原著論文

カオス性の異なる $1/f$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションの感性評価

山田 光宏, 井上 裕貴, 野月 悠平, 大和田 祥平, 金沢 文恵, 中村 雅人

茨城大学工学部

KANSEI Evaluation of Hand-Clapping Animation Utilizing $1/f$ Fluctuations with Different Chaotic Properties

Mitsuhiro YAMADA, Hiroki INOUE, Yuuhei NOZUKI, Sho-hei OHWADA,
Fumie KANEZAWA and Masato NAKAMURA

College of Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan

Abstract : In various human motions, $1/f^\beta$ fluctuation has been observed, so that $1/f$ fluctuation has been utilized for producing human animation in order to make it more human-like and natural. The $1/f$ fluctuation has been also utilized for producing animation of natural scenes, control of artificial environment, or etc., in order to make them more natural. Chaotic $1/f$ fluctuation or non-chaotic one has been utilized, however, subjective comparison between them has not been studied yet. In this paper, hand-clapping animation utilizing them is investigated by subjective comparison. As a result, the case with chaotic $1/f$ fluctuation was more natural and human-like than the case with non-chaotic one.

Keywords : Kansei evaluation, $1/f$ fluctuation, Human animation

1. はじめに

近年、映画やゲームなどのエンターテインメントの分野などにおいて、コンピュータグラフィックス (CG) により人工的に人体すなわちCGキャラクターと、その動作を生成した動画映像が制作されることが多くなってきている。実写と同等のリアルな人間の動作を表現するCGアニメーション（以下「ヒューマンアニメーション」とする）を制作するためには、人体の形状だけでなく、自然な、人間らしい動作を再現する必要がある。人間の様々な動作においては、時間的に変化する $1/f^\beta$ ゆらぎがみられる。ここで、 f は周波数であり、時系列のパワースペクトル密度 $P(f)$ が f に対して低周波領域において $P(f) \propto 1/f^\beta$ となるゆらぎを $1/f^\beta$ ゆらぎと呼び、指数 β がおよそ1となるゆらぎを $1/f$ ゆらぎと呼ぶ。 $1/f^\beta$ ゆらぎは、拍手の動作 [1] や、指を動かすタッピング [2]、マウスを動かす際の手の動き [3] にみられることが報告されている。このように、人間の動作は、単に規則的、周期的なものではなく、ゆらぎを伴うものであり、ゆらぎが人間らしさの重要な要素であると考えられる。

そこで、先行研究 [4] では、より自然で、人間らしいヒューマンアニメーションを実現するため、逆運動学 [5] を用いてCGキャラクターの動作を生成する手法において、単一のCGキャラクターの動作への $1/f^\beta$ ゆらぎの適用に関して検討した。逆運動学を用いた手法は、コストの高いモーションキャプチャや手作業によらずにCGキャラクターの動作を生成可能な手法である。CGキャラクターの動作としては、前述したように、その動作において $1/f^\beta$ ゆらぎがみられるという報告がな

されている拍手の動作を採り上げた。感性評価実験により心理的評価に関して検討した結果、拍手の周期および振幅を一定とした場合に比較し、周期を一定とし振幅のみに β を1とした $1/f$ ゆらぎを加えた場合のほうが、より自然で、人間らしいものであった。

$1/f^\beta$ ゆらぎにおける指数 β は時系列の乱雑さを定量化するものとなるが [6]、一方で、定量化にフラクタル次元を取り込んだGrassbergerらの提案する相関次元推定法 [7] があり、カオス性の有無を検定する標準的なアルゴリズムとして受け入れられている [8]。これによれば、 $1/f$ ゆらぎは、カオス性を有する $1/f$ ゆらぎと、カオス性の無い $1/f$ ゆらぎに明確に区別される。

カオス性を有する $1/f$ ゆらぎに関しては、比較的簡単な1次元写像により発生する間欠性カオスが $1/f$ ゆらぎとなることから、これが人工環境の温度の制御 [9] や照明の制御 [10] に適用され、心理的評価により快適性の向上効果が認められている。ここで、間欠性カオスとは、定常状態と不規則な状態が間欠的に発生するようなカオスである。以下、間欠性カオスによるカオス性を有する $1/f$ ゆらぎを「カオス的な $1/f$ ゆらぎ」とする。カオス的な $1/f$ ゆらぎによれば、自然で快適な人工環境の創造を可能にするものと考えられ、CGキャラクターの動作に適用した場合、自然なヒューマンアニメーションを実現する可能性があると考えられる。

一方、先行研究 [4] に用いた $1/f$ ゆらぎは、乱数による白色雑音を $1/f$ 型の周波数特性を有するデジタルフィルタに通すことにより発生させたものであり、カオス性の無い $1/f$ ゆらぎである。このようなカオス性の無い $1/f$ ゆらぎは、カオス的な $1/f$ ゆらぎとは異なり、不規則な状態が続き、

定常状態になることは無い。以下、カオス性の無い $1/f$ ゆらぎを「カオス的でない $1/f$ ゆらぎ」とする。前述したように、先行研究[4]においてカオス的でない $1/f$ ゆらぎをCGキャラクターの動作に適用した場合、自然な、人間らしいヒューマンアニメーションを実現した。

このように、どちらの $1/f$ ゆらぎも、波形は異なるが、パワースペクトルは同じ $1/f$ 型であり、従来、自然で人間らしいヒューマンアニメーションの制作や、自然で快適な人工環境の創造などに用いられてきた。しかしながら、従来は、自然さ、人間らしさ、快適さなどと β の値との関連のみが注目されており、自然さ、人間らしさ、快適さなどとカオス性の有無との関連に関する感性評価による検討はなされていない。すなわち、カオス的な $1/f$ ゆらぎとカオス的でない $1/f$ ゆらぎの心理的評価に関する比較検討は行われていない。

そこで、本論文では、カオス的な $1/f$ ゆらぎとカオス的でない $1/f$ ゆらぎを拍手のアニメーションに用いて、感性評価実験により心理的評価に関する比較検討を行うことにより、どちらの $1/f$ ゆらぎがより自然で人間らしいヒューマンアニメーションを実現するか明らかにすることを目的とする[11, 12]。先行研究[4]に基づき、拍手の周期を一定とし拍手の振幅のみに $1/f$ ゆらぎを加えることとし、先行研究と同様にアニメーションの制作および感性評価実験を行う。なお、本論文はCGキャラクターの動作に関する検討であり、ゆらぎの映像における効果のみを検討するため、先行研究[4]と同様に拍手音は発生させず、音による影響を除いた音を伴わないアニメーションを扱う。本論文では、ゆらぎの効果が被験者にとり、より明確になるよう、まず、画面内に大きく映し出された単一のCGキャラクターによるアニメーションにおいて、カオス的な $1/f$ ゆらぎを用いた場合とカオス的でない $1/f$ ゆらぎを用いた場合の比較検討を行う。単一のCGキャラクターによる検討は先行研究[4]においても行ったが、一般的なヒューマンアニメーションにおいては、画面内に複数のCGキャラクターが用いられる場合が多いと考えられる。このため、次に、より自然で人間らしい印象を与える $1/f$ ゆらぎを複数のCGキャラクターによる拍手のアニメーションに用いる。そして、 $1/f$ ゆらぎを用いない場合と比較し、一般的なヒューマンアニメーションと同様な場合における自然さ、人間らしさに関する有効性を感性評価により検討する。

以下、2章で関連研究について述べた後、3章では $1/f$ ゆらぎ時系列の発生方法とカオス性の有無の確認のための検定に関して述べる。4章では、単一のCGキャラクターによる拍手のアニメーションを用いたカオス的な $1/f$ ゆらぎとカオス的でない $1/f$ ゆらぎの比較検討に関して、5章では、複数のキャラクターによる拍手のアニメーションを用いた検討に関して述べる。6章では結論を述べる。

2. 関連研究

ヒューマンアニメーションの制作において、コストの高いモーションキャプチャや手作業によらずにCGキャラクターの

動作を生成可能な手法としては、逆運動学や力学シミュレーションを用いた手法がある。そのような手法として、力学シミュレーションに基づき人物歩行のアニメーションを自動生成する手法[13]や、神経振動子を用いた、より少ない計算コストで歩行アニメーションを生成する手法[14]、倒立振子という比較的単純な物理モデルと逆運動学により人間のバランス保持動作を実現する手法[15]などが提案されている。しかしながら、それらは力学的、運動学的に妥当な人間の動作を実現するのみであり、ゆらぎを考慮していない。逆運動学を用いた手法に $1/f$ ゆらぎを適用した例としては、拍手のアニメーションにカオス的でない $1/f$ ゆらぎを適用した先行研究[4]がある。

ヒューマンアニメーション以外に、様々な自然現象において $1/f^\beta$ ゆらぎがみられるため[16]、自然景観を表現するCGアニメーションの制作に $1/f^\beta$ ゆらぎを適用した例もある。その制作において、力学シミュレーションに基づく手法では計算時間がかかるという難点があることから、 $1/f^\beta$ ゆらぎを用いた、風による自然な木の枝や葉の動きのアニメーション[17]や、滝の流れにおいて特徴的である本流、飛沫、水煙、波を $1/f^\beta$ ゆらぎを用いて効率的に表現する滝のアニメーション生成法[18]が提案されている。また、風にたびくカーテンや、ろうそくの炎による光のゆらぎ、水に沈んだ写真のCGによる表現に $1/f$ ゆらぎを適用する手法も提案されている[19]。

アニメーション以外にも、従来、自然で快適な人工環境を創るために $1/f$ ゆらぎが適用されてきた。間欠性カオスによるカオス的な $1/f$ ゆらぎを用いて望ましい設定温度の近傍での温度ゆらぎを実現した石油ファンヒータが作られ、心理的評価により、ゆらぎによる快適性の向上が確認された例がある[9]。また、癒しを与える空間の創生のため、照明光を間欠性カオスによるカオス的な $1/f$ ゆらぎで制御した照明環境を構築し、心理的評価により快感情の向上効果が認められ、また、生理学的検証により α 波の増加が認められた例がある[10]。また、 $1/f$ ゆらぎを街路樹の植樹間隔のゆらぎに用いた場合の快適性について検討した例もある[20]。

いずれの従来研究においても、 $1/f^\beta$ ゆらぎにおける指数 β の値と自然さ、人間らしさ、快適さなどとの関連についてのみが注目されており、カオス性の有無と自然さ、人間らしさ、快適さなどとの関連に関する感性評価による検討は行われていない。すなわち、カオス的な $1/f$ ゆらぎとカオス的でない $1/f$ ゆらぎの心理的評価に関する比較検討は行われていない。

3. $1/f$ ゆらぎ時系列の発生とカオス性の検定

制作するアニメーションにおいては $1/f$ ゆらぎを用いて1回毎の拍手の振幅を変化させるため、拍手の回数が、アニメーションの制作に必要な $1/f$ ゆらぎ時系列の長さとなる。時系列のスペクトル解析にFFTを用いるため拍手の回数を2のべき乗とし、また、拍手の回数を535回とした先行研究[4]と大きく異ならないようにするため、本論文では拍手の回数を512回とした。したがって、アニメーションの制作に

カオス性の異なる $1/f$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションの感性評価

必要な時系列の長さは512となる。前述したように拍手の周期は一定とし、先行研究[4]と同様に拍手音の周期の測定結果[21]に基づき0.28秒とした。このため、アニメーションの制作に用いる時系列の標準化周期は0.28秒であり、その逆数である3.57Hzが標準化周波数となる。

まず、カオス的な $1/f$ ゆらぎの時系 $d_c(n)$ の発生方法に関して述べる。ここで、 n は離散時間である。 $d_c(n)$ の発生には、次式に示す一次元変形ベルヌイ写像 $g(d_c)$ ($0 \leq d_c \leq 1$) による間欠性カオスを用いた[22]。

$$d_c(n+1) = g(d_c(n)) = \begin{cases} d_c(n) + 2^{B-1}(1-2\varepsilon)(d_c(n))^B + \varepsilon, & \left(0 \leq d_c(n) \leq \frac{1}{2}\right) \\ d_c(n) - 2^{B-1}(1-2\varepsilon)(1-d_c(n))^B - \varepsilon, & \left(\frac{1}{2} < d_c(n) \leq 1\right) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、小摂動 $\varepsilon (> 0)$ は 1×10^{-13} とした、式(1)により発生される時系列は $1/f^\beta$ ゆらぎとなり、 $1/f^\beta$ ゆらぎの指数 β と式(1)における非負の分岐パラメータ B の関係が $\beta \cong 3 - B/(B-1)$ で与えられるとされている[22]。ここでは、 $\beta \cong 1$ となるよう $B = 2$ とした。

次に、カオス的でない $1/f$ ゆらぎ時系列 $d_N(n)$ の発生方法に関して述べる。 $d_N(n)$ の発生には、次式に示すような、乱数による白色雑音 $I(n)$ を用いた、 $1/f^\beta$ 型のスペクトルが得られるインパルス応答 $h(l)$ を有するデジタルフィルタによる畳込み演算を適用した[23]。

$$h(l) = \begin{cases} 1, & (l=0) \\ \prod_{k=1}^l \frac{\beta_0/2 + k - 1}{k}, & (l \geq 1) \end{cases} \quad (2)$$

$$d_N(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)I(n-l) \quad (3)$$

ここで、式(2)における β_0 が $1/f^\beta$ ゆらぎの指数 β となるとされているため[23]、ここでは β_0 を1とした。また、式(3)の L はインパルス応答長であり、 $1/f$ ゆらぎの周波数成分の最低周波数が標準化周波数の $1/L$ となり、 L 回の拍手にわたる周期が $1/f$ ゆらぎとなる最長周期となる。 L は前述した拍手の回数にあわせて512とした。

発生した時系列のカオス性の有無の確認のため、Grassbergerらの相関次元推定法によるカオス性の検定を行った。検定のためには十分長い時系列が必要となるため、 $d_c(n)$ および $d_N(n)$ を、それぞれ、 1×10^7 の長さの時系列として求めた。検定においては、次式による相関積分を求めた[24]。

$$C^m(r) = \sum_{i \neq j} H(r - \|\vec{w}_i - \vec{z}_j\|) \quad (4)$$

ここで、 $H(u)$ はヘビサイド関数で、 $u \geq 0$ のとき1、 $u < 0$ のとき0である。また、 $\vec{w}_i$ は、埋め込みにより時系列 $d(i)$ を m 次元のベクトル $(d(i), d(i+1), \dots, d(i+m-1))$ としたものであり、 $\vec{z}_j$ もまた同様に m 次元のベクトル $(d(j), d(j+1), \dots, d(j+m-1))$ である。 $\|\vec{w}_i - \vec{z}_j\|$ は $\vec{w}_i$ と $\vec{z}_j$ の距離である。 r は距離を表す変数であり、 $C^m(r)$ は2つのベクトルの距離の累積分布関数となる。

$C^m(r)$ が次式のようにスケーリングされるような r の領域において、

$$C^m(r) \propto r^{v(m)} \quad (5)$$

相関指数 $v(m)$ が埋め込み次元 m にらず一定となるとき、カオス的な時系列と判定される。ここで、 r の領域 $r_0 \leq r \leq (r_0 + \Delta r)$ において $C^m(r)$ が式(5)のようにスケーリングされるとする。このとき、 c_0 を定数とすると、

$$C^m(r_0) = c_0 \cdot r_0^{v(m)} \quad (6)$$

$$C^m(r_0 + \Delta r) = c_0 \cdot (r_0 + \Delta r)^{v(m)} \quad (7)$$

となるので、式(6)および式(7)の両辺の対数をとることにより、

$$\log_{10} C^m(r_0) = v(m) \log_{10} r_0 + \log_{10} c_0 \quad (8)$$

$$\log_{10} C^m(r_0 + \Delta r) = v(m) \log_{10} (r_0 + \Delta r) + \log_{10} c_0 \quad (9)$$

となる。式(9)から式(8)を、辺々、差し引いて整理すると、次式により $v(m)$ が与えられる。

$$v(m) = \frac{\log_{10} C^m(r_0 + \Delta r) - \log_{10} C^m(r_0)}{\log_{10} (r_0 + \Delta r) - \log_{10} r_0} \quad (10)$$

$d_c(n)$ および $d_N(n)$ に関して、それぞれ、式(10)における $\log_{10} r_0$ を3つ定めることにより r の領域を3つ定めたときの $v(m)$ の近似値を図1に示す。 $\log_{10} r_0$ の値は図中に示す。ここで、 Δr は、適切に $v(m)$ が近似されるよう試行錯誤により式(10)の分母が 1.50×10^{-1} となるように定めた。2つの時系列には定性的な違いが明確にみられる。 $d_c(n)$ の場合は m および r の領域の定め方によらず $v(m)$ が一定となり、カオス的な時系列と判定される。一方、 $d_N(n)$ の場合は r の領域の定め方によらず m に比例して $v(m)$ が増加しており、カオス的でない時系列と判定される。よって、 $d_c(n)$ がカオス的な時系列であり、 $d_N(n)$ がカオス的でない時系列であることを確認した。

アニメーションの制作に必要な時系列の長さは512であるため、 1×10^7 の長さの時系列 $d_c(n)$ および $d_N(n)$ から長さ512の部分を取り出し、平均0、分散1に規格化した時系列を、それぞれ、 $D_c(n)$ および $D_N(n)$ とした。 $D_c(n)$ および $D_N(n)$ を図2に、それらのパワースペクトルを図3に示す。間欠性カオスは定常状態と不規則な状態が間欠的に発生するカオスであるが、その特徴が図2(a)に現れている。一方、図2(b)に

図1 埋め込み次元 m に対する相関指数 $v(m)$ 。

図2 アニメーションの制作に用いた $1/f$ ゆらぎ時系列：
(a) $D_C(n)$, (b) $D_N(n)$.

図3 パワースペクトル：(a) $D_C(n)$ の場合 ($\beta=1.04$),
(b) $D_N(n)$ の場合 ($\beta=1.06$).

示すカオス的でない $1/f$ ゆらぎは、カオス的な $1/f$ ゆらぎとは異なり不規則な状態が続き定常状態になることが無く、2つの波形は異なっている。図3の横軸は標準化周波数(3.57Hz)を1としたときの相対周波数(Relative Frequency)を表し、縦軸はパワースペクトル密度(Power Spectral Density)を表す。波形は異なるが、どちらもパワースペクトルは $1/f^\beta$ 型である。相対周波数 4.80×10^{-1} 以下の範囲で最小二乗法によりパワースペクトル密度を直線近似し指数 β を求めたところ、 $D_C(n)$ および $D_N(n)$ において、それぞれ、1.04および1.06と、ほぼ1で同等となり、いずれも $1/f$ ゆらぎであることを確認した。

4. 単一のCGキャラクタによるカオス性の異なる $1/f$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションに関する検討

4.1 アニメーションの制作

アニメーションの制作は先行研究[4]と同様に行った。拍手の周期が0.28秒で一定であり、拍手の回数が512回であるため、143秒間のアニメーションを制作することになる。人間の両肩を結ぶ線分の中点を原点 $O(0,0,0)$ とし肩幅を長さの基準1とする図4に示す座標系を用いて、POV-Ray[25]

によるレンダリングを行い、アニメーションの要素であるフレームとなる図5に示すような画像を制作した。制作した動画映像は1秒間に60フレームとした。CGキャラクタの肩幅以外の各部の大きさは、18才以上30才未満の男子の体の平均値[26]に基づき肩幅を1とした相対値として設定し、可動となる関節を手首、肘、肩の3つとした。左手首および右手首の中心の y 座標および z 座標は試行錯誤により決定した適切な値で一定とし、両手首の中心の x 座標のみを変化させることにより拍手の動作を実現した。左手首および右手首の中心の y 座標は、それぞれ、 -6.86×10^{-1} および -6.31×10^{-1} とし、両手首の中心の z 座標は -2.75×10^{-1} とした。左肩および右肩の座標は、図4に示すように、それぞれ、 $(0.5, 0, 0)$ および $(-0.5, 0, 0)$ で一定とした。両肘の座標は、逆運動学[5]により、運動学的に妥当な動作となるように決定した。 n 回目の拍手の開始時点からの経過時間を $t_n(0 \leq t_n < 0.28)$ 秒とすると、 n 回目の拍手における左手首および右手首の中心の x 座標を、それぞれ、 $x_L(t_n)$ および $x_R(t_n)$ とし、次式で与えた。

$$x_L(t_n) = -x_R(t_n) = \begin{cases} s(t_n) & \text{for } s(t_n) \geq C_g \\ C_g & \text{for } s(t_n) < C_g \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 C_g は手のひらの厚みの半分の値である 4.42×10^{-2} とした。 $x_L(t_n)$ の値が C_g となると図5(a)に示す手のひらが合わさる状態となる。また、 $s(t_n)$ は先行研究[4]と同様に次式で与えられる正弦波とした。

$$s(t_n) = \frac{A(n)}{4} \left\{ \sin \left(2\pi \frac{t_n}{0.28} - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right\} \quad (12)$$

ここで、 $A(n)$ は n 回目の拍手における $x_L(t_n)$ と $x_R(t_n)$ の最大間隔、すなわち拍手の振幅である。 $A(n)$ には次式によりゆらぎを加え、ゆらぎの大きさが先行研究[4]に基づく最適値

図4 単一のCGキャラクタによるアニメーションの制作に用いた座標系。

図5 単一のCGキャラクタによるフレームの例：(a) 拍手を開始するとき、(b) $x_L(t_n)$ と $x_R(t_n)$ の間隔が最大値 $A(n)$ となるとき。

カオス性の異なる $1/f$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションの感性評価

となるようにし、 $A(n)$ の平均値も先行研究[4]と同様に肩幅の半分すなわち0.5となるようにした。

$$A(n) = 0.5 \left\{ 1 + \frac{10.6}{100} \times D(n) \right\} \quad (13)$$

式(13)の $D(n)$ に $D_C(n)$ もしくは $D_N(n)$ を用いることにより、カオス的な $1/f$ ゆらぎを用いたアニメーション A_C およびカオス的でない $1/f$ ゆらぎを用いたアニメーション A_N を制作した。

4.2 感性評価実験の方法

感性評価実験は自然さ、人間らしさに関して比較検討するためのものだが、自然さ、人間らしさの評価に最適な質問項目はあらかじめわからない。このため、感性評価実験には、先行研究[4]と同様に、「不自然な－自然な」、「人間らしくない－人間らしい」などを含む、ヒューマンアニメーションの評価に適切と考えられる多様な19種類の形容詞対により構成されたSD法による図6に示す感性評価票を用いた。そして、因子分析を用いて最適な質問項目すなわち形容詞対を抽出し比較検討することとした。また、被験者が評価しやすいように比較的段階の数の少ない5段階評定尺度法を用い、評価の値を2から-2までとした。評価は、一方のアニメーションに比較して他方のアニメーションをどのように評価するかという、2種類のアニメーションの間での相対評価とし、被験者にはその旨説明した。また、提示しているアニメーションが A_N と A_C のどちらであるかについては伏せ、ブラインドテストとした。被験者は19歳から24歳までの男性33名であった。アニメーションの提示には23インチの液晶ディスプレイを用い、画面から約1m離れた位置に被験者を着席させた。各被験者に対する実験は次の手順で行った。最初に A_N と A_C を同時に提示しながら実験に関する説明を行った。次に A_N のみを提示し、 A_N についての感性評価票の各形容詞対について-2から2までの評価の欄のいずれかに印を記入させた。次に A_C のみを提示し、 A_C についての感性評価票に

	2	1	0	-1	-2
飽きのくる					飽きのこない
アクティブな					アクティブでない
生き生きしていない					生き生きした
印象的でない					印象的な
違和感のない					違和感のある
おもしろい					つまらない
おもちゃっぽい					本物っぽい
重々しい					軽やかな
機械的な					機械的でない
元気一杯な					元気がない
心地わるい					心地よい
不自然な					自然な
親しみやすい					親しみにくい
好きでない					好きな
単調な					複雑な
滑らかな					滑らかでない
人間らしくない					人間らしい
メリハリのある					メリハリのない
ありふれた					めずらしい

図6 感性評価票。

A_N と同様に記入させた。最後に A_N および A_C を同時に提示し、任意の時間、必要に応じて評価を修正させた。以上により、被験者1人あたり2通りの感性評価が得られた。

4.3 感性評価実験の結果およびその分析

得られた評価に対して因子分析を適用した。因子の抽出には主因子法を用いた。固有値1以上の次元で因子の数を3と決定し、バリマックス回転を行い、表1に示す因子負荷量を得た。ただし、形容詞対の欄には、図6に示す評価が－（マイナス）側の形容詞のみ示している。第1因子においては、「不自然な－自然な」、「人間らしくない－人間らしい」などに対して因子負荷量が高く、「自然さ・人間らしさ」に関する因子とした。第1因子に関わる形容詞対が「自然さ・人間らしさ」の評価に最適な形容詞対と考えられ、それらに特に注目することとした。

次に、全ての形容詞対についての33名の被験者による評価の平均値を、 A_C と A_N の2通りについて、それぞれ求めた。それらの平均値を、以降、被験者間平均値と呼ぶこととする。2通りの被験者間平均値の間での有意差の有無について、t検定を用い、有意水準を5%として検定した。表2に、各形容詞対の被験者間平均値とp値を示す。

まず、第1因子の「自然さ・人間らしさ」に関わる形容詞対について検討する。例えば、「不自然な－自然な」に関しては、p値が0.027と有意水準より小さいため A_C の被験者間平均値-0.273と A_N の被験者間平均値0.697との間で有意差があるといえる。また、被験者間平均値の正負の符号を考慮すると、「自然な」の側すなわちマイナスの値である A_C のほうが、「不自然な」の側すなわちプラスの値である A_N に比較し、より自然なものであったといえる。同様に、第1因子となる「自然さ・人間らしさ」に関する因子の他の5つの有意差のある形容詞対も A_N に比較して A_C のほうが肯定的な結果

表1 因子と因子負荷量。

形容詞対 (マイナス側のみ)	因子	因子負荷量		
		第1因子	第2因子	第3因子
自然な	1	0.858	-0.207	0.020
本物っぽい	1	0.854	-0.296	0.090
機械的でない	1	0.812	-0.220	0.011
心地よい	1	0.762	-0.233	0.033
人間らしい	1	0.737	-0.338	0.144
違和感のある	1	-0.690	-0.064	-0.183
生き生きした	1	0.617	-0.384	-0.245
親しみにくい	1	-0.599	0.208	0.167
軽やかな	1	0.595	-0.053	-0.070
飽きのこない	1	0.582	-0.509	0.023
メリハリのない	2	-0.095	0.754	-0.034
元気がない	2	-0.132	0.646	0.249
複雑な	2	0.458	-0.592	-0.158
つまらない	2	-0.327	0.488	0.384
好きな	2	0.423	-0.437	0.258
印象的な	2	0.084	-0.424	-0.163
アクティブでない	3	-0.167	0.381	0.597
めずらしい	3	-0.058	-0.128	-0.541
滑らかでない	3	-0.340	0.086	-0.427
因子寄与率		0.307	0.154	0.069
累積寄与率		0.307	0.460	0.530

表2 各形容詞対における被験者間平均値および p 値
(*が付されたものが有意差のある形容詞対)。

形容詞対 (プラス側－マイナス側)	因子	被験者間平均値		p 値
		A_C	A_N	
不自然な－自然な	1	-0.273	0.697	0.027*
おもちゃっぽい－本物っぽい	1	-0.091	1.121	0.010*
機械的な－機械的でない	1	-0.242	0.758	0.034*
心地わるい－心地よい	1	-0.242	0.455	0.110
人間らしくない－人間らしい	1	-0.364	0.515	0.049*
違和感のない－違和感のある	1	0.606	-0.455	0.021*
生き生きしていない－生き生きした	1	-0.152	0.455	0.240
親しみやすい－親しみにくい	1	0.030	-0.697	0.090
重々しい－軽やかな	1	-0.121	-0.091	0.950
飽きのくる－飽きのこない	1	-0.212	0.818	0.023*
メリハリのある－メリハリのない	2	0.667	-0.455	0.012*
元気一杯な－元気のない	2	0.091	-0.697	0.054
単調な－複雑な	2	0.303	0.970	0.130
おもしろい－つまらない	2	-0.091	-0.576	0.230
好きでない－好きな	2	-0.061	0.636	0.091
印象的でない－印象的な	2	0.091	0.364	0.500
アクティブな－アクティブでない	3	0.061	0.455	0.390
ありふれた－めずらしい	3	0.455	-0.061	0.180
滑らかな－滑らかでない	3	0.697	0.000	0.120

となっており、 A_C のほうが、より自然な、本物っぽい、機械的でない、人間らしい、違和感のない、飽きのこないものであったといえる。以上の「自然さ・人間らしさ」の因子に関する分析結果より、 A_N に比較して A_C のほうが、より自然で人間らしいアニメーションであったといえる。

一方、他の因子に関わる形容詞対については、第二因子に関わる「メリハリのある－メリハリのない」のみに有意差があるといえ、 A_N に比較して A_C のほうが、よりメリハリのあるものであったといえる。このことから、定常状態と不規則な状態が間欠的に発生するカオス的な $1/f$ ゆらぎのほうが、不規則な状態が続き定常状態になることが無いカオス的でない $1/f$ ゆらぎよりも、よりメリハリのあるゆらぎとして被験者に評価されたと考えられる。そして、よりメリハリのあるカオス的な $1/f$ ゆらぎのほうが、ゆらぎの効果が高く、 A_C のほうがより自然で人間らしいアニメーションになったと考えられる。

5. 複数のCGキャラクタによる拍手のアニメーションに関する検討

5.1 アニメーションの制作

4.1と同様な手法により男性2体、女性2体のCGキャラクタを制作し、それら4体のCGキャラクタからランダムに1体を選択して髪および服の色をランダムに変更することを繰り返し、9体のCGキャラクタを生成し、規則的に配置した。男性のCGキャラクタの肩幅を1としたときの配置を図4と同様な座標系を用いて図7に示す。また、各CGキャラクタの拍手の動作に式(11)および式(13)と、式(12)の代わりに次式を用いることにより、CGキャラクタごとに拍手のタイミングをランダムにずらした。

$$s(t_n) = \frac{A(n)}{4} \left\{ \sin \left(2\pi \frac{t_n + \Delta t}{0.28} - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right\} \quad (14)$$

図7 複数のCGキャラクタの配置：(a) x-z平面への射影，
(b) y-z平面への射影。

ここで、 $\Delta t (0 \leq \Delta t < 0.28)$ は、各CGキャラクタごとに異なる値をとる乱数である。そして、 $D(n)$ に $D_C(n)$ を用いて拍手の振幅にカオス的な $1/f$ ゆらぎを加えた場合のアニメーション A_{MF} と、式(13)における $D(n)$ を0とした $1/f$ ゆらぎを加えない場合のアニメーション A_{MN} を、4.1と同様な手法により制作した。アニメーションに用いたフレームの例を図8に示す。

5.2 感性評価実験の方法

感性評価実験では、4.2と同様にして、 A_{MF} と A_{MN} の相対評価をブラインドテストとして実施した。被験者は19歳から25歳までの男女40名（約9割が男性）であった。各被験者に対する実験は次の手順で行った。最初に A_{MF} と A_{MN} を同時に提示しながら実験に関する説明を行った。次に A_{MN} のみを提示し、 A_{MN} についての感性評価票の各形容詞対について-2から2までの評価の欄のいずれかに印を記入させた。次に A_{MF} のみを提示し、 A_{MF} についての感性評価票に A_{MN} と同様に記入させた。最後に A_{MN} および A_{MF} を同時に提示し、任意の時間、必要に応じて評価を修正させた。以上により、被験者1人あたり2通りの感性評価が得られた。

5.3 感性評価実験の結果およびその分析

得られた評価に対して、まず、因子分析を4.3と同様に適用した。固有値1以上の次元で因子の数を2と決定し、表3に示す因子負荷量を得た。第1因子においては、「不自然な－自然な」、「人間らしくない－人間らしい」などに対して因子負荷量が高く、「自然さ・人間らしさ」に関する因子とした。第1因子に関わる形容詞対が「自然さ・人間らしさ」の評価に最適な形容詞対と考えられ、それらに特に注目することとした。

次に、「自然さ・人間らしさ」の因子に関わる形容詞対に関して、40名の被験者による評価の平均値、すなわち被験者間平均値を、 A_{MN} と A_{MF} の2通りについて、それぞれ求め

図8 複数のCGキャラクタによるフレームの例。

カオス性の異なる $1/f$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションの感性評価

表3 因子と因子負荷量.

形容詞対 (マイナス側のみ)	因子	因子負荷量	
		第1因子	第2因子
違和感のある	1	-0.787	-0.352
心地よい	1	0.781	0.380
自然な	1	0.752	0.405
複雑な	1	0.730	0.339
人間らしい	1	0.712	0.458
親しみにくい	1	-0.679	-0.382
機械的でない	1	0.665	0.547
飽きのこない	1	0.638	0.386
印象的な	1	0.629	0.097
滑らかでない	1	-0.601	-0.357
生き生きした	1	0.535	0.418
アクティブでない	1	-0.516	-0.322
メリハリのない	1	-0.428	-0.151
軽やかな	1	0.405	0.300
めずらしい	1	-0.309	-0.074
元気のない	2	-0.100	-0.824
つまらない	2	-0.294	-0.647
本物っぽい	2	0.558	0.642
好きな	2	0.295	0.473
因子寄与率		0.336	0.190
累積寄与率		0.336	0.527

た. 2通りの被験者間平均値の間での有意差の有無について, t 検定を用い, 有意水準を5%として検定した. 表4に, 各形容詞対の被験者間平均値と p 値を示す. 検定の結果, 15の形容詞対のなかで13の形容詞対において有意差があるといえる. 例えば, 「不自然な-自然な」に関しては, 有意差があり, 被験者間平均値の正負の符号を考慮すると, A_{MN} に比較して A_{MF} のほうが, より自然なものであったといえる. 同様に, 他の有意差のある形容詞対も考慮すると, A_{MN} に比較して A_{MF} のほうが, より違和感のない, 心地よい, 自然な, 複雑な, 人間らしい, 親しみやすい, 機械的でない, 飽きのこない, 印象的な, 滑らかな, 生き生きした, アクティブな, メリハリのあるものであったといえる. 以上の「自然さ・人間らしさ」の因子に関する分析結果より, A_{MN} に比較して A_{MF} のほうが, より自然で人間らしいアニメーションであったといえる.

6. 結 論

カオス的な $1/f$ ゆらぎとカオス的でない $1/f$ ゆらぎを拍手のアニメーションに用いて, 感性評価実験により, どちらがより自然で人間らしい印象を与えるか, 心理的評価に関する比較検討を行った. カオス的な $1/f$ ゆらぎの発生には1次元変形ベルヌーイ写像による間欠性カオスを用い, カオス的でない $1/f$ ゆらぎは乱数による白色雑音を用い, カオス的な $1/f$ ゆらぎは乱数による白色雑音を $1/f$ 型の周波数特性を有するデジタルフィルタに通すことにより発生させた. 発生した時系列にスペクトル解析およびカオス性の検定を適用した結果, 2つの時系列の波形は異なるがパワースペクトルは同じ $1/f$ 型となることを確認し, また, 相関指数に定性的な違いがありカオス性の有無を確認した. 単一のCGキャラクタによる感性評価実験の結果, カオス的でない $1/f$ ゆらぎを用いたアニメーションに比較し, カオス的な $1/f$ ゆらぎ

表4 「自然さ・人間らしさ」の因子に関する形容詞対における被験者間平均値および p 値
(*が付されたものが有意差のある形容詞対).

形容詞対 (プラス側-マイナス側)	被験者間平均値		p 値
	A_{MN}	A_{MF}	
違和感のない-違和感のある	-1.100	0.600	0.000*
心地わるい-心地よい	0.675	-0.775	0.000*
不自然な-自然な	0.800	-0.750	0.000*
単調な-複雑な	1.475	-0.675	0.000*
人間らしくない-人間らしい	1.000	-0.675	0.000*
親しみやすい-親しみにくい	-0.750	0.200	0.015*
機械的な-機械的でない	1.225	-0.400	0.000*
飽きのくる-飽きのこない	0.875	-0.775	0.001*
印象的でない-印象的な	0.500	-0.625	0.001*
滑らかな-滑らかでない	-0.450	0.500	0.015*
生き生きしていない-生き生きした	0.750	-0.350	0.005*
アクティブな-アクティブでない	-0.450	0.250	0.046*
メリハリのある-メリハリのない	-0.450	0.550	0.012*
重々しい-軽やかな	-0.150	-0.675	0.140
ありふれた-めずらしい	-0.225	0.175	0.220

を用いたアニメーションのほうが, より自然で人間らしいものであった. これは, 定常状態と不規則な状態が間欠的に発生するカオス的な $1/f$ ゆらぎのほうが, 不規則な状態が続き定常状態になることが無いカオス的でない $1/f$ ゆらぎよりも, よりメリハリのあるゆらぎとして被験者に評価され, ゆらぎの効果が高く, より自然で人間らしいアニメーションになったと考えられる. 次に, カオス的な $1/f$ ゆらぎを一般的なアニメーションと同様な複数のCGキャラクタによる拍手のアニメーションに用いて, $1/f$ ゆらぎを用いないアニメーションと感性評価実験により心理的評価に関する比較検討を行った. その結果, $1/f$ ゆらぎを用いないアニメーションに比べ, カオス的な $1/f$ ゆらぎを用いたアニメーションのほうが, より自然で人間らしいものとなったことから, カオス的な $1/f$ ゆらぎの有効性を確認した.

参 考 文 献

- [1] Musha, T., Katsurai, K., and Teramachi, Y.: Fluctuations of human tapping intervals, IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-32, pp.578-582, 1985.
- [2] Yoshinaga, H., Miyazima, S., and Mitake, S.: Fluctuation of biological rhythm in finger tapping, Physica A, 280, pp.582-586, 2000.
- [3] Dotov, D. G., Nie, L., and Chemero, A.: A demonstration of the transition from ready-to-hand to unready-to-hand, PLoS ONE (www.plosone.org), 5, Issue 3, pp.2-9, 2010.
- [4] 山田光宏, 佐藤康二, 麻生明義: $1/f^\beta$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションに関する研究, 芸術科学会論文誌, 9, 4, pp.154-162, 2010.
- [5] Tolani, D., Goswami, A., Badler, N. I.: Realtime inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs, Graphical Models, 62, pp.353-388, 2000.

- [6] 樋口知之：時系列のフラクタル解析，統計数理，37，2，pp.209-232，1989.
- [7] Grassberger, P. and Procaccia, I.: Measuring the strangeness of strange attractors, Physica D, 9, Issues 1-2, pp.189-208, 1983.
- [8] 宮野尚哉：非線形時系列解析によるカオス性検定，数理解析研究所講究録，1136，pp.28-36，2000.
- [9] 合原一幸，五百旗頭正：カオス応用システム，朝倉書店，pp.83-88，1995.
- [10] 中村達郎，今野紀子，島田尊正，宮保憲治： $1/f$ ゆらぎを適用した癒し環境空間の検討，電子情報通信学会通信ソサイエティ大会，BS-12-6，2007.
- [11] 井上裕貴，大和田祥平，野月悠平，山田光宏：発生方法の異なる $1/f$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションに関する研究，第27回NICOGRAPH論文コンテスト，P01，2011.
- [12] 山田光宏，井上裕貴，野月悠平，大和田祥平，金沢文恵，中村雅人：カオス性の異なる $1/f$ ゆらぎを用いた拍手のアニメーションの感性評価，第14回日本感性工学会大会，E3-2，2012.
- [13] 青木政勝，新谷幹夫，筒口拳：力学シミュレーションによる2次元アニメーションの自動生成，電子情報通信学会論文誌，J84-D-II，9，pp.2040-2047，2001.
- [14] 栗山繁，栗原芳己，金子豊久：神経振動子を用いた歩行アニメーションの自動生成，電子情報通信学会論文誌，J84-D-II，11，pp.2427-2436，2001.
- [15] 工藤俊亮，幸村琢，池内克史：全身を用いたバランス保持動作のモデル化とその生成，電子情報通信学会論文誌，J88-D-II，8，pp.1583-1591，2005.
- [16] 安久正紘，寺町康昌，山中一雄，住谷正夫：ゆらぎ現象の工学的応用について，応用物理，61，7，pp.690-697，1992.
- [17] Ota, S., Fujimoto, T., Tamura, M., Muraoka, K., Fujita, K., and Chiba, N.: $1/f^\beta$ noise-based real-time animation of trees swaying in wind fields, Proceedings of the Computer Graphics International, pp.52-59, 2003.
- [18] 高橋孝彰，藤本忠博，千葉則茂：滝のノイズベースアニメーション，芸術科学会論文誌，4，2，pp.68-76，2005.
- [19] 大淵栄作： $1/f$ ノイズ・ゆらぎを用いた実写とCGの合成，映像情報メディア学会誌，56，10，pp.1629-1632，2002.
- [20] 鈴木慎一，小林祐司，姫野由香，佐藤誠治：ゆらぎ理論とCGシミュレーションによる街路樹の植樹間隔の快適性評価に関する研究，日本建築学会技術報告集，14，27，pp.275-280，2008.
- [21] 西村竜一，宮里勉：仮想的集団による拍手音の合成，電子情報通信学会技術研究報告，MVE98-100，pp.17-24，1999.
- [22] Aizawa, Y., Kohyama, T.: Asymptotically non-stationary chaos, Prog. Theor. Phys., 71, 4, pp.847-850, 1984.
- [23] Kasdin, N. J.: Discrete simulation of colored noise and stochastic processes and $1/f^\alpha$ power law noise generation, Proceedings of the IEEE, 83, 5, pp.802-827, 1995.

- [24] 高安秀樹：フラクタル科学，朝倉書店，pp.88-98，1987.
- [25] <http://www.povray.org>
- [26] 河内まき子，丸持正明：2005 AIST 人体寸法データベース，産業技術総合研究所 H16PRO 287.

山田 光宏 (正会員)

1995年 静岡大学大学院電子科学研究科博士課程電子応用工学専攻修了。博士（工学）。現在，茨城大学講師。 $1/f$ ゆらぎの応用に関する研究に従事。日本感性工学会，電子情報通信学会，芸術科学会，IEEE，他会員。

井上 裕貴 (非会員)

2012年 茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程メディア通信工学専攻修了。同年，(株)日立ケーイーシステムズ入社。在学中は $1/f$ ゆらぎのアニメーションへの応用に関する研究に従事。

野月 悠平 (非会員)

2011年 茨城大学工学部メディア通信工学科卒業。在学中， $1/f$ ゆらぎのアニメーションへの応用に関する研究に従事。

大和田 祥平 (非会員)

2011年 茨城大学工学部メディア通信工学科卒業。在学中， $1/f$ ゆらぎのアニメーションへの応用に関する研究に従事。

金沢 文恵 (非会員)

2012年 茨城大学工学部メディア通信工学科卒業。同年，(株)シーエスデー入社。在学中， $1/f$ ゆらぎのアニメーションへの応用に関する研究に従事。

中村 雅人 (非会員)

2012年 茨城大学工学部メディア通信工学科卒業。同年，JA常総ひかり入社。在学中， $1/f$ ゆらぎのアニメーションへの応用に関する研究に従事。