

# 脈波信号解析による映像の生体影響評価

○ 阿部 誠 吉澤 誠 杉田典大 (東北大学) 田中 明 (福島大学)

阿部健一 山家智之 仁田新一 (東北大学)

千葉 滋 (シャープ株式会社)

## Assessing Biological Effects of Visual Stimulation by Analyzing Pulse Wave

\*M. Abe, M. Yoshizawa, N. Sugita (Tohoku University), A. Tanaka (Fukushima University),  
K. Abe, T. Yambe, S. Nitta (Tohoku University) and S. Chiba (Sharp Corporation)

**Abstract**— The maximum cross-correlation coefficient from blood pressure to heart rate,  $\rho_{\max}$  is a useful index to evaluate the effects of visual stimulation on the human. However  $\rho_{\max}$  needs an expensive and bulky equipment to measure continuous blood pressure and an ECG measurement device to measure heart rate. In this study, only plethysmogram was used to obtain  $\rho_{\max}$  without measurement of continuous blood pressure and ECG. Heart rate was obtained from the inter-beat-interval of the rising time of pulse wave. Blood pressure-related information was obtained from the difference of pulse transmission time or from integral value of pulse wave over a beat. The adequacy of the proposed method was evaluated on the basis of comparison with the conventional method.

**Key Words:** visual stimulation, plethysmogram, pulse transmission time

### 1 はじめに

新しい映像機器や映像情報の健全な普及のためには、映像が利用者の心身に与える影響が定量的に把握できることが望まれる。映像が心身に与える影響としては、ポケモン事件に代表される光過敏性発作、素人が撮影した手ぶれの多い映像や視点が極端に不自然に運動する CG 映像を見ることで引き起こされる映像酔い、人工的立体視による眼精疲労などが上げられる。

映像の生体影響を定量化する方法として、著者らは、Mayer 波帯域における血圧から心拍数までの最大相互相関係数  $\rho_{\max}$  を経時的に算出する方法を提案し、その有効性を確認してきた[1][2][3]。信頼性の高い映像評価には多くの被験者のデータが必要である。しかし、 $\rho_{\max}$  を得るための従来の方法では、電極装着を要する心電図計測に手間がかかり、大型で高価な連続血圧計を使用するため、1 度に 1 人の被験者を対象とした実験しかできず、被験者数の増加が容易ではなかった。

そこで本研究では、心電図と血圧の直接計測を必要としない方法として、光電容積脈波の計測情報から心拍数情報を算出し、また、血圧と逆相関の関係にある脈波伝播時間(pulse transmission time; *PTT*)に基づいた脈波伝播時間差(pulse transmission time difference; *PTTD*)[4][5][6]、あるいは脈波の拍内積分値を血圧情報の代用とする方法を検討した。

### 2 方法

#### 2.1 最大相互相関係数 $\rho_{\max}$

Fig.1(a)は、安静時における平均血圧変動(*MBP*)と負号をつけた心拍数変動(*-HR*)を、帯域通過フィルタによる処理を施し、血管運動に関する自律神経情報

を含むとされている Mayer 波成分に絞って表示したものである。安静時では、心臓血管中枢の圧反射機能によって心拍数が血圧に依存して調整される。つまり、*MBP* に対し、*-HR* が一定の遅れ時間をもって追従する傾向がみられる。そのため、血圧と心拍数の相互相関は高い値をとる。

次に、映像刺激時の *MBP* と *-HR* の変化を Fig.1(b) に示す。安静時に比べて *MBP* と *-HR* の関係が乱されていることが分かる。すなわち、映像刺激による情動反応によって血圧とは無関係に心拍数が変化したり、血管運動を介して血圧が心拍数に依存せずに変化したりする可能性がある。そのため、血圧と心拍数の相互相関は低くなると考えられる。

以上のことから、血圧変動と心拍数変動を Mayer 波帯域のみに成分を絞り、その間の相互相関関数の最大値  $\rho_{\max}$  を経時的に求める事により、映像の生体影響を定量化することが期待できる。

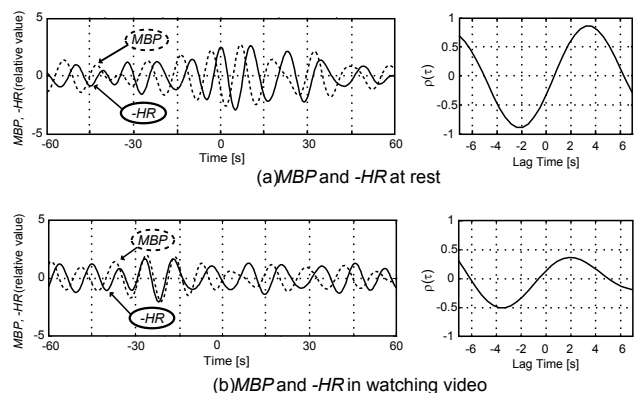


Fig.1 Left: time-series waveform of mean blood pressure (*MBP*) and heart rate (*-HR*) in Mayer wave band. Right: cross correlation coefficient  $\rho(\tau)$  from blood pressure to heart rate.

## 2.2 心拍数情報

従来は心電図のR波から次のR波までの間隔であるRR間隔から心拍数を求めていた。これに対し、本研究ではFig.2のように脈波の立ち上がりから次の立ち上がりまでの間隔をFF間隔(foot-to-foot interval)と定義し、これをRR間隔の代用とする。本実験では、赤外LEDとフォトトランジスタによって構成される光電容積脈波センサを製作し、脈波の計測を行なった。そして、指尖脈波からFF間隔の情報を得た。

## 2.3 血圧情報

心電図のR波から脈波が立ち上がるまでの時間であるPTTは、血圧と逆相関するので、心臓から異なる距離にある2点で計測したPTTの差PTTDも血圧と相関があると考えられる。さらに、PTTの差を計算することは、心電図から得るR波の情報が必要なくなるという利点もある。Fig.3にPTTDの求め方を示す。本実験では、指尖脈波と耳朶脈波を用いてPTTDを求めた。

また、Fig.4の影の部分に相当する脈波の拍内積分値 $PW_{area}$ は、血管の容積情報を表しているため血圧と相関があると考えられる。そこで、血圧信号の代わりに $PW_{area}$ を用いれば、1箇所の脈波(本実験の場合、指尖脈波)だけから、心拍数変動と血圧変動の相互相関係数の最大値 $\rho_{max}$ に相当する指標が求められる可能性がある。

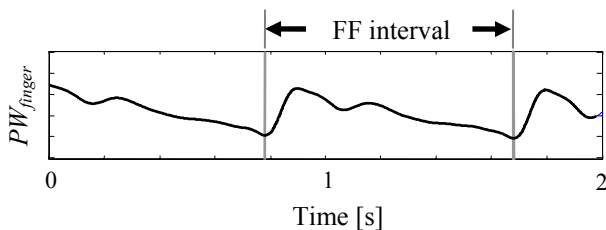


Fig.2 Definition of pulse foot-to-foot (FF) interval.

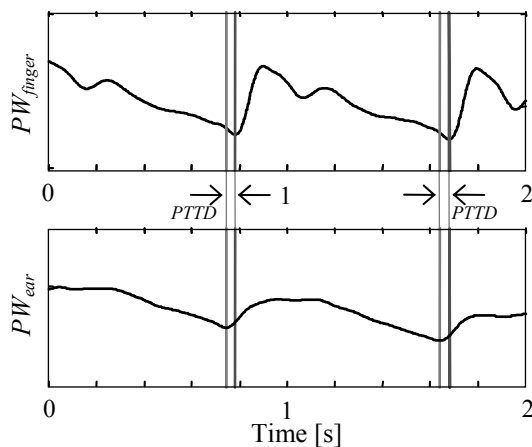


Fig.3 Definition of pulse transmission time difference (PTTD). Top: pulse wave measured at the finger tip. Bottom: pulse wave measured at the earlap.

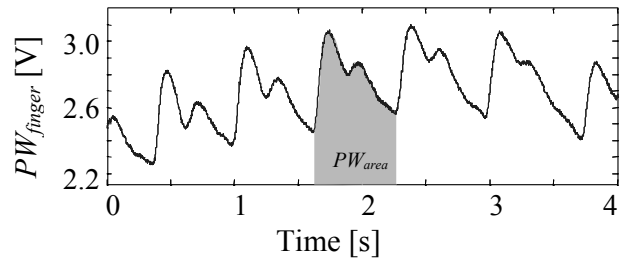


Fig.4 Definition of integral value of pulse wave over a beat.

## 2.4 実験方法

前述の方法の妥当性を検証するために、次の3つの実験を行った。

- 1) 安静実験: 座位で安静状態を5分間保つもの。
- 2) 筋肉負荷実験: 座位の安静状態と座位で両足を水平に上げたまま保つ状態をFig.5(a)のようなプロトコルで繰り返すもの。
- 3) 映像提示実験: Fig.5(b)のようなプロトコルで手ぶれの多い映像を視聴させるもの。この映像は、2003年7月8日にこれを見ていた松江市の中学生294人中36人が映像酔いの症状を訴え病院で手当てを受けたものである。

各実験中、心電図、人差し指先端と耳朶の2箇所の光電脈波、橈骨動脈圧を計測した。被験者はどちらの実験も健康な学生10人(男性8人、女性2人)である。

|            |              |            |              |            |
|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| 安静<br>(5分) | 筋肉負荷<br>(1分) | 安静<br>(2分) | 筋肉負荷<br>(1分) | 安静<br>(3分) |
|------------|--------------|------------|--------------|------------|

(a) Protocol of an experiment with muscular load

|            |                      |            |
|------------|----------------------|------------|
| 安静<br>(5分) | 手ぶれの多い映像の提示<br>(13分) | 安静<br>(3分) |
|------------|----------------------|------------|

(b) Protocol of an experiment in which a subject is watching a video taken by swaying handy camera

Fig.5 Protocol of experiment

## 2.5 解析

計測量から、心電図に基づく心拍数( $HR_{ECG}$ )、脈波に基づく心拍数( $HR_{PPG}$ )、連続血圧計に基づく平均血圧 $MBP$ 、脈波に基づく $PTTD$ および $PW_{area}$ を求め、それらをMayer波帯域に絞るために0.08~0.12Hzを通過域とする帯域通過フィルタを通した。安静実験では、心拍数情報同士の相関係数と血圧情報同士の相関係数を計算した。筋肉負荷実験および映像提示実験では、心拍数情報と血圧情報から $\rho_{max}$ を求め、平均血圧を用いた従来の方法と本研究での提案方法との比較を行なった。

### 3 結果

#### 3.1 安静実験

安静状態での実験において、心電図のRR間隔と指尖脈波のFF間隔の相関係数は、10人の平均で0.98であった。このことから、心電図に基づく心拍数情報とほぼ同じ情報を脈波から求められることがわかる。

PTTDおよびPW<sub>area</sub>とMBPとの相関係数は、10人の平均でそれぞれ、-0.52, 0.78であった。すなわち、PTTDは血压情報と逆の相関関係があり、PW<sub>area</sub>は血压情報とやや強い正の相関関係があり、ともに血压情報の代用として利用できると思われる。

#### 3.2 筋肉負荷実験

筋肉負荷実験において、HR<sub>ECG</sub>とMBPから得られる $\rho_{\max}$ を $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$ 、HR<sub>PPG</sub>とPTTDから得られる $\rho_{\max}$ を $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PTTD)$ 、HR<sub>PPG</sub>とPW<sub>area</sub>から得られる $\rho_{\max}$ を $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PW_{area})$ で表す。これらの時間変化を表すと、Fig.6, Fig.7のようになった。ただし、被験者に筋肉負荷を与えている時間は300s~360s, 480s~540sである。

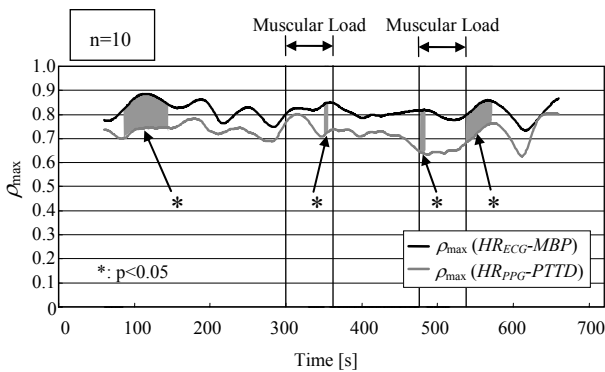


Fig.6 Comparison between  $\rho_{\max}$  using continuous blood pressure and  $\rho_{\max}$  using PTTD in the experiment muscular load. Average of 10 subjects.

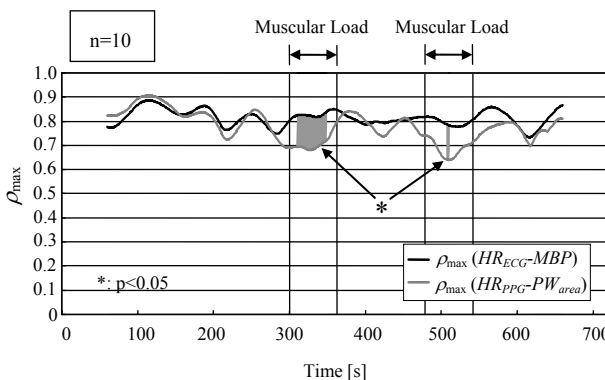


Fig.7 Comparison between  $\rho_{\max}$  using continuous blood pressure and  $\rho_{\max}$  using PW<sub>area</sub> in the experiment with muscular load. Average of 10 subjects.

筋肉負荷実験において、 $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PTTD)$ は $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$ より低い値で推移しているが、互いに似た変化をしている。

$\rho_{\max}(HR_{PPG} - PW_{area})$ は $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$ と近い値で推移している。また、被験者に筋肉負荷を与えたときに、両者の値の間に有意差が生じている。

#### 3.3 映像提示実験

映像提示実験において、 $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$ と $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PTTD)$ の時間波形の比較はFig.8のようになった。また、 $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$ と $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PW_{area})$ の比較はFig.9のようになった。ただし、被験者が映像を見ている時間は300s~1080sである。

10人の平均において、 $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PTTD)$ は、 $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$ に比べて低い値で推移しているが、波形の一部が互いに似ていることがわかる。

一方、 $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PW_{area})$ の場合は、 $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$ と近い値で推移しており、どの時間においても両者の間に有意差はなかった。また、両者はよく似た波形をしている。

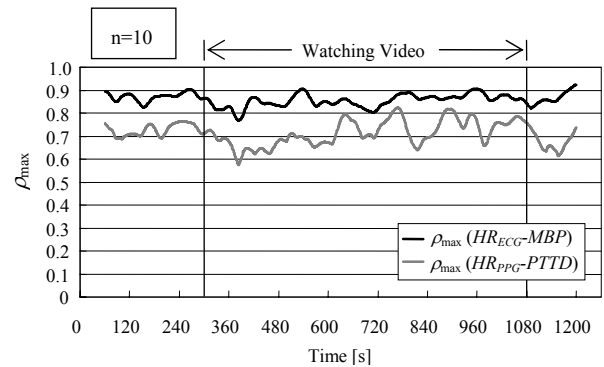


Fig.8 Comparison between  $\rho_{\max}$  using continuous blood pressure and  $\rho_{\max}$  using PTTD in presentation of the swaying video image. Average of 10 subjects. Significant difference was found between  $\rho_{\max}(HR_{ECG} - MBP)$  and  $\rho_{\max}(HR_{PPG} - PTTD)$  almost everywhere.

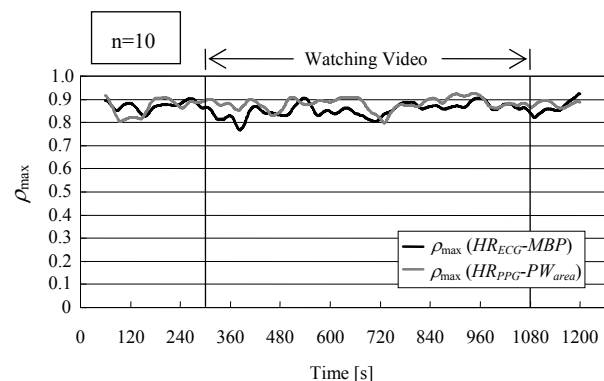


Fig.9 Comparison between  $\rho_{\max}$  using continuous blood pressure and  $\rho_{\max}$  using PW<sub>area</sub> in presentation of the swaying video image. Average of 10 subjects. No significant difference was found.

## 4 考察

安静実験の結果から、脈波から得られる心拍数情報は、心電図より得られる心拍数情報の代用となることが示された。また、 $PTTD$  と  $PW_{area}$  は、どちらも血圧と相関のある情報であることがわかった。両者のうち、 $PW_{area}$  のほうがより簡易に計測でき、血圧との相関関係も強い情報であることがわかった。したがって、血圧情報の代用としては拍内積分値のほうが有用であると思われる。

筋肉負荷実験から、 $PTTD$  と  $PW_{area}$  を用いた  $\rho_{max}$  は、いずれも連続血圧計を用いた従来の方法から得られる  $\rho_{max}$  と似た波形が得られることがわかった。特に、 $PW_{area}$  を用いた  $\rho_{max}$  は連続血圧を用いたときとほぼ同じ値で推移している。しかし、筋肉負荷時において、 $\rho_{max}(HR_{PPG} - PW_{area})$  は  $\rho_{max}(HR_{ECG} - MBP)$  に比べて有意に小さい値で推移する傾向がみられる。

映像提示実験においても、 $PTTD$  を用いた  $\rho_{max}$  より  $PW_{area}$  を用いた  $\rho_{max}$  の方が連続血圧を用いた  $\rho_{max}$  に近い値となった。安静実験、筋肉負荷実験の結果と合わせて、 $PW_{area}$  を用いた方法のほうが  $\rho_{max}$  を求める方法として有用であると考えられる。

しかし、 $PTTD$  と  $PW_{area}$  は、血圧情報とは異なる情報を含んでいる可能性がある。すなわち、映像による心理的・精神的状態の変化によって変動する血圧の変化は、自律神経系によるフィードバック（圧受容器反射）によって常に調整されている。一方、脈波伝播時間を変動させる動脈血管コンプライアンスは、血圧ばかりでなく情動反応等によって変動する可能性がある。しかし、血圧とは異なり、この値を一定値に調整するような作用は弱いと推測される。すなわち、情動反応による血圧変動は抑制されるのに対し、脈波伝播時間の変動は直接的な抑制をあまり受けなため、Fig.8のように  $\rho_{max}(HR_{ECG} - MBP)$  の変動幅より  $\rho_{max}(HR_{PPG} - PTTD)$  の変動幅の方が大きくなった可能性がある。

また、 $PW_{area}$  は血圧と血流量の変化による血管の容積の変化を反映するものである。そのため、Fig.7からわかるように、筋肉負荷時や運動時といった血圧の変化に加えて血流量が変化するような状態では、血圧情報とは相関関係が弱くなり、 $\rho_{max}$  が低下すると考えられる。

以上から、脈波に基づく方法  $\rho_{max}$  は、従来の血圧を用いた  $\rho_{max}$  と似た指標であるが、これとは異なる情報も含む指標であり、むしろ、情動反応の変化をより敏感に反映する可能性があることが示唆された。

## 5 結論

本研究では、心電計と連続血圧計を用いず、光電容積脈波のみを用いて  $\rho_{max}$  を求める方法を2つ提案した。1つは、2つの脈波センサを用いるものであり、もう1つは、脈波センサが1つだけのものである。これらの方法はどちらも従来の方法の代用となる可能性があることが示された。ただし、それらの方法から得られる  $\rho_{max}$  は、血圧を用いる方法から得られる  $\rho_{max}$  とは必ずしも等しくなく、むしろ情動反応に敏感である可能性があることが示唆された。今後は、血圧情報との相違性やそれらの情報を用いたときの  $\rho_{max}$  の有用性に関して、さらなる検討が必要であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 杉田典大, 吉澤 誠, 田中 明, 阿部健一, 山家智之, 仁田新一: 乗り物酔いしやすさと3次元映像感受性の関連性の定量的評価, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp. 121-124, 2001
- [2] Yoshizawa, M., Sugita, N., Tanaka, A., Abe, K., Yambe, T., Nitta, S.: Quantitative and physiological evaluation of three dimensional images, Proc. of the 7th International Conference on Virtual System and Multimedia, pp. 864-871, 2001
- [3] 杉田典大, 吉澤 誠, 田中 明, 阿部健一, 山家智之, 仁田新一: 血圧-心拍数間の最大相互相関係数を用いた映像刺激の生体影響評価, ヒューマンインタフェースシンポジウム2002論文集, pp.125-128, 2002
- [4] Gribbin, B., Steptoe, A., Sleight, P.: Pulse wave velocity as a measure of blood pressure change, The Society for Psychophysiological Research, 13(1), pp.86-90, 1976
- [5] Jago, J.R., Murray, A.: Repeatability of peripheral pulse measurements on ears, fingers and toes using photoelectric plethysmography, Clin. Phys. Physiol. Meas., 9, pp. 319-329, 1988
- [6] Nitzan, M., Khanokh, B., Slovik, Y.: The difference in pulse transit time to the toe end finger measured by photoplethysmography, Physiol. Meas., 23, pp. 85-93, 2002