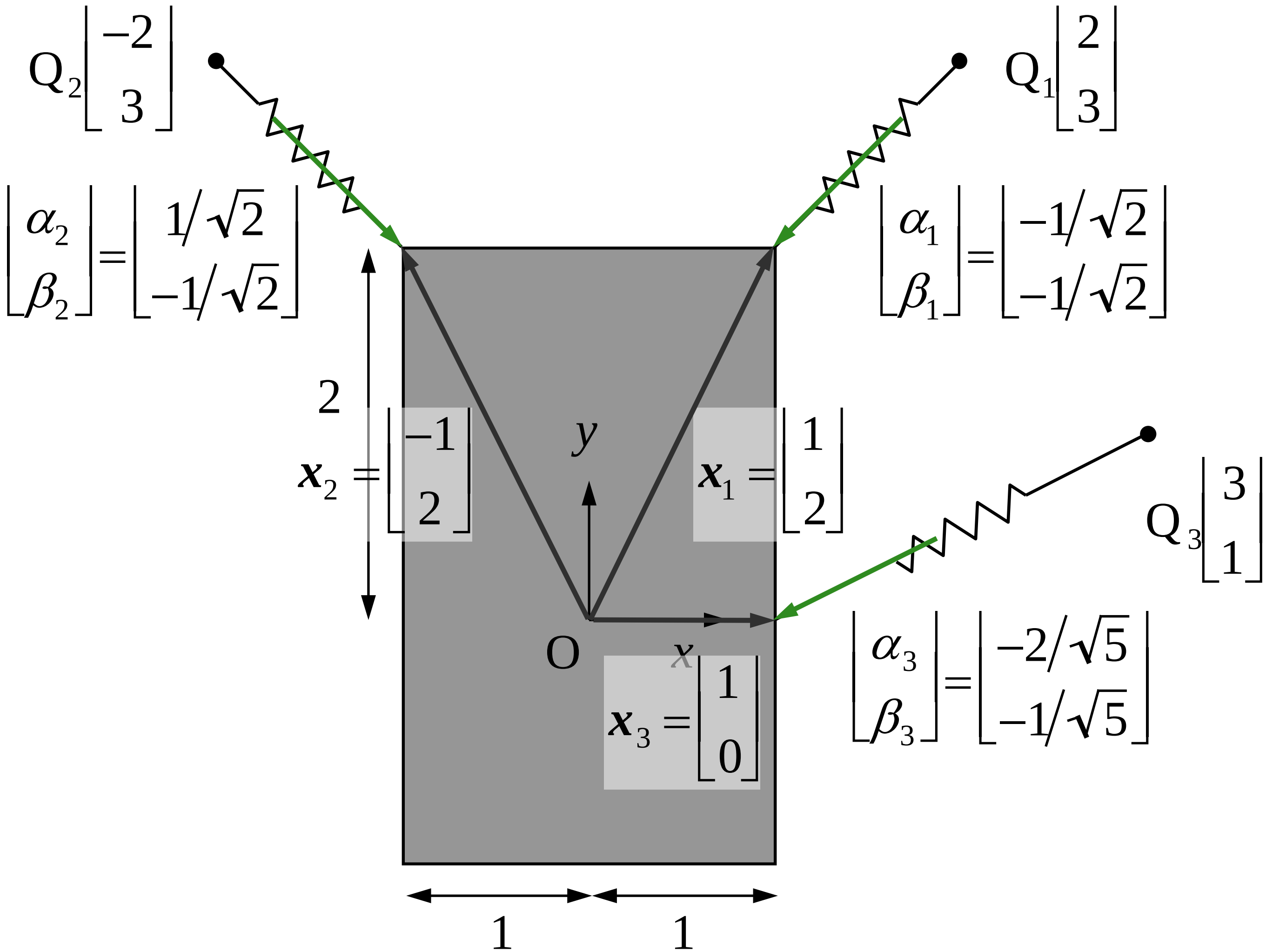
ハンドリング工学特論

大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻
システムインテグレーション講座
生産システムインテグレーション領域
若松　栄史

三本のバネで支えられている剛体の例



二次元空間運動における剛性行列①

剛性行列 : $K = \left[\begin{array}{cc|c} 9 & 2 & -3 \\ 2 & 6 & 1 \\ \hline -3 & 1 & 6 \end{array}\right]$ $\quad K = \left[\begin{array}{c|c} K_{00} & \boldsymbol{k}_{01} \\ \hline \boldsymbol{k}_{01}^T & k_{11} \end{array}\right]$

$K_{00} = \begin{bmatrix} 9 & 2 \\ 2 & 6 \end{bmatrix}$ →2次の正方行列

→正定対称行列、逆行列を持つ

$\boldsymbol{k}_{01} = \begin{bmatrix} -3 \\ 1 \end{bmatrix}$ →2次の列ベクトル

$k_{11} = 6$ →スカラー

※正定対称行列:固有値が全て正の実数となる対称行列

二次元空間運動における剛性行列②

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & 2 & -3 \\ 2 & 6 & 1 \\ -3 & 1 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} f_x = 9\Delta x + 2\Delta y - 3\Delta\theta \\ f_y = 2\Delta x + 6\Delta y + \Delta\theta \\ m = -3\Delta x + \Delta y + 6\Delta\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_x = 9\Delta x + 2\Delta y - 3\Delta\theta \\ f_y = 2\Delta x + 6\Delta y + \Delta\theta \end{cases} \qquad m = -3\Delta x + \Delta y + 6\Delta\theta$$

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & 2 \\ 2 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -3 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta\theta \qquad m = \begin{bmatrix} -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + 6\Delta\theta$$

$$\therefore \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01}\Delta\theta \qquad \therefore m = \boldsymbol{k}_{01}^T \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + k_{11}\Delta\theta$$

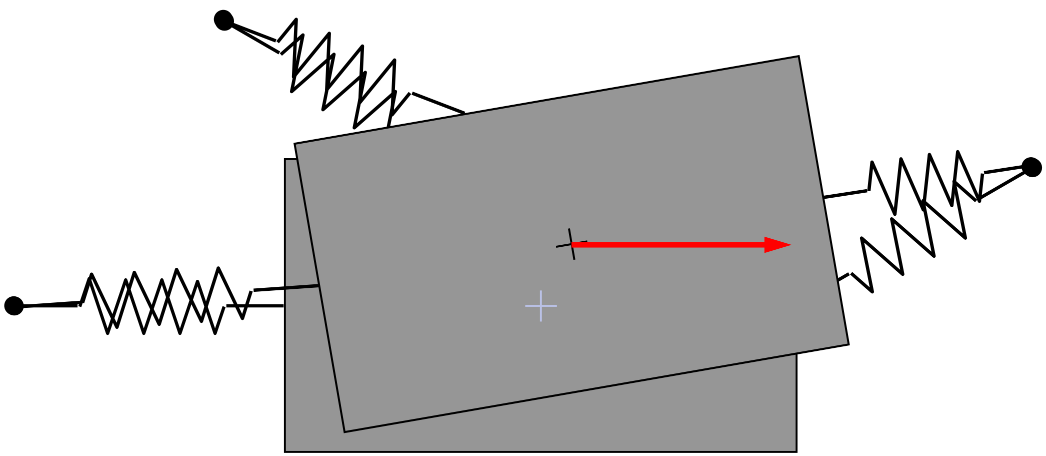
二次元空間運動における剛性行列③

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01} \Delta\theta$$

→外力を加えると微小並進変位と微小回転変位を生じる

$$m = \boldsymbol{k}_{01}^{T} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + k_{11} \Delta\theta$$

→モーメントを加えると微小並進変位と微小回転変位を生じる



三次元空間運動における剛性行列

$$K = \left[\begin{array}{c|c} K_{00} & K_{01} \\ \hline K_{01}^T & K_{11} \end{array}\right]$$

K_{00}, K_{01}, K_{11} ：3次の正方行列

K_{00}, K_{11} ：正定対称行列、逆行列を持つ

$$\boldsymbol{f} = K_{00}\Delta\boldsymbol{x} + K_{01}\Delta\boldsymbol{\theta} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = K_{00}\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + K_{01}\begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{m} = K_{01}^T\Delta\boldsymbol{x} + K_{11}\Delta\boldsymbol{\theta} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = K_{01}^T\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + K_{11}\begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix}$$

コンプライアンスセンターとは

物体に作用する力／モーメントと微小並進変位／微小回転変位との関係
→剛性行列（コンプライアンス行列）を用いて記述できる

- 力を加える→並進変位のみだけでなく回転変位も生じる
- モーメントを加える→回転変位のみだけでなく並進変位も生じる

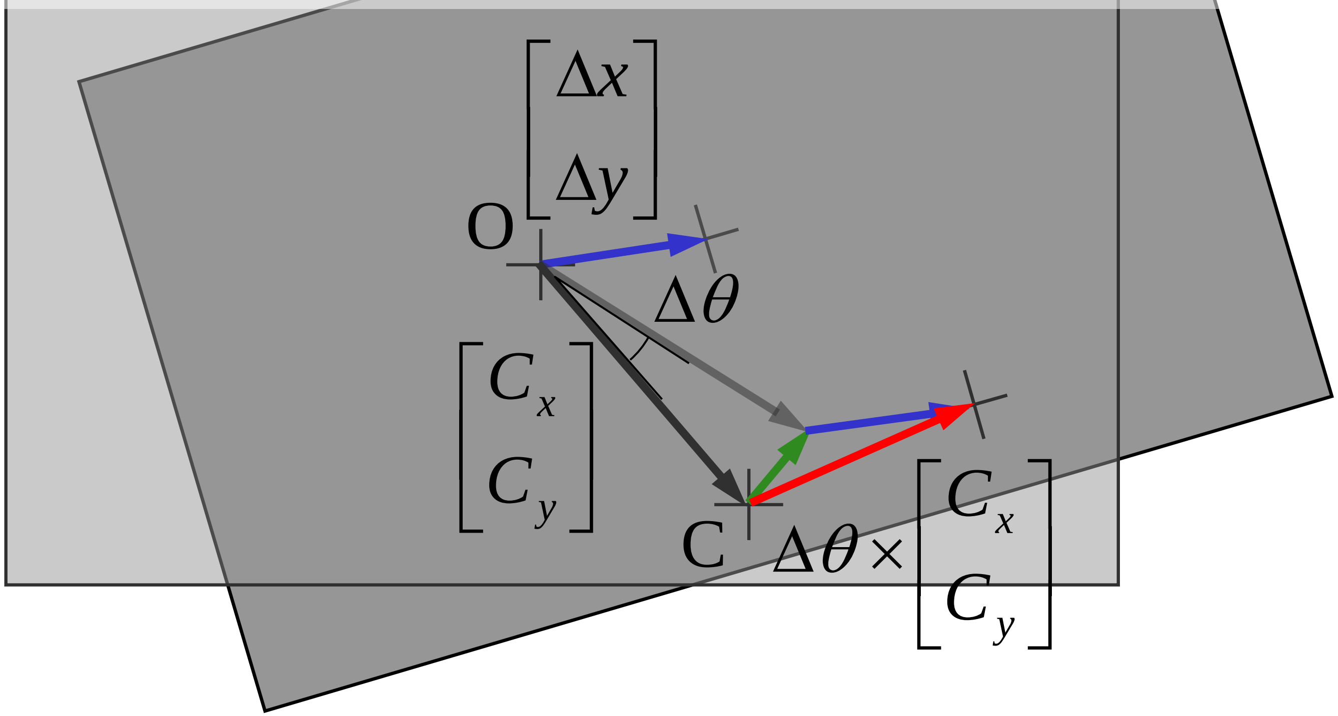
並進運動と回転運動が互いに干渉している

並進運動と回転運動を分離できる点がないか？
→コンプライアンスセンター

新参照点Cでの変位

新参照点Cでの変位$\Delta x', \Delta y', \Delta\theta'$：

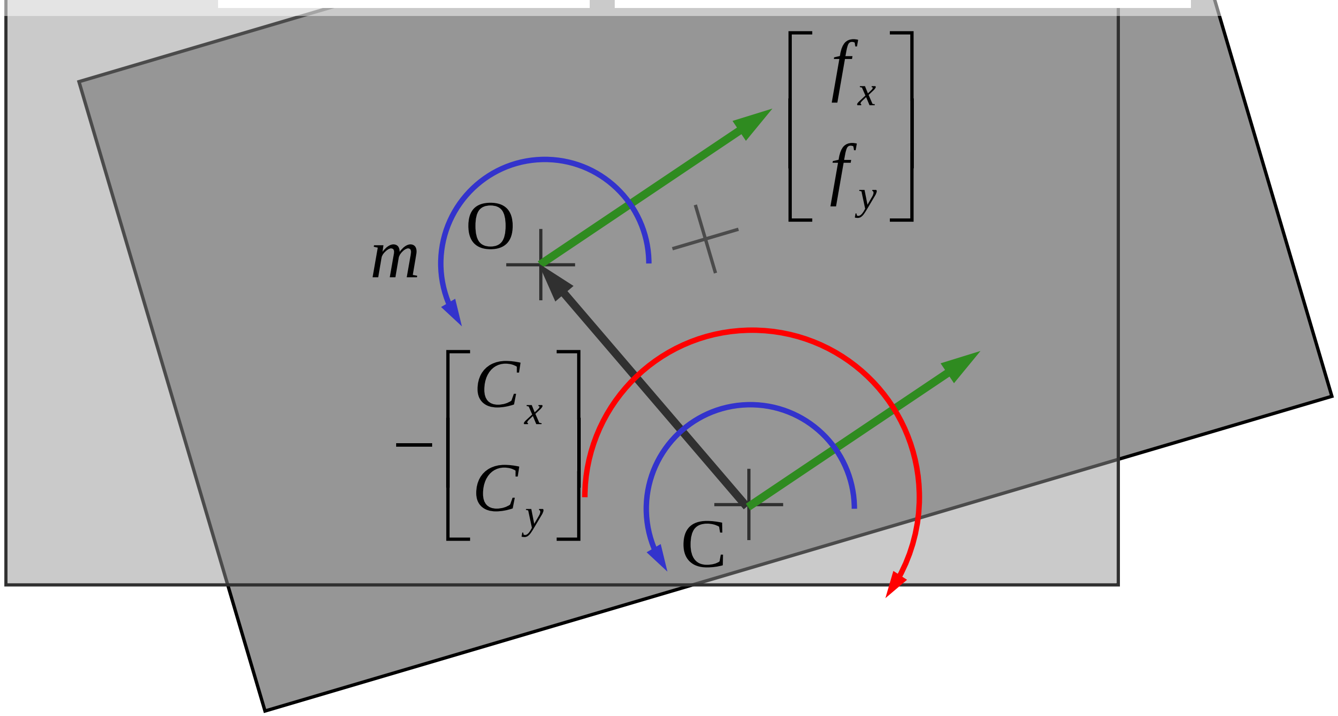
$$\begin{bmatrix}\Delta x'\\ \Delta y'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\end{bmatrix}+\Delta\theta\times\begin{bmatrix}C_x\\ C_y\end{bmatrix},\quad \Delta\theta'=\Delta\theta$$



新参照点Cにかかる力／モーメント

新参照点Cにかかる力／モーメントf_x', f_y', m':

$$\begin{bmatrix} f_x' \\ f_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}, \quad m' = m - \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}$$



新参照点Cでの変位と力／モーメント

何をしたいのか？

… 新参照点Cにおける変位と力／モーメントの関係を求めたい

そのためにどうするのか？

… 点Oでの変位と力／モーメントの関係を利用したい

$$\begin{cases} \Delta x' = \Delta x - C_y \Delta\theta \\ \Delta y' = \Delta y + C_x \Delta\theta \\ \Delta\theta' = \Delta\theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x = \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y = \Delta y' - C_x \Delta\theta' \\ \Delta\theta = \Delta\theta' \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_x' = f_x \\ f_y' = f_y \\ m' = m - C_x f_y + C_y f_x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_x = f_x' \\ f_y = f_y' \\ m = m' + C_x f_y' - C_y f_x' \end{cases}$$

二つの参照点での変位と力／モーメントの関係

$$\begin{cases} f_x = f_x' \\ f_y = f_y' \\ m = m' + C_x f_y' - C_y f_x' \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta x = \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y = \Delta y' - C_x \Delta\theta' \\ \Delta\theta = \Delta\theta' \end{cases}$$

$$f_x = 9\Delta x + 2\Delta y - 3\Delta\theta$$ より

$$f_x' = 9(\Delta x' + C_y \Delta\theta') + 2(\Delta y' - C_x \Delta\theta') - 3\Delta\theta'$$
$$= 9\Delta x' + 2\Delta y' + (-2C_x + 9C_y - 3)\Delta\theta'$$

$$f_y = 2\Delta x + 6\Delta y + \Delta\theta$$ より

$$f_y' = 2(\Delta x' + C_y \Delta\theta') + 6(\Delta y' - C_x \Delta\theta') + \Delta\theta'$$
$$= 2\Delta x' + 6\Delta y' + (-6C_x + 2C_y + 1)\Delta\theta'$$

新参照点Cでの変位と力／モーメントの関係①

$$f_x' = 9\Delta x' + 2\Delta y' + \boxed{\left(-2C_x + 9C_y - 3\right)}\Delta\theta'$$
$$f_y' = 2\Delta x' + 6\Delta y' + \boxed{\left(-6C_x + 2C_y + 1\right)}\Delta\theta'$$

並進運動と回転運動が分離されるためには

$$\begin{cases} -2C_x + 9C_y - 3 = 0 \\ -6C_x + 2C_y + 1 = 0 \end{cases}$$

$$\therefore C_x = \frac{3}{10}, C_y = \frac{2}{5}$$

新参照点Cにおける力と並進変位の関係:

$$f_x' = 9\Delta x' + 2\Delta y'$$
$$f_y' = 2\Delta x' + 6\Delta y'$$

新参照点Cでの変位と力／モーメントの関係②ー1

$$\begin{cases} f_x = f_x' \\ f_y = f_y' \\ m = m' + C_x f_y' - C_y f_x' \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta x = \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y = \Delta y' - C_x \Delta\theta' \\ \Delta\theta = \Delta\theta' \end{cases}$$

$$\begin{cases} m = -3\Delta x + \Delta y + 6\Delta\theta \\ C_x = \dfrac{3}{10}, C_y = \dfrac{2}{5}, f_x' = 9\Delta x' + 2\Delta y', f_y' = 2\Delta x' + 6\Delta y' \end{cases}$$

より

$$-3\left(\Delta x' + \frac{2}{5}\Delta\theta'\right) + \left(\Delta y' - \frac{3}{10}\Delta\theta'\right) + 6\Delta\theta'$$

$$= m' + \frac{3}{10}(2\Delta x' + 6\Delta y') - \frac{2}{5}(9\Delta x' + 2\Delta y')$$

新参照点Cでの変位と力／モーメントの関係②ー2

新参照点Cにおけるモーメントと回転変位の関係:

$$\begin{cases} f_x = f_x' \\ f_y = f_y' \\ m = m' + C_x f_y' - C_y f_x' \end{cases} \qquad m' = \frac{2}{9}\Delta\theta' \qquad \begin{cases} \Delta x = \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y = \Delta y' - C_x \Delta\theta' \\ \Delta\theta = \Delta\theta' \end{cases}$$

$$\begin{cases} m = -3\Delta x + \Delta y + 6\Delta\theta \\ C_x = \frac{3}{10}, C_y = \frac{2}{5}, f_x' = 9\Delta x' + 2\Delta y', f_y' = 2\Delta x' + 6\Delta y' \end{cases}$$

より

$$-3\left(\Delta x' + \frac{2}{5}\Delta\theta'\right) + \left(\Delta y' - \frac{3}{10}\Delta\theta'\right) + 6\Delta\theta'$$

$$= m' + \frac{3}{10}(2\Delta x' + 6\Delta y') - \frac{2}{5}(9\Delta x' + 2\Delta y')$$

コンプライアンスセンター

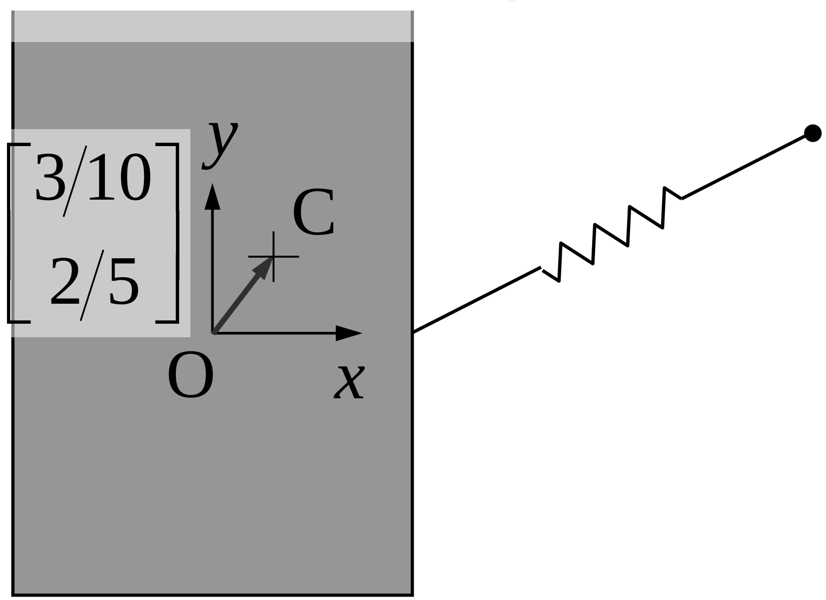
新参照点Cにおける変位と力／モーメントの関係：

$$f_x' = 9\Delta x' + 2\Delta y',\quad f_y' = 2\Delta x' + 6\Delta y',\quad m' = \frac{2}{9}\Delta\theta'$$

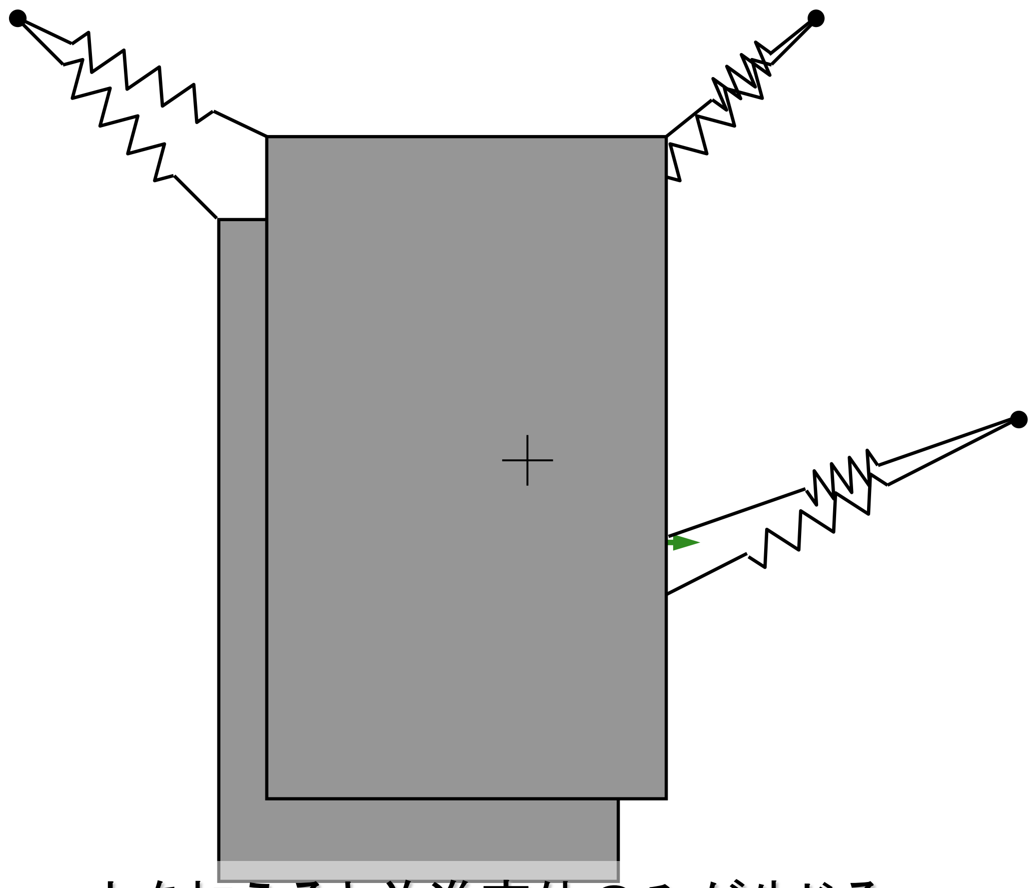
→並進運動と回転運動が分離できる

コンプライアンスセンター（compliance center）

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/10 \\ 2/5 \end{bmatrix}$$

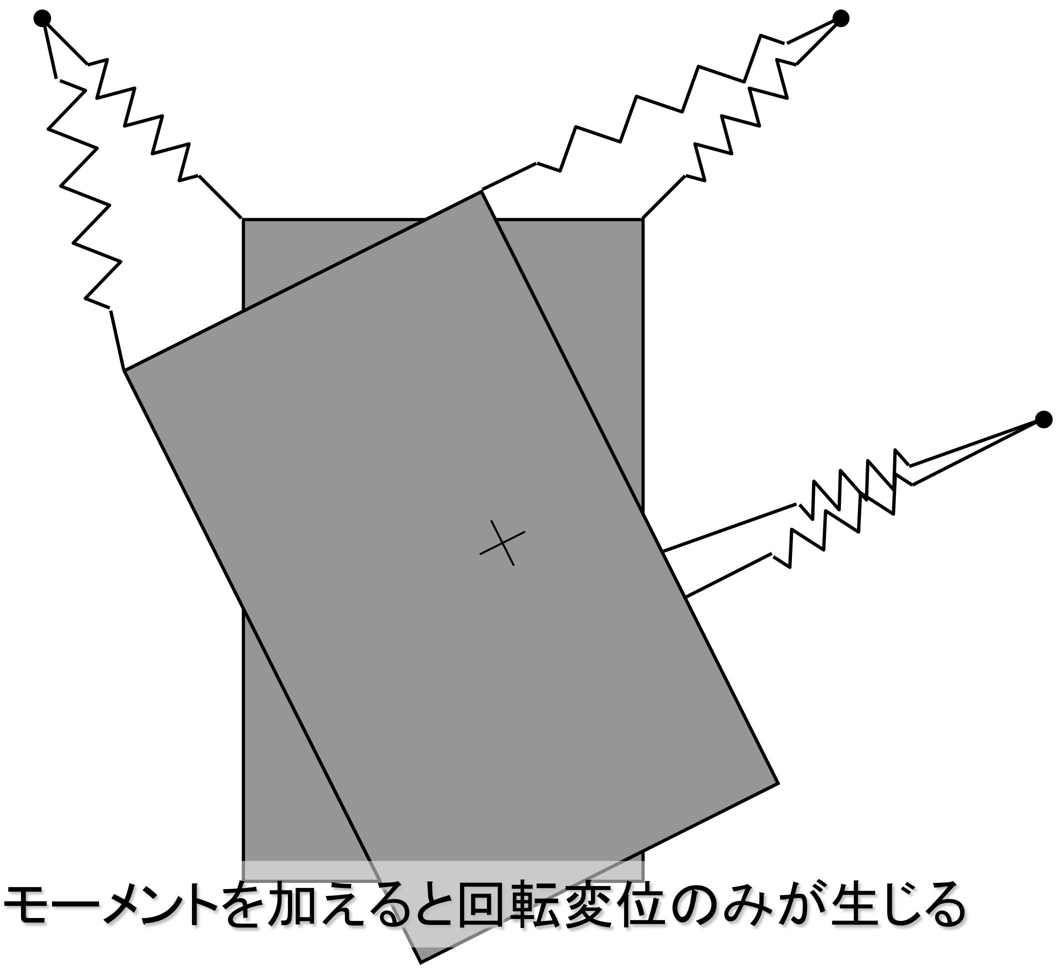


コンプライアンスセンターへの力



力を加えると並進変位のみが生じる

コンプライアンスセンターへのモーメント



モーメントを加えると回転変位のみが生じる

平面運動におけるコンプライアンスセンター①

$$\begin{cases} f_x = f_x' \\ f_y = f_y' \\ m = m' + C_x f_y' - C_y f_x' \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta x = \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y = \Delta y' - C_x \Delta\theta' \\ \Delta\theta = \Delta\theta' \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01} \Delta\theta$$ より

$$\begin{bmatrix} f_x' \\ f_y' \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y' - C_x \Delta\theta' \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01} \Delta\theta'$$

$$\begin{bmatrix} f_x' \\ f_y' \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix} + \left(K_{00} \begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01} \right) \Delta\theta'$$

平面運動におけるコンプライアンスセンター②

座標 $\begin{bmatrix} C_x & C_y \end{bmatrix}^T$ での力と変位の関係:

$$\begin{bmatrix} f_x' \\ f_y' \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix} + \left(K_{00} \begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01} \right) \Delta\theta'$$

座標 $\begin{bmatrix} C_x & C_y \end{bmatrix}^T$ がコンプライアンスセンターであるためには

$$K_{00} \begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01} = 0 \quad \text{より} \quad \begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix} = -K_{00}^{-1} \boldsymbol{k}_{01}$$

この時 $\begin{bmatrix} f_x' \\ f_y' \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix}$

平面運動におけるコンプライアンスセンター③

$$\begin{cases} f_x = f_x' \\ f_y = f_y' \\ m = m' + C_x f_y' - C_y f_x' \end{cases} \qquad \begin{cases} \Delta x = \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y = \Delta y' - C_x \Delta\theta' \\ \Delta\theta = \Delta\theta' \end{cases}$$

$$m = \boldsymbol{k}_{01}^T \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + k_{11}\Delta\theta$$ より

$$m' = \boldsymbol{k}_{01}^T \begin{bmatrix} \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y' - C_x \Delta\theta' \end{bmatrix} + k_{11}\Delta\theta' - C_x f_y' + C_y f_x'$$

$$m' = \boldsymbol{k}_{01}^T \begin{bmatrix} \Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y' - C_x \Delta\theta' \end{bmatrix} + k_{11}\Delta\theta' + \begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_x' \\ f_y' \end{bmatrix}$$

平面運動におけるコンプライアンスセンター④

$$m' = \boldsymbol{k}_{01}^{T}\begin{bmatrix}\Delta x' + C_y \Delta\theta' \\ \Delta y' - C_x \Delta\theta'\end{bmatrix} + k_{11}\Delta\theta' + \begin{bmatrix}C_y \\ -C_x\end{bmatrix}^{T}\begin{bmatrix}f_x{}' \\ f_y{}'\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}C_y \\ -C_x\end{bmatrix} = -K_{00}^{-1}\boldsymbol{k}_{01}, \quad \begin{bmatrix}f_x{}' \\ f_y{}'\end{bmatrix} = K_{00}\begin{bmatrix}\Delta x' \\ \Delta y'\end{bmatrix}$$ より

$$m' = \boldsymbol{k}_{01}^{T}\left(\begin{bmatrix}\Delta x' \\ \Delta y'\end{bmatrix} - K_{00}^{-1}\boldsymbol{k}_{01}\Delta\theta'\right) + k_{11}\Delta\theta' + \begin{bmatrix}C_y \\ -C_x\end{bmatrix}^{T} K_{00}\begin{bmatrix}\Delta x' \\ \Delta y'\end{bmatrix}$$

$$m' = \left(\begin{bmatrix}C_y \\ -C_x\end{bmatrix}^{T} K_{00} + \boldsymbol{k}_{01}^{T}\right)\begin{bmatrix}\Delta x' \\ \Delta y'\end{bmatrix} + \left(k_{11} - \boldsymbol{k}_{01}^{T} K_{00}^{-1}\boldsymbol{k}_{01}\right)\Delta\theta'$$

平面運動におけるコンプライアンスセンター⑤

$$m' = \left(\underline{\begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix}^T K_{00} + \boldsymbol{k}_{01}^T} \right) \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix} + \left(k_{11} - \boldsymbol{k}_{01}^T K_{00}^{-1} \boldsymbol{k}_{01} \right) \Delta\theta'$$

$$\left(\begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix}^T K_{00} + \boldsymbol{k}_{01}^T \right) = \left(\begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix}^T K_{00}^T + \boldsymbol{k}_{01}^T \right)$$

$$= \left(\left(K_{00} \begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix} \right)^T + \boldsymbol{k}_{01}^T \right) = \left(K_{00} \begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix} + \boldsymbol{k}_{01} \right)^T = 0$$

$$\therefore m' = \left(k_{11} - \boldsymbol{k}_{01}^T K_{00}^{-1} \boldsymbol{k}_{01} \right) \Delta\theta'$$

平面運動におけるコンプライアンスセンター⑥

剛性行列を $K = \begin{bmatrix} K_{00} & \boldsymbol{k}_{01} \\ \boldsymbol{k}_{01}^T & k_{11} \end{bmatrix}$ とする

座標 $\begin{bmatrix} C_x & C_y \end{bmatrix}^T$ がコンプライアンスセンターであるためには

$$\begin{bmatrix} C_y \\ -C_x \end{bmatrix} = -K_{00}^{-1} \boldsymbol{k}_{01}$$

この時 $\begin{bmatrix} f_x' \\ f_y' \end{bmatrix} = K_{00} \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix}$

$$m' = \left(k_{11} - \boldsymbol{k}_{01}^T K_{00}^{-1} \boldsymbol{k}_{01} \right) \Delta \theta'$$

三次元空間運動における剛性行列

$$K=\left[\begin{array}{c|c} K_{00} & K_{01} \\ \hline K_{01}^T & K_{11} \end{array}\right]$$

K_{00}, K_{01}, K_{11} ：3次の正方行列

K_{00}, K_{11} ：正定対称行列、逆行列を持つ

$$\boldsymbol{f}=K_{00}\Delta\boldsymbol{x}+K_{01}\Delta\boldsymbol{\theta} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}=K_{00}\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}+K_{01}\begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{m}=K_{01}^T\Delta\boldsymbol{x}+K_{11}\Delta\boldsymbol{\theta} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}=K_{01}^T\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}+K_{11}\begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix}$$

空間運動におけるコンプライアンスセンター①

新参照点Cの位置ベクトルを $\boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \end{bmatrix}^T$ とする

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -C_z & C_y \\ C_z & 0 & -C_x \\ -C_y & C_x & 0 \end{bmatrix}$$:歪対称行列

$$\boldsymbol{c} \times \Delta\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} C_y\Delta\theta_z - C_z\Delta\theta_y \\ C_z\Delta\theta_x - C_x\Delta\theta_z \\ C_x\Delta\theta_y - C_y\Delta\theta_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -C_z & C_y \\ C_z & 0 & -C_x \\ -C_y & C_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix} = S\Delta\boldsymbol{\theta}$$

$$\Delta\boldsymbol{\theta} \times \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_y C_z - \Delta\theta_z C_y \\ \Delta\theta_z C_x - \Delta\theta_x C_z \\ \Delta\theta_x C_y - \Delta\theta_y C_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C_z & -C_y \\ -C_z & 0 & C_x \\ C_y & -C_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix} = -S\Delta\boldsymbol{\theta}$$

空間運動におけるコンプライアンスセンター②

参照点Oと新参照点Cでの変位の関係：

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{x}' = \Delta \boldsymbol{x} + \Delta \boldsymbol{\theta} \times \underline{(\boldsymbol{c} - \boldsymbol{o})} = \Delta \boldsymbol{x} - S \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \boldsymbol{\theta}' = \Delta \boldsymbol{\theta} \end{cases}$$

参照点Oと新参照点Cでの力／モーメントの関係：

$$\begin{cases} \boldsymbol{f}' = \boldsymbol{f} \\ \boldsymbol{m}' = \boldsymbol{m} + \underline{(\boldsymbol{o} - \boldsymbol{c})} \times \boldsymbol{f} = \boldsymbol{m} - S \boldsymbol{f} \end{cases}$$

参照点Oでの変位と力／モーメントの関係：

$$\begin{cases} \boldsymbol{f} = K_{00} \Delta \boldsymbol{x} + K_{01} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{m} = K_{01}^{T} \Delta \boldsymbol{x} + K_{11} \Delta \boldsymbol{\theta} \end{cases}$$

空間運動におけるコンプライアンスセンター③

新参照点Cでの力と変位の関係:

$$\boldsymbol{f}' = K_{00}\Delta\boldsymbol{x}' + \left(K_{00}S + K_{01}\right)\Delta\boldsymbol{\theta}'$$

新参照点Cがコンプライアンスセンターであるためには

$$K_{00}S + K_{01} = 0_{3\times3} \quad \text{より} \quad S = -K_{00}^{-1}K_{01}$$

Sは歪対称行列であるので、$K_{00}^{-1}K_{01}$も歪対称でなければならない

$$-K_{00}^{-1}K_{01} = \begin{bmatrix} 0 & -C_z & C_y \\ C_z & 0 & -C_x \\ -C_y & C_x & 0 \end{bmatrix}$$

$K_{00}^{-1}K_{01}$が歪対称ではない場合、コンプライアンスセンターは存在しない

空間運動におけるコンプライアンスセンター④

剛性行列を$K=\begin{bmatrix} K_{00} & K_{01} \\ K_{01}^T & K_{11} \end{bmatrix}$とする

座標 $\begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \end{bmatrix}^T$ がコンプライアンスセンターであるためには

$$-K_{00}^{-1}K_{01}=\begin{bmatrix} 0 & -C_z & C_y \\ C_z & 0 & -C_x \\ -C_y & C_x & 0 \end{bmatrix}$$

この時 $\begin{cases} \boldsymbol{f}'=K_{00}\Delta\boldsymbol{x}' \\ \boldsymbol{m}'=\left(K_{11}-K_{01}^T K_{00}^{-1}K_{01}\right)\Delta\boldsymbol{\theta}' \end{cases}$

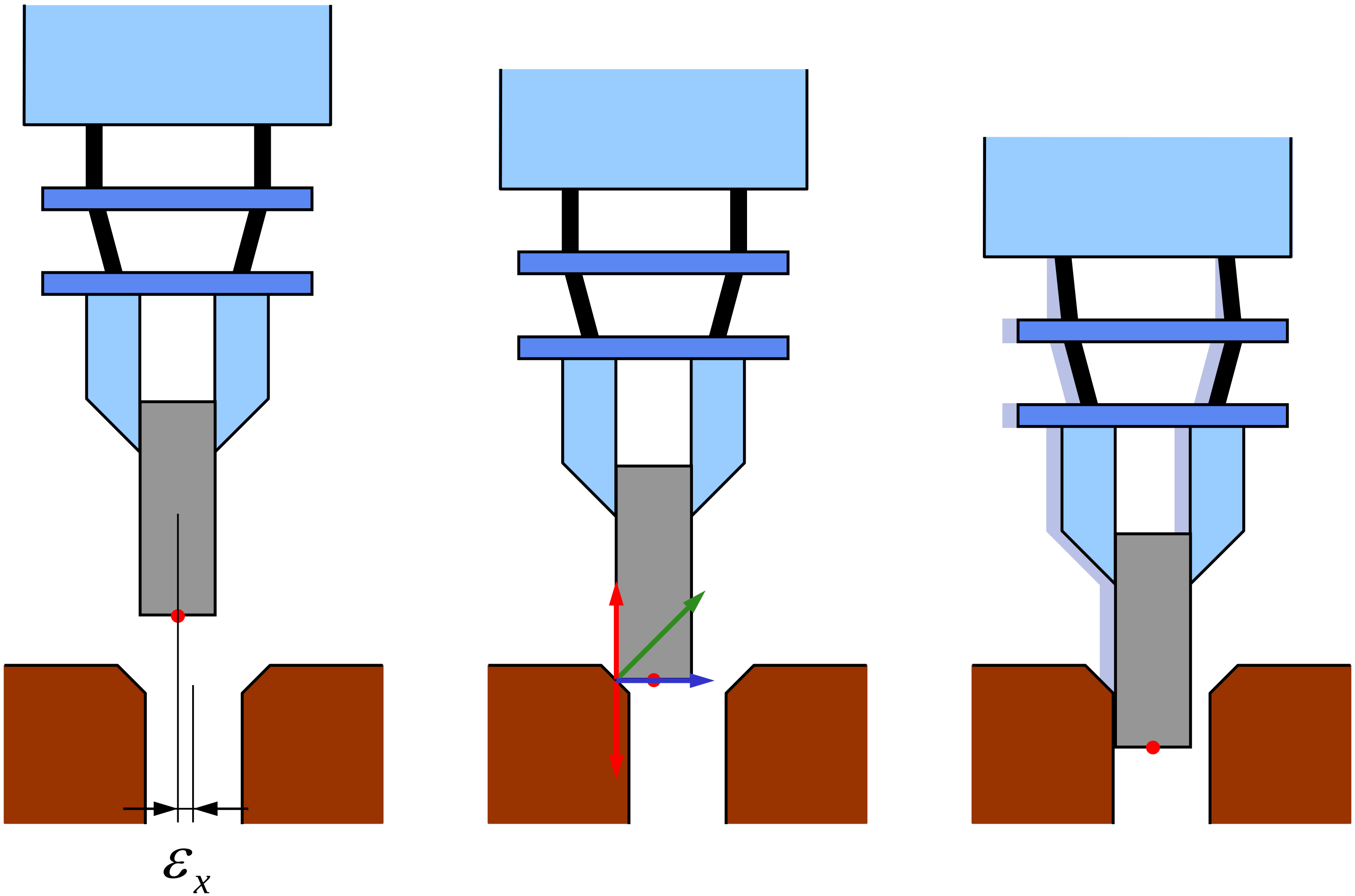
$K_{00}^{-1}K_{01}$が歪対称ではない場合、コンプライアンスセンターは存在しない

RCCハンド

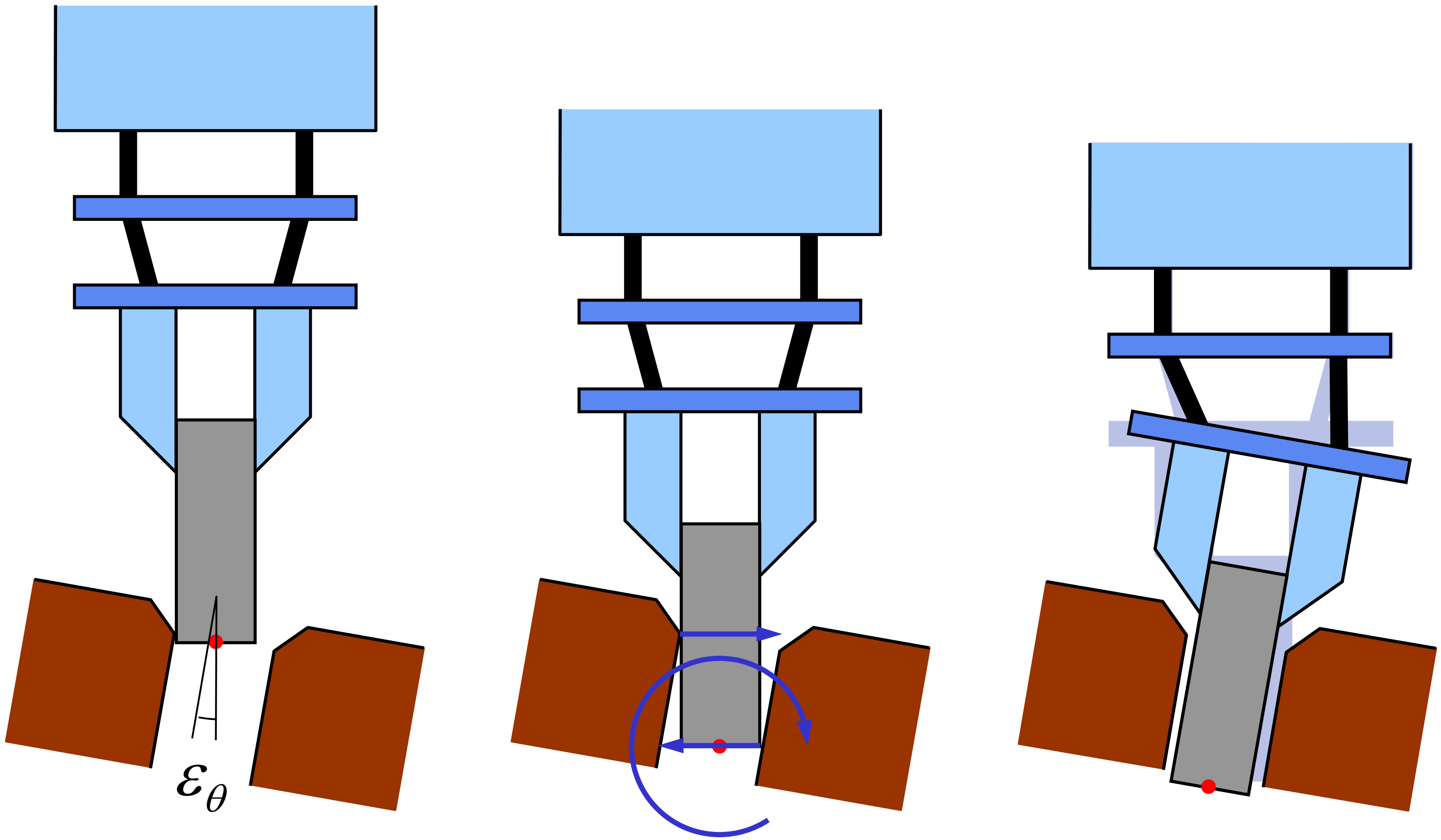
RCC（Remote Compliance Center）ハンド

- 米国Draper研究所のWhitney教授らのグループが開発
- 軸の軸穴への精密な挿入が目的
- 軸の先端にコンプライアンスセンターがあるように弾性要素を配置
- センサを使うことなく位置決め誤差と姿勢誤差を吸収可能

位置決め誤差が存在する場合



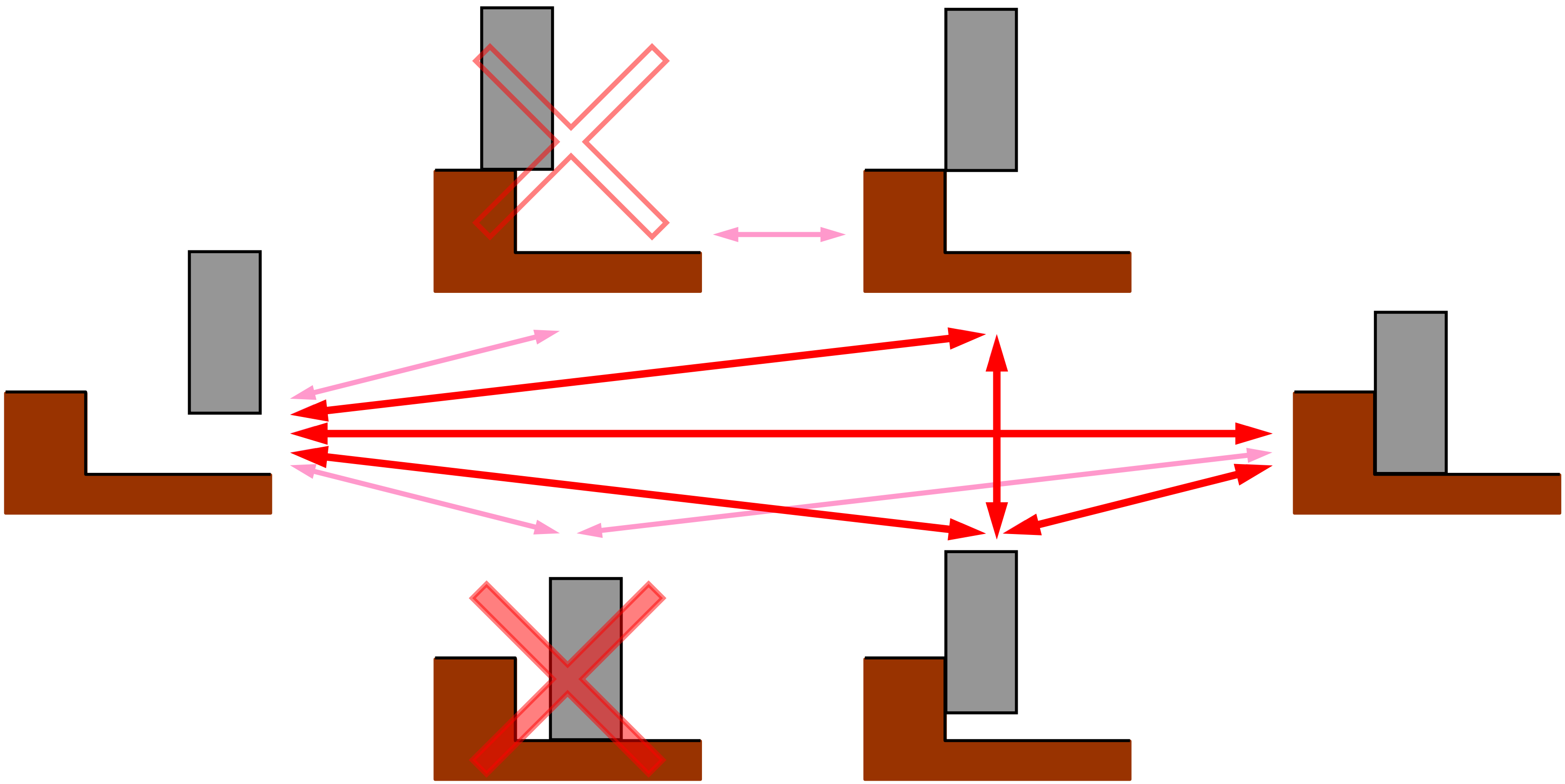
姿勢誤差が存在する場合



剛体のハンドリング作業の計画①

- どのようにハンドリングしたいのか？

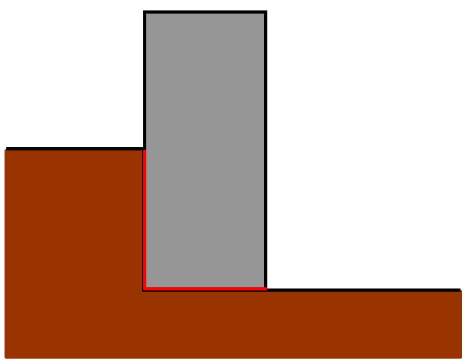
　→作業目標は何か？　初期状態／中間状態／目標状態は？

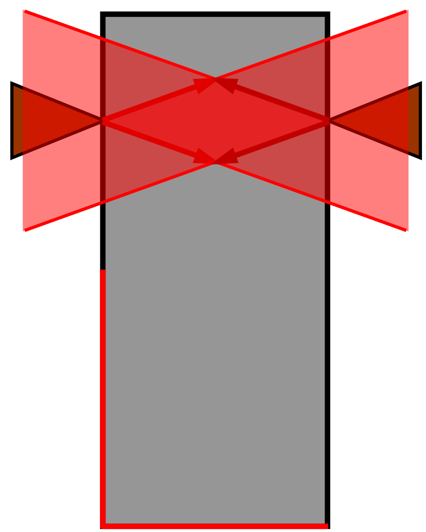


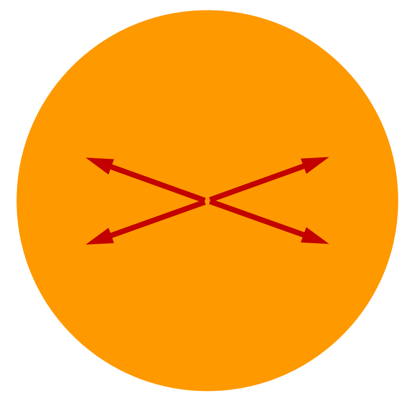
剛体のハンドリング作業の計画②

- どう持つか？

　→安定に把持するために、何本の指をどのように配置するか？





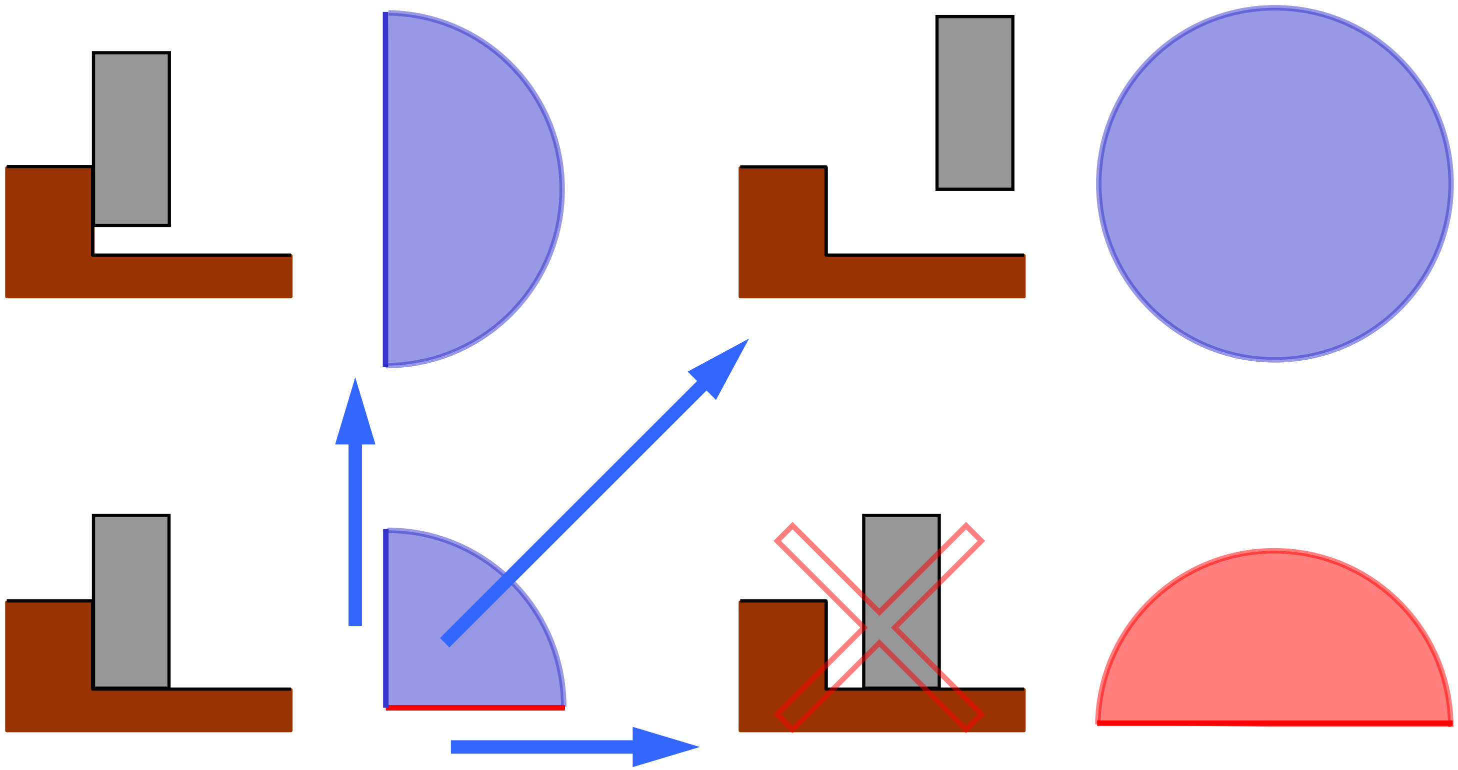


フォースクロージャ

剛体のハンドリング作業の計画③

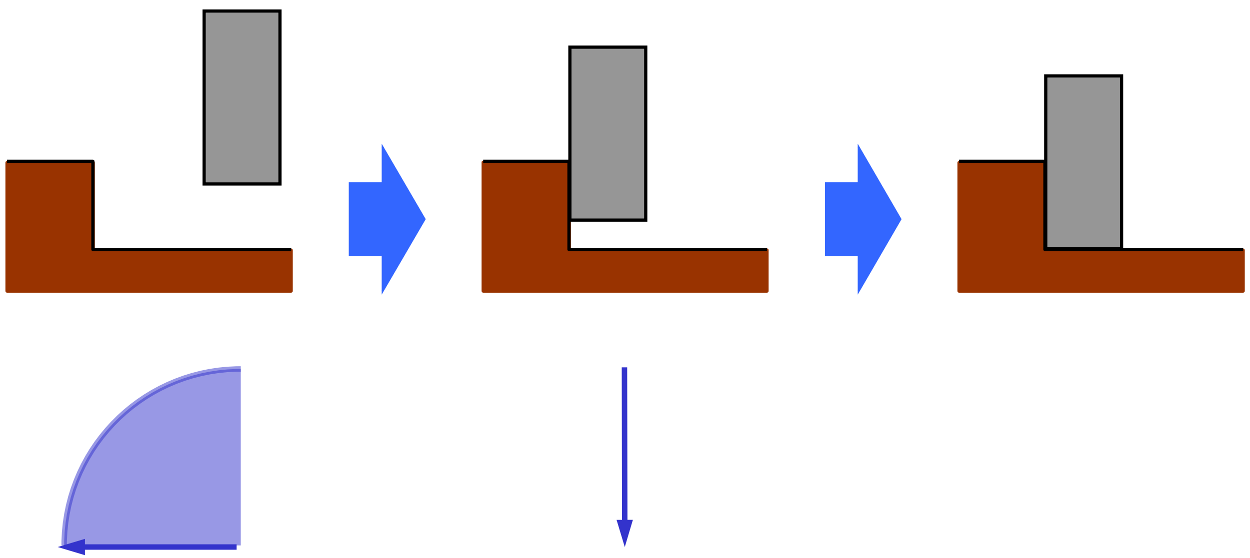
- どう動かすか？

→状態遷移を満足するための並進／回転運動はどうあるべきか？



剛体のハンドリング作業の計画③

- どう動かすか？
  →状態遷移を満足するための並進／回転運動はどうあるべきか？



剛体のハンドリング作業の計画④

- 位置決め誤差／姿勢誤差や、反応の遅れにどう対処するか？