

血行状態ディスプレイ「魔法の鏡」を使ったゲームの可能性

吉澤 誠^{†1} 杉田典大^{†2} 魚住洋佑^{†1} 加藤 誠^{†3}
本間経康^{†4} 山家智之^{†5} 田中 明^{†6}

ビデオカメラとコンピュータを使った鏡型ディスプレイ「魔法の鏡」によって、顔や掌の2次元的な映像脈波を抽出し、血行状態を動画として表示するとともに、自律神経指標を計算するシステムを開発した。呼吸周期を随意的に変化させると、自律神経系を経由して映像脈波の振幅や周期が変化する。本報告では、このシステムを使った、自律神経情報を遠隔・非接触的にコンピュータに伝えて行うゲームの可能性を議論する。

Possibility of Games Using a Blood Perfusion Display: "The Mirror Magical"

Makoto Yoshizawa^{†1} Norihiro Sugita^{†2} Yousuke Uozumi^{†1} Makoto Kato^{†3}
Noriyasu Homma^{†4} Tomoyuki Yambe^{†5} Akira Tanaka^{†6}

The authors have developed a dynamic blood perfusion display: "The Mirror Magical" that extracts two dimensional video pulse waves on faces or palms, shows dynamic change in their blood perfusion, and calculates indices of the autonomic nervous system. In this report, we will discuss possibility of games in which autonomic nervous information is sent to computers and processed, based on the physiological reflection that voluntary change in the respiratory period induces the change in the period and amplitude of the video pulse waves.

1. はじめに

少子高齢化に伴う医療費・介護費の増大に対処するためには、病気に至る前の未病対策が重要であり、家庭や職場において常時健康状態をチェックできることが理想的である。これを目的として、既にリストバンド型のウェアラブルセンサなどで常時身体の状態を記録する装置が市販されている。しかしそれらのほとんどが、接触式センサによって心拍数や活動度などの健康に関連すると思われる既存の生体指標を得るものである[1]。しかし、特別なセンサを常時身に付けることは煩わしく、毎日意識して機器を操作する必要があるような健康管理法は習慣化しにくい。

これに対して、洗面所や脱衣所にある鏡は多くの人々がほぼ毎日利用する。特に、洗面所や鏡台の鏡を使って自分の顔を毎日入念にチェックする人が多い。また、風呂場などの脱衣所の鏡では衣服を必ず脱ぐために顔に限らず全身をチェックすることが可能である。

一方、自分自身の体調を客観的かつ簡単に知ることが容易ではない。特に、多くの人々が悩んでいる冷え性・肩こり・血行不良・むくみ・だるさ・食欲不振などの不定愁訴のような自律神経に係る症状は、自覚することはできてもこれを客観的に把握することは困難である。

そこで本研究では、図1のような、ビデオカメラとコン



図1 健康管理ディスプレイ「魔法の鏡」のコンセプト

Figure 1 Concept of the health care display "The Mirror Magical"

ピュータを内蔵した鏡型ディスプレイの前に立つだけで、自律神経指標に基づいたその日の健康予報を使用者に直感的で分かりやすく表示するツール、いわば「魔法の鏡」を実現することを目的とし、そのプロトタイプを開発している。このシステムでは、ビデオカメラで撮影した顔や掌の映像信号の緑色成分の輝度平均値時系列を脈波信号として

^{†1} 東北大学 サイバーサイエンスセンター
Cyberscience Center, Tohoku University

^{†2} 東北大学 大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Tohoku University

^{†3} 東北大学 大学院医工学研究科
Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University

^{†4} 東北大学 大学院医学系研究科
Graduate School of Medicine, Tohoku University

^{†5} 東北大学 加齢医学研究所
Institute of Development, Aging and Cancer, Tohoku University

^{†6} 福島大学 共生システム理工学類
Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University

計測する．これによって遠隔・非接触的に生体情報を得ることができる[2, 3].

このようなシステムを実用化するための課題は、

- 1) 利用者にわかりやすく体調を知らせること
- 2) 利用の継続性を図ること

である．これらの課題への対策として、このシステムのユーザーインターフェースに娯楽性のあるゲーム的要素を導入することが考えられる．

そこで本報告では、呼吸周期を随意的に変化させると、自律神経系を經由して映像脈波の振幅や周期が変化するという生理的反射を利用し、自律神経情報を遠隔・非接触的にコンピュータに伝えることによって実現するゲームの可能性を議論する．

2. 方法

2.1 映像脈波の抽出・表示と自律神経指標の算出

著者らはこれまで、光電脈波計によって簡単に計測できる脈波信号に基づいて自律神経機能を表わすいくつかの指標を計測する方法に関する技術を開発してきた[4-6]．これらは、家庭での手軽な自律神経機能モニタリングに応用できる技術である．さらに、光電脈波計の代わりにビデオカメラで撮影した身体映像から、皮下の血液中のヘモグロビンが吸収する緑色信号に基づいて、血圧情報を反映する図2のような脈波伝搬時間差を遠隔的に推定する技術を開発し[7]、これが収縮期血圧と正の相関をすることを明らかにしている[8]．本研究では、これら2つの技術を組み合わせることにより、上記の鏡型ディスプレイを構築した．

まず、身体映像信号から脈波情報を得るため、設定した領域をモザイク状の小領域に分割し、各領域の緑色信号のうち心拍周波数近傍の成分が強いものだけを対象として選択する．これらの処理により、心拍変動に無関連な運動や周辺光変化による雑音成分をリアルタイムにキャンセルするアルゴリズムを開発した．

さらに、映像脈波情報から脈波伝搬時間差 (pulse transit time difference; PTTD) あるいは血行状態を推定するために、2箇所以上の領域間の信号の位相差を抽出するアルゴリズムを開発した．上記のアルゴリズムを Windows パソコンにおいてリアルタイムに算出できるような実装化を行った．特に、図2のように、各モザイク領域を変遷する2次元的な血行パターンを、顔などの実映像に重畳して表示し、心拍数と脈波伝搬時間差などともに、これらを利用者が見ることににより、その変化と自分自身の体調の変化とを比較することができるようにした[9].

一方、自律神経機能を簡単に評価するものとして心拍数変動検査が行われてきた．よく知られているように[10]、心拍間隔時系列あるいは瞬時心拍数時系列 (心拍数変動; HRV) は、呼吸周波数に同期した成分、すなわち呼吸性洞性不整脈 (respiratory sinus arrhythmia; RSA) の成分を含ん

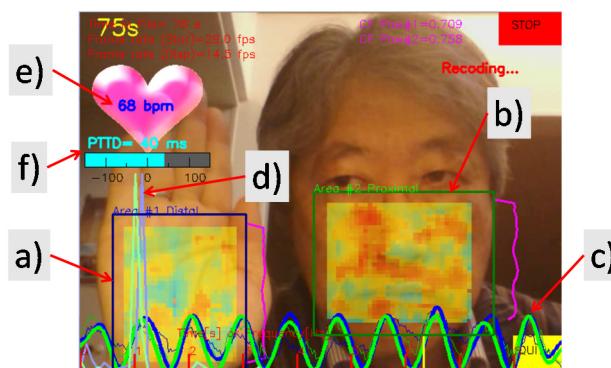


図2 血行状態のモザイク表示

a)掌 (遠位部) の領域 (青枠), b) 頬 (近位部) の領域 (緑枠), c) 掌および頬の脈波信号, d) 脈波信号のパワースペクトル, e) 心拍数, f) 掌と頬の間の脈波伝搬時間差(PTTD)

Figure 2 Mosaic-like display of dynamic blood perfusion a)Distal ROI (Region of interest) on the palm, b)Proximal ROI on the cheek, c)Video pulse waves of the palm and cheek, d)Power spectra of pulse waves, e)Heart rate, f)Pulse transit time difference (PTTD) between the palm and cheek.

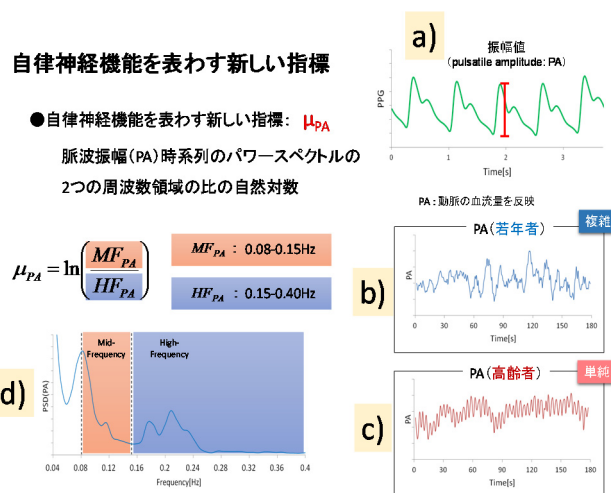


図3 血管運動に関係する自律神経機能表す指標 μ_{PA} [5]

Figure 3 An autonomic nervous system index μ_{PA} associated with vasomotion.

でいる．この成分は、副交感神経遮断薬で減衰するので、RSA の強さは副交感神経活動を表すと考えられている．一方、心拍数変動には約 10 秒を周期とする成分 (Mayer 波) が含まれており、この成分は交感神経活動と副交感神経活動の両方の影響を受けているが、主として交感神経が支配する血管運動調整機能に関係すると言われている．

心拍数変動の周波数成分のうち RSA に対応する約 0.15Hz~0.4Hz の成分は HF 成分と呼ばれ、Mayer 波に対応する約 0.04Hz~0.15Hz の成分は LF 成分と呼ばれている．HF 成分に対する LF 成分の比、すなわち LF/HF は副交感神経活動と交感神経活動のバランスを表す自律神経系の指標

とされており、特に精神的なストレス評価によく用いられている。LF/HF 以外にも、心拍数変動からは CVRR, RR50 などの指標も自律神経活動に関する指標が得られる[10]。

一方、自律神経機能の重要な役割である血管運動を介した循環系の制御性能を表わすことは難しい。そこでわれわれは、図 3 のような、脈波振幅 (pulse amplitude; PA) の時系列に基づく自律神経機能を表わす新たな指標 (μPA) を算出する方法提案し[5]、特許[6]を取得している。本システムでは、LF/HF, CVRR とともに、 μPA を計算して表示する機能を実現した。ここで、脈波振幅 PA とは図 3a) のような、一拍内の脈波の最大値と最小値の差として定義され、これを拍毎の時系列で表示した例が図 3b) (若年健常者: 22 歳) と図 3c) (高齢健常者: 74 歳) である。これらの波形からわかる通り、若年者と高齢者では時系列に含まれる周波数成分が異なる。 μPA はこの違いを表す指標であり、図 3d) で示される 2 つの周波数領域の PA 時系列のパワースペクトルの積分値の比の自然対数として定義されるものである。

また、Mayer 波帯域における瞬時心拍数 HRV と脈波伝搬時間差 PTTD の間の相互相関係数の最大値 $\rho_{\max}$ も算出可能である。 $\rho_{\max}$ は、LF/HF と同様にストレスや映像酔いなどの評価に使用できる指標である[11]。

以上の指標を計算・解析・出力するアルゴリズムを開発し、これを鏡型ディスプレイに実装することにより、既存の自律神経機能指標に加えて、他のウェアラブルセンサなどでは得られない血管運動を介した循環系の制御機能の良し悪しの評価を直感的にできるような「魔法の鏡」の試作機を構成する。

2.2 呼吸統制による自律神経情報に基づくゲーム

(1) 呼吸統制による自律神経情報の抽出

自律神経系が支配するほとんどの臓器は不随意的であり、意志では制御できない。しかし、唯一随意的に制御可能であるのは呼吸運動である。随意的に呼吸周期を変化させると、副交感神経系を介して心拍数が呼吸周期に同期する。すなわち、呼吸統制により副交感神経活動を変化させることができ、その変化を心拍数の周波数成分のうちの同期成分の強度を使って定量化することができる。

本システムを用いると、身体映像から遠隔・非接触的に心拍数変動が計測できるので、ビデオカメラ以外に何のセンサも使わずに、自律神経活動をコンピュータに伝えることができる。これによって、人間の内部状態に基づいたゲームを構成することが可能となる。さらに、本システムでは、脈波振幅 PA、あるいは脈波伝搬時間差 PTTD を計測できるので、それらの情報を反映させることもできる。

(2) 呼吸統制実験

周期的呼吸を行うことで瞬時心拍数 HRV がその周波数に同期するかどうかを確かめるために、次の 2 つの実験を行った。

実験 I (光電脈波による対照実験)[11]

- 被験者：健常者 71 名 (21 歳～75 歳、平均 34.4 歳 ± 18.5)
- 計測量：心電図および指尖光電脈波 (接触式センサ)
- 指標：瞬時心拍数 HRV および脈波伝搬時間 (pulse transit time; PTT, 心電図の R 波から脈波の立ち上がりまでの時間)
- プロトコル：安静 3 分→10 秒周期 (0.1Hz) 呼吸 2 分→4 秒周期 (0.25Hz) 呼吸 2 分

実験 II (映像脈波)

- 被験者：健常者 1 名 (62 歳)
- 計測量：PC フロントカメラ (SONY VAIO Pro 11 内臓フロントカメラ ExmorR for PC; 640 × 480, 30fps) による映像信号
- 指標：瞬時心拍数 HRV および脈波伝搬時間差 PTTD (掌と頬の間の脈波の立ち上がり時刻差)
- プロトコル：安静 1 分→10 秒周期 (0.1Hz) 呼吸 1 分→安静 1 分

3. 結果

図 4 は、開発した「魔法の鏡」の試作機である。



図 4 「魔法の鏡」試作機

Figure 4 Prototype of “The Mirror Magical”

これはハーフミラーの裏側に液晶パネル・ディスプレイを貼り合わせたものであり、外付け Web カメラ (30fps) からの顔映像をコンピュータで処理した結果を表示するものである。

同図の下部に表示されている波形は、被験者の顔の上(額)下(頬)の 2 か所の ROI の 2 つの映像脈波である。過去 10 秒程度の時間窓の映像脈波を心拍周波数 1 Hz 前後の帯域通過フィルタを通したものを表示し、1 秒程度の更新周期で表示している。画面の右上と左上の 2 か所にはそれぞれ平均心拍数と 2 つの ROI の間の脈波伝搬時間差 PTTD である。この例の場合は、血行状態のモザイク表示を行っていないが、これを行うと図 2 の例のような表示がなされる。

実験 I (光電脈波による対照実験)

図 5 は、ある被験者の瞬時心拍数 HRV と脈波伝搬時間 PTT の時系列の例である。安静時と 4 秒周期呼吸時の HRV と PTT には変化の周期が不明瞭であるが、10 秒周期時には HRV と PTT の両方に 10 秒周期の周期性 (1 分間に 6 回

の山) が明確である。

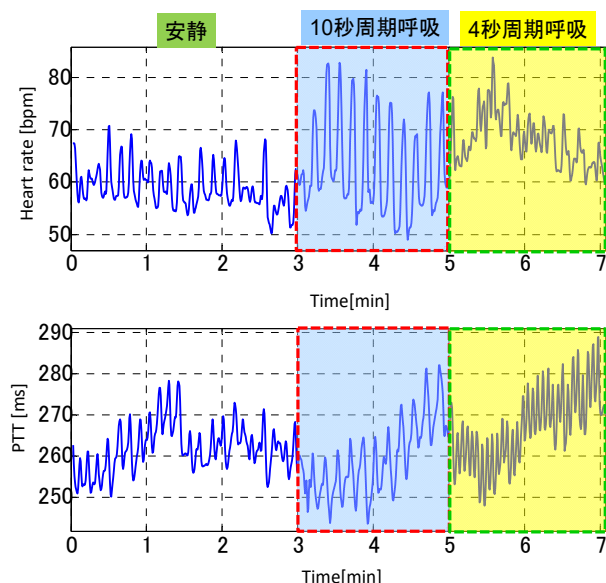


図 5 光電脈波からの瞬時心拍 HRV と脈波伝搬時間 PTT の例

Figure 5 An example of HRV and PTT measured from a photoelectric plethysmogram.

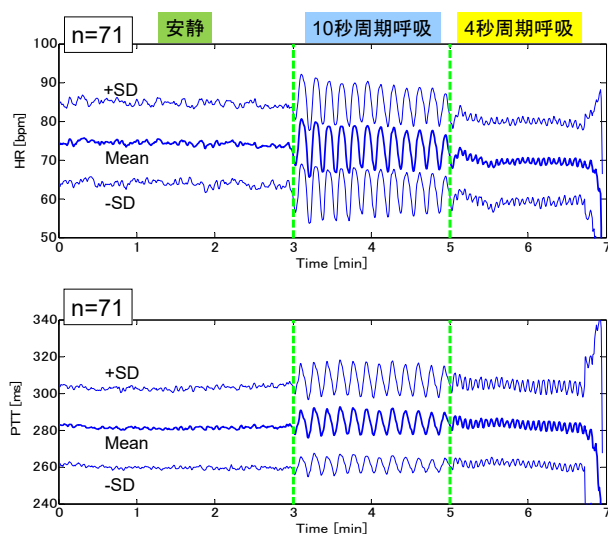


図 6 光電脈波からの HRV と PTT の 71 名の平均値
Figure 6 Mean values of HRV and PTT measured from a photoelectric plethysmogram [11].

図 6 は全被験者 71 名の HRV と PTT の平均値と標準偏差である[11]。安静時には各被験者の呼吸周期が一定ではないので、それらすべてのデータを加算した結果、フラットな波形となっている。一方、10 秒周期 (1 分間に 6 回) 時と 4 秒周期呼吸時 (1 分間に 15 回) にはそれぞれの周期性が明確である。ただし、それらの振幅(peak-to-peak 値)はそれぞれ約 12bpm に対して約 2bpm であり、10 秒周期の振幅が大幅に大きいことがわかる。

実験 II(映像脈波)

図 7 は映像脈波の時系列であり、実験開始から 40 秒から 80 秒までの 10 秒周期呼吸の前後の部分である。10 秒周期呼吸開始後に基線の大幅な変動が見られるが、これは深い呼吸になることにより身体の変位が増え、ROI が捉えている領域全体の輝度の平均が変化するためである。

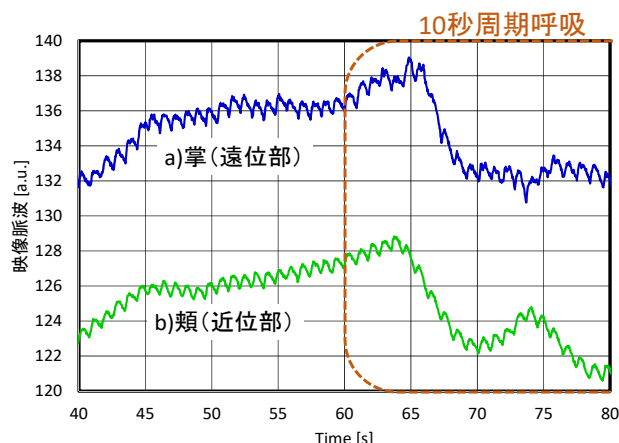


図 7 映像脈波の時系列

Figure 7 Video pulse waves.

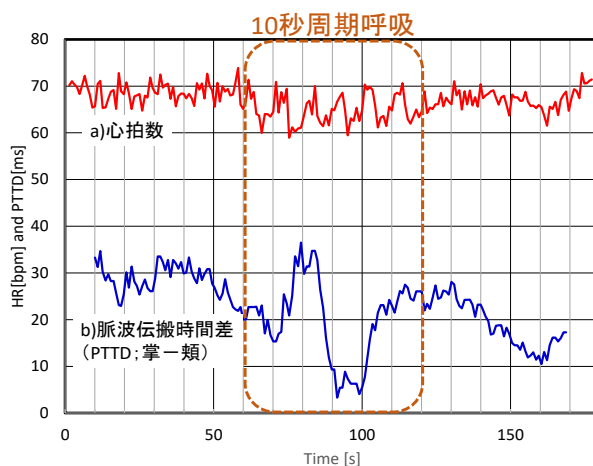


図 8 映像脈波から得られた瞬時心拍数 HRV と脈波伝搬時間差 PTTD

Figure 8 HRV and PTTD measured from video pulse waves.

図 8 は、図 7 で示した映像脈波から得られた瞬時心拍数 HRV と脈波伝搬時間差 PTTD である。ただし、PTTD については生信号のばらつきが大きいので、生信号に対して 10 秒間の窓に対する標準偏差 $\pm 25\%$ を除外したトリム平均処理を行った結果を表示している。10 秒周期呼吸区間において HRV が同じ周期で変動していることが確認できる。一方、PTTD はトリム平均のために呼吸周期に対する同期が確認できないが、10 秒周期区間中で基線が一旦増加した後減少する動きを見せた。

4. 考察

図5と図6を比較すると、光電脈波と比較して映像脈波は雑音成分が多いが、10秒周期の周期性は明確であるので、映像脈波による心拍数情報からも副交感神経情報を抽出できる可能性があることがわかる。

10秒周期の深い呼吸を続けると副交感神経系が賦活され、血圧が低下することが知られている[12]。図5のPTTの基線が10秒周期呼吸時に上昇（時間が延伸）しているのは血圧低下の影響を受けているためと考えられる。一方、図8のPTTDの基線も10秒周期呼吸時に大幅に変動しており、この変動も血圧変動による影響であると推測できる。上述したように、掌・顔間のPTTDは血圧変動に対して正の相関があると報告[8]されており、10秒周期呼吸中あるいはその後にPTTDが短縮したことは、深呼吸による血圧低下の作用である可能性がある。

以上のように、映像脈波を利用すれば、適当な呼吸統制をすることにより副交感神経活動を変化させることができ、その情報を脈波センサやゲーム機のコントローラなどを使わずに、遠隔・非接触的にコンピュータに伝えることができることが確かめられた。

われわれは、光電脈波計を装着したゲーム機用コントローラを使うことを前提とした、呼吸統制に基づくゲームの概念を既に特許化[13-15]しており、この概念の中のゲーム機用コントローラをビデオカメラで置き換えれば、HF成分以外のさまざまな自律神経情報（ μPA や ρ_{max} など）を使ったゲームを開発することができると思われる。

5. おわりに

ビデオカメラとコンピュータを使った鏡型ディスプレイ「魔法の鏡」によって、顔や掌の2次元的な映像脈波を抽出し、血行状態を動画として表示するとともに、自律神経指標を計算するシステムを開発した。呼吸周期を随意的に変化させると、自律神経系を経由して映像脈波の振幅や周期が変化する。本報告では、このシステムを使った自律神経情報を遠隔・非接触的にコンピュータに伝えて行うゲームの可能性を、呼吸統制実験の結果を基に議論した。その結果、接触式センサを使わない呼吸統制に基づくゲームを開発できる可能性が明らかとなった。

ゲーム的な要素を導入することで、「魔法の鏡」の継続的な利用が促進され、自覚できる体調の変化と「魔法の鏡」から得られる自律神経指標の関係を利用者自身で学習して行くことができ、その日の体調を予測するための手掛かりを把握できるようになると予想される。

謝辞 本研究は、文部科学省・（独）科学技術振興機構平成25年度革新的イノベーション創出プログラム「さりげないセンシングと日常人間ドックで実現する理想自己と家族の絆が導くモチベーション向上社会創生拠点」の補助を受けたものである。謹んで謝意を表する。

参考文献

- [1] Wearable Technology, <http://www.livescience.com/topics/wearable-technology/>
- [2] M. Poh, D. J. McDuff, and R. W. Picard: Advancements in noncontact, multiparameter physiological measurements using a webcam, *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol. 58, no.1, pp. 7-11(2011)
- [3] 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)
- [4] M. Abe, M. Yoshizawa, K. Obara, N. Sugita, et al.: Evaluation of Baroreflex Function Using Green Light Photoplethysmogram in Consideration of Resistance to Artifacts. *Advanced Biomedical Engineering*, Vol. 4, pp.1-6(2015)
- [5] Y. Kano, M. Yoshizawa, N. Sugita, et al.: Discrimination ability and reproducibility of a new index reflecting autonomic nervous function based on pulsatile amplitude of photoplethysmography, *36th Annual Conference of IEEE Engineering in Medicine Biology Society 2014*, 2014:1794-800(2014)
- [6] 吉澤誠, 他: 自律神経機能測定装置, 特許 5408751, 登録日: 2013年11月15日
- [7] 高森哲弥, 吉澤誠, 他: 脈波伝搬速度の測定方法およびシステム並びに撮像装置, 特許 6072893, 登録日: 2017年1月13日
- [8] N. Sugita, K. Obara, M. Yoshizawa, et al.: Techniques for estimating blood pressure variation using video images, *37th Annual Conference of IEEE Engineering in Medicine Biology Society 2015*, pp. 4218-4221(2015)
- [9] Makoto Yoshizawa, Norihiro Sugita, et al.: Blood perfusion display based on video pulse wave, *38th Annual Conference of IEEE Engineering in Medicine Biology Society 2016*, pp.4763-4767(2016)
- [10] 大塚邦明, 渡辺晴雄: 自律神経機能検査, 第二版, ホルター心電図検査, 文光堂(1995)
- [11] Makoto Yoshizawa, Norihiro Sugita, et al.: Evaluation of Autonomic Nervous Function for Elderly People Using Electrocardiogram and Plethysmograph, *SICE Annual Conference 2012*, Akita, Japan(2012)
- [12] W. Elliott, Jr., Izzo, W. B. White, et al.: Graded Blood Pressure Reduction in Hypertensive Outpatients Associated with Use of a Device to Assist with Slow Breathing, *J. Clin. Hypertens*, Vol. 6, No. 10, pp.553-559(2004)
- [13] 古田律克, 阿部悟郎, 吉澤誠, 他: ゲームプログラム、ゲーム装置、ゲームシステム、およびゲーム処理方法, 特許 5656160, 登録日: 2014年12月5日
- [14] 古田律克, 阿部悟郎, 吉澤誠, 他: ゲームプログラム、ゲーム装置、制御方法、およびゲームシステム, 特許 5721067, 登録日: 2015年4月3日
- [15] 古田律克, 吉澤誠, 他: 情報処理装置、情報処理方法および情報処理システム, 特許 5804405, 登録日: 2015年9月11日