慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	骨折手術の次世代プランニングの開発 : 3次元整復計画と固定強度解析の妥当性の検討
Sub Title	Development of innovative preoperative planning techniques for osteosynthesis : 3D registration technique and finite element analysis
Author	大木, 聡(Ōki, Satoshi) 名倉, 武雄(Nagura, Takeo)
Publisher	
Publication year	2019
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2018.)
JaLC DOI	
Abstract	治療困難な難治性骨折に対して3次元シミュレーションを行い、骨折の位置関係を3次元的に解析し、同モデルを3Dプリンタで再現して術前に綿密な計画をたてることで、正確な整復を行うシミュレーションするシステムを構築した。実際の臨床現場において同様のシミュレーションを行った結果、整復位置はいずれも良好であった。本手法は整復困難な骨折の治療や、手術前の教育、ディスカッションにおいて非常に有用であると考えられた。 We developed 3D preoperative simulation for fracture reduction and fixation using surface registration technique and 3D printer. This method contribute to accurate simulation for fractures with large bone defect or multiple fragments. It can be a good tool for education and discussion before the operation.
Notes	研究種目 : 若手研究(B) 研究期間 : 2017 ~ 2018 課題番号 : 17K16702 研究分野 : 整形外科
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_17K16702seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ６ 月　 ７ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2018
課題番号：１７Ｋ１６７０２

研究課題名（和文）骨折手術の次世代プランニングの開発-３次元整復計画と固定強度解析の妥当性の検討-

研究課題名（英文）Development of Innovative Preoperative Planning Techniques for Osteosynthesis - 3D Registration Technique and Finite Element Analysis -

研究代表者
大木　聡（OKI, Satoshi）

慶應義塾大学・医学部（信濃町）・講師（非常勤）

研究者番号：９０４６４８７５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,200,000円

研究成果の概要（和文）：治療困難な難治性骨折に対して３次元シミュレーションを行い、骨折の位置関係を３次元的に解析し、同モデルを３Dプリンタで再現して術前に綿密な計画をたてることで、正確な整復を行うシミュレーションするシステムを構築した。　実際の臨床現場において同様のシミュレーションを行った結果、整復位置はいずれも良好であった。本手法は整復困難な骨折の治療や、手術前の教育、ディスカッションにおいて非常に有用であると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
骨折の中で、骨欠損の大きいものや粉砕が強いものは難治性骨折といわれ、整形外科医によって治療成績のばらつきが多い。治療手術における整復や固定方法は術者によって様々であるが、インプラントは多くの場合は外に発注しているため手術中変更できないという現状がある。
本手法をもちいることで、難治性骨折の治療の前に、手術中の整復方法や固定インプラントを十分に計画することができ、術者間のコンセンサスを得ることや、若手教育を行うことも可能となった。

研究成果の概要（英文）：We developed 3D preoperative simulation for fracture reduction and fixation using surface registration technique and 3D printer. This method contribute to accurate simulation for fractures with large bone defect or multiple fragments. It can be a good tool for education and discussion before the operation.

研究分野：整形外科

キーワード：３次元シミュレーション　骨折治療

１．研究開始当初の背景

骨折治療は綿密な術前計画の後に行われる事が推奨されているが，レントゲン画像のトレースとインプラントの長さから２次元計画のみに基づいて行われることがほとんどであった．しかしながら高エネルギー外傷では間の骨片が粉砕，または欠損しており，術中所見と術者経験に依存することが多いのが現状であった．粉砕骨折や骨欠損を伴った骨折は血管柄付骨移植など難易度も高い手術手技が必要とされてきたが，近年創外固定を用いた骨切と骨移動や，Masqulet らが報告したセメント充填後の二期的骨移植による方法によって，近位端と遠位端の骨片の位置が正確であり，かつ強固な固定を得られれば，中間の粉砕と骨欠損は比較的容易に治療する事が可能となっている．

２．研究の目的

本研究では骨折治療に対しての３次元術前計画を行い，術中実現可能な位置にインプラントを設置した際の固定性のシミュレーションの固定性評価を行う事を目的とした．

３．研究の方法

研究は(1)３次元 CT を用いた術前計画,(2)有限要素法によるインプラント固定性予測の妥当性評価の２つの確立を目標として行った。

(1)３次元 CT を用いた術前計画

対象は治療困難と考えられた骨折患者で３次元術前計画を用いて治療した７例とした。内訳は、脛骨粉砕骨折１例、上腕骨遠位開放粉砕骨折１例、大腿骨遠位開放粉砕骨折２例、舟状骨偽関節１例、鎖骨偽関節２例であった（図１）。術前計画方法は患側・健側の両側 CT を 1mm スライスで撮影したのち、CT DICOM データとして出力した。ソフトウェア（AVIZO 9.3.0 MAXNET）を用いて健側と患側主骨片の表面データを作成した。患側主骨片の皮質骨表面のみ抽出し、健側表面データ上に Iterative Closest Point Algorithm による surface registration 法を用いて位置合わせした。その移動情報を用いて各骨片全体の表面データを健側表面データ上に投影し、骨折整復モデルを作成した。骨欠損が大きく骨片同士が独立している場合は CAD ソフト上で円柱型表面による架橋をはり、整復像表面データを 3D プリンタ（Uprint Plus, 丸紅）にて実体化した。整復モデル上には骨折線が再現されており、インプラントの種類選択、設置位置の検討、成型を行った（図２）。

本手法の有用性の指標として、手術中の術者の主観的な評価に加え、３次元データの計測から整復の正確性を評価した。正確性の評価は術前後の軸転位角度と短縮距離、関節内骨折においては関節転位距離を平面間距離より計算した。軸転位は骨折より遠い部分の関節面を Surface Registration で位置合わせし、骨折近位部の関節面の法線ベクトルの健側、患側の角度を整復前、整復後で計算し、その差を計算した。同様の位置合わせのモデルで関節中心距離の短縮率を計算した。　関節内骨折においては、関節面を含む主要骨片をもとに位置合わせをし、他の関節面の表面間距離を計算してその最大値を関節転位と定義した（図 3)。

(2)有限要素法によるインプラント固定性予測の妥当性評価

有限要素法は２次元または３次元モデルに物質の性質を示す物性値を設定する事で，外力が加わったときにその物質の変形を予測する機械工学で広く用いられている手法である．整形外科領域においても関節変形や人工関節の応力集中の解析に広く用いられてきたが，ほとんどの方法は骨の密度を皮質骨と海綿骨の２種類に設定して行うことがほとんどであった．近年，骨の内部構造を CT より再現し，その強度からシミュレーションを行うことが可能となった．申請者の施設ではそのソフトウェア（３D Bone）を購入しており，微細骨構造を再現してインプラントの設置位置によるシミュレーションを行う事が可能であるため、同ソフトの使用によりシミュレーションを行うこととした。

４．研究成果

(1)３次元 CT を用いた術前計画

治療対象は多岐にわたったが、同手法を用いることによる手術シミュレーションの有用性は広く、具体的には術前インプラントの成型、インプラントに合わせることによる整復、骨欠損の予測、再手術時の骨欠損方向の評価などに有用であることがわかった（図 4,5)。また、術後３次元評価による整復位はどれも良好であり、平均で軸角度 22.0→6.8 度、関節面偏位 10.8→2.5 mm、短縮矯正 6.5→2.8mm と改善がみられた（図３）。

(2)有限要素法によるインプラント固定性予測の妥当性評価

当初用いる予定であったソフトウェア 3D Bone は骨形状の位置の変化に合わせたモデルづくりが困難であり、他の有限要素ソフト ABAQUS によるシミュレーションを行うことに変更した。ABAQUS 内には骨強度の割当のシステムは自動化されていないが、スクリプト上で物性値を CT 値から割り当てるプログラムを確立させ、これを実装することを完了した。

Case number	1	2	3	4	5	6	7
骨折部位	脛骨近位	大腿遠位	大腿遠位	上腕遠位	舟状骨 偽関節	鎖骨 偽関節	鎖骨 偽関節
OTA分類	41C3	33C2.3	33C2.3	13C3.1	72B	15.2A	15.2A
性別	男性	男性	男性	男性	男性	男性	男性
年齢	48	43	46	51	34	36	34
受傷手術期間	13	10	3	7	237	213	354

図１　本研究の対象症例内訳

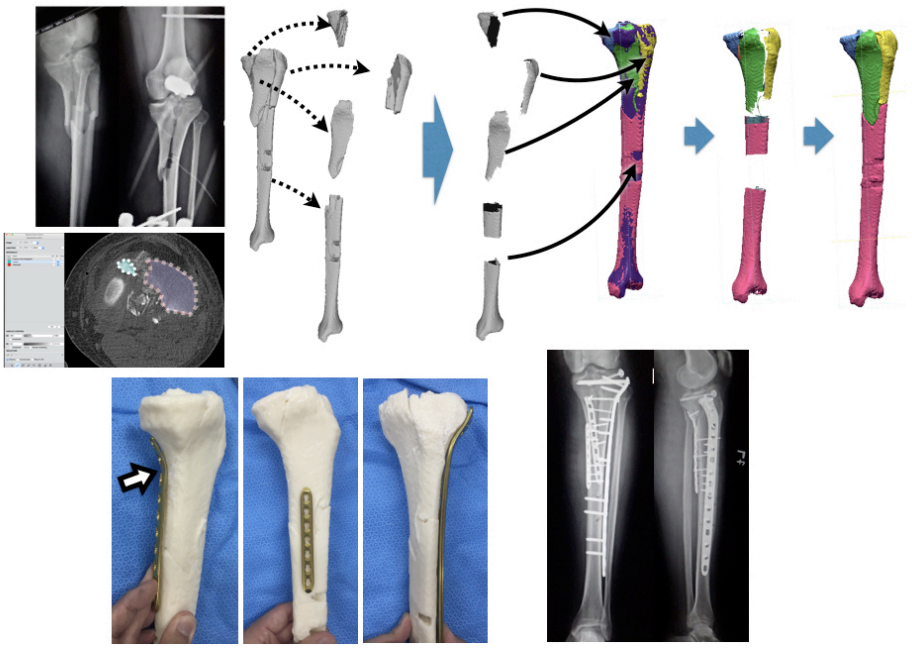

図２　３D 術前計画の方法
　まず CTDICOM データより３次元表面データを作成し、皮質を健側反転モデルに Surface Registration 法で位置合わせする。　その整復モデルを 3D プリンタを用いて実体化し、手術インプラントを合わせて成型する。成型したインプラントを用いて手術を行う。

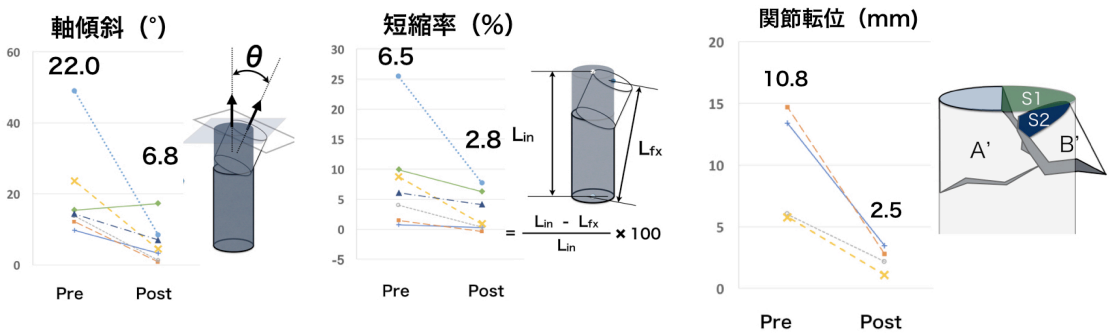

図３術後整復精度の評価方法とその結果

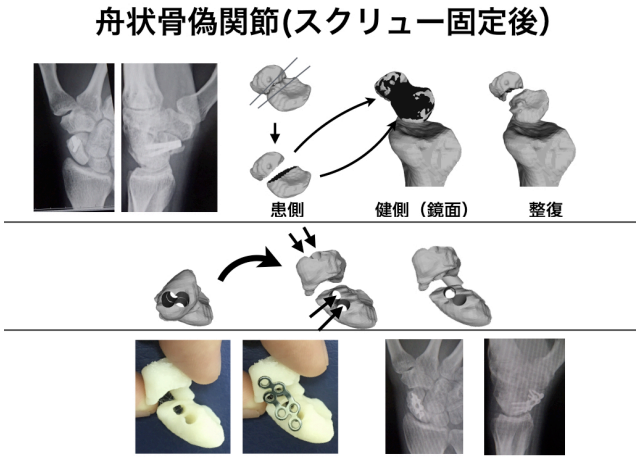

図４　舟状骨偽関節（再手術）例
　術前計画でもともと用いられていたインプラントによる骨欠損を再現し、再現したモデルを位置合わせすることによって整復後の骨欠損位置を予想できた。それによりプレート選択と的確なスクリュー位置の決定を行うことができた。

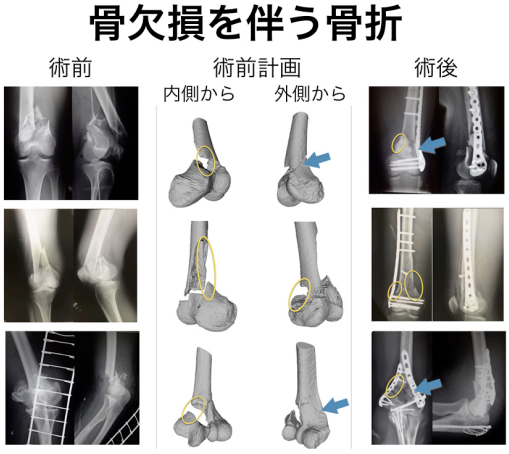

図５　骨欠損を含む開放骨折の治療
　整復モデルから骨欠損の量（黄色〇）を予測することが可能であった。
また、インプラントとの相対位置関係とそれぞれの骨片の相対位置関係（青矢印）から正確な整復位置を知ることができた。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　２　件）

(1) Oki S, Inaba N, Matsumura N, Iwamoto T, Yamada Y, Jinzaki M, Nagura T, The relationship between the morphological axis and the kinematic axis of the proximal radius., Surg Radiol Anat, 査読有, 41(4),2019, 423-429

(2) Oki S, Matsumura N, Kiriyama Y, Iwamoto T, Sato K, Nagura T.,Three-Dimensional Deformities of Nonoperative Midshaft Clavicle Fractures: A Surface Matching Analysis.Journal of Orthopedic Trauma,査読有, 31(11), 2017, e385-e389

〔学会発表〕（計　１　件）

(1)大木聡、骨折治療における 3D 術前計画の有用性、第１３回 CAOS 研究会、2019

６．研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：名倉　武雄

ローマ字氏名：NAGURA, Takeo