

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

基礎科目

初等幾何

線形代数

微分積分

機械力学

自動制御

古典機構学

伝統的な
運動構成論

ロボット機構学
(kinematics)

ロボット力学
(dynamics)

ロボット制御
(control)

現代の運動構成論

広義の「ロボット力学」

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

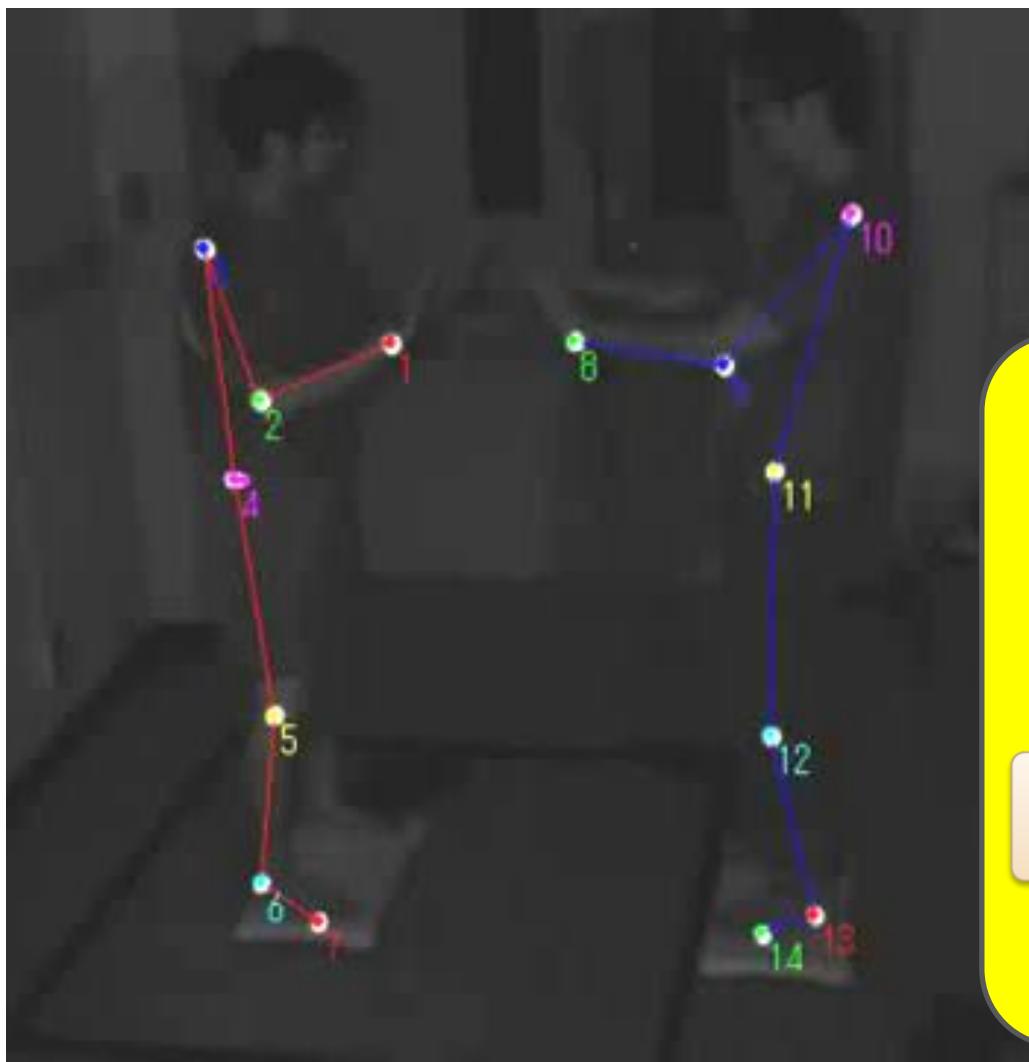
■ 成績評価

- 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

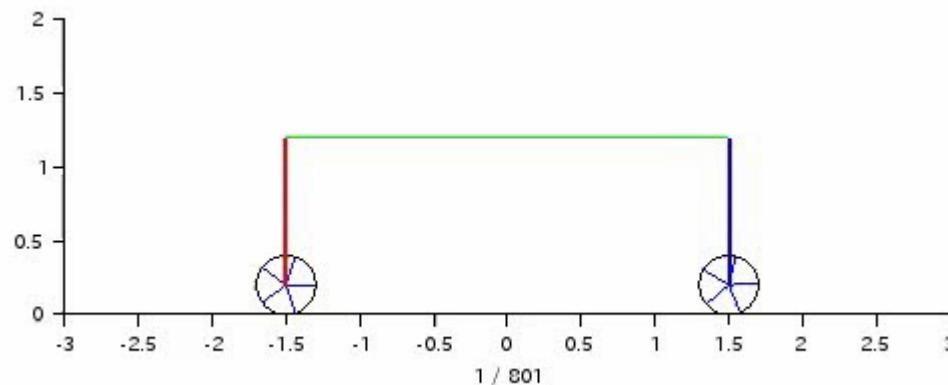
ロボット力学

ロボット機構学

を勉強すれば作れる？

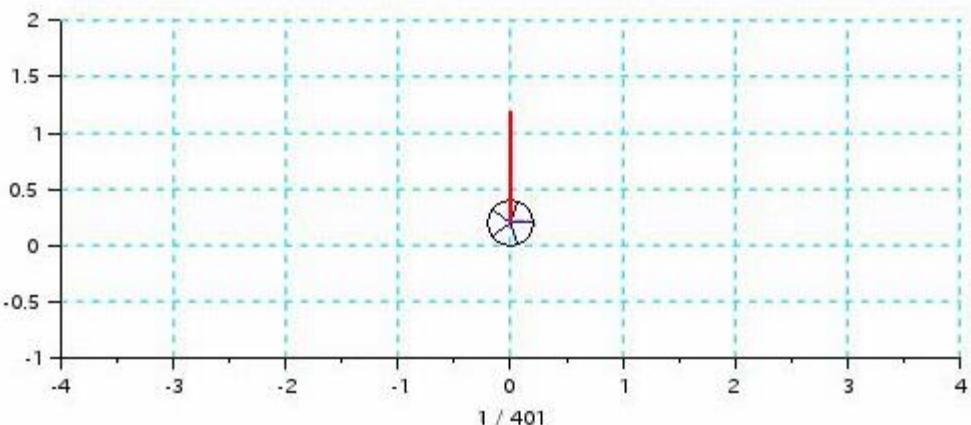
授業の最終目標 2/2

■ 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



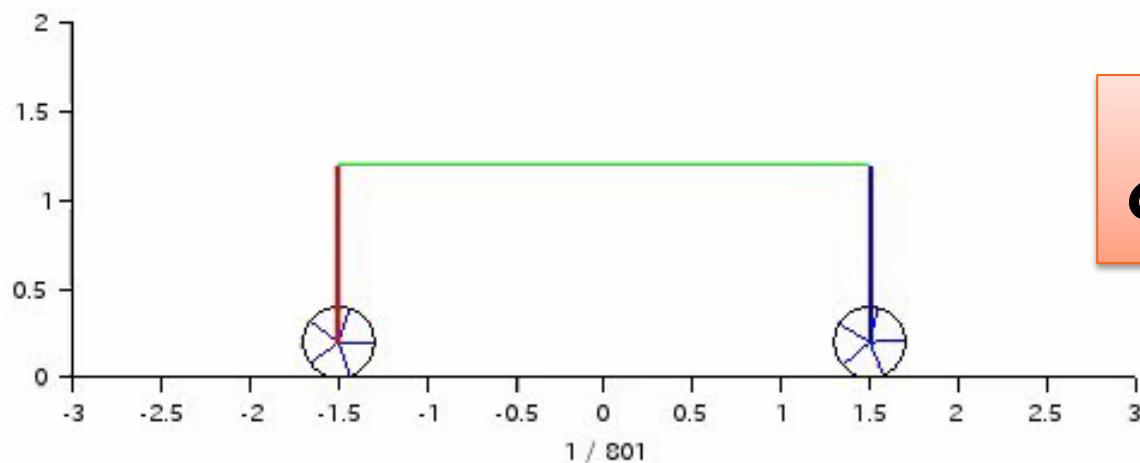
倒立ロボット

+ 転倒限界

+ 床

作り方は？

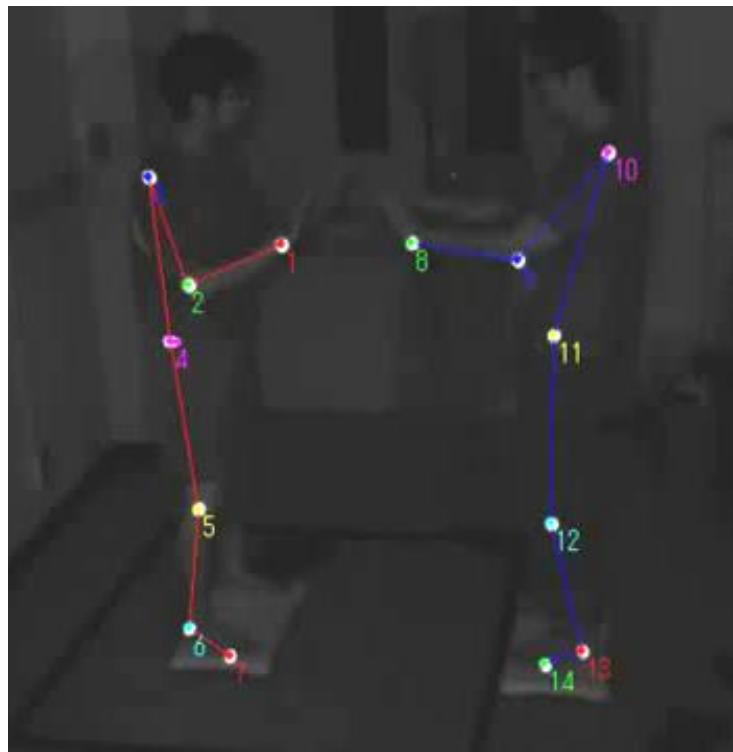
課題の例 つなげて対戦 !



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

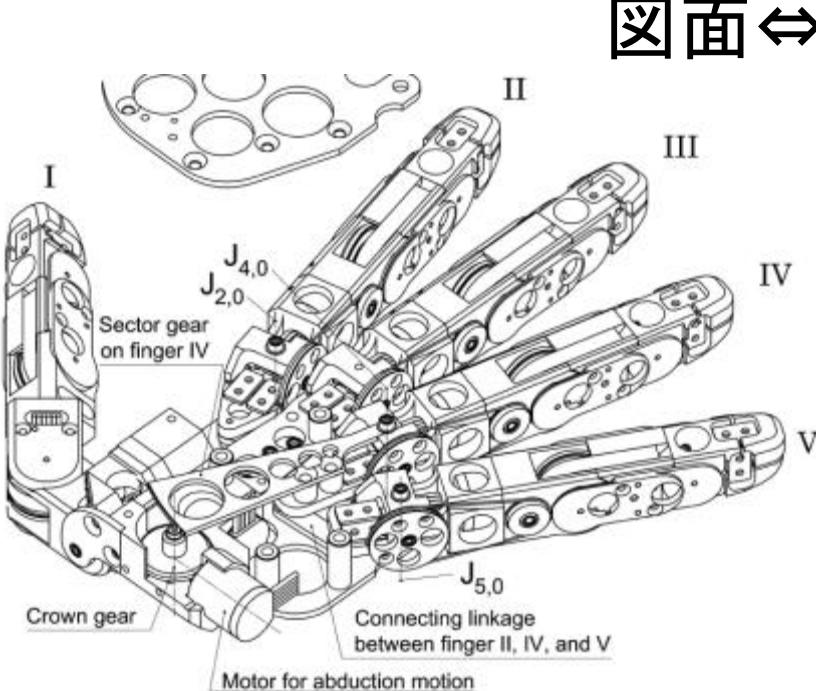
動き・力・位置関係

自転車の例



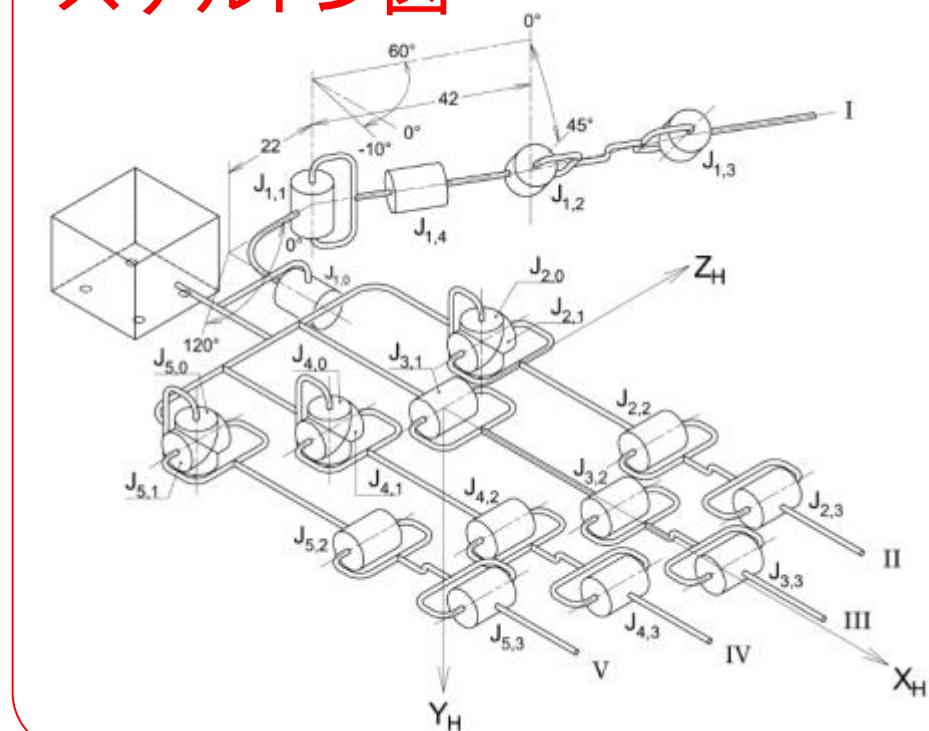
スケルトン図(別名:ポンチ絵)

■ 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

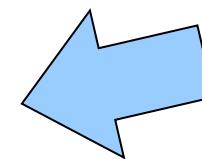
スケルトン図の実例



- 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。

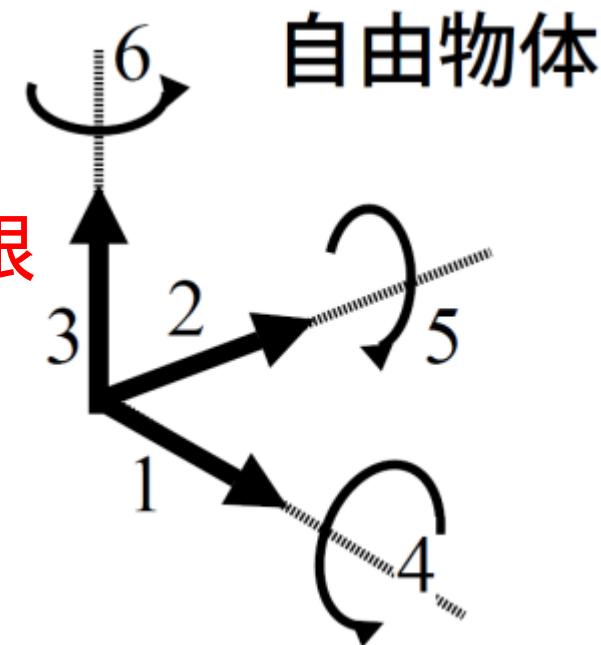
「運動を作る」ための思考法

- 「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.



直線運動が実現

1自由度に制限



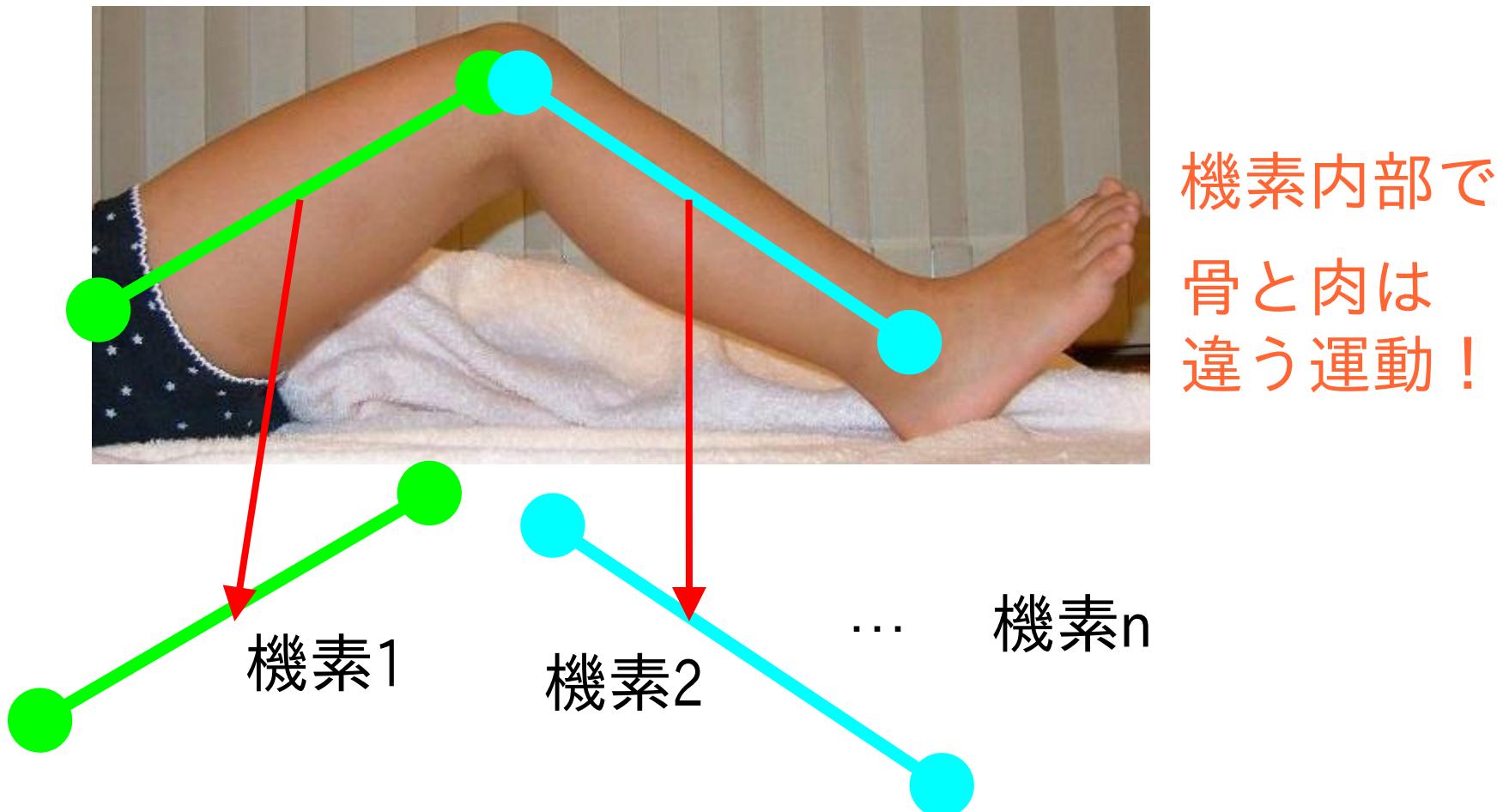
参考図書

- 伊藤「メカニズムの事典」(理工学社)
- 安田「機構学」(コロナ社)



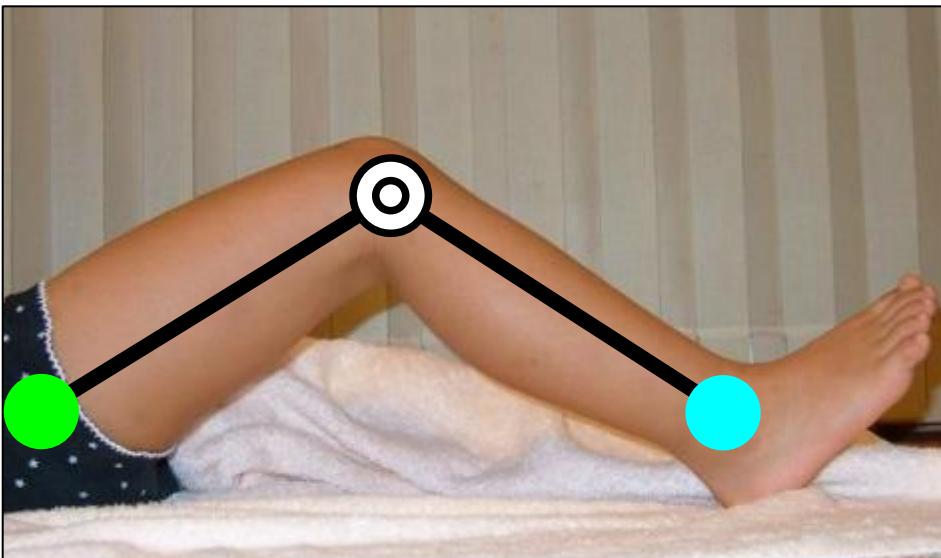
機素 (machine element)

定義：一体で運動する（とみなす）部品の単位

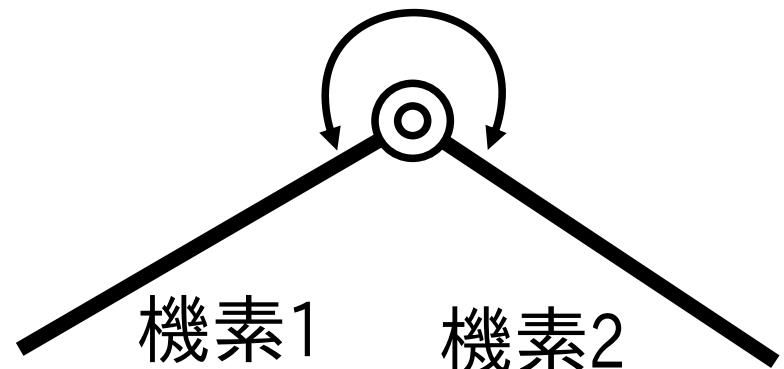


対偶(pair)

定義：互い接触し、相対運動する機素のペア



「回り対偶(turning pair)」

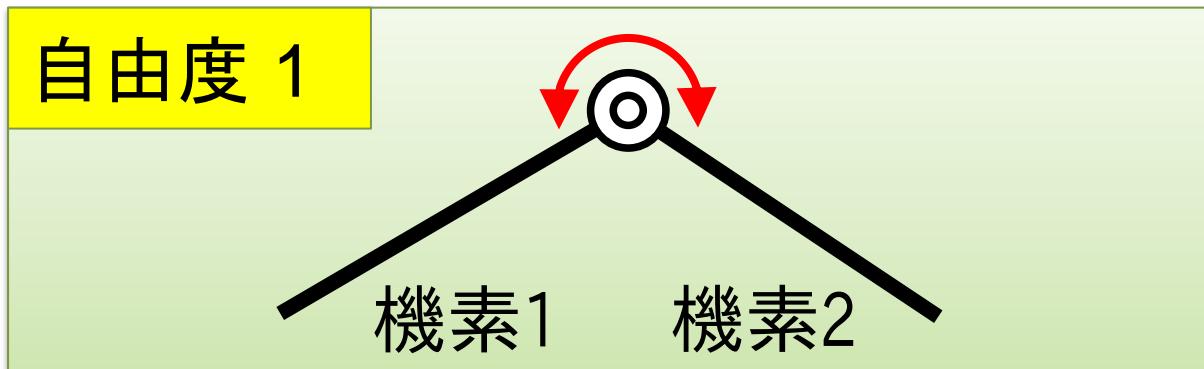


☆ 対偶の組み合せ = 機構

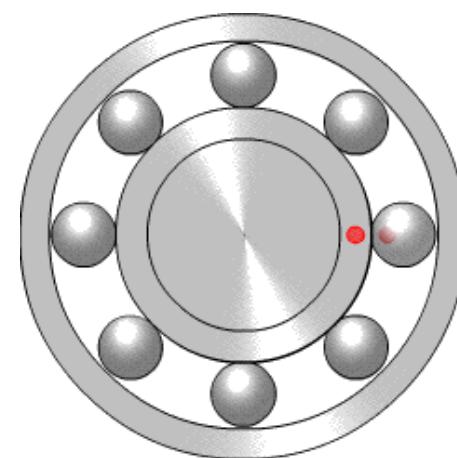
自由度の定義

- 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

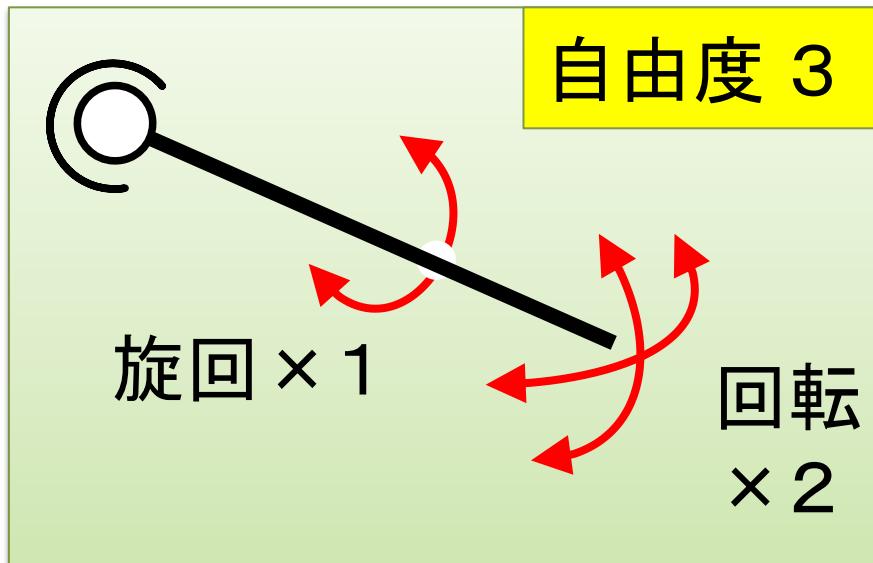
回り対偶 (turning pair)



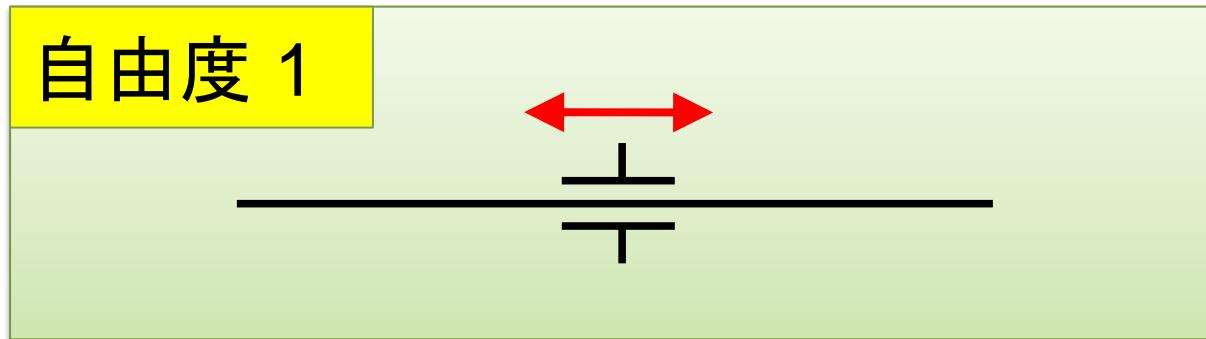
■ ボールベアリング(玉軸受)



球面対偶 (spherical pair)

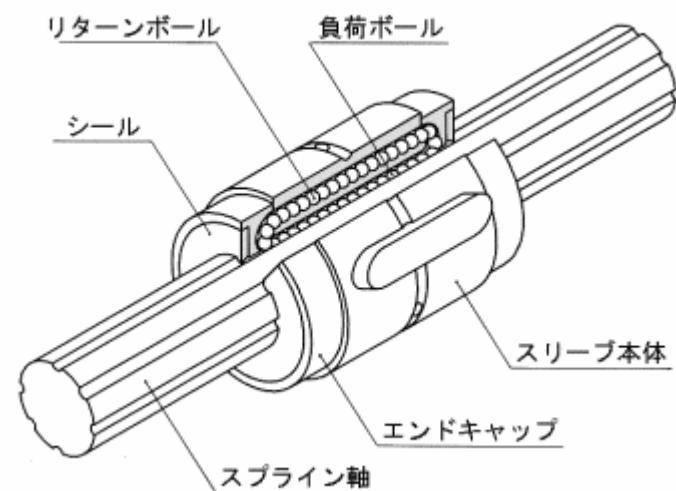


すべり対偶 (sliding pair)



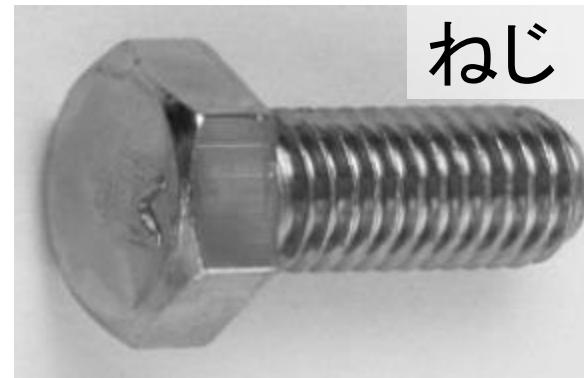
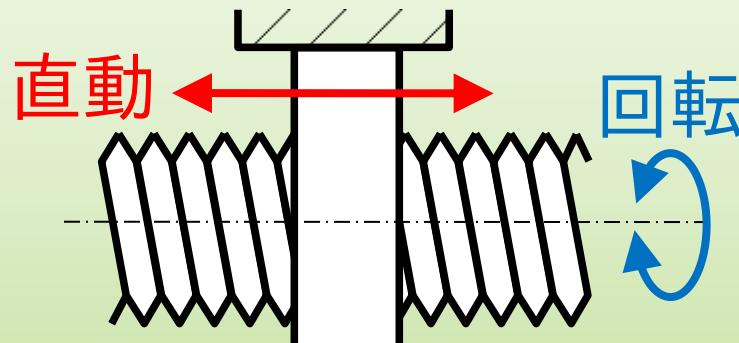
リニアガイド

ボールスプ ライン



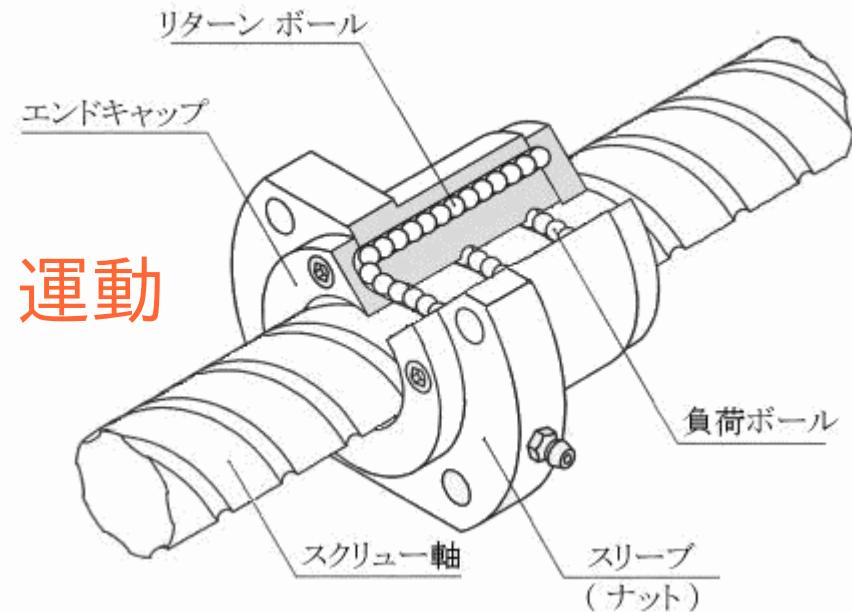
ねじ対偶 (screw pair)

自由度 1 (直動×回転)



締結 ⇔ 運動

ボールねじ:
回転入力 → 直動出力

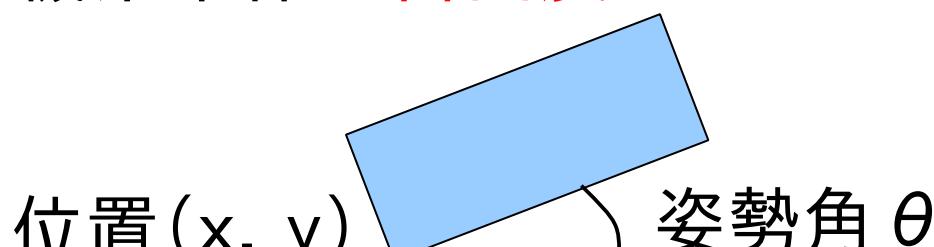


平面機構の自由度

■ 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.

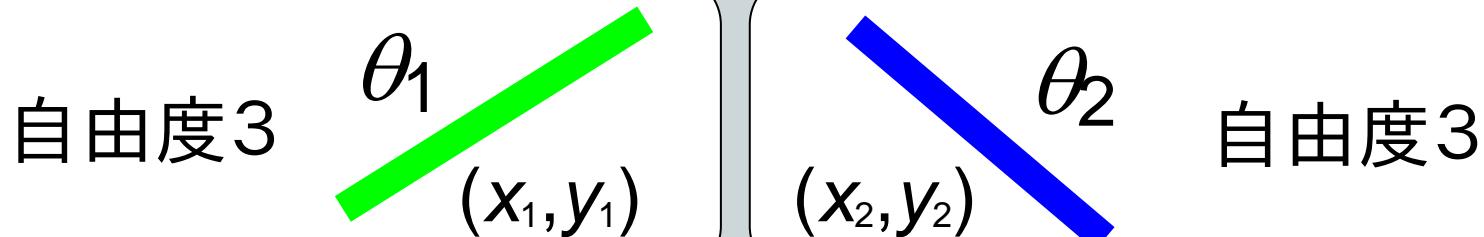
機素単体の自由度3



「機構の自由度」
の定義より、基準
の機素を1つ固定

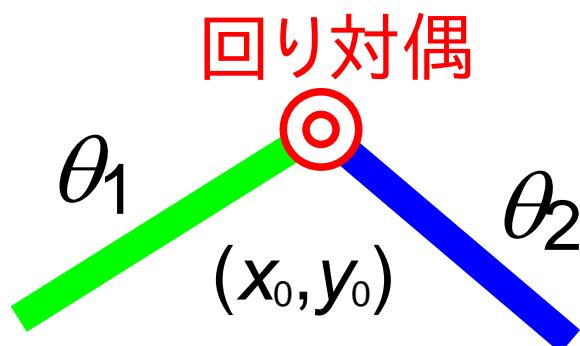
× $(n - \underline{1})$ 個
= $3(n - \underline{1})$

対偶による自由度減少



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
⇒ $6 - 2 \therefore$ 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.

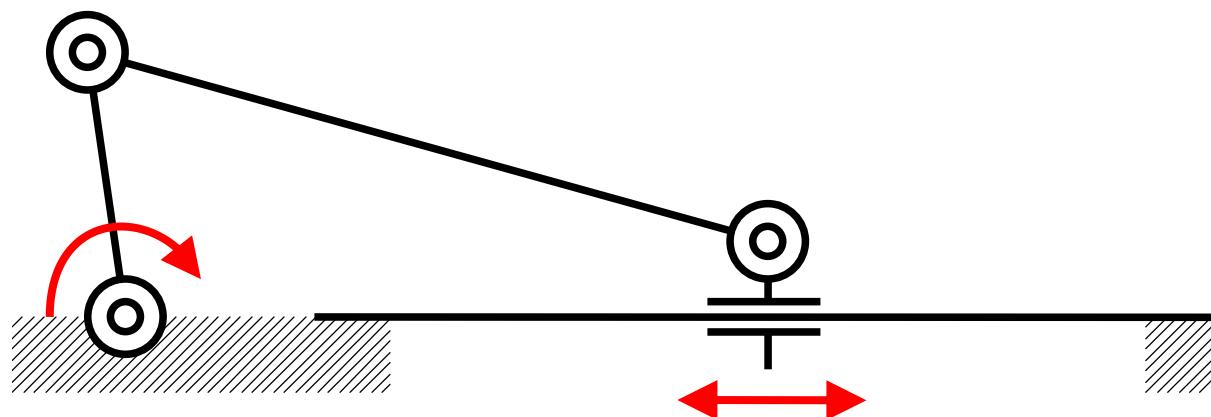
平面リンク機構

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

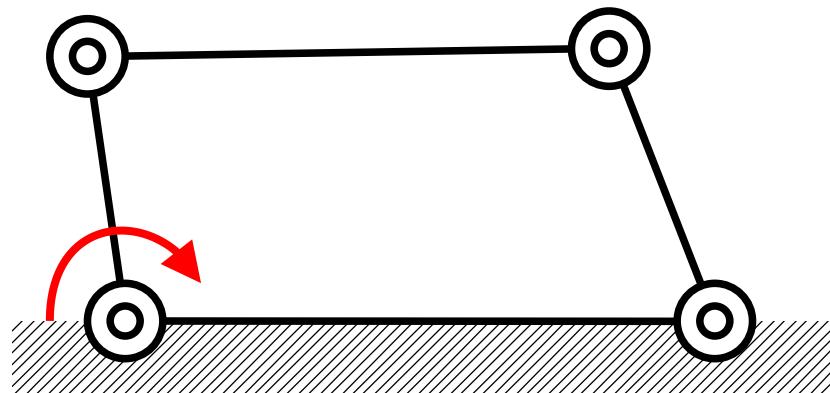
平面リンク機構・・運動が平面内のリンク機構

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

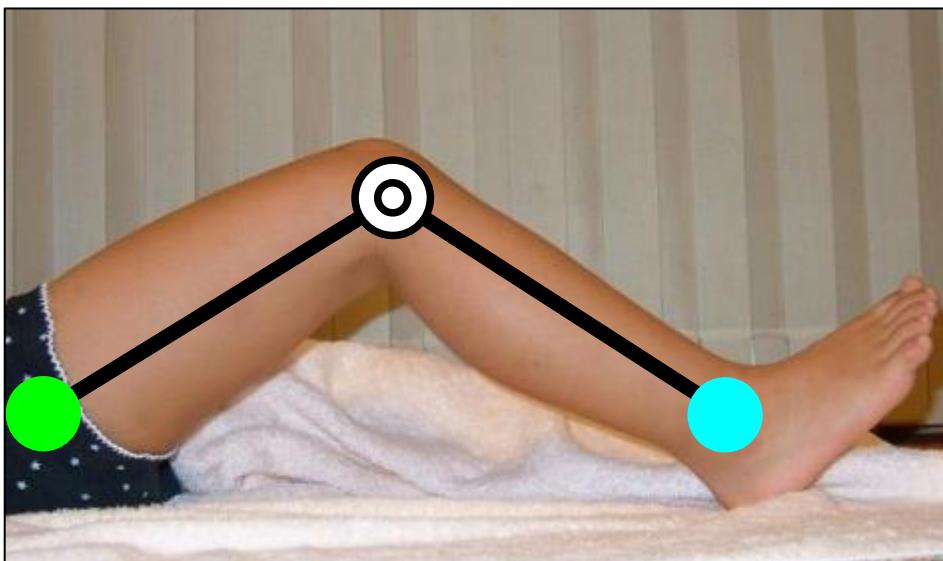
宇都宮大学大学院工学研究科
機械知能工学専攻 吉田 勝俊

※レポート用紙・教材のダウンロード

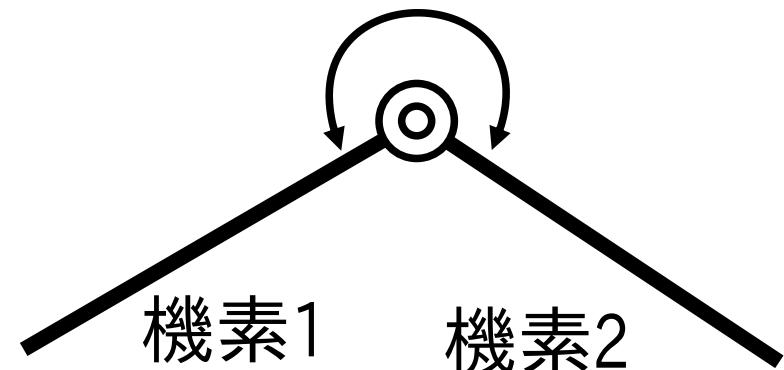
→ <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

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 = $3(n-1) - 2p_1 - p_2$

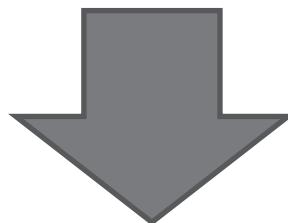


「回り対偶 (turning pair)」



学習内容

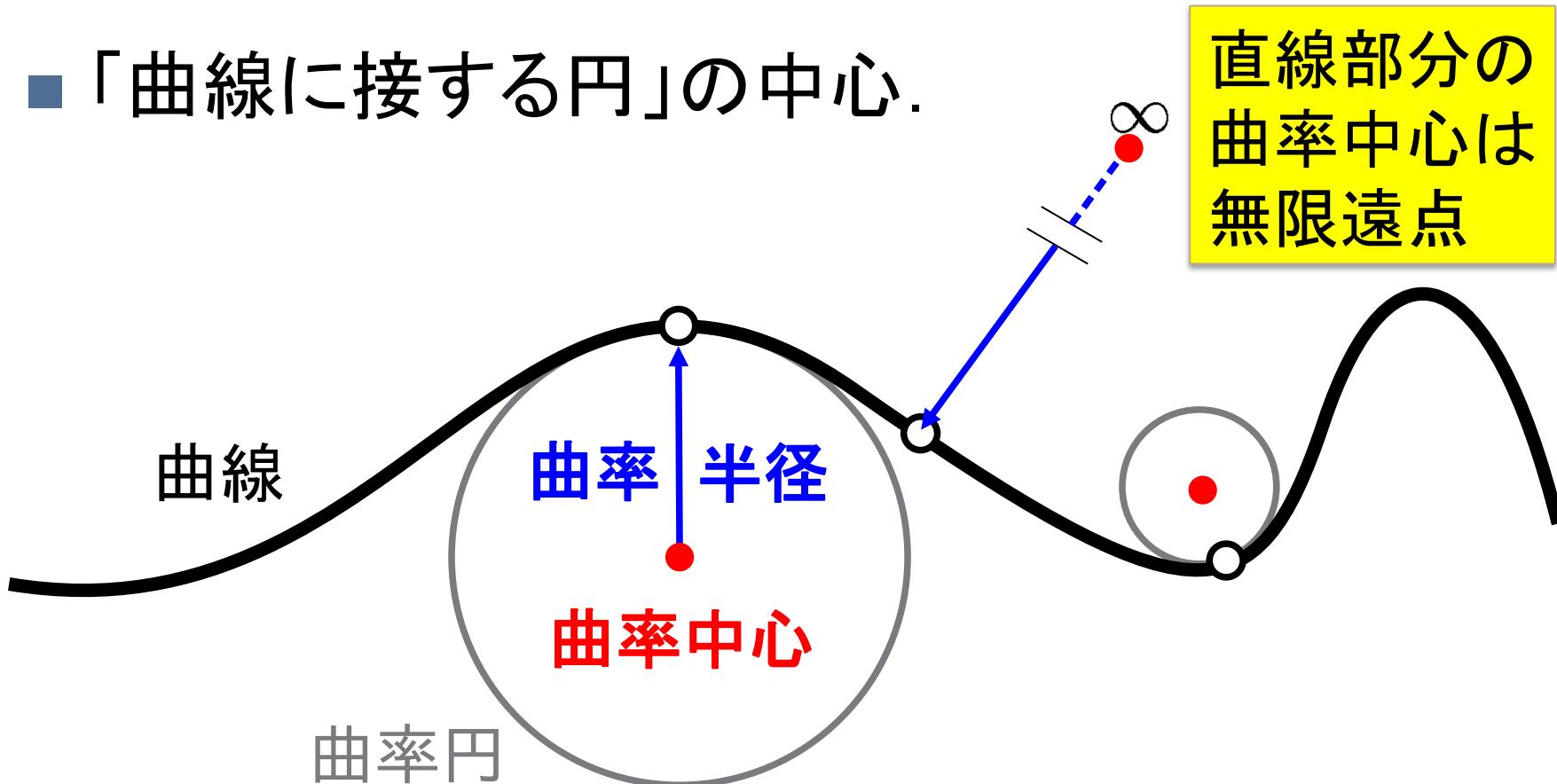
- より個別的な機構の特徴を、図式化したい！



- 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

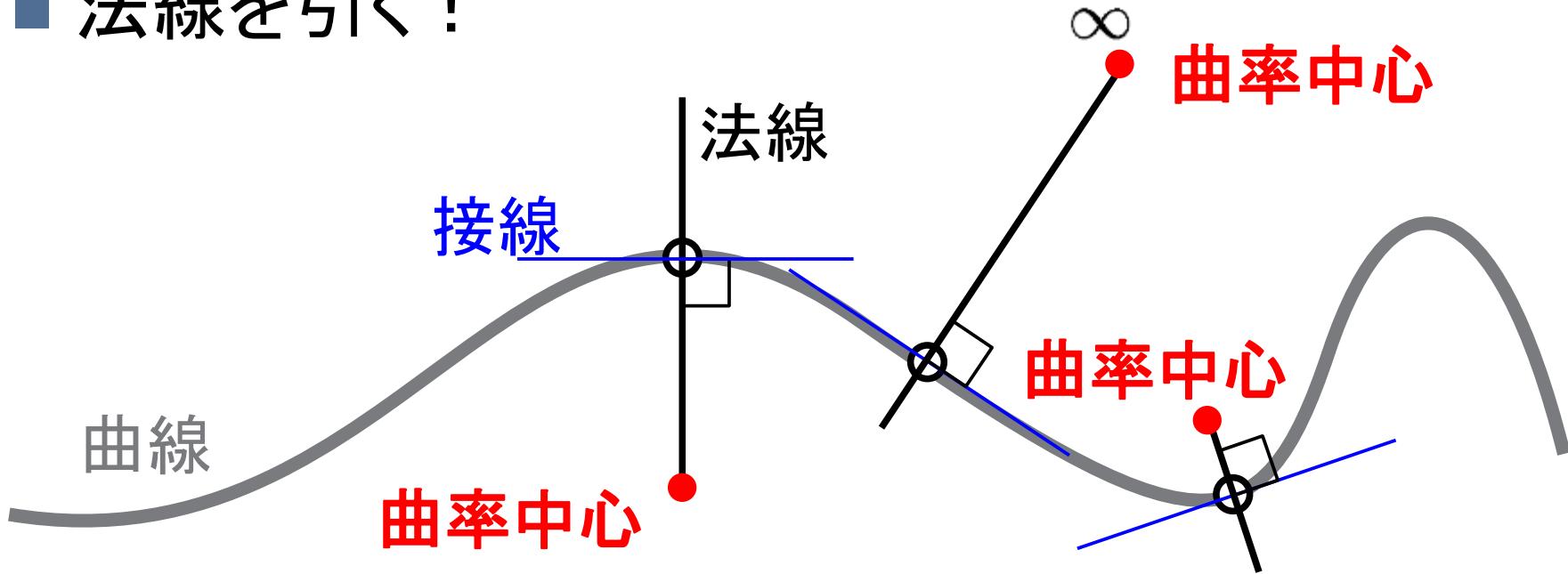
- 「曲線に接する円」の中心.



曲線は円弧でパッチワークできる！

曲率中心の見つけ方

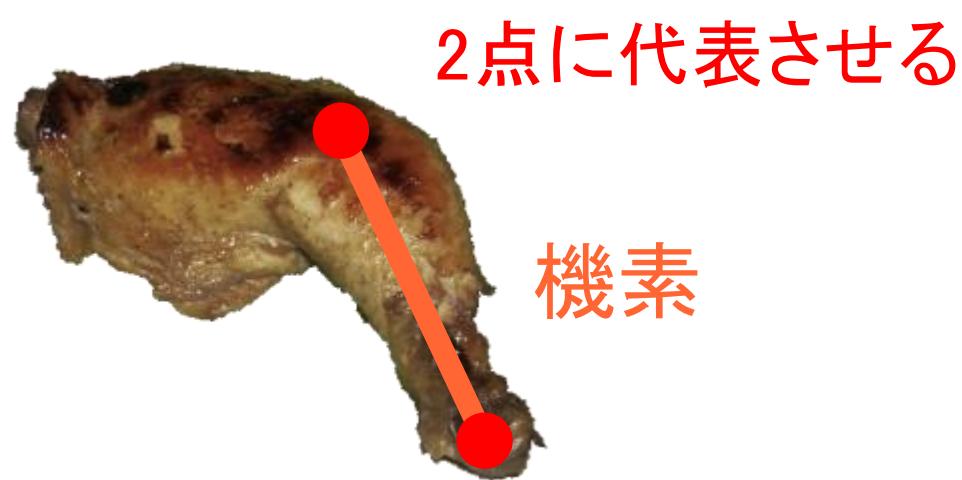
- 法線を引く！



曲率中心は、法線方向にある！

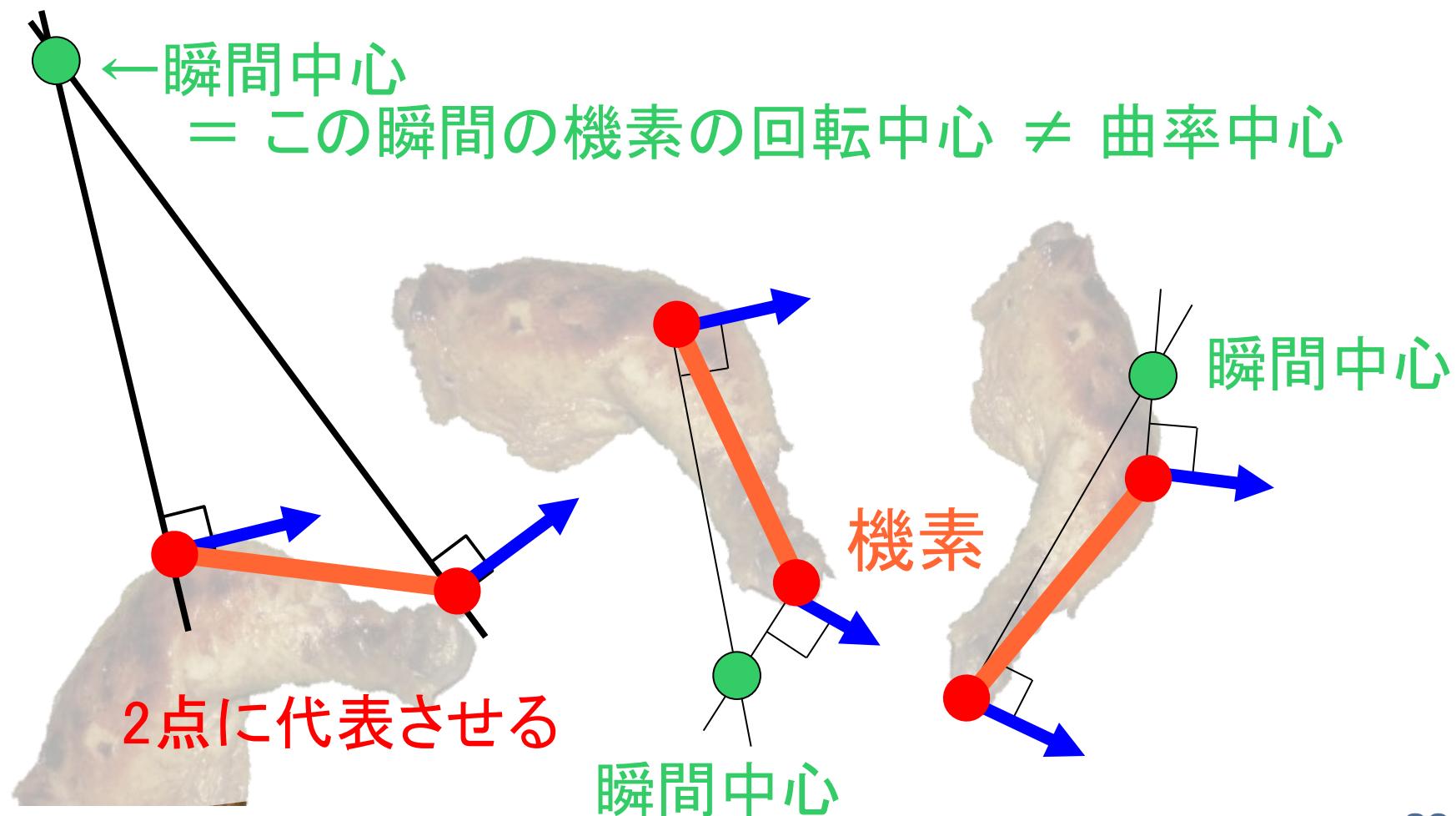
機素の運動

- 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.



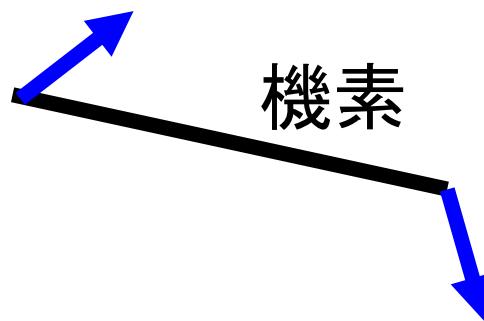
【定義】 機素の「瞬間中心」

- 「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.

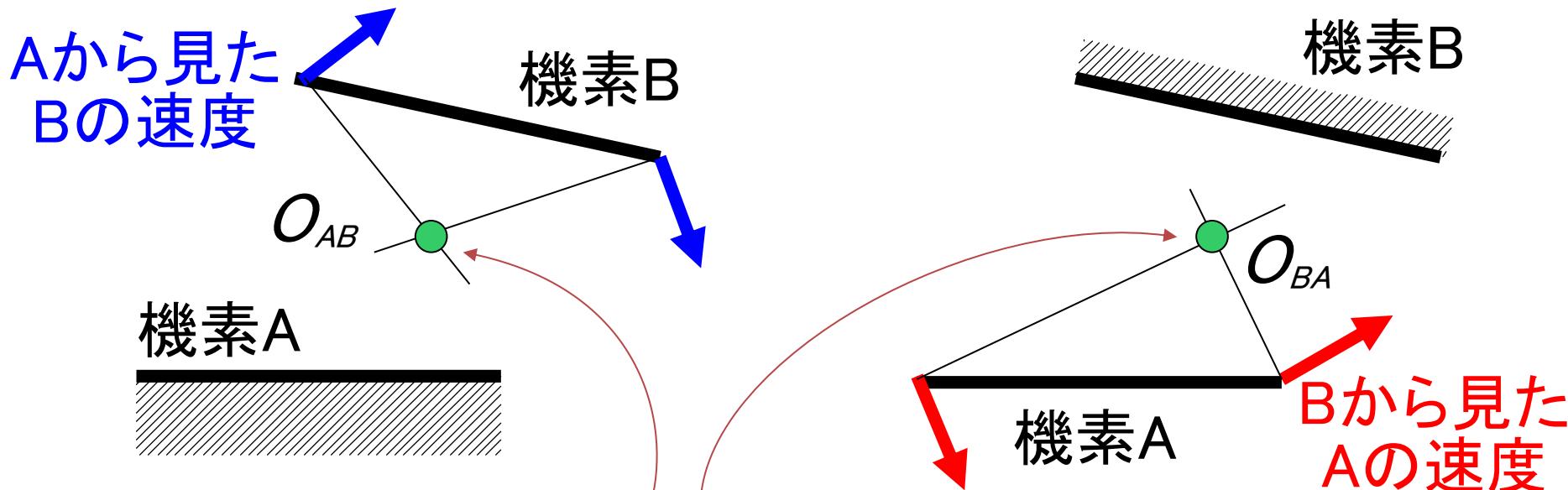


(紙面から見た速度)

【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。

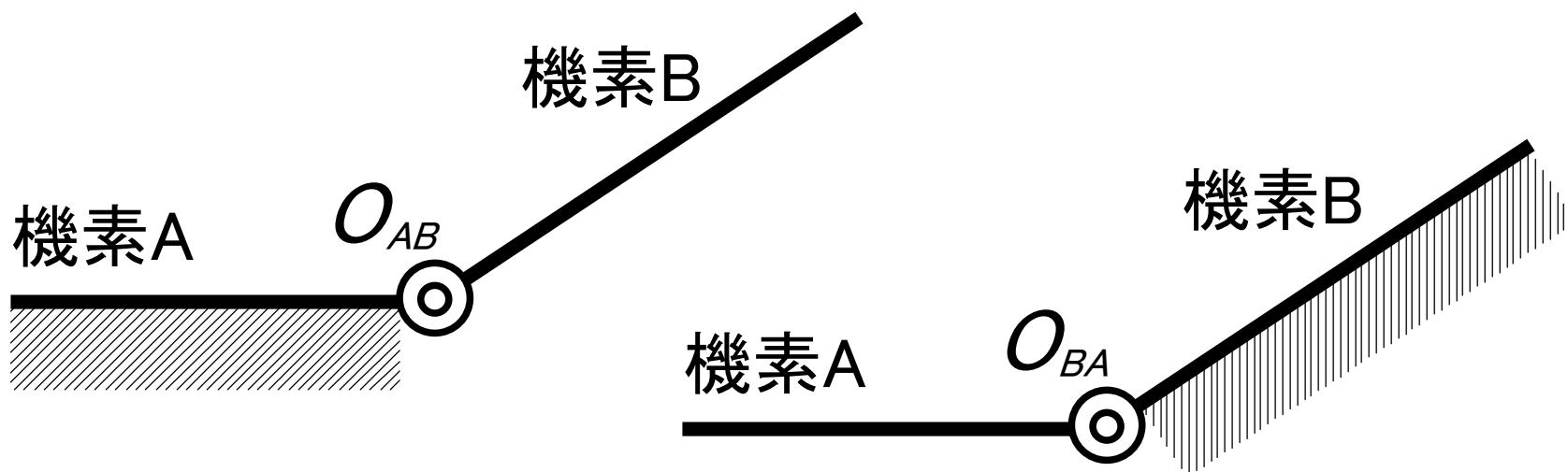
□ 機素Aから見た機素Bの瞬間中心を O_{AB} と書く。



どちらが基準でも回転中心は同じ場所！ ※ピン止め

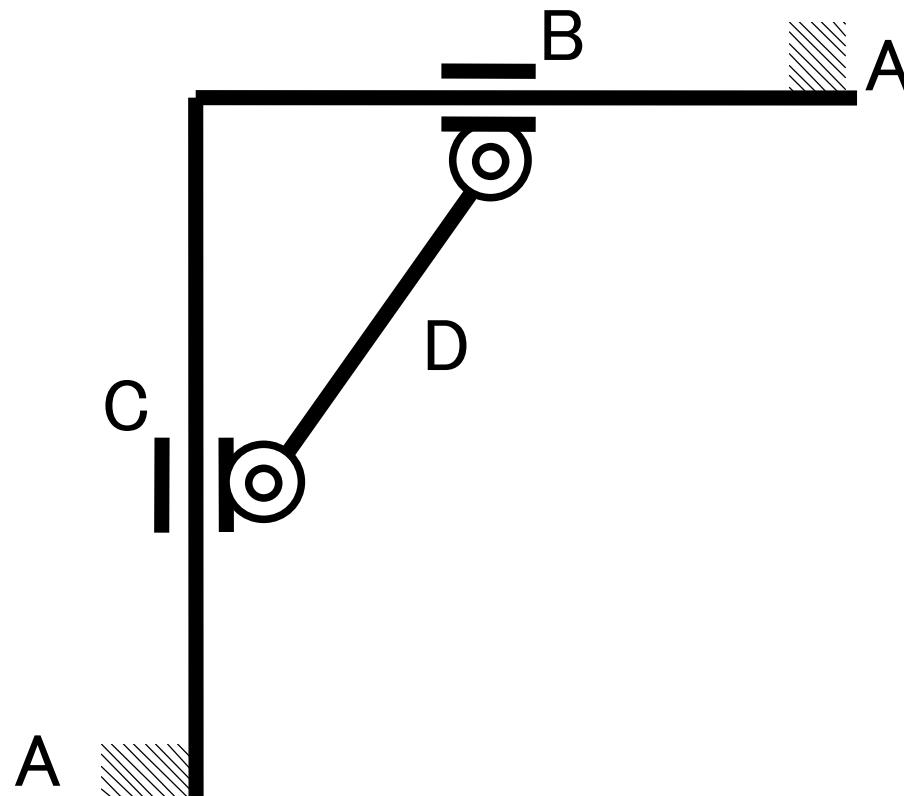
法則：一般に, $O_{AB} = O_{BA}$.

自明な瞬間中心の例(回り対偶)

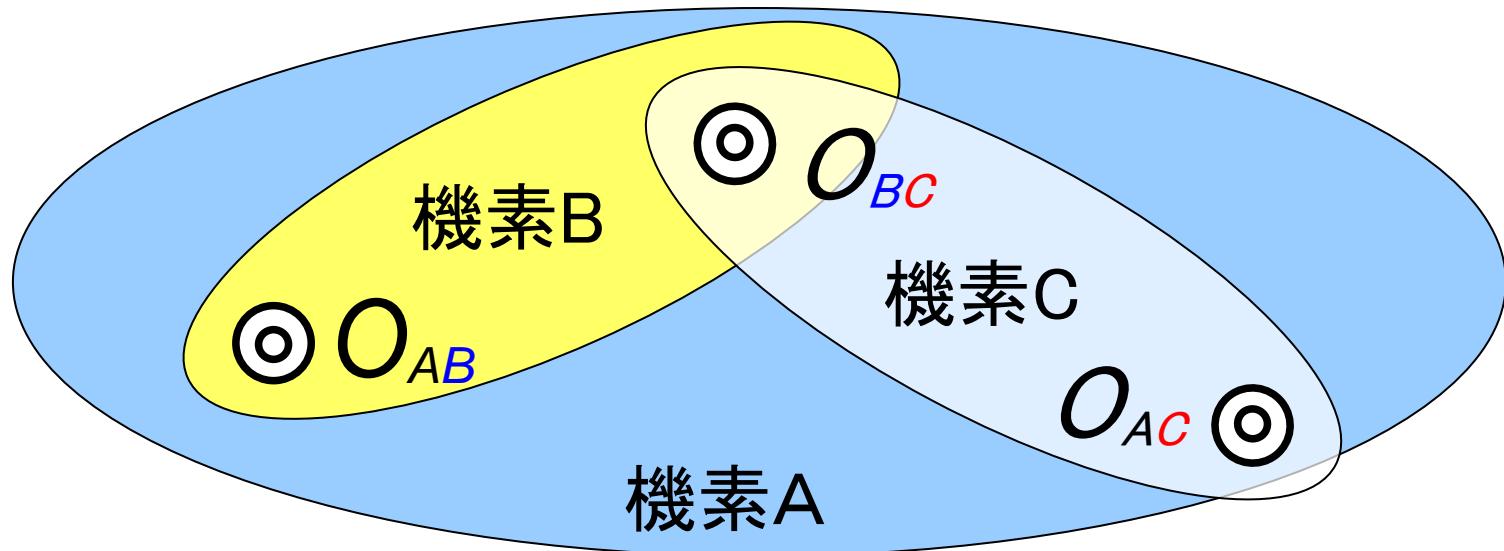


実習2：スライダの瞬間中心

- 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

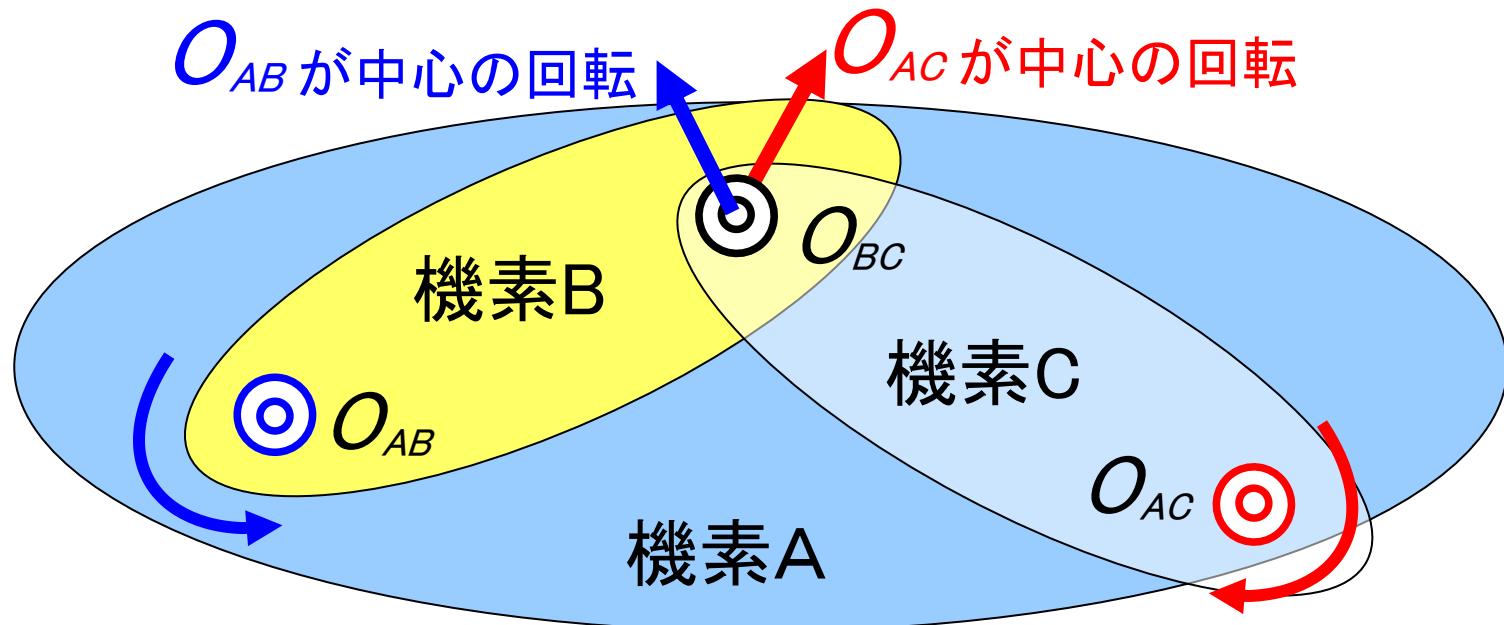


定理: O_{AB}, O_{BC}, O_{AC} は一直線に並ぶ.

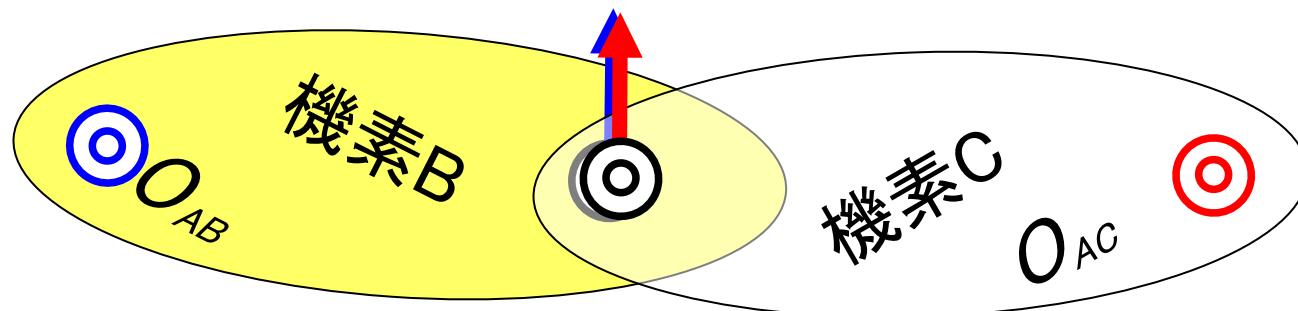
言い換え

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

定理の証明

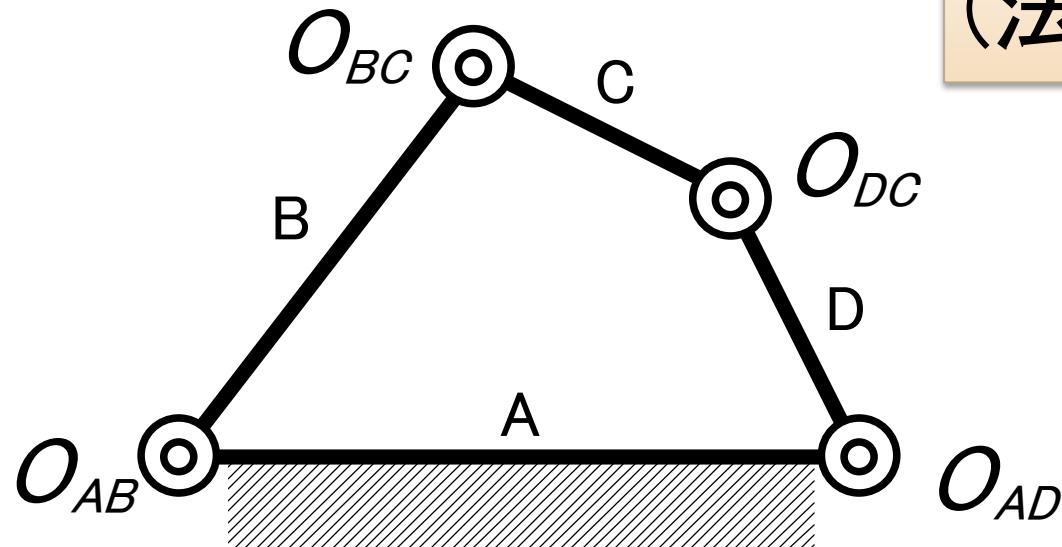


- 同じ点の速度は同じ \therefore 一直線に並ぶしかない



実習3： 中間節の瞬間中心

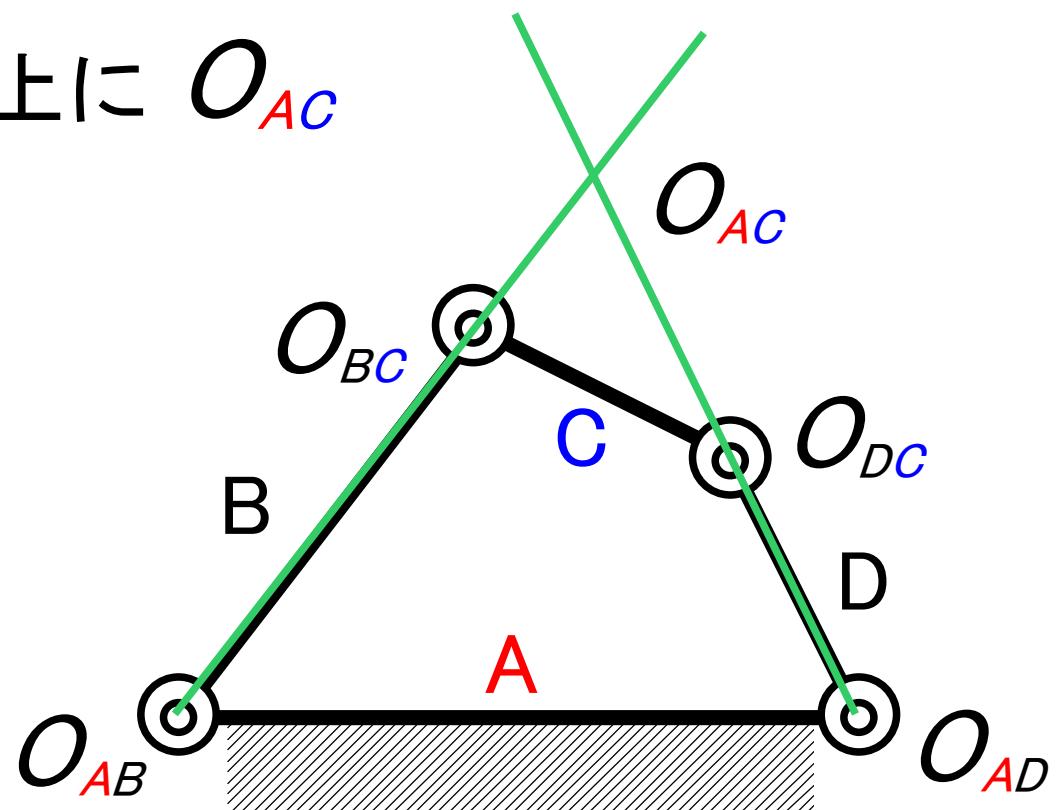
- 固定節Aに対する、機素Cの瞬間中心 O_{AC} を作図せよ。



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

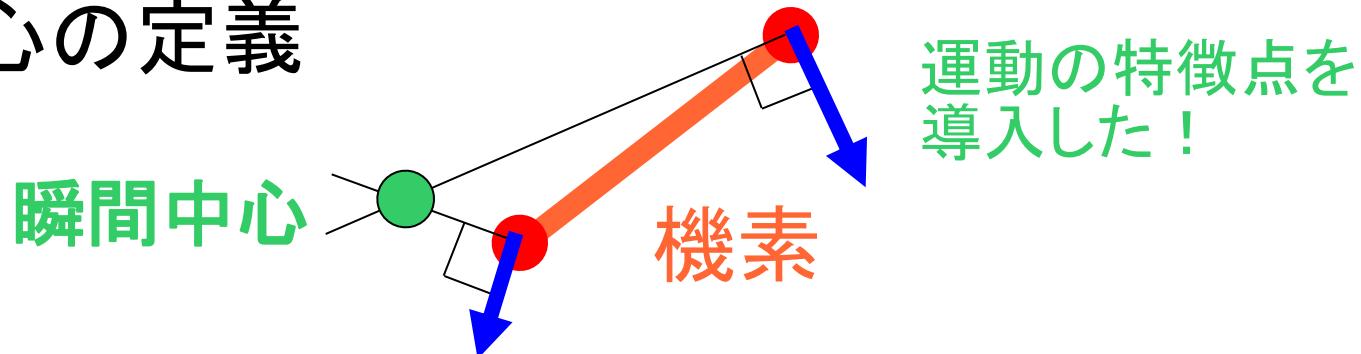
→ <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

この授業に必要なもの

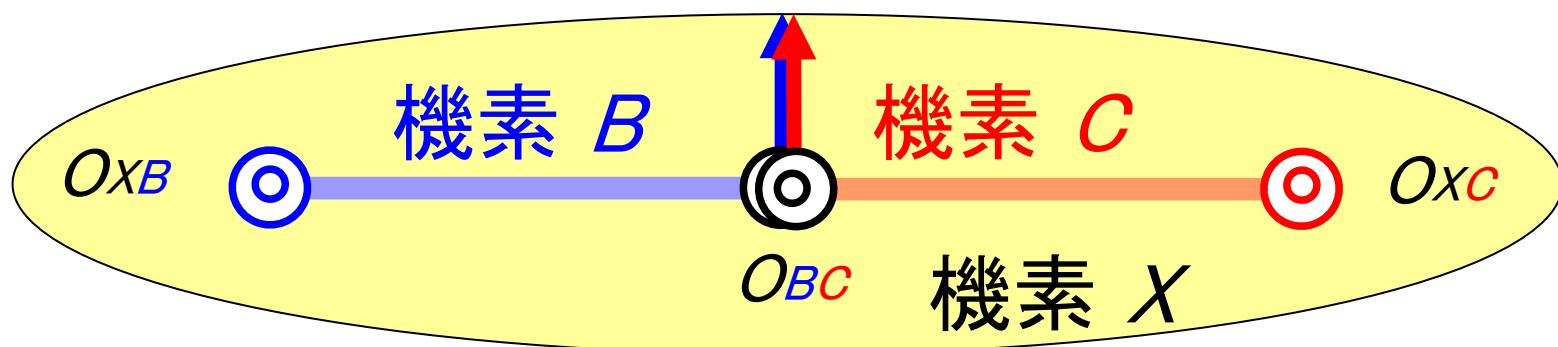
- コンパス（デバイダでもよい）
- 定規
- 「第1回レポート用紙」
 - <http://edu.katzlab.jp/lec/robo> からダウンロード
 - 「拡大縮小なし」で印刷。（寸法が狂うため）

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)



OxB , OxC を結ぶ直線上に OBC がくる。

学習内容

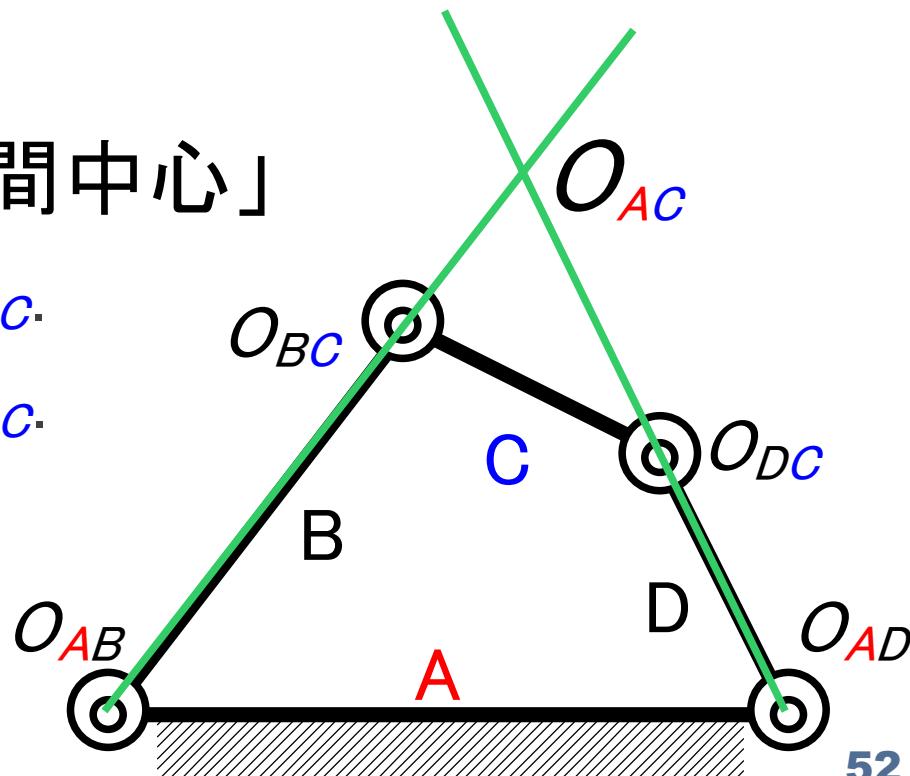
機素の運動速度を製図用具で求めたい！



「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、 $O_{XY} = O_{YX}$



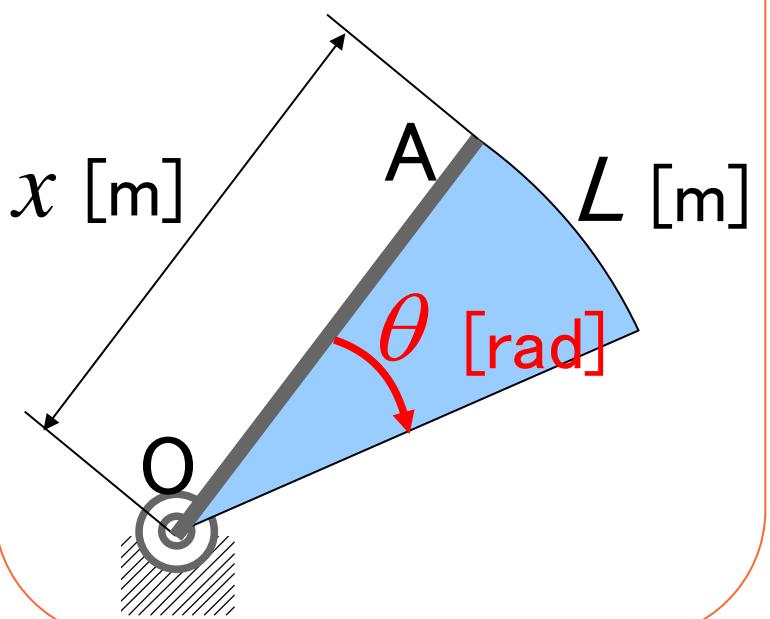
【復習】角速度

- 弧度法をまねて、「角速度 ω 」が定義される

弧度法

$$\theta \times x = L$$

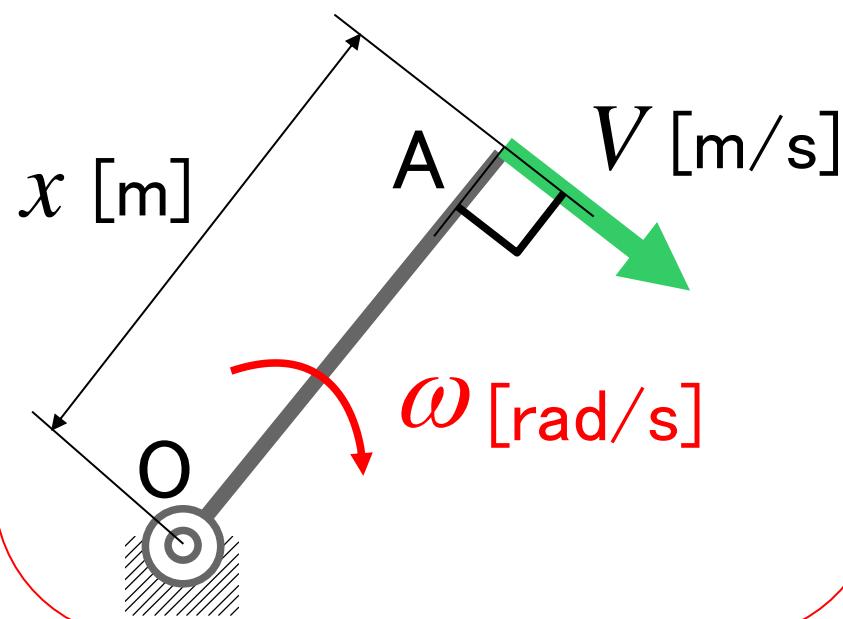
$\text{[rad]} \quad \times \quad \text{[m]} \quad = \quad \text{[m]}$



角速度 ω

$$\omega \times x = V$$

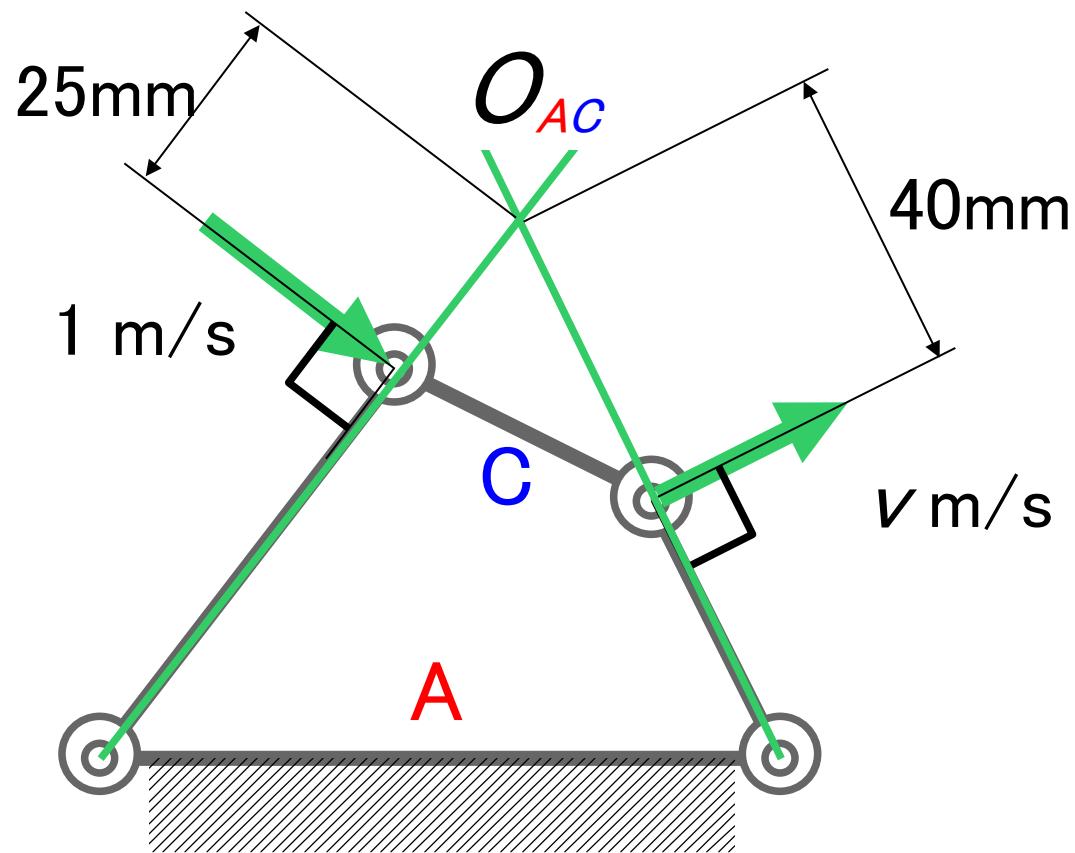
$\text{[rad/s]} \quad \times \quad \text{[m]} \quad = \quad \text{[m/s]}$



実習1：瞬間中心による速度解析

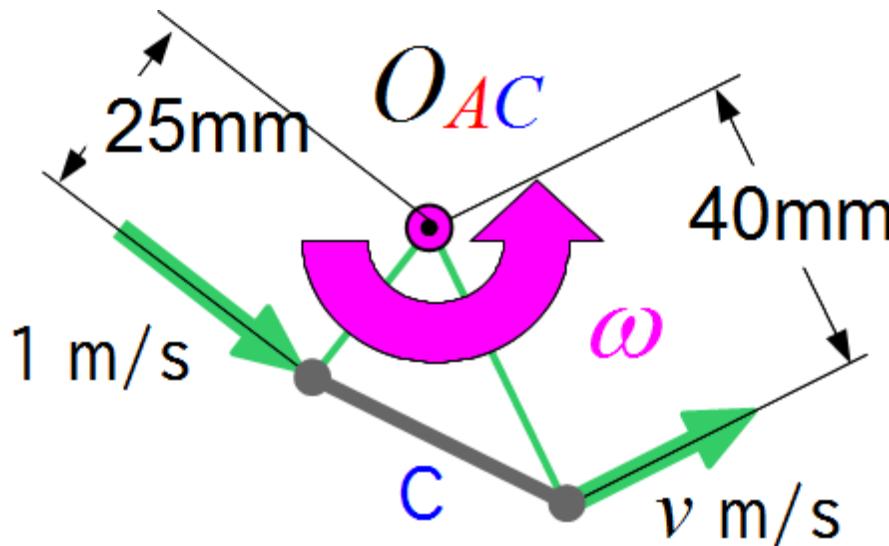
■ 速度 v を求めよ。

※ 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

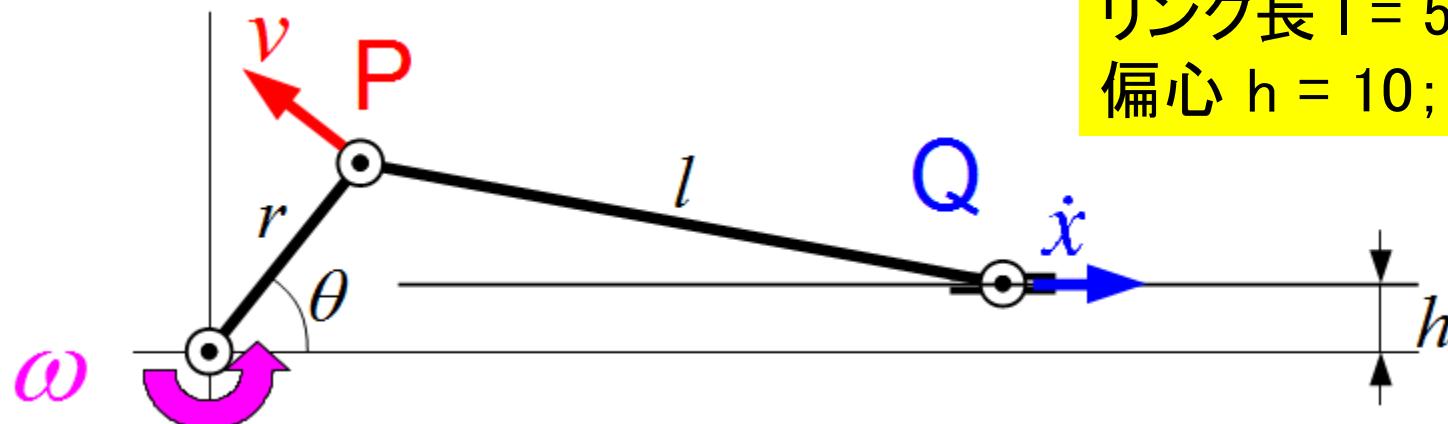
$$1/25 = \omega = v/40$$

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 $R = |\dot{x}| / |\nu|$ 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/>

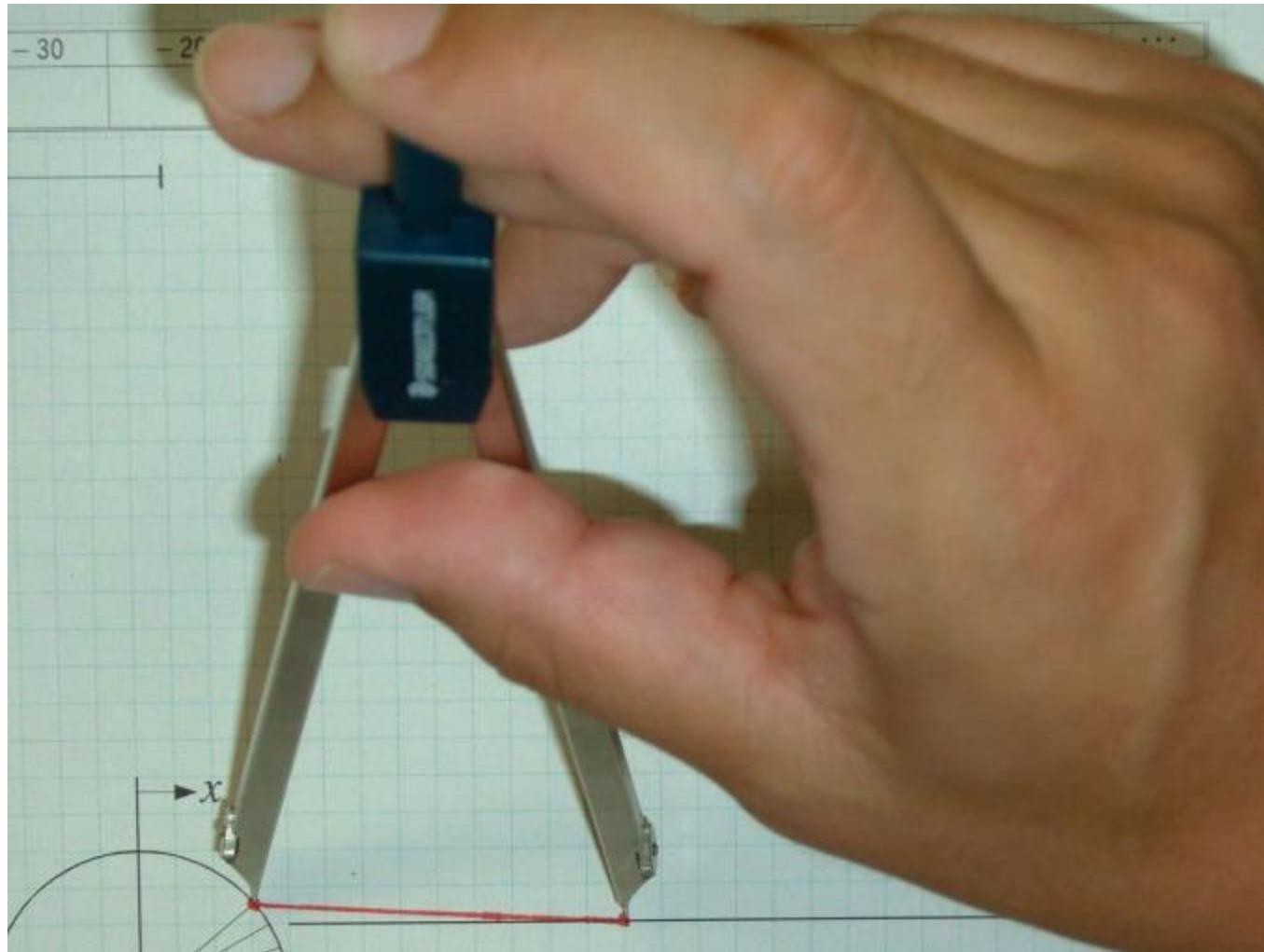
レポート提出方法

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.

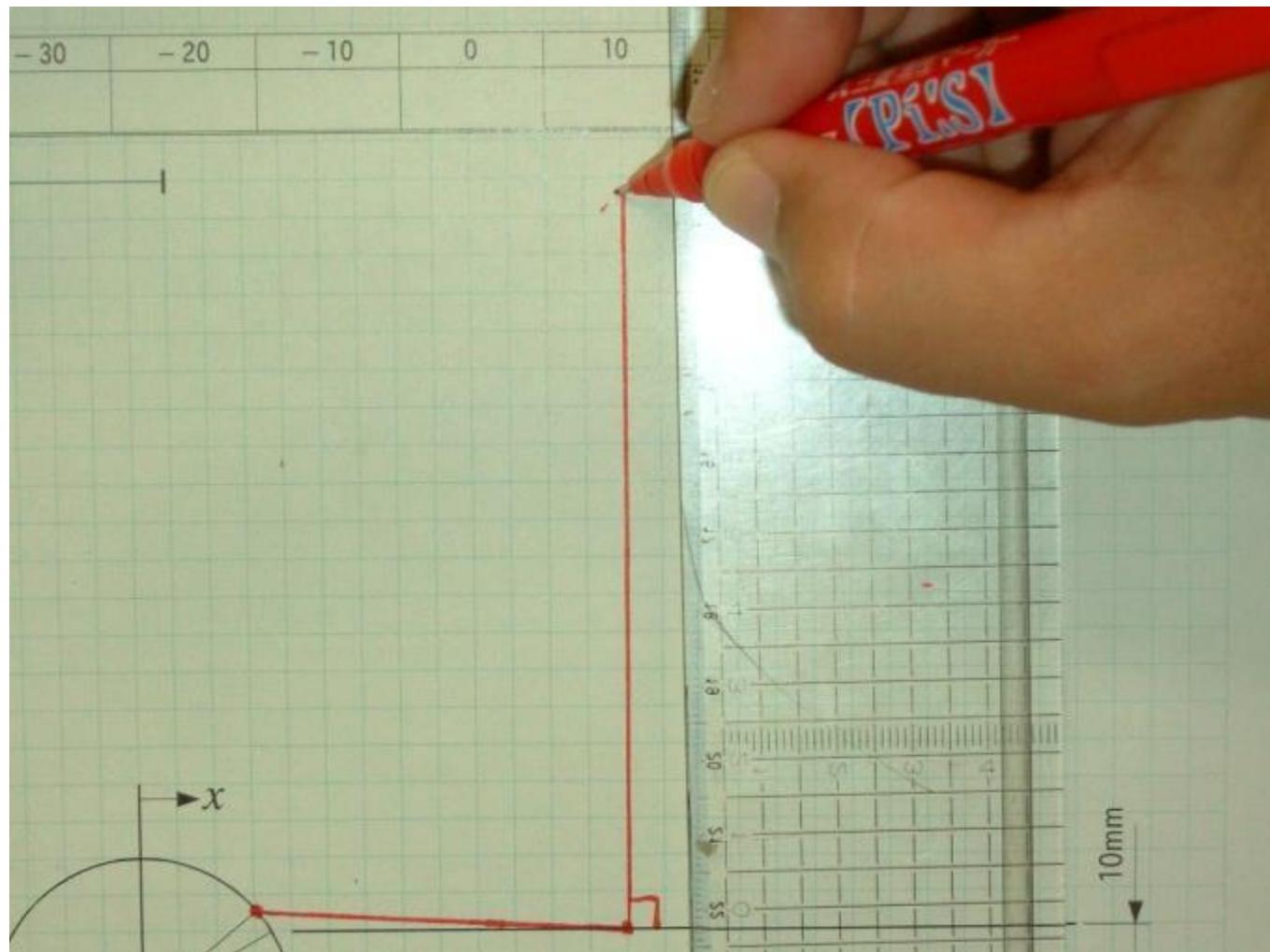
手順1

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



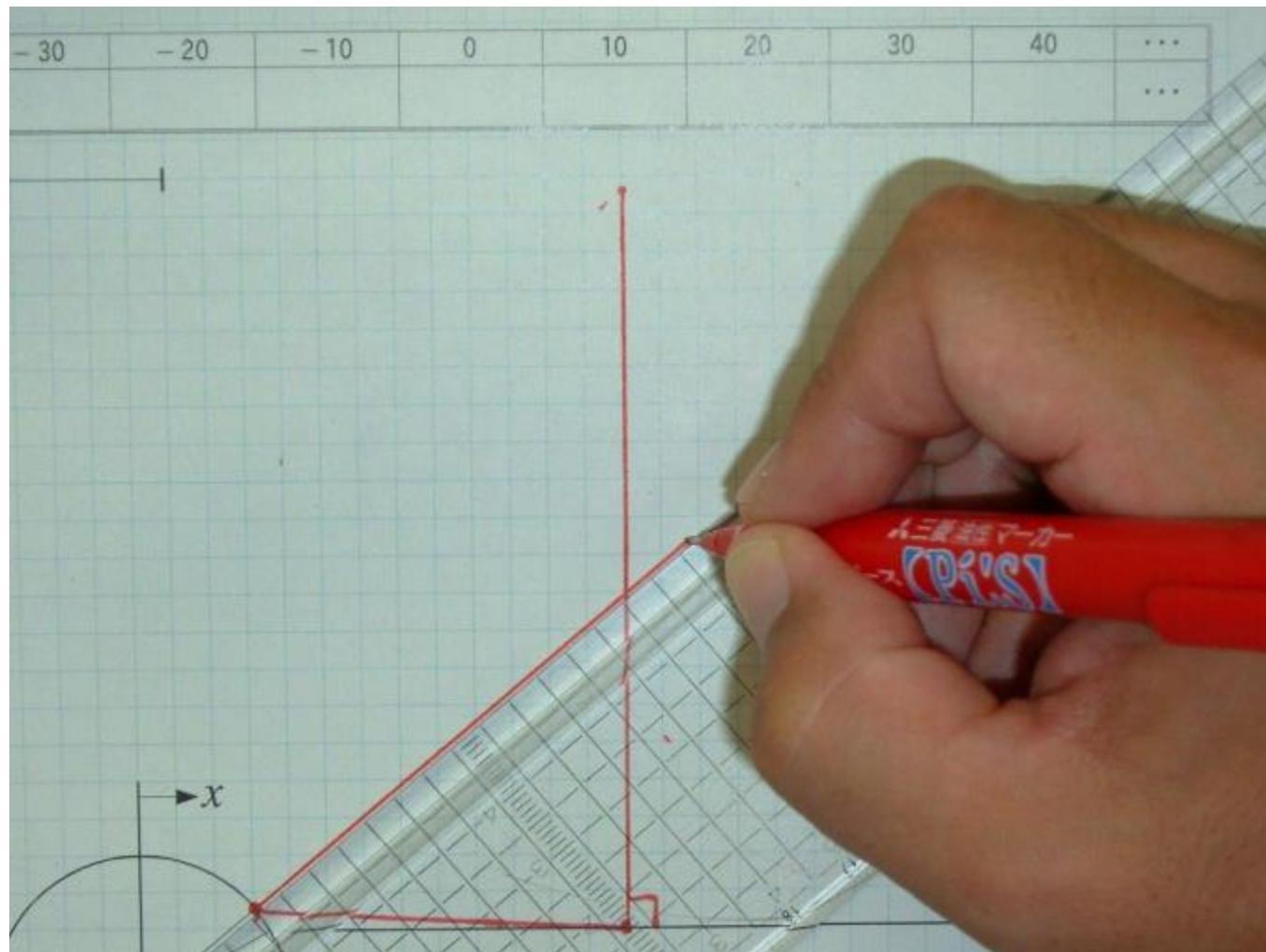
手順2

- リンク右端から瞬間中心へ線を引く(軌道の法線)



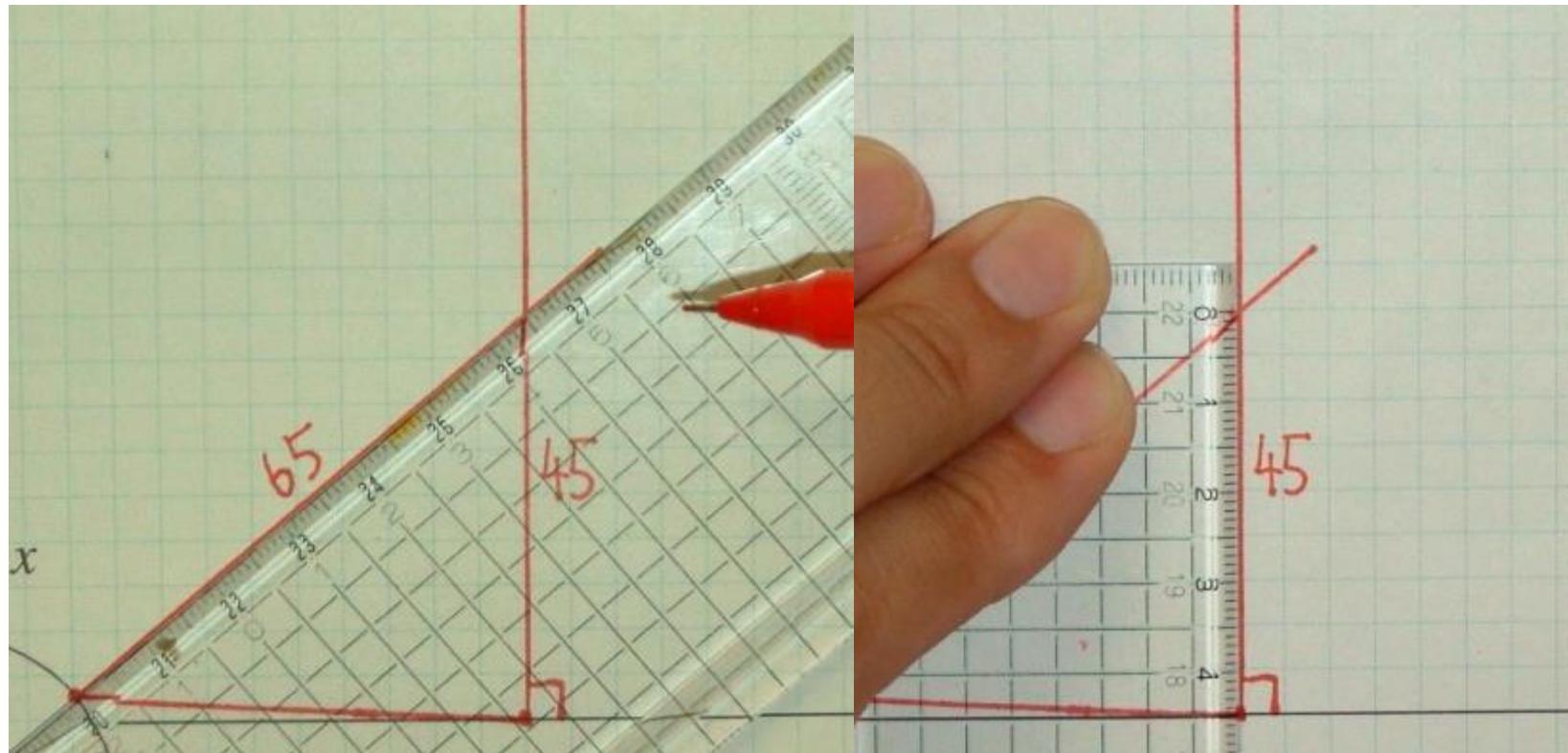
手順3

- リンク左端から瞬間中心へ線を引く（円周の法線）



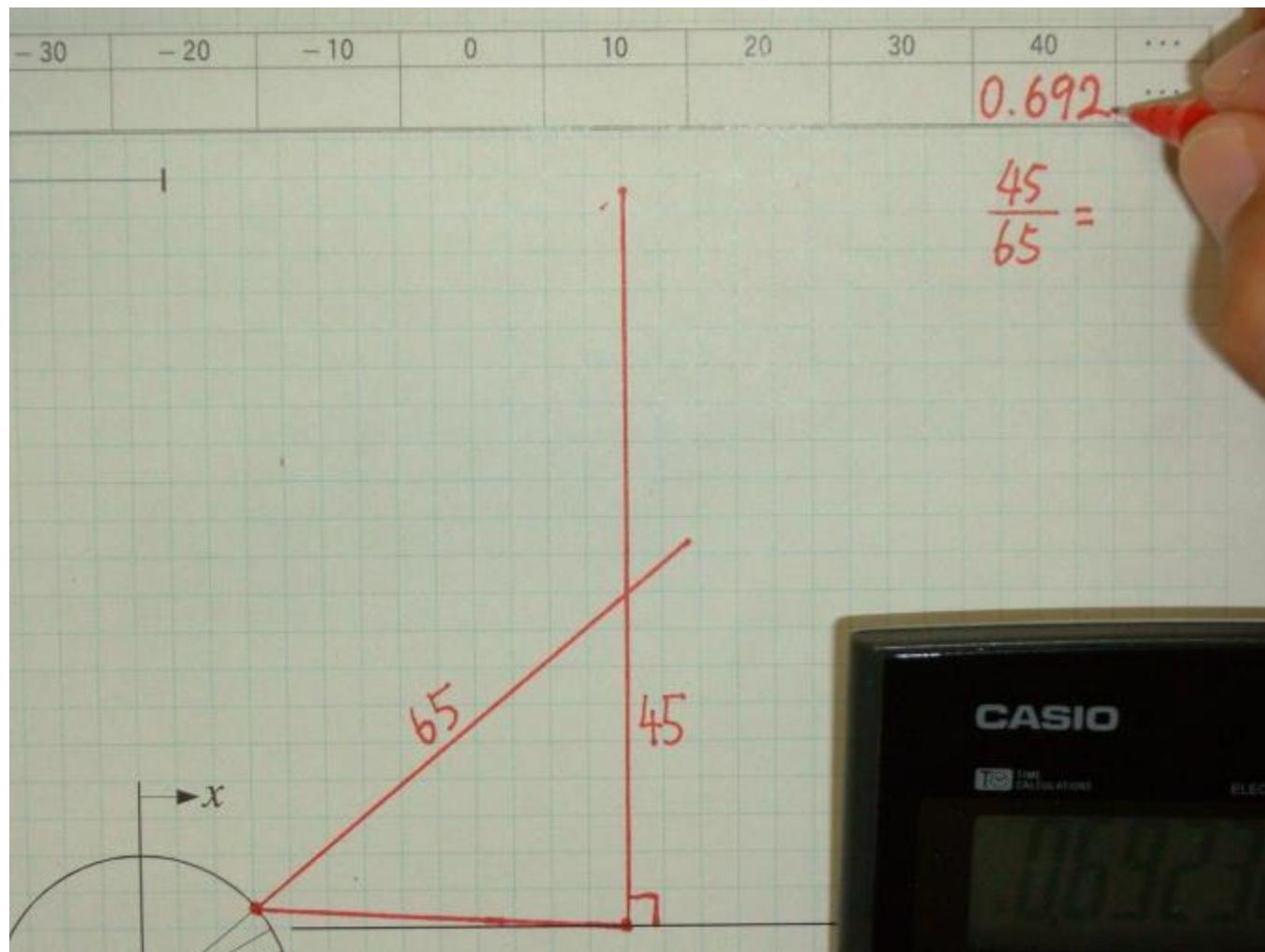
手順4

■ 瞬間中心(交点)との距離を測定



手順5

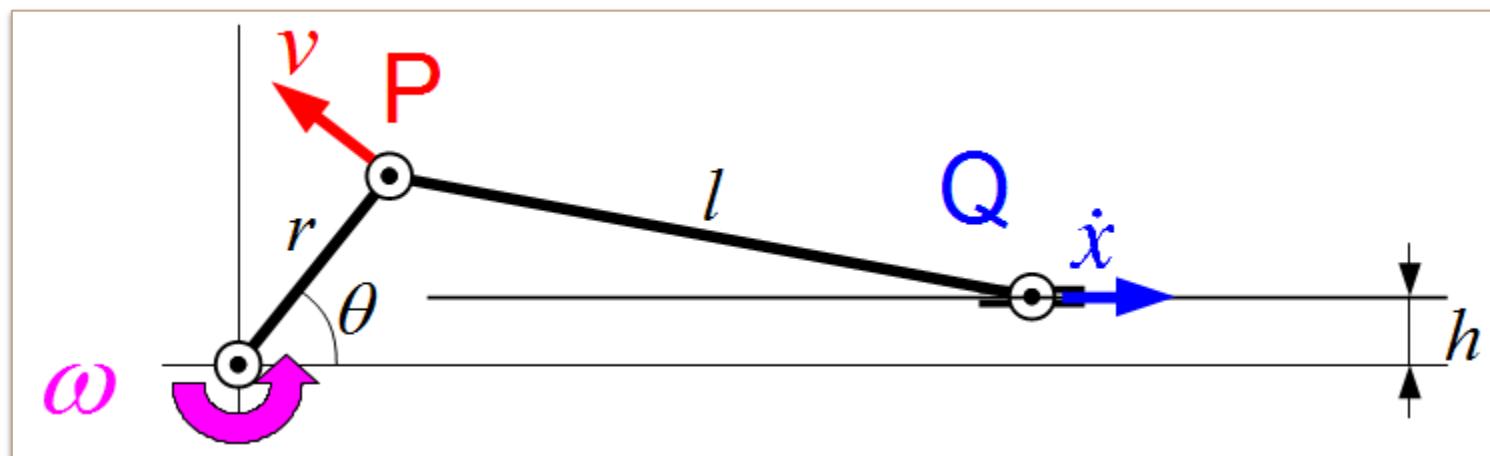
- 速度比 \equiv 瞬間中心との距離の比 を計算



速度比 0.692 の使い方

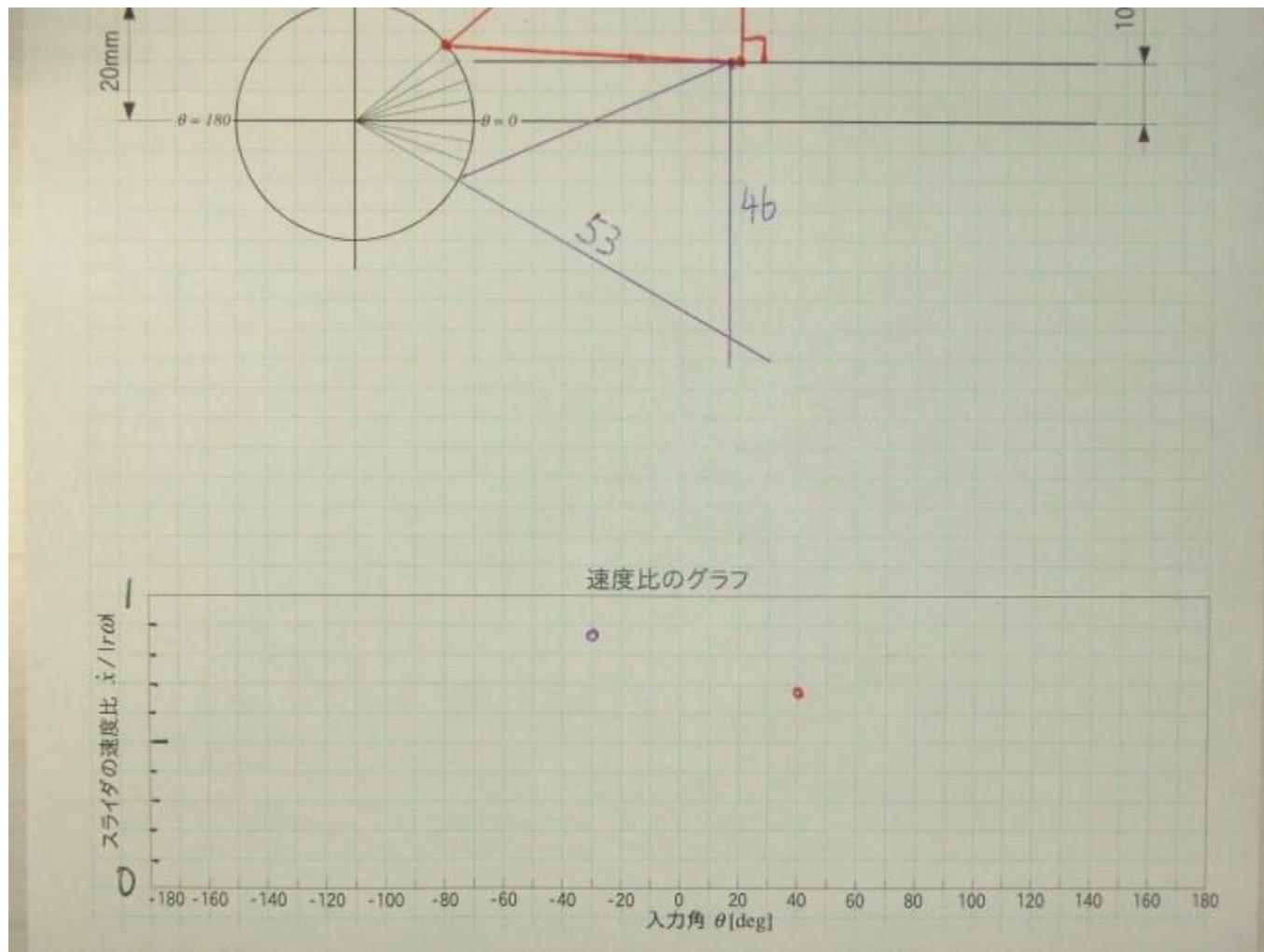
- 入力角 θ の角速度が $\omega = 5.2 \text{ rad/s}$ のとき
 - P の速度は, $v = r \omega = 10 \times 5.2 = 52 \text{ mm/s}$
- $\theta = 40\text{deg}$ での速度比は 0.692 より
 - Q の速度は, 運動方向の土に注意して

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



手順6

- グラフを作る. ($\theta = -30 \deg$ 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！