



人工股関節自動手術計画システムの開発

鍵山, 善之

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2007-09-25

(Date of Publication)

2014-05-16

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4079

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004079>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 鍵山 善之
博士の専攻分野の名称 博士（工学）
学 位 記 番 号 博い第 478 号
学位授与の 要 件 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の 日 付 平成 19 年 9 月 25 日

【 学位論文題目 】

人工股関節自動手術計画システムの開発

審 査 委 員

主 査 教 授 多田 幸生
教 授 貝原 俊也
教 授 有木 康雄

近年、グラフィック計算機を用いる新しい整形外科手術計画法が研究開発されている。こうした手法と手術ナビゲーション、手術ロボットを連携させることで正確な手術が可能となってきているが、これは同時に設置計画再現性の低下や計算機上での作業負担の増大招いている。そのため、我々は熟練整形外科医の経験・知識を定式化し、人工股関節手術における人工関節自動設置計画方法を開発した。本論文では、竹盤に埋め込まれる半球形をした人工関節、カップの自動設置計画方法（2章）とそれにより立案される計画に基づき人工股関節全体の手術計画を調整する方法（3章）、およびこうした自動手術計画の運用にあたり必要となる計画データの保存方法やネットワークを利用する運用方法（4章）について記述する。

まず、カップ自動設置計画アルゴリズムは、母床骨厚、カップ涙痕線偏位量、カップC E角、カップ骨被覆率といったカップ固定性と母床骨との接合性を評価する客観的評価基準に基づいている。我々は、カップの最適設置状態を、カップ骨被覆率を最大化し、他の評価基準の制約条件を満たす解と定義する。この解は、解剖学的特徴により限定された3次元領域において探索される。我々は、このアルゴリズムを8症例に適用し、熟練整形外科医と中堅整形外科医の設置計画と比較した。自動設置計画と熟練整形外科医による設置計画の誤差は、設置位置で3.54 mm、サイズで2.26 mmとなった。8症例の自動設置計画の内、7症例分が要求精度を満たす、もしくは要求精度を満たさないが大きくは離れていないと判断され、1症例のみ失敗と判断された。また、カップ涙痕線の閾値を変えて実験を行い、整形外科医の設置傾向にあわせて自動設置計画を調整できることが確認できた。これらの結果からカップ自動設置計画方法はその有用性を示したといえる。今後は、自動設置計画に悪影響を及ぼす骨髄と呼ばれる変形部位を認識し、評価対象から除く方法について検討することになっている。

次に、全体計画調整アルゴリズムは、脚長差、関節可動域の2つの客観的評価基準に基づき、計画の調整を行う。我々は、全体計画の最適設置・配置状態を、脚長差をその閾値内に抑え、必要最小限の関節可動域を満たす解と定義する。人工関節は、複数の部品の組合せで構成されるため、その組合せ内で脚長差、関節可動域の制約条件を満たすものを網羅的に探索する。この探索で最適解が得られない場合は、カップ自動設置計画アルゴリズムで得られるカップ設置可能解の中から、それぞれ脚長差、関節可動域を改善する方向にある解を適用し、探索を行う。脚長差はカップ設置におけるカップの固定性と垂直方向にトレードオフ関係にあり、関節可動域は、カップ固定性と水平方向でトレードオフ関係にあることから、本アルゴリズムでは、人工関節の組合せとカップ設置可能解を用いる垂直方向調整、カップ設置可能解を用いる水平方向調整の順で全体計画

形状特徴からストレートシステムシステムとアノミカルシステムシステムの2種類に分けられる人工関節システムのそれぞれで適用を行い、脚長差では、ストレートシステムの4症例中全症例、アノミカルシステムの11症例中10症例で制約条件を満たす解を得た。また、関節可動域では、ストレートシステムで4症例中3症例、アノミカルシステムで11症例中10症例で制約条件を満たす解を得た。このように両人工関節システムで良好な手術計画結果を得たことから、本アルゴリズムが異なる人工関節システム間においても汎用的に適用できることを示した。これにより、客観的定量評価情報を用い、最適設置・配置条件を定義することで、適切な手術計画を得られる本提案手法の有効性を確かめることが出来た。今後は、関節可動域が狭小化しやすい大腿骨の前捻角の大きい症例に対応するために、カップの前捻角を変更して手術計画を調整するシステムを構築する予定である。

また、現在手術計画システムや手術ナビゲーションシステム、手術ロボット間で手術計画データの受け渡しを行う際、標準化された中間フォーマットが存在しないことから、今回容易にインポート可能なXML手術計画フォーマットを提案する。この規格では、手術計画や手術ナビゲーションに必要な解剖学的座標系や剛体変換行列をXMLファイル内にまとめて保存し、3次元画像データや表面形状モデルファイルに対してはそれぞれリンクを張るようにすることで、一つのファイルで手術計画の全データを保存もしくは関連付けができるようにしている。手術計画において算出された各定量評価値も保存することも可能で、XMLデータベースを用いて、手術計画間の比較を行うことも可能になる。今回は、全体計画調整システムでの結果出力に本規格を採用し、実際にネットワークを介した運用を行った。関節可動域シミュレーション結果を含めた手術計画データでは、データ量が多く、VPNを利用する転送では100Mbps回線で1症例あたり5分から20分程度の時間を要したが、今後1Gbps以上での高速ネットワーク接続が一般化するのに伴い、改善すると考えられる。また、近年インターネットブラウザにおいても、Ajaxなど高い水準の対話的操作を行えるようになってきていることから、手術計画システムのフロントエンドサーバーを構築し、手術計画でのモデルデータをサーバーに残したまま、画像や映像情報をやり取りすることで閲覧する方法も検討することになっている。今後は、手術ナビゲーションシステム開発メーカーと本手術計画データフォーマットの入出力を各手術支援システム上で実装し、臨床適用に向けた準備を行うことにしている。

本論文は上記の内容に基づき、

- 1章 緒論
- 2章 カップ自動設置計画アルゴリズム
- 3章 カップ設置可能解を用いる全体計画調整アルゴリズム

- 4章 人工股関節手術計画XMLデータフォーマットの策定と手術計画システムの遠隔化
- 5章 結論
で構成される。

氏名	鍵山 善之		
論文題目	人工股関節自動手術計画システムの開発		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	多田 幸生
	副査	教授	貝原 俊也
	副査	教授	有木 康雄
	副査		
			印
			印
要 旨			
<p>計算機と情報工学・システム工学の進歩に伴い、情報技術・システム技術が様々な分野に適用されるようになってきた。医学の分野においてもこれらの技術の適用は不可欠となっている。整形外科では、骨折や関節症の治療法として損傷や変形のある病的な股関節を人工関節に置き換えることで関節機能を改善させ除痛を行うものがある。CTによる2次元画像を基に3次元的に複雑な形状の人工関節を3次元的に自由度の大きい生体内に設置するには整形外科医の経験・知識によるところが大きかった。本論文は3次元画像解析によって人工股関節手術における熟練整形外科医の経験・知識の定式化を行い、それを計算機に実装することで人工関節設置計画の自動化を図るものである。</p> <p>まず、第2章で骨盤側の人工関節カップ自動設置計画アルゴリズムを示している。母床骨厚、カップ涙痕線偏位量、カップCE角、カップ骨被覆率といったカップ固定性と母床骨との接合性を評価する客観的評価基準に基づいて適切な設置状態を定義し、骨盤の解剖学的特徴から探索範囲を限定し、効率的に設置解を見つける方法を提案している。これにより、整形外科医がおおむね了承可能な解を8症例中7症例得ることができ、本提案手法が変形股関節に適用可能であることを示している。</p> <p>次に、第3章では、骨盤側と大腿骨側それぞれの骨に埋入・設置される人工関節の設置自動計画から仮想的な人工股関節を仮想空間内に構成し、最終的な人工関節の配置・設置状態を調整する全体計画調整方法を提案している。この調整のための客観的評価基準として、関節全体で評価される脚長差と関節可動域を用いている。関節の動的評価には、標準化されている健常股関節の動作定義を人工関節用に拡張し、また骨形状モデルも人工関節置換時に骨切・掘削される部位を仮想的に除去することで、より現実的な股関節モデルを作り出して行っている。人工関節の組み合わせのみでは調整できない場合には、設置可能性の大きいカップ設置計画解で評価値が改善される方向に存在するものを順次適用して、適切な人工関節の配置・設置計画を得ている。これにより、15症例中13症例で客観的評価基準の制約条件を全て満たす計画が得られていることから、本手法の有効性を示しているといえる。</p>			

氏名	鍵山 善之
<p>最後の第4章では、前述のような3次元設置計画をまとめて保存し、手術ナビゲーションシステムや手術ロボットと手術計画データを相互に受け渡しすることを可能にする中間フォーマットとしてXMLを用いる手術計画データフォーマットを規格化している。これは、様々な解析・評価機能を持つ手術計画システムでの各評価値データも含めて保存できるもので、今後のシステム運用にあたり、各システム間で情報を共有するのに役立つと考えられるものである。</p> <p>以上のように、本論文は、計算機上で人工関節置換後の人工股関節を仮想的に構築し、骨形状モデル上で定義される客観的評価基準を用いて人工股関節手術計画全体を自動的に調整するアルゴリズムを提案するものであり、それによって整形外科医の意見を基に設定された制約条件を満たす設置計画を示せたことから、人工股関節・3次元手術計画における新しい知見を得たものとして価値ある集積である。近年、グラフィック計算機を用いる新しい整形外科手術計画法が研究開発されている。本論文で示された自動手術計画システムと手術ナビゲーション、手術ロボットを連携させることで、客観的に構築された手術計画に基づいてより正確な手術が可能となると期待される。</p> <p>よって、本研究は人工股関節・3次元手術計画の自動化の実現を可能とするものであり、学位申請者の鍵山善之は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。</p>	