

デジタルファブリケーションにおける半透明感と光沢感の表現

ACT-i

高谷 剛志

奈良先端科学技術大学院大学 博士後期課程
日本学術振興会 特別研究員 (DC1)

解決したい問題

視覚的質感の作製は職人技



未来ビジョン

計測した質感をそのまま作製



文化：貴重な有形文化財の複製
産業：自分の肌らしい義肢が作製可能

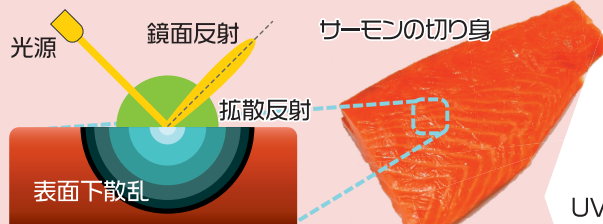
ACT-i研究期間の成果

半透明な質感の再現は可能

- ◎：半透明さの再現
- ：色の再現
- ：光沢さの再現

「半透明さ」と「光沢さ」

「光沢さ」…物体表面での鏡面反射光に依存



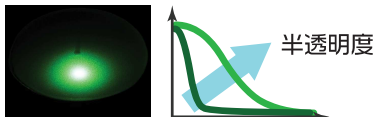
「半透明さ」…物体内部での散乱光に依存

質感の計測

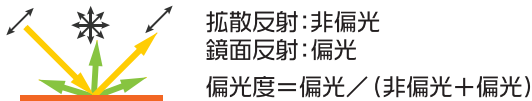
プロジェクタと偏光カメラを用いた内部計測システム



散乱光の空間的広がりを計測→半透明度



反射光の偏光度を計測→光沢度



質感の表現モデル

層構造による表現モデル

異なる透明度の材質が重なった時に現れる透明度をモデル化



UVプリンタによる印刷
×
3Dプリンタによる印刷

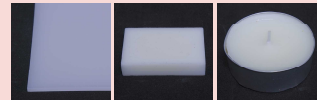


パラメータの探索

データベースを参照して特定

事前にすべての組合せて質感を合成し、データベースを構築

基底材質



UVインク



最大5層



4D BSSRDF

双方向散乱面反射分布関数
(Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution)
拡散近似

$$S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) = \frac{1}{\pi} \frac{F_i(x_i, \omega_i) R_d(x_i, x_o) F_o(x_o, \omega_o)}{\text{フネル透過率}} \quad \text{4D BSSRDF}$$

4D BSSRDF = 不均一な半透明材質の点像分布関数

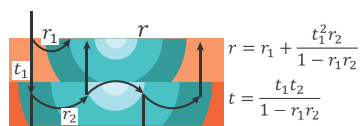
OTF

点像分布関数 (PSF; Point Spread Function)

フーリエ変換

光学伝達関数 (OTF; Optical Transfer Function)

表現モデルにおけるOTFの利点：
畳み込み積分が不要



散乱を考慮すると畳み込み積分が必要となるが、フーリエ変換によって乗算として計算可能

$$F[R](f_x) = F[R_1](f_x) + \frac{F[T_1](f_x)^2 F[R_2](f_x)}{1 - F[R_1](f_x) F[R_2](f_x)}$$

$$F[T](f_x) = \frac{F[T_1](f_x) F[T_2](f_x)}{1 - F[R_1](f_x) F[R_2](f_x)}$$

計測におけるOTFの利点：
計測時間が大幅に削減可能
(6時間→15分)

プロジェクタから投影する正弦波パターン

$$P(f_x, x) = O + A \cos(2\pi f_x x + \theta)$$

カメラで観測される正弦波パターン

$$I(f_x, x) = I_{dc}(f_x, x) + I_{ac}(f_x, x)$$

直流成分 交流成分

$$I_{ac}(f_x, x) = M(f_x, x) \cos(2\pi f_x x + \theta + \phi(f_x, x))$$

3つの異なる位相 $\theta \in \{-\frac{2}{3}\pi, 0, \frac{2}{3}\pi\}$ を投影・観測すると、交流成分の振幅と位相が計算可能

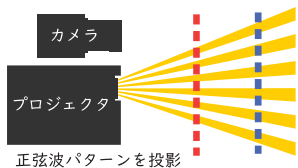
$$M(f_x, x) = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(I_1 - I_2)^2 + (I_2 - I_3)^2 + (I_3 - I_1)^2}$$

$$\phi(f_x, x) = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3}$$

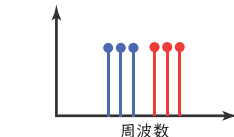
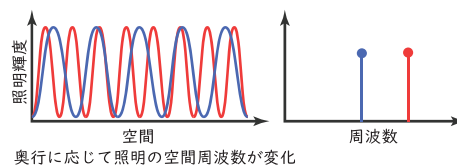
$$F[R](f_x) = M(f_x, x) e^{i\phi(f_x, x)}$$

立体的な質感の計測

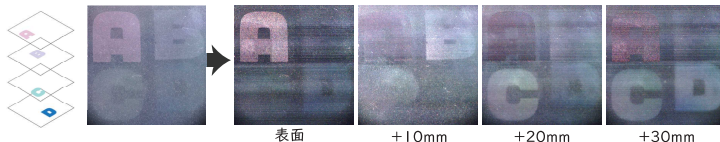
物体内部の断層画像を復元し、反射特性を計測



対象物体のテクスチャの影響をなくするため、投影する正弦波パターンの周波数を変化



位相曖昧性なく、各ピクセルごとに処理可能
観測は全ての周波数が混在しているため、周波数相関により信号を抽出



光沢度の制御

透明インクの密度によって光沢度を制御可能

