

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： レーザ光を用いた拡張現実感による  
作業支援環境の構築

指導教官： 吉川 榮和 教授

氏名： 松崎 剛士

提出年月日： 平成14年2月6日(水)

## 論文要旨

題目：レーザ光を用いた拡張現実感による作業支援環境の構築

吉川榮和研究室 松崎 剛士

要旨：

個人の嗜好の多様化と嗜好の急速な変化により、多品種少量生産へのニーズが高まっている。しかし多品種少量生産は、(i) 生産品目が多いため、品目ごとに作成する作業情報の作成/登録のコストが絶対的に高い、(ii) 多くの品目に対応するため多様な作業ができる高価な作業機器を導入する必要がある、(iii) 生産量が少ないため (i)、(ii) のコストが回収しにくい、などの理由により生産の自動化が困難である。そのため手作業で多品種少量生産を行っている生産現場が多いが、手作業にはヒューマンエラーによる歩留まりの低下や、低い生産性、作業教育の必要性という問題がある。効率よく手作業による生産を行うためには急速に発展する情報技術を用いて手作業を支援し、ヒューマンエラーの減少と生産性の向上、作業教育の負担軽減を図る作業支援環境を作成し、作業現場に導入する事が考えられる。適切な情報提示により作業教育を行う必要がなくなり、熟練作業員のノウハウを未熟練作業員が利用して高度で効率のよい生産を行い、ヒューマンエラーを事前に防止あるいは事後に警告するような仕組みを作成すれば、手作業による組み立て作業は大きく発展を見せることになるだろう。また、手作業は高齢者や障害者の社会参加、雇用の促進等に繋がるとしてその社会的意義を増しており、これらの観点からも手作業の作業支援は重要なものとする。以上の背景から本研究では、作業支援環境を用いた手作業による取り付け作業の生産性向上を図る幾つかの方法論を提案し、実際に作業支援環境を試作して各方法論の有効性を評価することを目的とする。

本研究で作成する作業支援環境は、回路基板への電子部品の取り付け作業を具体的な対象とする。作業支援環境は、(a) 新規作業員に対して行う作業教育の負担を軽減し、(b) 日本語を理解しない作業員でも利用でき、(c) 作業支援環境導入時のコスト負担が少ないことを目標として作成した。その目標に従い作業支援環境の要求仕様は、作業員に対し作業状況に応じて部品取り付けに関する情報提示を行い、作業指示情報は言語によらず直観的に理解しやすい図形や記号を用いたものとし、既存の生産ラインに改造を加える必要も生産ラインを長期間に渡って止める必要もなく作業支援環境を導入でき、さらに作業支援環境自体も比較的安価な機材で構成できるものとした。この要求仕様に従って幾つかの作業支援の方法を提案し、それらを実現することのできる作業支援環境を作成して予備実験を行い、提案した各種の作業支援方法の有効性を評価した。そして、その評価結果に基づいて、(1) ビデオカメラを用いて製品組み立て作業の状況を認識し、(2) テレビモニタを用いて取り付け部品の種類と取り付け方法を提示し、(3) レーザ光によって部品取り付け位置を基板に直接投影することを特徴とする作業支援環境を試作した。そして、試作した作業支援環境を用いて実際の生産現場での被験者実験を行い、その有効性を評価するとともに作業支援環境に用いる要素技術の改良点を抽出し、今後の展望として新たな情報提示手法を提案した。

# 目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 研究の背景	3
2.1.1 多品種少量生産と手作業の再興	3
2.1.2 手作業の特徴	5
2.1.3 手作業の現況	7
2.2 作業支援と拡張現実感	10
2.2.1 拡張現実感の定義	10
2.2.2 拡張現実感関連の既存の研究	10
2.2.3 拡張現実感要素技術の現状	13
2.3 研究の目的	16
第 3 章 拡張現実感を用いた作業支援環境	19
3.1 作業支援の対象	19
3.2 作業分析	20
3.2.1 分析対象	20
3.2.2 作業分析	23
3.2.3 考察	25
3.3 作業支援環境の構想	25
3.3.1 作業支援環境の目標	26
3.3.2 要求仕様	26
3.4 要求を満たすための提案手法	27
3.4.1 作業対象部品指示の方法	28
3.4.2 作業対象位置指示の方法	29
3.4.3 部品取り付け方向指示の方法	30
3.4.4 作業状況を認識する方法	31
3.5 概略設計と機能構成	32
3.5.1 概略設計	32
3.5.2 基板位置認識機能	33

3.5.3	作業状況認識機能	33
3.5.4	ボタン認識機能	34
3.5.5	キャリブレーション	34
3.5.6	レーザ光による図形描画機能	34
3.5.7	テレビモニタ出力機能	34
3.5.8	データベース機能	35
3.6	まとめ	35
<b>第 4 章 試作した作業支援環境の概要</b>		<b>37</b>
4.1	ハードウェア構成	37
4.1.1	全体構成	37
4.1.2	DA/AD コンバータ	39
4.1.3	操作ボタン	39
4.1.4	レーザダイオード	39
4.1.5	ガルバノミラー	40
4.1.6	ビデオカメラとビデオキャプチャ I/F	41
4.2	ソフトウェア構成	43
4.2.1	全体構成	43
4.2.2	基板位置認識機能	44
4.2.3	作業状況認識機能	48
4.2.4	キャリブレーション機能	49
4.2.5	DA/AD コンバータ制御機能	53
4.2.6	図形描画機能	54
4.2.7	データベース	55
4.3	まとめ	56
<b>第 5 章 試作システムの評価</b>		<b>57</b>
5.1	情報提示法の評価	57
5.1.1	作業対象部品指示方法の評価	57
5.1.2	作業対象位置指示の方法	58
5.1.3	部品の取り付け方向指示の方法	59
5.1.4	作業状況認識法の評価	59
5.2	作業支援環境の試作	60
5.2.1	試作した作業支援環境の概観	60
5.2.2	作業支援環境の導入と使用法	62

5.3	試作した作業支援環境の評価実験	63
5.3.1	実験目的	63
5.3.2	実験方法	63
5.3.3	実験結果と考察	66
5.4	今後の展望	71
第 6 章 結論		75
謝 辞		78
参 考 文 献		80
付録 A	DA/AD コンバータの仕様	付録-1
付録 B	JIS C 6802 レーザ製品の安全基準	付録-2
付録 C	基板位置認識機能の評価実験	付録-3
付録 D	キャリブレーションの性能評価実験	付録-5
付録 E	レーザ光による図形描画における視認性評価実験	付録-10
付録 F	XML の例	付録-13
付録 G	基板詳細	付録-17
付録 H	被験者実験の結果詳細	付録-26
付録 I	被験者実験アンケート	付録-53

## 目 次

2.1	セル生産の現場	8
2.2	生産現場の海外移転(2001年日経新聞調べ)	9
2.3	DigitalDesk(1) DigitalDesk 概観	11
2.4	DigitalDesk(2) 電卓アプリケーション	11
2.5	DigitalDesk(3) 作業状況の監視	11
2.6	ELMO	13
2.7	ボーイング社の航空機製造支援システム	13
2.8	透過ディスプレイを用いた作業支援拡張現実感	14
2.9	HMD の一例	15
2.10	プロトタイピング開発法	18
3.1	解析対象の作業ライン	19
3.2	作業指示書(模式図)	21
3.3	部品箱の配置例	22
3.4	レーザ光で部品箱を指し示す	28
3.5	レーザ光で部品の名称を描画	28
3.6	テレビモニタで部品の写真と名前を提示	28
3.7	レーザ光で取り付ける位置を照射	30
3.8	レーザ光で取り付け方向を指示	30
3.9	テレビモニタで取り付け方向を指示	31
3.10	概略設計図	32
4.1	ハードウェア構成図	37
4.2	試作した作業支援環境の概要	38
4.3	レーザダイオードの仕組み	40
4.4	レーザダイオード	40
4.5	(左)ガルバノミラー (右)ガルバノミラーとレーザダイオードを取り付けた状態	41
4.6	ビデオキャプチャI/F 経由で取得した基板の輪郭の画像	42

4.7	ソフトウェア構成図	43
4.8	処理前の画像	44
4.9	基板配置範囲推定処理	46
4.10	基板を縦方向に3等分した例	46
4.11	基板四隅の位置推定	47
4.12	作業員が基板に部品を取り付けているところ	48
4.13	I成分の抽出	49
4.14	画面座標系からDAコンバータ出力値への変換	50
4.15	キャリブレーションの画像処理	50
4.16	レーザ光の認識における諸条件	52
4.17	キャリブレーション測定値の評価	52
4.18	レーザ光で円を描画	55
4.19	レーザ光視認性の評価項目	55
5.1	試作した作業支援環境の概要	61
5.2	テレビモニタで提示する情報の例	61
5.3	本実験の環境	64
5.4	実験の様子景	67
A.1	DA/ADコンバータ	付録-1
C.1	作業を行っているときの基板位置	付録-4
C.2	作業を行っていないときの基板位置	付録-4
D.1	撮影環境(左から暗幕あり照明なし、暗幕あり照明あり、暗幕なし照明なし)	付録-6
D.2	赤ピクセル抽出	付録-7
D.3	キャリブレーション実験結果の凡例	付録-7
D.4	赤ピクセル抽出+ヒストグラム補正	付録-8
D.5	明度抽出	付録-9
E.1	視認性評価実験の結果	付録-11
G.1	被験者実験の基板詳細	付録-18
G.2	基板1に取り付ける部品	付録-19

G.3	部品1のシルク印刷	付録-20
G.4	部品2のシルク印刷	付録-20
G.5	部品3のシルク印刷(注:部品3は左端)	付録-20
G.6	部品4のシルク印刷(注:部品4は上端)	付録-21
G.7	部品5のシルク印刷(注:部品5は左側)	付録-21
G.8	部品6のシルク印刷(注:部品6は上列中央)	付録-21
G.9	基板2に取り付ける部品	付録-22
G.10	部品7のシルク印刷	付録-23
G.11	部品8のシルク印刷(注:部品8は中央)	付録-23
G.12	部品9のシルク印刷	付録-24
G.13	部品11のシルク印刷(注:部品11は左上)	付録-24
G.14	部品12のシルク印刷(注:部品12は右端)	付録-25
H.1	被験者Aの実験結果	付録-26
H.2	被験者実験グラフ凡例	付録-26
H.3	被験者A基板1作業1回目のタイムチャート	付録-28
H.4	ボタンを押す被験者	付録-29
H.5	手を振って作業状況を認識させる被験者A	付録-30
H.6	被験者A基板2作業1回目のタイムチャート	付録-32
H.7	被験者Bの実験結果	付録-37
H.8	被験者B基板1作業1回目のタイムチャート	付録-38
H.9	被験者B基板2作業1回目のタイムチャート	付録-40
H.10	被験者Cの実験結果	付録-43
H.11	被験者C基板2作業1回目のタイムチャート	付録-45
H.12	前屈みになって作業を行う被験者C	付録-46
H.13	被験者C基板1作業1回目のタイムチャート	付録-47
H.14	被験者Dの実験結果	付録-48
H.15	被験者D基板2作業1回目のタイムチャート	付録-49
H.16	被験者D基板1作業1回目のタイムチャート	付録-51
I.1	被験者Aアンケート結果(1/3)	付録-54
I.2	被験者Aアンケート結果(2/3)	付録-55
I.3	被験者Aアンケート結果(3/3)	付録-56

I.4	被験者Bアンケート結果(1/3)	付録-57
I.5	被験者Bアンケート結果(2/3)	付録-58
I.6	被験者Bアンケート結果(3/3)	付録-59
I.7	被験者Cアンケート結果(1/3)	付録-60
I.8	被験者Cアンケート結果(2/3)	付録-61
I.9	被験者Cアンケート結果(3/3)	付録-62
I.10	被験者Dアンケート結果(1/3)	付録-63
I.11	被験者Dアンケート結果(2/3)	付録-64
I.12	被験者Dアンケート結果(3/3)	付録-65

# 表 目 次

3.1	作業支援環境の目標と要求仕様	27
4.1	構成機材一覧	38
4.2	ビデオカメラの主な仕様	42
5.1	情報提示法の評価(注:採用した情報提示手法には○印をつけた)	60
A.1	AD12-8性能仕様書(抜粋)	付録-1
H.1	被験者Aの作業ミス状況	付録-27
H.2	被験者Bの作業ミス状況	付録-37
H.3	被験者Cの作業ミス状況	付録-43
H.4	被験者Dの作業ミス状況	付録-48

# 第 1 章 序論

近年の著しい情報技術の発展により、日本の産業社会の構造は大きく変わろうとしている。それは、従来までの工業化社会から脱工業化社会、すなわち情報社会への変革である。情報社会では、知識や情報が資本であり資産であり費用である。ただし、これは従来までの工業自体を否定しているわけではなく、情報技術を利用した高度な生産手法への転換を意味している。

電子機器や機械製品などの工業製品の生産手法には、製品の品種と生産量の相異で「少品種大量生産」と「多品種少量生産」との2つの方法に分けられる。

20世紀の大量生産大量消費社会を支えてきたのは、もちろん前者である。しかし、近年の高度情報化は個人の嗜好の多様化と嗜好の急速な変化をもたらした<sup>[1]</sup>。そして嗜好の多様化と急速な変化は、従来は生産コスト合理化の観点から軽視されてきた多品種少量生産を必要としており、現に多品種少量生産の生産現場は着実に増加の一途をたどっている<sup>[2]</sup>。

少品種大量生産の生産手法は無人の工場に見られるように自動化が容易であり、生産コストを低く抑えることが可能である。しかし、多品種少量生産は、(1)生産品目が多いため、品目ごとに作成する作業情報の作成/登録のコストが絶対的に高くなる、(2)多くの品目の製造に対応できる多様な工作ができる高価な工作機器を導入する必要がある、(3)生産量が少ないため(1),(2)のコストが回収しにくい、などの理由により生産の自動化が困難である。

これらの理由により、多品種少量生産が必要な場合、実際には人間が一つ一つ手作業で製品を組み立てている例が多い。しかし、手作業による作業にはヒューマンエラーによる歩溜まりの低下や、低い生産性、作業教育の必要性という問題がある。最近は高度に多能工化した作業員が一貫して作業を行うセル生産<sup>[3]</sup>の導入により、以前に比較して高速、高品質な生産を実現している工場も多いが、それでも人手での作業故に「作業前に専門の教育訓練を行う必要がある」という問題を解決するには至らない。特に、日本国内の高コスト体質を嫌い国外に工場を持つ企業が増加し、また生産ラインに外国人労働者を採用する国内工場も増加している昨今、指導員と作業員が、言葉の壁と動かない作業ラインを前にして途方に暮れるという図式は想像に難くない。

このような問題に対処するためには、情報技術を用いて人手による組み立て作業現

場にその作業を支援する何らかの仕組みを導入する事が考えられる。これにより、組み立て支援を行い、ヒューマンエラーの減少と生産性の向上、作業教育の負担軽減を図るのである。適切な情報提示により作業教育を行う必要が無くなり、熟練作業員のノウハウを未熟練作業員が利用して高度で効率のよい生産を行い、ヒューマンエラーを未然に防止あるいは事後に是正するような仕組みを作り込むことができれば、手作業による生産の3つの欠点を解決することができるだろう。

本研究ではこのような背景に鑑み、人間の手による組み立て作業の生産性向上を図るため、拡張現実感技術に注目して、幾つかの方法論を提案し、それぞれの方法の有効性を評価した。そして、その評価に基づいてビデオカメラを用いて製品組み立て作業の状況を認識し、レーザー光によって状況に応じた作業情報を組み立て製品に直接投影して組み立て作業を支援する拡張現実感環境を試作した。その際、特に作業支援情報の作成コストの低減、外国人等の言葉の通じない作業員の利用への配慮に留意し研究開発・設計を進めた。

本研究では、具体的な作業対象として、ある電機メーカーの制御機器用プリント基板の生産ラインでの電子部品取り付け作業の支援を取り上げた。このラインは年間に数千もの種類のプリント基板を生産するもので、典型的な多品種少量生産である。この生産ラインでは特に、プリント基板に機械による取り付けが困難な比較的大きな電子部品の実装が人手によって行われている。

以下に、本論文の構成を述べる。まず、第2章では、研究の背景として昨今の手作業による生産現場の状況を述べ、作業支援環境の一つの方法としての拡張現実感に関する既存の研究を概観し、本研究の目的を述べる。次に第3章では、実際の生産現場の作業を分析してその問題点を明らかにし、作成する作業支援環境の構想を創案した後にその要求仕様と概略設計について述べる。第4章では試作する作業支援環境の構成とその構成要素を説明し、それぞれについて行った評価実験について述べる。そして、第5章でそれまでに提案した幾つかの作業支援法の中から適切なものを選び出すために評価を行い、選び出した方法論で構成した試作システムを用いて被験者実験とその評価を行う。最後に、第6章で本論文の結論と今後の研究課題を展望する。

## 第 2 章 研究の背景と目的

第2章では本研究の背景について述べた後、作業支援に用いる拡張現実感について触れ、本研究の目的を述べる。

### 2.1 研究の背景

#### 2.1.1 多品種少量生産と手作業の再興

近年のめざましい情報化は我々の考え方にどういった影響をもたらしたのだろうか。数多くの便利なサービス、例えばインターネットによる通販やオーダーメイドサービスなどのように、我々の生活面に与える影響は枚挙に暇がない。このような物質面の変化と同時に、人々の精神面も情報化により大きな影響を受けた。ネットワークを介して様々な思想や人々の在り方に触れる機会が増え、それは人々に価値観の多様化、ひいては嗜好の多様化をもたらしたのである。嗜好の多様化は情報へのニーズを高め、ニーズがさらなる情報化を推し進める。「個性」「自分らしさ」などというキーワードが流行りだした時期は情報化が始まった年代と重なるが、これは偶然ではなく情報化と嗜好の多様化が車の両輪となって互いを発展させてきた結果である。同時に、情報化により様々な情報が瞬時に得られるようになったため、人々の嗜好の変化は大幅に速くなっている。嗜好の急速な変化、これも情報化による人々の精神的な変化の一つである。まとめると、これまでは穏やかな大河のように流れていた人々の嗜好が、いくつもの支流に別れ、それぞれが急流と化しているのが、現在の状況である。

情報化による変化を反映した現象のわかりやすい一例として、先程触れたインターネットを介した各種のオーダーメイドサービスを挙げることができる。これは、インターネット上で商品に関する詳細な仕様を注文すると、メーカーが個々人の多種多様なニーズに応じた商品を受注生産し、それを注文者が購入できるようにしたもので、このようなサービスが腕時計から自動車に至るまで様々な分野で盛んに行われている。もちろん既製品に比べると一般に高価で時間もかかるサービスだが、嗜好の多様化により従来のように様々な分野に均等にお金を使う消費スタイルから、節約できる分野は極端に出費を節約してこだわりのある物にお金をかける昨今の一点豪華主義的消費スタイルに合致し、インターネットを介したオーダーメイドサービスは新しい流通の形態と

して徐々に浸透を見せている。

もう一つの例が、アパレル業界の高付加価値化である。この業界は今や大きく二つのグループに分かれつつある。一つが、海外移転等による徹底的な低コスト化によって薄利多売を図るグループであり、もう一つが消費者のニーズに徹底して追従し高付加価値化を図るグループである。後者の高付加価値化グループは綿密で迅速なマーケティング調査を行い、その結果を生産工場への発注へと繋げることを特徴とする。生産工場は紡績工場に隣接して、あるいは紡績工場内に立地しているので、急な生産計画の変更や新しい品目の追加に臨機応変に対応できる。従来的大量生産方式では、最も売れると思われるボリュームゾーン向けに大量に製品を投入する焼畑農業的戦略が利益に繋がっていたが、この方法を用いると多くの品目を必要十分な分量だけ生産して利益を確保することが可能となる。

これらの例に共通しているのは、大量の品目を少量ずつ生産する、という事である。この生産手法は多品種少量生産と呼称される。対になる概念は大量生産である。大量生産手法は依然として産業の根幹であり続けるが、その一方で多品種少量生産も徐々にその有効性が再認識され、産業界に浸透しつつある。これは、情報化による嗜好の多様化と嗜好の急速な変化によりそのようなニーズが生じたことと、情報化により多品種生産を可能とする迅速な情報伝達のための社会的インフラが社会全体で整えられたことがその原因となっている。このようにして、生産の現場は従来的大量生産手法を主としつつも、高付加価値商品を販売するための多品種少量生産へと変化しつつある。

しかし、多品種少量生産を行う場合には、その生産手法が問題となる。多品種少量生産は以下の理由により生産工作の自動化が難しいのである。

- 2 生産品目が多いため、品目ごとに作成する作業情報の作成/登録のコストが相対的に高くなる。
- 2 多くの品目に対応するため多様な工作ができる高価な工作機器を導入する必要がある。
- 2 生産量が少ないため売上高も少なく、薄利では上記のコストが回収しにくい。

そのため、多品種少量生産の場合には機械による生産の自動化は有効ではないことがわかる。

現在の多品種少量生産は、大量生産の際に用いられる自動化生産に代わって、主に人手による作業(以下、手作業)によって行われている。これまでの産業革新が人間の「省力化」を意図してできるだけ排除しようとしてきた人による手作業が、このように

して情報化による個々人の嗜好に合致した高付加価値商品の生産・販売に伴って「新しい生産手法」として見直されつつある。

## 2.1.2 手作業の特徴

ここで、手作業による特徴を利点と欠点に分けて考察する。まず利点について考察する。

### 低い初期投資コスト

最初に、初期投資コストが低いことが挙げられる。機械による自動化生産を行うには生産機械を導入する必要がある。生産機械の発注から受け取りまでには長い時間がかかることが予想され、また個々の機械の価格も相当に高額になる。多品種少量生産を行う場合は、高度な汎用性を持つ生産機械を導入することが必要であり、さらに高額な投資を強要されることとなる。人間が作業すれば、これらの問題を軽減することができる。

### 多品種少量生産への適応性の高さ

一般に、人間は機械よりも適応力に優れており多種多様な作業が可能である。

### 生産計画の急激な変化に対応可能

初期コストの低さは、生産計画の急激な変化に対応可能であることを意味する。また機械に比べて初期投資コストが低いため、きめの細かい作業編成を行うことが、すなわち使用設備、作業ライン、作業人員配置、作業場所レイアウト設定の変更が可能となる。これはダイナミックな経営判断を可能とするため、企業の生き残りに少なからず貢献する利点である。

### 高齢者や障害者の社会参加

また、近年では高齢者や障害者の社会参加に繋がる点でも手作業が見直されている。これは例えばシルバー人材センターによって具体化されている。シルバー人材センターは、高年齢者等の雇用の安定等に関する法律に基づいて設置されている団体で、高齢者に屋内外の軽作業、遺跡発掘、庭木の剪定、草刈り、除草、介護手伝い、厨房手伝い、簡単な大工仕事、修理修繕、施設管理、受付業務、宛名/感謝状/表彰状書きのよ

うな軽作業を斡旋し、高齢者には追加的収入と健康の保持、生き甲斐、地域社会へは労働力の貢献を与えることを目的に各都道府県に設置されている。この事業は大きな成功を収めており、特に企業にはアウトソーシング<sup>□</sup>の動きに合致していることをその成功の理由として評される事が多い。

一方、手作業には数多くの欠点がある。代表的な欠点は低い生産速度、高いランニングコスト、作業員確保の困難、労働意欲の低下、作業教育の必要性である。以下、順番に考察する。

### 高いランニングコスト

生産機械と人間が全く同じ作業を行うと、一般に生産機械の方が生産速度が高い。そのため手作業で自動化生産と同等の生産速度を確保するには、数多くの作業員を雇用する必要があり、それは人件費の増加に繋がる。

### 作業員確保の困難

ここ十数年間で、優秀な作業員を安価に確保することが困難になってきている。過疎地のような他に働く場所の選択肢が少ない土地では、長期の就労が望め、労働意欲の高い優秀な作業員を確保することが容易だが、都市部では他に労働の選択肢が多いため、作業員の労働意欲が低く、数ヶ月程度で職を離れていくケースも多く見られるようになってきた。特にこの傾向は若年作業員に顕著である。

### 労働意欲の低下

多くの組み立て作業は生産機械でも可能な単純分業作業であるため、作業員の労働意欲を維持することが難しい。また、英語にもなった現場作業員の作業環境改善、「改善」(kaizen)を行う余地が少ないため、さらなる労働意欲の低下が見られる。

### 作業教育の必要性

機械、人間の両方に当てはまることだが、未知の作業を行うには対象とする作業の知識を得る必要がある。

---

<sup>□</sup> 業務を外注すること。特に、情報通信システムの設計・運用・保守を企業外の専門業者に全面的に委託すること。資源の有効活用、費用の削減をめざして行われる。

作業の知識には2種類あり、それは「作業全般の知識」と「特定の作業に関する知識」である。前者の教育は新たな機械や作業員の導入時に必要なものである。前述のように、近年作業員の就業期間が短い傾向があり、手作業による作業ラインでは頻繁に新規作業員の教育を行う必要に迫られる。

後者の特定の作業に関する知識の教育に関しては、機械、作業員に関わらず大きな問題である。この問題は特に多品種少量生産を行うとより重要なものとなる。一般に手作業はベルトコンベアを設置した生産ラインに作業員を配置し、各々の作業員が作業を行う形態が多い。この形態では、新たな製品を生産開始するたびに全作業員に作業教育を行う必要があるため、生産品目を増やすごとに高い教育コストを支払う必要がある。

また、作業教育は多くの時間を必要とし、作業教育に当たる熟練作業員あるいは指導員をその長い教育期間中拘束されるため、その分のマンパワーと人件費の損失も大きな問題である。

さらに、前述したように高齢者や障害者を作業員として採用すると、さらなる教育コストの上昇が予想される。ただ、生産機械においても全く同じ問題が発生するため、手作業に独特な問題とは言えない。

### 2.1.3 手作業の現況

このように、手作業は多くの利点がある代わりに多くの欠点もかかえている。これらの特徴から、手作業は自動化できない作業を代替して行う、いわば緊急避難的な生産手法として認識されてきた。

しかし近年では手作業の利点に注目してその利点を生かすために新しい手作業のあり方を模索し、新たな手作業の手法を確立している生産現場も多い。本項では、現代における手作業のさまざまなあり方の例を紹介する。

#### セル生産

セル生産では、多能工化した従業員による、高い多品種少量生産への適応性と各自の創意工夫による高能率化、モチベーションの向上といった利点が得られる。当然ながら高度な作業教育が必要となるが、多品種少量生産への対応や作業者の能力を高めるシステムとして、セル生産を導入する企業が増えている。図2.1はセル生産を導入した工場の写真である。ベルトコンベアが見あたらず、作業者が各々のスペースで組み立て作業を行っている姿が見られる。



図 2.1: セル生産の現場

セル生産の特徴は以下のようにまとめられる。

- 2 多品種生産への高い適応性：ベルトコンベアを使った流れ作業と違いベルトコンベア上の作業員全員に作業教育を行う必要が無くなるため、生産品目増加時の教育コストが低下する。
- 2 きめ細かい生産編成：生産量に応じて適切な量のマンパワーを1人単位でつぎ込むことができるため、きめ細かい生産編成が可能であり、したがって少ない編成ロスで多品種の生産が可能である。
- 2 労働意欲の改善：各々の作業員が工夫して独自の組み立て手法を確立し、効率の良い組み立てを行う手法を追求することができるため、高い労働意欲を保つことができる。
- 2 質の高い労働力を確保する必要性：個々の作業員に高度な組み立て知識と技術が要求されるため、質の高い労働力が必要である。2.1.2で述べたような、ほんの数ヶ月で職を離れる作業員が多い生産現場でセル生産を導入することは、教育コストがかさむばかりで生産性の向上を望むことができない。
- 2 高度な教育の必要性：一人完結作業を行うためには高度な教育を行う必要があり、作業教育コストが向上しがちである。

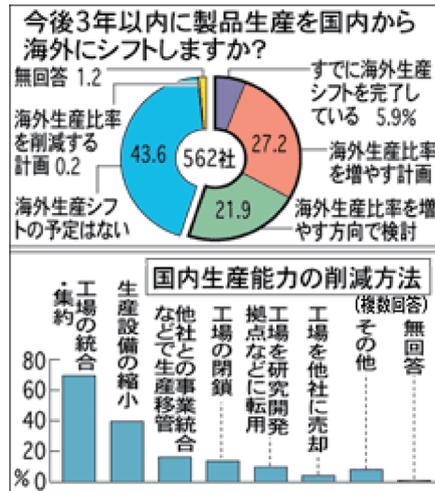


図 2.2: 生産現場の海外移転 (2001 年日経新聞調べ)

### 生産現場の国外移転

図 2.2 に示すように、近年、国内の高コスト体質を嫌い、人件費の安い国外へと生産ラインを移転する企業が多くなっている。

海外移転により、安い人件費によるランニングコストの抑制と質の高い作業員を確保することが可能になる。一般に人件費は下方硬直性を持つため、日本国内が未曾有の不況とはいえ人件費の高コスト体質が改善する見込みは少ない。そのため、中国や東南アジアのような現在人件費の安い地域に生産ラインを移転することは、ランニングコストの抑制策として有効である。また、そのような地域では質の高い作業員を大量に確保することが可能であり、さらなる海外移転へのモチベーションに繋がる。

しかし、生産ラインを海外に移転する場合には、現地作業員に新たな作業教育を行わなければならない。これに伴い多大なコストが必要になる。海外の生産拠点で新たな製品を生産する場合、生産手法を知っている日本人が日本から派遣され、作業教育を行うことになるが、その際に言葉の違いにより現地作業員との意志疎通が難しいため、日本人作業員を相手の作業教育に比べ多くの時間を要することになる。

### 流れ作業

実際の生産現場では、セル生産も国外移転も選択できない場合がある。それは、都市部に高価値、大規模な工場を保持し、移転するにはコスト的に引き合わない場合や、中小規模の工場で海外移転のきっかけが無い場合である。また、電気回路の組み立てのように、工程が多岐に渡っているためセル生産を導入できない組み立て作業も多く存在する。

このような生産現場では従来の流れ作業が連綿と続いている。その利点と欠点は2.1.2で述べたとおりである。

このように、手作業に関する変化はそれぞれ一長一短であり、さしあたって低い生産速度と作業教育の問題を解決するような生産手法は未だ確立されておらず、模索されている最中である。特に、作業教育に関しては問題は深刻である。高齢者、障害者の社会参加に繋がるという利点やセル生産、国外移転における利点は、実際には作業教育の負担増加を代償として得られたものであり、作業教育は手作業における深刻なボトルネックとなっているのが現状である。

上記の問題を解決するためには、画期的なブレイクスルー、すなわち前述した手作業の欠点を克服するような技術や思想が必要である。

## 2.2 作業支援と拡張現実感

前節で述べたように、手作業には未だ多くの問題が残されている。この問題を解決する一つの方策として、拡張現実感を用いた作業支援環境を構築することが考えられる。

本節では拡張現実感を概説した後、拡張現実感に関連する既存の研究について述べ、前述のような手作業の支援に適用できる拡張現実感技術とその特徴について述べる。

### 2.2.1 拡張現実感の定義

拡張現実感 (Augmented Reality: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」である<sup>[4]</sup>。その定義からは五感を始めとする人体の様々な感覚を基本とした拡張現実感が考えられるが、視覚を基本とした拡張現実感が研究や実用の対象となることが多い。

### 2.2.2 拡張現実感関連の既存の研究

本項では拡張現実感に関連する既存の研究を紹介する。

#### DigitalDesk

拡張現実感を応用した最も典型的で有名な研究が DigitalDesk<sup>[5]</sup> である。図 2.3 に示すように、上方に設置されたプロジェクタにより机の上にコンピュータの画面が投影され、机の上に置いてある現実の物体とプロジェクタによって投影された仮想の物体を区別することなく操作することができる。紙に書いた文字や図形はコンピュータに

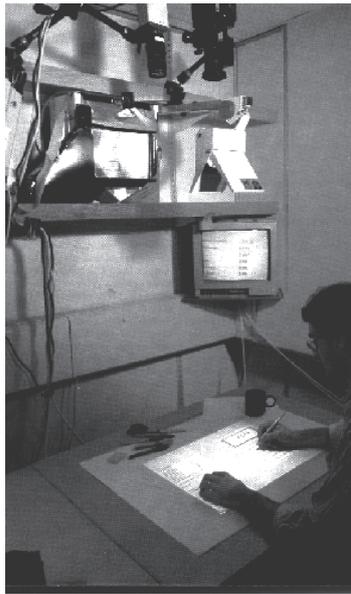


図 2.3: DigitalDesk(1) DigitalDesk 概観

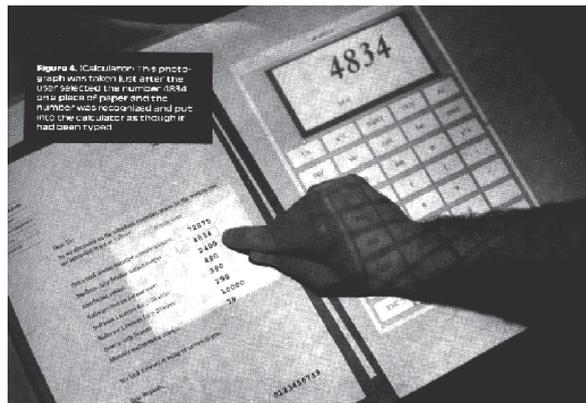


図 2.4: DigitalDesk(2) 電卓アプリケーション

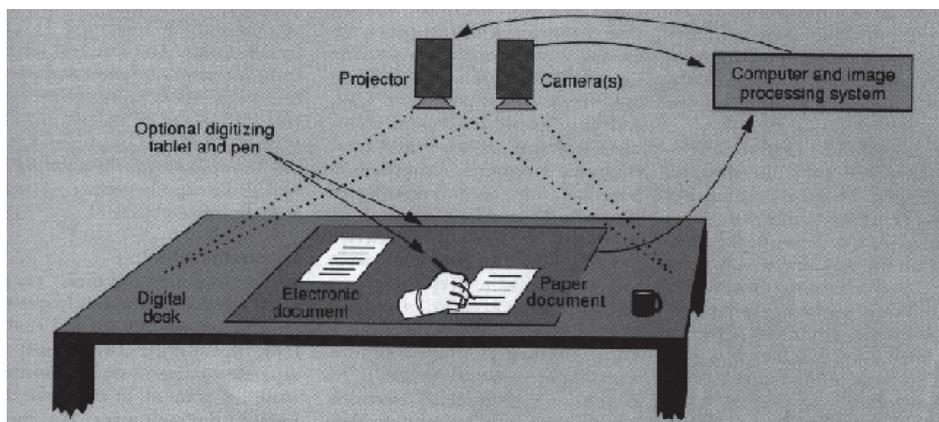


図 2.5: DigitalDesk(3) 作業状況の監視

データとして入力され、また逆に紙の上にコンピュータのデータを出力することが可能である。

図 2.4 はアプリケーションの一例で、利用者は電卓を利用しながら書類に対する作業を行っている。利用している電卓はプロジェクタによって投影された仮想の電卓であるが、利用者はむしろ仮想の電卓を現実の電卓があるように思って使いながら作業することができる。

利用者の動作は、図 2.5 にあるように常にカメラで作業状況を撮影し、電卓操作として認識する。このように机の上の全ての人の動きを DigitalDesk へ入力することができる。

DigitalDesk のように、現実世界とコンピュータの世界とが完全に混在しているようなシステムは、遍在するコンピュータ、ユビキタス (ubiquitous) コンピューティングへ発展するものとして注目を集めている。

## ELMO

通信総合研究所情報通信部門非常時通信グループでは、災害時のマルチメディア情報リアルタイム利用技術の研究開発の一環として拡張現実感の研究を行っている。この「ELMO」<sup>[6]</sup> と呼ばれるシステムは、半透明な LCD パネルを用いて実画像と CG の自然な合成を実現する拡張現実感システムである。図 2.6 にシステムの概観を示す。ELMO は利用者の位置情報に基づいた映像を提示して作業支援を行うことができ、被災者の位置情報を自動的に取得して災害救助活動を支援する技術や、利用者の位置情報などに基づいた情報提示により避難誘導などを支援する技術への応用が考えられている。

## ボーイング社航空機製造支援システム

最も有名で、かつ最も有効に実用されている拡張現実感を用いた作業支援システムが、図 2.7 に示すボーイング社の航空機製造支援システム<sup>[7]</sup> である。これは、複雑な作業となる航空機の電子機器配線ハーネスの作成作業の支援を目的としたもので、半透過型 HMD<sup>\*\*\*</sup> を用いて実際の配線ハーネスに重畳して作業情報を表示して作業員に適切な情報を与える。

## 透過ディスプレイによる作業支援拡張現実感

図 2.8 は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報処理学専攻で開発された、透過ディスプレイを用いた作業支援拡張現実感<sup>[8]</sup> の概観である。この研究では、透過

<sup>\*\*\*</sup> Head Mounted Display の略。頭部に装着する眼鏡型のディスプレイを指す。2.2.3 参照。



図 2.6: ELMO



図 2.7: ボーイング社の航空機製造支援システム

ディスプレイを用いて実際の電子部品が搭載されたプリント基板に作業支援情報を重畳させて表示することにより、電子部品検査の支援を行うことを目的としている。

### 2.2.3 拡張現実感要素技術の現状

本項では作業支援に適用できる拡張現実感の要素技術をいくつか提示し、その特徴について論じる。

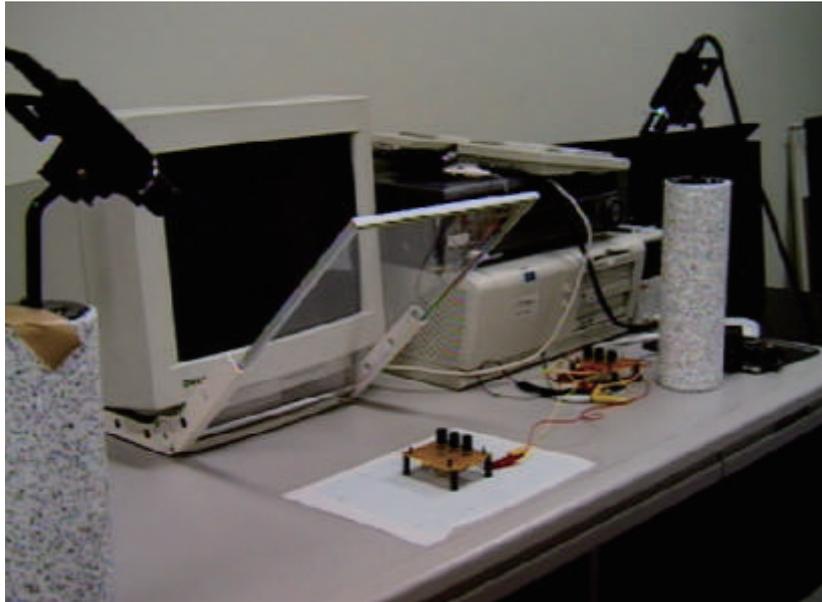


図 2.8: 透過ディスプレイを用いた作業支援拡張現実感

## HMD

半透過型のHMDに、コンピュータによる画像情報を現実世界に重畳させて提示する拡張現実感技術である。2.2.2で述べたボーイング社の航空機整備システムはこの方式であり、図2.9の例のように他にも多くの実績がある。

しかし、組み立て作業の現場で使うことを考えると、作業員がHMDを装着する必要があるため作業の邪魔になることや長時間の作業の場合に作業員に負担がかかるという欠点がある。

## 透過ディスプレイ

ハーフミラーや透過型液晶ディスプレイのような透過ディスプレイを用いて、現実世界に映像情報を重畳させて提示する拡張現実感技術である。

部品検査のように、作業対象を固定した状態で情報を提示する用途には適していると考えられるが、ベルトコンベアによる流れ作業のように作業対象が移動する場合に長大な透過ディスプレイが必要となること、大きな工具等を用いた作業を行う場合に透過ディスプレイ自体が作業の邪魔となること、現実の作業対象に透過ディスプレイから投影される映像情報を一致させるためには作業員の目の位置を固定しなければならないことが問題となる。

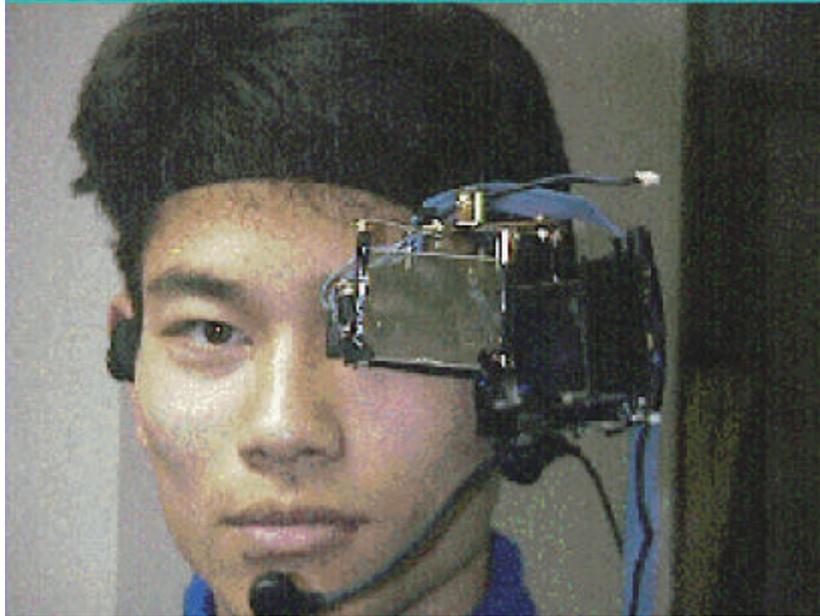


図 2.9: HMD の一例

## プロジェクタ

DigitalDesk のように、プロジェクタを用いて現実世界に映像情報を重畳させる技術である。

プロジェクタを用いるため情報量が多い上に情報を提示する範囲を広く設定することができ、また HMD と違って多くの人々が同時に利用することもできる。利用者が一切の機器を装着する必要がないため作業の邪魔にならない利点もある。

しかし、プロジェクタの照度は低く、プロジェクタによる拡張現実感を用いるには利用する環境を薄暗くする必要がある。そのため、目を酷使する事務作業には不適切であり、また医療や工場での作業のような高い照度が必要な環境で用いることもできない。

## レーザ光

レーザ光の光軸を高速に変化させたときにレーザ光が人間の目に残像となって残る現象を利用して、コンピュータによる画像を描画する拡張現実感技術である。レーザ光を用いた拡張現実感の実績が少ない。

プロジェクタを利用した拡張現実感と比較すると、プロジェクタと同様に広い範囲に情報を表示することができる上に同時に利用できる人数も多い。また、利用者が一切の機器を装着する必要がないため作業の邪魔にならない点も共通である。それに加

え、レーザ光は照度が高いため、プロジェクタの弱点であった照度の低さは問題にならない。

しかし、プロジェクタやHMDのようにテレビモニタを応用した情報提示法に比べると情報量の低下は否めず、また利用する機器の性能に描画する図形の精度や認識性を大きく制約される欠点がある。

### 音声によるガイド

音声による作業ガイド提示も拡張現実感技術の一つと考えることができる。

しかし、これは組み立て作業を行う工場で利用する場合には、安全に関する警告音等が聞こえにくくなること等、安全性に問題があり、また聾啞者の作業員の存在も考えれば、実際の組み立て作業現場に導入することは難しい。また、外国人作業員を対象にした場合も、言語を基本とした作業指示は負担が大きい。

## 2.3 研究の目的

これまで述べてきたように、手作業には機械化生産では得ることのできないような利点と、機械化生産では考える必要のなかった欠点が存在する。特に手作業においては作業教育が深刻な問題であり、作業教育の問題が解決すればセル生産への移行や生産現場の海外移転のような生産性向上を図る手段を採用することができる。

作業教育の問題を解決するには、作業時に作業員に適時情報を与えれば良い。作業に関する知識を与えるため前もって作業教育が必要であるが、もし作業時に随時作業員に必要な情報を与えるようにすれば、セル生産の現場では全く未熟練の作業員であっても複雑な工程を一人でこなせるようになるだろうし、海外の作業ラインに導入すれば、わざわざ日本から作業指導員を派遣しなくても済むだろう。

作業情報を与える方法には従来のテレビモニタを使った方法がまず考えられるが、テレビモニタへの情報提示ではテレビモニタと実際の作業状況を見比べてその対応関係を調べる必要があるため、視点移動が多くなって作業の負担を増す以外に注意ミスも生じる。そこで、作業情報を与える方法として、拡張現実感を利用することが考えられる。拡張現実感を用いて、作業対象に対して作業の手助けとなる情報を重畳して提示することができれば、テレビモニタのように作業対象と情報を見比べる必要がなく視点移動の少ない情報提示法が実現できる。

以上の背景に鑑み、本研究の目標は、手作業による組立作業を支援する情報提示手法を確立することとする。具体的には、情報提示に拡張現実感を用いた組立作業を支

援するための情報提示法を幾つか提案し、その情報提示法を評価し、評価に基づいて作業支援を行う作業支援環境を作成する。そして、作成した作業支援環境を用いて実験を行い、実験から得られた知見をもとにして情報提示法の改良点の確認と新たな情報提示法の提案を行うことを目的とする。

拡張現実感を用いた作業情報の提示は、2.2.2で述べたように既に幾つか先行研究<sup>[5][6][7][8]</sup>がある。しかし、それらは拡張現実感における要素技術の追求を主目的としており、作業支援を行うのに重要なノウハウの蓄積や情報提示の手法の有効性を調べることは目的とされていない。本研究の目的は拡張現実感を用いた情報提示による手作業の作業支援であるが、より実際の作業現場に貢献することができるように、拡張現実感を用いた情報提示におけるノウハウの蓄積や、情報提示手法の有効性も調べることを研究の範囲とする。そのため、高度な拡張現実感の要素技術や十分な作業支援のノウハウが必要になる複雑な作業は研究の対象とせず、単純な作業を対象として基礎的な知見を得る方針とする。

次に本研究の意義について述べる。本章の最初で述べたように、人々の嗜好の多様化や変化が多品種少量生産への要求を高め、多品種少量生産への要求が手作業による作業を盛んにした。そして、手作業は生産性が低いためコスト高になりやすく、生産性の低さは結果として製品の価格を押し上げるため、消費者は自分の嗜好に合う製品を高い値段で買わざるを得ない。従って、本研究の研究成果によって手作業の生産性が向上すれば、消費者は低価格で手作業による製品を購入することができ、嗜好の多様化に合ったライフスタイルを送ることができるようになることを期待できる。

本研究では、実際の研究開発にあたり、プロトタイプ開発法<sup>[9]</sup>と呼ばれる開発手法を採用した。この開発法の特徴は図 2.10にあるように、最初に作業分析と問題抽出を行った後の開発サイクルを、方向修正を行いつつ一定レベルの開発品ができるまで繰り返すことである。開発の初期段階で仕様を固めてしまう一般的なウォーターフォール開発法と比較すると、現場の声を適宜開発品に反映させることができるため、特にユーザインタフェースの開発に適している。

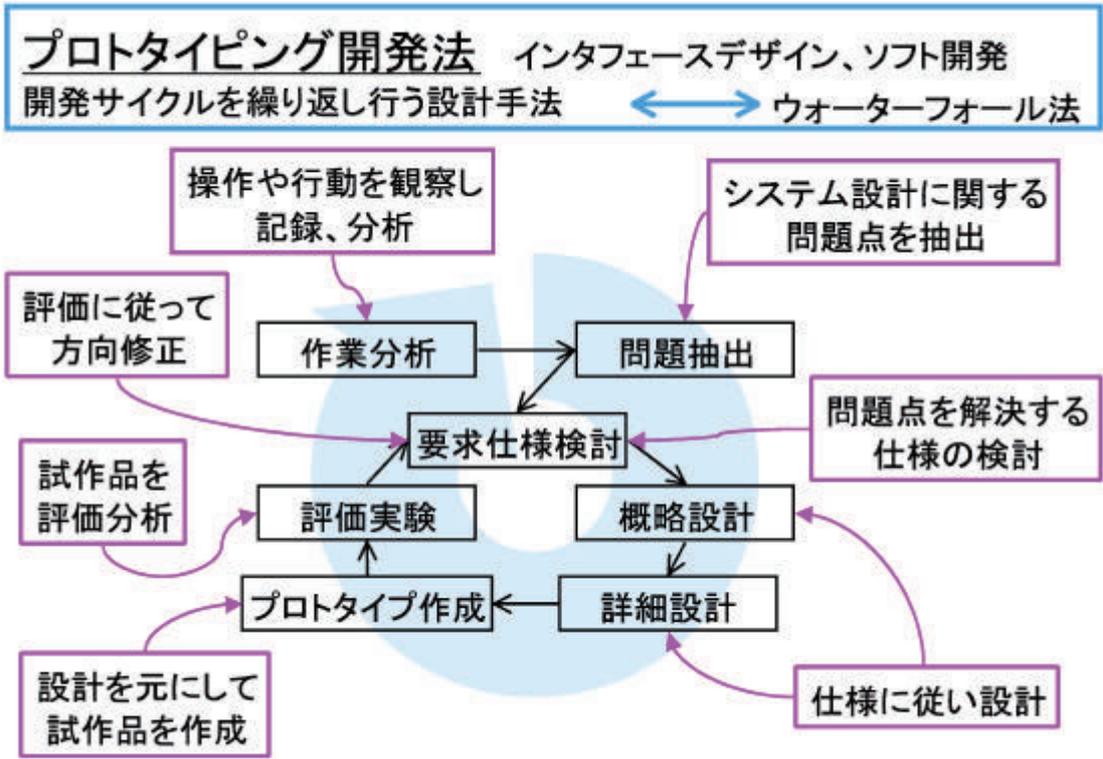


図 2.10: プロトタイプ開発法

## 第 3 章 拡張現実感を用いた作業支援環境

本章では、試作する作業支援環境の構成とその詳細、および用いる要素技術の性能評価について述べる。

はじめに、支援対象とする作業およびその作業分析について述べ、その分析結果から問題点を抽出して設定した作業支援環境の目標と要求仕様について述べる。次に、要求仕様をもとにして、試作する作業支援環境で用いることのできる作業支援の手法を幾つか提案する。最後に提案手法に基づき、作業支援環境の概略設計について述べる。

### 3.1 作業支援の対象



図 3.1: 解析対象の作業ライン

図 3.1は、ある電機メーカーの電気回路組み立て作業ラインである。このラインに流れてくる基板には、前もって機械により殆どの部品が取り付けられており、ここでは機械による取り付けが困難な大型の部品を、手作業で基板に取り付ける作業を行っている。

この作業ラインでは2.1.2に述べたような作業員の流動化が問題となっている。具体的には、一部作業員の入れ替わりが激しいため、未熟練作業員が多くなり生産性が低下し、同時に新しく入ってきた作業員に対する作業教育のコストが大きくなっている。また、類似の作業ラインを海外で立ち上げる機会が多いが、海外の作業ラインで作業教育を行うのは時間的にも費用的にも困難である。また、ベルトコンベアの上を流れる基板に対して行う作業内容は複雑な製品のセル生産に比べ容易に情報提示が行えるが、以上のような条件は本研究の研究範囲である拡張現実感を用いた情報提示におけるノウハウの蓄積や、情報提示手法の有効性の評価など本研究で目的とする拡張現実感を用いた組立作業の情報提示手法の確立によって大きく改善される可能性があるため、研究の対象として十分適している。

## 3.2 作業分析

本節では、上記で述べた作業の支援のため実際の手作業現場を分析し、その分析から抽出された具体的な問題について述べる。

### 3.2.1 分析対象

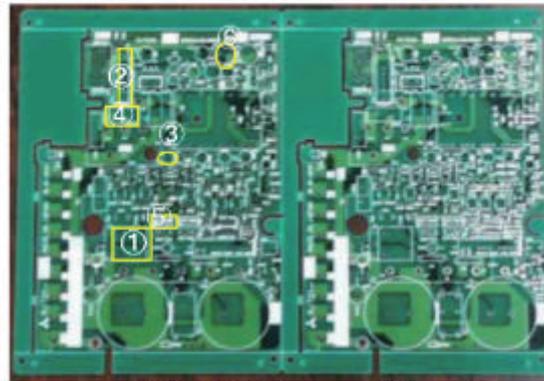
上記3.1で述べた作業は大略以下のような流れとなっている。

1. **基板の設置**： 基板取り付け枠をベルトコンベアに乗せ、その上に基板を取り付ける。
2. **部品の取り付け**： ベルトコンベア上を作業員から見て左から右へ流れる基板上に電子部品を取り付ける。
3. **取り付け終了**： すべての部品を取り付けたら、次の基板を作業するための準備を行う。

以下では、まず作業環境について述べ、つぎに取り付け手順について順番に述べる。

#### 作業環境

工場内の照明は窓から入る自然光とベルトコンベア上方に取り付けられた蛍光灯によるものである。自然光は窓のブラインドによって調整することができる。作業時の照度は、9月の午後2時に測定したところベルトコンベア上で600から1100Lux程度であった。蛍光灯の直下では照度が高く、そうでないところは照度が低い。



1	OSH1625SP	FIN2
2	BKO-CB0034H01	HIC1
3	UPLIH470MEH1TA	C10
4	TNR15G471K	VAR2
5	HCPL7800	IC1
6	UPLIC681MPH1TD	C2

図 3.2: 作業指示書 (模式図)

作業ラインではベルトコンベアが作業台に取り付けられている。作業台の前方には作業指示書と部品の極性等の注意書きが貼られており、作業員が前を向いたときにこれらが見えるようになっている。図 3.2 に作業指示書の例を示す。なお、この作業指示書は基板の設計図から自動生成される。

取り付ける部品は、あらかじめ幅 155mm、奥行き 105mm、高さ 30mm のアルミ製の箱 (以下部品箱と呼ぶ) に入れて以下の 3 カ所に分けて配置されている。

- 2 ベルトコンベアと作業員の間にある奥行き 105mm の部品箱専用のスペース。作業員から見て横長になるようぴったりはめ込まれて置かれる。部品の種類や数によっては縦長になるよう立てかけて置かれることもある。
- 2 作業員から見てベルトコンベアの向こう側のスペース。
- 2 作業台とベルトコンベアの間。ここに部品箱を置く場合は、比較的大きな部品を入れた大型の部品箱が置かれる。

これらの部品箱の配置例を図 3.3 に示す。

なお、以下では作業手順について述べる。

## 基板の設置

基板には種類により様々な大きさがあるが、その基板を流すためのベルトコンベアの幅は一定である。そこで、ベルトコンベアの幅と同じ大きさの金属製の基板枠に基板を取り付け、ベルトコンベアに設置する。その際、基板は基板枠に蝶ネジで固定する。これらの基板枠は、あらかじめ作業員の背後に置かれている。

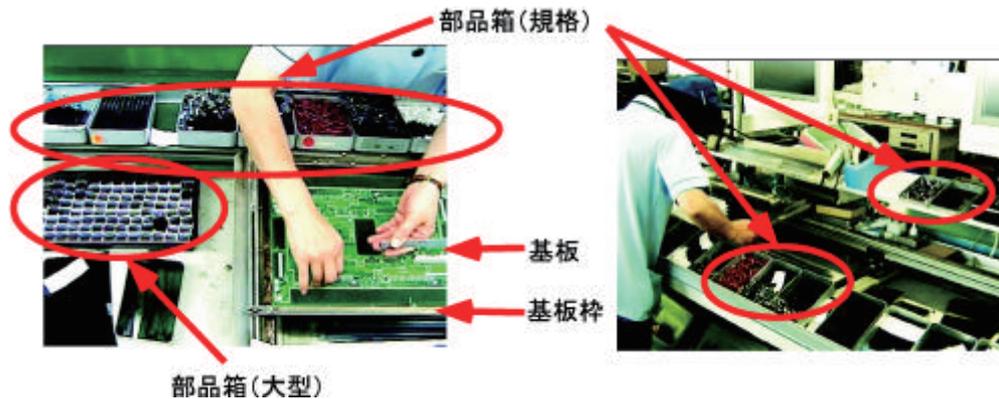


図 3.3: 部品箱の配置例

### 部品の取り付け

作業員は、ベルトコンベアに乗って左から右へゆっくりと移動している基板上に電子部品を取り付ける。ベルトコンベアの移動速度は可変であり、作業員の熟練度、取り付け部品点数、および作業の難易度に応じて変更することができるが、その速度は数cm/分程度である。

なお、この作業過程に至るまでに、比較的小さな表面実装部品は既に機械によって取り付けられていて、作業員が取り付ける部品は機械では取り付けるのが困難な比較的大きい部品である。1枚の基板上に取り付ける部品数は基板の種類により異なるが、概ね数個から数十個程度である。この作業過程で取り付けられる部品の例を以下に示す。

- 2 コネクタ (大、小)
- 2 抵抗 (セメント、モジュール)
- 2 コンデンサ (電解、フィルム)
- 2 リレースイッチ
- 2 コイル
- 2 トランス

これらの部品の中には、電解コンデンサやリレースイッチのように取り付け方向が指定されているものと、抵抗やコイルのように取り付け方向が指定されていないものがある。

基板には部品の取り付け方向や形などの情報がシルク印刷されており、作業員は作業指示書とこのシルク印刷を手がかりに部品を取り付ける。

## 取り付け終了

すべての部品の取り付けが終わると、ベルトコンベアによってそのまま基板が流れていくのに任せるか、ベルトコンベア上の基板枠を手で押し流して次の作業工程に渡す。その後、次の基板への作業を開始するために基板設置手順に戻る。

### 3.2.2 作業分析

作業の分析は実際の作業員による作業内容をビデオ撮影し解析する手法と、工場関係者に対するインタビューによる手法により行った。ビデオによる解析は、主に実際の作業内容の分析を目的とし、インタビューは、ライン生産を管理する工場関係者の立場から見た作業の背景情報や問題点の抽出を目的とする。

#### ビデオ解析

ビデオ撮影の際には、熟練作業員が作業している様子を約5分間にわたり撮影した。撮影時間が短時間のため、適切な作業教育や作業支援を行うための手がかりを得るためには、作業員の非効率的な動きではなく、効率的に動いていると思われる動作を分析する。

作業は上述のように基板の設置、部品の取り付け、取り付け終了と大きく分けて3つの作業からなるが、このうち部品の取り付け作業が作業時間の大部分を占めるため、部品の取り付けに関して詳しく分析を行う。

実際の作業員による作業内容を撮影したビデオ解析した結果、以下のような特徴が見られた。

**作業員の知識** 作業を行う間、作業員は一度も作業指示書を見ることがなかった。これは、作業内容を完全に記憶していることを意味する。

**部品箱の配置** 作業員は、基板が流れてくる方向である左側から順番に、部品箱を取り付ける順番に配置している。これには、部品箱と基板の間で手が動く距離が少なくなること、また作業指示書の代わりに部品箱の配置がそのまま作業手順となっているため作業指示書を見る必要が少なくなること、の2つの効果がある。

**部品の取り出しと取り付け** 同じ部品を複数取り付ける場合には、一度に必要なだけの部品数を左手に取り、右手で部品を取り付けつつ、同時に左手では次に取り付ける

部品の方向を確認し、適切な向きを向くよう回転させている。この動作は高度な取り付け技術と、取り付け部品に対する詳細な知識を持っていることを意味する。

**取り付け後** 部品取り付け後に、部品の取り付けが上手くいったか否かを確認する動作がときおり見られた。この動作は特に、トランスのような足の多い部品を取り付ける際に多く見られた。

## インタビュー

インタビューは生産ラインを管理する工場関係者3名に対して行った。その結果、以下のことがわかった。

**作業員による作業手順の改良** 作業指示書には部品の取り付け順序が記述されている。しかし、熟練した作業員はその取り付け順序通りではなく、独自に効率の良い取り付け順序を考案し、独自の取り付け順序で作業を行っている。設計図から自動生成する取り付け手順は取り付け効率の最適化を行ったものではないため、この作業員独自の工夫が生産速度を上げていると思われる。

**歩溜まり** 前述のように、取り付ける部品には電解コンデンサのような極性を持つものがある。このような部品の取り付けの際には、極性を逆に取り付けてしまうミスが発生しうる。また、類似の部品が一カ所に集中するような基板レイアウトになっている場合も、作業指示書と異なる場所へ部品を取り付けるミスが発生しうる。これらのミスは後の工程で検品しているため、実際に不良品を出荷することは少ないものの、生産性を下げる一因となっている。

**作業員の流動化** 工場では昼夜交代の勤務体制を取っている。このうち、昼間は熟練度の高い作業員が長年に渡って作業を行っているため歩溜まりも高く、生産効率もよい。しかし、夜間は有能な作業員を集めることが難しく、また職に就いている期間が短いという特徴があり、そのため夜間は勤務経験の少ない作業員が作業に従事することが多い。近年は作業員の流動化がさらに増加する傾向にあり、そのため十分な作業教育を行うことができず、歩溜まりや生産性の低下に繋がっている。

**海外での作業** 企業としては、生産コストの抑制を目的とした生産ラインの工場移転や、海外に生産拠点を持つ企業との提携等に対応する必要がある。このような場合、地

理的に離れているため日本からの技術者や作業指導員の派遣は時間、費用の両面で負担となる。また、作業マニュアルや作業指示書は日本語で書かれているため、それらの現地語への翻訳や現地文化に適応した就労形態への変更も行う必要がある。

**作業教育** 新しく作業員を雇った場合は、最初に作業教育を行う必要があり、その間は、新規作業員は作業を行うことができない。作業教育を行うには、作業を熟知している指導員が必要となるが、指導員を確保し作業教育を行わせることは金銭的にも、人材の有効理由の観点からも企業にとって負担となる。

### 3.2.3 考察

インタビューからは作業教育に関する話題が多く出たため、作業知識の習得や作業の熟練度の観点から熟練作業員による作業のビデオ解析結果を考察する。

ビデオ解析の結果、熟練作業員は2つの意味で「熟練」しているものと考えられる。

一つは作業そのものに熟練していることである。足が多数あり取り付けが困難な部品を難なく取り付けること、また取り付け作業を行うと同時にもう片方の手で部品の極性を確認するような複雑な作業は、作業そのものに熟練していないと行うことができない。また、独自に効率の良い部品取り付け手順を考案し、それに従って部品箱を並べ替えるような自発的な活動を行うことができることも作業そのものに熟練した結果と考えられる。未熟練作業員が熟練作業員と同様の効率で作業を行うには、実際に手を動かして習熟する以外にない。

もう一つは個々の基板に対して熟練していることである。これは、個々の基板の、どの部品を取り付けるか、どこに部品を取り付けるか、どうやって部品を取り付けるかに関する知識と方法に対して経験を積み十分な知識を持っているため、作業指示書を一切見ることなく作業することができる。これは1つ目の「熟練」とは異なり、極性の存在を知っている、シルク印刷の意味がわかる、作業指示書の読み方が解るといった基礎的な知識が身につけていれば効率は悪いながらも未熟練作業員も熟練作業員と同じように作業を行うことができる。

## 3.3 作業支援環境の構想

本節では、前節の分析をもとに、作業支援環境の目標を示し、そこから要求仕様の策定と概略設計を行って試作すべき作業支援システムを構想する。

### 3.3.1 作業支援環境の目標

本研究では、上述の作業分析の結果をもとに、部品取り付け作業を対象に以下のような作業支援環境の構築を目標とする。

- (a) 新規作業員に対する作業教育の負荷を軽減すること
- (b) 日本語を理解しない作業員も考慮すること
- (c) 作業支援環境導入時のコスト負担が軽いこと

(a)については、前述のインタビューより特に新規作業員の作業教育に必要な時間、労力、コストの低減をねらったものである。

(b)については、優秀な作業員の確保や作業員の人件費低減を目的として、外国人労働者を作業員として雇用する場合や、生産ラインを海外へ移転して現地の人を作業員として雇用する場合を考えたものである。

(c)については、作業環境の導入に際してコストがかかりすぎると生産コスト全体の大きな影響を与えるため、導入にかかるコストの低減が必要である。

### 3.3.2 要求仕様

本項では、上記の目標を実現するために作業支援環境に必要とされる具体的な要求仕様について述べる。

(a) 新規作業員に対する作業教育の負荷軽減を実現するため、作業支援環境は、作業員に対し作業状況に応じて以下の情報を提示するものとする。

- 2 どの部品を取り付けるか
- 2 どこに部品を取り付けるか
- 2 どのように部品を取り付けるか

つまり、新規作業員に対して、部品の種類、極性の有無、作業時の一般的な注意等の基礎的な知識やルールを教えるだけで作業員が部品の取り付け作業ができるようする。

(b) 日本語を理解しない作業員も考慮して、作業指示情報を言語によらず直観的に理解しやすい図形や記号を用いて、日本語が理解できなくても提示情報が何を意味しているのかがわかるようにする。

(c) 作業支援環境導入時のコスト負担軽減のために、既存の生産ラインに改造を加える必要も生産ラインを長期間止める必要もなく作業支援環境を導入でき、さらに作業支援環境自体も比較的安価な機材で構成するものとする。

すなわち、要求仕様は以下の通りである。

- (1) どの部品を取り付けるかを作業員に提示する
- (2) どこに部品を取り付けるかを作業員に提示する
- (3) どのように部品を取り付けるかを作業員に提示する
- (4) (1)～(3) の情報を作業状況に応じて提示する
- (5) (1)～(3) の情報を言語によらず図形や記号で提示する
- (6) 作業支援環境の導入時に既存の生産ラインを大きく改造せず、短期間で導入可能とする
- (7) 作業支援環境の各構成要素は比較的安価な機材で構成する

以上の要求仕様を目標と併せて表 3.1 に示す。

なお、本研究の目的は効率の良い作業支援手法を模索し評価することなので、作成する作業支援環境の汎用性は考慮せず、作業支援環境は分析対象の作業ラインに特化した作業支援を行う。

### 3.4 要求を満たすための提案手法

本節では、3.3.2 で述べた要求仕様を満たすために考えられる方法を提案する。

目標	要求仕様
(a) 新規作業員に対して行う作業教育の負荷を軽減する	作業員に対し作業状況に応じて <ul style="list-style-type: none"> <li>・ どの部品を取り付けるか</li> <li>・ どこに部品を取り付けるか</li> <li>・ どのように部品を取り付けるか</li> </ul> 以上のような情報を提示する
(b) 日本語を理解しない作業員も考慮する	作業指示情報を言語によらず直観的に理解しやすい図形や記号を用いたものとする
(c) 作業支援環境導入時のコスト負担が軽い	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 導入の際に既存の生産ラインに改造を加える必要も生産ラインを長期間に渡って止める必要もない</li> <li>・ 比較的安価な機材で構成する</li> </ul>

表 3.1: 作業支援環境の目標と要求仕様

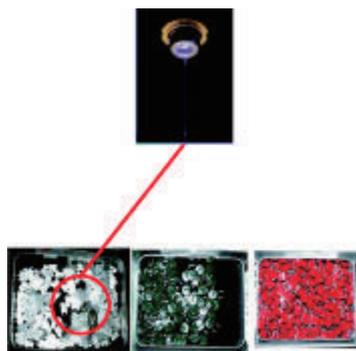


図 3.4: レーザ光で部品箱を指し示す

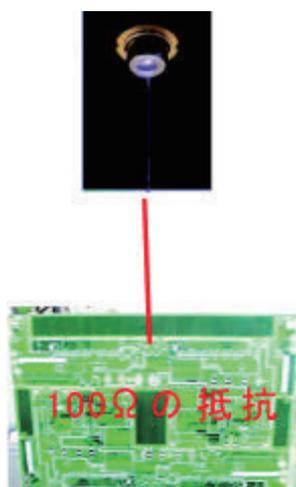


図 3.5: レーザ光で部品の名称を描画

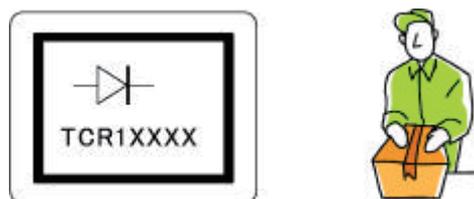


図 3.6: テレビモニタで部品の写真と名前を提示

### 3.4.1 作業対象部品指示の方法

要求仕様のうち「(1) どの部品を取り付けるかを作業員に提示する」を実現する方法を提案する。ここでは、要求仕様(1)に関連して、(5)～(7)も考慮する。

### 上方よりレーザー光で部品箱を指し示す

この方法は、図3.4のように上方よりレーザー光を取り付ける部品が格納された部品箱に照射し、次に取り付けるべき部品を指示する。この指示法は言語を用いないため要求仕様(5)を満たす。また、レーザー光を照射する装置はさほど高価ではなく、生産ラインを改造、停止させる必要もないため導入の負担は軽く、要求仕様(6)、(7)を満たす。さらに、作業指示書や後述のテレビモニタを用いた方法に比べると、作業時の視点移動が少ないという利点がある。

### 上方よりレーザー光で部品の名前や形を描画する

この方法は、図3.5のようにレーザー光を用いて作業対象の基板上に取り付ける部品の名前や形状を描画し、作業員に取り付ける部品を教示する方法である。要求仕様への適合性は、レーザー光で部品箱を指し示す場合とほぼ同様である。唯一の相違点はレーザー光で部品の名前を描画する場合に言語の知識がある程度必要となることであるが、部品の名前程度であれば問題ないと思われる。レーザー光で部品箱を指し示す方法と同様、視点移動が少ないという利点がある。

### テレビモニタに部品の写真と名前を提示する

図3.6のように、作業員の前に配置したテレビモニタに取り付ける部品の写真と名前を表示して作業員に情報提示する方法である。この指示法は言語を用いないため要求仕様(5)を満たす。テレビモニタは安価に導入することができ、生産ラインを改造、停止させる必要もないため導入の負担は軽く、要求仕様(6)、(7)を満たす。上記2つのレーザー光を使った情報提示に比べて視認性に勝り、多くの情報を提示することが可能である。

## 3.4.2 作業対象位置指示の方法

要求仕様のうち「(2)どこに部品を取り付けるかを作業員に提示する」を実現する方法を提案する。ここでは、要求仕様(2)に関連して、(5)～(7)も考慮する。

### レーザー光で取り付ける位置を照射する

図3.7のように、基板上の部品を取り付ける位置にレーザー光を照射し、作業員に部品の取り付け位置を指示する方法である。この方法も前述のレーザー光による情報提示手

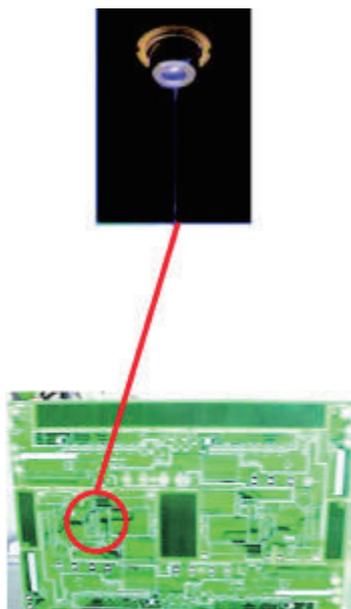


図 3.7: レーザ光で取り付ける位置を照射

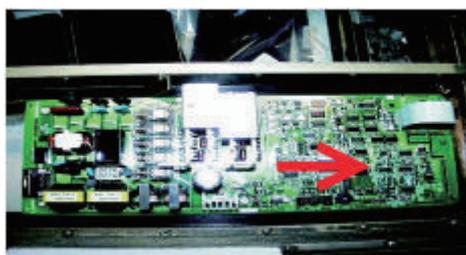


図 3.8: レーザ光で取り付け方向を指示

法と同様に、要求仕様(5)～(7)に適合している。視点移動が少なく、直感的に理解しやすいという利点がある。

#### テレビモニタで取り付ける位置を指示する

作業員の前に配置したテレビモニタに基板の写真と部品を取り付ける位置を表示する方法である。この方法も前述のテレビモニタによる情報提示手法と同様に、要求仕様(5)～(7)に適合している。上記のレーザー光を使った方法に比べて、簡単に高い精度で部品取り付け位置を指示することが可能である。

#### 3.4.3 部品取り付け方向指示の方法

要求仕様のうち「(3) どのように部品を取り付けるかを作業員に提示する」を実現する方法を提案する。ここでは、要求仕様(3)に関連して、(5)～(7)も考慮する。

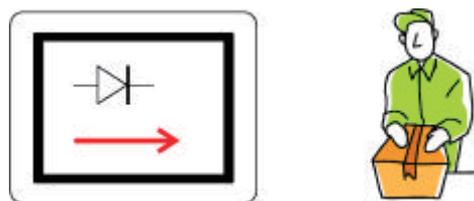


図 3.9: テレビモニターで取り付け方向を指示

#### レーザ光で取り付ける方向を提示する

図 3.8のように、作業対象の基板上にレーザ光を用いて、矢印などの部品取り付けの方向を示す図形を描画する方法である。この方法も前述のレーザ光による情報提示手法と同様に、要求仕様(5)～(7)に適合している。さらに、作業指示書やテレビモニターを用いた方法に比べると、作業時の視点移動が少ないという利点がある。

#### テレビモニターに部品を取り付ける方向を提示する

図 3.9のように、テレビモニターに部品取り付けの方向を表示する方法である。この方法も前述のテレビモニターによる情報提示手法と同様に、要求仕様(5)～(7)に適合している。上記のレーザ光を使った情報提示に比べて視認性に勝り、例えば、部品の取り付け方向を示す映像を提示することで作業員に対して理解しやすく取り付け方向を指示することが可能である。

### 3.4.4 作業状況を認識する方法

要求仕様のうち「(4) (1)～(3)の情報を作業状況に応じて提示する」方法について検討する。作業状況に応じて作業情報を提示するためには、作業支援環境に作業員の作業状況を認識させる必要がある。そのため、ここでは、作業状況を認識する方法について提案する。なお、要求仕様(4)に関連して、(6)、(7)も考慮する。

#### 押しボタンスイッチにより作業状況を知らせる

作業員の前に配置した押しボタンスイッチを用いて作業支援環境に作業状況を通知する仕組みである。具体的には、部品の取り付けが終わるたびに押しボタンスイッチを押し、取り付け作業がどの段階まで進行しているかを作業支援環境に認識させる。この方法は開発が容易で機器自体も安価であるため要求仕様(6)、(7)を満たしている。さらに、操作法が簡単のため作業員に利用方法の説明が必要でない利点がある。

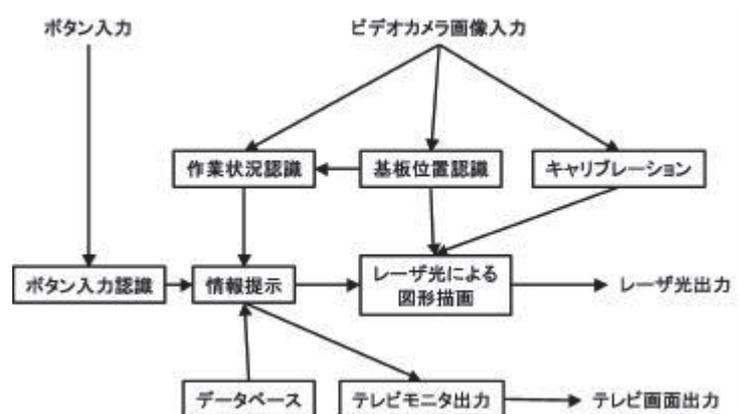


図 3.10: 概略設計図

### 作業状況を自動的に認識する

上方からビデオカメラで作業の様子を撮影し、その画像を画像認識して作業員が部品を取り付けたことを自動的に認識する方法である。ビデオカメラや画像取得デバイスは比較的安価であるため要求仕様(6)、(7)を満たしている。また、上記の押しボタンスイッチを使う方法に比べ、作業員がボタンを押す必要がないため、作業員の負荷が少ないという利点がある。

## 3.5 概略設計と機能構成

前節に述べたように、本システムに適用する作業支援法には様々な選択肢が存在する。本研究ではこれまでに述べた方法のそれぞれに対して適用可能性を試験し、最適なものを採用する方針とする。本節では、前節で述べた作業支援の方法を実現する作業支援環境の概略設計を行い、設計において必要とされた機能の構成について述べる。

### 3.5.1 概略設計

作業支援環境の概略設計図を図3.10に示す。作業支援環境は、外部からの入力として、押しボタンスイッチによる入力とビデオカメラにより撮影される作業状況の映像を取得する。作業支援環境は押しボタンスイッチによる入力か、または基板位置認識機能から通知された基板位置と、ビデオカメラ映像を作業状況認識機能で処理した結果をもとにして、現在作業員が行っている作業を認識する。この認識結果をもとに現在行っている作業に関する情報をデータベースから取得し、テレビモニタとレーザー光による図形描画機能により次に行うべき作業の情報を提示する。レーザー光による図形

描画機能には、基板位置認識機能から基板の位置が、キャリブレーション機能からレーザー光とビデオカメラの座標の対応関係が通知される。レーザー光による図形描画機能はこれらの情報をもとにして、レーザー光を照射する。本作業支援環境が以上のような動作を行うために、以下に述べる機能が必要である。

### 3.5.2 基板位置認識機能

部品取り付け時には基板がベルトコンベア上にあるため、その位置は時々刻々と変化している。基板位置認識機能は、ビデオカメラで基板を撮影し、その画像の中で基板がどこにあるのかを認識することを目的とする機能である。

この機能は以下の提案手法で必要となる。提案手法には、レーザー光を用いた図形描画によって情報提示を行う方法を挙げた。その中でも、レーザー光を用いて部品を取り付ける場所を指示する方法を実現するためには、基板がどこにあるかを作業支援環境が認識する必要がある。また、情報提示切り替えの方法に作業状況の自動認識を採用する場合にも作業支援環境が基板位置を認識する必要がある。

### 3.5.3 作業状況認識機能

この機能は、ビデオカメラで撮影した画像と基板の位置をもとにして、作業員が現在どのような作業を行っているかを認識する機能である。3.4.4で述べた、作業状況を自動的に認識する方法のために必要な機能である。

この機能を実現するには2つの方法が考えられる。

1つは基板を高解像度のビデオカメラで撮影し、部品取り付け前と取り付け後の映像を比較して差分を取る方法である。これにより、どこにどのような部品が取り付けられたかを認識することができる。しかし、基板はベルトコンベア上を流れるため、移動する基板上の小さな部品を認識するためには、相当に高解像度かつ広角のビデオカメラを用意するか、ビデオカメラが常に基板を捉えるよう首振り機構と基板への自動追尾機能を用意する必要がある。

もう1つは、作業員の手動きを抽出して、作業員の手が部品の近辺に一定時間所在していたら作業員が部品取り付け作業を行ったものと判断する方法である。1つ目の方法に比較して、部品を取り付けていないのに取り付けたと判断されてしまう、あるいは逆に取り付けたのに取り付けていないと判断されてしまうような誤認識が多くなることが予想されるが、特殊なビデオカメラを用意する必要がなく、安価なハードウェアで実現できるという利点がある。

### 3.5.4 ボタン認識機能

ボタン認識機能は、指示ボタンを作業員が押したことを認識する機能である。この機能は3.4.4で述べた、押しボタンスイッチにより作業状況を知らせる方法で必要となる。

### 3.5.5 キャリブレーション

キャリブレーションは「較正」を意味する言葉であるが、本論文ではレーザー光で図形を描画するにあたってその特性を前もって評価する機能を、キャリブレーションと呼称する。3.4.1ではレーザー光を用いた情報提示手法を複数提案したが、その全てに必要となる機能である。

レーザー光で図形を描画する際には、レーザー光の照射方向を制御して光軸を高速に変化させて人間の目にその残像を見せることを利用する。そのため、図形を描画する際の情報は照射角度を基準としたものとなる。仮に平面に対し図形を描画することを想定すると、平面への距離や角度を前もって測定しておかなければ、意図した図形を描画することができないことは明白である。また、基板の特定位置に図形を描画する用途を考えると、どのような角度を与えれば基板上のどこにレーザー光が照射されるかというデータを予め計測しておく必要がある。

### 3.5.6 レーザ光による図形描画機能

「基板上的(あるいは作業ライン上の)どこにどういう図形を描画する」という情報を元にして、レーザー光の照射角度を連続的に制御する機能である。この機能はレーザー光を用いた情報提示を行う際に必要となる。

レーザー光による図形描画は残像を利用した技術のため、人間の目に認識しやすいようにレーザー光の速度を制御する必要があり、言い換えれば、複雑な図形を描画するときにも、単純な直線を描画するときにも光の濃度が一定となるように制御する必要がある。そのため、機能は2つの要素技術から成立する。まず、描画する図形を細かい直線へと分解して再構成する技術が必要である。次に、キャリブレーションで得た測定データを元にして、レーザー光の角度を決定する技術が必要である。

### 3.5.7 テレビモニタ出力機能

テレビモニタを用いて情報提示を行う機能である。3.4.1ではテレビモニタを用いた情報提示手法を複数提案したが、その全てに必要となる機能である。

### 3.5.8 データベース機能

作業支援環境が作業情報を提示するには3つの情報、「基板のどこにどのような部品を取り付けるのか」「どのような部品が存在するのか」「どのような手順で作業を行うのか」が必要になる。データベース機能は、これらの情報を蓄積・検索する機能である。この機能は、全ての情報提示手法において必要となる。

現在の作業現場では、上記の作業情報に関する情報提示を作業指示書を用いて行っている。この作業指示書はCAM<sup>10)</sup>用のデータを元にして自動的に作成している。作業支援環境を導入した場合、「基板のどこにどのような部品を取り付けるのか」と「どのような部品が存在するのか」に関しては、現在利用しているCAMデータから自動的に作成できるようにすることが望ましい。また「どのような手順で作業を行うのか」に関しても、より効率の良い作業手順が判明した場合に作業手順を素早く変更できるようにすると作業環境の改善につながる。加えて、将来自動的に効率の良い作業手順を作成するシステムを作成したときなどを考えると、変更がしやすく、他のシステムからの読み出し/書き込みが容易なデータベースを作成する必要がある。このように柔軟なデータベースを作成すると、作業支援環境の安価に導入できるという目標に貢献するものと考えられる。

## 3.6 まとめ

まず最初に実際の作業現場を分析し、作業教育が生産性向上のボトルネックとなっていることがわかった。そのため、作業教育を行うことなしに未熟練作業員が作業を行うことができれば生産性向上に寄与することができると考えた。以上の背景を鑑み、本研究では

- (a) 新規作業員に対して行う作業教育の負荷を軽減すること
- (b) 日本語を理解しない作業員も考慮すること
- (c) 作業支援環境導入時のコスト負担が軽いこと

の3つの項目を目標として設定し、目標を達成するために、

- (1) どの部品を取り付けるかを作業員に提示する
- (2) どこに部品を取り付けるかを作業員に提示する
- (3) どのように部品を取り付けるかを作業員に提示する

---

<sup>10)</sup> computer-aided manufacturing コンピュータで製造を支援するシステム

- (4) (1)～(3) の情報を作業状況に応じて提示する
- (5) (1)～(3) の情報を言語によらず図形や記号で提示する
- (6) 作業支援環境の導入時に既存の生産ラインを大きく改造せず、短期間で導入可能とする
- (7) 作業支援環境の各構成要素は比較的安価の機材で構成するものとする

以上の要求仕様を満たす作業支援環境を作成することとした。次に、要求仕様を満たす手法を以下のように提案した。

#### 2 作業対象部品指示の方法

- { 上方よりレーザ光で部品箱を指し示す
- { 上方よりレーザ光で部品の名前や形を描画する
- { テレビモニタに部品の写真と名前を提示する

#### 2 作業対象位置指示の方法

- { レーザ光で取り付ける位置を照射する
- { テレビモニタで取り付ける位置を指示する

#### 2 部品取り付け方向指示の方法

- { レーザ光で取り付ける方向を提示する
- { テレビモニタに部品を取り付ける方向を提示する

#### 2 作業状況を認識する方法

- { 押しボタンスイッチにより作業状況を知らせる
- { 作業状況を自動的に認識する

提案手法を実現するため概略設計を行い、以下のような要素機能が必要なことを抽出した。

- 2 基板位置認識機能
- 2 作業状況認識機能
- 2 ボタン認識機能
- 2 キャリブレーション
- 2 レーザ光による図形描画機能
- 2 テレビモニタ出力機能
- 2 データベース機能

## 第 4 章 試作した作業支援環境の概要

本章では試作した作業支援環境のハードウェアとソフトウェアの構成とその詳細、および要素技術の性能評価について述べる。

### 4.1 ハードウェア構成

本節では、作業支援環境を構成するハードウェアについてその全体構成を述べた後、特に詳細な説明と性能評価が必要と思われる構成機材について述べる。

#### 4.1.1 全体構成



図 4.1: ハードウェア構成図

図 4.1 に作業支援環境のハードウェア構成の概要図を、図 4.2 に構成機材の配置を、表 4.1 に実際に試作したシステムに利用した機材の一覧を示す。

図 4.1 のように、作業支援環境はノート PC を中心に構成した。これは、PC の持つ汎用性による容易な開発とノート PC の省スペース性を重視したためである。利用した PC の CPU は Intel 社製 Pentium III 1.33GHz、メモリは 256MB であり、OS は Windows 2000 Professional を用いた。

以下では、図 4.1 および図 4.2 に基づきハードウェア面から全体の動きを簡単に説明する。ベルトコンベア上方に配置されたビデオカメラからビデオキャプチャ I/F 経由で取り込まれた取り付け作業の映像は、まず基板位置認識機能で処理される。基板位置認識機能によってビデオ画像中の基板の位置が認識され、DA/AD コンバータを通して



図 4.2: 試作した作業支援環境の概要

ガルバノミラーとレーザダイオードをそれぞれ制御して任意の位置に図形を描画する。また、用いる作業支援の方法によっては同時にテレビモニタに作業支援のための情報を提示し、あるいは操作ボタンボックスの操作やビデオカメラ画像から取り込んだ画像から作業状況の認識を行う。

以下では、構成機材の詳細について説明する。

ノート PC	IBM 社 ThinkPad T23
DA/AD コンバータ	CONTEC 社 AD12-8
ビデオキャプチャ I/F	I/O データ社 USB-CAP2
CCD カメラ	SONY 社 CCD-MC100
ガルバノスキャナ	Cambridge Technology 社 6800HP
レーザダイオード	RS Components 社 213-3562
テレビモニタ	SHARP 社 LC10RV2-D
操作ボタン	自作

表 4.1: 構成機材一覧

## 4.1.2 DA/ADコンバータ

作業支援環境の試作に用いたDA/ADコンバータの写真と主要な仕様を、付録Aに示す。本DA/ADコンバータは、DA変換、AD変換、デジタル入力、デジタル出力が可能な仕様となっているが、本研究ではAD変換機能は用いていない。

DA/ADコンバータは、ガルバノミラーの制御、レーザダイオードの制御、操作ボタンからの入力を検知、以上の機能のためPCとの入出力を行う。具体的には、それぞれDA/ADコンバータのDA変換、デジタル出力、デジタル入力機能を用いて実装する。なお、DA変換を用いたガルバノミラー制御の詳細は4.5に譲る。

DA/ADコンバータを用いたアナログ/デジタル出力値の更新とデジタル入力の取得は、2000回/secの頻度で行った。更新頻度は可変であり、DA/ADコンバータそのものはそれ以上に高い頻度での入出力を行うことが可能であるが、DA/ADコンバータに接続するガルバノミラーやレーザダイオードの反応速度が遅いため、ソフトウェアの高速な処理を優先し2000回/secの更新頻度で十分であると判断した。この場合、DAコンバータ部のセトリングタイム<sup>※</sup>は典型値で16  $\mu$  secであり、更新時間500  $\mu$  secと比較して十分高速なため、セトリングタイムの影響を無視することができる。

なお、デジタル出力の出力電流は8mAと少なくレーザダイオードを発光させるには不十分なため、トランジスタによりレーザダイオードの電源電流をDAコンバータのデジタル出力でスイッチングしている。

## 4.1.3 操作ボタン

操作ボタンは、3.5.4で述べた、作業状況を認識するための押しボタンスイッチを押しボタンボックスに入れたものである。操作ボタンは3つのボタンから構成され、ボタンはそれぞれ「最初からやり直し」、「作業戻る」、「作業進む」を意味する。

操作ボタンは3つのボタンのOn/O<sup>®</sup>があるため、3bitで8状態を取りうる。操作ボタンの出力はDA/ADコンバータのデジタル入力部へ接続され、ボタンの状態がPCのソフトウェアに通知される。

## 4.1.4 レーザダイオード

レーザダイオードとは、半導体のダイオードの構造に似た発光素子であり、その構造を図4.3に示す。すなわち、レーザダイオードはダイオードのようにp型半導体とn

---

<sup>※</sup> 設定した電圧に到達するまでの時間

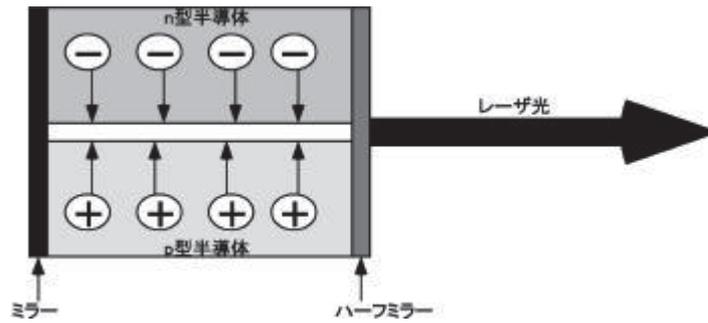


図 4.3: レーザダイオードの仕組み

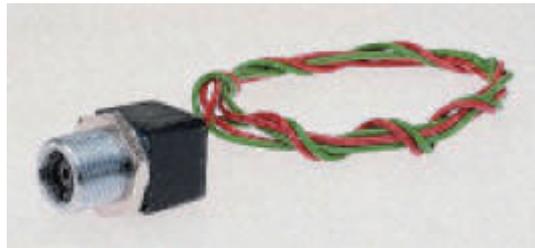


図 4.4: レーザダイオード

型半導体を接合させた構造となっており、接合部で電子と正孔が結合する際に生ずる光をミラーとハーフミラーで共振させて単一周波数の光を発光する。

本作業支援環境に利用したレーザダイオードを図 4.4 に示す。このダイオードは最大出力 1.0mW、波長 635nm(赤色)のレーザ光を照射する能力を持つ。

レーザ光をヒューマンインタフェースに利用する当たって懸念されるのが、その安全性である。レーザ光はエネルギー密度が高いため、光の強さによっては目や皮膚に傷害を及ぼす危険性がある。この問題は特にペンやキーホルダー型のレーザポインタが市販されるようになってから深刻になり、そのため、レーザ光における安全基準である JIS C 6802 規格が定められた。付録 B に JIS C 6802 「レーザ製品の安全基準」を掲載する。

作業支援環境で利用したレーザダイオードは、このうちクラス 2 の安全基準を満たすものを選択した。これは、万が一レーザ光が作業員の目に当たった場合の危険性を考慮しての処置である。

#### 4.1.5 ガルバノミラー

レーザ光を情報提示として用いる場合には、その光軸を高速に変化させ、レーザ光の残像により図形描画を行う。ガルバノミラーは、サーボモータで制御された 2 軸の鏡

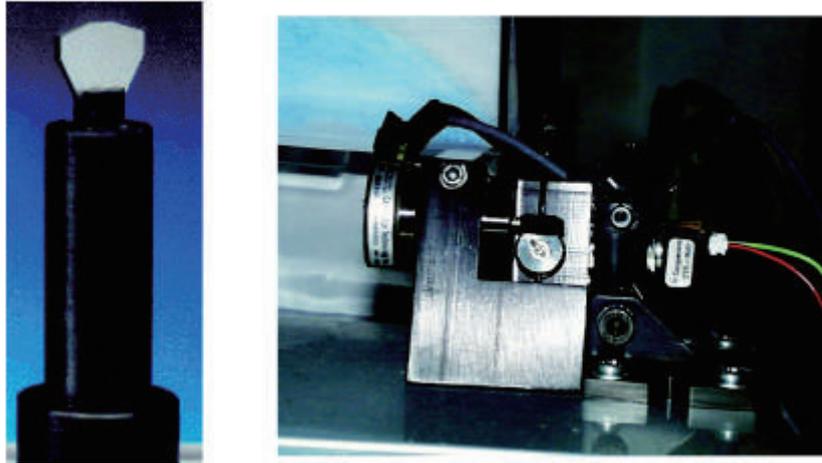


図 4.5: (左) ガルバノミラー (右) ガルバノミラーとレーザダイオードを取り付けた状態

によってレーザ光の光軸を任意の方向に制御する装置である。

装置は図 4.5 左に示すようなミラー部と制御部に別れており、電気信号を制御部に入力してミラーの角度を制御する。設置の際は、図 4.5 右のように専用の金属製の台座にミラーとレーザダイオードを取り付け、取り付け精度を確保する。

本研究で用いたガルバノミラーの制御について説明する。このガルバノミラーは  $-10\text{V}$  から  $+10\text{V}$  の入力電圧によりミラーの角度を制御する。この際、X 軸ミラーと Y 軸ミラーを独立して制御できるように、ガルバノミラーの入力は 2 系統用意されている。ガルバノミラーのメカ角 (ミラーの角度) は入力電圧  $1\text{V}$  あたり  $2^\circ$  の割合で変化するが、許容入力電圧は  $\{-10\text{V}$  から  $+10\text{V}$  の範囲内なので、メカ角は中立位置から最大  $\{-20^\circ$  から  $+20^\circ$  まで変化させることができる。また、レーザ光の光学角はメカ角の 2 倍変化するので、レーザ光は中立位置から最大  $\{-40^\circ$  から  $+40^\circ$  の範囲を照射することができる。なお、制御部には X 軸 Y 軸独立の減衰器があり、減衰器を調節してメカ角の変化量を連続的に抑制することが可能である。

なお、本研究で用いた DA コンバータは  $0\text{V}$  から  $+4.095\text{V}$  まで電圧を出力するため、レーザ光の光学角は、X 軸、Y 軸ともに  $0\sim 16.38^\circ$  まで変化させることができる。

#### 4.1.6 ビデオカメラとビデオキャプチャ I/F

使用するビデオカメラの主な仕様を表 4.2 に示す。ビデオカメラにはズームレンズが装備されており、基板周辺を大きく拡大して高解像度で撮影することが可能である。しかし、基板周辺を拡大して撮影した場合、撮影範囲が狭くなりベルトコンベア上を流れる基板を短時間しか撮影することができない。本研究では、なるべく広い範囲で基

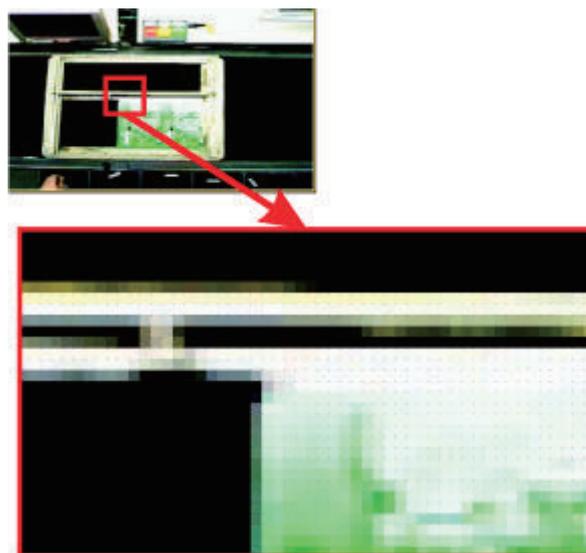


図 4.6: ビデオキャプチャI/F 経由で取得した基板の輪郭の画像

板を撮影するため、ビデオカメラを最も広角となるように設定して撮影した。

本研究では、PC との接続の容易性やコスト面の理由から、USB 規格でノート PC 接続するビデオキャプチャI/F を利用した。現在普及している USB 規格は転送帯域が最大 12MB と狭いため、動画のような広い帯域を必要とするデータを転送するには負担が大きい。そのため、本研究で使用するビデオキャプチャI/F は、通常取り込んだ画像に非可逆圧縮を行って PC に転送する。非可逆圧縮とは、人間の目に検知しにくい範囲で情報を省略し高い圧縮率を実現する処理である。見た目に殆ど劣化がない画像を非常に小さいデータ量で表現することができるため、静止画の規格である JPEG、動画の規格である MPEG を代表として広く利用されている技術である。しかし、非可逆圧縮を行った画像は見た目には殆ど劣化を認識することができないとはいえ、実際には失われてしまう情報もある。図 4.6 の上部は実際に基板が作業ライン上を流れている場面を撮影しビデオキャプチャI/F を介して取り込んだものである。一見画像の劣化なく取り込めているように見えるが、図下部のように拡大してみると基板の輪郭がにじん

撮像素子	CCD 1/4 インチ
画素数	41 万画素
焦点距離	3.4~10.2mm
F 値	2.8~4.0

表 4.2: ビデオカメラの主な仕様

であり、正確に基板の輪郭を抽出することが難しいことがわかる。そのため、ビデオキャプチャI/Fを介して得る画像は完全な画像ではなく、圧縮による画像劣化があることに留意して処理を行う必要がある。

## 4.2 ソフトウェア構成

本節では、作業支援環境を構成するソフトウェアについてその全体構成を述べた後、特に詳細な説明と性能評価が必要と思われる構成要素について詳しく述べる。

### 4.2.1 全体構成

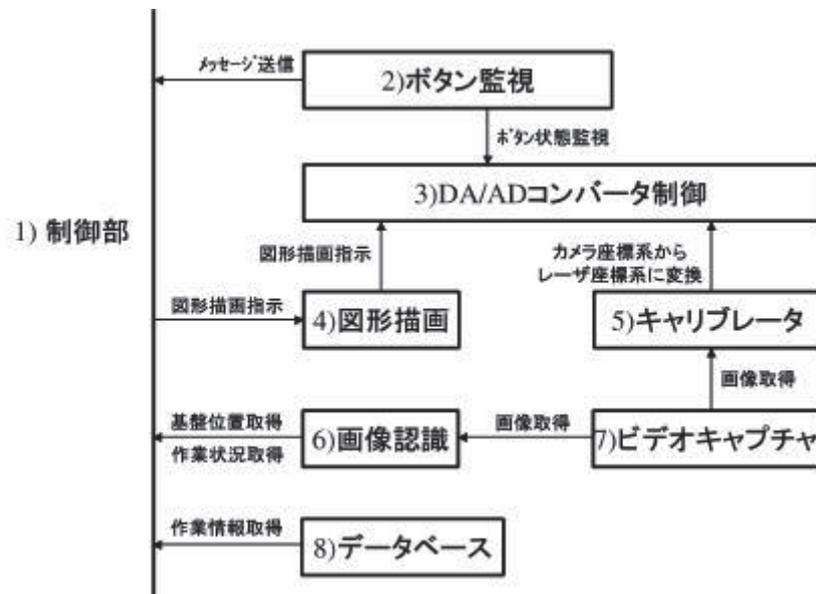


図 4.7: ソフトウェア構成図

図 4.7に作業支援環境のソフトウェア構成の概要を示す。図 4.7に示した各構成要素は実際には一つのソフトウェアとして統合されPCに実装されている。なお、ソフトウェアの開発にはMicrosoft VisualC++ 6.0を用いた。

以下では、各構成要素について説明する。以下の番号は図 4.7中の番号と一致している。

1. **制御部**：ソフトウェア全体の動作を統括する構成要素である。
2. **ボタン監視**：作業状況を指示するボタンの状況を常に監視する構成要素である。ボタンからの入力を感じると制御部に通知する。

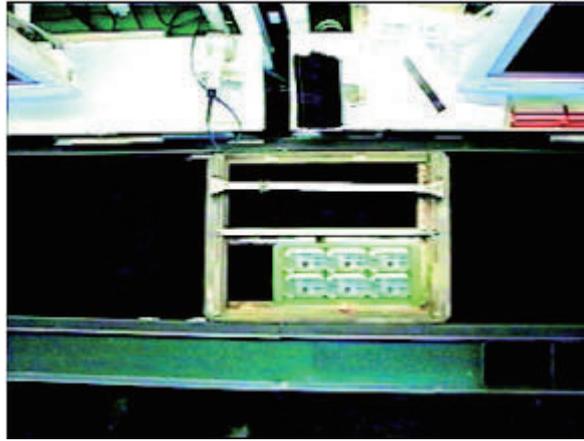


図 4.8: 処理前の画像

3. **DA/AD コンバータ制御**：図形描画を制御する機能と、ボタン監視を行う機能を持っている。前者は、図形描画部から送られてきた図形描画の情報とキャリブレータから送られてきた情報を利用して、DA コンバータへ渡す情報を作成する。後者はDA/AD コンバータのデジタル入力機能を利用して、ボタンが押されたかどうかを監視しボタン監視部に通知する。
4. **図形描画**：制御部の指示を受け、描画する図形を表すデータを作成する。
5. **キャリブレータ**：ビデオカメラの座標系をレーザ光の座標系に変換する機能を持ち、その機能はDA/AD コンバータ制御部で利用される。詳細は後述する。
6. **画像認識**：ビデオカメラで撮影した画像から2つの処理を行う。1つは画像中で基板の位置する座標を計測する機能であり、もう1つは手の色を抽出して作業状況を認識する機能である。詳細は、基板位置認識機能を4.2.2で、作業情報認識機能を4.2.3で後述する。
7. **ビデオキャプチャ**：ビデオカメラで撮影した画像を取得する。
8. **データベース**：作業支援に欠かせない基板、部品、作業内容に関する情報を蓄積・検索する機能である。詳細は後述する。

#### 4.2.2 基板位置認識機能

基板位置認識機能の概略は3.5.2で述べたが、ここでは実際の実現方法について詳しく説明する。

基板位置認識処理では、ビデオカメラから取り込んだ画像を3段階に分けて処理する。図4.8にビデオカメラから取り込んだ画像例を示す。3.2.1で示した実際の作業ライ

ンと違い、ベルトコンベアの背景が黒く着色されているが、これは基板位置認識等の画像処理を容易に行うことができるよう、基板位置認識処理に際してベルトコンベアの下に黒い暗幕を敷いているものである。

**基板配置範囲推定処理** 基板配置範囲推定処理ではビデオカメラで撮影した画像から基板の大まかな位置を推定する。この処理は基板の位置を限定して以降の画像処理を行う範囲を狭くし、処理速度の向上を図ることを目的とする。

1. ビデオカメラから取得した画像をその明度<sup>\*\*\*</sup>によりある閾値で二値化する。二値化後の画像を図4.9上に示す。白く見えるピクセル(画素)が二値化の際に明度が閾値を上回ったピクセル、すなわち1のピクセルとなっていることを表す。図のように、暗幕の敷いてある範囲内では基板と基板枠は1のピクセルとなっており、それ以外は0となっている。
2. この画像から、x方向に走査した時の値が1のピクセル数をy座標ごとに調べる。なお、画像では左上を原点とし、水平右にx軸を、垂直下にy軸をとっている。図4.9下が、y座標ごとの1のピクセル数の累計を表したグラフである。それを1階微分して1のピクセル数が急激に変化する座標を計算して2カ所求め、その座標を基板座標候補の上限と下限として設定する。同様に、x軸方向に対しても処理を行い、基板座標候補の上限と下限とする。

この処理を見てわかるように、基板位置認識機能は本研究で対象とする作業環境に特化したものである。基板枠は指定の物を利用する必要があり、また基板枠や基板が欠損無く正確に撮影できることを前提条件としている。

**基板位置推定処理** 基板配置範囲推定処理で推定した範囲内から、基板の位置を推定する。本研究の作業対象の基板は例外なく長方形であり、またビデオカメラで撮影した画像もほとんど歪みがないため、ここでは基板が画像内で長方形として撮影されているものと仮定して処理する。

この処理は以下の手順で行う。

1. まず、基板配置範囲推定処理で抽出した二値化画像をy方向に3等分する。図4.10に3等分した例を示す。
2. 次に、図4.11に示すように基板四隅の推定を行う。以下の説明では、図4.10のように3等分したときの各部分を上から順に、上部、中部、下部との表現する。

---

<sup>\*\*\*</sup> 色を赤、緑、青に分解したときに、3つの中で最も高い値

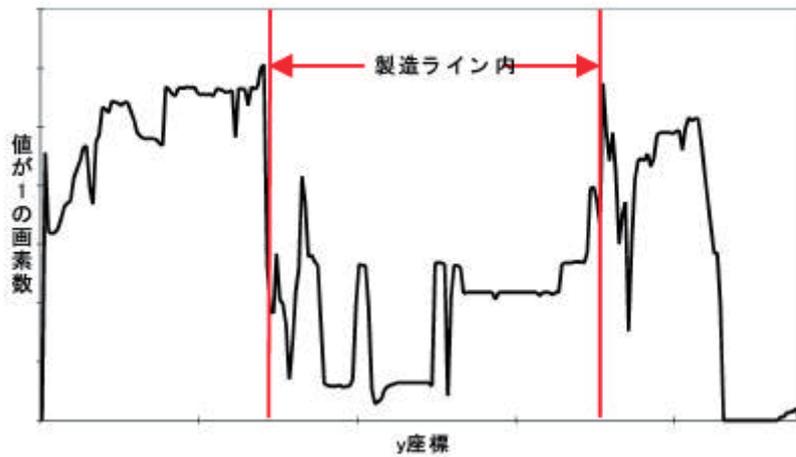


図 4.9: 基板配置範囲推定処理

**基板の右端の推定** 二値化画像の上部を上端から下端まで走査し、値が1のピクセル数を数える。この処理を右端から左方向に走査して1階微分を行い、最初にある閾値以上となった場所を基板の右端とする。



図 4.10: 基板を縦方向に3等分した例

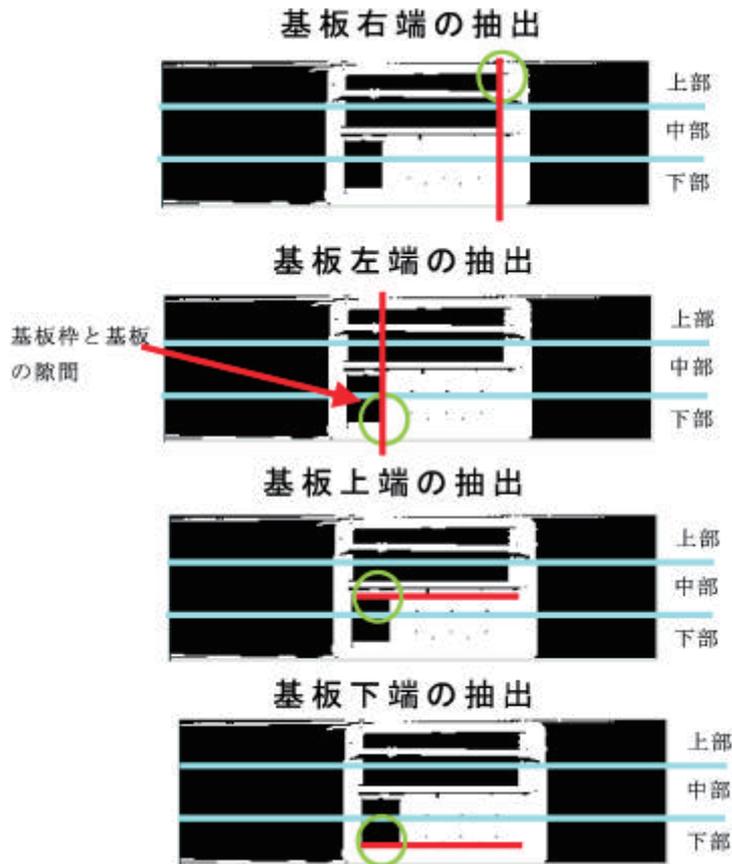


図 4.11: 基板四隅の位置推定

**基板の左端の推定** 基板枠の下部で、基板枠と基板の隙間を求める。この隙間の右端が基板の左端にあたるため、隙間の右端の値を基板の左端とする。

**基板の上端の推定** 基板の左端の推定で求めた基板枠と基板の隙間を拡大していき、基板枠の中部で隙間にあたる部分を検出する。このとき、隙間の上端を基板の上端とする。

**基板の下端の推定** 基板の左端の推定で求めた基板枠と基板の隙間の下端を、基板の下端とする。

**座標補完処理** 作業員が部品を取り付ける際には、図 4.12 のように作業員の手が基板の上にさしかかってしまい、基板配置範囲推定処理や基板位置推定処理が期待している、基板全体がビデオカメラで撮影した画像に映っているという前提条件が崩れ、正確に基板の座標を推定できなくなることがある。そこで、このような場合には、ベルトコンベア上を移動する基板の速度が一定であることを利用して、過去の基板位置座



図 4.12: 作業員が基板に部品を取り付けているところ

標データから現在の基板位置を推定する。これにより短時間であれば基板上に手が映り込んでいても基板位置座標が正しく補完される。

具体的には、基板の左右端の変化速度が一定であると仮定し、基板位置推定処理で推定した座標の信頼性を最小自乗法によって評価する。信頼性が高いと判断した場合は基板位置推定処理で推定した座標を現在の基板位置とするが、信頼性が低いと判断した場合はその位置座標は採用せず、過去の基板位置座標データをもとに推測した基板位置座標を出力する。

### 性能評価

以上の処理を経て得られる基板座標は、上記のような作業員の手による測定誤差、4.1.6に述べたような画像圧縮誤差、推定を明度を基準にして行っているため明るさの変化に対する脆弱性等の理由により推定した基板位置に誤差が含まれている可能性がある。そのため、基板位置認識機能の性能評価を行い、その機能を確認する必要がある。

性能評価のために行った実験の詳細は付録 C に譲るが、実験の結果より、基板位置認識機能は十分な精度を持って基板位置を測定できることがわかった。

### 4.2.3 作業状況認識機能

この機能は、ビデオカメラで撮影した映像から部品の取り付け状況を認識することを目的としたものであり、その概略は 3.5.3 で述べた。

部品の取り付け状況を認識するには、基板を高解像度のビデオカメラで撮影し、部品を取り付けたときと取り付けしていないときの差分を取って部品の取り付け状況を把



図 4.13: I成分の抽出

握する処理方法が考えられるが、基板はベルトコンベア上を移動するので、画角が広くかつ高解像度のビデオカメラとビデオキャプチャI/Fを用意しなければこの手法を用いることができない。そのため、本作業支援環境ではビデオカメラで撮影した映像から作業対象の部品の周囲を監視し、作業対象の部品の周辺で作業員の手が一定時間停止している状態をもって部品の取り付けが行われたものと判断することにした。

部品の周辺に作業員の手があることを認識する方法には、ビデオカメラ画像から手の色を抽出する方法を採用した。画像から手の色を抽出するために、まずRGB色空間で表されたビデオカメラ画像の色空間をYIQ色空間に変換する。RGB色空間からYIQ色空間への変換式を式4.1から4.3に示す。

$$Y = +0.2990 \text{ } \text{€} R + 0.5870 \text{ } \text{€} G + 0.1140 \text{ } \text{€} B \quad (4.1)$$

$$I = +0.5959 \text{ } \text{€} R \text{ ; } 0.2750 \text{ } \text{€} G \text{ ; } 0.3210 \text{ } \text{€} B \quad (4.2)$$

$$Q = +0.2065 \text{ } \text{€} R \text{ ; } 0.4969 \text{ } \text{€} G \text{ ; } 0.2904 \text{ } \text{€} B \quad (4.3)$$

YIQ色空間では、皮膚の色はI成分に強く現れるため、I成分がある閾値を越えた部分を手とみなす。図4.13に、I成分が一定の閾値を越えた部分を黄色く着色した画像を示す。基板の周辺では手の部分だけが黄色く着色されていることがわかる。

#### 4.2.4 キャリブレーション機能

キャリブレーション機能の概略は3.5.5で述べた通りである。ここでは、その詳細について説明する。

レーザー光により図形を描画する場合には、DAコンバータからの電圧出力でガルバノミラーを制御し、レーザー光を偏光させるが、この時の描画指示情報は、DAコンバータ

の出力値を基準にして指示するのではなく、ビデオカメラで撮影した画像の中で、どこにどのような図形を描画するかを指示するものである。従って、図4.14のようにビデオカメラ画像の座標系(画面座標系)からDAコンバータ出力値の座標系への変換を行う必要がある。この機能がキャリブレーションである。

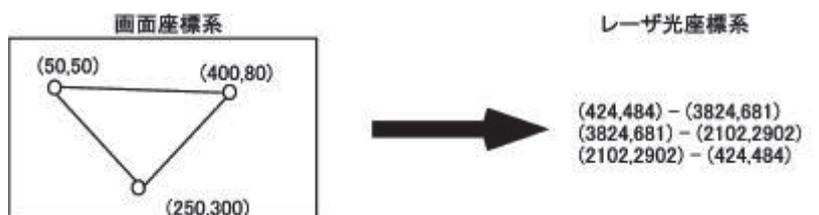


図 4.14: 画面座標系から DA コンバータ出力値への変換

キャリブレーション機能の要点は、画面座標系から DA コンバータ出力値へ変換するルックアップテーブルを作成することである。そこで、ガルバノミラーの可動範囲全域をくまなくレーザ光で走査し、そのときに観測された画面座標系でのレーザ光の座標と、DA コンバータ出力値の組み合わせを記録して前述のルックアップテーブルを作成する。

### アルゴリズム

キャリブレーションは以下のアルゴリズムで実現した。

**比較元画像取得** レーザ光を照射していない時点での画像を取得する。ここで取得した画像を以下「比較元画像」と呼ぶ。

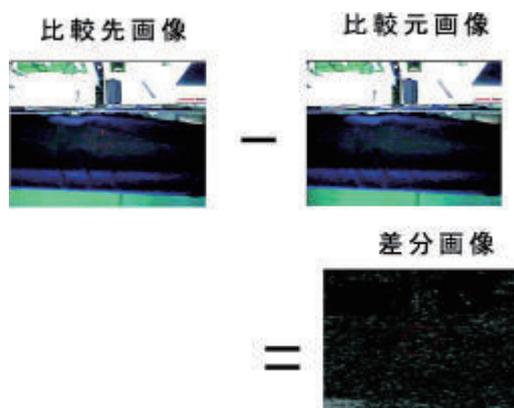


図 4.15: キャリブレーションの画像処理

**画像認識** DA コンバータのある出力値でレーザ光を照射し、その時の画像を取得する。この画像を「比較先画像」と呼ぶ。そして、図 4.15 のように比較元画像と比較先画像の差分を取り、差分画像を作成する。差分を取る方法は複数あり、その詳細は後述する。

差分画像の中から、比較元画像と比較先画像の差が最も大きい画素の座標を、画面座標系でのレーザ光を照射している位置座標として認識する。上記の過程を、DA コンバータ出力値を基準とした升目状に、ガルバノミラーの可動範囲全域に渡って繰り返す。

**データの検定** 理想的には、上記の手法で DA コンバータの出力値とレーザ光の照射位置との関係を表すルックアップテーブルが作成されるはずであるが、以下の理由により、レーザ光の照射位置を正確に認識することが困難な場合がある。

- 2 図 4.16 左上のように、撮影の際にはレーザ光が物体に当たって反射したときの分散が無視できない。そのため厳密に一点の座標とすることが難しい。
- 2 図 4.16 右上はレーザ光の反射が明瞭に撮影できている場合を示しているが、レーザ光の反射が明瞭に撮影できない場合も多い。明確に撮影できない条件を図 4.16 右下に示す。図では赤い円の中央部にレーザ光が照射されているが、その認識は肉眼でも困難である。
- 2 図 4.16 左下のように、赤色のレーザ光が白色で撮影される場合があり、レーザ光が赤色であることを前提としたアルゴリズムでは認識できない。

これらの理由により、上記のアルゴリズムから得られたレーザ光の座標が信頼できるか否かを検定し、信頼できる座標のみを用いてルックアップテーブルを作成する。この検定は上記のアルゴリズムでレーザ光の照射を升目状に行ったことを利用する。具体的には、正しくレーザ光の照射位置を測定できた場合に、DA コンバータ出力値と認識したレーザ光の照射位置にほぼ比例関係が成立する事を利用し、最小自乗法を用いて検定する。このとき、回帰直線から一定値以上離れている測定値は信頼性が低いと判断し、ルックアップテーブルから除外する。

図 4.17 に、検定の例を示す。横軸が DA コンバータ出力値、縦軸が画面座標である。図 4.17 中の青い点が測定されたレーザ光の照射位置であり、黒い直線がその回帰直線を表す。丸で囲ってある測定値があるが、これらは回帰直線からの距離が大きいため信頼性が低いとして除外された測定値である。

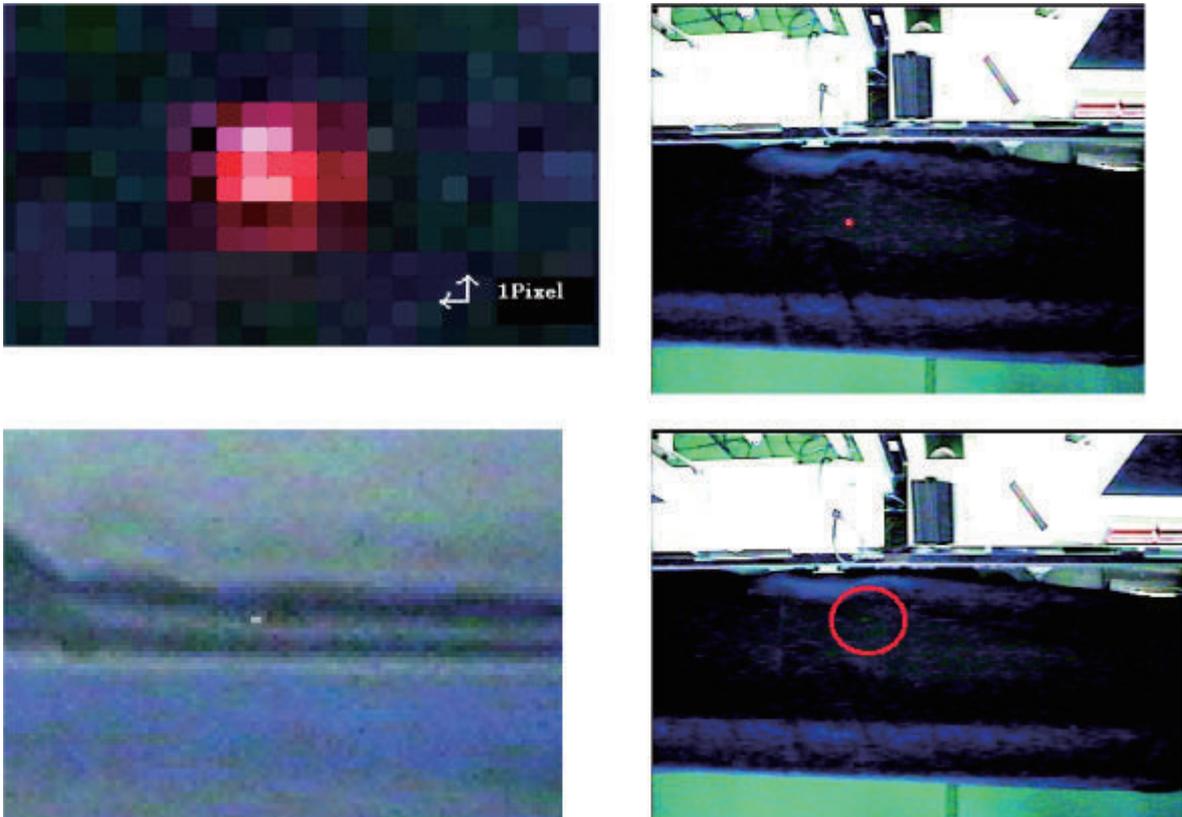


図 4.16: レーザ光の認識における諸条件

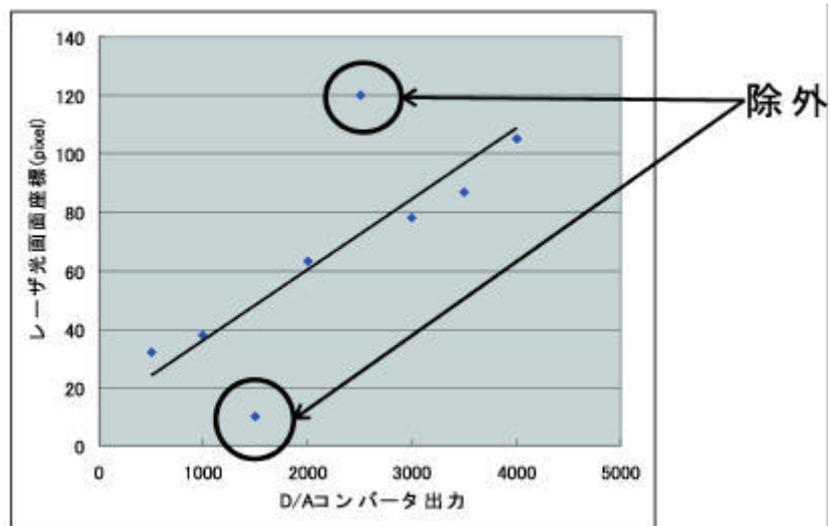


図 4.17: キャリブレーション測定値の評価

以上のような検定の結果から、信頼性が高いとされた測定値のみがキャリブレーション情報であるルックアップテーブルとして保存され、後述の図形描画処理の際に利用される。

#### 差分取得手法

比較元画像と比較先画像の差分を取る際、以下のような手法が考えられる。

- (1) レーザ光が赤いことを利用して、赤色のピクセルのみで差分を取る手法。
- (2) 比較元画像と比較先画像のヒストグラムを補正してから、赤色のピクセルのみで差分を取る手法。(1)の方法では画像取得中にビデオカメラのホワイトバランスが変化してしまった場合に著しく測定精度が下がることが考えられるため、その問題を改善することを期待する。
- (3) 明度で差分を取る方法。図4.17左下のようにレーザ光が赤色で撮影できない条件でも測定できることを期待する。

いずれの方法が精度良く認識できるのかを判断するため、性能評価実験を行った。実験の詳細は付録Dに譲るが、実験の結果より、明度で差分を取る方法が有効であるという知見が得られたため、キャリブレーションに用いる差分取得手法には明度の差分を用いることにする。

#### 4.2.5 DA/AD コンバータ制御機能

ここでは、DA/AD コンバータ制御機能について述べる。以下では、まず、DA コンバータ出力部について説明し、その後デジタル入出力について述べる。

ガルバノミラーの角度を制御するDA コンバータ出力部は、キャリブレーション情報と図形描画情報を入力とする。キャリブレーション情報は4.2.4で述べたように、DA コンバータ出力値と画面座標系でのレーザ光の照射座標のルックアップテーブルから構成される。図形描画情報は描画すべき図形の情報であり、画面座標系で表現されたベクトルデータ群として表される。図形描画情報は画面座標系で構成されているため、キャリブレーション情報を元にしてDA コンバータ出力値に変換する必要がある。具体的には、ルックアップテーブルから線形補間によりDA コンバータ出力値を求める。

変換によって得られたDA コンバータ出力値データ群は、DA コンバータ出力部内のバッファに蓄積される。バッファ内のデータは、その格納順にDA コンバータの出力値として出力される。DA コンバータの出力値は2000Hzの短い頻度で更新されるため、レーザ光の残像現象を使った図形描画が可能となる。

一方、レーザダイオードの On/O<sup>®</sup> を制御するデジタル出力機能は、図形描画情報に含まれているレーザダイオードの On/O<sup>®</sup> 情報をそのままデジタル出力する。この情報も DA コンバータ出力部と同様に 2000Hz で更新される。

また、操作ボタンの入力を得るデジタル入力機能も同様に動作する。すなわち、2000Hz の周期で操作ボタンの状態を検知し、もし変化があれば制御部へ通知する。

#### 4.2.6 図形描画機能

図形描画機能の概略は 3.5.6 で述べたが、本項ではその詳細を説明する。

##### 図形描画機能の詳細

図形描画機能は、制御部からの図形指示情報をレーザ光で描画するための細かいベクトルデータ群に変換して、DA/AD コンバータ制御機能に渡すことを目的とする。

DA/AD コンバータでは、前述のように 2000Hz の頻度でデータの更新が行われる。そのため、仮にガルバノミラーの可動範囲いっぱいを使った長い直線を描画する際に 1 つのベクトルデータ、すなわち直線の端点と端点を交互にレーザで照射するように表現してしまうと、ミラーの物理的回転特性により直線を描画し終わる前に次のデータに更新されてしまうため、直線全体を描画することができず、またミラーの動きが直線中央付近では高速に、端点で低速に動くため端点付近は色濃く、中央は色薄い直線を描画することになってしまう。したがって、どのような図形を描画するにしても細かく区切ったベクトルデータで表現する必要がある。また、曲線を描画するためには曲線を細かく区切った直線のベクトルデータで表現する必要もある。

図形描画機能を用いて実際に円を描画した例を図 4.18 に示す。実際のベクトルデータでは 24 角形の正多角形を描画しているが、見た目には円に見え、不自然でないことがわかる。なお、図 4.18 はデジタルカメラにより暗所で撮影したものであるが、その理由は明るい場所ではレーザ光による残像を利用した図形描画をうまくカメラで撮影することができないためである。

##### 視認性

図 4.19 に示すように、レーザ光で図形を描画して情報提示する際には考慮すべき点が 2 つある。1 つは図形の同時表示数であり、もう 1 つは図形の大きさである。作業支援環境はレーザ光の残像現象を用いて基板上に図形描画を行うため図形の線長が長くなるとレーザ光のエネルギーが分散してコントラスト比が落ち、さらにレーザ光が経路を走査する時間間隔が長くなるためちらつきが発生し、視認性が悪くなることが予想される。そのため、図形の同時表示数や図形の大きさには自ずと限界が生ずる。し



図 4.18: レーザ光で円を描画

かし、図形を同時に多く描画すれば情報量が増加し、図形を大きく描画すれば作業員にとって図形を発見しやすくなり、また複雑な図形を作業員にわかりやすく描画することが可能となる。

そのため、図形の同時表示数の限界と、図形の大きさの限界を調べ、情報量と視認性のバランスの取れた条件を調べるための実験を行った。実験の詳細は付録Eに譲るが、実験の結果、円を描画する場合、その半径は画面座標系で1ピクセル(実験条件時の軸空間で約4mm)程度が最も視認性に優れることがわかった。また、許容される図形の同時表示数は2個までで、特に視認性を重視する局面では1個のみの表示が望まれることがわかった。

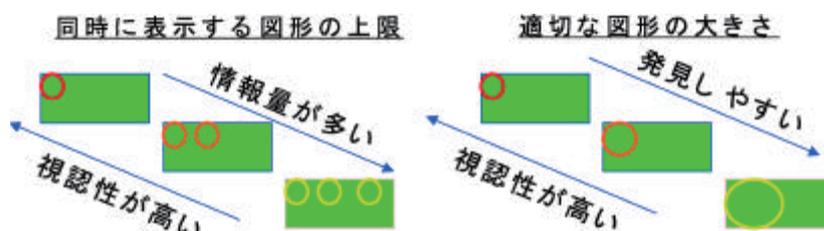


図 4.19: レーザ光視認性の評価項目

#### 4.2.7 データベース

データベースの概略は3.5.8で述べたが、本項ではその詳細を説明する。

作業支援環境では、「基板のどこにどのような部品を取り付けるのか」「どのような部品が存在するのか」「作業手順」の3つの情報を保持し検索するデータベースを作成する必要がある。またこのデータベースは新しい品目へ容易に対応するために変更がしやすく、既存の情報を有効利用するために他システムからの読み込み/書き出しが容易である必要がある。

そのため、データベースの実装はXML(eXtensible Markup Language)<sup>[11]</sup>を用いて行った。XMLは自己拡張が可能なマークアップ言語の1つであり、標準化団体であるW3C<sup>[12]</sup>によって標準化されている。XMLの特徴は文書構造を決定するための規則を文書の作成者が決定できることであり、上記3つの情報に適した文章構造を適当に設定することができる。また、標準化された規格のため、専用の編集ソフトがあり人力でデータベースを整備するのが容易であり、また他ソフトからのデータの移転、移出も容易である。

作業支援環境を試作する際には、上述した「基板のどこにどのような部品を取り付けるのか」「どのような部品が存在するのか」「作業手順」の3つの情報に対応するため、「基板情報データベース」「部品情報データベース」「作業手順データベース」3つのデータベースを作成した。このうち、基板情報データベースに関しては基板固有の情報を保持している既存のCAMデータからのデータ移入が可能であり、部品情報データベースに関しては部品管理データベースからのデータ移入が可能であると思われる。しかし作業手順データベースに関しては既存のデータベースから適切な作業手順を作成することはできないため、人間の手によって作成する、あるいは不適切な手順になるのを承知でCAMデータから適当に作成する必要がある。本研究ではこの3つのデータベースは人間の手によって記述した。本研究で実際に利用したXMLによるデータの例を、付録Fに掲載する。

### 4.3 まとめ

本章では、試作した作業支援環境の概要について述べた。まずハードウェアの概略の詳細について述べ、DA/ADコンバータ、操作ボタン、レーザダイオード、ガルバノミラー、ビデオカメラとビデオキャプチャI/Fについてその詳細を述べた。次にソフトウェアの概略と構成要素の詳細について述べた。特に、基板位置認識機能、作業状況認識機能、DA/ADコンバータ制御機能、図形描画機能、データベースについて、必要に応じて性能評価実験の結果を交えつつ詳細を述べた。

試作した作業支援環境の実際の設置方法および利用方法は次の第5章で説明する。

## 第 5 章 試作システムの評価

本章では、まず、3.4で挙げた様々な情報提示手法を評価し、最も適切と思われる情報提示手法を選択する。その後、選択した情報提示手法のみで作業支援環境を構成し、実際の作業ラインに作業支援環境を設置して被験者実験を行い、要素技術と情報提示手法の評価を行う。そして、最後に評価の結果をまとめ将来展望を述べる。

### 5.1 情報提示法の評価

3.4では様々な情報提示手法を挙げたが、作業支援環境を構成する際にこれらの手法を評価して、最も適切と思われる情報提示手法を選択することが必要である。本節では、適切な情報提示手法を選択するための評価とその結果について述べる。

評価は学校関係者と生産ライン管理担当者を対象としてインタビュー法を用いて行った。インタビューでは、実際に評価する各手法を試作して、それを対象者に見てもらい、視認性（見やすさ）と認知性（理解しやすさ）に関する意見を得た。

#### 5.1.1 作業対象部品指示方法の評価

ここでは、作業情報の中でも「どの部品を取り付けるか」を作業員に提示する方法を評価する。なお、評価する情報提示手法は、3.4.1で述べた手法である。

##### レーザー光で部品箱を指し示す場合

この手法は、図3.4のように、取り付ける部品の入った箱をレーザー光で照射して作業員に情報提示する方法である。

インタビュー調査では、視認性が低くわかりづらいとの意見が得られた。これは、下記の理由により視認性が劣るためである。

1. 基板と違って部品が箱の中に収納されているため描画対象が平面でなく、陰となってレーザー光の反射が見えないことが多い。
2. 部品が様々な色に着色されているため、レーザー光を判別しにくい。
3. 部品箱が数多くあるため探す範囲が広く、レーザー光の反射を見つけづらい。

4. 上記の問題を解決するためにはレーザ光により大きめの図形を描画して作業員に情報提示することが考えられるが、その場合には4.2.6で述べたように大きい図形を描画するとレーザ光のエネルギーが分散してしまい、さらに見づらくなってしまふ。

#### レーザ光で部品の名前や形を描画する場合

図3.5にあるように、レーザ光で基板上に取り付ける部品の名前や特徴、形状を描画して作業員に情報提示を行う方法である。

この手法を実現するため実際に試作してみたところ、ガルバノミラーの時間応答性の問題から文字のような複雑な図形を描画することは難しいことが判明した。そのため、簡単な図形を描画して部品の種類だけでもレーザ光を用いて提示するような機能を実装した。

しかし、インタビュー調査でこの手法の評価を行ったところ、大きめの図形を描画して情報提示を行うとレーザ光が暗くて見えにくく、逆に小さい図形で情報提示を行うと図形を判別しづらいとの意見が得られた。また、図形を描画すると図形のどの部分が部品取り付け場所を指示しているかを判別することが難しくなることも判明した。

#### テレビモニタで部品の写真と名前を提示する場合

テレビモニタに部品の写真と名前を表示し、作業員への情報提示を行う方法である。

インタビュー調査では、視認性と認知性の観点から取り付け部品の種類の提示手法の中で最も高い評価が得られた。

以上の結果から、部品の種類を提示する方法としてテレビモニタを用いた方法を選択することにした。

### 5.1.2 作業対象位置指示の方法

ここでは、作業情報の中でも「どこに部品を取り付けるか」を作業員に提示する方法を評価する。なお、評価する情報提示手法は、3.4.2で述べた手法である。

#### レーザ光で取り付け位置を照射する方法

図3.7にあるように、基板上の部品取り付け位置をレーザ光で指し示し、作業員に情報提示する方法である。

インタビュー調査の結果、視認性が若干劣るものの十分実用に耐えるものとして評価された。視認性については4.2.6にて既に述べたが、レーザー光で描画する図形の大きさと同時描画数の制限を守れば視認性を確保する事が可能である。

また、認知性に関しては、テレビモニタを用いた取り付け位置の指示手法に比べ視点移動が少なく直観的であるという大きな利点があることから、テレビモニタを用いた取り付け位置の指示手法の評価は行わず、この方法を選択することにした。

### 5.1.3 部品の取り付け方向指示の方法

ここでは、作業情報の中でも「どのように部品を取り付けるか」を作業員に提示する方法を評価する。なお、評価する情報提示手法は、3.4.3で述べた手法である。

#### レーザー光で取り付ける方向を提示する

図3.8にあるように、レーザー光を用いて部品を取り付ける方向を示す図形を基板上に描画し、作業員に情報提示する方法である。

5.1.1で述べたように、図形を描画して情報提示する方法には視認性の問題が生ずる。実際に、図形を描画して部品を取り付ける方向を示す機能を実装し、評価を行ったところ、やはり視認性が大きく劣るとの意見が得られた。

#### テレビモニタに部品を取り付ける方法を提示する

図3.9に示すように、テレビモニタに部品を取り付ける方向を表示して作業員に情報提示する方法である。

インタビュー調査では、視認性と認知性に関して十分良い評価が得られたため、この方法を採用することにした。

以上、情報提示手法について表5.1にまとめた。

### 5.1.4 作業状況認識法の評価

作業支援環境が作業状況を認識するための方法として、3.5.3と3.5.4に作業員の手を認識して作業状況を自動的に判別する方法と、操作ボタンを利用する方法を提案した。この2つの方法は相互に補完する特徴を持っているため、両方とも採用することとした。

## 5.2 作業支援環境の試作

前節での評価をもとにして作業支援環境を試作した。本節では、試作した作業支援環境について述べる。

### 5.2.1 試作した作業支援環境の概観

試作した作業支援環境の概要を図5.1に示す。また、テレビモニタで提示する情報の例を図5.2に示す。

どの部品を取り付けるか	
レーザー光で部品箱を示す	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 部品の陰となってレーザー光の反射が見えないことが多い。</li> <li>・ 部品が様々な色に着色されているため、レーザー光を判別しにくい。</li> <li>・ 部品箱が数多くあるため探す範囲が広く、レーザー光の反射を見つけづらい。</li> <li>・ 視認性向上のため大きめの図形を描画するとレーザー光のエネルギーが分散してしまい見づらくなる。</li> </ul>
レーザー光で部品の名前や形を描画する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 複雑な図形を描画できない。</li> <li>・ 大きな図形を描画するとレーザー光が暗くて見えにくい。</li> <li>・ 小さな図形を描画すると図形が判別しづらい。</li> <li>・ 部品取り付け位置の指示がわかりづらくなる。</li> </ul>
○テレビモニタで部品の写真と名前を提示する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 視認性と認知性に優れる。</li> </ul>
どこに部品を取り付けるか	
○レーザー光で取り付ける位置を照射する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 描画する図形の大きさと同時表示数の制限を守れば視認性を確保することができる。</li> <li>・ 視点移動が少なく直感的な情報提示が可能。</li> </ul>
どのように部品を取り付けるか	
レーザー光で指示する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 視認性に劣る</li> </ul>
○テレビモニタで指示する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 視認性と認知性に優れる。</li> </ul>

表 5.1: 情報提示法の評価 (注:採用した情報提示手法には○印をつけた)

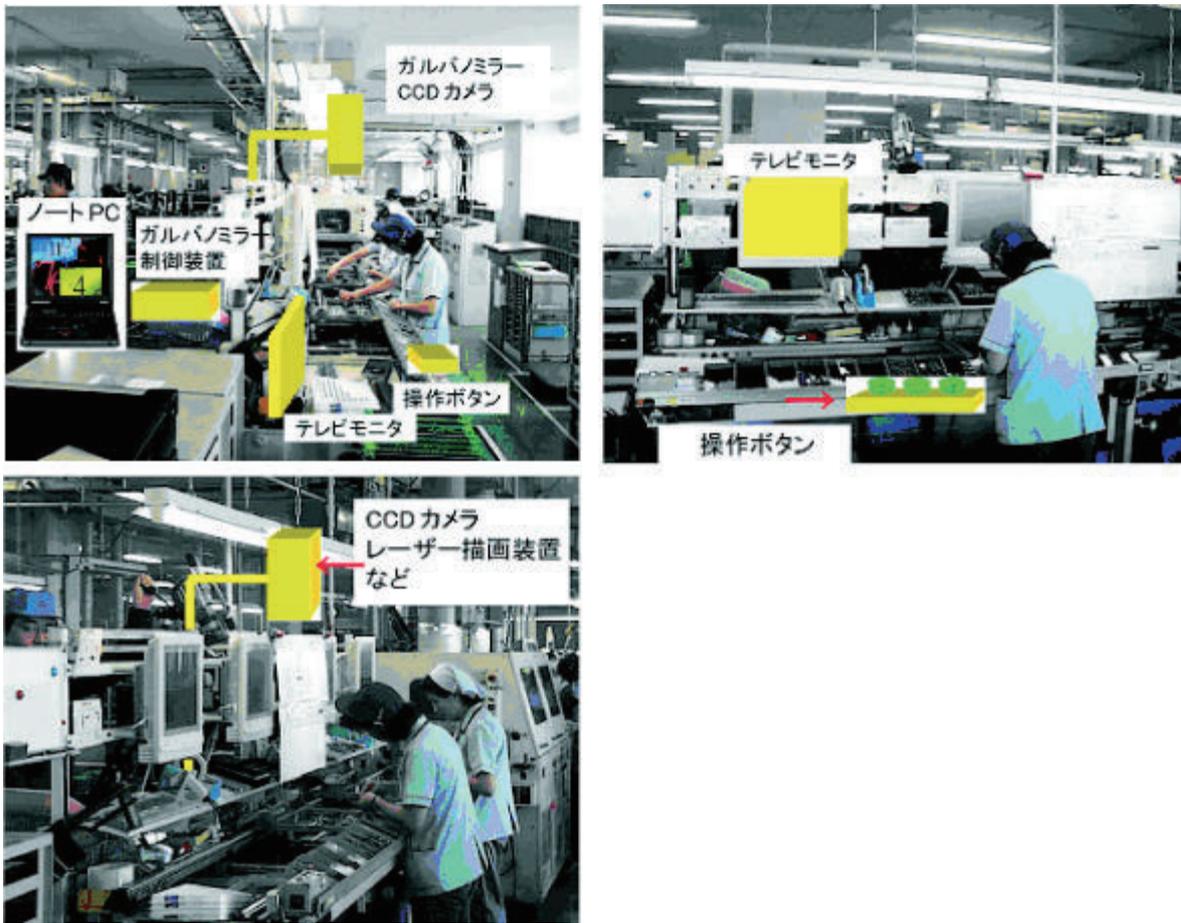


図 5.1: 試作した作業支援環境の概要

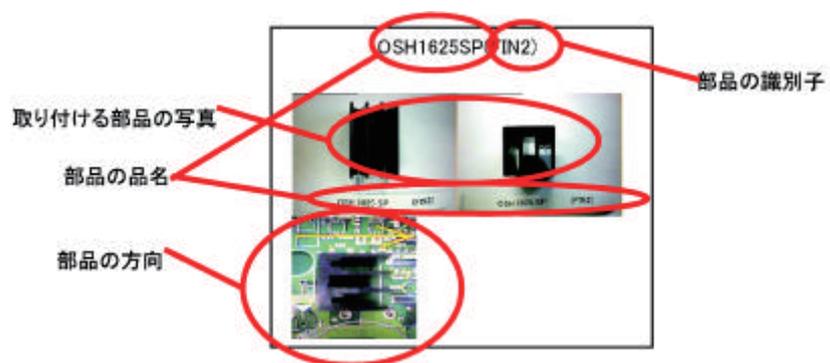


図 5.2: テレビモニタで提示する情報の例

以下では、試作した作業支援環境の動作を、実際に生産ラインへ導入する方法とその使用法により説明する。

## 5.2.2 作業支援環境の導入と使用法

ここでは試作した作業支援環境の導入方法とその使用法を述べる。作業支援環境は3.2で述べたベルトコンベアを用いた基板部品取り付け流れ作業を支援の対象とする。また、作業支援環境は図4.2にあるように構成し、各構成要素は以下のように設置する。

- 2 コンピュータ:作業の邪魔にならないように生産ラインの背面に設置する。
- 2 テレビモニタ:作業員から見やすいように、ベルトコンベアを挟んで作業員の反対側に設置する。
- 2 操作ボタン:作業員が操作しやすいように作業員の手元に設置する。
- 2 ビデオカメラとガルバノミラー:ベルトコンベア上を流れる部品を撮影し、部品上にレーザ光で情報提示を行うため、この2つはベルトコンベアの上方に設置する。

また、作業員が本作業支援環境を使って作業をする場合の手順を以下に示す。

1. 作業員はテレビモニタに表示された「どの部品を取り付けるか」「どの方向に部品を取り付けるか」に関する情報を取得する。
2. テレビモニタに表示された部品種類に関する情報より、部品箱から取り付ける部品を探し手に取る。
3. テレビモニタに表示された取り付け方向に関する情報をもとにして取り付け部品の方向を確認する。
4. 基板の上にレーザ光で描画された「どこに部品を取り付けるか」に関する情報より、部品を取り付ける場所を確認し、部品を取り付ける。
5. 部品を取り付けたことを作業支援環境が検知し、次に取り付ける部品の情報を提示する。
6. 万一、部品を取り付けたことを作業支援システムが検知することができなければ、作業員が押しボタンスイッチを押して適切な情報提示を行うよう作業支援環境に指示する。

## 5.3 試作した作業支援環境の評価実験

本節では、試作した作業支援環境の評価実験について述べる。まず実験の位置づけと目的を明確にし、次に実験の方法および結果について述べ、最後にその結果をまとめ将来展望を述べる。

### 5.3.1 実験目的

本実験では、作業支援環境を用いて作業したときに生ずる、作業支援環境を用いないで作業したときに対する作業時間、作業内容、ヒューマンエラーの定量的、定性的傾向を観測し、作業支援環境の有効性の評価と、より有効な作業支援を行うための方法論を確立するための知見を得ることを目的とする。

### 5.3.2 実験方法

#### 概要

本実験では被験者に基板への部品の取り付け作業を行ってもらい、その作業の様子をビデオカメラで撮影する。この際、作業支援環境を用いた場合と用いない場合の2種類の条件下で作業を行ってもらい、それぞれの条件でのビデオ映像を比較観察して作業時間、作業内容、ヒューマンエラーの違いを観測する。また、作業後にアンケートを行い、作業そのものと作業支援環境に対する被験者の主観的な評価を得る。

#### 実験手順

**実験環境** 実験は工場内の実際の基板生産ラインで行う。本実験のためにベルトコンベアを用いた流れ作業による組み立て作業ラインを用意し、この作業ライン上で通常の組み立て作業ができるよう作業手順書と部品箱を用意する。部品箱の中には部品と、部品の品名と識別子が書かれた紙片が入っており、作業指示書と部品の品名、部品の識別子、基板にシルク印刷された部品の識別子を読めば、部品取り付け作業に関する基本的な情報が得られ作業できるようになっている。部品箱は順不同に並べられており、作業指示書および作業支援環境の作業手順と部品箱の配置は一致していない。

さらに、上記に加えて、作業支援環境を基板生産ラインに設置する。作業支援環境の設置方法については、基本的に5.2.2の通りであるが、操作ボタンは配線の都合上、作業員から見てベルトコンベアの反対側に設置する。この状態での実験環境の概略図

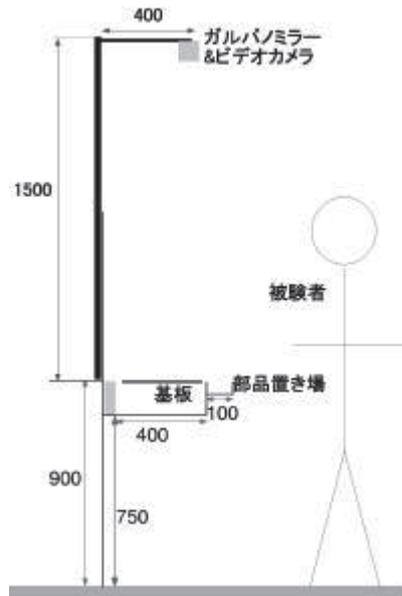


図 5.3: 本実験の環境

を図5.3に示す。また、この実験のために、作業支援環境のソフトウェアに作業内容のログを取る機能を加え、作業状況認識機能の操作ボタンの動作状況を記録する。また、被験者が作業している様子を撮影するため作業撮影用ビデオカメラを設置する。この設置の際には、被験者の表情と手元が撮影できるように留意する。なお、実験の前には、実験環境の照度と基板がベルトコンベア上を流れる速度を測定する。

実験は以下のような手順で行う。

1. 実験開始後、被験者は一人一人個別に呼び出され、口頭による説明と実験手順書を用いて作業内容と実験手順を知らされる。
2. 被験者はこの説明に従い、基板に対して作業を行う。
3. 作業は2枚の基板に対し5回ずつ、計10回行う。基板に対する被験者の作業が終了するごとに、実験関係者が作業のミスを確認して記録する。
4. 作業終了後、被験者はアンケートに答える。
5. 以上を4人の被験者に対してそれぞれ行う。

実験後の解析は、ビデオ、ログ、アンケートを用い、個人個人の傾向を追って知見を得るものとする。被験者の数が4人と少ないため、データの統計面での知見を得ることは行わない。

## 実験条件

**被験者に与える知識** 以下の事項のみが被験者に知らされ、作業内容と作業支援環境に関する一切の情報は与えられない。

- 2 これから行う実験では、基板に部品を取り付ける作業を行う。基板は2種類あり、それぞれ5回、計10回の作業を行う。
- 2 基板はベルトコンベアの上をゆっくりと流れている。部品を全て取り付けると1回の作業が終わりとなる。
- 2 作業内容の指示を2種類の方法で行う。

作業指示書の読み方や作業支援環境の使い方は、被験者が独自に体得することを期待する。

**作業内容** 作業対象の基板は2種類(基板1、基板2)用意し、被験者の半分は基板1の作業後に基板2を、残りの半分は基板2の後に基板1を作業する。基板ごとの詳しい作業内容は付録Gに譲る。

また、被験者の半分は作業指示書と作業支援環境を用いた作業を先に行い、その後作業指示書のみで作業を行う。残りの半分は逆の順番で作業を行う。「どちらの基板を先に作業するか」と「作業支援をいつ行うか」の2×2で4種類のパターンがあり得るので、なるべく特徴的な知見が得られるよう被験者4名のそれぞれに異なる作業パターンを割り振る。

## 被験者

本実験は4名の被験者の協力を得て行われた。ここでは、被験者のプロフィールについて述べる。

**被験者に共通する特徴** いずれの被験者も、事前のインタビューにより電気回路部品に関する知識を持っていないことを確認した。これは、あらかじめ詳しい電気回路部品の知識を持っていると、作業支援が無くとも正確な部品取り付け作業を行うことのできる可能性があり、本実験の目的に適さない。そのため、電気回路部品に関する知識を持っていないことを事前に確認した。

**被験者A** 高校生男子。コンタクトレンズを着用し、矯正視力は右1.5、左2.0である。アルバイト経験はないが、中学校在学中に自治体独特の教育プログラムで飲食店での軽作業を行ったことはある。一切の被験者実験の経験はない。

(基板1, 作業支援あり) → (基板2, 作業支援なし)の順番で作業を行った。

**被験者 B** 文学部に在学中の大学女子学生。眼鏡をかけ、矯正視力は両眼共に1.0である。事務、講師等のアルバイト経験があるが、組み立て作業にかかわる作業経験はなく、また類似の被験者実験の経験もない。

(基板1, 作業支援なし) → (基板2, 作業支援あり) の順番で作業を行った。

**被験者 C** 高校生男子。裸眼視力は右0.4、左0.6である。アルバイト経験、被験者実験の経験はない。

(基板2, 作業支援あり) → (基板1, 作業支援なし) の順番で作業を行った。

**被験者 D** 高校生男子。矯正視力は両眼とも1.2である。アルバイト経験はない。小学校低学年の頃に日本語と英語の文章を読み比べ違いを調べる実験の被験者になったことがある。

(基板2, 作業支援なし) → (基板1, 作業支援あり) の順番で作業を行った。

### 5.3.3 実験結果と考察

#### 実験環境の測定結果

**作業環境照度** 実験時の照度はビデオカメラとガルバノミラー直下1500mmの地点(作業対象の基板と同じ高さ)で1450Luxとであった。

**ベルトコンベア上の基板の移動速度** ベルトコンベア上を移動する基板の速度は7.69cm/分であった。

#### 実験結果

実験時の様子を図5.4に示す。

実験の結果、以下のようなデータが得られた。

- 2 **ビデオ映像**：被験者が作業している際にビデオカメラで撮影した映像である。映像を解析して、被験者の特徴的な動作を調査することができる。また、解析によって以下のようなデータも得られた。

{ **作業内容**：被験者が行った作業内容別の作業時間。詳細は後述する。

{ **作業総時間**：基板に対し部品取り付け作業するのに要した作業時間。



図 5.4: 実験の様子景

- 2 **作業ミスの記録**：被験者の作業で発生した、部品の種類、取り付け場所、取り付ける方向の作業間違いの記録。
- 2 **ログ**：被験者がいつ操作ボタンを押したか、作業支援環境の作業状況認識機能がいつ被験者の作業を認識したかの記録。
- 2 **アンケートの回答**

### 実験結果の解析の手順

各々の被験者に対して実験で得られたデータを個別に解析する前に、解析の手順について述べる。まず、被験者の作業を撮影したビデオ映像を観察し、作業内容を以下の3種類に分類する。

1. **組立作業**：手を動かして作業している状態として定義した。
2. **情報取得**：「組立作業」の分類条件に当てはまらず、以下のどちらかに当てはまっている状態として定義した。
  - 1:顔を前に向けて作業指示書やテレビモニタを見ている。
  - 2:能動的に作業支援環境を操作している。
3. **検索**：以上のどちらにも当てはまらない状態。この状態では、被験者は取り付ける部品を探している、基板を見て取り付け位置を探している、何をしたらよいかわからず狼狽している等の状態であると考えられる。

次に、作業状況のビデオ映像から特徴のある動作を抜粋し、部品の取り付け状況と作業支援の状況をまとめ、タイムチャートにする。

動作の抜粋は、被験者の作業環境の利用方法が特徴的な場合、作業の進め方に独自の手法が見られる場合、作業にとまどい動作が止まっている場合など、作業支援環境

の作業支援手法に新たな方法を考案する際に手がかりになるとと思われる動作を特に重視して行った。

このタイムチャートをもとに、必要に応じて前述の作業時間や作業ミスの一覧、アンケートを参考にして、被験者の行動を考察する。

## 実験結果

実験結果の詳細については付録Hに譲り、ここでは順番に、「どの部品を取り付けるか?」「どこに部品を取り付けるか?」「どのように部品を取り付けるか?」に関する情報提示と、作業状況認識機能についてその分析と知見をもとに、作業支援環境の有効性の評価と問題点の抽出を行う。

**「どの部品を取り付けるか?」に関する情報提示手法について** 試作した作業支援環境では、テレビモニタに取り付けるべき部品の写真を提示することで情報提示を行った。全ての被験者は作業支援環境を利用する試行においてテレビモニタを頼りにして取り付ける部品を探しており、またアンケートからもテレビモニタによるどの部品を取り付けるかに関する情報提示には高い評価が与えられていた。以上の結果より、この支援手法は作業員が作業対象の部品を間違いなく選ぶことができるという点で有効性が認められた。

しかし、作業員前方のテレビモニタに情報を提示しているため、視点移動が生じ、作業速度の向上には寄与しにくいと思われる。2.2.3ではプロジェクタを使った拡張現実感に対し実際の生産ラインのように明るいところでは視認性に問題があると述べたが、視認性の問題を考慮しても情報量の多さを生かして取り付けるべき部品の写真を提示する情報提示を行うに当たっては有効な作業支援ができる可能性がある。

**「どこに部品を取り付けるか?」に関する情報提示手法について** 試作した作業支援環境では、レーザー光で部品取り付け位置を照射して情報提示を行った。しかし、被験者のアンケートからはレーザー光による指示はあまり利用されなかったことがわかった。また、作業支援環境を用いたときの部品取り付け位置の間違いは、作業支援環境を用いなかった作業に比べても大幅に減ったとはいえない結果となっており、レーザー光による情報提示が利用されなかったことがわかる。その原因は以下の2つである。

**レーザー光の視認性** レーザ光が見えにくかったという被験者からの感想が多く、特に被験者Cに至っては「そもそもレーザー光に気づかなかった」とのアンケート回答が

あり、レーザ光の視認性が低かったことがレーザ光が有効に利用されなかった原因の一つであるといえる。しかし、レーザ光の視認性を向上させるにはレーザ光の出力を上げるしかない。現在は JIS C 6802 でクラス 2 と定義された安全基準に従ったレーザダイオードを作業支援環境で利用しているが、これをクラス 3A、クラス 3B の安全基準に従った高出力のレーザダイオードを利用すれば視認性の向上が期待できる。しかし、例えばクラス 3B では「直接のビーム内観察状態は、常に危険なものである。拡散反射の観察は、通常安全である」と定義されており拡散反射を用いた情報提示は安全であるように思えるが、長時間利用した場合の視力低下に繋がることが予想されるためレーザ光の出力向上という解決法は適度な範囲に抑えなければならない。

**基板位置認識機能の精度** レーザ光に気づけなかった被験者 C を除く 3 人の被験者全てが、レーザ光の指示が不正確で当てにならなかったとアンケートで回答している。したがって、レーザ光による場所の指示が不正確だったことがレーザ光による指示が被験者に利用されなかった原因の一つであるといえる。

レーザ光が正確な取り付け場所を指し示すことができなかった原因は、基板位置認識機能の精度が低かったことである。これは以下のような理由による。基板位置認識機能はビデオカメラがほぼ全ての時間で基板全体を撮影でき、部品取り付けのために基板の上に手を伸ばす動作は数秒程度であることを前提条件としていた。しかし、部品の極性を基板上で確認する、部品取り付けに手間取る、常に前屈みになって作業する、といった基板の上方で行う動作を被験者が数多く行ったため、基板位置認識機能の期待する前提条件に合致していないことが多かった。

現在の基板位置認識アルゴリズムを用いたまま基板位置認識機能の精度を上げるには、部品取り付けのため基板の上に手を伸ばす動作に仮定する作業時間をより長時間にするという方法が考えられる。このようにすれば、部品の極性を基板の上方で確認する、部品取り付けに手間取る、といった基板の上方で行う十秒前後の作業には恐らく対応できると思われる。しかし、常に基板の上に覆い被さるように作業する作業員に対してはこの方法では解決できない。この問題に対しては、ビデオカメラの位置を基板の真上から基板の斜め上に変更して、常に基板を撮影できるようにするべきであると考えられる。また、同時にレーザダイオードとガルバノミラーも同様に設置位置を変更し、作業員が前屈みになったときにレーザ光を照射することができないという問題を解決するべきであるとも考える。

実験ではレーザ光による部品取り付け位置支援はあまり有効に利用されなかったと

述べたが、以下のような状況では有効に利用されることがわかった。

被験者Bは作業支援環境を用いなかった試行の際に、部品を全て左右対称の基板の反対側に取り付けてしまうという作業ミスをした。このような大きな作業ミスは、作業支援環境のレーザ光を用いた部品取り付け場所の情報提示を用いていれば防ぐことができる。

また、多くの被験者が基板2の部品12のように取り付け場所の判断が難しい部品で取り付けミスを犯しているため、このような取り付けミスを防止するためにレーザ光を用いた作業支援は有効であると思われる。ただし、この場合の部品取り付け位置への指示は特に正確である必要がある。

「どのように部品を取り付けるか?」に関する情報提示手法について 試作した作業支援環境では、テレビモニタにどのようにして部品を取り付けるかを表す写真を提示した。しかし、被験者Aはテレビモニタの見方を間違えてしまい、被験者Bは最後まで部品の極性の存在に気づかず、被験者Cも作業の最後でようやく極性の存在に気づくことができた。また、被験者Dはテレビモニタを利用して部品の取り付け方向を確認したとアンケートで回答しているが、Dは取り付け方向を間違えるミスを多く犯している。このような実験結果からわかるように、作業支援環境は「どのように部品を取り付けるか?」に関する的確な情報提示を行うことができなかった。

その原因は、部品の極性を表す情報の意匠に問題があったことと、被験者が部品に極性があることに気づかない場合があったことであった。これらの問題は、部品の極性を表す情報の意匠を工夫すれば解決できる。

**作業状況認識機能について** 作業状況認識機能の誤動作、すなわち作業が終了していないのに終了したものとして認識してしまう、また作業が終了したのにまだ終了していないものとしてしまうという現象も、全ての被験者の試行において目立った。作業状況認識機能の誤動作の原因は、2つ考えられる。

一つは、被験者の服の色に反応してしまうことである。この現象は被験者Aの実験時に見られた。この問題の対策として作業状況認識機能で肌色として認識する閾値を実験時よりも狭く設定すると、ロバスト性が向上するため誤認識が少なくなる。しかし、閾値を狭く設定すると照明条件が変化したときなどに対応できないため、この方法で作業状況認識機能の性能が大幅に向上するとは考えにくい。

もう一つは、作業状況認識機能は取り付けの部品の周辺に作業員の手がしばらく止

まっている状態を部品取り付けが完了したものとして認識するため、取り付け作業に不慣れで取り付けに手間取ると、取り付け作業の途中で作業状況認識機能が反応してしまうことである。この現象は全ての被験者の実験時に見られた。この現象が発生すると、次に取り付ける部品の情報が提示されてしまい、作業員を困惑させてしまう。この問題は、現在の処理方法を利用する限り避けられそうにない。

被験者Bを除く全ての被験者は、ボタンを利用して作業指示情報を得る場面が多く見られたが、被験者がボタンを多用した理由は、作業状況の誤動作に加えて作業状況認識機能のインタフェースが直観的でなく、利用法がわからなかったためボタンを積極的に利用したのではないかと考えられる。従って、作業状況認識機能の性能がいかに向上したとしても、そのインタフェースにある程度の分かりにくさが存在する限り、作業員が能動的に作業支援環境に指示を行うためのインタフェースとしてボタンによる操作は残すべきである。

## 5.4 今後の展望

本節では、実験で得られた知見をもとに、どのような作業支援の方針が有効であるかを考察し、今後の方向を展望する。

### 作業員の未熟練さを補完する指針

実験では、被験者は全員が未熟練作業員であった。そのため、様々な場面にとまどい、作業が止まった。このように「とまどう」「作業が止まる」という動作が未熟練作業員の特徴といえる。このような動作を作業員が行っているときは、作業員の作業情報に対する要求が高くなっている状態と考えられるので、作業支援環境は普段は視認性を優先しておおまかな情報を提示し、作業がしばらく滞っている状態を認識すると詳細な情報を提示するという情報提示法が考えられる。

また、あらかじめ未熟練作業員がとまどう、作業が止まることが予想できる場合もある。例えば、上記の実験での基板1の部品3、6のように取り付け場所が紛らわしく間違えそうな場合である。そこで、事前に各作業の難易度を判定し、難易度の高い作業であると判定されればあらかじめ詳細な情報を提示するという手法が考えられる。

さらに、未熟練作業員の特徴に作業ミスが多いことも挙げられる。作業員は作業を進めるにつれて作業内容を記憶していくが、その過程で間違えた作業内容を覚えてしまうことがある。実際の生産ラインでは、作業ミスは検品工程で発見され、作業員に

作業ミスがあったことが知らされるが、作業した製品が検品工程に流れるにはしばらく時間がかかるため、その間に作業ミスのある製品が生産されるだけでなく、作業員が間違えた作業内容を覚えてしまい、その後の作業の信頼性に大きく影響する。従って、作業支援環境が作業ミスを随時監視し、作業ミスが見つかったときには即座に作業員に通知し、作業員の記憶の間違いを修正する支援方法が考えられる。

### 作業員の高度な作業技術を支援する指針

以上の考察は、未熟練作業員の未熟練な作業を支援するための方法である。以下では、未熟練作業員の作業習熟の観点から考察する。本研究の作業支援環境を試作する際には、未熟練作業員は作業の習熟に時間がかかり、また熟練作業員ほどの複雑な作業を行えないものとして仮定し、設計を行った。しかし、図H.1、図H.7、図H.10、図H.14に示したように、4人の被験者の作業時間を見ると「取り付け作業」に分類される時間は全員急激に減少し一定の値に落ち着くか、あるいは最初から効率よく作業を行っており作業内容に改善する余地が見られない場合が多かった。「情報取得」「検索」に分類される時間も、「取り付け作業」の時間と同様に大幅に減少した。従って、上記の実験からは未熟練作業員は作業の習熟に時間がかかるという前提は、作業内容が簡単なものであれば成り立たないことがわかった。また、被験者によっては熟練作業員の作業で見られたように複数の作業を同時に行う作業スタイルを採っており、従って未熟練作業員は熟練作業員ほどの高度な作業を行うことができないという前提は必ずしも正しいとはいえない。したがって、未熟練の作業員に対してもある程度高度な作業技術を期待して良いのではないかと考える。

未熟練作業員が熟練作業員のように高度な作業を行うことを支援する方法を考える。実験では被験者が熟練作業員のように、部品を取り付けつつ次に取り付ける部品の極性を確認するという複数の作業を同時に行う場面がみられたが、作業支援環境は同時に一つの部品に対する情報提示しか行わなかったため被験者が同時に作業する際の手助けにはならなかった。したがって、現在行っている取り付け作業に関する情報提示を行いつつ、次に行うべき作業の情報も同時に提示する支援方法が考えられる。

### 作業員の自立を支援する指針

一方、未熟練作業員に対してセル生産のような複雑な作業を支援する作業支援環境を考えると、作業内容を学習することを支援する方法と、作業に関する情報を逐次提示する方法が考えられる。本研究で試作した作業支援環境は後者の方法である。試作

した作業支援環境は支援対象の作業内容が単純だったため十分な作業内容を提示することができたが、複雑な作業が対象となると全ての作業情報を適切に提示することは難しくなる。以下では作業内容の学習を支援する方法を提案する。

作業員が作業内容を学習することを作業支援の目的とする場合には、作業支援環境が全ての情報を提示してしまうと学習の手助けにならない。従って、作業員が特に要求する情報のみを作業支援環境が提示する方針を作業を支援する。作業員が特に必要とする情報が何であるかを推測するには幾つかの方法がある。例えば、上述したように作業が止まった状態を認識して作業情報を提示する方法がある。また、試作した作業支援環境の作業状況認識機能の機能は「部品を取り付け終わったことを認識して、次に行う作業の情報を提示する」ことだったが、作業員が特に必要とする情報を提示するという方針をもとにすると作業状況認識機能に「作業員がどの部品の作業を行おうとしているかを認識して、その部品に関する作業情報を提示する」機能を持たせるべきである。この機能を具体的に説明すると、作業員の手が部品箱の上で停止した状態を認識し、その部品に関する作業情報を提示する動作を行うものとなる。この方針では、試作した作業支援環境の作業状況認識機能の誤認識問題は改善する。部品が集中する基板の上で、手がどの部品の上にあるかを認識するのは難しいが、部品箱は配置場所が分散しているため、認識が容易である。また、作業員が特定の部品の情報が欲しくなったときは、その部品の部品箱の上に手を置くと情報が得られるという直観的なインタフェースを提供することができる。また、部品箱の上でどの程度の時間作業員の手を認識したら情報を提示するかを調節すると、作業員が能動的に情報を取得しようとしたときのみ情報が得られるため、作業教育にも有効である。

### 作業員の個性に適応する指針

本節では、作業員の未熟さを補完するための方法から、作業員の作業学習を支援する方法まで様々な作業支援手法を述べた。これらの方法論はほぼ全て同時に利用できるが、作業員の技術レベルによっては意味のない作業支援やかえって邪魔になる作業支援になる可能性がある。そのため、作業支援環境が作業員の技術レベルを判断し、全ての情報を詳細に随時提供する状態から、徐々に最小限の情報だけを提示する方針に変化していく、利用者に適応したインタフェースを提供することが期待される。

このように作業支援環境をいわゆる適応型インタフェースとして発展させることができる。ある程度作業に熟練した作業員から、全く未熟練な作業員、または高齢者や障害を持った作業員に対して、個別に対応し適切な作業支援を行うことができる。ま

た、作業員の得手不得手を判断して、作業員の長所を生かした作業を行うように支援することもできるであろう。

手作業による多品種少量生産は消費者の多様な価値観、多様な趣味嗜好を支えているが、適応型インタフェースを備えた作業支援環境を用いると作業員の多様性をも支えることができる。第2章では「手作業における諸問題を解決する画期的なブレイクスルーが発生する余地がある」と述べたが、作業員の多様性を生かした生産手法がそのブレイクスルーのきっかけになるのではないだろうか。

## 第 6 章 結論

本研究は手作業による組立作業の生産性向上に寄与する作業支援環境を構築するため、生産性向上を図る幾つかの方法論を提案、評価し、評価に基づいて拡張現実感を用いた作業支援環境を試作した。そして、実験を通して試作した作業支援環境の評価を行い、実験で得られた知見を元にして要素技術の改良点と新たな作業支援の方法論を提案した。

第2章では、研究の背景として、近年の高度情報化による人々の嗜好の多様化と急速な変化から多品種少量生産が盛んとなりつつあり、多品種少量生産に対応するため手作業が見直されつつある現況を俯瞰した。そして、手作業を支援する手法として本研究で着目した拡張現実感に関連する従来研究を展望した。そして、これらを背景として、本研究の目的が拡張現実感を用いて手作業による組み立て作業を支援するための作業支援環境の試作と実験による評価であることを述べた。

第3章では、まず研究の対象とする生産ラインを分析し、作業員に対する作業教育の必要性が生産性向上のボトルネックとなっていることを述べた。これより、本研究では作業教育を受けていない新規作業員でも組立作業を行うことができるような作業支援環境を構築して生産性の向上を図ることとし、その作業支援環境を構想した。作業支援環境は、(a) 新規作業員に対して行う作業教育の負荷を軽減すること、(b) 日本語を理解しない作業員も考慮すること、(c) 作業支援環境導入時のコスト負担が軽いこと、を目標として具体的な要求仕様を策定し、その仕様を満たすための情報提示手法や作業状況認識手法を提案した。さらに、これらの手法に基づき、試作する作業支援環境の概略設計を行い、その機能構成について説明した。

第4章では試作した作業支援環境のハードウェアとソフトウェアについて述べた。ハードウェアは、全体を制御する PC を中心に、DA/AD コンバータ、操作ボタン、レーザダイオード、ガルバノミラー、ビデオカメラ、ビデオキャプチャ I/F から構成され、ソフトウェアは、基板位置認識機能、作業状況認識機能、キャリブレーション機能、DA/AD コンバータ制御機能、図形描画機能、データベースから構成される。特に、ソフトウェアでは、基板位置認識機能、キャリブレーション機能、図形描画機能についてその詳細とそれらの性能評価について述べた。

第5章では、実際に試作した作業支援環境を用いて、第3章で提案した各種の情報提

示手法の評価について述べた。評価の結果、取り付け部品の種類と取り付け方向の指示にはテレビモニタを、部品取り付け位置の指示にはレーザー光を用いることとした。そして、これらの情報提示手法を用いて構築した作業支援環境を使って被験者実験を行い、作業時の各被験者の行動から作業支援環境の利点と欠点、改良点を行うべき点について考察した。

実験の結果、作業支援環境の利点として以下のようなことがわかった。

- 2 テレビモニタに取り付けるべき部品の写真を提示して情報提示を用いると、作業員が作業対象の部品を間違いなく選ぶことができる。
- 2 部品を取り付ける基板を間違えてしまうという大きな作業ミスは、作業支援環境のレーザー光を用いた部品取り付け場所の情報提示を用いていけば防ぐことができる。
- 2 レーザ光を用いた部品取り付け場所の情報提示は、取り付け位置が複雑な部品に対する作業ミスを防ぐことができる。

一方、欠点として以下のようなことがわかった。

- 2 テレビモニタを用いた情報提示は、テレビモニタが作業員の前方にあるため視点移動が生じ、作業速度の向上に寄与しにくい。
- 2 レーザ光の視認性が低く、レーザー光が見えにくい、レーザー光に気づかないという問題が発生する。
- 2 基板位置認識機能の精度が低く、レーザー光で正確な部品位置を指示することができない。
- 2 テレビモニタを用いて部品の取り付け方向を指示したが、部品の取り付け方向を間違える作業ミスが多く見られた。
- 2 作業状況認識機能が作業員の服の色に誤って反応してしまい、誤認識が多い。
- 2 作業状況認識機能が取り付け部品の周辺に作業員の手がしばらく留まっている状態を部品取り付けが完了したものとして認識するため、誤認識が多い。

また、これらの欠点を克服するため、以下のような改良が考えられる。

- 2 明るいところでは視認性に難があるという問題を考慮しつつ、プロジェクタを使った拡張現実感を用いて、情報量が多く視点移動の少ない情報提示を行う。
- 2 レーザダイオードの出力を向上して視認性を高める。
- 2 作業状況認識機能が人間の肌の色として認識する閾値を狭くする。

- 2 作業状況認識機能が仮定する、作業員が部品取り付けのため基板の上に手を伸ばす動作の作業時間を、より長時間にする。
- 2 ビデオカメラの位置を基板の真上から基板の斜め上に変更して、常に基板を撮影できるようにする。
- 2 部品の極性を表す情報の意匠を工夫する。

最後に、実験結果をもとにして、作業支援環境のあるべき姿を展望し、作業員の技術レベルや個性に合わせて情報提示の方法を使い分ける作業支援環境を提案した。

本研究では要素技術が未成熟だったため、試作した作業支援環境を用いれば全く未経験の作業員でも複雑な作業を行うことができる、という目標が完全に達成できたとはいえない。しかし、レーザ光による拡張現実感を用いた作業指示はその精度を高めることができれば有望な情報提示手法となる可能性があることがわかった。また、作業支援環境が正確に作業状況を認識し、さらに作業員の技術レベルや個性を把握することができる、多様な作業員の多様な特徴を生かすことができる、全く新しい作業支援が可能となることが示唆された。

今後は、本研究で用いた各要素技術の性能向上と共に、新たな作業支援の方法論を確立するという方針で研究を進めることが望まれる。具体的には、まず基板位置認識機能と作業状況認識機能の精度を上げ、作業員が作業支援環境の指示間違いを気にせずに作業に集中できるようにする。それと並行して、実際の作業現場での作業員の学習速度を具体的に把握し、どのように情報提示を行えば学習を支援することができるかを調査する。調査結果を考慮して、作業員の熟練度に合わせて作業支援を行い、基本的な作業の支援から作業教育の支援までを可能とする作業支援環境を作成する。それをもとに、将来的には作業支援環境が作業員の技術レベルに対応し、多様な作業員に適切な情報と作業方法を提示し、支援することができるような適応型インタフェースとして発展させるための新しい作業支援手法の方法論を確立していきたい。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たっては、数多くの人々から様々な形での助言と協力をいただきました。感謝の意を込めて一人一人に謝辞を述べさせていただきます。

吉川榮和教授には、著者が4回生で研究室に配属されてから、研究の方向性や進め方から卒業論文、修士論文の書き方に至るまで全ての研究活動に対してご指導とご鞭撻を賜りました。特に、本論文に纏めた研究や本論文の執筆に関して、大変お忙しい中にも関わらず、始終適切で細やかな熱意あふれるご指導を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表する次第であります。

下田宏助教授に心より感謝致します。構成部品の製作、プログラムの実装、論文作成、実験解析、出張手続き、車の運転、機材運搬など、研究の全ての分野に渡って直接の指導と適切な助言と強力な協力を頂きました。下田宏助教授が居なければこの研究は全く違う形になっており、ここまでたどり着けなかったと思います。特に、何度も生産現場に訪れる際に食したひつまぶし(下図参照)や焼き肉は胃袋に染み渡り、研究を進める活力になりました。

石井裕剛助手に感謝致します。参考文献や論文、最近の技術動向や業界動向などについて、豊富な助言を頂くことができました。

遠く離れた所まで足を伸ばしていただき実験に協力していただいた被験者の皆様に、深く感謝します。各人に特徴的な動作をしていただいたおかげで、実験の解析は充実したものとなりました。

修士課程1回生の新田和弘君に深く感謝します。新田和弘君が居なければ、本研究の画像処理関係は低い完成度のまま今を迎えていたと思います。また、新田君の研究室のネットワーク、計算機管理、イベント、グルメ、買い物等様々な雑用を誰も知らないところでこなしていく様は、小人の靴屋の伝承を彷彿とさせました。

谷友美秘書、吉川万里子秘書に感謝します。研究室での快適な研究生活を送るためにお世話頂くどころか、特殊な部品の発注や各種書類の処理など、本当に多くの仕事をお願いしてしまいました。

修士課程2回生の面々に感謝します。特に社領一将君においては、学部4回生の頃から陰となり日陰となり互いに足を引っ張り合っては傷を舐め合ってきました。

最後に、昼夜問わず共に過ごして下さった吉川研究室の学生の皆様に深く感謝致し

ます。



## 参考文献

- [1] 小野五郎：超価値観—パラダイム・パラダイム, 通商産業調査会 (1994).
- [2] M.J.Piore, C.F.Sabel(山之内靖・永易浩一・石田あつみ訳), 第二の産業分水嶺, 筑摩書房(1993).
- [3] 秋野晶二, 日本企業の国際化と生産システムの変容：電機電子産業の海外進出とセル生産方式(上)(中)(下), 『立教経済学研究』(立教大学)第50巻第1号,第2号,第51巻第1号 (1996～1997).
- [4] R. T. Azuma: A Survey of Augmented Reality, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385(1997).
- [5] P.Wellner : Interacting with Paper on the DigitalDesk, Communications of the ACM, 86-96 (1993).
- [6] 清川清,大野浩之,倉田義則, : ELMO: An Enhanced Optical See -Through Display Using an LCD Panel for Mutual Occlusion, International Symposium on Mixed Reality 2001(2001).
- [7] VIRTUAL REALITY special report,Jan-Feb,pp.51-55(1996).
- [8] 和田誠一郎：強調現実感技術を用いた電子部品検査の支援環境に関する研究, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文 (1998).
- [9] 田村博：ヒューマンインタフェース, オーム社 (1998).
- [10] 武藤 一夫：高精度3次元金型技術—CAD/CAE/CAM/CAT 入門, 日刊工業新聞社 (1995).
- [11] <http://www.w3.org/XML/>
- [12] <http://www.w3.org/>

## 付録 A DA/ADコンバータの仕様

<仕様>

■アナログ出力

チャンネル数 非絶縁出力2チャンネル

出力レンジ 0V～+4.095V

分解能 12bit

非直線性誤差 ±2LSB Max.

オフセット誤差 ±3LSB Max.

ゲイン誤差 ±16LSB Max.

セトリングタイム 16  $\mu$  sec TYP

最大出力電流容量 5mA

■デジタル入力

入力点数 非絶縁入力4点 正論理

入力レベル TTLレベル

■デジタル出力

出力点数 非絶縁出力4点 正論理

出力レベル TTLレベル IOL = 8mA

■その他

消費電流 100mA MAX

表 A.1: AD12-8 性能仕様書 (抜粋)



図 A.1: DA/AD コンバータ

## 付録 B JIS C 6802 レーザ製品の安全基準

- 2 クラス1：合理的に予知可能な運転条件で安全である。
- 2 クラス2：400 nm～700 nmの波長範囲で可視放射を放出する。目の保護は、通常まばたき反射作用を含む嫌悪反応によってなされる。
- 2 クラス3A：裸眼での観察に対して安全である。400 nm～700 nmの波長範囲で放出するレーザに対して、保護はまばたき反射作用を含む嫌悪反応によってなされる。他の波長に対しては、裸眼に対する危険性はクラス1よりも大きくはない。光学的手段（顕微鏡等）による直接のビーム内観察状態（直接ビームまたは鏡面反射光を観察する状態）は危険。
- 2 クラス3B：直接のビーム内観察状態は、常に危険なものである。拡散反射の観察は、通常安全である。
- 2 クラス4：危険な拡散反射を生じる能力を持つ。それらは皮膚障害を起こし、また火災発生の危険がある。これらの使用には細心の注意が必要である。

## 付録 C 基板位置認識機能の評価実験

**目的** 基板位置認識機能の精度を測定し、その信頼性を量る。

**方法** 基板を稼働中のベルトコンベア上に乗せ、基板の座標を基板座標認識機能を用いて随時推定する。ベルトコンベアは一定の速度で動いているため、基板の座標と時間は一次関数の関係となっていることが推測される。よって、時間と得られた基板座標の間で相関を取り、相関係数の高さを推定座標の精度として評価する。

これを、作業員が作業を行っている状態と行っていない状態で2回行い、それぞれ評価を行う。

**結果** 作業員が作業を行っていない状態の結果を図C.1に、作業を行っている状態の結果を図C.2に示す。グラフは横軸を時間、縦軸を基板の座標としている。

まず、作業を行っていない状態の結果から述べる。時間と左端、右端のX座標との相関係数は、共に0.999を上回った。よって、この状態でのX座標の精度は非常に高いものと考えられる。時間と上端、下端のY座標との相関係数は、0.802と0.950となった。X座標の推測に比べ相関係数が低いのは、数値演算精度の問題とX座標に比べY座標の変化が少ないことの2点が原因と考えられる。この測定は113.1秒の間行い362個のサンプルを得たが、この間上端のY座標は132から133に、下端のY座標は165から166にしか変化していない。座標の推測は整数型で行っているため、Y座標は階段状に急激に変化する。このことが相関係数の低さに現れたものと考えられる。定性的に評価すると、上端のY座標は132と133以外の値は取っておらず、ある時間に132から133に初めて変化した後は測定終了まで133の値を推測し続けている。下端のY座標も同様であり、そのためY座標においても高い測定精度が得られていると考えられる。

次に、作業を行っている状態の結果を述べる。時間と左端、右端のX座標との相関係数は、共に0.999を上回った。よって、この状態でもX座標の精度は非常に高いものと考えられる。外乱があるにもかかわらず高い精度が得られた理由は、作業員の手は基板の下側から差し出されるため、X座標の推定には影響を及ぼさなかったのではないかと推測される。時間と上端、下端のY座標との相関係数は、0.865と0.863となり、作業を行っていないときと比較しても遜色のない、上端の推測に至ってはより高い相

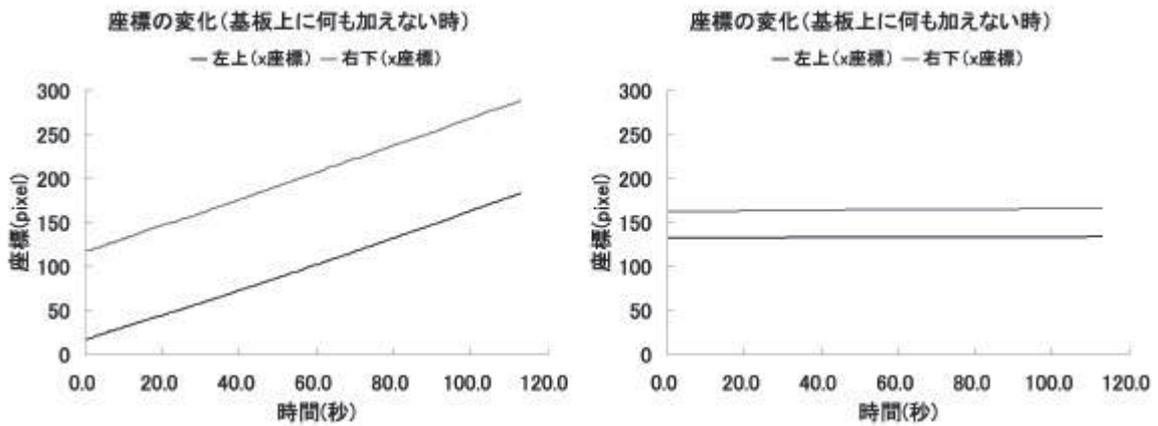


図 C.1: 作業を行っているときの基板位置

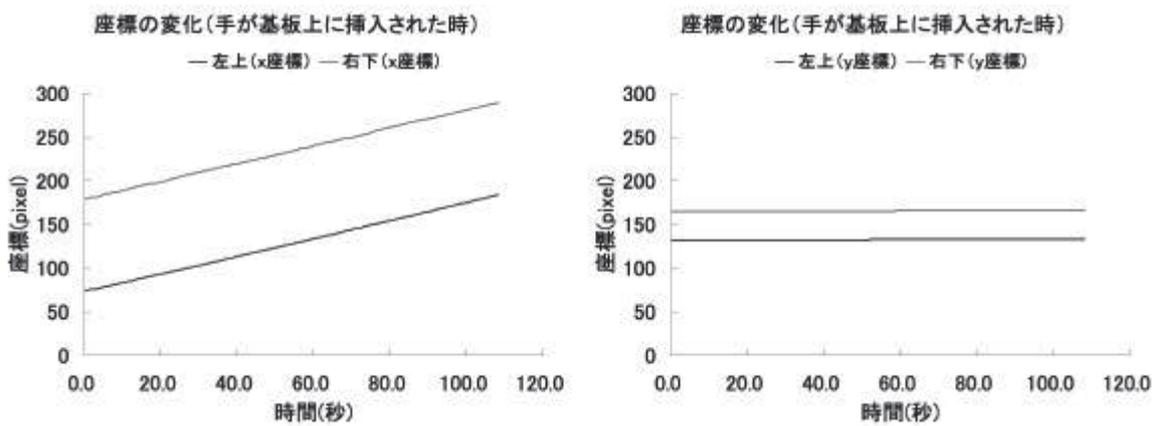


図 C.2: 作業を行っていないときの基板位置

関係数さえ得ることができた。上端に関しては、上端の座標推測は作業員の手による外乱の影響を受けないことが原因として挙げられる。問題の下端だが、こちらも定性的に評価すると作業を行っていない状態と同様に測定時間中下端のY座標は165から166にしか変化しておらず、ある時間に165から166に初めて変化した後は測定終了まで166の値を推測し続けている。よって、作業を行っている状態でも非常に高い精度で基板座標を得ることができることがわかった。

## 付録 D キャリブレーションの性能評価実験

**目的** キャリブレーションでボトムネックとなるのが、画像認識の部分である。画像認識の精度が悪ければ信頼性の低い測定値ばかりが集まり、信頼性が低いとして除外した測定値の補完が困難となる。

画像認識精度を大きく左右する要素は2つ考えられる。

一つが前述したように差分を取得する手法である。もう一つは撮影条件である。通常、作業ラインは非常に照度が高いため、レーザー光を照射してもビデオカメラで撮影することが困難である。また、作業ラインには白い板が張られているため、同じくレーザー光を撮影することが困難である。キャリブレーションの際に照明を消す、あるいは作業ラインを黒く着色する等の処置を行えばキャリブレーションの精度が向上すると思われるが、これは負担となる作業である。

そのため、本実験では様々な撮影条件における差分取得手法の性能を評価し、撮影条件に応じた差分取得手法を採用する際の参考となる知見を得ることを目的とする。

**方法** 実際のキャリブレーションと同様、比較元画像と、レーザー光を升目状に照射したときの比較先画像を取得する。升目は縦横8点、合計64点確保し、それぞれに対してレーザー光を照射する。次に、64枚の比較先画像の中からレーザー光が照射されている画面座標を調べる。これは差分取得手法のところでも述べた3種類の差分取得手法に加え、人間の目を用いて調査する。最後に、調査した画面座標とそれぞれの差分取得手法で得られた座標を比較し、その距離が5ピクセル以内だった測定は測定が成功したものであるとしてその調査成功率を評価する。測定が失敗した場合、測定値は調査した画面座標から大きく外れるため、5ピクセルという大きい安全率をとっても問題ないと判断した。

評価は3つの撮影条件に対して行う。まず作業ラインに暗幕を引いて照明を消した状態で測定し、次に作業ラインに暗幕を引き照明をつけ測定し、最後に暗幕を使わず照明を消した状態で測定する。

### 結果



図 D.1: 撮影環境 (左から暗幕あり照明なし、暗幕あり照明あり、暗幕なし照明なし)

**撮影環境** 3種類の撮影環境は以下のように計測された。それぞれの撮影環境の写真を図D.1に掲載する。

- 2 暗幕あり照明なし 550Lux。この条件では、64点中63点を目視あるいはいずれかの差分取得手法で確認することができた。
- 2 暗幕あり照明あり 1350Lux この条件では、64点中62点を同様に確認した。
- 2 暗幕なし照明なし 550Lux この条件では、64点中47点を同様に確認した。

**差分取得手法(1) 赤色ピクセルの差分** まず、赤色のピクセルのみで差分を取る手法の結果について述べる。3種類の撮影条件での結果を図D.2に掲載する。グラフの凡例は図D.3に示すとおりである。目視座標は3種類の差分取得手法か目視で確認したレーザー光の画面座標である。ほぼ目視のみで座標を確認したのでこのように呼称する。計測座標が、特定の差分取得手法を用いて取得したレーザー光の画面座標である。この凡例は後に述べる差分取得手法の結果を表すグラフにも共通する。

まず、暗幕あり照明なしの条件、すなわち最も撮影が容易と考えられる条件の結果から述べる。この条件の結果は図D.2左上に示される。青い丸(目視座標)と紫色の菱形(レーザー光の画面座標)が重なっている部分は、座標の測定が成功した部分である。青い丸のみが見える部分は座標の測定が失敗した部分であり、その測定値はグラフ左上や下に見える菱形のように全く異なる値を示している。この条件で成功した測定は31点となり、63点がいずれかの方法で確認できたことから認識率は0.492となった。

次に、暗幕あり照明ありの条件での結果を述べる。この条件の結果を図D.2右上に示す。図D.2左上に比べ明らかに測定が成功している数が少ないが、照度が大きく変化していることが原因である。この条件での認識率は22/62で0.355となった。

最後に、暗幕なし照明なしの条件での結果を述べる。この条件の結果を図D.2左下に示す。図の中央周辺に目視でも認識できていないことを示す四角い空白が見られるが、

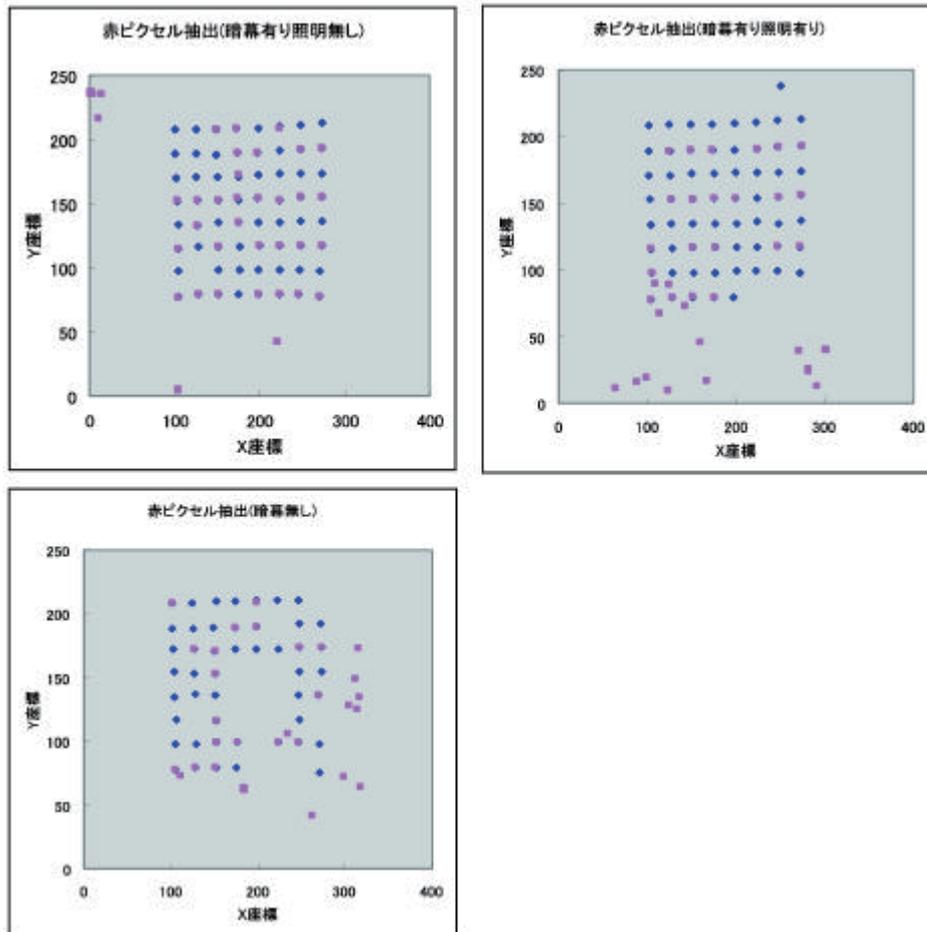


図 D.2: 赤ピクセル抽出

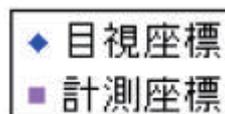


図 D.3: キャリブレーション実験結果の凡例

これは図 D.1右の中央右よりに見られる銀色の反射板によって認識が非常に困難になっていることを示すものである。この条件での認識率は18/47で0.383となった。

**差分取得手法 (2) 赤色ピクセルの差分+ヒストグラム補正** 次に、ヒストグラム補正を行った後に赤色ピクセルの差分を取る手法の結果について述べる。

まず、暗幕あり照明なしの条件の結果から述べる。この条件の結果は図 D.4左上に示される。認識率は34/63で0.540となった。

次に、暗幕あり照明ありの条件での結果を述べる。この条件の結果を図 D.4右上に示す。この条件での認識率は20/62で0.355となった。

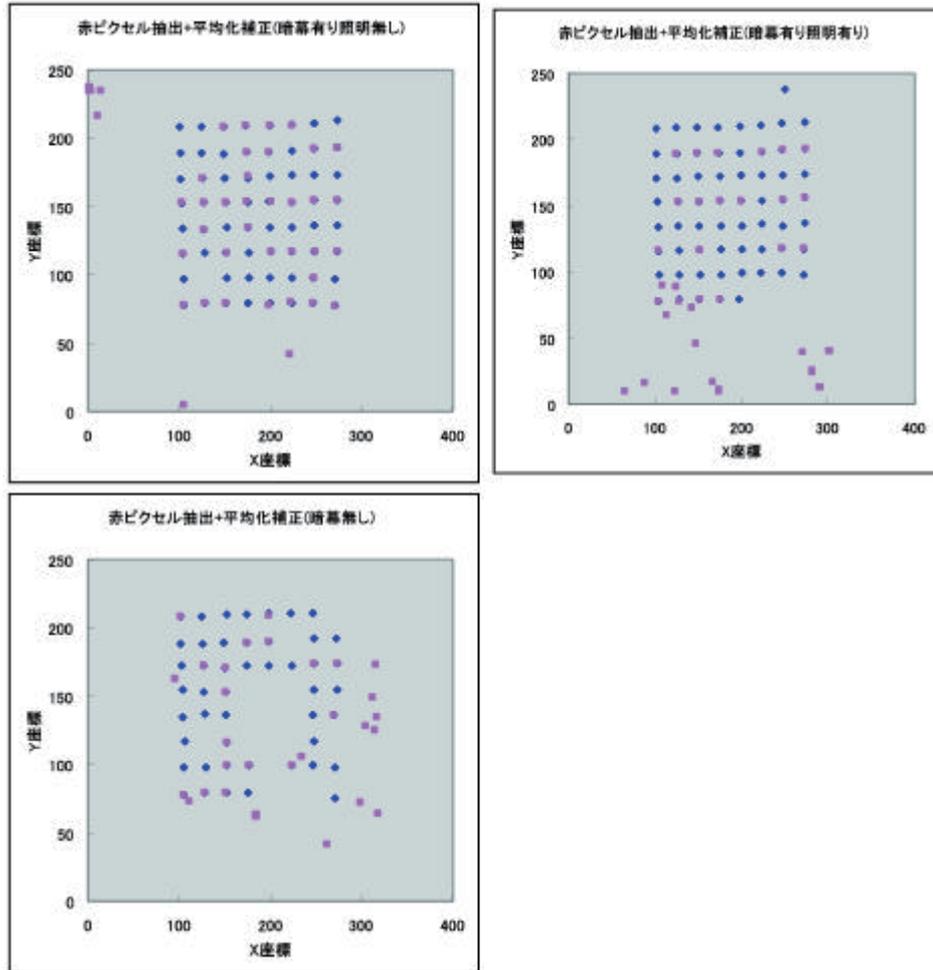


図 D.4: 赤ピクセル抽出+ヒストグラム補正

最後に、暗幕なし照明なしの条件での結果を述べる。この条件の結果を図D.4左下に示す。この条件での認識率は17/47で0.362となった。

ヒストグラム補正を利用しないときと比較しても殆ど変わらないかむしろ悪化しており、認識率向上のための手法としてヒストグラム補正は有効でないことがわかる。

**差分取得手法 (3) 明度の差分** 最後に、明度の差分を取る手法の結果について述べる。

まず、暗幕あり照明なしの条件の結果から述べる。この条件の結果は図D.5左上に示される。認識率は60/63で0.952となった。

次に、暗幕あり照明ありの条件での結果を述べる。この条件の結果を図D.5右上に示す。この条件での認識率は53/62で0.855となった。

最後に、暗幕なし照明なしの条件での結果を述べる。この条件の結果を図D.5左下に示す。この条件での認識率は32/47で0.681となった。

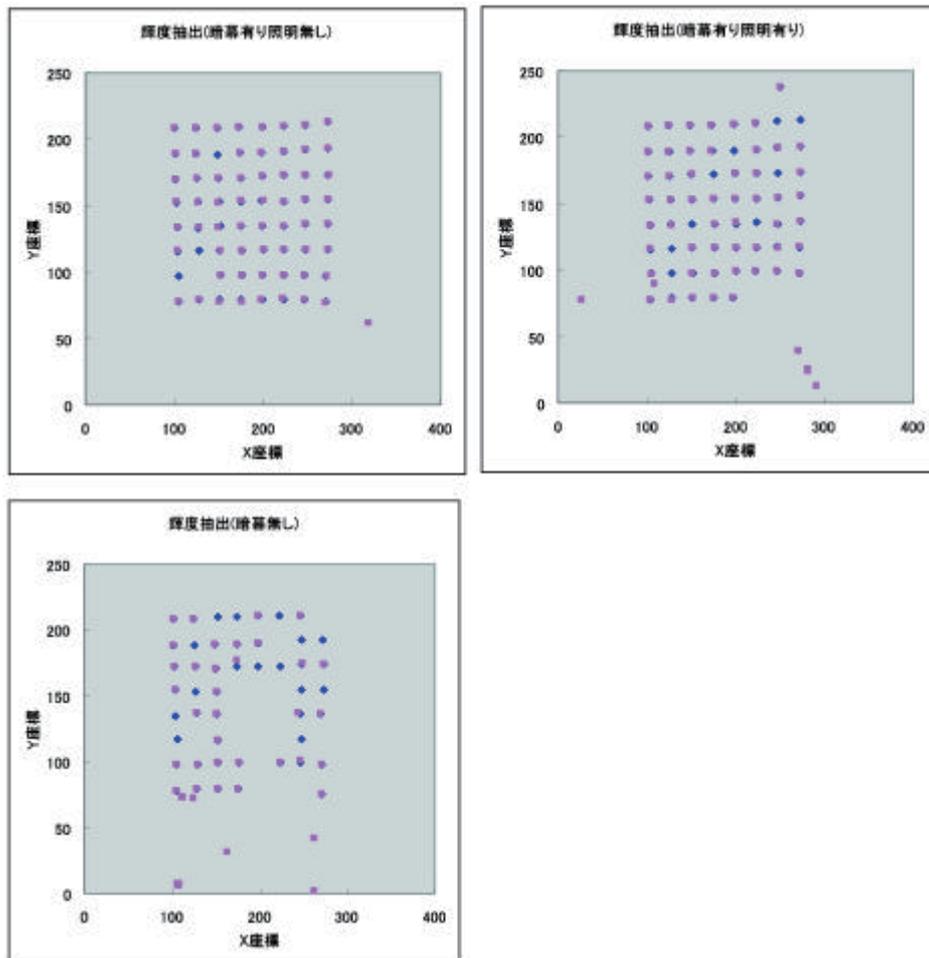


図 D.5: 明度抽出

このように、他の手法に比較し非常に高い認識精度が得られた。特に、暗幕なし照明なしの条件でさえ他手法の暗幕あり照明なし条件を上回る認識精度が得られることは、作業支援環境設置時の負担低減に貢献するものと考えられる。

以上の結果より、いずれの撮影条件でも差分取得手法には明度の差分が有効であるとの知見が得られた。

## 付録 E レーザ光による図形描画における視認性の評価実験

**目的** 本実験の目的は、図形の同時表示数の限界と、図形の大きさの限界を調べ、情報量と視認性のバランスの取れた条件を調べることである。

**方法** 調査はアンケートを用いて行った。被験者は学校関係者3名、工場関係者4名の7名である。

表示する図形は円を用いた。この図形を、同時表示数1、2、4、6個の4条件、大きさを半径0、1、2、4、6ピクセルの5条件用意し、それぞれ別個に設定して24条件を被験者に提示する。半径0ピクセルの円は点となる。実験時、1ピクセルは基板上で約4mm程度の長さになる。

被験者には、各条件毎に以下のようなアンケートに回答してもらった。

- 2 レーザ光を見つけるのは容易ですか?
- 2 レーザ光をはっきり見ることができましたか?
- 2 図形描画のちらつきは気になりましたか?
- 2 総合評価

各項目は7段階評価となっており、4の評価を「実用上許容できる」ものとして基準とした。各項目はそれぞれ発見しやすさ、体感のコントラスト、ちらつき、総合評価を示すことを期待する。

**結果** 結果を表した表を図E.1に示す。表の値は各設問の平均点を表している。表は参考のため着色されており、4以上の評価に暖色系、3以下の寒色系の着色を施した。

**発見しやすさ** まず「レーザ光図形を見つけるのは容易ですか?」の項目について述べる。表のように同時表示数が増えると確実に評点が下がり、予想通り同時表示数の増加によって発見しにくくなることがわかった。これはコントラスト比の低下が原因と思われる。

総合評価					コントラスト				
	1	2	4	6		1	2	4	6
0	4.429	4.286	3.714	2.857	0	4.857	4.714	4.429	3.571
1	5.429	5.000	4.429	3.714	1	6.143	5.286	4.857	4.000
2	5.714	4.429	3.714	3.143	2	6.000	5.000	4.000	3.429
4	4.000	3.143	2.286	2.000	4	3.857	3.571	2.429	2.286
6	3.143	2.429	1.286	1.286	6	3.571	2.429	1.429	1.571

発見しやすさ					ちらつき				
	1	2	4	6		1	2	4	6
0	4.286	4.000	4.143	3.429	0	5.857	5.571	3.571	2.714
1	5.857	5.286	5.000	4.286	1	5.286	4.714	3.857	3.143
2	6.000	5.000	4.429	4.000	2	5.286	4.286	3.286	2.857
4	5.000	4.143	3.571	2.571	4	3.429	2.857	2.143	2.000
6	4.714	3.429	2.000	1.571	6	3.143	2.429	1.286	1.286

(注:横軸が図形の同時表示数、縦軸が図形の大きさ(pixel))

図 E.1: 視認性評価実験の結果

一方で図形サイズを軸にしてみると図形の大きさが1ピクセルのところで評価値が最大になり、この大きさと図形を表示するのが最も発見しやすいということがわかった。総じて、発見のしやすさは多くの条件で許容されている。

**体感のコントラスト** 「レーザ光をはっきりと見ることができましたか？」の項目について述べる、これも同時表示数が増えると確実に評点が下がり、体感のコントラスト比が下がることがわかる。

また、図形の大きさにおいても1ピクセルの条件で最も高い評価が得られることがわかった。これは、図形の大きさが0ピクセルの条件では人間の目で感じるコントラスト比が飽和してしまったのではないかと推測される。もし推測が正しいならば、ある程度エネルギーを分散させた方が体感コントラスト比が高くなるのではないかと考えられる。

**ちらつき** 「図形のちらつきは気になりましたか？」の項目について述べる。これも同時表示数が増えると評点が下がることがわかる。

図形の大きさの増加も一般に評価に影響を与えているが、同時表示数増えるときの評価の落ち込み方が図形の大きさによって異なっている。図形の大きさが1ピクセルの時が最も評価の落ち込み方が少なくなっていることがわかる。

この項目は前述の2項目に比較して評価が辛く、利用者にとってちらつきが気になることが留意点として挙げられる。

**総合評価** 総合評価と上記3項目の評点との相関係数は、それぞれ0.804、0.900、0.785となり、総合評価が体感のコントラストと高い相関を見せていることがわかる。実際、体感のコントラストと同様に図形の大きさが1ピクセルの時に最も高い評価が得られている。

**考察** 図形の大きさは半径1ピクセル程度のものが高い視認性を得るのに成功しているため、この大きさを提示することが推奨される。

## 付録 F XML の例

ここでは、4.2.7で述べたXMLによるデータベースの例を掲載する。ここに掲載したデータベースは、第5章の実験で実際に用いられた。

### 基板情報データベース

```
<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS"?>
<PCBs xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation='PCB.xsd' >
  <PCB id="基板 1">
    <size width='260' height='180' />
    <layout>
      <p mark="FIN2" id="OSH1625SP" x="45" y="117" degree="90"/>
      <p mark="HIC1" id="BK0-CB0034H01" x="50" y="35" />
      <p mark="C10" id="UPLIH470MEH1TA" x="73" y="74" degree="90"/>
      <p mark="VAR2" id="TNR15G471K" x="62" y="53" />
      <p mark="IC1" id="HCPL7800" x="71" y="116"/>
      <p mark="C2" id="UPLIC681MPH1TD" x="101" y="22" degree="90"/>
    </layout>
  </PCB>
  <PCB id="基板 2">
    <size width='325' height='240' />
    <layout>
      <p mark="C3" id="LGU2G221MHLB" x="56" y="126" degree="0"/>
      <p mark="L3" id="BK0-NC5079H11" x="125" y="143" degree="180"/>
      <p mark="RA1" id="G5P-1DC24V" x="249" y="177"/>
      <p mark="C8" id="C7NP2J223K" x="28" y="202" degree="90"/>
      <p mark="R3" id="RCG5T0.470HMU" x="74" y="115" degree="90"/>
      <p mark="O18" id="HCPL-V454" x="124" y="195" degree="180"/>
    </layout>
  </PCB>
</PCBs>
```

</PCB>

</PCBs>

### 部品情報データベース

```
<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS"?>
```

```
<components xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation='component.xsd' >
```

```
<!--category について
```

R : 抵抗

C : コンデンサ

VAR : パリスタ

FIN : 放熱フィン

IC : IC

RA : リレー

OI : Optical Isolator?

HIC : ?

```
-->
```

```
<component id="100u" category="C" polar="true" pic="PIC00067.JPG"
setPic="PIC00081.JPG" polePic="bbb"/>
```

```
<component id="100ohm" category="R"/>
```

```
<component id="OSH1625SP" category="FIN" pic="OSH1625SP.jpg"
setPic="p_OSH1625SP.jpg"/>
```

```
<component id="BKO-CB0034H01" category="HIC" pic="BKO-CB0034H01.jpg"
setPic="p_BKO-CB0034H01.jpg"/>
```

```
<component id="UPLIC681MPH1TD" category="C" pic="UPLIC681MPH1TD.jpg"
setPic="p_brown_capci tor.jpg"/>
```

```
<component id="TNR15G471K" category="VAR" pic="TNR15G471K.jpg"/>
```

```
<component id="HCPL7800" category="IC" pic="HCPL7800.jpg"
setPic="p_HCPL7800.jpg"/>
```

```
<component id="UPLIH470MEH1TA" category="C" pic="UPLIH470MEH1TA.jpg"
setPic="p_brown_capci tor.jpg"/>
```

```

<component id="LGU2G221MHLB" category="C" pic="LGU2G221MHLB.jpg"
setPic="p_LGU2G221MHLB.jpg"/>
<component id="BK0-NC5079H11" category="L" pic="BK0-NC5079H11.jpg"
setPic="p_BK0-NC5079H11.jpg"/>
<component id="G5P-1DC24V" category="RA" pic="G5P-1DC24V.jpg"
setPic="p_G5P-1DC24V.jpg"/>
<component id="C7NP2J223K" category="C" pic="C7NP2J223K.jpg"/>
<component id="RCG5T0.470HMU" category="R" pic="RCG5T0.470HMU.jpg"/>
<component id="HCPL-V454" category="01" pic="HCPL-V454.jpg"
setPic="p_HCPL-V454.jpg"/>
</components>

```

#### 作業手順データベース

```

<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS"?>
<jobsheet xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation='jobsheet.xsd' >

```

```

<PCB id="基板1">
<g>
<p mark="FIN2"/>
</g>
<g>
<p mark="HIC1"/>
</g>
<g>
<p mark="C10"/>
</g>
<g>
<p mark="VAR2"/>
</g>
<g>

```

```
<p mark="IC1"/>
</g>
<g>
<p mark="C2"/>
</g>
</PCB>
```

```
<PCB id="基板 2">
<g>
<p mark="C3"/>
</g>
<g>
<p mark="L3"/>
</g>
<g>
<p mark="RA1"/>
</g>
<g>
<p mark="C8"/>
</g>
<g>
<p mark="R3"/>
</g>
<g>
<p mark="O18"/>
</g>
</PCB>
</j obsheet>
```

## 付録 G 基板詳細

### 基板詳細

ここでは、作業内容の詳細と作業対象の基板について述べる。

**部品取り付け点数** 基板1、2共に、部品の取り付け点数は6点と少ない。これは、全く作業内容を覚えていない状態から作業内容を覚えてしまった状態へ変化する過程の詳細を観測するための処置である。また、実際の組立作業では既に機械によって基板に多くの部品が取り付けられているが、実験では全く部品が取り付けられていない状態で作業を行う。

**取り付け部品について** 全ての部品は取り付けを容易に行うことができるよう、足を5mm程度の長さに切りつめてある。

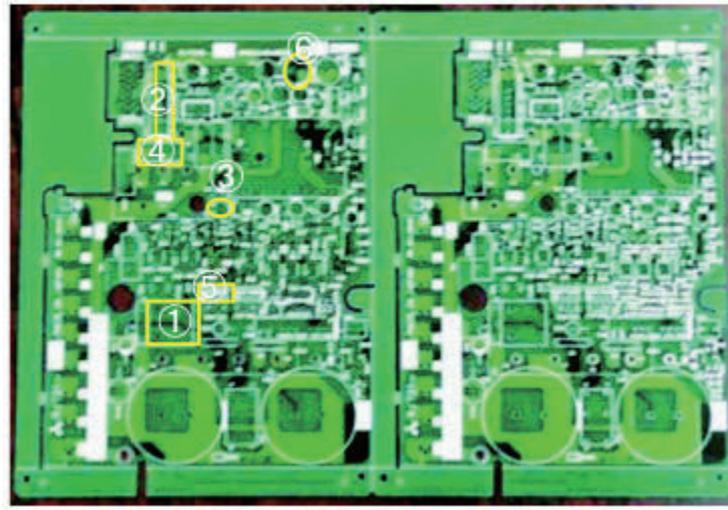
**作業指示について** 作業支援環境は、以下に紹介する順番で部品の取り付けを行うよう作業員に指示する。また、作業指示書も以下の順番で部品の情報を記述したが、作業指示書に指示に従わない独自の順番で作業を行うことも可能である。

**基板1** 基板1の詳細について述べる。基板については付録図G.1上、取り付け部品は図G.2に写真を掲載する。

基板1は横260mm、縦180mmの大きさである。特徴として、全く同じ構成の回路が同一基板内に2つ横に並んで配置されていることが挙げられる。これは、少ない作業量で多くの製品を生産するためのものであり、部品取り付けとはんだ付け処理を行った後に基板中央を切断して2枚の基板とすることが可能である。

以下では各部品に関して述べる。説明中でシルク印刷の模式図を掲載するが、図中緑色が基板、白色がシルク印刷、黒色が基板の穴を意味している。また、本来全てのシルク印刷にはR1等のように部品の識別子が印刷されているが、図においては特に述べない限り省略し、説明と関係ない部品のシルク印刷も記載を省略していることを前もって述べておきたい。

## 基板1



## 基板2

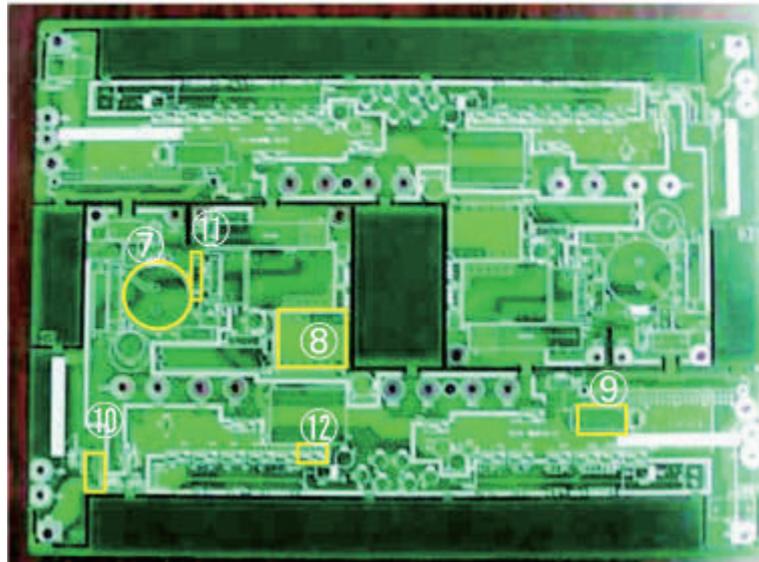
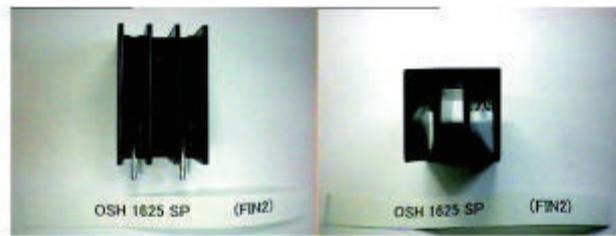


図 G.1: 被験者実験の基板詳細

- 2 部品1:放熱フィン。部品の取り付け方向があり、取り付け方向の有無は判別が容易である。また、シルク印刷は図G.3のようになっており、取り付け方向を逆にして取り付けると部品がシルク印刷からはみ出すことから、取り付け時に部品の取り付け方向を間違える可能性は低いものと考えられる。また、周囲に間違えて取り付けることが考えられるような部品設置場所もないため、取り付け難易度は最も易しい部類に属する。
- 2 部品2:部品詳細不明。部品の取り付け方向があるが、図G.4のように基板に穴が穿たれているため取り付け方向を逆にして取り付けることはできない。また、この

## 基板1の取り付け部品詳細



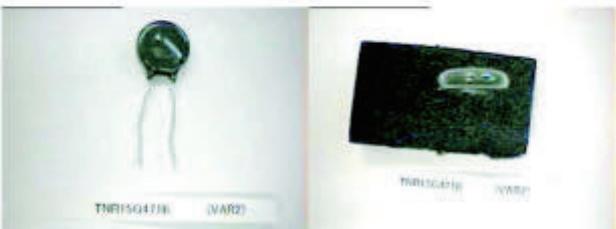
部品1  
放熱フィン  
極性有り



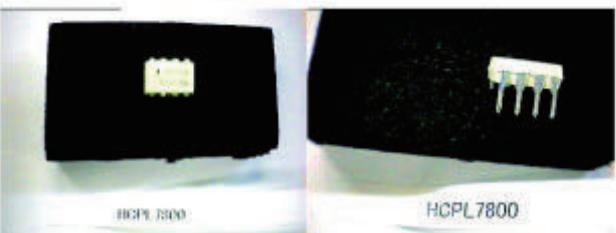
部品2  
極性有り



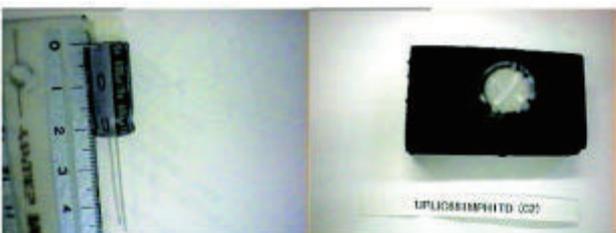
部品3  
コンデンサ  
極性有り



部品4  
極性無し



部品5  
極性有り



部品6  
コンデンサ  
極性有り

図 G.2: 基板1に取り付ける部品

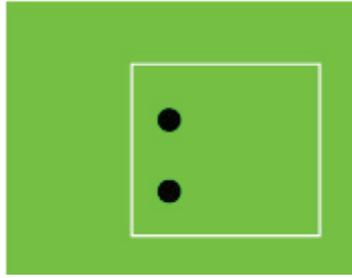


図 G.3: 部品1のシルク印刷

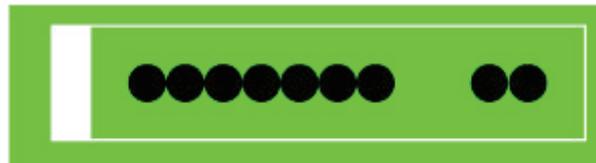


図 G.4: 部品2のシルク印刷

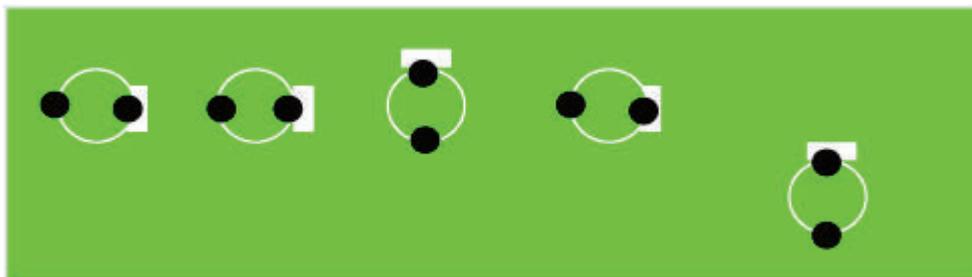


図 G.5: 部品3のシルク印刷 (注:部品3は左端)

ような形態の取り付け穴は他にないため、部品1同様取り付け難易度は易しい。

- 2 部品3:電解コンデンサ。極性があり、あらかじめ回路素子の知識がないと極性の存在自体に気づかないことが予想される。また、図G.5のように近隣に類似の部品を取り付ける場所が複数あるため、取り付け位置を間違える可能性も高い。加えて、部品3は部品6は大きさのみが異なる相似形の外見をしているため、部品3と6を間違えて取り付ける可能性も考えられる。以上より、取り付け難易度の相当高い部品であると考えられる。
- 2 部品4:部品詳細不明。部品の取り付け方向はどちらでもよい。しかし、図G.6にあるように類似の部品の取り付け場所が隣接しているため、取り付け場所を間違える可能性がある。
- 2 部品5:IC。部品の取り付け方向があり、基板の穴も逆に取り付けることを妨げないが、部品上部に品番が印刷されており、図G.7のようにシルク印刷の文字列と

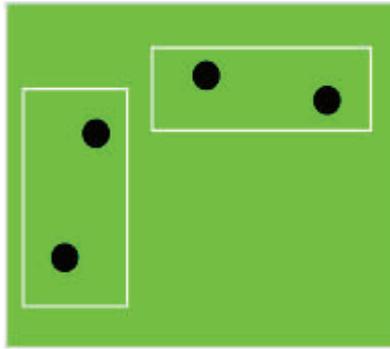


図 G.6: 部品 4 のシルク印刷 (注:部品 4 は上端)

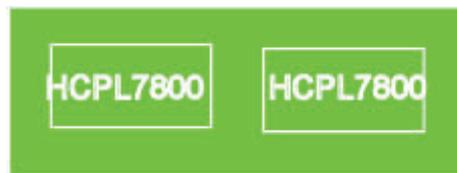


図 G.7: 部品 5 のシルク印刷 (注:部品 5 は左側)

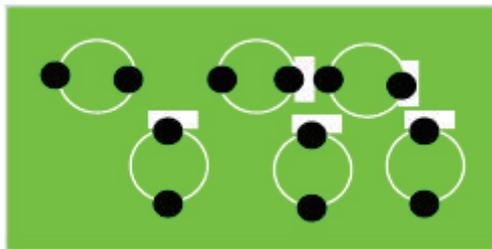


図 G.8: 部品 6 のシルク印刷 (注:部品 6 は上列中央)

方向を合わせれば正しい部品の取り付け方向で部品を取り付ける事ができる。この部品の取り付け位置に隣接して、全く同一の部品を取り付ける場所があるため、間違えて隣接箇所に部品を取り付ける可能性が高い。

- 2 部品 6:電解コンデンサ。部品 3 と同様、極性間違い、部品 3 と 6 の区別が付かないことが予想される。また、図 G.8 のように取り付け位置を間違えそうな部品取り付け場所が近接しており、部品 3 と同程度に極めて高い取り付け難度の部品であると言える。

**基板 2** 基板 2 の詳細について述べる。基板については付録図 G.1 下、取り付け部品は図 G.9 に写真を掲載する。

基板 2 は横 325mm、縦 240mm の大きさである。特徴として、全く同じ構成の回路が同一基板内に 2 つ、中央を点対称として構成されていることが挙げられる。その意図は

## 基板2の取り付け部品詳細

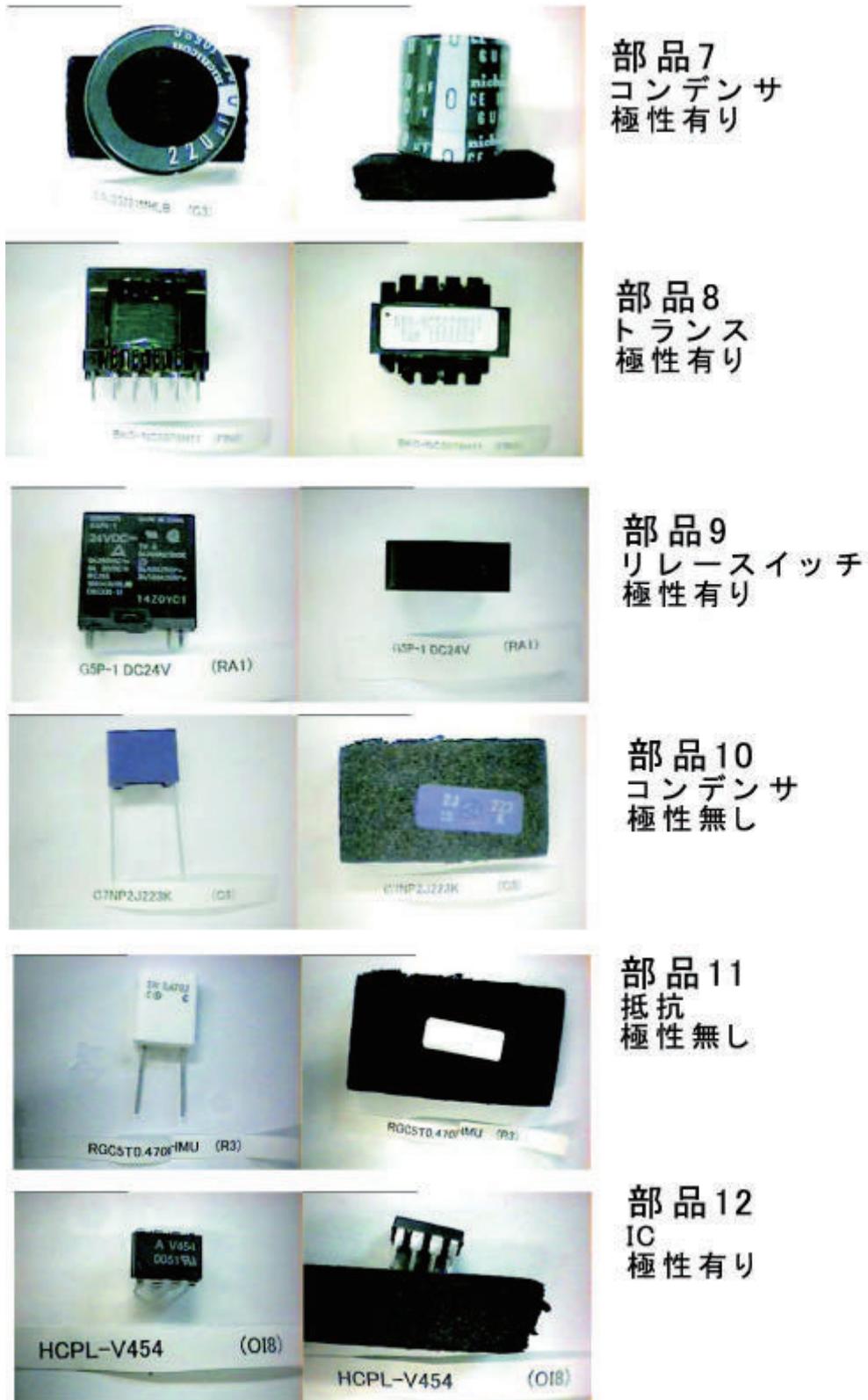


図 G.9: 基板2に取り付ける部品

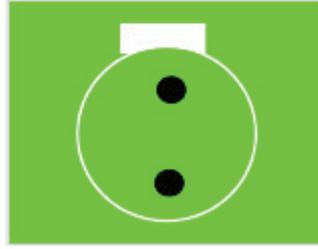


図 G.10: 部品7のシルク印刷

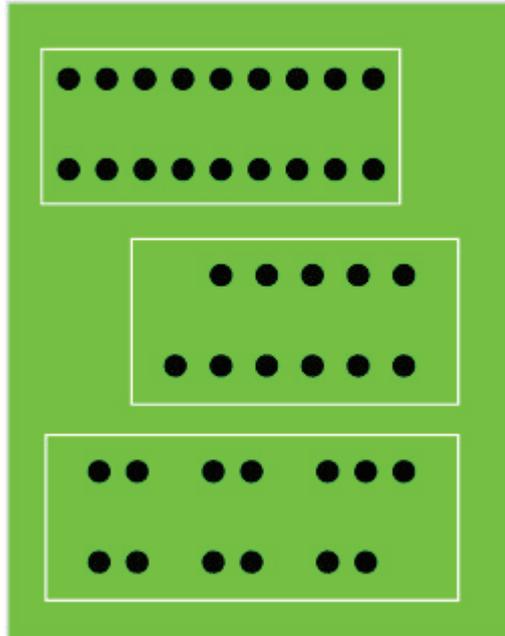


図 G.11: 部品8のシルク印刷 (注:部品8は中央)

基板1と同様である。

以下では各部品に関して述べる。

- 2 部品7:電解コンデンサ。全部品中で最も大きい。極性があり、あらかじめ回路素子の知識がないと極性の存在自体に気づかないことが予想されるが、他の電解コンデンサに比較して大型のため、部品の極性表示に気づく可能性もある。シルク印刷は図G.10のようになっており、近隣にミスを誘発するような部品取り付け場所は存在しない。
- 2 部品8:トランス。部品の取り付け方向があるが、図G.11のように穴が穿たれているため取り付け方向を間違えて取り付けることはあり得ない。近隣に似たような形状のシルク印刷が存在するが、どれも穴の開け方が異なるため、場所の判断に時間を要することはあっても間違えて取り付けることはない。

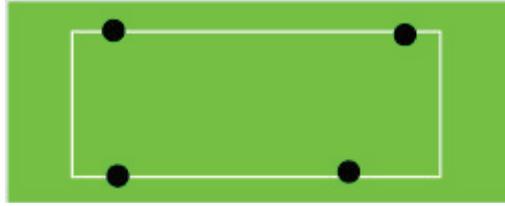


図 G.12: 部品 9 のシルク印刷

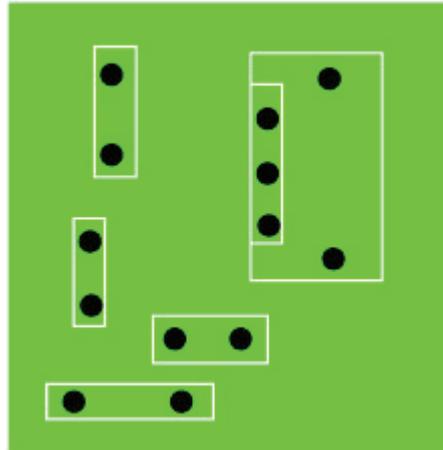


図 G.13: 部品 11 のシルク印刷 (注:部品 11 は左上)

- 2 部品 9:リレースイッチ。部品の取り付け方向があるが、図 G.12のように穴が穿たれているため取り付け方向を間違えて取り付けることはあり得ない。近隣にも似たような形状の部品取り付け場所は存在しないため、取り付けは比較的容易であると考えられる。
- 2 部品 10:コンデンサ。部品の取り付け方向はなく、近隣に取り付けミスを誘発するような部品取り付け場所も存在しない。
- 2 部品 11:抵抗。部品の取り付け方向はない。しかし、図 G.13に見えるように、似たような形状のシルク印刷が取り付け位置近辺に複数存在し、取り付けミスが生ずる可能性がある。
- 2 部品 12:IC。部品の取り付け方向があるが、部品 5 と同様に部品に印刷された品番を手がかりに正しい部品の取り付け方向で部品取り付けを行うことは可能である。しかし、図 G.14のように全く同じ品番の部品を取り付ける場所が近隣に複数存在しており、取り付け場所を間違える可能性は非常に高いと推測される。

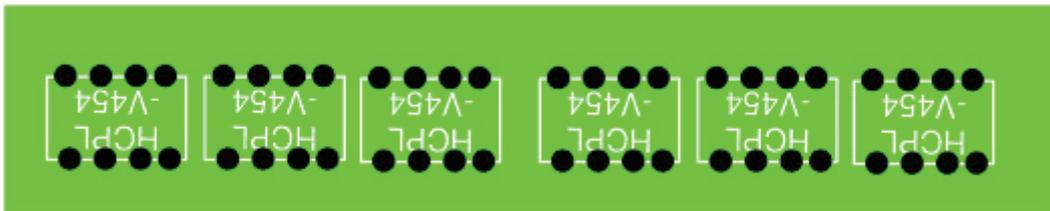


図 G.14: 部品 12 のシルク印刷 (注:部品 12 は右端)

## 付録 H 被験者実験の結果詳細

ここでは、第5章で行った試作した作業支援環境を用いた被験者実験の結果詳細を述べる。

### 被験者 A の実験結果

被験者 A の作業時間の累計を図 H.1 に、作業ミスの一覧を表 H.1 に示す。図 H.1 では、横軸が各基板毎の試行回数、縦軸が各作業時間と総作業時間である。

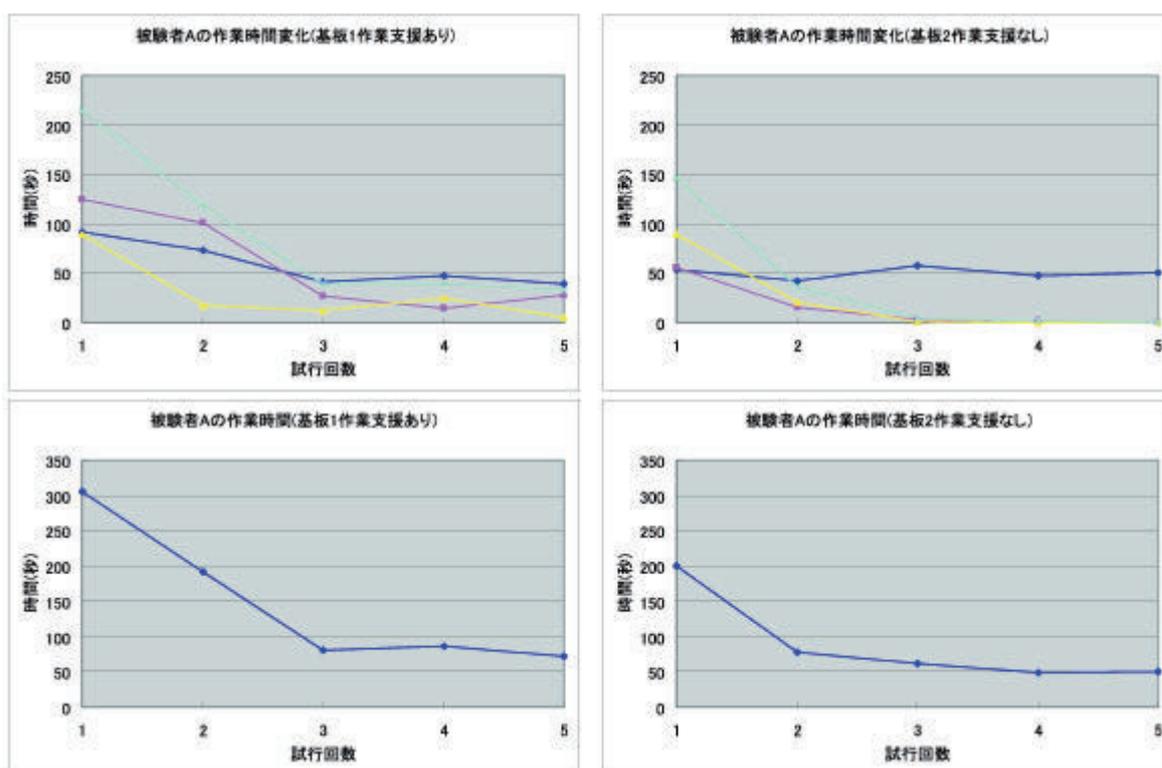


図 H.1: 被験者 A の実験結果

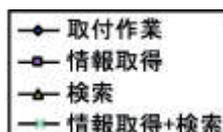


図 H.2: 被験者実験グラフ凡例

**被験者 A 基板1 試行1回目** 被験者 A(以下、Aと略す)はまず最初に、基板1に対し作業支援環境を用いて作業を行った。

**分析** 作業のタイムチャートを図H.3に示す。タイムチャートは横軸に作業開始からの時間、縦軸に状態を示している。状態は2種類あり、タイムチャート上半部に被験者がどの作業を行っているかを示し、下半部に作業支援環境がどの部品に対する情報提示を行っているかを示す。また、タイムチャートの上下欄外に部品の取り付け状況と作業支援環境の作業状況認識機能の動作状況を記している。

Aはまず、テレビモニタを参照して作業開始直後に部品1を手にとった。タイムチャートではこの時点を実作業開始としている。その後テレビモニタと基板を交互に見る動作を繰り返し(図中a)、部品取り付けを開始(b)したのは21秒の時点であった。aの動作は何をするべきなのかを把握するための、あるいは作業支援環境が何をする物なのかを把握するための時間であると考えられる。

部品を即座に手に取ることができたのと対照的に部品取り付けには時間がかかり、部品1の取り付けが終わったのはbから56秒経った77秒の時点であった。この間(c)、被験者はテレビモニタと基板を頻繁に見る動作を行った。この部品1の取り付けを作業支援環境は認識することができなかった。cの動作はAにとって、単に取り付け方が悪くて部品が取り付けられないのか、それとも部品を取り付ける場所が間違っているため取り付けることができないのかが判断できないため、情報をより確かなものにするべく情報を取得しているものであると推測される。

部品1取り付け後、図H.4のようにAは操作ボタンを押した(d)。この動作によって作業支援環境は部品1の情報提示を終え、部品2の情報提示を開始した。これより、Aはボタンの操作法をすぐに理解したことがわかる。

eの時点で作業支援環境がAの作業を認識した。この時、部品2のみならず部品3、4、

被験者 A	基板1 支援有り	基板2 支援無し
1回目	部品6場所	
2回目	部品6場所 部品3極性	
3回目	部品6極性	
4回目	部品3極性	
5回目		

表 H.1: 被験者 A の作業ミス状況

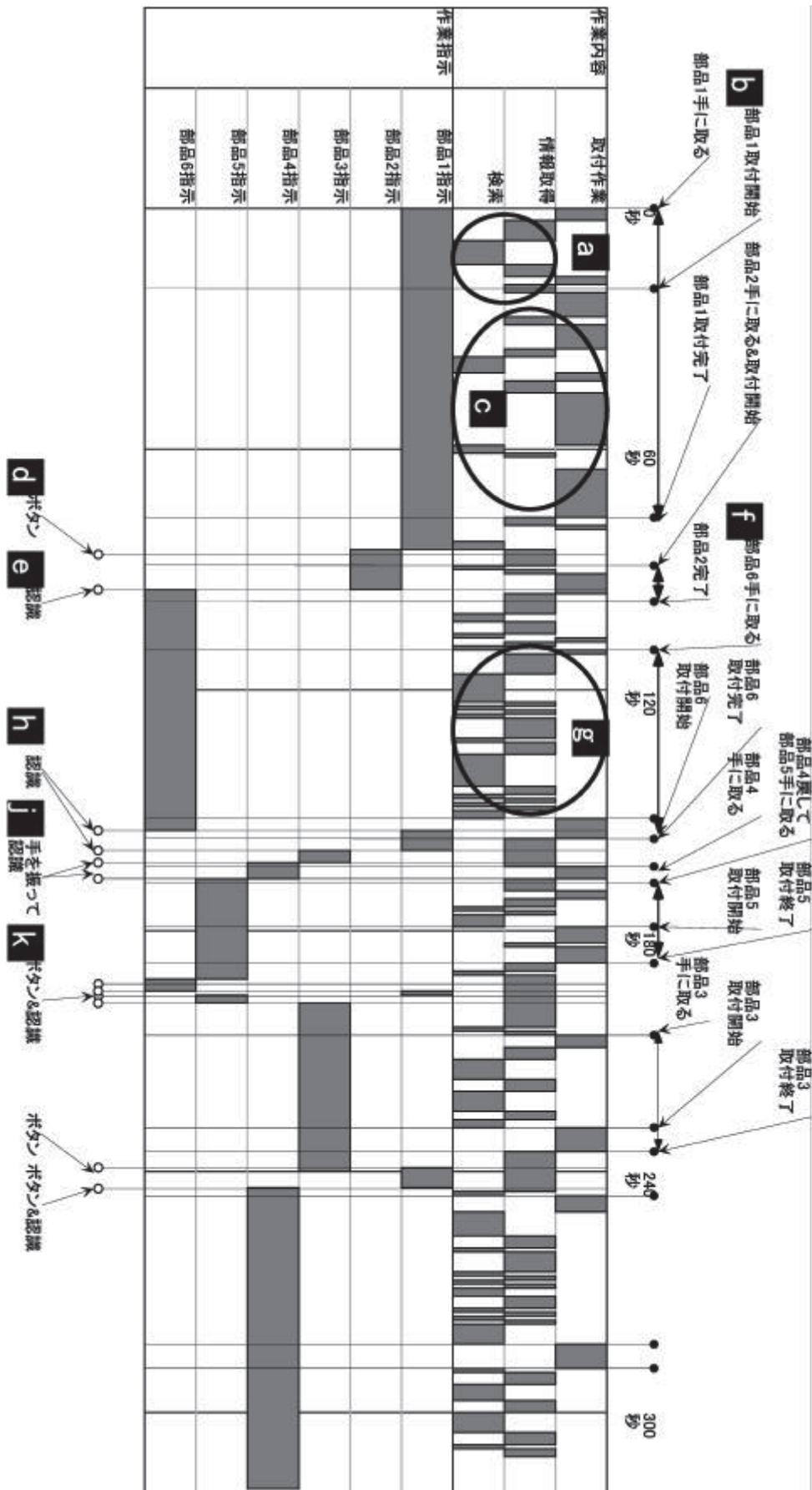


図 H.3: 被験者 A 基板1作業1回目のタイムチャート  
付録-28



図 H.4: ボタンを押す被験者

5の作業まで終了したものと誤認識してしまい、作業支援環境は部品6の情報提示を開始した。そのため、Aは部品2の取り付け終了後部品6の作業を開始した(f)。作業指示書は部品2の次に部品3の作業をするよう記述しており、部品6の作業を開始したことからAは作業指示書ではなく作業支援環境の提示する情報を優先して利用していることがわかる。

部品6を手にとってから取り付けを開始するまで、40秒もの時間を要した。この間、Aはgで基板とテレビモニタを交互に見る動作を繰り返した。部品6はGで述べたように極性がある部品であり、また取り付け場所も複雑で取り付けが難しい。そのため、このような動作を行って間違いなく取り付けようとの姿勢が窺える。しかし、Aは取り付け場所を間違えている。

hで、Aが操作ボタンに手を伸ばそうとしたところその動きを作業状況認識機能が認識し、作業支援環境は次に作業する部品の情報提示を開始した。それを見てAは図H.5のように基板の上で手を振る動作を行った(j)。その動作を認識して、作業支援環境は情報を提示していた部品とは異なる部品の情報提示を開始した。Aはhの時点まで作業状況認識機能に気づいていなかったものと推測される。ただし、Aは作業状況認識機能を作業状況を認識する機能としてではなく、基板の上で手を振ったことを認識する機能として認識していると思われる。

kではAが操作ボタンを押して情報を検索しているところ、その動きを作業状況認識機能が認識してしまい、Aの意図しない情報を作業支援環境が提示してしまうこととなった。これは、実験時にAが赤い服を着ており、肌色として認識する幅を広く設定していた作業状況認識機能が服の色を肌の色として認識してしまったことが原因と考えられる。



図 H.5: 手を振って作業状況を認識させる被験者 A

**考察** 各被験者の作業に対する考察は、分析から得られた知見をもとにして、試作した作業支援環境における要素技術の不十分な点や改良点を明らかにし、作業支援環境の行った情報提示手法の有効だった場面とそうでなかった場面について述べ、新たな作業支援環境の情報提示手法を考案することを主眼とする。

なお、以下の考察では、実験の被験者を被験者記号(A)で記述し、一般にこの作業支援環境を利用することを想定している作業員を「作業員」と記述する。取り付けに時間がかかる場合は、作業員の意図が間違っている場合と意図は間違っていないが単に取り付け方が悪い場合に分けられる。その両方の場合とも、取り付けに時間がかかると作業員は自分の行おうとしている作業が正しいのか否かがわからないため不安になり、図中cのように情報を求める動作を行うものと予想される。その不安は、取り付けに時間がかかる原因がいずれの場合でも作業員に正しい情報を与えると解決できると思われるため、取り付けに時間がかかっていること事態を作業支援環境が認識してより詳細な情報を与えると、作業員の不安を取り除き自信を持って作業を行う手助けとなると考えられる。

部品6の取り付けの際、Aは40秒もの時間をかけて情報を取得しようとしたが、結局取り付け場所を間違えてしまっている。部品6のような取り付け難易度の高い部品に関しては、特に詳しい情報を提示する必要かあると考えられる。

作業全体を通して、Aは作業状況の指示にボタンを頻繁に利用するなど作業状況認識機能は有効に利用されなかった。その原因は幾つか考えられるが、作業状況の認識精度が高くないことがまず最初に挙げられる。作業状況の認識精度が低いため、作業を行ったときに認識されず、作業を行っていないときに誤って認識されてしまうことがある。このような動作を行うため、Aは作業状況認識機能を作業状況を認識する機

能として理解できなかつたのではないかと考えられる。もう一つの原因として操作ボタンによる方法に比べ操作方法が直観的でないことが挙げられる。ボタンは直観的なインタフェースであり、作業状況認識機能と違って誤動作する心配がない。そのため、誤認識の発生しがちな作業状況認識機能への依存度が低くなるものと考えられる。作業状況認識機能には、特別な操作を行わなくても自動的に作業状況を認識するという利点があるが、この機能を有効に利用するには、高い認識精度をもたせて誤認識を減らすことが重要である。

## 被験者 A 基板 1 試行 2~5 回目

**分析** 2回目以降は、Aが作業をする際のテレビモニタで取り付ける部品を確認し、部品を手に取り、レーザ光とシルク印刷を手がかりに取り付け位置を探し、テレビモニタで部品の部品の取り付け方向を確認し、取り付け、ボタンを押して次の情報を得る、という流れが定着したため、作業内容で「検索」に分類される時間が減少している。これは、作業そのものに慣れて「何をしたらよいかかわからない」状態から脱したことが大きいですが、それ以外の要因として熟練作業員に見られたように、手を動かして作業を行いながら、次の作業に必要な情報を取得するという動きができるようになることも挙げられる。

表H.1からわかるように、Aは基板1の作業に対して以下のような作業ミスをしている。

- 2 部品6の場所間違い
- 2 部品6の極性違い
- 2 部品3の極性違い

部品3と6は共に取り付け極性のある電解コンデンサである。部品6の場所間違いは取り付け1回目と2回目に発生し、それ以降は発生していない。これは取り付け3回目に取り付け間違いしていることに気づいたからであり、試行後のアンケートの自由記述からも「作業の途中で間違いに気づいた」との記述が見られた。しかし、電解コンデンサの極性に関しては最後までその存在に気づかなかつたため、間違いは最後まで減らなかった。

Aは作業中に基板を迂回してボタンに手を伸ばす姿が見られた。これはボタンを押すときの伸ばす手が作業状況認識機能に認識されないようにするためのものであるように見える。

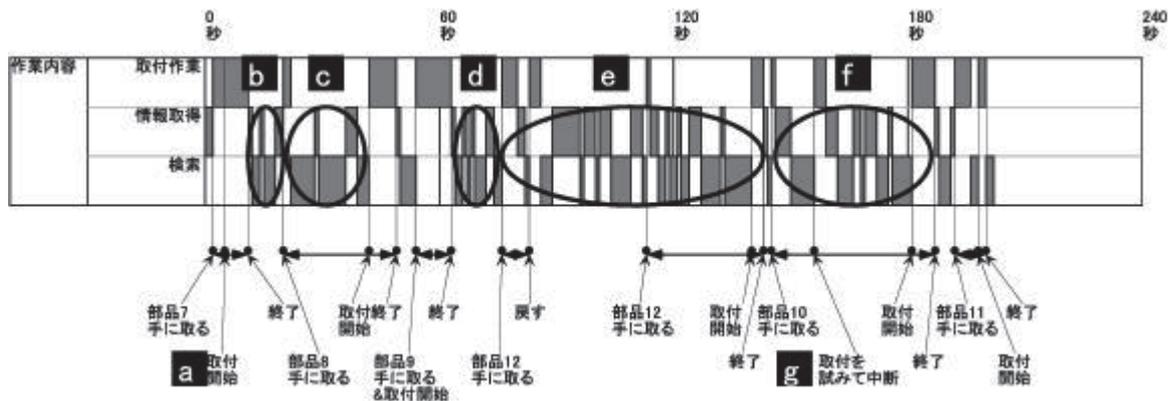


図 H.6: 被験者 A 基板 2 作業 1 回目のタイムチャート

実際に手を動かして作業している時間は、最初の作業で計 90 秒ほどかかったもののその後徐々に減少し、約 50 秒前後で推移した。このことは図 H.1 からわかる。このように、作業そのものにある程度習熟するにはあまり時間を要さないことが予想される。また、総作業時間や情報取得の時間と検索の時間を足し合わせた値も同様の変化をしており、作業そのものへの慣熟と作業支援環境への慣熟が並行してほぼ同じ速度で行われたと思われる。

**考察** 熟練作業員のように作業しながら次に必要な情報を取得するという動きを、作業になれていないはずの被験者が行っていた。このことから作業員に対し現在の作業だけでなく、次に行う作業の情報も付加的に提示するとより作業効率が上がるのではないかとと思われる。

作業員が作業支援環境への作業状況の伝達に操作ボタンを主に利用していると、ボタンに伸ばす手を作業状況認識機能が認識してしまうことがあるため、作業状況認識機能が邪魔になる。これはボタンをベルトコンベアの手前側に設置すれば解決する問題ではあるが、作業員が暖色系の服を着ているときや半袖の時にベルトコンベアの向こう側においてある部品を手にする事を考えると、全く同じ問題が発生する。そのため、作業状況認識機能では肌色として認識する閾値を実験時よりも狭く設定する必要がある。

**被験者 A 基板 2 試行 1 回目** 次に、被験者 A は基板 2 に対し作業支援環境を用いない状態で作業を行った。

**分析** 作業のタイムチャートを図 H.6 に示す。

Aはまず最初に部品7を手に取り、部品の取り付け方向を確かめた後(a)にそれを基板に取り付けた。基板1では最後までコンデンサの極性に気づけなかったのに対し、基板2の作業では最初からコンデンサの極性に気づいている。これは、部品7が非常に大きな部品で極性を示す記号も大きく印刷されており、そのためAは最初から極性の存在に気づいたものと考えられる。

Aは部品8を手にする際、交互に何度も作業指示書と部品箱を見比べてから部品を手を取った。このことは図H.6中bに現れている。この動作は作業指示書に書かれている部品の品名と、部品箱の中に入っている部品の品名を書いた紙片を見比べ、部品を検索している動作であると推測される。また、部品8を手にとってから取り付けるまでも、部品と作業指示書と基板を交互に見比べ、部品を取り付ける方向を確認する動作を行った(c)。部品8の取り付け方向はシルク印刷されておらず、部品の足の配置と基板に穿たれた穴の配置を比較する必要があるため、時間がかかったものと考えられる。

Aは部品12を手にとってから取り付けるまでの間(e)、一度手を取った部品を部品箱に戻す動きをし、また頻繁に作業指示書と基板を交互に見る動作を行った。部品12を手にするまでの期間(d)も同様の動作を行っているため、dとeは同じように解釈すべき時間と思われる。部品12を取り付けるまでに時間がかかったのは、Gで述べたように部品12を取り付ける場所が非常にわかりづらいことが原因であろうと考えられる。

Aは部品10を取り付ける際、図中fのように基板と作業指示書を見比べる動作が目立ち、また途中で誤って部品11の位置へ取り付けを試みて中断すること(g)もあった。部品10は取り付けが易しく、部品10の近辺で間違えて取り付けそうな部品取り付け場所は存在しない。しかし、この時点では部品10と共に部品11が取り付けされておらず、部品10と部品11の取り付け用の穴がほぼ同じ形状をしているため、gのような動作を行ったものと考えられる。また、アンケートで「箱に入っていた部品名と作業指示書が違っていたが部品指示書の方を優先して作業した」との記述が得られたが、これはおそらくこの作業に対する記述であると思われる。しかし、実際にはそのような事実は確認されなかった。

なお、この作業を通して、取り付けミスはなかった。

**考察** 部品8のように、部品の取り付け方向を確かめるのにシルク印刷が当てにならない場合は、作業支援環境による情報提示が有効に利用されることが期待できる。

また、部品12のように近辺に間違えて取り付けの可能性のある部品取り付け場所がある場合も、作業支援は有効であると思われる。ただし、この場合の情報提示は正確

で理解しやすいものである必要があり、もし不正確で理解しづらいとかえって混乱を助長する可能性がある。このことは後に述べるアンケートでも触れられている。

部品 10 のような作業指示の見間違いは、作業支援環境を使用している時には見られなかった。そのため、作業支援環境の「どの部品を取り付けるのか」という情報を提供する機能は有効に利用されたと思われる。

## 被験者 A 基板 2 試行 2~5 回目

**分析** A は作業を行うにつれ徐々に作業内容を覚えてしまい、3 回目以降の作業時間は殆ど「取り付け作業」に分類されるもののみとなった。このことは図 H.1 右上のグラフからも読みとれる。一方で「取り付け作業」時間は 1 回目から殆ど変化していない。

図中 c に代表されるように、作業支援なしで作業を行うと「検索」に分類される作業時間が増加することがわかった。このことは図 H.1 からわかる。上段のグラフを見比べると、作業支援環境を使用している場合では「情報取得」が「検索」を常に上回っており、作業支援環境から能動的に情報を取得する時間が多かったことを示すが、作業支援環境を使用しない場合では「検索」が「情報取得」を常に上回っており、取り付け部品や取り付け場所を探す時間が多かったことを表す。

なお、作業を通して、取り付けミスはなかった。

**考察** 「取り付け作業」に分類される時間は、1 回目の作業から殆ど変化することがなかった。これは、基板 1 の作業時に取り付け作業そのものに慣れてしまい、作業内容が変わっても取り付け作業に関しては新たに学習する内容が無かったことを意味すると思われる。したがって、作業そのものの習熟はかなり早期に完了するため、未熟練の作業員に対しても比較的短い時間である程度複雑な作業を行うことができるものと期待される。

## 被験者 A アンケート

**分析** 試行後に行ったアンケートの結果を付録 I に示す。

まず、作業支援環境を用いたときのアンケート結果から述べる。「取り付ける部品の種類はすぐにわかりましたか？」の設問では 7 段階中 5 の評点の評価が与えられ、「どのようにして取り付ける部品の種類を判断しましたか？」の設問では作業指示書を利用せずに作業支援環境のみを用いて作業を行っていることがわかった。自由記述回答で

は、「箱に入っていた部品の名前よりもモニタの方が部品が表示されてわかりやすかった」となっており作業支援環境の「どの部品を取り付けるか」を情報提示する機能は有効に利用されたものと思われる。

「部品を取り付ける位置はすぐにわかりましたか？」の項目で7段階中4の評点しか得られなかった。この被験者は部品の取り付ける位置を基板のシルク印刷とモニタに表示された部品の識別子を対応させて取り付ける方法を主にしており、レーザ光による指示は副次的なものとしか利用していなかった。これはアンケートの自由記述回答で、「レーザ光の指示がずれることがありとまどった、あまり頼りにならなかった、もっと正確な位置を指示すべきで不正確な位置を指示するくらいならない方が良い」との記述があったことからわかる。

「部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はすぐにわかりましたか？」の設問では、7段階中5の評価が得られたが、Aはテレビモニタよりシルク印刷を優先して情報を取得していたことがアンケート回答からわかるため、評価は作業支援環境に対するものではなくシルク印刷の読みやすさを表しているものと思われる。テレビモニタを利用しなかった理由については、自由記述での「モニタに表示された情報と基板のシルク印刷が異なるのでシルク印刷を優先して作業した」(注:実際にはこのようなことは無かった)、との記述から、Aはモニタの情報の読み方を間違えていた可能性がある。これは、テレビモニタに部品を取り付ける方向を表示していたにもかかわらず、作業の最後まで部品を取り付ける方向の存在に気づかない結果と一致する。

作業支援環境の理解しやすさを問う設問では、レーザ光による部品の場所の指示が正確でないと判定された以外はおおむね良好な結果が得られた。

一方、作業支援環境を利用せず、作業指示書だけで作業したときの評価は、部品位置、部品の方向のわかりやすさで作業支援環境を利用したときの評価を上回った。作業支援環境を利用したときと比較して情報量は減っており、新たに提示されるようになった情報は存在しない。そのため、この評価は基板1と基板2の難易度の差を示すものなのか、作業支援環境を利用しない方が作業が容易になると判断しているものかはわからない。ただし、実験後の感想で「基板2の方が作業が容易だった」と口述しており、それを示すように基板2の作業では一切の作業ミスが発生しておらず、また基板2には極性の判断しにくい電解コンデンサが存在していないことから基板2の難易度の低さがわかる。したがって、評価の差は基板1と基板2の難易度の差を示す可能性が高いと思われる。

**考察** レーザ光による部品取り付け位置の指示に関しては良い評価が得られなかった。これは、レーザ光による指示が正確でないことに対する不満が低い評価へと繋がったものである。レーザ光の指示が不正確になったのは、基板位置認識機能で生じた誤差が原因である。基板位置認識機能は基板の上に手を重畳したときに生じる誤差を、過去のデータ元にして補正している。手が重畳している時間が短時間であれば補正することができるが、長時間になると補正することができなくなる。そして、**A**は基板の上方で部品を手を持ってしばらく悩むことが多かったため、基板位置認識機能で誤差が生じた。レーザ光による指示をより正確にするには基板位置認識機能の改良が必要である。

また、アンケート結果からテレビモニタの情報の読み方を間違えていた可能性が読みとれるが、テレビモニタに表示した部品の取り付け方向を示す図として基板に取り付けた部品の写真を利用していたことが原因ではないかと考えられる。テレビモニタでは部品の写真を部品の取り付け方向に応じて回転させて取り付ける方向を提示していたのだが、この図を取り付ける場所を表す図と解釈してしまい、取り付ける方向を表す図形は気にしなかったのではないかとと思われる。そして、部品**3**と部品**6**では全く同じ写真を利用し、回転させて再利用していたが、**A**はテレビモニタを写真の部品の方向よりも部品の場所を提示する情報源として解釈していたため混乱が生じたと推測される。部品の取り付け方向を表す図を作成する手間を考えて写真を利用したが、写真には部品の他に背景等の必要以上の情報が含まれているため、このような齟齬が発生したと考えられる。したがって、写真ではなく図を用いて部品の取り付け方向を示し、しかも取り付け方向の存在を強く主張するような意匠とすることが必要である。

## 被験者 B の実験結果

被験者**B**の作業時間を図H.7に、作業ミスの一覧を表H.2に示す。なお、被験者**B**、**C**、**D**については、それぞれの被験者に独特の知見のみを抜粋して分析する。

**被験者 B 基板 1 試行 1 回目** 被験者**B**は最初に、基板**1**に対し作業支援環境なしで作業を行った。

**分析** 作業のタイムチャートを図H.8に示す。タイムチャートの読み方は被験者**A**と同様である。

**B**の特徴は、部品を手に取りる際に作業指示書の作業手順に従わず、並んでいる部品箱

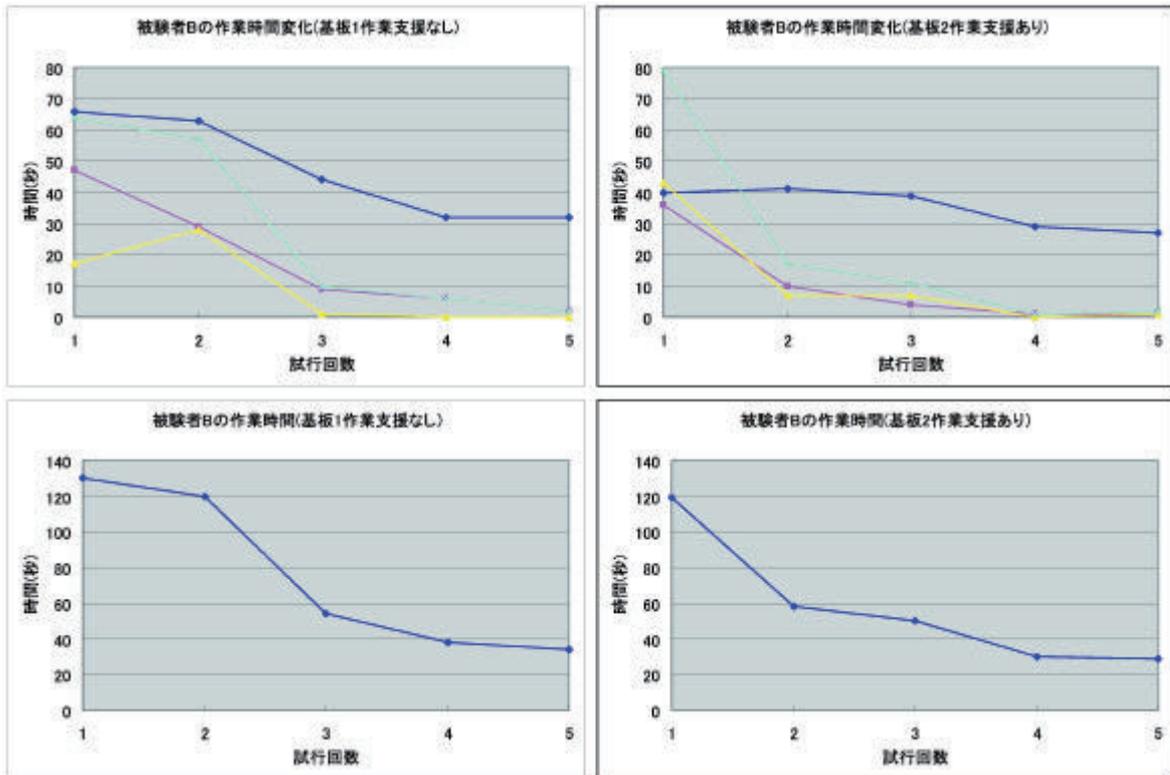


図 H.7: 被験者 B の実験結果

の左から順番に部品を手に取り、作業を行うことである。そのため、図中 a のように取り付け作業を行いながらもう片方の手で部品箱から次の部品を取り出す、あるいは作業指示書を読みながら部品箱から部品を取り出す動作が可能である。このことは作業時間全体を通して常に手に部品を持っていることがタイムチャートからもわかる。この動作は全体的な作業速度の向上に寄与している。

この作業で B は大きな作業ミスを行っている。付録 G で述べているが、基板 1 は左右

被験者 B	基板 1 支援無し	基板 2 支援有り
1回目	部品 6 極性	部品 12 場所
2回目		部品 12 場所
3回目	部品 3 極性	部品 12 場所
4回目		部品 12 場所
5回目	部品 3 極性	部品 12 場所
(備考:基板 1 の作業は全て隣接する他の基板上へ行った物)		

表 H.2: 被験者 B の作業ミス状況

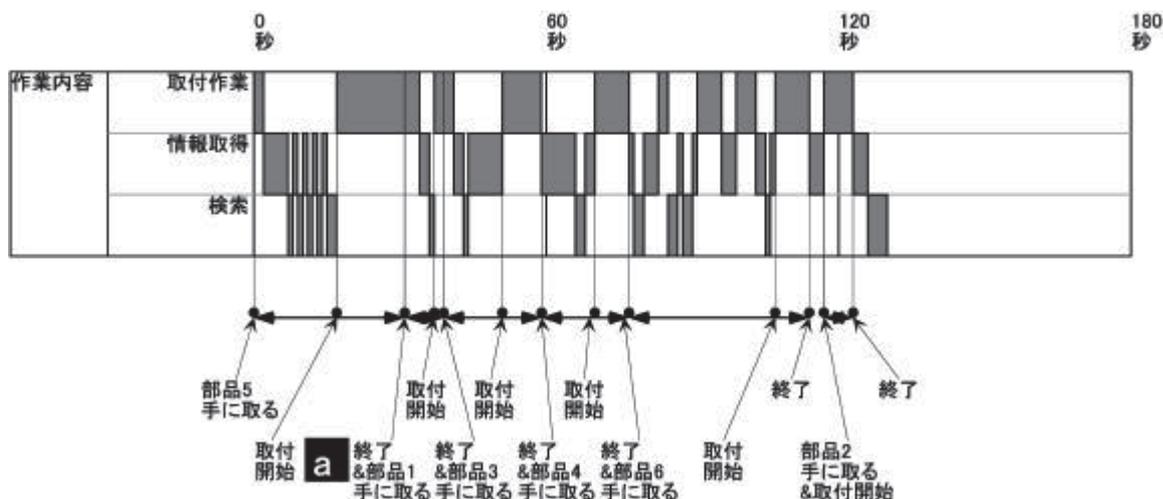


図 H.8: 被験者B 基板1 作業1回目のタイムチャート

に同じ構成の基板が結合された構造になっている。本実験では左半分に対し部品の取り付け作業をするよう指示したが、Bは右半分に部品を取り付けている。また、この作業ミス以外にも、部品6の極性間違いが見られた。

**考察** 部品箱の並んでいる順番に作業を行うと、全体的な作業速度の向上を図ることができる。そのため、作業支援環境の作業支援法である、次に作業すべき部品を作業支援環境が指示する方法は、部品取り付けが終わってから作業支援環境の提示する情報を閲覧する手間が生じるため作業速度の向上には貢献しにくいことが予想される。従って作業支援環境の支援方法として、作業員が何か部品を手にしたことを認識し、その部品に対して作業支援を行うか、あるいは作業支援環境が指示する順番に部品箱を並べておくかのいずれかの方法が有効であろうと思われる。

部品を取り付ける基板を間違えてしまう、という大きな作業ミスは、本作業支援環境のレーザ光を用いた部品取り付け場所の情報提示を用いていれば防ぐことができたものと思われる。

#### 被験者B 基板1 試行2~5回目

**分析** Bは、2回目の試行からは部品を取り、作業指示書を見て、部品を取り付けつつ次の部品を手に取る、という流れが定着し、総作業時間が短縮している。作業の終盤では作業指示書を一瞥するだけで作業を行っていた。

作業時間の分布については、被験者Aの作業支援環境なしの作業と同様に作業後半

では殆ど「情報取得」「検索」の時間が無くなり、作業内容を暗記して作業したことがわかる。総作業時間は3回目以降減少し、1回目と2回目では余り変化がない。これは、2回目の作業では作業内容の記憶を確かめながら、なるべく作業内容を暗記して作業を行う方針で作業を行っていたのではないかと推測した。それを裏付けるものとして、図H.7左上のグラフに示すように、2回目の作業では「検索」に分類される時間が1回目よりも増加している。作業内容のうち「部品取り付け」に分類される時間は、被験者Aの基板1枚目の作業に比較するとその減少の仕方が緩やかになっている。これは、最初から被験者Bがある程度速く部品を取り付けており、作業時間を短縮する余地が少なかったからではないかと思われる。

なお、部品を取り付ける基板を間違えるミスは、最後まで修正されることがなかった。それ以外にもコンデンサの極性間違いが最後まで見られ、Bはコンデンサの極性の存在に気づかなかつたと思われる。

**考察** Bのように、自分で基礎知識の学習の期間を設け、能動的に基礎知識を吸収、暗記しようとする作業員がいることが想定される。このような作業員を対象とすると、作業支援環境が全ての情報を提示してしまうと学習の手助けにならないことが予想される。したがって、作業員がどのような意図を持って作業を行っているかを作業支援環境が推測して、作業員の意図に応じた作業支援を行うという支援方法が考えられる。例えば、作業員が全く作業内容がわからない状態だと作業支援環境が判断すれば、作業に関する全ての情報を提示し、作業内容を記憶しつつある状態だと判断すれば徐々に簡潔な情報を提示する、という方法が考えられる。

**被験者B 基板2 試行1回目** 被験者Bは次に、基板2に対し作業支援環境を使用して作業を行った。

**分析** 作業のタイムチャートを図H.9に示す。

Bは最初テレビモニタの指示に従って部品7を手にとった(a)。これは、基板1の作業の際に部品を作業指示書の取り付け手順によらず、部品箱の左から順に手に取っていたのとは対照的である。しかし、部品7を手にとって取り付け場所を探している際にその動きを作業状況認識機能が認識してしまい、作業指示が部品7から部品11に変化した(b)。そのためBは部品7を部品箱に戻し、部品11を手にとって作業を行った(c)。この動作は最初のボタン操作を行う前の動作であり、能動的に目的の部品に関する情報を得る方法がわからなかったため、仕方なく情報提示されている部品に対する作業

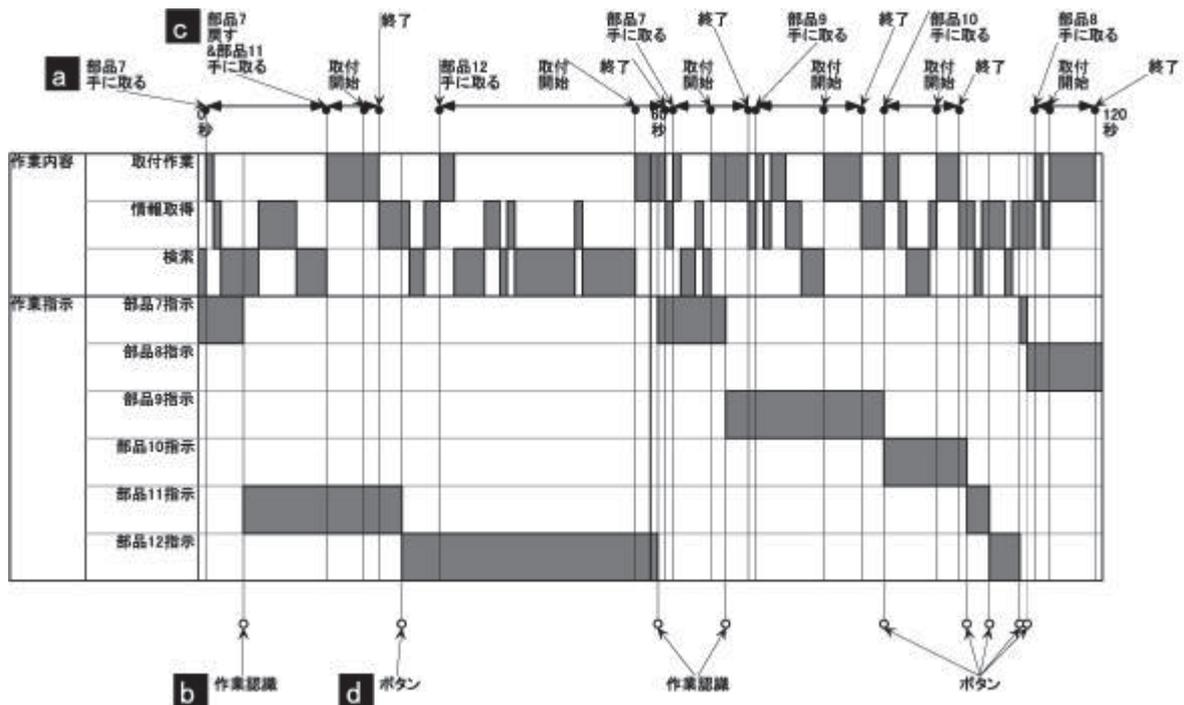


図 H.9: 被験者B 基板2 作業1回目のタイムチャート

を行ったものと解釈できる。ボタンの操作を利用し始めた後(d以降)は、このように一度手に取った部品を部品箱に戻す動作は行わなくなった。

この試行での作業ミスは、部品12を本来取り付けるべき場所の隣に取り付けるというものであった。

**考察** 部品12の取り付けミスに関しては、レーザ光による部品取り付け場所の支援が的確であれば発生しなかったミスである。後に述べるようにアンケートでは、レーザ光による取り付け場所の指示が微妙にずれているためわかりにくい、という回答が得られており、被験者Aと同様にレーザ光の精度に関して不満を感じていることがわかる。したがって、レーザ光による部品取り付け場所の指示の精度を向上することは重要な課題であるといえる。

#### 被験者B 基板2 試行2～5回目

**分析** 1回目の試行の図H.9bのように、一度手に取った部品を部品箱に戻す動作は行わなかった。これは、ボタンを操作して適切な部品の情報を得る方法を使用したため、部品を部品箱に戻すよりはボタンを操作して手に持っている部品の取り付け情報を提示させていたためと思われる。またBの作業の特徴として、作業の前半はボタン

を使わず部品を手に取りるときに情報提示されている部品の取り付けを行い、情報提示されている部品が既に取り付け終わっていることが多い作業の後半になってボタンを利用するようにするという作業の進め方を取ったことが挙げられる。このように作業すれば、作業状況認識機能が誤認識しても気にせずに作業を行うことができる。このようにボタンを頼らない作業の進め方を取ったことは、5回の作業全体を通して、Bの押したボタンの回数は5回のみであったことからわかる。これは、被験者Aが5回の作業を通して70回近くボタンを押したことは対照的である。このようにボタン操作を少なくして無駄な時間を無くしたことが、Aに比較してBが効率の良い作業を行うことができた原因の一つと考えられる。ただし、基板1の作業と同様にBが作業内容を暗記してしまったため、作業支援環境を利用せず、ボタン操作を行うことがなかったということも効率よく作業できたことに寄与している。図H.7の作業時間からもわかるように、Bは試行の後半ではほとんどテレビモニタを見ておらず、部品を手に取りるとテレビモニタを一瞥して取り付け作業を行っていた。

「部品取り付け」に分類される時間は、「情報取得」「検索」に分類される時間に比較すると作業を通じて減少の度合いが少なかった。このことは、Bが取り付け作業そのものには基板1の試行で慣れてしまっており、取り付け技術向上の余地が少なかったのではないかと思われる。

なお、Bは1回目の試行で犯した作業ミス最後まで繰り返した。他の作業ミスは発生しなかった。

**考察** これまでの分析からもわかるように、Bは作業内容を暗記して作業を行う傾向があることがわかる。作業支援環境がどのような情報提示を行おうとも、作業員が完全に情報を覚えてしまった方が作業効率はよい。作業員が作業内容を覚えるようになると、徐々に作業支援環境への操作が少なくなることが予想されるため、作業員の作業支援環境への操作が少なくなると作業支援環境は作業内容の暗記を手助けするような情報指示を行う、あるいは簡潔な情報提示を行うようにすべきであると考えられる。

また、Bの部品12の取り付けミスのように、一度間違えて取り付け方法を覚えてしまうと後々までミスが継続するため、部品取り付け後次の作業過程に製品が流れていく前に、作業ミスを検知し、作業員に作業ミスの内容を知らせてすぐに間違いを訂正するような作業支援が考えられる。

## 被験者B アンケート

**分析** まず、基板1を作業指示書だけで作業したときのアンケート結果について述べる。「部品を取り付ける位置はすぐにわかりましたか?」「部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はすぐにわかりましたか?」という設問では、全て7段階中1の評価であった。基板1には部品3と6のように部品取り付け場所が複雑な部品があったため、部品取り付け場所がわかりにくかった旨の評価が得られたものと思われる。基板1の作業では部品取り付け場所を間違えるミスは発生しなかったが、アンケートの回答から推測するとこれはBが偶然正しい位置に取り付けていただけの可能性も否定できない。部品を取り付ける方向がわからなかったというアンケート回答だが、これは電解コンデンサの極性間違いの多さからBが極性の存在に気づけなかったのではないかと推測できる。

一方、作業支援環境を用いて作業を行ったときのアンケート結果について述べる。「取り付ける部品の種類はすぐにわかりましたか?」で7段階中7の最高の評価が得られ、自由記述で「部品を取り付ける際にテレビモニタの部品の写真をあてにした」という回答が得られた。また、取り付ける部品の種類を間違えるミスを最初から最後まで犯さなかったことから、部品の種類を指示する情報提示は有効に機能したものと考えられる。一方、「部品を取り付ける位置はすぐにわかりましたか?」では7段階中5という評価であり、しかも自由記述で「主にシルク印刷を元にして部品取り付け位置を探した」という回答が得られた。これは「レーザ光では位置がいまいちつかめない、レーザ光が微妙にずれるのでちょっとわかりにくい」という自由記述からも、レーザ光による取り付け位置の情報提示が信頼されていなかったことがわかる。ただ、実験後の感想でレーザ光がある方が部品取り付け位置の目安になってわかりやすかったという口述があり、Bにとってレーザ光は信頼はできないが目安にはなる程度の認識はあったと思われる。さらに、「部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はすぐにわかりましたか?」の設問では7段階中1という最低の評価であった。また、自由記述からも最後まで部品に取り付ける方向があることに気づけなかったことが回答されており、テレビモニタによる部品取り付け方向の指示は利用されなかったことがわかる。

**考察** 部品の種類を提示するのに、テレビモニタに部品の写真を提示する手法は有効であることがアンケートからわかる。しかし、テレビモニタに部品の取り付け方向を表示する情報提示は有効に生かされておらず、最後まで部品の取り付け方向に気づかない結果となった。これは被験者Aの実験結果に共通するものであり、従って部品

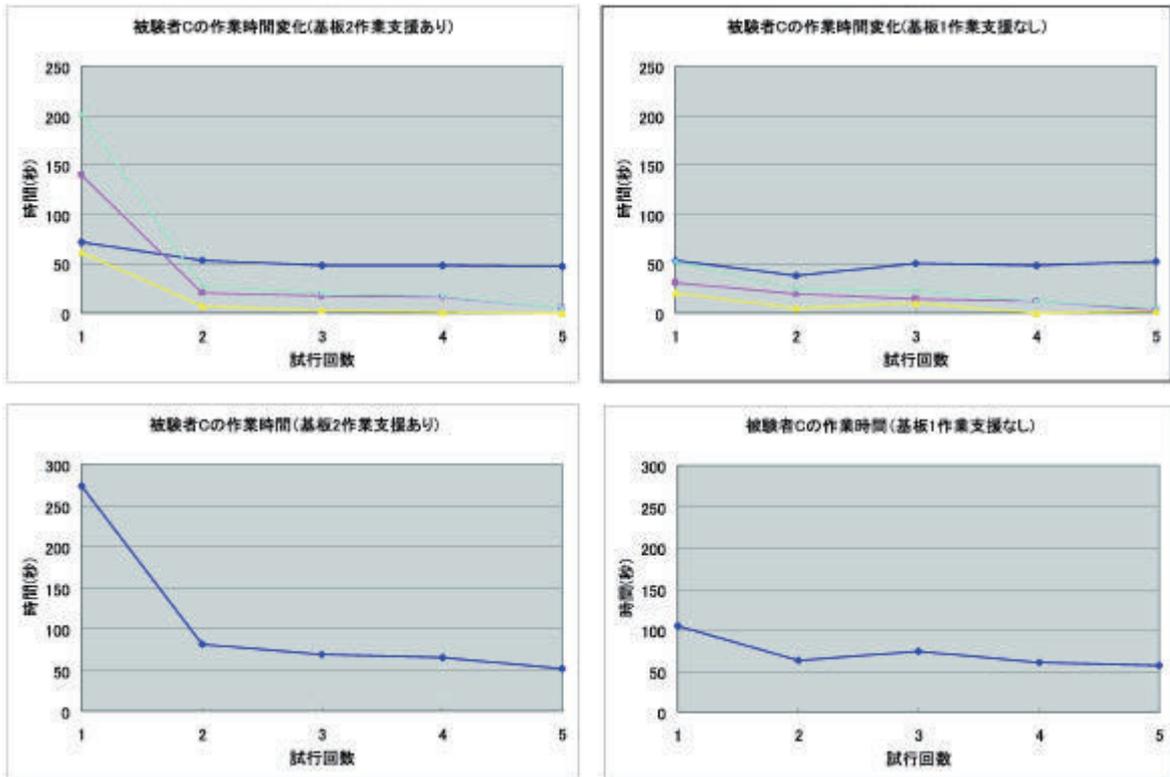


図 H.10: 被験者 C の実験結果

取り付け方向の提示に関しては、現在の方法が適切でないといえる。

### 被験者 C の実験結果

作業時間を図 H.10 に、作業ミスの一覧を表 H.3 に示す。

被験者 C 基板 2 試行 1 回目 被験者 C は最初に、基板 2 に対し作業支援環境を用いて作業を行った。

被験者 C	基板 2 支援有り	基板 1 支援無し
1 回目		部品 6 場所 部品 3 極性
2 回目	部品 7 極性	部品 6 場所
3 回目		部品 6 場所
4 回目		部品 6 場所
5 回目		部品 6 場所

表 H.3: 被験者 C の作業ミス状況

**分析** 作業のタイムチャートを図H.11に示す。

被験者A、Bとは異なり、Cは作業開始後部品を手にとらず、テレビモニタ、作業指示書、基板、部品を見比べる動作をしばらく行った(a)。その後、操作ボタンに手を伸ばし、何度かボタンを押す動作を行いボタンの機能を確認した(b)。この動作も被験者A、Bには見られなかったものである。

Cが最初に行った部品7の取り付け(c)と部品8の取り付け(d)は、作業支援環境の指示した通りの順番で取り付けが行われている。しかし、部品9の取り付け(e)以降は作業支援環境の指示する部品とは異なる部品を取り付けており、たまにボタンを連打して(f,h,g)補助的にテレビモニタを見る程度にしか作業支援環境を利用しなかった。

Cは視力が悪いこともあり、作業指示書や部品を見る、取り付けを行う、などほぼ全ての作業に置いて前屈みになり、基板に覆い被さるような形で作業を行っていた。そのため、基板位置認識機能が正常に動作することができずレーザー光が全く不正確な場所に照射される場面が多く、また基板に覆い被さったCの体の上にレーザー光が照射されたためレーザー光を視認できない場面が多々あった。この様子を図H.12に示す。この写真では前屈みになって作業をするCの様子を見て取れるが、それに加えてCの頭にレーザー光が照射されていることもわかる。

なお、この試行では作業ミスはなかった。

**考察** Cはボタンを能動的に利用する場面が多く見られたものの、消極的にしか作業支援環境を利用しなかった。

作業支援環境は作業ライン上方から作業状況をビデオカメラで撮影し、レーザー光で基板を照射するため、Cのように前屈みになって基板に覆い被さるように作業する作業員に対しレーザー光による作業支援を行うことができない。このような場合は、前屈みにならないよう作業員に注意を喚起するようう対策を講じる必要がある。

## 被験者C 基板2 試行2～5回目

**分析** 1回目の試行から作業支援環境を利用することが少なかったCだが、試行が進むにつれこの傾向が強くなった。図H.10に示した作業時間を見ると、1回目の作業ではボタンを押すなど作業支援環境を利用しようという姿勢が見え「情報取得」「検索」の時間が多くなっているが、2回目以降は「情報取得」「検索」の時間が急激に少なくなっている。被験者A、Bの場合、この時間は徐々に減少しているため、被験者Cに特有の特徴である。

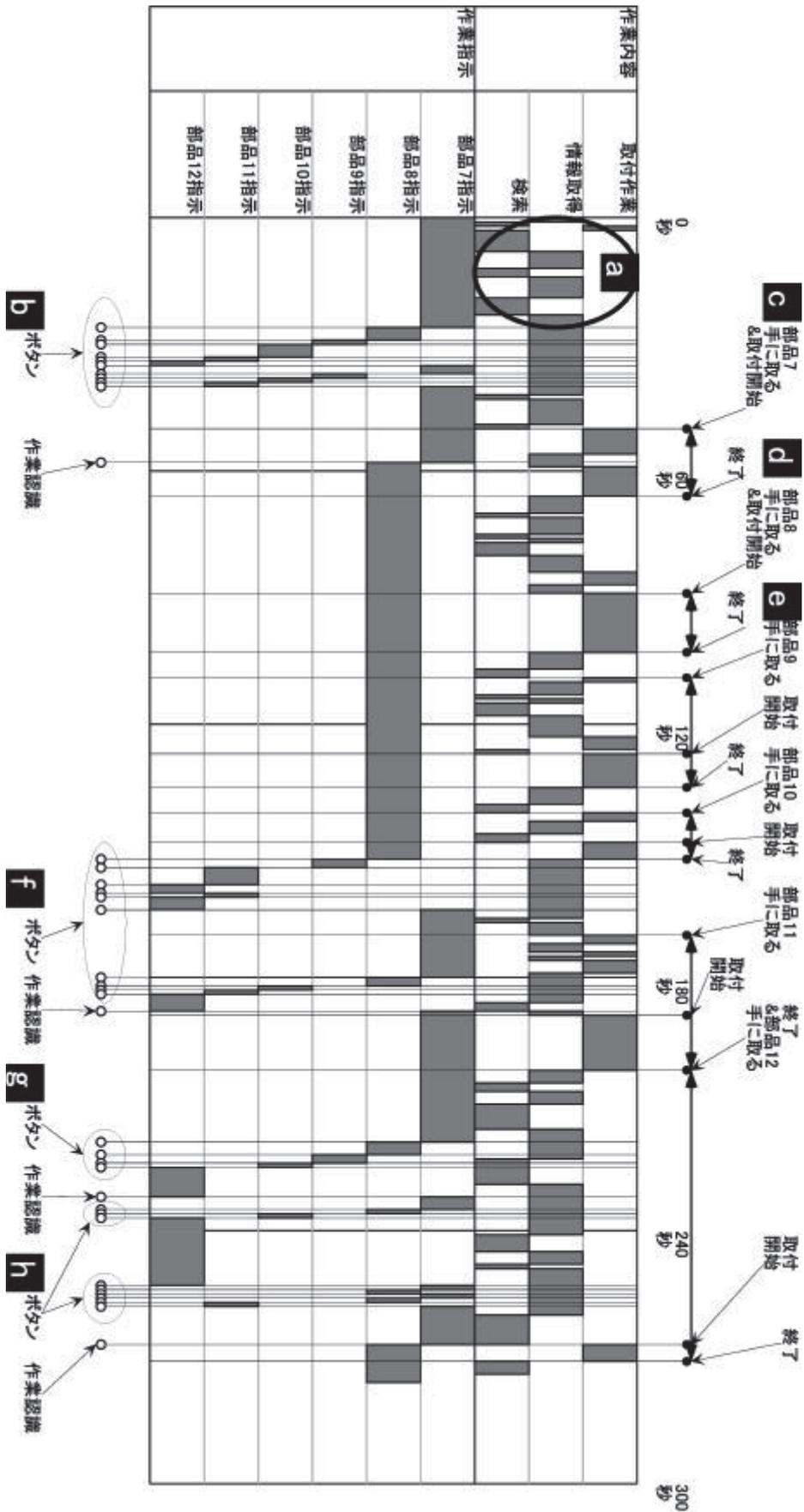


図 H.11: 被験者C 基板2 作業1 回目のタイムチャート  
付録-45



図 H.12: 前屈みになって作業を行う被験者 C

また、Bは試行2回目に部品7の極性を間違える作業ミスを犯している。試行3回目までは部品7の極性に気づかずに作業をしていたようだが、試行4回目に部品の極性に気づいた旨の発言があり、4回目以降は極性を意識して作業を行っていた。

**考察** Cは作業支援環境を無視し、作業指示書を主な作業情報源として作業していた。これは後述のアンケート結果でも述べているが、テレビモニタに表示される情報の意味がわからなかったこととレーザ光の存在そのものに気づかなかったことが原因である。従って、テレビモニタに表示する情報を直観的に理解しやすくすることが重要である。また、作業中に前屈みになってレーザ光の反射が見えなくなる問題に関しては、前屈みになって作業する作業員への対策が必要である。

**被験者 C 基板1 試行1～5回目** 被験者Cは次に、基板1に対し作業支援環境を用いないで作業を行った。

**分析** 試行1回目のタイムチャートを図H.13に示す。

基板2の作業の際に作業支援環境を無視する方針で作業を行っていたため、作業支援環境を用いない基板1の作業に対しても適応が早く、作業にかかる時間は作業1回目から5回目までほとんど変化していない。Cは試行1回目に部品3の極性を間違い、部品6の場所を間違える作業ミスを犯している。2回目以降は部品3の極性に気づき極性に関する間違いはなかったが、部品6の場所を間違える作業ミスは最後まで続いた。

**考察** 被験者Bと同じように、作業ミスのうち最後まで修正されないものが見られた。このことは、被験者Bで述べた部品取り付け後次の作業過程に製品が流れていく

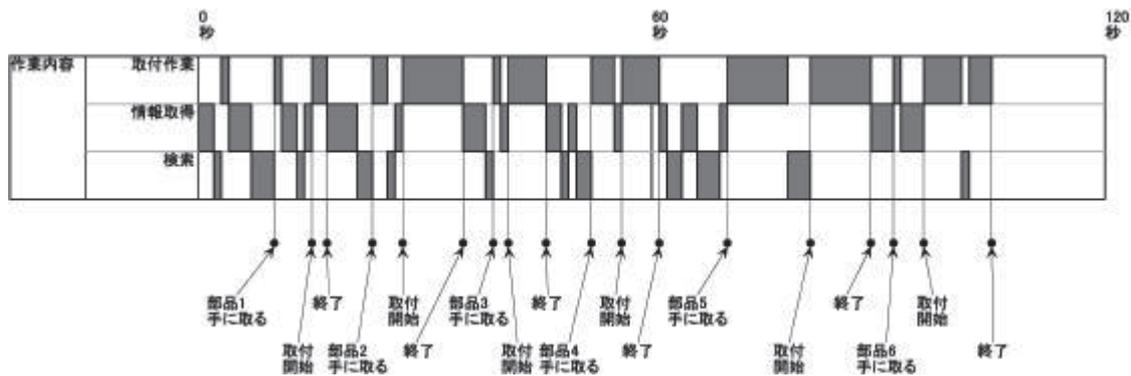


図 H.13: 被験者 C 基板 1 作業 1 回目のタイムチャート

前に、作業ミスを検知し、作業員に作業ミスの内容を知らせてすぐに間違いを訂正するような作業支援が重要であることを示す。

### 被験者 C アンケート

**分析** アンケート結果では、Cが作業支援環境を当てにせず作業を行ったことが記されていた。Cは取り付ける部品の種類と取り付ける場所を判断するのに作業指示書しか見ておらず、部品を取り付ける方向を判断するにもシルク印刷を主な情報源としており、テレビモニタは補助的にしか利用しなかった。また、レーザ光に全く気づかなかった旨の記述があり、またモニタの見方がよくわからなかったとのことからも作業支援環境が利用されなかったことがわかる。

**考察** 作業員にとって作業支援環境の利用法がわかりにくいと、作業支援環境の利用法を模索するよりも作業支援環境を利用しないで作業する方法を選択する作業員が出てくることが予想される。したがって、作業支援環境の利用法を認知性の観点からよりわかりやすくする必要がある。

### 被験者 D の実験結果

作業時間を図 H.14 に、作業ミスの一覧を表 H.4 に示す。

**被験者 D 基板 2 試行 1~5 回目** 被験者 D は最初に、基板 2 に対し作業支援環境を使用せず作業を行った。

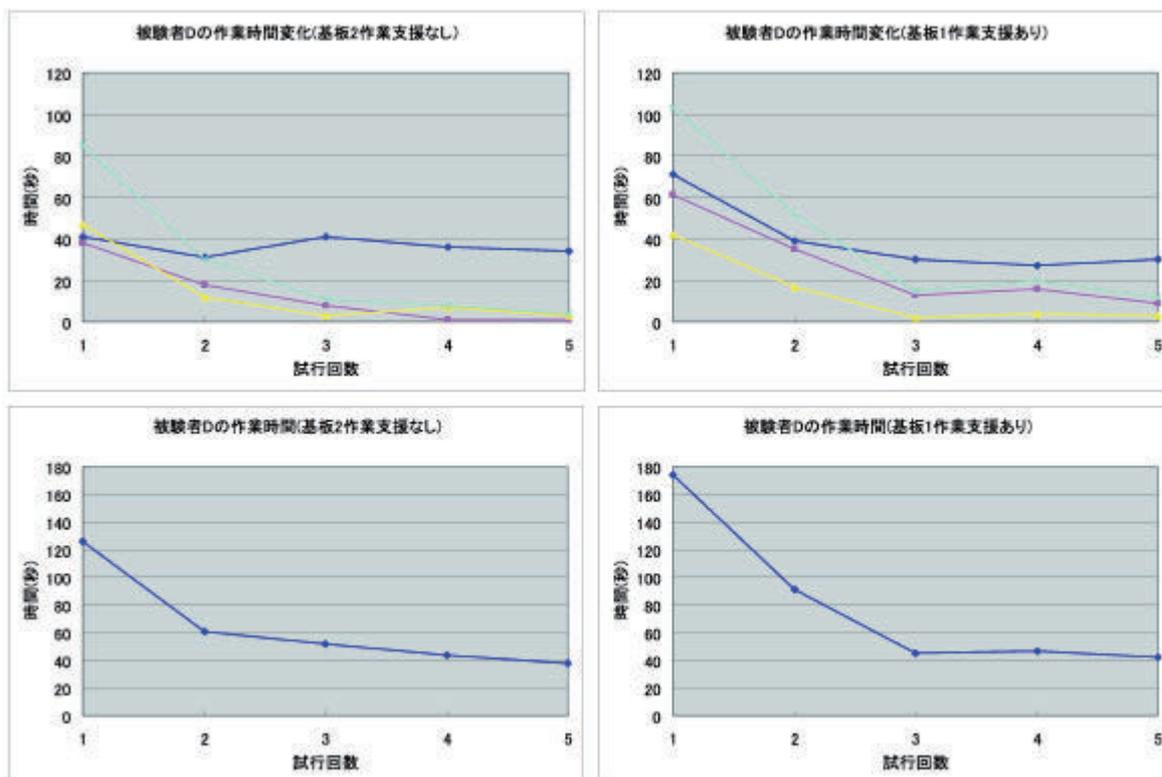


図 H.14: 被験者 D の実験結果

**分析** 1回目の作業のタイムチャートを図H.15に示す。Dは最初に部品の形を一つ一つ確認し、その中から部品 12を手に取った (a)。しかしその後、部品を部品箱に戻し (b)、作業指示書の指示する順番で作業を行った。

1回目の試行の際に見られた D の特徴的な動作として、いわゆる「指さし確認」が挙げられる。Dは部品を手に取る際に部品を指さして確認し、部品を取り付ける場所を検索する際にも作業指示書と基板を指さして確認していた。この動作は2回目以降は減少したが、部品取り付け後の確認時には時折この動作が見られた。

被験者 D	基板 2 支援無し	基板 1 支援有り
1回目		部品 3/4/6 場所
2回目	部品 7 極性	部品 3 場所 部品 6 極性
3回目		部品 3 極性
4回目	部品 7 極性	部品 3 極性 部品 6 場所
5回目		

表 H.4: 被験者 D の作業ミス状況

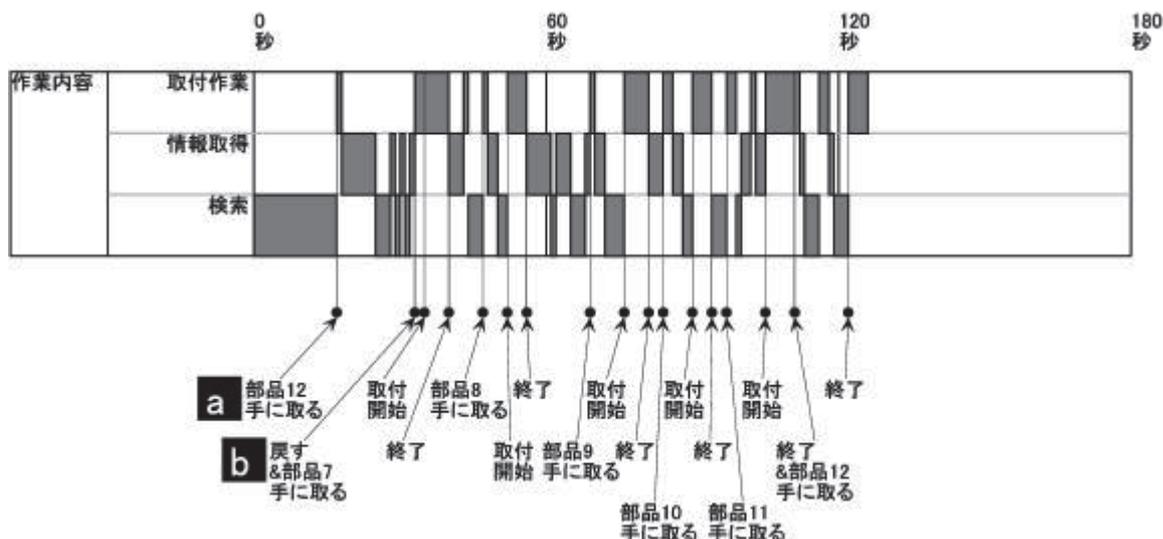


図 H.15: 被験者 D 基板 2 作業 1 回目のタイムチャート

5回の試行を通して「部品取り付け」に分類される作業時間はほぼ変化しなかった。Dの作業は最初から無駄が見られず、総作業時間を短縮するための余地がなかったのではないかとと思われる。作業全体の時間は1回目から2回目にかけて半減し、その後も漸減しているが、この変化は「情報取得」「検索」に分類される作業時間の減少に対応している。

また、Dは2回目と4回目の試行の際に、部品7の極性を間違えている。これは、部品の極性に気づけなかったためと思われる。

**考察** この被験者は部品取り付け作業に最初から無駄が見られず、作業指示書を読みつつ作業を通して作業内容に習熟することも効率よくできている。また、指さし確認を行って作業内容を逐一確認することも行っているため、極性に気づけなかったために犯した作業ミス以外の作業ミスはなかった。そのため、Dがこの作業を行うという状況では作業支援環境を用いる利点は無いと思われる。

**被験者 D 基板 1 試行 1 回目** 被験者 D は次に、基板 1 に対し作業支援環境を使用して作業を行った。

**分析** 作業のタイムチャートを図 H.16 に示す。

図 H.16 中 a から b までは、D は作業支援環境の提示した部品に対する部品取り付けを行った。しかし、図 H.16 中 c で作業支援環境が部品 6 の情報提示をしているにもかかわらず

ならず、Dは部品6に似た形状の部品である部品3を手にとって作業を行おうとし、その後部品箱に部品を戻した。

図中dでは、Dは部品箱とテレビモニタを交互に見比べる動作を行った。これは、テレビモニタに既に取り付けが終わった部品1の写真が提示されており、Dは何をしたらよいのかわからなくなったのではないかと推測される。

その後eで部品3の情報が提示されたため、Dは部品3の取り付けを行った。部品6と4の取り付けの際(f,g)にはテレビモニタを見ず作業指示書を見ていた。

部品4の取り付け後、Dは基板をベルトコンベアから落としてしまった。そのため、基板をベルトコンベアに戻す時間と方々に散らばった部品を回収するのに時間がかかった(h)。その後、散らばった部品を基板に取り付け直したが、部品が散乱しており解析の際の手がかりが少なかったため、この時いつどの部品を取り付けたかをビデオ映像で確認することはできなかった。

なお、これらの試行では、操作ボタンを全く利用しなかった。

Dは被験者Cほどではないが、取り付け時に前屈みになる癖があった。そのため、レーザ光の指示が大きくずれる場合が多かった。

図H.14の作業時間を分析すると「部品取り付け」の時間が目立って多く、基板2に対して初めて作業を行ったときに比べても多い。これは、部品取り付けを行う際に部品を手にとって部品箱に戻すような試行錯誤を多く回数が多かったためと考えられる。また、hのように基板を一度取り落としてしまい、再度取り付け作業行う必要が生じたことも要因として大きい。

この作業で部品3と6の電解コンデンサの取り付け場所を間違える、部品4の取り付け場所を間違えるという作業ミスがあったが、これらは基板を落としたときに間違えて部品を取り付けたのではないかと推測される。

**考察** 被験者Dは図H.16中dで取り付けに手間取っている。これは、作業支援環境の提示する情報を信頼しすぎて、作業支援環境の提示する部品情報が既に取り付けの終了した部品に対する情報であることに気づくまで時間がかかったのではないかとと思われる。さらに、Dは作業状況認識機能を過度に信頼していたようである。実際には作業状況認識機能は作業員の手の動きを認識して動作するため、誤認識を完全に防ぐことは難しいが、Dは作業支援環境が常に正しい取り付け部品を情報提示するものと考えていたのではないかとと思われる。Dがそのように考えたため、この試行ではDが操作ボタンを全く利用しなかったのではないかと推測される。したがって、作業状況

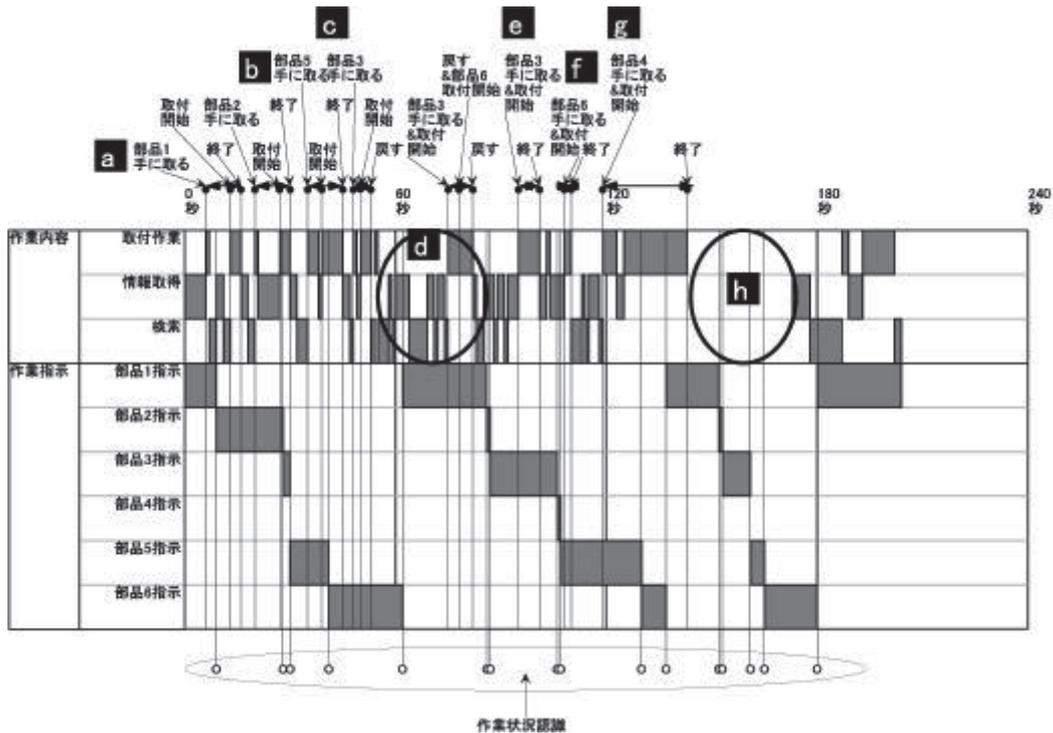


図 H.16: 被験者D 基板1 作業1回目のタイムチャート

認識機能の認識性能を向上させるか、作業状況認識機能があまり信頼できるものではないことを作業員に認識させることが必要であると思われる。

#### 被験者D 基板1 試行2~5回目

**分析** Dの2回目以降の試行では1回目の試行と異なり、積極的にボタンを利用していた。

作業ミスは、部品3と6の極性間違いと取り付け場所間違いであった。極性間違いが最後まで続いたのは極性の存在に気づかなかった被験者に共通するが、他の被験者と違い取り付け場所の間違いが作業後半になっても続いていた。これは、作業後半になっても部品を取り付ける場所を正確に確認できていなかったことを表す。

**考察** 最後まで部品の場所が正確に確認できないという作業ミスを防ぐには、レーザー光による正確な部品取り付け場所の指示を行うことが重要であると考えられる。

#### 被験者D アンケート

**分析** 作業指示書だけで作業したときには、「どの部品を取り付けるか、どこに部品を取り付けるかを比較的簡単に理解することができ、部品の取り付ける方向は理解するのが容易ではなかった」との回答が得られた。

一方作業支援環境を利用したときには、「取り付ける部品の種類を判別するため主に作業指示書を利用していた」という回答が得られた。テレビモニタをあまり利用しなかった理由は、「テレビモニタの表示が次々と変化するため変化のない作業指示書の方がわかりやすかったから」という回答が得られた。部品取り付け位置の判別も作業指示書を主体にして行っており、「レーザ光による指示がわかりにくかった」との回答が得られている。しかし、Dは「部品を取り付ける方向を判断するための材料としてテレビモニタを利用している」と回答しており、部品を取り付ける方向を指示する方法として有効に利用されていたことがわかる。

**考察** ここでも、作業状況認識機能とレーザ光の取り付け場所指示の不正確さが問題となっており、これらの機能の精度向上が必要とされていることがわかる。

## 付録 I 被験者実験アンケート

A

実験後アンケート a 氏名: [REDACTED]

お疲れさまでした。最後に、アンケートにご協力ください。実験では、最初に「レーザー光とモニタを利用して作業」していただき、次に「作業指示書だけで作業」していただきました。それぞれの作業について、数字に○をつけて評価してください。

1. レーザ光とモニタを利用して作業した時

- 取り付ける部品の種類はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4  5 6 7 (よくわかった)
- どのようにして取り付ける部品の種類を判断しましたか？(もともと頼りにしたもの 1 つに 、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - 1 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「作業指示書(基板の写真)」に書かれた部品の名前」を対応させた
  - 2 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「モニタに表示された部品の名前」を対応させた
  - 3 「部品の形」と「モニタに表示された部品の写真」
  - 4 その他(記述してください)
- なぜこのような順番になりましたか？(自由記述)  
箱に入っていた部品の名前よりモニタの方が、どの部品も表示されてわかりやすかったから
- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3  4 5 6 7 (よくわかった)
- どのようにして部品を取り付ける位置を判断しましたか？(もともと頼りにしたもの 1 つに 、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - 1 作業指示書に書かれた部品の取り付け位置
  - 2 レーザ光による指示
  - 3 「基板のシルク印刷(白く印刷された文字)」と「モニタに表示された記号(R1,C1,FIN2 など)」を対応させた
  - 4 その他(記述してください)
- なぜこのような順番になりましたか？(自由記述)  
基板がわかりやすかった
- 部品には取り付けの方向が指定されている物がありました。部品の取り付けの方向はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4  5 6 7 (よくわかった)
- どのようにして部品の取り付けの方向を判断しましたか？(もともと頼りにしたもの 1 つに 、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - 1 モニタに表示された部品の写真
  - 2 基板のシルク印刷(白く印刷された文字と記号)
  - 3 その他(記述してください)
- なぜこのような順番になりましたか？(自由記述)  
基板が正しいと判断したから

- レーザ光は「部品を取り付ける位置」を示していました。このことはすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (よくわかった)
- テレビモニタは「取り付ける部品の種類」と「部品を取り付ける方向」を示していました。このことはすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 赤、黄色、緑色のボタンはそれぞれ作業やり直し、戻る、進むを意味していました。このことは解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (よくわかった)
- レーザ光による部品の場所の指示は正確だったと思いますか？  
(不正確だった) 1 2 ③ 4 5 6 7 (正確だった)
- レーザ光は見えやすかったですか？  
(見えにくかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (見やすかった)

2. 作業指示書だけで作業したとき

- どの部品を取り付けたら良いのかすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (よくわかった)

3. 以下の項目に関して、自由に記述してください

□ この作業に関して思ったこと

作業指示書「けのかが」2回目ではじめていたから、すばやくてしまった回数を書き換えることに、さあ間違がマいたかな?と思うことがありました。箱に入っていた部署名と作業指示書が違ってあてたが、作業指示書の方をたよって作業を行いました。

□ レーザ光による作業指示に関して、このようにした方がよい、ここがわかりにくい、等感じたこと

一歩ある瞬間が時々あて、少しとどろいた。どちらかというは、頼りにならないと思った。もっと正確な位置に指示するべきである。不正確な位置を指示するならば、ない方がよいと思った。

B

実験後アンケート b 氏名: [REDACTED]

お疲れさまでした。最後に、アンケートにご協力ください。実験では、最初に「作業指示書だけで作業」していただき、次に「レーザー光とモニタを有りにして作業」していただきました。それぞれの作業についてお答えください。

1. 作業指示書だけで作業したとき

- どの部品を取り付けたら良いのかすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) ① 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) ① 2 3 4 5 6 7 (よくわかった)
- 部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) ① 2 3 4 5 6 7 (よくわかった)

2. レーザ光とモニタを利用して作業した時

- 取り付ける部品の種類はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (よくわかった)
- どのようにして取り付ける部品の種類を判断しましたか？(もっとも頼りにしたもの 1 つに◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - 1 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「作業指示書(基板の写真)」に書かれた部品の名前を対応させた
  - ② 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「モニタに表示された部品の名前」を対応させた
  - ③ 「部品の形」と「モニタに表示された部品の写真」
  - 4 その他(記述してください)
- なぜこのような順番になりましたか？(自由記述)  
形を自分で見たものがわかりやすかったのと
- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- どのようにして部品を取り付ける位置を判断しましたか？(もっとも頼りにしたもの 1 つに◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - 1 作業指示書に書かれた部品の取り付け位置
  - ② レーザ光による指示
  - ③ 「基板のシルク印刷(白く印刷された文字)」と「モニタに表示された記号(R1,C1,FIN2 など)」を対応させた
  - 4 その他(記述してください)
- なぜこのような順番になりましたか？(自由記述)  
レーザー光は位置があまり正確でないのと
- 部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向は

ぐに解りましたか？

(よくわからなかった) ① 2 3 4 5 6 7 (よくわかった)

- どのようにして部品の取り付け方向を判断しましたか？(もっとも頼りにしたもの 1 つに ◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - 1 モニタに表示された部品の写真
  - 2 基板のシルク印刷(白く印刷された文字と記号)
  - 3 その他(記述してください: 下向き存在に気がつきませんでした。)
- なぜこのような順番になりましたか？(自由記述)

- レーザ光は「部品を取り付ける位置」を示していました。このことはすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (よくわかった)

- テレビモニタは「取り付ける部品の種類」と「部品を取り付ける方向」を示していました。このことはすぐに解りましたか？

(よくわからなかった) 1 2 3 ④ 5 6 7 (よくわかった)

- 赤、黄色、緑色のボタンはそれぞれ作業やり直し、戻る、進むを意味していました。このことは解りましたか？

(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (よくわかった)

- レーザ光による部品の場所の指示は正確だったと思いますか？

(不正確だった) 1 2 ③ 4 5 6 7 (正確だった)

- レーザ光は見えやすかったですか？

(見えにくかった) 1 2 3 4 5 6 ⑦ (見えやすかった)

3. 以下の項目に関して、自由に記述してください

- この作業に関して思ったこと

単純作業ですが取り回し向まどは頭が  
まわりませんでした。よくできそうです。

- レーザ光による作業指示に関して、このようにした方がよい、ここがわかりにくい、等感じ  
たこと

微妙に下げてるので、ちょっとわかりにくいと思えた。

実験後アンケート a 氏名: [REDACTED]

お疲れさまでした。最後に、アンケートにご協力ください。実験では、最初に「レーザー光とモニタを利用して作業」していただき、次に「作業指示書だけで作業」していただきました。それぞれの作業について、数字に○をつけて評価してください。

1. レーザ光とモニタを利用して作業した時

- 取り付ける部品の種類はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 ⑥ 7 (よくわかった)
- どのようにして取り付ける部品の種類を判断しましたか?(もともと頼りにしたもの 1 つに◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)  
① 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「作業指示書(基板の写真)に書かれた部品の名前」を対応させた  
2 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「モニタに表示された部品の名前」を対応させた  
3 「部品の形」と「モニタに表示された部品の写真」  
4 その他(記述してください: )
- なぜこのような順番になりましたか?(自由記述)  
セクタの見方がよくわからなかったから
- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- どのようにして部品を取り付ける位置を判断しましたか?(もともと頼りにしたもの 1 つに◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)  
① 作業指示書に書かれた部品の取り付け位置  
2 レーザ光による指示  
3 「基板のシルク印刷(白く印刷された文字)」と「モニタに表示された記号(R1,C1,FIN2 など)」を対応させた  
4 その他(記述してください: )
- なぜこのような順番になりましたか?(自由記述)  
レーザー光に全然気付かなかった
- 部品には取り付け方向が指定されている物がありました。部品の取り付け方向はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 ② 3 4 5 6 7 (よくわかった)
- どのようにして部品の取り付け方向を判断しましたか?(もともと頼りにしたもの 1 つに◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)  
① モニタに表示された部品の写真  
② 基板のシルク印刷(白く印刷された文字と記号)  
3 その他(記述してください: )
- なぜこのような順番になりましたか?(自由記述)  
あまりセクタを見なかった

- レーザ光は「部品を取り付ける位置」を示していました。このことはすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) ① 2 3 4 5 6 7 (よくわかった)
- テレビモニタは「取り付ける部品の種類」と「部品を取り付ける方向」を示していました。このことはすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 ③ 4 5 6 7 (よくわかった)
- 赤、黄色、緑色のボタンはそれぞれ作業やり直し、戻る、進むを意味していました。このことは解りましたか？  
(よくわからなかった) ① 2 3 4 5 6 7 (よくわかった)
- レーザ光による部品の場所の指示は正確だったと思いますか？  
(不正確だった) ① 2 3 4 5 6 7 (正確だった)
- レーザ光は見えやすかったですか？  
(見えにくかった) ① 2 3 4 5 6 7 (見えやすかった)

レーザー光に  
長びつかりました。

2. 作業指示書だけで作業したとき

- どの部品を取り付けたら良いのかすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 ④ 5 6 7 (よくわかった)

3. 以下の項目に関して、自由に記述してください

- この作業に関して思ったこと

単純だ、た  
目ばかりのり

- レーザ光による作業指示に関して、このようにした方がよい、ここがわかりにくい、等感じ  
たこと

というが、レーザー光の存在を全く感知できなかった

D

実験後アンケート b 氏名: [REDACTED]

お疲れさまでした。最後に、アンケートにご協力ください。実験では、最初に「作業指示書だけで作業」していただき、次に「レーザー光とモニタを有りにして作業」していただきました。それぞれの作業についてお答えください。

1. 作業指示書だけで作業したとき

- どの部品を取り付けたら良いのかすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)
- 部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 ③ 4 5 6 7 (よくわかった)

2. レーザ光とモニタを利用して作業した時

- 取り付ける部品の種類はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 3 ④ 5 6 7 (よくわかった)
- どのようにして取り付ける部品の種類を判断しましたか?(もっとも頼りにしたもの 1 つに◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - ① 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「作業指示書(基板の写真)」に書かれた部品の名前」を対応させた
  - 2 「部品の箱に入っていた部品の名前」と「モニタに表示された部品の名前」を対応させた
  - ③ 「部品の形」と「モニタに表示された部品の写真」
  - 4 その他(記述してください: )
- なぜこのような順番になりましたか?(自由記述)

モニタが次々にかわっていくから、かわらない指示書の方がわかりやすかったから

- 部品を取り付ける位置はすぐに解りましたか？  
(よくわからなかった) 1 2 ③ 4 5 6 7 (よくわかった)
- どのようにして部品を取り付ける位置を判断しましたか?(もっとも頼りにしたもの 1 つに◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - ① 作業指示書に書かれた部品の取り付け位置
  - ② レーザ光による指示
  - 3 「基板のシルク印刷(白く印刷された文字)」と「モニタに表示された記号(R1,C1,FIN2 など)」を対応させた
  - 4 その他(記述してください: )
- なぜこのような順番になりましたか?(自由記述)

レーザーが何となく分かるようになってきたから

- 部品には取り付ける方向が指定されている物がありました。部品の取り付ける方向はす

ぐに解りましたか？

(よくわからなかった) 1 2 ③ 4 5 6 7 (よくわかった)

- どのようにして部品の取り付け方向を判断しましたか？(もっとも頼りにしたもの 1 つに  
◎、それ以外に頼りにしたもの(複数可)に○をつけてください)
  - ① モニタに表示された部品の写真
  - 2 基板のシルク印刷(白く印刷された文字と記号)
  - 3 その他(記述してください)
- なぜこのような順番になりましたか？(自由記述)

- レーザ光は「部品を取り付ける位置」を示していました。このことはすぐに解りましたか？

(よくわからなかった) 1 2 3 4 5 ⑥ 7 (よくわかった)

- テレビモニタは「取り付ける部品の種類」と「部品を取り付ける方向」を示していました。このことはすぐに解りましたか？

(よくわからなかった) 1 2 3 ④ 5 6 7 (よくわかった)

- 赤、黄色、緑色のボタンはそれぞれ作業やり直し、戻る、進むを意味していました。このことは解りましたか？

(よくわからなかった) 1 2 3 4 ⑤ 6 7 (よくわかった)

- レーザ光による部品の場所の指示は正確だったと思いますか？

(不正確だった) 1 2 3 ④ 5 6 7 (正確だった)

- レーザ光は見えやすかったですか？

(見えにくかった) 1 2 ③ 4 5 6 7 (見えやすかった)

3. 以下の項目に関して、自由に記述してください

□ この作業に関して思ったこと

何回もするうちにだんだん慣れました。

□ レーザ光による作業指示に関して、このようにした方がよい、ここがわかりにくい、等感じたこと

レーザー光がちらちらしていて見にくかった。