コンピュータグラフィックス(R)

第2回：物体をシーンに配置する

コンピュータグラフィックス

- 到達目標
  - コンピュータグラフィックスの技術体系を理解
  - 背景的な数学的知識も習得する
- 事前に履修しておくことが望まれる科目
  - 数学3・4（ベクトルの内積と外積，行列と一次変換）
- 毎回出席をとる
- 教科書
  - コンピュータグラフィックス，CG-ARTS協会

ー成績評価方法ー

- 平常点評価　100%
  - テストを予定(詳細は後日アナウンス)
- 開催日時
  - 復習テスト(1): 50%
    - **第8回講義**
  - 復習テスト(2): 50%
    - **第15回講義**
  - **両日とも, 再試験の予定はありません.**
- 毎回, 出席をとります. (成績評価に反映させることもありうる.)

講義資料

- 毎回の授業の直前までに，講義スライドのPDF版をmanaba+Rにアップロードします．

出席

https://ctat.ritsumei.ac.jp

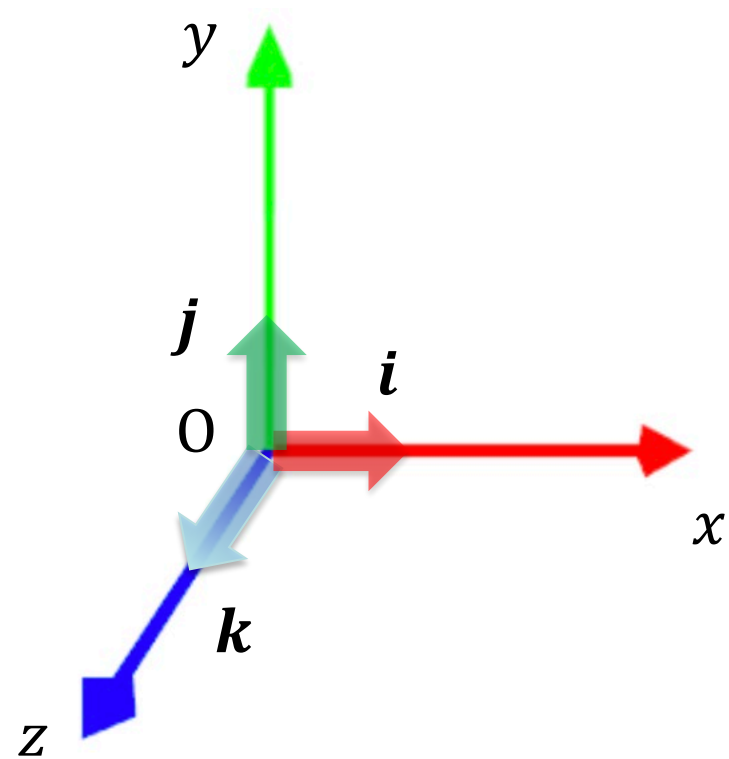
受付番号は授業中にアナウンスします.

シーンとは

問:「座標系」を一つ定義するために必要な情報は何だろうか？

答

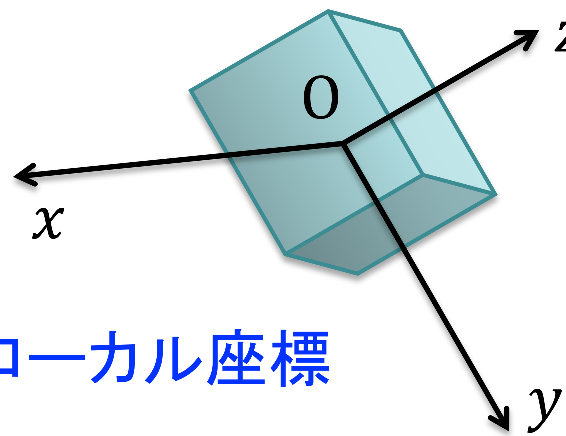
- 原点 O の位置
- 3つの座標軸 x, y, z の方向
  基本ベクトル(基底ベクトル) $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ を与える
  $(|\boldsymbol{i}| = |\boldsymbol{j}| = |\boldsymbol{k}| = 1)$



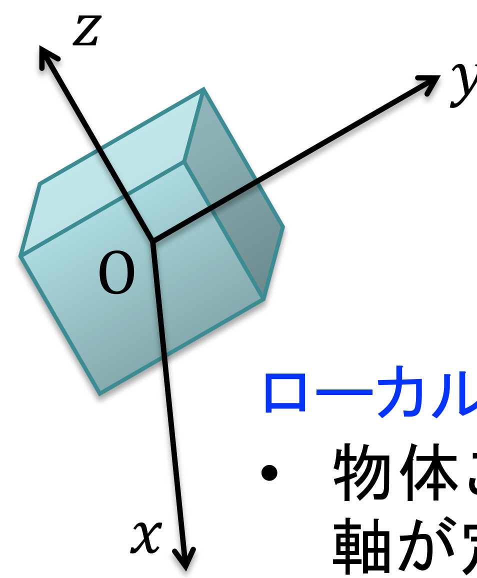
シーンとは

- 「シーン」とはCGで描かれる形状群を配置した空間のことである.
- 演劇の「シーン」が，役者，大道具，小道具などが配置された舞台上の空間であるのと同様である.
- シーンに置かれる形状群は、フラットに置かれるのではなく、階層構造を持つこともある
- シーンに形状を配置する
＝形状を記述する「ローカル座標」を「ワールド座標」に変換する

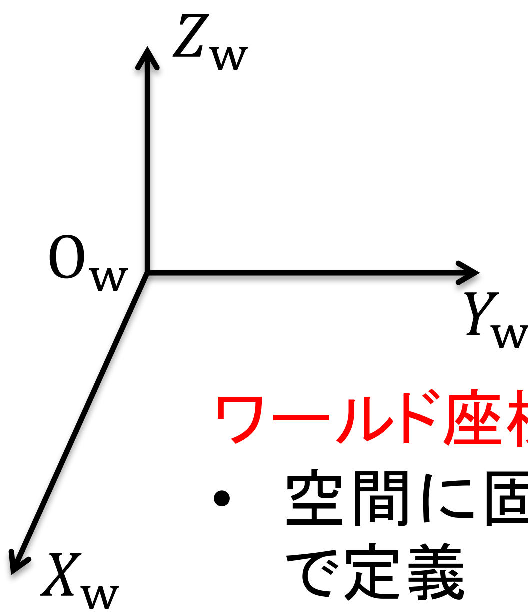
シーンとは



ローカル座標

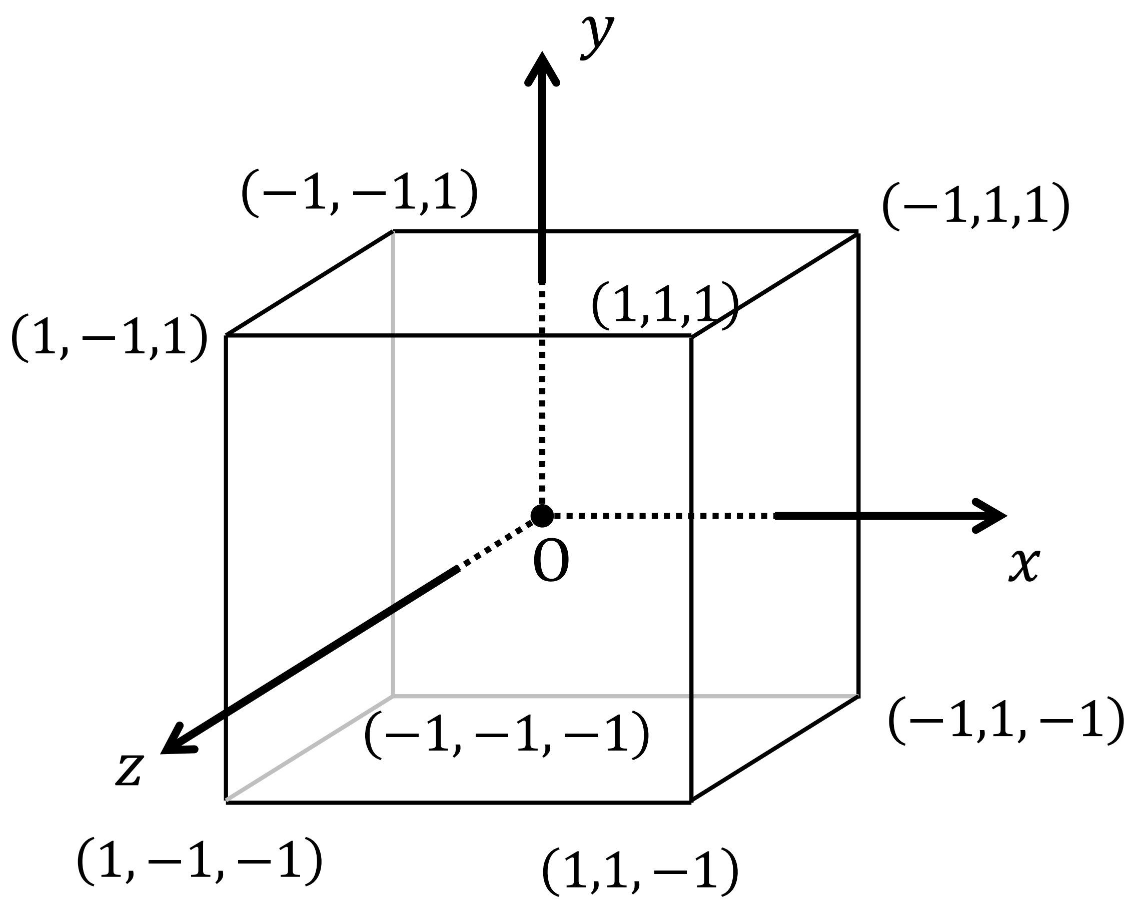


ローカル座標
- 物体ごとに座標軸が定義される
- シーン内に物体の数だけ存在



ワールド座標
- 空間に固定された原点と座標軸で定義
- シーン内に1つだけ

ローカル座標による形状定義



物体に定義されたローカル座標による立方体の定義

ワールド座標とローカル座標（まとめ）

- 空間（シーン）の中に固定的に設置された座標系を「ワールド座標」という.
  - 通常は一つのシーンに一つだけ
  - 図形の描画は，最終的にこの座標系で行われる
- シーン内に配置される個々の形状に貼り付けられた座標系を「ローカル座標」(オブジェクト座標，局所座標)という
  - 配置される形状ごとに一つずつ存在する.

シーン内への形状の「配置」

- シーン内に配置される個々の形状は，「形状情報」と「配置情報」を持つ
  - (1) まず，記述に便利なローカル座標で定義される（形状情報の設定）
  - (2) 次に，シーン内に適当な「位置」と「向き」で配置される（配置情報の決定）
- 配置とは，数学的には，ローカル座標 ⇒ ワールド座標という座標変換のことである

ローカル座標 ⇒ ワールド座標

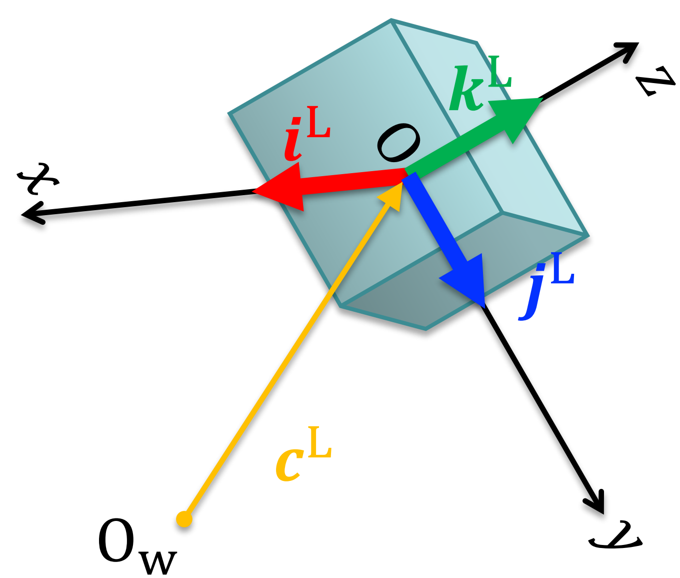
- 点 P がローカル座標の成分表示で $\left(x^{\mathrm{L}}, y^{\mathrm{L}}, z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{local}}$ と表されているとする.
  ⇒ 点 P のワールド座標での成分を求めたい.
  - 最終的な描画はワールド座標でなされる
- ローカル座標の「基本ベクトル」と「原点」が，ワールド座標の成分表示で以下であるとする:

$$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \left(i_x^{\mathrm{L}}, i_y^{\mathrm{L}}, i_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}}$$

$$\boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \left(j_x^{\mathrm{L}}, j_y^{\mathrm{L}}, j_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}}$$

$$\boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \left(k_x^{\mathrm{L}}, k_y^{\mathrm{L}}, k_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}}$$

$$\boldsymbol{c}^{\mathrm{L}} = \left(c_x^{\mathrm{L}}, c_y^{\mathrm{L}}, c_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}}$$



ローカル座標 ⇒ ワールド座標

- 点 P の位置ベクトル $\boldsymbol{r}$ は，ローカル座標の基本ベクトルと原点の位置ベクトルを用いて，以下のように表現できる：

$$\boldsymbol{r} = x^{\mathrm{L}}\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} + y^{\mathrm{L}}\boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} + z^{\mathrm{L}}\boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} + \boldsymbol{c}^{\mathrm{L}} \qquad (*)$$

※ 成分でなくベクトルで表現されているので，特定の座標系には依存しない表現

- $\boldsymbol{r}$ のワールド座標成分を求めて「配置」したい

$$\boldsymbol{r} = \left(x^{\mathrm{W}}, y^{\mathrm{W}}, z^{\mathrm{W}}\right)_{\underline{\mathrm{world}}}$$

以下では省略

- 式 (*) において，$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}}, \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}}, \boldsymbol{k}^{\mathrm{L}}, \boldsymbol{c}^{\mathrm{L}}$ をワールド座標で成分表示すればよい．

ローカル座標 ⇒ ワールド座標

$$\boldsymbol{r} = x^{\mathrm{L}}\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} + y^{\mathrm{L}}\boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} + z^{\mathrm{L}}\boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} + \boldsymbol{c}^{\mathrm{L}} \qquad (*)$$

$$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \left(i_x^{\mathrm{L}}, i_y^{\mathrm{L}}, i_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}} \qquad \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \left(j_x^{\mathrm{L}}, j_y^{\mathrm{L}}, j_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}}$$

$$\boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \left(k_x^{\mathrm{L}}, k_y^{\mathrm{L}}, k_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}} \qquad \boldsymbol{c}^{\mathrm{L}} = \left(c_x^{\mathrm{L}}, c_y^{\mathrm{L}}, c_z^{\mathrm{L}}\right)_{\mathrm{world}}$$

$$\begin{bmatrix} x^{\mathrm{W}} \\ y^{\mathrm{W}} \\ z^{\mathrm{W}} \end{bmatrix} = x^{\mathrm{L}} \begin{bmatrix} i_x^{\mathrm{L}} \\ i_y^{\mathrm{L}} \\ i_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix} + y^{\mathrm{L}} \begin{bmatrix} j_x^{\mathrm{L}} \\ j_y^{\mathrm{L}} \\ j_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix} + z^{\mathrm{L}} \begin{bmatrix} k_x^{\mathrm{L}} \\ k_y^{\mathrm{L}} \\ k_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x^{\mathrm{L}} \\ c_y^{\mathrm{L}} \\ c_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} x^{\mathrm{W}} \\ y^{\mathrm{W}} \\ z^{\mathrm{W}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x^{\mathrm{L}} & j_x^{\mathrm{L}} & k_x^{\mathrm{L}} \\ i_y^{\mathrm{L}} & j_y^{\mathrm{L}} & k_y^{\mathrm{L}} \\ i_z^{\mathrm{L}} & j_z^{\mathrm{L}} & k_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{\mathrm{L}} \\ y^{\mathrm{L}} \\ z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x^{\mathrm{L}} \\ c_y^{\mathrm{L}} \\ c_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix}$$

ローカル座標からワールド座標への変換は，基本ベクトルを並べた3×3行列と原点の位置ベクトルを用いて行える．

ローカル座標 ⇒ ワールド座標

- 同次座標
  - ベクトル：第４成分に1を加えて4次元化

    $(x, y, z) \quad \Rightarrow \quad (x, y, z, 1)$

  - 行列：座標変換には第4行が $(0,0,0,1)$ の ４×４ 行列を用いる.

    $$\begin{bmatrix} a & d & g & j \\ b & e & h & k \\ c & f & i & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

  - ４×4行列と4次元ベクトルで座標変換を計算し，最後に3次元に戻す.
  - 回転や平行移動を行列とベクトルの積で表現できる.

ローカル座標 ⇒ ワールド座標

$$\boldsymbol{r} = x^{\mathrm{L}}\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} + y^{\mathrm{L}}\boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} + z^{\mathrm{L}}\boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} + \boldsymbol{c}^{\mathrm{L}} \qquad (*)$$

$$\begin{bmatrix} x^{\mathrm{W}} \\ y^{\mathrm{W}} \\ z^{\mathrm{W}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x^{\mathrm{L}} & j_x^{\mathrm{L}} & k_x^{\mathrm{L}} \\ i_y^{\mathrm{L}} & j_y^{\mathrm{L}} & k_y^{\mathrm{L}} \\ i_z^{\mathrm{L}} & j_z^{\mathrm{L}} & k_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{\mathrm{L}} \\ y^{\mathrm{L}} \\ z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x^{\mathrm{L}} \\ c_y^{\mathrm{L}} \\ c_z^{\mathrm{L}} \end{bmatrix}$$

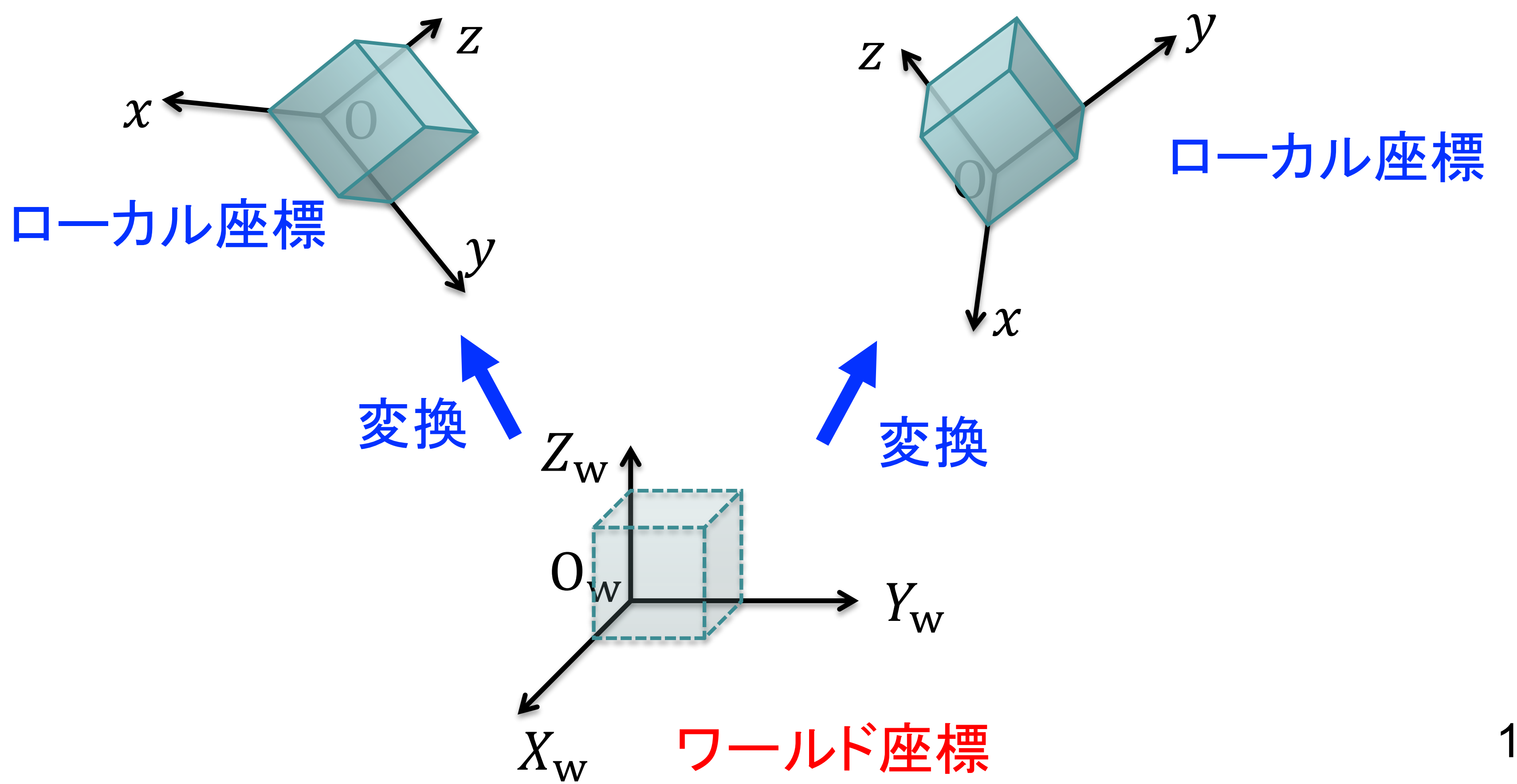
$$\Downarrow$$

$$\begin{bmatrix} x^{\mathrm{W}} \\ y^{\mathrm{W}} \\ z^{\mathrm{W}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x^{\mathrm{L}} & j_x^{\mathrm{L}} & k_x^{\mathrm{L}} & c_x^{\mathrm{L}} \\ i_y^{\mathrm{L}} & j_y^{\mathrm{L}} & k_y^{\mathrm{L}} & c_y^{\mathrm{L}} \\ i_z^{\mathrm{L}} & j_z^{\mathrm{L}} & k_z^{\mathrm{L}} & c_z^{\mathrm{L}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{\mathrm{L}} \\ y^{\mathrm{L}} \\ z^{\mathrm{L}} \\ 1 \end{bmatrix}$$

ローカル座標からワールド座標への変換は，基本ベクトルと原点の位置ベクトルを並べた4×4行列で表される**アフィン変換 (affine transform)** となる．

ローカル座標 ⇒ ワールド座標（まとめ）

- 形状をワールド座標に配置するには？
  1. 全ての頂点に対してアフィン変換を実行
  2. 得られた頂点を変換前と同様に接続



ローカル座標 ⇒ ワールド座標（直観的理解）

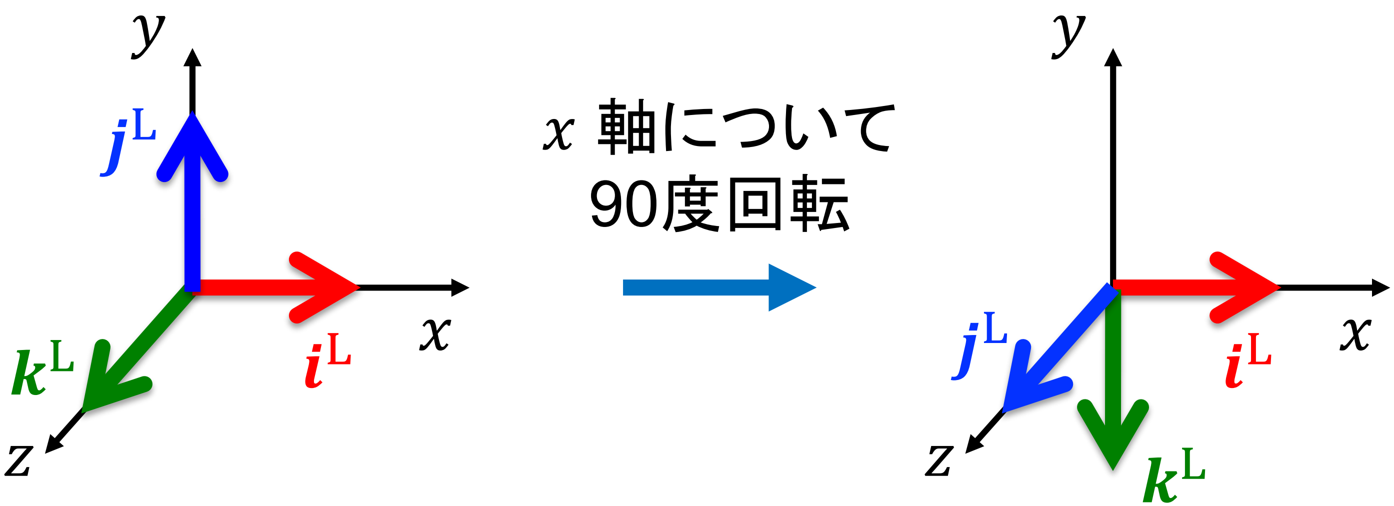
- シーン構築の直感的イメージ
  1. はじめは，ローカル座標とワールド座標が一致
     - 座標軸が重なっているというイメージ
     - この状態で形状を作る（設計する）
  2. 平行移動，回転などのアフィン変換によって，ローカル座標の座標軸が，ユーザの望む場所と向きで配置される
     - 座標軸と一緒に形状も配置される

考えてみよう(1): 回転

問: ローカル座標で定義された形状を, x 軸のまわりに90度回転して配置する変換行列を同時座標系を用いて表そう.

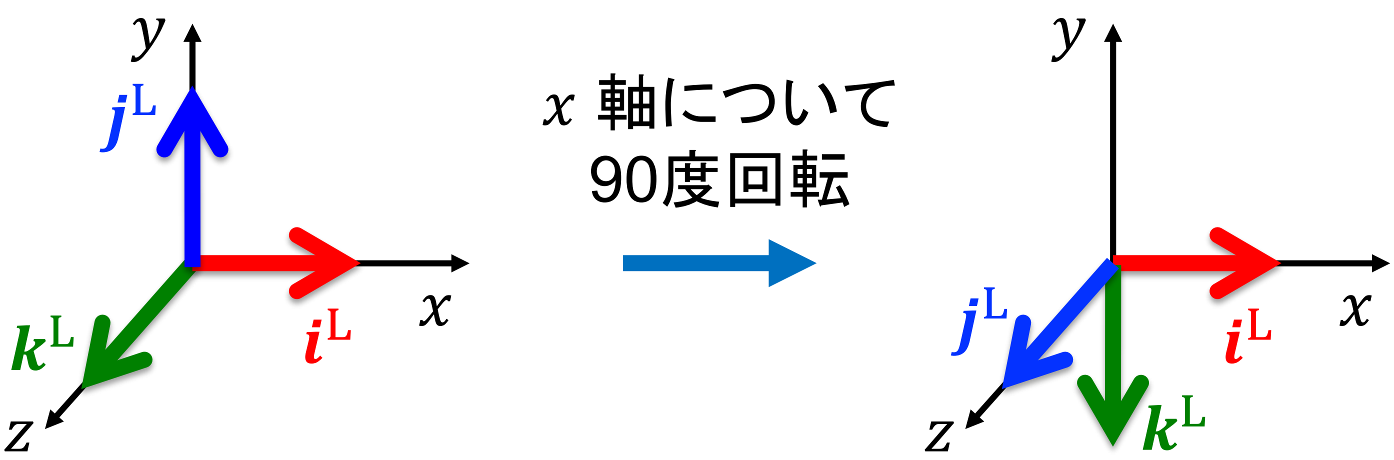
「考えてみよう(1)：回転」の答え

- ローカル座標を定義する3つの基本ベクトルが，回転によってどのように変換されるかを考える.



回転前　　　　　　　　回転後

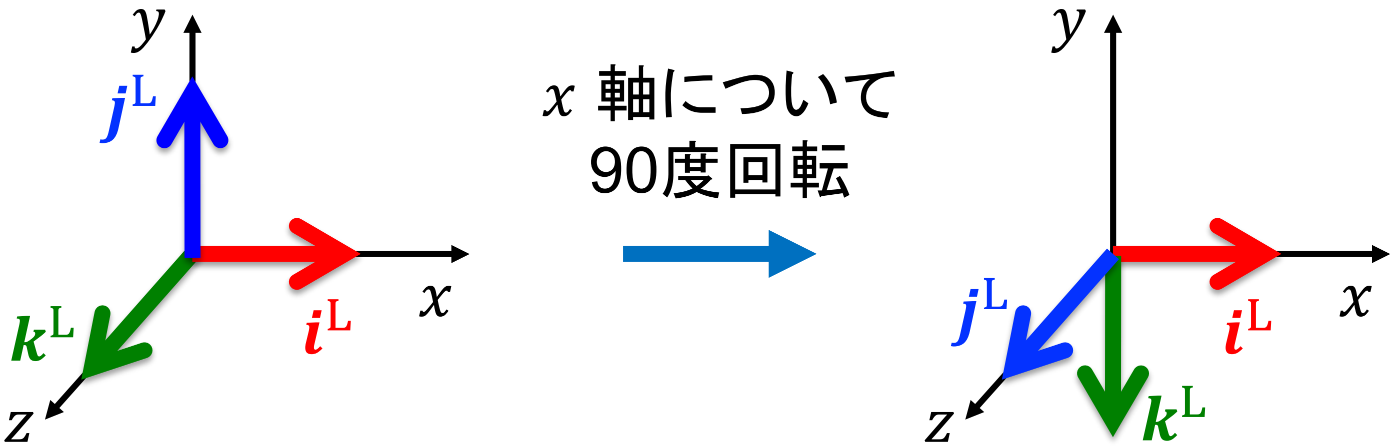
「考えてみよう(1)：回転」の答え



$$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} i_x^{\mathrm{L}} & j_x^{\mathrm{L}} & k_x^{\mathrm{L}} & c_x^{\mathrm{L}} \\ i_y^{\mathrm{L}} & j_y^{\mathrm{L}} & k_y^{\mathrm{L}} & c_y^{\mathrm{L}} \\ i_z^{\mathrm{L}} & j_z^{\mathrm{L}} & k_z^{\mathrm{L}} & c_z^{\mathrm{L}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

「考えてみよう(1)：回転」の答え



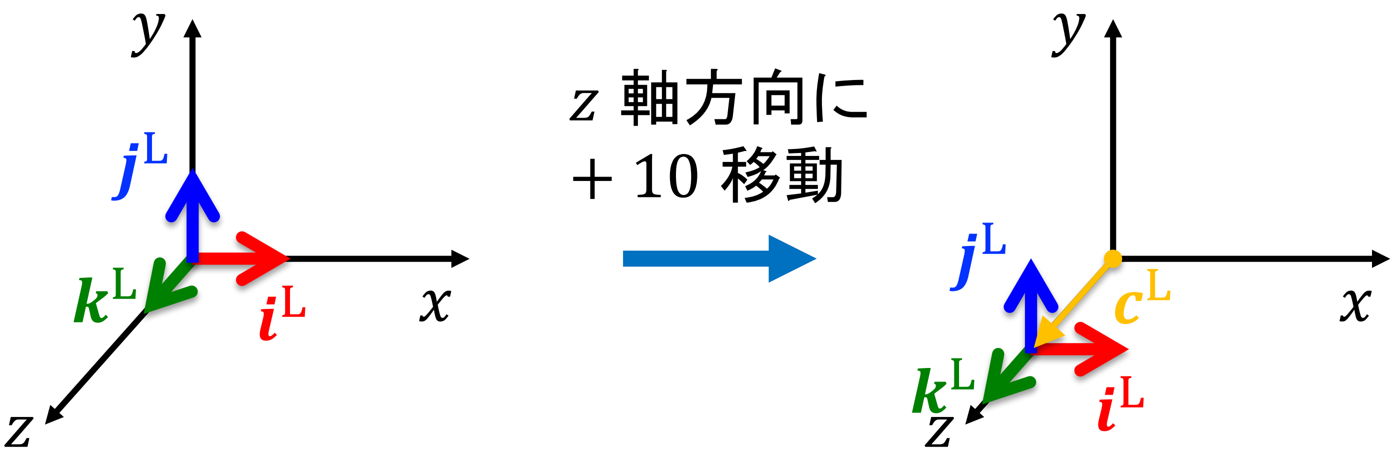
座標変換の例

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

考えてみよう(2): 平行移動

問: ローカル座標で定義された点 (x, y, z) を z 軸の方向に $+10$ だけ平行移動して配置した場合のワールド座標は $(x, y, z+10)$ である. この変換を同時座標系を用いて表そう.

「考えてみよう(2): 平行移動」の答え



$$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{c}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{c}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix}$$

「考えてみよう(2): 平行移動」の答え

$$\therefore \begin{bmatrix} i_x^{\mathrm{L}} & j_x^{\mathrm{L}} & k_x^{\mathrm{L}} & c_x^{\mathrm{L}} \\ i_y^{\mathrm{L}} & j_y^{\mathrm{L}} & k_y^{\mathrm{L}} & c_y^{\mathrm{L}} \\ i_z^{\mathrm{L}} & j_z^{\mathrm{L}} & k_z^{\mathrm{L}} & c_z^{\mathrm{L}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

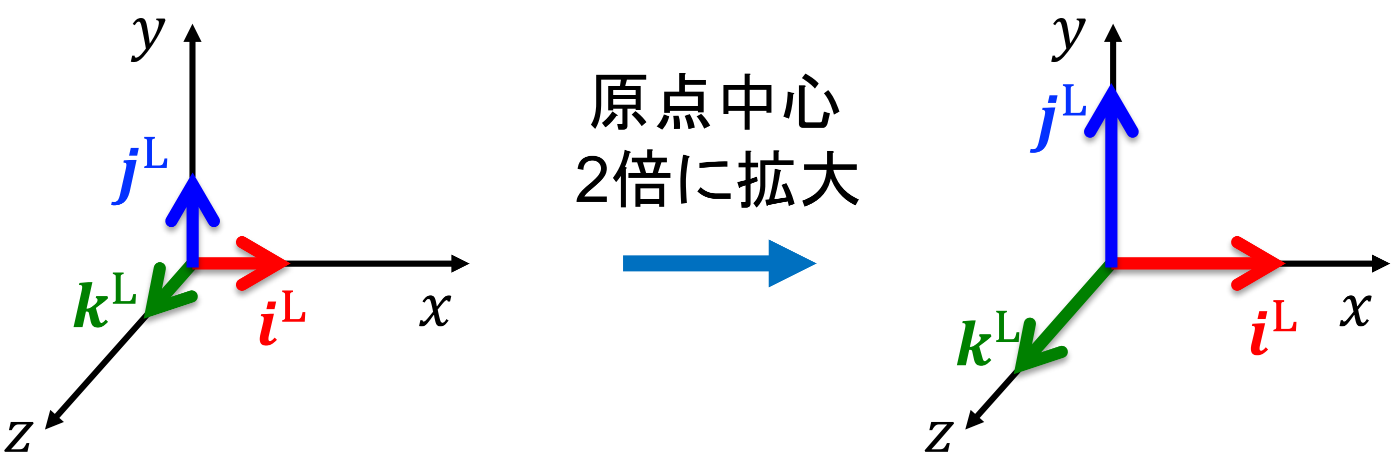
座標変換の例

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 13 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c + 10 \\ 1 \end{bmatrix}$$

考えてみよう(3): スケール変換

問: ローカル座標で定義された形状を, 原点を中心に2倍に拡大して配置する. この変換行列を同次座標系で表せ.

「考えてみよう(3): スケール変換」の答え

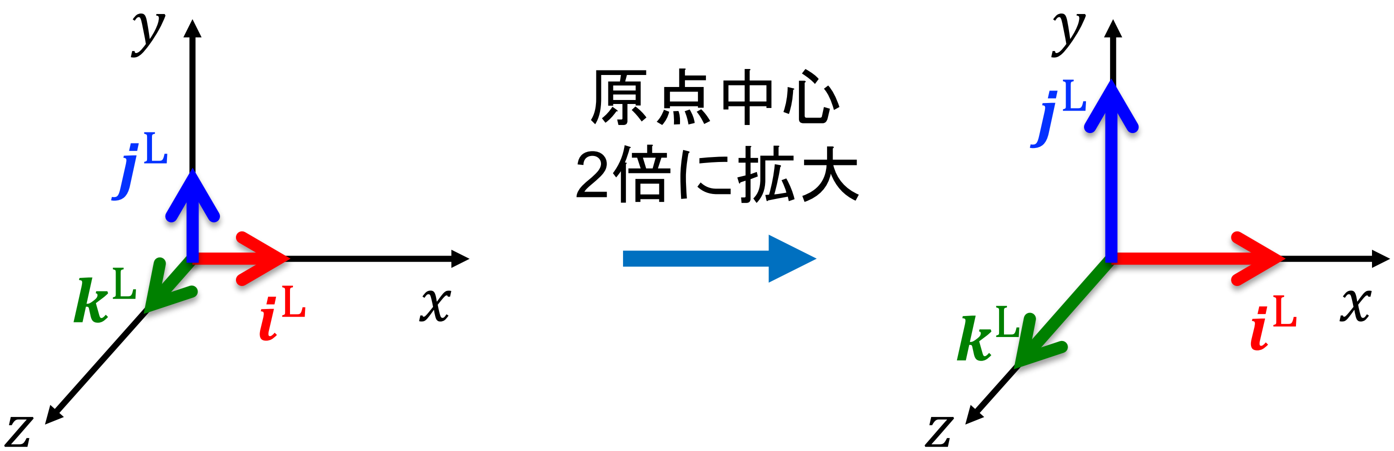


$$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix}0\\1\\0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{i}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix}2\\0\\0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{j}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix}0\\2\\0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{k}^{\mathrm{L}} = \begin{bmatrix}0\\0\\2\end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} i_x^{\mathrm{L}} & j_x^{\mathrm{L}} & k_x^{\mathrm{L}} & c_x^{\mathrm{L}} \\ i_y^{\mathrm{L}} & j_y^{\mathrm{L}} & k_y^{\mathrm{L}} & c_y^{\mathrm{L}} \\ i_z^{\mathrm{L}} & j_z^{\mathrm{L}} & k_z^{\mathrm{L}} & c_z^{\mathrm{L}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

「考えてみよう(3): スケール変換」の答え

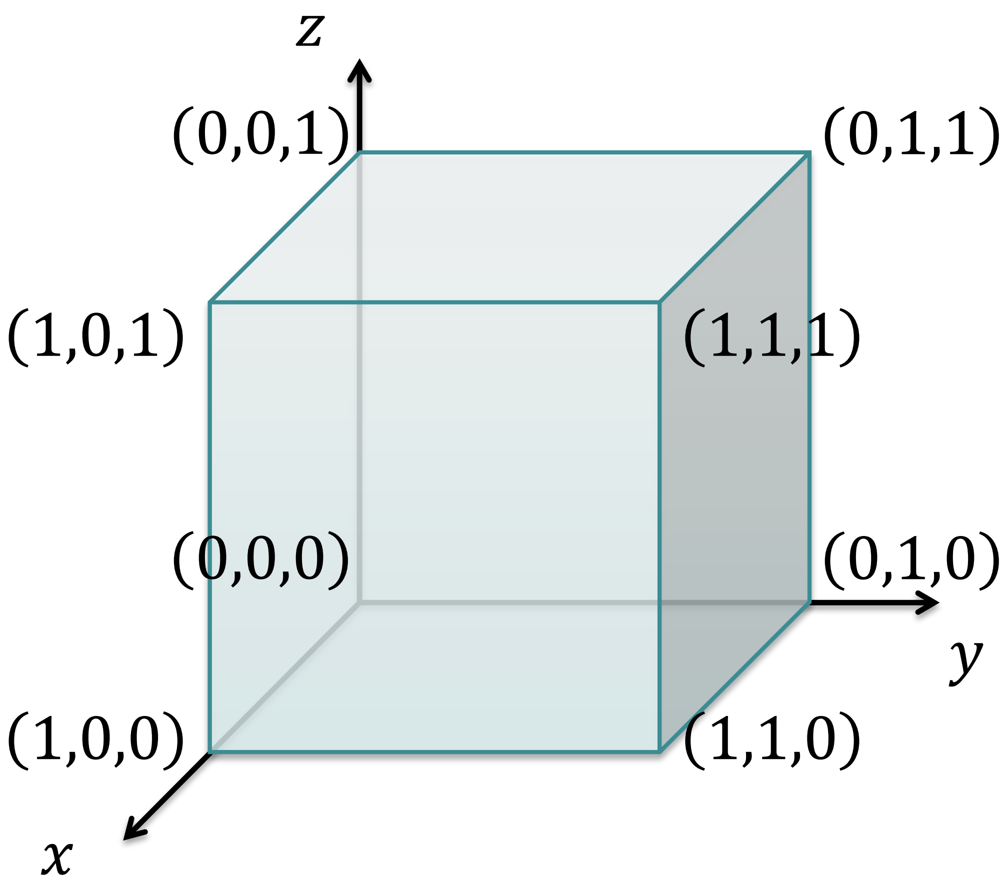


座標変換の例

$$\begin{bmatrix}2&0&0&0\\0&2&0&0\\0&0&2&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\0\\0\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\1\end{bmatrix},\quad\begin{bmatrix}2&0&0&0\\0&2&0&0\\0&0&2&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\1\\0\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2\\2\\0\\1\end{bmatrix}$$

考えてみよう(4): 合成変換1

問: ローカル座標で定義された以下の立方体を,
(1) 原点を中心に2倍の大きさに拡大したあと,
(2) z 軸方向に $+10$ 平行移動せよ.



「考えてみよう(4): 合成変換1」の答え

(1) 原点を中心に2倍の大きさに拡大 (2) z 軸方向に $+10$ 平行移動

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

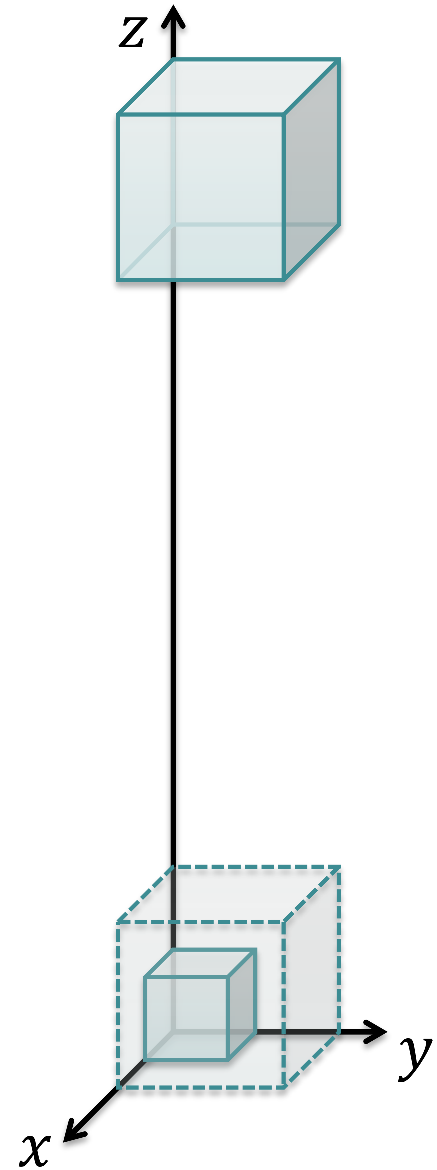
$$\therefore \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

「考えてみよう(4): 合成変換1」の答え

座標変換の例

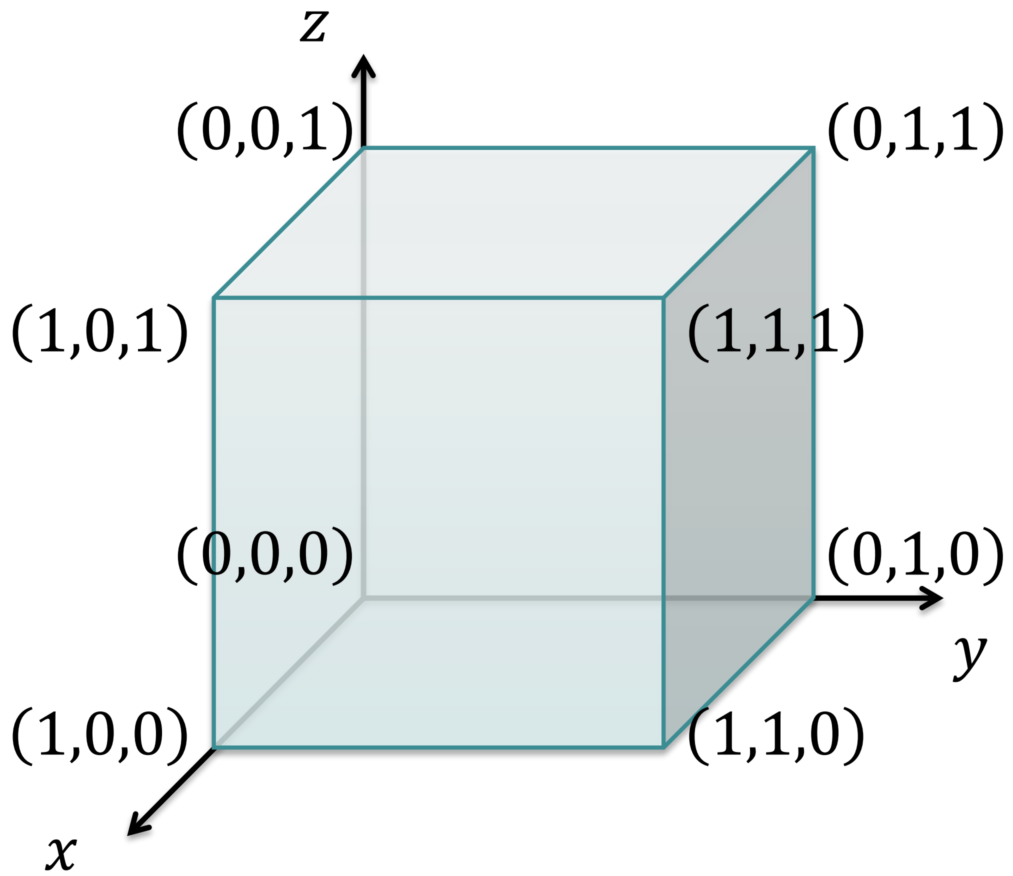
$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 12 \\ 1 \end{bmatrix}$$



考えてみよう(5): 合成変換2

問: ローカル座標で定義された以下の立方体を,
(1) z 軸方向に $+10$ 平行移動したあと,
(2) 原点を中心に2倍の大きさに拡大せよ.



「考えてみよう(5): 合成変換2」の答え

(1) z 軸方向に $+10$ 平行移動

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 原点を中心に2倍の大きさに拡大

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

「考えてみよう(5): 合成変換2」の答え

座標変換の例

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 20 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 22 \\ 1 \end{bmatrix}$$