

エネルギー科学研究科
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文

題目： 拡張現実感による組立作業支援効果の
定量的評価手法の提案

指導教員： 吉川 榮和 教授

氏名： 米谷 健司

提出年月日： 平成18年2月9日(木)

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 拡張現実感 (AR) 技術	3
2.1.1 拡張現実感 (AR) とは	3
2.1.2 AR による支援情報提示の特徴	5
2.2 AR システムの現状	8
2.2.1 AR に関する先行研究	8
2.2.2 AR システムの課題と評価方法の必要性	10
2.3 昨年度の研究	11
2.4 本年度の研究の目的と意義	12
2.5 研究の流れ	12
第 3 章 組立作業のタスク分析	14
3.1 タスク分析手法	14
3.1.1 タスク分析の必要性	14
3.1.2 タスク分析の方法と特徴	15
3.1.3 ペトリネットによるタスクの記述	17
3.2 組立作業タスク分析実験	18
3.2.1 実験目的	18
3.2.2 作業マニュアルの設計	18
3.2.3 実験方法	19
3.2.4 実験手順	21
3.3 実験結果および考察	25
3.4 拡張現実感による組立作業支援効果の定量的評価手法の提案	25
第 4 章 部品探索実験	30
4.1 実験の目的	30

4.2	実験方法	30
4.2.1	実験概要	30
4.2.2	実験条件	30
4.2.3	実験で用いる AR システム	33
4.2.4	実験手順	36
4.3	実験結果	38
4.4	探索作業に関する AR システムとマニュアルの定量評価	46
4.4.1	実験結果の考察	46
4.4.2	探索作業時間のモデリング	47
4.4.3	モデルの検証	49
第 5 章	部品配置実験	53
5.1	実験の目的	53
5.2	実験方法	53
5.2.1	実験概要	53
5.2.2	実験条件	53
5.2.3	実験で用いる AR システム	57
5.2.4	実験環境	57
5.2.5	実験手順	59
5.3	実験結果	60
5.4	考察	68
第 6 章	結論	69
	謝 辞	72
	参 考 文 献	73
付録 A	大型リアプロジェクター設計マニュアル	付録 A-1
A.1	色制御信号基板	付録 A-2
A.1.1	色制御基板の設置	付録 A-2
A.1.2	色制御基板へのコネクタの取り付け	付録 A-4
A.2	制御信号制御基板	付録 A-6
A.2.1	制御信号制御基板の設置	付録 A-6

A.2.2	制御信号制御基板へのコネクタの取り付け	付録 A-8
A.3	同期信号発生基板	付録 A-10
A.3.1	同期信号発生基板の設置	付録 A-10
A.3.2	同期信号発生基板へのコネクタの取り付け	付録 A-12
A.4	電源ユニット	付録 A-14
A.4.1	電源ユニットの設置	付録 A-14
A.4.2	電源ユニットへのコネクタの取り付け	付録 A-16
A.5	制御ユニット	付録 A-18
A.5.1	制御ユニットの設置	付録 A-18
A.5.2	制御ユニットへのコネクタの取り付け	付録 A-20
A.6	音声ユニット	付録 A-22
A.6.1	音声ユニットの設置	付録 A-22
A.6.2	音声ユニットへのコネクタの取り付け	付録 A-24
A.7	完成品	付録 A-26
 付録 B 探索実験で用いた部品		付録 B-1
 付録 C ARToolKit		付録 C-1
C.1	ARToolKit の概要	付録 C-1
C.2	マーカ検出処理	付録 C-1
C.2.1	取り扱う座標系	付録 C-1
C.2.2	マーカ抽出	付録 C-4
C.2.3	マーカ識別	付録 C-4
C.2.4	4 頂点位置検出	付録 C-5
C.3	マーカの 3 次元位置推定	付録 C-5
C.3.1	回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定	付録 C-6
C.3.2	平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ の推定	付録 C-8
C.3.3	変換行列 $\mathbf{T}_{\mathbf{cm}}$ の修正	付録 C-8
C.4	カメラキャリブレーション	付録 C-8
 付録 D 部品探索実験の概要及び被験者の手引き		付録 D-1
D.1	はじめに	付録 D-1
D.2	実験の概要	付録 D-1

D.3 Glasstron	付録D-1
D.4 作業内容	付録D-2
D.5 実験手順	付録D-2
D.6 注意点	付録D-4

目 次

2.1	拡張現実感の位置づけ	4
2.2	拡張現実感の例	4
2.3	HMD を用いた拡張現実感の実現方法	5
2.4	ハンドヘルドディスプレイを用いた拡張現実感の実現方法	6
2.5	プロジェクタを用いた拡張現実感の実現方法	6
2.6	対象の直感的理解	7
2.7	情報内容の容易な理解	8
2.8	ボーイング社の航空機ワイヤーハーネス作成支援システム	9
2.9	KARMA	9
2.10	AR デバイスにおける視線切り替え作業	11
3.1	ペトリネットの例	18
3.2	大型リアプロジェクタ	19
3.3	一般的なマニュアルの構成	20
3.4	実験で用いるマニュアルの構成	20
3.5	実験配置図	21
3.6	撮影環境図	22
3.7	ビデオ機器接続図	22
3.8	練習に用いたモータの外観	23
3.9	実験の流れ	24
3.10	ペトリネットによる組立作業中の視線移動(冗長な例)	27
3.11	ペトリネットによる組立作業中の視線移動の最短パス	28
3.12	最適な AR 情報提示方法の例	28
3.13	マニュアルを用いた認知作業の様子	29
3.14	最適な AR システム下での認知作業の様子	29
4.1	互いの類似性が低い部品	31
4.2	互いの類似性が高い部品	32

4.3	部品の組み合わせの分類	32
4.4	ARToolKit のマーカ	33
4.5	ARToolKit を用いて設計した AR システムの例	34
4.6	Glasstron	35
4.7	システム動作の様子	36
4.8	実験環境見取り図	37
4.9	実験で使用する机	37
4.10	部品の配置位置	38
4.11	実験手順	39
4.12	部品探索実験の結果	45
4.13	AR システムを用いた部品探索作業の作業時間	46
4.14	マニュアルを用いた探索作業の作業時間	48
4.15	推定値と実測値の相関	49
5.1	部品 A の外観	54
5.2	部品 B の外観	55
5.3	部品 C の外観	55
5.4	部品 D の外観	56
5.5	部品 E の外観	56
5.6	システムの動作状況	57
5.7	実験環境	58
5.8	ポスター正面図	58
5.9	実験手順その 1	59
5.10	実験手順その 2	60
5.11	AR システムを用いた作業状況	60
5.12	マニュアルを用いた作業状況	61
5.13	配置実験結果 (全体)	65
5.14	グループ A・B の作業時間の比較 (マニュアル)	66
5.15	グループ A・B の作業時間の比較 (AR システム)	66
5.16	配置実験結果 (平均)	67
6.1	提案する評価手法の概念図	71
A.1		付録 A-3

A.2	付録 A-3
A.3	付録 A-3
A.4	付録 A-5
A.5	付録 A-7
A.6	付録 A-7
A.7	付録 A-7
A.8	付録 A-9
A.9	付録 A-11
A.10	付録 A-11
A.11	付録 A-11
A.12	付録 A-13
A.13	付録 A-15
A.14	付録 A-15
A.15	付録 A-15
A.16	付録 A-17
A.17	付録 A-17
A.18	付録 A-19
A.19	付録 A-19
A.20	付録 A-19
A.21	付録 A-21
A.22	付録 A-23
A.23	付録 A-23
A.24	付録 A-23
A.25	付録 A-25
A.26	付録 A-26
B.1 部品 A1	付録 B-1
B.2 部品 B1	付録 B-1
B.3 部品 C1	付録 B-1
B.4 部品 D1	付録 B-1
B.5 部品 E1	付録 B-1
B.6 部品 E2	付録 B-1
B.7 部品 F1	付録 B-1

B.8 部品 F2	付録B-1
B.9 部品 G1	付録B-1
B.10 部品 G2	付録B-2
B.11 部品 H1	付録B-2
B.12 部品 H2	付録B-2
B.13 部品 I1	付録B-2
B.14 部品 I2	付録B-2
B.15 部品 I3	付録B-2
B.16 部品 I4	付録B-2
B.17 部品 J1	付録B-2
B.18 部品 J2	付録B-2
B.19 部品 J3	付録B-3
B.20 部品 J4	付録B-3
B.21 部品 K1	付録B-3
B.22 部品 K2	付録B-3
B.23 部品 K3	付録B-3
B.24 部品 K4	付録B-3
B.25 部品 L1	付録B-3
B.26 部品 L2	付録B-3
B.27 部品 L3	付録B-3
B.28 部品 L4	付録B-3
B.29 部品 L5	付録B-3
B.30 部品 L6	付録B-3
B.31 部品 M1	付録B-4
B.32 部品 M2	付録B-4
B.33 部品 M3	付録B-4
B.34 部品 M4	付録B-4
B.35 部品 M5	付録B-4
B.36 部品 M6	付録B-4
B.37 部品 N1	付録B-5
B.38 部品 N2	付録B-5
B.39 部品 N3	付録B-5

B.40 部品 N4	付録B-5
B.41 部品 N5	付録B-5
B.42 部品 N6	付録B-5
B.43 部品 N7	付録B-5
B.44 部品 N8	付録B-5
B.45 部品 O1	付録B-6
B.46 部品 O2	付録B-6
B.47 部品 O3	付録B-6
B.48 部品 O4	付録B-6
B.49 部品 O5	付録B-6
B.50 部品 O6	付録B-6
B.51 部品 O7	付録B-6
B.52 部品 O8	付録B-6
B.53 部品 P1	付録B-7
B.54 部品 P2	付録B-7
B.55 部品 P3	付録B-7
B.56 部品 P4	付録B-7
B.57 部品 P5	付録B-7
B.58 部品 P6	付録B-7
B.59 部品 P7	付録B-7
B.60 部品 P8	付録B-7
B.61 部品 P9	付録B-7
B.62 部品 P10	付録B-7
B.63 部品 Q1	付録B-8
B.64 部品 Q2	付録B-8
B.65 部品 Q3	付録B-8
B.66 部品 Q4	付録B-8
B.67 部品 Q5	付録B-8
B.68 部品 Q6	付録B-8
B.69 部品 Q7	付録B-8
B.70 部品 Q8	付録B-8
B.71 部品 Q9	付録B-8

B.72 部品 Q10	付録B-8
B.73 部品 Q11	付録B-8
B.74 部品 Q12	付録B-8
C.1 ARToolKit の使用例	付録C-2
C.2 システムが取り扱う座標系	付録C-3
C.3 マーカの例	付録C-7
C.4 格子点のフィッティング 1	付録C-9
C.5 格子点のフィッティング 2	付録C-9
D.1 Glasstron	付録D-2
D.2 ARToolKit のマーカ	付録D-2
D.3 実験環境図	付録D-3

表 目 次

3.1	GOMS モデルの要素の説明	15
3.2	キーストロークレベルモデルの操作	15
3.3	GOMS モデルによる実行時間予測	16
3.4	組立作業における認知作業の時間と占有率	26
4.1	AR システムの実験順序及び正解	40
4.2	マニュアルの実験順序及び正解	41
4.3	AR システムを用いた探索実験の結果	42
4.4	AR システムを用いた探索実験の結果 (平均)	42
4.5	マニュアルを用いた探索実験の結果 (部品数 2~8)	43
4.6	マニュアルを用いた探索実験の結果 (部品数 10~12)	44
4.7	マニュアルを用いた探索作業のモデルと実測値の比較 (部品数 2~10)	50
4.8	マニュアルを用いた探索作業のモデルと実測値の比較 (部品数 12)	51
5.1	マニュアルを用いた配置実験の結果	62
5.2	AR システムを用いた配置実験の結果	63
5.3	グループごとの作業時間	64
5.4	部品ごとの作業時間の平均値	64
5.5	配置作業の短縮率	67
A.1		付録 A-4
A.2		付録 A-8
A.3		付録 A-12
A.4		付録 A-16
A.5		付録 A-20
A.6		付録 A-24

第 1 章 序論

我が国の高度経済成長期を支えた団塊の世代のベテランたちが引退するにあたって、基幹系のシステムの開発・保守や現場での作業の効率の低下を不安視する 2007 年問題が昨今、叫ばれている。企業は速やかに、ベテランたちの培った技術やノウハウを若い作業員たちに伝えるべきであるが、人材の流動化が激しい現代社会において、技術の継承が非常に困難であるのが現状である。そこで、未熟な作業員たちをコンピュータ技術を用いて支援する方法が注目されている。

近年の急速な技術革新により、コンピュータグラフィックスを用いた人工的な世界にユーザを没入させる人工現実感 (Virtual Reality;VR) の技術は飛躍的に進歩した。現在の VR は、実際の世界と区別がつかないくらいのリアリティのある環境を作ることが可能となり、これまでのようなゲームやアミューズメント施設に用いられていた娯楽目的のものだけではなく、現場作業の教育や訓練などの分野でも、積極的に導入され高い評価を得ている。

しかし、VR はある作業の事前訓練や教育は効果的であるが、実際の作業を行なうにあたって、リアルタイムに支援するには不向きである。そこで VR と比べて「実世界志向」のヒューマンインタフェースである拡張現実感 (Augmented Reality ; AR) 技術が注目されている。AR 技術とは、現実世界においてコンピュータを用いて生成した図形や文字などの仮想情報を付加することによって現実を補強、拡張する技術のことである。特に人間の視覚に対し、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display;HMD) などを用いて文字情報や画像情報を提示することによって、得られる情報を拡張し行動の支援を行う研究は幅広く行われている。これは軍事、医療、生産など多岐の分野に渡っており、今後も新たな応用が期待されている。

一方、AR 技術を実際の各分野で実用化するためには、まだ多くの要素技術の改善点が残されている。例えば人間の動きに相互作用性を持たせたような情報提示を行う場合には、人間の動きをリアルタイムで検出する、リアルタイムトラッキング技術が必要となるが、こうした技術は人間の動きが一定範囲内であったり、周囲環境にあらかじめ何らかのマーキングが必要であったりと、まだ限定的な条件下でしか実用レベルに達していない。

新たな AR 技術を利用した支援システムを提案・設計する際、あらかじめそのシステ

ムが有用性を持つかどうかを検証することが重要となるが、このような状況下ではシステムの有用性を検証するには、全ての要素技術が確立するのを待つ必要が生じる。またARには、装着した表示デバイスに参照情報を表示させるものから、半透過型のディスプレイやレーザ光の投影によってユーザの視界に情報を重畳させるものまで、様々な手法が考えられるため、最適な提示手法の選択もあらかじめ検討する必要がある。このためARシステムの研究者や実際に従来手法にARシステムを導入しようとしている設計者から、システム的设计段階でその有用性の検証・効果的な情報提示手法の検討ができる評価指標が求められてきた。

本研究室では昨年度までにARデバイス間のユーザビリティを比較する研究を行なった。そこで本年度の研究では、従来型のマニュアルを用いた組立作業の状況をタスク分析することで得られた認知作業において、基礎的な実験を行ないデータを収集しモデルを立てることで、マニュアルを用いた作業に対してARシステムを導入した際に、どれだけの作業効率が見られるかをシステム設計前に定量的に評価する手法の提案を目的とする。

本論文は、第1章の序論を含め、全6章で構成されている。第2章では、拡張現実感とこれを用いた先行研究について述べたのち、本研究の目的と意義及び、簡単な研究の流れを述べる。第3章では、実際の電気機器を用いた組立作業の被験者実験を行ない、実験映像のタスク分析から得られた認知作業をペトリネットで記述することで、ARシステムの最適な情報提示手法を明らかにすると同時に、組立作業に含まれる認知作業に関する基礎的な実験を提案する。第4章では、第3章で述べた基礎実験の一つである部品探索作業の基礎実験をARシステムとマニュアル、両方のデバイスで行ない、データを収集しモデルを立てる。第5章でも第4章と同様に、第3章で述べた基礎実験の一つである部品配置作業の基礎実験をARシステムとマニュアル、両方のデバイスで行ないデータを収集しモデルを立てる。第6章では本研究の結果をまとめ、提案する評価手法について説明したのち、今後の課題を述べる。

第 2 章 研究の背景と目的

本章ではまず、拡張現実感とは何かについて述べ、その後拡張現実感技術を用いた作業支援システムの現状と課題について述べる。最後に本研究の目的と意義を述べる。

2.1 拡張現実感 (AR) 技術

2.1.1 拡張現実感 (AR) とは

近年、新しいヒューマンマシンインタフェースの手法として現実世界にコンピュータで生成された情報を付加する拡張現実感 (Augmented Reality: AR) が注目されている。人工現実感 (Virtual Reality: VR) が計算機などの人工的な手段を用いて生成された仮想世界のみに着目しているのに対して、AR は現実世界をベースに、仮想情報を加えて現実世界を増強・拡張する。Azuma らは AR とは「現実空間をベースに、空間および空間上に存在するものの持つ意味を拡張して、そこにはないものや情報を付加する技術」と定義している^[1]。VR が計算機などの人工的な手段を用いて生成された仮想世界のみに着目しているのに対して、AR は現実世界をベースに、仮想情報を加えて現実世界を拡張するものである。AR と VR の実世界の関係は図 2.1^[2] に示すようになり、AR は現実世界に近い「実世界志向」^[3] のインタフェースであることが分かる。AR により拡張された情報は、視覚情報に限定されるものではなく、触覚など他の知覚にも同様に適用できる。しかし、既存の AR を利用したシステムの大半は視覚への情報提示を対象としている。

図 2.2 に AR の例を示す。これは、ビルなどの観光情報を、直接、その建物に重ねて表示している。

このように、AR は多岐の分野への応用が可能である。例えば、ユーザに対して機械の保守作業を支援するために操作すべき部品の位置を指示したり、機器の内部構造の情報等を文字・画像によって表示することができる。このように、実世界では不可視な情報を拡張現実としてユーザに提示することによって、ユーザの作業を支援する研究が盛んに行なわれている。

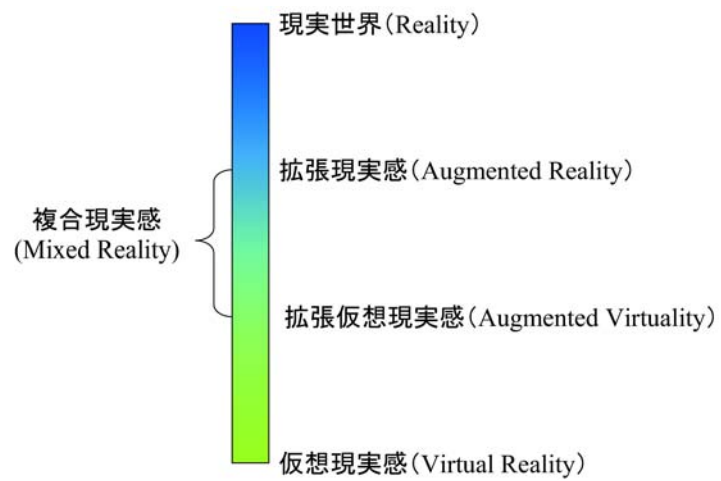


図 2.1: 拡張現実感の位置づけ



図 2.2: 拡張現実感の例

2.1.2 ARによる支援情報提示の特徴

ここではARによる視覚情報の支援方法の特徴について述べる。ARを視覚的に実現する方法としては、ヘッドマウントディスプレイ（Head Mounted Display:HMD）を用いた方法やハンドヘルドディスプレイを用いた方法、プロジェクタを用いた方法^[4]がある。

HMDを用いた方法の例を図2.3に示す。ユーザは光学シースルーやビデオシースルー型のHMDを装着し、HMDの画面を通して現実世界を見る。HMDの画面には、コンピュータで作成した記号や文字で表現された付加情報を表す画像を、現実世界に重畳させるように表示する。この表示により、ユーザは、付加情報が現実世界と重なった状態で見ることができる。HMDを用いた方法では、付加情報を表示するデバイスであるHMDをユーザが装着するため、ユーザの場所に関係なく付加情報を重畳表示することが可能である。また、ARに対し高い没入感が得られるというメリットがある。

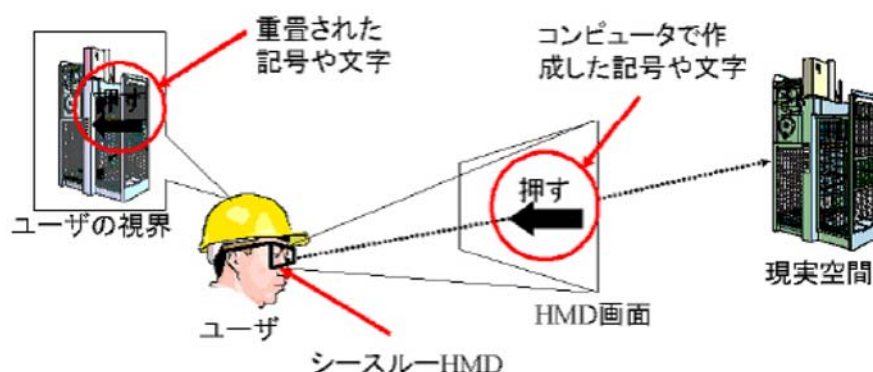


図 2.3: HMD を用いた拡張現実感の実現方法

ハンドヘルド型ディスプレイを用いた方法の例を図2.4に示す。この方法は、小型テレビやPDAなどのデバイスのディスプレイにHMDを用いた場合と同様に現実世界に情報を付加した画像が表示される。HMDの場合と異なり、装着に伴う負担が無いことがメリットであるが、両手が塞がるなどのデメリットもある。

プロジェクタを用いた方法の例を図2.5に示す。現実世界にプロジェクタを用い付加情報を投影することで、ユーザは現実世界に付加情報を重畳した状態で見ることができる。この方法は、ユーザがいる空間全体に対して付加情報を投影できるため、一度に複数のユーザが同じ付加情報を見ることができる。また高精度な重畳表示が可能な

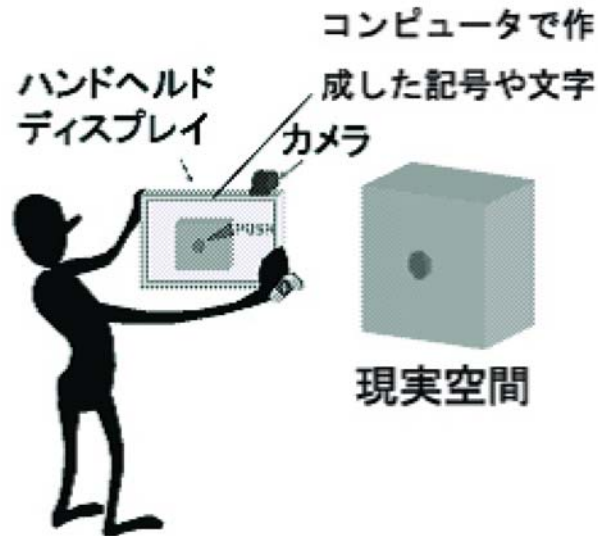


図 2.4: ハンドヘルドディスプレイを用いた拡張現実感の実現方法

こと、ユーザが機器を装着する必要が無いことがメリットとして挙げられるが、作業範囲が投影設備によって限定されるため、歩き回る作業の支援は困難である。

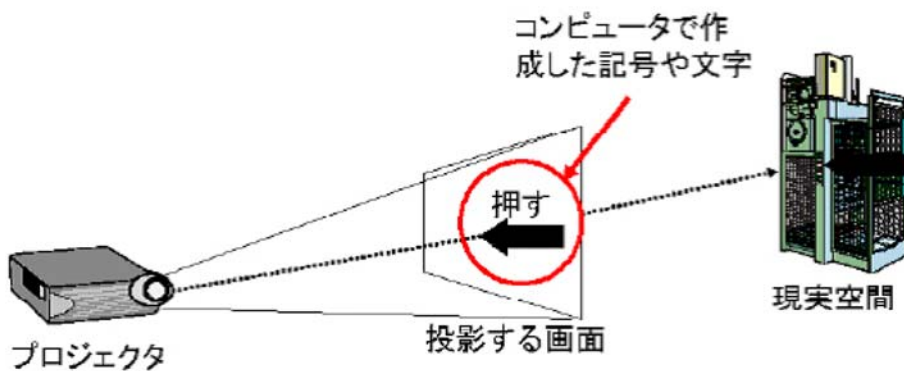


図 2.5: プロジェクタを用いた拡張現実感の実現方法

以上のような方法で実現された拡張現実感には次のような特徴がある。

1. 対象物の直感的理解を促進する

情報を、現実空間内で情報が指し示している対象物の上に重畳表示するため、情報の対象をユーザは直感的に理解することができる。例えば、図 2.6 に示すよ

うに、機器のレバーを上げる操作を行なう際、従来の紙ベースのマニュアルを用いた作業では、マニュアルと実物を見比べて操作の対象となるレバーを特定する必要がある。そのため、ユーザは、視線移動を繰り返す必要があり、作業対象を容易に特定できない。また、レバーを間違える可能性が大きくなってしまう。一方、ARを用いると、現実空間にある操作対象のレバーを矢印や文字で表現した付加情報を重畳表示するため、ユーザは機器を見るだけで操作するレバーを特定することができる。そのため、レバーを特定することが容易であり、間違える可能性が小さくなる。また、作業対象物が同じような色や形のものが並んでいるような場合でも、作業対象を仮想現実像によって目立たせることもできるため、ユーザは迷うことなく直感的に作業対象を見つけることができる。

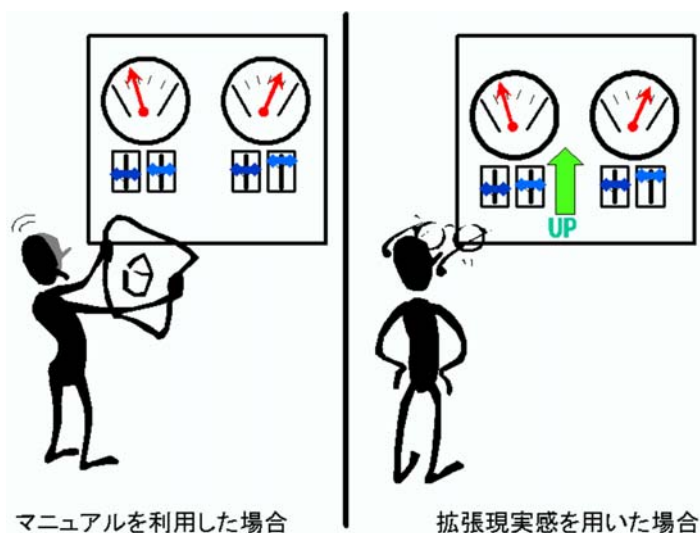


図 2.6: 対象の直感的理解

2. 情報内容の容易な理解を促進する

提示情報は、文字だけでなく絵を用いても表現できるため、ユーザは情報の内容を容易かつ即座に理解できる。例えば、図 2.7 のように、レバーを上げる操作では、文字のみの情報では、ユーザに多くの情報を表示できる反面、ユーザはレバーを動かす方向を全ての文字を読んで理解する必要がある。一方、情報の内容を矢印で表現した場合は、矢印を見たユーザは即座にレバーを移動させる方向を理解することが可能であるが、矢印のみの情報では意味が不明確になる場合があり、情報の本来の意味とユーザの解釈が一致していない可能性もある。そこで、文

字と絵を併用することで、文字の情報を明確化することができる。

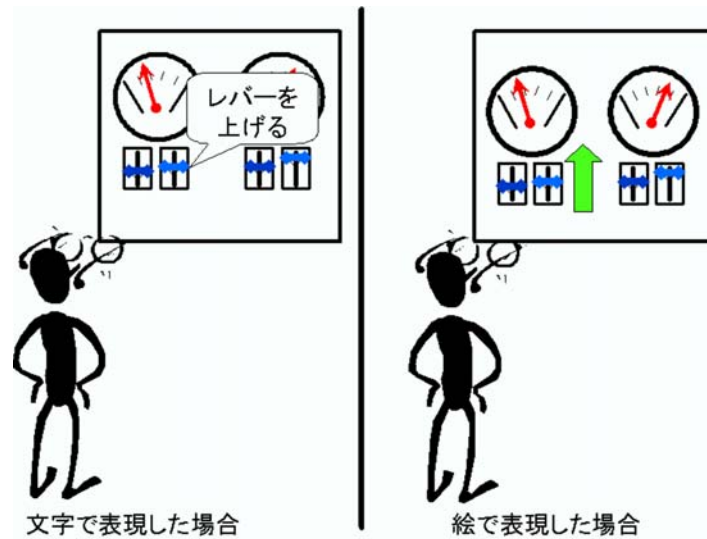


図 2.7: 情報内容の容易な理解

2.2 ARシステムの現状

2.2.1 ARに関する先行研究

ARを用いてユーザを支援するシステム(以下、ARシステム)の研究は、製造業分野や医療分野、軍事分野など様々な分野において行なわれている。

その一つにボーイング社の航空機ワイヤーハーネス作製支援システムが実用化されている^[5]。このシステムは航空機の電子機器配線ワイヤーハーネスの配線を行なう際、図2.8に示すように、配線すべきハーネスの種類と位置を作業員が装着する光学シースルー方式のHMDを用いて基板上に重畳表示することで、作業をナビゲーションするシステムである。

また、レーザプリンタのメンテナンスを目的としたナビゲーションシステムとして図2.9に示すKARMAがある^[6]。これは作業員が目的の作業を行なうにはどのパーツをどのように動かせばよいかを光学シースルー方式のHMDに情報提示するものである。

また本研究室では一昨年度、AR技術とRFIDを用いた原子力プラントにおける系統隔離作業支援システム(Isolation Support System using AR and RFID; ISSAR)の開

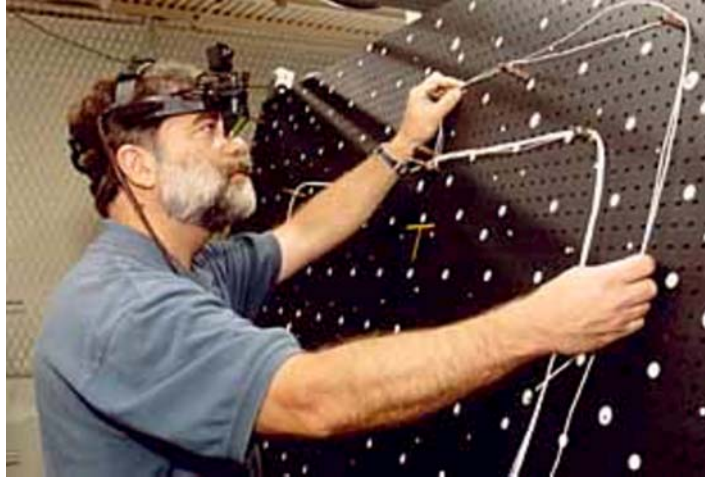


図 2.8: ボーイング社の航空機ワイヤーハーネス作成支援システム

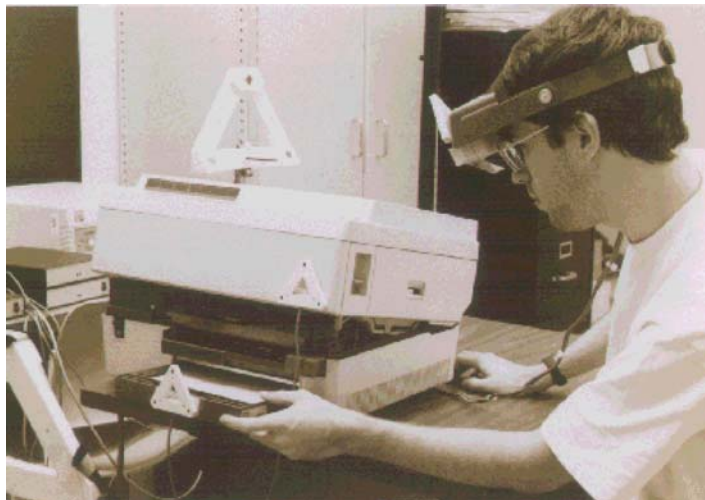


図 2.9: KARMA

発・設計とそのユーザビリティを調べるための被験者実験を行なった^[7]。このシステムは、原子力発電プラントの保守点検における主要な作業の一つである系統隔離作業を対象に、AR技術とRFIDを用いた作業支援システムで、複数あるバルブの中から作業の対象となるバルブを探索する作業をARシステムを用いて支援する機能が核となる。特に、ユーザへの情報提示に様々な形態のデバイスを使用することが考えられる点に着目し、ウェアラブル型及び、ハンドヘルド型の情報提示デバイスを持つ複数種のISSARを設計・試作し、それぞれの情報提示デバイスを用いる場合の作業効率や作業負荷、ユーザビリティなどを計測する被験者実験を行なうことによりISSARの最適なインタフェース形態を調査したものである。

2.2.2 ARシステムの課題と評価方法の必要性

以上でも述べたとおり、AR技術は様々な分野で応用がなされており、従来の手法にARシステムを導入することでの、支援効果の差が認められている。例えば、前項のワイヤーハーネス作成支援システムやKARMAが、作業時間短縮やエラー率低減など、十分な支援効果が得られているのに対して、ISSARでは、ARシステムがマニュアルと比較して有意な結果が得られなかった。また清川らが行なった拡張現実感を用いた対面協調作業支援システム^[8]においても、ARデバイス間の有意差は見られたもののARを用いない場合と比較した結果、有意差は見られなかった。

このようにARを用いた場合でも、現状の技術では作業内容によっては支援効果に差が見られ、またその支援効果を評価するのが困難であるため、実際の現場の作業においては、積極的には導入されておらず、ゲームやアミューズメント施設などのエンターテインメント^[9]の分野で用いられているのが盛んであるのが現状である。

一方、あるシステムのインタフェースを評価する手法として、これまでに一番多く利用されてきたのはプロトコル解析 (protocol analysis)^[10] を含めた広義のユーザテスト (user testing)、或いはユーザビリティテスト (usability testing)^[11] である。この手法は、すでに完成した製品が利用でき、あるいはそのプロトタイプを用いることで、その有用性や問題点を評価する手法である。しかし、この手法は、完成したシステムそのものやそのプロトタイプがないと実施が不可能で、開発プロセスの後半でしか利用できない。このため、予算や時間などを余分にかかる恐れがある。

このような問題を解決するために、開発プロセスの前半においても、機器の操作仕様から、システムを評価する手段としてヒューリスティック評価法^[12] と認知的ウォークスルー手法^[13] がある。これは、評価者が機器の操作仕様や、紙プロトタイプを使い

ながら、その使い勝手を「検査」することにより、その問題点を発見し、改善案を探る手法の総称である。しかしこの手法はシステム設計前に、あくまでもシステムの問題点のみを抽出し、使いやすさ、ユーザビリティを評価する手法であり、作業効率などを定量的に評価する手法ではない。また、どちらの手法も評価をするための専門家の存在が不可欠であり、設計現場でそのまま実践できるものではない。

ARシステムの研究開発を行なう者によって、システムの設計段階でその有用性の検証・効果的な情報提示手法の検討が簡単にできる評価指標が必要である。しかし、実際にこの指標を追求した研究はなくその登場が求められてきた。

2.3 昨年度の研究

ARシステムの評価指標を明らかにする為に昨年度、佐野は、ARシステムを用いたユーザの行動記録からユーザモデリング^[14]を用いたタスク分析を行ない、仮想情報と実世界の視線移動の切り替え動作に注目した。そこで図2.10のように切り替え作業が容易なARデバイスほど作業支援に有意に働くという仮説を立てた。この仮説の下で、ハンドヘルド型のデバイス2種類（タブレットPC・小型液晶テレビ）とHMD型のデバイス1種類（遮蔽型HMD）を用いてバルブ探索という実際の作業を対象にして評価実験を行なったところ、視線の切り替え作業が最も頻繁に行なわれていた遮蔽型HMDであるSCOPOが、最も作業において有意に働き、仮説は証明された^[15]。

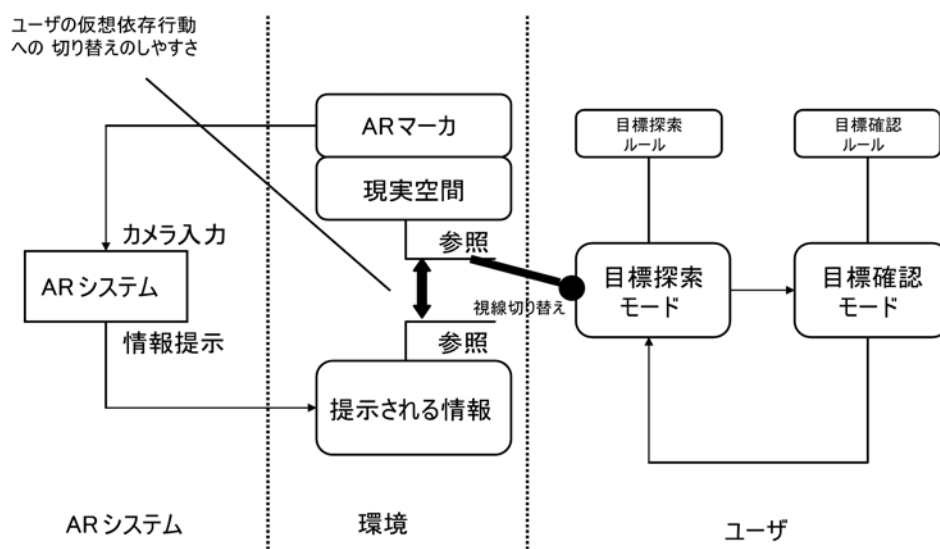


図 2.10: AR デバイスにおける視線切り替え作業

2.4 本年度の研究の目的と意義

昨年度の実験では視線移動の容易さという AR デバイス間の評価基準は明らかになった一方で、最適な AR デバイスと紙ベースのマニュアルを比較した場合、有意な差が得られなかった。ここで AR システムがユーザに与える支援効果について考えると、AR システムは、人が重いものを持ち上げたり運んだりするような実際に体を使う作業（以下、身体作業）の負荷を軽減させるのではなく、人が物を探したり、あるいはマニュアルに記載されている情報を記憶したりするという認知的な作業（以下、認知作業）を支援することが主たるシステムであることが分かる。即ち、作業全体に占める認知作業の割合が多いほど、AR システムが有意であるという予測が立つ。昨年度、更に一昨年度の研究においては、バルブ探索という作業を行なうに当たってバルブ間の移動という身体作業が作業全体を占める割合が多く、また作業自体の記憶負荷が低いことから、AR と紙ベースのマニュアルに有意な差が見られなかったものと推測される。

そこで本研究では、AR デバイス間ではなく、マニュアルを用いた場合と AR を用いた場合の作業についての作業効率を比較することを主眼とする。ここでは、特に基幹系のシステムの保全作業において、未熟な作業員はマニュアルを用いる機会が非常に多い「組立作業」中の記憶や照合といった認知作業に対し、AR を用いた場合、どの程度の認知作業に対して支援効果が得られるかを定量的に評価する手法の提案を目標として研究を進める。そこでまず、組立作業中に占める認知作業の種類を、実験による被験者の行動のタスク分析により明らかにする。そして、明らかになった認知作業ごとの基礎実験を、AR を用いた場合とマニュアルを用いた場合で行ない、基礎的なデータを集める。ここで用いる AR デバイスは、AR の概念を最も具現化できるものとしてビデオシースルー型の HMD である Glasstron を用いる。そして得られたデータを元に、解析を行ない、AR による組立作業の支援効果の定量的評価手法を確立させる。

本研究で提案する手法により、様々な作業に対して AR を導入する際に、AR システムの設計段階でその作業効率の見積もり、得られるメリットとシステム設計コストを予測することが可能となるだけでなく、今後の AR システムの研究の大きな指針となる。

2.5 研究の流れ

ここでは本研究の流れについて簡単に説明する。AR とマニュアルの組立作業における作業効率を定量評価するためには以下の項目を明らかにすることが必須となる。

- (1) 組立作業中に含まれる認知作業の種類
- (2) 組立作業支援システムを設計するに当たっての最適な AR 情報提示手法
- (3) 組立作業中に含まれる認知作業に対してマニュアルを用いた場合に要する時間
- (4) 組立作業に含まれる認知作業に対して AR システムを用いた場合に要する時間

まず(1)に関しては、実際の電気機器を対象とした組立作業の被験者実験を行ない、その実験状況を録画した映像からタスク分析を行ない、含まれる認知作業を明らかにする。次に(2)に関しては、タスク分析により得られた認知作業の一連の流れをペトリネットを用いた記述で視覚的に明らかにし、従来のマニュアルを用いた作業に対し、ARを導入した場合、どのような情報提示方法が最適であるかを検討する。(3)、(4)に関しては、その認知作業に関する基礎的な実験を AR システム、マニュアルの両方のデバイスを用いて行ない、データを収集し明らかにする。最後にそのデータを元に認知作業に関する定量評価手法を提案する。

第 3 章 組立作業のタスク分析

マニュアルを用いた場合の組立作業中に含まれる認知作業を調べ、組み立て作業を支援するための最適な情報提示手法を明らかにするために、実際の電気機器を対象とした組み立て被験者実験(以下、組立作業実験)を行なった。実験映像からタスク分析を行い、認知作業ごとに分類してその作業時間を計測した。本章では、まず、本実験で用いるタスク分析手法について述べる。次いで、組み立て作業実験の環境設計、実験方法を記し、最後に実験結果をタスク分析することで得られた認知作業から、ARを用いた最適な情報提示手法を示し、マニュアルとARシステムにおける認知作業の基礎実験の提案を行なう。

3.1 タスク分析手法

3.1.1 タスク分析の必要性

一般的にタスク分析とは、あるシステムに対するユーザの操作や行動を観察し、記録、分析することによって、システム設計に関する問題点を抽出し、それをユーザとシステムとの両側面から観察し、設計の要求項目や改善項目を明らかにする評価手法である。ユーザにタスクを課し、その作業過程においてユーザの犯すエラーや戸惑い、非効率な操作や不完全な操作を観察することから、作業の問題点とその重要性の度合いが明確になるその解決案の発見は必ずしも容易ではない。時には、一つの問題解決案が新たな問題を引き起こすこともあるが、タスク分析を行なわない設計者は、問題点の存在すら気づかないことが多い。実際のユーザを観察することがヒューマンインタフェースデザインを進めるための第一歩であると同時に、良いシステムを作るための最も有効な手段である。設計するシステムが、既存のシステムに置き換わる新しいものであれば、まず従来のシステムでのタスク分析を十分に行い、その結果を新しい設計仕様に反映させることが有効である。従って本研究で対象としている組立作業を認知的に支援する最適なARシステムの提示方法を明らかにするにはまず、従来のマニュアルを用いた場合のユーザの認知行動を十分にタスク分析する必要がある。

3.1.2 タスク分析の方法と特徴

ここでは、既に様々なシステム設計において利用されているタスク分析の例として、GOMS モデル^[16]を説明する。GOMS モデルとは、ユーザがデバイスやシステムを利用してタスクを遂行するのに持っていなければならない手続き的な知識の表現である。GOMS モデルは表 3.1 に示す、ゴール (G)、オペレータ (O)、メソッド (M)、選択規則 (S) の 4 つの要素を使って、利用者の行動を階層的に記述し分析する。ここで、GOMS モデルを用いて打鍵レベルのオペレータをタスク分析して、個々の実行時間を記述したものを表 3.2 に示す。このタスク分析を元に、あるコンピュータシステムにおいて、4 つのオペレータから構成された「1 枚の紙を出力する」というメソッドにかかる時間を予測したものを表 3.3 に示す。

この結果から「plotograph」というタイプ作業を「p」とすることで 1 枚当たり 2.40 秒の短縮がなされるということが分かる。このようにタスク分析を用いることで、作業そのものを単位タスクに分解することが可能となり、それらを組み合わせることでシステムに要する時間を予測したり、効率的な手順を探ったりすることが出来る。

表 3.1: GOMS モデルの要素の説明

目標 goal	利用者が達成しようとしている目標、必要に応じてサブゴールに分割される 例：文章の編集をしたい
基本動作 operator	利用者が行なう行ため。身体作業のような外的な行ためと認知作業のような内的な行ためがある 例：次のページに進む、編集結果を確認する
目標達成方法 method	目標を達成するための方法であり、一連の基本動作で表現される 例：次のページに進む→次の作業目標を得る
方法の選択規制 selection rule	目標を達成するための複数の方法があるとき、状況に応じて適切なものを選択するための規則 例：1 行移動の方法を使う、文字のある行を検索する方法を使う

表 3.2: キーストロークレベルモデルの操作

オペレータ	内容	時間 (秒)
K	キーまたはボタンを押す	0.3
P	ディスプレイ上の目標をマウスでポイントする	1.1
H	キーボードや他のデバイス上の定位置に手を移動する	0.4
M	心的準備	1.35
$D(n, l)$	全長 lcm の折れ線を n 本の線分によって書く	$0.9n + 0.16l$
$R(t)$	システム応答	t

表 3.3: GOMS モデルによる実行時間予測

plotgraph を実行する		
作業内容	オペレータ	作業時間 (秒)
1. 心的準備	M	1.35
2. Plotgraph とタイプする	9K	2.7
3. スペース文字をタイプする	K	0.3
4.4 桁の数字をタイプする	4K	1.2
5. 心的準備	M	1.35
6. スペース文字をタイプする	K	0.3
7.3 桁の数字をタイプする	3K	0.9
8. 心的準備	M	1.35
9. RETURN をタイプする	K	0.3
10. システム応答	R	5
	合計	14.75

xwd を実行する		
作業内容	オペレータ	作業時間 (秒)
1. 準備思考	M	1.35
2. xwd コマンドをタイプする	12K	3.6
3. RETURN をタイプする	K	0.3
4. システム応答	R	1
	合計	6.25

ウィンドウを選択する		
作業内容	オペレータ	作業時間 (秒)
1. マウスに手を伸ばす	H	0.4
2. マウスポインタでウィンドウを指す	P	1.1
3. マウスボタンをクリックする	K	0.3
4. システム応答	R	6
	合計	7.8

xpr を実行する		
作業内容	オペレータ	作業時間 (秒)
1. 心的準備	M	1.35
2. xpr コマンドをタイプする	24K	7.2
3. RETURN をタイプする	K	0.3
4. システム応答	R	1
	合計	9.85

紙 1 枚出力するのに予測される時間	38.65 秒
--------------------	---------

3.1.3 ペトリネットによるタスクの記述

ここでは本研究で用いるタスク分析手法について述べる。最適な AR システムの情報提示方法を見出すためには、従来手法であるマニュアルを用いた作業をタスク分析することで、認知負荷が最少となるものを明らかにしなければならない。前項の GOMS モデルでは、作業手順がすでに決定している場合には、その単位タスクを列挙することで作業のどの部分を短縮すればどれほど効果が得られるかを明確化することは出来るが、単位タスクの組み合わせから、未知の最適な手順を見つけ出すタスク分析手法としては不向きである。そのためには、マニュアルを用いた認知作業の一連の流れが視覚的に明らかになるようなモデルで記述する必要がある。

そこで、本研究ではペトリネット^[17]を用いたタスクの記述を行なう。ペトリネットは、回路やコンピュータのオペレーティングシステムの設計、および並列で非同期的な振る舞いをするシステムをモデル化するために有用なグラフィックモデルである。これはフローチャートのような静的なダイアグラムと異なり、システムの流れを動的に表現することが可能なモデルである。

ペトリネットについて簡単に説明すると、ペトリネットは図 3.1 のように、4 つの部分からなっている。まず“プレース”と呼ばれる“円”があり、つぎにトランジションと呼ばれる“直線”がある。3 つ目は、トランジションからプレース（あるいはプレースからトランジション）に向かう“アロー”がある。アローはネットにおける流れの方向を示している。矢印の先端は、それが指し示しているところの入力を意味し、矢印の尾はその抜け出しているところからの出力である。4 つ目に、そのアロー上を流れる“トークン”と呼ばれる黒い円がある。トークンは、このダイアグラムの“動的部分”であり、トークンの流れがシステムの流れを示している。トークンは、どのトランジションが発火するかによってプレースからプレースへ動き回る。しかし、トランジションが発火する前は、そのトランジションに接続されている全ての入力プレース（アローがトランジションに向かっているプレース）がトークンを持たなければならない。

本研究では、マニュアルを用いて作業をするユーザの行動を、このペトリネットによるモデルで記述することで、認知作業の様子を視覚的に明らかにし、作業の流れを最短とするルートから最適な AR システムの情報提示手法を見つける。

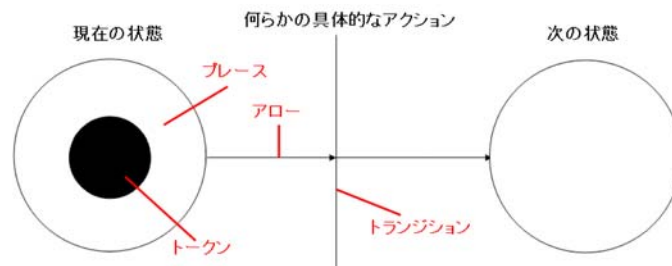


図 3.1: ペトリネットの例

3.2 組立作業タスク分析実験

昨年度、佐野は AR デバイスを用いた認知作業のタスク分析を行なうためにバルブ探索作業の実験映像からユーザがデバイスの画面の情報を参照している行動を抽出し、解析を行なった。本実験では、部品の組立作業を対象として、それに含まれる認知作業を分析するためにマニュアルを参照する行動を抽出する。

3.2.1 実験目的

実際の電気機器を用いて、組み立て作業の被験者実験を行なう。実験の映像を元に、前節で述べたペトリネットによるタスク分析を行い、組立作業を構成している認知作業の種類や数、実行時間を明らかにする。

3.2.2 作業マニュアルの設計

実験では組立作業の対象物として図 3.2 のような大型リアプロジェクト (池上通信機製 pp-85B) の下層内部構造を用いる。大型リアプロジェクトの構造は複雑であり、ゼロから完全に組み立てるには、非常に困難であると考え、ここでは、3 枚のプリント基板 (色制御信号基板、制御信号分配基板、同期信号発生基板) と 3 個のユニット (電源ユニット、制御ユニット、音声ユニット)、50 個のコネクタの取り付け作業に限定した。部品を固定するためのネジは 4mm φ と 5mm φ の 2 種類であり、固定具はプラスチックのマグネットドライバー 1 種類とした。

組立作業には、作業プロセスを明確に示したマニュアルが必要である。ここでは、タスク分析用に設計したマニュアルについて説明する。実際の作業で用いられるマニュアルでは、図 3.3 のように、作業の手順を示した文章と部品などを示した写真などが、同ページに掲載されている場合がある。しかし、このようなマニュアルでは、実験後



図 3.2: 大型リアプロジェクタ

に作業者の行動を記録した映像からタスク分析を行なうに当たって、作業者の視線がどの情報を参照にしているかを見極めるのが困難である。そこで本実験では、作業者がどの作業中にどの情報を参照にしているのかというタスク分析を容易にするために、図 3.4 のようなページ構成のマニュアルを設計した。このように、作業の手順を示した文章と写真を完全に分離することで、作業者は、作業内容と作業図の情報の切り替えをマニュアルのページを交互にめくることで行なわなければならない。このページをめくるという作業を一つの区切りとすることで、実験映像に対してタスク分析を行なう際に、作業者がどの情報を参照しているかを容易に知ることが出来る。

3.2.3 実験方法

大型リアプロジェクタの組立作業実験は、平成 17 年 10 月に京都大学宇治キャンパス計算機室で行なった。被験者は組立作業経験の無い 20～25 歳の大学生および大学院生 5 名である。図 3.5 に実験環境の機器配置図を示す。図 3.5 のように、プリント基板、ユニット、ネジを入れた箱は実験者が大型リアプロジェクターを向いたときの背後に配置した。また、コネクタについては、取り外した状態でリアプロジェクター内にランダムに配置した。

図 3.6 に示すような撮影環境にて、前節のマニュアルを用いて大型リアプロジェクタの下層内部構造の組み立て作業実験を行なった。実験の様子を記録するために固定カ

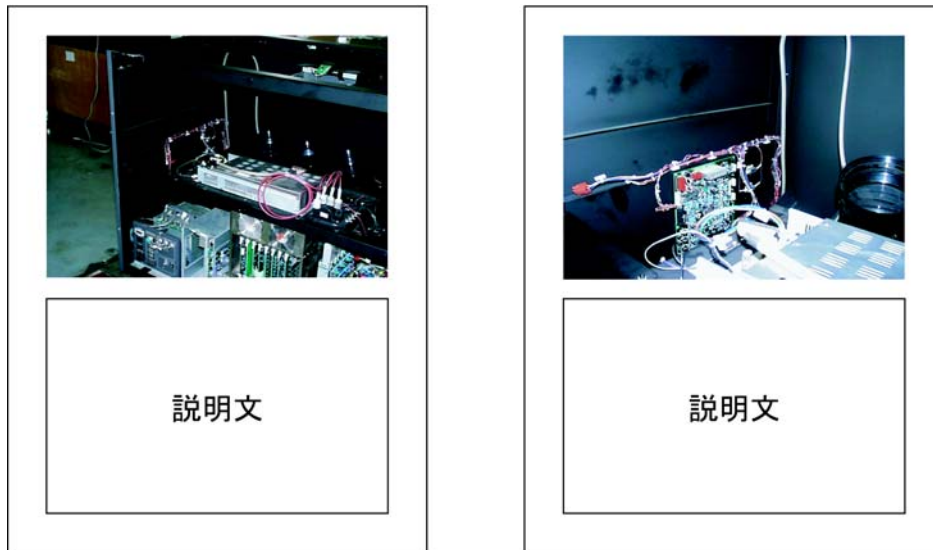


図 3.3: 一般的なマニュアルの構成

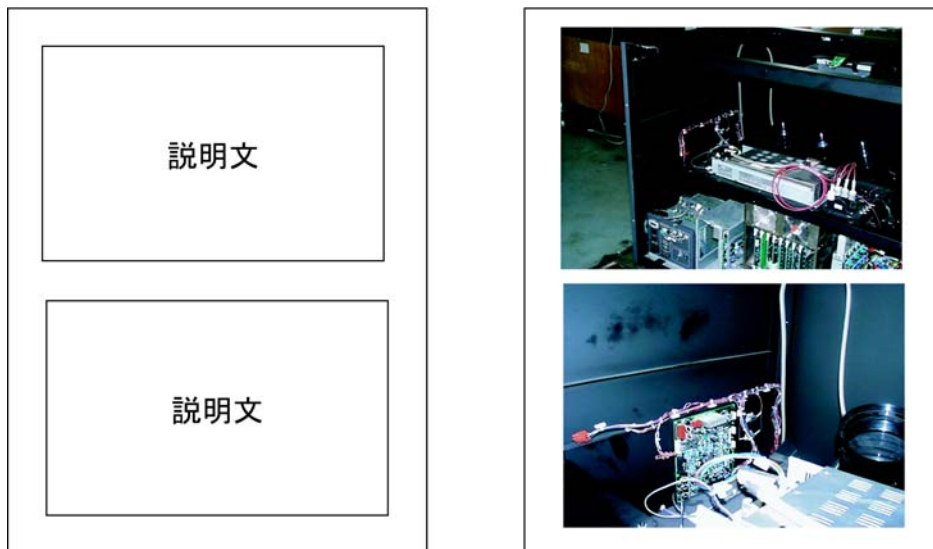


図 3.4: 実験で用いるマニュアルの構成

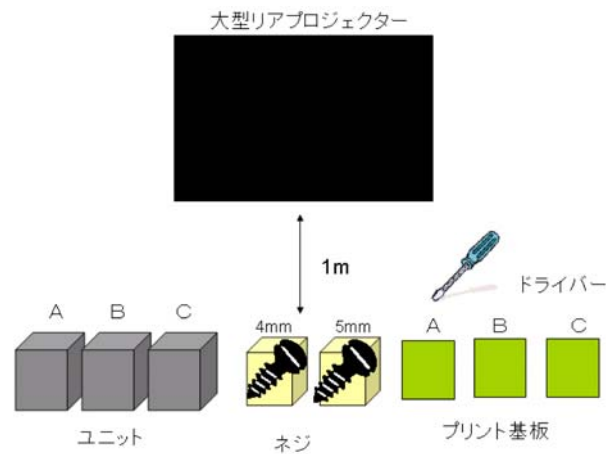


図 3.5: 実験配置図

メラを3台設置し、被験者の行動を撮影した。また、大型リアプロジェクタは構造上、固定カメラの死角が多数存在するため、実験者の1人がハンディビデオカメラを持ち、タスクの最中は被験者の後方から実験の様子を撮影した。

ビデオ機器の接続図を図3.7に示す。固定カメラの映像とハンディビデオカメラの映像の4つの映像を、4画面スプリッタを介して1つの画面に統合し、実験中は、その映像をビデオに録画すると共にテレビに表示した。

3.2.4 実験手順

まず本実験に入る前に、被験者に組み立て作業に慣れてもらうために図3.8のようなモータを使って簡単な練習を行なってもらった。この作業も付録Aのようなマニュアルであり、実験で使うマニュアルと同様の構成にした。

本実験の手順は図3.9のようになる。組み立て作業の流れはマニュアルに従うものとし、一つの部品が取り付けられるまでは次の作業に着手しないように予め、注意をした。組み立て作業は実験者が「はじめ」と発声することにより開始され、最後の部品が取り付け終わった時点で被験者に「終わりました」と発言してもらい終了する。

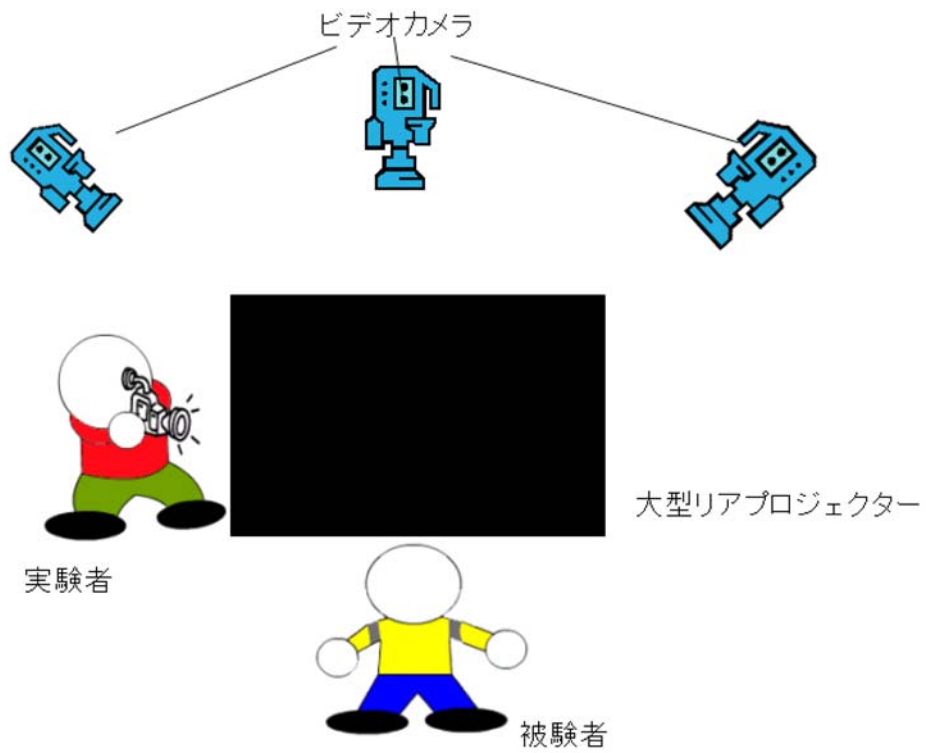


図 3.6: 撮影環境図

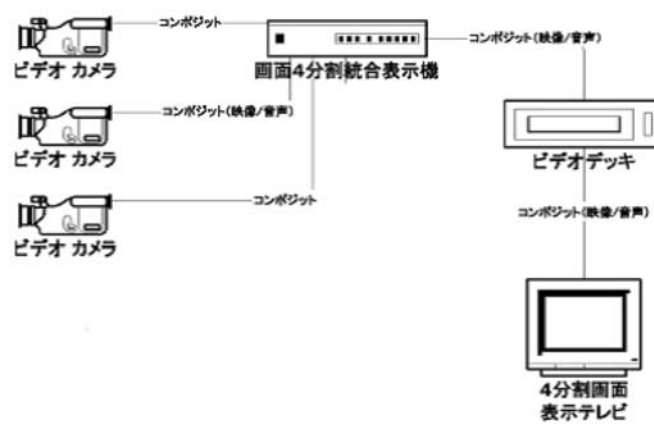


図 3.7: ビデオ機器接続図



図 3.8: 練習に用いたモータの外観

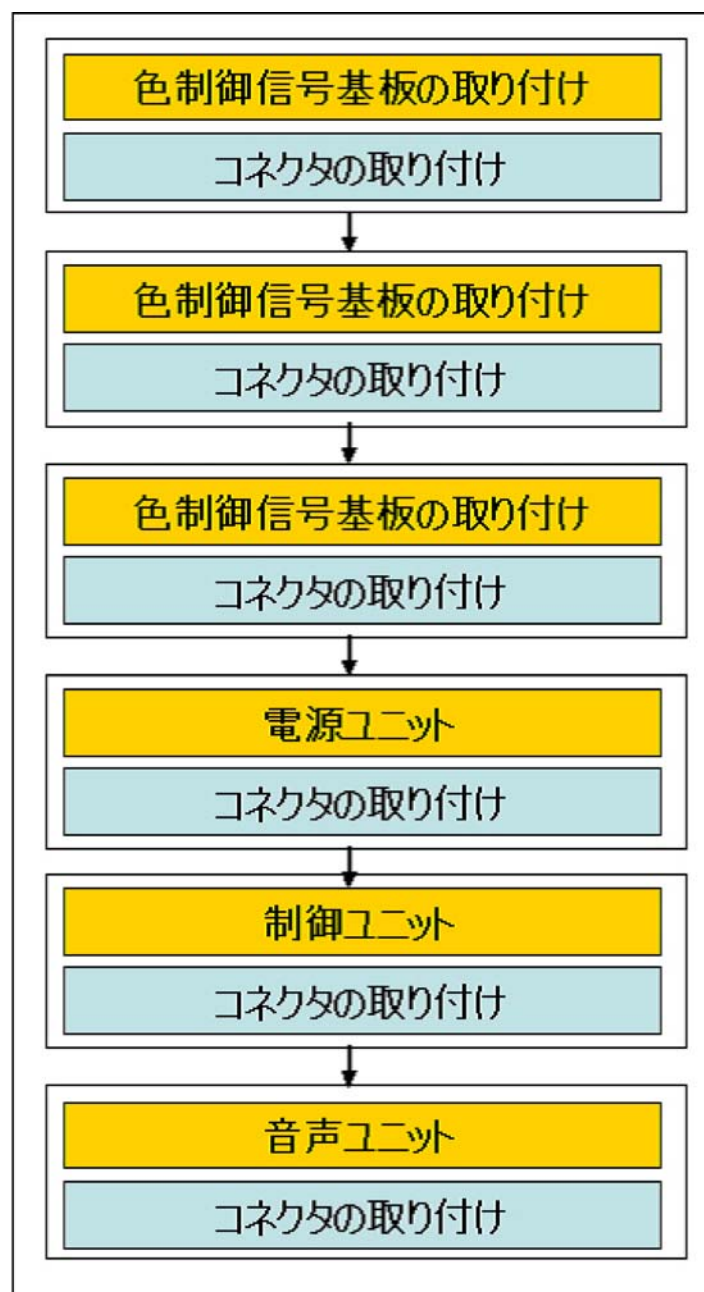


図 3.9: 実験の流れ

3.3 実験結果および考察

実験映像に対してタスク分析を行ない、認知作業を明らかにする。被験者がユニットを選択する、コネクタを取り付けるなどといった身体作業の直前に、マニュアルのどの部分を参照していたかを映像から抽出し、それらを認知作業として記述したところ、以下の6種類に分類されることが分かった。

- (1) 部品の決定
- (2) 部品上のネジ穴の確認
- (3) ネジの決定
- (4) 取り付け位置の決定
- (5) 取り付け位置のネジ穴の確認
- (6) 正確な部品の重ね合わせ

作業全体におけるそれぞれの時間と占有率を表3.4に示す。部品や位置の探索作業においては、マニュアルを参照して目的の部品・位置を探し当てるまでの時間、部品の重ねあわせ作業は、マニュアルを参照して部品を目的の取り付け位置に重ね、実際にドライバーを使って作業に入る直前までの時間をカウントした。この結果、本実験での組立作業における認知作業の作業時間の割合が、38.3%と高い割合であることが示された。また、上記の6種類の認知作業をさらに大きく分類すると

- 部品探索作業
- 部品配置作業

の2種類に分けられる。ここでいう探索作業はマニュアルに記載されている部品を集合の中から一意に決定する認知作業であり、配置作業は、マニュアルに記載されている配置位置と部品の方向を記憶し、正確に重ね合わせる作業である。

3.4 拡張現実感による組立作業支援効果の定量的評価手法の提案

前節の6種類の認知作業をペトリネットで記述し、最短パスを見つけることにより、最適なAR提示手法を明らかにする。視線移動の観点から、作業者が何を見ているかを

表 3.4: 組立作業における認知作業の時間と占有率

被験者 1		
認知作業	作業時間 (秒)	占有率 (%)
部品の決定	813.4	19.6
部品上のネジ穴の確認	57	1.4
ネジの決定	25.8	0.6
取り付け位置の決定	247.9	6
取り付け位置のネジ穴の確認	33.6	0.8
正確な部品の重ね合わせ	175.6	4.2
総認知時間	1353.3	32.6
総作業時間	2803.9	67.4
総試行時間	4157.2	100.0

被験者 2		
認知作業	作業時間 (秒)	占有率 (%)
部品の決定	660.5	17.9
部品上のネジ穴の確認	30.5	0.8
ネジの決定	21	0.6
取り付け位置の決定	308.4	8.4
取り付け位置のネジ穴の確認	25.9	0.7
正確な部品の重ね合わせ	176.9	4.8
総認知時間	1223.2	33.1
総作業時間	2469.5	66.9
総試行時間	3692.7	100.0

被験者 3		
認知作業	作業時間 (秒)	占有率 (%)
部品の決定	1076.4	21
部品上のネジ穴の確認	31.4	0.6
ネジの決定	30.6	0.6
取り付け位置の決定	464.9	9.1
取り付け位置のネジ穴の確認	41.33	0.8
正確な部品の重ね合わせ	235.63	4.6
総認知時間	1880.26	36.7
総作業時間	3237.9	63.3
総試行時間	5118.16	100.0

被験者 4		
認知作業	作業時間 (秒)	占有率 (%)
部品の決定	884.6	22.8
部品上のネジ穴の確認	22.3	0.6
ネジの決定	29.5	0.8
取り付け位置の決定	282.4	7.3
取り付け位置のネジ穴の確認	20.1	0.5
正確な部品の重ね合わせ	186.4	4.8
総認知時間	1425.3	36.8
総作業時間	2448.5	63.2
総試行時間	3873.8	100.0

被験者 5		
認知作業	作業時間 (秒)	占有率 (%)
部品の決定	1295.4	31.4
部品上のネジ穴の確認	35.7	0.9
ネジの決定	18	0.4
取り付け位置の決定	320.5	7.8
取り付け位置のネジ穴の確認	25.6	0.6
正確な部品の重ね合わせ	208.9	5.1
総認知時間	1904.1	46.2
総作業時間	2215.4	53.8
総試行時間	4119.5	100.0

平均		
認知作業	時間 (秒)	占有率 (%)
部品の決定	979.2	23.3
部品上のネジ穴の確認	29.9	0.7
ネジの決定	24.8	0.6
取り付け位置の決定	344.3	8.2
取り付け位置のネジ穴の確認	28.2	0.7
正確な部品の重ね合わせ	201.9	4.8
総認知時間	1608.3	38.3
総作業時間	2592.8	61.7
総試行時間	4201.1	100.0

単位タスクとして記述した。部品を探して、取り付けるまでの作業において、視線移動の切り替えが多い冗長な例を図 3.10 に示す。このように、一つの認知作業ごとに視線を切り替えた場合、取り付け作業までに計 6 回の視線移動の切り替えが起きる。それに対し、部品、或いは配置位置を探索すると同時に、ネジ穴や配置部品の表示などがなされた場合、図 3.11 のように視線移動の切り替えが 3 回となる。従って、視線移動の切り替えを最少とする情報提示が認知作業を支援する AR システムにおいて最適であると考えられる。図 3.12 に例を示す。このように、部品の探索とネジ穴の確認を同時に行なうことが可能となる、。

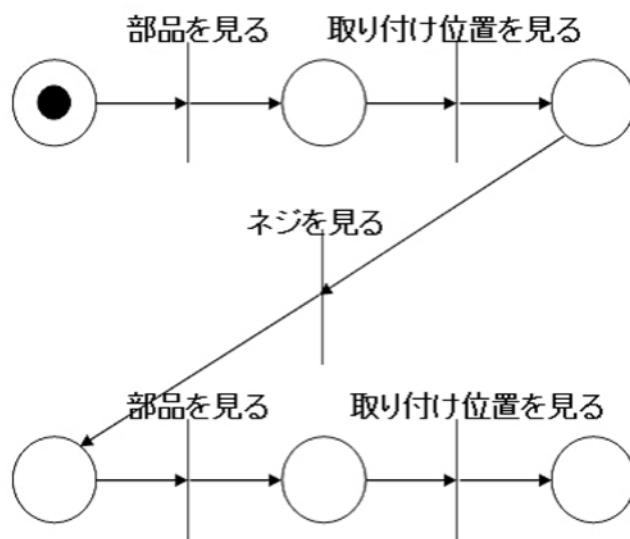


図 3.10: ペトリネットによる組立作業中の視線移動 (冗長な例)

視線移動の観点から、マニュアルを用いて作業を行う場合の認知作業の様子をペトリネットで記述すると、図 3.13 のようになり、最適な AR による情報提示を受けながら、作業を行った場合は図 3.14 のようになると推測される。

このモデルを定量的に評価するために、組立作業中の認知作業である部品の探索作業と部品の配置作業に関する基礎実験を提案する。

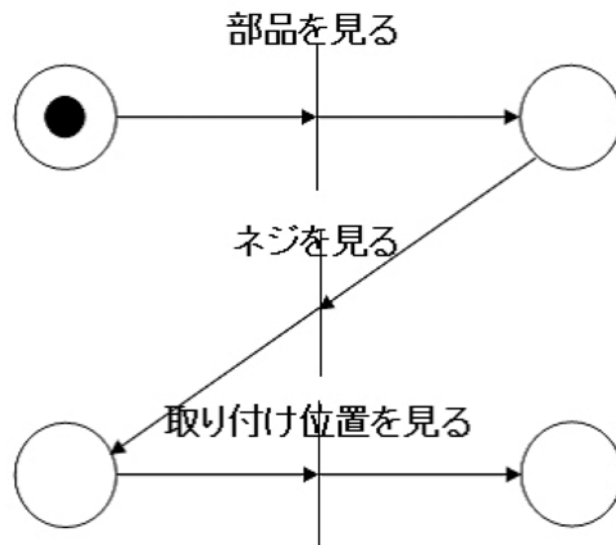


図 3.11: ペトリネットによる組立作業中の視線移動の最短パス

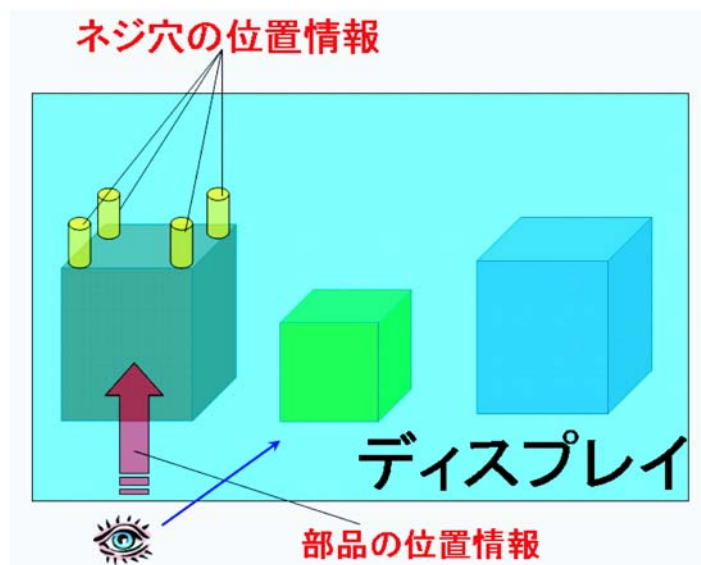


図 3.12: 最適な AR 情報提示方法の例

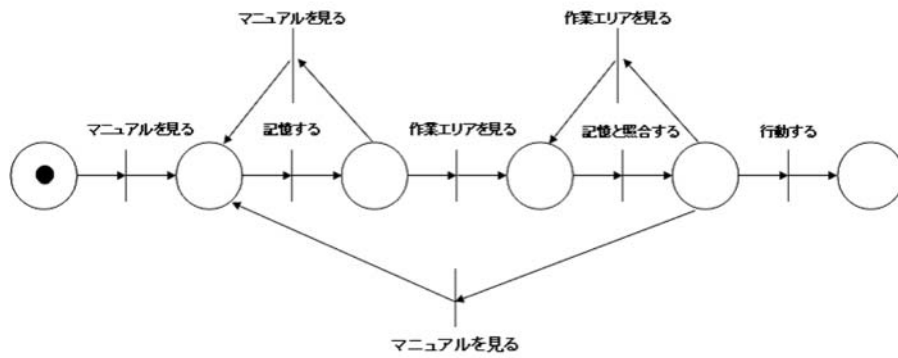


図 3.13: マニュアルを用いた認知作業の様子

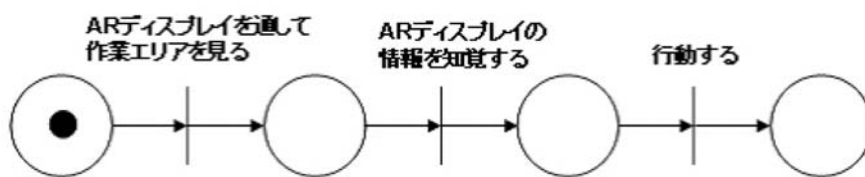


図 3.14: 最適な AR システム下での認知作業の様子

第 4 章 部品探索実験

本章では、第 3 章で示した定量評価手法の提案のために行った基礎実験の一つ、部品探索実験について述べる。

4.1 実験の目的

マニュアルを用いた組立作業において、部品を探索する作業が認知作業として存在することが分かった。ここでは、部品探索作業の被験者実験を AR システム及びマニュアルを用いた場合の両方で行ない、その実験データを比較・解析し、部品探索作業においてマニュアルから AR システムに移行した場合にどの程度、認知作業に要する時間が軽減されるかを定量的に算出するモデルを立てることを目的とする。

4.2 実験方法

4.2.1 実験概要

HMD を用いた AR システムと紙ベースのマニュアルを用いて、部品の探索作業の被験者実験を行なう。探索する部品としては、電気機器の基幹となる部品の一つであるプリント基板を用いるものとし、被験者は机上に配置された複数のプリント基板のうちから、各デバイスで指示された部品を選び出す作業を繰り返す。計測項目は作業が完遂するまでの時間であり、出来るだけ均一なデータを取得するために、6 名の被験者に対してパターンや手順を変えことなく全く同様の作業を行わせた。また、正解は必ず存在するという事も伝えた。

4.2.2 実験条件

マニュアルを用いて組立作業における部品の探索を行なう際に、部品の数と部品の類似度でその作業時間が変化すると考えられる。ここで部品の数と部品の類似度を入力することで、作業時間を算出するようなモデルを立てるには、この 2 つの条件を組

み合わせて実験を行なう必要がある。部品の数については、2、4、6、8、10、12個の計6種類行なうものとする。

部品の類似度については、「類似性が低い」「類似性が高い」の2種類とする。

「類似性が低い」部品に関しては、図4.1のように計17種類用意した。この17種類の部品のグループをここではA~Pと表記する（これを部品グループと呼ぶ）。「類似性が高い」部品に関しては、図4.2のようにベースとなる部品の画像に対して、画像編集ソフトのPhotoshopを用いて画像処理を行ない、抵抗数やチップ数などのわずかの違いを含ませたものを作成した。この類似性の高い部品の表記は、(E1,E2)のようにして同じ部品グループ内での数字で識別するものとする。これらの部品を、付録Bにあるように合計74種類作成した。

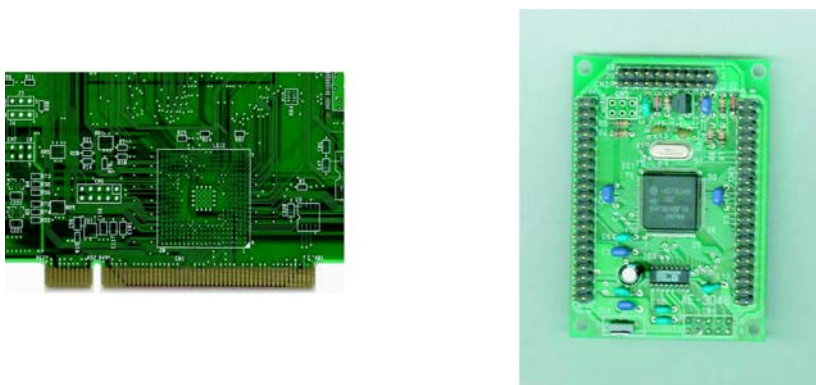


図 4.1: 互いの類似性が低い部品

この2つの条件を組み合わせる実験を行なうが、ここで2条件の組み合わせ方法について例を使って述べる。

まず部品の数を決定する。ここでは8個とする。次に、部品グループの数とその種類を決める。ここでは3グループとし、部品の種類は(F,H,P)とした。そして、それぞれの部品グループ内の部品の数を合計が8個になるように、設定する。ここでは(F1,F2,H1,H2,P1,P2,P3,P4)とした。さらにこの中から正解を設定するが、正解が存在するグループによって、作業時間が変化すると予測されるので、部品グループ内の個数が互いに異なる場合だけ、同じ数の組み合わせで部品の種類だけを変えた別のパターンを作らねばならない。即ち、この例の場合、図4.3に示すように2個の部品グループが2つあって、4個の部品グループが1つあるパターンにおいては2個の方に正解があるパターンと4個の方に正解があるパターンの合計2パターン用意しなくてはならない。なお、後述のようにARシステムはが直接、目的の部品を指示する仕様となっ

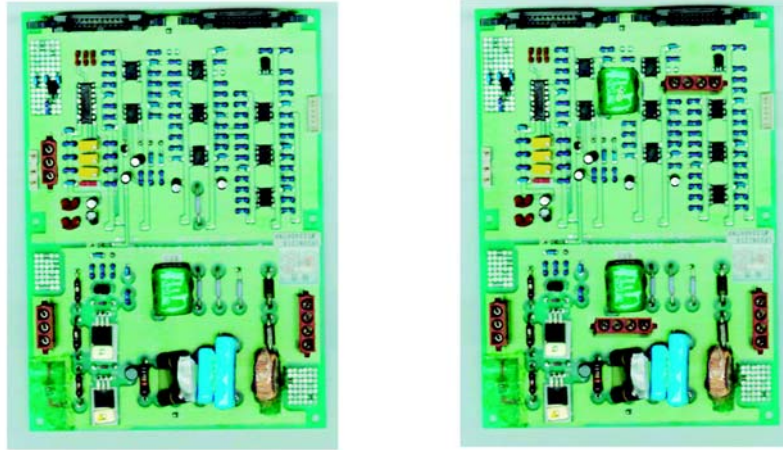


図 4.2: 互いの類似性が高い部品

同じ8個の組み合わせでも正解が含まれるグループの個数によって異なるものとする

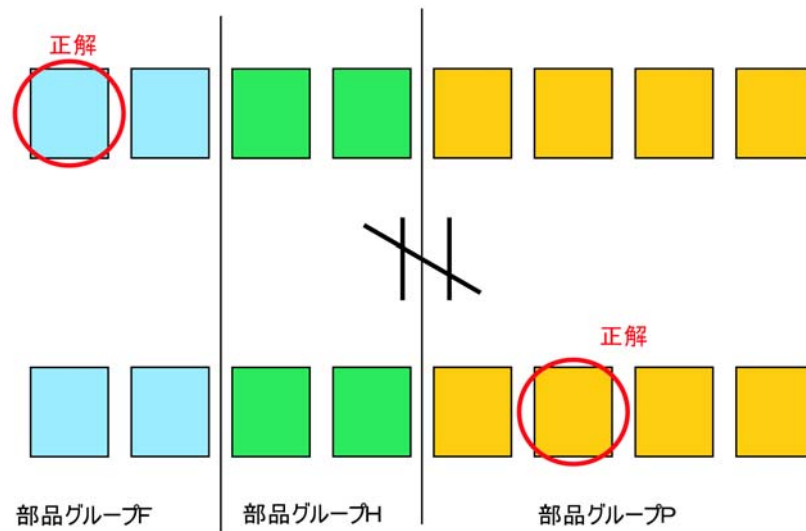


図 4.3: 部品の組み合わせの分類

いるので類似度と個数による組み合わせによる違いは現れないものと考え、上記の条件設定の規則はマニュアルにおいてのみ適応するものとする。

4.2.3 実験で用いる AR システム

4.2.3.1 ARToolKit について

ユーザに情報提示をする際、それを提示する 3 次元座標に整合性を持たせるためには、周囲環境に対するユーザの位置と向きを取得するトラッキング機能が必要となる。このために本システムでは、ARToolKit^[18] を用いてある。

ARToolKit は加藤らが開発した図 4.4 に示す黒色正方形マーカ上に 3 次元仮想オブジェクトを重畳表示する AR システム構築用ライブラリである^{[18][19]}。情報端末と USB カメラ、ディスプレイがあれば ARToolKit を利用して容易に AR システムを構築できる。

ARToolKit ライブラリを用いれば、マーカトラッキング、表示位置計算、描画、キャリブレーションなどを行うことができる。また、図 4.4 に示すような、マーカの登録も容易に行うことができる。図 4.5^[20] に ARToolKit を用いて設計された AR システムの例を示す。ARToolKit の詳細については付録 C で述べる。



図 4.4: ARToolKit のマーカ

4.2.3.2 システム設計

本実験で用いる表示デバイスとしては図 4.6 に示す遮蔽型ビデオシーラー方式の HMD である Glasstron (SONY 製 PLM-A35) を用いる。このデバイスに頭部の動きと連動するようにデバイス上部に CCD カメラ (ワテック製 WAT-230 VIVID) を設置して、カメラから取り込んだ画像を眼前のディスプレイに表示する。

実験に用いるソフトウェアとして、ARToolKit ライブラリを用いて探索システムのソフトウェアを設計する。本システムは、探索対象となるプリント基板に対して、正解を示す黄色の球とその方向を指示する円錐状の CG を HMD ディスプレイを通し

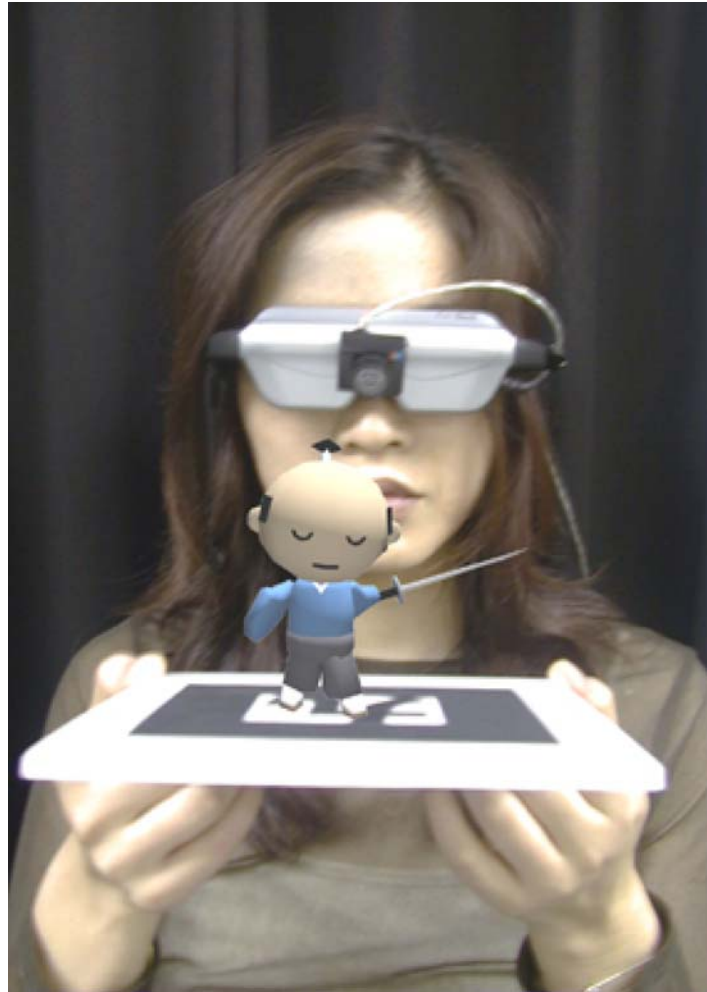


図 4.5: ARToolKit を用いて設計した AR システムの例



図 4.6: Glasstron

て表示する。動作図は図 4.7 のようになる。本システムは Microsoft Windows2000 上で動作する。開発環境には Microsoft Visual C++6.0 を使用した。

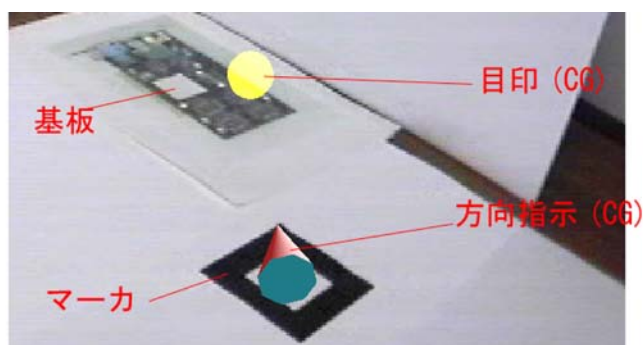


図 4.7: システム動作の様子

本実験は京都大学宇治キャンパスの吉川研究室の計算機室において行なった。実験環境の見取り図は図 4.8 に示す。図 4.9 に示す 1.2m × 1.5m の机の上に図 4.10 のような 4 × 3 の A4 サイズのマス目を割り振った紙を貼り付けた。紙には AR システムで用いるための 8cm × 8cm の正方形マーカを 6 枚配置しており、被験者はこのマーカを Glasstron に取り付けられた CCD カメラで写すことでトラッキングを行い、Glasstron のディスプレイを通して情報を取得する。被験者は着座したまま、作業を行ってもらう。実験者は、ストップウォッチを用いて作業時間の計測をし、実験間にプログラムの入れ替えをする者が 1 人、ビデオカメラを通して実験映像を納めるものが 1 人、計 2 人で行う。また部品の配置の入れ替えは 2 人で行う。

4.2.4 実験手順

本実験は 2005 年 12 月下旬から 2006 年 1 月上旬にかけて行った。被験者 6 名の学生（男性 6 名、平均年齢 22.5 歳、眼鏡使用 2 名）とした。図 4.11 のような流れで実験を進めた。まず、実験開始前に付録 D に示す探索実験の被験者手引き書を配布し被験者に熟読させる。その際、必ず正解を選ぶように被験者に強く念を押した。その後、被験者に Glasstron を装着させ、部品の数が 2,4,6,8,10,12 の順で 6 試行を各 2 回、練習させる。次に AR システムを用いた探索作業実験を表 4.1 のような順番で計 24 試行行う。AR システムでの実験が終了した後は、40 分間の休憩を行う。マニュアルにおいても同様に、事前に部品の数が 2,4,6,8,10,12 の順で 6 試行を計 2 回、練習させた後に、表 4.2 のような順番で計 87 試行行う。マニュアルでの実験が終了したら、簡単なアンケート

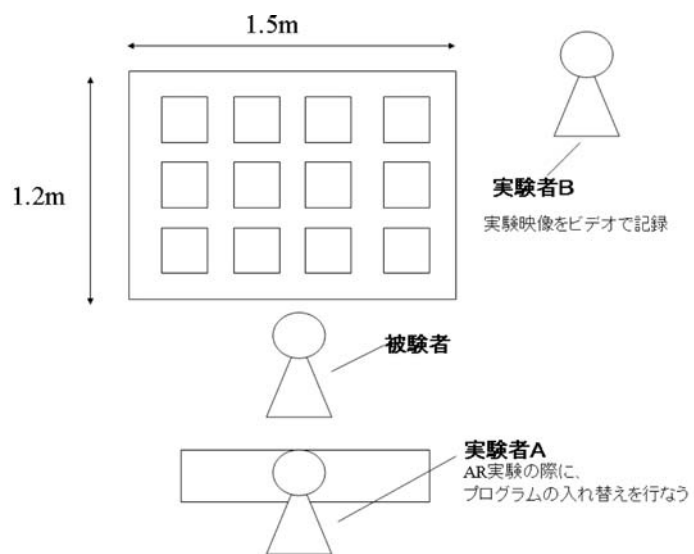


図 4.8: 実験環境見取り図

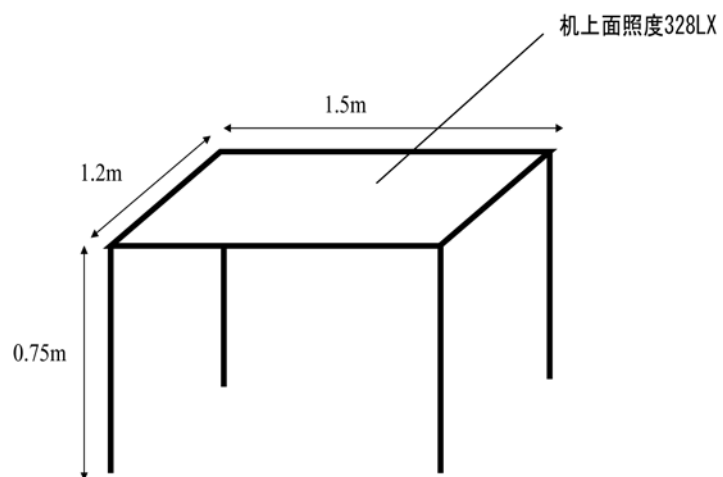


図 4.9: 実験で使用する机

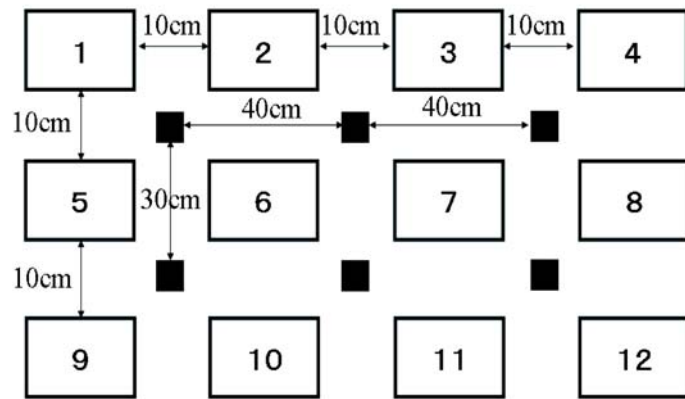


図 4.10: 部品の配置位置

を行い、自由な感想を述べてもらった。

4.3 実験結果

実験の結果、得られたデータを以下の表 4.3~4.6 に示す。表の結果を纏めたものが図 4.12 である。図 4.12 では、マニュアルを用いた作業時間に大きな外れ値があることを考慮して、定量評価を行なう際により均一なデータを導出するために最大時間と最少時間を除いた。なお、全体の作業を通してエラーは認められなかった。

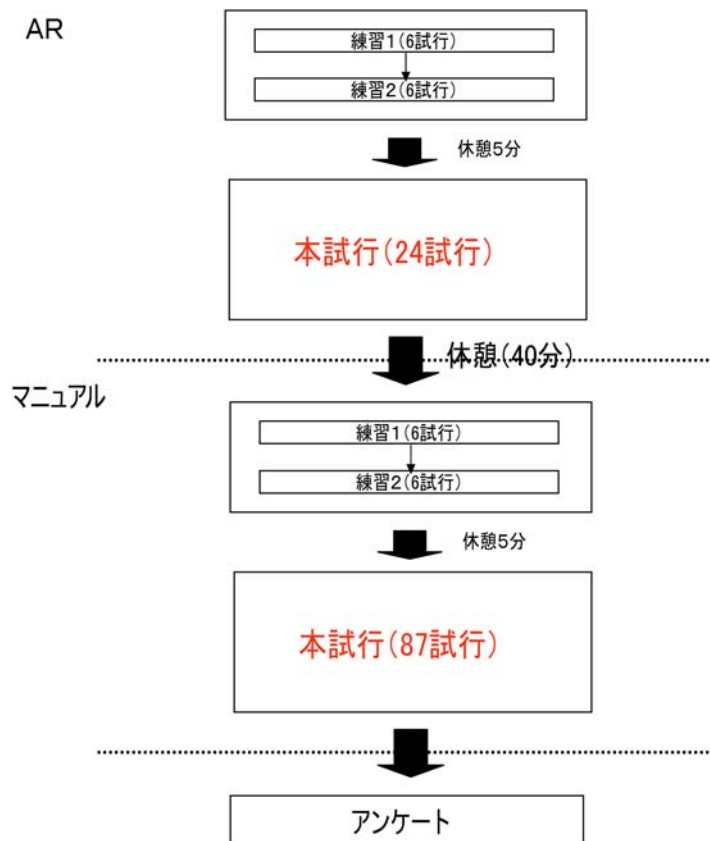


図 4.11: 実験手順

表 4.1: AR システムの実験順序及び正解

順番	組み合わせ	正解
1	L1,L3,L4,L6	L3
2	Q3,Q4,Q5,Q7,Q8,Q9,Q11,Q12	Q5
3	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q1
4	M1,M2,M3,M4,M5,M6	M2
5	P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	P3
6	E1,E2	E2
7	G1,G2	G2
8	O1,O2,O3,O4,O5,O6,O7,8	O3
9	P1,P2,P3,P4,Q5,P6,P7,P8,P9,P10	P2
10	K1,K2,K3,K4	K3
11	L1,L2,L3,L4,L5,L6	L2
12	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q1
13	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q12
14	N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	N4
15	O3,O5,O7,O8	O3
16	Q1,Q2,Q3,Q8,Q9,Q10	Q10
17	K2,K4	K2
18	P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	P7
19	M1,M2,M3,M4,M5,M6	M2
20	P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	P1
21	J1,J2,J3,J4	J3
22	N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	N3
23	H1,H2	H2
24	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q9

表 4.2: マニュアルの実験順序及び正解

順番	組み合わせ	正解
1	D1,E2,F1,G1,K1,P6	E2
2	D1,I1,L6,M3,F1,F2,P5,P6,P7,P8,P9,P10	F2
3	A1,O1,K1,K2,P2,P3,P5,P6,P7,P8,P9,P10	K1
4	I1,I2,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	P4
5	C1,D1,E1,F2,G2,L2,O6,P6,H1,H2,M2,M4	C1
6	B1,J1,J3,J4	J3
7	B1,E2,I3,K1,J2,J4,P2,P6	P2
8	E2,G1,P9,P10,I1,I2,I3,I4,L1,L2,L4,L6	P9
9	D1,I4,J3,M5,O8,Q3,N1,N3,N4,N6,N7,N8	Q3
10	A1,B1,L4,M4,K2,K3,N1,N2,N3,N8	L4
11	E1,E2,F1,F2,L2,L6,O1,O5	O1
12	J2,K4,L3,N8	N8
13	A1,F2,K1,K3,N2,N8,O1,O2,O3,O4,O5,O7	N2
14	C1,D1,F2,L1,O8,Q2,E1,E2,I1,I3,J1,J3	F2
15	C1,Q1,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	C1
16	Q2,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q12	Q12
17	A1,N2,O1,Q8,H1,H2,L1,L2,L3,L4,L5,L6	N2
18	A1,B1,F1,G2,H1,I3,K1,K2,M1,M2,M3,M5	B1
19	E1,E2,F1,F2,J2,J4,K1,K3,N1,N6,Q4,Q8	N6
20	G1,M1,M4,M5	G1
21	E1,F1,M2,N1,G1,G2,I1,I2,O2,O4,O6,O7	E1
22	K3,M6,E1,E2,F1,F2,J1,J2	M6
23	K2,N2,F1,F2,P1,P2,P3,P5,P6,P8,P9,P10	P6
24	B1,D1,G1,J1,I1,I2,I3,I4	I1
25	F1,F2,Q4,Q5,Q6,Q9,Q11,Q12	Q6
26	I1,I2,I3,I4,P4,P6,P9,P10	P9
27	A1,M6,F1,F2,K1,K4,L1,L2,L3,L4,L5,L6	L3
28	M2,M3,N1,N5,L1,L3,L5,L6	N5
29	D1,K4,M1,N1,J2,J3,O1,O5,P1,P6,P8,P10	O5
30	L1,L2,L3,L4,L5,L6,O1,O3,O4,O6,O11,O12	O1
31	A1,H1,K2,K4,N2,N4,N7,N8,P1,P3,P7,P8	P3
32	B1,C1,I3,M1,Q1,Q2,Q3,Q6	M1
33	Q5,Q11,M1,M2,M3,M4,M5,M6	Q5
34	A1,B1,E2,F2,G1,I3,J1,L4,M2,O6	I3
35	C1,D1,M6,N2,O2,O4,Q3,Q4,Q5,Q8,Q10,Q12	Q10
36	C1,H2,P1,P2,J1,J2,J3,J4	P1
37	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q4
38	D1,J4,L2,M2,P4,Q12,N3,N4,O1,O3,O5,O8	N4
39	A1,F2,H2,J2,I1,I2,M2,M3,M4,M6	M3
40	F1,L1,G1,G2,J1,J2,J3,J4	J4
41	J1,J2,J3,J4	J3
42	B1,F1,I1,O3,P2,Q1,L1,L5	L1
43	G1,G2,H1,H2	H2
44	E1,J4,O2,O3,O5,O6,O7,O8	E1

順番	組み合わせ	正解
45	A1,D1,H1,L6,M1,P2,I1,I3,J1,J2,J3,J4	J1
46	P1,P2,P3,P4,P6,P7,P8,P9,P10,P12	P8
47	A1,M6,Q1,Q2,Q3,Q5,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q11
48	L1,L2,L3,L4,L5,L6	L6
49	K3,L2,Q4,Q12	L2
50	B1,E2,I1,M6,N2,O8,H1,H2,J2,J3,K2,K3	J2
51	K3,K4	K3
52	H1,I3,J1,P5,L2,L3,L5,L6,M1,M3,M4,M6	M4
53	I1,I2,I3,I4,O1,O2,O3,O4,O5,O6,O7,O8	O2
54	C1,Q11,K1,K2,K3,K4,P1,P2,P3,P5,P9,P10	Q11
55	B1,J4,M3,P5,F1,F2,I1,I2,I3,I4	F1
56	A1,H2,E1,E2,I1,I2,I3,I4,Q1,Q6,Q8,Q9	A1
57	K1,K2,K3,K4,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	K2
58	E2,G1,H1,I2,I3,M3,P7,Q8,O1,O2,O4,O6	O4
59	A1,E1,F2,G1,H1,I2,M5,N2,P3,Q6,O1,O8	M5
60	L2,M6,Q2,Q3,Q4,Q7,Q9,Q12	Q2
61	A1,F1,J1,J2	J2
62	K1,K4,P9,P10,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	K4
63	B1,J4,F1,F2,O2,O6,L1,L2,L3,L4,L5,L6	J4
64	C1,H1,E1,E2,L5,L6,N2,N7,O3,O5,O7,O8	H1
65	C1,I1,K2,N8,O6,Q7,M1,M2,M3,M4,M5,M6	M6
66	D1,G2	G2
67	F1,K4,L2,O5,I1,I4,J1,J3	K4
68	P2,Q5,K1,K2,K3,K4,O2,O3,O4,O5,O6,O7	O7
69	F2,G1,N8,P5,I1,I2,I3,I4,K1,K2,K3,K4	P5
70	C1,D1,E2,F2,K2,Q2,P9,P10	C1
71	B1,G1,K2,K3,Q2,Q4,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q12	B1
72	A1,B1,E1,F1,I3,J3,O2,Q8,H1,H2,N1,N5	N1
73	A1,H1,I2,I4,N2,N5,O1,O4,P1,P6,P7,P10	P7
74	E1,E2,M1,M3,O3,O4,O5,O7	O3
75	A1,B1,C1,E1,H2,J2,K2,L5,M1,O7,P1,Q6	H2
76	H1,H2,J2,J4,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	N7
77	A1,B1,F1,G1,H2,J1,L4,O7,I1,I2,I3,I4	A1
78	A1,D1,N1,Q1,G1,G2,J2,J3,O2,O3,P5,P10	Q1
79	A1,C1,F1,G2,I1,I4,K2,K3,O3,O8,Q4,Q7	Q7
80	G1,G2,Q1,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q10,Q11,Q12	G2
81	E2,G2,F1,F2,H1,H2,I1,I4	I4
82	B1,E2,F2,G1,J3,K2,N4,P2	G1
83	A1,G1,I3,I4,J2,J3,Q4,Q8,M1,M2,M5,M6	Q8
84	A1,C1,J4,O2,H1,H2,N2,N3,M1,M2,M3,M5	M2
85	A1,H2,I1,I2,I3,I4,Q2,Q5,Q6,Q7,Q9,Q12	I2
86	A1,B1,E1,G2,H1,I3,J4,K4,N8,Q1,P8,P10	P10
87	N3,O4,E1,E2,K1,K2,K3,K4	N3

表 4.3: AR システムを用いた探索実験の結果

部品の個数 (個)	作業時間 (秒)					平均
	被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	
4	3.6	3.7	2.1	3.7	3.5	3.3
8	3.1	3.1	4.5	2.9	2.2	3.2
12	2.0	3.2	2.8	2.2	3.6	2.8
6	2.6	3.5	7.1	3.5	5.1	4.4
10	3.3	3.5	2.9	1.9	2.6	2.9
2	1.9	2.1	3.1	2.8	2.3	2.4
2	1.2	1.8	1.5	2.2	1.4	1.6
8	2.4	1.9	2.1	1.9	3.5	2.4
10	3.1	2.2	2	1.91	2.3	2.3
4	2.2	2.5	2.4	2.7	1.6	2.3
6	1.4	2.5	1.9	3.4	2.4	2.3
12	2.6	1.9	2.4	3.0	2.6	2.5
12	2.6	3.5	2.0	2.7	2.2	2.6
8	2.1	2.2	3.5	2.1	2.5	2.5
4	1.6	3.8	1.8	2.6	3.2	2.6
6	2.0	2.4	3.1	3.0	3.4	2.8
2	4.1	1.5	2.0	1.8	2.5	2.4
10	3.8	3.2	2.5	2.0	1.8	2.7
6	2.6	2.2	3.3	1.8	1.5	2.3
10	2.4	3.2	2.7	4.2	2.5	3.0
4	1.3	3.5	4.2	2.3	1.7	2.6
8	2.3	2.3	1.5	2.2	5.8	2.8
2	1.4	2.8	2.2	2.4	2.2	2.2
12	2.3	5.4	2.0	2.3	4.2	3.3

表 4.4: AR システムを用いた探索実験の結果 (平均)

部品の個数 (個)	作業時間 (秒)	標準偏差
2	2.2	0.6
4	2.7	0.8
6	2.9	1.2
8	2.7	0.9
10	2.7	0.6
12	2.8	0.8

表 4.5: マニュアルを用いた探索実験の結果 (部品数 2~8)

単位:秒

個数	組み合わせ	正解	被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	被験者F	平均
2	D1,G2	G2	2.7	2.0	2.3	2.2	3.6	2.4	2.5
	K3,K4	K3	5.2	3.9	4.3	3.8	6.9	12.2	6.0
4	K3,L2,Q4,Q12	L2	2.5	3.1	3.7	3.5	3.4	2.1	3.1
	J2,K4,L3,N8	N8	3.3	2.6	3.8	4.6	4.9	2.3	3.6
	G1,M1,M4,M5	G1	2.4	3.5	3.3	3.0	3.6	5.8	3.6
	G1,G2,H1,H2	H2	4.2	5.8	14.6	5.3	7.2	8.6	7.6
	A1,F1,J1,J2	J2	6.4	5.8	7.8	9.3	8.8	10.1	8.0
	B1,J1,J3,J4	J3	6.2	4.8	15.3	6.3	7.9	8.2	8.1
	J1,J2,J3,J4	J3	7.8	7.2	12.6	6.3	10.2	19.4	10.6
6	D1,E2,F1,G1,K1,P6	E2	4.8	2.3	4.6	3.2	4.0	2.8	3.6
	L1,L2,L3,L4,L5,L6	L6	32.5	14.8	16.2	26.3	20.3	17.6	21.3
8	B1,C1,I3,M1,Q1,Q2,Q3,Q6	M1	1.9	2.3	2.8	3.1	2.7	2.0	2.5
	E1,J4,O2,O3,O5,O6,O7,O8	E1	2.3	3.7	3.4	1.5	2.9	3.3	2.8
	C1,D1,E2,F2,K2,Q2,P9,P10	C1	3.4	2.9	2.0	3.5	4.1	2.8	3.1
	N3,O4,E1,E2,K1,K2,K3,K4	N3	3.5	2.9	3.1	2.5	4.2	5.0	3.5
	B1,E2,F2,G1,J3,K2,N4,P2	G1	4.4	3.3	4.8	3.2	5.3	4.8	4.3
	K3,M6,E1,E2,F1,F2,J1,J2	M6	3.8	5.9	3.4	4.2	5.3	6.5	4.8
	B1,F1,I1,O3,P2,Q1,L1,L5	L1	6.5	3.9	4.0	2.8	3.7	8.8	4.9
	F1,K4,L2,O5,I1,I4,J1,J3	K4	4.3	5.7	10.2	3.5	3.0	3.8	5.1
	E1,E2,F1,F2,L2,L6,O1,O5	O1	6.5	4.8	5.8	5.5	8.2	3.2	5.7
	E2,G2,F1,F2,H1,H2,I1,I4	I4	5.2	3.9	4.3	3.8	6.9	12.2	6.0
	M2,M3,N1,N5,L1,L3,L5,L6	N5	6.4	10.5	6.1	8.2	9.6	8.4	8.2
	F1,L1,G1,G2,J1,J2,J3,J4	J4	7.8	7.2	12.6	8.0	11.8	9.5	9.5
	B1,E2,I3,K1,J2,J4,P2,P6	P2	10.0	6.3	8.9	6.9	10.9	15.0	9.7
	Q5,Q11,M1,M2,M3,M4,M5,M6	Q5	9.2	7.2	10.2	7.7	7.0	19.3	10.1
	E1,E2,M1,M3,O3,O4,O5,O7	O3	9.5	11.2	13.3	6.5	28.7	12.1	13.6
	I1,I2,I3,I4,P4,P6,P9,P10	P9	12.3	15.2	10.3	12.3	12.3	20.3	13.8
	C1,H2,P1,P2,J1,J2,J3,J4	P1	8.8	19.4	12.8	20.4	9.5	14.7	14.3
	L2,M6,Q2,Q3,Q4,Q7,Q9,Q12	Q2	12.5	14.8	16.2	26.3	20.3	17.6	18.0
	B1,D1,G1,J1,I1,I2,I3,I4	I1	12.6	9.5	17.4	15.8	21.2	41.1	19.6
	F1,F2,Q4,Q5,Q6,Q9,Q11,Q12	Q6	67.3	38.2	36.3	22.1	26.7	47.3	39.6
Q2,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q12	Q12	42.5	40.5	33.3	39.7	26.1	64.2	41.0	

表 4.6: マニュアルを用いた探索実験の結果 (部品数 10~12)

単位:秒									
個数	組み合わせ	正解	被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	被験者F	平均
10	A1,B1,E2,F2,G1,I3,J1,L4,M2,O6	I3	4.9	3.1	4.6	3.2	2.7	3.1	3.6
	P1,P2,P3,P4,P6,P7,P8,P9,P10,P12	P8	63.5	45.7	75.9	67.3	97.6	92.3	73.7
12	A1,B1,F1,G2,H1,I3,K1,K2,M1,M2,M3,M5	B1	3.5	2.4	3.9	4.8	2.9	3.5	3.5
	C1,Q11,K1,K2,K3,K4,P1,P2,P3,P5,P9,P10	Q11	2.5	4.2	3.7	1.8	3.7	5.1	3.5
	E1,F1,M2,N1,G1,G2,I1,I2,O2,O4,O6,O7	E1	2.2	2.4	2.1	6.3	4.3	4.5	3.6
	A1,D1,N1,Q1,G1,G2,J2,J3,O2,O3,P5,P10	Q1	2.3	4.8	3.0	2.4	5.0	4.3	3.6
	A1,N2,O1,Q8,H1,H2,L1,L2,L3,L4,L5,L6	N2	2.6	3.6	4.4	2.6	5.0	3.6	3.6
	C1,Q1,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	C1	2.9	6.4	4.2	3.0	2.5	3.5	3.8
	A1,B1,F1,G1,H2,J1,L4,O7,I1,I2,I3,I4	A1	2.6	4.6	3.2	3.1	3.5	6.3	3.9
	B1,J4,F1,F2,O2,O6,L1,L2,L3,L4,L5,L6	J4	1.8	3.5	3.8	3.7	5.8	4.8	3.9
	A1,H2,E1,E2,I1,I2,I3,I4,Q1,Q6,Q8,Q9	A1	2.2	3.2	3.8	4.0	5.1	6.3	4.1
	D1,I4,J3,M5,O8,Q3,N1,N3,N4,N6,N7,N8	Q3	2.5	3.6	2.7	4.0	6.2	5.8	4.1
	A1,B1,C1,E1,H2,J2,K2,L5,M1,O7,P1,Q6	H2	3.6	4.3	5.2	4.2	3.7	3.8	4.1
	C1,H1,E1,E2,L5,L6,N2,N7,O3,O5,O7,O8	H1	3.2	2.7	4.6	6.1	6.2	3.1	4.3
	F2,G1,N8,P5,I1,I2,I3,I4,K1,K2,K3,K4	P5	2.5	4.6	3.9	10.2	2.5	2.8	4.4
	D1,J4,L2,M2,P4,Q12,N3,N4,O1,O3,O5,O8	N4	4.0	7.7	7.6	4.8	2.2	6.1	5.4
	C1,D1,E1,F2,G2,L2,O6,P6,H1,H2,M2,M4	C1	3.5	5.3	4.8	5.0	4.8	9.3	5.4
	A1,E1,F2,G1,H1,I2,M5,N2,P3,Q6,O1,O8	M5	5.7	4.7	7.8	3.6	6.4	6.1	5.7
	A1,B1,E1,F1,I3,J3,O2,Q8,H1,H2,N1,N5	N1	7.6	5.5	6.8	4.4	5.0	5.5	5.8
	B1,G1,K2,K3,Q2,Q4,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q12	B1	5.0	4.5	4.9	5.8	9.5	6.0	6.0
	A1,C1,F1,G2,I1,I4,K2,K3,O3,O8,Q4,Q7	Q7	6.7	10.5	2.8	4.4	8.5	6.7	6.6
	G1,G2,Q1,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q10,Q11,Q12	G2	5.8	5.7	7.5	8.1	8.3	4.4	6.6
	C1,D1,F2,L1,O8,Q2,E1,E2,I1,I3,J1,J3	F2	7.3	3.5	5.8	13.0	7.8	5.4	7.1
	B1,E2,I1,M6,N2,O8,H1,H2,J2,J3,K2,K3	J2	12.6	7.8	10.3	3.9	8.2	8.5	8.6
	K1,K4,P9,P10,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	K4	5.6	10.5	14.6	5.9	6.6	9.0	8.7
	A1,G1,I3,I4,J2,J3,Q4,Q8,M1,M2,M5,M6	Q8	8.5	6.5	8.1	8.3	11.8	14.5	9.6
	D1,K4,M1,N1,J2,J3,O1,O5,P1,P6,P8,P10	O5	11.4	7.6	7.8	5.3	9.8	19.3	10.2
	A1,F2,K1,K3,N2,N8,O1,O2,O3,O4,O5,O7	N2	7.7	15.1	9.9	11.7	10.2	14.9	11.6
	A1,B1,E1,G2,H1,I3,J4,K4,N8,Q1,P8,P10	P10	11.1	7.9	19.9	9.5	10.5	11.4	11.7
	E1,E2,F1,F2,J2,J4,K1,K3,N1,N6,Q4,Q8	N6	11.2	10.4	15.2	10.4	13.3	17.3	13.0
	E2,G1,P9,P10,I1,I2,I3,I4,L1,L2,L4,L6	P9	14.0	10.9	12.3	11.1	19.4	15.8	13.9
	A1,H1,K2,K4,N2,N4,N7,N8,P1,P3,P7,P8	P3	12.6	8.8	20.9	12.0	17.4	12.7	14.1
	A1,M6,F1,F2,K1,K4,L1,L2,L3,L4,L5,L6	L3	8.1	18.2	25.7	14.6	12.6	19.4	16.4
	A1,O1,K1,K2,P2,P3,P5,P6,P7,P8,P9,P10	K1	18.3	20.5	11.3	14.1	13.7	21.3	16.5
	D1,I1,L6,M3,F1,F2,P5,P6,P7,P8,P9,P10	F2	25.0	11.2	12.9	13.0	18.8	24.8	17.6
	A1,H2,I1,I2,I3,I4,Q2,Q5,Q6,Q7,Q9,Q12	I2	13.5	19.2	17.9	18.0	15.2	24.3	18.0
	A1,H1,I2,I4,N2,N5,O1,O4,P1,P6,P7,P10	P7	22.5	13.8	18.5	24.1	13.3	19.0	18.5
	C1,D1,M6,N2,O2,O4,Q3,Q4,Q5,Q8,Q10,Q12	Q10	14.6	19.3	21.3	19.2	20.1	17.2	18.6
	P2,Q5,K1,K2,K3,K4,O2,O3,O4,O5,O6,O7	O7	15.7	21.5	23.5	10.2	19.3	31.2	20.2
	A1,C1,J4,O2,H1,H2,N2,N3,M1,M2,M3,M5	M2	19.7	18.6	10.8	30.5	24.0	26.1	21.6
	E2,G1,H1,I2,J3,M3,P7,Q8,O1,O2,O4,O6	O4	15.1	20.5	20.8	24.2	30.6	23.7	22.5
	C1,I1,K2,N8,O6,Q7,M1,M2,M3,M4,M5,M6	M6	19.4	20.3	15.3	39.3	22.3	37.6	25.7
	A1,D1,H1,L6,M1,P2,I1,I3,J1,J2,J3,J4	J1	19.1	23.3	19.3	22.1	30.3	45.2	26.6
	H1,I3,J1,P5,L2,L3,L5,L6,M1,M3,M4,M6	M4	20.3	26.2	25.4	22.0	40.9	29.8	27.4
	K1,K2,K3,K4,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	K2	18.1	22.1	27.4	22.6	43.1	47.6	30.2
	L1,L2,L3,L4,L5,L6,O1,O3,O4,O6,O11,O12	O1	30.1	44.3	26.8	36.0	29.0	30.4	32.8
	I1,I2,I3,I4,O1,O2,O3,O4,O5,O6,O7,O8	O2	38.0	41.1	39.2	50.9	30.9	39.0	39.9
	K2,N2,F1,F2,P1,P2,P3,P5,P6,P8,P9,P10	P6	53.1	40.4	47.2	35.3	65.1	59.1	50.0
	I1,I2,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	P4	65.9	51.0	36.7	73.6	48.4	59.9	55.9
H1,H2,J2,J4,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	N7	62.5	71.5	56.3	32.8	76.1	51.9	58.5	
A1,M6,Q1,Q2,Q3,Q5,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q11	69.9	51.5	59.7	76.6	90.4	72.4	70.1	
Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	Q4	93.6	112.4	60.5	72.3	97.5	220.4	109.5	

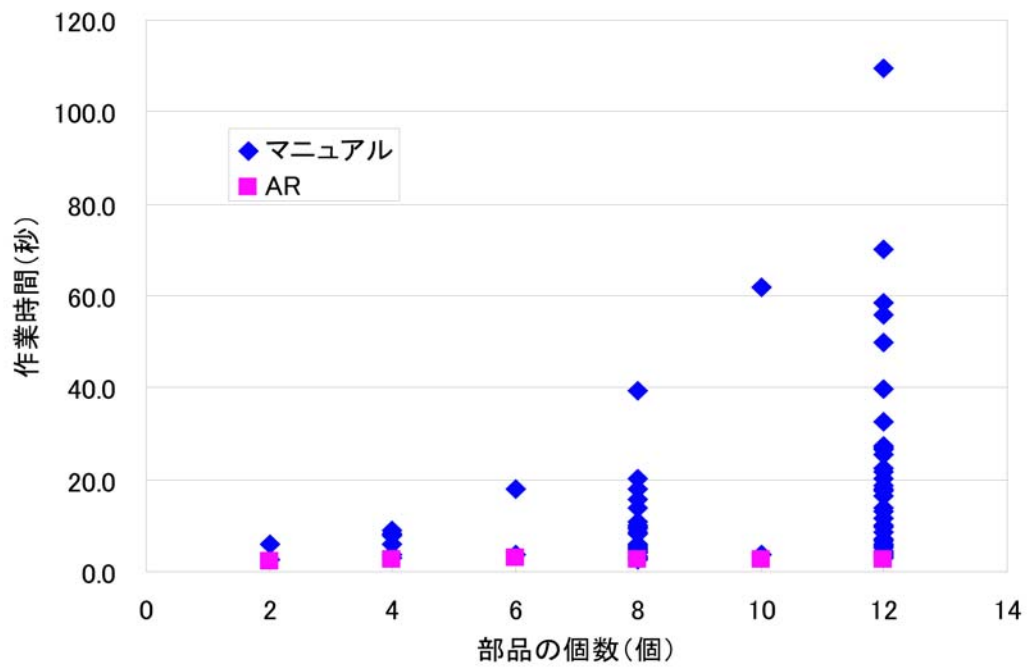


図 4.12: 部品探索実験の結果

4.4 探索作業に関するARシステムとマニュアルの定量評価

4.4.1 実験結果の考察

ARシステムにおける探索作業の結果は図4.13のようになった。ARシステムを用いた探索作業が、眼前のディスプレイに表示された部品の場所を示したCGを知覚し、応答するだけの作業に入れ替わったため、部品の数に関わらずほぼ一定の作業時間を要することが分かる。即ち、ARシステムを用いた場合、第3章での示したように、認知作業のループは無く、1回だけであると考えられるので、この結果を線形近似したところ、以下の式(4.1)のようになった。

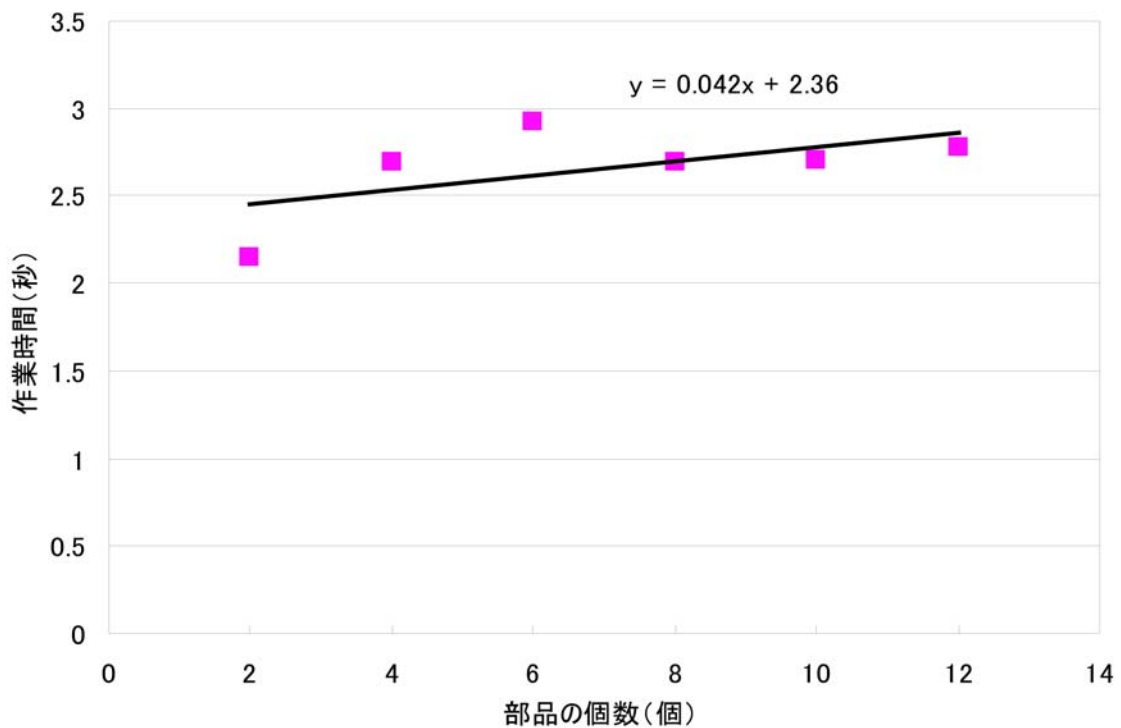


図 4.13: ARシステムを用いた部品探索作業の作業時間

$$y = 0.042x + 2.36 \quad (4.1)$$

次にマニュアルについては、D1,E2,F1,G1,K1,P6のような独立した種類を選択する組み合わせと、J1,J2,J3,J4のような複数の類似した部品の中から選択する組み合わせを

抽出した図 4.14 を示す。前者の場合、部品の数の増加に応じて緩やかな作業時間の上昇が見られたものの、大きな変化は認められなかった。これは、机上に記憶した部品と類似しているものが無いので、部品ごとの比較作業がすばやくかつ同時に行なわれているためと考えられる。即ち、類似性が低い集合から一意に部品を選び出す作業も、認知作業のループは少なく、あったとしても無視できるくらい短いものと考えられるため AR システムの場合と同様に、この結果を線形近似して作業時間の推定式が立てたところ、式 (4.2) が得られた。

$$y = 0.13x + 2.65 \quad (4.2)$$

一方、2 個以上部品が存在する部品グループに正解が含まれている場合は図 4.14 のような単調増加傾向が見られる。ここでマニュアルを用いた探索作業において類似した部品を比較して正解を選び出すというプロセスについて考えると、作業者は部品の 1 対 1 比較を繰り返して、目的の部品に到達していると予想される。ここで探索作業において全ての部品の対一比較すると仮定すればその回数は、部品の個数を n とすると ${}_n C_2$ 回である。即ち、個数の二乗に比例するものと考えられる。そこで 2 次関数で多項式近似したところ図 4.14 のような曲線が得られた。曲線の式は式 (4.3) のようになる。

$$y = 0.78x^2 - 1.49x + 3.56 \quad (4.3)$$

4.4.2 探索作業時間のモデリング

前項の結果を受けて、AR システム、マニュアル、両方の探索作業に要する時間を推定する式をモデリングする。部品の探索作業に要する時間を y 秒、総部品数を x 個とする。まず AR システムを用いた場合の作業時間の推定式は、式 (4.1) より、式 (4.4) となる。

$$y = 0.042x + 2.36 \quad (4.4)$$

次にマニュアルを用いた場合の推定式について述べる。目的となる部品と互いに類似性が強い部品がない場合、即ち、独立した部品を探索する場合、推定式は、式 (4.3) より式 (4.5) のようになる。

$$y = 0.13x + 2.65 \quad (4.5)$$

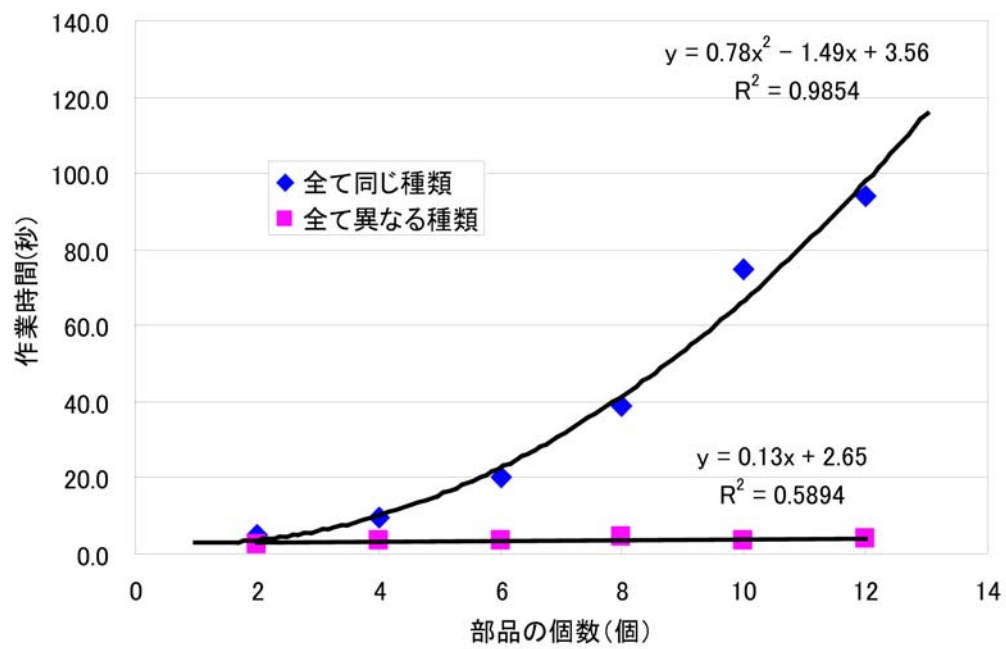


図 4.14: マニュアルを用いた探索作業の作業時間

部品の個数が2個以上で部品グループが1個の場合、即ち、全てが互いに類似性が強い部品の中から探索する場合の推定式は、式(4.3)より式(4.6)となる。

$$y = 0.78x^2 - 1.49x + 3.56 \quad (4.6)$$

さらにここで目的の部品が存在する部品グループにある部品の数を x_1 、部品グループの数を x_2 とすると探索作業が部品の種類の分類を行ない、そののちに類似した部品の比較作業を行なっていると考えると推定式は、式(4.5)及び式(4.6)の和から、式(4.7)が求められる。

$$y = 0.78x_1^2 - 1.49x_1 + 0.13x_2 + 6.20 \quad (4.7)$$

4.4.3 モデルの検証

前項で推定したモデル式を、実験で求められた実測値と比較して検証する。モデルから求められた部品の組み合わせごとの推定値と実測値を示したものが表4.7と表4.8である。この表を元に、推定値と実測値の相関関係を図4.15に示す。この時、相関係数 R^2 は0.889となり、高い相関が認められた。

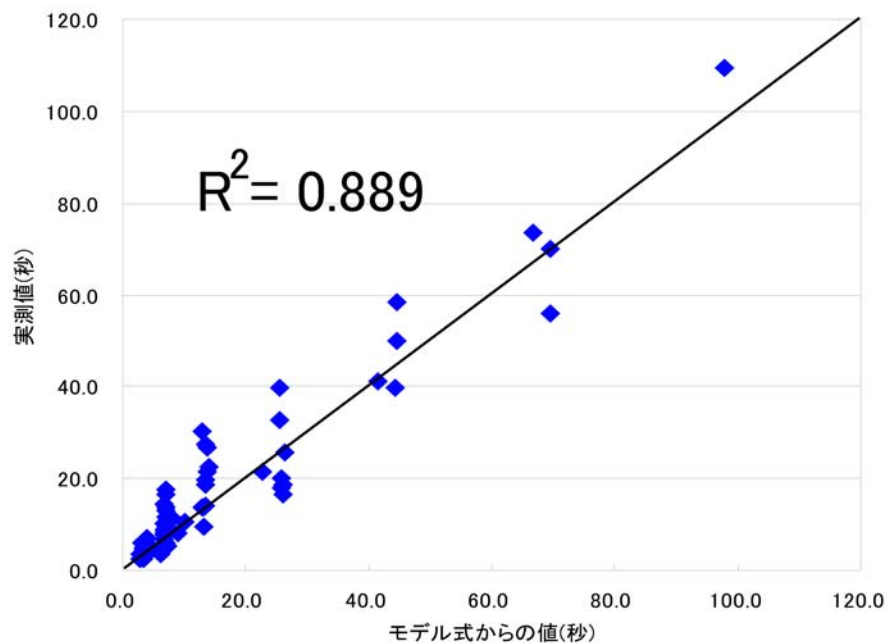


図 4.15: 推定値と実測値の相関

表 4.7: マニュアルを用いた探索作業のモデルと実測値の比較 (部品数 2~10)

個数 (個)	組み合わせ	部品グループ数 (個)	正解グループにある部品数 (個)	推定値 (秒)	実測値 (秒)
2	D1,G2	2	1	2.9	2.5
	K3,K4	1	2	3.7	6.0
4	K3,L2,Q4,Q12	3	1	3.0	3.1
	J2,K4,L3,N8	4	1	3.2	3.6
	G1,M1,M4,M5	2	1	2.9	3.6
	G1,G2,H1,H2	2	2	6.6	7.6
	A1,F1,J1,J2	3	2	6.7	8.0
	B1,J1,J3,J4	2	3	9.0	8.1
	J1,J2,J3,J4	1	4	10.1	10.6
6	D1,E2,F1,G1,K1,P6	6	1	6.3	3.6
	L1,L2,L3,L4,L5,L6	1	6	22.7	21.3
8	B1,C1,I3,M1,Q1,Q2,Q3,Q6	5	1	3.3	2.5
	E1,J4,O2,O3,O5,O6,O7,O8	3	1	3.0	2.8
	C1,D1,E2,F2,K2,Q2,P9,P10	7	1	3.6	3.1
	N3,O4,E1,E2,K1,K2,K3,K4	4	1	3.2	3.5
	B1,E2,F2,G1,J3,K2,N4,P2	8	1	3.7	4.3
	K3,M6,E1,E2,F1,F2,J1,J2	5	1	3.3	4.8
	B1,F1,I1,O3,P2,Q1,L1,L5	6	2	7.1	4.9
	F1,K4,L2,O5,I1,I4,J1,J3	6	1	6.3	5.1
	E1,E2,F1,F2,L2,L6,O1,O5	4	2	6.9	5.7
	E2,G2,F1,F2,H1,H2,I1,I4	5	2	7.0	6.0
	M2,M3,N1,N5,L1,L3,L5,L6	3	2	6.7	8.2
	F1,L1,G1,G2,J1,J2,J3,J4	4	4	13.2	9.5
	B1,E2,I3,K1,J2,J4,P2,P6	6	2	7.1	9.7
	Q5,Q11,M1,M2,M3,M4,M5,M6	2	2	6.6	10.1
	E1,E2,M1,M3,O3,O4,O5,O7	3	4	13.1	13.6
	I1,I2,I3,I4,P4,P6,P9,P10	2	4	13.0	13.8
	C1,H2,P1,P2,J1,J2,J3,J4	3	2	6.7	14.3
	L2,M6,Q2,Q3,Q4,Q7,Q9,Q12	3	6	25.7	18.0
	B1,D1,G1,J1,I1,I2,I3,I4	5	4	13.4	19.6
	F1,F2,Q4,Q5,Q6,Q9,Q11,Q12	2	6	25.6	39.6
Q2,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q12	1	8	41.5	41.0	
10	A1,B1,E2,F2,G1,I3,J1,L4,M2,O6	10	1	4.0	3.6
	P1,P2,P3,P4,P6,P7,P8,P9,P10,P12	1	10	66.6	73.7

表 4.8: マニュアルを用いた探索作業のモデルと実測値の比較 (部品数 12)

個数 (個)	組み合わせ	部品グループ数 (個)	正解グループにある部品数 (個)	理論値 (秒)	実測値 (秒)
12	A1,B1,F1,G2,H1,I3,K1,K2,M1,M2,M3,M5	8	1	3.7	3.5
	C1,Q11,K1,K2,K3,K4,P1,P2,P3,P5,P9,P10	4	1	3.2	3.5
	E1,F1,M2,N1,G1,G2,I1,I2,O2,O4,O6,O7	7	1	3.6	3.6
	A1,D1,N1,Q1,G1,G2,J2,J3,O2,O3,P5,P10	8	1	3.7	3.6
	A1,N2,O1,Q8,H1,H2,L1,L2,L3,L4,L5,L6	6	1	3.5	3.6
	C1,Q1,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	3	1	3.0	3.8
	A1,B1,F1,G1,H2,J1,L4,O7,I1,I2,I3,I4	9	1	3.9	3.9
	B1,J4,F1,F2,O2,O6,L1,L2,L3,L4,L5,L6	5	1	3.3	3.9
	A1,H2,E1,E2,I1,I2,I3,I4,Q1,Q6,Q8,Q9	5	1	3.3	4.1
	D1,I4,J3,M5,O8,Q3,N1,N3,N4,N6,N7,N8	7	1	3.6	4.1
	A1,B1,C1,E1,H2,J2,K2,L5,M1,O7,P1,Q6	12	1	4.3	4.1
	C1,H1,E1,E2,L5,L6,N2,N7,O3,O5,O7,O8	6	1	3.5	4.3
	F2,G1,N8,P5,I1,I2,I3,I4,K1,K2,K3,K4	6	1	3.5	4.4
	D1,J4,L2,M2,P4,Q12,N3,N4,O1,O3,O5,O8	8	2	7.4	5.4
	C1,D1,E1,F2,G2,L2,O6,P6,H1,H2,M2,M4	10	1	4.0	5.4
	A1,E1,F2,G1,H1,I2,M5,N2,P3,Q6,O1,O8	11	1	4.1	5.7
	A1,B1,E1,F1,I3,J3,O2,Q8,H1,H2,N1,N5	10	1	4.0	5.8
	B1,G1,K2,K3,Q2,Q4,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q12	4	1	3.2	6.0
	A1,C1,F1,G2,I1,I4,K2,K3,O3,O8,Q4,Q7	8	1	3.7	6.6
	G1,G2,Q1,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q10,Q11,Q12	2	2	6.6	6.6
	C1,D1,F2,L1,O8,Q2,E1,E2,I1,I3,J1,J3	9	1	3.9	7.1
	B1,E2,I1,M6,N2,O8,H1,H2,J2,J3,K2,K3	9	2	7.6	8.6
	K1,K4,P9,P10,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	3	2	6.7	8.7
	A1,G1,I3,I4,J2,J3,Q4,Q8,M1,M2,M5,M6	6	2	7.1	9.6
	D1,K4,M1,N1,J2,J3,O1,O5,P1,P6,P8,P10	7	2	7.3	10.2
	A1,F2,K1,K3,N2,N8,O1,O2,O3,O4,O5,O7	5	2	7.0	11.6
	A1,B1,E1,G2,H1,I3,J4,K4,N8,Q1,P8,P10	11	2	7.8	11.7
	E1,E2,F1,F2,J2,J4,K1,K3,N1,N6,Q4,Q8	6	2	7.1	13.0
	E2,G1,P9,P10,I1,I2,I3,I4,L1,L2,L4,L6	5	2	7.0	13.9
	A1,H1,K2,K4,N2,N4,N7,N8,P1,P3,P7,P8	5	4	13.4	14.1
	A1,M6,F1,F2,K1,K4,L1,L2,L3,L4,L5,L6	5	6	26.0	16.4
	A1,O1,K1,K2,P2,P3,P5,P6,P7,P8,P9,P10	4	2	6.9	16.5
	D1,I1,L6,M3,F1,F2,P5,P6,P7,P8,P9,P10	6	2	7.1	17.6
	A1,H2,I1,I2,I3,I4,Q2,Q5,Q6,Q7,Q9,Q12	4	6	25.9	18.0
	A1,H1,I2,I4,N2,N5,O1,O4,P1,P6,P7,P10	6	4	13.5	18.5
	C1,D1,M6,N2,O2,O4,Q3,Q4,Q5,Q8,Q10,Q12	6	6	26.1	18.6
	P2,Q5,K1,K2,K3,K4,O2,O3,O4,O5,O6,O7	4	6	25.9	20.2
	A1,C1,J4,O2,H1,H2,N2,N3,M1,M2,M3,M5	7	4	13.7	21.6
	E2,G1,H1,I2,J3,M3,P7,Q8,O1,O2,O4,O6	9	4	13.9	22.5
	C1,I1,K2,N8,O6,Q7,M1,M2,M3,M4,M5,M6	7	6	26.3	25.7
	A1,D1,H1,L6,M1,P2,I1,I3,J1,J2,J3,J4	8	4	13.8	26.6
	H1,I3,J1,P5,L2,L3,L5,L6,M1,M3,M4,M6	6	4	13.5	27.4
	K1,K2,K3,K4,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	2	4	13.0	30.2
	L1,L2,L3,L4,L5,L6,O1,O3,O4,O6,O11,O12	2	6	25.6	32.8
	I1,I2,I3,I4,O1,O2,O3,O4,O5,O6,O7,O8	2	8	44.4	39.9
	K2,N2,F1,F2,P1,P2,P3,P5,P6,P8,P9,P10	4	8	44.7	50.0
	I1,I2,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10	2	10	69.5	55.9
	H1,H2,J2,J4,N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7,N8	3	8	44.5	58.5
	A1,M6,Q1,Q2,Q3,Q5,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	3	10	69.6	70.1
	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9,Q10,Q11,Q12	1	12	97.9	109.5

以上より、部品の探索作業に要する時間を部品の類似性と個数から、マニュアル、ARシステム両方の場合で定量的に推定することが可能となった。

第 5 章 部品配置実験

本章では第 3 章に示した定量評価手法の確立のために行った基礎実験の一つである部品配置実験について述べる。

5.1 実験の目的

マニュアルを用いた組立作業において、部品の方向を正確に把握し、図面通り配置する作業が認知作業として存在することが分かった。ここでは、部品配置作業の被験者実験を AR システム及びマニュアルを用いた場合の両方で行ない、その実験データを比較・解析し、部品配置作業においてマニュアルから AR システムに移行した場合にどの程度、認知作業に要する時間が軽減されるかを定量的に算出するモデルを構築することを目的とする。

5.2 実験方法

5.2.1 実験概要

HMD を用いた AR システムと紙ベースのマニュアルを用いて、部品の配置作業を行なう。配置する部品としてはプリント基板およびハードディスクを模した部品を用いる。計測項目は第 4 章と同様に作業を完遂するまでの時間である。

5.2.2 実験条件

部品の配置という認知作業に要する時間を AR システムとマニュアルの定量比較するに当たっての実験条件を設定する。作業者がマニュアルを参照して部品を配置する際に、部品がどの方向を向いているかの情報を正確に取得する必要がある。この取り付け方向の自由度は部品によって異なる。たとえばプリント基板のような部品ではコネクタなどがある上面を裏にして貼り付けるというケースはほとんどない。また部品の縦横長からも自由度が制限されている。こういった部品の自由度ごとに、部品を配置する作業時間が変化すると予想される。部品の自由度を入力することで、配置作業

の時間を算出するようなモデルを立てるには、部品が与えられた際に生じる自由度をパラメータとして変化させ、ARシステム、マニュアルの両方で評価する実験が必要となる。ここでは図 5.1~5.5 のような 5 種類の部品を用いた配置実験を行なう。部品のそれぞれの自由度について簡単に説明する。

部品 A：縦 8cm 横 16cm の長方形のプリント基板を模している。上面に実際の抵抗やコンデンサを配置しており、下面が表に来ることはない。回転角は 180 度のみとして 2 自由度とした。

部品 B：縦 8cm 横 16cm の長方形のハードディスクを模している。上下どちらを表に向けることも可能である。回転角は 180 度のみとして 4 自由度とした。

部品 C：縦 8cm 横 8cm の正方形のプリント基板を模している。上面に実際の抵抗やコンデンサを配置しており、下面が表に来ることはない。回転角は 90 度のみとして 4 自由度とした。

部品 D：縦 8cm 横 8cm の正方形のハードディスクを模している。上下どちらを表に向けることも可能である。回転角は 90 度のみとして 8 自由度とした。

部品 E：高さ 8cm 縦 8cm 横 16cm の立体のハードディスクを模している。正方形の面が取り付け面にくることはなく、回転角は 90 度のみとして 8 自由度とした。

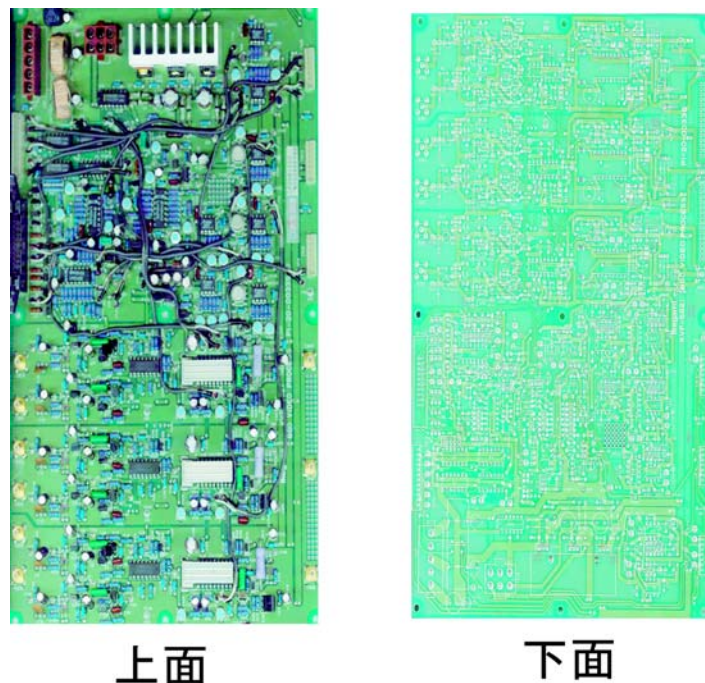


図 5.1: 部品 A の外観

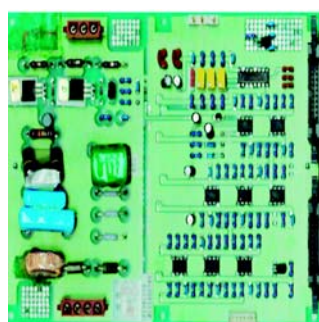


上面

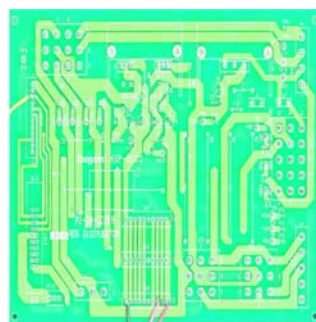


下面

図 5.2: 部品Bの外観

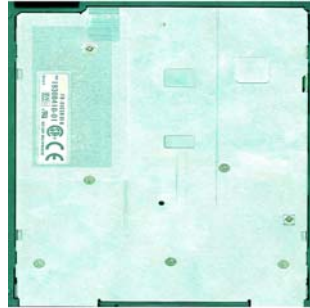


上面



下面

図 5.3: 部品Cの外観



上面



下面

図 5.4: 部品Dの外観



図 5.5: 部品Eの外観

5.2.3 実験で用いる AR システム

AR 情報の表示デバイスとして第 4 章と同様に上部に CCD カメラを取り付けた遮蔽型 HMD である Glasstron を用いる。

実験に用いるソフトウェアとして、ARToolKit ライブラリを使用したソフトウェアを構成した。図 5.6 のようにマス目の取り付けるべき位置に、方向まで正確に示した部品の CG を HMD ディスプレイを通して表示する。本システムは、Microsoft Windows2000 上で動作する。開発環境には Microsoft Visual C++6.0 を使用した。

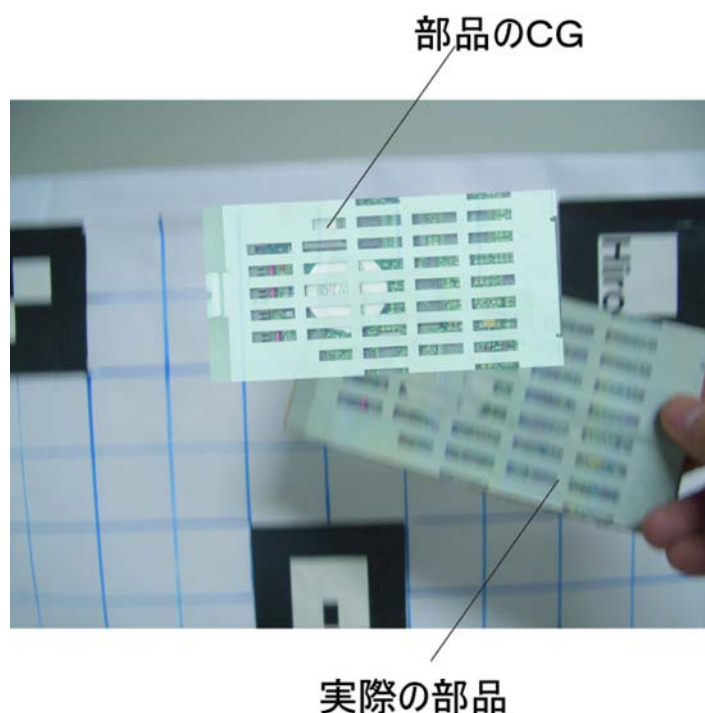


図 5.6: システムの動作状況

5.2.4 実験環境

本実験は、京都大学宇治キャンパスの吉川研究室の計算機室において行う。図 5.7 に実験環境の見取り図を示す。図 5.7 のように、一辺 40cm の正方形の鉄板に紙を貼り付けたものを前方面、底面、左側面と組み立て、そこに図 5.8 に示すような 8cm × 8cm の正方形のマーカと 4cm × 4cm のマス目が 80 個描かれたポスターを配置する。このポスターは取り外しできるようになっており、前方面、底面、左側面と 3 箇所で行う際に、正確に貼り替えるようにしている。被験者は着座したまま、作業を行ってもら

う。実験者は、ストップウォッチを持って作業時間を計測するほか、ARシステムを用いた作業におけるデスクトップPCでのプログラムの入れ替えや、ポスターの貼り替え作業を行う。

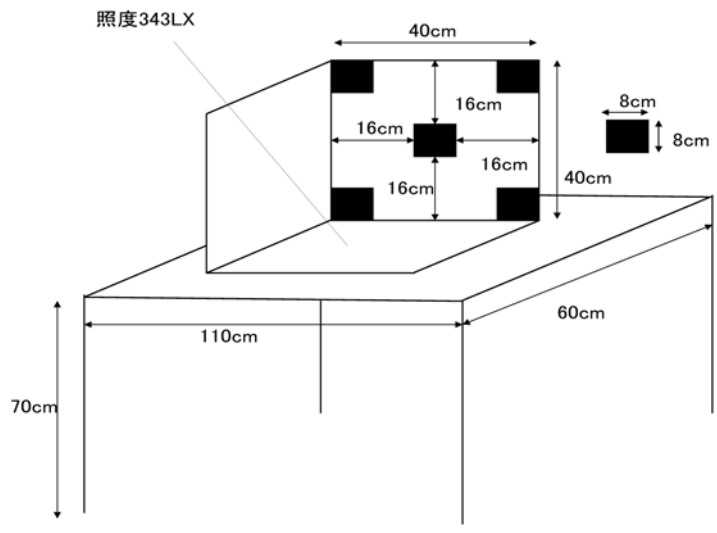


図 5.7: 実験環境

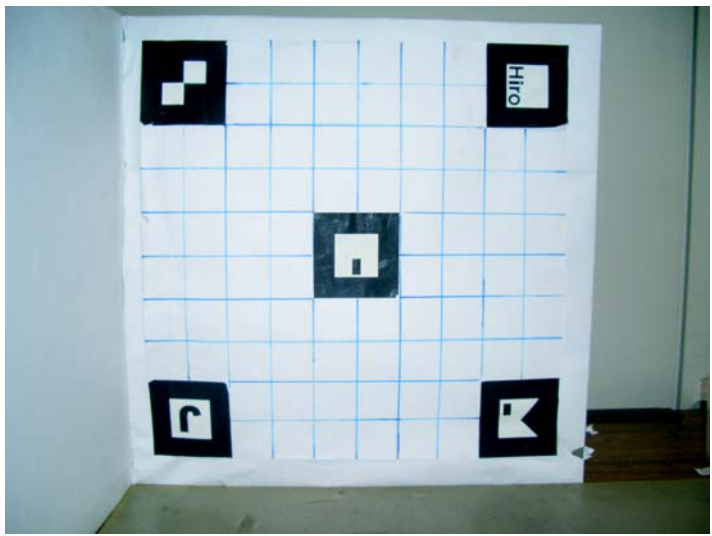


図 5.8: ポスター正面図

5.2.5 実験手順

実験の大きな流れは図 5.9 に示す通りグループ A とグループ B の 2 パターン用意した。これは、マニュアルと AR システムを用いて配置作業を行なうに当たって、作業に慣れが生じないことを確認するためである。グループ A はまず、Glasstron を用いた AR システムの作業の練習を 15 試行 (前方面、底面、左側面各 1 回ずつ 5 種類の部品) 行ってもらい、その後、マニュアルを用いた作業を同様に 15 試行行ってもらう。その後、10 分の休憩を挟み、本実験に入る。練習と同様に AR システムの配置実験を行った後に、マニュアルを用いた配置実験を行う。実験の細かい流れは図 5.10 に示すようになっており、部品 A、部品 B、部品 C、部品 D、部品 E を順番に行い、部品毎に底面、前方面、側面の順で 2 試行ずつ計 30 試行×2 (AR システムとマニュアル) の 60 試行の配置作業を行う。グループ B は以上の作業をの順番を AR システムとマニュアルを逆にして行う。すなわちマニュアルで練習を行ったのちに AR システムで練習を行い、休憩を挟み、マニュアルで配置実験をしたのちに AR システムで配置実験を行う。

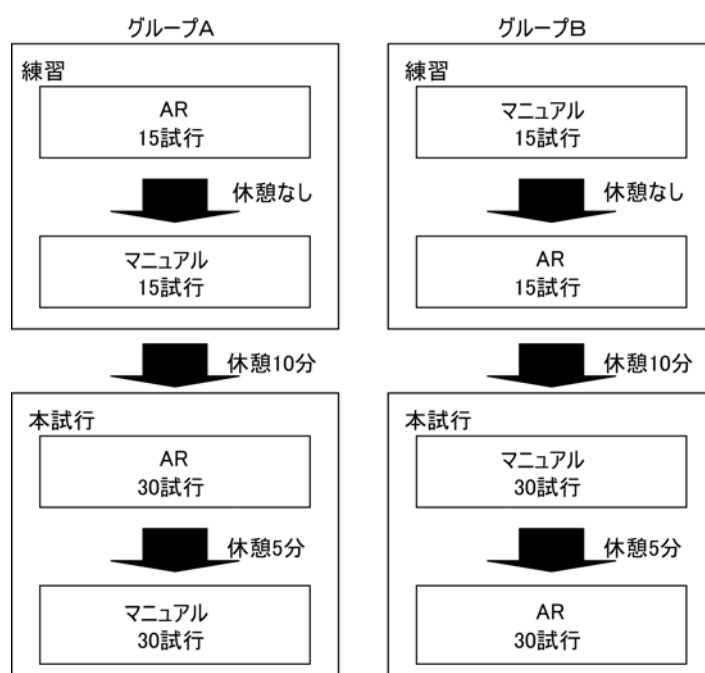


図 5.9: 実験手順その 1

本実験は 2006 年 1 月 28 日 (土)、29 日 (日) の計 2 日かけて行った。被験者 6 名の学生 (男性 6 名、平均年齢 22.3 歳、眼鏡使用 1 名) とした。AR システムを用いた作業の様子は図 5.11 のようになり、マニュアルを用いた作業の様子は図 5.12 のように

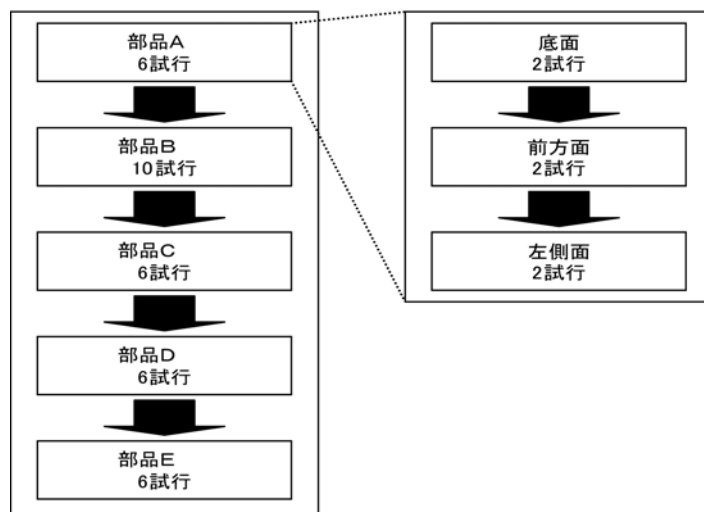


図 5.10: 実験手順その 2

なった。



図 5.11: AR システムを用いた作業状況

5.3 実験結果

実験の結果、得られたデータを以下の表 5.1～5.4 に示す。全ての作業を通じて、配置の間違ひは無かった。なおグループ A の被験者が A～C でグループ B の被験者が D～F である。表 5.1、表 5.2 はそれぞれ各被験者のマニュアルを用いた場合の作業時間



図 5.12: マニュアルを用いた作業状況

と AR システムを用いた場合の作業時間の集計を示し、グループごとの平均作業時間を表 5.3 に示す。表 5.4 は、各部品の平均作業時間を示している。各被験者の AR システム、マニュアルの両方での配置作業時間を示したグラフを図 5.13 に、グループごとの作業時間を示したグラフを図 5.14、図 5.15 に示し、全体の平均値を図 5.16 に示す。また、ここでマニュアルの場合においては各部品につき、6 試行×5 の 30 試行の平均を抽出したが、AR システムの場合は、カメラの精度や誤認識などで大幅な遅延が見られた場合があったので、各部品の作業時間のうち最大値を除去した。

表 5.1: マニュアルを用いた配置実験の結果

部品	位置	作業時間 (秒)						平均
		被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	被験者F	
部品A	底面	5.8	3.5	4.6	3.5	3.9	4.3	4.5
		3.7	4.3	5.3	5.0	5.3	4.8	
	前面	5.9	5.3	4.5	5.2	3.7	4.0	4.5
		5.0	3.3	3.9	4.2	4.8	4.1	
	左側面	4.2	4.9	4.4	4.1	4.3	4.1	4.6
		4.7	5.0	5.1	5.0	5.0	4.5	
部品B	底面	5.8	4.2	4.9	5.2	3.5	4.6	4.6
		4.3	6.0	4.3	3.9	4.7	4.3	
	前面	4.1	4.6	4.8	4.6	4.7	4.0	4.6
		4.8	5.1	5.3	4.8	4.2	4.5	
	左側面	4.3	4.3	5.1	5.6	4.7	3.6	4.6
		4.8	4.8	4.7	4.1	4.6	4.8	
部品C	底面	3.8	5.4	6.0	4.6	5.7	5.3	4.7
		4.1	4.2	4.3	4.2	4.8	3.6	
	前面	5.1	4.2	5.3	3.6	3.9	4.9	4.7
		4.3	4.8	4.8	5.3	5.4	4.8	
	左側面	5.0	5.0	4.7	3.9	4.3	3.5	4.3
		4.1	4.2	4.2	3.4	4.7	4.7	
部品D	底面	4.4	6.8	4.2	4.4	4.2	4.2	4.5
		4.5	4.5	3.3	4.5	5.4	4.1	
	前面	5.7	3.5	5.2	4.3	5.9	4.2	5.2
		5.5	5.0	5.5	6.3	5.0	6.0	
	左側面	4.8	4.2	4.9	3.2	4.3	4.2	4.1
		3.3	4.6	3.8	3.4	4.5	4.6	
部品E	底面	9.2	7.5	6.5	10.5	8.5	6.1	8.0
		7.8	8.6	5.8	8.9	9.6	7.5	
	前面	9.5	6.9	7.0	5.4	7.4	8.5	7.2
		6.3	8.3	5.5	5.7	7.8	7.6	
	左側面	7.6	5.8	7.8	9.8	7.9	7.7	6.9
		6.2	4.9	5.1	7.3	6.3	6.9	

表 5.2: ARシステムを用いた配置実験の結果

部品	位置	作業時間 (秒)						平均
		被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	被験者F	
部品A	底面	2.4	4.3	2.2	8.4	2.2	2.4	3.3
		1.7	2.5	4.7	2.4	4.4	2.2	
	前面	4.6	4.5	2.8	3.4	4.6	3.5	3.7
		2.1	3.5	5.3	2.2	2.5	5.2	
	左側面	2.2	2.2	4.9	3.5	2.6	2.4	3.1
		2.5	3.2	2.3	6.3	2.8	2.3	
部品B	底面	2.5	2.7	2.5	2.4	3.7	3.5	3.6
		2.9	4.2	2.5	2.6	4.1	9.4	
	前面	1.6	3.3	7.9	3.7	2.4	2.7	3.7
		2.0	8.3	3.5	2.7	2.8	3.5	
	左側面	1.4	2.6	2.0	2.4	2.4	2.5	2.4
		2.8	3.5	2.7	1.9	3.0	1.8	
部品C	底面	2.6	5.3	4.1	2.2	7.8	2.0	3.4
		2.8	2.6	4.2	2.5	2.5	2.6	
	前面	3.2	3.5	3.2	2.4	8.5	2.2	3.9
		1.7	10.1	2.8	2.4	2.3	4.5	
	左側面	3.4	4.1	5.3	2.7	2.6	3.3	3.1
		2.5	3.2	2.6	1.7	2.3	2.7	
部品D	底面	3.1	4.7	12.3	3.5	3.3	4.3	4.2
		2.4	3.3	3.5	2.6	4.5	2.9	
	前面	3.5	4.6	2.4	2.3	2.5	2.2	2.9
		2.1	3.0	2.9	3.5	3.0	3.0	
	左側面	2.1	4.2	3.2	2.6	2.6	3.9	3.8
		3.0	4.3	4.5	5.6	2.7	7.5	
部品E	底面	5.7	7.0	6.8	6.9	7.7	4.7	6.5
		6.4	7.2	6.8	7.5	6.2	5.3	
	前面	6.8	4.6	5.9	6.0	8.3	4.9	8.6
		13.9	7.9	25.3	6.4	6.7	6.3	
	左側面	7.1	6.2	6.3	6.5	5.9	5.2	7.2
		10.5	6.4	10.5	7.7	9.4	5.1	

表 5.3: グループごとの作業時間

単位 (秒)

部品	グループ A		グループ B	
	マニュアル	AR システム	マニュアル	AR システム
部品 A	4.61	3.22	4.44	3.52
部品 B	4.79	3.27	4.48	3.19
部品 C	4.64	3.42	4.47	3.48
部品 D	4.65	3.53	4.58	3.77
部品 E	7.01	8.40	7.75	6.48

表 5.4: 部品ごとの作業時間の平均値

部品	マニュアル (秒)	AR システム (秒)
部品 A	4.5	3.0
部品 B	4.6	2.7
部品 C	4.6	3.0
部品 D	4.6	3.1
部品 E	7.4	6.6

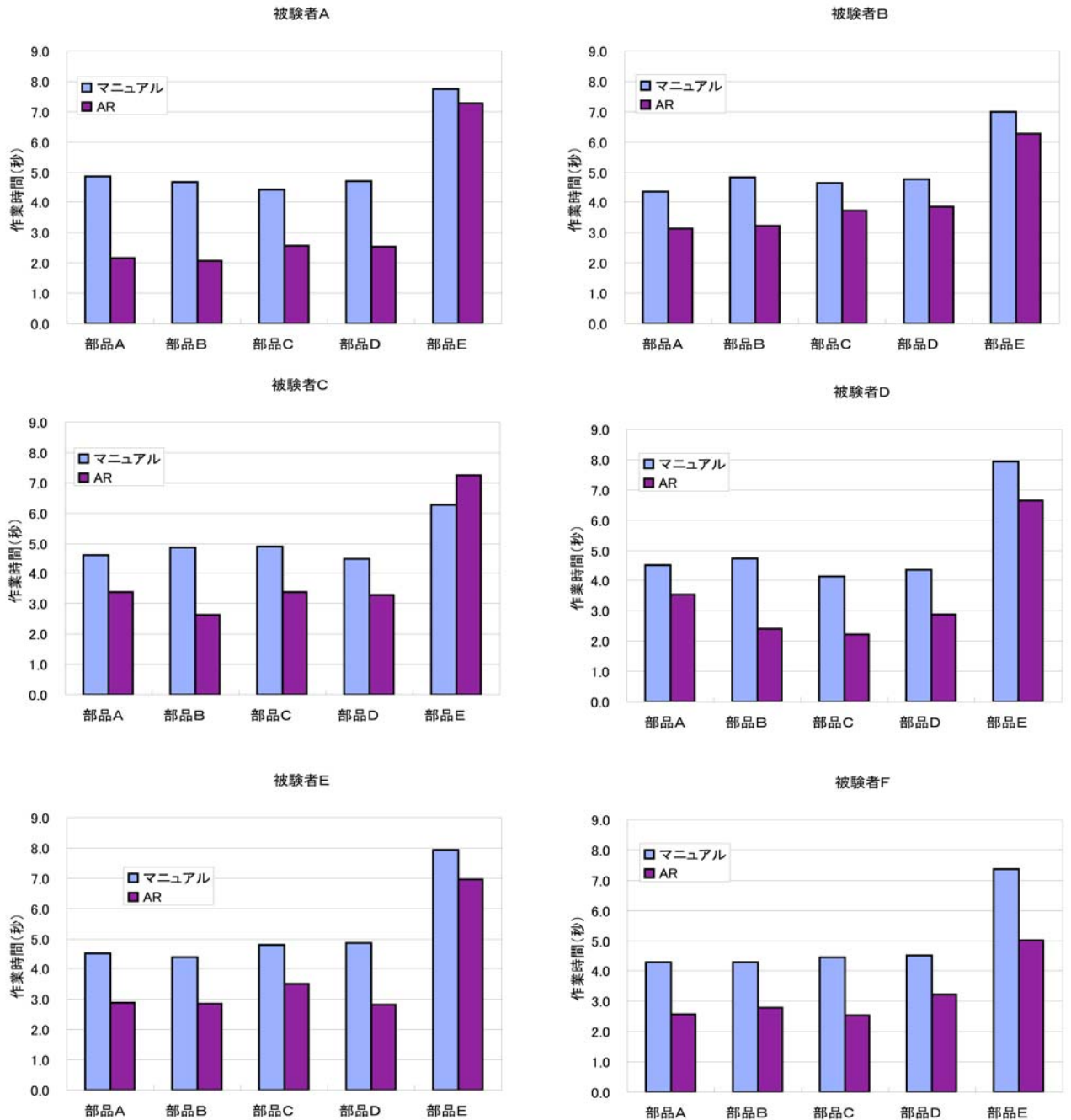


図 5.13: 配置実験結果 (全体)

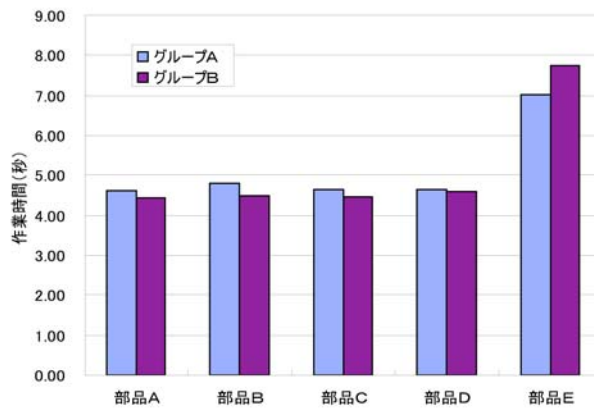


図 5.14: グループ A・B の作業時間の比較 (マニュアル)

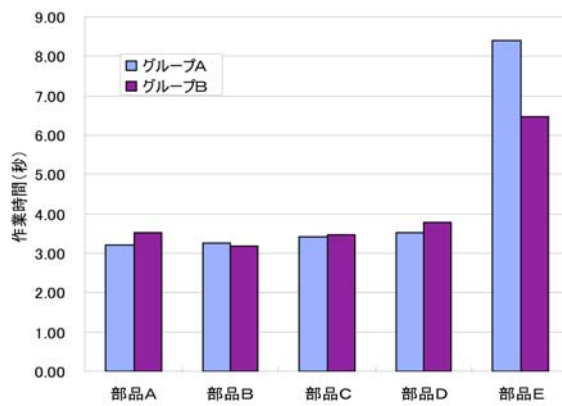


図 5.15: グループ A・B の作業時間の比較 (AR システム)

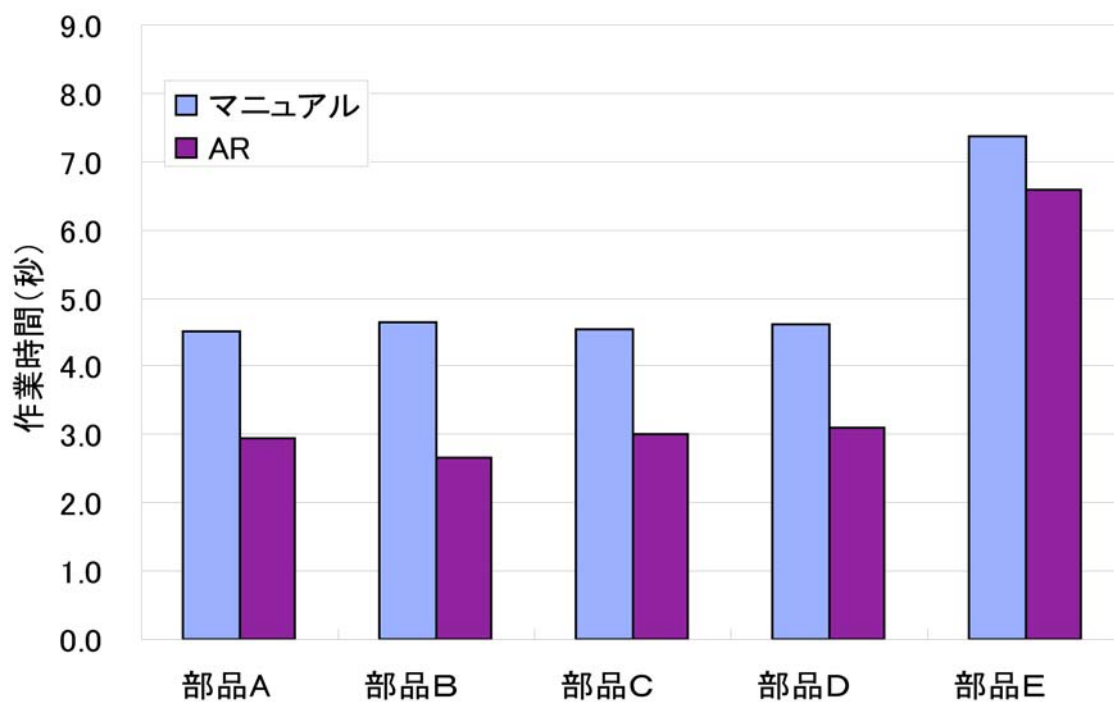


図 5.16: 配置実験結果 (平均)

表 5.5: 配置作業の短縮率

	マニュアル (秒)	AR システム (秒)	短縮率 (AR システム/マニュアル)
平面部品	4.6	2.9	0.64
部品E	7.4	6.6	0.89

5.4 考察

実験結果から、まず AR システム間、マニュアル間での作業時間の比較をすると、表 5.4 に示されるように、どちらも平面部品である部品 A～D の自由度における違いはほとんどなかったが、立体である部品 E に関してはどちらの方法とも平面部品と比較して時間を要した。これはどちらの方法でも平面の表裏の識別にはほとんど時間を要さないのに対し、立体は最大で 3 平面を同時に識別して正確な方向を決定しなければならない為であると考えられる。次に、グループ間の比較を行なう。平面部品については、グループ A とグループ B で大きな違いは見られなかったが、AR システムの立体部品である部品 E において 2 秒程度の違いが見られた。これは、特に作業員 C が、実験全体を通して AR システムに不慣れであったために生じた差であると考えられる。

最後にマニュアル、AR システム間の比較を行なう。表 5.5 に示されるように、有意差が無かった 4 つの平面部品の配置作業の平均時間はマニュアルが 4.6 秒であるのに対して、AR システムが 2.9 秒と 36 % の作業時間の低減が認められた。立体部品の配置作業の平均時間がマニュアルが 7.4 秒であるのに対して、AR システムは 6.6 秒と 11 % 程度しか作業時間の低減が認められなかった。これは、立体の方向を特定しようと様々な角度から部品の CG を見ようとする過程でマーカーが画面から外れ、情報が途切れることで判断が遅れる場合が平面と比べて多い為と考えられる。即ち、AR の特性による遅延ではなく、システムの精度による遅延と考えられる。

第 6 章 結論

本研究では、拡張現実感 (AR) による組立作業の支援システムを設計した際に、マニュアルと比較してどの程度、効率化が見込まれるかを定量的に評価する方法を提案することを目的として、各種実験を行なった。

まず第 2 章では、研究の背景として、AR を用いた先行研究を述べた上で、AR にしたことにより得られるメリットが少ないものがあることや、それらをシステム設計段階で評価する手法がない現状とその問題点を示した。そして、AR が作業における認知作業の部分の支援することに着目し、タスク分析を用いて認知作業を明らかにする対象として電気機器の組立作業を選択した。そして組立作業中に含まれる認知作業に関する基礎実験を行ない、定量評価手法を確立させることを本研究の目的とすることを述べた。

第 3 章では、まずタスク分析の説明とそれを用いた例として、GOMS モデルを用いたキーストロック作業の分析を紹介し、作業時間の予測や効率化にタスク分析が非常に有用であることを示した。次に、本研究で用いるタスク分析手法として、組立作業の一連の流れを視覚的に明らかにし、最適な AR 情報提示手法を発見するためにペトリネットを用いることを述べた。そして、実験用に設計したマニュアルを用いた大型リアプロジェクターの組立作業の被験者実験を行ない、実験映像をタスク分析する手順について述べた。実験結果から、AR システムは、作業者の視線移動を最短にするように設計することが最適な情報提示に繋がることを示した。また、組立作業中に含まれる認知作業として部品の探索作業と部品の配置作業が存在することを示し、これらの基礎実験を次章以降で行なうことを述べた。

第 4 章では、第 3 章で明らかになった組立作業の認知作業の一つである部品探索に関する基礎実験について述べた。まず、実験条件として、部品の個数と類似性を設定することを述べ、その条件の説明と組み合わせ方について詳細に示した。次に、AR デバイスとしての遮蔽型 HMD の Glasston とソフトウェアに用いるライブラリである ARToolKit について説明し、実験で用いる AR システムのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べた。そして、実験環境ならびに実験手順について述べ、マニュアル、AR システムの両方の実験から得られた結果を示した。実験の結果から、探索作業におけるマニュアルと AR システムの作業時間の推定式を立て、実測値と比較検証

したところ、相関係数が 0.889 と高い相関が認められた。

第 5 章では、第 4 章と同様に第 3 章で明らかになった組立作業の認知作業の一つである部品配置に関する基礎実験について述べた。まず実験条件として、部品の配置する方向の自由度を 5 種類設定した。そして、実験で用いる AR システムのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べ、実験環境の設計に関する説明を行なった。部品配置作業において、マニュアル内、及び AR システム内での評価では、4 つの平面の部品と立体の部品に作業時間に差が見られたものの、自由度と関連した結果は得られなかった。次に、マニュアルと AR システム間の比較では、平面の部品においては 36 % 程度の作業時間の低減が見られ、立体の部品ではシステムの精度の問題から 11 % 程度の作業時間の低減が見られた。

ここで、第 4 章、第 5 章で得られた結果から、マニュアルを用いて目的の部品を探索して適切な位置に配置するという作業に対して AR システムを導入した場合、以下の図 6.1 のような流れで、支援効果を定量的に推定できることが分かった。この図について説明する。従来の紙ベースの作業マニュアルを用いた組立作業において、ある 1 個の部品を探索する作業時間、この場合、実際の身体作業が伴わない部品探索という認知作業に要する時間を第 4 章で立てた部品の個数と類似性をパラメータとした推定式で算出する。そして AR システムにおいても同様に時間を算出する。次に選んだ部品を取り付けるべき位置に正しい方向で配置するという認知作業時間について、第 5 章で立てた部品の自由度（本研究で認められたのは平面か立体か）で同様に作業時間の差を算出する。以上より、組立作業中に存在する 2 種類の認知作業に要する作業時間の合計をマニュアル、AR システム両方で算出することが可能となり、この合計時間の差が、従来手法に AR システムを導入することで得られる作業効率となる。

本研究では拡張現実感による組立作業支援効果の定量的評価手法の提案を行なった。この手法を用いることにより、組立作業に AR システムを導入する際に、マニュアルから得られる部品の類似性と個数、またその配置する際の自由度から、作業全体の認知作業時間の短縮をシステム設計段階で見積もることが可能となった。

提案手法の有用性をより高く証明するために、実際の組立作業を対象に検証実験を行う必要がある。しかし、これには、理想的な最適な情報提示手法だけにとどまらず、理想的な AR 環境を設計できることが大前提である。本研究では、組立作業における認知作業を単位タスクにまで分解して、身体的要素や外的要素が加わりにくい理想的な AR 環境下で実験を行なったが、現段階の技術力においては、複雑な作業に AR システムを完全に導入するには、ハード面では情報提示デバイスの装着感、ソフト面で

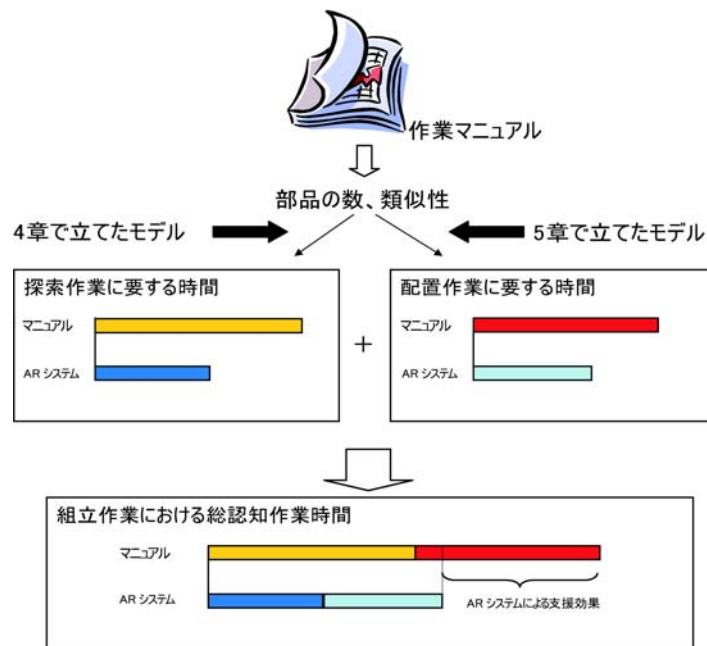


図 6.1: 提案する評価手法の概念図

はトラッキング精度などの技術的問題が数多く存在する。このため、このような技術的要素を向上させ、理想的な AR 環境を実現させることも定量評価手法の確立には必須事項であると考えられる。

また、本研究では組立作業のみを評価の対象にしたが、AR を用いて支援が可能な作業はまだ数多く存在する。その作業には、本研究と同様にタスク分析を行うことで、新たな認知作業が明らかになる可能性がある。

今後の課題としては、理想的な AR 環境を実現できる AR システムを開発して、本研究で述べたモデルから導出された作業効率と検証すると同時に様々な作業に関して同様のタスク分析を行ない、基礎実験を行なうことで、幅広い作業に適応できる定量評価手法を確立させることである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、エネルギー研究科長として多忙な中、小生の研究の方向性から研究の位置付け、論文のまとめ方等、細部に至るまで、適切かつ暖かい御指導を頂いた吉川榮和教授に深く感謝いたします。

単なる研究室という枠組みに留まらず、体育会という異質な空間に6年間も属していた小生に、社会人としてのルールまでも熱心に指導して頂いた下田宏助教授に心から感謝いたします。

一時は本気で絶望的な状況にまで陥った小生の研究を、見捨てずに熱心ご指導いただき、時には修羅のように厳しく、時には父のように優しくあった石井裕剛助手に深く感謝いたします。

未熟な小生が、修士論文を完成させることが出来たのは先生たちのおかげです。

また、意外と居心地が良かった当研究室の皆さんに感謝の意を表したいと思います。独特の雰囲気癒し系の宇田旭伸君には、ライブドアショックの際に株の用語を少し教えてもらいました。絶対やりませんが、古今無双の大エースとして研究室の頂点に君臨してきた関山友輝君は、底辺に這いつくばっていた小生には、眩しくて眩しくて仕方ありません。やばいやばいといいながらもきっちり要所は抑えていた冨田和宏君は、勝ち組です。独特の雰囲気が癒し系の服部瑤子さんは、うちの母親と同じ名前です。振動マスターのマスター1回生の鶴田将之君は2chじゃなくてリクナビを使って就職活動をしましょう。中井俊憲君は大物の予感がします。田中君にもう一度会いたい。現実逃避にゲームをしているときに学士4回生の近藤祐樹君を見ると、たまに我に返ることがありましたが返らないこともありました。やや特殊な当研究室の状況に引きながらもいつのまにか溶け込んでいた松岡和宏君が、僕は好きでした。

さらに、研究を進めるうえで何かとお世話して頂きました、毒舌秘書の山下恵美衣さん、結婚おめでとうございます谷友美さん、中国語を極めた吉川万里子さん、久しぶりに現れるなり「よう！今、俺ニートだぜ(・∀・)b」っと小生の度肝を抜く男前な発言をしてくださった駒井遥さんに心から御礼申し上げます。

最後に、自分勝手な生き方を四半世紀も許してくれた最高の両親と、様々な御支援・御助力をいただいたすべての方々に心から感謝いたします。

どう見ても、素晴らしい研究室での2年間でした。本当にありがとうございます。

参考文献

- [1] Ronald Azuma, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier, Blair MacIntyre: Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, 21, 6 (Nov/Dec 2001), pp. 34-47 (2001)
- [2] P. Milgram, F. Kishino: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, IEICE Transactions of Information System E77-D, 12pp. 1321-1329 (1998)
- [3] Ronald Azuma: A Survey of Augmented Reality, Presence, Vol. 6 No. 4, pp. 355-385 (1997)
- [4] Steve Mann: Telepointer: Hands-Free Completely Self Contained Wearable Visual Augmented Reality without Headwear and without any Infrastructural Reliance, ISWC 2000, pp. 177-178 (2000)
- [5] BOEING: Mathematics and Computing Technology Focus, <http://www.boeing.com/defense-space/aerospace/training/instruct/augmented.htm> (2006年2月7日現在)
- [6] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Doree Seligman: KARMA, <http://www.cs.columbia.edu/graphics/projects/karma/karma.html> (2006年2月7日現在)
- [7] 山崎雄一郎: 拡張現実感と RFID を用いた系統隔離作業支援システムの試作と実験評価: 京都大学大学院エネルギー科学研究科修士論文, pp. 3-14 (2004)
- [8] 清川清: 拡張現実感インタフェースを用いた対面協調作業のコミュニケーション過程: 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol. 7 No. 2 (2002)
- [9] Hiroyuki Tarumi: Design and Evaluation of a Location-Based Virtual City System for Mobile Phones; Proceedings of the 2005 Symposium on Applications and the Internet (2005)
- [10] 海保博之, 原田悦子: プロトコル分析入門, pp. 246; 新曜社 (1993)

- [11] Rubin J:Handbook of Usability Testing,pp.330;John Wiley & Sons(1994)
- [12] Nielsen J.and Molich R.:Heuristic evaluation of user interfaces Proceedings.ACM CHI'90,pp249-256(1990)
- [13] Polson P.G.,Lewis C.,Rieaman J.and Wharton C.:Cognitive walkthroughs;a method for theory-based evaluation of user interface,International Journal ofMan-Machine Studies,36,pp741-73(1993)
- [14] 北島宗雄:ユーザモデルによるインタフェース評価:ソフトウェア科学会チュートリアル,pp.3-8(1994)
- [15] 佐野真治:AR 技術によるナビゲーションのユーザ行動の実験解析:京都大学大学院エネルギー科学研究科修士論文,(2005)
- [16] Card, S. K., Moran, T. P., Newell; A. The psychology of human-computer interaction;Hillsdale, NJ; Lawrence Erlbaum Associates(1983).
- [17] W. ライシツヒ 著,長谷川健介,高橋弘治訳;ペトリネット入門-並列同時進行の表現と解析,シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社 (1988)
- [18] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst:Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94(1999)
- [19] Hirokazu Kato,Mark Billinghurst,Rob Blanding,Richard May:AR tool kit 1.0 PC Documentation,
http://www.hitl.washington.edu/research/shared_space/download/ (2006年2月7日現在)
- [20] <http://artoolkit.sourceforge.net/img/nakaohome.jpg>(2006年2月7日現在)

付録 A 大型リアプロジェクター設計マニュアル

A.1 色制御信号基板

A.1.1 色制御基板の設置

色制御基板（図 A1）をフレームの図 A2 の位置に上下を図の通りにして配置、4 mm のネジ 9 本で固定する。道具はプラスドライバー。ネジの配置は黄色の丸印で示されている。完成したら図 A3 のようになっていることを確認する。

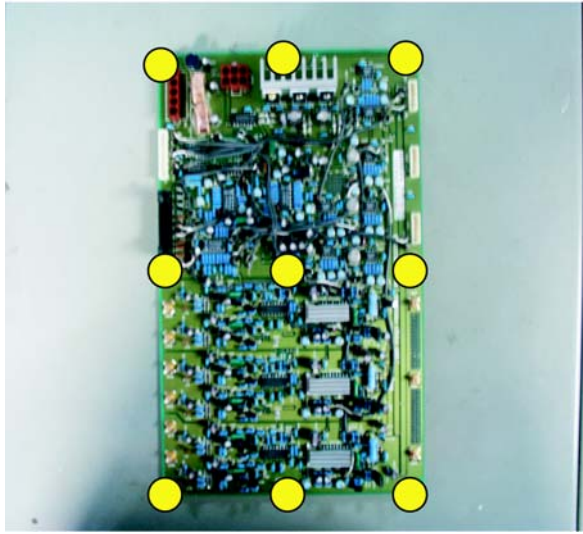


図 A.1:

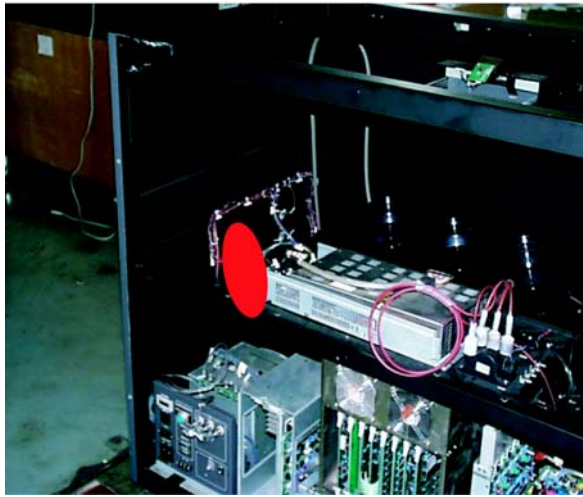


図 A.2:



図 A.3:
付録 A-3

A.1.2 色制御基板へのコネクタの取り付け

ネジを用いた固定が終わったら次頁図 A4 の番号通り、以下の表の手順に従ってコネクタを取り付けていく。

	コネクタ番号
①にコネクタを取り付ける	20CN1
②にコネクタを取り付ける	20CN3
③にコネクタを取り付ける	20CN4B
④にコネクタを取り付ける	20CN1R
⑤にコネクタを取り付ける	20CN1G
⑥にコネクタを取り付ける	20CN1B
⑦にコネクタを取り付ける	20CN2R
⑧にコネクタを取り付ける	20CN2G
⑨にコネクタを取り付ける	20CN3R
⑩にコネクタを取り付ける	20CN3G
⑪にコネクタを取り付ける	20CN2B
⑫にコネクタを取り付ける	20CN3B
⑬にコネクタを取り付ける	20CN4R
⑭にコネクタを取り付ける	20CN4G
⑮にコネクタを取り付ける	20CN4B
⑯にコネクタを取り付ける	20CN2

表 A.1:

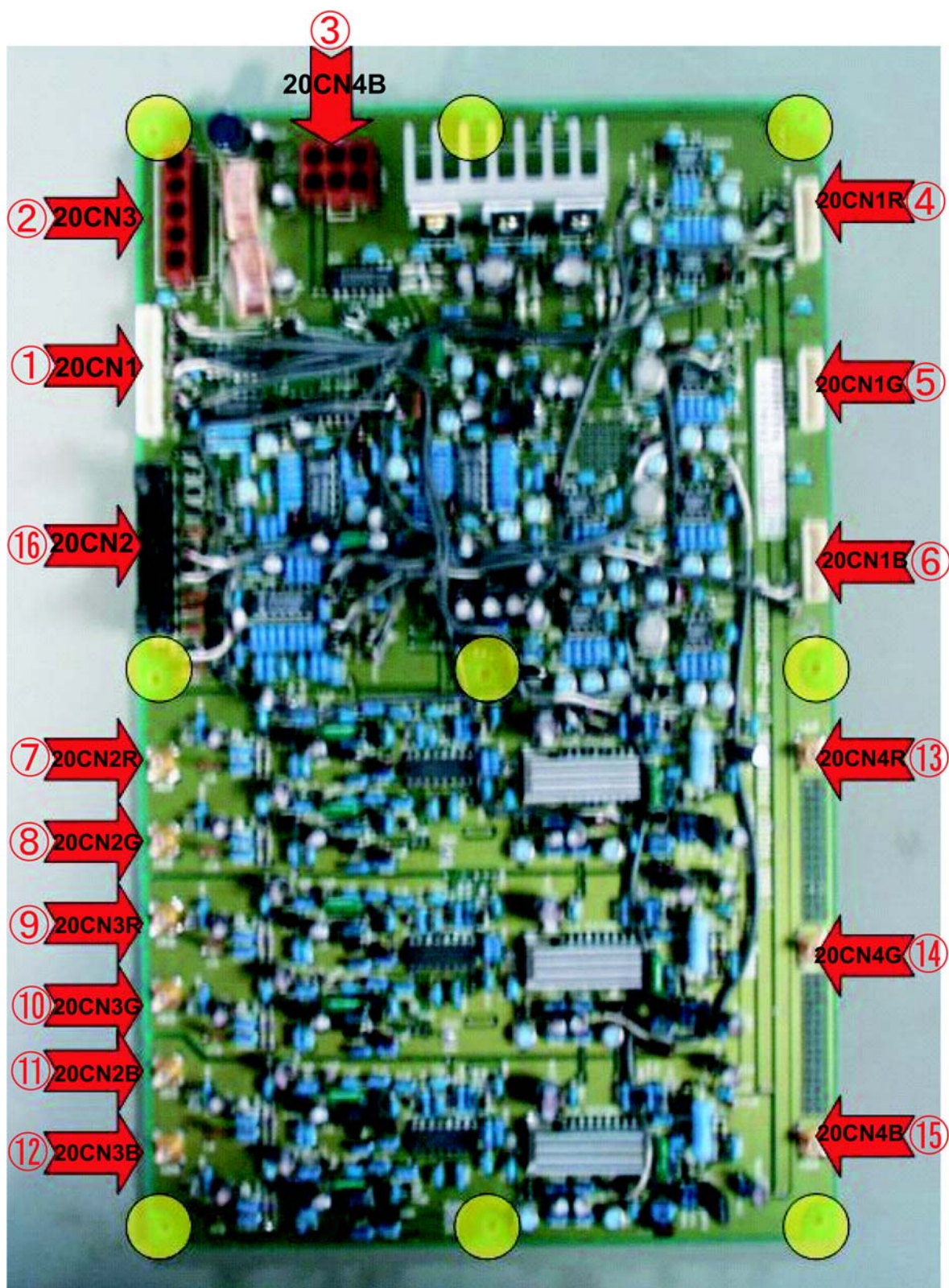


図 A.4:

A.2 制御信号制御基板

A.2.1 制御信号制御基板の設置

制御信号分配基板（図 A5）をフレームの図 A6 の位置に上下を図のとおりにして配置、4 mm のネジ 4 本で固定する。道具はプラスドライバー。ネジの配置は黄色の丸印で示されている。完成したら図 A7 のようになっていることを確認する。

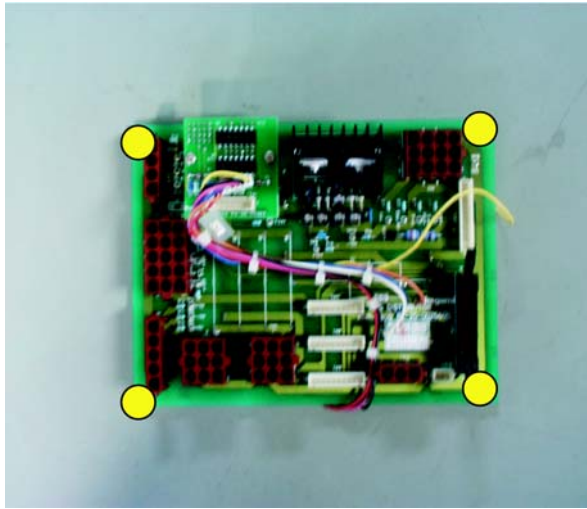


図 A.5:



図 A.6:



図 A.7:

A.2.2 制御信号制御基板へのコネクタの取り付け

ネジを用いた固定が終わったら次頁図 A8 の番号通り、以下の手順に従ってコネクタを取り付けていく。

	コネクタ番号
①にコネクタを差し込む	16CN1
②にコネクタを差し込む	16CN2
③にコネクタを差し込む	16CN3
④にコネクタを差し込む	16CN4
⑤にコネクタを差し込む	16CN5
⑥にコネクタを差し込む	16CN6
⑦にコネクタを差し込む	16CN7
⑧にコネクタを差し込む	16CN8
⑨にコネクタを差し込む	16CN9
⑩にコネクタを差し込む	16CN10
⑪にコネクタを差し込む	16CN11
⑫にコネクタを差し込む	16CN12
⑬にコネクタを差し込む	16CN13
⑭にコネクタを差し込む	CN1

表 A.2:

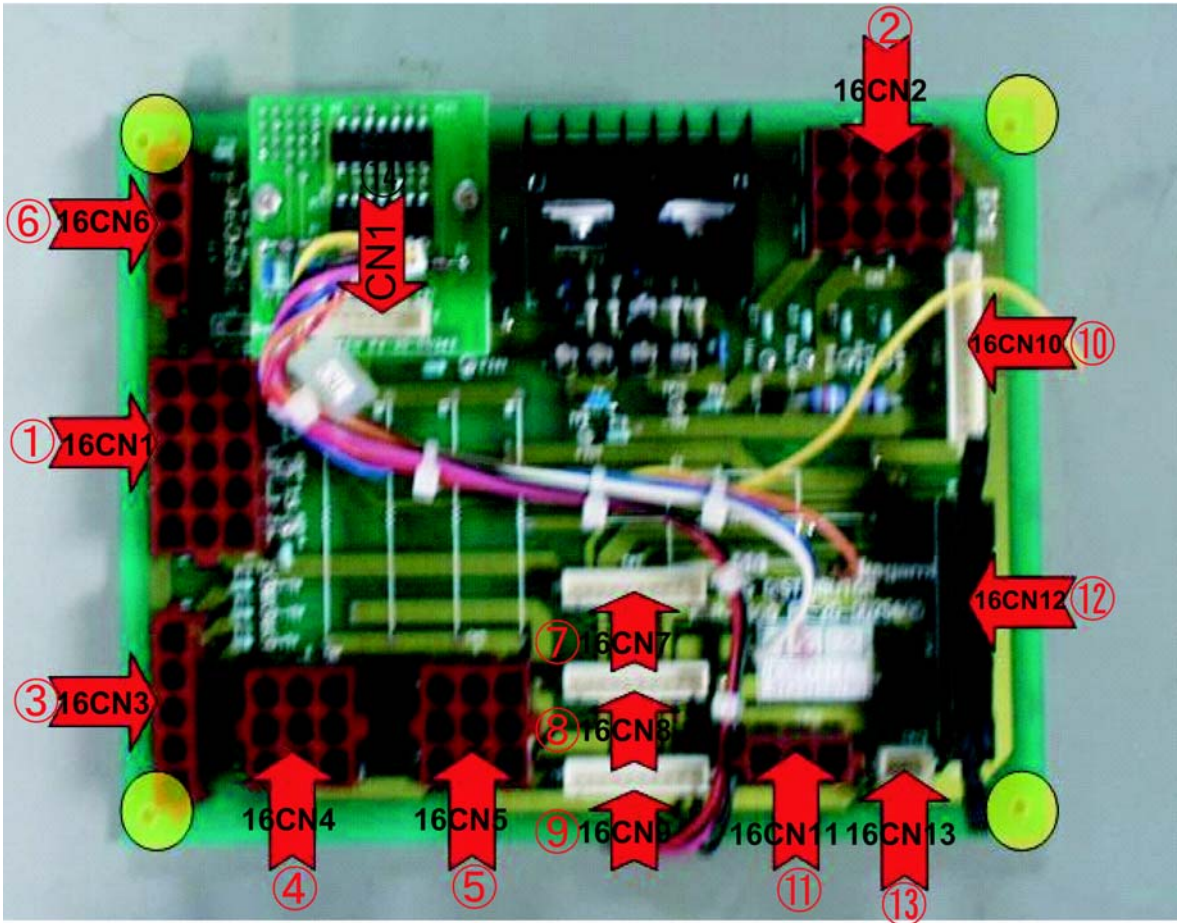


図 A.8:

A.3 同期信号発生基板

A.3.1 同期信号発生基板の設置

同期信号発生基板（図 A9）をフレームの図 A10 の位置に上下を図のとおりにして配置、4 mm のネジ 6 本で固定する。道具はプラスドライバー。ネジの配置は黄色の丸印で示されている。完成したら図 A11 のようになっていることを確認する。

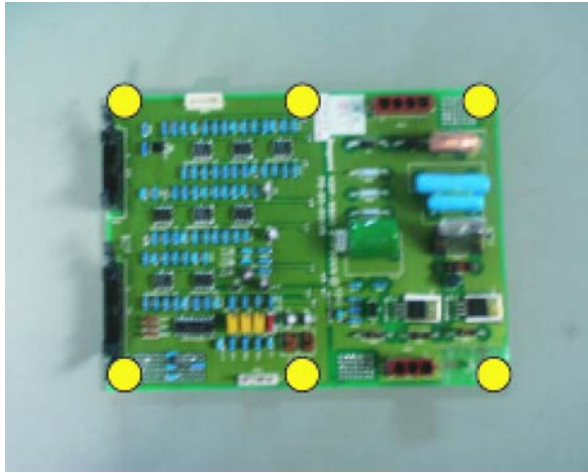


図 A.9:

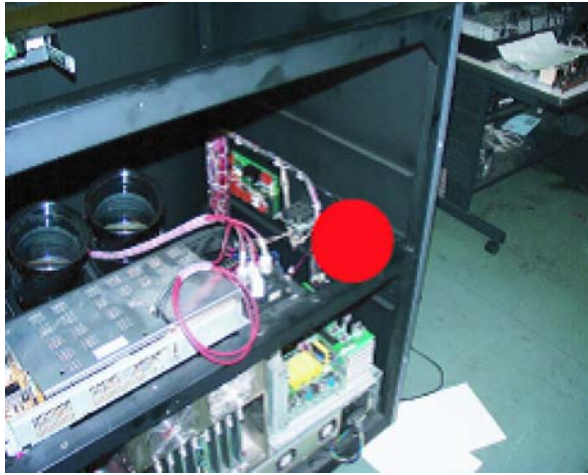


図 A.10:



図 A.11:

A.3.2 同期信号発生基板へのコネクタの取り付け

ネジを用いた固定が終わったら図 A12 の番号通り、以下の表の手順に従ってコネクタを取り付けていく。

	コネクタ番号
①にコネクタを差し込む	5CN1
②にコネクタを差し込む	5CN2
③にコネクタを差し込む	5CN3
④にコネクタを差し込む	5CN4
⑤にコネクタを差し込む	5CN5
⑥にコネクタを差し込む	5CN6

表 A.3:

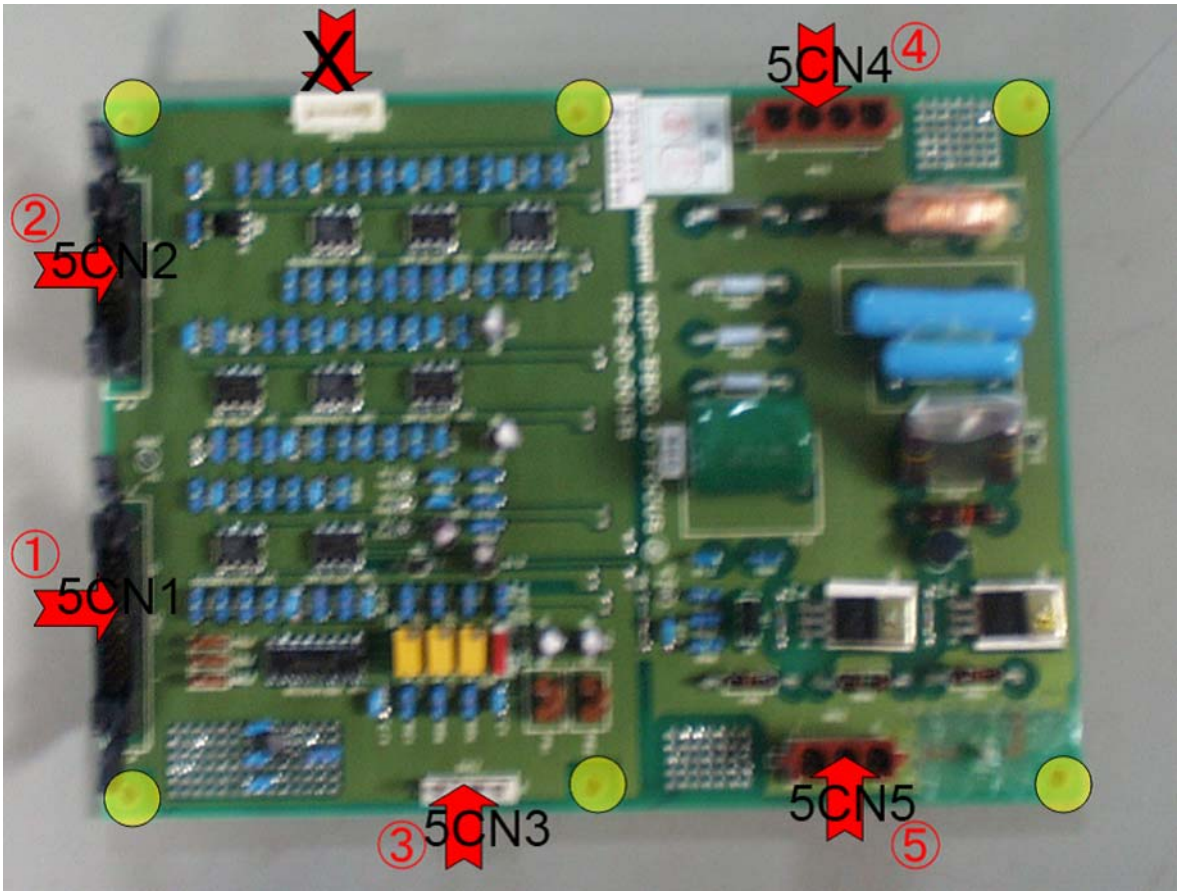


図 A.12:

A.4 電源ユニット

A.4.1 電源ユニットの設置

電源ユニット（図 A13）を図 A14 の赤円の位置にユニットの向きに注意して配置、4 mmのネジ4本で固定する。ネジの配置は黄色の矢印で示されている。完成したら図 A15 のようになっていることを確認する。

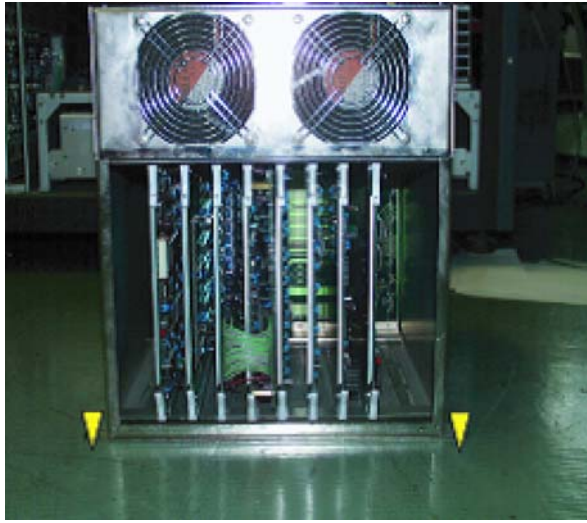


図 A.13:



図 A.14:



図 A.15:

A.4.2 電源ユニットへのコネクタの取り付け

電源ユニットの各部位にコネクタを取り付ける。取り付けるべき場所は大きく分けて2箇所あり、図 A13 の状態を正面として右部（図 A16）、左部（図 A17）とする。以下の手順に従って、コネクタを取り付けていく。

	コネクタ番号
右部	
①にコネクタを差し込む	8CN1
②にコネクタを差し込む	8CN6
③にコネクタを差し込む	8CN2
左部	
①にコネクタを差し込む	8CN4
②にコネクタを差し込む	8CN5
③にコネクタを差し込む	8CN3

表 A.4:

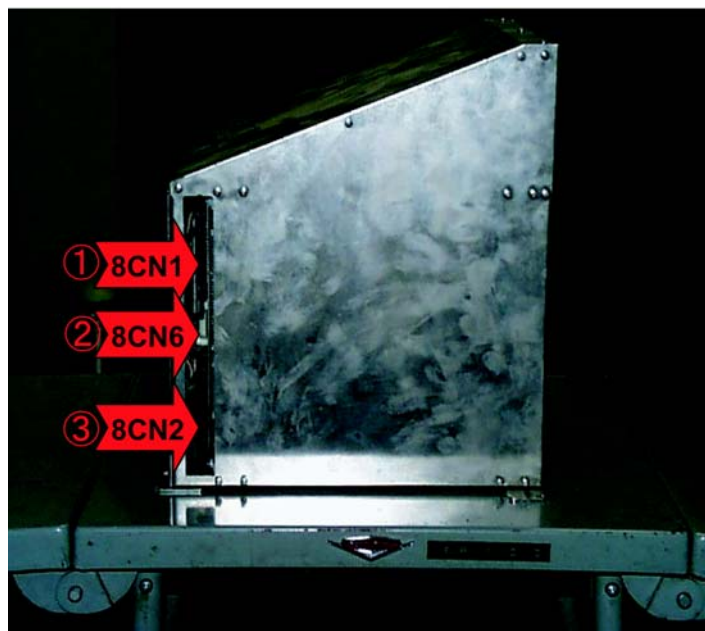


図 A.16:

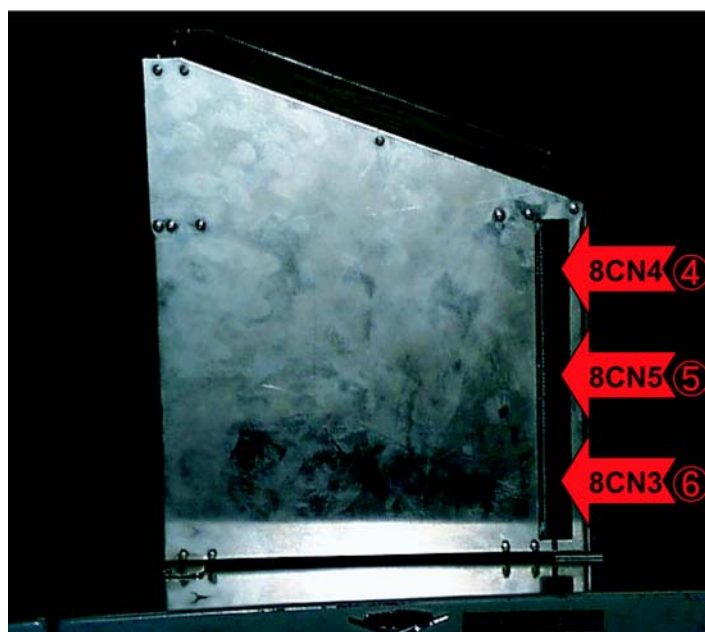


図 A.17:

A.5 制御ユニット

A.5.1 制御ユニットの設置

制御ユニット（図 A18）を図 A19 の赤円の位置に図 A21 となるようにユニットの向きに注意して配置、4 mm のネジ 2 本で固定する。ネジの配置は黄色の矢印で示されている。完成したら図 A20 のようになっていることを確認する。

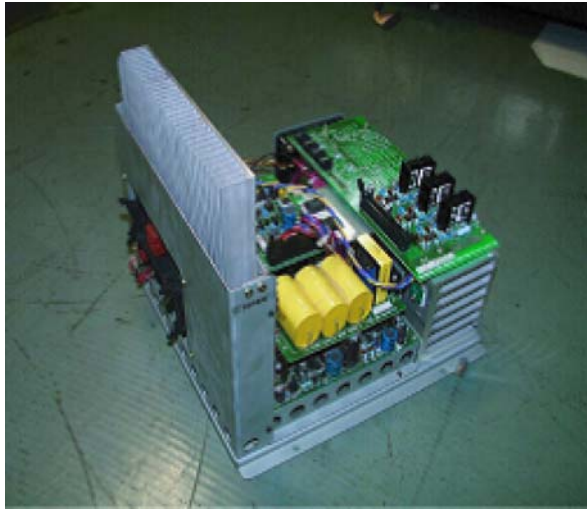


図 A.18:

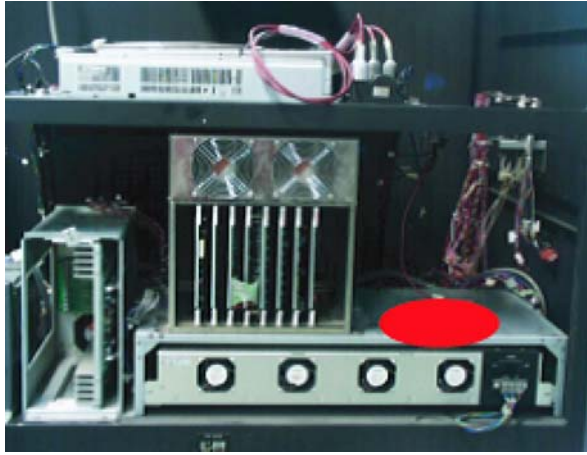


図 A.19:



図 A.20:

A.5.2 制御ユニットへのコネクタの取り付け

制御ユニットの各部位にコネクタを取り付ける。ネジを用いた固定が終わったら次頁図 A21 の番号通り、以下の手順に従ってコネクタを取り付けていく。

	コネクタ番号
①にコネクタを差し込む	3CN2
②にコネクタを差し込む	3CN3
③にコネクタを差し込む	3CN4
④にコネクタを差し込む	CN5
⑤にコネクタを差し込む	CN10
⑥にコネクタを差し込む	2CN1

表 A.5:

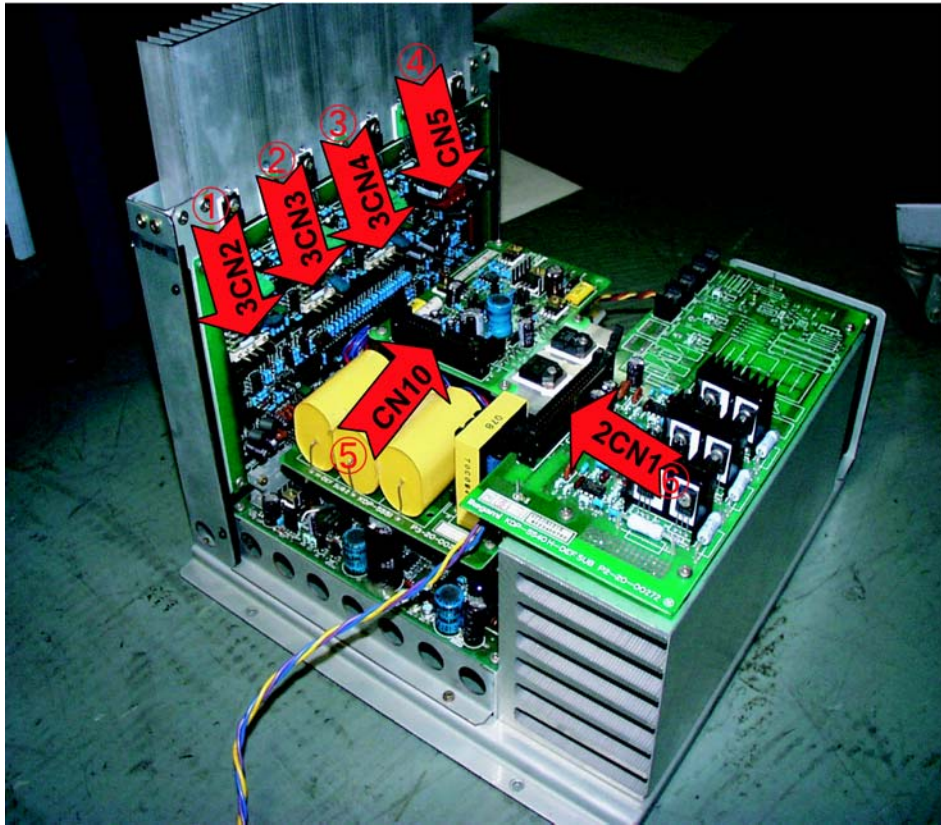


図 A.21:

A.6 音声ユニット

A.6.1 音声ユニットの設置

音声ユニット（図 A22）を図 A23 の赤円の位置にユニットの向きに注意して配置、4 mmのネジ4本で固定する。ネジの配置は黄色の矢印で示されている。道具はプラスドライバー。完成したら図 A24 のようになっていることを確認する。

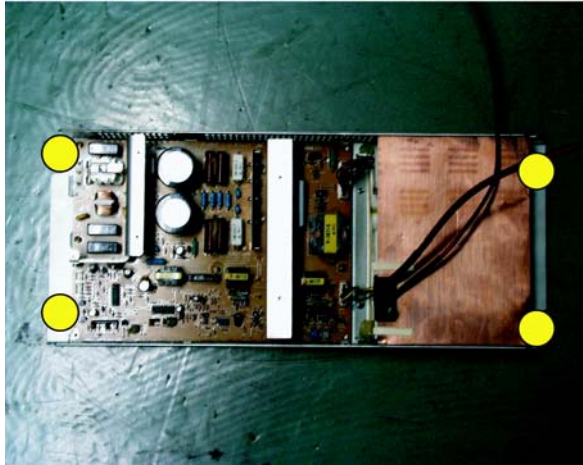


図 A.22:



図 A.23:

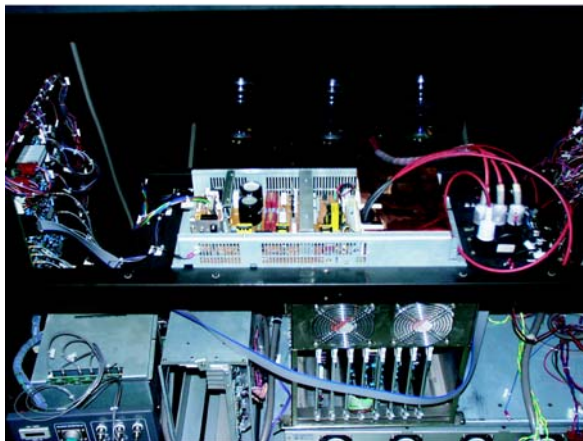


図 A.24:

A.6.2 音声ユニットへのコネクタの取り付け

音声ユニットにコネクタを取り付ける。ネジを用いた固定が終わったら次頁の図 A25 の番号通り、以下の手順に従ってコネクタを取り付けていく。

	コネクタ番号
①にコネクタを差し込む	17CN1
②にコネクタを差し込む	17CN2
③にコネクタを差し込む	17CN3

表 A.6:

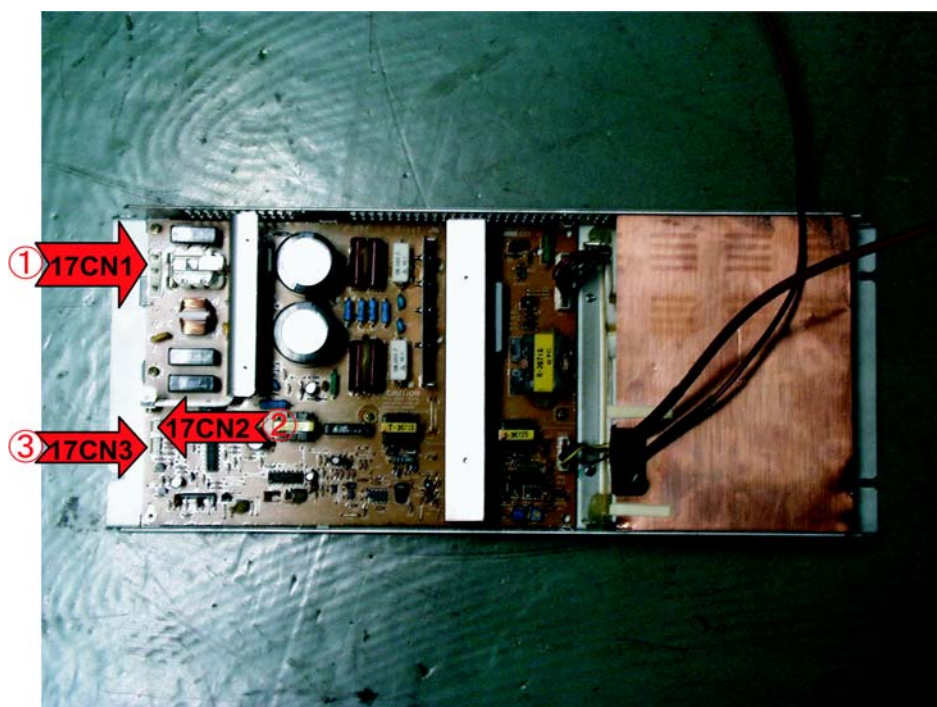


図 A.25:

A.7 完成品

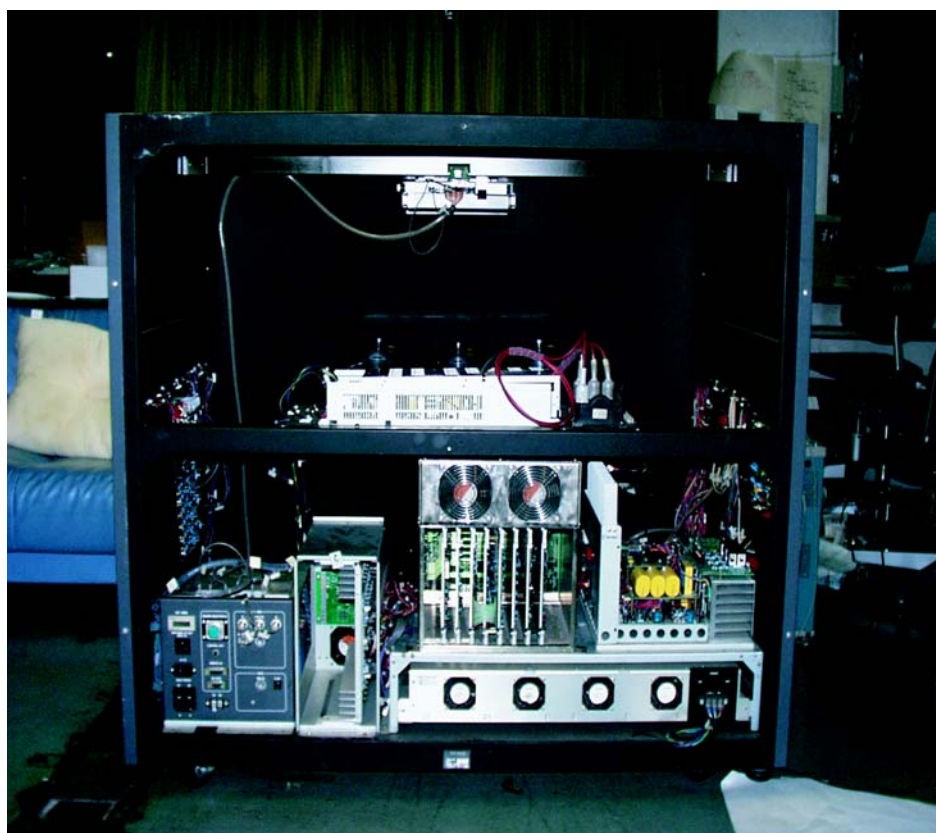


図 A.26:

付録 B 探索実験で用いた部品



図 B.1: 部品 A1



図 B.2: 部品 B1



図 B.3: 部品 C1



図 B.4: 部品 D1



図 B.5: 部品 E1



図 B.6: 部品 E2



図 B.7: 部品 F1



図 B.8: 部品 F2

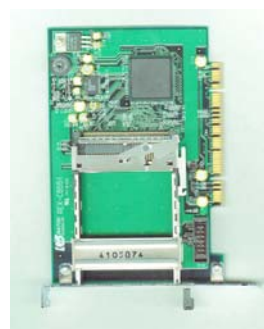


図 B.9: 部品 G1



図 B.10: 部品 G2



図 B.11: 部品 H1



図 B.12: 部品 H2

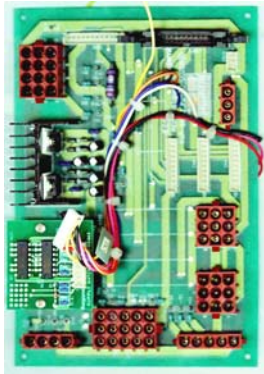


図 B.13: 部品 I1

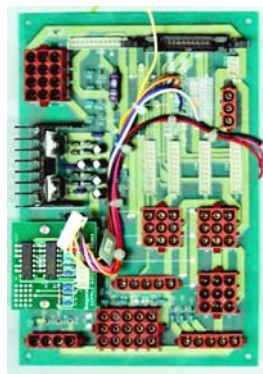


図 B.14: 部品 I2

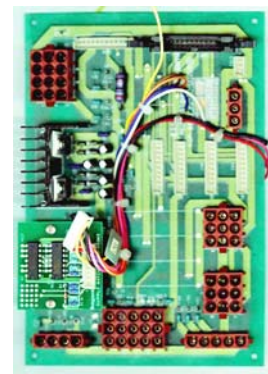


図 B.15: 部品 I3

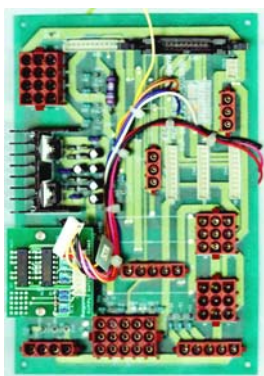


図 B.16: 部品 I4



図 B.17: 部品 J1



図 B.18: 部品 J2



図 B.19: 部品 J3



図 B.20: 部品 J4



図 B.21: 部品 K1



図 B.22: 部品 K2



図 B.23: 部品 K3



図 B.24: 部品 K4



図 B.25: 部品 L1



図 B.26: 部品 L2



図 B.27: 部品 L3

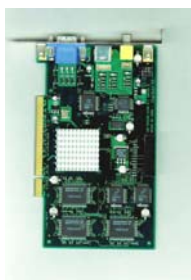


図 B.28: 部品 L4

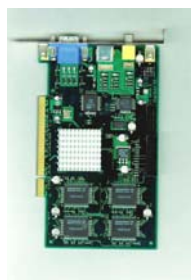


図 B.29: 部品 L5



図 B.30: 部品 L6



図 B.31: 部品 M1



図 B.32: 部品 M2



図 B.33: 部品 M3



図 B.34: 部品 M4



図 B.35: 部品 M5



図 B.36: 部品 M6



図 B.37: 部品 N1



図 B.38: 部品 N2



図 B.39: 部品 N3



図 B.40: 部品 N4



図 B.41: 部品 N5



図 B.42: 部品 N6



図 B.43: 部品 N7



図 B.44: 部品 N8



図 B.45: 部品 O1



図 B.46: 部品 O2



図 B.47: 部品 O3



図 B.48: 部品 O4



図 B.49: 部品 O5



図 B.50: 部品 O6



図 B.51: 部品 O7



図 B.52: 部品 O8



図 B.53: 部品 P1



図 B.54: 部品 P2

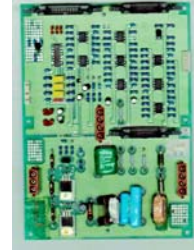


図 B.55: 部品 P3



図 B.56: 部品 P4



図 B.57: 部品 P5

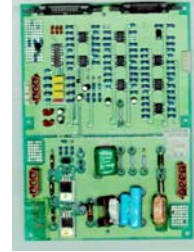


図 B.58: 部品 P6



図 B.59: 部品 P7



図 B.60: 部品 P8

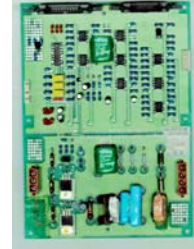


図 B.61: 部品 P9



図 B.62: 部品 P10



図 B.63: 部品 Q1



図 B.64: 部品 Q2



図 B.65: 部品 Q3



図 B.66: 部品 Q4



図 B.67: 部品 Q5



図 B.68: 部品 Q6



図 B.69: 部品 Q7



図 B.70: 部品 Q8



図 B.71: 部品 Q9



図 B.72: 部品 Q10



図 B.73: 部品 Q11



図 B.74: 部品 Q12

付録 C ARToolKit

C.1 ARToolKit の概要

広島市立大学の加藤氏らによって開発され、ワシントン大学 HIT Lab の WWW サーバでソースコードが公開されている ARToolKit は、正方形マーカ上に 3 次元仮想物体の重ね合わせを行う拡張現実感 (Augmented Reality :AR) システム構築用ツールである。情報端末とカメラと HMD があれば ARToolKit を利用して容易に AR システムを構築できる。表示のみではなく 3 次元での情報操作が可能なインタフェースシステムや、デスクトップ・テーブルトップでの拡張現実感アプリケーションの開発を得意としている。理論的にはマーカを設置すれば屋外環境、大規模空間でも利用可能だが、テーブル上の空間程度の大きさでの利用が現実的である。

ARToolKit は C 言語で記述されたマルチプラットフォームのソフトウェアであり、画像入力ライブラリ (libARVideo)、画像処理ライブラリ (libAR)、画像表示ライブラリ (libARgsub) と、光学シースルー HMD 用キャリブレーションや複数マーカによる位置計算等の補助ライブラリ (libARgsubUtil、libARMulti) によって構成される。

ARToolKit を用いて構築した AR システムでは、カメラキャリブレーション、HMD キャリブレーション、マーカ検出処理、マーカ座標系からカメラ座標系への座標変換行列を求める処理 (マーカの 3 次元位置推定)、HMD スクリーンの適切な位置への仮想物体描画処理などの処理が可能である。

ARToolKit を利用した AR システムによって仮想物体を表示している例を図 C.1 に示す。

以降に本研究で利用した ARToolKit のマーカ検出処理とマーカの 3 次元位置推定処理について述べる。

C.2 マーカ検出処理

C.2.1 取り扱う座標系

図 C.2 に ARToolKit システムが取り扱う座標系を示す。仮想物体はマーカ座標系の上で表現される。カメラ座標系は焦点位置を原点、画像平面に垂直な方向を Z 軸、画像の

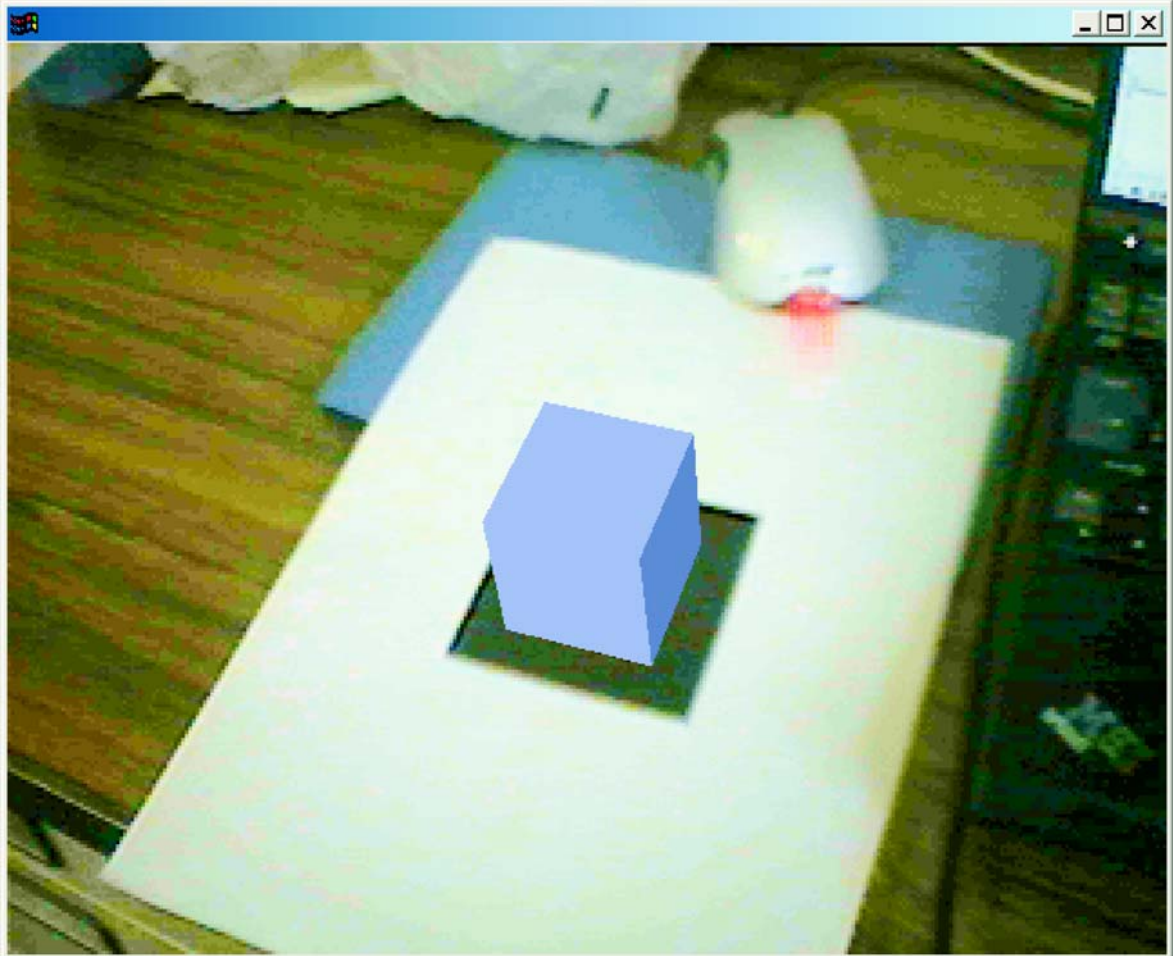


図 C.1: ARToolKit の使用例

x, y 軸に平行な方向を各 X, Y 軸とする。マーカ座標系で表現された点 (X_m, Y_m, Z_m) は、回転・平行移動でカメラ座標系でカメラ座標系に変換可能で、その座標系では (X_c, Y_c, Z_c) と表記する。透視変換モデルによって投影される画像平面は理想スクリーン座標系と呼び、この座標系においては (x_c, y_c) に写るものとする。また、理想スクリーン座標系から歪み関数によって変換された座標系を観測スクリーン座標系とし、実際にカメラから取り込まれたデータをこの座標系で表現し、その座標値を (x_d, y_d) で表す。

HMD と目は理想的な透視変換モデルで変換でき、HMD の映像表示面を HMD スクリーン座標系と呼び、その上の座標値を (x_s, y_s) で表す。この HMD スクリーン座標系に対し同一方向に X, Y 軸を持ち、垂直な方向に Z 軸を有する目の焦点位置を原点とする座標系を目座標系と呼び、その座標系は (X_e, Y_e, Z_e) で表す。

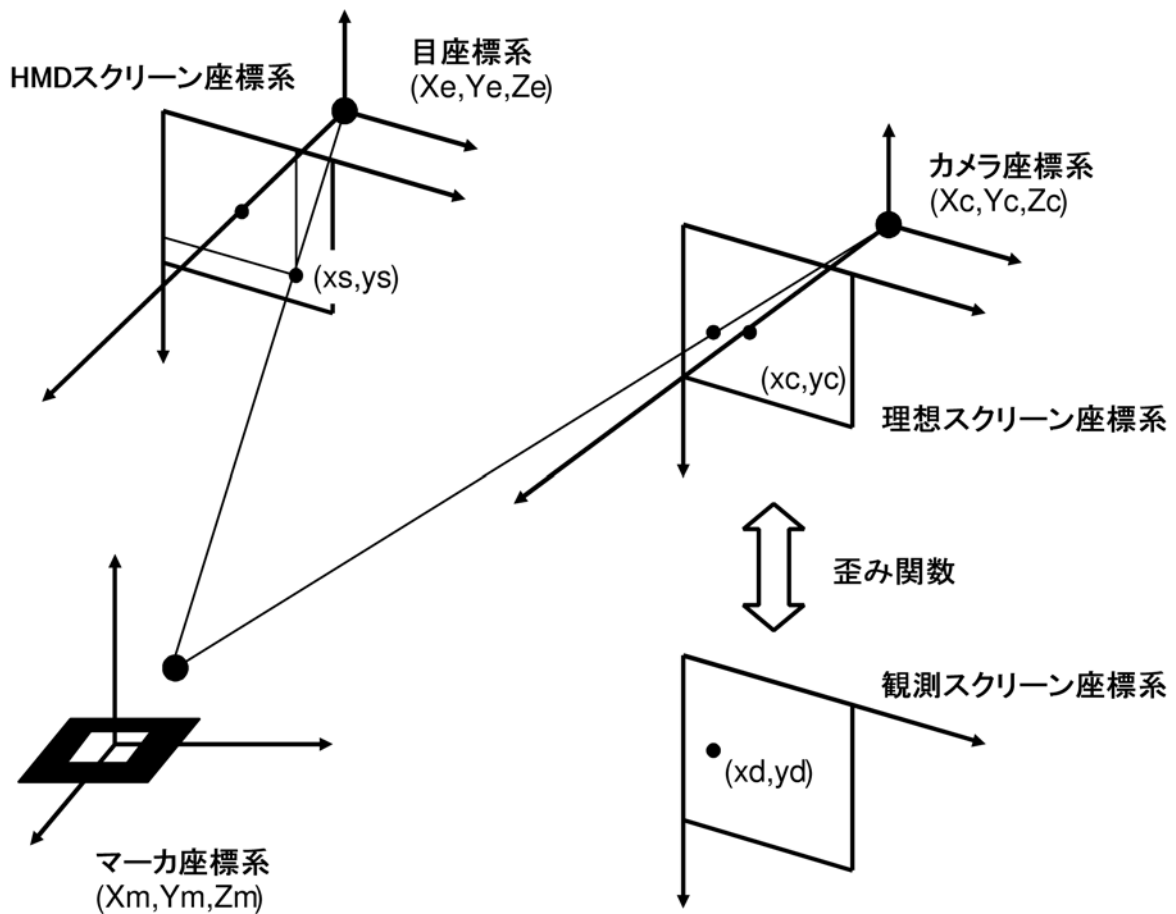


図 C.2: システムが取り扱う座標系

C.2.2 マーカ抽出

入力された画像に対して、固定閾値による2値化、連結領域ごとの面積・外接長方形計算を行ったのち、面積値によって巨大領域と微小領域を除外し、外接長方形情報から画像境界に接する連結領域も除外する。残された連結領域に対して輪郭線追跡を行い、輪郭線上の画素位置を全て記憶する。輪郭線データに対して折れ線近似を行い、4本の線分によって十分な精度で近似できた連結領域をマーカ候補とする。このときの4つの折れ点の座標値を記憶しておく。

C.2.3 マーカ識別

図C.3にマーカの例を示す。マーカの中央部に識別用のパターンが描かれている。このパターンを事前に登録したパターンとのテンプレートマッチングによって識別する。マーカは透視変換モデルによって理想スクリーン座標系に投影されるので、マーカ座標系 $(X_m - Y_m, 0)$ 平面内の点 $(X_m, Y_m, 0)$ は以下の式で理想スクリーン座標系上の点 (x_c, y_c) に変換される。

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.1})$$

マーカの大きさは既知なので、その情報とマーカ抽出処理で求めた4頂点の座標値を用いると、この式のすべての C の値を求められる。従って、マーカ内部のパターンはこの式によって正規化できる。具体的にはマーカ内部のパターン領域を 64×64 に分割し、その領域に対する画素値を入力画像から抜き出し、 64×64 画素のパターン画像を得る。これを 16×16 に縮小しテンプレートマッチングに使用する。マーカの回転に対処するために、90度おきに回転したテンプレートを4枚作成しておき、それらと入力画像に対し以下の式で類似度を計算し、最大値をとるものをマーカの種類および方向と見なす。

$$s^{(l)} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x}) \cdot (x_i^{(l)} - \tilde{x}^{(l)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i^{(l)} - \tilde{x}^{(l)})^2}} \quad (\text{C.2})$$

ここで x_i は画像ベクトルの i 番目の要素を示す。 \tilde{x} は要素の平均値で、 N は画素の階調数、この場合は256となる。 $x^{(l)}$ は l 番目のテンプレート画像を意味する。この式は明るさの正規化された2つの画像ベクトルの余弦を求めることになる。

C.2.4 4 頂点位置検出

マーカの各辺に対応する輪郭線データに最小2乗法で直線当てはめを行い、それら直線の交点を頂点座標値とする。この直線当てはめの際、以下の歪み関数による変換を行い、理想スクリーン座標系における頂点座標値を求める。

$$\begin{aligned} \frac{z_d}{z_c} &= \{1 - pz_c^2\}, \\ z_c^2 &= (x_c - x_{c0})^2 + (y_c - y_{c0})^2, \quad z_d^2 = (x_d - x_{c0})^2 + (y_d - y_{c0})^2 \\ x_d &= \frac{z_d}{z_c}(x_c - x_{c0}) + x_{c0}, \quad y_d = \frac{z_d}{z_c}(y_c - y_{c0}) + y_{c0} \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

ここで (x_c, y_c) は理想スクリーン座標系での座標値、 (x_d, y_d) は観測スクリーン座標値である。また、 p は歪み率、 (x_{c0}, y_{c0}) は歪み中心座標値で、この3パラメータはカメラキャリブレーションによって求めておく。ここでの計算では、式 (C.3) の逆変換が必要となるが、その計算は初期値を (x_d, y_d) としたニュートン法の4回の繰り返しで十分な精度が得られる。観測された正方形マーカ画像では樽型歪みでの影響でその辺は曲線となるが、この変換によって辺は直線として扱うことができる。

C.3 マーカの3次元位置推定

これはマーカ座標系からカメラ座標系への変換行列 \mathbf{T}_{cm} を推定する問題である。この変換行列は回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ と平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ からなる。理想スクリーン座標系とカメラ座標系の間は透視変換モデルで変換でき、その具体的な変換行列は事前のキャリブレーションにより求めておく。これらの座標系はの関係は式 (C.4),(C.5) のように表現できる。式 (C.1) は、マーカ座標系の $X_m - Y_m$ 平面内座標値と理想スクリーン座標系の関係式であるが、以下の式はマーカ座標系の3次元座標値を取り扱うものである。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{\text{cm}} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.4})$$

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.5})$$

マーカ座標系におけるマーカの4頂点の座標値は図 C.3 に示すように設定されており、これらに対応する理想スクリーン座標系における座標値もこれまでの処理で得られている。これらの情報から式 (C.4) における \mathbf{T}_{cm} を求めるが、その手順は、

1. 回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定
2. 平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ の推定
3. 変換行列 \mathbf{T}_{cm} の修正

となる。

C.3.1 回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定

理想スクリーン座標系におけるマーカの頂点位置から向かい合う2辺の直線の方程式が得られる。それを式 (C.6) のように表し、式 (C.5) の x_c, y_c をこれに代入することで式 (C.7) が得られる。

$$a_1x + b_1y + c_1 = 0, \quad a_2x + b_2y + c_2 = 0 \quad (\text{C.6})$$

$$\begin{aligned} a_1P_{11}X_c + (a_1P_{12} + b_1P_{22})Y_c + (a_1P_{13} + b_1P_{23} + c_1)Z_c &= 0 \\ a_2P_{11}X_c + (a_2P_{12} + b_2P_{22})Y_c + (a_2P_{13} + b_2P_{23} + c_2)Z_c &= 0 \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

この式はカメラ座標系によって表現される3次元空間中の平面の方程式であり、3次元空間中のマーカの辺がこの平面内に存在することを意味する。マーカの向かい合う2辺は平行なのでその方向ベクトルは一致し、式 (C.7) の2平面の面内方向となる。つまり、式 (C.7) の2平面の各法線ベクトルの外積として計算されるベクトルが、平行2辺のカメラ座標系における方向ベクトルとなる。この計算を2組の平行2辺に対して行うことでマーカの隣り合う2辺の方向ベクトル $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2$ を求めることができる。

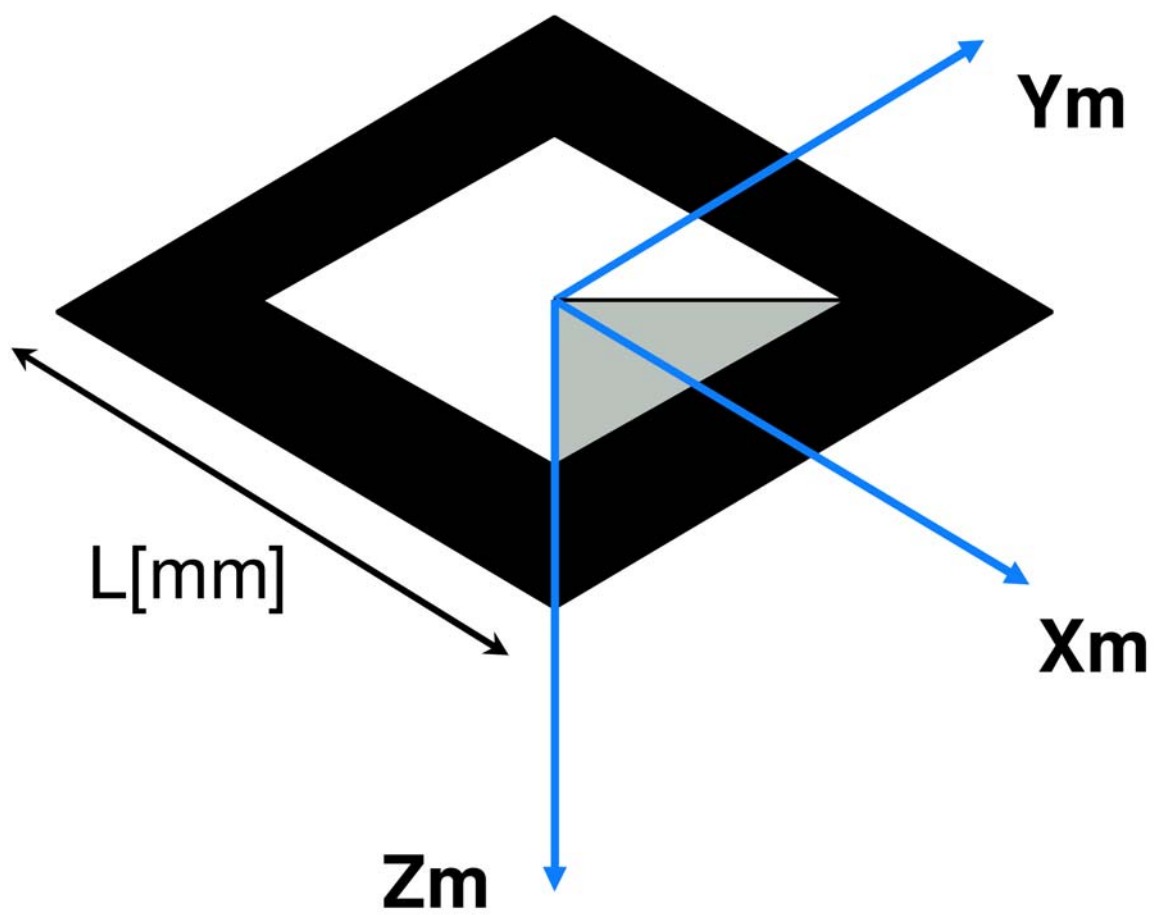


図 C.3: マーカの例

C.3.2 平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ の推定

式 (C.4)(C.5) を結合し、マーカの 4 頂点のマーカ座標系での座標値、理想スクリーン座標系での座標値を代入すると、 T_1, T_2, T_3 に関する i 次方程式が 8 個得られる。行列 \mathbf{P}, \mathbf{R} が既知なので、これらの式から T_1, T_2, T_3 を計算できる。

C.3.3 変換行列 T_{cm} の修正

以上の計算で T_{cm} は計算されるが、回転行列の計算において大きな誤差を伴う。そこで再度画像情報を利用し回転行列の修正を行う。

C.4 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションでは 4×6 の格子点を持つ板を使用する。この板をカメラで撮影し、図 C.4, C.5 のようにキーボード操作で各格子点に対してフィッティングを行う。この作業を数回繰り返す、観測される全ての格子点に対してその 3 次元座標値と観測スクリーン座標系での座標値を式 (C.9) に代入することで、パラメータ C_{ij} に関する一次方程式が多数得られ、その値を計算できる。この行列 \mathbf{C} は式 (C.9) に示すように透視変換成分と回転・平行移動成分に分割することができ、 \mathbf{R} の回転行列としての制約を用いることで、透視変換行列 \mathbf{P} を計算できる。

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hx_y \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.8})$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.9})$$

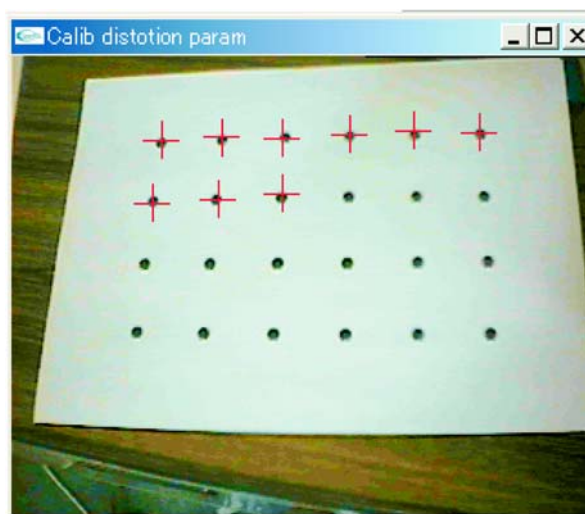


図 C.4: 格子点のフィッティング 1

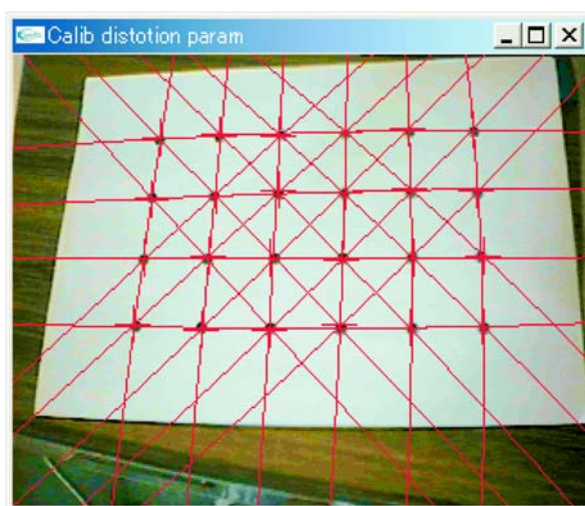


図 C.5: 格子点のフィッティング 2

付録 D 部品探索実験の概要及び被験者の手引き

D.1 はじめに

実験にご協力くださりありがとうございます。現在、我々ARチームは、組み立て作業に、拡張現実感（Augmented Reality;AR）を用いた技術を導入することでの作業の違いを定量的に評価する手法を提案する為の研究を行なっています。本実験では、組み立て作業の中でも部品、ここではプリント基板の探索作業におけるマニュアルを用いた場合とARを用いた場合の違いを調べることを目的としています。

D.2 実験の概要

本実験は、吉川研究室計算機室内にてそれぞれの被験者に対して行なうものです。

まず、ARを用いた作業についてですが Glasstron と呼ばれる、頭部に取り付けるディスプレイの方法で、指示を受け作業を行っていただきます。作業とは、前述の通り、プリント基板の探索作業を行ないます。しかし、本実験ではあくまでこれを模擬したものであり、内容的体力的に全く難しいものではなく、要はディスプレイに提示される指示に従って、複数の基板の中からターゲットとなる基板をできるだけ素早く正確に、探索していただくだけのことです。同様の作業をマニュアルを用いても行ないます。なお、探索作業を全問正解した被験者の方には些少ではありますが、アルバイト料とは別に特別ボーナスを差し上げたいと思います。

D.3 Glasstron

- ソニー製の両眼式HMDです。
- 完全に覆われているので外部の光景を直接見ることはできません。
- HMDを装着すると両目の前にCCDカメラで撮影された被験者の視界の映像とCGが表示されます。



図 D.1: Glasstron

D.4 作業内容

計算機室内には約 1.5m × 2m のポスターが床に貼られます。ポスターには縦 3 個 × 横 4 個合計 12 個のプリント基板の配置位置が定められています。さらに AR を用いる場合に必要となるマーカも図のような位置に張られています。被験者には、この 12 個のマスマに配置されたプリント基板の中からターゲットとなるプリント基板を探索してもらいます。なお、探索する基板の個数は 2 個～12 個までランダムに行ないます。



図 D.2: ARToolKit のマーカ

D.5 実験手順

以下に具体的な実験手順を載せます。

- 被験者は最初にポスターの手前に立ってください
- 実験管理者の「スタート」の呼び声とともに、デバイスの指示に沿って基板を探してください。この際、動き回ることなく静止した状態で探索してください。

AR を用いる場合

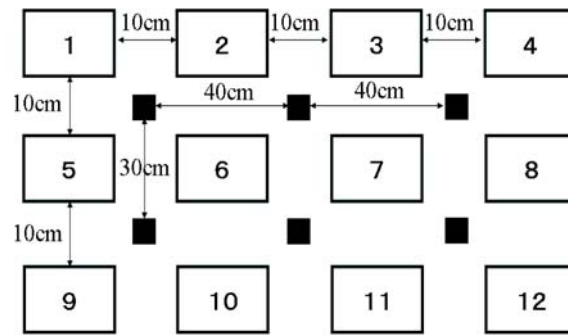


図 D.3: 実験環境図

- Glasstron の画面上には、視界以外に目的の基板をナビゲーションする黄色い球の CG が立体的に表示されます。その CG が重畳された基板が正解の基板です。
- 被験者は、正しい基板だと確信したら、その基板を手にとらず、指差して配置されている番号を言ってください。
- 実験の最初にシステムに慣れてもらうための練習を 6 試行だけ行います。
- 本実験の試行数は全部で 30 試行あります
- AR 実験が終わったら 10 分程度休憩してもらいます。

マニュアルを用いる場合

- ターゲットとなる基板を示した写真を作業ごとに 1 枚作業前に渡します。作業前には決して見ないで下さい
- 作業ごとに基板の入れ替えを行ないますが、一つの試行が終わるごとに後ろを実験環境と逆の方向を向いて、この入れ替え作業も決して見ないで下さい。
- 作業開始の合図と同時にマニュアルを見て、そこに示されている写真と同様の基板を探索してください。
- この場合、基板を発見したら指を指して基板の番号を言って下さい
- AR の場合と同様に実験の最初に練習を 12 試行だけ行います。
- 本実験の試行は 87 試行あります
- 両デバイスとも、できるだけ素早く正確に行ってください

D.6 注意点

- Glasstron は実験終了まで外さないで下さい
- 作業中の被験者の行動は全て撮影されています。また、音声も同時に録音しているので番号を言うときには、はっきり聞こえるようにして下さい。
- HMD を装着するときは、必ず実験者にサポートをさせてください。

以上宜しくお願いします