

高信頼性・高安全性外科手術支援ロボットシステムの設計

織田村元樹 (東大) 岡田昌史 (東大) 中村仁彦 (東大)

High Reliability and Security of Surgical Robot System

*Motoki ODAMURA (Univ. of Tokyo), Masahumi OKADA (Univ. of Tokyo), Yoshihiko NAKAMURA (Univ. of Tokyo)

Abstract— Breakdown of surgical robot systems can cause fatal trouble because human work in the working area of these robot differ from industrial robots. So these system require high security and reliability. In this paper, we propose the techniques which realize the high security and reliability of the surgical robot system, and enhance security and reliability of the surgical robot system.

Key Words: Suigical Robot, Security, Reliability

1. はじめに

医療技術の発達に伴い様々な低侵襲手術が可能となってきた。しかし、内視鏡下外科手術に代表される低侵襲手術は患者の負担を減少させる一方術者への技術的負担を増大させる。この問題を解消する手段として低侵襲手術を容易に行うことを可能にする様々なロボットシステムが開発されている¹⁾。

こうした医療ロボットシステムの故障や誤動作は患者や術者の生命の危険につながるため、これらのシステムには高い安全性と信頼性が求められる。本研究では、岸らによって開発された臓器拍動補償機能を持つ内視鏡下外科手術支援ロボットシステム²⁾を基に高い安全性と信頼性を備えたシステムを構築することを目的とする。

2. ロボットシステム

本研究で用いる臓器拍動補償機能を持つ内視鏡下外科手術支援ロボットシステムは、高速度カメラ (DALSA-CA-D6) による臓器運動計測ユニット (Motion Detect Unit), 三次元位置計測器 (OPTOTRAK) およびマスタデバイス (PHANTOM) からなる座標変換ユニット (Coordinate Manage Unit), NTSC カメラ, 画像提示用モニタからなる画像処理ユニット (Vision Process Unit), スレーブロボットからなるロボット制御ユニット (Robot Control Unit), メモリ共有インタフェース (memolink) からなるデータ転送ユニット (Data Transfer Unit) の5ユニットからなっている。その関係図を Fig. 1 に示す。

これらのユニットにより以下の技術を実装し、臓器運動補償機能を実現している。

マーカトラッキング： 前フレーム画像でのマーカ位置

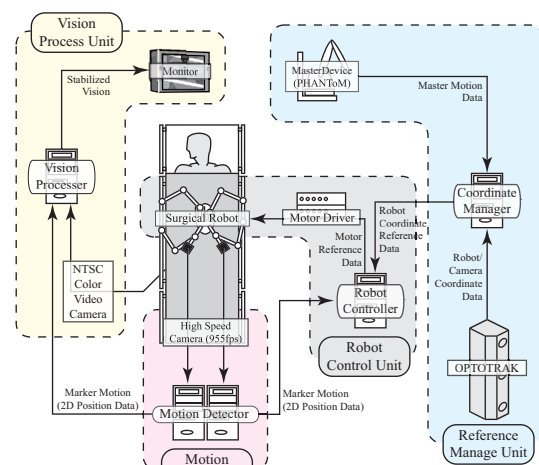


Fig.1 System Arrangement

近傍でテンプレートマッチングを繰り返すことによりマーカの運動を追尾し、拍動臓器上に固定したマーカの運動の計測を行う。

ビジュアルスタビライズ： 提示画像を臓器に固定したマーカの運動に同期させて動かすことで、臓器の拍動運動を停止させた画像を提示する。

モーションスタビライズ： マーカの運動データを三次元再構築しスレーブロボット先端の運動に加えることでロボットに拍動運動を補償した運動を行わせる。

3. 信頼性・安全性の向上

3.1 フォールトトレランスとフェイルセーフ

以下、システムの機能の損失を障害 (failure), 障害を引き起こす原因となるものをフォールト (fault) と呼ぶ。

システムの信頼性・安全性を向上させる手段としては、フォールトに対する対策を講じることにより障害の発生を抑える”フォールトトレラント”と、発生した障害が拡散し致命的な事故につながることを防止する”フェイルセーフ”とがある。

信頼性を向上させるという点に置いては障害の発生自体を抑えるフォールトトレランスがより有効であるが、全ての障害の発生を防止することはできない。そのため、これらの両方を充実させることが安全性・信頼性を高める上で非常に重要である。

3.2 臓器運動計測ユニットでのフォールトトレランス

臓器運動補償機能は臓器運動計測ユニットにより計測した臓器運動を元に処理を行っており、同ユニットは臓器運動補償機能を実現する上で重要な役割を担っている。そのため、同ユニットでのフォールトの発生を抑えることはシステムの安定性を向上するのに有効である。

マーカ初期位置指定の自動化：従来のシステムにおいてマーカの初期位置指定は手動で行っており、トラッキング失敗の原因のひとつとなっている。明点探索後短時間のトラッキングを行い運動量の相関によりマーカと臓器反射とを区別することでマーカの初期位置指定を自動化し、トラッキング開始成功率の向上およびトラッキング失敗時の連続稼働を可能にした。

マーカ形状の改良：従来のトラッキングターゲットには円筒状のマーカを使用しており、マーカ姿勢の変化により画像上でのマーカの形状が変化しテンプレートマッチングを失敗する可能性がある。これに対しマーカを球状にすることにより、視方向によるマーカ形状の変化をなくしトラッキングの信頼性を向上させた。

隠蔽マーカ位置の推定：手術室環境においてこのシステムを使用する場合、術具や臓器などによりマーカが隠蔽されることが考えられる。本研究では3つのマーカのうち2つが隠蔽された場合は初期マーカ位置の三角形を並進移動を、1つが隠蔽された場合には並進・回転・拡大縮小を加え隠蔽されたマーカ位置を推定することによりトラッキングの安定性を向上させた。

3.3 ユニット間フェイルセーフ

複数のユニットからなるシステムにおいては、一部のユニットで発生した障害を他ユニットに拡散させないた

めに、あるユニットで発生した障害を別ユニットが検知できる機構が必要となる。こうした機構を実現するものとして、マンマシンシステムで人為的誤操作による事故を防ぐための”インターロック”と呼ばれる構造が知られている。これは正常な操作が行われていない場合マシン側の動作を抑制するというものである。本研究では、データ転送ユニットを利用して一定周期ごとにユニット間で相互に信号を送るシステム(Call-Signal-System)を開発しユニット間の障害の伝播を防止する。

Call-Signal-Systemの検証実験として行った、モーションスタビライズ動作時に擬似的に障害を発生させた場合のモータ出力値を Fig. 2 に示す。

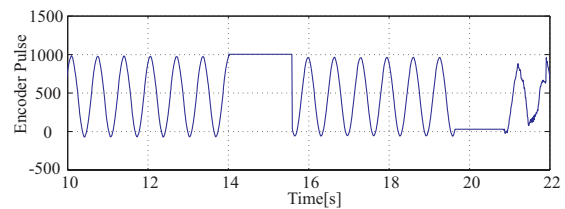


Fig.2 Call-signal-System Result

4. in-vivo 実験

本システムの検証実験として、2002年8月、2003年1月および8月に豚を用いた in-vivo 実験を行った。2002年8月の in-vivo 実験においては高信頼性トラッキングシステムのみ、2003年の二度の実験においては全システムの検証を行い、その有効性を確認した。

5. おわりに

本稿では、以下のような結論が得られた。トラッキング初期位置の自動取得・隠蔽マーカ位置推定などによる高信頼性トラッキングアルゴリズムおよび Call-Signal-System によるユニット間フェイルシステムを開発し、臓器運動補償機能付き内視鏡下外科手術支援ロボットシステムの信頼性・安全性を向上させた。

なお本研究は、未来開拓推進事業「外科領域を中心とするロボティクスシステムの開発」「手術ロボティクスシステム開発プロジェクト」(代表：佐久間一郎)のご支援を受けました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Gary S. Guthart and J.Kenneth Salisbury Jr., "The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2001), No. 77, pp. 618-621.
- 2) Y. Nakamura, K. Kishi: "Robotic stabilization assisting cardiac surgery on beating hearts", Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, 10(4/5), pp. 205-208, 2001