

ータを用いた有限要素法解析で、インプラント刺入高位の相違による大腿骨頸部/インプラント周囲の応力・ひずみを解析し、術後の荷重歩行によるカットアウトの危険性を予測・評価することである。

## B 対象と方法

症例は2例、右大腿骨転子部骨折を受傷した83歳女性と非骨折例として左大腿骨骨髄炎後の30歳女性。大腿骨近位部を2mm sliceで定量的CTを撮影。瑞穂医科工業のCHS・lag screw (01-801-12)の3D製図をΦSTATION Ver13.2 (SAEILO社)にて作製、Solid Works (Solid Works社)に変換したCADデータを用い健側大腿骨頸部にlag screwを刺入したシミュレーションモデルを作成した。screw位置による頸部周囲の相当応力、最小主ひずみの違いを検討した。有限要素解析ソフトウェアにはMECHANICAL FINDERを用いた。CT画像上で閾値処理し解析対象となる健側大腿骨近位部を抽出、3次元構築した。この大腿骨近位部の有限要素法モデルに対し、screwのCADデータを用い、大腿骨転子部骨折の観血的整復内固定術を模擬して、頸部から骨頭直下までscrewを挿入したモデルを作成した。大腿骨の海綿骨では3ミリの正四面体要素、皮質骨外層では0.4mm、ヤング率10GPaの正三角形要素の皮質シェルを構築した。三次元骨形状を作成し、材料特性は要素位置に対応するCT値から骨密度を算出し、Keyak (1998)らの理論に基づいて材料特性に変換した不均一材料とした。一方screwの材料特性はTi 6 Al 4 Vチタン合金の特性を用い均一材料とした。インプラントと骨界面の境界条件は完全固着とした。荷重条件および拘束条件は、片脚に全体重をかけた体勢を模擬した条件を設定、100kgfの荷重をかけた。

screw刺入部位は前後方向では中央に、頸部骨軸に平行に設定。冠状面でlag screw位置が、頸部最遠位(calcar直上)のもの、頸部最遠位から5mm、10mm、15mm近位に移動した場合について各々線形解析を行い各症例についてscrew高位別に相当応力、最小主ひずみ比較検討した。

## C 結果

screwがcalcar直上より近位にあるほど大腿骨頸部基部の相当応力は増加しscrew周囲の最小主ひずみの絶対値も増加する傾向は2例とも変わらなかったが、非骨折例では相当応力・最小主ひずみともに骨折例より小さい傾向にあった。(表1)

## D. E 考察・結論

大腿骨転子部骨折治療後のretrospectiveな臨床研究から中心部より近位に刺入されたscrewはカットアウトの確率が高い。これは本研究の結果と合致する。また骨折症例と非骨折症例との比較をすると骨折例では相当応力、最小主ひずみの絶対値ともに非骨折例より高い値となり、骨折例ではscrew刺入高位を厳密にコントロールし、応力・ひずみを最小になるように挿入するべきであると考えられる。本法は患者固有の解析モデルを作成でき、術前計画や術後のリハビリ計画として利用できる利点がある。今後はさらに骨折の存在やscrew骨界面の接触条件を考慮したモデルに発展し解析すべきと考える。

表1 スクリュー刺入位置による相当応力・最小主ひずみの相違

相当応力 (MPa)	スクリュー刺入高位			
	Calcar 直上	5mm 近位	10mm 近位	15mm 近位
骨折症例	16.7	16.8	18.9	18.8
非骨折症例	7.15	8.66	9.88	10.7

最小主ひずみ (x10 <sup>-4</sup> strain)	スクリュー刺入高位			
	Calcar 直上	5mm 近位	10mm 近位	15mm 近位
骨折症例	5.42	7.49	11.8	11.5
非骨折症例	3.71	4.30	4.07	3.84

G 研究発表

1 論文発表

Imai, K., Ohnishi, I., Bessho, M. and Nakamura, K., Nonlinear finite element model predicts vertebral bone strength and fracture site. Spine 2006;31:1789-94.

別所雅彦(東京大学 整形外科), 大西五三男, 松本卓也, 佐藤和強, 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 (1344-9486) 7 巻 3 号 Page343-344 (2005)

松本卓也(東京大学 医学部整形外科), 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 (1344-9486) 7 巻 3 号 Page525-526 (2005)

2 学会発表

(海外)

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. 52nd Meeting of Orthopadic Research Society. Chicago 2006 (0224) Transactions Vol.31, Chicago, IL, 2006

(国内)

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 - 第7回骨粗鬆症学会 2005.10 大阪

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－第 7 回骨粗鬆症学 2005. 10  
大阪

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) 第  
18 回日本臨床バイオメカニクス学会 2005. 10  
北海道

別所雅彦、大西五三男、松本卓也、佐藤和強、  
中村耕三：犬大腿骨欠損モデルに対する CT/有  
限要素法による強度評価 第 14 回コンピュー  
タ外科学会 2005. 11 千葉

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 第 14 回コンピュータ外科学会  
2005. 11 千葉

厚生労働科学研究費補助金（身体機能解析・補助・代替機器開発研究事業）  
分担研究報告書

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	大阪大学大学院医学系研究科器官制御外科学講座講師
研究協力者	米延 策雄	独立行政法人国立病院機構大阪南医療センター整形外科
研究協力者	斉藤 正伸	独立行政法人国立病院機構大阪南医療センター整形外科
研究協力者	前田 ゆき	独立行政法人国立病院機構大阪南医療センター整形外科
研究協力者	中島 義和	東京大学大学院工学系研究科インテリジェント・モデリング・ラボラトリー
研究協力者	佐藤 嘉伸	大阪大学大学院医学系研究科画像解析学
研究協力者	小山 毅	大阪大学大学院医学系研究科器官制御外科学
研究協力者	岡田 俊之	大阪大学大学院医学系研究科画像解析学
研究協力者	陳 延偉	立命館大学大学院理工学研究科
研究協力者	岩崎 祐太	立命館大学大学院理工学研究科

研究要旨

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：

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経路を作成することが必要であるが、現時点では、この整復計画立案の自動化は極めて困難であり、手作業に頼らざるを得ない。そこで、大腿骨頸部骨折の整復計画立案を可能な限り自動化および最適化することを目的とした。その前提条件として、1. 術前の CT 画像を用い、2. CT 画像から各骨片を切り分ける作業は済んでいて、3. 反対側は健常であるとした。前年度の研究では、一つの骨片のポリゴンモデルにて骨折線上の点群を 30 点程度 手作業で選択し、その点群と対応する骨片のポリゴンモデルとの表面-ポイント レジストレーション法により骨片同士の位置合わせを行なう手法を考案した。しかし、この手法では、骨折線上の点群の選択を手作業で行なう必要があった。また、特に骨密度が低い部位では、骨片のポリゴンモデルが不正確なため、対応する骨片で骨折線ではない部分に点群がマッチングすることも多く、位置合わせの誤差は大きかった。さらに、3-part 以上の粉碎骨折の場合で、骨折線が比較的単調な場合は、方向が定まらないために自動整復位置は不良であった。そこで、今年度は、骨片のモデルから骨折線のみを対話的に簡便に抽出するソフトウェアを開発し、骨折線の抽出を可能な限り自動的に行なえるようにした。そして、骨片の骨折線を、対応する骨片の骨折線にマッチングさせるレジストレーション手法を考案した。しかし、骨折線のみを用いて位置合わせを行なう手法では、3-part 以上の粉碎骨折で骨折線が比較的単調な場合は、方向が定まらないために自動整復位置は不良であった。このような場合でも安定した整復位置を得るため、反対側の大腿骨の鏡像の形状にマッチングさせる従来の手法を骨折線による手法と組み合わせて、それらの最適解を得ることにした。大腿骨頸部骨折 4 例の CT 画像を用い、各骨片の切り分けを手作業で行ない、各骨片のポリゴンモデルを作成した上で、反対側大腿骨のみを照合に用いる方法、骨折線のみを照合に用いる方法、および、双方を組み合わせて最適化する方法を比較・検討した。その結果、反対側のみを照合に用いる方法では、左右の大腿骨の非対称性により整復位置の誤差、特に並進の誤差が比較的大きく、並進で 10mm 以上、回転で 10 度以上となることもあった。また、骨折線のみを照合に用いる方法では、3-part 以上の粉碎骨折では、方向が定まらないために回転の誤差が大きくなることもあった。しかし、双方を組み合わせて最適化する方法では、整復位置の結果は安定しており、並進の誤差は概ね 4mm 以内、回転の誤差は概ね 4 度以内であり、許容範囲内であると考えられた。来年度の計画としては、現在、CT 画像からの各骨片の切り分けを手作業に頼っているが、この作業を可能な限り自動化することを模索していく。

## 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。三次元的な整復計画立案を手作業で行なうと多大な手間と時間が掛かるため、可能な限り整復計画立案を自動化することが望ましいが、現時点では、この整復計画立案の自動化は極めて困難であり、手作業に頼らざるを得ない。

骨折整復の自動計画に関しては過去に幾つかの報告があるが [1- 3]、それらは いずれも大腿骨骨幹部骨折などの長管骨骨折を対象としている。本研究で主として対象としているのは、高齢者に多い大腿骨頸部骨折であり、整復手術を必要とする骨折の中では最も頻度が高い。しかし、大腿骨頸部骨折の自動整復計画に関する過去の報告は、我々のグループによる、反対側を利用した整復計画 [4, 5] 以外には見当たらない。その理由としては、長管骨骨折の場合は、各骨片の骨軸を一致させることが整復のための大きな指標となるのに対し、大腿骨頸部骨折の場合は、大腿骨近位部の形状は個人差が大きいために [6]、前捻角や頸体角などの大腿骨頸部の形状に関するパラメータも個人差が大きく、骨幹部における骨軸のような単純な指標を用いることができないからである。

この研究の目標は、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である。その前提条件として、

1. 術前の CT 画像を用いる。
2. CT 画像から各骨片を切り分ける作業 (セグメンテーション) は済んでいる (一部 手作業で)。
3. 反対側は健常である。

ことにした。

前年度の研究では、各骨片のポリゴンモデルを作成した上、一つの骨片のポリゴンモデルにて骨折線上の点群を 30 点程度 手作業で選択し、その点群と対応する骨片のポリゴンモデルとの表面-ポイント レジストレーション法により骨片同士の位置合わせを行なう手法を考案した。しかし、この手法では、骨折線上の点群の選択を手作業で行なう必要があった。また、特に骨密度が低い部位では、骨片のポリゴンモデルが不正確なため、対応する骨片で骨折線ではない部分に点群がマッチングすることも多く、位置合わせの誤差は大きかった。さらに、3-part 以上の粉碎骨折の場合で、骨折線が比較的単調な場合は、方向が定まらないために自動整復位置は不良であった。

そこで、骨片のポリゴンモデルから骨折線のみを対話的に簡便に抽出するソフトウェアを今年度 開発し、骨折線同士を照合に用いることにし

た。さらに、骨片の骨折線上の点群を、対応する骨片の骨折線にマッチングさせる手法を考案した。

しかし、実際に、骨折線のみを用いて位置合わせを行なってみたところ、3-part 以上の粉碎骨折で骨折線が比較的単調な場合は、方向が定まらないために自動整復位置は不安定であった。また、骨密度が低い大転子部では骨折線がうまく抽出されないという問題もあった。これらのような場合でも安定した整復位置を得るため、骨片を反対側の大腿骨の鏡像の形状にマッチングさせる我々の従来の手法を、骨折線のみによる手法と組み合わせ、それらの最適解を得ることにした。

## B. 研究方法

1. 術前にスライス厚 1.25- 2.5mm の CT 画像を撮影し得た大腿骨頸部骨折 4 症例を対象とした。いずれも、反対側は健常であった。
2. 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 [7] を用いて、セグメンテーション後の CT 画像から各骨片および反対側大腿骨の三次元ポリゴンモデルを作成した。
3. 曲率を利用して、骨片のポリゴンモデルから骨折線のみを対話的に簡便に抽出するソフトウェアを今年度 開発した。このソフトウェアには、造影 CT から血管のみを抽出する方法 [8] を転用した。これを用いて、各骨片のポリゴンモデルから骨折線をポリラインモデルとして対話的に半自動的に抽出した。
4. 骨片を整復する順序に関しては、骨幹部を含む最遠位の骨片に、対応する骨折線が長い順に骨片を合わせて行き、骨片同士を合わせたものを、新たな最遠位骨片とした。
5. 著者の一人の整形外科医が手動で合わせた整復計画を正解の位置とした。
6. 骨片の初期位置を、正解位置から並進 15mm、回転 30 度でランダムに振って設定した上、以下の 3 つの方法により自動整復計画立案を行ない、正解の位置からの並進および回転の誤差を、骨片の重心にて計測した。

(1) 反対側の照合のみによる方法 (従来の方法)

(2) 骨折線の照合のみによる方法

(3) 反対側の照合と骨折線の照合を組み合わせで最適化する方法

(1)の方法では、iterative closest point (ICP)

法 [9] による表面-ポイント レジストレーションを行なった。その際、初期位置合わせは行なわなかった。(2)の方法では、ICP 法による表面-ポイント レジストレーション法を応用して、骨片の骨折線上の点群を、対応する骨片の骨折線に点对線でマッチングさせるレジストレーション手法を新たに考案し、これを用いた。その際、初期位置合わせは行なわなかった。(3)の方法では、各骨片が反対側鏡像に合うように、かつ、骨折線同士も合うように、ICP 法を応用し、距離の誤差が最小となるような解を推定した。その際、まず(2)の方法で求めた位置を初期位置として(1)の方法を適用した。

7. 試行は 50 回 行ない、その平均を求めた。

### C. 研究結果

(1) 反対側のみを照合に用いる方法では、左右の大腿骨の非対称性により特に並進の誤差が比較的大きく、並進で 10mm 以上、回転で 10 度以上となることもあった。また、初期位置に大きく依存していた。

(2) 骨折線のみを照合に用いる方法では、誤差が比較的小さかったが、特に 3-part 以上の粉碎骨折では、回転の誤差が大きくなることがあった。初期位置には依存しなかった。

(3) 骨折線による照合方法と反対側による照合方法を組み合わせて最適化する方法では、整復位置の結果は安定しており、並進の誤差は概ね 4mm 以内、回転の誤差は概ね 4 度以内であった。

### D. 考察

反対側のみを照合に用いる従来の方法では、左右の大腿骨の非対称が大きければ それだけ誤差が大きくなる上に、ICP 法の特性により、初期位置合わせに大きく依存していた。また、骨折線のみを照合に用いる方法では、3-part 以上の粉碎骨折では、骨片の方向が定まらないために、回転の誤差が大きくなることがあった。しかし、骨折線による照合方法と反対側による照合方法を組み合わせて最適化する方法では、整復位置の結果は安定しており、許容範囲内であると考えられた。

来年度の計画としては、現在、CT 画像からの各骨片の切り分けを手作業に頼っているが、この作業を可能な限り自動化することを模索していく。

### E. 結論

術前の CT 画像を用いて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目的とした。骨片の画像から骨折線を簡便に抽出するシステムを開発した。骨折線を照合に用いる方法と反対側を照合に用いる従来の方法とを組み合

わせて最適化する方法を考案した。この方法を用いれば、整復位置の結果は安定しており、許容範囲内であると考えられた。

### F. 参考文献

[1] Gosling T, Westphal R, Hufner T, Faulstich J, Kfuri M Jr, Wahl F, Krettek C. Robot-assisted fracture reduction: a preliminary study in the femur shaft. *Med Biol Eng Comput.* 2005;43(1):115-20.

[2] Koo TK, Chao EY, Mak AF. Development and validation of a new approach for computer-aided long bone fracture reduction using unilateral external fixator. *J Biomech.* 2006;39(11):2104-12. Epub 2005 Jul 26.

[3] Viceconti M, Andrisano AO, Toni A, Giunti A. Automatic fracture reduction with a computer-controlled external fixator. *Med Eng Phys.* 1994;16(2):143-9.

[4] 岡田 俊之, 渡邊 曜子, 中島 義和, 佐藤 嘉伸, 小山 毅, 菅野 伸彦, 米延 策雄, 吉川 秀樹, 越智 隆弘, 田村 進一. 3次元CT画像を用いた反対側に基づく大腿骨骨折整復計画とその精度検証. 電子情報通信学会技術研究報告 [医用画像] Vol.103, No.597, pp.13-8, 2004.

[5] Okada T, Nakajima Y, Sato Y, Koyama T, Sugano N, Yonenobu K, Yoshikawa H, Tamura S. Preoperative Planning for Proximal Femur Fracture Reduction Based on Volume Registration of Contralateral Femur Using 3D CT Data. 4th Annual Conference of the International Society for Computer Assisted Orthopaedic Surgery (CAOS-International), June 2004, Chicago.

[6] Sugano N, Noble PC, Kamaric E, Salama JK, Ochi T, Tullos HS. The morphology of the femur in developmental dysplasia of the hip. *J Bone Joint Surg Br.* 1998;80(4):711-9.

[7] Lorensen WE, Cline HE. Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM Computer Graphics* 1987;21:163-9.

[8] 山本 宗主, 梶本 潤, 堀 雅敏, 佐藤 嘉伸, 村上 卓道, 中村 仁信, 田村 進一. 近傍濃淡情報を用いた分岐点解析による肝臓 CT 画像からの血管 3次元木構造の抽出手法. 信学技報 2006;105(579):MI2005-80, 57-60.

[9] Besl PJ, McKay ND. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans Patt Anal Machine Intell* 1992;14:239-56.

## G. 研究発表

### 1. 学会発表

- 1) Koyama T, Iwasaki Y, Sato Y, Okada T, Chen YW, Sugano N: CT-based semi-automatic planning for proximal femoral fracture reduction using fracture lines and the contralateral femur. 6th Annual Conference of the International Society for Computer Assisted Orthopaedic Surgery (CAOS-International), June 2006, Montreal.
- 2) 岩崎 祐太, 岡田 俊之, 小山 毅, 陳 延偉,

菅野 伸彦, 佐藤 嘉伸: 3次元CT画像を用いた骨折線と反対側形状に基づく半自動骨折整復計画. 第15回日本コンピュータ外科学会, 2006年10月, 東京.

### 2. 論文発表: なし

## H. 知的財産の出願・登録状況

1. 特許取得: なし
2. 実用新案登録: なし

厚生労働科学研究費補助金（身体機能解析・補助・代替機器開発研究事業）  
分担研究報告書

大腿骨骨折整復ナビゲーションシステムの開発

分担研究者 中島 義和 東京大学大学院工学系研究科 助教授

大腿骨骨折整復支援装置に関し、ナビゲーションシステムの研究開発を行った。ナビゲーションシステムは、光学式3次元位置センサ、X線透視撮影装置、および骨折整復支援ロボットと通信を行いながら、術中における骨折部状態の把握、骨折整復経路の計算、および骨折整復支援ロボットの制御を行うソフトウェアシステムである。また、骨折整復ロボット制御法として、骨折整復支援装置の脚把持部（ロボットアーム先端）に装着された力・トルクセンサの計測値を利用した膝関節と足関節の位置姿勢状態推定法を提案し、ソフトウェアに実装した。

A. 研究目的

大腿骨骨折整復支援装置の実用化を目指して、生体内に骨折骨の位置姿勢計測、骨折整復支援ロボットの制御を行うナビゲーションソフトウェアシステムを開発する。

また、脚への荷重と関節の状態に一定の関係があることに着目し、整復支援装置先端部に装着された力・トルクセンサの値（あるいはそれらから計算した脚への荷重）から、脚関節の状態、さらには各下肢骨の相対位置姿勢を推定し、その知識に基づき、より安全で高精度な整復動作制御法を整復支援装置に実装する。

B. 研究方法

ナビゲーションソフトウェアシステムの開発では、(1) 生体内にある骨折骨（骨片）の位置姿勢計測、(2) 骨折整復経路の計算、(3) 骨折整復支援ロボットの制御を行うナビゲーションソフトウェアシステムを開発した。このソフトウェアは、光学式3次元位置センサおよび骨折整復支援ロボット（専用通信プロトコル）を制御し、またネットワークを介してX線透視撮影装置（DICOM通

信）とデータ通信を行う。

また、力・トルクセンサ計測値を利用した整復動作制御法に関しては、健常者ボランティアによる下肢牽引実験を行う。

C. 研究結果

ナビゲーションソフトウェアの開発をいった。動作検証実験は、来年度初旬（5月頃）の実施を予定している。

また、整復動作制御法に関し、脚荷重と各下肢骨間相対位置姿勢の計測値を関数化し、それにより力・トルクから脚関節の位置姿勢推定が行える可能性を確認した。

D. 考察

骨折整復支援ロボットの制御を行うナビゲーションソフトウェアシステムの開発、および力・トルクセンサ計測値を利用した整復動作制御法の提案と実装を行った。X線透視撮影による骨位置姿勢モニタリングなどを実装し、システムの安全性をより向上させる予定である。

E. 結論

より安全、高精度な下肢骨折整復支援装置の実

現に向けて、骨折整復ナビゲーションシステムソフトウェアを開発した。また新しい整復動作制御法を提案し、その実現可能性を示した。

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

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, *in-press* (2006).

##### 2. 学会発表

なし

#### H. 知的財産権の出願・登録状況

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	米延 策雄	独立行政法人国立病院機構大阪南医療センター整形外科
研究協力者	斉藤 正伸	独立行政法人国立病院機構大阪南医療センター整形外科
研究協力者	前田 ゆき	独立行政法人国立病院機構大阪南医療センター整形外科
研究協力者	中島 義和 トリー	東京大学大学院工学系研究科インテリジェント・モデリング・ラボラ トリー
研究協力者	佐藤 嘉伸	大阪大学大学院医学系研究科画像解析学
研究協力者	小山 毅	大阪大学大学院医学系研究科器官制御外科学
研究協力者	岡田 俊之	大阪大学大学院医学系研究科画像解析学
研究協力者	陳 延偉	立命館大学大学院理工学研究科
研究協力者	岩崎 祐太	立命館大学大学院理工学研究科

A. 研究目的 大腿骨骨折は、安静臥床に伴う歩行能力など機能低下や痴呆、肺炎、褥瘡などの合併症を起こさないためにも、手術的に治療を行い早期離床させるのが治療の原則である。大腿骨骨折患者の手術治療は原則的に、徒手の整復および内固定術を施行している。大腿骨頸部骨折手術の成功率は95%以上と言われているが、整復不良、不適切なスクリュー位置、不安定型骨折、骨粗鬆症等の因子が存在すると、合併症の起こる確率は20%以上に上昇すると言われている<sup>1)</sup>。骨折整復不良、不適切なスクリュー位置等の因子が加わることで、術後離床期間の延長、再手術などで高齢者の機能予後を低下させる可能性がある<sup>2)</sup>。よって適切な骨折整復および整復位の保持と適切な位置での内固定が重要である。しかし、従来は骨折整復を2次元のイメージ画像をもとに術者の経験と主観に基づき整復位を決定しているため、適切な骨折整復、および適切な位置での内固定を目指すには、これらの因子を定量化し、分析する必要がある。そこで我々はまず骨折整復操作の定量的解析を行い、最終的には最短で安全な解剖学的整復位を目指してイメージガイダンスシステムとロボット工学を骨折治療に導入することを目標に、骨折整復支援ロボット（FRACROBO）を開発した。

骨折整復支援ロボットは6軸力覚センサを備えたモータを有する介達式牽引整復装置である。動作方法にはナビゲーションによる命令によって作動する自動モード、術者がリモコン操作によってロボットの動作を命令する他動モードの2つのモードを有している。モータ出力に関しては、牽引方向には1332N、回旋方向には70.8Nmの出力を有する。6軸力覚センサユニットは牽引方向には800N、回旋方向には40Nmまでの感度を有する。FRACROBOの安全設計に関しては、術者が緊急にロボットの動作を停止できる緊急非常ボタンを備えると同時に、下肢にかかる牽引力が300N、回旋トルクが25Nmを超えると、下肢にかかる牽引力ならびに回旋トルクを吸収するソケットでFail safe 機能を備えている。FRACROBOを実際の臨床で使用の際に、骨折整復を行うために十分な力およびトルクを骨折整復支援ロボットの出力の設定および骨折整復ロボットの安全性の評価のため、実際の骨折整復患者に必要な牽引力・回旋トルクを計測、さらに健常者に対して下肢への牽引・回旋動作などの整復動作を施行した。これらの予備実験によって骨折整復支援ロボットが骨折整復に十分なカトルクを有し、さらに安全性を備えていることを検証した。

本年度は、骨折整復支援ロボットの自動モードを使用して、実際の大腿骨頸部骨折患者の骨折整復を2例行ったので、それらを報告する。

B. 研究方法 この臨床使用に際して、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、同意を得た患者を対象とした。

症例1. 71歳の男性患者で、右大腿骨転子間骨折 (EVANS分類Type1, group1) を受傷された。既往歴に脊髄梗塞を認め、両下肢不全麻痺を認めた。術前の歩行能力はロフトランド杖2本にて屋内歩行が可能であった。受傷後10日目に観血的整復固定術施行。

症例2. 93歳の女性患者で、右大腿骨転子間骨折 (EVANS分類Type1, group4) を受傷された。既往歴は特記事項なし。術前の歩行能力は家人の見守り下にて屋内杖歩行が可能であった。受傷後13日目に観血的整復固定術施行。

整復方法は、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、骨折整復支援ロボットの自動モードを使用して繰り返し施行した。患肢は骨折整復支援ロボットの足部固定具に、反対側の下肢は牽引手術台の足部固定具に固定した。骨折整復支援ロボットの足部固定具に備えた6軸力覚センサにかかる力・トルクを計測、それらを記録した。

### C. 研究結果

症例1：骨折整復に要した牽引量、力、ならびに回旋角度、トルクをそれぞれ図2、図3に表示した。

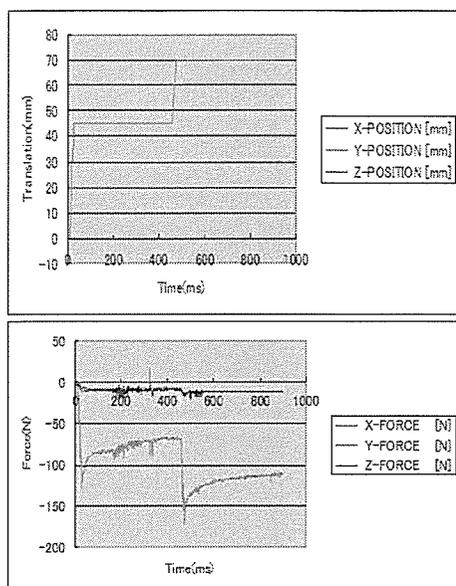


図2. 整復時の牽引距離および牽引力

骨折整復に必要な牽引距離は70mmであった。下肢牽引に伴い、牽引力が急激に上昇し、徐々に定常化することがわかる。骨折整復に必要な最大牽引力は180.3Nであった。

骨折整復に必要な回旋角度は35度、下肢回旋に伴い、B軸のトルクは急激に上昇するが、すぐに低下している。C軸のトルクは徐々に上昇している。骨折整復終了後はカトルクの大きな変動は認められなかった。

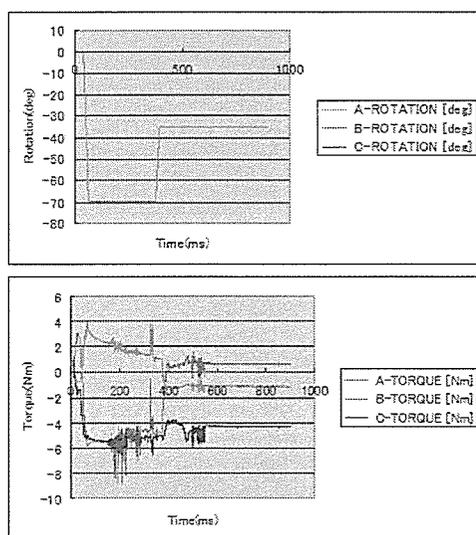


図3. 整復時の回旋角度および回旋トルク

症例2：骨折整復に要した牽引量、力、ならびに回旋角度、トルクをそれぞれ、図4、図5に表示した。

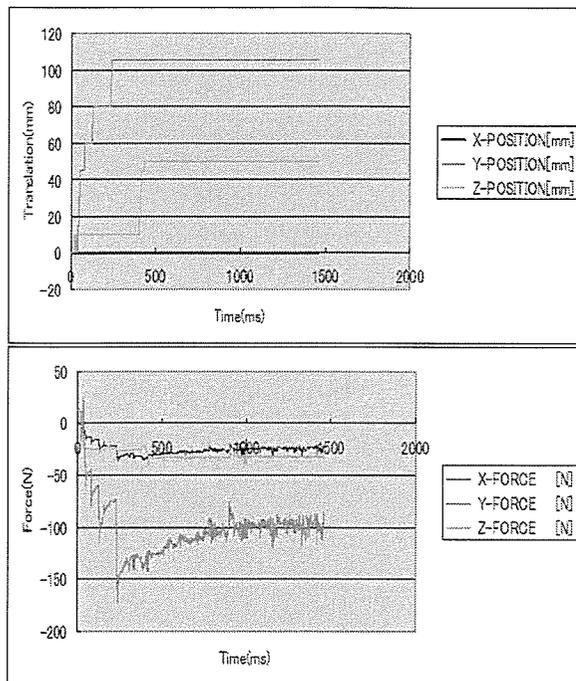


図4. 整復時の牽引距離および牽引力

骨折整復に必要な牽引距離は105mmであった。下肢牽引に伴い、牽引力が急激に上昇し、徐々に定常化することがわかる。骨折整復に必要な最大牽引力は173.8Nであった。

骨折整復に必要な回旋角度は105度、下肢回旋に伴い、B軸のトルクは急激に上昇するが、すぐに低下している。C軸のトルクは徐々に上昇している。骨折整復終了後は力トルクの大きな変動は認められなかった。

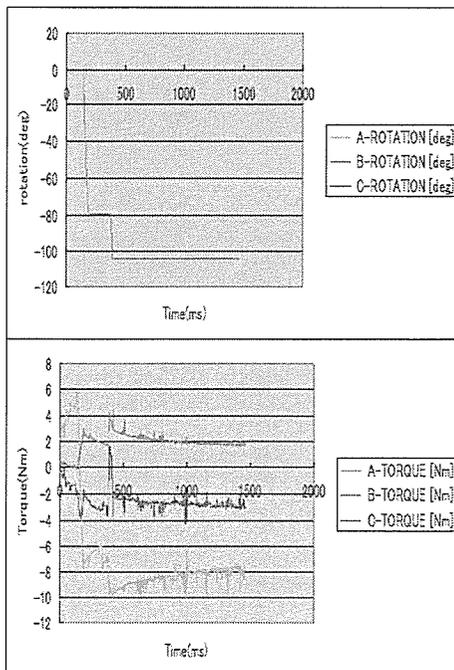


図5. 整復時の回旋角度および回旋トルク

D. 考察 コンピュータ支援手術を利用して、人工関節手術・脊椎手術を臨床使用しているが、大腿骨頸部骨折整復に関して臨床報告はいまだかつてない。また、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、牽引回旋等の操作を行う。今回、我々の開発した骨折整復支援ロボットも足部を固定し、整復操作を行う6軸力覚センサを備えたモータを有する介達式牽引整復装置である。

骨折整復支援ロボットの自動モードを臨床使用したが、安全かつスムーズに整復を行うことが可能であった。患者に特に整復操作によっておこりうる合併症は認めなかった。

この装置を使用することで今まで検討できなかった整復時の移動距離・力・トルクが簡単に記録することができた。これらのデータが、より正確な整復操作のデータが得ることができる可能性がある。ただ現時点では、二次元透視装置を使用して骨折整復の可否を決定しているため、正確な整復ができていないか定かではない。

来年度の課題として、二次元透視装置を使用して骨折整復操作のデータ収集を行うと同時に、正確な骨折整復の判断に、三次元透視装置を使用する方法、イメージガイダンスシステムを使用する方法<sup>4) 3)</sup>を検討中である。可能な限り正確な整復を目指し、整復時の定量的なデータを採取したいと考える。

E. 結論 骨折整復支援ロボットの自動モードを使用して、大腿骨頸部骨折の整復を行った。スムーズかつ安全に整復操作が可能であった。さらに正確な整復を目指し、整復時の定量的なデータを採取したいと考える。

## F. 参考文献

- 1) Alicja Bojan. : Interrelations between critical factors in cut out complications in 3066 patients treated with Gamma Nails. J. Orthop Trauma, Vol.18 (9) Suppl: S21, 2004
- 2) Miller CW. : Survival and ambulation following hip fracture. J Bone Joint Surg Am. 60 (7) :930-934, 1978.
- 3) 中島義和、古結義浩など：骨折整復支援ロボティックシステムにおける画像ナビゲーション：日本コンピュータ外科学会誌5 (3)、307-308、2003
- 4) 岡田俊之、渡辺曜子など：反対側を利用した大腿骨骨折整復計画とその精度検証：日本コンピュータ外科学会誌5 (3)、309-310、2003

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

1. 前田ゆき、菅野伸彦など：大腿骨骨折整復支援ロボットの臨床使用の報告：日本コンピュータ外科学会大会・コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集89-90. 2006
2. 前田ゆき、菅野伸彦、斉藤正伸：大腿骨骨折整復支援ロボットの開発：Hip Joint 6 (32)、259-262、2006

### 2. 学会発表

1. Y. Maeda, N. Sugano et al. : Robot-assisted femoral fracture reduction. 52nd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society
2. Y. Maeda, N. Sugano, et al: Robot-assisted femoral fracture reduction. 2<sup>nd</sup> Asian International Conference on Computer-Aided Surgery
3. 前田ゆき、菅野伸彦など：大腿骨骨折整復支援ロボットの臨床使用の報告：第15回日本コンピュータ外科学会大会

## H. 知的財産の出願・登録状況

1. 特許取得：なし
2. 実用新案登録：なし