Reality の導入に際してのヒューマンファクター的要件, ヒューマンファクターズ-11(2), p.155-166, 2007 年
- 3) M.NAKANISHI, Y.OKADA, Development of an Instruction System with Augmented Reality Technology -for supporting both skilled and unskilled workers-, INSCIT(International Conference on Multidisciplinary Information Sciences and Technologies) in Merida, Spain, p.112-p.116, November in 2006
- 4) T. AKASAKA, M.NAKANISHI, Y.OKADA, Appropriate Complexity of Image Displayed on Head-Mounted Displays in Augmented Reality, 12th International Conference on HCI (Human Computer Interaction) in Beijing, China, Judging, July in 2007

