

7E-1 トライオン神経回路網が生成する音楽のスペクトル分析*

足立 整治†

ATR 人間情報通信研究所‡

1 序

人間の思考、推量、感情といった高次脳機能の解明は脳科学の中で最も興味深い分野のひとつである。この高次脳機能を解明するための数理的モデルの第一歩としてトライオン神経回路網が提案されている。また回路網によって生成される時空間パターンの複雑さを応用して作曲が試みられている。この得られた音楽を評価するためスペクトル分析を行った。

高次脳機能は、i) 大脳皮質の広範囲な領域を必要とする、ii) 数10秒もの期間持続する、iii) 必ずしも入力刺激を必要としない機能と特徴づけることができる。例としては、作曲・音楽の想起、数学的思考・直感、あるいは囲碁・将棋などのゲームでの判断があげられる。高次脳機能と対照的なものとして、文字・人の顔などのパターン認識が考えられる。これは、限られた皮質野で、普通数100m秒のうちにこなされる。したがって、高次脳機能には、パターン認識に比べて何10倍ものニューロンの100倍以上も長い期間にわたる発火の時空間パターンが関与していると考えられる。

大脳皮質の情報処理のモデル化にあたって考慮しなければならないのはコラム構造である。視覚野にコラム構造があることはよく知られている[1, 2]。Mountcastleはコラム構造が大脳皮質全体に分布しており、1つのコラムが情報処理の基礎的エレメントであるという仮説を提案している[3]。以下ではこのコラムの数学的理想化をトライオンと呼ぶ。少数のコラムで形成されるネットワークのダイナミクスを記述する数理的モデルがトライオン回路網モデルである。

2 トライオンモデル

トライオンは名前の示すとおり発火状態に応じて3つの自由度を持つ。発火状態のアップデートは同期的、確率的に行なわれる。したがって、トライオンの発火状態は過去の発火状態に依存するが、モデルでは2つ前までの状態のみを考える。時刻 n において i 番目のトライオンが S_i の発火状態を持つ確率 $P(S_i)$ は

$$P(S_i) = \frac{1}{Z} g(S_i) \exp(\beta M_i S_i),$$

と表される。ただし

$$M_i = \sum_j (V_{ij} S_j' + W_{ij} S_j'') - V_i,$$

$$Z = \sum_{S=\pm 1,0} g(S) \exp(\beta M_i S),$$

である。ここで、 S_j' 、 S_j'' は j 番目トライオンのそれぞれ時刻 $n-1$ 、 $n-2$ での状態をあらわす。 V_{ij} 、 W_{ij} は相互作用の係数、 V_i は発火しきい値である。3つのトライオンの自由度+1, 0, -1 はトライオンに含まれるニューロンのうち、発火しているものの数がそれぞれ多い状態、平均の状態、少ない状態を表している。 $g(S)$ は1つのトライオンで平均数のニューロンが発火している場合の方が他の場合に比べてニューロン同士の組み合わせが多いことに由来する因子である。すなわち $g(0) \gg g(\pm 1)$ である。また、 β は確率的アップデートを行なう際のゆらぎの度合を表す‘温度’の逆数である。

6個のトライオンで構成されるネットワークのシミュレーションの結果を図1に示す。シミュレーションからわかるのは、相互作用の対称性を良くした場合、生成パターンに準定常・周期的時空間パターンが現れることである。パラメータの取り方によって数100のパターンが記憶されることがわかっている[4]。また、Hebb 則によって相互作用を変更することにより特定のパターンの出現度を増やすことができる。

3 スペクトル分析

人間の脳に音楽がいかにかコーディングされているかは明らかではないが、最も簡単な方法として各時刻における発火パターンを音のピッチにマップする方法が考えられる。Leng, Shaw と Wright はこの方法を用いてトライオン回路網が生成する時空間パターンから音楽を作成を試みた[5]。

この音楽(トライオン音楽)を客観的に評価する1つの方法がスペクトル分析である。Voss と Clarke[6] によって音楽に $1/f$ ゆらぎがあることが指摘されて以来、人間によって作曲された広範囲にわたる音楽のパワースペクトラムがほぼ $1/f$ 型をしていることがわかってきた。反対に、音階上の音を無作為に選んだ場合、またはランダムウォークによって選んだ場合それぞれ $1/f^0$ 型、 $1/f^2$ 型のスペクトラムが得られる。

トライオン音楽を解析する前に、準備として Bach の Brandenburg Concerto No. 1 第1楽章のパワースペク

*Trion Network and Spectrum Analysis of Trion Music

†Seiji ADACHI

‡ATR Human Information Processing Research Laboratories

トラムを計算した。それを図 2(a) に示す。細かい構造を除いて、 $1/f^{1.3}$ 型のスペクトラムが得られた。次に図 1 と同じパラメータを使って得られるトライオン音楽のパワースペクトラムを図 2(b) に示す。2つのピークを除いて $1/f$ 型のスペクトラムを持っていることがわかる。これらのピークは 6 ステップおよび 2 ステップのバタンの周期性が強いことを示している。そこで、これらの周期性を弱めるために発火しきい値 V_i を上げた。その時のスペクトラムを図 2(c) に示す。今度はピークは現れないが、高周波領域で $1/f$ 型、低周波領域で $1/f^0$ 型のスペクトラムが得られた。

4 まとめと議論

大脳皮質のコラム構造を取り入れたトライオンモデルを解説し、生成された音楽が人間によって作曲された音楽と同じ $1/f$ スペクトラムを持つことを示した。これはトライオン回路網が作曲にかかわる脳機能に関係するための必要条件が満足されたことを意味する。

一方、 $1/f$ ゆらぎは半導体素子の雑音など脳機能と無関係な現象にも広く見られる。したがって、 $1/f$ スペクトラムそのものが音楽、および作曲に関与する脳機能を決定づけるとは考えられない。一般に、スペクトル分析では時系列の時間平均操作を行う。それゆえ音楽にとって重要なリズム・旋律構造の有無はこの方法では見分けることができない。おなじスペクトラムを持ちながら、自然現象における $1/f$ ゆらぎから作られた音楽にしばしば構造がみられないのはこの理由からである。トライオン音楽ではシミュレーションからわかるように基になる生成パターンに構造が自然に備わっている。したがって、トライオンモデルは作曲に関与するなんらかの脳機能を反映する有力なモデルであると思われる。

参考文献

- [1] D. H. Hubel and T. N. Wiesel, Proc. Roy. Soc. Lond. B198, 1 (1977)
- [2] T. Bonhoeffer and A. Grinvald, Nature 353 3 Oct 429 (1991)
- [3] V. B. Mountcastle, in *the Mindful Brain*(MIT Press, Cambridge 1978)
- [4] J. V. McGrann, G. L. Shaw, D. J. Silverman and J. C. Pearson, Phys. Rev. A43, 5678 (1991)
- [5] X. Leng, G. L. Shaw and E. L. Wright, Music Percept. 8 49 (1990)
- [6] R. F. Voss and J. Clarke, J. Acoust. Soc. Am. 63 258 (1978)

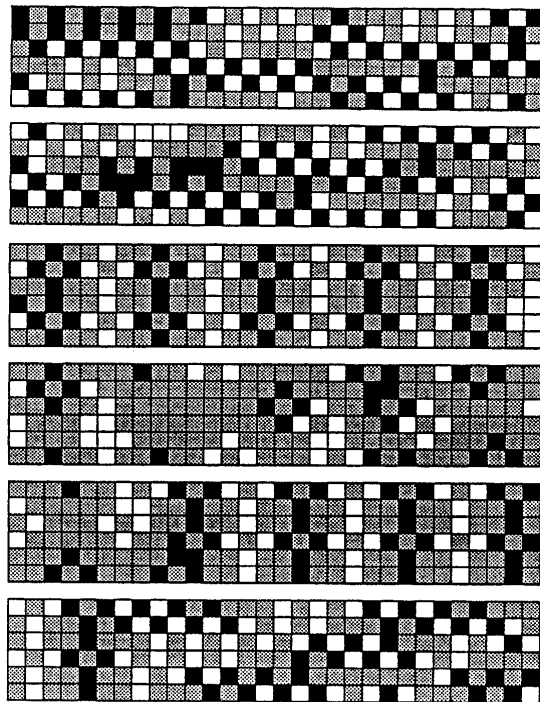


図 1: 6個のトライオンで構成されるネットワークの時間発展。各セルの色調 黒、グレー、白はそれぞれそのトライオンの発火状態 $+1, 0, -1$ に対応している。縦に描かれた6つのセルが1つの時間ステップのネットワークの状態を表す。時間の順序は図の左上から右下である。シミュレーション時の温度⁻¹パラメータは $\beta = 6.35$, 相互作用は $V_{i,i-1} = V_{i,i+1} = 1.0$, $W_{i,i-2} = W_{i,i-1} = W_{i,i+2} = -0.6$ 以外は 0、しきい値 V_i は 0 である。

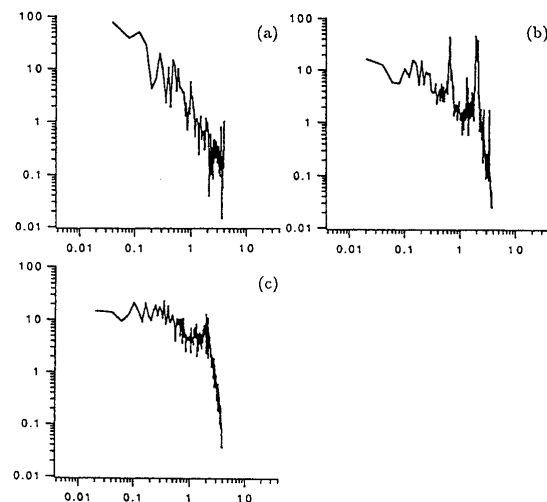


図 2: パワースペクトラム。横軸は周波数 (Hz)、縦軸は適当な単位でのスペクトラムを表す。(a) Bach Brandenburg Concerto No. 1 第1楽章 (b) 図 1 と同じパラメータによるトライオン音楽 (c) しきい値 V_i を 1.0 にしたときのトライオン音楽