

が困難である。CT画像を元に作成する、3次元表面形状モデルを利用した3次元手術シミュレーションでは、変形を手術に準じた手順で様々な変形矯正が施行できる上、様々な方向から回旋を含めて3次元的な変形矯正の評価が可能な手法である。今回、術後、UBL創外固定器を術後の設置位置に変更し術後矯正計画を行うことができ、必ずしも術前計画通りにいかない場合にも、対応が可能であることが確認できた。

## E. 結論

大腿骨骨幹部骨折変形治癒例に対して、CT画像とUBL創外固定器のCADデータを用いた変形矯正のシミュレーションを行った。回旋を含む複合変形に対して創外固定器の設置部位から矯正後の形態予測まで計画を行うことができ、さらに、術後に実際にUBL創外固定器を設置した位置で、術後矯正計画を行うことが可能となった。

## F. 研究発表

### 1. 論文発表

Matsuyama J, Ohnishi I, Sakai R, Bessho M, Matsumoto T, Miyasaka K, Harada A, Ohashi S, Nakamura K. A new method for evaluation of fracture healing by echo tracking. *Ultrasound Med Biol* 2008;34: 775-83

### 2. 学会発表

Bessho, M.; Ohnishi, I.; Matsumoto, T.; Ohashi, S.; Tobita, K.; Matsuyama, J.; Nakamura, K.; Prediction of strength and fracture location of the proximal femur by a CT-based nonlinear finite element method - Effect of load direction on hip fracture load and fracture site - . 9th EFORT congress,

Transactions P91, Nice, France (29 May - 1 June, 2008)

別所雅彦、大西五三男、松本卓也、大橋暁、飛田健治、松山順太郎、中村耕三、CT画像を用いた有限要素法非線形解析による大腿骨近位部の骨強度評価 荷重・拘束条件の相違による予測骨強度の相違について、日本整形外科学会雑誌(0021-5325)82巻3号 Page S518 (2008)

大橋暁、大西五三男、松本卓也、別所雅彦、飛田健治、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 非対称ピンプロファイルはピンと骨の界面における応力集中を軽減する、日本整形外科学会雑誌(0021-5325)82巻3号 Page S518 (2008)

金子雅子、大西五三男、別所雅彦、松本卓也、中村耕三、CT有限要素法による大腿骨近位部の骨強度評価—骨強度基準値作成に関する予備的研究—、*Osteoporosis Japan* Vol.16 Suppl.1, 2008, p142 2008

今井一博、大西五三男、山本精三、中村耕三、CT/有限要素法による脊椎椎体骨折リスクおよびアレントロネート効果の評価、*Osteoporosis Japan* Vol.16 Suppl.1, 2008, p144, 2008

別所雅彦、大西五三男、松本卓也、金子雅子、大橋暁、飛田健治、中村耕三、CT/有限要素法による骨強度評価について—大腿骨近位部の薬剤効果判定への応用に関する予備的研究— *Osteoporosis Japan* Vol.16 Suppl.1, 2008, p145, 2008

松本卓也、大西五三男、別所雅彦、大橋暁、飛田健治、金子雅子、中村耕三、CT/有限要素法による脊椎椎体の強度解析—日常生活における骨強度評価への応用— *Osteoporosis*

Japan Vol.16 Suppl.1, 2008, p143

松本卓也、大西五三男、飛田健治、別所雅彦、大橋暁、中村耕三、大腿骨変形に対する変形矯正コンピューターシミュレーション、コンピュータ外科学会誌 Vol.10,No.3, 253-4, 2008

G. 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

## 低侵襲・高精度骨折整復・治療支援システムの開発

分担研究者 佐久間 一郎 東京大学大学院工学系研究科教授

研究要旨 本研究では大腿部骨折を支援するために、骨折整復装置・レーザーガイドシステム・UBL創外固定器のナビゲーションシステムについて研究・開発を行った。各システムについて設計・開発をすすめ、安全かつ精密な骨折整復を実現するための制御アルゴリズムについて検討を行った。

### A. 研究目的

本研究では直達式骨折整復術および UBL 創外固定器による骨折整復術のために、直達式骨折整復装置・レーザーガイドシステム・UBL 創外固定器ナビゲーションシステムについて研究・開発を行った。安全かつ高精度な整復を制御アルゴリズムについて検討し動作を確認することを目的とした。

### B. 研究方法

#### (1) 直達式骨折整復装置の開発と拘束パワーアシスト制御

直達式骨折整復装置において、高精度な骨折整復を実現するためには、直達ジグの高精度な位置決めが不可欠である。過年度の研究において開発した整復装置は剛性が十分でないことが明らかとなったため、高い剛性とするための設計および開発を行った(図 1)。



図 1 骨折整復支援ロボット  
駆動制御については、ナビゲーションシステ

ムが生成した整復パスに基づく自動制御と力センサで計測した力・トルクを用いたパワーアシスト制御がある。これは、骨折整復に必要な力をロボットにより支援するもので、力センサで医師の意図している並進・回転方向を判断することにより実現している。しかしながら、単純に力センサにより検出された力およびトルクをそのままロボットの駆動に反映させると、医師の意図とずれが生じる可能性や場合によっては組織に過大な負荷がかかり損傷する危険性があるなどの問題がある。このような損傷を回避するためには、遠位骨片の姿勢の調節を行い際に、回転中心を限定すればよいと考えられる。よって回転中心を遠位骨片の骨折部仮想的に拘束した安全なパワーアシスト制御(拘束パワーアシスト制御)を提案した。

拘束パワーアシスト制御では、不適切な回転中心で回転を行うと組織を損傷してしまう可能性が非常に高いため、遠位骨片の骨折部を中心とする拘束を行った。これにより、骨折部断面の位置を固定した状態で断面の姿勢のみを変更することが可能となり、安全かつ高精度な骨折整復パワーアシストが期待できる。

本年度は、実装した拘束パワーアシスト制御において、拘束精度の評価を行った。具体的には拘束した回転中心の変位量の評価を行った。



## (2) レーザーガイダンスシステムの開発

レーザーガイダンスシステムは、従来のナビゲーションシステムとは異なり、目標とする術具の位置・姿勢(術前計画)をレーザー光で術野に直接描画するシステムである。術具の位置・姿勢は二機のレーザーポインタから生成される2つの平面の交線で表現される。

本年度は、レーザーガイダンスシステムの構築および分担研究者の中島(東京大学)により開発がすすめられている骨折整復術用のナビゲーションシステムとの統合を進めた。これにより、来年度から医師による *in vitro* 実験および臨床への適用を実施していく。

## (3) UBL 創外固定器のナビゲーション・マニピュレータの開発

UBL 創外固定器は骨変形や骨折時の早期リハビリの実施のための有用なツールである。一方、解剖学的な骨軸と創外固定器の設置位置・姿勢の精度が予後に関わるため、術前の計画に対して高い精度で設置しなければならない。そこで、位置と姿勢を呈示する簡易ナビゲーションシステムと UBL 創外固定器の把持および位置決めを支援するマニピュレータの開発を目的としている。

高精度なUBL創外固定器のマニピュレーションを実現するためには、十分な剛性が必要である。一方、サイズについてはコンパクトな物が求められている。本年度は、設計した UBL 創外固定器把持マニピュレータについて有限要素解析を用いて応力・歪み解析を行い、設計したマニピュレータが十分な剛性を有するか確認を行った。以上の手法で設計したマニピュレータの試作を行いシミュレーションとの比較を行った。

(倫理面での配慮)

特になし

## C. 研究結果

### (1) 直達式骨折整復装置の開発と拘束パワーアシスト制御

提案した拘束パワーアシスト制御について、拘束精度評価を行った。遠位側骨片の骨折部を中心とする回転運動において回転中心の変位を評価した。結果を表1に示す。

表1 拘束パワーアシスト制御における拘束点の変位量の評価結果。

	RMS Err.	MAX
拘束点の変位[mm]	1.98	3.63

### (2) レーザーガイダンスシステムの開発

来年度におけるレーザーガイダンスシステムの臨床への適用を目指し、レーザースキャナーおよび制御装置の開発を行った。ナビゲーションシステムとの接続および位置・姿勢呈示が可能であることを確認した。

### (3) UBL 創外固定器のナビゲーション・マニピュレータの開発

有限要素解析による UBL 創外固定器マニピュレータのたわみ量の分布を図2に示す。現在の PEEK 製マニピュレータでは、最大 7 mm, 7 deg 程度のたわみが生じていることがわかった。そこで、特に剛性が不足している部品について材料をアルミニウムに変更し、再設計を行った。再設計後のたわみ量について有限要素解析で求めた結果を図3に示す。UBL設置側におけるたわみ量は最大で 0.5 mm, 1.0 deg であり、十分な精度が期待できることが確認された。

以上の解析結果に基づき開発した UBL 創外固定器把持マニピュレータを図 4 に示す。開発したマニピュレータは 470 g であり、マニピュレータを把持する空気圧駆動把持アームで十分把持が可能な重量である。



図 2 有限要素解析によるたわみ量分布



図 3 再設計後のたわみ量分布

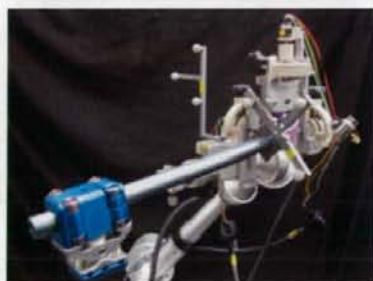


図 4 開発した UBL 創外固定器把持マニピュレータ

#### D. 考察

(1) 直達式骨折整復装置における拘束パワー

#### アシスト制御

本年度は直達式骨折整復装置のパワーアシストにおいて、回転中心を固定する拘束パワーアシスト制御について提案した。これにより、パワーアシスト時において想定していない方向にロボットが動くリスクを軽減することが可能と考えられる。一方、拘束精度については安全性を保证するに十分か否かについて安全性の観点から検討する必要がある。

#### (2) レーザーガイダンスシステムの開発

本年度はシステムの開発を中心に研究をすすめた。開発したシステムが正常に動作することが確認され、in vitro 実験および臨床への適用への準備が整った。一方、臨床への適用のための検討事項として、無影灯下でのレーザー光強度について検討する必要がある。

#### (3) UBL 創外固定器把持マニピュレータ

本年度は過年度において開発したマニピュレータについて、空気圧駆動把持マニピュレータで把持が可能な軽量化と剛性の向上を目的とし、有限要素解析による再設計および製作を行った。一般的に剛性と重量は相関関係にあるため、たわみ量に大きな影響を与える部品についてアルミニウムを用いることにより、軽量かつ高い剛性を得ることができた。今後、本年度製作したマニピュレータによる UBL 創外固定器の誘導精度評価を行い、臨床への適用を目指していく。

#### E. 結論

本年度は直達式骨折整復装置における拘束パワーアシスト制御の提案、レーザーガイダンス装置の開発、UBL 創外固定器マニピュレータの設計・製作を行った。拘束パワーアシスト制御については安全なパワーアシストによる骨折整復支援の可能性が確認された。レーザー

ーガイドランス装置については、開発した装置がナビゲーションシステムによって指定した位置・姿勢にレーザー光が照射されることを確認した。UBL 創外固定器把持マニピュレータについては、有限要素解析により軽量かつ十分な剛性を有する様に再設計・製作を行った。

#### F. 研究発表

##### 1.論文発表

なし

##### 2.学会発表

[1] S. Joung, K. Kamon, H. Liao, J. Iwaki, T. Nakazawa, M. Mitsuishi, Y. Nakajima, T. Koyama, N. Sugano, Y. Maeda, M. Besho, A. Ohashi, T. Matsumoto, I. Onishi, I. Sakuma, "A robot assisted hip fracture reduction with a navigation system", Med Image Comput Comput Assist Interv Int Conf Med Image Comput Comput Assist Interv. 2008;11(Pt 2):501-8.

#### G. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

##### 1.特許取得

##### 2.実用新案登録

##### 3.その他



## 低侵襲・高精度骨折整復・治療支援システムの開発

分担研究者 光石 衛 東京大学大学院工学系研究科教授

研究要旨 本研究では大腿部骨折を支援するために、骨折整復ナビゲーションシステムとロボットを統合したシステムの研究・開発を行った。評価実験のためのモデル骨を製作し、統合システムによる介達式自動骨折整復実験による統合システムの評価を行った。

### A. 研究目的

大腿骨骨折、中でも特に頭部骨折は骨粗鬆症を有する高齢者に多く、寝たきりの原因になるなど、社会の高齢化を迎える中で症例数の増加とともに問題となっている。整復手術では、患部の状態をX線撮影によって随時確認するが、透視画像から骨折状態の把握や整復計画を行うことは困難であるため、整復の精度や手術時間への影響が問題となる。また、X線撮影の繰り返しによる手術スタッフおよび患者のX線被曝も問題となる。そのため、手術支援システムの開発が求められている。

本年度は、骨折整復ロボットとナビゲーションシステムの統合をすすめた。評価実験のためのモデル骨を作成し、統合システムによる介達式骨折整復について検討を行った。

### B. 研究方法

#### (1) 軟部組織を有した骨折モデルの開発

本研究において評価実験を行うための骨折モデルの設計・開発を行った。脛骨・大腿骨からなるプラスチック製骨モデル(Sawbones, USA)を用いた。医師による指導のもと、大腿骨に骨折を模擬した切断を行い、腰椎と大腿骨に筋肉を模擬したゴムを設置した。製作した骨折モデルを図1に示す。



図1 製作した下肢骨折モデル

製作したモデル骨の定性的妥当性を評価するために、開発を行っている骨折整復支援装置を用いて牽引・回旋を行い、反力と大腿骨位置の関係について妥当性を評価した。

#### (2) ナビゲーションシステムとロボットの統合と統合システムによる介達式自動骨折整復

本研究課題で開発をすすめているナビゲーションシステムと骨折整復支援ロボットを統合し、前項で述べたモデル骨に対する介達式自動骨折整復を行った。実験は術中X線撮像装置が利用可能な病院施設にて行った。実験における機器の配置を図に示す。



図2 介達式自動骨折整復実験

実験において、骨折部にずれが生じるように大腿骨の初期位置を調節した。なお、本実験において、腰椎は固定とした。ロボットキャリブレーションおよびモデル骨のレジストレーションの後、牽引を含む整復経路をナビゲーションシステムで設定した。整復経路情報を連続的にロボットに送信し、その情報をもとにロボットを駆動させることで、骨折の自動整復を行った。

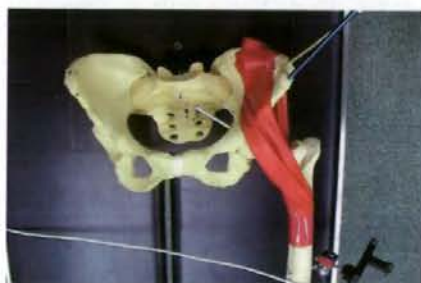


図3 整復前の骨折状態

(倫理面での配慮)

特になし

### C. 研究結果

#### (1) 軟部組織を有した骨折モデルの開発

製作した骨折モデルにおける反力と大腿骨位置の測定結果を図4に示す。反力の位置の関係には生体と同様のヒステリシスが見られ、定性的には生体を模擬できていることが確認された。また、医師による評価においても、概ね生体特性に近いことが確認された。

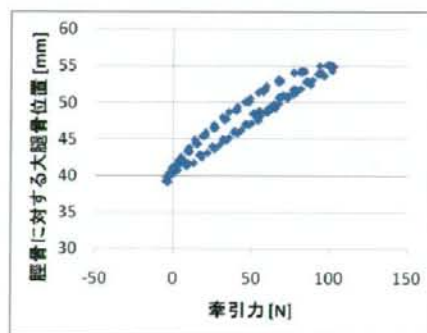


図4 開発した骨折モデルにおける牽引力に対する大腿骨位置の評価結果

#### (2) ナビゲーションシステムとロボットの統合と

統合システムによる介達式自動骨折整復

統合システムによる自動整復結果を図5および表1に示す。手術計画との誤差は2.5 mm程度であり、徒手による骨折整復に劣らない結果が得られることが確認された。



図5 統合システムによる介達式自動骨折整復結果



表1 統合システムによる介達式自動骨折整復結果

誤差	X	Y	Z
姿勢[deg]	-0.25	0.05	0.11
位置[mm]	0.06	2.47	-0.39

#### D. 考察

##### (1) 軟部組織を有した骨折モデルの開発

評価実験用のモデルとしてモデル骨およびゴムを用いた下肢骨折モデルを開発した。反力と大腿骨位置の関係においては、生体と同様のヒステリシスが見られ、定性的には妥当なモデルであることが確認された。

定量的にも医師の評価による結果、大きく異なるものではないことが確認され、in vitro 実験用としては妥当なモデルであると言える。特に、下肢の構造は豚などの他の動物はヒトと大きく異なるためにin vivo 実験を行うことが難しく、このようなモデル骨が不可欠であると考えられる。一方、本モデルの妥当性についてはより定量的に評価刷る必要があると考えられる。

##### (2) ナビゲーションシステムとロボットの統合と

###### 統合システムによる介達式自動骨折整復

ナビゲーションシステムとロボットの統合をすすめるため、統合システムによる介達式自動骨折整復を行った。本年度は初期の結果として膝関節を固定した状態で行ったが、3 mm 以下の誤差であった。誤差の主な原因としてはロボットの機構におけるガタや、自重等によるたわみが考えられ、膝関節固定下においては1 mm 程度の誤差とする必要があると考えられる。

#### E. 結論

今年度における研究として、実験用骨折モデル骨の開発、ナビゲーションシステムと骨折

整復支援ロボットの統合システムの構築、統合システムによる介達式自動骨折整復実験を行った。

統合システムによりナビゲーションシステム上で設定された整復経路に沿ってロボットによる骨折整復が可能であることを確認した。また、整復精度はRMSで2.5 mmであった。以上より、統合システムによる安全かつ高精度な骨折整復支援の可能性が示唆された。

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

##### 2. 学会発表

- [1] "Control of Fracture Reduction Robot using Force/Torque Measurement," T. Douke, Y. Nakajima, Y. Mori, S. Onogi, N. Sugita, M. Mitsuishi, M. Bessho, S. Ohhashi, K. Tobita, I. Ohnishi, I. Sakuma, T. Dohi, Y. Maeda, T. Koyama, N. Sugano, K. Yonenobu, Y. Matsumoto, K. Nakamura, IEEE EMBC (Int'l Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society) 2008, Vancouver, Canada, 2008, pp. 3265-3268
- [2] "Control of Fracture Reduction Robot based on Biomechanical Model of Human Leg," T. Douke, Y. Nakajima, Y. Mori, S. Onogi, N. Sugita, M. Mitsuishi, M. Bessho, S. Ohhashi, K. Tobita, I. Ohnishi, I. Sakuma, T. Dohi, Y. Maeda, T. Koyama, N. Sugano, K. Yonenobu, Y. Matsumoto, K. Nakamura, IEEE BIOROB 2008, Arizona, USA, 2008, pp. 295-299,
- [3] "手術支援ロボットへの応用を目指した人体筋骨格モデルの構築," 道家健仁, 中島

義和, 森泰元, 小野木真哉, 杉田直彦, 光石衛, 別所雅彦, 大橋暁, 飛田健治, 大西五三男, 佐久間一郎, 土肥健純, 前田ゆき, 小山毅, 菅野伸彦, 米延策雄, 松本洋一郎, 中村耕三, 日本コンピュータ外科学会誌, vol.10, no.3, 東京, 2008, pp.313-314

- [4] “手術支援ロボットへの応用を目指した人体筋骨格モデルの構築,” 道家健仁, 中島義和, 小野木真哉, 光石衛, 杉田直彦, 佐久間一郎, 松本洋一郎, 第35回日本臨床バイオメカニクス学会, 大阪, 2008, pp. 170

G. 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

分担研究者 中島 義和 東京大学大学院工学系研究科 准教授

研究要旨 本研究では大腿部骨折整復を支援するために、骨折整復ナビゲーションシステム・骨折整復経路の自動生成法・ロボットによる介達式骨折整復における膝の数式モデルによる記述法について研究・開発を行った。各システムについて設計・開発をすすめ、安全かつ精密な骨折整復を実現するための制御アルゴリズムについて検討を行った。

#### A. 研究目的

大腿骨骨折、中でも特に頭部骨折は骨粗鬆症を有する高齢者に多く、寝たきりの原因になるなど、社会の高齢化を迎える中で症例数の増加とともに問題となっている。整復手術では、患部の状態をX線撮影によって随時確認するが、透視画像から骨折状態の把握や整復計画を行うことは困難であるため、整復の精度や手術時間への影響が問題となる。また、X線撮影の繰り返しによる手術スタッフおよび患者のX線被曝も問題となる。そのため、手術支援システムの開発が求められている。

本年度は、骨折整復術支援のためのナビゲーションシステムの設計・開発を行った。また、ロボットによる介達式骨折整復術のための膝の筋骨格モデル化について検討を行った。

#### B. 研究方法

##### (1) 骨折整復術ナビゲーションシステムの設計・開発と骨折整復経路自動生成に関する検討

現在の骨折整復術では、術中 X 線画像を参考に骨折部の整復および接合を行うが、二次元画像のために奥行きに関する情報がなく、高精度な骨折整復を行うためには高度な技術と経験が必要である。そこで、術前 CT 画像、すなわち三次元画像を呈示する手術ナビゲーションシステムが期待されている。過年度の研

究において術前 CT 画像と術中 X 線画像の位置合わせを行う 2D/3D レジストレーション法について検討をおこなった。本年度は、来年度の臨床への適用を目的とし、ナビゲーションシステムの設計および開発を行った。

また、骨折整復ナビゲーションに要求される機能として整復経路の生成が挙げられる。一般的に大腿骨骨折整復は遠位骨片を牽引後、位置・姿勢を調節しつつ弛緩させるといった手順で行われる。軟部組織の損傷等が懸念されるため、初期位置から最短距離で直接整復位置へと動かしてはならない。そこで、初期位置からの牽引に対応した整復経路の自動生成アルゴリズムについて検討を行った。

##### (2) 2-D/3-D レジストレーション法による骨片位置姿勢画像計測の高速化と骨片位置姿勢トラッキング法に関する検討

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 線透視画像の例を図 1 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



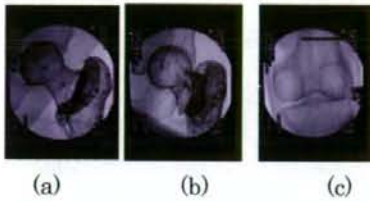


図1 X-ray fluoroscopic images. (a) frontal image of proximal part, (b) lateral image of proximal part, (c) distal part.

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。

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(図2)。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。

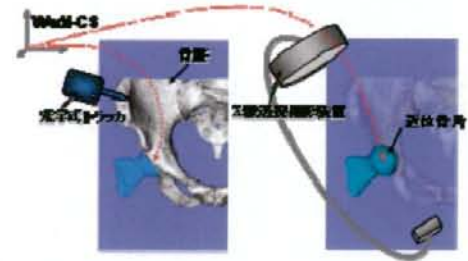


図2 Schematic diagram of kinematics knowledge based registration

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。概念図を図3に示す。

大腿骨近位骨片と遠位骨片は、前述の手法で計測する。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図3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。

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

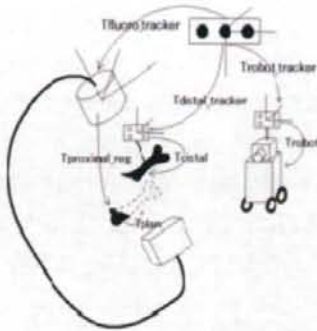


図3 Schematic diagram of coordinate integration

### (3) 介達式骨折整復のための麻酔下における膝関節の筋骨格モデルに関する検討

ロボットによる介達式骨折整復支援における課題として、ロボットによる把持部から骨折部までの間に膝関節を含むために、精確に遠位骨片の骨折部を制御できない点が挙げられる。過年度では、力/トルクから遠位骨片の位置/姿勢算出について検討を行い、平面近似による推定法について提案した。単純な剛体モデルと比較すると良好な推定精度であったが、生体組織の有するヒステリシス特性や外挿における推定精度が悪いなどの課題があった。上記課題の解決法として膝関節に関係する筋肉および靭帯を力学モデルで表現することが挙げられる。そこで、本年度は力/トルクから筋肉および靭帯の力学パラメータ推定について検討を行った。

一般的に弛緩時の筋肉・靭帯はバネ・ダンパモデルで表現可能であることが報告されている。そこで、本研究では個々の靭帯および筋肉について異なるバネ定数・ダンパ定数を

有すると考え、個々の靭帯・筋肉における付着位置を考慮した力学モデルの構築を提案した。図4に示すように、膝関節には内側側副靭帯・外側側副靭帯・前十字靭帯・後十字靭帯の4本の靭帯がある。それぞれの靭帯が図5のように表現されるバネおよびダンパからなると考えられる。その時、個々の靭帯における力の釣り合いは、

$$F_i(t) = k_i(L_i(t) - L_i(0)) + c_i \frac{\partial L}{\partial t}$$

と表される。ここで、 $F_i$ は張力、 $L_i$ は長さ、 $k_i$ はバネ定数、 $c_i$ はダンパ定数である。



図4 膝関節

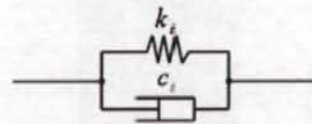


図5 バネ・ダンパモデル

一方、図6のように膝関節全体で見た場合も牽引力と靭帯における張力の和が釣り合っていることから、各靭帯における張力を

$$P_i = \zeta_i \vec{e}_x + \eta_i \vec{e}_y + \zeta_i \vec{e}_z$$

とすると、

$$\text{牽引方向 } F(t) = \sum \eta_i \left[ k_i(L_i(t) - L_i(0)) + c_i \frac{\partial L_i}{\partial t} \right]$$

$$\text{回旋方向 } T(t) = \sum (\xi_i \zeta_i - \alpha \zeta_i) \left[ k_i(L_i(t) - L_i(0)) + c_i \frac{\partial L_i}{\partial t} \right]$$

と表される。以上より、付着位置から  $\eta_i$ ,  $\xi_i$ ,  $\zeta_i$  が得られ、測定した力/トルクと遠位骨片の位置・姿勢から  $k_i$ ,  $c_i$ ,  $L_i$  を推定することで、遠位骨片に伝達している力・トルクを算出することが可能となる。

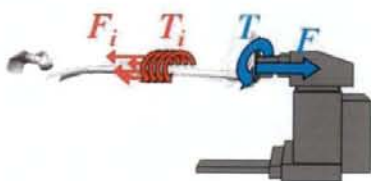


図6 足首における牽引力・回旋トルクと膝関節における牽引力・回旋トルクの釣り合い

提案する筋・骨格モデルの妥当性を評価するために、図7に示す下肢モデル骨(Sawbones, USA)および靭帯・筋肉を模擬したゴムを用いて、推定パラメータの評価を行った。



図7 下肢モデル骨

(倫理面での配慮)  
特になし

## C. 研究結果

### (1) 骨折整復術ナビゲーションシステムの設計・開発と骨折整復経路自動生成に関する検討

開発したナビゲーションシステムの外観を図8に示す。ナビゲーションシステムの開発において、全ての機能を同一の画面からアクセスできるものとはせず、術式に沿ったシナリオによって使用可能な機能を制限・解放する設計とした。具体的には、シナリオは 1) 患者データ(術前 CT 画像など)の読み込み, 2) 遠位骨片のレジストレーション, 3) 近位骨片のレジストレーション, 4) 整復経路の設定, 5) ロボットによる骨折整復から成る。また、GUI の配置および各ボタン等のインターフェイスの大きさなどについては、医師との議論を通じて改良・改善をすすめた。



図8 ナビゲーションシステム

整復経路の自動生成については、牽引後の回旋角度は整復終了の直前までに分散させる方がより安全であると考えられる。そこで、牽引方向と距離を指定することで、牽引後の状態・整復状態の変換行列を求め、回旋角度を弛緩させる距離に対して均一に分散させることとした。



- (2) 2-D/3-D レジストレーション法による骨片位置姿勢画像計測の高速化と骨片位置姿勢トラッキング法に関する検討

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。図 9 に ray trace 法および提案手法で生成した DRR の例を示す。

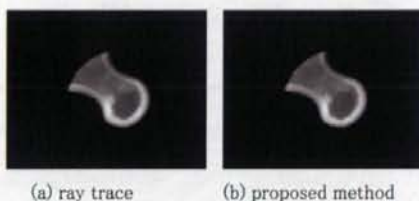


図9 DRRs

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。実験の様子を図 10 に示す。



図10 実験装置

- (3) 介達式骨折整復のための麻酔下における膝関節の筋骨格モデルに関する検討

図 11 に提案した筋骨格モデルを用いて推定された各靭帯における張力を示す。図の様に各靭帯に生じる張力およびその方向が推定できていることが確認された。



図11 推定された各靭帯における張力およびその牽引方向への分解

#### D. 考察

- (1) 骨折整復術ナビゲーションシステムの設計・開発と骨折整復経路自動生成に関する検討

ナビゲーションについては医師に意見を求めつつ、機能および GUI の実装をすすめた。開発したナビゲーションシステムについて、来年度早期における in vitro 実験および臨床への適用へとすすめていく。

整復経路生成については、基本的な手法として、牽引された位置から最終的な整復位置までの間について回旋角度を平均化する整復経路生成について提案した。しかしながら、本手法では軟部組織等については考慮しておらず、軟部組織に対する安全性や骨片の干渉などについて考慮する必要がある。

- (2) 介達式骨折整復のための麻酔下における膝関節の筋骨格モデルに関する検討  
本手法により、足首の位置で牽引力および

回旋トルクを印加した場合、膝関節において生じる張力やトルクを推定することが可能であった。これにより足首における牽引力および回旋トルクから大腿骨遠位骨片の位置・姿勢推定の可能性が示唆された。一方、骨折患者における内部パラメータ同定がどの程度可能なのかについて検討する必要がある。また、生体下肢においてはより多くの軟部組織が関与していると考えられ、in vivo における本手法の妥当性について検討する必要がある。

#### E. 結論

本年度は、1) 手術ナビゲーションシステムの開発とロボットとの統合、2) 整復経路自動生成法の提案、3) 2-D/3-D レジストレーション法による骨片位置姿勢画像計測の高速化と骨片位置姿勢トラッキング法に関する検討、4) 介達式骨折整復のための麻酔下における膝関節の筋骨格モデルに関する検討を行った。

以上を踏まえ、来年度は本システムの臨床への適用を目指し研究・開発をすすめていく。

#### F. 研究発表

1.論文発表  
なし

2.学会発表

- [1] "Control of Fracture Reduction Robot using Force/Torque Measurement," T. Douke, Y. Nakajima, Y. Mori, S. Onogi, N. Sugita, M. Mitsuishi, M. Bessho, S. Ohhashi, K. Tobita, I. Ohnishi, I. Sakuma, T. Dohi, Y. Maeda, T. Koyama, N. Sugano, K. Yonenobu, Y. Matsumoto, K. Nakamura, IEEE EMBC (Int'l Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology

Society) 2008, Vancouver, Canada, 2008, pp. 3265-3268

- [2] "Control of Fracture Reduction Robot based on Biomechanical Model of Human Leg," T. Douke, Y. Nakajima, Y. Mori, S. Onogi, N. Sugita, M. Mitsuishi, M. Bessho, S. Ohhashi, K. Tobita, I. Ohnishi, I. Sakuma, T. Dohi, Y. Maeda, T. Koyama, N. Sugano, K. Yonenobu, Y. Matsumoto, K. Nakamura, IEEE BIOROB 2008, Arizona, USA, 2008, pp. 295-299,
- [3] "手術支援ロボットへの応用を目指した人体筋骨格モデルの構築," 道家健仁, 中島義和, 森泰元, 小野木真哉, 杉田直彦, 光石衛, 別所雅彦, 大橋暁, 飛田健治, 大西五三男, 佐久間一郎, 土肥健純, 前田ゆき, 小山毅, 菅野伸彦, 米延策雄, 松本洋一郎, 中村耕三, 日本コンピュータ外科学会誌, vol.10, no.3, 東京, 2008, pp.313-314
- [4] "手術支援ロボットへの応用を目指した人体筋骨格モデルの構築," 道家健仁, 中島義和, 小野木真哉, 光石衛, 杉田直彦, 佐久間一郎, 松本洋一郎, 第35回日本臨床バイオメカニクス学会, 大阪, 2008, pp. 170

#### G. 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



医療機器開発推進研究事業  
低侵襲・高精度骨折整復・治療支援システムの開発

分担研究者 荻田 達郎 東京大学医学部附属病院 講師

研究要旨 さまざまな病態における骨強度・骨折のリスクを非侵襲且つ高精度に定量評価できる診断装置の開発を行うことを目的とする。人体に非侵襲であるエコーを利用し、骨強度判定を行う装置を開発した。この手法 (echo tracking 法) は成人の脛骨では高い測定精度が得られた。しかし骨幅の狭小や変形が残存する場合、正確な測定を行うことに難渋した。そこで、今までの研究に加えて、細く脆弱な骨に対して追加研究を行った。狭小化・変形した骨に対して応用可能な新しい小型プローブの開発と下肢の固定ジグの改良・開発である。今回、その精度評価を行ったので報告する。

#### 研究目的

研究の目標は、さまざまな病態における骨強度・骨折のリスクを非侵襲且つ高精度に定量評価できる診断装置の開発を行うことを目的とする。

#### 研究方法

本研究において開発する方法は超音波を利用する。特に超音波による微小変位計測法として実用化され、心・血管壁の運動を定量的に評価する方法として確立しているエコートラッキング法を応用し、日常生活動作にて生ずる微小な骨の変形・歪を非侵襲に高精度に検出することにより、骨強度を判定し骨折リスクを評価する。これまでの骨強度診断は X 線写真を読影するしか方法が無く、主観的なものであったが、この研究が発展すれば、定量的に評価することで骨折リスクの程度に応じた患者個々の最適な骨折予防法の選択が可能となる。本研究では動的な荷重負荷による骨の変位をミクロン単位で高精度に測定できることが予

備実験から明らかとなっている。また、生体計測においても健康脛骨の生理的範囲内の微小な荷重に対する骨の変形量測定を行い骨の微小変形を検出することに成功している。

現在、臨床応用を行うに当たり下肢の形状 (骨長・骨幅・測定部位) を考慮した測定装置の開発が必要になった。

そのため測定部位の形状に適したプローブの開発と下肢の保持具の開発を行った。プローブ開発において、脛骨の遠位端に設置可能な極めて小さいものが必要であることから、既存するもので生体に用いられている経直腸用シングルプローブ (周波数 7.5MHz、形状  $\phi$  8mm 円形、重量 0.6g) に着目し開発を開始した。電子プローブではなくシングルプローブによりエコートラッキングが可能であるか、そしてこれらを平面配置することで面変化も検出可能であるかの検討を行った。3 個の経直腸用シングルプローブを平板上に正三角形の頂点にあたる位置にそれぞれ配置し、これを金属平板に対し向け金属平板を微小変化させることにより面変化の検出を行った。また、これ



に続く基礎実験として新たに開発した骨計測用シングルプローブ（15mm×12.2mm内に9つの振動子を有する）の音響特性を測定し、これを用いた臨床測定を健常脛骨において評価を行い、さらに動物実験においてウサギ脛骨に対してプローブの測定精度評価を行った。

下肢保持具として遠位支持部の明確化、測定精度の向上、測定の安全性・効率性向上を目標とし新たな保持装置を開発した。既存の陰圧による下肢全体を包み込む方法ではなく、シリコンゴムスポンジを支持部材料として用いたU字状の治具で、近位部は4cm、遠位部は2cm程度の幅で下肢を保持する。さらに近位部と遠位部は高さ調整機能と共にそれぞれの荷重が測定可能なものとし設置再現性の向上を図った。この下肢治具の固定性の評価として健常脛骨にて2.5N荷重を加え下肢の回旋の程度を評価した。さらに、これらの新規プローブと下肢保持機能に対応可能な解析ソフトも新たに開発した。これらを用い臨床測定を実施し、既存の測定と比較することにより精度、安全性、効率化の評価を行った。

荷重機構に関しても、従来はフォースゲージを用いて脛骨に25Nの荷重をかけていたが、圧縮方向が一定でないため再現性誤差が生じる可能性があったため、本年度回転型荷重機構の開発に取り組んだ。

#### （倫理面への配慮）

今回の研究で用いられる超音波はすでに臨床で用いられているものと周波数・音圧ともにかかわらず安全性は確立されている。また、検査の際に負荷される荷重は被検者

が日常生活において常に受けている荷重より充分小さいものでありこの検査による骨への損傷は無く安全である。

検査に際しては対象者および対象者家族に口頭および文書を用いて説明を行い、十分に理解し同意を得られたもののみを対象とする。また、全研究を通して患者の個人情報とは公開されない。

動物実験に関しては動物試験受託者よりAAALAC Internationalの許可を得た。

#### 研究結果

基礎実験では、経直腸用シングルプローブにおいても金属表面のエコートラックが可能でありミクロンの精度で面変化も検出可能であった。このことから新たに骨計測用プローブの開発を行い、小型プローブの音響特性を評価した結果、中心周波数7.47MHz、比帯域74.7%、素子感度-30.7dB、静電容量700pFと骨表面波形を取得するために十分な特性、感度があることが実証された。また、実際の脛骨測定においても既存の電子プローブと遜色のないエコートラック測定が可能であった。

新規下肢保持具では近位部と遠位部を既存のものと比較し局所的に保持することに成功し、2.5N荷重による回旋角度は脛骨骨幹部上に設置したアングルメーターにて0.1度以下の回旋で、十分な保持力を有していることが実証された。また、これらの臨床健常骨測定において測定中・測定後の痛みや不快感を残すことはなく、安全性に問題は全く見られなかった。

これらのプローブ、治具を用いた健常脛骨における測定の結果、5回計測において

標準偏差 0.007 度と既存測定 の 0.015 度に対して 2 倍程度の測定再現性が実現された。

また、小型マトリックスプローブの測定精度評価にあたり、測定対象物に表面を研磨したアルミニウム平板と軟部組織を除去した兎の脛骨を使用した。結果は横軸に Laser 変位計より計測した傾斜角、縦軸にマトリックスプローブより算出した傾斜角をとり、5 回計測した結果を表にプロットし相関関係を評価した。アルミニウム平板の結果は R2 乗が 0.9966、直線の傾きが 1.01 で、兎脛骨では、R2 乗が 0.996、直線の傾きが 0.986 であった。

狭小化した骨、変形のある骨の測定において、骨幹端部の狭小した部位での計測を可能にする小型プローブとより高精度な計測を可能とする固定治具が必要であったが、新たに開発した骨計測用プローブでは既存のプローブと遜色のない精度で狭小部位での計測を可能と可能であり、下肢固定治具においては支持部位の局所化によっても荷重に対し安定した固定性を有していた。

狭小化した骨、変形のある骨に新たなプローブと下肢固定治具の開発を行い、これらが偽関節部の剛性測定における要求を満たしていることを明らかにした。

## 考察

新しく開発した小型プローブは、従来使用していた、リニアプローブと遜色ない結果が得られた。下肢の固定ジグの開発で、測定精度の上がり、下肢の変形がある患者に対しても正確な測定結果が望める

## 結論

変形骨に応用するための新たなプローブと下肢固定治具の開発を行い、これらが骨の剛性測定における要求を満たしていることを明らかにした。

今後、開発を行った下肢保持具と荷重機構と共に臨床応用し、骨粗鬆症患者を含めた易骨折性を有する骨の剛性測定を測定し骨折リスク評価を行う。



三次元骨強度解析モデルを用いた大腿骨近位部の強度評価に関する研究

分担研究者 別所 雅彦 東京大学整形外科 特任助教

分担研究者 大橋 暁 東京大学整形外科 特任助教

研究要旨 高齢者の大腿骨近位部骨折の危険予測は画像診断や骨密度測定にて行われるが、これは骨粗鬆の程度は評価するが、構造的強度を評価できないという限界がある。大腿骨近位部分の強度の範囲は、ある程度過去の摘出標本からの圧縮試験等で報告されているが、患者固有の大腿骨近位部分の強度は評価できない。本研究では、大腿骨転子部骨折の患者に対して非骨折側の定量的 CT 撮影を行い、定量的 CT 画像を用いた三次元骨強度解析を行い解析の結果と、先行研究の強度試験の結果と比較することによって、本方法の臨床における有用性を評価した。

対象は、80 歳代の女性の大腿骨転子部骨折患者 20 名(平均 85 歳)。受傷後 1 週間以内に定量的 CT を撮像し、非骨折側の三次元解析モデルを作成した。立位を模擬した条件と側方転倒・後側方転倒を模擬した条件を設定した。Newton-Raphson 法を用いた荷重増分法による非線形解析を行い、予測骨折荷重を解析した。

結果は、予測骨折荷重は、立位条件 3080 N(標準偏差(SD) 550 N)、側方転倒条件 1040 N(SD 236 N)、後側方転倒条件 700 N(SD 167 N)であった。先行研究の実証試験の結果と比較しても矛盾しない結果が得られ、三次元骨強度解析モデルを用いた大腿骨近位部の強度評価は、臨床において有用であると示唆された。

#### A. 研究目的

高齢者の大腿骨近位部骨折の危険予測は画像診断や骨密度測定にて行われるが、これは骨粗鬆の程度は評価するが、構造的強度を評価できないという限界がある。大腿骨近位部分の強度の範囲は、ある程度過去の摘出標本からの圧縮試験等で報告されているが、患者固有の大腿骨近位部分の強度は評価できない。このため、大腿骨近位部分の強度評価を正確に行うことができれば、大腿骨転子部骨折を整復する際に近位骨片に対しどの程度の荷重が加わると大腿骨近位部(大腿骨頸部)にさらに破壊が発生するか危険度の評価が可能となり、骨折整復・固定の制御動作に対して有用な情報となる。

本研究では、大腿骨転子部骨折の患者に対して非骨折側の定量的 CT 撮影を行い、定量的 CT 画像を用いた三次元骨強度解析モデルを作成し、解析の結果と、先行研究の強度試験の結果と比較することによって、本方法の臨床における有用性を評価した。

#### B. 研究方法

80 歳代の女性の大腿骨転子部骨折患者 20 名(平均 85 歳)。受傷後 1 週間以内に骨量ファントム(B-MAS 200, 京都科学)とともに定量的 CT を撮像(120kV, 150mAs, slice thickness 3 mm, matrix 512×512)を行った。定量的 CT 画像を解析コンピュータに転送し、海綿骨に 3mm の 4 節点ソリッド要素と、皮質骨外