

令和元年6月16日現在

機関番号：32657

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12915

研究課題名(和文)鏡視下手術支援ロボットも臓器同定が可能な可視光・不可視光同時撮像内視鏡の開発研究

研究課題名(英文) Research and development of a visible and invisible-light sensitive endoscope for even a surgery-assisting robot to identify organs in endoscopic surgery

研究代表者

宮脇 富士夫 (MIYAWAKI, fujio)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：50174222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：鏡視下外科手術用内視鏡の可視光動画を人間に、紫外光および赤外光の動画を手術支援ロボットに提供できる鏡視下手術用可視光・不可視光同時撮像内視鏡を試作した。本研究では、本内視鏡の機構の確立および仕様の決定を目的とする。近赤外光用カメラの前面に設置する近赤外光透過フィルタは優れたハイパスフィルタ性能を有す市販品が存在していたが、近紫外光透過フィルタは単独のものは存在せず、2枚のフィルタを重ねて使用することとした。これらを内視鏡に内蔵させ評価した結果、近赤外光用カメラは明瞭な画像が取得できたが、近紫外光用カメラは合計3台評価したものの、ロッドレンズでの減衰が大きく、視認可能な画像は取得できていない。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者は「Scrub Nurse Robot (SNR; 器械出し看護師ロボット)」という手術支援ロボットを提案し、その開発に着手した。このSNR開発の過程で、鏡視下手術で撮像される内視鏡映像から内臓などを手術支援ロボットも認識できれば、より高度の手術支援が可能となるのではないかと考えた。そして、動物内臓表面の不可視光に対する反射特性を検討した結果、不可視光動画をロボットに、可視光動画を執刀医に提供する内視鏡を考案し試作した。

期間内の研究結果から、明瞭な近赤外光画像は取得できたが、近紫外光画像はまだ取得できていない。これに関する幾つかの問題点を解決しつつ当初の目標を達成する。

研究成果の概要(英文)：A visible and invisible-light sensitive endoscope for endoscopic surgery was invented. A visible-light, infrared-light and ultraviolet-light sensitive cameras were equipped with the endoscope. Both the infrared and ultraviolet-light images are used for a surgery-assisting robot to identify organs and understand what surgical procedure a surgeon is currently conducting, and the visible-light images are presented to the surgeon. High-pass and low-pass filters are indispensable to the infrared and ultraviolet-light sensitive cameras, respectively. We examined the properties of commercially-available filters. Good high-pass filters for infrared light were available and clear infrared images were obtained. However, any low-pass filter for ultraviolet light did not exist, and two different filters were used. Finally, no visible images were obtained probably due to the characteristic of a rod lens under strong near-ultraviolet-light irradiation, although three different cameras were tested.

研究分野：生体医工学

キーワード：鏡視下手術支援ロボット 器械出し看護師ロボット 臓器同定 内視鏡 透過・遮断フィルタ 近紫外光用カメラ 不可視光撮像 可視光撮像

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 研究代表者は、世界で初めて「Scrub Nurse Robot (SNR; 器械出し看護師ロボット)」という手術支援ロボットを提案し、その開発に着手した。その後、この SNR の開発は、2 つの科学研究費基盤研究 (B) を通して着実に進展している。その過程で、鏡視下手術で撮像される内視鏡映像から内臓などを手術支援ロボットも認識できれば、より高度の手術支援が可能となるのではないかと考えた。そして、近紫外光と近赤外光に着目し、動物内臓表面の不可視光に対する反射特性の検討した結果、単一あるいは複数の不可視光波長の使用によって、種々の臓器同定が可能であることが判った。

### (2) 鏡視下手術用可視光・不可視光同時撮像内視鏡試作 1 号機 (図 1) の構造と機能

鏡視下外科手術用内視鏡で撮像される可視光動画を術者に、近紫外光および近赤外光動画を手術支援ロボットにリアルタイムに供給できる内視鏡を考案し、その試作 1 号機を作製した。その構造と特徴は下記のようなものである。

#### 1) 光束分割

2 つの光束分割プリズム (分割比 7 : 3) によって、元の光量の 30% を可視光路に、20% を赤外光路に、50% を紫外光路に導く仕組みとし、可視光撮像素子にはフルハイビジョンの 1/3 インチ単板 MOS を、不可視光撮像素子には標準画質の 1/3 インチ CMOS (35 万画素、株式会社 NSK)

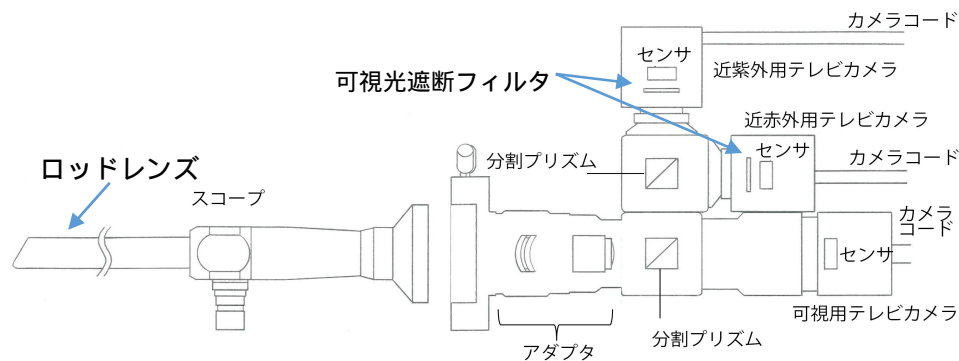


図 1 鏡視下手術用可視光・不可視同時撮像内視鏡 試作 1 号機

を使用している。

#### 2) 特殊ロッドレンズ

ロッドレンズは特注のレンズを使用した。すなわち、通常のロッドレンズは紫外光と赤外光を遮断するコーティングが施されているが、本ロッドレンズはそのコーティングを除去しており、できるだけ不可視光を透す仕様になっている。

### 2. 研究の目的

本試作機には不可視光画像の明るさに関する検討課題が残されており、本研究ではこれを不可視光源の照射光量および試作内視鏡の機構の観点から検討し、可視光・不可視光同時撮像内視鏡の機構の確立および仕様の決定を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 分光測定

具体的な明るさの指標として、過去の動物実験で得られた明るさの不可視光画像が得られれば、手術支援ロボットは臓器同定可能と考えている。しかし、動物実験の際の不可視光撮像カメラ (C8000-30: 浜松ホトニクス社製; BT-CCD (背面照射型 CCD) を採用しており、紫外域から可視、近赤外域に至る波長域で高い光電変換効率をもつカメラ) とその撮影条件は本内視鏡のそれらとは全く異なっているため、まず対象物までの距離、不可視光源の種類と照射光量を変数とし、内視鏡に戻ってくる反射光量をマルチチャンネル分光器 (PMA-12: 浜松ホトニクス社製; 測定可能波長域: 200 ~ 950 nm) で測定した。因みに、この分光器で計測する光量の単位はカウントである。

#### 1) 各種光源の分光測定

本研究の不可視光源は小型で安定した単一波長の不可視光を照射できる LED を光源として使用し、本研究で使用する分光器は測定波長範囲が 200 nm から 950 nm であるため、使用する LED の波長はこの測定範囲内とした。

紫外光源はレボックス社製の 2 種類の LED 光源 (365 nm、375 nm)、日亜化学工業社製の 375 nm UV-LED を三灯使用したブラックライト (SK375UV-002)、オプトコード社製の高出力 UV-LED 卓上スポット 385 nm (LED385-SPT/L.) を使用し、それぞれの分光測定を行った。紫外光源出力はレボックス社製、日亜化学工業社製、オプトコード社製の順で高くなっているが、オプトコード社製の光源は出力をつまみ調節できるタイプである。

赤外光 LED 光源はレボックス社製の 780 nm、810 nm、890 nm、940 nm の波長を使用し、それぞれの分光測定を行った。また、鏡視下手術で使用されるキセノン光源 (CL-300X、新興光器社

製)の分光測定も行った。

レボックス社製の LED 光源を使用する際には、自作の LED 光源切替装置(図2)を使用した。この装置の電圧が12Vであり、レボックス社製紫外光 LED 一個の直流順電圧が3.6V、赤外光 LED 一個の直流順電圧が3V以下であることから、紫外光 LED は三個一組、赤外光 LED は四個一組として使用した。

これらの分光特性計測方法は光源から15cm離れた位置に鏡を置き、鏡面から全反射されてくる強い光に対して(臨床よりも過酷な条件)種々の条件下で実験を行った(図2)。但し、図2は分光器受光プローブの前面にフィルタを設置しているが、光源の分光特性計測ではフィルタは当然設置しない状況で計測した。分光器受光プローブの上部に LED 光源を取付け、鏡面との距離が15cmになるように設置した。これ以上近づけると光量の計測可能上限を超えるためである。鏡からの LED 反射光を、露光時間19msとし、十回計測し平均値を出す計測を十回行った。光源を変えながら同様の計測を行った。

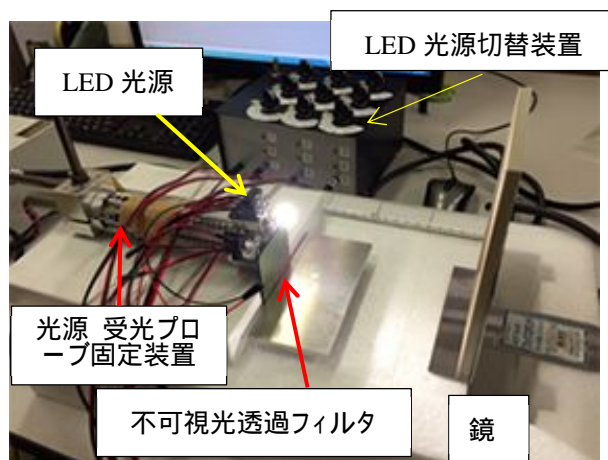


図2 分光計測実験風景

## 2) 不可視光透過フィルタの選択と評価

不可視光撮像素子の前面に設置し、所望の波長域を通すフィルタは市販品(図3)を使用した。しかし、近紫外光のみを透過し可視光や赤外光を遮断するフィルタは存在しないことが分かった。最も可能性の高いものが385nm以下の光を透過するフィルタ(朝日分光株式会社、385nmフィルタと略す)であり、紫外光は320nmから380nmの帯域において実質的に減衰せず透過するものの、約660nm以上の波長も透過するという欠点を持っていたが、入手し計測対象とした。

しかし、このフィルタだけでは不十分であるので、このフィルタが透過可視光領域を遮断できるフィルタを探した結果、630nm以上の波長を遮断するフィルタである近赤外線遮断フィルタ(セラテックジャパン株式会社; 630nmフィルタと略す)を見つけた。製造会社の仕様によると350nmから630nmの帯域は90%以上透過し、650nmから670nmは約50%透過し、700nmから1050nmは0.5%未満しか透さないとのことであり、入手して検討することとした。

赤外光透過フィルタは3種類(朝日分光株式会社)を試した。780nm以上の赤外光を通すフィルタ(780nmフィルタと略す)、810nm以上の赤外光を通すフィルタ(810nmフィルタ)、930nm以上の赤外光を通すフィルタ(930nmフィルタ)である。

## (2) 不可視光画像の評価

上記の評価実験の後に適切と判断したフィルタを内視鏡試作1号機に内蔵させて評価したが、結果の項に詳述したように、視認可能な近紫外光画像が取得できなかったため、本内視鏡に搭載でき、高価すぎず、近紫外光に感度のあるカメラを探した。1台目のカメラはARTCAM-500MI-BW-WOM-OP(アートレイ社)であり、2台目として380nm近辺で前記のカメラよりも感度(相対感度は約70%)が高いARTCAM-407UV-WOM(図4、アートレイ社)を入手して評価した。

まず、内視鏡に装着する

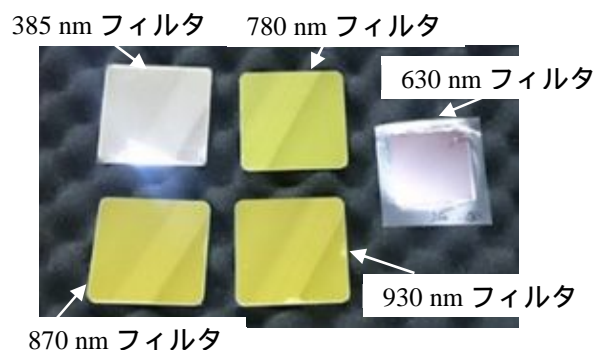


図3 評価したフィルタ

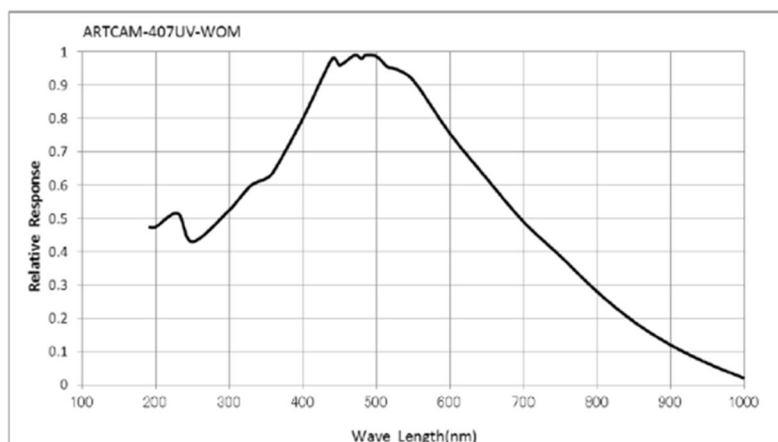


図4 ARTCAM-407UV-WOMの波長特性の仕様

前に視認可能な画像が得られる最小近紫外光量を計測した。その際には、紫外光カメラの前面に紫外光透過フィルタを設置し、被写体の人体模型から 500 mm 離れた。紫外光源は 100 mm、分光器プローブは 50 mm 離して、不可視光画像撮影と分光計測を同時に行った（図 5 装着前）。

次に、紫外光カメラと近紫外光透過フィルタを内視鏡に装着した後に不可視光画像撮影と分光計測を同時に行った（図 5 装着後）。この際、内視鏡の先端は被写体から 500 mm ではなく、40 mm 離して設置した。このように距離が装着前後で異なる理由はそれぞれの焦点距離に合わせたためである。

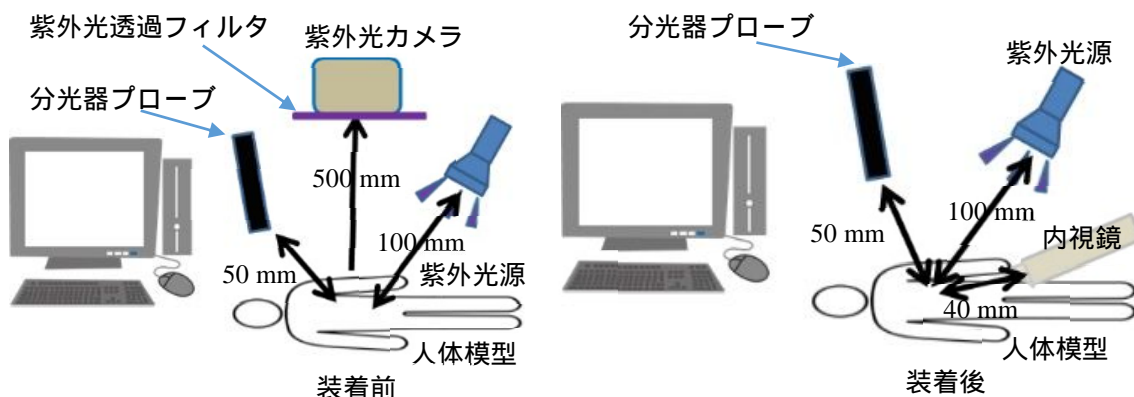


図 5 不可視光カメラの装着前後評価実験

#### 4. 研究成果

##### (1) 分光測定

###### 1) 各種光源の分光測定

キセノン光は、可視光領域は 6 ~ 10 万カウントの反射光量を示し、800 nm 台後半から 950 nm までは 20 万カウント以上であったが、380 nm 未満の紫外光は殆ど含まれていなかった。

###### 2) 不可視光透過フィルタの選択と評価

近紫外光透過フィルタとして可能性のある 385 nm フィルタの特性を検証した。図 6 はフィルタを設置しない状態で、375 nm および 940 nm LED 光を鏡面に向かって同時に照射した時の分光器が捉えた反射光であり、381 nm で 11.6 万 Counts、938 nm で 15.6 万 Counts のピークを持つ光

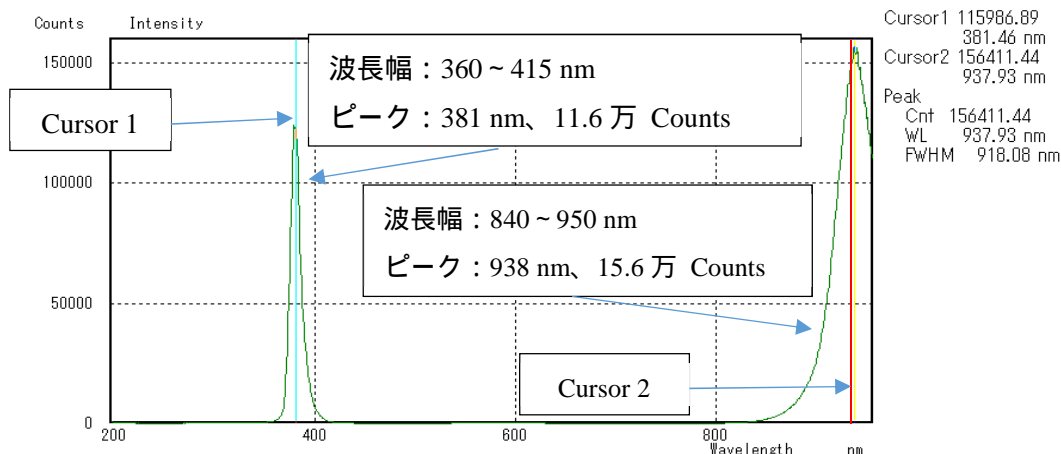


図 6 375 nm および 940 nm LED 光同時照射時の光量

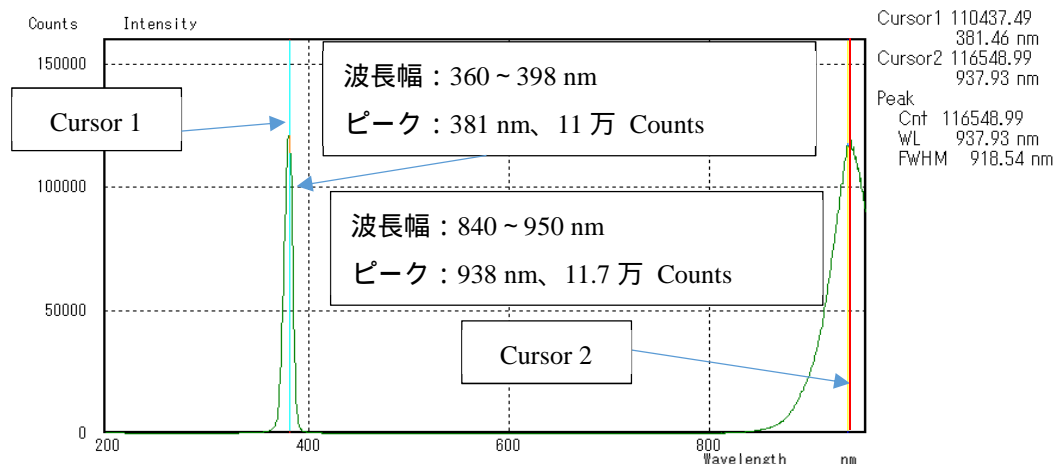


図 7 375 nm および 940 nm LED 光同時照射に対する 385 nm フィルタの効果

が記録された。

次に、分光器プローブの前面に 385 nm フィルタを密着した場合（図 7） 375 nm 光源に含まれている 385 nm 以上の光は完全に遮断されていた。さらに、フィルタの無い場合の 381 nm が 11.6 万 Counts であったのが、385 nm フィルタを装着してもピーク値は 11 万 Counts であり、わずかに減衰するに留まった。一方、940 nm の LED 光のピークは 385 nm フィルタ無しの場合 15.6 万 Counts であったのが、385 nm フィルタ有りの場合でも 11.7 万 Counts が計測されており（75 % ほど透過） 385 nm フィルタは赤外光を殆ど遮断できないことが追試できた。

次に、この 385 nm フィルタに、630 nm 以上の波長を遮断するフィルタを重ね合わせて、分光測定を行ったところ、381 nm のピークは 7.2 万カウントに減衰した（フィルタ無しから約 38% の減衰）が、940 nm LED からの光が完全に遮断できていた（図 8）。このことから 385 nm と 630 nm フィルタの二枚組にして近紫外光カメラの前面に設置することとした。

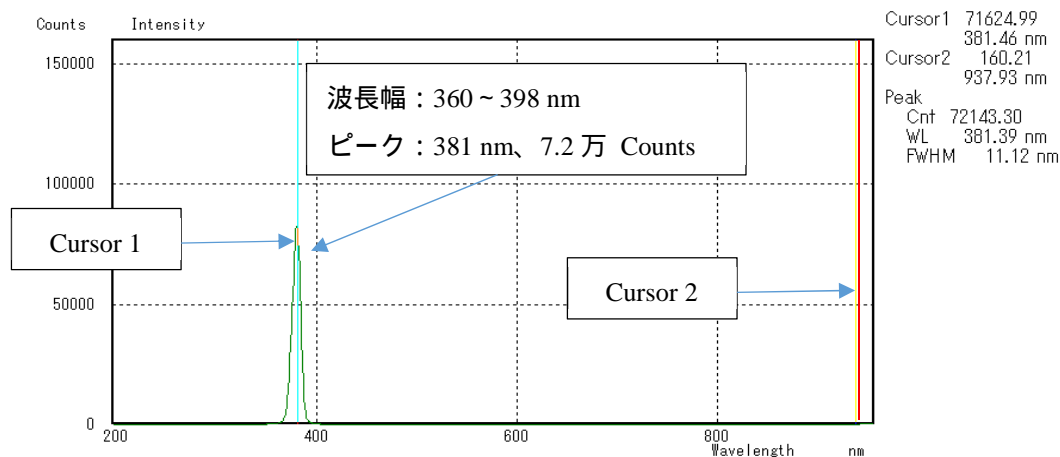


図 8 375 nm および 940 nm LED 光同時照射に対する二枚組フィルタ（385 nm と 630 nm）の効果

近赤外光透過フィルタとして検証した 3 種類のフィルタ（780 nm フィルタ、810 nm フィルタ、930 nm フィルタ）はいずれもそれぞれの LED 光源をほとんど減衰せずに透過するとともに優れたハイパスフィルタ特性を示した。

## (2) 不可視光画像の評価

### 1) 試作内視鏡 1 号機（標準画質カメラ）の評価

上記で検討し適切と判断したフィルタを内視鏡に内蔵できるように加工して、試作機の製造を委託した会社に近紫外光透過フィルタ（2 枚組み）と近赤外光透過フィルタをそれぞれのカメラの前面に設置し、焦点の微調整をしてもらい、本内視鏡で撮像される不可視光画像の明るさを検討した。

まず、内視鏡の先端部を人体模型の手前 3~5 cm に設置し、先端からキセノン光を照射し、人体模型の映像を取得した。赤外光カメラでは明瞭な画像が得られたため、可視光ばかりでなく大量の近赤外光を含んでいることが確認された。さらに、ごくわずかではあるが紫外光カメラも感光していた（画像としては全く認識できなかった）。この理由は 2 枚組の近紫外光透過フィルタは可視光および 1,000 nm までの赤外光は遮断できるが、それ以上の赤外光（製造会社の仕様によれば 1,150 nm まで計測しており、透過することが分かっている）は遮断できないからであり、キセノン光に含まれる 1,000 nm 以上の赤外光に感光したことが示唆された。

上記と同じ条件で、人体模型に近紫外光光源（ピーク波長 375 nm）を照射して（分光器では内視鏡には 13.8 万カウントの近紫外光が入っている条件）内視鏡画像を取得したが、紫外光カメラには全く何も写っていなかった。しかし、この光源を直接内視鏡に照射すると光源は明瞭に写ってはいいたので、カメラの感度に問題があると判断した。

### 2) 試作内視鏡 2 号機（USB2.0 CMOS カメラ：ARTCAM-500MI-BW-WOM-OP、アトレイ社）の評価

装着前評価：分光器で取得した反射光量のピークが約 13.8 万 Counts のとき十分認識可能な画像が取得できた。紫外光透過フィルタはこれまでの評価から約 40 % 減衰することが分かっているため、カメラには約 8.3 万 Counts の光量が届いていると判断した。

装着後評価：この UV カメラを内視鏡に装着して（図 9）評価したが、装着前評価と同様の光量にも拘わらずカメラは認識可能な画像を取得できなかった。

内視鏡を構成する種々のガラス製品の仕様を検索した結果、フィルタによる前記の減衰率以外に、ロッドレンズによって約 16% 減衰し、最初のプリズム表面で約 10% 低下し、このプリズムの光路分割で約 30% 低下し、2 個目のプリズム表面で約 10%、このプリズムの光路分割で約 30% 低下する。最後にフィルタによ

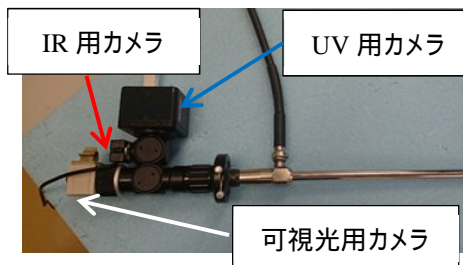
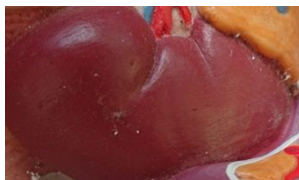


図 9 試作 2 号機

て約 40%低下するので、結局元の約 20%の近紫外光しか紫外光カメラに届かない計算となった。それでも約 2.6 万カウント強の近紫外光が CMOS に届いているはずであるため、紫外光カメラとして使用しているカメラに問題があると判断した。

3) 試作内視鏡 3 号機 ( CCD カメラ : ARTCAM-407UV-WOM、アートレイ社 ) の評価

装着前評価 : 試作 2 号機で使用したカメラよりも高感度のカメラ ( ARTCAM-407UV-WOM ) の前面には 2 枚組み紫外光透過フィルタを装着し、図 5 のような設定で、385 nm 近紫外光源 ( オプトコード社 ) を人体模型に向けて照射した。同時に、人体模型からプローブを 40 mm 離して反射光量をマルチチャンネル分光器で計測しつつ、種々の光量のもと暗室内で撮影した。



可視光照射下



紫外光照射下

図 10 人体模型の可視光と紫外光写真 ( 装着前評価 )

385 nm の反射光量が約 2,500 Counts でさえも、全体的に暗いが認識可能な映像が高感度近紫外光用カメラで撮影できた ( 図 10 )。フィルタによる減衰を考慮すると、約 1600 Counts の近紫外光がカメラに入射していると計算できたので、この光量がこの近紫外光カメラの撮影可能最小光量と判断した。

装着後評価 : 製造委託会社に高感度近紫外光カメラとその撮像素子の前面に 2 枚組み近紫外光透過フィルタを装着してもらい、焦点調節を行ってもらった。さらに、近赤外光カメラとしてこれまで使用していた標準カメラを別の高感度の近赤外光カメラに取り替えて、その前面に近赤外光透過フィルタを装着してもらい、焦点調節を行ってもらった ( 図 11 )。

近紫外光光源を最大出力まで上げたが認識可能な画像是取得できなかった。内視鏡製作を委託した会社に問い合わせ、ロッドレンズについて詳細な検討をした結果、ロッドレンズで想定以上の近紫外光減衰が起きている可能性が浮上し、現在対処法を検討している。

このように、鏡視下手術用可視光・不可視光同時撮像内視鏡には近紫外光照射時の画像是取得できていない問題がある。解決策として、近紫外光画像のみロッドレンズを介さない方法を現在検討中である。

また、近紫外光透過フィルタとして使用している、2 枚重ねの市販のフィルタの改良、あるいは専門業者による特注品による改良も必要と考えている。新規の特注品設計の際には、1,000 nm 以上の赤外光を透すという問題も解決しなければならない。この問題は、キセノン光源自体に赤外光を減弱するフィルタを装着する方法も考えられる。

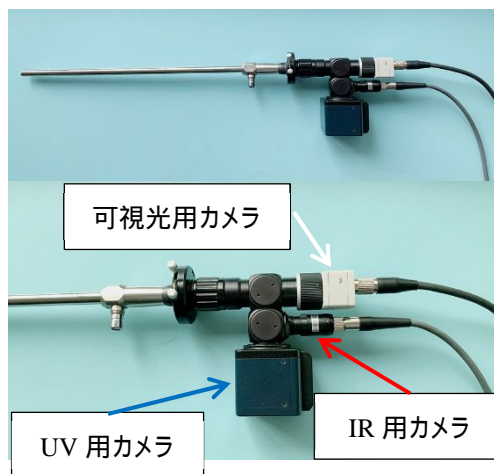


図 11 試作 3 号機

## 5 . 主な発表論文等

なし

[ 雑誌論文 ] ( 計 0 件 )

[ 学会発表 ] ( 計 0 件 )

[ 図書 ] ( 計 0 件 )

[ 産業財産権 ]

出願状況 ( 計 0 件 )

取得状況 ( 計 0 件 )

[ その他 ]

ホームページ等

<http://www2.miyawaki-lab.com/>

## 6 . 研究組織

(1) 研究分担者 : なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 中山 翔太郎

ローマ字氏名 : ( NAKAYAMA , syotaro )

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。