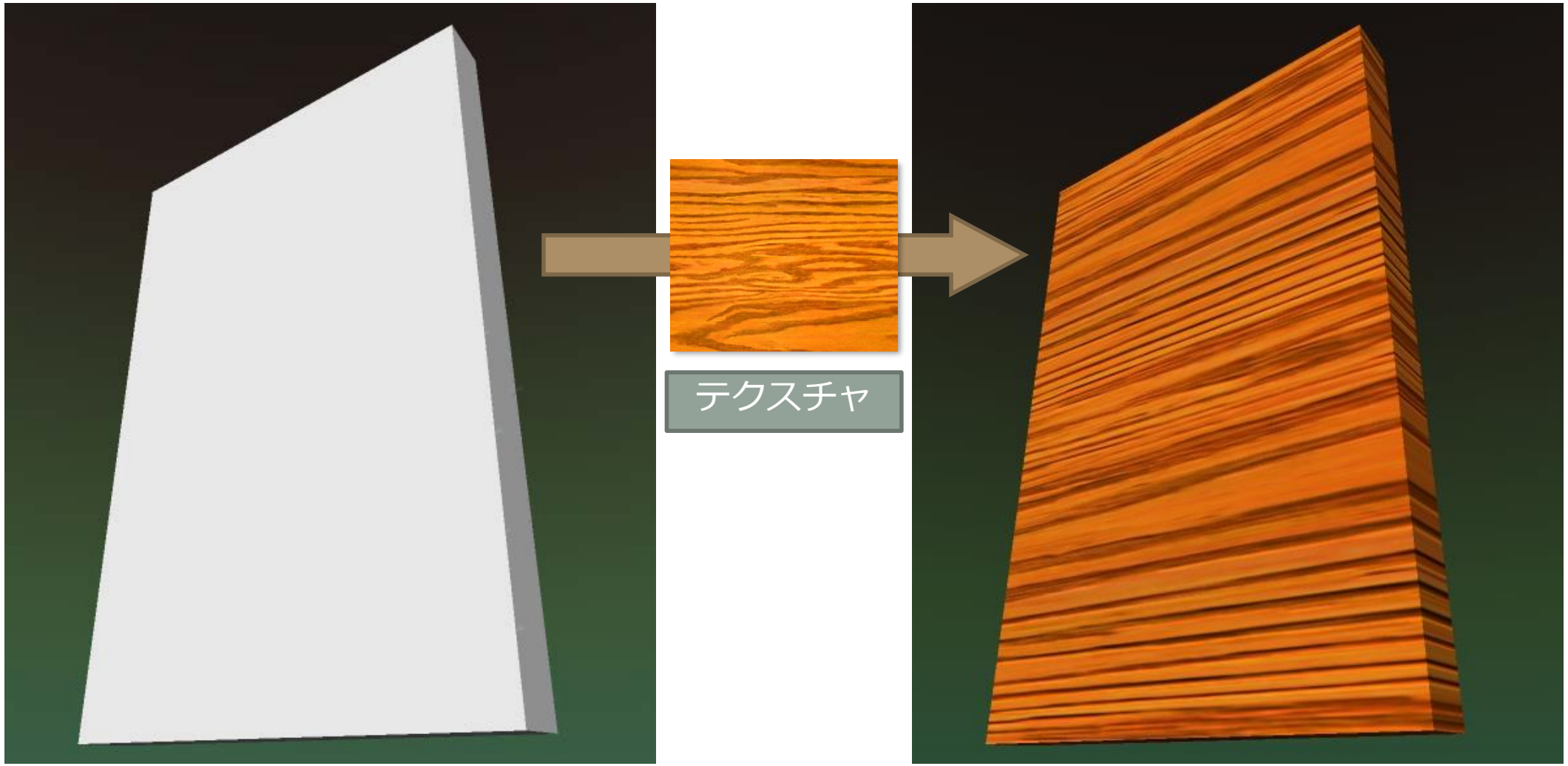
ゲームグラフィックス特論

第8回 テクスチャマッピング (1)

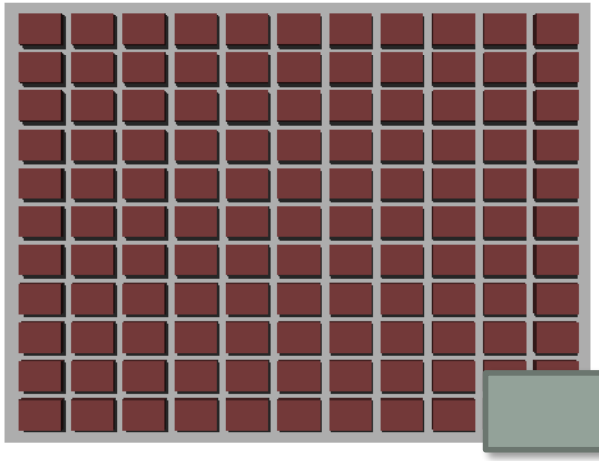
物体表面に画像を貼付ける

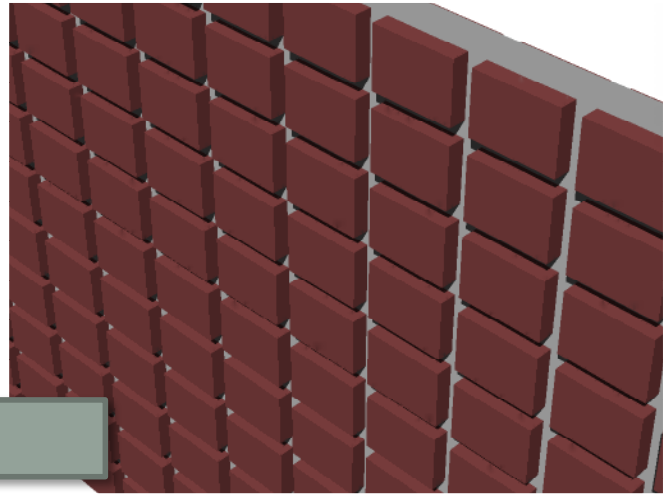
表面材質の画像による制御

テクスチャマッピング (Texturing)



レンガの壁の表現





レンガを図形で表現する

レンガをテクスチャで表現する

テクスチャを使ったレンガの壁

Without bump/highlight mapping

With highlight mapping

With bump mapping

With bump/highlight mapping

Parallax Occlusion Mapping with Silhouettes (Crysis)

テクスチャマッピングの手順

画像の読み込みと標本化方法の設定

テクスチャマッピングの手順

1. テクスチャの作成
   i. テクスチャオブジェクトの作成と結合
   ii. テクスチャメモリの確保と画像の読み込み
2. テクスチャ座標の生成
   i. 頂点属性にテクスチャ座標を追加する
   ii. テクスチャ座標をバーテックスシェーダの in (attribute) 変数に渡す
3. バーテックスシェーダの処理
   i. in (attribute) 変数のテクスチャ座標値を必要に応じて座標変換する
   ii. 変換後の座標値を out (varying) 変数に格納して次のステージに送る
4. フラグメントシェーダの処理
   i. in (varying) 変数で受け取った座標値をもとにテクスチャを標本化する
   ii. 標本化したテクスチャの画素値を使って陰影を計算する
   iii. 求めた陰影をカラー値としてカラーバッファに格納する

テクスチャオブジェクトの準備

- N 個のテクスチャオブジェクトを作成する
  - GLuint tex[N];
  - glGenTextures(N, tex);
- i 番目のテクスチャオブジェクトを結合する
  - glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, tex[i]);

二次元テクスチャの場合

テクスチャに用いる画像の準備

- 配列変数に画像を格納する
  - GLubyte image[HEIGHT][WIDTH][CHANNEL];
    - HEIGHT, WIDTH は画像の幅と高の画素数
      - 初期の OpenGL では 2 の整数乗 2^n にする必要があったが今はこの制限はない
    - CHANNEL は画像のチャンネル数
      - カラー (GL_RGB) なら3，アルファチャンネル付き (GL_RGBA) なら4
  - 配列変数 (image) の各要素に画素の色を格納する
    - image[y][x][0] = <赤色のレベル (0～255)>;
    - image[y][x][1] = <緑色のレベル (0～255)>;
    - image[y][x][2] = <青色のレベル (0～255)>;
    - image[y][x][3] = <不透明度 (0～255)>;

GL_RGBA のとき, 0: 透明，255: 不透明

画像の読み込み

- テクスチャメモリを確保して，そこに画像データを格納する
  - glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, *internalFormat*, WIDTH, HEIGHT, 0, *format*, *type*, image);
    - 2次元テクスチャなら第1引数は GL_TEXTURE_2D
    - 第2引数はミップマップのレベル（後述）で基本は 0
    - 第6引数は今は使われないので常に 0 (かつてはテクスチャの境界線の太さの指定だった)

internalFormat (GPU内でのデータの形式)	**format** (画像データ image の形式)	**type** (画像データ image のデータ型)
GL_RED (1チャンネル、グレースケール)	**GL_RED** (1チャンネル)	**GL_UNSIGNED_BYTE** (GLubyte, 符号なし 8bit 整数)
GL_RG (2チャンネル)	**GL_RG** (2チャンネル)	**GL_UNSIGNED_SHORT** (GLushort, 符号なし 16bit 整数)
GL_RGB (3チャンネル、カラー)	**GL_RGB**, **GL_BGR** (3チャンネル)	**GL_UNSIGNED_INT** (GLuint, 符号なし 32bit 整数)
GL_RGBA (4チャンネル、カラー+不透明度)	**GL_RGBA**, **GL_BGRA** (4チャンネル)	**GL_FLOAT** (GLfloat, 32bit 浮動小数点)

ほかにも
たくさん

internalFormat, format, type

- internalFormat と format が一致している必要はない
  - 変換して読み込まれる
- format が GL_BGR, GL_BGRA
  - 画像のチャネルの R と B が入れ替わっているとき
    - OpenCV, ARToolKit 等でキャプチャした画像をテクスチャとして使うとき便利
- type が GL_UNSIGNED_BYTE のとき
  - 0～255 の整数値が 0～1 の実数値に変換されて読み込まれる
- type が GL_FLOAT のとき
  - internalFormat が GL_RGB/GL_RGBA
    - 配列 image の各要素の値は [0, 1] にクランプされて読み込まれる
  - internalFormat が GL_RGB32F/GL_RGBA32F
    - 配列 image の各要素の値はそのままシェーダで参照される
    - GL_RGB16F/GL_RGBA16F （16bits 浮動小数点もあり）
    - OpenEXR と組み合わせて HDRI を扱うときや GPGPU で便利

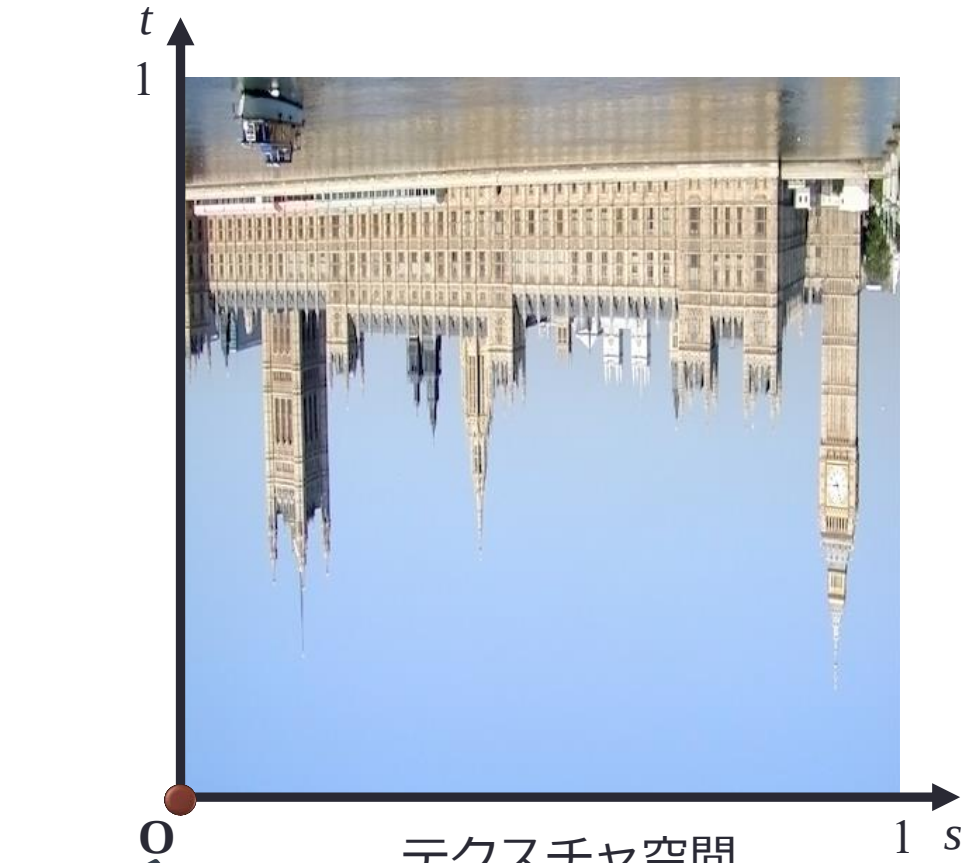
テクスチャ空間

画像の原点

(0, 0)

テクスチャ画像

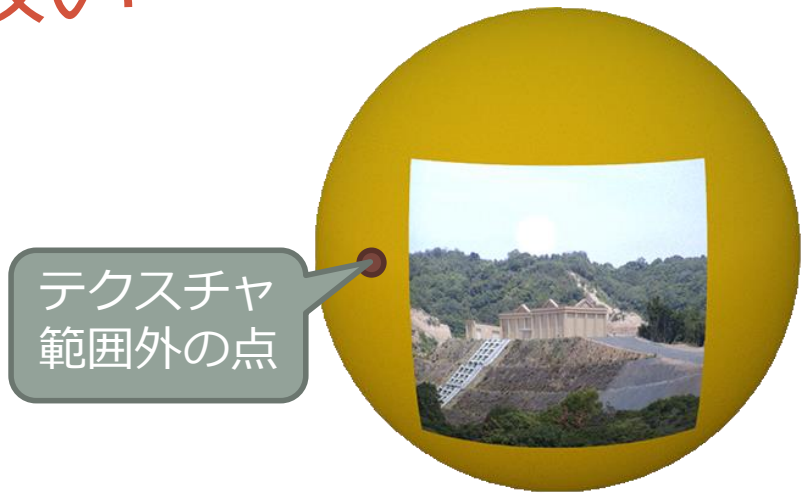
テクスチャ空間は読み込まれた画像は
サイズに関係なく[0, 1]の範囲にある



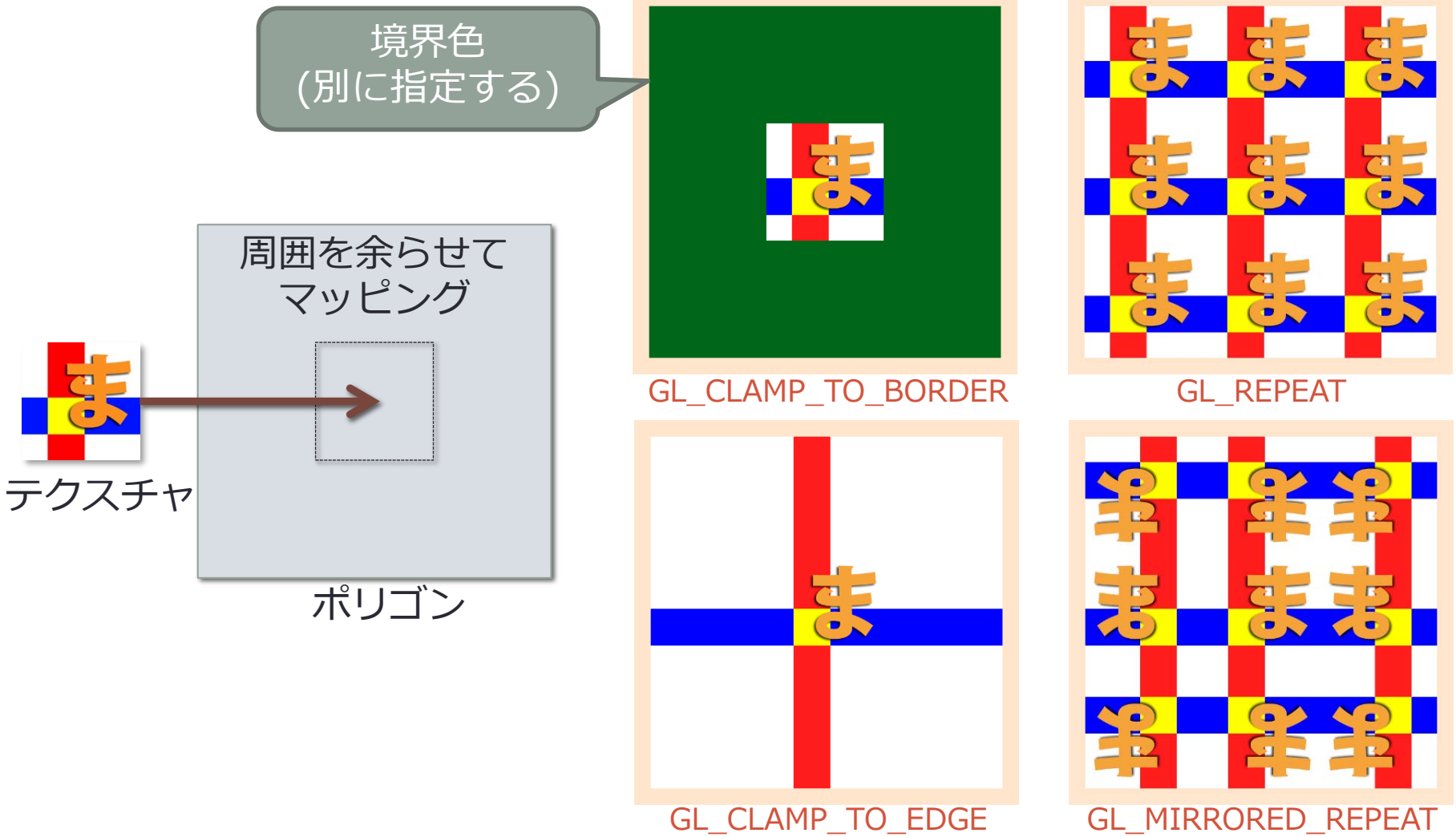
テクスチャの原点

テクスチャ範囲外の標本点の取り扱い

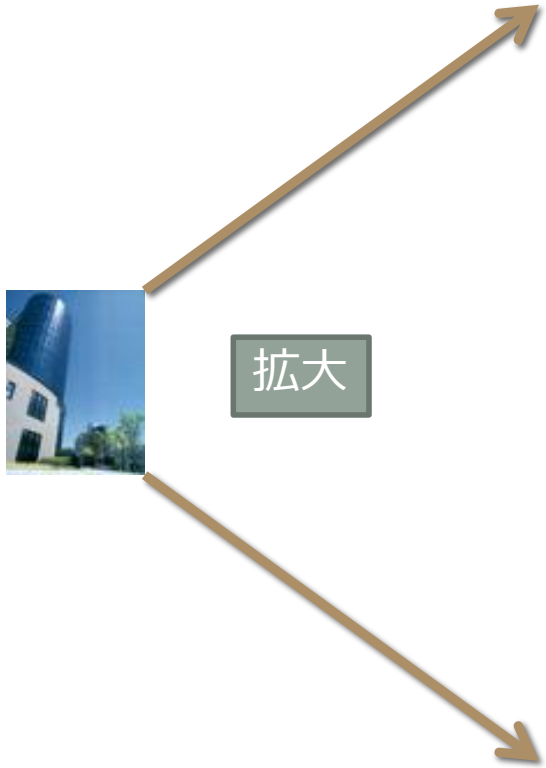
- テクスチャのラッピングモードの選択
  - glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, *mode*);
  - glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, *mode*);
    - *mode*: ラッピングモード, テクスチャ座標がテクスチャ空間の GL_TEXTURE_WRAP_S あるいは GL_TEXTURE_WRAP_T 方向の範囲をはみ出た時の処理
      - GL_CLAMP_TO_BORDER – 境界色を延長する
      - GL_CLAMP_TO_EDGE – テクスチャの最外周の画素の色を延長する
      - GL_MIRRORED_REPEAT – 同じテクスチャを反転しながら繰り返す
      - GL_REPEAT – 同じテクスチャを繰り返す



ラッピングモード


境界色
(別に指定する)
周囲を余らせて
マッピング
テクスチャ
ポリゴン
GL_CLAMP_TO_BORDER
GL_REPEAT
GL_CLAMP_TO_EDGE
GL_MIRRORED_REPEAT

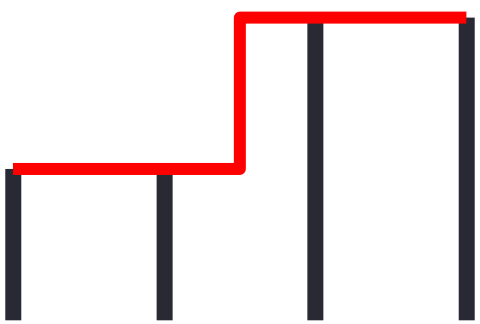
テクスチャの拡大



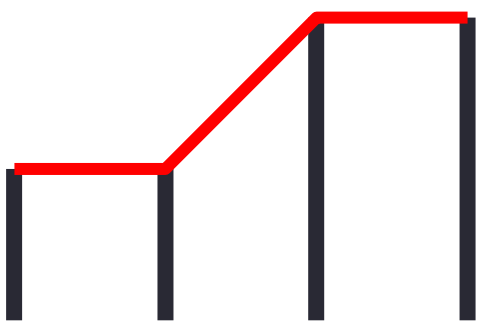
最近傍法
(nearest neighbor)

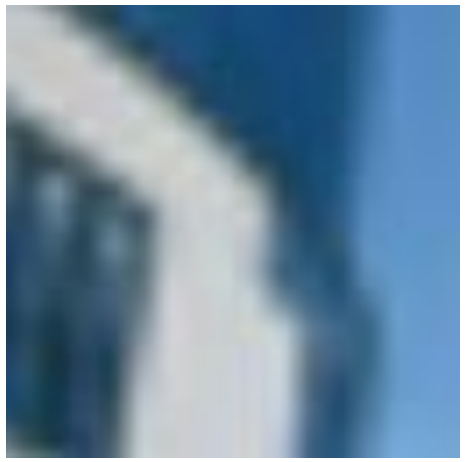
双線形補間
(bilinear)

拡大フィルタ



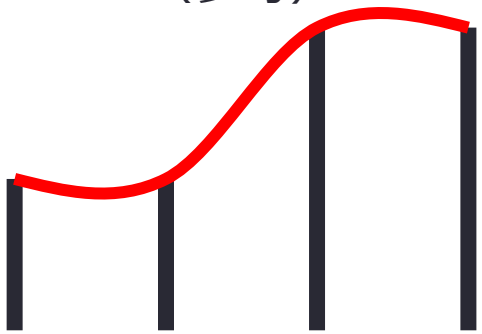
最近傍法
(nearest neighbor)





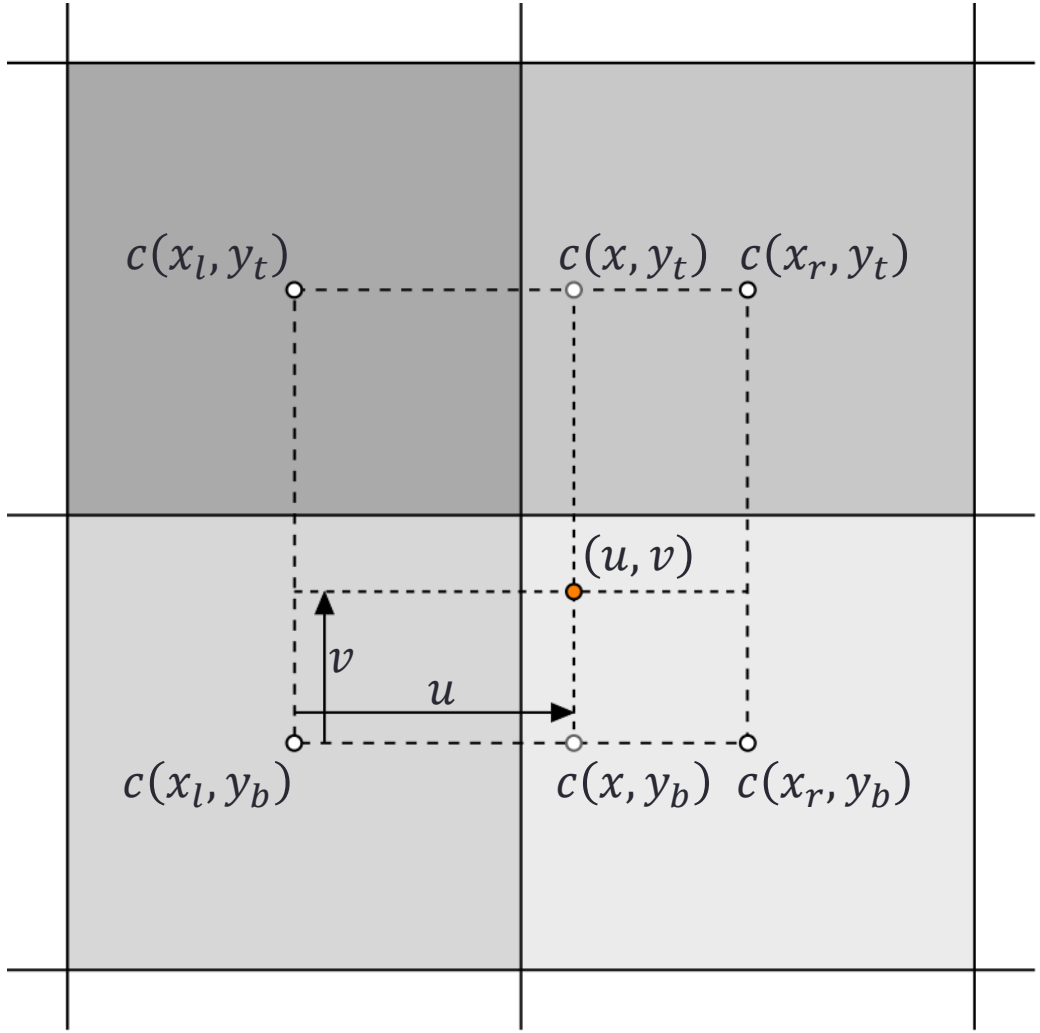
双線形補間
(bilinear)

（参考）



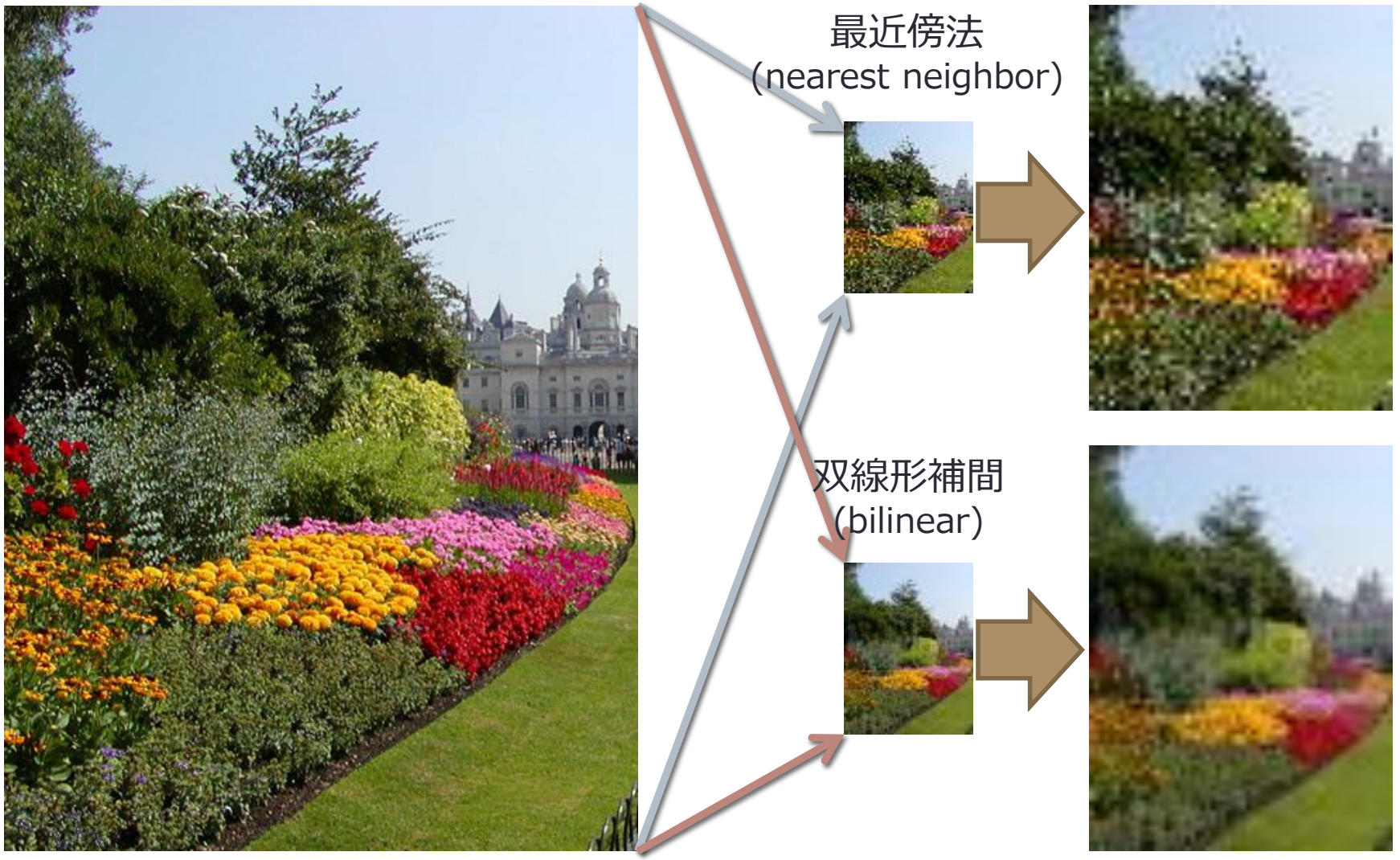
双三次補間
(bicubic)

テクスチャの双線形（バイリニア）補間



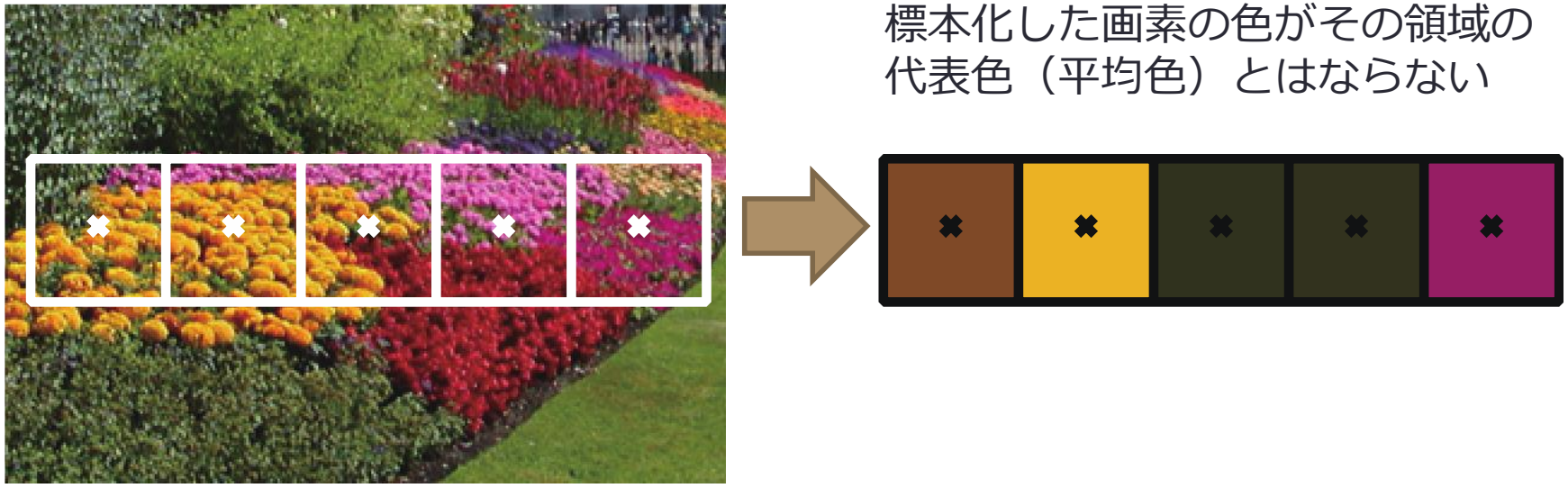
$$
\begin{aligned}
(x_l, y_b) &= (\lfloor x \rfloor, \lfloor y \rfloor) \\
(u, v) &= (x, y) - (x_l, y_b) \\
c(x, y_b) &= c(x_l, y_b)(1-u) + c(x_r, y_b)u \\
c(x, y_t) &= c(x_l, y_t)(1-u) + c(x_r, y_t)u \\
c(x, y) &= c(x, y_b)(1-v) + c(x, y_t)v \\
&= c(x_l, y_b)(1-u)(1-v) \\
&\quad + c(x_r, y_b)u(1-v) \\
&\quad + c(x_l, y_t)(1-u)v \\
&\quad + c(x_r, y_t)uv
\end{aligned}
$$

テクスチャの縮小

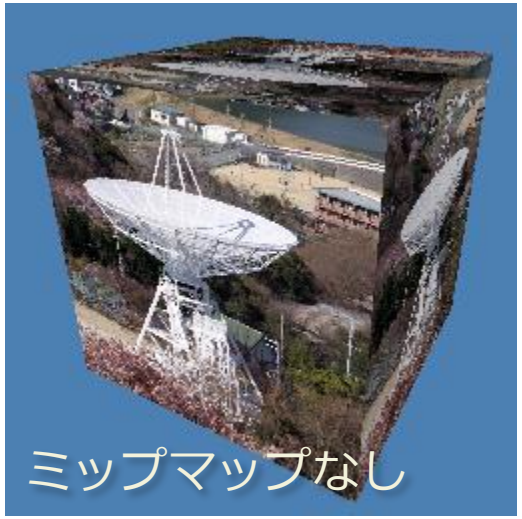


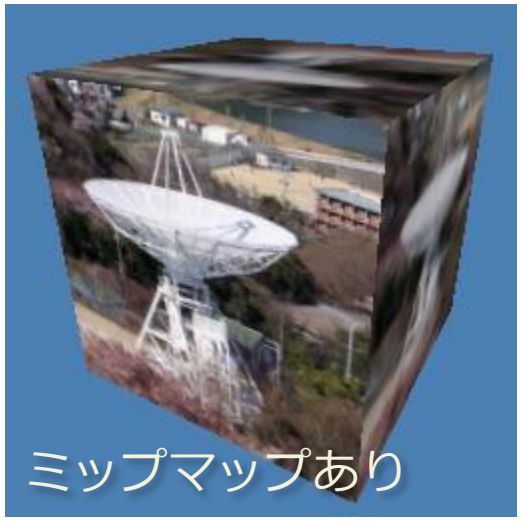
エイリアシングの発生

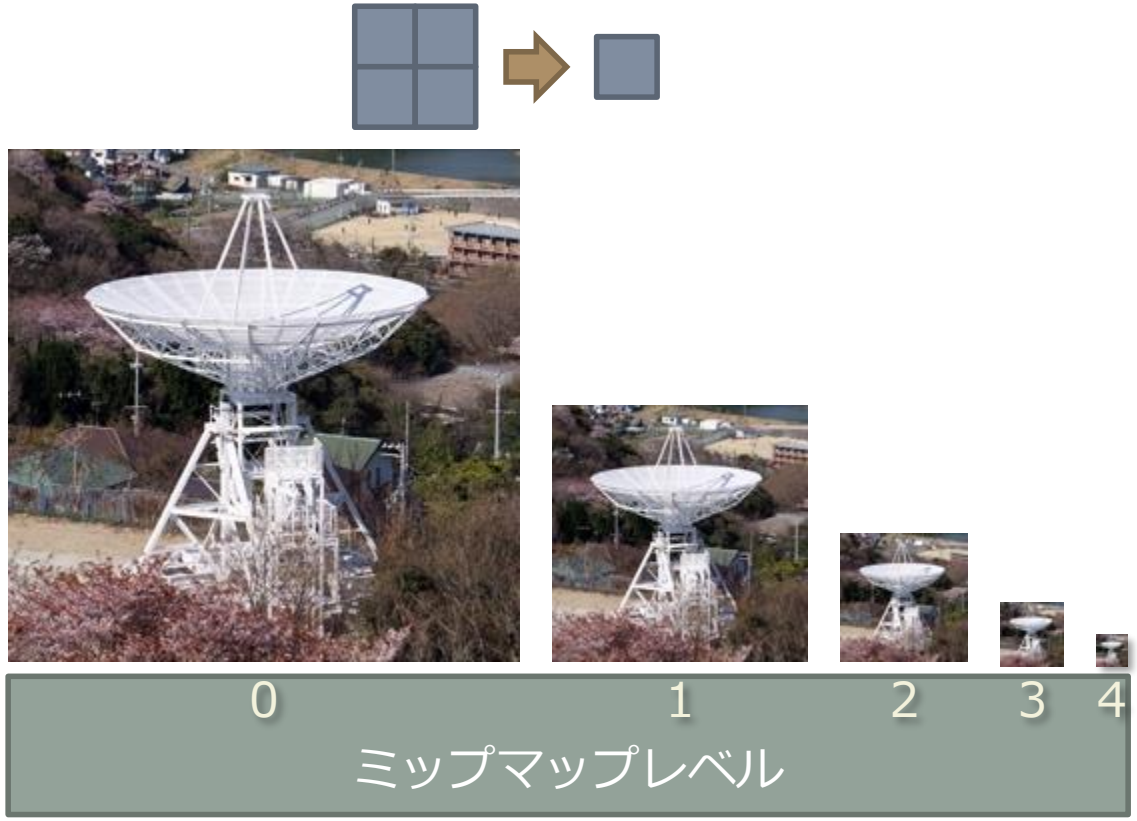
- 縮小では複数の画素が1画素にまとめられる
  - 画素の中の１箇所で標本化するとエイリアシングが発生する



ミップマップ







複数の解像度のテクスチャを用意しておいて画面上に現れるテクスチャの縮小率に応じて切り替えて使う

ミップマップのテクスチャの読み込み

```
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, internalFormat, WIDTH    , HEIGHT    ,
  0, format, type, image0);
  :
  :
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 1, internalFormat, WIDTH / 2, HEIGHT / 2,
  0, format, type, image1);
  :
  :
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 2, internalFormat, WIDTH / 4, HEIGHT / 4,
  0, format, type, image2);
  :
  :
```

image0: 本来の解像度 (レベル 0, ベース) のテクスチャ

image1: image0 の解像度を縦横 1 / 2 に縮小したもの

image2: image0 の解像度を縦横 1 / 4 に縮小したもの

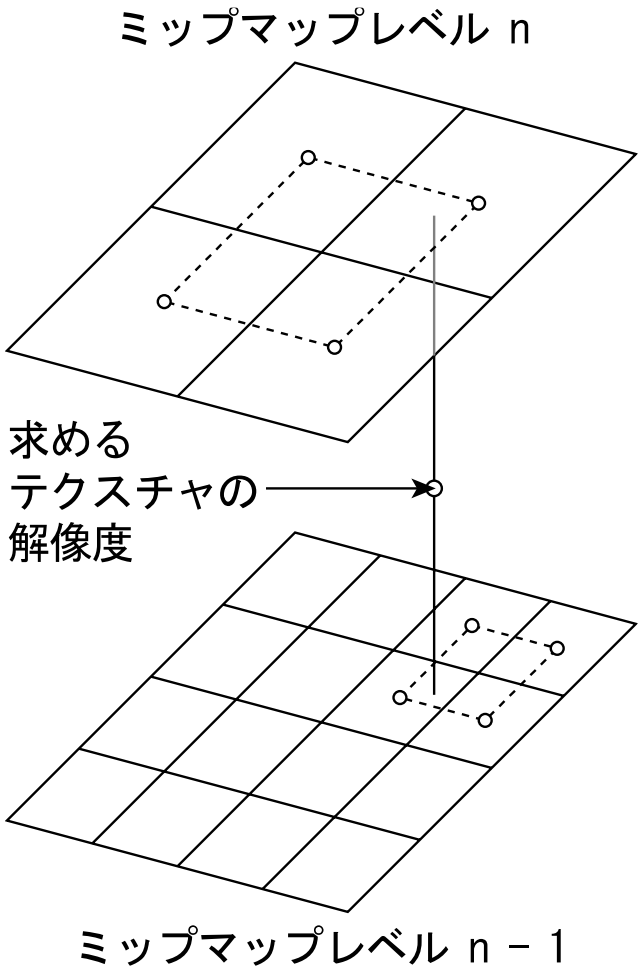
（以下，繰り返し － 繰り返しの最大回数は解像度が1になるまで）

またはレベル 0 のテクスチャだけに画像 (image0) を読み込み image1, image2 に nullptr を指定して

```
glGenerateMipmap(GL_TEXTURE_2D);
```

一発！

ミップマップによる標本化



目標の解像度に一致するミップマップレベルが存在するわけではない

前後のレベルで標本化する

標本化には最近傍法と双線形補間を選択可能

それぞれレベルの標本化結果を補間する

これにも最近傍法と双線形補間を選択可能

レベルの切り替わり場所の境界を目立たなくできる

ミップマップによる標本化方法の設定

- glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, *filter*);
  - *filter*: テクスチャが拡大される時に用いるフィルタの指定
    - GL_NEAREST – 最近傍法, GL_LINER – 双線形補間
- glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, *filter*);
  - *filter*: テクスチャが縮小される時に用いるフィルタの指定
    - GL_NEAREST – 最近傍補間, GL_LINER – 双線形補間
    - GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST – 最近傍法の結果に最近傍法を適用
    - GL_LINEAR_MIPMAP_NEAREST – 双線形補間の結果に最近傍補間を適用
    - GL_NEAREST_MIPMAP_LINEAR – 最近傍補法の結果に線形補間を適用
    - GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR – 双線形補間の結果に線形補間を適用

ミップマップ使用時

テクスチャの使用

- 使用するテクスチャユニットを指定する
  - glActiveTexture(GL_TEXTURE0);
    - 使用可能なテクスチャユニットの数は次の手順で units に取得できる

```
GLint units;
glGetIntegerv(GL_ACTIVE_TEXTURE, &units);
```

    - または

```
GLint units;
glGetIntegerv(GL_MAX_COMBINED_TEXTURE_IMAGE_UNITS, &units);
```

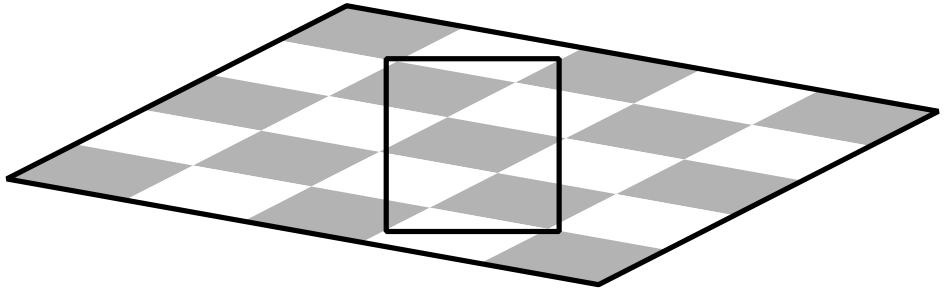
- 作成したテクスチャオブジェクトを結合する
  - glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, tex);

テクスチャの標本化の改良

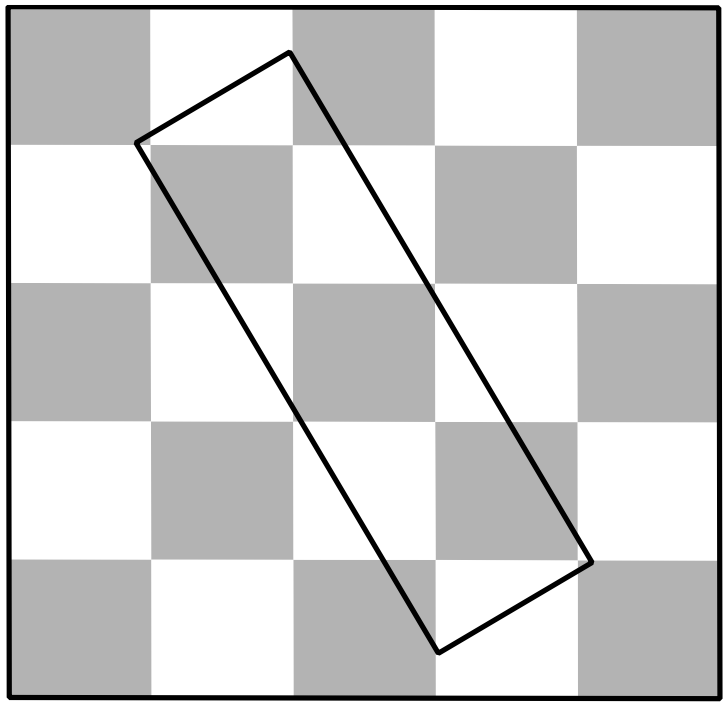
OpenGL の標準機能には実装されていない手法

視線の入射角が浅い場合

- 1 画素に収まる縦方向と横方向の画素数が異なる
  - エイリアシングを防ぐために多い方に合わせてテクスチャを選択すると，マッピングされるテクスチャがぼけ過ぎる



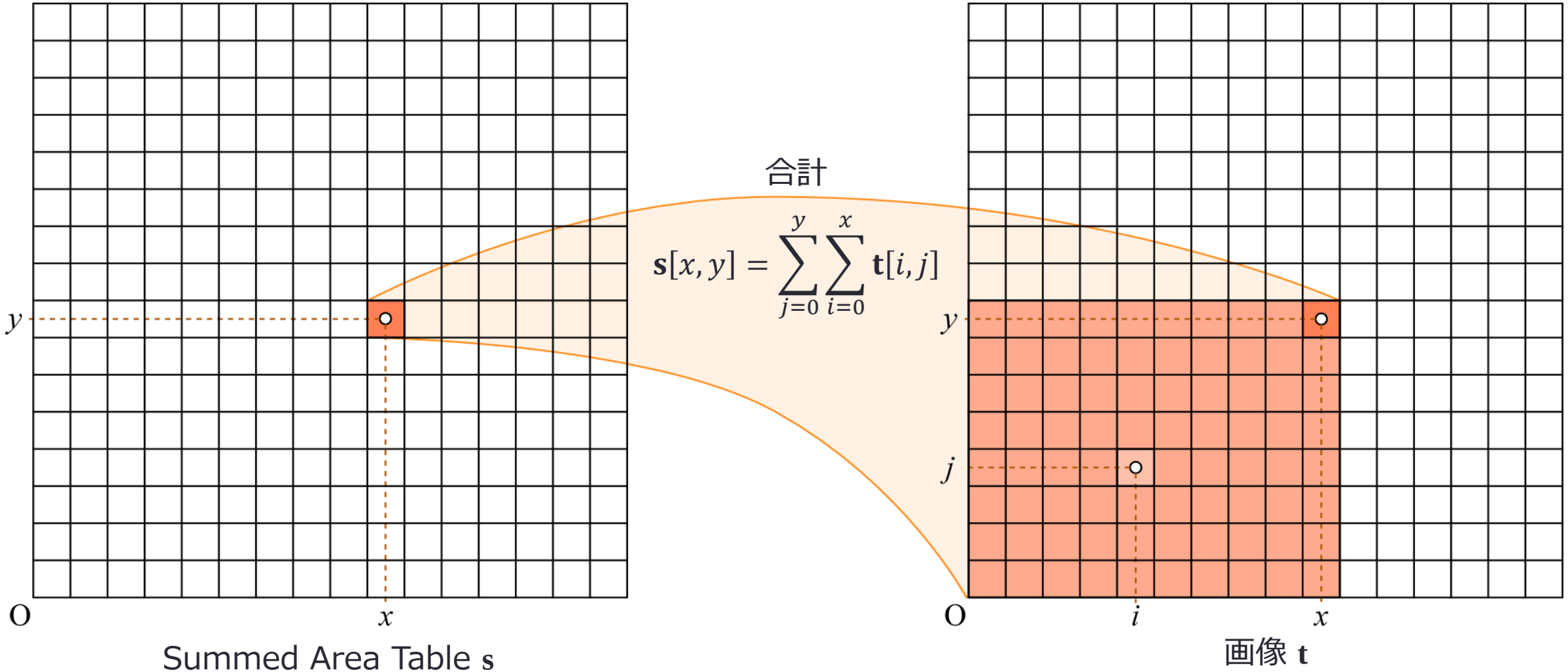
画面上の1画素



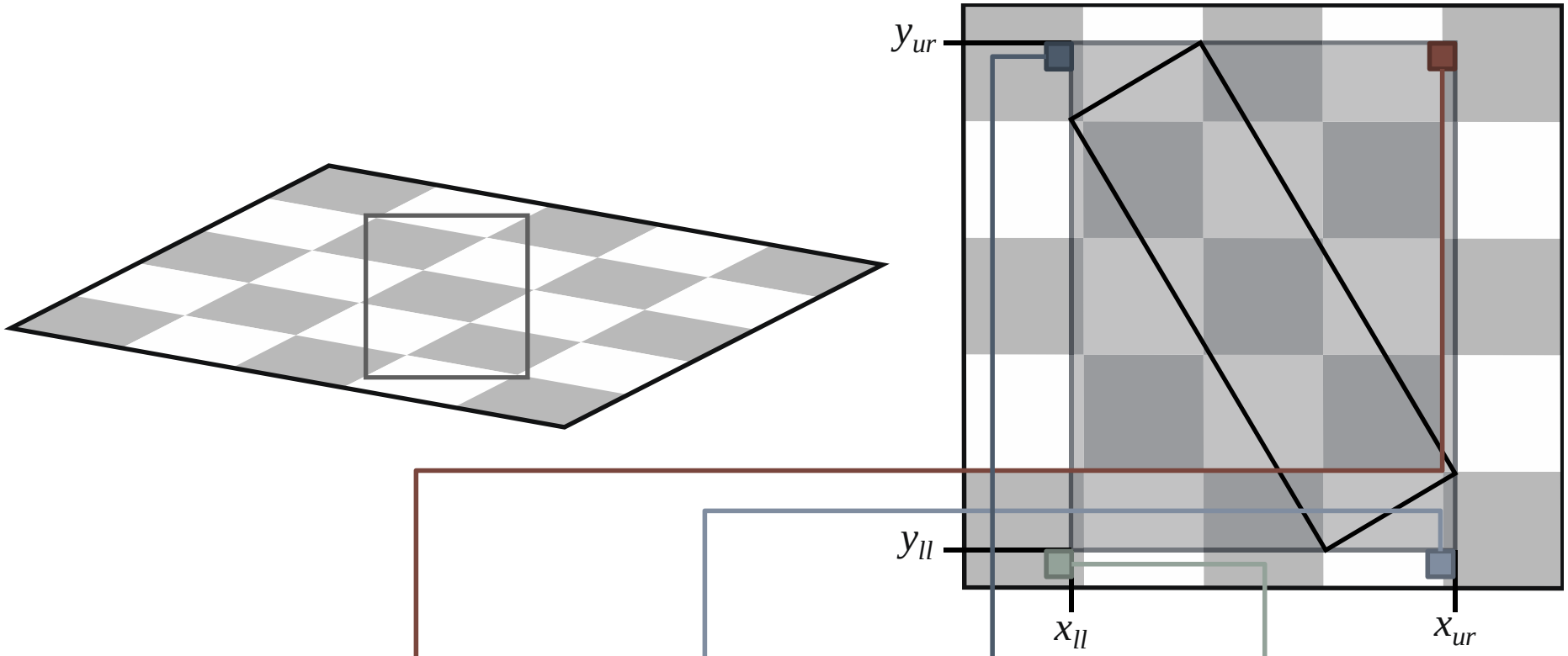
標本化されるテクスチャの画素

非対称ミップマップ (Ripmap)

Summed-Area Table (SAT)

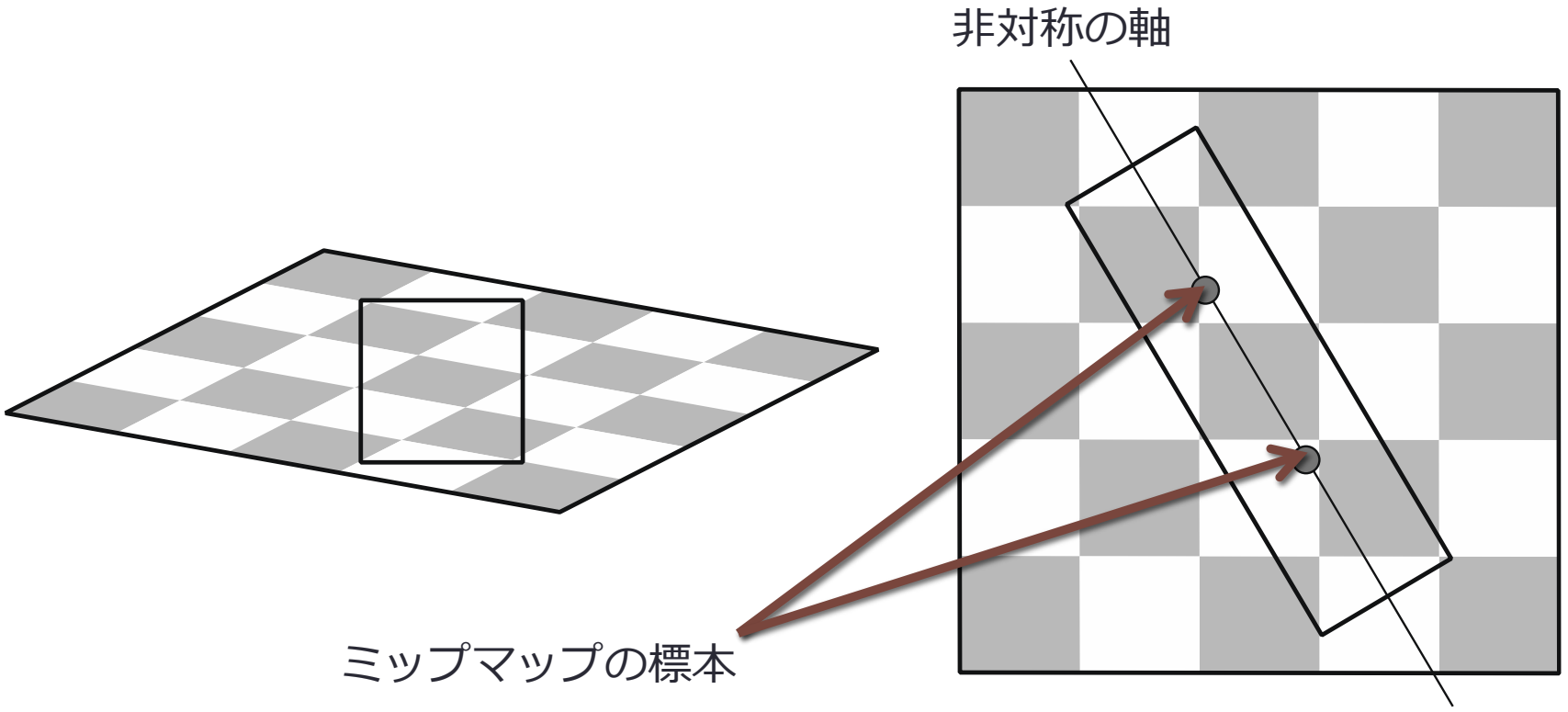


SAT を使った領域の標本化



$$\mathbf{c} = \frac{\mathbf{s}[x_{ur}, y_{ur}] - \mathbf{s}[x_{ur}, y_{ll}] - \mathbf{s}[x_{ll}, y_{ur}] + \mathbf{s}[x_{ll}, y_{ll}]}{(x_{ur} - x_{ll})(y_{ur} - y_{ll})}$$

Unconstrained Anisotropic Filtering



矩形テクスチャ

- GL_TEXTURE_RECTANGLE
  - GL_TEXTURE_2D の代わりに使用する
    - テクスチャ空間の大きさは [0, 1] ではなく画像のサイズに一致する
      - テクスチャ座標が画素位置と一致するので画像処理などに便利
    - ラッピングモードに GL_REPEAT, GL_MIRRORED_REPEAT が**使えない**
      - GL_CLAMP_TO_EDGE, GL_CLAMP_TO_BORDER だけ
    - テクスチャの補間方法としてミップマップが**使えない**
      - GL_TEXTURE_MIN_FILTER は GL_NEAREST, GL_LINEAR だけ
  - 今はあまり使う意味はない
    - GL_TEXTURE_2D が 2^n 以外の画素数に対応する前に代わりに使われた
      - https://www.opengl.org/wiki/Rectangle_Texture の Purpose 参照
  - これを使った画像処理のサンプルあります (ビルド・実行には OpenCV 必要)
    - https://github.com/tokoik/filtertest

glTexStorage2D()

- ミップマップの複数レベルのテクスチャメモリを同時に確保
  - glTexStorage2D(*target*, *levels*, *internalFormat*, *width*, *height*)
    - *target*: GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_RECTANGLE など
    - *levels*: 確保するミップマップのレベル, 0 ならミップマップなし
    - *internalFormat*: GPU 内でのデータの形式．1チャンネル (モノクロ) なら GL_RED，2チャンネルなら GL_RG，カラーなら GL_RGB または GL_BGR，アルファチャンネル付きなら GL_RGBA または GL_BGRA.
    - *width*, *height*: テクスチャのサイズ
  - テクスチャの転送は行わない

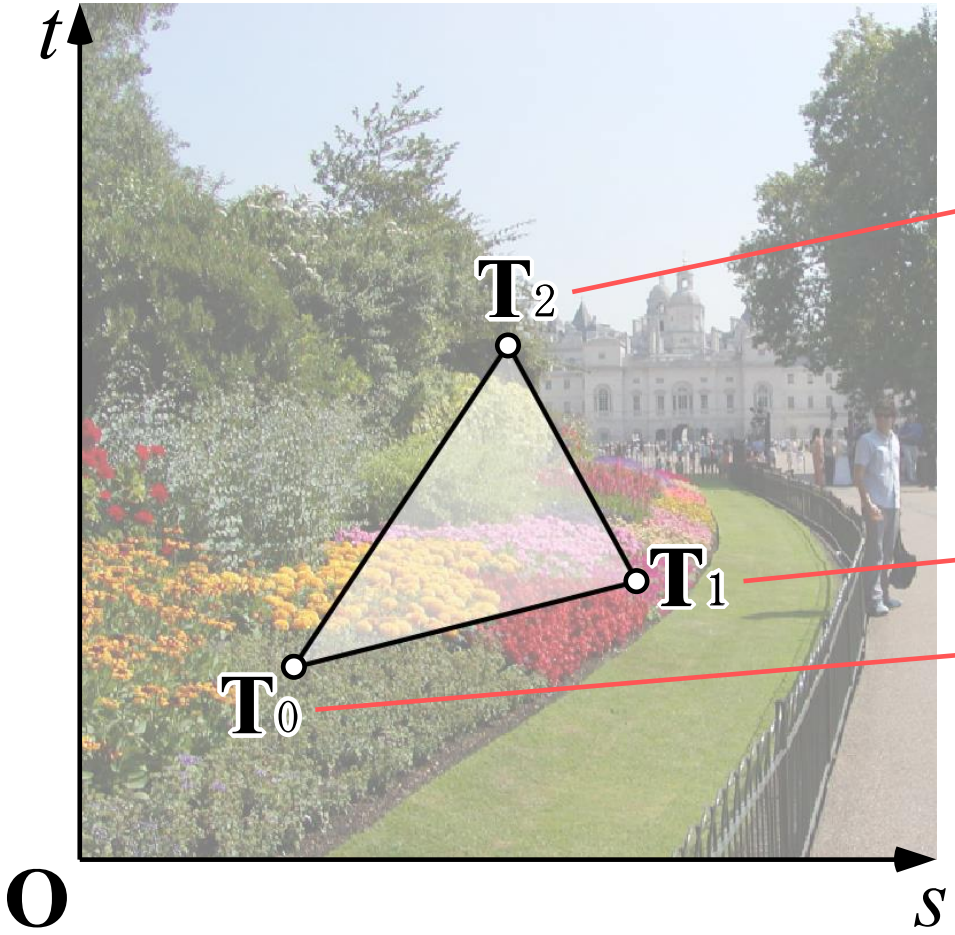
```
for (i = 0; i < levels; i++) {
  glTexImage2D(target, i, internalformat, width, height, 0, format, type, NULL);
  width = max(1, (width / 2));
  height = max(1, (height / 2));
}
```

  - OpenGL 4.2 以降 (macOS では使えない)

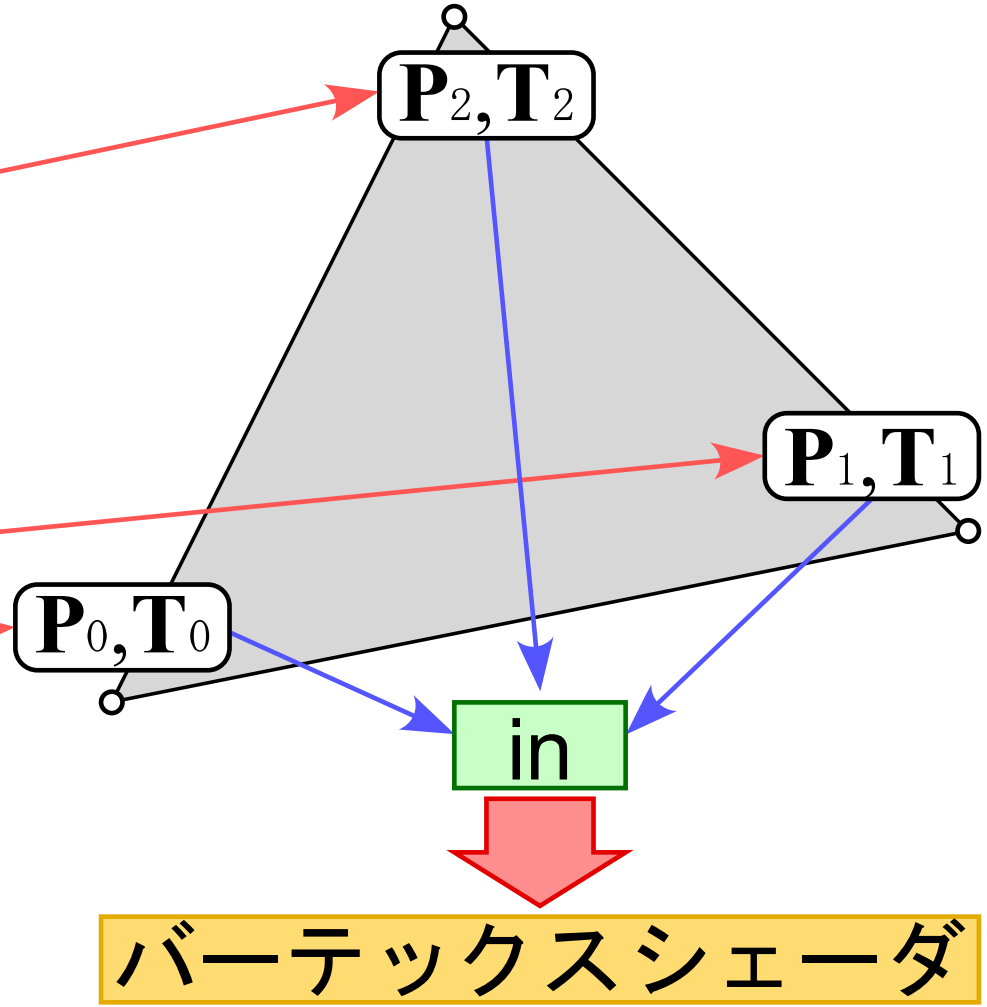
テクスチャ座標の設定

in (attribute) 変数にテクスチャ座標を指定する

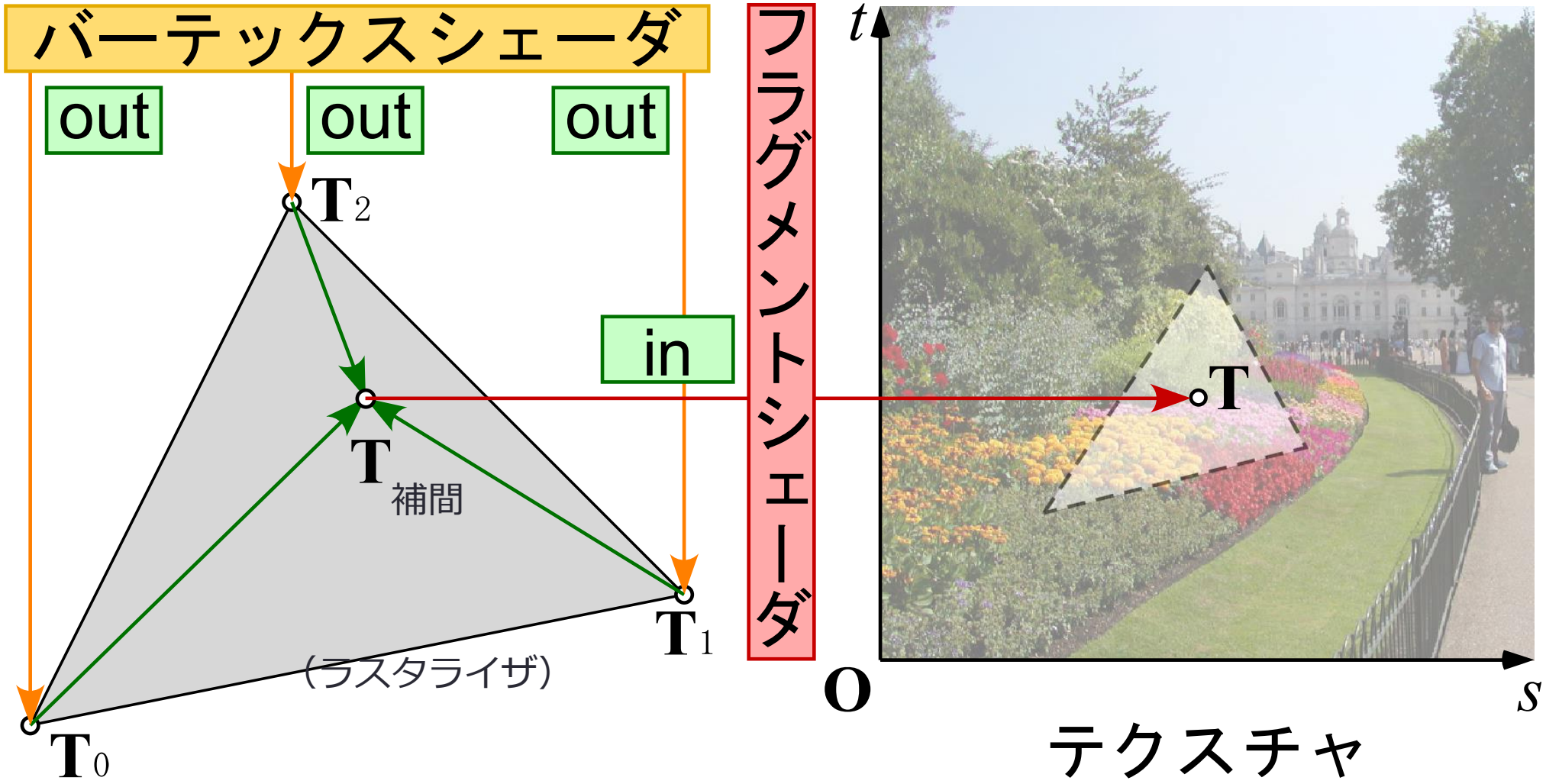
テクスチャ座標を in 変数に設定



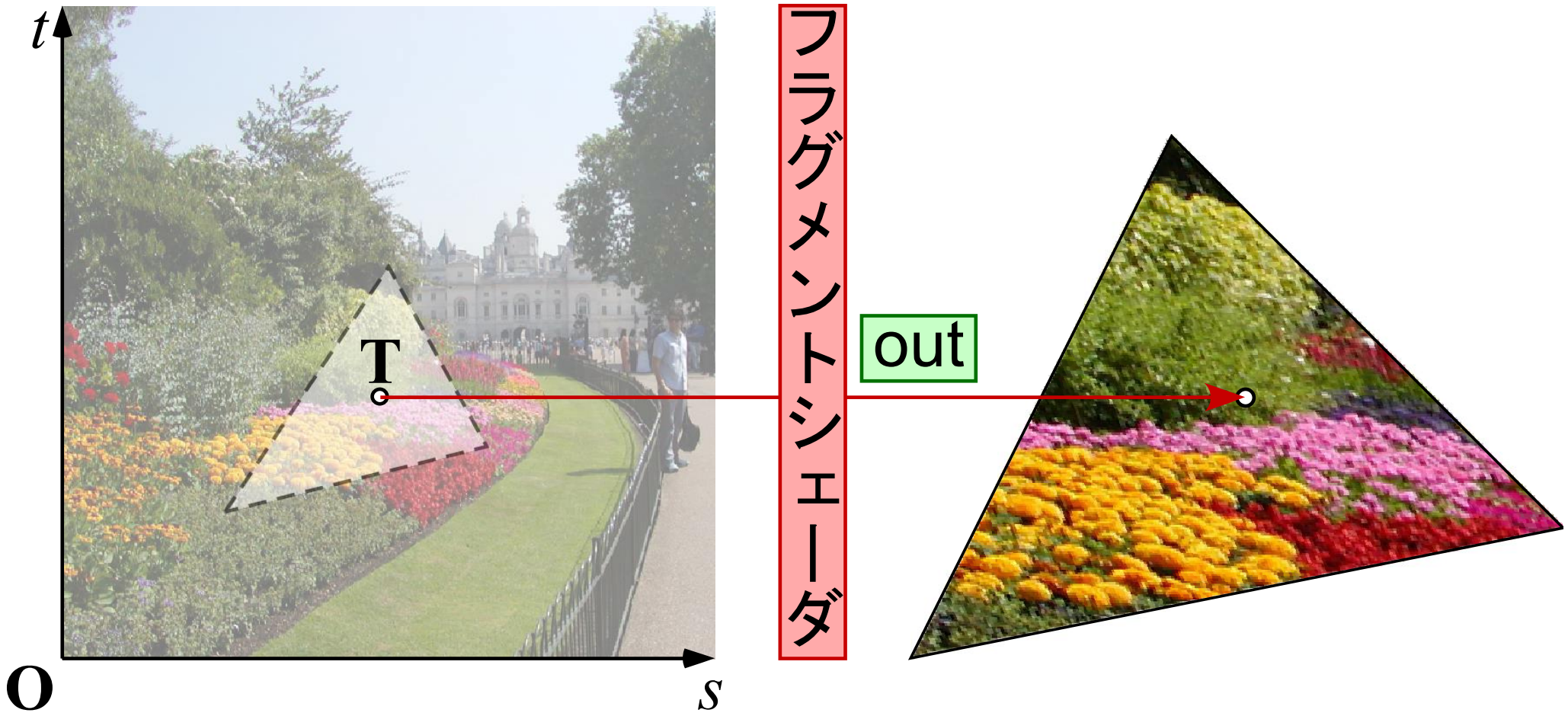
テクスチャ



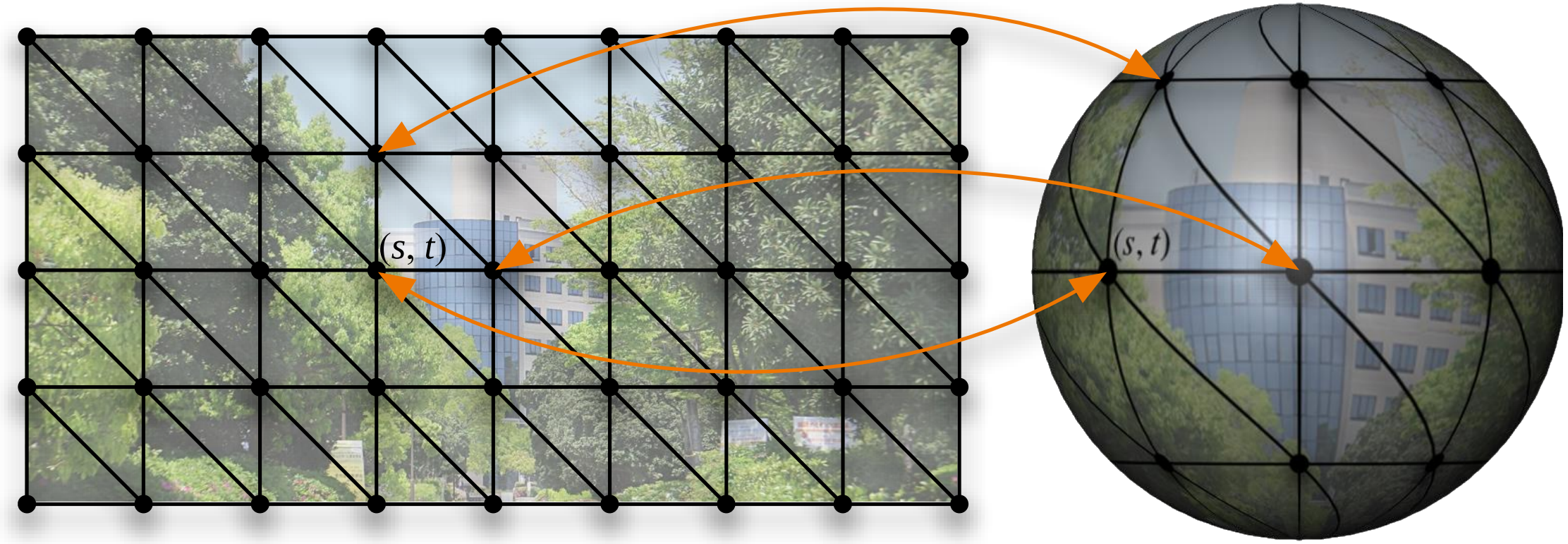
テクスチャの参照


バーテックスシェーダ
out
out
out
in
フラグメントシェーダ
T2
T
補間
T1
T0
(ラスタライザ)
t
T
O
s
テクスチャ

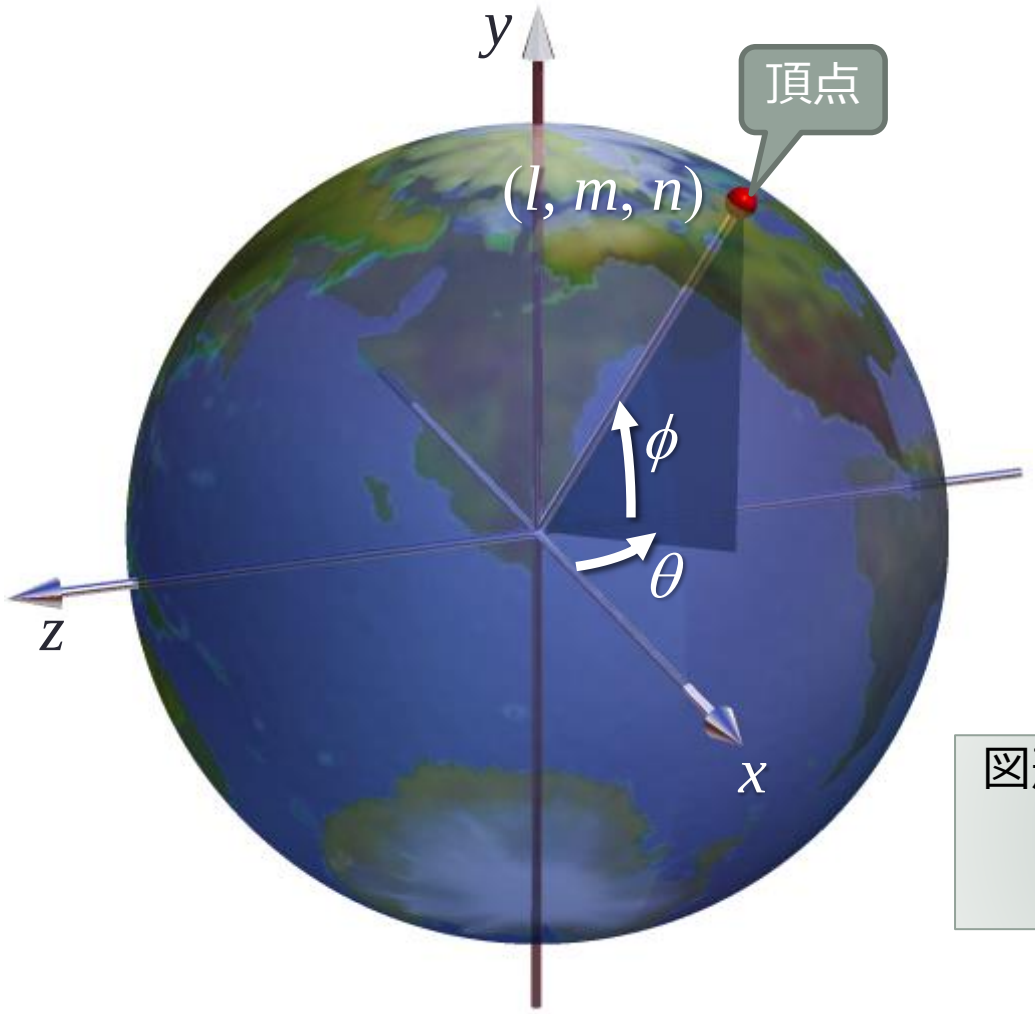
参照した画素値を使って陰影付け

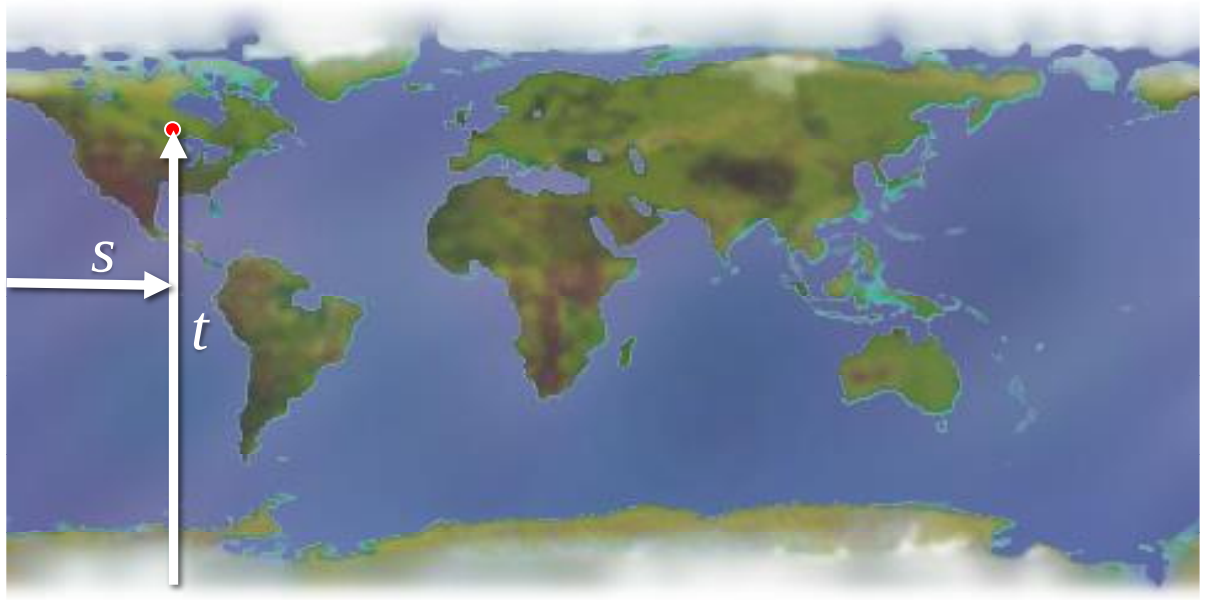


テクスチャ座標の割り当て



球面マッピング





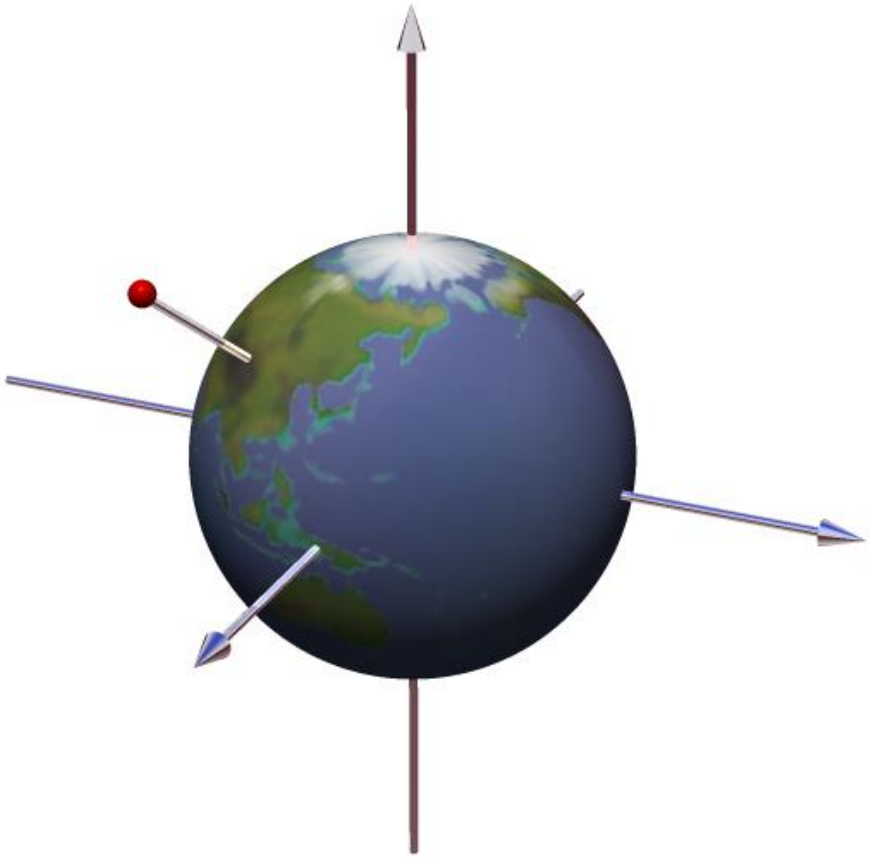
図形の表面上の
頂点位置
(l, m, n)

$$s = \frac{\theta + \pi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\tan^{-1}\left(\frac{l}{n}\right) + \frac{1}{2}$$

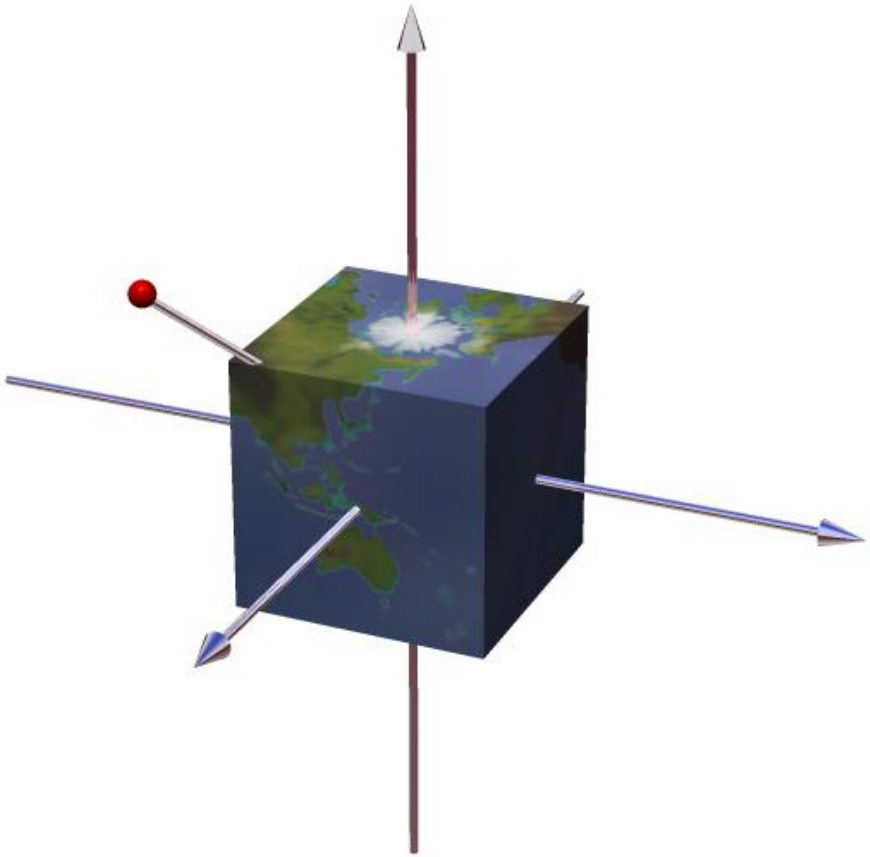
$$t = \frac{\phi + \pi/2}{\pi} = \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{m}{\sqrt{l^2 + n^2}}\right) + \frac{1}{2}$$

球面マッピングされた物体

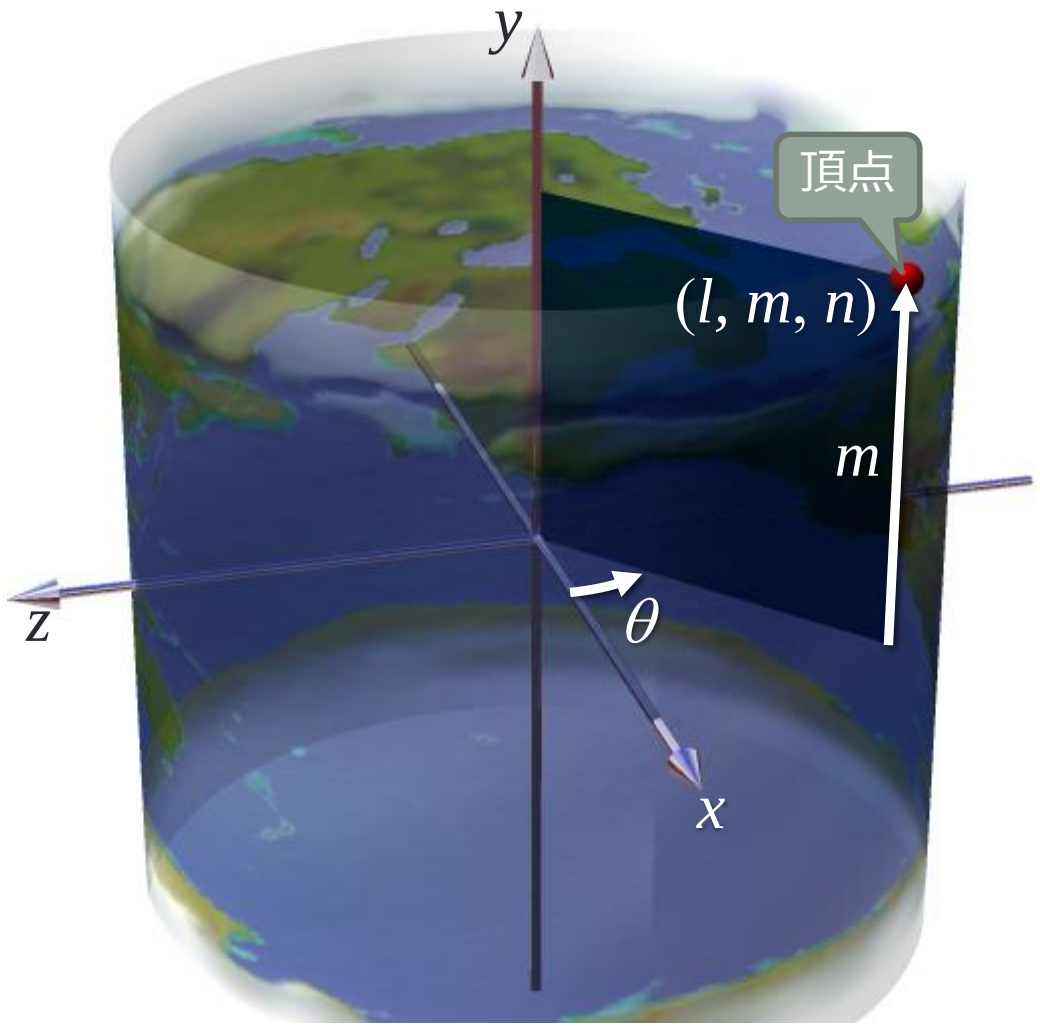
球に球面マッピング



立方体に球面マッピング



円柱マッピング



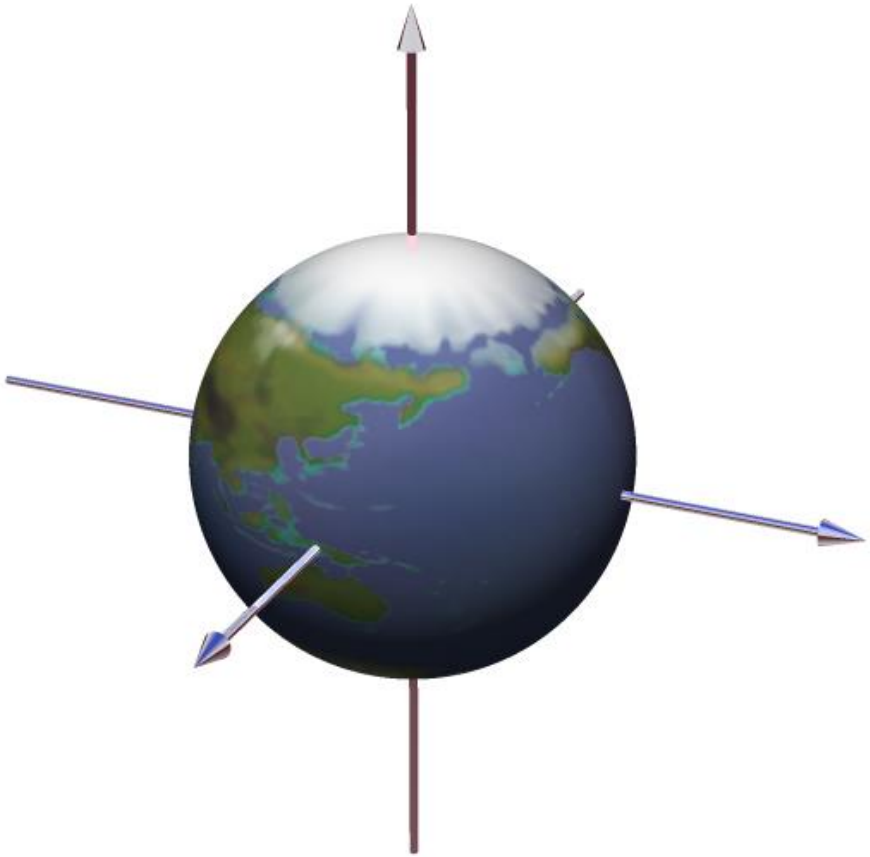
図形の表面上の
頂点位置
(l, m, n)
図形の高さ h

$$s = \frac{\theta + \pi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\tan^{-1}\left(\frac{l}{n}\right) + \frac{1}{2}$$

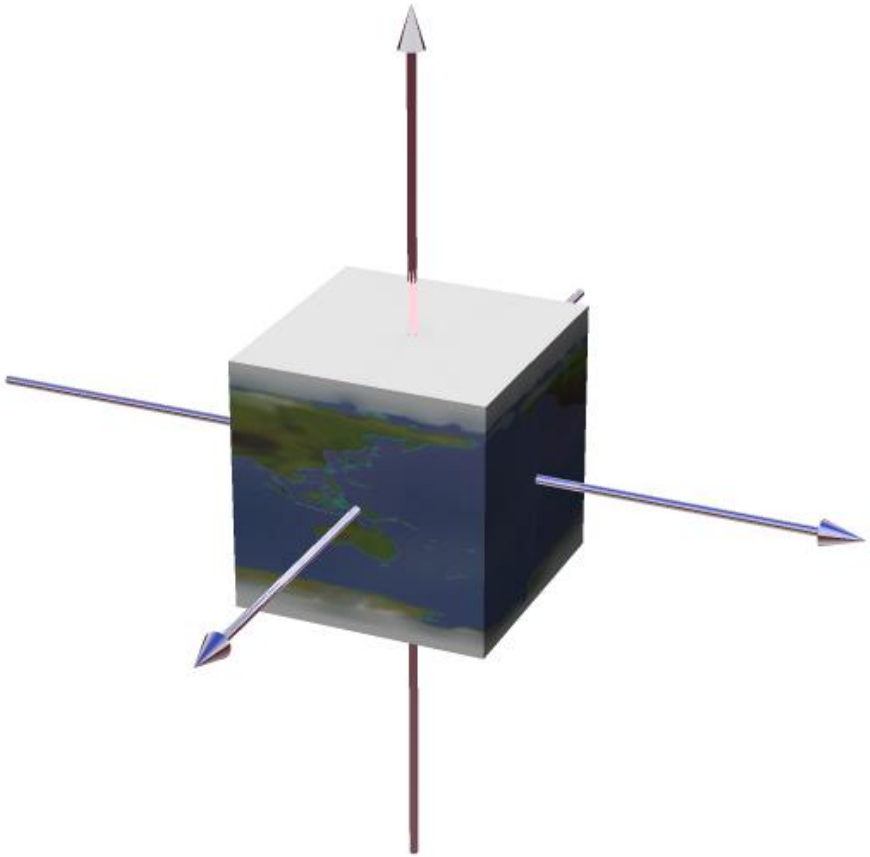
$$t = \frac{m}{h} + \frac{1}{2}$$

円柱マッピングされた物体

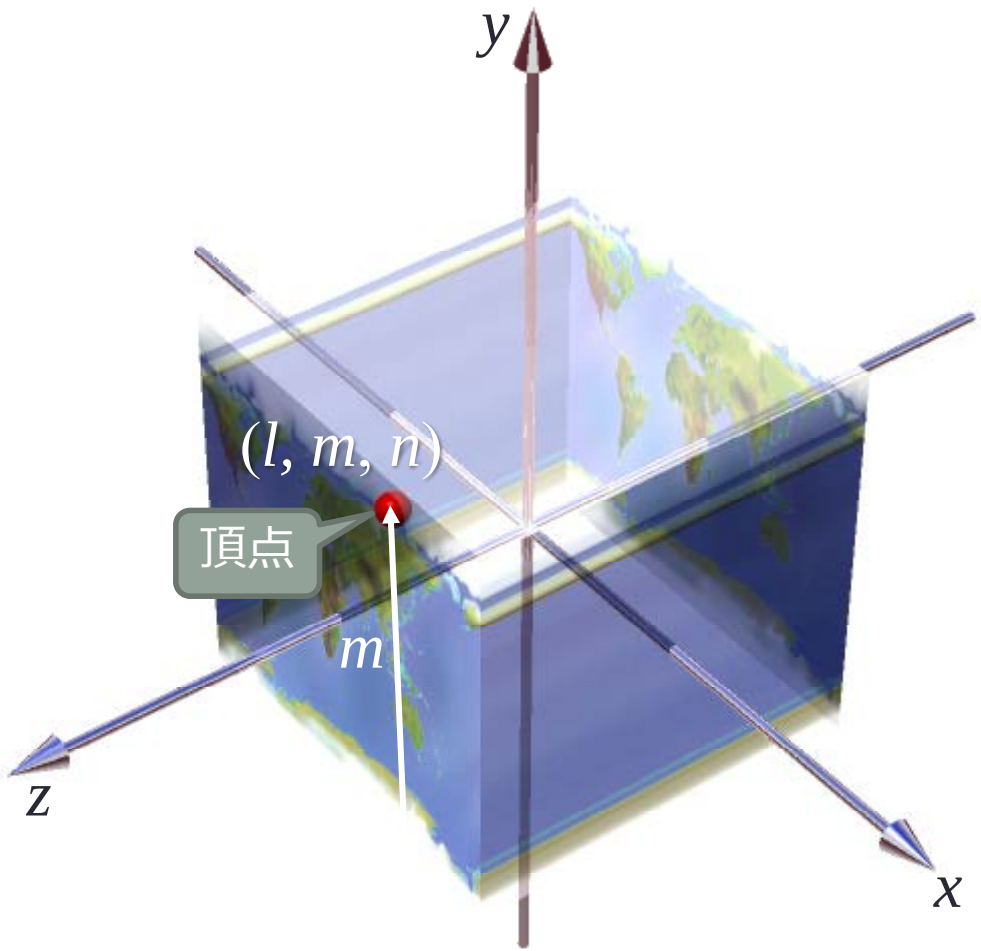
球に円柱マッピング

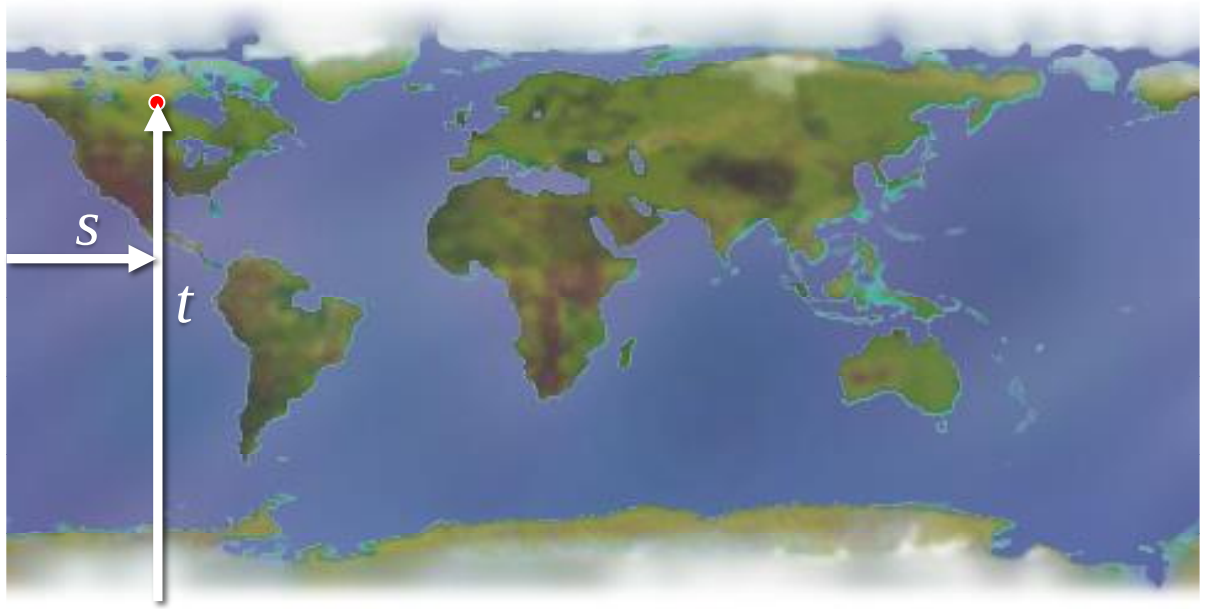


立方体に円柱マッピング



平行マッピング



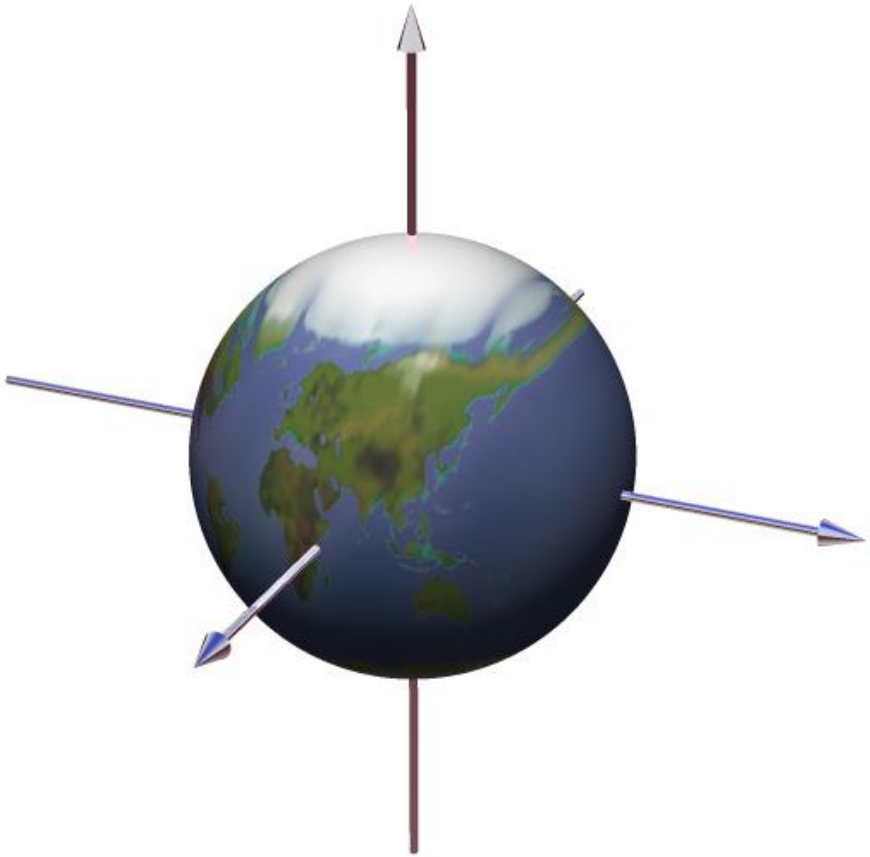


図形の表面上の
頂点位置
(l, m, n)
幅 w, 高さ h

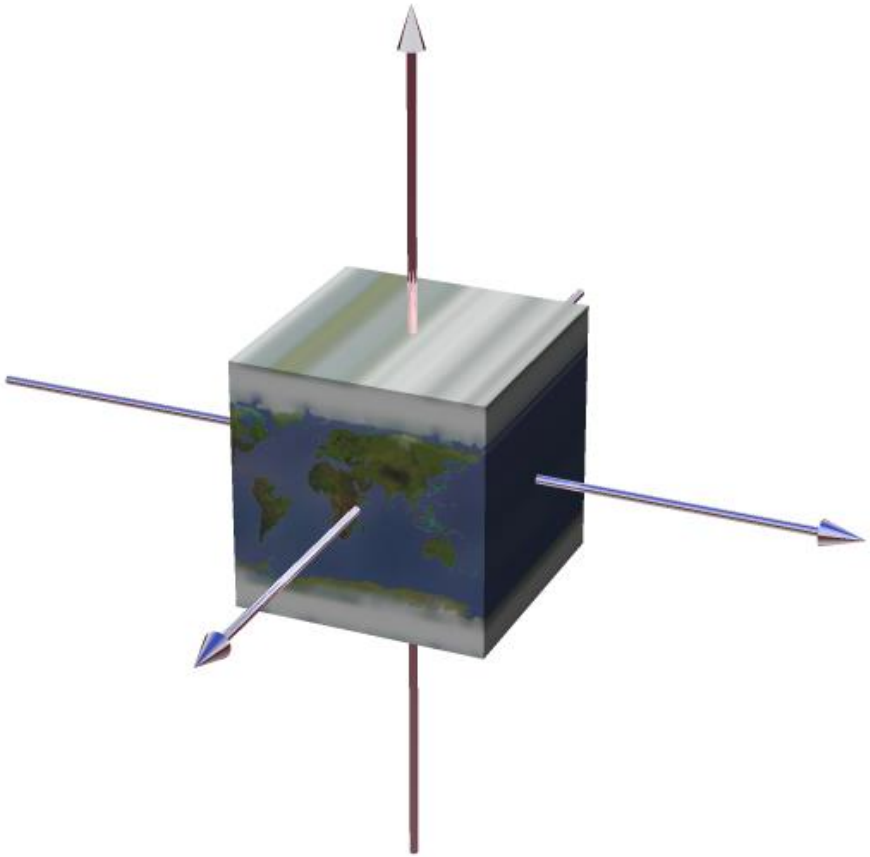
$$s = \frac{l}{w} + \frac{1}{2}$$
$$t = \frac{m}{h} + \frac{1}{2}$$

平行マッピングされた物体

球に平行マッピング

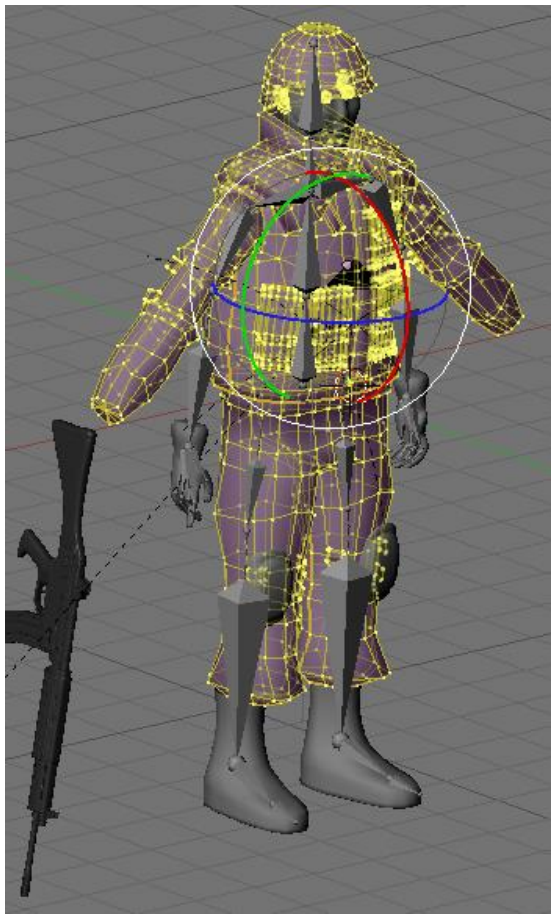


立方体に平行マッピング



UV マッピング

図形 → 展開 ← テクスチャ



（提供: デザイン情報学科15期 篠原史典氏）

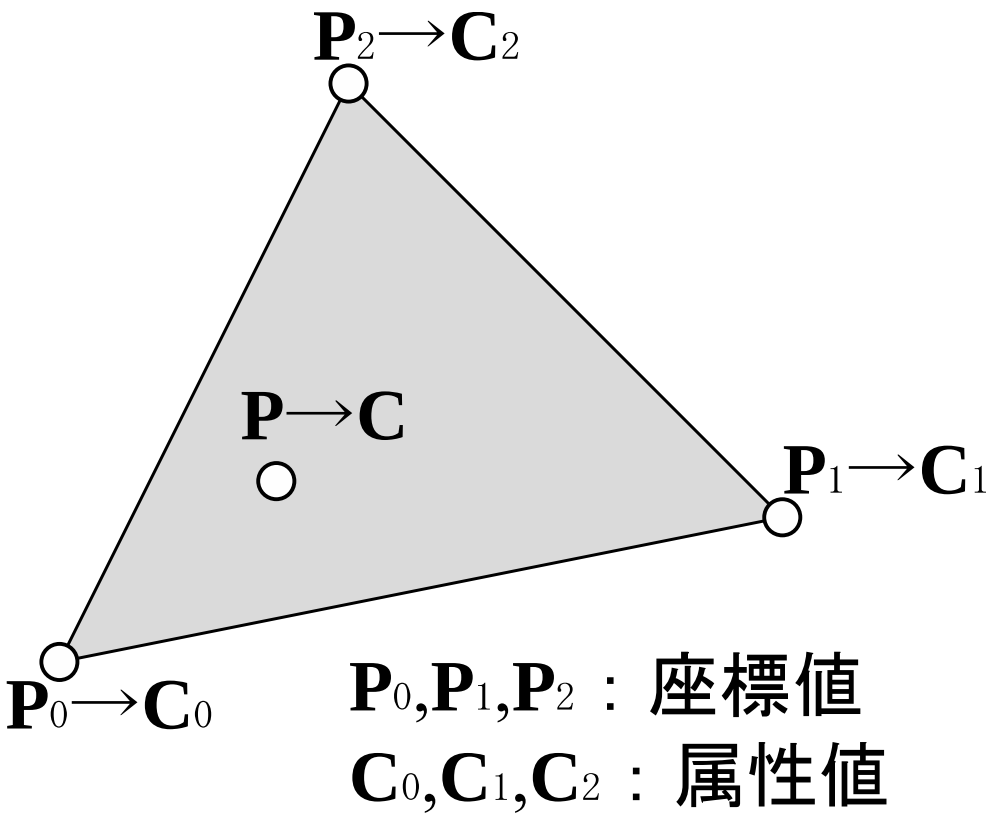
UV マッピングの結果

（提供: デザイン情報学科15期 篠原史典氏）

頂点属性の線形補間（再掲）

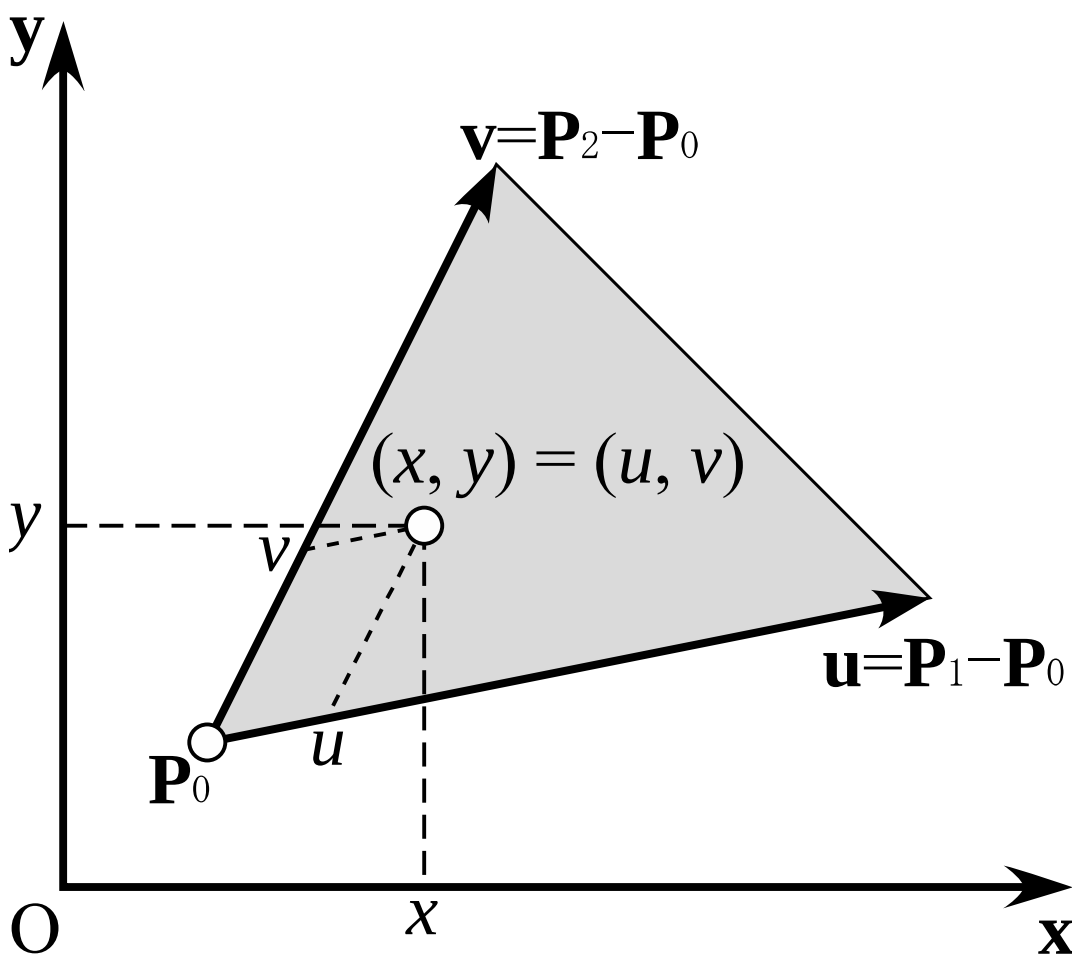
透視変換の影響

頂点属性の線形補間



- 三角形の頂点の座標値 ($\mathbf{P}_0$, $\mathbf{P}_1$, $\mathbf{P}_2$, gl_Position に出力するもの) に属性値 ($\mathbf{C}_0$, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$,色など) を対応づける
- 三角形の内部の点 $\mathbf{P}$ における属性値 $\mathbf{C}$ を線形補間により求める

三角形の内部のパラメータ座標



- 内部の点 $\mathbf{P} = (x, y)$ を $u = \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0$, $v = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_0$ を軸とする座標 (u, v) で表す

$$x\mathbf{x} + y\mathbf{y} + \mathbf{O} = u\mathbf{u} + v\mathbf{v} + \mathbf{P}_0$$

$$\mathbf{x} = (1, 0)$$
$$\mathbf{y} = (0, 1)$$
$$\mathbf{u} = (x_u, y_u)$$
$$\mathbf{v} = (x_v, y_v)$$
$$\mathbf{P}_0 = (x_0, y_0)$$
$$\mathbf{P}_1 = (x_1, y_1)$$
$$\mathbf{P}_2 = (x_2, y_2)$$

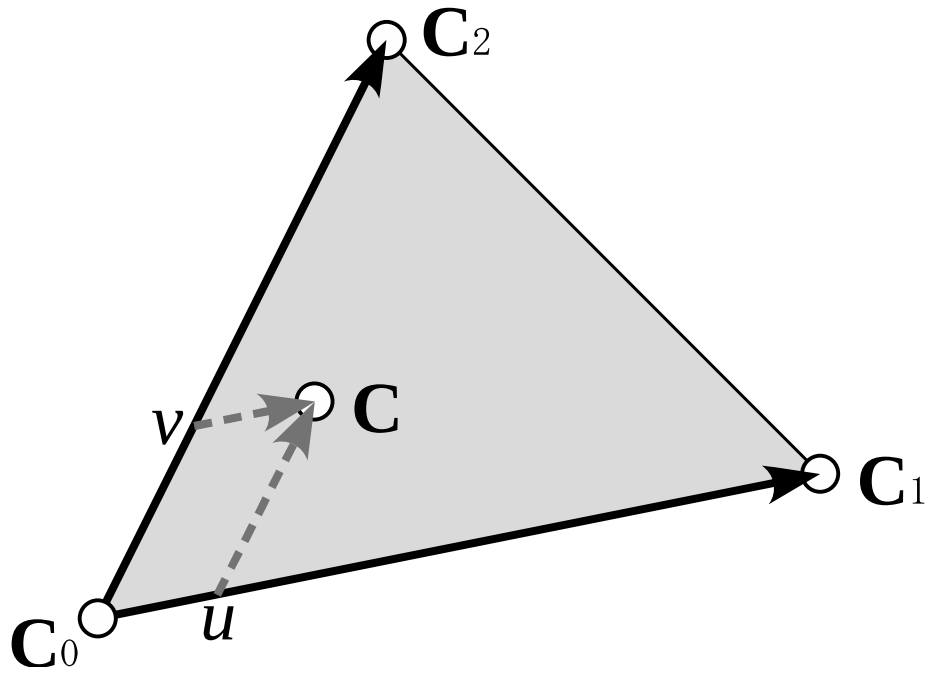
パラメータ座標による補間

- 連立方程式で表す

$$\begin{cases} x = ux_u + vx_v + x_0 \\ y = uy_u + vy_v + y_0 \end{cases}$$

- u, v について解く

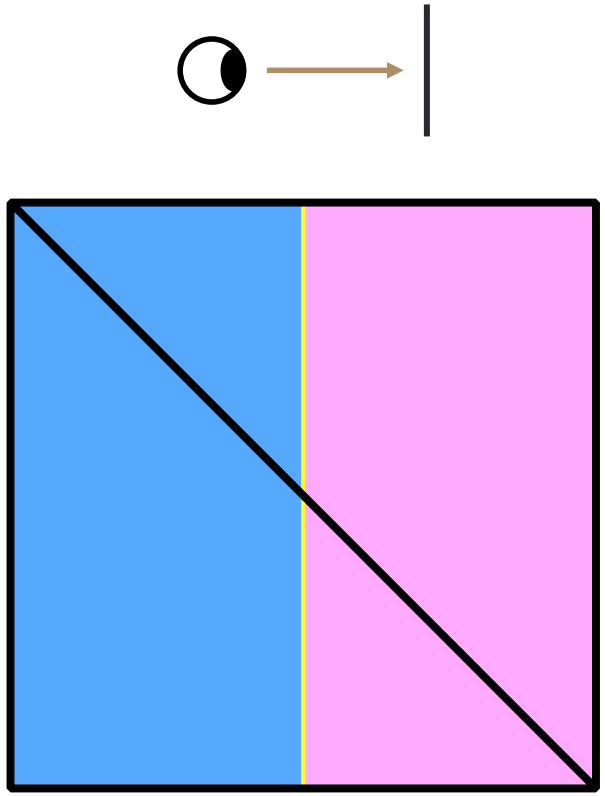
$$\begin{cases} u = \dfrac{(x - x_0)y_v - (y - y_0)x_v}{x_u y_v - x_v y_u} \\ v = \dfrac{(y - y_0)x_u - (x - x_0)y_u}{x_u y_v - x_v y_u} \end{cases}$$



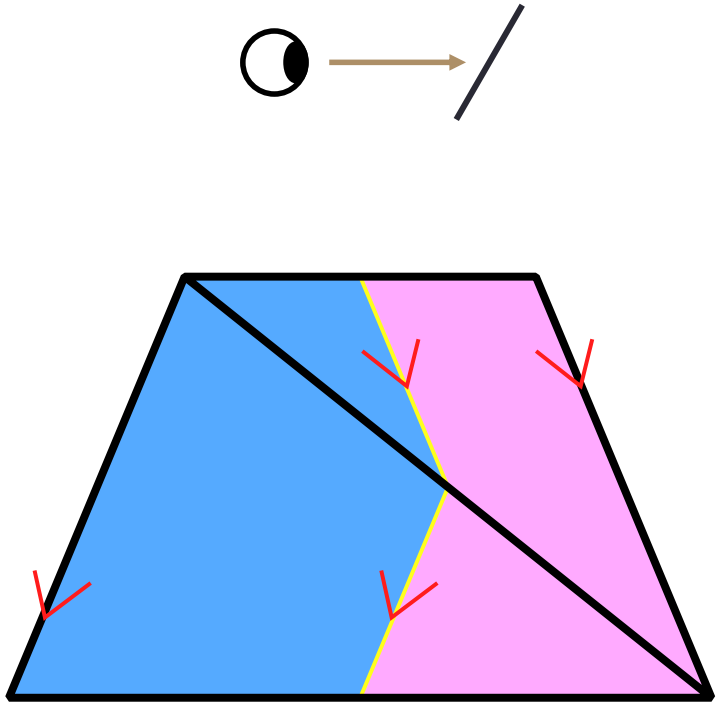
$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= u(\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_0) + v(\mathbf{C}_2 - \mathbf{C}_0) + \mathbf{C}_0 \\ &= (1 - u - v)\mathbf{C}_0 + u\mathbf{C}_1 + v\mathbf{C}_2 \end{aligned}$$

透視投影の影響

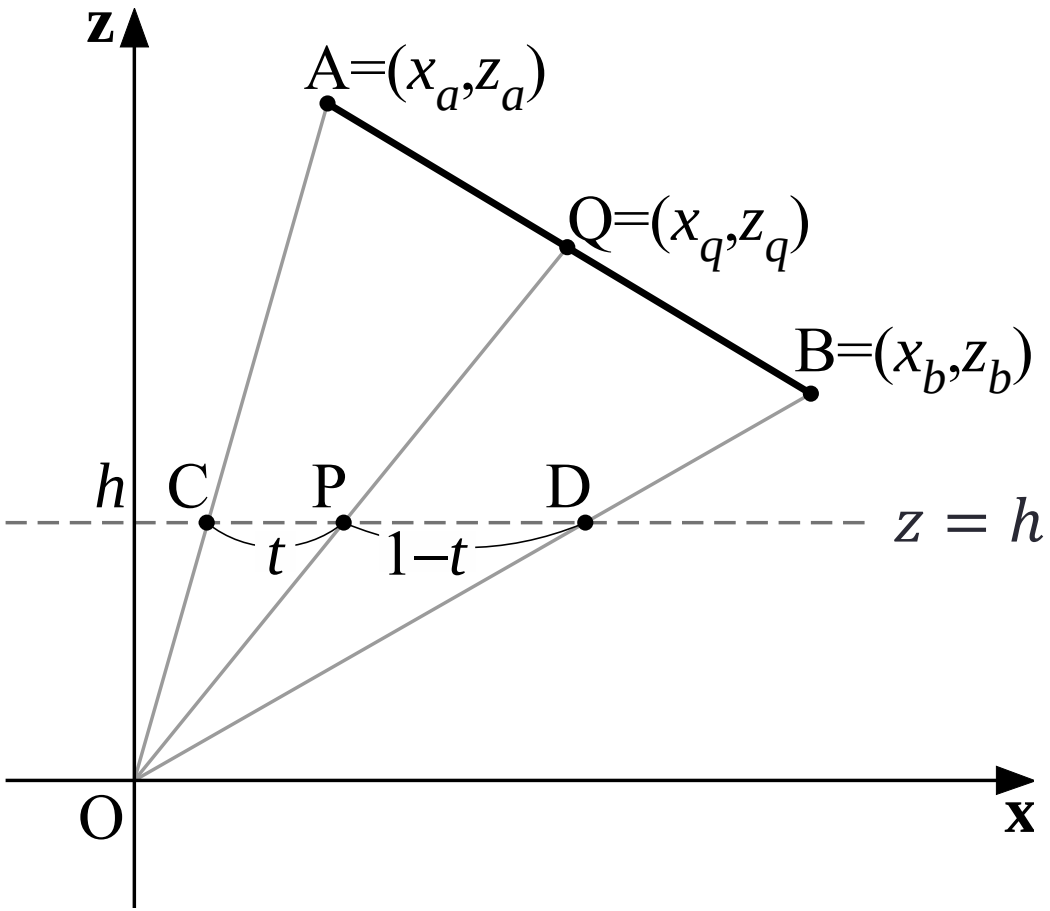
正面から見る



浅い角度から見る



線形補間の逆透視投影



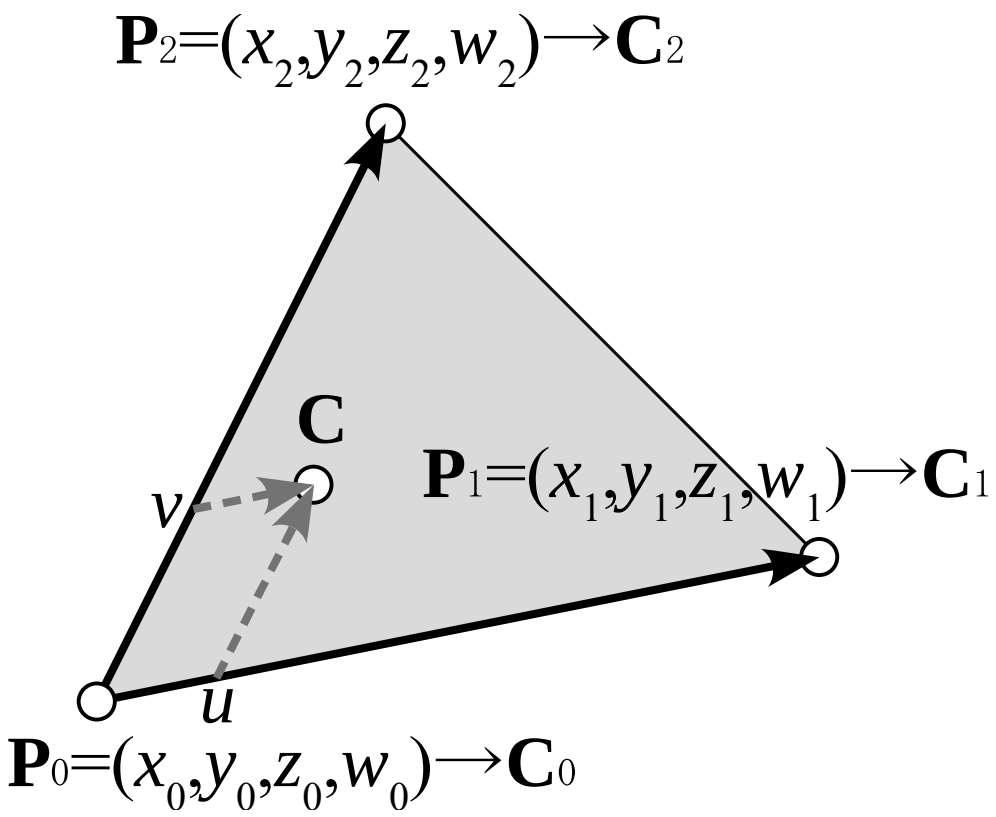
- P を AB 上に投影した点 Q

$$x_q = \frac{\frac{x_a}{z_a}(1-t) + \frac{x_b}{z_b}t}{\frac{1}{z_a}(1-t) + \frac{1}{z_b}t}$$

$$z_q = \frac{1}{\frac{1}{z_a}(1-t) + \frac{1}{z_b}t}$$

1. 属性値を座標値の w（透視投影により z が格納されている）で割ったもの（スクリーン上の位置）を線形補間
2. これを w の逆数を線形補間したもので割る

透視投影を考慮した補間



$$\mathbf{C} = w\left\{(1-u-v)\frac{\mathbf{C}_0}{w_0} + u\frac{\mathbf{C}_1}{w_1} + v\frac{\mathbf{C}_2}{w_2}\right\}$$

$$w = \frac{1}{(1-u-v)\frac{1}{w_0} + u\frac{1}{w_1} + v\frac{1}{w_2}}$$

テクスチャマッピングして描画

テクスチャ座標とテクスチャオブジェクト

テクスチャ座標の in (attribute) 変数

```
// プログラムオブジェクトの作成
GLuint program = glCreateProgram();

…（ソースプログラムの読み込み，コンパイル，取り付け，リンク等）

// in (attribute) 変数のインデックスの検索（見つからなければ -1）
nvLoc = glGetAttribLocation(program, "nv");  // 頂点法線
tvLoc = glGetAttribLocation(program, "tv");  // テクスチャ座標
```

バーテックスシェーダに追加する in 変数 (attribute 変数)

テクスチャユニットの uniform 変数

```
// 視点座標系への変換行列（モデルビュー変換行列）
mwLoc = glGetUniformLocation(program, "mw");

// クリッピング座標系への変換行列（モデルビュー・投影変換行列）
mcLoc = glGetUniformLocation(program, "mc");

// 法線変換行列
mgLoc = glGetUniformLocation(program, "mg");

// テクスチャユニット番号
texLoc = glGetUniformLocation(program, "tex");
```

フラグメントシェーダに
追加する uniform 変数

頂点配列オブジェクトを作成する

```
// 頂点配列オブジェクト
GLuint vao;
glGenVertexArrays(1, &vao);
glBindVertexArray(vao);
```

頂点バッファオブジェクトを作成する

```
// 頂点バッファオブジェクト
GLuint vbo[4];
glGenBuffers(4, vbo);
```

位置，法線，テクスチャ座標，頂点のインデックスの4つ分

形状データ

```
// 形状データ
static GLfloat pv[VERTICES][3];   // 頂点位置
static GLfloat nv[VERTICES][3];   // 頂点法線
static GLfloat tv[VERTICES][2];   // テクスチャ座標
static GLuint face[FACES][3];     // 三角形の頂点インデックス

…（形状データの作成等）
```

二次元のテクスチャ座標

位置と法線の頂点バッファオブジェクト

```
// 頂点の座標値 pv 用の頂点バッファオブジェクト
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo[0]);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof pv, pv, GL_STATIC_DRAW);

// 頂点バッファオブジェクトを in 変数 pv から参照できるようにする
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);
glEnableVertexAttribArray(0);

// 頂点の法線ベクトル nv 用のバッファオブジェクト
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo[1]);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof nv, nv, GL_STATIC_DRAW);

// 頂点バッファオブジェクトを in 変数 nv から参照できるようにする
glVertexAttribPointer(nvLoc, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);
glEnableVertexAttribArray(nvLoc);
```

テクスチャ座標と頂点インデックス

```
// 頂点のテクスチャ座標値 tv 用のバッファオブジェクト
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo[2]);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof tv, tv, GL_STATIC_DRAW);

// 頂点バッファオブジェクトを in 変数 tv から参照できるようにする
glVertexAttribPointer(tvLoc, 2, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);
glEnableVertexAttribArray(tvLoc);

// 頂点のインデックス face 用のバッファオブジェクト
glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, vbo[3]);
glBufferData(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, sizeof face, face, GL_STATIC_DRAW);
```

二次元のテクスチャ座標

テクスチャオブジェクト

```
// テクスチャオブジェクトの作成
GLuint tex;
glGenTextures(1, &tex);
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, tex);
```

マッピングする画像の読み込み

内部フォーマット

```
// テクスチャメモリの確保と画像の読み込み
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGB, width, height, 0, format, GL_UNSIGNED_BYTE, image);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_LINEAR);      // 拡大時に線形補間
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_LINEAR);      // 縮小時に線形補間
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_CLAMP_TO_EDGE);   // エッジでクランプ
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_CLAMP_TO_EDGE);   // エッジでクランプ
```

width, height, fomat は，それぞれ画像 image の幅，高さ，書式
image は unsigned char 型の配列

テクスチャをマッピングして描画する

```
// シェーダプログラムを選択
glUseProgram(program);

// uniform 変数を設定する
glUniformMatrix4fv(mwLoc, 1, GL_FALSE, mw);
glUniformMatrix4fv(mcLoc, 1, GL_FALSE, mc);
glUniformMatrix4fv(mgLoc, 1, GL_FALSE, mg);
glUniform1i(texLoc, 0);

// 使用するテクスチャユニットの指定
glActiveTexture(GL_TEXTURE0);

// マッピングするテクスチャの指定
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, tex);

// 描画に使う頂点配列オブジェクトの指定
glBindVertexArray(vao);

// 図形の描画
glDrawElements(GL_TRIANGLES, FACES * 3, GL_UNSIGNED_INT, face);
```

テクスチャユニット 0 のユニット番号
テクスチャユニット 0

バーテックスシェーダ

```
#version 410
…

in vec4 pv;                 // ローカル座標系の頂点位置
in vec4 nv;                 // 頂点の法線ベクトル
in vec2 tv;                 // 頂点のテクスチャ座標値

uniform mat4 mw;            // 視点座標系への変換行列
uniform mat4 mc;            // クリッピング座標系への変換行列
uniform mat4 mg;            // 法線ベクトルの変換行列
```

バーテックスシェーダ

```
out vec4 dc;              // フラグメントシェーダに送る頂点色の環境光＋拡散光
out vec4 sc;              // フラグメントシェーダに送る頂点色の鏡面反射光
out vec2 tc;              // フラグメントシェーダに送るテクスチャ座標

void main(void)
{
  …

  dc = iamb + idiff;      // 環境光＋拡散光をフラグメントシェーダに送る
  sc = ispec;             // 鏡面反射光をフラグメントシェーダに送る
  tc = tv;                // テクスチャ座標はそのままフラグメントシェーダに送る

  gl_Position = mc * pv;
}
```

鏡面反射光にはテクスチャの
色を影響させないので分ける

フラグメントシェーダ

```
#version 410

in vec4 dc;                 // 環境光＋拡散反射光
in vec4 sc;                 // 鏡面反射光
in vec2 tc;                 // テクスチャ座標
uniform sampler2D tex;      // テクスチャユニット
out vec4 fc;                // カラーバッファ

void main(void)
{
  fc = texture(tex, tc) * dc + sc;
}
```

テクスチャユニット

テクスチャの色を
拡散反射係数として使う

補間されたテクスチャ座標

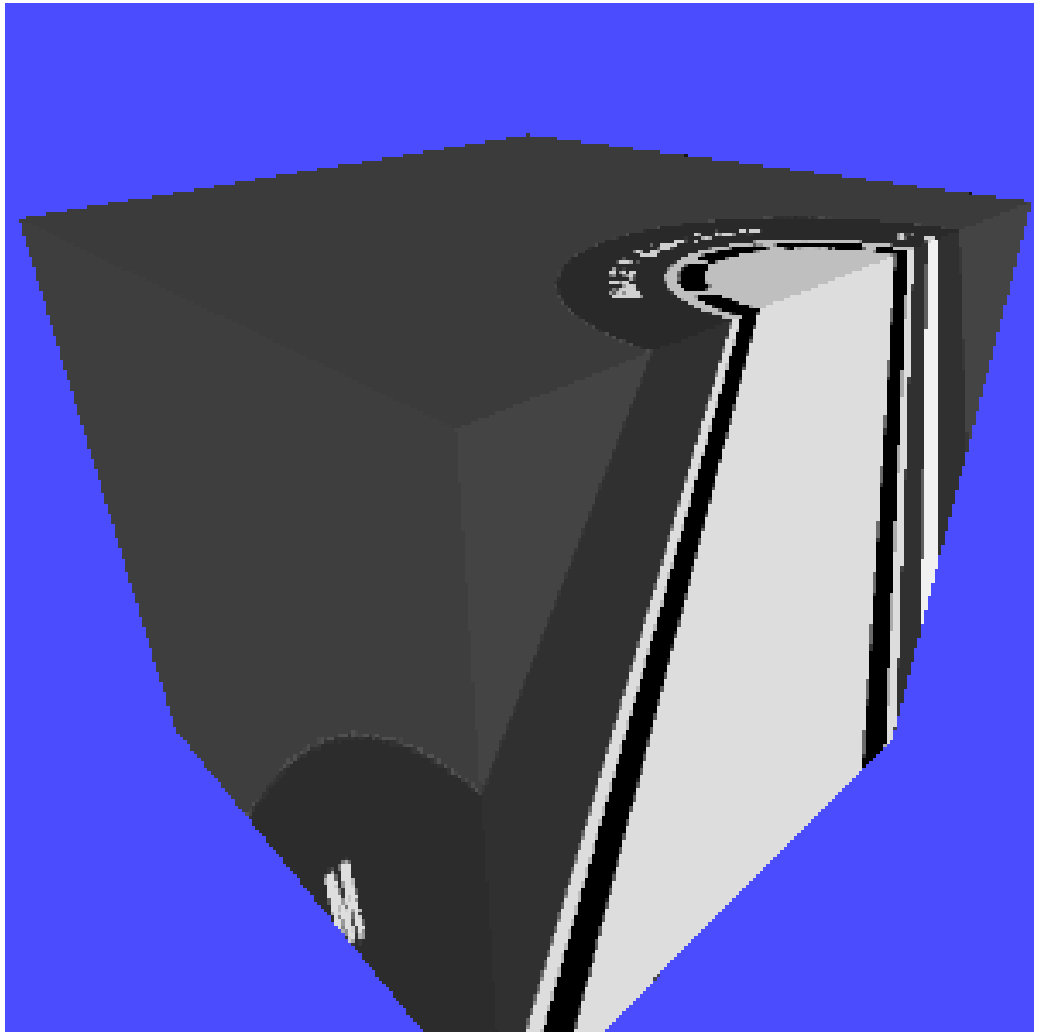
テクスチャを標本化する組み込み関数

3次元テクスチャ

テクスチャ座標も同次座標

3次元のパラメータ空間

- 頂点に対応付けるパラメータ座標を3次元で指定する
  - パラメータ座標を2次元のテクスチャ座標に変換する
  - テクスチャ自体を3次元にする（医用画像等）



同次座標のテクスチャ座標

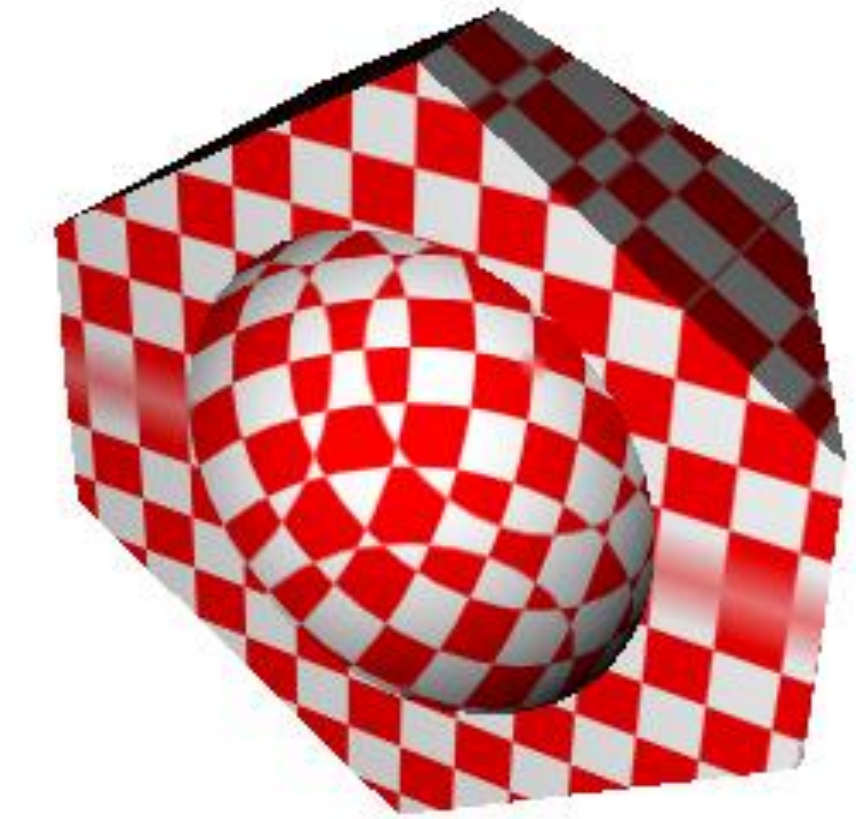
```
#version 410

in vec4 dc;                 // 環境光＋拡散反射光
in vec4 sc;                 // 鏡面反射光
in vec4 tc;                 // テクスチャ座標
uniform sampler2D tex;      // テクスチャユニット
out vec4 fc;                // カラーバッファ

void main(void)
{
  fc = textureProj(tex, tc) * dc + sc;
}
```

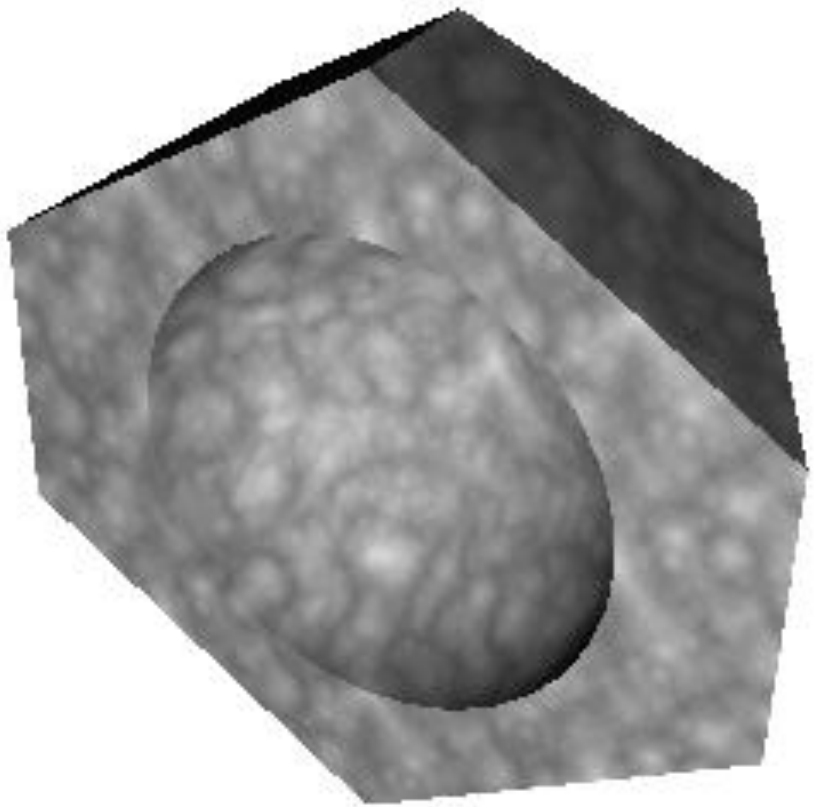
tc の XY 要素をW要素で割って二次元のテクスチャ座標で標本化する

同次座標のテクスチャ座標

テクスチャ座標を投影変換してテクスチャを標本化する組み込み関数

3D テクスチャ（ソリッドテクスチャ）





3 次元テクスチャの読み込み

- テクスチャメモリを確保して，そこに画像データを格納する
  - glTexImage3D(GL_TEXTURE_3D, 0, *internalFormat*, WIDTH, HEIGHT, DEPTH, 0, *format*, *type*, image);
    - *internalFormat*: テクスチャにアルファチャネルを持たせるなら GL_RGBA，持たせないなら GL_RGB
    - *format*: 画像データ (image) の形式，画像がアルファチャンネルを持っていれば GL_RGBA または GL_BGRA，持っていないなら GL_RGB または GL_BGR
    - *type*: 画像を格納している配列変数 (image) のデータ型，GLubyte なら GL_UNSIGNED_BYTE
    - 3次元テクスチャなら第1引数は GL_TEXTURE_3D, 第2引数はミップマップのレベルで基本は 0，第7引数はテクスチャの境界線の太さの指定だったが今は使われないので常に 0.

3次元テクスチャのサンプリング

```
#version 410

in vec4 dc;                 // 環境光＋拡散反射光
in vec4 sc;                 // 鏡面反射光
in vec3 tc;                 // テクスチャ座標
uniform sampler3D tex;      // テクスチャユニット
out vec4 fc;                // カラーバッファ

void main(void)
{
  fc = texture(tex, tc) * dc + sc;
}
```

3次元のテクスチャ座標

テクスチャを標本化する組み込み関数

複数のテクスチャの使用

テクスチャの合成・異なる材質に対するマッピング

Multipass Texture Rendering

- Multipass Rendering
  - 複数回に分けてレンダリングする
    - 照明方程式は多くの要素をもとに一度で結果を得る
    - 要因ごとに分けて別々にレンダリングし，合成することもできる
- 照明方程式の様々な要素はテクスチャで表現可能
  - 環境光の反射光・拡散反射光・鏡面反射光の和
  - テクスチャをつけたレンダリング結果を合成する
    - add
      - そのまま加算する
    - blend
      - アルファ値を使って合成する

マルチテクスチャ

- 複数のテクスチャを同時に使う

```
GLuint tex[2];
glGenTextures(2, tex);
```

- サンプラの uniform 変数 (uniform 変数の配列を使うこともできる)

```
GLint  tex0Loc = glGetUniformLocation(program, "tex0");
GLint  tex1Loc = glGetUniformLocation(program, "tex1");
```

- テクスチャユニットごとにテクスチャオブジェクトを指定する

```
glUniform1f(tex0Loc, 0);                // tex0 のテクスチャユニットは 0
glUniform1f(tex1Loc, 1);                // tex1 のテクスチャユニットは 1
glActiveTexture(GL_TEXTURE0);           // テクスチャユニット 0
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, tex[0]);   // 一つ目のテクスチャ
glActiveTexture(GL_TEXTURE1);           // テクスチャユニット 1
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, tex[1]);   // 二つ目のテクスチャ
…（複数のテクスチャをマッピングする図形の描画）
```

フラグメントシェーダでマルチテクスチャ

- テクスチャユニットごとにサンプラの uniform 変数を用意する

```
uniform sampler2D tex0;  // テクスチャユニット 0
uniform sampler2D tex1;  // テクスチャユニット 1
in vec2 tc0;             // 一つ目のテクスチャのテクスチャ座標
in vec2 tc1;             // 一つ目のテクスチャのテクスチャ座標
```

- それぞれのサンプラ変数とテクスチャ座標を使う

```
vec4 c0 = texture(tex0, tc0);
vec4 c1 = texture(tex1, tc1);
```

小テスト－テクスチャマッピング

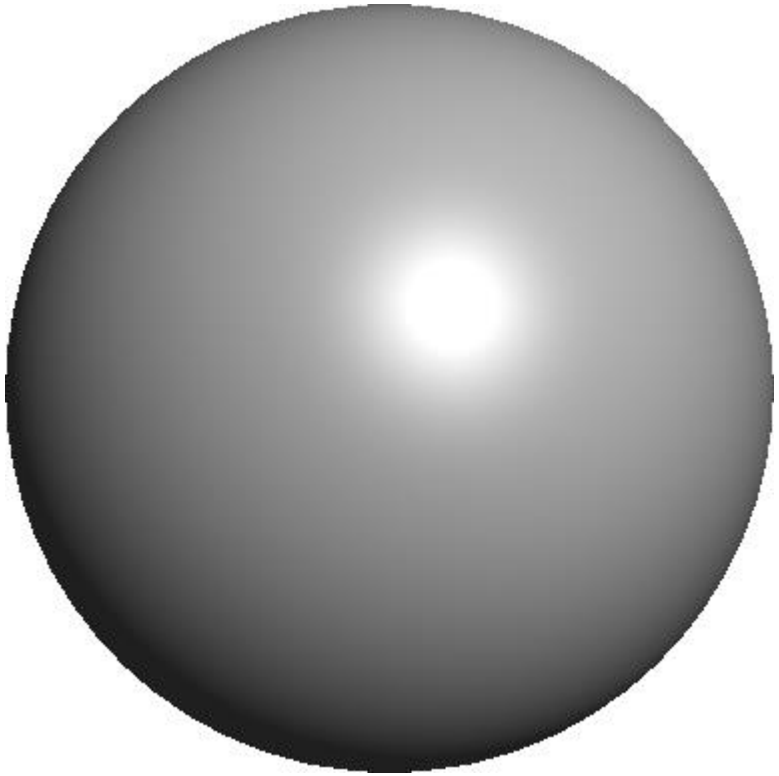
Moodle の小テストに解答してください

宿題

- テクスチャをマッピングしてください.
  - 次のプログラムは**画素単位に陰影をつけた**球を回転するアニメーションを表示します.
    - https://github.com/tokoik/ggsample08
  - これにテクスチャユニット0に割り当てられたテクスチャを，陰影を付けてマッピングしてください .
    - テクスチャユニット 0 には既に画像を割り当てています．サンプラの uniform 変数の変数名は color です.
  - in 変数 pv, nv, tv にはそれぞれ位置，法線，テクスチャ座標が入っています.
    - tv.s と　tv.t には 0～1の値が入っています.
- ggsample08.frag を**アップロード**してください.

宿題プログラムの生成画像

マッピング前



マッピング後