

近赤外光および緑色光による光電容積脈波を用いた血圧変動推定

阿部 誠¹, 吉澤 誠², 杉田 典大³, 山家 智之⁴

¹信州大学工学部 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

²東北大学サイバーサイエンスセンター (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05)

³東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05)

⁴東北大学加齢医学研究所 (〒980-8575 宮城県仙台市青葉区星稜町 4-1)

Estimation of Blood Pressure Variability Using Near-Infrared and Green Light Photoplethysmogram

Makoto ABE¹, Makoto YOSHIZAWA², Norihiro SUGITA³, and Tomoyuki YAMBE⁴

¹Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

²Tohoku Univ., 6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

³Tohoku Univ., 6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

⁴Tohoku Univ., 4-1 Seiryō-machi, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8575

Abstract: A photoplethysmogram (PPG) is a volumetric measurement of arteries. A PPG sensor is famous as a wearable sensor and useful for the evaluation of heart rate. In particular, a green light PPG sensor is less affected by motion artifacts than a near-infrared light PPG sensor. Thus, the green light PPG sensor is expected as a new wearable sensor to obtain the biological information. However, the method of estimation of blood pressure using the green light PPG have been not proposed. Therefore, we propose the method to estimate blood pressure variability using the pulse transit time (PTT) obtained from the green light PPG. The results of an experiment including the Valsalva maneuver show that we can obtain blood pressure variability from the PTT calculated from the green light PPG in a similar way to the near-infrared light PPG.

Keywords: blood pressure variability, photoplethysmogram, autonomic nervous activity

1. はじめに

近年、日本における高齢化は進行の一途をたどり、それにとまらぬ医療費の増大は社会的な問題となっている。そこで、医療費の増大への対策として、国民医療費の約3割を占めている生活習慣病を予防することが重要であるといわれている。そのため、日常生活における自分自身による健康管理の重要性が高まってきている。

最近では、日常生活における手軽に健康管理を行うためのツールとして、さまざまなウェアラブルデバイスが開発されている。それらのデバイスの中には、生体情報として、緑色光による光電容積脈波センサを用いて心拍数の計測が行われているものがある。一方で、それらのデバイスでは、光電容積脈波脈波信号から健康管理に重要な情報である血圧の推定は行われておらず、健康管理を行うには十分であるとはいえない。

これまで、光電容積脈波を用いて血圧情報を推定する方法がいくつか検討されてきた¹⁻³⁾。しかし、これらの手法は、いずれも近赤外光を用いた光電容積脈波に対するものであり、緑色光を用いたものに関する検討はほとんどなされていない。

そこで、著者らは、緑色光による光電容積脈波から得られる脈波伝播時間を用いる方法を提案し、安静時における血圧変動を推定するのに有用であることを示してきた⁴⁾。しかし、安静時以外の血圧が急激に変動するような状況における有効性の検証はなされていなかった。そこで、本研究では、息こらえ負荷試験によって血圧を意図的に変動させたとき、緑色光による光電容積脈波から血圧変動を推定する方法が有効かどうかについて検証を行なった。

2. 方法

2.1 光電容積脈波

光電容積脈波 (photoplethysmogram: PPG) は、指尖や耳朶といった部位に一定の光を照射し、透過あるいは反射してきた光量の変化によって、血管内の血液量を記録する方法であり、測定が非常に簡便で非侵襲という利点がある。照射光には近赤外光 (800-900 nm) が多く用いられるが、これはこの波長域の光が、体の組織と比べて血中の酸化ヘモグロビンに対し強い吸光特性を持つためである。最近では、同様の原理で緑色光 (500-600

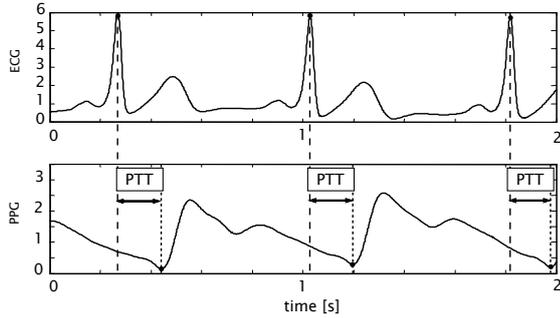


Fig. 1 Definition of pulse transit time (PTT)

nm) が用いられる場合も多くなっている。

PPG から得られる有用な情報として、脈波伝播時間 (pulse transit time: PTT) がある。PTT は Fig. 1 に示すように、心電図の R 波のピークから PPG の立ち上がり点までの時間差によって定義され、血圧と負の相関関係にあることが知られている⁵⁾。本研究では、血圧を一定の値に制御するための反射システムである圧受容器反射に着目し、それに起因する自律神経活動を表す指標である ρ_{\max} の算出の際、PTT を血圧情報の代用情報として用いることを検討する。

2.2 最大相互相関係数 ρ_{\max}

自律神経活動の評価に用いる最大相互相関係数 ρ_{\max} は次のようにして算出される。

ある実験データにおいて、拍ごとに得られる平均血圧と心拍数の 2 つのデータを、3 次のスプライン補間を用いて $\Delta t = 0.2$ 秒ごとの等間隔の時系列データに変換し、それぞれを $u(t)$, $v(t)$ で表す。ここで、 $t = i\Delta t$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) である。次に、自律神経活動を表す 0.1 Hz 前後の Mayer 波と呼ばれる成分を抽出するために、それぞれの信号に対し、0.08 Hz から 0.12 Hz までを通過域とする帯域通過フィルタを施す。さらに、 $u(t)$ と $v(t)$ のある時刻 t [s] に対し、 $t - 60$ [s] から $t + 60$ [s] までをハミング窓をかけて抽出し、(1) 式のように二乗平均値で規格化された相互相関関数である相互相関係数 $\rho_{uv}(\tau)$ を求める。

$$\rho_{uv}(\tau) = \frac{\varphi_{uv}(\tau)}{\sqrt{\varphi_{uu}(0) \cdot \varphi_{vv}(0)}} \quad (1)$$

ここで、 $\varphi_{uv}(\tau)$ は $u(t)$ から $v(t)$ への相互相関関数、 $\varphi_{uu}(0)$, $\varphi_{vv}(0)$ はそれぞれ $u(t)$, $v(t)$ のラグ τ を 0 とした自己相関関数である。また、 $\tau = j\Delta t$ ($j = 0, 1, 2, \dots$) である。このとき、

$$\rho_{\max} = \max_{0s \leq \tau \leq 10s} \rho_{uv}(\tau) \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \arg \max_{0s \leq \tau \leq 10s} \rho_{uv}(\tau) \quad (3)$$

のように ρ_{\max} および τ_{\max} を定義する。以上の処理を、時間方向に 1 秒ごとにシフトしながら施すこ

とで ρ_{\max} および τ_{\max} を経時的に求める。

ρ_{\max} は、血圧変動と心拍数変動の間の線形相関性の強さを時間領域で求め、最大値が 1 となるように規格化した指標であるといえる。本研究では、PPG から得られる PTT と心拍数変動を用いて ρ_{\max} を算出し、従来の血圧による ρ_{\max} と比較することで有効性の検証を行う。

3. 息こらえ負荷試験を用いた実験

本研究では、血圧を意図的に変化させるための実験として、Valsalva 試験に準ずるかたちの息こらえによる負荷試験を行い、提案方法の有効性の検証を行った。なお、本研究で行った実験は、伝統的な Valsalva 試験とは若干異なるため、息こらえ負荷試験と呼ぶこととする。

3.1 Valsalva 試験

Valsalva 試験では、息こらえをすることで胸腔内圧を変化させ、心拍数および血圧の反応パターンにより自律神経系の機能を推定する目的で実施されている。Valsalva 試験の正常反応は、Fig. 2 に示すように血行動態的に 4 相に分けられている⁶⁾。そのうち、圧受容器反射よりも遠心性の交感神経の作用が優位となる第 II 相において、 ρ_{\max} が低下すると考えられる。

3.2 実験の概要

実験のプロトコルは、安静 3 分、息こらえ 1 分、安静 5 分、息こらえ 1 分、安静 3 分の順で計 13 分の実験を行った。安静時には、被験者は自由呼吸を行ってもらった。また、息こらえ 10 秒前からカウントダウンを行い、息を吸ってから止めるように指示を与えた。被験者は 22.8 ± 1.1 歳の健常者 20 名 (男性 20 名) である。なお、実験はヘルシキ宣言に則り、東北大学大学院工学研究科の「ヒトを対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を得たうえで、被験者から事前にインフォームドコンセントを得て行った。

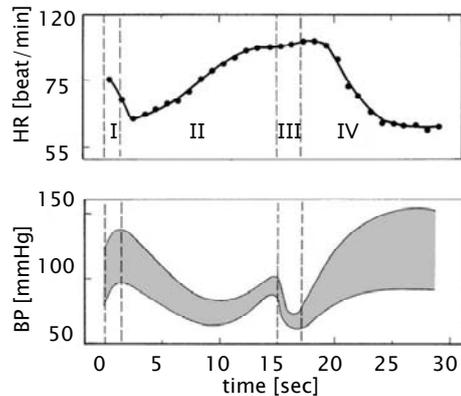


Fig. 2 Responses of heart rate and blood pressure in Valsalva maneuver

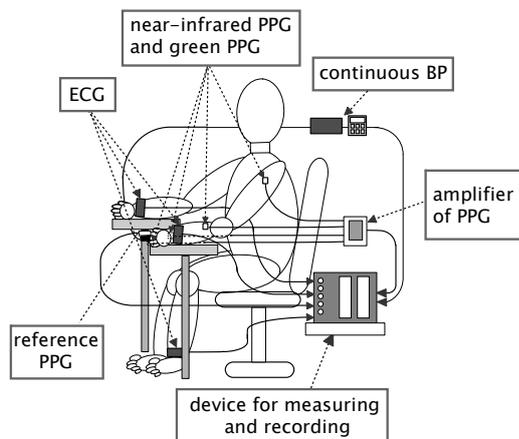


Fig. 3 Summary of experimental setup

実験中は、Fig. 3 に示すように、心電図、連続血圧、近赤外光および緑色光による PPG を計測した。心電図は四肢に取り付けた電極から誘導し、連続血圧は容積補償型連続血圧計（Finapres 社製 PORTAPRES）によって計測した。PPG に関しては、近赤外光および緑色光によるフォトフレクタを用いた自作のセンサを使用し、左手の指先、左手首、左前腕、左上腕の計 4 箇所それぞれにそれぞれのセンサを配置した。これらのデータを、生体信号用の増幅器ならびに 16 bit の AD コンバータを備えた装置（BIOPAC 社製 MP150）を用いて、サンプリング周波数 1 kHz にてパソコンに取り込んだ。

4. 結果

息こらえ負荷試験において、被験者 20 名全員のデータが解析可能であったが、PPG に関しては、近赤外光および緑色光の両方で安定的に解析可能な指尖部のデータのみを解析対象とした。

ある被験者の平均血圧（mean blood pressure: MBP）、近赤外光による PPG から得られる PTT（IRPTT）、および緑色光による PPG から得られる PTT（GPTT）の比較を Fig. 4 に示す。PTT は

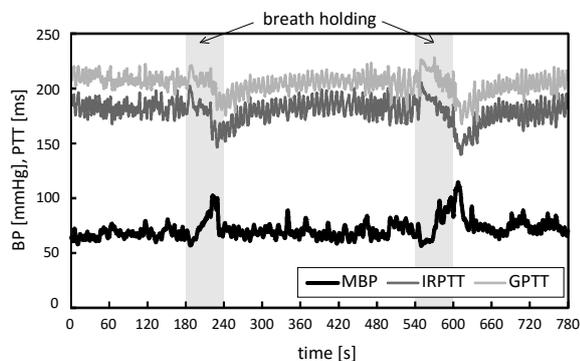


Fig. 4 Comparison between mean blood pressure and PTTs obtained from near-infrared and green light PPG

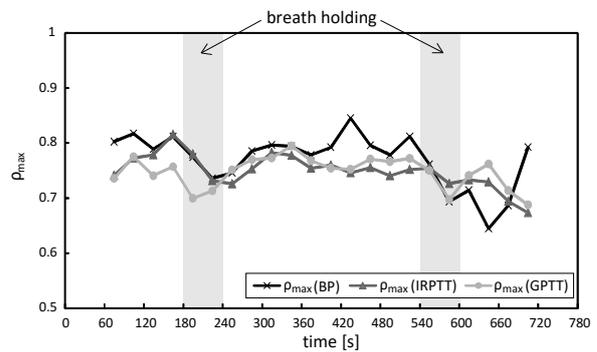


Fig. 5 Comparison between ρ_{\max} calculated from blood pressure and ρ_{\max} s calculated from near-infrared and green light PPG

MBP と負の相関関係にあるといわれているように、互いに逆位相で変化していることがわかる。ただし、相関係数を算出すると MBP と IRPTT では -0.65、MBP と GPTT では -0.49 と強い相関関係とはいえない結果となった。他の被験者についても同様の結果が得られたことを考慮すると、PTT の値のみから血圧の絶対値を推定することは困難であることがわかる。

次に、Mayer 波成分を抽出した後の MBP と PTT の比較を行う。従来の連続血圧を用いた $\rho_{\max}(\text{BP})$ 、近赤外光による PPG から得られる PTT による $\rho_{\max}(\text{IRPTT})$ 、緑色光による PPG から得られる PTT による $\rho_{\max}(\text{GPTT})$ の比較を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の結果から、 $\rho_{\max}(\text{IRPTT})$ と $\rho_{\max}(\text{GPTT})$ のいずれも、従来の血圧を用いた $\rho_{\max}(\text{BP})$ に近い値で推移していることがわかる。また、 ρ_{\max} の減少が予想される息こらえ負荷時において、すべての指標で低下する傾向が見られた。特に、緑色光による PPG から得られる PTT においても、自律神経活動の変化を捉えることが可能であることは、これまでの研究では得られていない重要な知見である。

5. 考察

Fig. 4 の結果からわかるように、大局的に見ると血圧と PTT は逆位相の関係にあるものの、必ずしも強い相関関係にあるとはいえない。この原因としては、PTT が血圧のみならず、血管の形状、血液の物理的特性、血管運動神経系の活動などに依存するためであると考えられる。

一方で、Fig. 5 の結果からわかるように、血圧に含まれる Mayer 波成分が、PTT にも同様に含まれていると考えられる。近赤外光による PPG から得られる PTT に関しては、血圧の Mayer 波成分が含まれていることをすでに著者らが示してきたが、本研究では、新たに緑色光による PPG から得られる PTT にも同様に含まれていることを示した。

ここで、近赤外光の PPG と緑色光の PPG の差

異について検証した先行研究として、Sandberg らの報告がある⁸⁾。その報告によると、近赤外光と緑色光では身体への透過深度が異なり、近赤外光では体表面から 13 mm 以上深い部分の血管、緑色光は体表面近くの血管の情報を反映しているといわれている。そのため、近赤外光による PPG から得られる PTT と緑色光による PPG から得られる PTT には、必ずしも同じ情報が含まれているとは限らない。しかしながら、Fig. 5 の結果から、息こらえ負荷試験によって生じる血圧の変化にともなう自律神経活動の変化に関しては、どちらの波長の光でも同様の変化として捉えることが可能であると考えられる。すなわち、緑色光の PPG による血圧変動は近赤外光によるものと同様な評価が可能であるため、センサ自体を置き換えることが可能であることを示している。緑色光による PPG は近赤外光による PPG に比べて体動などのノイズに強いという先行研究の結果をふまえると^{9,10)}、これまで近赤外光で計測を行っていたものを緑色光に置き換えることで、より安定的な計測を行える可能性があるといえる。

6. おわりに

本研究では、近赤外光および緑色光による光電容積脈波を用いて血圧変動を推定し、その血圧変動を用いて算出される自律神経活動の評価指標 ρ_{\max} の有効性を検証した。

その結果、近赤外光および緑色光による光電容積脈波から得られる脈波伝播時間を用いた ρ_{\max} は、従来の連続血圧による ρ_{\max} と近い値で推移し、 ρ_{\max} の特徴的な変動と同様に捉えることが可能であることが示された。

緑色光による光電容積脈波は近赤外光のものに比べて体動などのノイズに強く、ウェアラブルデバイスに向いているセンサである。そのセンサから自律神経活動を評価する指標が算出可能であることにより、これからのウェアラブルデバイスでは、心拍数の算出のみにとどまらず、自律神経活動の推定も行える可能性が示唆された。

ただし、本研究では、息こらえ負荷試験による血圧および自律神経活動の変化のみを対象とした有効性の検証であるため、今後はさらに、他の自律神経機能検査においても緑色光による光電容積脈波での評価が有効かどうかを検証する必要があると考えられる。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP25870040 および

JP16K16385 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) X. F. Teng, Y. T. Zhang: "Continuous and noninvasive estimation of arterial blood pressure using a photoplethysmographic approach", Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2003, (2003) pp. 3153–3156.
- 2) J. Allen, A. Murray: "Modeling the relationship between peripheral blood pressure and blood volume pulses using linear and neural network system identification techniques", *Physiol. Meas.*, **20** (1999) pp. 287–301.
- 3) M. Masè, W. Mattei, R. Cucino, L. Faes, G. Nollo: "Feasibility of cuff-free measurement of systolic and diastolic arterial blood pressure", *J. Electrocardiol.*, **44** (2011) pp. 201–207.
- 4) M. Abe, M. Yoshizawa, K. Obara, N. Sugita, N. Homma, T. Yambe: "Evaluation of Baroreflex Function Using Green Light Photoplethysmogram in Consideration of Resistance to Artifacts", *Adv. Biomed. Eng.*, **4** (2015) pp. 1–6.
- 5) B. Gribbin, A. Steptoe, P. Sleight: "Pulse wave velocity as a measure of blood pressure change", *Psychophysiology*, **13**(1) (1976) pp. 86–90.
- 6) 浅井宏佑: 自律神経機能検査 (文光堂, 1995) pp. 16–22.
- 7) N. Sugita, M. Yoshizawa, M. Abe, A. Tanaka, T. Watanabe, S. Chiba, T. Yambe, S. Nitta: "Evaluation of adaptation to visually induced motion sickness based on the maximum cross-correlation between pulse transmission time and heart rate", *J. NeuroEng. Rehabil.*, **4**(35) (2007) online journal.
- 8) M. Sandberg, Q. Zhang, J. Styf, B. Gerdle, L. G. Lindberg: "Non-invasive monitoring of muscle blood perfusion by photoplethysmography: evaluation of a new application", *Acta. Physiol. Scand.*, **183**(4) (2005) pp. 335–343.
- 9) Y. Maeda, M. Sekine, T. Tamura: "Relationship between measurement site and motion artifacts in wearable reflected photoplethysmography", *J. Med. Syst.*, **35**(5) (2011) pp. 969–976.
- 10) B. A. Fallow, T. Tarumi, H. Tanaka: "Influence of skin type and wavelength on light wave reflectance", *J. Clin. Monit. Comput.*, **27**(3) (2013) pp. 313–317.