ロボット手術用リアルタイムシミュレーション技術の開発 —情報提示手法に関する基礎的検討—

Development of real-time simulation for robotic tele-surgery

○学 川村 和也 (早大) 学 小林 洋 (早大)
正 藤江 正克 (早大)

Kazuya KAWAMURA, Waseda University, kazuya_k.fmr@fuji.waseda.jp
Yo KOBAYASHI, Waseda University
Masakatsu G. FUJIE, Waseda University

In recent year, robotics and computer technology introduced in surgical domain allow surgery to be performed more precise medical care. In particular, computer technology enables precise surgical simulation using virtual reality or computer graphics. In our research, we will focus on constructing an intra-operative navigation system with online information of organs and surgical tools based on surgical simulation with mechanical models. This proposed simulation system consists of two simulators and an actual manipulator: virtual slave manipulator, organs deformation calculator and master controller. In this paper, we illustrated the organs deformation calculator and an experiment with pig liver and this simulator.

Key Words: Simulation, Real-time, Organs Deformation

1. 緒言

内視鏡下手術に代表される低侵襲手術が始まり、患者への負担軽減が目指されている。その一つとして手術支援用にロボット技術が外科手術環境に導入されてきている。この手術支援ロボットは、従来の外科手術の高度化を目的として開発されてきた。手術支援ロボット開発の目的の一つである患者に対する負担軽減の実現は可能となったが、従来の手術とは異なるため医師に十分な訓練が必要となり医師に与えられる負担が大きくなっている。外科手術領域におけるこの低侵襲化は、従来医師が臓器や患部から直接得ることができた視覚情報や触覚情報を大きく制限することとなっている。この取得可能な情報が制限された手術においても患者への負担を軽減し安全で正確な治療を行うことが求められている。

この課題へのアプローチの一つとして、コンピュータを用いたシミュレーション技術が着目されている。最近のIT技術の高度化に伴い、医療の現場においてもIT技術の導入が進んでいる。仮想的に外科手術環境を再現することで、若手医師のトレーニングとなり、仮想的な反力を利用したトレーニングシステムが研究されている[1]。また術前の手術計画においても大きな利点を持ち、切開など外科手術において要求される事項を絞りこんで術前の手術計画支援用のシステムが研究されている[2]。

2. 研究アプローチ

力学的な特性を規範としたシミュレーション技術は、同一条件下で対象の状態を任意に再現でき、そこに続く状態を予測することができる。このシミュレーション技術を用いることで手術支援ロボットとロボットを操作する医師に対し、患部の術中情報をオンラインで提示することが可能となる。本研究では、術具から受ける力やそれに伴う変形など術中における患部の状態をオンラインで提示し、医師の判断をリアルタイムにサポートするリアルタイムシミュレータの開発を目的とする(図1)。

このリアルタイムシミュレータの開発にあたり、プロトタイプとして手術手技の中から把持動作に着目した。把持動作は基本的な手術手技の一つであり、必要不可欠な動作と言える。術中の把持動作において、把持する対象となる臓器が柔

らかいものであり、臓器に対して複数の干渉を生じると考えられる。そのため、術中の状態に対し、力学モデルを構築し対象臓器の挙動を再現することが必要となる。本報では、この臓器が持つ力学的特性を再現するシミュレータの開発を行い、その特性の再現に関して述べる。

Fig.1 Concept overview

3. 臓器変形計算シミュレータについて

本研究では、術中の臓器の変形や力の負荷状態を把握するために、臓器の力学的特性をモデル化して、仮想空間上にその挙動をリアルタイムに再現するシミュレータの開発を行った。プロトタイプとして構築したシミュレータは、力学的特性を表現するためにMass-Spring-Damper法(MSD法)を採用している(図2)。この手法は、リアルタイムにその挙動を計算することが可能であると同時に、対象に与えられる状況の変化(接触から始まり、把持や切断へと進む過程)に対応しやすいという利点が挙げられる。開発したモデルについて以下に簡潔に述べる。

対象物体に三角形を用いたメッシュを格子状に作成しており、各エッジに対し力学的特性を再現する要素としてバネと

ダンパで構成される三要素モデルを適用している。この三要素モデルは臓器の力学的特性を再現できる最小モデルとしてプロタイプシミュレータに用いた。これによりノードに対して負荷された力が各エッジを介して伝達され全体の変形が再現される。後述する実験には、エッジ数 897、ノード数 196 のモデルを用いている。

Fig.2 Simulation Model

4. 評価実験

4.1 実験目的・方法

構築したシミュレーションモデルを用いた力学的特性の再現が可能かどうかの確認試験を行った。ブタ肝臓に対して糸を掛けて一定の速度で引張試験を行い、そのときに対象に生じた変形量と力を計測し、その値を用いて特性の再現を行った。以下に実験装置の概要を示す (図 3)。

Fig.3 Experimental Tools

Fig.4 Marker position

直動モータを用いて一定速度を保持した状態で引張り試験を行い、変形量についてはパターンマッチングを、力については引張部に取り付けた力センサを用いて計測した。試験を行うにあたり、ブタ肝臓の端部を固定し、残りの部位は自由端とした。

4.2 実験結果・考察

ブタ肝臓に対する引張試験を行った結果を以下に示す。図 5 は縦軸にマーカの変形量を、横軸に時間をとった変形量の結果を示す。図 6 は、縦軸に力センサから計測した反力を、横軸に時間をとった取得した反力の結果を示す。次にこれらの結果から三要素モデルの各パラメータを推定し、シミュレーションした結果を図 5 および図 6 に示す。

Fig.5 Comparison of displacement

Fig.6 Comparison of force

入力を与える近傍は大きな変化を示し、入力位置から遠くなるほど挙動の変化率は小さくなる。そこで比較を行う上で、入力点近傍の出力を現実の挙動と比較した。Fig.5 と Fig.6 より、パターンマッチングから得られた結果を入力としてシミュレーションするとモデルから得られる力は実際のブタ肝臓の場合と傾向の一致は確認されたものの大きくズレが生じる箇所が確認された。これは、3 要素モデルで対象としたモデルを模擬した際に、弾性要素が強く再現され、位置入力の揺らぎの影響が大きく出たと考える。モデルパラメータの設定手法やノード数などのシミュレーション精度に影響する因子をより正確に求める必要があるが、力の変化傾向が確認できたため、柔らかい臓器を引張る際の提示手法としての可能性が示せた。

謝 辞

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」、および岐阜・大垣地域知的クラスター創成事業の支援を受けて行われた。

文 献

- [1] Y. Kuroda, M. Hirai, M. Nakao, T. Kuroda, K. Nagase and H. Yoshihara, "Multi-finger Haptic Interaction for Soft Tissue Exclusion Manipulation", SIGGRAPH Poster
- [2] 中尾 恵, 黒田 知宏, 小山 博史, 小森 優, 松田 哲也, 坂口 元一, 米田正始, "組織切開・開創シミュレーションによる手術計画支援", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.2, pp.163-170, 2003.