

LK-014

モニタ監視作業における判断・操作ミス測定のためのシステム開発とその応用  
Development and application of a system for measuring the error of judgment and operation in monitoring task

今西 明†  
Akira Imanishi

雄山 真弓‡  
Mayumi Oyama

## 1. 序

近年、医療事故や航空機事故、原発事故をはじめとする大規模な事故が多発しており、その原因の大半をヒューマンエラー(human error)が占めると考えられている。そこで我々はヒューマンエラーが生じる際の人間の情報処理過程を定量的に計測し、かつその際の指尖容積脈波(finger plethysmogram)を測定し、作業中の人間の精神・心理状態を把握するための心理学実験システムの開発を行った。

## 2. 実験システム

## (1) 概要

本実験システムは、医療場面における患者の容態を監視者がモニタ(ディスプレイ)で監視し、適切な処置を行う作業を想定したものであり、監視者の作業遂行量と監視作業中の生体情報(指尖容積脈波)を組み合わせて測定するシステムの構築を行った。モニタには、カオス理論(chaos theory)を基にして、“正常”から“軽度”、“中度”、“重度”、“心停止(絶命)”の5段階(以下、それぞれの状態の波形を正常波形、軽度波形、中度波形、重度波形、心停止波形とし、軽度波形以降を異常波形と総称する)の心電波形を複数(1つから9つまでを選択可能)表示する。

監視者は複数の患者の容態を同時に監視し、容態が悪化した患者に対し、キーボードによって英数字列を入力することによって処置を行う。処置が適切であれば、患者の容態は正常な状態へ回復し、不適切であれば、容態は悪化する。もし患者が心停止した場合、監視者は任意で新しい患者を入れ替えることが可能である。なお患者はそれぞれが独立しており、異なる病気の心電波形を有するように作成した。

監視者の生体情報の変化と判断・操作ミスの関係を調べ、その結果を報告する。

## (2) 特徴

本実験システムにおける特徴は患者の容態変化のタイミングにカオス理論を導入した点である。ランダムネス(randomness)とは異なり、カオス理論を基にしたタイミングで患者の容態を変化させることにより、あたかもそこに人間が存在しているかのように再現することが可能である。さらに作業中の監視者の指尖容積脈波を測定し、カオス解析(chaos analysis)を行うことによって、その者の精神・心理状態を把握することを目的とした実験システムである。

本実験システムは情報を与える側(患者)とそれを受ける側(監視者)にカオス理論を用いたことが過去に例を見ない実験システムである。

† 関西学院大学大学院文学研究科

‡ 関西学院大学文学部総合心理科学科

## (3) カオス

本実験システムには、様々な部分でカオスを取り入れている。ここではカオスについて述べる。

カオスとは、“ある系が決定論的法則に従って変化しているにも関わらず、複雑で不規則、不安定なふるまいをし、遠い将来における状態が予測不能になる現象”のことである<sup>(1)</sup>。ここで“決定論的法則”とは、あるシステムの動き方の規則が完全に決まっており、その動く過程においてサイコロ振りやコイン投げのような確率的不確実性に入り込む余地が全くなく、ある時点の状態(初期値)が決まれば、その後の状態が原理的に全て決定されることをいう<sup>(2)</sup>。

近年、カオス理論は様々な分野で注目され始め、さらに応用もされている。その応用方法として、大きく分けて以下の2点が挙げられる。1点目は“自然界の変動からカオス性を抽出し、それを分析することによって状態の把握や予測に利用する方法”である。この方法によって、それまでランダム現象であると考えられていたものが、実はカオスのふるまいをすることが発見され、それらの状態の把握や予測が可能となった。気象分野であれば天気予報<sup>(3)</sup>、経済分野であれば株価予想<sup>(4)</sup>、などが挙げられる。他にも地震規模と頻度、文における単語の種類と出現頻度、都市の人口とそれに対応する都市数の分布、絶滅種の数など、カオスを有するものは我々の身のまわりに種々存在することが判明している<sup>(5)</sup>。そしてその最たるものが人間(生体)への応用である。Tsuda, Tahara, & Iwanaga<sup>(6)</sup>がカオス理論を用いた生体、特に血流の分析によって、心臓疾患や脳機能疾患を発見することが可能であると主張して以来、様々な生体信号のカオス解析がなされ、さらにその信号にカオス性が存在することが明らかになってきた。また後に田原<sup>(5)</sup>は“健康な生体はカオスに満ちている。カオスは生命の源であると共に、それを支える装置であり、その過程であり、結果である”と人間そのものがカオスであることを主張している。

カオス理論の応用方法の2点目は“簡単なルールからカオスを作り出し、その不規則な変動を制御信号として利用する方法”である。実際に石油ファンヒーターを用いて実験を行い、カオス性を組み込んだ製品とそうでないものとの快適性を比較した研究もある<sup>(7)</sup>。その結果、カオス性を組み込んだ製品の方がより快適であるという報告が得られた。これは田原<sup>(5)</sup>の“人間はカオスである”と解釈される主張より、人間や機械のそれぞれが有している“ゆらぎ”が共鳴した結果、快適性が増加したものであると考えられる。

以上のように、カオス理論は様々な方法で応用されている。本実験システムは上記2点の応用方法を用いており、前者の応用方法は患者の容態変化のタイミングに用い、後者の応用方法は指尖容積脈波のカオス解析に用いている。

(4) メイン画面

Figure1 は本実験システムにおける、メイン画面である。監視する患者数は任意で1名から9名までを選択することが可能であり、各ウィンドウ内にそれぞれの患者の心電波形を表示する。上段左の患者を“心電図第1”とし、左から右へ、さらに上段から下段へ昇順で心電図番号を割り当てた。

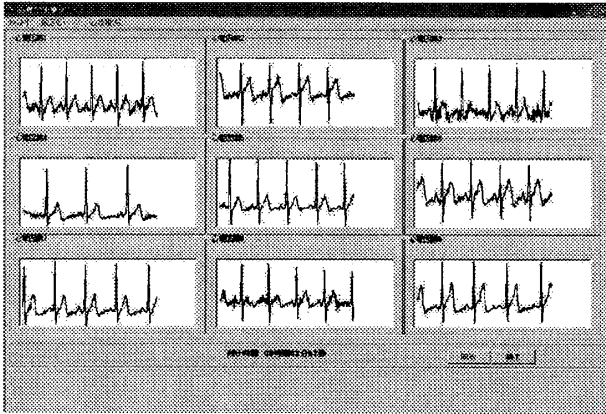


Figure1. 本実験システムにおけるメイン画面

(5) 心電波形

患者の容態(心電波形)は“正常”, “軽度”, “中度”, “重度”, “心停止(絶命)”の5段階に変化する。9種類の正常波形を用意し、さらに異常波形では心室細動や三段脈など、9種類の病気を用意した。Figure2 は正常波形および心室細動を有する患者の心電波形を示している。

心電波形は左から右へ移行し、右端に達すると再び左端から表示される。各患者の正常波形は同一の心電波形を表示しないようにランダムに選択し、表示する。そして正常波形と異常波形の組み合わせも同一の異常波形が表示されないように、全て異なる組み合わせを行い、ランダムに決定する。異常波形は各病気内での変化のみであり、病気間で変化することはない。つまり心室細動を有する患者は常に心室細動の症状(心電波形)しか現れず、三段脈等の別の病気の症状が現れることはない。

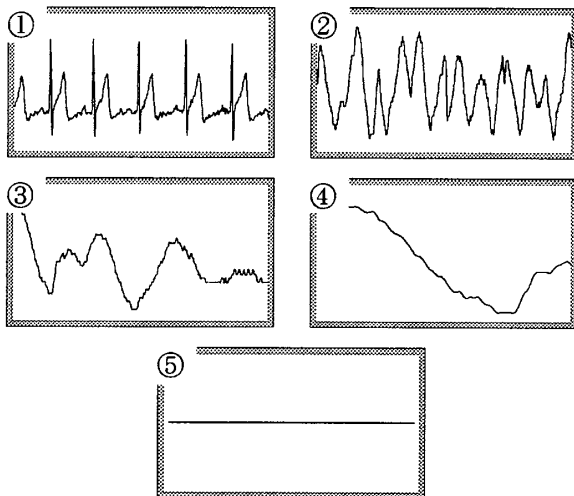


Figure2. 心電波形  
(①正常・②軽度・③中度・④重度・⑤心停止)

(6) パラメータ

本実験システムでは、様々なパラメータの設定が可能である。監視する患者数を選択することや、それらを表示する場所や測定時間の設定が可能である。

また心電波形を変化させるタイミングも患者別に設定が可能である。つまり正常波形から軽度波形へ容態が悪化するまでの時間、異常波形から更に症状の重い異常波形(軽度波形から中度波形など)へ容態が悪化するまでの時間設定が可能である。設定された範囲内でカオス理論に基づいて患者の容態(心電波形)は変化する。

(7) 処置

監視者は容態が悪化した患者に対し、キーボードによって処置を行う。キーボードによる処置とは、数桁の英数字列(以下、処置内容とする)を入力することである。処置内容は任意で最低1桁から最大20桁までの英数字を設定することが可能である。

(8) 測定

測定の開始はメイン画面右下にある“開始”をクリックする。最初に、モニタ中央にカウントダウン画面が現れ、設定した数の患者の心電波形が表示される。

監視者は容態が悪化している(異常波形が表示されている)患者に対して処置を行う。Figure3 は処置方法を図式化したものである。また Figure4 は入力エリアが現れ、“256”の処置内容を入力した際のメイン画面の例である。

患者の容態が悪化した状態(異常波形)から回復する場合は、容態の段階(軽・中・重)に関わらず、一気に正常な状態(正常波形)へ変化するが、悪化する場合は、容態の段階に関わらず、一段階ずつ変化する。心停止した場合も同様に、キーボードによる英数字の入力を行うが、処置内容は一貫して心電図番号を用いて行う。

適切な処置を行った場合はスピーカーよりベルが1回、不適切な場合は3回ベルを鳴らす。適切な処置を行った場合のベルと不適切な処置を行った場合のベルは全く同質

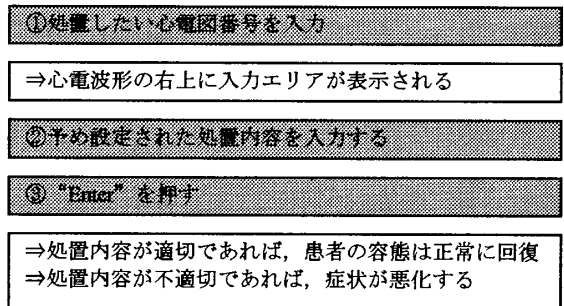


Figure3. 処置方法とその際の反応

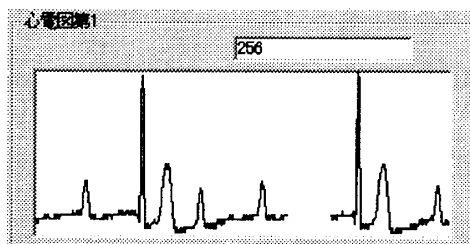


Figure4. 処置内容を入力した際のメイン画面の例

のものであるが、監視者はベルが鳴らされる回数で十分な弁別が可能である。

また患者が正常な状態である(正常波形が表示されている)にも関わらず、監視者が処置を行おうとした場合、入力エリアは表示されず、心電波形は軽度波形に悪化する。その際、スピーカーからベルは鳴らされない。

(9) 出力ファイル

本実験システムでは、測定で得られたデータを自動的に CSV ファイル形式に変換し、所定の場所に保存するように作成した。Table1 は出力した CSV ファイルの例である。また Table1 は“経過時間”に記載された行のみを抽出したものである。

生成された CSV ファイルには心電図第 1 から心電図第 9 までのデータを出力する。このファイルは 1 行に 5msec 毎のデータを記載する。CSV ファイル形式の限界(最大 65536 行)のため、1 つのファイルにつき、5min 間(60000 行)のデータまでを記録する。5min 間以上の測定を行う場合、5min 間単位でファイルを分割して記録する。

Table1 における各表示の詳細を説明する。1 行目は各患者における項目名を記載したものである。項目名の語尾に記載されている数字は心電図番号を示している。

“経過時間”はいずれかの患者の心電波形に変化が現れた、または監視者がいずれかの患者に対し、何らかの処置を行った際の情報が 100msec 単位で記載されたものである。何も変化が生じない、または何も処置を行わなかった場合における“経過時間”は空白である。

“心電データ”はウィンドウに表示された各患者の心電波形の基となったデータを記載したものである。

“種別”に記載されている数字は“経過時間”に記載された時間における心電波形の種類を示しており、用意した 9 種類の波形のいずれかが選択される。

“レベル”に記載された数字は心電波形の症状の段階を表したものである。“0”は正常波形、“1”は軽度波形、“2”は中度波形、“3”は重度波形、Table1 には示されていないが、“9999”は心停止波形を示す。

“処置”は各患者に対して入力した数字を示している。

Table1  
CSV データファイルの例

経過時間	心電データ1	種別1	レベル1	処置1	イベント1	.....
01:29.1	0.08	9	1			.....
01:38.2	8.00E-02	9	1		11	.....
01:39.8	4.37E-02	9	1		12	.....
01:40.1	0.04	9	1		12	.....
01:41.0	0.1541248	9	2	16	13	.....
01:46.4	7.72E-02	9	2		11	.....
01:49.9	0.1232341	9	2		12	.....
01:50.1	0.12382	9	2		12	.....
01:50.7	0.1589538	9	2		12	.....
01:51.3	0.2337976	9	2		12	.....
01:51.9	8.68E-02	9	3	2391	13	.....
01:58.3	-0.2010394	9	3		11	.....
01:59.4	0.1519183	9	3		12	.....
01:59.9	0.1598371	9	3		12	.....
02:00.4	0.1718353	9	3		12	.....
02:00.8	0.1605711	9	3		12	.....
02:01.1	0.1195858	9	3		12	.....
02:01.5	0.3610075	9	3		12	.....
02:02.6	3.33E-02	3	0	468137	13	.....
:	:	:	:	:	:	:

“イベント”に記載されている数字は十の位が心電図番号を示し、一の位の“1”は患者を選択したこと、“2”は実際に数字を入力したこと、“3”は処置を実行する“Enter”を押したことを示している。

Table1 から実際に読み取ることができる内容は以下の通りである。開始 01:29.1 後、心電図第 1 に軽度の異常波形が表れた。その後、01:38.2 時に心電図第 1 に対し、被験者は心電図番号である 1 を入力し、01:39.8 時から 01:41.1 時にかけて“16”の数字列を入力し、“Enter”を押した。しかしその処置内容は不適切であったため、患者の容態が悪化し、心電波形は中度波形へ移行した。01:46.4 時に再び心電図第 1 を選択し、01:49.9 から 01:51.3 にかけて、“2391”の数字列を入力したが、再び適切ではなかったため、さらに容態が悪化し、心電波形は重度波形に移行した。さらに 01:58.3 時に心電図第 1 を選択し、“468137”を入力した結果、適切な処置であったため、患者は正常波形、つまり正常な状態に回復した。

3. 心理学実験への応用

生体情報がカオス性を有することは既に述べたが、これまでの研究によって、指尖容積脈波のカオス解析から得られた時系列のリアプノフ指数(Lyapunov exponent)は外部環境の変化に対する適応力、コミュニケーション能力、自己発信能力に関係する指標であることが判明してきている。時系列のリアプノフ指数は、一定ではなく、常に“ゆらぎ”(上下変動)を持つ値である。つまり生体は適度な“ゆらぎ”を持つことで、コミュニケーションを含む外部環境の変化に上手く対応し、精神的バランスを保っていることと関係している。例えば、極度の緊張状態が続く場合、リアプノフ指数は高く、“ゆらぎ”がない状態を示す。反対にリアプノフ指数が低く、“ゆらぎ”が少ない状態が続く場合、鬱状態や老人の認知症状と関係していることなどが、Oyama-Higa M., Setogawa M., Miao T. (8) や Oyama-Higa M., Miao T. (9) の測定結果から発見されている。

そこで本実験は、生体情報として指尖容積脈波のリアプノフ指数を用いて、監視者の作業中における判断・操作ミスとの関係を検証した。

生体情報の計測には、指尖/耳朶脈波収集装置 BCU101(CCI 製 200Hz)を用いて、指尖容積脈波の測定を行った。指尖容積脈波とは、指尖(指先)の血液に含まれるヘモグロビン量の容積変化を測定するものである。測定で得られたデータを BACS DETECTOR Version2.0.3(CCI 製)でカオス解析を行った。

指尖容積脈波における分析の対象は最大リアプノフ指数とした。指尖容積脈波のデータ 3500 点を用いて、最大リアプノフ指数を算出し、次に 200 点スライドして、次の 3500 点で求める方法を用いて時系列の最大リアプノフ指数を算出した。計算に用いたパラメータの設定値は以下の通りである。

- サンプル周期：200Hz (5msec)
- 時定数：1sec
- スライド点数：200 点
- 1 ブロック測定点数：3500 点
- 埋め込み遅延時間：10 点
- 超球サイズ：0.08
- 近傍点数：20 点

そして本実験では、13名の被験者(監視者)を対象とし、3名、6名、9名の患者を同時監視させる3つの条件を設け、被験者1名につき、全条件を行わせた(被験者内実験計画)。監視作業(測定)は1条件につき、40min間行わせ、条件間に15min間の休憩を設けた。

患者の変化数に対して適切な処置を行った割合(以下、正答率とする)と指尖容積脈波のリアプノフ指数を算出した。そして各条件において、40min間測定した両データをそれぞれ3min間で1ブロックとし、13ブロックに分割した(13ブロック目のみ4min間)。次に、各ブロックにおける、それぞれの平均値を算出した(以下、それぞれをブロック正答率、ブロックリアプノフ指数とする)。Figure5は3人同時監視条件のブロック正答率とブロックリアプノフ指数の推移を表したグラフである。棒グラフはブロック正答率、折れ線グラフはブロックリアプノフ指数を示している。Figure5より、両変数は非常に類似した軌道を描いていることが分かる。3人同時監視条件と同様に、6人、9人同時監視条件においても両変数のグラフの軌道は類似していた。

条件毎にブロック正答率とブロックリアプノフ指数の関係を検証した結果、両データ間には3人同時監視条件( $r(13) = .82, p < .001$ ), 6人同時監視条件( $r(13) = .77, p < .01$ ), 9人同時監視条件( $r(13) = .90, p < .001$ )の全条件において、有意に正の相関が確認された。つまり、正答率が高い時はリアプノフ指数が高く、正答率が低い時はリアプノフ指数が低い値を示した。正答率が高く、リアプノフ指数が高いということは、与えられた環境に柔軟に対応できる状態であることを示していることが本実験の結果から実証された。また正答率が低い場合、被験者はネガティブな心理的变化が生じていたことが考えられた。

以上の結果より、本実験システムは監視作業中の監視者の状態把握が可能であることが判明し、利用価値の高いものであることが示唆された。

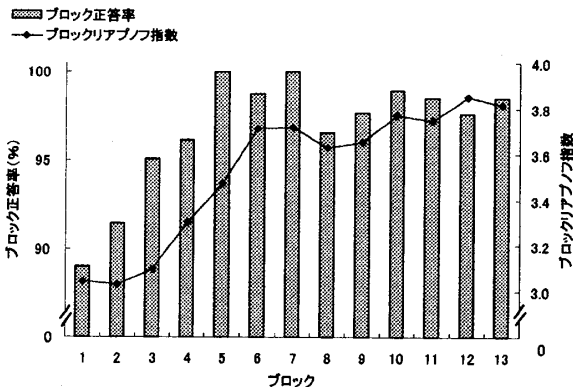


Figure5. ブロック正答率とブロックリアプノフ指数における推移(3人同時監視条件)

#### 4. 今後の展望

本実験システムでは心電波形という2次元的な刺激を用いたが、今後は映像等の3次元的な刺激を用いたり、全く種類の異なる刺激を同時に監視したりするようなシステムの開発を行っていく。

また本実験システムと指尖/耳朶脈波収集装置(BCU101)

は連動していなかったため、両装置における測定の開始は実験者が手動で行った。今後は本実験システムと指尖/耳朶脈波収集装置(BCU101)を連動したシステムを開発する予定である。

#### 5. 謝辞

本実験システムは株式会社CCI、および株式会社システムアンサーの協力を得た。この場を借りてお礼申し上げる。

#### 参考文献

- (1) 田原孝(2001). カオス・複雑系で生活リズムと健康を考える. 教育と医学, 49, 334-347.
- (2) 苗鉄軍(2003). カオスセミナーノート. 福岡: 株式会社コンピュータコンビニエンス.
- (3) Lorentz, E.N.(1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of Atmos Sciences*, 20, 130-141.
- (4) 依田守生・飯塚仁嗣(1993). 市場分析, 株価予想はどこまで可能か?. *エレクトロニクス*, 38, 47-49.
- (5) 田原孝(1995). 臨床におけるカオスの応用. *バイオメカニズム学会誌*, 19, 105-116.
- (6) Tsuda, I., Tahara, T., & Iwanaga, H. (1992). An observation of chaotic pulsation in human capillary vessels and its dependence on mental and physical conditions. *Journal of bifurcation and chaos*, 3, 313-324.
- (7) 鯨田海平・片山立・森戸克美(1993). 快適石油ファンヒーターをカオスで!! *エレクトロニクス*, 38, 34-37.
- (8) Oyama-Higa, M., Setogawa, M., Miao, T. (2005). Distinction of Pattern within Time-Series Data Using Constellation Graphs. *ICEIS-PRIS2005*, 192-197.
- (9) Oyama-Higa, M., Miao, T. (2005). Representation of a Physio-Psychological Index through Constellation Graphs. *ICNC'05-FSKD'05.*, in print.