

## 複雑系解析から見た多重課題遂行中の付加課題の影響

苗鉄軍<sup>\*1</sup> 清水俊行<sup>\*1</sup> 三宅晋司<sup>\*2</sup> 橋本正浩<sup>\*2</sup> 下山修<sup>\*3</sup>

### Alterations of Complexity Measures during Subsidiary Task in Multi-attribute Operations

Tiejun Miao<sup>\*1</sup>, Toshiyuki Shimizu<sup>\*1</sup>, Shinji Miyake<sup>\*2</sup>, Masahiro Hashimoto<sup>\*2</sup>, Osamu Shimoyama<sup>\*3</sup>

**Abstract** – A subsidiary distractive task was added during Multi-Attribute Task Battery (MATB) operations, pointing to study changes in workload in the simulated automobile voice navigation system. The effects of the subsidiary task were assessed using both complexity measure of finger plethysmograms and fractal properties of heart rate variability. We observed that the largest Lyapunov exponent increased during the subsidiary task, indicating an increase of overall dynamical complexity underlying the biological process. Fractal scaling exponent, a measure of correlation property of heart rate variability, increased similarly and approached to 1.0 (1/f), which was explained in relation to formations of long-range coherence by through complex feedback loops.

**Keywords:** chaos, fractal, complexity, multiattribute, workload

#### 1. はじめに

Multi-Attribute Task Battery (以下 MATB と略記) を用いて運転操作に類似した主作業を遂行中に音声提示による付加作業(経路暗記)を与える実験を行った<sup>[1]</sup>。この実験では、実験室レベルで、車の運転中の携帯電話による会話やカーナビの使用などが運転操作にどのように影響するのか、どのようにワークロードが変化するかについて検証した。結果として生理指標に変化が見られ、NASA-TLX による主観的ワークロードは、付加作業のある Task で有意に高い値が認められた。

これらの結果を更に究明するために、本研究では複雑系の解析による信号(データ)発生のダイナミクス的、非線形的な構造の追及を行った。音声提示による付加作業(経路暗記)は、生体内部に多くのフィードバックループを含む複雑なプロセスに影響すると考えられる。また、カオスとフラクタル理論に基づいた Complexity measure の適用により、従来の線形性分析法(例えば、FFT、自己回帰など)では抽出できなかった非線形性情報が抽出できる。本研究では、指尖脈波のカオス解析によって脈波の発生に関わる生体非線形ダイナミクスの記述ができた。さらに、最近の非周期性成分の解析に注目された心拍変動分析技術を用いて、心拍ゆらぎ変化の複雑構造を検討した。

#### 2. 方法

##### 2.1 実験

被験者は年齢 18~24 歳の健康な男子大学生 20 名であった。運転操作に相当する主作業は計器看視作業、補償

型追従作業、燃料管理作業の作業を同時に行う MATB<sup>[2]</sup> を実行させた。付加作業は、斜め方向を含む格子状の経路図を用いて交差点毎に 7 方向のいずれかへ進行指示を音声で提示し、辿った経路を、地図のように頭に思い浮かべ、記憶するように指示した。方向指示は 20 秒間隔で 7 回行い、7 回の指示を与えた後、同じ指示をもう一度繰り返した。被験者へは実験終了後、直ちに最後に向いている方向を尋ねるとともに、地図上に辿った経路を再現させた。実験は 5 分間の安静開眼状態の後、5 分間の MATB を行わせた(Task1)。作業終了後、NASA-TLX による評価を行わせた。この手順をさらに 2 回繰り返し(Task2、Task3)、2 回目の作業開始後、約 10 秒経過後から音声による方向指示の付加作業を与えた。

指尖脈波は、光学式容積脈波計(CCI BC2000)を左手人差し指に取り付けて測定を行い、サンプリング間隔 5msec によってカオス解析を行った。心電図(NEC 三栄 SYNAFIT2200)は、胸部 CM<sub>5</sub> から導出し、R 波の検出による R-R 間隔トレンドグラム(RRI)を作成した。

##### 2.2 カオスとフラクタルスケーリング解析

脈波時系列データは、時間遅れ法によって状態空間に再構成を行った。この状態空間においてカオス解析から動力学的な不変量として、最大 Lyapunov 指数 1 の計算を行った。1 は状態空間内におけるアトラクターの軌道不安定性(発散性)と情報発生率を表す。1 が大きければ、状態は不安定であり、速い情報発生が行われる。指尖脈波のカオス解析では、時間遅れは 50msec、埋め込み次元は 4 を用いた。計算ウィンドウは 60sec とした。

RRI データは、不等間隔(拍単位)のまま DFA(Detrended Fluctuation Analysis)<sup>[3]</sup>技術を利用してフラクタルスケーリングの性質を記述した。DFA は、RRI から全体の平均値を引いて積分時系列を作る。それぞれのウィンドウサイズに対する root-mean-square 分散を算出し、これをウィ

\*1: 株式会社コンピュータコンビニエンス

\*2: 産業医科大学

\*3: 日産自動車株式会社

\*1: Computer Convenience Inc.

\*2: University of Occupational and Environmental Health, Japan

\*3: Nissan Motors Co., Ltd.

ンドウサイズごとに log-log 対数軸でプロットする。フラクタルスケーリング指数は、log-log プロットから当てはめた直線の傾きで表される。本実験では short-term と long-term のスケーリング指数 1 と 2 が得られた。は 0-0.5 の場合、変動はホワイトノイズのように全く相関がなく、完全に不規則である。1.5-2.0 の場合、ブラウン運動のように過去の値と強く相関する。0.5-1.5 の場合（傾きが中程度）は、フラクタル的変動である。が 1.0 となる場合、1/f ゆらぎと対応する。

### 3. 結果

有効な 16 人分の実験データで Task ごとによる指尖脈波のカオス解析の結果と RRI の DFA 解析の結果を図 1-3 に示した。

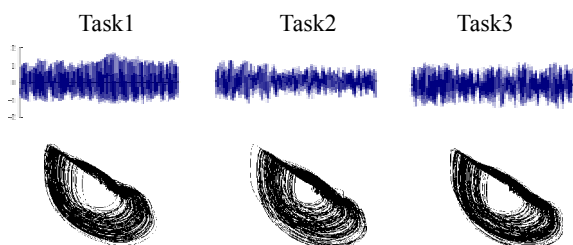


図 1 Task ごとの指尖脈波(上)とアトラクター(下)  
Fig.1 Plethysmograms and attractors for each Task

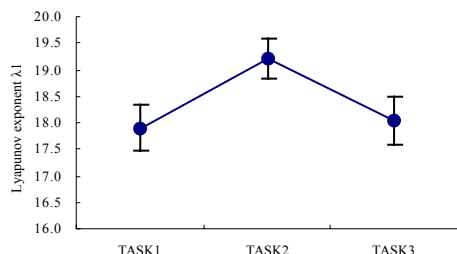


図 2 Task と Lyapunov 指数 1 (平均値と標準誤差)  
Fig.2 Task and corresponding Lyapunov exponent 1

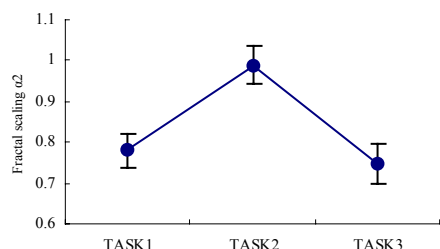
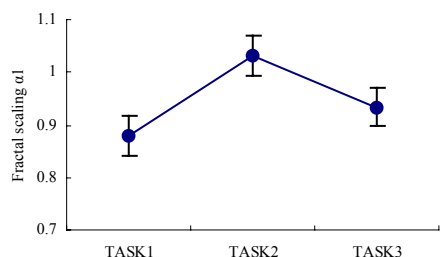


図 3 RRI の Fractal scaling RRI 指数(上: 1、下: 2)  
Fig.3 RRI fractal scaling exponents. (above: 1, below: 2)

Task1(最初段階の主作業) Task2(主作業+付加作業) Task3(最後段階の主作業)について、図 1 に典型的な指尖脈波波形とそれらに対応する動力学再構成で得られたカオスアトラクターを示した。付加作業のある Task2 ではより複雑なカオスアトラクター構造と大きなゆらぎが現れていることが示された。指尖脈波のカオス解析による最大 Lyapunov 指数 1 の平均値と標準誤差を図 2 に示した。Task2 で有意に高い 1 が認められた。これは指尖脈波の発生に関わる非線形構造は複雑性が高くなることを意味している。状態空間における高い発散性と不安定性に対応し、Task2 において活発な精神活動が行われたことを示唆していると考えられた。

図 3 に DFA のフラクタルスケーリング指数の平均値と標準誤差を示した。1 と 2 の両指数とも Task2 で数値的に 1.0 (1/f) に近づく結果が得られた。1 と 2 は付加作業のある Task2 で、Task1 および Task3 に比べて有意に高い値が認められた ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.005$ )。

### 4. 考察

図 1 (上) に示したように、Task2 で指尖脈波の振幅は小さくなっている。付加作業による増加したワークロードに対処するために交感神経系がより活発化したことにより、末梢血管が収縮したことが主な原因と考えられる。これと比較し、カオス解析の結果は、図 2 の Task2 による情報発生率(即ち、不安定性・発散性を示す  $\lambda_1$ ) が大きくなることが判明した。すなわち、音声提示の付加作業によるメンタルワークロードが生じている時「情報発生率増加」と「振幅減少」との相補関係が得られた。また、NASA-TLX による主観評価でも、Task2 でワークロードが高く評価されており、この結果とも対応付けられると考えられる。

最近の DFA による R-R 間隔の時系列データ解析は心身状態の診断と予後において、有効な方法として注目されている。本実験では Task2 におけるフラクタル指数 1 と 2 が 1.0 (1/f) に近づく傾向が見られ、これは健康者で付加作業(経路記憶)時に、short 時間スケールと long 時間スケールともに、生体システムにおいて長距離相関性を増進したと考えられる。

### 参考文献

- [1] Miyake, S., Hashimoto, M., Miao, T., Shimizu, T., Tabe, M., Shiraishi, Y.: Effects of a Memory Task during a Multi-attribute Task; Adjunct Proceeding of HCI International 2003, Grete, Greece, pp.73-74 (2003).
- [2] Comstock, J.R. and Arnegard, R.J.: Multi-attribute task battery; NASA-Tech. Memorandum 104174, Hampton, VA, NASA Langley Research Center (1992).
- [3] Peng, C.K., Havlin, S., Stanley, H.E., Goldberger, A.L.: Quantification of Scaling Exponents and Crossover Phenomena in Non-stationary Heartbeat Time Series; Chaos, Vol.5, pp.82-87 (1995).