

(13) 視知覚を考慮した形状デザインに関する研究

SHAPE DESIGN BASED ON VISUAL PERCEPTION

小倉 洋樹*, 岸 光男**

Hiroki OGURA and Mitsuo KISHI

* 大阪府立大学大学院生 工学研究科機械系専攻 (〒599-8531 堺市学園町 1-1)

** 工博 大阪府立大学助教授 工学部海洋システム工学科 (〒599-8531 堺市学園町 1-1)

In this study we propose a shape design based on visual perception. The design variables are the surface shape and the light source position. Of course, constraints on the design space are specified. As a visual perception model, we introduce a monocular computer vision that estimates surface shape from a gray-level picture. The surface can be illuminated under different lighting position, e.g. by a distant light source or by a close light source. By controlling the surface shape and the light source position, we try to maximize the difference between the estimated surface shape and the actual. Application examples for vault structures are provided to illustrate the proposed design method.

Keywords: surface shape design, shape from shading, visual computational model, vault

1. はじめに

構造物の形状設計問題の多くは、力学的観点から研究されている。ただし、建築物や自動車などの外観形状は、まず視覚に訴えることが重要である。形状設計問題を視覚認知の観点から考えてみたい。

実際の形状よりも立体感を強調させるデザインを、ここでは“視覚効果のある形状デザイン”と呼ぶことにする。もし、形状の奥行き感に関する研究が進めば、デザイナーの感性に委ねられていた形状デザインの一部を、工学設計の枠組みで取り扱うことも可能となる。

視覚効果のある形状デザインについて、感性工学からのアプローチが考えられる。たとえば SD 法などにより、人間の心理評価を分析することができる。ただし、その結果を形状デザインに反映させる方法が問題となる。

映像分野では、平面画像から立体形状を感じさせるために、様々な技術装置が研究開発されている。たとえば、両眼視差によって人間が奥行きを感じることを利用して、左右の目に別々の映像を送り立体感を出させる。人間は両眼視差以外にも様々な情報から奥行きを感じとる¹⁾。その手がかりとして、陰影、運動、肌理(きめ)などがあり、単眼視でもそれらの情報から奥行きを感じとることができる。

本研究では、奥行き手がかりとして陰影に注目し、陰影からの形状推定の数学モデルによって視覚効果のある形状デザインをめざすことにする。具体例として、屋内から見上げた天井形状の設計問題を取り扱う。

2. 陰影からの形状推定

物体表面の輝度(見たときの明るさを数量的に示したもの)の変化が陰影である。陰影から形状を推定する計算モデルを考える。

(1) 輝度

入射光があらゆる方向に均等に反射する特性の表面を Lambert 面という。以下ではすべて Lambert 面を仮定する。

その拡散反射面の輝度 P (cd/m^2) は、表面に到達する光の照度を E 、表面色の視感反射率を ρ 、円周率を π とすれば、

$$P = E \cdot \rho / \pi \quad (1)$$

で表される²⁾。Lambert 面での輝度は、観測距離や方向に依存しない。

照度 E は表面に到達する光量を表し、光源の光の強さを I (cd) とすれば

$$E = I / d^2 \quad (2)$$

である。 d は光源との測光距離を表す。面が θ 度傾くと、その点の照度は

$$E = I \cdot \cos \theta / d^2 \quad (3)$$

となる。

(2) 反射地図

濃淡画像からの立体形状知覚(Shape from Shading)に関

する研究は、コンピュータビジョンと結びつく³⁾。表面反射率が一樣な物体について、それが方向既知の無限遠の光源(平行光源)で照らされる場合を想定して計算(イメージ)される輝度分布を“反射地図”という。反射地図には、面の法線向きの情報も含まれる。Horn らは、反射地図を用いて、陰影画像から物体表面の方向(法線)が数学的に求められることを示した⁴⁻⁶⁾。ただし、‘形状は滑らかに変化する’という物理的条件を制約としている。本研究でも、反射地図の考え方を参考にして、陰影の画像強度分布から法線方向を導く。

(3)形状推定

平行光源から光を受けるとき、その反射面の輝度は次式で表される⁷⁾。

$$P = k \cdot I_0 \cdot \cos \theta \quad (4)$$

I_0 は平行光源の強さ、 k は定数である。また、 θ はその点での反射面法線と光源方向とのなす角であり、たとえば 2 次元平面では、光源が下方にあるとき

$$\cos \theta = 1 / \sqrt{df(x)^2 + 1} \quad (5)$$

となる。ここで、 df は反射面の傾き(= df/dx)である。

したがって、平行光源の強さがわかれば、陰影画像から各点での反射面の傾きを推定できることになる。推定された反射面の傾きを dg とするなら、この dg を積分することで反射面の形状を求めることができる。ただし、式 (5) からわかるように、そのままでは反射面の向きを一意に決定することはできない。そのため、あらかじめ保有している反射地図の向き情報を参照することになる。

3. 表面形状設計問題

ここでは、物体形状とそれを照らす光源配置とを考慮しながら、奥行き感を高めるという設計問題を考える。すなわち、限られた空間内で、表面形状および光源配置を設計パラメタとして、陰影より推定される形状と実際の形状との差を最大化することをめざす。

点光源によって照らされている対称物体の陰影について、それに平行光源が照射しているとして形状を推定してみる。そのとき、推定された形状は実際の形状と異なったものになる。これを“奥行きギャップ”としよう。光源位置を意識しない限り、平行光源に対する反射地図を用いることになるわけだから、この状況設定は無謀なことではない。

以上より、表面形状設計問題を定式化すると、

$$\begin{aligned} &\text{Find } f(x), L \\ &\text{Such that } D(g(x), f(x)) \rightarrow \max. \\ &\text{Subject to } x \in \mathcal{X}, f \in \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで、 $f(x)$ は実際の表面形状で、 x は空間の独立変数、 L は光源の位置ベクトル、 $g(x)$ は推定された表面形状、 D はデザインとして意味のある奥行きギャップをあらわす関数、 $\mathcal{X}$ および Ω はそれぞれ x と f の許容領域であ

る。

4. 天井の形状設計

天井が実際よりも高く見えるように天井形状と光源位置とを求めることを考える。ここでは、天井の2次元断面形状の設計を対象にして、1次元の陰影画像から2次元形状を推定していく。この設計問題の空間に対する制約条件は、天井高さと横幅である。天井形状は対称であるとして、中心部($x=0$)での天井高さの奥行きギャップが評価関数となる。照明は、点光源の線列として扱う。

4.1 天井の形状設計問題

天井の形状設計問題は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} &\text{Find } f(x), L \\ &\text{Such that } g(0)/f(0) \rightarrow \max. \\ &\text{Subject to } 0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq f(x) \leq b \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $f(x)$ は天井の実際形状、 L は光源の位置ベクトル、 $g(x)$ は推定された天井形状、 D は天井中心での奥行きギャップ、 a および b は制約となる天井の横半幅と高さを表す(図-1参照)。

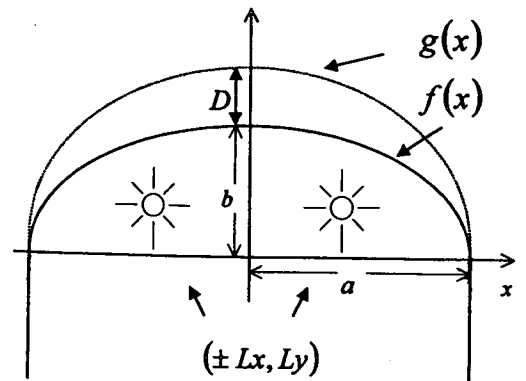


図-1 天井の形状設計

4.2 天井の形状推定

天井の形状推定に際し、以下の条件を設定する。

- 観測者は、中心軸($x=0$)上に位置し、天井を真上に見上げる。
- 観測者は、真下からの平行光源を想定する。
- 天井形状は、光源に向かって凹である。
- 天井の内部表面は、Lambert 面である。
- 実際の光源は、点光源である。
- 点光源からの光は、直接観測者に届かない。
- 一度拡散した光について、再拡散は考えない。
- 天井形状は滑らかである。

実際には、天状は点光源によって照らされていることから、次式で各点での輝度が決まる。

$$P' = k \cdot I_0' \cdot \cos \theta' / d^2 \quad (10)$$

ただし、 I_0 は点光源の強さ、 θ' は天井面の法線と点光源からの入射光とのなす角度、 d は光源からの距離である。

この輝度値 P' が平行光源によるものと判断して、輝度分布の最大値 P'_{max} から平行光源の強さを求める。同時に、その点での天井面の傾きを 0 であるとみなす。輝度 P' から傾き $dg(x)$ を推定すると、式(4),(5),(10)から

$$dg(x) = -\sqrt{(P'_{max}/P')^2 - 1} \quad (11)$$

となる。

4.3 数値計算例

以下では、図-2 に示すように、天井形状をパラメタ N の関数で与える。設計変数として、光源位置 $L = (L_x, L_y)$ 、パラメタ N のほかに、天井の横幅に対する高さの比率 b/a を考える。なお、懸垂型の光源を想定して、光源は天井面から $a/2$ 以上離すという人為的な制約条件を付加する。

(1)光源が1つの場合

最適化計算の結果、 $L = (0,0)$ 、 $N = 3.0$ 、 $b/a = 0.9$ のとき、奥行きギャップが最大となった。すなわち、天井を中心尖鋭の形にし、光源を原点に配置する。こうすることで、天井は中心がさらに尖鋭な形に見える(らしい)。コンピュータグラフィックス(CG)による濃淡画像で、それを確かめることにする。その画像を図-3 に示す。中心付近と両端が暗く、そ

の中間部は明るくみえる。天井の凹凸に関して先験的情報を持っているなら、奥行きを感じとれるかもしれない。実際には、輝度が小さいところでは、正確な奥行きは推定しにくい。

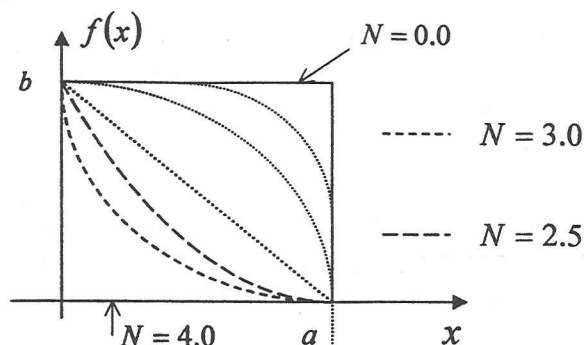


図-2 天井の形状関数

(2)光源が2つの場合

最適化計算の結果、 $L = (\pm a, -0.5b)$ 、 $N = 2.5$ 、 $b/a = 1.0$ のとき、奥行きギャップが最大となった。すなわち、天井を少し中心尖鋭な形にし、光源を両端部に配置する。濃淡画像を見ると、両端だけが明るく、他の暗い部分については濃淡変化を感じとれない(図-4 参照)。

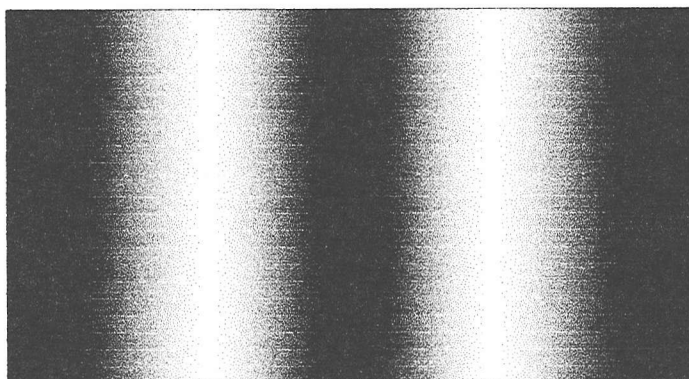


図-3 濃淡画像(光源1つ)

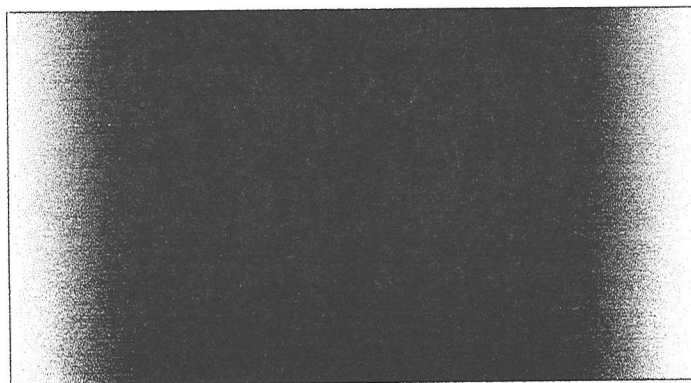


図-4 濃淡画像(光源2つ)

5. あとがき

濃淡画像からの形状推定を手がかりにして、形状設計問題について考えてみた。以下に結果をまとめる。

- A) 点光源と平行光源との相違に注目して、奥行きギャップ最大化設計を提案した。
- B) 数値計算による結果を CG で表示し、その効果を検証した。現時点では、提案手法の有効性を確認するには至っていない。

感性工学というソフトなアプローチではなく、本研究で提示したハードなアプローチによっても、形状デザインを取り扱うことができる。今後、バーチャルリアリティ機器の活用により、形状デザインは多くのエンジニアの研究テーマとなりうる。

参考文献

- 1) 乾俊郎: 知覚と運動, 認知心理学, 1, 東京大学出版会, 1995.
- 2) 山中俊夫: 色彩学の基礎, 文化書房博文社, 1997.
- 3) 平井有三: 視覚と記憶の情報処理, 培風館, 1995.
- 4) Ikeuchi, K. and Horn, B.K.P.: Numerical shape from shading and occluding boundaries, Artificial Intelligence, vol.17, pp.141-184, 1988.
- 5) 川人光男, 行場次郎, 藤田一郎, 乾俊郎: 視覚と聴覚, 岩波講座認知科学講座, 3, 岩波書店, 1994.
- 6) 早川秀樹: 陰影からのアプローチ—形状知覚モデルとしての考察—, 認知科学の発展, vol.5, 講談社, 1997.
- 7) 大石進一, 牧野光則: グラフィックス, 日本評論社, 1994.