

「2019年度マルチスペクトル画像による遠隔診療
支援のフィジビリティ研究補助事業」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	7
3.1 遠隔診療における診断項目の明確化	7
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 マルチスペクトル画像の撮影	9
3.2.1 使用機材	
3.2.2 撮影環境	
3.2.3 測定用 PC の性能条件	
3.2.4 撮影条件の検討項目と評価方法	
3.2.5 検討方法	
3.2.6 結果	
3.2.7 撮影条件	
3.3 マルチスペクトル撮影画像の再構成	16
3.3.1 マルチスペクトル画像を用いた高精度色再現画像の再構成	
3.3.2 マルチスペクトル画像を用いた病変部強調画像方式の検討	

3.4 診断に必要な色域およびスペクトル帯域の検証（フィジビリティ実験検証）

20

3.4.1 フィジビリティ検証における遠隔診療支援検証

3.4.2 フィジビリティ検証システム

3.4.3 マルチスペクトル画像による疾病検知のフィジビリティ検証

3.4.4 マルチスペクト画像を用いた貧血症の検出に関わるフィジビリティ検証

3.4.5 マルチスペクト画像を用いたむくみの検出に関わるフィジビリティ検証

3.4.6 バイタルデータを用いたアラート検知

4. まとめ

28

1. 研究の概要

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。

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検証を行うための基盤技術として、マルチスペクトルカメラの撮影条件の明確化 診断に利用可能となるマルチスペクトル撮影画像からの忠実色再現画像再構成技術、診断が必要な病変領域を特定、強調技術 の3点について、基本技術の確立がなされた。

実際の遠隔診断におけるフィジビリティ検証においては、マルチスペクトルカメラによる撮影を利用した “貧血症” および “むくみ” の2つの症例について検証し行い、特に “貧血症” の検出においては、得られたマルチスペクトル撮影から画像が有効であることを示すことができた。

加えて、遠隔医療システムにおけるバイタルデータ活用によるアラート検出の可能性も合わせて示すことができた、

2 研究の背景と目的

2.1 背景

対面診療を遠隔診断へ移行する際、現在、Skype 等のインターネットを利用した TV 電話に加えて、血圧、心拍などのバイタルデータを送る形で診療が行われている。これまでの臨床での実験から、遠隔診療では触診ができないことから、これらの情報に加えて、より精細な画像を医師側に送ることが非常に有効であることが知られている、

この場合、対面診療で医師が直接観察していた情報を映像として見ることとなり、必要十分な映像品質が得られない点が課題とされている。例えば遠隔診療では、皮膚の状態、顔色などの視診が重要だが、下記の課題が指摘されている。

- ①色再現性不足：医師側表示色は患者側の本来の色と一致せず、適切な診断が困難。加えて光源や場所、天候によって色再現が一定でなく、過去のカルテ画像との比較が困難。
- ②映像の質感再現性不足：解像度はカメラ、ディスプレイの高解像度化で改善されているが、例えば患部の腫れ、起伏などの状況を十分把握することができない。

本研究では、遠隔診療の支援技術の第一歩として、上記の TV 電話+バイタルデータを用いた遠隔診療において、①の色再現性を組合わせた診療刑について、その可能性と実施手段について取り組むこととする。

ここでは、忠実に色再現性を上げるだけでなく、その映像の色情報を利用し、病変部を強調するなど診断の支援に有効な方式の検討も行うこととする。

2.2 技術的課題

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。

*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、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

フィジビリティ検証を通して検証する。

このため、①診断に利用可能となる色域の高精度な色再現技術および ②診断が必要な患部に関わるスペクトル帯域を用いた病変範囲の特定および強調技術 の 2 点の技術について臨床から得られるデータをもとに確立するとともに、実際の遠隔診断におけるフィジビリティ検証を通して、マルチスペクトルカメラによる撮影に必要となる撮影条件を明確化および得られたマルチスペクトル撮影から再構成された画像が遠隔診療に有効性を検証すること目的とする。

2.4 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。

(1) 遠隔診療において診断する患部とその状態の明確化

これまで実施されてきた遠隔診療のデータをもとに、今回、患部観察が必須となる診断項目と診断に必要な患部の状態（画像情報）を明確にする。

(2) 臨床現場でのマルチスペクトル画像の撮影（撮影条件の検討）

臨床現場において、診断に用いる顔画像や患部をマルチスペクトル画像として撮影する必要がある。本研究では、診断に必要とされる色域およびスペクトル帯域を明確にするため、ハイパースペクトルカメラを用いて、精度の高いマルチスペクトル画像を撮影するための撮影条件を明確化する、

(3) マルチスペクトル撮影画像の再構成

ハイパースペクトルによって得られた高精度のマルチスペクトル画像をもとに、診断評価用の複数のマルチスペクトル帯域を用いた場合の再構成画像を作成す方式の検討を行う。加えて、マルチスペクトル画像を用いて、病変部を強調する方式についても検討する。

(4) 診断に必要とされるに色域およびスペクトル帯域の検証（フィジビリティ検証）

上記の撮影条件で得られたマルチスペクトル画像をもとに、臨床医に評価していただき、遠隔診療において、高精度再現が必要となる色域および高精度再現が必要なスペクトル帯域を明らかにする。加えて、得られた画像に対して臨床的な評価を行ってもらい有効性を検証する。

2.5 研究の意義

本研究は、複数のスペクトルで撮影した画像を用いることにより、遠隔診療時において得ることの困難な患部（浮腫、むくみ、黄斑など）の状態（色や起伏）を、診断支援を可能とするものであり、そのために必要となる色域およびスペクトル帯域を明確するものである。本研究では、実際の遠隔診療での臨床データを用いてフィジビリティを検証し、医療用マルチスペクトルカメラの設計に資する研究である。

3 研究内容

3.1 遠隔診療における診断項目の明確化

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され点を指摘している。

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、上記の診断では必須となるとされており、光源や場所、天候によって色再現が一定であるとされた。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、例えば患部の腫れ、起伏などの状況を十分把握することができない。その意味では、例えば、むくみなどにおける影の再現なども非常に重要な要素になる点が指摘された。

一方、直接の対面診療とは別に、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となる。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新d何が必要とされているといわれている。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、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

本検討のフィジビリティ検証を行うにあたって、今回、前述の本間医師が、従来より遠隔診療実験を継続しているケアハウスのご協力を得て行うこととした。

この場合、ある特定疾患（発熱、重篤化など）が実験期間中に発生し、その疾患に対しての症例報告に関するデータが得られれば、もちろん良いが、必ずしも疾患が起こるとは限らない。

このため、本検討では、以下の診断項目を基本として検討を進めることとした。

- (1) 急性疾患だけでなく、慢性疾患に関わる診断項目の検討を行う。具体的には、貧血時における目の下（内側）の色で診断を行うので、その部分の色の判別が正確に行うことは意義がある。このため、本検討では、目の下（内側）のマルチスペクトル画像を用いた検討を実施する。(図 3.1.1 参照)
- (2) 慢性疾患に関わる足のむくみは重要な診断項目となる。実際には、立合い者（介護者）が、むくみがあると思われる部位を数秒間押して、その戻るか否かにとり診断する、遠隔診療側では、その様子が非常にわかりにくいとされている。本検討では、むくみのようすが適切に表示できるかを検討する。(図 3.1.2 参照)
- (3) 皮膚疾患に関わる症例がある場合、特に皮疹などは原因がわかりにくい場合も多く、専門医による診断が必要な場合も多い、本検討では、実施したフィジビリティでの事前検討として、皮膚病変のマクロ診断において適用可能な色再現技術および病変部の検出、強調方式の検討を行う。
- (4) 遠隔診療において、上記の慢性時の疾患が悪化する、あるいは別の重篤な急性疾患による急変を事前に察知して、適切な診断につなげることが非常に重要である、このため、具体的には、平常時にバイタルデータ（心拍、血圧、歩行、体重など）をモニタするとともに、急性疾患が発出する可能性について事前検知して、その場合の画像の変化をとらえるためのアラート検出の検討を行い、可能であれば、その際の画像による診断の可能性について検討する。



貧血症の診断部位

図 3.1.1 貧血症における診断



**“むくみ”の
診断部位**

図 3.1.2 “むくみ”における診断部位

3.2 マルチスペクトル画像の撮影

3.2.1 使用機材

本検討においてマルチスペクトル撮影に用いる使用機材を以下に示す

①ハイパースペクトルカメラ[トプコンテクノ社 SR-5000]

SR-5000 の外観および使用を図 3.2.1 に示す。



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
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 (^{1,2})
測定波長範囲	380～780nm
波長精度	±0.5nm *Hg輝線において、高精度モード時
スペクトル波長幅	7nm (半値幅)
波長分解能	1nm

図 3.2.1. ハイパースペクトルカメラ (SR-5000HS) の外観および仕様

②LED 光源(D55) [セリック株式会社 LED 人工太陽照明灯 LE-9ND55F]

光源のスペクトルを図 3.2.2 に示す。本グラフは実際の太陽光のスペクトルデータ（ピンク）と LED 人工太陽照明灯（青）のスペクトル相対値である。

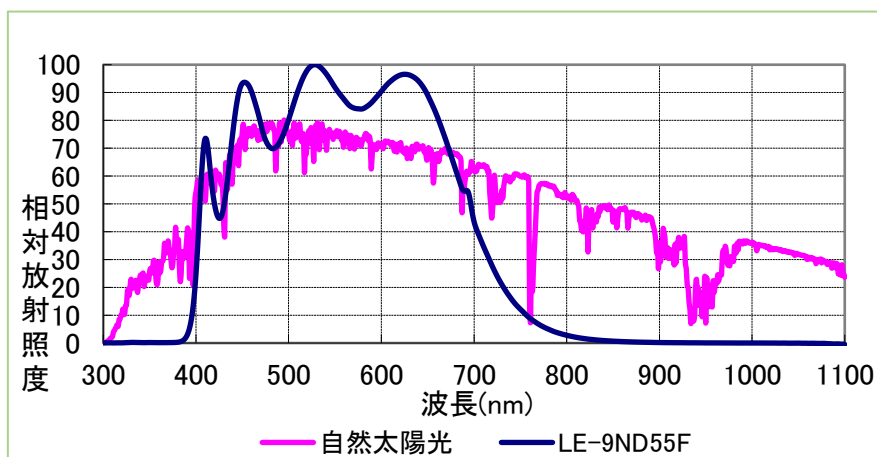


図 3.2.2. LE-9ND55F 分光データ

参考：セリック株式会社 <https://www.seric.co.jp/%E8%A3%BD%E5%93%81%E4%B8%80%E8%A6%A7/solax-io/>

③白色板 [エックスライト社 KHG3421-WB]

照明のスペクトルを測定するため、白色版を用いた。

④測定データ収集用 PC (撮影に用いる PC のスペック詳細を表 3.2.1 に示す)

表 3.2.1. 測定用 PC スペック

	PC1 (CF-SX2)	PC2 (D4KA47)
OS	Windows10 Pro	Windows10 Pro
CPU	Intel core i5 3320M 2.6GHz	Intel core i9 9900K 3.6GHz
メモリ	8.00 GB	32 GB
容量	256 GB (HDD)	476 GB (SSD)
グラフィックボード	なし	NVIDIA TITAN RTX

なお、検討先立ち、上記 2 種類の性能の PC において測定し、必要となる PC の仕様を明らかにした。

⑤照度計 ([CEM 社 DT-1309]

撮影時の照明による照度を照度計により測定する。明らかとするため、本検討においては。

3.2.2 撮影環境

本検討における撮影環境 (図 3.2.3) を記す。

1. ハイパースペクトルカメラ①を白色板③に対し垂直上に設置する。LED 光源②は、本来であれば白色板の垂直上に設置すべきだが、物理的制約で、LED 光源を撮影範囲内に入りこまず、かつ撮影範囲が最も明るくなる位置に照度計で測定して設置した。この時、撮影時光源条件としては、白色板との距離：約 18cm, 入射角度：約 45 度とし照度：図 3.2.3 撮影環境 6.59kLux となるように固定して撮影条件を求めた。

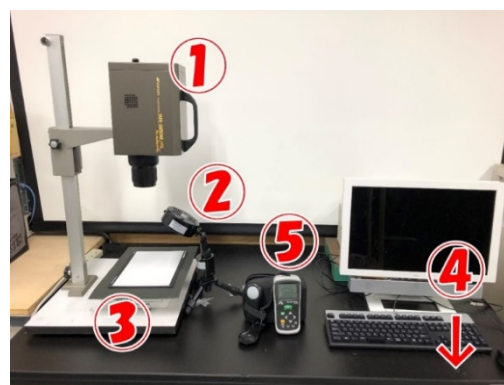


図 3.2.3 実験撮影の環境

2. 撮影用 PC を用い目視で確認したピント限界が 30 cm 弱であったため、検体の厚みに合わせピント調整を行うことなどを考慮しカメラと白色板との距離は 30 cm とした。

3. 室内は照明を消し、遮光カーテンを使用し簡易的な暗室状態とした。

3.2.3 測定用 PC の性能条件

本検討の進行中、当初 PC1（旧 PC）を用いて撮影時間に 5 分以上かかり臨床使用が現実的でないという問題や、原因不明のノイズ(図 14)が混入する問題が発生していた。このため、撮影に使用する PC のスペックを表 3.2.1 に示される 2 種類の PC を用いて比較実験を行った。その結果、図 3.2.4 にしえされるように、カメラ本体の性能に依存していると考えられていた撮影時間も短縮され、さらに発生していたノイズが大幅に低減した。このため、以降の実験は PC2 を用いて行うこととした、

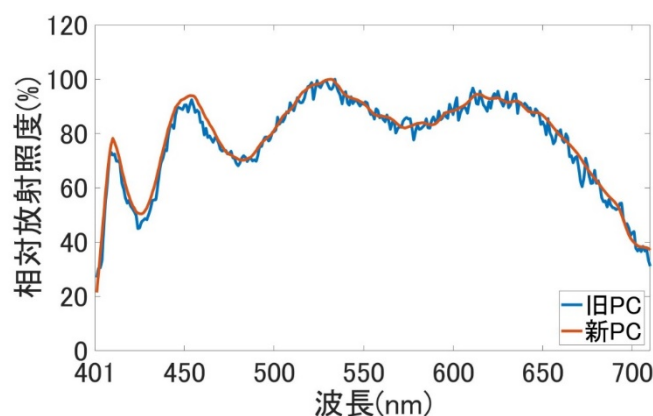


図 3.2.4. PC によるノイズ変化

3.2.4 撮影条件の検討項目と評価方法

本検討では②LED 光源のスペクトル値をサンプル値の真値とし、真値と測定値から算出した誤差率及び、測定データより作成したスペクトルのグラフをもとに最適な撮影条件を検討する。

検討項目として、1 回の撮影からスペクトルを求めた場合と加算平均を行った場合のスペクトルの比較を行い加算平均によるノイズの軽減効果を調べた。また、撮影時の積分時間の長さによりノイズの軽減効果を測定するとともに、積分時間の長さにより必要となる計測時間の長さを求めた。以上の 3 点より総合的に臨床及び病理検体への診断に最適な撮影条件の検討を行った。

また本検討中、使用する PC のスペックにより画像のスペクトルにノイズが発生する事象や撮影時間を含む測定時間が大幅に長くなる事象が発生した。

本検討での具体的検討項目は以下の通りである。

- ①加算平均の有無：1 回の撮影からもとめたスペクトルデータと 5 回撮影データより加算平均を行い求めたスペクトルデータを比較しノイズの軽減効果を調査した。
- ②積分時間：カメラの積分時間の長さによるノイズへの影響を調べる。積分時間は 5~50ms 間では 5ms 間隔、50~100ms 間では 10ms 間隔、100ms~はサチュレーションが発

生するまで 50ms 間隔で撮影を行う。尚、本検討条件では積分時間 200ms でサチューレーションが発生したため、測定は積分時間 150ms までとしている。

③計測時間：計測時間は測定対象となる被験者への負担の目安となる。このため積分時間と加算平均によるノイズの軽減具合と比較しつつ適切な条件を検討する。計測時間は、検体を実際に撮影する時間(臨床においては患者さんに静止してもらう撮影時間とし、撮影時間に加え画像作成時間を足した測定時間の 2 種類を求める。測定時間は撮影時のインターバル時間となる。

また、本検討に記載する撮影時間及び計測時間は各条件 5 回ずつ撮影をした際の実測値を平均したものである。

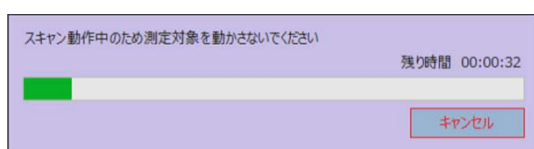
実際にどれほどの軽減効果があったのかを定量化するために評価値としては式(3-1)ですらされる誤差率 ε により求めた。 $ave(M - T)$ は測定した真値(光源の相対放射照度) T と測定値 M の差を全バンドで求めた平均値であり、 $ave(T)$ は測定したバンドの範囲内の真値の平均値である。

$$\cdot \text{誤差率} \quad \varepsilon = \frac{ave(M-T)}{ave(T)} \quad \dots (3-1)$$

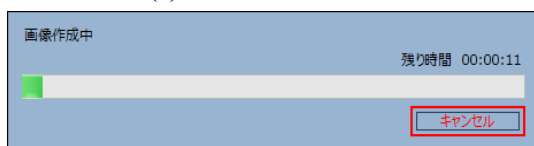
3.2.5 検討方法

具体的測定方法は以下のとおりである。

- (1) 3.2.3 で示した撮影環境を作成し、PC の画面で目視にてカメラのピントを合わせる。
- (2) 撮影時間内は対象物を動かさないようにし撮影を行う。SR5000 用の撮影ソフトでは図 3.2.5 に示されるように、撮影時にスキャン動作(図 3,2,5(a))と画像作成動作(図 3,2,5(b))が示されることから、(a)から(b)に切り替わるまでの時間を、ストップウォッチを用いて撮影時間および測定時間を計測する。



(a)スキャン動作画面



(b)画像作成時間画面

図 3.2.5. 撮影処理画面

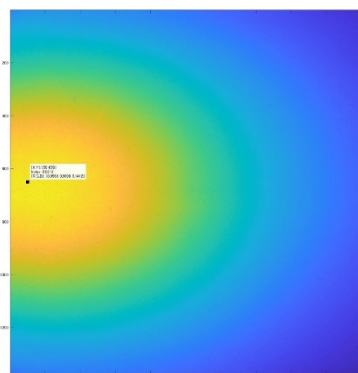


図 3.2.6. プロット点選択画像 (例)

- (3) 撮影画像を Matlab に読み込み図 3.2.6 の様に画像化し、画像内から目視にて最も明るい点をプロットし、選択した点のデータは全バンドの内最大値を 1 とし正規化をし必要であれば加算平均を行い真値との比較を行った。

3.2.6 結果

実際のスペクトルのデータを図 3.2.6 に示す。ここで、積分時間 5ms, 50ms, 100ms, 150ms を代表値とし、撮影画像内の任意の同一座標の相対放射照度のスペクトルのグラフとして示す。ただし、図中の青い線(Model)は真値を示したものである。ここで、本検討においてはノイズが多い 400nm 以下及び 711nm 以上のデータを取り除いて評価を行った。この結果から積分時間が長いほどノイズが軽減していることがわかる。

定量的に評価するため、加算平均を行った場合と加算平均を行わなかった場合の誤差率を求めた結果を表 3.2.2 と図 3.2.7 に示す。図 3.2.7 の青線は「加算平均なし」を、赤線は「加算平均あり」を表す。

加算平均を行った結果、各積分時間において誤差率の軽減具合に差はあるが、誤差率を低下させることができたこの結果より加算平均を行うことで、35ms 以降では誤差率が 1.8~2.2% で安定し突発的なノイズによる誤差率の上昇が起きにくくなっていることがわかる。また加算平均を行わなくても 100sec 以上にすれば安定して得られることがわかる。

図 3.2.6. 積分時間に対するスペクトルノイズ

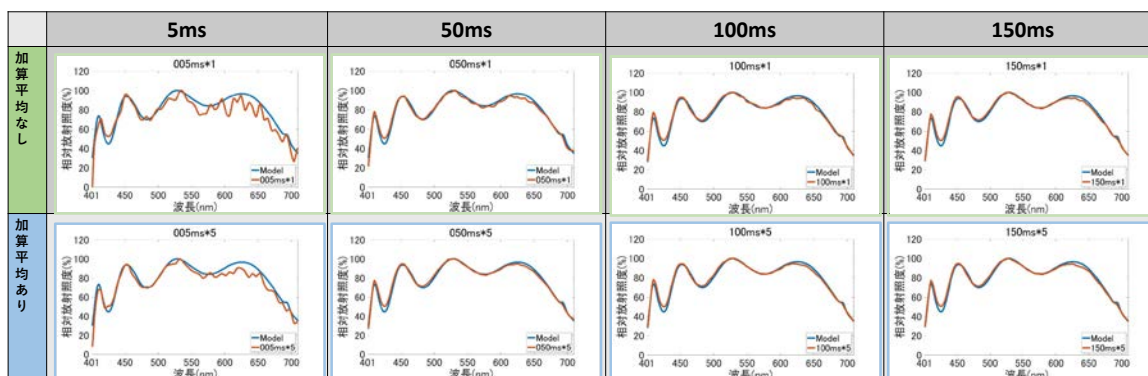


表 3.2.2. 加算平均による誤差率の変化

積分時間	5ms	10ms	15ms	20ms	25ms	30ms	35ms	40ms
	s				s			
誤差率 (加算平均あり)	5.3%	2.6%	2.8%	2.5%	2.3%	2.4%	2.2%	2.1%
誤差率(加算平均なし)	7.6%	3.0%	3.1%	2.5%	2.7%	2.4%	2.8%	2.2%
	45ms	50ms	60ms	70ms	80ms	90ms	100ms	150ms
	s				s			
	1.9%	2.1%	2.1%	2.0%	2.2%	2.0%	2.0%	2.1%
	2.3%	2.5%	2.5%	2.2%	2.5%	2.2%	2.1%	2.1%

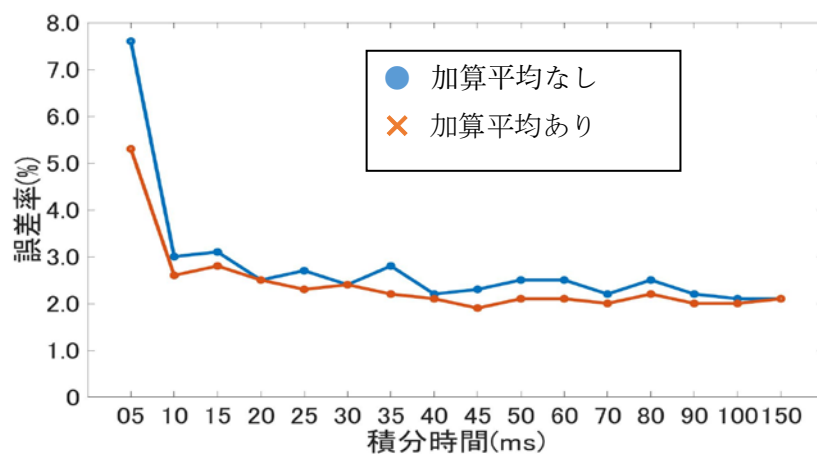


図 3.2.7 積分時間に対する誤差率の変化

計測時間について実際に撮影を行う時間を撮影時間、画像作成時間を含んだ時間を計測時間とし、測定結果を以下の表 3.2.3 に、積分時間ごとの撮影時間の変化を図 3.2.8 に示す。

これらの結果より、撮影時間については、積分時間 5ms ごとに約 1 秒ずつ延長する結果となった。また、これらの結果から測定を行っていない 55ms,65ms,75ms,85ms,95ms また、105ms~145ms の撮影時間も予測することができる。

一方、測定時間と撮影時間の差より画像作成にかかる時間は積分時間に関わらずほぼ一定で 32.6s かかることがわかった。

表 3.2.3. 撮影時間と測定時間

積分時間	5ms	10ms	15ms	20ms	25ms	30ms	35ms	40ms
撮影時間	8.7s	8.7s	9.6s	10.6s	11.6s	12.6s	13.6s	14.6s
測定時間	41.3	41.4s	42.8s	43.2s	44.6s	46.0s	45.7s	48.5s
	45ms	50ms	60ms	70ms	80ms	90ms	100ms	150ms
	15.6s	16.6s	18.6s	19.7s	21.7s	23.7s	25.8s	34.8s
	47.9s	48.2s	52.0s	52.5s	54.2s	55.6s	57.3s	66.5s

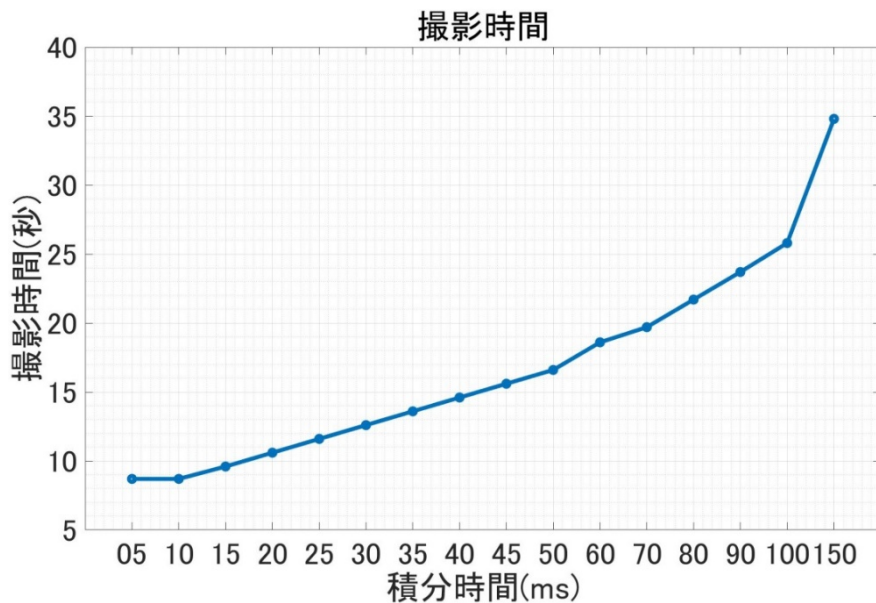


図 3.2.8 . 積分時間ごとの撮影時間の変化

3.2.7 撮影条件の検討結果

本検討では、マルチスペクトルカメラにおける特性を明らかにし、マルチスペクトル画像を得る撮影条件として、積分時間と撮影時間の関係を求めて、フィジビリティ実験での撮影条件を明らかにした。その結果、被験者に対し撮影を行う場合、顔、腕や足など、ある程度固定され、やや長めの時間の撮影が可能な場合には、積分時間 100ms や 150msec と設定することで、20 秒、30 秒の撮影時間が必要となり、ノイズの軽減することができることが示された。さらに、呼吸や心拍の影響を考慮して、長く静止することが難しい場合には、誤差率がある程度安定している 35~50ms 程度の積分時間を選択し、静止時間が 15 秒前後に抑えることも可能となる。

また、積分時間の短縮によりノイズによる誤差率が大きくなるため加算平均を行うことで誤差率の軽減を行う方法も選択肢の一つである。特に、積分時間を 5~10ms など極端に短くする必要がある場合などは、本検討で行った 5 回よりも多くの加算平均を行うことで軽減させる必要があると考えられる。

一方、病理画像診断における撮影などで、静止状態で撮影可能な場合には、積分時間を 100msec 以上に長くしてノイズの発生を極力低下させるとともに、加算平均も併せて行うことでより正確なデータを得やすくなると考えられる。

3.3 マルチスペクトル撮影画像の再構成

3.3.1 マルチスペクトル画像を用いた高精度色再現画像の再構成

マルチスペクトルカメラで撮影された画像を用いた高精度色再現画像の再構成は、得られた複数バンドの値からスペクトルを求め、再構成画像を作成する。

以下、スペクトル画像を用いた再構成画像の生成方式を示す。

病理画像のハイパースペクトル画像の活用方法としてランベルト・ベール則に基づく色補正法が提案されている。病理標本は組織の状態や固定化や染色などの手順によって大きく色が異なる場合が生ずるため、安定した画像として得られず、その後の定量的解析を行う場合に、ばらつきが生ずる可能性が残る。

一方、マルチスペクトル画像は撮影画像のスペクトル特徴を詳細に取得するため各組織の特性による色素量推定が可能である。マルチスペクトルカメラの再構成は、得られた複数バンドの値から基準となるスペクトルと測定された吸光度をもとに色素量を推定し、再構成画像を作成する。ここで、色素量推定は次式に基づいて推定される。

$$\mathbf{a} = \mathbf{X}\mathbf{c} + \mathbf{n} \quad (1)$$

このとき、 \mathbf{a} は吸光度、 \mathbf{X} は分光吸収係数、 \mathbf{c} は色素量、 \mathbf{n} は染色液以外の情報である。また、吸光度は次式の関係にある。

$$\mathbf{a} = -\log(\mathbf{T}) \quad (2)$$

このとき、 \mathbf{T} は分光透過率である。色素量は次式を用いて求めることが可能である。

$$\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{X}^+ \mathbf{a} \quad (3)$$

このとき、 \mathbf{X}^+ は次式を用いて求めることで、吸光度から色素量が推定できる。

$$\mathbf{X}^+ = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \quad (4)$$

これにより、推定した色素量から、対象物の自身もつ吸光度が得られ、光源などによらない忠実な色再現が可能となる。

図 3.3.1 にマクロ病理切片の RGB 画像とマルチスペクトルカメラで撮影した画像から再構成した画像例を示す。

ここで、マルチスペクトル画像は、7バンドのカメラで撮影したものを用い、再構成においては、得られた7バンド画像の値と分光放射計で得られた基準位置のスペクトルをも画像全体のスペクトルを推定し、再構成画像を作成して例を示す。

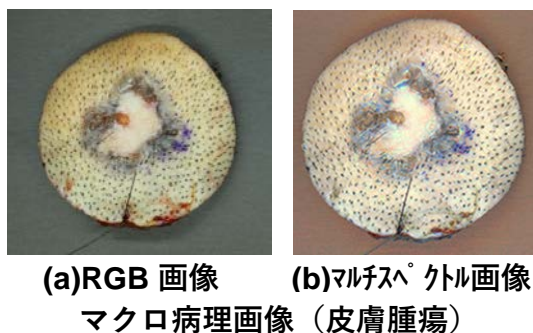


図 3.3.1 マルチスペクトル画像の再構成

また、再構成画像で得られている分光反射率の組織による違いを、元の分光放射計で測定したものと RGB 画像として色度を計算したものの差分を図 3.3.2 に示す。RGB 画像の色度推定は RGB 分光特性より計算した値を用いている。定量的評価は、基準位置の実測スペクトルと推定スペクトルを比較するとともに、得られる色度値と実測値との差から客観評価を行った。

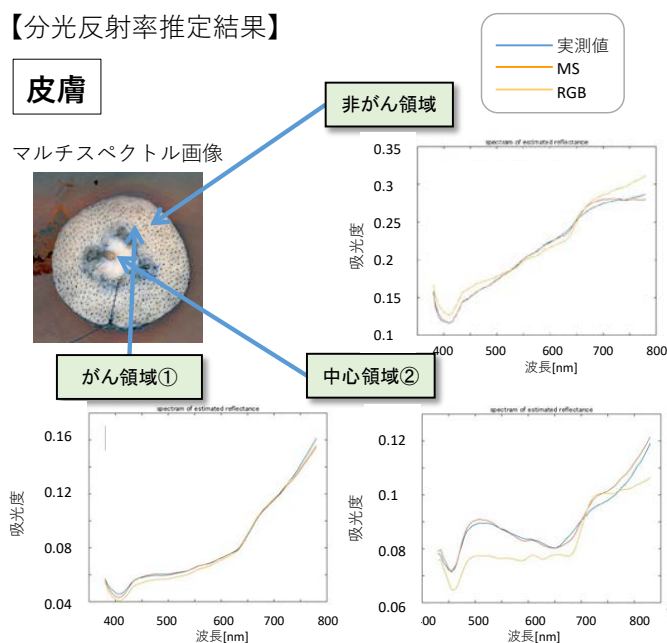


図 3.3.2 マルチスペクトル画像と RGB 画像のスペクトル特性

本フィジビリティ検証においても、同様の方式を適用することで、高精度な再構成画像

を得ることが可能となる。

3.3.2 マルチスペクトル画像を用いた病変部強調画像方式の検討

撮影した画像における病変部の広がり精度よく求めることは、その後の治療方針を決定するうえで、非常に重要な診断項目となる。一般的にRGB画像を利用して病変部の強調を行うと、正常部の色も同時に変化するため病変部の特徴を明確にできず、正しく病変部を特定することが困難である。一方、マルチスペクトル画像を用いた場合、画像のKL (Karhunen-Loeve) 変換等を適用することにより、正常部の色を変化させずに、病変部に関わるスペクトルのみを変化・強調させることができる。ここでは、皮膚のメラノーマに代表される悪性腫瘍を例に得られたマルチスペクトル画像から、病変部を強調して示す方式について、2種類の方法を検討した。

①方式1 特定波長強調法

メラニン色素の吸収が大きい短波長のバンド画像（マルチスペクトル画像では450nm画像、RGBではBバンド画像）を強調する。具体的には、反射係数から得られたスペクトル画像の中で、450nm付近の画像を抽出して反射係数を増幅し、推定画像に重ね表示する。

この方式で強調した画像例を 図3.3.3 に示す。

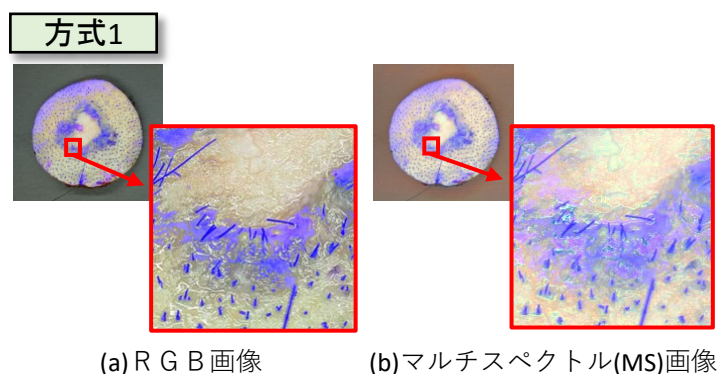


図3.3.3 バンド強調による病変強調（方式1）

②方式2 主成分除去法

マルチスペクトル画像の7次元信号に対し、バンド方向への主成分分析を行い、第一主成分以外の成分を残差画像とする。第M主成分は皮膚全体でもともと持っている基本成分と考え、主成分は残渣スペクトル成分に対して、特定波長の信号値のみを数倍増幅して強調し、他のバンド信号値をゼロとすることで強調画像を作成する。

この方式では、元の画像信号を f 、第一主成分として得られる画像を \tilde{f} 、 M を主成分数、 W 重み係数とすると、下記の式で表すことが可能となる。

$$fe = f + W |f - \tilde{f}| \quad (3)$$

$$\tilde{f} = \sum_1^{M_i} \alpha_i v_i \quad (4)$$

この方式で強調した画像例を 図3.3.4 に示す。

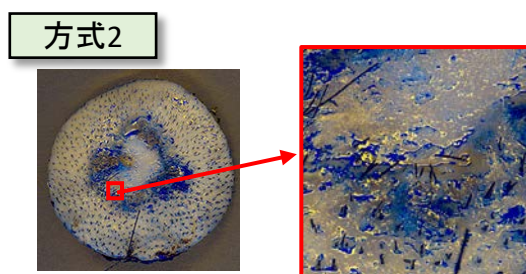


図 3.3.3 主成分分析による病変強調（方式2）

3.3.3 マルチスペクトル画像による再構成の検討結果

マルチスペクトル画像による再構成方式の検討において、皮膚疾患のマクロ病理のマルチスペクトルデータをもとに方式検討を行った結果

- (1) 診断に利用可能となるマルチスペクトル撮影画像からの忠実色再現を可能とする画像再構成技術
- (2) 診断が必要な患部に関わるスペクトル情報を用いた皮膚などの病変領域を特定し、強調表示する技術

以上の2点を方式を検証し、診断において有効な結果が得られることを示した。

3.4 診断に必要な色域およびスペクトル帯域の検証(フィジビリティ実験検証)

3.4.1 フィジビリティ検証における遠隔診療支援検証

本検討では、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て体調を管理する遠隔診療において、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である。

フィジビリティ検証にあたっては、福島県郡山市内のケアハウス(生活が自立した高齢者が暮らす軽費老人ホーム)の利用者にご協力をいただき、2019年11月～2020年3月の5カ月にわたり遠隔診療を受けていただき、その中で月一回のテレビ電話(Skype)を用いた遠隔診察、毎日のバイタルデータ測定(体温、心拍、活動量、体重など)を実施およびバイタルデータを用いたアラート管理を行うとともに、必要となる疾患の診断に際してマルチスペクトルカメラによる撮影を実施させていただいた。

ケアハウスにおいては、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12名の方に対して実施した。なお、本フィジビリティ検証は、ケアハウスの倫理委員会および埼玉医科大学倫理委員会()の承認を得て実施している。

3.4.2 フィジビリティ検証システム

本実験のフィジビリティ検証システムでは、テレビ電話(Skype)を用いた遠隔診察と、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、NTTテクノクロス社の“ひかり健康相談”システムを使用し、協力者は、NFC通信機能を備えた電子体温計、活動量計、自動血圧計、体重・体組成計の4種の測定器を用いて、毎日定期的に測定してもらう。各測定器に記録されたバイタルデータは、実験スタッフが定期的にスマートフォンを利用して、サーバーへ転送し、東京での診察医が月に1回各患者のグラフ結果を診断に利用している。また、マルチスペクトル画像の撮影は、被験者から、疾患につながる方を選定し、撮影に協力した頂いた。

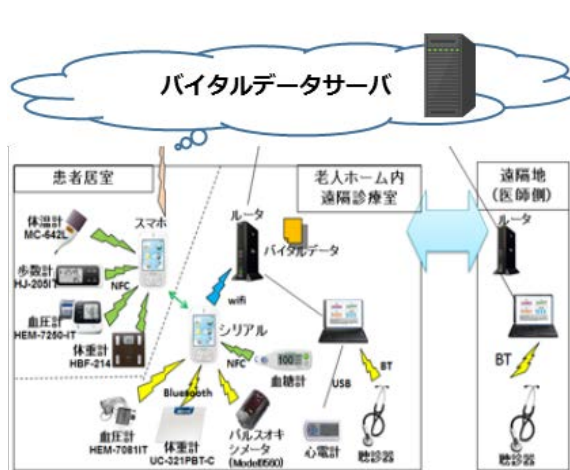


図 3.4.1 実験システム

3.4.3 マルチスペクトル画像による疾病検知のフィジビリティ検証

本検討では 18 名の協力者を得て実施されたが、本実験期間中、急性の疾患に罹患した方はいなかったため、急性疾患に対する画像データを取得することはなかった。

一方、慢性疾患において、通常のカメラでの検出が難しいとされている、目の内側検査による貧血症の診断および“むくみ”の検証に有効であるかについてフィジビリティ検証を行うこととした。これまでの、遠隔診療における総合的診断によって、上記症例に関する該当者および通常者の計 6 名を主治医となる本間医師に選別していただき、マルチスペクトルカメラを用いた撮影を行った、協力者の症状を示したものを表 3.4.2 に示す。

表 3.4.3 マルチスペクトル撮影協力者

協力者 No	症状等	協力者 No	症状等
2	リウマチ	14	健常
3	貧血	15	術後・貧血
10	むくみ	17	むくみ

3.4.4 マルチスペクトル画像を用いた貧血症の検出に関わるフィジビリティ検証

貧血を示す、目の下（内側）のRGB画像およびスペクトルを図3.4.4に示す。本結果が示すように、貧血症である、協力者3, 15 において、640-720nmの赤スペクトルに比較し、500-560nmの帯域における分光反射率が明らかに高くなっていることが明確になっている。また、この基準によると、協力者10は、やや貧血の傾向があると判断することができる。


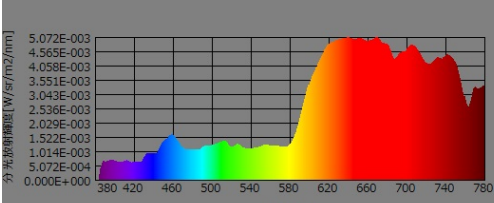

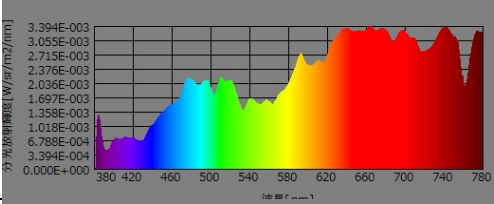

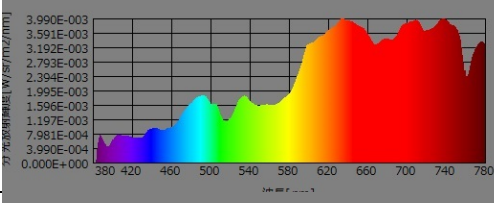

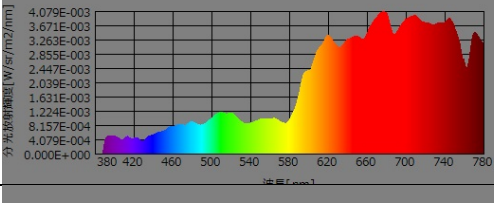

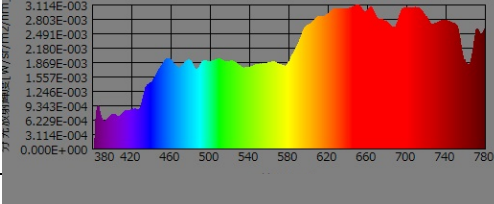

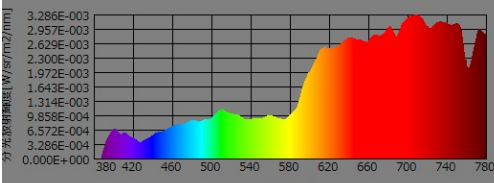
	RGB画像	スペクトル	x,y
2			194 163
3			98 47
10			327 164
14			460 202
15			112 173
17			125 131

図 3.4.4 貧血の診断に関わるマルチスペクトル画像

3.4.5 マルチスペクトル画像を用いたむくみの検出に関わるフィジビリティ検証

むくみを検出ため、撮影前に数秒間足の内側をスタッフが親指で押下後、凹部が残るか否かを観察する。遠隔診療で、この凹部を明確に見えることが望まれている。

図3.4.5は、主治医からむくみを指摘されている、協力者10、17に関する通常部分とむくみ凹部のスペクトル、および通常者である協力者14の同様部分のスペクトルを示している。

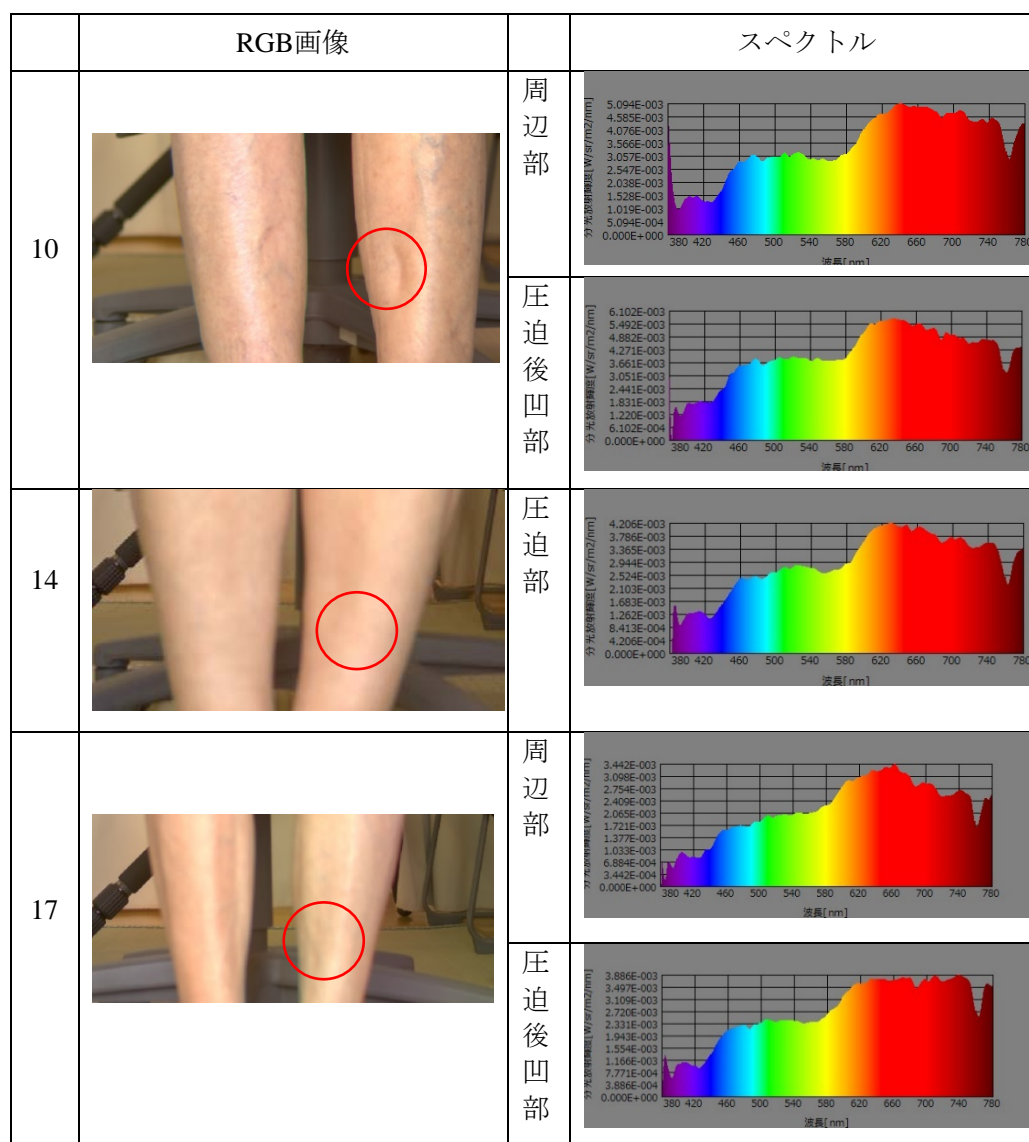


図3.4.4 むくみによる凹部のスペクトル画像

3.4.6 バイタルデータを用いたアラート検知

本フィジビリティ検証において、画像撮影とともに、バイタルデータとの連動もシステムとして重要な要素である。このため、バイタルデータによる容態悪化に関するアラート検知についても検討を行った。

アラート検知方式の検討は、本フィジビリティ検証に先立ち、2013年~2014年に測定され、測定期間中に異なる病態を罹患した4例のデータを利用する。罹患状態は、症状出現時と症状のピーク期間を被験者の主治医に決定している。本検討では最高血圧、最低血圧、脈拍、体温、体重（微分値）、体脂肪率を分析項目とする。各測定データおよび罹患状態を表3.4.1に示す。

表3.4.1 アラート検出被験者の疾患

	測定機関	罹患期間	ピーク期間	慢性疾患	急性疾患・悪化
A	10/1-12/31	10/1-11/23	11/17-11/23	慢性うっ血性心不全、高血圧、脂質異常症、前立腺肥大	心不全の悪化
B	9/7- 9/29	9/25- 9/29	9/28- 9/29	高血圧、胃炎、逆流性食道炎、前立腺肥大	胆石症
C	2/1- 2/28	2/8- 2/10	2/10	高血圧、糖尿病、肥満	インフルエンザ
D	4//1- 5/31	4/29- 5/8	5/8	高血圧、肺気腫	肺炎

3.4.3.1 主成分分析によるアラート検知

本検討では、主成分分析および機械学習（SVM）によるアラート検知を検討した。

主成分分析では、被験者4名のデータをまとめて正規化した後主成分分析を行った。寄与率は第一主成分 42.8、第二主成分 21.5、第三主成分 16.3、となり、合計で 80.6 となり、第一主成分から第三主成分までで 80%程度のデータが集約されているといえる。

図 3.4.2 は 4 名の被験者における横軸が第一主成分、縦軸が第二主成分における散布図となっている。

図 3.4.1(a)は、慢性心不全の増悪がみられた被験者 A の場合を表し。正常時のプロットは下の中心に集中しているのに対し、罹患時のデータは一部の罹患データが右上にプロットされる傾向がみられる。

図 3.4.2(b)は胆石症を発症した被験者 B の場合である。ここで、正常時をピンクの十字で表示し、正常時と罹患時の差は見られないが、ピーク時は上部にプロットされた。ピーク日のバイタルデータでは血圧、脈拍において特に変動がみられたが、罹患時に変動は少なく通常時に混ざってしまったと考えられる。

図 3.4.2(c)は急性インフルエンザを発症した被験者 C の場合である。正常時のプロットは左下に集中し、罹患時は図の右に分布していてピーク時のプロットは右上に外れてい

た。分析前のバイタルデータにおいて体温に大きな変化が見られ、体重の減少もみられた。主成分分析でもプロットが大きく外れたことは、体温の影響を大きく受けたと考えられる。

図 3.4.2(d)は、肺気腫をベースとした感染増悪を発症した被験者 D の場合である。ここで、罹患時も全体に分散していて特に傾向はみられなかった。軽度の体温上昇と、体重の減少傾向しか変動は見られなかった。変動も小さく、主成分分析に影響が検出困難であった。

以上のことから、正常時と罹患時のバイタルデータにある程度変化があり、いくつかの測定要素に大きな変化がみられる疾患においては、第一主成分、第二主成分の変化を捉えることができ、疾患によって分布に違いがみられ、症例の違いがプロットの分布位置に影響を与えているのかについては検証は今後の課題となる。

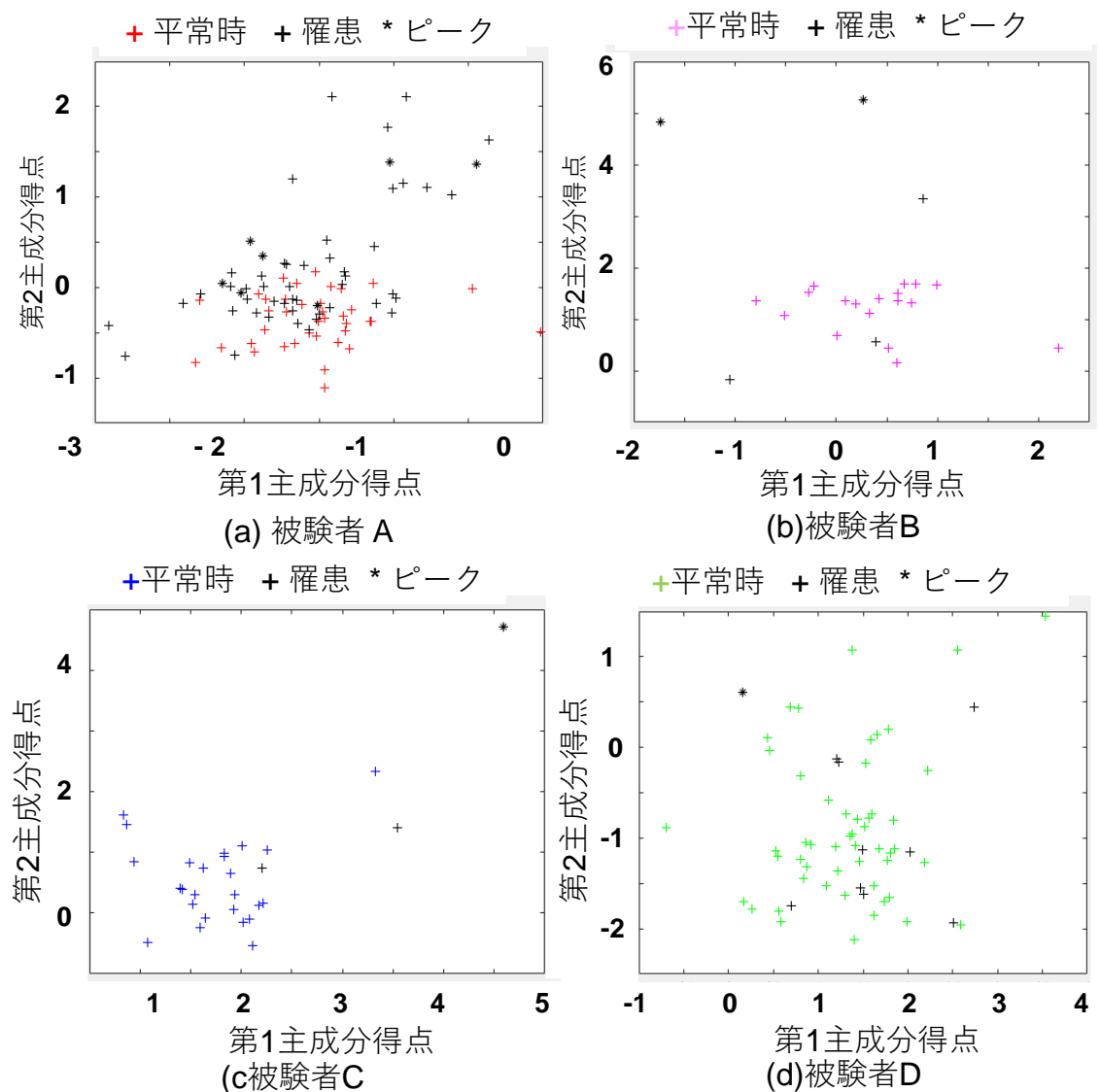


図 3.4.2 主成分得点における通常時と罹患時の分布特性

3.4.3.2 機械学習によるアラート検知

データは上記主成分分析を用いた検討で使用した 4 名のデータを使用する。先と同様に症状出現時を主治医に決定していただき、体調が通常の場合を 0、罹患期間を 1 として機械学習を行う。データ数は通常時(0)が 88 個、罹患時(1)が 42 個であるため、SMOTE を用いて通常時(0)が 84 個、罹患時(1)が 84 個の均衡データを作成し SVM を用いて学習し、10-fold cross-validation (10 分割交差検証)を行った。

その結果の。コンフュージョンマトリックスは表 3.4.2 に示す。正解率は 88.69%となった、今回の実験では、既存のバイタルデータの判別しか行わなかったが、学習データの数を増やし判別の精度を上げることで、バイタルデータのわずかな変化から病態の罹患を事前に予測することが可能になるのではないかと考える。

表 3.4.2 SVM 学習結果のコンフュージョンマトリックス

		推定	
		正常 (0)	罹患 (1)
真値	正常 (0)	74	10
	罹患 (1)	9	75

3.4.4 マルチスペクトル画像を用いた遠隔診療支援のフィジビリティ検証結果

今回のフィジビリティ検証では、急性疾患や皮膚疾患に関わる症例が発現しなかったことから、基本的に慢性疾患に関わる貧血症および“むくみ”の検出にマルチスペクトル画像が有効であるかの検証を行った。

その結果、貧血症の検出には、500-720nmの帯域に着目することで、精度よく検出可能であることが明らかとなった。今年度は、検証する対象者数、回数の中で、十分な試験数の確保が困難であったため、定量的に診断の指標を決定することはできなかったが、本結果については、主治医の本間医師からも、大変有効な結果が得られているとの評価を得ている、

一方、“むくみ”の検出には、今回は十分に検出可能となるスペクトルの特徴は得られなかった。今後、より多くの症例について検証するとともに、スペクトル情報以外の形状情報も含めた画像処理により検出する検討を続ける予定である。

5. 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。

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検証を行うための基盤技術として、

- ①マルチスペクトルカメラの撮影条件の明確化
- ②皮膚疾患のマクロ病理データをもとに診断に利用可能となるマルチスペクトル撮影画像からの忠実色再現を可能とする画像再構成技術
- ③診断が必要な患部に関わるスペクトル情報を用いた皮膚などの病変領域を特定し、強調表示する技術

以上の3点について、検証、技術蓄積が行うことができ、今後につながる基盤技術の確立がなされた。

実際の遠隔診断におけるフィジビリティ検証において、マルチスペクトルカメラによる撮影を利用した“貧血症”および“むくみ”の2つの症例について検証し行い、特に“貧血症”の検出においては、得られたマルチスペクトル撮影から画像が有効であることを示すことができた。

加えて、遠隔医療システムでは重要な役割を果たす、バイタルデータ活用によるアラート検出の可能性も合わせて示すことができ、今後画像データとの連携の課題も示すことができた、