

Fig. 1 Appearance of the system

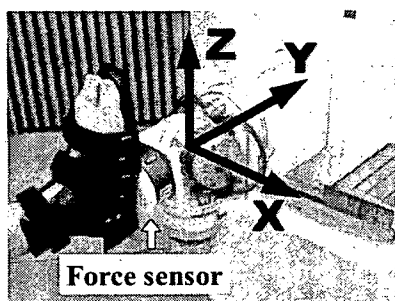


Fig. 2 Drive axes of the robot and the force sensor

一般の加工ロボットにおいて、精密な加工を実現するために、ロボットは加工対象となる部品の位置決めを正確に行ない、部品の位置が変化しないように把持する必要がある。そうでなければ、ロボットがどれほど正確に加工動作を行っても高精度な加工は実現しない。一方、手術支援ロボットにおいては、ロボットは手術ベッドの上に位置する患部の位置を、その場で計測する必要がある。患部位置決めを行うための有効な手段のひとつとして、X線透視撮影による画像計測がある。精密、且つ安全な手術支援を実現するためには、安定、高精度、且つ実用に耐える処理速度を持つ画像計測手法の確立が必須である。

また、手術支援ロボットの操作を正確、迅速に行うためには、洗練された統合ソフトウェアの実装が必要不可欠となる。統合ソフトウェアは単に操作を簡便にするだけでなく、手術中に発生する様々な状況変化に対してシステムを迅速に対応させるためにも重要であり、臨床

適用に向けて重点的に検討すべき項目のひとつである。

介達式整復作業では、足先を把持した状態で牽引や回旋などの整復動作を加え、骨折で分離した骨片を整合させる。このとき、外力を加える足の把持部と、制御対象である大腿骨骨片の間に足首の関節や膝関節が存在する。そのため、足把持部に加えた運動が必ずしもそのまま大腿骨骨片の運動とはならない。しかし、精度の高い整復を安全に行うためには、術中の大腿骨骨折の位置姿勢を正確に把握することが必要である。骨片の動きが予定の軌道を外れた場合、脚に損傷を与えてしまう可能性がある。術中に随時X線撮影で骨片の位置姿勢を確認し修正を加えながら整復を行うと、その繰り返しによりX線被曝量が増え、手術時間も延長される。より安全で正確な整復手術の実現のためには、下肢の非剛体運動を考慮した整復動作の実現が必要である。我々は、対象となる人体下肢の力学的な特性を考慮した整復ロボットの制御手法を提案する。骨折整復ロボットの制御において、人体下肢の特性を利用する意義を以下に述べる。

- 整復動作中の患部骨片の位置姿勢を推定することで、骨片の予期しない動きによって、患部やその周辺に損傷を与える危険性を小さくする。
- より正確な整復を実現することで骨折の早期回復及び再発防止を図る。
- 整復手術中にX線撮影で患部の状態を確認する回数を減らすことによって、患者及び術者のX線被曝量を軽減する。
- より安定で迅速な整復動作の実現と、整復手術中に患部の状態を確認する回数の低減によって、手術時間を短縮する。

## B. 研究方法

### 1. 手法

統合ソフトウェアシステムおよび各種装置間のデータ通信の概要を Fig. 3 に示す。

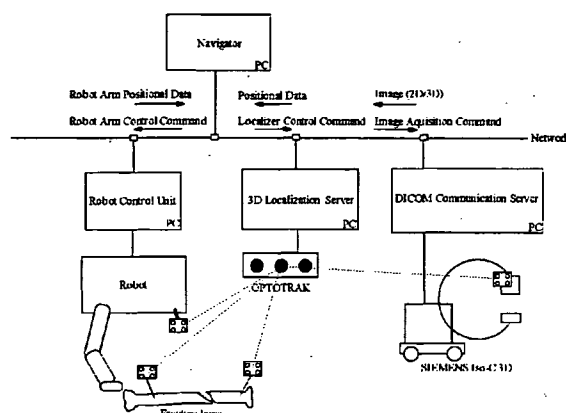


Fig. 3 Configuration of data communication

統合ソフトウェアシステムは、手術支援ロボット、光学式 3 次元位置計測装置、および X 線透視撮影装置とネットワークを介して情報通信を行う。手術支援ロボットとの通信は、TCP/IP による独自の通信プロトコル(通信プロトコルの規格化および通信 API の開発は、東京大学工学系研究科光石研究室で行われた)で行い、ロボット制御命令とロボット状態データが交換される。光学式 3 次元位置計測装置(OPTOTRAK certus. Northern Digital Inc., Canada)とは、光学式トラックの位置姿勢情報が交換され、通信は専用線による通信と TCP/IP による通信の 2 つの手段から選択可能である。X 線透視撮影装置(Siemens Iso-C 3D. Siemens AG Co., Ltd., Germany)との通信では、術中に撮影した X 線透視画像の取得が行われる。通信プロトコルは TCP/IP による DICOM 通信である。

統合ソフトウェアシステムは、術中において、手術ロボット、光学式 3 次元位置計測装置、X 線透視撮影装置と共に使用し、以下の作業を行う;(1) 骨形状、整復計画など、術前データ

の読み込み、(2) X 線透視撮影による大腿骨近位骨片、遠位骨片の位置姿勢計測と、光学式 3 次元位置姿勢計測装置を用いた連続位置姿勢計測(以下、骨片位置姿勢トラッキングと表記する)、(3) 大腿骨近位骨片、遠位骨片、X 線透視撮影装置、ロボットの位置姿勢座標系統合、(4) 大腿骨近位骨片と遠位骨片の位置姿勢からの骨折整復動作軌跡(以下、骨折整復パスと表記する)の計画、(5) ロボット制御。統合ソフトウェアシステムでは、これらの作業を簡便且つ効率的に実施するための機能およびユーザインタフェースを実装する。

以下、統合ソフトウェアシステムの主たる機能である、骨片位置姿勢画像計測、座標系統合、骨折整復パス計画、ロボット制御のそれぞれについて述べる。

#### 1-1. 骨片位置姿勢画像計測

骨片位置姿勢画像計測では、大腿骨近位部(骨折部)で正側面の 2 回、遠位部(膝関節部)で正面の 1 回の X 線透視撮影を行う。撮影した X 線透視画像の例を Fig. 4 に示す。近位骨片の位置姿勢は骨折部を撮影した 2 枚の X 線透視画像よりステレオ画像位置姿勢推定を行う。遠位骨片の位置姿勢推定は、骨折部と膝関節部を撮影した 3 枚の X 線透視画像を用いて行う。推定は、骨頭中心点や骨軸などの骨形状特徴をインタラクティブに指定して行う初期位置姿勢設定と、画素濃淡値に基づく 2-D/3-D レジストレーション法による位置姿勢自動補正で行う。画素濃淡値に基づく 2-D/3-D レジストレーションでは、擬似 X 線画像(Digitally reconstructed radiography. 以下、DRR と表記する)の生成に時間を要する。DRR 生成手法に、コンピュータグラフィックス(以下、CG と表記する)におけるボリュームレンダリングで有効性が示されている light field 法を導入

し、推定速度を向上させる。

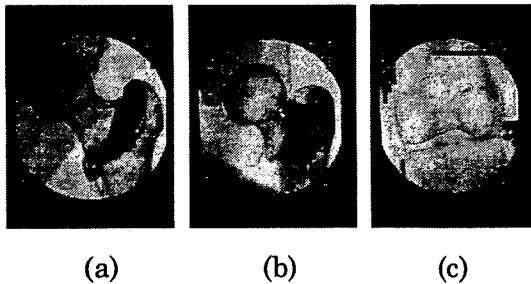


Fig. 4 X-ray fluoroscopic images. (a) frontal image of proximal part, (b) lateral image of proximal part, (c) distal part.

近位／遠位骨片の位置姿勢計測の後、それらの位置姿勢トラッキングを行う。遠位骨片の位置姿勢トラッキングは、光学式3次元位置計測装置のトラッカを遠位骨片に外科手術的に固定することで行う。近位骨片の位置姿勢トラッキングは、光学式3次元位置計測装置のトラッカを骨盤に外科手術的に固定して行う光学式3次元位置計測装置による計測と、骨折部のX線透視撮影(正面のみ)による画像計測を組み合わせたハイブリッド計測手法を用いる。近位骨片は、骨折整復動作において骨片の姿勢や周辺を覆う筋肉などの状態が変化するため、光学式3次元位置計測装置のトラッカの固定が困難である。そのため、X線透視撮影による画像計測での位置姿勢計測を行う必要があるが、一般に、X線透視撮影による画像計測では、撮影の奥行き方向に対する平行移動成分の計測誤差が大きくなる。そこで、X線透視撮影による画像計測における撮影の奥行き方向に対する平行移動成分の計測誤差を、骨盤に固定した位置計測トラッカの位置姿勢で補償する(Fig. 5)。股関節においては骨盤の臼蓋中心点と大腿骨の骨頭中心点は、骨盤に対する大腿骨の姿勢に依らずほぼ一致するため、本手法により計算の安定性、精度向上が期待できる。

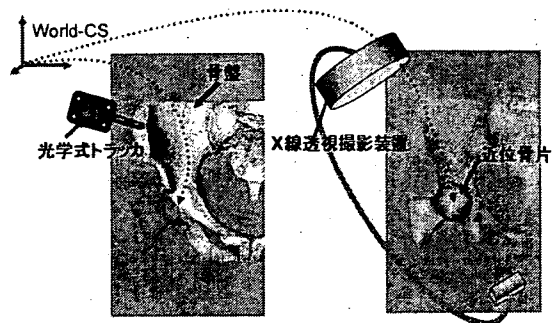


Fig. 5 Schematic diagram of kinematics knowledge based registration

### 1-2. 座標系統合

大腿骨近位骨片、遠位骨片、X線透視撮影装置、およびロボットの位置姿勢座標系統合について述べる。概念図を Fig. 6 に示す。

大腿骨近位骨片と遠位骨片は、1-1節で述べた手法で計測する。X線透視撮影装置とロボットは、光学式3次元位置計測装置のトラッカを装置に固定することで位置姿勢計測を行う。これらの位置姿勢座標系を統合することで、骨折整復パスの計算、およびロボット動作経路の計算を行う。各装置間の座標系変換行列を Fig. 6 の様に定義すると、ロボット動作の座標系変換行列は以下の式で表すことができる。

$$T = T_{robot}^{-1} \cdot T_{robot\_trac\ ker}^{-1} \cdot T_{fluoro\_trac\ ker} \cdot T_{proximal\_reg} \cdot T_{plan} \cdot T_{distal}^{-1} \cdot T_{distal\_trac\ ker}^{-1} \cdot T_{robot\_trac\ ker} \cdot T_{robot}$$

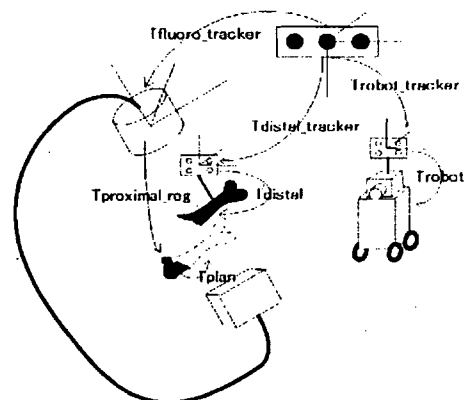


Fig. 6 Schematic diagram of coordinate integration

### 1-3. 骨折整復パス計画

骨折整復パス計画の様子を Fig. 7 に示す。骨折整復パスの計画では、まず、ソフトウェアの CG 画面上で骨折状態を確認する。次に、術前データとして読み込んだ整復計画を確認する。整復計画は、現在の近位骨片の位置姿勢に対する遠位骨片の目標位置姿勢として、CG 画面上で表示される。次に、遠位骨片の牽引など、骨折整復動作の途中で取る遠位骨片の通過経路を CG 画面上でインタラクティブに入力・編集する。複数の途中経路を指定可能とする。ソフトウェアシステムは、上述した遠位骨片位置姿勢(現在位置姿勢, 目標位置姿勢(計画位置姿勢), 途中通過位置姿勢)の間においてクォータニオンと線形補間による経路補間を行い、整復動作のアニメーションを生成し、外科医に呈示する。

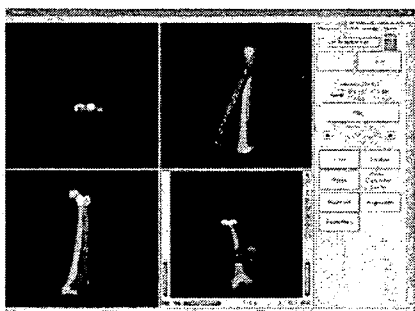


Fig. 7 Planning of fracture reduction path

### 1-4. 人体下肢の特性を考慮したロボット制御

人体の脚は膝関節などの関節を含むため、骨折整復中に加えられた荷重によって変形し、整復動作中の大腿骨位置姿勢の変化に影響を与える。この関節の変形を補償した骨折整復動作の実現のため、下肢にかかる力・トルクの計測による大腿骨の位置姿勢推定を行い、ロボット制御に適用する。

## 2. 実験方法

### 2-1. システム動作検証実験

骨折整復ロボット, 光学式3次元位置計測装置, X線透視撮影装置, および統合ソフトウェアシステムを実装したコンピュータラックをX線透視室に配置し, システムの動作を確認する。

### 2-2. 骨片位置姿勢画像計測実験

骨片位置姿勢画像計測に関して, 位置姿勢推定速度および推定精度について従来手法と比較する。

#### 2-2-A. 骨片位置姿勢画像計測速度実験

モデル骨および骨折患者5名のCT画像を用いて, light field法を導入した画素濃淡値に基づく2-D/3-Dレジストレーションの推定時間を比較する。CT撮影はToshiba Aquilion 64(東芝メディカル, Japan)で行い, 画素サイズは $0.684 \times 0.684 \times 1.0$  mmとする。X線透視撮影はSIEMENS Iso-C 3D装置(Siemens AG Co., Ltd., Germany)で行い, 画像サイズは $640 \times 512$ とする。

#### 2-2-B. X線透視撮影装置と光学式3次元位置計測装置によるハイブリッド計測実験

モデル骨を用いて, X線透視撮影装置と光学式3次元位置計測装置によるハイブリッド計測手法の推定精度を検証する。CT画像撮影およびX線透視画像撮影は, 2-2-A節で述べた実験と同様の条件で行う。

### 2-3. 人体下肢の特性を考慮したロボット制御実験

#### 2-3-A. 健常者下肢牽引回旋実験

健常者を対象に実験を行い, 下肢に牽引・回旋を加えた際の, 牽引力・回旋トルクと下肢の各骨の位置姿勢との関係を調べ, 両者の関係を関数として表現する可能性を検討する。

#### 2-3-B. 下肢筋骨格モデルを用いた, 大腿骨位置姿勢推定実験

人体下肢を模擬した筋骨格モデルを対象

に、牽引と回旋の実験を行い、その結果を元に整復動作中の大腿骨の位置姿勢の推定を行う。実験装置を Fig. 8 に示す。実験では骨盤と左足の模擬骨モデルに下肢の主要な筋肉・靭帯を模擬した 2 種類の弾性ゴムを貼り付けた下肢骨格筋モデルを作成し、使用した。ゴムの張り付けの際には解剖学的な筋・靭帯付着位置に貼り付け、より人体に近いモデルを再現した。この下肢骨格筋モデルを整復ロボットに取り付けて整復動作を行う。

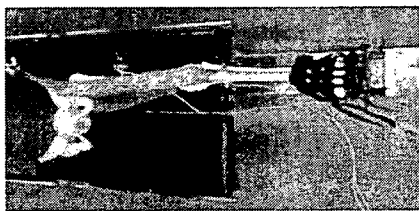


Fig. 8 Experiment setup

## C. 研究結果

### 1. システム動作検証実験結果

東京大学医学部附属病院 X 線透視室に、骨折整復ロボット、光学式 3 次元位置計測装置、X 線透視撮影装置、および統合ソフトウェアシステムを実装したコンピュータラックを X 線透視室に配置し、システムの動作確認をした。実験の様子を Fig. 9 に示す。装置間の配置を工夫することで、現存する検査室・手術室でのシステム稼動が可能であること、および複数の装置が正常に連携して動作することを確認した。

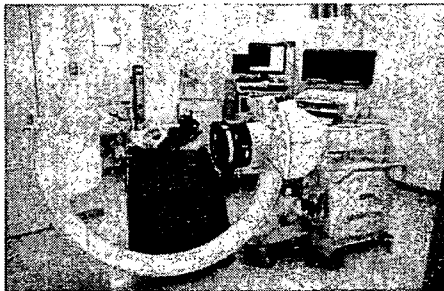
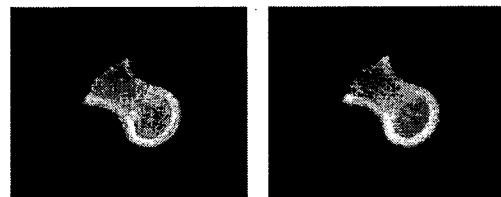


Fig. 9 Appearance of fracture reduction assistance system

### 2-A. 骨片位置姿勢画像計測速度実験結果

2D/3D レジストレーションにおける擬似 X 線画像 (DRR) 生成に要する処理時間に関して、提案手法と一般的な手法である ray trace 法を比較した。提案手法の処理時間は 23.8 秒であり、処理速度は ray trace 法と比較して 4.4 倍であった。また、提案手法は light field 法を基にするため空間の離散化を行っている。画質の劣化を検証するため、ray trace 法で生成した画像と提案手法で生成した画像の相関計算を行ったところ、0.9995 であった。Fig. 10 に ray trace 法および提案手法で生成した DRR の例を示す。



(a) ray trace

(b) proposed method

Fig. 10 DRRs

### 2-B. X 線透視撮影装置と光学式 3 次元位置計測装置によるハイブリッド計測実験結果

一方向 X 線透視撮影による位置姿勢計測と、X 線透視撮影装置と光学式 3 次元位置計測装置によるハイブリッド位置姿勢計測に関して、精度を検証した。実験の様子を Fig. 11 に示す。

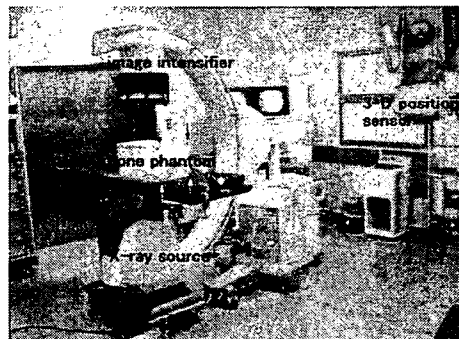


Fig. 11 Experiment setup

### 3-A. 健常者下肢牽引回旋実験結果

計測値より、力センサの計測値に対する、脛骨の座標系からの大腿骨座標系の相対位置姿勢の関係を調べた。そのため、健常者を対象に下肢の牽引に対する力・トルクの計測を行った(Fig. 12)。計測は、通常用いられる骨折整復装置に力センサを取り付けた装置を用いた。また、脛骨と大腿骨には皮膚の上から位置マーカを取り付け、牽引中の各骨の位置と姿勢を3次元位置計測装置で計測した。実験は、下肢に緊張のないよう足を治具に固定した状態から、内外への回旋と、脚の軸方向への牽引を行った。

結果を Fig. 13 に示す。結果より、力・トルクに対する大腿骨位置姿勢は重解を持たず、力・トルクの値から一意に求めることが可能であることを確認した。

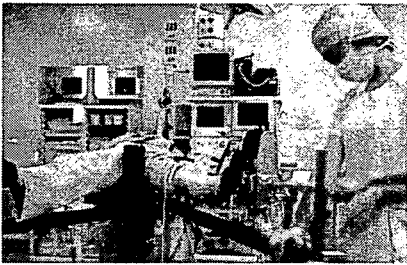


Fig. 12 Experiment on a healthy subject

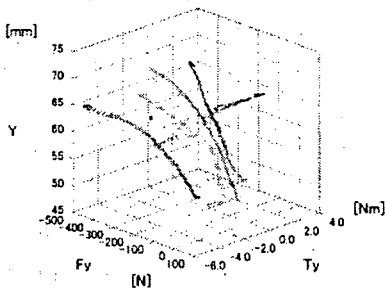


Fig. 13 relationship between position and force-torque

### 3-B. 下肢筋骨格モデルを用いた、大腿骨位置姿勢推定実験結果

まず、牽引力と回旋トルクに対する、骨折整復ロボットからみた大腿骨の位置姿勢の各成

分の変化について、平面のあてはめを行った。そのうち、牽引力  $F_y$  及び回旋トルク  $T_y$  に対する、大腿骨の  $y$  方向(骨軸方向)の位置についての結果を Fig. 14 に示す。

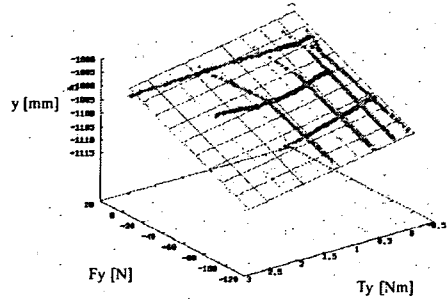


Fig. 14 Femur position to Force and torque

この結果を用いて統合ソフトウェアから骨折整復ロボットを制御し、ナビゲーションで指定された整復状態と実際のモデル骨を用いた実験によって得られた実際の整復状態を比較した。結果を Fig. 15 に示す。膝関節を固定した状態における整復誤差は 3.0 mm,  $0.3^\circ$  であった。膝関節を固定しない通常の状態での整復誤差は、下肢関節が変形のない剛体であると仮定した場合で 9.27 mm,  $0.72^\circ$  , 提案手法で 2.05 mm,  $0.16^\circ$  であった。

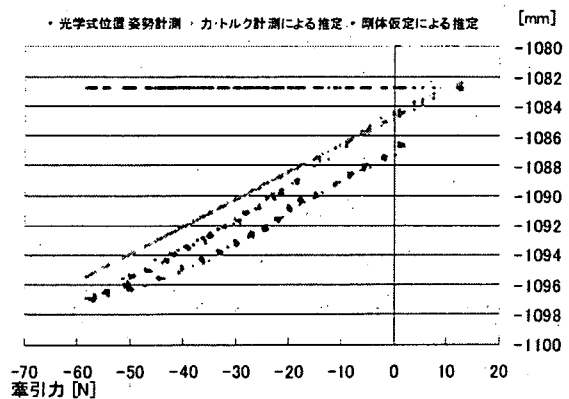


Fig. 15 accuracy of fracture reduction

### D. 考察

骨折整復支援ロボットの実用化の際の安全

性・精確性の向上, 患者・医師へのリスクの低減を目的としてレジストレーションの高速化, 骨折整復パスの作成, ロボット制御を実現した。結果より, 本システムの有用性を確認した。

レジストレーションの高速化では, 画質を低下させることなく約 4.4 倍の速度向上を達成できた。レジストレーションの短縮はそのまま手術時間の短縮へと繋がる。従来手法では手術への適用が躊躇された 2-D/3-D レジストレーションにおいて, 提案手法によってその適用可能性を示した。また, 骨折整復パス計画など統合ソフトウェアのユーザインタフェースの操作性も良好であった。

人体下肢の特性を考慮したロボット制御では, 膝関節でヒステリシスが見られるなど臨床適用に対する課題は残るものの, 下肢関節が変形のない剛体であると仮定した場合と比べ, 大幅に精度を向上できた。

## E. 研究発表

### 1. 論文発表

- [1] 中島義和, 菅野伸彦, 桃井康行, 小山毅, 山本宗主, 笹間俊彦, 田村裕一, 米延策雄, 佐藤嘉伸, 佐久間一郎, 吉川秀樹, 越智隆弘, 田村進一: “レーザーガイドランスの特性解析と 3 次元位置センサ・一体型システムの開発,” 日本コンピュータ外科学会誌, vol. 7, no. 1, pp. 15-23 (2005).
- [2] Fumihiko Ino, Yasuhiro Kawasaki, Takahiro Tashiro, Yoshikazu Nakajima, Yoshinobu Sato, Shinichi Tamura, and Kenichi Hagihara: “A parallel implementation of 2-D/3-D image registration for computer-assisted surgery,” *Int. J. Bioinformatics Research and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 341-358 (2006).
- [3] Y. Nakajima, T. Tashiro, N. Sugano, K. Yonenobu, T. Koyama, Y. Maeda, Y. Tamura, M. Saito, S. Tamura,

M. Mitsuishi, N. Sugita, I. Sakuma, T. Ochi, Y. Matsumoto: “Fluoroscopic Bone Fragment Tracking for Surgical Navigations on Femur Fracture Reduction by Incorporating Optical Tracking of Hip Joint Rotation Center,” *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 9, pp. 1703-1706 (2007).

[4] Y. Cheng, S. Wang, T. Yamazaki, J. Zhao, Y. Nakajima, S. Tamura: “Hip cartilage thickness measurement accuracy improvement,” *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 31, no. 8, pp. 643-655 (2007).

### 2. 学会発表

- [1] F. Ino, Y. Kawasaki, T. Tashiro, Y. Nakajima, Y. Sato, S. Tamura, K. Hagihara, “A Parallel Implementation of 2-D/3-D Image Registration for Computer-Assisted Surgery,” In Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS) 2005, Volume II Workshops, pp. 316-320, Fukuoka.
- [2] N. Sugano, K. Yonenobu, Y. Nakajima, Y. Sato, S. Tamura, I. Sakuma, Y. Tamura, T. Ochi, “Navigation and Robotics for Straight Surgical Tools,” The First International Conference on Complex Medical Engineering (CME) 2005, pp. 222-225, Takamatsu, Japan (2005).
- [3] 森泰元, 中島義和, 杉田直彦, 割澤伸一, 光石衛, 前田ゆき, 菅野伸彦, 斉藤正伸, 米延策雄, 佐久間一郎, 土肥健純, 大西五三男, 中村耕三, “脚の牽引回旋に対する力・トルク計測—大腿骨骨折整復ロボティック手術における脚荷重からの骨位置姿勢推定にむけて—,” 日本コンピュータ外科学会, 第 14 回, 2005.
- [4] 森泰元, 中島義和, 杉田直彦, 割澤伸一, 光石衛, 前田ゆき, 菅野伸彦, 斉藤正伸, 米延策雄, 佐久間一郎, 土肥健純, 大西五三男, 中村耕三, “大腿骨骨折整復支援ロボティックシステムにおける整復

動作制御のための下肢モデリング,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2006.

[5] Y. Maeda, M. Saito, K. Yonenobu, N. Sugano, S. Warisawa, M. Mitsuishi, I. Sakuma, Y. Nakajima, “Case reports of robot assisted intertrochanteric fracture reduction, ” CARS (Computer Assisted Radiology and Surgery) 2007, Berlin, Germany, in-press(2007-06).

[6] Y. Nakajima, N. Sugita, T. Saito, K. Fujiwara, N. Abe, T. Ozaki, M. Suzuki, H. Moriya, T. Inoue, K. Kuramoto, Y. Nakashima, M. Mitsuishi, “Patient specific planning of point-pair registration,” Proceedings of International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS) 2008, in-press, 2008.

#### F. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む.)

##### 1.特許取得

なし

##### 2.実用新案登録

なし

##### 3.その他

なし



高齢者の大腿骨頸部骨折等の治療を支援する  
高精度手術支援システム開発に関する研究

分担研究者 菅野 伸彦 大阪大学整形外科准教授

研究要旨 骨折整復支援ロボットを用いて骨折の整復操作を行なうための骨折自動整復プログラムを開発した。反対側の大腿骨に照合する方法と、骨折線を照合する方法を考案した。また、従来の大腿骨頸部骨折手術時の整復に要する牽引および回旋トルクを計測し、ボランティアでそれより大きい牽引および回旋トルクを負荷しても、安全であることを確認した。

A. 研究目的

骨折整復支援ロボットを用いて骨折の整復操作を行なうには、術前に目標の整復位置を計画し、整復動作パスを作成することが必要である。三次元画像上で骨片の整復計画立案作業を手作業で行なうには、多大な時間と労力を要するため、可能な限り整復計画立案を自動化することが望ましい。そこで、大腿骨頸部骨折の最適な整復計画立案を可能な限り自動化することを研究目的とした。

また、骨折整復支援ロボットを臨床的に安全かつ有効に使用できるかの検証を行うことを目的とした。

B. 研究方法

1) 術前コンピュータシミュレーションシステムの研究開発:

術前にスライス厚 1-2.5mm の CT 画像を撮影し得た大腿骨頸部骨折の症例 3 例を対象とした。そのうち 1 例は骨片が 2-part の単純骨折であり、2 例は骨片が 3-part 以上の粉碎骨折であった。CT 画像から骨の領域だけを抽出し、さらに骨の領域を各骨片に切り分けた (セグメンテーション)。骨片同士が接触していない部分では、CT 値により自動的にセグメンテーションが可能であった。骨片同士が接触してい

る部分では、自動セグメンテーションが困難であったため、手作業でセグメンテーションを行なった。その後、Marching Cube 法を用いて、セグメンテーション後の CT 画像から各骨片の三次元表面ポリゴンモデルを作成した (図 1)。



図1. 各骨片の表面モデル。

骨片同士の位置合わせ(レジストレーション)を以下のようにして行なった。骨片の大きさにより整復する順序を決めた。2 番目に大きい骨片を最大の骨片に合わせようとして整復を行なうことにした。2 番目に大きい骨片の表面モデル上にて、骨折線上の点を 30 点だけ手作業で適宜選択し、iterative closest point (ICP) 法による表面-ポイント レジストレーション手法により、その点群を、最大骨片の表面モデルにマッチングさせた (図 2 左)。その際、初期位置合わせとして、2 番目に大きい骨片の骨折線上の 4 点と、それらの点に対応する、最大骨片の骨折上の 4 点を表面モデル上にて手作業で適宜ピックアップし、初期位置合わせに用い

た。

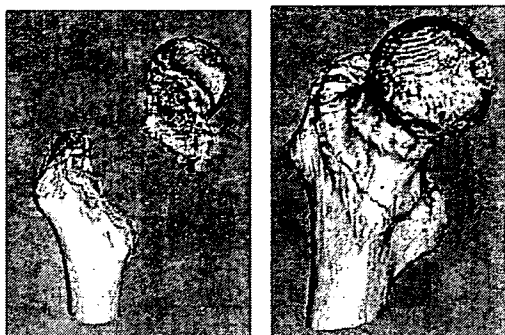


図2. 骨折線に沿って整復

2番目に大きい骨片を最大骨片に位置合わせした後に、それらの骨片を合体して表面モデルを作成し、これを新たな最大骨片のモデルとした(図2右)。粉碎骨折の場合で骨片が3-part 以上の場合は、繰り返し、全ての骨片の位置合わせを行なった。

2)骨折整復牽引手術台での大腿骨頸部骨折症例の整復操作のカトルク分析および介達式骨折整復支援ロボットの操作上の安全性の検証:

実験1は大腿骨骨折患者5例(女性5例)、平均年齢81歳を対象とした。骨折型はEvans分類にて安定型が2例、不安定型が3例であった。力学計測は牽引手術台の足部固定部にとりつけた6軸力覚センサ(図2)を用いて、骨折整復時に足部固定部での下肢にかかる牽引力・回旋トルクを測定した。通常のイメージ操作下で、同一の経験ある術者により牽引・回旋操作を適切な整復と考えられるところまで繰り返し施行した。その際の牽引力・回旋トルクを測定した。

実験2は、下肢外傷歴のない健常者ボランティア62名(男性30名、女性32名)を対象とした。対象健常者の平均年齢22.7歳(18-34歳)、平均身長165.4cm(148-183cm)、平均体重57.5kg(43.0-92.0kg)、平均大腿周囲径は

44.3cm(37-61cm)であった。力学計測は、FRACROBOの足部固定部に取り付けられた6軸力覚センサを用いて、下肢にかかる牽引力、内旋トルク・外旋トルクを計測した。計測方法は、まず被験者を牽引手術台に臥床させ、計測対象となる下肢はFRACROBOの足部固定板に、反対側の下肢は牽引手術台の足部固定板に検側股関節外転30度、対側は股関節外転30度、膝関節中間位にて固定した。下肢への牽引力は膝関節中間位にて遠位へ5mmずつ牽引負荷を加えた時点の力を計測した。回旋トルクは、股関節伸展0度、膝関節伸展0度として内旋方向あるいは外旋方向に5度ずつ回旋負荷を加えた時点のトルクを計測した。最大計測値は、被験者が下肢に違和感、疼痛を訴える直前の計測値と定義した。

(倫理面での配慮)

術前コンピュータシミュレーションシステムの研究開発研究では、骨折の診断および術前計画のために撮像されたCT画像から、個人情報を除いた画像データベースを用いて解析研究を行っている。

また、骨折整復牽引手術台での大腿骨頸部骨折症例の整復操作のカトルク分析および介達式骨折整復支援ロボットの操作上の安全性の検証に際して、大阪南医療センター倫理委員会に承認を得、骨折整復支援ロボットを使用することを説明し、同意を得た患者およびボランティアを対象とした。

### C. 研究結果

1)術前コンピュータシミュレーションシステムの研究開発:

2-partの単純骨折の場合では、骨折線部で骨片同士が僅かに重なっている箇所を認めたものの、自動整復位置は良好であった

(図 2)。

3-part 以上の粉碎骨折の場合でも、骨折線の凹凸が特徴的な場合は、整復位置は良好であった。

3-part 以上の粉碎骨折の場合で、骨折線が単調で直線的な場合は、ずれた位置で合ってしまったたり、骨折部で折れ曲がるようにして合ってしまったたりし、整復位置は不良であった (図 3)。

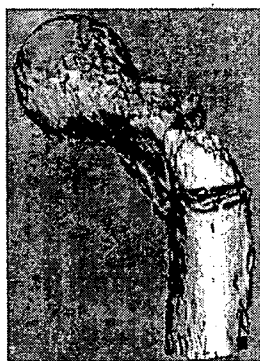


図 3. 3-part 以上の粉碎骨折で骨折線が単調で直線的な場合。

大転子部のように骨密度が比較的低い部分では、骨以外の軟部組織との切り分けが困難となりセグメンテーションが不良となる場合があり、そのような場所に骨折線がある場合は、骨片同士がずれた位置で重なるようにして合ってしまい、整復位置は不良であった。

2)骨折整復牽引手術台での大腿骨頸部骨折症例の整復操作のカトルク分析および介達式骨折整復支援ロボットの操作上の安全性の検証:

実験1:骨折整復に必要な最大牽引力は平均 215.9N(146.3-294.9N)、最大内旋トルクは平均 3.2Nm(1.6-4.4Nm)であり、これらの値で整復が可能と推定できた。牽引保持に必要な力は平均 163.8N(103.7-274.0N)、内旋保持

に必要なトルクは平均 2.4Nm(1.2-4.8Nm)であった。安定型骨折の場合、整復に必要な最大牽引力は 165.7N、整復に必要な内旋トルクは 3.3Nm に対して、不安定型骨折の場合、整復に必要な最大牽引力は 229.2N、整復に必要な内旋トルクは 3.3Nm であった。不安定型骨折は安定型骨折と比較して整復に牽引力を要するものの、内旋トルクはどちらも同程度のトルクを要した。

実験 2: 健常者の下肢を固定し、牽引および回旋動作を行った際に、下肢に違和感・疼痛を生じる最大牽引力・最大回旋トルクの平均値を表 3 に示す。最大牽引力は平均 232.9N(114.0-311.0N)、最大外旋トルクは平均 6.31Nm(1.32-15.56Nm)、最大内旋トルクは平均 7.69Nm(2.28-14.23Nm)であった。男性被験者では、最大牽引力は 268.2N、最大内旋トルクは 8.19Nm、最大外旋トルクは 9.1Nm であった。女性被験者では、最大牽引力は 201.58N、最大内旋トルクは 4.69Nm、最大外旋トルクは 6.33Nm で、男女間で有意差を認められた(表 4)。一方で最大牽引力、最大回旋トルクと身長、体重および大腿周囲径との相関は見られなかった(t 検定)。牽引距離と牽引力、回旋角度と回旋トルクとの関係の一例を図 5 に例示する。症例は 22 歳男性である。牽引力は牽引距離に比例を示し、回旋トルクは、ある地点を越えるとトルクの緩やかな上昇が見られた。全例同様の傾向が認められた。

#### D. 考察

1)術前コンピュータシミュレーションシステムの研究開発:

今回用いた手法は、ICP 法による表面ポイントレジストレーション手法であるが、結果としては概ね、2-part の単純骨折では成功するが、

3-part 以上の粉碎骨折では失敗することが多かった。そのため、この手法だけでは限界があると考えられた。整復位置が不良となる様式としては以下の(A)骨折部で骨片同士がずれた位置で重なり合う場合と(B)骨折線の部分の位置は互いに合っているが、骨片同士の方向が合っていない場合の2つがあり、これらの原因としては、それぞれ以下のように考えられた。

(A) 一方の骨片の骨折線上の点群が、他方の骨片の表面モデル上の骨折線以外の箇所にマッチングしてしまう。

(B) 3-part 以上の粉碎骨折の場合で骨折線が単調で直線的な場合は、対応する骨片の骨折線同士の位置が合っている、それだけでは骨片同士の方向が定まらず、骨片同士の方向には自由度がある。

そこで、これらの現象を防ぐため、それぞれ以下のような対策を検討中である。

(A) 骨片全体ではなく骨折線の部分のみを表面モデルとして抽出し、それを表面-ポイントレジストレーションに用いることにより、骨折線以外の部分がマッチしてしまうことを防ぐ。これを実現するため、骨片のモデル上では骨折線の部分の曲率が大きいことを利用して、曲率が大きい部分のみを骨片のモデルから抽出することを検討中である。

(B) 3-part 以上の粉碎骨折で、骨片の方向の合わせ方に自由度がある場合、骨片を整復する方向および骨片を整復する順番を変えて、最適なものを自動的に算出して採用できるようにする。また、骨折線部分にて骨片の表面モデル同士が滑らかに移行するような最適な方向を採用する。そのために、骨片の表面モデル上にて、骨折線付近の法線ベクトルの分布を考慮して最適な方向を計算できるようにする。

2)骨折整復牽引手術台での大腿骨頸部骨折症例の整復操作のカトルク分析および介達式骨折整復支援ロボットの操作上の安全性の検証:

大腿骨骨折整復操作について、今まで定量化し分析されたことはなかった。通常の大腿骨骨折整復は、足部をブーツで固定した牽引整復装置から足部関節、膝関節、およびカウンターとなる股関節の軟部組織を解して骨折した大腿骨の両骨片に整復力が伝わることから、健常者の下肢全体の軟部組織、すなわち下肢各関節の関節包、下肢の筋肉・靭帯・皮膚等を牽引ないし回旋した際にかかる牽引力・回旋トルクは骨折整復に必要な力と仮定し、今回、骨折患者および健常者を対象とした2つの実験を施行した。

徒手整復による大腿骨骨折整復に必要な最大牽引力は平均 215.9N、最大内旋トルクは平均 3.2Nm であり、これらの値で整復が可能と推定できた。FRACROBO のモータ出力が牽引方向には 1332N、回旋方向には 70.8Nm であり、骨折整復に十分な出力を備えていることが分かった。

FRACROBO を安全に運用するために、健常者で軟部組織に疼痛を誘発するカトルクレベル以下で操作できれば、過剰な力負荷による合併損傷を回避できると考えられるが、この違和感や疼痛を誘発する最大牽引力は平均 232.9N、最大内旋トルクは平均 7.69Nm であり、大腿骨頸部骨折で骨折整復の際に必要なカトルクレベルより大きかった。このことから、健常者での下肢牽引および回旋時の疼痛を誘発する平均レベル、つまり牽引であれば  $200 \pm 50\text{N}$ 、内旋であれば  $4.7 \pm 2\text{Nm}$  ぐらいの出力設定で整復操作を行えば下肢軟部組織、靭帯、関節包等にあたえる損傷がなく、骨

折整復を行うことができると考えられる。ただ、大腿骨頸部骨折の整復時の定量的解析のサンプルが少なく、整復時にさらに大きい牽引力および回旋トルクが必要な例がある可能性もあり、今後データを増やし検討する必要がある。

健常者下肢を牽引および回旋した際の牽引力は距離に比例、回旋トルクはある地点より急激にトルクが上昇する傾向が認められた。この理由として、牽引方向には下肢各関節の関節包、下肢の筋肉・靭帯・皮膚の緊張度に依存しており、牽引動作に対して牽引力は牽引距離に比例傾向となると考えられた。これに対して回旋方向には、最初は下肢各関節の関節包、下肢の筋肉・靭帯・皮膚等の緊張がなく、下肢各関節の可動範囲で下肢が動くため、あまり軟部組織に緊張が働かない。よってトルクの上昇を認めない。下肢各関節の可動範囲を超えると、下肢各関節の関節包、下肢の筋肉・靭帯・皮膚の緊張度が強くなり、そのトルクが反映されトルクが上昇すると考えられた。

健常者下肢牽引力・回旋トルクは今回の検討では、健常者各パラメータとは相関は認めなかったが、男女間で牽引力・回旋トルク共に有意差を認めため、下肢の軟部組織の硬さに影響していることが示唆される。今後下肢牽引力・回旋トルクに関与する因子も検討課題である。

#### E. 結論

骨折整復支援ロボットを用いて骨折の整復操作を行なうための骨折自動整復プログラムを開発し、反対側の大腿骨に照合する方法と、骨折線を照合する方法を考案した結果、2-Part 骨折までは正確な整復が可能であった。FRACROBO を実際の臨床で使用する際に、FRACROBO の操作性および出力の有効性と

安全性の確認のために、骨折患者および健常者において整復操作を行い、この際の計測データにより、臨床でも FRACROBO が安全に使用できると確認された。

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

- 1) 前田ゆき, 齊藤正伸, 菅野伸彦. 大腿骨骨折整復支援ロボットの開発. Hip Joint 32 巻 Page259-262, 2006.
- 2) 倉爪亮, 中村かほり, 岡田俊之, 佐藤嘉伸, 菅野伸彦, 小山毅, 岩下友美, 長谷川勉. 2 視点からの二次元 X 線投影像と統計的形状モデルを用いた大腿骨形状の三次元復元. 電子情報通信学会論文誌 D: 情報・システム 90 巻 3 号 Page945-955, 2007.

##### 2. 学会発表

- 1) 森泰元, 中島義和, 杉田直彦, 割澤伸一, 光石衛, 前田ゆき, 菅野伸彦, 齊藤正伸, 米延策雄, 佐久間一郎, 土肥健純, 大西五三男, 中村耕三. 脚の牽引回旋に対する力・トルク計測 大腿骨骨折整復ロボティック手術における脚荷重からの骨位置姿勢推定にむけて. 日本コンピュータ外科学会誌 (1344-9486)7 巻 3 号 Page421-422, 2005.
- 2) 前田ゆき, 菅野伸彦, 齊藤正伸, 田村裕一, 割澤信一, 光石衛, 佐久間一郎, 中島義和, 米延策雄. 大腿骨骨折整復支援ロボットの開発. 日本コンピュータ外科学会誌 (1344-9486)7 巻 3 号 Page505-506, 2005.
- 3) 岩崎祐太, 岡田俊之, 小山毅, 陳延偉, 菅野伸彦, 佐藤嘉伸. 次元 CT 画像を用いた骨折線と反対側形状に基づく大腿骨近位部骨折に対する半自動骨折整復計画. 日本コン

コンピュータ外科学会誌(1344-9486)8 卷 3 号  
Page216-217, 2006.

4) 前田ゆき, 菅野伸彦, 齋藤正伸, 割澤  
信一, 光石衛, 佐久間一郎, 中島義和, 米延  
策雄. 大腿骨骨折整復支援ロボットの臨床使  
用経験. 日本コンピュータ外科学会誌  
(1344-9486)8 卷 3 号 Page230-231, 2006.

5) 森本顕二郎, 廖洪恩, 杉田直彦, 光石  
衛, 中島義和, 小山毅, 菅野伸彦, 前田ゆき,  
別所雅彦, 大橋暁, 松本卓也, 松山順太郎,  
岩城純一郎, 中沢東治, 池田大作, 大西五  
三男, 佐久間一郎. 直達式骨折整復支援装  
置に関する研究 直達式骨折整復術における  
牽引力・整復経路測定. 日本コンピュータ外  
科学会誌(1344-9486)8 卷 3 号 Page352-353,  
2006.

#### G. 知的財産権の出願・登録状況

##### 1.特許取得

なし

##### 2.実用新案登録

なし

##### 3.その他

なし

## Ⅱ 研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表

【H17.4.1～H20.3.31】

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
森 泰元、中島義和、杉田直彦、割澤伸一、光石衛、前田ゆき、菅野伸彦、斉藤正伸、米延策雄、佐久間一郎、土肥健純、大西五三男、中村耕三	脚の牽引回旋に対する力・トルク計測-大腿骨骨折整復ロボティック手術における脚荷重からの骨位置姿勢推定にむけて	第14回日本コンピュータ外科学会大会 第15回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集		151-152	2005
S.Onogi, K.Moromoto, I.Sakuma, Y.Nakajima, T.Koyama, N.Sugano, Y.Tamura, S.Yonenobu, Y.Momoi	Development of the Needle Insection Robot for Percutaneous Vertebroplasty	Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2005	Part II, Lecture Note in Computer Science 3750	105-113	2005
Mamoru Mitsuishi, Naohiko Sugita, Shin'ichi Warisawa, Tatsuya Ishizuka, Touji Nakazawa, Nobuhiko Sugano, Kazuo Yonenobu, Ichiro Sakuma	Development of a Computer-Integrated Femoral Head Fracture Reduction System	Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics		834-839	2005
中島義和、菅野伸彦、桃井康行、小山毅、山本宗主、笹間俊彦、田村裕一、米述策雄、佐藤嘉伸、佐久間一郎、吉川秀樹、越智隆弘、田村進一	レーザガイダンスの特性解析と三次元位置センタ一・一一体型システムの開発	日本コンピュータ外科学会誌	vol.7 No.1	15-23	2005
N.Sugano, K.Yonenobu, Y.Nakajima, Y.Sato, S.Tamura, I.Sakuma, Y.Tamura, T.Ochi	Navigation and Robotics for Straight Surgical Tools	The First International Conference on Complex Medical Engineering (CME2005)		222-225	2005
別所雅彦、大西五三男、松本卓也、松山順太郎、中村耕三	CT/有限要素法による大腿骨頸部の強度評価について 薬剤効果判定への応用に関する予備的研究	Osteoporosis Japan	13(Suppl.1)	221	2005
松本卓也、大西五三男、別所雅彦、今井一博、松山順太郎、中村耕三	CT/有限要素法による脊椎椎体の圧縮強度解析 骨粗鬆症治療効果判定への応用	Osteoporosis Japan	13(Suppl.1)	222	2005
別所雅彦、大西五三男、松本卓也、松山順太郎、中村耕三	犬大腿骨骨欠損モデルに対するCT/有限要素法による・強度評価	日本コンピュータ外科学会誌	7(3)	343-34	2005



松本卓也, 大西五三男, 別所雅彦, 大橋暁, 中村耕三	CT/有限要素法による手術計画への可能性 Lag screw 刺入高位による大腿骨頸部の応力・ひずみの検討	日本コンピュータ外科学会誌	7(3)	525-26	2005
別所雅彦, 大西五三男, 松本卓也, 大橋暁, 藤森祥弘, 影山敏昭, 中村耕三	欠損を有する大腿骨に対するCT/有限要素法(第2報)	バイオメカニクス学会雑誌	18	62	2005
森本頭二郎, 廖洪恩, 杉田直彦, 光石衛, 中島義和, 小山毅, 菅野伸彦, 前田ゆき, 別所雅彦, 大橋暁, 松本卓也, 松山順太郎, 岩城純一郎, 中沢東治, 池田大作, 大西五三男, 佐久間一郎	直達式骨折整復支援装置に関する研究—直達式骨折整復術における牽引力・整復経路測定—	第15回日本コンピュータ外科学会大会 第16回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集		pp.211-212	2006
M. Bessho, I. Ohnishi, J. Matsuyama, T. Matsumoto, K. Nakamura	PREDICTION OF STRENGTH AND STRAIN OF THE PROXIMAL FEMUR BY A CT BASED FINITE ELEMENT METHOD.	Transactions of orthopaedic Research Society	31	0224	2006
Matsuyama J, Ohnishi I, Sakai R, Suzuki H, Harada A, Bessho M, Matsumoto T, Nakamura K	A NEW METHOD FOR ACCURATE MEASUREMENT OF BONE DEFORMATION WITH ECHO TRACKING	Transactions of orthopaedic Research Society	31	1776	2006
Matsuyama, J, Ohnishi, I; Sakai, R; Suzuki, H; Harada, A; Bessho, M; Matsumoto, T; Nakamura, K	A New Method for Measurement of Bone Deformation by Echo Tracking	Medical Engineering & Physics	28	588-595	2006
Imai K, Ohnishi I, Yamamoto S, Nakamura K.	Nonlinear finite element model predicts vertebral bone strength and fracture site.	Spine	31 (16)	1789-94	2006
M. Bessho, I. Ohnishi, J. Matsuyama, T. Matsumoto, K. Imai, K. Nakamura	Prediction of Strength and Strain of the Proximal Femur by CT based Finite Element Method	Proceedings of the 79th Annual meeting of the Japanese Orthopaedic Association	80(3)	S211	2006

松山順太郎, 大西五三男, 酒井亮一, 鈴木浩之, 大塚利樹, 宮坂好一, 別所雅彦, 大橋暁, 松本卓也, 中村耕三	骨癒合の診断と利用可能な骨癒合促進法 超音波エコートラッキング法を用いた新しい骨癒合判定法	骨折	28 (Suppl.)	S12	2006
別所雅彦, 大西五三男, 松本卓也, 松山順太郎, 大橋暁, 中村耕三	CT/有限要素法・QCTによる大腿骨近位部の強度評価 薬剤効果判定の予備的研究について	骨折	28 (Suppl.)	S87	2006
別所雅彦, 大西五三男, 大橋暁, 松本卓也, 松山順太郎, 中村耕三	CT/有限要素法は、DEXA 法よりも大腿骨近位部の強度評価をより正確に予測する -新鮮死体標本での評価	Osteoporosis Japan	14(Suppl.1)	176	2006
今井一博, 大西五三男, 山本精三, 中村耕三	CT/有限要素法は高い感度・特異度で非外傷性椎体骨折のリスクを評価する	Osteoporosis Japan	14(Suppl.1)	176	2006
今井一博, 大西五三男, 山本精三, 中村耕三	CT/有限要素法を用いた高齢女性の脊椎椎体強度予測解析	Osteoporosis Japan	14(Suppl.1)	160	2006
松山順太郎, 大西五三男, 酒井亮一, 宮坂好一, 皆川栄一, 原田烈光, 別所雅彦, 大橋暁, 松本卓也, 中村耕三	超音波エコートラッキング法を用いた骨粗鬆症に対する骨強度判定の試み	Osteoporosis Japan	14(Suppl.1)	178	2006
松山順太郎, 大西五三男, 酒井亮一, 鈴木浩之, 大塚利樹, 宮坂好一, 原田烈光, 別所雅彦, 大橋暁, 松本卓也, 中村耕三	骨折治療の新世紀 超音波エコートラッキング法を用いた骨癒合判定法	日本整形外科学会雑誌	80(3)	S186	2006
松本卓也, 大西五三男, 別所雅彦, 大橋暁, 中村耕三	CT・CAD/有限要素法を用いた大腿骨転子部骨折に対する骨接合術のための術前計画	骨折	28 (Suppl.)	S211	2006
大橋暁, 大西五三男, 別所雅彦, 松本卓也, 松山順太郎, 中村耕三	CT/有限要素解析を用いた創外固定ピン応力の検討	骨折	28 (Suppl.)	S213	2006
大橋暁, 大西五三男, 松本卓也, 別所雅彦, 松山順太郎, 中村耕三	CT・CAD/有限要素法解析を用いた創外固定ピン応力の検討	日本コンピュータ外科学会誌	8 (3)	212-213	2006
松本卓也, 大西五三男, 別所雅彦, 大橋暁, 中村耕三	CT/有限要素法による手術計画への可能性 Lag screw 刺入高位による大腿骨頸部の応力・ひずみの検討	日本コンピュータ外科学会誌	8 (3)	214-215	2006

別所雅彦, 大西五三男, 松本卓也, 大橋暁, 松山順太郎, 中村耕三	新鮮死体大腿骨標本のCT/有限要素法による骨ひずみ予測の正確性の検証	日本コンピュータ外科学会誌	8 (3)	256-257	2006
前田ゆき, 斉藤正伸, 菅野伸彦	大腿骨骨折整復支援ロボットの開発	Hip Joint	32	259-262	2006
倉爪亮, 中村かほり, 岡田俊之, 佐藤嘉伸, 菅野伸彦, 小山毅, 岩下友美, 長谷川勉	2視点からの二次元X線投影像と統計的形状モデルを用いた大腿骨形状の三次元復元.	電子情報通信学会論文誌D: 情報・システム	90巻3号	945-955	2007
Fumihiko Ino, Yasuhiro Kawasaki, Takahiro Tashiro, Yoshikazu Nakajima, Yoshinobu Sato, Shinichi Tamura, and Kenichi Hagihara	A parallel implementation of 2-D/3-D image registration for computer-assisted surgery	J. Bioinformatics Research and Applications	vol. 2, no.4	341-358	2006
Takahiro Ishii, Yoshihiro Mukai, Noboru Hosono, Hironobu Sakaura, Ryutaro Fujii, Yoshikazu Nakajima, Shinichi Tamura, Motoki Iwasaki, Hideki Yoshikawa, and Kazuomi Sugamoto	Kinematics of the Cervical Spine in Lateral Bending	SPINE,	vol. 31, no. 2	155-160	2006
Bessho M, Ohnishi I, Matsuyama J, Matsumoto T, Imai K, Nakamura K.	Prediction of strength and strain of the proximal femur by a CT-based finite element method	Journal of Biomechanics	40(8)	1745-53	2007
M. Bessho; I. Ohnishi; S. Ohashi; J. Matsuyama; T. Matsumoto; K. Nakamura,	EVALUATION OF THE EFFICACY OF AN OSTEODYNAMIC AGENT BY PREDICTING THE STRENGTH OF THE PROXIMAL FEMUR USING A CT-BASED FINITE ELEMENT METHOD -A PRELIMINARY STUDY-	Transactions of orthopaedic Research Society	32	1269	2007
Matsuyama, J; Ohnishi, I; Sakai, R; Miyasaka, K; Harada, A; Bessho, M; Ohashi, T; Matsumoto, T; Nakamura, K	A NEW METHOD FOR EVALUATION OF FRACTURE HEALING BY ECHO TRACKING	Transactions of orthopaedic Research Society	32	941	2007
大西五三男, 松本卓也, 大橋暁, 別所雅彦, 松山順太郎, 中村耕三	新しい医療技術 創外固定における新しいコンピュータ支援技術	整形・災害外科	50 (2)	157-163	2007

大西五三男, 松山順太郎, 別所雅彦, 松本卓也, 大橋暁, 中村耕三	新しい医療技術 骨折部位強度の新しい評価法	整形・災害外科	50(10)	1121-1129	2007
今井一博, 大西五三男, 松本卓也, 山本精三, 中村耕三	【骨粗鬆症性脊椎骨折の発症リスクファクターと予後因子】CT/有限要素法による骨粗鬆症性脊椎骨折の予測	骨・関節・靭帯	20 (1)	29-34	2007
大橋暁, 大西五三男, 松山順太郎, 松本卓也, 別所雅彦, 中村耕三	創外固定ピンの非対称スレッド形状が引抜き強度に与える影響の力学試験および有限要素法解析による検討	日本創外固定・骨延長学会雑誌	18	45-51	2007
大西五三男, 松本卓也, 松山順太郎, 大橋暁, 別所雅彦, 佐藤和強, 岡崎裕司, 中村耕三	ユニバーサル・バー・リンク機構を有する片側式創外固定器による変形矯正	日本創外固定・骨延長学会雑誌	18	53-61	2007
松山順太郎, 大西五三男, 別所雅彦, 大橋暁, 松本卓也, 中村耕三, 酒井亮一, 鈴木浩之, 大塚利樹, 宮坂好一, 原田烈光	超音波エコートラッキング法を用いた骨癒合判定法	日本創外固定・骨延長学会雑誌	18	127	2007
M. Bessho; I. Ohnishi; S. Ohashi; J. Matsuyama; T. Matsumoto; K. Nakanura	EVALUATION OF THE EFFICACY OF AN OSTEODYNAMIC AGENT BY PREDICTING THE STRENGTH OF THE PROXIMAL FEMUR USING A CT-BASED FINITE ELEMENT METHOD - A PRELIMINARY STUDY-	8th EFORT congress, Transactions	8	P1569	2007
Ohashi, S.; Ohnishi, I.; Bessho, M.; Matsuyama, J.; Matsumoto, T.; Nakanura, K	Analysis of the stress distribution at the Pin-bone interface of external fixation using a patient specific CTCAD-based finite-element method	8th EFORT congress, Transactions	8	P1311	2007
別所雅彦, 大西五三男, 松本卓也, 大橋暁, 中村耕三	大腿骨近位部の強度評価について CT/有限要素法・QCT による薬剤効果判定への応用について	SERM: Selective Estrogen Receptor	5	82-83	2007
松本卓也, 大西五三男, 別所雅彦, 大橋暁, 中村耕三	CT/有限要素法による脊椎椎体の圧縮強度解析 骨粗鬆症治療効果判定への応用	SERM: Selective Estrogen Receptor	5	80-81	2007
今井一博, 大西五三男, 山本精三, 中村耕三	CT/有限要素法による骨粗鬆症治療薬の効果判定	Osteoporosis Japan	15(2)	196-199	2007