

審査の結果の要旨

氏名 山中 紀明

本論文は、子宮内胎児外科手術用の同軸レーザー誘導照射内視鏡システムとして、双胎間輸血症候群の治療を目的としている、胎盤上吻合血管レーザー凝固術を安全かつ正確に行うことは極めて重要である。これを実現するために、本研究では下記の3点について開発することを目的としている。

- ・ 観察と高出力レーザー照射を同軸で行い視野の任意点へレーザーを誘導する内視鏡の構成手法を明確にし、臨床使用可能な大きさで開発する。
- ・ レーザー照射において、呼吸や体位変化による目標の移動に対応可能な追従機能を開発する。
- ・ 上記内視鏡と追跡機能を統合したシステムにおいて、評価実験を行い、臨床応用における有用性を検証する。

まず、内視鏡操作による危険性と術者の負担低減を目的に、内視鏡画像の取得とレーザー照射の光学系を同一とし、目標点を内視鏡画像上でクリックするだけで、レーザー照射による目標血管の凝固が可能となる。胎児外科での使用を考慮して、3枚の対物レンズ系とリレーレンズ系としてGRINロッドレンズを用いた。このGRINレンズ1本で十分な有効長を確保しレーザー光の反射面を最少の2面に抑えることで、高伝達効率を実現した。また、細径内視鏡内でのレーザー光の伝達と誘導角度の制御では、ケラレの問題を生じる。そこでシングルモードファイバレーザーを用いて、レーザー照射点の高出力密度を確保し、ケラレを最小限として高伝達効率と広誘導角度を実現した。

術中は母胎の呼吸等により照射対象が移動する可能性があるため、広域追跡用に逐次追跡を行うことで、目標点を喪失しても再追跡が可能となった。また、逐次追跡の処理では、まず内視鏡画像をLoG(Laplacian of Gaussian)画像に変換する。その際強調される羊水中の浮遊物や鏡面反射領域の影響を抑えるために、円形フィルタを考案した。それにより、浮遊物や鏡面反射領域を除去に成功した。特徴点抽出にはFAST(Features from Accelerated Segment Test)を用いて特徴点のオプティカルフローを求め、Homography行列の計算で誤追跡点を除去した。

目標点を指定した後ガルバノスキャナを制御するため、カメラとスキャナの座標系の統合を行った。カメラキャリブレーションにはチェッカーボードを用い、内視鏡画像に基づくキャリブレーションを行った。この際、カメラ光学系とレーザー光学系が内視鏡を共有しているため、カメラ仮想座標系においてキャリブレーションすることで、高精度な位置決めを可能とした。

内視鏡画像の画質の評価として、解像度と色収差の評価を行っている。その結果、解像度はMTF50が画像全体で0.096 cycles/pixelである。また距離20 mm

における MTF50 は、平均 1.2 cycles/mm、色収差は平均 1.37 pixel である。レーザー照射における評価では、10~20 mm の距離における照射スポット径が 0.17~0.29 mm である。90%の伝達効率となる範囲をレーザー誘導範囲とすると水平方向に 42.6°、鉛直方向に 46.4° で角度の変更が可能である。また、レーザー出力の最大伝達効率を 66.2%とすると、最大出力 33.8 W でのレーザー照射が可能であった。レーザー照射の位置決め精度では、距離 10~20 mm で平均 0.12~0.17 mm の誤差であった。鶏肝臓によるファントム実験で、距離 20 mm からの照射において照射点の直径は、50 W 照射時に 3 mm までの拡大を確認している。

追跡性能実験として、動画による胎盤上血管の追跡を行った。その結果、レーザー照射の追跡は、300 フレームにおいて 10 pixel 以下の誤差であり、目標喪失後の検出誤差は 4.2 pixel である。内視鏡と追跡機能を統合したシステムに対し、in vivo 実験を行い、呼吸運動を模倣した動きにおける内視鏡画像上で目標血管を指定してレーザー照射を行った。その結果として、照射点とその末梢側の血管の収縮を確認している。

以上の結果から、レーザー照射時に血管の変化を確認可能な内視鏡が実現できたと言える。また、レーザー出力の高伝達効率と小径レーザースポットによって、生体組織の凝固に必要なレーザー出力密度を実現している。さらに、広域のレーザー誘導範囲が実現されたことから、レーザー照射前の内視鏡の位置決めも容易となり、血管径に対し十分な精度で位置決めが可能になった。目標追跡は 10 s 程度の間であるが小さな誤差で追跡可能であることが示され、レーザー照射に十分適用可能である。内視鏡と目標追跡を統合したシステムに対する in vivo 実験より、システムとして移動血管を凝固するに足る性能を有していると考えられる。これより、レーザー凝固術を簡易かつより安全に行える可能性が示された。

これにより、双胎間輸血症候群に対する胎盤上吻合血管レーザー凝固術のために、内視鏡を移動させることなく移動する任意の照射目標点へレーザー照射を行う同軸レーザー誘導照射内視鏡システムが実現したと言える。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位論文として合格と認められる。