

任意位置の複数平面を用いた AR 位置合わせ手法

植松 裕子[†] 齋藤 英雄[†]

[†] 慶應義塾大学理工学部情報工学科

抄録

Augmented Reality(AR)において、仮想物体を現実世界に位置合わせすることは最も重要な課題である。また近年では、センサや人工的なマーカではなく自然特徴を用いた位置合わせ手法が望まれている。そこで本研究では、現実世界に平面が多数存在しているという事実に注目し、未校正カメラで撮影された画像列から、自然特徴として任意位置・姿勢の複数平面を用いるビジョンベースの位置合わせ手法を提案する。本手法では、利用する複数平面でそれぞれ定義した world 座標系において射影行列を算出し、全ての world 座標系に共通となる射影空間を用いてそれらを統合し、仮想物体を入力画像に合成する。また、利用する平面の数による精度の比較を行うことで、任意位置・姿勢の複数平面であっても、位置合わせの精度を向上できることを示す。

Image Based Registration for Augmented Reality by Using Multiple Planes

Yuko Uematsu[†] Hideo Saito[†]

[†] Department of Information and Computer Science, Keio University

ABSTRACT

This paper presents a novel registration method for overlaying a virtual object onto real-world by using multiple planes in arbitrary position and pose. Recently, AR registration methods which do not require neither artificial markers nor sensors are desired. We assign a 3D coordinate system for each plane independently. For each coordinate system, projection matrix is computed in order to relate the coordinate system to input images. Then, all the 3D coordinates are integrated into a projective 3D coordinate space that is defined by two base images. Such integration can reduce errors in registration of a virtual object with the real-world coordinate. For demonstrating the effectiveness of the proposed method, an experiment for overlay of a virtual object into an image sequence taken with a handy video camera is performed. Error analysis via a synthesized image sequence is also performed, which indicates that the integration of a number of marker planes reduces the registration error.

1 はじめに

現実世界と仮想世界を融合するための技術として、Augmented Reality(AR)/Mixed Reality(MR) という技術がある。一般によく知られた Virtual Reality(VR) は、コンピュータで作られた仮想世界の中に人間が入っていくというアプローチであるが、AR/MR では仮想世界だけでなく現実世界も扱うことで、相互に補完・増強し、両者を融合した新しい世界を生み出すことができ

る。実際に、エンターテインメント、医療、教育などの分野で利用するための研究も進んでいる [1, 2, 3]。それらの例として、MR システム研究所が開発した“MR ホッケー”がある [4]。これは、プレーヤーがシースルーの Head Mounted Display(HMD) を装着し、テーブル上に浮いている仮想のパックを打ち合うというものである。HMD がシースルーであるため、現実世界(テーブル)に仮想物体(パック)が重畳表示されて見え、

従来の VR アプリケーションなどでは体感できない臨場感を味わうことができる。また、Billinghurst, 加藤らによって “Magic Book” というアプリケーションも開発されている [5, 6]。黒色のマーカを印刷した紙をシースルーの HMD で見ることで、その紙の上に 3 次元の仮想オブジェクトを表示し、ページごとにマーカを認識して物語を展開する 3 次元絵本である。その他にも、インテリアデザインや機械の修理などのアプリケーションも開発されている [7]。このような現実世界と仮想世界の整合における課題は、両者の正確な位置合わせを、仮想物体の画質・陰影などを考慮し、遅延なくリアルタイムに実現することにある。これらは、幾何学的整合性、光学的整合性、時間的整合性 [2] と呼ばれるが、本論文ではこれらの課題のうちの幾何学的整合性問題を解決する一手法について述べる。

将来的に望まれる AR システムでは、任意の環境で使用できることが必要となる。そのため、センサの有効範囲に制限されたり人為的なマーカを配置することなく、ビジョンベースで自然特徴を用いる手法を進展させることが期待されている。そこで本論文では、視点から撮影された画像を用い、前述のような自然特徴により幾何学的整合性問題を解決する手法を提案する。提案手法では、自然特徴として現実世界に存在する複数の平面を用いる。これは、室内や都市の屋外のような現実世界には、多くの平面が存在するという事実注目しているためである。複数の平面を用いる手法は以前にも提案されているが、平面が直交しているなどの条件が必要であった [8, 9]。そこで、それぞれの平面の関係性を必要としない任意位置・姿勢の複数平面を用い、射影グリッド [10] および射影復元による射影空間を用いて複数平面からの情報を 1 つに統合することが可能な手法を提案する。

2 提案手法

図 1 に手法の概要を示す。未校正カメラによって現実環境を撮影した連続画像列を入力とする。本手法では、任意位置・姿勢の複数平面を自然特徴として用いている。同様に複数平面を用いた従来手法 [8] では、それらの平面同士が直交しているなどの条件が必要であったが、本手法では、平面同士の関係性を全く必要としない。利用する各平面に対して、それぞれ独自の world 座標系を定義し、それら全ての world 座標系において

共通となる射影空間を用いて複数平面の情報を 1 つに統合することで、任意位置・姿勢の複数平面を利用することを可能にしている。

n 枚の平面が存在する入力画像列に対して、自然特徴点抽出・追跡処理を行い、抽出された特徴点を利用する平面ごとに分ける。抽出された特徴点を用い、各平面について world 座標系 - 画像座標系間の Homography を求める。次に、各 Homography を 2 次元から 3 次元に拡張し、それぞれ射影行列を算出する。つまり、射影行列は利用する平面の数だけ算出されることになる。本手法では、利用する平面同士の関係性を必要としないため、各平面で自由に world 座標系を定義することができる。すなわち、全 world 座標系 - 画像座標系間の射影行列が算出されるのである。これらの射影行列には、算出の過程で推定したパラメータの誤差がそれぞれ含まれている可能性がある。そこで、これらを 1 つに統合することで、それぞれの誤差を吸収することができる。

統合を行うためには、各 world 座標系で共通となる座標系が必要となる。そこで本手法では、2 つの視点から撮影された画像から成る射影空間を定義し、複数の射影行列を 1 つに統合する。この射影空間は、2 つの画像のみによって成り立つため、world 座標系の定義に依らず全ての平面に対して共通である。そして、統合された射影行列を用い、仮想物体を現実環境に位置合わせし、合成する。図 2 に、利用する平面とその world 座標系の定義を示す。

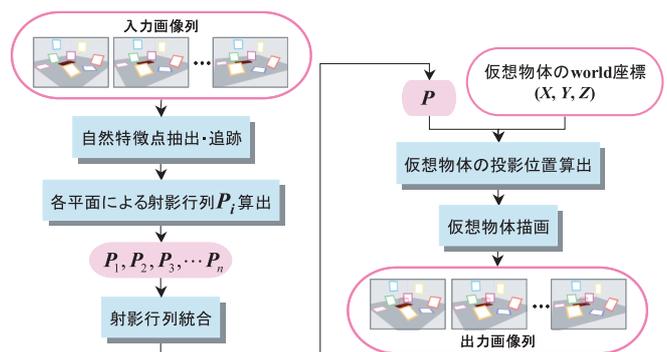


図 1 手法の概要

2.1 自然特徴点の抽出・追跡

本手法では、各フレームでの射影行列を求めるために Homography を算出するが、その算出の際には、対

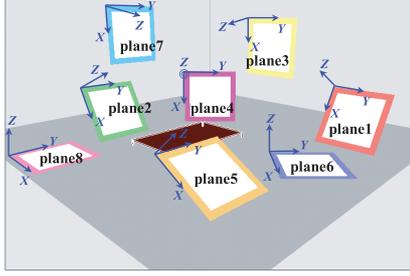


図 2 利用する平面と world 座標系の定義

象とする平面上で 4 点以上の対応点がわからなくてはならない。また、2.3 で述べる射影空間を定義するために必要な F-Matrix を算出する際にも、8 点以上の対応点が必要となる。このため、対応点を自動的に抽出し、フレーム間で追跡することは非常に重要である。そこで本手法では、自然特徴点抽出・追跡手法として、処理が高速、実装が容易、結果の信頼度が高いという点から、Kanade-Lucas-Tomasi 手法 (KLT-Tracker) [12] を適用し、図 3 のように特徴点を抽出する。

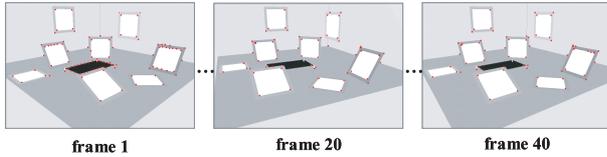


図 3 自然特徴点抽出例

2.2 射影行列の算出

射影行列とは world 座標系 (3 次元) と画像座標系 (2 次元) の関係を表す 3×4 の行列であり、次式のように表される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \simeq P \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで $Z = 0$ の場合を考えると、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} &\simeq P \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &\simeq \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \simeq \hat{P} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

となり、射影行列 P の 3 列目成分を削除した 3×3 の行列 \hat{P} で表すことができる。その結果 \hat{P} は、2 次元座標と 2 次元座標の関係を表したものとなり、Homography と同等のものと言える。つまり、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \simeq \hat{P} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \simeq H \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\hat{P} = H$$

となる。そこで本手法では、この理論を用いて Homography から射影行列を求めていく。

2.2.1 Homography の算出

図 2 に示した平面は、各 world 座標系において $Z = 0$ の平面である。そこで前述のように、world 座標系 (2 次元) と画像座標系との Homography を算出する。算出に必要な対応点は、2.1 で抽出した自然特徴点を 4 点以上用いる。

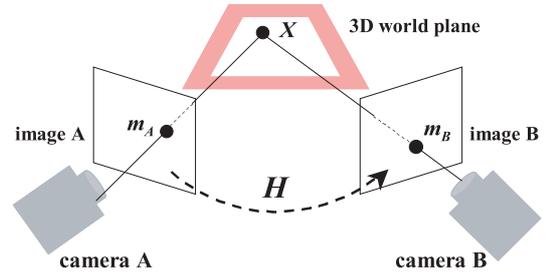


図 4 Homography による対応付け

2.2.2 内部パラメータの算出

カメラの内部パラメータから成る内部行列 A を次のように定義する。

$$A = \begin{pmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \left[\begin{array}{l} c_x, c_y : \text{画像中心} \\ f : \text{焦点距離} \end{array} \right] \quad (4)$$

ここで、

$$P = A [R | t] = A [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \quad (5)$$

のように回転行列 R を 3 つの列ベクトルとして表すことができるので、式 (3) と合わせると、

$$\hat{P} = A [r_1 \ r_2 \ t] = H \quad (6)$$

と考えることができる．よって， R の性質より， r_1 と r_2 の内積が 0 となることを利用し，焦点距離 f を算出する．

2.2.3 外部パラメータの算出

カメラの外部パラメータである回転行列 R および並進ベクトル t を求める．2.2.2 で R の第 1, 2 列ベクトル r_1, r_2 と t は求めているので， R の第 3 列ベクトルがわかればよい．そこで，また R の性質より， r_3 は r_1 と r_2 の外積となることを利用する．よって R は，

$$R = [r_1 \ r_2 \ (r_1 \times r_2)] \quad (7)$$

となる．これで，各平面から求めた Homography による射影行列がわかる．

2.3 射影行列の統合

本手法では，2 つの視点から撮影した画像（参照画像）から成る射影空間を定義する．この空間というのは 2 つの参照画像のみによって決まるものなので，利用する平面に関係なく，全 world 座標系で共通である．そこで図 5 のように，ある平面 i で定義された world 座標系と射影空間座標系の関係を T_{wp_i} という 4×4 の行列で表し，射影空間座標系と画像座標系の関係を T_{pi_i} という 3×4 の行列で表すと， T_{wp_i} を求めることにより，2.2 で求めた P_i と合わせて $T_{pi_i} = P_i T_{wp_i}^{-1}$ となって T_{pi_i} を算出できるので，その成分を平均して 1 つに統合することで world 座標 - 画像座標の変換が一意に決まる．

本手法では，統合に用いる射影空間として，射影グリッドによる空間と射影復元の考え方をを用いた空間の 2 通りを定義する．以下では，まず各座標系間を関係付ける行列 (T_{wp_i}, T_{pi_i}) の算出法について述べ，次に 2 つの射影空間の定義および，world 座標に対応する射影空間座標の算出について示す．

2.3.1 T_{wp_i} の算出

world 座標系から射影空間座標系へと変換する行列を T_{wp} と定義する．ある平面 i 上の点について，world 座標を $C_w \simeq [X_j, Y_j, Z_j, 1]^T$ ，それに対応する射影空間座標を $C_p \simeq [p_j, q_j, r_j, 1]^T$ ，変換行列を T_{wp_i} とす

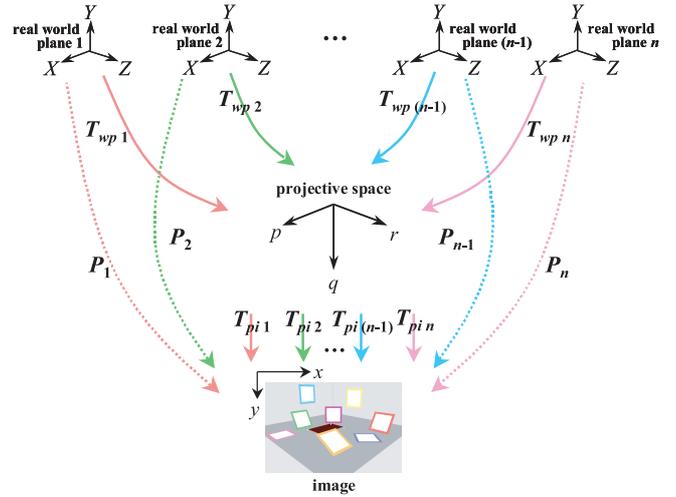


図 5 n 枚の平面を用いたときの各座標系の関係

ると，

$$T_{wp_i} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{bmatrix} \quad (8)$$

を用いて

$$C_p \simeq T_{wp_i} C_w \quad (9)$$

のように表すことができる．

T_{wp_i} を定数倍しても式 (9) は成り立つので， $t_{44} = 1$ と置いて式 (9) を整理すると

$$M_j t = b_j \quad (10)$$

となる．ただし

$$M_j = \begin{bmatrix} C_{w_j}^T & 0 & 0 & -X_j p_j & -Y_j p_j & -Z_j p_j \\ 0 & C_{w_j}^T & 0 & -X_j q_j & -Y_j q_j & -Z_j q_j \\ 0 & 0 & C_{w_j}^T & -X_j r_j & -Y_j r_j & -Z_j r_j \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$t = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_{41} \ t_{42} \ t_{43}]^T \quad (12)$$

$$b_j = \begin{bmatrix} p_j \\ q_j \\ r_j \end{bmatrix} \quad (13)$$

である．よって，world 座標中の k 点 ($k \geq 5$) と対応する射影空間座標中の k 点が与えられれば，式 (10) は

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_k \end{bmatrix} t = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \quad (14)$$

とすることができるので，最小自乗法より

$$t = \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_k \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

として T_{wp_i} を算出することができる．ただし

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_k \end{bmatrix}^+ = \left(\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_k \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_k \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_k \end{bmatrix}^\top \quad (16)$$

とする．

また， $k = 5$ の場合，その 5 点はどの 3 点も同一直線上に存在してはならず，どの 4 点も同一平面上に存在してはならないという制限がある．

2.3.2 T_{p_i} の算出

平面 i について T_{wp_i} を求めると， $T_{p_i} = P_i T_{wp_i}^{-1}$ によって T_{p_i} を算出できる．そこで，利用する n 枚の平面についてそれぞれ $T_{p_{i_1}}, \dots, T_{p_{i_n}}$ を求め，それらの成分を平均したものを統合後の T_{p_i} とする．

$$T_{p_i} = \begin{bmatrix} t_{i11} & t_{i12} & t_{i13} & t_{i14} \\ t_{i21} & t_{i22} & t_{i23} & t_{i24} \\ t_{i31} & t_{i32} & t_{i33} & t_{i34} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_{p_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} t_{i11} & t_{i12} & t_{i13} & t_{i14} \\ t_{i21} & t_{i22} & t_{i23} & t_{i24} \\ t_{i31} & t_{i32} & t_{i33} & t_{i34} \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.3.3 射影空間座標の算出

T_{wp_i} を算出するには，world 座標と射影空間座標の対応点が 5 組以上必要となる．ここでは，各射影空間の定義と，world 座標および参照画像座標から，対応する射影空間座標を算出する方法について述べる．

射影グリッドによる射影空間

射影グリッド空間 [10] の定義を以下に示す．図 6 のように 2 台の参照カメラが存在するときに，それらの中心射影によって構成される非ユークリッド空間を“射影グリッド空間”とし，この空間を定義する 3 軸 (P , Q , R 軸) を，カメラ A から得られる画像 (参照画像 A) の U_A 軸， V_A 軸，およびカメラ B から得られる画像 (参照画像 B) の U_B 軸とする．ここで，ある点の world 座標を $C_w \simeq [X_j, Y_j, Z_j, 1]^\top$ ，2 つの参照画像上に投影された座標をそれぞれ $C_A \simeq [u_A, v_A, 1]^\top$ ， $C_B \simeq [u_B, v_B, 1]^\top$ ，対応する射影空間座標を $C_P \simeq [p, q, r, 1]^\top$ とすると， C_A は直線として，また C_B を通り V_B 軸に平行な参照画像 B 上の直線は平面として射影グリッド空間に逆射影されるので， C_P はその直線と平面の交点，つまり $C_P \simeq [u_A, v_A, u_B, 1]^\top$ として表すことができる．よって，参照画像上での座標から world 座標に対応する射影空間座標を 5 点求め，式 (15) より T_{wp_i} を算出する．

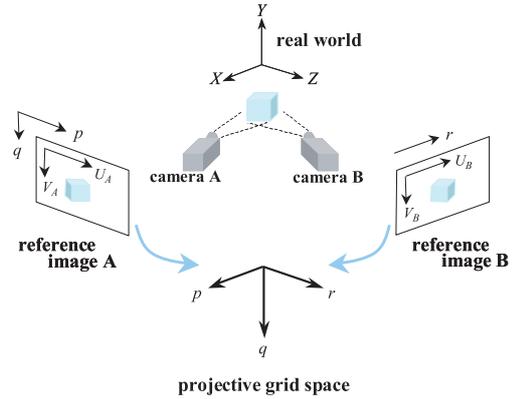


図 6 射影グリッド空間の定義

射影復元による射影空間

3 次元の射影変換は，同次座標を用いて次のように表すことができる．

$$\lambda \tilde{X}' = H_p \tilde{X} \quad (19)$$

ここで， H_p は任意の 4×4 行列である．射影変換のもとでは，長さや角度のみでなく，平行性も保たれない．3 次元形状を復元した結果が，このような 3 次元射影変換の不定性を持つとき，その復元を射影復元 [11] とよぶ．

2 つの視点から撮影された画像 (参照画像 A, B) の

エピポラ幾何が既知であるとき，その射影空間は一般に次のように定義される．

$$\begin{aligned} P_A &= [I \mid 0] \\ P_B &= [Me_B] \end{aligned} \quad (20)$$

$$M = -\frac{[e_B]_{\times} F_{AB}}{\|e_B\|^2} \quad (21)$$

ここで， F_{AB} は参照画像 A から B への F-matrix， e_B は参照画像 B におけるエピポルである．射影空間での座標 $C_p \simeq [p, q, r, 1]^T$ と 2 枚の参照画像上での座標 $C_A \simeq [u_A, v_A, 1]^T$ ， $C_B \simeq [u_B, v_B, 1]^T$ との間には，次の関係が成り立つ．

$$AC_p = 0 \quad (22)$$

A とは， P^i を射影行列 P の i 番目の行ベクトルとしたとき，

$$AC_p = \begin{bmatrix} P_A^1 - u_A P_A^3 \\ P_A^2 - v_A P_A^3 \\ P_B^1 - u_B P_B^3 \\ P_B^2 - v_B P_B^3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

と表される．ここで A を特異値分解すると，最も小さい特異値に対応する固有ベクトルが射影空間座標 $C_p \simeq [p, q, r, 1]^T$ となる．このように，参照画像上での座標から射影空間座標 C_p を 5 点以上求めることで，式 (15) より T_{wp_i} を算出する．

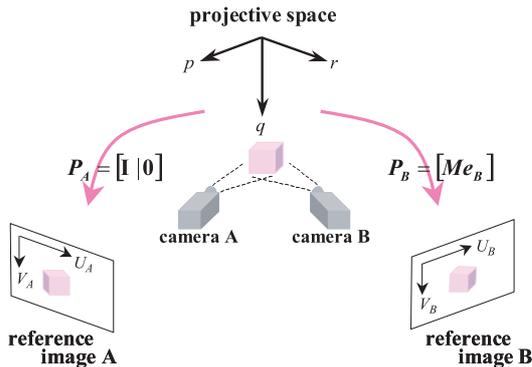


図 7 射影復元による射影空間の定義

3 実験

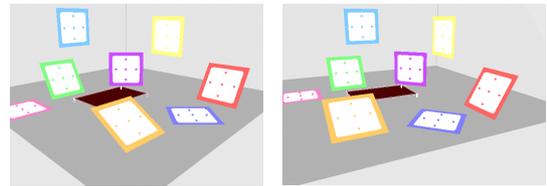
本手法の有用性を実証するために 2 つの実験を行った．両実験とも，用いた入力画像は RGB カラー画像で，画像サイズは 720×480 ピクセルである．まず，実

験 1 では未校正カメラ (SONY DCR-TRV900) によって現実環境を撮影した連続画像 (図 8) を入力画像として本手法を適用した．位置合わせに利用した平面は 8 枚であり，それらの統合には射影復元による射影空間を用いた．次に実験 2 では，OpenGL により作成した画像 (図 9) を入力とし，1 枚の平面のみを利用した場合と，8 枚を統合した場合を比較した．CG 画像を入力としたのは，仮想物体を位置合わせする座標の理論値を正確に知るためであり，処理の流れは実験 1 (実画像を用いた実験) と変わらない．また，射影グリッドによる射影空間と射影復元による射影空間を用いた場合の比較も行った．なお，両実験とも仮想物体のレンダリングには OpenGL を用いている．また，射影空間を構築するための参照画像は，入力画像の初期フレームと最終フレームとした．



(a) frame0 (b) frame50

図 8 入力画像列 (実験 1)



(a) frame0 (b) frame40

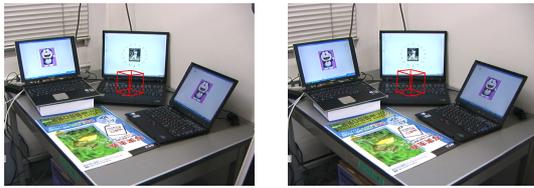
図 9 入力画像列 (実験 2)



(a) 実験 1 (b) 実験 2

図 10 位置合わせする仮想物体

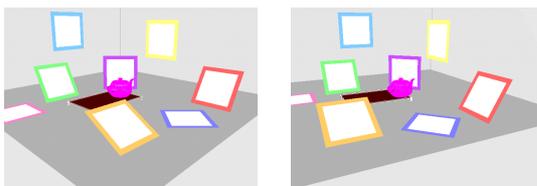
実験 1 において，仮想物体を入力画像列に位置合わせし，合成した結果を図 11 に示す．カメラの移動に応じて各カメラ位置での射影行列を算出し，仮想物体を適切な場所に位置合わせしていることがわかる．



(a) frame0 (b) frame50

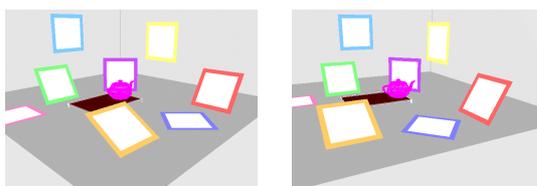
図 11 合成画像列 (実験 1)

実験 2 において, 1 平面のみを用いた場合および 8 平面を 2 通りの射影空間でそれぞれ統合した場合の合成結果を図 12 ~ 14 に示す. また, 利用する平面数の違いによる理論値との誤差の比較を図 15 に示す. この結果より, 8 平面を射影空間で統合した結果の方が, 明らかに理論値との誤差が小さくなっている. よって本手法を適用することで, 平面同士の関係性が全くわかっていないような場合でも, 任意位置・姿勢の複数平面と全ての world 座標系に共通となる射影空間を用いることで, 複数平面の情報を 1 つに統合し, さらに推定されたパラメータに含まれる誤差を相互に打ち消し合っ て正確な位置合わせを実現できることがわかる. また, 利用する平面が少ないと, フレーム間でのぶれが大きいこともわかる. このことから, 複数平面を利用した方が, 人間の見た目にも滑らかで見やすい合成画像を生成できると考えられ, どのような平面も用いることができる本手法は, 非常に有意であるといえる.



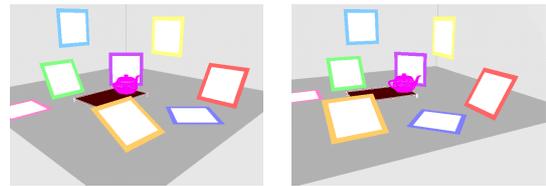
(a) frame0 (b) frame40

図 12 合成画像列 (実験 2 平面 1 枚)



(a) frame0 (b) frame40

図 13 合成画像列 (実験 2 平面 8 枚 射影グリッド)



(a) frame0 (b) frame40

図 14 合成画像列 (実験 2 平面 8 枚 射影復元)

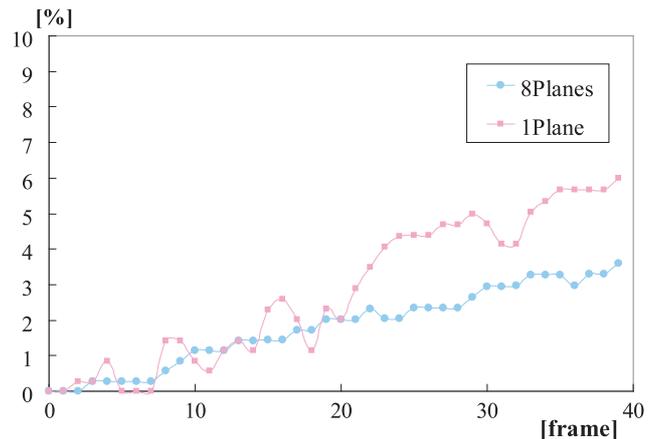
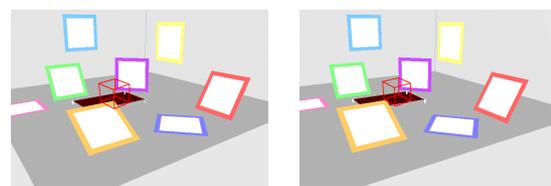


図 15 平面の数の違いによる理論値との誤差の比較

また, 射影グリッドを用いた場合と射影復元を用いた場合との比較を行うため, 8 頂点それぞれの座標を各フレームで算出し, それらを線をつないぐことで立方体を描画した. 図 16 ~ 17 に結果を示す. 射影グリッドを用いた場合では, 立方体が歪んで描画されているフレームがあることがわかる. 一方, 射影復元を用いた場合は, どのフレームでの歪みなく描画されていることがわかる. これは, 射影復元を用いた場合は, これにより定義された world 座標とそれに対応する画像座標の関係は線形関係にあるのに対して, 射影グリッドの場合は, world 座標と画像座標の関係が厳密には線形の関係では無いことに原因がある.



(a) frame20 (b) frame30

図 16 射影グリッドによる射影空間を用いた結果

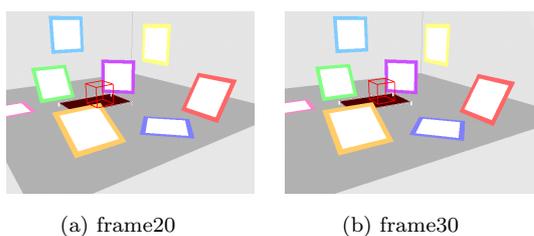


図 17 射影復元による射影空間を用いた結果

4 おわりに

本論文では、視点から撮影された画像のみを用いて幾何学的整合性問題を解決する一手法を提案した。本手法では、使用環境に条件の多いセンサや人工的なマーカを必要とせず、現実世界に存在する自然特徴のみを用いて、各フレームにおけるカメラの3次元位置・姿勢を推定し、仮想物体を入力画像に合成した。また、自然特徴として、室内や都市の屋外に多数存在する平面を用いることにより、使用環境の条件を軽減させることができた。さらに、平面同士の関係性を必要としない任意位置・姿勢の複数平面を用い、それらの情報を全ての平面に対して共通となるように定義した射影空間を用いて統合することにより、仮想物体を現実環境に正しく位置合わせし、合成画像を生成することができた。

今後は、精度の向上を図るとともに、より広範囲に適用できるように改良することが重要である。

参考文献

- [1] R. T. Azuma: “A Survey of Augmented Reality”, *Presence*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [2] 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, No. 3, pp. 266–272, 1998.
- [3] R. T. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier and B. MacIntyre: “Recent Advances in Augmented Reality”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 34–47, 2001.
- [4] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: “協調型複合現実感システムの実現 - MR ホッケー -”, *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集*, Vol. 2, pp. 165–168, 1997.
- [5] M. Billinghurst, S. Campbell, D. Hendrickson, W. Chinthammit, I. Poupyrev and K. Takahashi: “Magic Book: Exploring Transitions in Collaborative AR Interfaces”, *SIGGRAPH 2000 Emerging Technologies*, Vol. 21, No. 6, pp. 34–47, 2001.
- [6] 加藤博一, M. Billinghurst, I. Poupyrev, 鉄谷信二, 橘啓八郎: “拡張現実感技術を用いたタンジブルインタフェース”, *芸術科学会論文誌*, Vol. 1, No. 2, pp. 97–104, 2002.
- [7] <http://www.mr-system.com/>
- [8] G. Simon and M-O. Berger: “Reconstructing while registering: a novel approach for markerless augmented reality”, *Proc. of the IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002)*, pp. 285–294, 2002.
- [9] G. Simon, A. W. Fitzgibbon and A. Zisserman: “Markerless Tracking using Planar Structures in the Scene”, *Proc. of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR2000)*, pp. 120–128, 2000.
- [10] H. Saito and T. Kanade: “Shape reconstruction in projective grid space from large number of images”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 49–54, 1999.
- [11] 佐藤淳: “コンピュータビジョン”, コロナ社, 2003.
- [12] J. Shi and C. Tomasi: “Good Features to track”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593–600, 1994.
- [13] S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto and H. Tamura: “MR Platform: A Basic Body on Which Mixed Reality Applications Are Built”, *Proc. of the IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2002)*, pp. 246–253, 2002.