

「2023年度遠隔診療に向けたマルチスペクトルカメラ開発および画像システム実用化のフィジビリティスタディ 補助事業」報告書

埼玉医科大学 保健医療学部

小林 直樹



この報告書は、競輪の補助により作成しました

目次

1. 研究の概要	4
2 研究の背景と目的	5
2.1 背景	
2.2 技術的課題	
2.3 目的	
2.4 研究の進め方	
2.5 研究の意義	
3 研究内容	8
3.1 診断項目の明確化	
3.1.1 遠隔診療における課題と対象	
3.1.2 具体的診断項目の特定方法	
3.2 対面診療の患者を対象とした分光画像撮影	10
3.2.1 皮膚病変の遠隔診断用画像システム	
3.2.1.1 撮影画像の決定	
3.2.1.2 ハイパースペクトル撮影条件の検討	
(1) 使用機材	
(2) 撮影環境	
(3) 撮影条件の検討	
3.2.1.3 マクロ検体の撮影	
3.2.1.4 アノテーションの作成	
3.2.2 遠隔診断用バイタルデータ取得用マルチスペクトル画像撮影	18

3.3	診断用スペクトル帯域の決定	22
3.3.1	皮膚病変の辺縁特定および良性/悪性の判定	
3.3.1.1	病理診断による病変部位および診断名の特定	
3.3.1.2	色域の分割法の評価	
3.3.1.3	クラスタリングを用いた PCA による次元削減方式の検討	
3.3.2	遠隔診断用バイタルデータ取得用マルチスペクトルカメラ	
3.4	遠隔診療用マルチスペクトルカメラの試作	27
3.4.1	皮膚病変向けマルチスペクトルカメラ	
3.4.2	遠隔診療向けバイタルデータ取得マルチスペクトルカメラ	
3.5	マルチスペクトルカメラを用いた画像システムによる フィジビリティ評価	29
3.5.1	皮膚病変向けマルチスペクトルカメラのフィジビリティ検証	
3.5.2	遠隔診療向けマルチスペクトルカメラ画像システムのフィジビリティ検証	
3.5.2.1	検証実験内容	
3.5.2.2	フィジビリティ検証システム	
3.5.2.3	マルチスペクトル画像による遠隔診療のフィジビリティ検証結果	
4.	まとめ	37

1. 研究の概要

【背景】 コロナ渦でオンライン診療の実施が広がりを見せている。その中で医師は肌の色、目、皮膚の疾患状態等の映像から目視診断するが、現在のRGBカメラを用いたシステムでは、目視診断で重要な微妙な色の差を再現できず、高度な診断は困難となっている。加えて、患者側の撮影条件により再現色が不安定で診断項目が限定され、オンライン診療・遠隔診療の大幅普及の阻害要因の一つとなっている。

この課題を克服するため、①肌の色、目の粘膜状態、皮膚の疾患状態など微妙な色あいを含んだ高精度な色再現 ②疾患特性に対応した疾患の特定・疾患範囲（辺縁）の可視化を実現する最適な複数フィルタ搭載のマルチスペクトルカメラ開発および画像システムを実用化が望まれている。

【目的】 本研究では、高度な目視診断を可能とするマルチスペクトルカメラ開発および画像システムの実用化に向け、①肌の色、目の粘膜状態、皮膚の疾患状態など診断に結びつく高精度な色再現に必要なスペクトル情報 ②疾病の特徴および疾病辺縁特定を高精度で実現するスペクトル帯域の2点を対面診療（臨床）の患者撮影データから明確にし、高精度の色再現を可能とする遠隔診断用偏光分光型マルチスペクトルカメラを開発する。加えて、本カメラを用いた画像システムを遠隔診療の臨床現場で利用し、有効性に関するフィジビリティスタディを行う。

【研究の進め方】 上記の検証に向けて、以下のステップで検証を進める
上記の検証に向けて、以下のステップで検証を進める。

- (1) 実用化する診断内容の決定
- (2) 対面診療の患者を対象とした分光画像撮影
- (3) 診断用スペクトル帯域の決定
- (4) 遠隔診療用マルチスペクトルカメラの試作
- (5) 上記マルチスペクトルカメラを用いた画像システムによるフィジビリティ評価

【新規性・発展性】 これまで行ってきた検体を対照するだけでなく、臨床での対面診療患者を対象としたスペクトル画像を撮影して診断に有効なスペクトル帯域を特定し、実用化可能な臨床向け偏光分光型マルチスペクトルカメラを開発する点は世界初の取組となる。加えて、本開発カメラを用いた画像システムを遠隔診療の臨床現場でフィジビリティ検証し、臨床医によって効果を評価することも従来行われていない。本開発・検証は、遠隔目視診断における新開発カメラの有効性・実用性を検証するもので、遠隔診療はもとより、対面診療、内視鏡などの目視診断への発展が期待できる。

2 研究の背景と目的

2.1 背景

コロナ渦においてオンライン診療の実施が普及し、広がりを見せている。その中で医師は肌の色、目、皮膚の疾患状態などを映像から目視診断するが、今の実用システムでは、疾患状態を診断するために必要十分な映像品質が得られていない。特に、目視診断で重要な微妙な色の差を既存のRGBカメラでは十分再現できず、映像情報を利用した高度な目視診断は困難となっている。加えて、患者側の撮影条件により、医師側に再現色が一定ではない事などが原因で、診断項目が限定され、遠隔診療の大幅普及の阻害要因の一つとなっている。

2.2 技術的課題

オンライン診療・遠隔診断向けの最適な複数フィルタを搭載したマルチスペクトルカメラを開発し、①肌の色、目の粘膜の状態、皮膚の疾患状態など微妙な色あいを含んだ高精度な色再現 ②疾患の特性に対応した、疾患の特定・疾患範囲の忠実再現 を実現可能とする画像システムを構築することで、オンライン診療および皮膚疾患の遠隔診断における診断精度の向上し、その普及促進につなげる。また、本方式は遠隔診断のみならず、新たな高精度な皮膚疾患診断支援につながるものである。

忠実な色再現性を実現する技術として、マルチスペクトル撮影・表示を用いた技術提案・検討されている*。この方式は、RGB3 バンドでの撮影、表示では再現できない色を、多バンドで計測することで、対象物の分光吸光度をより正確に読取り、そのスペクトルを用いて忠実な色再現を可能とする技術である。一方、この方式を用いて、あらゆる色域でまんべんなく色再現精度を上げようとする、医療診断への応用において、特に精度を必要とする色域の色再現精度や患部の診断に関わる帯域のスペクトル精度が低下する可能性がある。このため、遠隔医療の実現に必要なマルチスペクトルカメラを設計するためには、高精度な色再現が必要な色域を明確にし、加えて、患部の診断に関わるスペクトル帯域を明確にすることが必要となる。

オンライン診療・遠隔診療向けに、この課題を克服するため、①肌の色、目の粘膜状態、皮膚の疾患状態など微妙な色あいを含んだ高精度な色再現 ②疾患特性に対応した疾患の特定・疾患範囲（辺縁）の可視化 を実現する最適な複数フィルタ搭載のマルチスペクトルカメラ開発および画像システムを実用化が望まれている。

この実現により、オンライン診療および皮膚疾患等の遠隔による目視診断における診断精度の向上し、遠隔診療の普及促進につなげる。また、本方式は遠隔での目視診断のみならず、新たな高精度な皮膚疾患などの目視診断や内視鏡診断の支援にもつながるものである。

*山口雅浩, “ナチュラルビジョン“, 映像情報メディア学会誌 vol. 62(9), pp. 1396-1402, 2008

2.3 目的

本研究では、高度な目視診断を可能とするマルチスペクトルカメラ開発および画像システムの実用化に向け、①肌の色、目の粘膜の状態、皮膚の疾患状態など疾患診断に結ぶつく高精度な色再現に必要なスペクトル情報 ②疾病の特徴および疾病辺縁特定を高精度で実現するスペクトル帯域 の 2 点を対面診療（臨床）の患者撮影データから明確にし、高精度の色再現を可能とする遠隔診断用偏光分光型マルチスペクトルカメラを開発する。加えて、本カメラを用いた画像システムを遠隔診療の臨床現場で利用し、有効性に関するフィジビリティスタディを行い、その有効性を示すことを目的とする。

2.4 研究の進め方

本事業では、オンライン診療・遠隔診断の実用化に向けて、臨床での対面診療の患者を対象とした分光画像データの撮影を行い、そのデータをもとに診断項目に適した高精度な色再現と疾病の特徴・辺縁を特定可能とするスペクトルデータを特定する。さらに、その結果に基づいて遠隔診療用の偏光分光型マルチスペクトルカメラの開発をするとともに画像システムを実現し、実際の遠隔診療でのフィジビリティ検証実験を行う。上記の検証に向けて、以下のステップで検証を進める。

①実用化する診断内容の決定

実際の遠隔診療において必要かつ適用価値の高い診断内容を共同研究者の医師と決定する

② 対面診療の患者を対象とした分光画像撮影

上記診断内容に関わる部位（目の粘膜、皮膚表面等）を高速ハイパーペクトルカメラ（100バンド程度）により分光画像を撮影する。

③ 診断用スペクトル帯域の決定

ハイパーペクトル画像の疾病部スペクトルを用いた色素量推定結果および独自開発で求めた差分スペクトルと臨床医の診断結果から機械学習により疾病および辺縁推定を行う学習エンジンを生成する。学習エンジンによる診断推定結果の有効性を医師に評価してもらい、診断に有効な帯域を決定する。

④ 遠隔診断用マルチスペクトルカメラの試作

③の設計条件に基づき偏光分光フィルタを設計・製作し、偏光分光型マルチスペクトルカメラを開発する。

⑤ フィジビリティ検証

上記マルチスペクトルカメラを用いて、臨床現場により疾患のマルチスペクトル映像撮影を行い、臨床医による疾患の診断、疾患範囲の特定を行ってもらい、フィジビリティ評価を行う。

2.5 研究の意義

本検証は、遠隔目視診断における偏向分光型マルチメディアカメラの有効性を検証するものであり、本検討では検証される疾患への適用で培われる技術は、実用システムに転用し、オンライン診療における遠隔診断への適用は直近で利用の要望は高い。さらには、遠隔に限らず目視での病理診断、マクロ病理診断あるいは、内視鏡カメラでの診断などにも結び付いて、目視診断が必要な医療分野での発展が期待できる。また、本検討で用いられる手法は、医療分野に限らず、マルチスペクトルカメラを測定器としてとらえた場合の設計方法として応用可能となる。

3 研究内容

3.1 診断項目の明確化

3.1.1 遠隔診療における課題と対象

本検討にあたっては、遠隔診療を10年にわたり実施してきている埼玉医療センターの本間聡起医師の協力のもと、フィジビリティ検証の進め方を含めて検討を行った。本間医師は、遠隔診断を行う上で、医師が直接観察していた情報を映像として見るのが重要な診断項目は複数あるが、中でも、皮膚の状態、顔色などの視診が画像再現の重要性が特に高いと指摘している。加えて画像診断時のバイタルデータ取得も有効であるとの指摘がある。

特に、医師側表示色は患者側の本来の色と一致させる色再現性が、上記診断では必須とされており、光源や場所、天候によって色再現が一定であるとされる。加えて、映像のカメラ、ディスプレイの高解像度化で改善されているが、例えば皮膚など疾患に対しては、その病片を目視レベルで、忠実に医師に伝えることが重要な点も指摘されている。これは、マクロ病理ともいわれる診断で、例えば、皮膚の手術を行う前に、その施術部分を目視診断で事前に特定するという重要な診断になる。特に、皮膚疾患の場合、その形状、色彩は非常に微妙であり、その病片の病床の特定（たとえば、メラノーマか良性の母斑かの診断）には、経験豊かな専門医の診断が必要とされている。このため、このような専門医がいない医療施設においては、遠隔でこれらの所見を、診断支援をしてもらうことは非常に有効となる。今回、検討を行うマルチスペクトルの撮影は、色再現性という点で、この診断支援においても有効であると考えられることから、今回の診断項目として、主に皮膚疾患のマクロ病理診断における支援も視野に入れた色再現技術の検討を行うこととした。

3.1.2 具体的診断項目の特定方法

埼玉医科大学皮膚科・病理学の医師および埼玉メディカルセンターの医師との打合せを重ね、遠隔診断での診断内容を絞って検証を行うことにした。

A) 皮膚病変の遠隔診断用画像システム

埼玉医科大学病院皮膚科学・病理学の医師との打合せを重ねて検体の症例については当面对象を絞らずに検体を取得することとし、加えて、遠隔診断での診断内容は以下の2点に絞って検証を行うことに決定した。

- a) 皮膚病変辺縁の特定は、基底細胞がんを絞って高精度な診断検証を進める。
- b) 病変部の良性・悪性の判定は、病変の種類を特定せず判定できることを目標に検証を進める。

B) 遠隔診断用バイタルデータ取得

埼玉メディカルセンターの医師との打合せを重ね、遠隔診療に必要となるバイタルデータ（脈波、血圧など）をマルチスペクトルカメラを用いて取得する方式の検証を行った。

3.2 対面診療の患者を対象とした分光画像撮影

3.2.1 皮膚病変の遠隔診断用画像システム

3.2.1.1 撮影画像の決定

上記手順で得られた検体に対して、以下の画像を取得する。

- 1) 固定前の検体全体のハイパースペクトル画像
- 2) 固定後の検体全体のハイパースペクトル画像
- 3) 病理船団用切断面を示す検体全体のRGB画像
- 4) 病理診断用切断面のRGB画像

3.2.1.2 ハイパースペクトル撮影条件の検討

(1) 使用機材

本検討で用いた撮影機材を示す。

① ハイパースペクトルカメラ

ハイパースペクトルカメラにはトプコンテクノ社のSR-5000を用いた。トプコンテクノ社のSR-5000ハイパースペクトルカメラの主な仕様を表3.2.1に示す。



図 3.2..11 SR-5000

表 3.2.1.1 SR-5000 の主な仕様

測定モード	分光モード
受光器	140万画素 CCD イメージセンサ
対物レンズ	標準：f = 32mm 標準+広角アタッチメントレンズ：f = 24mm 望遠：f = 140mm マクロ ※レンズ選択式
有効画素数	1376 × 1024
データビット	14 bit
測定範囲	0.5～5,000,000 cd/m ²
測定波長範囲	380～780 nm
波長精度	±0.5 nm Hg 輝線において高精度モード時
スペクトル波長幅	7 nm(半値幅)
波長分解能	1 nm
直線性	輝度：±2%以内 色度：±0.002 以内

	望遠、マクロは±0.0035 以内(1cd/m ² 以下) ±0.002 以内(1cd/m ² 超過)±0.005 以内
面内ムラ均一性	輝度：±2%以内 色度：0.003 以内
繰返し精度	輝度：0/5%以下 色度：0.002：0.5～1 cd/m ² 0.001：1 cd/m ² 以上
インターフェース	USB 3.0/外部トリガ
電源	専用 AC アダプタ AC100～240V(50/60Hz)
消費電力	約 20W
使用条件	0～40℃、85%R.H.以下
外形寸法(突起含まず)	標準：W162×H247×D372.5 mm 広角：W162×H247×D402.4 mm 望遠：W162×H247×D412.5 mm マクロ：W162×H247×D330.5 mm
重量	標準：約 5.5kg 広角：約 5.7kg 望遠：約 7.6kg マクロ：約 4.9kg

② LED 照明

光源はセリック株式会社の Solax-iO LE-9ND55 を用いた。太陽光を再現した色彩評価用白色 LED である。Solax-iO LE-9ND55 の主な仕様と光学性能を下記の表に記載する。



図 3.2.1.2 白色 LED

表 3.2.1.2 Solax-iO LE-9ND55 の主な仕様

ランプ容量	約 8.7 W
中心光度	約 650 cd
配光角	約 40°
平均演色評価数	約 97
色温度	約 5500 K
体温湿度範囲	-10～35℃
外形寸法	φ 120×47 (mm)
重量	約 450 g

表 3.3.1.3 Solax シリーズの光学性能

中心照度	650 Lx
1/2 照度範囲	φ 0.7 m

※照射距離 1 m の場合



図 3.2.1.3 太陽光スペクトルと LED スペクトル

色を正確に見るための光は、可視光線全域にわたって、全ての色の波長を持ち、尚且つ、その分光分布がバランス良く連続スペクトルである必要がある。自然太陽光は、連続スペクトルを有するので、色彩を正確に見る光源として理想とされている。今回用いた Solax-iO は太陽光を忠実に再現した照明である[8]。

③ 偏光フィルタ

偏光フィルタにはエドモンド・オプティクス・ジャパンの TS High Contrast Plastic Polarizing Plate を用いた。エドモンド・オプティクス・ジャパンの偏光フィルタ TS High Contrast Plastic Polarizing Plate の仕様を下記の表に記載する。



図

3.2.1.4 偏光フィルタ

表 3.2.1.4 偏光フィルタの仕様

タイプ	Linear Polarizer
消光比	10,000 : 1
波長域	400~700 nm
直径	20.00 mm
寸法公差	+0.0/-0.2 mm
厚さ	2.00 mm
厚み公差	±0.2 mm
平行度	<4 分
コーティング	AR : Ravg <0.5% @ 400~700 nm
基板	Polymer Film between B270
透過率	25%
透過率公差	±2 %
平面度	< 1 λ
構造	Dichroic Polarizing Film between Glass
動作温度	-25 ~ +65 °C
偏光軸マーキング	±2 °

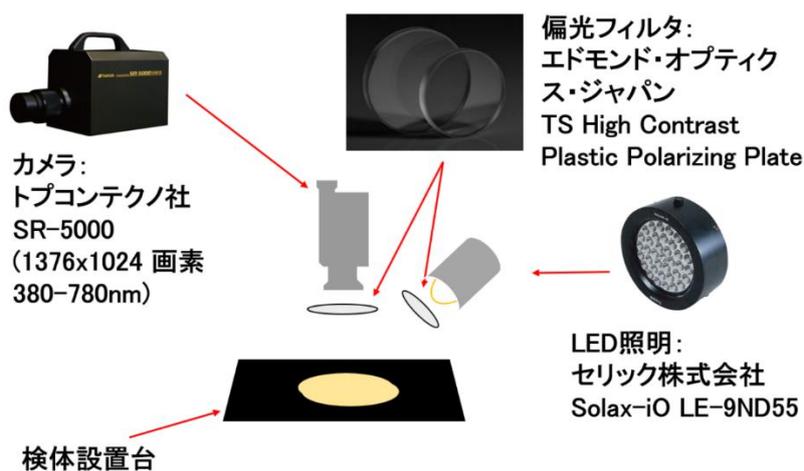
図2(b)より、スペクトルカメラと LED 照明のそれぞれに1つずつ設置している。クロスニコルと呼ばれる状態で設置し、皮膚検体の水滴・水分などで LED 照明が全反射されることを防止する。

(2) 撮影環境

下記の図 3.2.5 に実際の撮影環境の周辺画像と撮影環境の模式図を示す。



(a) 撮影環境の周辺画像



(b) 撮影環境の模式図

図 3.2.1.5 撮影環境の周辺画像と撮影環境の模式図

(3) 撮影条件の検討

撮影条件について、カラーチャート、皮膚画像を用いて、光源条件、偏光設定、カメラ／光源の撮影角度、撮影時の積分時間等の撮影条件と撮影精度について実験検討を行い、安定したハイパースペクトル撮影を構築した。

- 1) 配置位置： カメラ垂直配置、光源25度チルト配置 撮影範囲
- 2) 直交偏光配置 (全反射防止)
- 3) 積分時間： 200 msec

3.2.1.3 マクロ検体の撮影

- a) 検体画像取得手順の確立：手順を確立し症例の収集を実施された。
- 1) 週一回（火曜日）の手術日に摘出された皮膚検体を画像取得対象とする。撮影画像の内容は皮膚科、病理の医師と協議して決定する。
 - 2) 症例は、手術約2週間前に行われる手術カンファの時に候補を挙げ、手術日、時間の連絡をメールにて送り確認する。
 - 3) 対象検体は、毎週の手術の際に皮膚科医の臨床にて判断し、検体の提供を行い、手術摘出後、皮膚科で情報を発行し生検体を病理側に渡す。
 - 4) 検体は速やかに病理医が分光画像、病変画像の撮影を実施し、その後、ホルマリン固定を行う。ホルマリン固定後は、通常の見本と同様の処理にて病理診断を行う。
 - 5) 保健医療学部への提供画像は、個人情報情報を識別情報に変えて提供する。

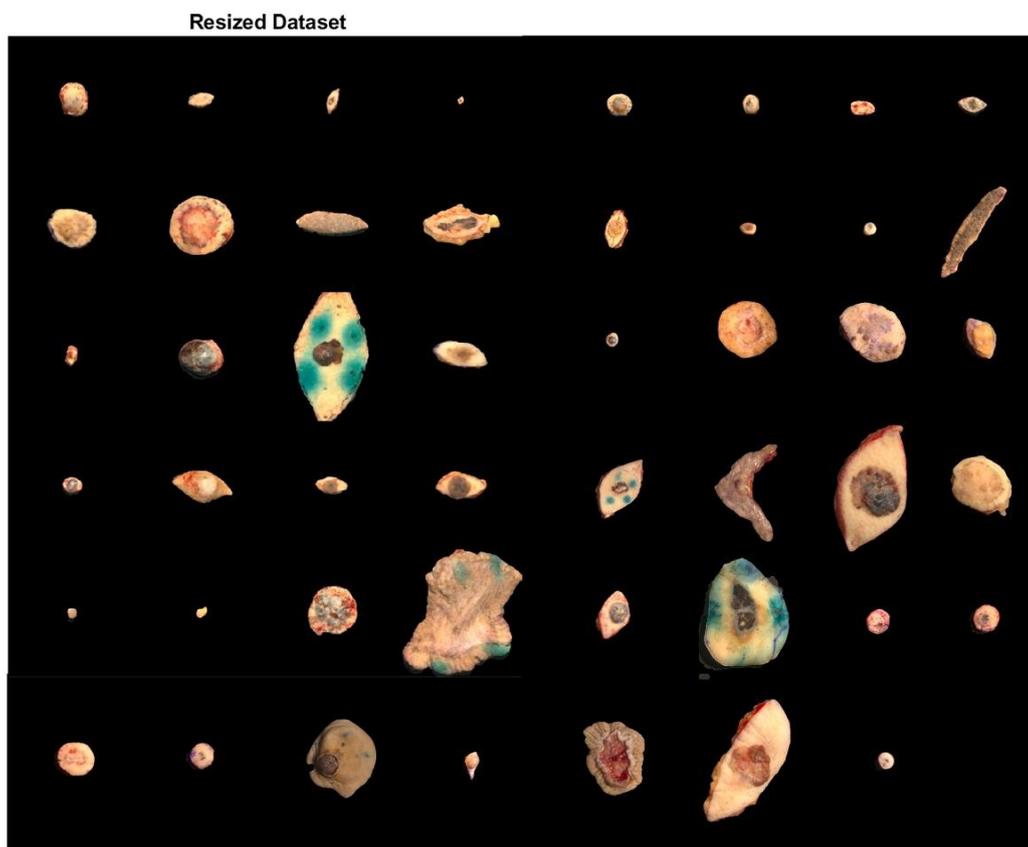


図 3.2.1.6 提供された検体(RGB 再現画像)

表 3.2.1.5 提供検体および診断名

画像番号	良悪性の判別	疾患名	画像番号	良悪性の判別	疾患名
1	悪性	粘液性癌	25	前がん	ポーエン病
2	良性	メラニン色素沈着	26	良性	黒色細胞性母斑
3	悪性	基底細胞癌	27	良性	青色母斑
4	悪性	基底細胞癌	28	良性	メラノサイト性母斑
5	前がん	有棘細胞癌	29	悪性	基底細胞癌
6	悪性	基底細胞癌	30	悪性	扁平上皮癌
7	良性	メラノサイト性母斑	31	前がん	ポーエン病
8	悪性	基底細胞癌	32	良性	皮脂線維
9	良性	メラノサイト性母斑	33	悪性	悪性黒色腫
10	悪性	基底細胞癌	34	悪性	バジレット病
11	悪性	メラノーマ	35	悪性	基底細胞癌
12	良性	メラノサイト性母斑	36	前がん	ポーエン病
13	悪性	基底細胞癌	37	悪性	悪性黒色腫
14	良性	皮膚線維腫	38	悪性	基底細胞癌
15	良性	メラノサイト性母斑	39	悪性	基底細胞癌
16	良性	メラノサイト性母斑	40	悪性	基底細胞癌
17	良性	メラノサイト性母斑	41	悪性	基底細胞癌
18	良性	メラノサイト性母斑	42	悪性	基底細胞癌
19	悪性	基底細胞癌	43	悪性	悪性黒色腫
20	悪性	バジレット病	44	悪性	基底細胞癌
21	悪性	基底細胞癌	45	悪性	扁平上皮癌
22	悪性	基底細胞癌	46	前がん	ポーエン病
23	悪性	基底細胞癌	47	悪性	基底細胞癌
24	悪性	基底細胞癌			

令和3年4月以降取得した画像を含め、令和5年10月の間に埼玉医科大学病院皮膚科学の手術によって病理診断に提供された検体数は76症例である。

3.2.4 アノテーションの作成

病理診断においては、検体は病理標本作成用切片に切分け、病変の範囲を確定する。図3.2.7を例として、8症例の再構成画像と病理標本作成用切片の画像を示す。その病理診断による病変部位および診断名の特定病理医により、病変部のアノテーション作成および病理診断名特定した。具垂知的手順は以下のとおりである。

- 1) 上記検体の取得によりで、全部で73症例のスペクトル画像が得られた。
- 2) 病理診断された検体は、病理診断時に撮影される病理検査用の切出し位置を記した画像および切出し面の画像を同時に保管する。
- 3) 上記の検体に対して実施された病理診断での切出し面における病変範囲に対してアノ

テーションを病理医が付与する。

- 4) 加えて、切出し位置の画像、切断面の病変一画像（アノテーション）を参考に、ハイパースペクトル画像から再構成されたRGB画像に対して、病変部を示すアノテーションを作成する。（病理医）
- 5) 73検体の取得画像の中で、病変部が深層にあり表面での検出が困難であると病理医が判断したものを除く。

令和6年10月末までに、47検体の試料の撮影およびアノテーション画像を作成した。表3.2.1 に病理医が診断した病名を示す。

また 図3.2.7 および。図3.2.8 に、実験で用いた検体の切片作成時の切断面の画像(例) および、切断面画像にアノテーション(赤線)を入力した画像例を示す。



図 3. 2. 1. 7 a (一部)



図3. 2. 7. 1 b (一部)



図3.2.1.8 病理診断時のアノテーション画像

図3.2.9 は、図3.2.7 で病理医がマークした切断面のアノテーションをもとに、病理医が元のマクロ画像に、疾病領域のアノテーションを記入した画像(書く症例右図)である。本検討では、このアノテーション領域を用いて以降の検証を行っている、

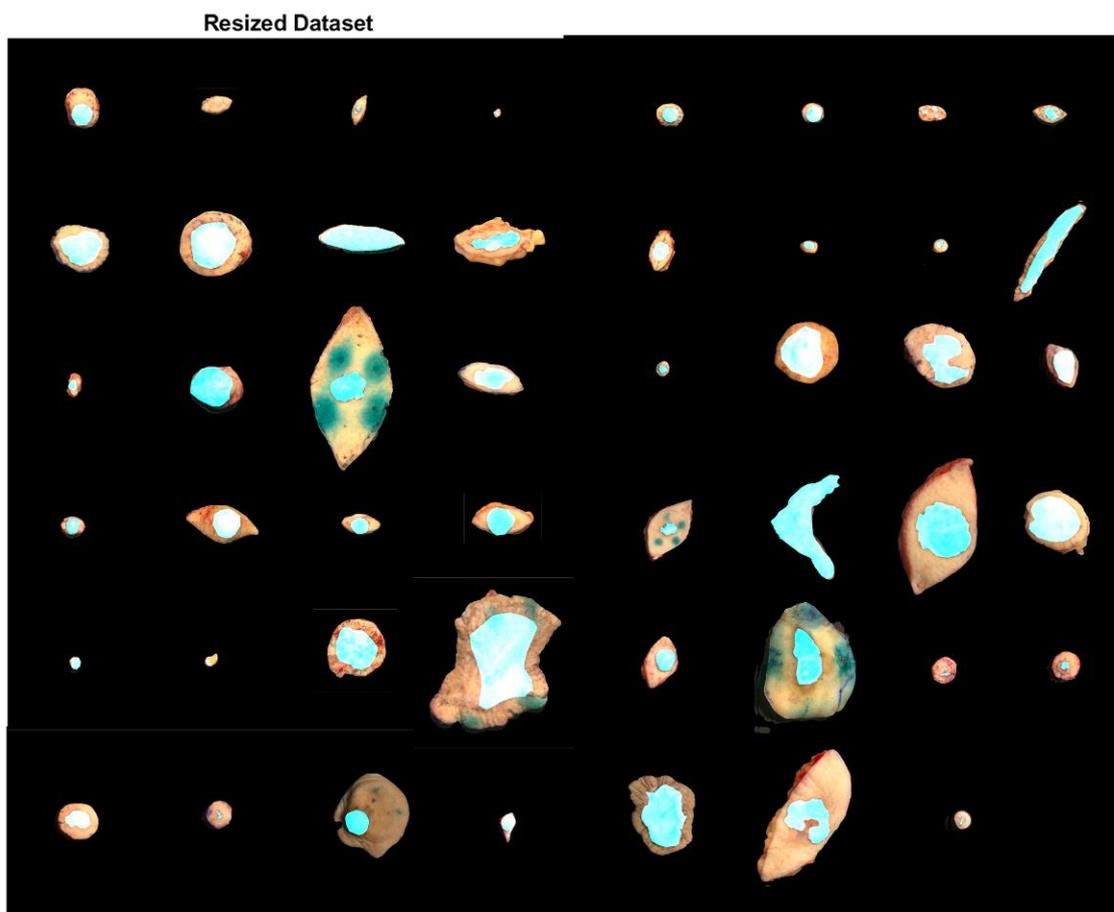


図3.2.1.9 RGB再構成画像およびアノテーションデータ

3.2.2 遠隔診断用バイタルデータ取得用マルチスペクトル画像撮影

偏光分光型マルチスペクトルカメラの実験機を用いて映像撮影の予備実験を行い、バイタルデータ取得のフィジビリティ検証に向けた撮影条件検討した。

3.2.2.1 偏光分光型マルチスペクトルカメラおよび撮影機材

本研究で使用する機材をに示す。(図 3.2.2.3)

- ・偏光分光型マルチスペクトルカメラ (FUJIFILM 社製) (図** (a))
- ・ハロゲン光源 (日本 PI 社製 PCU-UHX (射波長: 400~1700nm)) (図 15 (b))
- ・白色シート (背景光源補正用)



(a) 偏光分光型マルチスペクトルカメラ



(b) ハロゲン光源

図3.2.2.3 本実験での使用機材

3.2.2.2 脈波の時系列信号の取得手順

(1) 4バンドを用いた脈波検出法

従来法では RGB カメラにて撮影した体表面の色変化を Red Green Blue の各面で取得し、主に、Green の信号を用いて脈波を検出し、心拍数の測定に利用していた。一方、より精度高く測定する方法としては、RGB の各信号に対して、主成分分析・独立成分分析を行うことで脈波成分を抽出する方法が提案されている。

本研究においては、RGB+近赤外 (NIR) の波長を加えて4バンドのマルチスペクトル映像を撮影し、得られた4 band の信号に対して主成分成分分析を行うことで、精度を高めること方式を検証する。本研究における脈波計測システム概要を図 2 に示す。

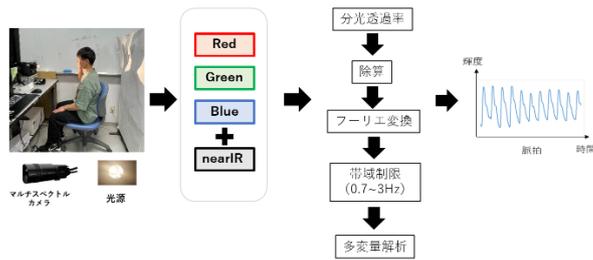


図 3.2.2.4 脈波計測システム

(手順 1) 4 撮影画像による脈波信号の検出

本提案法では 4 バンドの偏光分光型マルチスペクトルカメラを用いて被験者の手のひらおよび顔を対象に撮影を行う。得られた画像に対しては、図 3.2.11 のようにカメラで取得した映像からサンプリング範囲を指定し、指定範囲の平均輝度変化の信号を取得する。

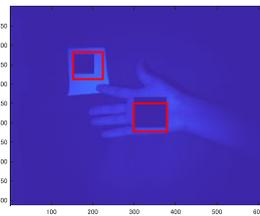
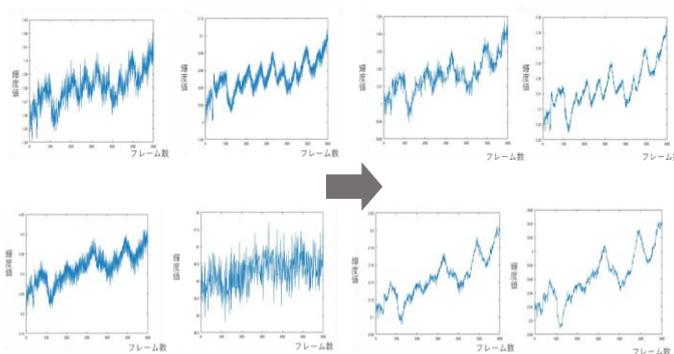


図 3.2.2.5 画像のサンプリング例

(手順 2) 背景輝度変化を利用した、光源由来のノイズ除去

撮影時に得た信号の光源の変化などに由来するノイズの除去が課題であった。本検討では、測定したい部位の信号と被験者の後ろに白色となる背景を設置し、得られた被験者の体表面の輝度変化を背景の輝度変化で除算して得られた信号を用いた。(図 3.2.2.6)



(光源処理前)

(光源処理：除算後)

図 3.2.2.6 光源の影響の除去

(手順 3) 帯域制限による信号の補正

カメラ撮影で得た信号に含まれるノイズや体動等の影響を除くため、時系列信号に対し

て帯域制限 (0.7~3Hz) を行うことで脈波成分に近い周波数帯の信号のみを取り出す。

(手順 4) 主成分分析

帯域制限にてノイズや体動の影響を大きく削除しているが、ノイズや体動成分には脈波成分の同じ周波数を持つものもあり、十分な精度が得られない可能性がある。そのため、混合信号を分解する手法として 4 波長の信号に対して主成分分析を用いて波長に依存しない脈波信号を抽出する。

3.2.2.3 脈波の時系列信号の取得用の撮影条件の検討

露光フレーム数、露光時間、撮影距離、蛍光灯の有無の影響を検討し、撮影条件として予備実験を行った。(表 3.2.2.1)

表3.2.2.1 撮影条件の検討実験項目

撮影距離	露光時間	frame rate/時間(frame number)	光源量
60cm	15ms	60fps / 10s (600)	
90cm	15ms	60fps / 10s (600)	
120cm	15ms	60fps / 10s (600)	

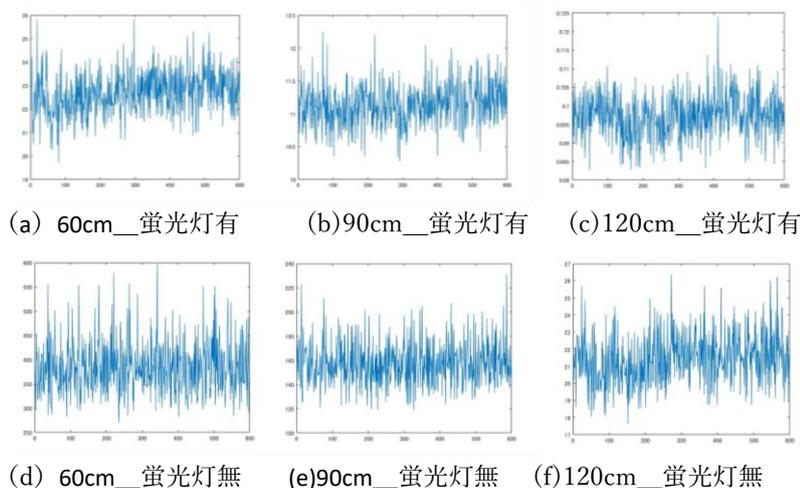


図3.2.2.7 撮影距離による比較

次に、図 3.3.2.7 に画像データから得られた信号データを示す。撮影距離 60cm での撮影に比較すると 90cm、120cm での撮影画像輝度が低くなっており、加えて蛍光灯があってもなくても信号波形への影響はほとんどないことがわかる。

上記の信号の結果から、下記の撮影条件を決定した。

- 1) 露光フレーム数: 60フレーム/秒
- 2) 露光時間: 15msec
- 3) 撮影距離: 60cm
- 4) 蛍光灯の有無: 背景(白地)撮影によって影響をなくすることが可能

3.2.2.4 バイタルデータ取得に向けた取得画像範囲(テンプレート)の検討

- 1) テンプレートサイズ: 20x20, 30x30, 40x40の3種類を比較した結果を図3.2.2.8に示す。この結果、30x30が最適であるとの結果が得られた。
- 2) 撮影位置: 血圧測定に関わる脈波伝搬速度を得るために、顔(頬、首)および手(手のひら、手首)の4か所を測定した結果、頬と手のひらからのデータがSN比の良い結果が得られた。

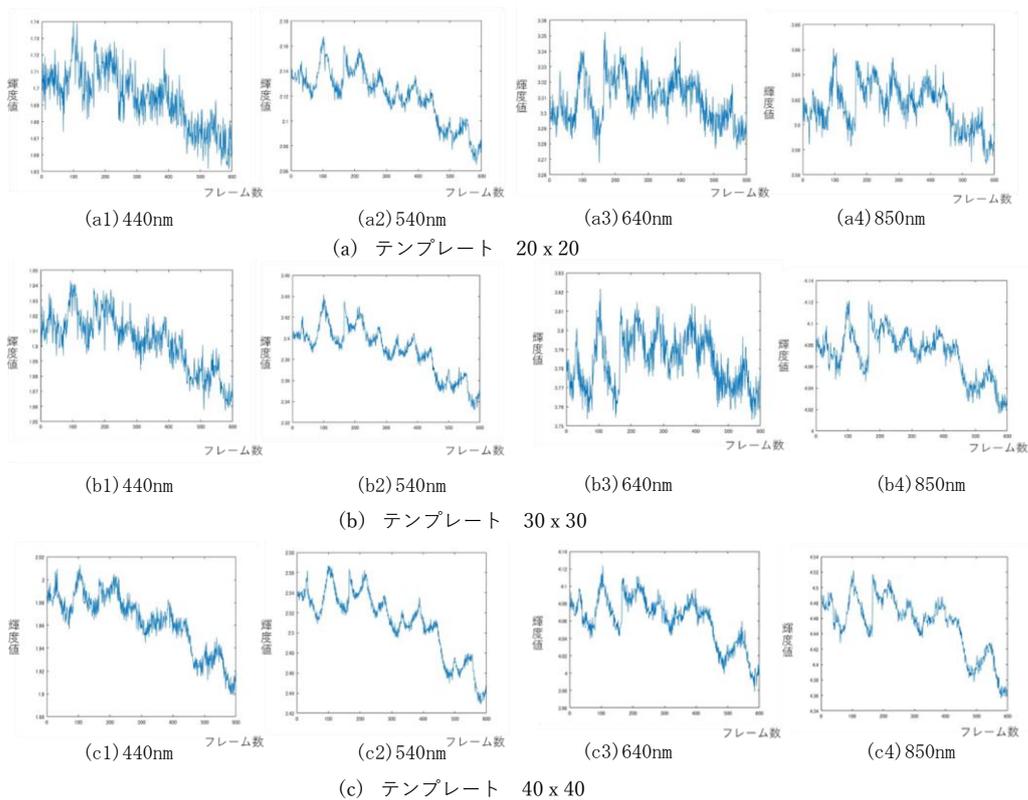


図 3.2.2.8 テンプレートサイズの検討結果

3.3 診断用スペクトル帯域の決定

3.3.1 皮膚病変の遠隔診断用画像システム

3.3.1.1 皮膚病変の辺縁特定の判定用アルゴリズムおよび帯域の検討

上記の検体の中で、最も検体数の多い「基底細胞がん」に絞って、病変領域の辺縁を求めるアルゴリズムの検討を行った。機械学習の種類としては、バギング、ブースティング、KNN、カーネルSVMの4種類のアルゴリズムを比較した。

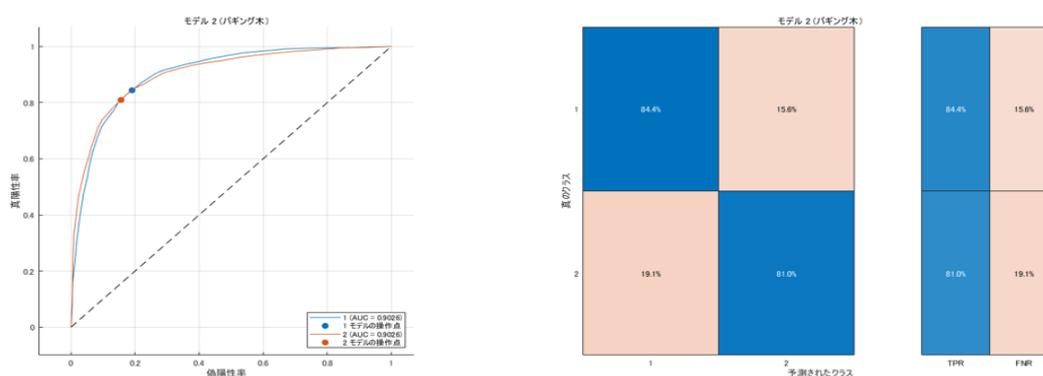
本検討では、21-401 バンドで分類学習を行った結果は以下の通りである。ここで、1 バンド目が 380nm、2 バンド目が 381nm そして 401 バンド目が 780nm の波長成分となっている

左側が ROC 曲線、右側が混合行列である。

ROC 曲線は各軸が TPR(すべての positive のうち実際に positive であったもの)と FPR(すべての negative のうち実際に negative であったもの)を表し、positive、negative に分類する際の閾値を変更し、各閾値ごとの TPR と FPR をプロットしたものであり、AUC はその曲線の面積を表し、AUC が大きいほど優れた分類モデルとされる。

また ROC 曲線の横軸は偽陽性率(FPR)であり、縦軸は真陽性率(TPR)である。

どちらも単位はなく、0 から 1 の値で表される。



偽陽性率

図 3.3.1.1 モデル 1 バギングの結果

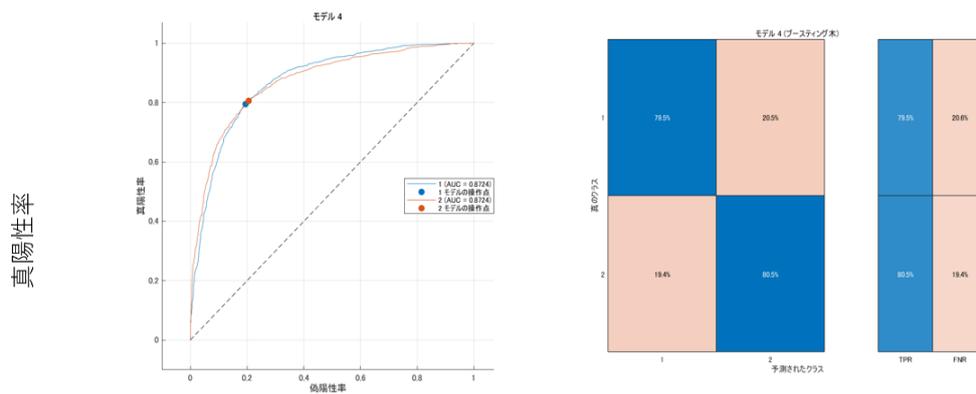


図 3.3.1.2 モデル 2 ブースティングの結果

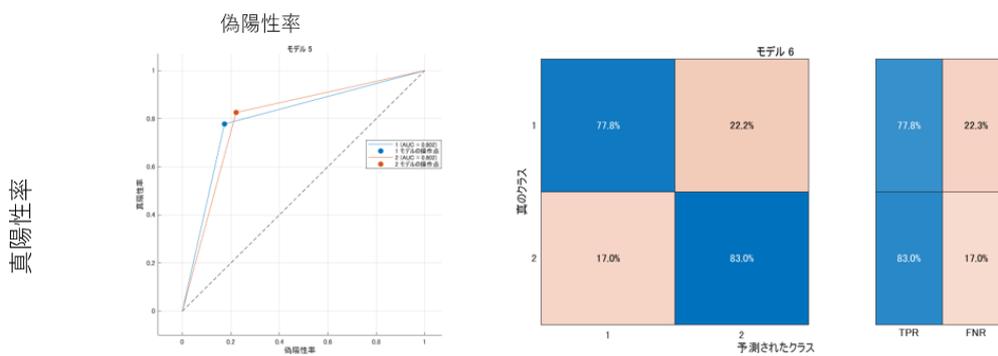


図 3.3.1.3 モデル 3 KNN の結果

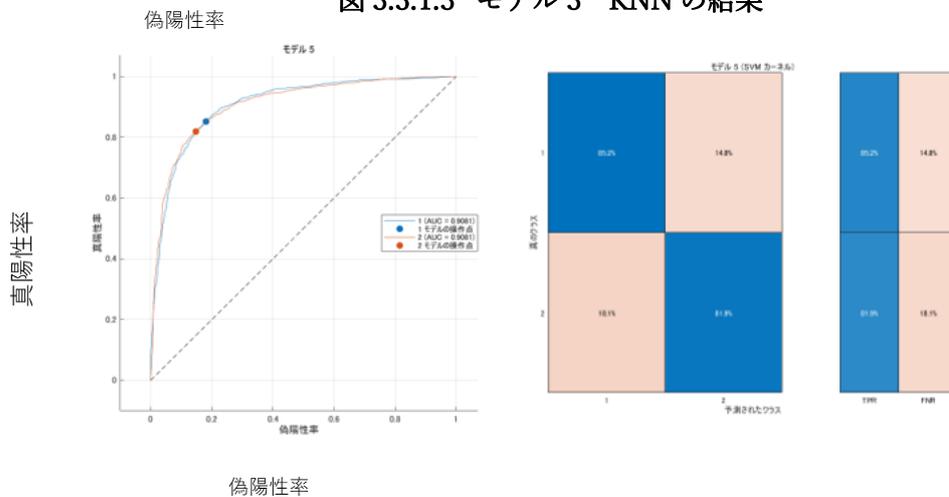


図 3.3.1.4 モデル 4 カーネル SVM の結果

精度に関してはバギング、ブースティング、KNN、カーネル SVM の順に 82.8%、80%、80.2%、83.5% になりカーネル SVM が 1 番高く、次にバギングの精度が高かった。また AUC に関しては順に 0.90、0.87、0.80、0.91 となり(小数点第二で四捨五入)、AUC についてもカーネル SVM が 1 番高く、次にバギングが高かった。

3.3.1.2 皮膚病変の良性、悪性の判定用アルゴリズムおよび帯域の検討

(1) 色素量推定にもとづく良性、悪性の判定アルゴリズムの検討

皮膚を構成する吸光成分で支配的な、酸化ヘモグロビン(酸化 Hb)、還元ヘモグロビン(還元 Hb)、ユーメラニン、ビリルビン、βカロチンの色素の分光吸収係数をもとに色素量推定を行い、RGB画像とともに推定色素量を特徴量として用いて、機械学習 (SVM) を用いて良性・悪性判定を行った。47症例における精度 (正答率)・面積比・臨床検査性能を算出した結果を表8に示す。

表 3.3.2.1 特徴量の主要なパラメータ (20 症例)

特徴量	精度評価[%]	面積比評価[%]
ユーメラニン,βカロチン, RGB Green, RGB Blue	85.0	69.3
RGB	75.0	63.9
Red	60.0	62.3
Green	40.0	39.9
Blue	60.0	58.8
色素量 5 つ	55.0	58.3
酸化 Hb	10.0	10.4
還元 Hb	65.0	59.5
ユーメラニン	55.0	59.4
ビリルビン	55.0	62.3
βカロチン	50.0	50.6
RGB,色素量 5 つ	65.0	64.1

表 3.3.2.2 ユーメラニン,βカロチン,RGB Green, RGB Brue を用いた評価

ユーメラニン,βカロチン,RGB Green, RGB Brue	47 症例 (悪性 29 症例、良性 18 症例)
精度[%]	74.5%
面積比[%]	73.3%
感度 (真陽性率) [%]	96.6%
特異度 (真陰性率) [%]	38.9%
陽性的中率[%]	71.8%
陰性的中率[%]	87.5%
偽陽性率[%]	61.1%
偽陰性率[%]	3.4%

その結果、ユーメラニン、βカロチンと Green. Blue を特徴量として用いた場合 74% (面積比 73%) の正答率となった。

(2) 各バンドを用いた良性・悪性判定の検討

特定の1波長を選択し、機械学習によって、良性・悪性を判定する処理を行い、その正解率から診断用に有効なスペクトル帯域の検討を行った。また、色素推定によって得たメラニン色素を除き、残りのスペクトルから良性/悪性を判別する処理を行った場合の正解率を求めた。これらの結果から、400nm, 430nm, 530nm および 600nm の波長を用いると有効との結果が得られた。



図3.3.2.1 スペクトル解析

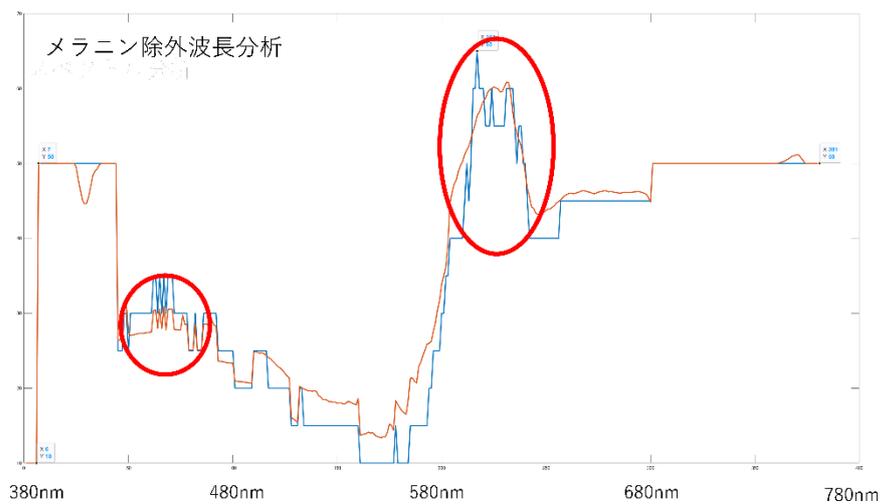


図3.3.2.2 メラニン除外スペクトル解析

3.3.2 遠隔診断用バイタルデータ取得用マルチスペクトルカメラのスペクトル

遠隔診断用バイタルデータ取得用マルチスペクトルカメラは、60フレーム/秒での動画撮影が必要であるため、バンド幅の広いマルチスペクトルカメラが必要となることから、カメラのバンドは R : 640nm、G : 540nm、B : 440nm に近赤外 850nm を加えた4バンドのマルチスペクトルカメラとした。

3.4 遠隔診療用マルチスペクトルカメラの試作

3.4.1 マルチスペクトルカメラ（試験機）の実装検証

マルチスペクトルカメラに4波長のフィルターを実装し、その出力結果から、必要な照度、撮影距離、露光時間、フレームレートなどの撮影条件について検証を行った、その結果、照度に応じて閾値を超えないように設定するなど撮影条件の設定が必要であることが明確になり、撮影条件の明確化を行った。

(1) 偏光分光型マルチスペクトルカメラ

本研究で使用するマルチスペクトルカメラシステムの特徴を以下に示す。光は様々な波長で構成されており、マルチスペクトルカメラは対象物から反射された特定の波長の光をとらえることで、人の眼では認識できない情報を可視化するものである。FUJIFILMが開発したマルチスペクトルカメラは、世界で初めて偏光方式を採用し、最大9つの波長に分光した映像(分光映像)を高精細かつ同時に撮影を行い、リアルタイムに表示することが可能である。レンズには、独自開発フィルターが搭載されている。マルチスペクトルカメラシステムの構造を図18に示す。独自開発フィルターには、特定の振動方向の光を透過させる「偏光フィルター」と特定の波長の光を透過させる「光学バンドパスフィルター」の機能が搭載されている。

既存の方式とマルチスペクトルカメラシステムとのイメージセンサーの比較を図19に示す。既存の方式であるRGBカメラのイメージ

センサーは、各ピクセルが特定の波長のみを透過させるため1つのピクセルで1つの波長しかとらえられない。そのため、各波長の情報量が少なく解像度が低い映像となる。しかし、マルチスペクトルカメラシステムは偏光イメージセンサーで、フィルターを透過した各波長の偏光情報を全てのピクセルで取得すること

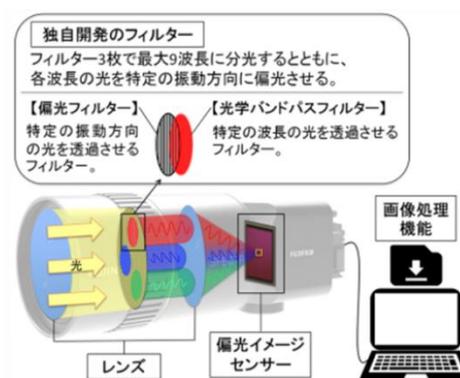


図 3. 4. 1 偏光分光型マルチスペクトルカメラフィルター

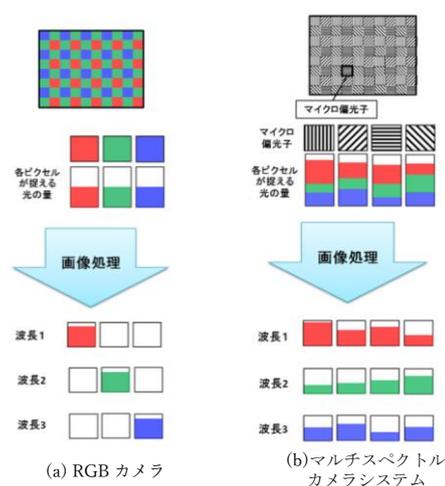


図 3. 4. 2 偏光分光型マルチスペクトルカメラの原理

が出来る. それにより各波長の情報量が多くなり, 最先端の画像処理を行うことで高解像・高フレームレートを実現する[9].

3.4.2 皮膚病変の遠隔診断用画像システム用マルチスペクトルカメラ

当初、3.3.1の検討をもとに6～8バンドの偏光分光型マルチスペクトルカメラの試作を予定していた。しかし、発注直前にメーカー製造が中止との連絡があり、今期の本カメラによる試作は断念した。この結果、既存のマルチスペクトルカメラをもとに、新たな方式および設計の検討を行うこととした。

具体的には、以下の2種類のマルチスペクトルカメラを用いる方式の検討を行った。なお、方式変更により、具体的方式決定および試作機実装は今後の課題となった。

(A) 8バンド可視光領域カメラ

400nm～700nmの可視域における8バンドの異なる波長の画像を取得する。対象波長範囲で多くの画像情報を取得可能

中心波長	474nm, 495nm, 526nm, 546nm, 578nm, 597nm, 621nm, 640nm
バンド当たり画素数	256 × 256

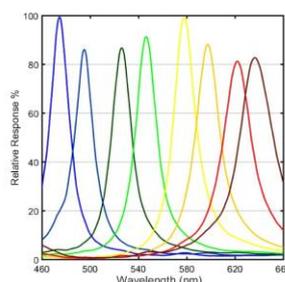


図 3.4.3 マルチスペクトルカメラ A

(B) 8バンドNIR領域カメラ

400nm～700nmの可視域における8バンドの異なる波長の画像を取得する。対象波長範囲で多くの画像情報を取得可能

中心波長	720nm, 760nm, 800nm, 840nm, 860nm, 900nm, 940nm, 980nm
バンド当たり画素数	256 × 256

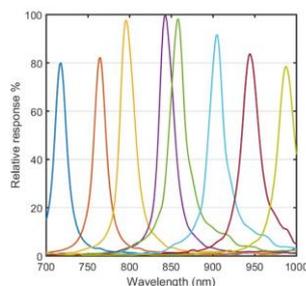


図 3.4.4 マルチスペクトルカメラ B

3.4.2 遠隔診断用バイタルデータ取得用マルチスペクトルカメラ

既に提供されていたRGB+近赤外の4バンドの偏光分離型マルチスペクトルカメラを用いて、遠隔診療向けのバイタルデータ取得に向けたフィジビリティ検証を行う準備を行った。

3.5 遠隔診療向けマルチスペクトルカメラ画像システムのフィジビリティ検証

3.5.1 皮膚病変向けマルチスペクトルカメラのフィジビリティ検証

本年度は当初予定のマルチスペクトルカメラの試作ができなくなったため、予定のフィジビリティ検証は実施できなかった。一方、皮膚病変の検体の入手は予定通りできたことで、その解析によって必要となるバンドの特定および解析手法の確立ができた。現在、使用なカメラを用いたマルチスペクトルによる撮影方式の検討を進め、今後のフィジビリティ検証に備えることとした。

3.5.2 遠隔診療向けマルチスペクトルカメラ画像システムのフィジビリティ検証

3.5.2.1 検証実験内容

(1) マルチスペクトル画像システムの検証

フィジビリティ検証においては、実際の老人ホームの被験者を対象に被験者のバイタルデータを利用した遠隔診療において、マルチスペクトル画像を用いた診療情報を加えることで遠隔診断の精度向上の可能性をめざすフィジビリティ検証の予定で話を進めた。ただし、コロナ禍は終息したといわれるが、今年度も装置を持ち込む実験は短期に限られた。検証は上記施設の理事である本間聡起医師のもと、臨床医としてのフィジビリティ評価検証を行ってもらい、実際の撮影装置を持ち込んでのフィジビリティ検証は、2回に限定して行った。本検証では、手元にある偏光分光型マルチスペクトルカメラを用いて、バイタルデータ取得のフィジビリティ検証実験を2回実施した。

1回目 令和6年2月 8日 参加者 10名

2回目 令和6年3月21日 参加者 13名

いずれの場合も、脈波を頬および手のひらをマルチスペクトルカメラを用いて撮影して脈波検出を下記アルゴリズムにより検出・評価した。

(2) バイタルデータ測定 of 検証

なお、画像装置を持ち込んで行う検証は短期間であるが、その基礎データとなる毎日のバイタルデータ（最高血圧、最低血圧、脈拍数、体温、血中酸素量、体重、活動量）の定期的測定は施設内で行えるため、長期に実施して、基礎データとした。実施期間は令和6年9月から令和6年3月とし、被験者13名に対して実施した。上記バイタルデータはスマートフォンにデータを送り、スマートフォンに送られたデータはインターネットを通じてデータベース化され、医師はそのデータから遠隔診療時に参考データとして利用した。

本被験者には。上記バイタルデータの基礎データおよび疾患診断に加えて、画像システム検証における脈波計測を実施し、本マルチスペクトルカメラを臨床現場で実施する際のフィジビリティに関するシステム検証を行った。

施設においては、本検証の目的、実施方法、個人情報の管理方法などに関する説明を行い、参加協力していただける13名の方に対して実施した。なお、本フィジビリティ検証は、社会福祉法人共生福祉会の研究倫理委員会および埼玉医科大学倫理委員会（977）の承認を得て実施している。

3.5.2.2 フィジビリティ検証システム

(1) 遠隔診断用のマルチスペクトル画像システム

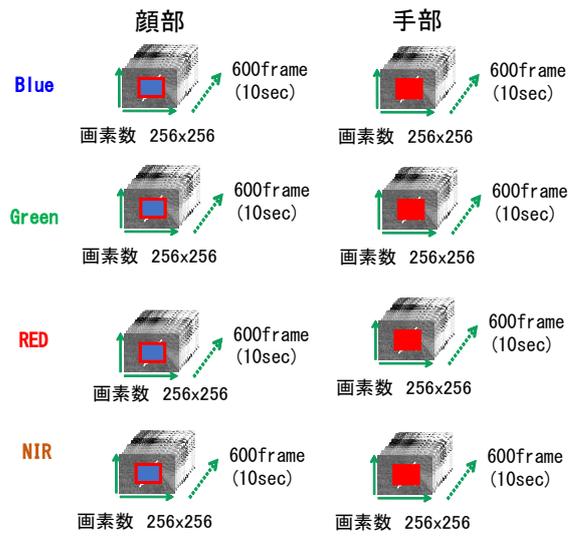
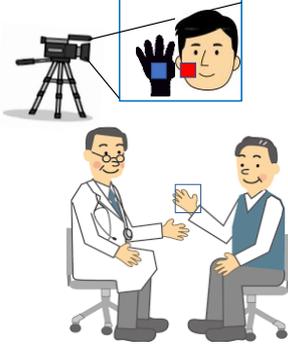
協力者の方に座ってもらい、顔と手に光源をあてて、偏光分光型マルチスペクトルカメラでの撮影を行う。60frame/secの露光速度で10秒間、600フレームの撮影を行い、得られた画像に以下の処理を行うことで、手および顔の脈波を測定を行い、さらに得られた脈波の手および顔の時間差から、血圧測定の見安となる脈波伝搬時間の推定を行うこととした。

- 1) 4波長の画像に対して、テンプレート範囲の明るさを平均して算出
- 2) 算出した明るさの時系列信号に対しての帯域フィルタ処理 (0.7-3.0Hz)
- 3) 4波長の時系列データに対する多変量解析処理 (主成分分析) により、高精度の時系列信号の取得。
- 4) 得られた脈波信号による脈拍数の算出
- 5) 手と顔の脈波の相互相関関数による、時間差検出精度の精査による評価

(協力者撮影)

手部と顔部を同時撮影

マルチスペクトルカメラ

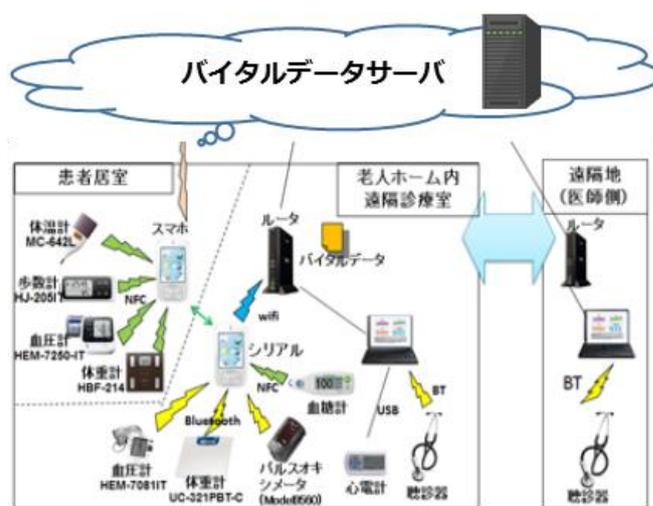


(2) バイタルデータ測定システム

本実験のフィジビリティ検証システムでは、患者自身が自室で測定するバイタルデータのテレモニタリングが行われている。加えて、必要に応じてマルチスペクトル画像の撮影を実施している。

テレモニタリングは、オムロン社の“OMRON connect”システムを使用し、協力者は、Bluetooth 通信機能を備えた電子体温計、自動血圧計、体重・体組成、パルスオキシメーターの5種の測定器を用い

て、毎日定期的に測定してもらう。(図 3.6.1) 各測定器に記録されたバイタルデータは、スマートフォンを利用して、サーバーへ転送し、診察医が月に1回各患者のグラフ結果を診断に利用する。また、マルチスペクトル画像の撮影は、週一回程度の頻度で、バイタルデータに関わる画像データの収集に協力して頂いた。



3.5.3 マルチスペクトル画像による遠隔診療のフィジビリティ検証結果

(1) フィジビリティ検証で得られた脈波データ

フィジビリティ検証で得られた、フィルタ処理後と主成分分析で動きノイズを取り除いたデータの一例をしめす。

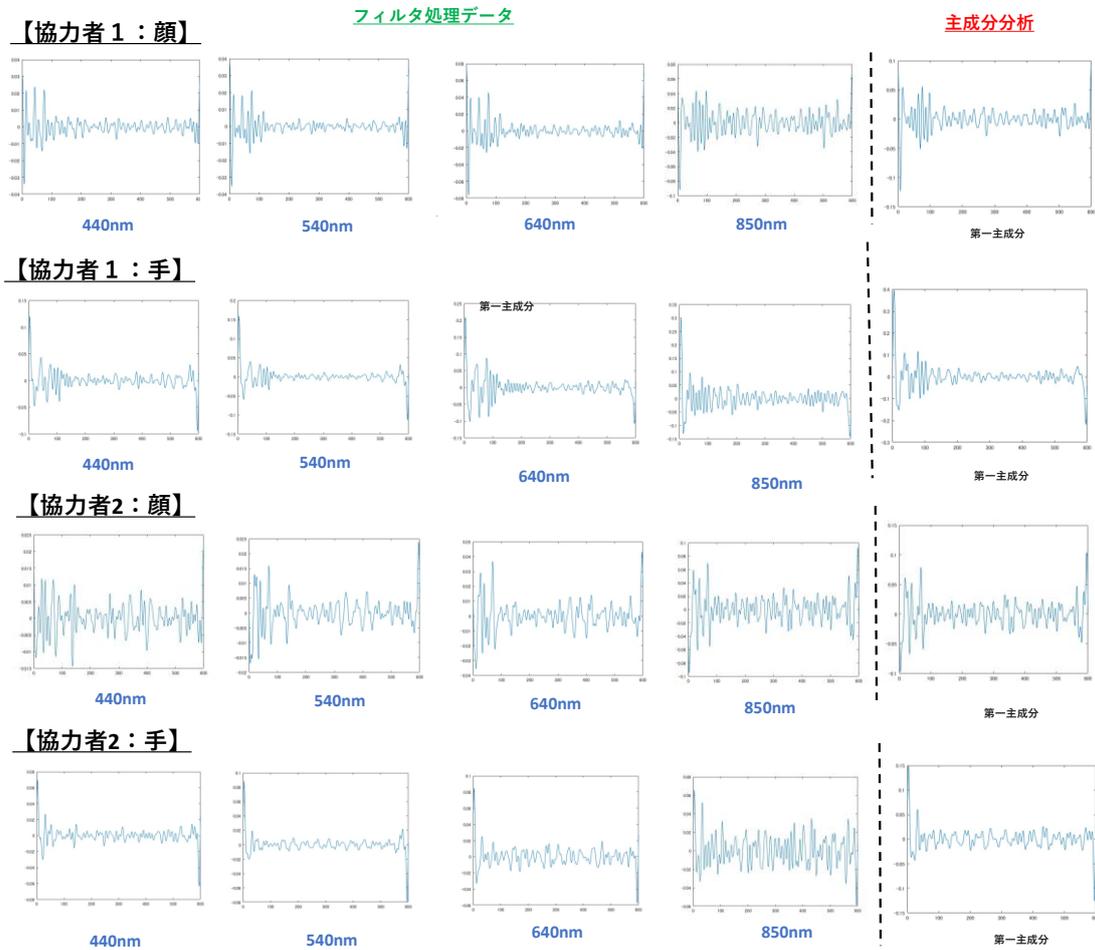


図 3.5.1 フィジビリティ検証で得られた脈波信号例 (1)

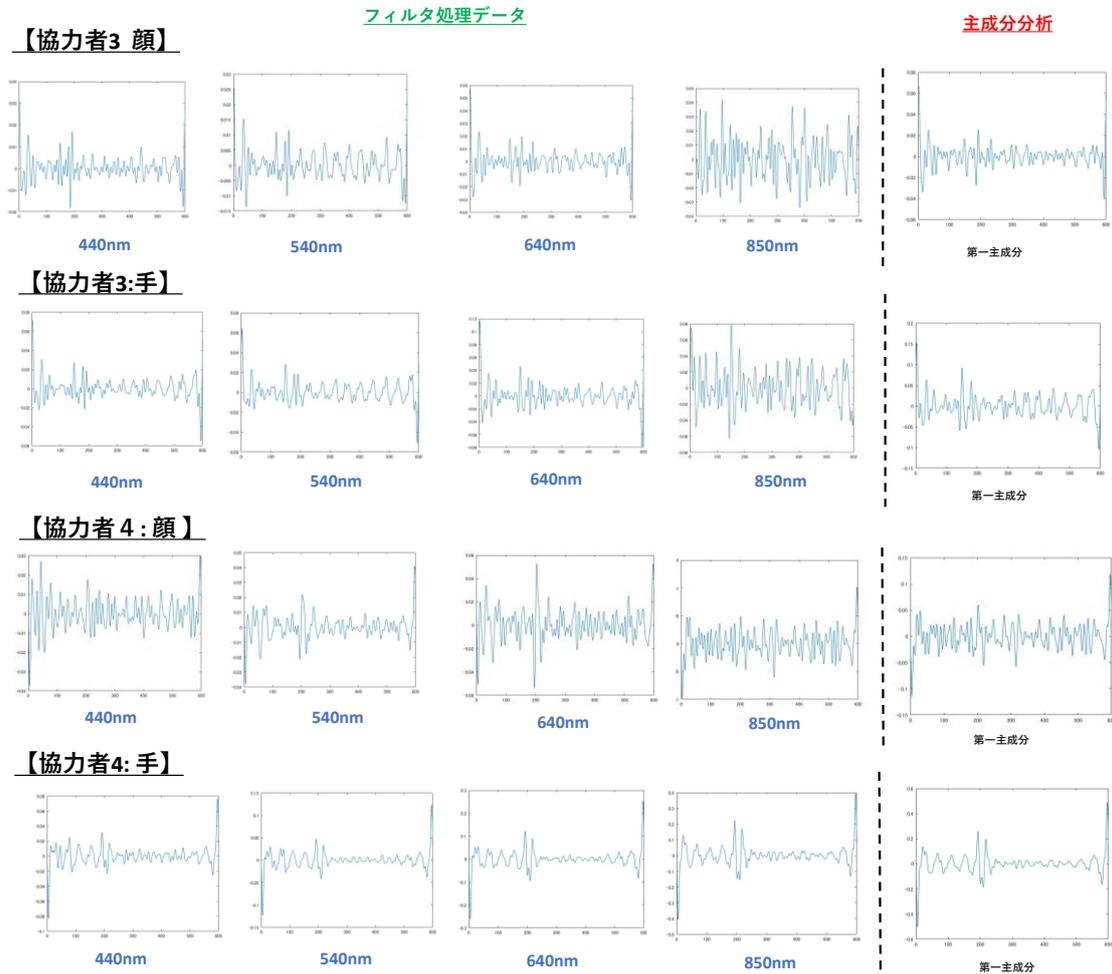


図 3.5.2 フィジビリティ検証で得られた脈波信号例（2）

(2) 画像システムから得られたバイタルデータ

上記の結果から、得られた脈波数および血圧測定に必要となる、顔と手の相互相関係数から得られる脈波の時間差を求めた結果を下記に示す。

表 3.5.1 得られたバイタルデータ

協力者	脈拍数	最大相互相関値 (頬-手)	ずれ
1	90	0.297	-1
2	108	0.139	-1
3	90	0.136	-1
4	90	0.079	-2
5	81	0.179	0
6	93	0.007	0
7	99	0.584	0
8	93	-0.022	-7

本検討では 13 名の協力者を得て実施されたが、脈拍が検出できたのは 8 名であり、さらに、その中で顔と手との十分な相互相関係数が得られたデータは 5 人分と非常に少なかった。

信号が適切に得られたデータから、脈拍数に関しては比較的良好な結果が得られており、脈拍測定には十分対応できる精度が得られることが示された。

一方、得られた脈波伝搬速度となる時間差に関しては、差が出た場合も 1 サンプル時間分での精度でしか今回求めていないため、その差分の精度は十分ではなく、より精度の高い、撮影速度および差分の推定処理が求められる。

(3) フィジビリティ検証結果の医師からの評価

- 1) 有害事象： 本フィジビリティ実験においてシステムによる有害事象の発生は認められなかった。
- 2) システム環境の課題： バイタルデータの測定機器から Bluetooth によるスマートフォンへの転送に要するペアリング外れが 3 名で複数回発生し、データ収集時に利用するアプリのバージョンアップに手持ちのスマートフォンの機種が対応できない、などのトラブルがあり、研究協力者が自己測定を継続しているにもかかわらず、一定の期間、データが欠損している状態が発生した。
- 3) 疾病の予測： なお、今回の研究期間中に、7 名の研究協力者に COVID-19 感染が認められたが、いずれも軽症で、血液酸素飽和度の低下も認められなかった。ほかに、1 名に市中肺炎と急性尿路感染症による 2~3 週の 2 回の入院を経験したケースがあったが、特に後遺症なく回復した。なお、入院期間中のモニタリングは実施されていない。今後、今回得られたバイタルデータの解析による疾病予測に役立つ解析方式への期待は高い。
- 4) 画像によるバイタルデータ取得： 上記のバイタルデータ取得が日常的に、画像撮影のみで得られるのであれば、非常に有意義であり、画像システムへの期待は大変高い。一方、今回の得られた画像からは、脈拍数の解析は可能と思われるが、血圧の精度の高い測定には十分でない状況である。若派の検出の精度向上とともに、画像による血圧推定ができるシステムの開発が待たれる。
- 5) 画像システムの課題： なお、画像によるバイタルデータの撮影において、現在は検証用の実験ソフトのままであることから、臨床の場で対象者自身あるいは対応する施設の従業員が作業するためには、対応可能なユーザインタフェースとはなっていない。今後、臨床での導入を目指すためには、ユーザインタフェースを含めソフトの改善が必要である。

4. まとめ

本研究では、遠隔診療において、現在の RGB カメラでは診断が困難となる、微妙な色再現が必要となる症例および診断項目を明らかとし、これらの診断支援を実現するために、マルチスペクトルカメラによって得られるスペクトル画像をもととした診断支援の有効性を遠隔診療のフィジビリティ実験を通して検証した。

フィジビリティ検証に向けては、

A) 皮膚病変の遠隔診断用画像システム

B) 遠隔診断用バイタルデータ取得

の2パターンの診療支援に向けてのフィジビリティ検証を行った。

その結果、マルチメディア画像を用いた診断支援を行うための社会実装むけて、以下の知見を得た。

A) 皮膚病変の遠隔診断用画像システムの検討

①皮膚病変の遠隔診断用画像システムに関しては、ハイパースペクトル画像を用いて、臨床で得られた約50症例のデータをもとに、病変範囲の特定に有効な分別アルゴリズムの検討を行い、カーネルSVMの有効性を示すことができた。

②病変の良性悪性判定に有効なスペクトルに関する検討を行い、機械学習の結果から、400nm, 430nm, 530nm および 600nm の波長を用いると有効との結果が得られた。

また、これらの波長を用いたマルチスペクトルカメラによる臨床現場での撮影に関しては、当初予定していたカメラ提供ベンダーの製造中止に伴い、マルチスペクトルカメラの方式設計の見直しが必要となり、今後の課題となった。

B) 遠隔診断用バイタルデータ取得の検証

バイタルデータの測定システムと並行して、偏光分光型マルチスペクトルカメラを用いてRGB+NIRの4バンド画像を用いたバイタルデータ測定のフィジビリティ検証を行った。その結果、脈拍数即手においては、十分な精度を得られる結果が得られたが、一方、血圧測定に必要な精度で脈波を得ることはできず、カメラの改良が求められることとなった。

加えて、臨床で利用するためのユーザインタフェースの改良も並行して行う必要性が、臨床現場から求められた。