

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04491

研究課題名（和文）赤外線マルチカメラによる胸腔鏡下手術支援システムの開発

研究課題名（英文）A study on endoscopic surgery support system by using multiple cameras

研究代表者

森本 雅和（Morimoto, Masakazu）

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10305683

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,700,000円

研究成果の概要（和文）：胸腔鏡下手術の際、従来の1台の内視鏡カメラを用いる手技に、2台目のカメラを追加することで、手術をより安全かつスムーズに進められることを確認した。その際、2台目のカメラについては、胸腔上部に固定し、術野を俯瞰的に撮影できるように設置することで、医師および手術助手の負担を増やすことなく、上記の効果を得ることができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

胸腔鏡下手術の手術効率と安全性を高めるために、もう一台の内視鏡カメラを追加することを提案した。2台の内視鏡カメラを用いた動物実験により2台のカメラ配置のについて検証した結果、2台目のカメラを胸腔上部に固定し、術野を俯瞰的に撮影できるように設置することで、医師および手術助手の負担を増やすことなく、上記の効果を得ることができることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Video-assisted thoracoscopic surgery has been shown to be safer and smoother by adding a second camera to the traditional procedure of using one endoscopic camera.

By fixing the second camera to the upper part of the thoracic cavity and installing it so that the surgical field can be photographed with a bird's-eye view, the above effects can be obtained without burdening doctors and surgical assistants.

研究分野：画像認識

キーワード：手術支援システム AI画像解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年標準的となった「完全胸腔鏡下手術」では、術者は胸腔内を直視せず、胸腔鏡からの映像を見ながら手術が行われる。カメラにより拡大した映像を見ることができ、術者と助手が同じ視野を共有できることなどが利点として挙げられる一方、視野が狭く、視点が限定されるため、術部の情報を得にくいという欠点がある。

また、胸(腹)腔鏡下手術においてまれに発生する問題として、動脈の切開による出血がある。術者は事前に CT などにより患部付近の血管走行を確認しているが、臓器は容易に移動・変形するため、想定していた箇所以外に血管が位置している場合がある。特に肺は手術時に肺胞から空気を抜くことで体積が 1/3 程度に収縮しているため、血管の位置は事前の計測モデルから大きく変化している。医師は随時血管位置を確認しながら手術を進めるが、動脈を傷つけてしまった場合には大量の出血が生じ、最悪の場合には患者が死亡する例もある。

2. 研究の目的

本研究プロジェクトでは、胸腔内にカメラを複数配置することで、完全胸腔鏡下手術を支援するシステムを開発し、以下の学術的「問い」について明らかにする。

- (1) 内視鏡手術において、術者の視野を効果的に支援するためには、カメラを何台、どのように配置すれば最も効果的かを確認するために、トレーニングキットを用いた実験を行うとともに、豚を用いたマルチカメラ環境下での肺葉摘出実験を行い、その効果を確認する。
- (2) 複数視点のカメラ映像から、収縮肺の三次元計測がどの程度の精度と処理時間で可能となるかを検証する。
- (3) 赤外線カメラを使用することにより、血管強調表示や深部血管表示による収縮肺 3D モデルの推定精度と、血管走行予測精度はどのように改善するか、また、赤外線カメラ映像を AI により変換することで、通常の可視光カメラ映像に変換することが可能かを検証する。

3. 研究の方法

(1) マルチカメラ環境下での内視鏡手術実験

一般的に内視鏡手術は一台の内視鏡を用いて行われるが、一視点のみで視野が限られ死角が生じてしまう。そこで提案システムのように別の向きから撮影するサブカメラを用いることで、手術効率が向上すると考えられる。ここでは、一台のカメラを使用した場合とサブカメラを同時に用いて内視鏡手術を行う場合の手術時間への影響を検証する。

検証を行う際には、実際の手術環境ではなく内視鏡手術用のトレーニング用器具(ドライ BOX・持針器)を用いて検証を行う。検証を行う際には、ドライ BOX の内部が透けて見える部分には目隠しをして行う。

マルチカメラ環境下での胸腔鏡手術実験を医師に依頼し、豚による動物実験として実施した。その様子を図 1 に示す。ここでの目的は、サブ視点を追加して手術を行うことで、手術にどのような影響を与えるのかを調べることである。実験内容としては、豚の胸腔鏡手術を行うときに、主モニタに医療用内視鏡カメラの映像を映し、サブモニタに医療用内視鏡カメラ 1 つと工業用内視鏡カメラ 2 つ、そして後で分析しやすいように、術者の視線を検出するための映像の合計 4 つの映像をサブモニタに 4 分割して映した状態で実施した。そしてサブモニタを注視した回数を調べることで、サブモニタの有用性を検証した。

ただし、実験の冒頭で医師より工業用内視鏡映像は画質が悪く、内視鏡手術での利用は適さないとの意見が合ったため、通常の医療用内視鏡 2 台での実験に切り替えた。



図 1. マルチカメラ環境下での豚肺葉摘出実験

(2) 収縮肺の三次元計測実験

収縮肺の三次元撮影には RGB-D センサを使用することを考える。複数視点からの撮影データを合成することで、広範囲で高精度な術野の把握が可能になると考えられる。本章では、複数視点の三次元撮影データの合成を行い、その精度や範囲を検証する。手術の際、複数のカメラの位置関係を固定して撮影することは困難なため、得たデータのみからのデータ統合を行う。3D データの合成の精度を確認するために実験を行う。肺の表面画像をテクスチャとして印刷し、卵型の発泡スチロールに貼り付けたものを収縮肺モデルとして実験を行う。対象物を回転台の中心に置き、一定角度ずつ回転させて撮影を行う。回転角度は 0° から 350° まで 10° ずつ合計 36 回撮影を行う。撮影して得られた回転角度の異なる 2 つの 3D データを用いて、ICP (Iterative Closest Point) と Colored Point Cloud Registration を用いて、対応する特徴点により合成変換する行列を求めて点群合成を行う。

(3) 赤外線マルチスペクトルカメラによる血管強調表示と、肺赤外画像から肺カラー画像の復元

胸腔鏡手術（肺の手術）を行う際には、肺を収縮させて内部の空気を抜いて行われる。この場合、肺の形状が大きく変化して血管の位置が事前の検査画像等から大きくずれてしまう。そこで、血管の位置をリアルタイムに認識することが重要となる。通常の内視鏡映像から血管部分を見分けるのは経験が必要である。人体を透過しやすく血液中のヘモグロビンは波長 $780\text{nm} - 950\text{nm}$ の赤外光（近赤外光）の吸収特性をもつ。そこで、提案システムでは通常の RGB 画像とは異なり、人の目では見えない赤外線を含めた複数波長帯域の画像を撮影可能なマルチスペクトルカメラを使用する。本章では、可視光と赤外光に感度をもつ 3 チャンネルのカメラに可視光カットフィルタを使用することで、赤外線のみを撮影し、血管領域の可視化が可能かを検証する。

また、血管可視化のためにマルチスペクトルカメラで撮影する場合には、可視光のような色情報が失われてしまう。内視鏡手術の際に、1 台のカメラをサブカメラおよび赤外線カメラの両方として使用するためには、一部帯域画像から可視光画像を復元することが必要となる。本章では、可視光画像である婦人科の腹腔鏡手術画像のデータセットの RGB の各成分の画像およびグレースケールに変換した画像から、pix2pix を用いての可視光画像が再現できるか検証し、赤外線画像のような一部の波長帯域の画像からの可視光画像復元の可能性を検証する。

4. 研究成果

(1) マルチカメラ環境下での内視鏡手術実験結果

内視鏡手術のトレーニング方法の 1 種として 10 個程度の平面上の小さなリングに内視鏡の映像を見ながら針を通していくものがある。今回の実験では、直径 4mm のリングを円形状に配置し指定した順番に針をリングに通していき、すべてのリングに針を通すまでの時間を計測する。サブカメラの効果を検証するために、内視鏡映像ではすべてのリングの見え方が一様だが、サブカメラではそれぞれのリングの高さや位置の違いが認識できるよう、ランダムにリングの高さに $0\text{mm} - 10\text{mm}$ の高低差をつけて行った。

計測を行う際には、ドライ BOX の中央のポートに状況に応じて自由に視点を移動できるカメラ 1（内視鏡用カメラ）を挿入し、それに対して垂直の視点となるようカメラ 2（サブカメラ）を固定する。カメラ 1 のみで行うものを実験 1、カメラ 1 とカメラ 2 両方を用いて行うものを実験 2 とする。20 代の工学部の男子学生 3 人（以下 A・B・C とする）に対して実験を行ってもらい、実験 1・実験 2 を交互にそれぞれ 10 回ずつ行った。なお、実験 1・2 の条件で 5 回ずつ事前トレーニングを行ったのちに、計測を行った。それぞれの学生のカメラの台数ごとの手術トレーニング遂行時間の計測実験の結果を図 2 に示す。

図 5.7 より、3 人ともサブカメラを使用した場合のほうが、遂行時間が短くなっているのがわかる。試行ごとにばらつきがあるため、各条件での 10 回の遂行時間の合計で比較すると、サブカメラを用いた場合のほうが A・B・C はそれぞれ 15.2%、19.7%、26.6% 短くなった。また、全体合計でみると 20.8% 遂行時間が短くなった。

次に、マルチカメラ環境下での豚肺葉摘出実験時に、術者がサブモニターを見た回数を、見ている時間により注視（1 秒以上）と瞥見（一秒未満）に分ける。また、手術中の作業内容を動画から 4 つに分けて集計した。術者がサブモニターを見た回数を注視、瞥見分けて動画から集計した結果を図 8 に示す。結果より、脂肪などを焼き切る作業の割合が大きく、サブモニターを見ている回数も多い。しかし、作業時間に対してのサブモニターを見た割合は切除部位を縫合するための糸通しが最も割合が高く、繊細な作業が必要な場

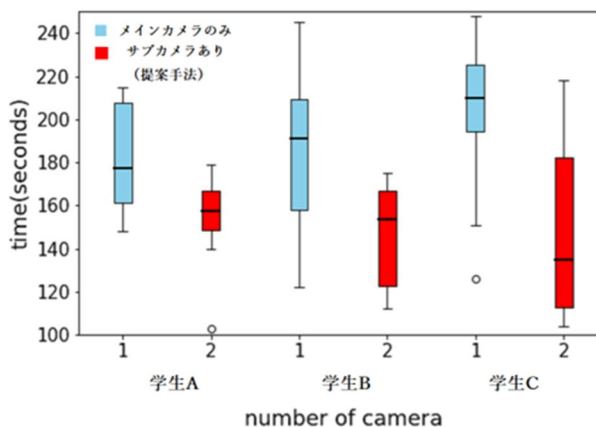


図 2. タスク遂行時間の変化

合にサブモニタを注視していることがわかる。

実際に手術を行った医師に2台目のカメラある場合のメリット、デメリットを聞いたところ以下の意見が得られた。まず、メリットとして、「新しい視点を活用することで素早く安全確認が可能(従来はカメラを抜いて別の穴から入れ直していたが、もう一つのモニタに目を向けるだけでいい。)」 「全体を俯瞰する映像と細部を拡大する映像などがあると、理解しやすい。」 「安心感がある」という意見が得られた。デメリットとしては、「別の穴を開けるのは、患者の侵襲が増えるため避けたい」「今回用意した工業用内視鏡カメラでは、画像が不鮮明で細部が見えず、カメラの向きのコントロールもできないため使えない」「医療用内視鏡2台を使うと、カメラ助手が更に一名必要になる」との意見であった。

これらの意見を総合すると、1台の内視鏡カメラは全体を俯瞰する位置に固定し、2台目の内視鏡カメラを従来どおりカメラ助手が、従来よりも術部を拡大して表示するように操作することで、内視鏡手術の効率と安全性を高められる可能性が示された。

(2) 収縮肺の三次元計測実験結果

角度ごとに ICP を用いて合成した結果例を図 2.5, Colored PCR を用いて合成した結果例を図 2.6 に示す。統合点群の2視点の角度差ごとで、それぞれの角度で35回ずつ行ったため、それぞれの手法での統合成功率を図 2.7, 図 2.8 に示す。ただし、いずれの手法を用いた時も50°以上の時は全く合成することができなかつたため省略した。ICP を用いた時は、角度が20°以上の時はほとんど合成することができなかつた。この原因は、ICP は表面の形状のみで合成するため、今回の対象物が卵型で形状の特徴が乏しく、同じような特徴を持つ点が多くあつたためだと考えられる。

Colored PCR を用いた時は30°以下で統合成功率が50%を上回っており、20,30°ではICPよりも統合成功率が大きく改善していることがわかる。ICP は形状特徴のみを利用してしたが、Colored Point Cloud Registration ではそれに加えて表面の色情報のテクスチャを利用していため統合成功率が改善したと考えられる。

Colored PCR を用いることで、ICP より統合成功率が大幅に向上したが、視点角度差40°以上の場合ではColored PCR でも合成は困難である。Colored PCR を使用すると収縮肺全体の三次元計測を行うためにはかなり多くの台数が必要となるため、実際の手術でこの手法を用いて合成して肺の三次元形状の撮影を行うことは困難であると考えられ、今後は別の手法を検討する必要がある。

(3) 赤外線カメラによる血管強調表示と赤外画像からカラー画像の復元結果

肺の代わりに腕を撮影した赤外線画像に対して、血管領域と抽出し、強調表示した結果、皮膚表面付近に存在する血管領域を可視化することができたものの、多くのノイズが混じっており完全に分離することはできなかつた。

内視鏡手術の際に、1台のカメラをサブカメラおよび赤外線カメラの両方として使用するためには、一部帯域画像から可視光画像を復元することが必要となる。本章では、可視光画像である婦人科の腹腔鏡手術画像のデータセットのRGBの各成分の画像およびグレースケールに変換した画像から、pix2pixを用いての可視光画像が再現できるか検証し、赤外線画像のような一部の波長帯域の画像からの可視光画像復元の可能性を検証する。

腹腔鏡手術画像のデータセットから、学習用画像5000枚・テスト用画像500枚を使用する。前処理を行いリサイズした画像(図12(b))と各成分画像(図12(c)-(f))の2枚1組の画像をpix2pixに入力して学習を行う。学習結果を用いて500枚のテスト用画像の各成分画像から可視光画像を復元し、元画像とpix2pixによる復元画像との1pixel当たりの誤差を表すMAE(平均絶対誤差)およびRMSE(平均平方二乗誤差)によって評価をする。

学習画像を50枚、500枚、5000枚、15000枚と変化させて、学習画像の枚数による精度検証を行った。復元結果の例を図14に示す。図より、いずれの成分画像で学習を行った場合でも、学習画像が多いほどMAE, RMSEが小さくなり、復元精度が高くなっているのがわかる。図14の実際の復元結果を見ると、学習枚数50枚でも血管部分と鉗子の色は再現できているが、学習枚数が多いほど微細な色合いを再現できているのが確認できる。少ない枚数でも再現できているのは、手術映像においてどのような場面でも赤の濃淡でほとんどの領域が占められているためだと考えられる。

以上の結果より、赤外線領域で撮影した画像をもとに、通常の色調のような色調を再現できることを示した。しかし、実際の手術時に使用するには色変換速度の関係から、表示できるフレームレートが下がることや、誤変換や偽変換が手術手技に与える影響を慎重に検証する必要がある。



(a)元画像



(b)学習データが 50 枚の場合
(MAE=10.3, RMSE=14.4)



(c)学習データが 500 枚の場合
(MAE=10.6, RMSE=15.3)



(d)学習データが 5000 枚の場合
(MAE=7.9, RMSE=11.8)



(e)学習データが 15000 枚の場合
(MAE=8.1, RMSE=12.1)

図 14. 学習枚数ごとの G 成分の学習による復元画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 板野浩司, 森本雅和
2. 発表標題 胸腔鏡下手術のマルチカメラ支援システム
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masakazu Morimoto, Teijiro Isokawa Nobuyuki Matsui, Yoshimasa Maniwa, Yugo Tanaka
2. 発表標題 A Study on Endoscopic Surgery Support System
3. 学会等名 10th International conference on Informatics, Electronics & Vision (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	眞庭 謙昌 (Maniwa Yoshimasa) (50362778)	神戸大学・医学研究科・教授 (14501)	
研究分担者	松井 伸之 (Matsui Nobuyuki) (10173783)	兵庫県立大学・工学研究科・特任教授 (24506)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 雄悟 (Yugo Tanaka) (20403256)	神戸大学・医学部附属病院・講師 (14501)	
研究分担者	磯川 梯次郎 (Teijiro Isokawa) (70336832)	兵庫県立大学・工学研究科・准教授 (24506)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------