

遠隔容積脈波を用いた交感神経活動の評価†

野村保友*, 神田真理子*, 清 文美*, 松尾篤史**

Evaluation of sympathetic nerve activity using plethysmographic signals measured remotely†

Yasutomo Nomura*, Mariko Kanda*, Ayami Sei*, Atsushi Matsuo**

Plethysmographic signals were detected remotely (0.5 m) under the standard room light by the use of a built-in webcam on note PC. The RGB color movies were recorded at video-rate and the region of interest was set to the forehead of each subject. Changes in the average intensity of G channel appeared to be consistent with pulsation, respiration and the body movement. When the time series data was subjected to Fourier analysis, we found the characteristic peaks corresponding to the frequency of heart rate and respiration in the spectra. As for the B channel, we observed the respiration signal but the very weak signal of pulsation. Neither were almost contained in the R channel. In subjects that kept running for 3 minutes, the exercise increased the frequency of the plethysmographic signal measured remotely, suggesting the sympathetic nerve activation. This was confirmed by the increase in the LF/HF ratio of electrocardiogram and the salivary amylase activity. Furthermore, the exercise increased pulsation as well as respiration measured remotely. The remote vital monitor would be one of the evaluation methods of sympathetic nerve activity and be especially useful for the person who has difficulty wearing the sensor for sympathetic nerve activity.

Key words : photoplethysmogram, sympathetic nerve, heart rate, respiration

1 はじめに

一般にバイタルサインとしては脈拍, 呼吸, 体温, 血圧の4つの指標が主に使われる. これらは患者の基本情報であることから医療現場においては携帯型バイタルモニタを用いてこれらを記録している. 医療現場以外でも例えば2002年中国で重症急性呼吸器症候群(SARS)が発生し世界各国へ感染が広がったとき, 日本国内の国際空港では赤外線カメラを使ってウイルス患者を体温にもとづいてスクリーニングした. これにより国内での感染拡大を防ぐことができたため遠隔バイタルモニタの重要性が確認された¹⁾.

体温以外にも脈拍や呼吸の遠隔バイタルモニタがあれば睡眠時無呼吸症候群の検査を無拘束測定できるなど, その需要はたいへん高いと考えられる. 2008年にUCアーバインのグループは民生用デジタルカメラを使った遠隔容積脈波計測法を提案した²⁾. 2013年には富士通が体動除去アルゴリズムを提案して遠隔容積脈波計測による脈拍評価の精度が向上した³⁾. その精度から考えると

従来より頻用されている密着型の光電容積脈波と同様に遠隔容積脈波の波形にも交感神経活動が反映される可能性がある.

交感神経活動の情報は快・不快の情動を他者への確に伝達することが困難な重症心身障害者のノーバーバルコミュニケーションに大変有効である⁴⁾. 本研究の目的は遠隔容積脈波を用いて交感神経活動の評価が可能であるかどうかを明らかにすることである⁵⁾. さらに遠隔バイタルモニタとして脈拍に加えて呼吸数を正しく評価できるのか検討した.

2 実験

2・1 画像処理

21~22歳の健常者に対して動かないよう指示を与えて, 椅子に座らせた. 遠隔, すなわち離れた場所から生体情報を直接読み取るために観察しやすい顔面を選択した. 通常室内光のもとで被験者顔面から0.1~5m離れてHP ProBook 430 G3の内臓カメラを使って顔全体のカ

† 原稿受理 平成29年2月24日 Received February 24, 2017

* システム生体工学科 (Department of Systems Life Engineering)

** システム生体工学専攻(Graduate school of Engineering, Division of Systems Life Engineering)

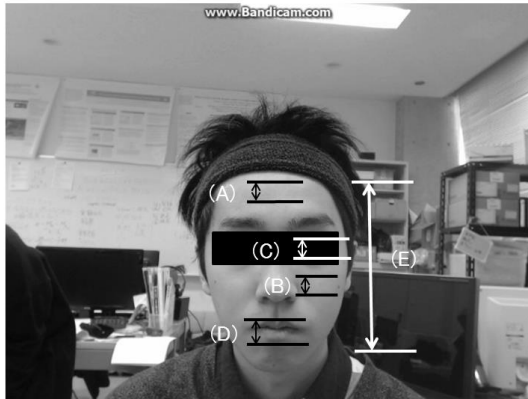


Fig.1 Five ROIs in typical G channel image of a subject face. A: forehead, B: nose, C: eye, D: lip, E: entire face.

ラー動画(630×430 pixel)を 90 秒間撮影し、AVI 方式で保存した。解析ソフト ImageJ を用いて RGB の各チャンネルの動画像に分け、顔の各部位を観察領域 ROI に設定した。遠隔バイタルモニタとして、各 ROI の平均輝度の時系列データの中に脈拍や呼吸の情報が含まれるのか検討するためにフーリエ解析を行った。

2・2 交感神経活動の評価

遠隔容積脈波が交感神経活動の影響を受けるのかを検討するために、指尖容積脈波・唾液アミラーゼ活性あるいは心電図との同時測定を行った。指尖容積脈波計はパルスオキシメータモジュール NJL5501R を用いて自作し、右手人差し指に装着した。心電計はオペアンプ LM324-N を用いて自作し、左右の手首及び左足首に電極を装着する単極誘導によって心電図を導出した。

心電図は R 波のピークを抽出して心拍間隔を求め、その時系列データをフーリエ解析した。低周波成分 (0.05~0.15 Hz, low frequency component, LF) と高周波成分 (0.15~0.4 Hz, high frequency component, HF) の面積比 (LF/HF) を求めることで自律神経活動を評価した。指尖容積脈波についても波形のピークを検出し、その間隔の時系列データから心電図と同様にフーリエ解析から低周波成分 (0.05~0.15 Hz, LF) と高周波成分 (0.15~0.4 Hz, HF) の比を求め解析を行った。また指尖容積脈波における脈拍数の求め方は、心電図の R-R 間隔から心拍数を求めるのと同様に計算した。唾液アミラーゼ活性 (NIPRO, DM-3.1) は舌下にチップを 30 秒間入れ唾液を採取して計測した。

交感神経活動を亢進させるために、21~22 歳の健康者 6 名に対して 3 分間の階段昇降を持続する運動負荷をかけた。運動前 (Rest), 運動直後 (Exercise), 運動負荷後 20 分安静にした回復期 (Recovery) にそれぞれ 90 秒間、遠隔容積脈波及び指尖容積脈波を計測し、唾液アミラーゼ活性はそれぞれの計測の直前に測定した。心電図で交感神経活動活性化を確かめる実験では、LF/HF に対する効果を明らかにするために計測時間を 3 分に延長した。各データを比較するために有意水準 5% で t

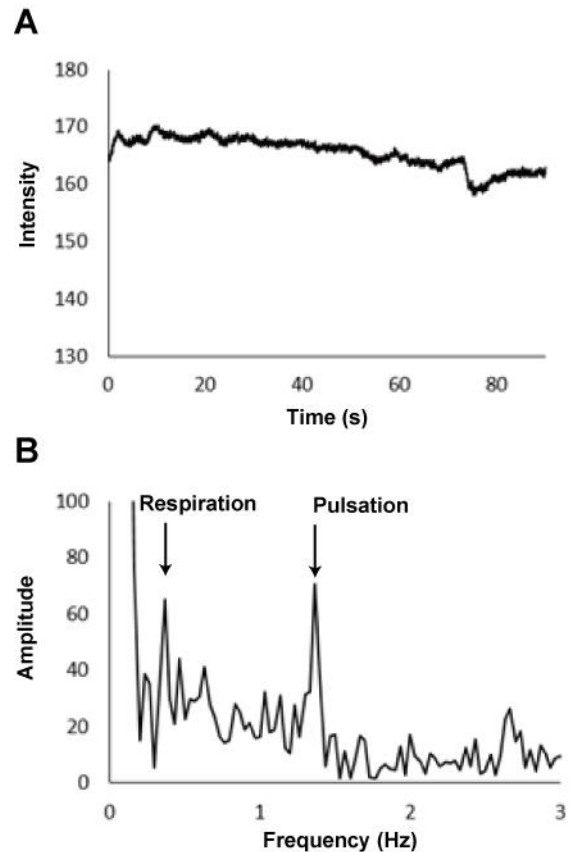


Fig.2 Remote vital signals obtained from G channel image of the forehead of a subject. A: Time series data of the average intensity in the ROI. B: The Fourier spectrum containing the frequency corresponding to pulsation and respiration.

検定を行った。

3 結果と考察

3・1 遠隔バイタルモニタ

遠隔バイタルモニタとして最適な測定条件を得るために顔の部位、RGB の各チャンネル、カメラとの距離が結果に与える影響を検討した。まずカメラとの距離を 0.5 m に固定して撮影した顔面に 5 か所の ROI を設定した (Fig.1)。カラー動画を RGB の 3 チャンネルに分けた。Fig.1A の前額部における G チャンネルの平均輝度の時系列データを Fig.2A に示す。R と B のデータは示さないが、各チャンネルの輝度変化の概形は似ていて 70 秒近傍でのやや大きな変動は 3 チャンネルに共通したことから被験者の体動によるものであると判断された。平均輝度の時系列データの時間を拡大すると 5 秒間に 6 個ほどの山が G チャンネルに顕著に表れた。同時測定した指尖容積脈波の脈拍波形とほぼ一致した。Fig.2B に示すように G チャンネルの輝度の時系列データをフーリエ解析すると、多くの被験者で 1 Hz 強と 0.3 Hz 近傍に特徴的なピークが観察された。B チャンネルでは安静時の脈拍に相当する 1 Hz 強のピークは弱まったが、呼吸数

に相当する 0.3 Hz 近傍のピークは変わらず観察された。

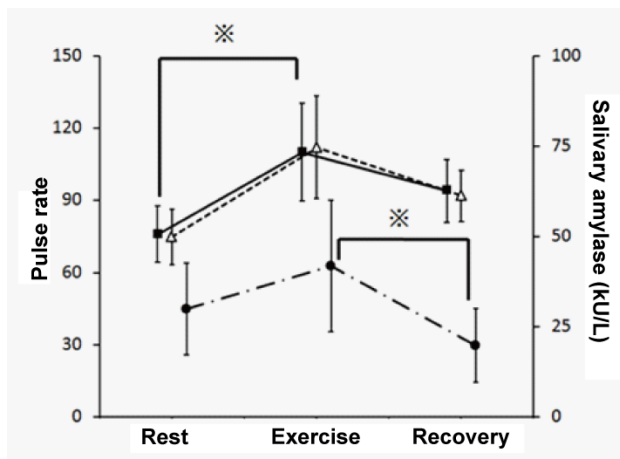


Fig.3 Effect of exercise on remote (closed squares) and finger plethysmogram (open triangles), salivary amylase activity (closed circles). Statistical significance were assessed using a *t*-test, **p* < 0.05.

一方、Rチャンネルでは特徴的なピークはほとんど確認できなかった。ヘモグロビンの吸収スペクトルとカメラの受光特性 (Rチャンネル受光ピークは約 620 nm, Gチャンネルは約 540 nm, Bチャンネルは約 460 nm) から、Gチャンネルが血液ヘモグロビンの吸収ピークに近い波長の光を記録しているのに対して、RやBではその寄与が小さな波長であることとこの結果は矛盾しない。またGだけでなく、ヘモグロビンの吸収が弱いBチャンネルにおいても呼吸に相当する周波数成分が観察されたことから呼吸成分は呼吸運動に由来する可能性がある。しかしながらBと同様にヘモグロビンの吸収が弱いRチャンネルで呼吸成分が明瞭に観察されなかったことはこの波長領域が3つの中で最も散乱効果が小さいことが関連すると思われた。Fig.1Cの眼の領域では瞬目が優勢になるため、脈拍に相当するピークは観察されなかった。Fig.1.B, D, Eの領域からはFig.2と似たシグナルが得られたが、脈拍や呼吸に由来する特徴的なピークは前額部のAに比べて弱かった。したがって前額部から記録することが遠隔バイタルモニタとして一番適していると判断された。また被験者の前額部とカメラとの距離を0.1~5 mの範囲で記録し解析すると、カメラが近い方が特徴的なピークは強くなった。しかし0.5 mより近づくと被験者は圧迫感を感じたため、0.5 mが適切であると判断した。

3・2 遠隔容積脈波による交感神経活動の評価

遠隔バイタルモニタによって安静時の脈拍や呼吸を評価できる可能性が示唆されたので、次に運動時について検討した。運動負荷による交感神経活動活性化をすでに確立している指尖容積脈波、唾液アミラーゼ活性、心電図と提案手法と比較した。被験者6人の遠隔容積脈波、指尖容積脈波、唾液アミラーゼ活性の結果をまとめてFig.3に示す。運動前のRestにおいては遠隔容積脈波か

ら平均脈拍数 76.6 ± 11.6 が得られた。運動直後の

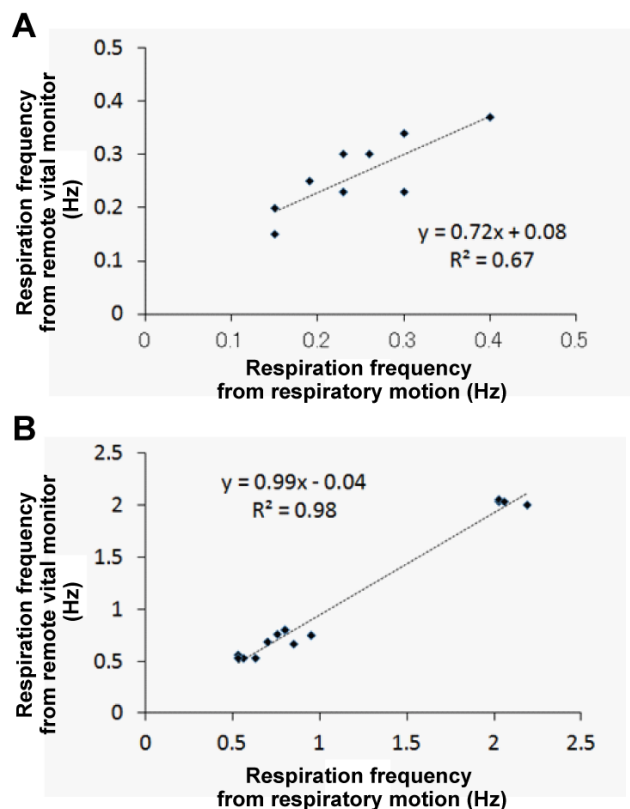


Fig.4 Comparison between respiration frequency obtained from remote vital monitor and that from respiratory motion. A: resting breath, B: breath controlled by a metronome.

Exerciseでは 110 ± 20.3 へ有意に増加した。運動から20分経過したRecoveryにおいては回復が期待されたが、 94 ± 10.6 であり有意差はなかった。脈拍数の回復にはさらに時間が必要だったのかもしれない。これらの値は指尖容積脈波から見積もられたRestの平均脈拍数 75 ± 11.4 , Exerciseの 112 ± 21.3 , Recoveryの 92 ± 10.2 と良く一致しており、遠隔容積脈波は運動に対しても正しく計測できた。また3分間の階段昇降という運動負荷は、交感神経活動を活性化させた可能性がある。運動を支えるエネルギー需要の増加に応えるべく下肢への酸素供給の増加を伴う血流変化が交感神経活動の活性化によって誘起されたと解釈される。このことは交感神経活動の指標である心電図のR-R間隔ゆらぎのLF/HFの増加及び唾液アミラーゼ活性の上昇から確認された。データは示さないが、例えば心電図のLF/HFは、Restの平均LF/HF 0.43 ± 0.04 からExerciseでは 0.63 ± 0.07 へ有意に増加した。運動直後からRecoveryでは 0.51 ± 0.04 へ有意に減少した。同様に指尖容積脈波のLF/HFは、RestのLF/HF 0.45 ± 0.05 から運動直後にはExerciseの 0.61 ± 0.12 へ有意に増加した。運動直後からRecoveryでは 0.44 ± 0.07 へ有意に減少した。Fig.3に示すように、唾液アミラーゼ活性はRestでは 30.0 ± 15.8 kU/Lであっ

たが、運動直後の Exercise では 42.0 ± 18.2 kU/L になった。運動から 20 分経過後の Recovery では 18.0 ± 10.2 kU/L へ有意に減少した。一般に 0~30 kU/L の範囲内はストレスがない状態であるとされていることから Recovery の 18kU/L は運動により亢進した交感神経活動が抑制されたことを示唆している。

3・2 遠隔バイタルモニタにおける呼吸の確認

呼吸成分が G チャンネルだけでなく B チャンネルでも観察されたことからヘモグロビンの吸収以外に呼吸運動が含まれる可能性が示唆された。呼吸運動は胸郭の容積変動に由来するので、遠隔バイタルモニタとは別に被験者の胸部を横から撮影して呼吸周波数を評価した。安静時の呼吸周波数を二つの方法で評価し比較した結果を Fig.4A に示す。正の相関が得られたが、二つの評価法から得られた呼吸周波数は完全には一致しなかった。その原因はいくつかあるが、遠隔バイタルモニタについては被験者の化粧の程度、そして被験者胸部を横から撮影する呼吸運動については身体に対する服装の密着の程度が影響したと考えられた。いずれも現時点では数値化できていないため、得られた結果を補正するに至っていない。そこで化粧をしていない被験者に身体に密着する服を着てもらい、メトロノームの音に合わせて呼吸させて計測した結果を Fig.4B に示す。遠隔バイタルモニタにおける平均輝度の時系列データ上の脈拍成分と重なることを避けるためにメトロノームの周波数は 0.5, 0.75, 2 Hz に設定した。極めて高い正の相関関係が得られ、遠隔バイタルモニタから得られた呼吸周波数と呼吸運動から評価された呼吸周波数はほぼ一致することが示された。さらに 20 秒間の無呼吸テストを行って解析すると、両者の特徴的なピーク周波数が消失することを確認した。

4 まとめ

遠隔バイタルモニタで得られる脈拍は指尖容積脈波とよく一致しており、心電波形から得られる交感神経活動ともよく合った。したがって最近提案された遠隔容積脈波²⁾は交感神経活動の評価に使えることが確認された。遠隔容積脈波には呼吸シグナルも含まれており、調節された呼吸運動を正確に反映した。

5 展望

交感神経活動の亢進を遠隔バイタルモニタで測定できれば、様々な分野への応用が期待される。例えば交感神経活動の情報が快・不快の情動を他者への確に伝達することが困難な重症心身障害者から離れて計測することでノーバーバルコミュニケーションツールにつながる可能性がある。また昼夜逆転した学生の講義中の居眠りや疲労による注意散漫などでも交感神経活動が抑制される可能性があり、その予防に利用できるかもしれない。さらに遠隔バイタルモニタで得られる呼吸周波数は呼吸運動を正確に反映することが明らかになったため、脈拍と呼吸の非拘束同時測定の今後の展開にも期待したい。

参考文献

- 1) G. Sun, T. Saga, T. Shimizu, Y. Hakozaki, and T. Matsui, *Int J Infect Dis.* 25, 56-8 (2014).
- 2) W. Verkruysse, L. O. Svaasand, and J. S. Nelson, *Opt Express.* 16(26), 21434-45 (2008).
- 3) 富士通, 2013 年電子情報通信学会 総合大会(2013)
- 4) 山口昌樹, 竹田一則, 村上満, “人間科学と福祉工学” コロナ社 (2007).
- 5) 神田真理子, 清 文美, 松尾篤史, 野村保友, “日本福祉工学会第 20 回学術講演会” (2016)