RAO 支援システムにおける空間確保マニピュレータの開発

～予備実験からの試作, および軟組織剥離評価実験～

Development of Muscle Retracting Manipulator for RAO

柳原勝(学生会員)^{a*}, 岡本淳^a, 石井猛^b, 桃井康行^b, 三井教寛^b, 矢野英雄^c, 藤江正克^a

^a早稲田大学理工学研究科

^b日立製作所

^c富士温泉病院

Masaru Yanagihara ^a, Jun Okamoto ^a, Takeshi Ishii ^b, Yasuyuki Momoi ^b, Norihiro Mitsui ^b, Hideo Yano ^c, Masakatsu G. Fujie ^a

^a Waseda University, Department of Mechanical Engineering

^b Hitachi, Ltd.

^c Fuji Rehabilitation Hospital

Abstract

Hip joint surgeries are commonplace in our aging society. In this paper a prototype of a muscle retracting manipulator for minimally invasive RAO (Rotational Acetabular Osteotomy and one of the hip joint surgeries) is described. The muscle retracting manipulator's role is to make a surgical space between muscles and the surface of bone around hip joint for the other manipulator whose role is to cut bone. The mechanical structure is very thin to follow narrow path and tough enough to peel muscles around hip joint. Peeling force of periosteum by using a raspator (a conventional peeling tool of periosteum) were measured as a preliminary experiment. The prototype of the manipulator was composed from the result. Evaluation of the prototype was done on a porcine iliac bone.

Key words

Rotational Acetabular Osteotomy, Manipulator, Minimally Invasive Surgery, Peeled soft tissues.

1. はじめに

世界中で高齢者だけでなく, 多くの若者が股関節の変形症による歩行時の痛みに悩まされ, 大きな手術と, 手術後に長期間のリハビリを必要としている。

股関節手術は, 大きく分けて 2 種類の手術法に分かれる。1 つは人工股関節置換術, もう 1 つはノミなどにより股関節の形状を整える骨切り術である。

前者の人工股関節置換術では, 術前計画に基づいたナビゲーションと骨切削用マニピュレータを組み合わせたシステムの導入が進み, インプラントのための正確な骨切削が可能になりつつある¹⁾。このシステムはカッタ先端に装着された力センサによって, 骨に

* 早稲田大学理工学研究科

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 59-307

m-s-r@toki.waseda.jp

受付 2004 年 11 月 24 日;採択 2006 年 2 月 9 日

Fig.1 Conventional RAO.

対する切削力を制御している。これは、必要最低限の骨を切削するという点で、骨に対する低侵襲を可能にしている。しかし周囲の軟組織を大きく展開するという点で軟組織に対して低侵襲とは言えない。ロボットシステムを使用せずに低侵襲で行なう手技が現在注目されているが、視野の確保が難しく、軟組織に対する安全性を確保することが難しい²⁾³⁾。

後者の骨切り術は人工股関節を使わず、自骨を用いるという点で生体組織を活かした股関節の再建が可能という長所がある。しかし、手術中における術野の確保が難しいため軟組織に対して大きな展開を必要とし、また骨や軟組織の再生能力が回復に必要不可欠となる⁴⁾。このため、若年層を対象とすることが主流であるが、低侵襲で手術することが可能となれば適用範囲が高齢者に広がり、年齢層に関係なく早期回復が可能になると考えられる。

RAO (Rotational Acetabular Osteotomy, 日本名は寛骨臼回転骨切り術、以下RAOと略す)は初期段階の臼蓋形成不全や先天性股関節脱臼の患者に行なわれている有効な骨切り術の1つである⁴⁾⁵⁾。手術の手順は、まず股関節付近について広範囲に切開する。その際、骨の形状と坐骨神経の場所が確認できるように、寛骨臼と大腿骨頭まわりの筋肉を大きく切開し、靱帯を切り離す。次にノミを骨の表面にあて、寛骨臼の臼蓋をお椀状に切り取る(Fig.1)。さらに切り取られたお椀状の臼蓋を大腿骨頭に覆いかぶせるようにずらし、固定する。われわれはFig.2のようなRAOを低侵襲で行なう手術支援マニピュレータを構想した。このシステムは2種類のマニピュレータで構成され、1つは筋肉と骨の間に入って、骨を切るマニピュレータである⁶⁾。本研究ではもう1つの軟組織に対して安全性を確保し、また同時に手術空間を確保する空間確保マニピュレータの開発を目的とした。なお、マニピュレータの進入経路は術前に画像診断装置で取った

Fig.2 The conceptual design of surgery assisting manipulators for RAO.

骨の情報から軌道を計画する。術中は軟組織と骨の間で計画した軌道を辿りながら、軟性内視鏡でリアルタイムに軟組織や骨の形状をモニタリングし、簡易的な入力装置で医師が軌道を補正する。

本報では、まず医師の協力を得て動物実験にて、軟組織を剥離するのに必要な力を測定した予備実験について、次にその結果より動力や伝達方式を検討し、多関節マニピュレータのプロトタイプを製作した。さらに評価実験について報告する。

2. 方法

2. 1 設計のための予備実験

1) 目的

股関節の骨の周辺には、多くの筋肉、坐骨神経、大腿神経、大腿動脈を代表するような人体の機能を支配する軟組織が多く存在する。神経と血管の位置は、筋肉の中に埋もれているため、手術を担当する医師の経験と知識によって判断される。従来のRAOにおいて医師は、それらが確認できるまで軟組織の切開を行ない、ラスパトリ(骨膜剥離子)や開創具、骨切りノミを用いて、筋肉ごと骨から剥離して圧排することで安全性を確認してきた⁴⁾⁵⁾。

RAOを低侵襲で施行するためには、まず空間確保マニピュレータが小さな切開から進入して、軟組織を剥離しながら骨表面上を進まなければならない。従来のRAOで使用されるラスパトリを用いて軟組織剥離に必要な力を測定し、マニピュレータに必要な力の指標を得ることを目的とする。

2) 方法

実験装置概要図をFig.3に示す。ラスパトリの根元に力センサ(6軸力センサIFSTM)を装着し、さらにハンドルを取り付けた。医師はハンドル部を握って、従来

Fig.3 Experimental design.

の手術と同様にブタの腸骨 (in vivo, 筋弛緩剤投与後) で軟組織を剥離する。力センサによって、刃先にかかる力を測定する。腸骨表面方向に対して垂直な成分を F_z 、水平な力を F_x とした。腸骨表面上の軟組織の張り付き方は部位により異なるため、次に示す (a) と (b) の 2 パターンに分けて測定し、それぞれのパターンの 4 カ所について行なった。

- (a) 筋肉の起始部であり軟組織が非常に硬く張り付いていると考えられる切開口付近の骨表面
- (b) 端部に比べて柔らかく張り付いていると考えられる股関節深部の骨表面

3) 結果・考察

Fig.4 は (a) の部位に対して、Fig.5 は (b) の部位に対して軟組織剥離を行なった 4 カ所のうち、1 カ所の結果である。(a) の特徴を有する部位は最大値の平均が 80N 程度になり、メスやカッタを補助用の術具として用いる必要があると考えられる。(b) の特徴を有する 4 カ所の最大値の平均を求めると、 F_x は 5N、 F_z は 8N を加えて軟組織剥離を行っていることがわかった。実験の際、医師は術具を骨表面に当てて、強く押しでは弱める、という動作を繰り返していた。これは、一度に大きく剥離するのは危険であるという理由と、先端の刃が骨の表面にうまく当たるように刃先の姿勢を調整しているためと考えられる。

これよりマニピュレータ先端部にラスパトリと同様の刃を付けた場合、出力しなければならない力の指標を得ることができた。

Fig.4 Pre-experimental result about (a).

Fig.5 Pre-experimental result about (b).

2. 2 空間確保マニピュレータ試作機

1) 要求仕様

RAO を低侵襲で施行するには、マニピュレータは小さな切開から寛骨臼を回り込んで寛骨臼深部まで到達しなければならない。Fig.6 に点線で、股関節周りで有効と考えられるマニピュレータのアプローチパスを示す。切開は医師の意見より直径 50mm を目標とした。アプローチの入り口 (切開口) として有効と考えられるのは大腿筋膜張筋と腸腰筋と大腿直筋の間の隙間である。この隙間を通して寛骨臼の腸骨稜にアプローチすることにより、皮膚表面から骨表面までの距離が小さくなり、股関節深部までのアプローチが容易になると考えられる。切開口から股関節深部までの距離は 170mm を想定した。切開口から腸骨稜まで (A) はおだやかな平面に近く、アプローチも直線的に可能であると考えられる。寛骨臼深部に至る際 (B) に、回り込む動作が必要であると考えた。

Fig.6 Approach path around the hip joint.

Fig.7 Prototype of the muscle retracting manipulator and the drive unit.

Fig.8 Bending mechanism by belt.

Fig.9 Drive system over view of one joint.

2) 駆動メカニズム

股関節深部において回りこむ自由度を3とし，試作した空間確保マニピュレータをFig.7に示す．また，従来の術式において使われる術具を参考に，幅を15mmとし，厚さは想定する空間(20mm)を確保するのに必要な力を得るために行なった要素実験の結果⁷⁾より6mm，先端部を4mmとした．患者の切開口付近では，骨切りマニピュレータと空間確保マニピュレータの2つが動作する．そこで，マニピュレータ同士の干渉を避けるために，駆動部から関節部までのアームに曲折した形状を設けた(Fig.7)．軟組織剥離時において，必要な先端部の力から各関節のトルクを求めると，最も各関節に大きいトルクが必要となるとき(関節が真っ直ぐに近い状態)で，第1関節は0.15Nm，第2関節は0.35Nm，第3関節は0.58Nmとなった．これと空間確保時に必要な関節トルク⁷⁾より，各関節に必要な駆動機構を選定した．各関節を駆動するアクチュエータには力制御に有効であり，コンパクトでトルクに優れるDCブラシレスモータ(maxon社製，型番:200142)を採用した．減速器は100倍の減速比のハーモニックドライブ[®](Harmonic Drive社製，型番:CSF-8-100-2XHF)を採用した．減速されたトルクはプーリーを介してベルトにより先端の関節部に伝達される．なお，各関節のベルトが干渉しないようにするため，ベルトの経路は各関節の中心を通るようにした

8). 関節の構造の概要をFig.8の右図に示す.

予備実験の結果より, 軟組織を剥離するのに術具先端部の刃を骨表面に対して押し付けている力が分かった. これより, 先端部にラスパトリと同形状の刃を設けた (Fig.7 右下図). 軟組織の剥離は刃の先端が骨表面とあたる力を制御することによって行なう. 刃先の力は各関節のトルクが作用して発生する. そこで各関節の駆動トルクを伝達するベルトにテンションセンサを設けて関節トルクのフィードバック制御を行ない, 刃先の力を制御する. また, コントローラには万が一を期して安全性のため, 緊急停止ボタンを設けた. Fig.9に製作した3自由度の中の1自由度について, 駆動機構とコントローラの概要図を示す.

3. 結果

3. 1 位置精度評価実験

空間確保マニピュレータは術前に画像診断装置で得られた情報より軌道計画し, その軌道上で軟組織を剥離する. つまり, 骨表面上で軌道上を動く位置と, 軟組織を剥離する力の両方を制御する必要がある. そこで位置の精度評価実験を行なった. 目標値として入力した関節角度に対して, 実際に関節が屈曲した角度を外界センサで測定した. なお, 測定には光学式位置測定器OPTOTRAK 3020TMを用い, マニピュレータの関節にマーカを取り付け, 関節角度を算出した. 関節が真っ直ぐのときを 0degreeとした. 評価は3関節おののに対して行なった. マニピュレータが実際に軌道上を動く際は, 非常にゆっくりした動作で良いため, 0degreeを初期位置とし, 振幅 60degree, 周波数 0.1Hzのサイン波状の目標値を与えた. そのときの目標値と測定値を第一関節についてFig.10, 第二関節をFig.11, 第三関節をFig.12に示す. 目標値に対する実際の屈曲角度の平均誤差(絶対値)は, 第一関節で 6.5degree, 第二関節で 3.8degree, 第三関節で 3.5degreeであった. しかし, 最大誤差は第一関節で 37.8degree, 第二関節で 24.8degree, 第三関節で 10degreeであった. 最大誤差は三関節すべて, 回転方向が逆転した際であった. 逆転時は誤差が大きくなるが, 遅れを生じるような形であった. 逆転時の繰り返し誤差は, 第一関節で 1.5degree, 第二関節で 1.2degree, 第三関節で 1.3degreeであった.

Fig.10 Relationship between target angle and actual bending angle about first joint.

Fig.11 Relationship between target angle and actual bending angle about second joint.

Fig.12 Relationship between target angle and actual bending angle about third joint.

Fig.13 Experimental design and view of peeling periosteum by muscle retracting manipulator.

3. 2 軟組織剥離実験

空間確保マニピュレータ試作機を用いて、軟組織剥離の有効性を確認するために、ブタの摘出骨を用いて評価実験を行なった。対象部位を腸骨稜(低侵襲で行なう際に、切開口として有効と考えられる部位)とする。実験の概観をFig.13に示す。空間確保マニピュレータは術前に立てた軌道上を動きながら軟組織を剥離することが必要である。そこで、マニピュレータ先端部の刃と骨表面が接触する力を制御して軟組織を剥離した後に、軌道上からずれたマニピュレータの位置を修正、また軟組織を剥離する、という動作を1回の動作として繰り返す。軟組織と骨表面の間にある軌道上を通りながら、股関節深部へ進入する。力制御をしている時間間隔は、予備実験の波形より2秒とし、急な指令が入ることは危険であることから、力制御に切り替えた瞬間から徐々に目標値を上げて、2秒後に目標値に達するようにした。次の2秒で位置を修正した。このような動作を交互に行なった。

Fig.14 Relationship between each torque and time.

力の入力値は、予備実験の結果より決定した。骨の表面と平行な方向を x とし、垂直な方向を z とする。先端の力が2秒ごとに z 方向に8N、 x 方向に5Nになるように一定の勾配で、関節トルクを入力した。位置の入力は初期位置に戻るようにした。またマニピュレータ自体は、1軸方向に動くテーブルに固定し、骨表面と平行を保ちながら深部へ進入する方向に動かした。時間ごとの各関節のトルクをFig.14に示す。先端の関節になるほど、追従性が悪くなり、深部に進むにつれて徐々に不安定になることがわかった。この結果、小さな切開部から進入し、力と位置の切り替えが3回目(12秒)のところで、ブタの腸骨の幅である、奥行き(x 方向)50mmの深さまで筋肉を骨から剥離することができた(Fig.15)。

Fig.15 Pealed area in the surface of bone.

4. 考察

本報告では、空間確保マニピュレータを試作し、その評価を行なった。

可動範囲は 3 関節それぞれ $\pm 60\text{degree}$ としたが、従来の術具を用いた直線的アプローチよりも可動範囲が広く、小さな切開から股関節深部まで到達が可能である。また、ハーモニクドライブやベルトを用いたコンパクトな駆動部で、各関節は軟組織を剥離するのに十分なトルクを出すことが可能である。

位置精度評価実験では、術前に計画した軌道上を動作することが可能であることを確認した。関節の回転方向が逆転した際に、誤差が大きくなるが、この原因としては、ベルトの摩擦が考えられる。繰り返し誤差が小さいことから、誤差分のベルトの長さを巻き取ることや摩擦のモデル化することによって精度が向上することが可能である。また、実際の医療現場では、マニピュレータ先端位置が神経、血管が近づいたときや個体差に対応するため、医師の意思を反映する必要がある。この場合、簡易的なジョイスティックなどの入力装置で、先端部の操作することも可能である。

軟組織剥離実験では、ブタの摘出骨を対象に、マニピュレータ先端部の刃と骨表面が接触する力を制御することで軟組織の剥離が可能であった。また、軌道上を動作するための位置と軟組織を剥離するための力を交互に制御することによって、小さな切開部から 50mm の深さまで進入が可能であった。トルクの制御が深部に到達するにつれて不安定になるということがあったが、骨表面と筋肉などの厚い軟組織の境界を剥離するため、骨表面とマニピュレータ先端の接触力だけではなく、深部に進めば進むほど軟組織との接触から受ける影響が大きくなると考えられる。これは筋肉の力学的特性を測定し、変形量に対する反力をモデリングすることによって解決する方法が考えられる。実験では、刃先の姿勢が骨の表面と平行になるようにセッティングしたが、実際の手術においては、複雑な形状をもつ骨の表面と刃先を合わせる必要がある。このため、先端部に軟性内視鏡を装着し、その映像を見ながら、医師が入力装置で刃先の姿勢を微調整できるようなシステムの構築を予定している。また、骨と軟組織の間に確保できる空間の大きさは、軟組織を剥離した量に依存する。今後は剥離した量と空間の関係から、必要最低限の空間を確保するアルゴリズムの構築する。空間確保ができた後は本報告で述

べたマニピュレータを保持する装置、画像診断装置から得られる情報を統合し、空間確保マニピュレータ全体の駆動アルゴリズム構築へと着手していく予定である。臨床への有用性としては、骨切り術だけでなく人工股関節置換術における視野確保が必要な場面や、股関節だけでなく膝関節や脊髄を対象とした手術への応用も可能となる。

5. 結言

RAO を低侵襲で施行することを目的とした空間確保マニピュレータの試作機を製作した。

空間確保マニピュレータについて設計するにあたり、軟組織を剥離するのに必要な力をブタの腸骨部を用いて測定した。測定結果を用いて空間確保マニピュレータの試作機の製作を行なった。試作機をブタの軟組織と骨の間に挿入して各関節を駆動することにより、骨の表面から軟組織を剥離した。

*

謝辞：厚生省メディカルフロンティア政策による医薬品副作用被害救済・研究振興調査機構に感謝の意を表す。本研究の一部は、日本学術振興会 21 世紀 COE プログラム「超高齢化社会における人とロボット技術の共生」、文部科学省科学技術振興調整費戦略的研究拠点プログラム「先端科学と健康医療の融合研究拠点の形成」の支援を受けて行なわれた。

文献

- 1) Taylor R.H, et al. An image-directed robotic system for precise orthopaedic surgery. Robotics and Automation IEEE Transactions on Publication 1994;10: 3:261-275.
- 2) 樋口富士男ほか. 小切開前側方進入による初回人工股関節置換術. 整形・災害外科 2004;47:1529-1535
- 3) 中村茂ほか. 小切開後方進入法による最小侵襲 THA, 整形・災害外科 2004;47:1549-1553.
- 4) Stanley Hoppenfeld, Piet deBoer. 整形外科医のための手術解剖学図説. 寺山和雄, 辻陽雄. second ed. 東京: 南江堂, 2005:333-378.
- 5) ニノ宮節夫ほか. 股関節の手術. 東京: 中山書店, 1993;4:83-86.
- 6) 柳原勝, 波多野弘芳, 藤江正克. RAO 骨切り支援マニピュレータの開発. 函館: ROBOMEC, 2003;2P2-2F-C3.
- 7) 柳原勝, 岡本淳, 三井教寛, 矢野英雄, 藤江正克. RAO 支援マニピュレータの開発. JJCLA 2003; 5:239-240.
- 8) Ikuta K., et al. Hyper Finger for Remote Minimally Invasive Surgery in Deep Area. Tokyo: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 2002;171-181.