

# ユーザのアクセプタビリティに着目した 拡張現実感環境の構築方法の提案

藤野 秀則\*<sup>1</sup> 石井 裕剛\*<sup>1</sup> 下田 宏\*<sup>1</sup>

Suggestion of the construction method of an augmented reality environment  
focusing users' acceptability

Hidenori Fujino\*<sup>1</sup> Hirotake Ishii\*<sup>1</sup> Hiroshi Shimoda\*<sup>1</sup>

**Abstract** – For developing an AR environment for supporting human work, the effective methodology of using AR environments must not only be suggested, but the specifications for keeping the effectiveness of suggested methodology also must be investigated. The experimental environment for investigating the specifications needs to simulate from a low performance environment to a high performance AR environment from the viewpoint of the user's acceptability. Once a high performance AR environment is constructed, a low performance environment is simulated easily. So in this report, we suggest the method for constructing a high performance AR environment focusing user's acceptability.

**Keywords** : augmented Reality, interface design, user's acceptability, outside-in tracking, and a wireless system

## 1. はじめに

拡張現実感技術 (Augmented Reality: AR) の概念が提唱されて以来、産業・工業分野において、作業に関する情報を直感的に理解できる形でできる AR は、人手作業における作業効率を向上させ、ヒューマンエラーを低減できる技術として期待されてきた。<sup>[1]</sup> 特に、1990 年代以降、高性能なコンピュータが低価格で供給されるようになり、人手作業を支援する AR の実現のために、要素技術の開発を目的とする基礎研究<sup>[1][2]</sup> や、実際の手作業を対象とした AR による作業支援という方法論の適用可能性を探る研究<sup>[3][4]</sup> が多く行われてきている。

しかし、これまでに、それらの研究成果を元に、実際の手作業の現場で AR を適用した作業支援システムを構築・運用している例や、実用化までの明確な道筋のもとで技術開発が進められている例は極めて少ない。

その理由として、作業支援のための AR 環境を開発するための要求仕様を明確にする手段がないこと考えられる。

AR を用いた作業支援の方法論が提案され、その方法論に実際の現場に適用すべく作業支援のための AR 環境を構築する場合、その方法論の有効性と導入・維持コストとの費用対効果を見積もる必要がある。一般に導入・維持コストを下げると、ユーザのアクセプタ

ビリティを規定する AR の各種要因の性能も低下するが、費用対効果を正確に見積もるためには、方法論の有効性を維持できる範囲でどこまで AR 環境の各種要因の性能を低下させられるかを調査する必要がある。

しかし、現在、このような調査を系統的に行える実験環境はまだなく、このことが、闇雲に高性能な要素技術を用いて AR 環境を構築しても費用対効果の面から導入されないという結果や、コストを意識しすぎるあまり、安価な技術を用いて方法論の有効性を維持できず結局使い物にならないという結果につながり、現場への AR 導入が遅々として進まない現状の原因になっていると考えられる。

そこで、本研究では、ある方法論が提案されたとき、その方法論の有効性が維持できる AR 環境の性能の範囲を調査できる実験環境の構築を目的とする。

このような環境では、ユーザのアクセプタビリティを構成する諸要素の性能が低いものだけでなく、極めて高いものも模擬できなければならない。ただ、高い性能を持つ環境を構築できれば、その性能を人為的に低下させることは容易であると考えられる。

そこで、本研究では、AR に対するユーザのアクセプタビリティを規定する、コスト性以外の要因に関して、方法論の有効性に影響を与える性能を規定する要因について考察し、それらの点から理想的と考えられる AR 環境を構築する。

本研究で構築する AR 環境は、上記のような実験環境としてだけでなく、AR 環境の構成の一例としてアミューズメントや訓練への応用が可能であるほか、一

\*1: 京都大学大学院工学部 エネルギー科学研究科

\*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

般にまだ広く認知されているとは言い難い AR のデモンストレーションシステムとしても利用可能であると考えられる。

本報告では、まず、これまでに提案されている AR の要素技術について展望した後、ユーザのアクセタビリティを構成する諸要素を整理し、方法論の有効性に影響を与える AR の性能とはどのようなものかについて考察する。ついで、それらの性能の面から、現時点で構築しうる理想的な AR 環境を構想し、今後の展望について述べる。

## 2. 本研究における前提

一口に産業・工業分野での人手作業といっても、たとえば、クリーンルーム内での超精密加工・検査作業や倉庫内でのピッキング作業、製品組み立て作業、あるいは事務室での伝票整理作業など非常に多岐にわたり、どのような作業に従事している作業員かによって、どのような点がアクセタビリティに大きく影響を与えるかが異なるため、あらゆるの人手作業の作業員に対して高いアクセタビリティを持つ AR 環境を構築することは極めて難しい。

そこで、本研究では対象とする作業員を、原子カプラントや化学プラントなどの大規模プラント内でメンテナンス作業や巡視点検作業などの工務作業に従事する作業員をユーザとして想定した環境の構築を行う。

また、AR についても、人のどのような感覚器官に対して情報提示を行うかによってその構成は大きく異なる。そこで、本研究では視覚に対する AR を対象とする。以下、AR という場合には、視覚に対する AR を指す。

## 3. AR の要素技術の展望

図 1 に示すように、AR は (1) ユーザやユーザを取り巻く環境の振る舞いを計測するトラッキング技術、(2) 計測結果から状況を同定し提示情報を生成する情報処理技術、(3) 生成した情報をユーザに提示するディスプレイ技術によって構成される。

トラッキング技術： トラッキング技術は、ユーザの 3 次元位置姿勢を追跡する技術であり、ユーザや環境の立ち振る舞いに合わせた情報提示を行うためには必要不可欠な技術である。その方法として一般に、画像センサによる方法、赤外線画像センサによる方法、超音波センサによる方法、磁気センサによる方法、慣性センサによる方法の 5 つがある。ただ、赤外線画像センサや超音波センサ、磁気センサはコストや設備の規模から実験環境以外で利用されることは少ない。また、慣性センサはドリフト誤差が発生するため、画像センサと組み合わせ、画像センサがトラッキングに失

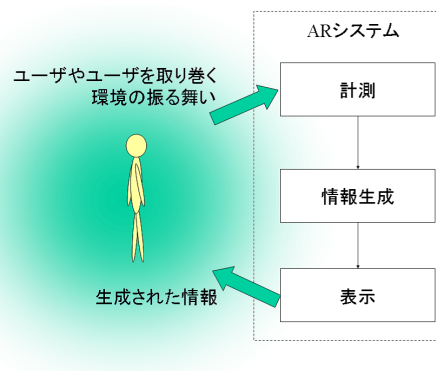


図 1 AR の基本的枠組み  
Fig. 1 The basic framework of AR

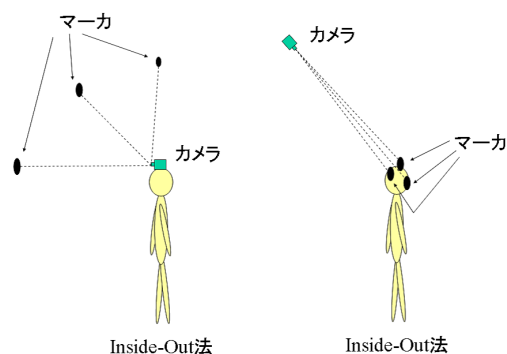


図 2 画像センサを用いた 2 種類のトラッキング方法  
Fig. 2 Two types of Tracking methods by Image sensor

敗した場合のバックアップとして用いられることが多い。

画像センサによる方法はセンシングを容易にするためにマーカを用いる方法と、自然特徴点を用いる方法の 2 つにさらに分けられる。ただ、自然特徴点を用いる方法はロバスト性の点で実用的な技術はまだ確立されていない。

マーカを用いたトラッキングでは図 2 に示すように、カメラをユーザが装着し、環境中に添付されたマーカを認識・計測することで、ユーザの 3 次元位置姿勢をトラッキングする Inside-Out 方式 (例えば、<sup>[5]</sup> など) と、カメラを環境中に設置し、ユーザの身体に添付されたマーカの 3 次元位置を計測することによりユーザの 3 次元位置姿勢をトラッキングする Outside-In 方式 (例えば、<sup>[6]</sup>) がある。

Inside-Out 方式の場合、環境中にマーカを多数添付し、それらの 3 次元位置を全て計測する必要がある。一方で、Outside-In 方式の場合でも、環境中にカメラを設置し、その 3 次元位置を計測する必要があるが、Inside-Out 方式で用いられるマーカの数に比べ、カメラの台数は少なくてよいため、環境構築にかかる労力は

小さい。

また、Inside-Out 方式ではユーザがカメラを装着するため、ユーザの負担軽減のために小型のカメラでなければならず、カメラの性能からトラッキング精度が低下しやすい。一方、Outside-In 方式の場合、カメラの大きさは環境中に設置できるものであれば、大型のものでもかまわないため、解像度の高いカメラを利用した高精度のトラッキングが可能となる。一方で、マーカに比べカメラはその取り扱いを慎重にせねばならず、維持費用が掛かるほか、電源や画像を伝送するケーブルが必要となるため、屋外での使用には不適である。

さらに、設備コストの面から見た場合、Inside-Out 方式では必要なカメラの台数がユーザの数によって決まるのに対し、Outside-In 方式では必要なカメラの台数は AR 環境の広さによって決まるため、広いエリアを AR 環境とする場合やユーザの数が少ない場合には、Inside-Out 方式が適しており、狭いエリアに複数のユーザがいる AR 環境では Outside-In 方式が適している。

情報処理技術： 情報処理技術としては、一般的なデータマイニング技術や CG 合成技術などがあるが、どのような作業をどのような方法論で支援するかによって用いられる情報処理技術が異なる。

ディスプレイ技術： AR に用いられるディスプレイの種類としては、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) 型、ハンドヘルド PC 型、プロジェクタ型の 3 つがある。HMD 型には、ビデオで撮影した環境の映像に情報を負荷し、その映像をユーザに提示するビデオシースルー型と、ハーフミラーなどによってユーザの網膜上で情報を重畳させる光学シースルー型の 2 つがある。さらに、ビデオシースルー型 HMD には完全にユーザをビデオ映像の中に没入させる没入型と、片目の目元に小型ディスプレイを配しておき必要に応じて参照するかたちで使用される参照型に分けられる。

HMD 型、ハンドヘルド PC 型は持ち運び可能であるのに対し、プロジェクタ型は基本的に固定されて用いられるため、プロジェクタ型を用いた場合には一般的に狭い範囲でしか AR 環境を構築できない。ただ、プロジェクタ型の場合、ユーザがディスプレイデバイスを持ち運ぶ必要がなく、また、HMD のようにユーザの視界を制限したり、ハンドヘルド PC のように片方の手が不自由になることがないため、ユーザの負担は小さい。

HMD 型とハンドヘルド PC 型を比べると、大きな違いとして、HMD 型は両手が自由になるのに対し、ハンドヘルド PC 型は片手が必ずふさがる。一方、HMD

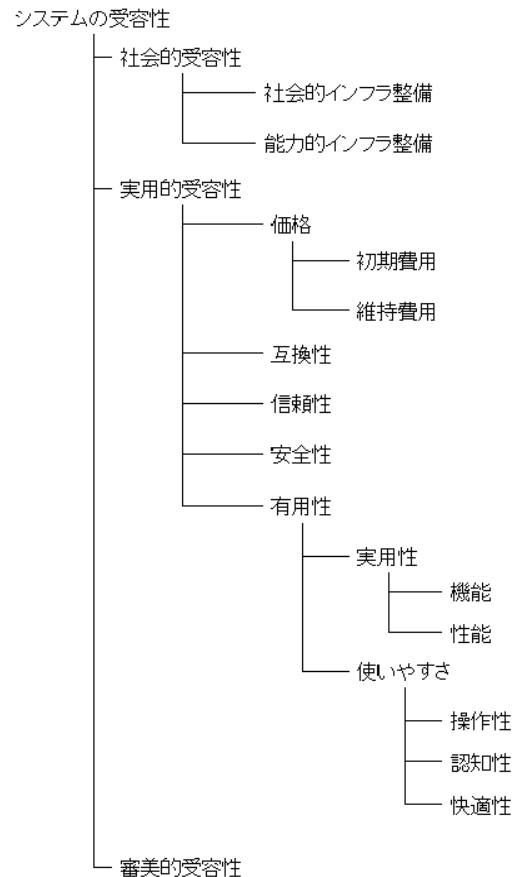


図 3 システムの受容性の概念構造 [7]  
Fig. 3 The structure of concepts in system acceptability

型に比べ、ハンドヘルド PC はディスプレイの解像度が高いため、広範囲を一度に見渡すことができる。

このように、いずれも一長一短であり、対象によって用いられるタイプが異なる。

#### 4. アクセプタビリティと AR 環境の性能

一般にシステムに対するアクセプタビリティは図 3 に示すように、社会的受容性、実用的受容性、審美的受容性の 3 つの受容性から構成される [7]。社会的受容性とは、システムを運用する上での社会的インフラ整備や法整備の状況、あるいは、システムを構成している技術そのものに対するユーザの印象など、システムを取り巻く社会・文化的側面におけるシステムのアクセプタビリティである。実用的受容性とは、そのシステムの単体としてのアクセプタビリティであり、システムを利用することでどの程度の経営的效果が得られるのかという観点からのアクセプタビリティである。審美的受容性とは、システムに対する情緒的なアクセプタビリティで、例えば、インタフェースのデザインの美しさ、かっこよさなど、ユーザの嗜好からくるアクセプタビリティである。作業支援システムのような

プロフェッショナルを対象とするシステムでは、特に他の2つに比べ実用的受容性が特に重要となる。

実用的受容性はさらに、「価格」、「互換性」、「信頼性」、「安全性」、「有用性」の5つの概念から構成される。

「価格」は初期費用と維持費用の2つから構成される。当然、システムを利用することによるメリットに対して価格が高い場合にはそのシステムは受容されない。

「互換性」とは、既存のシステムと導入しようとしているシステムとの親和性である。新たに導入しようとしているシステムが既存のインフラと互換性がない場合には、そのシステムのためのインフラを新たに構築しなければならず、価格を高める要因となる。

「信頼性」とは、システムが仕様書に書かれている性能を間違いなく発揮しつづけるかを意味する。たとえば、性能が高くて、よく不具合を起こしその性能を維持できなければ、受容されにくい。

「安全性」とは、システムを使用する際の身体的危険性がどの程度排除されているかを意味する。ユーザの不注意による操作ミスや、システムの的な不具合が発生した場合に、ユーザに身体的危害が加わるようなシステムは受容されにくい。

「有用性」とは、そのシステムを使用する場合の具体的メリットを表すユーティリティと、システムの使いやすさを表すユーザビリティから構成される。

「ユーティリティ」は具体的には、そのシステムが持つどのような機能を持つか、その性能はどの程度のものかによって規定される。システムに新たな機能を組み込む場合、その機能はユーザにとって利用価値があるものでなければならず、その性能も機能の利用価値を十分に維持できるものでなければならない。

一方、「ユーザビリティ」とはそのシステムの使いやすさを表す。すなわち、システムの取り扱いやすさ(操作性)、操作方法の分かりやすさや操作ミスの起こりにくさ(認知性)、システムを使う際の心地よさ(快適性)によって規定される。たとえば、非常に有効な方法論に従い、ユーティリティの高いAR環境を構築したとしても、ユーザビリティが低い場合には、そのシステムは受容されない。したがって、システムの実用的受容性を高めるためには、ユーティリティを高めるだけでなく、ユーザビリティを低下させないことが必要である。

以上が、各概念の概要であるが、これら5つの概念の中で価格と互換性については、方法論の有効性に直接影響を与えるものではない。そこで以下では、実用的受容性を構成する概念のうち価格と互換性以外の概念について、ARシステムの性能を規定する要因について考察する。

**信頼性** AR環境における信頼性とは、すなわち、ARが提示する情報がどの程度信頼できるものであるかである。この信頼性に関して、AR環境の性能を規定する要因としては、トラッキング精度や速度が空間的に安定しているかと、特に光学シースルー型HMDを用いた場合に正しくユーザの網膜上に情報が投影されるか、の2点である。ユーザの立つ位置によってトラッキング精度や速度が低下する場合には信頼性は低くなる。また、光学シースルー型HMDの場合、キャリブレーションを正しく行っても、使用している最中にHMDの装着位置がずれてしまい、情報が網膜上の正しい位置に投影されなくなる場合があり、信頼性を低下させる要因となる。

**安全性** 安全性に関して、AR環境の性能を規定する要因としては、ユーザの視野をどの程度制限するかが挙げられる。本研究で想定している各種プラント内での作業では、足元や頭上に注意して移動しなければ転倒や衝突が起こる場合が多い。そこで、ユーザの視界はできるだけ制限しないことが望ましい。

**ユーティリティ** 作業支援用ARによって提示される情報は当然作業をする上で価値のあるものでなければならない。ただ、これは方法論の有効性そのものにかかわってくる問題であり、本研究では対象とはしない。その他のユーティリティに関して、AR環境の性能を規定する要因としては、トラッキング精度・速度がどの程度か、あるいは、情報処理速度はどの程度かが上げられる。トラッキング精度が悪ければ、正しい位置に情報を重畳することができない。また、トラッキング速度や情報処理速度が遅く、情報提示が遅れると、必要なときに情報が得られなくなり、ユーティリティを低下させる。

**ユーザビリティ** ユーザビリティに関して、ARの性能を規定する要因については、操作性、認知性、快適性の3つの側面から考察する。操作性要因としては、インタフェースを構成する各種デバイスの装着位置が挙げられる。具体的にはHMDを用いた場合には両手が自由になるが、頭部の動きは制限される。一方、ハンドヘルドPCを用いた場合には頭部の動きは自由になるが、少なくとも一方の手はPCを把持せねばならない。ARの認知性要因としては、セットアップ方法の難易度が挙げられる。基本的にARは、ユーザの立ち振る舞いをトラッキングし、その情報に基づいて情報を生成し、ユーザに提示するというシステムであるため、ユーザは情報をディスプレイを見るだけでよい。ARの操作方法自体は何ら難しい点はない。しかし、人は当然それぞれに異なった視覚特性を持っているため、特にHMDによって情報提示するためには、個々人の視覚特性に合わせるための何らかのセッ

トアップ作業が必要となる。この作業はできるだけ簡単に行え、かつ、その手順を容易に学習できるものでなければならない。快適性要因としてとしてはインタフェースを構成する各種デバイスの大きさや数、重さが挙げられる。当然ながら、インタフェースは小型で軽く、また数は少ない方が望ましい。

以上の方法論の有効性に影響を与える AR 環境の性能を規定する要因を表 1 にまとめる。

### 5. 理想的な AR 環境の構想

表 1 に示した AR の性能について、これらを全て満たす AR 環境として、以下のような AR 環境を構想する。ただし、表 1 の 4 . に示した要因は、方法論の有効性そのものに関わる要因である。本研究では、方法論の有効性は確認されているという前提で、その有効性を保証できる範囲を明らかにできる実験環境を構築することが目的であるため、4 . についてはすでに満たされていると仮定し、その他の要因について、現時点で実現しうる理想的な AR 環境を構想する。

1) Outside-In トラッキングを用いる。: Outside-In 方式を適用することにより、カメラやトラッキング用の PC をユーザが身につけられるような小型のものにする必要がなく、高性能なカメラや高速処理が可能なデスクトップ PC を用いたトラッキングが可能となるため、表 1 に示した、1, 6, 7 について高性能な AR 環境となる。なお、具体的なトラッキング方法については先報 [8] に譲る。

2) 生成した情報をユーザに無線で送信する。: トラッキング結果にしたがって情報を生成する PC は高速処理が可能なデスクトップ PC とし、生成された情報はユーザが身につけたディスプレイデバイスに無線で送信する。これにより 3, 6 について高性能な AR 環境となる。

3) 光学シースルー型 HMD を用いる。: HMD を用いる場合、両手が自由になることから、8 について高性能な AR といえる。光学シースルー型 HMD はユーザは実世界を直接見ることができるため 2 についても高性能となる。また、明るさや解像度の面からも極めて高性能な光学シースルー型 HMD が開発されており、それらを用いることにより、9 について十分に高い性能の AR 環境となる。また、光学シースルー HMD の場合、実世界をユーザの視点に近い位置から撮影するカメラが不要となるため、7 の性能も高めることができる。

4) ヘルメット内にユーザが身につけるデバイスを全て収める。: 1), 2), 3) から、ユーザは身につける必要があるデバイスは無線通信のための機器と光学シースルー型 HMD のみとなる。よって、これらはユーザ

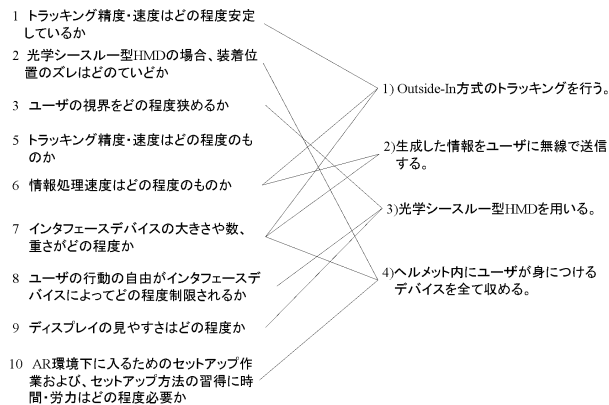


図 4 構想した AR 環境の仕様  
Fig. 4 The specifications of suggested AR environment

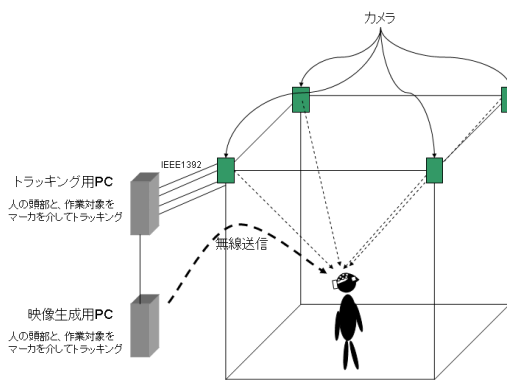


図 5 提案する AR 環境の構成  
Fig. 5 The image of suggested AR environment

が普段から身につけているヘルメット収める。こうすることにより、ユーザはヘルメットを普段どおり身につけるだけで AR 環境下に入ることができ、7, 10 の性能を高めることができる。また、光学シースルー型 HMD をヘルメットに固定することにより、ズレの発生を抑制できると考えられ、2 について性能を高めることができる。

以上、各性能を規定する要因と構想との対応を図 4 に、構想した AR 環境の概観を図 5 に、ユーザが身につけるヘルメットの概観を図 6 示す。なお、ヘルメットには図 6 に示すようにトラッキングのためにマークが添付する。

### 6. まとめと今後の展望

本報告では、作業支援のための AR 環境を対象に、まず、現在までに提案されている AR の要素技術について展望した後、アクセプタビリティの概念から方法論の有効性に影響を与える AR 環境の性能を考察し、その結果に基づいて、現時点で構築しうる理想的な性能をもつ AR 環境を構想、提案した。

表 1 AR 環境の性能の規定因

Table 1 Factors of performance of AR environment

概念	性能を規定する要因
信頼性	1. トラッキング精度・速度はどの程度安定しているか 2. 光学シースルー型 HMD の場合、装着位置のズレはどの程度か
安全性	3. ユーザの視界をどの程度狭めるか
ユーティリティ	4. 提示される情報は作業をする上でどの程度の価値のあるものか 5. トラッキング精度・速度はどの程度のものか 6. 情報処理速度はどの程度のものか
ユーザビリティ	7. インタフェースデバイスの大きさや数、重さがどの程度か 8. ユーザの行動の自由がインタフェースデバイスによってどの程度制限されるか 9. ディスプレイの見やすさはどの程度か 10. AR 環境下に入るためのセットアップ作業の習得および、実践に時間・労力はどの程度必要か。

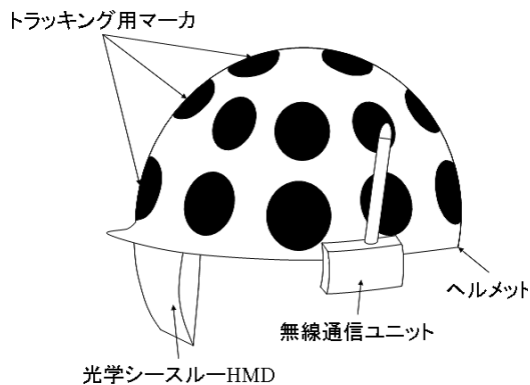


図 6 提案する AR 環境下におけるユーザインタフェースデバイス

Fig. 6 The user interface device for suggested AR environment

今後の展望として、今回提案した AR 環境を実際に構築し、被験者実験を行う予定である。

#### 謝辞

本研究は京都大学 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」の一部として行われ、京都大学より研究助成を受けております。ここに深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Azuma,R.: A Survey of Augmented Reality; Presence:Teleoperators and Virtual Environments, **Vol.6**, No.4, pp.355-385(1997).
- [2] Azuma,R., Baillot,Y., Behringer,R., Feiner,S., Julier,S., MacIntyre,B.: Recent Advances in Augmented Reality; Computer Graphics and Applications, IEEE, **Vol.21**, No.6, pp.34-47(2001).
- [3] Navab,N.: Developing killer Apps for Industrial Augmented Reality: Computer Graphics and Applications, IEEE, **Vol.24**, No.3, pp.16-22(2004).
- [4] Regenbrecht,H., Baratoff,G., Wilke,W.: Augmented Reality Projects in the Automotive and Aerospace industries; Computer Graphics and Applications, IEEE, **Vol.25**, No.6, pp.48-56(2005).
- [5] 加藤, Billinghamurst,M., 浅野, 橘: マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション; 日

本ヴァーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp607-616(1999).

- [6] Satoh,K., Uchiyama,S., Yamamoto,H.: A head tracking method using bird's-eye view camera and gyroscope The Proceedings of ISMAR2004, pp.202 - 211(2004).
- [7] 黒須, 伊藤, 時津: ユーザ工学入門-使い勝手を考える・ISO13407 への具体的アプローチ-; 共立出版株式会社 (1999).
- [8] Ishii,H., Fujino,H., Droivoldsmo,A.: Development of a Tracking Method for Augmented Reality Applied to Nuclear Plant Maintenance Work : (2) Circular Marker; Halden Project VR Workshop(2005).