

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 専門科目「ロボット工学」

# 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/>

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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
- ロボット機構学 (kinematics)
- ロボット工学 (dynamics)
- ロボット制御 (control)

伝統的な  
運動構成論

現代の  
運動構成論

広義の「ロボット工学」

2

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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 ロボット工学

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

3

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## ロボット工学 開講場所

週	場所	内容
1	講義室	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	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	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	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

4

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 「ロボット工学」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「機械工学」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

5

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 学習目標

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

6

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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？

7

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 授業の最終目標 2/2

■ 第4部「ロボット制御」の課題



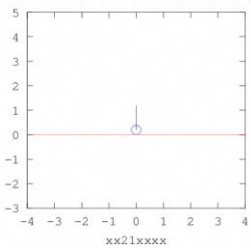
- 機構を表す Part 1~2 ロボット機構学
- 運動方程式を導く Part 3 ロボット力学
- 制御方法を決める Part 4 ロボット制御

8

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 課題の例 転倒するロボット

$a = 0.00, b = 0.00$  (1 / 50)



倒立ロボット  
+ 転倒限界  
+ 床

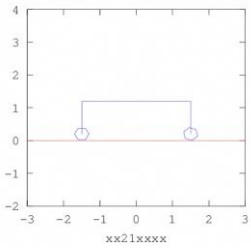
作り方は？

9

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 課題の例 つなげて対戦！

$b1 = 0.00, b2 = 0.00$  (1 / 80)



どうやって？


10

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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！

現実の手押し相撲      人工知能



■ まだ小学生に負ける. 今後もっと強くする！

11

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

製図用具で運動解析する！

## PART 1: 古典機構学

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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)

13

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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/>

14

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 「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

15

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 自転車の例



形状の保持

力→動き

回転→直進

人が乗らないと倒れる

16

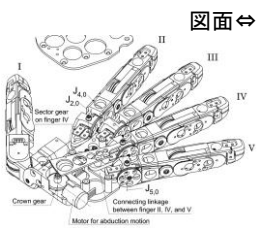
UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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

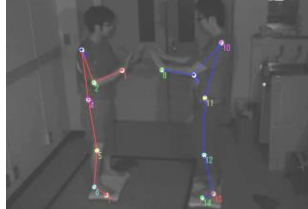


信学技報HIP2005-61(2005-10)より

17

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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。

18

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 「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

自由物体

19

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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)

20

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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!

機素1 機素2 ... 機素n

21

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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)」

機素1 機素2

☆ 対偶の組み合わせ = 機構

22

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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

23

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 回り対偶 (turning pair)

自由度 1

機素1 機素2

- ボールベアリング (玉軸受)

24

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 球面對偶 (spherical pair)

自由度 3

回転 × 1  
回轉 × 2

25

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### すべり対偶 (sliding pair)

自由度 1

26

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### ねじ対偶 (screw pair)

自由度 1 (直動 ∞ 回轉)

直動 ←→ 回轉

27

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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

位置  $(x, y)$       姿勢角  $\theta$

×  $(n-1)$  個  
=  $3(n-1)$

「機構の自由度」の定義より、基準の機素を1つ固定

28

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 対偶による自由度減少

自由度3

$\theta_1$   
 $(x_1, y_1)$

自由度3

$\theta_2$   
 $(x_2, y_2)$

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  
⇒  $6-2$  ∴ 自由度4

29

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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.

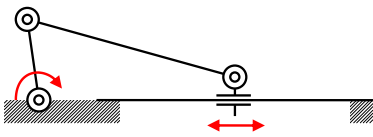
30

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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

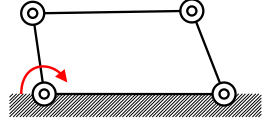


34

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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

32

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

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

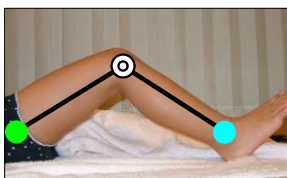
※レポート用紙・教材のダウンロード  
 → <http://edu.katzlab.jp/lec/robo/>

33

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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)」

機素1 機素2

34

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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

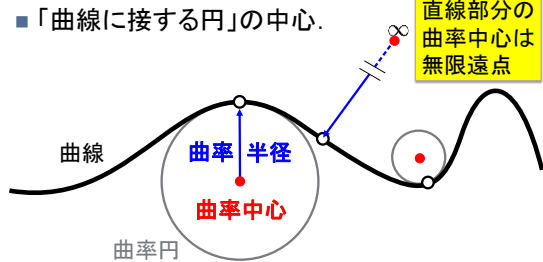
35

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 【準備】 曲率中心

- 「曲線に接する円」の中心。

直線部分の曲率中心は無限遠点



曲線

曲率半径

曲率中心

曲率円

曲線は円弧でパッチワークできる!

36

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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!

37

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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。

2点に代表させる  
機素

38

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 【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

←瞬間中心  
= この瞬間の機素の回転中心 ≠ 曲率中心

2点に代表させる  
瞬間中心

39

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 実習1: 機素の瞬間中心

- 次の機素の瞬間中心を作図せよ。

機素  
(紙面から見た速度)

40

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 【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。

Aから見たBの速度  
機素B  
 $O_{AB}$   
機素A

Bから見たAの速度  
機素A  
 $O_{BA}$

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,  $O_{AB} = O_{BA}$ .

41

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 自明な瞬間中心の例(回り対偶)

機素A  $O_{AB}$  機素B  
機素A  $O_{BA}$  機素B

42

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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.

43

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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

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

44

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 定理の証明

- 同じ点の速度は同じ ∴ 一直線に並ぶしかない

45

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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)

46

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 回答例

- $O_{AB}, O_{BC}$  の線上に  $O_{AC}$
- $O_{AD}, O_{DC}$  の線上に  $O_{AC}$

47

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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)

48



UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 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/>

49

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

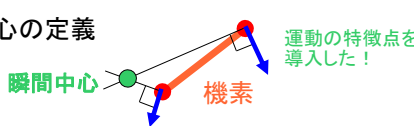
## この授業に必要なもの

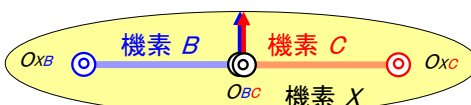
- コンパス (デバイダでもよい)
- 定規
- 「第1回レポート用紙」
  - <http://edu.katzlab.jp/lec/robo> からダウンロード
  - 「拡大縮小なし」で印刷。(寸法が狂うため)

50

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 第3講の復習

- 瞬間中心の定義
 

運動の特徴点を導入した!
- 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。

51

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

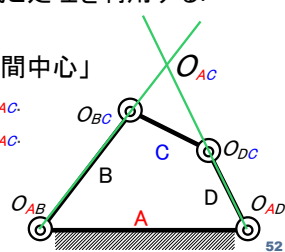
## 学習内容

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,  $O_{XY} = O_{YX}$



52

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

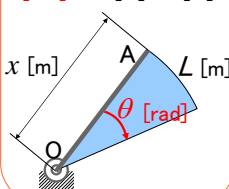
## 【復習】 角速度

- 弧度法をまねて、「角速度  $\omega$ 」が定義される

弧度法

$$\theta \times x = L$$

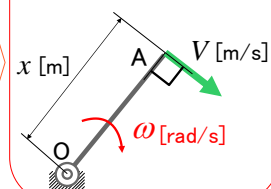
[rad] [m] [m]



角速度  $\omega$

$$\omega \times x = V$$

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



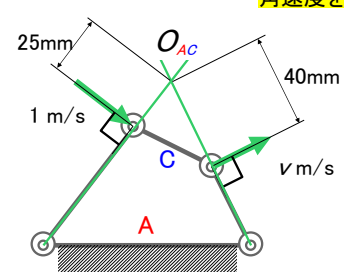
53

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

## 実習1: 瞬間中心による速度解析

- 速度  $v$  を求めよ.

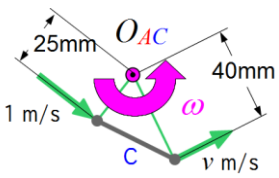
※  $O_{ac}$  まわりの角速度を考えよ



54

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  $\omega$  が共通



すなわち

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

が成立し

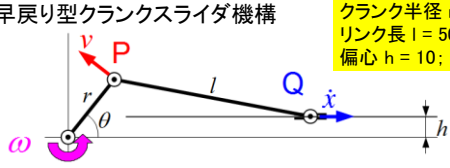
$$\therefore v = 40/25 = 1.6\text{m/s}$$

55

第1回レポート課題(速度の図式解法)

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  $\theta$  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/>

56

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。

57

手順1

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



58

手順2

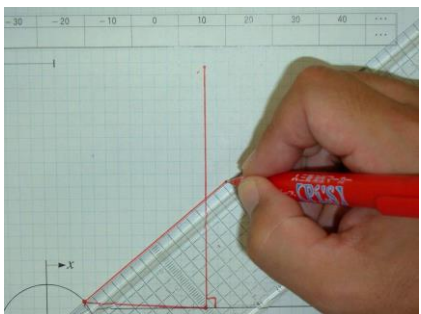
- リンク右端から瞬間中心へ線を引く(軌道の法線)



59

手順3

- リンク左端から瞬間中心へ線を引く(円周の法線)

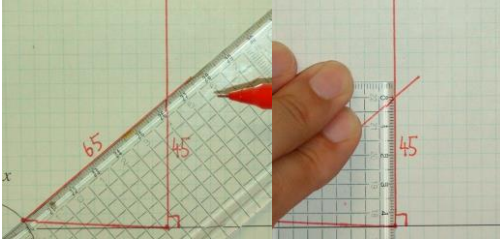


60

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 手順4

- 瞬間中心(交点)との距離を測定

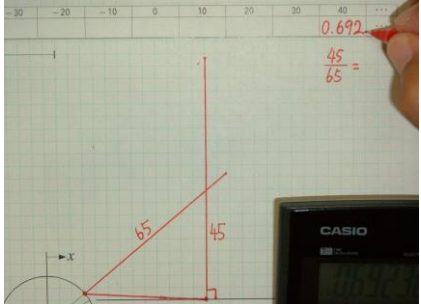


61

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 手順5

- 速度比  $\equiv$  瞬間中心との距離の比 を計算

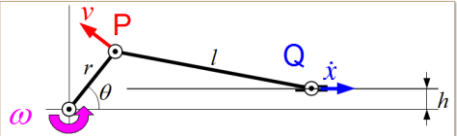


62

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 速度比 0.692 の使い方

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

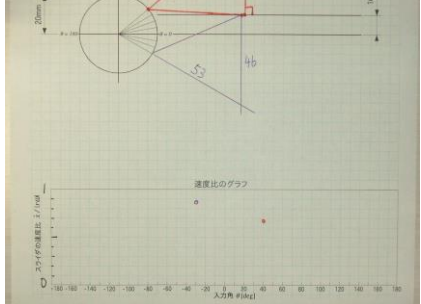


63

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 手順6

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



64

UTSUNOMIYA UNIVERSITY

### 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!

65