

ホタルの引き込み現象を模擬したインタラクティブ イルミネーションシステム

西 裕子[†] 櫻沢 繁[‡] 美馬 義亮[‡] 山本 敏雄[‡]

インタラクティブイルミネーションシステム「ホタルモジュール」を製作した。これは「脈波モジュール」と「同期モジュール」という光の明滅モジュールで構成される。脈波モジュールは脈拍に合わせて明滅し、同期モジュールは、引き込み現象によってその明滅に同期する。同期モジュールに引き込み現象に代表される van der Pol 方程式を用いたところ、ユーザーにポジティブな印象を与えることがわかった。引き込み現象による同期化がより自然なインタラクションをもたらしたと考えられる。

Interactive Illumination System Simulating Entrainment Phenomenon of Fireflies

HIROKO NISHI[†] SHIGERU SAKURAZAWA[‡] YOSHIAKI MIMA TOSHIO YAMAMOTO

Interactive illumination system named as “Hotal module” was designed. This system consists of two blinking modules named as “Cardio pulse Module” and “Synchronous Module.” The Cardio pulse Module has the blinker light which is synchronized with rhythm of heartbeat. And also the Synchronous Module has the blinker light which is synchronized with the blinker light of Cardio pulse Module like a feature of entrainment phenomenon. To evaluate impression and physiological effects of the system, impression to Synchronous Module and pulse wave of subjects were recorded during their use of the system. As the result, when the Synchronous Module which behaves using van der Pol equation was synchronized with the other Synchronous Modules, tendency of positive impression to Synchronous Module has been seen. These results suggest that the Hotal module shows more natural interaction by applying synchronization such as the entrainment phenomenon to the system.

1. はじめに

互いに異なる近い固有周期を持つ非線形振動子が、固有周期からずれて安定した周期で同期する現象を「引き込み現象」という。これは自然界に見られる非線形現象の1つで、生物の協調・協同動作もその1つである。例えば、東南アジアの河辺では数千匹ものホタルが一斉に同時明滅発光を繰り返すことが知られている。身近なところでは、コンサートなどで拍手をする際、観客の手を叩くタイミングが次第に合っていくという現象がしばしば起こる。

これらの現象は体感する人もしくは観測者に一体感や心地良さをもたらすことがある。よって、引き込み現象によってリズムが合うことと身体のリラックスと

の間には、強い関連があると考えられる。

ノンバーバルなインタラクションである引き込み現象はコミュニケーションにおいても通用する共通語ともいえ、生物学的にみて本質的重要性を持っていると考えられている。母親が乳児を寝かしつける際、まず母親が呼吸間隔を大きくし寝る体勢に入ってから乳児に呼吸の引き込みを起こさせ寝かしつけていることがわかっている。また、対面して会話をする場合、話し手と聞き手の呼吸の引き込みが生じるのに対し、非対面では話し手と聞き手それぞれが自己固有のリズムで呼吸することがわかっている[1]。よって引き込み現象は自分以外のものや人との関係性の構築に重要な役割を担っていると考えられる。

他方、ある人の目に見えない生理状態を、目に見える、または認知できる形で本人に提示することをバイオフィードバックとよぶ。特に、安静時に心拍音をフィードバックすると、閉眼安静状態よりも興奮時や緊張時に優位になるとされる交感神経の活動が抑制される[2]。

[†] 公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科
Future University Hakodate, Graduate School of Systems
Information Science

[‡] 公立はこだて未来大学システム情報科学部
Future University Hakodate, School of Systems Information
Science

また、周期的明滅光が心拍に与える影響を調査した結果、交感神経の働きが抑制されたという報告がある[3]。しかし、ここで使われた明滅光の周期は 20Hz である。この周期は「光感受性発作」と呼ばれる脳の機能障害を起こす危険性のある 5~50Hz の範囲に含まれる。光感受性発作は周期視覚刺激による一種の脳内リズムの引き込み現象によるものである。この研究では強制的に脳内リズムを周期的明滅光の周期と引き込みを起こさせることで交感神経を抑制しており、リラクゼーション効果の有無については検証されていない。

以上を踏まえ、我々は、引き込み現象とバイオフィードバックに期待されるリラクゼーション効果を利用してイルミネーションシステム“ホタルモジュール”の開発を行ってきた[4]。我々はこれまでに、脈拍のリズムに合わせて光が明滅する脈波モジュールと、その明滅光と同期してホタルのように光が明滅する同期モジュールを製作した。

本稿では特に、そのシステムの中の同期モジュール同士が、非線形振動子の結合によって相互引き込みを起こす場合、同期機構を持たない場合に比べて、与える印象の自然さやリラクゼーション効果の観点から、引き込み現象の有用性を検証する。

2. システムの概要

ホタルモジュールは、生体信号のバイオフィードバックと引き込み現象を利用したリラクゼーションシステムである。我々は、ホタルの集団同期発光の美しさと、思わず引き込まれるような没入感をもとに、システムのアイデアを発想するに至った。よって、形状やその振る舞いはホタルをイメージさせるものとした。

ホタルモジュールは、脈拍のリズムに合わせて LED の光が明滅する「脈波モジュール」と、受光素子から周囲の光を受光し同期発光する「同期モジュール」によって構成されている。これらを図 1 に示すような 10 cm×7 cm の丸みを帯びた形状の容器に実装した。ホタルのような柔らかい光を実現するため、LED の光を半透明なシリコンボールで拡散させた[4]。

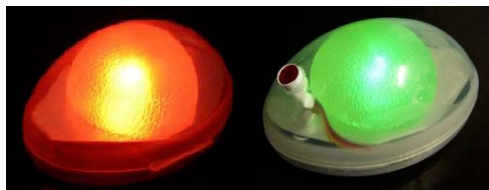


図 1 ホタルモジュール

Figure 1 Hotal module

また、脈波モジュールは、ユーザーが首から下げた時に胸の付近に位置するよう、ストラップがつけられている。同期モジュールは暗い空間に 20 個配置され、図 2 のようにホタルが存在するような空間を演出するような構成とした。

空間に配置された同期モジュールは、初めそれぞれの固有周期や位相で明滅する。しかし周囲の光と自分の光の相互作用により、協調するように徐々に明滅パターンが変化し、最終的には空間全体が同期して光る。

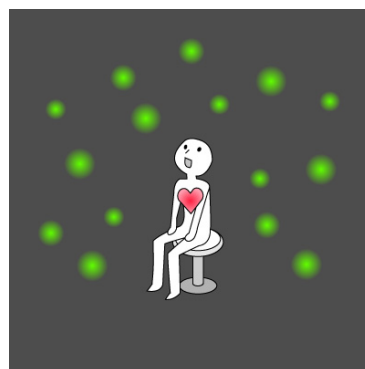


図 2 ホタルモジュールが配置された空間

Figure 2 The space in which the Hotal module arranged

3. van der Pol方程式による明滅光

同期モジュールの同期機構には、非線形振動子の運動モデルである van der Pol 方程式を用いている。図 4 のようにバネで結合された二つの振り子のモデルにおいて、 θ_1 を光の強さに対応付けることによってコントロールを行っている。

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta_1}{dt^2} &= -\frac{g}{l}\sin\theta_1 - \varepsilon\frac{d\theta_1}{dt}(\theta_1^2 - \theta_0^2) - k(\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{d^2\theta_2}{dt^2} &= -\frac{g}{l}\sin\theta_2 - \varepsilon\frac{d\theta_2}{dt}(\theta_2^2 - \theta_0^2) - k(\theta_2 - \theta_1) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 l は振り子の長さ、 θ_0 は強制力と復元力の入れ替わる角度、 θ_1 、 θ_2 は振り子のそれぞれの角度、 k は結合強度、 ε は強制力と復元力の強さ、 g は重力加速度である。

このような振動子を搭載した 20 個のモジュールを相互作用させた時、各々のモジュールの位相を単位ベクトルで表し、それらの平均の絶対値によってコヒーレンスを評価した。そのコヒーレンスが時間と共に遷移してゆく様子を図 3 に示す。これによって 20 個の

同期モジュールの明滅が同期に至る様子がわかる。すなわち、縦軸は同期モジュールの輝度のばらつき具合を示し、この値が1のときは完全に同期している状態である。最初はそれぞれの明滅にずれが生じるため、ばらつきが大きく値は低いが、時間が経つにつれて1に近づき、同期に至る様子が観察された。

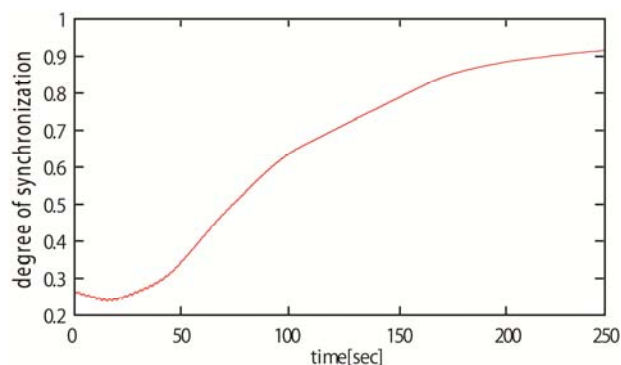


図 3 同期モジュールが同期に至る過程

Figure 3 Synchronization process of Synchronous Module

また、同期モジュールを3対同期させたときの光の輝度を周波数解析した結果(図4)、癒し効果のある周期性変動に共通した特徴として知られる $1/f$ ゆらぎが確認された。

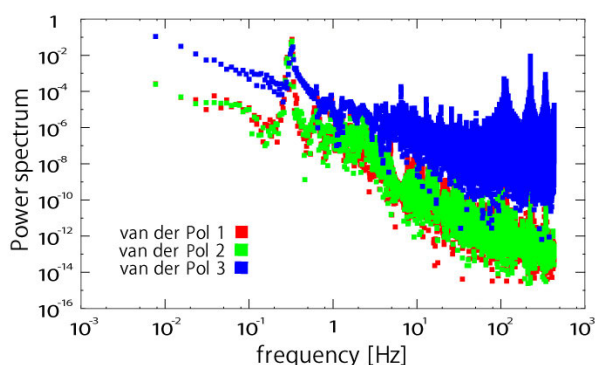


図 4 同期モジュールの $1/f$ ゆらぎ

Figure 4 $1/f$ fluctuation of Synchronous Module

また、この同期モジュールは脈波モジュールを対向させたときにも、同様に徐々に明滅が同期に至る様子が確認された。同期モジュール間で行われるインタラクションだけでなく、脈波モジュールを介して、人と同期モジュール間で行われるインタラクションが成立する。本研究では、このように複数の要素間で行われるインタラクションが、ユーザーへリラクゼーション効果を与えるものと考えている。

4. 同期モジュールの評価実験

van der Pol 方程式を組み込んだ同期モジュールの明滅光が引き込みを起こす際に、システムが与える印象やリラクゼーション効果について、同期機構を持たない明滅光と比較した。

被験者が明滅を見て感じた印象を定量的に評価するため、イメージ調査などに用いられる SD 法を用いて印象評価を行った。質問紙には7段階の評定尺度(形容詞対)12対を記した。形容詞対は自然、色彩、環境を対象とした研究で頻繁に用いられているものを設定した[5]。これら12対の形容詞対は順序による効果を避けるため、順序はランダムとした。因子分析により各試行の印象の違いを分析した。また、質問紙には明滅パターンの印象について自由表記の欄を設けた。

そして、被験者の生理状態についても評価を行うため脈波の計測を行った。イヤーセンサを被験者の右手小指にはさみ、そこから得られた信号を増幅器によって増幅した。計測された信号は A/D 変換器(AD Instruments, PowerLab/4SP)で A/D 変換されてパソコン(IBM, X40)のハードディスクに記録された。脈波の信号から、 $r-r$ 間隔を算出し、その時系列データを再サンプリングしたものを周波数解析し、パワー密度を求めた。そして交感神経の活動指標として知られる周波数成分 $LF/(HF+LF)$ 成分を算出し、各試行間で比較を行った。LF 成分は $0.05 \sim 0.2$ Hz の区間とし、HF 成分は $0.2 \sim 0.35$ Hz の区間として算出した。この値が高ければ交感神経の活動が活性状態にあることが示される。

実験を以下の3パターンの試行について行った。それぞれ異なる同期モジュールの明滅パターンについて、リラクゼーション効果を比較した。

試行 1. 正弦波の明滅光が一定周期で光る(非同期)

試行 2. 周期がわずかに異なる2つの一定周期の正弦波の明滅光がたまに同期する($T=2.0, 1.9$)

試行 3. van der Pol 方程式を搭載した同期モジュールの明滅光が引き込み同相同期する

いずれも同期モジュールは18個用いた。被験者は、心身ともに健康な20歳~22歳の男女12名とした。実験は暗室内で行い、被験者には楽な姿勢でかつ身体を動かさずに LED の明滅光を見つめるよう教示した。光を見つめる際には、特定の一部分に終始注目するなど、偏った見方をしないように教示した。また、試行

を始める前にどのような明滅パターンが見られるのかをあらかじめ説明した。その際、印象を左右する言葉を用いずに、明滅光を同期の観点から説明した。実験時間は1試行につき約4分間とした。また、被験者の安静状態を比較するために、同期モジュールのない明所と暗所の2状態についても脈波の計測を行った。

同期モジュールの明滅パターンを解析するためにビデオカメラで撮影した。そして、画像解析を用いて光の輝度の時系列データに変換した。ビデオカメラは、被験者から見えないよう被験者の背後に取り付けて撮影を行った。

5. 印象評価の結果

形容詞対12項目について因子分析（主因子法，バリマックス回転）を行い，因子負荷が0.40以上を示す項目を選出したところ，12項目すべてが選出された。初期の固有値の大きさと減衰状況（4.0，2.3，0.5）から判断し，2つの因子が採択された。第一因子は孤独因子，第二因子は威圧的因子と解釈された。因子負荷量の結果を表1に，形容詞と因子の意味づけについて解釈の結果を表2に示す。

表1 因子負荷量

変数名	因子 No 1	因子 No 2
変化に富んだ 単調な	0.86	-0.22
生物的な 機械的な	0.79	0.09
面白い つまらない	0.77	0.025
開放的な 閉鎖的な	0.58	0.20
楽しい 悲しい	0.58	0.17
陽気な 陰気な	0.51	0.27
積極的な 消極的な	0.49	-0.02
心地の良い 心地の悪い	0.18	0.89
おだやかな はげしい	0.08	0.8
柔らかい 硬い	0.23	0.71
美しい 汚い	-0.00	0.70
くつろいだ 緊張した	0.30	0.51

表2 形容詞と因子の意味付け

変数名	寄与率 (%)	因子解釈
単調な，機械的な，つまらない，閉鎖的な，悲しい，陰気な，消極的な	27.72	孤独
心地の悪い，はげしい，硬い，きたない，緊張した	24.85	威圧

また，得られた因子得点について試行ごとに平均値を算出した。表3にその結果を示す。表からは，第一因子，第二因子ともに一定周期の Sin 波と van der Pol 方程式の試行間で差が見られた。第一因子では一定周期の Sin 波の因子得点の平均値は 0.98 とプラスの値を取っている。他方，速さの違う一定周期の Sin 波が2種類含まれる試行と van der Pol 方程式を用いた試行では，-0.24，-0.75 と，ともにマイナスの値を示す結果となった。また，第二因子では一定周期の Sin 波と，速さの違う一定周期の Sin 波が2種類含まれる試行においてともに正の値が得られた。一方，van der Pol 方程式を用いた試行ではマイナスの値を取っている。

どの試行においても，第一因子が第二因子よりも因子得点が高い値になった。また，第一因子と第二因子はともに，一定周期の Sin 波と van der Pol 方程式を用いたときとで正負の差が現れた。

表3 因子得点の平均値

試行	因子 1 (孤独)	因子 2 (威圧)
一定周期の Sin 波	0.98	0.06
一定周期の Sin 波 (速さの違う 2 種類)	-0.24	0.03
van der Pol 方程式	-0.75	-0.1

各試行について被験者が自分の言葉で回答した内容を抜粋する。Sin 波については，「動きがゆったりとしていて単調である。」，「信号機のように機械的。少し退屈な感じがした。」，「せかされるような印象。」などのコメントがあった。

また，速さの違う一定周期の Sin 波が2種類含まれる試行では，「明滅が合ったり，変化したりして飽きずに見ることができた。繰り返していた。」，「車のウィンカー，クリスマスツリーのようだった。」，「終始，一つのパターンが何度も繰り返されていた。リズム感があった。ずれから同期にいたる様が音楽みたい。」などのコメントがあった。van der Pol 方程式を用いた同期モジュールの試行については，「同期にいたるまでの過程がとても面白く，見ていて飽きなかった。コ

コミュニケーション.」「リズムが変化していた印象. 面白かった.」「最初の方は結構単調ではかない感じの印象を受けた. でも途中からは楽しそうで動きのある印象を受けた.」などのコメントがあった.

6. 交感神経の活動の評価

交感神経の活動指標についても評価を行った. 各試行における交感神経の活動指標 $LF/(HF+LF)$ の値の平均値と標準偏差を図 5 に示す. 横軸は試行の種類

(dark : 暗所, single sinumodal oscillator : sin 波, twin sinumodal oscillator : 速さの違う一定周期の sin 波が 2 種類含まれる試行, van der Pol : van der Pol 方程式) となり, 縦軸は周波数成分のパワー密度となっている. 赤丸部分が平均値, 上下の誤差棒が標準偏差である.

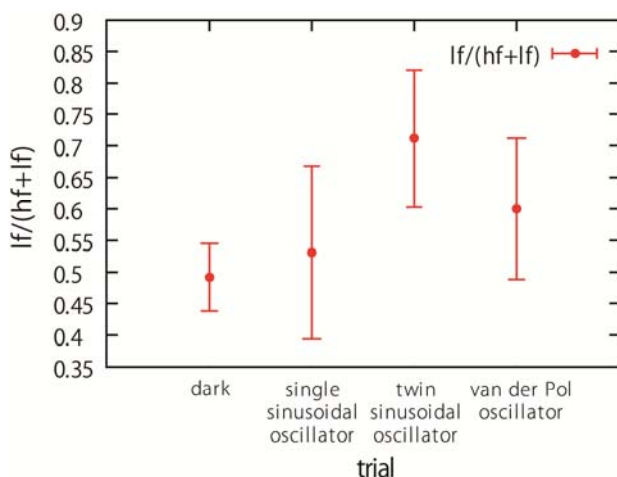


図 5 各試行における $LF/(HF+LF)$ の平均値と標準偏差

Figure 5 average and standard deviation of $LF/(HF+LF)$

一般的に, 室内光がある状態の方が室内光がない状態よりも交感神経が優位に働くとされている. しかし 12 人中 3 人は室内光がない状態に著しく交感神経が優位に働いていたため除外した. $LF/(HF+LF)$ の値を異なる試行間で比較すると, 速さの違う一定周期の sin 波が 2 種類含まれる試行の平均値が最も値が高い結果となった(0.71). 次に van der Pol 方程式を用いた試行が高く(0.60), 一定周期の sin 波が最も低い値となった. また, 3 つの試行間で t 検定を行ったところ, 速さの違う一定周期の sin 波が 2 種類含まれる試行と, van der Pol 方程式を用いた試行間で 1%水準において有意差が見られた[$P(T \leq t)$ 両側検定 : 0.001]. また, 一定周期の sin 波を用いた試行と, 速さの違う一定周

期の sin 波が 2 種類含まれる試行との間にも 1%水準で有意差が見られた[$P(T \leq t)$ 両側検定 : 0.0003]. 一方, 一定周期の sin 波と van der Pol 方程式を用いた試行との間では有意差が見られなかった. t 検定の結果を表 4, 表 5 に示す.

表4 t 検定の結果(1)

	一定周期(2種類)Sin 波	van der Pol
平均	0.71	0.60
分散	0.01	0.01
t	5.04	
$P(T \leq t)$ 両側	0.001	
t 境界値両側	3.35	

表5 t 検定の結果(2)

	一定周期の sin 波	一定周期(2種類)Sin 波
平均	0.53	0.71
分散	0.01	0.01
t	-5.98	
$P(T \leq t)$ 両側	0.0001	
t 境界値両側	2.89	

7. 考察

印象評価の結果では, 第一因子に孤独因子, そして第二因子に威圧因子とあることから, 孤独で威圧的, といったネガティブな印象が特徴的に抽出されたと考えられる. 特に一定周期の sin 波は, 第一因子, 第二因子ともに正の値を示し, ほかの試行と比較しても高い値となったことから, 3 つの試行のうち, 最もネガティブな印象を与えたと考えられる. コメントには「単調」「機械的」と記入され, $LF/(HF+LF)$ の結果では 3 試行中最も平均値が低い結果となっていた. これらのことから, sin 波は周期が変わることがなく, 同期モジュール間の相互作用もないため, 他の二つの試行と比較して周期やモジュール同士の明滅のタイミングに変化が少ないことがネガティブな印象を与えたのではないかと考えられる.

速さの違う一定周期の sin 波は, 因子分析では第一因子と第二因子の因子得点がどちらも低く, ほかの試行と比較しても最も特徴的ではないため, 孤独, 威圧といった印象とは違った印象であると考えられる. また, コメントには「クリスマスツリーのようだった」

「リズム感があった」と記入されていたため、ネガティブな印象ではないと考えられる。LF/(HF+LF)の結果は3試行中最も値が高いことから、もっとも興奮する明滅パターンであったと考えられる。しかし、ストレスとは違う印象がある明滅パターンであると考えられる。

一方、van der Pol 方程式を用いた試行では、因子得点の平均値が第一因子、第二因子ともに負の値を示していることから、ネガティブな印象がほかの3つの試行と比較して少ないと考えられる。コメントには、「面白かった」「楽しかった」「生き物のようだった」と記入されたことから、ポジティブな印象であると考えられる。また、LF/(HF+LF)の値は3つの試行の間において平均的な値であった。

LF/(HF+LF)の値において、速さの違う一定周期のsin波は、一定周期のsin波と、van der Pol 方程式を用いた試行間で有意差が見られた。このことから、明滅光の同期と非同期の状態が最も多く見られる試行が最も交感神経の活動を優位に働かせたことが分かった。

また、一定周期のsin波とvan der Pol 方程式を用いた試行の間には有意差が見られなかった。このことは、van der Pol 方程式を用いた同期モジュールは、最初ばらばらに明滅していても次第に同期していくためである。モジュール間での明滅に差が現れなくなり、sin波のような様な明滅パターンに近づいたため、交感神経の活動が適度に働いたと考えられる。

因子分析については、被験者数が少ないため信頼性は決して高くない。しかし、交感神経活動の評価に有意差が出た点や、被験者のコメントと因子分析の解釈を照らし合わせた結果、解釈に大きな違いが見られなかったことから、ある程度妥当性のある結果と考えられる。

以上のことから、van der Pol 方程式を用いた同期モジュールは、一定周期のsin波や速さの違う一定周期のsin波と比較して、ポジティブな印象を与え、適度に交感神経を活性化させることがわかった。よって、リラクゼーションシステムとしての効果を有する可能性があるとし唆される。

8. 参考文献

[1] 渡辺富夫, 大久保雅史, コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 5, pp. 1225-1231 (1998)

[2] Vaschillo E, Vaschillo B, Lehrer P, Heartbeat Sy 5 nchronizes with Respiratory Rhythm Only under Specific Circumstances, CHEST, Vol. 126, pp. 1385-1386 (2004)

[3] 青木孝志, 足達義則, 北出利勝, 鈴木昭二, 周期的明滅光が心拍変動および良導絡皮膚電気反応に与える影響, International Society of Life Information Science (ISLTS), Vol. 26, No. 1, pp. 94-98 (2008)

[4] 西裕子, 櫻沢繁, 美馬義亮, 山本敏雄, 引き込み現象を用いたリラクゼーションシステムの開発, HIS2010 予稿集, pp. 3221-3224 (2010)

[5] 井上正明, 小林利宣, 日本におけるSD法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観, 教育心理学研究, 第33巻, 第3号, pp69-76 (1985)