

偏光分光型マルチスペクトル映像カメラを用いた遠隔診療システムの検討

代表研究者	小林 直 樹	埼玉医科大学 保健医療学部 教授
共同研究者	石 川 雅 浩	埼玉医科大学 保健医療学部 講師
共同研究者	本 間 聡 起	埼玉メディカルセンター 健康管理センター センター長

1 はじめに（本研究の目的）

RGB 映像に加えて遠赤外線など複数の波長映像を用いてバイタルデータを取得し、患者の急変などを事前に診断[1]を可能とする遠隔診療用偏光分光型マルチスペクトル映像カメラを開発し、その遠隔診療での有効性を臨床の評価のもと検証する。このため、（１）測定用バイタルデータの明確化、（２）バイタルデータ測定用フィルタ設計の検討、（３）マルチスペクトルカメラの試作 および （４）映像からの信号抽出ソフト開発 （５）実験および評価 という手順で検討を進めた。

2 研究内容

2-1 測定用バイタルデータの明確化

通常の診療で利用される「脈拍数」「血圧」に加えて、コロナで重要になっている「酸素飽和度」の測定対象として、映像を用いた計測方法の検討を行う。「脈拍数」は、通常の RGB カメラによる検出方法が検討されてきているが[2][3]、これに加えて、顔と手などの脈波の時間差から求める脈波伝搬時間が血圧と相関があることから、血圧推定が可能である [4]。本検討では、映像から取得する脈波（映像脈波）の精度向上とともに、脈波伝搬時間推定精度の向上により、血圧推定の可能性を検討する。一方、「酸素飽和度は、可視光と赤外光の脈波から求められることは広く知られており、映像からの検出でも可能か否かを検討する、

2-2 バイタルデータ測定用フィルタ設計

（１）RGB 映像＋狭帯域映像による高精度脈波検出法の検討

人体表皮は容積脈波の変化によって反射強度が変化しており、非接触に脈波（映像脈波）が観測可能であるという点に着目して画像処理分野では広く研究が進められている。RGB ウェブカメラの Green 信号および信号処理で脈拍を推定する手法[2][3]、RGB ウェブカメラと独立成分分析を用いた脈拍推定を行う方法[5]等の提案があるが、いずれも脈波算出の正確性の評価はされず、脈拍数の精度も十分得られていない。脈波の変動（R-R 間隔の変動）[6]や、脈波伝播速度の推定などには、正確な脈波形状を得る必要があり、簡便な手法で精度良く脈波を推定する手法の確立が必要となる。

本検討では、RGB 映像に近赤外等の狭帯域映像を加えた 4 バンド映像の強度変化から得られる元信号に対して、独立成分分析を行い映像脈波を生成する方法を提案する。本方式の有効性を確認し、映像脈波算出に必要な撮影波長を決定するため、通常の RGB カメラと干渉フィルタ＋グレースケールカメラという 2 台のカメラから得られる 4 バンドの映像による検証実験を行った。ここで、干渉フィルタとして電子制御式の Varispec（CRI 社製）を用いて、干渉フィルタの波長を変更して撮影を行った。Varispec は透過光のバンド幅は 10nm で 850～1100nm まで自由に波長を変更可能であるが、1000～1070nm 付近では透過率が 1%前後まで落ちる特性がある。

本検討では、これらの 4 バンドの映像から反射強度の時系列変動信号（元信号）を画像処理によって取出し、さらに取り出した 4 バンドの元信号に帯域フィルタリングおよび独立成分分析といった信号処理を行うことで、精度の高い映像脈波を生成し、非接触に脈波が算出する場合の最適なバンドの評価を行った。（図 1）

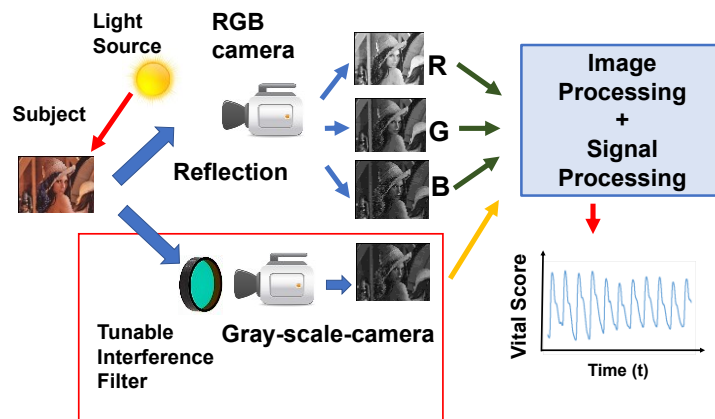


図1 4バンドの映像を用いた脈波抽出方式の概要（フィルタ検討システム）

（2）映像から得られる容積脈波（元信号）の算出

ここでは、映像脈波を得るため、ある着目領域（ROI：region of interest）を指定する。ここで、選択する部位としては、日常生活でも容易に測定可能な手掌および額を候補としたが、これらのうち予備測定で時間的な変動が少なかった手掌の皮膚表面を用いることとした。ROIは血管領域を含む明るい領域を選び、画素数は 100×100 とした。ROI内の反射強度の平均を求め、これを、測定した波長での映像の容積脈波に対応する元信号とした。

また、体動などによって引き起こされる信号の揺らぎを低減し、さらに映像のROIの位置を固定させるため、ROIの位置をフレーム間のパターンマッチング法により追跡して映像をキャプチャした。

（3）脈波測定のための信号処理

カメラ映像から得られる脈波は、非接触であるため体動や周辺環境の影響が大きくノイズがのりやすい状態にある。本検討では、信号処理を用いて可能な限り軽減するための前処理を実施した。

1）帯域制限による信号の補正

映像の反射率の変化には、脈波に由来する変動以外に、ノイズ、体動等の影響が含まれる。脈拍の周期は $0.7 \sim 3\text{Hz}$ となっているので、得られた信号からに対してこの値で帯域制限を行うこととする。ここでは、映像から得た容積脈波をFFTにより周波数成分を求め、これに対して $0.7 \sim 3\text{Hz}$ のフィルタリングをした後、逆フーリエ変換することで、帯域制限で得られた脈波に近い信号を取得し、カメラで得られた脈波信号とした。

2）RGB映像と狭帯域映像の同期

撮影時に、脈波計とRGBカメラ、狭帯域映像用のグレースケールカメラはそれぞれ同期が取れていないため、これらの信号を処理するためには、同期をとる必要がある。本検討では、事前に時計映像を同時撮影することで、同期のずれを求め、脈波計算時にRGBカメラとグレースケールカメラから得られる信号間の同期あわせを行った。

3）独立成分分析を用いた4バンド信号からの脈波成分抽出

2）で得られたRGBカメラおよび狭帯域フィルタを用いた狭帯域カメラの各信号でのノイズの影響が大きく削減されるが、体動成分やノイズには脈波成分と同じ周波数を持つものもあり、環境によって十分な精度が得られない可能性がある。これらの混合された信号成分を分離するため、本検討では、4バンドの映像から得られる時系列信号に対して、独立成分分析を用いて、体動やノイズ、脈波等の独立した信号を分離し、脈波成分のみを抽出して映像脈波とした。

(4) 相互相関による映像脈波精度評価

本研究で得られた映像脈波信号は、目標とする脈波計の指尖脈波信号と比較して評価する必要がある。また、本研究では脈拍数ではなく脈波の形を正確に捉えることを目標としているため波形の類似度による評価を行う。このため、4 バンドのカメラ映像から得られる脈波と撮影時に同時に脈波計で得られた脈波の相互相関数により精度を評価する。

本研究では脈波計で得られた波形を基準に、カメラ映像の解析で得られた脈波波形との相互相関関数を求め、最も相関係数が高い所の相関係数および脈波計との位相差を求めた。

(5) 実験 1 および結果

1) 実験

撮影映像のサイズは 960×600 画素とし、フレームレートは 30 フレーム/秒で撮影した。本検討で使用した狭帯域フィルタとしては 650nm, 800nm, 900nm の 3 バンドを選んで測定することとした。また、光源はハロゲン光源 (PCS-UHX (照射波長: 400 ~ 1700nm) 日本 PI 社製) を用いている。

各バンドのバンド幅は 10nm である。被験者は手を机の上に置き、手掌をカメラに向けて 1 分以上できるだけ動かさないようにしてもらい、2 台のカメラで撮影を行った。光源からの距離 30cm, RGB カメラ (GS3-U3-23S 6 M-C:pointgray 社製), グレースケールカメラ (GS3-U3-23S 6 M-C:point-gray 社製) に狭帯域フィルタを用いたものをそれぞれ 80cm に設置した。同時に、指尖脈波計を反対の手に装着してもらい、基準信号の測定を行った。ここで、被験者は 2 名について測定を行った。図 2 に実験環境を示す。

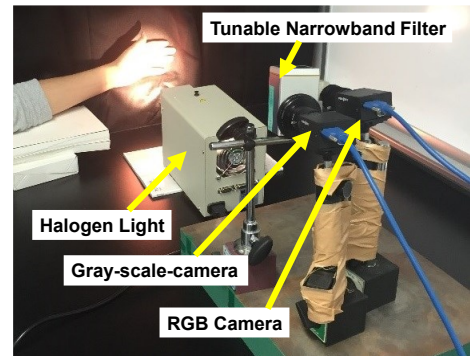


図 2 4 バンド (2 カメラ) の実験環境

2) 結果

表 1 に、R, G, B 及び狭帯域フィルタ映像のみから得られる脈波、RGB 映像のみの独立成分分析 (ICA) によって得られる脈波、RGB 映像 + 狭帯域映像に対して ICA を用いて得られた脈波、これらと測定された指尖脈波との相互相関関数の最大係数を示したものである。

この結果から、独立成分分析をした結果の方が、通常使われてる Green 波長も含めた単波長の結果より指尖脈波と相関の高い脈波が得られることがわかった。また、RGB 映像のみより、RGB に狭帯域フィルタ映像を加えて脈波の方が高い相関が得られ、特に 900nm (近赤外) の時、被験者を問わず高い結果が安定して得られることも明らかとなった。そこで、必要な波長を特定する検討をさらに行うこととした。

表 1 4 バンド映像から脈波推定結果

Sub1/Sub2	(1) NBF=650 nm	(2) NBF=800 nm	(3) NBF=900 nm	Ave.
only R	0.745/0.618	0.852/0.789	0.782/0.784	0.793/0.730
only G	0.873/0.554	0.898/0.815	0.890/0.850	0.887/0.740
only B	0.845/0.516	0.890/0.807	0.887/0.836	0.874/0.719
only NBF	0.673/0.598	0.830/0.829	0.622/0.344	0.708/0.590
RGB(ICA)	0.904/0.812	0.904/0.799	0.900/0.842	
RGB+NBF(ICA)	0.906/0.811	0.895/0.905	0.903/0.761	

(5) 実験 2 および結果

適正な干渉フィルタの帯域幅および適正な帯域について検討した。基本的には実験 1 と同様だが、今回は可変干渉フィルタの欠点である透過による減衰を少なくするため、使用する干渉フィルタを光学式のフィルタとした。フィルタは全部で 8 枚使用し、750nm ~ 1100nm まで 50nm 間隔で透過光の波長が異なるものを使用す

る。また、バンド幅は 25nm である。検証では実際に撮影を行う環境下で干渉フィルタを変更しながら撮影を行った。一人の被験者を対象にそれぞれのフィルタで撮影を行い、同時に脈波計で計測した信号との比較検証を行う。検証で得られた脈波計の信号を図 3(a)に、干渉フィルタを取り付けたカメラ映像で得られた信号を図 3(b)～(i)に示す。検証の結果から、800～950nm 波長の干渉フィルタで得られた信号は脈拍がハッキリと検出された。中でも 900nm が最もノイズ成分が少なく脈波計の信号に近いと判断出来る。従って、本実験では狭帯域波長情報として 800～900nm の干渉フィルタによって得られた信号を用いることとした。

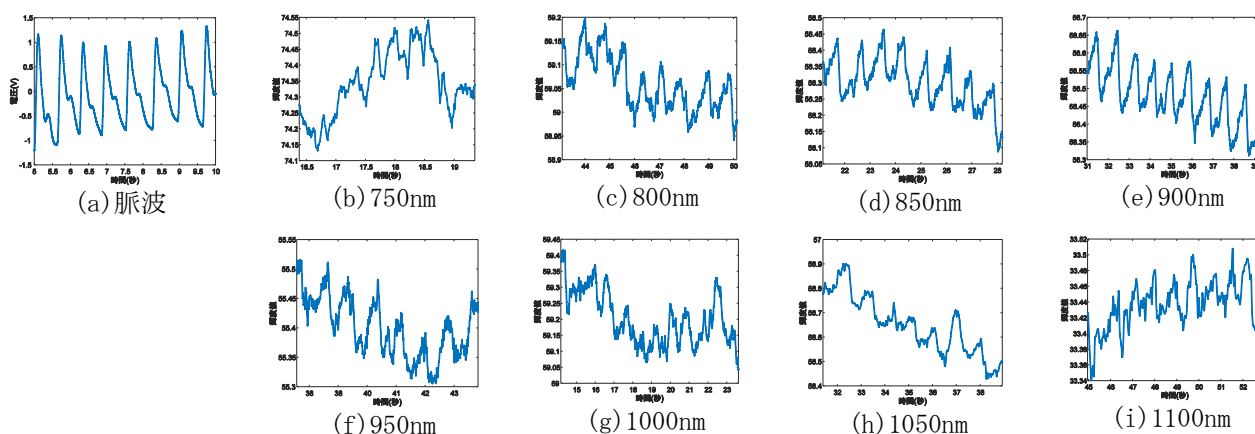


図 3 干渉フィルタにより得られる脈波信号

2-3 マルチスペクトルカメラの試作

(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。偏光分光型マルチスペクトルカメラは、2020 年 7 月に発表され、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となる方式である[7] (図 4)。レンズには、独自開発フィルタが搭載されている。独自開発フィルタには、特定の振動方向の光を透過させる「偏光フィルタ」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。

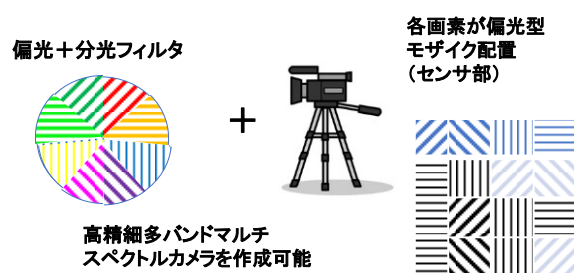


図 4 偏光分光型マルチスペクトルカメラ

また、センサ部は、既存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構造となっており、マルチスペクトルカメラでは、通常の RGB カメラと同様に、用途に合った独自のフィルタを開発してセンサに搭載することが必要であり[8]、そのため新たなフィルタ設計・センサ開発には多大なコストがかかるものであった。しかし、今回開発された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が出来る。それにより各波長の情報量が多くなるが、スペクトル特性を考慮した画像処理を行うことで、スペクトル毎の映像を生成し、高解像・高フレームレートを実現している。

(2) 遠隔診療向け偏光分光型マルチスペクトルカメラ

偏光分光型マルチスペクトルカメラを用いて、血流及びヘモグロビンの吸光変動によって得られる映像脈波を測定すると同時に手首・首の2箇所を同時に測定することで血圧推定に必要な脈波伝播時間の計測を行う。このため、2-2で検討した結果をもとに、本検討では、カメラレンズ側のフィルタとして、440nm, 540nm, 640nm, 850nmの光学分光フィルタに4方向の偏光を備えたフィルタを選択し、偏光分光型映像カメラを用いて4バンド映像を1台のカメラでリアルタイム映像として撮影し評価することとした。

2-4 映像からの信号抽出ソフト開発・遠隔診療実験環境整備

本研究では、4バンド(Red, Green, Blue, nearIR)の同時撮影が可能となった偏光分光型マルチスペクトルカメラが開発されたため、そのカメラを用いて血流およびヘモグロビンの吸光度変動から得られる映像脈波測定、脈波伝播時間の計測を行う。ここでは、偏光分光型マルチスペクトルカメラで得られた4バンド映像に対して、2-2での検討と同様4バンド(Red, Green, Blue, nearIR)の信号に対して、帯域制限処理および多変量解析(主成分分析)を行うことで、精度の向上を試みる。

(1) 撮影環境の検討

撮影時は被験者が椅子に座った状態で手首を首の近くに置き、カメラに両方の部位が入るようにして撮影を行う。蛍光灯や自然光などの影響を受けるため暗室環境下で、撮影対象である首・手首に近赤外波長を含むハロゲン光源を照射する。偏光分光型マルチスペクトルカメラをハロゲン光源と並列に約60cmの距離に設置し、MATLABのプログラムを用いて撮影を行う。撮影は60fps, 30秒間行い、評価用に、撮影と同時に指尖脈波の計測を行った。

(2) 画像処理範囲の検討

得られた映像を画素ごとに時系列信号として取得すると、測定対象以外の背景、影などがノイズの原因になってしまうため、カメラで撮影した映像から範囲を指定し、平均輝度変化を時系列信号として取得する。本研究では撮影したGreen(540nm)の画像を20×20[pixel]に分割し、輝度変化を拍動があると考え、その輝度変化の大きな領域を測定範囲として扱う。

(3) 分光反射率を用いた信号補正

映像の輝度信号には、光源変動が強く反映していることから、均一背景からの信号を用いて、光源成分を取り除いた分光反射率による成分を得て信号解析を行う必要がある。すなわち、血液の吸光度を反映した分光反射率を計測する必要があるため、光源の入射波長を取り除く補正が必要となる。ここで

$$\text{透過率} = \text{分光放射束}(I) / \text{入射する分光放射束}(I_0)$$

で算出されるため、撮影時には、白板での入射光の分光反射を測定し、光源の分光放射束の時系列変動を撮影と同時に得る必要がある。本撮影では、手首の測定範囲と重ならない撮影範囲に白いポリプロピレンシートを手首に巻いて同時撮影した。その結果、分光反射率から算出される信号のSNは大幅に改善された。(図5)

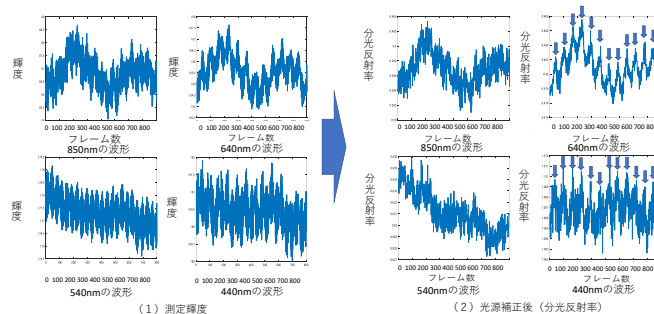


図5 分光反射率の補正による改善結果

(3) 測定部位の検討

本研究では、測定場所を輝度の変化の大きいところ選定して、測定場所の目印として行った。測定場所による比較について信号処理を行っていない状態で検証する。測定場所とした範囲を図6の赤あるいはオレンジで示す。手首では赤印を含めて4か所、首は3か所の波形を求めて比較検討した。その結果、赤で示す領域が比較的ノイズが少なく、信号が鮮明であったため、手首・首それぞれ、赤で示す位置を測定位置とすることとした。

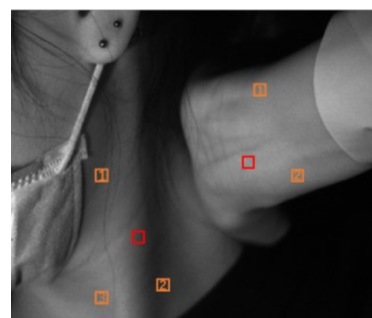


図6 測定位置

(4) 画像処理、時系列フィルタ処理、多変量解析の検討

2-2での検討と同様、有効な信号を取出すための画像処理（平滑処理など）カメラ撮影で得た元信号のノイズや体動等の影響除去するため、信号にFFTをかけて0.7Hz～3Hzの信号を取り出す時系列フィルタ処理を行い、脈波成分に近い周波数帯の信号のみを取り出す。また、脈波成分と同じ周波数の体動成分、ノイズ成分を分離させる手法として、多変量解析のうち、今回は主成分分析(PCA)を用いて、脈波成分に近い波形を取り出すこととした。

2-5 遠隔診療実験（バイタルデータ測定）

2-6 実験評価

(1) 実験および結果

ここまでの検討をもとに、被験者4人に対してバイタルデータの測定実験を行った。ここで撮影のフレームレートは60fsp, 30秒間の撮影を行った。撮影位置は、2-4(3)の検討で得られた測定領域(赤)を用いた。

画像処理および信号処理によって得られた、バイタルデータ(指尖脈波との相関係数、首と手首とのフレームのずれ)についての結果を表2に示す。

この結果から、指尖脈波との相関を見ると、手首からの映像脈波と脈波計での指尖脈波の相関は全体に低く、一方、首映像からの映像脈波と脈波計の指尖脈波は被験者A Bでは比較的高いが、C Dでは低くなり、被験者間の差が顕著である。また、手首と首との映像脈波間では、どの被験者でも比較的高い相関が高く、脈波の特徴は被験者毎に異なるが、同一被験者では似た形になっていると思われる。脈波伝搬時間に関わるフレーム間のずれに関しては、この2つの相関が高い場合には、ある程度参考になる可能性があることが分かる。

表2 バイタルデータに対応する相関係数および2点間の時間差

	被験者	440nm	540nm	640nm	850nm	PCA
手首/脈波計 相関係数	A	0.25	0.29	0.25	0.19	0.34
	B	0.10	0.12	0.10	0.12	0.20
	C	0.21	0.19	0.19	0.17	0.18
	D	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13
首/脈波計 相関係数	A	0.33	0.50	0.53	0.51	0.55
	B	0.37	0.49	0.53	0.40	0.40
	C	0.13	0.14	0.13	0.13	0.23
	D	0.19	0.20	0.18	0.18	0.19
首/手首の差 (フレーム数)	A	4 (68msec)	4 (68msec)	5 (85msec)	5 (85msec)	2 (34msec)
	B	3 (51msec)	2 (34msec)	1 (17msec)	1 (17msec)	1 (17msec)
	C	28 (476msec)	27 (459msec)	31 (0.527msec)	31 (0.527msec)	26 (442msec)
	D	-	-	26 (442msec)	26 (442msec)	26 (442msec)
首/手首 相関係数	A	0.83	0.65	0.64	0.61	0.65
	B	0.71	0.61	0.52	0.50	0.36
	C	0.59	0.49	0.51	0.48	0.52
	D	0.36	0.36	0.43	0.45	0.47

(2) 考察・今後の課題

1) 脈波測定の精度

信号処理を行う前の測定波形（元信号）を観察すると全体的な波長に細かい波、ノイズがのっている。その中では Green の波長は比較的、ノイズが少ないことが確認できている。一方、指尖脈波と映像から得た容積脈波（映像脈波）との相関が低かった場合の信号処理前の時系列信号をみると、SN 比が低いとともに、信号に大きな変動が加わっていることがわかる。特に、440nm, 850 nm では、信号の強度が十分ではなく、SN 比が悪い場合が多かった。SN 比が低い理由としては、フレームレートを 60fps とあげていることにより、1 フレームあたりの露光時間が短くなった事による露光不足、カメラのバンド幅も予備実験より狭くなっているために起こる光量不足が重なって、低い SN 比を引き起こしたと考えられる。改善するためには、光学フィルタの半値幅を広くするなど、安定した反射強度を確保するためのフィルタ設計も検討する必要がある。さらに、ヘモグロビンの吸光度、測定するため測定場所の選定や光の当たり方による照明条件などの撮影条件、画像処理条件の更なる検討が必要と考えられる。特に、相関が十分でなかった手首の測定においては、測定場所の最適化、平均化する測定範囲の大きさなど、今後検討すべき課題が多々あると思われる。

また、被験者による個人差に着目すると、特に首での相関も低かった被験者 C, D においては、信号全体の変動や周期的な変動が含まれており、これらの影響を十分に除去できていない点が課題として残った。

2) 脈波伝搬時間の計測

脈波伝搬速度の 20 代男性の基準値が約 1150~1300(PWV(cm/sec)), 20 代女性の基準値が約 1000~1100(PWV(cm/sec))であるため、おおよそ 2~4 フレームのずれが正しいと考えられる。このことから、今回の結果は、被験者によつての差は大きい。主成分分析を行うことで 4 バンドの情報から第一主成分が脈波に近い成分が抽出できており、PCA の第一主成分での脈波伝搬時間の抽出可能性があることが示された。

一方、60fps でも差分は 1-2 フレームと測定精度は低いことから、精度を向上させるためのフレームレートの向上および精度向上に必要な補完方式の検討が必要であることが明らかになった。

3 まとめ・今後の課題

本研究では、偏光分光型マルチスペクトルカメラを用いての手首・首間の人体表皮の撮影を行い、脈波測定・脈波伝播時間の計測について検討し、遠隔診療へ適用性について検討を行った。その結果、本システムは、被験者による差が大きいものの、高精度な脈波計測および脈波伝播時間の計測について可能であることが確認できた。しかし、安定して脈波情報の抽出ができなく、脈波成分以外のノイズとなる成分が多く含まれている、体動による動きの変化で光源の当たり方が変わってしまい波形が大きく変動するなど多くの問題点もわかった。

今後、まず 1 つ目の課題として、マルチスペクトルカメラの感度向上に向けたフィルタ設計が必要となる。撮影に用いる 4 バンドの波長帯の幅が狭いと考えられるのでバンド幅、フレーム数の検討を行う。また脈波成分以外の成分が多く検出されているため、ノイズを減らす処理・方法を検討する。

次に撮影環境の安定について検討を行う。測定範囲による差が大きいので安定して取得できるような方法。本研究では、首を用いたが首に光源をあてると陰影が出来てしまうため、頬など平坦な影のできない場所、体動、光源などの環境によるノイズ成分を減らす検討を行う。

3 番目に信号処理を行う前に、測定位置および ROI の大きさの必要条件を明確にし、最適化を図るための方式検討が必要となる。

これらの条件をクリアした後、被験者を増やし、多くの被験者による違いを明らかにして、どのような条件でも撮影可能とするためのシステム設計を行ってゆく必要がある。

【参考文献】

- [1] S. Homma, H. Imamura, T. Nakamura, et al. "A comparative study on the effectiveness of one-way printed communication versus videophone interactive interviews on health promotion," J Telemedicine Telecare, vol.22, no.1, pp. 56-63, 2016
- [2] J. Kranjec, S. Begus, G. Gersak et al., "Non-contact heart rate and heart rate variability measurements: A review", Biomedical Signal Processing and Control, vol. 13, pp. 102-112, 2014.
- [3] M.A. Hassan, A.S. Malik, D. Fofi, N. Saad, B. Karasfi, Y.S. Ali, F. Meriaudeau, "Heart rate estimation using facial video: A review", Biomedical Signal Processing and Control, vol. 38, pp.346-360 September 2017
- [4] M. Yoshizawa, N. Sugita, M. Abe, A. Tanaka, N. Homma, T. Yambe, "Non-contact blood pressure estimation using video pulse waves for ubiquitous health monitoring", IEEE Xplore, proc. 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2017)
- [5] K. Bakhtiyaria, N. Beckmannb, J. Ziegler, "Contactless heart rate variability measurement by IR and 3D depth sensors with respiratory sinus arrhythmia", Procedia Computer Science v10.109, pp498–505, 2017 A
- [6] B. Pomeranz, R. J. Macaulay, M. A. Caudill, I. Kutz, D. Adam, D. Gordon, K. M. Kilborn, A. C. Barger, D. C. Shannon, R. J. Cohen, Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis, American Journal of Physiology?Heart and Circulatory Physiology 248(1) H151-H153 (1985),
- [7] S. Ono "Snapshot multispectral imaging using a pixel-wise polarization color image sensor", Optics Express, Vol.28(23), pp34536-34578 (2020)
- [8] "A Real-Time RGB-NIR Imaging System Using a Single Image Sensor" Kazunori Yoshizaki, Munenori Fukunishi, Yasuhiro Komiya, Yusuke Monno, Masayuki Tanaka, Masatoshi Okutomi and Steven Lansel IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2016), June, 2016

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Plethysmography Using Skin Images Captured by RGB and Narrowband Filter Camera	Proc. of 2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), pp72-73	March 7, 2022