

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820161

研究課題名(和文) 無拘束計測が可能な血管伸展性の非接触型イメージングの実現

研究課題名(英文) Study on non-contact imaging of vascular compliance

研究代表者

中野 和也 (NAKANO, KAZUYA)

東京理科大学・理学部・助教

研究者番号：80713833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年、血管コンプライアンスは血管疾患との関係が注目されている。従来、静脈コンプライアンスではストレインゲージプレチスモグラフと呼ばれる手法を用いて、カフ圧変化に対する四肢の容積変化を計測している。また、動脈コンプライアンスの指標である脈波伝播速度では、PWVはトノメトリー法とオシロメトリック法と呼ばれるセンサーを2点の計測部位に接触させて各点における圧脈波の到達時間差と距離から求める。しかし、これらの計測手法は計測器を体に接触させる計測であるため、測定部位が限定され、動きによる誤差が生じる。そこで、本研究では、センサーを接触させることなく血管コンプライアンスが計測可能なシステムを提案した。

研究成果の概要(英文)：Recently, it is said that there is the relationship between human's venous compliance, which corresponds to the ability of veins to stretch, and venous thrombosis. Conventional strain-gauge plethysmograph (SPG) often suffers from errors due to limb movement. Thus, we proposed the non-contact and non-invasive imaging of venous compliance using RGB camera and, from the resulting images, observed the spatial distribution of venous compliance, which correlates with the distribution of veins.

Pulse wave velocity (PWV) has been used as the evaluation index of arteriosclerosis and is on the order of m/s. Currently, tonometry is the conventional methods to measure PWV. However, The direction or pressing force of tonometry sensor affects the measurement of pulse wave. Therefore, the non-contact measurement system based on digital color images of human skin was proposed. The PWV measured using the proposed system is in the order of m/s. The results demonstrate the feasibility of this method.

研究分野：生体医用光学 光情報処理

キーワード：血管コンプライアンス 静脈コンプライアンス 脈波伝播速度 非接触計測 光伝播モンテカルロ法 RGBカメラ

1. 研究開始当初の背景

血管の伸び縮みの指標として、血管コンプライアンスが注目されている。血管コンプライアンスは、静脈では静脈血栓閉塞症、動脈では動脈硬化症といった血管疾患との関係が指摘されている。特に、動脈硬化症は近年の食生活の変化及び高齢化により増加したメタボリックシンドロームに起因して増加傾向にある。また動脈硬化症が進行すると、心筋梗塞や脳卒中といった重大な脳心血管系疾患の発症につながる為、医療機関だけでなく、家庭等における血管の状態のモニタリングが重要であると言える。血管コンプライアンスに対する従来の計測及び評価方法について説明する。

(1) 静脈コンプライアンスの評価方法

静脈コンプライアンス (VC : Venous Compliance)とは、静脈内の血圧の変化 ΔP に対する静脈内の血液量変化 ΔV であり、したがって $VC = \Delta V / \Delta P$ となる。上記血液量の変化の計測には、ストレインゲージプレチスモグラフ (SPG: Strain-gauge plethysmography) と呼ばれる手法が用いられる。SPG は水銀で満たされたラバーゲージとラバーゲージで計測されたデータを表示及び記録するプレチスモグラフィから成る。計測時のラバーゲージには電流が流れており、ゲージの容積変化に比例してゲージの抵抗値が変化する。

VC の評価手法としては、Halliwill のグループが提案した方法を用いることが多い。本研究も以下に示す上記方法の手順に従う。まず、カフにより腕に 60mmHg の圧力 P を加え、8 分間の静脈閉塞（動脈は閉塞しない）によるうっ血状態にする。その後、カフ圧を 1 分間で速度 1mmHg/秒で 60mmHg から 0mmHg まで減圧を行い、カフ圧 P に対する容積 V をストレインゲージにより計測する。この時に、カフ圧と静脈内の血圧は一致することが報告されている。得られた圧力 P-血液量容積変化 V の 2 次回帰式 $V = \beta_0 + \beta_1 \times P + \beta_2 \times P^2$ を P で 1 次微分することで各圧力 P における VC ($= \Delta V / \Delta P = \beta_1 + 2\beta_2 P$) の一次関数のグラフを得ることができる。

(2) 動脈コンプライアンス (PWV) の計測

動脈コンプライアンスの評価指標としては、心臓から末梢に伝播する脈波伝播速度 (PWV : Pulse Wave Velocity)がある。PWV は動脈が硬化するにつれて速くなるため、動脈硬化症の指標としても臨床現場において用いられている。PWV は、心臓から身体の 2 点における距離 L を各点に脈波が到達する時間差 ΔT で割ることで $PWV = L / \Delta T$ として求める。到達時間差は 2 点において計測した各脈波の立ち上がり点の時間差から得られる。脈波の計測方法としては、トノメトリー法とオシロメトリック法がある。トノメトリー法では、トノメトリーセンサーと呼ばれる圧力センサーを橈骨上に存在する動脈が扁平に

なり、動脈壁の張力が無効になるまで押し当てることにより血管内圧と外圧が平衡し、血管内の圧力変化つまり圧脈波を計測することができる。オシロメトリック法も同様にカフを用いて圧脈波を計測する。

しかし、これらの計測手法は非侵襲ではあるが、計測器を直接体に接触させる計測であるため、測定部位が限定される。さらに測定部位のモーションアーチファクトによる測定誤差が生じる。また MRI のような核医学的な計測装置はコストも高く、設置に場所を要する。したがって、身体を拘束することなく、非接触に血管コンプライアンスを評価する手法は未だ提案されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、拡散反射分光法を応用して、RGB カメラによるヒトの皮膚の非侵襲かつ非接触な計測から静脈や動脈といった脈管の収縮・拡張の指標である血管コンプライアンスの計測及びイメージングを実現することである。血管コンプライアンスは静脈血栓閉塞症や動脈硬化といった疾患や身体活動との関係が指摘されており、疾患の予防の観点から簡便な計測方法が望まれる。さらに、従来の接触型計測では、身体に取り付けたセンサーの位置ずれにより運動中の脈管系の変化を測定することは困難であった。しかし、目的達成により非接触な計測から運動中の脈管系の変化を捉えることができれば、運動中の突然死等の予防においても非常に有益である。

3. 研究の方法

(1) 非接触静脈コンプライアンス計測システムの試作

提案システムは 24 ビット RGB CCD カメラ (DFK23U618, Imaging Source LLC, Charlotte, NC, USA), カメラレンズ (Pentax/Cosmica, Japan; f16mm, 1:1.4), メタルハライドランプ (LA-180Me-R4, Hayashi, Tokyo, Japan), リングイルミネーター, 1 組の偏光板, 計測用コンピュータから成る。リングイルミネーターに取り付けたリング状偏光板 (ring-shaped polarizer) ともう一方の偏光板 (analyzer) は皮膚表面からの鏡面反射の低減を目的として、クロスニコル配置とした。計測する箇所は手の甲で、画像サイズは 640×480 画素として、1 秒間に 1 フレーム (1 frames per second) で画像の取得を行う。静脈の閉塞にはカフ及びカフインフレーター (E-20, D.E. Hokanson Inc. Bellevue, WA, USA) を用いた。

(2) RGB 値から血液濃度の推定手法

本システムで計測した皮膚デジタルカラー画像の RGB 値から以下の手順により、全血液濃度の推定を行う。

① 色変換行列 N_1 (RGB 値→CIEXYZ 値) 標準カラーチャートの計測に基づいて求めた

色変換行列 N_1 により RGB 値を XYZ 刺激値に変換する。

② 色素変換行列 N_2 (CIEXYZ 値→皮膚色素濃度)

皮膚下に存在し、光を吸収する3つ色素タンパク質 (メラニン, 酸素化ヘモグロビン, 脱酸素化ヘモグロビン) を各波長において様々な濃度の組み合わせの下で光伝播モンテカルロ・シミュレーションを行い、各試行における分光反射率を求める。そして、求めた各分光反射率から CIEXYZ 刺激値を求め、その XYZ 刺激値を説明変数、3つの色素濃度を目的変数として重回帰分析を行い、XYZ 刺激値から上記色素濃度に変換する行列 N_2 を求める。手順①で変換した XYZ 刺激値を色素変換行列 N_2 により各色素濃度に変換する。

③ 全血液濃度の算出

最後に全血液濃度は酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビン濃度の加算から算出される。

(3) 非接触計測による静脈コンプライアンス(VC)の評価及びイメージング

従来、Halliwill の方法ではストレインゲージを用いて、カフ圧減圧時の血管の容積変化を記録していた。しかし、本研究では、ゲージの代わりに、RGB カメラを用いて複数枚の画像を取得し、そのデジタル画像から前述の(1)の手法を用いて、各画素における全血液濃度の変化を推定する。その後は前述の通り、圧力に対する各画素の全血液濃度の変化から各画素の VC を求めることによって VC 画像化が可能となる。

(4) 従来法 SPG 法との比較実験

提案システムと従来の SPG (EC6, D.E. Hokanson Inc. Bellevue, WA, USA) による同時計測を行い、計測結果の比較を行った。

(5) 非接触型 PWV 計測システムの試作

本システムでは、身体の2点に対して、(1)で説明した撮像システムをそれぞれ配置する。RGB デジタルカメラは HAS-L1 (株式会社 DITECT)、白色 LED 光源は LA-HDF60 と LA-HDF5010 (林時計工業株式会社) を用いた。また、2台の RGB カメラはカメラリンクケーブルにより PC 上の PCI Express カードに接続されている。同様に PCI Express カードに接続されたハードウェアトリガーを押すと PC を介して2台のカメラに電気信号が送信されて、50fps のフレームレートで同期撮影を開始する。

(6) 非接触計測による PWV の評価

PWV は、ヒトの身体の2箇所計測部位間における距離を脈波の到達時間差で割ることにより求める。したがって、計測を行う部位をどこにするかが重要となる。本研究システムは、皮膚内部からの可視

光域における拡散反射光の計測に基づいている。可視光(380-780 nm)が、皮膚組織中で散乱や吸収を繰り返しながら皮膚中を進達する深さは最大で 3 mm 程度と言われている。さらに、皮膚組織中から反射光は、それよりも浅い領域から皮膚表面に戻ってくる光である。また、本研究の計測システムは日常における PWV のモニタリングを目指していることから、計測部位は脱衣の不要な部分が望ましい。上記の観点から、脱衣が不要で皮膚が比較的薄い2箇所として顔と手を計測部位とすることを考えた。

計測2点間の距離は、メジャーを用いて計測した。計測方法は、大動脈起始部を基準にして、距離 L_1 (大動脈起始部—前額部間距離) 及び L_2 (大動脈起始部—手間距離) を求め、その差分から距離 L ($L_2 - L_1$) を求める。

4. 研究成果

(1) 非接触計測による静脈コンプライアンス(VC)の評価及びイメージング

Halliwill の方法に基づいて RGB 画像から推定したカフ圧に対する各被験者の血液濃度変化を Fig.1 に示す。縦軸は全血液量の変化 (CBV: Change in Blood Volume), 横軸はカフ圧を示す。二次回帰式 ($CBV = \beta_0 + \beta_1 \times P + \beta_2 \times P^2$) を Table1 に示す。さらにその二次回帰式をカフ圧 P で微分した各圧に対する VC のグラフを Fig.2 に示す。最後に VC を画像化した結果を Fig.3 に示す。

まず、Fig.1 と Table1 の結果から、カフ圧に対する全血液濃度の回帰式が精度よく推定できていることが分かる。さらに、Fig.1 を横軸のカフ圧で一次微分することにより得られた VC のグラフ (Fig.2) では、静脈コンプライアンスに個人差が見られた。また、Fig.3 に示す各カフ圧における VC の画像によると、元の RGB 画像から確認される静脈と VC の最も高い領域が一致していることが分かる。

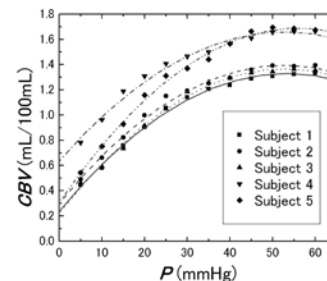


Fig.1 Change in blood volume among individuals.

Table 1. Results of regression analysis.

Subject	Regression formula	Determination coefficient
Subject 1	$y = 0.238 +$	$R^2 = 0.996,$

	$0.041x - 3.84 \times 10^{-4}x^2$	$p < 0.0001$
Subject 2	$y = 0.300 + 0.042x - 3.94 \times 10^{-4}x^2$	$R^2 = 0.993, p < 0.0001$
Subject 3	$y = 0.2189 + 0.043x - 4.09 \times 10^{-4}x^2$	$R^2 = 0.995, p < 0.0001$
Subject 4	$y = 0.636 + 0.039x - 3.65 \times 10^{-4}x^2$	$R^2 = 0.987, p < 0.0001$
Subject 5	$y = 0.309 + 0.049x - 4.41 \times 10^{-4}x^2$	$R^2 = 0.995, p < 0.0001$

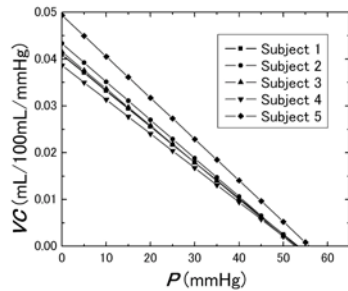


Fig.2 Difference in venous compliance among individuals.

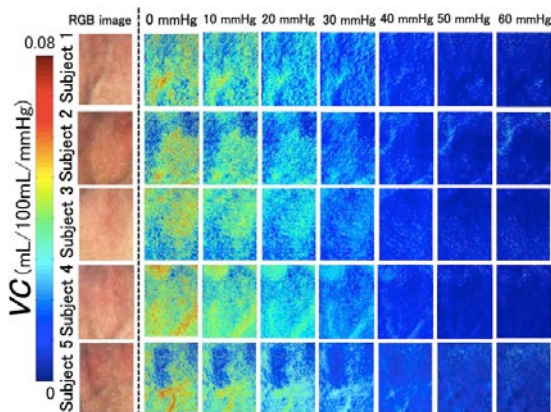


Fig.3 RGB images and corresponding images of venous compliance.

(2) 従来法 SPG 法との比較実験
 被験者の各画像に対して ROI(Region of Interest)を 100×100 画素の範囲で定め、ROI 内の平均血液量の変化を求めた。Fig.4 に SPG による計測結果、Fig.5 に提案システムによる ROI の結果を示す。Fig.4(a)及び Fig5(a)に圧力-血液量（容積）変化のグラフ、Fig.4(b)及び Fig5(b)に VC のグラフを示す。まず Fig.4(a)の SPG にて計測した血液量変化は加圧開始から減圧開始まで増加傾向にあることに対して、Fig.5(a)の提案法にて計測した血液量の変化は加圧開始 3 分程度でほとんど変化がない定常状態になっている。これは、SPG では加圧時の腕の容積変化を計測することから、血管の拡張とは関係のない血管外に漏出した血液の液体成分も評価しているのに対して、提案法では血管外に漏出することがない色素タンパク

質であるヘモグロビンの濃度を計測しているからだと考えられる。次に、Fig4(b)及び Fig5(b)の VC のグラフにおいて、横軸の圧力 20mmHg の値を VC の代表値として、同じ被験者に対する 2 つ手法で求めた VC の相関関係を Fig.6 に示す。その結果、SPG と提案システムで計測した各 VC は高い正の相関（相関係数 $R=0.897$ ）を示した。このことは、前述の間質液の漏出による SPG 計測への影響を考慮しても、両者の計測には高い正の相関があることが分かる。

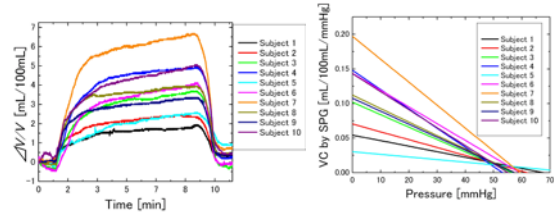


Fig.4 Results obtained by SPG for (a) change in limb volume, and (b) venous compliance.

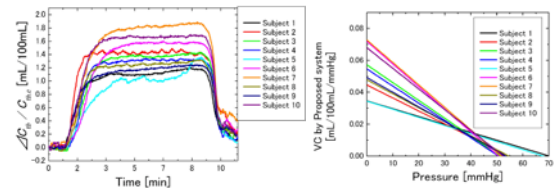


Fig.5 Results obtained by proposed system for (a) change in blood volume, and (b) venous compliance.

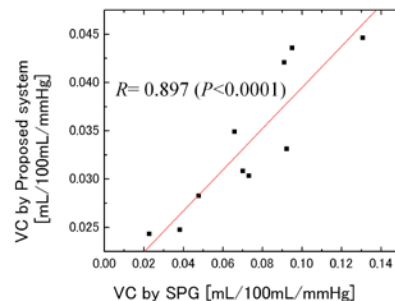


Fig.6 Relation between venous compliance by proposed system and that by SPG.

(3) 非接触計測による動脈コンプライアンスの評価

提案システムで計測した額と手の容積脈波を Fig.7 に示す。安静状態の成人の心臓は 1 分間あたり 50 から 80 程度鼓動する。したがって、容積脈波は、提案システムで計測した RGB 動画像から推定した全血液濃度の時間変化に対して、0.7 から 3.0 Hz の間で FFT バンドパスフィルタを掛けて抽出した。その結果、容積脈波の特徴でもある二峰性の波形を得ることが出来た。また、脈波伝播時間 ΔT は、2 つの脈波の立ち上がり点 (Fig.7 の + と ● の部分) の差分から求めた。Table2 は、20 代の 3 名の被験者に対する計測 2 点間の距離、脈波伝播時間、そしてその 2 つの情報から求

めた PWV を示す。先行研究において PWV のオーダーは m/s であることが知られているが、今回提案システムで計測した PWV も m/s オーダーを示した。このことから提案システムにおける PWV 計測の実現可能性を示していると言える。

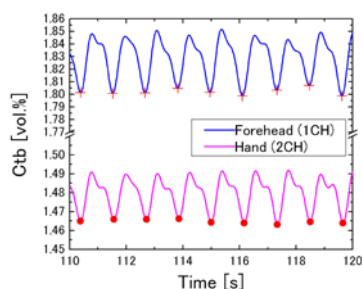


Fig. 7 Pulse transit time between two pulse waves

Table 2 Measuring results of PWV

Subject	L [m]	ΔT [s]	PWV [m/s]
Subject 1	0.490	0.054	9.07
Subject 2	0.510	0.032	15.9
Subject 3	0.480	0.030	16.0

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Kazuya Nakano, Ryota Satoh, Akira Hoshi, Ryohei Matsuda, Hiroyuki Suzuki, and Izumi Nishidate, “Non-contact Imaging of Venous Compliance in Humans Using an RGB Camera,” OPTICAL REVIEW, 査読有, Volume 22, Issue2, 2015, pp.335~341.
DOI:10.1007/s10043-015-0041-5

[学会発表] (計 9 件)

- ① Kazuya Nakano, Yuta Aoki, Ryota Satoh, Akira Hoshi, Hiroyuki Suzuki, and Izumi Nishidate, “Non-contact measurement of pulse wave velocity using RGB cameras,” SPIE 2016 Photonics West, BiOS, San Francisco, California (USA), 2016. 2.15.
- ② 中野和也, 青木佑太, 星輝, 佐藤遼太, 鈴木裕之, 西舘泉, “非接触計測による脈波伝播速度の評価,”第 56 回光波センシング技術研究会, 東京理科大学森戸記念館 (東京), 2015.12.9.
- ③ 中野和也, 青木佑太, 佐藤遼太, 星輝, 鈴木裕之, 西舘泉, “デジタルカラー動画像に基づいた脈波伝播速度の非接触計測,”第 13 回医用分光学研究会, グランドヒル市ヶ谷 (東京), 2015.12.4.

- ④ 中野和也, 青木佑太, 佐藤遼太, 星輝, 鈴木裕之, 西舘泉, “RGB カメラを用いた脈波伝播速度の非接触計測システム,”日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2015, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京), 2015.10.28.

- ⑤ Kazuya Nakano, Ryota Satoh, Akira Hoshi, Yuta Aoki, Hiroyuki Suzuki, and Izumi Nishidate, “Non-contact visualization of venous compliance in human using red, green, blue images,” The 5th Korea-Japan International Workshop on Digital Holography and International Photonics (DHIP2015), KIST, Gangneung (Korea), 2015.9.17.

- ⑥ 中野和也, 佐藤遼太, 星輝, 西舘泉, “RGB カメラを用いた静脈コンプライアンスの非接触イメージング” レーザー学会学術講演会第 35 回年大会, 東海大学高輪校舎 (東京), 2015.1.12.

- ⑦ 中野和也, 佐藤遼太, 星輝, 鈴木裕之, 西舘泉, “非接触型静脈コンプライアンスイメージングに対する評価実験,”第 54 回光波センシング技術研究会, 東京理科大学森戸記念館 (東京), 2014.12.9.

- ⑧ 中野和也, 佐藤遼太, 星輝, 鈴木裕之, 西舘泉, “静脈コンプライアンスの非接触型計測の評価,”日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 ((東京), 2014.11.7.

- ⑨ Kazuya Nakano, Ryohei Matsuda, Ryota Satoh, Hiroyuki Suzuki, and Izumi Nishidate, “Unconstrained Imaging of Venous Compliance Using RGB Camera,” Biomedical Imaging and Sensing Conference 2014 (BISC'14), Yokohama (Japan), 2014.4.24.

[その他]

ホームページ等

https://www.tus.ac.jp/fac_grad/p/index.php?6b50

6. 研究組織

(1)研究代表者

中野 和也 (NAKANO KAZUYA)

東京理科大学・理学部・助教

研究者番号 : 80713833

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし