マルチメディア工学

コンピュータグラフィックス
ボリュームグラフィックス

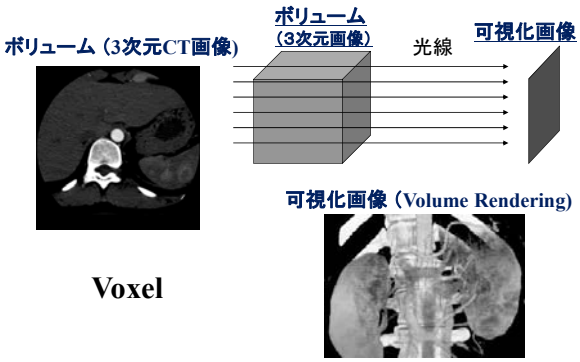
佐藤 嘉伸

大阪大学　大学院医学系研究科
放射線統合医学講座
yoshi@image.med.osaka-u.ac.jp
http://www.image.med.osaka-u.ac.jp/member/yoshi/
講義ホームページ: 日本語ページ → 授業の資料 → マルチメディア工学

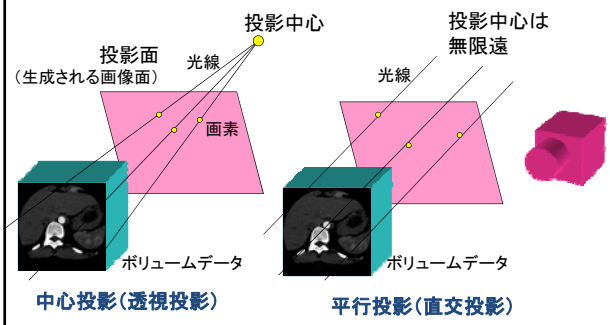
CG (Computer Graphics)

ボリュームグラフィックス
(Volume Graphics: VG)

ボリュームグラフィックス

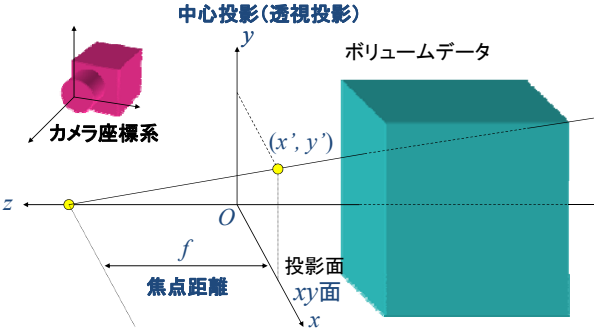


ボリュームデータの2次元画像への投影



ボリュームグラフィックスの基本処理：生成される画像の各画素は、3次元空間中の光線に対応する。ボリュームグラフィックスでは、光線に沿ったボリュームデータのボクセル値プロファイルに基づき、生成される画像の画素値を決定する。

ボリュームデータの2次元画像への投影



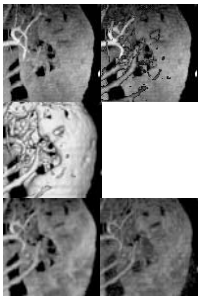
ボリュームグラフィックスの基本処理：生成される画像の各画素は、3次元空間中の光線に対応する。ボリュームグラフィックスでは、光線に沿ったボリュームデータのボクセル値プロファイルに基づき、生成される画像の画素値を決定する。

ボリュームグラフィックス法の分類

Maximum Intensity Projection (MIP)
- 最大値投影 (MIP)
- 極大値投影 (LMIP: Local MIP)

Surface Rendering (SR)
- 表面の陰影表示

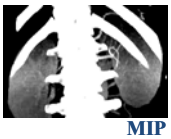
Volume Rendering (VR)
- ボリュームの透過表示
  - 陰影なし（Unshaded）
  - 陰影つき（Shaded）



ボリュームデータ可視化法 の比較

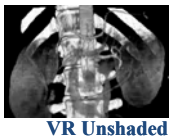
	SR	VR Unshaded	VR Shaded	MIP	LMIP
濃淡	×	○	△	◎	◎
形状	◎	○	○	△	△
空間関係	◎	○	○	×	◎
客観性	○	△	△	◎	○
多様性	△	○	◎	×	×

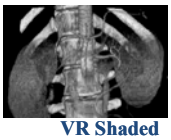
客観性: しきい値などへの依存性
多様性: 多彩な描画表現能力


MIP

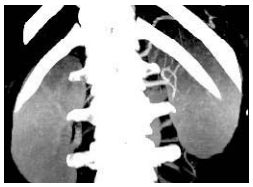

LMIP


SR


VR Unshaded


VR Shaded

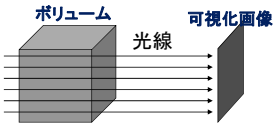
Maximum Intensity Projection (MIP)

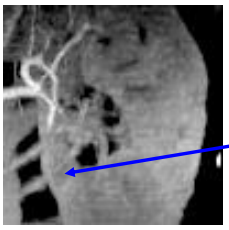

MIP


LMIP

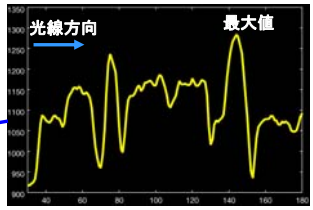
MIP: Maximum Intensity Projection

ボリューム (3次元画像)
↓ 光線上の最大値を選択
可視化画像





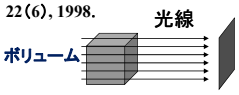
光線上のプロファイル



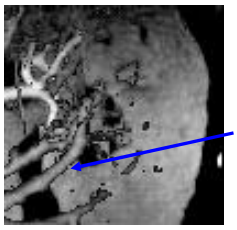
LMIP: Local Maximum Intensity Projection

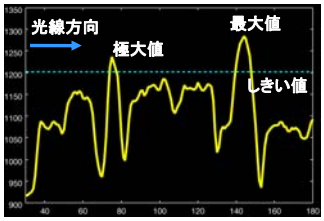
Y. Sato, et al., *JCAT*, 22(6), 1998.

ボリューム (3次元画像) ← しきい値
↓ 光線上の最初の極大値を選択(しきい値以上)
可視化画像



光線上のプロファイル



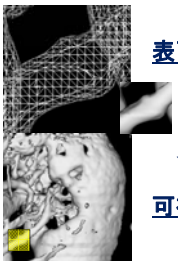


Surface Rendering

Surface Rendering

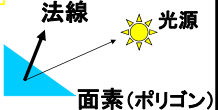
ボリューム (3次元画像) ← しきい値

↓ モデリング：マーチンキューブ法



表面形状モデル ← 表面(面素)の色・材質
光源(色・方向)

↓ レンダリング



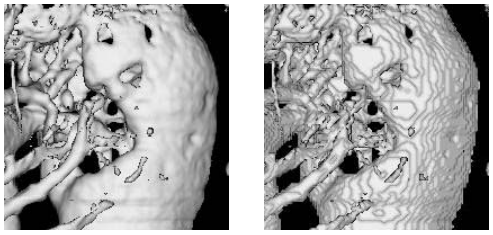
可視化画像

モデリングの原理：マーチンキューブ法

高解像度3次元形状モデリング手法

W. E. Lorensen and H. E. Cline, *Computer Graphics*, 21(3), 1987.

原画像に適用　　二値画像に適用



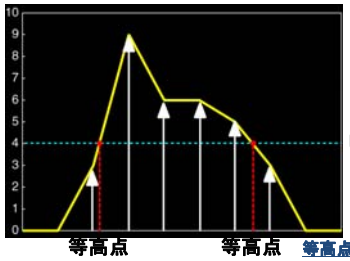
マーチンキューブ法

- 3次元画像（ボリュームデータ）の等濃淡値表面を抽出（再構成）する方法
- サブボクセル（1ボクセル以下）の解像度で再構成可能な方法
- 各ボクセル値の線形補間を行いながら、系統的にポリゴンデータ（表面形状モデル）に変換する。

モデリングの原理：マーチンキューブ法

1次元マーチンキューブ（インターバル）法

離散点での濃淡値を線形内挿して、2次元空間にプロットし、しきい値に対応する直線で切った切断点（等高点）



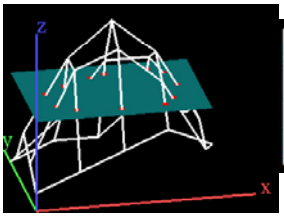
しきい値

等高点　　等高点　　等高点位置は連続値

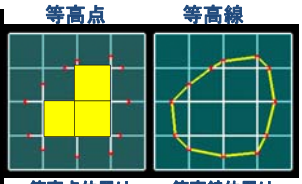
モデリングの原理：マーチンキューブ法

2次元マーチンキューブ（スクエア）法

3次元空間のしきい値平面で切った切断輪郭（等高線）

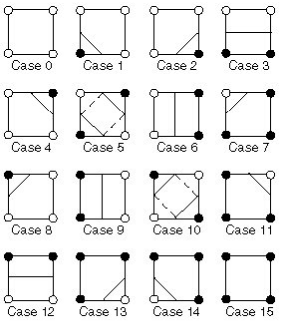


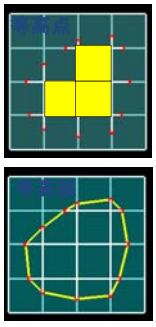
等高点　　等高線



等高点位置は格子線上　　等高線位置はサブ画素精度

2次元マーチンキューブ（スクエア）法
等高点から等高線へ

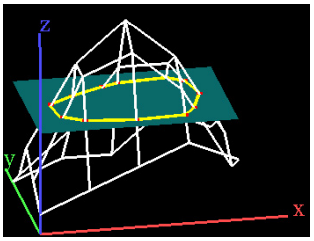


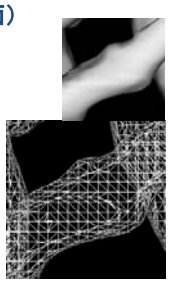


モデリングの原理：マーチンキューブ法

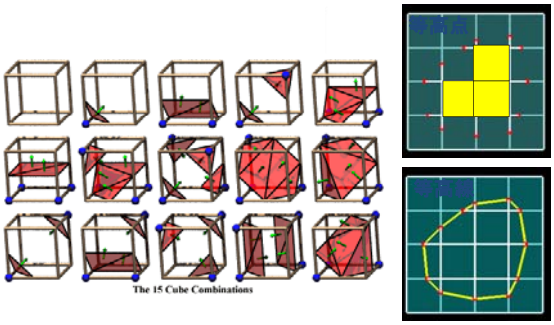
3次元マーチンキューブ法

4次元空間のしきい値超平面で切った切断表面（サブボクセル精度の等高面）

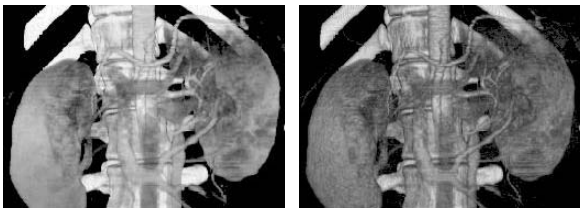




3次元マーチンキューブ法
等高点から等高面へ

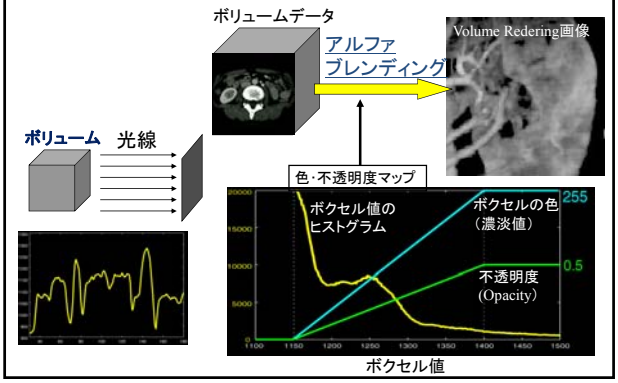


Volume Rendering



VR Unshaded　　VR Shaded

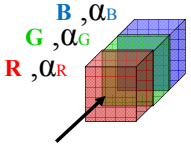
Volume Rendering: Unshaded（陰影なし）



不透明度合成の原理：アルファ・ブレンディング

ボクセル ＝ 半透明の 色つきゼリー

色, 不透明度 (0～1.0)　　各ボクセルの画素値への寄与



透過した光線の強さ × 不透明度 × 色

$(1-\alpha_R)(1-\alpha_G)\times\alpha_B\times B$

$+$

$(1-\alpha_R)\times\alpha_G\times G$

$+$

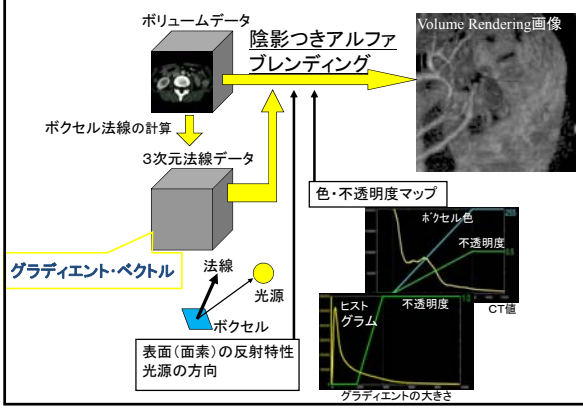
$\alpha_R\times R$

↓

光線に対応する画素値

演習問題4-A：光線に沿ったアルファブレンディングの一般式をかけ．光線に沿ってN個のボクセルがあるとし，i (1～N)で参照する．i = 1が最も視点に近いとする．また，不透明度をα_i，色を$\mathbf{C}_i$とする．

Volume Rendering: Shaded（陰影つき）

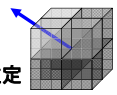


ボクセル法線計算の原理：
グラディエント（勾配）ベクトル

グラディエント・ベクトルの方向：濃淡変化が最大となる方向
グラディエント・ベクトルの大きさ：濃淡変化の大きさ

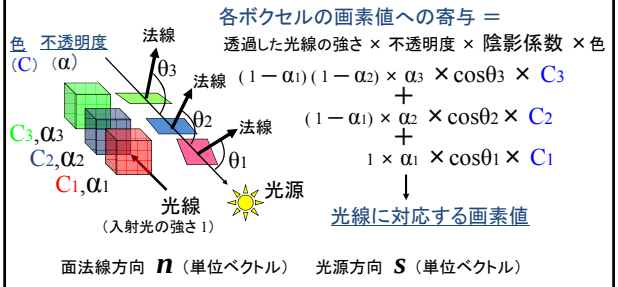
コントラスト大　　コントラスト小　　異なる方向

法線 ＝ グラディエントベクトルの方向



近傍ボクセルからの推定

陰影つきアルファブレンディング



各ボクセルの画素値への寄与 ＝

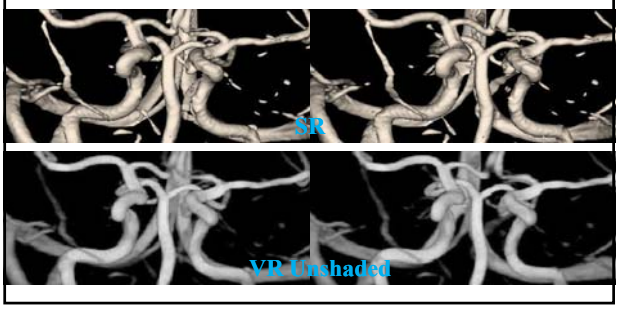
透過した光線の強さ × 不透明度 × 陰影係数 × 色

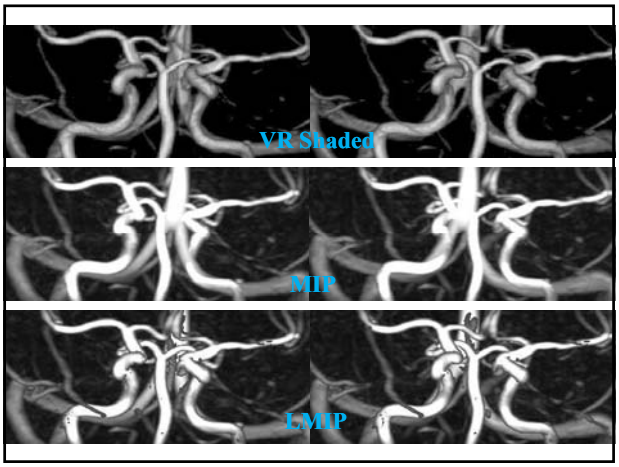
$(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\times\alpha_3\times\cos\theta_3\times C_3$
＋
$(1-\alpha_1)\times\alpha_2\times\cos\theta_2\times C_2$
＋
$1\times\alpha_1\times\cos\theta_1\times C_1$
↓
光線に対応する画素値

面法線方向 $\boldsymbol{n}$（単位ベクトル）　光源方向 $\boldsymbol{S}$（単位ベクトル）

演習問題4-B：光線に沿った陰影つきアルファブレンディングの一般式をかけ．光線に沿ってN個のボクセルがあるとし，k (1～N)で参照する．k = 1が最も視点に近いとする．また，不透明度をα_k，色を$\mathbf{C}_k$とする．

ボリュームグラフィックス法の比較
脳血管3次元像の例





ボリュームグラフィックス フリーソフト

Visualization Toolkit (VTK)　開発元：GE (General Electric)
動作環境：Unix, Windows　http://www.kitware.com
機能：SR, VR (Shaded, Unshaded)，種々の3次元画像解析ツール
特徴：C++クラスライブラリ。Tcl/Tk スクリプト言語をサポート。

Volpack　開発元：スタンフォード大学
動作環境：Unix　http://graphics.stanford.edu/software/volpack/
機能：VR (Shaded)
特徴：C関数ライブラリ。
不透明度関数設定におけるグラディエントの利用可能。

VG (Volume Graphics) プログラム演習

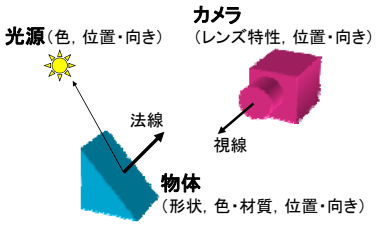
平行投影，超楕円体，回転，
アルファブレンディング，
グラディエントベクトル，拡散反射

CG (Computer Graphics)

物体形状表現
幾何学 Geometry

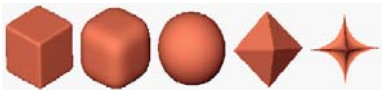
CG：3次元世界表現と表示

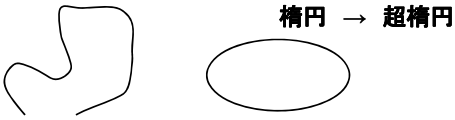
- 座標系，座標変換，回転の表現，投影(カメラ)モデル
- **物体形状表現 (幾何学 geometry) （スプライン関数，超2次関数）**
- 物体陰影表現 (photometry) （分光反射特性：拡散反射，鏡面反射）



CG： 物体形状表現

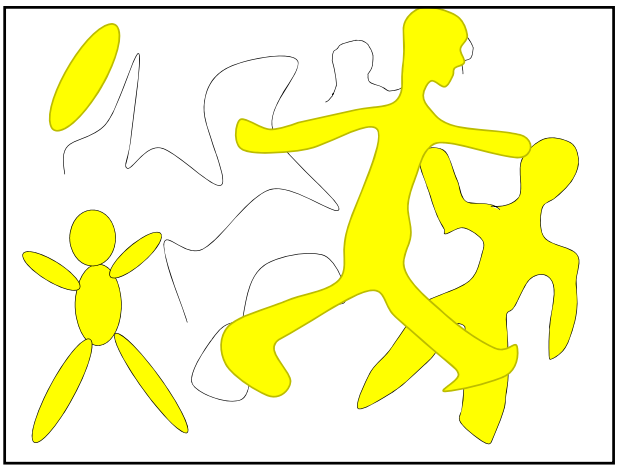
超2次関数 (Superquadrics)： 超楕円体





自由形状 vs 解析関数

形状表現の多様さ vs 形状制御の容易さ

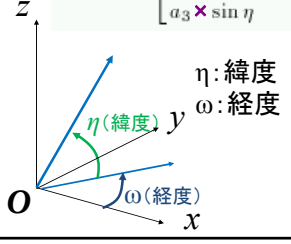


CG： 物体形状表現

2次関数 (Quadrics)： 楕円体

$$\left(\frac{x_1}{a_1}\right)^2+\left(\frac{x_2}{a_2}\right)^2+\left(\frac{x_3}{a_3}\right)^2=1$$

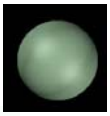
$$\underline{x}(\eta,\omega)=\begin{bmatrix}a_1\times\cos\eta\times\cos\omega\\ a_2\times\cos\eta\times\sin\omega\\ a_3\times\sin\eta\end{bmatrix},\quad \begin{matrix}-\pi/2 \le \eta \le \pi/2\\ -\pi \le \omega < \pi\end{matrix}$$



η：緯度
ω：経度

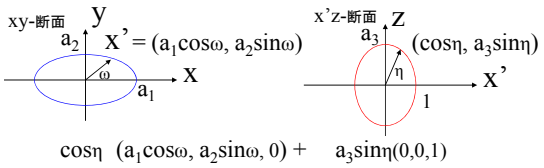
CG: 物体形状表現
Spherical Products

円 $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r\cos\theta \\ r\sin\theta \end{pmatrix}$　楕円 $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a\cos\theta \\ b\sin\theta \end{pmatrix}$



$$\left(\frac{x_1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{x_3}{a_3}\right)^2 = 1$$

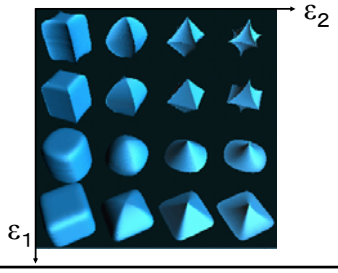
$$\underline{x}(\eta,\omega) = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\eta \\ \cos\eta \\ \sin\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\omega \\ \sin\omega \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} -\pi/2 \le \eta \le \pi/2 \\ -\pi \le \omega < \pi \end{matrix}$$



$\cos\eta\ (a_1\cos\omega, a_2\sin\omega, 0) + a_3\sin\eta(0,0,1)$

CG: 物体形状表現
超2次関数 (Superquadrics): 超楕円体

$$\underline{x}(\eta,\omega) = \begin{bmatrix} a_1 \times \cos^{\varepsilon_1}\eta \times \cos^{\varepsilon_2}\omega \\ a_2 \times \cos^{\varepsilon_1}\eta \times \sin^{\varepsilon_2}\omega \\ a_3 \times \sin^{\varepsilon_1}\eta \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} -\pi/2 \le \eta \le \pi/2 \\ -\pi \le \omega < \pi \end{matrix}$$

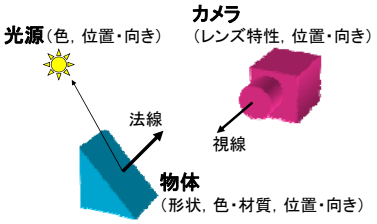


CG (Computer Graphics)

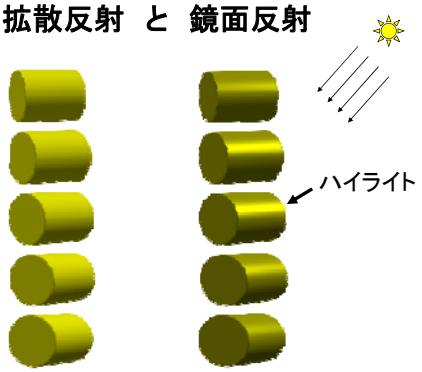
物体(表面)陰影表現
測光学 Photometry

CG:3次元世界表現と表示

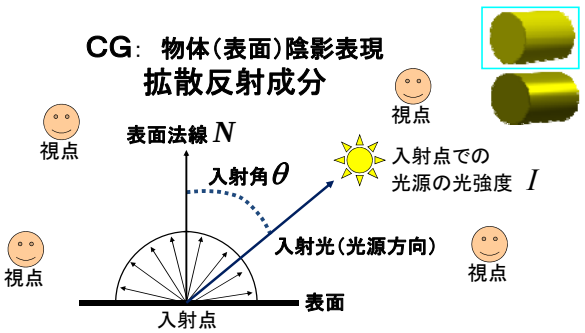
- 座標系，座標変換，回転の表現，投影(カメラ)モデル
- 物体形状表現 (geometry) （スプライン関数，超2次関数）
- **物体(表面)陰影表現 (測光学 photometry)**
  (分光反射特性:拡散反射，鏡面反射)



CG: 物体(表面)陰影表現
拡散反射 と 鏡面反射



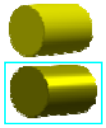
CG: 物体(表面)陰影表現
拡散反射成分

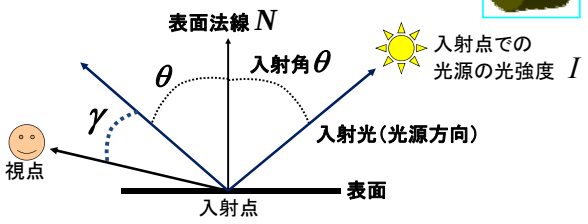


- 視点に依存しない(どこからみても同じ明るさに見える)
- みかけの明るさ I_d は、入射角のコサインに比例する。

$I_d = k_d I \cos\theta$ （k_d は、拡散反射係数）

CG: 物体(表面)陰影表現
鏡面反射成分



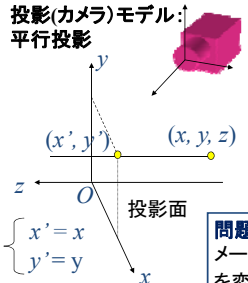


- 視点に依存する(みる方向によってみかけの明るさ I_s が変わる)
- ハイライトを生成し、その程度はハイライト指数 nに依存。

$$I_s = k_s\, I \cos^n \gamma \quad (\ k_s \text{ は、鏡面反射係数})$$

VGの原理: プログラム演習 (VG)
平行投影, 超楕円体, 拡散反射

投影(カメラ)モデル:
平行投影



カメラ座標系を世界座標系と考える.

物体形状表現: 超楕円体

$$\underline{x}(\eta,\omega) = \begin{bmatrix} a_1 \times \cos^{\varepsilon_1}\eta \times \cos^{\varepsilon_2}\omega \\ a_2 \times \cos^{\varepsilon_1}\eta \times \sin^{\varepsilon_2}\omega \\ a_3 \times \sin^{\varepsilon_1}\eta \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} -\pi/2 \le \eta \le \pi/2 \\ -\pi \le \omega < \pi \end{matrix}$$

物体陰影表現: 拡散反射成分のみ

光源: 平行光線

問題: 以上の条件で, 超楕円体の5つのパラメータ, 回転パラメータ, および光源の方向を変化させて**陰影つきボリュームレンダリング**画像を生成できるプログラムを作り, 方法・結果をレポートにまとめよ.

超楕円体ボリュームの生成: 1

楕円体

陰関数表現

$$\left(\frac{x_1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{x_3}{a_3}\right)^2 = 1$$

パラメトリック表現

$$\underline{x}(\eta,\omega) = \begin{bmatrix} a_1 \times \cos\eta \times \cos\omega \\ a_2 \times \cos\eta \times \sin\omega \\ a_3 \times \sin\eta \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} -\pi/2 \le \eta \le \pi/2 \\ -\pi \le \omega < \pi \end{matrix}$$

超楕円体

パラメトリック表現

$$\underline{x}(\eta,\omega) = \begin{bmatrix} a_1 \times \cos^{\varepsilon_1}\eta \times \cos^{\varepsilon_2}\omega \\ a_2 \times \cos^{\varepsilon_1}\eta \times \sin^{\varepsilon_2}\omega \\ a_3 \times \sin^{\varepsilon_1}\eta \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} -\pi/2 \le \eta \le \pi/2 \\ -\pi \le \omega < \pi \end{matrix}$$

問題P2-1 超楕円体の陰関数表現を導け.

超楕円体ボリュームの生成: 2

超楕円体の陰関数表現を以下とする

$$F(x, y, z) = 1$$

$128 \times 128 \times 128\ (128^3)$ の3次元配列を用意する. メモリに余裕があれば, 256^3でもよいし, メモリが足りなければ64^3でもよい.

3次元配列の各要素に, $F(x, y, z) > 1$ (Outside) のときは, 0, それ以外 (Inside) は100を入れる.

回転させて超楕円体のボリューム生成を行うためには, 回転行列をかけてから上の処理を行う.

ボリュームの平滑化

入力ボリューム(配列): $I(i, j, k)$
平滑化ボリューム(配列): $J(i, j, k)$

$$J(i,j,k) = (1/27) \sum_{p=-1}^{1} \sum_{q=-1}^{1} \sum_{r=-1}^{1} I(i+p, j+q, k+r)$$

(一様平均による平滑化)

一様平均による平滑化を何回か繰り返す

$$J_0(i,j,k) = I(i,j,k)$$

$$J_n(i,j,k) = (1/27) \sum_{p=-1}^{1} \sum_{q=-1}^{1} \sum_{r=-1}^{1} J_{n-1}(i+p, j+q, k+r)$$

問題P2-2: 一様平均による平滑化をn回繰り返すと, どんな平滑化になっているか? (n が大きくなるとある有名な関数の重み平均に近づく.)

グラディエント(勾配)ベクトルの計算

平滑化ボリューム(配列): $J(i, j, k)$
グラディエントボリューム(配列)

x成分: $Gx(i,j,k) = J(i+1,j,k) - J(i-1,j,k)$
y成分: $Gy(i,j,k) = J(i,j+1,k) - J(i,j-1,k)$
z成分: $Gz(i,j,k) = J(i,j,k+1) - J(i,j,k-1)$

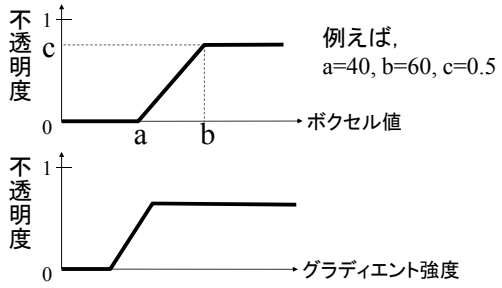
法線方向: $\boldsymbol{n} = (Gy, Gy, Gy) / \mathrm{Sqrt}(Gx^2+Gy^2+Gz^2)$
グラディエント強度: $\mathrm{Sqrt}(Gx^2+Gy^2+Gz^2)$

(i, j, k) は, 連続変数 (x, y, z) の離散変数に対応.

不透明度関数の設定

色は，例えば「白」に固定する．

不透明度は，例えば以下のようにする．



実験項目および考察事項

- 超楕円体のパラメータ，回転パラメータを変化させてボリュームレンダリングせよ．
- 光源の方向を変化させよ．
- 一様平均による平滑化の回数を変化させよ．
- 不透明度関数を変化させよ．
- その他，各自，創意工夫を加えて実験を行うこと．
- 以上の実験結果に考察を加えよ．
- プログラムが得意な学生は、使いやすいGUIも作成せよ。

発展課題：運動生成

- 同じ形状パラメータで、異なる2つの回転（姿勢）をもつ超楕円体の画像をそれぞれ生成せよ。
- 一方の姿勢から他方の姿勢に、超楕円体の姿勢がなめらかに変化するように、アニメーション画像系列（2つの姿勢の中間姿勢を持つ複数毎の画像）を生成せよ。
  - 単位四元数により回転を表現し、四元数の補間式を用いて、2つの回転の間を、回転角度差5度程度になるよう等角度間隔サンプリングを行う。角度差は、単位四元数の内積のArcCosにより求められる。
  - 必要なら、単位四元数表現をマトリックス表現に変換して、画像生成を行う。
- 四元数に基づく補間とオイラー角に基づく補間の両方の画像系列を生成し、どのような違いがあるか調べよ。

質問1

マルチメディア工学のプログラム演習について，質問です．

内容は，超楕円体のパラメータ表現を授業の配布資料どおりに サーフェイスレンダリングのプログラムで実装すると，座標の値が複素数になってしまう点があることについてです．

例えば、$-\pi/2 \leqq \eta \leqq \pi/2$なので，ηが -π/2、ε1が0.5の場合に z 座標の値が

$$z = a3 \times (\sin\eta)^{\varepsilon 1} = a3 \times (\sin(-\pi/2))^{0.5} = a3 \times (-1)^{0.5}$$

となってしまいます．この場合の対処について，授業の資料では触れられていないのでよく分りません．

現在はsinηやcosωの符号が，超楕円体上の点が，原点から見て どの方向にあるのか，sinηやcosωの大きさが原点からの距離に かかわる値で，ε1,ε2はその距離を補正する要素だと考え，以下のようなプログラムを作成しています．

$$z \text{ 座標の値} = a3 \times |\sin\eta|^{\varepsilon 1} \times (\sin\eta/|\sin\eta|)$$

以上の方法で問題ないのか，また問題がある場合はどのように 対処すべきか，が質問内容です。よろしくお願いします。

回答2

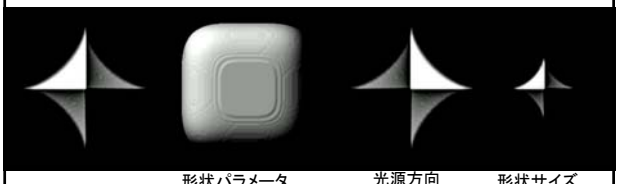
➢ z 座標の値 = a3 × |sinη|^ε1 × (sinη/|sinη|)
➢ この方法で問題がないか

考え方は合っています． ほとんど正解ですが，このままではsinη==0のときに ゼロ除算になってしまいます． 実際には計算精度の関係でぴったりゼロになることはないので 問題は起きないかもしれませんが….

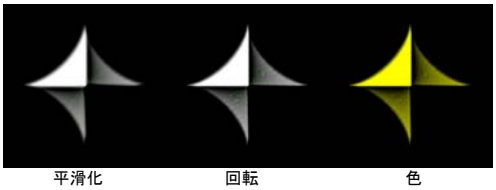
➢ どのように対処すべきか

(sinη/|sinη|)の部分を，sinη==0の時は0になるように修正すればいいです．
そのための関数がサンプルコードには用意してあります
(SurfaceRendering.clにあるsign()関数)ので，これを使ってもらってもOKです
.

Volume Rendering 出力例



形状パラメータ　光源方向　形状サイズ



平滑化　回転　色