

3次元データとシーンの位置合わせを 実現する Augmented Reality システムの提案

—動物の放射線治療の効率化に向けたシステムの提案—

谷山 友規^{†1} 赤木 康宏^{†2} 沖 佳憲^{†2} 伊藤 源太^{†3} 桃井 康行^{†3} 川崎 洋^{†2}

概要: 本研究では、動物病院における位置合わせ課題を解決するためのシステムとして、異なる2地点間において物体の3次元位置合わせを効率的に行うための Augmented Reality システムを提案する。本研究で解決する課題は、病院AにおいてCTスキャナにより特定した動物の病巣を、病院Bにある放射線装置により治療する際に必要な、病院間の動物の位置合わせ問題である。この問題を解決するために、病院Aにおいて動物の3次元形状を計測し、その形状データを病院BにおいてARシステムとしてカメラ画像に重ね合わせて表示する。重ね合わせの際に、各種画像処理により重ね合わせる動物どうしの差を強調することで、この作業を容易かつ高精度化する。

1. はじめに

Augmented Reality(AR)を用いた情報提示システムは、エンターテインメントの分野をはじめとし、カーナビゲーションや医療機器にまでその利用範囲を広げている。特に、車載カメラシステムや手術支援システムのような機器に対して、ARシステムを組み込む場合、実画像と仮想映像とを正確に重ね合わせることに高度な信頼性が求められる。さらに、提示する情報自体も目的に応じて、半透明化処理およびエッジ強調処理等により、利用者にとって判断しやすい映像に変換を行う必要がある。前者の、実映像と仮想映像の正確な位置合わせを行うためには、カメラとプロジェクタおよびディスプレイ等の投影装置との間の位置合わせが必要となる。また後者では、目的に応じた画像処理フィルタの設計が重要となる。

本研究では2箇所の異なる病院間において患者の3次元形状データを共有するためのARシステムを提案する。具体的には、動物に対する放射線治療現場の課題として、病巣を特定するためのCTスキャナを有する病院または処置室(A)と、放射線治療装置を有する病院または処置室(B)とが異なる場合、両装置間で患者である動物の姿勢を一致させる必要がある。そこで本研究では、病院Aに設置した

3次元形状計測装置により計測した患者の3次元形状データを、病院Bに設置したARシステムに投影することで、両者間の姿勢合わせを可能にするARシステムを提案する。

2. 関連研究

ARシステムに関する研究は、従来は軍事や医療分野が中心であったが、現在ではエンターテインメントやカーナビゲーションシステムにも用いられるなど、より実用的かつ幅広い利用を想定したシステムが開発されている。

その中でも特に医療支援を目的としたシステムは、人間の感覚のもつ限界を補うことのできる技術として注目されている。Hansenらの研究では、MRIにより事前に取得した臓器内部の血管構造を、iPadのもつカメラ画像上に重ね合わせて表示する手術支援システムを提案している[1]。この方法では、画像から高精度に臓器の形状を推定する必要があり、対象となる臓器自身が複雑に変形するような場合では適用が難しい。Boehlerらの研究では、臓器の位置を正確に推定するために、臓器の形状をあらかじめ3次元のボクセルデータとして表現しておき、手術中に計測した臓器の3次元形状と位置合わせする方法をとっている[2]。Kocevらの研究では、3次元形状計測装置の1つであるKinectを利用することで、術者の動作を認識し手術中に非接触で機器等の操作を可能にしている[3]。以上のように、手術を行う際に3次元形状計測装置を用いて、術者に必要な情報を提示することで、人間の理解を補助する手法が提案されている。

^{†1} 現在、鹿児島大学

Presently with Kagoshima University

^{†2} 現在、鹿児島大学 大学院 理工学研究科

Presently with Kagoshima University

^{†3} 現在、鹿児島大学 獣医学部

Presently with Kagoshima University

このような3次元形状を用いたARシステムにおいて重要となることは、システムが利用者の視点(カメラ等)のもつ座標系を正確に理解し、提示する情報自身のもつ座標系に変換することである。Kinectに代表される3次元形状計測技術においては、カメラを用いたシステムの位置合わせに関する研究が数多く行われている。例えば、チェッカーボードを用いた方法、ARマーカーと呼ばれる既知の模様を用いた方法[4]、立方体の箱を用いた方法等がある[5]。これらの方法では、既知の大きさ、模様をした校正儀を用いることで、校正儀のもつ座標系と、カメラのもつ座標系間の変換を求めることができる。こうして各機器から世界座標系(校正儀の座標系)との間の変換パラメータを求めておけば、任意の機器間で座標系を変換することが可能となる。

3. システムの概要

本研究では、3次元計測の1手法として、プロジェクタとカメラの各1台ずつを使用する方法を利用し、立方体を利用したシステムのキャリブレーションを実現する。本研究では、この3次元形状計測手法に基づき、2つの異なる病院のもつ検査・手術環境を仮想空間上で一致させることで、ARシステムを実装する。

提案するARシステムの概略図を図1に示す。本システムは、2つの異なる病院(AおよびB)間において、異なる構成をしている(図1)。まず、病院A(図1・A)においては、CT装置の座標原点を基準とし、対象の動物の3次元形状を取得する。これにより、病院Aにおいては治療を施すべき患部の3次元位置が正確に決定される。次に、患部の放射線治療を行うために、専用の装置がある病院B(図1・B)にその動物を移送し、その放射線治療装置の座標系において、病院Aで撮影した動物の3次元形状を提示する。さらに、対象の動物を提示位置と一致するように姿勢を取らせる。これにより、病院Bの装置上における対象動物の位置姿勢を、病院Aにおいて撮影した際の姿勢と一致させることができるので、目標の患部に対して正しく放射線を照射することができる。なお一連の作業において、動物は麻酔により眠らされており、能動的には動かないものとする。

以上本研究で提案するARシステムでは、病院Aにおける動物の3次元形状計測、病院AおよびBのもつ座標系間の変換、および病院Bに設置したカメラ上での、動物の3次元形状の提示を実現する。本システムを実現するための一連の流れを以下に示す。

- (1) 病院Aにおけるプロジェクタ-カメラシステムの校正
- (2) 病院Aにおける対象(この場合は治療対象の動物)の3次元形状計測
- (3) 病院Bにおける複数カメラシステムの校正
- (4) 病院Aから病院Bへの座標変換パラメータの算出

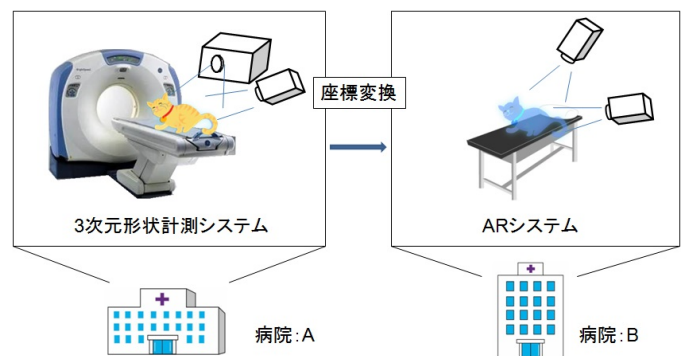


図1 病院間で患者の姿勢合わせを行うシステムの構成

- (5) 病院Bにおける(2)で計測した動物形状の提示
 - (6) 画像処理による(5)の強調表示
 - (7) 病院Bにおける実動物の位置合わせ(手作業)
- 各手法の詳細については、第4章では(1)～(4)を、第5章では(5)～(6)について述べる。

4. 3次元計測システム

本章では、病院Aにおいて用いる3次元形状計測に用いるプロジェクタ-カメラシステムおよび病院Bにおいて用いる動物の位置合わせのための複数カメラシステムの詳細について述べる。

4.1 既知の物体を用いたカメラシステムの校正

複数台のカメラ、またはカメラとプロジェクタから構成されるシステムにより形状計測および形状の投影を行うためには、各カメラ、プロジェクタの座標系および、それらが設置されている空間の座標系との関連性、つまり各座標系間の剛体変換を求める必要がある。本研究では、剛体変換を3次元の回転行列(式(1)のR)および、3次元の平行移動ベクトル(式(1)のt)の組み合わせで表現する(式(2))。

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, t = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

本研究では、形状が既知、かつ各面にパターン印刷された立方体を用意し、これをカメラから撮影することで、立方体の1頂点を原点としそこから伸びる3辺を軸とする世界座標系を定義し、カメラおよびプロジェクタ座標との変換パラメータR,tを推定する。本稿では、病院Aにおける世界座標系からカメラ座標系への変換行列を Rt_{ac} 、プ

ロジクタ座標系への変換を Rt_{ap} , 病院 B におけるカメラ 1 への変換行列を Rt_{bc1} , カメラ 2 への変換行列を Rt_{bc2} と記述する.

4.2 プロジェクタ-カメラシステムによる 3 次元計測

病院 A において対象となる動物の 3 次元形状を計測するために, プロジェクタ-カメラシステムによる形状計測手法を用いる. 本研究では, 3 次元形状を計測する代表的な手法である, GrayCode と呼ばれる複数枚のパターン画像を用いた方法を利用する [6][7][8]. この方法は, 計測対象物体を短時間で高精度に計測できるという特徴があり, かつシステム全体に可搬性があり, ベッドサイドで用いる際に有用であることから, 本研究で提案するシステムとして採用した.

本形状計測手法により取得できる情報は, 対象物体を構成する 3 次元点群, 各 3 次元点群データから構成されるポリゴンメッシュ, およびカメラから撮影した画像に対応するテクスチャ座標である. これらのデータは, 病院 A におけるカメラの座標系により表現されている.

4.3 複数カメラシステムによる 3 次元物体の提示

病院 B に設置する複数カメラの座標系において, 病院 A で計測した 3 次元物体 ($O_a = (x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)$) の形状を提示するための方法について述べる. 物体 O_a の座標系は病院 A におけるカメラから見たものであるため, これを世界座標系に変換した後に, 病院 B におけるカメラの座標系に変換すればよい.

$$O_{b1} = Rt_{bc1} \cdot Rt_{ac}^{-1} \cdot O_a \quad (3)$$

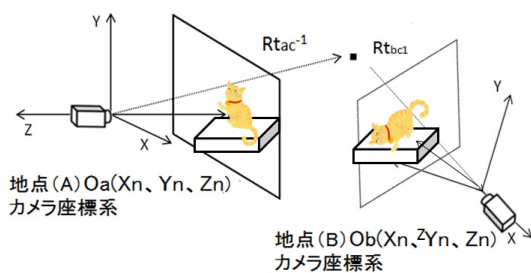


図 2 病院間における座標変換

また, 病院 B におけるカメラ 2 の座標系への変換は, (式 3) の Rt_{bc1} を Rt_{bc2} へ変更することで得られる. 以上の方法により求めた 3 次元形状 O_{b1} を, 病院 B で用いるカメラの焦点距離を用いて透視投影変換することで, 画面上に提示することができる.

5. 動物位置合わせのための画像処理

本章では, 病院 B において動物形状を提示し, 位置合わせ

を行う際の作業を行いやすくするための画像処理手法について述べる. 本研究ではより実際の現場で活用できるシステムの実装を目指し, プロトタイプシステムを用いて鹿児島大学動物病院において予備実験を行った (図 3). その結果, 既存手法の組み合わせのみでは以下の 2 点の課題があることが明らかになり, その解決を行った.



(a) プロジェクタ-カメラシステム (b) 複数カメラシステム

図 3 予備実験の実験環境

まず第 1 の課題として, 撮影対象の体毛の色 (輝度) が大きく異なる際には, 撮影像に暗い (明るい) 部分が正確に計測できないという問題が生じた. この解決方法として, カメラの感度を自動的に変更し, High Dynamic Range (HDR) 撮影を行う. 本手法の詳細は 5.1 節で述べる. 第 2 の課題として, 病院 B においては, カメラを 2 台設置し, 2 視点から位置合わせが行えるような環境を整えたが, 単純に病院 A において計測した動物形状を提示するのみでは, 体毛の影響により細部の形状が判断しにくいという問題が生じた. そこで, 取得した 3 次元点情報を利用して, 4 種類の画像処理手法を適用することで, 位置合わせを容易にする工夫を行う. ここで用いる 4 種類の画像処理手法は, 背景差分, エッジ抽出, α ブレンド, 色成分の反転処理である. また, これらの画像処理手法は複数を組み合わせて利用できるように, 処理順序に優先度を設けておく. 本手法の詳細は 5.2 節で述べる.

5.1 HDR 撮影による 3 次元形状の取得

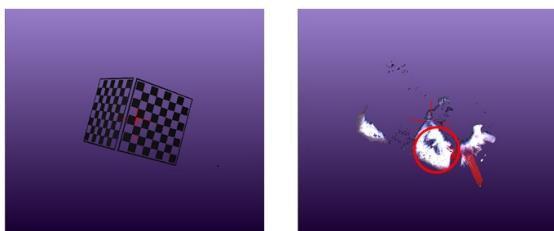
4.2 節で述べた Graycode パターンによる形状計測では, 対象物体にパターン光を投影するので, 対象物体の色に応じてカメラのダイナミックレンジを調整する必要がある. 特に濃淡のコントラストが強い対象物はダイナミックレンジから外れた部位が計測できないという問題がある (図 4). 本研究では, 計測対象である動物がどのような品種, 色, 模様であっても形状復元を行える状態にするために, カメラの感度を自動的に変更しながら 2 回撮影することで, この問題を解決する. 感度の値は, 予備実験において白と黒の体毛をもつ動物を撮影し, これに対応できる値を設定する.

以下に, 2 回の計測結果を合成するアルゴリズムを示す. これにより, 2 回の計測のどちらかで計測できていれば, 形状取得が実現できる.

(1) それぞれの 3 次元形状データからの depth 情報を取得

する。

- (2) depth 情報から 3 次元座標を求めたのち、2 次元のどこで描画されるかを確認する。
- (3) 感度が高い場合に撮影して得た 3 次元データを先に格納する。
- (4) 感度が低い場合に撮影して得た 3 次元データを (3) と同じ領域の場所に格納する。
- (5) データの点群が重ならない場合、そのままデータを格納する。
- (6) データの点群が重なる場合、感度が低い場合を採用する。



(a) キャリブレーションボックスによる復元結果 (b) HDR 前の対象が猫のクスの復元結果

図 4 3次元計測結果

5.2 画像処理による重ね合わせ映像の強調

本節では、病院 B において行う位置合わせ作業の際に生じる、現在のカメラ画像と、位置合わせ目標である 3 次元形状間の見分けにくさを解消するための画像処理手法について述べる。図 5 で各種の画像処理の効果を分かりやすくするために、校正用の立方体を例に用いて説明する。図 5(a) が入力のカメラ画像であり、図 5(c) が別の系で撮影した立方体の 3 次元形状を単純に重ね合わせたものである。なお、(c)~(f) では、位置合わせ前後の状態を 1,2 として順に示す。(c) の結果では、両物体の位置の差が明確には分からないという問題がある。これに対して (b),(d)~(f) は差が分かりやすくなっている。それぞれの手法の詳細を以下に述べる。

5.2.1 背景差分

撮影する環境によっては背景と位置合わせを行う対象物体との境界が分かりにくい場合が発生する。その場合の対処法として背景差分を用いる。背景画像は位置合わせ中にいつでも変更できるように、ユーザが指示した際のカメラ画像を背景画像として用いる。差分計算はカメラから取得した現在の画像と、背景画像との単純な差を求め、その差が閾値以下だった場合、その画素を白く表示するようにした。閾値はキャプチャ画像の影や反射の影響を考慮し 40 に設定している。その結果を図 5(b) に示す。

5.2.2 エッジ抽出

位置合わせを行う際には、人間は大まかな輪郭を手掛かりに用いることが多い。そこで、3 次元点群データから輪

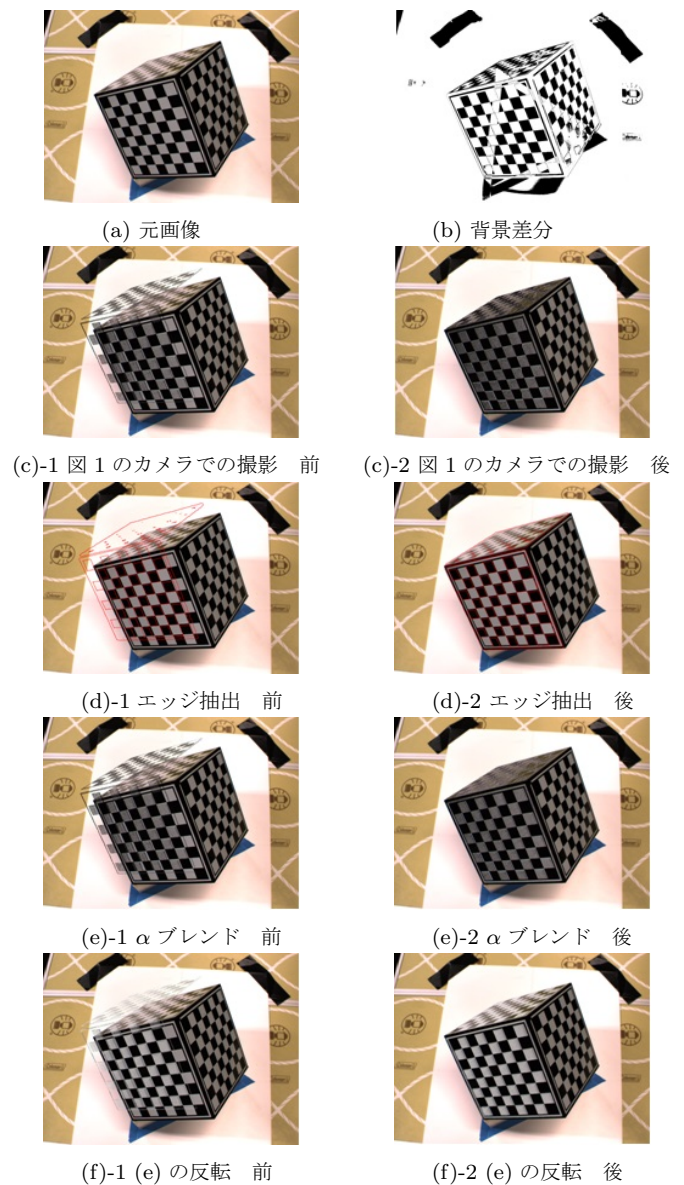


図 5 画像処理による情報提示の例

郭を検出し、これを提示する。輪郭は OpenCV のライブラリを使用し、ラプラシアンフィルタにより生成する。結果を図 5(d) に示す。

5.2.3 α ブレンド処理

本システムでは、3 次元形状をカメラ画像上に書き添えることで提示しているため、3 次元形状によりカメラ画像が隠されてしまう。そこで、 α ブレンドを用いて半透明に合成することで位置合わせを行う物体を透過して背景が見えるようにすることで問題を解消する。結果を図 5(e) に示す。

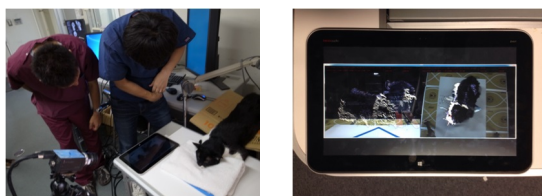
5.2.4 反転処理

ここまでの 3 種の画像処理では、形状計測時の物体のテクスチャの色を使用することで表示を行ってきたが、それでは α ブレンド処理をかけたとしても、レンダリング結果

と位置合わせを行う物体が似かよっていると、重なり具合の差を判別することが困難な場合がある。そこで、重ね合わせる3次元形状データの色を反転することで物体の重なり具合をわかりやすく表現する。結果を図5(f)に示す。

5.3 タブレット PC による情報提示

本システムのユーザが簡単に位置合わせを行えるようにするために、情報提示はタブレット PC を通じて行う。しかし、タブレット PC には複数台のカメラを制御するインターフェースなどが無いことが多いので、カメラの制御および各種画像処理を PC により行い、その結果をネットワークを通じてタブレット PC に転送することで利便性を高めた。



(a) 使用している様子 (b) タブレットの拡大図

図 6 タブレット PC を用いた位置合わせの確認

6. 実験

予備実験の際に得られた課題を解決するために、第5章で述べた各手法の検証を行った。検証項目は以下の3点である。

- 病院 A, B 間の位置合わせに関する正確性の提示
- HDR 撮影の効果
- 画像処理による視認性の向上効果の検証

実験に用いた装置は病院 A におけるシステムである、3次元形状計測を行うためのカメラとプロジェクタ、および病院 B におけるシステムである、画像処理による重ね合わせおよび位置合わせを行うための、カメラ 2 台である。各機器の配置は図 3(A) および (B) に示す。図 3(B) のカメラ間の位置は、2 台のカメラの視点の先がちょうど垂直に交わるようにし、位置合わせを行う際の動かす方向を限定する。また外部校正を正確に行う方法として、校正用の立方体は固定するものとし、セッティングする位置に目印を付け、立方体自体にズレが生じていないかを確認できるようにする。撮影対象として、実物の猫に類似した毛並みをもつぬいぐるみを用意し、実験を行った。

6.1 病院 A, B 間の位置合わせに関する正確性の提示

病院 B において提案システムを利用する際に、両者の位置合わせが正確に行われているかを簡単に確認できるように、校正用の立方体と同サイズの立方格子データを用意し、これを世界座標系から、各カメラの座標系へ変換し画面に

表示する (図 7)。これにより、カメラに映る実物の立方体に仮想的な格子が投影され、その位置の正確さが目視で確認できる。

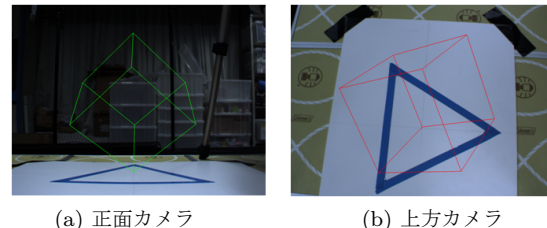
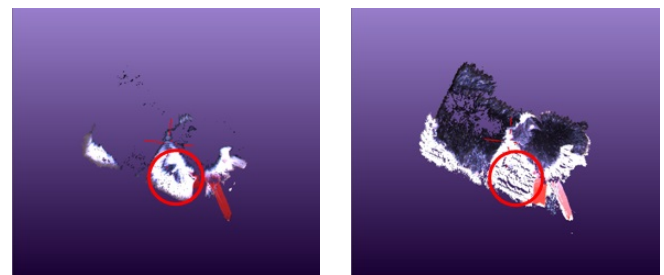


図 7 複数からの視点によるワイヤーフレーム処理

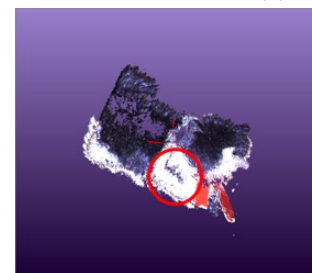
6.2 HDR 撮影の効果

次に、HDR 撮影による効果を検証する。図 8 は、HDR 撮影による合成を行った結果を示す。図からも分かるように、HDR 撮影により濃淡のコントラストが強い形状の物体でも明部および暗部双方の復元が可能であることが分かる。



(a) 感度が低い場合

(b) 感度が高い場合



(c) HDR 合成画像

図 8 HDR 撮影の効果

6.3 画像処理による視認性の向上効果の検証

図 9 および図 10 に、第 5 章で述べた各種画像処理を適用した結果をカメラ別に示す。

(b) の α ブレンド処理ではレンダリングしている物体の形状や色が顕著に分かる。その反面位置合わせを行う物体とレンダリングされている物体の境界に差が明確ではない。(c) の背景差分では、位置合わせを行う物体やそれを移動させる人の影や反射の影響を受け、差分される部分の割合が減少している。(d) の反転処理では、画素値の反転を

行っているため、位置合わせを行う物体とレンダリングされている物体の境界を顕著に確認することができるが、 α ブレンド処理とは反対に物体の形状の視認が難しくなる。(e)のエッジ抽出では、計測対象の動物の毛の長さや向きによってオクルージョンが増え、点と点との間に差ができてしまい余計な輪郭が出るのが問題である。

本研究では、これら画像処理の結果をキー操作によって変更を可能としているため、状況によってそれぞれの欠点を補うことで位置合わせを可能としている。

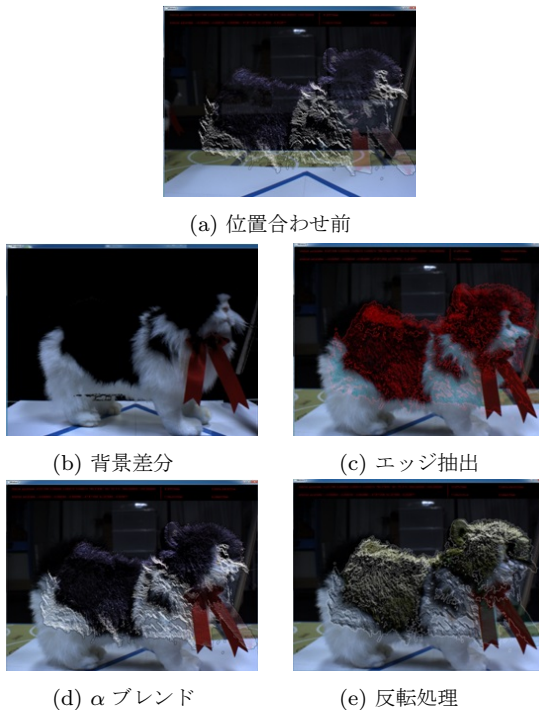


図 9 画像処理の重ね合わせ結果 1

7. 終わりに

本研究に基づき実装したシステムを動物病院において検証することで、従来の石工を用いて型を取るなど多くの手間がかかっていた手法に対して、簡易に病院間の対象動物の位置合わせを行うことが可能となった。しかし、現在は目視による判断でしか行うことができないという問題がある。

今後は、より高い精度での位置合わせを行うために、精度の高い校正を行える実験装置の開発や、位置合わせ環境においても3次元形状を計測する等の工夫を行い、位置合わせの精度を評価するシステムを開発していきたい。

謝辞 本研究の一部は、内閣府最先端研究 (LR030) および文科省科研費 (25870570) の助成を受けて実施された。

参考文献

[1] Hansen, C., Wieferich, J., Ritter, F., Rieder, C. and Peitgen, H.-O.: Illustrative visualization of 3D planning mod-

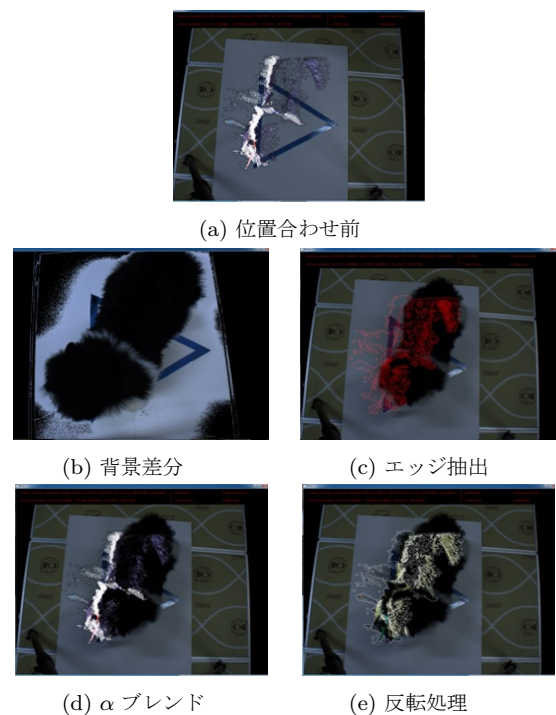


図 10 画像処理の重ね合わせ結果 2

els for augmented reality in liver surgery., *Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 5, No. 2, pp. 133-141 (2010).

[2] Boehler, T., van Straaten, D., Wirtz, S. and Peitgen, H.-O.: A robust and extendible framework for medical image registration focused on rapid clinical application deployment, *Comput. Biol. Med.*, Vol. 41, No. 6, pp. 340-349 (2011).

[3] Kocev, B., Ritter, F. and Linsen, L.: Projector-based surgeon-computer interaction on deformable surfaces, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, pp. 1-12 (online), DOI: 10.1007/s11548-013-0928-1 (2013).

[4] Kato, H. and Billinghurst, M.: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR 99)*, San Francisco, USA (1999).

[5] 榎本和史, 川崎 洋, 古川 亮: プロジェクタ・カメラを用いた3次元計測システムにおける複数形状計測時の誤差最小化による精度向上手法, *MIRU2007*, pp. 869-874 (2007).

[6] S.Inokuchi, K. and F.Matsuda: Range imaging system for 3-d object recognition, *ICPR*, pp. 806-808 (1984).

[7] 古川 亮, 川崎 洋: Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning, *Proceeding of IEEE International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 302-309 (2005).

[8] 川崎 洋, 大澤 裕, 古川 亮, 中村泰明: 空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な3次元形状復元, *情報処理学会論文誌*, Vol. 47, No. SIG 10(CVIM15), pp. 59-71 (2006).