

NAIST-IS-DT9661024

博士論文

強調現実感による工業作業支援システム

伴 好弘

1999年 03月 24日

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

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学)授与の要件として提出した博士論文である。

伴 好弘

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
佐藤 宏介 助教授

強調現実感による工業作業支援システム*

伴 好弘

内容梗概

工場などで日常的に行われる、装置の検査や生産工程においては多数の部材と様々な治具とを組み合わせなければならない。このような作業ではマニュアルの参照が必須のものである。しかし、マニュアルの可読性を上げるなどの工夫をしたとしても、作業対象とマニュアル間での視線の移動は頻繁に起こり、マニュアル中に指示された作業対象を見つけるまでに、不要な時間が経過してしまう問題がある。また、検査作業中に使用する治具についてマニュアル中の記述が熟練作業者を対象としていた場合、非熟練作業者には、治具の使用方法が理解できず、誤った操作をする可能性が生じる。

強調現実感 (Augmented Reality; AR) 技術は新しいマンマシンインタフェースの手法として注目されている。VR 技術が仮想世界像のみに着目しているのに対して、AR 技術とは、実世界を中心におき、生成された仮想世界像を実世界像上にスーパーインポーズすることによって、実世界像をオーグメントつまり「強調」しようとする試みである。実世界では不可視な情報を提示すれば、人間の視覚能力を越えることもできるであろう。

ここでもし上記のような作業に対して、AR 技術を利用すると、操作対象などの操作の方法を対象の上に重ねて文字情報のみならずグラフィカルな情報も作業者に提示することが可能になり、作業者は作業対象から視線を逸すことなく、的確な作業を進めることができる。また、非熟練作業者から熟練作業者まで、その熟練度に応じて適切な支援が行なわれることで、ヒューマンエラーの低減された確実な作業が実行できるものと考えられる。

*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 博士論文, NAIST-IS-DT9661024, 1999年03月24日.

本論文ではまず始めに、AR 技術を基にした作業支援について述べ、電子部品の検査システムについて著述する。続いて工業プラントを巡回しながら行われるフィールド作業への適用について論述する。

キーワード

強調現実感, ウェアラブルコンピュータ, 作業支援, 光学的透過, ビジュアルトラッキング

Industrial Work Assisting System Based on Augmented Reality*

Yoshihiro Ban

Abstract

Augmented reality (AR) has been received with much attention for a new interface between humans and computers. In this paper, two types of computer aided operation support system based on AR are proposed. One is a new supporting environment for inspection work of electronic parts by using AR technology. This system has an inspection management system with visual target tracking subsystem with two sided cameras. The other is a field operation supporting environment system which integrating a see-through head mounted display (HMD), an inertia navigation sensor, a PC with a 3D graphics engine and a battery onto a back-packing frame. This system, which is carried on a human operator's back, guides the operator by displaying a 3D view of a target part to be inspected and graphical information by superimposing on the operator's see-through real view. As it is a stand-alone system, the operator can use its online support anywhere in a large field plant. Simple tools attached on the target assist user's calibration between the operator's real view and the virtual view. A prototype system was applied to a field electric inspection task.

As AR aims to augment the real world, this paper treats a concrete inspection work with real industrial work by superimposing visual markers, visual commands and virtual instruments. Virtual manual and the virtual instruments can reduce

*Doctor's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT9661024, March 24, 1999.

work time and the number of mistakes. Results showed that ten or five subjects who used these environmental system did a typical inspection faster with less number of mistakes than other ten subjects who used a paper manual did.

Keywords:

augmented reality, wearable computer, work assist, visual tracking, optical see-through

目次

1. 序文	1
2. 総論	3
2.1 仮想現実感と強調現実感	3
2.2 ウェアラブルコンピュータ	7
2.3 AR 技術を用いた支援システム	11
2.4 AR 技術の適応可能な作業	16
2.5 作業工程管理とオンライン計測	16
2.6 バーチャルマニュアル	17
2.6.1 印刷マニュアルの問題点	17
2.6.2 AR 技術を用いた解決方法	18
2.7 バーチャル電子計測器	19
2.8 本研究の意義と論文の構成	20
3. 電子部品検査の支援 AR システム: Augmented Reality Inspection Environmental System;ARIES	21
3.1 AR 技術によって効率化が見込める作業	21
3.2 構成	22
3.3 処理フロー	24
3.4 カメラキャリブレーション	24
3.5 ディスプレイキャリブレーション	27
3.6 カメラによる作業対象のトラッキング	27
3.7 画像処理の手順	29
3.8 作業対象の指示	29
3.9 計測部位の指示と計測結果の表示	30
3.10 作業工程管理機能(バーチャルマニュアル)の実装	31
3.11 評価実験	33
3.11.1 実験装置	33

3.11.2 実験	33
3.12 実験結果と考察	36
4. 装着型フィールド作業支援システム:AR-Backpacker System	39
4.1 フィールド保守作業	39
4.2 フィールド作業に適合する AR システム	40
4.3 プロトタイプシステム	42
4.4 作業工程管理機能 (バーチャルマニュアル) の実装	43
4.5 オンライン計測機能 (バーチャル電子計測器) の実装	50
4.6 実環境・仮想環境間キャリブレーションと頭部姿勢補正	53
4.7 処理フロー	54
4.8 評価実験	56
4.8.1 実験条件	56
4.8.2 試行作業	57
4.9 実験結果と考察	59
5. 結論	63
謝辞	65
参考文献	67
付録	71
A. 研究発表業績	71

目次

1	頭部搭載型ディスプレイ	4
2	液晶シャッタ眼鏡	4
3	立体ディスプレイ	5
4	MRシステム研究所のMRリビングルーム(出典[6]より)	6
5	MITのウェアラブルコンピュータ(出典[8]より)	8
6	手を介しての情報交換装置(出典[10]より)	9
7	サイプナー社のモバイルアシスタントIV(出典[12]より)	10
8	日本IBMの携帯型コンピュータ(出典[13]より)	11
9	ソニーCSLのNaviCam(出典[14]より)	12
10	MRシステム研究所のAR ² ホッケー(出典[15]より)	12
11	コロンビア大学のキャンパス情報システム(出典[16]より)	13
12	コロンビア大学のKARMA(出典[22]より)	14
13	ボーイング社の作業支援ARシステム(出典[24]より)	15
14	電子部品検査支援ARシステムの構成図	23
15	電子部品検査支援ARシステムの概観	24
16	システム処理フロー	25
17	32ビット双方向DIOインタフェース	25
18	カメラキャリブレーション	26
19	基板の特徴点の追跡	28
20	バーチャル電子計測器	30
21	目標値相対表示	31
22	バーチャルマニュアルデータ構造	32
23	印刷マニュアル(一部を抜粋)	34
24	作業対象	35
25	AR技術を用いたフィールド作業支援	41
26	装着型AR装置(AR-Backpacker)	42
27	AR-Backpackerを装着した時の状態	44
28	AR-Backpacker構成図	45

29	AR-Backpacker の各モジュール	45
30	指示ポインタ	46
31	バーチャルマニュアル	46
32	バーチャルマニュアル記述例	49
33	デジタルマルチメータ	50
34	計測モード変更ガイド	51
35	バーチャル計測器	52
36	キャリブレーション用治具	53
37	システム処理フロー	55
38	ソフトウェア構成	55
39	実験対象	56
40	作業マニュアル (作業分岐部分)	58

表 目 次

1	バーチャルマニュアルのデータ構造	32
2	卓上作業支援環境の構築に使用した機材	33
3	本システムを用いた被験者の作業状況	37
4	印刷されたマニュアルを用いた被験者の作業状況	37
5	フィールド作業の分類	40
6	AR-Backpacker 仕様	43
7	バーチャルマニュアル記述のためのコマンドその1	47
8	バーチャルマニュアル記述のためのコマンドその2	48
9	作業内容	57
10	印刷マニュアルを用いた時の結果	59
11	AR-Backpacker を用いた時の結果	59

1. 序文

我々の身近なところには数えきれないほどの工業製品があり、生活に欠かすことができないものとなっている。従来、これらの工業製品は大量生産を行うことが前提である。近年新たな傾向として、少量多品種型の生産が行われるようになってきた。この背景には、大量生産された製品では利用者の要求を満たすことが不可能になってきたことがあげられる。いずれの生産方式でも、生産コストの削減と品質の均質化の面から、積極的な自動化が推し進められている。しかしながら、自動化ができない複雑な組み立て工程や、目視検査工程等の工程も多数存在している。また、工場やプラントの保守、点検は自動化が進められていない作業である。これらの作業を行う時、作業手順の書かれたマニュアルを参照しながら工程を進めていく。また、作業に必要な測定器具や工具は工程の内容によって適切なものを選択する必要がある。マニュアルの参照や計測器具の操作、工具の選択を行うとき、作業者は全工程中のどこなのかを記憶しておかなければならない。また計測器の操作では事前に計測器の操作に関する知識を要求されることにもなる。これら作業中に起きる動作の切り替えは、時としてマニュアルの参照箇所を間違えたり、計測器の操作を誤るなどのヒューマンエラーを誘発してしまう。そこで、本論文ではこのような人間の行う作業をコンピュータを用い、分かりやすくかつ的確に指示することで、ヒューマンエラーの削減や、作業者の負担の低減を可能にする支援システムの実現を目指して行った研究の成果をまとめたものである。

2. 総論

この章では、本研究の背景について述べ、本研究の意義と論文の構成を示す。

2.1 仮想現実感と強調現実感

近年、計算機の急速な性能向上によりコンピュータグラフィックス (Computer Graphics;CG) 技術は進歩している。これに伴い 3 次元画像生成が容易になってきた。CG 技術の進歩によって、仮想現実感 (Virtual Reality;VR) 技術が表現できる仮想環境は、ワイヤーフレームのみの仮想環境から、テクスチャマッピングを多用した仮想環境へと進歩をした。厳密な意味で CG 技術と VR 技術の相違点は、利用者の位置方向や操作をリアルタイムに CG 生成に反映させ、インタラクティブ性を持たせるか否かであると考えられる [1]。VR 技術を用いたシステムは仮想環境という人工的な環境を用いることで、人間の創造性、思考や訓練の支援環境として十分機能するに至っている。一般的に VR システムはそれ単体で利用される技術ではなく、シミュレーション装置などのサブシステムであることが多い。VR システムを大きく分類すると、フライトシミュレータを代表とするシミュレーション装置やゲームなどに用いられるタイプと、テレイグジスタンスタイプに分けることができる。前者は CG のみで構成された完全に人工的な仮想環境を利用者に提示する。後者は人間が進入不可能な環境などで作業ロボットの制御をする時に、操作をする人があたかもその場所で作業をしているような感覚を提示するため、ロボットに取り付けたカメラなどから得られる実環境映像を基に構築した仮想環境を提示することが多い。これらの VR システムは CG 映像であれ、実映像であれ、その場には存在しない環境を構築し、利用者がその環境に没入して利用することを目的に設計されている。高い没入感を得るために多くのシステムでは、利用者の視覚を仮想環境で満たすことで実現している。これを実現する最も容易な方法は、人間の視野を全て被い尽くすスクリーンに映像を投影することである。また、立体視が可能で人間の視野を仮想環境で満たすことのできる装置として、図 1 に示す頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display;HMD) がある。この HMD に利用者の位置や視線方向を検出するためのセンサを取り付け、

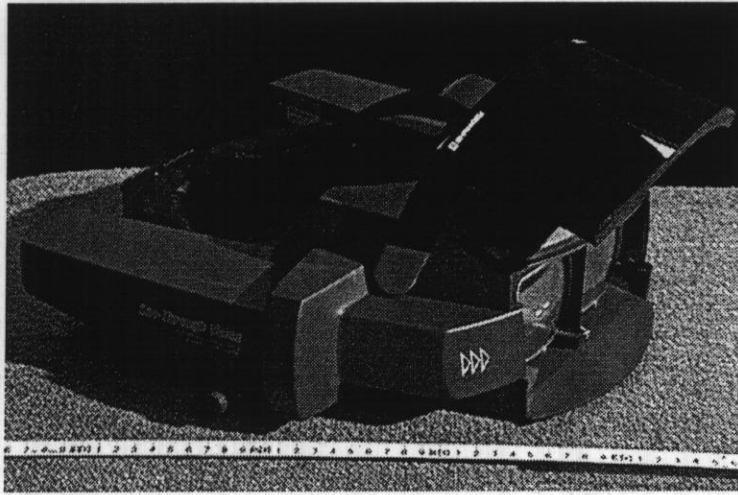


図 1 頭部搭載型ディスプレイ

利用者の位置や視線方向に対応する仮想環境映像を HMD に提示することにより、利用者は視覚について完全な没入感を得ることが可能になる。また仮想環境を立体提示する方法には、他に図 2 のような液晶シャッタ眼鏡を用い、右目左目に対応する映像が時分割表示されるディスプレイを見ることによって立体視を行う方法や、レンチキュラーレンズとスリットにより、両眼に対応する映像を指向性を持たせて表示可能にする機構を搭載した図 3 のような立体ディスプレイを用いる方法もある [2]。

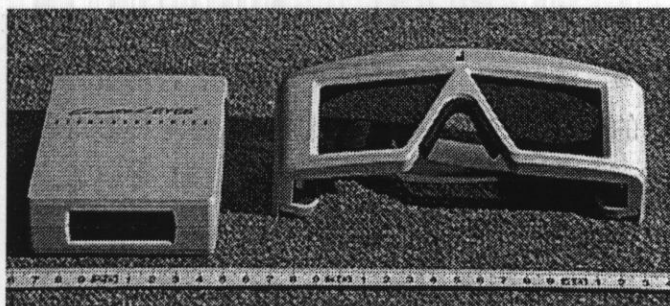


図 2 液晶シャッタ眼鏡



図 3 立体ディスプレイ

AR 技術は、VR 技術により合成された CG による仮想環境を実環境に融合させることで、実環境だけでは得ることのできない情報を仮想環境を介してユーザーに獲得させることを可能にする [3][4][5]。VR 技術が仮想世界像のみに着目しているのに対して、AR 技術とは、実世界を中心におき、生成された仮想世界像を実世界像上にスーパーインポーズすることによって、実世界像をオーグメントつまり「強調」しようとする技術である。ここで、生成すべき仮想世界像は任意であるが、実世界では不可視な情報を提示すれば、人間の視覚能力を越えることも可能であり、VR 技術ではなし得なかったまったく新しいアプローチが可能になると考えられる。身近な例をあげると、図 4 に示す、部屋の中の家具の配置を決めるときにどのような家具をどこに置くのかという検討を仮想環境を介して実現することが可能になる [6]。他の面から比較すると、VR 技術では仮想環境を中心としたため実現が非常に困難な利用形態、例えばビル建築や大型機械の製造における工程管理や計測などの作業の支援、工場やプラントで行われる保守作業、手術等の医療的処置を行う時の診断や判断の支援等に応用することが可能になる。今後ますます複雑化してくるこれらの業務では、莫大な費用や、非常に困難かつ複

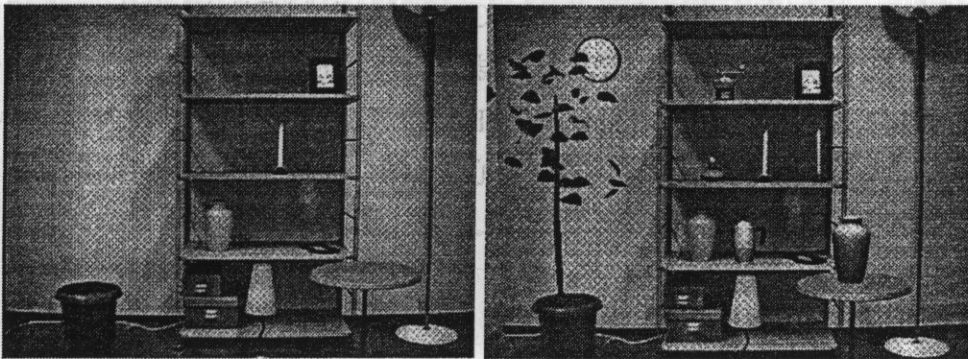
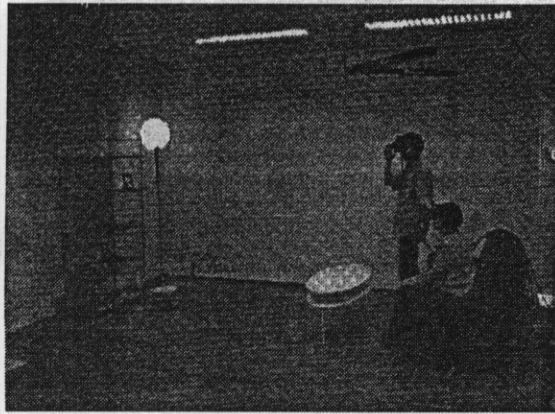


図 4 MR システム研究所の MR リビングルーム (出典 [6] より)

雑であったり、迅速な判断が求められることは容易に想像できる。また巨大システムの運用や保守、医療現場での作業は一般的に複雑かつ自動化が困難なものである。そのため人手に頼らざるを得ない。これらに AR 技術を用いることで、開発支援環境や作業支援環境としての利用が可能である。

2.2 ウェアラブルコンピュータ

AR 技術に関連する新たなトピックとして、ウェアラブルコンピュータがあげられる。従来、コンピュータの使用形態は装置自体の大きさ、重量、消費電力が大きいため、専ら机の上または専用の部屋の中に設置して用いられてきた。近年の急速な半導体集積技術、それと連動して発展してきている部品実装技術が、コンピュータの大きさ的、重量的、電力的な問題を解決し、運用中であっても自由に持ち運びができるような形態を実現した。この過程をさらに発展させ、体に常に装着または携帯できるような大きさまで小型化したコンピュータをウェアラブルコンピュータという。ウェアラブルコンピュータはマサチューセッツ工科大学 (MIT) のメディアラボが先進的な研究を行ってきている。当初、研究の動機は、どこにいても Emacs を用いたプログラミングや、メールの確認ができる装置の研究を主眼としていたのだが、AR 技術を導入し図 5 のような外部環境から得られる情報を元に環境中にない情報を付加することが可能なコミュニケーションツールとして発展してきている [7]。ウェアラブルコンピュータは以下に示すような特徴をもつ。

- 外部との通信機能を有している

コミュニケーションツールとしての側面を持つことから、通信機能は非常に重要な機能である。コンピュータ同士の通信はもとより、従来では考えられなかった、図 6 のような人間を介しての情報交換 [9][10] も考案されている。

- 超小型のディスプレイデバイスを有している

ウェアラブルコンピュータからの情報は、多くの場合視覚情報として利用者に提供される。ディスプレイデバイスに小型 HMD 等を用いるため、VR

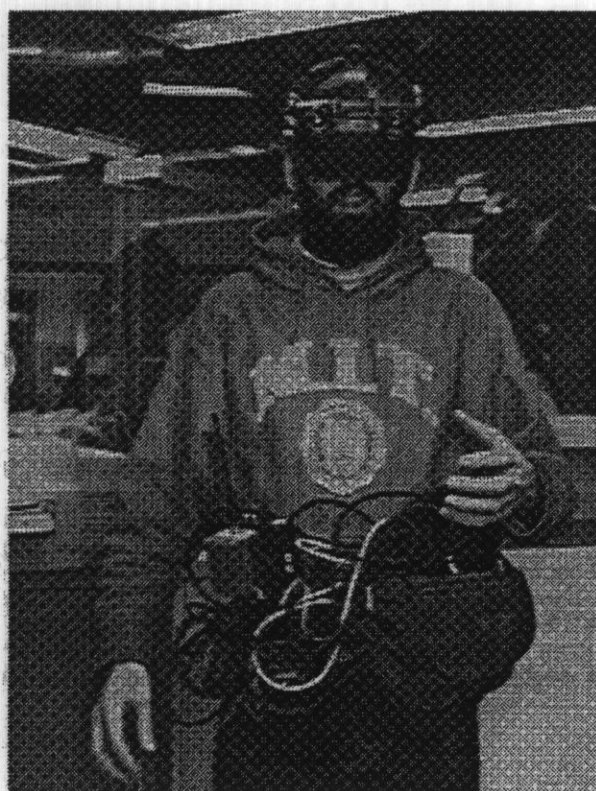


図5 MITのウェアラブルコンピュータ (出典 [8] より)

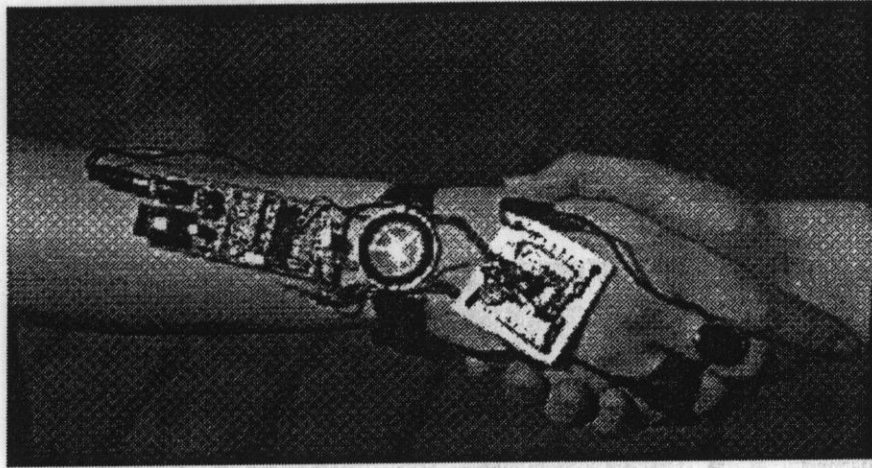


図 6 手を介しての情報交換装置 (出典 [10] より)

システムと良く似ているが、利用者の視野から外界が見える状態で提供する点が異なる。

- 利用者周辺の環境情報を取得できる
カメラや、視覚、音声、接触等のセンサを用いて積極的に利用者周辺の環境情報を取得できるようになっている。この機能は AR 技術と密接に関係し、利用者へ有用な情報を提供するためのトリガとして、また情報を付加する対象を認識するために利用される。
- 利用者により有用な情報を選択する機能を持つ
利用者への情報提供は、環境情報からのトリガや利用者からの要求に応じて行われる。この時、単に関連する情報を提供するのではなく、適切なタイミングや場所に必要最小限で行われる必要がある。これは、ウェアラブルコンピュータを利用することで、従来以上に情報を獲得することが可能になった利用者を、情報の洪水から解放するため必要な機能である。
- 利用者の行動を阻害しない
日常的な利用も想定されているため、ウェアラブルコンピュータを利用す

ることで、利用者の視覚や聴覚が阻害されないようにする必要がある。

現在市販されている数少ない携帯型コンピュータの中で、代表的なものは図7に示すサイブナー社 [11] のモバイルアシスタント IV である。また日本 IBM が



図7 サイブナー社のモバイルアシスタント IV(出典 [12] より)

試作モデルとして図8に示す装着型コンピュータを発表している。これらは通信機能を有していないため、厳密的にはウェアラブルコンピュータとは言えないものの、通信機能を装備すればすぐにでもウェアラブルコンピュータとしての利用は可能である。

これら装着型コンピュータと研究室レベルの装置を含め、現在ウェアラブルコンピュータに用いられている、小型軽量なコンピュータの処理能力はノートブック型コンピュータの性能とほぼ同じであるが、VRシステムやARシステムで用いられている高性能ワークステーションの処理能力には及ばない。しかし、将来的には十分に解決可能である。一方ソフトウェア面での研究は始められたばかりであるため、まだ実用的に利用可能なレベルには到達していない。しかし従来、

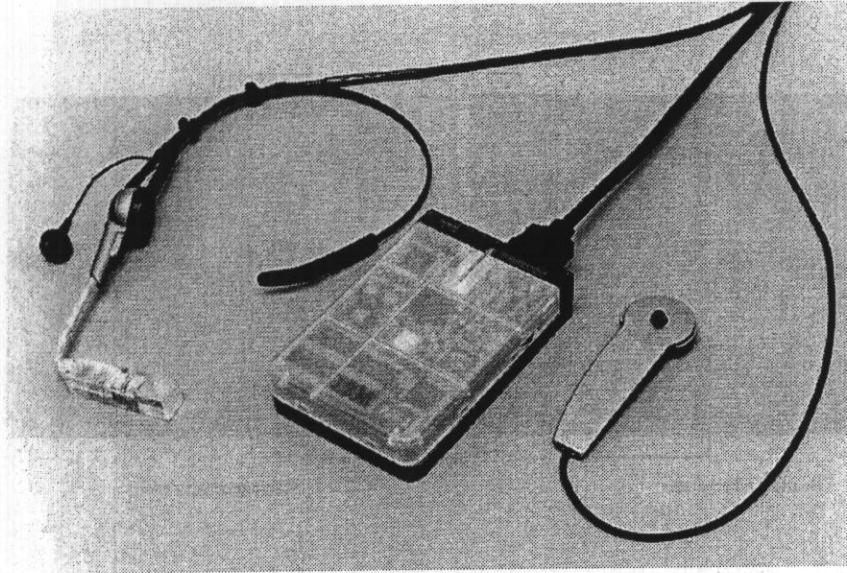


図 8 日本 IBM の携帯型コンピュータ (出典 [13] より)

携帯電話と携帯情報端末 (PDA) といったようにそれぞれが独立している情報端末を統合し、AR 技術を用いることで、従来の端末では不可能だった実世界の情報と、電子化された情報とをシームレスに融合した形で利用者に提供できることから、工業分野、医療分野等多くの分野での応用が期待されている。

2.3 AR 技術を用いた支援システム

AR 技術はこれまで、図 9 に示すソニー CSL の NaviCam[14] や図 10 の MR システム研究所 AR²ホッケー [15]、図 11 に示すコロンビア大学のキャンパス情報システム [16] といった新しいメディア環境を構築するという立場から研究されることが多かった。最近では手術支援 [17] や診断支援 [18][19][20] といった医療への応用が実用化を目指して研究が行われている。しかしながら、工業作業を支援するシステムととらえた研究は少なく。その数少ない例として、オフィス機器のメンテナンスを支援するための先駆的な AR システムとして図 12 に示すコロンビア大学の KARMA[21] がある。また産業界ではボーイング社が図 13 に示すワイ

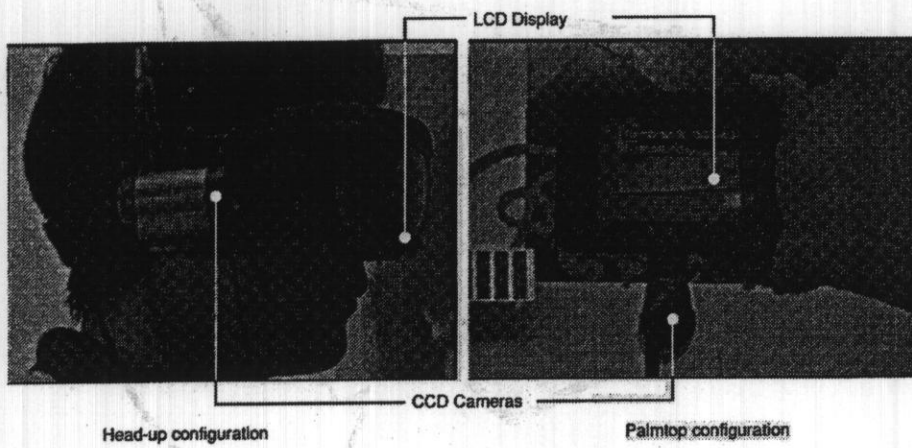


図 9 ソニー CSL の NaviCam(出典 [14] より)



図 10 MR システム研究所の AR²ホッケー(出典 [15] より)

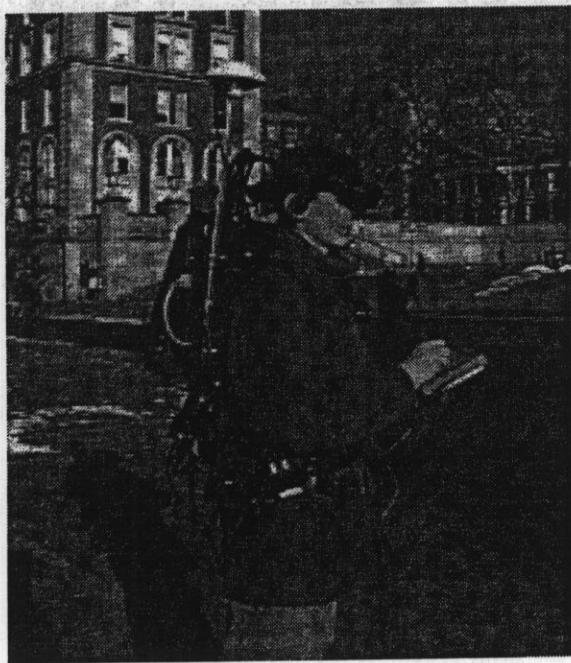


図 11 コロンビア大学のキャンパス情報システム (出典 [16] より)

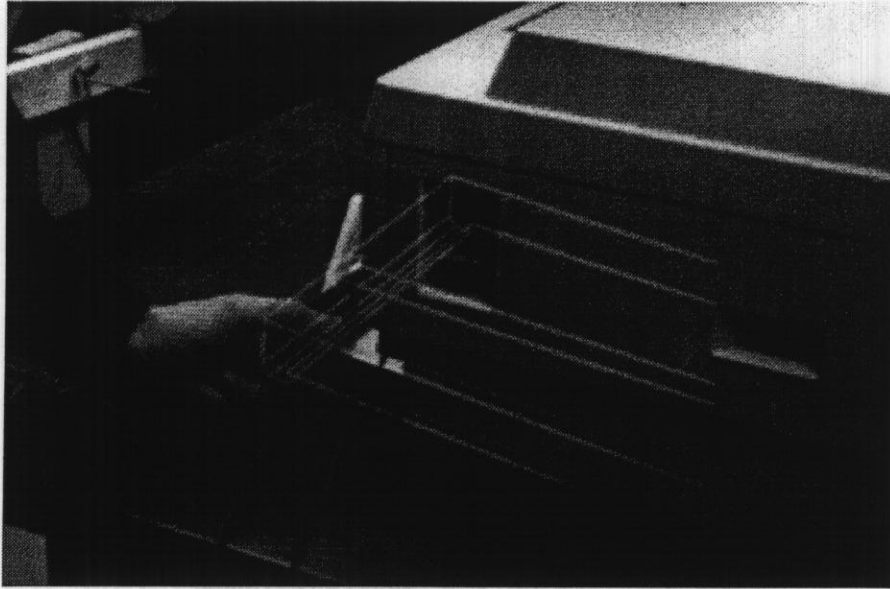


図 12 コロンビア大学の KARMA(出典 [22] より)

ヤハーネス製造のための AR システム [23] を構築している例が挙げられる。これらのシステムでは、HMD を装着した作業者にどこをどのように作業するかの手順を実対象上にスーパーインポーズすることによって、作業の複雑さを取り除くことに成功し、新しい作業スタイルを生み出した。しかしながら、これらの作業支援システムは作業情報を提示することが中心であり、作業そのものの管理の自動化まで含めたものではなかった。

製造作業や、装置の検査などの保守作業において作業手順を示したマニュアルと、調整や不具合発見のための計測装置は不可欠なものである。これらの作業においては、マニュアルの参照や計測装置のモード変更、計測値読み取り等によって、必ず作業対象から視線を逸す動作が起きる。また、今行っている作業とは直接関係しない情報もマニュアルに記載されているため、必要とする情報を選別しつつ作業を行う必要がある。これらが原因となり、再び作業対象に視線を戻したとき本来の対象と異なった箇所を操作したり、マニュアルの参照項目を読み飛ばすといった人為的な誤りを犯す原因となる可能性がある。そこで、新たな機能

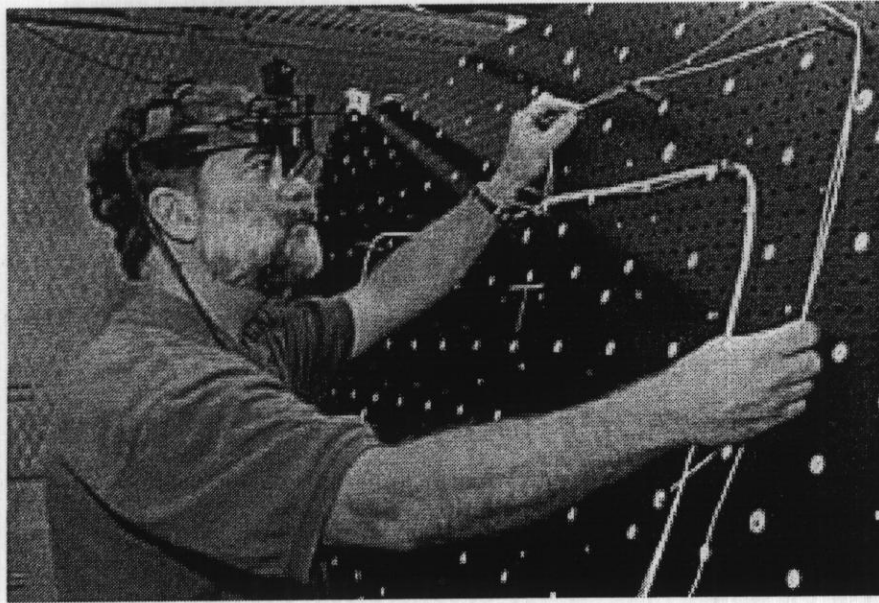


図 13 ボーイング社の作業支援 AR システム (出典 [24] より)

としてバーチャルマニュアルと呼ぶ作業工程管理システムが、作業対象の場所とその作業内容、および必要な治具を AR 技術によりオペレータに指示する。作業が計測の場合、バーチャル計測器と呼ぶ、その作業で必要とする計測機能に特化したオンライン計測器のグラフィカルユーザインタフェース (Graphical User Interface; GUI) が現れる。バーチャル計測器による計測値が設定範囲内の場合にのみ、バーチャルマニュアルは次の作業工程に移る。

このような作業支援システム下では、ユーザは作業対象から大きく視線を動かすことなく作業を続けることが可能となり、現在の作業項目に必要な情報の選別を気にする必要性から解放され、また作業項目を正しく完了しない限り次の項目へは移行しないロック機能により、疲労および人為的ミスの削減が可能となる。また、工場の国際分業において、電子化されたマニュアルはローカライズが容易なことも利点として考えられる。

2.4 AR 技術の適応可能な作業

自動化が困難な製造作業や検査作業の場合、反復的で単調な作業から項目数が非常に多くかつ複雑な作業まで、多岐にわたって存在する。このような作業の質的な観点から AR 技術を用いた作業支援システムの適応を考えたとき、支援システムが有効かつ効果的に機能する作業と、適応しても顕著な効果の得られない作業が存在することが考えられる。つまり、作業項目が少なく同じ作業を繰り返すような単調な作業の場合、作業者は比較的短時間で作業に熟れることが予想できる。このような作業では作業支援システムを導入することによって、逆に作業効率が落ちると予想できる。一方、作業項目が多くその内容が複雑な場合、作業者が全ての作業手順を正確に覚えることは一般的に困難である。このような場面では手順の参照や作業対象の操作などが同時に数多く発生するため、作業者にかかる負担が非常に大きなものとなる。AR 技術を用いた作業支援システムをこれらの複雑な作業に適応すると、支援システムが適切な指示を出したり作業の手順を管理することによって、作業者の負担を軽減し作業効率や、作業品質が向上するものと考えられる。これはウェアラブルコンピュータという観点から考えると、作業者の見掛け上の作業能力が向上したと等価になっていると考えることができる。このように人間の能力を拡張させる道具としての考え方は、ウェアラブルコンピュータの基本的な概念でもある。

2.5 作業工程管理とオンライン計測

作業手順が印刷された作業マニュアルでは、作業者自身が工程を管理する必要がある。そのため手順を間違えてしまったり項目を飛ばしてしまうことが起きても、即座に誤りを見つけ出すことが非常に困難である。そこで、手順を作業者に代わってコンピュータが管理することで、作業者が作業と平行して行っていた工程管理をコンピュータに代行させることが可能になる。これにより、作業者は必要とする作業のみに集中することができ、マニュアルの参照や工程の確認から生じていた作業手順の読み違いや、読みとばし等の人為的な誤りを削減することが可能となる。

生産や、検査などの作業を行なう上で、テスター、シンクロスコープ、ロジッ

クアナライザ等計測装置を用いることは少なくない。これらの機器は歴史的な関係で特有なユーザインタフェースを有している。そのため、常時使用していなければ、扱いにくいものである。そこで、必要となる計測機器からのオンライン計測による結果をCGで計測対象上にビジュアルに表示すれば、視線を外すことなく計測値の確認ができ、直感的で扱いやすい計測機器を構成できる。また、計測機器と作業指示とが連係動作することが可能になるため、計測結果に応じた作業内容の変更や、計測機器のモード設定を作業の進行状況に応じて自動変更することが可能になる。

2.6 バーチャルマニュアル

ここでは、新たに提案するバーチャルマニュアルというAR技術とコンピュータによる作業工程管理システムについて、提案するに至った動機と、基本的な概念について述べる。

2.6.1 印刷マニュアルの問題点

まず、どのような作業を行う上でも必要となるマニュアル、特に従来から用いられている印刷マニュアルを用いることによって生じる問題点を考察する。

(1) マニュアルと対象との頻繁な視点変更が必要

マニュアルの内容をすべて記憶することは困難であるため作業者はマニュアルと対象との間で視線を交互に移しながら作業を行わなければならない。しかし、マニュアルと対象物体の両方に神経を使わねばならず、作業工程の進行に関して以下の問題が存在する。

(a) 作業行程の重複・省略等の誤認

マニュアルと対象物体との頻繁な視点変更によって、現在マニュアルのどの工程まで作業が進んでいるのか分からなくなり、一部の作業行程を重複又は省略してしまう恐れがある。

(b) 検査結果による作業行程の分岐が複雑

電圧や、気体、液体の流量調節といった各種の調整作業においては、

計測結果によって一部の作業工程を省略したり、追加することがしばしば存在する。このようなとき、作業者はマニュアルのページを読みとばしたり戻ったりする必要がある。この作業工程の条件分岐は作業者のヒューマンエラーを誘発しやすい。

(2) 対象個所の把握が困難

通常、印刷マニュアルは文章による説明のため、作業個所等の指示も文章で行なわれることが多い。仮にマニュアル内に写真やイラストを掲載したとしても実際の対象物体と見比べる必要があり、対象個所の把握は容易でない。

2.6.2 AR 技術を用いた解決方法

上記の問題点は、AR 技術を用いることにより、解決可能となる。(1) にあげた問題点は、作業者の頻繁な視線変更であった。この原因は、マニュアルと作業対象、および計測機器の表示部分が離れたところに存在する点にある。したがって、実世界像と仮想世界像の融合を可能にする AR 技術を用いることによって、実世界像としての作業対象と、仮想世界像としてのマニュアルの情報や計測機器の出力結果も仮想世界像内に表示することで、作業者の視線変更を減少させることが可能となる。作業行程の把握については、コンピュータに作業行程を管理させることによって可能となる。加えて、コンピュータが作業工程を把握していることから、現在の作業に必要とされる最小限の情報のみを作業者に提示することができ、作業者を情報の洪水から解放することもできる。これにより、作業者はコンピュータに指示された作業行程にのみ意識を集中することが可能となり、作業行程の条件分岐によってマニュアル内の項目を探し出す必要もなくなる [25]。また、(2) であげた作業個所の把握についても同様であり、指示マーカを仮想世界像内に表示することにより、作業個所を作業対象上に直接提示することが可能となり、作業箇所の把握は容易になる。

これらを電気機器の調整作業で例えると、ある個所の電圧が指示値より低い場合のみスイッチを切り替えるという作業のように、計測結果によって作業の分岐が必要な工程がある。そこで、バーチャルマニュアルが計測器からの出力を解析

することにより、次に行なうべき行程を自動的に検索し、その結果作業者に対して操作を必要とするスイッチの上にマーカを表示し、操作を行うべき対象であることを指示する。したがって、作業者は作業分岐を意識することなく、指示された行程にのみ集中することが可能となる。また、バーチャルマニュアルが全工程を管理していることから行程の一時保存が可能である。ある対象を作業中であっても、随時別の対象へ切り替えて扱うことも可能であり、通信機能を用いて他の作業者と作業状況を共有する場合にも有効である。

2.7 バーチャル電子計測器

2.5でも述べたように、電子部品の調整、検査などの作業では、テスター、シンクロスコープ、ロジックアナライザ等、通常幾種もの電子計測機器を必要とする。これらの機器は歴史的な関係で特有なユーザインタフェースを有しているため、常時使用していなければ、扱いにくいものである。そこで、コンピュータにアナログ入力インタフェースを付加し、オンライン計測による結果をCGでビジュアルに表示すれば、直感的で扱いやすい計測機器を構成できる。ここでは、計測結果を仮想世界像に表示するバーチャル電子計測器を提案する。

バーチャル電子計測器とは、画像処理とAR技術を用いる本論文で提案する新たな電子計測器である。通常の電子計測器に比べ様々な特徴を有する。

- 出力結果の表示部を自由設計可能
通常の電子計測器と異なり、出力結果の表示部をCGによって自由に設定できる。
- 計測部位を視覚的に指示することが可能
印刷されたマニュアルでは計測箇所の指示が難しく、作業者は計測対象とマニュアルとを見比べながら慎重に作業箇所を探し出す。この作業は、作業者にマニュアルと計測対象間での頻繁な視点変更を強要し、作業効率を低下させる原因と考えられる。
- 計測結果による作業分岐の隠蔽
例えば、ある個所の電圧が指示値より低い場合のみスイッチを切り替える

という作業のように、計測結果によって作業の分岐が必要な工程もある。そこで、先に述べた工程管理システムが計測器からの出力を解析することにより次に行なうべき作業行程を検索することが可能となる。したがって、作業者は作業分岐を意識することなく、コンピュータに指示された作業行程にのみ集中することが可能になる。

- 複数の対象を同時に処理可能

コンピュータで作業行程の管理を行っているため、作業行程の一時保存が可能である。したがって、ある対象で計測作業中であっても、随時、別の対象を扱うことも可能となる。このことは、複数の作業者により計測作業を共有する場合にも有効であると考えられる。

このように、バーチャル電子計測器を用いることによって通常の作業で考えられる様々な問題点を克服することが可能となる。

2.8 本研究の意義と論文の構成

本研究は、AR技術による視覚的な作業指示により、工業作業における作業マニュアルの参照や計測装置の操作に伴うヒューマンエラーの削減とコンピュータを用いた作業工程管理と、計測装置の統合による計測器の状態設定と計測結果の自動取得によって動的な作業進行を実現することを目的とする。

本論文は5章からなる。

第3章では、卓上での電子回路の検査を想定したシステムの実現に関して、その構成と、特徴を述べ、評価実験を行い、検証した結果を考察する。

第4章では、工場やプラントでの多数点在する地点での検査を想定したフィールド作業支援システムに関して、プロトタイプシステムの構成について述べ、評価実験を通して得られた結果について考察する。

第5章では、上記二つのシステムに関して結論を述べ、強調現実感による工業作業支援システムに関する本研究の成果を総括する。

3. 電子部品検査の支援 AR システム: Augmented Reality Inspection Environmental System;ARIES

この章では、前章で述べた、AR 技術を用いた工業作業支援環境について、実装面での考察をしていく。一言に工業的作業と言っても多種多様な作業が存在する。本章では実世界上での作業を電子基板の調整、検査に限定することにより、実用的な作業支援環境を実現する。以下に目的と構成について説明を行う。

3.1 AR 技術によって効率化が見込める作業

数多くある作業工程で、その作業場所を卓上に限定しても数多くの作業が存在する。これら卓上作業の中で、特に調整、検査工程は一つの工程中に数多くの項目があり、作業内容が複雑である。また組み立て工程とは異なり、作業中に計測器を使用することから、作業者はその計測器の操作方法を熟知している必要がある。このように調整、検査工程は他の工程と違い、作業項目の多さや複雑さ、そこから生じる作業順序の維持、工程中に扱う機材の多様性により、作業者にかかる負担が大きい。そして生産現場に限らず、修理や保守の際にも、調整、検査を行うことはごく普通のことである。このような調整、検査工程に対して AR 技術を用いることで、作業時の工程の管理や計測器などの機材の自動操作、多様な作業対象に対応できるなどの点で、作業者にかかる負担の低減と効率化が計れると考えられる。逆に他の組み立て工程に対して AR 技術を用いる場合、その工程が単純であるほど従来手法との差は見られなくなる。

調整、検査工程の支援環境の実証モデルを構築する際に、扱う対象を電子基板とした。この理由は、電子基板には幾つかのスイッチやトリマ、計測時に使用するテストピン等が点在し、基板だけを眺めただけではどれが目的の対象かを判別することが難しいからである。また、電子基板の多くは基板の上に 2 次元的に部品が配置されているため、作業者に対して作業支援を行う場所が特定でき、現実的な作業を想定できるからである。

3.2 構成

システムを構成するにあたり、次に示すような条件を考慮した。

- ディスプレイデバイスの構成

AR 技術により情報を付加しようとした場合、HMD を用いる事も考えられるが、情報を付加する対象が卓上にあることと、卓上作業時の HMD 装着により起こるケーブルの取り回しなどの煩雑さを低減するために、CRT ディスプレイとーフミラーによる透過型ディスプレイを用いる。

- 作業対象である電子基板の位置や向きのトラッキングをどうするのか

卓上作業は作業者の手が届く範囲で行うため、作業対象のトラッキングに磁気式位置センサを用いることが考えられる。しかし、センサにコントローラに繋がるケーブルが付いていることに起因する基板のハンドリングの問題や、作業対象の構成材料に磁性を帯びるものが多いため計測精度に影響してしまう。そこで、作業対象に対して最小限の加工で取り付けが可能な大きさで、基板の構成材料に影響されないトラッキングが可能な、赤外線マーカを用いたビデオトラッキング機能を実現する。

図 14 は本システムの構成、図 15 は本システムの外観を示したものである。本システムは、以下に示すもので構成される。

- カメラ

(図 15 中 左右)

作業領域の左右に配置された 2 台のカメラより、対象物体を撮影する。作業中の手指によって対象が隠蔽されることをカメラを複数用いることにより減少させる。

- PC

(図 15 中 右下)

バーチャルマニュアル (2.6 章) を格納したり、ビデオカメラから入力される映像を、リアルタイム画像処理を行い、さらに仮想世界像を生成する部分である。

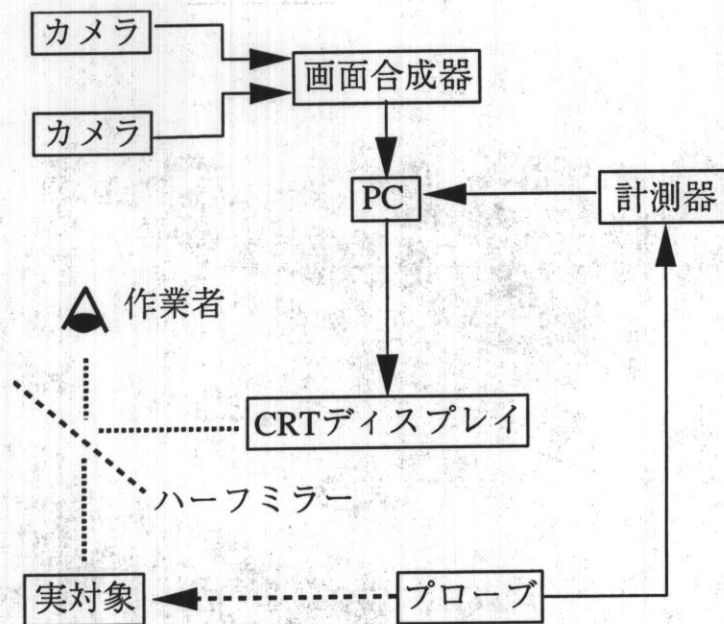


図 14 電子部品検査支援 AR システムの構成図

- **CRT ディスプレイ**

(図 15中 左奥)

仮想世界像を表示する。ここには作業を行うべき対象を示すマーカや、バーチャル電子計測器の表示が行われる。

- **ハーフミラー**

(図 15中 真中)

CRT ディスプレイに写し出された仮想世界像と実世界の対象物体は、このハーフミラー上で融合される。

対象とする電子部品は、プリント基板であり、ほぼ平面とみなすことができる。そのため、実対象への光路長と CRT ディスプレイへの光路長を一致させれば奥行きにずれがない状態で目視できる。

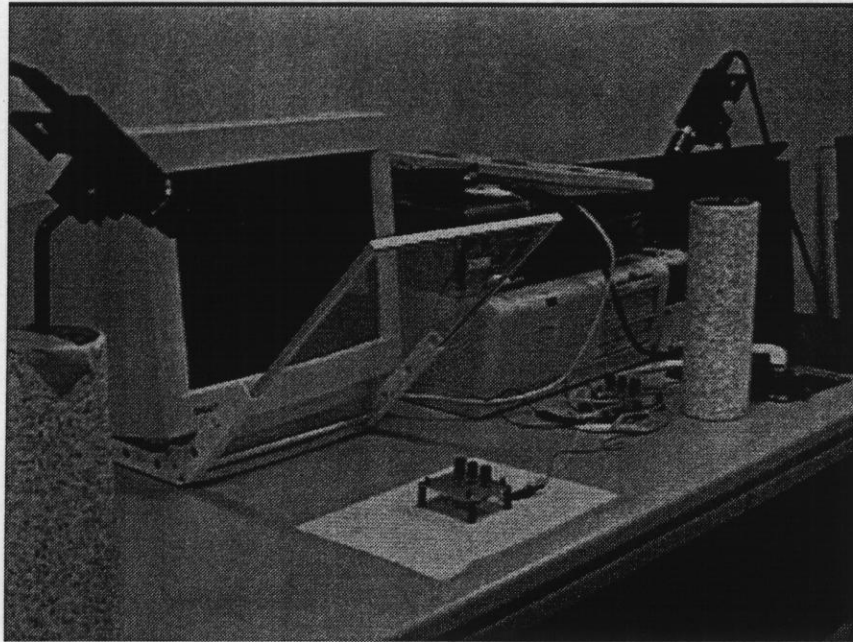


図 15 電子部品検査支援 AR システムの概観

3.3 処理フロー

本システムの処理の流れを図 16 に示す。この図のように、作業手順は PC 内のデータベースに蓄積されている。カメラから取得された作業対象の特徴点配置に基づき対象の種別が同定され、種別毎の作業項目と作業箇所情報がデータベースより動的に引き出される。特徴点のトラッキング情報に従い、対象上の作業箇所上に強調マーカがスーパーインポーズされるとともに、グラフィカルな作業指示が作業者に与えられる。この時、計測器からのデータは作業項目の目標値と比較され、条件が満たされれば次の作業項目に自動的に移る。

3.4 カメラキャリブレーション

図 15 のように、カメラは左右上方から俯瞰しているため実世界の座標は歪んで撮影される。そこで、カメラキャリブレーションを行い、実世界座標とカメラ画

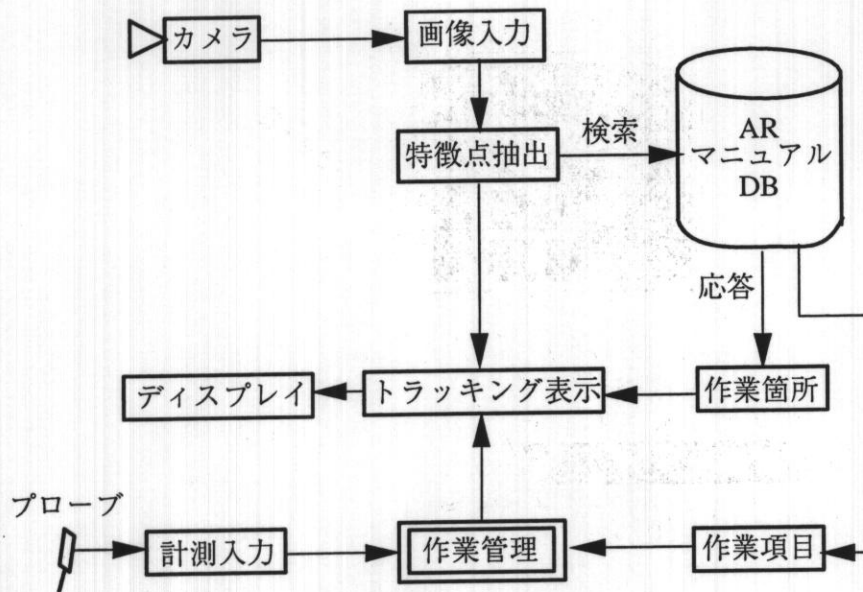


図 16 システム処理フロー

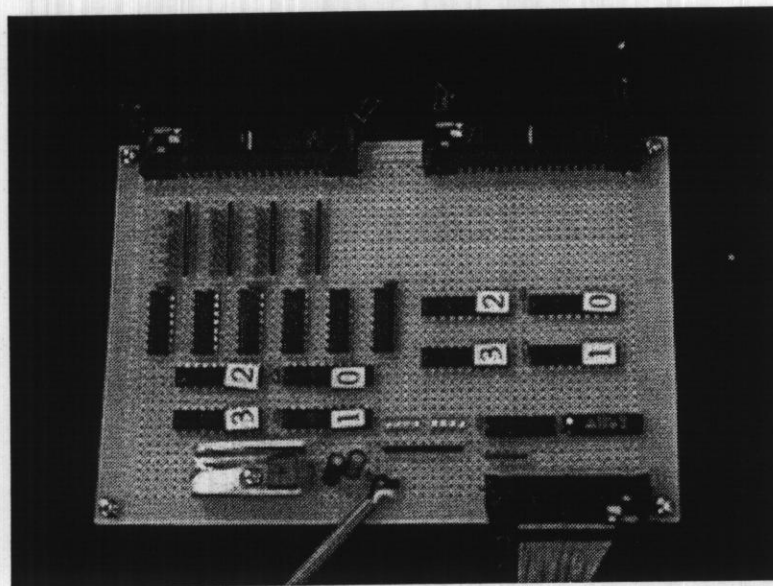


図 17 32ビット双方向DIO インタフェース

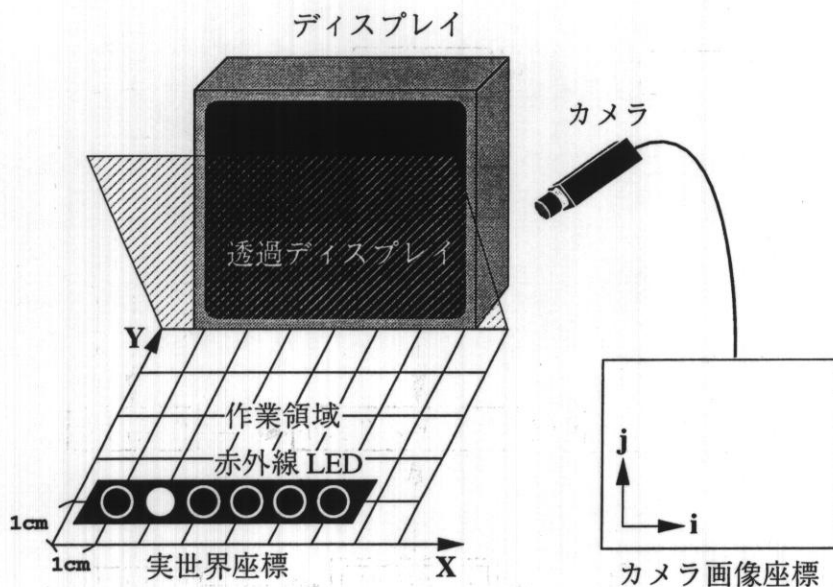


図 18 カメラキャリブレーション

像座標とを関係付ける [26]。提案するシステムでは撮影する範囲が狭く対象とカメラまでの距離も短いため、後述のカメラの場合レンズの幾何学的歪みを無視できることが分かった。そこでレンズの歪みの補正を行わず、実世界座標との関係付けをするためにルックアップテーブルを構成した。ルックアップテーブル内の点を線形補間することで、対応する実世界座標の位置が決定される。本システムの場合、作業平面内を約 2mm 以下の精度でキャリブレーションが行えた。

キャリブレーションを行なうため、PC のパラレルポートに接続された図 17 に示すデジタル I/O を用いて既知の座標に設置された赤外線 LED を点滅させる。赤外線 LED は、薄い棒状の治具の上に 1cm 間隔で 1 列に配置し、図 18 に示すように作業領域内に設置する。赤外線 LED を順々に発光させつつ、本治具を 1cm 間隔で移動させ、作業領域内すべての格子点の撮影を行う。

1. 計測

実世界の既知の座標上の点を撮影することにより、カメラ座標系での座標との対応を図る。しかし、図 18 のように離散的な座標しか観測できない。

このため、ルックアップテーブルは粗な状態である。

2. 補間

空白となっているルックアップテーブルの欄を埋めるため、空白部の値を内挿計算によって求める。内挿計算は、カメラ座標系の Y 軸が同じ値を持つ実世界上の格子点郡を複数選び出し、それぞれの格子点郡を最小二乗法による線形近似を行う。これにより単純に近傍の格子点間で線形近似していた時よりも補間精度の向上が図れた。

3.5 ディスプレイキャリブレーション

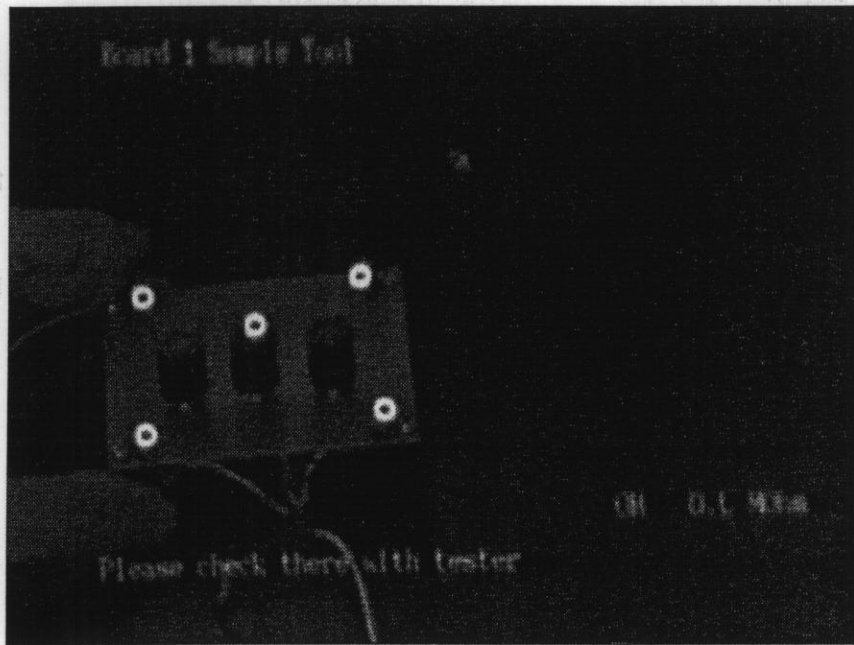
実世界座標とディスプレイ座標の軸方向を一致させるようにディスプレイを設置しているため、両座標間は平行移動とスケール変換で関係付けることができる。ここでは、ハーフミラーを通した目視により、マニュアルでキャリブレーションを行なう。

3.6 カメラによる作業対象のトラッキング

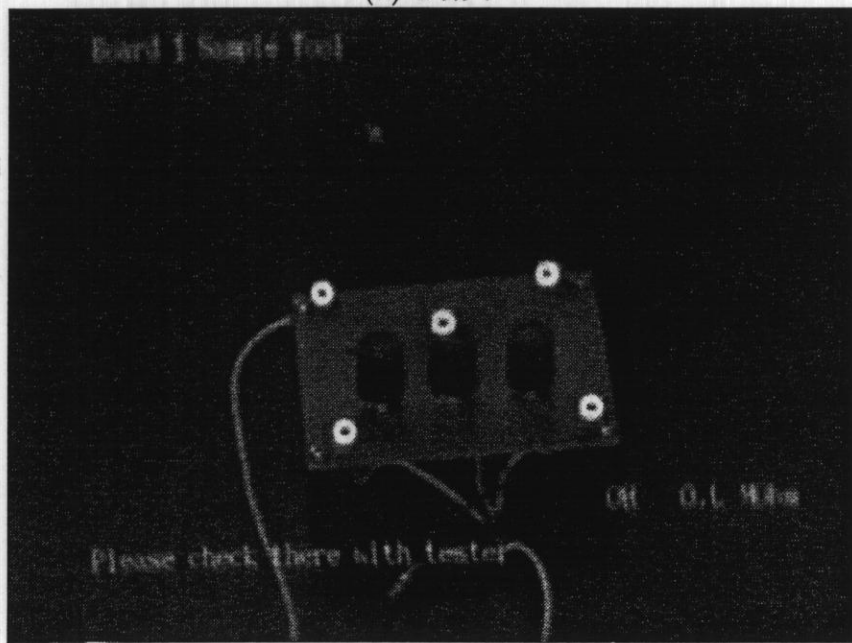
本章では、2.6章で述べた AR 技術による作業個所の指示を行なうため、画像処理による対象位置のトラッキングについて述べる。

本システムでは、二つのカメラを用いて作業対象を撮影し、画像処理を施すことで作業対象の種別とその位置および姿勢を検出する。そこで位置および種別の認識を容易にするため、対象上に赤外線 LED による特徴点を配置する。図 19(a)、(b) は、対象プリント基板を移動させている図である。図中の白い五つの点は、対象プリント基板に配置された赤外線 LED に追従させた仮想世界像の指示マークである。

特徴点を対象種別毎にユニークになるよう配置することによって、その配置情報から種別を同定することが可能になる。また、一つの対象には、二つの特徴点を基準点とし、物体座標系を設定する。物体座標系で対象上の調整個所 (IC の端子やスイッチ、可変抵抗) を記述する。



(a) 移動中



(b) 移動後

図 19 基板の特徴点の追跡

3.7 画像処理の手順

画像処理部では、以下のような手順で対象プリント基板の種別、位置の同定を行う。

1. 画像取得

図 15に見られるように、作業領域の両端に配置された二つのカメラより画像を取得する。これら二枚の画像を画像合成器により、二枚の画像が横に並んだ一枚の画像に変換し、PCに入力する。

2. 2 値化、ラベリング、重心計算

赤外線 LED の輝度は十分高いため、カメラの絞りを赤外線 LED の輝点以外が撮影されないところまで絞り込むことが出来る。この状態に設定したカメラから得られた画像を、固定閾値によって 2 値化処理を施す。この処理により、赤外線 LED 以外のノイズ成分が除去される。次に、ラベリング処理を施し、画像中に存在する複数の輝点を分離する。分離された輝点領域毎に重心計算を施し、特徴点のカメラ座標とする。

3. 対象プリント基板の種別、位置の同定

(2) で抽出された特徴点を用いて、それらの配置関係を計算する。各々の基板にはユニークな特徴点の配置が存在するため、特徴点の重心の配置関係から PC 上にあらかじめ登録されたデータベースを検索し、対象プリント基板の種別を同定する。

3.8 作業対象の指示

3.7章で述べた画像処理を行うことで、実世界上に存在するプリント基板の特定の場所に、仮想世界像をハーフミラーを介して重畳することが可能である。図 20 は、対象プリント基板のトラッキングを行ない、作業箇所を対象に追従させている様子を示している。プリント基板最上部および中央上方の小さい○印の輝点 3 点は、赤外線 LED を追従させた位置確認マーカである。マニュアルで指示される計測部位や作業箇所等を視覚的にユーザに指し示すことが可能であり、図中の

基板右下にある矢印は、可変抵抗のつまみを時計回りに回す指示を示している。また、No.8 D1 や No.26 D2 の表示部分とともにある大きい○印の輝点2点は抵抗計のプロープを当るべき計測部位を示している。

3.9 計測部位の指示と計測結果の表示

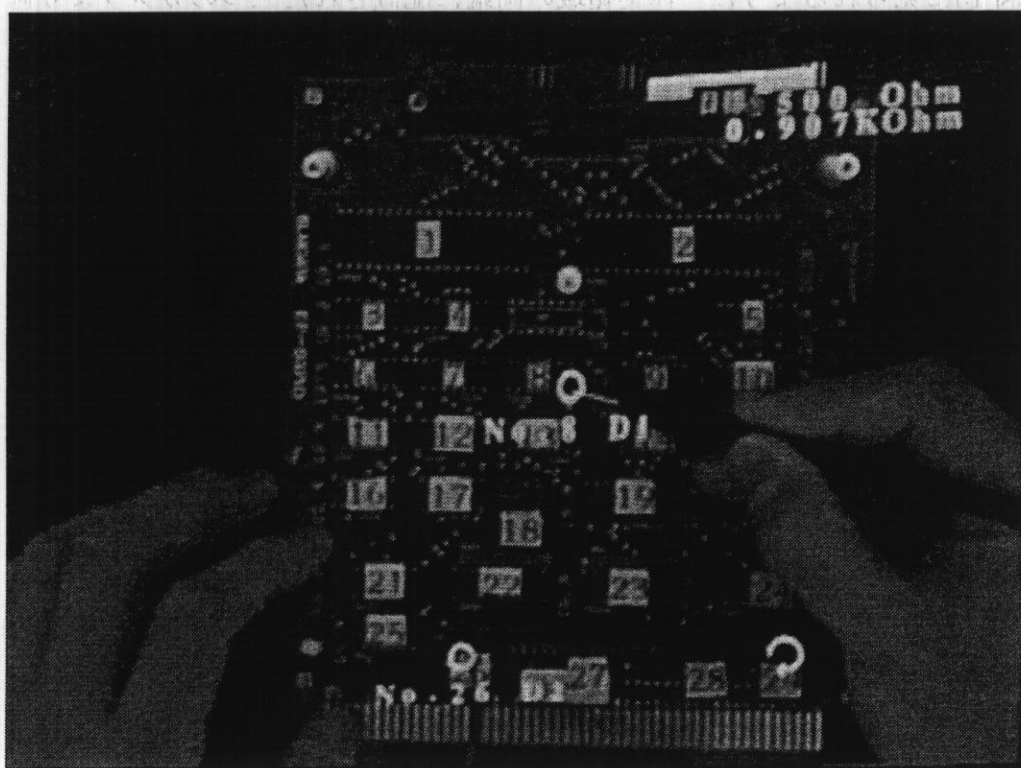


図 20 バーチャル電子計測器

図 20 のように、電子計測器からの出力も仮想世界像としてハーフミラー上に重ねることが可能である。これによって、ユーザは作業対象から視線を大きくそらすことなく計測結果を知ることができる。図のように二つの大きな○印のマーカ部分に計測器のプロープ2本をそれぞれつないだ時、上部にある計測器(抵抗計)に計測結果が表示されている様子を確認できる。カメラによる対象プリント基板のトラッキングに従い、作業対象に追従しつつ計測結果を表示できる。単に

計測結果を数値表示するのではなく、棒グラフ表示や図 21 に示すような、計測値が目標値からどれだけ違うかを相対的に表示する等、各種の表示方式の選択が可能である。

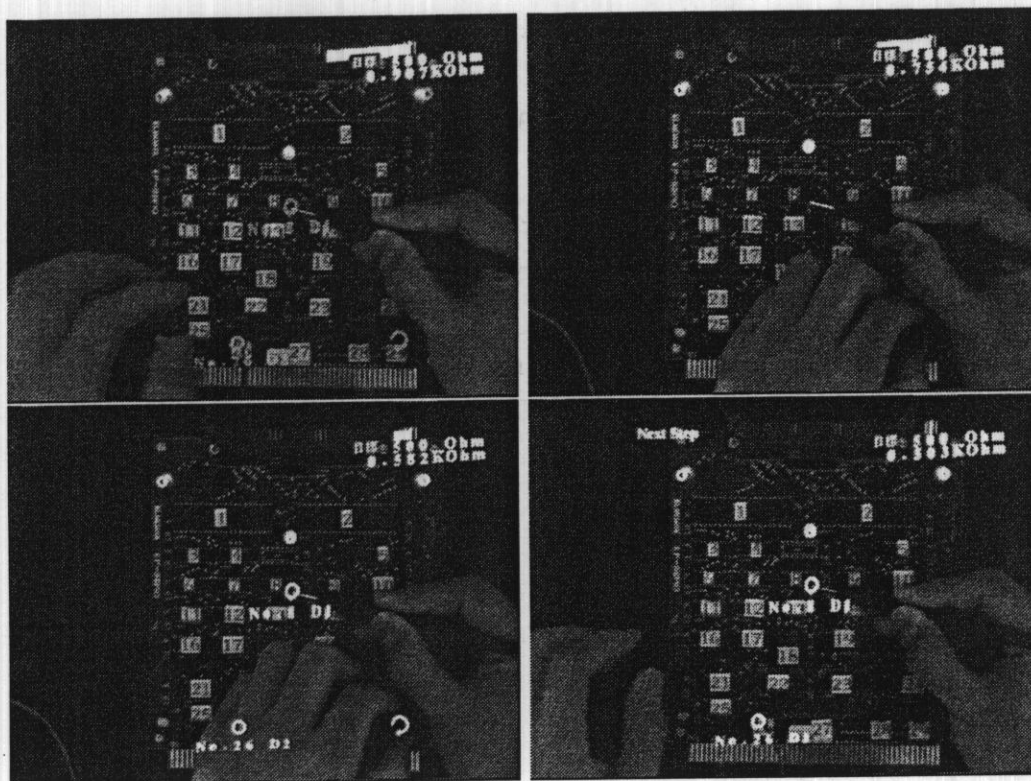


図 21 目標値相対表示

3.10 作業工程管理機能 (バーチャルマニュアル) の実装

PC に作業行程を管理させるためには、PC 内にマニュアルの情報を入力する必要がある。本システムにおいて、マニュアルの情報は図 22 のようなデータ構造を用いて PC に保存される。

図 22 において、各ブロックは表 1 のような情報を有している。

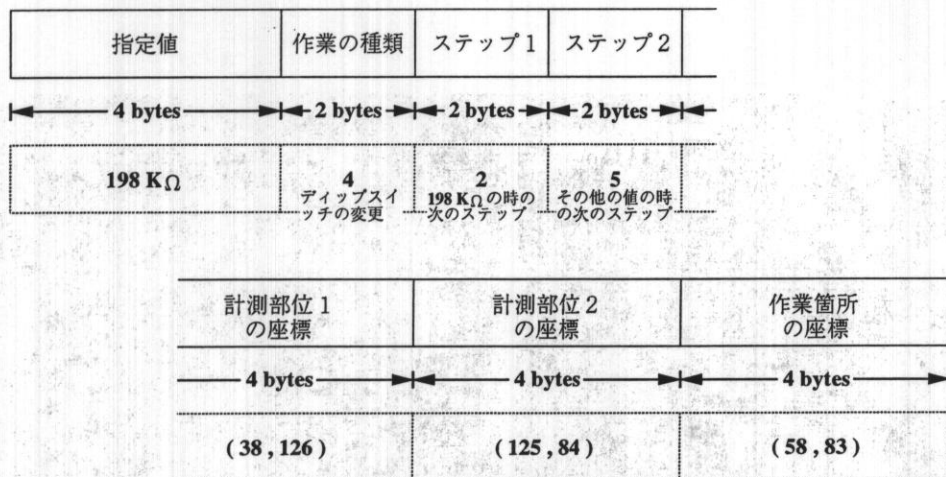


図 22 バーチャルマニュアルデータ構造

表 1 バーチャルマニュアルのデータ構造

指定値	: 目標とする計測器の値
作業の種類	: 作業行程の種類
ステップ 1	: 指定値に合致した場合の次の作業行程
ステップ 2	: 指定値に合致しなかった場合の次の作業行程
計測部位 1 の座標	: 計測部位の基板上的座標
計測部位 2 の座標	: 計測部位の基板上的座標
作業箇所の座標	: 作業箇所の基板上的座標

3.11 評価実験

この章では、本研究で構築した AR 技術を用いた卓上作業支援システムが有効であることを確認するため、印刷されたマニュアルを用いた作業と本システムを用いた作業を行った場合の作業時間および誤りについて考察する。

3.11.1 実験装置

実験を行なうに際し、表 2 に示す機材で実験装置を構成した。ソフトウェアは Linux 上で開発を行なった。この機材構成で、システムのスループットは約 0.09 秒 (11 frame/sec.) であった。

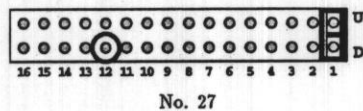
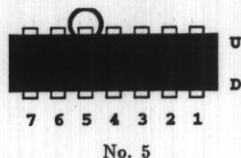
表 2 卓上作業支援環境の構築に使用した機材

PC 仕様	DELL 社 OptiPlex GXpro6200 Pentium PRO 200MHz 64MB Main memory
画像キャプチャボード	アルゴクラフト社 キャプチャボード
画像合成装置	SONY 社 WV-TW1
計測装置 (デジタルマルチメータ)	METEX 社 M-3850D

3.11.2 実験

情報科学専攻の大学院生 20 人を被験者とした。被験者はこの種の作業経験がなく、この実験ではじめて作業を行う。被験者の半数である 10 人に本システムを用いてプリント基板の調整作業を行ってもらい、残りの半数に図 23 に示す印刷マニュアルを用いて同様の作業を行ってもらった。印刷マニュアルは、既存の電子部品用マニュアルをできるだけ真似て作成しており、全体配置図、指示図等を含んでいる。

例：No. 5 の U 5 と No. 27 の D 12 の抵抗値を計測し、500 K Ω 以下なら No. 18 のスイッチ 1 を On にしなさい。



1. No.26 の U4 と No.20 の U4 の抵抗値を計測せよ。また、その抵抗値が 19.8 K Ω ならステップ (5) へ進め。298 K Ω ならステップ (3) へ進め。16.2 M Ω ならステップ (2) へ進め。
2. No.18 のスイッチ 3 を On にせよ。この時、No.26 の U4 と No.20 の U4 の抵抗値が 19.8 K Ω ならば、ステップ (5) へ進め。298 K Ω ならステップ (3) へ進め。
3. No.27 の D15 と No.13 の U5 の抵抗値を計測せよ。その抵抗値が 250 Ω ならば、ステップ (8) へ進め。330 Ω ならば、ステップ (9) へ進め。520 Ω ならば、ステップ (10) へ進め。
4. No.26 の D3 と No.15 の U4 の抵抗値を計測せよ。その抵抗値が 198K Ω ならば、ステップ (5) へ進め。298K Ω ならば、ステップ (6) へ進め。398 Ω ならば、ステップ (7) へ進め。
5. No.26 の D2 と No.8 の D1 の抵抗値を計測せよ。その抵抗値が 480 Ω ~ 520 Ω になるよう No.29 の可変抵抗を調節し、ステップ (3) へ進め。

図 23 印刷マニュアル (一部を抜粋)

作業対象として、図 24 に示すプリント基板を用意した。この作業対象には、二つの可変抵抗および、四つのディップスイッチが設置されており、本実験では、図下に見えるジャンパピンと IC のリードピンをプローブ点として用いた。作業内容は、指定されたディップスイッチの On/Off や指示ポイント間の抵抗値の計測、さらにその計測値によって分岐する可変抵抗の調節など、12 工程の作業である。AR による作業指示は、作業点指示は○印を、抵抗調整は回転矢印を明滅させて行い、同時に簡単な英語メッセージを表示させた。キャリブレーション誤差のため、IC のリードピン一本一本は正確に指示できない制約があり、IC の調整の場合はピン番号を同時表示させた。被験者には、○印とピン番号の両方からピンを確認するよう強制させた。

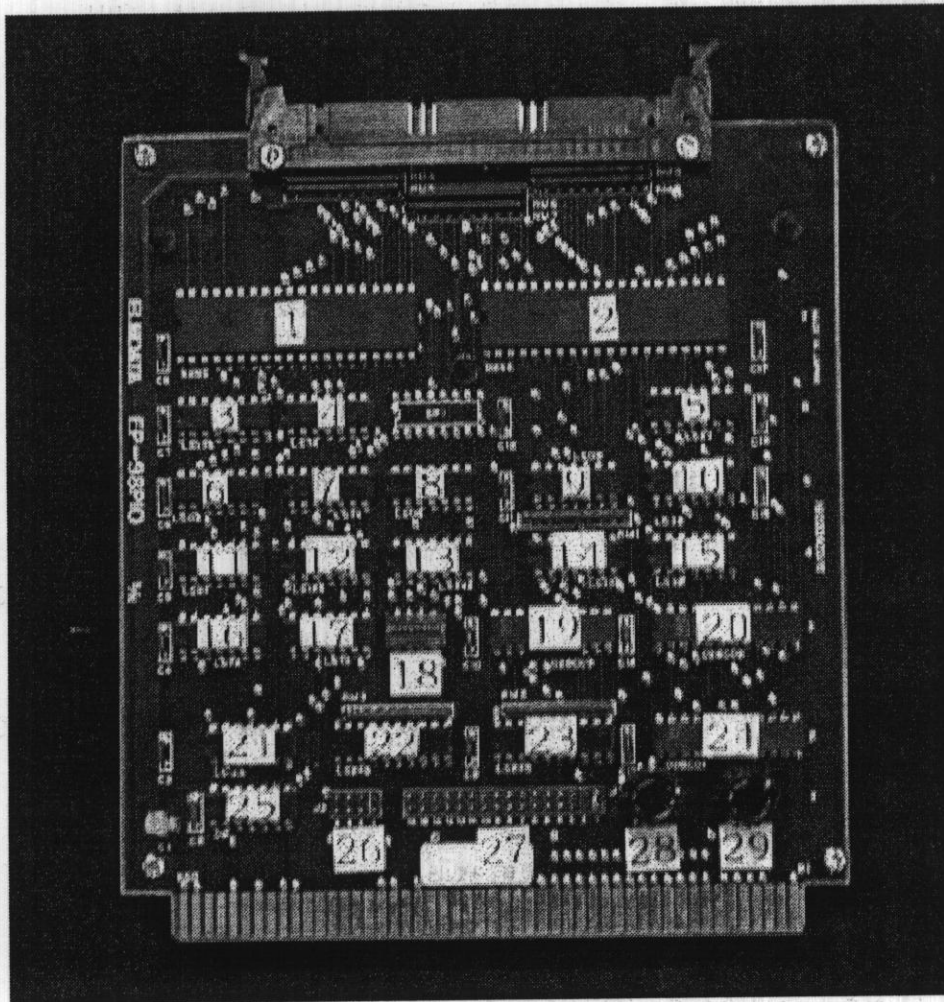


図 24 作業対象

3.12 実験結果と考察

表3と表4は、本システムを用いて基板検査を行った被験者と印刷されたマニュアルを用いて基板検査を行った被験者の作業時間および、誤りの個数についてまとめたものである。本システムを用いる被験者の作業時間は、印刷マニュアルを用いる被験者の作業時間の約3分の1に削減できている。これは、印刷マニュアルを用いた被験者には、次に示すように第2.6.1節であげた問題点や想定外の誤りも見受けられた。

1. 対象基板に視点を移したため、作業行程の進行状態が分からなくなる。
被験者の多くはマニュアルの説明箇所を明瞭に理解、記憶せずに作業を行なうため、マニュアルから視線をはずしたり、何かの拍子に冊子が閉じてしまった際に、現在行っている作業行程がマニュアルのどこに記されているかを失ってしまう。
2. 逆に、マニュアルに視点を移したため、計測部位が分からなくなる。
(1)と同様、プリント基板のように類似した部品が多数マウントされている対象では、一旦それから視線をはずせば対象箇所がどこなのかを失ってしまう。
3. マニュアルの説明文を精読していないため、作業行程を誤って把握している。
作業者の多くはマニュアル内の必要と思われる部分のみを読み、そのまま作業に入るため作業行程内容の誤解が生じていた。

また、本システムを用いて基板検査作業を行った被験者の誤り総数は0である。本システムでは、計測値が指定値にならない限り次の作業工程へ進めないため、手順通りに作業が実行された。印刷マニュアルを用いて作業を行った被験者による誤りは平均0.6回/人であり、作業行程、計測部位の誤認が生じている。現実の電子部品の調整作業で、もしこのような作業誤りを起こせば、製品全体の不良を引き起こすため、致命的な損失になると考えられる。

このようなAR技術を用いた作業支援システムは従来にない特徴を備えるた

表 3 本システムを用いた被験者の作業状況

作業者	作業時間	誤りの回数
A	206	0
B	321	0
C	244	0
D	168	0
E	162	0
F	298	0
G	243	0
H	174	0
I	178	0
J	229	0
平均	222.3	0

表 4 印刷されたマニュアルを用いた被験者の作業状況

作業者	作業時間	誤りの回数
K	640	2
L	744	2
M	885	0
N	618	1
O	1001	0
P	527	0
Q	596	0
R	582	1
S	728	0
T	604	0
平均	692.5	0.6

め、主観的な評価について得ることができたので、代表的なものとして以下に挙げ、その考察を述べる。

- 基板を見てどこに端子を接続すればいいのか直感的に分かる。
この意見は AR による作業指示が有効かつ効果的に機能しているものと考えられる。本システムでは直感的に指示内容が分かるように、文字情報よりも図形による指示を行うように実装したので、これが効果的であったものと考えられる。
- 作業の順番を覚えなくてもいいので、作業が容易に行えた。
作業の進行はコンピュータが管理しているため、作業者は作業内容を熟知していなくても作業を進行できたからではないかと考えられる。また計測作業についても目標値への誘導が有効に機能していたものと考えられる。
- 作業対象を見る位置が固定されているため、作業をやりにくい。
透過型ディスプレイの仕様上、ハーフミラーの上から作業対象を眺め、しかも重畳表示が正しく行われる範囲が狭いため、結果として作業者の動作が拘束されてしまうことから起きていると考えられる。

このほかの意見の多くは否定的な意見よりも肯定的な意見が多く得られ、作業がやりやすかったという意見が多くを占めた。このことから、卓上システムへの AR 技術を用いた作業支援環境は実用的な利用が可能であると考えられる。

4. 装着型フィールド作業支援システム:AR-Backpacker System

この章では、AR技術を用いた工業作業支援システムのフィールド作業へ適応について述べる。また、プロトタイプシステムを実装し、フィールド作業での有効性について考察する。

4.1 フィールド保守作業

第3章で述べた作業工程管理機能、オンライン計測機能を統合した電子部品検査の支援ARシステムでは、その対象として卓上におけるプリント基板検査作業を想定した。しかし元々、卓上はマニュアルを併置し参照しやすい環境であることもあり、卓上作業よりも工場プラント内のフィールド保守作業の支援の方が急務とされている。フィールド保守作業でも卓上作業と同じように、AR技術の効果を発揮できる作業と、従来手法との差が認められない作業が存在する。AR技術を用いることで大きな効果の得られる作業は、作業者が行うべき全ての手順を覚えることができない作業であり、計測により作業分岐が起きるため、非常に複雑な作業を行う時である。このような作業では、安全上できるだけ両手を自由にさせたい要請があり、またかさ張りやすいマニュアルを持参することを避け、作業実施内容をノートに書き写す作業を除外したいことから、AR技術を用いた作業支援環境が求められている。

プラント内のフィールド保守作業の多くは、広いプラント内に点在する検査対象(以降、検査ホットスポットと呼ぶ)を巡回し、バルブやスイッチを開閉したり、計測器を当て数値を読み取ることである。表5に示すように、作業全体は作業者の検査ホットスポットの探索とその場所への移動、検査ホットスポット内での作業の二種からなる。本章では、事故時の緊急対応ではなく、通常時の保守検査作業を想定し、後者の個々の検査スポット内での作業を支援対象とする。

ここでフィールドで移動しつつ作業するという場合、従来のARシステムにおいては問題とならなかった点が、新たに浮かび上がってくる。

表 5 フィールド作業の分類

作業区分	作業内容
広域作業	作業場所の探索 目的とする作業場所への移動
ホットスポット内作業	ホットスポット内のスイッチ等の操作 電圧などの測定や調整

I HMD 装着の危険性

通常 HMD は外界映像を遮断することにより、ユーザの視界の入れ替えを実現している。そのため HMD を装着した作業者は外界を見ることができず、いわゆるビデオシースルー方式は突然の機器障害時に外界が監視できなくなり工作機械や作業車の接近、階段、障害物などの状況を目視確認できなくなり、作業者の安全を確保することは困難となる。

II 位置・姿勢検出の制約

通常の VR システムでは、作業者が実験室などの一定の環境を管理された範囲内で利用することを前提としているため、作業者の位置や姿勢を検出するために計測可能領域の狭いセンサや外部トランスミッタを必要とする磁気センサでも適用が可能である。しかしプラント一般は広域であり、計測範囲や結線の問題により利用困難である。

III 仮想環境生成装置の可搬性

実時間で作業者の視野全体の仮想環境を生成する必要性から、CG による VR 環境の生成には通常高速なグラフィックワークステーションを利用する。しかし、このような規模の装置は通常大形で重量もあり、このまま作業者が可搬して用いることは困難である。

4.2 フィールド作業に適合する AR システム

これらの問題を解決するために、次の機能を設定する。

I 光学シースルー方式

HMD を装着した作業者が歩行中に危険を目視回避できるよう、常に実世界の映像を見ることができる透過型 HMD を用いる、いわゆる光学シースルー方式が適している。

II 慣性センサによる位置・姿勢計測

作業者の位置や姿勢を検出するセンサは計測基準とはケーブルで繋がれていない自立型である必要がある。そこで、ジャイロセンサや加速度センサなどの慣性センサを用いる。

III 小型軽量で装着可能 (wearable)

AR システムでは現在の注目項目に必要な情報のみを仮想環境からスーパーインポーズするため VR のように全環境を合成する必要はなく、PC をベースとした小型軽量の装置でも実現可能である。また、作業者の両手を自由にするため、装置は背負型かあるいは第 2.2 章で述べた、衣服型の装着可能 (wearable) なものでなければならない [8]。

これらの考えを基にした AR システムの構成概念を図 25 右方に示す。

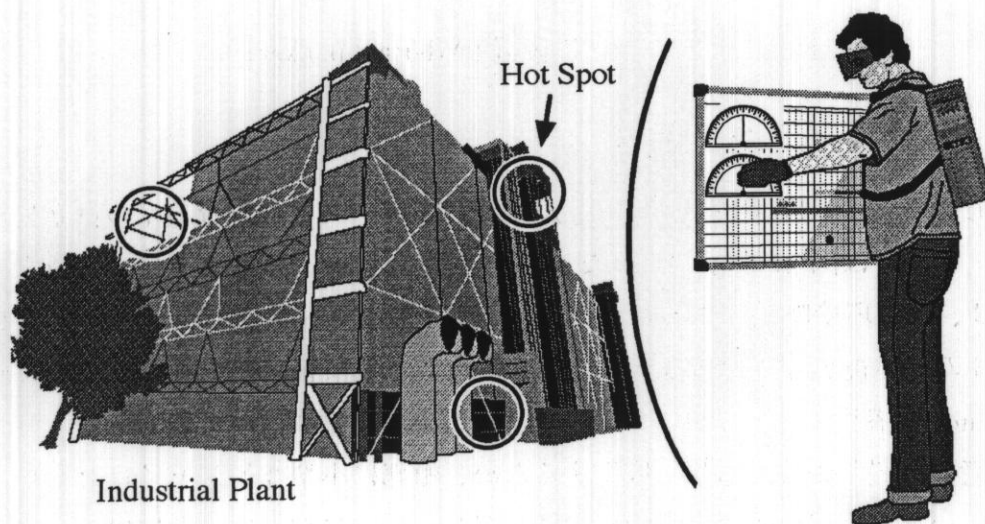


図 25 AR 技術を用いたフィールド作業支援

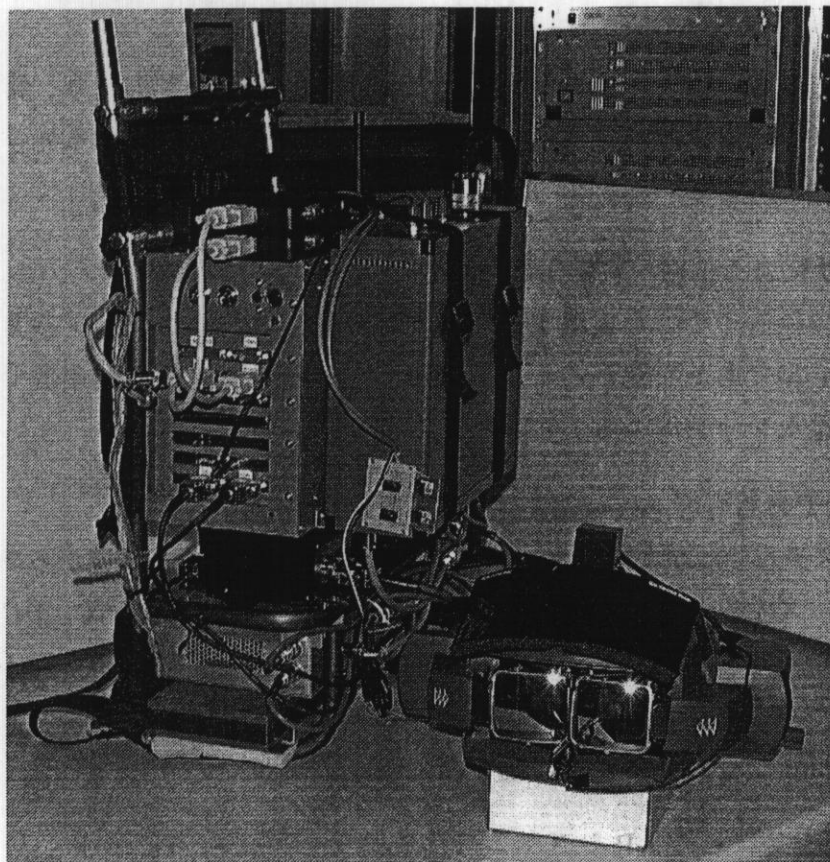


図 26 装着型 AR 装置 (AR-Backpacker)

4.3 プロトタイプシステム

試作したシステムは図 26 に示すような、PC をベースとした背負型の自立装置である。装着時は図 27 に示すような形態をとる。図 28 に示すように、搭載する PC には、仮想環境映像生成のための 3 次元グラフィックアクセラレータを搭載し、CG の立体視が可能である。ホストシステムとの情報交換を行なうために無線 Ethernet を搭載し、TCP/IP プロトコルを用いた情報通信が可能である。装置に作業者の位置と姿勢の情報を取得するため、頭部に小型 3 軸ジャイロセンサを設置している。仮想環境のディスプレイ装置として透過型 HMD を採用した。これらの装置はすべて同一のバッテリー用いて約 1.5 時間駆動することが可能である。

表 6 AR-Backpacker 仕様

PC 仕様	AMD K-6 233MHz 128MB Main memory PC カードソケット × 2 シリアルポート × 4
グラフィックアクセラレータ	Daiiamond Multimedia FIRE GL-3000
無線 Ethernet	関西電機 AirPort LAN (2MBps)
OS	Windows NT 4.0
仮想環境構築ライブラリ	SENSE8 WorldToolKit ver.2.1
慣性センサ	Data Tec. GU-3011
透過型 HMD バッテリ	島津 STV-E(バッテリー駆動に改造) 12V 5Ah × 2 DC-DC コンバータ
フレーム	登山用バックパック用 アルミニウムフレーム
重量	約 15Kg

図 29 に示すように、装置は機能毎のモジュール構造となっており、これらモジュールのマウントに登山用フレームを用いている。装着時の形態から、この装置を AR-Backpacker と呼んでいる。この詳細を表 6 に示す。

4.4 作業工程管理機能 (バーチャルマニュアル) の実装

本プロトタイプでは、AR-Backpacker に実装したバーチャルマニュアルは文字情報と、作業対象を指し示すポインタ、次に述べる対話型の計測装置の表示部を

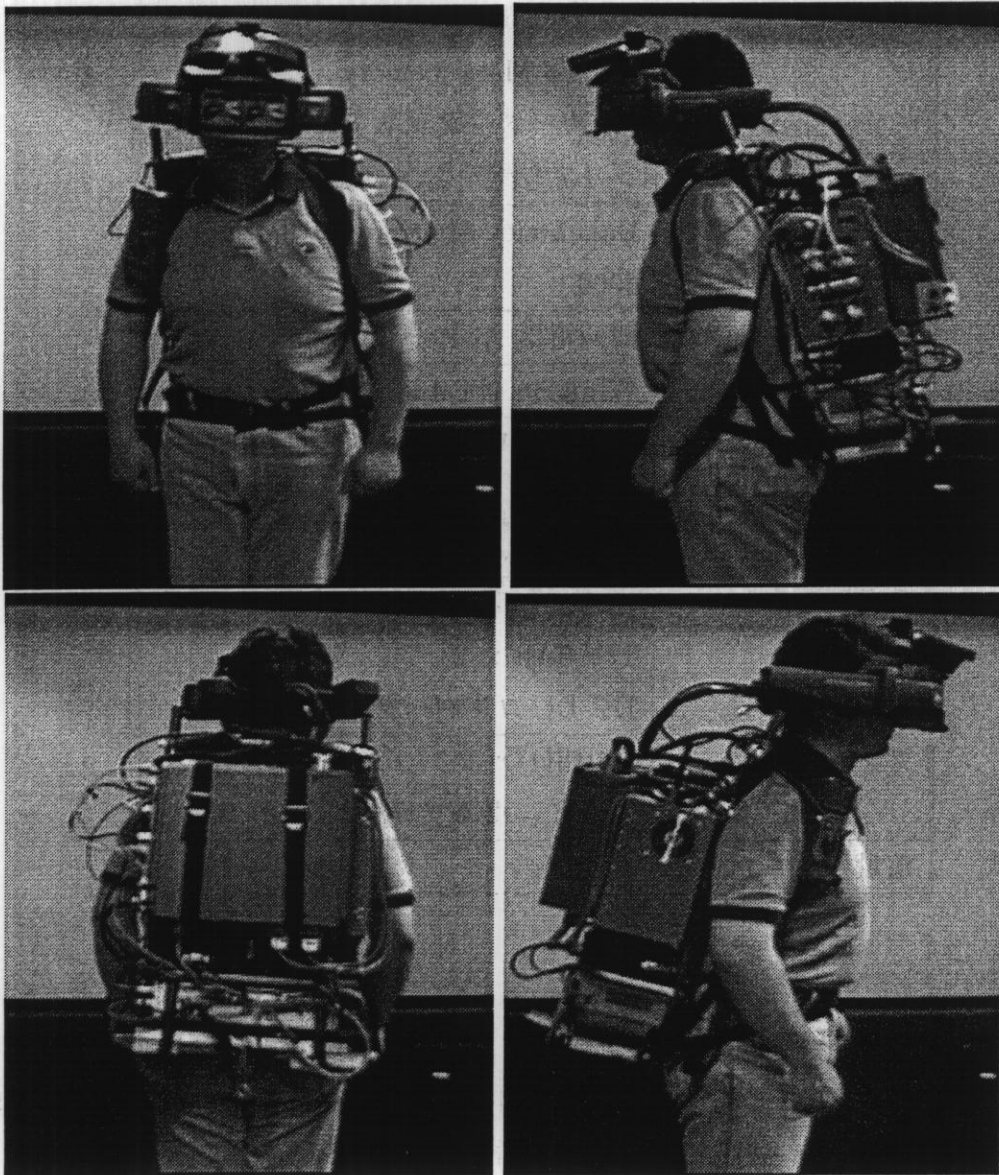


図 27 AR-Backpacker を装着した時の状態

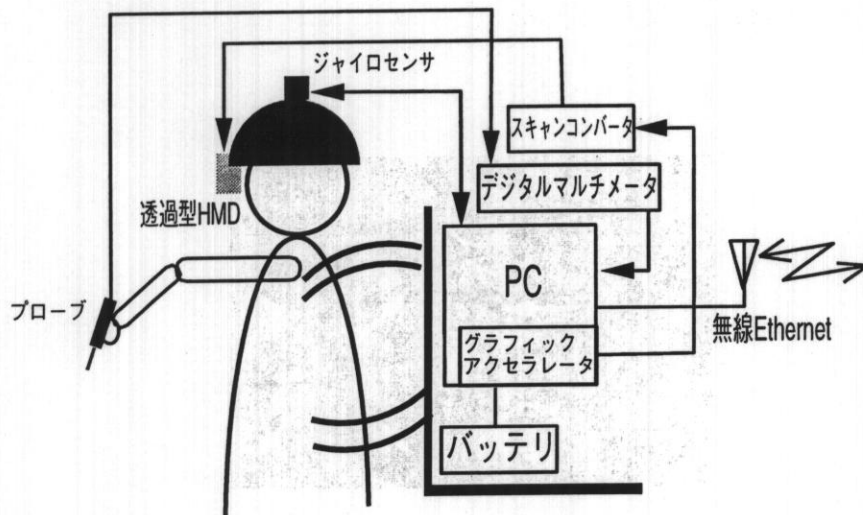


図 28 AR-Backpacker 構成図

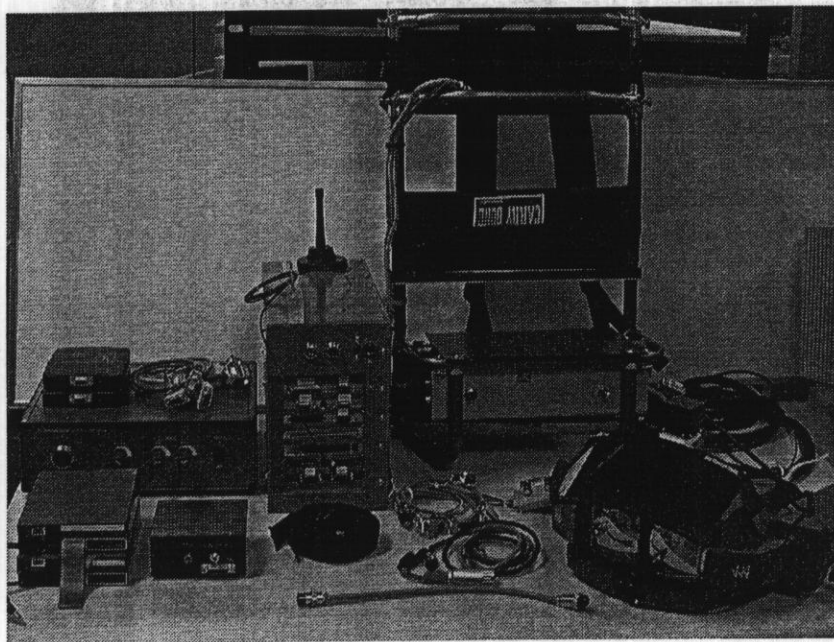


図 29 AR-Backpacker の各モジュール

任意の場所に表示できるように実装を行なった。ポインタは図 30に示す種類が利用でき、任意の位置、大きさで表示ができる。図 31は作業対象をポインタを用いて指し示しているところである。

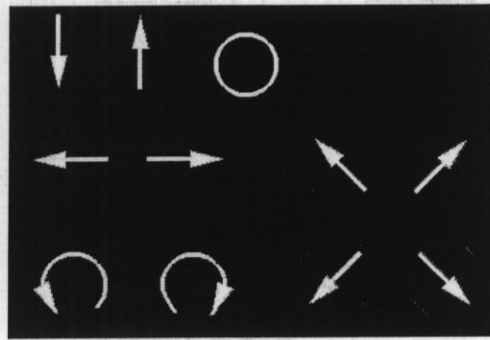


図 30 指示ポインタ



図 31 パーチャルマニュアル

また、バーチャルマニュアルの記述は卓上システムで用いた数値だけのものから、表7、8に示すような数種類のコマンドと数値による記述が可能である。これにより、作業マニュアルの記述時における分かりにくさが軽減された。実際の記述例は図32のようになり、作業一手順を一つのファイルとして管理する。

表7 バーチャルマニュアル記述のためのコマンドその1

コマンド	引数	コマンドの説明
文字列表示設定		
align	[center, left, right]	文字列の配置の設定
color	r g b	文字列の色の設定
scale	x y z	文字列の大きさの設定
position	x y z	文字列の表示場所の設定
orientation	x y z	文字列の向きの設定
text	string	表示文字列の設定
ポインタ設定		
pscale	x y z	ポインタの大きさの設定
pposition	x y z	ポインタの表示場所の設定
prorientation	x y z	ポインタの向きの設定
pointer	type	ポインタの種類
ジャイロセンサ制御		
gstop	なし	ヘッドトラッキング停止
gstart	なし	ヘッドトラッキング開始
ginit	なし	イニシャルポジション設定
ビューポイント初期化		
vreset	なし	ビューポイントの初期化

表 8 バーチャルマニュアル記述のためのコマンドその 2

コマンド	引数	コマンドの説明
tool	type mode orderdval branchfile	バーチャルツールの 設定
バーチャルツールの計測タイプ (type)	"DCmV", "DCV", "ACmV", "ACV", "FREQ", "LOGIC", "REG", "DIODE", "CAP", "hFE", "TEMP", "DC4mA", "AC4mA", "DC400mA", "AC400mA", "DC20A", "AC20A", "OFF"	
バーチャルツールのモード (mode)	1: 単純計測モード (branchfileは無効) 2: 条件分岐計測モード (orderdvalは無効)	
branchfileの構造	orderdval0 script0 orderdval1 script1 orderdval2 script2 orderdval3 script3 . . orderdvaln scriptn	

```
gstart
```

```
position 0 0 4000.0
```

```
scale 25 25 1.0
```

```
text Tester_power_ON_and
```

```
text Connect_PROBE
```

```
position 1800 2000 4000
```

```
scale 25 25 1.0
```

```
text T16
```

```
pposition 1800 2100 4000
```

```
pscale 25 25 1.0
```

```
pointer 1
```

```
tposition 1800 1600 4000
```

```
t scale 40 40 1.0
```

```
tool 2 DCV 0.0 branchfile.txt
```

図 32 バーチャルマニュアル記述例

4.5 オンライン計測機能 (バーチャル電子計測器) の実装

本プロトタイプは、バーチャル計測器の計測部として図 33に示すPC と接続可能なデジタルマルチメータを用いている。試作のため、このデジタルマルチメータは計測モード設定の自動的な変更ができないものの、計測モードと計測値をPCに入力することが可能なので、バーチャル計測器では計測モードが指定されたモードと現在のモードが違った場合に、図 34に示すようにモード変更を作業者にガイドする機能を備えている。図 35に、作業者が作業中に用いるバーチャル計測器の表示例 (直流電圧計) を示す。



図 33 デジタルマルチメータ

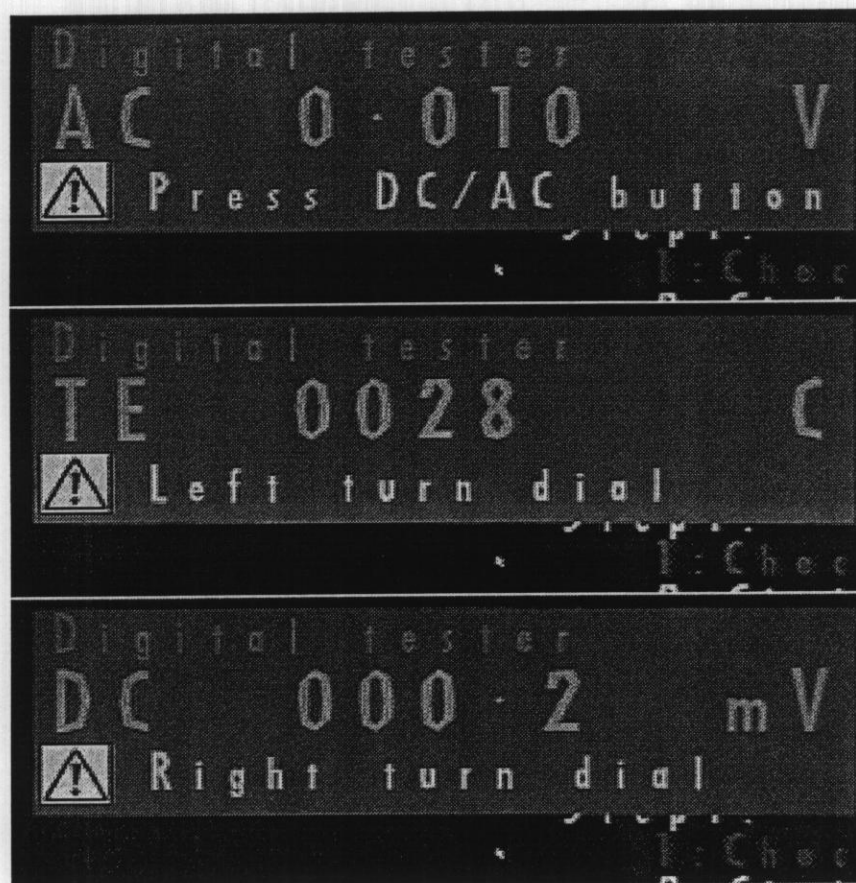


図 34 計測モード変更ガイド



図 35 バーチャル計測器

4.6 実環境・仮想環境間キャリブレーションと頭部姿勢補正

ARにおいては実環境と仮想環境間での座標整合(レジストレーション)が重要な技術課題の一つとされている。作業空間を特定できる室内用途では、あらかじめキャリブレーションを何らかの方法で一度のみ行えばよいが、プラント内を巡回し作業対象を次々に変更する場合には、キャリブレーションはその都度実行しなければならない。頭部位置姿勢の補正は、ビデオトラッキング方式 [27][28] や磁気位置センサを用いた方式 [29] が有効であるが、装置の構成要素が多くなったり自立型装置には不向きなセンサシステムを用いることから、本プロトタイプでは次のような簡易な方法を採用した。

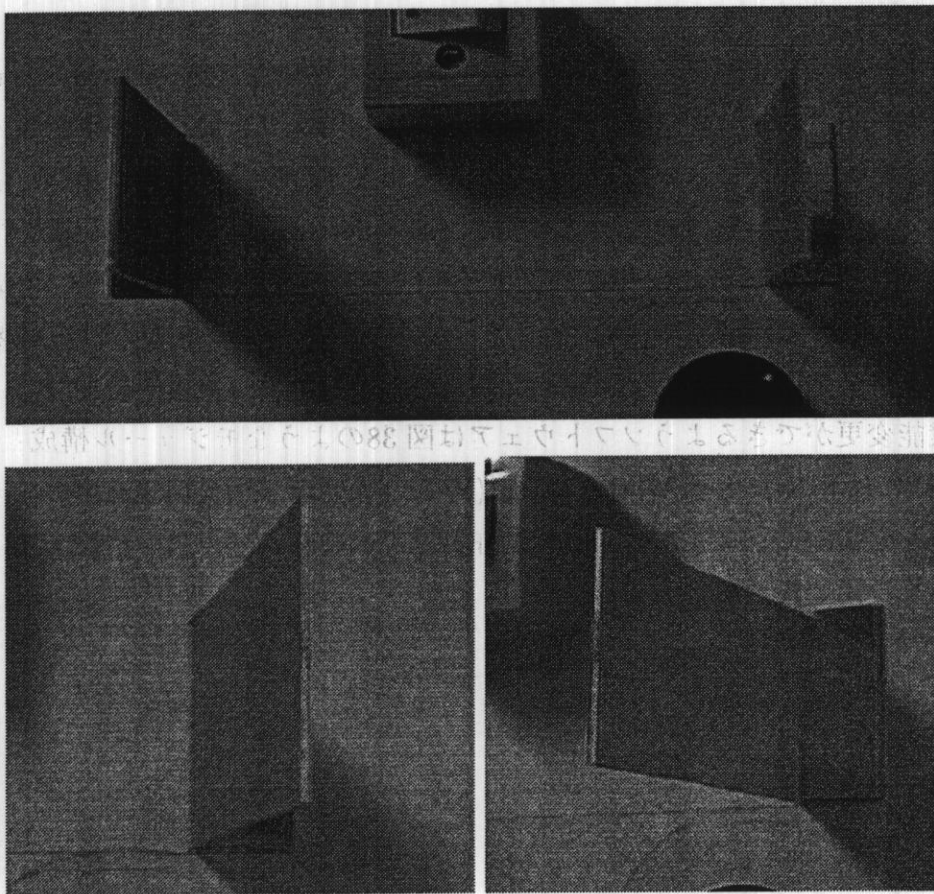


図 36 キャリブレーション用治具

図 36に、作業ホットスポットに取り付けられた提案する治具を示す。この治具は各面を異なる色を有する平面板であり、作業者は平面板と同じ平面上に自身の視点が位置するように、平面板の色と見かけの面積を見ながら頭部の位置を補正する。この治具を左右2箇所それぞれ内向きに設置することで、床上の頭部位置を空間中に固定することができる。地上高は作業者の身長データから得ることで、座標を固定できる。作業者は、できるだけ頭部位置を動かさないようにしつつ作業に入る。作業者の頭部姿勢変化による仮想環境の位置ずれに対しては、HMD 上部に設置された小型3軸ジャイロセンサのデータより補正する。

4.7 処理フロー

AR-Backpacker 内でのシステム処理の流れを図 37に示す。各種作業のバーチャルマニュアルはホストシステム側に蓄積され、作業対象毎に AR-Backpacker 内にダウンロードされる。ホストシステムの役割はマニュアル情報や作業対象の形状情報などを管理保存し、AR-Backpacker からの要求に応じて必要な情報を伝達することである。AR-Backpacker とは無線 Ethernet を通じて情報の交換を行なう。今回の実装では Windows NT のファイル共有機能を用いて実現している。

AR-Backpacker に搭載している PC が行なう処理はリアルタイム性を必要とし、また、バーチャル計測器を実現する計測ハードウェアの変更や追加の時に速やかに機能変更ができるようソフトウェアは図 38のようなモジュール構成とし、CG の生成には SENSE8 社 WorldToolKit(WTK) 仮想環境開発環境を用いて実装した。それぞれのモジュールは非同期動作可能で、モジュール間の情報交換には共有メモリを用いている。

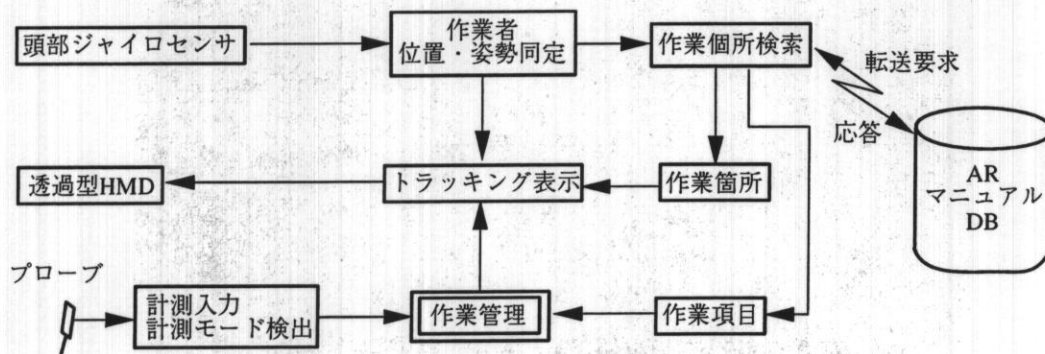


図 37 システム処理フロー

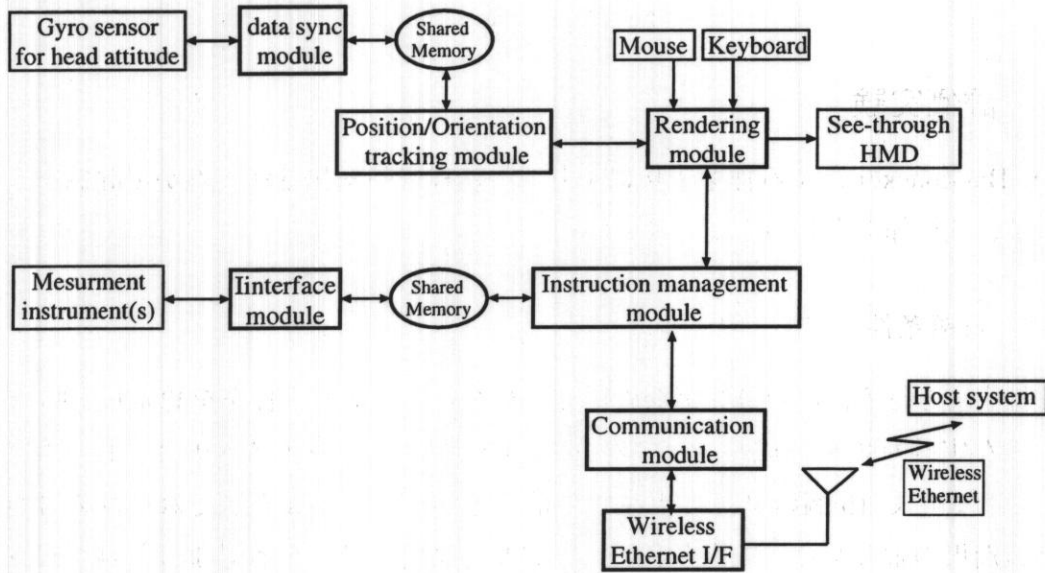


図 38 ソフトウェア構成

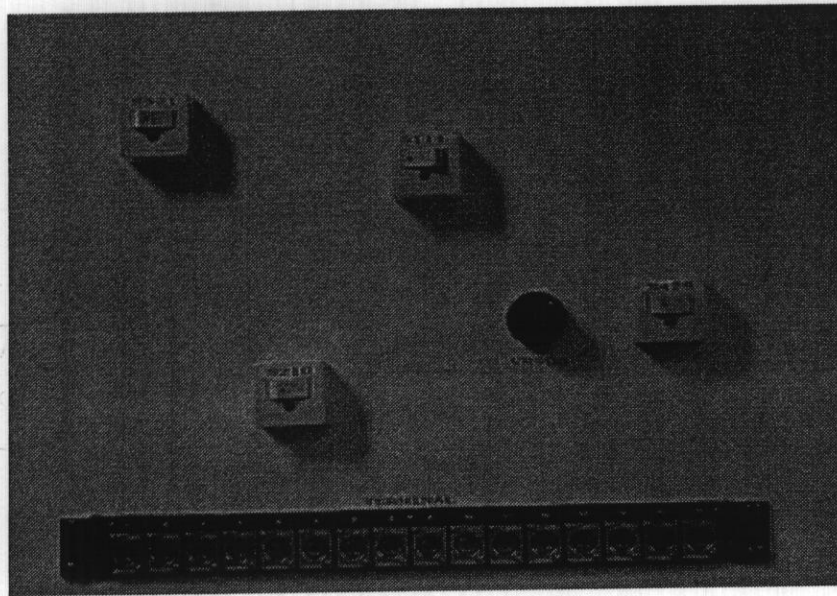


図 39 実験対象

4.8 評価実験

AR-Backpackerによる作業支援により、どの程度効率化されるのかを評価するために、試行作業を行った。

4.8.1 実験条件

評価実験を行うにあたり、実際の保守に行われるであろう作業を想定し、図 39 のような実験対象を作成した。この実験対象には 4 つのスイッチと、1 つのボリュームそして 16 個のターミナルから構成されている。また、それぞれの部材には識別用の番号が振ってあり、マニュアル作業時にはこの番号よりどれを操作すればいいのか指示される。試行実験ではこのモックアップに対して次に述べる試行作業で、印刷マニュアルの場合の作業時間と、AR-Backpacker を用いたときの作業時間を計時し、作業時に起きた誤りの回数を数えることで、作業効率の比較を行った。

表 9 作業内容

分岐前の作業	
1	デジタルマルチメータの電源を投入し、電圧計測モードに設定する。
2	指定のターミナルにプローブを接続し、電圧を計測する。
3	電圧を読み、対応表から作業手順を選択する。
作業分岐後の作業	
A	指定されたターミナル間をケーブルで接続する。
B	スイッチを対応表に書かれた状態に変更する。
C	ボリュームを反時計回りにいっぱいまで回す。
D	指定されたターミナルにプローブを接続し、指定された電圧にボリュームを調整する。
E	プローブを違うターミナルに接続し、電圧を指定された電圧にボリュームを調節する。
F	プローブをターミナルから外し、作業を完了する。

4.8.2 試行作業

試行作業は表 9 の内容で、計測した結果から対応表を見ることで作業の条件分岐が起きる内容となっている。実験の被験者として、情報科学専攻の大学院生 10 名に参加してもらい、印刷マニュアルによる作業と、AR-Backpacker による作業を行ってもらった。図 40 が作業マニュアル中の分岐個所の項目である。

作業マニュアル

- (1) デジタルマルチメータ (以下マルチメータ) の電源を投入し、電圧モードにする。
マルチメータの読みは小数点以下2桁目以降を切り捨てる。
- (2) マルチメータのプロブをターミナル16へ接続する。
- (3) そのときの電圧を読み、表1から対応する操作の書かれたページへ進む。

表1: 作業対応表

電圧	操作方法	S111	S210	S321	S475	電圧	操作方法	S111	S210	S321	S475
0.1	B	OFF	ON	ON	OFF	2.6	G	ON	ON	ON	ON
0.2	D	OFF	OFF	OFF	ON	2.7	F	OFF	ON	ON	ON
0.3	B	OFF	ON	ON	OFF	2.8	F	OFF	ON	ON	ON
0.4	F	OFF	ON	ON	ON	2.9	E	ON	OFF	OFF	ON
0.5	F	OFF	ON	ON	ON	3.0	D	OFF	OFF	OFF	ON
0.6	F	OFF	ON	ON	ON	3.1	C	ON	ON	ON	OFF
0.7	B	OFF	ON	ON	OFF	3.2	B	OFF	ON	ON	OFF
0.8	E	ON	OFF	OFF	ON	3.3	B	OFF	ON	ON	OFF
0.9	D	OFF	OFF	OFF	ON	3.4	E	ON	OFF	OFF	ON
1.0	C	ON	ON	ON	OFF	3.5	B	OFF	ON	ON	OFF
1.1	D	OFF	OFF	OFF	ON	3.6	D	OFF	OFF	OFF	ON
1.2	F	OFF	ON	ON	ON	3.7	A	ON	OFF	OFF	OFF
1.3	E	ON	OFF	OFF	ON	3.8	E	ON	OFF	OFF	ON
1.4	E	ON	OFF	OFF	ON	3.9	C	ON	ON	ON	OFF
1.5	B	OFF	ON	ON	OFF	4.0	G	ON	ON	ON	ON
1.6	C	ON	ON	ON	OFF	4.1	C	ON	ON	ON	OFF
1.7	A	ON	OFF	OFF	OFF	4.2	C	ON	ON	ON	OFF
1.8	E	ON	OFF	OFF	ON	4.3	F	OFF	ON	ON	ON
1.9	C	ON	ON	ON	OFF	4.4	B	OFF	ON	ON	OFF
2.0	G	ON	ON	ON	ON	4.5	F	OFF	ON	ON	ON
2.1	F	OFF	ON	ON	ON	4.6	A	ON	OFF	OFF	OFF
2.2	C	ON	ON	ON	OFF	4.7	C	ON	ON	ON	OFF
2.3	C	ON	ON	ON	OFF	4.8	B	OFF	ON	ON	OFF
2.4	E	ON	OFF	OFF	ON	4.9	E	ON	OFF	OFF	ON
2.5	G	ON	ON	ON	ON	5.0	C	ON	ON	ON	OFF

図 40 作業マニュアル (作業分岐部分)

表 10 印刷マニュアルを用いた時の結果

作業者	総作業時間 [sec.]	作業誤り数 [回]
A	150	1
B	167	0
C	332	3
D	544	5
E	148	1
平均	268.2	2.0

表 11 AR-Backpacker を用いた時の結果

作業者	総作業時間 [sec.]	作業誤り数 [回]
F	146	0
G	349	0
H	422	0
I	253	0
J	282	0
平均	290.4	0.0

4.9 実験結果と考察

印刷マニュアルを用いた時の作業時間と、作業の誤りについての結果を表 10に、AR-Backpacker を用いたときの作業時間と、作業の誤りについて表 11に示す。

印刷マニュアルを用いたときの作業の平均総作業時間は約 268 秒であり、平均誤り数は 2 回であった。同じく AR-Backpacker を用いたときの作業の平均総作業時間は約 290 秒であり、平均誤り数は 0 回であった。

これらの平均値を比較すると、作業時間的には印刷マニュアルを用いた作業の方が短時間で作業を終えている。しかし、作業中の誤り数が平均して 2 回起きて

いるため、作業の質の面では良くないことが分かる。一方の AR-Backpacker を用いたときの作業時間は印刷マニュアルの作業より時間を要している。しかし、作業の誤り数は 0 回に削減されている。工業用途として特に重要視される作業の品質管理の面では所期の目標を達成していると考えられる。AR-Backpacker を用いるときの方が、なぜ作業時間を要したのかを次に考察する。

従来にない新しい作業スタイルのため、被験者がシステム自体に熟れるのに時間がかかった。

この問題が作業時間の増加に大きく影響を及ぼしていることが、作業後の被験者への面接調査で判明した。被験者が平素作業した経験のある印刷マニュアルでの作業と違い、AR-Backpacker を用いた作業が初めてであるため、装置の機能を理解しながら作業を行ったために余分な作業時間が必要だったことが推察できる。AR-Backpacker を用いた作業に十分熟練した場合、作業時間をさらに減少させることが可能である考える。

卓上システムの時の同様に本システムの提案する作業スタイルは従来の作業と比べ特異なものであるため、主観的な評価についても重要であると考えられる。代表的なものとして以下に挙げ、その考察を述べる。

- 作業指示が実対象上に出るため非常に分かりやすい。
作業対象に直接操作の促す図形による指示が表示されるため、どこを操作すればいいのかを直感的に理解できたからであると考えられる。
- 計測結果が作業対象上に表示され、るため調整作業が容易だった。
従来は計測器に表示される計測値と作業対象との間で頻繁な視線移動を伴うが、本システムでは作業対象と同じ位置に計測値をリアルタイムで表示することで、ダイヤルなどの調整量と計測値の変化の対応付けが容易となり、結果として調整作業が容易になったものと考えられる。
- 視界が狭いため、窮屈な感じがする。
ディスプレイデバイスとして透過型 HMD を採用したことが原因であると考えられる。本システムでは大形の部類に入る HMD を用いたため、HMD

自体の重量と、利用者の頭部が覆われてしまうことによる閉塞感が利用者に窮屈な感じを与える原因であると考えられる。

- 重量表示がずれてしまうため作業指示が見にくくなる。

頭部姿勢の検出に小型のジャイロセンサを用いている。このセンサが持つドリフト現象が大きく影響してしまった結果であると考えられる。現在のところシステムに採用したジャイロセンサの仕様上、ドリフトの生じない安定した動作が可能な時間がセンサの初期化後の約 20 分間に限られているため、これ以上の連続運転ではドリフト現象が表面化してしまう。

- 装置重いため非常に疲れる。

本システムは自立型の装置として構成してあり、大形のバッテリーを備えている。また、本来商用電源で使用するのを直流駆動できるように改造した HMD を用いたためそのコントローラの重量 2Kg ほどになるため、装置全体の重量を増加させてしまっている。

否定的な意見の大半はシステムの重量や、HMD の重さのため、窮屈な感じがするという意見であり、作業が分かりにくいという意見はなかった。重量的な問題は本システムの場合、機能の実証を最大の目的で構築したためそれほど考慮していなかったが、実際の応用においては高密度実装技術や、軽量の素材を用いることで、軽量化が可能であると考えられる。肯定的な意見の大半が、計測器を用いた調整作業が容易であったと意見であった。その他には面白い、新鮮な感覚で作業が行える等の意見を得た。主観的な評価における本システムの評価は重量的な問題を除いて好意的であったと考えられる。

5. 結論

本研究は、AR技術による視覚的な作業指示により、工業作業における作業マニュアルの参照や計測装置の操作に伴って起きるヒューマンエラーの削減、コンピュータによる作業工程管理と、計測装置の統合による計測装置の状態把握と計測結果の自動取得による動的な作業進行を可能にした工業作業支援システムを構築した。

電子部品検査の支援システムでは、平面的なプリント基板の検査という卓上の作業に限定したため、デスクトップディスプレイとハーフミラーを用いることで実世界と仮想世界を奥行きがずれなく融合可能となった。作業者はHMD等の装置を身につける必要がなく、自由に視点を変更でき、従来の作業と変わらない方式で作業が可能である。

また、電子部品検査のような専門的知識を必要とする作業を行う際には、その作業手順を記したマニュアルが必要となる。このような作業を行う際、マニュアルと対象となる電子部品間の視点変更が作業効率および誤りの誘発に大きな影響をおよぼしており、強調現実感技術を用いて作業手順を対象部品上に重畳して表示することで、作業効率とその信頼性を大幅に向上可能であることが分かった。また、作業手順をPCに管理をさせることによって、作業者は作業行程の把握、計測結果による作業行程の分岐の判断という誤りを起こしやすい作業から解放され、誤りを減少できることが分かった。

ここでは、デスクトップ型のPCを用いたが、ノート型のPCを用いることによって、携帯型作業支援ARシステムの実現も容易であり、広範な応用が期待される。

装着型強調現実感装置によるフィールド作業支援システムでは、これまで実験室内に留まりがちなARシステムをフィールド使用に拡張する際に必要な検討を行い、背負型のプロトタイプを実現した。このシステムは必要な計測装置を、AR技術によるバーチャル計測器として装置内に実装しており、計測器を明示的に携帯する必要はない。ホストコンピュータ内に保存されている作業マニュアルは無線LANによっていつでもどこでも参照可能であり、一旦それを装置内にダウンロードすれば、計測も含めた総合的な作業工程管理の下で作業することができる。

余計な装置を背負い、頭には HMD を装着するという格好では、逆に作業性を低下させる心配があるが、熟練作業員でなくとも誤りの少ない作業が行え、しかも作業内容がオンラインで記録・保存・通信できる利点は品質管理上有益である。ただし、この利点が活かせる対象はオンライン計測可能なものに限定されており、バルブの開閉など状態把握が視認できない困難な対象に対しては、もし誤った作業が施されてもシステムが関知できない問題点がある。今後解決すべき問題点と認識している。

フィールド作業支援で提案する実環境と仮想環境間のキャリブレーション法は、2色平面板を見ながらの作業員自身の移動を強制するものであり、携行装置としての実用的妥協を図ったものである。今後、ビデオトラッキング方式を小型軽量に実装することができれば、背負装置への搭載も可能であると考えられる [30]。

プロトタイプは背負うにせよ比較的大きな装置をなってしまったが、今後の小型軽量化に問題となる構成要素はなく、実用に向けての実証が行えたものと考えられる。今後、この進展著しい AR 技術を工業応用面から実証を続けたい。

これら二つのシステムにより、本論文で提案する AR 技術による視覚的で直感的に理解できる作業指示機構と、コンピュータによる計測装置を統合した作業工程管理機構を備えた作業支援システムが実社会の具体的な作業において適応可能であることが実証された。また作業員の熟練度に影響されない、高品質な作業を実現するための支援環境として有効に機能していることが実証された [31]。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始多大なる御指導を頂いた奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 千原 國宏 教授に厚く御礼申し上げます。研究者としてのものの考え方、行動の仕方など多くのことを学ばせて頂きました。また、多数の発表の機会や研究調査の機会を持たせて頂きましたことは、研究をまとめていく上で非常に有益かつ重要なものでした。改めて御礼申し上げます。

本研究をまとまるにあたり、副指導教官として数々の有益な御助言を頂きました情報科学研究科 横矢 直和 教授に厚く御礼申し上げます。

情報科学研究科 佐藤 宏介 助教授には、副指導教官として多大なるご指導を頂き、また、問題に直面したときに適切なお助言を賜りました。これらは研究活動を行う上でたいへん有益なものでありました。厚く御礼申し上げます。

日頃より、御指導、御助言頂きました先端科学技術研究調査センター 大城 理助教授に厚く御礼申し上げます。

研究を行う上で数々の御教示並びにご助力を頂きました東京大学 眞溪 歩 先生に厚く御礼申し上げます。

プログラミングに関して数々のお助言を賜りました和歌山大学 陳 謙 先生に厚く御礼申し上げます。

卓上システムを構築するにあたり、多大なるご協力を頂いた和田 誠一郎氏(現日本 IBM 株式会社)に厚く御礼申し上げます。

研究を行うに当たり、大型建造物の建造現場での基礎調査を行う機会を与えてくださった竹中工務店 北原 英雄氏並びに、研究調査に快くご協力下さった方々に厚く御礼申し上げます。研究上、たいへん貴重な情報を得ることができました。

像情報処理学講座の諸氏には、研究上の様々な局面にて多大なる御協力を頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

最後になりましたが、発表の場などで、研究に関したたいへん有益なお助言下さりました、各大学の先生方、各方面の研究者のみなさま方に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 広田光一. 人工現実感のための基盤技術. 画像ラボ, No. GA01-19, pp. 24 - 29, May 1995.
- [2] 館暲, 廣瀬通孝. バーチャルテックラボ. 工業調査会, 1992.
- [3] T.P. Caudell. Introduction to augmented and virtual reality. *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 2351, pp. 272 - 281, 1994.
- [4] 田村秀行. 複合現実環境の構築と描画. 日本バーチャルリアリティ学会第2回講習会, January 1998.
- [5] 田村秀行, 大田友一. 複合現実感. 映像情報メディア学会誌, Vol. 52, No. 3, pp. 266 - 272, 1998.
- [6] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行. MR リビングルーム-MR 空間の幾何的・画質的整合性に関する考察. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 2, pp. 55 - 60, 1998.
- [7] T. Starner, S. Mann, B. Rhodes, J. Levine, J. Healey, D. Kirsch, R.W. Picard, and A. Pentland. Augmented reality through wearable computing. *M.I.T Media Laboratory Perceptual Computing Section Technical Report*, No. 397, 1997.
- [8] S. Mann. Wearable computing: A first step toward personal imaging. *IEEE Computer*, Vol. 30, No. 2, pp. 25 - 32, February 1997.
- [9] T.G. Zimmerman. Personal area networks: Near-field untrabody communication. *IBM System Journal*, Vol. 35, No. 3, pp. 609 - 6017, 1996.
- [10] R.W. Picard and J. Healey. Affective wearables. *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers*, Vol. 1, No. 1, pp. 90 - 97, 1997.
- [11] <http://www.xybernaut.com/>. Xybernaut corporation.

- [12] http://www.xybernaut.com/support/2support_dphotos1.html. Xybernaut downloadable photos.
- [13] <http://www.ibm.co.jp/News/leads/980912/index.html>. 体に着けて使えるウェアラブルパソコン.
- [14] J. Rekimoto and K. Nagao. The world through the computer: Computer augmented interaction with real world environments. *UIST*, Vol. 14, No. 17, pp. 29 - 36, November 1995.
- [15] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行. AR²ホッケー: 協調型複合現実感システムの実現. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 3, No. 2, pp. 55 - 60, 1998.
- [16] S. Feiner, B. MacIntyre, and T. Höller. A touring machine: Prototyping 3d mobile augmented reality system for exploring the urban environment. *Proceedings of International Symposium on Wearable Computing*, pp. 74 - 81, 1997.
- [17] H. Iseki, T. Dohi, K. Nambu, T. Tanikawa, K. Kanatani, I. Ogawa, T. Fukuyo, and H. Saito. Single camera three-dimensional hivation microscope system for virtual reality in neuroseugery. *Proceedings of International Conference on Virtual System and Multimedia*, Vol. 1, pp. 278 - 279, September 1996.
- [18] M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi. Merging virtual objects with the real world: Seeing ultrasound imagery within the patient. *ACM Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 202 - 210, July 1992.
- [19] A. Matani, Y. Ban, O. Oshiro, and K. Chihara. A system for superimposing a medical image whthin the subject. In *18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, No. 713, 1996.

- [20] 深作和明, 根来真, 曾根脩輔. 仮想血管内視鏡による脳血管内手術に対する画像支援. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 2, pp. 55 - 60, 1998.
- [21] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann. Knowledge-based augmented reality. *Comm. ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 52-62, 1993.
- [22] <http://www.cs.columbia.edu/graphics/projects/karma/karma.html>. Knowledge-based augmented reality for maintenance assistance.
- [23] T.P. Caudell and D.W. Mizell. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Science*, Vol. 2, pp. 659 - 669, January 1992.
- [24] http://www.boeing.com/assocproducts/art/tech_focus.html. Applied research and development in information sciences and mathematics.
- [25] Y. Ban, K. Sato, and K. Chihara. Ar backpacker for manufacturing and inspection. In *Proceedings of International Conference on Virtual System and Multimedia*, Vol. 1, pp. 65 - 68, September 1996.
- [26] M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi. Dynamic registration correction in augmented-reality systems. *Virtual Reality Annual International Symposium(VRAIS)'95*, pp. 189 - 196, 1995.
- [27] 大隈隆史, 清川清, 竹村治雄, 横矢直和. ビデオシースルー型拡張現実のための実画像からのカメラパラメータの実時間推定. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 97, No. 324, pp. 13 - 20, October 1997.
- [28] 井上剛毅, Long Quan, 太田友一. 複合現実感のための線形的手法による仮想物体合成. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 97, No. 324, pp. 7 - 12, October 1997.

- [29] A.L. Janin, D.W. Mizell, and T.P. Caudell. Calibration of head-mounted displays for augmented reality applications. *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 246 – 255, September 1993.
- [30] 米村隆, 和田誠一郎, 伴好弘, 佐藤宏介, 千原國宏. 携帯型コンピュータによる強調現実感空間の共有. 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, 第3巻, pp. 307 – 308, 8 1998.
- [31] K. Sato, Y. Ban, and K. Chihara. MR aided engineering: Inspection support systems integrating virtual instruments and process control. In Yuichi Ohta and Hideyuki Tamura, editors, *Mixed Reality*, chapter 19, pp. 347 – 362. Springer-Verlag, March 1999.

付録

A. 研究発表業績

[学術論文]

- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏:“強調現実感による電子部品検査の作業支援環境”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, pp.185-191, (1998).
- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏:“AR バックパッカー:強調現実感による背負型フィールド作業支援システム”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌.(1998 照会后採録予定).

[国際会議]

- Yoshihiro Ban, Kosuke Sato and Kunihiro Chihara, “A portable VR-based inspection system with see-through HMD.”, Proceedings of International Conference on Japan USA Symposium on Flexible Automation, No.2, pp.975 - 978, 1996.
- Yoshihiro Ban, Kosuke Sato and Kunihiro Chihara, “AR backpacker for manufacturing and inspection.”, Proceedings of International Conference on Virtual System and Multimedia, pp.65-68, 1996.
- Yoshihiro Ban, Seiichirou Wada, Kosuke Sato and Kunihiro Chihara, “A Desktop Environment for Electronic Inspection by Augmented Reality.”, International Conference on Japan USA Symposium on Flexible Automation, No.3, pp.1277-1280, 1998.

[書籍]

- Kosuke Sato, Yoshihiro Ban and Kunihiro Chihara, "MR Aided Engineering: Inspection Support Systems Integrating Virtual Instruments and Process Control", Yuichi Ohta and Hideyuki Tamura ed., "Mixed Reality", Section 19, pp.347-362, Springer-Verlag, 1999.

[国内発表]

- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: "慣性航法型VRシステム", 電気関係学会関西支部連合大会講演会講演予稿集, No.G19-14, pp.G432, (1995).
- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: "慣性航法型に基づくバックパックVRシステム", 1996年電子情報通信学会総合大会論文集, No.D-420, pp.208, (1996).
- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: "AR技術に基づくHMD装着型工業用検査システム", 第39回自動制御連合講演会前刷, No.3044, pp.359-360, (1996).
- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: "可搬型AR技術による工業用作業支援システム", 日本バーチャルリアリティ学会第1回大会論文集, pp.17-18, (1996).
- 和田 誠一郎, 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: "画像認識と強調現実感を組み合わせた卓上作業の支援環境", 第6回インテリジェントFAシンポジウム論文集, pp.115-116, (1997).
- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: "AR技術による工業用作業支援環境に関する考察", 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, pp.97-98, (1997).
- 和田 誠一郎, 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: "強調現実感による電子部品検査の作業支援環境", 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.217-218, (1998).

- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏:“装着型強調現実感装置によるマニュアルレス作業環境”, 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.313-314, (1998).

[共同研究]

- Ayumu Matani, Yoshihiro Ban, Osamu Oshiro and Kunihiro Chihara, “An application of a virtual reality technique to echocardiogram”, 2nd Joint Workshop on Multimedia Communications, pp.8-5-1-8-5-7, 1995.
- 真溪 歩, 伴 好弘, 大城 理, 千原 國宏:超音波3次元再構成動画像の人体上へのスーパーインポーズ, 第16回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集, pp.227-228, (1995).
- Ayumu Matani, Yoshihiro Ban, Osamu Oshiro and Kunihiro Chihara, “A system for Superimposing a 3-Dimensional Stereoscopic Motion Echo Image of the Heart onto the Chest”, Journal of Japan Applied Physics, Vol.35, No.B5, pp.3121-3125, 1996.
- Ayumu Matani, Yoshihiro Ban, Osamu Oshiro and Kunihiro Chihara, “A system for Superimposing a Medical Image Within the Subject”, 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, No.713, 1996.
- 真溪 歩, 伴 好弘, 金谷 一郎, 榎田 敏之, 陳, 大城 理, 山口 英, 砂原 秀樹, 千原國宏, 三神 大世, 北島 顕:“遠隔超音波診断システム”, 第2回岡山医用工学国際フォーラム論文集, p.33, (1997).
- 米村 隆, 和田 誠一郎, 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏:“携帯型コンピュータによる強調現実感空間の共有”, 第42回システム制御情報学会研究発表講演会, pp.333-334, (1998)
- 米村 隆, 和田 誠一郎, 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏:“携帯型コンピュータによる強調現実感空間の共有”, 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.307-308, (1998)

- 野田 真一, 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: “実時間計測による実像・CG像間での相互隠蔽可能な光学シースルー複合現実感”, 第4回知能情報メディアシンポジウム, pp.217-224, (1998)

[その他 (機材展示・実演)]

- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: “慣性航法に基づくバックパック型 ARシステム”, 関西計測プラザ産官学交流展示, (1996)
- 伴 好弘, 和田 誠一郎, 佐藤 宏介, 千原 國宏: “強調現実感による電子部品検査の作業支援環境”, 日本バーチャルリアリティ学会 第4回複合現実感研究会, (1998)
- 伴 好弘, 佐藤 宏介, 千原 國宏: ARバックパッカー: “強調現実感による背負型フィールド作業支援システム”, 日本バーチャルリアリティ学会 第4回複合現実感研究会, (1998)

[賞]

- Best Young Researcher Award: “AR backpacker for manufacturing and inspection.”, International Conference on Virtual System and Multimedia, 1996.