

# 拡張現実のためのジャイロセンサを併用した ステレオカメラによる位置合わせ

藤井 博文† 神原 誠之† 岩佐 英彦† 竹村 治雄† 横矢 直和†‡

†奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

〒 630-0101 奈良県生駒市高山町 8916-5

Tel: 0743-72-5296 Fax: 0743-72-5299

‡通信・放送機構 奈良リサーチセンター

〒 630-0101 奈良県生駒市高山町 8916-19

Tel: 0743-79-5000 Fax: 0743-79-5022

E-mail: { hirofu-f, masay-ka, iwasa, takemura, yokoya }@is.aist-nara.ac.jp

あらまし: 現実環境に仮想物体を合成することで現実環境に情報を付加する拡張現実感において、現実環境と仮想環境の位置合わせは重要な問題である。本稿では、ビジョンセンサ(ステレオカメラ)とジャイロセンサを組合わせた位置合わせ手法を提案する。提案手法は、ステレオカメラから得られるマーカの三次元位置情報とジャイロセンサから得られるカメラの姿勢情報を利用し、カメラの平行移動を考慮したマーカの移動位置予測を行なうことによってロバストなマーカの追跡を実現する。また、計測範囲を拡大させるための自然特徴点を用いた位置合わせ手法を提案する。また本稿では、実際にビジョンベース拡張現実感システムを試作し、実験により提案手法の有効性を示す。

キーワード: 拡張現実感, マーカ追跡, 自然特徴点, ビジョンセンサ, ステレオカメラ, ジャイロセンサ

## A Registration Method Using Stereo Cameras with an Inertial Sensor for Augmented Reality

Hirofumi Fujii† Masayuki Kanbara† Hidehiko Iwasa† Haruo Takemura† Naokazu Yokoya†‡

†Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

8916-5 Takayama, Ikoma, Nara 630-0101, Japan

Tel: [+81]743-72-5296 Fax: [+81]743-72-5299

‡Nara Research Center, Telecommunications Advancement Organization of JAPAN

8916-19 Takayama, Ikoma, Nara 630-0101, Japan

Tel: [+81]743-79-5000 Fax: [+81]743-79-5022

E-mail: { hirofu-f, masay-ka, iwasa, takemura, yokoya }@is.aist-nara.ac.jp

Abstract: This paper proposes a registration method with stereo cameras and an inertial sensor for augmented reality (AR). The registration between real and virtual environments is one of the most important problems in AR that enhances a real environment with computer graphics. The vision-based registration is achieved by estimating a position and an orientation of cameras by tracking landmarks in the real environment. The proposed method realizes a robust tracking of landmarks using their 3D positions and a camera orientation. This paper also discusses a registration method with both landmarks and natural features to extend a tracking range. The feasibility of the proposed method has been successfully demonstrated with experiments.

Keyword: augmented reality, marker tracking, natural feature, vision sensor, stereo camera, inertial sensor

# 1 はじめに

近年、現実環境に仮想物体を合成することで、現実環境に情報を付加する拡張現実感が新たな情報提示・操作手法として注目されている [1, 2, 3, 4]. 仮想物体があたかも現実環境の一部であるかのような感覚を利用者に与える違和感のない拡張現実環境を構築するためには、現実環境と仮想物体を正確に位置合わせする必要がある。

現実環境と仮想環境の位置合わせ手法には超音波センサなどを利用した手法 [2] があるが、現実環境に超音波スピーカを配置する必要があるため計測範囲が制限される。これに対し、ビジョンセンサを用いた手法は、カメラとユーザの視点の位置関係を既知として、撮影された画像からカメラ位置を推定し、ユーザの視点から見た現実世界と仮想世界の位置合わせを行なう手法であり、現実環境に特別な装置を用意する必要がなく、本質的に計測範囲が限定されないという利点がある。ビジョンセンサを用いた従来手法 [5, 6] の多くは現実環境に配置したマーカを追跡し、求めたマーカの画像上の位置情報を利用して位置合わせを行っている。カメラで撮影された画像から画像処理によりマーカを追跡するため、マーカの画像上での位置が急激に変化すると追跡に失敗し、他の三次元センサを用いる方法に比べロバスト性に欠けるという問題点がある。

この問題を解決する手法として、ビジョンセンサとジャイロセンサを組合せた手法がある [7]. この手法は、カメラに取り付けたジャイロセンサから得られるカメラの姿勢情報より、次の画像上でのマーカの移動位置を予測し、ビジョンセンサのみでは困難であった速いマーカ移動の追跡に対応しており、計測範囲は制限されない。しかし、ジャイロセンサからの姿勢情報のみを予測に用いているため、カメラの平行移動による画像上でのマーカの移動位置の予測は行われておらず、カメラの平行移動によりマーカの画像上での位置が変化すると、ビジョンセンサのみによる手法と同様にマーカの追跡に失敗するという問題がある。

本稿では、カメラから遠くなるほどカメラの平行移動による画像上での見かけの動きが小さくなることに着目し、ビジョンセンサ (ステレオカメラ) によるマーカの三次元位置情報とジャイロセンサによるカメラの姿勢情報を用いて、カメラから最も遠いマーカを追跡することによりカメラの平行移動成分を推定する手法を提案する。そして、カメラの平行移動成分を考慮したマーカの移動位置を予測し、ロバストなマーカ追跡を実現する。

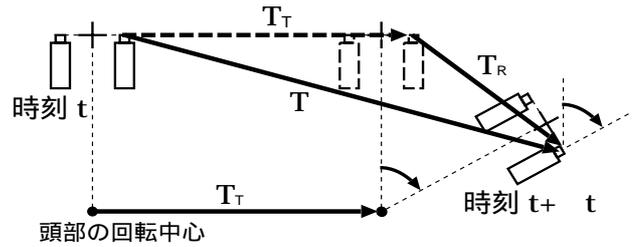


図 1: カメラの移動成分

ビジョンセンサを用いる従来手法 [5, 6] は、特徴点の追跡を容易にし、ロバストな位置合わせを実現するために、実環境中にマーカを配置している。しかし、位置合わせを行なうためにはマーカがカメラにより撮影されている必要があり、実際にはビジョンセンサを用いた位置合わせ手法の計測範囲は制限されることになる。この制限を解決する手法として、マーカに加えて実環境中の自然特徴点を追跡して位置合わせする手法 [8] がある。この手法では、テンプレートマッチングにより自然特徴点の追跡を行なっているため、近傍に類似した自然特徴点が存在した場合に誤って追跡してしまうといった問題がある。また、追跡にテンプレートマッチングなどの画像処理を用いているため、計算量が問題となる。そこで、本稿では、提案するカメラの平行移動成分を考慮した特徴点の移動位置予測手法を用いて、自然特徴点の探索範囲を限定することによって、自然特徴点の誤追跡を減らし、自然特徴点の高速な追跡を実現する手法についても述べる。

以下、2章ではカメラの平行移動成分を考慮した移動位置予測に基づくマーカの追跡手法、3章では自然特徴点を用いた位置合わせ手法について説明する。4章では、提案手法を用いて作成した拡張現実感システムについて述べた後、評価実験とその結果を報告する。

## 2 カメラの平行移動を考慮した移動位置予測に基づくマーカの追跡

### 2.1 問題の設定

本研究では、視点付近に固定されたステレオカメラとジャイロセンサを用いてカメラの動きを推定することで、マーカの移動予測を行ないロバストなマーカ追跡を実現する。カメラの動きは、一般に回転成分と平行移動成分に分けて考えることができ、本手法では回転成分はジャイロセンサより求め、平行移動成分はステレオカメラによるマーカの距離情報を用いて2フレーム間のマー

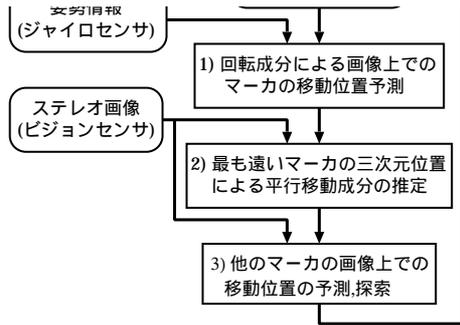


図 2: マーカ追跡手順

カの三次元空間内の動きから求める。

図 1に, 時刻  $t$  と  $t + \Delta t$  におけるステレオカメラの位置関係を示す. この時, ステレオカメラの動きは平行移動  $T$  と回転  $\Delta\theta$  より表される. 一般に, 拡張現実感において頭部に取り付けられたジャイロセンサから得られる回転成分  $\Delta\theta$  は人間の頭部の動きの特性から頭部を回転中心とした回転であると考えられるため, カメラの動きは頭部の回転中心における回転と頭部の回転中心の平行移動からなると考える必要がある. そのため, 回転の際, 頭部の回転中心とカメラの設置位置のずれから発生する平行移動成分  $T_R$  を考慮する必要があり, 頭部の回転中心の平行移動  $T_T$  を求めるには, カメラの平行移動成分  $T$  から平行移動成分  $T_R$  を取り除く必要がある.

提案する移動位置予測手法に基づくマーカの追跡手順を図 2に示す. 以降では, まず平行移動成分  $T_R$  を考慮した一つのマーカ追跡に基づく頭部の回転中心の平行移動  $T_T$  の推定処理について説明し, 続いて推定された  $T_T$  を考慮した全マーカの移動位置の予測と追跡手法について述べる.

## 2.2 一つのマーカの追跡に基づくカメラの平行移動成分の推定

2 フレーム間で一つのマーカを追跡することにより,  $T_T$  を推定する手法について述べる. 図 3に示すように,  $T_T$  の値は, 時刻  $t$  において位置が求められている一つのマーカ(以下, 注目マーカ)の時刻  $t + \Delta t$  におけるカメラ位置に対する予測位置  $P'$  と実際の位置  $P_b$  とのずれとして求められる. ここで, 注目マーカの時刻  $t + \Delta t$  における予測位置とは, 時刻  $t$  における注目マーカの位置と, ジャイロセンサで計測されるカメラの回転角度  $\Delta\theta$ ,

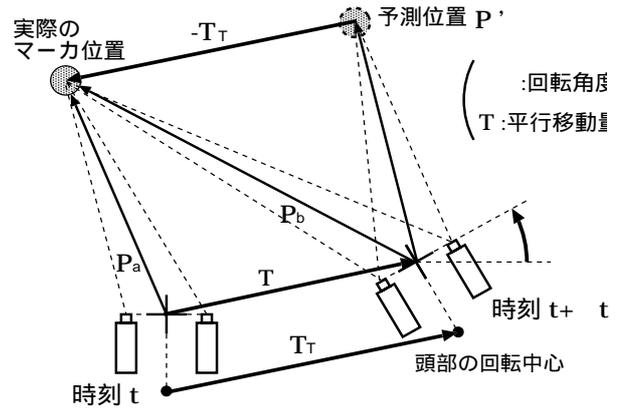


図 3: カメラの平行移動によるマーカの予測誤差

図 4: 回転中心とレンズ中心のずれによるカメラの平行移動

ならびに回転中心とカメラのレンズ中心のずれから生じる平行移動成分  $T_R$  を用いて推定される注目マーカの 3 次元位置のことであり,

$$P' = RP_a + T_R \quad (1)$$

として求まる. ここで  $R$  は  $\Delta\theta$  に対応した回転行列である.  $P'$ ,  $P_a$ ,  $R$ ,  $T_R$  の関係を図 4に示す. 次に, 時刻  $t + \Delta t$  でのカメラ位置に対する注目マーカの実際の三次元位置  $P_b$  をステレオ視によって求める. この際に, 注目マーカの探索窓を予測位置  $P'$  を利用して設定する.

以上により求めた  $P'$  と  $P_b$  から, カメラの平行移動成分  $T_T$  が次式により求まる.

$$T_T = P_b - P' \quad (2)$$

なお, 本稿においては, カメラからの距離の遠いマーカほどカメラの平行移動に伴う画像上での見かけの位置変化が小さくなることに着目し, 時刻  $t$  において最もカメラからの距離の遠いマーカを注目マーカとして選択する.

## 2.3 平行移動成分を考慮した全マーカの移動位置予測と追跡

前フレームのマーカの三次元位置情報からジャイロセンサにより得られるカメラの回転成分  $\Delta\theta$  と、前節で推定されたカメラの平行移動成分  $T_T$  を用いることで、全マーカの三次元位置が予測できる。

予測されたマーカ移動位置がカメラのフレーム内に存在するときは、予測されたマーカの三次元位置に対応したカメラ画像上の位置を求め探索窓を設定する。そして、ビジョンセンサで探索することによりマーカを追跡し、ステレオ法により三次元位置を求める。ビジョンセンサによる探索は、マーカの色情報を利用して背景と分離し、求めたマーカ領域の重心をマーカの画像上の位置とする。マーカの探索時に設定する探索窓の大きさは、マーカのカメラからの距離に応じて変化させる。画像上のマーカの大きさは、現実のマーカの大きさとステレオカメラから得られるマーカの三次元位置情報より求めることができる。ビジョンセンサによる正確なマーカ位置探索のためには、マーカの全体が探索窓内に含まれている必要があるため、探索窓の大きさには求めた画像上のマーカの大きさを定数倍した値に設定する。

予測されたマーカ移動位置がカメラのフレーム外に存在するときは、予測された移動位置をマーカの位置とすることにより、マーカのフレームアウトに対応することが可能となる。これにより、マーカの配置によるビジョンセンサへの計測範囲の制限を軽減することができる。ただし、平行移動成分の予測のためには1つのマーカの三次元位置情報が必要なため、最低1つのマーカが左右のカメラ各々に撮影されている必要がある。

## 3 自然特徴点を用いた位置合わせ

マーカを用いたビジョンセンサによる位置合わせ手法では、マーカが撮影されている必要があり、計測範囲が制限されるため、マーカに加えて自然特徴点を利用することで、計測範囲の拡大を図る。本章では、2章で述べた移動位置予測を適用した自然特徴点の追跡手法について説明する。提案手法の処理手順を図5に示す。図中1)のマーカと自然特徴点の追跡においては、図2のマーカ追跡と同様に移動位置予測を用いて自然特徴点を追跡する。しかし、自然特徴点の追跡には不確かさが含まれるため、追跡された自然特徴点の信頼性を評価(図中2))し、信頼性の高い自然特徴点の三次元位置情報を用いて位置合わせ(図中3))を行なう。以下、各処理について説

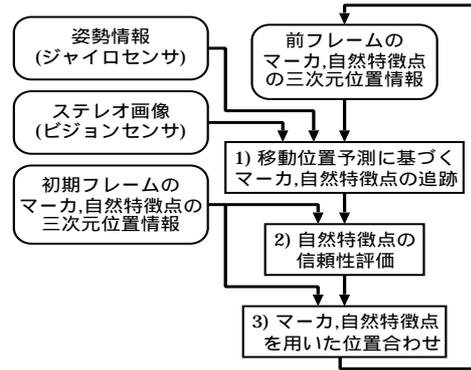


図5: 自然特徴点追跡と位置合わせ手順

明する。

### 3.1 移動位置予測に基づく自然特徴点の追跡

前章で述べた移動位置予測に基づくマーカの追跡と同様に、自然特徴点の移動位置を予測し、2フレーム間での対応をとることで追跡を行なう。予測に用いる平行移動成分は、自然特徴点に比べ信頼性が高いマーカにより推定する。

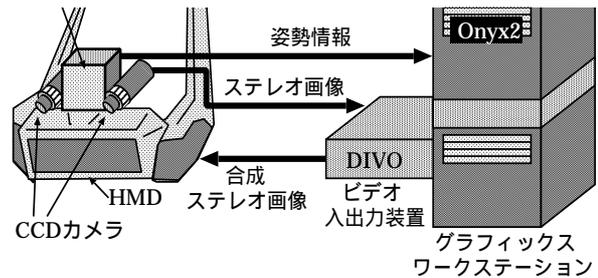
自然特徴点の追跡は、2フレーム間の対応をテンプレートマッチングによって求める。テンプレートマッチングには、前フレームの自然特徴点近傍をテンプレート、現フレームの自然特徴点の予測移動位置近傍を参照画像として用いる。まず、二乗誤差を評価尺度とした残差逐次検定法により粗な探索を行ない、次に最も相関が高くなった位置の近傍で正規化相互相関を用いて密な探索を行なうことにより、自然特徴点の位置情報を求めている。また、本手法では、テンプレートマッチングにおいて平行移動と回転のみを考えており、回転についてはジャイロセンサから求め、フレーム間でカメラがロール方向に大きく回転したときのみ、テンプレートの回転を行なう。

以上の移動位置予測に基づく追跡手法を繰り返すことにより、自然特徴点を追跡する。しかし、追跡された自然特徴点には不確かさが含まれるため、次節で述べる追跡された自然特徴点の評価を行なうことにより、信頼性の低い自然特徴点の追跡を中止する。

### 3.2 自然特徴点の信頼性評価

追跡された自然特徴点の信頼性の評価には以下の尺度を利用する。

- フレーム間での相関  
フレーム間での自然特徴点の探索時の正規化相互相関値が低い特徴点は追跡の失敗やオクルージョンなどによる自然特徴点の消失などが考えられるため、信頼性が低いと判断する。
- エピポーラ拘束による左右画像での位置ずれ  
左右画像で対応している自然特徴点の追跡により求めた左右画像上での位置が同一エピポーラ線からずれている場合、信頼性が低いと判断する。
- 三次元空間における位置ずれ  
初期フレームにおいて全ての自然特徴点の三次元位置を記録しておき、記録した三次元位置関係と追跡により求めた三次元位置関係との間で大きなずれがある特徴点については、信頼性が低いと判断する。



### 3.3 マーカと自然特徴点を併用した位置合わせ

前節において信頼性が高いと判断された自然特徴点を用いて位置合わせを行なう。初期フレームで左右画像において対応したマーカと自然特徴点を求め、三次元位置をステレオ法により計算し記録しておく。この記録したマーカと自然特徴点の三次元位置と、追跡により得られたマーカと自然特徴点の三次元位置を最小二乗誤差を用いて三次元空間において合わせることにより、位置合わせを行なっている。また、最小二乗誤差の計算において、信頼性の高いマーカの位置情報の重みが大きくなるようにしている。

## 4 実験

ジャイロセンサとビジョンセンサを組合わせた位置合わせ手法を利用したビデオスルー拡張現実感システムを試作し、カメラの平行移動成分を考慮した移動位置予測手法の有効性の確認とロバスト性の評価実験を行なった。また、本試作システムを用いてマーカと自然特徴点を併用した位置合わせ手法について実験を行なった。以下、4.1節では作成システムの構成を説明する。4.2節において作成システムのマーカ追跡実験、4.3節においてロバスト性の評価実験、4.4節において自然特徴点を用いた位置合わせ実験について述べる。

### 4.1 システム構成



(a) 探索窓の比較 (b) 仮想物体合成結果

図 8: マーカ追跡実験の結果

手法の探索窓を示している。ビジョンセンサのみを用いた場合の探索窓の大きさは、経験的な値に固定している。図 8(a) は、2 個のマーカが一度画面外に出て、再び画面内に戻る状況を表しているが、ビジョンセンサのみを用いた手法は一度画面外に出たマーカの追跡に失敗しているのに対し、提案手法はマーカの追跡に成功していることが確認できる。また、提案手法は、近いマーカに対する探索窓の大きさが大きくなっていることより、カメラからの距離に応じて探索窓の大きさが変化し、探索の効率が図られていることが確認できる。

図 8(b) は、実際に追跡されたマーカの位置情報を用いて、われわれが従来開発してきた手法 [5] により位置合わせを行ない、平面上に仮想物体 (酒樽) を合成した結果である。この図から、カメラの移動に応じて仮想物体が正しく合成されていることが確認できる。

### 4.3 ロバスト性の評価実験

試作した拡張現実感システムを用いて、以下のマーカ追跡法についてロバスト性の評価実験を行なった。

- ビジョンセンサのみによる手法 (文献 [5])
- カメラの平行移動成分を考慮しない組合せ手法
- カメラの平行移動成分を考慮した組合せ手法 (提案手法)

以上の手法について、全マーカに対して追跡に失敗したマーカの割合 (追跡失敗率) の比較を行なった。追跡失敗率は、式 (3) で定義する。同じデータに対する各手法の結果を得るため、ビジョンセンサからのステレオ画像とジャイロセンサからの姿勢情報を記録し、それらをシステムへの入力として各手法について実験を行なった。また、記録データを均等にサンプリングすることにより実行倍率を上げ、仮想的に速いカメラの移動を実現して実験を行なった結果を表 1, 2 に示す。表 1 は回転中心が平行移動しない場合、表 2 は回転中心が平行移動する場合の追跡失敗率である。実験は、CCD カメラとジャイロセンサを三脚に固定することにより実現した。実験には、150 フレームの記録データを利用した。

$$\text{追跡失敗率} = \frac{\text{追跡に失敗したマーカ数}}{\text{フレーム数} \times \text{マーカ個数}} \quad (3)$$

回転中心が平行移動しない場合 (表 1) は、ジャイロセンサから得られるカメラの姿勢情報のみからマーカの移動位置を予測可能である。表 1 から、ジャイロセンサの姿勢情報よりマーカの移動位置が予測できる組合せ手法は、追跡に失敗することなく正確に予測できていることが確認できる。また、実行倍率が高くなるとビジョンセンサのみによる手法の追跡失敗率が悪くなるのに対し、ジャイロセンサによるマーカの移動位置を予測することで、マーカの追跡を行なえていることが確認できる。回転中心が平行移動する場合 (表 2) は、実行倍率が低いとき、平行移動を考慮した予測が有効であることが確認できる。しかし、実行倍率が高くなりフレーム間のカメラの平行移動が大きくなると、最も遠いマーカを追跡できなくなり平行移動成分を予測できないため、平行移動成分の予測の有無によるマーカの追跡失敗率の差が小さくなっている。また、ジャイロセンサによる回転成分の予測の有無による追跡失敗率の差も小さくなっていることが確認できる。

表 1: 追跡失敗率 (回転中心の平行移動なし)

実行倍率	ビジョンセンサ [%]	組合せ手法	
		平行移動予測なし [%]	平行移動予測あり [%]
1	0	0	0
2	2.36	0	0
3	11.48	0	0
5	40.01	0	0
10	56.25	0	0
20	72.92	0	0
30	87.50	0	0
50	87.50	0	0

表 2: 追跡失敗率 (回転中心の平行移動あり)

実行倍率	ビジョンセンサ [%]	組合せ手法	
		平行移動予測なし [%]	平行移動予測あり [%]
1	1.43	0.50	0
2	16.39	9.63	6.93
3	27.04	19.13	16.58
4	40.97	35.42	32.99
5	46.55	32.33	30.60
10	56.25	49.11	49.11

次に、図 7 に示すように実際に CCD カメラとジャイロセンサを HMD に固定し、ビジョンベース拡張現実感システムとして利用した場合の結果を表 3、4 に示す。表 3 は、通常の拡張現実感システム使用時を想定し、マーカの近辺を様々な角度から眺めた場合の結果である。提案手法は、ビジョンセンサのみによる手法だけでなく、平行移動成分の予測を行わない組合せ手法と比較しても追跡失敗率が改善されており、有効であることが確認できる。表 4 は、激しく首を振った場合の結果である。平行移動成分が大きく予測が行えないため、平行移動成分を予測しない組合せ手法とほぼ同等の結果しか得られていない。しかし、これ程激しい首の振りに対しては画像上にモーションブラーが発生しており、ビジョンベース拡張現実感のための位置合わせ手法としての使用において想定外だと考えられる。

表 5 に、グラフィックワークステーション (Onyx2 IR 16CPU MIPS R10000 195MHz) でマーカの追跡部分を 4CPU で並列処理した時のフレームレートを示す。ステレオカメラとジャイロセンサを利用してマーカの移動位置を予測し、マーカの探索窓を大きくすることなく

表 3: 追跡失敗率 (HMD 搭載-通常速度)

ビジョンセンサ [%]	組合せ手法 [%]	
	平行移動予測なし	平行移動予測あり
7.47	1.26	0.34

表 4: 追跡失敗率 (HMD 搭載-高速)

ビジョンセンサ [%]	組合せ手法 [%]	
	平行移動予測なし	平行移動予測あり
18.37	14.43	14.18

表 5: フレームレート (4CPU)

ビジョンセンサ [fps]	組合せ手法 [fps]	
	平行移動予測なし	平行移動予測あり
15.11	14.99	14.92

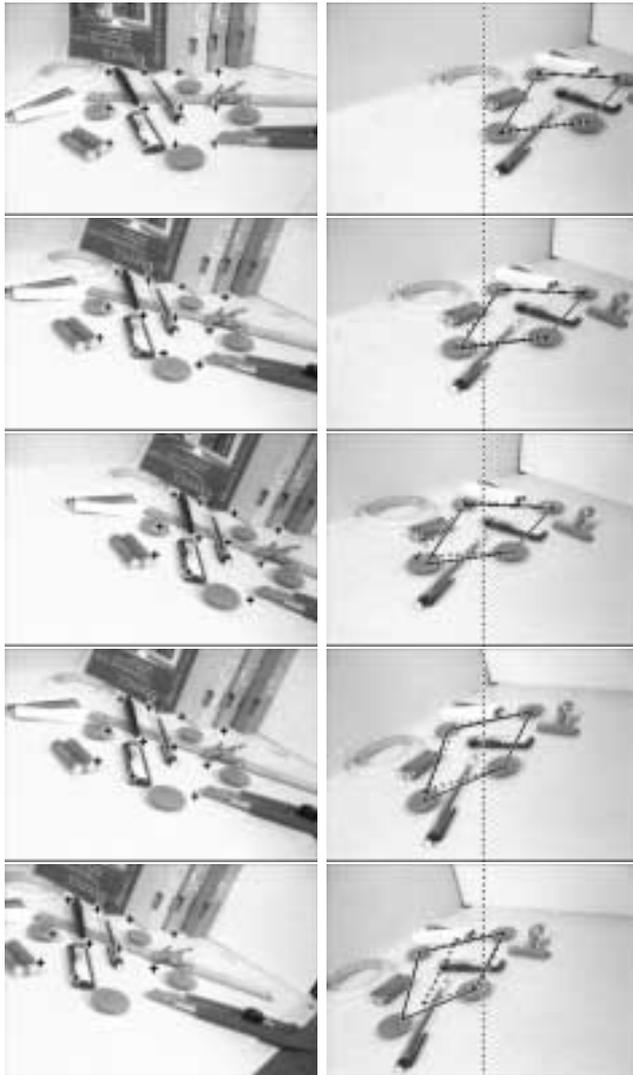
ロボаст性を向上させているため、ビジョンセンサのみによる位置合わせ手法と同程度のフレームレートを実現できていることが確認できる。

#### 4.4 自然特徴点を用いた位置合わせ実験

試作した拡張現実感システムを用いてマーカに加えて自然特徴点を追跡し、位置合わせを行なった結果を時系列順に上から並べたものを図 9 に示す。自然特徴点は、初期フレームにおいて左画像上の中央付近に格子状に配置し、右画像においてエピポーラ線に対応点を求め初期位置としている。

図 9(a) は、自然特徴点の追跡結果であり、黒い点により追跡している自然特徴点の位置を示している。追跡された自然特徴点は信頼性を評価することで、信頼性の高い自然特徴点のみが追跡されている。

図 9(b) は、4 個のマーカ位置を直線で結び四角形で表示しており、破線の四角形が 2 章の移動位置予測による位置合わせ手法の結果を、実線が 3 章の自然特徴点を併用した位置合わせ手法の結果を示している。実験では、マーカが画面外に出た時の両手法の位置合わせ精度を比較するために、入力画像の左半分を画面外と想定し、右半分のみで追跡を行なっている。移動位置予測のみによる手法では画面外に出たマーカは予測位置をマーカ位置としているので、ジャイロセンサのドリフトや予測の誤差の蓄積により、位置ずれが生じている。一方、マーカに加えて自然特徴点を用いた手法では、自然特徴点を用いてジャイロセンサのドリフトや予測の誤差を修正しているため、位置合わせ誤差は抑えられていることが確認できる。



(a) 自然特徴点追跡結果 (b) 位置合わせ結果

図 9: 自然特徴点を用いた位置合わせ実験の結果

グラフィックワークステーション (Onyx2 IR 16CPU MIPS R10000 195MHz) で自然特徴点を用いた位置合わせを 16CPU で並列処理した時, 処理にはフレーム当たり約 130ms が必要であった.

## 5 まとめ

本稿では, 拡張現実感における現実環境と仮想環境の位置合わせ問題に対して, ステレオカメラから得られるマーカの三次元位置情報とジャイロセンサから得られるカメラの姿勢情報を用い, カメラの平行移動を考慮したマーカの移動位置予測手法を提案した. また, 移動位置予測手法を自然特徴点の追跡に適用することにより, 計測範囲を拡大させる位置合わせ手法について述べた. 実際に拡張現実感システムを試作し, マーカの追跡実験とロバスト性の評価実験を行なうことにより, ビジョンセンサのみによる手法及びカメラの平行移動成分を考慮し

ていないビジョンセンサとジャイロセンサの組合せ手法に比べて, ロバストなマーカ追跡を実現できていることを確認した. また, 自然特徴点を用いることで位置合わせ範囲の拡大を実現した.

今後の課題としては, 追跡に適した自然特徴点の自動決定法と自然特徴点の動的な追加手法を検討し, 計測範囲が制限されないという利点を活かせるように拡張していくことが挙げられる.

本研究の一部は文部省・科研費補助金 (No. 09480068) による.

## 参考文献

- [1] R. T. Azuma: "A Survey of Augmented Reality," Presence, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [2] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann: "Knowledge-based Augmented Reality," Commun. of the ACM, Vol. 36, No. 7, pp. 52-62, 1993.
- [3] M. Bajura, H. Fuchs and R. Ohbuchi: "Merging Virtual Objects with the Real World: Seeing Ultrasound Imagery within the Patient," Proc. SIGGRAPH'92, Vol. 26, No. 2, pp. 203-210, 1992.
- [4] T. Ohshima, K. Satoh, H. Yamamoto and H. Tamura: "AR<sup>2</sup> Hockey: A Case Study of Collaborative Augmented Reality," Proc. ICPR'98, Vol. 2, pp. 1226-1229, 1998.
- [5] 神原, 大隈, 竹村, 横矢: "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.
- [6] 小林, 井上, L. Quan, 大田: "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.
- [7] S. You, U. Neumann, and R. Azuma: "Hybrid Inertial and Vision Tracking for Augmented Reality Registration," Proc. IEEE Virtual Reality'99, pp. 260-267, 1999.
- [8] J. Park, S. You, and U. Neumann: "Natural Feature Tracking for Extendible Robust Augmented Realities," IWAR'98, 1998.
- [9] U. Neumann, and S. You: "Natural Feature Tracking for Augmented Reality," IEEE Trans. Multimedia, Vol. 1, No. 1, pp. 53-64, Mar. 1999.