コンピューターグラフィックスS

第10回　演習(3):座標変換

システム創成情報工学科　尾下 真樹

2018年度 Q2

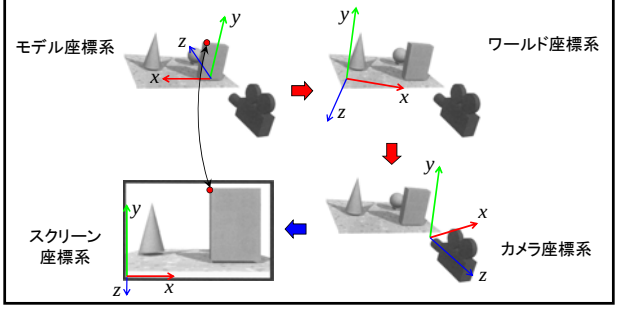
今日の内容

- 前回の復習
- 前回の演習の復習
- 視点操作の実現方法(復習)
- 視点操作の拡張
- 変換行列によるアニメーション
- 演習課題

前回の復習

座標変換(復習)

- モデル座標系からスクリーン座標系への変換



変換行列による座標変換の実現

- 視野変換＋射影変換
  - アフィン変換(視野変換)＋透視変換(射影変換)
  - 最終的なスクリーン座標は $(x'/w' \quad y/w' \quad z/w')$ となる

モデル座標系での頂点座標

$$\begin{pmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{00}S_x & R_{01} & R_{02} & T_x \\ R_{10} & R_{11}S_y & R_{12} & T_y \\ R_{20} & R_{21} & R_{22}S_z & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ w' \end{pmatrix}$$

射影変換(カメラ→スクリーン)　視野変換(モデル→カメラ)　スクリーン座標系での頂点座標

変換行列の設定

- OpenGLは、内部に変換行列を持っている
  - モデルビュー変換行列
  - 射影変換行列
    - 両者は別に扱った方が便利なので、別々に設定できるようになっている
- OpenGLの関数を呼び出すことで、これらの変換行列を変更できる

変換行列の変更

- glLoadIdentity()
  - 単位行列で初期化
- glTranslate(*x, y, z*)
  - 平行移動変換をかける
- glRotate(*angle, x, y, z*)
  - 指定した軸周りの回転変換をかける
  - angle は、1回転を360として指定

変換行列の変更

- 変換行列は順番に右側にかけられていく
  - プログラムで後から記述した変換行列の方が、実際には先に適用される

$$\begin{pmatrix} & \mathbf{A} & \\ & & \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

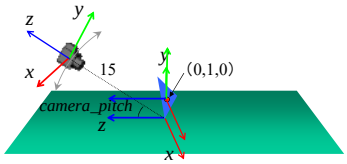
プログラムに記述する順番 →

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\mathbf{A}_3\cdots\mathbf{A}_n$$

← 適用される順番

サンプルプログラムの視野変換行列

- サンプルプログラムのシーン設定
  - カメラと水平面の角度(仰角)は camera_ptich
  - カメラと中心の間の距離は 15
  - ポリゴンを(0,1,0)の位置に描画



サンプルプログラムの視野変換行列

- モデル座標系 → カメラ座標系 への変換行列

③ ② ①

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-camera\_pitch) & -\sin(-camera\_pitch) & 0 \\ 0 & \sin(-camera\_pitch) & \cos(-camera\_pitch) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

ワールド座標系→カメラ座標系　　モデル座標系→ワールド座標系

  - *x*軸周りの回転
  - 2つの平行移動変換の位置に注意
    - 中心から15離れるということは、回転後の座標系でカメラを後方(z軸)に15下げることと同じ

サンプルプログラムの変換行列の設定

- 描画処理(display()関数)

```
// 変換行列を設定(ワールド座標系→カメラ座標系)
glMatrixMode( GL_MODELVIEW );
glLoadIdentity();
③ glTranslatef( 0.0,  0.0, - 15.0 );
② glRotatef( - camera_pitch, 1.0, 0.0, 0.0 );

// 地面を描画(ワールド座標系で頂点位置を指定)
・・・・・・

// 変換行列を設定(モデル座標系→カメラ座標系)
① glTranslatef( 0.0, 1.0, 0.0 );

// ポリゴンを描画(モデル座標系で頂点位置を指定)
・・・・・・
```

以降、視野変換行列を変更することを指定

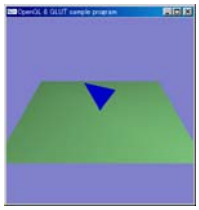
単位行列で初期化

平行移動行列・回転行列を順にかけることで、変換行列を設定

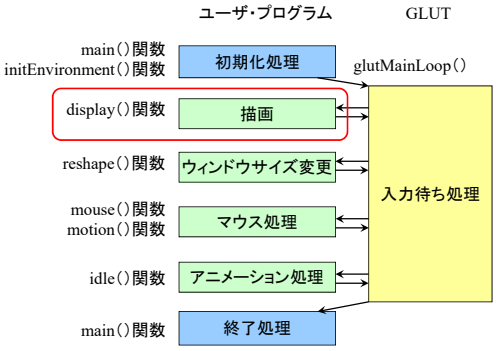
前回の演習の復習

サンプルプログラム

- opengl_sample.c
  - 地面と1枚の青い三角形が表示される
  - マウスの右ボタンドラッグで、視点を上下に回転



サンプルプログラムの構成

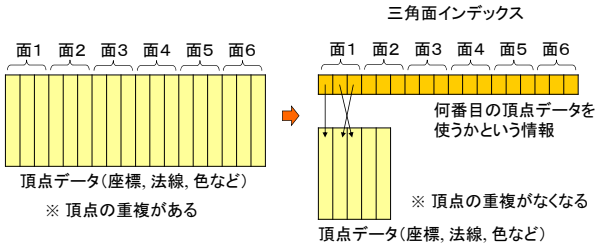


ポリゴンモデルの描画方法

- 方法1: glVertex() 関数に直接頂点座標を記述
  - 頂点データ(直接記述)、頂点ごとに渡す
- 方法2: 頂点データの配列を使用
  - 頂点データ、頂点ごとに渡す
- 方法3: 頂点データと面インデックスの配列を使用
  - 頂点データ＋面インデックス、頂点ごとに渡す
- 方法4: 頂点配列を使用
  - 頂点データ、OpenGLにまとめて渡す
- 方法5: 頂点配列と面インデックス配列を使用
  - 頂点データ＋面インデックス、OpenGLにまとめて渡す

三角面インデックス

- 頂点データの配列と、三角面インデックスの配列に分けて管理する



配列を使った四角すいの描画(1)

- 配列データの定義

```
const int  num_pyramid_vertices = 5;    // 頂点数
const int  num_pyramid_triangles = 6;   // 三角面数

// 角すいの頂点座標の配列
float  pyramid_vertices[ num_pyramid_vertices ][ 3 ] = {
          { 0.0, 1.0, 0.0 }, { 1.0,-0.8, 1.0 }, { 1.0,-0.8,-1.0 }, ・・・・・・
};

// 三角面インデックス(各三角面を構成する頂点の頂点番号)の配列
int  pyramid_tri_index[ num_pyramid_triangles ][ 3 ] = {
          { 0,3,1 }, { 0,2,4 }, { 0,1,2 }, { 0,4,3 }, { 1,3,2 }, { 4,2,3 }
};

// 三角面の法線ベクトルの配列(三角面を構成する頂点座標から計算)
float  pyramid_tri_normals[ num_pyramid_triangles ][ 3 ] = {
          { 0.00, 0.53, 0.85 }, // +Z方向の面
          ・・・・・・
```

配列を使った四角すいの描画(2)

- 配列データを参照しながら三角面を描画

```
void  renderPyramid3()
{
   int  i, j, v_no;
   glBegin( GL_TRIANGLES );
   for ( i=0; i<num_pyramid_triangles; i++ )
   {
      glNormal3f( pyramid_tri_normals[i][0],・・[i][1],・・ [i][2] );
      for ( j=0; j<3; j++ )
      {
         v_no = pyramid_tri_index[ i ][ j ];
         glVertex3f( pyramid_vertices[ v_no ][0], ・・・[ v_no ][1], ・・・
      }
   }
   glEnd();
}
```

各三角面ごとに繰り返し

三角面の各頂点ごとに繰り返し

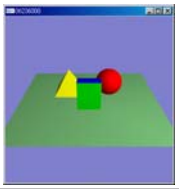
面の法線を指定(i番目の面のデータを指定)

頂点番号を取得(i番目の面のj番目の頂点が、何番目の頂点を使うかを取得)

頂点座標を指定(v_no番目の頂点のデータを指定)

演習課題

- ここまでのポリゴンモデルをまとめて描画
  - 変換行列を利用して、3つのポリゴンモデルを同時に描画
    - 変換行列については、後日学習するので、今回は、サンプルプログラムをそのまま使用しておく
  - 右のスクリーンショットと同じ画面になるように、プログラムの空欄を埋める
- 前回の演習課題のプログラムをもとに変更を加える



視点操作の実現方法（復習）

現在の視点操作の実現方法

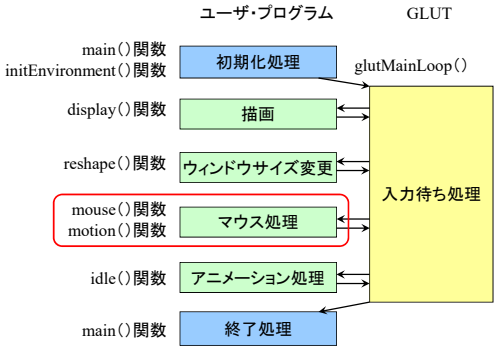
- マウスの右ボタンを押しながら、上下にドラッグすると、カメラの回転角度（仰角）が変化
- カメラの回転角度を表す変数 camera_pitch を定義
- マウス操作に応じて、camera_pitch の値を変化
- camera_pitch に応じて、変換行列を設定

視点操作のための変数

- 視点操作のための変数の定義
  - グローバル変数（全ての関数からアクセス可能な変数）として定義

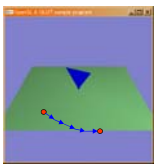
```
// 視点操作のための変数
float  camera_pitch = -30.0;  // X軸を軸とするカメラの回転角度

// マウスのドラッグのための変数
int  drag_mouse_r = 0;  // 右ボタンをドラッグ中かどうかのフラグ
(0:非ドラッグ中,1:ドラッグ中)
int  last_mouse_x;      // 最後に記録されたマウスカーソルのX座標
int  last_mouse_y;      // 最後に記録されたマウスカーソルのY座標
```

サンプルプログラムの構成



マウス操作時の処理

- マウス操作のコールバック関数
  - mouse()関数
    - マウスのボタンが、押されたとき、または、離されたときに呼ばれる
  - motion()関数
    - マウスのボタンが押された状態で、マウスが動かされたとき（ドラッグ時）に定期的に呼ばれる
    - ボタンが押されない状態で、マウスが動かされたときに呼ばれる関数もある（今回は使用しない）



マウス操作時の処理（クリック処理関数）

- 右ボタンがクリックされたことを記録
  - 変数 drag_mouse_r に状態を格納

```
// マウスクリック時に呼ばれるコールバック関数
void  mouse( int button, int state, int mx, int my )
{
        // 右ボタンが押されたらドラッグ開始のフラグを設定
        if ( ( button == GLUT_RIGHT_BUTTON ) && ( state == GLUT_DOWN ) )
                drag_mouse_r = 1;
        // 右ボタンが離されたらドラッグ終了のフラグを設定
        else if ( ( button == GLUT_RIGHT_BUTTON ) && ( state == GLUT_UP ) )
                drag_mouse_r = 0;

        // 現在のマウス座標を記録
        last_mouse_x = mx;
        last_mouse_y = my;
}
```

マウス操作時の処理（ドラッグ処理関数1）

- ドラッグされた距離に応じて視点を変更
  - 視点の方位角 camera_pitch を変化
    - 前回と今回のマウス座標の差から計算

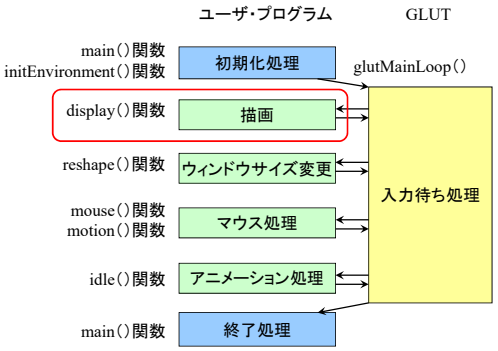
```
void  motion( int mx, int my )
{
        // 右ボタンのドラッグ中であれば、
        // マウスの移動量に応じて視点を回転する
        if ( drag_mouse_r == 1 )
        {
                // マウスの縦移動に応じてX軸を中心に回転
                camera_pitch -= ( my - last_mouse_y ) * 1.0;
                if ( camera_pitch < -90.0 )
                        camera_pitch = -90.0;
                else if ( camera_pitch > 0.0 )
                        camera_pitch = 0.0;
        }
        ……
```

マウス操作時の処理（ドラッグ処理関数2）

- 再描画の指示を行う
  - 視点の方位角 camera_pitch の変化に応じて、画面を再描画するため
  - GLUTに再描画を指示（適切なタイミングで再描画が実行される）

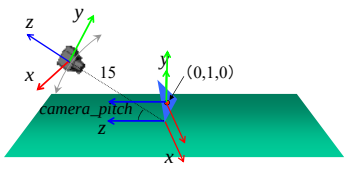
```
        // 今回のマウス座標を記録
        last_mouse_x = mx;
        last_mouse_y = my;

        // 再描画の指示を出す
        glutPostRedisplay();
}
```

サンプルプログラムの構成



サンプルプログラムの視野変換行列

- サンプルプログラムのシーン設定
  - カメラと水平面の角度（仰角）は camera_ptich
  - カメラと中心の間の距離は 15
  - ポリゴンを(0,1,0)の位置に描画



サンプルプログラムの視野変換行列

- モデル座標系 → カメラ座標系 への変換行列

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-camera\_pitch) & -\sin(-camera\_pitch) & 0 \\ 0 & \sin(-camera\_pitch) & \cos(-camera\_pitch) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

③ ② ①

ワールド座標系→カメラ座標系　　モデル座標系→ワールド座標系

- x軸周りの回転
- 2つの平行移動変換の位置に注意
  - 中心から15離れるということは、回転後の座標系でカメラを後方（z軸）に15下げることと同じ

サンプルプログラムの変換行列の設定

- 描画処理（display()関数）

```
// 変換行列を設定（ワールド座標系→カメラ座標系）
glMatrixMode( GL_MODELVIEW );
glLoadIdentity();
③ glTranslatef( 0.0,  0.0, - 15.0 );
② glRotatef( - camera_pitch, 1.0, 0.0, 0.0 );

// 地面を描画（ワールド座標系で頂点位置を指定）
・・・・・・

// 変換行列を設定（モデル座標系→カメラ座標系）
① glTranslatef( 0.0, 1.0, 0.0 );

// ポリゴンを描画（モデル座標系で頂点位置を指定）
・・・・・・
```

以降、視野変換行列を変更することを指定

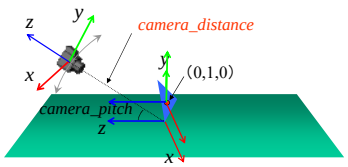
単位行列で初期化

平行移動行列・回転行列を順にかけることで、変換行列を設定

視点操作の拡張

視点操作の拡張

- 左ドラッグでカメラと注視点の距離を操作できるように拡張
  - カメラと注視点の距離を変数 camera_distance で表す

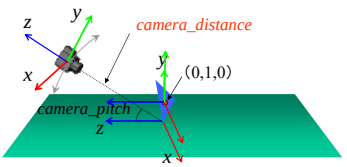


視点操作の拡張

- 変換行列

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -camera\_distance \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-camera\_pitch) & -\sin(-camera\_pitch) & 0 \\ 0 & \sin(-camera\_pitch) & \cos(-camera\_pitch) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

ワールド座標系→カメラ座標系　　モデル座標系→ワールド座標系



視点操作の拡張

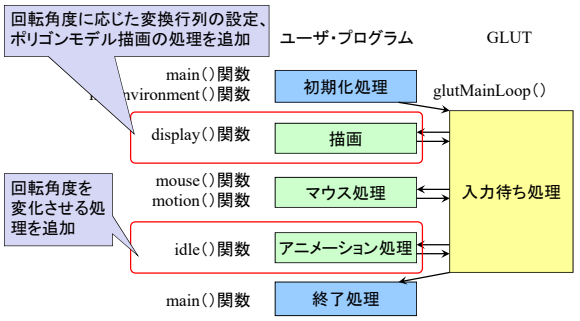
- プログラムの修正箇所（多いので注意）
  - 左ボタンの押下状態を記録する変数を追加
  - カメラと原点の距離を記録する変数を追加
  - mouse()関数に、左ボタンの押下状態を更新する処理を追加
  - motion()関数に、左ドラッグに応じてcamera_distance を変更する処理を追加
    - 一定値以上は近づかないように制限
  - display()関数を、camera_distance に応じて変換行列を設定するように変更

変換行列によるアニメーション

変換行列によるアニメーション

- 変換行列を組み合わせることで、さまざまな運動を実現できる
- アニメーション処理（idle()関数）
  - 運動を表す媒介変数の変化を記述
- 描画処理（dysplay()関数）
  - 媒介変数の値に応じて、回転角度や移動距離に応じた変換行列を設定

サンプルプログラムの構成



アニメーションに使用する変数

- 資料に従って、いくつかの媒介変数を追加
  - theta_cycle
    - 0～360 へ単調増加、360 になったら 0 に戻る
  - theta_repeat
    - 0～180 の間を往復、180 になったら減少を始める
    - theta_cycle から計算できる
  - move
    - 0～1 の間を加速度つきで往復
    - 1に近づくと速度が減少
  - theta_cycle2, theta_repeat2

ポリゴンの回転のための変数

- 変数定義（先頭）、変数の変化（idle()関数）

```
// アニメーションのための変数
float   theta_cycle = 0.0;

void  idle( void )
{
   // theta_cycle を 0～360 まで繰り返し変化させる
   // （360まで来たら0に戻る）
   theta_cycle += 0.1;
   if ( theta_cycle > 360 )
      theta_cycle -= 360;

   // 再描画の指示を出す（描画関数が呼ばれる）
   glutPostRedisplay();
}
```

1回の呼び出しの度にどれだけ回転を行うか、実行環境に応じて適当な値を設定

アニメーションの例

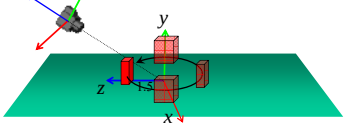
- 一定速度で回転運動
- 一定位置で回転運動
- 一定速度で回転運動（常に正面を向く）
- 一定速度で往復回転運動
- 一定速度で上下に往復移動運動
- 加速度つきで上下に往復移動運動
- 複数の物体の運動の組み合わせ

例1：一定速度で回転運動

- 移動→回転の順に適用
  - 移動にも回転が適用されるので、半径1.5で回転

$$\left(\mathbf{M} \begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle) & 0 & \sin(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle) & 0 & \cos(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

ワールド座標系→カメラ座標系　　モデル座標系→ワールド座標系



例1：一定速度で回転運動

- 行列と同じ順序で、回転・平行移動を適用

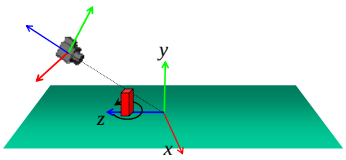
$$M = \begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle) & 0 & \sin(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle) & 0 & \cos(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
void  display( void )
{
        ……
        // 例1：一定速度で回転運動
        glRotatef( theta_cycle, 0.0f, 1.0f, 0.0f );
        glTranslatef( 0.0f, 0.0f, 1.5f );
        renderCube();
        ……
}
```

例2：一定位置で回転運動

- 回転→移動の順に適用（順序を逆）
  - 常に同じ位置に移動するので、その場で回転

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle) & 0 & \sin(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle) & 0 & \cos(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

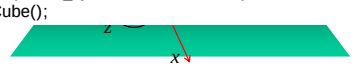


例2：一定位置で回転運動

- 回転→移動の順に適用（順序を逆）
  - 常に同じ位置に移動するので、その場で回転

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle) & 0 & \sin(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle) & 0 & \cos(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

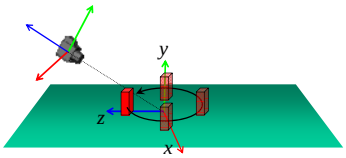
```
// 例2：一定位置で回転
glTranslatef( 0.0f, 0.0f, 1.5f );
glRotatef( theta_cycle, 0.0f, 1.0f, 0.0f );
renderCube();
```



例3：一定速度で回転運動2

- 常に正面を向くようにするためには？
  - 最初に逆方向に回転しておくことで、次の回転をキャンセル（移動にのみ回転がかかる）

$$M = \begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle) & 0 & \sin(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle) & 0 & \cos(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-theta\_cycle) & 0 & \sin(-theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-theta\_cycle) & 0 & \cos(-theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



例3：一定速度で回転運動2

- 常に正面を向くようにするためには？
  - 最初に逆方向に回転しておくことで、次の回転をキャンセル（移動にのみ回転がかかる）

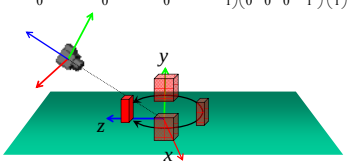
$$M = \begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle) & 0 & \sin(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle) & 0 & \cos(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-theta\_cycle) & 0 & \sin(-theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-theta\_cycle) & 0 & \cos(-theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
// 例3：一定速度で回転運動（常に正面を向く）
glRotatef( theta_cycle, 0.0f, 1.0f, 0.0f );
glTranslatef( 0.0f, 0.0f, 1.5f );
glRotatef( - theta_cycle, 0.0f, 1.0f, 0.0f );
renderCube();
```

例4：一定速度で往復回転運動

- 変換行列は例1と同じ、異なる変数を使用
  - 変数の変化（idle()関数）と 変換行列の設定（display()関数）の組み合わせが重要

$$M = \begin{pmatrix} \cos(theta\_repeat) & 0 & \sin(theta\_repeat) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_repeat) & 0 & \cos(theta\_repeat) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

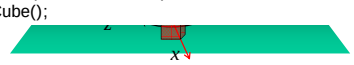


例4:一定速度で往復回転運動

- 変換行列は例1と同じ、異なる変数を使用
  - 変数の変化(idle()関数) と 変換行列の設定(display()関数)の組み合わせが重要

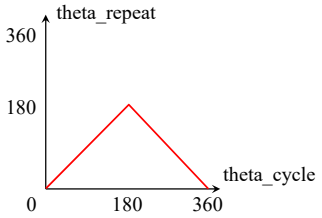
$$\left(\mathbf{M} \right) \begin{pmatrix} \cos(theta\_repeat) & 0 & \sin(theta\_repeat) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_repeat) & 0 & \cos(theta\_repeat) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

```
// 例4:一定速度で往復回転運動
glRotatef( theta_repeat, 0.0f, 1.0f, 0.0f );
glTranslatef( 0.0f, 0.0f, 1.5f );
renderCube();
```



例4:一定速度で往復回転運動

- アニメーション用の変数を追加
  - 0～180 の間で反復変化(theta_repeat)
    - 0～360 で繰り返し変化する変数(theta_cycle)から計算



例4:一定速度で往復回転運動

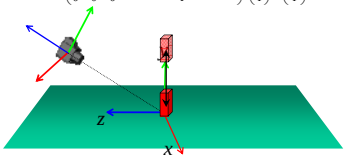
- アニメーション用の変数を追加
  - 0～180 の間で反復変化(theta_repeat)
    - 0～360 で繰り返し変化する変数(theta_cycle)から計算

```
void  idle( void )
{
        ......
        // theta_repeat を 0～180 の間で反復変化させる
        // (180まで増加したら0まで減少する)
        if ( theta_cycle <= 180 )
                theta_repeat = theta_cycle;
        else
                theta_repeat = 360 - theta_cycle;
        ......
}
```

例5:一定速度で上下に往復移動

- 回転だけではなく、位置に変数を使用することもできる
  - めり込みを避けるために y座標値を +1 している

$$\left(\mathbf{M} \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & theta\_repeat/180+1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

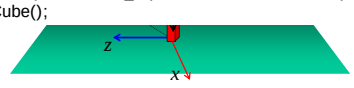


例5:一定速度で上下に往復移動

- 回転だけではなく、位置に変数を使用することもできる
  - めり込みを避けるために y座標値を +1 している

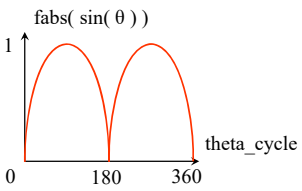
$$\left(\mathbf{M} \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & theta\_repeat/180+1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

```
// 例5:一定速度で上下に往復移動運動
glTranslatef( 0.0f, theta_repeat / 180.0 + 1.0f, 0.0f );
renderCube();
```



例6:加速度つきで上下に往復運動

- 変数の変化を工夫することで、移動速度を変化させるようなこともできる
  - ここでは三角関数の絶対値(fabs関数)を利用
    - 0～360 から 0～1 の間で変化する変数に変換



例6：加速度つきで上下に往復運動

- 変数の変化を工夫することで、移動速度を変化させるようなこともできる
  - ここでは三角関数の絶対値（fabs関数）を利用
    - sin関数の引数の範囲は 0～2π なので、0～360 の範囲を0～2π の範囲に変換

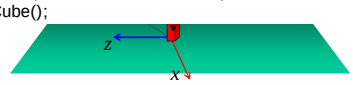
```
void  idle( void )
{
        // move を 0～1 の間で反復変化させる
        //（三角関数を用いることで、一定速度でなはなく、
        // 0 の近くで速度が小さく
        // 180 の近くで速度が大きくなるように変化させる）
        move = fabs( sin( theta_cycle * 3.1415926 / 180.0 ) );
}
```

例6：加速度つきで上下に往復運動

- 例5と同様の変換行列を使用

$$\left(\begin{array}{c}\mathbf{M}\end{array}\right)\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&move+1\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x\\y\\z\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{pmatrix}$$

```
// 例6：加速度つきで上下に放物往復移動運動
glTranslatef( 0.0f, move + 1.0f, 0.0f );
renderCube();
```



例7：複数の物体の運動

- それぞれ異なる変換行列を使用して描画

$$\left(\begin{array}{c}\mathbf{M}\end{array}\right)\begin{pmatrix}x\\y\\z\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{pmatrix}$$

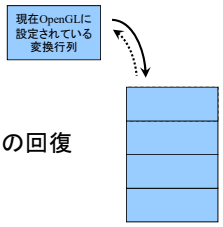
$$\left(\begin{array}{c}\mathbf{M}\end{array}\right)\begin{pmatrix}\cos(theta\_cycle)&0&\sin(theta\_cycle)&0\\0&1&0&0\\-\sin(theta\_cycle)&0&\cos(theta\_cycle)&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&1.5\\0&0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x\\y\\z\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{pmatrix}$$

$$\left(\begin{array}{c}\mathbf{M}\end{array}\right)\begin{pmatrix}\cos(theta\_cycle2)&0&\sin(theta\_cycle2)&0\\0&1&0&0\\-\sin(theta\_cycle2)&0&\cos(theta\_cycle2)&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&1.5\\0&0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x\\y\\z\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{pmatrix}$$

ワールド座標系→カメラ座標系（共通）

変換行列の退避・復元（1）

- 現在の変換行列を別領域（スタック）に記録しておき、後から復元することができる
- glPushMatrix()
  - 現在の変換行列の退避
  - スタックに積む
- glPopMatrix()
  - 最後に退避した変換行列の回復
  - スタックから取り出す



変換行列の退避・復元（2）

- glPushMatrix(), glPopMatrix() を複数回呼び出すと、保存と逆の順番で復元される
  - プログラミングの講義で学習したスタックを覚えていなければ、復習しておくこと
  - 変換行列の設定に適している
- glPushMatrix(), glPopMatrix() を使用するときの注意
  - 必ず両者の呼び出しの数が同じになるようにすること
  - Popをしないまま、Pushを呼び出し続けると、スタックが溢れてエラーとなる

変換行列の退避・復元の例

- ワールド座標系からカメラ座標系への変換行列を設定 — World → Camera
- 地面を描画
- 行列を退避
- 物体1からワールド座標系への変換行列 — World → Camera, Obj1 → World
- 物体1を描画
- 行列を回復 — World → Camera
- 物体2からワールド座標系への変換行列 — World → Camera, Obj2 → World
- 物体2を描画

例7：複数の物体の運動

- それぞれ異なる変換行列を使用して描画

$$\begin{pmatrix} & \mathbf{M} & \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} & \mathbf{M} & \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle) & 0 & \sin(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle) & 0 & \cos(theta\_cycle) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} & \mathbf{M} & \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos(theta\_cycle2) & 0 & \sin(theta\_cycle2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(theta\_cycle2) & 0 & \cos(theta\_cycle2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

ワールド座標系→カメラ座標系（共通）

例7：複数の物体の運動

- アニメーション用の変数を追加

```
void  idle( void )
{
        ......
        // theta_cycle2 を theta_cycle と同様に2倍の速度で変化させる
        theta_cycle2 += 2.0;
        if ( theta_cycle2 > 360 )
                theta_cycle2 -= 360;

        // theta_repeat2 を theta_repeat と同様に2倍の速度で変化させる
        if ( theta_cycle2 <= 180 )
                theta_repeat2 = theta_cycle2;
        else
                theta_repeat2 = 360 - theta_cycle2;
}
```

例7：複数の物体の運動

```
// 例7：2つの物体を描画（異なる周期で往復回転運動）
glPushMatrix();
glRotatef( theta_cycle2, 0.0, 1.0, 0.0 );
glTranslatef( 0.0, 0.0, 3.0 );
renderCube();
glPopMatrix();

glRotatef( theta_cycle, 0.0f, 1.0f, 0.0f );
glTranslatef( 0.0f, 0.0f, 1.5f );
renderCube();
```

例8：複数の物体の運動2（1）

- Push, Pop の有無による違いを確認
  - 物体1：回転運動
  - 物体2：加速度つきで上下に放物往復移動運動

```
// 例8：2つの物体を描画
glRotatef( theta_cycle2, 0.0, 1.0, 0.0 );
glTranslatef( 0.0, 0.0, 3.0 );
renderCube();

glTranslatef( 0.0f, move + 2, 0.0 );
renderCube();
```

例8：複数の物体の運動2（2）

- Push, Pop の有無による違いを確認
  - 物体1：回転運動
  - 物体2：加速度つきで上下に放物往復移動運動

```
// 例9：2つの物体を描画
glPushMatrix();
glRotatef( theta_cycle2, 0.0, 1.0, 0.0 );
glTranslatef( 0.0, 0.0, 3.0 );
renderCube();
glPopMatrix();

glTranslatef( 0.0f, move + 2, 0.0 );
renderCube();
```

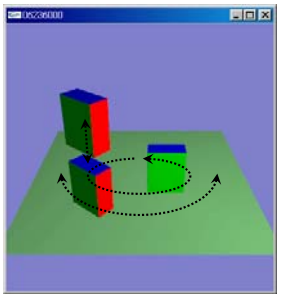
演習課題

演習課題

- 今までの内容を踏まえて、以下のような、3つの直方体のアニメーションを実現する
  - 1つ目の直方体は、常に正面を向いたまま、原点を中心とする半径1.5の円周上を、等速回転運動する。
  - 2つ目の直方体は、原点を中心とする半径3.0の半円上を、等速往復回転運動する。
  - 3つ目の直方体は、2つ目の直方体の上で、上下に方物往復移動運動する。

演習課題

- 演習課題のアニメーション

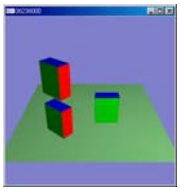


演習課題

```
void  display( void )
{
        glPushMatrix()  or  glPopMatrix()  or  どちらも入れない
        // 1つ目の直方体の描画（回転運動）
        ?
        glPushMatrix()  or  glPopMatrix()  or  どちらも入れない

        // 2つ目の直方体の描画（往復回転運動）
        ?
        glPushMatrix()  or  glPopMatrix()  or  どちらも入れない

        // 3つ目の直方体の描画（方物往復移動運動）
        ?
        glPushMatrix()  or  glPopMatrix()  or  どちらも入れない
}
```

演習課題

- ここまでの演習をテキストに従って行う
  - 前回の演習のファイルを、引き続き修正
  - プログラムの空欄は、自分で考えて、指定どおりのアニメーションが実現されるようにする



演習課題の提出

- 視点操作の拡張
- アニメーションの実現
  - 例1～9のアニメーションもコメントアウトして残す
- 上記の両方の課題を実現した、一つのプログラムを、Moodleから提出
  - ファイル名は、学生番号.c とする
  - 必ず、両方とも完成したプログラムを提出すること（部分点はなし）
  - 時間内に終わらなければ、締め切りまでに提出
- 締め切り 7月20日（金）18:00（厳守）

まとめ

- 前回の復習
- 前回の演習の復習
- 視点操作の実現方法（復習）
- 視点操作の拡張
- 変換行列によるアニメーション
- 演習課題

次回予告

- シェーディング
  - 光のモデル
  - スムーズシェーディング
- レポート課題