九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

HDR全天周画像のための顕著性マップ生成手法

岡崎, 大暉 九州大学大学院芸術工学研究院

原,健二 九州大学大学院芸術工学研究院

井上, 光平 九州大学大学院芸術工学研究院

浦浜 喜一 九州大学大学院芸術工学研究院

https://hdl.handle.net/2324/1937588

出版情報:2018-08-08 バージョン: 権利関係:

HDR全天周画像のための顕著性マップ生成手法

岡崎 大暉^{1,a)} 原 健二¹ 井上 光平¹ 浦浜 喜一¹

概要

360 度全天周画像は極付近に大きな歪みを有し,対象シーンの輝度範囲は通常の画像よりも広くなることが多い.本稿では,球面上の重合格子と多重局所トーンマッピングオペレータを用いて,既存の顕著性マップ生成手法を高ダイナミックレンジ全天周画像にも適用できるように拡張する. 実画像を用いた実験を通して提案手法の有効性を示す.

1. はじめに

顕著性マップは、画像や映像からヒトの興味を引く領域 や物体領域を抽出するために画素ごとに顕著性を評価し たもので、セグメンテーションや物体検出等、様々な分野 への応用が期待されており、盛んに研究が行われてきてい る [1]~[4]. これまで多数の顕著性マップ生成手法が提案さ れているが、これらの手法の多くは空間解像度が均一な通 常視野角の画像を対象としており、周囲 360 度の広範囲の 輝度情報を1枚に収めた全天周画像のように空間解像度が 不均一で、極や極付近において特異点をもつ広視野角画像 にそのまま用いることは適切ではない.また,全天周画像 を屋外で撮影する場合、広範囲の輝度情報を取得するため 白とびや黒潰れが発生しやすい. そのため, 全天周画像か らの顕著性マップ生成では、高ダイナミックレンジ (High Dynamic Range, HDR) 画像への対応も要求される. 一般 に、ヒトの目の視野角は200度程度しかなく、また1チャ ネル 10 ビット以上の階調データに対応可能な表示機器は 普及していない. そのため 360 度全天周画像と HDR 画像 を同時に用いた視覚計測による学習データの収集は難し く,深層学習などのデータ分析技術の利用は困難である.

本報告では,通常の狭視野角な低ダイナミックレンジ (Low Dynamic Range, LDR) 画像を対象とする既存の顕 著性マップ生成手法を HDR に対応した全天周画像(以降, HDR 全天周画像)にも適用できるように拡張する.まず, HDR 全天周画像における解像度不均一性と極問題に対応 するために,二つの緯度経度格子からなる陰陽格子 [5] を 用いて, HDR 全天周画像から幾何歪が少なく解像度が空

2. 関連研究

これまで多くの顕著マップ生成手法が報告されている. 例えば, Itti らの特徴理論に基づく顕著性マップの計算モ デル[1]に始まり,近年提案されている学習ベースのアプ ローチによるモデル[2]に至るまで数多くの手法が存在し ている[3],[4].しかし,これらの手法を矩形表現された HDR 全天周画像に直接適用すると,解像度不均一性や極 問題,広いダイナミックレンジに対応できず,正確な顕著 性マップが得られる可能性は低い.

全天周画像のための顕著性マップ生成手法として,Bogdanova ら [6] は,Itti らの手法 [1] を全天周画像に自然に 拡張した.彼らの手法は,幾何歪のない球面上での処理の ため,正確な顕著性マップの生成が可能であるが,球面上 での直接処理のため計算が複雑で,推定精度もItti らの手 法と同程度にとどまる.また,HDR 画像のための顕著性 マップ生成手法として Bremond ら [7] は,Itti らの手法 [1] を HDR 画像に自然に拡張し,HDR 画像に対しても正確 な顕著性マップを生成する手法を提案している.しかし, 彼らの手法は,HDR 画像の輝度値の高い明部領域におけ る顕著領域検出に主眼が置かれており,暗部領域における 推定精度は高くない.本論文では,全天周画像の解像度不 均一性と極問題を回避し,HDR 画像の明部領域に加えて 暗部領域においても顕著領域を正確に検出する手法を提案 する.

間的に均一な2枚の矩形平面画像を生成する.次に,各 HDR 矩形平面画像に位相の異なる複数のトーンマッピン グオペレータ (Tone Mapping Operator, TMO)を用いて トーンマッピング処理を施して複数枚の異なる輝度領域が 強調された LDR 画像を生成する.さらに,各格子の LDR 画像に既存の顕著性マップ生成手法を適用して得られた複 数枚の各多重露光顕著性マップを凸最適化で1枚の顕著性 マップに統合する.最後に,各格子の座標系から L1 最適 化により緯度経度格子の座標系の表現に戻し,球面調和関 数で近似することで,HDR 全天周画像の顕著性マップを 生成する.本手法を実際の HDR 全天周画像に適用し,そ の有効性を示す.

¹ 九州大学大学院芸術工学研究院

 $^{^{\}rm a)}~~2{\rm DS17097P@s.kyushu-u.ac.jp}$





図 2 陰陽格子. (a) 陰陽格子, (b) 陰格子, (c) 陽格子 ([5])

3. 提案手法

提案手法の詳細について述べる.図1に本手法の概要を 示す.提案手法は、図1(a)のように、球面座標系への座標 変換により得られた極角 $\theta \in [0,\pi]$ 、方位角 $\phi \in [0,2\pi)$ をそ れぞれ垂直・水平方向の画像座標とする HDR 全天周画像 を入力とする.ただし、図1(a),(f),(g)は、1 画素当たりの 方位各増分を極角増分の倍にして正方画像に変換したもの を表示している.以降、図1における各処理について順に 説明する.

3.1 陰陽格子

提案手法では,Kageyama ら [5] の陰陽格子(Yin-Yang grid)を用いる.陰陽格子は近年,地球科学分野において, 地球が球面状であることから生じる極問題の解決策の一つ として考案されたもので,緯度経度格子の低緯度領域から なる陰格子(Yin-grid)と,陰格子を高緯度領域を覆うよ うに回転させた陽格子(Yang-grid)の二つの格子に,球面 を一部重複を許して分割した重合格子である(図2).この 陰陽格子を HDR 全天周画像処理に用いることにより,地 球科学の分野と同様,極問題を回避する.図1(b)に図1(a) の陰格子に対応する HDR 陰格子画像(図1(b)上)と陽格 子に対応する HDR 陽格子画像(図1(b)下)を示す.

3.2 多重局所トーンマッピング

HDR 陰格子画像と HDR 陽格子画像に対し, 複数の TMO によるトーンマッピング処理を行う. HDR 画像の代表的 な生成方法として, 例えば, 低い露光量で撮影された低露 光画像, 高い露光量で撮影された高露光画像, その中間 である中露光画像の3枚を1枚の HDR 画像に合成する方 法がある. これに対し, 提案手法では, この HDR 画像生 成の入出力を逆にして, 階調変換により強調される輝度 範囲が互いに異なる 3 つのトーンマッピングオペレータ TMO₁, TMO₂, TMO₃ を用いて,各 HDR 格子画像から仮 想的な高露光画像 I_1 ,中露光画像 I_2 ,低露光画像 I_3 をそ れぞれ生成する (図 1(c)).これらの多重露光画像 I_1, I_2, I_3 に対して,LDR 画像を対象とする既存の顕著性マップ生 成手法を適用して顕著性マップ V_1, V_2, V_3 をそれぞれ得る (図 1(d)).各TMOの推定は、次式の Drago らの手法 [8] を用いる.

$$L_{d} = \frac{L_{d_{max}} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{max}+1)} \cdot \frac{\log_{10}(L+1)}{\log_{10}\left(2+8\left(\left(\frac{L}{L_{max}}\right)^{\frac{\log_{10}(b)}{\log_{10}(0.5)}}\right)\right)}$$
(1)

ここで, *L* は HDR 画像の輝度値, *L_{max}* は HDR 画像の最 大輝度値, *L_d* はトーンマッピング処理後の LDR 画像の輝 度値, *L_d* はトーンマッピング処理後の LDR 画像の輝 度値, *L_{dmax}* は LDR 画像の最大輝度値, *b* は明度領域の レンジ圧縮性と暗部領域でのコントラストを制御するパラ メータである.式 (1) のパラメータ*b*を適切に設定するこ とで,各 TMO の推定を精度よく行う.パラメータ*b*の設 定方法は、トーンマッピング処理により変換した LDR 画 像における白とび領域や黒潰れ領域が本来の顕著領域を含 まないように決定される.例えば TMO₁ の場合,はじめに 初期値 $b^{(0)}$ を用いて生成した高露光画像 *I*₁ の顕著性マッ プ $V_1^{(0)}$ を生成する.次に,この高露光画像 *I*₁ の白とび領 域における顕著性マップ $V_1^{(0)}$ の顕著度の平均値 $\mu^{(0)}$ を計 算する.さらに、パラメータ*b* を次式に基づき更新する.

$$b^{(k+1)} = \begin{cases} b^{(k)} & \text{if } \mu^{(k)} \leq \frac{S^{(k)}}{N} \\ b^{(k)} - \Delta b & \text{if } \mu^{(k)} > \frac{S^{(k)}}{N} \end{cases}$$
(2)

ここで, $k = 0, 1, \cdots$ は更新ステップ, $S^{(k)}$ は更新ステップ k における顕著性マップ $V_1^{(k)}$ の画素値の合計, N は画素数 である.更新ステップ k における平均値 $\mu^{(k)}$ が, $S^{(k)}/N$ より大きい場合,高露光画像の白とびさせた領域が顕著性 を多く含んでいるため, $b^{(k)} \geq b^{(k)} - \Delta b$ とおいて白とび の領域を拡大させ, $S^{(k)}/N$ 以下になるまで $k \leftarrow k + 1$ と して式 (2) の計算を収束するまで繰り返すことで TMO₁ の パラメータ b を決定する.TMO₃ においては,式 (2) で平 均値 $\mu^{(k)}$ が $S^{(k)}/N$ より大きい場合, $b^{(k)} \geq b^{(k)} + \Delta b$ と おいて黒潰れの領域を拡大させること以外は同様に行う. 提案手法では、 $\Delta b = 0.01$ とした. TMO₂ のパラメータ b は、TMO₁ のパラメータ値と TMO₃ のパラメータ値の中 間値として決定する.

3.3 凸最適化を用いた多重顕著性マップ統合

各格子の顕著性マップ V_1, V_2, V_3 をそれぞれ1枚の顕著 性マップに統合する.各格子の高露光画像 I_1 の顕著性マッ プ V_1 は各 HDR 画像の暗部領域の顕著性,各格子の低露 光画像 I_3 の顕著性マップ V_3 は各 HDR 画像の明部領域の 顕著性を正しく検出している点に着目し,各格子の中露光 画像 I_2 の顕著性マップ V_2 の顕著度レベルをトーンカーブ (Tone Curve, TC) で階調補正することを考える.それぞ れの TC を TC_{high}, TC_{low} とおいて,次式のL1 ノルムの 最適化問題を解くことにより各格子の TC_{high} と TC_{low} を 推定する.

 $\min_{\alpha_{1},\alpha_{2}} \|\mathbf{V}_{2}' - \alpha_{1}\mathbf{V}_{1}' - \alpha_{2}\mathbf{1}\|_{1} \quad s.t. \; \alpha_{1} > 0, \; 0 \le \alpha_{2} \le t \quad (3)$ $\min_{\beta_{1},\beta_{2}} \|\mathbf{V}_{2}' - \beta_{1}\mathbf{V}_{3}' - \beta_{2}\mathbf{1}\|_{1} \quad s.t. \; \beta_{1} > 0, \; 0 \le \beta_{2} \le t \quad (4)$

ここで、 $\mathbf{V}'_1 \in \mathbb{R}^L, \mathbf{V}'_3 \in \mathbb{R}^L$ は各 HDR 格子画像から得ら れた仮想的な各露光画像の顕著性マップV1,V3の一定値 以上の顕著性をもつ L 次元ベクトル, $\mathbf{V}'_2 \in \mathbb{R}^L$ は V_1, V_3 の一定値以上の顕著性をもつ位置と同じ位置の V2 の L 次 元ベクトル,1は要素が全て1のL次元ベクトル,Lは V_1, V_2, V_3 の一定値以上の顕著性をもつ画素数, α_1, β_1 はそ れぞれ各格子の $ext{TC}_{ ext{high}}, ext{TC}_{ ext{low}}$ の一次係数, $lpha_2, eta_2$ はそれ ぞれ各格子の TC_{high}, TC_{low} の切片である.ここで, 一次 係数 α₁, β₁ が正の値となるような制約を課しているのは, 各 TC が単調増加関数でなければならないためである. ま た、切片 α_2, β_2 が負の値や極端に大きくなることを防ぐ ために,0より大きく,ある閾値 t よりも小さい値となる ような制約を与える.次章の実験ではt = 0.1 とおいた. この式 (3), (4) は制約付きの最小化問題であるので、その まま解くことは難しい. そこで, 指示関数を導入し, 見か け上制約なしの最小化問題に置き換える. そうすること で,式(3),(4)はADMM(Alternating Direction Multiplier Method)を用いて解くことができる.また,L2ノルムと は異なり、L1 ノルムを用いることで外れ値への過剰な依 存を回避することができる.式 (3), (4) をパラメータ α_1 , $\alpha_2, \beta_1, \beta_2$ に関して解くことで、 V_1, V_3 を最適に補正する ことが可能である. これらの TC を用いて, 各格子の顕著 性マップ V_1, V_3 を補正した後,画像の正規化を行う.最後 に,各格子から得られた2枚の顕著性マップの和をとり, 画像の正規化を行うことで各 HDR 格子画像の顕著性マッ プが生成される (図 1(e)).

3.4 重複領域に基づく顕著度補正

図 1(e) の陰格子画像と陽格子画像の顕著性マップ(図



1(f))の重複領域をもとに、イメージスティッチング (image stitching)を行う.まず,各格子画像の顕著性マップを各格子の座標系から緯度経度画像の座標系の表現に戻して統合する.このとき,重複領域には、陽格子画像の顕著性マップの画素値を用いている.統合後の結果を図1(g)に示す.次に,陽格子画像の顕著度レベルを陰格子画像に合わせるために,陰格子画像の座標系に合わせたときの対応する重複領域の画素値をもとにロバスト回帰を行う.前節同様,提案手法ではL1ノルムでTCを推定する最適化モデルを次式のように定式化する.

 $\min_{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n} \|\mathbf{x}_1 - p_1 \mathbf{x}_2 - p_2 \mathbf{1}\|_1 \quad s.t. \ p_1 > 0, 0 \le p_2 \le t \quad (5)$

ここで、 $\mathbf{x}_1 \in \mathbb{R}^N$ は陰格子画像の重複領域の画素値のベク トル, $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^N$ は陽格子画像の重複領域の画素値のベク トル,1は要素が全て1のN次元ベクトル,Nは重複領 域の画素数, p₁ は TC の一次係数, p₂ は TC の切片であ る. 各重複領域の画素値のベクトルは [0,1] で正規化を行 う. 前節の式 (3),(4) 同様, 単調増加関数となるよう制約 を課している.また,次章の実験では閾値 t = 0.1 とおい た.式(5)の最適化を行うことで、陽格子画像の重複領域 の画素値 x2 と陰格子画像の重複領域の画素値 x1 との差異 が最小化されたパラメータ p1, p2 を求めることが可能であ る. このようにして得られた p1, p2 に対応する TC を図 3 に示す.図3のTCを基に,陽格子画像の輝度値を変換し た後,画像の正規化を行う(図1(f)).しかし,陰格子画像 と陽格子画像の境目には不自然なエッジがまだ存在するた め、次節で述べる球面調和関数を用いてこのエッジの問題 を解決する.

3.5 球面調和関数

エッジ部の違和感を取り除くために球面調和関数を用い て近似を行う.球面調和関数は,球面上の直交基底関数系 で球面上の任意の関数を近似的に表現することができる. 使用する球面調和関数ごとに最適なスケーリング係数を求 める.スケーリング係数は次式で与えられる.

$$c_m^l = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f(\theta, \phi) Y_m^l(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi$$
(6)

ここで, l,m は球面調和関数の次数で, 用いる球面調和 関数の数により変化する. c_m^l は次数 (l,m) に対応するス ケーリング係数, $f(\theta,\phi)$ は入力画像の球面座標 (θ,ϕ) にお ける画素値, $Y_m^l(\theta,\phi)$ は次数 (l,m) に対応する球面調和関 数の球面座標 (θ,ϕ) における関数値である. 以下の式のよ うに,式 (6) で求めたスケーリング係数 c と対応する球面 調和関数との線形和をとることで近似を行う.

$$S(\theta,\phi) = \sum_{l=0}^{L} \sum_{m=-l}^{m=l} c_m^l Y_m^l(\theta,\phi)$$
(7)

ここで, L は次数 l の範囲の上限を表す整数, $S(\theta, \phi)$ は球 面座標 (θ, ϕ) における出力画像の画素値, つまり S は全天 周画像の顕著性マップである.最大次数 L を適切に設定す ることで,精度よく近似を行うことができる.次章で述べ る実験では L = 12 とした.図 1(f) を球面調和関数で近似 した結果を図 1(g) に示す.

4. 実験

実際の HDR 全天周画像を用いて提案手法の評価を行う. 入力に用いた HDR 全天周画像のパノラマ表示 (図 4(a),(i)) を示す. ただし, HDR 全天周画像の元のサイズはいずれも 1024×2048 (ピクセル) であるが、ここでは 1024×1024 で 表示した. 画像フォーマットは Radiance の RGBE フォー マット(拡張子.hdr)を使用した. RGBE フォーマット は、RGBと指数部 (Exponent) にそれぞれ1バイトを割り 当てた合計 32bpp(bit per pixel) のフォーマットである. RGB 各チャネルに対し1バイトで仮数を表現し、全チャ ネル共通の指数部として1バイトが割り当てられる.ただ し、HDR 全天周画像にトーンマッピング処理を施して、8 ビットに変換した LDR 全天周画像を表示している. HDR 全天周画像に対して直接 (1)Harel らの手法 [2] を適用した 場合(以下, Harel), (2)Fang らの手法 [3] を適用した場 合(以下, Fang), (3)Tavakoli らの手法 [4] を適用した場 合(以下, Tavakoli), (4)Bremond らの手法 [7] を適用し た場合(以下,Bremond)を従来手法として,提案手法で 生成された各画像に (5)Harel らの手法を適用した場合(以 下, ours-Harel), (6)Fang らの手法を適用した場合(以下, ours-Fang), (7)Tavakoli らの手法を適用した場合(以下, ours-Tavakoli)との性能比較を行った.

従来手法で得られた顕著性マップをそれぞれ図 4(b)~(e), (j)~(m) に示す.提案手法を適用して得られた顕著性マッ プをそれぞれ図 4(f)~(h),(n)~(p) に示す.従来手法の場 合,HDR 全天周画像の高緯度にある物体領域や暗部領域 の顕著性が低く評価されていることが分かる.一方,提案 手法では高緯度にある物体領域や暗部領域の顕著性も他の 領域同様に正確に評価できている.



図 4 顕著性マップ生成. (a)HDR 全天周画像, (b)Harel, (c)Fang, (d)Tavakoli, (e)Bremond, (f)ours-Harel, (g)ours-Fang, (h)ours-Tavakoli, (i)HDR 全天周画像, (j)Harel, (k)Fang, (l)Tavakoli, (m)Bremond, (n)ours-Harel, (o)ours-Fang, (p)ours-Tavakoli

5. まとめ

既存の顕著性マップ生成手法を全天周を HDR 撮影した 画像に適用できるように拡張する手法を提案した.実験で は解像度不均一問題や極問題を回避した結果が得られた. また,従来手法と比べて広ダイナミックレンジに対応した 良好な結果が得られ,提案手法の有効性が示された.

参考文献

- L. Itti, C. Koch, and E. Niebur, A model of saliency based visual attention for rapid scene analysis, IEEE Trans. PAMI, vol.20, no.11, pp.1254–1259, 1998.
- [2] J. Harel, C. Koch, and P. Perona, Graph-based visual saliency, NIPS, vol.19, pp.545–552, 2006.
- [3] S. Fang, J. Li, and Y. Tian, Learning discriminative subspaces on random contrasts for image saliency analysis, IEEE Trans. Neural Netw. Learning Syst., vol.28, no.5, pp.1095–1108, 2016.
- [4] H.R. Tavakoli, E. Rahtu, and J. Heikkila, Fast and efficient detection using sparse sampling and kernel density estimation, Proc. of SCIA, pp.666–675, 2011.
- [5] A. Kageyama, and T. Sato, The 'Yin-Yang grid' : An overset grid in spherical geometry, Geochem. Geophys., 5, Q09005, 2004.
- [6] I. Bogdanova, A. Bur, and H. Hugli, Visual attention on the sphere, IEEE Trans. Image Process., vol.17, no.11, pp.2000-2014, 2008.
- [7] R. Bremond, J. Petit, J.P. Tarel, Saliency maps of high dynamic range images, Media Retargeting Workshop in Conjuction with ECCV' 10, 2010.
- [8] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N. Chiba, "Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes," Computer Graphics Forum, vol.3, pp.419–426, 2003.