

音声および映像を介した心理的・生理的指標の バイオフィードバック

Biofeedback of a Psychological and Physiological Index Mediated by Sound and Image

杉田典大*, 吉澤 誠**, 田中 明*, 阿部健一*, 山家智之***, 仁田新一***

Norihiro Sugita*, Makoto Yoshizawa**, Akira Tanaka*,
Ken-ichi Abe*, Tomoyuki Yambe***, Shin-ichi Nitta***

*東北大学 大学院 工学研究科, **東北大学 情報シナジーセンター,
**東北大学 加齢医学研究所

* Graduate School of Engineering, Tohoku University, ** Information Synergy Center,
Tohoku University, *** Institute of Development, Aging and Cancer, Tohoku University

キーワード: バイオフィードバック (biofeedback), 生理的・精神的状態 (physiological and psychological state),
マイヤー波 (Mayer wave), 最大相互相関係数 (maximum cross-correlation coefficient),
画像生成 (image generation),

連絡先: 〒980-8579 仙台市 青葉区 荒巻 字青葉 05 東北大学 大学院工学研究科 電気・通信工学専攻 吉澤研究室
杉田典大, Tel.: (022)217-7074, Fax.: (022)263-9290, E-mail: sugita@abe.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

従来の人工現実感システムの目的は, 主として, 現実世界をできるだけ忠実に再現しようとしたり, 人間の身体の物理的状態に応じた仮想空間を作り出そうとするものであった. これに対して, 人間の生理的・心理的・精神的状態を仮想空間にフィードバックするような人工現実感システムは, これまでほとんどない. もしこれが実現すれば, 現実世界の再現を超える新しいタイプの人工現実感システムを構築できるばかりでなく, 人間の興味・興奮・恐怖心を最大とするゲームマシンの設計や, 感情を相互に伝えられる遠隔通信システムの開発などに広く応用できる可能性がある. 生理的・心

理的・精神的状態を仮想空間にフィードバックすることは, 一種のバイオフィードバックを実現することである. これを実現するためには, i) 生理的・心理的・精神的状態が非侵襲的な指標に基づいてリアルタイムに定量化できること, ii) この指標によってリアルタイムに変化する外的環境が作られること, iii) この環境変化によって人間の生理的・心理的・精神的状態が変化すること, が必要である.

そこで本研究では, 人間に映像刺激を与えたときの情動反応を評価するためにわれわれ^{1, 2)}が新たに提案した生理指標である ρ_{max} (0.1Hz近傍のMayer波帯域に限定した血圧変動から心拍数変動までの相互相関係数の最大値) を利用し, この指

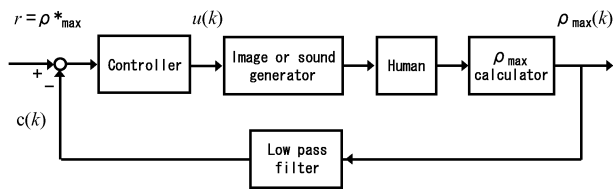


Fig. 1 Biofeedback system mediated by the maximum cross-correlation coefficient ρ_{max} .

標に応じて音声あるいは映像を変化させ、これを人間に提示することにより、上記のようなバイオフィードバックが成立するかどうかを検討した。すなわち、Fig.1に示すように、被験者の生理的・心理的精神的状态の変化 ρ_{max} の変化 音声あるいは映像の変化 被験者の生理的・心理的精神的状态の変化 ... というフィードバック・システムを作り、実際の ρ_{max} を適当な目標値 $r = \rho_{max}^*$ に近づけることができれば、このようなバイオフィードバックが可能であることを確かめることができると思われる。

また、心拍数をもとに音声进行操作するフィードバック・システムにおいて、被験者の作業効率に変化が生じた例³⁾も報告されていることから、 ρ_{max} を任意の目標値に近づけることができれば、視聴者を効率的に興奮させたり、逆に安静状態に導くことが可能な音声や映像を製作することができるかもしれない。

本研究では、まず、連続的に計測される血圧と心拍数から ρ_{max} をリアルタイムに計算することを、パソコン上で可能にした。さらに、この ρ_{max} をリアルタイムに反映する動揺画像や音声を被験者に提示するシステムを構築することによって、Fig.1のようなシステムを実現した。このシステムを用いて、被験者に、 ρ_{max} をある一定の目標値に収束させるように画像の動揺の大きさや音声の音量を増減させる実験を行い、実際にFig.1のようなフィードバックループが形成されるのかどうかを確かめた。

2. 方法

2.1 実験方法

被験者に対し、以下で述べる方法により、音声刺激を提示する実験と、映像刺激を提示する実験を行った。音声刺激として白色雑音を、映像刺激としてチェッカーボードが被験者の前後方向に周期的に移動する映像を用い、それぞれ、雑音の音量、移動の振幅を可変とした。実験中、トノメトリ式血圧計（日本コーリン製 JENTOW7700）を用いて血圧波形を計測し、心電図波形とともに1msの精度でパーソナルコンピュータに取り込んだ。この後、心電図波形からはR波の間隔から心拍数 ($HR[\text{min}^{-1}]$) を、血圧波形からは一拍での平均血圧 ($BP[\text{mmHg}]$) を計算した。このようにして得られた HR , BP を、線形補間を用いて0.5s毎のデータに再サンプリングし、後で述べる ρ_{max} の計算に用いた。

2.2 開ループ実験

まず、Fig.1中のControllerのパラメータを決定するために、 ρ_{max} に依存しない一定の刺激、すなわち、音声刺激では音量一定の白色雑音、映像刺激では振幅一定で移動するチェッカーボード画像を被験者に提示する開ループ実験を行った。1試行は、安静2分 刺激提示2分 安静2分 刺激提示2分 安静2分の計10分間行った

2.3 閉ループ実験

開ループ実験で得られたパラメータをもとに、PIコントローラを設計し、Fig.1で示される閉ループ実験を被験者5人に対して行った。1試行は、安静3分 フィードバック刺激提示5分 安静2分の計10分間とした。ここで、刺激提示の区間では、後で述べる方法により ρ_{max} によって、音量または移動振幅を操作した。

2.4 ρ_{max} のリアルタイム計算

k を離散時間として, $\Delta t = 0.5\text{s}$ 毎に BP と HR を再サンプリングした $BP(k)$ および $HR(k)$ に基づき, ある時刻 $t = k\Delta t$ [s] における ρ_{max} を, 以下のようにしてリアルタイムに求めた. まず, 時刻 t の前60秒間 (120点) のデータについて, 0.08Hz から 0.1Hz を通過帯域とする帯域通過フィルタを通し Mayer wave 成分のみを抽出した. このように処理されたデータに対し,

$$W(n) = \begin{cases} 1, & (\frac{N}{6} + 1 \leq n \leq \frac{5}{6}N) \\ 0.5(1 - \cos(\frac{6n\pi}{N})), & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

で定義される窓をかけた. ここで, N は窓のデータ数であり, 本実験では $N=120$ とした. この後, $BP(k)$, $-HR(k)$ (同相に近づけるために負号を付けた) 間の相互相関係数 (規格化相互相関関数) を $\rho_{xy}(l)$ とし, その最大値 ρ_{max} を (2) にしたがって求めた.

$$\rho_{max} = \max_{0 < l < 20} \phi_{xy}(l) \quad (2)$$

ここで, $\rho_{xy}(l)$ は, $BP(k)$ と $-HR(k)$ をそれぞれ $x(k)$, $y(k)$ としたときに,

$$\rho_{xy}(l) = \frac{\phi_{xy}(l)}{\sqrt{\phi_{xx}(0) \phi_{yy}(0)}} \quad (3)$$

で定義される. ここで, $\phi_{xy}(l)$ は $x(k)$ から $y(k)$ への相互相関関数であり, $\phi_{xx}(l)$, $\phi_{yy}(l)$ はそれぞれ $x(k)$, $y(k)$ の自己相関関数である. さらに, この ρ_{max} は 0.5s 毎に計算し, 時系列 $\rho_{max}(k)$ とみなす.

3. フィードバックコントローラ的设计

本研究の開ループ実験では, 操作量である白色雑音の音量および動揺画像の移動振幅を PI 制御アルゴリズムにより求めた. アルゴリズムで用いる測定値 $c(k)$ は, $\rho_{max}(k)$ から高周波のノイズを除去

するため,

$$c(k) = 0.2c(k-1) + 0.8\rho_{max}(k-1) \quad (4)$$

とした. すなわち, PI コントローラは $c(k)$ を目標値 ρ_{max}^* に近づけるように設計された. 開ループ実験からもとめられた時間遅れ L [s] と最大勾配 R から, 高橋 - チャンの公式⁴⁾

$$K_I = \frac{0.6}{G_0 L_0^2} \quad (5)$$

$$K_P = \frac{1.2}{G_0(L_0 + 1)} - \frac{1}{2}K_I \quad (6)$$

を用いて K_I , K_P を求めた. ここで, $G_0 = R\Delta t$, $L_0 = L/\Delta t$ である. 提示刺激の操作量 $u(k)$ は, 0 から最大音量もしくは最大振幅の間に収まるように, 以下のように定義される正規化を行った.

$$u_0(k+1) = u_0(k) + K_P\{c(k-1) - c(k)\} + K_I\{r - c(k)\} \quad (7)$$

$$u(k) = \begin{cases} 1, & (u_0(k) > b+5) \\ \frac{u_0(k)-b}{5}, & (b \leq u_0(k) \leq b+5) \\ 0, & (u_0(k) < b) \end{cases} \quad (8)$$

ここで, b は安静時間 (刺激を提示しない状態) 内の, $\rho_{max}^* - 0.05 < c(k) < \rho_{max}^* + 0.05$ を満たす時間 k における $u_0(k)$ の平均値である.

4. 結果

4.1 開ループ実験

Fig.2 と Fig.3 はそれぞれ, 音声刺激と映像刺激を用いて行った開ループ実験の結果から得られた ρ_{max} の時間変化である. 被験者に最大音量の白色雑音, もしくは最大振幅の同様映像を提示した $t=120\text{s}$ から 160s における ρ_{max} の変動は, 生体の圧受容器反射システムのステップ応答とみなせる. こ

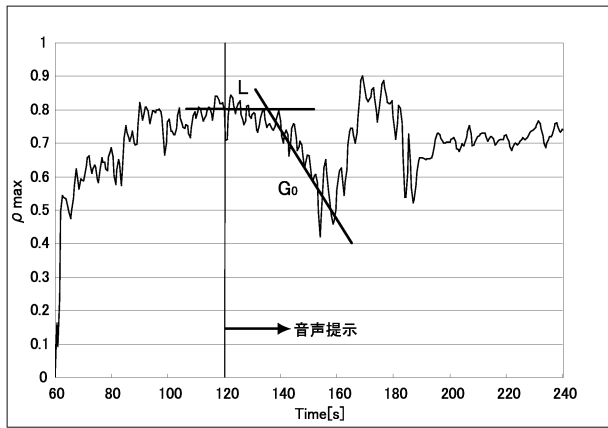


Fig. 2 Change in a subject's ρ_{max} with time in the experiment I in which the subject hearing the sound.

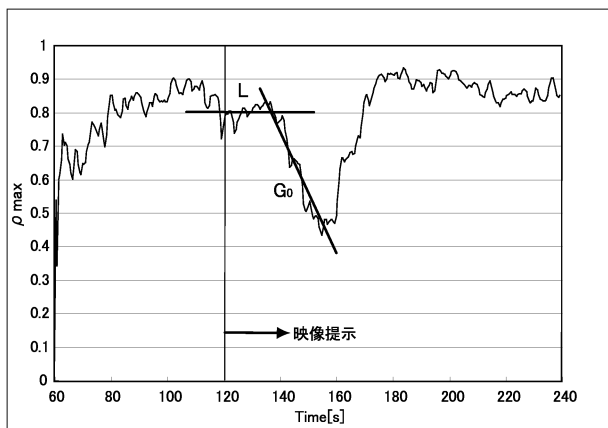


Fig. 3 Change in a subject's ρ_{max} with time in the experiment I in which the subject watching the image.

これらの変化より、音声実験では遅れ時間 $L=19.7s$ と最大勾配 $R=-0.0113$ 、映像実験では遅れ時間 $L=18.5s$ と最大勾配 $R=-0.0120$ が求められ、これらの値を(5)、(6)式に代入することにより、コントローラのパラメータを、それぞれ $K_I=-0.0684$ と $K_P=-5.22$ 、 $K_I=-0.146$ と $K_P=-5.06$ のように求めた。

4.2 閉ループ実験

Fig.4とFig.5はそれぞれ、音声刺激と映像刺激を用いて行った閉ループ実験の結果から得られた ρ_{max} の時間変化である。t=180sから480sの時間帯

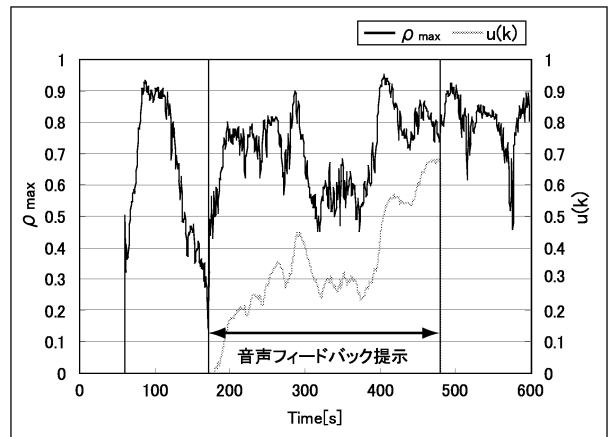


Fig. 4 Change in ρ_{max} and the manipulated variable $u(k)$ with time obtained from Experimental II in hearing the sound.

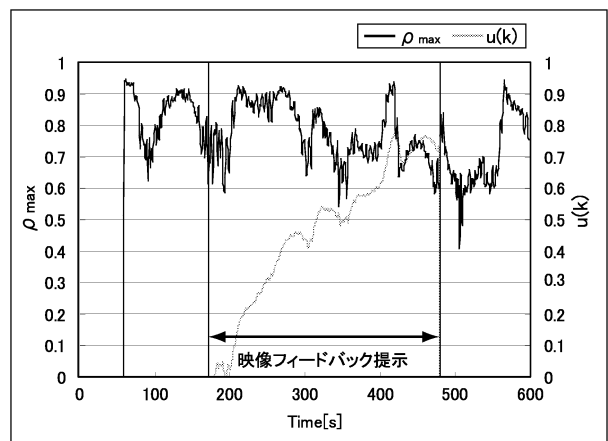


Fig. 5 Change in ρ_{max} and the manipulated variable $u(k)$ with time obtained from Experimental II in watching the image.

に、フィードバック制御された白色雑音もしくは動揺映像の提示を行った。目標値は $\rho_{max}^*=0.6$ に設定した。Fig.4の音声フィードバック実験では、t=300sから400sの時間に、操作量 $u(k)$ が上昇し、 ρ_{max} が目標値である0.6付近まで低下する結果が得られたが、t=400s以降では、 $u(k)$ の上昇にもかかわらず、 ρ_{max} が目標値0.6から離れて上昇する傾向がみられた。一方、Fig.5の映像フィードバック実験では、 ρ_{max} が目標値0.6近辺で安定する時間はほとんどなかった。しかし、提示開始直後から提示終了にかけて ρ_{max} が緩やかに低下する傾向がみられた。

他の被験者についても解析を行ったが、音声刺激、映像刺激共に、 ρ_{max} が連続的に0.6付近で安定する結果は得られなかった。

5. 考察

5.1 開ループ実験

Fig.2, Fig.3の結果から分かるように、音声や映像による負荷入力に対する ρ_{max} の応答は、約20sの比較的長い遅れ時間を持つことがわかる。遅れ時間20sは大きい値であり、システムを閉ループとした場合に安定性を損なう可能性がある。この遅れの要因としては、次のような可能性が考えられる。

- 1) ρ_{max} は、BPとHRの約10秒周期の揺らぎから求められているため
- 2) 本研究の場合、 ρ_{max} は過去60sのデータをもとに計算されるため
- 3) 音声、映像負荷による ρ_{max} の低下は、この負荷による影響がある程度蓄積されてから生じるため

また、負荷をかけはじめから約40s後には、 ρ_{max} が上昇する傾向がみられた。これは、生体が持っている回復能力によるものと考えられ、一定レベルの刺激を与え続けると ρ_{max} が自然回復してしまうことが分かる。このような非定常性は、生体指標を用いたバイオフィードバックにおけるコントローラ的设计に対して大きな障害となると思われる。

5.2 閉ループ実験

音声提示実験におけるFig.4の被験者は、比較的安定な結果が得られた例であり、他の被験者では、 ρ_{max} が目標値付近で安定した変動は示す結果は得られなかった。さらに、Fig.4の被験者の例でも、 ρ_{max} が目標値付近を変動した時間は100s程度であった。このことに関しては、開ループ実験の結果

でも述べた、生体の圧受容器反射システムの非定常性が影響していると考えられる。この結果から、今回用いたPI制御法をそのまま適用し、長時間にわたる安定的なバイオフィードバックを実現することは難しいと思われる。Fig.5の映像提示フィードバック実験では、提示中に ρ_{max} が目標値付近になることは、ほとんどなかった。しかし、負荷開始から終了後にかけて、 ρ_{max} が緩やかに低下をする傾向がみられた。これらのことから、音声や映像の提示によって起こる ρ_{max} の低下は、開ループ実験でみられるような短期的なもの、映像負荷の閉ループでみられるような長期的なものがあると考えられる。この反応の違いは、主に提示する刺激の違いによるものであり、白色雑音のようなストレスを誘発させる刺激は比較的速く、動揺画像のように、動揺による酔い等を誘発をさせる刺激は遅く現れる可能性がある。また、多くの被験者で、 ρ_{max} が目標値付近で安定しなかった原因として、目標値の設定が適切でなかったことが考えられる。すなわち、被験者によっては、 $\rho_{max}^*=0.6$ という目標値が低すぎた可能性がある。

6. まとめ

生体の生理的・精神的状態を反映した画像・音声をリアルタイムに生成するシステムを構築するために、本研究では、Mayer波成分のみの血圧-心拍数間の相互相関係数 ρ_{max} を介したバイオフィードバックシステムを構築した。このシステムを実現するために、パソコン上で ρ_{max} をリアルタイムに計算し、得られた ρ_{max} に依存して被験者に提示する音負荷の音量や映像負荷の動揺量を増減させることにより、コンピュータと人間の間にはフィードバックループを作り出すシステムを作成した。また、実際にこのシステムを用いた実験を行い、 ρ_{max} を介したバイオフィードバックがある程度実現できる可能性が示唆された。しかし、安定なフィード

バックシステムを構築するためには，個人差等を考慮した細かい調整が必要となることがわかった．

今後は，開ループ実験でみられた遅れ時間の解明と改善，生体の非正常性を考慮した制御法の確立，効果的に ρ_{max} を変化させることのできる刺激の検索等が課題として残されている．

参考文献

- 1) 杉田，吉澤，田中，阿部，山家，仁田： 血圧 - 心拍数間の相互相関係数を用いた映像刺激の影響評価，211/214，ヒューマンインタフェース2001論文集(2001)
- 2) 杉田，吉澤，田中，阿部，山家，仁田： 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，Human Interface，4-4 (2002) (掲載予定)
- 3) 牛田，横山，水野，高田： 瞬時心拍数で制御される音のバイオフィードバックの検討価，医用電子と生体工学，39-2，135/144 (2001)
- 4) 高橋安人(著)： デジタル制御，91/94 (1985)