

骨折 CT 画像からの半自動骨整復およびカスタム型骨折プレートデザインシステムの研究開発

加藤 徹[†] 高橋 弘毅[†] 山下 圈[†] 土井 章男^{††} 馬渡 太郎^{†††} 綿貫 宗則^{††††} 萩原 嘉廣^{†††††}

[†]フリーランス ^{††}岩手県立大学 ^{†††}国家公務員共済組合連合会 浜の町病院 ^{††††}JR 仙台病院 ^{†††††}Anylom 株式会社

Research and development of a semi-automated bone alignment and custom fracture plate design system based on fracture CT images

Toru KATO[†] Hiroki TAKAHASHI[†] Meguru YAMASHITA[†] Akio DOI^{††} Taro MAWATARI^{†††} Munenori WATANUKI^{††††}

Yoshihiro HAGIWARA^{†††††}

[†]Freelance ^{††}Iwate Prefectural University ^{†††}Hamanomachi Hospital ^{††††}JR Sendai Hospital ^{†††††}Anylom Inc.

〈あらまし〉 整形外科の医療現場において、骨折手術中に患者に適合したプレートデザイン決定を行う時間がボトルネックになっている。このため、患者の CT 画像から半自動的に骨折部位を抽出・整復データを作成し、医師自身が簡単にプレートデザインを行えるシステム開発が求められている。今回は 17 症例の骨折 CT 画像に対し、互いに空間的に離れた骨折部位をメッシュ化し、ICP 法を用いることで骨折部位の自動整復を実施した。更に、整復後のメッシュをボクセル画像化し、プレートデザイン・配置・応力解析・プレート出力の一連の作業が簡単に実行できる術前計画支援システムを研究開発した。

キーワード：医用 CT 画像、ボクセル化、骨折プレートデザイン、応力解析

<Summary> In orthopedic clinical practice, the time required to determine a patient-specific plate design during fracture surgery has become a bottleneck. To address this issue, there is a growing need for the development of a system that can semi-automatically extract fractured regions from a patient's CT images, generate aligned data, and allow surgeons themselves to easily perform plate design. In this study, we applied automatic alignment of fractured regions using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm on CT images from 17 fracture cases, after meshing the spatially separated fractured regions. Furthermore, we developed a preoperative planning support system, which enables seamless execution of plate design, placement, stress analysis, and plate output, by voxelizing the aligned meshes.

Keywords: Medical CT images, Voxelization, Fracture plate design, Stress analysis

1. はじめに

骨折治療の一法として、金属製プレートを用いた固定がある。近年は、患者ごとに適合したカスタムメイド型プレートが注目されており、術前に設計されたプレートは低侵襲手術や早期回復に貢献すると期待されている。この背景から、CT 画像からの骨折部位抽出とプレート自動生成技術の開発が求められている。

現在の解剖学的プレートは標準骨に基づいており、患者ごとに形状が合わず、手術中の調整が必要となるため、手術時間やリスクが増加する課題がある。

本研究では、整復済み CT 画像を用いて医師が簡単にプレートを設計できるシステムについて報告する。将来的には 10 分以内での設計完了と迅速な現場提供を目指す。

2. 関連研究

骨折部位の正確な復元は、外科手術の成功に直結する重要な課題であり、CT スキャンから得られる 3 次元点群やメッシュデータを活用した骨片の自動・半自動組立手法が数多く提案されている。これらの手法は、骨折の複雑さやデータ形式、目的に応じて使い分けが可能である。

2.1. 骨折形状のための半自動位置合わせシステムの開発

半自動位置合わせシステムでは、CNNによるCT値予測を用いて等値面を生成し、メッシュの分離や断面点群抽出、ICP法の精度向上を実現しており、曲面状の骨折にも有効である。さらに、ポリゴン化や自動復元機能も備える。[1]

2.2. 単純骨折の自動組立手法

単純骨折の自動組立手法では、多層セグメンテーションで骨表面を統合し、初期位置推定を通じてICP法の精度を高め、術前シミュレーションの質を向上させている。[2]

2.3. 接平面を用いた骨片境界セグメンテーション

骨折骨片の点群データを用いて、接平面に基づく手法で骨片の境界ループを抽出・復元する方法が提案されている。点群処理技術の進展を活用し、より実用的で高精度な骨折復元を目指している。[3]

3. 提案手法

3.1. 骨折部位の抽出

CT画像から2.1節で述べたCNNでCT値を予測し、マーキングキューブ法で骨領域のみをメッシュ化する。隣接三角形をグループ化し、メッシュ数の多い上位2グループを残すことでノイズ除去した骨折部位のみを抽出する。

3.2. 骨折部位の修復

メッシュA,Bの点群から曲率の高い断面(点群A,B)を取得し、ICP法で点群Bを点群Aに位置合わせする。この変換行列をメッシュBに適用し、自動修復した。(図1)(図2)

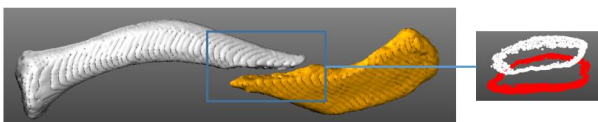


図1 骨折メッシュから断面の点群を取得

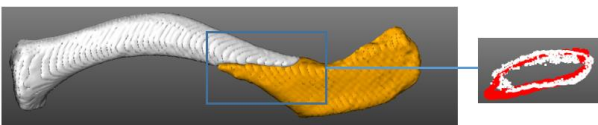


図2 ICP法による骨折の自動修復

本手法を大腿骨および鎖骨の17症例に適用し、それぞれ修復の有効性を確認した。

3.3. 修復データのボクセル画像化

修復データを対象に、それぞれ共通スケールのボクセルグリッドに変換した。ボクセル変換処理はオープンソースのVisualization Tool Kit [4]を用いて各ボクセルに対してメッシュの内外判定を行い、内部を+1000、外部を-1000で符号化し、2種類のメッシュを1つのボクセルデータに統合した。(図3)

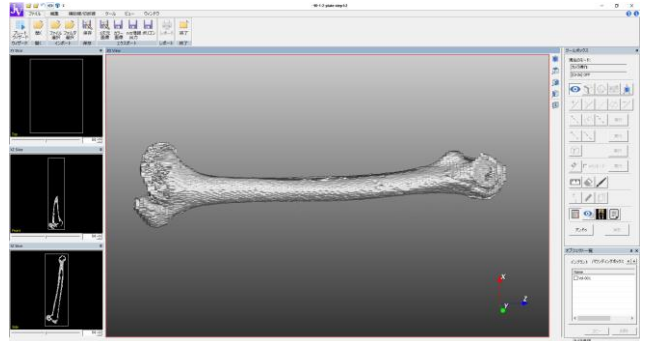


図3 修復後ボクセルデータの読み込み・可視化

3.4. プレート変形

修復ボクセルに対し、仮想的な骨折プレートの配置と変形シミュレーションを行う。

ボタン操作により、プレートの回転または移動モードを指定し、マウス操作で各軸に沿った回転や平行移動、数値入力による回転や移動が可能である。(図4)

また、プレートの幅・長さ・厚さの変更も可能である。

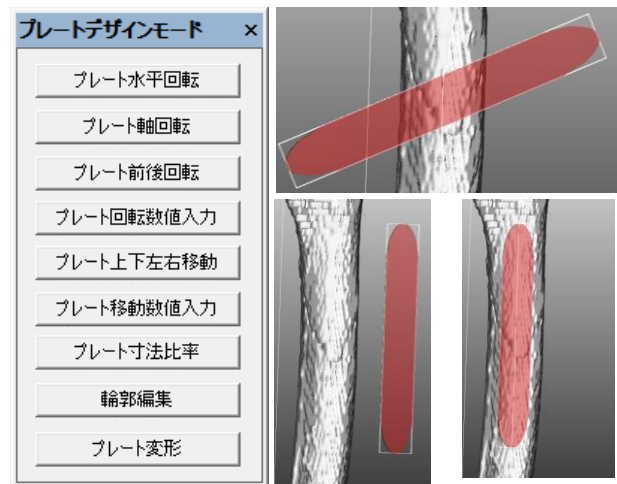


図4 プレートデザインのボタン、回転・移動例

位置や形状の決定後、骨折画像にフィットさせる変形処理を行う。変形処理は、図4と同様にプレートを骨折画像の手前に配置し、ビューの奥行方向に向かって実施する。この際、骨折画像から等値面を生成し、衝突判定によりプレートの変形データを作成する。これにより、プレートが骨表面に沿った形状に変形される(図5)。

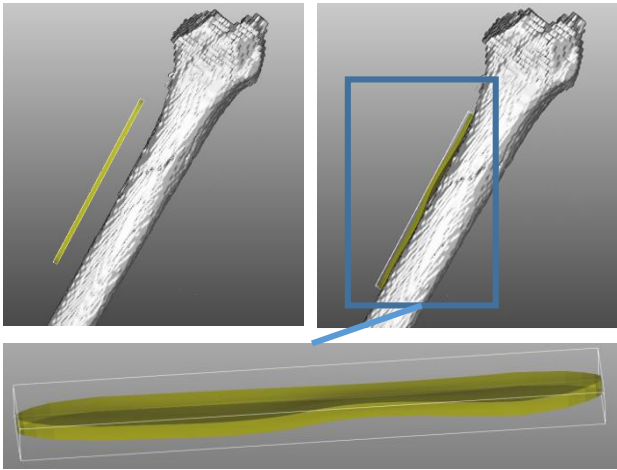


図5 プレート変形例 左上:変形前, 右上:変形後, 下:変形後のプレートのみ表示(別視点)

3.5. 変形後プレートのスクリーユ穴デザイン

変形後のプレートには, スクリュー穴の追加・削除・移動, 半径・長さの変更が可能である(図6). スクリュー穴のカスタマイズは骨折部に応じた固定力や応力分散の調整に有効であり, 内固定構造の生体力学的性能向上に寄与することが報告されている[5].

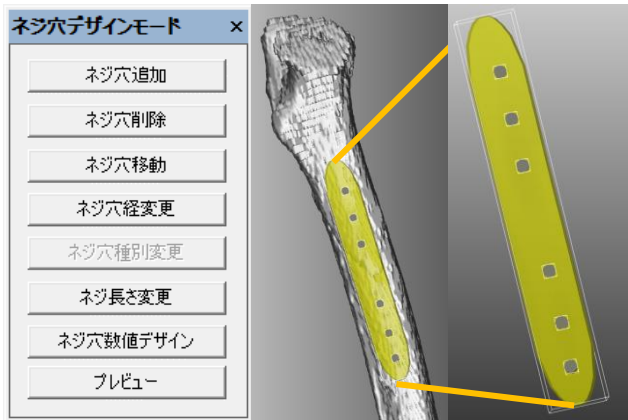


図6 スクリュー穴デザイン

3.6. 応力解析機能

応力解析機能では, 設計したプレートの強度評価を行い, 基準を満たした場合のみ STL ファイルを出力する. FEM 解析は4点曲げ試験に限定し, 自動メッシュ生成によって操作を簡素化した. 荷重や拘束条件の指定のみで解析が可能で, 材料は「Ti-6Al-4V」「Co-Cr-Mo」から選択できる. メッシュも5段階の細かさ(非常に荒い, 粗い, 中程度, 細かい, 非常に細かい)から選択し, 良質な三角形メッシュが生成される. 近年は FEM と仮想計画支援を統合した研究があり, Heらは大腿骨遠位骨折で FEM と仮想手術計画を組み合わせた評価の有用性を示している[6]. このような FEM 操作の簡略化は臨床応用において重要であり, 本システムもその一助となる.

4. 評価

4.1. ボクセル化の計算時間と精度

骨折症例 17 件に対し, ボクセル化処理を行い, 空間解像度 64^3 , 128^3 , 192^3 での処理時間を評価した.(表1) 64^3 では計算時間は最小 0.75 秒~最大 1.64 秒, 128^3 では 5.82~12.46 秒, 192^3 では 19.54~42.27 秒と, 解像度に比例して処理時間が増加した.

症例「72」のメッシュとボクセル化結果を図7に示す. 64^3 では 0.75 秒と高速であるが骨表面に段差が生じた. 128^3 では 5.82 秒に計算時間が増加したものの, 形状の再現性(骨の丸み)が向上し, 高解像度ボクセル化の有効性が確認された.

表1 症例ごとのボクセル化計算時間

症例名	メッシュ数		解像度別計算時間(秒)		
	A	B	64^3	128^3	192^3
72	12,102	7,986	0.75	5.82	19.54
75	39,856	21,928	0.8	6.14	22.03
g68	69,912	8,682	0.86	7.03	23.09
g80	78,898	25,504	0.9	7.1	23.12
g70	75,930	48,764	0.95	7.35	24.51
f61	146,122	123,870	0.96	7.52	24.74
g11	87,414	103,406	0.98	7.57	24.89
b5	164,444	197,442	1.02	7.75	25.04
f120	139,789	109,240	1.04	7.78	25.04
b131	224,516	108,570	1.09	7.86	26.11
h194	245,264	158,538	1.11	8.46	27.89
61	212,670	52,742	1.12	8.57	27.91
k65	344,530	134,030	1.15	8.81	29.13
80	208,544	86,244	1.17	9.02	32.75
90	314,558	160,146	1.27	10.04	33.25
a69	282,596	135,778	1.28	10.11	35.03
i175	185,604	228,443	1.64	12.46	42.27

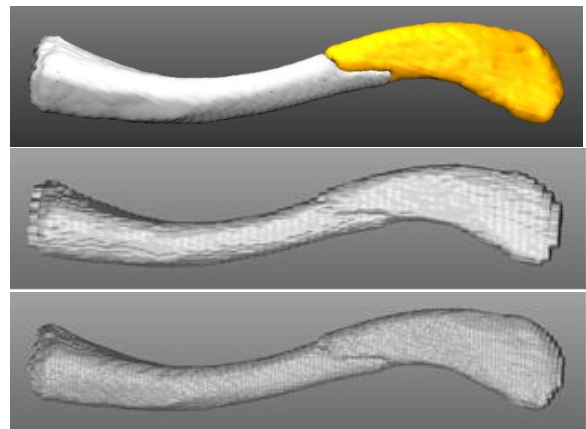


図7 症例「72」のメッシュとボクセル化結果(上段:骨折メッシュ, 中段:ボクセル化 64^3 , 下段:ボクセル化 128^3)

4.2. カスタム型骨折プレートの応力解析結果

症例「72」に対し、チタン合金 (Ti-6Al-4V) 製のプレートを 128°解像度で設計し、非常に粗いメッシュで FEM による 4 点曲げ試験を実施した。初期の荷重条件では、スクリュー穴近傍に最大 825MPa の高応力が発生し、応力集中が見られた (図 8)。そこで荷重位置をスクリュー穴から離して左右対称に再配置した結果、応力分布は大幅に改善された。解析後はプレート全体の約 95%が 200MPa 未満、残る領域も最大 300MPa 程度となり、チタン合金の降伏強度 (880MPa) を大きく下回った (図 9)。このことから、荷重位置の調整が応力集中の緩和に有効性が認められた。応力解析の処理時間は約 40 秒であった。

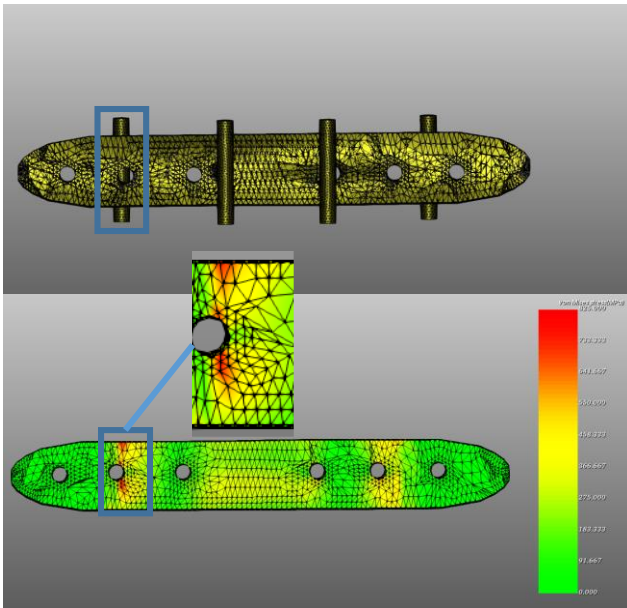


図 8 荷重位置変更前の応力解析 (上: 解析前, 下: 解析後)

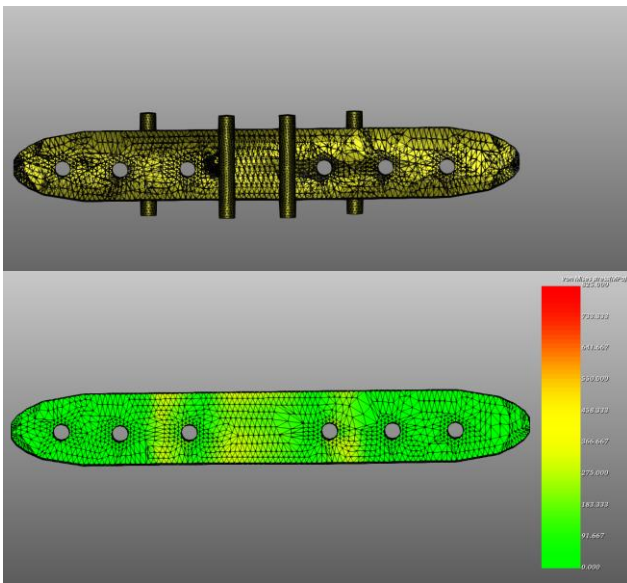


図 9 荷重位置変更後の応力解析 (上: 解析前, 下: 解析後)

5. おわりに

本研究では、CT 画像から骨折部位を抽出・修復し、ボクセル変換、プレート設計、応力解析までを統合した術前計画支援システムを開発した。

骨折抽出では CNN による CT 値予測と三角形の接続情報を用い、ノイズを除去しつつ骨折部位を分離した。修復では曲率に基づく断面点群と ICP 法により自動修復を実現し、修復後のメッシュはボクセル化して三次元的に可視化した。

さらに、修復データに基づくプレートの配置や変形、スクリュー穴設計を GUI 上で柔軟に操作可能とし、患者個別の設計を支援した。荷重条件などをテンプレート化した簡易 FEM 解析機能を搭載し、設計後の強度評価も可能とした。

本システムは、骨折修復から迅速なプレート設計・評価までを一貫して支援し、低侵襲なカスタムメイド手術の実現に向けての前進を期待するものである。今後は、複雑な骨折や修復精度の向上、GUI 改善を通じて臨床応用を目指す。

謝辞

本研究は公益財団法人 JKA の「深層学習を用いたカスタムメイド型骨用プレートシステムの研究開発」の研究開発補助事業と、岩手県立大学全学競争研究費「骨折修復機能を有したカスタムメイド型骨折用プレート設計システムの研究開発と臨床応用」の研究助成を得ました。評価に使用した CT 画像は東北大学、竹田総合病院から提供して頂きました。本研究で使用した CT 画像は東北大学大学院医学系研究科倫理委員会の承認を得ています (受付番号: 2020-1-632, 2020/10/26)。

参考文献

- 1) W. MENGZE, H. Takahashi, T. Kato, D. YING, A. Doi, "Development of a semi-automatic alignment system for fractured bone shapes", 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 29th 2024), B-Con PLAZA, Beppu, 24-26 January, 2024.
- 2) Bin Liu, et al. "An automatic personalized internal fixation plate modeling framework for minimally invasive long bone fracture surgery based on pre-registration with maximum common subgraph strategy", Computer-Aided Design, Vol. 107, Pages 1-11, Feb. 2019.
- 3) Bin Liu, et al. "A personalized preoperative modeling system for internal fixation plates in long bone fracture surgery—A straightforward way from CT images to plate model", The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Vol. 15, Issue 5, e2029, Aug. 2019.
- 4) VTK - The Visualization Toolkit, <https://vtk.org/>
- 5) Wei Sheng et al., "Finite Element- and Design of Experiment-Derived Optimization of Screw Configurations and a Locking Plate for Internal Fixation System", Computational and Mathematical Methods in Medicine, Aug. 2019.
- 6) He, Y et al., "Application of Finite Element Analysis Combined With Virtual Computer in Preoperative Planning of Distal Femoral Fracture". Frontiers in Surgery, Feb. 2022.