

1/f^β ゆらぎを用いた拍手のアニメーションに関する研究

山田光宏 佐藤康二 麻生明義

茨城大学工学部メディア通信工学科

A Study on Hand-Clapping Animation Utilizing 1/f^β Noise

Mitsuhiro Yamada Kouji Stoh Akiyoshi Asoh

Department of Media and Telecommunications Engineering, College of Engineering, Ibaraki
University

yamada-m @ mx.ibaraki.ac.jp

概要

人間の様々な動作において1/f^β ゆらぎがみられるが、ヒューマンアニメーションに1/f^β ゆらぎを適用した研究は、従来、みられない。そこで、本論文では、人間の動作として拍手を採り上げ、1/f^β ゆらぎを用いたヒューマンアニメーションに関して検討している。まず、1/f^β ゆらぎを拍手の周期や振幅に対して加えた、拍手のヒューマンアニメーションを制作した。次に、SD法を用いて被験者による評価実験を行い、実験結果に因子分析およびテューキーのWSD検定を適用した。その結果、拍手の周期および振幅を一定とした場合よりも、拍手の周期を一定とし拍手の振幅のみに1/f ゆらぎを加えた場合のほうが、より自然で、違和感のない、人間らしいものとなった。

Abstract

In various human motions, 1/f^β noise has been observed. However, its application to CG human animation has not been yet studied. In this paper, hand-clapping animation utilizing 1/f^β noise is investigated. The 1/f^β noise was applied to control of clapping intervals and amplitude, and produced human animations were examined by subjective experiment. As a result, the case when the intervals were constant and the amplitude was fluctuated by using 1/f noise was more natural, reasonable, and human-like than the case with constant intervals and constant amplitude.

キーワード: 1/f^β ゆらぎ, CG アニメーション, 拍手, 人間らしい, 被験者実験

Keywords: 1/f^β noise, CG animation, hand-clapping, human-like, subjective experiment

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およびその動作を生成した動画映像が制作され、CGは、動画映像の制作において必要不可欠なものとなってきている。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(本論文では、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、例えば、拍手における手を叩く時間間隔すなわち拍手の周期[1]や、指を動かすタッピングの際のリズム[2]、マウスを動かす際の手の動き[3]などに $1/f^\beta$ ゆらぎがみられることが報告されている。ここで、 f は周波数であり、 $1/f^\beta$ ゆらぎとは、低周波領域においてそのパワースペクトル密度(Power Spectral Density)が $1/f^\beta$ に比例するゆらぎである。代表的な $1/f^\beta$ ゆらぎには、指数 β が、それぞれ、およそ0, 1, 2となる、 $1/f^0$ ゆらぎ、 $1/f$ ゆらぎ、 $1/f^2$ ゆらぎがある[4]。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。このため、ヒューマンアニメーションにおいて、ゆらぎを考慮しない場合には、人間らしさのないロボットのような動きになってしまうと考えられる。

ヒューマンアニメーションの制作において、人間の動作を生成するためには、一般的に、モーションキャプチャによる手法、アニメータの手作業による方法、力学シミュレーションや逆運動学[5]を用いた手法がある。モーションキャプチャによれば、人間の動作に含まれるゆらぎを反映した映像を制作することが可能と考えられる。しかしながら、現在、映画制作やゲーム等のCGキャラクタの動作の収録に広く用いられている光学式のモーションキャプチャにおいては、ビデオカメラやデータ処理用PCなどの機材に加えて、人間が動くためのある程度の広さの空間が必要であり、設備を整えるためのコストが高くなる。また、映像制作に必要な人間の動作を全て取得する必要があるため、時間がかかり、人件費も高くなる。アニメータの手作業による制作の場合も、やはり、人件費などのコストが高くなる。コストの高いモーションキャプチャや手作業によらない力学シミュレーションや逆運動学を用いた手法に関しては、従来提案されているものは、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、前述したようなゆらぎを考慮した動作を表現する研究はみられない。

そこで、本論文では、モーションキャプチャや手作業によらずに、より自然な、人間らしいヒューマンアニメーションを実現するため、逆運動学を用いた手法における、CGキャラクタの動作への $1/f^\beta$ ゆらぎの適用に関して検討する[6]。具体的な人間の動作としては、前述したように、その周期が $1/f^\beta$ ゆらぎを有するという報告がなされており、映像作品中、使用される場面が多く、需要も多いと思われる、拍手の動作を採り上げる。なお、本論文では、ゆらぎの、映像における効果のみを検討するため、拍手音は発生させず、音を伴わないアニメーションを扱う。前述したよ

うに、拍手の周期が $1/f^\beta$ ゆらぎを有すると報告されていることから、ゆらぎを加える対象を拍手の周期とすることが考えられ、また、拍手の振幅にゆらぎを加えることも考えられる。また、 $1/f^0$ ゆらぎ、 $1/f$ ゆらぎ、 $1/f^2$ ゆらぎのうち、どのゆらぎを加えたほうが良いのか、検討する必要もある。このため、ゆらぎを加えない場合も含め、ゆらぎを加える対象や β の値を変化させたアニメーションを、複数、制作し、被験者による感性評価の実験を行い、ゆらぎを加えない場合に比較して、拍手の動作の自然さ、人間らしさが向上する場合は、どのような場合か、比較検討を行う。

以下、2章で関連研究について述べた後、3章では拍手のヒューマンアニメーションの制作方法を、4章では評価実験の結果とその分析結果について、5章では結論を述べる。

2 関連研究

様々な自然現象においても $1/f^\beta$ ゆらぎがみられる[7]が、自然景観を表現するCGアニメーションの制作に関しては、 $1/f^\beta$ ゆらぎを適用した例がある。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[8]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[9]が提案されている。また、風になびくカーテンや、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[10]。

力学シミュレーションや逆運動学を用いたヒューマンアニメーションの制作に関しては、力学シミュレーションに基づき人物歩行動のアニメーションを自動生成する手法[11]や、神経振動子を用いた、より少ない計算コストで歩行動アニメーションを生成する手法[12]、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[13]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、 $1/f^\beta$ ゆらぎのヒューマンアニメーションの制作への適用に関する研究は、まだ報告されていない。

一方、本論文で採り上げる動作である拍手に関し、人工的な拍手音の合成において、ゆらぎを適用した例が報告されている[14]。これは、あらかじめ人間の拍手音の計測から得たデータに基づくゆらぎを、合成した拍手音の時間間隔に加えることにより、実際の拍手に似た自然な拍手音が得られたとするものである。これより、拍手のヒューマンアニメーションに関しても、ゆらぎの適用による、自然さ、人間らしさの向上の可能性があると考えられる。

3 拍手のヒューマンアニメーションの制作

拍手のヒューマンアニメーションを、レンダリングにより制作した多数の画像を連続して表示する動画映

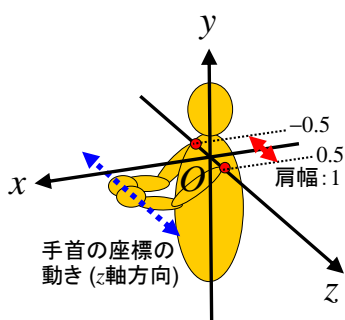


図 1: アニメーションの制作に用いた座標系 .

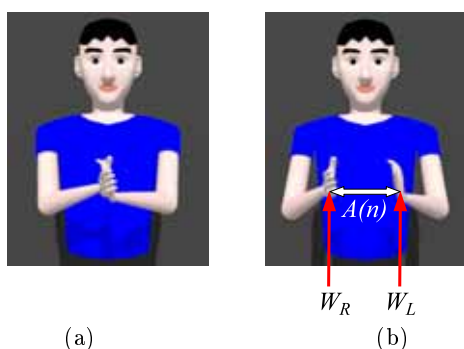


図 2: フレームの例: (a) 拍手を開始するとき, (b) W_L と W_R の間隔が最大値 $A(n)$ となるとき .

像として制作した . 動画映像の要素となる 1 つの画像がフレームとなる . 人間の上半身のみを表現するものとし, 図 1 に示す, 人間の両肩を結ぶ線分の中点を原点 $O(0, 0, 0)$ とし, 肩幅を長さの基準とした肩幅を 1 とする座標系を用い, POV-Ray[15] によるレンダリングを行い, 各フレームとなる画像を制作した . また, 肩幅以外の人体の各部の大きさを, 18 才以上 30 才未満の男子の身体の平均値 [16] に基づき, 肩幅に対する相対値として設定した . 可動となる関節は, 手首, 肘, 肩の 3 つの関節とした . ただし, 腕の付け根となる肩の関節については, 回転可能であるが, その座標は固定とした . 左手首の最上端の座標を W_L , 右手首の最下端の座標を W_R とし, 拍手の動作を, W_L および W_R の, x 座標および y 座標を固定し, z 座標のみを変化させることにより実現することとし, また, W_L と W_R は xy 平面に関して対称とした . また, 逆運動学に基づき, 手首の座標に連動して肘の関節の座標も変化させた .

アニメーションでは, 拍手を, 複数回, 繰り返すことになるが, n 回目の拍手の周期を $T(n)$ (秒) とし, また, n 回目の拍手における W_L と W_R の最大距離を n 回目の拍手の振幅 $A(n)$ とした . 図 2(a) は拍手を開始するとき, 図 2(b) は W_L と W_R の距離が最大値 $A(n)$ となるときのフレームの例である . 拍手, すなわち手を叩く動きを, CG アニメーションによりドラムを叩く手の動きを表現する例 [17] と, 実際の拍手の様子を撮影したビデオ映像を参考とし, 図 3 の模式図

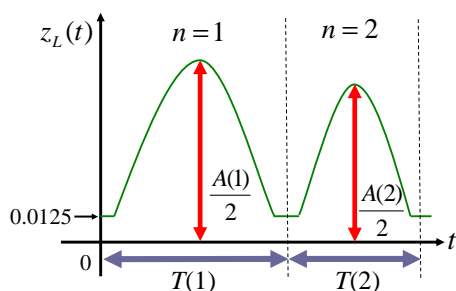


図 3: 拍手開始からの経過時間 t に対する $z_L(t)$ の模式図 .

に示す, 正弦波の下方部分が, 短時間, 一定値となるような波形とした . ここで, 図 3 は, 拍手開始からの経過時間を t としたときの, W_L の z 座標 $z_L(t)$ を示している . 手のひらの厚みを 0.025 としており, $z_L(t)$ が, その半分の 0.0125 となると, 手のひらの表面の z 座標が 0 となり, 図 2(a) に示す手のひらが合わさる状態となる . 実際の拍手のビデオ映像における手の動きでは, 手のひらが合わさるとき, 短時間, 手が同じ位置に留まっていたため, 前述のように $z_L(t)$ が 0.0125 で一定となる部分を設けることにより, 実際の拍手と同様に, 手のひらが合わさるとき, 短時間, 同じ座標に手が留まるようにしたものである .

以上の設定に基づき, n 回目の拍手の開始時点からの経過時間を $t_n (0 \leq t_n < T(n))$ (秒) とするとき, n 回目の拍手における $W_L (x_L(t_n), y_L(t_n), z_L(t_n))$ および $W_R (x_R(t_n), y_R(t_n), z_R(t_n))$ を次式で与えることとした .

$$x_L(t_n) = x_R(t_n) = 2.75 \times 10^{-1} \quad (1)$$

$$y_L(t_n) = y_R(t_n) = -6.86 \times 10^{-1} \quad (2)$$

$$z_L(t_n) = -z_R(t_n) = \begin{cases} s(t_n) & \text{for } s(t_n) \geq 0.0125 \\ 0.0125 & \text{for } s(t_n) < 0.0125 \end{cases} \quad (3)$$

ここで, $s(t_n)$ は, 次式で与えられる正弦波である .

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

拍手の周期 $T(n)$ および拍手の振幅 $A(n)$ には, 次式によりゆらぎを加えた .

$$T(n) = T_{avg} \left\{ 1 + \frac{T_f}{100} \times D_\beta(n) \right\} \quad (5)$$

$$A(n) = A_{avg} \left\{ 1 + \frac{A_f}{100} \times D_\beta(n) \right\} \quad (6)$$

ここで, T_f は拍手の周期のゆらぎの大きさを決定する係数, A_f は拍手の振幅のゆらぎの大きさを決定する係数である . 拍手音の周期を測定した従来の研究結果 [14] より拍手の平均周期を求めたところ 0.28(秒)であったため, $T(n)$ の平均値 T_{avg} を 0.28(秒) とした . $A(n)$ の平均値 A_{avg} は, 拍手の動きが無理なく感じられるよう, 前述の実際の拍手のビデオ映像を参

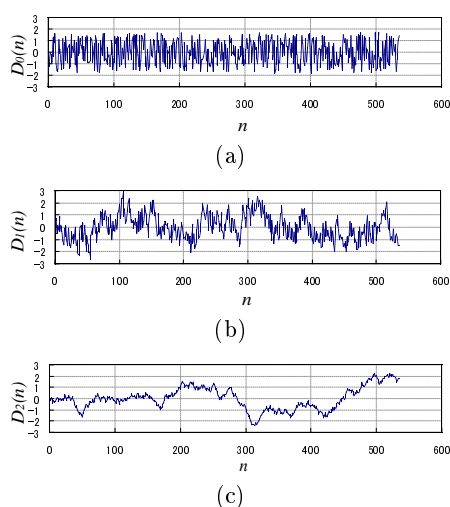


図 4: 時系列 $D_\beta(n)$: (a) $1/f^0$ ゆらぎ, (b) $1/f$ ゆらぎ, (c) $1/f^2$ ゆらぎ.

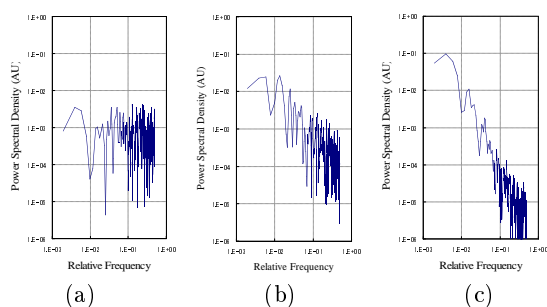


図 5: $D_\beta(n)$ のパワースペクトル: (a) $1/f^0$ ゆらぎ, (b) $1/f$ ゆらぎ, (c) $1/f^2$ ゆらぎ.

考にしつつ、試行錯誤により、肩幅の半分である 0.5 とした。 $D_\beta(n)$ は、白色雑音 $I(n)$ を次式に示すようなインパルス応答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 [18]、平均 0、分散 1 の $1/f^\beta$ ゆらぎの時系列を表す。

$$h(l) = \begin{cases} 1 & \text{for } l = 0 \\ \prod_{k=1}^l \frac{\frac{\beta}{2} + k - 1}{k} & \text{for } l \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$D_\beta(n) = \sum_{l=0}^N h(l)I(n-l) \quad (8)$$

ここで、 N はインパルス応答長であり、 $1/f^\beta$ ゆらぎの周波数成分の最低周波数が $1/N$ となり、 N 回の拍手にわたる周期が $1/f^\beta$ ゆらぎとなる最長周期となる。後述するように、評価実験においてはアニメーションを被験者へ 90 秒間提示したが、それよりも十分に長い 150 秒間程度のアニメーションを制作することとした。このとき、150 秒間での拍手の回数は 535(回)程

表 1: 変数の値の組み合わせ: (a) β, T_f, A_f の値, (b) c_f の値.

(a)				
	(A) $T_f = 0$ $A_f = c_f$	(B) $T_f = c_f$ $A_f = 0$	(C) $T_f = c_f$ $A_f = c_f$	(D) $T_f = 0$ $A_f = 0$
$1/f^0$	(i)	(iv)	(vii)	(x)
$1/f$	(ii)	(v)	(viii)	
$1/f^2$	(iii)	(vi)	(ix)	

(b)			
	ゆらぎ小	ゆらぎ中	ゆらぎ大
c_f	7.5	10.6	15

度となる (平均周期 $0.28 \times 535 \cong 150$ (秒)). それにあわせて N を 535 とし、 $1/f^\beta$ 型となる周波数範囲をできる限り広くし、 β の値によるゆらぎの波形の変化ができる限り大きくなるようにした。評価実験に用いた $1/f^0$ ゆらぎ、 $1/f$ ゆらぎ、 $1/f^2$ ゆらぎの時系列を図 4 に、また、それらのパワースペクトルを、横軸をサンプリング周波数に対する相対周波数として、図 5 に示す。最小二乗法により、相対周波数 0.01 以上で直線近似して求めた β の値は、それぞれ、 4.18×10^{-2} 、1.02、2.04 となり、それぞれのゆらぎが正確に実現されたことを確認した。

感性評価の実験においては、ゆらぎを加えない場合に比較し、 $1/f^0$ ゆらぎ、 $1/f$ ゆらぎ、 $1/f^2$ ゆらぎのうち、どのゆらぎを加えたほうがよいのか、また、ゆらぎを加える対象として拍手の周期と振幅が考えられるが、それをどのようにすればよいか、検討する必要がある。さらに、ゆらぎの大きさをどの程度にすればよいか、検討する必要がある。式 (5)、(6) における変数 (β, T_f, A_f) の値を、ゆらぎの大きさを決定する変数 c_f を用いて、表 1 に示す組み合わせに従い変化させることにより、次のように検討を行うこととした。

- 「 β の値」
 $D_\beta(n)$ には、 $1/f^0$ ゆらぎ、 $1/f$ ゆらぎ、 $1/f^2$ ゆらぎのいずれが良いか、検討する。
- 「ゆらぎを加える対象」
表 1(a) に示すように、次のうちいずれが良いか、検討する。
 - (A) 周期を一定 ($T_f = 0$) にして振幅のみにゆらぎを加えた ($A_f = c_f$) とき {(i), (ii), (iii)}
 - (B) 振幅を一定 ($A_f = 0$) にして周期のみにゆらぎを加えた ($T_f = c_f$) とき {(iv), (v), (vi)}
 - (C) 周期と振幅の両方にゆらぎを加えた ($A_f = T_f = c_f$) とき {(vii), (viii), (ix)}
 - (D) T_f および A_f を 0 として周期と振幅を一定とした、ゆらぎを加えないとき (x)
- 「ゆらぎの大きさ」(c_f の値)
 c_f の値は、小さすぎるとゆらぎが加えられたことが分からず、大きすぎると拍手の動作が不自

	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 .

然になるが、試行錯誤の結果、適切な値は 7.5 から 15 の範囲にあると考えられた。このため、上記の「 β の値」および「ゆらぎを加える対象」を適切に検討するためには、 c_f の値を、表 1(b) に示すように、次のうちどの場合にすれば良いか、検討する。

- ・ 7.5 とした場合 (ゆらぎ小)
- ・ 7.5 と 15 の対数等間隔での中間の値となる $10.6 (\cong 15/\sqrt{2} = 7.5 \times \sqrt{2})$ とした場合 (ゆらぎ中)
- ・ 15 とした場合 (ゆらぎ大)

上記の全ての組み合わせについて、それぞれ、拍手の回数が 535 (回) となる、150 秒程度の拍手のヒューマンアニメーションを制作した。一秒間に使用されるフレームの数がフレームレート (単位 frames per second, fps) となり、フレームレートの値が大きいほどキャラクターの動きが滑らかに見える。このため、フレームレートを評価実験において使用するディスプレイのリフレッシュレートの上限 (75(Hz)) にあわせて 75(fps) とすることにより、できる限りアニメーションの拍手の動きが滑らかになり被験者にとり見やすいようにした。

4 実験結果および分析結果

前章で述べたアニメーションについて、被験者による感性評価の実験を行った。評価の対象となるアニメーションの種類が多いため、まず、第一次評価実験において、比較的少数の被験者による予備実験として、「ゆらぎの大きさ」と「ゆらぎを加える対象」に関して検討し、評価対象のアニメーションの種類を絞り込んだ。次に、比較的多数の被験者による本実験として、第二次評価実験において「 β の値」に関して検討した。

両方の評価実験には、SD 法 (Semantic Differentials) による、図 6 に示す感性評価票を用いた。人間

表 2: 第一次評価実験結果における因子と因子荷重: (a) “ゆらぎ小” の場合, (b) “ゆらぎ中” の場合, (c) “ゆらぎ大” の場合 .

(a)

形容詞対 (+ 側)	第一因子	第二因子	第三因子
アクティブな	-0.791	0.282	0.0263
⋮	⋮	⋮	⋮
好きでない	0.223	0.693	0.0811
⋮	⋮	⋮	⋮
滑らかな	0.184	0.186	-0.698
⋮	⋮	⋮	⋮

(b)

形容詞対 (+ 側)	第一因子 自然さ	第二因子	第三因子
不自然な	0.875	0.0140	0.0441
人間らしくない	0.862	0.0364	0.188
心地わるい	0.807	0.279	0.119
⋮	⋮	⋮	⋮
アクティブな	0.206	-0.797	0.265
⋮	⋮	⋮	⋮
重々しい	0.0243	0.155	-0.768

(c)

形容詞対 (+ 側)	第一因子 自然さ	第二因子	第三因子
人間らしくない	0.847	0.161	0.100
心地わるい	0.835	0.146	0.00384
不自然な	0.830	0.128	0.0557
親しみやすい	-0.829	0.203	0.0713
⋮	⋮	⋮	⋮
おもしろい	0.126	0.796	0.0592
⋮	⋮	⋮	⋮
ありふれた	0.316	0.0366	0.756
⋮	⋮	⋮	⋮

表 3: 第一次評価実験での、ゆらぎの各大きさにおける、表 1(a) に示す (i) から (x) までの各被験者間平均値の、最高と最低との差。

形容詞対 (+ 側)	ゆらぎ小	ゆらぎ中	ゆらぎ大
不自然な	1.22	1.89	1.89
人間らしくない	1.11	2.00	1.67
心地わるい	1.33	1.33	1.33

はアニメーションを多様な観点から評価すると考えられるため、自然さ、人間らしさに関する感性ワードすなわち形容詞対である「不自然な-自然な」、「人間らしくない-人間らしい」と、アニメーションの評価に適切と考えられる他の形容詞対を含む、19組の形容詞対を文献 [19] より収集するなどして、感性評価票を構成した。評価の段階の数が増えると被験者にとり評価が難しくなるため、比較的段階の数の少ない5段階評定尺度法を用い、被験者には、各形容詞対について +2 から -2 までの評価をしてもらった。なお、被験者にアニメーションを提示する際には 20 インチのディスプレイ (SUN, GDM-20E20) を用い、被験者から約 1.5m 離れた位置にディスプレイを設置した。

4.1 第一次評価実験

表 1(b) に示す“ゆらぎ小”、“ゆらぎ中”、“ゆらぎ大”の、3つの場合について、それぞれ、表 1(a) に示す (i) から (x) までの 10 通りのアニメーションを用いた評価実験を、21 歳から 24 歳までの男性の 9 人の被験者に対して行った。各場合においては、被験者に、まずアニメーションを 90 秒間見せ、次に感性評価票に記入してもらい、という作業を、(i) から (x) までの 10 回、繰り返し行った。なお、アニメーションを被験者に見せる際には、(i) から (x) までのいずれのものかについて、また、ゆらぎの大きさについては伏せ、ブラインドテストとした。その結果、被験者一人あたり 30 通りの感性評価の結果が得られた。

得られた評価に対して因子分析を行った結果を、因子と因子負荷量に関して、表 2 に示す。因子分析においては、バリマックス回転を用い、固有値 1 以上の次元で因子の数を決定した。その結果、因子の数は 3 となり、各形容詞対ごとに 3 つの因子に対する因子負荷量が算出されたが、最も因子負荷量の絶対値が大きくなる因子に形容詞対が分類されるものとし、形容詞対を 3 つの因子に分類した。表 2 には、各因子ごとに、因子負荷量の絶対値が大きい順に形容詞対を並べてある。ただし、因子負荷量の絶対値が比較的大きい 0.8 以上となり、特定の因子に比較的大きく相関すると考えられる形容詞対は全て示しているが、因子負荷量の絶対値が 0.8 未満の形容詞対しかない因子の場合には、最も因子負荷量の絶対値が大きい形容詞対のみを示している。また、形容詞対の欄には、図 6 に示す評価が+(プラス)側の形容詞のみ示している。“ゆらぎ小”の場合には、因子負荷量の絶対値が 0.8 以上となる形容詞対はなかった。しかし、“ゆらぎ中”と“ゆらぎ大”の場合には、共通して、「不自然な-自然な」、「人間らしくない-人間らしい」、「心地わるい-心地よい」において、第一因子に対する因子負荷量の絶対値が 0.8 を超え、それらは、ゆらぎの大きさにかかわらず主要な形容詞対と考えられた。このため、それら 3 つの形容詞対が「ゆらぎの大きさ」に関する比較検討に最も適した形容詞対と考え、それらについての評価に着目した。また、“ゆらぎ中”と“ゆらぎ大”の場合における第一因子を「自然さ」と名づけた。

前述の 3 つの形容詞対について、9 人の被験者による評価の平均値を、30 通りの感性評価の結果ごとに、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。ゆらぎの各大きさにお

表 4: 第一次評価実験における“ゆらぎ中”での被験者間平均値:(a)「不自然な-自然な」、(b)「人間らしくない-人間らしい」、(c)「心地わるい-心地よい」。

(a)

	(A)	(B)	(C)	(D)
$1/f^0$	0.00	1.56	1.00	0.333
$1/f$	-0.333	0.667	-0.222	
$1/f^2$	0.556	0.667	0.111	
平均値	0.0740	0.963	0.296	0.333

(b)

	(A)	(B)	(C)	(D)
$1/f^0$	-0.333	1.11	1.33	0.444
$1/f$	-0.667	0.889	-0.111	
$1/f^2$	0.222	0.556	0.222	
平均値	-0.259	0.852	0.481	0.444

(c)

	(A)	(B)	(C)	(D)
$1/f^0$	0.556	1.11	1.11	0.333
$1/f$	-0.222	0.667	0.444	
$1/f^2$	0.222	0.333	0.333	
平均値	0.185	0.704	0.630	0.333

る、(i) から (x) までの各被験者間平均値の、最高と最低との差を、表 3 に示す。「心地わるい-心地よい」に関しては、ゆらぎの大きさにかかわらず差が同一となったが、「不自然な-自然な」に関しては、“ゆらぎ小”よりも、“ゆらぎ中”および“ゆらぎ大”の方が大きく、「人間らしくない-人間らしい」に関しては、“ゆらぎ中”が、“ゆらぎ大”および“ゆらぎ小”よりも大きかった。以上の結果から、“ゆらぎ中”の場合に (i) から (x) までの条件の差異による被験者間平均値の差異が最大になったため、“ゆらぎ中”が「ゆらぎを加える対象」および「 β の値」の違いを最も大きく評価に反映する場合と考えられ、それら 2 つを検討するために最適と考えられた。そこで、“ゆらぎ中”における被験者間平均値に関して、さらに詳しく検討した。

表 4 に、各形容詞対ごとに、“ゆらぎ中”における (i) から (x) までの被験者間平均値を示す。いずれの形容詞対に関しても、-(マイナス)の側の形容詞が肯定的な評価(自然な、人間らしい、心地よい)を表すため、被験者間平均値が低くなったほうが、より自然な、人間らしい、心地よい、良い印象を与えるものといえる。「ゆらぎを加える対象」に関して検討するため、表には、(A)、(B)、(C)のそれぞれにおける、被験者間平均値の平均値も示している。その平均値については、いずれの形容詞対においても、(A)の振幅のみにゆらぎを加えたときは、(D)のゆらぎを加えないときよりも低く、最も低い値となり、(C)の振幅と周期にゆらぎを加えたときが、(A)の次に低い値となった。そして、(B)の周期のみにゆらぎを加えたときが、(D)のゆらぎを加えないときよりも高く、最も高い値となった。また、各形容詞対における被験者間平均値の最低値をみると、いずれの形容詞対においても、(ii)のとき、すなわち「ゆらぎを加える対象」が(A)のと

表 5: 第二次評価実験における因子と因子負荷量 .

形容詞対 (+ 側)	第一因子 自然さ	第二因子
不自然な	0.899	0.130
違和感のある	-0.833	0.0277
人間らしくない	0.826	0.279
⋮	⋮	⋮
メリハリのある	0.0224	-0.773
⋮	⋮	⋮

きであり、そのなかでも $1/f$ ゆらぎを用いたときに、最低値 ((a), (b), (c) において、それぞれ、 -0.333 , -0.667 , -0.222) となり、全てマイナスの良い印象を与える結果となった。なお、(C) のときは、(a) と (b) の形容詞対において $1/f$ ゆらぎを用いたときにマイナスの値となったが、前述の最低値より高く、また、(c) の形容詞対においてはマイナスとはならなかった。よって、振幅にゆらぎを加えたときには、ゆらぎを加えないときよりも比較的良好印象を与えるという結果が得られたが、周期にゆらぎを加えたときは、むしろ、ゆらぎを加えないときよりも悪い印象を与えるという結果が得られたことがわかる。(C) のときは、振幅にゆらぎを加えたが、周期にも加えたために、(A) よりも悪くなったと考えられる。

以上のことから「ゆらぎの大きさ」を“ゆらぎ中”とした場合が「ゆらぎを加える対象」と「 β の値」を検討するために最適であり、また、「ゆらぎを加える対象」を (A) としたときに、最も自然で、人間らしく、心地よい、良い印象を与えたと考えられた。このため、第二次評価実験における最適な設定は、「ゆらぎの大きさ」を“ゆらぎ中”とし、「ゆらぎを加える対象」を (A)、すなわち周期を一定にして振幅のみにゆらぎを加えたとき {(i), (ii), (iii)} とすることと考えられた。

4.2 第二次評価実験

第二次評価実験では、拍手の周期を一定とし“ゆらぎ中”の大きさの $1/f^0$ ゆらぎ (i), $1/f$ ゆらぎ (ii), $1/f^2$ ゆらぎ (iii) を拍手の振幅のみに加えたときと、ゆらぎを加えないとき (x) という 4 つの条件に絞り、「 β の値」に関する評価実験を行った。また、信頼性の高い結果を得るため、より被験者数を増やし、19 歳から 24 歳までの 33 人の男性の被験者に対して、第一次評価実験と同様に、ブラインドテストとして行った。被験者には、4 種類のアニメーションについて、それぞれ、アニメーションを 90 秒間見せた後、感性評価票に記入してもらった。そして、次に、評価の正確さを期すため、1 つの画面を 4 等分に分割することにより 4 種類のアニメーションを同時に提示し、必要に応じて、任意の時間、感性評価票への記入を修正してもらった。その結果、被験者一人あたり 4 通りの感性評価の結果が得られた。

表 6: 第二次評価実験における、被験者間平均値、条件による被験者間平均値の差の絶対値、検定結果 (*印が付されたものが有意差あり): (a) 「不自然な-自然な」、(b) 「違和感のない-違和感のある」、(c) 「人間らしくない-人間らしい」.

(a)

	被験者間 平均値	被験者間平均値の差の絶対値		
		$1/f^2$	一定	$1/f^0$
$1/f$	-0.333	0.152	1.06*	1.15*
$1/f^2$	-0.182		0.909	1.00*
一定	0.727			0.0909
$1/f^0$	0.818			

(b)

	被験者間 平均値	被験者間平均値の差の絶対値		
		$1/f^2$	一定	$1/f^0$
$1/f$	0.394	0.121	1.03*	1.33*
$1/f^2$	0.273		0.909	1.21*
一定	-0.636			0.303
$1/f^0$	-0.939			

(c)

	被験者間 平均値	被験者間平均値の差の絶対値		
		$1/f^2$	$1/f^0$	一定
$1/f$	-0.333	0.212	0.970*	1.33*
$1/f^2$	-0.121		0.758	1.12*
$1/f^0$	0.636			0.364
一定	1.00			

得られた評価に対して第一次評価実験と同様な因子分析を行った結果、表 5 に示すように、因子の数は 2 となり、因子負荷量の絶対値が 0.8 を超えた形容詞対は、第一因子の「不自然な-自然な」、「違和感のある-違和感のない」、「人間らしくない-人間らしい」の 3 つであった。このため、第一因子を、第一次評価実験と同様に「自然さ」と名づけた。これら 3 つの形容詞対を主要な形容詞対と考え、次に、これらの形容詞対における被験者間平均値について、テューキーの WSD 検定 [20] を用い、有意水準を 1% に設定し、 $1/f^\beta$ ゆらぎによる効果の検定を行った。

表 6 に、前述の 3 つの形容詞対の 4 つの条件における被験者間平均値と、それらの間での差の絶対値を示す。表においては、ゆらぎを加えないとき、すなわち拍手の振幅と周期を一定としたときを「一定」と表している。なお、差の絶対値の右側に*印が付された箇所は、有意差が認められた組み合わせである。表 6(a) に示す「不自然な-自然な」に関しては、評価がマイナスのものが「自然な」ということになるため、最も自然であると評価されたときは $1/f$ ゆらぎを加えたときであり、 $1/f$ ゆらぎを加えたときのみが、ゆらぎを加えないときとの間で有意差があった。表 6(b) に示す「違和感のない-違和感のある」に関しては、評価がプラスのものが「違和感のない」ということになるため、最も違和感がないと評価されたときは $1/f$ ゆらぎを加えたときであり、 $1/f$ ゆらぎを加えたときのみが、ゆらぎを加えないときとの間で有意差があった。表 6(c) に示す「人間らしくない-人間らしい」に

関しては、評価がマイナスのものが「人間らしい」ということになるため、最も人間らしいと評価されたときは $1/f$ ゆらぎを加えたときであり、 $1/f$ ゆらぎを加えたときは、ゆらぎを加えないときとの間で有意差があった。

以上の分析結果より、ゆらぎを加えないときに対して、拍手の振幅のみに $1/f$ ゆらぎを加えたときのほうが、より自然で、違和感のない、人間らしい拍手のヒューマンアニメーションになるといえた。

5 結論

人間の様々な動作にみられる $1/f^\beta$ ゆらぎを拍手の周期および振幅に加えた、拍手のヒューマンアニメーションを制作し、ゆらぎを加えないときと比較するため、SD 法を用いて被験者による評価実験を行った。実験結果に因子分析およびテューキーの WSD 検定を適用し、 $1/f^\beta$ ゆらぎによる効果を検討した結果、次のことが結論として挙げられる。

評価実験には、多様な観点からの評価が行われるように、様々な 19 種類の形容詞対を用いたが、結果的に「自然さ」に関する形容詞対が、 $1/f^\beta$ ゆらぎによる効果の比較検討には最適であった。

従来研究において、人間の聴覚情報に訴える拍手音の合成において、拍手の時間間隔すわな周期にゆらぎを加えた場合に自然な拍手音が得られたと報告されている。それに対して、視覚情報に訴える拍手のヒューマンアニメーションについては、比較的中程度の大きさの $1/f$ ゆらぎを、拍手の周期ではなく、拍手の振幅のみに加えたとき、ゆらぎを加えないときよりも、より自然で、違和感のない、人間らしい拍手のヒューマンアニメーションになるといえた。

拍手以外の動作に関しても、その動作の振幅に $1/f$ ゆらぎを加えることで、より自然な、人間らしいヒューマンアニメーションとなる可能性がある。その点に関して、今後、検討する必要がある。

参考文献

- [1] T. Musha, K. Katsurai, and Y. Teramachi, "Fluctuations of human tapping intervals," IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-32, pp.578-582, 1985.
- [2] H. Yoshinaga, S. Miyazima, and S. Mitake, "Fluctuation of biological rhythm in finger tapping," Physica A, Vol.280, pp.582-586, 2000.
- [3] D. G. Dotov, L. Nie, and A. Chemero, "A demonstration of the transition from ready-to-hand to unready-to-hand," PLoS ONE (www.plosone.org), Vol.5, Issue 3, pp.2-9, March 2010.
- [4] 吉田倫幸, "1/f ゆらぎと快適性," 快適科学 (3 版), 長町三生 (編), pp.107-130, 海文堂, 東京, 1994.
- [5] D. Tolani, A. Goswami, N. I. Badler, "Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs," Graphical Models, Vol.62, pp.353-388, 2000.
- [6] 佐藤康二, 山田光宏, "1/f ゆらぎを用いたアニメーションに関する研究," 第 16 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集, p.107, 2008.
- [7] 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, Vol.61, No.7, pp.690-697, July 1992.
- [8] S. Ota, T. Fujimoto, M. Tamura, K. Muraoka, K. Fujita, and N. Chiba, "1/f^β noise-based real-time animation of trees swaying in wind fields," Proceedings of the Computer Graphics International, pp.52-59, 2003.
- [9] 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, Vol.4, No.2, pp.68-76, 2005.
- [10] 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, Vol.56, No.10, pp.1629-1632, 2002.
- [11] 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, Vol.J84-D-II, No.9, pp.2040-2047, Nov. 2001.
- [12] 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, Vol.J84-D-II, No.11, pp.2427-2436, Sep. 2001.
- [13] 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, Vol.J88-D-II, No.8, pp.1583-1591, Aug. 2005.
- [14] 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.
- [15] <http://www.povray.org>
- [16] 河内まき子・持丸正明, 2005 AIST 人体寸法データベース, 産業技術総合研究所 H16PRO 287.
- [17] V.B. Zordan and J.K. Hodgins, "Tracking and modifying upper-body human motion data with dynamic simulation," Proceedings of Computer Animation and Simulation '99, September, 1999.
- [18] N.J.Kasdin, "Discrete simulation of colored noise and stochastic processes and 1/f^α power law noise generation," Proceedings of the IEEE, Vol.83, No.5, pp.802-827, May 1995.
- [19] 長町三生, 感性工学のおはなし, pp.191-208, 日本規格協会, 東京, 1997.
- [20] 森敏昭, 吉田寿夫 (編), 心理学のためのデータ解析テクニカルブック, 北大路書房, 東京, 2001.

山田 光宏



1990年静岡大学工学部電子工学科卒業。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。1995年博士(工学)。同年茨城大学助手。1999年より茨城大学講師。1/f ゆらぎの芸術などへの応用に興味を持つ。芸術科学会, IEEE, 電子情報通信学会, 他会員。

佐藤 康二



2007年茨城大学工学部メディア通信工学科卒業。2009年茨城大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。同年日本電気通信システム株式会社入社。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。

麻生 明義



2009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。