

巡回セールスマン問題による迷路風画像の生成 Generating Maze-Like Images by Traveling Salesman Problem

井上 光平†
Kohei Inoue

常 セン†
Chang Jian

浦浜 喜一†
Kiichi Urahama

あらし

画像上に点を配置し、配置したすべての点を巡回する最短経路を巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP) を解いて求め、求めた経路に基づいて入力画像を迷路風の画像に変換するノンフォトリアリスティックレンダリング法を提案する。

1. まえがき

最近、交差のない1筆書きの線で絵を構成するノンフォトリアリスティックレンダリング法が提案されている。Boschら[1]は、モノクロ画像をランダムディザ法で黒点の集合に変換し、各点を巡回セールスマン問題 (TSP) によって結ぶ方法を提案した。Kaplanら[2]は、組織的ディザ法や、Secord[3]の重心ボロノイ図による点描画法を用いて点を配置するTSP線画を提案した。また、Kaplanら[2]は、線の幅を場所によって変えたり、Bスプライン曲線によって点を滑らかに結ぶ方法も提案した。Secord[3]の点描画法では、局所的に均一に点を配置することができる反面、画像のコントラストが低下するという難点がある。そこで、Kaplanら[2]は、はじめに入力画像のコントラストを強調し、強調した画像をTSP線画に変換するという方法を使った。また、Morales[4]は、上記の研究よりも早い時期に同様な線画を実際に描き、それをLabyrinthine Projectionと呼んだ。

本論文では、Kaplanら[2]のようなコントラスト強調が不要な点配置法として、重心ボロノイ図の母点に乗法的な重みを導入した乗法的重み付き重心ボロノイ図による点描画法を提案し、それによって得られた点配置に基づくTSP線画から、迷路風の画像を生成する方法を提案する。本論文では、TSP線画の線を太くして道のように表示した画像を迷路風画像と呼ぶことにする。また本論文では、TSP線画の線の幅だけでなく、線の濃さも可変にし、TSP線画を、従来のモノクロからカラーに拡張し、迷路風画像を立体的に表示する。

2. 迷路風画像の生成

カラー画像を $f = [f_i]$, $f_i = [r_i, g_i, b_i]$ ($i = 1, \dots, m$) とする。ここで $r_i, g_i, b_i \in \{0, \dots, 255\}$ は画素 i のRGB値であり、 f_i はそれらを並べたベクトルである。 m は画素数である。番号 i はラスタ走査の順に付けるとする。

2.1 点の配置

まず、 f からモノクロ画像 $y = [y_i]$; $y_i = 0.299r_i + 0.587g_i + 0.114b_i$ を作る。画素 i の暗度を $u_i = 1 - y_i/255$ とし、配置する点の個数 n を $n = \text{round}(\frac{1}{s} \sum_{i=1}^m u_i)$ とする。ここで s は1点を構成する画素数であり、 round は最も近い整数への丸めを表す。画像を2分割し、領域内での u_i の総和が最大の領域を更に2分割するという処

理を領域の個数が n になるまで繰り返す。その際、長方形領域の長辺を2等分することによって、細長い領域の生成を抑え、できるだけ正方形に近い領域を生成していく。最終的に得られた各領域の中心に点を初期配置する。

次に、点の位置を乗法的重み付き重心ボロノイ分割によって反復的に修正する。重みが大きな点のボロノイ領域は狭くなる傾向にあり、その結果、近傍の点が凝集し、コントラストの低下が抑えられる。点 j の座標を $z_j^{(0)}$ ($j = 1, \dots, n$) とすると、乗法的重みを $v_j^{(0)} = u(z_j^{(0)})(u(z)$ は z が含まれる画素の暗度を表す) とし、各画素 i を点

$$j^* = \arg \min_j \{v_j^{(t)} \|x_i - z_j^{(t)}\|\} \quad (1)$$

のボロノイ領域 $V_j^{(t)}$ に含める。ここで x_i は画素 i の座標であり、 t は反復回数である。点の座標を

$$z_j^{(t+1)} = \frac{\sum_{i \in V_j^{(t)}} u_i x_i}{\sum_{i \in V_j^{(t)}} u_i} \quad (2)$$

によって更新し、乗法的重みを

$$v_j^{(t+1)} = \max\{v_j^{(t)}, u(z_j^{(t+1)})\} \quad (3)$$

によって更新する。以上の処理を $z_j^{(t)}$ ($j = 1, \dots, n$) が収束するまで繰り返す。

2.2 巡回経路の計算

配置した点を巡回する経路をTSPを解くことによって求める。ここでは、2-OPTとOr-OPTに基づく局所探索アルゴリズム[5]を用いて局所最適解を求めた。

2.3 迷路風画像への変換

巡回経路を線分で結んで多角形を描き、経路を滑らかにするために次の処理を行う。まず描いた経路からの符号付距離変換を求める。具体的には、多角形の内部の距離値の符号を-とし、外部では+とする。次にガウス関数 $e^{-\alpha D^2(i, i')}$ を重みとする線形平滑化フィルタで距離値を平滑化し、距離値0のレベル集合を取り出して新たな経路とする。 $D(i, i')$ は画素 i, i' 間のユークリッド距離である。 $\alpha = 0.25$ とした。

白地に黒で経路を描くと、モノクロ画像 y を近似する一筆描きの線画が得られるが、ここでは、線の幅と濃さを暗度 u_i に基づいて場所ごとに変えることを考える。具体的には、 u_i が大きいところには細くて濃い線を描き、小さいところには太くて薄い線を描くことにする。線幅の最小値 w_{\min} と最大値 w_{\max} を設定し、画素 i での線幅の $\frac{1}{2}$ を $w_i = u_i w_{\min} + (1 - u_i) w_{\max}$ とする。線の濃さは $d_i = \alpha / w_i$ とする。

以上のようにして作成した線の幅と濃さが場所によって異なる経路の画像を \tilde{y} とし、 \tilde{y} を基に、次のような3通りの迷路風画像を生成する。

†九州大学大学院芸術工学研究院視覚情報部門

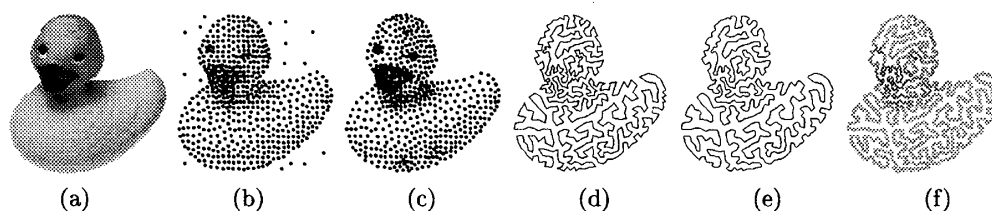


図 1: 点描画と TSP 線画の生成例: (a) 入力画像, (b) Secord[3] による点描画, (c) 提案手法による点描画, (d) TSP 線画, (e) 滑らかな TSP 線画, (f) 線幅と濃さが可変な TSP 線画

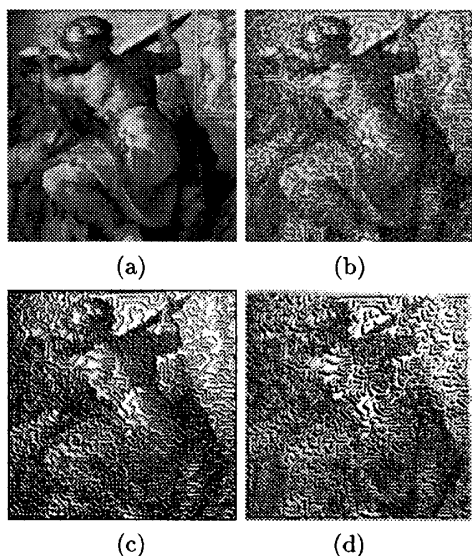


図 2: 迷路風画像の生成例 1

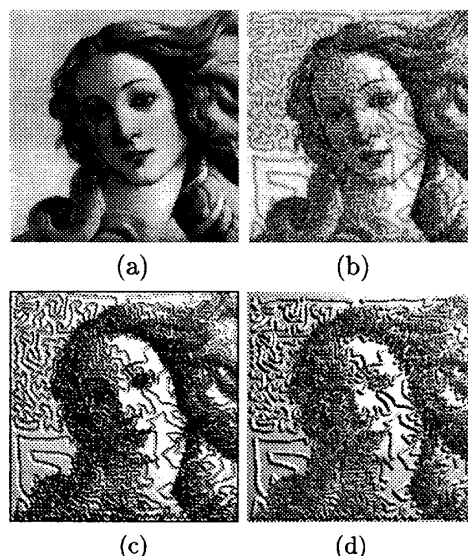


図 3: 迷路風画像の生成例 2

(1) 入力画像 f の RGB 値を YIQ 値に変換し, Y 値 y を $y' = \beta y + (1 - \beta)\bar{y}$ に変え, IQ 値はそのまま RGB 値に戻す.

(2) \bar{y} の値を高さとする凹凸面に (1) の画像をテクスチャマッピングする.

(3) 白い平面の上に経路があるとし, その経路上に, 半径 w_i , 色 f_i の球を配置して, 色の付いたチューブを経路に沿って配置したような迷路風画像を作成する.

3. 生成例

図 1(a) に示す画像を, Secord[3] の方法で点描画にした結果を図 1(b) に示し, 提案手法による結果を図 1(c) に示す. 乗法的重みの導入により, 点描画のコントラストの低下が抑えられていることがわかる. TSP を解いて求めた巡回経路を線分で結んだ結果を図 1(d) に示し, その経路を提案手法によって平滑化した結果を図 1(e) に示す. このように, 簡単な画像処理でも滑らかな経路が得られる. 線の太さと濃さを場所によって変えた TSP 線画 \bar{y} を図 1(f) に示す.

図 2 と図 3 に迷路風画像の生成例を示す. 図 2,3 の (a) は入力画像であり, (b),(c),(d) はそれぞれ提案手法 (1),(2),(3) による迷路風画像である. 図 2,3(b) は TSP 線画のカラー化による迷路風画像であり, 図 2,3(c) は立体的迷路風画像であり, 図 2,3(d) はチューブによる迷路風画像である. 図 2,3(c),(d) の生成には, POV-Ray[6]

を用いた. パラメータは $s = 21$, $w_{\min} = 1$, $w_{\max} = 3.5$, $\alpha = 1$, $\beta = 0.5$ とした. 図 2,3(c) は \bar{y} の値を高さとする凹凸面に図 2,3(b) をマッピングしたものであるが, 皮膚の色などが異なるように見える. これは, POV-Ray でレンダリングする際の照明の影響による. 本論文で生成した迷路風画像は, 経路が一筆描きで構成されているので, 実際の迷路のように分岐や行止りはないが, 入り組んだ経路を生成するには成功しているといえる.

4. むすび

乗法的重み付き重心ボロノイ図の母点を巡回する経路を巡回セールスマン問題を解いて求め, 経路の幅などを調節し, 立体的な迷路風画像を生成した. 迷路風動画の作成が今後の課題である.

参考文献

- [1] R. Bosch and A. Herman, "Continuous line drawings via the traveling salesman problem," *Operations Research Letters* vol. 32, pp. 302-303, 2004.
- [2] C. S. Kaplan and R. Bosch, "TSP art," *Proc. Bridges 2005*, pp. 303-310, 2005.
- [3] A. Secord, "Weighted Voronoi stippling," *Proc. NPAR '02*, pp. 37-43, 2002.
- [4] J. E. Morales, <http://www.virtualmo.com/>
- [5] 戸川隼人, 有澤誠編著, 臨時別冊・数理学「アルゴリズムの工具箱」, サイエンス社, Jan. 2000.
- [6] <http://www.povray.org/>