

修士論文

人工股関節全置換術における術前・術後 CT 画像を用いた
臼蓋カップと骨盤形状術後変化の自動検出

末長 和馬

2018 年 3 月 14 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

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.

末長和馬

審査委員：

佐藤 嘉伸 教授	(主指導教員)
金谷 重彦 教授	(副指導教員)
大竹 義人 准教授	(副指導教員)
横田 太 助教	(副指導教員)
鍵山 善之 准教授	(山梨大学)

人工股関節全置換術における術前・術後CT画像を用いた臼蓋カップと骨盤形状術後変化の自動検出

末長和馬

内容梗概

著者の所属する研究グループでは、人工股関節全置換術を対象とした自動術前計画システムを開発している。本システムはCT画像から再構成された骨形状を入力することで、人工関節の最適なサイズ、位置姿勢を決定する。これまで、術前計画を学習データとしてきたが、手術のより詳細なモデリングには、術後データも活用することが望ましい。そこで本研究は、術後データベース作成のための人工股関節カップ（以下カップ）と骨盤形状の術後の変化の自動検出することを目的としている。そこで本稿では全自動でのTHA術前計画・術後データ間の評価方法を提案する。術後セグメンテーション結果としてDice係数が骨盤で0.963、カップで0.740であった。また金属アーチファクト下である臼蓋縁の距離誤差を測定したところ、2.53 mmであった。位置合わせの結果として表面間距離誤差の0.826 mm、カップの平均中心間距離は4.08 mmとなった。全自動で以上の結果を得ることができたことから提案手法の有効性を確認できた。

キーワード:

自動術前計画システム, 人工股関節全置換術, 金属アーチファクト低減, 術後CT画像, 人工関節部品

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文,
NAIST-IS-MT1651061, 2018 年2 月1 日.

Automatic detection of postoperative change of acetabular cup and pelvis shape by pre- and post-operative CT for total hip arthroplasty

Kazuma Suenaga

Abstract

The research group to which the author belongs have been developing an automated preoperative planning system for total hip arthroplasty (THA). This system employs a statistical atlas, which was constructed with a large number of past preoperative plans prepared by an experienced surgeon, in order to model the expertise. This implementation enables to determine the optimal size, position, and rotation of the artificial joint by using preoperative CT images. However, it is desirable to use not only the preoperative data but also the postoperative data for more detailed modeling of surgery. In this paper, I propose automatic evaluation method between preoperative planning and postoperative data in THA. The mean Dice coefficient in postoperative CT images segmentation was 0.963 in the pelvis and 0.740 in the cup. The average surface distance of the acetabular rim which is affected by the metal artifact was measured 2.53 mm. As a result of registration of preoperative planning and postoperative data, the surface distance error is 0.826 mm, the average distance of cup center was 4.08 mm. I considered that these results showed the usefulness of the proposed fully automated method.

Keywords:

Automatic planning, THA, artifact reduction, postoperative CT image, Artificial joint part

. *Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651061, February 1, 2018.

目次

1. はじめに	1
2. 方法	3
2.1. 方法概要	3
2.2. 金属アーチファクトを含むセグメンテーション手法	6
2.3. 術前計画・術後の位置あわせ	7
2.4. 術前術後カップ比較	9
2.5. 術前術後骨棘評価	10
3. 実験・結果	12
3.1. 実験データセット	12
3.2. 術後 CT 画像のセグメンテーション実験と結果	13
3.2.1. 実験目的	13
3.2.2. 実験内容	13
3.2.3. 実験結果	13
3.3. 術前計画骨盤・術後骨盤の位置合わせ実験・結果	23
3.3.1. 実験目的	23
3.3.2. 実験条件	23
3.3.3. 実験結果	23
3.4. 術前計画・術後カップの比較	28
3.4.1. 実験目的	28
3.4.2. 実験条件	28
3.4.3. 実験結果	28
3.5. 術後骨棘評価	32
3.5.1. 実験目的	32
3.5.2. 実験条件	32
3.5.3. 実験結果	32
4. 考察	34
5. 結論	37
謝辞	38
参考文献	39
発表リスト	42

図目次

図 1	提案するシステムの全体図	4
図 2	金属アーチファクト低減処理	5
図 3	セグメンテーション手法	6
図 4	初期位置合わせの概要図	8
図 5	位置合わせの概要図	8
図 6	カップ比較の概要図	9
図 7	術後骨棘評価の概要図 1	10
図 8	術後骨棘評価の概要図 2	11
図 9	セグメンテーション評価方法	14
図 10	セグメンテーション評価方法(臼蓋縁評価)	15
図 11	セグメンテーション結果(骨盤)	16
図 12	セグメンテーション結果(カップ)	17
図 13	セグメンテーションの評価値	18
図 14	セグメンテーションの評価値	19
図 15	骨盤の距離誤差マッピング	20
図 16	カップの距離誤差マッピング	21
図 17	セグメンテーションにおける臼蓋縁評価	22
図 18	位置合わせ評価値(ASD)	24
図 19	手動セグメンテーションデータにおける距離誤差マッピング	25
図 20	自動セグメンテーションデータにおける距離誤差マッピング	26
図 21	精度に差のある症例	27
図 22	カップの術前計画・術後のサイズ差	29
図 23	術前計画・術後カップ比較(中心間距離)	30
図 24	カップ被覆率	31
図 25	術後骨棘評価代表例	33

表目次

表 1	データセット説明	12
表 2	セグメンテーション実験結果.....	15
表 3	位置合わせ評価値(ASD)の平均と標準偏差.....	24

1. はじめに

コンピュータ支援外科(Computer aided surgery : CAS)では，手術ナビゲーションやロボットシステムなどの様々なタイプの術中補助が開発されている[1][2][3][4][5]．これらの技術は，Taylor らによって最初に報告された外科用ロボットシステム「ROBODOC」によって開始された[6]．CAS 技術の適応としての主な例として人工股関節形成術 (Total Hip Arthroplasty : THA) があげられる．THA における術前計画段階では，インプラントのサイズ，ならびに三次元上の骨の位置および向きを対象の骨に対して決定し，ロボットおよびコンピュータ誘導支援システムを使用して手術を計画通り行うものである．過去の臨床研究によれば，これらのシステムは，術前 THA 計画を高精度で行うことが保証されている[7][8][9][10]．したがって，術中補助システムは十分に発展していると考えられる．そこで術前計画が重要になっているにもかかわらず，術前計画は術中補助システムよりも発展していない[11]．

そこで著者の所属する研究グループでは，術前 THA 計画を対象とした術前計画自動立案システムを開発している[12]．本システムは，経験豊かな外科医協力のもと手動で得られた制約を採用している[13][14]．また，外科医の専門知識として有している制約が統計アトラスで表している，統計的アトラスを基にした手法を提案している[15][16]．本システムでは，経験豊富な外科医の専門知識を表現するために，医用画像処理で広く使用されている統計的形状モデル (Statistical shape model : SSM) が採用されている[17]．しかし，現在の SSM は術前計画のみを参考にして構築されている．術前計画のみを参考に行っていると実際の手術中に，骨の硬さが原因で掘削位置よりも手前で固定されたり，術中の判断で設置計画を変更したりする可能性がある．Hassani らは術後に撮影した CT 画像と術前計画時のデータの位置合わせを行い，手動でカップサイズ，位置の差，角度差などを測定した[18]．この手法では手動で行っていることで負担が大きく時間がかかってしまう．

そこで本研究では術後に撮られた CT 画像に着目し、術後の骨とインプラントの位置関係や骨との関係を入力することで術前計画との差異を抽出し術後データ解析を自動で行う。本研究では術後の骨盤と THA の寛骨臼コンポーネント（カップ）に着目する。術後 CT 画像にはインプラントによる金属アーチファクトが生じ、また、術後の骨は THA 手術により削られているため術前とは骨の形が変わっている。このため術前計画で使用していた自動セグメンテーション[19]では術前の SSM 使っていることから適用することができない。そこで本研究では畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN)を用いて CT 画像からの多クラス領域抽出[20][21]を用いて術後 CT 画像から骨盤、カップの抽出を目指す。また術前計画データと術後データの位置合わせを行い、術後データ解析をすることで、術後データベースの拡張を行う。

本研究の新規点は

- ① 金属アーチファクトの含まれている CT での骨盤・カップのセグメンテーション
- ② 全自動での術前カップ・術後カップ解析となっている。

本論文の構成は次の通りである。2 章では、本研究の提案手法について述べる。3 章では、実験について述べる。4 章では、考察について述べる。5 章では、本研究の総括を述べる。

2. 方法

2.1. 方法概要

本研究の提案手法の概要を図 1 として示す．提案手法は，(1)セグメンテーション，(2)位置合わせ，(3)術前計画・術後比較，(4)術後骨棘評価に分かれている．手動でセグメンテーションした術後骨盤，術後カップラベルを学習させ，CNN のモデルを構築する．前処理として術後 CT 画像に対して金属アーチファクト低減処理を行う[22][23]．図 2 に金属アーチファクト低減処理前後の CT 画像を示す．図 2(a)は金属アーチファクト低減処理前，図 2(b)は金属アーチファクト低減処理後を表しており，放射状のノイズが低減していることが確認できる．構築した CNN のモデルに対して，金属アーチファクトを低減させた新規の CT 画像を入力することでセグメンテーションし領域を抽出する．位置合わせでは，術前 CT 画像，術後 CT 画像から骨盤を，術後 CT 画像からカップそれぞれの領域を抽出する．次に骨盤同士の位置合わせを行い，術前・術後の CT 座標系を合わせる．骨盤の位置合わせで得られた変換行列を用いカップを移動させ術前計画・術後の比較を行う．比較方法はカップサイズ，三次元上での距離，被覆率[24]である．術前術後の骨棘評価は術前の臼蓋縁を縁取りしたものと，術後データとの距離誤差を見て評価する．(1)セグメンテーション，(2)位置合わせ，(3)術前計画・術後比較，(4)術後骨棘評価の詳細は 2.2 節，2.3 節，2.4 節，2.5 節で説明する．

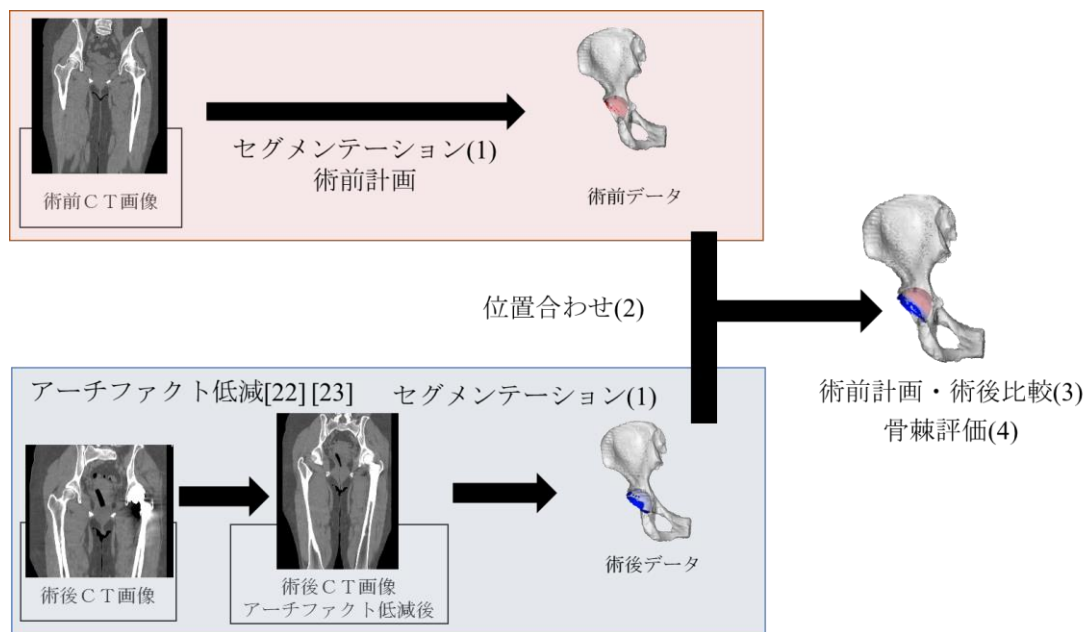
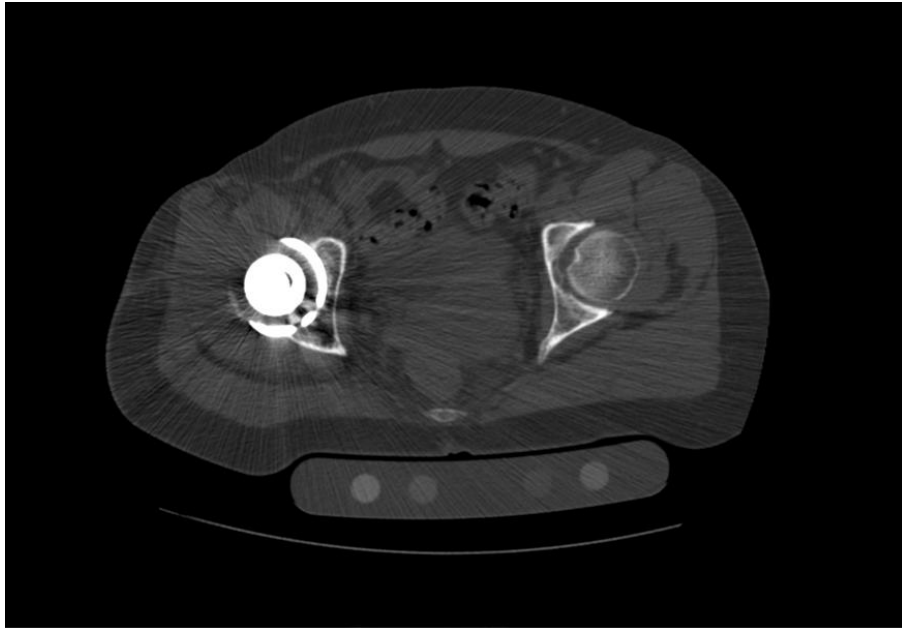
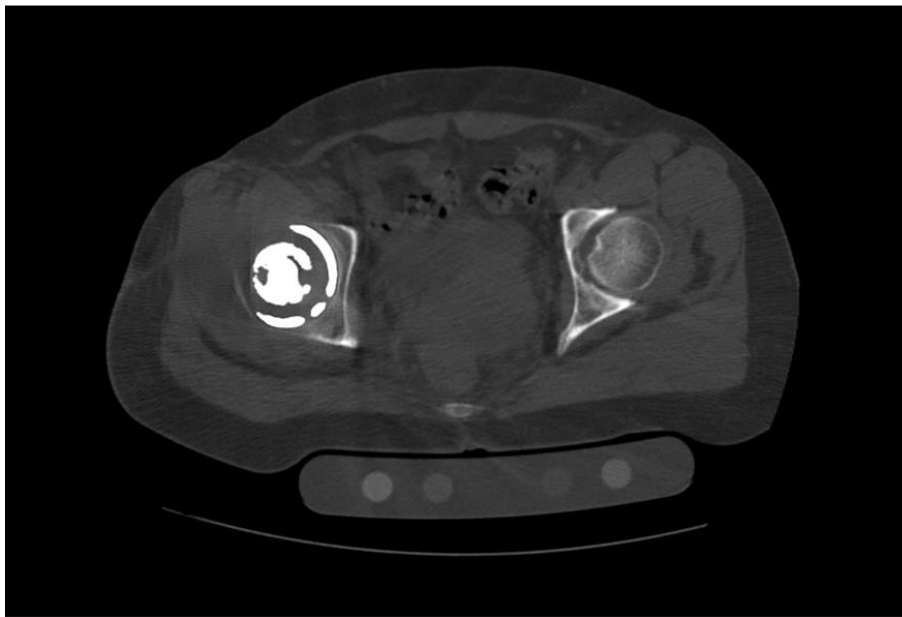


図 1 提案するシステムの全体図



a. 金属アーチファクト低減前



b. 金属アーチファクト低減後

図 2 金属アーチファクト低減処理

2.2. 金属アーチファクトを含むセグメンテーション手法

術後 CT 画像の金属アーチファクトを含むセグメンテーションを行う前に前処理として術後 CT 画像に対して `wxdicom` を用いて金属アーチファクト低減処理[22][23]を行う。セグメンテーション手法の概要を図 3 に示す。図 3 に示すように、3 次元画像の各スライスを入力とし、骨盤、カップラベルを出力する CNN を構築する。テスト時に、前処理として図 3 の SkinROI としての体表マスクの設定、後処理に Post processing として最大連結成分のみを抽出する処理を行う。また本システムで用いる CNN の構造は U-Net である[25]。自動セグメンテーション結果を `maskauto` とする。

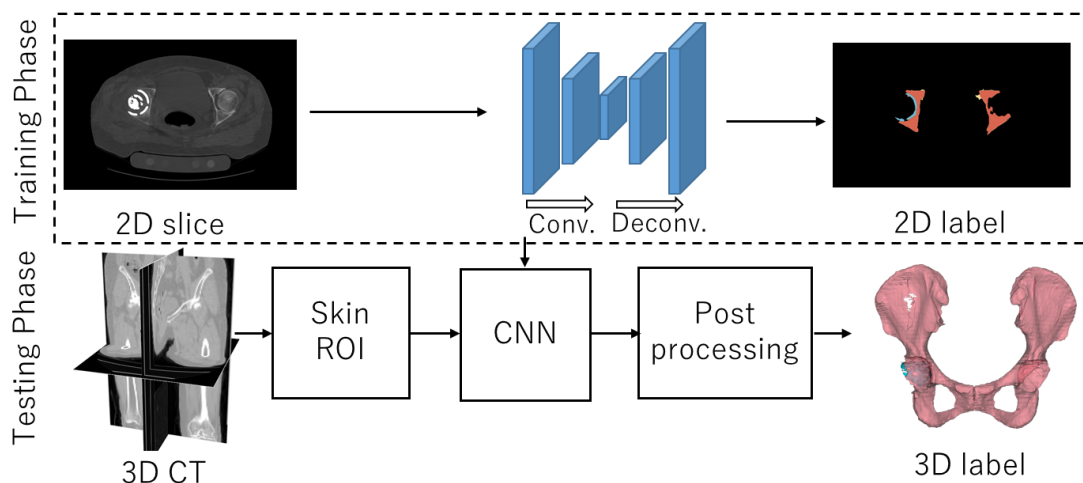


図 3 セグメンテーション手法

SkinROI は体表マスクの設定、Post processing では最大連結成分の抽出をそれぞれ行う。

2.3. 術前計画・術後の位置あわせ

術前計画・術後の初期位置合わせの概要図を図 4 に，位置合わせの概要図を図 5 に示す．術前 CT 画像は罹患側の骨盤をセグメンテーションし表面形状 P_{pre} を，術後 CT 画像では前処理として術後 CT 画像に対して `wxdicom` を用いて金属アーチファクト低減処理[22][23]を行った後，罹患側の骨盤とカップをセグメンテーションし表面形状 P_{post} ，表面形状 C_{post} を得る．位置合わせには IRTK[26][27]のサーフェスレジストレーションを使用し，最大イテレーション回数を 1000，イプシロンの値を 0.001，セルロケータを使用し双方向から最近を求めている．図 4 のように初期位置合わせとしてセグメンテーションしたままの骨盤同士で位置合わせを行うことで術後骨盤 P_{post} を初期位置骨盤 P_{post_inter} に，術後カップ C_{post} から初期位置カップ C_{post_inter} に変換する．この結果得た初期位置骨盤 P_{post_inter} から図 5 の位置合わせを行う．この位置合わせの際，初期位置骨盤 P_{post_inter} から初期位置カップ C_{post_inter} の重心から半径 50 mm の範囲で臼蓋周辺を取り除いた P_{post_clip} を作成し用いる．これは THA の手術の際にカップ挿入のため骨盤の臼蓋周辺を削られている部分の影響が位置合わせに生じないためである．このように 2 段階にして術前計画・術後骨盤の位置合わせし術後骨盤 P_{post} を術前の座標系変換する行列 T_{post_pre} を入手し適応することで P'_{post} を得る．

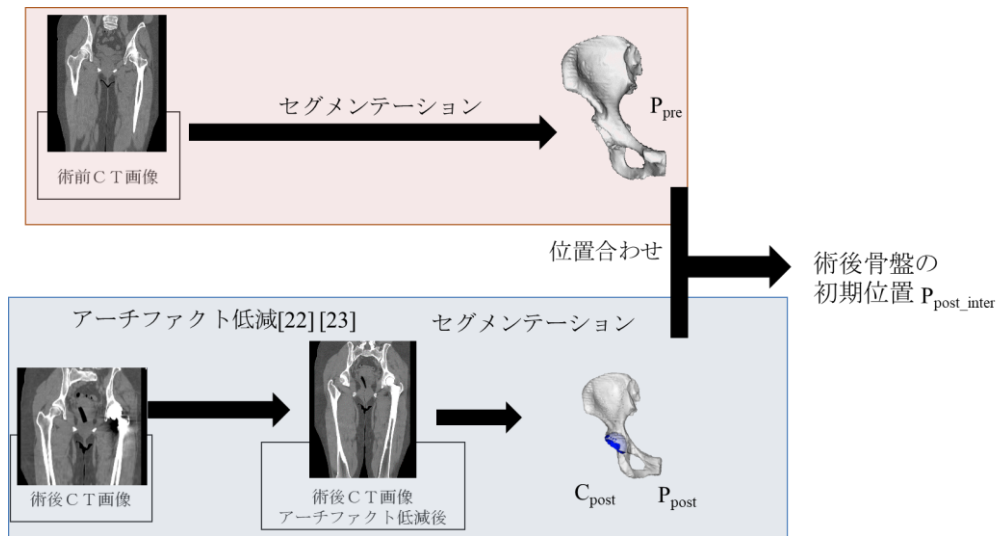


図 4 初期位置合わせの概要図

術前骨盤表面形状 P_{pre} と術後骨盤表面形状 P_{post} の位置合わせを行うことで位置合わせの初期位置 P_{post_inter} を得る。

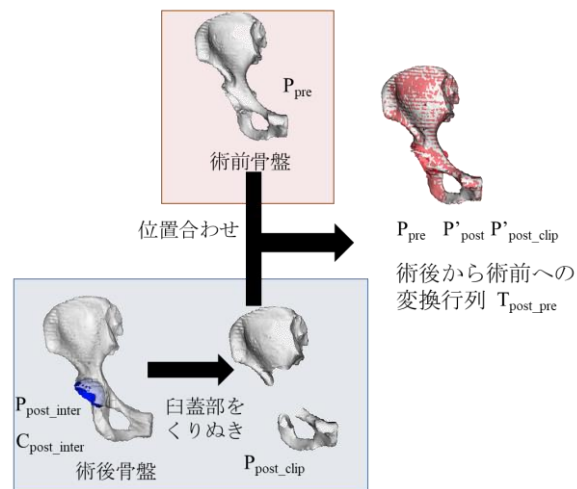


図 5 位置合わせの概要図

初期位置骨盤表面形状 P_{post_inter} から初期位置カップ表面形状 C_{post_inter} の重心から半径 50mm の範囲を切り取った表面形状 P_{post_clip} を用いて術前骨盤表面形状 P_{pre} と位置合わせを行い術後から術前への変換行列 T_{post_pre} を得る。 P'_{post} は P_{post} に T_{post_pre} を与えたもの。右の骨盤は赤が P_{pre} ，白が P'_{post} を表示。

2.4. 術前術後カップ比較

術前計画・術後骨盤の位置合わせで得た変換行列を用いてカップの位置・角度を変換する．概要図は図 6 である．術前計画は専門医が立てた術前計画したカップの表面形状 C_{pre} を術後はセグメンテーションしたカップの表面形状 C_{post} を使用する． C_{post} に対して図 5 の T_{post_pre} を適応することで C'_{post} とし同じ座標系で C_{pre} , C'_{post} を比較する．ここで比較する内容は，カップサイズ，カップの中心距離，被覆率[24]である．カップサイズは術前計画のサイズと術後手術記録のサイズを比較する．距離は C_{pre} のカップ中心と C'_{post} のカップ中心の距離をとる．ここでカップ中心はカップ表面形状の原点位置を示している．被覆率は Kagiya らの手法[24]を用いて求める．

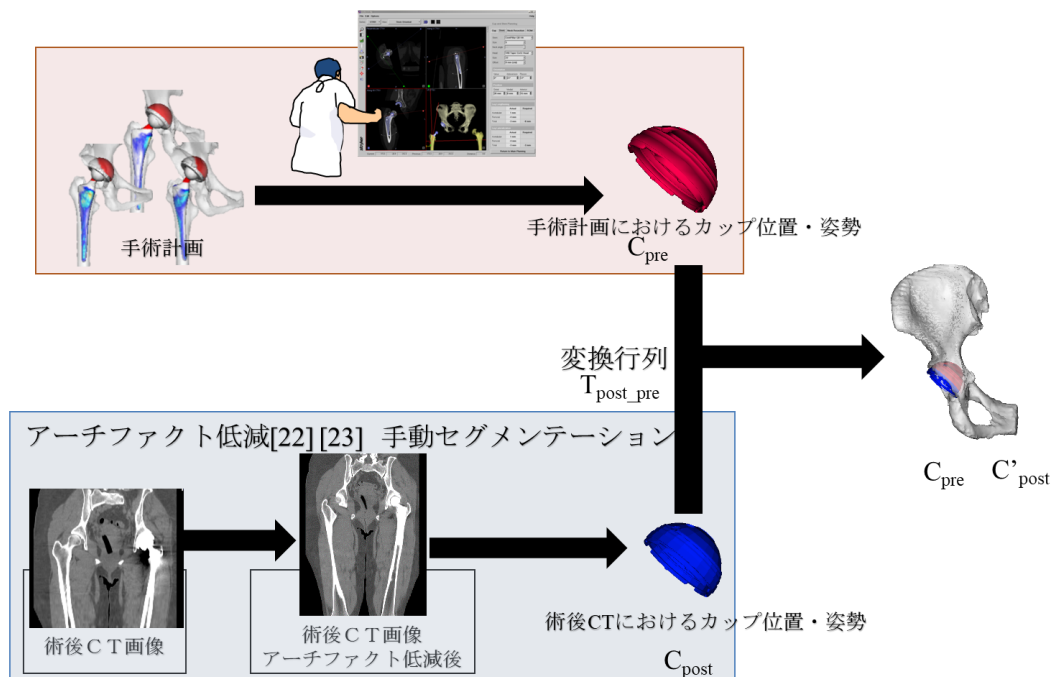


図 6 カップ比較の概要図

図 5 の変換行列 T_{post_pre} を術後カップ表面形状 C_{post} に対して与えることで術前表面形状 C_{pre} と同じ座標系の表面形状 C'_{post} を作成する．

2.5. 術前術後骨棘評価

術前・術後の骨盤の臼蓋縁を表面間距離誤差により比較することで，実際の手術でどの程度骨盤が削られているのかを可視化する．図 7 図 8 に術後骨棘評価の概要図を示す．まず術前 CT，術後 CT からそれぞれ骨盤表面形状 P_{pre} , P_{post} を得る．術後骨盤表面形状 P_{post} に対して図 5 の変換行列 T_{post_pre} を適応し P'_{post} として術前骨盤 P_{pre} と同じ座標系にする．術前骨盤 P_{pre} の臼蓋縁を縁取りし，図 8 の縁点群 R_{pre} を得る． R_{pre} は 200 点でできており， R_{pre} のそれぞれの点から P'_{post} の最短距離を探索することで，その縁と術後の骨盤との表面間距離誤差を求める．

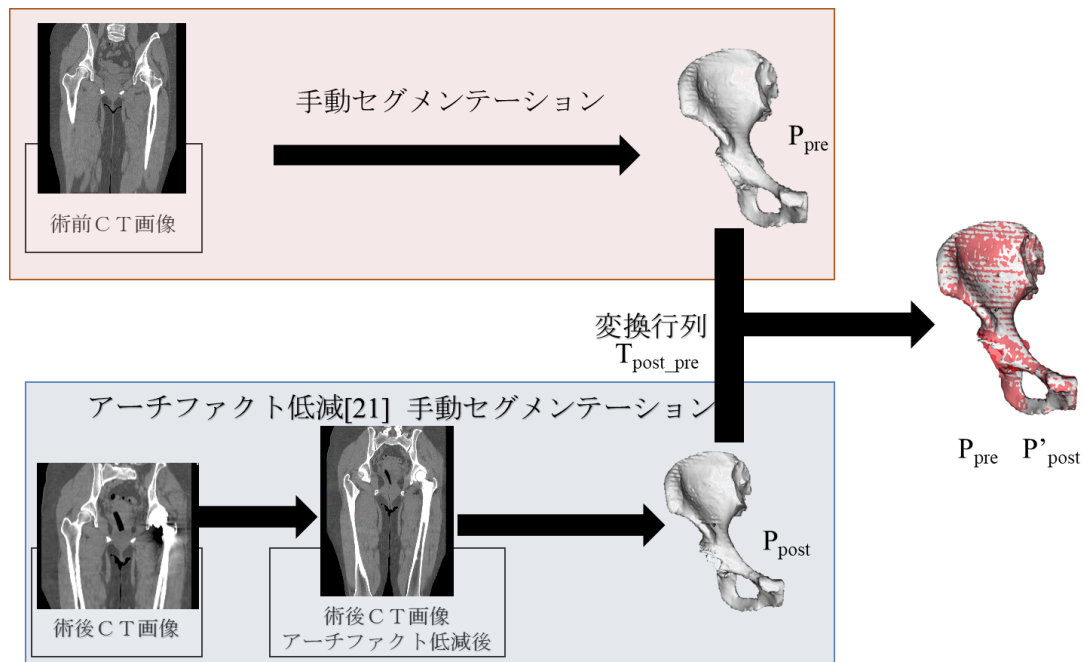


図 7 術後骨棘評価の概要図 1

図 5 の変換行列 T_{post_pre} を術後カップ表面形状 P_{post} に対して与えることで術前表面形状 P_{pre} と同じ座標系の表面形状 P'_{post} を作成する．右の骨盤は赤が P_{pre} ，白が P'_{post} を表示．

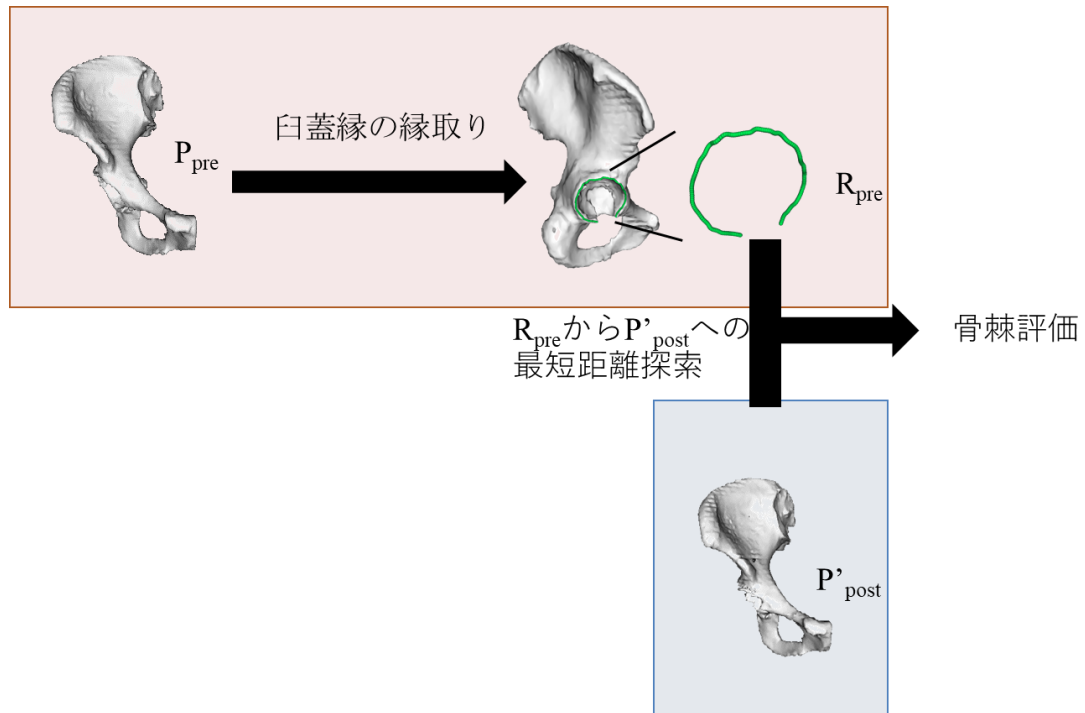


図 8 術後骨棘評価の概要図 2

術前表面形状 P_{pre} から臼蓋縁を縁取りし 200 点の点群 R_{pre} を作成し，点群 R_{pre} から術前表面形状 P_{post} との距離誤差を求め骨棘評価を行う．

3. 実験・結果

3.1. 実験データセット

大阪大学医学部附属病院で THA を施術した 19 症例の手術前後の C T 画像，また同一症例の Stryker CT-Hip System を用いて作成された術前計画を使用している．これらの患者はすべて片側疾患で反対側は疾患ではない．データセットの情報を表 1 にて示す．

表 1 データセット説明

データの概要	
共同研究機関	大阪大学医学部附属病院
対象症例	股関節手術対象患者
症例数	19症例（各手術前後）
画像形式	CT画像
画像サイズ	512 x 512 x 486~593 [voxels]
voxel サイズ	0.703125 x 0.703125 x 1 [mm ³]
手術計画立案システム	Stryker CT-Hip System
取扱部位	骨盤，インプラント(カップ)

3.2. 術後 CT 画像のセグメンテーション実験と結果

3.2.1. 実験目的

金属アーチファクトを含む術後 CT 画像の自動セグメンテーションの精度を評価する

3.2.2. 実験内容

2-fold 交差検証により提案手法の有効性を検証する．CNN の構造は U-Net[25]を使用する．体表領域は，固定閾値 0 HU で CT 画像を 2 値化し，自動で出力した．U-Net のパラメータは，イテレーション回数：100000 回，学習係数：1.0e-4，誤差関数：softmax cross entropy，レイヤ数：5，ノード数：32，カーネルサイズ：3 とした．

図 9 に評価方法の概要図を示す．手動セグメンテーション $mask_{manual}$ を正解データとして，Dice 係数及び平均表面距離誤差(Average symmetric surface distance : ASD)[28]により評価する．また図 10 に臼蓋縁評価方法を示す．手動で抽出した骨盤 P_{post} から臼蓋縁 R_{manual} を抽出す．この R_{manual} は 200 の点で構成される．この R_{manual} の 200 点から自動抽出した骨盤 P_{auto} との最短距離を求めることで金属アーチファクト下の局所的な表面間距離を得て評価を行う．

3.2.3. 実験結果

図 11 図 12 に骨盤・カップそれぞれの代表例の正解データとセグメンテーション結果の輪郭を表示した．それぞれ左側は原画像，右側は原画像に輪郭を表示した．図 11 の骨盤は a, b, c は精度の高い症例，d は精度の低い症例であった．また，図 12 のカップは a, b, は精度の高い症例，c, d は精度の低い症例であった．表 2 に示すのが Dice 係数及び ASD の測定値の平均と標準偏差を表示した．Dice 係数をグラフ化したものが図 13，ASD の平均値をグラフ化したものが図 14 となった．骨盤に着目すると平均 Dice 係数は 0.963，ASD が 0.308 mm という結果であり，カップに着目すると平均 Dice 係数は 0.740，ASD が 0.694 mm という結果であった．また，図 15，図 16には骨盤とカップそれぞれの正解データとセグメンテーション結果の表

面間距離をマッピングしたものとなった。

金属アーチファクト下の局所的な箇所を見る臼蓋縁の誤差は表 2 に示すように平均で 2.53 mm という結果であった。また図 17 に正解データの臼蓋縁を誤差量でカラーをつけてセグメンテーション結果に表示した。

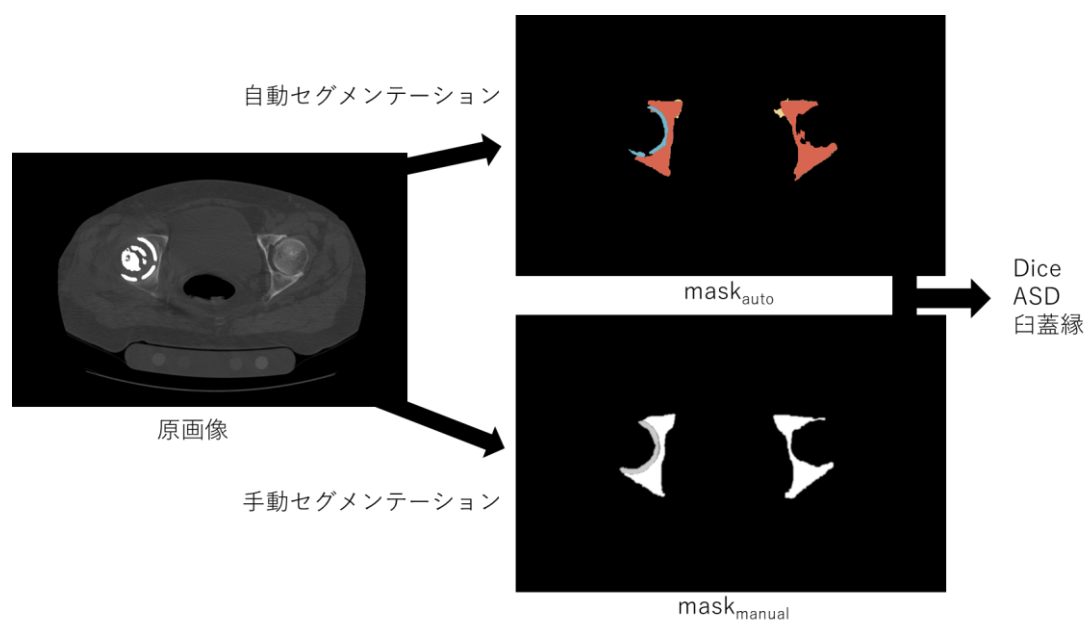


図 9 セグメンテーション評価方法

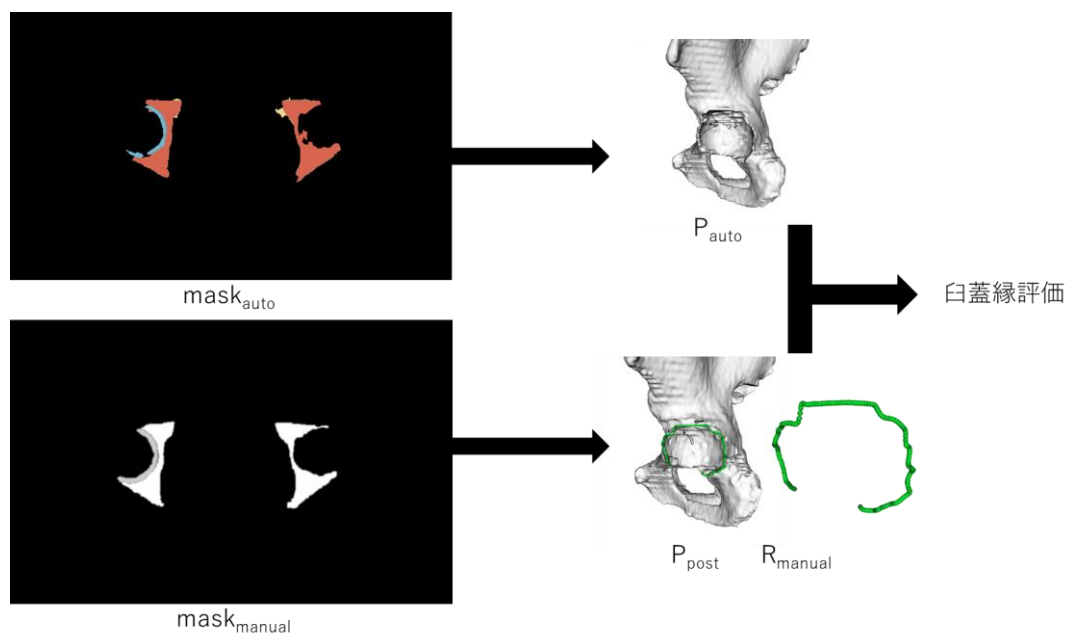
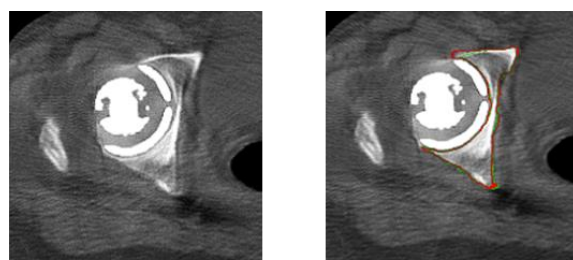


図 10 セグメンテーション評価方法(白蓋縁評価)

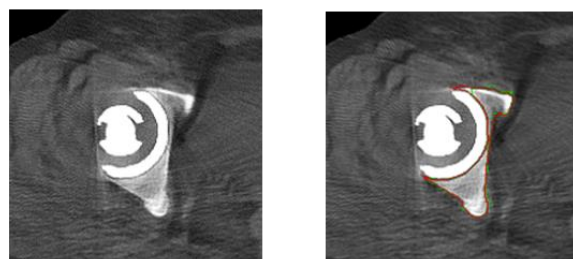
表 2 セグメンテーション実験結果

骨盤・カップの Dice, ASD と白蓋縁の誤差の平均と標準偏差

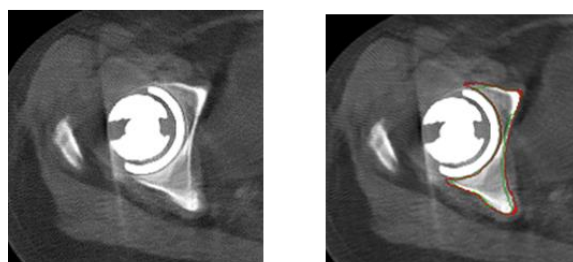
	骨盤	カップ	白蓋縁
Dice	0.963 ± 0.009	0.740 ± 0.071	—
ASD[mm]	0.308 ± 0.093	0.694 ± 0.247	2.53 ± 1.85



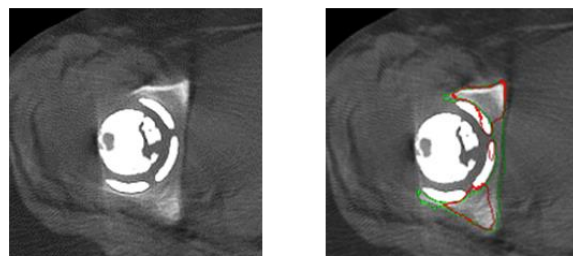
a : 患者No.1



b : 患者No.5



c : 患者No.10

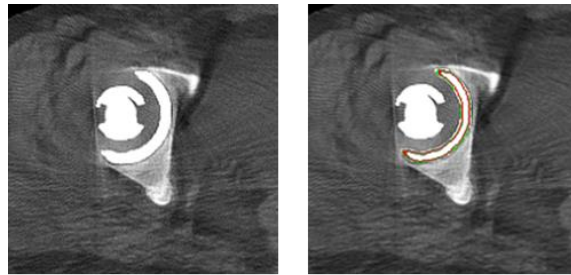


d : 患者No.13

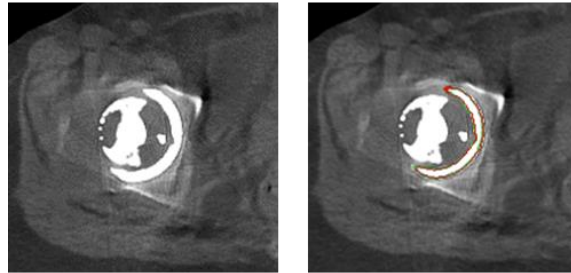
—手動(正解データ) —自動

図 11 セグメンテーション結果(骨盤)

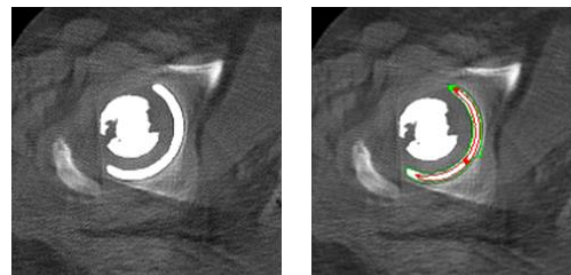
左は CT の原画像・右は正解データ・セグメンテーション結果の輪郭
a, b, c は精度が高い症例, d は精度の低い症例



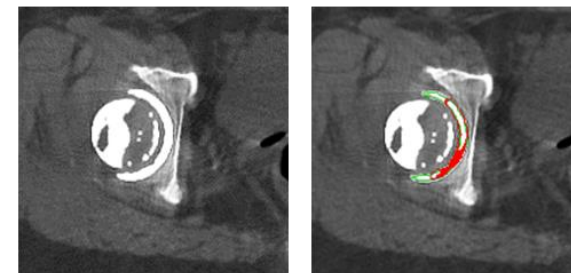
a : 患者No.5



b : 患者No.17



c : 患者No.6



d : 患者No.16

—手動(正解データ) —自動

図 12 セグメンテーション結果(カップ)

左は CT の原画像・右は正解データ・セグメンテーション結果の輪郭
a, b は精度が高い症例, c, d は精度の低い症例

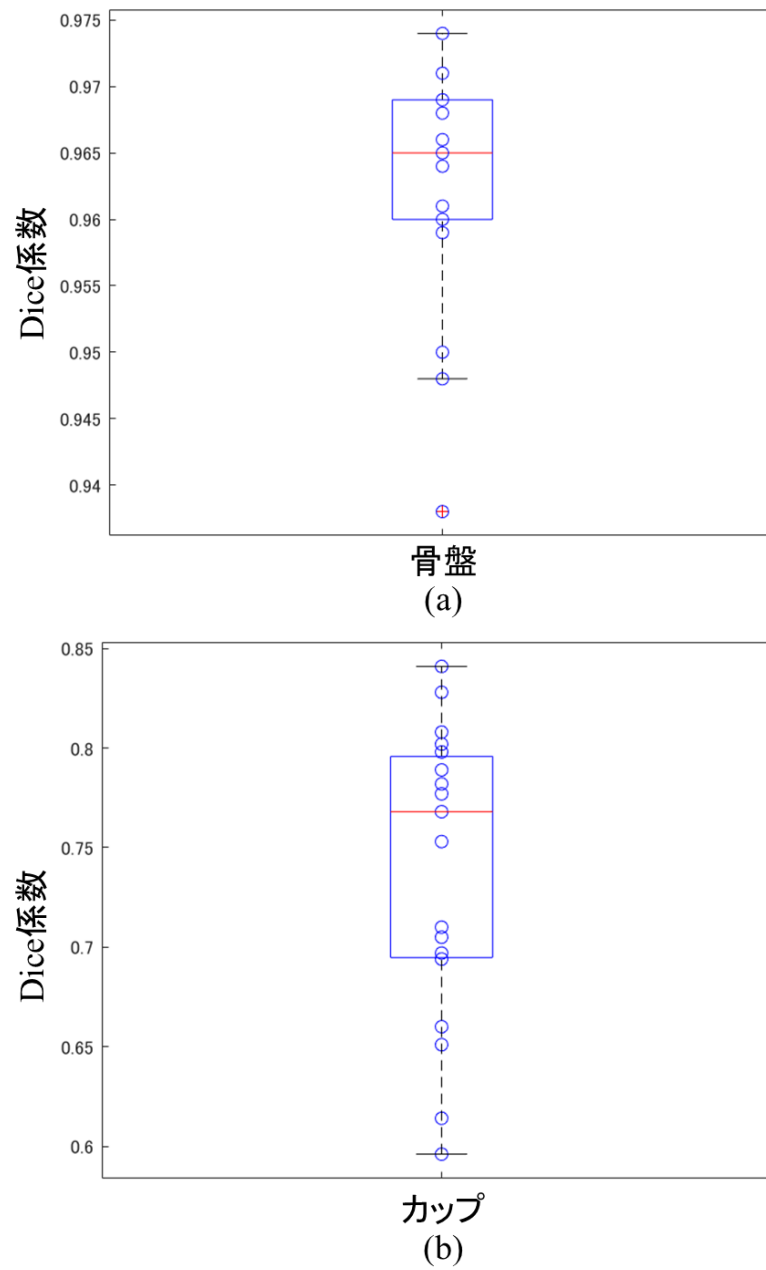


図 13 セグメンテーションの評価値
(a)は骨盤の Dice 係数, (b)はカップの Dice 係数

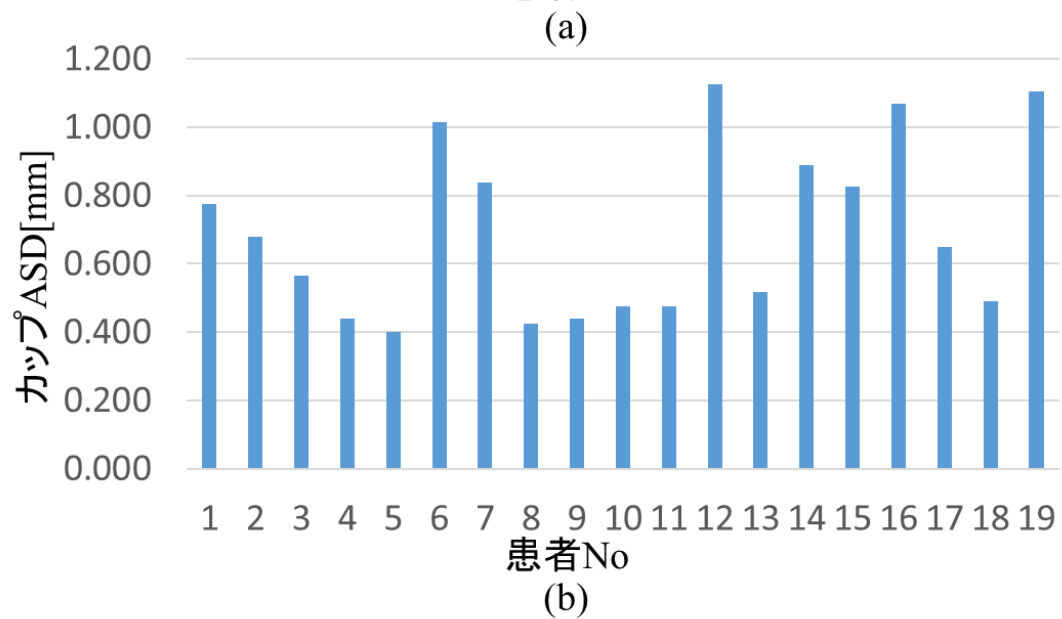
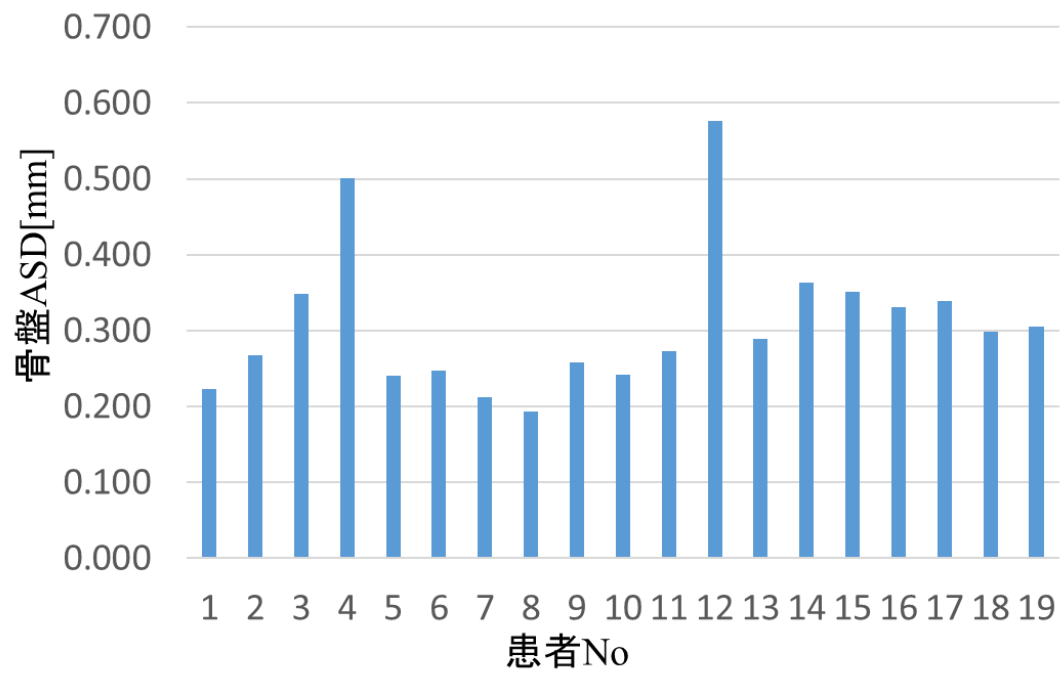


図 14 セグメンテーションの評価値
(a)は骨盤の患者ごとの ASD, (b)はカップの患者ごとの ASD

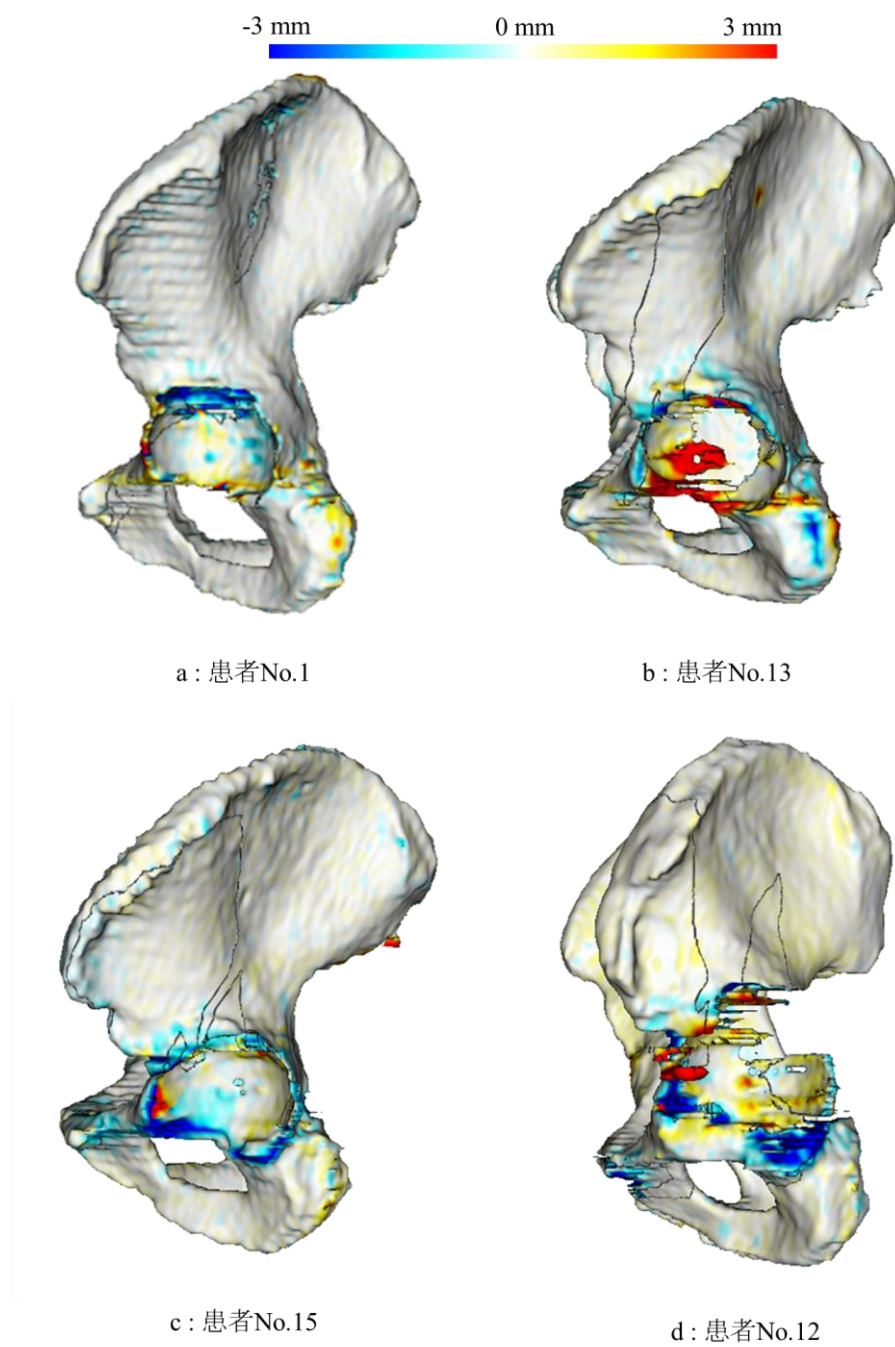


図 15 骨盤の距離誤差マッピング

カラーバーは正解データとの距離誤差を表している． a, b, c は誤差の小さい症例， d は誤差の大きい症例

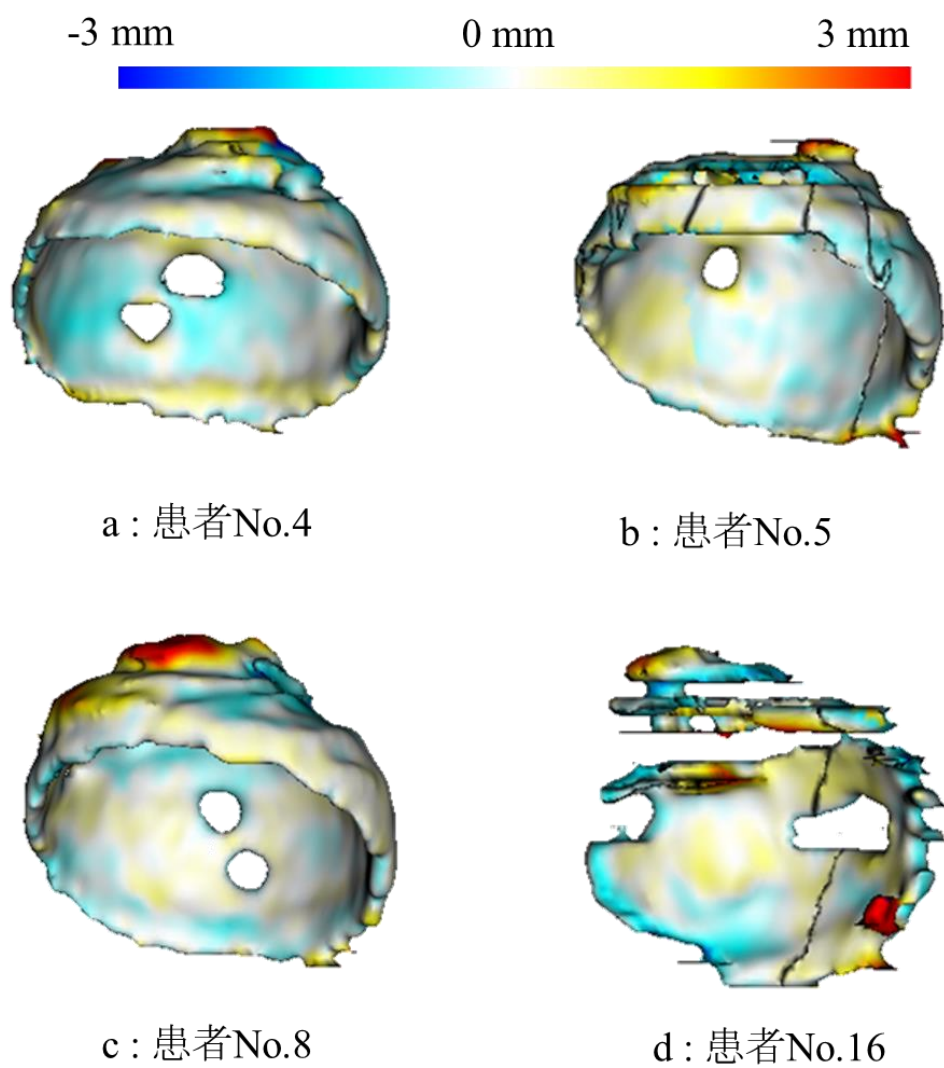


図 16 カップの距離誤差マッピング

カラーバーは正解データとの距離誤差を表している． a, b, c は誤差の小さい症例， d は誤差の大きい症例

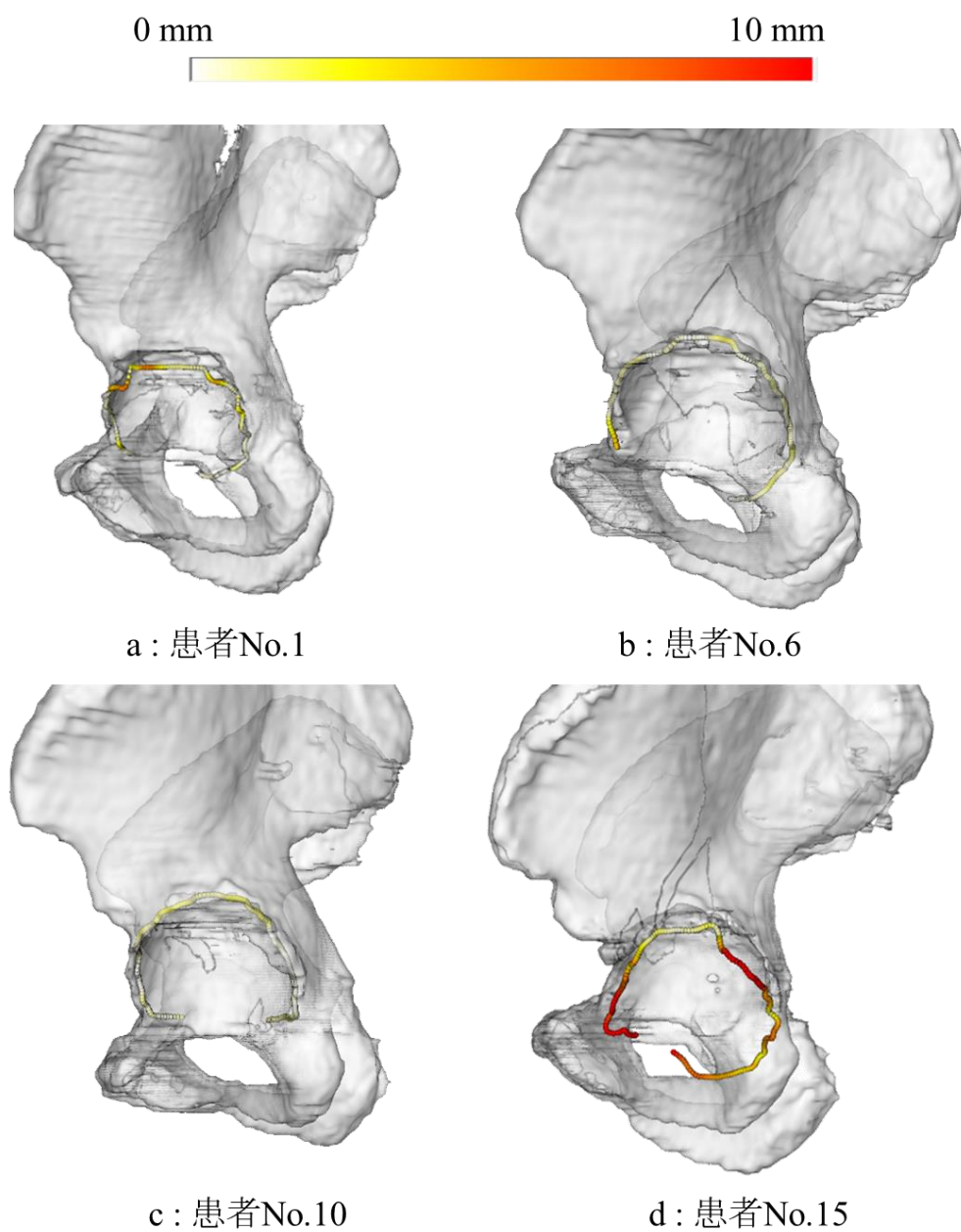


図 17 セグメンテーションにおける白蓋縁評価
 カラーバーは正解データとの距離誤差を表している． a, b, c は誤差の小さい症例， d は誤差の大きい症例

3.3. 術前計画骨盤・術後骨盤の位置合わせ実験・結果

3.3.1. 実験目的

術前計画データと術後データを同じ座標系で比較するために術前計画骨盤・術後骨盤の位置合わせの精度評価を行う。

3.3.2. 実験条件

データセットに対して 2.3 節の提案手法を適応する。このとき位置合わせには IRTK[26][27]のサーフェスレジストレーションを使用する。術前骨盤を正解データとし、術後データの臼蓋を切り取ったデータとの ASD を求めることで評価する。

3.3.3. 実験結果

図 18, 表 3 に ASD の測定値を示した。手動でセグメンテーションしたデータを適応させた場合、平均の ASD が 0.826 mm という結果であった。3.2 節で得た自動セグメンテーションしたデータを適応させた場合、平均の ASD が 0.772 mm という結果であった。図 19 は手動でセグメンテーションしたデータにおける、表面間距離を術後の臼蓋を切り取ったデータにマッピングしたものである。図 20 は自動セグメンテーションしたデータにおける、表面間距離を術後の臼蓋を切り取ったデータにマッピングしたものである。図 21 は手動セグメンテーションでの結果と自動セグメンテーションでの結果において ASD の差が大きかった症例を表示した。

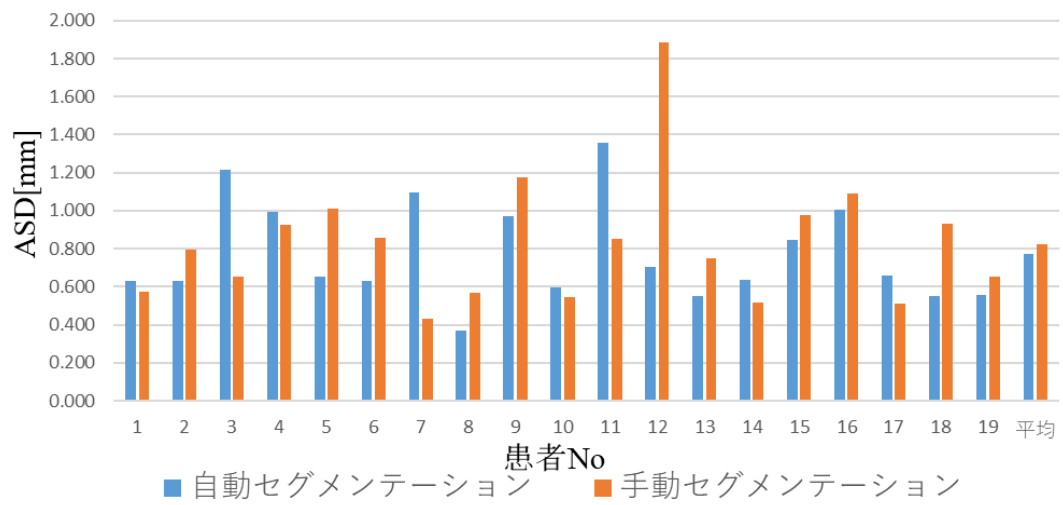


図 18 位置合わせ評価値(ASD)

表 3 位置合わせ評価値(ASD)の平均と標準偏差

	自動セグメンテーション	手動セグメンテーション
ASD[mm]	0.772 ± 0.256	0.826 ± 0.326

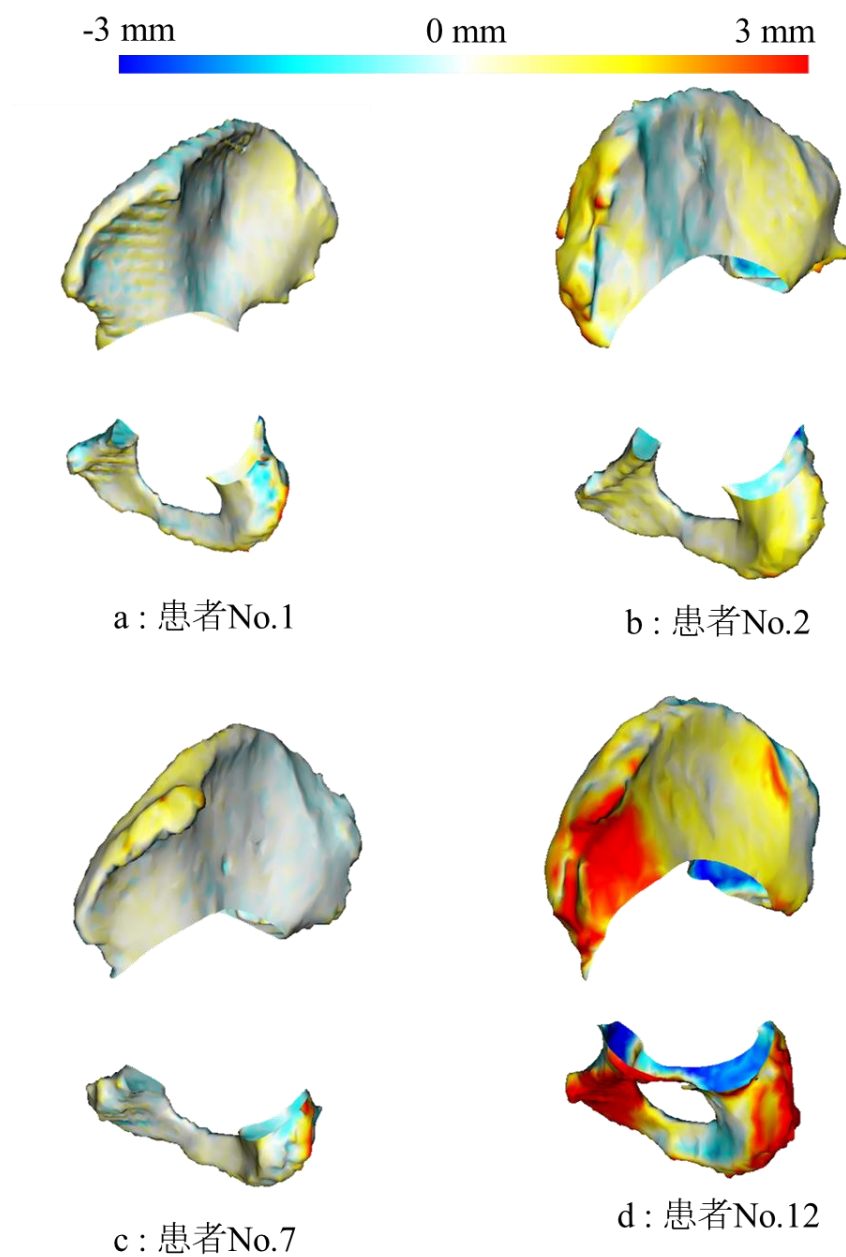


図 19 手動セグメンテーションデータにおける距離誤差マッピング
 カラーバーは正解データとの距離誤差を表している，a, b, c は誤差の小さい症例，d は誤差の大きい症例

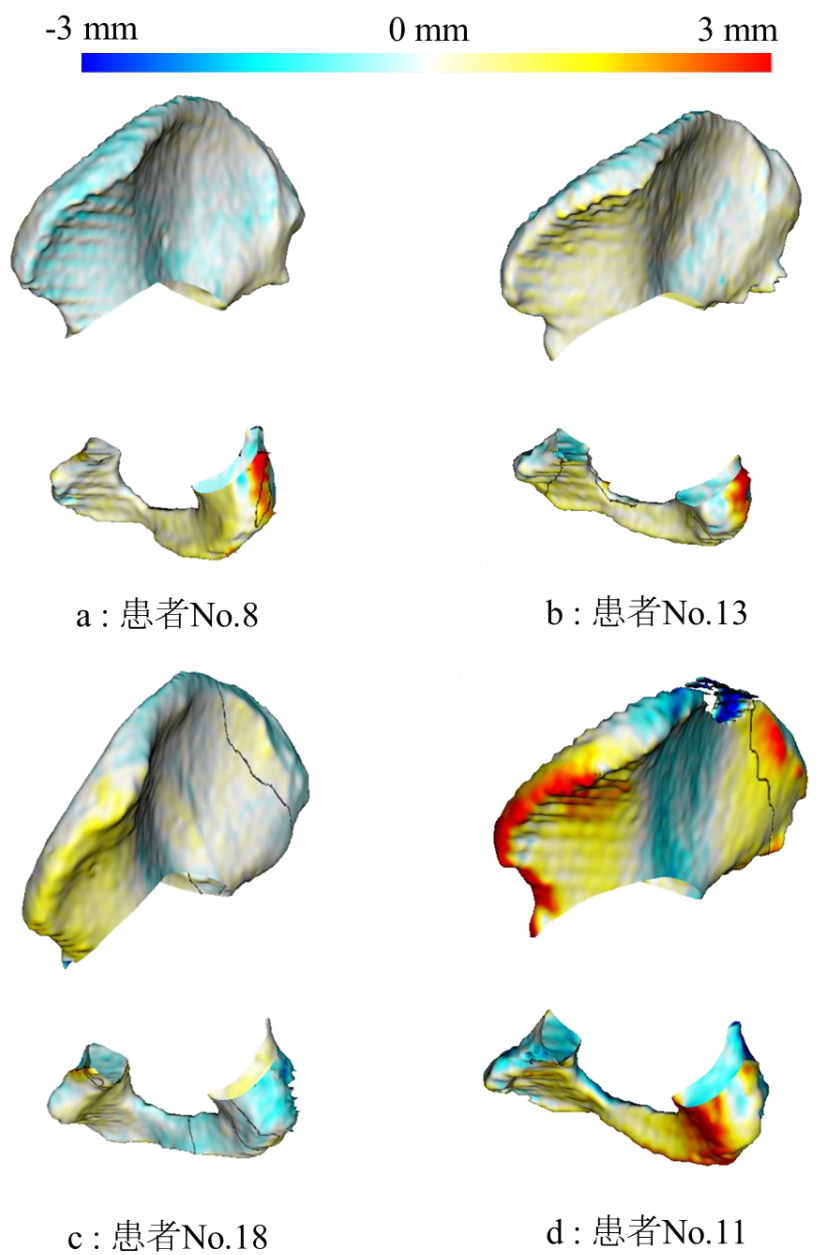
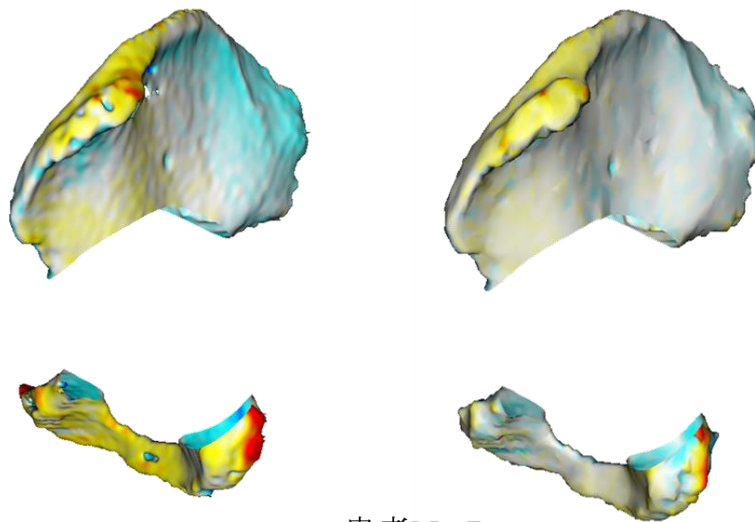
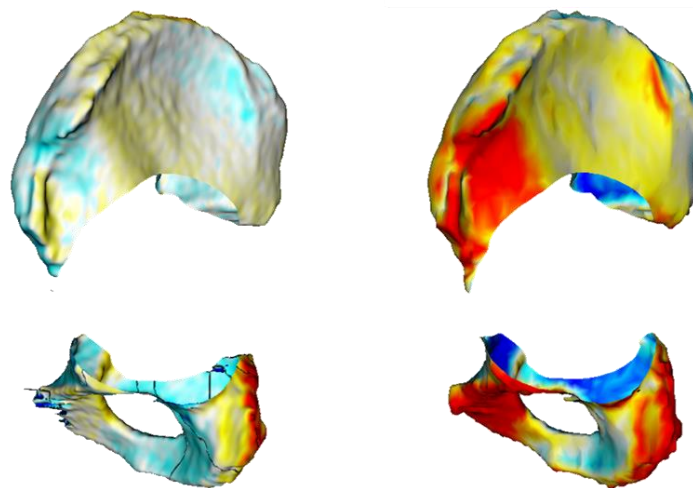


図 20 自動セグメンテーションデータにおける距離誤差マッピング
 カラーバーは正解データとの距離誤差を表している，a, b, c は誤差の小さい症例，d は誤差の大きい症例

-3 mm 0 mm 3 mm

A horizontal color scale bar ranging from -3 mm (blue) to 3 mm (red), with 0 mm (white) in the center.

a : 患者No.7



b : 患者No.12

図 21 精度に差のある症例

カラーバーは正解データとの距離誤差を表している． a, b ともに左が自動セグメンテーションでの結果，右が手動セグメンテーションでの結果である． a は手動セグメンテーションの方が精度の高い症例，b は自動セグメンテーションの方が精度の高い症例

3.4. 術前計画・術後カップの比較

3.4.1. 実験目的

術後カップデータベース構築のための術前計画・術後データカップの比較を行った．

3.4.2. 実験条件

データセットに対して 2.4 節の提案手法を適応する．カップサイズ，中心間距離，被覆率[24]を測定する．なお，カップサイズは 2mm 間隔でサイズが存在する．

3.4.3. 実験結果

図 22 に術前計画・術後記録のカップサイズ差を示した．また図 23(a)は術前計画カップ・術後カップの中心間の距離，また図 23(b)は中心間距離でも術前計画，術後手術計画でカップサイズの同じ症例の中心間距離とその平均も表示した．自動セグメンテーションで得たデータと，手動セグメンテーションで得たデータのそれぞれを表示している．カップサイズは 1 サイズ異なるものが 6 症例，2 サイズ異なるものが 1 症例存在した．自動セグメンテーションデータでは，中心間距離はすべて含めた場合の平均が 4.08 mm となり，カップサイズが同じものだけでは，3.98 mm であった．手動セグメンテーションデータでは，中心間距離はすべて含めた場合の平均が 4.10 mm となり，カップサイズが同じものだけでは，3.84 mm であった．図 24 は術前計画のカップ被覆率と術後カップの被覆率を示した．それぞれ平均でみると術前計画被覆率は 88.5 %，自動セグメンテーション結果での術後被覆率は 81.9 %，手動セグメンテーション結果での術後被覆率は 81.4 % となった．

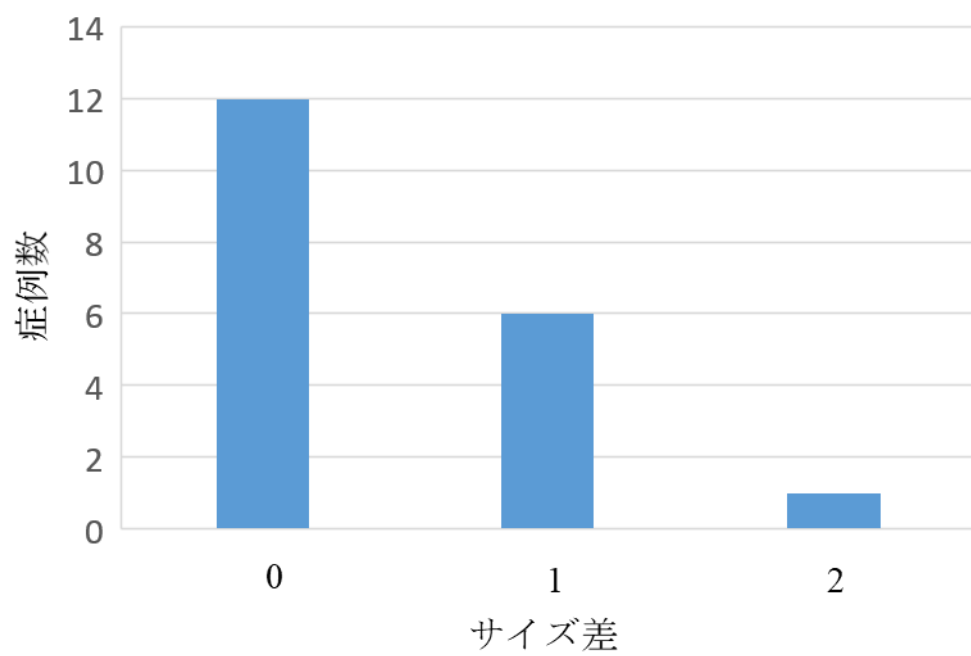


図 22 カップの術前計画・術後のサイズ差

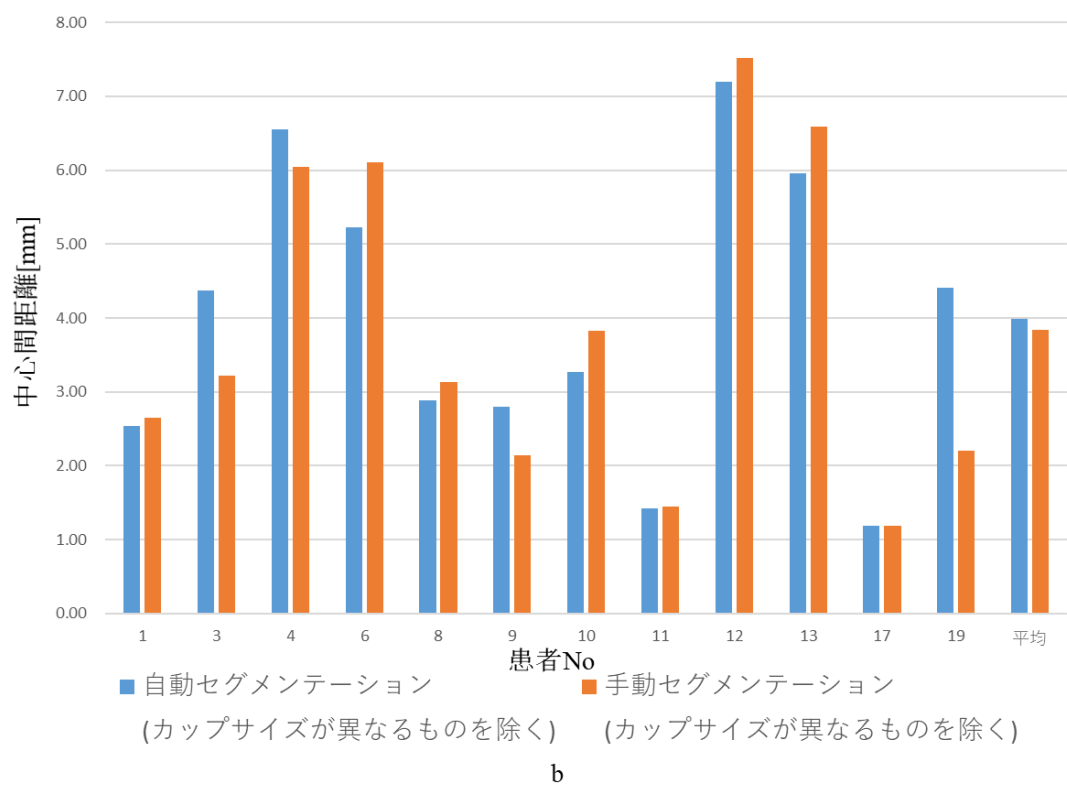
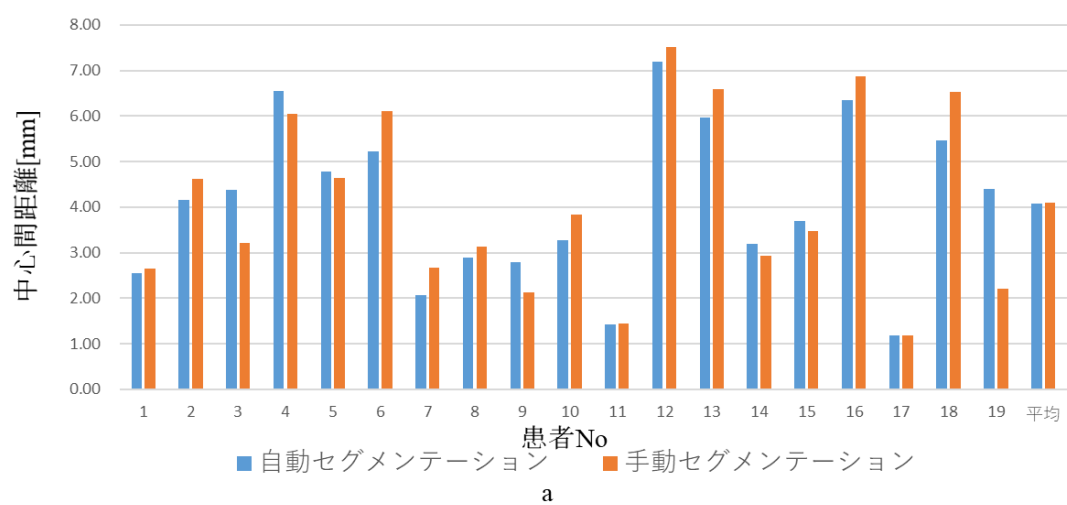


図 23 術前計画・術後カップ比較(中心間距離)
 a はすべての症例, b はカップサイズが術前計画・術後手術記録で同じもののみを示した.

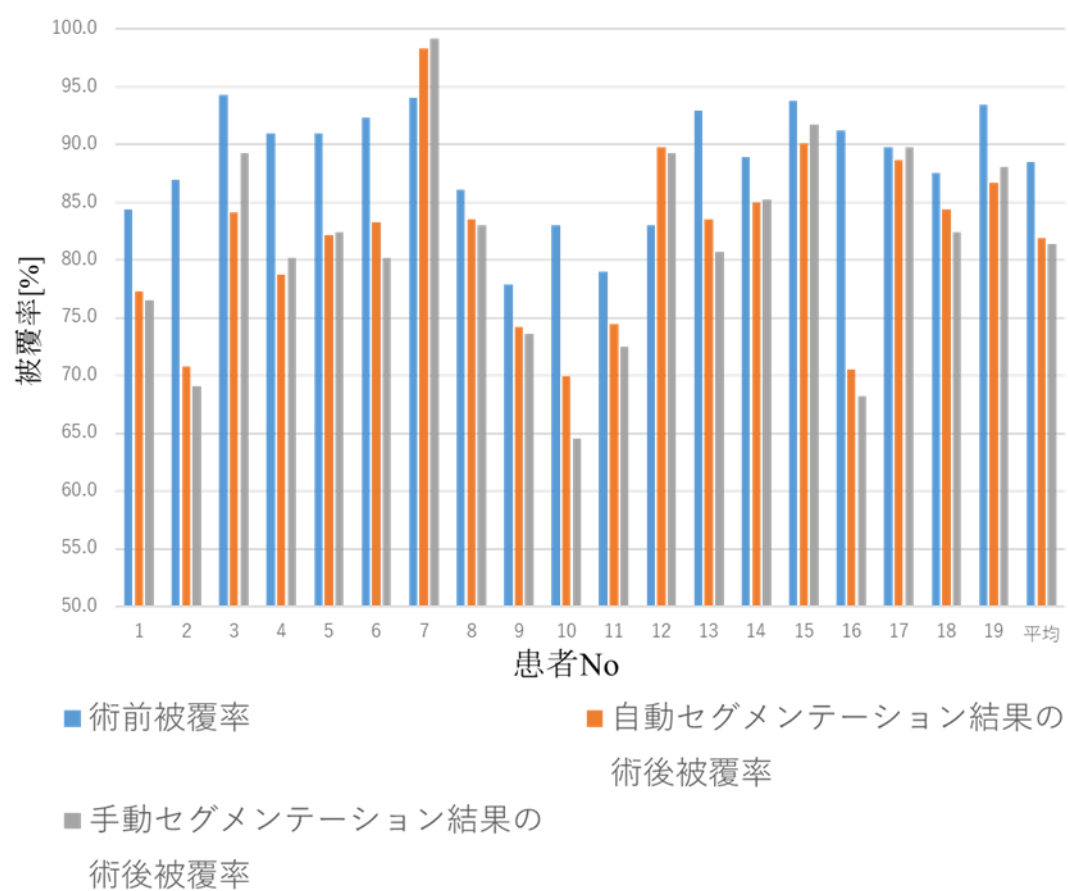


図 24 カップ被覆率

3.5. 術後骨棘評価

3.5.1. 実験目的

術後データベース構築のため，手術において実際に臼蓋縁がどの程度削られているのかを確認した．

3.5.2. 実験条件

データセットに対して 2.5 節の提案手法を適応する．術前骨盤から手動で抽出した臼蓋縁と術後の骨盤との距離誤差を求めることで評価する．

3.5.3. 実験結果

図 25 は代表的な例であった．患者 No.11 はあまり削られていない症例，患者 No.5 は下半分が大きく削られている症例，患者 No.12 は全体的に大きく削られている症例であった．また，SSM は術前の骨盤統計形状モデルに対して 19 症例の平均の掘削量をマッピングしたものを表示した．

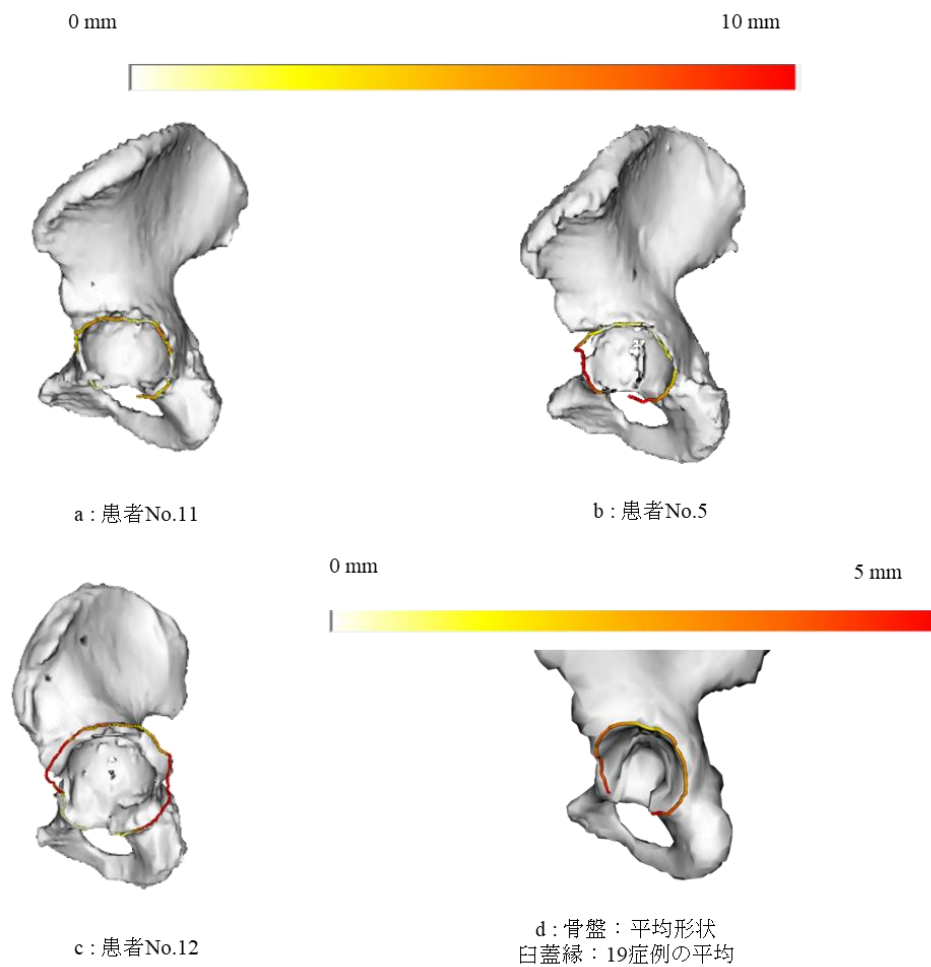


図 25 術後骨棘評価代表例

カラーバーは術前臼蓋縁と術後骨盤との距離を表している． a : 全体的に削りが小さい， b : 下部の削りが大きい， c : 全体的に削りが大きい， d : 平均形状でとった輪郭に 19 症例の平均掘削量を表示

4. 考察

① 術後の金属アーチファクトを含むセグメンテーション

骨盤に対して Dice 係数や ASD において図 13, 図 14 のように高い値を示し, 図 11 の a, b, c のように正解データと似通った輪郭が得られた. カップに関しては Dice 係数や ASD とともに図 13, 図 14 が示すように骨盤と比べると小さい値となった. しかし, 図 12 の a, b のように輪郭が一致している症例もある. Dice 係数が悪くなったのは, 骨盤とカップの体積差により起きたことがあげられ, Dice 係数・ASD の悪化にともに関係してくるのが, カップそのものが薄くセグメンテーションが抜け落ちてしまったこと, カップの上端が図 16 のようにセグメンテーションできていなかったことがあげられる. カップの上端がセグメンテーションできていなかったのは, CNN での学習データに axial 断面のみを学習していることで高さ方向に対して脆弱であったと考えられる. また, 骨盤は Dice 係数, ASD では高い評価が出たが, 金属アーチファクトの含まれる臼蓋周辺では表 2 であるように大きくずれてしまう症例が見受けられる. 同様に, 図 11 の d や図 12 の c, d で表示した輪郭においても, 金属アーチファクトを含む範囲の周辺や, 骨盤やカップの薄い部分においては正解データと異なる結果となった. ここから現状では自動セグメンテーションの結果で THA の自動計画[12]に反映させることはまだ早い. このセグメンテーションが活用できるようになれば術後の解析並びに, 術前計画への過去の術後データが活用できるようになる. そこで, CT の撮影原理上 axial 断面にアーチファクトが発生しやすいことから, 改善案として, 現在 axial 断面のみを学習データとして入力しているが, 金属アーチファクトの影響が axial 断面より比較的小さい coronal 断面, sagittal 断面を入力データとして学習させることで金属アーチファクト下や, 骨盤やカップの薄い部分でもセグメンテーションが行うことが期待できる.

② 術前計画・術後データ位置合わせ

表 3 が示しているように前骨盤を正解データとし, 術後データの臼蓋を切り取ったデータとの ASD は自動セグメンテーションデータが平均で

0.772 mm, 手動セグメンテーションデータが平均で 0.826 mm となっている。また, 表 1 から voxel のサイズが $0.703125 \times 0.703125 \times 1 \text{ mm}^3$ なので誤差は 1 voxel 程度だと考えられるため有用だと考えられる。しかし, 表 3 から誤差の最も大きいものは自動セグメンテーションデータで 1.359 mm であり, 手動セグメンテーションデータでは, 1.883 mm となっている。自動セグメンテーションデータで誤差が大きくなっているものは, 骨盤の薄い範囲がセグメンテーションできていない, もしくは逆に, 少量ではあるが骨盤周りの他の骨(今回は仙骨)領域までセグメンテーションしていたことが影響している。この改善案として, 上記のセグメンテーション精度の向上があげられる。また, 手動セグメンテーション側での誤差が大きい理由は, 臼蓋が術前 CT 画像の段階でかなり大きく変形している症例であり, 臼蓋の切り取り範囲周辺まで変形していたため生じたものである。この改善案として, 臼蓋縁周辺の切り抜き範囲を段階的に広げていき 3 段階, 4 段階でのレジストレーションを行うことがあげられる。これにより徐々に臼蓋周辺の影響が減り, 改善の期待ができる。

また表 3, 図 19, 図 20, 図 21 より自動セグメンテーション結果と手動セグメンテーション結果でそれぞれに対して精度の好い結果, 悪い結果がある。精度が異なっているものの特徴として, 手動セグメンテーションで複雑な部分である臼蓋や, 薄くなっており位置合わせが合いにくい部分が自動セグメンテーションでは見落とされることが多く位置合わせが合いやすくなっている点があげられる。また, 逆に自動セグメンテーションにより骨盤の範囲でない領域まで抽出してしまった結果位置合わせの精度が下がっている症例もあった。ここから一見自動セグメンテーションで好い結果が得られても, 現状自動セグメンテーションの細部の精度が低いいため期待しがたい。そこで①のようにセグメンテーション結果の向上が望まれる。

③ 術前計画・術後カップ比較

図 22 からカップサイズは専門医から提供を頂いたデータより違いが生じているものが 19 症例中 7 症例あり, 1/3 ほどが当てはまる。これを踏まえて, 中心間距離は, 自動セグメンテーションデータを用いた場合, 平均

で 4.08 mm の差があり，その中でカップサイズが異なるものを除くと平均で 3.98 mm となった．また，手動セグメンテーションデータを用いた場合，平均で 4.10 mm の差があり，その中でカップサイズが異なるものを除くと平均で 3.84 mm となった．カップサイズの異なる症例は計画位置にカップを挿入していたとしても骨盤の掘削量が術前計画時とは異なり，逆に，骨盤の掘削量が計画通りの場合，カップの中心位置が変わることになる．そこを踏まえカップサイズが異なる症例のみでの位置差を求めた．ここからやはり，カップサイズが術前計画時と変わると術後のカップ位置が大きく変わる傾向にあること，またカップサイズが変わらなくても位置の差が生じることがわかる．また次に，図 24 から被覆率は術前平均 88.5%，自動セグメンテーションデータを用いた場合の術後平均被覆率は 81.9%，手動セグメンテーションデータを用いた場合の術後平均被覆率は 81.4 %であり，ほとんどの症例で術後の方が減少している．このカップの中心位置や被覆率の結果は，骨の硬さが原因で掘削位置よりも手前で固定されたり，術中の判断で設置計画を変更したりしている可能性があてはまる．そこでどのような症例で差が大きくなっているのかを解析することで術前計画の段階で症例により術前と乖離が起きるかもしれないというアラートを出すことのできるシステムを開発できれば今後臨床に役立てることができる．また，この差が患者にとって負担になる可能性があるのかを今後専門医の方々の意見をもらう必要がある．

④ 術後骨棘評価

図 25 患者 No.11 はあまり削られていない症例，患者 No.5 は下半分が大きく削られている症例，患者 No.12 は全体的に大きく削られている症例である．また平均で見ると骨盤前面において大きく削られることが多いことがわかる．骨棘は THA 手術の際に削り残しが多いと股関節の関節機能に対して悪影響を及ぼす．そこで現状では骨盤に対してどの場所が多く削られているのがわかったためこれを利用し実際の手術において削るべき場所を可視化することができれば手術のナビゲーションとして利用可能であると考えられる．

5. 結論

本研究では THA における術前計画システム[12]に術後データを適応させるための手法を提案した．全自動で術前計画と術後データの評価を行うシステムを提案した．

金属アーチファクトを含む CT 画像からの骨盤，カップセグメンテーションは，骨盤において平均 Dice 係数，が 0.963，ASD が 0.308 mm であった．カップは平均 Dice 係数，が 0.704，ASD が 0.694 mm となった．臼蓋周辺を測定した臼蓋縁 ASD は 19 症例で平均 2.53 mm であった．ここから広範囲で見ると骨盤のセグメンテーションが可能であるが，金属アーチファクトを含む範囲では精度が低くなることがわかった．

術前計画・術後データの骨盤位置合わせでは，自動セグメンテーションしたデータの平均の ASD が 0.772 mm となり，誤差は 1 voxel 程度であり，セグメンテーションが成功している症例では有用であった．

術前計画・術後カップ比較では，自動セグメンテーションしたデータの中心間の距離は平均で 4.08 mm の差があり，また被覆率は術前平均 88.5%，術後自動セグメンテーションしたデータの平均被覆率は 81.9%であった．

術後骨棘評価では，術前から術後にかけて臼蓋全体的に 3~5 mm 削られていることがわかった．

以上のことより，提案手法の一連の流れが全自動で可能となった．その中で，術後のセグメンテーションは金属アーチファクト部分を精度高くセグメンテーションを行うのが重要となる．そのために 3 断面を入力にした手法を確立する必要がある．こちらが可能となると今回の提案手法である，位置合わせ，カップ比較，骨棘評価を用いて術前計画システムのデータ拡張が大規模データで行うことができ臨床においての利用が期待される．

謝辞

本研究を進めるにあたり，日ごろより有益な助言と丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 生体医用画像研究室 佐藤嘉伸 教授に深く感謝申し上げます．また，研究発表の際，貴重なご助言を賜りました 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 計算システムズ生物学研究室 金谷重彦 教授に厚く御礼申し上げます．本研究を遂行するにあたり，日ごろより多くの有益な御助言と丁寧な御指導を頂きました 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 生体医用画像研究室 大竹義人 准教授，同研究室 横田太 助教，山梨大学大学院 総合研究部 鍵山善之 准教授に深く感謝申し上げます．

本研究を進めるにあたり，CT 画像のご提供ならびに骨盤カップ自動抽出及び術後データからのデータ拡張に関するご協力，また多くの有益な御討論を賜りました大阪大学大学院医学系研究科運動器医工学治療学講座菅野伸彦教授，高尾正樹講師に厚く御礼申し上げます．

本研究を遂行するにあたり，日ごろより丁寧な御指導を頂きました福田紀生 氏，日朝祐太 氏，に心より感謝致します．大学院生活全般にわたり様々な面で支えて頂きました 田川郁代 秘書をはじめ，奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 生体医用画像研究室 の皆様に心からの感謝を申し上げます．

最後に，大学院修了まで多大な支援を頂いた家族に深く感謝し，ここに謝辞とさせていただきます．

参考文献

- [1] DiGioia A, Jaramaz B, Blackwell M, Simon D, Morgan F, Moody J, Nikou C, Colgan B, Aston C, Labarca R, Kischell E, Kanade T (1998) Image guided navigation system to measure intraoperatively acetabular implant alignment. *Clin Orthop Relat Res* 355:8–22
- [2] DiGioia A, Jaramaz B, Nikou C, Labarca R, Moody J, Colgan B (2000) Surgical navigation for total hip replacement with the use of hipnav. *Oper Tech Orthop* 10(1):3–8.
- [3] Bargar W, Bauer A, Borner M (1998) Primary and revision total hip replacement using the Robodoc system. *Clin Orthop Relat Res* 354:82–91
- [4] Sugano N (2003) Computer-assisted orthopedic surgery. *J Orthop Sci* 8(3):442–448
- [5] Gomes P (2011) Surgical robotics: reviewing the past, analyzing the present, imagining the future. *Robot Comput Integr Manuf* 27(2):261–266
- [6] Taylor RH, Mittelstadt B, Paul H, Hanson W, Kazanzides P, Zuhars J, Williamson B, Musits B, Glassman E, Bargar W (1994) An image-directed robotic system for precise orthopaedic surgery. *IEEE Trans Robot Autom* 10(3):261–275
- [7] Nakamura N, Sugano N, Nishii T, Kakimoto A, Miki H (2010) A comparison between robotic-assisted and manual implantation of cementless total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res* 468(4):1072–1081
- [8] Sugano N, Nishii T, Miki H, Yoshikawa H, Sato Y, Tamura S (2007) Mid-term results of cementless total hip replacement using a ceramic-on-ceramic bearing with and without computer navigation. *J Bone Joint Surg Br* 89(4):455–460
- [9] Iwana D, Nakamura N, Miki H, Kitada M, Hananouchi T, Sugano N (2013) Accuracy of angle and position of the cup using computed tomography-based navigation systems in total hip arthroplasty. *Comput Aided Surg* 18(5–6):187–194
- [10] Kitada M, Nakamura N, Iwana D, Kakimoto A, Nishii T, Sugano N (2011) Evaluation of the accuracy of computed tomography-based navigation for femoral stem orientation and leg length discrepancy. *J Arthroplasty* 26(5):674–679

- [11]Lattanzi R, Grazi E, Testi D, Viceconti M, Cappello A, Tony A (2003) Accuracy and repeatability of cementless total hip replacement surgery in patients with deformed anatomies. *Med Inform Internet Med* 28(1):59–77
- [12]Kagiyama Y, Takao M, Sugano N, Tada Y, Tomiyama N, Sato Y (2013) Optimization of surgical planning of total hip arthroplasty based on computational anatomy. *Proc IEEE EMBC* 2980–2983
- [13]KagiyamaY, Nakamoto M, TakaoM, SatoY, SuganoN,Yoshikawa H, Tamura S (2004) Automated preoperative 3D planning of acetabular cup positioning and size selection in total hip arthroplasty using CT data. *Proc CAOS* 312–313
- [14]KagiyamaY, Sugano N, TakaoM,NakamotoM, SatoY,Yoshikawa H, Akazawa K, Tada Y (2008) Automated preoperative planning procedure for acetabular cup based on 3D pelvic bone structure in total hip replacement. *Jpn Soc Med Biol Eng* 46(4):437–450 (in Japanese)
- [15]Otomaru I,KobayashiK,Okada T, Nakamoto M, TakaoM, Sugano N, Tada Y, Sato Y (2009) CT-based automated preoperative planning of acetabular cup size and position using pelvis-cup integrated statistical shape model. *Proc CAOS* 185–188
- [16]Otomaru I, NakamotoM, Okada T, Kagiyama Y, TakaoM, Sugano N, Tada Y, Tomiyama N, Sato Y (2012) Automated 3D acetabular cup planning in total hip arthroplasty based on expertise modeling using statistical shape model. *J Jpn Soc Comput Aided Surg* 14(1):27–37 (in Japanese)
- [17]Heimann T, Meinzer H-P (2009) Statistical shape models for 3D medical image segmentation: a review. *Med Image Anal* 13(4):543–563
- [18]Hassani, H., Cherix, S., Ek, E. T., Rüdiger, H. A. (2014). Comparisons of preoperative three-dimensional planning and surgical reconstruction in primary cementless total hip arthroplasty. *The Journal of arthroplasty*, 29(6), 1273-1277.
- [19]Yokota F, Okada T, Takao M, Sugano N, Tada Y, Tomiyama N, Sato Y (2013) Automated CT segmentation of diseased hip using hierarchical and conditional statistical shapemodels. *ProcMICCAI* 8150:190–197
- [20]Roth, H. R., Oda, H., Hayashi, Y., Oda, M., Shimizu, N., Fujiwara, M., Misawa, K Mori, K. (2017). Hierarchical 3D fully convolutional networks for multi-organ segmentation. *arXiv preprint arXiv:1704.06382*.

- [21] Dou, Q., Chen, H., Jin, Y., Yu, L., Qin, J., & Heng, P. A. (2016, October). 3D deeply supervised network for automatic liver segmentation from ct volumes. In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (pp. 149-157). Springer, Cham.
- [22] Treece, G. (2017). Refinement of clinical X-ray computed tomography (CT) scans containing metal implants. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 56, 11 - 23.
- [23] https://mi.eng.cam.ac.uk/Main/GMT_wxDicom
- [24] Kagiya, Y., Otomaru, I., Takao, M., Sugano, N., Nakamoto, M., Yokota, F., Tomiyama, N., TADA, Y., Sato, Y. (2016). CT-based automated planning of acetabular cup for total hip arthroplasty (THA) based on hybrid use of two statistical atlases. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 11(12), 2253-2271.
- [25] Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015, October). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention (pp. 234-241). Springer, Cham.
- [26] Rueckert, D., Sonoda, L. I., Hayes, C., Hill, D. L., Leach, M. O., & Hawkes, D. J. (1999). Nonrigid registration using free-form deformations: application to breast MR images. *IEEE transactions on medical imaging*, 18(8), 712-721.
- [27] <https://biomedica.doc.ic.ac.uk/software/irtk/>
- [28] Heimann, T., Van Ginneken, B., Styner, M. A., Arzhaeva, Y., Aurich, V., Bauer, C., ... & Bello, F. (2009). Comparison and evaluation of methods for liver segmentation from CT datasets. *IEEE transactions on medical imaging*, 28(8), 1251 - 1265.

発表リスト

- [1] 末長和馬，児山昂生，中西裕紀，横田太，大竹義人，高尾正樹，小川剛，上村圭亮，菅野伸彦，佐藤嘉伸 “人工股関節全置換術における術前術後の筋骨格及びインプラントの統計モデル作成を目的としたデータベース構築”，生体医用画像研究会 第4回若手発表会(2017).
- [2] 末長和馬，鍵山義之，中西裕紀，横田太，大竹義人，高尾正樹，菅野伸彦，佐藤嘉伸，“人工股関節カップ自動術前計画システムにおける術後 CT を用いた学習データ拡張，”第26回日本コンピュータ外科学会大会，2017.10.
- [3] 末長和馬，鍵山義之，中西裕紀，横田太，大竹義人，高尾正樹，菅野伸彦，佐藤嘉伸，“人工股関節カップ自動手術計画システムにおける術後データ解析～術後 CT 画像からのカップ自動抽出と術前計画との比較～”，第12回日本CAOS研究会，2018.3.(発表予定，採択済み)