

論文の内容の要旨

論文題目 On-site Hand-Eye Coordination in Master-Slave Surgical Robotic System using Stereo Vision and Kinematics

(ステレオ画像と運動学を用いたマスタ・スレーブ手術ロボットシステムにおける手術現場でのハンド・アイコーディネーションに関する研究)

氏 名 金 洪浩

近年は術者の手技を拡張させるためにダ・ヴィンチ手術ロボットシステムを用いたロボット支援手術が行なわれている。しかし、制限的なアプローチや大きさなどによる様々な問題が指摘されている。そこで最近新しい手術ロボットプラットフォームが注目を集めている。その中で、小型マスタ・スレーブ手術ロボットシステムは複数のスレーブロボットアームと内視鏡が手術テーブルに直接取り付けられる。そのため、小型であり、手術スタッフの患者への接近性が良い。また、より広くて柔軟なアプローチを可能にする多関節マニピュレータも開発されている。これらの新しい手術ロボットプラットフォームの実用化に向け、解決しなければならない技術的な課題がある。その中で本研究が扱うのはハンド・アイコーディネーション問題である。

マスタ・スレーブ手術ロボットシステムにおけるハンド・アイコーディネーションとは術者の操作によるマスタの動きの方向と内視鏡画像上に見えるスレーブ先端の動きの方向が一致することを指し、スレーブロボットのベース座標系と内視鏡のカメラ座標系との相対姿勢に基づいてマスタマニピュレータとスレーブロボットの制御関係を変換することにより実現する。しかし、小型マスタ・スレーブ手術ロボットシステムの場合は、スレーブロボットと内視鏡をつなぐ機械的なロボットアームがないため、スレーブロボットのベース座標系と内視鏡のカメラ座標系の相対姿勢を別途に計測しなければならない。また、多関節マニピュレータの場合は、軟性構造あるいは変形されやすい構造を持つため、体内に存在するスレーブロボットのベース座標系を体外から推定するのが困難である。従来、青木らは光学式位置計測システムを用いてスレーブロボットのベースと内視鏡の相対姿勢を計測した。しかし、光学式位置計測システムは高価であり、システム環境が複雑になり、センサとツールとの視線を確保しなければならないため、操作とセットアップに制約を与える問題がある。また、多関節マニピュレータへの適用のために必要な体内での測定は困難である。

そこで本研究は新しいマスタ・スレーブ手術ロボットプラットフォームにおいて、別の位置計測システムを使わずに、ステレオ画像とロボットの運動学情報だけでスレーブロボットのベース座標系と内視鏡のカメラ座標系の相対姿勢を計測し、ハンド・アイコーディネーションを実現する手法を提案する。

まず、ステレオ内視鏡の画像でスレーブ先端の2つの特徴点をトラッキングする。それによってステレオ内視鏡のカメラ座標系を基準にしたスレーブ先端の5自由度の位置と姿勢を計測する。画像上のスレーブ先端は背景の組織や臓器などに比べて比較的、内視鏡に近いところに配置されるため、より高いステレオ視差を持つ。これに着目し、複数の画像上のサンプリング線のステレオ視差を調べることによって、スレーブ先端のステレオ視差の有効範囲を推定する。その後、その範囲内のフィーチャポイントを垂直方向で探索することによってスレーブ先端の2つの特徴点を検出する。ここで2つの特徴点は、画像上のスレーブ先端の最上位点をエンドポイントとし、そこから一定距離で垂直に離れたところのフィーチャポイントをオフセットポイントとする。エンドポイントはスレーブ先端の位置に相当する。オフセットポイントからエンドポイントへの方向はスレーブ先端の座標系のz軸に相当する。したがって、本トラッキング手法でスレーブ先端の5自由度の位置と姿勢が分かるようになる。本提案手法は、既存の先行研究でよく使われた光学マーカや幾何学情報を使わないため、滅菌問題がなく、単純な形状のスレーブ先端のトラッキングにも適用可能である。

本提案手法のトラッキング性能を評価するために基礎的な評価実験を行なった。精密多軸ステージの上にスレーブ先端のサンプルを固定し、背景には心臓モデルを置き、ステージを1mm間隔で15mmまで動かしながらステレオ内視鏡でトラッキングを行なった。その結果、トラッキング誤差は平均0.75mm、速度は平均17fpsであった。静止状態でのトラッキング性能は光学式位置計測システムと同等な性能を持つことが分かった。

スレーブ先端の5自由度の位置と姿勢の情報だけではロボットの運動学情報を適用しても、スレーブロボットのベース座標系を特定することができない。そのため、残り1自由度、すなわち、スレーブ先端の軸の回転角度を推定しなければならない。初期位置でのスレーブ先端のx軸に関して、ステレオ内視鏡のカメラ座標系のz軸とスレーブ先端の座標系のz軸とともに垂直であると仮定をする。そして、初期位置でのスレーブ先端の仮定した6自由度の位置と姿勢にロボットの運動学情報を適用し、仮定のロボット空間を定義する。その後、マスタコンピュータを操作すると、逆運動学を解きながらスレーブ先端が目標位置に近づく。制御が行なわれる間に、仮定したロボット空間に基づいて予想されるスレーブ先端の位置が実際にリアルタイムでトラッキングしたスレーブ先端の位置に近くなるように初期位置で仮定したスレーブ先端の軸の回転角度を新しい値に更新を続ける。高い精度で迅速に真値に収束させるためには、高いトラッキング精度とスレーブ先端の大きな変位が必要である。ここで、初期位置でのスレーブ先端の軸の回転角度の推定に対して、画像計測によるトラッキング誤差の影響を抑えるために、カルマンフィルタを導入した。カルマンフィルタの計測ノイズとプロセスノイズはシミュレーション実験の結果から推定誤差の標準偏差と変化に相当するように設定した。

次に、初期位置でのスレーブ先端の5自由度の位置と姿勢と、推定したスレーブ先端

の軸の回転角度にロボットの運動学情報を適用することによって、ステレオ内視鏡のカメラ座標系とスレーブロボットのベース座標系との相対姿勢が求められる。その相対姿勢に基づいて、マスタマニピュレータとスレーブロボットの間の制御関係を適切に変換する。それによって、スレーブロボットとステレオ内視鏡のセッティング状態に関係なく、マスタマニピュレータの動きの方向と画像上のスレーブ先端の動きの方向が常に一致することになる。つまり、ハンド・アイコーディネーションが実現される。

本提案手法の有効性を検証するために、6軸ロボットアームとステレオ内視鏡を仮想空間にモデリングし、シミュレーション評価実験を実施した。静止状態で行なったトラッキング性能評価の実験結果に基づいて、正規分布のトラッキング誤差をシミュレーション条件に適用した。初期位置でのスレーブ先端の軸の回転角度の真値を -90° から 0° まで 10° 間隔で変えながら、各条件のシミュレーションを100回行なった。スレーブ先端は目標位置まで自動で制御が行なわれる。各制御フレームにスレーブロボットのベース座標系の姿勢の推定が行なわれる。シミュレーション実験の結果、スレーブロボットのベース座標系の姿勢の推定誤差 (RMS) は 0.82° であり、有効性が確認できた。

次に、実際の6軸ロボットアームとステレオ内視鏡を用いて、本提案手法の有用性評価に向け、ケーススタディを実施した。ステレオ内視鏡を5つの異なる位置と姿勢に変えながら、提案手法の適用の前と後に同一なスレーブ先端の制御を行ない、ステレオ内視鏡のカメラ座標系を基準にしたスレーブ先端の理想の軌跡と実際の軌跡を比較した。その結果、提案手法の適用の前、すなわち、予め設定されたマスタマニピュレータとスレーブロボットの制御関係に基づいて制御が行われた場合は、セッティング状態にしたがって、ステレオ内視鏡のカメラ座標系を基準にしたスレーブ先端の軌跡のばらつきが大きかった。一方、提案手法でステレオ内視鏡とスレーブロボットのベースの相対姿勢を推定し、マスタとスレーブの制御関係に変換を与えた後に同一のスレーブ先端の制御を行なった場合は、ステレオ内視鏡を基準にしたスレーブ先端の軌跡が理想の軌跡に近くなった。動的状態でのスレーブ先端のトラッキング誤差は平均 4.83mm 、ロボットベースの姿勢の推定誤差 (RMS) は 5.47° 、理想の軌跡と実際の軌跡との位置誤差 (RMS) は 2.43mm で計算された。この結果から、本提案手法の有用性が確認できた。

本研究で提案したステレオ視差を用いたスレーブ先端の5自由度の位置と姿勢のトラッキング手法は既存の先行研究でよく使われた光学マーカや幾何学情報などが不要であるため、簡単で、拡張性が高い。また、断続的にトラッキング誤差が大きくなってもカルマンフィルタにより安定的にスレーブ先端の軸の回転角度の推定が行なわれ、最終的にステレオ内視鏡とスレーブロボットのベースの相対姿勢が求められる。しかし、より安定的かつ迅速に高い精度の推定を目指すためにはよりロバスト性の高いトラッキング手法が必要である。また、カルマンフィルタの最適化も今後の課題である。

結論については、ステレオ画像とロボットの運動学情報を用いてマスタ・スレーブ手術ロボットシステムにおける手術現場でのハンド・アイコーディネーションを実現す

る手法を提案した。また、ステレオ視差のみでスレーブ先端の5自由度の位置と姿勢をトラッキングする手法と仮定したロボット空間に基づいてスレーブ先端を制御しながらスレーブロボットのベースを推定する手法を提案した。最後に、シミュレーション実験と6軸ロボットアームとステレオ内視鏡を用いた評価実験の結果、提案手法の有効性と有用性が検証された。

(以上)