

コンピュータグラフィックス基礎

第 2 回 2 次元の座標変換

遠藤結城



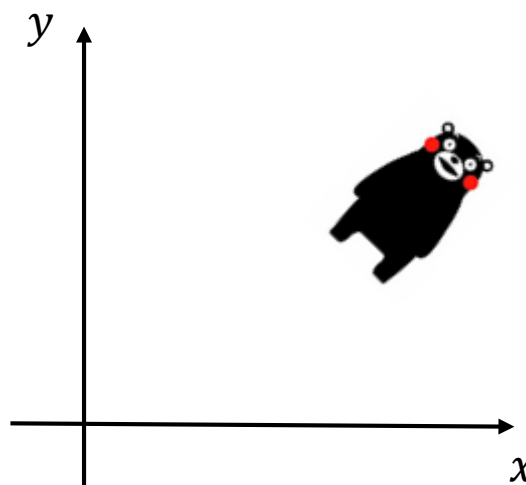
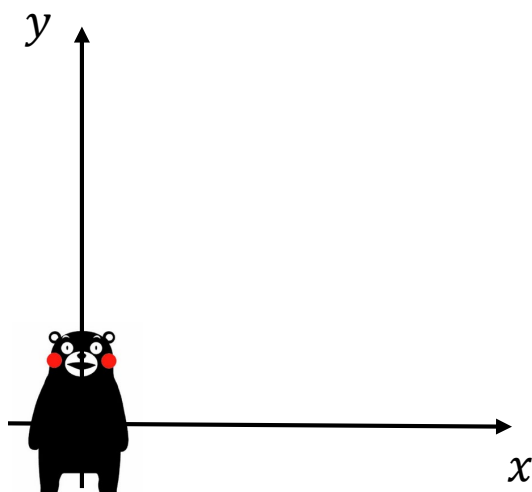
学習の目標

- 行列を用いた2次元での座標変換について理解する
- 2次元の座標変換を用いたプログラムの作成を行えるようになる



座標変換とは

- ある物体の位置や向き、形を変えること
 - 形を変える？（大きさの変化、せん断変形など）



- 位置や向きは相対的なものであることに注意
 - 物体が移動した？
 - カメラが移動した（座標系が変わった）？



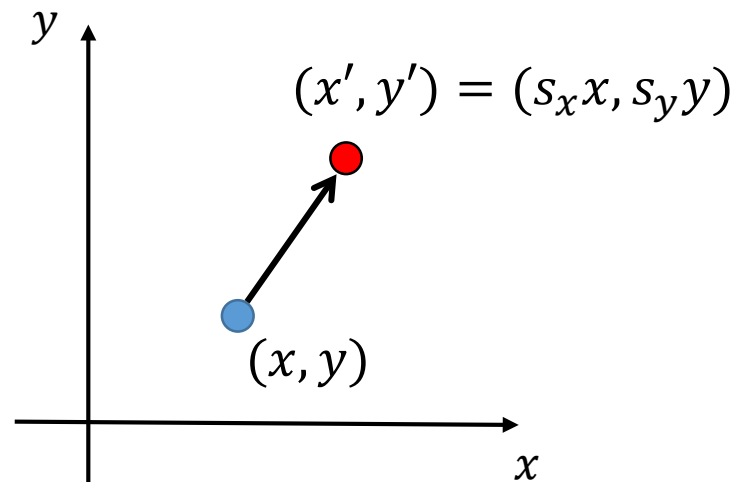
座標変換の式(1/2)

- 拡大縮小

$$x' = s_x x$$

$$y' = s_y y$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

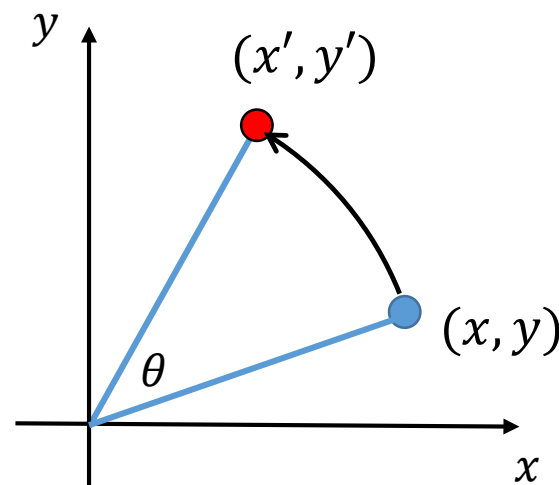


- 回転移動(原点中心)

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta$$

$$y' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

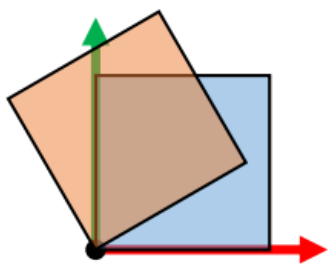
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$



線形変換

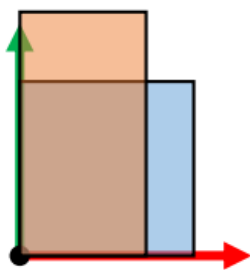
直線を直線に移す変換・原点の位置は変化しない変換

回転



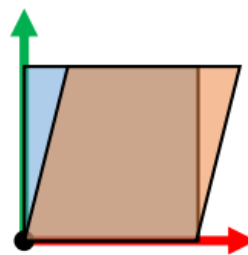
$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

スケーリング



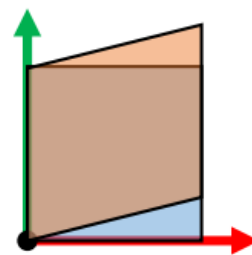
$$\begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix}$$

せん断 (X方向)



$$\begin{bmatrix} 1 & k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

せん断 (Y方向)



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{bmatrix}$$

参考) 行列式の値は面積の変化率を表す。

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} = ad - bc$$



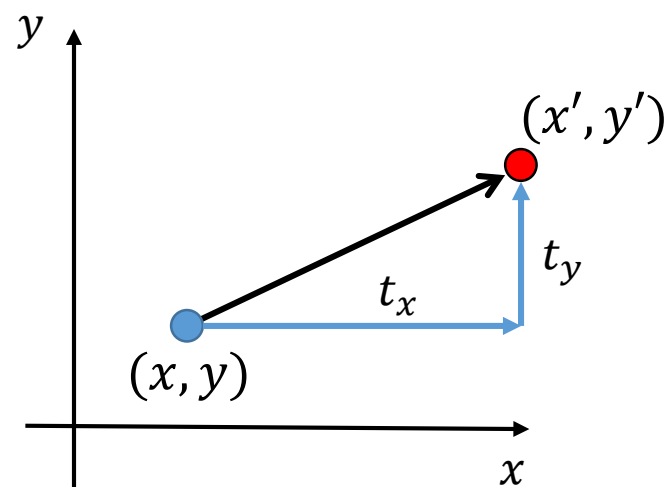
座標変換の式(2/2)

- 平行移動

$$x' = x + t_x$$

$$y' = y + t_y$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$$



アフィン変換(線形変換+平行移動)

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$$

座標変換を表す操作に「積」と「和」の演算が含まれる。何かと不便なことが多い。



便宜上、1つ次元を上げたベクトル(3次元ベクトル)を用いる(同次座標)。

変換行列

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & t_x \\ c & d & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

平行移動を含む座標変換操作が単純な「積」の演算1つで表現された。(3次元ベクトルと3x3行列の演算)これは便利!

複数回の座標変換操作が単純な行列の積の繰り返しだけで済む



3x3行列を用いた座標変換

拡大縮小

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

回転移動

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

平行移動

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$



アフィン変換の合成(変換行列の掛け合わせ)

- 異なるアフィン変換を組み合わせる座標変換



- 変換行列の掛け合わせ

注: 行列は掛け合わせる順番によって結果が異なる!



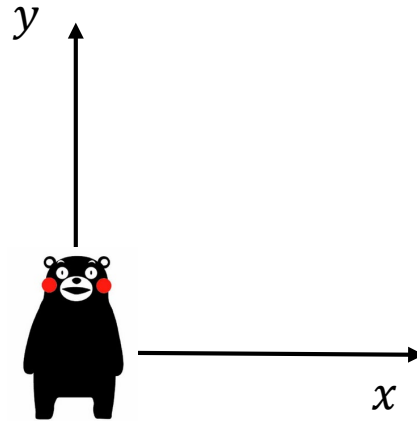
掛けあわせ順による結果の違い

60° の回転移動(原点中心)

$$R = \begin{bmatrix} \cos 60^\circ & -\sin 60^\circ & 0 \\ \sin 60^\circ & \cos 60^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(5,0)の平行移動

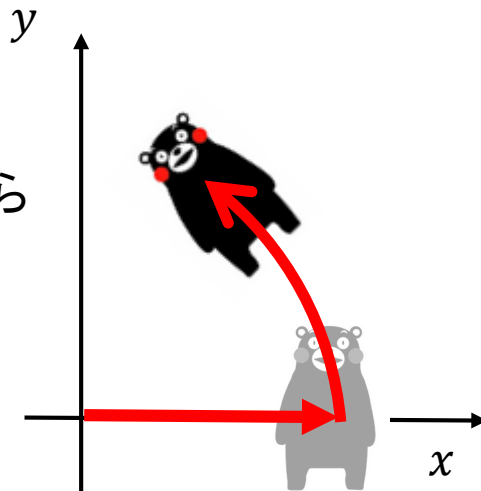
$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 5 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



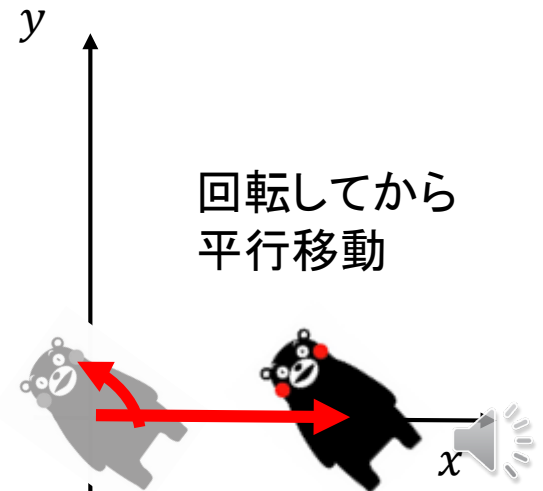
$$\mathbf{x}' = R\mathbf{T}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{x}' = T\mathbf{R}\mathbf{x}$$

平行移動してから
回転



回転してから
平行移動

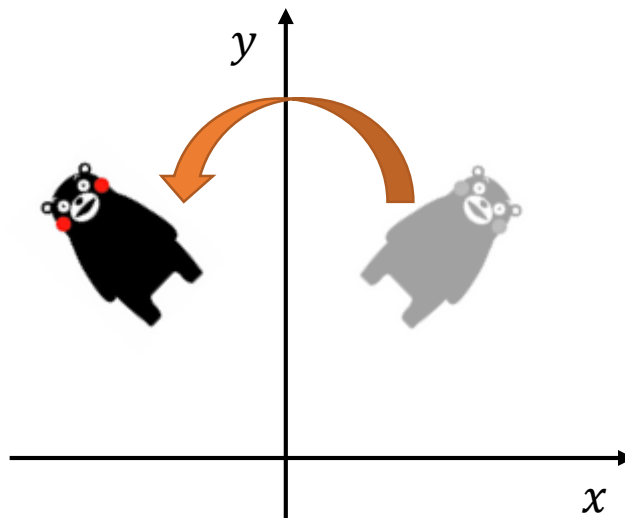


様々な座標変換

鏡映変換

(y 軸に関して)

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

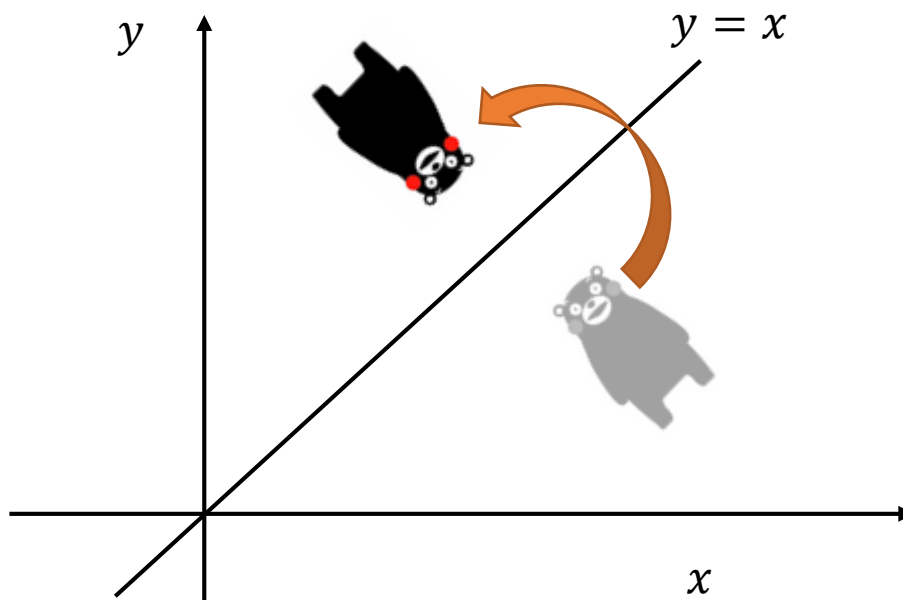


様々な座標変換

鏡映変換

($x=y$ に関して)

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

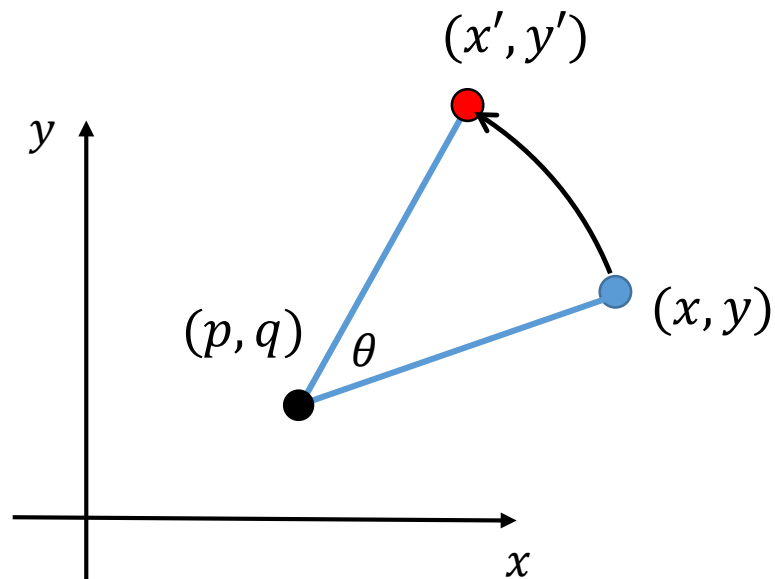


様々な座標変換

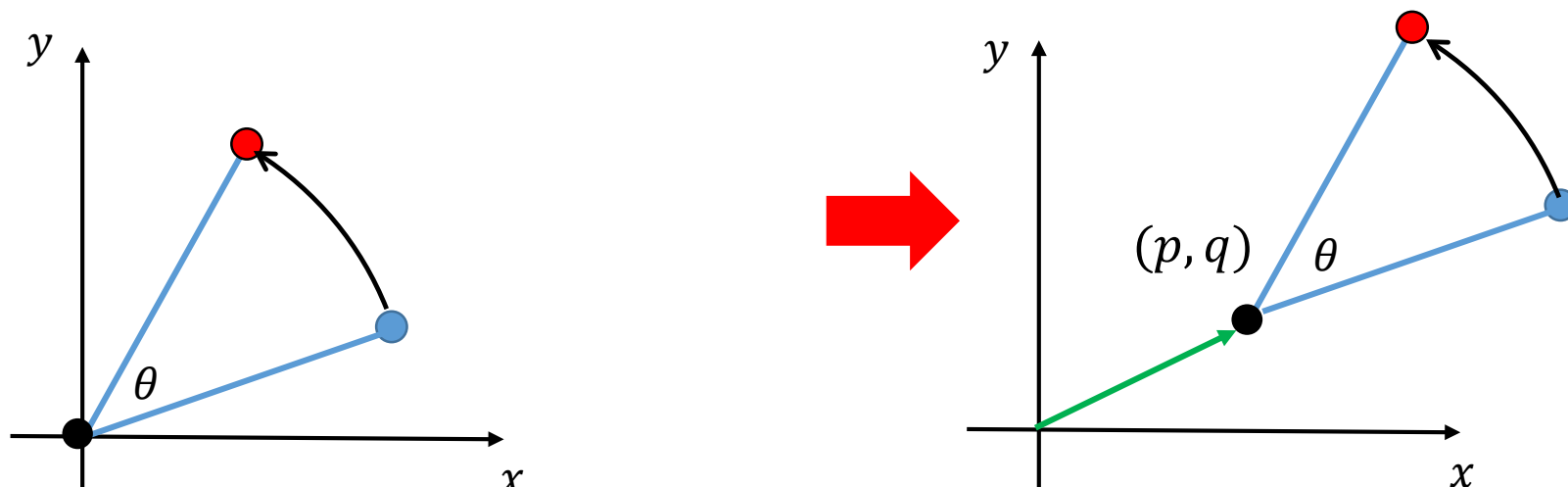
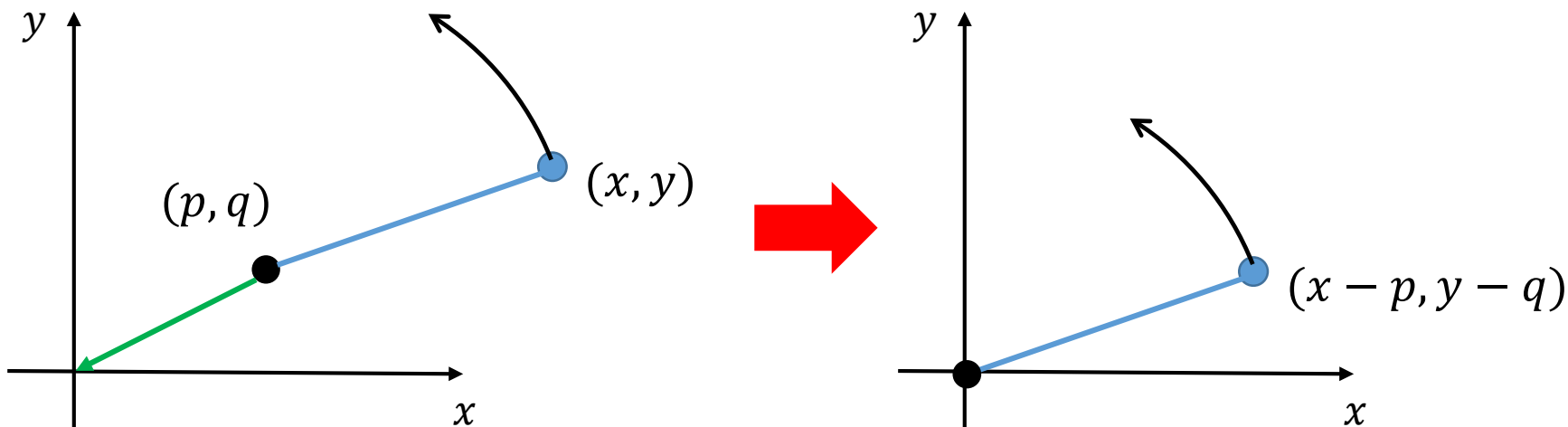
原点以外の点を中心とした回転

1. 回転の中心が原点となるような座標変換(平行移動)
2. 回転操作
3. Step.1で行った移動を元に戻すような平行移動

例: (p, q) を中心とした角度 θ の回転



点(p, q) 周りの回転



点(p, q) 周りの回転

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & p \\ 0 & 1 & q \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -p \\ 0 & 1 & -q \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}' = T^{-1}RT\mathbf{x}$$

R : 回転行列

T : 回転中心を原点に移す平行移動行列

T^{-1} : T の逆行列



OpenGL での座標変換



OpenGLでの座標変換

※ 3次元を想定した関数になっている

拡大縮小 `glScaled(sx, sy, 1.0);`
z 座標は変化させない

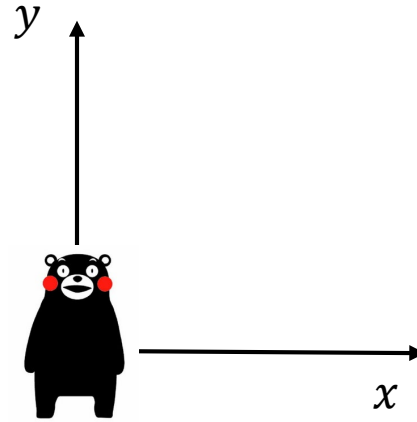
回転移動 `glRotated(theta, 0, 0, 1);`
回転角度 (0~360度) 回転軸ベクトル
xy 平面上の 2 次元図形の場合は (0,0,1) を指定

平行移動 `glTranslated(tx, ty, 0);`
z 座標は変化させない



記述する順番で結果が異なる

$$\mathbf{x}' = (\text{変換行列}) \mathbf{x}$$



```
glRotated( 60, 0, 0, 1);  
glTranslated( 5, 0, 0);
```

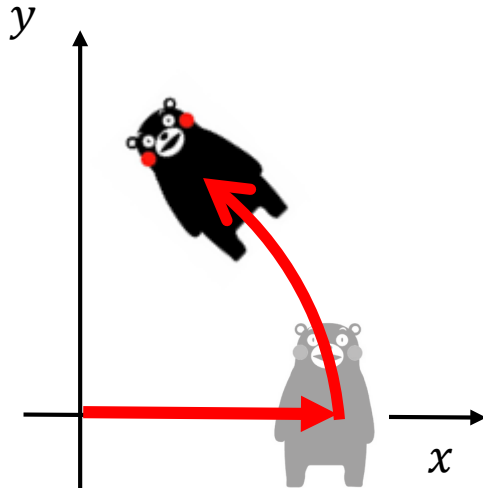
```
glTranslated( 5, 0, 0);  
glRotated( 60, 0, 0, 1);
```



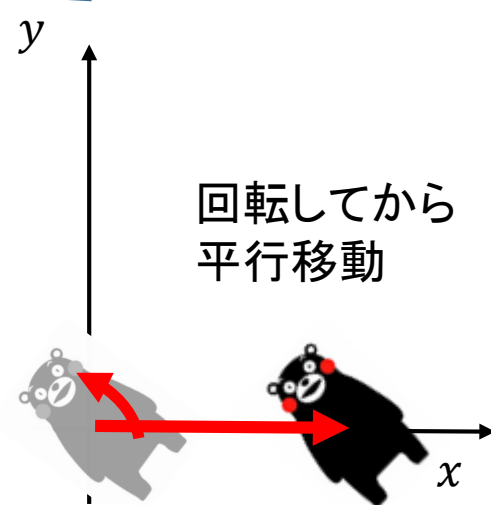
$$\mathbf{x}' = R T \mathbf{x}$$



$$\mathbf{x}' = T R \mathbf{x}$$



平行移動してから
回転



回転してから
平行移動



変換行列の演算式とプログラムコードでの
記述する順番は同じ

記述した後ろのものから順番に適用される

{glScaled, glRotated, glTranslated} は、
{拡大縮小、回転、平行移動} 行列を
現在の変換行列に、**右から掛ける**。



変換行列の操作

`glLoadIdentity()`

変換行列を初期化する。描画更新をするたびに初期化が必要。
(そうしないと、前回描画した時の変換行列が残ったままになっている。)

`glMultMatrixd(GLdouble *m)`

現在の変換行列に掛け合わせる行列を直接指定する。
引数に、16個の要素を持つ配列を指定する(3次元を基本とするので、
4x4行列の各要素)(授業の中では使用しない)

`glLoadMatrixd(GLdouble *m)`

現在の変換行列を取得する。引数に、16個の要素を持つ配列を指定する。
(3次元を基本とするので、4x4行列の各要素)
(授業の中では使用しない)



座標変換行列の Push と Pop

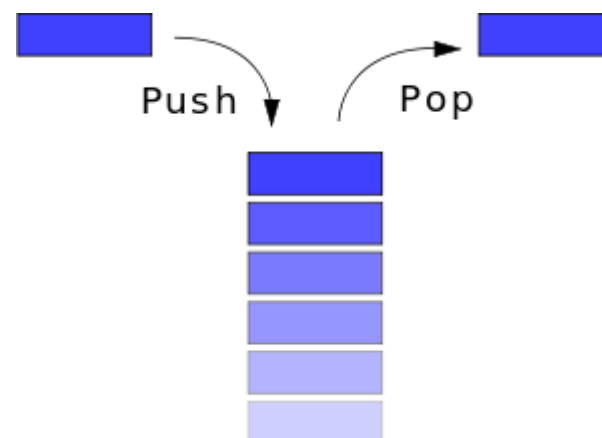


変換行列の格納(Push)と取り出し(Pop)

グラフィックスプログラムでは、ある時点の座標変換行列を保存しておき、後でまた、その行列を取り出したくなるのがよくある。

これを実現するために、行列スタックを使用する。

行列スタックに座標変換行列を格納し(Push)、必要な時に取り出す(Pop)。好きな順番には取りだせない。最後に入れたものが最初に取り出される。

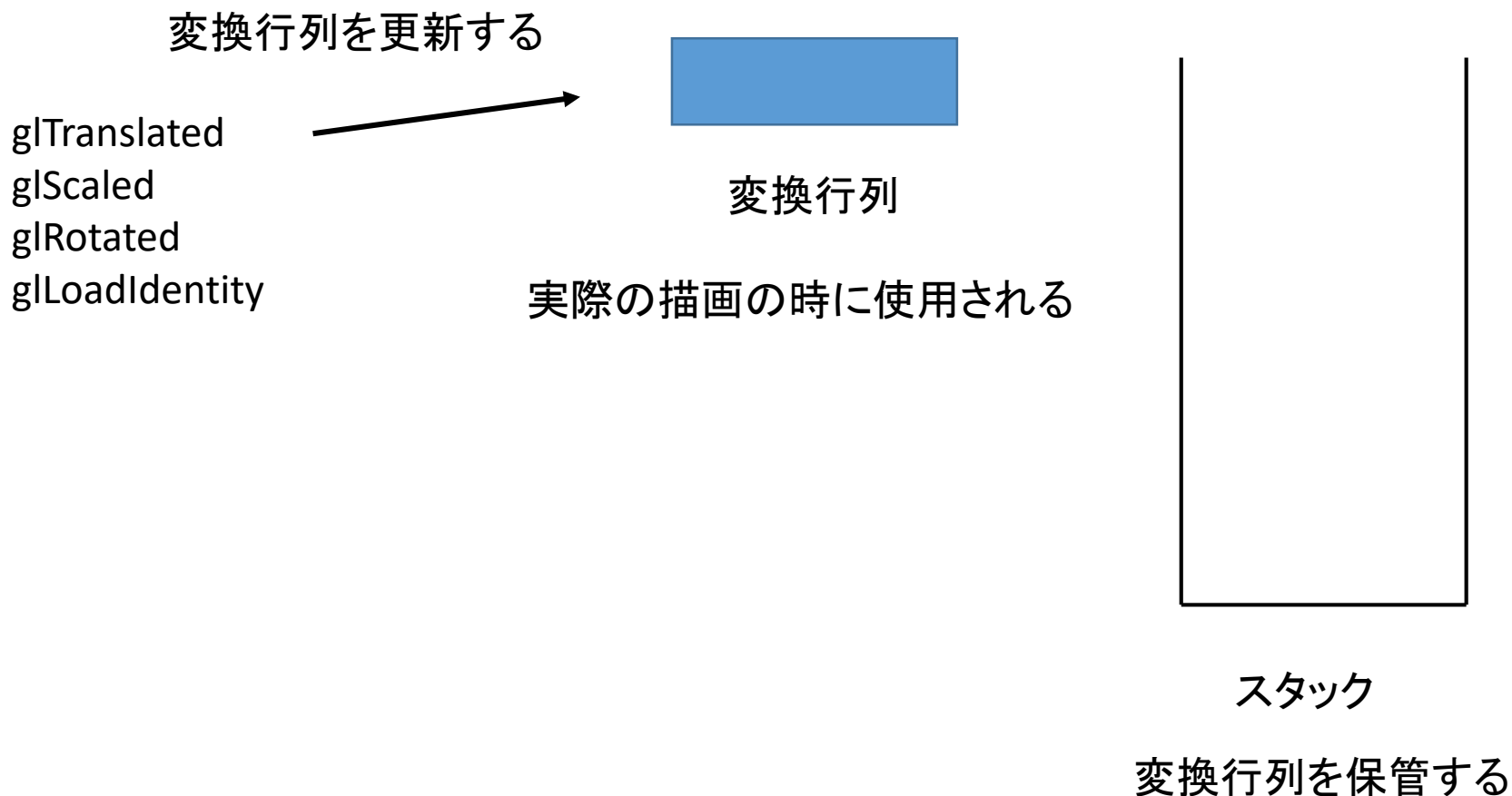


スタック

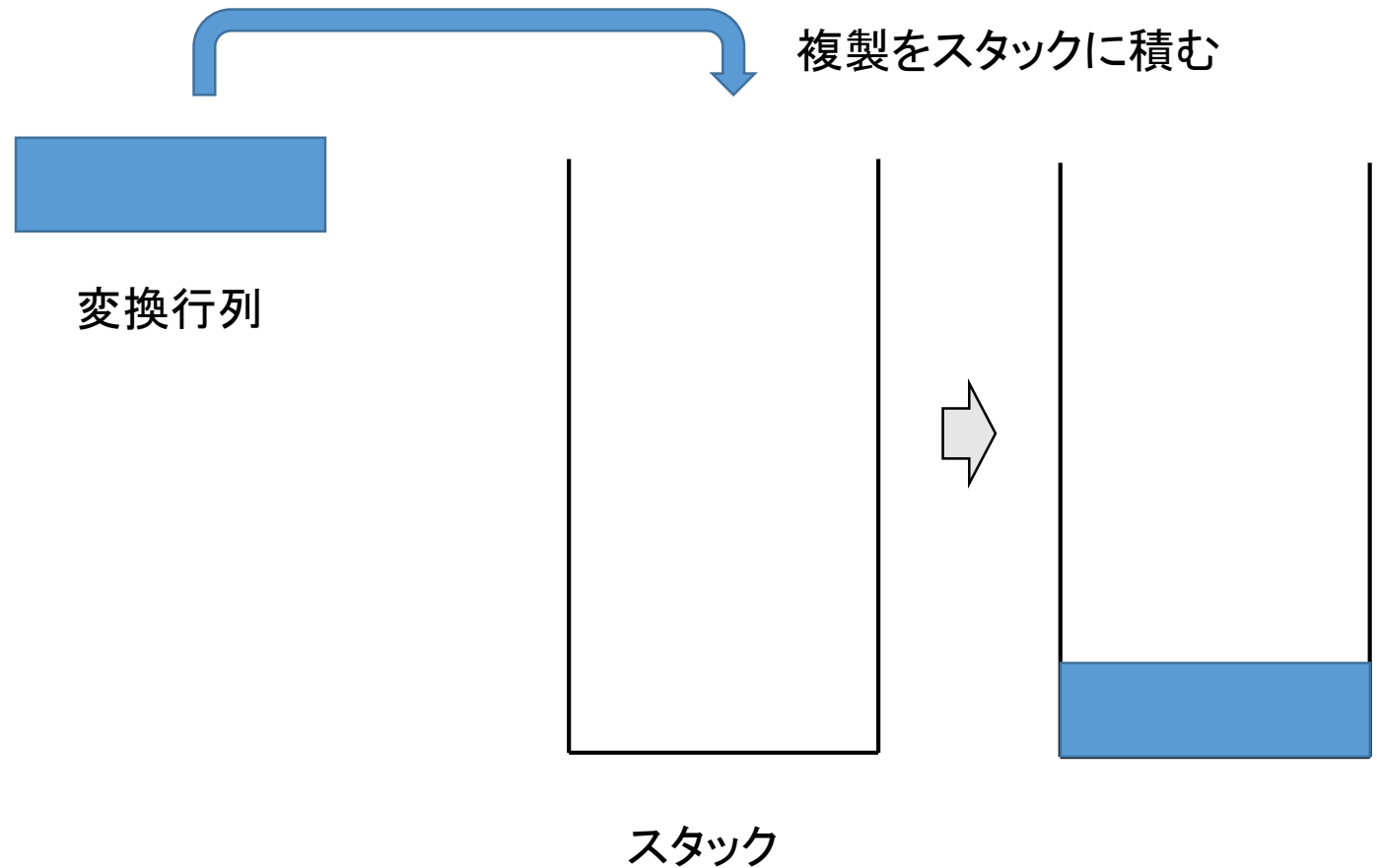
データの保存と取り出しを行う方法の1つ。後から入れたものが先に取りだされる(後入れ先出し)



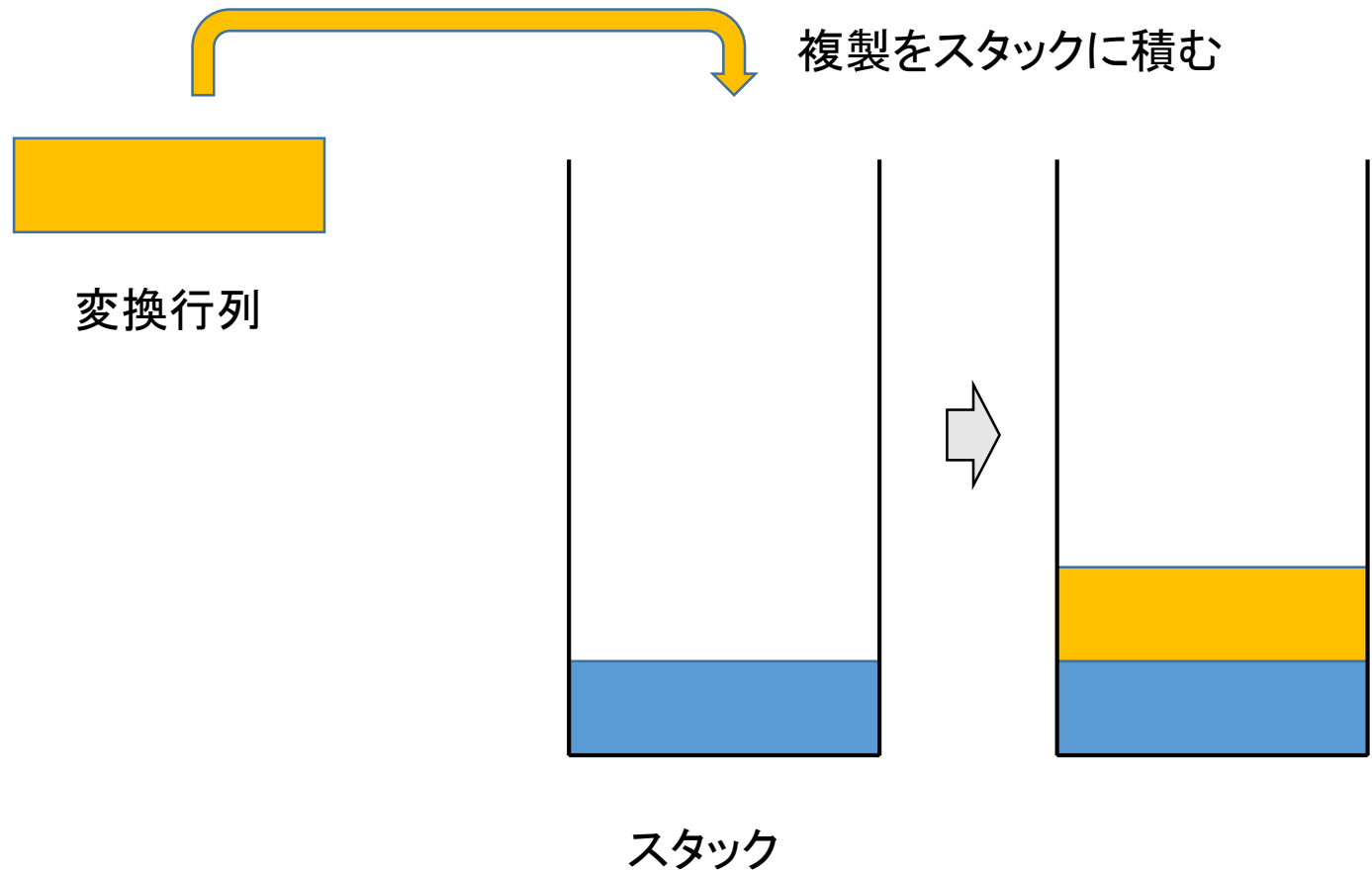
変換行列とスタックの関係



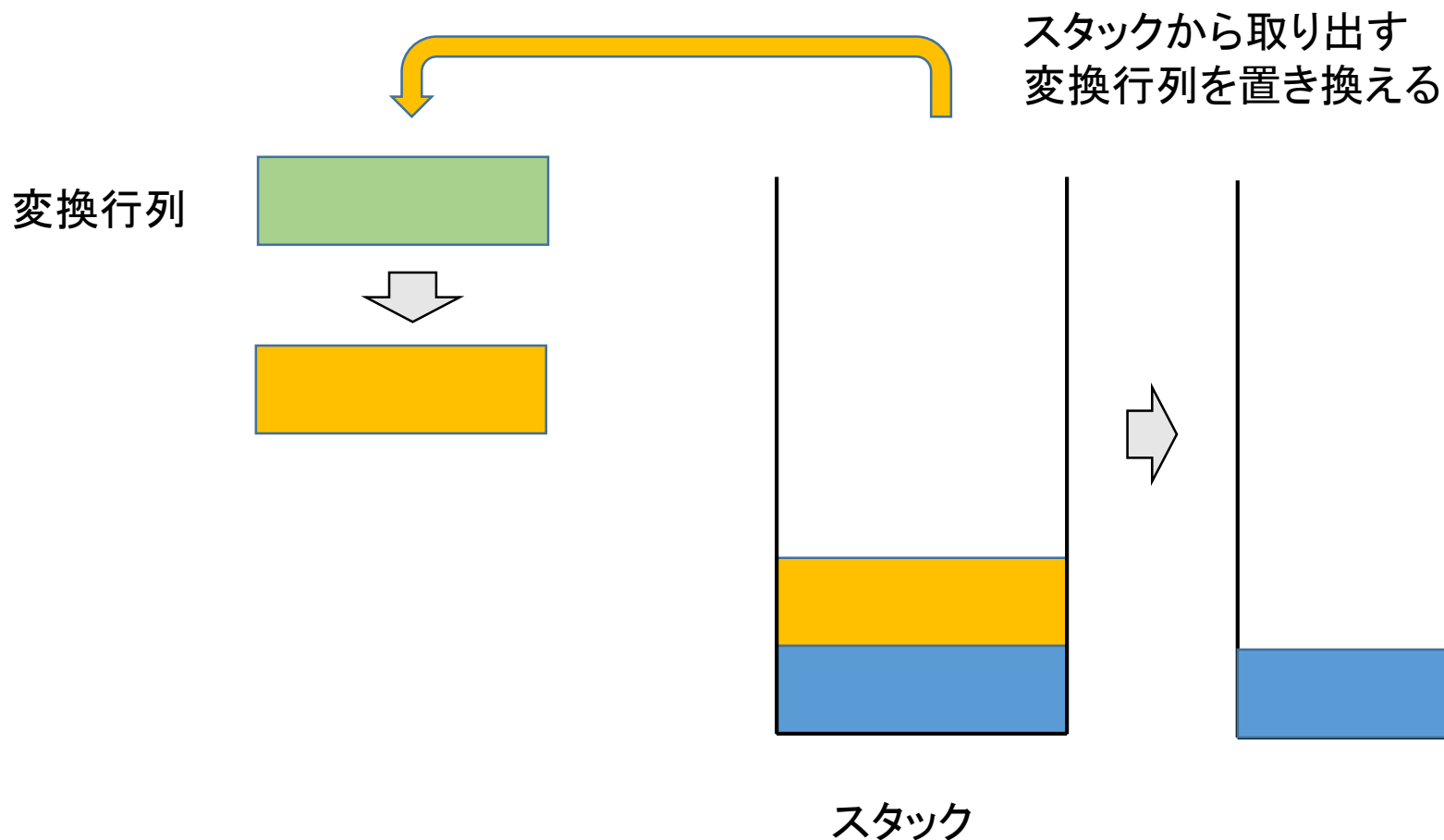
glPushMatrix の動作



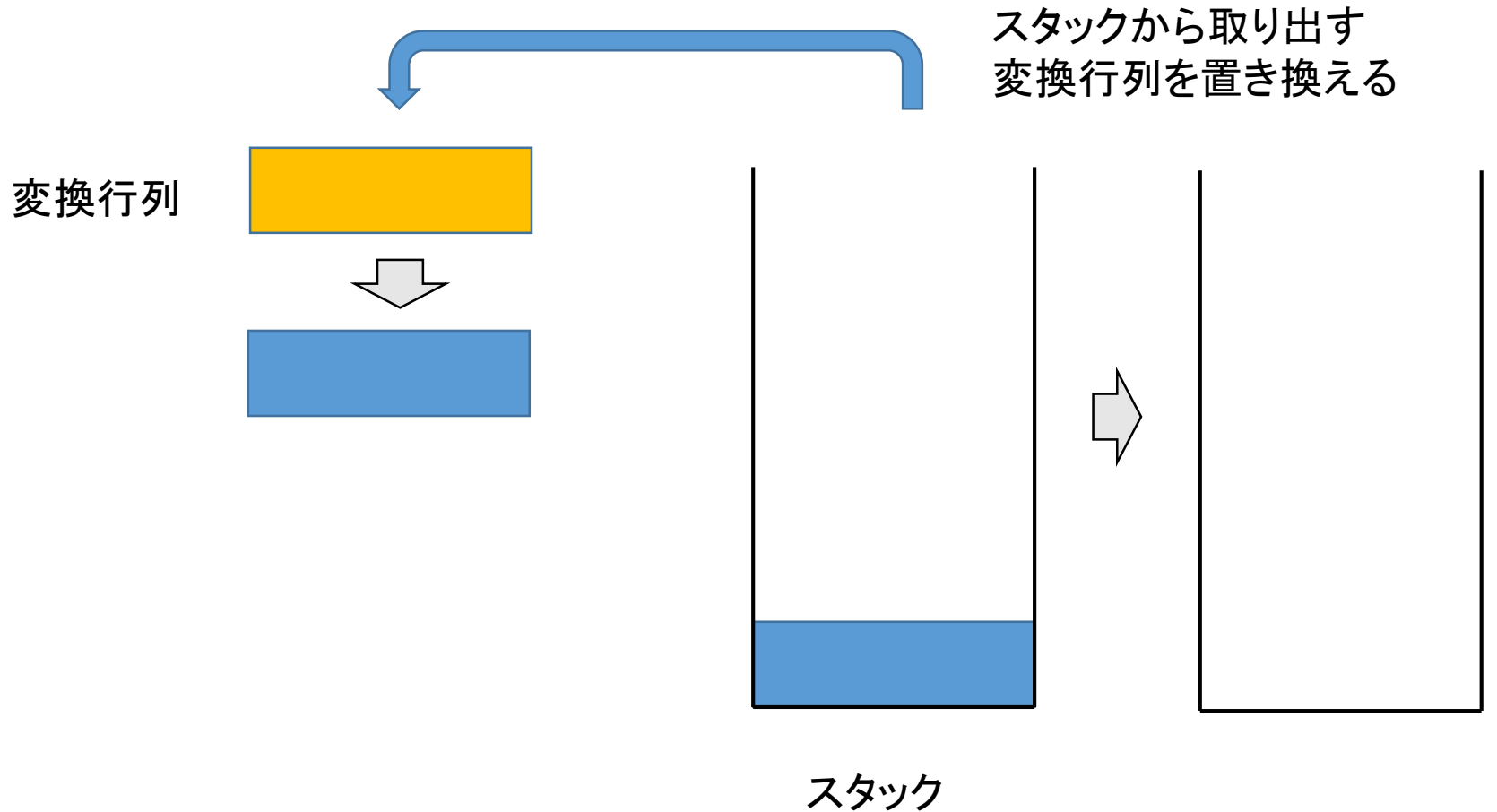
glPushMatrix の動作



glPopMatrix の動作



glPopMatrix の動作



変換行列の格納 glPushMatrixと 取り出し glPopMatrix

```
glLoadIdentity(); // I (単位行列)
glPushMatrix(); // スタックに[I]を格納
glTranslated(##,0); // T1
glPushMatrix(); // スタックに[T1]を格納
glTranslated(##,0); // T2
glRotated(##,0,0,1); // R1
glPushMatrix(); // スタックに[T1T2R1]を格納
glTranslated(##,0); // T3
glRotated(##,0,0,1); // R3
glPopMatrix(); // スタックから取出 T1T2R1
glTranslated(##,0); // T4
glPopMatrix(); // スタックから取出 T1
glTranslated(##,0); // T5
glRotated(##,0,0,1); // R4
glPopMatrix(); // スタックから取出 I
```

座標変換行列の状態

I

T1

T1T2

T1T2R1

T1T2R1T3

T1T2R1T3R3

T1T2R1T4

T1T5

T1T5R4



変換行列の階層化

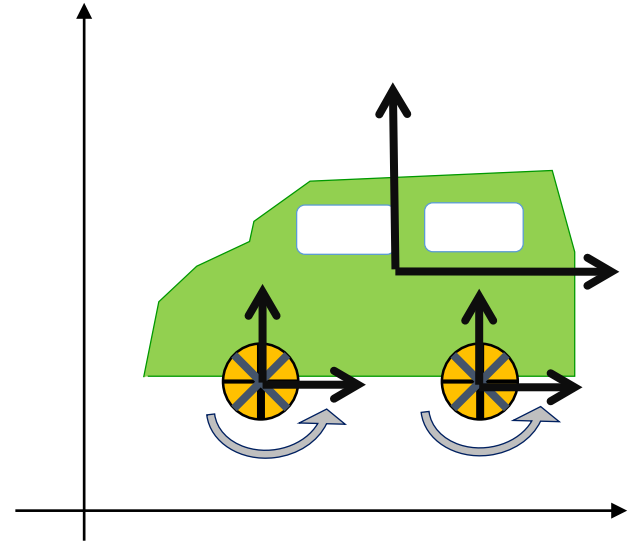
例:

車が移動している(平行移動)。

車には車輪が付いている。

車輪はそれぞれの軸を中心に回転している。

(平行移動と回転)



```
glLoadIdentity(); // I
glTranslated(##,##,0); // 車体の座標系の移動
/* 車体の描画 */
glPushMatrix(); // 現在の变换行列をスタックに格納
glTranslated(##,##,0); // 車体に対する前輪タイヤの座標系移動
glRotated(##,0,0,1); // 前輪タイヤ座標での回転
/* 前輪の描画 */
glPopMatrix(); // スタックから取出
glTranslated(##,##,0); // 車体に対する後輪タイヤの座標系移動
glRotated(##,0,0,1); // 後輪タイヤ座標での回転
/* 後輪の描画 */
```



変換行列の階層化

例: 遊園地のコーヒーカップ
台座が回転している(回転)
カップA~Dはそれぞれの軸を中心に回転している。
(平行移動と回転)



```
glLoadIdentity(); // I
glRotated(#,0,0,1); // 台座の座標系の回転
  台座の描画
glPushMatrix(); // 現在の变换行列をスタックに格納
glTranslated(##,0); // 台座に対するカップAの座標系移動
glRotated(#,0,0,1); // カップA座標での回転
  カップAの描画
glPopMatrix(); // スタックから取出
glPushMatrix(); // 現在の变换行列をスタックに格納
glTranslated(##,0); // 台座に対するカップBの座標系移動
glRotated(#,0,0,1); // カップB座標での回転
  カップBの描画
glPopMatrix(); // スタックから取出
glPushMatrix(); // 現在の变换行列をスタックに格納
glTranslated(##,0); // 台座に対するカップCの座標系移動
glRotated(#,0,0,1); // カップC座標での回転
  カップCの描画
glPopMatrix(); // スタックから取出
```



ディスプレイリスト

- 同じ形を複数描画するときには？

1. 特定の形を描画する関数を作成して、その関数を呼び出す。

2. ディスプレイリストを作成しておいて、それを用いる。

描画命令の集合に ID 番号を割り振る。
次回からは、この ID で描画を指示する。



ディスプレイリストの使用

ディスプレイリストの作成

```
glNewList( 1, GL_COMPILE);
```

好きな整数を割り当てる

例えば、「車輪」を描画する命令の記述

```
glEndList();
```

ディスプレイリストの呼び出し

```
glCallList( 1 );
```

このような記述で現在の座標変換行列を使って「車輪」が描かれる

例:

```
glPushMatrix();  
glTranslated( #, #, 0 );  
glCallList( 1 );  
glPopMatrix();  
glTranslated( #, #, 0 );  
glCallList( 1 );
```



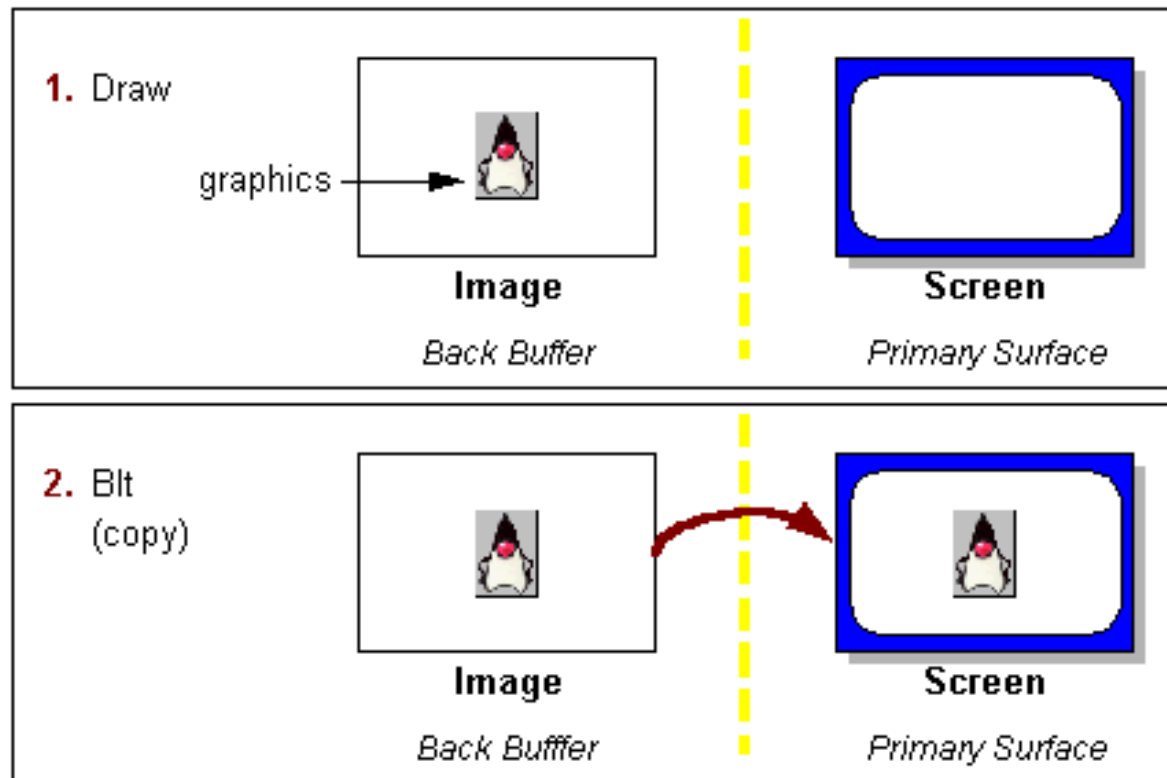
アニメーション表示のための OpenGL コマンド



ダブルバッファリング

- 二つのフレームバッファ(描画用メモリ)を使用する
- バックバッファに描画が終わったら、画面に結果を転送する

Double Buffering



OpenGL でのダブルバッファリング

```
glutInitDisplayMode(GLUT_RGBA | GLUT_DOUBLE);
```

main関数で行う初期設定

```
glutSwapBuffers();
```

バッファの転送。

display関数での描画処理が終わったあとに

「glFlush();」の代わりに記述する



一定時間ごとの処理実行

glutTimerFunc(ミリ秒, 呼び出す関数, 関数に渡す値);

```
// 100ミリ秒ごとに実行される  
void timer(int value) {  
    何か処理する  
    glutPostRedisplay(); // 再描画命令  
    glutTimerFunc(100, timer, 0); // 100ミリ秒後に自身を実行する  
}
```

```
int main(int argc, char ** argv) {  
    省略  
    glutTimerFunc(100, timer, 0);  
    glutMainLoop();  
    return 0;  
}
```



2次元



これだけで、自由な図形

アニメーションができる！！！！



課題概要（詳しくは別資料参照）

- サンプルコードをコンパイルして実行してみる
- コード中の数字を変えて、結果がどのように変化するか確認する
- 星が回転するアニメーション

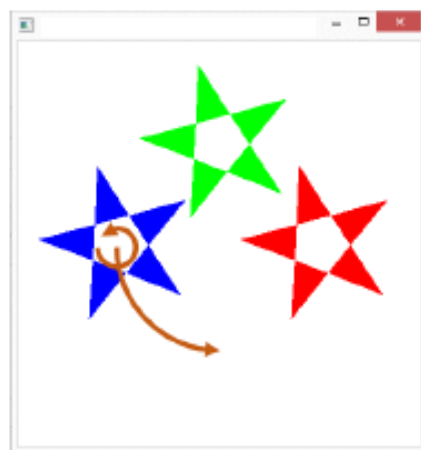


課題の目標

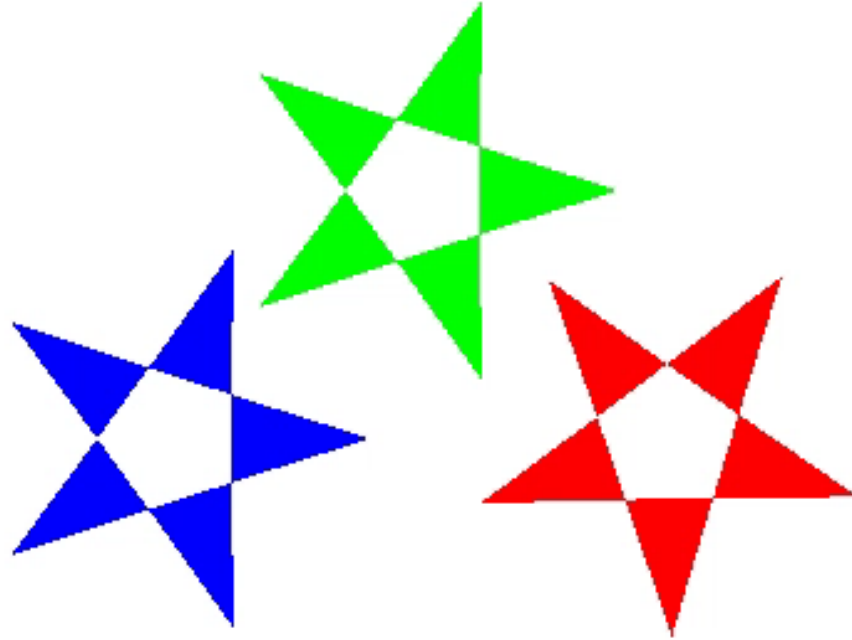
- ・ 2次元の座標変換行列の概念を理解する
- ・ ディスプレイリスト、座標変換行列のスタック、ダブルバッファリングなど、OpenGL の機能を使いこなす

課題の内容

1. 授業用 Web ページにある、それぞれのサンプルコードを実行し、プログラムコードと実行結果の様子を観察しなさい。プログラムの原理を理解するためには、コード内の数値を変更して結果を確認するとよい。
2. 03_star_rotation.cpp を実行すると、赤い星だけがその場で回転する。このプログラムコードを改変し、3つの星すべてが赤い星と同様にそれぞれが回転するようにし、さらに全ての星が原点(画面の中心)のまわりを回るようにしなさい(地球が自転しながら、太陽の周りを回っているイメージ)。



C:\Users\endo\source\repos\Project1\Re... — □ ×



3. 上記の課題 2 に加え、小さな黒い星が赤い星の周りをクルクル素早く回っている様子を描くように
しなさい（赤い星の図形で示された地球の周りを月が回っているイメージ）。

4. 次の条件を満たすような、2次元図形を画面に表示するプログラムを作成しなさい（できるだけ綺麗
な、または楽しい図形を描こう）。

- ディスプレイリストを用いる
- 一定時間ごとに描画を更新する
- `glPushMatrix`, `glPopMatrix` を用いる
- 複数の図形が画面上を移動または回転、または変形する

提出するレポートに含めるもの

• 上記の課題の 2, 3, 4 に相当するプログラムコードと、実行結果のウィンドウをキャプチャした図（動
いている様子が分かるように、複数のキャプチャ画像を含めること）。結果のアニメーションを `mp4` やア
ニメーション `gif` にすることができる場合は、動画ファイルも含めてください。



