

# 高操作性を有する人工膝関節置換術支援ロボットに関する研究

東京大学工学部機械工学科 光石杉田研究室 ○大津明範 江口透 山本江 杉田直彦 ◎光石衛

## 要旨

人工膝関節置換術において術者の支援を行う半自動型骨切除ロボットの研究を行った。高操作性を有する機構を開発するために術者の動作を大別し機構の役割分担を行うことを設計コンセプトとして機構の設計及び製作を行った。高操作性の定義として意思に沿った動作が可能であることと機構学的項目を設定した。解析や評価実験により定量的・主観的評価を行い、コンセプトや要求仕様を満足していることを確認した。

## 1. 背景と目的

変形性膝関節症の治療法である人工膝関節置換術では、良好な術後成績を残すために高い精度での骨切除が必要となるが、手技手術では精度が低い、侵襲が大きいといった問題がある。これらの問題を解決するため、ROBODOC[1] やMAKOplasty[2]等のロボットによる支援システムが開発されている。そのようなシステムを対象とし、骨切除精度向上や低侵襲化についての研究が数多くなされている一方で、操作性向上のための指針などはあまり存在しない。

本研究では、最小侵襲手術による人工膝関節置換術とする半自動型骨切除ロボットの開発を目的とする。設計コンセプトを示し評価モデルを製作し評価を行う。なお、本稿の内容のうち登壇者機械設計において分担し並進機構部のみを設計し、他の内容についてはすべてを担当した。

## 2. 高操作性を有する機構の設計

### 2.1. 概要

本研究で設計する骨切除ロボットは、人工膝関節置換術において術者がロボットアーム先端の術具を把持し操作を行い、術者が正しい切除範囲のみを切除するよう支援を行う。切除範囲外に術具が侵入しようとした場合、骨切除ロボットが力を制御し術者の動作を停止する。

骨切除ロボットの設計において要求仕様（高さ 1.8 m 以内、幅 1 m 以内、重量 350 kg 以内、膝関節を中心とした一辺 0.2m の立方体のワークスペース、高操作性を有する機構）と制約条件（並進誤差 2 mm 以内、6 自由度以上、術者作業領域及び術視野の確保）を設定する。精度が良く安全な手術動作を行うためには、骨切除ロボットが術者の意思に沿った動作が可能であり高操作性を有する機構である必要がある。特に本研究では高操作性を以下のように定義した。

- 1) 術者の意思に沿った動作が可能である、特異点がない
- 2) 機構学的項目として十分な可動域がある、術中の動作を大別できる

### 2.2. 設計コンセプト

本研究の骨切除ロボットが行う最小侵襲手術では小さな開創領域から術具を挿入するため、術具の姿勢を頻繁に変えながら手術を行う必要がある。このため、骨切除ロボットは術具の姿勢を小さな動きで容易に変更できることが求められる。そこで術中の

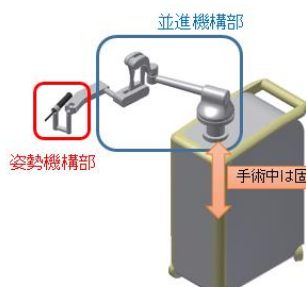


図1 提案機構

動作を 1) 術具の並進位置決定と、2) 術具の姿勢決定というそれぞれ独立した動作に大別し、機構に各動作のための機能を分担させる。並進位置決定を担当する並進機構部をロボットの根元側に配置し、術具の姿勢決定を担当する姿勢機構部を先端に配置することで、姿勢決定の際に動作が容易になり、ロボットの動きを小さくすることができる。

### 2.3. 提案機構

設計コンセプトを基に機構を設計した。並進機構部に平行リンク機構を採用することで術具の姿勢と手首の姿勢を一致させることができる。受動関節をもつモックアップを製作し医師に設計コンセプトの評価を得た。姿勢や視野が干渉しているという評価に基づいて並進機構部のアーム部のオフセットやアーム部の角度をつけることで、平行リンク部と術者の距離を設けた。

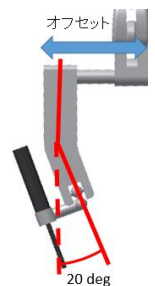


図2 アーム部

## 3. 提案機構の解析・主観的評価

制約条件に関する評価するために設計したモデルに対して有限要素解析と動作シミュレーションを行った。

### 3.1. 有限要素解析

有限要素解析では重力と切削反力によるたわみ解析を行い、制約条件である並進誤差が 2 mm 以内を満たすかを解析により評価した(図2)。反力は 30 N とし術具先端に対して各軸方向に加重し、術具先端の移動量からたわみによる並進誤差を求めた。最大たわみは術具先端で起こり、z 方向に荷重したときで 1.150 mm であり、制約条件である並進誤差 2 mm 以内を満たした。

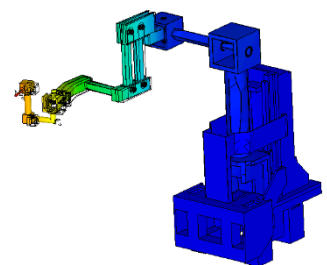


図3 有限要素解析

表1 有限要素解析結果

	たわみ
重力のみ	0.233 mm
x 方向荷重	1.150 mm
y 方向荷重	0.419 mm
z 方向荷重	0.229 mm



図4 動作シミュレーション

### 3.2. 動作シミュレーション

動作シミュレーションでは自動関節を持つ骨組みを用いて医師が術具を操作することで術具経路を計測し、計測した点を用いて手術の動作を再現した。これにより最小侵襲手術が可能なワークスペースを保持しているか、ロボットが視野を制限するかの評価を行った。術具が到達することができなかった点は存在せず、ワークスペースは十分であった。また、術者の視点から評価することにより、機構は視野に干渉する範囲は小さく、視野が十分に確保されていることが確かめられた。

## 4. 設計コンセプトに基づいた機械設計

### 4.1. モータの選定

本研究の骨切除ロボットは、面拘束を行い正しい切除範囲を切除するよう術者に対し力覚によって知らせ、術者が切除範囲外に術具を侵入させようとするとモータ制御によって動きを止め、切除範囲外に術具を侵入していることを知らせる。ここでモータ制御による荷重は方向性を持って与えられ、全軸がブレーキをかけるのではなく、切除範囲との境界を切除する際には、範囲外には術具が侵入しないが、それ以外の方向には自由に動き切除が可能である。将来的にモータを設置することを考え、モータの選定を行ったが、今回は機構の操作性の評価を行うことを目的としてポテンショメータを設置することにより捜査中の関節角度を測定する。

### 4.2. 機械設計

提案機構に基づいて機械設計を行い、ポテンショメータを設置した評価モデルを製作した。

設計では小型化と軽量化を考慮し、カウンターウェイトを設置することで、回転軸上に重心が位置し、動作時にロボットの重さが影響しないよう考慮した。高さ最大 1.63 m、幅 0.63 m、重量 70 kg であり、要求仕様を満たしている。

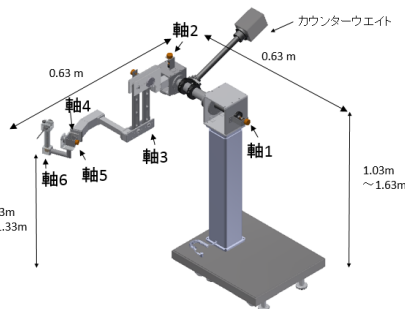


図5 評価モデル

### 5. 操作性の評価実験

設計コンセプトを検証するために動作範囲の検証、定量的評価及び主観的評価を行った。

#### 5.1. ワークスペースの検証

術具先端の動作範囲を測定することにより、要求仕様のワークスペースを満たしているかを検証した。術具を自由に動かし術具先端位置を測定した。実験では術具にマーカを取り付け、3次元位置計測器(Polaris)を用いて測定を行った。図7に示すように術具先端の動作範囲は要求仕様である膝関節を中心とした一辺 0.2m の立方体のワークスペースを満たしていることが確認された。



図6 評価実験

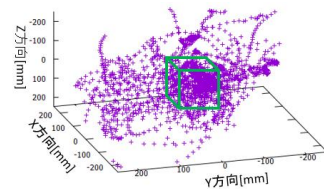


図7 ワークスペースの検討

#### 5.2. 定量的評価

医師が評価モデルを用いて手術動作を行って6つの面に対して切除動作を行い、図9のようにロボットの関節角度の時間変化を求めた。赤色の領域は並進位置決定を表し、青色の領域は術具の

姿勢決定を表す。術具の姿勢決定により切除を行っているとき並進機構部である軸1, 2, 3の関節角度変化が小さいことがわかった。

これは切除動作中には並進機構部の動作が小さいことを示し、設計コンセプトである機構の役割分担が行われていることが確認された。

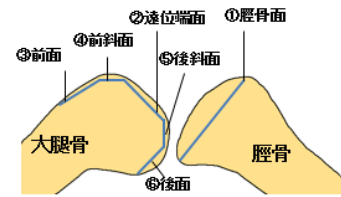


図8 切除平面

骨切除ロボットの可動域を取得したところ、軸2, 3, 5には構造的な可動域の制限が存在し、特に軸5の可動域は評価実験によって軸の動作範囲を満たしておらず、ロボットの可動域により動作が制限されていた可能性がある。

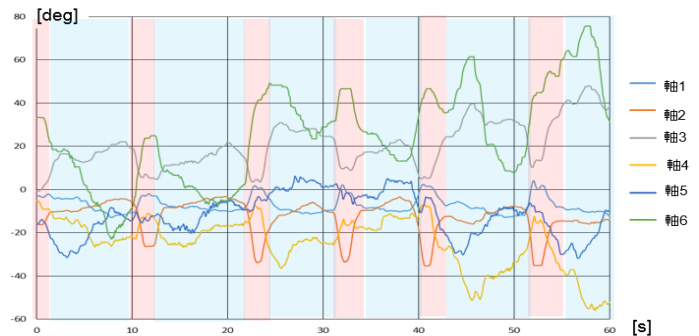


図9 関節角度の時間変化

### 5.3. 主観的評価

機構の操作性について医師3名から主観的評価を得た。「術者の意図に沿った動作が可能か」についてはどちらかと言えば可能であったという評価であり、操作性が低くなった要因としては軸5の可動範囲が限られていることが挙げられた。また軸4が手首の回転軸に対応しておらず、使いづらいという評価が得られた。また「動かしにくい点はあったか」については、存在しなかった。

「視野が確保されていたか」については、術具先端が内側を向く作業時に視野が阻害されたが、それ以外では視野が確保されているという評価が得られた。「姿勢の制限があったか」については削る面により把持部の持ち方に制限があったが、他の機構部が術者を干渉することはなかった。

以上の評価により高操作性を有する機構であることが確認されたが、術者の操作方法により視野の干渉や軸の可動域の制限が存在し、詳細の設計改善が必要であることがわかった。

## 6. 結言

設計コンセプトに基づいて提案機構を設計し、解析により要求仕様を満たしていることを検証した。そして評価モデルを製作し評価実験により設計コンセプトを満たしており、高操作性を有するか定量的や主観的に評価をした。その結果操作性は良好だが、可動域の制限などを考慮した再設計を行い、機構の改善が必要であることがわかった。

今後はモータを設置した評価モデルを用いて、モータ制御による手術支援システムの開発を行う。

### 参考文献

- [1] TAYLOR, Russell H., et al. Computer-integrated revision total hip replacement surgery: concept and preliminary results. *Medical image analysis*, 3,3: 301-319, 1999.
- [2] PEARLE, Andrew D et al., "Robot-assisted unicompartmental knee arthroplasty," *The Journal of arthroplasty* 25(2), 230-237, 2010.