

1917 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

Study on a surgical robot with high operability for total knee replacement arthroplasty

○学 吉原 馨（東大） 学 大津 明範（東大院）

正 山本 江（東大） ○正 杉田 直彦（東大） 正 光石 衛（東大）

Kaoru YOSHIHARA,^a Akinori OTSU,^a Ko YAMAMOTO,^a Naohiko SUGITA,^a Mamoru MITSUISHI,^a

^aUniversity of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Key Words: Surgical robot, TKA, Operability

1. 緒言

人工膝関節置換術において、手技手術では医師の技量を必要とし、十分な精度が達成できていない例も多い⁽¹⁾。また術野を視認できる開創領域が必要となるため侵襲が大きいという問題もある。上記の問題を解決するためロボットによる支援システムが開発されている。支援システムの中には全自动で高精度な骨切除を行うことができる ROBODOC⁽²⁾があるが、開創領域が大きく手術時間も長いという問題がある。また触覚ガイド等で術者の支援を行う半自動型の MAKOplasty⁽³⁾が開発されており、ROBODOC に比べて短い時間での低侵襲手術が可能であるが、精度のばらつきが大きい。そのため高い切除精度を維持しつつ術者が操作しやすい機構の開発や支援のためのロボット制御が重要になる。

本研究では、最小侵襲手術による人工膝関節置換術において高操作性を有する半自動型骨切除システムの開発を目的とする。簡易モデルの試作と評価を経て、高操作性を有する機構を提案し、実験にて評価する。

2. 高操作性を有する機構の提案

2.1. 要求仕様と制約条件

本研究では、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て操作し、術者が正しい切除範囲のみを切除するよう支援を行うことを目標とする骨切除ロボットの設計を行う。骨切除ロボットは要求仕様(高さ 1.8 m、幅 1 m 以内、重量 350 kg 以内、清潔部と不潔部の分離、骨切除ロボット各軸における十分な可動範囲、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、術者作業領域及び手術視野の確保)を満たすことが求められる。要求仕様の高操作性は主観的項目(直感的な動作が可能)と定量的項目(位置変化と姿勢変化の動作の大別、特異点がない)によって定義する。

2.2. 設計コンセプト

2.2.1. 位置調整と姿勢調整の機能の分担

骨切除ロボットは小さな動きで容易に術具の姿勢を変えられることが求められる。手術中の動作を大別し、術具の並進位置決定を行う位置調整機構と、術具の姿勢を決定し切除動作を行う姿勢調整機構という 2 つの機構で分担することで、主に姿勢変化動作で行われる切除動作時のロボット全体の動きが小さくなり、術具の姿勢変化が容易になることで、操作性を向上させることをコンセプトとする。

2.2.2. 手首と機構の回転中心の一致

Fig. 1 に示すように人間の手首の回転動作は回内・回外、掌屈・背屈、撓屈・尺屈の 3 つに分けて考えられ、その回転中心は手首にある。手術において骨切除は主に術者の手首を

回転中心とした姿勢変化動作によって行われていると考えられる。手首と姿勢変化を担う機構の回転中心が一致している場合、手首の姿勢変化中も位置調整機構は動作せず、手術中の動作を位置調整機構と姿勢調整機構で分担するという本研究のコンセプトを実現できる。

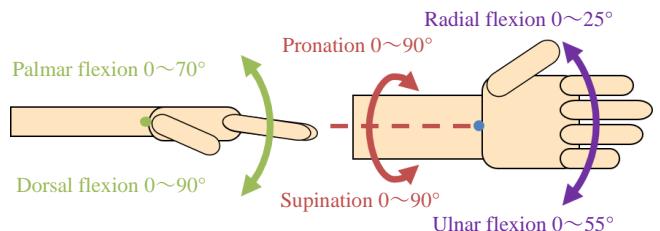


Fig. 1 Rotation of wrist

2.3. 従来の機構

先行研究⁽⁴⁾では、最小侵襲手術を対象とした人工膝関節置換術支援ロボットの研究を行った。高い操作性を持った機構を設計するために、Fig. 2 に示すように術具の姿勢決定を行う姿勢調整機構と並進位置決定を行う位置調整機構を設け、二つの機構が独立した動作をする機構を提案した。姿勢調整機構は右手の回転動作に対応する。また位置調整機構は右手の並進動作に対応し、平行リンクを採用することで手首の姿勢の追従が可能となる。課題として、従来の姿勢調整機構では Fig. 3 に示すように機構の回転軸と手首の回転軸が一致していない軸があり、二つの機構の動きが完全には独立していないため、操作性が低下しているということが挙げられた。また、ロボットがある特定の姿勢をとったときに機構が術者の視野に干渉していることや、尺屈の回転動作に対して可動範囲制限があることを改善する必要がある。

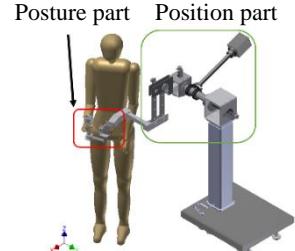


Fig. 2 Previous mechanism

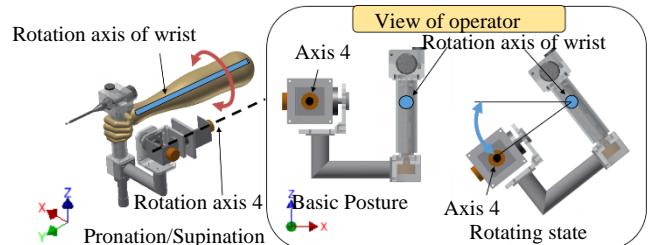


Fig. 3 Mismatch between rotation axis of wrist and robot's arm

2.4. 姿勢調整機構の提案

2.4.1. 1つの軸に平行リンクを採用したジンバル機構

機構と手首の回転中心を一致させるための機構として3軸のジンバル機構が挙げられる。手首の回内・回外、掌屈・背屈、撓屈・尺屈の回転をジンバル機構の3つの軸で担うこととで手首の回転動作に対応できる。しかしFig.3に示すように術者の腕の位置を考えると3軸のジンバル機構を本研究室の骨切除ロボットに用いることができない。そこで術者の腕とロボットアームの干渉を回避するためにジンバル機構の1つの軸に平行リンクを採用する。この機構を用いることで、術者の腕の位置を考慮し、なおかつ手首と機構の回転中心が一致した機構を実現できると考えられる。

2.4.2. 姿勢調整機構の提案

機構と手首の回転中心を一致させるため、Fig.4に示す1つの軸に平行リンクを採用したジンバル機構を姿勢調整機構に提案する。提案した姿勢調整機構について機械設計を行い、評価モデルを作成した。設計においては従来の提案機構における課題点も解消するよう考慮した。Fig.5に示すように位置調整機構と姿勢調整機構はそれぞれ3つの軸からなり、各軸にはポテンショメータを取り付けて関節角度を計測する。

Rotation center of wrist and robot

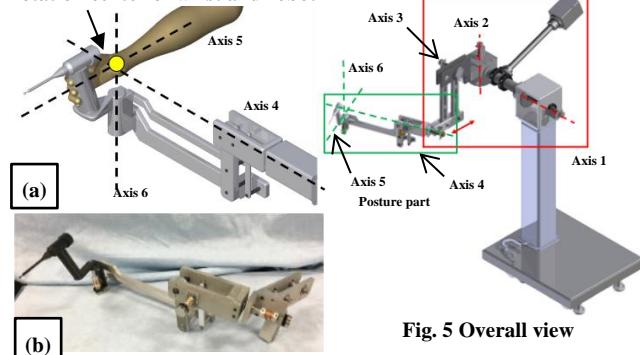


Fig. 4 Proposed mechanism.

Fig. 5 Overall view
of the proposed robot.

3. 操作性の評価実験

3.1. 定量的評価

定量的評価では、骨切除ロボット各軸における可動範囲、操作性（位置変化と姿勢変化の動作の大別、特異点の有無）を評価する。医師に手術中の動作や手首の位置を固定した姿勢変化動作をしてもらい、ポテンショメータで位置調整機構と姿勢調整機構の各軸の関節角度を計測した。結果をFigs.6, 7に示す。手術中の動作における位置調整機構の各軸の関節角度はFig.6より変化が小さいことがわかる。また手首の回内・回外、掌屈・背屈、撓屈・尺屈のそれぞれの回転について、姿勢変化中における位置調整機構各軸の関節角度は変化が小さかったことから、位置変化と姿勢変化の動作の大別ができるることを確認した。Fig.7には回内・回外の回転時における位置調整機構の関節角度の時間変化を示す。

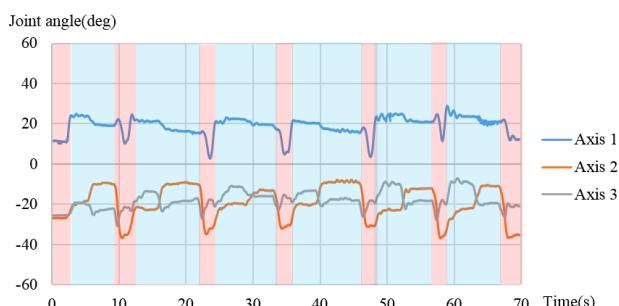


Fig. 6 Joint angle of position part during surgery motion.

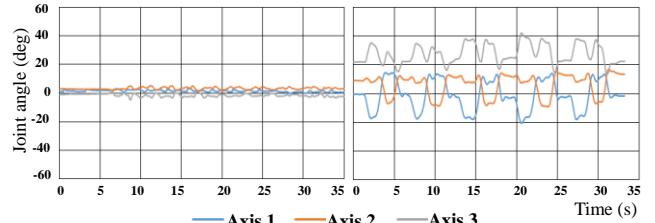


Fig. 7 Joint angle of position part during pronation/supination.

3.2. 主観的評価

アンケートを用いて医師による主観的評価を行った(Fig.8)。操作性に関して提案した機構は直感的な動作が可能であるという評価を得た。術者作業領域の確保について、予備実験で指摘された足固定具に干渉してしまう部分と掌屈背屈の際に大きく動いてしまう機構は共に大きく動いてしまう機構は共に

解消されたが、脛骨大腿骨の内側を切除する際に姿勢が制限されるという意見を得た。最小侵襲手術を対象とするため完全に制限をなくすことは難しく、多くの動作中で制限はなかったと言える。また昇降軸で機構の高さを調節することによって回避できる可能性もあり、今後の検討が必要と言える。手術視野の確保については5人中4人の被験者が十分に確保されていると回答するなど、高い評価を得られた。その他では、実際に手首と機構の回転中心が合っていない、持ち手が太いほうが良い、という意見も得られた。以上より、提案した機構が高操作性を有することがわかったが、個人差を考えた設計をすることでさらに操作性がよくなる可能性がある。



Fig. 8 Operability experiment.

4. 結言

設計コンセプトに基づいて簡易モデルの製作と評価を行い、得られた結果から高操作性を有する機構の提案をした。提案した機構の評価モデルを製作し、実験で定量的評価と主観的評価を行うことで提案した機構は設計コンセプトを満たしていくおり、高操作性を有することを確認した。今後は機構の修正を行い、モータを搭載して手術支援のための制御に移行していく。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 16H02319 の助成を受けたものです。

参考文献

- (1) M. Flören, et al., *The Journal of arthroplasty*, vol. 22, no. 6 Suppl 2, pp. 51–7, Sep. 2007.
- (2) TAYLOR, et al., *Medical image analysis*, 3.3: 301-319, 1999.
- (3) PEARLE, Andrew D et al., *The Journal of arthroplasty* 25(2), 230-237 (2010).
- (4) 大津ら，“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,” 精密工学会第 23 回学生会員卒業研究発表講演会, 2016.