

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、50kgf 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、矢状断での lag screw 位置が頸部中央から前方、後方に各 3mm 移動した場合について各々線形解析を行い screw 高位別に相当応力、最小主ひずみ比較検討した。

C. 研究結果

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した。

D. 考察

Gundle らは大腿骨頭内のスクリー位置によるカットアウトの相対危険度は尾側よりも頭側が高く腹側よりも背側が高いと報告した。解析例については、骨頭中央部より下部に screw を刺入した方が頸部基部の相当応力は少なく、スクリー周囲の最小主ひずみの絶対値も小さくなる事、背側よりも腹側の方が頸部基部の相当応力は少なく、スクリー周囲の最小主ひずみの絶対値も小さくなる事が示された。これは上の Gundle の報告と合致する。本法は患者固有の解析モデルを作成でき、術前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すべきと考える。

E. 結論

CT/有限要素法の解析モデルは患者固有のモデルであり、これに 3 次元の骨接合材料インプラントの 3 次元 CAD モデルを挿入することのできる解析システム

を完成した。解析事例では十分に妥当な結果が得られた。本法はさらに骨・インプラントの境界条件の改良また骨折を考慮できるシステムに改良する予定である。

G. 研究発表

1. 学会発表

- 1) CT/有限要素法による手術計画への可能性:松本卓也, 大西 五三男, 別所 雅彦, 大橋 暁, 中村 耕三, 第 14 回日本コンピュータ外科学会, 2005
- 2) 大腿骨頸部の骨強度は画像によるジオメトリ・構造解析で評価可能か? CT/有限要素法による骨強度評価について, 大西五三男 Osteoporosis Japan, 13 巻 Suppl. 1 号, 106 (2005. 09)
- 3) 画像に基づく骨疾患の評価-基礎から臨床まで-マクロ CT と骨力学特性: 今井一博, 大西五三男, 中村耕三, 日本骨代謝学会学術集会プログラム抄録集, 142 (2005. 06)
- 4) Bessho M, Ohnishi I, Matsuyama J, Matsumoto, T, Nakamura, K. Prediction of strength and strain of the proximal femur by a CT based finite element method. The 52nd annual meeting of the Orthopaedic Research Society, 2006 Chicago

H. 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

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

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医工学治療学

研究要旨

高齢者にしばしば起こる大腿骨頸部骨折に対しては、安静臥床に伴う歩行機能・身体機能の低下や痴呆、肺炎、褥瘡などの合併症を防ぐため、徒手整復および内固定術による手術的治療を行ない早期離床をさせるのが治療の原則である。手術的治療においては、適切な骨折整復操作および適切な整復位での内固定が重要であるが、大腿骨頸部骨折の骨折整復操作について定量的に分析されたことは従来なかった。そこで、骨折整復操作の定量的解析を行ない、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、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を開発した。

(I) 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:

骨折整復支援ロボットの出力を決定するために、まず、実際の骨折患者において骨折整復に必要な牽引力および回旋トルクを骨折整復支援ロボットを用いて計測した。次に、骨折整復支援ロボットによる整復動作がヒトの靭帯や関節包などの軟部組織に損傷を加えないかどうかを安全面から検討するために、健常者に対して骨折整復支援ロボットを用いて下肢への牽引・回旋動作などの整復動作を施行し、この際の牽引力および回旋トルクを計測した。実際の骨折患者における計測では、最大牽引力および最大内旋トルクはともに骨折整復支援ロボットの最大モータ出力の範囲内であった。これにより、骨折整復支援ロボットは、骨折整復に十分な出力を備えていることが分かり、骨折整復支援ロボットの出力の有効性および操作性を確認できた。また、健常者に対する整復動作の際の計測では、違和感や疼痛を誘発する最大牽引力および最大内旋トルクはともに、大腿骨頸部骨折患者において骨折整復に必要であった力およびトルクより大きかった。このことから、健常者で疼痛を誘発する平均レベル以下の牽引力およびトルクの出力設定で整復操作を行えば、軟部組織に対する損傷がなく骨折整復を行うことができると考えられ、骨折整復支援ロボットの安全性が確認できた。

(II) 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、術前的大腿骨頸部骨折の CT 画像から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最終目標として、今回は、CT 画像から抽出した骨片の形状から大腿骨頸部骨折の最適な整復計画を自動で導き出すことを目的とした。大腿骨頸部骨折 3 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。一つの骨片にて手作業で選択した骨折線上の点群と、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った。その結果、2-part の単純骨折の場合は、自動整復位置は良好であった。また、3-part 以上の粉碎骨折の場合でも、骨折線の形状が特徴的な場合は自動整復位置は良好であった。一方、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。また、大転子部のように骨密度が比較的低い部分では整復位置は不良であった。これらのことから、今回用いた手法では、2-part の単純骨折では自動整復は成功するが、3-part 以上の粉碎骨折ではうまく行かないと考えられた。そのため、今回用いた手法以外の要素を、骨片同士の位置合わせに用いることが今後必要であると考えられた。

(I) 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

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痲呆、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、骨癒合不全や内固定材の破綻などの起こる確率は 20%以上に上昇すると言われている¹⁾。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²⁾。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、従来は骨折整復を二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かと考える。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指し、骨折整復支援ロボット (FRACROBO) を開発した。FRACROBO 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。動作方法には自動モードと他動モードの 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 70.8N・m 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 40N・m 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 28N・m 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する際に、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が有しているが、人間に対して安全に使用できる範囲に力・トルクに出力を制限する必要がある。本研究では、骨折整復支援ロボットの出力を決定するために、実際の骨折整復患者に必要な牽引力・回旋トルクを計測した。次に骨折整復支援ロボットのもつ出力が人間の靭帯、関節包などの軟部組織に損傷を加えないかどうか検討するために、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、この際

の牽引力および回旋トルクを計測したので報告する。

B. 研究方法

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取り付けた 6 軸力覚センサを用いて、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 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。

C. 研究結果

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 3.2N・m (1.6-4.4N・m)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 2.4N・m (1.2-4.8N・m)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 3.3N・m 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 3.3N・m 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および最大回旋トルクについては、最大牽引力は平均 232.9N (114.0-311.0N)、最大外旋トルクは平均 6.31N・m (1.32-15.56N・m)、最大内旋トルクは平均 7.69N・m (2.28-14.23N・m)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 8.19N・

m、最大外旋トルクは 9.1N・m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 4.69 N・m、最大外旋トルクは 6.33N・mで、男女間で有意差を認めた。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。

D. 考察

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 3.2N・m 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 70.8N・m 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 を麻酔のかかった患者に対し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かんがえられるが、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 7.69N・m 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±50N、内旋であれば 4.7±2N・m 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いたため、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

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。今後、骨折整復の際に FRACROBO のカトルクの出力範囲を制限しながら実際の患者の骨折整復過程の記録および解析を行いたい。

F. 参考文献

- 1) Alicja Bojan. J. Orthop Trauma Vol.18(9) Suppl: S21; 2004
- 2) Charles W. Miller, M.D. J Bone Joint Surg Am 1978; 930-934

(II) 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:

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人の目で画像を判定してマウス操作で合わせるような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。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 [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。また、反対側を利用する方法は、反対側が骨折後、

人工関節置換術後または変形性関節症である場合には使用できない。そこで、CT 画像を用いて、反対側を利用せずに骨折部の断端の形状のみから大腿骨頸部骨折の最適な整復計画を自動で導き出すことが、この研究の目的である。整復計画の作業は大きく分けて以下の 2 段階から成る。

(1) 術前の CT 画像から各骨片を切り分けて抽出する (セグメンテーション)

(2) 各骨片同士の位置合わせを行なう (レジストレーション)

このうち (1) の作業を完全に自動で行なうことは、骨片同士が接触している部分では現時点では相当困難であるため、(1) の作業を手作業を含めて行なった上で、(2) の作業の自動化を行なうことを目的とした。骨片の位置合わせ(レジストレーション)には、CT-based のナビゲーションシステムで広く用いられている、表面-ポイント レジストレーション手法を用いることにした。

B. 研究方法

1. 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。

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 画像から各骨片の三次元表面ポリゴンモデルを作成した。

3. 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。

3-1. 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るように整復を行なうことにした。

3-2. 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 [8] 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。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。

3-3. 2 番目に大きい骨片を最大骨片に位置合わせした後、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。粉碎骨折の場合で骨片が 3-part 以上の場合は、3-1. から繰り返し、全ての骨片の位置合わせを行なった。

C. 研究結果

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。

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。

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。

D. 考察

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が、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。

E. 結論

今回用いた手法では、2-part の単純骨折では自動整復は成功するが、3-part 以上の粉碎骨折では うま

く行かないと考えられた。そのため、今回用いた手法以外の要素を、骨片同士の位置合わせに用いることが今後必要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.* 2005, in press.
- [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. *CAOS (Computer Assisted Orthopaedic Surgery) - International 2004*, 2004.
- [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] Lorenzen WE, Cline HE. Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM Computer Graphics* 1987;21:163-9.
- [8] Besl PJ, McKay ND. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans Patt Anal Machine Intell* 1992;14:239-56.

以下、(I)、(II) 共通。

G. 研究発表

1. 学会発表

- 1) Maeda Y, Sugano N, Saito M, Yonenobu K, Mitsuishi M, Warisawa S: Measurement of Traction Load and Torque Transferred to the Lower Extremity During Simulated Fracture Reduction: 19th Computer Assisted Radiology and Surgery. June 2005, Berlin.
- 2) Maeda Y, Sugano N, Saito M, Yonenobu K, Mitsuishi M, Warisawa S: Measurement of Traction Load and Torque Transferred to the Lower Extremity During Simulated Fracture Reduction: 5th Computer Assisted Orthopaedic Surgery. Jun 2005, Helsinki.
- 3) 前田ゆき、菅野伸彦、斉藤正伸、米延策雄、割澤信一、光石衛: 大腿骨骨折整復支援ロボットの開発: 第32回日本股関節学会. 2005年11月 新潟.
- 4) 前田ゆき、菅野伸彦、斉藤正伸、米延策雄、割澤信一、光石衛: 大腿骨骨折整復支援ロボットの開発: 第14回日本コンピュータ外科学会. 2005年11月 千葉.
- 5) Maeda Y, Sugano N, Saito M, Yonenobu K, Mitsuishi M, Warisawa S: ROBOT ASSISTED FEMORAL FRACTURE REDUCTION-PRELIMINARY STUDIES FOR PATIENTS AND HEALTHY VOLUNTEERS. The 52nd Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society: March 19-22, 2006, Chicago.

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

骨折下肢骨の位置姿勢推定とその知識を用いた整復支援装置の制御方式に関する研究

分担研究者 中島 義和 東京大学 IML 助教授

大腿骨近位部骨折整復支援装置に関し、その制御の安定性・高精度化を目指した下肢骨位置姿勢推定手法について研究を行った。具体的には、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・トルクセンサの値から、下肢骨、特に足先に対する大腿骨と脛骨の相対位置姿勢を推定する手法を提案した。健常者ボランティアによる基礎実験を行い、実現の可能性を示唆する結果を得た。

A. 研究目的

大腿骨近位部骨折整復手術は、通常、足先端を把持する方式（介達式）にて整復を行う。我々が研究している骨折整復支援装置も、骨折骨をワイヤーなどで直接把持する直達式に加え、介達式の機能も装備することを目指す。下肢は膝関節、足首関節など複数の関節を有しており、整復の際、足先端に加えた動作通りには脛骨および大腿骨は動かない。我々は、患者が意図的に運動しない状態においては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た。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、すなわち各下肢骨間の相対位置姿勢を推定し、その知識に基づく、より安全で高精度な整復動作制御方式を整復支援装置に実装する。

B. 研究方法

健常者ボランティアによる下肢牽引実験を行い、脚にかかる荷重と各下肢骨間の相対位置姿勢の関係を計測する。脚固定および牽引は牽引手術台を用いて行い、力・トルク計測は牽引治具にセンサを装着して、各下肢骨の位置姿勢は光学式3次元位置計測装置を用いて行った。実験は、臨床専

門医（整形外科）の監督、指導下において、また被験者への十分な事前説明および承諾を経て行った。

C. 研究結果

脚荷重と各下肢骨間相対位置姿勢の関係には、被験者内における再現性と、被験者間で同様の傾向があることを確かめた。

D. 考察

脚荷重と各下肢骨間相対位置姿勢の関係を、関数化し、さらには患者間の差異を更正する手法を確立しなければならない。また、その成果を知識とした整復動作制御方式を装置内に実装予定である。

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、整復動作制御方式を提案した。基礎実験を行い、その実現可能性を示した。現在は基礎的検討を終えた段階であるが、計測装置の整備や整復支援装置の開発など実験環境は着実に整いつつある。本研究は、装置の臨床適用に際して不可欠であり、早期の確立を目指したい。

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

森泰元ら, “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, pp. 151-152 (2005).

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

Ⅲ 研究成果の刊行に関する一覧表

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	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	105-113	2005
光石衛	Development of a Computer-Integrated Femoral Head Fracture Reduction System	Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics		834-839	2005
光石衛	Computer-Integrated Surgical System	Surgical Robotics 2nd Summer European University			2005
光石衛	Medical Robotics	Taiwan-Japan Bilateral Workshop on Automation Technology		153-177	2005
光石衛	Computer-Integrated Surgical Systems	6th International Workshop on Human-friendly Welfare Robotic Systems		37-80	2005
光石衛	手術支援ロボット	KECセミナー		43-69	2005
光石衛	Computer Integrated Surgical System	Thailand-Japan Technical Transfer Project Symposium			2005
光石衛	コンピュータ統合手術システム	第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会		1147-1148	2005

<p>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</p>	<p>レーザガイダンスの特性解析と三次元位置センサー・一体型システムの開発</p>	<p>日本コンピュータ外科学会誌</p>	<p>vol. 7 No. 1</p>	<p>15-23</p>	<p>2005</p>
---	---	----------------------	---------------------	--------------	-------------