原著論文

アニメーション刺激を用いた都市景観評価 に対する動学的モデル ーカルマンフィルタによる時系列解析ー[†]

長谷川 渡^{*1}・松下 裕^{*2}

本論文では、過去と現在の景観刺激の相互作用を考慮に入れられる都市景観の時系列解析手法を提案する。相互作用項を有するモデルと相互作用項を有しない加法形モデルの2つ評価モデルが用意され、カルマンフィルタで評価値を推定するために自己回帰過程で状態空間表現される。相互作用を考慮する必要性はこれらのモデルを都市景観の評価問題に適用したときの推定精度を比較することにより検討される。これは観測結果を加法形モデルの適用条件と照らし合わせることによっても検討される。これらの検討は相互作用考慮の必要性に対して肯定的な回答を与える。さらに、建物壁面色彩の適切な与え方に対して意見を述べる。

キーワード：都市景観、カルマンフィルタ、時系列解析、相互作用、アニメーション

1. はじめに

コンピュータグラフィックス技術の発展に伴い、建築や都市工学の分野では、動画像刺激を用いた都市景観評価の実験[1, 2]が行われるようになった。これらの結果を現実の都市景観設計に活かすためには、景観の時間経過が評価に与える影響を調べることが肝要であるが、この種の研究は殆どなされていないのが現状である。その原因として都市景観評価の時系列データの解析手法が構築されていないことが挙げられるであろう。

この現状を鑑みて、宮腰、松下[3]は、加法形モデルによる時系列データの解析手法を提案した。しかし、加法形モデルでは、各時間ピリオドの評価値がそのピリオドの景観刺激のみに依存するという仮定を設けているため、ピリオド間の相互作用を考慮できないという欠点を含んでいる。また、著者らの最近の研究[4]では、寒色壁面を連続提示したときの最終時間ピリオドのように累積的评价値(最初から現時点まで刺激を提示したときに得られる評価値)にある程度大きな変化が生じる場合、時系列データの評価問題への加法形モデルの適用妥当性は疑わしいという知見が得ら

れた。

本研究の目的は、都市景観評価において過去の刺激の影響を考慮して現時点の評価値を算出できる時系列解析手法を提案することである。この問題に対して、カルマンフィルタは有効な解決手段となり得る。なぜなら、観測不能な時間ピリオドの評価値を未知変数として推定することができ、さらに逐次的な予測・更新は評価実験と整合的であるからである。ところで、我々の最大の関心は、時間ピリオド間の相互作用が評価に対して本質的であるか否かを解明することにある。基本的に、この問題の解決は相互作用項を含むモデルと含まないモデルの優劣を判定することによって行われる。そのために、まず加法形タイプと相互作用タイプのモデル化関数を用意し、それぞれを自己回帰過程(AR過程)によって状態空間表現する。次に、パラメータ数とカルマンフィルタによる推定精度を勘案してモデルの優劣を判定し、相互作用の本質性を調べる。もし相互作用が本質的ならば、どの程度過去の刺激に遡って評価する必要があるかも検討する。また、移動平均過程(MA過程)による解析も行い、評価値の変化が誤差レベルの変動では説明がつかないことも検証する。本研究では、都市景観刺激として建物壁面色彩を変動要因としたアニメーションを用いる。特に、相互作用の検討には被験者の選好特性を考慮することが重要である。実際、累積的评价値にある程度の変化が生じる局面で相互作用は本質的になる可能性があるが、その変化は被験者の選好特性に大きく依存するからである。そこで、木多・奥・船橋・紙野[5]の知見

[†] A Dynamic Model for Evaluation of Cityscapes based on Animation stimuli - Time series analysis by Kalman Filtering -
Wataru HASEGAWA and Yutaka MATSUSHITA

^{*1} 株式会社デュオ・プロダクション
DUO PRODUCTION Co., Ltd.

^{*2} 金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

に従い、被験者を壁面色彩の統一性を重視するグループとそうでないグループに分けて検討を行う。これらの結果を踏まえて、都市景観設計で問題にされるべき“景観列の与え方”に対する考察も行う。言わば、都市景観設計の時間軸展開の可能性について言及する。

また、被験者から得られる観測結果に基づいての相互作用の本質性に関する検討も行う。具体的には、観測結果を加法形モデルの適用条件と照らし合わせることで相互作用の本質性を調べる。こうして得られた結果とモデルの優劣判定による結果との整合性を調べることで、モデルの優劣判定という機械的な作業で得られた相互作用の評価に意味があるかどうかを検証する。

2. モデル化関数

本研究では、動画像刺激に対して各時間ピリオド(時間ピリオド)の評価値を算出する。このためには、アニメーションを提示し適当な時間ピリオドの評価値を被験者より聞き出すという方法が最も単純であるが、この方法で時間ピリオドの評価値を回答することは困難であろう。実際、ある時間ピリオドの評価にはそれ以前の時間ピリオドの景観刺激の影響が反映され、正確にその時間ピリオドを意識すること自体が困難になるからである。そこで、まずアニメーションを最初から最後まで提示して被験者から“累積的”評価値を聞き出し、次いでモデル化関数を仮定して時間ピリオドの評価値を算出するという方法を用いる。このとき、アニメーションに3種類の提示時間を設定すれば、カルマンフィルタにより3つの時間ピリオドの評価値を求めることが可能になる。具体的な3種類の提示時間は次のように設定される。全45秒のアニメーションを3等分し、それぞれの時間区分をピリオド1, 2, 3とすると、

提示時間1 = ピリオド1

提示時間2 = ピリオド1 + ピリオド2

提示時間3 = ピリオド1 + ピリオド2 + ピリオド3となる。なお、アニメーション刺激は各ピリオドとも建物壁面色彩以外の内容(形態、道路等)は一定である。

このもとに、解析で用いるモデル化関数を説明する。以下、提示時間3の時系列刺激を (x_1, x_2, x_3) と表わし、その累積的評価値を $y(x_1, x_2, x_3)$ と記述する。ここに、各 x_i には建物壁面色彩の質的データ(暖色、寒色、中性色)が代入される。各時間ピリオドの評価値を与える関数を u_i ($i=1, 2, 3$)とする。

加法形モデルとは、累積評価値 y がピリオド評価値 $u_i(x_i)$ ($i=1, 2, 3$)の時間平均で表わされるモデルで

ある：

$$y(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{3}(u_1(x_1) + u_2(x_2) + u_3(x_3)). \quad (1)$$

(1)式において各ピリオドの評価値はそのピリオドの景観変数にのみ依存することに注意されたい。なお、ピリオドの評価値は観測不可能である。例えば、ピリオド3の刺激のみを提示しても、それは提示時間1の実験を行ったにすぎないことになる。

さらに、次のモデルを考える。

$$y(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{3}(u_1(x_1) + u_2(x_1, x_2) + u_3(x_1, x_2, x_3)) \quad (2)$$

これもピリオド評価値の時間平均で表わされているが、もはや加法形モデルではない。実際、(2)式の右辺第3項を $u_3(x_1, x_2, x_3) = u_1(x_1)u_2(x_2)u_3(x_3)$ とすれば3次の相互作用項と解釈される。本研究では、右辺第2項、第3項は

$$u_2(x_1, x_2) = a(x_1, x_2)u_1(x_1), \quad (3)$$

$$u_3(x_1, x_2, x_3) = b(x_1, x_3)u_1(x_1) + c(x_2, x_3)u_2(x_1, x_2) \quad (4)$$

で表わされる。(3), (4)式の各項は過去の刺激の関数と現在の刺激を変数に含む関数の積であるから相互作用項である。なお、このようにピリオド2, 3の相互作用項をそれ以前のピリオドの評価関数の加重和で表した理由は、次節でカルマンフィルタを用いるとき、(2)式のモデルを自己回帰過程で状態空間に表現するためである。以下、 b が項等的に0でないとき(2)式のモデルを2次の相互作用モデルと呼び、 b が項等的に0のとき1次の相互作用モデルと呼ぶ。

3. 実験方法

作成した実験刺激は被験者に住宅街を遊歩するイメージを与えるアニメーションである。図1にアニメーションの一部を示す。基本的には6種類のアニメーション刺激を使用するが、2節で示したようにピリオド評価値を抽出するため、45秒のアニメーション刺激に対して提示時間を3つ用意した。また、建物壁面色彩を暖色、寒色、中性色の3種類とした。なお、暖色は茶系、寒色は青系、中性色は緑系の壁面を用いた。使用した刺激の表記法を示す。建物壁面色彩が暖色の場合を w 、寒色の場合を c 、中性色の場合を g とする。このもとに、例えば、ピリオド1, 2, 3において暖色が連続する刺激を (w, w, w) と記述し、ピリオド1, 2が寒色でピリオド3が中性色の刺激を (c, c, g) と記述する。以上の表記法により、提示時間3の6種

図1 アニメーションの一部

類の刺激と提示時間1および2の刺激を記述すると次のような10刺激になる。

提示時間1 : $(w), (c)$

提示時間2 : $(w, w), (c, c)$

提示時間3 : $(w, w, w), (w, w, g), (w, w, c),$
 $(c, c, w), (c, c, g), (c, c, c)$

ここで、ピリオド1, 2では暖色と寒色の刺激を用い、ピリオド3のみに中性色刺激を含めた理由は次の通りである。まず、既往研究[4]で、加法形モデルの適用が疑わしくなるのは(すなわち、相互作用の必要性の兆候が顕著になるのは)寒色刺激を連続提示したときのピリオド3に至ってからであり、この局面での挙動を詳細に調べたかったからである。また、既往研究の結果より、相互作用の本質性を評価する上で寒色壁面を連続させた刺激は不可欠であり、その対比として(実際に住宅街で使われることの多い)暖色壁面の連続刺激を設定することは妥当であると思われる。さらに、本研究では、一人の被験者に上の動画像刺激を全て提示してアンケート調査を行う必要があり、被験者の負担を軽減したかったからである。従って、提示時間3の刺激は2つに類別される。すなわち、ピリオド2まで暖色壁面を連続提示したものと寒色壁面を連続提示したものである。以下では、前者を暖色基調刺激、後者を寒色基調刺激と呼ぶ。

被験者にはそれぞれの刺激提示終了後に「望ましさ」について7段階尺度で評価させた。なお、実験刺激は200インチのスクリーンに投影し、刺激の提示順序による影響を減らすため、実験計画法の乱塊法[6]を用いて8種類の提示順序を設けた。被験者は金沢工業大

学の学生61名である。従って、延べ610($=10 \times 61$)の回答が得られた。

4. 解析手法

4.1 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは、状態空間を仮定してシステムの線形射影を逐次的に予測・更新していくアルゴリズムである。本研究では、都市景観評価の時系列解析に適切なモデル化関数を選定するために、状態空間表現に対して1次と2次のAR過程(以下、AR(1), AR(2))を考える。1次と2次の相互作用モデルにはAR(1), AR(2)過程を、加法形モデルには特殊なAR(1)過程を対応させる。

以下、2次の相互作用モデルの状態空間表現を概説する。このとき、パラメータ行列が説明変数(i.e. (x_1, x_2) または (x_1, x_2, x_3))に依存する状態空間モデル[7 13.8節]を用いるが、簡単のため、説明変数を省略して提示時間 t ($=1, 2, 3$)の累積評価値を y_t 、ピリオド t の評価値およびその母平均を u_t, μ_t と記述する。ピリオド2, 3で変数 x_i ($i \leq t$) の値が定まると、(3), (4)式の a, b, c を確定値と考えて、平均の線型性から

$$\mu_2 = a\mu_1 \quad (5)$$

$$\mu_3 = c\mu_2 + b\mu_1 \quad (6)$$

を得る。再び(3), (4)式を用いると、次のような u_t を確率変数とする回帰モデルを考えることができる。

$$u_2 - \mu_2 = a(u_1 - \mu_1) + \text{誤差}$$

$$u_3 - \mu_3 = b(u_1 - \mu_1) + c(u_2 - \mu_2) + \text{誤差}$$

この関係を利用して状態空間表現を構築する。いま、各ピリオドの状態ベクトルは直近3時点のピリオド評価値と平均値の差(i.e., 評価値の母平均回りの変動)の組とする。すなわち、

$$\xi_t = [d_t, d_{t-1}, d_{t-2}]'$$

とする。ここに、記号' はベクトルの転置を取ることの意味する。 d_t は $u_t - \mu_t$ と表わされるべき量であるが、推定は u_t, μ_t と分けて行われるわけではなく、 d_t という量に対して行われる。なお、 d_0 および d_{-1} は0とする。このとき、状態方程式および観測方程式はそれぞれ次式で表わされる。

$$\xi_{t+1} = F_t \xi_t + v_{t+1},$$

$$y_t = H_t(A_t' + \xi_t) + w_t,$$

ここに, F_t は 3×3 の時変変数行列であり, H_t, A_t は 3×1 の時変変数ベクトルである. 特に, F_t, A_t の成分は説明変数の関数である (次式参照). v_t と w_t は攪乱項であり, それぞれ 3×1 のベクトルおよびスカラーである. これらはそれぞれ分散 σ^2, ω^2 のホワイトノイズと仮定する. 具体的なAR(2)過程の F_t, H_t, A_t を示す.

$$F_1 = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} c & b & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (a, b, c > 0)$$

$$H_1 = [1 \quad 0 \quad 0] \\ H_2 = [1/2 \quad 1/2 \quad 0] \\ H_3 = [1/3 \quad 1/3 \quad 1/3]$$

$$A_1 = [\mu_1 \quad 0 \quad 0]$$

$$A_2 = [\mu_2 \quad \mu_1 \quad 0]$$

$$A_3 = [\mu_3 \quad \mu_2 \quad \mu_1] \quad (\mu_1, \mu_2, \mu_3 > 0)$$

(5), (6)式より, μ_2, μ_3 は μ_1 より定まることに注意すると, 2次の相互作用モデルでは未知数は μ_1, a, b, c および攪乱項の分散 σ^2, ω^2 の6種類である. なお, 未知数は正の実数という制約のもとに推定される. なお, 1次の相互作用モデルでは F_2 において $b = 0$ とおけばよい.

加法形モデルのために特別なAR(1)過程を考える. すなわち, 行列 F_1, F_2 において, $a = c = 1, b = 0$ とする. このとき, 関数 u_1, u_2, u_3 の間には(3), (4)式のような従属関係がないので, 母平均は(5), (6)式のように定まらない. 従って, 加法形モデルの未知数は $u_1, u_2, u_3, \sigma^2, \omega^2$ の5種類である.

さらに, 2次のMA過程 (MA(2)) を考える.

$$y_t = \mu_1 + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2}$$

ここに, θ_1, θ_2 は定数であり, 各 ε_t は攪乱項であり分散 σ^2 のホワイトノイズとする. なお, $\varepsilon_{-1} = \varepsilon_0 = 0$ である. このモデルは各提示時間の累積的評価値が母平均と直近3時点の誤差項の加重和との総和で表わされる. 以下, これを誤差発展モデルと呼ぶ. このモデルの未知変数は $\mu_1, \theta_1, \theta_2, \sigma^2$ の4種類である. ただし, θ_1, θ_2 には正の実数という制約は与えない.

4.2 未知パラメータの推定

前節の未知パラメータは, 初期状態 ξ_1 と攪乱項が正規分布に従うことを仮定すれば, 状態空間の尤度を求めることができる. 被験者 i から得られた y_t の観測値を y_{ti} すると, AR(2) 過程の標本尤度は次式で求められる.

$$LL(\mu, \sigma, \omega, a, b, c)$$

$$= \prod_{t=1}^3 \prod_{i=1}^n (2\pi R_{t|t-1})^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{e_{ti}^2}{2R_{t|t-1}}\right)$$

ここに,

$$R_{t|t-1} = H_t P_{t|t-1} H_t' + \omega^2, \\ e_{ti} = y_{ti} - H_t(A_t' + \xi_{t|t-1})$$

である. なお, $R_{t|t-1}, P_{t|t-1}, \xi_{t|t-1}$ はピリオド $t-1$ の値に基づいて予測されたピリオド t の値であることを意味する. $P_{t|t-1}$ は 3×3 の行列である. ここで, 予測値 $\xi_{t|t-1}$ および $P_{t|t-1}$ は初期値 $\xi_{1|0}, P_{1|0}$ を与えれば, 次のカルマンフィルタのアルゴリズムより求めることが可能である[7, 8].

(観測による更新)

$$\xi_{t|t} = \xi_{t|t-1} + P_{t|t-1} H_t' (H_t P_{t|t-1} H_t' + \omega^2)^{-1} \\ \times \bar{y}_t - H_t (A_t' + \xi_{t|t-1})$$

$$P_{t|t} = P_{t|t-1}$$

$$- \{P_{t|t-1} H_t' (H_t P_{t|t-1} H_t' + \omega^2)^{-1} H_t P_{t|t-1}\}$$

(時間更新)

$$\xi_{t+1|t} = F_t \xi_{t|t} + \omega^2$$

$$P_{t+1|t} = F_t P_{t|t} F_t' + \sigma^2$$

上式において, $\xi_{t|t}, P_{t|t}$ は観測値 y_t に基づく $\xi_{t|t-1}, P_{t|t-1}$ の更新値を意味する. また, $\bar{y}_t$ は y_t の標本平均である. なお, カルマンフィルタの初期値は次のように与えられた.

$$\xi_{1|0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, P_{1|0} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

4.3 モデルの評価

加法形モデル, 相互作用モデル(1次, 2次)および誤差発展モデルの優劣の判断にはAICを用いる. AICは次式で表わされる.

$$AIC(M) = -2MLL(M) + 2k,$$

ここに, $MLL(M)$ はモデル M の最大対数尤度を示し, k は未知パラメータの個数を示す. なお, AICはその数値が低いほど良いモデルであることを表す.

5. モデルの優劣評価からの考察

時系列解析を行う前に被験者の選好特性を把握する。このとき、木多ら[5]の静止画像による都市景観評価において、「建物壁面色彩の統一性を重視する評価者とそうでない評価者に分かれる」という知見に注目し、被験者全体を建物壁面色彩の統一性を重視するか否かによって類別する。類別は次の判断基準によって行われる。

$$(w, w, w) > (w, w, c) \text{ and } (c, c, c) > (c, c, w).$$

ここに、 $>$ は刺激の強選好を表す。上の基準を満たす被験者は29名であり、それ以外の被験者は32名であった。以下、前者を統一重視グループ、後者を統一非重視グループと呼ぶ。これら2つのグループの累積評価値の平均のグラフを、暖色基調刺激と寒色基調刺激別に図2(a), (b), 図3(a), (b)に示す。図より、統一重視グループでは、全てのピリオドで暖色または寒色に統一した刺激の評価は上昇傾向にある。しかも、第3ピリオドで上昇幅が大きくなる。これに対して、統一非重視グループでは、暖色基調、寒色基調と

図2 統一重視グループの累積評価値の平均値

図3 統一非重視グループの累積評価値の平均値

もに基調色の連続提示は評価の低下を引き起こす。しかも、暖色基調では、ピリオド3でどのような壁面色彩を与えても評価は低下する。寒色基調では、ピリオド3で寒色以外の壁面色彩を与えれば評価は上昇するが、そもそも寒色基調自体の評価が低いため、評価値を高水準に回復させるまでには至らない。

以下、4つの解析モデルの優劣を、それぞれのモデルが3節に示す6つの刺激を統一的に説明する能力を比較することによって判定する。ここで、未知数 a, b, c は景観刺激の変数に依存すること((3), (4)式)を思い出そう。従って、2次の相互作用モデルでは、未知数とするべき a, b, c は次のようになる。

$$\begin{aligned} &a(w, w), a(c, c), \\ &b(w, w), b(w, g), b(w, c), b(c, w), b(c, g), b(c, c), \\ &c(w, w), c(w, g), c(w, c), c(c, w), c(c, g), c(c, c). \end{aligned}$$

すなわち、 a については暖色基調と寒色基調で1個ずつを未知数とすれば十分なのである。さらに、 $\mu_1(w), \mu_1(c)$ および σ^2, ω^2 が未知数として付加されるので、未知数の総数は18個となる。1次の相互作用モデルでは、以上から b を省けば良いので、未知数の総数は12個となる。加法形モデルでは、 $\mu_1(w), \mu_1(c), \mu_2(w), \mu_2(c), \mu_3(w), \mu_3(c), \mu_3(g)$, と σ^2, ω^2 が未知数であるから、その総数は9個である。

表1に各解析モデルの対数尤度(LL), AICの値、未知数の総数を示す。表2には推定された a, b, c の値を示す。表1より、最適なモデルはグループによって異なることが分かる。統一重視グループでは1次相互作用モデルが最も優れているのに対し、統一非重視グループでは加法形モデルが優れている。ただし、統一非重視グループにおいて加法形モデルと1次相互作用モデルとの差は微小である。従って、統一性を重視する評価者は、過去のピリオドの刺激の影響を受けて当該ピリオドの評価を行っていることになる。統一感とは過去刺激と現在刺激を照らし合わせて判断する訳であるから、このことは当然の帰結と解釈できるであろう。また、1次相互作用モデルが2次相互作用モデル

表1 モデル別の対数尤度とAIC

グループ モデル	統一群 (29名)		非統一群 (32名)		未知数の 総数
	LL	AIC	LL	AIC	
誤差発展モデル	-890.02	1788.03	-1017.45	2042.91	4
加法形モデル	-843.52	1705.04	-979.78	1977.55	9
1次相互作用モデル	-778.90	1581.81	-977.13	1978.27	12
2次相互作用モデル	-779.19	1594.37	-976.00	1988.01	18

表2 相互作用モデルにおける未知変数の推定値

グループ モデル	統一重視グループ (29名)			統一非重視グループ (32名)		
1次相互作用モデル	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
(<i>w, w, w</i>)	1.02	—	1.27	1.09	—	0.89
(<i>w, w, g</i>)		—	0.00		—	0.27
(<i>w, w, c</i>)		—	0.00		—	0.45
(<i>c, c, w</i>)	0.96	—	0.00	0.91	—	1.38
(<i>c, c, g</i>)		—	0.80		—	1.15
(<i>c, c, c</i>)		—	1.46		—	0.95
2次相互作用モデル	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
(<i>w, w, w</i>)	1.02	1.29	0.00	1.09	0.00	0.88
(<i>w, w, g</i>)		0.00	0.00		0.29	0.00
(<i>w, w, c</i>)		0.00	0.00		0.00	0.44
(<i>c, c, w</i>)	0.96	0.00	0.00	0.89	1.28	0.00
(<i>c, c, g</i>)		0.00	0.79		1.06	0.00
(<i>c, c, c</i>)		0.99	0.43		0.87	0.00

に対して優越性を示すことから、評価者は過去1ピリオドのみの影響を受けて当該ピリオドを評価していると考えられる。このことは都市景観評価において遠い過去の影響は除外できることを示唆する重要な知見となり得るが、ピリオド数をさらに増やして検討する必要がある。実際、表2より、統一重視グループの*b*の値をみると、ピリオド1から3まで暖色壁面の場合と寒色壁面の場合では1.0程度の値を有しているのに対して他の場合は0.0となっているから、*b*はピリオド1, 3の刺激(i.e., x_1, x_3)に関して意味のある関数となっており、必ずしも1次の相互作用項だけで十分というわけではない。また、両グループともに誤差発展モデルのAICの値は他のモデルの値に比べて極度に低いので、評価値の変化は誤差レベルの変動ではないと結論付けられる。

図4, 5に加法形モデルおよび1次相互作用モデルで推定したピリオドの評価値の平均をグループ別に示す。ここに、 μ_2, μ_3 は(5), (6)式で算出された値である。図には前掲の累積評価値の平均も併せて示す。なお、暖色基調、寒色基調それぞれ3つの刺激で、ピリオド1およびピリオド2における暖色または寒色の評価値は共通であることに注意されたい。図4と図5を比較すると、統一重視グループでは加法形モデルと相互作用モデルによって算出されたピリオド3の評価値は大きく異なるが、統一非重視グループではそれほど異なっていないことが分かる。以下、グループ別に景観設計の観点からの考察を行う。

図4の相互作用モデルの結果より、統一重視グループでは、累積評価値のピリオド3での増減がピリオド評価値の増減に敏感に反映していることが分かる。このことは、(6)式と表2の*c*の値より、回帰係数の掛け算が相乗効果や相殺効果をもたらしたことに起因する。従って、統一重視グループでは、ピリオド3の景

図4 各刺激における統一重視グループのピリオド評価値

図5 各刺激における統一非重視グループのピリオド評価値

観評価において、ピリオド2とピリオド3の景観をペアで考慮する必要性があることになる。このことは、暖色基調刺激、寒色基調刺激ともに、基調色を連続して与えることの重要性を強調するのである。これに対して、図5より、統一性を重視しない評価者では、各ピリオドの景観をペアで捉えるべきという拘束はなくなる。言い換えれば、景観設計において、景観の並び方を柔軟に変更しても良いことになる。従って、そもそも評価値が低いレベルにある寒色基調ではなるべく早くに(i.e., ピリオド2で)基調色に変化を与えることが有効になる可能性がある。一方、暖色基調では、評価値が比較的高いこととピリオド3で基調色を付与しても評価値が低下していることを考慮に入れると、基調色と同一色相で彩度または明度に変化を与える程度の変更が効果的であると考えられる。

6. 観測結果による相互作用の本質性の考察

最初に、都市景観評価の時系列解析に加法形モデルを適用するための判定条件ⁱの基本概念を概説する。これにより、都市景観時系列データにおける相互作用の意味を明確にする。加法形モデルは“独立性”[9, 6章]という重要な性質を有する。これは「各ピリオドの刺激の選好順序はそれ以外のピリオドの刺激内容に依存しない」ⁱⁱというものである。3節の刺激で例示すると次のようになる。ある被験者の選好が

$$(w, w, w) \succ (w, w, g) \succ (w, w, c) \quad (9)$$

であるならば、

$$(c, c, w) \succ (c, c, g) \succ (c, c, c) \quad (10)$$

でなければならない。その逆も成り立つ。加法形モデルの存在を仮定するとこのことは容易に示される。実際、(9)式を(1)式に代入すると $u_3(w) > u_3(g) > u_3(c)$ が得られる。これと(1)式より、 $y(c, c, w) > y(c, c, g) > y(c, c, c)$ となるから、加法形モデルの順序保存性より(10)式が誘導される。ここでの要点は「ピリオド3の評価値がピリオド1, 2の景観刺激に依存しない」ということである。しかし、被験者から聞き出す累積的評価値が絶対判断による回答であることを考慮すると、もう少し評価値の独立性の条件を緩めておくことが妥当であると思われる。そこで、評価値

の値そのものではなく、それらの間隔がピリオド1, 2の景観刺激に対して独立であると考えことにする。すなわち、寒色基調と暖色基調の評価において原点のズレは認容しようということである。実際、図2, 3より、いずれの被験者グループにおいても暖色基調と寒色基調の累積評価値には一定レベルの差があり、これが原点のずれに起因していないとは断言できない。以上より、次のような判定条件を設定する。

$$(A) \quad u_3(w) - u_3(c), u_3(g) - u_3(c) \text{の値は第1, 2ピリオドの景観刺激に依存しない,}$$

これは加法形モデルの必要条件であるが、第一段階のスクリーニングとしてならば、(A)を加法形モデル適用の判定条件と捉えることは妥当であろう。すなわち、(A)が成立すれば加法形モデルの適用は妥当(従って相互作用が不必要)と判定するが、そうでなければ不適当(従って相互作用が必要)と判定するのである。なお、(A)は w と g の評価値を $u_3(c)$ の値を基準として変換したものであるが、加法形モデルの各関数 u_i は間隔尺度であるから、このような変換を行っても尺度の意味は損なわないことに注意されたい。

以下では、統一重視グループと統一非重視グループ別に、観測結果が判定条件(A)に適合する可否かを統計的に調べる。具体的には、まず暖色基調と寒色基調別に3つの刺激の第3ピリオドの評価値を求める。ここで、提示時間2の累積的評価値は次式で与えられることに注意しよう。

$$y(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(u_1(x_1) + u_2(x_2)).$$

これと(1)式より、例えば、 g の第3ピリオド評価値は $u_3(g) = 3y(w, w, g) - 2y(w, w)$ で求められる。 w, c も同様に求められる。次に、暖色基調と寒色基調の場合で各被験者の $u_3(w) - u_3(c)$ と $u_3(g) - u_3(c)$ を算出し、これらの母平均の差を検定する。

表3に統一重視グループと統一非重視グループのこれらの平均、標準偏差、検定結果を示す。なお、寒色基調と暖色基調で同一の被験者に回答させているため、対応のあるデータに対する検定となる。表より、統一重視グループでは $u_3(w) - u_3(c)$ と $u_3(g) - u_3(c)$ の平均にはそれぞれ水準1%および5%で有意な差が認められ、相互作用の必要性が示された。しかし統一非重視グループでは、これらの平均には統計的に有意な差が認められず、相互作用が本質的でない可能性が高いことが示された。従って、モデルの優劣の判定で得られた結果はこの判定方法で得られた結果と一致する。大雑把に言って、累積的評価値に大きな変動がある局面では相互作用が本質的になっている可能性が高く、そうでない局面では相互作用は本質的ではないと

i 既往研究[4]では可解性条件に注目して加法形モデル適用のための判定条件を提案した。

ii 厳密に言うところの加法的コンジョイント構造の独立性は、任意の1つの成分の選好順序の他成分に対する独立性としてではなく、(それよりさらに厳しい)任意複数成分の組に対する選好順序の残りの成分に対する独立性として記述されている。

表3 ピリオド3の評価値間隔の母平均の差の検定

基調色 ピリオド 評価値	統一重視グループ				備考
	暖色基調		寒色基調		
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
$u_3(w)-u_3(c)$	7.34	3.81	-6.52	3.93	**
$u_3(g)-u_3(c)$	0.21	4.87	-2.69	4.56	*
基調色 ピリオド 評価値	統一非重視グループ				備考
	暖色基調		寒色基調		
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
$u_3(w)-u_3(c)$	2.25	4.88	1.50	3.06	
$u_3(g)-u_3(c)$	-0.84	5.52	0.66	4.04	

**: 1%有意

*: 5%有意

考えられる。既往研究[4]でも累積的評価値にある程度の変化が生じたときに相互作用を考慮する必要性があると指摘されており、本研究の結果は既往研究の結果と対応する。実際、統一重視グループのように同一色相の連続提示でピリオド3の評価値が大きく増加する場合は相互作用が必要になり、統一非重視グループのように変化が小さい場合は相互作用が必要でなくなる。ただし、既往研究では寒色壁面連続提示の効果はピリオド3の評価値を急降下させるという結果（従って本研究の統一重視グループと逆の効果）となって現れたことを付記しておく。

7. おわりに

本研究では、過去と現在の景観刺激の相互作用を考慮に入れられる都市景観評価の時系列解析手法を考案し、建物壁面色彩の評価問題に適用した。相互作用の本質性に関する検討は、モデルの優劣判定による方法と観測結果に基づく方法で行った。その結果、次のような知見が得られた。

- 相互作用の本質性に関しては、モデルの優劣判定による結果と観測記録に基づく結果は整合的である。
- 建物壁面色彩評価において色彩の統一性を重視する評価者では、相互作用を考慮することが必要である。しかも、モデルの優劣判定から、ピリオドの総数が3の場合、1ピリオドだけ以前の刺激との相互作用が重要になる。
- 色彩の統一性重視の評価者に対しては、ピリオド3まで同一の建物壁面色彩を与えることが不可欠である。このタイプの評価者では、現在と1つ以前のピリオドの景観が同一色のペアのとき、相乗効果を生み出すためである。
- 統一性を重視しない評価者では相互作用は本質的ではない。従って、壁面色彩の並びには特に

拘束はなく、同一色相壁面の連続に相乗効果はない。暖色壁面の評価が高いことを考慮に入ると、暖色を基調としながら彩度や明度に変化を与えることが望ましいと考えられる。

以上より、評価者の特性を把握した上で本解析手法を適用すれば、有効な景観列の与え方を提示できることが確認された。このことは、都市景観設計の時間軸への拡張可能性を示唆するものである。今後の課題として、まず、ピリオド数を増やしたとき1ピリオド以前の相互作用で十分であるかどうかの検証が挙げられる。さらに、より重要な課題として、観測記録に基づいて相互作用判定を行った上で、自動的にモデル化関数を選出しピリオド評価値を算出できるアルゴリズムの構築が挙げられる。このためには相互作用モデルを特定できる判定条件も提案する必要がある。単純な相互作用モデルの構築が重要である。

謝辞

本論文に対して匿名差読者より有益なコメントをいただいたことを感謝する。また、金沢工業大学心理情報学科平成20年度4年生の石田京子君には実験およびデータ整理で多大な協力をいただいた。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- [1] 鄭在熙, 奥俊信, 船橋国男, 小浦久子, 木多道宏. (1998). パーチャルリアリティを用いた街路景観の移行変化と評価に関する研究—建物の高さ及びセットバックの変化と連続性等の評価の関係—, 日本建築学会計画系論文集, 第503号, pp.163-169.
- [2] 小泉光司, 岸本達也. (2007). 銀座中央通りにおける建物高さと建物ファザードに着目した景観分析—個性的な街路景観創出を目的としたVRを用いた景観分析（その1）—, 日本建築学会計画系論文集, 第613号, pp.151-158.
- [3] 宮腰淳一, 松下裕. (2000). 時間変化を伴う都市景観の評価—(2) 分析方法と適応例—, 第16回ファジィシステムシンポジウム論文集, pp.447-450.
- [4] 長谷川渡, 松下裕. (2007). アニメーション刺激を用いた都市景観の評価—加法形モデルによる測定方法の検証—, 日本知能情報ファジィ学会評価問題研究会第12回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論文集, pp.71-76.
- [5] 木多道宏, 奥俊信, 船橋国男, 紙野桂人. (1997). 都市景観における色彩の評価構造に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第502号, pp.147-154.
- [6] 鷺尾泰俊. (1974). 実験計画法, 日本規格協会.
- [7] J. D. ハミルトン, 沖本竜義・井上智夫訳. (2006). 時系列解析（下）非定常/応用定常過程編, シーエーピー出版, pp.542-548.
- [8] 阿倍威郎, 上田徹. (1985). 状態空間モデルを用いた電話収入予測, 電子通信学会論文誌, Vol. J68-A

No.5, pp.437-443.

- [9] D.H. Krantz, R.D. Luce, P. Suppes, & A. Tversky. (1971). Foundations of Measurement(Vol.1). New York: Academic Press.

(2009年3月13日 受付)

(2009年5月21日 採録)

[問い合わせ先]

〒921-8143 石川県金沢市大額町ル39番地4

株式会社デュオ・プロダクション

長谷川 渡

TEL: 076-298-9811

E-mail: hasegawa@duopro.co.jp

著者紹介

はせがわ わたる
長谷川 渡 [非会員]

2006年いしかわCGコンテストにおいて最優秀賞を受賞。2009年金沢工業大学大学院経営工学専攻修了。同年、(株)デュオ・プロダクション入社。現在に至る。コンピュータグラフィックスを用いたデザイン業務やWebにおけるユーザビリティ設計およびシステム開発に従事。

まつした ゆたか
松下 裕 [正会員]

1985年東北大学大学院工学研究科博士課程前期建築学専攻修了。同年、清水建設(株)入社。2005年金沢工業大学心理情報学科助教授。2007年同大学同学科准教授。現在に至る。博士(工学)。感性情報の心理学と意思決定の研究に従事。日本知能情報ファジィ学会、日本建築学会、日本数学会、日本心理学会、各会員。

A Dynamic Model for Evaluation of Cityscapes based on Animation stimuli - Time series analysis by Kalman Filtering - by

Wataru HASEGAWA and Yutaka MATSUSHITA

Abstract :

This paper develops an analyzing method for a time series of cityscape evaluations so as to take account of interactions between views in the previous time period and the current period. Two evaluation models are provided, one of which includes interaction terms, and the other of which is an additive model having no interaction terms. These models are represented in the state-spaces by the auto-regression process to estimate evaluation values by the Kalman filtering. The necessity of considering interactions is examined by comparing the accuracy of their estimations when these models are applied to a cityscape evaluation problem. Also, it is checked whether observed results meet the application condition for the additive model. These examinations give an affirmative answer to the question about the necessity of considering interactions. In addition, a brief but instructive comment is made on color sequences suitable to façades in a cityscape.

Keywords : Cityscape, Kalman Filtering, Time series analysis, Interaction, Animation

Contact Address : **Wataru HASEGAWA**

DUO PRODUCTION Co., Ltd.

Ru-39-4 Onuka, Kanazawa, Ishikawa 921-8143, JAPAN

TEL : 076-298-9811

E-mail : hasegawa@duopro.co.jp