

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： AR技術によるナビゲーションの  
ユーザ行動の実験解析

指導教員： 吉川 榮和 教授

氏名： 佐野 真治

提出年月日： 平成17年2月9日(水)

# 目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 拡張現実感 (AR) 技術によるナビゲーションの現状	3
2.1.1 拡張現実感 (AR) とは	3
2.1.2 AR 技術を用いたナビゲーションの特徴	3
2.1.3 AR の情報提示方法	6
2.1.4 AR 技術を用いた先行研究	9
2.2 AR 技術によるナビゲーションの課題	11
2.3 ユーザモデリング	11
2.4 研究の目的と意義	12
第 3 章 ISSAR の概要・評価実験とデータ解析	14
3.1 ISSAR の概要	14
3.1.1 ISSAR の機能紹介	14
3.1.2 ISSAR の詳細	18
3.1.3 ARToolKit について	21
3.2 ISSAR の評価実験	22
3.2.1 実験目的	22
3.2.2 実験方法	22
3.2.3 過去の結果	29
3.3 行動データの解析	30
3.3.1 解析目的	30
3.3.2 解析の観点	30
3.3.3 解析方法	31
3.3.4 解析結果	32
3.4 AR ナビシステムにおけるユーザモデルの仮説の導出	32
第 4 章 ユーザの視線測定実験	38
4.1 視線測定実験の目的	38
4.2 視線測定実験方針	38

4.3	視線測定システム	39
4.3.1	ハードウェア構成	39
4.3.2	ソフトウェア構成	43
4.4	実験方法	44
4.4.1	実験環境	44
4.4.2	タスク	47
4.4.3	計測項目	47
4.4.4	実験の手順	47
4.4.5	実験の実施	48
4.5	実験の結果	49
4.6	考察	54
4.6.1	被験者の現実依存・仮想依存行動について	54
4.6.2	被験者の移動について	55
4.6.3	まとめ	55
	<b>第 5 章 結論</b>	<b>57</b>
	<b>謝 辞</b>	<b>59</b>
	<b>参 考 文 献</b>	<b>60</b>

# 目次

2.1	拡張現実感の例	4
2.2	対象物の直感的理解	5
2.3	情報内容の容易な理解	5
2.4	ビデオシースルー方式	7
2.5	光学シースルー方式	7
2.6	ハンドヘルド参照型ディスプレイ	8
2.7	ボーイング社のワイヤーハーネス作成支援システム	9
2.8	KARMA	10
2.9	NaviCam の概要	10
2.10	NaviCam において提示される情報	10
3.1	系統隔離作業の流れ	14
3.2	作業者の誘導のイメージ図	15
3.3	バルブ指示のイメージ図	15
3.4	バルブの正誤判定のイメージ図	16
3.5	AR を用いたバルブ探索支援サブシステムのイメージ図	16
3.6	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	17
3.7	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	17
3.8	RFID を用いたバルブ確認支援サブシステムのイメージ図	18
3.9	用意したデバイスの種類と特徴	19
3.10	ウェアラブル型 ISSAR のハードウェア構成	19
3.11	ウェアラブル型 ISSAR の操作インタフェース	20
3.12	ハンドヘルド型 ISSAR のハードウェア構成	20
3.13	ARToolKit のマーカ	21
3.14	ARToolKit を用いて構築した AR システムの例	21
3.15	SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成図	22
3.16	Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成図	23
3.17	携帯小型 TV を用いた ISSAR のハードウェア構成図	23
3.18	タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア構成図	24
3.19	実験環境の機器配置図	25
3.20	実験環境の概観	25

3.21	実験環境の見取り図	26
3.22	ISSAR を用いた場合のタスク遂行手順	26
3.23	MGT 施設のバルブ配置図	27
3.24	実験環境録画システム	29
3.25	各インタフェースのタスク完遂時間の平均値	29
3.26	AR デバイスによるタスク試行の際のデータフローチャート	34
3.27	タスクの概念図	35
3.28	参照頻度と参照占有率の関係 (SCOPO・Glasstron については視線計測 ができなかったためデータなし)	35
3.29	移動頻度と移動占有率の関係	36
3.30	ISSAR におけるユーザモデルの仮説	36
3.31	一般的な AR ナビシステムにおけるユーザモデルの仮説	37
4.1	SCOPO を用いた視線測定システムの装着図	40
4.2	SCOPO における視線測定カメラの取り付け位置	40
4.3	SCOPO を用いた視線測定システムのハードウェア構成図	41
4.4	携帯小型テレビを用いた視線測定システムの装着図	42
4.5	タブレット PC を用いた ISSAR の装着図	43
4.6	タブレット PC を用いた視線測定システムのハードウェア構成図	43
4.7	視線測定実験の実験環境見取り図	45
4.8	実験環境の様子	45
4.9	ポスターの詳細	46
4.10	視線測定実験の録画系	46
4.11	視線測定実験の流れ	48
4.12	SCOPO を装着したシステムでの実験風景	49
4.13	携帯小型テレビを装着したシステムでの実験風景	50
4.14	TabletPC を装着したシステムでの実験風景	50
4.15	参照頻度・参照占有率特性	51
4.16	移動頻度・移動占有率特性	51
4.17	参照頻度・参照占有率特性の被験者毎の分布	53
4.18	移動頻度・移動占有率特性の被験者毎の分布	54

# 表 目 次

3.1	各タスクで使用する情報提示デバイスとパターン . . . . .	28
4.1	SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア . . . . .	41
4.2	携帯小型 TV を用いた ISSAR のハードウェア . . . . .	42
4.3	タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア . . . . .	44
4.4	被験者が各タスクで使用するデバイスとタスクパターン . . . . .	49
4.5	視線測定実験の結果 . . . . .	52
4.6	視線測定実験の各被験者の平均 . . . . .	53
4.7	参照占有率・参照頻度・移動占有率・移動頻度の平均値 . . . . .	53

# 第 1 章 序論

コンピュータを用いて生成した文字や図形などの情報を現実世界に重畳表示する技術である拡張現実感 (Augmented Reality ; AR) 技術を用いた商品や研究が、近年様々な分野において増えている。AR 技術とは人間の得る情報に、さらに情報を付加することによって現実を補強、拡張する技術のことである。特に人間の視覚情報に、ヘッドマウンテッドディスプレイ (Head Mounted Display;HMD) などを用いて文字情報や画像情報を提示することによって、得られる情報を拡張し行動のナビゲーションを行う学究は幅広く行われている。これは軍事、医療、生産など多岐の分野に渡っており、今後も新たな応用が期待されている。

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

新たな AR 技術を利用するナビゲーションシステムを提案・設計する際、あらかじめそのシステムが有用性を持つかどうかの検証をすることが重要となるが、このような状況下ではシステムの有用性の検証をするには、全ての要素技術が確立するのを待つ必要が生じる。また AR には、装着した表示デバイスに参照情報を表示させるものから、半透過型のディスプレイやレーザー光の投影によってユーザの視界に情報を重畳させるものまで、様々な手法が考えられるため、最適な提示手法の選択もあらかじめ検討する必要がある。このため AR を利用したナビゲーションシステムの研究開発を行う者によって、システムの設計段階でその有用性の検証・効果的な情報提示手法の検討ができる評価指標が求められてきた。

例えば、中嶋が行った AR 技術を用いた天体観察支援システムの研究では、野外においてユーザに星座などの情報提示を行うことで天体観測を支援するナビゲーションシステムを開発した<sup>[1]</sup>。この結果、紙を持って天体観察をする場合とこのシステムによる情報提示を受ける場合との比較から双方の特徴を知ることができたと結論付けているが、一方で課題として、技術的な制約から屋外での実験を行うことができず、さらに情報提示手法や操作方法などのユーザインタフェースの評価を行うことができなかったとも述べている。

そこで本研究では、AR 技術を用いたナビゲーションシステム環境下におけるユーザ

の認知行動の解析を行い、ユーザの認知行動の特定の側面をモデルとして表現し、さらにその認知行動を予測分析・評価する方法を模索する。解析の対象として、AR技術と非接触型の認証技術であるRFIDを用いた、原子力プラントにおける系統隔離作業支援システム(Isolation Support System using AR and RFID; ISSAR)の被験者実験で撮影された行動記録を扱う。具体的には、ユーザの視線の対象が現実の視野とシステムによって負荷された情報とに切り替えられていることに着目し、時間あたりのユーザの双方の情報参照の切り替え回数やその比率と、ユーザビリティとの関連性について調査した。また、ISSAR被験者実験だけでは得られなかったユーザの視線移動の記録を得るために、補完的・追加的な被験者実験を行いユーザの探索行動を調査・解析した。

本論文は、第1章の序論を含め、全5章で構成されている。第2章では、拡張現実感とこれを用いた先行研究と、ユーザモデルについて述べる。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)の設計と被験者実験の方法・結果について述べ、その被験者実験の結果を解析し、これをもとにユーザモデルの仮説を立てる。第4章では、第3章で述べた仮説の検証を行うためにISSARを用いて実験室環境で行った追加的な被験者実験の方法と結果について述べる。第5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、AR 技術とは何かについて述べ、その後 AR ナビゲーションの現状と課題について述べる。最後に本研究の目的と意義を述べる。

### 2.1 拡張現実感 (AR) 技術によるナビゲーションの現状

#### 2.1.1 拡張現実感 (AR) とは

近年、新しいヒューマンマシンインタフェースの手法として現実世界にコンピュータで生成された仮想現実 (Virtual Reality: VR) を付加する拡張現実感 (Augmented Reality: AR) が注目されている。VR が計算機などの人工的な手段を用いて生成された仮想世界のみに着目しているのに対して、AR は現実世界をベースに、仮想情報を加えて現実世界を増強・拡張する。Azuma らは拡張現実感 (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。VR が計算機などの人工的な手段を用いて生成された仮想世界のみに着目しているのに対して、AR は現実世界をベースに、仮想情報を加えて現実世界を拡張するものである。この定義は、視覚情報に限定されるものではなく、他の知覚にも同様に適用できる。しかし、既存の AR を利用したシステムの大半は視覚への情報提示を対象としている。

図 2.1 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。

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

#### 2.1.2 AR 技術を用いたナビゲーションの特徴

一般に AR を用いたナビゲーションには以下のような特徴がある。

##### 1. 対象物の直感的理解を可能とする

情報を、現実空間内で情報が指し示している対象物の上に重畳表示するため、



図 2.1: 拡張現実感の例

情報の対象をユーザは直感的に理解することができる。例えば、図 2.2 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を可能とする

提示情報は、文字だけでなく絵を用いても表現できるため、ユーザは情報の内容を容易かつ即座に理解できる。例えば、図 2.3 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。

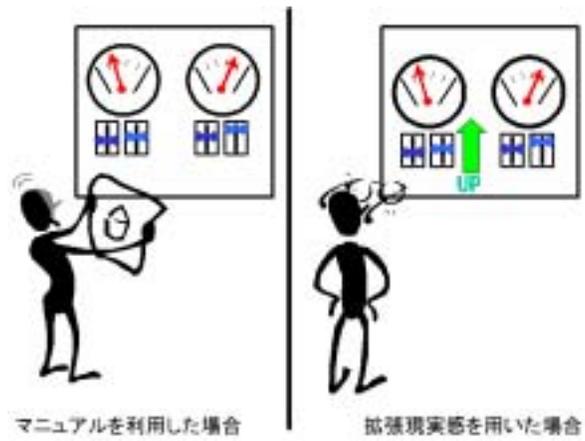


図 2.2: 対象物の直感的理解

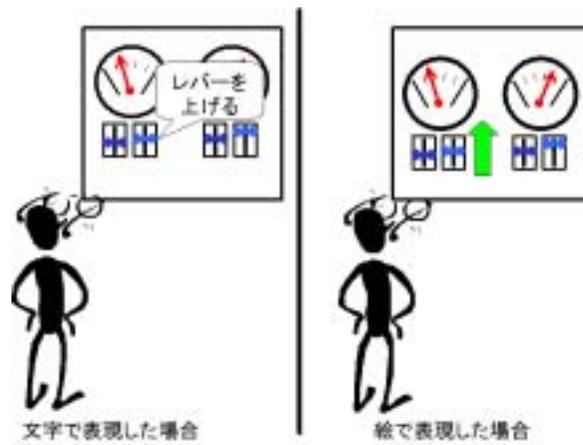


図 2.3: 情報内容の容易な理解

### 2.1.3 ARの情報提示方法

ARシステムにおける情報提示としては、現状で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) シースルー型ヘッドマウントディスプレイ (Head-Mounted Display: HMD) を用いる方法
- (b) 参照型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) シースルー型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。これに対し、ARシステムで用いるHMDは外部の視界に付加情報を重畳表示ユーザが装着したときに提示情報と外界の様子を同時に得ることができるという特徴を持つ。シースルー型HMDには一般に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2.4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2.5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
- ユーザの焦点と提示情報の焦点を合わせるのが難しい

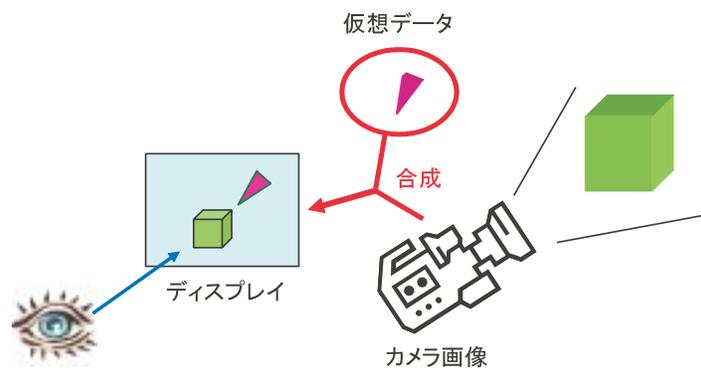


図 2.4: ビデオシースルー方式

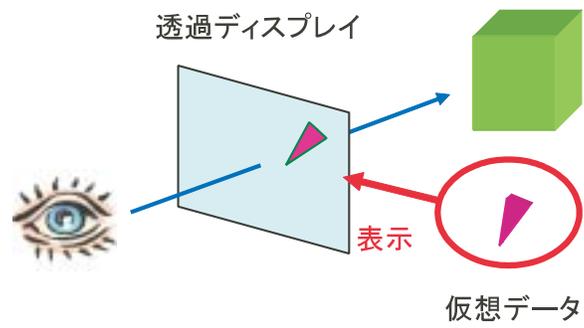


図 2.5: 光学シースルー方式

– 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

(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。

図2.6に示すように、この方法では、ハンドヘルドディスプレイとCCDカメラを用いてビデオシースルー方式の情報提示を行う。システムは、カメラから得られた映像の上に、文字や画像などの提示情報を合成して表示する。生成された映像は液晶ディスプレイによってユーザーに提示される。

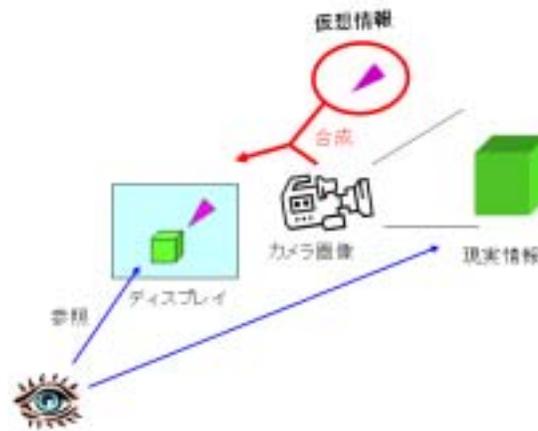


図 2.6: ハンドヘルド参照型ディスプレイ

(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 [2][3]。

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しやすいこと、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。

#### 2.1.4 AR 技術を用いた先行研究

AR を用いてユーザをナビゲーションするシステム (以下、AR ナビシステム) の研究は、製造業分野や医療分野、軍事分野など様々な分野において行われている。

その一つにボーイング社の航空機ワイヤーハーネス作製支援システムが実用化されている [4]。このシステムは航空機の電子機器配線ワイヤーハーネスの配線を行う際、図 2.7 に示すように、配線すべきハーネスの種類と位置を作業員が装着する光学シースルー方式の HMD を用いて基板上に重畳表示することで、作業をナビゲーションするシステムである。

また、レーザプリンタのメンテナンスを目的としたナビゲーションシステムとして図 2.8 に示す KARMA がある [5]。これは作業員が目的の作業を行うにはどのパーツをどのように動かせばよいかを光学シースルー方式の HMD に情報提示するものである。

作業のナビゲーションのほかにも、教育・娯楽の分野でも AR は研究されている。ソニー CSL が開発した NaviCam は、参照型ディスプレイとしてカメラ付きのラップトップを用いた図 2.9 に示すようなシステムである [6][7]。建築家の展覧会において、入場者はこれを入り口で受け取り、会場内を歩きまわると、図 2.10 に示すように、ラップトップ上に立体的な CG によって描かれた建築模型が実際の映像に合成されるという仕組みである。

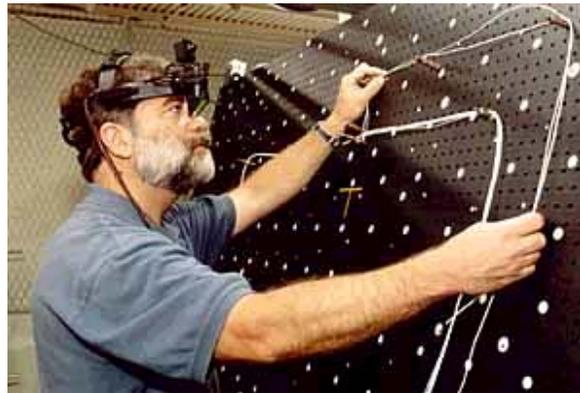


図 2.7: ボーイング社のワイヤーハーネス作成支援システム



図 2.8: KARMA

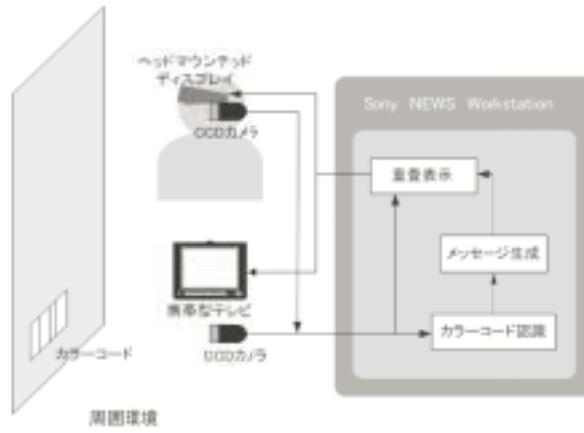


図 2.9: NaviCam の概要

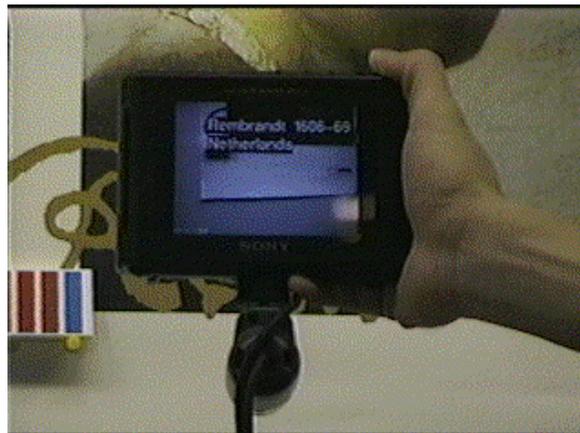


図 2.10: NaviCam において提示される情報

## 2.2 AR技術によるナビゲーションの課題

以上でも述べたとおり、AR技術は様々な分野で応用がなされている。しかし、各分野で実用化するためには、まだ多くの要素技術の改善が必要とされている。

例えばARナビシステムによって人間の動きにリアルタイムに相互作用性を持たせたような情報提示を行うような場合、人間の周囲環境に対する相対的な位置をリアルタイムで検出する、トラッキングと呼ばれる技術が必要となる。しかし、こうした技術は人間がシステムにとって未知の場所を自由に動き回る、といった環境では実現が難しく、人間の動けるのが定められた範囲内であったり、周囲環境にあらかじめ何らかの操作が必要であったりと、まだ限定的な条件下でしか実用レベルに達していないのが実情である。

AR技術を利用するナビゲーションシステムに限らず、新たなシステムを提案・設計する際、あらかじめそのシステムが有用性を持つかどうかの検証をすることが重要となる。しかし、このようにシステムに必要な要素技術がまだまだ開発途上であるため、システムの有用性の検証をするために、システムの被験者実験をすることができない。

また、上で述べたようにARには様々な情報提示手法が考えられるが、その提示手法によって必要となる技術も大きく異なるため、最適な提示手法の選択もあらかじめ検討する必要がある。しかし、有用性の検証の場合と同じく、要素技術が確立されていない現時点で提示手法の検討のために被験者実験を行うことは難しい。

これらのことから、ARを利用したナビゲーションシステムの研究開発を行う者によって、システムの設計段階でその有用性の検証・効果的な情報提示手法の検討ができる評価指標が必要である。しかし、実際にこの指標を追求した先行研究はなくその登場が求められてきた。

## 2.3 ユーザモデリング

前節で述べたように、ARナビシステムを構築する上で、あらかじめその有用性の検証と最適な情報提示デバイス選択を行うことが重要となる。

あるシステムを構築する際、より使い勝手の良いものを設計するための最も一般的なアプローチは、被験者実験を行い、そのユーザビリティを調べるという方法であるが、この方法では実際に実験システムを構築せねばならず、コストや手間がかかる上に技術も要求される。システムの最終仕様を設計の初期段階から検討するために、評価指標を決定することが重要となる。そこで、システムを評価する上でのアプローチ方法の一つにユーザモデリングを利用したものがある。

ユーザモデリングとは、システムとユーザーとの相互作用を通してユーザーに関する情報を取得、解析し、ユーザーの行動パターンや癖などの特性となるモデルを構築することである。このモデルを利用することで、システム的环境下でユーザの行動がどのように表現されるか、また、異なる条件下でユーザの行動がどのようになるかを評価することができる<sup>[8][9]</sup>。

これをARナビシステムに応用すれば、ARデバイスの相違を要因とするユーザの行動の変化や、デバイスの相違に関わらないユーザの行動共通点を表現することが可能となる。

## 2.4 研究の目的と意義

本研究では、ARを用いたナビゲーションシステム环境下のユーザにとって、そのシステムが有用であるか、また、どのような情報提示方法が有効であるかを知るために、それを利用するユーザの認知行動解析及び、モデル構築に焦点をあてる。

昨年度、AR技術とRFIDを用いた原子力プラントにおける系統隔離作業支援システム(Isolation Support System using AR and RFID; ISSAR)の開発・設計とそのユーザビリティを調べるための被験者実験を行った<sup>[10]</sup>。このシステムは、原子力発電プラントの保守点検における主要な作業の一つである系統隔離作業を対象に、AR技術とRFIDを用いた作業支援システムで、複数あるバルブの中から作業の対象となるバルブを、ARToolKitを用いてユーザをナビゲーションする機能が核となる。特に、ユーザへの情報提示に様々な形態のデバイスを使用することが考えられる点に着目し、ウェアラブル型及び、ハンドヘルド型の情報提示デバイスを持つ複数種のISSARを設計・試作し、それぞれの情報提示デバイスを用いる場合の作業効率や作業負荷、ユーザビリティなどを計測する被験者実験を行うことによりISSARの最適なインタフェース形態を調査したものである。なおこの実験の詳細については第3章で述べる。

このISSAR被験者実験で撮影された行動記録を解析対象とし、ISSAR下におけるユーザモデル構築を行う。このデータから、ユーザの認知行動をモデルとして表現することで、その認知行動を予測分析・評価することが可能となる。さらに、モデルをISSARのみならず、一般的なARナビシステムについて拡張する。

本研究の目的はISSARを通じて、ARを用いたナビゲーション环境下におけるユーザモデリングを行うことで、ユーザの認知行動を理解することである。ARに関する先行研究の多くは、要素技術の追求を目的としており、本研究のようにユーザモデリングの観点からユーザの行動を解析した例はない。このため、本研究によって得られる知見は、特定のAR環境のコスト・時間の節約といった経済的側面の問題解決のみならず、一般的なARナビシステム环境下におけるユーザの認知行動を理解する上で非常

に有用なものとなり、今後のシステムの設計や評価の指標となるものである。

以下、第3章では、ISSARの被験者実験の概要と結果の解析からユーザの認知行動について考察し、モデルの仮説を立て、第4章ではこの検証のため行った補足的な実験とその結果について述べる。

## 第 3 章 ISSAR の概要・評価実験とデータ解析

ユーザの AR ナビシステム環境下での認知行動を調査するため、ISSAR 被験者実験 (以下、ISSAR 実験) の実験データを集計・解析した。本章では、まず、ISSAR の概要について述べる。次いで、ISSAR の概略について評価実験の方法と結果、その後、データを集計・解析しユーザモデルの仮説を立てる。

### 3.1 ISSAR の概要

#### 3.1.1 ISSAR の機能紹介

原子力プラントの定期点検において系統隔離作業という作業がある。これはプラント作業員が作業指示書に従って多数のバルブの中から操作対象となるバルブを見つけ出し、操作を行うものである。図 3.1 に示すように、指示書に従ってバルブを探索し、発見したバルブのバルブ識別 ID を指示書と比較しバルブの ID と開閉状態が合致しているか確認後、バルブの開閉操作をする。しかし、ID を見間違えたり、密集したバルブ群において誤ったバルブ操作を行ったりというヒューマンエラーが発生しやすくこのインタフェースの高度化が求められている<sup>[11]</sup>。

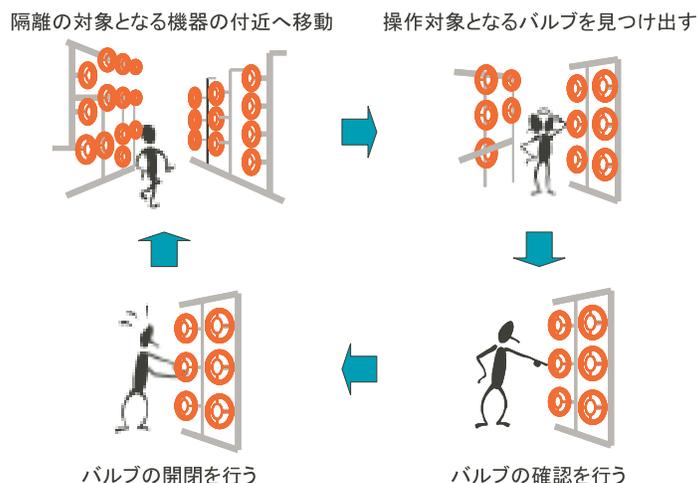


図 3.1: 系統隔離作業の流れ

ISSAR は、この系統隔離作業の支援し、作業効率の向上とヒューマンエラーの低減を目標としている。ISSAR の要求仕様は以下ようになる。

- (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
- (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
- (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

また、制約条件は以下ようになる。

- (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
- (b) 作業者の身体的な動きを大きく制限してはならない
- (c) 操作が複雑であってはならない
- (d) 作業者の移動範囲を限定しない

以上の要求仕様・制約条件から鑑み、ISSAR に必要とされる機能がバルブ探索支援機能とバルブ確認支援機能である。バルブ探索支援機能とは図 3.2、3.3 に示すような作業者を目的のバルブまで導き指示する機能、バルブ確認支援機能とは図 3.4 に示すような作業者が操作しようとしたバルブが正しいものかどうかを判定する機能である。

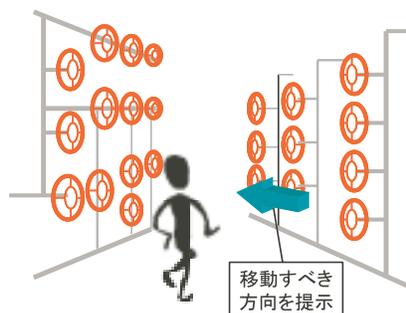


図 3.2: 作業者の誘導のイメージ図

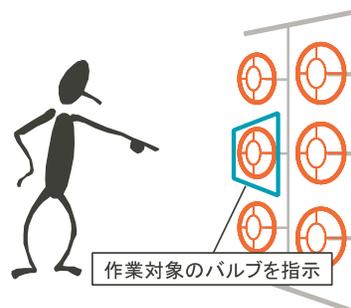


図 3.3: バルブ指示のイメージ図

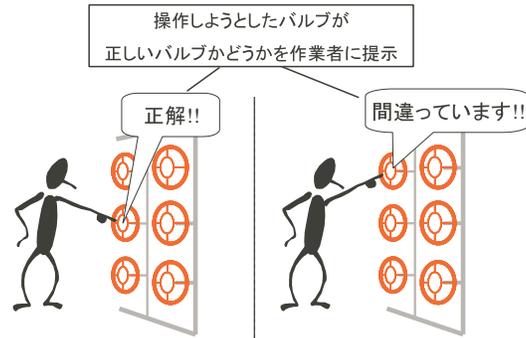


図 3.4: バルブの正誤判定のイメージ図

### バルブ探索支援機能

ISSAR ではこの機能に AR 技術を用いる。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 3.5 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。

バルブ探索支援機能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 3.6 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 3.7 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。この機能は後述する ARToolKit ライブラリを用いて実現する。

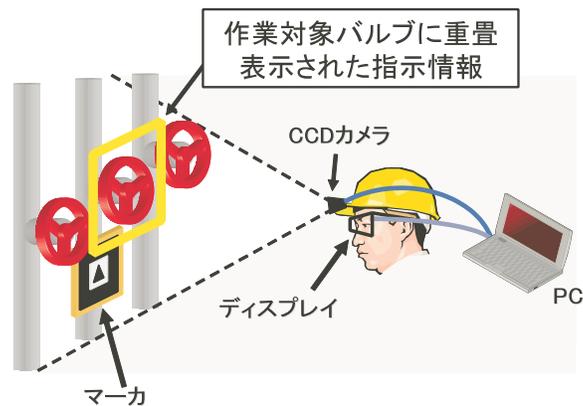


図 3.5: AR を用いたバルブ探索支援サブシステムのイメージ図



図 3.6: 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 3.7: 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

## バルブ確認支援機能

バルブ確認支援機能の実装には RFID を用いた。RFID とは数ミリ～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リーダ/ライタで読み書きを行うことができる、非接触型フリーパス乗車システムや電子マネーなどに採用されている技術である<sup>[13]</sup>。

図 3.8 に、RFID を用いたバルブ確認支援機能のイメージ図を示す。バルブに RFID タグを、作業員の手の甲に RFID リーダを取り付けることによって、作業員がバルブの正誤を確認する際に、手を近づけると報知音で知らせる機能を実装した。

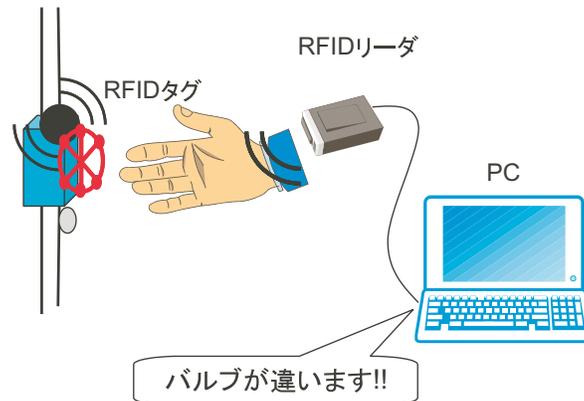


図 3.8: RFID を用いたバルブ確認支援サブシステムのイメージ図

### 3.1.2 ISSAR の詳細

ISSAR を実現するために、HMD とハンドヘルドディスプレイを用いて AR を実現した。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。図 3.9 に用意した情報提示デバイスの種類を示す。

#### ウェアラブル型 ISSAR のインタフェース

図 3.10 にウェアラブル型 ISSAR のハードウェア構成を示す。ユーザは遮へい型 HMD の Glasstron(Sony 製)、参照型 HMD の SCOPO(三菱電機製) を頭部に装備し、カメラを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背中の専用のバックパックに収納、RFID リーダは右手(利き腕)の手首に装着する。

また、作業員が ISSAR を使用する上で、あるバルブを発見・確認し開閉動作を行った後には次のバルブ探索のステップに移るためにシステムにその命令を入力しなけれ



図 3.9: 用意したデバイスの種類と特徴

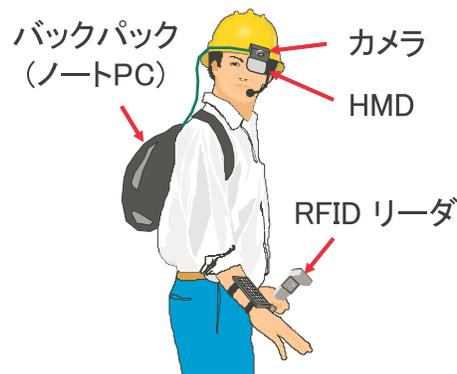


図 3.10: ウェアラブル型 ISSAR のハードウェア構成

ばならない。そこで身体的な制約が少なく操作しやすい2ボタン式の操作インターフェースを設計する。図 3.11 にその様子を示す。2つのボタンにはそれぞれ「探索するバルブを次のものに切り替える」、「前のものに戻す」という機能が割当てられている。

#### ハンドヘルド型 ISSAR のインターフェース

図 3.12 にハンドヘルド型 ISSAR 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 (ACER 製) と、小型液晶テレビ (SHARP 製) のハンドヘルドディスプレイが情報提示デバイスとした。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 ISSAR 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 ISSAR のように視界や頭部の動きの制限は無い。

ウェアラブル型 ISSAR と同様に、PDA では2ボタン式操作インターフェースを用いる。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「探索するバルブを次のものに切り替える」、ペンのクリックボタンを押しながらペントッチした

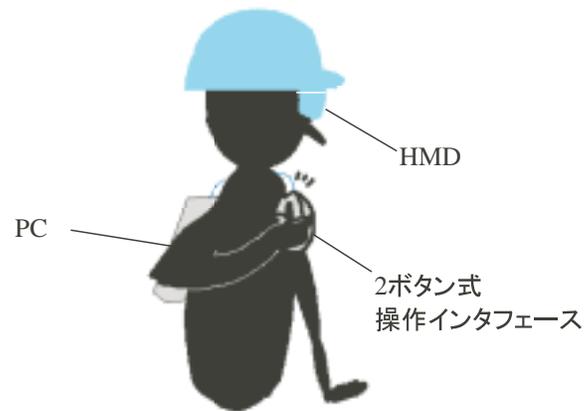


図 3.11: ウェアラブル型 ISSAR の操作インターフェース

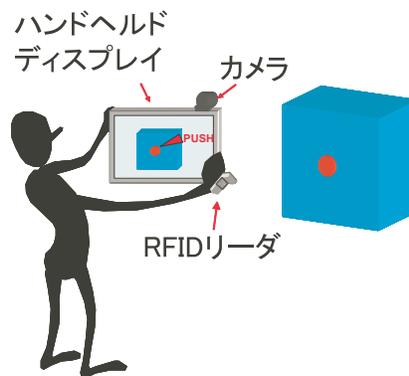


図 3.12: ハンドヘルド型 ISSAR のハードウェア構成

場合を「前のものに戻す」に対応させる。

### 3.1.3 ARToolKit について

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

ARToolKit は東らが開発した図 3.13 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>[14][15]</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 3.13: 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 3.13 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 3.14 に ARToolKit を用いて構築された AR システムの例を示す。ARToolKit の詳細については付録 A で述べる。



図 3.14: ARToolKit を用いて構築した AR システムの例

## 3.2 ISSARの評価実験

### 3.2.1 実験目的

ISSARではユーザへの情報提示に様々な形態のデバイスを使用することが考えられる点に着目し、第3.1.2節で述べたようなHMD及び、ハンドヘルドディスプレイの情報提示デバイスを持つ複数種のISSARを設計・試作した。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、ユーザビリティなど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調査した。

### 3.2.2 実験方法

#### ハードウェア構成

実験では情報提示デバイスについては図3.9に示すような4種類のデバイスを用意した。小型液晶テレビとTabletPCは参照型ハンドヘルドディスプレイ、Glasstoronはビデオシースルー方式のHMD、そしてSCOPOは参照型のHMDである。各デバイス毎のISSARハードウェア構成を図3.15から図3.18に示す。

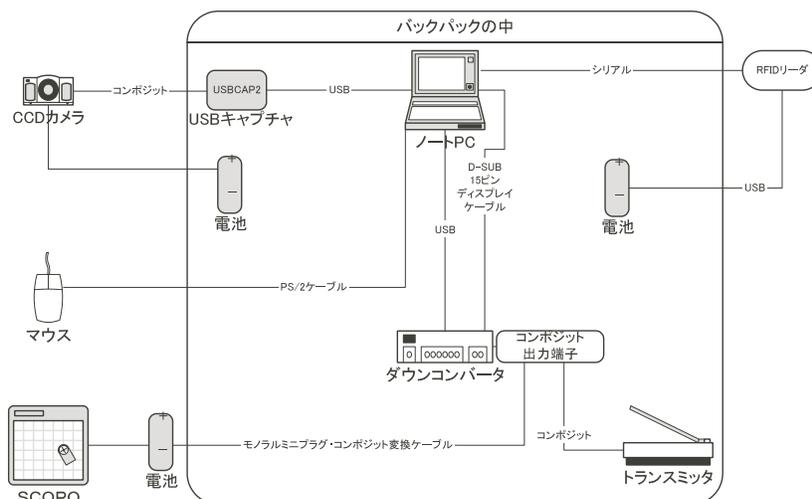


図 3.15: SCOPO を用いた ISSAR のハードウェア構成図

#### ソフトウェア構成

実験システムではバルブ探索支援機能とバルブ確認支援機能を実装した。このシステムはMicrosoft Visual C++で製作し、Windows上で動作する。

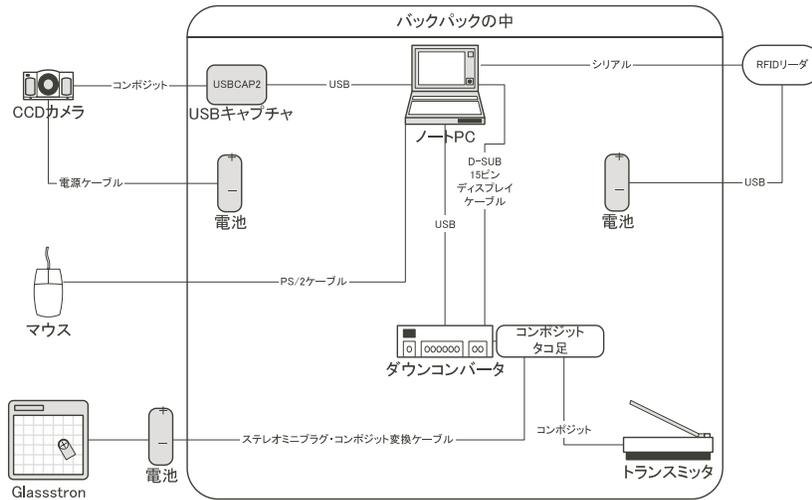


図 3.16: Glasstron を用いた ISSAR のハードウェア構成図

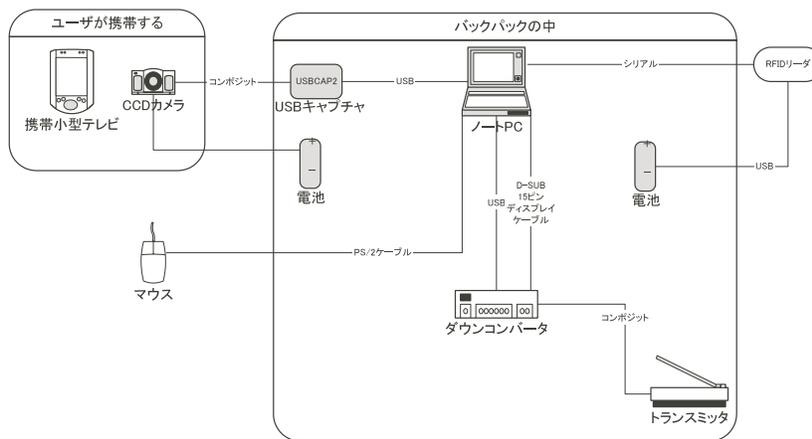


図 3.17: 携帯小型 TV を用いた ISSAR のハードウェア構成図

## 実験環境とタスク

ISSAR 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。図 3.19 に実験環境の機器配置図を示す。

図 3.20 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。

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

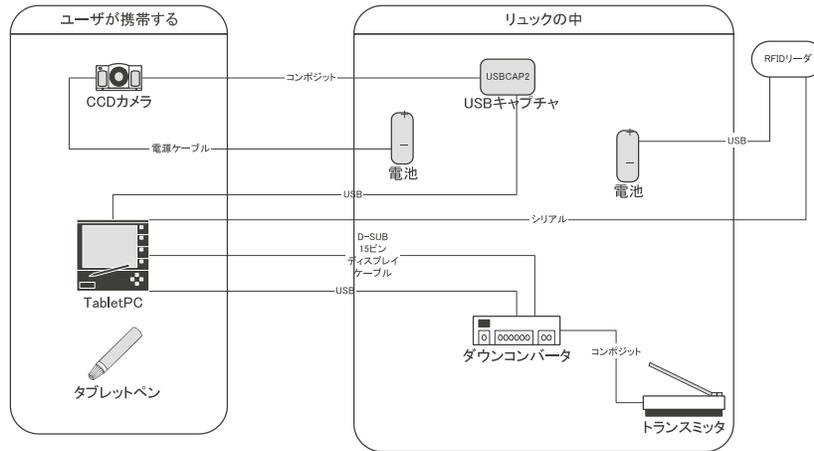


図 3.18: タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア構成図

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 3.21 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。

実験室環境における実験と同様に、系統隔離作業のバルブ探索を模擬したタスクとして、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4種のデバイスそれぞれについて被験者に課した。また、これらのデバイスとは別に探索すべきバルブが順に書かれた紙の作業指示書も用意し、タスクを被験者に課した。タスク開始時には被験者は必ず図 3.21 に示すスタート位置で同じ方向を向いているものとした。図に ISSAR を用いた場合の具体的なタスク遂行手順を示す。

被験者にはあらかじめ付録 C に示す、ISSAR 実験の被験者マニュアルを読んでもらう。

タスクは実験者が「はじめ」と発声することにより開始される。

ISSAR を用いる場合は、方向指示オブジェクトとバルブ指示オブジェクトを頼りに、バルブを探す。目的のバルブが見つかったと判断したら、被験者は手に装着した RFID リーダをバルブに貼り付けられたタグに近づけ、目的のバルブであるかどうかを確認する。対象のバルブが正しい場合は、そのバルブが正しいことを示す音が鳴り、対象のバルブが間違っている場合、間違っていることを示す音が鳴る。被験者が目的のバルブを発見したと判断した場合は、「これです」と言って、見つけたバルブを指さすものとする。指さしたバルブが正しい場合は、実験者が「OK です」と発声し、被験者は操作インターフェースを用いて作業ステップを1つ先に進め、次のバルブを探索する。間違っている場合は、再度同じバルブを探索する。

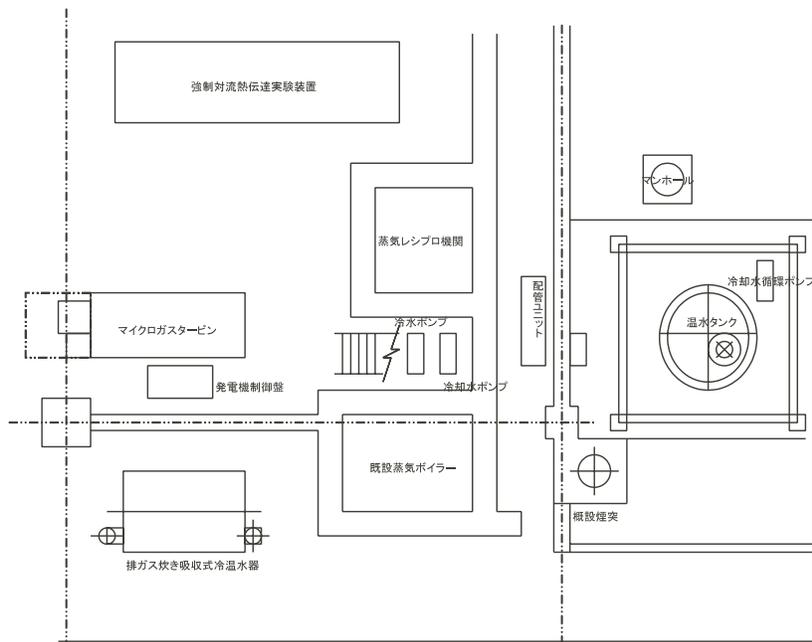


図 3.19: 実験環境の機器配置図

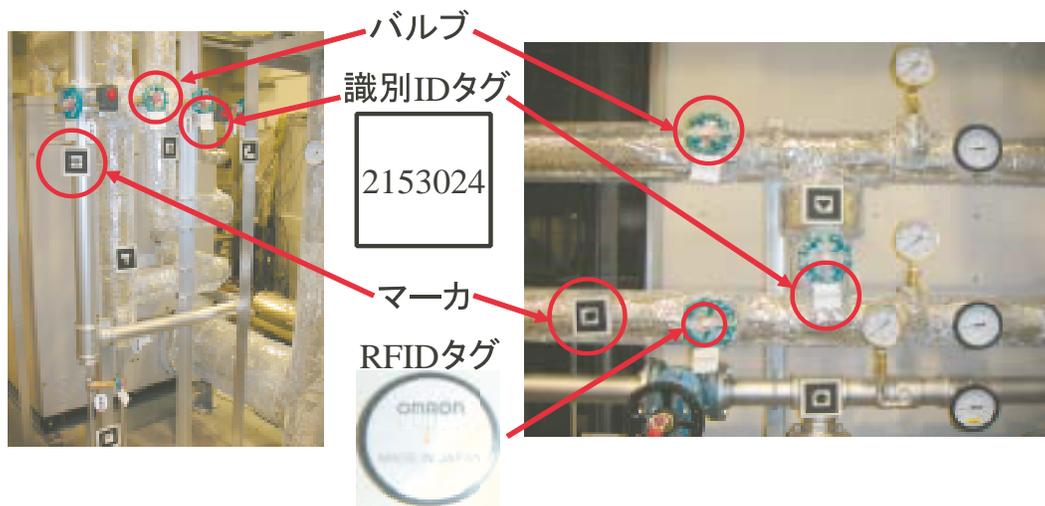


図 3.20: 実験環境の概観

- ...スタート地点
- ...バルブ
- ...マーカ

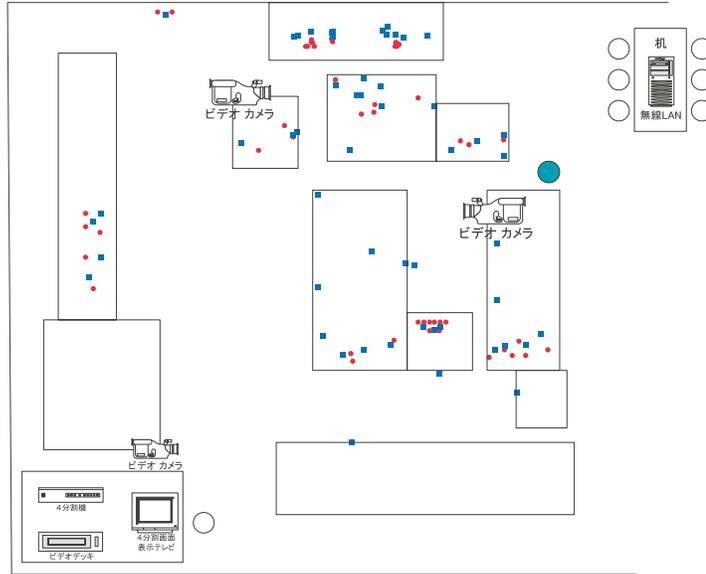


図 3.21: 実験環境の見取り図

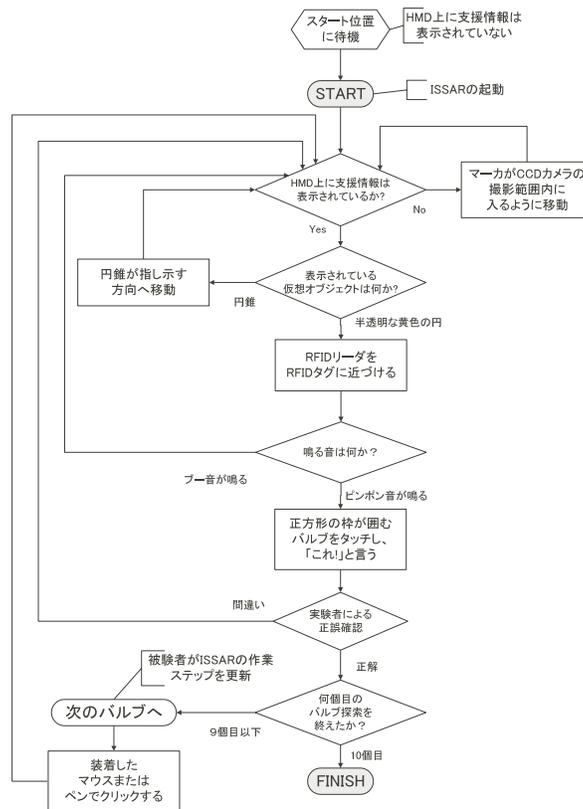


図 3.22: ISSAR を用いた場合のタスク遂行手順

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おう。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 3.23 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。

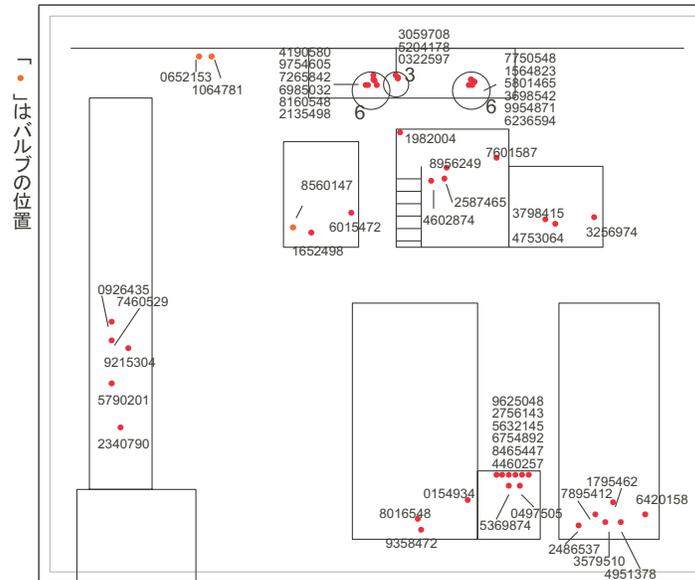


図 3.23: MGT 施設のバルブ配置図

タスクの遂行に関して被験者ごとの条件を統一するために、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。

また、被験者の順序効果・学習効果をなくするために、表 3.1 に示すようなタスクパターンを用いた。

また、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 3.24 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 3.21 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

表 3.1: 各タスクで使用する情報提示デバイスとパターン

	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	携帯小型テレビ 10	携帯小型テレビ 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	携帯小型テレビ 14	携帯小型テレビ 15	タブレット PC 16
タスク 10	携帯小型テレビ 11	タブレット PC 12	SCOPO 13	携帯小型テレビ 14	SCOPO 15	タブレット PC 16	携帯小型テレビ 17
タスク 11	SCOPO 12	携帯小型テレビ 13	携帯小型テレビ 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	携帯小型テレビ 17	携帯小型テレビ 18	タブレット PC 19
タスク 13	携帯小型テレビ 14	タブレット PC 15	SCOPO 16	携帯小型テレビ 17	SCOPO 18	タブレット PC 19	携帯小型テレビ 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	携帯小型テレビ 16	携帯小型テレビ 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	携帯小型テレビ 20	携帯小型テレビ 1	タブレット PC 2
タスク 10	タブレット PC 18	SCOPO 19	携帯小型テレビ 20	SCOPO 1	タブレット PC 2	携帯小型テレビ 3
タスク 11	携帯小型テレビ 19	携帯小型テレビ 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	携帯小型テレビ 3	携帯小型テレビ 4	タブレット PC 5
タスク 13	タブレット PC 1	SCOPO 2	携帯小型テレビ 3	SCOPO 4	タブレット PC 5	携帯小型テレビ 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

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。

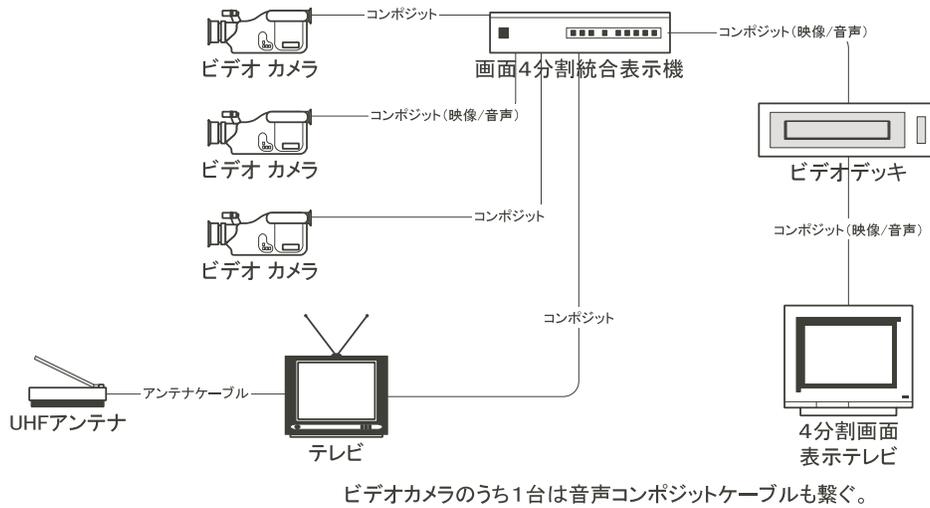


図 3.24: 実験環境録画システム

### 3.2.3 過去の結果

第 3.2.2 節で述べたような実験タスクをユーザにさせた上で、山崎はデバイス毎にユーザのタスク効率やストレスの特徴が示されるとの観点から、各タスクにおけるタスク完遂時間、被験者が誤ったバルブを指差したエラーの回数、ユーザビリティテスト、インタビューなどを行った<sup>[10]</sup>。この結果のうち、タスク完遂時間について図 3.25 に示す。また、エラーは実験全体を通して1度もなかった。

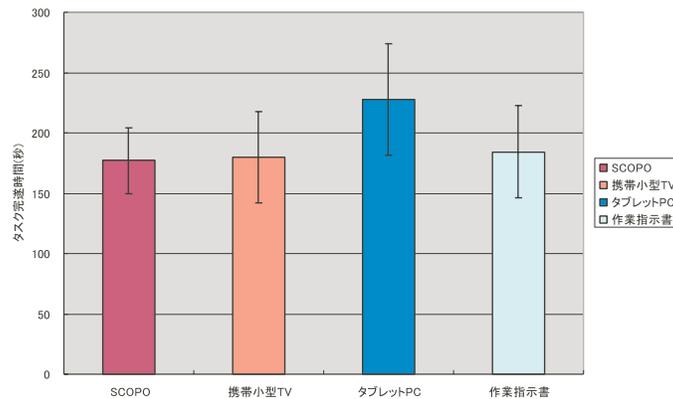


図 3.25: 各インターフェースのタスク完遂時間の平均値

山崎は実験の結果、ISSAR 実験環境下では、紙の作業指示書に比べて AR デバイスを用いた場合でも効率の面での優位性はあまり見られなかったが、さらに広い環境であれば効果があると考えられると結論付けた。また、RFID によって目標のバルブを確認することによってユーザのエラーを低減する効果があるとも述べた。

一方、ウェアラブル型の AR デバイス同士の比較の点では、Glasstron は装着することによってユーザの視界が狭まり、また、距離感を奪うことから SCOPO の方が評価が高いことが判明した。さらに、優位であった SCOPO を、2 つのハンドヘルド型ディスプレイと比較した結果、携帯小型テレビ、SCOPO、タブレット PC の順に有用性があることが明らかとなった<sup>[10]</sup>。

### 3.3 行動データの解析

山崎の考察をふまえ、新たな観点から撮影された ISSAR 実験のビデオをもとにビデオ解析を行う。

#### 3.3.1 解析目的

ISSAR 実験における山崎の考察においてビデオから集計したデータは、タスク毎の遂行時間、エラー回数のみであるが、ユーザの認知行動を知るためにはユーザの行動を細かく分類し、分類された行動を数値化する必要がある。

そこで、ユーザ行動の特性を理解することを目的として、ISSAR 実験において撮影した実験録画ビデオを基に、ユーザの行動データを分析しなおす。

#### 3.3.2 解析の観点

北島によればインタフェース評価のためにユーザの行動を分析するには、タスク中のユーザの行動を細かく分類・定義する必要があるとしている<sup>[8]</sup>。そこで、まずビデオを観察しユーザの行動を分類した。その結果、AR デバイスを用いた場合、ユーザのタスク中の行動は図 3.26 に示すフローチャート図のようになった。

ビデオ観察からユーザはタスク中に目標となるバルブを探索する行動をとる期間とバルブが正しいか確認する行動をとる期間との大きく 2 つのモードにわけられると考え、前者をユーザの目標探索モード、後者を目標確認モードと名づけた。

さらにユーザーが AR による情報提示によって行動する目標探索モードにおいて、ユーザ行動が ISSAR によって付加される情報に基づいた行動と、ISSAR に依存せずユーザが現実世界から得る情報に基づいた行動とに区分されることに着目し、前者を

仮想依存行動、後者を現実依存行動と名づける。図 3.26 では目標探索行動のうち、グレーで塗られた部分が仮想依存行動、白で塗られた部分が現実依存行動である。

そこで、録画ビデオを解析するにあたり、この2つのモードのうち目標探索モードにおける仮想依存行動と現実依存行動が、ISSARの有用性やARデバイスの効果とどのような関係があるかを検討するために、双方の行動にユーザが費やす時間的な特性を調べるためにビデオ解析を進める。

### 3.3.3 解析方法

ビデオ解析をする際、ユーザの行動が仮想依存行動なのか現実依存行動なのかを区別するために、可能な限り細かく分類し、その時間を計測することが必要である。しかし、実験環境で録画したビデオには無線で送信しているものもあるが、トランスミッタとレシーバの間の障害物によってノイズが発生して映像の内容確認が不可能なものも多く含まれていた。また、環境の周囲に固定したカメラでは全てのエリアをカバーすることが不可能であったので、本解析では正確を期するため実験監督者によってユーザを追跡、撮影した録画ビデオを利用した。

あるバルブ探索を開始してから次のバルブ探索に移行するまでの間を1ターンとし、ユーザが課される10ターンからなるバルブ探索課題を1タスクとする。

タスクの開始時間を0秒とし、1タスク、10ターンの間に以下の項目を計測した。

- (a) 画面表示確認開始時間
- (b) 画面表示確認終了時間
- (c) 移動開始時間
- (d) 移動終了時間
- (e) 被験者が「これです」と言って指差しを行った時間
- (f) 被験者がマウスをクリックした時間

なお、図 3.27 に示すように、1ターンの間には画面表示確認や移動は複数回行われる可能性があるため、1ターンの間に、(a)(b)、(c)(d)は繰り返されることもあり、また、(a)(b)間と(c)(d)間が重なる場合もありうる。ただし、ウェアラブル型である Glasstron・HMD に関しては目の動きの計測が録画カメラからでは不可能であるため、(a)(b)の計測は断念した。

この結果から、1回のタスクについて

- (A) 1ターンの時間
- (B) ディスプレイを見た回数
- (C) ディスプレイを見ていた時間

- (D) 移動・停止の繰り返した回数
- (E) 移動に用いた時間

が算出される。ただし、Glasstron・SCOPO に関しては (a)(b) が計測できなかったため、(B)(C) は算出できなかった。

### 3.3.4 解析結果

解析の結果得られたデータから、全被験者平均の時間あたりの仮想情報参照繰り返し回数 (参照頻度)・試行時間中の参照時間の占有率 (参照占有率)、及び、時間あたりの移動回数 (移動頻度)・試行時間中の移動時間の占有率 (移動占有率) を算出し、横軸を参照頻度、縦軸を参照占有率としてプロットしたものを図 3.28 に、横軸を移動頻度、縦軸を移動占有率としてプロットしたものを図 3.29 に示す。TabletPC に比べ携帯小型テレビでは参照頻度が高く、参照占有率が低い結果が表れている。また、持ち運びがしにくいとされたデバイスが移動占有率が高い傾向にあることも表れている。

## 3.4 AR ナビシステムにおけるユーザモデルの仮説の導出

ISSAR 実験における山崎の考察において、小型携帯テレビや SCOPO はタブレット PC に比べ情報の参照が行いやすいとされている。一方で、本解析では小型携帯テレビは参照頻度が比較的高く、参照占有率が低い。このことから、情報の参照が行いやすいデバイスでは、付加情報の参照頻度が高く、また、参照に要する時間が短いという推測が成り立つ。これは、目標探索モードにおいて仮想依存行動と現実依存行動との切り替えが容易で、かつ、仮想依存行動に要する時間が短いシステムが、被験者実験で実際に高いユーザビリティを示すということを示している。

以上のことから ISSAR におけるユーザモデルの仮説を図 3.30 に示す。

これは ISSAR が現実情報を基に仮想情報を生成し、ユーザが仮想依存行動と現実依存行動とをスイッチングしながら目標探索行動を行っているということを示している。ISSAR は入力された現実の映像を基に矢印や円の仮想オブジェクトを生成、ユーザに提示し、ユーザは現実の映像と仮想オブジェクトを交互に参照しながら目標となるバルブ探索を行う。バルブを発見すると目標が正しいかどうかを RFID リーダを用いて確認し、その結果音によって出力された正解・不正解判定に従って目標探索を再度繰り返す。現実の映像と仮想オブジェクトとを交互に参照する 2 本の矢印の幅は、ユーザの現実依存行動から仮想依存行動へのスイッチングのしやすさ、仮想依存行動から現実依存行動へのスイッチングのしやすさを意味し、この幅が狭いほどスイッチングにストレスを感じない有用なデバイスであることを示している。

また、一般的な AR ナビシステムにおけるユーザモデル仮説は図 3.31 に示すようになる。これもユーザが現実情報とそれを基に AR ナビシステムが生成した仮想情報とを交互に参照していることを表しており、ユーザは与えられた仕事を、これらの情報を手がかりにして行動する。与えられた仕事をこなすため、ユーザが上記のスイッチングを行いながら、タスクの受け取りと行動を繰り返していることを示している。

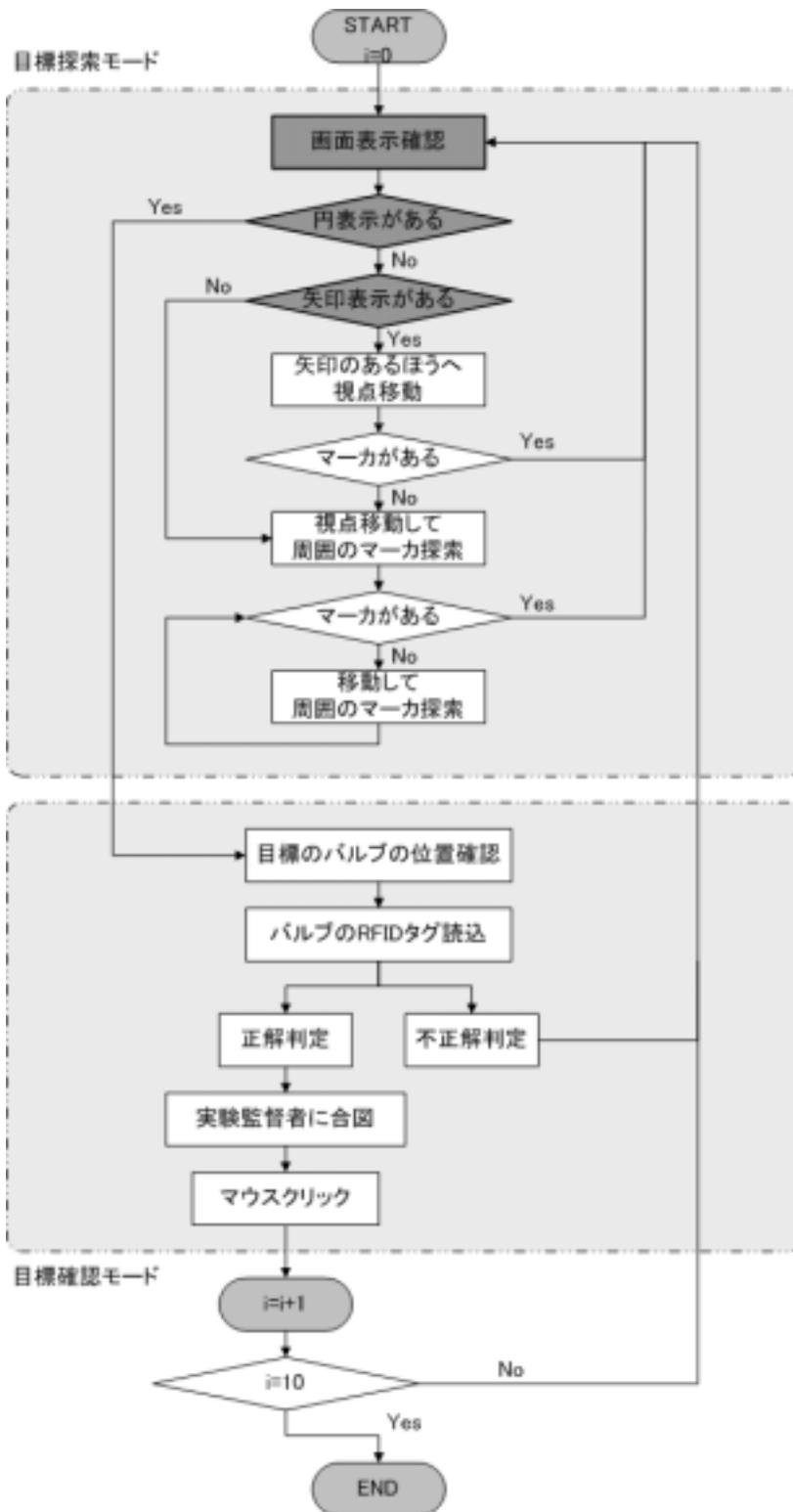


図 3.26: AR デバイスによるタスク試行の際のデータフローチャート

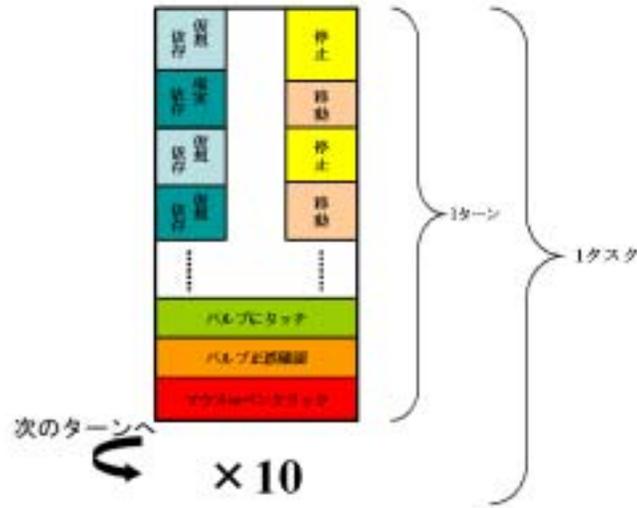


図 3.27: タスクの概念図

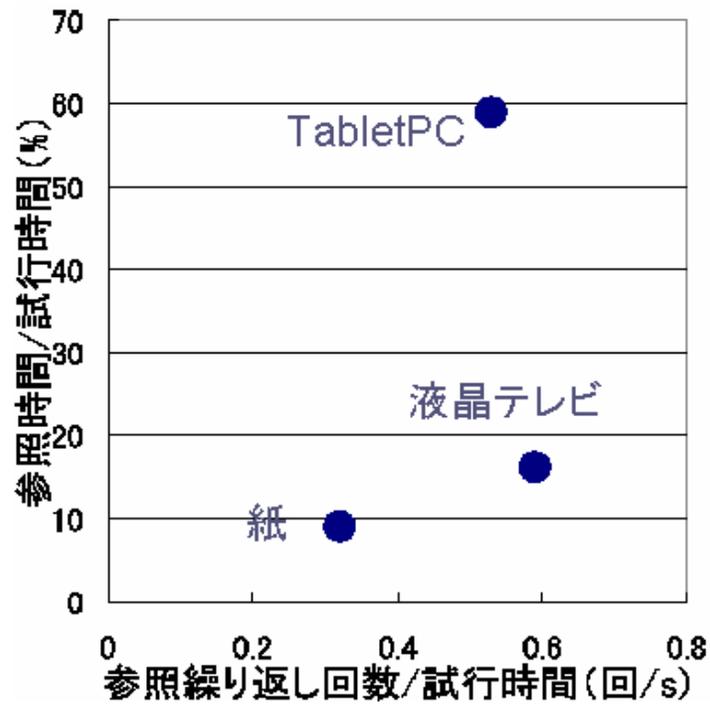


図 3.28: 参照頻度と参照占有率の関係 (SCOPO・Glasstron については視線計測ができなかったためデータなし)

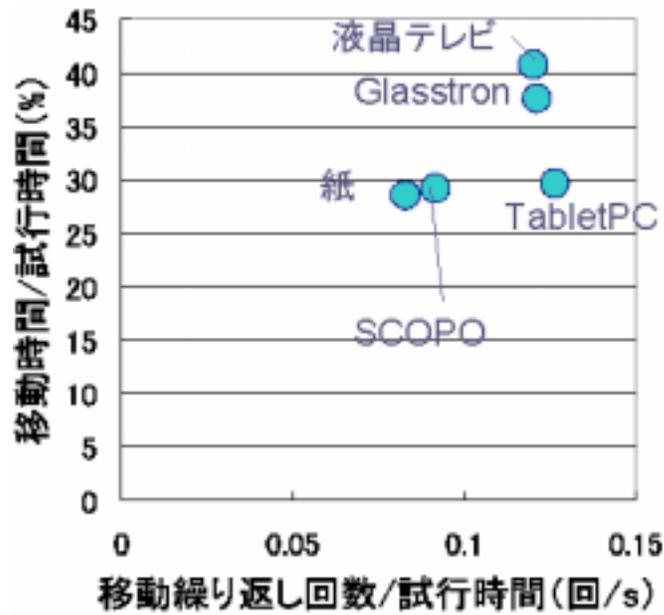


図 3.29: 移動頻度と移動占有率の関係

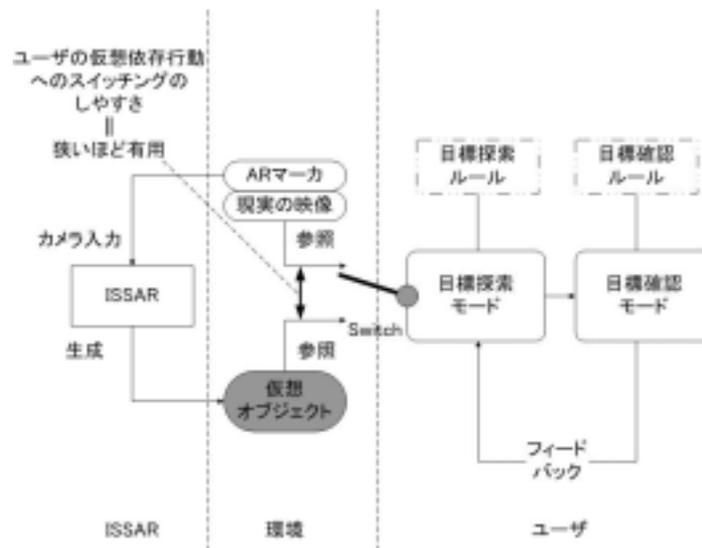


図 3.30: ISSAR におけるユーザモデルの仮説

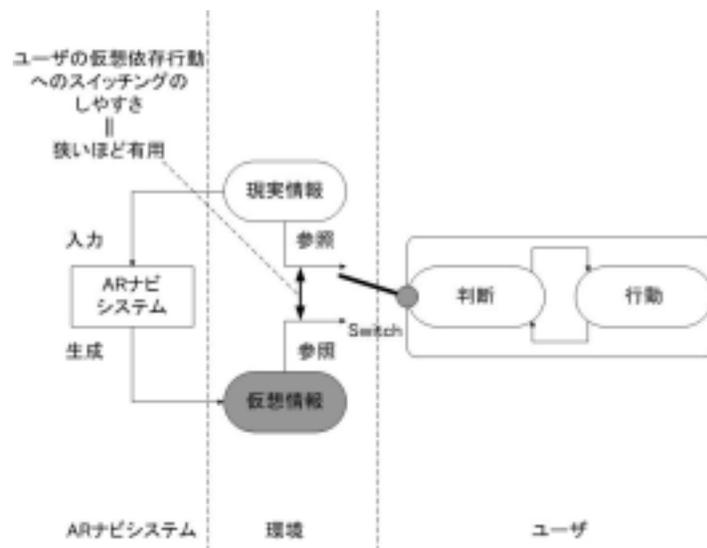


図 3.31: 一般的な AR ナビシステムにおけるユーザモデルの仮説

## 第 4 章 ユーザの視線測定実験

ISSAR 実験ではウェアラブル型のデバイスについてのデータ計測が不可能であり、またタスクパターンによって実験条件が異なるという問題点があった。そこで、ISSAR 実験のデータをもとに立てた仮説モデルを検証するために、ISSAR を利用したシステムを試作し追加的な実験を行った。本章ではまず追加実験の目的について触れ、その後、追加実験（以下、視線測定実験）用のシステム（以下、視線測定システム）の説明と実験方法・結果について述べる。

### 4.1 視線測定実験の目的

山崎が試作した 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おり、複数の AR デバイスに関する比較実験を行うことが可能であったが、一方でユーザ行動を計測するという面から見ると、一部のデバイスでは視線の計測が行えないという問題点があった。また、実験環境が広く無線による送信映像にノイズが走ったり、バルブの探索の難易度がパターンによって異なるなどという問題もあった。

そこでこれらの問題点を補完する追加的な実験を行う。具体的には SCOPO を装着する際にも、被験者の視線を捉える小型のカメラを取り付け、これによる録画ビデオを計測対象とする。また、実験環境の広さに起因するデメリットを打ち消すため比較的狭く、かつ、各バルブを探索する難易度に差がないような環境で実験を行う。

ただし、Glasstron については密閉型 HMD であり視線測定のためのカメラの取り付けが困難であり、実験システムのインタフェースには、片目参照型 HMD の SCOPO のみを用いる。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。

本実験は吉川研究室の計算機室においてバルブ探索のための環境を構築し行う。

### 4.2 視線測定実験方針

3つのインタフェースを比較するにあたり、同時に比較を行うとインタフェースの順序効果を排除する観点から、最低 12 名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 回に分けて行うことで、6 名の被験者のみによって実験が実施可能となる。

被験者のタスク中の仮想依存行動と現実依存行動の区別が重要となるため、視線の撮影を最優先させ、また、実験のタスクパターンによるタスク難易度の偏りが無い環境設定で追加実験を行う。

## 4.3 視線測定システム

前述の ISSAR 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。

### 4.3.1 ハードウェア構成

ハードウェア構成は基本的には ISSAR とほぼ同様である。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、片目参照型 HMD の SCOPO 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。また、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。ただし、RFID による、バルブ確認支援機能は省略し、SCOPO に関しては追加ハードウェアとして視線測定用の小型のカメラを取り付ける。携帯小型テレビ、タブレット PC については従来どおり実験監督者のビデオカメラによる被験者の視線の撮影を行う。

なお、各デバイスの仕様詳細については付録 B で述べる。

#### SCOPO を用いた視線測定システムのハードウェア構成

図 4.1 に、本実験における SCOPO を用いた視線測定実験用 AR システムの装着図を示す。また、図 4.2 には、視線測定用の CCD カメラの取り付け位置を示す。

SCOPO を用いた ISSAR は、ヘルメットに SCOPO が取り付けられている。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 CCD 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、図 4.3 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 4.3 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。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



図 4.1: SCOPO を用いた視線測定システムの装着図

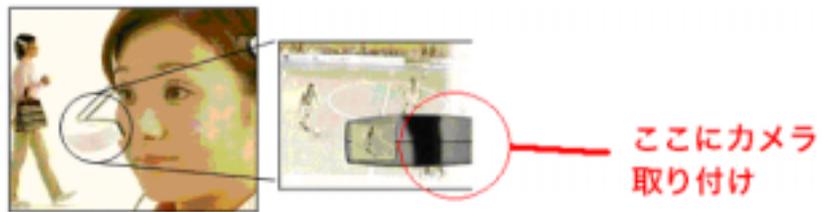


図 4.2: SCOPO における視線測定カメラの取り付け位置

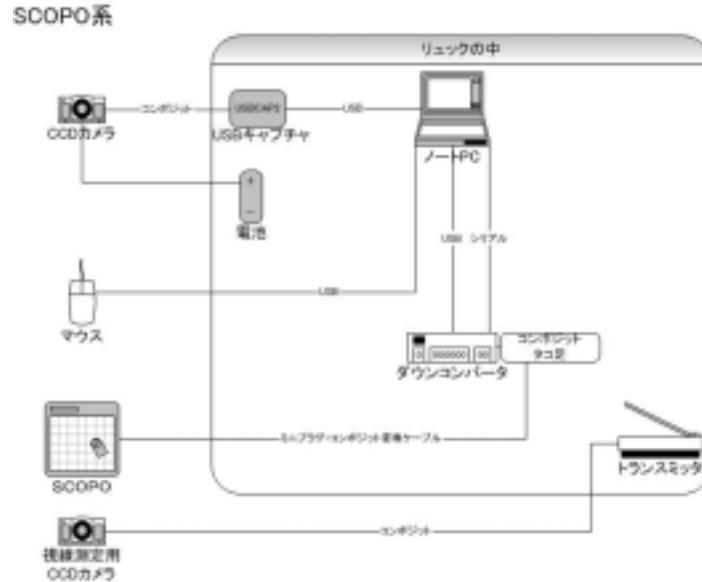


図 4.3: SCOPO を用いた視線測定システムのハードウェア構成図

る。表 4.1 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。

表 4.1: 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 (視線測定用含む)	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
トランスミッタ	TR-25R	コロナ電業
無線 LAN カード	WLI-PCM-L11	BUFFALO

#### 携帯小型 TV を用いた視線測定システムのハードウェア構成

図 4.4 に、本実験における携帯小型 TV を用いた視線測定システムの装着図を示す。図 4.4 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。操作マウスの装着は SCOPO と同様に行う。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は ISSAR 実験における図 3.17 と同じとなる。

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



図 4.4: 携帯小型テレビを用いた視線測定システムの装着図

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。操作マウスの動作はSCOPOと同じである。表 4.2 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。

表 4.2: 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
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
トランスミッタ	TR-25R	コロナ電業
無線 LAN カード	WLI-PCM-L11	BUFFALO

#### タブレット PC を用いた ISSAR のハードウェア構成

図 4.5 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 4.5 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。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 4.6 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



図 4.5: タブレット PC を用いた ISSAR の装着図

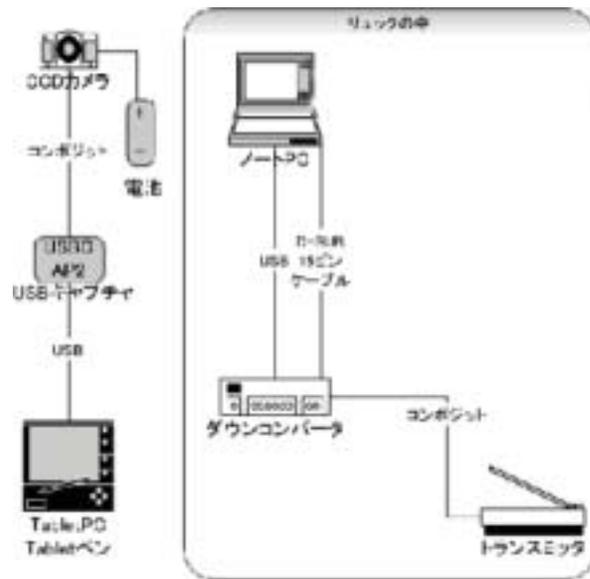


図 4.6: タブレット PC を用いた視線測定システムのハードウェア構成図

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 4.3 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。

#### 4.3.2 ソフトウェア構成

ソフトウェアも基本的には ISSAR とほぼ同様である。ただし、バルブ探索支援機能において提示される仮想オブジェクトのサイズを見やすくするために通常の 2 倍の大

表 4.3: 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
トランスミッタ	TR-25R	コロナ電業
無線 LAN カード	WLI-PCM-L11	BUFFALO

きさになるように改変した。また、RFID によるバルブ確認支援機能は省略した。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 を使用する。

## 4.4 実験方法

### 4.4.1 実験環境

本実験は、京都大学宇治キャンパスの吉川研究室の計算機室において行なう。図 4.7 に実験環境の見取り図を、図 4.8 を示す。

一辺 4.55m の正方形を実験環境とし、その四方に図 4.9 に示すポスターを垂直に 4 枚設置した。各ポスターには、バルブを模した赤い円が 8 個とと AR マーカが 3 個描かれている。バルブには番号などの目印となるものは一切描かれていない。なお AR マーカは認識精度を上げるため通常の 2 倍の一辺 16cm のものとし、また、蛍光灯や太陽光の反射による認識精度低下を防ぐため、マーカの素材を通常の紙製ではなく、フェルトと画用紙を組み合わせたものとした。床面は平らであるが、障害物として、回り込まなければならない 3 つのテーブルと、2 つのまたがなければならない低い板を設置する。

撮影映像は、実験監督者が持つハンディーカメラによるもの以外に、SCOPO の場合は情報提示画面の側にある視線測定カメラの映像を、携帯小型テレビの場合はユーザーに提示されている映像をそれぞれ無線トランスミッタによって実験環境外に置いてあるテレビに伝送しビデオデッキで録画する。ただしこれらには音声マイクがないため実験環境の天井中央から小型のマイクを吊り下げ録音したものを別途ビデオデッキに入力する。実験の録画系を図 4.10 に示す。

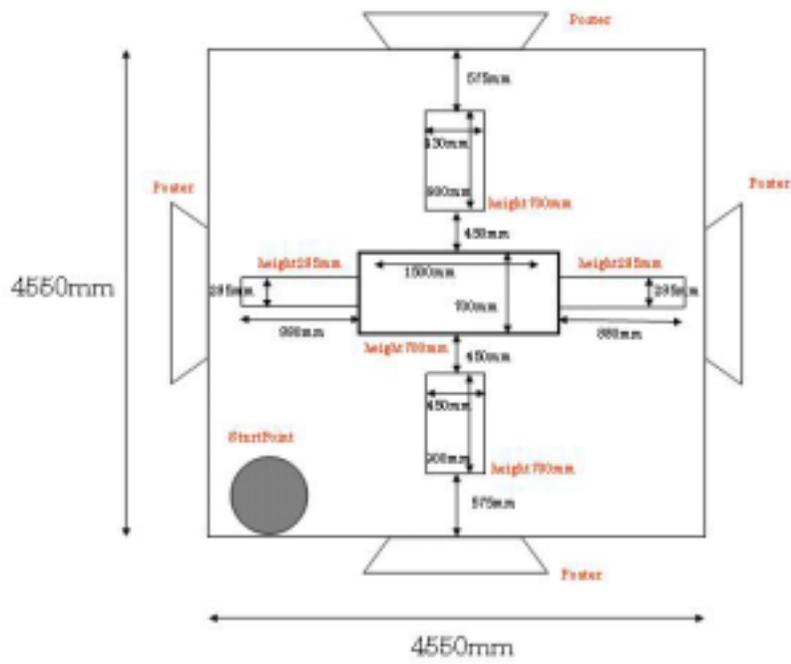


図 4.7: 視線測定実験の実験環境見取り図



図 4.8: 実験環境の様子

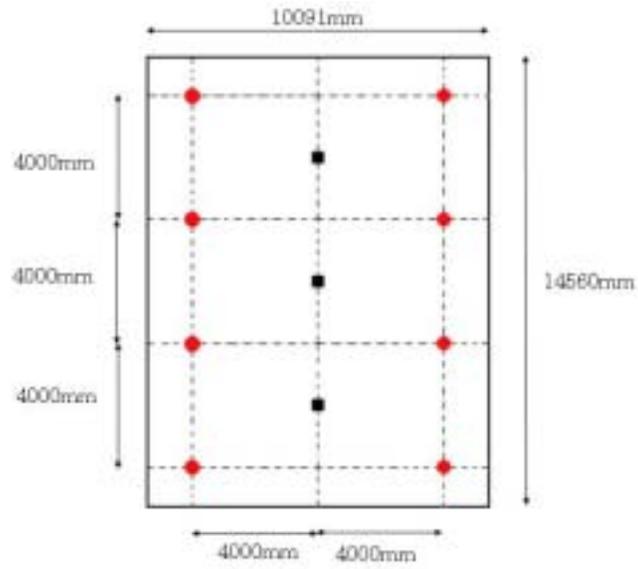


図 4.9: ポスターの詳細

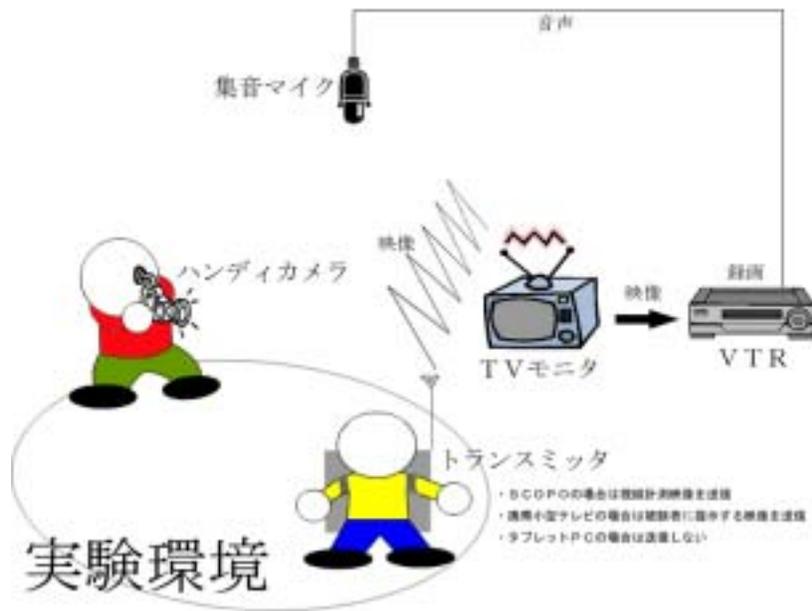


図 4.10: 視線測定実験の録画系

#### 4.4.2 タスク

ISSAR 実験と同様に、32 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被験者に課する。タスク開始時には被験者は必ず図 4.7 に示すスタート位置で同じ方向を向いているものとする。

タスクは実験者が「はじめ」と発声することにより開始される。

視線測定システムのバルブ探索支援機能によって提示された矢印と円を頼りに、バルブを探す。目的のバルブが見つかったと判断したら、「これです」と言って、見つけたバルブをタッチするものとする。タッチしたバルブが正しい場合は、実験者が「正解です」と発声し、被験者は操作インターフェースを用いて作業ステップを 1 つ先に進め、次のバルブを探索する。間違っている場合は、再度同じバルブを探索する。

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作成した被験者の手引きを読んでもらい、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する。

#### 4.4.3 計測項目

本実験では、

- (a) 画面表示確認開始時間
- (b) 画面表示確認終了時間
- (c) 移動開始時間
- (d) 移動終了時間
- (e) 被験者がマウスをクリックした時間

の 5 項目について計測する。これによって画面を見ている回数・時間、移動している回数・時間などが算出されるのは ISSAR 実験と同様である。

また、実験後に簡単なインタビューを行い、3 種のデバイスについての長所・短所と自由感想を述べてもらった。

#### 4.4.4 実験の手順

まず実験開始前に、付録 D に示す視線測定実験の被験者マニュアルを配布し、被験者に熟読させる。

その後、被験者に実験開始前に SCOPO と携帯小型テレビとタブレット PC を用いた作業の事前練習を充分に行わせる。

本番の実験では、被験者は SCOPO、携帯小型テレビ、タブレット PC を用いて、それぞれ 2 回ずつ計 6 回タスクを遂行する。

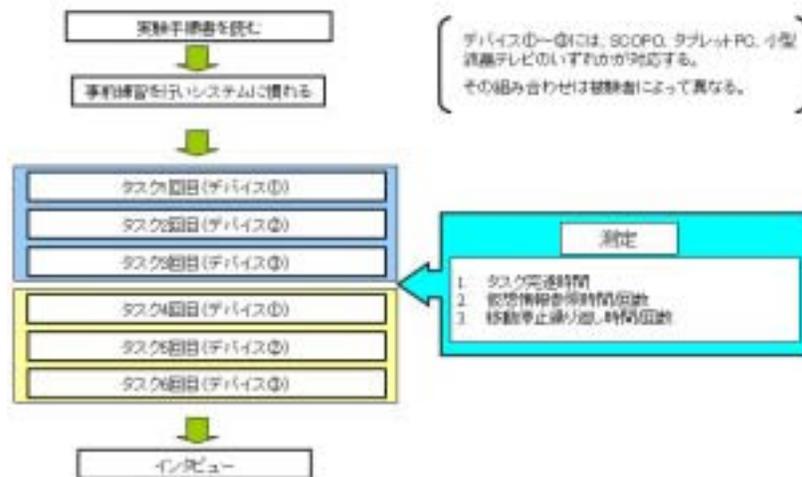


図 4.11: 視線測定実験の流れ

図 4.11 に示すように、1 巡目のタスク (タスク 1 からタスク 3) と、2 巡目のタスク (タスク 4 からタスク 5) 両方で全ての評価指標を測定する。ただし、1 巡目と 2 巡目との間で被験者を休ませる。

実験終了後、10 分程度のインタビューを行う。その回答はノートに記録する。

#### 4.4.5 実験の実施

本実験は、2004 年 12 月 28 日、29 日、30 日、2005 年 1 月 5 日、6 日、7 日の合計 6 日間で行った。被験者は 6 名の学生 (男性 5 名、女性 1 名、平均年齢 23.67 歳、範囲 22-25 歳) とした。

##### バルブ探索パターンの設定

バルブ探索パターンは、本番用に 6 パターン、実験の事前練習用を含めた予備用に 6 パターン用意した。全てのバルブ探索パターンは、動線距離が等しく、左右への振り返る回数、障害物を乗り越える・迂回する回数を等しくなるように設計した。なお、各バルブ探索パターンの詳細については付録 F 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ーンの組み合わせの設定

表 4.4 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ーンの組み合わせを示す。

表 4.4: 被験者が各タスクで使用するデバイスとタスクパターン

		被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5	被験者 6
タスク 1	使用デバイス	SCOPO	携帯小型 TV	タブレット PC	SCOPO	タブレット PC	携帯小型 TV
	タスクパターン	1	2	3	4	5	6
タスク 2	使用デバイス	携帯小型 TV	タブレット PC	SCOPO	タブレット PC	携帯小型 TV	SCOPO
	タスクパターン	2	3	4	5	6	1
タスク 3	使用デバイス	タブレット PC	SCOPO	携帯小型 TV	携帯小型 TV	SCOPO	タブレット PC
	タスクパターン	3	4	5	6	1	2
タスク 4	使用デバイス	携帯小型 TV	タブレット PC	SCOPO	タブレット PC	携帯小型 TV	SCOPO
	タスクパターン	4	5	6	1	2	3
タスク 5	使用デバイス	SCOPO	携帯小型 TV	タブレット PC	SCOPO	タブレット PC	携帯小型 TV
	タスクパターン	5	6	1	2	3	4
タスク 6	使用デバイス	タブレット PC	SCOPO	携帯小型 TV	携帯小型 TV	SCOPO	タブレット PC
	タスクパターン	6	1	2	3	4	5

タスク途中でなんらかの理由により中止した場合は、予備のタスクパターンを用いて再度やり直します

また、図 4.12、図 4.13、図 4.14 にそれぞれのデバイスを使ったときの実験風景を示す。



図 4.12: SCOPO を装着したシステムでの実験風景

## 4.5 実験の結果

実験の結果得られたデータを以下に示す。表 4.5、4.6 は、各被験者のデバイス毎のデータとその平均であり、表 4.7 は、各デバイスの参照頻度、参照占有率、移動頻度、



図 4.13: 携帯小型テレビを装着したシステムでの実験風景



図 4.14: TabletPC を装着したシステムでの実験風景

移動占有率である。

この結果から、図 4.15 に示す平均の参照頻度・参照占有率特性と、図 4.16 に示す移動頻度・移動占有率特性及び、図 4.17、図 4.18 に示す、それぞれの特性の被験者の分布図が得られた。

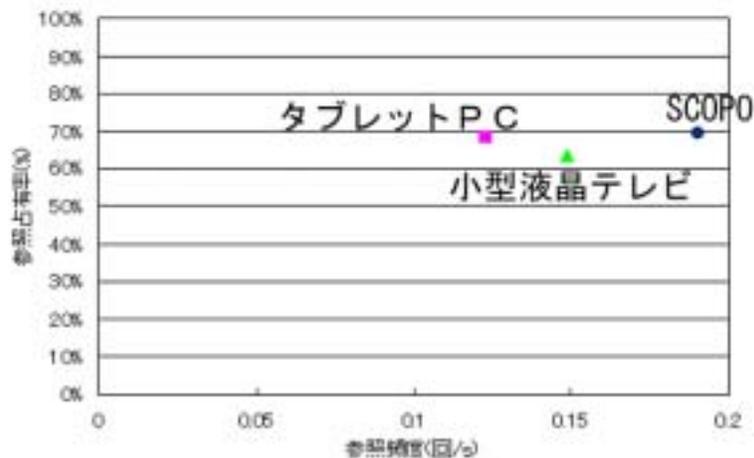


図 4.15: 参照頻度・参照占有率特性

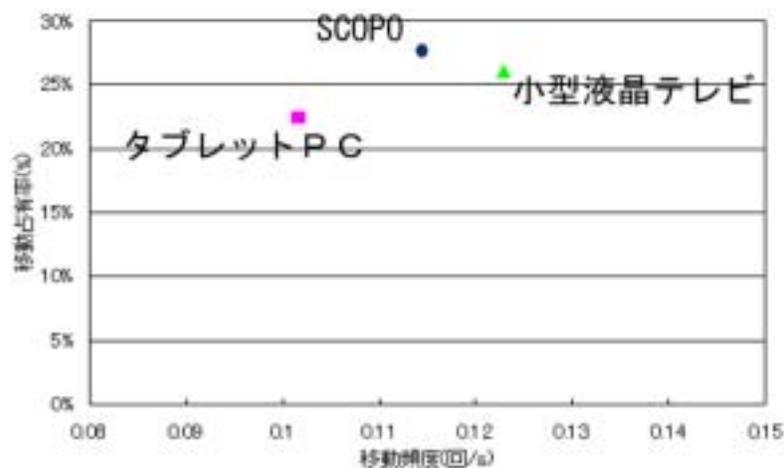


図 4.16: 移動頻度・移動占有率特性

図 4.15 より、デバイスを問わず全般的に ISSAR 実験に比べ高い参照占有率、低い参照頻度が示された。

またインタフェース毎の算出された値を比較すると (以下全て有意確率 5% の t 検定による) 以下のような結果が得られた。

表 4.5: 視線測定実験の結果

被験者 1					
	総試行時間 [s]	総参照時間 [s]	総移動時間 [s]	総参照回数 [回]	総移動回数 [回]
SCOPO	145.389	114.369	46.281	30.500	16.500
タブレット PC	109.638	81.342	30.584	15.000	13.500
携帯小型テレビ	95.029	67.851	26.824	15.000	15.000
	参照占有率 [%]	参照頻度 [回/s]	移動占有率 [%]	移動頻度 [回/s]	
SCOPO	0.787	0.210	0.318	0.113	
タブレット PC	0.742	0.137	0.279	0.123	
携帯小型テレビ	0.714	0.158	0.282	0.158	

被験者 2					
	総試行時間 [s]	総参照時間 [s]	総移動時間 [s]	総参照回数 [回]	総移動回数 [回]
SCOPO	185.797	123.332	44.024	32.000	17.000
タブレット PC	155.564	122.288	23.493	21.500	11.500
携帯小型テレビ	129.767	91.097	31.849	14.500	12.000
	参照占有率 [%]	参照頻度 [回/s]	移動占有率 [%]	移動頻度 [回/s]	
SCOPO	0.664	0.172	0.237	0.091	
タブレット PC	0.786	0.138	0.151	0.074	
携帯小型テレビ	0.702	0.112	0.245	0.092	

被験者 3					
	総試行時間 [s]	総参照時間 [s]	総移動時間 [s]	総参照回数 [回]	総移動回数 [回]
SCOPO	118.190	70.046	40.046	24.500	14.000
タブレット PC	117.734	85.893	29.242	13.000	13.000
携帯小型テレビ	111.261	72.272	32.157	12.500	12.000
	参照占有率 [%]	参照頻度 [回/s]	移動占有率 [%]	移動頻度 [回/s]	
SCOPO	0.593	0.207	0.339	0.118	
タブレット PC	0.730	0.110	0.248	0.110	
携帯小型テレビ	0.650	0.112	0.289	0.108	

被験者 4					
	総試行時間 [s]	総参照時間 [s]	総移動時間 [s]	総参照回数 [回]	総移動回数 [回]
SCOPO	196.571	147.468	50.907	27.000	24.000
タブレット PC	141.172	92.625	29.436	13.500	15.500
携帯小型テレビ	89.625	67.429	24.798	15.500	12.500
	参照占有率 [%]	参照頻度 [回/s]	移動占有率 [%]	移動頻度 [回/s]	
SCOPO	0.750	0.137	0.259	0.122	
タブレット PC	0.656	0.096	0.209	0.110	
携帯小型テレビ	0.752	0.173	0.277	0.139	

被験者 5					
	総試行時間 [s]	総参照時間 [s]	総移動時間 [s]	総参照回数 [回]	総移動回数 [回]
SCOPO	121.687	77.665	27.501	32.000	13.500
タブレット PC	135.735	73.455	29.648	21.000	14.500
携帯小型テレビ	93.829	38.280	21.390	22.000	12.000
	参照占有率 [%]	参照頻度 [回/s]	移動占有率 [%]	移動頻度 [回/s]	
SCOPO	0.638	0.263	0.226	0.111	
タブレット PC	0.541	0.155	0.218	0.107	
携帯小型テレビ	0.408	0.234	0.228	0.128	

被験者 6					
	総試行時間 [s]	総参照時間 [s]	総移動時間 [s]	総参照回数 [回]	総移動回数 [回]
SCOPO	114.735	80.810	34.484	22.000	16.000
タブレット PC	116.922	74.063	30.851	11.500	11.000
携帯小型テレビ	82.813	45.852	20.023	10.000	10.500
	参照占有率 [%]	参照頻度 [回/s]	移動占有率 [%]	移動頻度 [回/s]	
SCOPO	0.704	0.192	0.301	0.139	
タブレット PC	0.633	0.098	0.264	0.094	
携帯小型テレビ	0.554	0.121	0.242	0.127	

表 4.6: 視線測定実験の各被験者の平均

平均					
	総試行時間 [s]	総参照時間 [s]	総移動時間 [s]	総参照回数 [回]	総移動回数 [回]
SCOPO	147.061	102.281	40.540	28.000	16.833
タブレット PC	129.461	88.277	28.875	15.917	13.167
携帯小型テレビ	100.387	63.797	26.173	14.917	12.333

	参照占有率 [%]	参照頻度 [回/s]	移動占有率 [%]	移動頻度 [回/s]
SCOPO	0.696	0.190	0.276	0.114
タブレット PC	0.682	0.123	0.223	0.102
携帯小型テレビ	0.636	0.149	0.261	0.123

表 4.7: 参照占有率・参照頻度・移動占有率・移動頻度の平均値

	参照占有率 (=参照時間/試行時間)	参照頻度 (=参照回数/試行時間)[回/s]
scopo	0.696	0.276
PC	0.682	0.223
TV	0.636	0.261

	移動占有率 (=移動時間/試行時間)	移動頻度 (=移動回数/試行時間)[回/s]
scopo	0.190	0.114
PC	0.123	0.102
TV	0.149	0.123

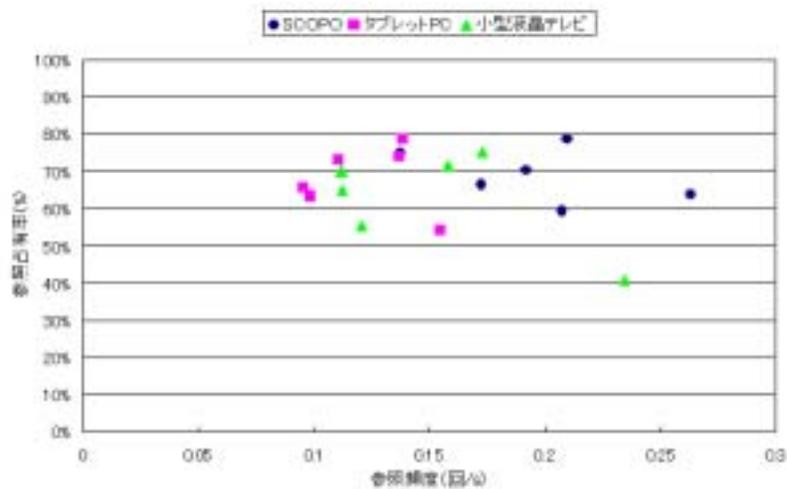


図 4.17: 参照頻度・参照占有率特性の被験者毎の分布

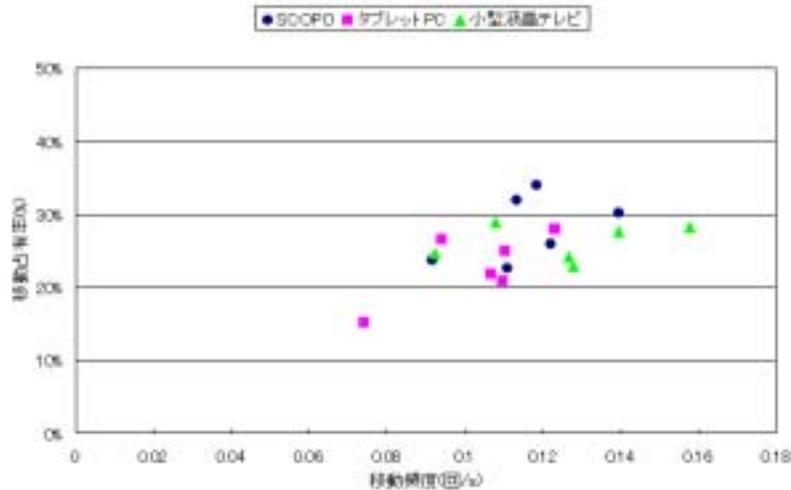


図 4.18: 移動頻度・移動占有率特性の被験者毎の分布

- (a) 参照時間占有率については、携帯小型テレビ、SCOPO、タブレット PC とも、互いに有意な差は見られなかった
- (b) 参照頻度については、SCOPO とタブレット PC 間のみ有意な差が見られ、他の組み合わせでは見られなかった
- (c) 移動時間占有率については、SCOPO とタブレット PC 間にのみ有意な差が見られ、他の組み合わせでは見られなかった
- (d) 移動頻度については、携帯小型テレビとタブレット PC 間にのみ有意な差が見られ、他の組み合わせでは見られなかった

また、各被験者に対して行なったインタビューの結果については付録 G で述べる。

## 4.6 考察

視線測定実験結果全体の傾向として、ISSAR 実験の結果と比較すると、算出される値のデバイス毎のばらつきが小さくなった。これはタスクパターンの難易度を均一化したことに加え、実験環境を比較的狭く、障害物の少ない環境で構成したため、デバイスの可搬性や大きさ重さに由来する要因が減ったことを示している。

### 4.6.1 被験者の現実依存・仮想依存行動について

ISSAR 実験に比べて視線測定実験で全般的に参照占有率が高く、参照頻度が低い傾向にあったのも、実験環境の狭さと障害物の少なさが要因である。デバイスの種類を問わず、被験者は 1 ターンの間必要とされる移動距離が短く、また、障害物が少ない

ため、移動中もほとんど画面から目を離さず、ISSAR 実験よりも仮想情報に依存する傾向が見られた。また、この要因によってどのデバイスでも仮想依存行動を行ったまま移動していた。そのため、現実依存行動を必要とされるのが、障害物を避けたりまたいだりといった回避行動を行うときや、模擬バルブにタッチするときのみになった。以上より参照占有率に有意な差が現れなかったと考えられる。

一方、参照占有率には有意な差が見られなかったにも関わらず、参照頻度は3種のデバイス間では大きな差が見られた。これは、被験者がSCOPOの場合だと障害物回避の際に障害物を所謂「チラ見」したり、目標となるバルブがオブジェクトで示された瞬間に現実の視野で直接「チラ見」といった行動を見せるのに対し、携帯小型テレビではその傾向が弱まり、タブレットPCではさらに弱まるのが主因である。このことは、SCOPOに比べて他の2種のデバイスが仮想依存・現実依存行動のスイッチングを行ないにくいことを示している。現実的に、本実験環境のような障害物の少なく、狭いエリアの中では行動する上で「チラ見」をする必要は必ずしもないが、スイッチングの容易なデバイスの装着時ではそれが頻繁に行なわれている。このことに山崎の実験結果を加味すれば、参照頻度が増えれば増えるほど有用性があることがわかる。

また、図4.17に示されるように、携帯小型テレビやタブレットPCでは分布が比較的狭い範囲であるのに対し、SCOPOはx軸方向に広がるような分布である。これは、SCOPOが被験者によって比較的、相性があることを示しているが、実際この図の点分布のうち左の2人はSCOPOは最も扱いにくいデバイスであったとインタビューで述べており、このことによってもユーザビリティと参照頻度との関係の裏づけがなされた。

一方、参照占有率とユーザビリティとの関係については、上でも述べたとおり、デバイス毎の差が表れる実験結果ではなかったため、明らかにはならなかった。

#### 4.6.2 被験者の移動について

ISSAR 実験ではタブレットPCは重くて持ち運びにくい、という評価が多く、タスク完遂時間も移動頻度も最も高いデバイスであった。しかし、視線測定実験ではタブレットPCを最も持ち運びやすいデバイスに挙げる被験者が多く、移動頻度も3機種中最も低い値である。これは、ISSAR 実験に比べて実験環境が大幅に狭く、障害物が減った上に、本実験では被験者がタブレットPC装着の場合にのみ、AR キャリーの装着を行なわなかったためである。

#### 4.6.3 まとめ

第3章で立てた仮説モデルは、ARナビシステムのユーザは仮想情報と現実情報とを交互に受け取りながら判断を行い、行動を起こすことを表したものであった。そして、

ユーザが仮想情報と現実情報との受け取りのスイッチングが容易であることがユーザビリティの指標の一つであることを述べ、そのパラメータとして参照頻度と参照占有率を提案した。

本実験の結果、実験環境・条件の異なる AR ナビゲーションシステム環境下においても同様の特性が示され、仮説の裏づけがとれたと結論付ける。

## 第 5 章 結論

本研究では、技術的に被験者実験を行なうことが難しい AR 技術を用いたナビゲーションシステムを、被験者実験を行なわなくても設計段階でそのユーザビリティの予測や適切な AR デバイスを選択できるような指標の作成を目的として、AR ナビシステム環境におけるユーザの認知行動の解析を行ない、その認知行動を評価する方法を模索した。解析の対象を原子力プラントにおける系統隔離作業支援システム (ISSAR) を用いた被験者実験の行動録画ビデオとし、足りないデータに関しては、新たに追加的な実験を行いデータを収集・解析した。

まず、第 2 章では、研究の背景として、AR 技術とは何か、そして、近年の AR 技術を用いたナビゲーションシステムを取り巻く現状について述べた。そして、AR 技術を用いたナビゲーションの特徴と AR の重要な要素である情報提示インタフェースには様々な形態があることについて述べ、その後 AR 技術を用いた先行研究について触れた。そして、AR 技術を扱った研究・開発には技術的に未成熟な部分があり、あらかじめ設計段階でその評価ができるような手段が必要とされていることについて述べ、その一つの手段としてユーザモデリングによる方法を提案した。それから、ISSAR によって得られた実験の録画ビデオを解析対象として、ここからユーザモデルの構築を目指し、AR ナビシステムの評価指標となることを目指した。

第 3 章では、ISSAR の概要について説明し、山崎によって行なわれた評価実験の目的・方法・結果について述べた。その後、ISSAR 実験の録画ビデオを基に、解析を行なうことについて述べ、その目的・観点・方法について取り上げた。この結果、AR ナビシステム的环境下でユーザは、現実にシステムと関係なく得られる情報と、それを基にシステムが生成した仮想的な情報とを交互に取り入れている、現実依存行動と仮想依存行動とのスイッチングに着目し、ユーザの時間あたりのスイッチング回数、及び、仮想依存行動の時間的な割合に注目し、そこからユーザの認知行動を追及した。そして ISSAR と AR ナビシステムに応用したユーザモデルの仮説として、スイッチングを行なう AR ナビシステム环境下でのユーザモデルを提案し、スイッチングがスムーズに行なえるほど、AR は有用に機能していると推論した。

第 4 章では、山崎の行なった ISSAR 実験の実験環境と実験条件だけでは仮説モデルの裏づけが不十分であること、そして、解析できなかったデータがあることに触れし、これを補完するために行なう追加的な視線計測実験について説明した。ウェアラブル型 HMD の SCOPO と、ハンドヘルド型のディスプレイである携帯小型テレビ、タブレット PC を用意し、ISSAR をベースに、実験環境を狭く、できるだけデバイスの種

類以外の要因に影響されない条件の実験環境を構成し、実験では被験者の視線が画面を見ているのか外界を見ているのかを中心にデータの収集・解析を行なった実験方法・手順について述べた。

実験の結果、確かに、現実依存行動と仮想依存行動とのスイッチングを頻繁に行なっているデバイスを用いたシステムほど、有用性が高いことが確かめられた。一方で、仮想依存行動の全体に占める割合は、何らかのパラメータとしての特性は示されなかった。今後の課題としては、スイッチングの頻度がユーザビリティに与える影響を確かめると共に、他のユーザビリティに関わるパラメータの導出が期待される。

## 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、研究の方向性や、実験の準備、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下田宏助教に心より感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、豊富な助言を頂きました石井裕剛助手に深く感謝いたします。

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回生の米谷健司君、学士課程4回生の鶴田君に深く感謝いたします。

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

研究生生活において、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。

そして、6年間の大学生活を支え続けてくれた、家族・友人・先輩・後輩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] 中島健:ウェアラブル拡張現実感技術による天体観察支援システム, 奈良先端科学技術大学院大学大学院情報科学研究科修士論文, pp.12-36(2000)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] Instructional Systems -Augmented Reality-; <http://www.boeing.com/defense-space/aerospace/training/instruct/augmented.htm>(2005年2月8日現在)
- [5] KARMA; <http://www.cs.columbia.edu/graphics/projects/karma/karma.html>(2005年2月8日現在)
- [6] 暦本純一; Augmented interaction 状況認識に基づく新しいインタラクションスタイルの提案:インタラクティブシステムとソフトウェア II, pp.9-17(1994)
- [7] 暦本純一; 2次元マトリックスコードを利用した拡張現実感システムの構成手法:インタラクティブシステムとソフトウェア IV(1996)
- [8] 北島宗雄; ユーザモデルによるインタフェース評価:ソフトウェア科学会チュートリアル, pp.3-8(1994)
- [9] 情報処理学会; 新版 情報処理ハンドブック:第10編第2章第3節 (1995)
- [10] 山崎雄一郎; 拡張現実感とRFIDを用いた系統隔離作業支援システムの試作と実験評価:京都大学大学院エネルギー科学研究科修士論文, pp.3-14(2004)
- [11] 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)
- [12] JR 東日本:Suica, <http://www.jreast.co.jp/suica/> (2005年2月8日現在)

- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 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/) (2005年2月8日現在)