

「骨切り術のための3次元ベース術前計画支援システムの研究開発」

土井章男（ソフトウェア情報学部、教授）、馬渡太郎（浜の町病院、医師）、
一戸貞文（岩手医科大学、准教授）、高柳亮太郎（株式会社インフォコム、社員）

本研究では、整形外科で行われている難易度の高い骨切り術を対象に術前計画支援システムの研究開発を目指したものである。本システムでは、CT画像を対象に、3次元画像処理技術、セグメンテーション技術、メッシュ生成技術、有限要素法技術、形状モデリング技術を応用することにより、医師が骨切り術を安全にかつ正確に行えるようにする。対象とする症例は、股AROと膝HTOである。さらに術前に十分なシミュレーションを行うために、3Dプリンタを用いて、手術前・後の骨の状況を再現可能な環境を構築した。平成26年度は、科学技術振興機構の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)ハイリスク挑戦タイプにより、株式会社岩手情報システム、株式会社インフォコム、浜の町病院、岩手医科大学と共同研究を継続している。

1 研究の概要

膠原病等の治療による弊害やリウマチ、骨変形症により、大腿骨骨頭部分が壊死することで、股関節部分が損傷する（図1）。これらの治療には、大腿骨全置換手術（THA：Total Hip Arthroplasty）が用いられている（図2）。しかしながら、THAで使用される人工関節は、寿命が15年～20年であり、40代、50代の患者に対しては、再度、人工関節置換術が必要になる可能性が高い。しかしながら、再手術では、古い人工関節と一体化した人体骨があるため、人工関節のみを取り出すことが困難であり、骨全体の強度も弱めてしまう。また、固定で骨セメント剤（骨と人工関節を接着・固定する接着剤）を使用している場合、その再手術はさらに困難となる。図1の症例に対して、大腿骨頭回転骨切り術（股ARO）は、骨頭部分の切断・回転のみで、壊死部分を回避するため、術後の経過と回復が素晴らしく、ほぼ元の状態に復帰可能である（図3）。

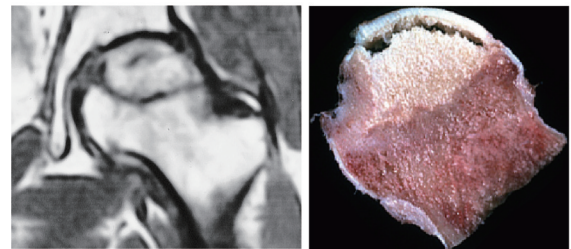


図1 骨頭の損傷と骨頭の切断・回転

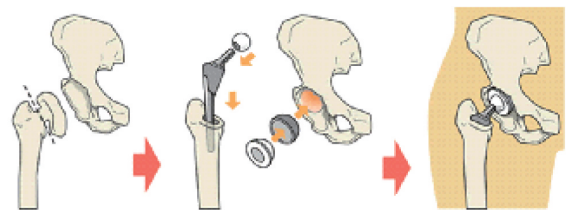


図2 大腿骨全置換手術
(THA：Total Hip Arthroplasty)

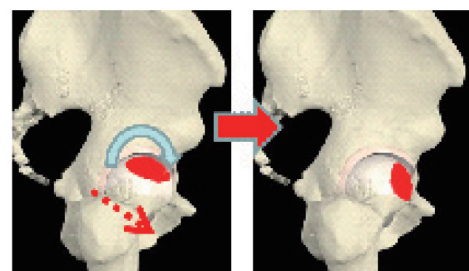


図3 大腿骨頭回転骨切り術（股ARO）

しかしながら、股AROの手術は骨頭部分の切断・回転の位置決めが困難なため、九州大学医学部を中心とした整形外科グループや九州大学医学部から派生した医師グループでのみ、行われているのが現状である。

高位脛骨骨切り術（膝HTO）は、下枝全長の変形度合いにより、骨切り面や角度の指定が困難になってくる。このような難易度の高い骨切り術が広がらない理由の一つは、十分な術前シミュレーションを行えるソフトウェアが流通していないためである。そこで、我々は、整形外科医が容易に使用可能な骨切り術の術前計画支援システムを研究開発し、股ARO等の困難な手術が容易に可能となる医師の増加に貢献するものである。

人工関節モデルの代表的な配置方法には、2Dテンプレティングと3Dテンプレティングがある。2Dテンプレティングは、正面方向と側面方向の人工関節形状を透明なシートに印刷したものを、2次元のレントゲン画像上で配置する。2Dテンプレティングでは、正面方向と側面方向を別々に配置するため、人工関節の配置に矛盾が生じ、また、高さ方向の回転角度の指定（回旋と呼ばれる）も困難である。3Dテンプレティングでは、3次元の人工関節形状モデルをCT画像内で配置する方式であるため、正面および側面の配置では、矛盾なく配置可能である。

2 研究の内容

2次元の画面やタブレット等で3次元物体を取り扱う際に3面図がよく使われるが、複数の切断面配置が必要な場合、その指定は非常に時間を要する作業となる。そこで、我々は、方向性を持たせた線分（方向付き線分（stroke）と呼ばれる）で、切断面をスクリーン上に定義し、法線方向が正となる平面で囲まれた空間のみを切断する方式²⁾を利用する。ここでは、実際の操作手順を説明する。切断面の表裏は下図のように骨切り線の配置順（①→②の順で配置）により、矢印の方向が表になる（図4-A、図4-B）。骨切り面が1枚の場合、切断結果は骨切り面表裏問わず図4-Cのようなになる。

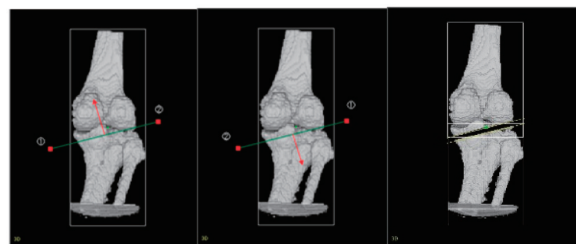


図4 対話操作による切断面指定
(4-A、4-B、4-C)

図5-Aは、延長線を表し、線分を最後まで引く必要はない。図5-B、図5-Cは、それぞれ、2個の異なった向きの切断面で切り取った結果である。この方向付き線分を用いることで、3次元空間の任意領域を画面上（スクリーン）から指定することが可能となる。

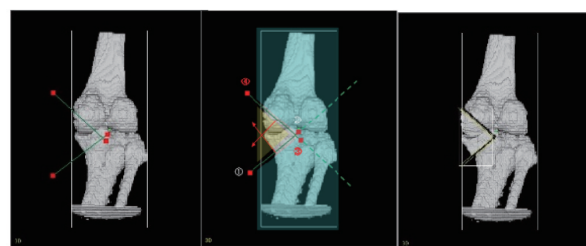


図5 対話操作による切断面指定
(5-A、5-B、5-C)

3 これまで得られた研究の成果

本章では、具体的な人工関節の配置シミュレーション方法について、記載する。研究開発したプロトタイプの名前は、JointVisionと呼んでいる。

Step-1) 人工股関節形状の決定

JointVisionを用いて、人工股関節の配置シミュレーションを行い、形状の妥当性を検証する。この段階で、作成した人工股関節の長さ、角度、太さが適切かを目視で確認する。問題があった場合は、形状パラメータを再設定して、再度、人工股関節形状を変更する。この作業を得た段階で、その人工股関節は、個人の体型に合ったテイラーメイド人工股関節である。さらに次の手順では、術前計画レベルでの詳細なチェックを行う。

Step-2) ポリウム画像の向き調整

JointVisionはCT画像に対して、自由な視点から作業を行うことができるが、人工股関節配置シミュレーションでは、膝蓋骨を正面に表示し、以後の作業において、人工股関節の位置や角度の基準とする（図6）。



図6 正面の調整とインプラントサイズ調整

Step-3) インプラント選択

人工股関節と皮質骨の間が広いとその固定性が不良と成る可能性がある。しかし一方、実際の手術では、皮質骨を削らないといけないような、髓腔に比べて大きな人工股関節では骨折のリスクがあり、また術後の大腿部痛の原因となる可能性もある。したがって、髓腔内におさまり、小さすぎず、大きすぎないサイズを選択が重要である。大きすぎるサイズよりは、一つ小さなサイズが選択される。特にセメントステムでは、少し小さいサイズでもあまり問題はない。

Step-4) インプラントの前捻調整

人工股関節の前捻は、正面から見て30°程度である。ただし、元々の大腿骨頭とステムのヘッド位置があまりにずれる場合は調整する（図7）。

Step-5) 骨切り線の最終決定

骨切り線を決定するためには、以下の注意が必要である（図8）。

- 1) 中殿筋が付着する大転子は残す必要がある。
- 2) 頸部骨切り位置は術後の下肢長を決める重要なポイントであり、もともとの頸部長を考慮してプランニングする必要がある。

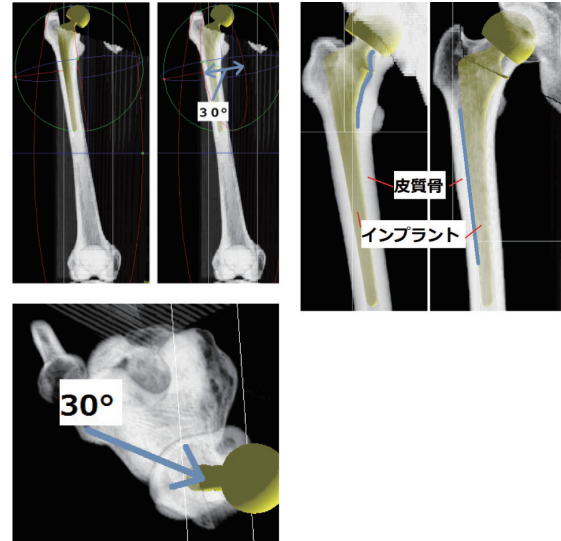


図7 膝蓋骨を正面として30°回転

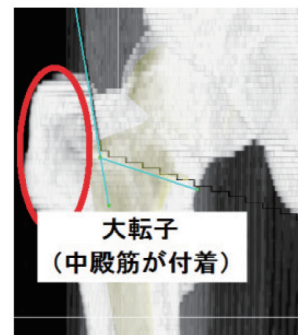


図8 骨切り線の決定

Step-6) インナーキャップの位置と配置

ステムに取り付けられるキャップ部分が骨頭部分に重なるかどうかを確認する（図9）。

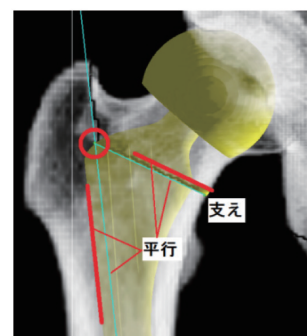


図9 キャップ部分の確認

Step-7) ソケットの位置と配置

骨盤部分にソケットを配置する。骨盤部分に合わせて、ソケットのサイズを決定し、配置場所は骨盤形状から決められる。固定には、骨セメントおよびネジ固定が使用される（図10）。

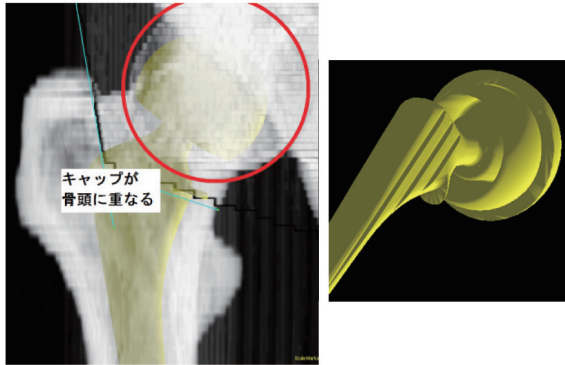


図10 キャップ位置の確認とソケット部分

術前計画支援システムを構築する上で最初の課題は、「骨領域の自動セグメンテーション」であった。医師が容易にシステムを使用するためには、CT画像から、ほぼ全自動（一部の特別な画像において、一部、対話作業が加わる）で、骨盤、大腿骨、脛骨、軟骨の領域を抽出・分離（セグメンテーション）する必要がある。従来、CT画像から、骨領域のみを自動的に抽出することは、骨密度、体型、症例等の個人差があるため、全自動の処理が困難であった。本研究では、全自動を標準とし、パラメータ設定の変更がどうしても必要なときのみ、ユーザが対話的にその操作を行えるように設計した。

具体的には、CT画像に対して、骨領域を指定するパラメータの自動決定プログラムを開発することで、個人差を吸収した。どうしても吸収出来ないケースでは、適切なパラメータをトライアンドエラーで画面を見ながら行う対話方式を採用した。

また、高度なセグメンテーション機能として、領域拡張法とSnakeなどに代表される変形手法を実装した。さらに、システムに学習機能を付加することで、本システムを使えば使うほど、対象となるデータ群に最適化する仕組みを加えている。

2番目の課題は、「iRadシリーズ（DICOM画

像管理システム）」との連携インターフェース構築であった。共同参加企業である（株）インフォコムとの協力を得ながら、DICOM画像管理システムである（株）インフォコムのiRadシリーズと3次元ベース術前計画支援システム間でデータ（2次元画像（レントゲン画像）、3次元画像（CT、MRI）、患者情報など）をやり取りするための連携インターフェース機能とそのユーザインターフェースを構築した。また、他社のDICOM画像管理システムとの連携も可能にするため、出来る限り、汎用的なユーザインターフェースを設計・開発した。

（株）インフォコム以外のDICOM画像管理システムでも稼働させるため、他メーカーのDICOM画像管理システム環境下での過不足部分は、この連携インターフェース機能で吸収する。この方式のメリットは、3次元ベース術前計画支援システム部分は変更せずに、連携インターフェース機能の変更のみで済むため、メンテナンス費用を安く抑えられる。

さらに本システムで作成した術前計画結果は、必要に応じて、実物モデルを造形するために、各種3Dプリンタによる造形機能を追加した。図11は我々の研究室で出力した事例である。大脳と皮膚モデル、骨と筋肉はUV硬化性樹脂、膝関節はABS樹脂を使用している。

研究開発した術前計画支援システムは、浜の町病院および岩手医科大学で試行、各種展示会や研究会において、アンケート調査を行うことにより、問題点の確認とシステムの改良を行っている。

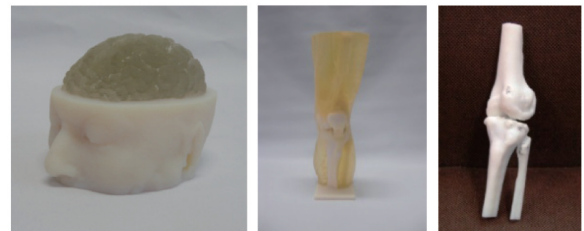


図11 造形モデル

4 今後の具体的な展開

本研究成果は、科学技術振興機構の研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）ハイリス

ク挑戦タイプ（平成25年度）に採択され、株式会社岩手情報システム、株式会社インフォコム、浜の町病院、岩手医科大学との共同研究である（期間は平成25年9月から平成27年3月まで）。本共同研究の目的は、JointVisionの製品化である。

膠原病や免疫疾患による骨の壊死は、年齢が高い場合には人工関節置換術で対応可能である。しかしながら、低年齢の場合（50歳以下）、人工関節の寿命（一般に約15～20年と想定されている）を考慮すると、再置換手術が難しいため（古い人工関節を取り外す際に骨の損失が非常に大きくなる）、人工関節置換術の適応が困難である。このような症例に対して、大腿骨頭前方回転骨切り術（股ARO）などの骨切り術は、骨への栄養も恒常的に確保されるため、術後の回復が良好で、術後、QOL（Quality Of Life）の高い生活が得られている。

しかしながら、人工関節置換術と比較して、手術の難度が高いため、医師の負担や術前計画にも困難が伴い、実施可能な病院が限定されている。この問題を少しでも解決するためには、術前計画の段階で、正確な術前計画案を作成し、術前に十分なシミュレーションを行える環境が必要である。例えば、仮想空間上での骨切前後の結果表示や、術前・術中・術後のシミュレーションを十分行うことで、医療ミスや術後の不具合を減らせると確信する。

5 論文・学会発表等の実績

- 1) A. Doi, H. Takahashi, B. Syuto, M. Katayama, H. Nagashima, M. Okumura, “Tailor-Made Plate Design and Manufacturing System for Treating Bone Fractures in Small Animals”, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 17, No. 4, 2013/4.
- 2) A. Doi, H. Takahashi, T. Kato, T. Mawatari, and S. Ichinohe, “Design of tailor-made hip-joint implants and the stress analysis”, *The 12th Asian Symposium on Visualization (ASV12)*, pp. 215-216(ext. abstract), ASV12-137(DVD), Taiwan, ROC, 2013/5.

- 3) A. Doi, H. Takahashi, T. Mawatari, and S. Ichinohe, “Generation and Applications of CT Images of Ideal Standing Position for Total Knee Arthroplasty Surgery”, *10th Int. Conf. on Modeling and Measurement in Medicine and Biology, BIOMED 2013*, Wessex Institute of Technology, 2013/4.
- 4) 土井章男, 高橋弘毅, 加藤徹, 松井佳一, 田村昌人, 首藤文榮, 奥村正裕, “骨折治療のためのテイラーメイドプレート設計・製造の統合システム”, 日本バーチャルリアリティ学会, 第23回テレマージョン技術研究会, *VR学研報 Vol.19, No. CS-2*, pp. 21-32, 2014/6.
- 5) 馬渡太郎, 池村聡, 松井元, 井口貴裕, 光安浩章, 川原慎也, 土井章男, 高橋弘毅, “大腿骨頭回転骨切り術における骨切り面設定一意図的内反位と前捻角についての検討”, *日本整形外科学会雑誌 (The Journal of the Japanese Orthopaedic Association)*, Vol.88, No.3, 3-Po-374, p. S829, 2014/5.
- 6) 加藤徹, 高橋弘毅, 松井佳一, 土井章男, 坂本尚久, 小山田耕二, “高品質レンダラを用いた整形用術前計画支援システムの研究開発”, 第22回テレマージョン技術研究会, 日本バーチャルリアリティ学会, 2014/2.

6 受賞・特許・解説

- 1) 徳田正幸・伊藤史人・土井章男、膝関節の大腿骨及び脛骨の骨軸自動抽出方法、ならびに骨軸自動抽出プログラム、特願2007-183768、2007.7.12（出願日）。
- 2) 土井章男、“医用画像、工業用CT、歯科用画像から、三次元形状を容易に作成するソフトウェア - Volume Extractor Ver. 3.0”、画像ラボ5月号、2014/5.
- 3) 土井章男、“3Dプリンタの造形技術と医療分野への応用”、映像情報 *Industrial*、45巻、11号、pp. 80-86、2013/11.

7 その他

本研究の一部は、平成25年度岩手県立大学い

わてものづくり・ソフトウェア融合テクノロジーセンター学術研究費、科学技術振興機構（JST）A-STEP、科研費（基盤研究費C、課題番号26350541）、総務省SCOPE地域ICT振興型研究開発より研究支援を受けました。関係部門、関係者各位に深謝の意を表します。