

NAIST-IS-MT0151028

修士論文

ハンドヘルドGPSを用いた
屋外ウェアラブル型拡張現実感システム

小田島 太郎

2002年2月7日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

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

小田島 太郎

審査委員： 横矢 直和 教授
鹿野 清宏 教授
山澤 一誠 助教授

ハンドヘルド GPS を用いた 屋外ウェアラブル型拡張現実感システム*

小田島 太郎

内容梗概

近年，ウェアラブルコンピュータ上で拡張現実感 (Augmented Reality:AR) を実現する研究がさかんに行われている．これにより，従来では困難であった屋外における拡張現実感の実現でき，観光名所などで建物へ注釈情報を付加するといった観光ガイドとしての応用などが可能になる．一般に拡張現実感を実現するためには，現実環境と仮想環境との位置合わせが重要な課題となる．このためには，ユーザの位置と姿勢を計測する必要がある．屋外においてユーザ視点位置を計測するためには汎地球測位装置 (Global Positioning System:GPS) を，姿勢情報を取得するためにはジャイロセンサ等を使用することが多い．従来の屋外型 AR では位置計測のためにディファレンシャル GPS やリアルタイムキネマティック GPS が用いられてきた．しかし，これらは精度良く計測が行える反面，現状では機器構成が複雑になるためにユーザが装着して利用するには不向きである．そこで本研究では，小型で携帯が容易なハンドヘルド式の GPS を用いた屋外で利用可能なウェアラブル型拡張現実感システムを提案する．提案手法では，位置情報の取得にハンドヘルド式の GPS を，姿勢情報の取得にジャイロセンサを用い，ユーザの移動時には建物などに対する注釈情報を，静止時には高い位置合わせ精度が要求される建造物などの仮想物体の重畳表示を可能にする．なお，静止時には，高精度な位置合わせを実現するために，各センサの誤差や同期ずれなどにより生じる仮想物体の表示位置ずれを，画像処理により補正する．さらに，三次元地図を

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0151028, 2002年2月7日.

用いることで，現実物体と仮想物体の正確な奥行き前後関係の表現を簡易的に試みた．最後に，実際に屋外環境での実験を行うことでシステムの有用性を示す．

キーワード

ウェアラブルコンピュータ, 拡張現実感, ハンドヘルド GPS, 姿勢センサ

An Outdoor Wearable Augmented Reality System Using a Hand-held GPS*

Taro Odashima

Abstract

This paper describes an outdoor wearable augmented reality system. Augmented reality is a technology which enhances a real environment with virtual objects such as computer graphics. Using a wearable computer, outdoor augmented reality can be realized. Therefore, in the sight spot, the system can be used as a sightseeing guidance system that superimposes annotations on a real object such as a building. In augmented reality, the registration between the real and virtual environments is one of the most important problems. This requires the measurement of user's position and orientation in the real world. Usually, a global positioning system(GPS) and a gyro sensor are used to measure the position and orientation in outdoor environments. Since most of outdoor augmented reality systems use differential GPS or real-time kinematic GPS to measure user's position accurately, hardware configurations of such systems are complex and become heavy. This paper proposes an outdoor wearable augmented reality system using a hand-held GPS. The proposed system measures user's position and orientation using the hand-held GPS and inertial sensor. The system overlays annotation information to real objects when a user is moving, and can superimpose virtual objects that requires the high accuracy of registration when a user is resting. The system corrects the error of a gyro sensor using an image-based technique.

* Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0151028, February 7, 2002.

The system also resolves the occlusion problem between real and virtual objects using a 3-D map of environment. The feasibility of the proposed system has been successfully demonstrated with experiments.

Keywords:

wearable computer, augmented reality, hand-held GPS, inertial sensor

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究と本研究の位置付け	2
2.1 拡張現実感とウェアラブルコンピュータ	2
2.1.1 拡張現実感	2
2.1.2 ウェアラブルコンピュータ	5
2.2 ウェアラブルコンピュータを用いた拡張現実感	7
2.3 本研究の位置付け	10
3. ハンドヘルド式 GPS を用いたウェアラブル型 拡張現実感システム	13
3.1 システム構成と処理の流れ	13
3.2 位置・姿勢情報の取得	17
3.2.1 ハンドヘルド式 GPS による位置情報の取得	17
3.2.2 GPS による静止判定	18
3.2.3 ジャイロセンサによる姿勢情報の取得	19
3.3 画像処理による仮想物体の表示位置ずれの補正	19
3.3.1 処理の流れ	19
3.3.2 特徴点の検出	20
3.3.3 対応点の検出	21
3.3.4 球面上の座標の求め方	23
3.3.5 回転行列の求め方	23
3.4 仮想物体と実物体の隠蔽問題の解決	24
4. 実験	26
4.1 検証実験	26
4.1.1 注釈表示実験	26
4.1.2 位置ずれ補正の検証	28
4.1.3 仮想物体と実物体の隠蔽問題の検証	30

4.2 屋外環境での実験	32
5. むすび	35
参考文献	37

図目次

1	拡張現実感技術の応用例	3
2	ウェアラブルコンピュータの例	6
3	ウェアラブルコンピュータの応用例	6
4	ウェアラブル型拡張現実感の応用例	8
5	DGPS を用いた屋外型ウェアラブル拡張現実感システムの例	11
6	ウェアラブル型拡張現実感システムの構成と外観	15
7	各フレーム中の処理の流れ	16
8	GPS 誤差の推移	17
9	フレーム間の対応点の決定	22
10	現実環境と画像平面との関係	23
11	3 点の対応を利用した回転行列の計算法	24
12	オクルージョン問題	25
13	Z-buffer 法によるオクルージョン問題の解決	25
14	建物へのワイヤフレームの重畳表示	27
15	本学情報科学研究科正面玄関への注釈表示	27
16	本学事務局および食堂への注釈提示	27
17	位置ずれ補正に使用したマーカー	28
18	仮想物体の表示位置補正の実験結果	29
19	ユーザ位置と 2 つの建物の位置関係	30
20	オクルージョン問題を考慮しない場合の注釈	31
21	Z-buffer 法によるオクルージョン問題の解決	31
22	建物の配置	32
23	提案システムを用いた屋外実験における提示画像の例	33
24	静止時における仮想案内板の合成提示実験	34

表目次

1	ウェアラブル型拡張現実感のための位置計測手法の比較	12
---	-------------------------------------	----

2	GPSによる静止判定の正答率	18
---	--------------------------	----

1. はじめに

駅前や観光名所などにおいて，建物や行先の情報は一般に案内板やパンフレットなどによって提供される．しかし，これらを用いて目的地までたどり着くためには実際の場所と地図上の場所との対応付けが必要となるが，この対応付けの作業は建物の数が増えたり地図が複雑になると困難になる．そこで，現実環境に仮想物体を合成する技術である拡張現実感 (Augmented Reality:AR) を利用すれば，建物への注釈などを重畳表示することで直感的な情報提示が可能となると考えられる [10, 31]．また，ユーザが身につけて使用することのできるウェアラブルコンピュータ上で拡張現実感を実現すれば，ユーザは任意の場所において情報を得ることができる．

一般に拡張現実感を実現するためには現実環境と仮想物体との位置合わせが重要な課題となるため，ユーザの現在位置及び視線方向（姿勢）を計測する必要がある [19]．一般に，屋外において位置を測定するためには汎地球測位システム (Global Positioning System:GPS) を，姿勢を測定するためにはジャイロセンサ等を使用することが多い．従来，高精度に現在位置を計測するために，ディファレンシャル GPS やリアルタイムキネマティック GPS が用いられてきた [11, 12]．しかし，これらは精度良く計測が行える反面，現状では機器構成が複雑になるためにウェアラブルコンピュータには不向きであると考えられる．

そこで本論文では，ユーザの位置計測に小型で携帯が容易なハンドヘルド式の GPS を用い，屋外において建物等への注釈付けを行うウェアラブル型拡張現実感システムを提案する．また，ユーザの静止時には仮想物体の表示位置のずれをを画像処理により補正することで，建物への注釈に加えて高精度な位置合わせ精度の要求される仮想物体の重畳表示を実現する．実際に注釈提示システムを構築することにより，その有用性を示す．

以降，2章で関連研究及び本研究の位置付けを述べ，3章で提案システム及び提案手法を詳述し，4章で提案手法の有効性及び提案システムの有用性を検証する実験を行う．

2. 関連研究と本研究の位置付け

2.1 拡張現実感とウェアラブルコンピュータ

2.1.1 拡張現実感

拡張現実感とは、現実環境にCGなどで生成された仮想物体を重畳表示する技術である。従来、研究されてきた仮想現実感 (Virtual Reality:VR) では、提示される映像は全て仮想のものであるために、高い写実性や豊かな臨場感を出すには限界がある。拡張現実感是我々が見ている現実環境に必要な仮想物体を重畳表示するため、写実性が高く、臨場感豊かな画像を提示することが可能となる。以下に拡張現実感の応用例を挙げる。

組み立て・メンテナンス支援 [1]

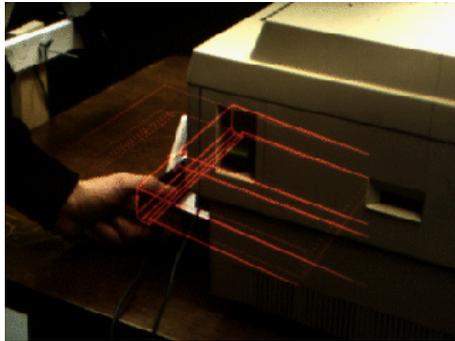
予備知識を必要とする機器の組み立てやメンテナンス、使用などにおいて、HMD(Head Mounted Display) を通して使用者に作業内容や手順を指示することにより、作業ミスの防止や作業の効率化を図る。図 1(a) は、カートリッジを重畳表示し、プリンタのメンテナンス作業を支援している様子である。

注釈・情報提示 [2]

対象物体に関する解説や注釈案内板などの情報を現実環境へ重畳表示することで、直感的にわかりやすい情報提供を行う。図 1(b) は、車の運転中に見える建物に対して注釈情報を重畳表示した例である。

手術支援・シミュレーション [3]

MRI(Magnetic Resonance Imaging) やCT(Computer Tomography) などから得られた臓器、腫瘍などの三次元画像を患者の体の上から合成することにより、患部の位置を正確に把握しながら手術を行うことができる。また、手術のトレーニングとしても使用することが可能である。図 1(c) は、患者の体に超音波画像を重畳表示し、手術の支援を行うアプリケーションの例である。



(a) KARMA [1]



(b) 車載型注釈表示システム [2]



(c) 手術シミュレーション [3]



(d) AR もぐらたたき [4]

図 1 拡張現実感技術の応用例

ゲーム・アミューズメント [4, 5]

現実環境にゲームのキャラクターなどを重畳表示することにより、現実環境全体を舞台としたアトラクションに拡張現実感を応用することが可能である。図1(d)は、テーブルの上に仮想的なモグラを合成し、それをハンマーで叩いて倒したモグラの数を競うゲームの例である。

このように、拡張現実感の応用は多岐に渡る。そのため、拡張現実感とはコンピュータビジョンと仮想現実感の境界領域において現在最もさかんに研究が行われている分野の1つである。

これら拡張現実感において現実環境に仮想物体を合成する際、仮想物体を違和感なく合成するために以下の整合性問題を解決する必要がある [39] .

幾何学的整合性

仮想物体に対するユーザの位置および姿勢を求める問題 . 位置合わせの精度が悪いと仮想物体が現実環境の正しい位置に表示されず , 違和感が生じる .

光学的整合性

仮想物体に対する照明条件と現実環境の照明条件と一致させる問題 . この整合性がとれていないと , ハイライトや陰影のつき方が周りにある現実物体と異なるために , 違和感が生じる .

時間的整合性

仮想物体の合成を現実環境と同期させる問題 . 幾何学的整合性や光学的整合性の解決 , あるいは仮想物体の描画に要する時間分だけ仮想物体の表示に対して時間遅延が生じると , ユーザの行動と表示される仮想物体の同期がとれず , 違和感が生じる .

これらの整合性問題のうち , 幾何学的整合性 (位置合わせ) の問題はユーザに違和感を与える最も大きな要因とされている . また , 他の 2 つの整合性の問題は幾何学的整合性が解決されていることが前提であるため , 本論文では拡張現実感の実現に関する問題としては主に幾何学的整合性を扱う .

2.1.2 ウェアラブルコンピュータ

ウェアラブルコンピュータ (Wearable Computer) とは、ユーザが身につけて使用することのできるコンピュータの総称であり、近年のコンピュータの小型化・高性能化に伴いさかんに研究が行われている [6, 7, 8]。ウェアラブルコンピュータの例を図 2 に示す。(a) は MIT メディアラボにおいて開発中のウェアラブルコンピュータであり、人間とコンピュータとの新しいインタラクションのプロトタイプ構築を目標としている。(b) は日立の小型 HMD およびハンドマウスである。小型 HMD は従来の HMD とは異なり、片方の目で現実環境を、もう片方の目でディスプレイに表示された映像を見ることが可能である。また、ハンドマウスは従来のマウスのようにカーソル移動に平面が必要であるということはなく、カーソル移動やボタンクリックなど、必要な操作を全て手のみで行うことが可能である。

ウェアラブルコンピュータはユーザが日常的に身につけ、さまざまな日常作業を支援することを目的としている。以下にウェアラブルコンピュータを用いた作業支援の例を挙げる。

バリアフリー [6]

ウェアラブルコンピュータを用いて障害者の作業支援を行うことができる。図 3(a) は、障害者の指先に取り付けたウェアラブルコンピュータが指点字を出力し、触覚提示するものである。

ヘルスケア [7]

ウェアラブルコンピュータを身につけ、運動中の脈拍測定など、ヘルスケア方面へ応用することが可能である。

記憶支援 [8]

時間が経つにつれ消滅したり変化したりする曖昧な人間の記憶を支援することができる。図 3(b) に示す応用例では、手袋をつけた手で物に触れると関連映像が再生される。

このように、ウェアラブルコンピュータの応用可能分野も多岐に渡る。



(a) MIThril(MIT Media Lab)



(b) WIA-100NB(日立) [9]

図 2 ウェアラブルコンピュータの例



(a) 障害者の作業支援 [6]

(b) 記憶支援 [8]

図 3 ウェアラブルコンピュータの応用例

2.2 ウェアラブルコンピュータを用いた拡張現実感

前述のとおり，拡張現実感およびウェアラブルコンピュータはともに現在さかんに研究されている分野である．また，この2つを組み合わせた，ウェアラブル型拡張現実感の研究も現在注目されつつある．これにより，従来の拡張現実感のようなユーザの移動範囲の機器的な制限が存在しなくなる．それにより，ウェアラブル型拡張現実感は以下に示すような応用が可能となる．

現実環境への情報付加 [10, 11]

拡張現実感をウェアラブルコンピュータ上で実現することにより，ユーザの必要なときに必要な情報を直感的に提示することができる．図4(a)に示す Touring Machine は，街の中でユーザの見ている現実環境に情報を重畳表示するアプリケーションの例である．

ゲーム・アミューズメント [12]

従来の拡張現実感によるゲームやアミューズメントでは，ユーザが自由に動き回ることが困難であった．そこで，ウェアラブルコンピュータを用いることで，ユーザが自由に動き回ることでできる拡張現実感によるアミューズメントの構築が可能になると考えられる．図4(b)に示す ARQuake は，現実環境の中で仮想的なキャラクターと戦うアミューズメントアプリケーションの例である．

直感的なインターフェース [13, 14, 15]

コンピュータを操作する際にマウスなどの特別な装置を使わずに，主に自分の手を用いることで直感的な操作が可能となる．図4(c)はユーザの手の指先にメニューを表示し，それを指で選択するインターフェースである．

また，従来のキーボードによるパスワード入力では，他人が入力者の手元を注視することによりパスワードが漏洩する可能性がある．そこで，パスワードを入力するキーボードを拡張現実感を用いて入力者にのみ提示し，また提示するたびにキーの配置を変更することによりパスワードの漏洩を防ぐことが可能である．図4(d)は，そのようなセキュアなパスワード入力アプリケーションの画面である．



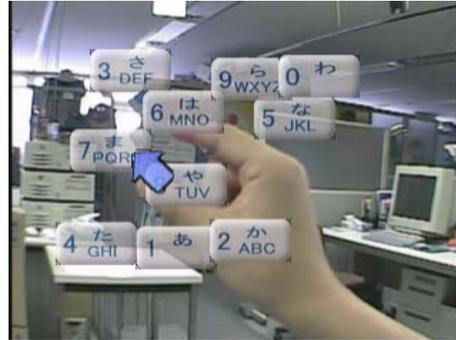
(a) Touring Machine [10]



(b) ARQuake [12]



(c) てのひらめにゆう [13]



(d) Wyvern [15]

図 4 ウェアラブル型拡張現実感の応用例

このように、広い範囲において利用可能であるという利点を活かしたウェアラブル型拡張現実感のアプリケーションが多数発表されている。

このようなウェアラブル型拡張現実感を実現する際、持ち運びの容易な装置を用いていかにユーザの位置合わせを行うかが重要な課題となる。従来の拡張現実感においては、位置合わせに移動範囲の制限のある装置 [35, 40, 41, 42] や、持ち運びの困難な装置を使用していたため、また複雑な画像処理による位置合わせのために豊富な計算資源を持つワークステーションなどを使用していたため、ユーザの位置は固定もしくは非常に限られた範囲のみ移動可能であった。

しかし、ウェアラブルコンピュータにはユーザが使用する機器に制約があるため、従来の位置合わせ手法はウェアラブル型拡張現実感には適用困難であること

が多い。例えば、ウェアラブルコンピュータは一般的なワークステーションなどに比べ計算資源が乏しいため、複雑な計算を行うことは困難である。また、大掛かりな装置をウェアラブルコンピュータとして身につけることは非現実的である。

そこで、以下に従来提案されてきたウェアラブル型拡張現実感のための位置合わせを挙げる。

主にハードウェアデバイスを使用する方法

Höllerer ら [11] は、位置計測にディファレンシャルGPSを、姿勢計測にジャイロセンサを使用した。しかし、ディファレンシャルGPSは精度良く位置計測が行える半面、図5に示すとおり、現状では機器構成が大掛かりとなるためにウェアラブルコンピュータとして使用するのは困難であるという問題が生じる。また、この手法はGPS衛星の補足可能な屋外でしか使用することができない。

椎尾ら [16] は位置情報を記録したRFIDタグを床に敷き詰め、裏面にタグリーダーを取り付けた靴でその上を歩くことにより位置情報を取得する手法を提案した。しかし、この手法は床一面にRFIDタグを敷き詰める必要があり、インフラ整備のためのコストが膨大なものになり、実用上現実的ではない。

位置合わせは、一般にユーザの位置及び姿勢が必要となる。姿勢計測に使用されるハードウェアデバイスはジャイロセンサが一般的であるが、ジャイロセンサは十分身につけられる大きさであり、電源供給が可能であれば計測範囲に制限がなく、ウェアラブル型拡張現実感に十分利用可能である。また、ファイバージャイロのような高精度な計測装置も存在する。一方、位置計測に関しては、小型で計測範囲に制限がなく、精度良く位置計測が行えるハードウェアデバイスは現在のところ存在しない。

主に画像処理を使用する方法

興梠ら [17] は、位置が既知の場所であらかじめ撮影したパノラマ画像データベースとユーザの視点からの画像をマッチングすることで、現在位置及び姿勢を計算する手法を提案した。またその際、パノラマ画像を疎な間隔で

撮影し、パノラマ画像データベースのない場所においては複数の慣性センサを利用して位置推定を行うことによりパノラマ画像データベースの量の削減を試みている。しかし、この手法は屋外のような広範囲においては必要なパノラマ画像データベースが膨大な量となる、時刻や天候などにより同じ地点においても撮影される視点画像が異なる、という問題が存在する。

ハードウェアデバイスと画像処理を組み合わせる方法

Thomas ら [12] は、建物から離れた屋外における位置計測にはディファレンシャル GPS のみを用い、屋外の建物に近い場所においては建物の側面に設置した 3 次元座標の既知なマーカを追跡することによりディファレンシャル GPS の誤差を補正する。さらに屋内においては、マーカ追跡による位置計測を利用して位置合わせを行っている。このように複数の手法を組み合わせることにより、屋内外における位置計測が可能となる。しかし、先述のようにディファレンシャル GPS は機器構成が大掛かりであり、さらにマーカを常に視界に入るように配置する必要があるため、インフラ整備のためのコストがかかるという問題が存在する。

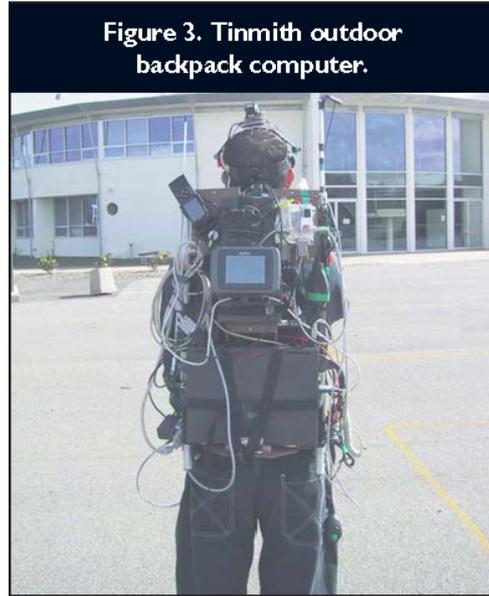
2.3 本研究の位置付け

本研究は、屋外において建物への注釈付けを行う小型のウェアラブル型拡張現実感システムの構築を目的としている。前節において位置合わせの従来手法を検討した結果、計算資源の乏しいウェアラブルコンピュータにおいて屋外で利用でき、かつ複雑な計算の必要ない位置合わせ手法として、位置合わせのためのハードウェアデバイスを用いる方法に注目した。

前節で述べたとおり、ハードウェアデバイスを用いた位置合わせの問題は位置情報の取得が課題となる。従来の屋外型ウェアラブル拡張現実感において、位置情報の取得にはディファレンシャル GPS が主に用いられているが、ディファレンシャル GPS は機器構成が複雑であるためにウェアラブルコンピュータには不向きであるという問題がある。そこで、位置情報の取得に小型で携帯の容易なハンドヘルド式 GPS を使用した屋外型ウェアラブル拡張現実感システムを提案す



(a) Höllerer ら [10]



(b) Thomas ら [12]

図 5 DGPS を用いた屋外型ウェアラブル拡張現実感システムの例

る．これにより，従来の屋外型ウェアラブル拡張現実感システムに比べ軽量のシステムが構築できると考えられる．従来手法と提案手法の特徴の比較を表 1 に示す．これより，ハンドヘルド式 GPS は従来手法に比べて装置の小ささやインフラ整備の容易さの面で優れていると言える．その反面，ハンドヘルド式 GPS は従来手法に比べ測位精度が劣るため，建物へ正しく注釈情報を提示することが可能であるか，精度の検証実験を行う必要がある．

また，ハンドヘルド式 GPS とジャイロセンサを使用した位置合わせは，それぞれのセンサの誤差や同期ずれなど，さまざまな要因により仮想物体の表示位置がずれることがある．本研究では，ユーザの静止時において，その位置ずれの補正を行う．具体的には，前フレームからのカメラの姿勢変化量を特徴点追跡と行列演算を用いて実時間で求める．表示位置のずれは移動時にも生じるが，移動時にはユーザの頭の揺れや GPS のサンプリングレートなどにより仮想物体の位置

表 1 ウェアラブル型拡張現実感のための位置計測手法の比較

手法	大きさ・質量	計測精度	インフラ整備の 容易さ	適用可能 範囲
ハンドヘルド式 GPS DGPS [10, 12] RFID タグ [16]				屋外 屋外 屋内

ずれが大きなものとなり，計算資源に乏しいウェアラブルコンピュータにおいて補正を行うことは困難であると考え，移動時の補正は行わない。

3. ハンドヘルド式GPSを用いたウェアラブル型 拡張現実感システム

本章では、屋外において現実環境へ仮想物体を重畳表示するビデオシースルー式のウェアラブル型拡張現実感システムの詳細について述べる。3.1節で機器構成および処理の流れを、3.2節でGPSによる位置情報取得・静止判定の精度検証およびジャイロセンサによる姿勢情報の取得法について記述する。3.3節で静止時における仮想物体の位置ずれ補正手法を、3.4節で仮想物体と実物体との隠蔽問題の解決法をそれぞれ述べる。

3.1 システム構成と処理の流れ

屋外において現実環境へ仮想物体を重畳表示するウェアラブル型拡張現実感システムの機器構成を図6に示す。GPSおよびジャイロセンサからユーザの位置・姿勢情報を取得し、これらの情報から注釈および仮想物体の表示位置を決定する。その後、カメラより得られた現実環境の映像に注釈情報および仮想物体を重畳合成し、表示デバイスを介してユーザに合成画像を提示する。

以下に、それぞれの機器の詳細について述べる。

カメラ Point Grey Research 社製 Dragonfly

情報転送周期：30[Hz]

解像度：640×480[pixels]

ユーザの視点付近に設置し、ユーザのしている現実環境の画像を取得する。

電源は12[V]のバッテリーパックから供給される。

GPS GARMIN 社製 eTrex

情報転送周期：1[Hz]

ヘルメットに装着し、ユーザの現在位置を計測する。電源は1.5[V]の乾電池から供給される。

姿勢センサ TOKIMEC 社製 TISS-5-40

情報転送周期：250[Hz]

方位角ドリフト：±1.0[°/h]

重量：550[g]

ヘルメットに装着し，ユーザの姿勢を計測する．電源はカメラと同じバッテリーパックから供給される．

計算機 DELL 社製 ノート PC Inspiron 8100

CPU 周波数：1.2[GHz]

搭載メモリ：512[MB]

重量：3.6[kg]

カメラ・GPS・姿勢センサの各センサからそれぞれ情報を取得し，内部に保持した注釈情報を現実環境の画像に重ね合わせ，注釈つき画像を生成する．電源は，内臓バッテリーから供給される．

表示デバイス MicroOptical 社製 Clip-On Display

ヘルメットに装着し，注釈つき画像をユーザの左目に提示する．ユーザはこのデバイスを介して注釈つき画像を見ることができる．電源は7.2[V]のバッテリーパックから供給される．

なお，本システムの総重量は約7[kg]であり，稼働時間は約2時間半である．

以下に注釈合成画像の生成手順の概要を述べる．

1. カメラによりユーザの視点から見た現実環境の画像を取得する．
2. GPS 及びジャイロセンサにより，ユーザの現在位置・姿勢を計測する．その際，ジャイロセンサとカメラとの同期をとる．ユーザが静止している際には，さらに画像処理によりジャイロセンサの誤差補正を行う．
3. ステップ2で計測した情報と計算機内に保持した注釈情報とを比較し，注釈を表示する場所を決定する．
4. 現実環境の画像に注釈をステップ3において決定した場所へ重畳表示する．ユーザが静止している際には，仮想案内板等のCGオブジェクトの重畳表示も行う．



図 6 ウェアラブル型拡張現実感システムの構成と外観

また、各フレーム中の処理の流れを図7に示す。

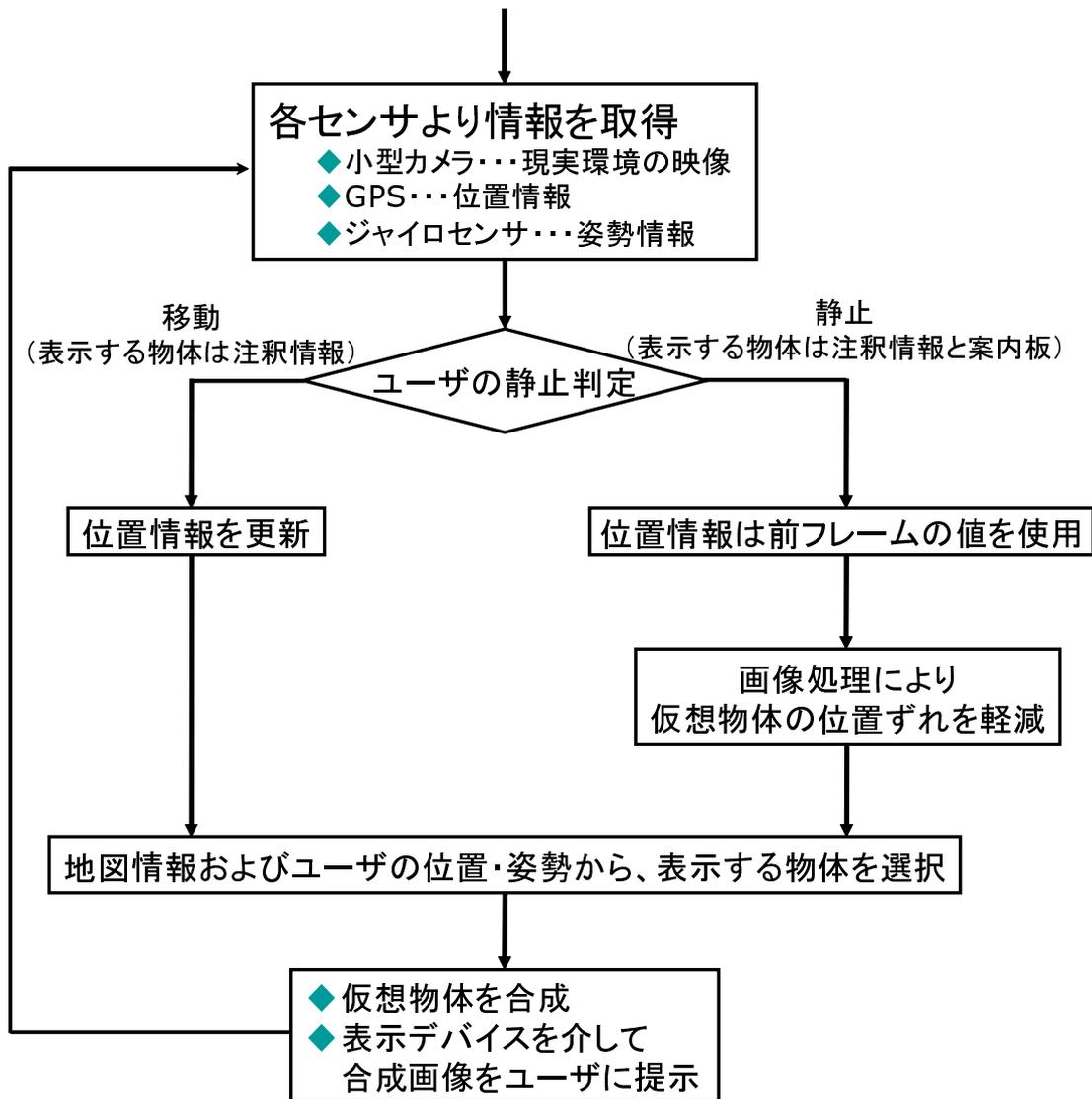


図 7 各フレーム中の処理の流れ

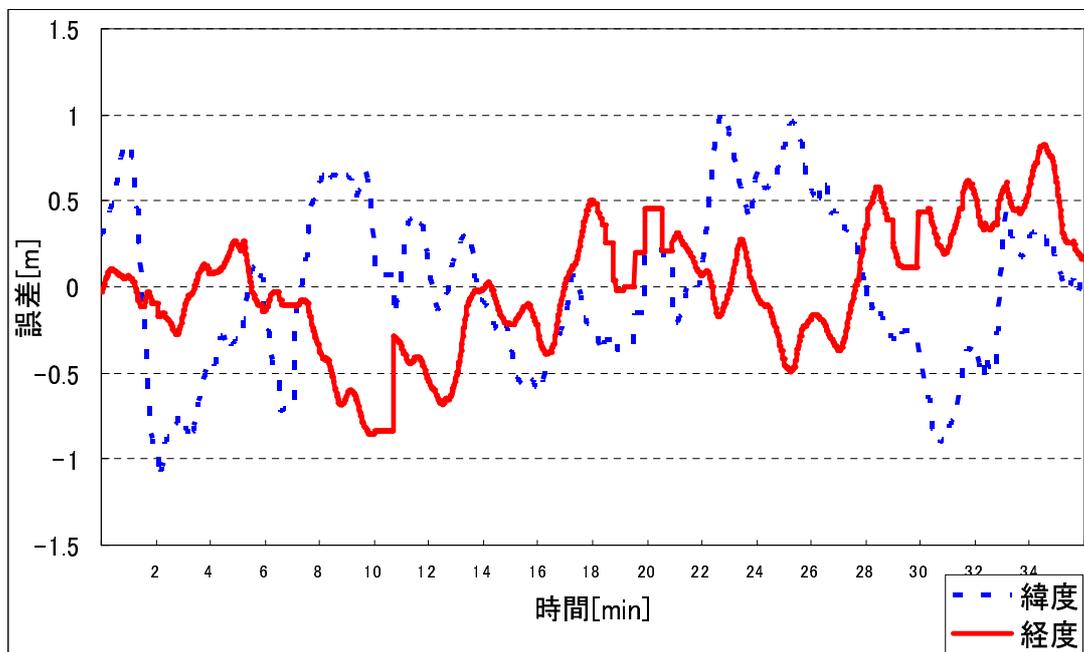


図 8 GPS 誤差の推移

3.2 位置・姿勢情報の取得

3.2.1 ハンドヘルド式 GPS による位置情報の取得

本項では、GPS により得られる位置情報の精度検証について述べる。まず、GPS の計測精度を調べるために、実際に GARMIN 社製のハンドヘルド式 GPS である eTrex を用い、緯度及び経度が既知の場所で GPS 衛星を 7～9 個捕捉している状態で 40 分程度現在位置を計測した。位置情報は国土地理院が事前に干渉測位法にて計測したものを利用した。図 8 は、計測値と真値との誤差をメートル単位に換算した際の誤差の推移をグラフにしたものである。横軸は時間 [分] であり、縦軸は真値との誤差 [m] である。この結果より、緯度・経度いずれにおいても誤差は高々 1m 程度であることが確認できる。これは通常の屋外環境で建物などへの注釈提示に利用可能な精度であると考えられる。

表 2 GPS による静止判定の正答率

閾値 [km/h]	正答数	誤答数	合計	正答率 [%]
0.01	835	768	1603	52.09
0.05	1528	75	1603	95.32
0.1	1537	62	1603	95.88
0.2	1551	52	1603	96.76
0.3	1549	54	1603	96.63
0.4	1528	75	1603	95.32
0.5	1308	295	1603	81.60
0.6	1164	439	1603	72.61

3.2.2 GPS による静止判定

次に，eTrex による静止判定の検証について述べる．eTrex は，ユーザの現在位置のほかに東方向および北方向の移動速度も計測することができるため，これらを v_e, v_n とし，閾値 h を用いて以下の式で静止判定を行う．

$$v_e^2 + v_n^2 \begin{cases} \leq h^2 & \text{: 静止} \\ > h^2 & \text{: 移動} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) は，ユーザの移動方向にかかわらず，移動の速さが閾値以下であれば静止していると判断し，そうでなければ移動していると判断する．この静止判定法の有効性を調べるため，および最適な閾値を求めるために実際に，人間の歩く速度とされる 4[km/h] 付近の速度で移動し，静止判定の閾値を変化させ，正答率を調べる実験を行った．実験結果を表 2 に示す．最も正答率の高い閾値 0.2[km/h] における誤答数 52 の中で，静止・移動直後の 2～3 秒の間に静止しているにもかかわらず移動していると判断した，あるいは移動しているにもかかわらず静止していると判断したというタイムラグによるものが 51，移動中に誤って静止判定を出したものが 1 であった．この結果より，2～3 秒のタイムラグを許容すれば，閾値を 0.2[km/h] 前後に設定することで GPS による静止判定は十分利用可能である

と考えられる．

3.2.3 ジャイロセンサによる姿勢情報の取得

本システムでは，ユーザの姿勢情報をジャイロセンサにより取得している．ジャイロセンサからはほぼ実時間で姿勢情報が取得できるが，カメラから得られる現実環境の画像は多少の時間遅延が生じる．そのために姿勢が変化したとき，先に仮想物体が動き，後で現実環境の画像が動くといったいわゆる同期ずれの問題が生じる．そこで，キューを用いて遅延時間分の姿勢情報をためることにより同期ずれの問題を解消する．その際のキューのサイズは次の手順で決定する．

1. ジャイロセンサを静止させる
2. ジャイロセンサを動かし，姿勢情報をキューに入れる
3. カメラ画像が，フレーム間差分により動き始めたとき判定されるまでキューに姿勢情報を入れる
4. カメラ画像が動き始めたとき判定されたらキューへの挿入を中断する

このときのキューのサイズにより同期ずれを求める．

3.3 画像処理による仮想物体の表示位置ずれの補正

本システムでは，同期ずれのほかにセンサの特性などにより，仮想物体の表示位置が本来あるべき場所とずれてしまうことがある．そこで，前フレームからのカメラの姿勢の変化を画像処理により求め，表示位置のずれを補正する手法を以下に提案する．なお，この処理はユーザの静止時にのみ行い，移動時には行わない．

3.3.1 処理の流れ

まず，ユーザが静止しているという仮定から，現実環境はカメラを中心とする球の表面に投影されているとみなすことができる．すなわち，カメラ位置を原点

とした球面上の点の3次元座標を (X, Y, Z) , 球の半径を K とすると

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = K^2 \quad (2)$$

の関係がある．以下では簡単のため， $K = 1$ (単位球) とする．次に，以下の手順に沿って姿勢情報である回転行列を求める．

1. 初期フレームで，特徴点を求める
2. 2つのフレーム間で，対応する3点を求める
3. 得られた6点が球面に投影された際の座標を求める
4. 6点の対応点の球面上の座標より，行列演算を用いて回転行列を求める

このようにして求めた回転行列が，前フレームからの姿勢の変化量である．以下に，各処理の詳しい手順を示す．

3.3.2 特徴点の検出

まず初期フレームにおいて，Moravec のインタレスト・オペレータ [20] を用いて特徴点を検出する．Moravec のインタレスト・オペレータは，画像上の小領域において縦・横・斜め各方向に対して輝度地の変化量を求め，その変化量の最小値が極大になる点を特徴点とする．これは輝度値が周囲から孤立している点やコーナーなどを検出することを意味している．Moravec のインタレスト・オペレータの定義式を式 (3) に示す．

$$\min(d1, d2, d3, d4) \quad (3)$$

ただし，

$$d1 = \sum_x \sum_y \frac{(I_{x,y} - I_{x+1,y})^2}{n}$$
$$d2 = \sum_x \sum_y \frac{(I_{x,y} - I_{x+1,y+1})^2}{n}$$

$$d3 = \sum_x \sum_y \frac{(I_{x,y} - I_{x,y+1})^2}{n}$$

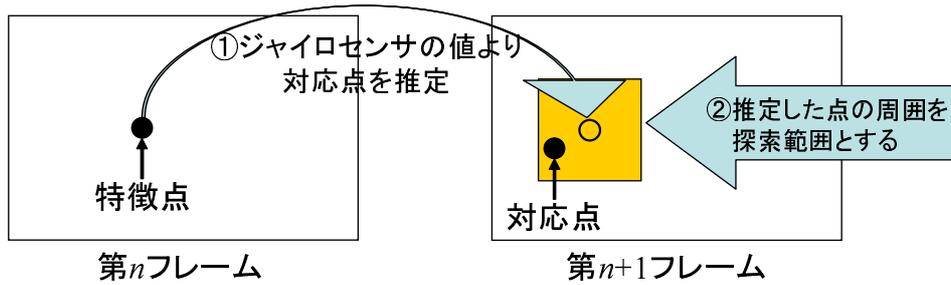
$$d4 = \sum_x \sum_y \frac{(I_{x,y} - I_{x-1,y+1})^2}{n}$$

ここで d は方向分散値を表しており，ウインドウ内の座標 (x, y) において4方向の隣接画素との2乗誤差を求め，ウインドウ内の全画素に対して方向ごとに2乗誤差の平均を求めている．なお， n は小領域内の画素数である．そして，各方向の方向分散値の最小値が Moravec のインタレスト・オペレータの値である．画像上の小領域内の各画素についてインタレスト・オペレータを適用し，その値が極大となる画素をその領域内の特徴点とする．

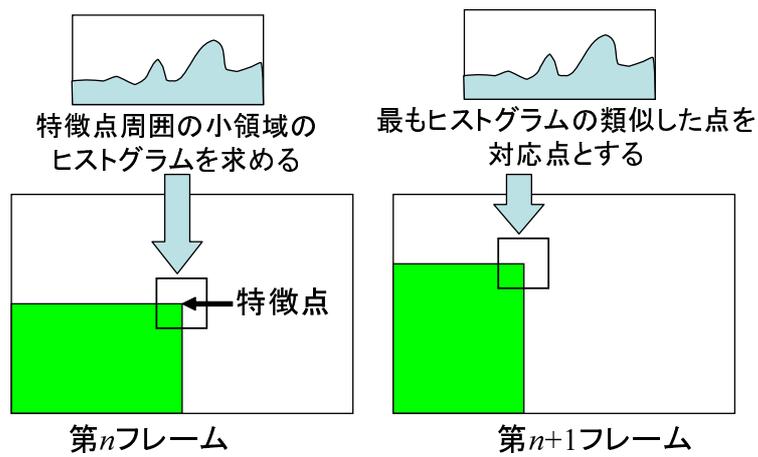
3.3.3 対応点の検出

連続するフレーム間の対応点を求める際，従来では単純なフレーム間のパターンマッチングや，ヒストグラムを利用した高速なアクティブ探索法 [22] などが用いられてきた．本研究では，図9に示すように対応点の大まかな推定にジャイロセンサを用い，その周囲のヒストグラムを用いて検索することにより対応点を決定する．このように探索範囲を限定することでエラー時の誤差を最小限におさえ，また高速な処理が可能となる．また，点の照合にパターンマッチングではなくヒストグラムを用いることにより，カメラがロール角方向に回転した場合にも対応することができる．

また，同一の特徴点を常に追跡した場合，姿勢によってはその特徴点が画面外に出てしまい，対応点が検出されなかったり誤追跡する可能性がある．そのため，追跡中の特徴点が画像の端近くまで移動した場合，Moravec のインタレスト・オペレータを再び適用して新たな特徴点を求める．

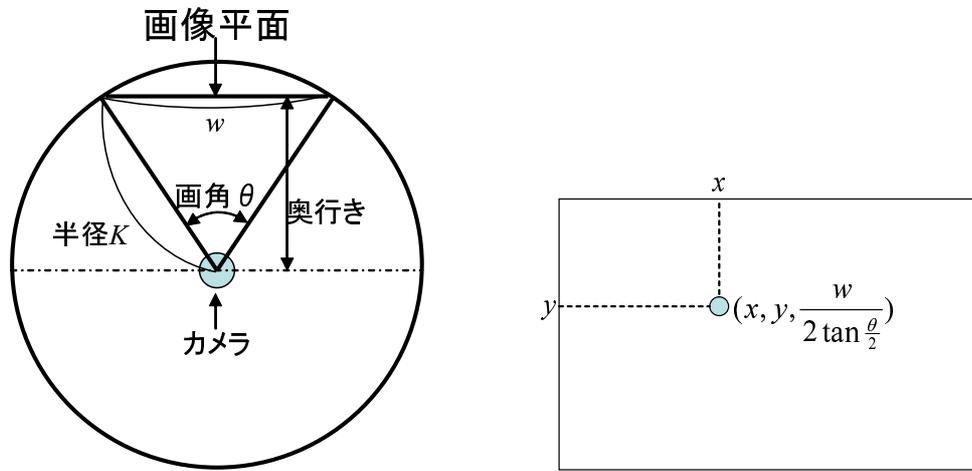


(a) ジャイロセンサを用いた対応点探索範囲の限定



(b) ヒストグラムを用いた対応点の決定

図 9 フレーム間の対応点の決定



(a) 現実環境と画像平面（上から見た図） (b) 画像平面の奥行き

図 10 現実環境と画像平面との関係

3.3.4 球面上の座標の求め方

次に、画像平面上の点に対応する球面の座標を求める手法を示す。画像上の座標と球面投影時の座標との関係を求めるために、画像平面の奥行きが何画素に相当するのかを求める必要がある。これは、画面の横幅を w [pixel]、カメラの画角を θ として $\frac{w}{2 \tan \frac{\theta}{2}}$ [pixel] と表すことができる（図 10）。

これより、画像上の点 (x, y) に対応する 3 次元座標は $(x, y, \frac{w}{2 \tan \frac{\theta}{2}})$ を式 (2) を満たすように正規化した値、すなわち

$$\left(\lambda x, \lambda y, \frac{\lambda w}{2 \tan \frac{\theta}{2}} \right) \text{ ただし } \lambda = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + \frac{w^2}{4 \tan^2 \frac{\theta}{2}}}}$$

となる。

3.3.5 回転行列の求め方

一般に、3 次元空間中の回転変換では、3 点の対応が求めれば変換行列（回転行列）を求めることができる。具体的には、3 次元空間中の点 P_1, P_2, P_3 とその

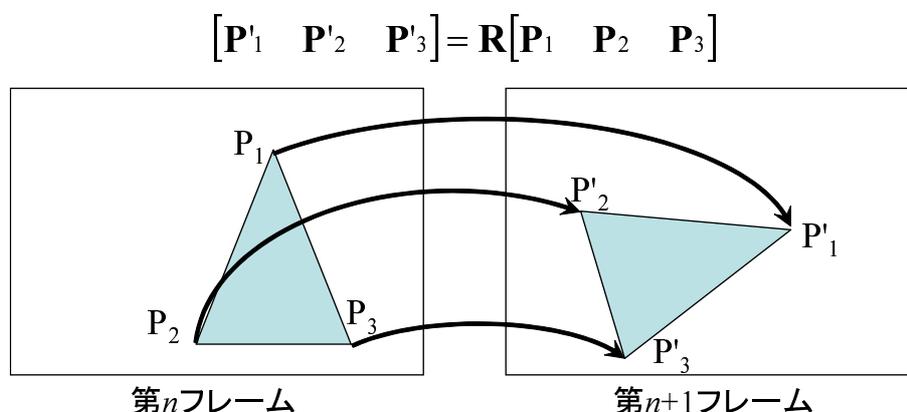


図 11 3 点の対応を利用した回転行列の計算法

対応点 P'_1, P'_2, P'_3 は, 3×3 の回転行列 R を用いて

$$(P'_1 \ P'_2 \ P'_3) = R \cdot (P_1 \ P_2 \ P_3)$$

と表すことができる (図 11 . これにより, 回転行列 R は,

$$R = (P'_1 \ P'_2 \ P'_3) \cdot (P_1 \ P_2 \ P_3)^{-1}$$

となる . このようにして求めた R は前フレームからの姿勢の変化量なので, 前フレームにおける姿勢にこの値を加えることにより仮想物体の表示位置の補正を行うことができる .

3.4 仮想物体と実物体の隠蔽問題の解決

違和感のない拡張現実感の実現における課題の 1 つに, 仮想物体と実物体との奥行き前後関係を正しく表現する問題, いわゆるオクルージョン問題がある . 特に本論文で述べる注釈提示システムでは, オクルージョン問題を解決しなければ図 12 のように手前の建物に対する注釈と奥の建物に対する注釈が共に手前の建物の前へ表示されてしまい, ユーザが混乱する可能性が生じる . 本研究では Z-buffer 法および 3 次元地図を使用することで, オクルージョン問題を解決する .

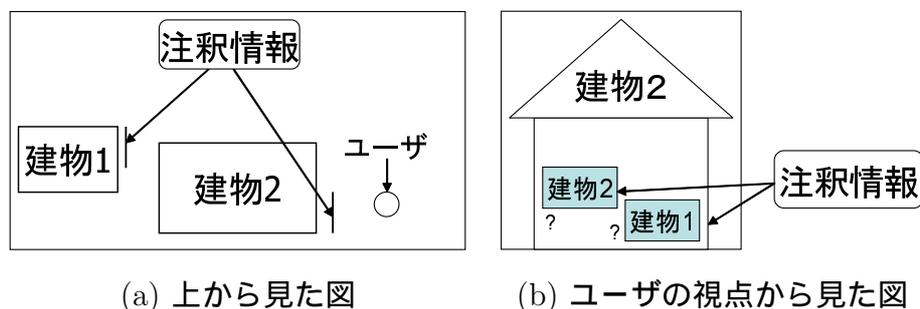


図 12 オクルージョン問題

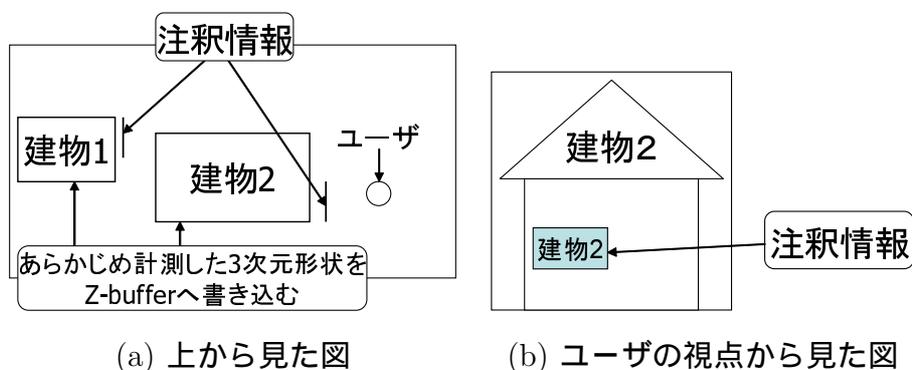


図 13 Z-buffer 法によるオクルージョン問題の解決

Z-buffer 法は、3-D グラフィックスにおける陰面消去アルゴリズムの 1 つであり、表示画面上の各画素に対し、その画素に描画される物体までの距離を記録した Z-buffer を保持している。同じ画素に新たな物体の書き込みが生じた場合は、その物体の奥行きと現在の Z-buffer の値を比較し、物体のほうが視点に近ければ書き込みを行い、Z-buffer の値を更新する。そうでなければ書き込みも更新も行わない。本研究においては、建物の 3 次元形状は多角柱で近似し、多角形の形状や大きさは地図を用いて測定した。

図 13 のように、建物のように他の注釈情報を隠す可能性のある物体の形状をあらかじめ測定しておき、仮想物体を描画する前に現実物体までの距離を Z-buffer へ書き込む。これにより、現実物体により隠蔽されている仮想物体は描画されないため現実物体による仮想物体の隠蔽が可能となる。

4. 実験

4.1 検証実験

本章では、3章で述べた各手法に対し、その有効性の検証実験を行う。4.1.1項では建物への注釈表示時におけるGPSの影響を調べ、4.1.2項では3.3節で述べた画像処理による位置ずれ補正手法の検証実験を行う。また、4.1.3項では3.4節で述べたオクルージョン問題の解決法の検証実験を行う。

4.1.1 注釈表示実験

3.2.1項で述べたGPSの計測精度が建物への注釈表示という目的に利用可能かどうかを調べるために、提案システムを用いてGPSから得られた位置情報およびジャイロセンサから得られた姿勢情報をもとに現実環境の建物に対し、ワイヤーフレームを重ね合わせる実験を行った。なお、本実験においてはジャイロセンサの誤差補正は行っていない。図14は、本学の敷地内において、2つの建物に対してワイヤーフレームを描画したものである。建物までの距離は、(a)は約20m、(b)は約120mである。結果より、(a)の場合で画像上での誤差は数十画素、(b)の場合は建物とワイヤーフレームはほぼ一致しているということが確認できる。

次に、実際に建物へ注釈を重畳表示させる実験を行った。図15は、本学情報科学研究科の正面玄関の×印に対して矢印付きの注釈情報を重畳表示した画像である。×印までの距離は、(a)は約25m、(b)は約80mである。対象までの距離が短い(a)では×印と矢印に数十画素の誤差が見られるが、(b)では誤差は数画素であり、×印と矢印はほぼ一致している。

また、図16は、本学事務局および食堂に対し注釈情報を重畳表示した画像である。建物までの距離は、(a)、(b)ともに約25mであり、注釈情報は常にユーザと正対して表示している。この結果より、屋外における建物への注釈提示という目的に対しては、数十画素の誤差は支障をきたさないと考えられる。これらの実験から、GPS衛星が7～9個捕捉できており、また注釈付けの対象物体までの距離が約25m以上あれば、ほぼ正確に位置合わせが行われており、屋外における注釈提示システムへの利用は可能であると考えられる。



(a) 距離:約 20[m]



(b) 距離:約 120[m]

図 14 建物へのワイヤーフレームの重畳表示



(a) 距離:約 25[m]



(b) 距離:約 80[m]

図 15 本学情報科学研究科正面玄関への注釈表示



(a) 事務局 (距離:約 25[m])



(b) 食堂 (距離:約 25[m])

図 16 本学事務局および食堂への注釈提示



図 17 位置ずれ補正に使用したマーカー

4.1.2 位置ずれ補正の検証

3.3 節で述べた仮想物体の位置ずれ補正手法に対し、その手法の有効性を検証する実験を行った。まず、図 17 に示すような約 7m 離れた位置にあるマーカーに対して、正方形の点を重畳表示した。その後、姿勢のみを変化させた際の点とマーカーのずれを調べた。実験結果を図 18 に示す。青色の点が位置ずれ補正を行わずにジャイロの姿勢情報のみで点を重畳表示したものであり、赤色の点が提案手法を用いて位置ずれの補正を行ったものである。なお、本実験では、ユーザが静止している状態を想定しているため、GPS を使わずにユーザの位置を固定とした。

これらの結果より、提案手法による仮想物体の表示位置のずれが軽減されていることが確認できる。なお、画像の平均更新レートは誤差補正を行わない時は 30 フレーム毎秒、誤差補正を行った時は 27 フレーム毎秒であった。提案手法では、姿勢が急激に変化するほど Moravec のインタレスト・オペレータの適用回数が多くなるために更新レートが落ちる。しかし、通常の使用においては 20 フレーム毎秒を下回ることはないと考えられる。



図 18 仮想物体の表示位置補正の実験結果

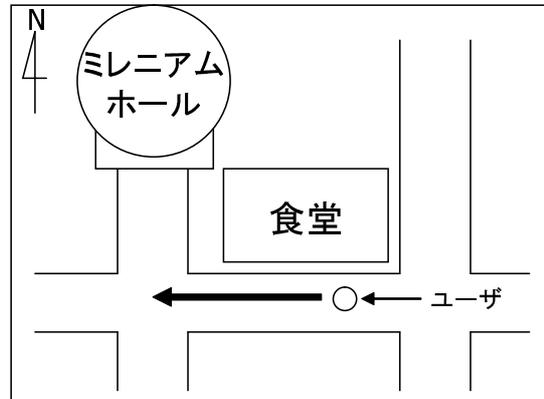


図 19 ユーザ位置と 2 つの建物の位置関係

4.1.3 仮想物体と実物体の隠蔽問題の検証

3.4 節で述べたオクルージョン問題の解決法に対し、実際の注釈情報を用いることで本手法の有効性を検証する実験を行った。ユーザと建物の位置関係は図 19 のようになっており、ユーザからはミレニアムホールは完全に遮蔽されている。図 20 は、本学の建物である食堂およびミレニアムホールに対し、オクルージョン問題を考慮せずに注釈情報を重畳表示したものであり、食堂により隠蔽されているミレニアムホールに対する注釈が表示されていることがわかる。

次に、3.4 節のオクルージョン問題の解決法を用いて図 20 の位置から図 19 の矢印に沿って徐々にミレニアムホールが見える位置に移動した様子を図 21 に示す。この結果より、ミレニアムホールが見える位置に移動するにしたがって、それに対する注釈情報が徐々に表示されているということがわかる。この実験結果より、本手法によりオクルージョン問題が解決されていることが確認できる。なお、(b)においてミレニアムホールに対する注釈情報を隠蔽しきれていないが、これは GPS の誤差および建物の形状を正確に測定できていないことが原因と考えられる。



図 20 オクルージョン問題を考慮しない場合の注釈



(a) ミレニアムホールが見えない場合



(b) 一部見えている場合



(c) 見えている場合

図 21 Z-buffer 法によるオクルージョン問題の解決

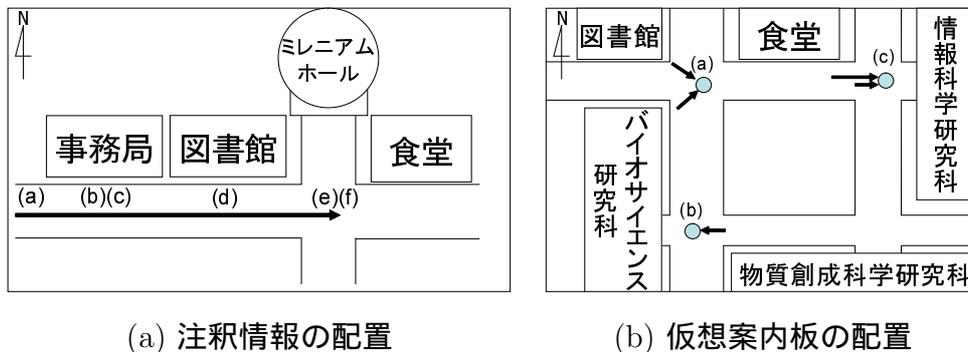
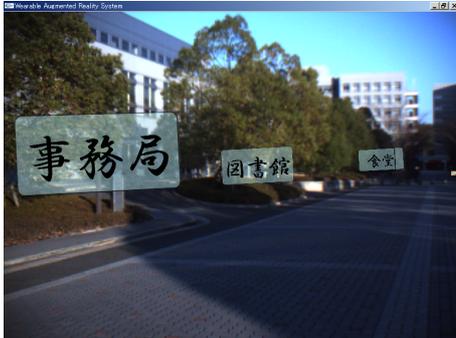


図 22 建物の配置

4.2 屋外環境での実験

最後に、提案システムを用いて実際に本学の屋外において建物に対する注釈表示および、静止時における仮想物体表示の実験を行った。図 22(a) は注釈情報の表示される建物の配置を示しており、(b) の丸印は静止時に表示される仮想案内板の位置を示している。図 22(a) の矢印に沿って事務局の前からミレニアムホールの前まで移動した際のユーザ提示画像を図 23 に示す。同図 (a), (b) より、ユーザが移動するにつれ、注釈情報が正しい位置に移動していることがわかる。また、(b), (c) および (e), (f) より、ユーザの姿勢が変化するにしたがって注釈情報も適切な場所へ移動していることがわかる。さらに (d), (e) よりミレニアムホールに対するオクルージョン問題が解決されていることがわかる。

次に、仮想案内板の表示実験の結果を図 24 に示す。案内板は、図 22(b) における 3 箇所の丸印に配置した。地点 (a) においては異なる 2 方向から同一の案内板を撮影し、地点 (b) においては同一地点から時間を 5 分おいて撮影した。また、地点 (c) においては同一の方向から距離を変えて観察した。GPS 衛星の捕捉数は、地点 (a) においては 5 個、地点 (b), (c) においては 3 ~ 4 個であった。これらの結果から、案内板の表示位置は観察地点や時刻が変化しても、案内に支障をきたすほど大きなずれはないということが確認できる。



(a) 本学入口



(b) 事務局の前



(c) 事務局の前 (姿勢変更)



(d) 図書館の前



(e) ミレニアムホールの前

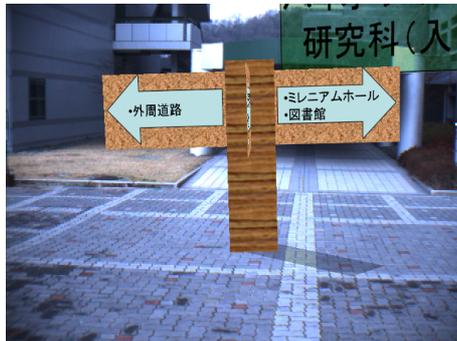


(f) ミレニアムホールの前 (姿勢変更)

図 23 提案システムを用いた屋外実験における提示画像の例



(a) 食堂・図書館前 (観察方向変更)



(b) バイオサイエンス研究科前 (観察時刻変更)



(c) 情報科学研究科前 (観察距離変更)

図 24 静止時における仮想案内板の合成提示実験

5. むすび

本論文では、位置合わせに小型のデバイスを用いた屋外で利用可能なウェアラブル型拡張現実感システムの構築を目標とし、ユーザの位置測定に小型で携帯の容易なハンドヘルド式の GPS を用いることを提案し、システム全体の装備を小型化することを試みた。また、ユーザの静止時における画像処理を用いた仮想物体の表示位置補正手法を提案し、Z-buffer 法と 3 次元地図を用いたオクルージョン問題の解決を試みた。

具体的な応用例としてビデオスルー型のウェアラブル型注釈提示システムのプロトタイプを構築し、検証・評価実験を行った。ハンドヘルド式 GPS は、衛星の捕捉数が GPS 衛星を十分な数であれば誤差は 1m 程度であり、また、衛星の捕捉数が 3 ~ 4 個でも建物への注釈表示および仮想案内板の表示という目的には利用可能であることを確認した。また、仮想物体の表示位置補正手法の検証実験では、位置補正を行わなかった場合に比べて仮想物体が適切な位置に表示されており、表示位置補正が有効であることが確認できた。オクルージョン問題の解決法においては、ある建物が別の建物で遮蔽されている場合、遮蔽されている建物に対する注釈を Z-buffer 法により隠蔽できていることを確認した。提案システムは、建物に対する注釈提示の他に、景観シミュレーションなどへの応用が考えられる。

今後の課題として、屋内のような GPS による位置測定の行えない場所でも利用可能な位置推定手法との統合、および無線 LAN などを利用した注釈情報や仮想物体の自動更新が挙げられる。これにより、屋内外の任意の場所で利用可能な拡張現実感システムの構築や注釈情報のリアルタイムな更新、ユーザ自身による注釈情報の付加、複数のユーザによる注釈情報の共有などが行え、また広い範囲において全ての仮想物体情報を計算機内に保持する必要がなくなると考えられる。

謝辞

本研究の全過程を通して、懇切なる御指導，御鞭撻を賜った視覚情報メディア講座 横矢 直和教授 に心より感謝いたします。

副指導教官として、有益な御助言を頂いた音情報処理学講座 鹿野 清宏教授 ならびに視覚情報メディア講座 山澤 一誠助教授 に厚く感謝いたします。

本研究の遂行に多大なる御助言，御鞭撻を賜った視覚情報メディア講座 神原 誠之助手 には厚く御礼申し上げます。また，物心両面において常に暖かい御助言を頂いた視覚情報メディア講座の諸氏に深く感謝いたします。日々の研究活動を支えて頂いた，視覚情報メディア講座 事務補佐員 北川 知代 女史に深く感謝いたします。最後に，日頃の生活を支え，常に励まして頂いた 西田 親子 女史に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann: “*Knowledge-based Augmented Reality*,” Commun. of the ACM, Vol. 36, No. 7, pp. 52-62, 1993.
- [2] 寺田 智裕, 神原 誠之, 横矢 直和: “拡張現実感を用いた車載型アノテーションシステムの構築”, 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, NAIST-IS-MT0051065, 2000.
- [3] M. Rosenthal, A. State, J. Lee, G. Hirota, J. Ackerman, K. Keller, E. D. Pisano, M. Jiroutek, K. Muller and H. Fuchs: “*Augmented Reality Guidance for Needle Biopsies: A Randomized, Controlled Trial in Phantoms*,” Proc. of MICCAI, pp. 240-248, 2001.
- [4] M. Kanbara, H. Fujii, H. Takemura and N. Yokoya: “*Whack Them Out! — A Whack-a-Mole Game Using Video See-through MR*,” Proc. of ISMR’01, pp. 198, 2001.
- [5] T. Ohshima, K. Sato, H. Yamamoto, and H. Tamura: “*AR² Hockey: A Case Study of Collaborative Augmented Reality*,” Proc. 14th Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 1226-1229, 1998.
- [6] 雨宮 智浩, 檜山 敦, 中茂 睦裕, 福島 智, 広田 光一, 廣瀬 通孝: “盲聾者ナビゲーションのためのウェアラブル指点字インタフェースの研究”, ヒューマンインタフェース学会報告集, vol. 4, No. 3, pp. 11-14, 2002.
- [7] 小見 正幸, 尾崎 徹, 杉本 千佳, 柴 健次, 保坂 寛, 板生 清, 苗村 潔: “ヘルスケア用ウェアラブルセンシングユニットの開発研究”, 2002 年春季マイクロメカトロニクス学術講演会講演論文集, pp. 19-20, 2002.
- [8] 河村 竜幸, 上岡 隆宏, 浮田 宗伯, 河野 恭之, 木戸出 正継: “着用指向情報パートナーにおける記憶支援システムの開発に向けて”, 人工知能学会 第3回 AI若手の集い MYCOM2002, 2002.

- [9] 日立, “WIA-100NB”, <http://www.hitachi.co.jp/wia/>, 2002.
- [10] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höllerer, and A. Webster: “*A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment*,” Proc. of ISWC, pp. 74-81, October 1997.
- [11] T. Höllerer, S. Feiner, and J. Pavlik: “*Embedding Multimedia Presentations in the Real World*,” Proc. of ISWC, pp. 79-86, 1999.
- [12] B. Thomas and W. Piekarski: “*ARQuake: The Outdoor Augmented Reality Gaming System*,” Comm. of the ACM, Vol. 45, No. 1, pp. 36-38, 2002.
- [13] 佐々木 博史: “『てのひらめにゆう』:ウェアラブルコンピュータ用入力インタフェース”, 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, NAIST-IS-MT9851045, 2000.
- [14] 小島 佳幸: “Wearable MR による手を用いた直感的操作”, 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, NAIST-IS-MT0051037, 2002.
- [15] 蔵田 武志, 興梠 正克, 加藤 丈和, 大隈 隆史, 遠藤 健: “ウェアラブルビジュアルインターフェースのための機能分散型ハンドトラッキング手法とその応用”, 第20回HI学会研究会・日本VR学会ウェアラブル/アウトドアVR研究委員会第2回研究会, pp. 31-36, 2002.
- [16] 椎尾 一郎: “RFID を利用したユーザ位置検出システム”, 情報処理学会研究会報告 00-HI-88, pp. 45-50, 2000.
- [17] 興梠 正克, 蔵田 武志, 坂上 勝彦: “ウェアラブルシステムのためのビューベースな位置方位取得手法”, 信学技報 PRMU2001-226, 2002.
- [18] 藤井 博文: “拡張現実感のためのビジョンセンサとジャイロセンサの組み合わせによる位置合わせ”, 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, NAIST-IS-MT9851093, 2000.

- [19] 天目 隆平, 神原 誠之, 横矢 直和: “拡張現実感技術を用いたウェアラブル型注釈提示システム”, 信学総大, No. A-16-46, 2002.
- [20] H. P. Moravec: “*Visual Mapping by a Robot Rover*,” Proc. of the 6th Int. Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 598-600, 1979.
- [21] 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ド位置合わせ手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 129-137, June, 2002.
- [22] 村瀬 洋, VV. Vinod: “局所色情報を用いた高速物体探索-アクティブ探索法-”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-DII, No.9, pp. 2035-2042, 1998.
- [23] R. Azuma: “*A Survey of Augmented Reality*,” Presence, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [24] 穴吹 まほろ, 佐藤 清秀, 山本 裕之, 田村 秀行: “屋外装着型複合現実感システムの開発と応用”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.277-280, 2001.
- [25] 原 健太郎, 穴吹 まほろ, 佐藤 清秀, 山本 裕之, 田村 秀行: “屋外装着型複合現実感システムの検討と試作”, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp. 407-410, 2000.
- [26] H. Tamura, H. Yamamoto, and A. Katayama: “*Role of Vision and Graphics in Building a Mixed Reality Space*,” Proc. Int. Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding for Visual Information Media, pp. 1 - 8, 2002.
- [27] 藤井 博文, 神原 博文, 岩佐 英彦, 竹村 治雄, 横矢 直和: “ジャイロセンサを用いたビジョンベースドARのためのマーカ追跡手法”, 信学技報, MVE99-59, 1999.
- [28] 土屋 淳, 辻 宏道: “GPS 測定の基礎”, 日本測量協会, 1995.

- [29] 佐藤 淳: “コンピュータビジョン—視覚の幾何学—”, コロナ社, 1999.
- [30] 小田島 太郎, 神原 誠之, 横矢 直和: “GPS を用いた屋外で利用可能なウェアラブル型拡張現実感システム”, 情報科学技術フォーラム (FIT) 一般講演論文集, Vol. 3, No. I-96, Sep. 2002.
- [31] 小田島 太郎, 神原 誠之, 横矢 直和: “拡張現実感を用いた屋外型ウェアラブル注釈情報提示システム”, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU2002-181, Jan. 2003.
- [32] J. Rekimoto and K. Nagao: “*The World through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments*,” Proc. of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 29-36, 1995.
- [33] 神原 誠之, 大隈 隆史, 竹村 治雄, 横矢 直和: “ビデオシースルー型拡張現実感のための実時間ステレオ画像合成”, 信学論 (D-II), Vol. J82-D-II, No. 10, pp. 1775-1783, 1999.
- [34] J. Park, S. You, and U. Neumann: “*Natural Feature Tracking for Extendible Robust Augmented Realities*,” Proc. of the 1st IEEE Int. Workshop on Augmented Reality, 1998.
- [35] 中村 元亨, 大隈 隆史, 竹村 治雄, 横矢 直和: “AR 環境における情報の生成・管理手法の一考察”, 情処研報, 98-HI-76, 1998.
- [36] A. State, G. Hirota, D. T. Chen, W. F. Garrett, and M. A. Livingston: “*Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking*,” Proc. SIGGRAPH’96, pp. 429-438, 1996.
- [37] 横光 澄男, 大隈 隆史, 竹村 治雄, 横矢 直和: “多視点ステレオ実画像を用いた屋外環境構造の再構成”, 信学技報, PRMU98-250, 1999.
- [38] G. J. Klinker, K. H. Ahlers, D. E. Breen, P-Y. Chevalier, C. Crampton, D. S. Greer, D. Koller, A. Kramer, E. Rose, M. Tuceryan, and R. T. Whitaker:

“Confluence of Computer Vision and Interactive Graphics for Augmented Reality,” Presence, Vol. 6, No. 4, pp. 433-451, 1997.

- [39] 田村 秀行, 大田 友一: “複合現実感”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 52, pp. 266-272, 1998.
- [40] 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和: “仮想環境と拡張環境のシームレスな切り替えによる協調作業支援手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 657-664, 1999.
- [41] 大隈 隆史, 竹村 治雄, 片山 喜章, 岩佐 英彦, 横矢 直和: “Spiral Tree: 順序つき階層構造の3次元資格化手法”, 信学論 (A), Vol. J81-A, No. 2, pp. 280-288, 1998.
- [42] 小川 亮, 馬場 博巳, 乃万 司: “実世界指向インタフェースによる案内図システムの実現”, 情報処理学会第59回全国大会後援論文集 (4), pp. 37-38, 1998.
- [43] 大隈 隆史, 竹村 治雄, 横矢 直和: “拡張現実感システムのための画像からの実時間カメラ位置姿勢推定”, 信学論 (D-II), Vol. J82-D-II, No. 10, pp. 1784-1792, 1999.
- [44] 小林 俊広, 井上 剛毅, L. Quan, 大田 友一: “3視点のアフィン画像を用いた線形的手法によるカメラ姿勢の推定”, 信学技報, PRMU98-245, 1999.
- [45] 加藤 博一, M. Billinghurst, 浅野 浩一, 橋 啓八郎: “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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 607-616, 1999.
- [46] 佐藤 清秀, 山本 裕之, 田村 秀行: “カメラと3次元センサの組み合わせによる現実空間と仮想空間の位置合わせ手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 1, pp. 295-302, 1999.
- [47] 神原 誠之, 岩佐 英彦, 竹村 治雄, 横矢 直和: “マーカー切り替え追跡による広範囲見回し可能なビデオスルー型拡張現実感”, 信学技報, PRMU99-199, 2000.