45. 照明計算とCGのための各種建築材料の反射指向特性モデル

上谷 芳昭 (福山大学)

1. はじめに

近年のコンピュータの発達によって、精度の高い照明計算やCG（コンピュータグラフィックス）の手法を照明設計に利用することが可能となった。しかし、現実の建築空間を構成する建築仕上げ材料の反射指向特性のデータが十分に整備されていないために、たとえ優れたアルゴリズムを使用しても最終的な予測値の精度は必ずしも良くはない。本研究では、様々な建築材料の実測値をもとに、照明計算やCGのための反射指向特性の数式モデルを構成した。

2. 反射指向特性モデル

空間の指向性輝度分布を計算するためには、空間の構成面の反射指向特性をモデル化して計算に組み込む必要がある。建築材料の表面仕上げには、複合的な非金属材料が用いられることが多い。一般に非金属材料表面の反射光は、入射光の色を保存する表皮反射 (Boundary reflection) と、選択吸収により材料特有の色を示す層内反射 (Layer reflection) の2成分からなる。表皮層内反射分離測光により測定した結果^[1]によれば、表皮反射は材料表面の状態や入射条件によって拡散反射性から正反射性と様々で、層内反射は材料表面の状態や入射条件によらず拡散反射性に近いことが多い。よって本研究では、層内・表皮反射を分離してモデル化を行い^[2]、様々な材料の表面の状態を表すパラメータを実測値により決定する。

材料表面の反射指向特性は(1)式に示す反射特性関数 (Luminous Intensity Coefficient, LIC) ρ [1/sr] で表す。このとき拡散反射率 R は(2)式で表わされる。層内反射成分は材料によらずほぼ均等拡散反射性であることが多いので、反射特性関数の層内反射成分 ρ_l は(3)式に示す均等拡散反射モデルで表した。表皮反射成分は材料表面の状態によって拡散性から指向性まで様々であるので、表皮反射光が材料表面を構成する様々な向きの微小な正反射性の面（小素面）からの正反射光であると仮定し、表皮反射成分 ρ_b を(4)式に示すようにモデル化した。 ρ_f は小素面の分布関数で、 K は分布関数以外の要因を表わす係数である。表皮反射率 R_b は ρ_b を(2)式によって積分することで得られる。小素面の分布関数が材料表面の法線に関して対称な(5)式に示す正規分布 $p_f(\theta_f)$ であると仮定し、標準偏差 σ_f を反射指向特性の実測値^[1] から求めた。分布関数の標準偏差 σ_f 、係数 K 、表皮反射率 R_b 、層内反射率 R_l および反射率 R を表に示す。

3. おわりに

様々な建築材料の実測値をもとに、照明計算やCGのための反射指向特性の数式モデルを構成した。本研究の反射モデルは表皮反射と層内反射を分離してモデル化を行っているので、反射光の強さおよび色の予測に有用である。今後、更に実測データを蓄積し、反射モデルを充実したい。なお、本研究は第1回照明学会研究・教育助成による。

数式

$$\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) = \frac{L_o(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \cos \theta_o}{E(\theta_i, \phi_i)} \quad (1)$$

$$R(\theta_i, \phi_i) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o) \sin \theta_o d\theta_o d\phi_o. \quad (2)$$

$$\rho_l = \frac{R_L}{\pi} \cos \theta_o \quad (3)$$

$$\rho_b = K \frac{p_f(\theta_f, \phi_f) R_f(\psi_f)}{4 \cos \theta_f \cos \theta_i} \quad (4)$$

$$p_f(\theta_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{\theta_f^2}{2\sigma_f^2}\right) \quad (5)$$

θ_i, ϕ_i : 入射角、入射方位角
 θ_o, ϕ_o : 反射角、反射方位角
 $L_o(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o)$: 反射光の輝度 [cd/m²]
 $E(\theta_i, \phi_i)$: 平行光による照度 [lx]
 x, x', x'' : 要素 S_f, S_j, S_K 上の点
 x_o, x'_o, x''_o : 要素 S_f, S_j, S_K の重心
 R_L : 層内反射率
 θ_f : 小素面の法線と材料表面の法線のなす角
 ϕ_f : 小素面の法線の方位角
 ψ_f : 小素面の法線と正反射光のなす角
 $R(\psi_f)$: 小素面のフレネル反射率
 σ_f : 小素面の分布関数の標準偏差

表 各種材料の反射モデルのパラメータ

試料	K	σ	R_b	R_l	R
ラテックスペイント (準光沢、濃灰色)	3.103	0.041	0.068	0.151	0.219
ラテックスペイント (準光沢、明灰色)	2.933	0.038	0.084	0.347	0.431
ラテックスペイント (準光沢、白色)	2.814	0.038	0.078	0.755	0.833
ラテックスペイント (無光沢、濃灰色)	1.765	0.568	0.058	0.153	0.211
ラテックスペイント (無光沢、明灰色)	2.195	0.330	0.066	0.326	0.392
ラテックスペイント (無光沢、白色)	2.206	0.284	0.065	0.726	0.791
素材 (ひのき) No.104	1.594	0.057	0.048	0.418	0.466
つき板合板 (塗装なし、チーク) No.205	1.349	0.188	0.040	0.056	0.096
つき板合板 (樹脂塗装、チーク) No.206	3.135	0.044	0.049	0.035	0.084
プリント合板 (米松) No.302	4.072	0.080	0.089	0.363	0.452
クロス No.726	2.764	0.474	0.086	0.506	0.592
たたみ No.700	3.893	0.698	0.129	0.194	0.323
花崗岩 No.601	1.953	0.331	0.057	0.356	0.413
大理石 No.610	7.747	0.013	0.054	0.602	0.656
Pタイル No.741	2.116	0.111	0.059	0.326	0.384

文献 [1] 松浦、上谷：建築材料の偏光を用いた反射指向特性の測定、日本建築学会計画系論文報告集第388号、昭和63年6月、pp.15-22。
[2] Uetani, Y., Matsuura, K., A Method of Luminance Calculation in an Anisotropic Diffuse Reflecting Interior, Journal of the IES, Vol.22, No.2, pp.166-175, 1993.