

NAIST-IS-MT9751038

修士論文

ビデオシースルー型拡張現実感のための
ステレオ画像合成

神原 誠之

1999年2月12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。

神原 誠之

指導教官： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
竹村 治雄 助教授

ビデオシースルー型拡張現実感のための ステレオ画像合成*

神原 誠之

内容梗概

現実環境と仮想環境を合成する技術は拡張現実感と呼ばれ、現実環境に情報を付加することが可能であることから新たな情報提示手法の1つとして注目されている。拡張現実環境をユーザに提示するには、幾何学的整合性問題を実時間で解決する必要がある。幾何学的整合性問題には、現実環境と仮想環境の位置ずれのない環境をユーザに提示するためにユーザの視点の位置姿勢情報を獲得する問題と、正確な奥行き前後関係を表現するために現実物体と仮想物体の位置関係を推定する問題とが含まれる。

本研究では、幾何学的整合性問題を解決した拡張現実環境の実現を目的とし、現実環境と仮想環境のステレオ画像合成手法を提案する。ここでは、現実環境と仮想環境の時間的な同期が取れるため、幾何学的整合性問題を解決すれば、画像の合成段階では理論的に両者の位置ずれが生じないという特徴を持つビデオシースルー型拡張現実環境に注目した。本手法は、まず、現実環境中に配置されたマーカを、2眼のステレオカメラで撮影した画像からカメラパラメータを推定することで現実環境と仮想環境の位置合わせを行なう。つぎに、現実物体と仮想物体の正確な前後関係を表現するため、ステレオ画像対から、現実環境の奥行き情報を動的に取得する。その際、カメラパラメータから仮想物体の投影される画像上の領域を求め、その領域に対してのみ奥行き推定を行なうことで計算量を削減する。最後に、それらの結果を用いて画像を合成し、ユーザへ提示する。また、頭部装

*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-MT9751038, 1999年2月12日.

着型ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) に取り付けられた 2 眼のステレオカメラを用いたビデオシースルー型拡張現実環境提示システムのプロトタイプを試作し、提案手法を用いた画像合成の有効性を確認した.

キーワード

拡張現実感, ステレオ, 隠蔽, ビデオシースルー, 実時間処理

Composition of Stereo Images for Video See-through Augmented Reality*

Masayuki Kanbara

Abstract

This paper describes a method of stereo image composition for video see-through augmented reality. In an augmented reality system, it is required to obtain the position and orientation of the user's viewpoint to display the composed image maintaining correct registration of real and virtual worlds and estimate the depth of real world to compose an image maintaining consistent occlusion between real and virtual objects. All the procedures must be done in real-time. This paper proposes a method for augmented reality with vision sensor and video see-through head mounted display. It can synchronize the display-timing between the virtual and the real worlds, so that an alignment error is reduced. The method calculates camera parameters from three markers in image sequences captured by a pair of stereo cameras mounted on a HMD. In addition, it estimates depth of real world from a pair of stereo images to generate a composed image maintaining consistent occlusions between real and virtual objects. A region of depth estimation is limited because a position of virtual objects is calculated using camera parameters. Finally developed is a video see-through augmented reality system which mainly consists of a pair of stereo cameras mounted on the HMD and a standard graphics workstation. The feasibility of the system has been successfully demonstrated with experiments.

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9751038, February 12, 1999.

Keywords:

Augmented reality, Stereo, Occlusion, Video See-through, Real-time processing

目次

1. まえがき	1
2. 関連研究: 拡張現実感	3
2.1 拡張現実感とその応用分野	3
2.2 拡張現実感の技術課題	6
2.2.1 幾何学的整合性問題	7
2.2.2 重畳表示手法	11
2.3 拡張現実感に関する従来研究	12
2.4 本研究の位置付けと方針	15
3. 現実環境と仮想環境のステレオ画像合成	17
3.1 ステレオ視の原理	17
3.2 カメラパラメータの推定 - 実環境と仮想環境の位置合わせ -	19
3.2.1 マーカの抽出	20
3.2.2 マーカの3次元位置の推定	22
3.2.3 モデルビュー行列の推定	22
3.3 現実環境の奥行き情報の獲得	23
3.3.1 奥行きの推定	24
3.3.2 対応点探索領域の限定による計算量の削減	26
3.4 ステレオ画像合成	26
4. ビデオシースルー型拡張現実感システムの構築	29
4.1 システム構成	29
4.2 実験	30
5. 考察	39
6. むすび	42
謝辞	43

目 次

1	複合現実感の提示方法と応用例	4
2	カメラ座標系と世界座標系の関係	8
3	現実環境と仮想環境の位置ずれ	8
4	センサ座標系と世界座標系の関係	10
5	現実環境と仮想環境の前後関係の矛盾	10
6	重畳表示方式	12
7	センサ座標系とカメラ座標系が異なる場合の各座標系の関係	14
8	センサ座標系とカメラ座標系が一致している場合の各座標系の関係	16
9	画像合成の処理の流れ	18
10	標準ステレオ撮像系	19
11	第 1 フレームの左右画像のマーカのラベル付け	20
12	マーカ追跡の処理の流れ	21
13	カメラ座標系と世界座標系の関係	24
14	奥行き推定の処理手順	25
15	奥行き推定領域の決定	27
16	画像合成処理の手順	28
17	ビデオシースルー型 HMD	30
18	システム構成	31
19	合成される仮想物体	32
20	実験に利用した現実環境の例	32
21	実験の様子	33
22	マーカの追跡結果 1	34
23	マーカの追跡結果 2	35
24	現実環境の奥行き推定	36
25	合成ステレオ画像 1	37
26	合成ステレオ画像 2	38

表 目 次

1	実験環境	29
---	----------------	----

1. まえがき

近年，計算機を用いて生成された仮想環境を，現実環境に合成提示することで現実環境に情報を付加することが可能な技術として拡張現実感 (AR: Augmented Reality) が注目されている [1]. AR が注目されている背景には以下のような理由が考えられる. 従来研究されてきた仮想現実感 (VR: Virtual Reality) は，現実環境ではできない体験を疑似的に体験することを可能にした. しかし，コンピュータグラフィックスのみから構築される VR 環境の写実性や臨場感には限界がある. 特に，作業や景観などのシミュレーションを行なう場合，仮想環境の写実性の低さは大きな問題となる. 写実性を高めるためには，現実環境を正確に再現する必要があるため，計算機に現実環境の情報を入力するという複雑な作業が伴う. そこで，現実環境はそのままユーザに提示し，そこに必要な仮想環境を合成することで，臨場感の高い合成環境をユーザに提示する AR への要求が高まってきたと考えられる.

AR 環境を構築する際には，現実環境と仮想環境との間の幾つかの整合性問題を解決する必要がある [2]. 特に，幾何学的整合性問題は，ユーザに違和感を与える最も大きな要因であると考えられる.

幾何学的整合性問題には，仮想環境と現実環境の位置ずれのない合成画像を提示するためのユーザの視点と仮想物体の位置関係を求める問題と，現実環境と仮想環境の前後関係を正確に表現するための現実環境と仮想物体の位置関係を求める問題が含まれる. 前者は，現実環境に対するユーザの視点位置姿勢を求める問題と捉えることができる. この問題を解決する手法としては 3 次元位置姿勢が計測可能な 3 次元センサなどを用いて求める手法が挙げられる. 後者は，AR 環境において，現実物体の 3 次元形状を獲得する問題と捉えることができる. 現実環境が静的な環境であれば，あらかじめ現実環境の 3 次元情報を記憶しておくことで解決できる. しかし，AR 環境で一般に扱われるような動的な環境に対応するには，動的に変化する現実環境の 3 次元形状を実時間で取得する必要がある. 更に，幾何学的整合性問題を解決しても，仮想環境と現実環境を重畳表示する際，合成方式により正確に表現できない場合がある. そのため，幾何学的整合性問題を解決する手法と，現実環境と仮想物体の合成方式の組合せについて検討する必

要がある。

本論文では、幾何学的整合性問題を解決した AR 環境の実現を目的とし、そのための、現実環境と仮想環境のステレオ画像合成手法を提案する。ここでは、現実環境と仮想環境の時間的な同期が取れるため、同期ずれによる両者の位置ずれが生じないという特徴を持つビジョンセンサとビデオシースルーを組み合わせた AR 環境に注目した。提案手法では、幾何学的整合性を解決するため以下の処理を行なう。まず、特徴点としてマーカを現実環境中に配置し、HMD に取り付けられた 2 眼のステレオカメラによって現実環境を撮影する。その画像よりステレオ視の原理に基いて推定したマーカの 3 次元位置からカメラパラメータを推定する。次に、現実物体と仮想物体の正確な前後関係を表現するため、現実環境を撮影したステレオ画像対から、現実環境の 3 次元形状を動的に取得する。その際、奥行き推定問題を拡張現実感に特化することで計算量の削減を行なう。また、提案した画像合成手法を用いたビデオシースルー型 AR システムを作成し、提案手法の有効性を確認するための実験を行なった。

以降、2 章では拡張現実感とその応用分野、技術課題、従来研究について述べ、本研究の位置付けについて説明する。3 章では現実環境と仮想環境のステレオ画像合成手法について説明する。4 章では本手法を用いたビデオシースルー型拡張現実感システムの構築と実験結果について述べ、5 章では試作システムに関する現状での問題点について考察する。

2. 関連研究：拡張現実感

2.1 拡張現実感とその応用分野

ARは、計算機により生成された仮想環境を現実環境に合成提示する技術であり、現実環境に情報を付加した環境をユーザに提示することが可能である。Milgramらは、ARと計算機内に構築された仮想環境内に現実環境の情報を取り込むことで仮想環境の写実性を強化する Augmented Virtualty (AV) を包含する複合現実感 (MR: Mixed Reality) の概念を提唱しており [3]、両者に明確な境界を設けることはできないとしている。そのためここでは、MRを以下の項目で分類する。

- ハーフミラーなどを用いて映り込む仮想環境と透過して見える現実環境を合成する (光学合成) か、カメラによって撮影された現実環境の映像上に仮想環境画像を合成する (ビデオ合成) か。
- 提示される現実環境が、ユーザが存在する環境 (現場型) か、遠隔地であるか (遠隔型)。
- 提示される現実環境が、現在の環境 (実時間方式) か、過去に蓄積されたもの (蓄積型) か。

これらの項目で MR を分類した場合、図 1 のように 4 つに分類される [4]。それぞれについて、以下で説明する。

A. 光学シースルー

ハーフミラーなどを用いて映り込む仮想環境と透過して見える現実環境を同時にユーザに提示する方法である。光学合成を採用しているため、現場型の実時間方式になる。

B. ビデオシースルー

ユーザの視線方向と光軸を一致させたカメラなどで撮影した現実環境の映像上などに、仮想環境画像を合成してユーザに提示する方法である。

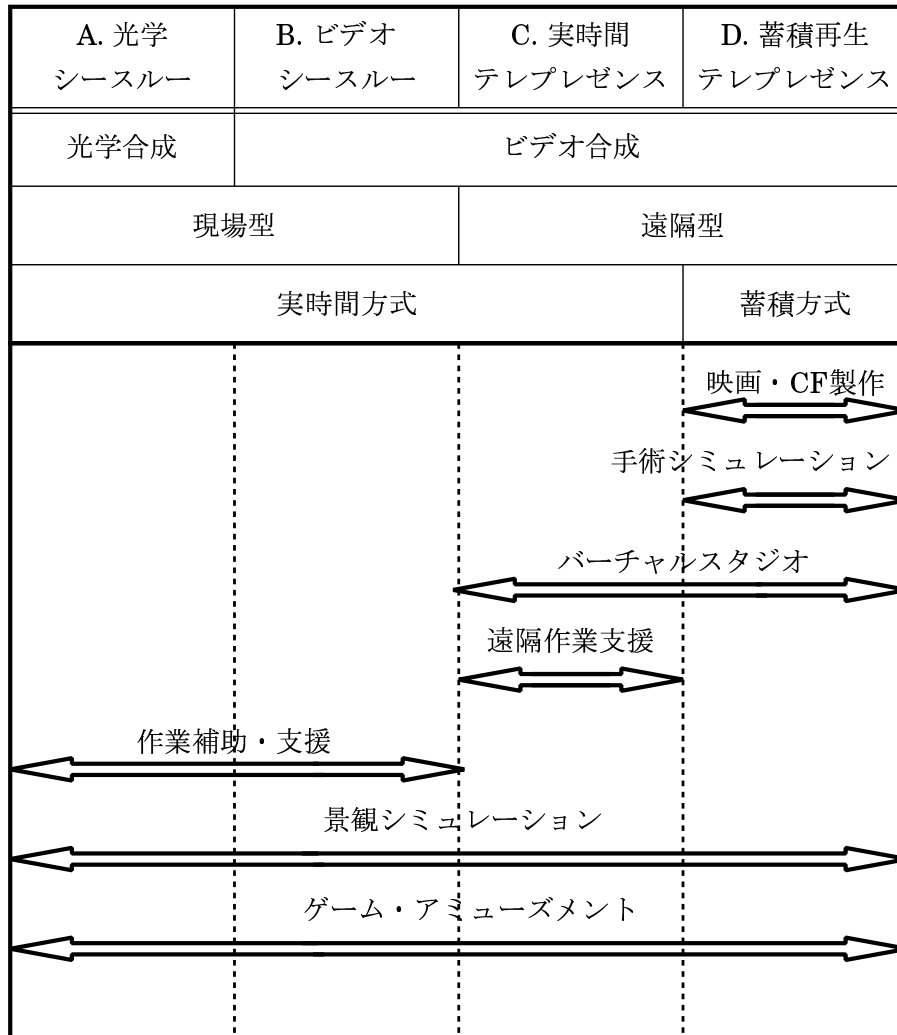


図 1 複合現実感の提示方法と応用例

C. 実時間テレプレゼンス

ビデオシースルーの概念を拡張し、ユーザのいる場所ではなく、遠隔地の光景を現実環境として用いる。遠隔地に配置した移動カメラをユーザの視点の動きに合わせて制御することで得られる映像や、全方位センサを用いて視線方向に応じて切り出した映像に仮想物体を合成してユーザに提示す

る方法などがある。

D. 蓄積再生テレプレゼンス

C を更に拡張し，現実世界を多数のカメラや，全方位センサなどを移動させてあらかじめ撮影した画像をデータベースとして蓄積しておく．このデータベースから，利用時のユーザの視点に応じた任意の光景を生成した画像に仮想物体を合成する方法である．

近年，AR 分野で研究されているものの多くは A と B に分類され，D に分類されるものの多くは AV に属する．AR の分野で A ～ C の実時間方式に分類されるものでは，ユーザは，現実環境に対してインタラクションが可能であるが，それに応じた現実環境の認識と AR 環境への反映，すなわち，AR 環境の構築を実時間で行なわなければならない．逆に，D のように現実環境が蓄積方式である場合，現実環境に対してのインタラクションは不可能であるが，AR 環境の構築には，時間の制約がないため，臨場感の高い AR 環境を作成可能である．

以下に，図 1 の応用例について概観する．

【映画・CF 製作】

現実環境を撮影された映像に仮想物体を合成することで実写では撮影できない映像を作成する．非常に臨場感の高い映像が要求され，蓄積された画像を用いるため膨大な時間をかけて人手によって合成される場合が多い．

【手術シミュレーション】 [5]

CT (Computed Tomography) などから得られた臓器の 3 次元画像を，手術中のビデオに合成し HMD などに表示することで，患部の 3 次元位置を確認しながら手術のトレーニングを行なうなど，VR 環境でのシミュレーションより映像の写実性が高いため，実用性が高い．

【バーチャルスタジオ】 [6]

電子セットと呼ばれ，テレビ番組の作成において従来背景として用いた大道具の代わりに仮想画像や現実画像を用いるものである．実際の撮影現場

と違い、大道具作成などが不要になり、作成費の削減が可能であるという利点がある。

【遠隔作業支援】

実際には人間が行けない空間にロボットなどを送り、そこから送られてくる画像に、作業手順などの情報を重畳表示することで作業支援を行なう。

【作業補助・支援】 [7, 8, 9]

現実環境で作業を行なう際、HMD などを通して現実環境に作業指示や情報を提示することで、作業の効率化を図る。

【景観シミュレーション】 [10, 11]

現実環境に、建設予定の建築物を合成することで、建築する前に建築後の景観を評価するのに使用される。

【ゲーム・アミューズメント】

現実環境に、ゲームのキャラクタなどを合成した映像を、HMD などを用いてユーザに提示することでアトラクションに応用可能である。

2.2 拡張現実感の技術課題

臨場感の高い AR 環境を構築するためには、現実環境と仮想環境との間における幾つかの整合性問題を解決する必要がある [2, 4]。主なものを以下に挙げる。

幾何学的整合性問題

現実環境、仮想環境、ユーザの視点の 3 次元空間における位置姿勢の関係を推定する問題である。

時間的整合性問題

ユーザの移動、視線の変化、実環境の変化などによって生じる実世界に対する仮想物体の追従の時間遅れの問題である。

光学的整合性問題

現実環境と仮想環境の画質のずれや陰影の問題である。

上記の整合性問題の中で、幾何学的整合性問題は、他の整合性問題にも影響を与える問題であり、ユーザに違和感を与える最も大きな要因である。そこで、本論文では、幾何学的整合性問題について検討を行なう。更に、幾何学的整合性問題を解決しても、仮想環境と現実環境を重畳表示する際、合成方式により幾何学的な整合性が正確に表現できない場合がある。そのため、幾何学的整合性問題を解決する手法と、現実環境と仮想物体の合成手法の組合せについて検討する必要がある。以降、2.2.1 節では、幾何学的整合性問題について、2.2.2 節では、現実環境と仮想環境との合成手法について説明する。

2.2.1 幾何学的整合性問題

幾何学的整合性問題には、仮想環境と現実環境の位置ずれのない合成画像を提示するためにユーザの視点と仮想物体の位置関係を求める問題と、現実物体と仮想物体の前後関係を正確に表現するために現実物体と仮想物体の位置関係を求める問題が含まれる。これらの問題を整理するために、図 2 に示すように、基準となる世界座標系を設定して考える。この時、現実環境における世界座標系の位置姿勢と、世界座標系と仮想物体の 3 次元空間における位置関係 (図 2 B) は、ユーザが設定するため既知である。以下それぞれの問題について説明する。

【ユーザの視点と仮想物体の位置関係を求める問題】

この問題は、仮想物体がユーザにどのように見えるかを決定するものであり、図 2 に示したユーザの視点の位置姿勢を示すカメラ座標系における仮想物体の位置姿勢 (図 2 C) を求める問題である。図 3 に示すように、ユーザの視点と仮想物体の位置関係が正確に推定できなければ提示画像に位置ずれが生じ、設定通りに合成されない。この問題は、世界座標系と仮想物体の関係 (図 2 B) が既知であるため、世界座標系とカメラ座標系の 3 次元空間における位置関係 (図 2 A) を求める問題となる。この問題を解決する

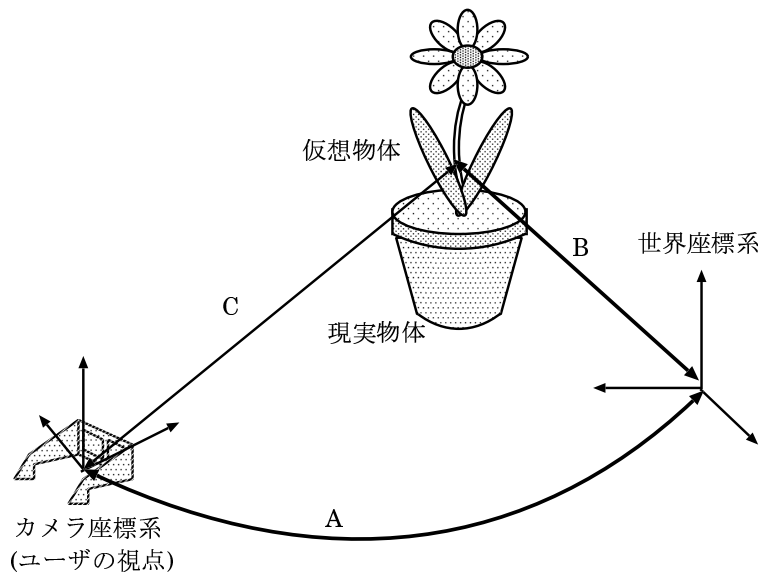


図 2 カメラ座標系と世界座標系の関係

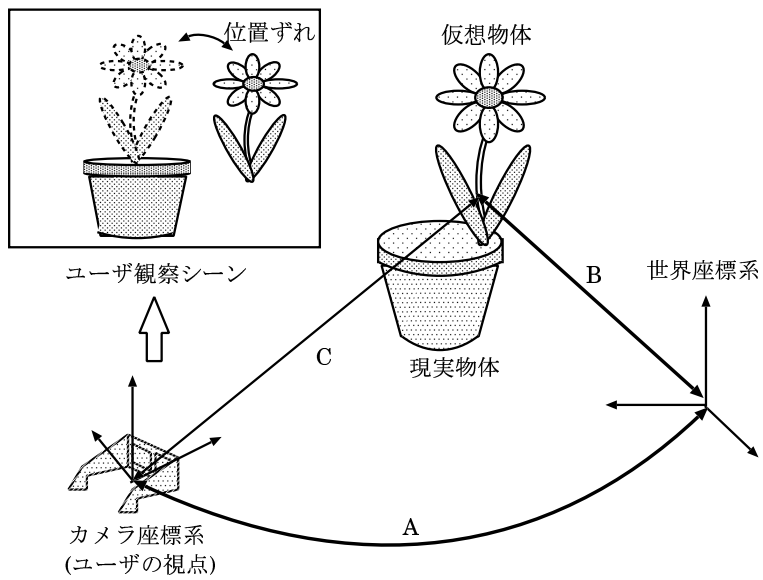


図 3 現実環境と仮想環境の位置ずれ

ためには、世界座標系に対する視点位置姿勢を3次元センサなどを用いて求める手法が挙げられる。現実環境におけるユーザの視点情報を獲得する手法として、以下の2つが挙げられる。

- 磁気式，超音波式，多関節アーム型など，特殊な装置を用いて視点情報を獲得する手法 [8]
- カメラによって撮影された画像から視点情報を推定する手法 [12].

前者は、3次元位置姿勢を比較的容易に獲得することができるが、特殊な装置が必要、計測範囲が限られてしまうなどの問題点がある。一方、後者は撮影された画像から視点情報を推定するため測定範囲は必ずしも限定されない。カメラと視点の位置関係が既知であれば、撮影された画像からカメラパラメータを求めることで視点情報を獲得できる。したがって、コンピュータビジョンの分野で研究されてきた手法を利用して視点情報を求めることができる [13].

【現実物体と仮想物体の位置関係を求める問題】

この問題は、仮想物体と現実物体の奥行き関係 (図 4 A) を求める問題である。これが解決されなければ、図 5 で示すように、実際は視点からの距離が仮想物体よりも近い現実物体上に仮想物体が上書されることで、仮想物体と現実物体の前後関係が矛盾する。世界座標系と仮想物体の関係 (図 4 B) が既知であるため、この問題は、世界座標系と現実物体の3次元空間における位置関係 (図 4 C) を求める問題となる。

現実環境が静的な環境であれば、あらかじめ世界座標系における現実環境の3次元情報を計測し、それを記憶しておく、つまり図 4 C をユーザが設定しておくことで解決できる。しかし、AR で扱われるような動的な環境に対応するには、世界座標系と現実物体の位置関係 (図 4 C) を連続して取得する必要がある。この問題を解決する手法には、世界座標系における位置関係 (図 4 D) が既知な実時間3次元計測装置から奥行きを計測し、3次元計測装置の位置姿勢を表すセンサ座標系における現実物体の位置 (図 4 E

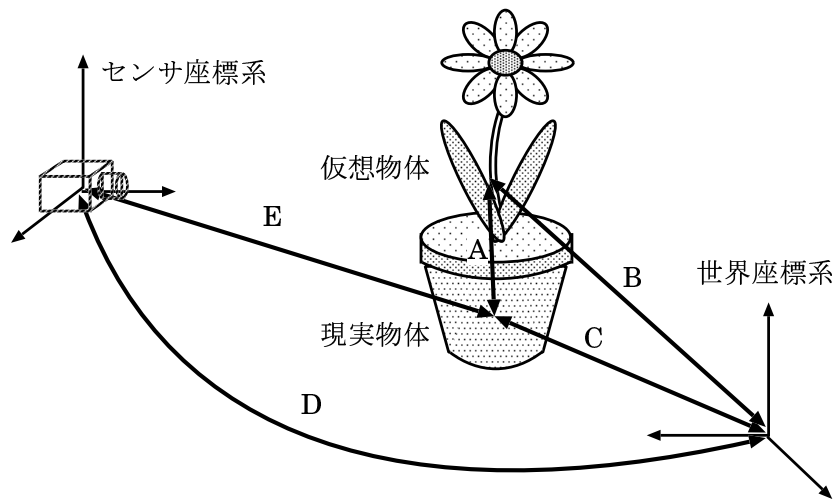


図 4 センサ座標系と世界座標系の関係

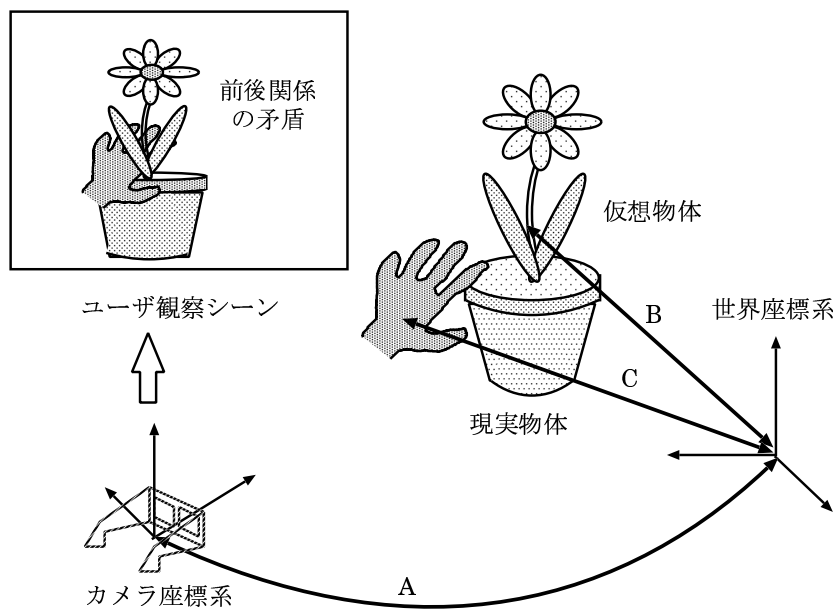


図 5 現実環境と仮想環境の前後関係の矛盾

)を求めるものがある。そうすることで、間接的に世界座標系と現実物体の3次元的位置関係(図4C)を求めることができる。

2.2.2 重畳表示手法

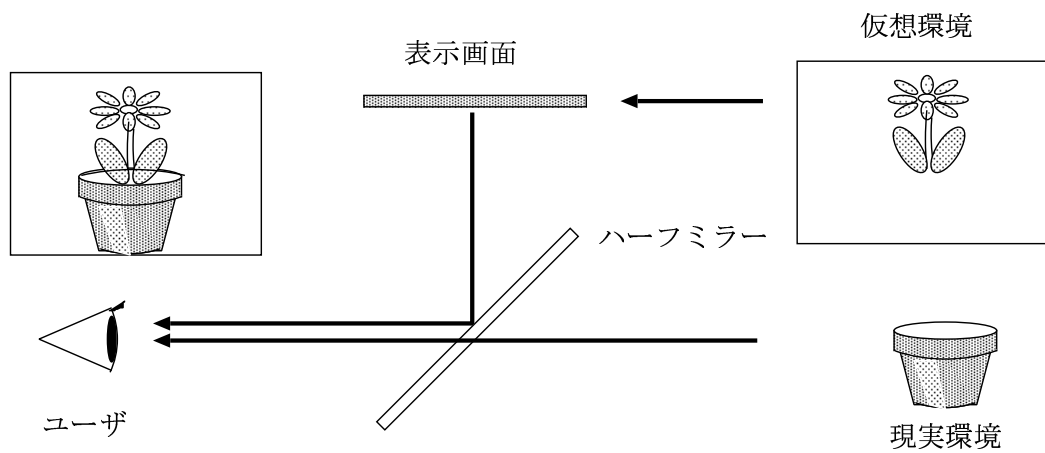
現実環境と仮想物体を合成する手法には以下の2つが挙げられる。

【光学合成】

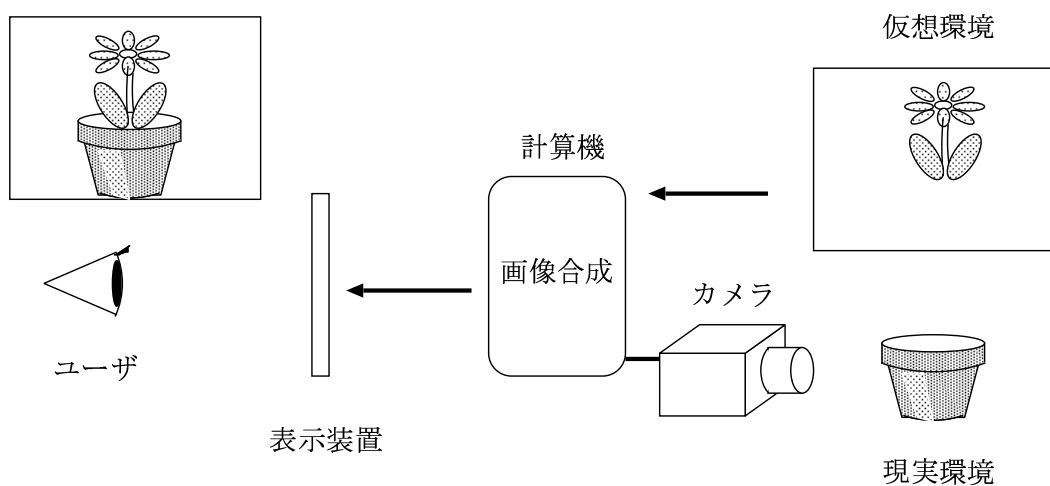
図6(a)に示すように、ハーフミラーなどを用いて、映り込む仮想環境と透過して見える現実環境を同時にユーザに提示する手法である。現実環境が時間遅れなく提示できる反面、仮想環境を提示する際の計算時間などは、現実環境と仮想環境の同期ずれとなり、これが位置ずれとしてユーザに知覚される。ハーフミラーを用いているため現実環境が若干暗く見え、仮想物体は半透明に表示される。そのため、現実物体と仮想物体の前後関係を隠蔽により表現するのは一般的に困難である。また、仮想物体を置くことによる光学的効果(実物体への影など)も表現できない。

【ビデオ合成】

図6(b)に示すように、カメラなどによって撮影された現実環境の画像上に、仮想物体を描画する手法である。2.1節で述べたB.ビデオシースルー方式の場合、ユーザの視線方向とカメラの光軸方向を一致させて撮影した現実環境の映像上に、仮想環境を合成して提示することで実現される。現実環境と仮想環境の同期をとって提示できるため、同期ずれによる両者の位置ずれは生じない。しかし、提示される環境全体が、仮想環境を提示する際の計算時間などによって遅れて提示される[14]。また、現実物体と仮想物体の前後関係が分かれば、お互いを隠蔽でき、現実物体との前後関係を表現できる。



(a) 光学式シースルー



(b) ビデオシースルー

図 6 重畳表示方式

2.3 拡張現実感に関する従来研究

本節では、幾何学的整合性問題の解決手法の観点から従来手法を概観する。まず、ユーザの視点位置の推定手法について、次に、現実環境の3次元形状の獲得手法について述べる。

ユーザの視点位置情報獲得には、VR で良く使用される磁気式 3 次元センサを用いた手法が多い。また、磁気式 3 次元センサは、磁気の歪みによって多少の計測誤差があるものの、3 次元位置の推定がロバストであるため現実環境の作業補助などに応用されている。その例として、プリンタのメンテナンスの手順を現実環境に重畳表示することで、作業補助を行なうものなどがある [8]。

ビジョンセンサを用いて視点位置を推定する手法は、ビデオ合成で用いる現実環境を撮影した画像から視点位置を推定することで現実環境と仮想環境の同期ずれが原因となる位置ずれをなくすことができるため、ビデオ合成と組み合わせることが多い。従来、現実環境中の特徴点を、単眼のカメラで撮影した画像から、カメラパラメータを推定する手法が提案されている [15, 16, 17, 18]。その一つには、現実環境中の特徴点として同一平面上の既知の 4 つのマーカをカメラにより撮影した画像から実時間でカメラパラメータを求めることで拡張現実環境を提示する手法がある [18]。しかし、単眼のカメラを用いるとユーザの両眼に同じ画像を提示することになり、現実環境の奥行き感を提示することができない点や、現実物体と仮想物体の前後関係に矛盾のある合成画像になるという点が問題になっていた。そこで、現実環境を撮影するカメラに 2 眼のステレオカメラを用いる手法がある。その手法には、ステレオカメラと他の 3 次元センサと組み合わせることで精度を上げるものも提案されている [19, 20]。2 眼のステレオカメラをビジョンセンサとして用いることで、現実環境中に配置されたマーカ 3 点を撮影した画像からカメラパラメータを推定し現実環境と仮想物体を合成することができる [21]。

次に現実物体と仮想物体の正確な前後関係を表現した AR の従来手法を以下に挙げる。現実環境が静的であれば、あらかじめ現実環境の 3 次元形状を計測し、記憶しておくことで解決することができる [19]。動的な現実環境に対応するには、実時間 3 次元センサを用いて 3 次元形状を連続して獲得する必要がある。2.1 節で述べたように、3 次元計測センサを用いて推定した奥行きを、現実環境の 3 次元形状とする手法がある。それらの手法は、3 次元形状の獲得に、コンピュータービジョンの分野において多くの研究がなされている実時間奥行き推定の手法が利用されている。それらの多くは、多眼 (3 眼以上) ステレオや特殊な処理装置が用いられている [22, 23]。これは、図 7 のように、カメラ座標系 (ユーザの視点) と

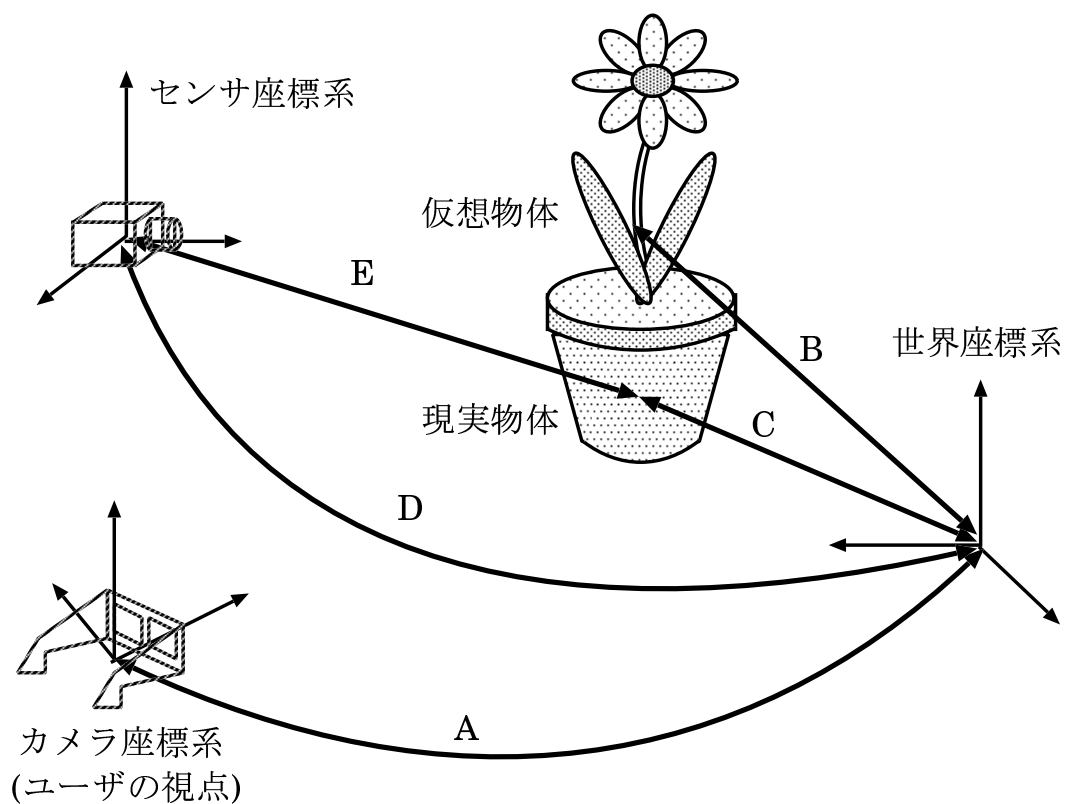


図 7 センサ座標系とカメラ座標系が異なる場合の各座標系の関係

現実環境の 3 次元形状を推定するセンサ座標系が異なる。一方、図 8 のように、現実環境の 3 次元形状を獲得するセンサとユーザの視点を一致させている手法もある [24]。この手法では AR 環境に提示するための現実環境を撮影したステレオ画像対を現実環境の 3 次元形状の獲得に利用する。しかし、ステレオ画像対から奥行きを推定すると、処理速度や解像度が十分に得られないため、実時間奥行き推定は困難とされている [24]。以上のように、2 眼ステレオカメラを現実環境の 3 次元計測に用いた AR では、いかに奥行き推定の計算量を削減し、実時間処理を実現するかが問題となる。

2.4 本研究の位置付けと方針

本研究は、幾何学的整合性問題を解決した AR 環境の実現を目的としている。前述の背景から、幾何学的整合性問題を解決した AR 環境をユーザに提示するために、現実環境を撮影した画像からユーザの視点位置を求めるビジョンセンサと、各環境の隠蔽関係を表現可能なビデオ合成の組合せを用いる。

提案手法では、ビデオ合成に使用する現実環境として、2 眼のステレオカメラから撮影された画像を使用し、仮想物体と合成した画像を左右のそれぞれの目に提示する。ビジョンセンサは、このステレオ画像対からユーザの視点の位置計測を行なう。動的な現実環境における現実物体と仮想物体の位置関係を求めるには、実時間で現実環境の 3 次元形状を獲得する必要がある。2.3 節で述べたように、図 7 のようにユーザの視点と異なった位置に、現実環境を計測するセンサを設置した場合、3 次元計測センサは、現実物体の表面形状 (2.5 次元) の計測しか行なえないため、センサから隠蔽されている領域の 3 次元形状は推定不可能である。そのため、センサの位置と異なるユーザの視点からの視野には、現実環境の 3 次元形状の計測されていない領域が存在する可能性がある。これを解決するためには、センサの位置とユーザの視点位置を一致させることが考えられる。そうすることで、センサから計測不能な領域は、ユーザの視点から見えない領域と一致するため、この領域の奥行きを求める必要がなくなる。しかし、ユーザの視点とセンサの位置を一致させるためには、視点の動きに応じてセンサを移動させなければならないため、センサを小型化する必要がある。そこで、視点位置計測に用いた 2 眼のステレオカメラを、3 次元計測センサとして用いる。よって、各座標系の関係は図 8 のようになる。センサ座標系とカメラ座標系を一致させることで、世界座標系におけるユーザ位置姿勢 (図 8 A) とカメラ座標系における現実環境の奥行き (図 8 D) をステレオカメラにより撮影された画像対から推定する。ここで問題になるのは、2 眼のステレオ画像対から現実環境の奥行きを実時間で推定しなければならないことである。2.3 節でも述べた通り、2 眼のステレオ画像対から実時間奥行き推定は困難である。そこで、提案手法では、ユーザの視点情報を先に求め、あらかじめカメラ座標系における仮想物体の位置を計算し、奥行き推定を仮想物体が画像上に投影される領域に限定し、計算量の削減を行なう。

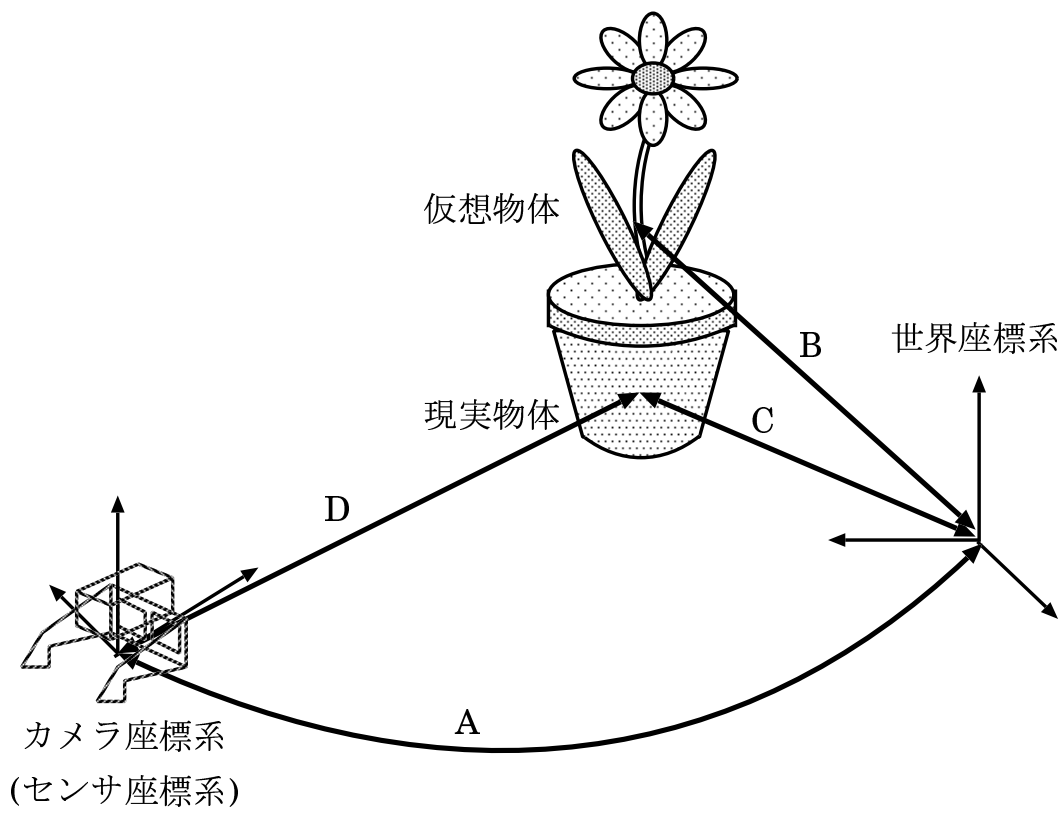


図 8 センサ座標系とカメラ座標系が一致している場合の各座標系の関係

3. 現実環境と仮想環境のステレオ画像合成

本章では、2章で述べた2つの幾何学的整合性問題を解決した現実環境と仮想環境のステレオ画像合成手法について述べる。画像合成の処理手順を図9に示す。まず、入力されたステレオ画像対から視点位置情報を推定(図9 A)し、次に、現実物体と仮想物体の前後関係を正確に表現するために現実環境の奥行き情報を獲得する(図9 B)。最後に、それらの結果を用いて画像合成を行なう(図9 C)。

以降、まず3.1節で本研究で利用するステレオ視の原理について述べた後、3.2節ではカメラパラメータの推定手法、3.3節ではカメラパラメータを用いた現実環境の実時間奥行き推定手法、3.4節で実画像とCGの合成手法について述べる。

3.1 ステレオ視の原理

ステレオ視とは、カメラなどの視覚センサを異なる位置に配置し、それぞれから観測された画像から奥行き情報を獲得する手法であり三角測量法に基づいている。人間の目も同様の原理により、現実環境の奥行き情報や3次元構造の把握を行なっている。このため、計算機による画像からの奥行き情報の獲得手法として、古くから注目され多くの研究が行なわれてきた[25]。

ステレオ視のもっとも標準的な構成は図10に示されるように、まったく同じカメラ2台が、光軸が平行で、各画像面が同一平面上にのるように配置される場合である。原点を2つのカメラのレンズ中心の中点、 X, Z 軸をそれぞれ基線、光軸方向に一致させたカメラ座標系の点 $P(X, Y, Z)$ が、各画像の中心が原点である左右画像上のそれぞれ $P_l(x_l, y_l), P_r(x_r, y_r)$ に投影されたとすると以下の関係式が成立する。

$$X = \frac{B(x_l + x_r)}{2(x_l - x_r)} \quad (1)$$

$$Y = \frac{B(y_l + y_r)}{2(x_l - x_r)} \quad (2)$$

$$Z = \frac{fB}{x_l - x_r} \quad (3)$$

但し、 f は焦点距離、 B は基線長、 $x_l - x_r$ は視差である。したがって、 f, B が

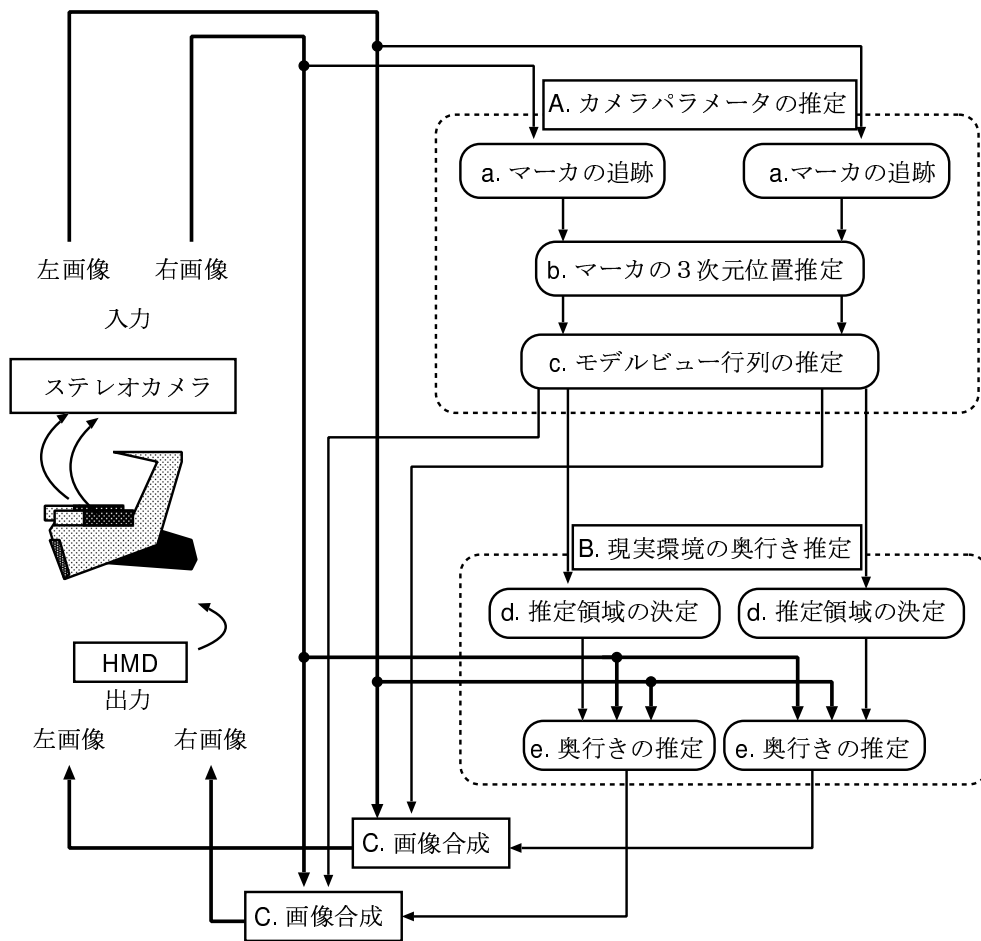


図 9 画像合成の処理の流れ

既知のもとでは、マーカの左右の画像上の座標から、3次元位置 (X, Y, Z) が計算される。

さらに、図 10 のようなカメラ配置では、常に $y_l = y_r$ が成立する。つまり、左右の投影点の y 座標は常に等しくなるため、対応点を見つける際、同一スキャンライン上を探索すればよいことになる。一般的なカメラ配置においても、3次元空間中の点 P の一方の画像上への投影点の対応点は、その点の3次元空間中の位置に関わらず、両カメラのレンズ中心と3次元空間の点 P が構成する平面と画像面の交線(エピポーラ線)上に存在する。これはエピポーラ拘束と呼ばれ、対応点

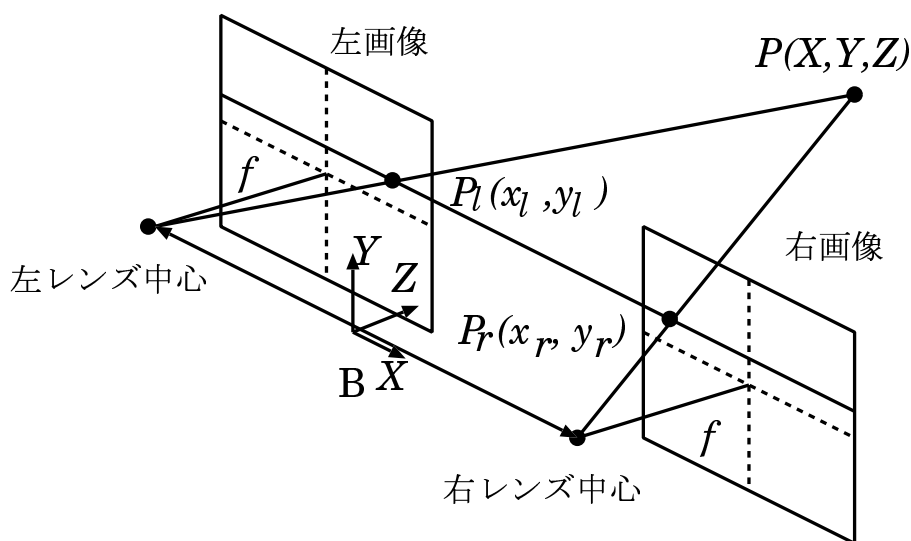


図 10 標準ステレオ撮像系

探索の際，2次元の探索から1次元の探索に簡単化することができるため，ステレオ視にとって，重要な意味を持つ．本論文では，ステレオカメラにより撮影した画像をユーザの両眼へ提示するため，人間の目のモデルと同様に図 10に示す標準ステレオ撮像系を用いる．

3.2 カメラパラメータの推定 – 実環境と仮想環境の位置合わせ –

カメラパラメータを推定するため以下の3段階の処理が行われる．本論文では，簡単化のために特徴点として青色のマーカを用いる．

1. 入力された2枚の画像のそれぞれから青色領域を抽出しマーカの画像上の座標と左右画像間の対応関係を求める．
2. マーカの画像上の座標からステレオ視によりマーカの3次元座標を推定する．
3. マーカの3次元座標から，現実環境と仮想環境の位置関係を表すモデルビュー行列を計算する．

以降では，それぞれの段階について詳細を順に述べる．

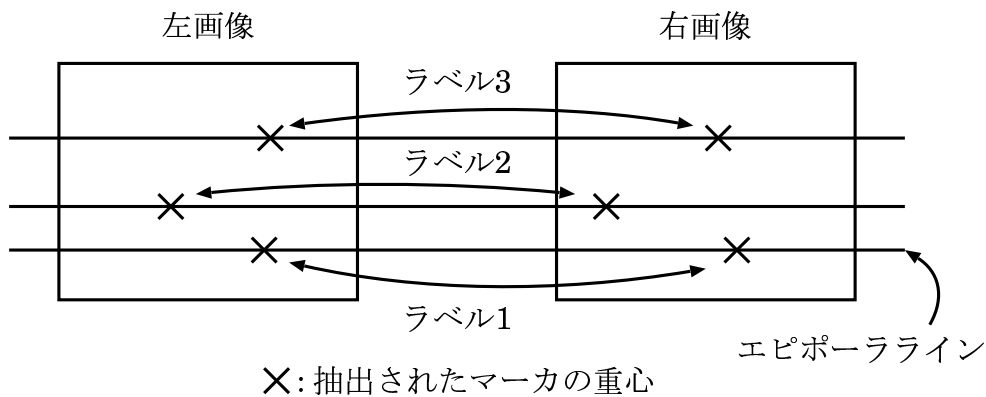


図 11 第 1 フレームの左右画像のマーカのラベル付け

3.2.1 マーカの抽出

毎フレーム全画面について青色領域を抽出すると処理に時間がかかる．そこで、第 1 フレームにおいてのみ全画面について青色領域抽出を行い、第 2 フレーム以降は前フレームの情報をもとに青色領域を追跡する．抽出された領域を用いてマーカの画像上での座標を得る．

第 1 フレームでは以下の手順でマーカを抽出する．

1. 入力された 2 枚の画像に対して画像全体を走査して青色の領域を抽出する．
2. ノイズを除去し、それぞれの領域の重心をマーカの画像上の座標とする．
3. 左右の画像にそれぞれ 3 つずつのマーカの座標が求めれば、図 11 が示すように、エピポーラ拘束により左右画像のマーカのそれぞれ対応をとりラベル付け (ラベル 1,2,3) を行う．標準ステレオ撮像系を用いているので、対応するマーカは同一スキャンライン上に存在する．

フレームの更新レートがビデオレートに近い場合、フレーム間でのマーカの画像上の座標の変化は少ないと仮定できる．したがって、第 2 フレーム以降では以下の手順でマーカを抽出する．

1. 前フレームにおけるマーカの画像上の座標をもとに探索窓を決定する．

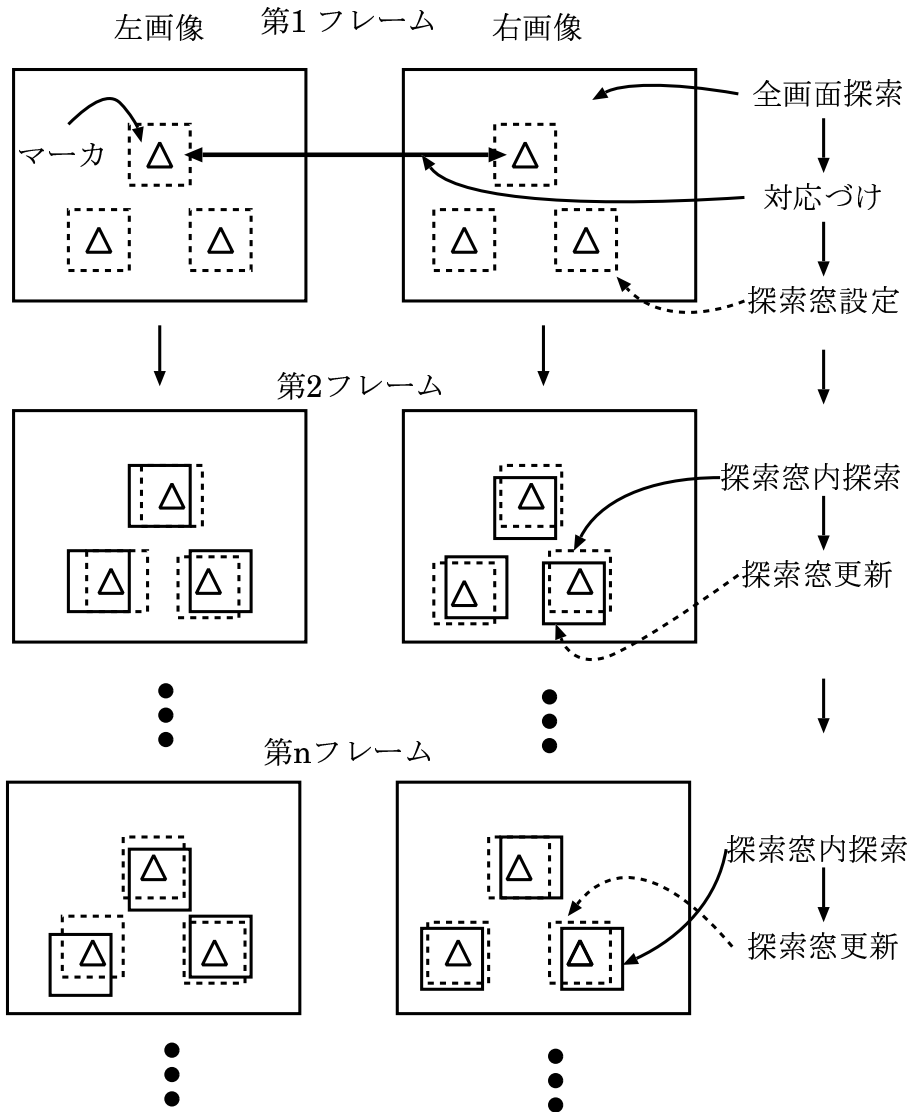


図 12 マーカ追跡の処理の流れ

2. それぞれの探索窓に対して青色領域の重心を求め、それをマーカの画像上の座標とする。左右画像のマーカの対応は第1フレームで求められたものを使用する。
- 3 組のマーカの対応が取れないときや青色領域が探索窓内から抽出できないとき

は，再度第 1 フレームと同様の処理からやり直す．以上の処理の流れを図 12 に示す．

3.2.2 マーカの 3 次元位置の推定

前節で求めたマーカの左右の画像上の座標から各マーカの 3 次元位置を推定する．カメラの配置を図 10 に示す標準ステレオ撮像系を用いているため，カメラ座標系は，原点を左右のレンズ中心の中点， X, Z 軸をそれぞれ基線，カメラの光軸方向で定義される座標系となる．3.1 節で述べたステレオ視の原理から，マーカの 3 次元位置 $P(X, Y, Z)$ は，式 (1) ~ (3) で計算することができる．

3.2.3 モデルビュー行列の推定

仮想物体を画像に合成するためには，仮想物体の位置姿勢を定義している世界座標系からカメラ座標系への変換行列 (モデルビュー行列 \mathbf{M}) が必要になる．モデルビュー行列 \mathbf{M} はある点の世界座標系での座標値 \mathbf{w} ，カメラ座標系での座標値を \mathbf{c} とするとき，

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}\mathbf{w}$$

と変換する行列である．但し， \mathbf{w} と \mathbf{c} は，同次座標系の 4×1 ベクトル， \mathbf{M} は， 4×4 行列である．また， \mathbf{M} は回転成分 \mathbf{R} と平行移動成分 \mathbf{T} を用いて

$$\mathbf{M} = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & \\ & \mathbf{R} & & \mathbf{T} \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

と表せる．

ここで計算を簡略化するために，図 13 に示すように世界座標系を以下のように定義する．

- 原点はラベル 1 のマーカ ($\mathbf{m1}$) の 3 次元位置．
- x 軸はラベル 1 ($\mathbf{m1}$) とラベル 2 ($\mathbf{m2}$) のマーカを結ぶ直線．

- $x - y$ 平面は 3 つのマーカ (m_1, m_2, m_3) の存在する平面.

平行移動成分 \mathbf{T} は世界座標系の原点としたラベル 1 のマーカのカメラ座標値として求められる. また, 回転成分 \mathbf{R} は以下の手順で求めることができる.

1. 世界座標系の各軸の方向成分をカメラ座標系で表現し, これを $\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n, \mathbf{z}_n$ とする. ラベル 1, 2, 3 のカメラ座標系の位置を $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3$ とすると,

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_n &= \mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1, \\ \mathbf{y}_n &= (\mathbf{V}_3 - \mathbf{V}_1) - \frac{\mathbf{x}_n^\top (\mathbf{V}_3 - \mathbf{V}_1)}{\mathbf{x}_n^\top \mathbf{x}_n} \mathbf{x}_n, \\ \mathbf{z}_n &= \mathbf{x}_n \times \mathbf{y}_n.\end{aligned}$$

2. $\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n, \mathbf{z}_n$ を正規化する. 正規化した各軸の方向成分を $\mathbf{x}'_n, \mathbf{y}'_n, \mathbf{z}'_n$ とすると,

$$\mathbf{x}'_n = \frac{\mathbf{x}_n}{\|\mathbf{x}_n\|}, \quad \mathbf{y}'_n = \frac{\mathbf{y}_n}{\|\mathbf{y}_n\|}, \quad \mathbf{z}'_n = \frac{\mathbf{z}_n}{\|\mathbf{z}_n\|}$$

3. 以上で求めた $\mathbf{x}'_n, \mathbf{y}'_n, \mathbf{z}'_n$ を用いて以下の式で \mathbf{R} を得る.

$$\mathbf{R} = [\mathbf{x}'_n \ \mathbf{y}'_n \ \mathbf{z}'_n]$$

以上より, 世界座標系とカメラ座標系の位置関係を表すモデルビュー行列を得ることができる.

3.3 現実環境の奥行き情報の獲得

本節では, 現実環境と仮想環境の前後関係を正確に表現するために, 現実環境の奥行き推定手法について述べる. 動的な環境の前後関係を正確に表現するためには, 実時間で現実環境の奥行きを獲得しなければならない. ここでは, 標準的なステレオの対応点探索手法を用い, 3.2 節で求めたカメラパラメータを用いた処理領域の限定によって計算量を削減することで実時間処理を実現する.

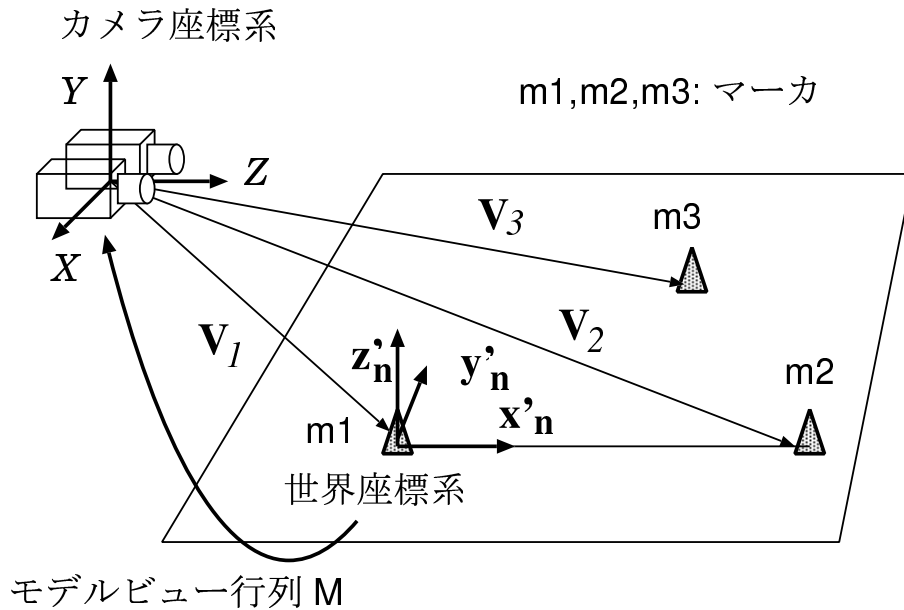


図 13 カメラ座標系と世界座標系の関係

3.3.1 奥行き の 推 定

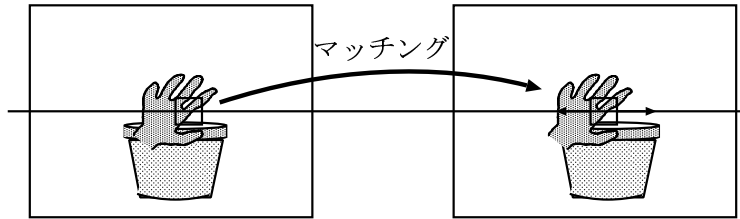
本手法では、ステレオの対応点探索にブロックマッチング [25] を用いる。ステレオの対応点探索手法の手順を以下に述べる。また、その手順を図 14 に示す。

1. 左右画像に対して sobel フィルター [26] を用いてエッジを検出する。
2. 左画像を基準画像とし右画像とのマッチングを行なう。この際、マッチングは基準画像のエッジの検出された画素に対して行い、探索窓は 5×5 画素、マッチングの評価基準として SAD(sum of absolute differences) を用いた。SAD は以下の式で表せる。

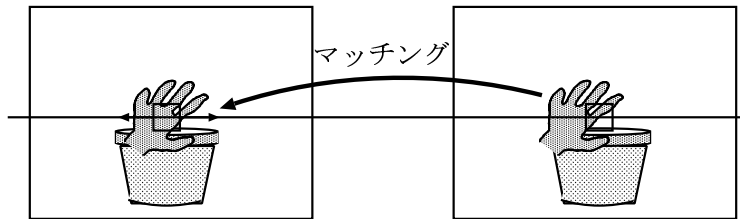
$$\begin{aligned}
 SAD(d) = \sum_i \sum_j (& |I_{rR}(x+d+i, y+j) - I_{sR}(x+i, y+j)| \\
 & + |I_{rG}(x+d+i, y+j) - I_{sG}(x+i, y+j)| \\
 & + |I_{rB}(x+d+i, y+j) - I_{sB}(x+i, y+j)|)
 \end{aligned}$$



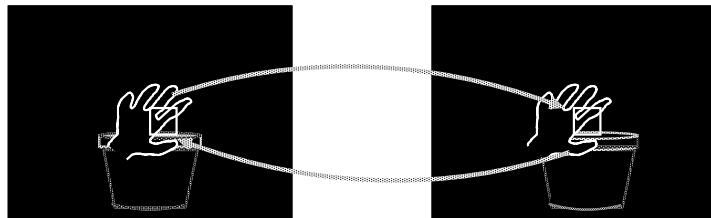
(1) sobel フィルタを用いてエッジ検出



(2)左画像を基準に対応点探索



(3)右画像を基準に対応点探索



(4)誤対応の除去



(5)エッジ間の値の補間

図 14 奥行き推定の処理手順

但し、 $I(x, y)$ は、座標 (x, y) における輝度値を示し、 I_r, I_s は、それぞれ、基準画像と参照画像を、 I_R, I_G, I_B は、それぞれ、赤、緑、青成分を表す。

3. 2. と同様に、右画像を基準画像として左画像とのマッチングを行なう。
4. 左画像から右画像への対応 (ステップ 2) と右画像から左画像への対応 (ステップ 3) が一致しない場合、誤対応とみなし取り除く。
5. エッジ間を値の低い方で補間する。この際、誤った補間をなくすため、一定値より広いエッジ間の補間を行なわない。

以上の処理により、左右の視差画像を求める。

3.3.2 対応点探索領域の限定による計算量の削減

仮想物体のカメラ座標系における位置が既知であれば、仮想物体と前後関係を考慮する必要のある現実物体が存在する領域が限定できる。3.2 節で求めたモデルビュー行列を用いてカメラ座標系に変換された仮想物体の外接直方体を画像上に投影することで、奥行き推定を行なう領域を決定する (図 15)。以下に現実環境の奥行きを求める手順を示す。

1. 図 15A が示すように、世界座標系で表されている仮想物体の外接直方体を、モデルビュー行列を用いて、カメラ座標系に変換する。
2. 図 15B が示すように、CG の 外接直方体を画像上に投影し、その外接長方形を奥行き推定を行なう領域とする。

これによって、実画像上の必要な領域のみ奥行きを推定し、計算量を削減する。

3.4 ステレオ画像合成

前節で求めたモデルビュー行列と現実環境の奥行き情報を用いて現実環境を撮影した画像に CG を描画する。現実物体が仮想物体より手前にある領域には、透明な仮想物体をあらかじめ描画し CG が描画されないようにすることで、現実物

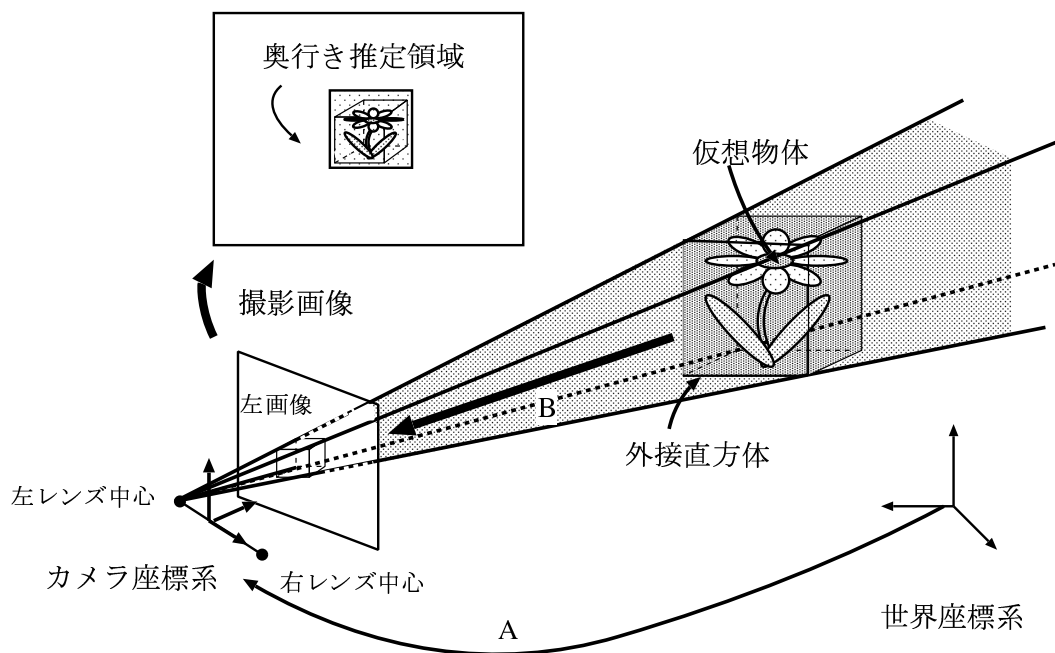


図 15 奥行き推定領域の決定

体による CG 像の隠蔽を表現する。処理の手順を図 16 に示す。最初に、カメラによって撮影された現実環境の画像 (図 16(a)) 上に、現実環境の奥行き情報 (図 16(b)) をもとに透明な物体を描画する (図 16(c))。そして、モデルビュー行列を用いて生成した CG を描画する (図 16(d,e))。この処理を、左右それぞれの入力画像に対して行なう。以上の処理によって、両眼立体視が可能な合成画像を出力することができる。

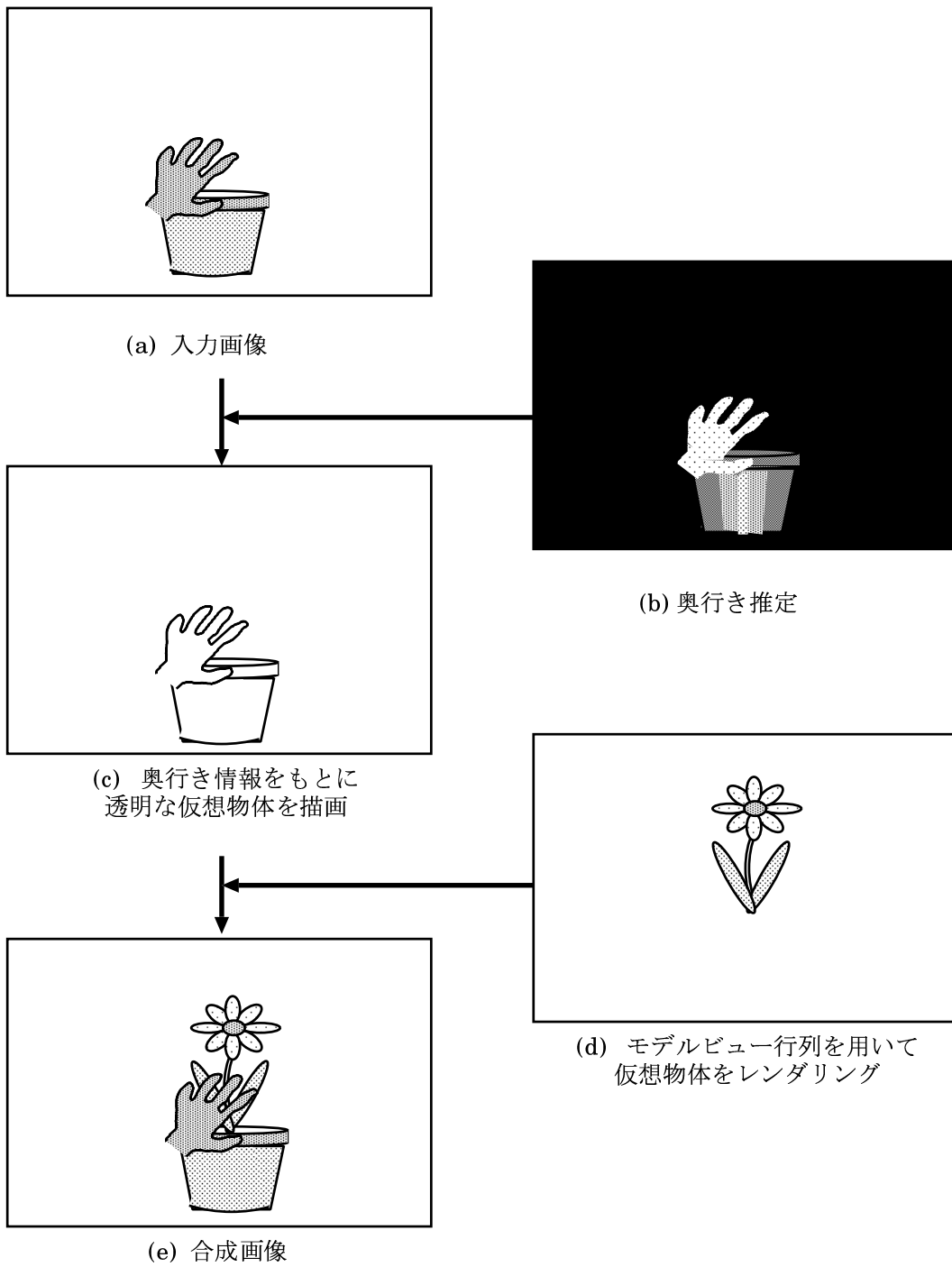


図 16 画像合成処理の手順

4. ビデオシースルー型拡張現実感システムの構築

3章で述べたステレオ画像合成手法の有効性を確認するため、ビデオシースルー型拡張現実感システムを試作し、実験を行った。

4.1 システム構成

プロトタイプシステムの構築に使用した機器を表1に示す。

表1 実験環境

カメラ	東芝 1/3 インチ CCD カメラ IK-UM42
HMD	オリンパス mediamask
ビデオボード	DIVO (入力画像サイズ 720 × 486 画素)
計算機	SGI Onyx2 IR: 16CPU MIPS R10000 195 Hz

実験システムでは、図17のように、HMDに2個のCCDカメラを取り付けたビデオシースルー型HMDを用いた。カメラ間距離(基線長)は6.5cmとし、光軸方向は、ユーザの視線方向と一致させた。

システムの構成を図18に示す。カメラによって撮影された画像は、ビデオ入出力装置を用いてグラフィックスワークステーションに入力し画像合成の処理が行なわれる。計算機では、16CPUを用いた並列処理を行う。その後、再度ビデオ入出力装置を通して出力され、HMDの左右の目に左右それぞれの合成画像が映し出される。入力画像と提示画像は、720 × 486画素である。実際の処理はフィールド単位で行なうため、360 × 243画素の画像で行なわれる。

合成される仮想物体は図19に示すように、酒樽のCG(約3700ポリゴン)を利用した。現実環境は、作業補助などへの応用で考えられる環境として、卓上を設定した(図20)。また、図21に、実験の様子を示す。ユーザは、ステレオカメラを取り付けたHMDを装着し、マーカーはユーザの前にある卓上に配置されている。

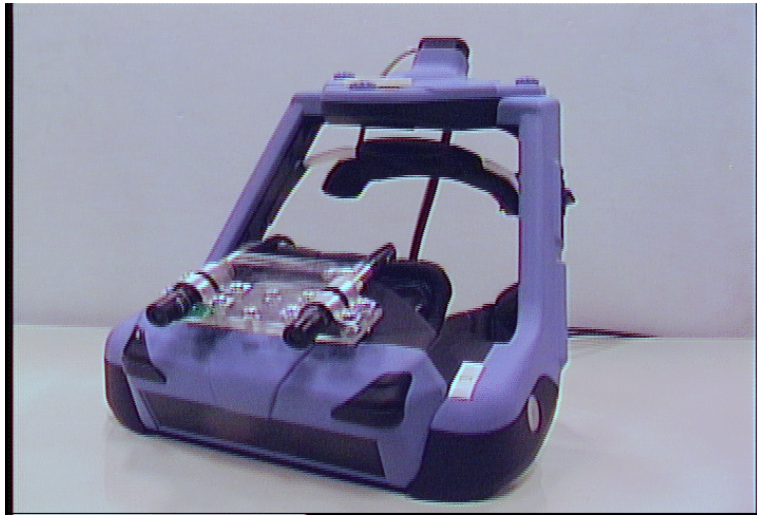


図 17 ビデオシースルー型 HMD

4.2 実験

本節では、カメラパラメータの推定、奥行き推定、画像合成、の各処理結果、処理時間について述べる。

【カメラパラメータの推定】

視点(カメラ)の移動にともなうマーカの追跡結果は、図 22に示すように、第 1 フレームに対応付けられたラベルを保ちながら追跡が行なわれていることが確認できる。しかし、色情報をもとにマーカの追跡を行なっているので、図 23で示すような現実物体によるマーカの隠蔽や、画像上でのマーカの重複が生じると追跡を行なえないという点、照明などによるマーカの映り方の違いによって、マーカの画像上の座標が不安定になり、精度が悪くなる点が問題となった。

【奥行き推定】

図 24に視点の移動にともなった奥行き推定結果を視差画像で示す。視点の移動によって仮想物体が描画される領域が変化し、それに応じて奥行き推

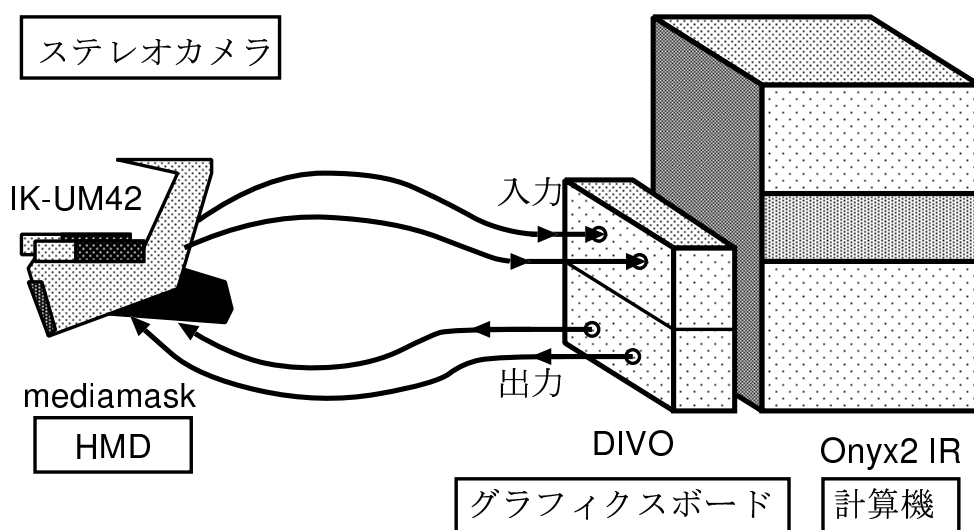


図 18 システム構成

定する領域が決定されていることが確認できる。図 24で見られる合成画像の場合、現実環境の奥行き推定の計算量は、推定領域を限定することで約 10 ~ 20 % に削減された。

【ステレオ画像合成】

図 25は机の上の 3 点のマーカから求めたカメラパラメータを用いて実画像と仮想物体を合成した画像である。3 次元位置が未知の 3 点のマーカから、カメラとマーカの位置関係を求め、合成画像を提示できていることが確認できる。また、手前へ移動するボールペンが仮想物体より手前に存在する時は、現実物体によって仮想物体が隠蔽されており、仮想物体と現実物体の前後関係が矛盾なく表現されていることが確認できる。また、HMD に左右のそれぞれの画像を提示することで、背景や仮想物体に立体感を与え、合成画像を提示できている。しかし、マーカの追跡が行えなかった場合、図 26の様に仮想物体を合成することはできない。

【処理時間】



図 19 合成される仮想物体

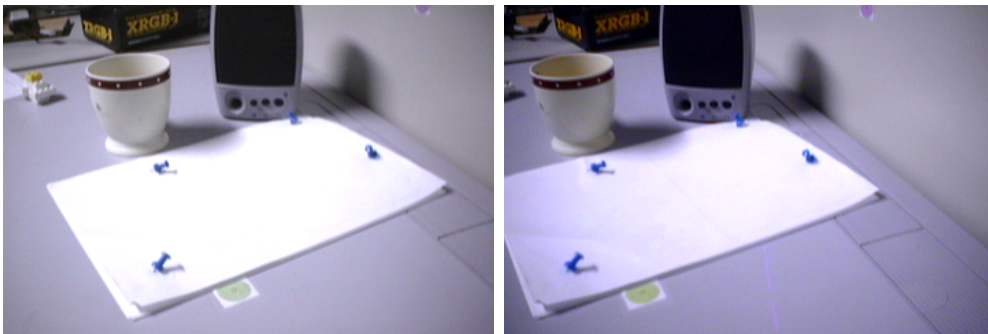


図 20 実験に利用した現実環境の例

画像更新レートは，実験で用いた仮想物体 (約 3700 ポリゴン) を合成し，奥行き推定領域が $360 \text{ 画素} \times 243 \text{ 画素} \times 32 \text{ 段階}^1$ から約 $100 \text{ 画素} \times 100 \text{ 画素} \times 32 \text{ 段階}$ (約 11%) に限定された場合 (図 25 の例) で平均 10 フレーム/秒 (約 100 ミリ秒) である．カメラパラメータの推定に約 20 ミリ秒，現実環境の奥行き推定に約 40 ミリ秒，CG の合成に約 20 ミリ秒，残りは画像の入力に費やされている．ビデオシースルー HMD を用いているため，現実環境と仮想環境との時間的なずれはない．その反面，合成画像が出力されてからユーザに提示されるまでに遅延が生じるため，ユーザには全体で

¹画像幅 × 画像高 × 奥行き

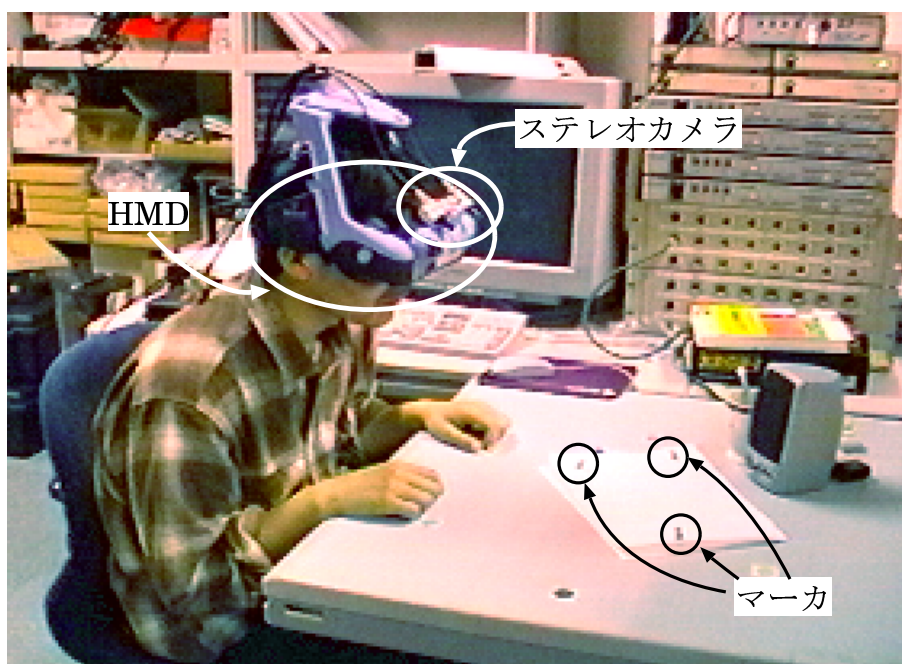
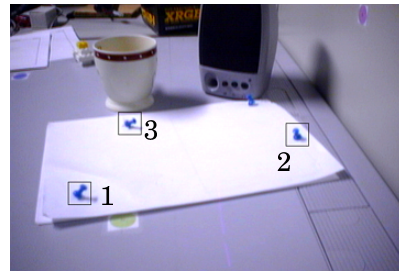
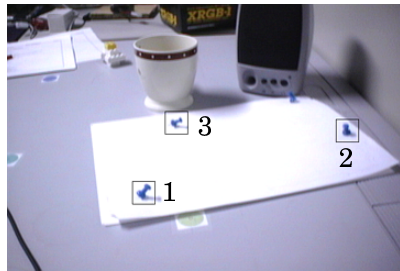
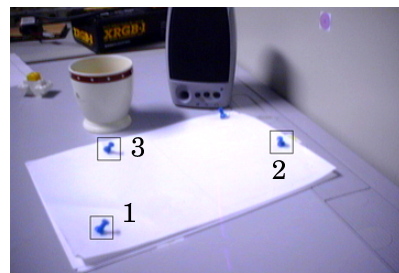
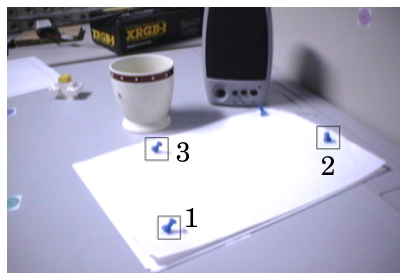


図 21 実験の様子

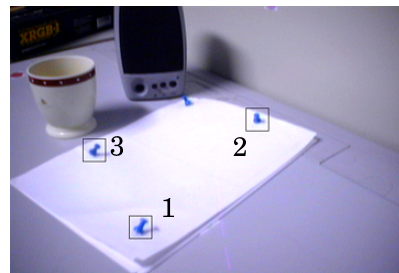
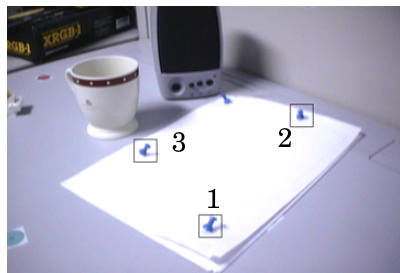
約 4～5 フレーム (約 133～166 ミリ秒) 時間の遅延をともなって合成画像が提示される。



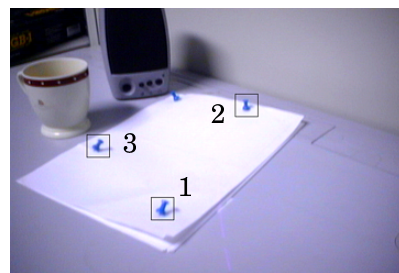
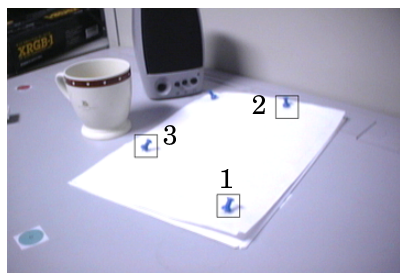
(1)



(2)



(3)

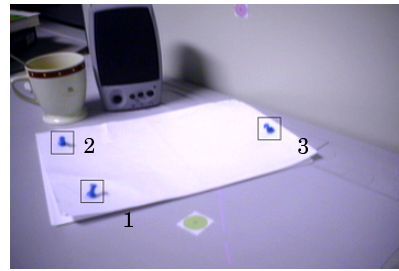
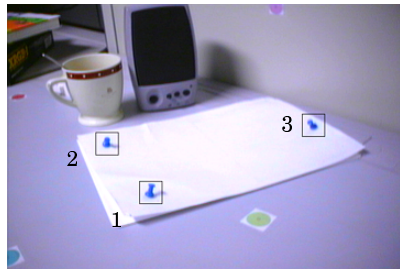


左画像

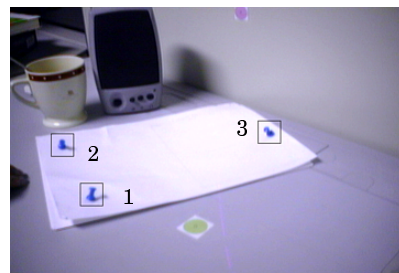
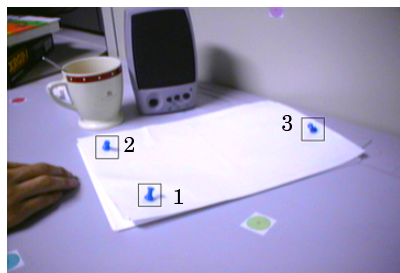
(4)

右画像

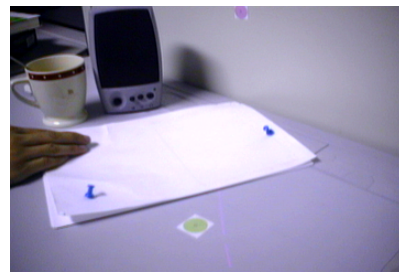
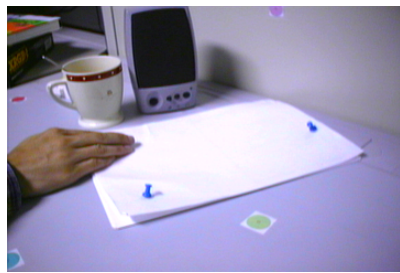
図 22 マーカの追跡結果 1



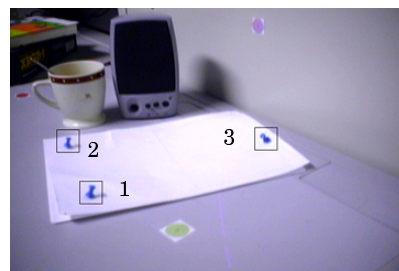
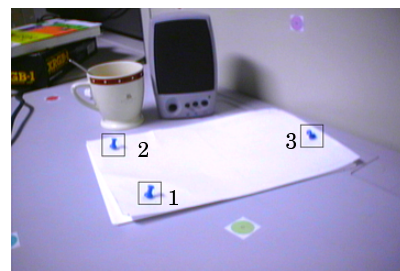
(1)



(2)



(3)



左画像

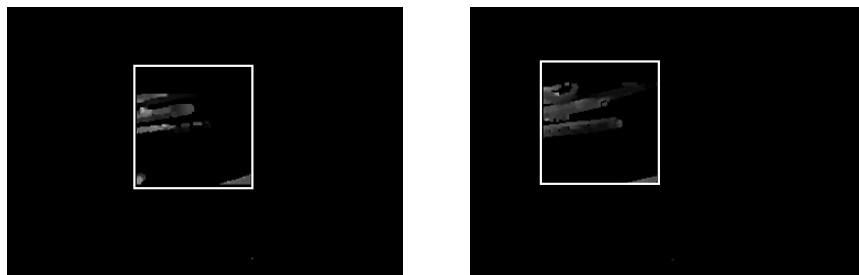
(4)

右画像

図 23 マーカの追跡結果 2



(1)



(2)



(3)

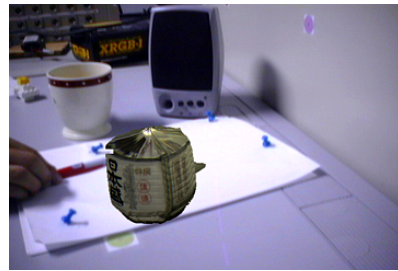
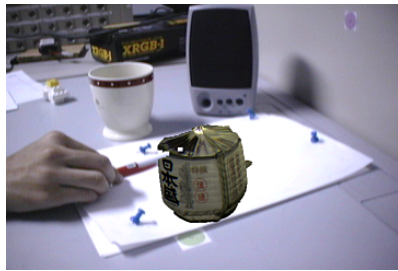


左画像

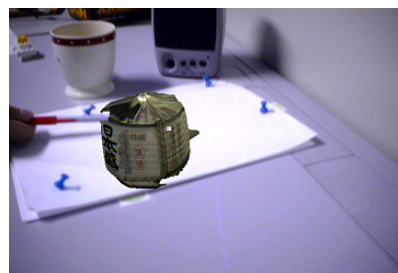
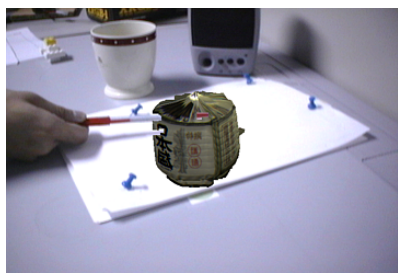
(4)

右画像

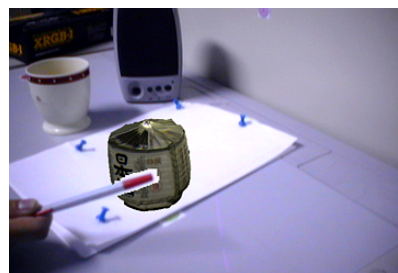
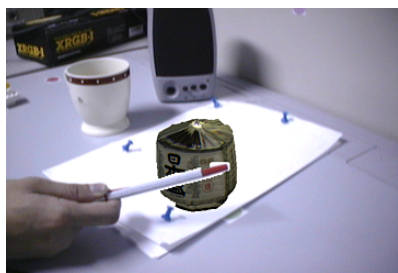
図 24 現実環境の奥行き推定



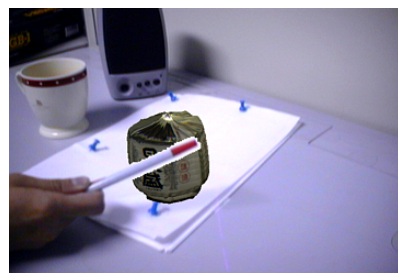
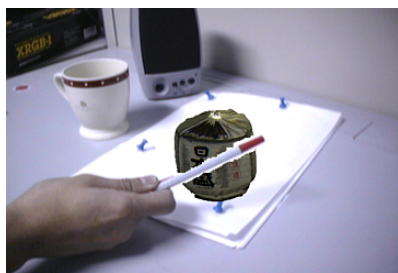
(1)



(2)



(3)

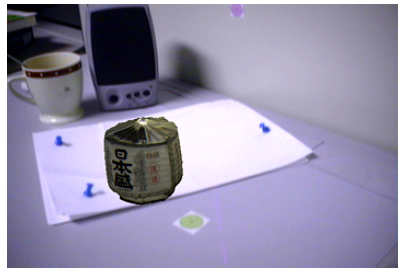
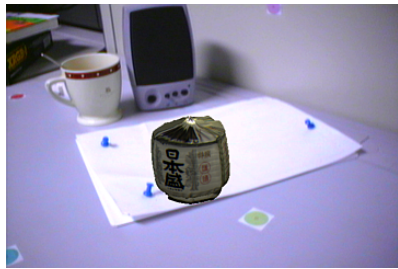


左画像

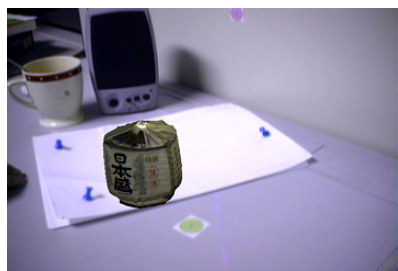
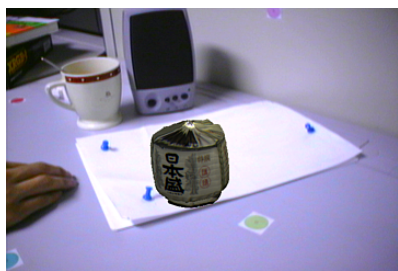
(4)

右画像

図 25 合成ステレオ画像 1



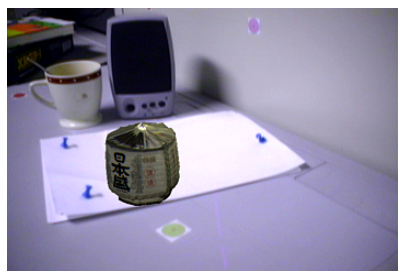
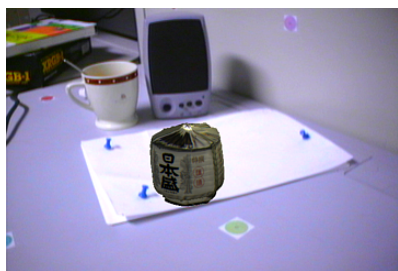
(1)



(2)



(3)



(4)

左画像

右画像

図 26 合成ステレオ画像 2

5. 考察

4章では、2眼のステレオカメラによって撮影された画像から、ユーザの視点位置と、現実環境の奥行きを推定を行なうことで幾何学的整合性問題の解決したAR環境の構築を試みた。その結果、提案したステレオ画像合成手法によって、ビデオシースルー型AR環境を構築することが可能であることを確認した。よって、提案手法は現実環境での作業補助や実時間型の景観シミュレーションに応用可能である。実験で明かになった現状での問題点をカメラパラメータの推定と現実環境の奥行き推定に関して以下に挙げる。

【カメラパラメータの推定】

実験で明かになったカメラパラメータの推定に関する問題点を以下に挙げる。

1. マーカの追跡が光源環境の変化や現実物体によるマーカの隠蔽によって妨げられる問題。
2. 撮影されたマーカの重心をマーカの画像上の座標とするため画像上の特徴点の位置を正確に推定できない問題。
3. 3つのマーカがカメラに撮影されていないためユーザが移動や見回しを自由に行なうことができない問題。

これらは、使用する特徴点を増加させることで解決できる。それには以下の手法が考えられる。

- 4点以上のマーカの使用

3次元空間に世界座標系の基準となるマーカ以外に現実環境に多数の1マーカを多数配置し、それらがカメラによって撮影された画像を用いる。そうすることで、1部のマーカが現実物体によって隠蔽されても、撮影された画像内に最低3点のマーカあればユーザの視点の推定が可能になる。また、4点以上の特徴点を用いることでカメラパラメータの推定の高精度化が行なえろと考えられる。

- 新たな特徴点の追加

上記の手法を実現し、4点以上のマーカを利用した場合でも、第1フレームにすべてのマーカが存在する必要がある。しかし、これはカメラパラメータの推定範囲が限定されることになる。そこで、第1フレームには、世界座標系の基準となるマーカが存在すれば、視点が変化することで新たに視野内に現れるマーカを随時抽出し、それを特徴点として扱うことで視野の推定範囲を拡大することが可能である。

- マーカを用いない特徴点の利用

新たな特徴点を追加する拡張を行なっても、マーカを使用することで視点の推定範囲は限定される。そこで、世界座標系の基準となるマーカ以外は、入力画像からテクスチャ情報などをもとに追跡可能な特徴点を自動検出し追加することで、視点の位置姿勢の測定範囲を拡大することが考えられる。

【現実環境の奥行き推定】

現実環境の奥行き推定に関する問題点と考察を以下に挙げる。

- 仮想物体が画像上に占める領域によって計算量が増加する問題

削減される計算量は、画面上に投影された仮想物体の外接長方形の領域の大きさによって決定する。したがって、仮想物体が画面上に占める割合が大きくなればなるほど、計算量の削減率は低くなる。この問題を解決する手法として、仮想物体が投影された画像上の領域をあらかじめ設定した大きさに拡大または縮小して処理を行なうことで奥行き推定の計算量を一定にする手法が考えられる。奥行き推定において対応点探索問題は領域内の画像を拡大・縮小を行なう処理より多くの処理時間がかかるため本手法により計算時間の削減が可能である。

- 奥行き推定のさらなる高速化に関する問題

仮想物体が描画される画像上の領域のみの奥行きを推定することで計算量の削減を行なった。しかし、4章の実験では、奥行き推定領域を約10～20%に削減した場合でも、奥行き推定の処理時間は処理時

間全体の約 4 割を占める結果となった。したがって、奥行き推定の計算量の削減について、さらに検討する必要がある。計算量の削減を行なうための手法を以下に挙げる。

– 奥行きの段階の削減

モデルビュー行列を用いてカメラ座標系における仮想物体の外接直方体の位置を計算することでカメラ座標系における仮想物体が存在する奥行きを求めることができる。また、AR で必要な奥行き情報は、仮想物体との前後関係である。そのため、提案手法では、奥行きは 32 段階で推定していたが、カメラ座標系における仮想物体の存在する領域付近は奥行きの計算を密に行ない、その他の領域は計算をおおまかな奥行きを計算することで、計算量の削減が行なえると考えられる。

– 時系列情報の利用

合成する現実環境として動的な環境を想定しているため、時系列情報をそのまま利用することはできない。しかし、更新レートがビデオレートに近い場合、現実物体や視線の変化量は少ないと考えられるため、対応点問題の対応点の候補などとして時系列情報を利用することが可能である。

6. むすび

本論文では、AR 環境構築の際に解決しなければならない整合性問題のうち、特に、ユーザに違和感を与える大きな要因であると考えられる幾何学的整合性問題を解決する手法を提案した。提案手法は、ステレオカメラによって撮影された画像から現実環境と仮想環境を位置合わせし、現実環境の奥行きの実時間推定を行なうことで、両者の正確な前後関係を表現する。提案手法の有効性を確認するため、同期ずれによる両者の位置ずれが生じにくいビデオシースルー型 AR システムを実際に構築して実験を行なった。その結果、3つのマーカが撮影されていれば現実環境と仮想環境の位置関係が推定でき、違和感のない AR 環境を生成できることを確認した。また、現実環境の奥行き推定の実時間処理を実現することで、現実物体による仮想物体の隠蔽を正しく表現できることを確認した。したがって、現実環境における組み立て作業や機械のメンテナンスの補助を行なう AR システムに応用可能であると考えられる。しかし、現状の問題点として、実用的なアプリケーションに耐えうるロバスト性に欠ける点、マーカを用いているためユーザの視点の計測範囲に制限がないというビジョンセンサの利点を十分に活かすことができていない点が挙げられる。

本論文の課題としては、多数のマーカを用いることによるロバストなマーカ追跡、カメラパラメータ推定の高精度化や、奥行き推定の際の時系列情報の利用などが挙げられる。また、幾何学的整合性問題だけでなく、時間的整合性問題や光学的整合性問題についても検討を行なう必要がある。

謝辞

本研究の全過程を通して、懇切なる御指導、御鞭撻を賜ったソフトウェア基礎講座 横矢 直和教授 に心より深謝致します。

本研究の遂行にあたり、有益な御助言と御鞭撻を賜った像情報処理学講座 千原 國宏教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、終始、暖かい御指導をして頂いたソフトウェア基礎講座 竹村 治雄助教授に深く感謝致します。

そして本研究を通じて、有益な御助言を頂いたソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦助手、並びに山澤 一誠助手に厚く感謝致します。本研究の遂行に多大なる御助言、御鞭撻を賜った大隈 隆史氏、清川 清氏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ソフトウェア基礎講座の諸氏に深く感謝致します。最後に、ソフトウェア基礎講座事務補佐員 福永 博美嬢に深く感謝致します。

参考文献

- [1] R. T. Azuma: “A Survey of Augmented Reality,” *Presence*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [2] T. Ohshima, K. Satoh, H. Yamamoto and H. Tamura: “AR² Hockey: A Case Study of Collaborative Augmented Reality,” *Proc. VRAIS'98*, pp. 14–18, 1998.
- [3] P. Milgram and F. Kishino: “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Display,” *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol. E77-D, No. 12, pp. 1321–1329, 1994.
- [4] 田村: “複合現実感研究プロジェクト”, 電子情報通信学会総合大会, ISS-1-4, pp. 455–466, 1997.
- [5] F. Betting, J. Feldar, N. Ayache and F. Devernay: “A New Framework for Fusing Stereo Images with Volumetric Medical Images ,” *Proc. Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine*, pp. 30–39, 1995.
- [6] S. Gibbs, C. Arapis, C. Breiteneder, V. Lalioti, S. Mostafawy and J. Speier: “Virtual Stadio: An Overview,” *IEEE Multimedia*, Vol. 5, No. 1, pp. 18–35, 1998.
- [7] A. State, A. Livingston, W. F. Garrett, G. Hirota and H. Fuchs: “Technologies for Augmented Reality Systems: Realizing Ultrasound-Guided Needle Biopsies,” *Proc. SIGGRAPH'96*, pp. 439–446, 1996.
- [8] S. Feiner, B. MacIntyre and D. Seligmann: “Knowledge-based Augmented Reality,” *Commun. of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 52–62, 1993.
- [9] 仲村, 大隈, 竹村, 横矢: “AR 環境における情報の生成・管理手法の一考察”, 情報処理学会ヒューマンインタフェース研究会報告, 98-HI-76, 1998.

- [10] 玉田, 亀井, 瀬尾: “ビデオ空間と CG 空間の融合による高解像度 3 次元仮想都市空間管理環境の構築”, 日本バーチャルリアリティ学会第 1 回大会論文集, pp. 167–168, 1996.
- [11] 横光, 大隈, 竹村, 横矢: “多視点ステレオ実画像を用いた仮想空間の構築に関する一検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第 3 回大会論文集, pp. 223–224, 1998.
- [12] J. Rekimoto: “Matrix: A Realtime Object Identification and Registration Method for Augmented Reality,” Proc. APCHI, 1998.
- [13] 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,” *Precense*, Vol. 6, No. 4, pp. 433–451, 1997.
- [14] E. K. Edwards, J. P. Rolland and K. P. Keller: “Video See-through Design for Merging of Real and Virtual Environment2,” Proc. VRAIS’93, pp. 197–204, 1993.
- [15] M. Uenohara and T. Kanade: “Vision-Based Object Registration for Real-time Image Overlay,” Proc. Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine, pp. 13–22, 1995.
- [16] 中沢, 中野, 小松, 斎藤: “画像中の特徴点に基づく実写画像と CG 画像との動画合成システム”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 51, No. 7, pp. 1086–1095, 1997.
- [17] 井上, 小林, L. Quan, 大田: “3 視点のアフィン画像からの線形的手法による形状と動きの推定を用いた仮想物体の融合”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU’98) 講演論文集, Vol. I, pp. 13–18, 1998.
- [18] T. Okuma, K. Kiyokawa, H. Takemura and N. Yokoya: “An Augmented Reality System Using a Real-time Vision Based Registration,” Proc. 14th

- Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 1226–1229, 1998.
- [19] A. State, G. Hirota, D. T. Chen, W. F. Garrett and A. Livingston: “Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking,” Proc. SIGGRAPH’96, pp. 429–438, 1996.
- [20] 佐藤, 山本, 田村: “現実空間と仮想空間の位置合わせ手法 – ステレオカメラと3次元センサの組合せ –”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU’98) 講演論文集, Vol. I, pp. 7–12, 1998.
- [21] 神原, 大隈, 竹村, 横矢: “複合現実感のための実時間ステレオ画像合成”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 22, No. 33, pp. 31–36, 1998.
- [22] T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano and M. Tanaka: “Stereo Machine for Video-rate Dense Depth Mapping and Its New Application,” Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 196–202, 1996.
- [23] 松原, 岩佐, 竹村, 横矢: “ステレオ視による奥行き推定に基づく実画像と仮想物体の合成”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU’96) 講演論文集, Vol. I, pp. 43–48, 1996.
- [24] M. M. Wloka and B. G. Anderson: “Resolving Occlusion in Augmented Reality,” Proc. 1995 ACM Sympo. on Interactive 3D Graphics, pp. 5–12, 1995.
- [25] 奥富: “CVCV-WG 特別報告:コンピュータビジョンにおける技術評論と将来展望 (X) - ステレオ視 (Stereo Vision)-”, 情処研報, 96-CVIM-102, 1996.
- [26] 尾上: “画像処理ハンドブック”, 昭晃堂, 1987.