ロボティクス基礎

第1学期 木 Ⅲ・Ⅳ限 11:00-13:50 1号館 大講義室

担当:平田 健太郎

ロボットダイナミクスのモデリングと制御の基礎

システムコースの学生は「ロボットダイナミクス」３年４期（見浪）を履修すると, 3次元のロボティクスを本格的に学ぶことができる.

剛体の力学は2次元⇒3次元で難しさが劇的に増す. (まさに異次元)　この講義では, 運動については2次元に限定するので, 内容は比較的簡単.

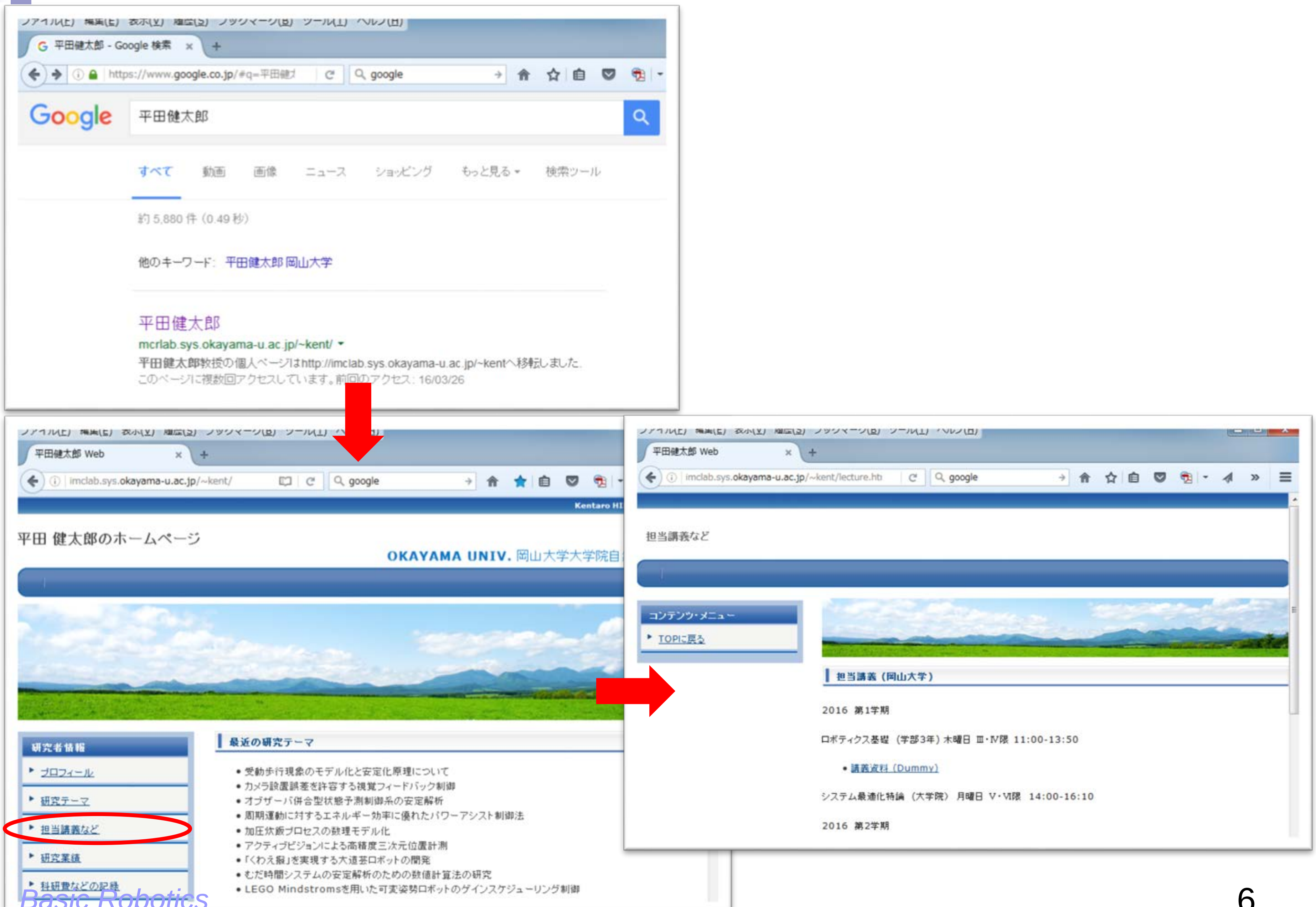
- 出席: 基礎制御理論と同様, ICカードリーダーによって出席を取るので, 必ず学生証を持参
- 講義形式:　スライドと板書
  見づらければ前に座りましょう
- 教科書:　特になし
- 参考書:　美多 勉, 大須賀 公一　著;
  ロボット制御工学入門, コロナ社, 1989

講義日程(予定)

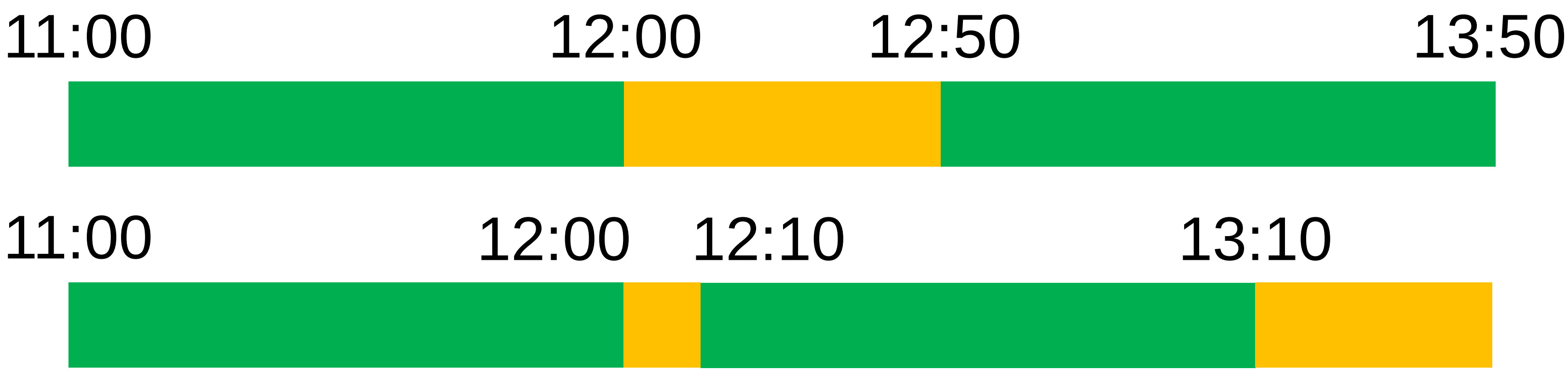
4/11		第1回	序論
4/16	*	第2回	運動方程式 （4/25休講分）
4/18		第3回	ラグランジュ法
5/9		第4回	座標変換
5/16		第5回	運動学・動力学
5/21	*	第6回	線形制御との関わり （5/23休講分）
5/30		第7回	サーボ系
6/6		第8回	まとめ/期末試験

* 補講

- 連絡用email address
  kent@sys.okayama-u.ac.jp
- 配布資料, 連絡がある場合, 平田のwebページ(「担当講義など」以下) にアップ


平田健太郎 - Google 検索
https://www.google.co.jp/#q=平田健太
google
Google
平田健太郎
すべて
動画
画像
ニュース
ショッピング
もっと見る
検索ツール
約 5,880 件（0.49 秒）
他のキーワード: 平田健太郎 岡山大学
平田健太郎
mcrlab.sys.okayama-u.ac.jp/~kent/
平田健太郎教授の個人ページはhttp://imclab.sys.okayama-u.ac.jp/~kentへ移転しました。
このページに複数回アクセスしています。前回のアクセス: 16/03/26
平田健太郎 Web
imclab.sys.okayama-u.ac.jp/~kent/
平田 健太郎のホームページ
OKAYAMA UNIV. 岡山大学大学院自
研究者情報
プロフィール
研究テーマ
担当講義など
研究業績
科研費などの記録
最近の研究テーマ
受動歩行現象のモデル化と安定化原理について
カメラ設置誤差を許容する視覚フィードバック制御
オブザーバ併合型状態予測制御系の安定解析
周期運動に対するエネルギー効率に優れたパワーアシスト制御法
加圧成形プロセスの数理モデル化
アクティブビジョンによる高精度三次元位置計測
「くわえ掴」を実現する大道芸ロボットの開発
むだ時間システムの安定解析のための数値計算法の研究
LEGO Mindstromsを用いた可変姿勢ロボットのゲインスケジューリング制御
平田健太郎 Web
imclab.sys.okayama-u.ac.jp/~kent/lecture.htm
担当講義など
コンテンツ·メニュー
TOPに戻る
担当講義（岡山大学）
2016 第1学期
ロボティクス基礎（学部3年）木曜日 III·IV限 11:00-13:50
講義資料（Dummy）
システム最適化特論（大学院）月曜日 V·VI限 14:00-16:10
2016 第2学期

- 単位数問題
  - H25年度以前の入学生？
- 昼休み問題

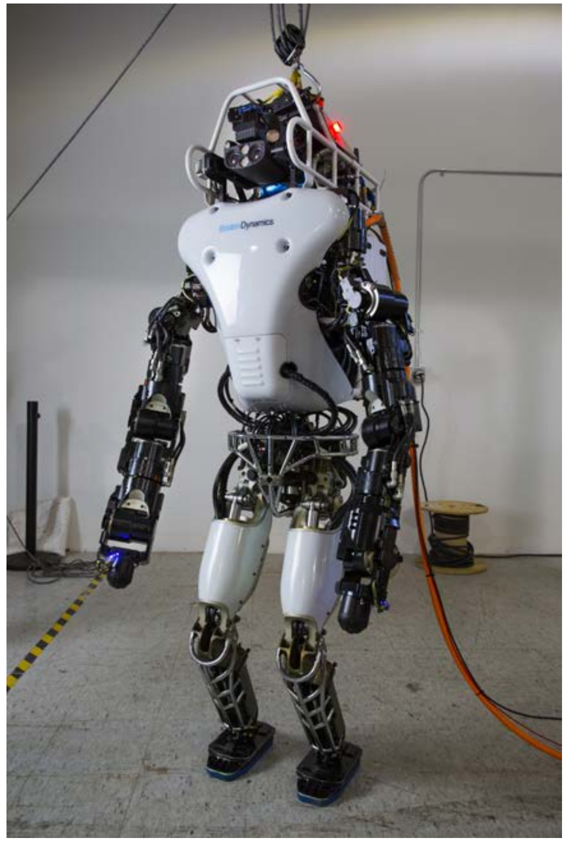


序論

Q. 何かを思うように動かす（制御する）という意味では同じなのに, なぜ「システム制御」と「ロボティクス」の講義が分かれているか

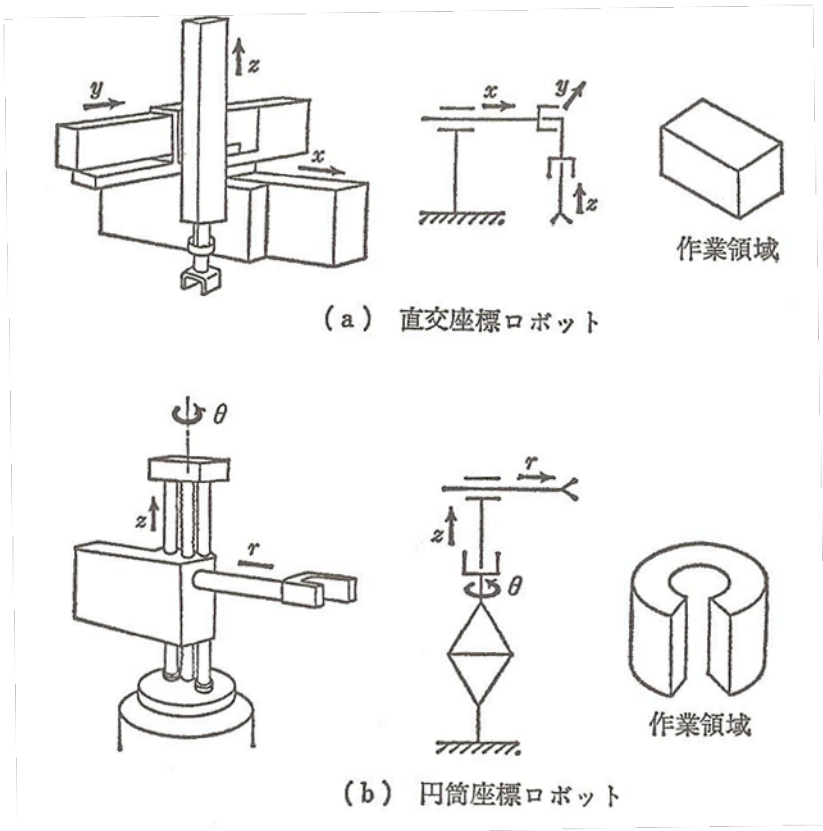
A. 対象（および必然的に方法論）が違うから

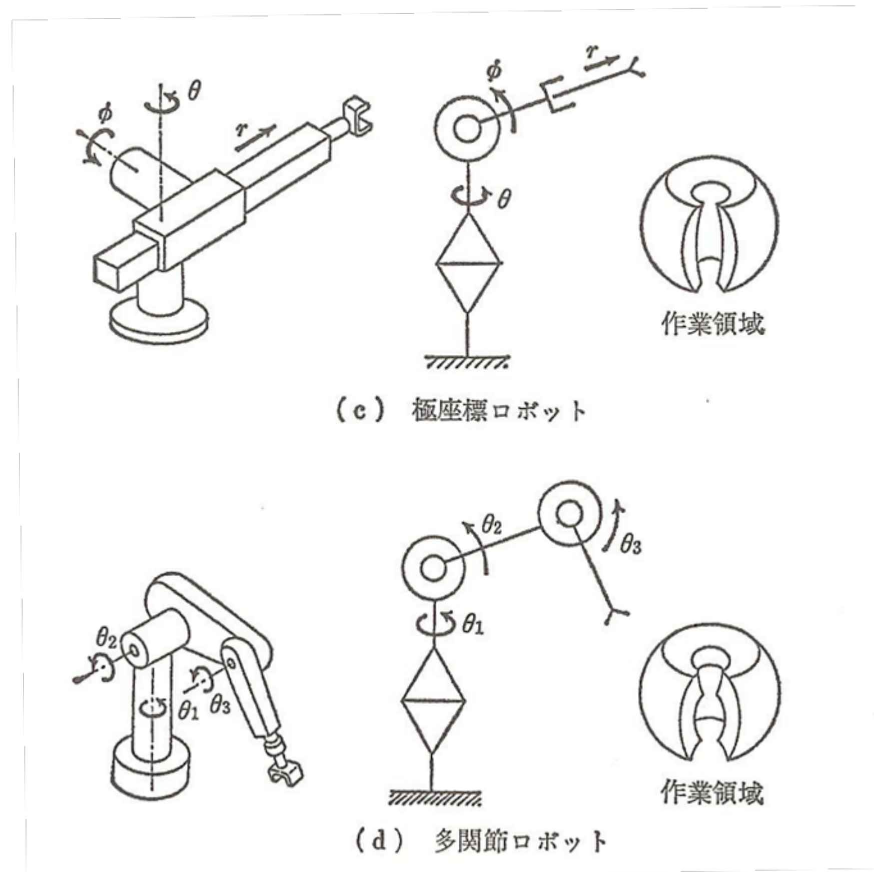
ロボティクス基礎の制御対象は明らかにロボットである.



https://youtu.be/rVlhMGQgDkY

■ ロボットアームの主なタイプ





では, システム制御Ｉ（古典制御理論）における制御対象は何であったか？

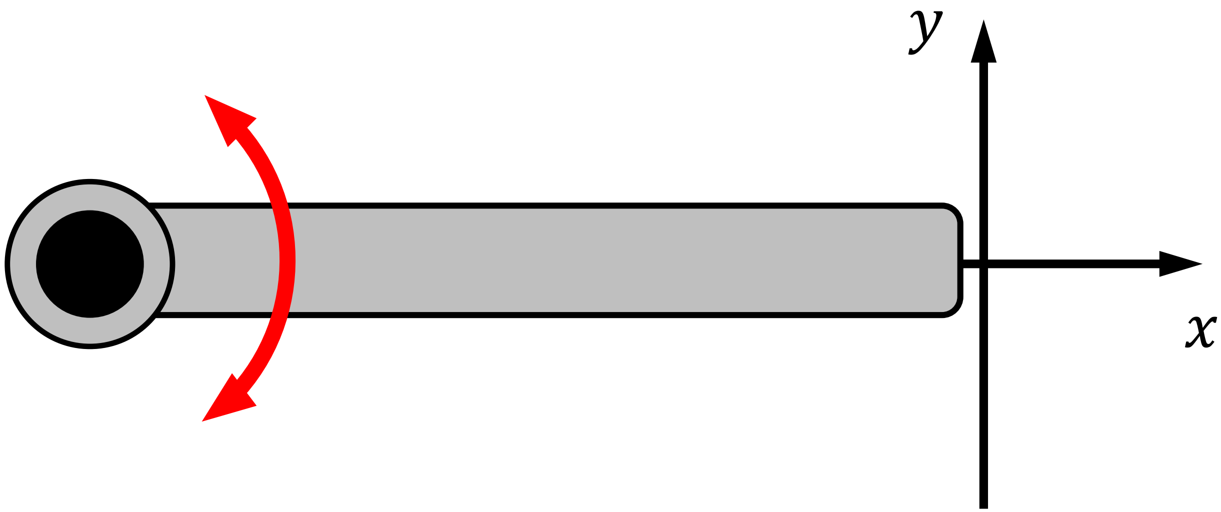
$$Y(s) = G(s)U(s)$$

$$y(t) = G\int_0^t g(t-\tau)u(\tau)d\tau$$

$$Y(s) = \mathcal{L}[y(t)], G(s) = \mathcal{L}[g(t)], U(s) = \mathcal{L}[u(t)]$$

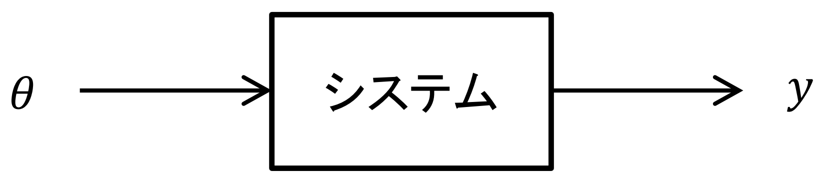
入力を2倍にすると…?

Linearity



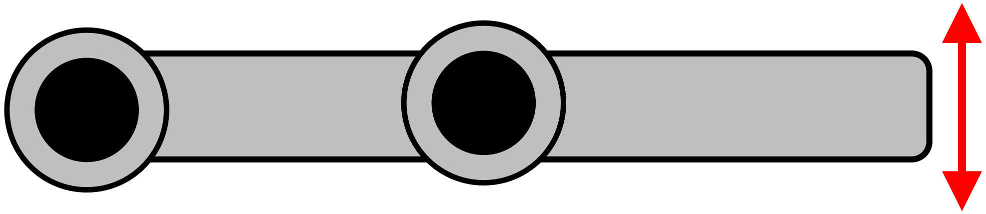
根本の回転角 θ が微小であるとき, 先端の y 方向の移動量は $r\theta$

θ が2倍になれば, 先端の移動量も2倍になる⇒線形

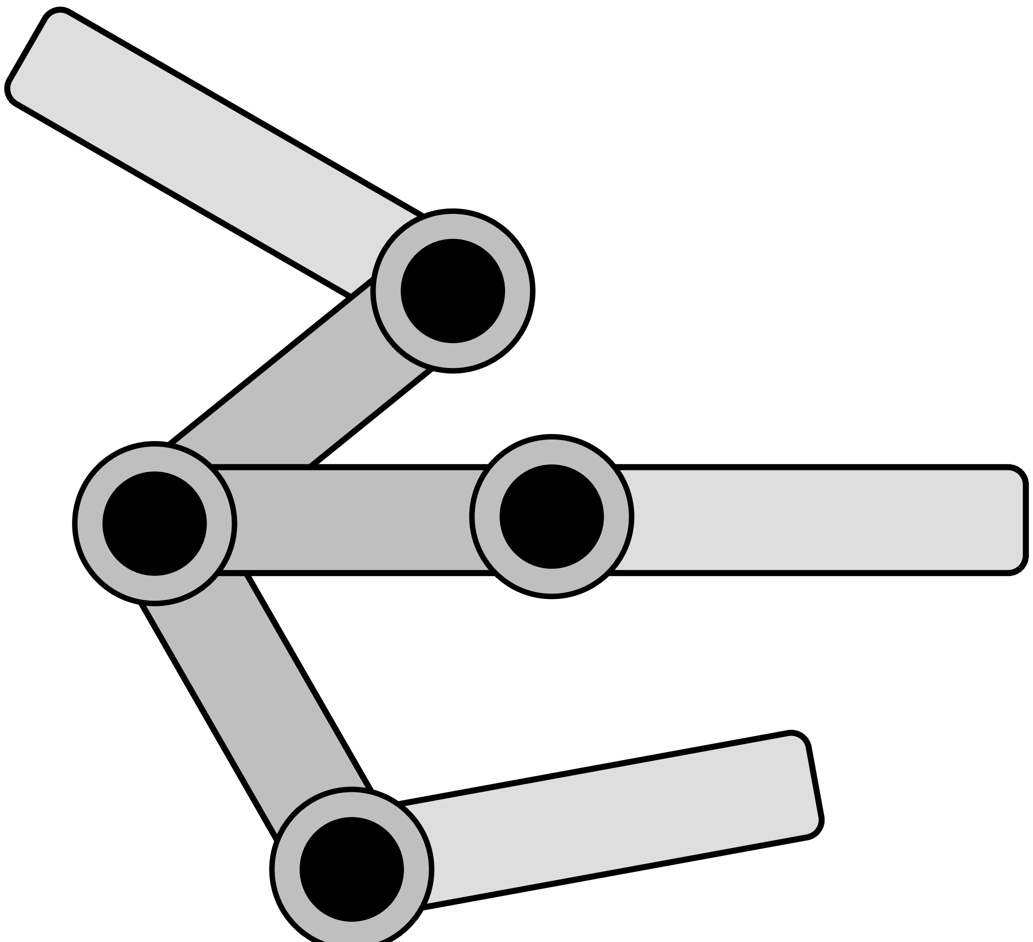


回転角 θ が微小でないとき, 先端の y 方向の移動量は $r\sin\theta$

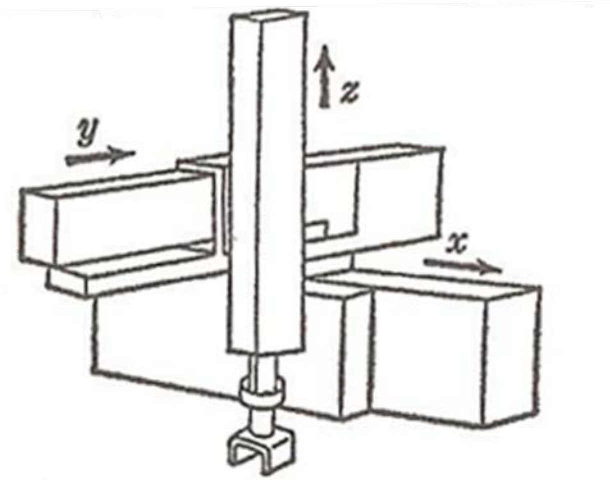
一般に $r\sin 2\theta \neq 2r\sin\theta$ ⇒線形でない



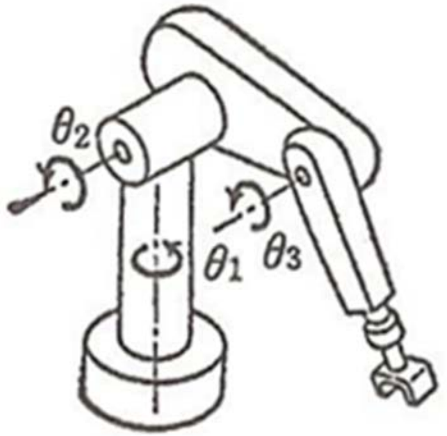
先端 (手先) を僅かに
動かすだけなら線形だが…



ロボットの用途からすれば,
腕を大きく動かして複雑な
動きをさせたい



このタイプであれば, 各軸の運動に干渉はなく, それぞれを線形システムと考えてもよさそう.



しかしヒトの腕を模した器用さ (障害物の裏側に回り込んで作業する等) を求めると, このようなタイプが望ましいことになり, 各軸動作の干渉, 非線形性は避けられない.

ロボットは非線形な制御対象である.

Difficulties:

非線形系の挙動はそもそも複雑である.

非線形系に対する制御理論は, 一般に線形制御理論よりも (さらに) 難しい.

- デモ: 二重振子の運動
  Demonstration: Motion of Double Pendulum

たった2本のリンクからなるマニピュレータであっても, その自由運動は非常に複雑

↓

本講義の最初の目標:

この運動を数学的に記述すること

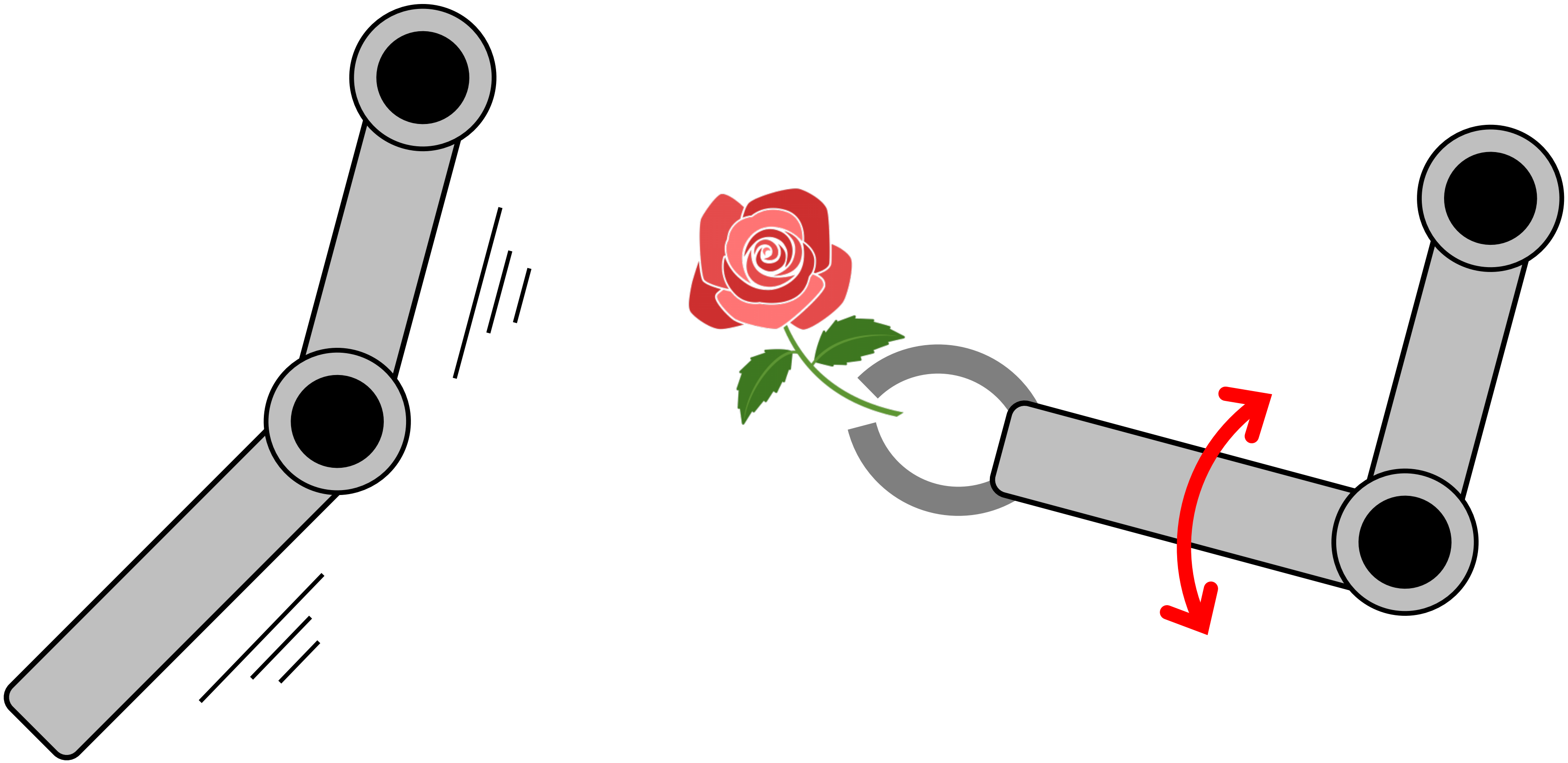
しかし, ロボットは特殊な非線形系である
ので, その特徴を利用すると, 比較的容易に
制御することができる.

具体的には…

剛体シリアルリンク系なので, 運動の記述を
ある程度系統的に行える.

⇒ その基礎を学ぶのが本講義

2リンクアームの運動方程式



二重振子の軸にモータを取り付けて強制的に駆動すれば，これは2リンクマニピュレータである.

剛体の運動について知っておくべきこと

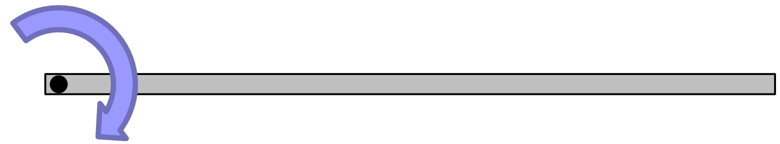
剛体 (rigid body) とは？

重心（質量中心）

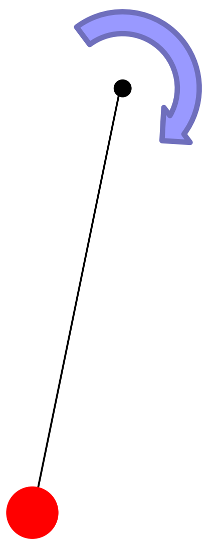
慣性モーメント

慣性モーメントの計算

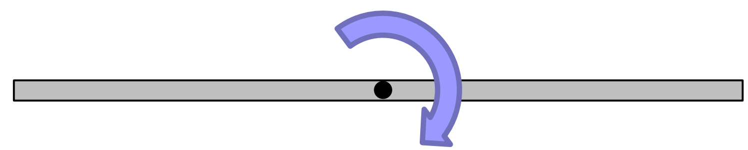
長さ ℓ, 質量 M (均質)の棒, 回転中心は端点



長さ ℓ の糸（質量なし）の先端に
取り付けた質量 M の質点



長さ ℓ, 質量 M (均質)の棒, 回転中心は中点



オイラーの運動方程式

$$\tau = I\ddot{\theta}$$

トルク　慣性モーメント　角加速度

ニュートンの運動方程式

$$f = m\ddot{x}$$

力　質量　加速度

これらの積分形

$$f = m\ddot{x}$$ ニュートンの運動方程式

$$\int_0^{\Delta t} f(\tau)\, d\tau \simeq f(0)\Delta t = \int_0^{\Delta t} m\ddot{x}(\tau)\, d\tau = m\dot{x}(\Delta t) - m\dot{x}(0)$$

運動量の変化分は力積に等しい. 力が作用しなければ運動量保存則.

$$\tau = I\ddot{\theta}$$ オイラーの運動方程式

同様にして, 角運動量保存則が導かれる.

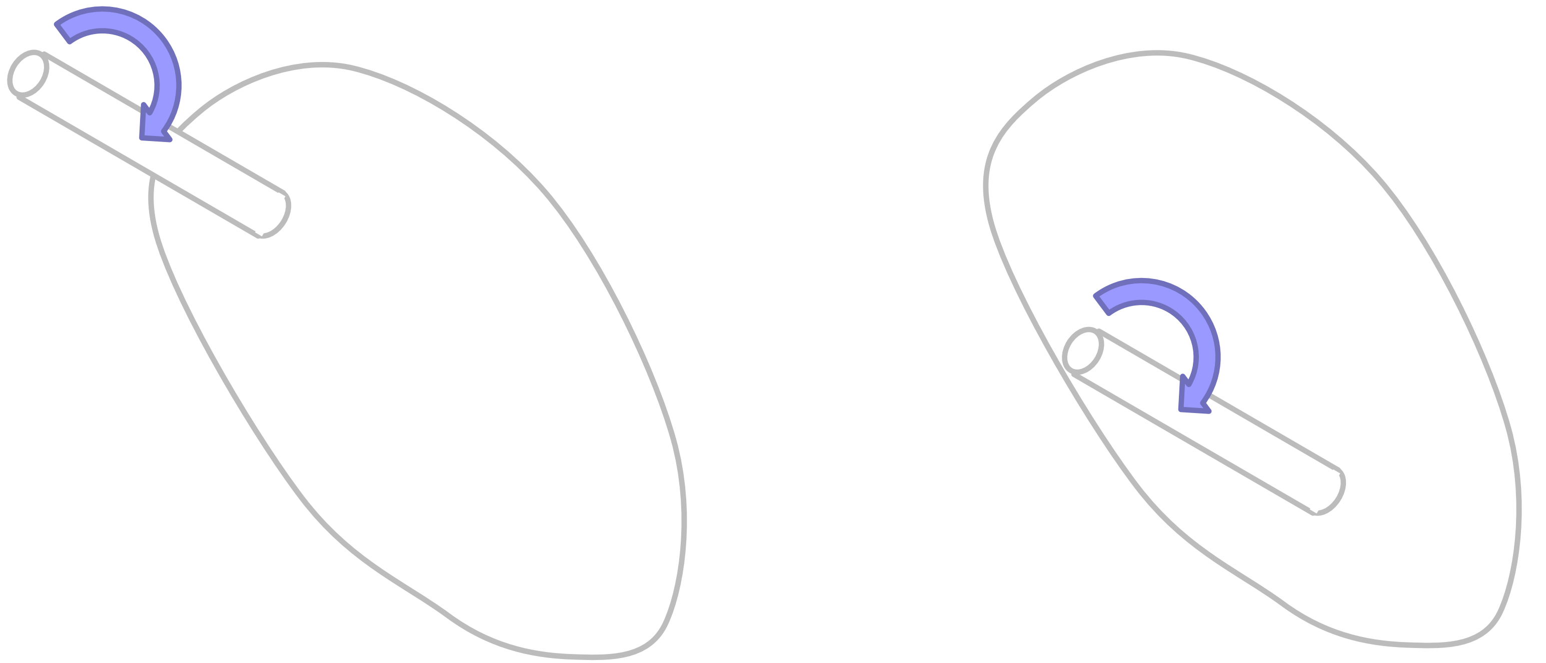
角運動量保存則:　Persuasive Example

$$I_1\dot{\theta}_1 = I_2\dot{\theta}_2 \qquad\qquad I_i \propto M\ell_i^2$$

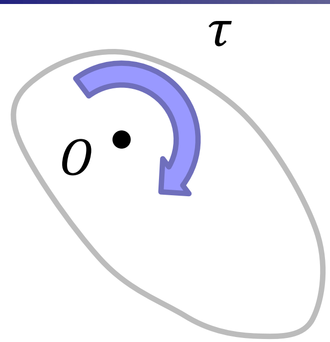
全質量が不変ならば

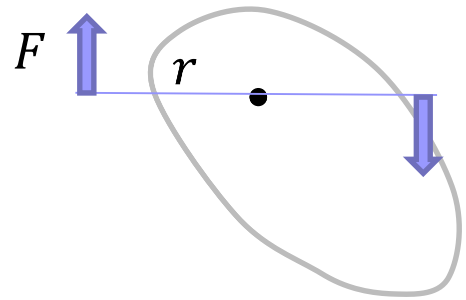
$$\ell_2 < \ell_1 \;\Rightarrow\; I_2 \ll I_1 \;\Rightarrow\; \dot{\theta}_2 \gg \dot{\theta}_1$$

慣性モーメントは, ある点まわりで定められる.
では, トルクは「どこまわり」に働くか？



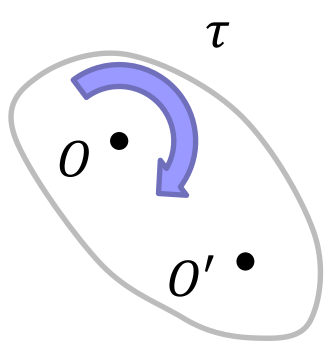
同じトルクで捻るとき, 物体への作用はどう違うか？

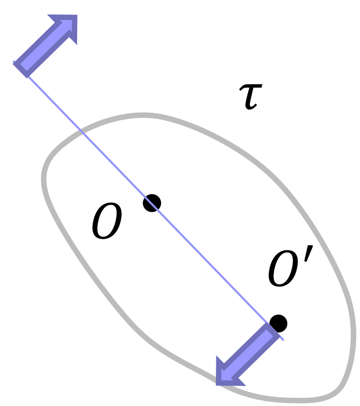




モーメントアームの長さが r であれば $2Fr = \tau$ より$F = \frac{\tau}{2r}$.
作用点は任意に動かすことができる.

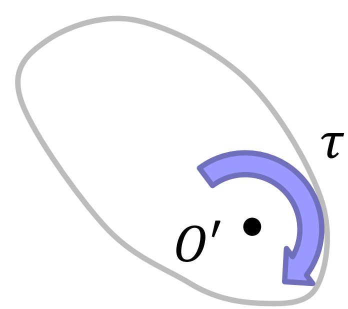
ある軸まわりに作用しているトルクは, 仮想的に一対の偶力で置き換えられる.





作用点がO'となるように偶力をとる. OO'の距離を r'とすれば偶力の大きさは $F' = \frac{\tau}{2r\prime}$.作用点がO' の力は O' まわりの回転に寄与しないので, O' まわりの回転に関するトルクは $\tau' = F'(2r') = \tau$.

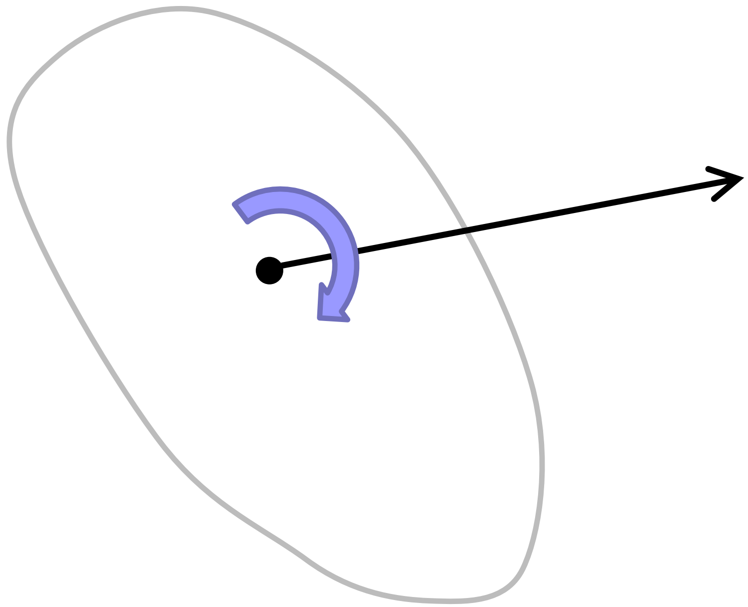
別の軸まわりに働くトルクは？



トルクは「どこまわり」に依存しない.

回転運動と並進運動について

剛体の運動は, なぜ重心の並進運動と, 重心まわりの回転運動に分解できるのか？



剛体を質点系とみなす.

各点の質量を m_i, 位置ベクトルを r_i, 作用する外力を f_i^e,
点 j から受ける内力を f_{ij} とする. 質点 i の運動方程式は

$$m_i \ddot{r}_i = f_i^e + \sum_{i \neq j} f_{ij}$$

すべての質点について加え合わせると

$$\sum_i (m_i \ddot{r}_i) = \sum_i f_i^e + \sum_i \sum_{i \neq j} f_{ij}$$

作用反作用の法則から右辺第2項は0. 一方重心の定義より

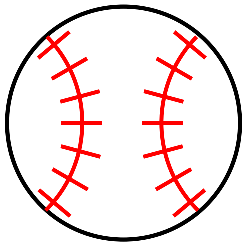
$$r_g = \frac{\sum_i (m_i r_i)}{\sum_i m_i}$$

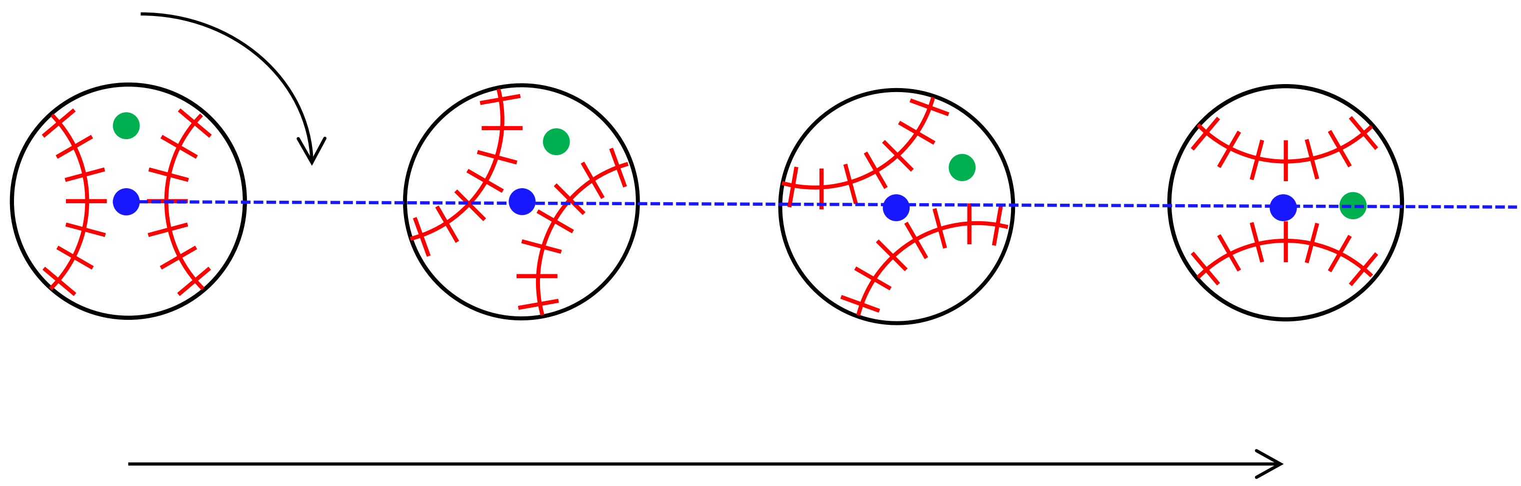
m_i は時間に依存しないので

$$\ddot{r}_g = \frac{\sum_i (m_i \ddot{r}_i)}{\sum_i m_i}$$

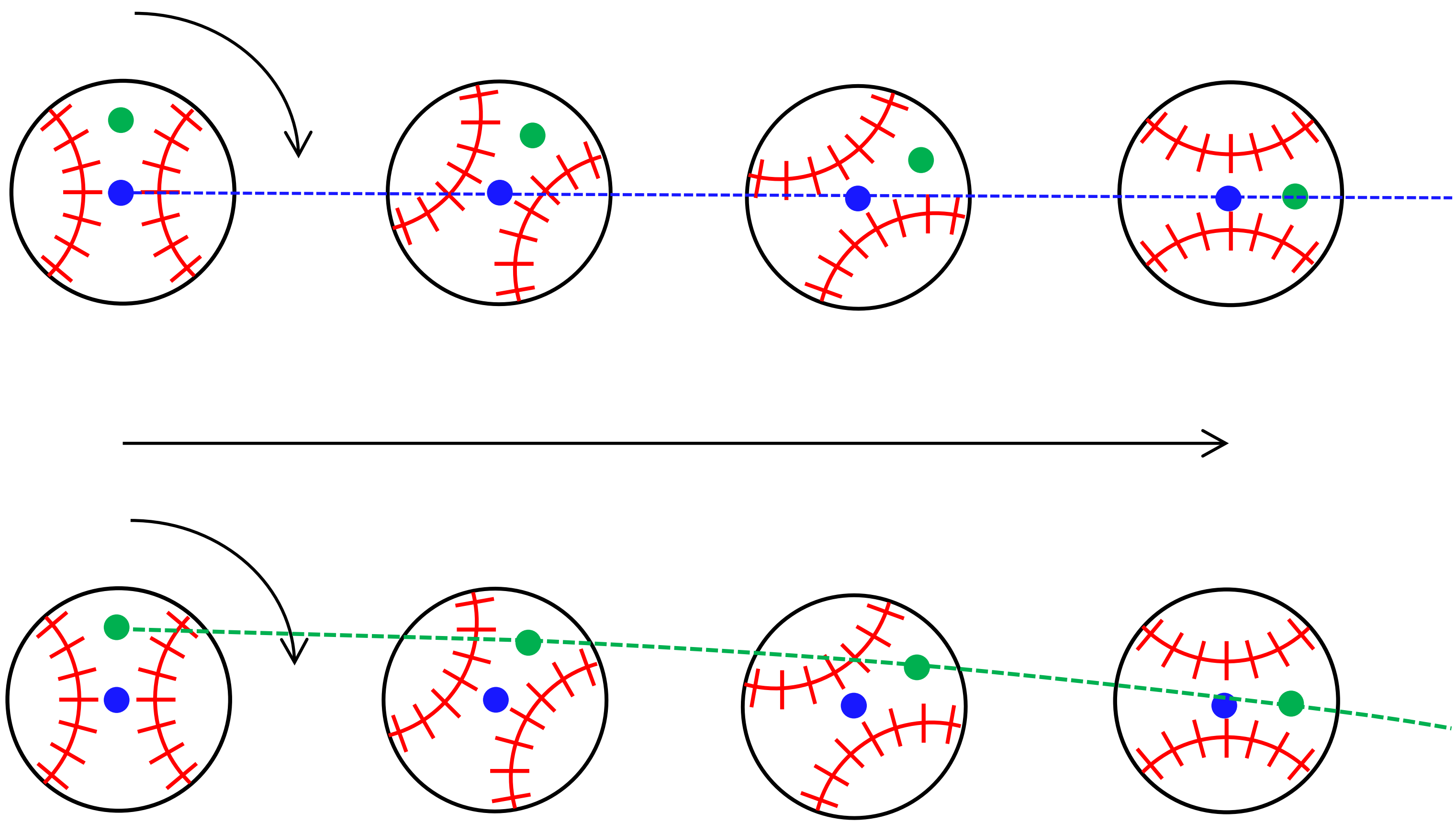
全質量　重心の加速度　外力の総和

$$\boxed{\left(\sum_i m_i\right) \ddot{r}_g = \sum_i f_i^e}$$



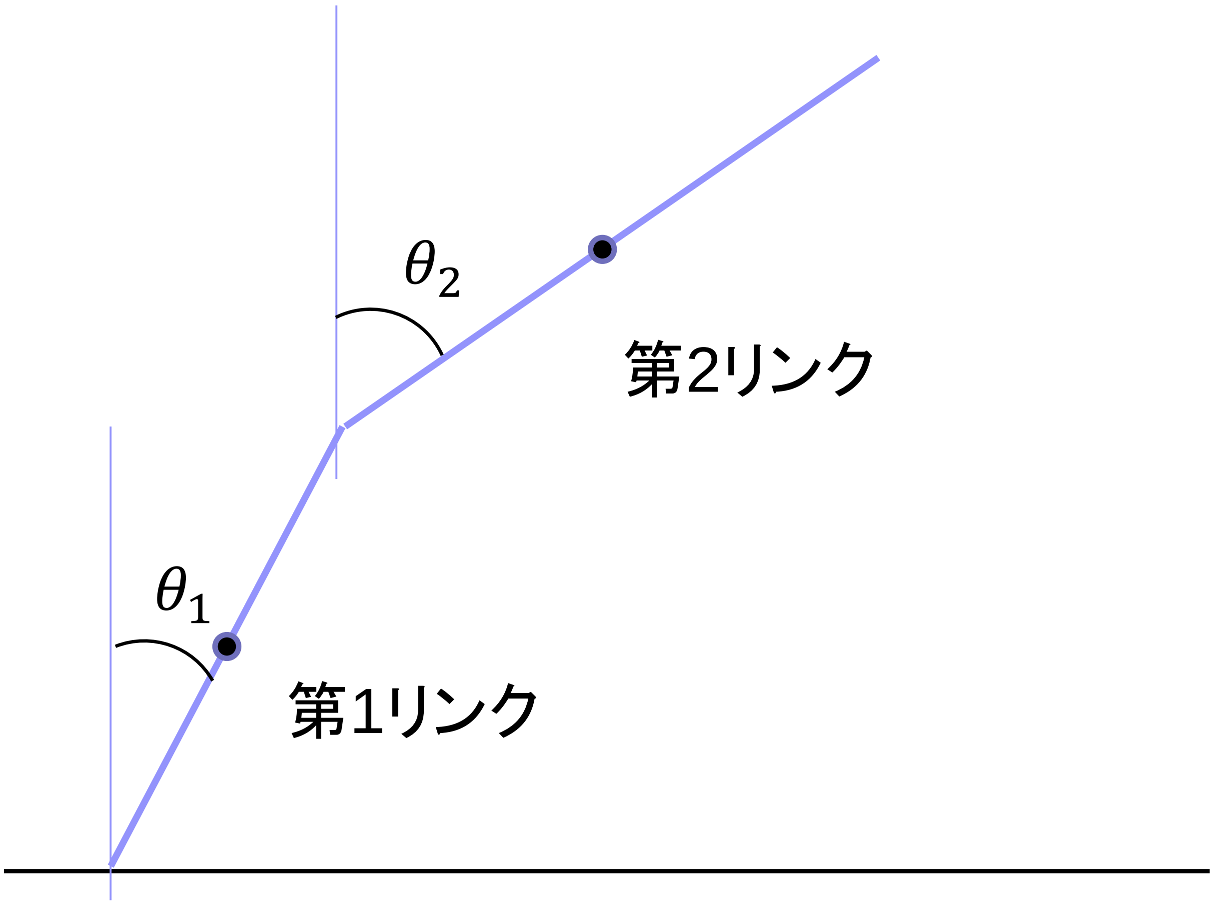


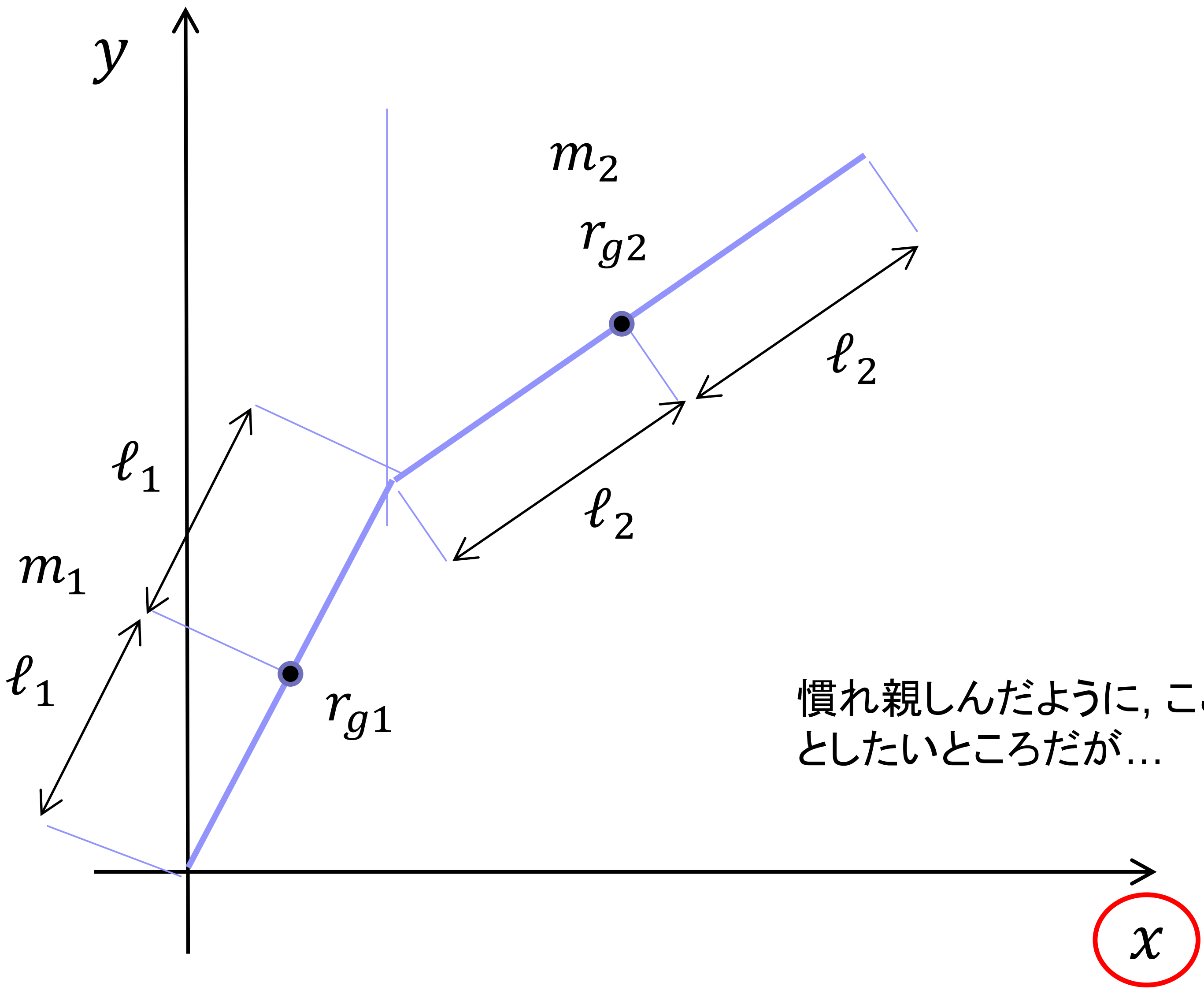
簡単のため, 外力は作用していないとすれば, 重心は等速直線運動し,
重心周りでボールが一定の角速度で回転している, と見ることができる.



ボールは緑の点の周りを回転している, とみなすこともできるが, 緑の点は重心でないので, その運動を単純に外力の和から推測することはできない.
(回転運動との連成によって, 複雑な運動をしている.)

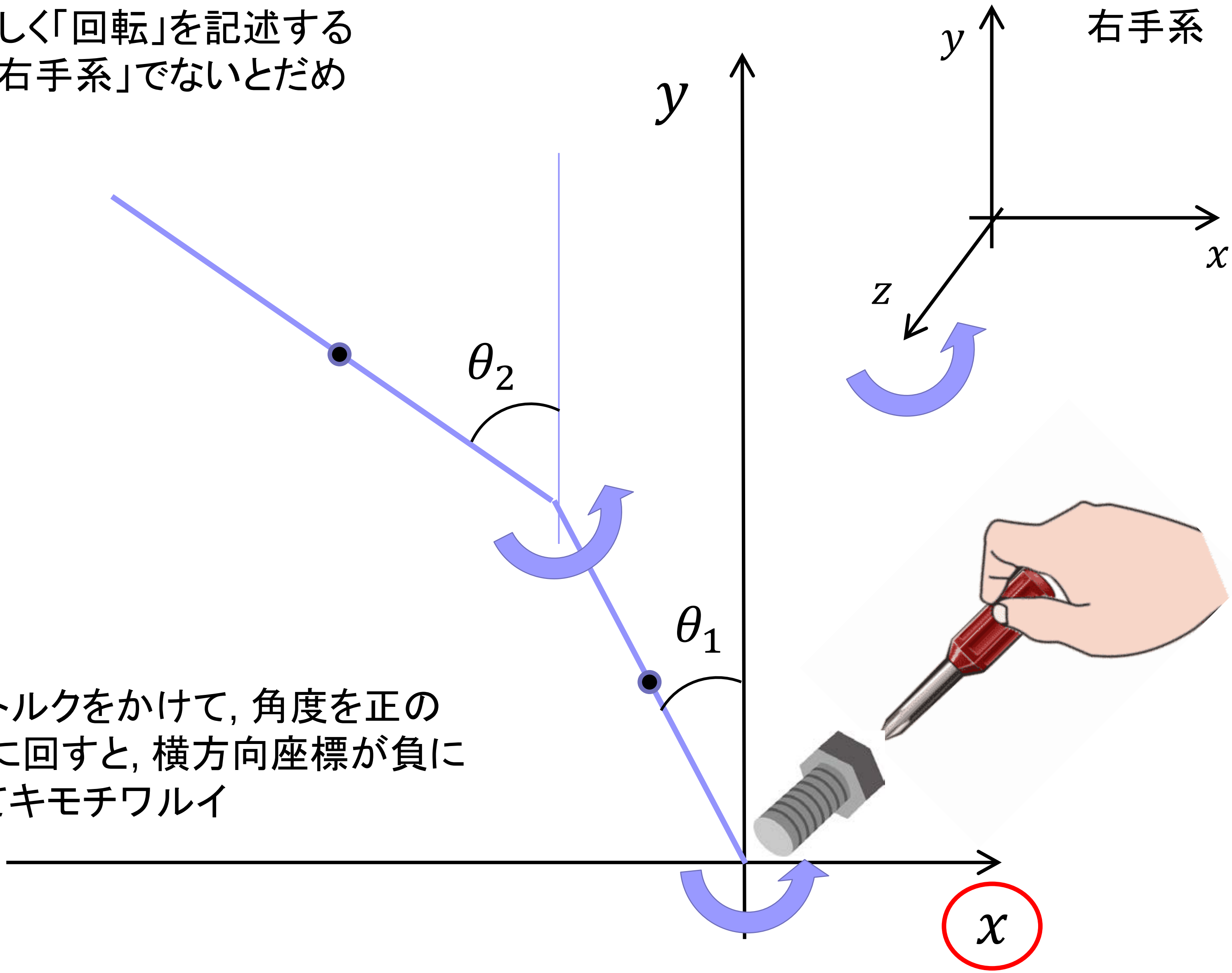
鉛直面内を運動する2リンクマニピュレータ



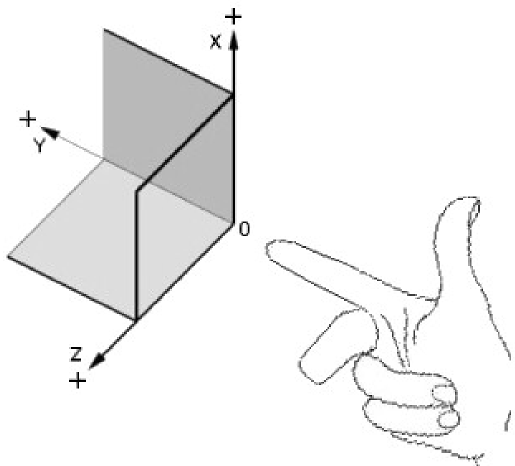


慣れ親しんだように, ここをx軸
としたいところだが…

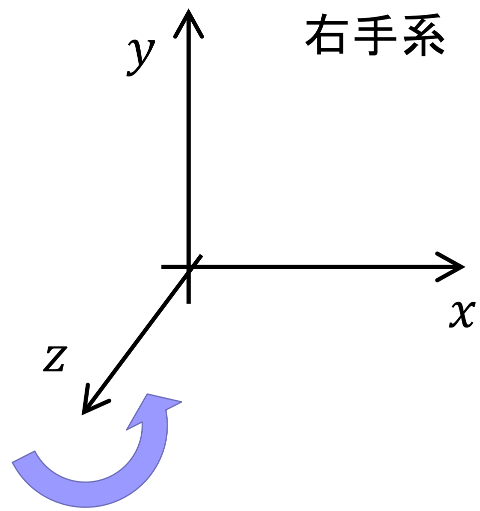
将来的に正しく「回転」を記述するためには,「右手系」でないとだめ



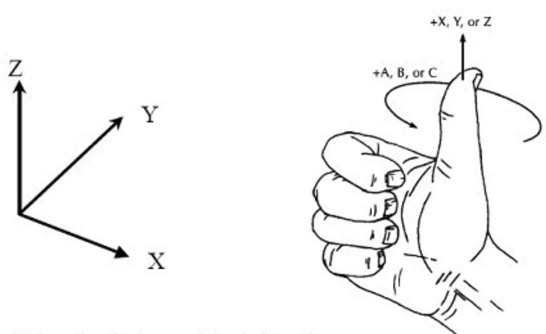
正のトルクをかけて, 角度を正の方向に回すと, 横方向座標が負になってキモチワルイ



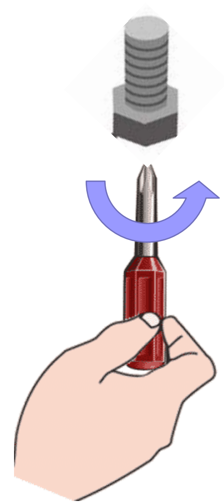
右手系



Right Hand Rule



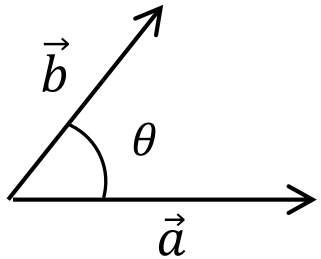
The right hand rule is used to define the positive direction of the coordinate axes.



各軸の正の
向きにねじ込む
方向が正転

ベクトル間の演算

内積 (inner product)

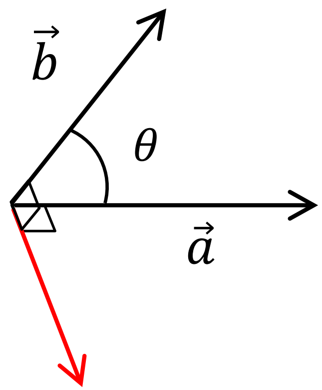


$$\langle \vec{a}\,, \vec{b}\,\rangle = |\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta$$

スカラー量

外積 (outer product)

ベクトル量



$\vec{a} \times \vec{b}$　それぞれのベクトルに直交し, 右手系をなす方向

$$\left|\vec{a} \times \vec{b}\right| = |\vec{a}||\vec{b}|\sin\theta$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} e_x & e_y & e_z \\ x_a & y_a & z_a \\ x_b & y_b & z_b \end{vmatrix} = (y_a z_b - z_a y_b,\, z_a x_b - x_a z_b,\, x_a y_b - y_a x_b)$$

外積は3次元空間内での回転運動の記述において重要な役割を果たす.
(右手系を使っておかないと困る.)

オイラーの運動方程式 (3次元バージョン)

ω： 各軸まわりの角速度(ベクトル)

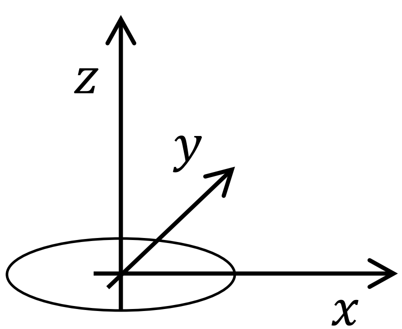
$$N = I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega)$$

各軸まわりのトルク（ベクトル）

慣性行列

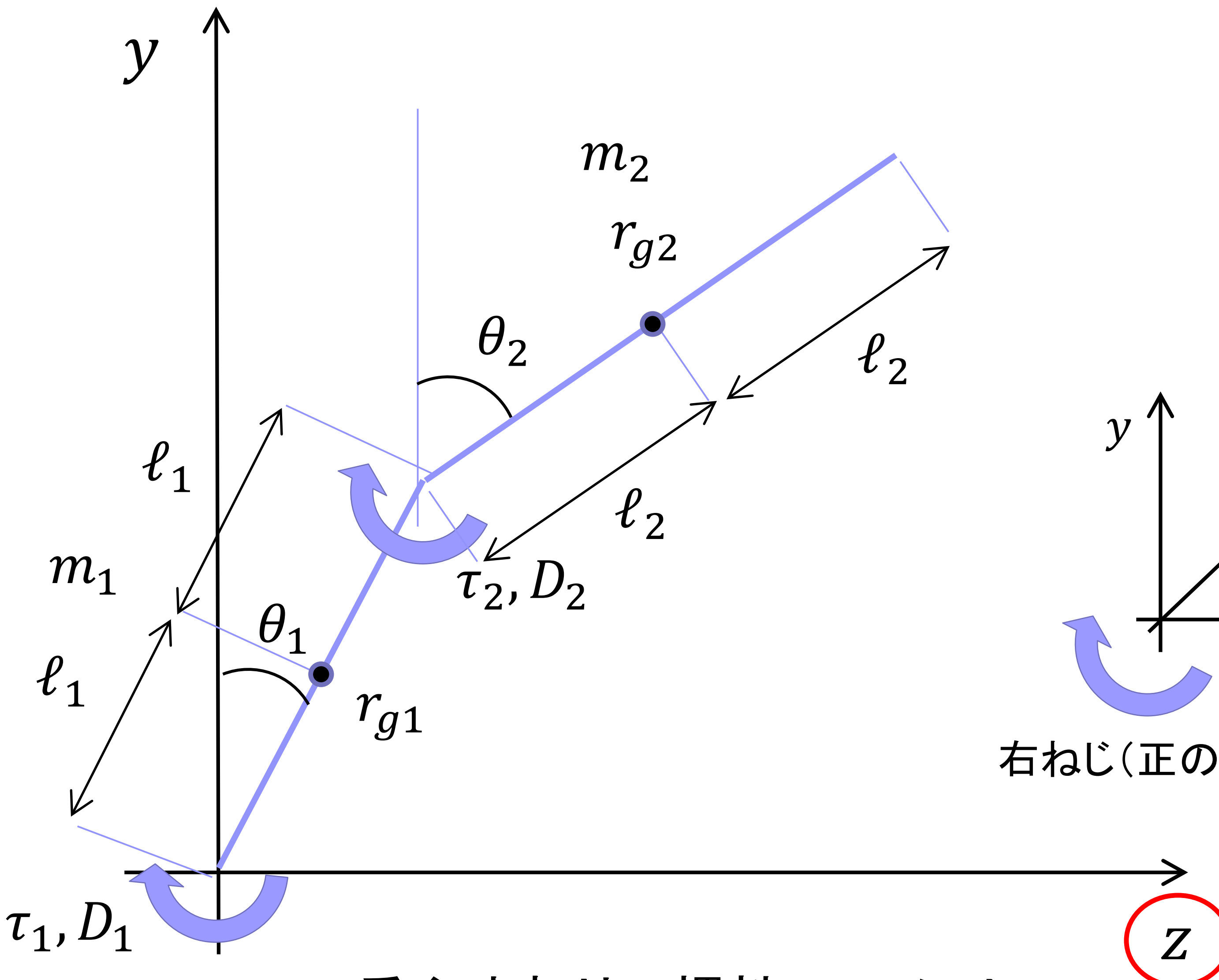
ベクトル間の外積

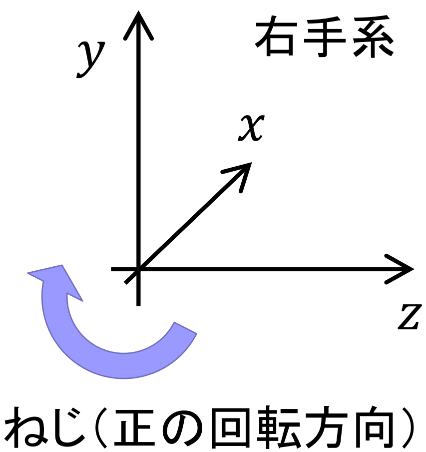
xy平面内の回転のとき



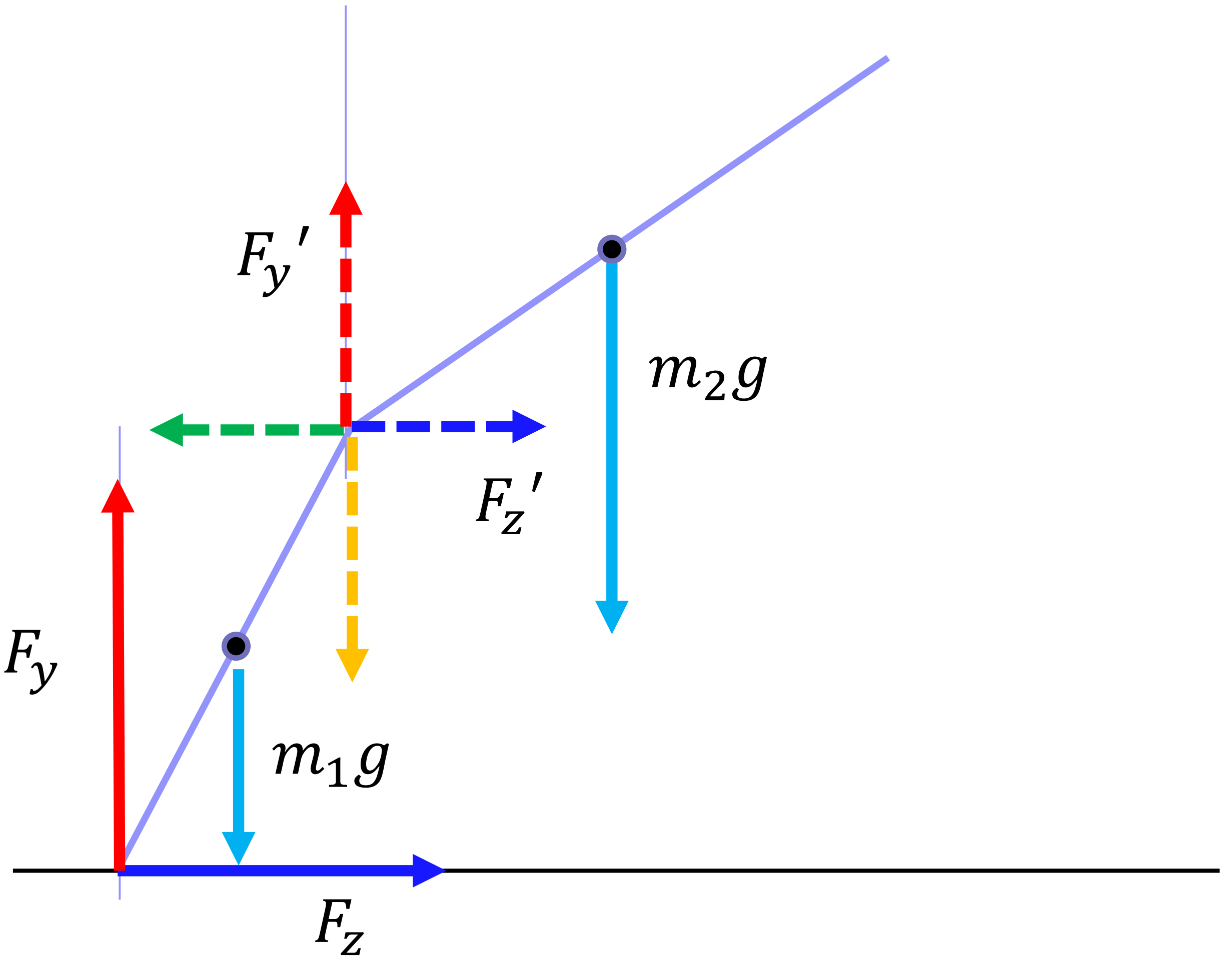
$$N = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ n_z \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}, \omega = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

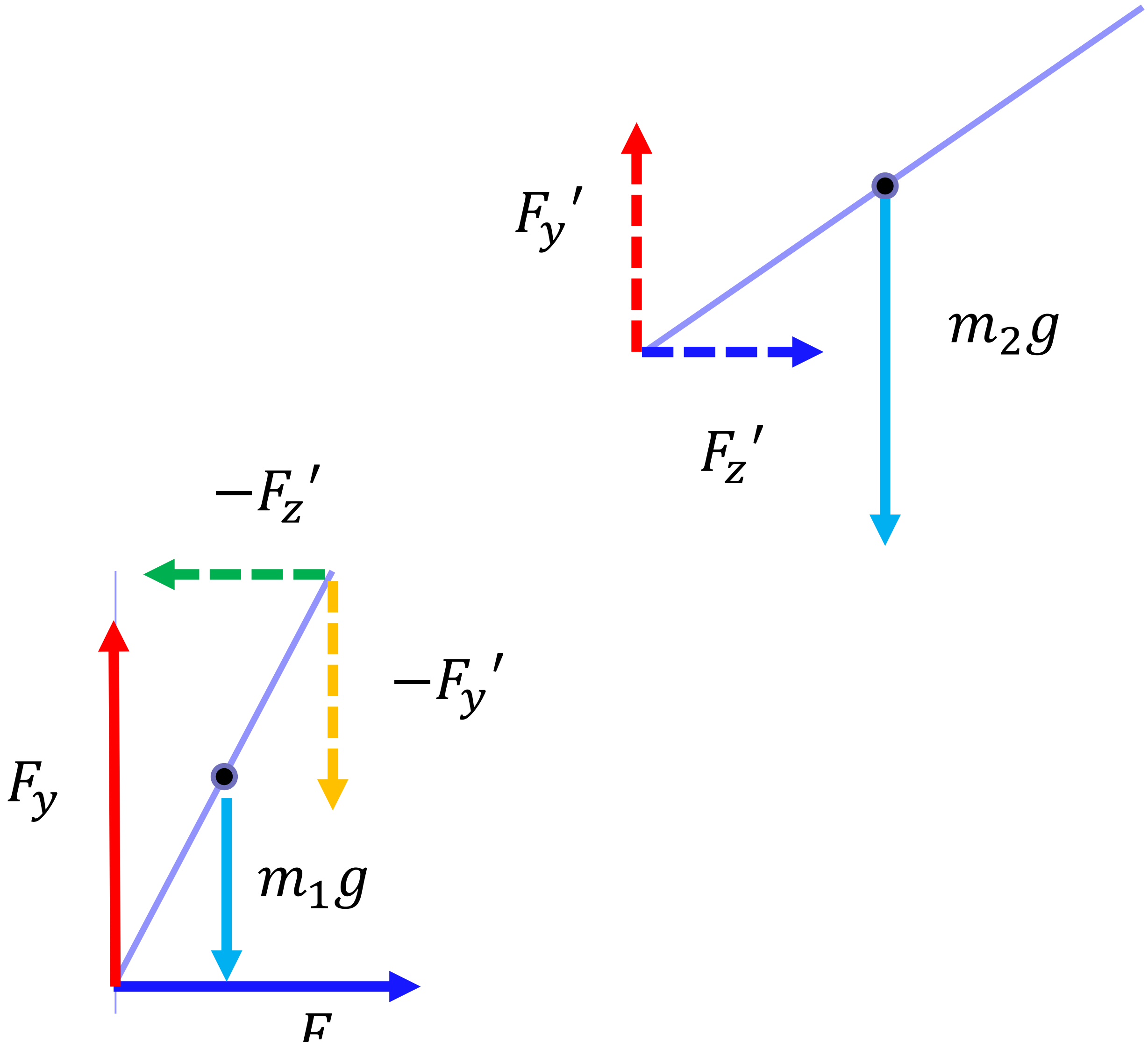
$I\omega$とωは同方向なので外積は0. したがって第2項は現れない.





重心まわりの慣性モーメント I_1, I_2


F_y'
$m_2 g$
F_z'
F_y
$m_1 g$
F_z


F_y'
$m_2 g$
F_z'
$-F_z'$
$-F_y'$
F_y
$m_1 g$
F_z

■ Equation of Motion for Double Pendulum

第1リンク重心の並進運動

$$m_1 \frac{d^2}{dt^2}(\ell_1 \sin\theta_1) = F_z - F_z' \qquad \cdots (1)$$

$$m_1 \frac{d^2}{dt^2}(\ell_1 \cos\theta_1) = -m_1 g - F_y' + F_y \qquad \cdots (2)$$

第2リンク重心の並進運動

$$m_2 \frac{d^2}{dt^2}(2\ell_1 \sin\theta_1 + \ell_2 \sin\theta_2) = F_z' \qquad \cdots (3)$$

$$m_2 \frac{d^2}{dt^2}(2\ell_1 \cos\theta_1 + \ell_2 \cos\theta_2) = -m_2 g + F_y' \qquad \cdots (4)$$

第1リンクの重心まわりの回転運動

$$I_1 \frac{d^2}{dt^2}\theta_1 + D_1\dot{\theta}_1 - D_2\left(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1\right) = (F_y + F_y')\ell_1 \sin\theta_1$$

$$-(F_z + F_z')\ell_1 \cos\theta_1 + \tau_1 - \tau_2 \cdots \ (5)$$

$$I_1 = \int_{-\ell_1}^{\ell_1} \left(\frac{m_1}{2\ell_1}\right) r^2 dr = \left(\frac{m_1}{2\ell_1}\right) 2 \left[\frac{r^3}{3}\right]_0^{\ell_1} = \frac{1}{3} m_1 \ell_1^2$$

第2リンクの重心まわりの回転運動

$$I_2 \frac{d^2}{dt^2}\theta_2 + D_2\left(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1\right) = F_y'\ell_2 \sin\theta_2 - F_z'\ \ell_2 \cos\theta_2 + \tau_2 \cdots \ (6)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} m_2 \ell_2^2$$

(1)～(6)から内力であるF_z, F_y, F_z', F_y' を消去する.

$$\frac{d^2}{dt^2}\sin\theta$$ 等の計算

陽に表現していないが, 角度θ は時間関数 $\theta(t)$ であることに注意

$\sin\theta$ を θ で微分してから, θ を時間微分してかける

$$\frac{d^2}{dt^2}\sin\theta(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{d}{dt}\sin\theta(t)\right) = \frac{d}{dt}\left(\cos\theta(t)\,\dot{\theta}(t)\right)$$

$$= \left(\frac{d}{dt}\cos\theta(t)\right)\dot{\theta}(t) + \cos\theta(t)\frac{d}{dt}\left(\dot{\theta}(t)\right)$$

$$= -\sin\theta(t)\,\dot{\theta}^2(t) + \cos\theta(t)\,\ddot{\theta}(t)$$

必要な微分演算を行い, (1)～(6)から内力F_z, F_y, F_z', F_y' を消去すると, $\theta_1, \dot{\theta}_1, \ddot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2$ からなる方程式（運動方程式）が得られる

⬇

レポート課題:

次回（補講） 4/16(火)11:00- 大講義室の講義冒頭で提出