

専門科目「ロボット力学」

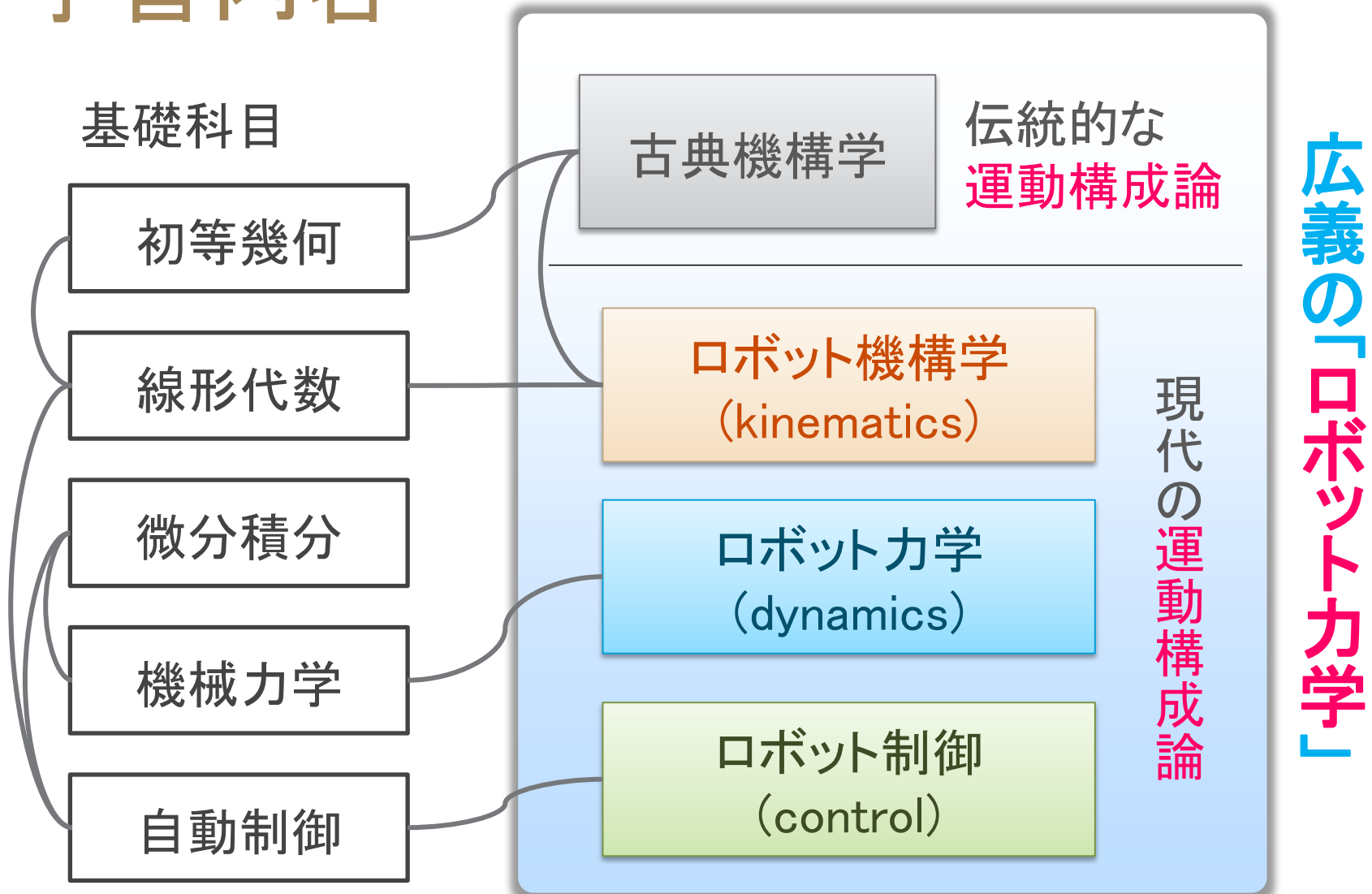
第1講 ガイダンス

宇都宮大学大学院工学研究科
機械知能工学専攻 吉田 勝俊

※レポート用紙・教材のダウンロード

➔ <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

学習内容



授業計画

1講 ガイダンス

第1部 古典機構学

2講 リンク機構と自由度

3講 瞬間中心の法則

4講 リンク速度の図式解法

○第1回レポート

第2部 ロボット機構学

5講 位置ベクトルと座標系

6講 多体系の運動学

7講 ロボット・マニピュレータ

○第2回レポート

第3部 ロボット力学

8講 オイラー・ラグランジュ方程式

9講 一般化力とその応用

10講 接触と摩擦

11講 床面に転倒する倒立ロボット

○第3回レポート

第4部 ロボット制御

12講 対戦型ロボット・シミュレータ

13講 グループワーク1

14講 グループワーク2

15講 競技会(発表を含む)／まとめ

○第4回レポート

ロボット力学 開講場所

週	場所	内容	
1	講義室	第1部	ガイダンス
2	講義室		リンク機構と自由度
3	講義室		瞬間中心の法則
4	講義室		リンク速度の図式解法
5	講義室	第2部	位置ベクトルと座標系
6	講義室 → メディア基盤センター		多体系の運動学
7	メディア基盤センター		ロボット・マニピュレータ
8	メディア基盤センター	第3部	オイラー・ラグランジュ方程式
9	メディア基盤センター		一般化力とその応用
10	メディア基盤センター		接触と摩擦
11	メディア基盤センター		床面に転倒する倒立ロボット
12	講義室 → メディア基盤センター	第4部	対戦型ロボット・シミュレータ
13	メディア基盤センター		グループワーク1
14	メディア基盤センター		グループワーク2
15	メディア基盤センター		競技会(発表を含む)／まとめ

「ロボット力学」の受講方法

■ 配布資料

- <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/> でダウンロード
- 各自, 印刷して持参せよ

■ 参考書

- 必修科目「機械力学」のテキスト

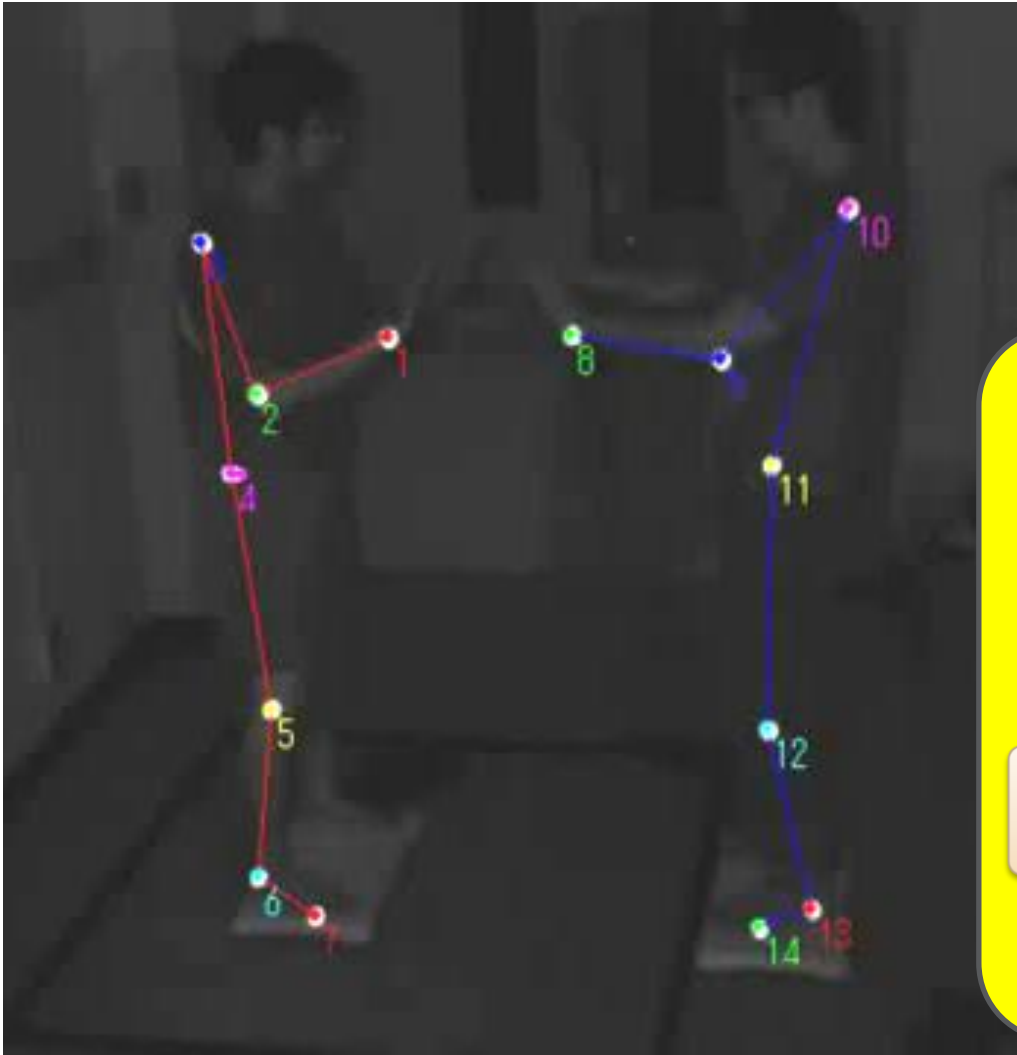
■ 成績評価

- 全4回のレポートの提出. (2/3以上の出席)
- 配点・・・レポート25% × 4回
- 秀 ≥ 90 点 優 ≥ 80 点 良 ≥ 70 点 可 ≥ 60 点

学習目標

- 古典機構学 / ロボット機構学 40%
- ロボット力学 / 制御 40%
- グループワーク（コミュニケーション） 20%

授業の最終目標 1/2



真似する機械を
作って遊ぶ！

手押し相撲に必要な...

ロボット制御

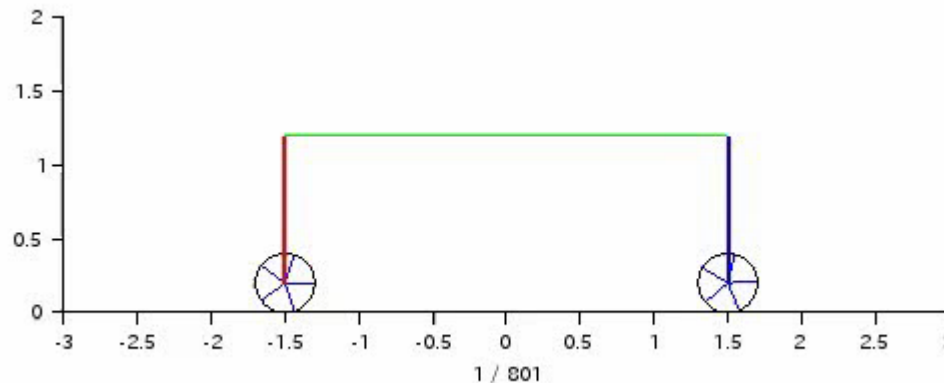
ロボット力学

ロボット機構学

を勉強すれば作れる？

授業の最終目標 2/2

■ 第4部「ロボット制御」の課題

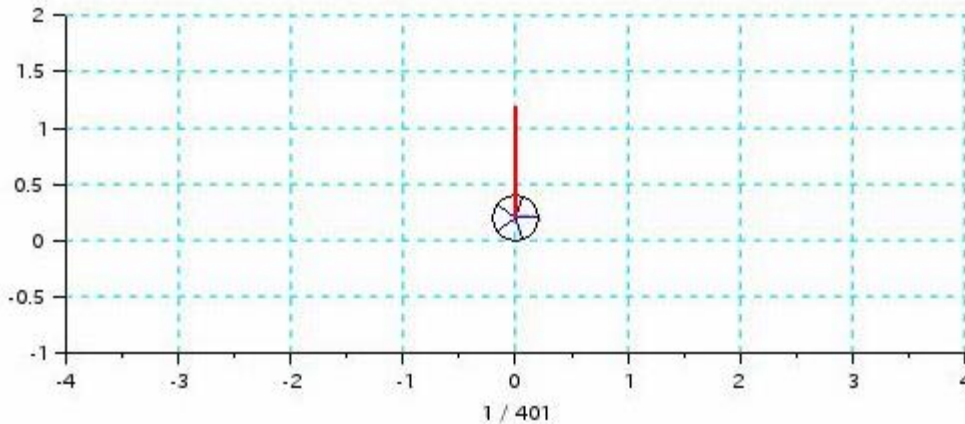


- | | | |
|------------|----------|---------|
| □ 機構を表す | Part 1~2 | ロボット機構学 |
| □ 運動方程式を導く | Part 3 | ロボット力学 |
| □ 制御方法を決める | Part 4 | ロボット制御 |

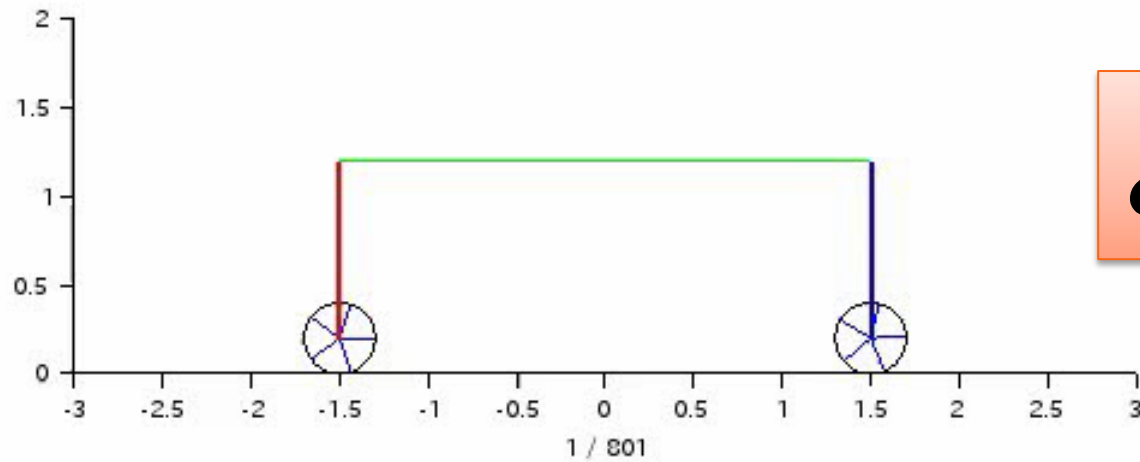
課題の例 転倒するロボット

倒立ロボット
+ 転倒限界
+ 床

作り方は？



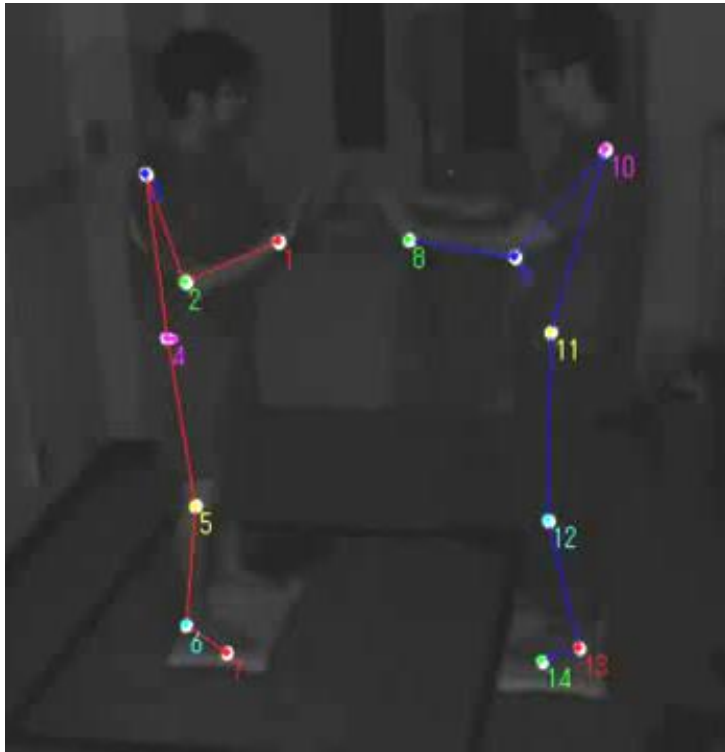
課題の例 つなげて対戦！



どうやって？

授業の続編は・・・吉田研究室へ！

- 手押し相撲の**人工知能**を開発中！



人工知能



- まだ小学生に負ける。今後もっと強くする！

製図用具で運動解析する！

PART 1: 古典機構学

古典機構学とは？

- 定義1:「運動」を作り出すメカニズムの辞典
 - 古典機構学・・・メカ(機械要素)の組合せ方法
 - ※ロボット・・・メカ＋電気＋知能の組合せ
- 定義2:「運動」の解析法(力・慣性を無視)
 - 古典機構学 ... 定規とコンパス
 - ロボット運動学 ... ベクトル計算
 - ※機械/ロボット力学は＋力・慣性(運動方程式)

専門科目「ロボット力学」

第2講

リンク機構と自由度

宇都宮大学大学院工学研究科
機械知能工学専攻 吉田 勝俊

※レポート用紙・教材のダウンロード

➔ <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

「機械」にできること？

- 形状(位置関係)を保つ
- 力を動きに変える (逆も)
- 動き方を変換する

動き・力・位置関係

自転車の例

形状の保持

力→動き

回転→直進

午前10:55

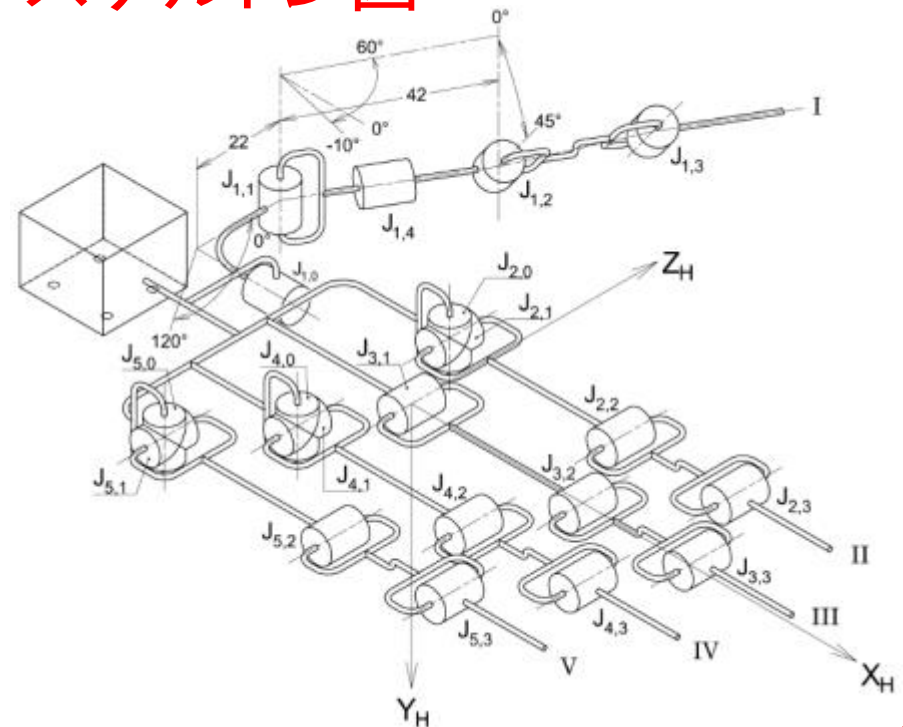
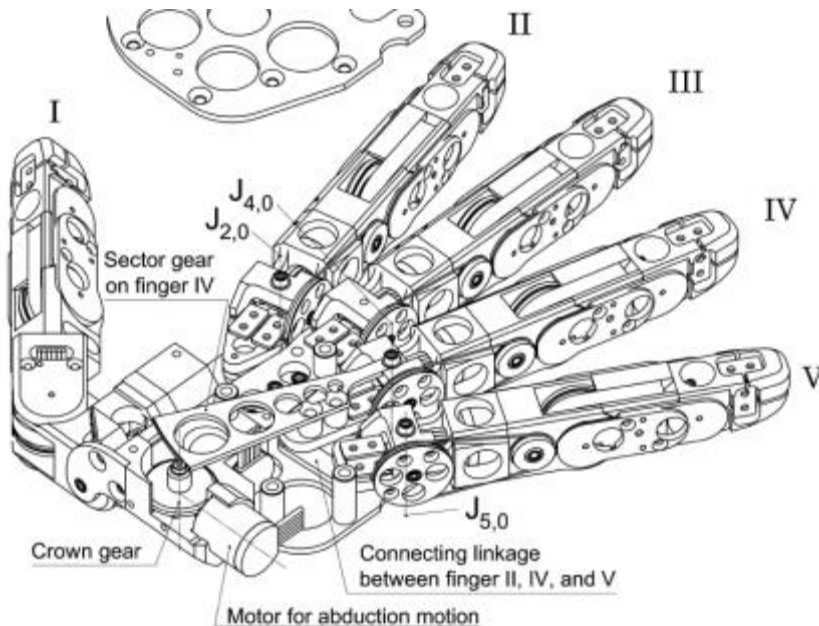
人が乗らないと倒れる

スケルトン図(別名:ポンチ絵)

- いわゆる「線図」のこと. 製作用→思考用

図面⇔

スケルトン図



信学技報HIP2005-61(2005-10) より

スケルトン図の実例



- 現実の関節とは，必ずしも対応しない.
- スケルトン図＝モデル(模型)
- ある現実のモデルは，用途ごとに複数あってよい.

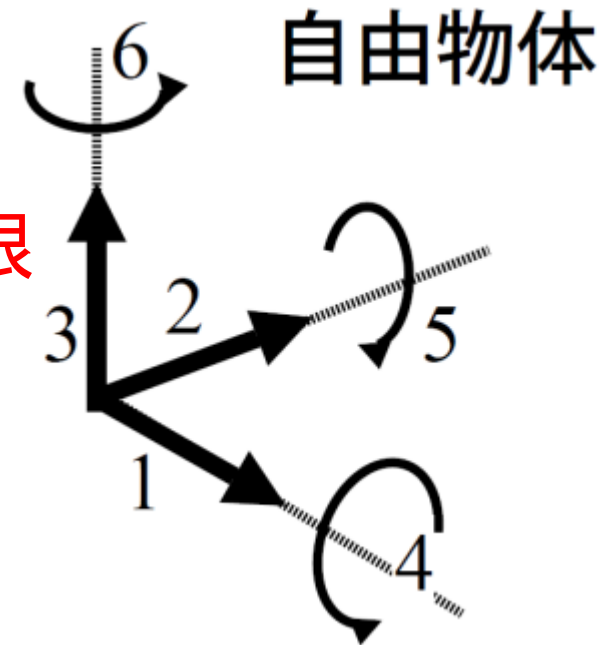
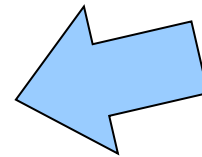
「運動を作る」ための思考法

- 「運動の実現」=「**自由度の制限**」
- 自由物体の姿勢=6自由度
 - 6つの数値で記録できる.
 - 並進3 + 回転3.



1 自由度に制限

直線運動が実現



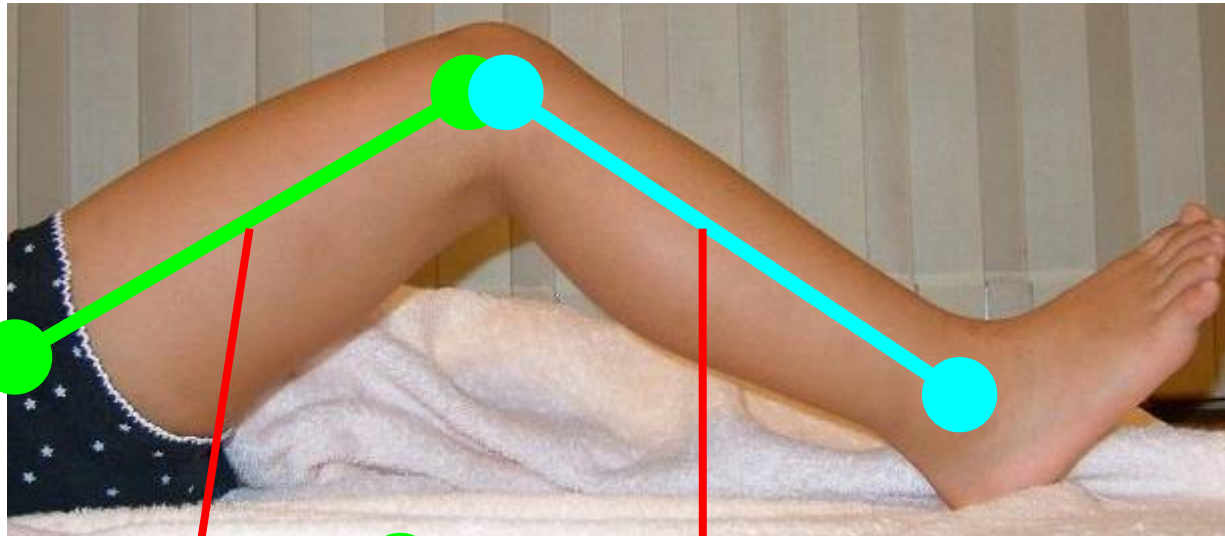
参考図書

- 伊藤「メカニズムの事典」(理工学社)
- 安田「機構学」(コロナ社)

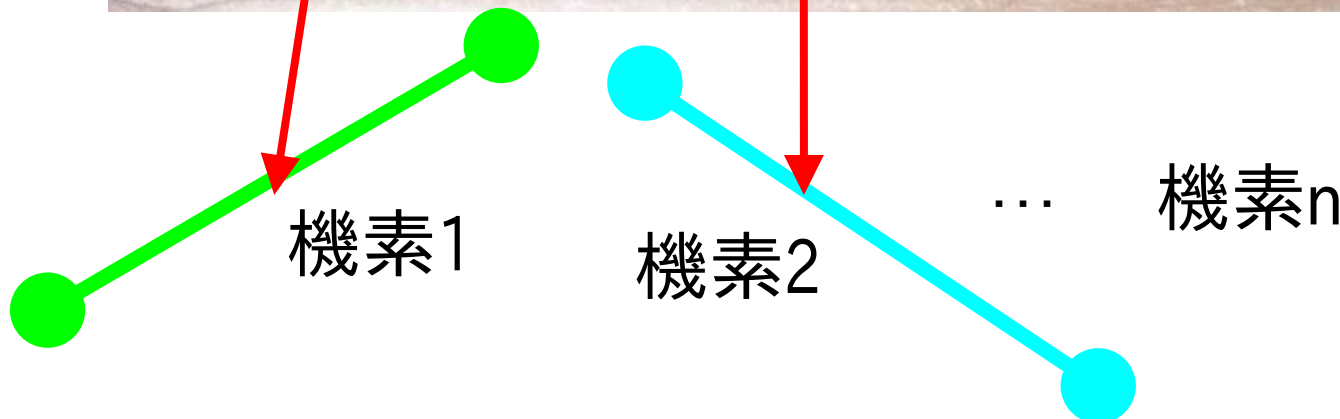


機素 (machine element)

定義：一体で運動する(とみなす)部品の単位

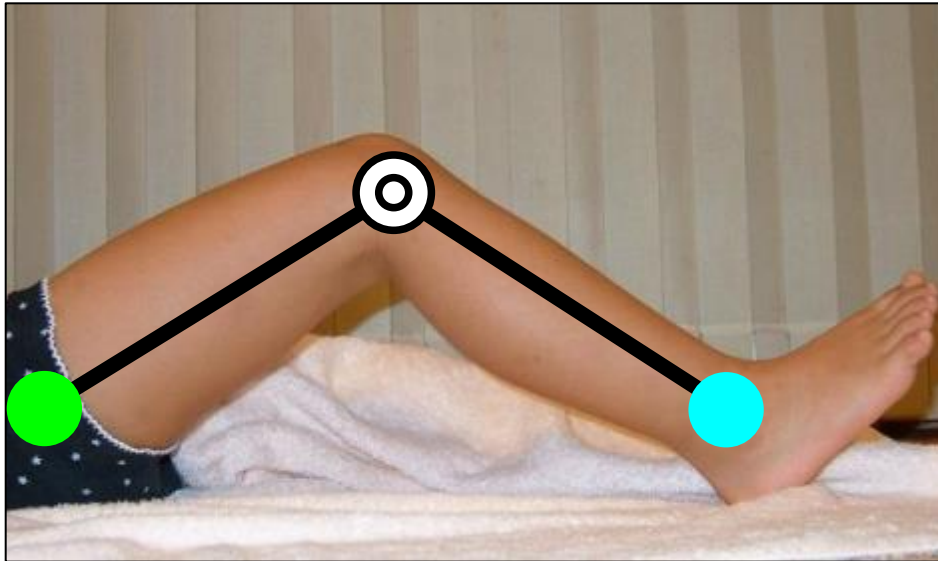


機素内部で
骨と肉は
違う運動！

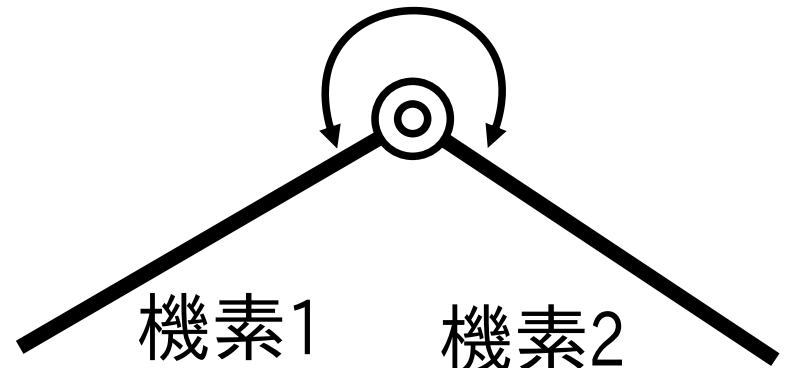


対偶 (pair)

定義：互い接触し，相対運動する機素のペア



「回対偶 (turning pair)」



☆ 対偶の組み合わせ = 機構

自由度の定義

■ 定義(対偶の自由度):

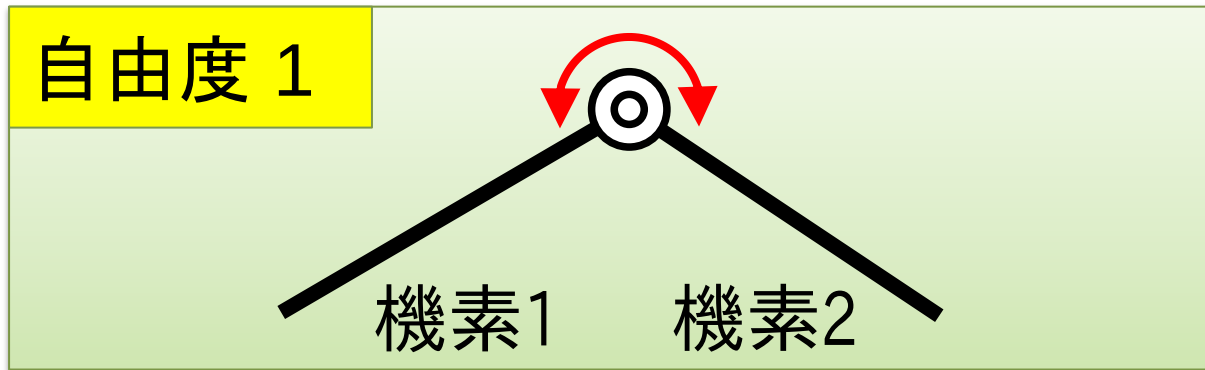
□ 対偶の**相対姿勢**を表すのに必要な変数の個数

■ 定義(機構の自由度):

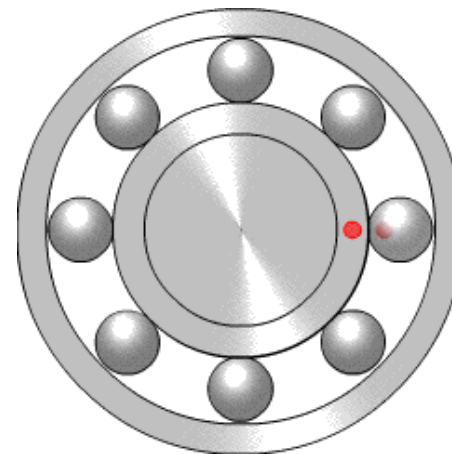
□ **ある機素を空間に固定**したとき...

□ 機構の**絶対姿勢**を表すのに必要な変数の個数

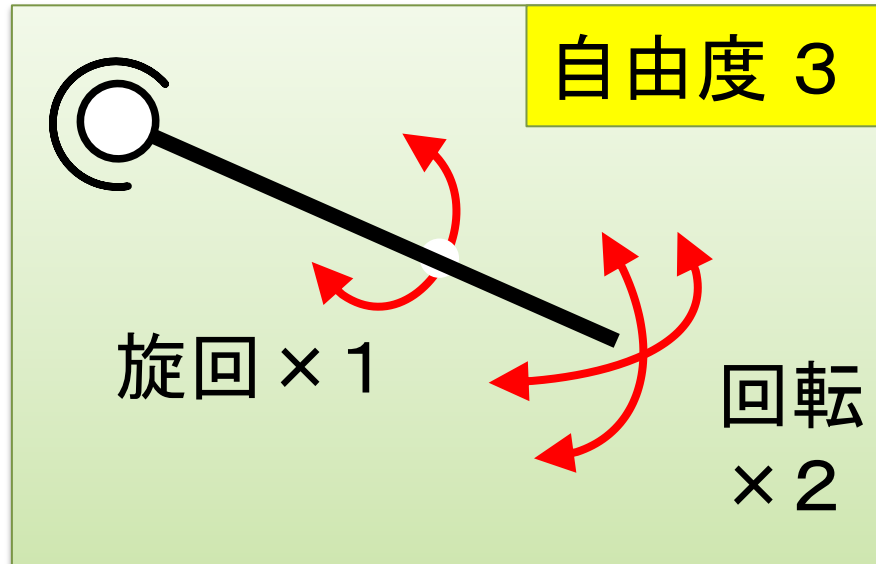
回り対偶 (turning pair)



■ ボールベアリング (玉軸受)

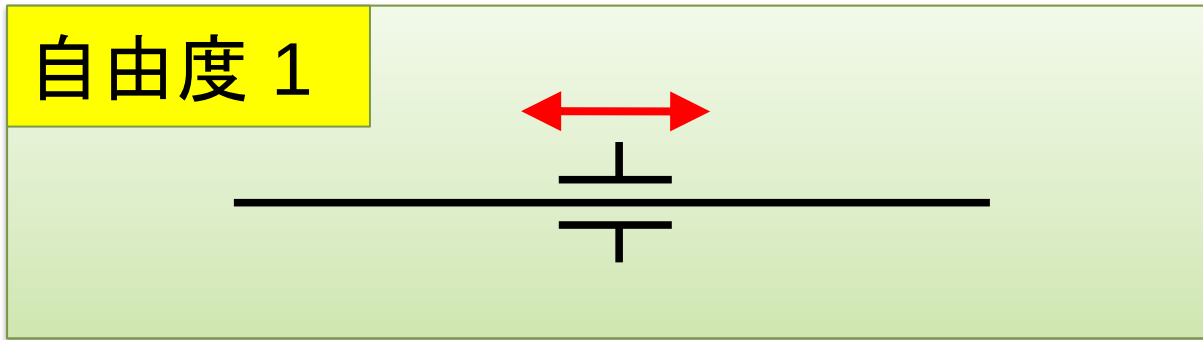


球面对偶 (spherical pair)



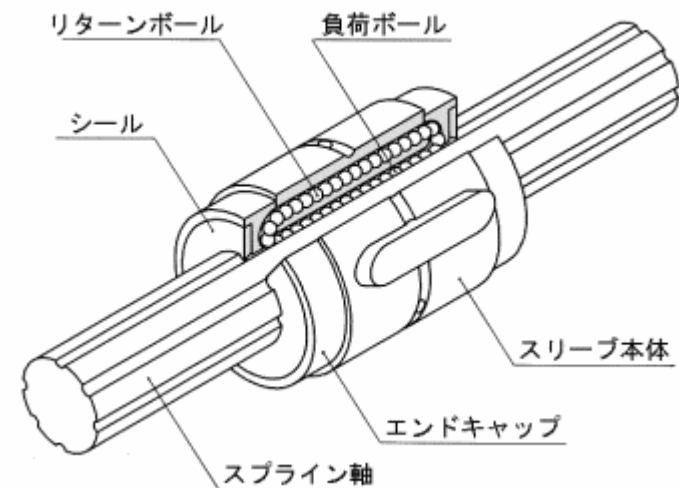
すべり対偶 (sliding pair)

自由度 1



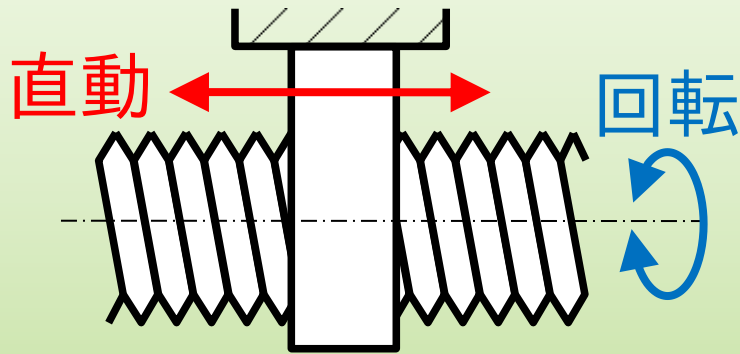
リニアガイド

ボールスプライン



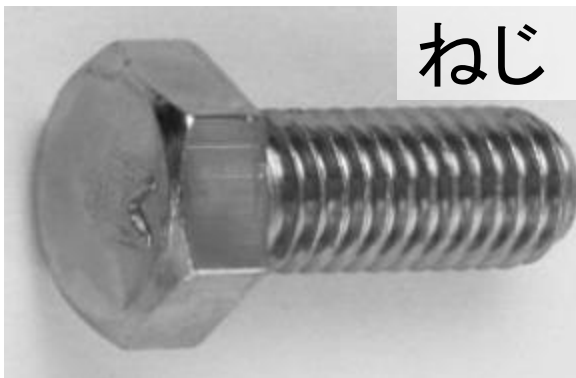
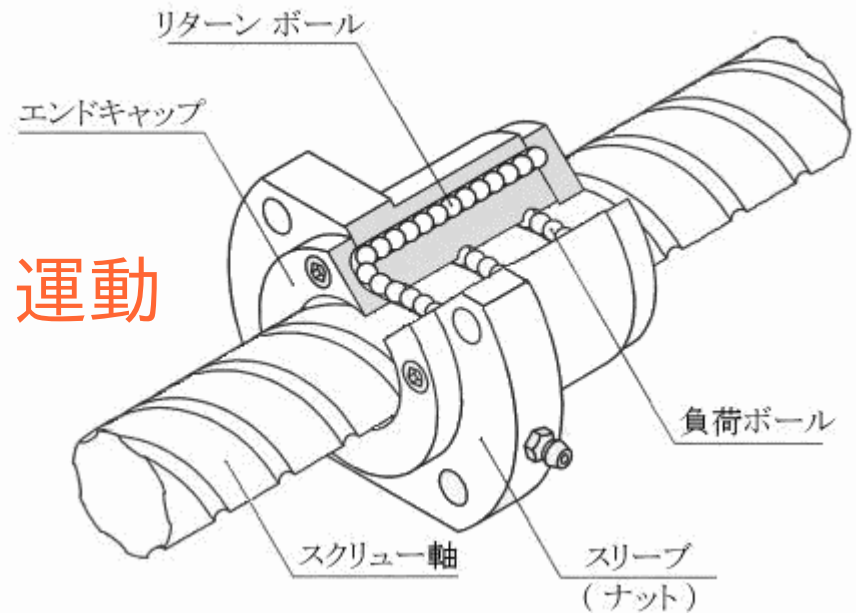
ねじ対偶 (screw pair)

自由度 1 (直動 $\propto$ 回転)



ボールねじ:

回転入力 $\rightarrow$ 直動出力



締結 $\leftrightarrow$ 運動

平面機構の自由度

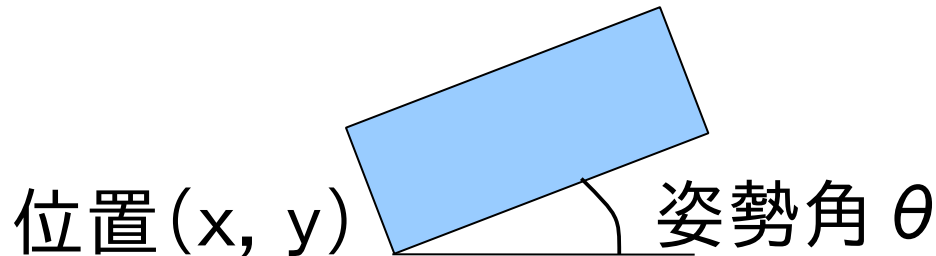
■ 平面機構の自由度 $= 3(n-1) - 2p_1 - p_2$

□ n … 機素の個数.

□ p_1 … 自由度1の対偶の個数.

□ p_2 … 自由度2の対偶の個数.

機素単体の自由度3

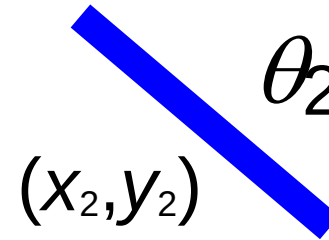
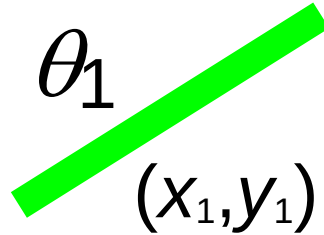


「機構の自由度」
の定義より, 基準
の機素を1つ固定

× $(n-1)$ 個
= $3(n-1)$

対偶による自由度減少

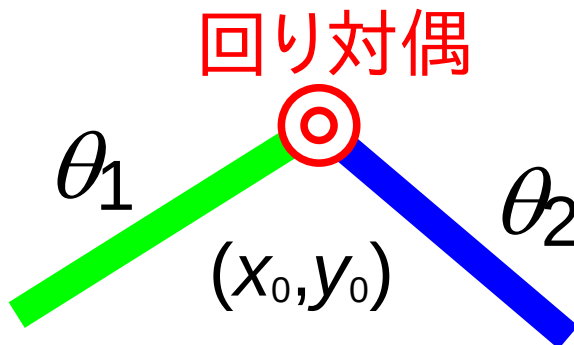
自由度3



自由度3

計) 自由度 = $3 + 3 = 6$

- 自由度1の対偶を追加すると...



位置の指定が統合

$\Rightarrow 6 - 2 \therefore$ 自由度4

立体機構の自由度

■ 立体機構の自由度

$$= 6(n-1) - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5$$

□ n … 機素の個数.

□ p_1 … 自由度1の対偶の個数.

□ p_2 … 自由度2の対偶の個数.

□ p_3 … 自由度3の対偶の個数.

□ p_4 … 自由度4の対偶の個数.

□ p_5 … 自由度5の対偶の個数.

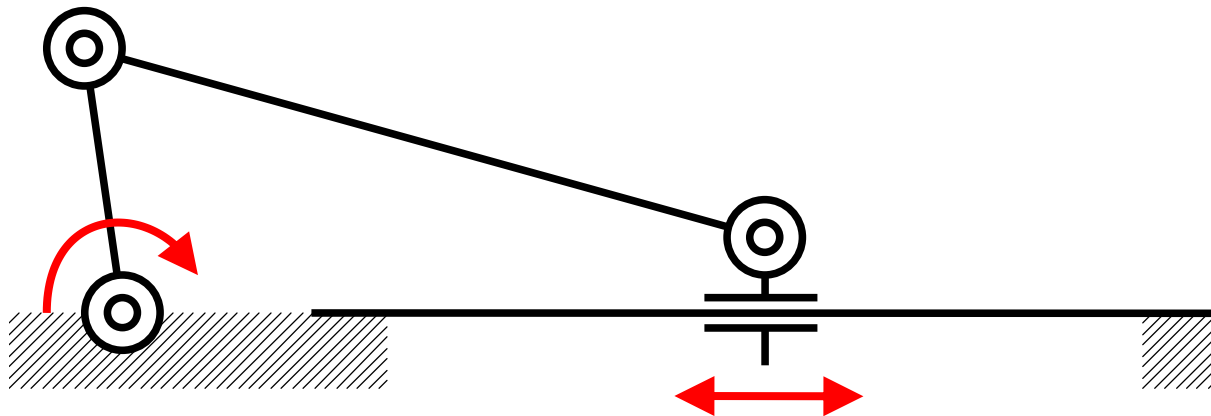
平面リンク機構

連鎖(chain)・・・機素・対偶の連結構造≡機構

リンク機構・・・・・・剛体からなる連鎖

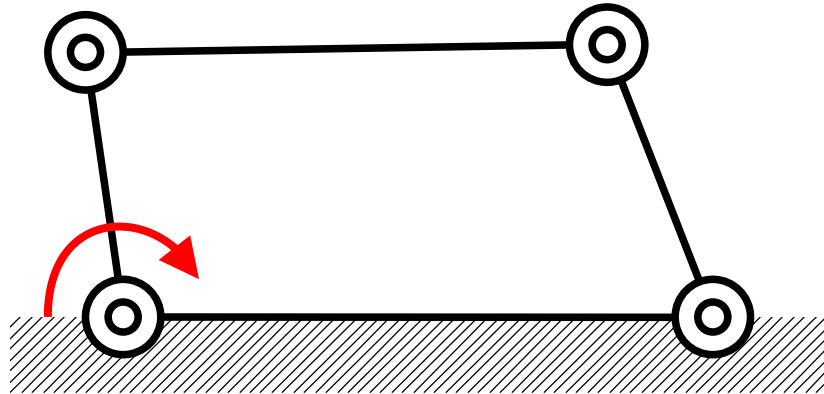
平面リンク機構・・運動が平面内のリンク機構

実習1 次の平面リンク機構の自由度を求めよ



実習2： 平面リンク機構の自由度

- 次の平面リンク機構の自由度を求めよ.



※対偶はすべて回り対偶

専門科目「ロボット力学」

第3講

瞬間中心の法則

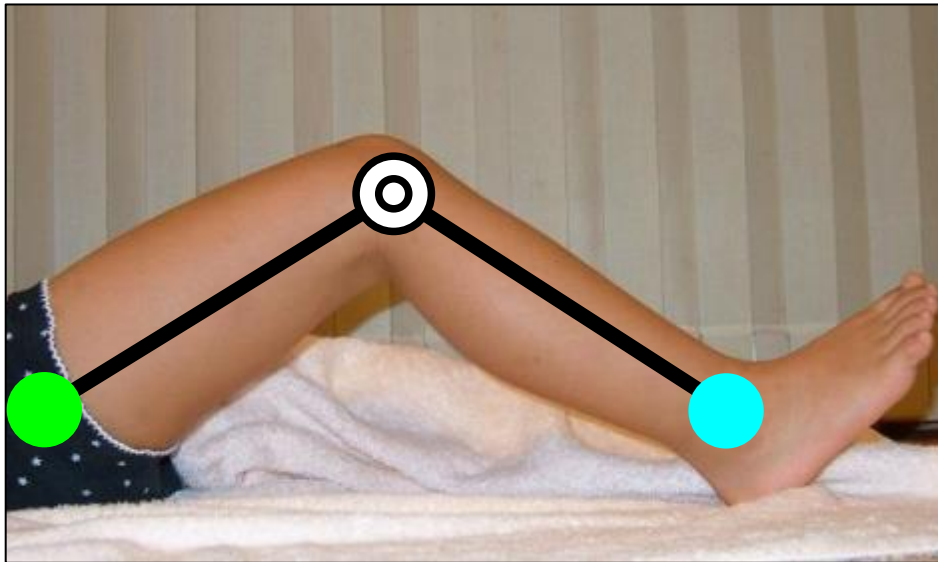
宇都宮大学大学院工学研究科
機械知能工学専攻 吉田 勝俊

※レポート用紙・教材のダウンロード

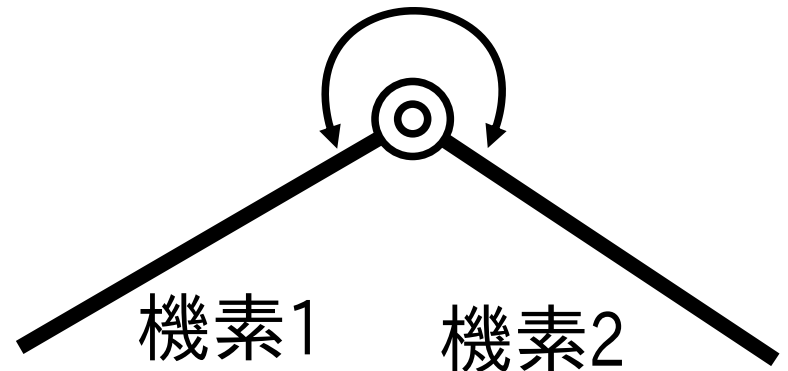
➔ <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

2講の復習

- 機構学の専門用語を導入した.
 - 機素, 対偶, リンク機構, 平面リンク機構
- 「機構の自由度」という数値を導入した.
 - 平面機構の自由度 $= 3(n-1) - 2p_1 - p_2$

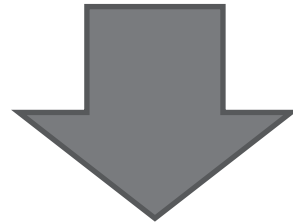


「回り対偶 (turning pair)」



学習内容

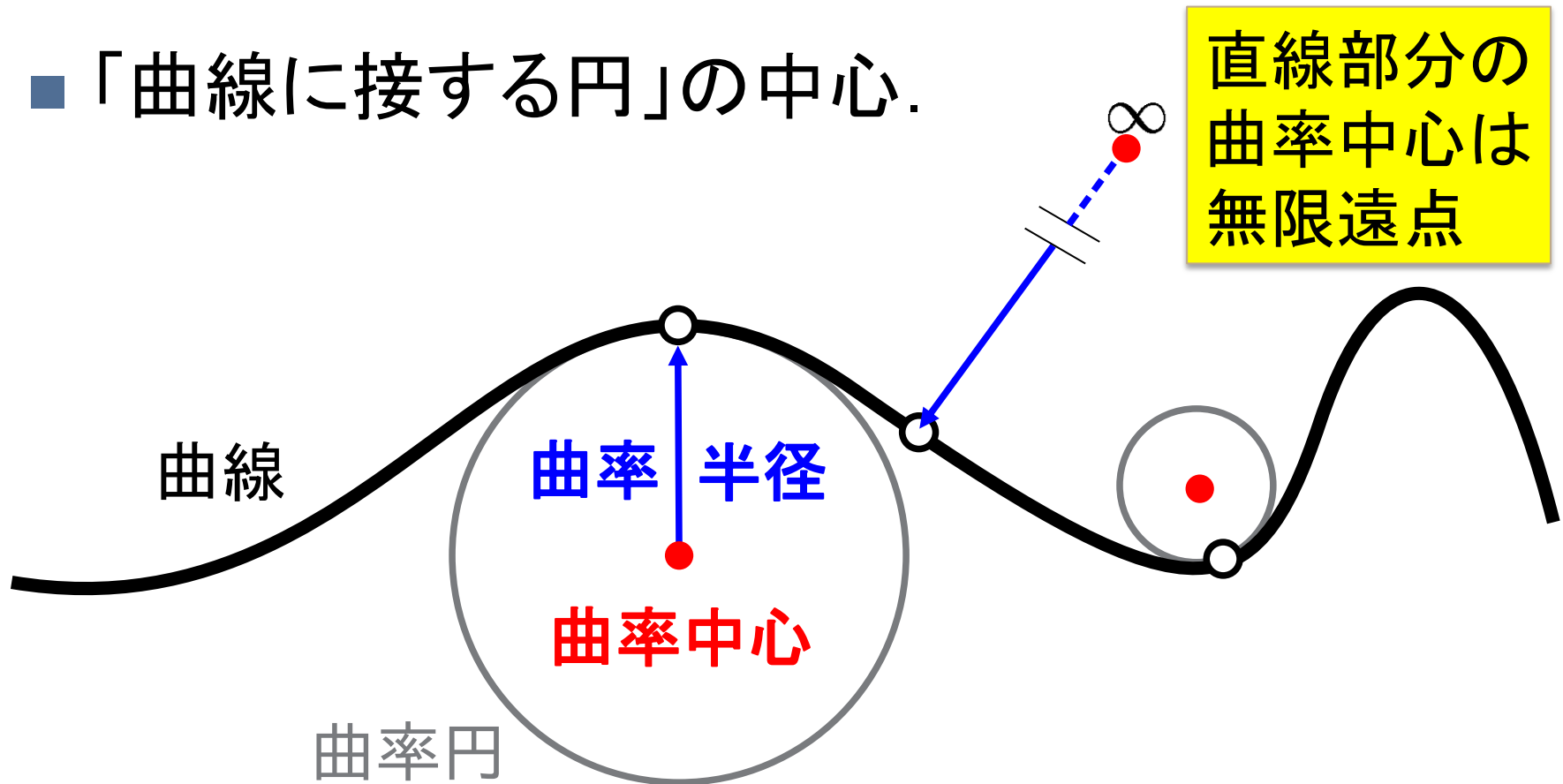
- より個別的な機構の特徴を，図式化したい！



- 機素の運動の特徴点を導入する.
 - 瞬間中心の定義
 - 3瞬間中心の定理(ケネディーの定理)
 - 例題

【準備】 曲率中心

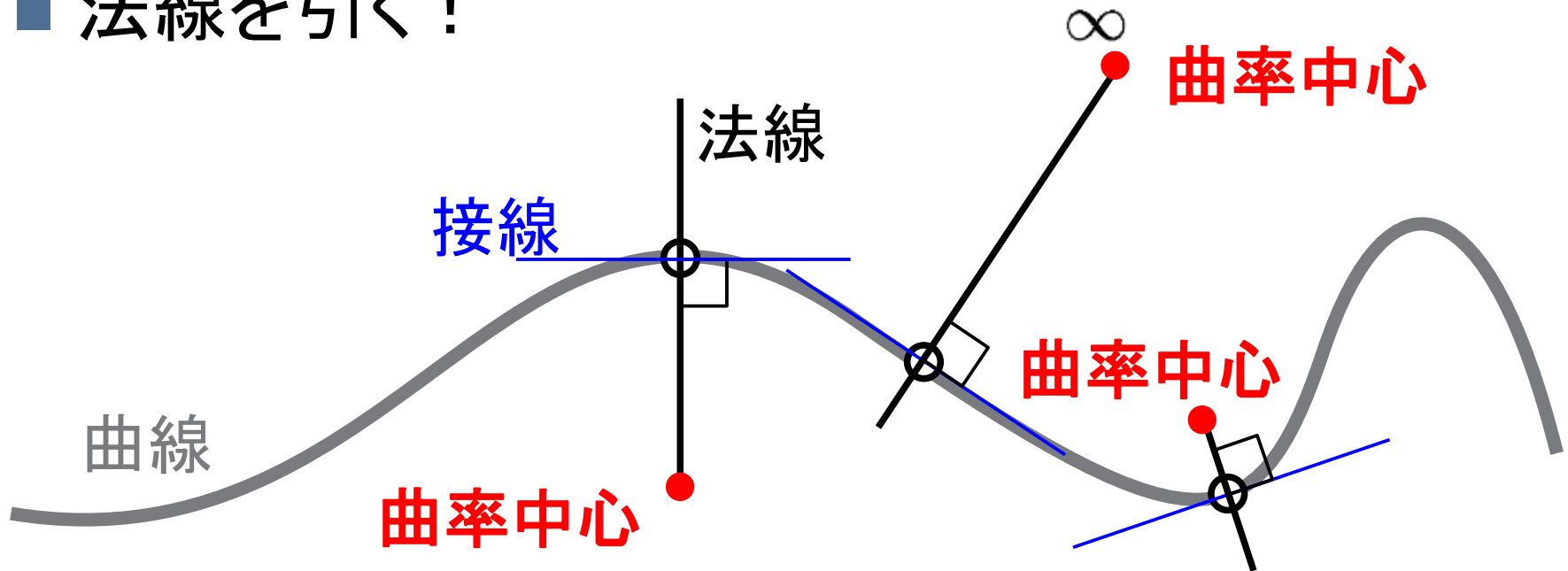
- 「曲線に接する円」の中心.



曲線は円弧でパッチワークできる！

曲率中心の見つけ方

- 法線を引く！



曲率中心は，法線方向にある！

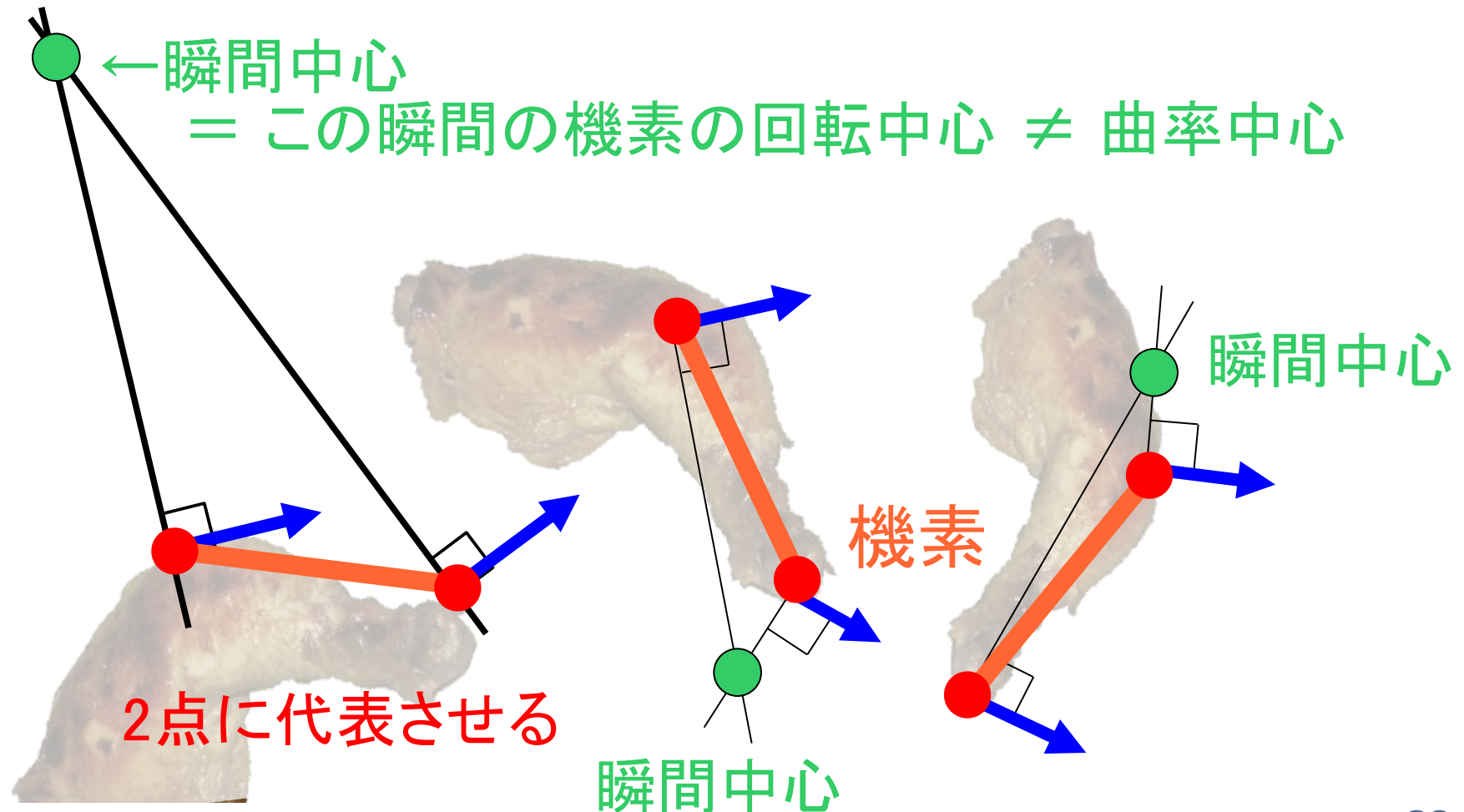
機素の運動

- 機素は「2点」または「線分」でモデル化！
 - 「1点」だと回転を考慮できない。



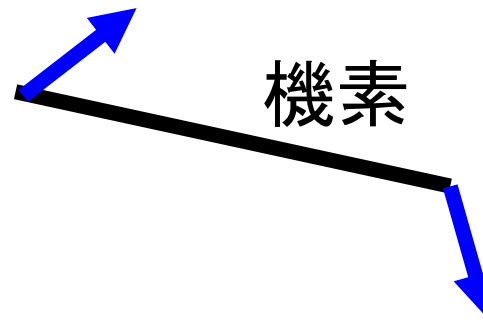
【定義】 機素の「瞬間中心」

- 「機素の2点の速度ベクトル」の法線の交点



実習1： 機素の瞬間中心

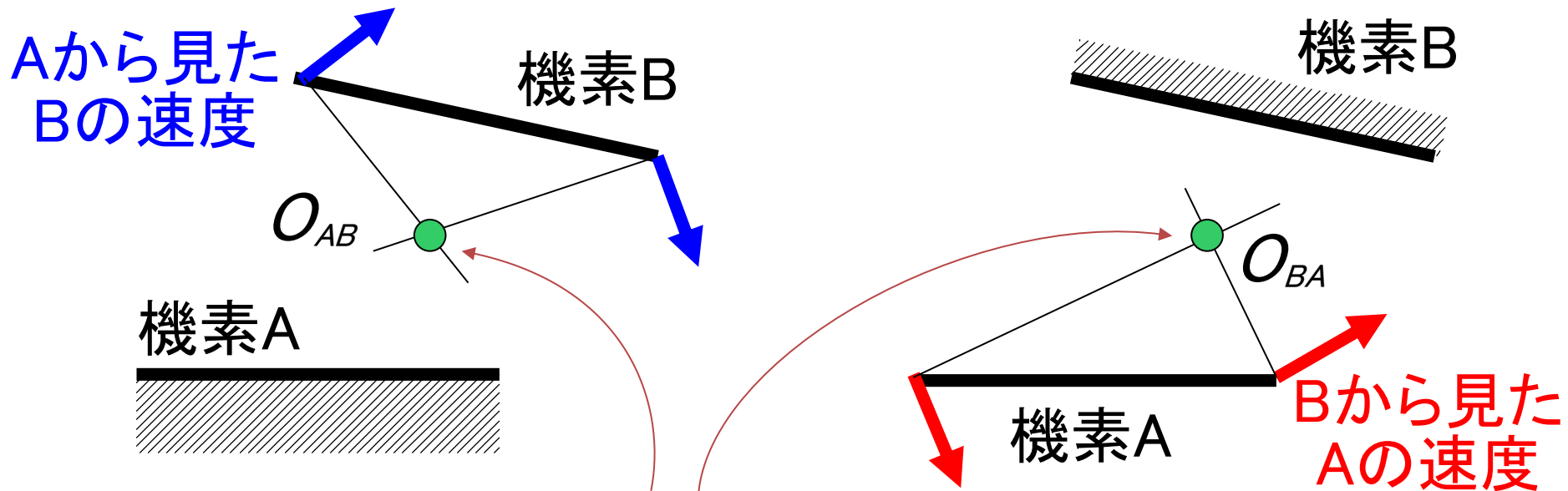
- 次の機素の瞬間中心を作図せよ.



(紙面から見た速度)

【定義】 機構の瞬間中心

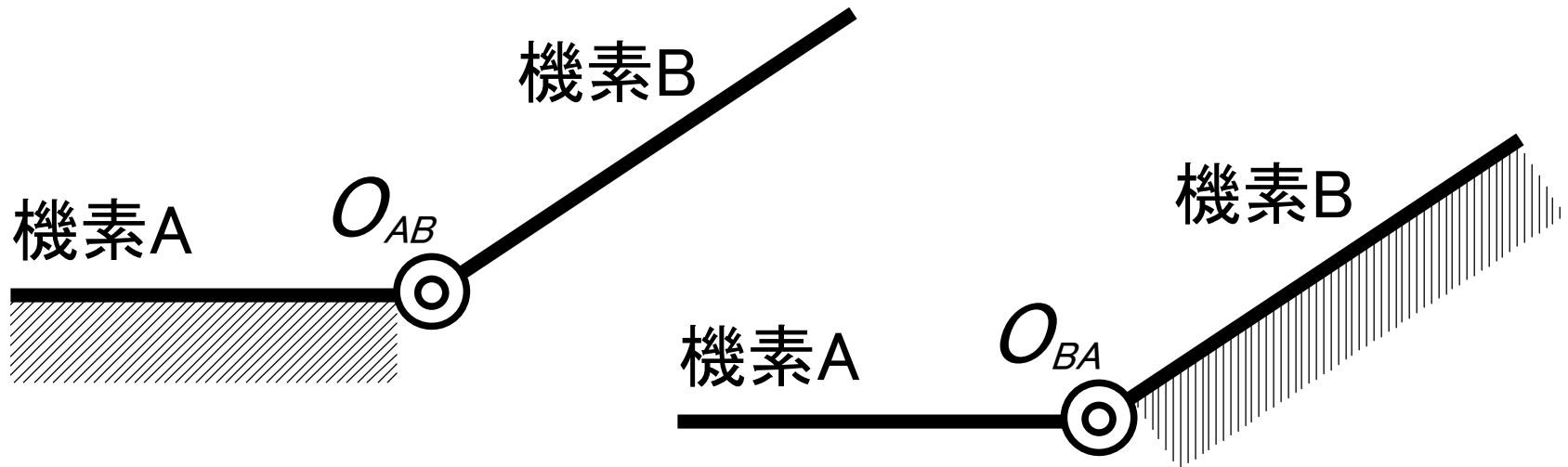
- 観測点が動くと、速度ベクトルは変化する。
- 機素Aから見た機素Bの瞬間中心を O_{AB} と書く。



どちらが基準でも回転中心は同じ場所！ ※ピン止め

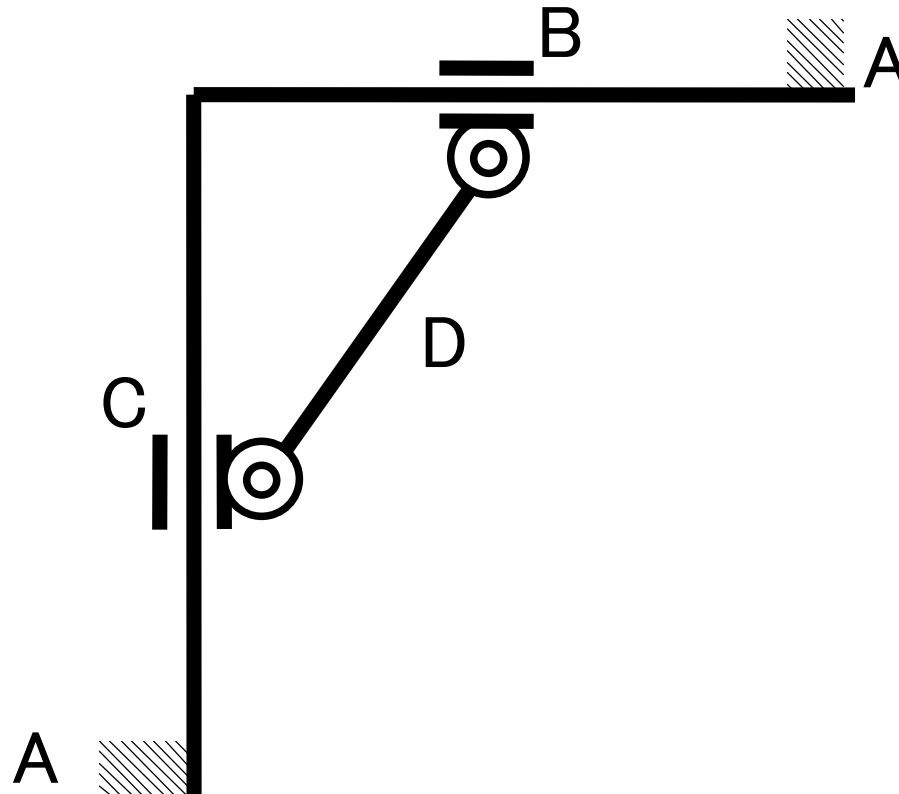
法則： 一般に、 $O_{AB} = O_{BA}$.

自明な瞬間中心の例(回り対偶)

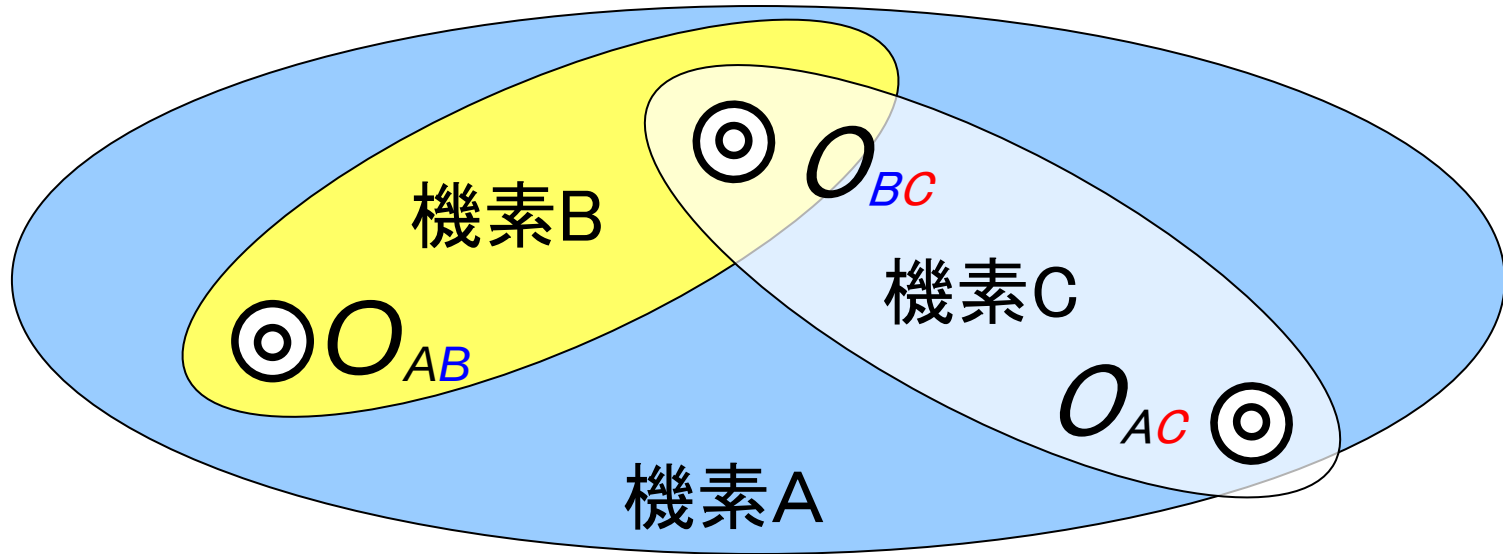


実習2: スライダの瞬間中心

- 固定節Aに対する, 機素Dの瞬間中心 O_{AD} を作図せよ.



3瞬間中心の定理

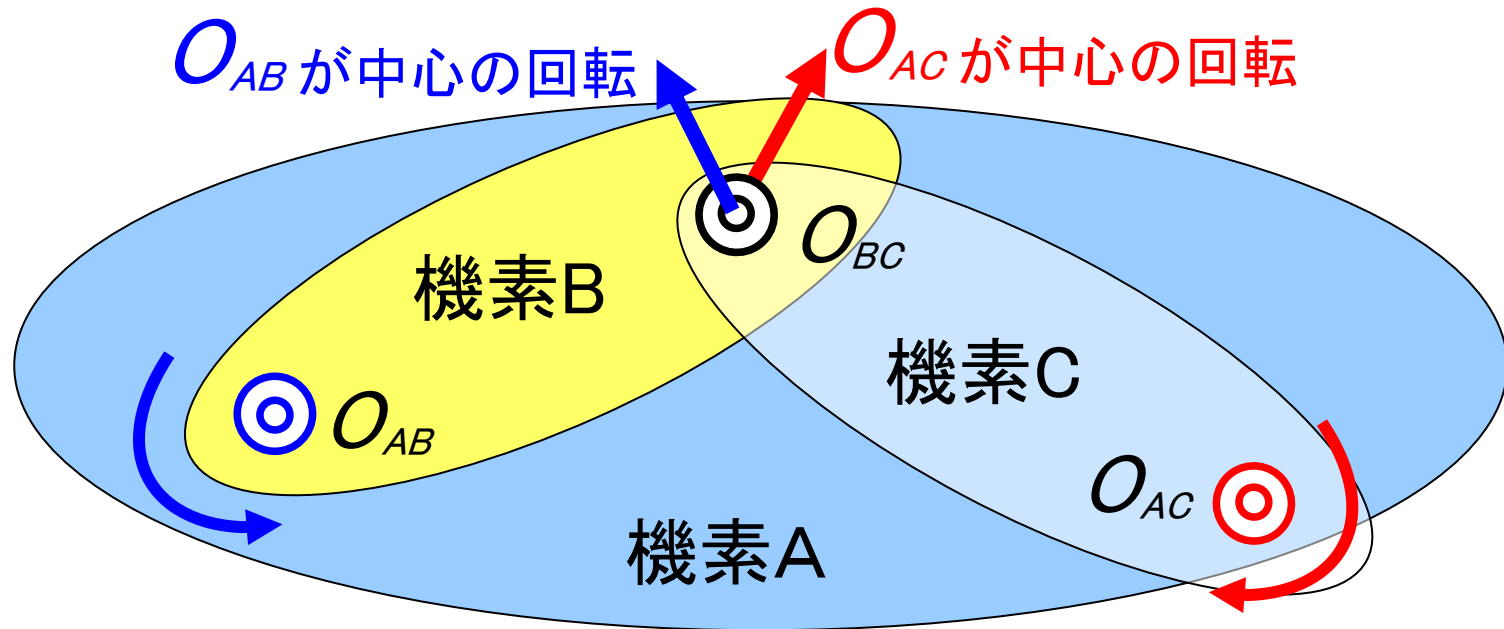


定理: O_{AB} , O_{BC} , O_{AC} は一直線に並ぶ.

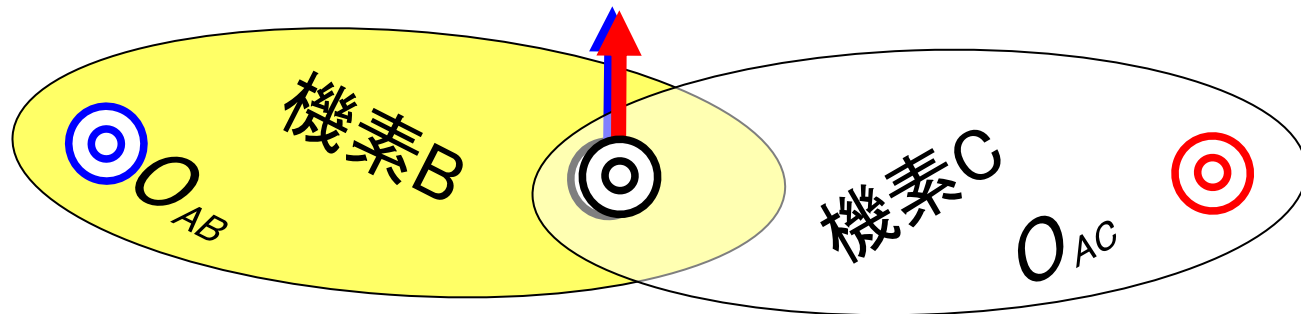
言い換え

$\Leftrightarrow O_{XB}$, O_{XC} を結ぶ直線上に O_{BC} がくる.

定理の証明



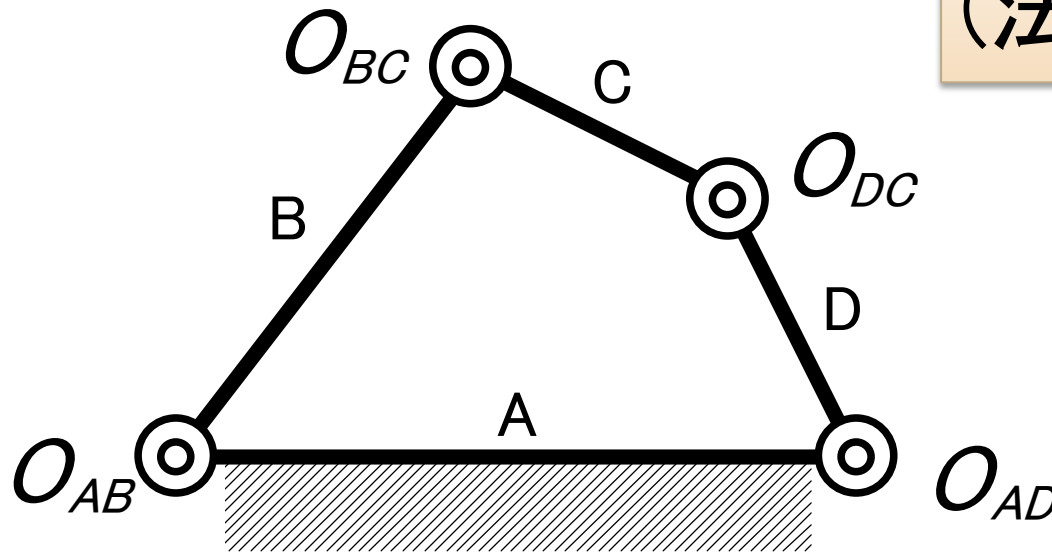
- 同じ点の速度は同じ $\therefore$ 一直線に並ぶしかない



実習3： 中間節の瞬間中心

- 固定節Aに対する，機素Cの瞬間中心 O_{AC} を作図せよ.

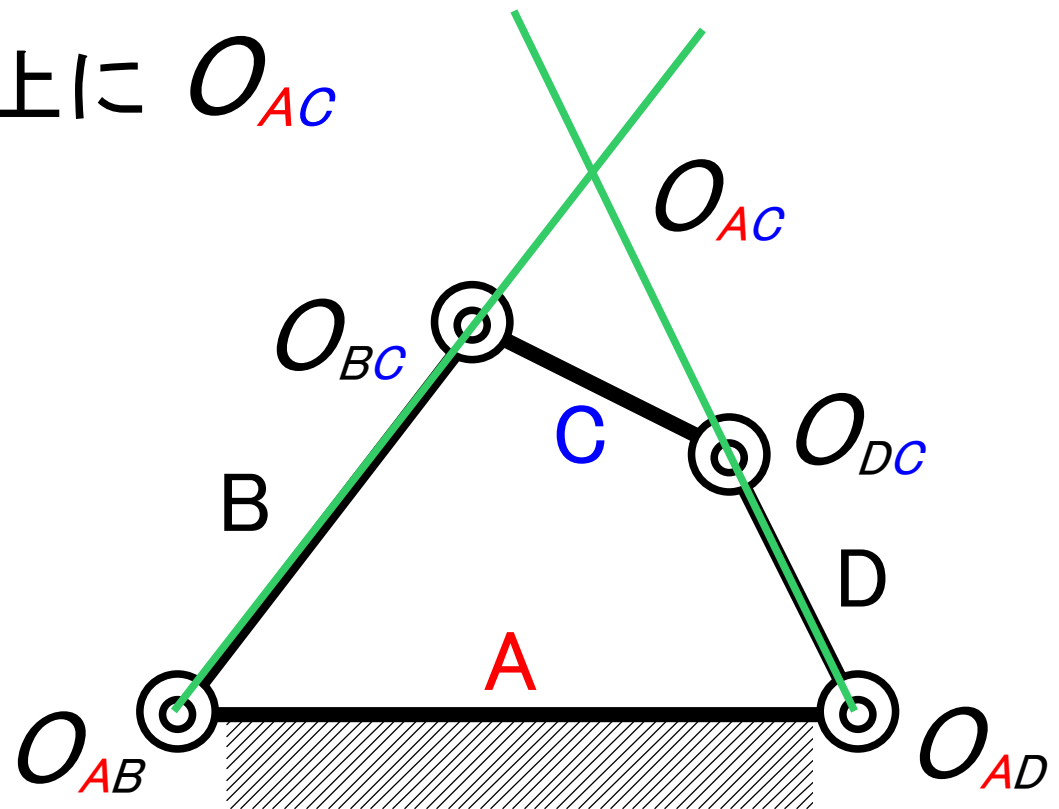
ヒント： $O_{XY} = O_{YX}$
(法則)



回答例

■ O_{AB} , O_{BC} の線上に O_{AC}

■ O_{AD} , O_{DC} の線上に O_{AC}



次回に持参するもの. 忘れるな！

- コンパス （デバイダでもよい）
- 定規
- 第1回レポート用紙
 - <http://edu.katzlab.jp/lec/robo> からダウンロード
 - 「**拡大縮小なし**」で印刷. （寸法が狂うため）

専門科目「ロボット力学」

第4講

リンク速度の作図解法

宇都宮大学大学院工学研究科
機械知能工学専攻 吉田 勝俊

※レポート用紙・教材のダウンロード

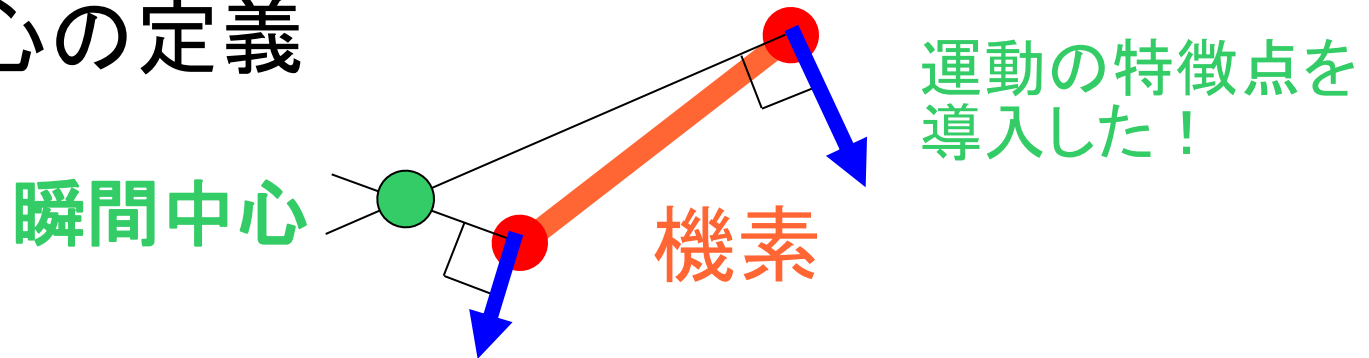
➔ <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

この授業に必要なもの

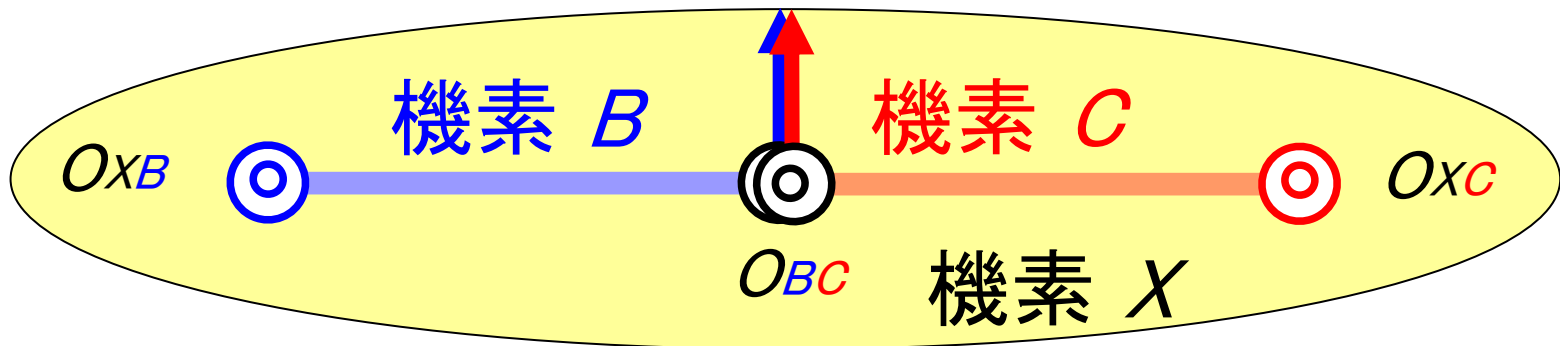
- コンパス（デバイダでもよい）
- 定規
- 「第1回レポート用紙」
 - <http://edu.katzlab.jp/lec/robo> からダウンロード
 - 「**拡大縮小なし**」で印刷。（寸法が狂うため）

第3講の復習

■ 瞬間中心の定義



■ 3瞬間中心の定理(ケネディーの定理)



O_{XB} , O_{XC} を結ぶ直線上に O_{BC} がくる.

学習内容

機素の運動速度を製図用具で求めたい！



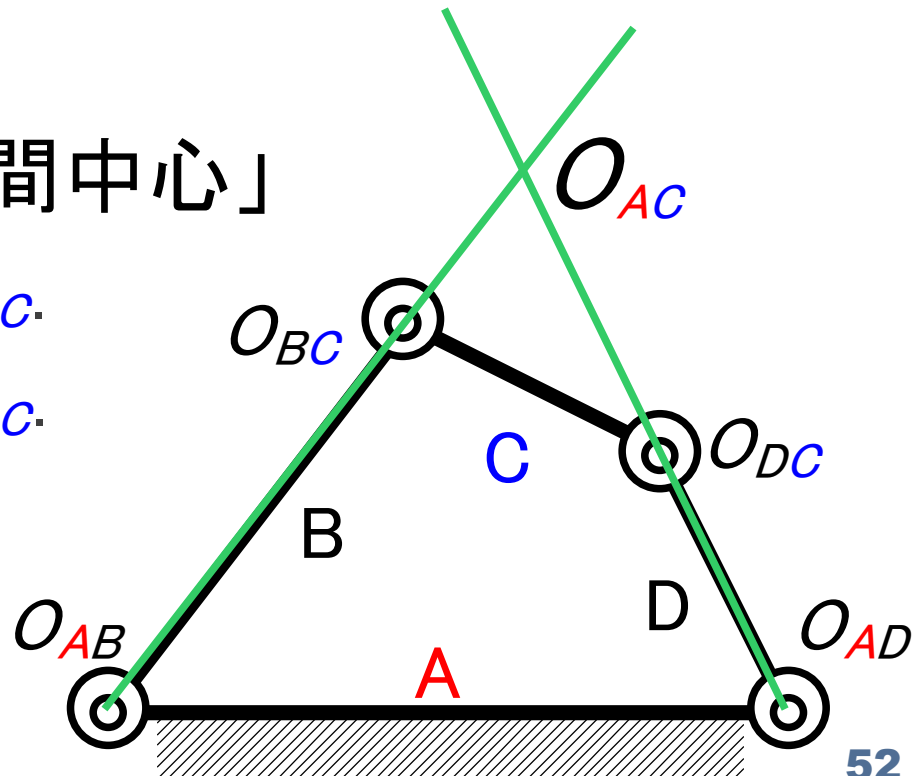
「瞬間中心」の定義と定理を利用する.

■ 復習「中間節 C の瞬間中心」

□ O_{AB} , O_{BC} の線上に O_{AC} .

□ O_{AD} , O_{DC} の線上に O_{AC} .

□ ただし, $O_{XY} = O_{YX}$



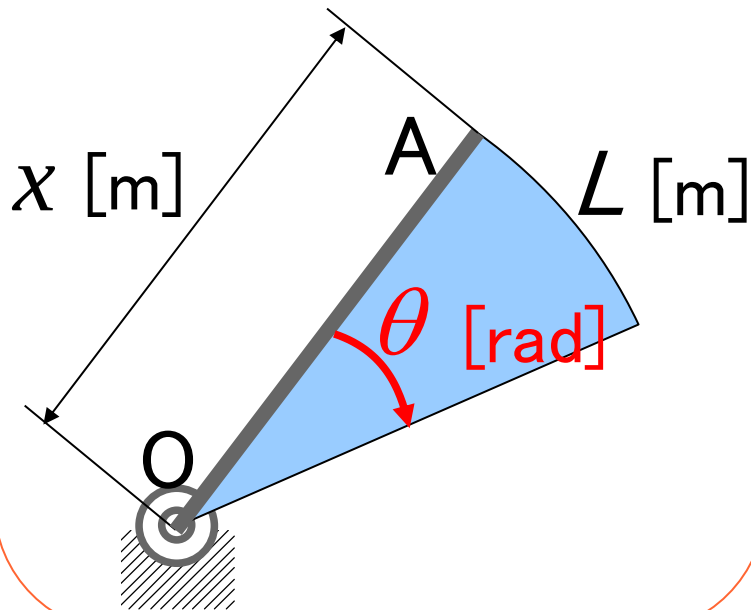
【復習】 角速度

- 弧度法をまねて, 「**角速度 ω** 」が定義される

弧度法

$$\theta \times x = L$$

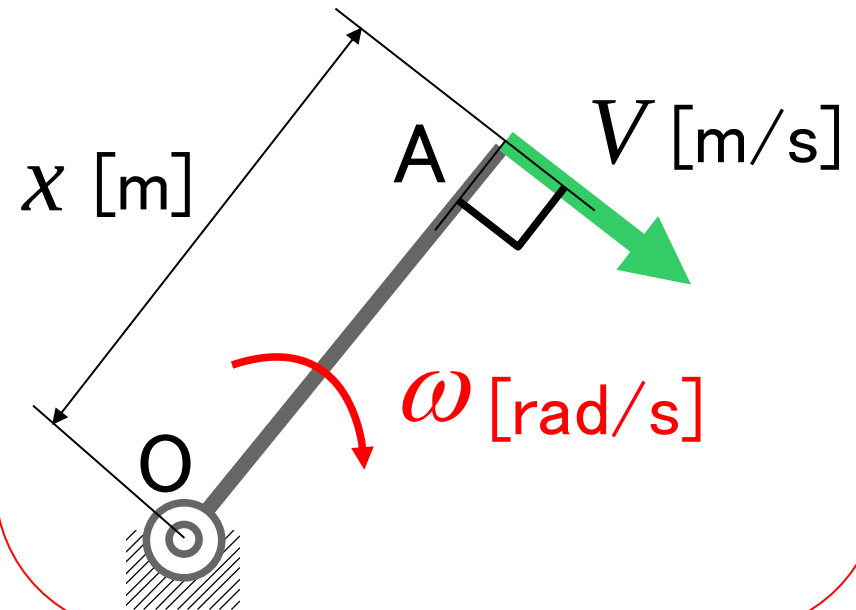
[rad] [m] [m]



角速度 ω

$$\omega \times x = V$$

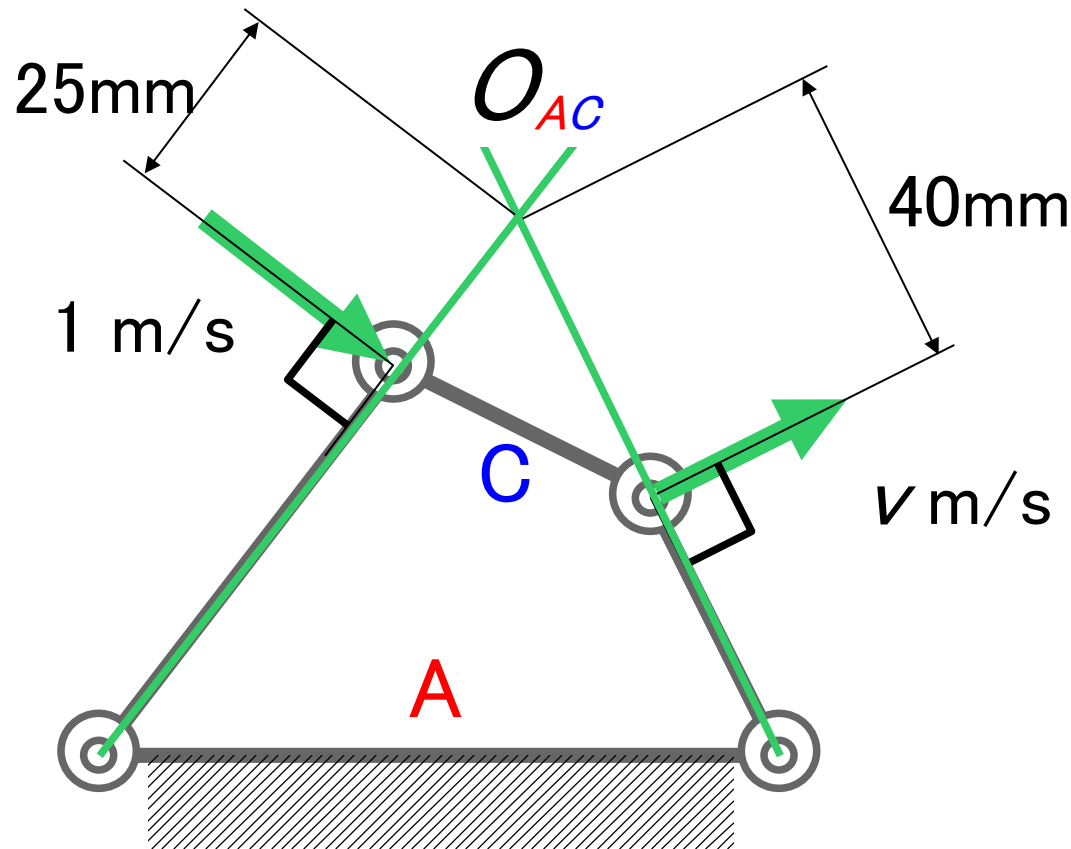
[rad/s] [m] [m/s]



実習1：瞬間中心による速度解析

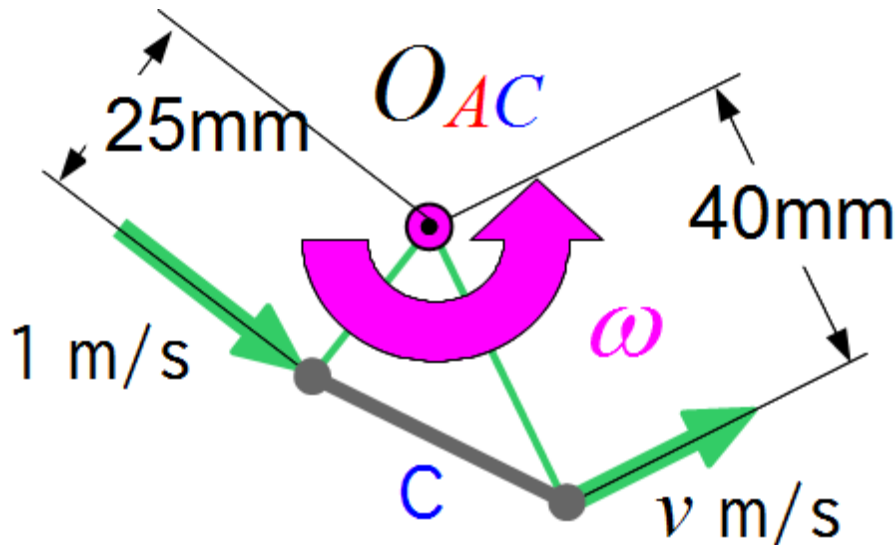
- 速度 v を求めよ.

※ O_{AC} まわりの
角速度を考えよ



例題の解法

- O_{AC} は, リンク C の瞬間中心
 → この瞬間, リンク C は O_{AC} まわりに回転
- リンク C は剛体
 → C 上の点は角速度 ω が共通



すなわち

$$1/25 = \omega = v/40$$

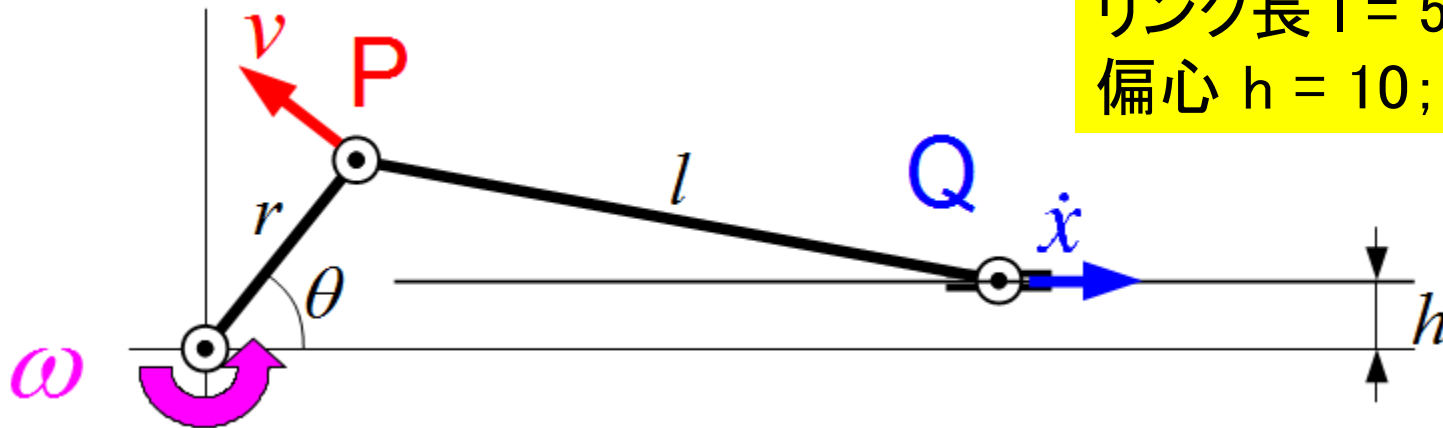
が成立し

$$\therefore v = 40/25 = 1.6 \text{ m/s}$$

ロボット力学 第1回レポート課題 (第4回で出題)

早戻り型クランクスライダ機構

クランク半径 $r = 20$;
リンク長 $l = 50$;
偏心 $h = 10$;



- ① 図式解法による速度解析の手順を解説せよ.
- ② P と Q の速度比 $R = |\dot{x}/v|$ を求めよ.
- ③ θ と R のグラフを描き「早戻り」の理由を考察せよ.

サポートサイト <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

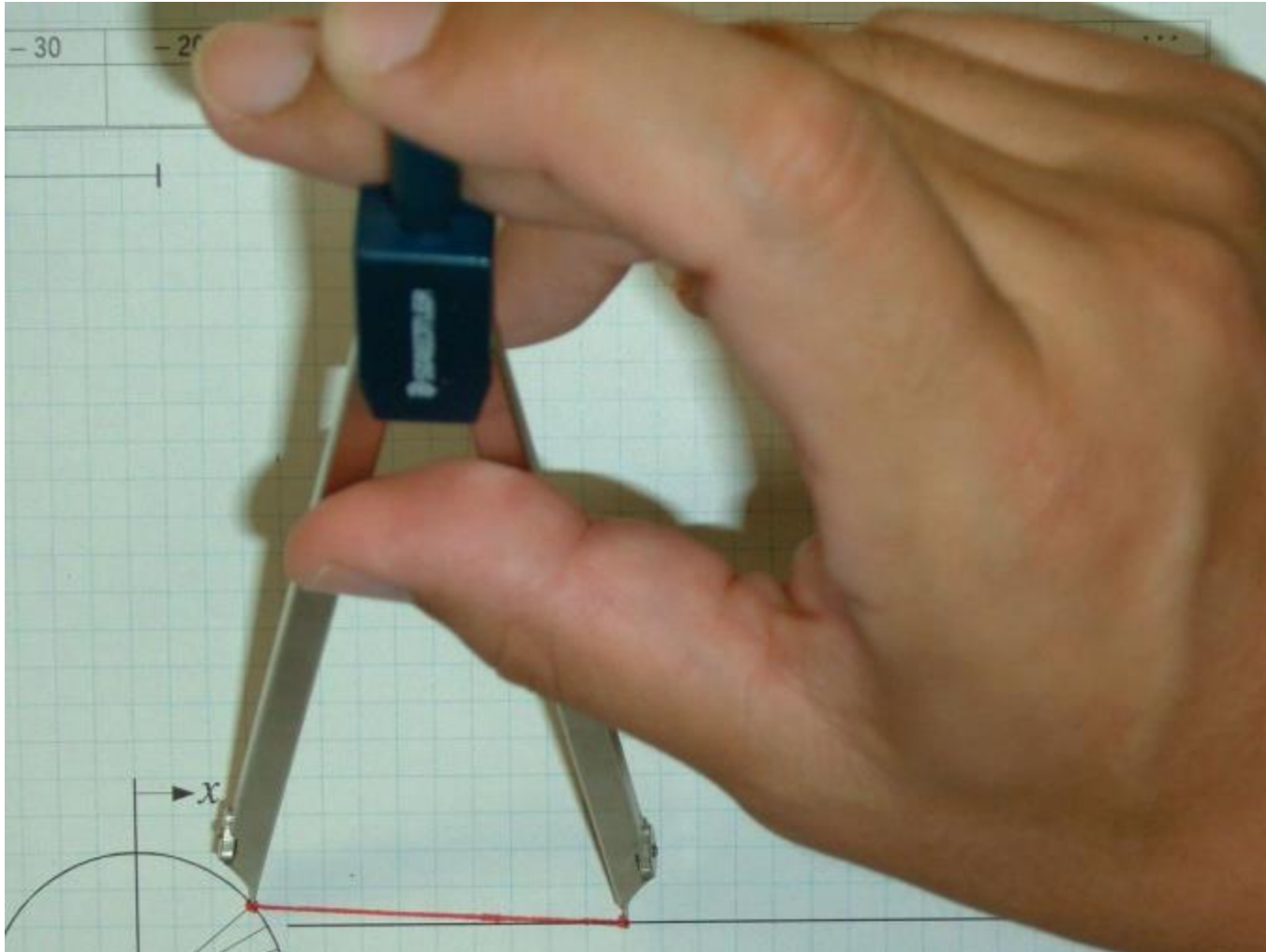
レポート提出方法

複製が疑われるレポートは不正行為(カンニング)とみなす！

- 専用レポート用紙1枚以内 (裏面も使用せよ).
 - レポート用紙 → <http://edu.katzlab.jp/lec/robo>
 - 学籍番号と氏名を忘れぬこと.
- ✕ 切: 次回授業日の前日. 吉田教授室Box.
 - 次々回の授業日からは受けとらない.
- 採点基準: ※不親切な書き方は不可！
 - 解法は正しいか.
 - 高校生が読んで分かる内容か.
 - 分かりやすさの工夫や, 興味を引く工夫はあるか.

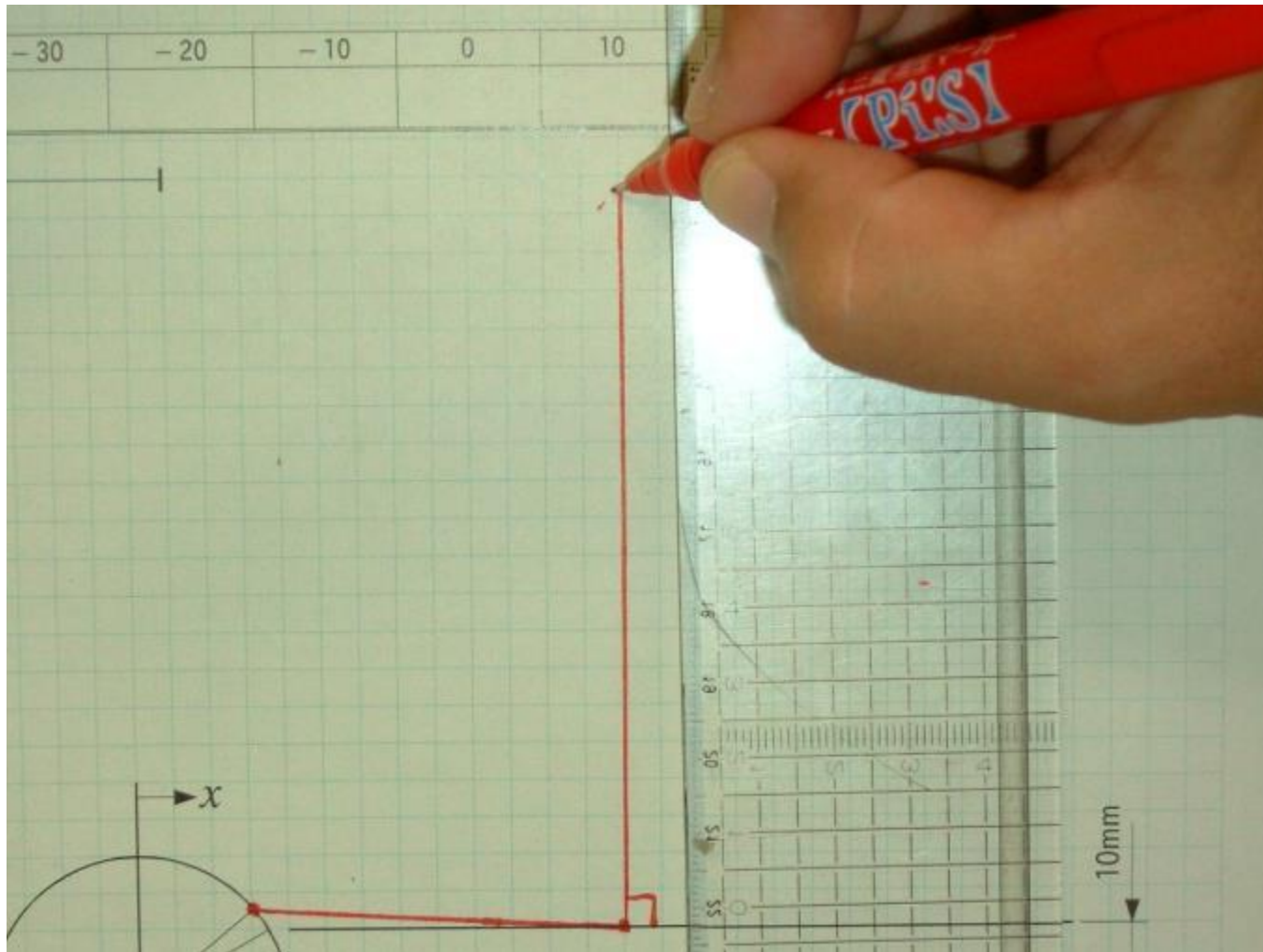
手順1

- (例えば) $\theta = 40 \text{ deg}$ の姿勢にリンク長 l を描く.



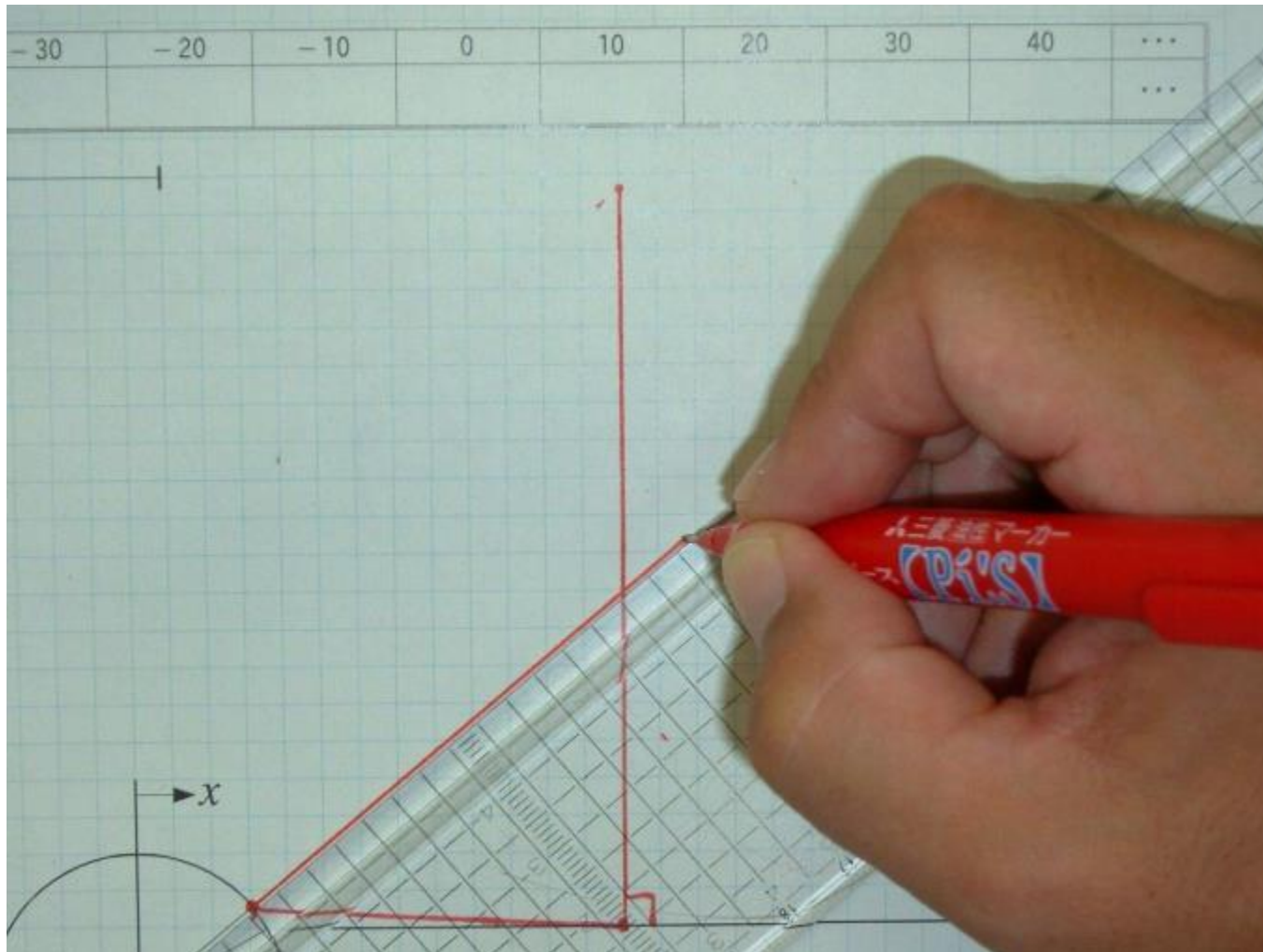
手順2

- リンク右端から瞬間中心へ線を引く(軌道の法線)



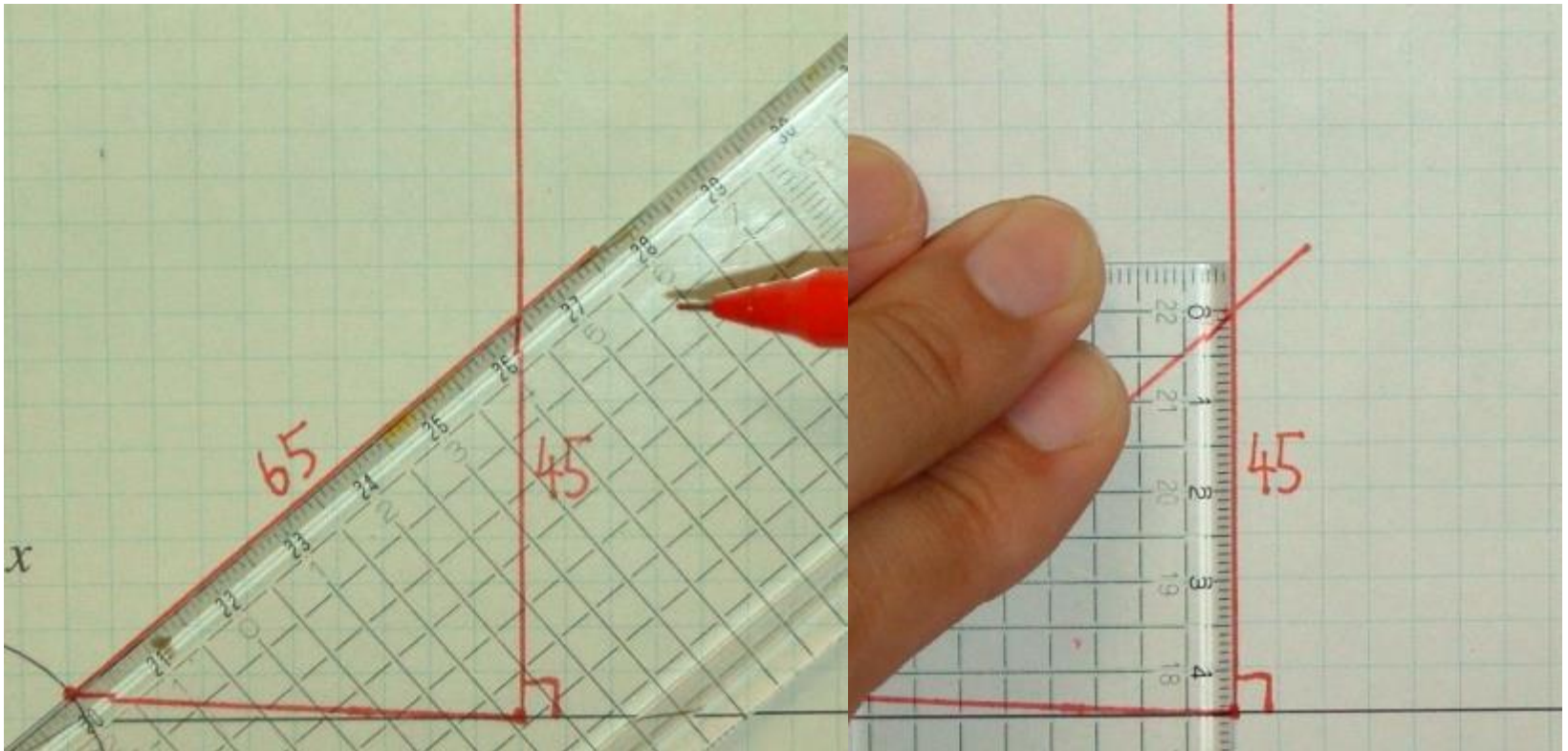
手順3

- リンク左端から瞬間中心へ線を引く（円周の法線）



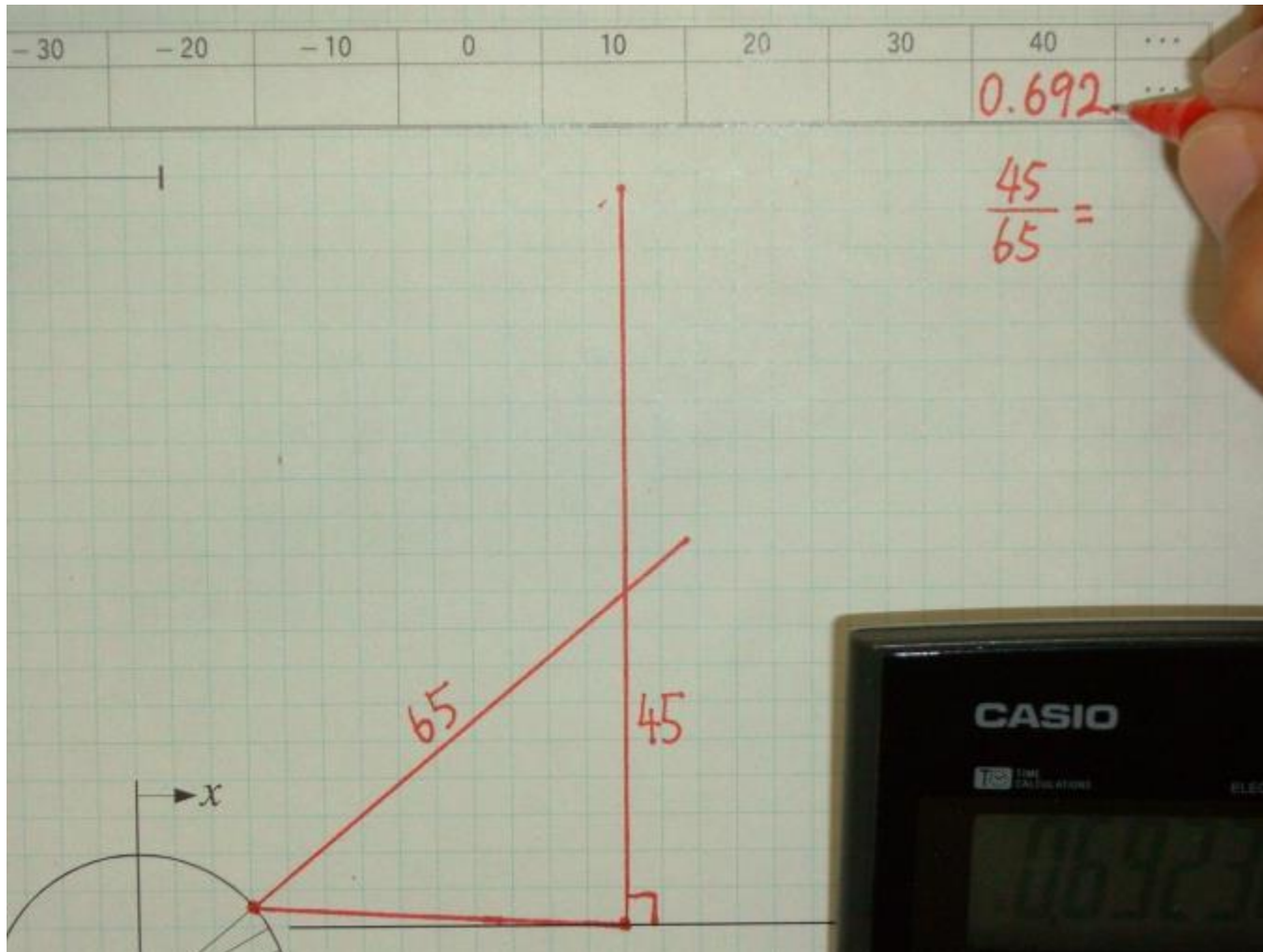
手順4

- 瞬間中心（交点）との距離を測定



手順5

- 速度比 $\equiv$ 瞬間中心との距離の比 を計算



速度比 0.692 の使い方

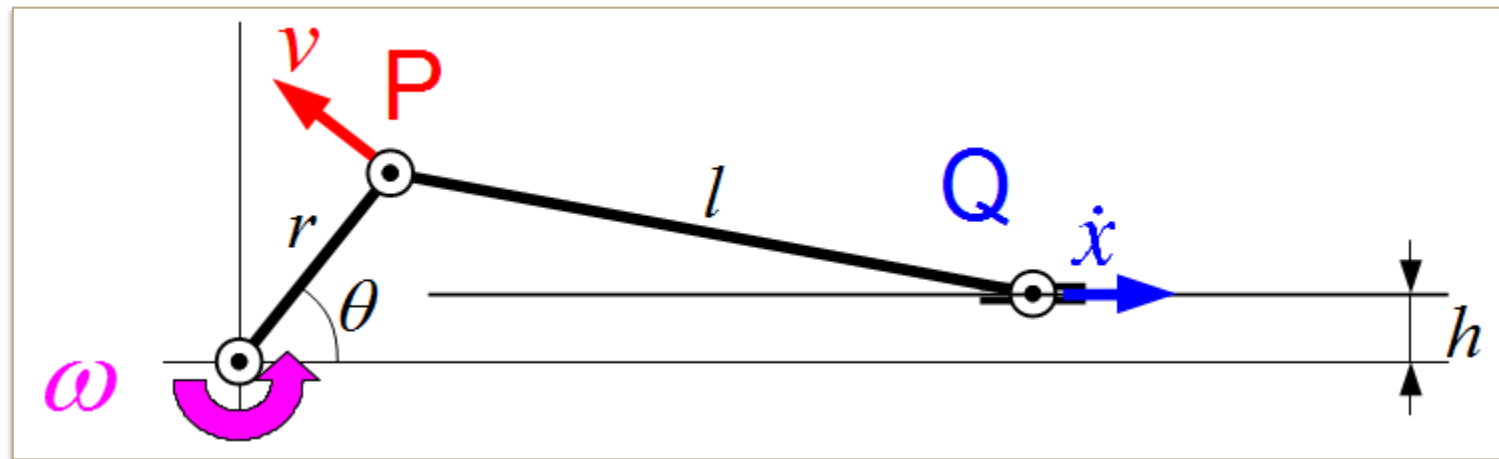
- 入力角 θ の角速度が $\omega = 5.2 \text{ rad/s}$ のとき

- P の速度は, $v = r \omega = 10 \times 5.2 = 52 \text{ mm/s}$

- $\theta = 40\text{deg}$ での速度比は 0.692 より

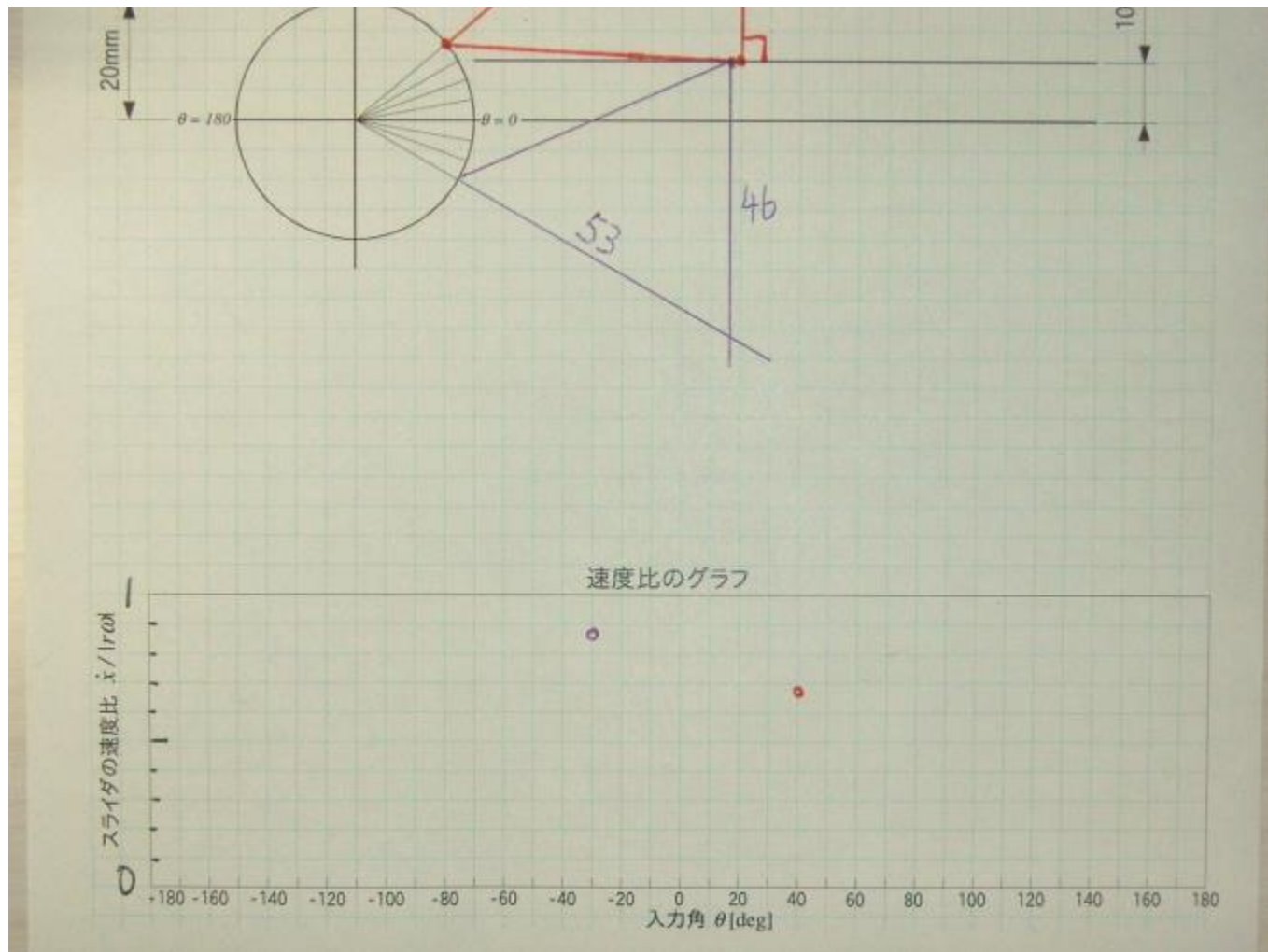
- Q の速度は, 運動方向の±に注意して

$$\dot{x} = -52 \times 0.692 = -35.9 \text{ mm/s}$$



手順6

- グラフを作る. ($\theta = -30 \text{ deg}$ も加えた)



同様に，作業を進める・・・

以上，速度の図式解法でした．

第1回レポートを提出してください！