

エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文

題目： 拡張現実感とRFIDを用いた  
系統隔離作業支援システムの  
試作と実験評価

指導教官： 吉川 榮和 教授

氏名： 山崎 雄一郎

提出年月日： 平成16年2月5日(木)

# 目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 系統隔離作業の現状	3
2.2 拡張現実感	5
2.2.1 拡張現実感 (AR) とは	5
2.2.2 AR を用いた作業支援	5
2.2.3 AR システムを構成するための要素技術	8
2.2.4 ARToolkit	12
2.2.5 AR を用いて作業を支援する際の課題	13
2.3 RFID	13
2.4 本研究の目的と意義	14
第 3 章 拡張現実感と RFID を用いた系統隔離作業支援システム (ISSAR) の設計	15
3.1 ISSAR の要求仕様	15
3.2 概略設計	16
3.3 ISSAR のシステム構成	17
3.3.1 バルブ探索支援サブシステム	18
3.3.2 作業情報データベース	21
3.3.3 バルブ確認支援サブシステム	21
3.3.4 作業進捗管理サブシステム	22
3.3.5 システム構成のまとめ	22
3.4 インタフェース設計	23
3.4.1 ウェアラブル型 ISSAR	24
3.4.2 ハンドヘルド型 ISSAR	26
3.5 ISSAR インタフェース比較実験の計画	27
第 4 章 実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR の評価実験	28
4.1 実験の目的	28
4.2 実験用システムの開発	28

4.2.1	ハードウェア構成	28
4.2.2	ソフトウェア構成	32
4.3	実験方法	34
4.3.1	実験環境	34
4.3.2	タスク	35
4.3.3	評価指標と測定手法	38
4.3.4	実験手順の設計	43
4.3.5	実験の実施	48
4.4	実験結果	50
4.4.1	タスク完遂時間	50
4.4.2	エラー回数	52
4.4.3	フリッカーテスト	54
4.4.4	NASA-TLX	55
4.4.5	SART10-D	57
4.4.6	ユーザビリティテスト(レーティング項目)	59
4.4.7	ユーザビリティテスト(自由記述項目)	59
4.4.8	インタビュー	59
4.5	実験の考察	62
<b>第 5 章</b>	<b>原子力発電プラントの模擬的な環境における ISSAR の評価実験</b>	<b>66</b>
5.1	実験の目的	66
5.2	実験方針	66
5.3	実験用システムの開発	67
5.3.1	ハードウェア構成	67
5.3.2	ソフトウェア構成	72
5.4	実験方法	74
5.4.1	実験環境	74
5.4.2	タスク	77
5.4.3	評価指標	78
5.4.4	実験手順	80
5.4.5	実験の実施	82
5.5	SCOPO と Glasstron の比較実験(実験 A)の結果	83
5.5.1	タスク完遂時間	83
5.5.2	エラー回数	86
5.5.3	NASA-TLX	86

5.5.4 ユーザビリティテスト (レーティング項目) . . . . .	86
5.5.5 ユーザビリティテスト (自由記述項目) . . . . .	89
5.6 ハンドヘルド型 ISSAR とウェアラブル型 ISSAR の比較実験 (実験 B) の 結果 . . . . .	90
5.6.1 タスク完遂時間 . . . . .	90
5.6.2 エラー回数 . . . . .	91
5.6.3 NASA-TLX . . . . .	92
5.6.4 ユーザビリティテスト (レーティング項目) . . . . .	92
5.6.5 ユーザビリティテスト (自由記述項目) . . . . .	94
5.6.6 インタビュー結果 . . . . .	95
5.7 実験の考察 . . . . .	96
5.7.1 実験 A の考察 . . . . .	96
5.7.2 実験 B の考察 . . . . .	97
5.7.3 実験全体の考察 . . . . .	98
<b>第 6 章 結論</b>	<b>99</b>
<b>謝 辞</b>	<b>101</b>
<b>参 考 文 献</b>	<b>102</b>

# 目 次

2.1	作業指示書の例	3
2.2	系統隔離作業の流れ	4
2.3	拡張現実感の例	6
2.4	対象物の直感的理解	7
2.5	情報内容の容易な理解	7
2.6	ビデオシースルー方式	9
2.7	光学シースルー方式	9
2.8	ARToolKit のマーカ	12
2.9	ARToolKit を用いて構築した AR システムの例	12
2.10	RFID	13
3.1	AR を用いたバルブ指示のイメージ図	17
3.2	AR を用いた作業者の誘導のイメージ図	18
3.3	RFID を用いたバルブの正誤判定のイメージ図	18
3.4	AR を用いたバルブ探索支援サブシステムのイメージ図	19
3.5	作業対象バルブがカメラ撮影範囲内にある場合の情報提示	19
3.6	作業対象バルブがカメラ撮影範囲外にある場合の情報提示	19
3.7	RFID を用いたバルブ確認支援サブシステムのイメージ図	21
3.8	ISSAR のシステム構成図	23
3.9	ウェアラブル型 ISSAR のハードウェア構成	24
3.10	ウェアラブル型 ISSAR の操作インタフェース	25
3.11	ハンドヘルド型 ISSAR のハードウェア構成	26
4.1	Glasstron を用いた ISSAR の装着図	29
4.2	Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成図	29
4.3	SCOPO を用いた ISSAR の装着図	30
4.4	SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成図	31
4.5	DataGlass2 を用いた ISSAR の装着図	31
4.6	DataGlass2 を用いた ISSAR のハードウェア構成図	32
4.7	実験環境の概観	34
4.8	実験環境録画システム	35

4.9	実験環境の見取り図	36
4.10	バルブ発見時の指差し確認	36
4.11	ARシステムを用いた場合のタスク遂行手順	37
4.12	フリッカー測定器	39
4.13	日本語版 NASA-TLX プログラムの画面例	40
4.14	本実験で使用した SART10-D 回答表	42
4.15	作業工程カード	45
4.16	バルブ配置図	46
4.17	実験の流れ	48
4.18	各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差	51
4.19	各インタフェースのエラー回数の平均値と標準偏差	53
4.20	各インタフェースの CFF の変化値の平均と標準偏差	55
4.21	各インタフェース間の WWL 得点の比較	56
4.22	各インタフェース間の SART スコアの比較	59
4.23	質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評価値	60
5.1	SCOPO を用いた ISSAR の装着図	67
5.2	SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成図	68
5.3	Glasstron を用いた ISSAR の装着図	69
5.4	Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成図	70
5.5	携帯小型 TV を用いた ISSAR の装着図	71
5.6	携帯小型 TV を用いた ISSAR のハードウェア構成図	71
5.7	タブレット PC を用いた ISSAR の装着図	72
5.8	タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア構成図	72
5.9	実験環境の機器配置図	74
5.10	実験環境の概観	75
5.11	実験環境の見取り図	76
5.12	実験環境録画システム	76
5.13	ISSAR を用いた場合のタスク遂行手順	77
5.14	MGT 施設のバルブ配置図	78
5.15	原子力プラントの模擬環境における実験の流れ	81
5.16	実験 A の各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差	85
5.17	実験 A の各インタフェース間の WWL 得点の比較	87
5.18	質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評価値	89
5.19	実験 B の各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差	91

5.20 実験 B の各インタフェース間の WWL 得点の比較 . . . . .	94
5.21 質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評価値 . . . . .	95

# 表目次

3.1	3種類のHMDの特徴	25
4.1	Glasstronを用いた実験用ARシステムのハードウェア	30
4.2	SCOPOを用いたISSARのハードウェア	30
4.3	DataGlass2を用いたISSARのハードウェア	32
4.4	NASA-TLXの尺度とその説明	40
4.5	被験者が各タスクで使用するHMDとバルブ探索パターン	49
4.6	タスク完遂時間の測定結果(単位:秒)	51
4.7	エラー回数の測定結果(単位:回)	52
4.8	フリッカーテストの測定結果(1)(単位:Hz)	54
4.9	フリッカーテストの測定結果(2)(単位:Hz)	54
4.10	NASA-TLXの評定結果	56
4.11	GlasstronのSART10-D評定結果	57
4.12	SCOPOのSART10-D評定結果	57
4.13	DataGlass2のSART10-D評定結果	58
4.14	インタフェース別のSARTスコア	58
4.15	5つの質問項目の評定結果	60
4.16	Glasstronに関するユーザビリティテストの自由記述結果	61
4.17	SCOPOに関するユーザビリティテストの自由記述結果	61
4.18	DataGlass2に関するユーザビリティテストの自由記述結果	61
5.1	SCOPOを用いたISSARのハードウェア	69
5.2	Glasstronを用いたISSARのハードウェア	70
5.3	携帯小型TVを用いたISSARのハードウェア	71
5.4	タブレットPCを用いたISSARのハードウェア	73
5.5	各タスクで使用する情報提示デバイスとバルブ探索パターン	84
5.6	実験Aのタスク完遂時間の測定結果	85
5.7	実験AのNASA-TLXの評定結果	87
5.8	実験Aのユーザビリティテスト(レーティング項目)の評定結果	88
5.9	実験Bのタスク完遂時間の測定結果	90
5.10	実験BのNASA-TLXの評定結果	92

5.11 実験 B のユーザビリティテスト (レーティング項目) の評価結果 . . . . .	93
--	----

# 第 1 章 序論

近年の地球温暖化問題を背景に、CO<sub>2</sub> 排出が少なく安定して電気エネルギーを生産できる原子力発電がますます重要な役割を担うようになってきている。しかし、原子力発電プラントでは、ひとたび大きな事故が起きると周囲の住人や環境に与える影響が計り知れないため、安全性と信頼性のさらなる向上を目指して運転と保守の両分野において様々な対策が行われている。一方、近年の電力自由化の流れの中で、原子力発電プラントは経済性の向上も求められるようになってきており、安全性と信頼性を確保した上で効率の良い運用が必要とされている。

わが国では、原子力発電プラントは約 12ヶ月に 1 度、定期点検することが義務づけられており、長期間に渡りプラントを停止して大規模な分解・点検を行っている。しかし、同出力の火力発電所に比べて、原子力発電プラントの構成機器の数は非常に多く、プラントのシステムが複雑化しているため、保守点検に係わる作業量が膨大なものとなっている。原子力発電プラントの効率の良い運用のためには、定期点検作業の効率化による期間短縮や省力化が必要である。さらに、近年の原子力発電プラントでは、熟練作業者の高齢化が進んでおり、若手作業員への技術ノウハウの継承が問題となっている。また、原子力発電プラントの設備が高度化する中、保守点検の対象が複雑化しており作業が難しくなっているため、経験の少ない作業員のヒューマンエラーをいかに防止するかが課題となっている。

このように、原子力発電プラントの継続的な信頼性や安全性の向上、保守作業の効率化やコスト削減が求められる中で、それらの課題を解決するためには、プラント構成機器の高度化だけでなく、プラントを運転・保守する人間とプラントの間に存在するヒューマンマシンシステム (HMS) の高度化が必要であると考えられる。

一方、近年注目を集めている新しいヒューマンインタフェース技術として、拡張現実感 (Augmented Reality: AR) と RFID (Radio Frequency Identification: RFID) がある。拡張現実感とは現実世界に仮想世界を重ね表示する技術であり、ユーザに直感的な情報提示を行うことができる技術である。RFID は無線通信により RFID タグとリーダーの間で情報通信を行う技術であり、非接触で様々な物体を自動認識・自動識別できる技術である。これらの技術は近年になって実用化のための研究開発が盛んに行われており、原子力発電プラントにおける保守作業の支援に適用することにより、作業効率の向上、ヒューマンエラーの低減が可能になると期待される。

そこで本研究では、原子力発電プラントの保守点検における主要な作業の一つである系統隔離作業を対象に、拡張現実感と RFID を用いた作業支援システム (Isolation

Support System using AR and RFID: ISSAR) の開発・評価を行う。特に本研究では ISSAR を開発するにあたり、作業員への情報提示に様々な形態のデバイスを使用することが考えられる点に注目し、ウェアラブル型およびハンドヘルド型の情報提示デバイスを持つ複数の ISSAR を設計・試作する。そして、それぞれの情報提示デバイスを用いる場合の作業効率や作業負荷、ユーザビリティ等を計測する被験者実験を行うことにより ISSAR の最適なインタフェース形態を模索する。

系統隔離作業では、保守作業者が紙に書かれた作業指示を頼りにプラント内の膨大な数のバルブの中から系統隔離に必要なバルブを見つけ出して操作する作業が行われている。しかし、紙に書かれた作業指示を頼りにした作業では、バルブを間違える、作業現場にたどり着くまでに時間がかかる、作業の順番を間違える等のヒューマンエラーが起こりやすいという問題がある。拡張現実感を用いて作業員に対して作業現場までのナビゲーションや作業対象バルブの指示等を行い、RFID を用いて作業対象バルブの正誤確認を自動的に行うことを可能にすれば、系統隔離作業におけるこれらの問題を解決できると期待される。

本論文は、第1章の序論を含め、6章で構成されている。第2章では、系統隔離作業の現状と問題点について述べ、拡張現実感とRFIDの各技術の現状について述べる。そして本研究の目的と意義を述べる。第3章では、拡張現実感とRFIDを用いた系統隔離作業支援システム (ISSAR) の設計について述べる。第4章では第3章で述べた設計に従って試作したウェアラブル型の ISSAR について述べ、その後、試作したウェアラブル型の ISSAR を用いて実験室環境で行った評価実験について述べる。第5章では、第4章で行った評価実験の結果をもとに設計を見直して試作したウェアラブル型およびハンドヘルド型の ISSAR について述べ、その後、試作したウェアラブル型およびハンドヘルド型の ISSAR を用いて模擬プラント環境で行った評価実験について述べる。第6章では、本研究の結果をまとめ、今後の課題を述べる。

## 第 2 章 研究の背景と目的

本章ではまず、本研究が支援対象とする系統隔離作業の現状とその問題点について述べる。次いで、本研究に関連する技術とその応用例について述べる。最後に本研究の目的について述べる。

### 2.1 系統隔離作業の現状

わが国の原子力発電プラントでは、安全性と信頼性の確保のために約 12ヶ月に 1 度の定期点検が義務付けられている。

原子力発電プラントの機器、設備に対する保守作業は、「系統隔離」、「分解前のデータ採取」、「分解」、「点検・検査」、「部品交換」、「組み立て」、「単体動作確認」、「系統インサースビス」、「機能確認試験」が標準的な作業ステップになっている<sup>[1]</sup>。定期点検中も燃料の崩壊熱を除去するために、燃料冷却系統など設備の一部は稼働状態にあるため、保守点検の際には、この燃料冷却系統を作動させながら、保守点検する設備、機器の系統を隔離する必要がある。系統隔離作業は作業安全と燃料の冷却確保の面から行う必要があり、設備に対する広範囲な専門知識が要求される。

系統隔離作業では、保守作業センタの系統隔離作業支援ワークステーションから出力される作業指示書に従って、保守作業者が操作対象のバルブを順に見つけ出し操作する。作業指示書には、図 2.1 に示すように、作業対象となるバルブの識別 ID と作業前の状態、作業内容、作業実績の記入欄が並んでいる。

機器番号	機器名称	作業前	作業後	確認
V-21452	空気乾燥機制御電源	入	切	レ
V-35421	空気圧縮機制御電源	入	切	レ
V-12541	冷却機制御電源	入	切	レ
N-23544	NDR-1 制御電源	入	切	レ
T-21414	T-3 制御電源	入	切	レ
V-32541	空気乾燥機入口弁	○	×	レ
V-4524	空気乾燥機出口弁	○	×	
V-32125	空気圧縮機入口弁	○	○	
V-84214	空気圧縮機出口弁	×	○	
V-32445	冷却機入口弁	○	×	
V-4152D	冷却機出口弁	○	×	

図 2.1: 作業指示書の例

保守作業者は、保守作業センタの系統隔離作業支援ワークステーションから作業指

示書を入手した後、作業指示書を参照しながら、図 2.2 に示すように、以下の一連の作業を繰り返す。

- (1) 作業指示書に従い隔離対象機器の付近へ移動する。
- (2) 作業対象となるバルブを識別 ID をもとに探す。
- (3) 実際のバルブの状態と作業指示書に記載されている状態が同じであることを確認した後にバルブを操作する。
- (4) 作業実績を作業指示書に記入する。

全行程の終了後は作業実績を系統隔離作業支援ワークステーションへ入力する。

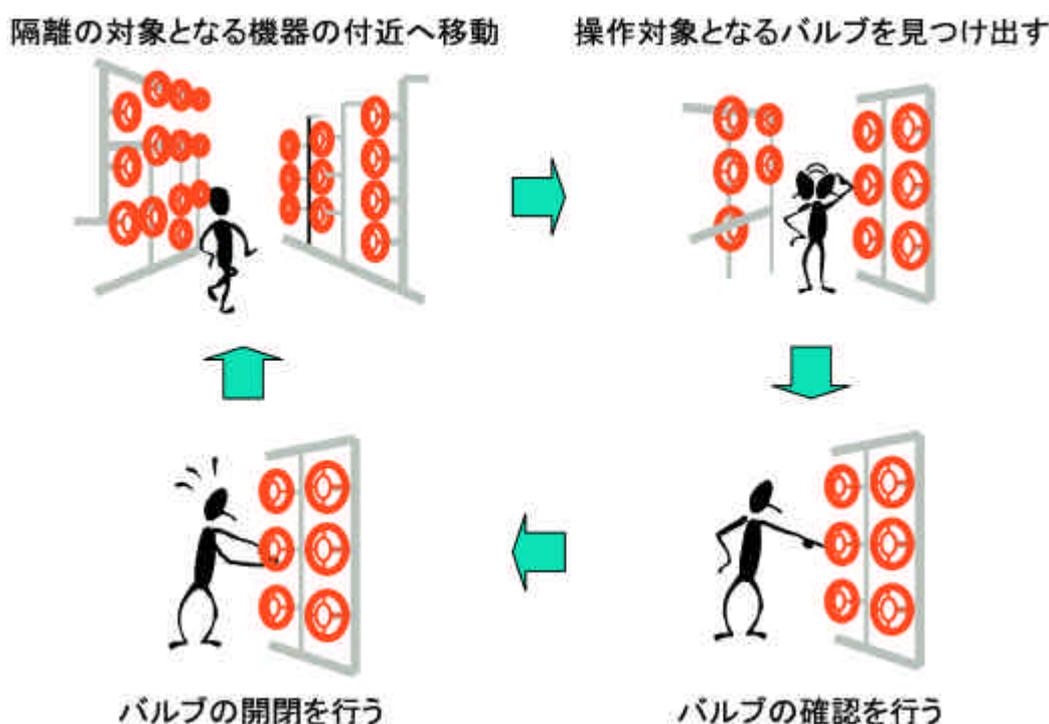


図 2.2: 系統隔離作業の流れ

このような系統隔離作業には以下のような問題点が指摘されている。

1. プラント内のバルブは英数字で構成される ID を持つが、一般に ID の文字数は多く、保守作業者が作業指示書に記載されたバルブの ID に従ってバルブを探索する際に、数字や英字を見間違えることがある。
2. プラント内には同じような色や形のバルブが多数存在し、また、それらが密集して存在する場合があるため、作業対象のバルブの近接のバルブを操作してしまうことがある。

3. 原子力発電プラントの内部は広大で複雑に入り組んでいるため、作業対象にたどり着くまでに時間がかかる。また、間違った場所にたどり着いてしまう場合がある。
4. バルブを探し出して操作するという作業を繰り返し行う内に、一つ一つの作業に対して注意力が低下する場合がある。

このように、系統隔離作業では作業効率の向上とヒューマンエラーの低減が課題となっている。これらの課題を解決するためにはプラントの機器構成の高度化だけではなく、保守作業者とプラントの間に存在するヒューマンマシンインタフェースシステム(HMS)の高度化が必要である<sup>[2]</sup>。

## 2.2 拡張現実感

前節で述べたように、系統隔離作業には多くの問題がある。この問題を解決する1つの方策として、拡張現実感を用いた作業支援システムを導入することが考えられる。本節では拡張現実感の概要を説明した後、前述した系統隔離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。なお、既存の拡張現実感を用いた作業支援システムの例については付録Aで述べる。

### 2.2.1 拡張現実感 (AR) とは

Azumaらは拡張現実感(AR)とは「現実空間をベースに、空間および空間上に存在するものの持つ意味を拡張して、そこにはないものや情報を付加する技術」と定義している<sup>[3]</sup>。

図2.3にARの例を示す。これは、ビルや美術館などの観光情報を、直接その建物に重ねて表示している。

仮想現実感(Virtual Reality: VR)が計算機などの人工的な手段を用いて生成された仮想世界のみに着目しているのに対して、ARは現実世界をベースに、仮想情報を加えて現実世界を増強・拡張する。それによって、現実世界のみでは得られないような種々の応用が可能である。例えば、機械の保守作業を支援するために操作すべき部品的位置を指示したり、機器の内部構造の情報等を表示することができる。このように、実世界では不可視な情報を拡張現実としてユーザに提示することによって、ユーザの作業を支援する研究が盛んに行われている。

### 2.2.2 ARを用いた作業支援

製造業分野や医療分野、軍事分野など様々な分野において、ARを用いて作業を支援する研究が行われている。一般にARを用いた作業支援には以下のような特徴がある。



図 2.3: 拡張現実感の例

### 1. 対象物の直感的理解が可能

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

### 2. 情報内容の容易な理解が可能

提示情報は、文字だけでなく絵を用いても表現できるため、ユーザは情報の内容を容易かつ即座に理解できる。例えば、図 2.5 のように、レバーを上げる操作では、文字のみの情報では、ユーザはレバーを動かす方向を全ての文字を読んで理解する必要がある。一方、情報の内容を矢印で表現した場合は、矢印を見たユーザは即座にレバーを移動させる方向を理解することが可能である。また、文字のみの情報では意味が不明確になる場合があり、情報の本来の意味とユーザの解釈が一致していない可能性もある。しかし、文字と絵を併用することで、文字の情報を明確化することができる。

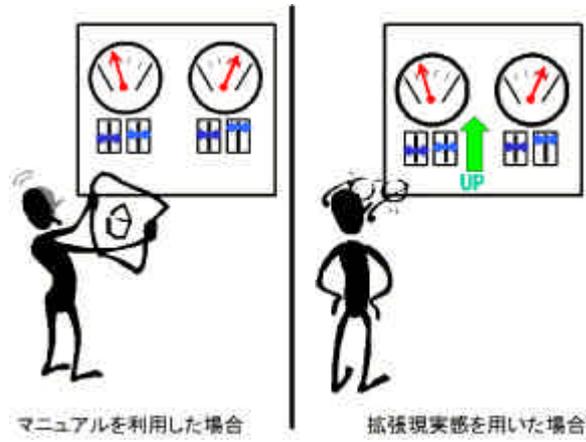


図 2.4: 対象物の直感的理解

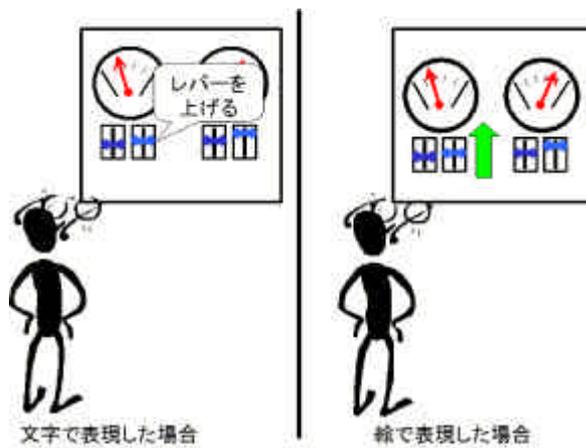


図 2.5: 情報内容の容易な理解

### 2.2.3 ARシステムを構成するための要素技術

本項ではARシステムを実現するために特に重要な情報提示技術、トラッキング技術、レジストレーション技術、キャリブレーション技術の各技術について説明する。

#### (A) 情報提示技術

ARシステムにおける情報提示としては、視覚に提示を行うのが最も一般的である。ARシステムの視覚への情報提示は以下の3つの方法に大別される。

- (a) ヘッドマウントディスプレイ (Head-Mounted Display: HMD) を用いる方法
- (b) ハンドヘルドディスプレイを用いる方法
- (c) 実環境に仮想現実像を直接投影する方法

以下に、それぞれの情報提示方法の概要と、その方法を用いたARシステムの研究例について述べる。

#### (a) HMDを用いる方法

HMDはVRシステムでよく用いられる情報提示デバイスである。一般的にVRシステムで用いられる遮へい型のHMDは使用時に外部の様子が全く見えなくなるため、VR空間に没入できるという特徴がある。一般に、HMDを用いたARシステムの情報提示方式には、ビデオシースルー方式と光学シースルー方式がある。ビデオシースルー方式とは、図2.6に示すように、現実世界の環境をCCDカメラ等でコンピュータに一旦取り込み、取り込んだ現実世界像にコンピュータ上で仮想世界像を重畳した画像を非透過型ディスプレイに提示する方式である。ビデオシースルー方式は次のような特徴をもつ。

- 現実世界像と仮想現実像の位置合わせが行いやすい
- 実際の視点と提示される映像の視点がずれる
- 提示映像に時間遅れがある
- 解像度に限界がある

一方、光学シースルー方式とは、図2.7に示すように、透過型のディスプレイ越しに現実世界像を直接視認し、必要な部分に仮想世界像を表示する方式である。これは網膜上で現実世界と仮想世界を融合していると言える。光学シースルー方式は次のような特徴をもつ。

- 現実世界像に対して視点のずれがない
- 現実世界像に時間遅れが無い

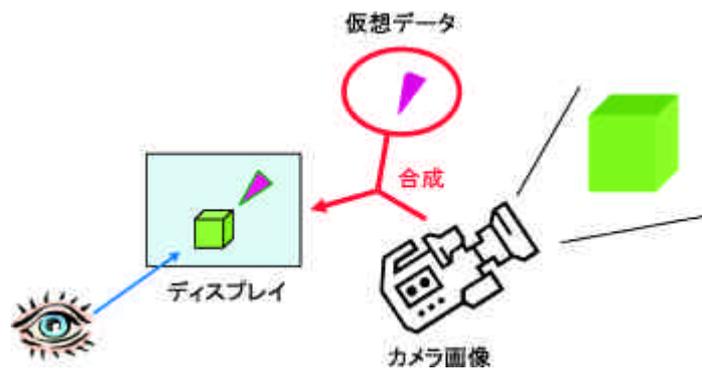


図 2.6: ビデオシースルー方式

- ユーザの焦点と提示情報の焦点を合わせるのが難しい
- 現実世界像を仮想データによって隠微することが難しい

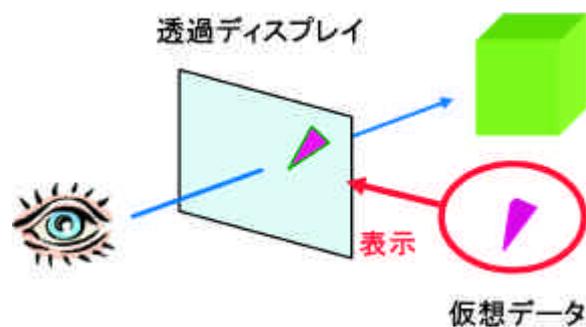


図 2.7: 光学シースルー方式

(b) ハンドヘルドディスプレイを用いる方法

近年のコンピュータの軽量・小型化により、携帯電話やPDAなどの携帯して持ち歩くことができるハンドヘルド型のコンピュータが普及してきている。ARシステムを実現するための情報提示デバイスとして、PDAやタブレットPCなどのハンドヘルドディスプレイを用いる方法がある。

(c) 実環境に仮想現実像を直接投影する方法

実環境に仮想現実像を直接投影する方法ではプロジェクタの映像やレーザ光を対象物体上に投影する<sup>[4][5]</sup>。本研究では、この情報提示方法を用いたARシステムを投影型ARシステムと呼ぶ。

HMDを用いたARシステムは、ウェアラブルであるため動き回りやすいこと、両手が自由であることが長所であるが、光学シースルー方式の場合の位置合わせが難しい。また、コストが他のARシステムに比べて高い。ハンドヘルドディスプレイを用いたARシステムは、取り扱いやすく、表示も見やすいこと、他のARシステムに比べて低コストであることが長所であるが、手に持つ必要があるため、作業の邪魔になる可能性がある。投影型のARシステムは高精度な重畳表示が可能なこと、ユーザが機器を装着する必要が無いことが長所であるが、作業範囲が投影設備によって限定されるため、歩き回る作業の支援はできない。

## (B) トラッキング技術

ARシステムでは、ユーザの動きに応じて、仮想現実像を適切な位置に描画し続ける必要がある。そのためには、ユーザの3次元的な位置と方向が実時間に分かっているなければならない。後述する各種センサから得られた情報をもとに、ユーザの位置と姿勢を実時間に計算することをトラッキングという。現在までに様々なトラッキング手法が研究開発されており、ARシステムやVRシステムに適用されている<sup>[6]</sup>。以下に、トラッキングで代表的な手法について説明する。

- ジャイロセンサ

ジャイロセンサは角速度を計測するセンサである。角速度を時間積分することにより回転角度を得られるが、これには誤差蓄積によるドリフトを伴う。

- 加速度センサ

加速度センサは加速度を検出する。出力を時間積分すれば速度、さらに積分すれば位置が得られる。一般に加速度センサは温度などの環境要因によって感度変動やオフセット変動がある。また、蓄積するノイズの影響が大きいため、加速度センサのみを用いて長時間に渡り位置を算出するのは難しい。

- 磁気センサ

トランスミッタから発生する球状の磁気を利用して、3次元の位置と角度を計測する。POLHEMUS社のFASTRAKの場合、計測誤差は位置が0.8mm、角度が0.15°と高精度ではあるが、計測範囲に金属や電子機器など磁場を乱す要因があれば計測結果に誤差が生じる。

- DGPS(Differential Global Positioning System)

GPS衛星からの電波信号を受信し経度・緯度情報を得る。衛星からの信号に加えて、地上の基準局から誤差修正信号を受信することで、正確な位置を得られる。

精度は電波状態に大きく左右される。電波状態が良好であれば、10cm オーダーの精度が得られるが、環境によっては誤差が数 m から 10 数 m になる場合がある。一般に屋内での使用は困難である。

- ビジョンセンサ

ユーザの頭部に固定したカメラを用いて得た画像を解析し、認識した特徴点の位置からユーザの位置と姿勢を推定する方法で、様々なアルゴリズムが考案されている。これはマーカを用いる方法とマーカを用いない方法に大別される。マーカを用いる方法では、環境に既知の形状を持つマーカを設置しておき、それらのマーカをカメラ撮影して得られた画像を処理することによりユーザの位置姿勢を計算する。マーカトラッキングは、以下の処理を行う。

1. 画像取得

カメラ画像を取得する。

2. マーカ抽出

カメラ画像からマーカを抽出する。

3. マーカ識別

マーカの種類を識別する。

4. マーカ位置計算

カメラ画像におけるマーカの位置から、実空間におけるマーカとカメラの3次元の位置関係を計算する。

マーカを用いない方法には、周辺環境の自然特徴点やエッジを抽出して追跡する方法や、複数のカメラを用いて深度を得る方法などがある。

トラッキングの精度を上げるために、上述したトラッキング手法や他の手法を組み合わせる方法も研究されている<sup>[7][8]</sup>。この手法はハイブリッドトラッキングと呼ばれる。

### (C) レジストレーション

レジストレーションとは、トラッキングと後述するキャリブレーションの結果から仮想世界と現実世界の整合をとり、ディスプレイ上の適切な表示位置を計算することである。光学シースルー方式のARシステムでは、現実環境の表示対象に仮想現実像が正確に重畳することを指し、ビデオシースルー方式のARシステムでは、一旦コンピュータに取り込まれた現実世界像の中の表示対象に正確に仮想現実像が重畳することを意味する。

正確なレジストレーションを行うためには、トラッキングと後述するキャリブレーションを正確に行わなくてはならない。

## (D) キャリブレーション

正確なレジストレーションと正確なトラッキングを行うために、カメラレンズのゆがみや、HMD とカメラの位置関係、ユーザごとの両眼間距離や焦点距離などのパラメータを前もって評価し、システムの動作を補正しておくことをキャリブレーションという。

特に、カメラのゆがみや焦点距離の評価を行うカメラキャリブレーションとディスプレイと目の位置関係を評価するディスプレイキャリブレーションが重要である。

### 2.2.4 ARToolKit

ARToolKit は図 2.8 に示す黒色正方形マーカ上に 3 次元仮想オブジェクトを重畳表示する AR システム構築用ライブラリである<sup>[9][10]</sup>。情報端末と USB カメラ、ディスプレイがあれば ARToolKit を利用して容易に AR システムを構築できる。



図 2.8: ARToolKit のマーカ

ARToolKit ライブラリを用いれば、マーカトラッキング、表示位置計算、描画、キャリブレーションなどを行うことができる。また、図 2.8 に示すような、マーカの登録も容易に行うことができる。図 2.9 に ARToolKit を用いて構築された AR システムの例を示す<sup>[11]</sup>。ARToolKit の詳細については付録 B で述べる。



図 2.9: ARToolKit を用いて構築した AR システムの例

## 2.2.5 ARを用いて作業を支援する際の課題

ARを用いた作業支援システムを実用的なものにするには様々な課題を克服しなければならない。その中でも特に重要なものにインタフェースの問題がある。ARを用いた作業支援の先行研究には既に様々なものがあるが、それらの大半はトラッキングなどの要素技術の追求を目的としている。ARを用いた作業支援システムは仮想現実をユーザの視界に重畳表示して、通常ではありえない視界環境を提供して、複雑な作業を支援することを目的とする以上、ユーザがその環境を違和感無く知覚し、簡単に扱えるようにしなければならない。ARシステムのインタフェースに関する研究は、「レジストレーション精度をどの程度まで上げるべきか」や「表示の時間遅れはどの程度まで小さくしなければならないか」というようなものが最も多いが、ARシステムのインタフェースをユーザビリティの観点から取り扱った研究例は少なく、幅広い分野において一層の研究が望まれている。

## 2.3 RFID

近年、非接触型フリーパス乗車システムや電子マネーなど、RFIDタグが組み込まれたカードの利用が増えてきている。RFIDシステムでは、図2.10のように、数ミリ～数センチ程度の大きさのRFIDタグにデータを記録し、その内容を電波や電磁波などの無線通信によって読み書きを行う。



図 2.10: RFID

従来の自動認識技術であるバーコードと、RFIDタグを比べると、バーコードが目に見える線をリーダを近接させて読み取ることにより、IDやデータを取得するのに対し、RFIDタグには、目に見える線が不要、障害物があっても読み取り可能、IDやデータの読み書きが自由に行えるという利点がある。

RFIDタグには、電池を内蔵するアクティブ・タグと非内蔵型のパッシブ・タグの2種類がある。アクティブ・タグは、内蔵された電池のエネルギーで、リーダとのデータ

送受信を行う。電源を内蔵するため交信距離を伸ばすことができる長所があるが、電池を内蔵する以上、小型化に限界がある。また、パッシブ・タグに比べて価格が高いことや、電池の寿命の問題がある。一方、パッシブ・タグは、電力の供給はリーダーからタグへ供給される。タグは、ICおよびアンテナのみを備え、起動後にリーダーと相互通信を行う。交信距離は短い、小型、薄型、低価格という長所があり、現在主流となっている。また、タグの形状には、トレーサビリティ<sup>[12]</sup>で使用することが多いラベル型やSuica<sup>[13]</sup>やEdyなどのカード型のほか、コイン型、スティック型などの形状がある。

RFID技術を用いた研究例としては、郵政総合研究所での郵便処理システムの開発が挙げられる<sup>[14]</sup>。現在、郵便局での小包引き受けから配達までの作業は必要情報の入力処理や区分け処理に膨大な時間を費やしているが、このシステムではRFIDが非接触で自動的にRFIDタグの情報を読み書きできること、また複数のタグを同時に読取ることができる特徴などを利用することで、短時間で正確に各処理を行うことができると期待されている。

このように、RFID技術は作業支援を行うための新しいヒューマンインタフェースとして様々な応用が期待されている。

## 2.4 本研究の目的と意義

系統隔離作業の作業効率の向上とヒューマンエラーの低減を目指すにあたり、本研究では、ARシステムによってユーザに直感的な情報提示が可能であるという点と、RFIDによって非接触に情報を読み書きできるという点に着目し、拡張現実感とRFIDを用いた系統隔離作業支援システム (Isolation Support System using AR and RFID: ISSAR) を提案する。

ISSARを設計するにあたり、作業員への情報提示や情報入力に用いるインタフェースには様々な形態が考えられる。実用的なシステムを開発するためにはISSARの様々なインタフェースを、作業効率や正確性、ユーザビリティなどの観点から比較評価する必要がある。

すなわち、ISSARを試作し、被験者実験を通して各種インタフェースを比較評価することを本研究の目的とする。

拡張現実感を用いた作業支援の先行研究には既に様々なものがあるが、それらは要素技術の追求を目的としており、原子力発電プラントの保守作業支援を行うARシステムのインタフェースをユーザビリティやワークロードの観点から比較評価した例は無いため、本研究によって得られる知見は、今後実際に作業支援システムを開発する場合に設計の指針になると考えられる。

## 第 3 章 拡張現実感と RFID を用いた系統隔離作業支援システム (ISSAR) の設計

本章では、まず、現在の系統隔離作業における課題をもとに策定した ISSAR の要求仕様および、ISSAR を開発するにあたり制約となる条件について述べる。次いで、策定した要求仕様をもとに設計した ISSAR の概略について述べる。その後、ISSAR を構成する各種サブシステムについて述べる。

### 3.1 ISSAR の要求仕様

本研究で提案する ISSAR は、原子力発電プラントの定期点検における系統隔離作業の支援を目指したものである。具体的には ISSAR を導入することによって、次の 2 つを実現することを目標としている。

- 作業効率の向上
- ヒューマンエラーの低減

第 2 章で述べた系統隔離作業の課題を踏まえ、上記の目標を実現するために ISSAR に必要とされる要求仕様を次のように定める。

#### (A) どのバルブが作業対象のバルブかを作業者に提示する機能を持つ

作業者がバルブの識別 ID タグを見なくても作業対象のバルブを見つけられるように指示する。これにより、バルブに添付された識別 ID と、作業指示書に記載された識別 ID を照合する必要がなくなるため、作業時間を短縮できると予想される。また、識別 ID の読み間違いや記憶間違いがなくなるため、ヒューマンエラーが低減できると期待される。

#### (B) 作業対象バルブがある場所まで作業者を誘導する機能を持つ

迷わずに作業対象バルブのある場所までたどり着けるように、作業対象バルブが作業者から見てどの方向にあるのかを提示する。現在の場所から作業位置まで迷わずに移動できるため、最短経路で移動できるようになり、移動時間が短縮できると予想される。

#### (C) 操作しようとしたバルブが間違っていないかを作業者に提示する

作業者が正しいバルブを操作しようとした場合は正しいということを、間違っ  
たバルブを操作しようとした場合は間違っていることを作業者に伝える。これに  
より、ヒューマンエラーが低減できると期待される。

本研究では、ISSAR を設計するにあたり、以下の制約条件があるものとする。

- (a) 提示された情報を作業者が理解する際に高い注意を要するものであってはならない  
提示された情報の理解が難しく注意を要するものであれば、実際の作業に対す  
る注意力が低下し、作業効率の低下を招くばかりでなく、ヒューマンエラーの原  
因になる可能性がある。従って作業者に提示する情報は理解が容易である必要が  
ある。
- (b) 作業者の身体的な動きを大きく制限してはならない  
身体的な動きの制限が作業に支障をきたす程に大きければ、作業効率の低下を  
招くばかりでなく、ヒューマンエラーの原因になる可能性がある。
- (c) 操作が複雑であってはならない  
支援システムの使用にあたって複雑な操作が必要であれば、作業者がその操作  
に集中してしまい、作業自体に対する集中力が低下し、作業効率の低下を招くば  
かりでなく、ヒューマンエラーを誘発する可能性がある。
- (d) 作業者の移動範囲を限定しない  
系統隔離作業は広範囲を歩き回るため、移動範囲を限定してはならない。

## 3.2 概略設計

3.1 節で述べた要求仕様と制約条件を踏まえて、作業支援システムを以下の機能で構  
成する。

### (a) バルブ指示機能

AR を用いて仮想オブジェクトを作業者の視界に重畳表示することにより、作  
業対象のバルブを目立たせる。これにより、3.1 節で述べた要求仕様 (A) 満たし、  
制約条件 (a) を満たす。以降、この仮想オブジェクトを「バルブ指示オブジェク  
ト」と呼ぶ。

### (b) ナビゲーション機能

AR を用いて、作業対象のバルブのある方向を指し示す仮想オブジェクトを作業者の視界に表示する。これにより、3.1 節で述べた要求仕様 (B) 満たし、制約条件 (a) を満たす。以降、この仮想オブジェクトを「方向指示オブジェクト」と呼ぶ。

(c) バルブ自動確認機能

プラント内にある全てのバルブにバルブの識別 ID を記録した RFID タグを予め添付しておき、作業者のバルブ操作時に自動的に RFID タグから識別 ID を読み取り、操作しようとしているバルブが正しいかどうかの確認を行う。これにより、3.1 節で述べた要求仕様 (C) 満たし、制約条件 (c) を満たす。

(d) 作業進ちょく管理機能

ISSAR の作業支援の進行を管理する。作業者の操作をインタフェースを介してシステムに反映し、システムが支援対象とするバルブの変更を行う。

(e) データベース機能

上記の (a) から (d) の機能を実現するために必要なバルブの識別 ID と位置情報、作業を行う順番を格納した作業情報データベース

図 3.1 に AR を用いたバルブ指示、図 3.2 に AR を用いた作業者の誘導、図 3.3 に RFID を用いたバルブ正誤判定のイメージ図を示す。

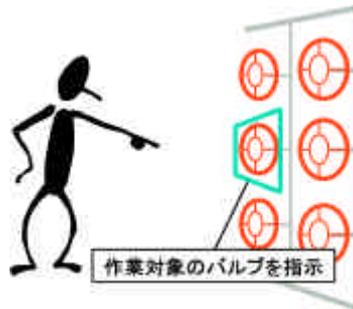


図 3.1: AR を用いたバルブ指示のイメージ図

### 3.3 ISSAR のシステム構成

ISSAR は、以下のように 3 つのサブシステムと 1 つのデータベースで構成される。

- (1) AR を用いたバルブ探索支援サブシステム
- (2) 作業情報データベース

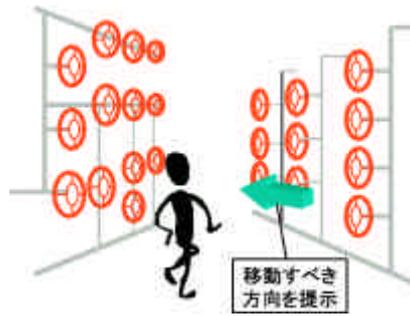


図 3.2: AR を用いた作業者の誘導のイメージ図

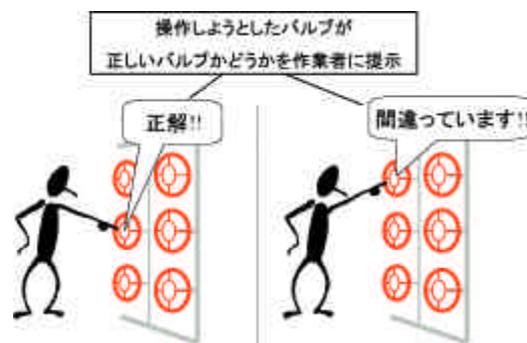


図 3.3: RFID を用いたバルブの正誤判定のイメージ図

- (3) RFID を用いたバルブ確認支援サブシステム
- (4) 作業進捗管理サブシステム

以下にそれぞれのサブシステムとデータベースについて述べる。

### 3.3.1 バルブ探索支援サブシステム

AR を用いたバルブ探索支援サブシステムは、作業者の前方を撮影する小型 CCD カメラと作業者に情報提示するためのディスプレイ、ノート PC によって構成され、図 3.4 に示すように AR によって操作すべきバルブを直感的に提示して作業者を支援する。

バルブ探索支援サブシステムは作業者の視界に作業対象のバルブがあればその位置を指示し、作業者の視界になければ移動すべき方向を示す。図 3.5 に示すように、カメラ撮影範囲内に作業対象バルブが入っていれば、バルブ指示オブジェクトを作業対象バルブに重畳して表示する。図 3.6 に示すように、カメラ撮影範囲内に作業対象バルブが入っていなければ、方向指示オブジェクトをマーカ上に表示する。AR を用いたバルブ探索支援サブシステムは以下の機能で実現する。

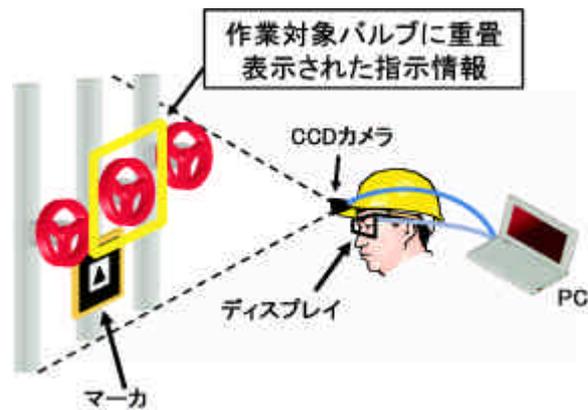


図 3.4: AR を用いたバルブ探索支援サブシステムのイメージ図



図 3.5: 作業対象バルブがカメラ撮影範囲内にある場合の情報提示



図 3.6: 作業対象バルブがカメラ撮影範囲外にある場合の情報提示

#### (1) トラッキング機能

第2章で述べたように、ARシステムでは作業者の3次元的位置と姿勢を実時間的に計測する必要がある。本研究では、第2章に述べたトラッキング手法の中で、構築が容易で精度も良いマーカトラッキングを用いる。すなわち、バルブ操作を行う作業環境内に種類と位置が既知のマーカを予め貼り付けておき、作業者の前方を撮影する小型 CCD カメラで撮影した画像を処理することにより、マーカと作業者の相対的な3次元位置関係を求める。これによりプラント内での作業者の3次元位置を実時間的に知ることができる。

#### (2) キャリブレーション機能

正確な位置に作業者に提示する情報を表示するためには、作業者の前方を撮影するカメラのレンズの歪みや、ディスプレイとカメラの位置関係、ユーザごとの両眼間距離や焦点距離などの特性を前もって計測する必要がある。キャリブレーション機能は作業を行う前にそれらのパラメータを計測し、システムを補正する。

#### (3) 表示位置計算機能

表示位置計算機能は、バルブ指示オブジェクト、もしくは方向指示オブジェクトのディスプレイ上の表示位置を計算する。

具体的には以下の処理を行う。

STEP 1 (1)のトラッキング結果と作業情報データベースから得られる作業対象バルブの位置情報から、実空間における作業者と作業対象バルブの相対的な3次元位置関係を計算する。

STEP 2 カメラと作業対象バルブの相対的な3次元位置とカメラの画角から、カメラ撮影範囲内に作業対象バルブが入るかどうかを判別する。

STEP 3 カメラ撮影範囲内に作業対象バルブが入っていれば、上述(2)でのキャリブレーション結果の情報とSTEP 1で求めたバルブと保守作業員の相対的な位置情報を用いて、作業者の視界内にあるバルブの上にバルブ指示オブジェクトを重畳表示させるためのディスプレイ上での表示位置を求める。

STEP 4 カメラ撮影範囲内に作業対象バルブが入っていなければ、上述(2)でのキャリブレーション結果の情報とSTEP 1で求めたバルブと保守作業員の相対的な位置情報を用いて、作業者の視界内にあるマーカの上に方向指示オブジェクトを重畳表示させるためのディスプレイ上での表示位置を求める。

#### (4) 情報提示機能

表示位置計算機能で計算された表示位置に、状況に応じてバルブ指示オブジェクト、もしくは方向指示オブジェクトを表示する。

上述した(1)トラッキング機能、(2)キャリブレーション機能の開発は、加藤らによって提供されているARToolKitライブラリを用いて行う。

### 3.3.2 作業情報データベース

作業情報データベースが格納する情報を以下に示す。

- 作業の順番と識別 ID  
それぞれのバルブが操作される順番にバルブの識別 ID を並べて格納する。
- バルブの位置・姿勢  
全てのバルブの位置と姿勢 (6 パラメータ) を、それぞれの ID と対応付けて格納する。実空間で基準となる座標系を設定し、その座標系で全てのバルブの位置、姿勢を登録する。
- マーカ識別用パターン  
マーカトラッキングでは、1つのマーカでトラッキングできる範囲は限られているため、マーカを複数用いるが、そのため複数のマーカを識別する必要がある。ARToolKit のマーカ登録プログラムによって登録したマーカのパターンファイルを格納し、それぞれに ID 番号を振って対応付ける。
- マーカの位置・姿勢  
全てのマーカの位置と姿勢 (6 パラメータ) をマーカ ID と対応付けて格納する。バルブの位置・姿勢と同様の基準座標系において、マーカの位置と姿勢を登録する。

### 3.3.3 バルブ確認支援サブシステム

図 3.7 に、RFID を用いたバルブ確認支援サブシステムのイメージ図を示す。

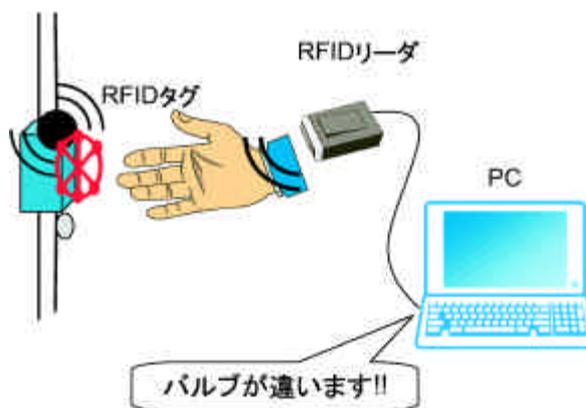


図 3.7: RFID を用いたバルブ確認支援サブシステムのイメージ図

バルブ確認支援サブシステムの動作の流れを以下に示す。

1. 作業者がバルブの前に手を伸ばす。

2. 手に装備した RFID リーダが RFID タグのバルブ識別 ID を読み取る。
3. 読み取ったバルブ識別 ID を PC に送る。
4. 作業情報データベースをもとに作業対象バルブであるかどうかの正誤判定を行う。
5. 正誤判定結果を作業者に提示する。

バルブ確認支援サブシステムは以下の機能で構成する。

(1) RFID タグ読み取り機能

バルブに貼り付けられた RFID タグに記録されているバルブ識別 ID を、作業者が装備したリーダを用いて読み取り、その情報を PC に送る。

(2) 正誤判定機能

事前に作成された作業情報データベースをもとに、作業者が操作すべきバルブの識別 ID と、RFID タグから読み出したバルブ識別 ID が一致するか判定する。

(3) 確認情報提示機能

正誤判定機能で判定した結果を作業者に報知音によって提示する。

報知音以外に視覚提示も考えられるが、バルブ探索支援サブシステムは視覚に情報提示を行うので、視覚に負担が集中するのを避けるために、バルブ確認支援サブシステムの情報提示は音声によって行う。

### 3.3.4 作業進捗管理サブシステム

作業進捗管理サブシステムは、現在の作業が作業工程全体のどの部分にあたるかを管理する。本論文では以降、作業行程全体における現在の作業行程を作業ステップと呼ぶ。作業ステップの進行、後退は作業者が操作インタフェースを介して操作することにより行う。

### 3.3.5 システム構成のまとめ

図 3.8 に、ISSAR の 3 つのサブシステムとデータベース、入出力デバイスの関係を示す。

以下に、図中の (1) から (8) の説明を述べる。

- (1) 作業進捗管理サブシステムが作業者の操作デバイスの操作を受け取り、作業ステップを更新する。
- (2) バルブ探索支援サブシステムがカメラ画像を受け取る。
- (3) 作業進捗管理サブシステムが、バルブ探索支援サブシステムとバルブ確認支援サブシステムに現在の作業ステップを伝える。

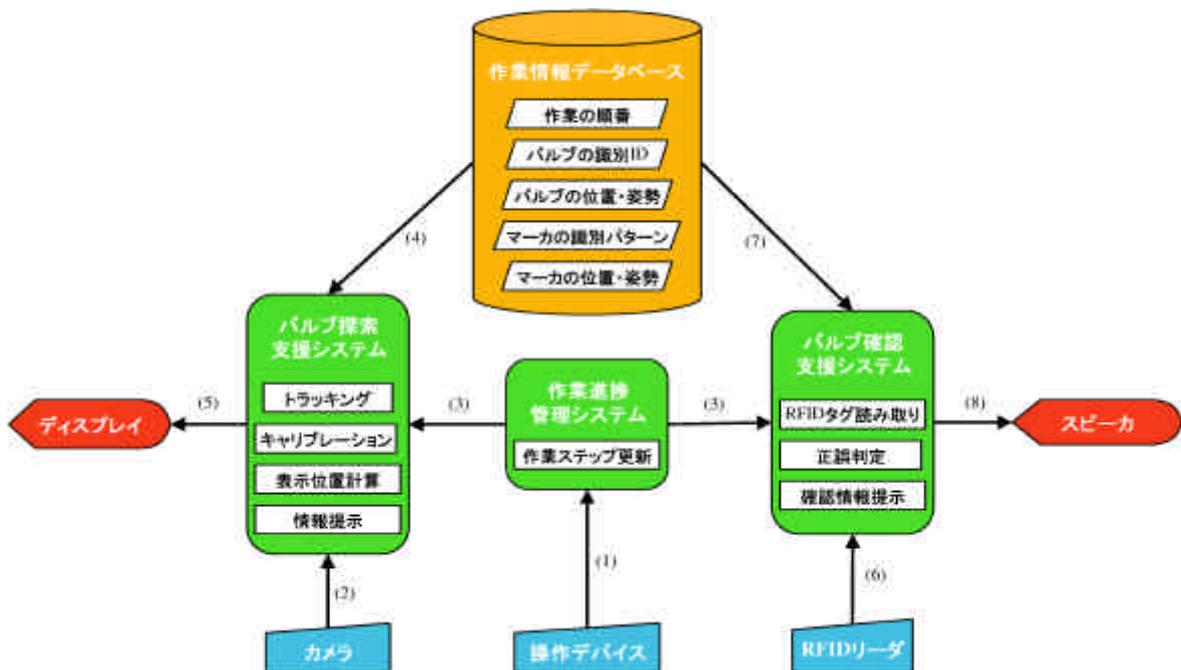


図 3.8: ISSAR のシステム構成図

- (4) バルブ探索支援サブシステムが作業情報データベースから、マーカの位置姿勢情報と現在の作業ステップに対応する作業対象バルブの位置姿勢情報を受け取る。
- (5) バルブ探索支援サブシステムが支援情報をディスプレイ表示する。
- (6) バルブ確認支援サブシステムが、RFIDリーダーが読み取ったRFIDタグに格納されたバルブ識別ID情報を受け取る。
- (7) バルブ確認支援サブシステムが、作業情報データベースから現在の作業ステップに対応する作業対象バルブの識別IDを受け取る。
- (8) バルブ確認支援サブシステムがバルブの正誤判定結果を音声提示する。

### 3.4 インタフェース設計

本節では、ISSARのインタフェース設計について述べる。第2章で述べたように、ARシステムを実現する方法にはHMDを用いる方法、ハンドヘルドディスプレイを用いる方法、プロジェクタやレーザーポインタを用いて投影する方法があるが、3.1節に述べたように、ISSARインタフェースは身体的な制約が大きくないこと、作業者の移動範囲を限定しないということという制約条件があるため、系統隔離作業の支援には、作業の邪魔にならず、自由に動き回ることができるHMD、もしくは取り回しが簡単でどこにでも携帯して持っていけるハンドヘルドディスプレイを用いる方法が適してい

る。本研究では、作業範囲が狭く、持ち運びができない投影型の AR システムは採用しない。

以上より、ISSAR は、HMD とハンドヘルドディスプレイを用いて AR を実現する。以下では、HMD を用いた ISSAR をウェアラブル型 ISSAR、ハンドヘルドディスプレイを用いた ISSAR をハンドヘルド型 ISSAR と呼ぶことにする。ISSAR のインタフェースとしては、遮へい型 HMD、透過型 HMD、参照型 HMD、PDA、タブレット PC などの情報提示インタフェースやボタン操作、ペン操作などの操作インタフェースなど、多様な形態が考えられる。原子力発電プラントに実際に ISSAR の導入を検討した場合、どのような ISSAR インタフェースが適しているのか、という知見が必要である。そのため本研究では、実験によって多様な ISSAR を比較評価する。

以下、本節では、実験で使用する ISSAR のインタフェースについて説明する。

### 3.4.1 ウェアラブル型 ISSAR

#### ハードウェア構成

図 3.9 にウェアラブル型のハードウェア構成を示す。ウェアラブル型 ISSAR は、HMD が情報提示デバイスである。カメラは頭部のヘルメットに固定し、ノート PC などの情報処理端末はバックパックに収納する。RFID リーダは右手 (利き腕) の手首に装着する。ウェアラブル型は両手が自由であるため手作業を妨げることはないが、HMD の装着によって作業者の視界や頭部の動きが制限される。

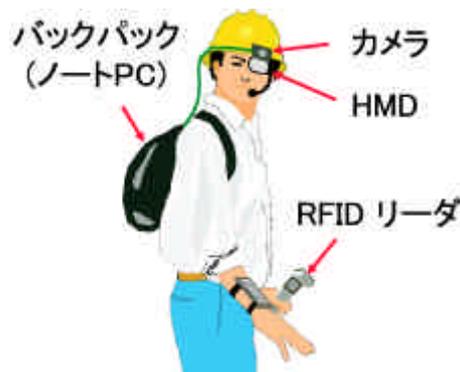


図 3.9: ウェアラブル型 ISSAR のハードウェア構成

#### 情報提示インタフェース

第 2 章で述べたように HMD には、遮へい型、透過型、参照型のものがある。表 3.1 に遮へい型 HMD の Glasstron(Sony 製)、参照型 HMD の SCOPO(三菱電機製)、透過

型 HMD の DataGlass2(島津製作所製) の特徴を示す。ISSAR の情報提示インターフェースとして、これら 3 種類の HMD を用いてシステムを試作する。

表 3.1: 3 種類の HMD の特徴

使用HMD	Glasstron (SONY製)	SCOPO (三菱電機製)	DataGlass2 (島津製作所製)
装着図			
HMDの種類	遮へい型	参照型	透過型
ARの方式	ビデオ シースルー	ビデオ シースルー	光学的 シースルー
現実世界像	カメラ画像	実視界	実視界

### 操作インターフェース

ISSAR を使用するためには、作業者が操作インターフェースを介して、3.3.4 項で述べた作業進ちょく管理サブシステムへ「作業ステップを進める」と「作業ステップを戻す」という 2 つの命令を送る必要がある。3.1 節で述べた制約条件 (b)、(c) から、身体的な制約が小さく、操作が簡単な操作インターフェースとして、2 ボタン式の操作インターフェースを設計する。図 3.10 に、2 ボタン式操作インターフェースのイメージ図を示す。



図 3.10: ウェアラブル型 ISSAR の操作インターフェース

この操作デバイスの 2 つのボタンに、それぞれ「作業ステップを進める」、「作業ステップを戻す」の機能を持たせる。操作デバイスは、作業者の体の動きを制限しては

ならないため、図 3.10 に示すように、操作デバイスは作業者の左胸（利き腕と逆側の胸）に装着し、作業の邪魔にならないようにする。

### 3.4.2 ハンドヘルド型 ISSAR

#### ハードウェア構成

図 3.11 にハンドヘルド型のハードウェア構成を示す。ハンドヘルド型 ISSAR ではタブレット PC や PDA などのハンドヘルドディスプレイが情報提示デバイスである。カメラはハンドヘルドディスプレイに取り付ける。ハンドヘルド型ではシステムを利用する場合にデバイスを手に持つ必要があるが、ウェアラブル型のように視界や頭部の動きの制限は無い。

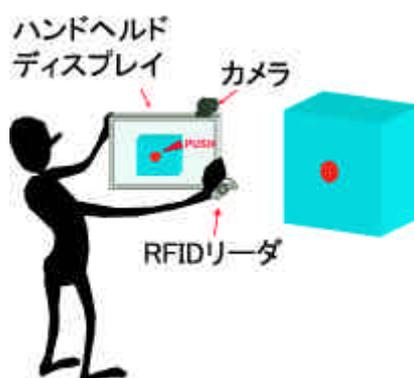


図 3.11: ハンドヘルド型 ISSAR のハードウェア構成

#### 情報提示インタフェース

3.1 節で述べた制約条件 (a)、(b) から、ディスプレイが大きいため視認性が高く、ペン操作ができるタブレット PC と、デバイス自体が小さく軽量で扱いやすい PDA を、ハンドヘルド型 ISSAR の情報提示デバイスとして提案する。

#### 操作インタフェース

ウェアラブル型と同様に、PDA では 2 ボタン式操作インタフェースを用いる。タブレット PC を用いたシステムでは、タブレットペンによって操作を行う。タブレットペンを用いた場合の操作は、ディスプレイにペントッチした場合を「作業ステップを進める」、ペンのクリックボタンを押しながらペントッチした場合を「作業ステップを戻す」に対応させる。

### 3.5 ISSAR インタフェース比較実験の計画

3.4 節で述べたように、原子力発電プラントの系統隔離作業に実際に ISSAR を導入した場合に、どのような ISSAR のインタフェース形態が最も優れているのかを調べるため、本研究は様々な ISSAR インタフェースを比較する実験を行う。

対象とする ISSAR インタフェースは、ウェアラブル型 ISSAR として、遮へい型 HMD、参照型 HMD、透過型 HMD の 3 つの異なる情報提示インタフェースを持つもの、ハンドヘルド型 ISSAR として、携帯小型 TV とタブレット PC の 2 つを用いた ISSAR インタフェースの合計 5 種類の ISSAR インタフェースを比較する。携帯小型 TV を用いた ISSAR インタフェースの構築は PDA を用いるよりも容易かつ安価であるため、本研究では携帯小型 TV を PDA の代用として用いる。

後述する実験結果に対するインタフェースの順序効果を取り除くためには、同時に比較するインタフェースの数の順列に相当する人数の被験者が最低限必要である。3 種のインタフェースの比較ならば 6 人、4 種のインタフェースの比較ならば 24 人、5 種のインタフェースの比較ならば 120 人である。本研究は、5 種類の ISSAR インタフェースの比較を行うが、120 人の被験者を集めることは難しいため実験を分けて行う。

本研究で開発を目指す ISSAR は、原子力発電プラントでの系統隔離作業を支援することを目的としているため、正確に ISSAR を評価するためには、実際のプラントで評価実験を行うことが望ましい。しかし、原子力発電プラントで新しい機器を使用するためにはあらかじめ安全性を確認することが必須であり、また、本研究の様に、様々な実験を繰り返し実施する必要がある場合には、長期間に渡って繰り返し実験環境を使用する必要があり、厳重に管理する必要がある原子力発電プラント内に実験環境を確保することは非常に困難である。そこで、本研究では、系統隔離作業の対象となる作業環境を模した実験環境を実験の目的にあわせて構築して利用する。

ISSAR インタフェースの比較実験を行うにあたり、考案した実験方法の妥当性を確認することが必須である。そのため、ISSAR インタフェースの比較評価の第 1 段階として実験室環境の様な非常に簡略化した環境において被験者実験を行い、考案した実験の方法が妥当であるかを調べ、それと同時にシステム設計の問題点、情報提示インタフェースの問題点等を予備実験的に模索する。

一方、第 2 段階の実験では、系統隔離作業を作業対象とした場合に、どのようなインタフェースが最も適しているかを調べることを主な目的とするため、より実際の作業現場に近い環境で評価実験を行うことが望ましい。そこで、系統隔離作業で実際に操作するバルブと似たバルブが多数設置されている MGT 施設を系統隔離作業の模擬作業対象として評価実験を行う。

## 第 4 章 実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR の評価実験

本章では、第 3 章で述べた各種 ISSAR のうち、ウェアラブル型に分類される ISSAR に対して行った評価実験について述べる。この実験は実験室環境において実施し、ISSAR の各種機能のうち、主にバルブ指示機能とナビゲーション機能を使用して評価を行った。

### 4.1 実験の目的

本実験では、第 3 章で述べた各種ウェアラブル型 ISSAR を試作し、それらを用いて実験室環境において模擬的にバルブ探索作業を行い、システム設計の問題点、情報提示インタフェースの問題点、実験方法の問題点、各種 ISSAR を比較評価するのに適した評価指標を探ることを目的とする。

なお、本実験では、ISSAR の各種機能の内、主にバルブ指示機能とナビゲーション機能を用いた場合の評価を行い、バルブ自動確認機能と操作インタフェースを用いた場合の評価は行わない。これらの機能は第 5 章で述べる評価実験において評価する。

### 4.2 実験用システムの開発

第 3 章で述べた様に、ウェアラブル型に分類される ISSAR は 3 種類あり、それぞれ情報提示デバイスとして、遮へい型 HMD の Glasstron、参照型 HMD の SCOPO、透過型 HMD の DataGlass2 を用いている。

以下では、第 3 章で述べた ISSAR の設計を元に試作した 3 種類のウェアラブル型 ISSAR のハードウェア構成とソフトウェア構成について述べる。

#### 4.2.1 ハードウェア構成

本項では、実験用に試作したウェアラブル型に分類される ISSAR のハードウェア構成を述べる。

Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成

図 4.1 に、Glasstron(遮蔽型 HMD) を用いた ISSAR をユーザが装着した様子を示す。



図 4.1: Glasstron を用いた ISSAR の装着図

図 4.1 に示すように、CCD カメラは Glasstron の上部に前方を向くように固定する。また、図 4.2 に Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成図を示す。

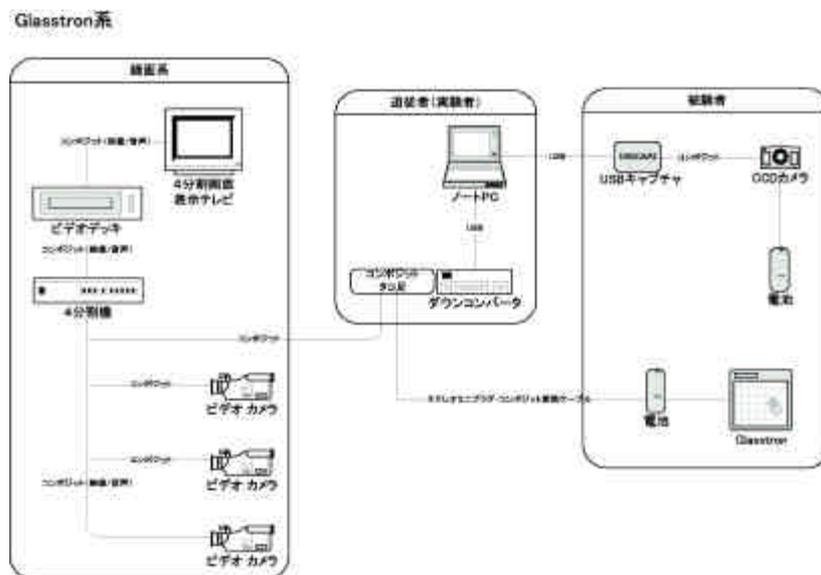


図 4.2: Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成図

本システムでは、CCD カメラが撮影した画像を、USB キャプチャを介してノート PC に取り込む。その画像をノート PC が処理し、作業支援情報を付加した画像をダウンロードコンバータを介して Glasstron に出力する。表 4.1 に、Glasstron を用いた実験用システムを構成するハードウェアを示す。なお、各デバイスの仕様は付録 C で述べる。

#### SCOPO を用いた AR システムのハードウェア構成

図 4.3 に、SCOPO(参照型 HMD) を用いた ISSAR をユーザが装着した様子を示す。

表 4.1: Glasstron を用いた実験用 AR システムのハードウェア

ハードウェア	製品名	メーカー
HMD	Glasstron	SONY
CCD カメラ	CK-200	Keyence
ノート PC	ThinkPad T30	IBM
ビデオキャプチャカード	USB-CAP2	I-O DATA
ダウンコンバータ	DSC06d-HR	Digital Arts



図 4.3: SCOPO を用いた ISSAR の装着図

図 4.3 に示すように、CCD カメラは被験者のひたいに前方を向くよう両面テープで固定する。図 4.4 に SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成図を示す。図 4.4 に示すように、本システムでは、Glasstron を用いた ISSAR と同様に、CCD カメラが撮影した画像を、USB キャプチャを介してノート PC に取り込む。その画像をノート PC が処理し、作業支援情報を付加した画像をダウンコンバータを介して SCOPO に出力する。表 4.2 に、SCOPO を用いた ISSAR を構成するハードウェアを示す。なお、各デバイスの仕様は付録 C で述べる。

表 4.2: SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア

ハードウェア	製品名	メーカー
HMD	SCOPO	三菱電機
CCD カメラ	CK-200	Keyence
ノート PC	ThinkPad T30	IBM
ビデオキャプチャカード	USB-CAP2	I-O DATA
ダウンコンバータ	DSC06d-HR	Digital Arts

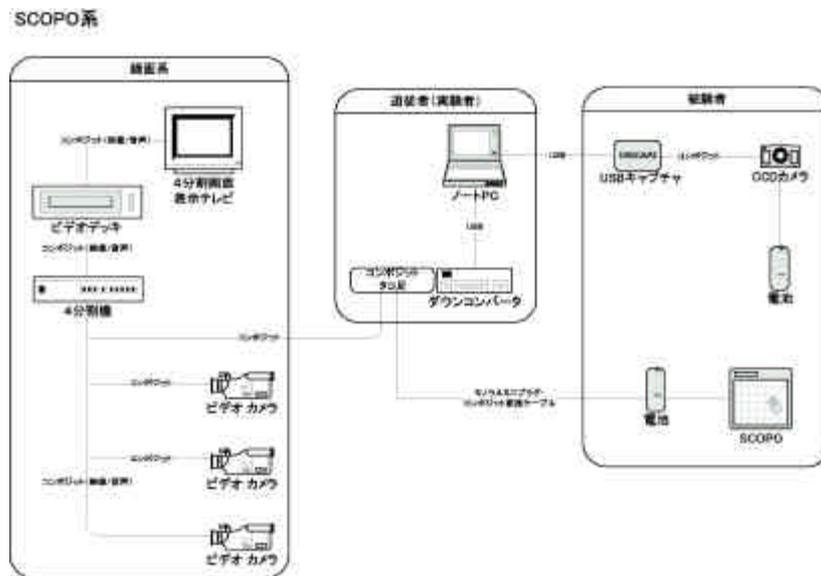


図 4.4: SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成図

#### DataGlass2 を用いた ISSAR のハードウェア構成

図 4.5 に、DataGlass2(透過型 HMD) を用いた ISSAR をユーザが装着した様子を示す。



図 4.5: DataGlass2 を用いた ISSAR の装着図

図 4.5 に示すように、CCD カメラは HMD のディスプレイの横に前方を向くように固定する。また、図 4.6 に DataGlass2 を用いた ISSAR の構成図を示す。

図 4.6 に示すように、本システムでは、CCD カメラが撮影した画像を、USB キャプチャを介してノート PC に取り込む。その画像をノート PC が処理し、ディスプレイ上の適切な表示位置を計算し、作業支援情報のみをマルチディスプレイ PC カードを介して DataGlass2 に出力する。表 4.3 に、DataGlass2 を用いた ISSAR を構成するハー

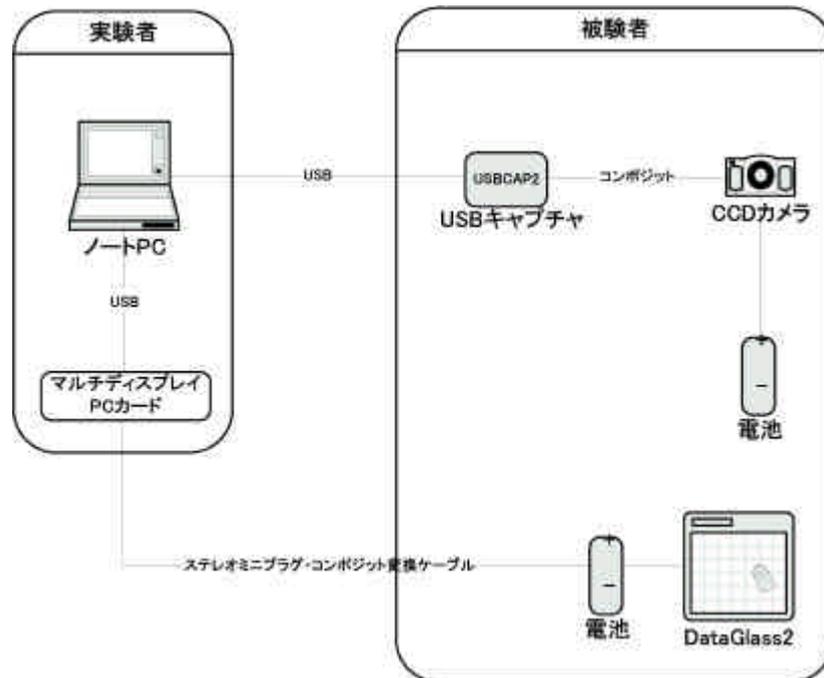


図 4.6: DataGlass2 を用いた ISSAR のハードウェア構成図

ドウェアを示す。なお、各デバイスの仕様は付録 C で述べる。

表 4.3: DataGlass2 を用いた ISSAR のハードウェア

ハードウェア	製品名	メーカー
HMD	DataGlass2	島津製作所
CCD カメラ	CK-200	Keyence
ノート PC	ThinkPad T30	IBM
ビデオキャプチャカード	USB-CAP2	I-O DATA
マルチディスプレイ PC カード	CBMLX2	I-O DATA

## 4.2.2 ソフトウェア構成

本項では、第 3 章で述べた ISSAR のバルブ探索支援システム、作業進捗管理システム、作業情報データベースの各機能について述べる。試作したシステムは Microsoft Windows 上で動作する。開発環境には Microsoft Visual C++6.0 を使用した。

### バルブ探索支援システムの実装

#### 1. トラッキング機能・キャリブレーション機能

トラッキング機能と HMD キャリブレーションを除くキャリブレーション機能は ARToolkit ライブラリを用いて開発した。

- トラッキングにおける画像取得では、CCD カメラから USB キャプチャを介してノート PC に画像 320 × 240 の画像を取り込む。これは、ARToolkit の画像入力ライブラリによって実現した。
- トラッキングにおけるマーカ抽出、マーカ識別は ARToolkit の画像処理ライブラリを使用した。
- マーカ登録、カメラキャリブレーション、ディスプレイキャリブレーションは ARToolkit の補助ライブラリを使用した。

光学シースルー HMD のディスプレイキャリブレーションは、カメラが撮影したマーカ上に仮想オブジェクトを重畳表示し、実際に見えるマーカと表示画像のずれを上下左右で微調整する、簡易的なキャリブレーションを行った。カメラの方向は真正面に向けて固定するという前提である。

## 2. 表示位置計算機能

認識したマーカの位置から、目的のバルブがカメラ画像内に入っているかどうかを調べられる。カメラの焦点を原点とする座標系を本論文ではカメラ座標系と呼ぶ。カメラ座標系におけるカメラ焦点を通る法線ベクトルと、カメラ焦点から作業対象バルブへ向かうベクトルの為す角がカメラの画角より小さければ、すなわちそれはカメラの撮影範囲内に目的のバルブが存在することになる。その場合はバルブ指示オブジェクトを表示することになるので、ディスプレイにおけるバルブの位置を計算する。カメラ撮影範囲内にバルブが無い場合は、方向指示オブジェクトをマーカ上に表示することになるので、ディスプレイ上のマーカ位置を計算する。

## 3. 情報表示機能

表示位置計算機能で計算された位置に仮想オブジェクトを表示する。仮想オブジェクトの描画には、Silicon Graphics 社の 3 次元グラフィック API である OpenGL を用いた。

## 作業進捗管理システムの実装

作業進捗管理システムは作業ステップを表すカウンタを、入力により増減することにより実現した。

## 作業情報データベースの実装

バルブの位置、姿勢、作業の順番と識別 ID、マーカパターンや、マーカの位置、を多数の配列によって格納する。

### 4.3 実験方法

本実験では、各種ウェアラブル型 ISSAR を用いて、複数の被験者に系統隔離作業を模した作業を行ってもらい、各種指標を計測することによって、実験の妥当性およびシステムの問題点等を模索する。以下では、実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR の評価実験の方法を、実験環境、タスク、評価指標と測定手法、実験手順の設計、実験の実施、被験者、実験日程に分けて説明する。

#### 4.3.1 実験環境

実験環境は、本研究室の一室の 5m × 5m の一区画に構築した。図 4.7 に示すように実験環境の壁にバルブの写真で作成した模擬バルブ 50 枚と 10 種類のトラッキング用マーカを壁に貼り付けた。トラッキング用マーカの貼り付け位置は、できる限り被験者がどの方向を向いても CCD カメラの撮影範囲内にマーカが入るようにあらかじめ調整した。全ての模擬バルブには、識別番号として 7 桁の無作為な数字が記入された識別 ID タグを取り付けた。



図 4.7: 実験環境の概観

また、実験の様子を記録するために、実験環境録画システムを構成した。実験環境録画システムは図 4.8 に示すように 3 台の固定カメラ、4 画面スプリッタ、ビデオデッキ、4 分割画面表示テレビで構成される。3 台のうちの 2 台のカメラは被験者の行動を撮影し、1 台のカメラは時刻を表示したディスプレイ画面を撮影した。固定カメラの映

像と被験者に提示する映像の3つの映像を4画面スプリッタを介して1つの画面に統合した(残りの1画面には何も入力しなかった)。実験中は、統合した映像をビデオに録画すると共に実験の障害にならない位置に設置したテレビに表示し、被験者に提示する映像に問題が生じていないかを実験者が確認した。図4.9にバルブ、マーカと実験機器の位置を記した実験環境の見取り図を示す。

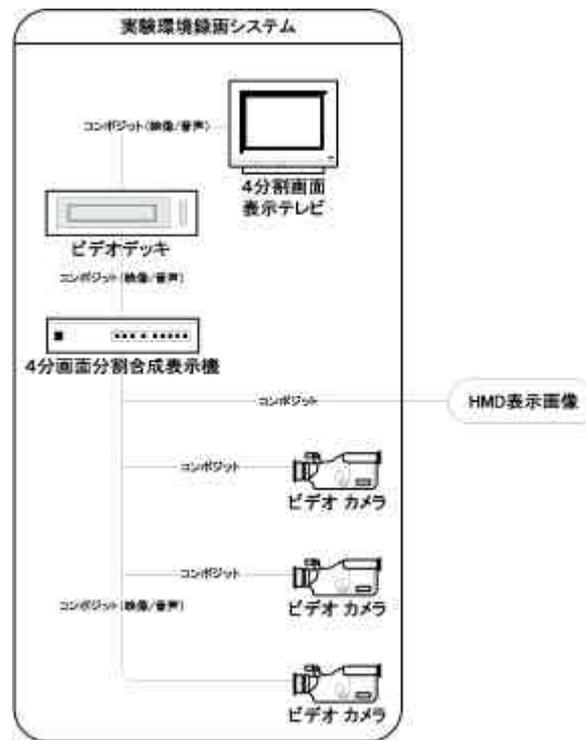


図 4.8: 実験環境録画システム

### 4.3.2 タスク

本実験では、系統隔離作業のバルブ探しを模擬したタスクとして、50個の模擬バルブの中から指定した10個の模擬バルブを順番に探し出す作業を被験者に課した。タスクの開始時の被験者の位置・方向に関しては、図4.9の中の「タスクスタート位置」に示すように、常に同じ位置・方向で、タスクを開始するものとした。なお、以下では、1つのタスクで探す10個のバルブの組み合わせとその順序をバルブ探索パターンと呼ぶ。バルブ探索パタンの詳細については後述する。

実験開始後、被験者が目的のバルブを発見した場合は、図4.10に示すように、発見した模擬バルブに手で触れて「これ」と言うように指示した。実験者は被験者からの発見の合図があった場合、触れているバルブが正しければ、バルブ探索パターンに従っ

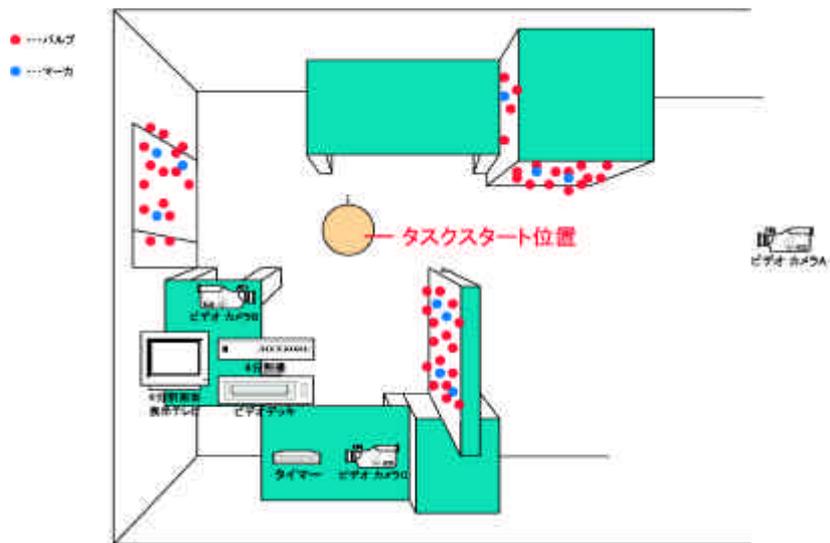


図 4.9: 実験環境の見取り図

て次のバルブを探し、間違っていれば探し直すように指示した。また、1分間で目的のバルブが見つからなかった場合は、目的のバルブを見つけることができなかったとして、バルブ探索パターンに従って次のバルブを探すように指示した。



図 4.10: バルブ発見時の指差し確認

タスクの遂行に関して被験者ごとの条件を揃えるために、各被験者に対し事前に、全てのタスクにおいて可能な限り正確かつ迅速にタスクを遂行するよう指示した。

図 4.11 に AR システムを用いた場合の具体的なタスク遂行手順を示す。

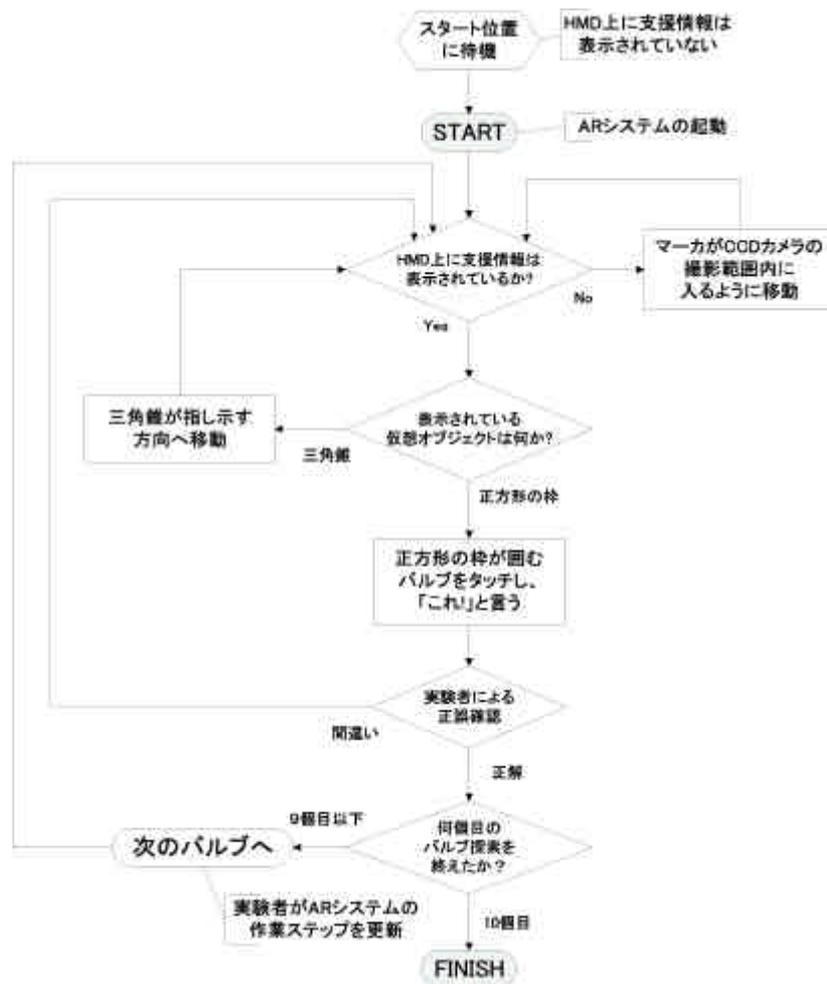


図 4.11: AR システムを用いた場合のタスク遂行手順

### 4.3.3 評価指標と測定手法

本項では各種 ISSAR の評価を行うために用いた評価指標について述べる。本研究で用いた評価指標は(1)タスク完遂時間、(2)エラー回数、(3)フリッカー値、(4)NASA-TLX、(5)ユーザビリティテスト、(6)SART の6つである。また、上記の評価指標のみでは分からない被験者の主観的な意見、感想を聞き出すために、実験終了時にインタビューを行った。以下にそれぞれの評価指標の説明と、その測定方法について述べる。

#### タスク完遂時間

被験者が、実験のタスクを達成するのに要する時間を計測し、作業効率の指標とする。タスク完遂時間が短いほど作業効率が高いものとする。具体的には、実験者が「スタート」と発声した瞬間から被験者が10個目のバルブを正しく見つけて「これ」と発声するまでの時間を計測し、タスク完遂時間とする。タスク完遂時間を指標とした各インタフェース間の比較には検定を用いた。すなわち、3つのインタフェース間の比較には、まず1元配置の分散分析で3つのインタフェースの平均値が同一であるかを検定する。次に、2つのインタフェース間の比較では、F検定によって分散が異なるかどうかを検定し、分散に有意差がなければt検定によって、平均値に有意差があるかどうかを検定する。2つのインタフェースのタスク完遂時間の分散に有意差があれば、Welchの検定により平均値に差があるかどうかを検定する。

#### エラー回数

被験者が指定されていないバルブに対して「これ」と言った回数を計測し、作業の正確性の指標とする。エラー回数を指標とした各インタフェース間の比較にはタスク完遂時間の比較と同様に検定を用いた。

#### フリッカー値

労働科学分野において疲労判定に広く用いられる指標にフリッカー値(CFF: Critical Flicker Fusion Frequency)がある。CFFは、点滅する光点が融合して連続点灯しているように見える臨界周波数である。大脳皮質機能の活動水準に関係するとされている。タスクの前後にCFFを測定し、その変化値を見れば、タスクにおける脳の疲労の度合いを測ることができる。フリッカー測定には連続点灯しているように見える高い周波数から次第に下げていき、被験者がちらつきを知覚したときの周波数を測定する下降法と、逆に低い周波数から次第に上げていき、被験者がちらつきを感じなくなったときの周波数を測定する上昇法がある。本実験では、図4.12に示すフリッカー測定器を用いて、タスクの前後でそれぞれ上昇法と下降法でCFFを測定した。そして、タスク

の前に上昇法と下降法で計測した CFF の平均値とタスクの後に上昇法と下降法で計測した CFF の平均値の差を疲労度の指標とした。



図 4.12: フリッカー測定器

各インタフェース間の疲労度の比較は、タスク完遂時間やエラー回数の場合と同様に 1 元配置の分散分析、F 検定、t 検定、Welch の検定で行った。

## NASA-TLX

精神的な作業負荷をメンタルワークロード (mental workload : MWL) という。その代表的な主観測定尺度として NASA が開発した NASA - TLX がある。NASA - TLX では、種々の作業場面での主観構造の検討から抽出された、知的・知覚的要求、身体的要求、タイムプレッシャー、作業成績、努力、フラストレーションの 6 因子の得点をもとに、個人の評価基準の重みづけを考慮して総合的負担度を算出する。NASA-TLX の各因子の説明を、表 4.4 に示す。本研究では芳賀による日本語版 NASA-TLX プログラムを用いてメンタルワークロードの評価を行う。日本語版 NASA-TLX プログラムでは、図 4.13 の左側に示すように、被験者がワークロードを評価する前に、「自分がその作業を遂行する際のワークロードの評定として、どちらがより重要と思われるか」という基準で 6 つの尺度項目の重要度を一対比較する。その中で何回「より重要」なものとして選択されたかが各尺度の重みとなる。作業のワークロードを評定する際には、被験者は図 4.13 の右側に示すように 6 つの尺度ごとにスライドバーをドラッグする。0 ~ 100 の連続値であるスライドバーの位置を評価値として読み取り、これを一対比較によって定められた尺度ごとの重みを掛けて平均したものが加重平均ワークロードスコア (WWL) となる。本実験では、この日本語版 NASA-TLX プログラムを各タスクの終了後に被験者に行わせる。NASA-TLX は主観評価であり得点のつけ方は被験者によっ

て異なるため、各インタフェースに対して単純に被験者間の WWL 得点の大小によって比較することはできない。そのため、一人一人の被験者の各インタフェースに対する WWL 得点の大小関係の傾向によって各インタフェースのメンタルワークロードの比較を行う。

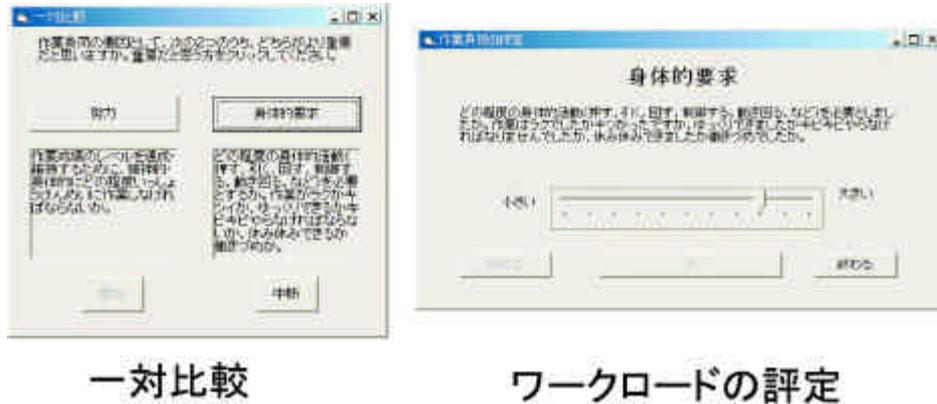


図 4.13: 日本語版 NASA-TLX プログラムの画面例

表 4.4: NASA-TLX の尺度とその説明

尺度	説明
知的・知覚的要求	どの程度の知的、知覚的活動（考える、決める、計算する、見る、など）を必要とするか。課題が易しいか難しいか単純か複雑か正確さが求められるか大雑把でよいか。
身体的要求	どの程度の身体的活動（押す、引く、まわす、制御する、動き回る）を必要とするか。作業がラクかキツいか、ゆっくりできるかキビキビやらなければならないか、休み休みできるか働きづめか。
タイムプレッシャー	仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的圧迫感がどの程度か。ペースはゆっくりとして余裕があるものか、それとも速くて余裕の無いものか。
作業成績	作業指示者によって設定された課題の目標をどの程度達成できたか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足しているか。
努力	作業成績のレベルを達成・維持するために、精神的身体的にどの程度一生懸命に作業しなければならないか。
フラストレーション	作業中に、不安感、落胆、イライラ、ストレス、悩みをどの程度感じるか。あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じるか。

### 状況認識

状況認識 (Situation Awareness) とは、作業に影響するさまざまな要素を把握し、総合的に判断する能力のことである。正式には「時間・空間的な環境の中での要素の知覚、それらの意味の理解、近い将来のそれらの状態の推定」と定義される。人間が複雑な状況の下で適切な行動を選択するためには、的確な状況認識を獲得し保持する必要がある。

SAの評価方法として代表的なものにSART (Situation Awareness Rating Technique)がある。SARTでは、まず以下の3つを2極間スケールで評定する。

- (A) 認知資源の需要
- (B) 認知資源の供給
- (C) 状況の理解

これらの結果を次式に入れることでSARTスコアを算出する。

$$SA = U - (D - S) \quad (4.1)$$

(SA: 状況認識, U: 状況の理解, D: 認知資源の需要, S: 認知資源の供給)

本研究では、上記のSARTを応用した評価法であるSART-10Dを用いて状況認識の評価を行う。SART-10Dは、上記の(A)の認知資源の需要を3つ、(B)の認知資源の供給を4つ、(C)の状況の理解を3つに分類した合計10個の尺度を持つ。以下にSART-10Dにおける尺度を示す。

- (A) 認知資源の需要
  - (a) 状況が急に変化するかどうか
  - (b) 注意しておかなくてはいけない変化が多いかどうか
  - (c) 状況が複雑かどうか
- (B) 認知資源の供給
  - (d) 行動への準備がどの程度必要か
  - (e) 新しい変化に対応するための心的容量の程度
  - (f) 状況に注意を集中した程度
  - (g) 状況に注意を分配した程度
- (C) 状況の理解
  - (h) 受け取り理解した知識の程度
  - (i) 得られた知識の質や価値の程度
  - (j) 経験により状況を知っていたかどうか

上記の(a)から(j)の評定結果を認知資源の需要、認知資源の供給、状況の理解の3つのカテゴリの中で、それぞれの平均値を算出し、式(4.1)に当てはめ、SARTスコアを算出する。

本実験では、図4.14に示すSART10-Dの回答表を用いて、10項目7段階で状況認識を評価した。

	低い ←→ 高い						
	1	2	3	4	5	6	7
1. 状況が急に变化するかどうか							
2. 注意しておかなくてはいけない変化が多いかどうか							
3. 状況が複雑かどうか							
4. 行動への準備がどの程度必要か							
5. 新しい変化に対応するための心的容量の程度							
6. 状況に注意を集中した程度							
7. 状況に注意を分配した程度							
8. 受け取り理解した知識の程度							
9. 得られた知識の質や価値の程度							
10. 経験により状況を知っていたかどうか							

図 4.14: 本実験で使用した SART10-D 回答表

## ユーザビリティテスト

システムの有用性はユーティリティとユーザビリティの二つの側面から構成されている。ユーティリティは機能、性能のことであり、ユーザにとってシステムのプラス面がどれだけ高いかを表し、ユーザビリティは使いにくさ、判りにくさなどマイナス面がどれだけ小さいかを表す。使い勝手のよいシステムであるためには、ユーティリティの高さとともに、高いユーザビリティを持つ必要がある<sup>[15]</sup>。

ユーザビリティには、3つの側面がある。1つは、機器の操作すなわち人間の出力系に関係した側面であり、もう1つは機器の認識すなわち人間の入力系に関係した側面、あと1つは機器操作にまつわる人間の内部状態に関係した側面である。要約して表現すれば、操作性、認知性、快適性ということができる。

本実験では、ISSARのインタフェースの有用性を測るために、以下の7つの質問項目を持つユーザビリティテストを行った。(Q1)から(Q5)までの5項目は「そんなことはない」から「そのとおりだ」までの5段階スケールの質問項目で、(QA)と(QB)は自由記述の質問項目である。本論文では以降(Q1)から(Q5)までの質問項目をレーティング項目、(QA)と(QB)の質問項目を自由記述項目と呼ぶ。

- レーティング項目

- (Q1) このシステムを動かすために、事前にたくさんの事を学ぶ必要があったか
- (Q2) このシステムが持つ色々な機能はよくまとまっているか
- (Q3) このシステムはむだに複雑になってないか
- (Q4) このシステムの使用方法について自信を持って動かせたか
- (Q5) このシステムはこれからの仕事に役に立つと思うか

- 自由記述項目

- (QA) このシステムの良いところを挙げてください

(QB) このシステムが改良すべき点を挙げてください

(Q1) と (Q4) はインタフェースの認知性に関する質問で、(Q2) と (Q3) は操作性に関する質問である。(Q1)、(Q2)、(Q3)、(Q4) は Brooke のユーザビリティテストから引用した<sup>[16]</sup>。本研究は (Q5) を有用性を評価する総合的な質問として追加した。(Q2) と (Q4) と (Q5) は点数が高いほど高評価となるが、(Q1) と (Q3) は点数が高いほど低評価となる逆転質問である。本研究は自由記述の (QA) をインタフェースのユーティリティに関する質問項目、(QB) をユーザビリティに関する質問項目として追加した。

## インタビュー

実験終了後、被験者に対して、各 ISSAR のインタフェースのさまざまな側面に関する質問、実験方法に関する質問、評価指標に関する質問を行う。

あらかじめ用意した質問と、タスク遂行時の被験者の様子を観察し、その中から疑問を感じた行動の理由、動機などを適宜質問する。

用意した質問は次のようなものである。

1. 作業指示書、SCOPO、Glasstron、DataGlass2 の中で作業を正確に効率よく行えたのはどれですか？
2. SCOPO と Glasstron と DataGlass2 の中で負担が大きいのはどれですか？
3. SCOPO と Glasstron と DataGlass2 の中で表示が見やすいのはどれですか？
4. 作業指示書による作業とシステムによる作業ではやりやすいですか？
5. 作業指示書を除いて動きやすかったインタフェースはどれですか？
6. 各インタフェースについての感想をお願いします。
7. 評価指標についての感想をお願いします。

### 4.3.4 実験手順の設計

本項では、実験結果へのバイアス要因について考察する。次いで、実験結果へのバイアス要因を排除するための実験手順の設計を行う。

#### 実験結果へのバイアス要因に対する考察

本実験は、4.1 節に述べたように、被験者に 3 種類のウェアラブル型 ISSAR の情報提示デバイスを用いてタスクを実行させ、4.3.3 項で述べた評価指標の測定を行い、システムの問題点、情報提示インタフェースの問題点、実験方法の問題点、タスクに対する評価指標の適合性を探ることを目的としている。

そのためには、評価指標で測定しようとする対象と関係のないものを測定することにならないように、各評価指標を測定する際には、以下に述べる効果による実験結果へのバイアス要因を排除する必要がある。

- (a) バルブ探索パタンの学習効果
- (b) タスクの学習効果
- (c) ISSAR インタフェースの学習効果
- (d) ISSAR インタフェースの順序効果

以下に、上記のバイアス要因の説明と、その排除方法を述べる。

- (a) バルブ探索パタンの学習効果

同一のバルブ探索パターンで複数回タスクを行えば、被験者が回数を重ねるほどパターンを学習し、前半のタスクに比べ後半のタスクを素早く正確に行うと予想される。このように、同一もしくは類似した内容のバルブ探索パターンを用いたタスクを複数回繰り返すことによって生じる学習効果を排除するために、本実験では1人の被験者が同じバルブ探索パターンを用いたタスクを行わないようパターンを複数用意する。

また、それぞれのバルブ探索パターンは被験者が理想的な経路を移動した場合の動線距離が等しくなるように作成し、バルブ探索パターンごとに理想的な経路を移動した場合の移動時間に差が発生しないようにする。

- (b) タスクの学習効果

複数のバルブから目的のバルブを探すという作業は、一般の人では普段の生活で頻繁には行う機会がない作業であるため、十分には習熟していないと予想される。被験者がタスクに十分習熟していない間は、タスクを繰り返すにつれて、タスクをより素早く正確に行うことができるようになると予想される。このようなタスクの習熟度合いは、タスクの経験回数が少ないうちは急激に上昇し、ある程度回数を重ねるにつれて上昇は鈍り、安定していくと予想される。

事前練習では、このようなタスクの学習効果を排除するため、実験開始前に各被験者に対し、十分に練習させる。

また、本実験では、実験の最初と最後に作業指示書を用いてタスクを行わせ、作業指示書を用いた2回のタスクのタスク完遂時間とエラー回数に有意な差が無いことを確認して、タスクの学習効果が生じていないことを確認する。

本実験における作業指示書とは図 4.15 に示すように、バルブの識別 ID が書かれたカードが10枚バルブ探索パターン順に束になった作業工程カードと、図 4.16 に

示すように、模擬バルブの位置と識別 ID が記入された実験室の見取り図であるバルブ配置図である。



図 4.15: 作業工程カード

作業指示書を用いたタスクは、以下のようになる。

- (1) 開始の合図で作業工程カードの表紙をめくり、1つ目のバルブの識別 ID を確認する。
  - (2) バルブ配置図の中から、作業工程カードに書かれた ID 番号を探し出す。
  - (3) バルブ配置図で目的のバルブの位置を確認し、その場所へ移動する。
  - (4) 壁面に多数存在する模擬バルブから、作業工程カードの識別 ID 番号が書かれた識別 ID タグを持つ模擬バルブを探し出す。
  - (5) 模擬バルブにタッチして「これ」と言い、実験者に正誤確認を求める。
  - (6) 正しければ、作業工程カードをめくり次のバルブ探索へ移行する。間違っていればもう一度探し直す。
- (c) ISSAR のインターフェースに関する学習効果
- 実験では、被験者は3種類の ISSAR デバイスを用いてタスクを行う。各被験者の3種の ISSAR の情報提示インターフェースの習熟度に著しい差があれば、実験結果について被験者間の客観的な比較ができない。そのため、各被験者が事前練習において3種の ISSAR の情報提示インターフェースに十分に慣れていたかを調べる必要がある。

本番の実験では、被験者に3種の ISSAR デバイスによるタスクを各2回ずつ行わせ、各デバイスの1回目と2回目のタスク完遂時間に有意な差が無いこと、各デ

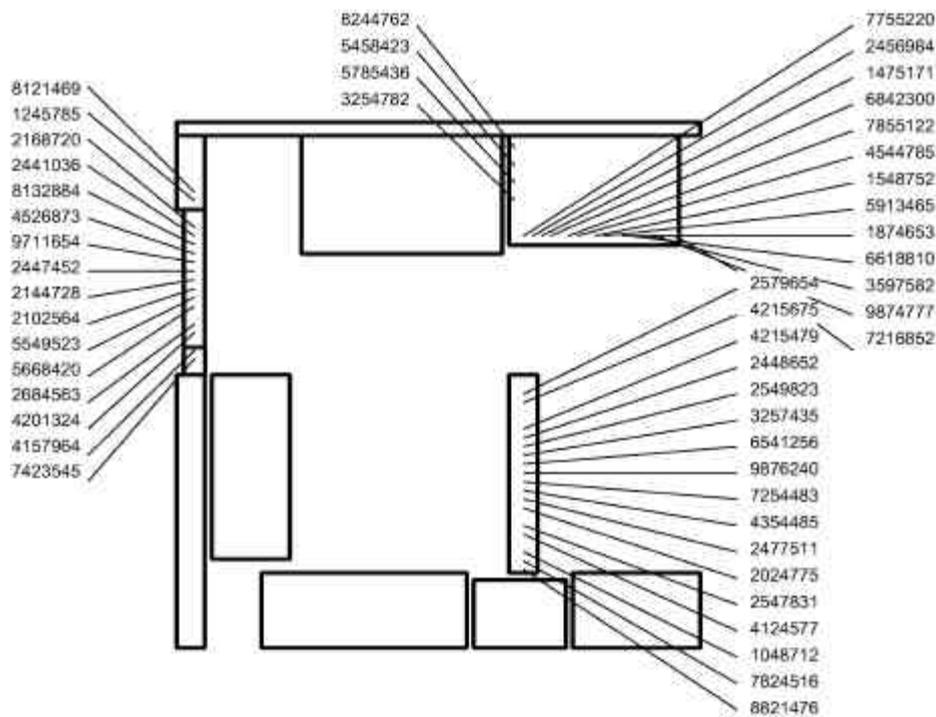


図 4.16: バルブ配置図

バイスの 1 回目と 2 回目のエラー回数に有意な差が無いことを確認して、ISSAR インタフェースの学習効果が生じていないことを確認する。

(d) ISSAR のインタフェースに関する順序効果

被験者は 3 種類の ISSAR インタフェースを用いてタスクを行うが、各被験者が使用する ISSAR インタフェースの順番が同一であれば、その順序によって結果に影響が生じる可能性がある。

本番の実験では、このような ISSAR インタフェースの順序効果を排除するために、被験者によって使用する ISSAR インタフェースの順番を入れ替える。

3 種類の ISSAR を同時に評価する場合、順序効果を排除するためには 6 通りの順番全てに対して実験を行う必要がある。従って、インタフェースに関する順序効果を排除するためには被験者は少なくとも 6 人必要である。

(e) タスクやインタフェースに対する知識の差の効果

被験者の系統隔離作業や HMD に関する知識に差があれば、知識をもつ被験者が知識を持たない被験者より素早く正確にタスクを行うと予想される。

本研究は知識の差の効果を排除するために、事前練習の前に各被験者に実験マニュアルを配布し、熟読させて被験者間の知識に差が出ないようにする。

実験マニュアルは以下の内容を説明する。

– 実験の流れ

作業指示書を用いた作業と3種のISSARデバイスを用いた作業の事前練習から、本実験、インタビューへの流れを説明し、フリッカーテスト、NASA-TLXプログラム、ユーザビリティテストをどのようなタイミングで行うかについて説明する。

– タスクの説明

50個の模擬バルブから指定した10個の模擬バルブを順番に探し出す作業を行うこと、また全てのタスクは可能な限り正確かつ迅速に行うことを説明する。また、ARシステムを用いる場合、支援情報をディスプレイに表示させたい場合はCCDカメラの撮影範囲内にマーカが入るように頭の向きや位置を調整する必要があることを説明する。

– デバイス装着に関する説明

各デバイスの装着方法と、調整方法について説明する。

– 各評価指標の測定方法

フリッカー測定器の使用法、NASA-TLXプログラムの使用法、SART10-Dとユーザビリティテストの回答方法に関して説明する。

実験で使用した実験マニュアルは付録Dに掲載する。

## 実験手順

以上に述べた検討をもとに、本研究で行う実験の手順を以下のように定めた。

- 被験者に実験のマニュアルを熟読させる。  
実験開始前に、実験マニュアル配布し、被験者に熟読させる。
- 被験者に実験で用いる全てのISSARのデバイスに十分なれるまで練習させる。  
被験者に実験開始前に作業指示書を用いた作業と3種類のISSARデバイスを用いた作業の事前練習を充分に行わせる。
- タスクの実施し各種評価指標を計測する。  
被験者は作業指示書、3種類のISSARデバイスを用いて、それぞれ2回ずつ計8回タスクを遂行する。作業指示書と3種類のISSARインタフェースを用いたタスクの1回目と2回目のタスク完遂時間とエラー回数の変化を測定し、タスクの学習効果、ISSARインタフェースの学習効果の有無を調べる。

そのため、図 4.17 に示すように、タスクの 1 巡目 (タスク 1 からタスク 4) はタスク完遂時間とエラー回数のみを計測する。ISSAR インタフェースを用いた 2 巡目のタスク (タスク 5 からタスク 7) では全ての評価指標を測定する。作業指示書を用いた 2 巡目のタスク (タスク 8) ではタスク完遂時間とエラー回数を計測する。

- 実験後のインタビューを行う。  
15 分程度のインタビューを行う。その様子はビデオ撮影する。

実験の流れの詳細を図 4.17 に示す。

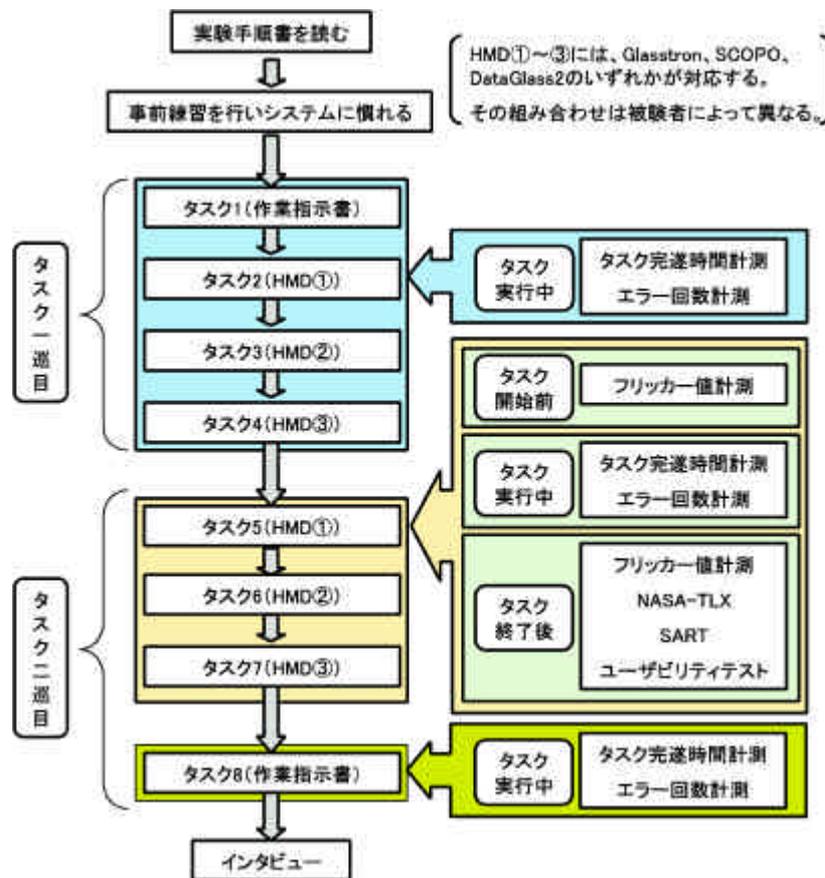


図 4.17: 実験の流れ

### 4.3.5 実験の実施

本項では、前節の実験手順の設計に従って行った実験の詳細について述べる。

## 被験者

被験者は系統隔離作業の経験をもたない6名の学生(男性, 平均年齢23.0才, 範囲22-24才)とした。6人中3人は眼鏡をかけて実験を行った。各被験者は裸眼または矯正後の視力に屈折異常、色覚異常は無かった。

## 実験日程

実験は2003年9月6日から8日までの3日間に行った。

## バルブ探索パタンの設定

バルブ探索ボタンは、実験の事前練習用に1ボタン、作業指示書を使用した場合のタスク用に2ボタン、ISSARを使用した場合のタスク用に6ボタン用意した。実験が失敗した場合に用いる予備として、作業指示書用に1ボタン、ISSAR用に2ボタンを用意した。全てのバルブ探索ボタンは、動線距離が等しくなるように設計している。なお、各バルブ探索ボタンの詳細については付録Eに示す。

## 被験者ごとの各タスクで使用するHMDとバルブ探索ボタンの組み合わせの設定

表4.5に、被験者が各タスクで使用する情報提示デバイスとバルブ探索ボタンの組み合わせを示す。これらの組み合わせは、4.3.4項で述べたISSARのインタフェースに関する順序効果を排除するために、各被験者ごとに使用するHMDの使用する順番が異なる設計となっている。

表 4.5: 被験者が各タスクで使用するHMDとバルブ探索ボタン

	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	被験者 E	被験者 F
タスク 1	作業指示書 作業指示書用ボタン 1	作業指示書 作業指示書用ボタン 2	作業指示書 作業指示書用ボタン 1	作業指示書 作業指示書用ボタン 2	作業指示書 作業指示書用ボタン 1	作業指示書 作業指示書用ボタン 2
タスク 2	Glasstron ISSAR 用ボタン 1	Glasstron ISSAR 用ボタン 2	SCOPO ISSAR 用ボタン 1	SCOPO ISSAR 用ボタン 5	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 4	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 5
タスク 3	SCOPO ISSAR 用ボタン 2	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 1	Glasstron ISSAR 用ボタン 3	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 6	Glasstron ISSAR 用ボタン 5	SCOPO ISSAR 用ボタン 4
タスク 4	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 3	SCOPO ISSAR 用ボタン 3	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 2	Glasstron ISSAR 用ボタン 4	SCOPO ISSAR 用ボタン 6	Glasstron ISSAR 用ボタン 6
タスク 5	Glasstron ISSAR 用ボタン 4	Glasstron ISSAR 用ボタン 5	SCOPO ISSAR 用ボタン 4	SCOPO ISSAR 用ボタン 2	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 1	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 2
タスク 6	SCOPO ISSAR 用ボタン 5	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 4	Glasstron ISSAR 用ボタン 6	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 3	Glasstron ISSAR 用ボタン 2	SCOPO ISSAR 用ボタン 1
タスク 7	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 6	SCOPO ISSAR 用ボタン 6	DataGlass2 ISSAR 用ボタン 5	Glasstron ISSAR 用ボタン 1	SCOPO ISSAR 用ボタン 3	Glasstron ISSAR 用ボタン 3
タスク 8	作業指示書 作業指示書用ボタン 2	作業指示書 作業指示書用ボタン 1	作業指示書 作業指示書用ボタン 2	作業指示書 作業指示書用ボタン 1	作業指示書 作業指示書用ボタン 2	作業指示書 作業指示書用ボタン 1

タスク途中で中止した場合は、予備のバルブ探索ボタンを用いてやり直す

## 実験

実験開始前に被験者に対して被験者マニュアルを配布し、熟読するよう指示した。

本番のタスク開始前に被験者にタスクと各 ISSAR デバイスの使用法に十分に慣れさせ、実験結果からタスクの学習効果と ISSAR インタフェースの学習効果を排除することを目的に、事前練習を行った。事前練習では、作業指示書と 3 種の ISSAR デバイスを用いて、それぞれ 10 分程度、練習用のバルブ探索パターンを用いてタスクを遂行させた。

透過型 HMD を用いる場合は、そのタスク直前にキャリブレーションを行った。

本番のタスクは表 4.5 に従って行った。タスク遂行中にトラブルが生じ中断した場合は、予備のバルブ探索パターンに変更してタスクをやり直した。

また、4.3.1 項で述べた実験環境録画システムを各タスクの開始直前に起動して実験の様子を記録をし、タスク終了後は停止した。

実験終了後に 15 分から 30 分程度のインタビューを行い、その内容をビデオで撮影した。

## 4.4 実験結果

実験の結果をタスク完遂時間、エラー回数、フリッカーテスト、NASA-TLX、ユーザビリティテスト、SART10-D に分けて示す。インタビュー結果は代表的な意見のみ示し、全ての意見は付録 F で示す。

### 4.4.1 タスク完遂時間

#### 測定結果

タスク完遂時間の計測の結果を表 4.6 に示す。また、各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差を示したグラフを図 4.18 に示す。

#### 学習効果の有無の確認

タスク完遂時間に関して、タスク自体の学習効果とインタフェースの学習効果の有無を調べた。

##### 1. タスクの学習効果

作業指示書を用いた 1 巡目のタスクと 2 巡目のタスクのタスク完遂時間には有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。

表 4.6: タスク完遂時間の測定結果 (単位: 秒)

	作業指示書		Glasstron		SCOPO		DataGlass2	
	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目
被験者 A	230	277	102	65	98	75	99	107
被験者 B	146	135	67	75	117	124	141	183
被験者 C	163	126	56	57	75	86	79	117
被験者 D	211	240	76	72	100	85	159	171
被験者 E	175	109	82	79	120	66	141	119
被験者 F	143	213	82	78	73	68	208	214
平均	178.0	183.3	77.5	71.0	97.2	84.0	137.8	151.8
標準偏差	35.4	69.3	15.6	8.5	20.0	21.3	45.5	43.6
平均	180.7		74.3		90.6		144.8	
標準偏差	52.5		12.4		20.9		43.1	

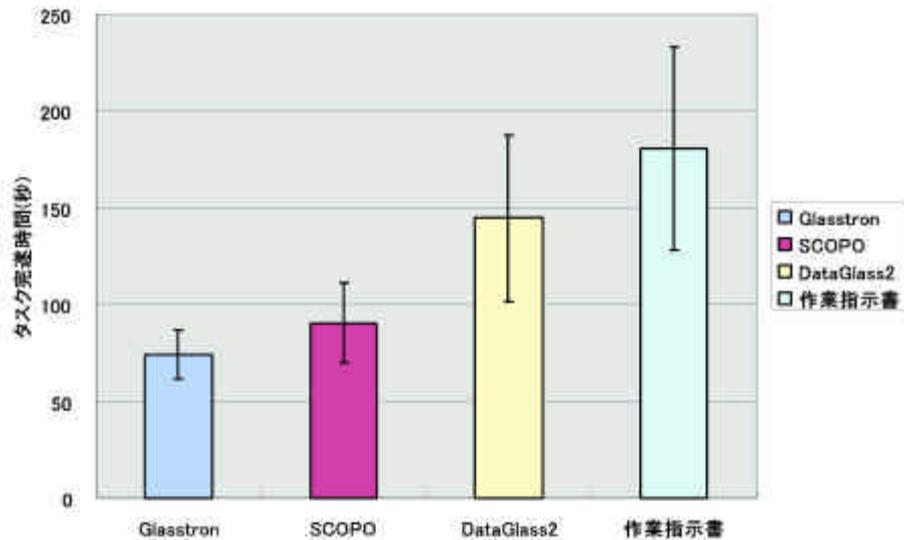


図 4.18: 各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差

## 2. インタフェースの学習効果

Glasstron、SCOPO、DataGlass2 を用いた 1 巡目のタスクと 2 巡目のタスクにはタスク完遂時間に有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。

### インタフェース間の比較

各インタフェース間のタスク完遂時間の差を調べた。

1. Glasstron を用いた作業は、SCOPO を用いた作業よりもタスク完遂時間が有意に短い (有意水準 5% の t 検定)。
2. Glasstron を用いた作業は、DataGlass2 を用いた作業よりもタスク完遂時間が有意に短い (有意水準 5% の Welch の検定)。
3. SCOPO を用いた作業は、DataGlass2 を用いた作業よりもタスク完遂時間が有意に短い (有意水準 5% の Welch の検定)。

## 4.4.2 エラー回数

### 測定結果

タスク完遂時間計測の結果を表 4.7 に示す。各インタフェースのエラー回数の平均値と標準偏差を示したグラフを図 4.19 に示す。

表 4.7: エラー回数の測定結果 (単位: 回)

	作業指示書		Glasstron		SCOPO		DataGlass2	
	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目
被験者 A	1	0	0	0	0	0	2	3
被験者 B	0	0	0	0	2	1	3	6
被験者 C	1	0	1	0	0	1	0	1
被験者 D	1	0	0	0	0	0	2	1
被験者 E	0	0	0	0	0	0	8	2
被験者 F	0	0	1	0	0	0	1	1
平均	0.5	0.0	0.3	0.0	0.3	0.3	2.7	2.3
標準偏差	0.5	0.0	0.5	0.0	0.8	0.5	2.8	2.0
平均	0.3		0.2		0.3		2.5	
標準偏差	0.5		0.4		0.7		2.3	

### 学習効果の有無の確認

エラー回数に関して、タスク自体の学習効果とインタフェースの学習効果の発生を調べた。

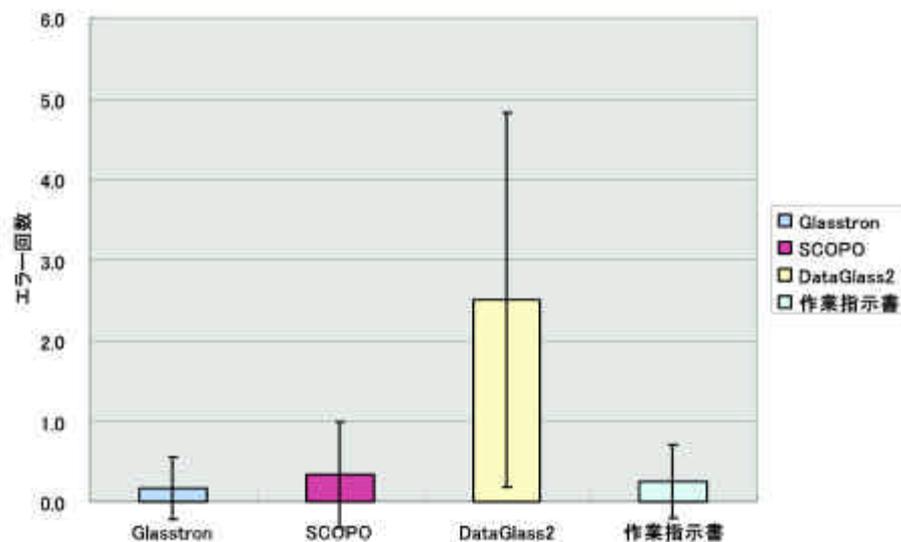


図 4.19: 各インターフェースのエラー回数の平均値と標準偏差

#### 1. タスクの学習効果

作業指示書を用いた 1 巡目のタスクは 2 巡目のタスクよりもエラー回数が有意に少ない (有意水準 5% の t 検定)。

#### 2. インタフェースの学習効果

Glasstron、SCOPO、DataGlass2 を用いた 1 巡目のタスクと 2 巡目のタスクでは、エラー回数に有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。

### インタフェース間の比較

各インタフェース間のエラー回数の差を調べた。

1. Glasstron を用いた作業と SCOPO を用いた作業ではエラー回数に有意差は無い (有意水準 5% の t 検定)。
2. Glasstron を用いた作業は、DataGlass2 を用いた作業よりもエラー回数が有意に少ない (有意水準 5% の Welch の検定)。
3. SCOPO を用いた作業は、DataGlass2 を用いた作業よりもエラー回数が有意に少ない (有意水準 5% の Welch の検定)。

### 4.4.3 フリッカーテスト

#### 測定結果

フリッカーテストの測定結果を表 4.8、および表 4.9 に示す。各インタフェースの CCF 値の変化値の平均と標準偏差を示したグラフを図 4.20 に示す。

表 4.8: フリッカーテストの測定結果 (1) (単位: Hz)

		タスク前			タスク後			タスク前後の 平均値の差
		上昇法	下降法	平均	上昇法	下降法	平均	
被験者 A	Glasstron	35	36	35.5	35	34	34.5	1
	SCOPO	33	34	33.5	34	34	34	-0.5
	DataGlass2	34	34	34	33	35	34	0
被験者 B	Glasstron	39	37	38	36	33	34.5	3.5
	SCOPO	39	44	41.5	34	32	33	8.5
	DataGlass2	37	39	38	35	33	34	4
被験者 C	Glasstron	36	34	35	36	36	36	-1
	SCOPO	34	36	35	39	37	38	-3
	DataGlass2	35	38	36.5	38	37	37.5	-1
被験者 D	Glasstron	34	34	34	31	29	30	4
	SCOPO	33	32	32.5	32	32	32	0.5
	DataGlass2	33	33	33	43	37	40	-7
被験者 E	Glasstron	34	34	34	33	33	33	1
	SCOPO	35	35	35	33	34	33.5	1.5
	DataGlass2	35	34	34.5	34	33	33.5	1
被験者 F	Glasstron	45	42	43.5	41	42	41.5	2
	SCOPO	45	44	44.5	43	40	41.5	3
	DataGlass2	46	44	45	40	42	41	4

表 4.9: フリッカーテストの測定結果 (2) (単位: Hz)

	Glasstron	SCOPO	DataGlass2
被験者 A	1.0	-0.5	0.0
被験者 B	3.5	8.5	4.0
被験者 C	-1.0	-3.0	-1.0
被験者 D	4.0	0.5	-7.0
被験者 E	1.0	1.5	1.0
被験者 F	2.0	3.0	4.0
平均	1.8	1.7	0.2
標準偏差	1.8	3.9	4.1

図 4.20 で分かるように、CCF の変化値は被験者によって非常にばらつきがあった。

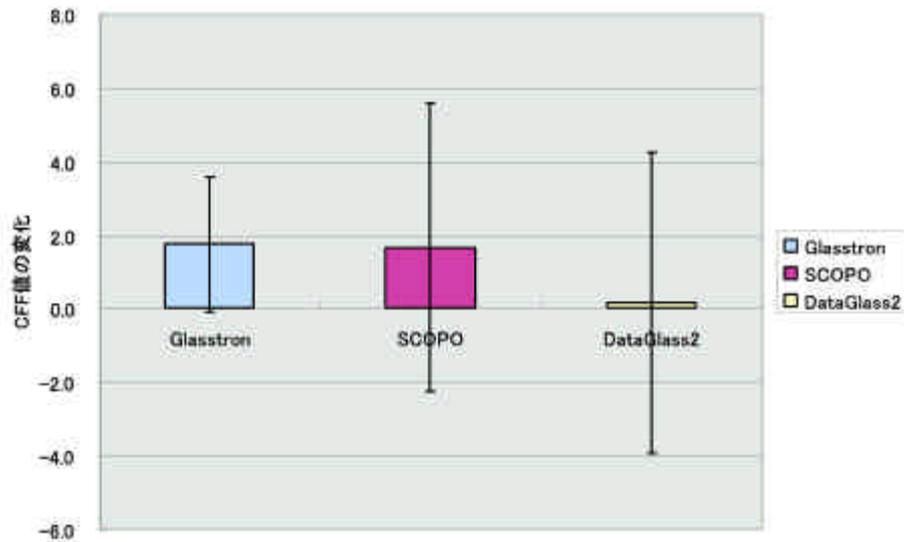


図 4.20: 各インタフェースの CFF の変化値の平均と標準偏差

#### インタフェース間の比較

各インタフェース間の CFF の変化値の差を調べた。

1. Glasstron を用いた作業と SCOPO を用いた作業では CFF の変化値に有意差は無い (有意水準 5% の t 検定)。
2. Glasstron を用いた作業と DataGlass2 を用いた作業では CFF の変化値に有意差は無い (有意水準 5% の t 検定)。
3. SCOPO を用いた作業と DataGlass2 を用いた作業では CFF の変化値に有意差は無い (有意水準 5% の t 検定)。

#### 4.4.4 NASA-TLX

##### 評価結果

NASA-TLX の評価結果を表 4.10 に示す。

#### インタフェース間の比較

図 4.21 に、各インタフェース間の WWL 得点の比較を示す。

図 4.21 より次のことがいえる。

1. Glasstron を用いた作業は SCOPO を用いた作業よりもメンタルワークロードが小さいと感じる人が多い。

表 4.10: NASA-TLX の評価結果

	Glasstron	SCOPO	Dataglass2
被験者 A	76.5	79.9	92.3
被験者 B	50.4	72.7	72.4
被験者 C	34.8	62.4	69.3
被験者 D	14.0	24.5	82.7
被験者 E	69.3	65.7	71.7
被験者 F	48.7	48.6	48.7
平均	48.9	59.0	72.8
標準偏差	22.8	19.9	14.6

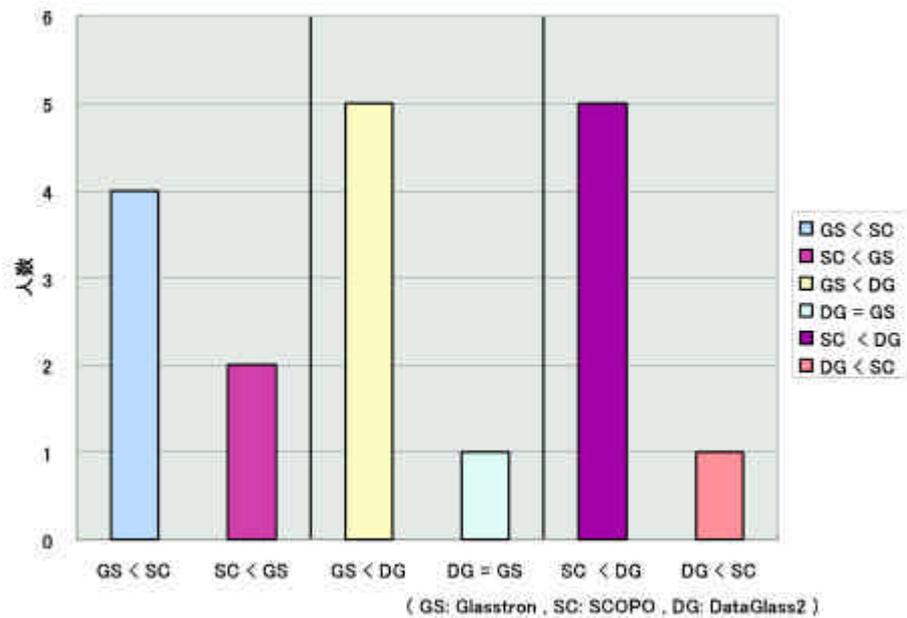


図 4.21: 各インタフェース間のWWL得点の比較

2. Glasstron を用いた作業は DataGlass2 を用いた作業よりもメンタルワークロードが小さいと感じる人が多い。
3. SCOPO を用いた作業は DataGlass2 を用いた作業よりもメンタルワークロードが小さいと感じる人が多い。

#### 4.4.5 SART10-D

##### 評価結果

表 4.11 に Glasstron の SART10-D 評価結果を、表 4.12 に SCOPO の SART10-D 評価結果を、表 4.13 に DataGlass2 の SART10-D 評価結果を示す。

表 4.11: Glasstron の SART10-D 評価結果

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	SART スコア
被験者 A	3	6	5	5	3	7	6	2	3	4	3.6
被験者 B	5	2	2	2	1	2	2	6	4	2	2.8
被験者 C	3	3	3	2	3	5	5	4	6	5	5.8
被験者 D	2	2	1	1	4	6	2	6	6	4	6.9
被験者 E	5	4	3	6	6	3	3	7	7	3	6.2
被験者 F	6	4	4	2	2	2	2	6	6	4	2.7
平均	4.0	3.5	3.0	3.0	3.2	4.2	3.3	5.2	5.3	3.7	4.6
標準偏差	1.5	1.5	1.4	2.0	1.7	2.1	1.8	1.8	1.5	1.0	1.9

表 4.12: SCOPO の SART10-D 評価結果

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	SART スコア
被験者 A	5	4	6	5	6	6	7	6	4	5	6.0
被験者 B	5	5	5	7	6	5	5	4	2	3	3.8
被験者 C	5	5	2	1	4	6	6	6	6	5	5.9
被験者 D	4	3	1	1	1	5	6	4	5	4	4.9
被験者 E	2	3	3	6	4	3	3	7	6	4	7.0
被験者 F	6	4	4	2	2	2	2	6	6	4	2.7
平均	4.5	4.0	3.5	3.7	3.8	4.5	4.8	5.5	4.8	4.2	5.0
標準偏差	1.4	0.9	1.9	2.7	2.0	1.6	1.9	1.2	1.6	0.8	1.6

表 4.14 に各インタフェースの SART スコアを示す。

##### インタフェース間の比較

図 4.21 に、人数別の各インタフェース間の SART スコアの比較を示す。

表 4.13: DataGlass2 の SART10-D 評価結果

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	SART スコア
被験者 A	4	6	6	6	5	7	3	5	2	4	3.6
被験者 B	1	4	2	4	5	7	7	4	3	3	6.8
被験者 C	3	2	5	6	4	7	5	3	3	5	5.8
被験者 D	6	5	3	4	5	2	4	3	1	4	1.8
被験者 E	5	5	4	5	3	6	6	6	3	5	5.0
被験者 F	1	4	2	6	6	6	6	1	1	4	5.7
平均	3.3	4.3	3.7	5.2	4.7	5.8	5.2	3.7	2.2	4.2	4.8
標準偏差	2.1	1.4	1.6	1.0	1.0	1.9	1.5	1.8	1.0	0.8	1.8

表 4.14: インタフェース別の SART スコア

	Glasstron	SCOPO	Dataglass2
被験者 A	3.6	6.0	3.6
被験者 B	2.8	3.8	6.8
被験者 C	5.8	5.9	5.8
被験者 D	6.9	4.9	1.8
被験者 E	6.2	7.0	5.0
被験者 F	2.7	2.7	5.7
平均	4.7	5.1	4.8
標準偏差	1.9	1.6	1.8

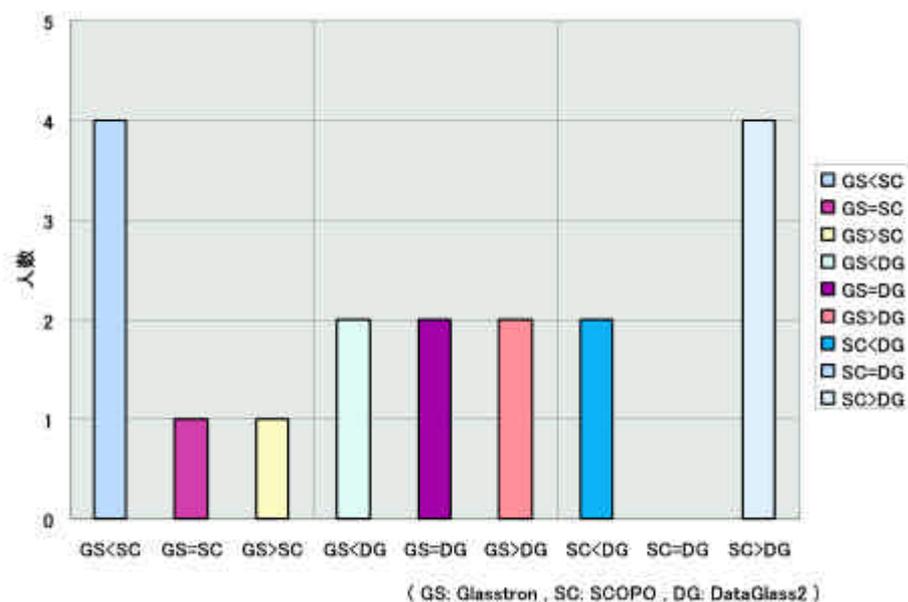


図 4.22: 各インタフェース間の SART スコアの比較

#### 4.4.6 ユーザビリティテスト (レーティング項目)

##### ユーザビリティテスト回答結果

ユーザビリティテストの 5 つの質問項目の評定結果を表 4.15 に示す。

##### インタフェース間の比較

図 4.23 に質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評定値を示す。

#### 4.4.7 ユーザビリティテスト (自由記述項目)

##### 回答結果

表 4.16 に Glasstron の、表 4.17 に SCOPO の、表 4.18 に DataGlass2 の、ユーザビリティテストの自由記述項目の結果を示す。

#### 4.4.8 インタビュー

##### 回答結果

インタビューで得られた代表的な意見を以下に示す。全てのインタビュー結果は付録 F に示す。

表 4.15: 5つの質問項目の評定結果

		被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	被験者 E	被験者 F	平均	標準偏差
Q1(R)	GT	5	4	4	4	4	4	4.2	0.4
	SC	2	1	4	5	3	5	3.3	1.6
	DG	2	2	3	5	3	5	3.3	1.4
Q2	GT	3	4	5	5	5	3	4.2	1.0
	SC	3	3	4	4	5	3	3.7	0.8
	DG	2	2	2	1	4	2	2.2	1.0
Q3(R)	GT	4	4	4	4	5	4	4.2	0.4
	SC	4	2	3	3	2	3	2.8	0.8
	DG	2	3	2	3	3	3	2.7	0.5
Q4	GT	4	4	5	4	4	4	4.2	0.4
	SC	2	2	5	4	4	5	3.7	1.4
	DG	2	2	2	1	2	3	2.0	0.6
Q5	GT	4	3	4	4	4	4	3.8	0.4
	SC	3	2	4	4	4	5	3.7	1.0
	DG	2	2	3	1	1	2	1.8	0.8

Q1 と Q3 は逆転質問であるため、6 から評定値を引いた値に換算する

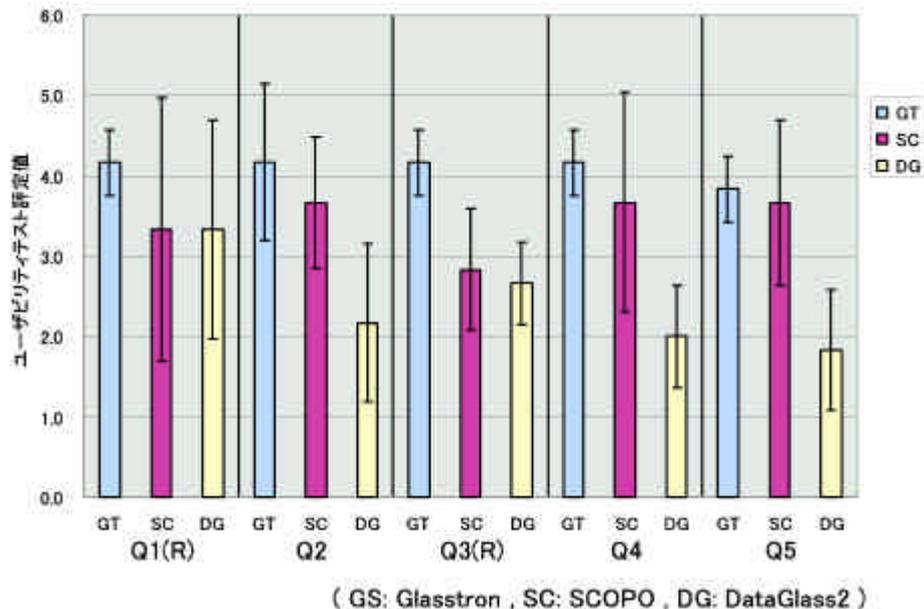


図 4.23: 質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評定値

表 4.16: Glasstron に関するユーザビリティテストの自由記述結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	色彩の彩度が丁度。画質が滑らか。表示が素早い。	ちょっと重い。
被験者 B	見やすい。大雑把な場所がわかりやすい。	目が疲れる。
被験者 C	ズレが小さい。タイムラグが小さい。	重量させてほしい。
被験者 D	表示が正確でわかりやすい。	実際の自分と対象物の位置関係とビデオの自分と対象物の位置関係の誤差が大きい。
被験者 E	現実と重ね合わせているのでわかりやすい。視線の移動がない。	正確に出してくれない。タイムラグがある。近くで見ると何も表示しない。
被験者 F	実物が全く違和感なく見られる。	リフレッシュレートが低い。カーソルのぶれが大きい。(多分右目につけられた方が見やすかった。効き目なので)

表 4.17: SCOPO に関するユーザビリティテストの自由記述結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	マーカ方向が的確。	視線との不一致(特に右目)
被験者 B	近未来的。	装着のしづらさ。
被験者 C	視界が広い。誤差が小さい。	シースルーにしてほしい。戸惑う。
被験者 D	正確な情報を得つつも対象物と自分の位置も正確にわかる。情報を得やすいと感じた。	最初の身体へのとりつけ位置で画面の見やすさが大きくわかり、その位置が悪いと正確な情報を得にくい。
被験者 E	画面が作業の邪魔になりにくい。作業位置の確認が行いやすい。	画面が小さい。色が悪い。たまに違うのを提示する(速く動くとき)。
被験者 F	自分の視界でパルプが見られるので指さしはしやすい。	画面と実物の目線の使い分けに慣れが必要。

表 4.18: DataGlass2 に関するユーザビリティテストの自由記述結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	あまりない。	見づらい。マーカが不正確。
被験者 B	ボタンのある大体の方向がわかる。	大体の方向しかわからない。目が疲れがちかちかする。
被験者 C	シースルー。	ズレが大きい。タイムラグが大きい。
被験者 D	直接対象物を見つても情報が見れる点。正に AR であるところ。自分と対象物の位置関係を把握しやすい。	画面小さすぎ。処理遅すぎ。
被験者 E	正確に提示してくれる。解像度が高く見やすい。	現実と感覚にギャップがある。
被験者 F	視野がきれい。両眼なので違和感が少ない。	身体的感覚とのずれをなくせるよう、カメラが調整できるようにした方がよい。指差しがしにくいときがある。

1. 作業指示書、SCOPO、Glasstron、DataGlass2の中で作業を正確に効率よく行えたのは？  
GlasstronとSCOPOが効率的に作業を行えたという意見が大半だった。
2. SCOPOとGlasstronとDataGlass2の中で負担が大きいのは？  
DataGlass2の重畳がずれやすいため最も疲れるという意見が多かった。
3. SCOPOとGlasstronとDataGlass2の中で表示が見やすいのは？  
Glasstronが最も見やすいという意見が大半だった。SCOPOは表示画面が小さく見辛いという意見があった。
4. 作業指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良い？  
慣れればシステムの方が良いという意見が多かった。
5. 作業指示書を除いて動きやすかったインタフェースは？  
現実世界を実視界で見るSCOPOとDataGlass2が動き回りやすいという意見が大半だった。
6. 各インタフェースについての感想は？
  - Glasstronは、最も見やすいが遠近感が無くバルブを指差すのが難しいという感想が多かった。
  - SCOPOは、見やすいが視線の移動が多い。表示画像の現実世界像と実世界との対応付けが難しいという感想が多かった。
  - DataGlass2は、重畳がずれやすい、マーカを認識しているかどうか分からないという感想が多かった。
7. 評価指標についての感想は？  
NASA-TLXとSARTの質問の意味が分かり難いという意見があった。

## 4.5 実験の考察

### Glasstronについて

Glasstronを用いたISSARはタスク完遂時間が短く、エラー回数が少なく、メンタルワークロードが低く、ユーザビリティテストの評価も高い結果となった。今回の実験室環境とタスクであれば、他の2つのインタフェースと比べて優れているといえる。

ユーザビリティテストのレーティング項目の結果は全て高い評価であったが、特にQ1(このシステムを動かすために事前にたくさんのことを学ぶ必要があったか?)とQ3(このシステムはむだに複雑になっていないか?)の2質問項目の結果が他のインタフェースに比べて高い評価であった。Q1はシステムの認知性に関する質問で、システムのわかりやすさを尋ねている。Q3はシステムの操作性に関する質問で、システムの

扱いやすさを尋ねている。

SCOPO ではディスプレイと実空間の視線切り替えが必要で、DataGlass2 ではディスプレイキャリブレーションが必要であるが、Glasstron はそのような操作を必要とせず、他の2つのインタフェースと比較して、単純なインタフェースであるため、初めての人には分かりやすく、また扱いやすかったと考えられる。

ユーザビリティテストの自由記述項目やインタビューの意見をまとめると、Glasstron の表示は最も見やすいが、現実世界像の視野が狭く遠近感が無いため、障害物がある環境では、衝突・転倒などの危険性があると予想される。

また、カメラ画像を現実世界像とする Glasstron を用いた AR システムでは、を身体的感覚と視覚からイメージする体の動きにずれがあるため、バルブを指で指す作業が他のインタフェースに比べて難しく、一度カメラの前に手を持ってきて手を撮影してから動かさなければ思う場所に手を伸ばせないことが分かった。

原子力発電プラントの系統隔離作業は、細かい手作業が必要になるうえ入り組んだ場所を歩く必要がある。今回のタスクでは Glasstron の成績が最も良かったものの、実際のプラント環境においても Glasstron を用いた ISSAR が優れているかどうかは疑わしいため、環境を変えて他のインタフェースと比較し、遠近感の欠如や身体的感覚のずれの影響を調べる必要がある。

## SCOPO について

SCOPO は、タスク完遂時間や NASA-TLX、ユーザビリティテストのレーティング項目においては、Glasstron よりも低い評価となっているが、全ての指標において DataGlass2 より高評価であった。全般的に特別に高評価の項目があったわけではないが、低評価となる項目も無かった。

SCOPO は現実世界の知覚を実視界で行うため、視界が肉眼と変わらない。そのため、Glasstron 使用時に比べ、移動の際に不安がない。また、細かい手作業にも対応できると予想される。

ただし、視線の切り替えが大変であるという感想は多かった。ディスプレイの中で仮想オブジェクトが指し示している場所が、実空間ではどこにあたるのかを瞬時に理解するのは難しいという感想があった。

ユーザビリティテストの自由記述項目では、SCOPO のディスプレイは小さいため見にくい、また、位置がずれやすいという感想があった。今後、よりディスプレイが大きい SCOPO を開発する、ディスプレイがずれないように固定方法を改良する等の対策が必要である。

## DataGlass2 について

DataGlass2 を用いた ISSAR は、タスク完遂時間、エラー回数、NASA-TLX、ユーザビリティのレーティング項目において、他の 2 つのインタフェースよりも低評価となった。特にエラーの数が他のインタフェースと較べて非常に多かった。また、DataGlass2 ではユーザがカメラにどこまでの範囲が写っているかを知ることができないため、カメラの撮影範囲にマーカが入っているかどうか判断できないという問題があった。

DataGlass2 を用いた ISSAR は光学シースルー方式であるため、ディスプレイキャリブレーションが必要である。しかし、光学シースルー AR のディスプレイキャリブレーションではディスプレイの位置や角度が少しでもずれると、重畳画像の表示位置が大きすぎてしまうために改めてキャリブレーションをしなくてはならない。

本研究では簡易的なキャリブレーション機能を開発して本実験を行ったが、タスク中にディスプレイが少しずつずれ、目的のバルブとは異なるバルブを指差してしまうという状況になった。それが、DataGlass2 を用いたタスクでエラー回数が非常に多かった原因である。

実際の現場の作業では、作業者は動き回るため、ディスプレイがずれる状況は頻繁に起こりうる。その度に作業を中断してディスプレイキャリブレーションを行うのは現実的ではない。そのため、ディスプレイの物理的なずれを自動的に補正して適切な位置に表示するディスプレイキャリブレーション技術が必要である。

## 評価指標について

タスク完遂時間、エラー回数、NASA-TLX、ユーザビリティテストは妥当な結果が出た。フリッカーテストの結果はばらつきが非常に大きく、インタフェース間に違いは見られなかった。本実験のタスクは 1 回 3 分程度と短く、フリッカー値に明確に違いが出るほど疲労度が高いものではないため、フリッカーテストは本実験の評価指標として適していないことが分かった。SART も被験者によってばらつきが大きかった。実験のタスクは、めまぐるしく変わる状況の中で大量かつ流動的な情報の中から必要なものを取捨選択するというものではないため、そのような能力を測る SART は本実験の評価指標として適していないことが分かった。

## 被験者数について

被験者が 6 人と少ないため、実験結果の信頼性を上げるためには被験者数を増やす必要があると考えられる。

## 実験環境について

本実験の環境は、足下が平面で障害物がなく、障害物につまずくということが起こらない環境であった。しかし、実際の作業環境では足下や頭の周りに障害物がないか注意しながら移動する必要があり、作業員の視界が制限される Glasstron は実際の使用には問題があることが予想される。

## システムについて

インタビュー結果から、バルブ指示オブジェクトが見にくいという意見が出された。バルブ指示オブジェクトは、赤い正方形の枠であり、それを目的のバルブを囲い込むように重畳表示していたが、視認性を上げるために、色や形を変更する必要がある。

## 第 5 章 原子力発電プラントの模擬的な環境における ISSAR の評価実験

本章では、原子力発電プラントの模擬的な環境において行った ISSAR インタフェースの比較評価実験について述べる。

### 5.1 実験の目的

本研究で試作した ISSAR は情報提示インタフェースや操作インタフェースに多様性を持っている。

本実験は原子力発電プラント現場への ISSAR の導入を検討する上で、最適な ISSAR インタフェースを提案することを目的とし、特に情報提示インタフェースのあり方を探るため、被験者実験により各種の情報提示インタフェースの比較評価を行う。

第 4 章で述べた実験の結果によって Dataglass2 は、本研究で開発を目指す ISSAR に要求される仕様を満たすことができないことが判明したため、本実験ではウェアラブル型 ISSAR のインタフェースから Dataglass2 は除外する。従って、ISSAR インタフェースには、ウェアラブル型の情報提示デバイスとして両目遮へい型 HMD の Glasstron、片目参照型 HMD の SCOPO を用いる。ハンドヘルド型の情報提示デバイスとしてタブレット PC と PDA の代用品である携帯小型テレビを使用する。

本実験はマイクロガスタービン発電施設を原子力発電プラントの擬似的な環境として実験を行う。

### 5.2 実験方針

4 つのインタフェースを比較するにあたり、同時に比較を行えばインタフェースの順序効果を排除するために、最低 24 人の被験者が必要であるが、比較対象を 2 つのグループに分け、実験を前半と後半の 2 回に分けて行うと、最低 12 名の被験者で実験が実施可能である。

第 4 章で述べた実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR の評価実験の結果より、複雑な環境を動き回るタスクを行う場合、Glasstron は SCOPO と比べて危険性が高いと予想される。そこで本実験では、SCOPO は Glasstron よりも系統隔離作業を行うのに適しているとの予想のもと、実験 A において、SCOPO と Glasstron の比較評価を行

い、同時に実験 B において、ハンドヘルド型である携帯小型 TV とタブレット PC とウェアラブル型の SCOPO の 3 種類の比較評価を行う。

## 5.3 実験用システムの開発

第 3 章で述べた設計と第 4 章で述べた実験室環境における実験で抽出された課題から、ISSAR の設計を変更して試作した本実験用のウェアラブル ISSAR のハードウェア構成とソフトウェア構成を述べる。

### 5.3.1 ハードウェア構成

実験ではウェアラブル型の ISSAR の情報提示デバイスとして、遮へい型 HMD の Glasstron、参照型 HMD の SCOPO の 2 種類の HMD と、ハンドヘルド型の ISSAR の情報提示デバイスとして、タブレット PC と携帯小型テレビを使用する。第 3 章でインタフェース設計を行った 2 ボタン式操作インタフェースとして 2 ボタンの USB マウスを用いた。作業中の危険防止のため、頭にはヘルメットを、肘と膝にはプロテクタを装備する。

#### SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成

図 5.1 に、本実験における SCOPO(参照型 HMD) を用いた実験用 AR システムの装着図を示す。



図 5.1: SCOPO を用いた ISSAR の装着図

SCOPO を用いた ISSAR は、ヘルメットに SCOPO が取り付けられている。CCD カ

メラはヘルメットのひさしの下にカメラの台座を取り付け、そこにカメラが前を向くように固定する。右手の甲には RFID リーダを取り付ける。操作マウスはバックパックの左の肩掛けベルトにマジックテープで取り付ける。図 5.2 に SCOPO を用いた実験用 AR システムのハードウェア構成図を示す。

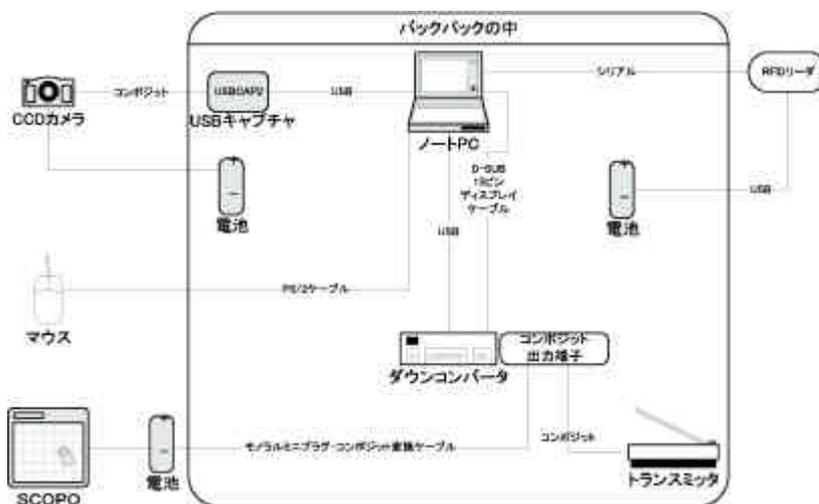


図 5.2: SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成図

図 5.2 に示すように、本システムでは、CCD カメラが撮影した画像を、USB ビデオキャプチャを介してノート PC に取り込む。その画像をノート PC が処理し、作業支援情報を付加した画像をダウンコンバータを介して SCOPO に出力する。その出力は同時に無線トランスミッタを介して、実験環境録画システムに送信される。RFID リーダは RFID タグの格納するバルブ識別 ID を読み取り、ノート PC に送る。マウスの左クリックは「作業ステップを進める」、右クリックは「作業ステップを戻す」に対応する。表 5.1 に、SCOPO を用いた実験用システムを構成するハードウェアを示す。なお、各デバイスの仕様は付録 C で述べる。

#### Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成

図 5.3 に、本実験における Glasstron(遮へい型 HMD) を用いた実験用バルブ探索支援システムの装着図を示す。

図 5.3 に示すように、ヘルメットのひさしの下にカメラの台座を取り付け、そこにカメラが前を向くように固定する。操作マウスと RFID リーダの装備は SCOPO と同様である。図 5.4 に Glasstron を用いた実験用システムのハードウェア構成図を示す。システムの動作は SCOPO と同様である。表 5.2 に、Glasstron を用いた実験用システムを構成するハードウェアを示す。なお、各デバイスの仕様は付録 C で述べる。

表 5.1: SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア

ハードウェア	製品名	メーカー
HMD	SCOPO	三菱電機
CCD カメラ	WAT-230A	Watec
ノート PC	ThinkPad T30	IBM
マウス	IntelliMouse	Microsoft
ビデオキャプチャカード	USB-CAP2	I-O DATA
ダウンコンバータ	NV-CV1600R	NOVAC
RFID リーダ	V700-HMD11	OMRON
トランスミッタ	TR-25R	コロナ電業
無線 LAN カード	WLI-PCM-L11	BUFFALO

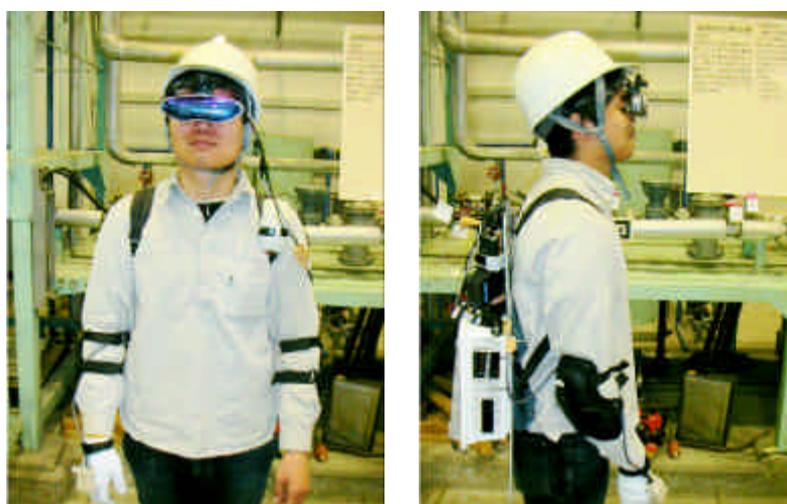


図 5.3: Glasstron を用いた ISSAR の装着図

#### 携帯小型 TV を用いた ISSAR のハードウェア構成

図 5.5 に、本実験における携帯小型 TV(遮へい型 HMD) を用いた実験用バルブ探索支援システムの装着図を示す。図 5.5 に示すように、CCD カメラは携帯小型 TV のディスプレイの上側面に台座を固定し、ディスプレイの後方を向くように固定する。操作マウス、RFID リーダの装着は SCOPO や Glasstron と同様に行う。図 5.6 に携帯小型 TV を用いた実験用システムのハードウェア構成図を示す。

本システムでは、CCD カメラが撮影した画像を、USB ビデオキャプチャを介してノート PC に取り込む。その画像をノート PC が処理し、作業支援情報を付加した画像をダウンコンバータを介して無線トランスミッタに出力する。トランスミッタの無線を携帯小型 TV のアンテナが受信し、ディスプレイに画像が表示される。同時に、実験環境録画システムもこの無線を受信する。RFID リーダと操作マウスの動作は SCOPO

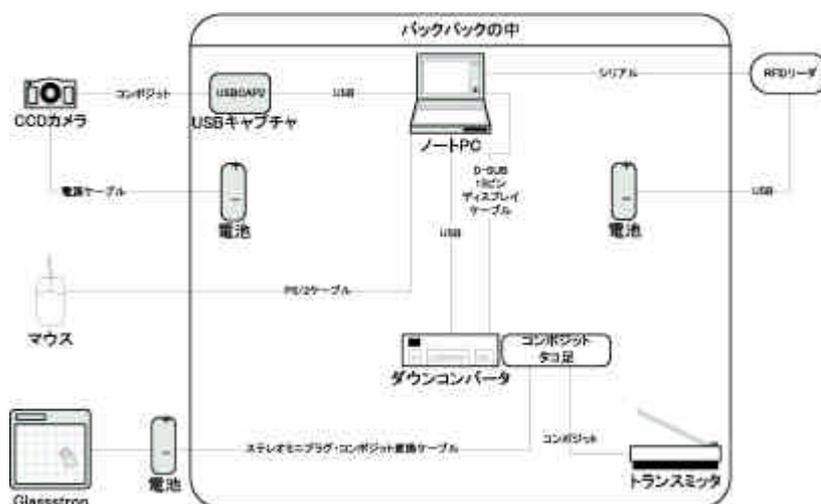


図 5.4: Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成図

表 5.2: Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア

ハードウェア	製品名	メーカー
HMD	Glasstron	Sony
CCD カメラ	WAT-230A	Watec
ノート PC	ThinkPad T30	IBM
マウス	IntelliMouse	Microsoft
ビデオキャプチャカード	USB-CAP2	I-O DATA
ダウンコンバータ	NV-CV1600R	NOVAC
RFID リーダ	V700-HMD11	OMRON
トランスミッタ	TR-25R	コロナ電業
無線 LAN カード	WLI-PCM-L11	BUFFALO

や Glasstron と同じである。表 5.3 に、携帯小型 TV を用いた実験用システムを構成するハードウェアを示す。なお、各デバイスの仕様は付録 C で述べる。

#### タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア構成

図 5.7 に、本実験におけるタブレット PC を用いた実験用バルブ探索支援システムの装着図を示す。

図 5.7 に示すように、CCD カメラはタブレット PC の上側面に台座を固定し、ディスプレイの後方を向くように固定する。RFID リーダの装着は他のインタフェースと同様に行う。操作デバイスとして、タブレットペンを装備する。タブレットペンはタブレット PC に収納可能である。図 5.8 にタブレット PC を用いた実験用システムのハードウェア構成図を示す。

本システムでは、CCD カメラが撮影した画像を、USB ビデオキャプチャを介してタ



図 5.5: 携帯小型 TV を用いた ISSAR の装着図

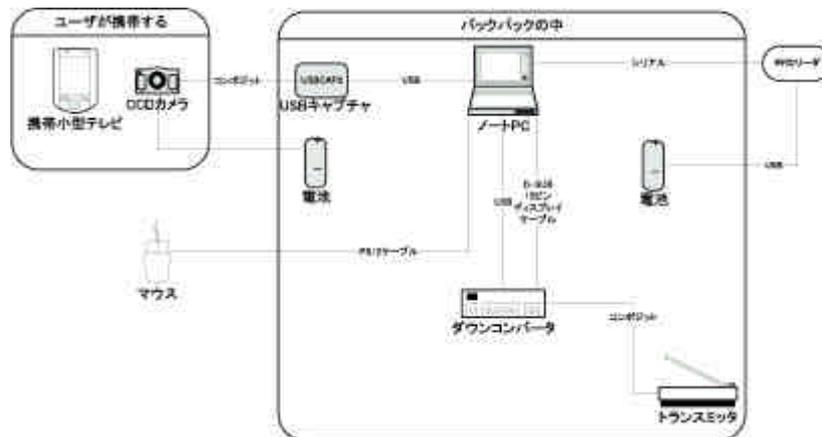


図 5.6: 携帯小型 TV を用いた ISSAR のハードウェア構成図

表 5.3: 携帯小型 TV を用いた ISSAR のハードウェア

ハードウェア	製品名	メーカー
小型液晶テレビ	SY-4100	CASIO
CCD カメラ	WAT-230A	Watec
ノート PC	ThinkPad T30	IBM
マウス	IntelliMouse	Microsoft
ビデオキャプチャカード	USB-CAP2	I-O DATA
ダウンコンバータ	NV-CV1600R	NOVAC
RFID リーダ	V700-HMD11	OMRON
トランスミッタ	TR-25R	コロナ電業
無線 LAN カード	WLI-PCM-L11	BUFFALO



図 5.7: タブレット PC を用いた ISSAR の装着図

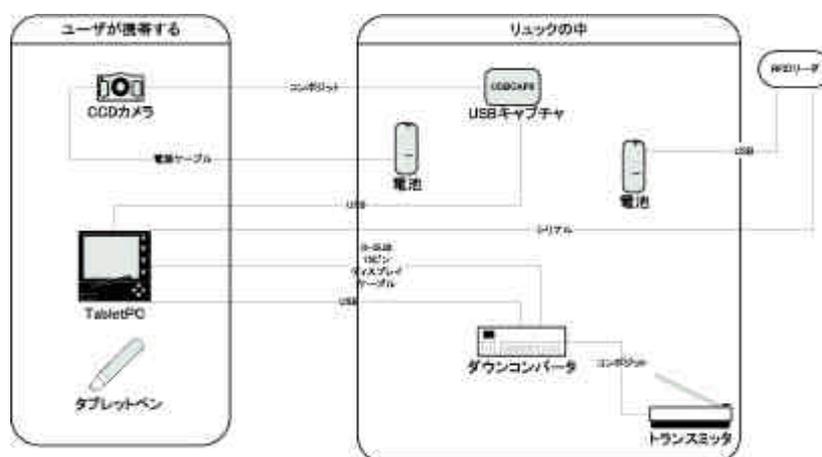


図 5.8: タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア構成図

タブレット PC に取り込む。その画像をタブレット PC が処理し、作業支援情報を付加した画像を表示する。同時にその画像をダウンコンバータを介してトランスミッタに出力し、無線で実験環境録画システムに画像を送信する。タブレットペンでタブレット PC の画面を 1 回タッチすると作業ステップが 1 つ進み、タブレットペンのクリックを押しながら画面にタッチすると作業ステップが 1 つ戻る。表 5.4 に、タブレット PC を用いた実験用システムを構成するハードウェアを示す。なお、各デバイスの仕様は付録 C で述べる。

### 5.3.2 ソフトウェア構成

本項では、ウェアラブル型 ISSAR の評価実験で見つかったバルブ指示オブジェクトの視認性の問題を解決するためのバルブ探索支援システムの変更について述べる。ま

表 5.4: タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア

ハードウェア	製品名	メーカー
TabletPC	Travel Mate C100	Acer
CCD カメラ	WAT-230A	Watec
ノート PC	ThinkPad T30	IBM
ビデオキャプチャカード	USB-CAP2	I-O DATA
ダウンコンバータ	NV-CV1600R	NOVAC
RFID リーダ	V700-HMD11	OMRON
トランスミッタ	TR-25R	コロナ電業
無線 LAN カード	WLI-PCM-L11	BUFFALO

た、ISSAR のバルブ確認支援システムの各機能の実装について述べる。次に、作業情報データベースの格納情報について述べる。作業進ちょく管理システムはウェアラブル型 ISSAR の評価実験のものと同じである。試作したシステムは Microsoft Windows 上で動作する。開発環境には Microsoft Visual C++6.0 を使用した。

#### バルブ探索支援システムの変更

第 4 章で述べたように、実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR の評価実験の際に、表示されたバルブ指示オブジェクトが見難いという感想が得られた。そのため、模擬プラント環境における実験では、バルブ指示オブジェクトを変更した。情報表示機能の変更点は以下の 2 つである。

1. 赤色では環境が暗い場合に特に視認性が悪かったため、バルブ指示オブジェクトを赤色から視認性の良い黄色に変更した。
2. 正方形の枠による指示では、遠い距離から見ると特に視認性が悪かったため、囲う方式から半透明の円を重畳する方式に変更した。

情報提示機能以外は全て実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR の評価実験と同じである。

#### バルブ確認支援システム

バルブ確認支援システムはマルチスレッド化し、バルブ探索支援システムと並列に動作するようにした。

## 5.4 実験方法

### 5.4.1 実験環境

#### MGT 発電施設

本実験は、神戸大学海事科学部のマイクロガスタービン (MGT) 発電施設 1 階の 1 区画を実験環境とした。この MGT 発電施設はタクマ汎用機械株式会社製のマイクロガスタービン (TCP-30)、冷水ポンプ、冷却水ポンプ、それらを繋ぐ配管とバルブによって構成される。また、強制対流熱伝達実験装置と蒸気レシプロ機関が併設している。強制対流熱伝達実験装置はサージタンク、ポンプ、伝熱テスト部、ヘッドタンクおよび冷却器からなる水ループである。図 5.9 に実験環境の機器配置図を示す。MGT 発電施設は原子力発電プラント環境を比較した場合、原子力発電プラントは MGT 発電施設よりも遥かに広大であるが機器配置が複雑でバルブが多数存在するという点で共通しているため、MGT 発電施設に存在する多数のバルブから指定されたバルブを順番に探し出す作業をタスクとした場合の実験結果は、原子力発電プラントの系統隔離作業に適用できると考えられる。

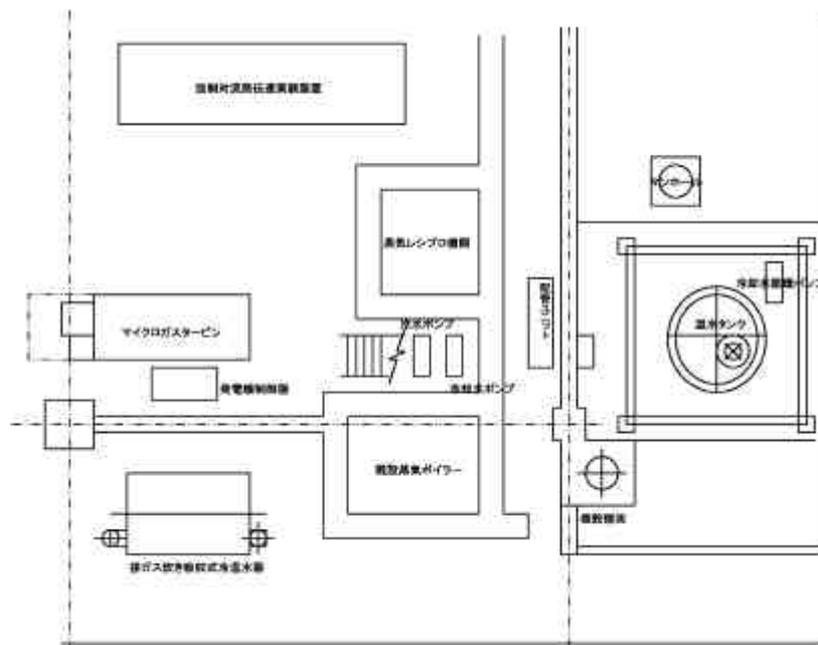


図 5.9: 実験環境の機器配置図

## 実験環境

図 5.10 に示すような、MGT 発電施設において、50 個のバルブを対象に実験を行った。全てのバルブには、識別番号として7桁の無作為な数字が記入された識別 ID タグと RFID タグを取り付けた。それぞれ絵柄の異なる 62 個のマーカを MGT 施設中に、どこにいてもマーカが視界に入るような位置に貼り付けた。また、実験の様子を記録するために固定カメラを 3 台設置し、被験者の行動を撮影した。

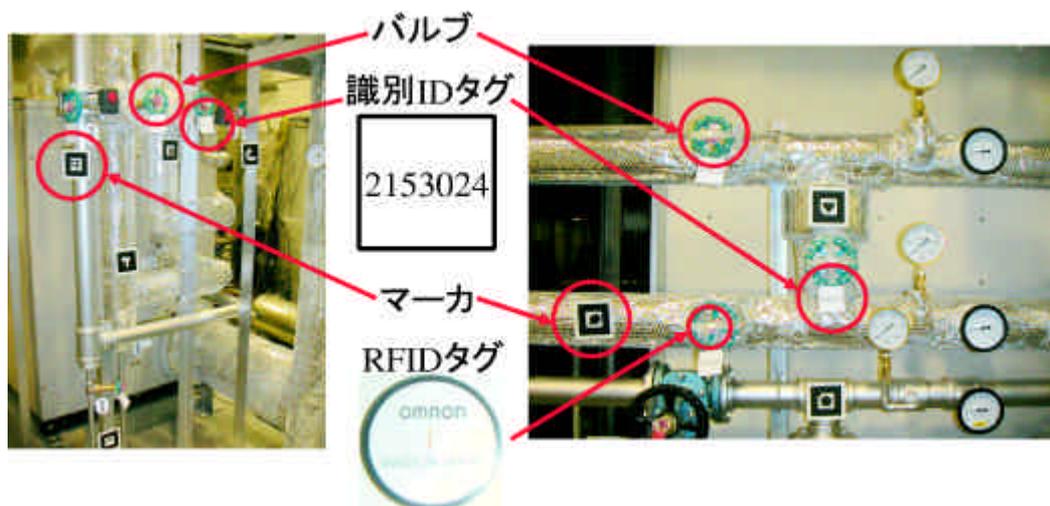


図 5.10: 実験環境の概観

実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR 評価実験と同様に、固定カメラの映像と被験者に提示する映像の 4 つの映像を 4 画面スプリッタを介して 1 つの画面に統合し、実験中は、その映像をビデオに録画すると共にテレビに表示し、実験者が被験者に提示する映像に問題が生じていないかを確認した。また、MGT 施設は広く入り組んでおり、固定カメラの死角が多数存在するため、実験者の 1 人がハンディビデオカメラを持ち、タスクの最中は被験者の後方から実験の様子を撮影した。図 5.11 にバルブ、マーカと実験機器の位置を記した実験環境の見取り図を示す。

実験状況や ISSAR の情報提示内容を記録するために実験環境録画システムを構成した。図 5.12 に実験環境録画システムの構成を示す。実験環境録画システムでは、3 台の固定カメラが図 5.11 に示す場所に実験環境を撮影するために配置されている。一方、タスク中は被験者が使用するディスプレイの映像は無線トランスミッタによって実験環境録画システムに送信されており、UHF アンテナがその映像を受信する。その映像は、観察用のテレビを通して、3 台の固定カメラの映像と共に画面 4 分割統合機によって一つの画面に統合され、ビデオデッキで録画される。その録画映像は 4 分割画面表示テレビに映され、実験者は実験中それを監視する。

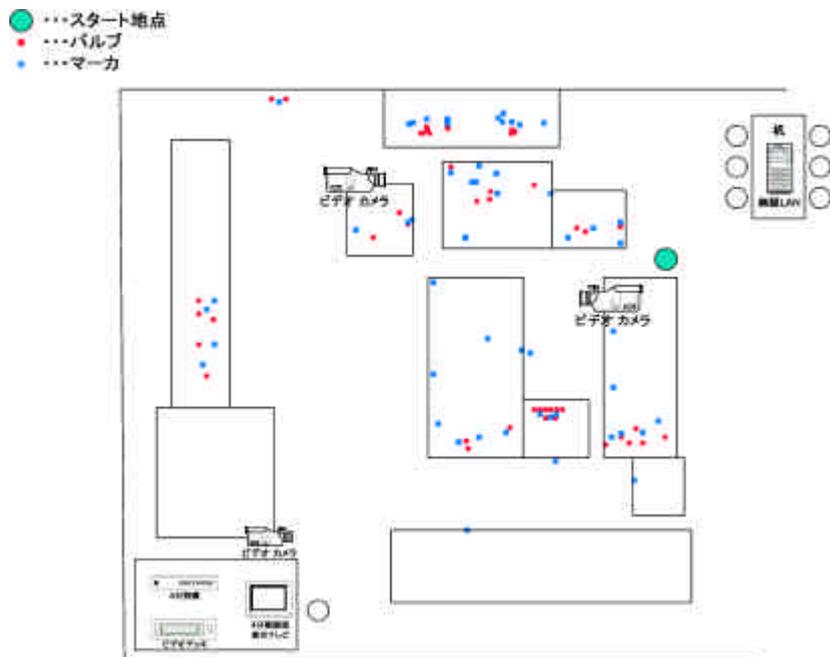


図 5.11: 実験環境の見取り図

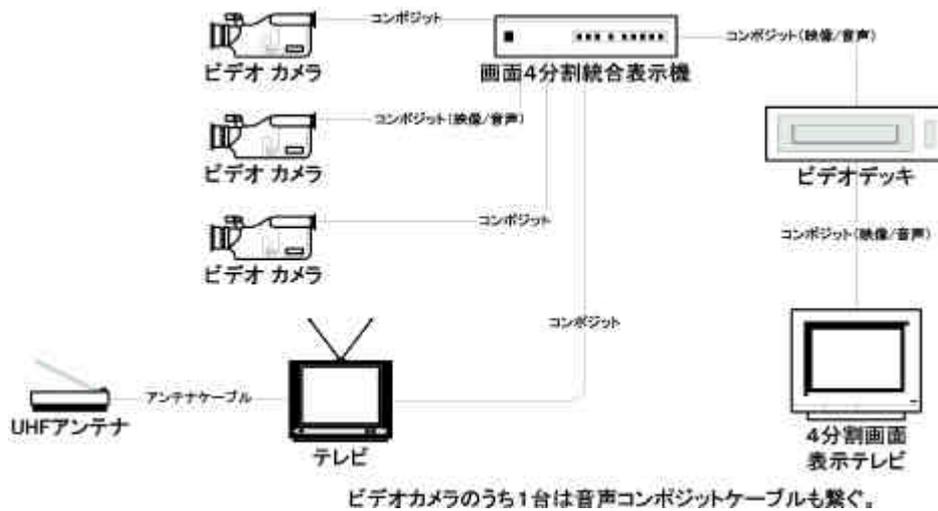


図 5.12: 実験環境録画システム



違う場合は、再度同じバルブを探索する。

作業指示書を用いる場合は、実験室環境における実験と同様に、バルブ配置図の中から作業行程表に書かれた ID 番号を探し出し、その場所まで移動した後、作業工程表の識別 ID 番号が書かれた識別 ID タグを持つ模擬バルブを探し出し、「これ」と言う。実験者は確認をし、正しければ「正解です」と言い次のバルブ探しへ移ってもらい、間違っていれば「間違っています」と言い、バルブを探し直してもらう。本実験で用いる作業指示書は、実験室環境で行った実験とは異なり、バルブの識別 ID がバルブ探索パターン順に書かれた作業工程表と、図 5.14 に示すように、バルブの位置と識別 ID が記入された MGT 施設の見取り図であるバルブ配置図である。

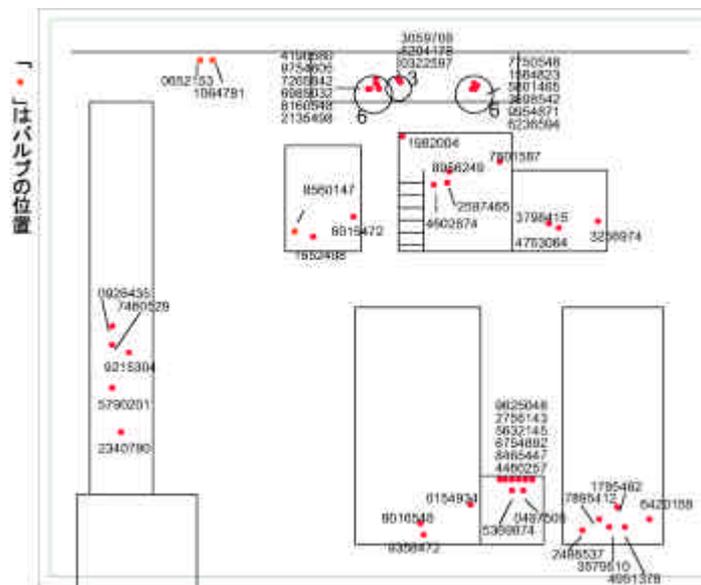


図 5.14: MGT 施設のバルブ配置図

タスクの遂行に関して被験者ごとの条件を揃えるために、各被験者に対し事前に、全てのタスクにおいて可能な限り正確かつ迅速にタスクを遂行するよう指示した。また、2分間で目的のバルブが見つからなかった場合も、バルブ探索パターンに従って次のバルブを探すように指示した。

### 5.4.3 評価指標

実験室環境における実験の結果、3分程度のタスクではフリッカー値に差は出ないこと、状況が常に変化するような作業では無いため、系統隔離作業のタスクを測るのに SART は適していないことが分かった。そのため、模擬プラント環境における実験では、フリッカーテストと SART は行わない。

すなわち、本実験では(1)タスク完遂時間、(2)エラー回数、(3)NASA-TLX、(4)ユーザビリティテストの4つの評価指標を用いた。

(2)エラー回数と(3)NASA-TLXは第3章で述べた実験室環境における実験と同じ測定法で測定し、解析も同様の方法とした。

以下では、第3章で述べた実験と異なるタスク完遂時間とユーザビリティテストについて述べる。また、実験室環境における実験と同様に、上記の評価指標のみでは分からない被験者の主観的な意見、感想を聞き出すために、実験終了時にインタビューを行ったが、実験室環境における実験とは質問内容が若干異なるのでそれについても説明する。

### タスク完遂時間

本実験では、実験の様子をビデオカメラで撮影し、後日、ビデオを解析することによりタスク完遂時間を計測した。

### ユーザビリティ

第4章で述べたように、ユーザビリティには認知性、操作性、快適性の3つの側面があるが、実験室環境における実験ではユーザビリティテストのレーティング項目に快適性に関する質問項目が入っていなかった。また、質問の意味が分かり難いという感想が多かったため、模擬プラント環境における実験では、5つの質問項目の質問文を変更し、新たに快適性に関する2つの質問項目を追加した。

変更したユーザビリティテストのレーティング項目は以下の通りである。

- (Q1) このシステムを動かすために、事前にたくさんの事を学ぶ必要がありましたか
- (Q2) このシステムが持つ色々な機能はよくまとまっていると思いますか
- (Q3) このシステムはむだに複雑になっていると思いますか
- (Q4) このシステムの使い方は分かりやすかったですか
- (Q5) このシステムはバルブを探して操作する作業に役に立つと思いますか
- (Q6) このシステムの操作は快適でしたか
- (Q7) このシステムの装着は快適でしたか

ユーザビリティテストの自由記述項目は実験室環境における実験と同様に、以下の2項目である。

- (QA) このシステムの良いところを挙げてください
- (QB) このシステムが改良すべき点を挙げてください

## インタビュー

実験室環境における実験と同様に、実験終了後に被験者に対して、15分程度、各ISSARインタフェースのさまざまな側面に関する質問をした。

予め用意した質問と、タスク遂行時の被験者の様子を観察し、その中から疑問を感じた行動の理由、動機などを適宜質問した。用意した質問は次のようなものである。

- 作業がすばやく行えたと思うインタフェースはどれですか？
- 作業をやっていて疲れるインタフェースはどれですか？
- 歩きにくい場所がありますが、不安はありませんでしたか？
- 表示が見やすいのはどのインタフェースですか？
- 操作しやすいのはどのインタフェースですか？
- 細かい手作業をするとしたらどのインタフェースがやりやすいですか？
- 装着していて不快だったのはどのインタフェースですか？
- Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？
- 円錐などのCG表示はわかりやすかったか？
- 各インタフェースについての感想をお願いします。

### 5.4.4 実験手順

第4章で述べた実験結果へのバイアス要因の排除という点から、実験の手順を再設計した。以下では実験開始前、実験A、実験B、実験終了後に分けて述べる。

#### 実験開始前

実験開始前に、実験マニュアルを配布し、被験者に熟読させる。

#### 実験A：SCOPOとGlasstronの比較実験

- 事前練習  
被験者に実験開始前に作業指示書を用いた作業とSCOPOとGlasstronを用いた作業の事前練習を充分に行わせる。
- 本番の実験  
被験者は作業指示書、SCOPO、Glasstronを用いて、それぞれ2回ずつ計6回タスクを遂行する。作業指示書とSCOPO、Glasstronを用いたタスクの1回目と2回目のタスク完遂時間とエラー回数の変化を測定し、タスクの学習効果、ISSARインタフェースの学習効果の有無を調べる。そのため、図5.15に示すように、タスクの1巡目(タスク1からタスク3)はタスク完遂時間とエラー回数を計測する。

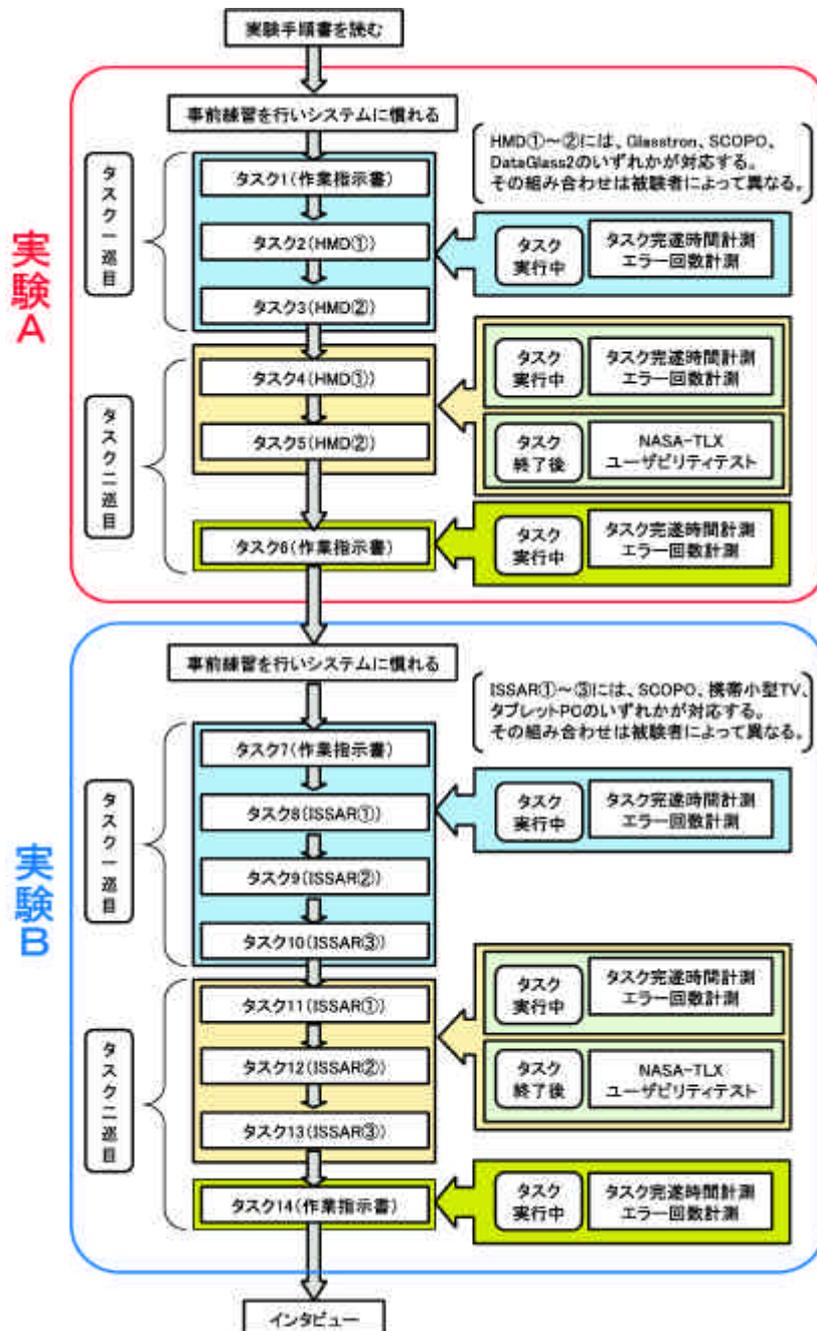


図 5.15: 原子カプラントの模擬環境における実験の流れ

ISSAR インタフェースを用いた2巡目のタスク (タスク 4 からタスク 5) では全ての評価指標を測定する。作業指示書を用いた2巡目のタスク (タスク 6) ではタスク完遂時間とエラー回数を計測する。

#### 実験 B : SCOPO、携帯小型 TV、タブレット PC の比較実験

- 事前練習

被験者に実験開始前に携帯小型 TV とタブレット PC を用いた作業の事前練習を充分に行わせる。

- 本番の実験

被験者は作業指示書、SCOPO、携帯小型 TV、タブレット PC を用いて、それぞれ2回ずつ計8回タスクを遂行する。作業指示書とSCOPO、携帯小型 TV、タブレット PC を用いたタスクの1回目と2回目のタスク完遂時間とエラー回数の変化を測定し、タスクの学習効果、ISSAR インタフェースの学習効果の有無を調べる。

そのため、図 5.15 に示すように、タスクの1巡目 (タスク 7 からタスク 10) はタスク完遂時間とエラー回数を計測する。ISSAR インタフェースを用いた2巡目のタスク (タスク 11 からタスク 13) では全ての評価指標を測定する。作業指示書を用いた2巡目のタスク (タスク 14) ではタスク完遂時間とエラー回数を計測する。

#### 実験終了後

15分程度のインタビューを行う。その様子はビデオで撮影する。

### 5.4.5 実験の実施

#### 被験者

被験者は系統隔離作業の経験をもたない12名の学生 (男性11名、女性1名、平均年齢22.0歳、範囲19-24歳) とした。12人中4人はコンタクトレンズをつけて実験を行った。各被験者は裸眼またはコンタクトレンズを装着し、矯正後の視力に屈折異常、色覚異常は無かった。

#### 実験日程

本実験は、2003年12月12日、13日、15日～18日の合計6日間で行った。

## バルブ探索パタンの設定

バルブ探索パタンは、実験の事前練習用に2パタン、本番タスク用に20パタン用意した。全てのバルブ探索パタンは、動線距離が等しくなるように設計した。なお、各バルブ探索パタンの詳細については付録 E に示す。

## 被験者ごとの各タスクで使用する情報提示デバイスとバルブ探索パタンの組み合わせの設定

表 5.5 に、被験者が各タスクで使用する情報提示デバイスとバルブ探索パタンの組み合わせを示す。

## 実験

実験室環境における実験と同様に、実験開始前に被験者に対して被験者マニュアルを配布し、熟読するよう指示した。

実験 A の本番のタスク開始前に被験者にタスクと各 ISSAR デバイスの使用法に十分に慣れさせ、実験結果からタスクの学習効果と ISSAR インタフェースの学習効果を排除することを目的に、事前練習を行った。事前練習では、作業指示書と SCOPO と Glasstron を用いて、それぞれ 10 分程度、練習用の探索バルブパタンを用いてタスクを遂行させた。

本番のタスクは表 5.5 に従って行った。タスク遂行中にトラブルが生じ中断した場合は、予備のバルブ探索パタンに変更してタスクをやり直した。

また、4.3.1 項で述べた実験環境録画システムを各タスクの開始直前に起動して実験の様子を記録し、タスク終了後は停止した。また、タスクの最中はハンディビデオカメラで被験者を撮影し続けた。

実験終了後に 15 分から 30 分程度のインタビューを行い、ビデオ撮影した。

## 5.5 SCOPO と Glasstron の比較実験 (実験 A) の結果

### 5.5.1 タスク完遂時間

#### 測定結果

実験 A のタスク完遂時間計測の結果を表 5.6 に示す。各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差を示したグラフを図 5.16 に示す。

表 5.5: 各タスクで使用する情報提示デバイスとバルブ探索パタン

	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5	被験者 6	被験者 7
練習	作業指示書 1	作業指示書 2	作業指示書 3	作業指示書 4	作業指示書 5	作業指示書 6	作業指示書 7
タスク 1	作業指示書 2	作業指示書 3	作業指示書 4	作業指示書 5	作業指示書 6	作業指示書 7	作業指示書 8
タスク 2	SCOPO 3	Glasstron 4	SCOPO 5	Glasstron 6	SCOPO 7	Glasstron 8	SCOPO 9
タスク 3	Glasstron 4	SCOPO 5	Glasstron 6	SCOPO 7	Glasstron 8	SCOPO 9	Glasstron 10
タスク 4	SCOPO 5	Glasstron 6	SCOPO 7	Glasstron 8	SCOPO 9	Glasstron 10	SCOPO 11
タスク 5	Glasstron 6	SCOPO 7	Glasstron 8	SCOPO 9	Glasstron 10	SCOPO 11	Glasstron 12
タスク 6	作業指示書 7	作業指示書 8	作業指示書 9	作業指示書 10	作業指示書 11	作業指示書 12	作業指示書 13
タスク 7	作業指示書 8	作業指示書 9	作業指示書 10	作業指示書 11	作業指示書 12	作業指示書 13	作業指示書 14
タスク 8	SCOPO 9	模擬 PDA 10	模擬 PDA 11	タブレット PC 12	タブレット PC 13	SCOPO 14	SCOPO 15
タスク 9	タブレット PC 10	SCOPO 11	タブレット PC 12	SCOPO 13	模擬 PDA 14	模擬 PDA 15	タブレット PC 16
タスク 10	模擬 PDA 11	タブレット PC 12	SCOPO 13	模擬 PDA 14	SCOPO 15	タブレット PC 16	模擬 PDA 17
タスク 11	SCOPO 12	模擬 PDA 13	模擬 PDA 14	タブレット PC 15	タブレット PC 16	SCOPO 17	SCOPO 18
タスク 12	タブレット PC 13	SCOPO 14	タブレット PC 15	SCOPO 16	模擬 PDA 17	模擬 PDA 18	タブレット PC 19
タスク 13	模擬 PDA 14	タブレット PC 15	SCOPO 16	模擬 PDA 17	SCOPO 18	タブレット PC 19	模擬 PDA 20
タスク 14	作業指示書 15	作業指示書 16	作業指示書 17	作業指示書 18	作業指示書 19	作業指示書 20	作業指示書 1

	被験者 8	被験者 9	被験者 10	被験者 11	被験者 12	被験者 13
練習	作業指示書 8	作業指示書 9	作業指示書 10	作業指示書 11	作業指示書 12	作業指示書 13
タスク 1	作業指示書 9	作業指示書 10	作業指示書 11	作業指示書 12	作業指示書 13	作業指示書 14
タスク 2	Glasstron 10	SCOPO 11	Glasstron 12	SCOPO 13	Glasstron 14	SCOPO 15
タスク 3	SCOPO 11	Glasstron 12	SCOPO 13	Glasstron 14	SCOPO 15	Glasstron 16
タスク 4	Glasstron 12	SCOPO 13	Glasstron 14	SCOPO 15	Glasstron 16	SCOPO 17
タスク 5	SCOPO 13	Glasstron 14	SCOPO 15	Glasstron 16	SCOPO 17	Glasstron 18
タスク 6	作業指示書 14	作業指示書 15	作業指示書 16	作業指示書 17	作業指示書 18	作業指示書 19
タスク 7	作業指示書 15	作業指示書 16	作業指示書 17	作業指示書 18	作業指示書 19	作業指示書 20
タスク 8	模擬 PDA 16	模擬 PDA 17	タブレット PC 18	タブレット PC 19	SCOPO 20	SCOPO 1
タスク 9	SCOPO 17	タブレット PC 18	SCOPO 19	模擬 PDA 20	模擬 PDA 1	タブレット PC 2
タスク 10	タブレット PC 18	SCOPO 19	模擬 PDA 20	SCOPO 1	タブレット PC 2	模擬 PDA 3
タスク 11	模擬 PDA 19	模擬 PDA 20	タブレット PC 1	タブレット PC 2	SCOPO 3	SCOPO 4
タスク 12	SCOPO 20	タブレット PC 1	SCOPO 2	模擬 PDA 3	模擬 PDA 4	タブレット PC 5
タスク 13	タブレット PC 1	SCOPO 2	模擬 PDA 3	SCOPO 4	タブレット PC 5	模擬 PDA 6
タスク 14	作業指示書 2	作業指示書 3	作業指示書 4	作業指示書 5	作業指示書 6	作業指示書 7

表 5.6: 実験 A のタスク完遂時間の測定結果

	作業指示書		SCOPO		Glasstron	
	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目
被験者 A	177	185	167	208	210	170
被験者 B	158	164	232	217	307	378
被験者 C	241	274	229	179	313	243
被験者 D	162	177	159	159	168	159
被験者 E	270	182	194	261	202	207
被験者 F	254	225	218	266	253	226
被験者 G	232	271	289	246	211	237
被験者 H	195	170	197	189	197	292
被験者 I	335	164	189	170	263	250
被験者 J	153	124	135	202	201	199
被験者 K	181	169	145	197	214	216
被験者 L	153	149	180	169	191	190
平均	209.3	187.9	194.5	205.2	227.4	230.6
標準偏差	57.4	45.9	42.9	36.0	46.2	59.1
平均	198.6		199.8		229.0	
標準偏差	52.0		39.1		51.9	

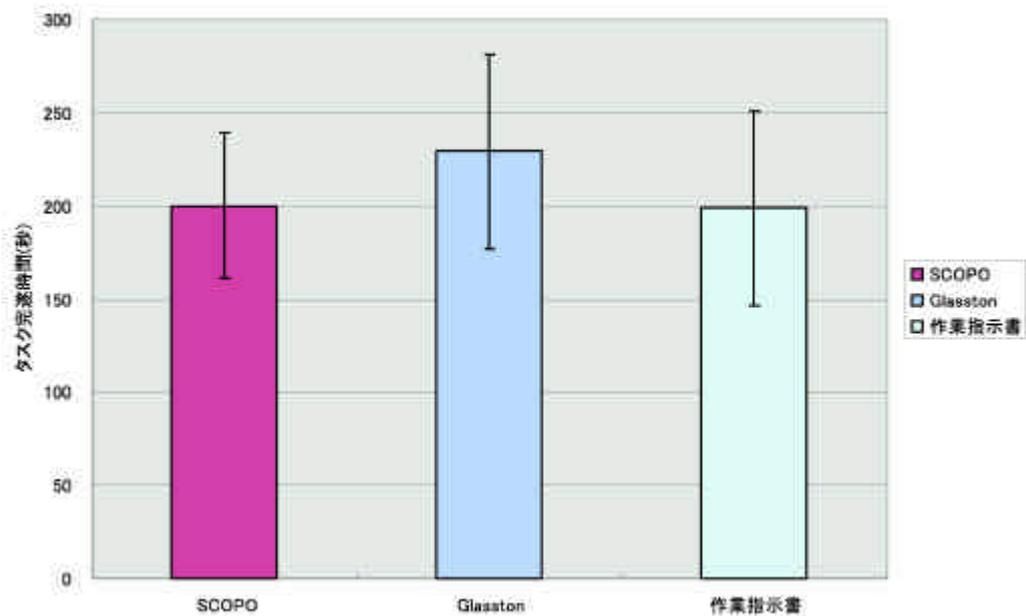


図 5.16: 実験 A の各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差

## 学習効果の有無の確認

タスク完遂時間に関して、タスク自体の学習効果とインタフェースの学習効果の発生を調べた。

### 1. タスクの学習効果

作業指示書を用いた1巡目のタスクと2巡目のタスクのタスク完遂時間には有意差は無かった(有意水準5%のt検定)。

### 2. インタフェースの学習効果

SCOPOを用いた1巡目のタスクと2巡目のタスクにはタスク完遂時間に有意差は無かった(有意水準5%のt検定)。Glasstronを用いた1巡目のタスクと2巡目のタスクにはタスク完遂時間に有意差は無かった(有意水準5%のt検定)。

## インタフェース間の比較

SCOPOを用いた作業はGlasstronを使用した作業よりも、タスク完遂時間が有意に短いという結果となった(有意水準5%のt検定)。

### 5.5.2 エラー回数

全被験者の全タスクにおいて、バルブを間違えて指し示すエラーは発生しなかった。

### 5.5.3 NASA-TLX

#### 評価結果

NASA-TLXの評価結果を表5.7に示す。

## インタフェース間の比較

図5.17に、人数別の各インタフェース間のWWL得点の比較を示す。図5.17からSCOPOを用いた作業の方が、Glasstronを用いた作業よりもメンタルワークロードが低いと感じる人が多かった(12人中8人)。

### 5.5.4 ユーザビリティテスト(レーティング項目)

#### 評価結果

ユーザビリティテストの結果を表5.8に示す。Q3とQ5は高得点なほど低評価となる質問であるため、得点が1ならば5に、2ならば4に点数を変換して他の質問項目との整合をとる。

表 5.7: 実験 A の NASA-TLX の 評 定 結 果

	SCOPO	Glasstron
被験者 A	69.8	18.1
被験者 B	52.3	64.7
被験者 C	22.9	43.1
被験者 D	45.4	47.3
被験者 E	66.8	81.5
被験者 F	38.7	31.5
被験者 G	67.1	31.3
被験者 H	57.5	32.2
被験者 I	66.3	71.2
被験者 J	19.7	44.3
被験者 K	49.1	75.6
被験者 L	16.0	61.3
平均	47.6	50.2
標準偏差	19.5	20.3

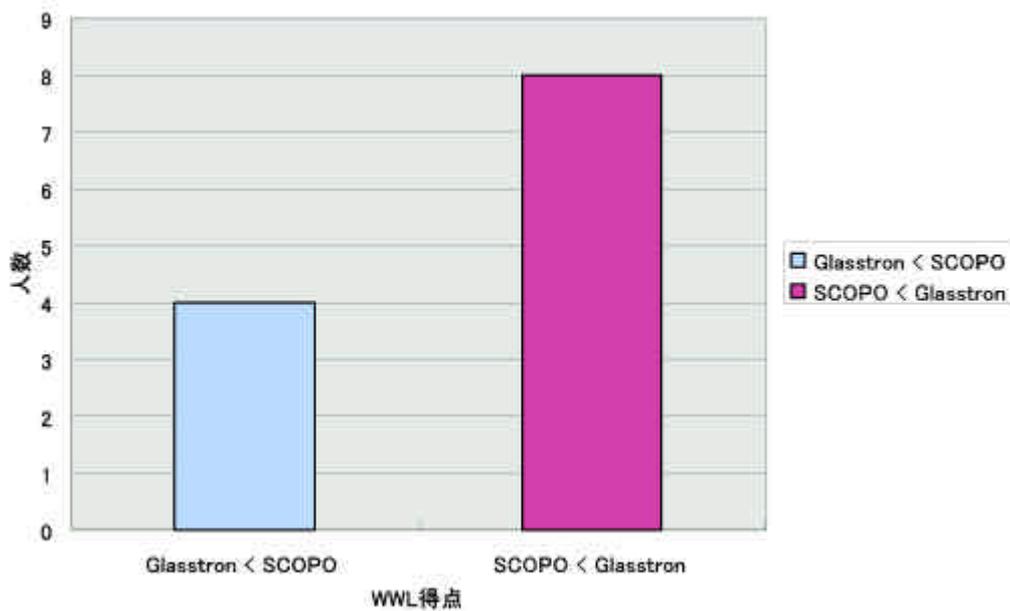


図 5.17: 実験 A の各インタフェース間の WWL 得点の比較

表 5.8: 実験 A のユーザビリティテスト (レーティング項目) の評価結果

		被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	被験者 E	被験者 F	被験者 G
Q1(R)	SC	4	4	4	4	4	4	4
	GT	4	4	4	4	3	4	2
Q2	SC	3	4	3	4	2	4	4
	GT	4	3	3	4	2	4	5
Q3(R)	SC	4	5	5	4	3	4	5
	GT	5	4	4	4	2	3	5
Q4	SC	4	4	5	4	4	4	5
	GT	5	5	4	4	3	5	5
Q5	SC	2	5	4	4	5	4	5
	GT	4	4	3	4	3	4	5
Q6	SC	2	4	4	3	4	4	2
	GT	4	3	2	3	1	5	5
Q7	SC	2	4	4	3	4	4	4
	GT	2	2	3	2	2	1	5
		被験者 H	被験者 I	被験者 J	被験者 K	被験者 L	平均	標準偏差
Q1(R)	SC	5	2	4	2	5	3.8	0.9
	GT	5	2	4	2	5	3.6	1.1
Q2	SC	4	4	4	5	4	3.8	0.8
	GT	4	2	4	4	4	3.6	0.9
Q3(R)	SC	5	5	4	3	3	4.2	0.8
	GT	3	4	4	2	3	3.6	1.0
Q4	SC	3	5	4	4	5	4.3	0.6
	GT	5	4	5	4	5	4.5	0.7
Q5	SC	4	4	4	5	5	4.3	0.9
	GT	2	3	3	2	4	3.4	0.9
Q6	SC	5	3	4	4	4	3.6	0.9
	GT	2	2	3	1	3	2.8	1.3
Q7	SC	5	2	4	2	4	3.5	1.0
	GT	1	1	2	2	2	2.1	1.1

## インタフェース間の比較

図 5.18 に質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評価値の平均と標準偏差を示したグラフを示す。

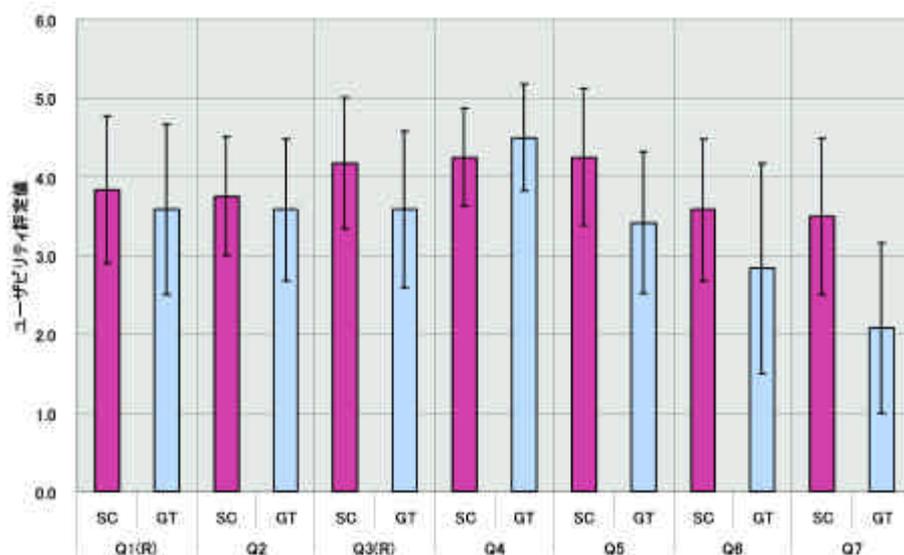


図 5.18: 質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評価値

### 5.5.5 ユーザビリティテスト (自由記述項目)

#### 回答結果

SCOPO と Glasstron を情報提示インタフェースとして使用した場合を比較して、それぞれの長所と問題点について質問したユーザビリティテストの自由記述項目の結果のうち、主なものを以下に示す。全ての回答については付録 G に示す。

#### 1. SCOPO

- 自然な視界が確保されているので動きやすく安全
- 目が疲れる

#### 2. Glasstron

- とっつきやすい
- 視野が狭い
- ディスプレイ映像と実際の距離感が異なる
- 動き回りにくい

## 5.6 ハンドヘルド型 ISSAR とウェアラブル型 ISSAR の比較実験 (実験 B) の結果

### 5.6.1 タスク完遂時間

#### 測定結果

実験 B のタスク完遂時間計測の結果を表 5.9 に示す。各インタフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差を示したグラフを図 5.19 に示す。

表 5.9: 実験 B のタスク完遂時間の測定結果

	作業指示書		SCOPO		携帯小型 TV		タブレット PC	
	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目	1 巡目	2 巡目
被験者 A	182	173	232	176	257	223	300	231
被験者 B	198	177	167	136	184	161	298	241
被験者 C	191	144	217	194	237	220	274	245
被験者 D	165	134	124	189	111	135	176	131
被験者 E	181	213	201	184	253	193	287	219
被験者 F	275	231	190	199	170	179	266	300
被験者 G	216	245	207	206	194	167	225	236
被験者 H	131	141	159	163	133	171	265	242
被験者 I	213	202	148	150	148	188	197	180
被験者 J	129	161	174	131	159	148	188	195
被験者 K	220	181	175	179	144	161	192	207
被験者 L	174	141	187	161	190	195	194	168
平均	189.5	178.6	181.7	172.3	181.6	178.4	238.6	216.4
標準偏差	40.0	37.4	30.5	24.3	47.3	26.8	47.7	43.8
平均	184.1		177.0		180.0		227.5	
標準偏差	38.3		27.4		37.6		46.2	

#### 学習効果の有無の確認

タスク完遂時間に関して、タスク自体の学習効果とインタフェースの学習効果の発生を調べた。

##### 1. タスクの学習効果

作業指示書を用いた 1 回目のタスクと 2 回目のタスクの結果の間には有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。

##### 2. インタフェースの学習効果

SCOPO を用いた 1 巡目のタスクと 2 巡目のタスクのタスク完遂時間に有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。携帯小型 TV を用いた 1 巡目のタスクと 2 巡

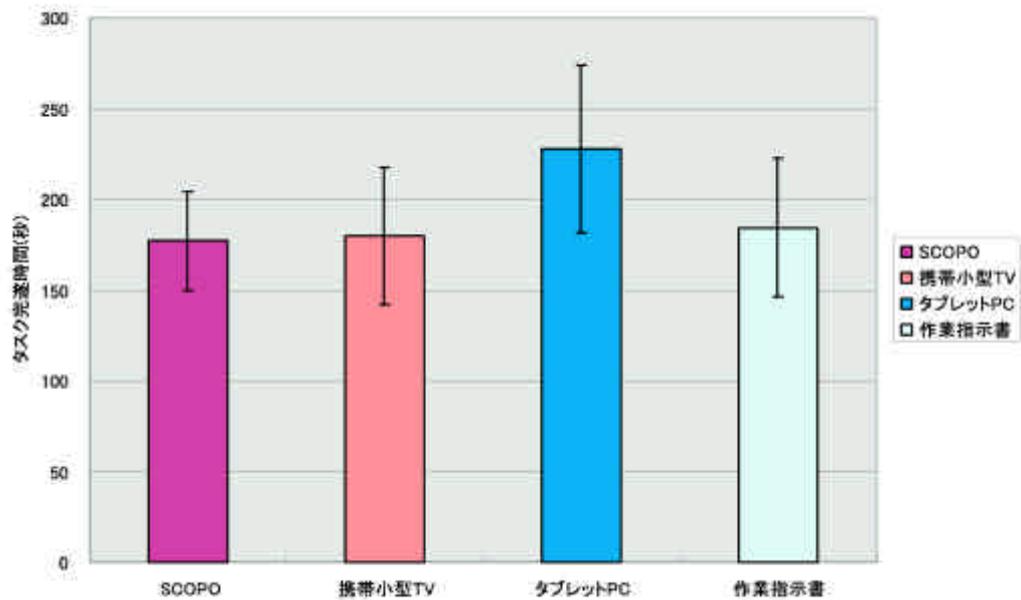


図 5.19: 実験 B の各インターフェースのタスク完遂時間の平均値と標準偏差

目のタスクにはタスク完遂時間に有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。タブレット PC を用いた 1 巡目のタスクと 2 巡目のタスクにはタスク完遂時間に有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。

### インターフェース間の比較

各インターフェース間のタスク完遂時間の差を調べた。

1. 携帯小型 TV を用いた作業と SCOPO を用いた作業ではタスク完遂時間に有意差は無かった (有意水準 5% の t 検定)。
2. 携帯小型 TV を用いた作業は、タブレット PC を用いた作業よりもタスク完遂時間が有意に短かった (有意水準 5% の t 検定)。
3. SCOPO を用いた作業は、タブレット PC を用いた作業よりもタスク完遂時間が有意に短かった (有意水準 5% の Welch の検定)。

### 5.6.2 エラー回数

全被験者の全タスクにおいて、バルブを間違えて指し示すエラーは発生しなかった。

### 5.6.3 NASA-TLX

#### 評価結果

NASA-TLX の評価結果を表 5.10 に示す。

表 5.10: 実験 B の NASA-TLX の評価結果

	SCOPO	携帯小型 TV	タブレット PC
被験者 A	53.7	17.2	57.6
被験者 B	55.3	50.0	70.7
被験者 C	37.6	15.7	34.5
被験者 D	46.3	46.1	62.7
被験者 E	74.7	63.5	67.6
被験者 F	20.1	14.3	22.9
被験者 G	39.3	50.0	69.3
被験者 H	59.9	58.7	86.5
被験者 I	58.0	38.7	81.1
被験者 J	10.4	34.4	57.3
被験者 K	66.4	34.5	66.9
被験者 L	46.0	24.7	64.0
平均	47.3	37.3	61.8
標準偏差	18.5	16.9	17.8

#### インタフェース間の比較

図 5.20 に、人数別の各インタフェース間の WWL 得点の比較を示す。図 5.20 より次のことがいえる。

1. 携帯小型 TV を用いた作業は SCOPO を用いた作業よりもメンタルワークロードが小さいと感じる人が多い。
2. 携帯小型 TV を用いた作業はタブレット PC を用いた作業よりもメンタルワークロードが小さいと感じる人が多い。
3. SCOPO を用いた作業はタブレット PC を用いた作業よりもメンタルワークロードが小さいと感じる人が多い。

### 5.6.4 ユーザビリティテスト (レーティング項目)

#### ユーザビリティテスト評価結果

ユーザビリティテストの結果を表 5.11 に示す。Q3 と Q5 は高得点なほど低評価となる質問であるため、得点が 1 ならば 5 に、2 ならば 4 に点数を変換して他の質問項目との整合をとる。

表 5.11: 実験 B のユーザビリティテスト (レーティング項目) の評価結果

		被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	被験者 E	被験者 F	被験者 G
Q1(R)	SC	4	4	4	4	4	4	4
	PD	5	4	4	4	4	5	4
	TP	4	4	4	4	4	4	2
Q2	SC	4	5	3	4	3	3	4
	PD	4	5	4	4	4	4	4
	TP	4	4	3	4	3	2	2
Q3(R)	SC	5	4	4	4	2	4	4
	PD	4	5	5	4	3	4	4
	TP	4	4	4	4	4	2	4
Q4	SC	4	4	5	4	3	5	1
	PD	5	4	5	4	4	5	5
	TP	5	4	4	4	4	4	4
Q5	SC	4	4	4	4	4	5	2
	PD	3	4	5	4	4	5	5
	TP	4	4	4	4	5	2	4
Q6	SC	5	4	4	4	3	4	2
	PD	5	4	5	4	4	5	5
	TP	2	3	3	2	4	3	4
Q7	SC	4	4	4	3	3	4	2
	PD	5	5	5	3	4	3	5
	TP	2	3	3	2	3	3	2
		被験者 H	被験者 I	被験者 J	被験者 K	被験者 L	平均	標準偏差
Q1(R)	SC	5	2	4	2	5	3.8	0.9
	PD	5	5	3	4	5	4.3	0.7
	TP	5	2	4	3	5	3.8	1.0
Q2	SC	5	4	4	3	4	3.8	0.7
	PD	4	5	4	5	3	4.2	0.6
	TP	4	3	3	4	3	3.3	0.8
Q3(R)	SC	4	4	4	3	3	3.8	0.8
	PD	5	5	3	4	3	4.1	0.8
	TP	4	2	3	3	3	3.4	0.8
Q4	SC	5	4	4	4	5	4.0	1.1
	PD	5	5	4	4	5	4.6	0.5
	TP	2	2	4	4	5	3.8	0.9
Q5	SC	5	3	4	4	5	4.0	0.9
	PD	5	5	4	5	3	4.3	0.8
	TP	2	1	3	3	2	3.2	1.2
Q6	SC	4	2	4	3	4	3.6	0.9
	PD	5	5	3	4	3	4.3	0.8
	TP	1	1	2	2	3	2.5	1.0
Q7	SC	4	2	4	3	4	3.4	0.8
	PD	5	5	4	4	3	4.3	0.9
	TP	1	1	4	2	2	2.3	0.9

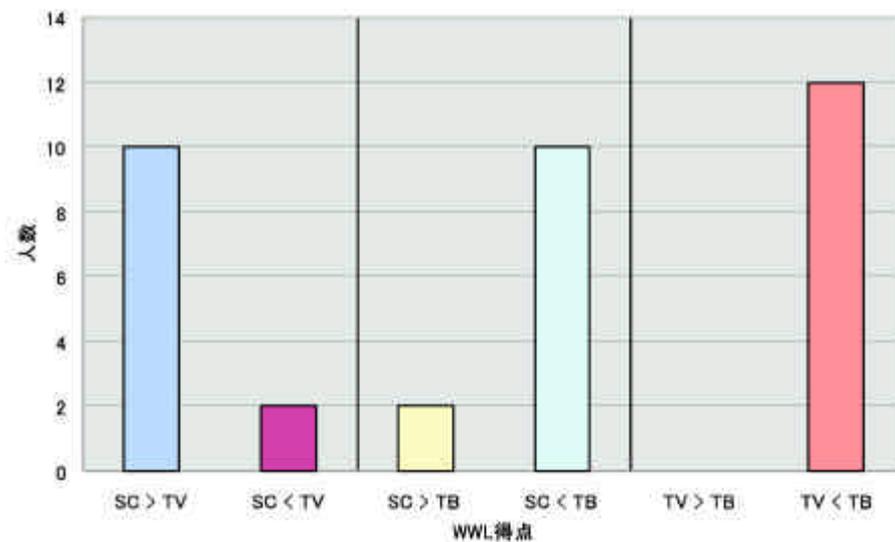


図 5.20: 実験 B の各インタフェース間の WWL 得点の比較

#### インタフェース間の比較

図 5.21 に質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評価値の平均と標準偏差を示したグラフを示す。

### 5.6.5 ユーザビリティテスト (自由記述項目)

#### 回答結果

SCOPO、タブレット PC および携帯小型 TV を情報提示インタフェースとして使用した場合を比較して、それぞれの長所と問題点について質問したユーザビリティテストの自由記述項目の結果のうち、主なものを以下に示す。全ての回答については付録 G に示す。

#### 1. SCOPO

- 両手が自由なので作業しやすく、移動の際の不安が低減される

#### 2. 携帯小型 TV

- 小さくて軽いので持ち運びしやすい
- 背中から伸びるコードが邪魔
- 手が塞がっている

#### 3. タブレット PC

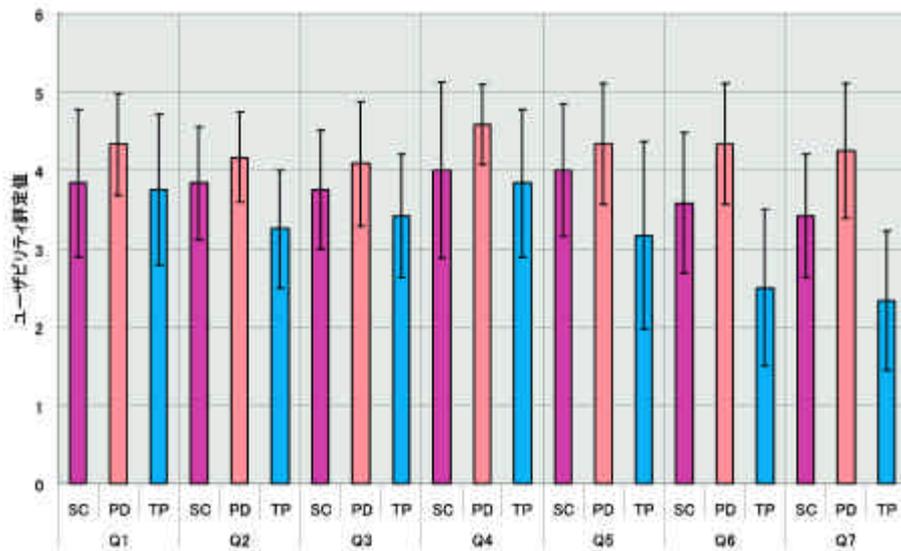


図 5.21: 質問項目別の各インタフェースのユーザビリティテスト評定値

- 画面が大きくて見やすい
- 重くて疲れる

### 5.6.6 インタビュー結果

1. 作業を正確に効率よく行えたと思うインタフェースは？  
携帯小型 TV という感想が多かった。次に SCOPO という意見が多かった。
2. 段差を踏み越えるときに不安になりましたか？  
Glasstron を装着していたときに不安になったという意見が大半であった。
3. 作業指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いですか？  
慣れればシステムの方が良いという意見が多かった。
4. 作業指示書を除いて動きやすかったインタフェースはどれですか？  
SCOPO か携帯小型 TV という意見が大半だった。

他の回答については、付録 F に示す。

## 5.7 実験の考察

### 5.7.1 実験 A の考察

#### SCOPO と Glasstron の比較について

SCOPO はタスク完遂時間、メンタルワークロードとユーザビリティテストのレーティング項目の Q4 を除く全ての項目で Glasstron より高い評価であった。Q4(このシステムの使い方はわかりやすかったですか?) は認知性に関連する質問で、システムのわかりやすさについて尋ねる質問である。

第 4 章でも述べたように、Glasstron は SCOPO のように視線の切り替えが必要なく、常に 1 つのディスプレイを見続ければよいのでユーザに様々な動作を要求しない分、ユーザに受け入れられ易かったと考えられる。しかし、操作性、快適性などの項目は全て Glasstron よりも SCOPO が上回っており、SCOPO の方がユーザビリティが高いと言える。

実験室環境における実験では Glasstron の方が SCOPO よりも高い評価であったが、今回の実験では移動範囲が広く、様々な障害物が存在する環境で使用したため、Glasstron の距離感の欠如、視界の狭さが問題となり、評価が逆転したと言える。

ユーザビリティテストの自由記述結果では、Glasstron の問題点として、ディスプレイ映像と実際の距離感の違いを挙げる被験者が多数いた。一方 SCOPO は肉眼で現実世界を把握できるため、安全に素早く移動できたという感想が大半を占めた。

SCOPO の視線の切り替えに関しては、始めのうちは戸惑うが、慣れてくればマーカを見るときだけディスプレイを見ることができるようになり、通常は自分の目で見て動き回るといふ、支援情報の使い分けが可能になっていた。

今回の実験環境には、約 20cm 程度の段差のある場所が 1 箇所あった。その場所を踏み越えた時の状況をインタビューで聞いたところ、ほとんどの人は Glasstron を装着しながら段差を踏み越えるのに不安を感じたと回答した。

また、2 ボタン式の操作インターフェースは被験者の左胸に取り付け、SCOPO と Glasstron のどちらもボタン操作によって作業ステップを変更し、次のバルブ探索へ移るが、Glasstron を用いた場合は装備した操作ボタンを視界に入れることが難しいため、SCOPO を用いるより若干操作が難しくなっていたと考えられる。

実験室環境における実験の結果と、実験 A の結果を総合すると、現時点の HMD と AR の技術水準を考慮した場合、ウェアラブル型 ISSAR の情報提示インターフェースとしては参照型の HMD が最も適している。

## 5.7.2 実験 B の考察

### タブレット PC について

タブレット PC は、タスク完遂時間、NASA-TLX、ユーザビリティテストの全てにおいて、他のインタフェースと較べて低い評価であった。

ユーザビリティテストの自由記述結果とインタビュー結果より、タブレット PC で最も問題となったのは、その重さによる身体的な負荷の大きさであることが判明した。特に高い位置のバルブを探す場合に、ディスプレイを持ち上げなければならないが、それが被験者に対して大きな負担となった。

3分程度のタスクで身体的負荷の影響がある以上、現場の長時間の作業にタブレット PC を用いた ISSAR を導入するのは難しい。

また、タブレットペンを用いた操作インタフェースは、使用するためには両手が必要であり、手作業を行う現場の作業にタブレットペン操作インタフェースを導入するのは問題があると考えられる。

### 携帯小型 TV について

携帯小型 TV は、タスク完遂時間、NASA-TLX、ユーザビリティテストにおいて、他のインタフェースと較べて高い評価であった。

ユーザビリティテストの自由記述結果とインタビュー結果より、軽くて、持ち運びやすいこと、扱いやすいことが携帯小型 TV の長所として多数挙げられた。短所は特に無いという意見が多かったが、背中に伸びるコードが邪魔になったという感想や、手が塞がるのでその分、実際の作業では使いづらくなるのではないかと、という意見があった。

今回は携帯小型 TV を PDA の代替品として比較実験を行った。PDA は携帯小型 TV と同様に実験 B の結果、ハンドヘルド型 ISSAR には、PDA サイズのディスプレイが適していると言える。

### ウェアラブル型 ISSAR とハンドヘルド型 ISSAR の比較について

SCOPO と携帯小型 TV ではタスク完遂時間に有意差は無かったが、NASA-TLX やユーザビリティテストなどの主観指標では、携帯小型 TV の方が高い評価であった。インタビューの中で「最も効果的に作業を行えたと思う ISSAR インタフェースは何か」という質問をしたが、その結果、被験者 12 人中 8 人が携帯小型 TV が良いと回答し、4 人が SCOPO が良いと回答した。

今回の実験は細かい手作業をタスクに入れていないが、両手を使わなければならないタスクの場合には、ハンドヘルド型デバイスでは、一旦どこかにデバイスを置くか収納して作業を行わなければならないと、作業効率が低下すると予想される。今後、両手を

使わなければならないようなタスクを対象に評価実験を行い、ウェアラブル型 ISSAR とハンドヘルド型 ISSAR の比較を行う必要がある。

### 5.7.3 実験全体の考察

#### AR を用いたバルブ探索支援システムについて

本研究での全ての実験において、作業指示書を用いた作業は、タスクの学習効果を測るために実施するという位置づけであり、常に実験の最初と最後に順番が固定されていたためインタフェースの順序効果の影響が結果から排除されておらず、単純に ISSAR インタフェースを用いた他の作業と比較することはできないが、ISSAR の有効性を調べるための参考データとして作業指示書を用いた作業のタスク完遂時間を見ると、SCOPO や携帯小型 TV を用いた作業とあまり差は無い。

しかし、実際の系統隔離作業では作業員プラントはプラント内部の地図は携帯せず、経験を頼りに作業を行っている。熟練していない作業者が系統隔離作業を行う場合に、経験の不足を補完するシステムとして、効果があると考えられる。

#### RFID を用いたバルブ確認支援システムについて

今回の原子力発電プラントの模擬的な環境における ISSAR の評価実験では、全ての被験者の全てのタスクにおいて、エラー回数はゼロとなった。これは主に RFID を用いたバルブ確認支援システムが有効に機能した為であると考えられる。

RFID を用いたバルブ確認支援システムでは、被験者が間違ったバルブに対して RFID リーダを近づけた場合、警告音を発して間違いを被験者に知らせる。

今回の実験では、全ての被験者が、バルブを断定する前に必ずこの機能を利用していった。RFID タグをリーダーで読み取る動作も、全ての被験者が問題なく利用することができていたため、バルブ確認支援システムは系統隔離作業でのヒューマンエラーを低減させるのに有効であると考えられる。

## 第 6 章 結論

本研究では、原子力発電プラントにおける系統隔離作業の作業効率の向上とヒューマンエラーの低減を目的として、拡張現実感 (AR) と RFID を用いた系統隔離作業支援システム (ISSAR) を提案・設計・試作し、各種の評価実験を行って ISSAR の最適なユーザインタフェースの形態を模索した。

まず第 2 章では、研究の背景として、近年の原子力発電プラントにおける系統隔離作業の現状とその問題点について述べた。そして、ISSAR を実現する際に用いる要素技術として AR と RFID を取り上げ、各技術の現状と問題点を述べた。そして、ISSAR を設計するにあたり、情報提示や操作に用いるインタフェースには様々な形態が考えられることを述べた。そして実際に各種のインタフェースを備えた ISSAR を試作して被験者実験を行い、タスクパフォーマンスや主観評価などの観点から各 ISSAR を比較評価することを本研究の目的とすることを述べた。

第 3 章では、まず、現在の系統隔離作業における課題をもとに策定した ISSAR の要求仕様について述べた。その後、策定した要求仕様をもとに設計した ISSAR の概略について述べた。そして、ISSAR は操作対象バルブに指示オブジェクトを重畳表示する機能、作業位置までナビゲーションする機能、操作対象の自動確認機能を持つことを述べた。また、ISSAR のインタフェースとしてウェアラブル型とハンドヘルド型を提案した。

第 4 章では、第 3 章で述べた各種 ISSAR のうち、ウェアラブル型に分類される ISSAR に対して行った比較評価実験について述べた。まず、情報提示インタフェースとして、遮蔽型 HMD の Glasstron、参照型 HMD の SCOPO、透過型 HMD の DataGlass2 を用いた 3 種類のウェアラブル型の ISSAR を試作することを述べ、それらのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べた。次に、評価実験を行う際の実験環境に関して、模擬バルブ、トラッキング用マーカ、実験環境録画システム等を説明した。そして、本研究では、実験の評価指標として、タスク完遂時間、エラー回数、フリッカーテスト、NASA-TLX、SART10-D、ユーザビリティテストを用いること述べた。さらに、これらの評価指標を用いて ISSAR を比較評価するにあたり、タスクの学習効果、インタフェースの学習効果、バルブ探索パタンの学習効果、インタフェースの順序効果等の各種バイアス要因を考慮する必要があることについて述べ、各種バイアス要因を排除することを考慮して設計した実験方法について述べた。実験の結果、最もタスク完遂時間が短かったのは Glasstron で、次にタスク完遂時間が短かったのは SCOPO であった。また、最もエラー回数が多く、評価が一番低かったのは DataGlass2 であっ

た。これは透過型 HMD である DataGlass2 はキャリブレーションを正確に行うことが難しく、また作業中に頻繁に装着位置がずれることが原因であると考えられる。また、ISSAR の比較評価実験の指標には、SART やフリッカーテストは適していないことが判明した。

第 5 章では、原子力発電プラントの模擬的な環境としてマイクロガスタービン施設を用いて行った ISSAR の比較評価実験について述べた。まず、情報提示インタフェースとして、タブレット PC と PDA を模擬した携帯小型 TV を用いた 2 種類のハンドヘルド型の ISSAR を新たに試作することを述べ、それらのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べた。その後、実験を SCOPO と Glasstron の比較を行う実験 A と、携帯小型 TV、タブレット PC および SCOPO 間の比較を行う実験 B に分けて行うことを述べた。実験 A の結果、移動範囲が広く、様々な障害物が存在する環境では、遮蔽型 HMD の距離感が欠如していること、視界が狭いことが問題となり、ほとんどの評価指標で Glasstron よりも SCOPO の方が評価が高いことが判明した。また、実験 B の結果、携帯小型 TV が全ての評価指標で最も評価が高く、携帯小型 TV がタブレット PC のような大型のディスプレイよりも優れていることが分かった。また、全てのタスクでエラー数がゼロとなり、ISSAR の RFID を用いたバルブ確認支援システムが有効であることが判明した。

本研究では、系統隔離作業の経験を持たない学生を被験者として原子力発電プラントを模擬した環境で実験を行った。しかし、実際の現場への ISSAR の導入を目標とする上では、原子力発電プラント内で実際の作業者を被験者として実験を行い、そこから得られた知見をもとに、より実用的なシステムを開発していく必要がある。

また、本研究はインタフェースの比較評価を主題としたため、システムの構築が容易で動作が安定しているマーカトラッキングを用いて AR 環境を実現したが、原子力発電プラント内にマーカを大量に貼り付けるのは実際には非常に困難であるため、自然特徴点を用いたトラッキングとマーカトラッキングを融合させたハイブリッドトラッキングなどの技術を利用して、新しい ISSAR を開発することが今後の課題である。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究全般にわたってご指導を頂きました吉川榮和教授に深く感謝いたします。吉川教授には、お忙しい身に関わらず、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。ここに感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、実験方法などについて豊富な助言を頂きました下田宏助教授に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、本研究の方向性や、システムの開発、実験の準備、車の運転、論文の校正など、研究の全般にわたって多大な御指導、御協力を頂きました石井裕剛助手に心より感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、様々な面で助けていただいた修士課程1回生の佐野真治君、前嶋真行君に深く感謝します。

研究を進めるうえで何かとお世話して頂きました谷友美秘書、吉川万里子秘書に深く感謝いたします。

研究生活において、互いに苦楽を共にした修士課程2回生の皆様に深く感謝いたします。

最後に、昼夜問わずとも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いたします。

## 参考文献

- [1] 原子力百科辞典 ATOMICA: <http://sta-atm.jst.go.jp/atomica/index/> (2004年2月2日現在)
- [2] 尾崎貞彦, 吉川榮和, 北村正晴, 古田一雄, 五福明夫, 伊藤広二: 原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発, 日本原子力学会 2002 年春の年会要旨集, 第 II 分冊, p407(2002)
- [3] Ronald Azuma, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier, Blair MacIntyre: Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, 21,6(Nov/Dec 2001), pp.34-47(2001)
- [4] Steve Mann: Telepointer: Hands-Free Completely Self Contained Wearable Visual Augmented Reality without Headwear and without any Infrastructural Reliance, ISWC 2000, pp.177-178(2000)
- [5] 松崎剛士, 新田和弘, 下田宏, 吉川榮和, WuWei, 中川隆志, 寺下尚孝: レーザ光とカメラを用いた作業支援環境の構築, 計測自動制御学会システム・情報部門シンポジウム 2001 講演論文集, pp.343-348(2001)
- [6] Rolland, J.P., L. Davis, and Y. Baillot: "A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments", in Augmented Reality and Wearable Computers, Ch. 3, Ed. Barfield and Caudell, Mahwah, NJ., (2001)
- [7] Suyu You, Ulrich Neumann, Ronald Azuma: Hybrid Inertial and Vision Tracking for Augmented Reality Registration, IEEE Virtual Reality '99, pp.260-267(1999)
- [8] 佐藤 清秀, 穴吹 まほろ, 山本 裕之, 田村 秀行: 屋外装着型複合現実感のためのハイブリット位置合わせ手法, 電気情報通信学会技術研究報告 PRMU2002-223-232 [パターン認識・メディア理解], 101,652, pp.71-78(2002)
- [9] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94(1999)
- [10] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst, Rob Blanding, Richard May: AR tool kit 1.0 PC Documentation,

[http://www.hitl.washington.edu/research/shared\\_space/download/](http://www.hitl.washington.edu/research/shared_space/download/) (2004年1月8日現在)

- [11] The Human Interface Technology Laboratory:Shared Space,  
[http://www.hitl.washington.edu/research/shared\\_space/](http://www.hitl.washington.edu/research/shared_space/) (2004年1月8日現在)
- [12] The Canadian Cattle Identification Agency: <http://www.canadaid.ca/>(2004年2月2日現在)
- [13] JR 東日本:Suica, <http://www.jreast.co.jp/suica/> (2004年2月2日現在)
- [14] 岩間司, 佐藤政則, 鈴木こおじ, 熊倉均: 無線ID(RFID) タグを用いた郵便処理システムに関する調査研究, 郵政研究所月報, No.140, pp.6-18(2000)
- [15] 黒須正明, 伊東昌子, 時津倫子: ユーザ工学入門, 共立出版, pp.1-29(1999)
- [16] Brooke, J., SUS - A "quick and dirty" usability scale,"<http://www.cee.hw.ac.uk/ph/sus.html/>(2004年2月5日現在)

# 付録目次

付録 A 拡張現実感の研究例	付録 A-1
A.1 HMD を用いた AR システムの例	付録 A-1
A.2 ハンドヘルドディスプレイを用いた AR の例	付録 A-2
A.3 実環境に仮想現実像を直接投影する AR の例	付録 A-4
付録 B ARToolKit	付録 B-1
B.1 ARToolKit の概要	付録 B-1
B.2 マーカ検出処理	付録 B-1
B.2.1 取り扱う座標系	付録 B-1
B.2.2 マーカ抽出	付録 B-2
B.2.3 マーカ識別	付録 B-3
B.2.4 4 頂点位置検出	付録 B-4
B.3 マーカの 3 次元位置推定	付録 B-4
B.3.1 回転移動成分 $R_{3 \times 3}$ の推定	付録 B-5
B.3.2 平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ の推定	付録 B-6
B.3.3 変換行列 $T_{cm}$ の修正	付録 B-6
B.4 カメラキャリブレーション	付録 B-7
付録 C 実験に用いた機材の仕様	付録 C-1
付録 D 実験手順書	付録 D-1
D.1 実験室環境におけるウェアラブル型 ISSAR の評価実験で用いた実験手順書	付録 D-1
D.1.1 はじめに	付録 D-1
D.1.2 実験の手順	付録 D-2
D.2 原子力発電プラントの模擬的な環境における ISSAR の評価実験で用いた実験手順書	付録 D-8
D.2.1 はじめに	付録 D-8

D.2.2	実験の概要 . . . . .	付録D-8
D.2.3	作業内容 . . . . .	付録D-10
D.2.4	各デバイスとRFIDリーダの機能 . . . . .	付録D-12
D.2.5	作業完遂後の評価指標 . . . . .	付録D-14
D.2.6	実験手順 . . . . .	付録D-17
D.2.7	注意点 . . . . .	付録D-18
付録 E	評価実験の各パターンにおけるバルブ探索の順番	付録 E-1
付録 F	インタビューの結果の詳細	付録 F-1
F.1	予備実験のインタビューの結果 . . . . .	付録F-1
F.2	本実験のインタビューの結果 . . . . .	付録F-5
付録 G	ユーザビリティテスト (自由記述項目) の結果詳細	付録 G-1
G.1	実験 A . . . . .	付録 G-1
G.2	実験 B . . . . .	付録 G-1
参考文献		付録 G-4

## 付録 図目次

A.1	航空機ワイヤーハーネス製作支援システム	付録 A-1
A.2	KARMA	付録 A-1
A.3	NaviCam の外観	付録 A-2
A.4	NaviCam の情報提示画面	付録 A-3
A.5	NaviCam の概念図	付録 A-3
A.6	DigitalDesk の概観	付録 A-4
A.7	DigitalDesk の電卓アプリケーション	付録 A-5
B.1	ARToolKit の使用例	付録 B-2
B.2	システムが取り扱う座標系	付録 B-3
B.3	マーカの例	付録 B-6
B.4	格子点のフィッティング 1	付録 B-8
B.5	格子点のフィッティング 2	付録 B-9
D.1	DataGlass2	付録 D-2
D.2	Glasstron	付録 D-3
D.3	SCOPO	付録 D-3
D.4	本実験で用いるマーカ (AR Tool Kit 用マーカ)	付録 D-4
D.5	NASA TLX 起動	付録 D-5
D.6	一対比較	付録 D-6
D.7	一対比較の結果	付録 D-7
D.8	作業負担の判定	付録 D-7
D.9	HMD 「Glasstron」(ソニー)	付録 D-9
D.10	HMD 「SCOPO」(三菱電機)	付録 D-9
D.11	TabletPC	付録 D-10
D.12	マーカの例	付録 D-11
D.13	円錐が右下を指しています 右下を向くとターゲットがあります	付録 D-12
D.14	フロアの見取り図	付録 D-13

D.15 RFID リーダ (左端) . . . . .	付録D-14
D.16 NASA-TLX 起動 . . . . .	付録D-15
D.17 対比較 . . . . .	付録D-15
D.18 対比較の結果 . . . . .	付録D-16
D.19 作業負担の判定 . . . . .	付録D-16

## 付録表目次

C.1 HMD の仕様 . . . . .	付録 C-1
C.2 PC の仕様 . . . . .	付録 C-1
C.3 小型 CCD カメラの仕様 . . . . .	付録 C-1
C.4 小型液晶テレビの仕様 . . . . .	付録 C-2
C.5 ダウンスキャンコンバータ DSC06d-HR の仕様 . . . . .	付録 C-2
C.6 ダウンスキャンコンバータ CreaVision 1600 の仕様 . . . . .	付録 C-3
C.7 USB キャプチャの仕様 . . . . .	付録 C-3
C.8 マルチディスプレイカードの仕様 . . . . .	付録 C-3
C.9 マウスの仕様 . . . . .	付録 C-3
C.10 RFID リーダの仕様 . . . . .	付録 C-4
C.11 RFID タグの仕様 . . . . .	付録 C-4
C.12 録画用テレビの仕様 . . . . .	付録 C-4
C.13 録画用ビデオカメラの仕様 . . . . .	付録 C-4
D.1 被験者の行うプロセスの順番 . . . . .	付録 D-3
D.2 実験前半 ( Glasstron、SCOPO の評価 ) の順番 . . . . .	付録 D-17
D.3 実験後半 ( SCOPO、液晶テレビ、TabletPC の評価 ) の順番 . . . . .	付録 D-18
E.1 実験室環境の評価実験の各パターンにおけるバルブ探索の順番 . . . . .	付録 E-1
E.2 プラントの模擬環境の評価実験の各パターンにおけるバルブ探索の順番 . . . . .	付録 E-2
F.1 被験者 A のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-1
F.2 被験者 B のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-2
F.3 被験者 C のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-2
F.4 被験者 D のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-3
F.5 被験者 E のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-3
F.6 被験者 F のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-4
F.7 被験者 2 のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-5
F.8 被験者 3 のインタビュー結果 . . . . .	付録 F-6

F.9	被験者4のインタビュー結果 . . . . .	付録F-7
F.10	被験者5のインタビュー結果 . . . . .	付録F-8
F.11	被験者6のインタビュー結果 . . . . .	付録F-9
F.12	被験者7のインタビュー結果 . . . . .	付録F-10
F.13	被験者8のインタビュー結果 . . . . .	付録F-11
F.14	被験者9のインタビュー結果 . . . . .	付録F-12
F.15	被験者10のインタビュー結果 . . . . .	付録F-13
F.16	被験者11のインタビュー結果 . . . . .	付録F-14
F.17	被験者12のインタビュー結果 . . . . .	付録F-15
F.18	被験者13のインタビュー結果 . . . . .	付録F-16
G.1	実験AのSCOPOに関するユーザビリティテストの自由記述の結果 . .	付録G-1
G.2	実験AのGlasstronに関するユーザビリティテストの自由記述の結果 .	付録G-2
G.3	実験BのSCOPOに関するユーザビリティテストの自由記述の結果 . .	付録G-2
G.4	実験Bの携帯小型TVに関するユーザビリティテストの自由記述の結果	付録G-3
G.5	実験BのタブレットPCに関するユーザビリティテストの自由記述の結果	付録G-3

## 付録 A 拡張現実感の研究例

### A.1 HMDを用いたARシステムの例

HMDを用いたARシステムの例としては、図 A.1 に示すボーイング社の航空機ワイヤーハーネス製作支援システム<sup>[1]</sup> や、図 A.2 に示すコロンビア大学の KARMA<sup>[2]</sup> が挙げられる。

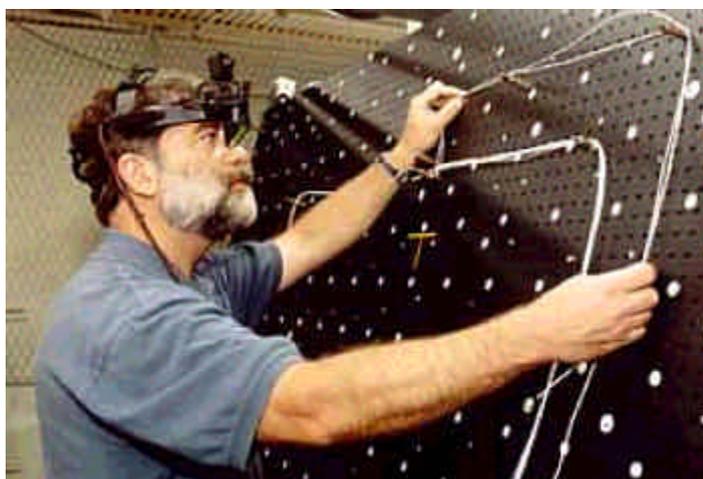


図 A.1: 航空機ワイヤーハーネス製作支援システム



図 A.2: KARMA

ボーイング社では、航空機のワイヤーハーネスの製作作業を支援するARシステムが実用化されている。ワイヤーハーネスの製作作業は非常に複雑な配線図を施した基板

上で組立て作業を行っていたが、透過型 HMD を用いて、配線すべきケーブルのみを無地の基盤に重畳表示することで、作業の複雑さを取り除くことに成功し、25%から50%の製作短縮という成果をあげている。

一方 KARMA は、レーザープリンタのメンテナンスガイドを対象としたシステムである。このシステムでは、ユーザの作業進捗状況に合わせて、ユーザが装備する透過型 HMD にプリンタ内部の構造や可動物をワイヤフレームを重畳表示する。

## A.2 ハンドヘルドディスプレイを用いた AR の例

このようなハンドヘルドディスプレイを用いた AR システムの研究例にソニー CSL の NaviCam がある<sup>[3]</sup>。図 A.3 に NaviCam の外観を、図 A.4 に情報提示画面を、図 A.5 に概念図を示す。



図 A.3: NaviCam の外観

NaviCam は小型のビデオカメラを装着したハンドヘルドディスプレイを持ち歩くタイプの AR システムである。ビデオカメラからの映像はリアルタイムにワークステーションに取り込まれて処理される。普段はディスプレイ上に撮影画像が表示されているが、情報が必要な場所に予め貼り付けてあるカラーコードをカメラが撮影すると、ディスプレイの現実世界の画像上に仮想データが重畳表示される。



図 A.4: NaviCam の情報提示画面

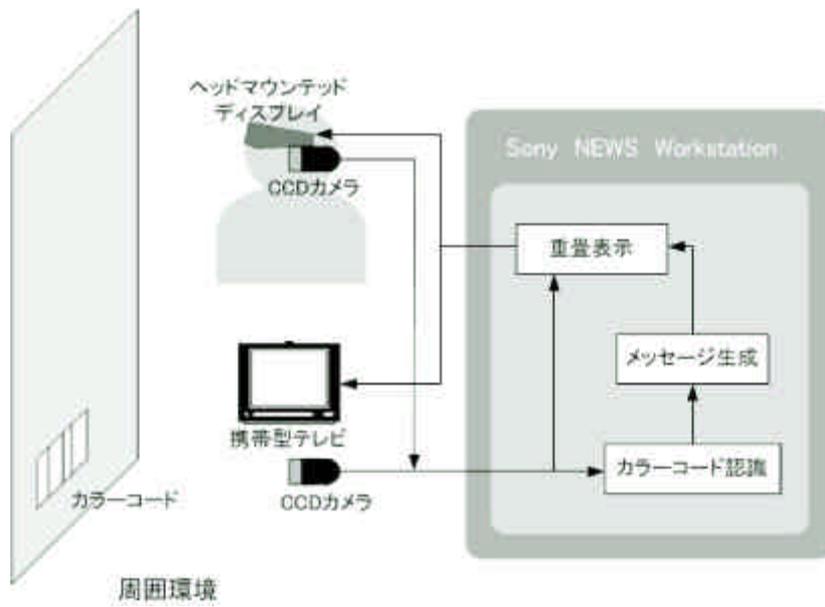


図 A.5: NaviCam の概念図

### A.3 実環境に仮想現実像を直接投影する AR の例

実環境に仮想現実像を直接投影する AR(投影型 AR)システムの有名な研究に Wellner の DigitalDesk がある [4]。



図 A.6: DigitalDesk の概観

Digital Desk では、図 A.6 に示すように上方に設置されたプロジェクタを用いて机上へ画像を投影し、通常の机にデジタル機能を持たせる。図 A.7 はアプリケーションの一例で、ユーザは仮想の電卓を利用しながら書類に対する作業を行っている。



図 A.7: DigitalDesk の電卓アプリケーション

## 付録 B ARToolkit

### B.1 ARToolkit の概要

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

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

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

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

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

### B.2 マーカ検出処理

#### B.2.1 取り扱う座標系

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



図 B.1: ARToolKit の使用例

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

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

## B.2.2 マーカ抽出

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

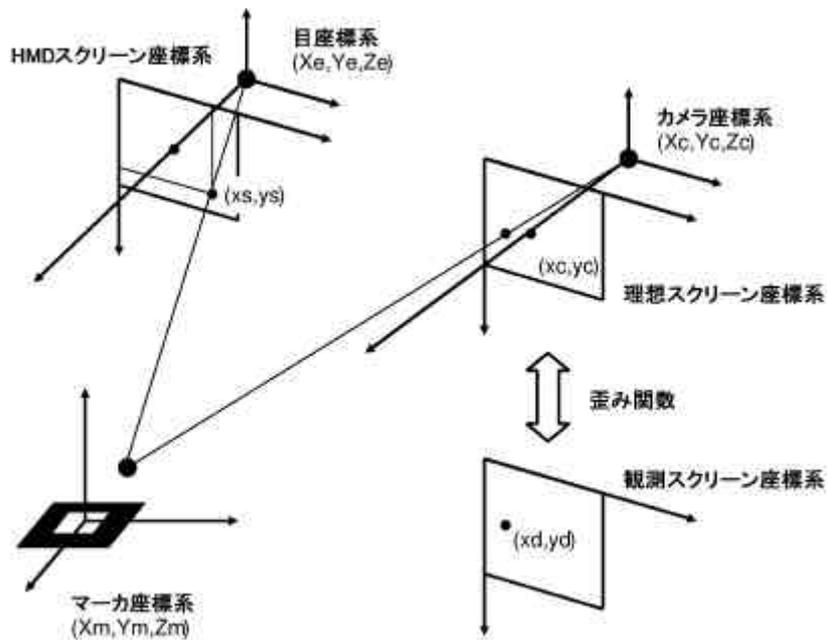


図 B.2: システムが取り扱う座標系

### B.2.3 マーカ識別

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

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

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

向と見なす。

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

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

#### B.2.4 4 頂点位置検出

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

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

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

### B.3 マーカの 3 次元位置推定

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

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} &= \mathbf{T}_{cm} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

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

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

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

となる。

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

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

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

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

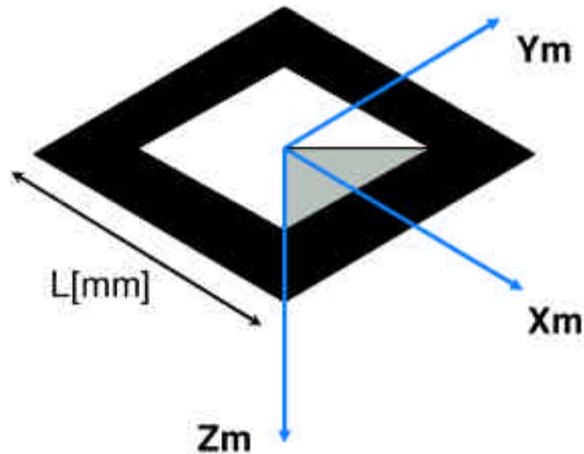


図 B.3: マーカの例

この式はカメラ座標系によって表現される3次元空間中の平面の方程式であり、3次元空間中のマーカの辺がこの平面内に存在することを意味する。マーカの向かい合う2辺は平行なのでその方向ベクトルは一致し、式(B.7)の2平面の面内方向となる。つまり、式(B.7)の2平面の各法線ベクトルの外積として計算されるベクトルが、平行2辺のカメラ座標系における方向ベクトルとなる。この計算を2組の平行2辺に対して行うことでマーカの隣り合う2辺の方向ベクトル  $U_1, U_2$  を求めることができる。

### B.3.2 平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ の推定

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

### B.3.3 変換行列 $T_{cm}$ の修正

上の計算で  $T_{cm}$  が計算されるが、回転行列の計算においてしばしば大きな誤差を伴う。そこで、再度、画像情報を利用し回転行列の修正を行う(式4)においては回転行列は9個のパラメータで表現されているが、これを3つの回転角(a:  $Z_m$  軸の傾斜方向, b:  $Z_m$  軸の傾斜角度, c:  $X_m$ - $Y_m$  平面の  $Z_m$  軸周りの回転角)で表現する。これはZYZオイラー角表現を修正したものである。通常のオイラー角表現ではベクトルの微小変動が回転角に大きな変化を及ぼす場合があるが、この表現ではそのような影響が小さい(式8)に回転行列を回転角で表した式を示す。

$$R = \begin{bmatrix} \cos a \cos b \cos(c-a) - \sin a \sin(c-a) & -\cos a \cos b \sin(c-a) - \sin a \cos(c-a) & \cos a \sin b \\ \sin a \cos b \cos(c-a) + \cos a \sin(c-a) & -\sin a \cos b \sin(c-a) + \cos a \cos(c-a) & \sin a \sin b \\ -\sin a \cos(c-a) & \sin a \sin(c-a) & \cos b \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

この式より(式9)が導出でき、回転行列  $R_{3 \times 3}$  から各回転角を求めることができる。

$$\begin{aligned} \cos b &= R_{33} \\ \cos a &= R_{13} / \sin b \\ \sin a &= R_{23} / \sin b \\ \sin c &= (R_{32}R_{13} - R_{31}R_{23}) / (R_{13}^2 + R_{23}^2) \\ \cos c &= -(R_{13}R_{31} + R_{23}R_{32}) / (R_{13}^2 + R_{23}^2) \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

そこで、これまでに求めた  $T_{cm}$  を用いて、マーカー4頂点の座標値を(式4,5)に代入することで、その理想スクリーン座標値を計算できる。この計算値と実際に画像処理によって求められた値の誤差の2乗和が少なくなるように a,b,c の値を修正する。具体的には、山登り法を用いて10回の繰り返し処理により新たな回転成分  $R_{3 \times 3}$  を求める。さらに2.3.2の処理を再適用し平行移動成分  $T_{3 \times 1}$  も更新する。この処理の理論的な収束性は証明していないが、初期値が適切に与えられること、回転ベクトルの微小変化が3つの回転角 abc に対しても微小変化しか与えないことから、妥当なものと考え、実験的に問題がないことを確認した。

## B.4 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションでは  $4 \times 6$  の格子点を持つ板を使用する。この板をカメラで撮影し、図B.4,B.5のようにキーボード操作で各格子点に対してフィッティングを行う。この作業を数回繰り返し、観測される全ての格子点に対してその3次元座標値と観測スクリーン座標系での座標値を式(B.11)に代入することで、パラメータ  $C_{ij}$  に関する一次方程式が多数得られ、その値を計算できる。この行列 C は式(B.11)に示すように透視変換成分と回転・平行移動成分に分割することができ、R の回転行列としての制約を用いることで、透視変換行列 P を計算できる。

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hx_y \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.10})$$

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

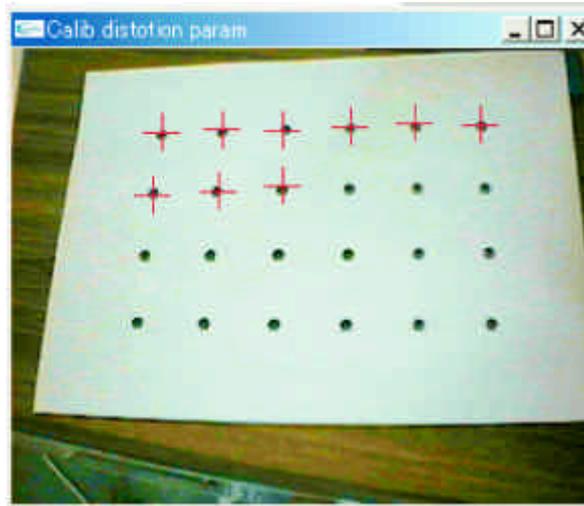


図 B.4: 格子点のフィッティング 1

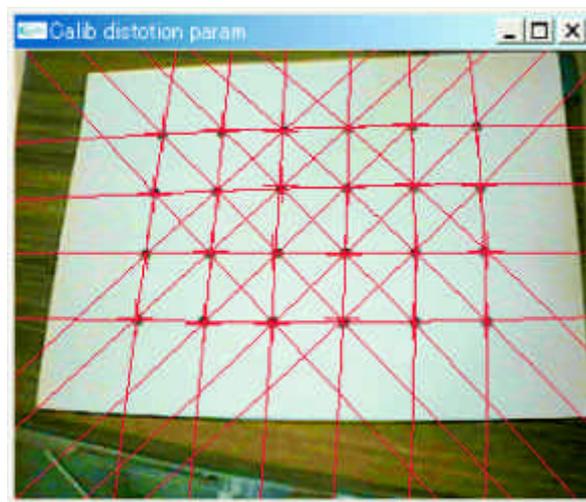


図 B.5: 格子点のフィッティング 2

## 付録 C 実験に用いた機材の仕様

表 C.1: HMD の仕様

	三菱電機 SCOPO	SONY Glasstron	島津製作所 Dataglass2
画面解像度	23 万画素 (800 × 225 ドット)	18 万画素 2 基搭載	(800 × 600 ドット SVGA フルカラー)
入力端子		特殊ステレオミニジャック	HD-Sub15 ピン
消費電力		3.8W	2W
質量 (本体)		150g	80g
外景光透過率	—	—	15 %

表 C.2: PC の仕様

	ACER TravelMateC100	IBM ThinkPadX31	IBM ThinkPadT 3 0
OS	Windows XP Tablet PC Edition	Windows XP Professional	Windows 2000 Professional
CPU	Pentium III-M 800MHz	Pentium III-M 1.60GHz	Pentium 4-M 1.80GHz
RAM	256MB	512MB	256MB
画面	10.4 型 TFT 液晶	12.1V 型 TFT 液晶	14.1V 型 TFT 液晶
USB ポート	2	2	2
重量	1.4kg	1.7kg	2.3kg

表 C.3: 小型 CCD カメラの仕様

	キーエンス CK-200	Watec FF-WAT-230A
CCD	有効 25 万画素 NTSC 方式	有効 25 万画素 NTSC 方式
映像出力	コンポジット方式	コンポジット方式
レンズ	F2.8	F2.0
水平画角	44 度	51 度
最低照度	10 ルクス	0.4 ルクス
電源電圧	DC4.8 ~ 6.0V	DC5.4 ~ 7.5V
重量	12g	30g

表 C.4: 小型液晶テレビの仕様

	CASIO 計算機 SY-4100
画面	4V 型 TFT 液晶
電源	内蔵充電電池

表 C.5: ダウンスキャンコンバータ DSC06d-HR の仕様

	DigitalArts DSC06d-HR	
対応入力	640 × 400 ~ 1024 × 768	
対応出力	NTSC・VGA・SVGA・XGA	
対応映像入力	コンピュータ映像信号	D-sub シュリンク 15pin(メス) × 1 系統
		対応解像度 640 × 400 ~ 1024 × 768pixel
		水平周波数 20kHz ~ 68 kHz
		垂直周波数 50Hz ~ 120Hz
		(ノンインターレス)
		R G B 0.7Vp-p 75
		Hs、Vs、Cs 2V ~ 5Vp-p 1K
		Sync on G 0.3Vp-p 75
インボーズ入力	NTSC 複合映像信号	BNC × 1 系統
		1Vp-p 75
	Y/C セパレート映像信号	ミニ DIN4pin(S 端子) × 1 系統
		Y 1Vp-p 75
		C 0.3Vp-p 75 (バースト値)
スルーアウト出力	コンピュータ映像信号	D-sub シュリンク 15pin(メス) × 1 系統
変換映像出力	NTSC 複合映像信号	BNC × 1 系統
		1Vp-p 75
	Y/C セパレート映像信号	ミニ DIN4pin(S 端子) × 1 系統
		Y 1Vp-p 75
		C 0.3Vp-p 75 (バースト値)
	コンポーネント映像信号	D-sub シュリンク 15pin(メス) × 1 系統
		フォーマット 480i/480p
		R G B、Y Cb Cr 0.7Vp-p 75
		1Vp-p(同期付加)
	コンピュータ映像信号	コンポーネント映像信号出力と共用
		対応解像度 640 × 400 ~ 1024 × 768pixel
		水平周波数 31.5kHz ~ 48.5 kHz
		垂直周波数 60Hz(ノンインターレス)
		R G B、0.7Vp-p 75
		Hs、Vs、Cs 3.3 V p-p 1k
		Sync on G 0.3 V p-p 75
消費電力	25W	

表 C.6: ダウンスキャンコンバータ CreaVision 1600 の仕様

	novac CreaVision 1600
対応解像度 / リフレッシュレート	640 × 480 ドット (リフレッシュレート 120Hz ~)
	1600 × 1200 (リフレッシュレート 85Hz)
入力端子	VGA パススルー入力 (付属ケーブル経由)
出力端子	コンポジット (RCA ピン) および S ビデオ (ミニ DIN)
対応テレビ方式	NTSC
消費電量	最大 450mA
重量	80g

表 C.7: USB キャプチャの仕様

	I・O データ USB-CAP2
I/F 仕様	USB Spec.1.1 準拠
" ビデオ入力	S ビデオ × 1, NTSC コンポジット × 1
" " ビデオフォーマット	RGB16bit, RGB24bit, YUV422, YUV12
" フレームレート	30Fps (352 × 288 CIF SIZE)
フレームサイズ (動画)	VideoRecorderDS : 最大 352x288
	VideoRecorder : 最大 352x288
	Holds Sight : 320 × 240 固定
電源電圧	DC5.0V(USB ポートより供給)
消費電流	300mA
質量	90g

表 C.8: マルチディスプレイカードの仕様

	I・O データ CBMLX2
VRAM 容量	4MB
グラフィックアクセラレータチップ	SMI Lynx3DM4
接続バス形態	PCMCIA Type II
最大表示色	1619 万色
電源電圧	3.135 ~ 3.465V
消費電流	432 ~ 580mA
質量	35g

表 C.9: マウスの仕様

	ELECOM M-N2P2LG
インターフェイス	PS/2
コネクタ形状	miniDIN6pin オス
分解能	1 段階 400 カウント
重量	146g

表 C.10: RFID リーダの仕様

	OMRON V700-HMD11
上位インターフェース	RS-232C
消費電力	DC5V ± 5 %
	発信時 200mA 以下 非発信時 25mA 以下
質量	約 210g

表 C.11: RFID タグの仕様

	OMRON V700-D13P21
メモリ容量	112bytes
	(ユーザエリア)
メモリ種類	EEP-ROM
データ保持時間	データ書き込み後 10 年
データ書換回数	各アドレス毎 10 万回
質量	約 2g

表 C.12: 録画用テレビの仕様

	SONY KV-10PR1	SHARP LC-10RV2-D
画面	10 型ブラウン管	10 型 TFT 液晶
入力	コンポジット方式 × 1	コンポジット方式 × 1 ミニプラグ × 1
出力	コンポジット方式 × 1	ミニプラグ × 1
消費電力	48W	23W

表 C.13: 録画用ビデオカメラの仕様

	SHARP ViewcamZ7	SONY DigitalHandycam DCR-VX1000	SONY CCD-MC100
CCD	133 万画素 CCD	41 万画素 3CCD	41 万画素 CCD
ズーム	光学 10 倍ズーム	光学 10 倍ズーム	光学 3 倍
メディア	MiniDV	MiniDV	—
画面	2.5 型 TFT 液晶	18 万画素ビューファインダー	—
消費電力	4.0W	9.5W	1.8W
重量	490g	1.6kg	75g

## 付録 D 実験手順書

### D.1 実験室環境におけるウェアラブル型ISSARの評価実験で用いた実験手順書

この節では実験室環境におけるウェアラブル型ISSARの評価実験で、実験を始めるにあたって被験者に最初に手渡した実験手順書を記載する。

#### D.1.1 はじめに

被験者の皆様、実験へのご協力ありがとうございます。本実験は、原子力プラントにおいて作業員を支援するシステムのインタフェースが、作業員にとって使いやすいものであるかどうかを調べることを目的としています。被験者の方々には、3種のHMDを装着する状態、及びHMDを装着しないで紙の指示書に従う状態の計4パターンでプラントにおける系統隔離作業におけるバルブ探索の模擬タスクを行っていただきます。この際それぞれのパターンにおいて、

- タスクの完遂時間の記録
- 作業におけるエラー数の記録

を行わせていただきます。また、タスク終了後に、

- フリッカーによる眼球疲労度の計測
- NASA TLX
- SART
- ユーザビリティテスト

を行わせていただきます。なお眼球疲労度の計測については、インタフェース使用前と比較するため、タスク前にも予め行います。また、4パターンのタスクはそれぞれ2回ずつ繰り返し、その試行の順番は以下ようになります。

- (1) 紙の指示書
- (2) HMD1
- (3) HMD2
- (4) HMD3
- (5) HMD1
- (6) HMD2
- (7) HMD3
- (8) 紙の指示書

HMD1、HMD2、HMD3 は被験者によって異なり、今回は以下のようになります。

島津製作所製「DataGlass2」	HMD ( )
SONY 製「Glasstron」	HMD ( )
三菱電機製「SCOPO」	HMD ( )



図 D.1: DataGlass2

### D.1.2 実験の手順

4つのパターンにおいてそれぞれ以下の1~7の手順で実験を行っていただきます。ただし、紙の指示書によるタスクの場合は、「完遂時間の記録」「エラー数の記録」のみを行います。また、5~7のプロセスは2度目の試行の際のみ行います。プロセスの順番を表D.1に示します。



図 D.2: Glasstron



図 D.3: SCOPO

表 D.1: 被験者の行うプロセスの順番

	眼球 疲労度	HMD 装着	タスク実行 完遂時間・	眼球 疲労度	NASA TLX	SART	ユーザビリティ テスト
紙			1				
HMD1			2				
HMD2			3				
HMD3			4				
HMD1	5	6	7	8	9	10	11
HMD2	12	13	14	15	16	17	18
HMD3	19	20	21	22	23	24	25
紙			26				

### (1) フリッカーによる眼球疲労度の計測

測定器の側面にある UP-DOWN 切り替えスイッチを“ UP ”にします。そして、のぞき部に顔面を付け、必ず握りボタンスイッチを押したままでリセットボタンを押します。これで、測定開始です。握りボタンスイッチを押したままでいるとゆっくりとチラツキ回数が多くなります。チラツキが分からなくなったところで、握りボタンスイッチから指を離します。続いて、UP-DOWN 切り替えスイッチを“ DOWN ”にし、同様の操作を行ない、チラツキが分かったところで、握りボタンスイッチから指を離します。

### (2) HMD 装着

係が準備した HMD を装着してください。HMD には CCD カメラなども備え付けられています。装着の際、HMD の画面全体が見えるように、位置を調整してください。

### (3) タスク実行

計算機室入って奥右側の扉の位置からタスクを開始します。計算機室の奥の壁にはバルブを模した紙が 50 枚貼り付けてあります。全てのバルブには 7 桁のランダムな数字が記入されたナンバープレートがぶら下げてあります。被験者には係から 10 枚のナンバーが書かれたカードが渡されるので、カードの順番どおりにそのナンバーのついたバルブをできるだけすばやく正確に探し出して下さい。

被験者が HMD を装着している場合、CCD カメラの撮影範囲内に図 D.4 のようなマーカが入ると、拡張現実感 (AR) 技術によって目的のバルブの位置情報を得ることができます。



図 D.4: 本実験で用いるマーカ (AR Tool Kit 用マーカ)

被験者が HMD を装着していない場合、ナンバーが書かれたカード以外に目的のバルブの位置を示した指示書が係から渡されます。

これらの情報を元に被験者は目的のバルブを探索し、これを見つけたらそのバルブを手で触って合図してもらいます。係が正しいバルブであると確認すれば、次のバルブの探索に移ってもらいます。間違っていればもう一度探しなおしてもらいます。10個目のバルブの探索が完了した時点で、タスク終了になります。ここまでのタスク完了に要した時間と各バルブ探索の際のエラーの回数を記録します。

(4) 再びフリッカーによる眼球疲労度の測定

プロセス1と同様の操作を行ってください。

(5) タスク実行

タスクを行った際に感じたままに、Windows パソコン上で NASA TLX の質問に回答してください。ソフトを起動すると図 D.5 のような画面が示されます。一番上のボタンをクリックし、次々に現れる図 D.6 のような質問画面に対し、より重要だと感じられた方を選んでください。

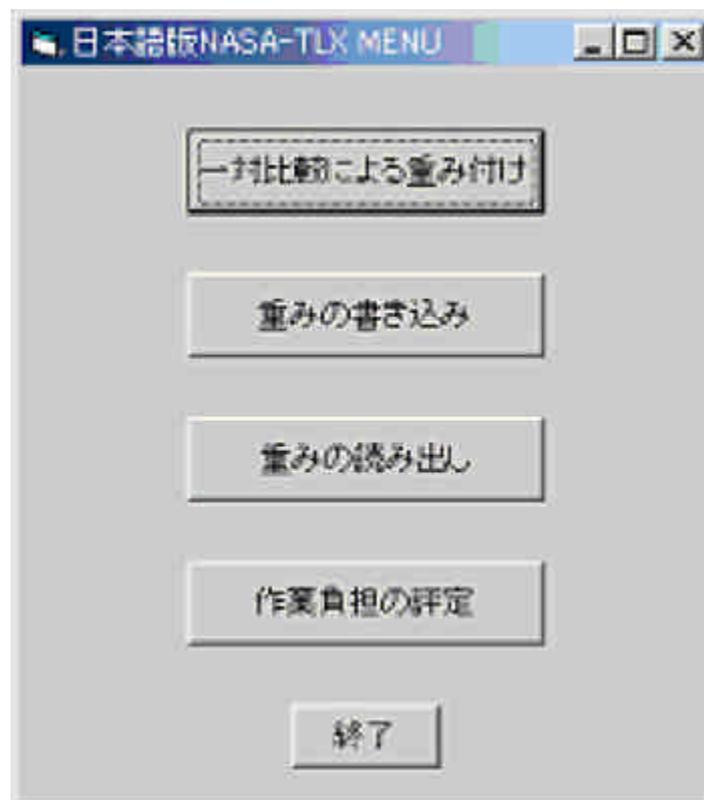


図 D.5: NASA TLX 起動

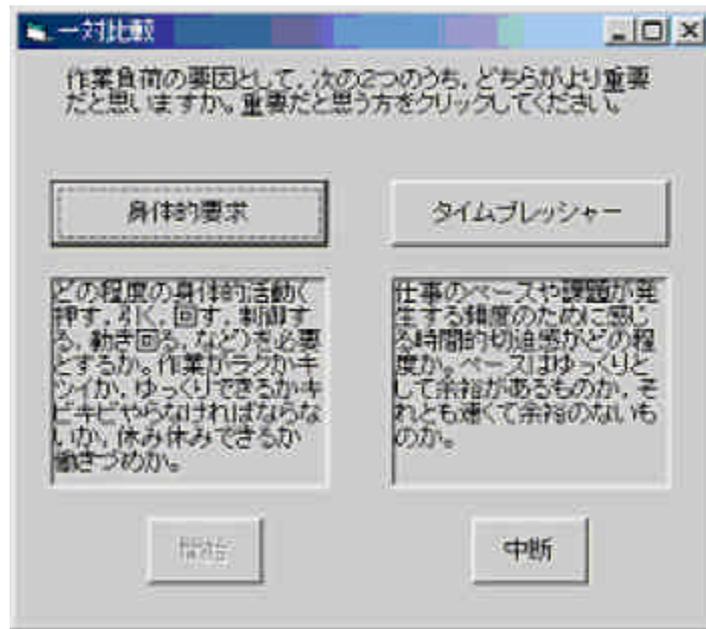


図 D.6: 一対比較

これを終わると、図 D.7 のような画面が示されるので、「ファイルに保存」を選んで結果を適当な名前をつけて保存した後、「ワークロード評価へ進む」を選んでください。次々に図 D.8 のような質問画面が現れるので 11 段階の中から適当と思われる箇所を選んで答えてください。

これを終わると、結果をまたファイルに保存して、NASA TLX は終了です。

#### (6) SART

SART では以下の 10 項目について、「低い 高い」の間で 7 段階で被験者に評価を行ってまいります。分からないことは係に質問してください。

- SART
- 状況が急に变化するかどうか
- 注意しておかなくてはいけない変化が多いかどうか
- 状況が複雑かどうか
- 行動への準備がどの程度必要か
- 新しい変化に対応するための心的容量の程度



図 D.7: 一対比較の結果



図 D.8: 作業負担の判定

- 状況に注意を集中した程度
- 状況に注意を分配した程度
- 受け取り理解した知識の程度
- 得られた知識の質や価値の程度
- 経験により状況を知っていたかどうか

#### (7) ユーザビリティテスト

実験者の合図で、配布されたユーザビリティテストシートに記入を開始してください。各質問項目に対して「そんなことはない・1・2・3・4・5・そのとおりだ」の5つの選択肢の中から適当だと思うものを選んでください。分からないことは実験者に質問してください。

以上のプロセスを、4パターンについて繰り返すと実験は終了です。ご協力ありがとうございました。

## D.2 原子力発電プラントの模擬的な環境における ISSAR の評価実験で用いた実験手順書

この章では原子力発電プラントの模擬的な環境における ISSAR の評価実験で、実験を始めるにあたって被験者に最初に手渡した実験手順書を記載する。

### D.2.1 はじめに

はるばる神戸までお越しくださり、また、実験にご協力くださりありがとうございます。現在、我々AR チームは、原子力プラントにおける保守作業を作業員がより安全・確実に行うことができるためのシステムの開発を行っています。本実験では、作業員にとってどのようなインタフェースが最適であるかを調査することを目的としています。

### D.2.2 実験の概要

本実験は、2003年12月10日(水)から、17日(水)までの、土日を除く6日間、午前の部(9時~15時)と午後の部(15時~21時)にわけ、それぞれ1人ずつ、計12人の被験者に対して行うものです。

被験者の方々には、2種類のHMD（ヘッドマウンテッドディスプレイ）と呼ばれる、頭部に取り付けるメガネ型ディスプレイ、TabletPCというペン入力方式のパソコン、小型液晶テレビ、そして、紙の作業指示書の計5通りの方法で（以下ではこれらを「デバイス」と呼びます）によって、指示を受け作業を行っていただきます。作業とは、プラントにおけるバルブの系統隔離作業と呼ばれるもののことです。しかし、本実験ではあくまでこれを模擬したものであり、内容的体力的に全く難しいものではなく、要は指示に従って、たくさんあるバルブの中からターゲットとなるバルブをできるだけ素早く正確に、順番に従い探索していただくだけのことです。



図 D.9: HMD「Glasstron」(ソニー)



図 D.10: HMD「SCOPO」(三菱電機)

なお、上で述べた、5つのパターンで実験を行う際、それぞれにおいて、

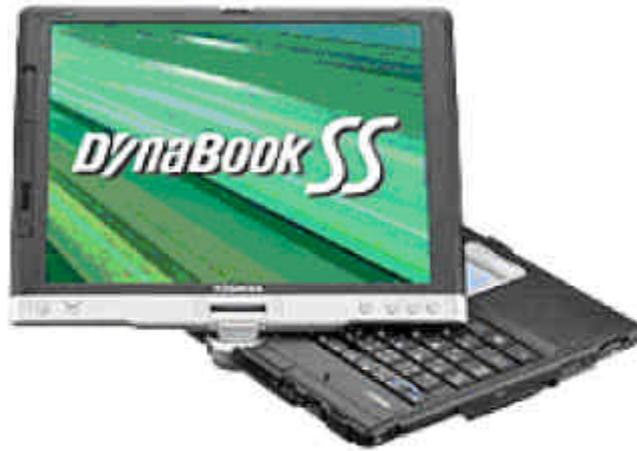


図 D.11: TabletPC

- タスク完遂時間
- タスクにおけるエラー数

を記録させていただきます。また、それぞれの実験後には

- 「NASA-TLX」という、パソコンを用いたテスト
- 「ユーザビリティテスト」という、紙に書くテスト
- アンケート
- インタビュー

を行わせていただきます。詳しくはD.5節で触れます。

### D.2.3 作業内容

被験者には、作業所内にある50個のバルブの中から、デバイスによって指示された10個のバルブを探索、できるだけ素早く正確に見つけ出していただきます。詳しい作業内容は以下のとおりになります。

- 作業指示書を用いる場合...

- 作業指示書（フロアの見取り図と行程表）を見て、バルブを探してください。
- 実験者の1人が被験者の後ろについて回ります。
- バルブを見つけたら、数字を見比べて確認した上で、正しいと確信を持った  
ら、そのバルブを指差して「これ！」と言ってください。
- 実験者は正しいければ「OKです!」、間違っていたら「間違っています!」と  
言います。
- OKが出れば次のバルブを探してください。間違っていれば探しなおしてく  
ださい。

- その他のデバイスの場合...

- デバイスの指示に沿ってバルブを探してください。
- タスク中、実験者の1人が被験者の後ろについて回ります。
- 各デバイスの画面上には、視界以外に目的のバルブをナビゲーションするCG  
が立体的に表示されます。CGは、図D.12に示すような、マーカと呼ばれる  
絵記号の張り紙の上に表示される「円錐」の場合と、バルブの上に表示され  
る「黄色い丸印」の場合があります。



図 D.12: マーカの例

- 円錐が表示されるのは、画面外に目的のバルブがあるときです。円錐の頂点  
が指し示す方向を向くか、移動してください。(図D.13)
- 黄色い丸印が表示されるのは、目的のバルブが画面内にある時です。丸印の  
付いたバルブが目的のバルブです。(図D.13)

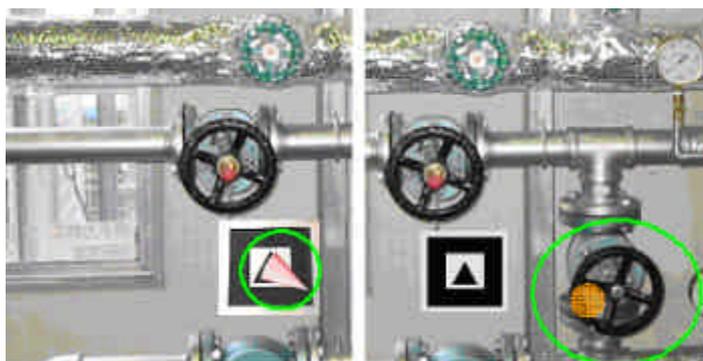


図 D.13: 円錐が右下を指しています 右下を向くとターゲットがあります

- バルブを見つけたら、RFID リーダと呼ばれる機械を、バルブについている RFID タグに近づけてください。
- 自動的にバルブの ID が読み取られ、正しいければとピンポン音が鳴ります。間違っていればブーと音が鳴ります。
- 被験者は、その音を聞いて、正しいバルブだと確信したら、そのバルブを指差して「これ！」とってください。
- 実験者は正しいければ「OK です！」、間違っていたら「間違っています！」と言います。
- OK が出たら、装備しているマウスボタンをクリックして、次のバルブを探してください。

なお、各デバイスや RFID リーダの機能については、D.6 節で触れます。

また、作業所のフロアの見取り図とバルブの位置は以下ようになります。

#### D.2.4 各デバイスと RFID リーダの機能

- Glasstron

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



図 D.14: フロアの見取り図

- SCOPO
  - 三菱電機製のヘルメット一体型 HMD です。
  - 右目の斜め前に小さな画面があり、そこに視界映像と CG 表示されます。
  - 実際の視界とその画面を比較しながら、バルブを探索します。
  
- TabletPC
  - 東芝製のペン入力タイプのノートパソコンです。
  - 画面を回転して折りたたむことにより、キーボードを完全に隠して、ディスプレイだけが表に出る形状にできます。
  - CCD カメラがパソコンの裏に取り付けてあり、それによる画像と CG が画面に表示されます。
  
- 液晶テレビ
  - カシオ計算機製の小型液晶テレビです。

– TabletPC と同じく、カメラがテレビの裏に取り付けてあり、それによる画像と CG が画面に表示されます。

- RFID リーダと RFID タグ

– RFID とは、近距離内で無線でデータをやり取りすることができる技術です。「無線版バーコード」と思っただいて結構です。

– リーダをタグに近づけると（数 mm ~ 1cm 程度）、タグの ID を読み取り、探しているバルブであるかどうかの確認ができます。



図 D.15: RFID リーダ（左端）

## D.2.5 作業完遂後の評価指標

- NASA-TLX

作業を行った際に感じたままに、Windows パソコン上で NASA - TLX の質問に回答してください。ソフトを起動すると図 D.16 のような画面が示されます。一番上のボタンをクリックし、次々に現れる図 D.17 のような質問画面に対し、より重要だと感じられた方を選んでください。

これを終わると、図 D.18 のような画面が示されるので、「ワークロード評価へ進む」を選んでください。次々に図 D.19 のような質問画面が現れるので 11 段階の中から適当と思われる箇所を選んで答えてください。

これを終わると、「ファイルに保存」を選択して回答結果を保存し、NASA TLX は終了です。

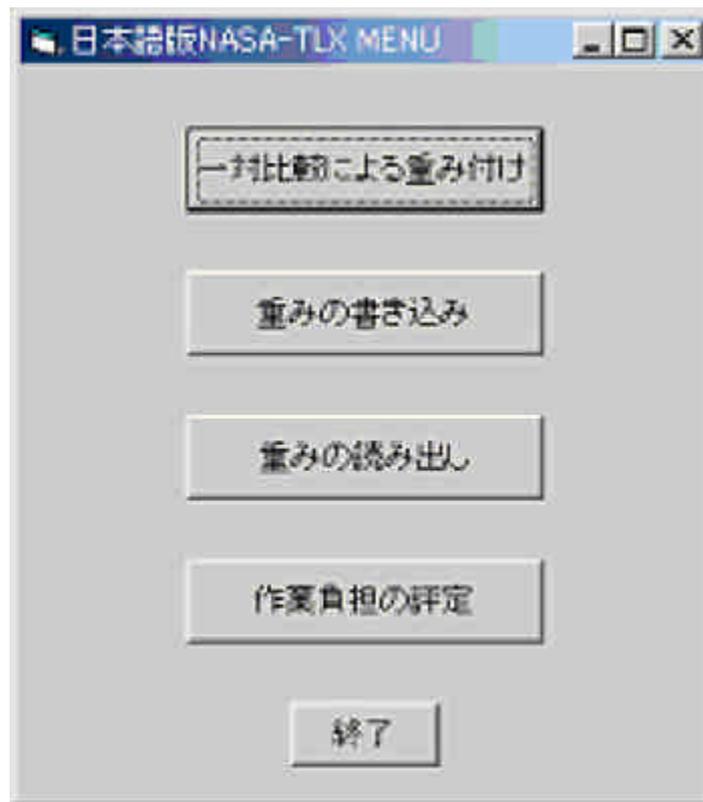


図 D.16: NASA-TLX 起動

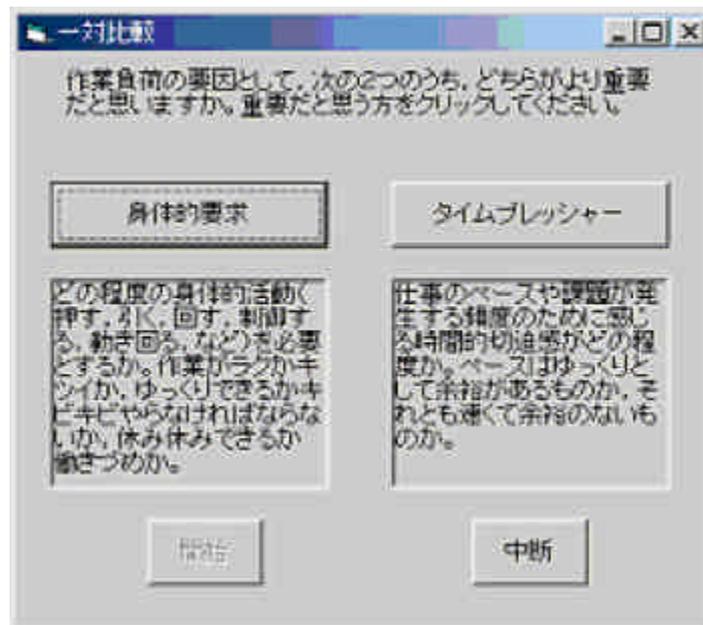


図 D.17: 一対比較

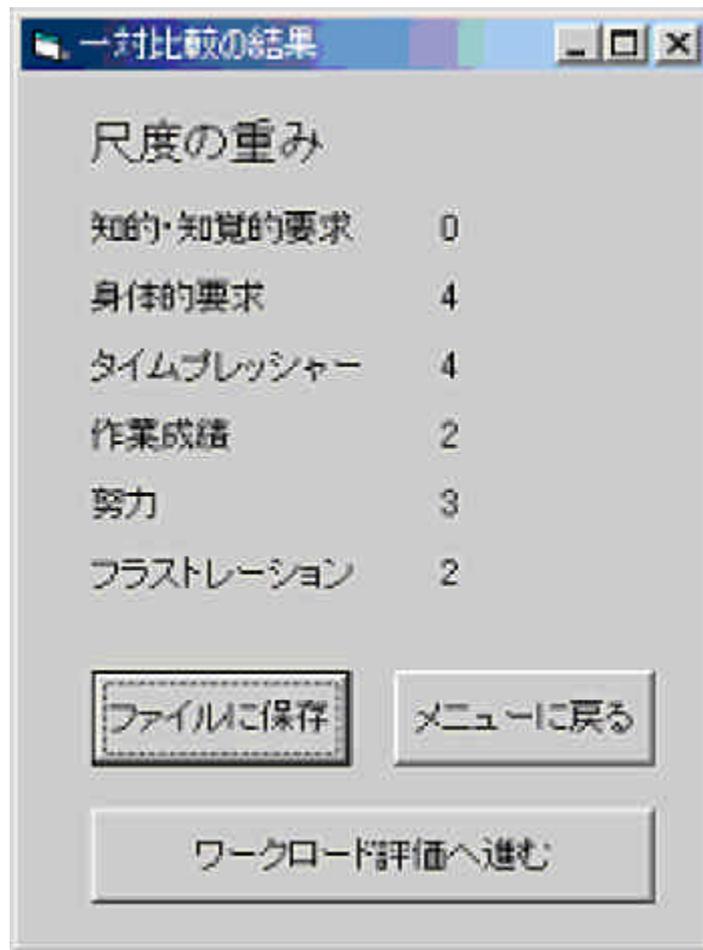


図 D.18: 一対比較の結果



図 D.19: 作業負担の判定

- ユーザビリティテスト

実験者の合図で、配布されたユーザビリティテストシートに記入を開始してください。各質問項目に対して「そんなことはない・1・2・3・4・5・そのとおりだ」の7つの選択肢の中から適当だと思うものを選んでください。分からないことは実験者に質問してください。

- アンケート

実験者の合図で、配布されたアンケート用紙に記入してください。分からないことは実験者に質問してください。

- インタビュー

全ての作業終了後に、実験者から被験者へインタビューを行います。実験者の質問に答えたり、実験全体や各デバイスについての率直な感想をしてもらいます。インタビューの内容はビデオカメラで撮影します。

## D.2.6 実験手順

実験前半ではまず、2機種 of HMD を用いて、後半では、HMD の SCOPO と、液晶テレビ、TabletPC を用いて比較していただきます。また、12人の被験者それぞれ用いるデバイスの順番が異なります。以下の2つの表のようになります。

表 D.2: 実験前半 ( Glasstron、SCOPO の評価 ) の順番

	HMD 装着	作業実行	NASA TLX	ユーザビリティ テスト	アンケート	インタビュー
紙の指示書		1				
	2	3				
	4	5				
	6	7	8	9	10	
	11	12	13	14	15	
紙の指示書		16				17

表 D.3: 実験後半 (SCOPO、液晶テレビ、TabletPC の評価) の順番

	HMD 装着	作業実行	NASA TLX	ユーザビリティ テスト	アンケート	インタビュー
紙の指示書		18				
	19	20				
	21	22				
	23	24			0	
	25	26	27	28	29	
	30	31	32	33	34	
	35	36	37	38	39	
紙の指示書		40				41

## D.2.7 注意点

- インタビュー
- 特に Glasstron を使用する作業の際には、目視で直接周囲を見ることができなくなりますので障害物などに注意してください。
- 作業中の被験者の行動は全て撮影されています。また、音声も同時に録音しているので「これです」と言うときには、はっきり聞こえるようにして下さい。
- HMD、ヘルメットなどを装着するときは、必ず実験者にそれをさせてください。
- 作業中は、万が一の怪我を防ぐため肘と膝にプロテクターを装着してください。

以上のとおりに従い、実験に参加してください。よろしくお願いします。

# 付録 E 評価実験の各パターンにおけるバルブ探索の順番

表 E.1: 実験室環境の評価実験の各パターンにおけるバルブ探索の順番

セット番号	セット 1	セット 2	セット 3	セット 4	セット 5	セット 6	
バルブ番号	1	8132884	9876240	1048712	1475171	2168720	7855122
	2	8244762	6618810	4201324	2024775	6541256	8132884
	3	4544785	4354485	6842300	2684563	1548752	4544785
	4	4215479	7423545	5668420	7824516	2547831	2024775
	5	2684563	5785436	3597582	4157964	7423545	5458423
	6	7824516	2441036	8821476	4215675	5913465	2549823
	7	2102564	2579654	1245785	4544785	5785436	1245785
	8	3597582	2447452	3254782	8244762	7755220	7216852
	9	1048712	7755220	4215479	4526873	4354485	6541256
	10	5549523	3257435	9874777	7216852	5668420	9711654

セット番号	セット 7	セット 8	セット 9	セット 10	セット 11	セット 12	
バルブ番号	1	9874777	2549823	4201324	2549823	9874777	6541256
	2	2102564	4201324	9874777	4201324	2102564	7216852
	3	4124577	1874653	3257435	1874653	4124577	2684563
	4	2168720	5785436	8244762	5785436	2168720	8821476
	5	3254782	1245785	4354485	1245785	3254782	8244762
	6	2448652	8821476	2168720	8821476	2448652	9711654
	7	4157964	6842300	5458423	6842300	4157964	2448652
	8	7855122	2448652	5549523	2448652	7855122	2441036
	9	8244762	4157964	2448652	4157964	8244762	6618810
	10	4526873	5458423	5913465	5458423	4526873	2477511

表 E.2: プラントの模擬環境の評価実験の各パターンにおけるバルブ探索の順番

セット番号		セット 1	セット 2	セット 3	セット 4	セット 5
バルブ番号	1	7265842	2756143	7460529	8016548	8560147
	2	3256974	8560147	5204178	9215304	0652153
	3	5790201	3698542	7750548	3256974	1982004
	4	0154934	1064781	6420158	0322597	5369874
	5	9625048	3579510	5801465	7265842	7750548
	6	1652498	0926435	5632145	6754892	7895412
	7	0652153	9358472	1652498	6015472	6420158
	8	6236594	3798415	2587465	2486537	5790201
	9	1795462	6985032	8160548	9954871	2135498
	10	2587465	7601587	3798415	1564823	6236594

セット番号		セット 6	セット 7	セット 8	セット 9	セット 10
バルブ番号	1	1564823	4602874	3798415	0322597	4460257
	2	1652498	0652153	8465447	3798415	6015472
	3	0322597	0926435	7460529	9215304	1564823
	4	2340790	4753064	3579510	9358472	0652153
	5	0154934	3059708	1795462	5369874	7895412
	6	8956249	9954871	4190580	8560147	2340790
	7	9754605	1795462	3698542	1064781	0154934
	8	0497505	8016548	9358472	5801465	3256974
	9	4951378	8560147	6015472	3579510	5204178
	10	1064781	4951378	6985032	7601587	8956249

セット番号		セット 11	セット 12	セット 13	セット 14	セット 15
バルブ番号	1	9215304	9358472	6015472	7750548	7601587
	2	8160548	5790201	1064781	8560147	1064781
	3	6236594	3798415	8956249	4190580	2340790
	4	4951378	4190580	9625048	0926435	4753064
	5	7750548	2135498	9954871	9358472	5204178
	6	0497505	8465447	6420158	2587465	3698542
	7	8560147	8560147	2486537	7265842	7895412
	8	1982004	7895412	2340790	8465447	9358472
	9	2135498	1564823	0322597	3579510	6015472
	10	4753064	5801465	7750548	0652153	3579510

セット番号		セット 16	セット 17	セット 18	セット 19	セット 20
バルブ番号	1	3256974	8465447	1652498	9954871	3798415
	2	5369874	1652498	1064781	6015472	5369874
	3	5790201	6236594	7601587	5204178	0926435
	4	1795462	0652153	0497505	7460529	2486537
	5	2486537	4951378	7750548	8016548	4951378
	6	3059708	9215304	3579510	2587465	9754605
	7	9954871	9358472	7895412	6985032	5801465
	8	0154934	4753064	2340790	6754892	0154934
	9	1652498	2135498	7265842	1795462	8560147
	10	9754605	4602874	7750548	0652153	3059708

## 付録 F インタビューの結果の詳細

### F.1 予備実験のインタビューの結果

表 F.1: 被験者 A のインタビュー結果

質問内容	回答
紙 , SCOPO , Glasstron , Data-Glass2 で作業を正確に効率よく行えたデバイスは?	Glasstron
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で作業の負担が大きいデバイスは?	重畳が正確でないため DataGlass2
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で表示が見やすいデバイスは?	Glasstron > SCOPO > DataGlass2
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか?	慣れればシステム
SCOPO の感想	自分の視界なので動きやすい . モニタを確認するのが面倒である .
Glasstron の感想	遠近感が無く , バルブを指し示すのが難しい .
DataGlass2 の感想	隣り合ったバルブがあると重畳情報がどちらを指し示しているのか分からない . 利目に着けたい . 重畳がしっかりしてたら使いやすいかもしれない .

表 F.2: 被験者 B のインタビュー結果

質問内容	回答
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で作業の負担が大きいデバイスは？	SCOPO , DataGlass2
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron > SCOPO > DataGlass2
SCOPO の感想	印象に残ってない．装備しづらい．まずまず見やすい．
Glasstron の感想	両眼式なので使いやすかったが，若干遠近感が取りにくい．
DataGlass2 の感想	処理が遅くて見にくい
実験全体の感想	疲れた．SART10-D,NASA-TLX はなんとなく分かった．

表 F.3: 被験者 C のインタビュー結果

質問内容	回答
紙 , SCOPO , Glasstron , Data-Glass2 で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > Glasstron > DataGlass2
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で作業の負担が大きいデバイスは？	この単純作業においては表示が一番正確な Glasstron が遠近感の誤差を差し引いても一番使いやすいと考えられる．SCOPO は視線の移動が若干わずらわしい．
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron
動きやすいデバイス（紙を除く）	SCOPO , DataGlass2 は実際の視界があるから動きやすい．Glasstron は遠近感が無いから歩きにくく，危険である．
SCOPO の感想	モニタがテキスト感覚で参照できる．視線の移動が多いものの苦にはならない．
Glasstron の感想	現実と感覚が違う．
DataGlass2 の感想	重畳がずれている．処理が遅い．
実験全体の感想	フリッカーは意味がないと思った．NASA-TLX の一対比較が難しい，言葉の意味が分かりにくい，例がほしい．SART10-D はまだわかりやすかった．

表 F.4: 被験者 D のインタビュー結果

質問内容	回答
紙 , SCOPO , Glasstron , Data-Glass2 で作業を正確に効率よく行えたデバイスは?	Glasstron > SCOPO > 紙 > DataGlass2
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で作業の負担が大きいデバイスは?	Glasstron > SCOPO > DataGlass2
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で表示が見やすいデバイスは?	Glasstron は彩度がちょうど良い上、表示が速い。SCOPO は彩度が低い。DataGlass2 は右目と左目の使い分けが難しく疲れる。また、表示速度が遅く、重畳していない。
動きやすいデバイス(紙を除く)	SCOPO , DataGlass2 は視界が広い。Glasstron は遠近感がないため、一度モニタに自分の手を入れて遠近感を確かめる必要がある。
実験全体の感想	NASA-TLX はなんとなくわかった。SART10-D はよくわからなかった。実験全体としてはおもしろかった。

表 F.5: 被験者 E のインタビュー結果

質問内容	回答
紙 , SCOPO , Glasstron , Data-Glass2 で作業を正確に効率よく行えたデバイスは?	SCOPO > Glasstron > 紙 > DataGlass
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で作業の負担が大きいデバイスは?	DataGlass2 > SCOPO > Glasstron
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で表示が見やすいデバイスは?	Glasstron
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは?	SCOPO
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか?	システム
動きやすいデバイス(紙を除く)	SCOPO > DataGlass2 > Glasstron
SCOPO の感想	見やすいが視線の移動が多く、実世界との対応付けが難しい。
Glasstron の感想	遠近感がない。
DataGlass2 の感想	重畳のずれが大きい。マーカが認識されない時が多い。
実験全体の感想	NASA-TLX は微妙。SART10-D はなんとなく分かった。

表 F.6: 被験者 F のインタビュー結果

質問内容	回答
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で作業の負担が大きいデバイスは？	処理速度が遅く表示色が薄いため DataGlass2
SCOPO と Glasstron と Data-Glass2 で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron
操作性が良いデバイスは？	SCOPO
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	AR の正確性がまだ未熟であるので現時点では紙
動きやすいデバイス（紙を除く）	SCOPO , DataGlass2
SCOPO の感想	使うには便利. モニタの位置の調整しだいで見にくくなる（視線の移動が多くなる）
Glasstron の感想	重量がしっかりしている. 遠近感があわない（画面に一度手を入れたらわかる）
DataGlass2 の感想	画面が小さすぎる（マーカが入りきらない）, カメラ画像にマーカが入っているのか画面からはわからない
実験全体の感想	NASA-TLX は最初のうちよくわからなかったけど, 2度3度としていくうちにわかってきた. SART10-D は全然わからなかった.

## F.2 本実験のインタビューの結果

表 F.7: 被験者 2 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	Glasstron > SCOPO > 紙	Glasstron は足元が隙間から見たので平気。完全密閉なら危険
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	SCOPO が一番	視界と画面を両方見られない。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	PC が一番	片手に持つには重い。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	
操作性が良いデバイスは？	Glasstron SCOPO > 小型テレビ > PC	
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	Glasstron が一番	
装着していて不快なデバイスは？	SCOPO か Glasstron	
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	マウス	
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	立体的なので奥行きがわかりやすい。黄色い表示は、表示の向こうがわかりにくくなる。
乗り越える箇所で歩きづらかったデバイスは？	小型テレビが一番歩きやすかった	
システムの改善案	携帯型ではカメラを片手に、本体をもう一方の手に持つようにすれば良い。	
実験全体の感想	全体として疲れた	

表 F.8: 被験者 3 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > Glasstron	SCOPO は慣れると動きやすい。Glasstron は遠近感が掴みづらい。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO 小型テレビ > PC	SCOPO は両手が空くが、片目は疲れる。小型テレビは見やすいが、手がふさがる。目線とカメラ画像が一致しないのもわかりにくい。PC は大きくて重い。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	PC が一番	
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	PC が一番	
操作性が良いデバイスは？	小型テレビ SCOPO PC が最悪	SCOPO は画面が小さいのでバルブが密集すると見分けにくい。
装着していて不快なデバイスは？	PC Glasstron	PC は重い。Glasstron は気持ち悪い。
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい。	立体的なので向きがわかりやすい。
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	(バルブの量が多ければ) システム	紙の場合、一番違いの数字が増えるとしんどい。
システムの改善案	長所同士をかけあわせたようなデバイスが欲しい。	
実験全体の感想	思ったより疲れた。タスクの繰り返しがしんどい。	

表 F.9: 被験者 4 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 紙 > Glasstron	映像による指示がわかりやすい。Glasstron は遠近感が掴みづらい。SCOPO は視界と画面が両方確保されている。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	小型テレビは紙を見ている感覚で慣れやすい。SCOPO は目のそばにあるのでチラチラし、目が疲れる。PC は画面が見にくい。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	SCOPO > Glasstron	
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	SCOPO > 小型テレビ > PC	
操作性が良いデバイスは？	小型テレビが一番	
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO が一番	携帯型は両手がふさがるので不便。
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron が一番	重くて、遠近感が掴みづらい。作業しづらい。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	ペン	
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	
TabletPC がもし滑らかに表示されていればどうか？	いいかもしれない	
システムの改善案	SCOPO が目が疲れないようなものになるのが良い。	

表 F.10: 被験者 5 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 紙 > Glasstron	Glasstron は密閉されていて、作業しづらい。また、遠近感が掴みづらい。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	小型テレビは顔を持っていかなくても手を持っていけば認識してくれるので良い。PC は嵩高くて重く、使い勝手が悪い。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	SCOPO Glasstron	SCOPO は片目だけで見たので疲れる。Glasstron はつけ心地が悪いのと隙間からの視界とかも見てたので疲れた。実視界を見ずにカメラ画像だけでやればもっと疲れる気がする。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	PC > 小型テレビ	PC は画面が大きい。手元で見るという動作に慣れているのでやりやすい。
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO が一番。	作業は実際の視界を見て行いたい。携帯型は二人で作業すれば、1 人が探索、1 人が作業というふうに手分けするなら良いかも。
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron > PC > SCOPO 小型テレビ	Glasstron は密閉されていて、不快。PC は重い。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	マウス	クリック感がない Tablet ペンは不安。常に持ち続けなければいけないのも面倒。
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	バルブのある方向はわかるが、バルブまでの距離がわからない。
TabletPC がもし滑らかに表示されたいらばどうか？	ベルトをつけてぶら下げれば、良いかも。	画面が大きいのは長所。

表 F.11: 被験者6のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 紙 > Glasstron	HMD はバルブの向きがわかるのが良いが、Glasstron は遠近感がつかみにくい。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > PC > SCOPO	携帯型は実際の視界と比較しやすい。SCOPO はしにくい。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	Glasstron は立体感がなく精神的に疲れた。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	PC > SCOPO > 小型テレビ	PC は重い。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	SCOPO > 小型テレビ > PC	
操作性が良いデバイスは？	SCOPO か小型テレビ	
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO	
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron	遠近感が掴みづらいから。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	マウス	
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい。	しかし、向きはわかるが、距離がわからない。遮蔽物の手前なのか裏側なのかわからない。
実験全体の感想	面白かった。	

表 F.12: 被験者 7 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > Glasstron > 紙	SCOPO は視界と画面が比較しやすい。Glasstron は遠近感がとりづらい。狭いところでぶつかりそう。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	小型テレビは見たいところにカメラを合わせやすい。PC は高い位置にカメラを合わせづらく、処理画像が遅い。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	遠近感なく視野が狭いため Glasstron は注意が必要。SCOPO は実際の視野との比較がスムーズ。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron が一番	画面が大きい。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	小型テレビが一番	目標のバルブにカメラを合わせやすい。
操作性が良いデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > Glasstron	小型テレビはカメラの取り回しがしやすい。SCOPO は視野が自由。
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO > Glasstron	両手が空くのは重要。Glasstron は遠近感が把握できないので動きにくい。
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron PC > SCOPO > 小型テレビ	
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	同じ	
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすいが表示がずれる	
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	システム	システムは考えなくても探せる。髪は面倒。
乗り越える箇所では歩きづらかったデバイスは？	Glasstron > PC	
実験全体の感想	面白かった。近づくとも CG が消えるのが不満。	

表 F.13: 被験者 8 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	Glasstron > 紙 > SCOPO	Glasstron の遠近感のずれは気にならない。SCOPO は画面が小さく、目が疲れる。視界と画面の比較が難しい。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	小型テレビはカメラの取り回しが楽。PC は重い。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	SCOPO > Glasstron	SCOPO は画面が小さく、三角錐の頂点が把握できない。実際の視野との比較が困難。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	SCOPO が一番	
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	画面の大きさが重要。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	小型テレビは得たい情報だけを映しやすいが、PC は画面の中から得たい情報を探す必要がある。
操作性が良いデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > Glasstron	小型テレビは一旦マーカの位置を把握すれば便利。SCOPO は画面調整が可能で拘束感がない。
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO > Glasstron	拘束感がなく、視野も広く、両手が使えるのが良い。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	マウス	クリック感がある。
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	周囲環境にはない色だから。円錐がこっちを向いているとわかりにくい。
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	システム	機械と自分とで二重に確認できるのが良い。疲れ方が違う。
乗り越える箇所で歩きづらかったデバイスは？	Glasstron か PC	Glasstron は遠近感がない。PC は大きく重い。小型テレビは携帯電話を持って歩く感覚。
システムの改善案	マーカをもっと増やして欲しい。	マーカを探すのに時間がかかる。でも慣れたら大丈夫。
実験全体の感想	楽しかった	

表 F.14: 被験者 9 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > Glasstron > 紙	SCOPO は探したいときだけ画面を見られる。Glasstron は視野が狭く動きにくい。紙はいちいち下を向いて確認するのが面倒。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 小型テレビ > PC	SCOPO はずっと前を向いていられる。小型テレビは下を向くのが面倒。PC は重くて大きくて疲れる。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	短時間なら SCOPO 慣れれば Glasstron のほうが疲れる	
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	PC > 小型テレビ > SCOPO	PC は重い。小型テレビはやや重い。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	SCOPO	慣れると SCOPO が見やすい。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	小型テレビが一番	手で自由に動かせる。微調整がしやすい。
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO > Glasstron	両手が空いているものが良い。Glasstron は視界が狭い。
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron と PC	Glasstron は顔につけるには大きくて重い。PC も大きくて重い。あんなに画面が大きい必要はない。SCOPO は画面がずれてくる。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	Tablet ペン	マウスは服が邪魔して手が届きにくい。小型テレビでもペンが使えるほうが良い。
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	システム	見る範囲が狭くて大丈夫だから。紙だと毎回全体を見なければならぬ。
乗り越える箇所で歩きづらかったデバイスは？	Glasstron	足元がほとんど見えない。
システムの改善案	SCOPO の画面を大きくして欲しい。	
実験全体の感想	最初は楽勝かとおもったけど単純作業でつまらん。	

表 F.15: 被験者 10 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 紙 > Glasstron	SCOPO は画面と視界が両方確保できる。ディスプレイも近くて見やすい。Glasstron は密閉されて障害物が怖い。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	小型テレビが一番適切な距離で見れる。視野が確保しやすい。PC は重くてペンが操作しにくい。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	SCOPO > Glasstron	SCOPO は画面を見るほうの目が疲れる。Glasstron は足元が見えないので気が張って精神的に疲れる。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	PC > 小型テレビ	PC は重くて手が疲れる。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	SCOPO > Glasstron	Glasstron は画面と目が離れていて見にくかった(?)
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	小型テレビ > PC > SCOPO	小型テレビは普段から慣れたスタイル。HMD は初めてで慣れていない。
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	紙 SCOPO が一番	両手が空いているのが良い。Glasstron は視野が狭く作業しにくい。
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron が一番	視野が狭い。SCOPO は目が疲れるという点以外は特に問題なし。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	マウス	クリック感がない Tablet ペンは不安。
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	システム	初めは紙がやりやすいと感じたが、慣れるとシステムのほうが楽。時間的にも短く感じた。
乗り越える箇所で歩きづらかったデバイスは？	Glasstron > PC	足元が見えず、何度もつまずきかけた。
システムの改善案	小型テレビで両手が空けば使いやすいと思う	
実験全体の感想	楽しかった	

表 F.16: 被験者 11 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > Glasstron 紙	自動的に教えてくれる HMD は紙より良い。Glasstron では視界が狭まり、おそるそる歩く必要がある。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 小型テレビ > PC	SCOPO は両手を使えるのが良い。PC は重くて、カメラを合わせるのがつらい。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	SCOPO は動くとき両目で見られる。Glasstron は遠近感がつかみづらく、歩きにくい。段差などが不安。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	PC > 小型テレビ > SCOPO	PC は重い。携帯型は手を使うので疲れる。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	あの程度なら、どちらでも十分見やすい。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	SCOPO > 小型テレビ PC	携帯型は画面が大きい割りに見にくい。だいたい円錐の向きさえわかれば良い。
操作性が良いデバイスは？	SCOPO が一番	Glasstron は歩きにくいのが致命的。携帯型は手がふさがるのであまり。SCOPO は普段している動作にプラスで画面がついているだけだからやりやすい。
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO が一番 小型テレビ > PC	Glasstron は移動であれだけやりにくいだから作業は無理。携帯型、特に PC は作業の邪魔。
装着していて不快なデバイスは？	PC > Glasstron	PC は重くて疲労がたまる。Glasstron は顔につけるには大きすぎ。小型テレビは長時間になれば不快。ポケットにしまえるなら大丈夫かも。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	あまり変わらない	
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	奥行きがつかみやすい。
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	紙の指示書を早く読めるかどうかの個人差による	
乗り越える箇所で歩きづらかったデバイスは？	Glasstron > PC	
システムの改善案	PC はせめてぶら下げようにしたほうが良い。	
実験全体の感想	わりと面白かった。	

表 F.17: 被験者 12 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > Glasstron > 紙	紙は探すのに時間がかかる。Glasstron は視界が狭く、遠近感も掴めない。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	小型テレビ > PC > SCOPO	SCOPO は視界と画面の目の切り替えがしんどい。PC は重くて、処理が遅い。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	実際の視界が見えず、段差や突起が気になる。SCOPO は特に疲れない。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > PC	
操作性が良いデバイスは？	小型テレビ > SCOPO > Glasstron > PC	
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO > 小型テレビ > Glasstron > PC	手が空いている方が良い。Glasstron は遠近感がないので作業はつらい。
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron > SCOPO > PC > 小型テレビ	目の前に画面があるのは不快。PC は重い。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	マウス	ペンを常に持っているのは面倒。
円錐などの CG 表示はわかりやすかったか？	わかりやすい	どこを見ているも目標を教えてくれるのが良い。紙はわざわざ見る必要がある。
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	システム	
乗り越える箇所で歩きづらかったデバイスは？	Glasstron が一番	Glasstron は足元が見えない。他は直接目視するので普段と変わらない。
システムの改善案	RFID リーダは無線化すると楽。リーダのピンポン音だけでは、数字確認より不安。	
実験全体の感想	背負子が重い。	

表 F.18: 被験者 13 のインタビュー結果

質問内容	回答	理由
紙、SCOPO、Glasstron で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 紙 > Glasstron	SCOPO は自動的に目標を教えてくれて、視界も確保されている。Glasstron は視野が狭く、遠近感を掴みづらい。手探りが必要。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業を正確に効率よく行えたデバイスは？	SCOPO > 小型テレビ > (紙) > PC	両手使える方が良い。PC は重くて 10 分 20 分以上はしんどい。PC 画面が滑らかでも一緒。
SCOPO と Glasstron で作業の負担が大きいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	Glasstron は歩くとき注意が必要。SCOPO はあまり苦にならない。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で作業の負担が大きいデバイスは？	PC > SCOPO > 小型テレビ	SCOPO、小型テレビはそれほど気にならない。
SCOPO と Glasstron で表示が見やすいデバイスは？	Glasstron > SCOPO	どちらもまあまあ良い。
SCOPO、小型テレビ、TabletPC で表示が見やすいデバイスは？	小型テレビ > PC	PC は反応が遅い。
細かい手作業を含む場合効率が良いと考えられるデバイスは？	SCOPO が一番	Glasstron は遠近感が掴めないのが無理。携帯型は両手が空かないし、しまうにしても時間がかかり面倒。
装着していて不快なデバイスは？	Glasstron > PC; SCOPO > 小型テレビ	Glasstron ではビデオカメラの視界画像に慣れていない。SCOPO は見たくないときは見なくて良い点が良い。PC は重い。
Tablet ペンとマウスではどちらが扱いやすいか？	変わらない	
紙の指示書による作業とシステムによる作業ではどちらが良いか？	システム	ただバルブが密集している場合、目標の表示がわかりにくい。正対しないと。
乗り越える箇所で歩きづらかったデバイスは？	Glasstron	遠近感が掴みづらく、視野が狭い。携帯型は普段と変わらないので問題なし。SCOPO も。
システムの改善案	円錐が近すぎる場合や、照明状態、遮蔽物に影響されないようにしてほしい。画面が白っぽいと黄色の円が見えない。	
実験全体の感想	楽しかった。	

# 付録 G ユーザビリティテスト(自由記述項目)の結果詳細

## G.1 実験 A

表 G.1 と表 G.2 に実験 A の SCOPO に関するユーザビリティテストの自由記述の結果と実験 A の Glasstron に関するユーザビリティテストの自由記述の結果を示す。

表 G.1: 実験 A の SCOPO に関するユーザビリティテストの自由記述の結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	視界が確保されていて安全だし、装備も軽い。	片目だけど、かなり疲れた。結局ディスプレイと目を交互に使っていた気がする。
被験者 B	片眼が使えるから動きやすい。遠近感が掴みやすい。	画面をもう少し大きくしたほうが見やすくいいと思う。
被験者 C	指示画面と自分の視界の両方が確保されているので活動しやすい。	画面があと少し見やすいと良いと思います。
被験者 D	普通の目で見える視界が大きく作業の危険が少ない。	画面が小さいので画面内の円錐を大きくすれば、見やすくよいと思う。
被験者 E	自分の視野が保てる場所が良い。指示と実際の自分の位置が比較できて目標までの行動がしやすい。	目標の指示が混雑することがあるのでどれが目標か判断しにくいところがあった。もう少し裸眼に近い感じに見れると作業しやすいと思う。
被験者 F	バルブを見つけやすい。Glasstron より動きやすく距離感がとりやすかった。	練習でつけていたときより少し見え方が違ってた。物が少し小さく見える。
被験者 G	画面情報だけでなく自分の目で実際に確認できる点。	円錐の頂点がわかるように黒い点をハッキリ入れてほしい。
被験者 H	装着が快適で視界が拓けているので動きやすく、歩く速度も Glasstron よりも素早く動けた。	もう一回り画面を大きくすることと、しっかり画面が固定されることが改良すべき点だと思う。途中でズレてきました。
被験者 I	片目だけしかディスプレイに奪われていないので比較的広い視野で敏速に動ける。	右目だけがディスプレイを見続けるとすぐ右目だけが疲れるので途中で逆の目につけかえられるようなシステムが必要だと思う。
被験者 J	初めは HMD の方がとつきやすいと思ったが、片目でちらちらとマークを見るときだけ用いれば移動やマークに RFID リーダを合わせるのは両眼で実際の空間を見ることができてはるかに行きやすくなっていた。	フィット感の向上。
被験者 K	実際に目で見える画像と、ディスプレイで見える視界の両方が見えるので安全でしかもバルブを見つけやすい。	目標のバルブが見つけられないとき、ディスプレイを見続けるのがしんどい。
被験者 L	障害物をよけやすい。片目なので気楽。探し物を見つけやすい。	近すぎると黄色の丸が出ない。脳と目が疲れるかも(長いことやったら)

## G.2 実験 B

表 G.3、表 G.4 および表 G.5 に実験 B の SCOPO に関するユーザビリティテストの自由記述の結果、実験 B の携帯小型 TV に関するユーザビリティテストの自由記述の結果および実験 B のタブレット PC に関するユーザビリティテストの自由記述の結果を示す。

表 G.2: 実験 A の Glasstron に関するユーザビリティテストの自由記述の結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	全部覆われている分、視界が安定してブレにくい。疲れにくい	ディスプレイの重さと、実際の景色とのギャップの改善。
被験者 B	矢印にそって歩けばよいところ。	重さ。ディスプレイの映像と実際の距離感の違い。目が疲れるところ。
被験者 C	画面と実際の視界を見比べる手間がないのが楽。	画面だけでは遠近感がつかめず、作業しにくい。動き回りにくい。
被験者 D	画面が大きく (SCOPO と比べて) 円錐が見やすい。	実際の視界とディスプレイとのギャップがあり、歩いていると怖い。
被験者 E	他のものと比べるとあまり良いところはない。	裸眼と感覚が違うので目標の実際の位置がわかりにくいし、動きにくい。目標が混乱して判りにくいことがある。
被験者 F	バルブを見つけやすい。SCOPO より見やすかった。	遠近感がとりづらい。動きにくい。
被験者 G	SCOPO に比べて目の疲れが少ないように思います。	映像が 2D のように見えたので、もう少し立体的に見せるようにするといいと思います。
被験者 H	全体が映っているので慣れやすく、すぐ使えると思う。初めての人にとって使いやすかった。	画面の見える視界の範囲をもう一回りくらい大きくしたほうが、動きやすいと思う。
被験者 I	目で見ただけではわかりにくい部分のバルブを探することができる。	両目とも完全にディスプレイに視界を奪われるので動くときに障害物があっても気づかない。
被験者 J	円錐を使って探索できるのが画期的	遠近感の掴みやすさの向上。頭部のフィット感の向上。
被験者 K	片目のディスプレイよりは目の運動が少ないので楽。	距離感が掴みにくい。
被験者 L	地図がわからない人には良いかもしれない。慣れれば使いやすい。面白い。	1つの円錐しか見えないので全てのマーカが目的地を指せばわかりやすいのでは？黄色がぶれるのが見にくい。目視と少しずれているのが気になる。足場の悪い所、危険な所では使いにくそう。

表 G.3: 実験 B の SCOPO に関するユーザビリティテストの自由記述の結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	手が塞がっていないため作業はしやすい。	細かいところだと表示がはっきりせず、1つにしぼるのが難しい。目が疲れる。ディスプレイ 裸眼
被験者 B	動きやすい。両手が自由になるので楽。カメラの向きと視線が合うので見やすい。	片眼で集中して見るから眼が疲れてしまう。
被験者 C	手で画面を持つタイプより視線移動が少なくてすむ。	一番画面が見やすい位置でしっかり固定できるといい。ずれやすかった。手持ちのタイプより眼が疲れやすいと思う。
被験者 D	両手が空くので作業しやすい。	特に思いつかない。
被験者 E	両手が空いているところ。	画面と実際の遠近感がわかりにくいところ。画面に集中して周りが見えなくなるところ。
被験者 F	小型の画面は大型のに比べて画面の動きがスムーズだった。大型の方は見やすかった。	大型の方はもう少し早くスムーズに動いてほしい。あと高い所にあるバルブが見つげづらい。
被験者 G	両手が空き、移動の際の不安が低減される。	マーカを増やす。
被験者 H	軽くて両手が使えること。画面とは別に外の状況も把握できること。ずっと前を向きながら作業ができること。	もう少し画面を大きくすることと思う。
被験者 I	手に何も持たなくてもよいので操作がしやすい。	やはり片目の疲労度が強い。
被験者 J	両手が使える点。身体的負荷が小さい。	フィット感の向上。
被験者 K	両手が自由に使える。	目標物を探しにくい。
被験者 L	両手が空いているので楽。TabletPC より指示の反応が早い。	目が疲れる (長時間やると) 手に持つのは見やすいが重い。長時間持つとしんどい。

表 G.4: 実験 B の携帯小型 TV に関するユーザビリティテストの自由記述の結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	頭や目をさほど動かさずにすみ、画面表示も早い。軽い。	手が塞がっている分、作業はしにくいかもしれない。
被験者 B	軽くて動きやすいところ。	特になし。
被験者 C	紙の指示を見るように簡単で、しかも映像での指示なのでわかりやすい。画面自体が小さく軽いので楽。	特になし。
被験者 D	手で持てるので、素早く絵の方向へカメラを向けられ、次のバルブの方向が早くわかる。	特になし。
被験者 E	他のものよりもバルブを探しやすい。動きやすい。	バルブの位置を指す円錐の立体的距離感がわかりにくい。
被験者 F	小さいけど見やすかった。	機器を手で持たなければならないこと。
被験者 G	軽く小さいのでとり回しが利く点。	マーカを増やせば一番良いと思います。
被験者 H	動きやすく、視界も広く、テレビも小さく軽くて持ちやすくで目標物のバルブを見つけやすかった。	特になしと思う。
被験者 I	ディスプレイを見ながら広い視野を確保できるのですごい作業しやすかった。	特になし。強いて言うなら小型液晶テレビを手装着できるようにしていればより使いやすい。
被験者 J	両目で認識できる。視野が広い。	片手が使えないので肩からぶら下げるなどの形にした方がいいと思われる。
被験者 K	軽くて持ち運びしやすいところ。	背中から伸びるコード。
被験者 L	目が疲れない。見やすい。小さいからあまり手が疲れない。	手が塞がる。ちょっとマーカから離れないと認識してくれない。

表 G.5: 実験 B のタブレット PC に関するユーザビリティテストの自由記述の結果

	このシステムで良いと思うところを挙げてください。	このシステムで改良すべきと思うところを挙げてください。
被験者 A	ちょっと片手で支えるには重かったが、視界がさえぎられていないため作業はしやすかった。遠くから位置を把握するには良いと思う。	画面の遅れ・ブレ。近づくと反応が遅くなってしまふ。
被験者 B	画面が大きくて見やすい。	重い。下や上を見るときに機械全体を傾けないといけなくて疲れる。
被験者 C	画面上でペン操作できる。	手に持つパソコンが重い。画面が見にくい。
被験者 D	画面が大きいので見やすい。	さすがに長時間やるとなると重いと思う。下げ机みたいなので体に固定できると手も空くし、軽く感じると思う。
被験者 E	実際の視覚と画面を比較してバルブを探すのが楽に行えた。他のものに比べるとバルブを探しやすかった。	高い位置のバルブを探すときに、カメラを高く上げないといけなくて少ししんどい。
被験者 F	画面が大きいの。見やすい。	高い所のものが見にくい。画面がスムーズに動かない。少し重かった。
被験者 G	目に対する負荷が少ないと思います。	場所がわかりづらいと感じました。
被験者 H	画面が大きくて一度にたくさんの情報が得ることができること。	重くて手が疲れる。下を向く頻度が多い。接写で平面的な画像なので凸凹のあるところはわかりづらいので焦点をもう少し遠くにした方がいいと思う。
被験者 I	特になし。携帯性がすごく悪いと思う。	ハード機器自体がすごく重い点、ペンで操作するのでホントに操作できたのか不明瞭な点を含めて操作性がすごく悪い。
被験者 J	両目で認識できること。	重い。長時間用いると疲労がたまるので、軽量化と肩からぶら下げるような形にした方がいいと思われる。やや画像が荒い。
被験者 K	画面が大きいの。	反応が遅い。
被験者 L	画面が大きいの。見やすい。	重くてしんどい。マーカが出るまでの時間が遅い。解像度が悪い。

## 参 考 文 献

- [1] BOEING:  
Mathematics and Computing Technology Focus, <http://www.boeing.com/defense-space/aerospace/training/instruct/augmented.htm> (2004年2月2日現在)
  
- [2] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Doree Seligmann:  
<http://www1.cs.columbia.edu/graphics/projects/karma/karma.html> (2004年2月2日現在)
  
- [3] Jun Rekimoto: NaviCam: A Magnifying Glass Approach to Augmented Reality Systems, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6, No. 4 pp.399-412(1997)
  
- [4] P. Wellner: Interacting with Paper on the DigitalDesk, Communications of the ACM, 86-96(1993).