

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360061

研究課題名(和文)自然事象の数理モデルと感性に基づく自然印象テクスチャ・形状の創発システムの開発

研究課題名(英文)Development of Emerging System of Textures/Patterns Representing Natural Impression Based on Mathematical Models of Natural Events and KANSEI

研究代表者

青山 英樹(Aoyama, Hideki)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：40149894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自然な印象を呈する(a)シボ(皮皺)模様、(b)木目模様、(c)水玉・抽象柄模様、(d)美的曲線模様を創発するとともに、これらの模様を感性(印象)により感覚的にデザインするシステムを開発した。システム開発において、次の～の手法を導入した。自然界の事象・状態を数理モデルとして構築し、その特徴パラメータの操作により模様(デザイン)を創発した。特徴パラメータと感性(印象)の相関を数理モデル化するための感性情報を収集した。パラメータと感性(印象)の相関を数理モデル化し、感性(印象)から自然印象模様をデザインした。

研究成果の概要(英文)：In this study, a system to emerge the following textures/patterns representing natural impressions; that is, (a) wrinkle texture, (b) wood grain pattern, (c) polka dots/abstract pattern, and (d) aesthetic curve pattern and to design the textures/patterns according to designer's KANSEI was developed. In the development, the following processes are introduced; that is, (1) textures/patterns are emerged by controlling the parameters of mathematical models which were constructed from natural events and natural states, (2) KANSEI data was gathered to construct correlation models between the mathematical parameters and KANSEI (impression), and (3) natural impression textures/patterns were designed from KANSEI (impression) based on the correlation models.

研究分野：デジタルデザイン，デジタルマニュファクチュアリング，CAD/CAM，意匠デザイン，生産システム，金型

キーワード：デザイン創発 テクスチャ 美的曲線 自然印象 感性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 工業デザインとして多用されている自然な印象を呈する代表的なテクスチャ(模様)は、シボ(皮皺)そして木目である。これらの模様は、自然物のコピーとしてデザインされているが、非効率のプロセスであり、コスト高となり、多様なデザインが得られにくいなどの問題がある。自然な印象を呈するシボ(皮皺)・木目デザインを効率的に生成する手法の確立が望まれている。

(2) 水玉模様や抽象柄模様はコンピュータシステムで生成可能であるが、現状では、一定ルールに基づく規則的模様となっている。自然な印象を呈する水玉模様や抽象柄模様のデザインは意匠デザインの分野で強く要望されており、その創発法の確立が期待されている。

(3) 工業製品のデザインの高度化のために自由曲線が多用されているが、自然界に存在するような美的曲線の工学的生成は確立しておらず、効率的美的曲線の生成法の確立が望まれている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、次の、のシステムを開発することを目的としている。

自然現象として現れるさまざまな事象・状態を数理モデルとして表現することにより、自然な印象を呈するテクスチャ(模様)や形状(曲線)を創発するデザインシステムを開発する。

テクスチャ(模様)や形状(曲線)に対して要求する印象を言葉(感性言語)で感覚的に表現し、感性に基づいて自然な印象を呈するテクスチャ(模様)や形状(曲線)を創発するシステムを開発する。

(2) 自然事象の数理モデルおよび感性に基づき、自然な印象を呈する(a)シボ(皮皺)模様、(b)木目模様、(c)水玉・抽象柄模様、(d)美的曲線を創発するシステムを開発する。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、自然な印象を呈する(a)シボ(皮皺)模様、(b)木目模様、(c)水玉・抽象柄模様、(d)美的曲線の多様解を創発するとともに、これらの模様を感性(印象)により感覚的にデザインするシステムを開発する。

(2) 次の ~ の手法を基本として研究を遂行する。

自然界の事象・状態を数理モデルとして構築し、数理モデルの特徴パラメータの操作により多様解(多様なデザイン)を創発するシステムを開発する。

自然界の事象・状態から構築された数理モデルの特徴パラメータと感性(印象)の相関を数理モデル化するための感性情

報を収集する。(アンケート調査の実施)アンケート情報より、自然事象・状態の数理モデル特徴パラメータと感性(印象)の相関を数理モデル化し、感性(印象)から自然印象模様をデザインするシステムを開発する。

## 4. 研究成果

(1) シボ(皮皺)模様創発システム

工学的自然感の導入

デザインされたシボ形状が自然な印象を与えることを本研究の重要な課題であると考え、自然界に潜在的に存在するといわれる“フラクタル”と“ $1/f$  ゆらぎ”をシステムに導入した。幾何学的フラクタルの生成法に基づいてフラクタル形状を生成し、そのフラクタル形状の組み合わせ配置によりシボの基礎形状を構築した。得られる基礎形状に対し、形状の持つパラメータに対して“ $1/f$  ゆらぎ”を与え、自然な印象を付与した。

シボ形状に印象の定量的制御方法

本研究では、テクスチャの解析などによく利用される2次元フーリエ変換のパワースペクトルに着目した。官能評価実験により、シボの印象の数値化を行い、パワースペクトルの特徴との関係を明らかにした。得られた結果を応用することで、シボ形状の定量的制御を可能とした。

シボ形状の生成方法

本システムでは、幾何学的フラクタルを採用した。幾何学的フラクタルでは、ジェネレータと呼ばれる線分で構成される幾何形状を定義し、それを構成する各線分をジェネレータ自身の形状で置き換えるプロセスを繰り返すことにより得られるフラクタルである。シボ形状を構成する1要素としてシボエレメントを定義、シボエレメントの組み合わせ配置によりシボ形状を生成することにした。

シボエレメントの組み合わせ配置によりシボ形状を生成するが、その際、人工皮革の皺模様に認められる「方向性」を生成するため、シボエレメントをある方向に連続的・断続的に配置し、シボの基礎形状とした。

“ $1/f$  ゆらぎ”の付与[1]

上述の方法で生成されたシボ基本形状は、同一のシボエレメントの等間隔配置であるため、規則的な印象を与える形状となっている。そこで、この基本形状に対し、“ $1/f$  ゆらぎ”の性質を付与し、自然な印象を発する形状とした。

幾何学的フラクタルであるシボエレメントは、細かな線分で構成されている。本研究では、シボエレメントの構成線分一本一本に対し“ゆらぎ”を付与した。“ゆらぎ”を付与するパラメータは、構成線分の両端点の $x$ 、 $y$ 座標位置、線分の幅、線分をシボの凹部とし、深さとした。これらの変化量を3次元的な $1/f$  ゆらぎ波形を生成した。

シボ(皮皺)実行結果

図1に実行結果を示す。ジェネレータの形状，格子点の配置規則，シボエレメントの配置規則，ゆらぎのパラメータを変更することで，多様な形状の生成が可能であった。



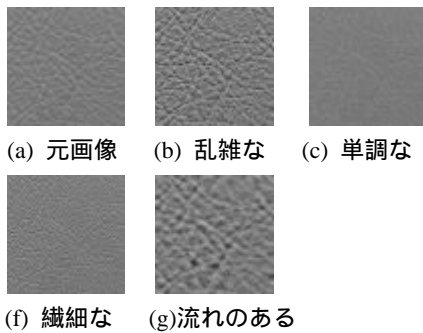
(a) 結果例1 (b) 結果例2 (c) 結果例3

図1 システムの実行結果例

印象の定量化と印象によるシボ模様制御  
シボ模様の印象は，次の(a)~(m)の感性言語で表現することとした。すなわち，(a)なめらかな，(b)凹凸がある，(c)あたたかさ，(d)自然な，(e)落ち着いた，(f)丈夫そう，(g)やわらかそう，(h)単調な，(i)複雑な，(j)繊細な，(k)乱雑な，(l)高級そう，(m)流れのある，である。

シボ模様の2次元パワースペクトル曲線[2]を低周波域と高周波域を分け，印象を制御するパラメータとして，低周波域の最小二乗近似直線の傾き，低周波域の切片，高周波域における最小二乗近似直線の傾き，高周波域における縦軸の重心を抽出した。

上述の(a)~(m)の感性言語に関する官能評価結果に基づき，2次元パワースペクトル曲線から抽出したパラメータで印象を制御し，2次元フーリエ逆変換することで所望の印象を持つシボ形状を生成した。感性言語によるシボ模様制御の結果を図2に示す。



(a) 元画像 (b) 乱雑な (c) 単調な  
(f) 繊細な (g) 流れのある

図2 シボ形状の定量的制御結果

## (2) 木目模様創発システム

### デジタル木目模様の生成手法

デジタル木目模様は，樹木生長シミュレーションによりデジタル樹木を構築し，そのデジタル樹木の切断面より獲得された。樹木生長シミュレーションは，公的機関より公表されている各地域の気象データを用いて，樹木の生物学的性質に基づいた生長モデルに基づいて行われた。デジタル樹木は，樹木生長シミュレーションによって得られた生長データを基に，独自に提案する仮想エネルギー法を用いて構築された。

樹木は，軸方向の生長である伸長生長と幹径方向の生長である肥大生長により形成さ

れる。本研究では，樹木の肥大生長に対して生育環境の影響を考慮した肥大生長モデルを構築し，さらに，肥大生長モデルを基礎として伸長生長モデルを構築した。肥大生長は，樹幹に毎年付け加わる新しい木材の断面積がほぼ一定[3]という樹木の性質を基に，等差数列によりモデル化を行った。1年間に生長する断面積増加量を $dS$ ， $n$ 年目の樹幹断面積を $S_n$ ，樹幹半径を $R_n$ とおくと，等差数列の一般項と円の面積から $n$ 年目の樹幹半径 $R_n$ は式(1)より求められる。

$$R_n = \sqrt{\frac{S_1 + (n-1)dS}{\pi}} \quad (1)$$

各年の断面積増加量 $dS$ は，水，温度，光の3要因によって算出される光合成速度によって導出される。伸長生長モデルは，小川が提案している直径と樹高の関係式である拡張相対生長式[4]を用いて構築された。 $n$ 年目の樹高を $H_n$ ，樹幹半径を $R_n$ とおくと，樹高 $H_n$ は式(2)より求められる。

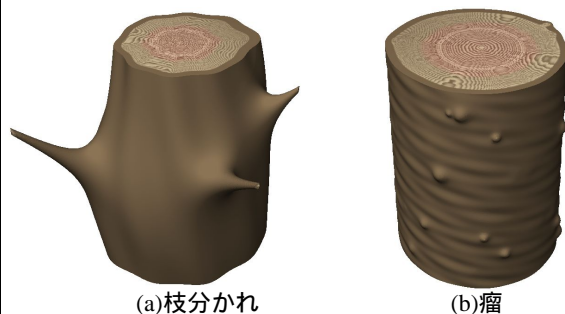
$$\frac{1}{H_n} = \frac{1}{A(2R_n)^h} + \frac{1}{H^*} \quad (2)$$

上式において， $H^*$ は樹種に依存する最大樹高， $A$ は樹種に依存する定数である。これらの生長モデルによって，樹木が生育した各年の生長量（肥大生長量・伸長生長量）が算出される。

木目模様の重要な意匠要素である生長輪，節，瘤を表現するため，デジタル樹木のモデリングに対して，鶴岡のポテンシャル法[5]を応用した仮想エネルギー法を提案した。仮想エネルギー法では，樹幹および樹枝の中心線部分に線電荷を，樹瘤に点電荷を与え，樹木モデルを構築する。生長シミュレーションで求められている各年の樹幹半径に相当するエネルギーを求め，電荷により形成される等エネルギー面を抽出することにより，樹幹や樹幹内部の生長輪，樹皮，枝皮を表現する。さらに，樹幹形状・樹枝形状は，複数の正弦波を合成した関数を半径方向に加算し形成される。このことにより，生長輪，樹皮，枝皮の半径方向値に対してゆらぎ付与した。本研究では，このように導出されたデジタル樹木情報よりソリッドテクスチャモデルを構築し，デジタル樹木として表示する。

### システムの実行結果

デジタル樹木の生成例を図3に示す。仮想



(a) 枝分かれ (b) 瘤

図3 デジタル樹木

エネルギー法により枝分かれや瘤を生成できることを確認した。また図4に示すように、本システムは、STLデータ形式により切断面形状を与えることにより、デジタル樹木を任意形状に切断し、その木目模様を生成することが可能である。また、図5～図12は、本システムで創発された様々な木目模様を示している。

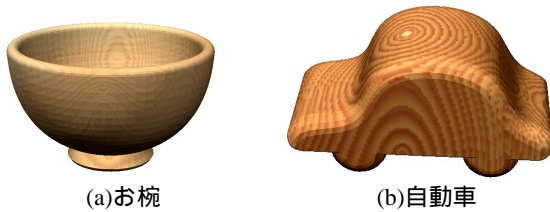


図4 任意形状切断



(a) 柁目 (b) 板目  
図5 スライス切断

図6 ロータリー切断

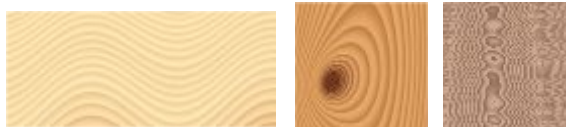


図7 ハーフロータリー切断

図8 節

図9 縮み空



図10 ロータリー切断

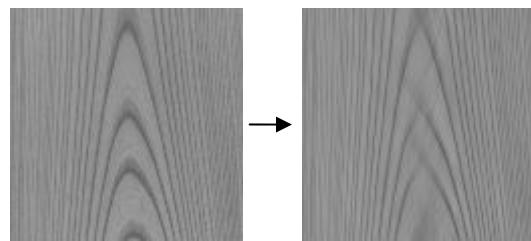
図11 瘤空

図12 渦空

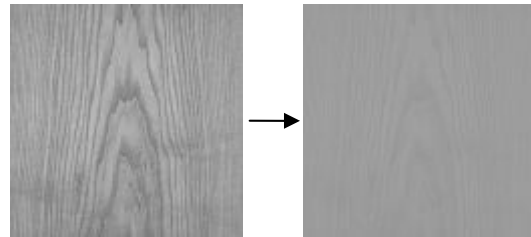
#### 感性に基づく木目模様デザイン

顧客の要求する印象を呈する木目模様を生成するため、木目模様の印象を定量化し、印象と模様の特徴を表す印象パラメータとの相関関係を導出し、回帰式を得る。同回帰式より顧客が要求する印象から印象パラメータ値を求め、木目模様を生成する。印象の定量化は、木目模様の印象を表す感性言語に評価値を与えることで実現した。木目模様の特徴を表す印象パラメータは、木目模様の二次元フーリエ解析により得られるパワースペクトルから抽出した。

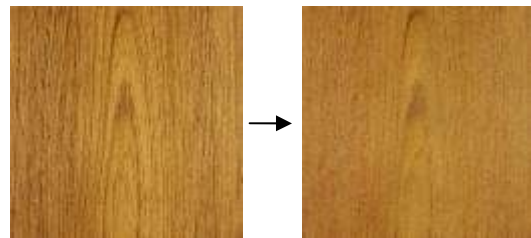
木目模様の印象を定量的に表現するため、感性言語に評価値を与える方法を採用した。模様に関する過去の論文、木目カタログ、木目デザインへのインタビュー、一般辞書などを参考に、木目模様の印象を表す50個の形容詞を抽出し、クラスタ分析により8個の感性言語（高級感のある、なごんだ、深みのある、繊細な、寂しい、単調な、複雑な、派手な）を選定した。選定した感性言語を用いて官能評価実験を行った。樹種や木理の異なる17種の木目模様を試料とし、15名の被験者（学生）に対して、それぞれの感性言語に関して最も当てはまる場合には5点、最も当て



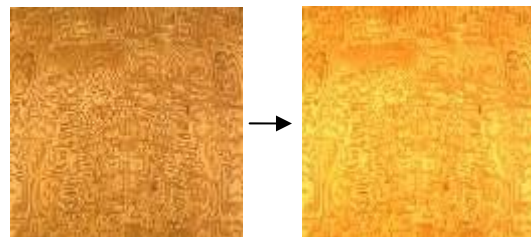
(a) なごんだ



(b) 単調な



(c) 寂しい



(d) 派手な

図13 システムの実行結果

はまらない場合に1点を採点する5段階評価法によるアンケートを行った。得られたアンケート結果の平均値を感性データとして構築した。

開発したシステムの実行結果の例を図13に示す。図13(a), (b)は、グレースケール模様（元模様）に「なごんだ」、「単調な」という印象を最大値5点とした結果、(c), (d)はカラー模様（元模様）に「寂しい」、「派手な」という印象を最大値5点とした結果である。提案手法の有用性を確認するため、評価実験を行った。評価実験では、感性言語の評価値を変化させた試料を5枚ずつ用意し、その感性言語に対し当てはまる順位を回答する順位法を用いた。評価結果をフリーマンの検定法とスピアマンの順位相関係数を用いて判定した。その結果、グレースケール模様では、8個中6個の感性言語（なごんだ、繊細な、寂しい、単調な、複雑な、派手な）で、カラー模様では、8個中5個の感性言語（高級感のある、なごんだ、寂しい、単調な、派手な）で有用性を確認できた。以上より、パワースペクトル特徴量により木目模様の印象を制御できることがわかった。

### (3) 水玉・抽象柄模様創発システム

#### 水玉模様生成法

水玉模様創発システムは、配色デザインサブシステムと配置デザインサブシステムから構成されている。

#### - 1 配色デザインサブシステム

色の印象を表す9つの言葉(色印象語)を選定し、被験者15名による予備実験アンケートにより、18個の単色に対する9つの色印象語に対する得点を獲得し、同データを基にHSV値(色相,彩度,明度)と9つの色印象語の関係をニューラルネットワークでモデル化した。9つの色印象語は、「かわいい」、「すっきりした」、「優雅な」、「モダンな」、「どっしりした」、「ダイナミックな」、「派手な」、「ロマンチックな」、「ダンディな」である。これらの色印象語は、その内在する意味において重畳し、互いに独立していない。このため、ニューラルネットワークの構築の際に、アンケートデータに対する因子分析により独立因子を抽出し、“各印象語の因子負荷量×各印象語の重み係数”の総和を入力層とした。9つの色印象語に対する重み係数を与えることにより、その印象を呈する色、すなわちHSV値を決定することができる。

#### - 2 配置デザインサブシステム

配置デザインサブシステムは、水玉パラメータ決定モジュールと水玉配置モジュールから構成されている。

ある面積の中に複数の半径からなる円盤を配置することにより、水玉模様を生成する。各水玉の個数は、“水玉半径の逆数”と“その水玉の総面積”の関係が、両対数軸において直線の関係になるように決定する。この直線の傾き $a$ は、自然現象であるゆらぎを定量化し、水玉の配置から受ける印象を制御するパラメータ(ゆらぎ係数)となることがわかっている。

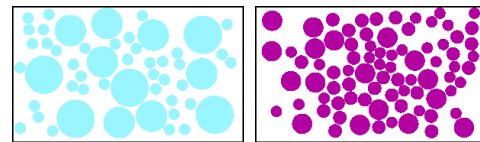
配置の印象を表す7つの言葉(配置印象語)を選定し、被験者19名による予備実験アンケートにより水玉配置に対する配置印象語の得点を獲得し、同データを基に水玉模様デザインと7つの配置印象語の関係をニューラルネットワークでモデル化した。7つの配置印象語は、「すっきりした」、「精密な」、「力強い」、「シンプルな」、「かわいらしい」、「動的な」、「まとまりのよい」である。7つの配置印象語に重み係数を与えると、水玉パラメータ(半径 $r_1, r_2, r_3$ , ゆらぎ係数 $a$ )を決定する。

水玉パラメータ決定モジュールにおいて、ゆらぎ係数 $a$ と水玉模様の半径 $r_i$ ( $i$ は $1 \sim j$ (整数)で、 $j$ は水玉模様を構成する水玉の種類の数)を与えることにより、配置される各水玉の個数が決定される。その水玉となる円盤を矩形の容器に入れ、その容器を揺動運動させながら容器の面積を指定の大きさになるまでゆっくり縮小させる。その過程で、円盤は他の円盤や壁と衝突を繰り返しながら配置される。これにより、自然な印象を呈

する配置が可能となる[6]。

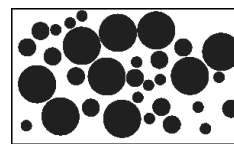
#### 水玉模様創発結果

図14(a)~(c)は、システムにより創発された水玉模様例を示している。図14(a)は、9つの配色印象語のうち「すっきりした」の重み係数を最大(5点)、7つの配置印象語のうち「シンプルな」の重み係数を最大(5点)とし、これら以外の印象語の重み係数を最小(1点)とした結果である。図14(b),(c)に関しても同様である。色と配置に対する印象により、異なる水玉模様が創発されていることがわかる。



(a) 色: すっきりした  
配置: シンプルな

(b) 色: 優雅な  
配置: 精密な



(c) 色: モダンな  
配置: 動的な

図14 水玉模様創発結果

### (4) 美的曲線創発システム

#### 形状評価指標の提案

デザイナーは、曲線・曲面の“曲率の変化の度合い”や“形状の複雑さ”を暗に意識しながら形状の具現化(デザイン)を行っているといわれている[7]。“曲率の変化の度合い”を表す指標として、曲線に含まれる曲率とその割合(度数)を両対数軸で表したときの度数分布図(曲率対数分布図という)の分布の傾きが有効であるという提案[7]がなされている。

本研究ではこの“曲率対数分布図の傾き”に加えて、曲がり具合を定量化するための“曲率半径総和”, および曲率を出現頻度順に並べた“Zipf分布図”, 曲率分布の複雑さを定量化するための“曲率分布情報エントロピー”と形状の複雑さを定量化するための“フラクタル次元”を形状の印象を定量化する指標として提案した。曲面形状を評価対象とする際には、評価曲率として最大曲率と最小曲率を用いた。

### (5) 得られた成果の国内外における位置づけ

#### シボ(皮皺)模様の創発(デザイン)に関して

自然事象の数理モデルの一つである“フラクタル”をCG表現に応用する研究は多くみられるが、幾何的印象模様のレベルを超えていない。自然な印象を呈するデザイン創発に対して、自然界に内在する特徴である“ゆらぎ”を利用する研究もみられるが、一種のノイズ的要素としての利用に止まっており、自然印象を呈するに至っていない。

本研究で開発したシボ模様創発システムでは、“フラクタル”と“ゆらぎ”を組み合わせることでモデル化することにより、自然の印象を呈するデザインを可能としており、“ゆらぎの程度”と“感性”の数理モデルを導出し、感性による自然印象シボ模様の創発を実現している。

木目模様の創発（デザイン）に関して樹木のモデリングのために数理モデルを利用している研究はいくつかみられるが、その多くは樹木の外形形状のモデリングを目的としている。樹木の内部構造のモデリングを目的とした研究もいくつかあるが、幾何的モデリングに対して強制的なゆらぎ成分を加えた手法に止まっている。

本研究では、各地・各年の気象情報を基に樹木の成長に“ゆらぎ”成分を付加した電荷ポテンシャル数理モデルを構築し、木目模様を創発している。

水玉・抽象柄模様の創発（デザイン）に関して

本研究では、感性と水玉の組合せの数理モデルを導出し、感性より水玉の組合せを決める手法を開発した。従来の抽象柄模様は、幾何的相似形状の一定ルールによる配置であり、幾何学的手法に止まっている。本研究では、生物の生長過程や熔融金属の凝固結晶化過程を数理モデルとして構築し、自然な印象を呈する模様を創発した。

美的曲線の創発（デザイン）に関して

本研究では、曲率変化の程度と感性（印象）の数理モデルを明らかにし、従来研究にはない感性を基に曲率変化の程度を導出し、それを基に美的曲線を創発した。

#### <引用文献>

- [1] 桃井貞美, CG による質感表現のための 3 次元連続な揺らぎの生成手法, 長野県情報技術試験場研究報告, No.16 (2000), pp.23.
- [2] 北垣亮馬, 兼松学, 野口貴文, 2 次元フーリエ変換による打放しコンクリート視覚情報の定量的評価に関する研究, 日本建築学会 構造系 論文集, No.597 (2005), pp.33-38.
- [3] ピーター・トーマス: 樹木学, 築地書館, (2001), p.154.
- [4] 小川辰入: 個体群の構造と機能, 朝倉書店, (1980), p.221.
- [5] 鶴岡信治: ポテンシャル法を用いた木目の表示方法について, NICOGRAPH '85 論文集, (1985), pp.83-88.
- [6] 荒井誠, 他 3 名: 多数円板の矩形内配置問題 (振動制御法によるアプローチ), 日本機械学会 論文集 (C 編), Vol.64, No.627(1998), pp.4321-4330.
- [7] 原田 利宣, 中嶋 信幸, 栗原 祐介, 吉本 富士市: 視覚言語を用いた曲線の自動フェアリングシステム, デザイン学研究, Vol. 47, No.143 (1996), 21-28.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### [雑誌論文](計10件)

木村文彦, 大家哲朗, 青山英樹, 意匠デザインにおける高品質形状のための曲率単調曲線生成手法, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 80, No. 6, 2014, 598-603.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/80/6/80\\_598/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/80/6/80_598/_pdf)

秋山涼, 青山英樹, 大家哲朗, デジタルスタイルデザインに関する研究 - 要求する印象を呈する木目模様の生成法 -, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 80, No. 5, 2014, 484-490.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/80/5/80\\_484/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/80/5/80_484/_pdf)

蒲原有紀, 青山英樹, 大家哲朗, デジタルスタイルデザインに関する研究 - 感性言語による水玉模様デザイン創発システム -, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 79, No. 9, 2013, 853-859.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/79/9/79\\_853/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/79/9/79_853/_pdf)

Ryo Akiyama, Takuro Mori, Hideki Aoyama, Tetsuo Oya, Digital Design Method of Wood Grain Pattern Based on Kansei, International Journal of CAD/CAM, 査読有, Vol. 13, No. 2, 2013, 13-21.

<http://www.ijcc.org/ojs/index.php/ijcc/article/viewFile/243/149>

#### [学会発表](計13件)

秋山涼, 青山英樹, 大家哲朗, 要求する印象を呈する木目模様の生成法 - カラー模様への対応 -, 2013 年度精密工学会秋季大会 学術講演会, 2013 年 9 月 13 日, 関西大学 (大阪府・吹田市).

秋山涼, 青山英樹, 大家哲朗, 感性に基づく木目模様デザインに関する基礎研究, Design シンポジウム 2012 講演論文集, 2012 年 10 月 17 日, 京都大学 (京都府・京都市).

蒲原有紀, 青山英樹, 大家哲朗, 自然現象のモデル化に基づく模様生成法, Design シンポジウム 2012 講演論文集, 2012 年 10 月 17 日, 京都大学 (京都府・京都市).

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

青山 英樹 (AOYAMA, Hideki)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 40149894

##### (2) 研究分担者

大家 哲朗 (Oya, Tetsuo)  
慶應義塾大学・理工学部・専任講師  
研究者番号: 10410846