

仙台市/仙台市産業振興事業団  
ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー  
第18回 C18/Rev 1.0

# マニピュレータの 構造・特性・制御の基礎

仙台市地域連携フェロー

熊谷正朗

kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部  
ロボット開発工学研究室 **RDE**

## 今回の目的

### ○ 腕ロボット・脚ロボットの基礎の把握

テーマ1: マニピュレータの機構

- ・ 腕ロボットの概要と要素
- ・ 自由度と関節の数、角度の表現
- ・ 腕ロボット・脚ロボットの関節配置

テーマ2: マニピュレータの特性と制御

- ・ 運動学と逆運動学
- ・ 特異点と運動の制約
- ・ 制御系の概要と原理の活用

C18 マニピュレータの構造, 特性, 制御 Page. 2 基礎からのメカトロニクスセミナー

## マニピュレータ

### ○ いわゆる腕型のロボット

◇ 昔から認知される実用的「ロボット」 (引)安川電機

- ・ 「産業用ロボット」
- ・ ロボットアーム



◇ 複数の関節とリンク

- ・ **関節**: 可動な箇所 回転/直動、能動/受動
- ・ **リンク**: ひとつかたまりで動く部分(関節の間)
- ・ **手先(手先効果器)**: 先端部分

※本資料のロボット写真は各社WEBサイト等から引用しました→(引)印

C18 マニピュレータの構造, 特性, 制御 Page. 3 基礎からのメカトロニクスセミナー

## マニピュレータ

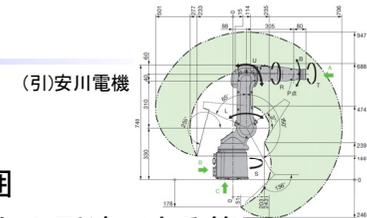
### ○ 関連用語

◇ 可動範囲/動作範囲

- ・ 関節を動かし手先の到達できる範囲  
(単純に手先の位置+手先の姿勢)

◇ 剛性(高い/低い)

- ・ 手先の硬さと強さ
- ・ ある力をかけたときに、たわむ程度
- ・ 構造、関節角度に大きく依存。



C18 マニピュレータの構造, 特性, 制御 Page. 4 基礎からのメカトロニクスセミナー

## マニピュレータの区分

### ○ 直列型と並列型

#### ◇直列型（シリアルマニピュレータ）

- ・根元から、  
リンクー関節ーリンクー…関節ー手先  
と1本につながる。



#### ◇並列型（パラレルマニピュレータ）

- ・根元から、手先までの間に、  
複数の関節ーリンクのつながりが  
並列に入る。

MOTOMAN-MPP3  
(引)安川電機

## マニピュレータの区分

### ○ 直列型と並列型

#### 直列型の例



(引)安川電機

#### 並列型の例



(引)ファナック

(株)安川電機 双腕15自由度  
MOTOMAN-SDA5D (7+7+1)

ファナック(株) 4/6 自由度  
M-1iA

## マニピュレータの区分

### ○ 直列型と並列型

#### ◇直列型の特徴

- 構造が単純。
- 可動範囲を広く取りやすい。
- △ 剛性を高めにくい。(高めるとごつくなりやすい)
- △ アクチュエータも手先まで続く。
- △ 関節角度→手先位置姿勢は求めやすい。  
手先位置姿勢→関節角度は求めにくい。

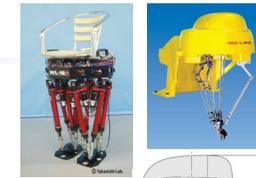


## マニピュレータの区分

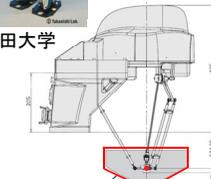
### ○ 直列型と並列型

#### ◇並列型の特徴

- △ 構造(設計)が複雑。
- △ 可動範囲を取りにくい。
- 剛性を高めやすい。
- アクチュエータを根元配置→高速運動可。
- △ 関節角度→手先位置姿勢は求めにくい。  
手先位置姿勢→関節角度は求めやすい。



(引)早稲田大学



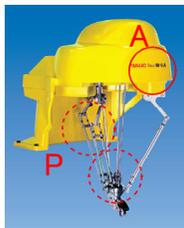
(引)ファナック

## マニピュレータの関節

### ○ 関節の種類

#### ◇能動関節と受動関節

- ・能動（アクティブ）  
アクチュエータ入りで動作を制御。
- ・受動（パッシブ）  
アクチュエータなし  
他の能動関節の動きに連動して動き、  
機構としてマニピュレータを成立させる。

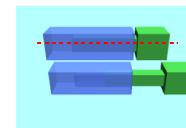
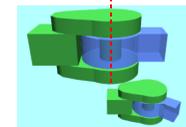


## マニピュレータの関節

### ○ 関節の種類

#### ◇回転関節と直動関節

- ・回転関節  
一本の軸を中心に曲がる関節
- ・直動関節  
一本の直線に沿って長さが変わる関節  
※ねじれない＝円筒ではない

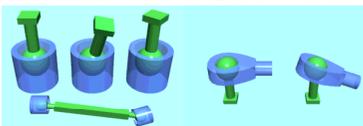


## マニピュレータの関節

### ○ 関節の種類

#### ◇球面関節

- ・ボールジョイント、ロッドエンド
- ・任意の方向に回転する関節。
- ・現状では受動型のみで能動は無い。  
※球面モータは能動型の可能性
- ・主に「機構間の長さを決める」用途に。



## マニピュレータと自由度

### ○ どのくらい動作が自由か

#### ◇自由度 Degree Of Freedom = DOF

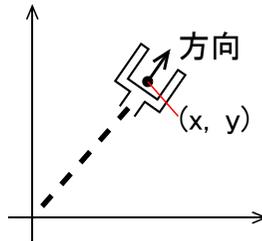
- ・他と連動すること無く、自由に設定できる  
位置、姿勢、角度など の数
- ・空間の自由度： 6自由度（次に説明）
- ・マニピュレータの(能動)自由度：  
関節(モータ)の数、軸数
- ・手先の自由度 ≤ マニピュレータの自由度  
不足 → なにかの動作ができない / 連動

## マニピュレータと自由度

### ○ 平面と空間の自由度

#### ◇平面の自由度

- ・位置(並進): 2自由度
- ・姿勢(回転): 1自由度
- ・合計3自由度

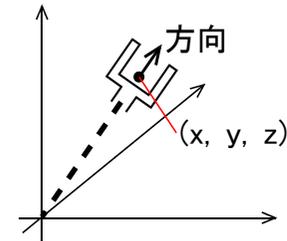


## マニピュレータと自由度

### ○ 平面と空間の自由度

#### ◇空間の自由度

- ・位置(並進): 3自由度 ※明らか?
- ・姿勢(回転): 3自由度 ※本当?
- ・合計6自由度



## マニピュレータと自由度

### ○ 空間の回転表現

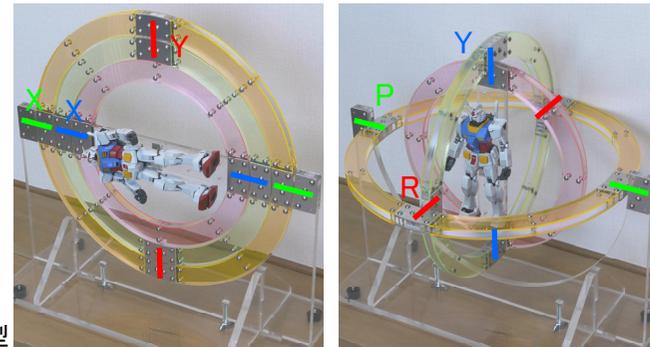
#### ◇空間の回転は3自由度

- ・例) 前後軸・左右軸・鉛直軸まわりの回転
- ・これで、どんな姿勢も表せる? → 十分
- ・オイラー角、ロール・ピッチ・ヨー角などの表現
- ※教科書や分野によって様々

## マニピュレータと自由度

### ○ 空間の回転表現

#### ◇オイラー角 と ロール・ピッチ・ヨー



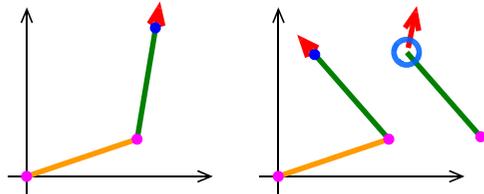
X-Y-Z型

## マニピュレータと自由度

### ○ 自由度の不足と連動の例

#### ◇ 平面の2自由度ロボット

- ・手先の位置は自由に決められる
- 手先の向きは自動的に決まる
- 向きも決めれば、もう1関節

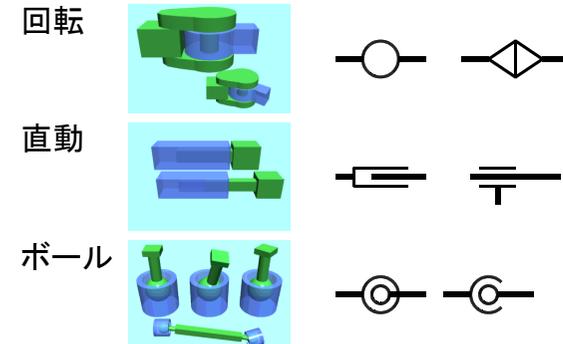


## マニピュレータの機構

### ○ 関節の記号化

※いくつかの表記法がある中の一部

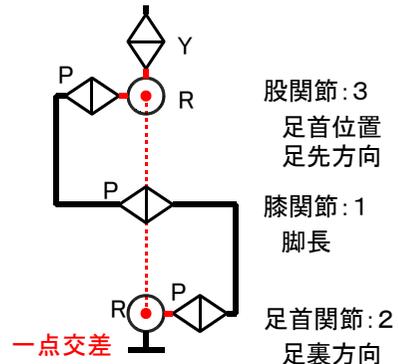
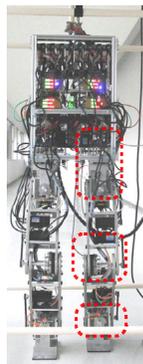
#### ◇ 機構検討のための単純化イラスト



## マニピュレータの機構

### ○ 関節の記号による腕と脚の表現例

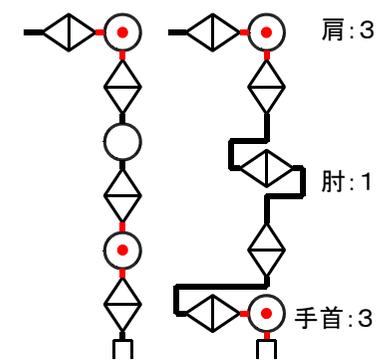
#### ◇ 脚ロボット (一般的6自由度)



## マニピュレータの機構

### ○ 関節の記号による腕と脚の表現例

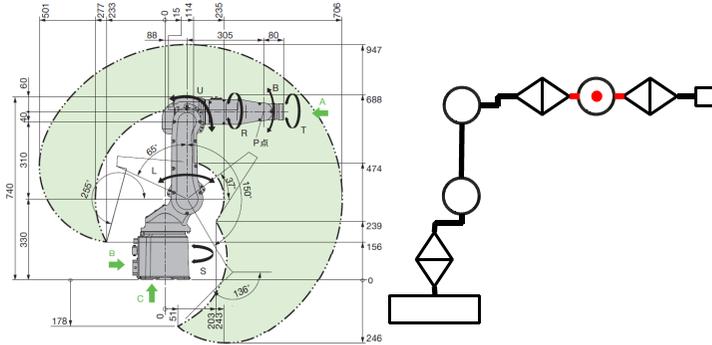
#### ◇ 腕ロボット (7自由度型、人模擬)



## マニピュレータの機構

### ○ 関節の向きとロボットの特徴

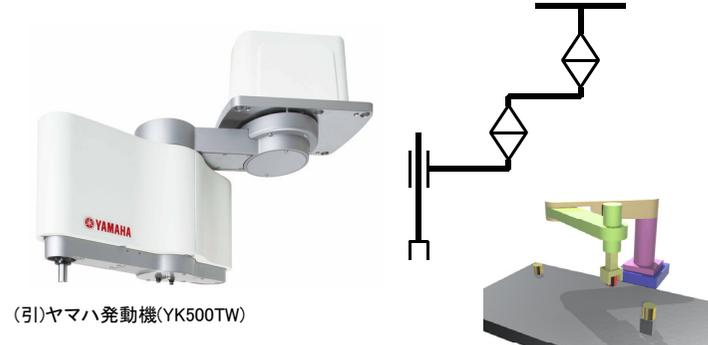
◇5, 6自由度の産業用ロボット



## マニピュレータの機構

### ○ 関節の向きとロボットの特徴

◇SCARA型ロボット（水平多関節、スカラ）



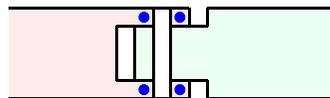
(引)ヤマハ発動機(YK500TW)

## マニピュレータの機構

### ○ 関節の向きとロボットの特徴

◇SCARA型の特徴

- ・主要な関節がすべて鉛直軸  
= 水平移動の関節の駆動に重力がかからない。  
※重力は関節の軸受機構のみで受け
- ・水平方向での低消費電力、高速化



## マニピュレータの機構選定

### ○ 自由度は いくら必要か？

◇マニピュレータに求める動作を考える

- ・手先の位置の自由度
- ・手先の姿勢の自由度  
(+可動範囲)

◇必要な空間自由度  $\leq$  マニピュレータ自由度

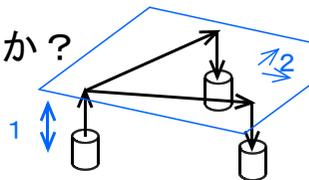
- ・高自由度のマニピュレータは高い！  
(+精度や剛性に影響しやすい)

## マニピュレータの機構選定

### ○ 自由度は いくら必要か？

#### ◇手先の位置の自由度

- ・一般的には3。
- ・例) つかむ→持ち上げる(上下自由度)  
→移動する(平面位置の自由度)  
→下ろす、離す
- ・水平移動がポイント→ポイントなら2。  
※腕ロボットはおそらく不要



## マニピュレータの機構選定

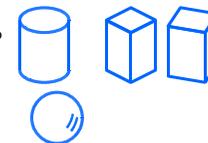
### ○ 自由度は いくら必要か？

#### ◇手先の姿勢の自由度

- ・用途によって大きく変わる。

#### ◇運搬系

- ・つかんで持ち上げるだけ  
=前後左右の傾けは不要 →最大で1  
水平面内の方向あわせは？
- ・水平面内が円形(球や円筒)は回転対称  
→ゼロにもなりうる。



## マニピュレータの機構選定

### ○ 自由度は いくら必要か？

#### ◇手先の姿勢

#### ◇組み立て系

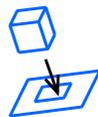
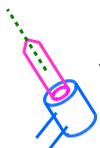
- ・組み付ける方向によって1~3

#### ◇回転工具系

- ・最終的な工具の軸の「指す方向」のみ:2

#### ◇検査装置系

- ・画面の回転はソフトで対処可能か？



## マニピュレータの機構選定

### ○ 自由度は いくら必要か？

#### ◇マニピュレータに求める動作を考える

- ・手先の位置/姿勢の自由度

#### ◇予備の自由度

- ・一般的には不要。
- ・自由度の予備  
→途中の腕部分の位置の自由、  
メカ的可動限界の克服。

十分検討の上での選定を

## Intermission プラモデルの自由度

### ○ ロボットプラモの機構がすごい

#### ◇ガンプラ=ガンダムのプラモデル



MG 1/100  
RX-78-2 ガンダム  
Ver 3.0

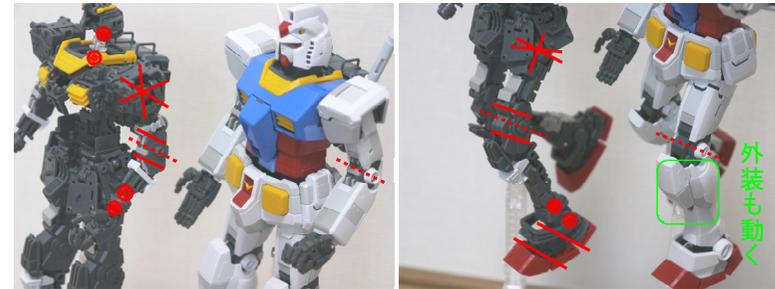


## Intermission プラモデルの自由度

### ○ ロボットプラモの機構がすごい

#### ◇プラモデルの関節自由度

- ・あきらかに、実在のロボットより多い。

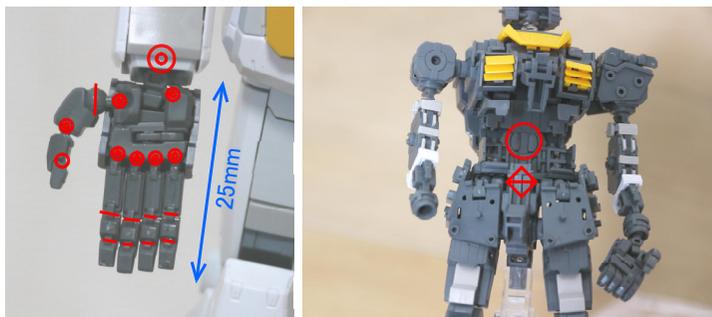


## Intermission プラモデルの自由度

### ○ ロボットプラモの機構がすごい

#### ◇プラモデルの関節自由度

- ・ハンド部(一体成形) 腰部

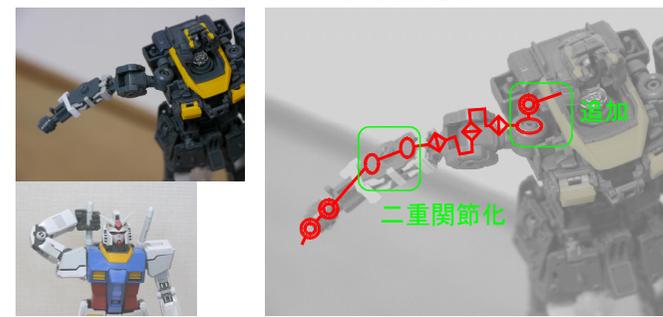


## Intermission プラモデルの自由度

### ○ ロボットプラモの機構がすごい

#### ◇プラモデルの関節自由度

- ・肩関節まわりの自由度増加



## Intermission プラモデルの自由度

### ○ ロボットプラモの進歩

◇なぜここまで複雑化？

- ・(特に昔の)ロボットアニメの不具合解消。
- ・ロボットの動きを「人間のポーズで」  
つくってしまった←人間の自由度は膨大
- ・昔のプラモはアニメ劇中とプラモの動作の  
ギャップがすごかった。  
→ どうしたら「名シーン」を再現できるか？

## Intermission プラモデルの自由度

### ○ ロボットプラモの進歩

◇なぜここまで複雑化？

- ・3次元CADの発達、金型技術/成形技術の  
発達で、年々プラモが高度になる。
- ・最近ではアニメを作る段階で3次元モデル  
が作られる(ロボット部分はCG)ので、  
このようなミスマッチは減りつつある？

## 今回の目的

### ○ 腕ロボット・脚ロボットの基礎の把握

テーマ1: マニピュレータの機構

- ・腕ロボットの概要と要素
- ・自由度と関節の数、角度の表現
- ・腕ロボット・脚ロボットの関節配置

テーマ2: マニピュレータの特性と制御

- ・運動学と逆運動学
- ・特異点と運動の制約
- ・制御系の概要と原理の活用

## マニピュレータの制御

### ○ 関節の制御 と 全体の制御

◇マニピュレータ制御に必要なこと

- ・手先の運動を計画する。  
←仕様 や より上位の制御
- ・各関節の角度等を算出する。  
=「逆運動学」
- ・各関節の角度制御を行う。  
=各種モータコントローラ等  
※力の制御をするときは異なる手法もある

## 順運動学 と 逆運動学

### ○ 関節角度 と 手先の位置姿勢

#### ◇ 関節角度 → 手先 = 【順運動学】

- ・ある関節を動かすと、その先の腕の向きが変化する→手先の位置&方向の変化
- ・直列型では、(面倒だが)単純に計算可。

#### ◇ 手先 → 関節角度 = 【逆運動学】

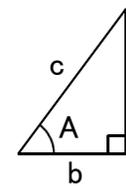
- ・手先の位置と姿勢を実現する関節角度を算出する。
- ・同、数式では直接求まらない場合もある。

## 数学のおさらい

### ○ 三角関数

#### ◇ 角度と座標の関係を表せる

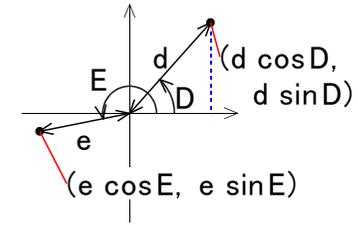
- ・sin(正弦)、cos(余弦)、tan(正接)
- ・および逆関数  $\sin^{-1}$ 、 $\cos^{-1}$ 、 $\tan^{-1}$  (atan)



$$\sin A = a/c$$

$$\cos A = b/c$$

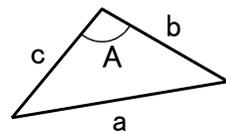
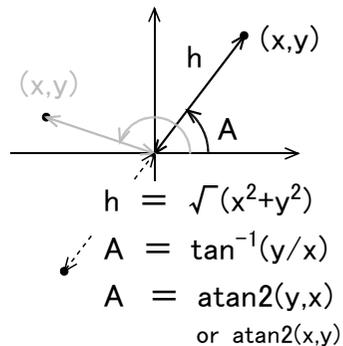
$$\tan A = a/b$$



## 数学のおさらい

### ○ 三角関数

#### ◇ 角を求める: 座標と余弦定理 3辺→角度



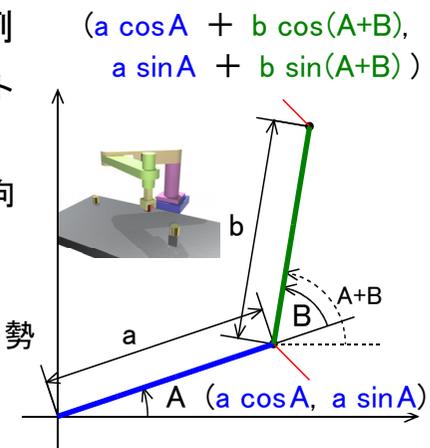
- ・  $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$
- ・  $\cos A = (b^2 + c^2 - a^2) / 2bc$
- ・  $A = \cos^{-1}\{(b^2 + c^2 - a^2) / 2bc\}$

## 順運動学 と 逆運動学

### ○ 順運動学の例

#### ◇ SCARAロボット

- ・関節で回転
- ・リンクの方向と長さ
- ↓
- 手先位置姿勢



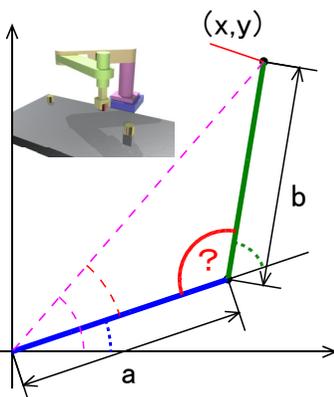
## 順運動学 と 逆運動学

### ○ 逆運動学の例

◇余弦定理の利用

計算手順:

- ・座標→距離
- ・3辺→角度
- ・→第2関節角度
- ・座標→手先方向
- ・→第1関節角度



## 順運動学 と 逆運動学

### ○ 計算のこつ (?)

◇解析解(数式)と数値解(反復計算)

- ・順か逆は一般に直接的に数式が求まる。
- ・もう一方は求まらない場合がある。  
→ 反復計算で結果を求める

◇求めやすい構造にする

- ・例) 肩と手首がそれぞれ1点で交わるなら  
肘関節は余弦定理で求められ、  
肩関節は手首位置から計算できる。

## 特異点・特異姿勢

### ○ ロボットが動作できなくなる点

◇ロボットの運動の制約

- ・可動範囲の限界 (それ以上腕が届かない)
- ・動かせそうで、動きに制限が生じる。  
例): 伸ばしきった腕を縮める方向  
→ 特異点、特異姿勢 (メカの「死点」含む)
- ・後者はその方向の動作がまったくできないわけではないが、数学的におかしくなる。



## 特異点・特異姿勢

### ○ ロボットが動作できなくなる点

◇特異点の数学的意味

- ・ある手先の速度を実現しようとする、  
一部の関節速度が無量大となる必要。

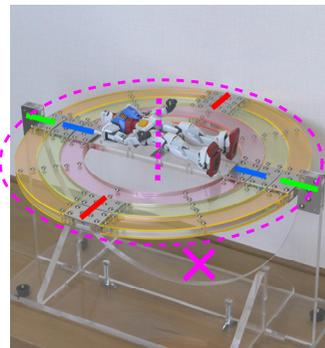
◇特異点のロボット動作的意味

- ・特異点に近いロボットの関節状態で、  
手先の動作のために、一部の関節が  
非常に早い動きを求められる  
→ 駆動速度制約、過速度エラー

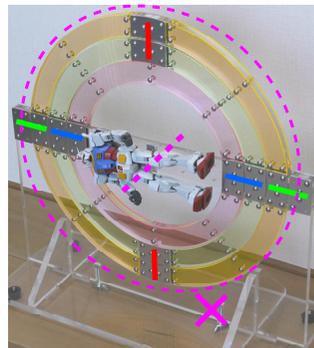
## 特異点・特異姿勢

### ○ 特異点の実例

#### ◇オイラー角の特異姿勢



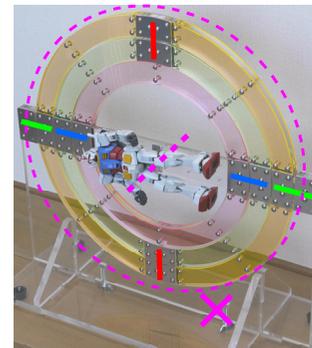
○回転できない方向



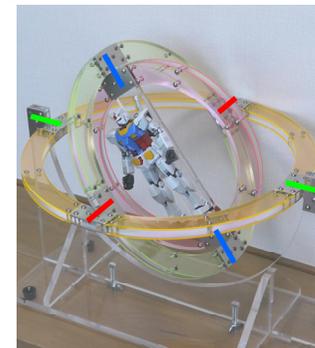
## 特異点・特異姿勢

### ○ 特異点の実例

#### ◇オイラー角の特異姿勢



一旦複数の軸を大きく回転しないと  
○方向に回らず



## 特異点・特異姿勢

### ○ 特異点の見た目の傾向

#### ◇ロボット運用時にトラブル

- ・手先の運動速度にくらべて、あるところで一部の関節の速度が、妙に速い。  
手先まったりでも、関節がきゅっと回る。

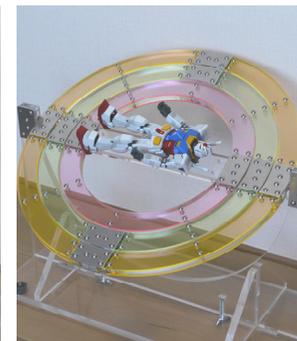
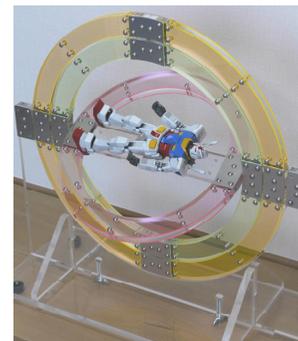
#### ◇同じ動作を、異なる関節で実現できる

- ・同じ手先の速度を複数の関節(セット)で実現できる。  
=ダブった分、自由度がどこかで目減り。

## 特異点・特異姿勢

### ○ 自由度の低下

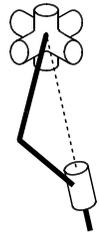
#### ◇同じ動作を、異なる関節で実現できる:例)



## 特異点・特異姿勢

### ○ 特異点を避けるには

- ◇ロボットの動作に余裕をもつ
  - ・明確な特異点は、延ばしきるような限界。



- ◇ロボットの自由度の配置に注意
  - ・動作中に、回転軸がそろうような形態になることはないか？
  - ※最終自由度が手首ねじりも多分要注意

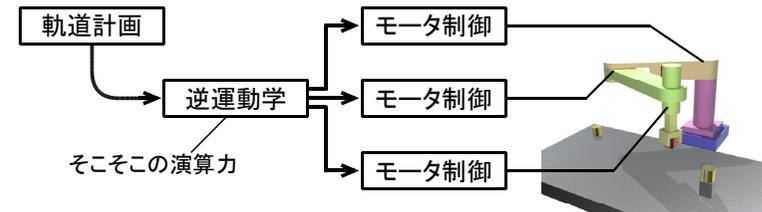


- ◇動作確認時の想定外の関節速度上昇
  - ・その近辺を使わない工夫をする。

## マニピュレータの制御系

### ○ 制御の階層設計

- 1:各関節の角度制御(角速度制御)
- 2:手先指令→逆運動学→関節制御  
→順運動学→手先実位置



## マニピュレータの制御系

### ○ 利用者の立場

- ◇制御系一式での産業用ロボット
  - ・一般に、軌道計画部まで含んだ一式で販売されている。
  - ・数学的なプログラミングは一般に不要。  
例) 入力装置(ティーチングペンダント等)で、手先の位置姿勢を数値/レバー操作/直接つかんでの移動などで記憶させる。  
→ 外部からの入力でポイント間移動

## マニピュレータの制御系

### ○ 制御の留意点 (簡易的なものを内製する場合)

- ◇多軸制御
  - ・一般に軸数が多い
    - 同期の厳密さは一般にそれほど必要ないが、動作ずれは軌道変化になる。
- ◇非線形さ
  - ・一般的には全体的な姿勢によって、各部に作用する重力等による関節負荷が大きく変わる→制御の誤差要因 参考→C09

## マニピュレータ原理の応用

### ○ 回転関節のメカを採用してみる

#### ◇ 回転機構 VS 直動機構

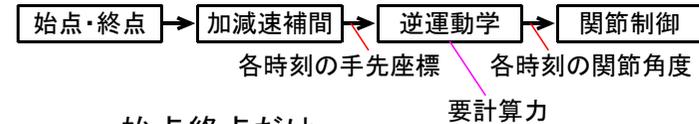
- ・直動機構はそのガイド部品などのために、**重く、高価**になりがち。**回転のほうが楽**。
- ・直動は、単にx,y,zの動作なので、動作の設計は楽。**回転は運動学計算が必要**。  
→ リアルタイムにそこそこの計算  
+ 関節への指令が必要
- ・手軽に回転関節で動作をつくれませんか？

## マニピュレータ原理の応用

### ○ 回転関節のメカを採用してみる

#### ◇ 始点と終点だけを計算すると？

- ・通常の回転関節ロボの制御:



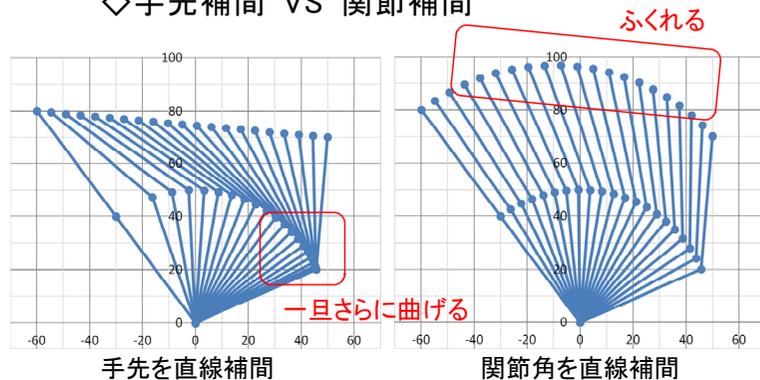
- ・始点終点だけ:



## マニピュレータ原理の応用

### ○ 回転関節のメカを採用してみる

#### ◇ 手先補間 VS 関節補間



## マニピュレータ原理の応用

### ○ 回転関節のメカを採用してみる

#### ◇ 簡易的回転関節マニピュレータの特徴

- ・三角関数的計算は始点と終点のみ。  
= 事前に**表計算ソフト**などで済む
- ・関節角度を時間と共に変化させる  
= **市販のモータコントローラ**の  
ポイント-to-ポイント**制御**で十分
- ・手先を直線に動かすことは困難で  
**外にふくれやすい**。

## マニピュレータに関わる余談

### ○ 特異点(死点)の力的な活用

◇ある種の特異点(関節伸ばしきり型など)

- ・関節を大きく動かして、手先が少し動く
- ・損失がなければ、(減速機の原理)  
入力の速度×力=出力の速度×力  
なので、大きな力出力を得やすい。
- ・逆に(1)、手先に力かけても動きにくい。
- ・逆に(2)、関節が曲がっていると力弱い。

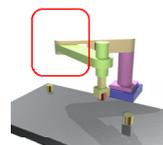
## マニピュレータに関わる余談

### ○ 肘に注意

◇マニピュレータで動作指定するのは手先だけ

◇残りの部分はどう動く???

- ・肘に当たる部分などは勝手に動く  
& 指定できない  
= 手先の運動だけ考えていると危険。



- ・自由度が余っていれば(手先≦関節)、  
その分である程度は調整可能。

## マニピュレータに関わる余談

### ○ 動力学

◇“勢い”も考えた、動作の解析

- ・運動学は、形の上での角度や速度の  
検討をするもの = 質量を考えない
- ・腕や脚を振り回すと、その反動がある  
→ 加速に伴う慣性力の反作用
- ・高速な動作、力を考慮した制御などには  
必要な検討。
- ・数学的により高度、複雑。

## マニピュレータに関わる余談

### ○ 脚と腕

◇腕型ロボットと脚歩行ロボットの違い?

- ・胴体→手先/足先の関係は数学的に同じ。
- ・腕ロボットはベースが固定で常に基準。  
脚は接地している脚が地面から見て根元。  
= 踏み換えると力のかかり方などが劇的に変化  
かつ、固定されていない。
- ・腕は先ほど細く、脚はほぼ変わらず。  
(アクチュエータの出力的にも)

## マニピュレータに関わる余談

### ○ 人型のロボットが膝を曲げて歩く理由

#### ◇膝の特異点を回避する

- ・膝関節が伸びきるあたりで高速回転に。
- ・「足の軌道を数值的に設計 → 逆運動学」なので、特異点は問題になる。



(引)本田技研

#### ◇膝を伸ばして歩くには？

- ・膝関節を特別扱いにする。
- ・最初から逆運動学を使わない  
≡全関節に軌道を直接設定する。

C18 マニピュレータの構造,特性,制御 Page. 61 基礎からのメカトロニクスセミナー

## まとめ

### ○ マニピュレータの機構

- ・直列型と並列型がある。一般に直列型が多いが、産業用でも並列型も見られる。
- ・実現したい空間の位置と姿勢を**自由度**という単位で表す。
- ・マニピュレータの自由度(**関節の数**)は、**目的動作の自由度以上**が必須条件。
- ・自由度と可動範囲が主な選定条件。

C18 マニピュレータの構造,特性,制御 Page. 62 基礎からのメカトロニクスセミナー

## まとめ

### ○ マニピュレータの制御・制約

- ・関節の角度/速度制御と、**運動学**を併用。
- ・手先を直線的に動かすためには、常時関節角度の計算が必要となり、複雑。
- ・簡易的には、従来の制御器で済ませることも可能。
- ・**特異点/特異姿勢**と呼ばれる問題がある。利用上、思わぬ制約になる場合があり、急に関節速度が上がるときは留意する。

C18 マニピュレータの構造,特性,制御 Page. 63 基礎からのメカトロニクスセミナー