

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

C18/Rev 1.0

第18回

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

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



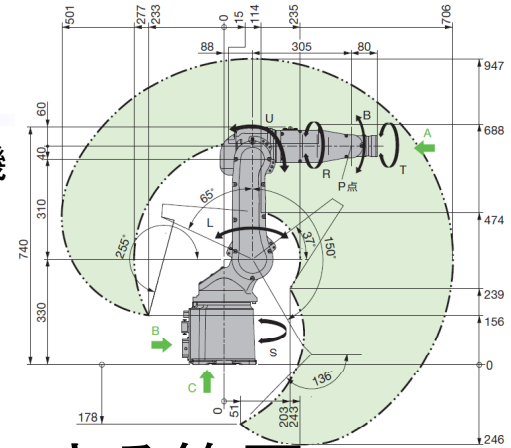
◇複数の関節とリンク

- ・ **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

マニピュレータ

(引)安川電機



○ 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。

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、
リンカー関節ーリンカー…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。



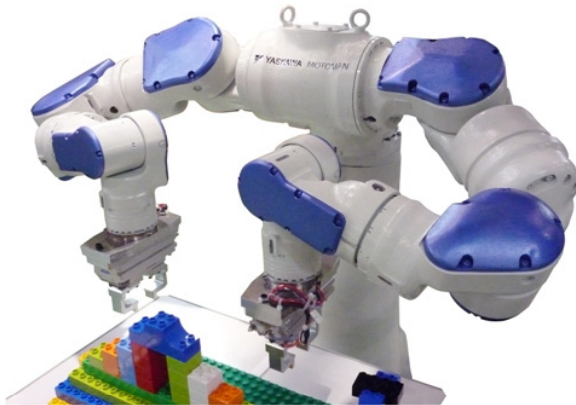
MOTOMAN-MPP3

(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

(株)安川電機 双腕15自由度
MOTOMAN-SDA5D (7+7+1)

並列型の例



(引)ファナック

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

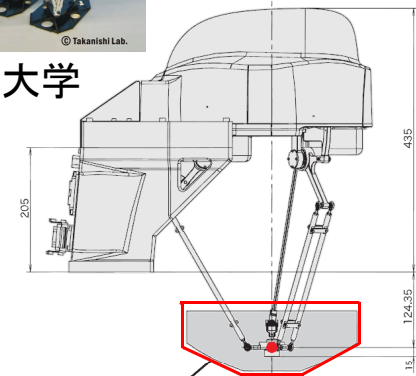
○ 直列型と並列型

◇ 並列型の特徴

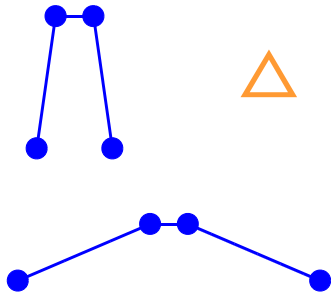
- △ 構造(設計)が複雑。
- △ 可動範囲を取りにくい。
- 剛性を高めやすい。
- アクチュエータを根元配置→高速運動可。
- △ 関節角度→手先位置姿勢は求めにくい。
手先位置姿勢→関節角度は求めやすい。



(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

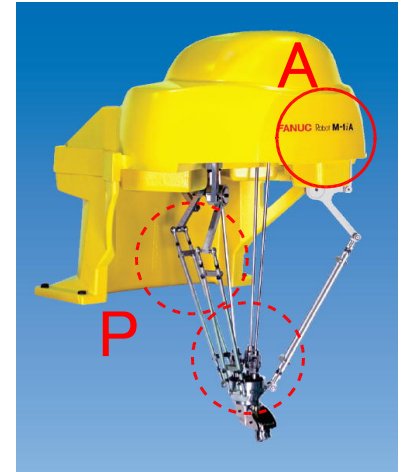
- ・ 能動（アクティブ）

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

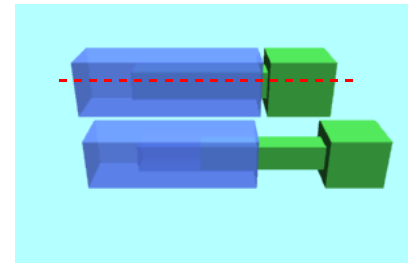
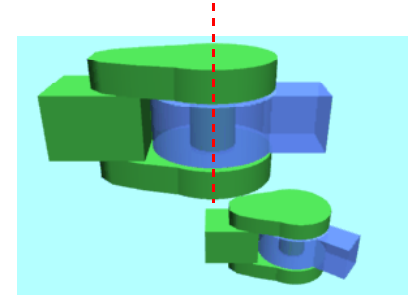
- ・ 回転関節

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

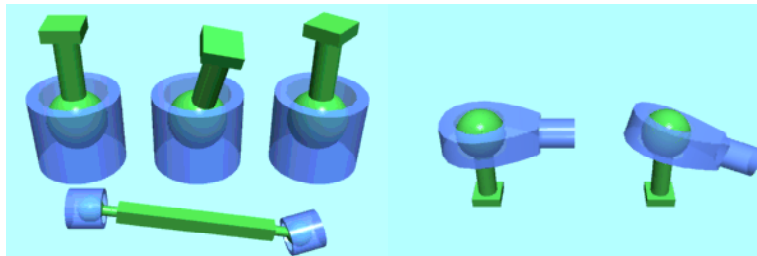


マニピュレータの関節

○ 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**

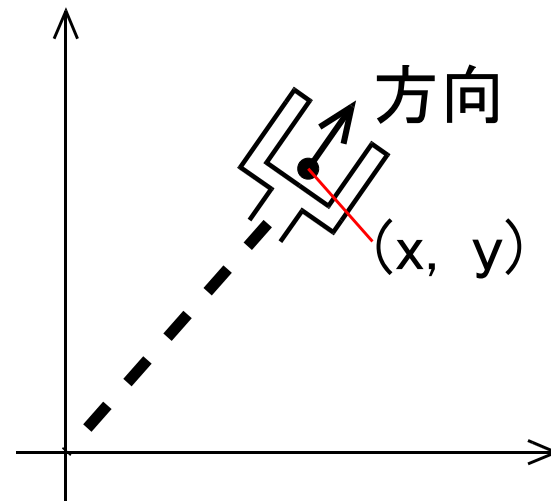
- ・ 他と連動すること無く、自由に設定できる位置、姿勢、角度など の数
- ・ **空間**の自由度： 6自由度（次に説明）
- ・ **マニピュレータ**の(能動)自由度：
関節(モータ)の数、軸数
- ・ 手先の自由度 $\leq$ マニピュレータの自由度
不足 $\rightarrow$ なにかの動作ができない／連動

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

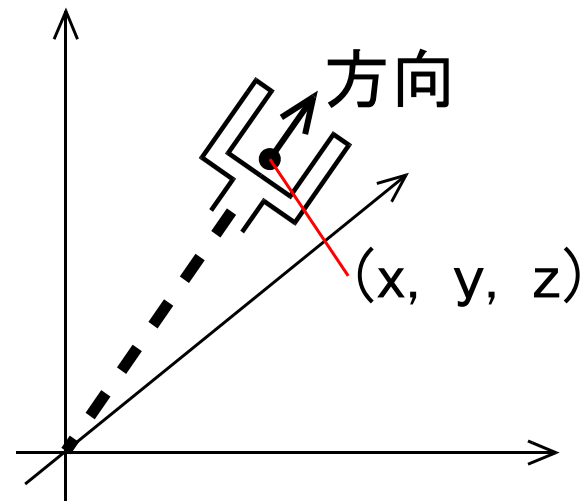


マニピュレータと自由度

○ 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

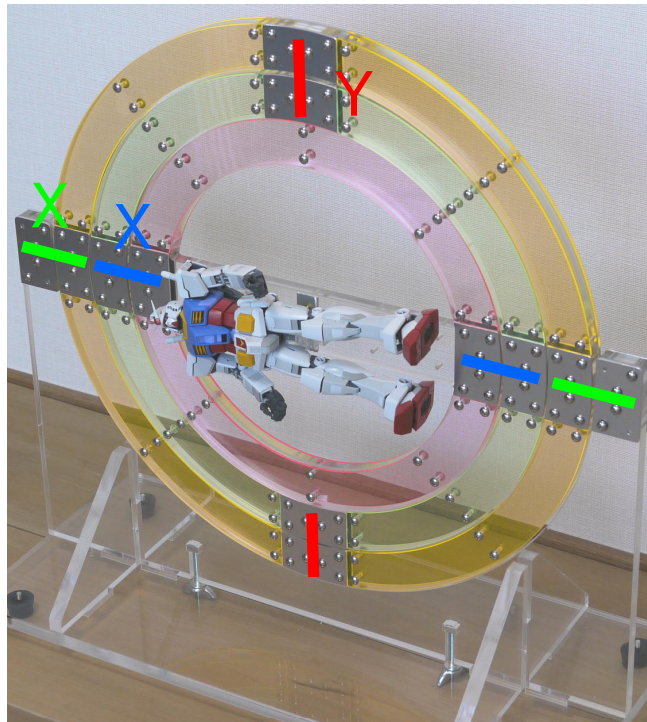
◇空間の回転は3自由度

- ・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

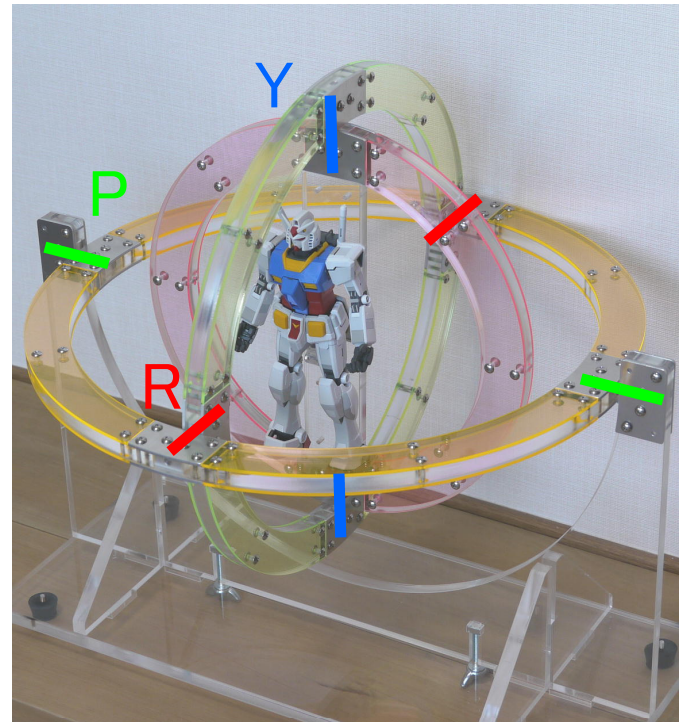
マニピュレータと自由度

○ 空間の回転表現

◇オイラー角 と ロール・ピッチ・ヨー



X-Y-X型

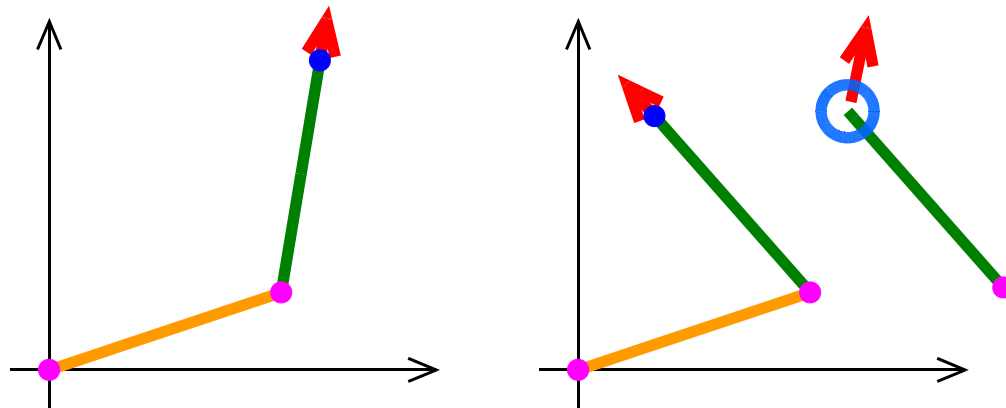


マニピュレータと自由度

○ 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



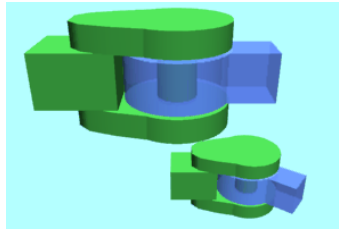
マニピュレータの機構

○ 関節の記号化

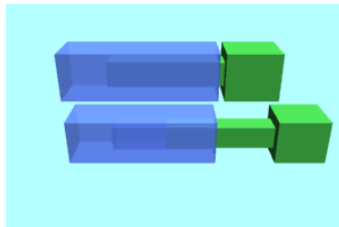
※いくつかの表記法がある中の一部

◇機構検討のための単純化イラスト

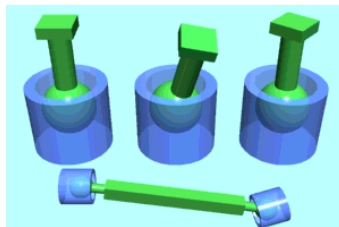
回転



直動



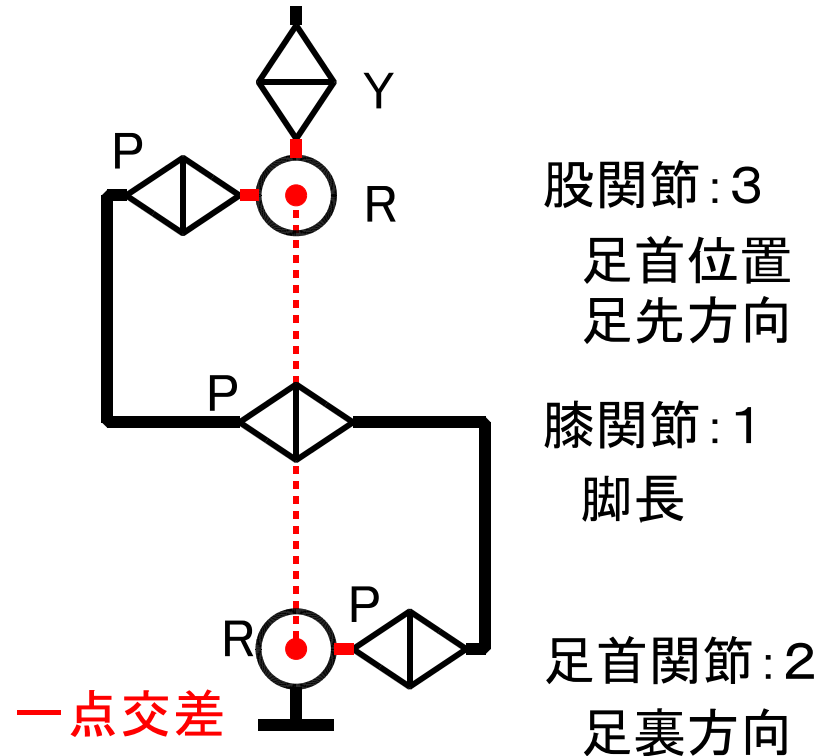
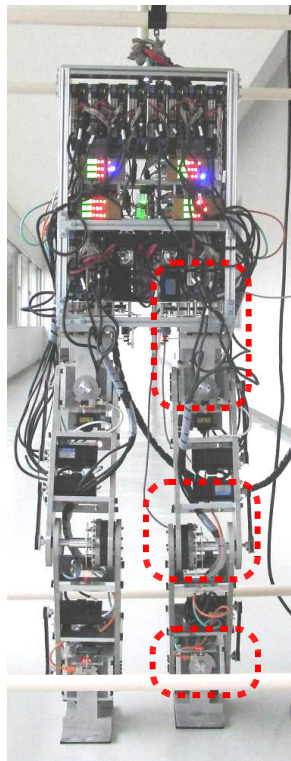
ボール



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

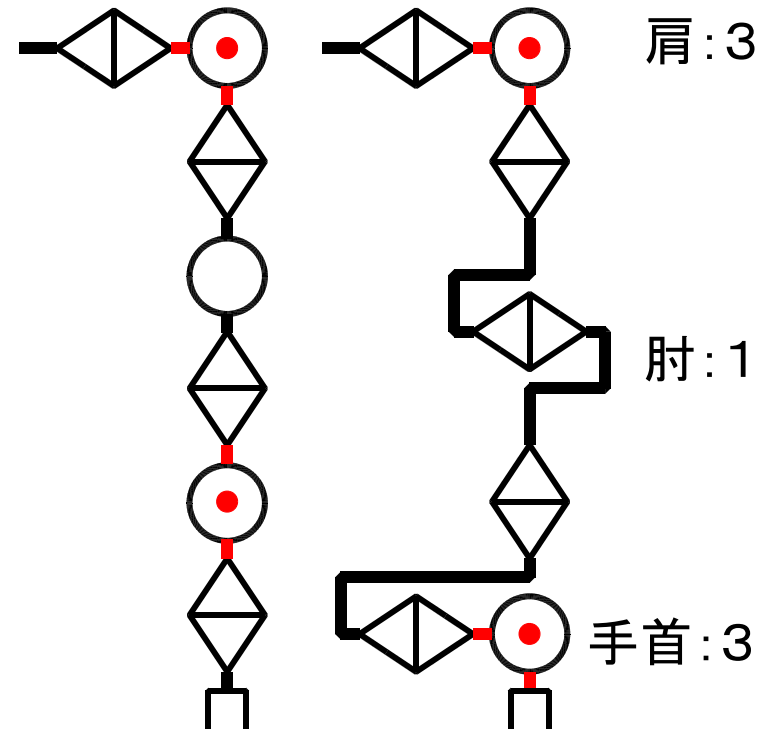
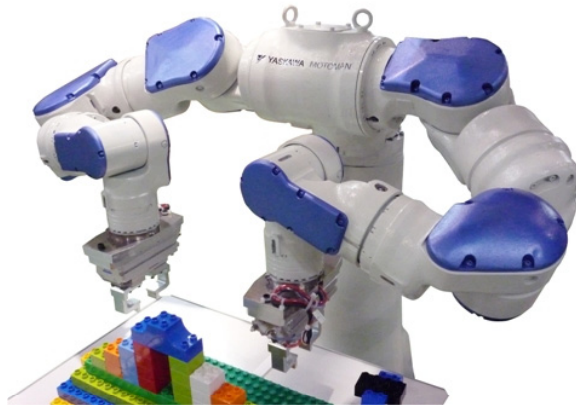
◇脚ロボット（一般的6自由度）



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

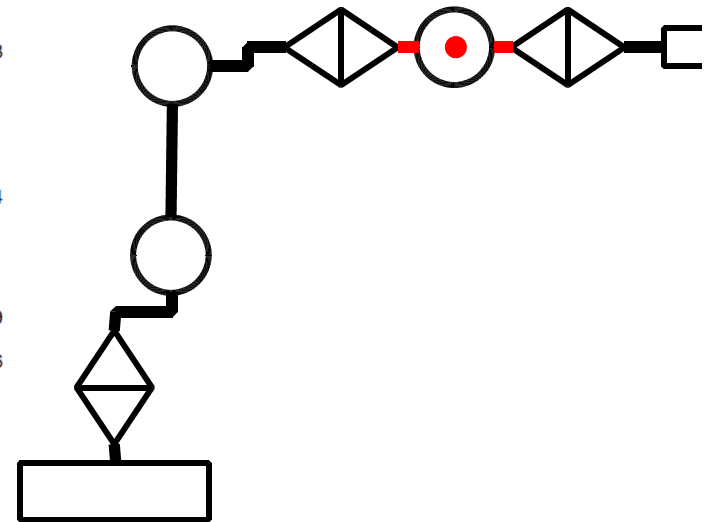
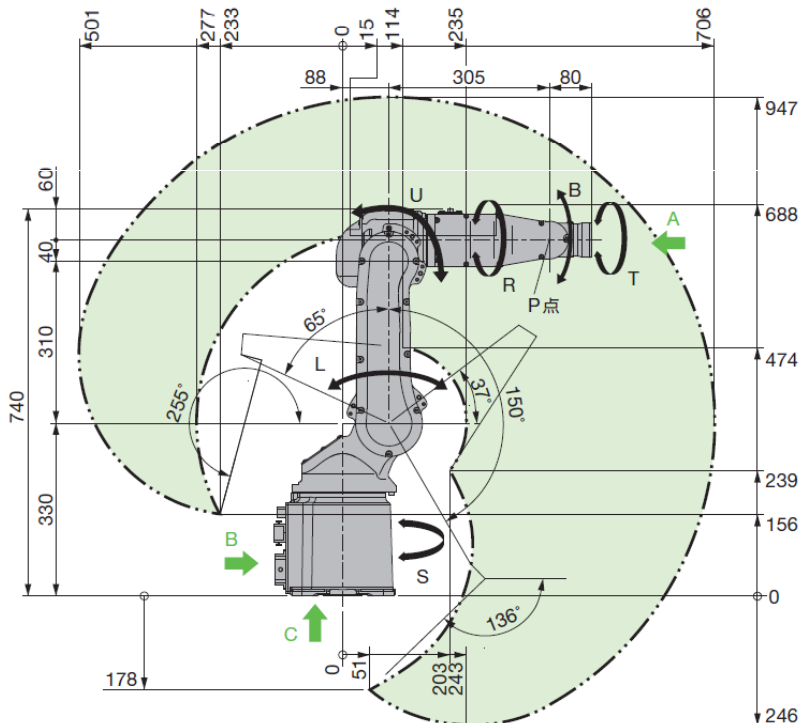
◇ 腕ロボット（7自由度型、人模擬）



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



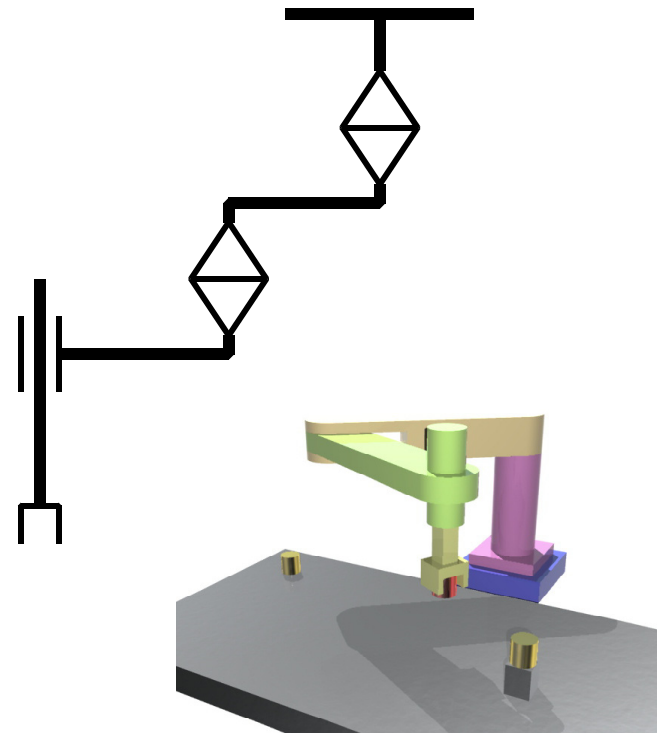
マニピュレータの機構

○ 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)

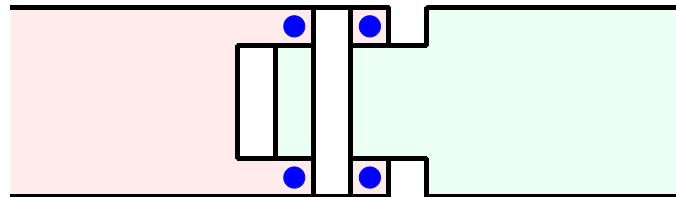


マニピュレータの機構

○ 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

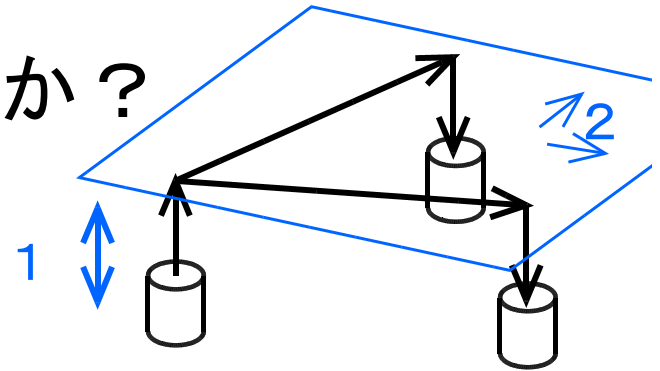
- ・高自由度のマニピュレータは高い！
- (+精度や剛性に影響しやすい)

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ーポイントなら2。
- ※腕ロボットはおそらく不要

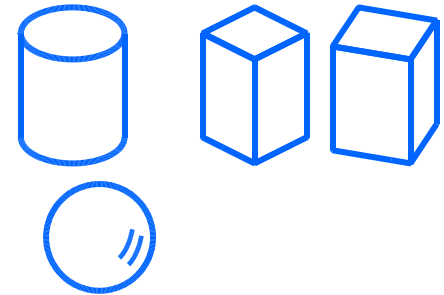


マニピュレータの機構選定

○ 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。

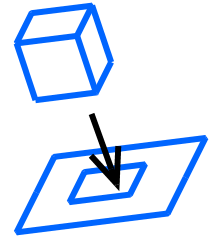
マニピュレータの機構選定

○ 自由度は いくら必要か？

◇手先の姿勢

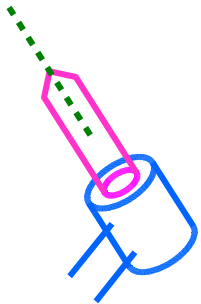
◇組み立て系

- ・組み付ける方向によって1～3



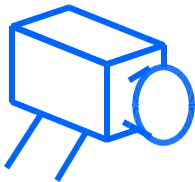
◇回転工具系

- ・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

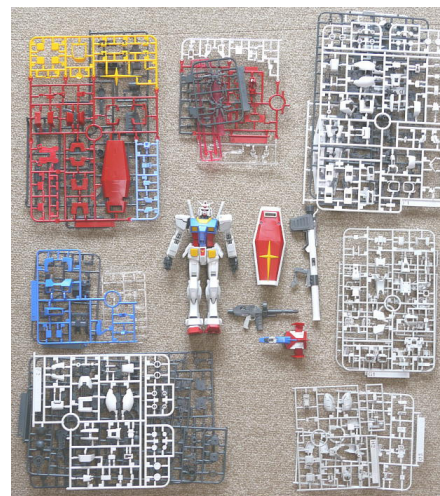
◇ガンプラ=ガンダムのプラモデル



MG 1/100

RX-78-2 ガンダム

Ver 3.0

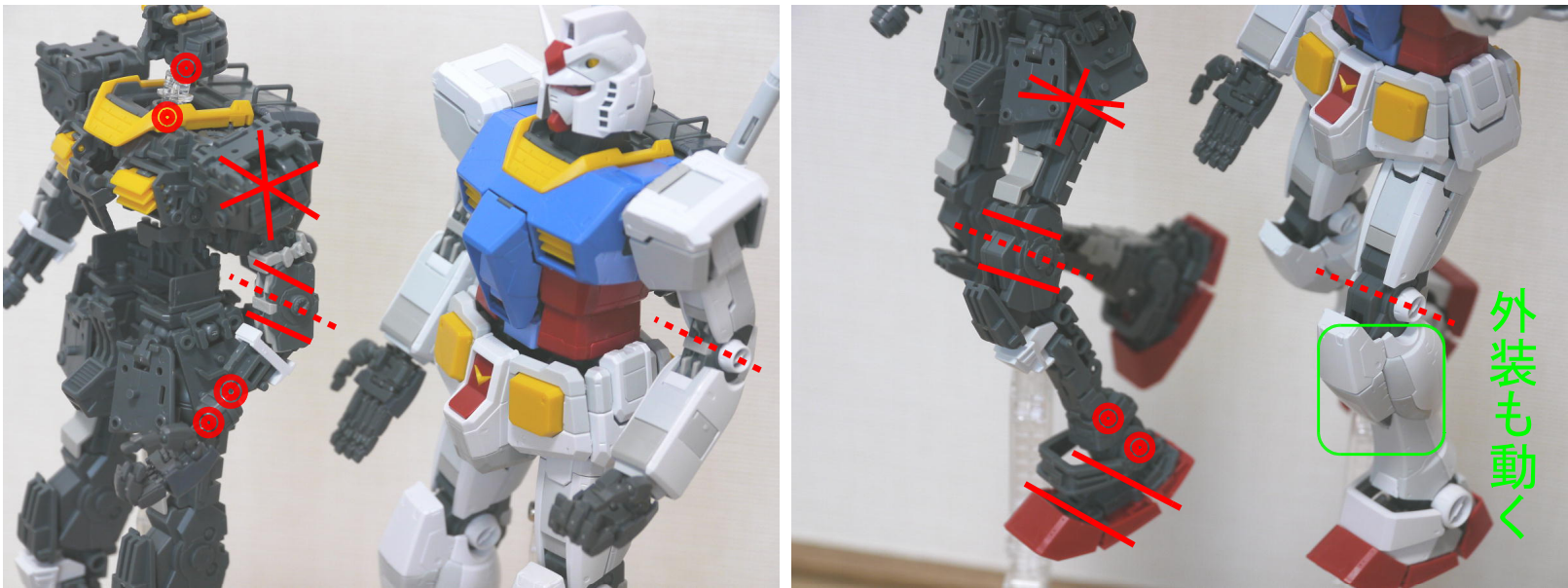


Intermission プラモデルの自由度

○ 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。

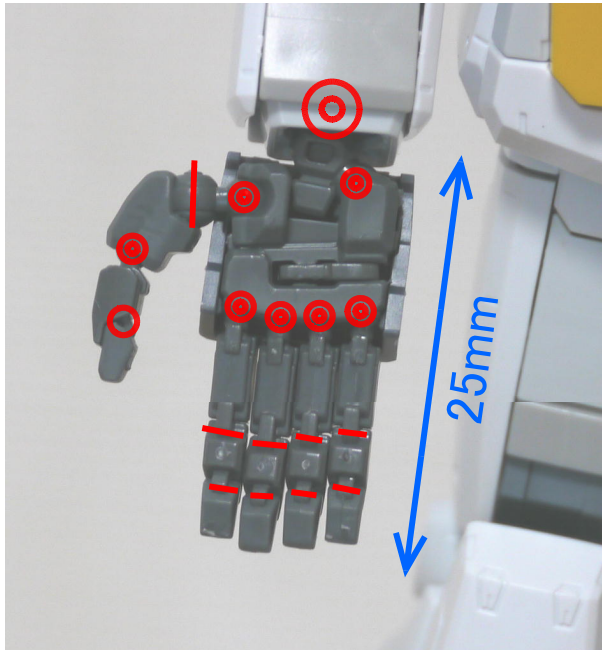
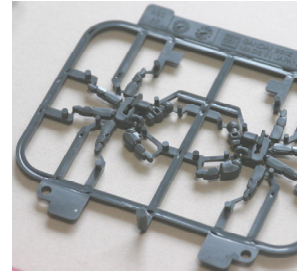


Intermission プラモデルの自由度

○ 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

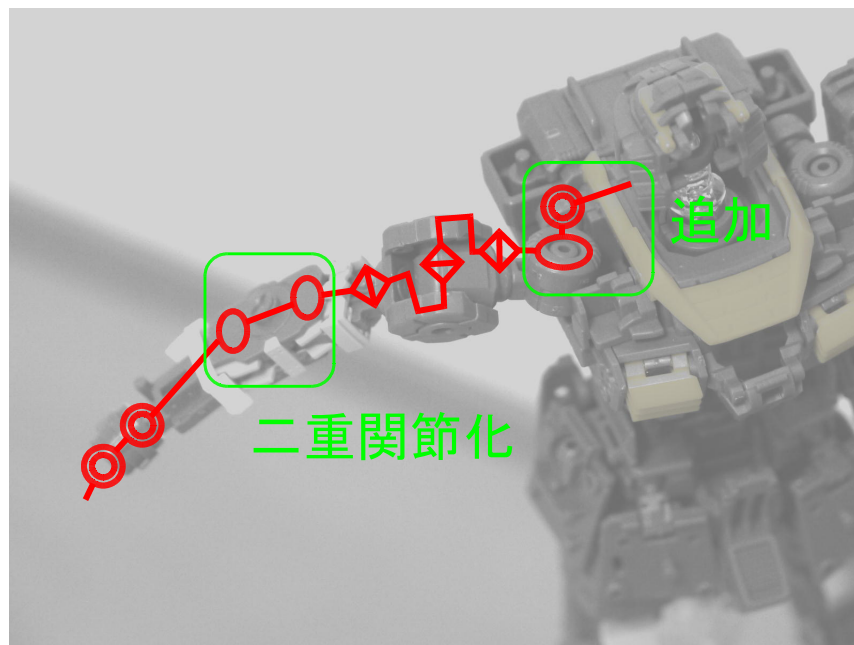


Intermission プラモデルの自由度

○ 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】

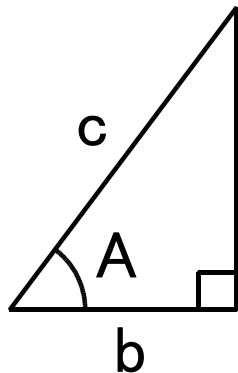
- ・ 手先の位置と姿勢を実現する関節角度を算出する。
- ・ 同、数式では直接求まらない場合もある。

数学のおさらい

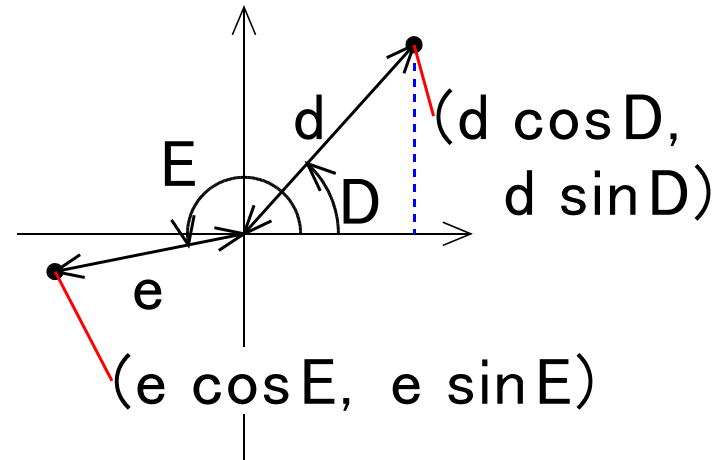
○ 三角関数

◇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)



$$\begin{aligned}\sin A &= a/c \\ \cos A &= b/c \\ \tan A &= a/b\end{aligned}$$

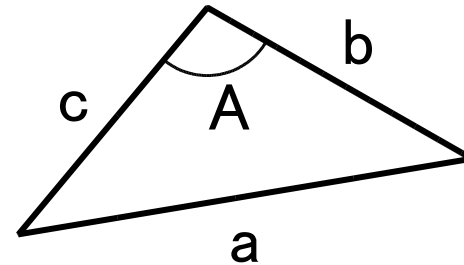
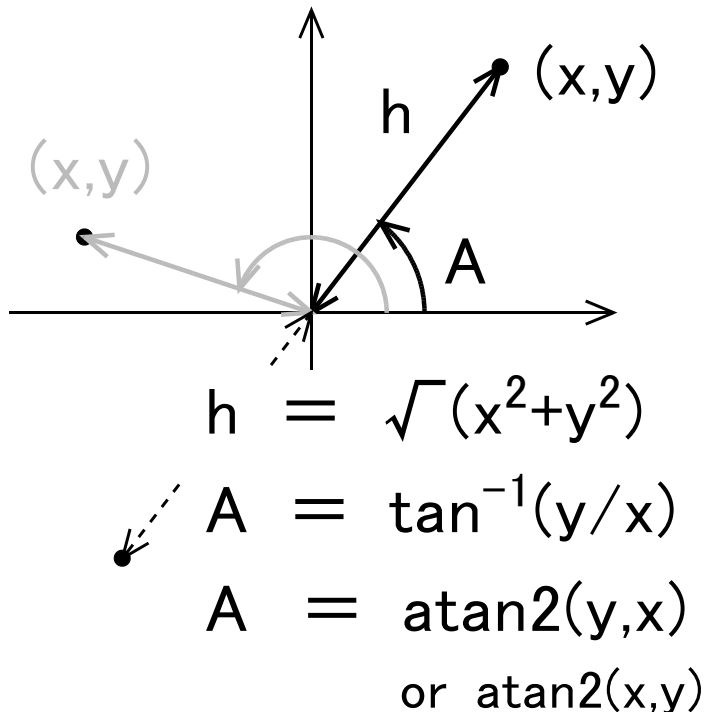


数学のおさらい

○ 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

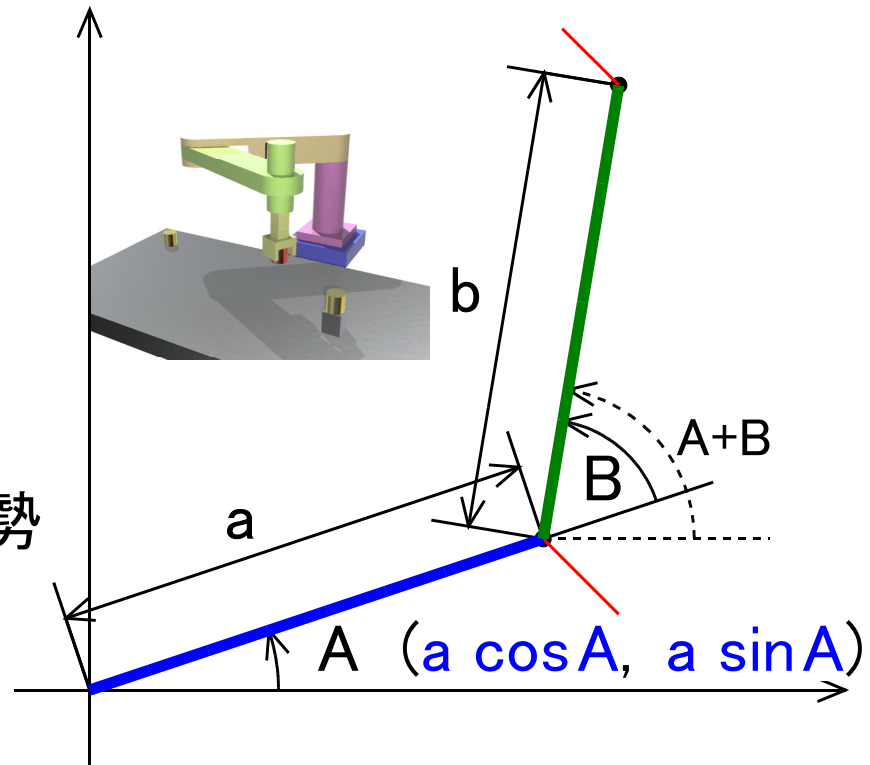
◇SCARAロボット

- ・ 関節で回転
- ・ リンクの方向と長さ



手先位置姿勢

$$\begin{aligned} & (a \cos A + b \cos(A+B), \\ & a \sin A + b \sin(A+B)) \end{aligned}$$



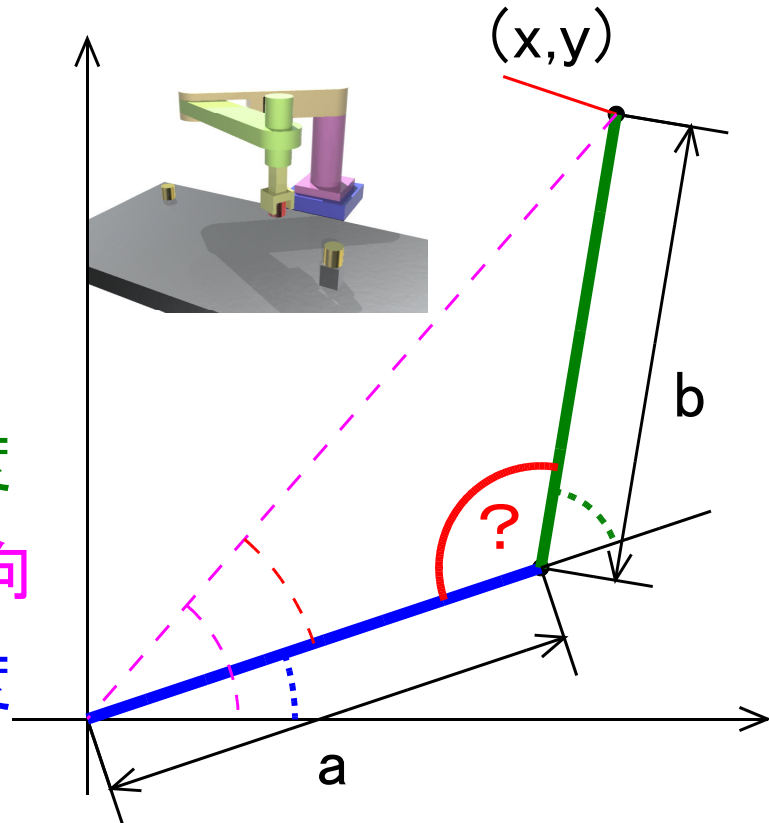
順運動学 と 逆運動学

○ 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

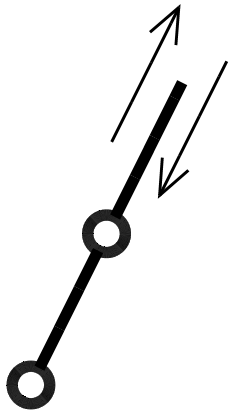
- ・ 例) 肩と手首がそれぞれ1点で交わるなら
肘関節は余弦定理で求められ、
肩関節は手首位置から計算できる。

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）
- ・ 動かそうと、動きに制限が生じる。
例）：延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限大となる必要。

◇特異点のロボット動作の意味

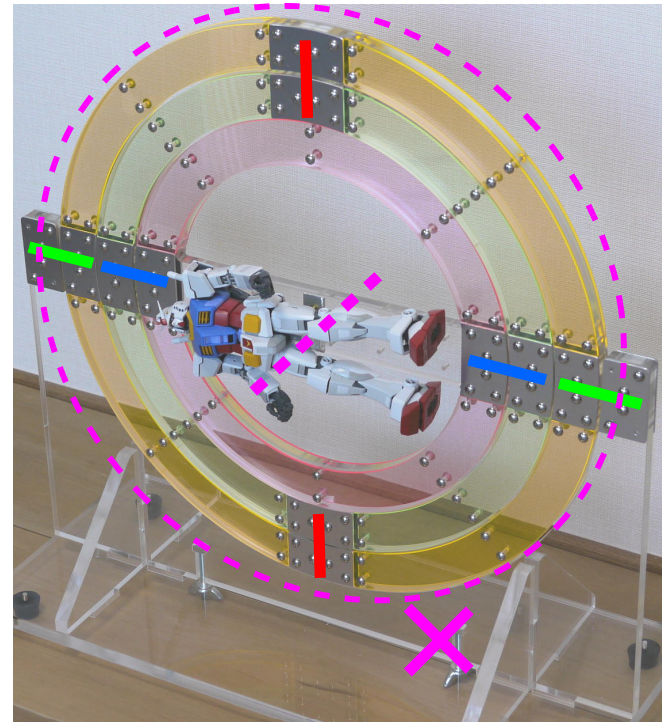
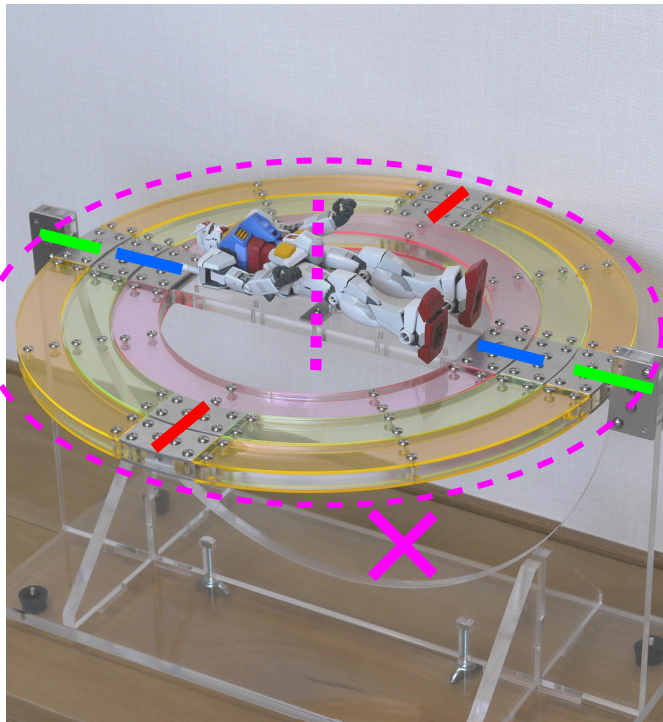
- ・特異点に近いロボットの関節状態で、手先の動作のために、一部の関節が非常に早い動きを求められる
→ 駆動速度制約、過速度エラー

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

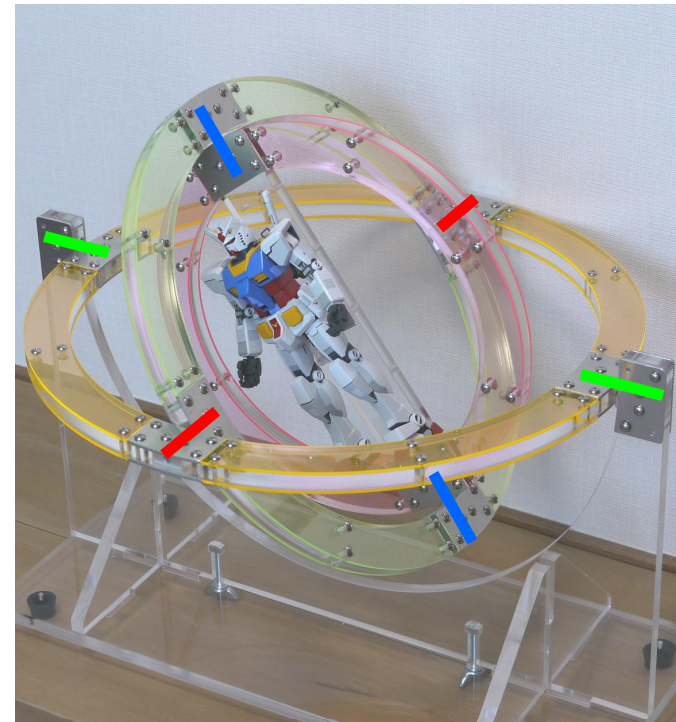
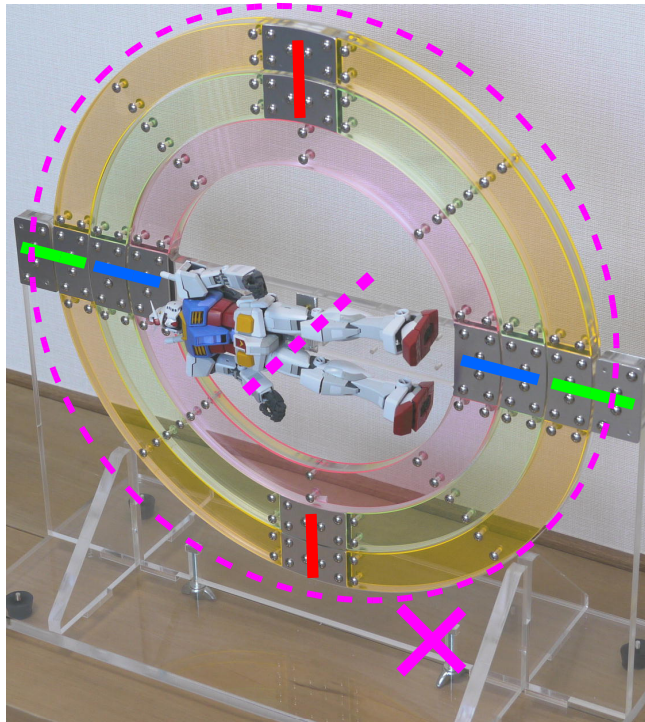


特異点・特異姿勢

○ 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。

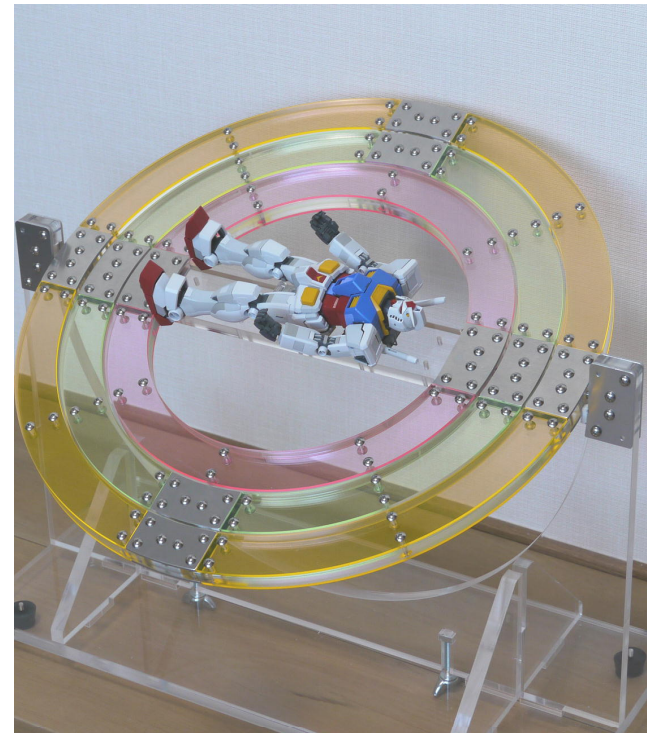
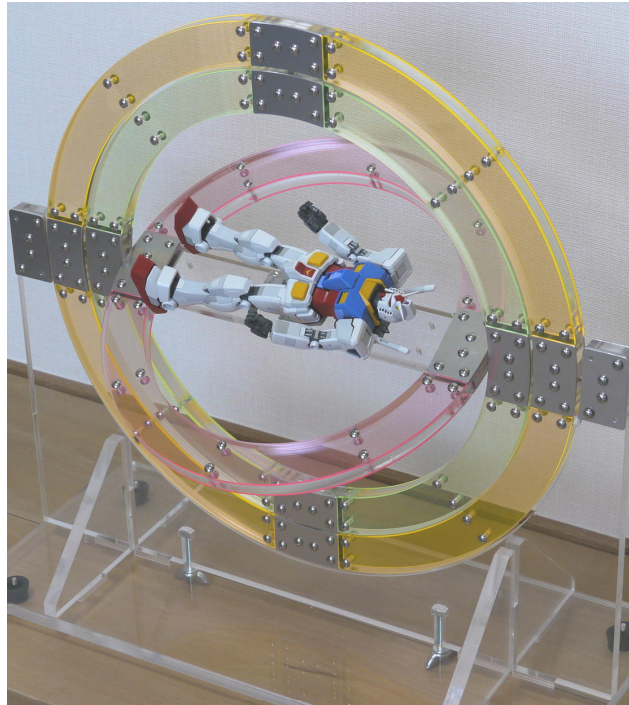
◇同じ動作を、異なる関節で実現できる

- ・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)

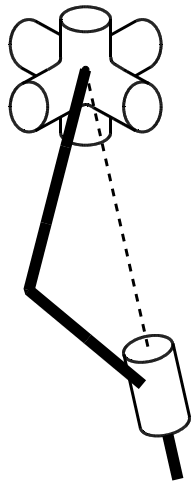


特異点・特異姿勢

○ 特異点を避けるには

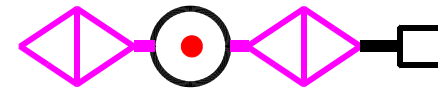
◇ロボットの動作に余裕をもつ

- ・ 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

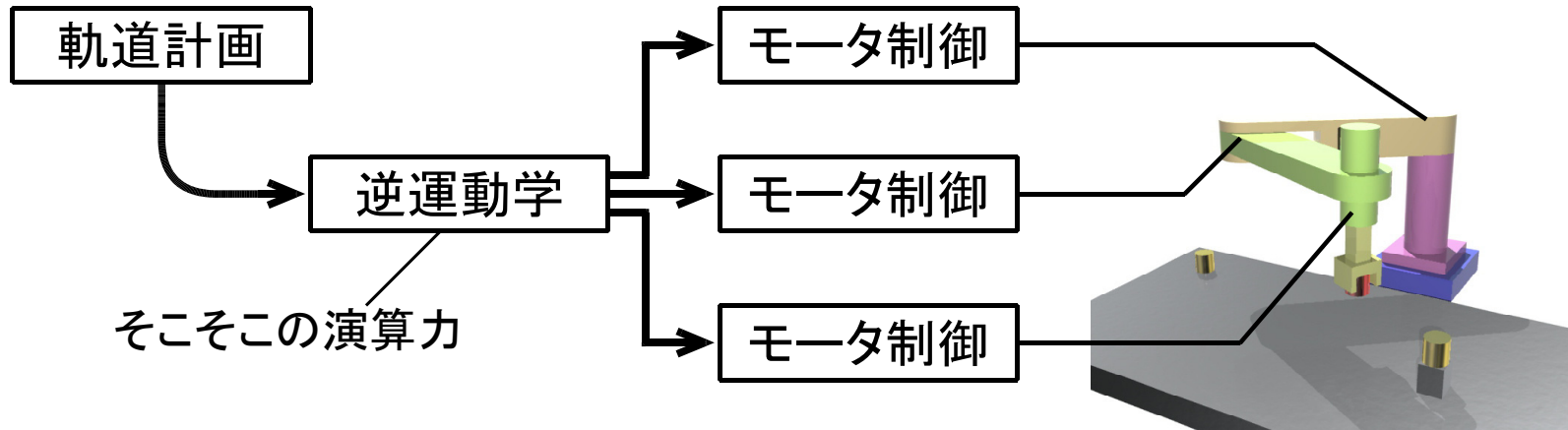
- ・ その近辺を使わない工夫をする。

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

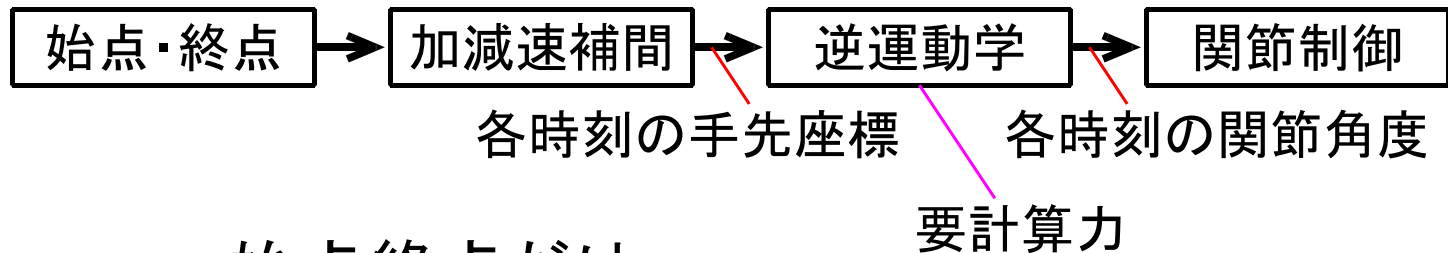
- ・ **直動機構**はそのガイド部品などのために、**重く、高価**になりがち。**回転のほうが楽**。
- ・ 直動は、単に x, y, z の動作なので、動作の設計は楽。**回転は運動学計算が必要**。
 - リアルタイムにそこそこの計算
+ 関節への指令が必要
- ・ 手軽に回転関節で動作をつくれないか？

マニピュレータ原理の応用

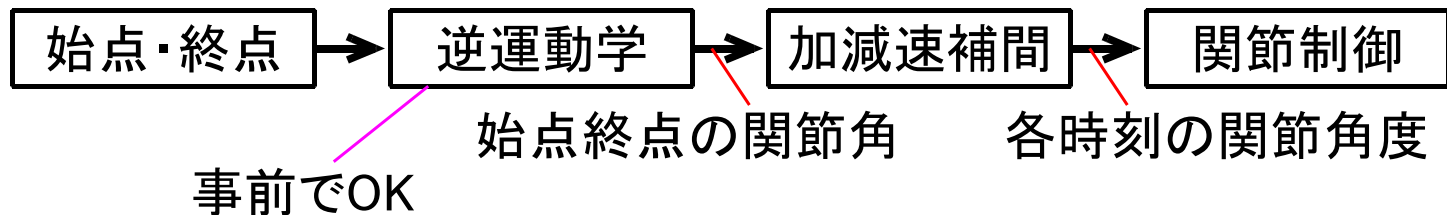
○ 回転関節のメカを採用してみる

◇ 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：



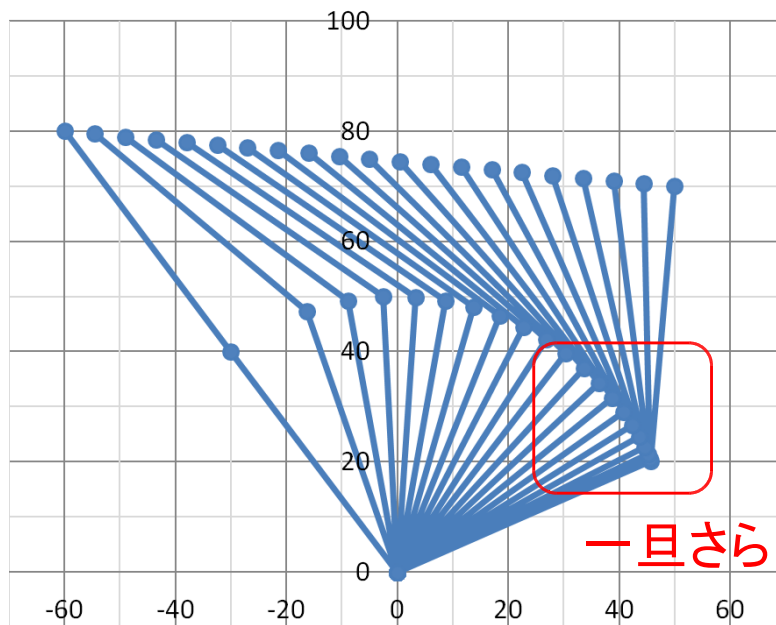
・ 始点終点だけ：



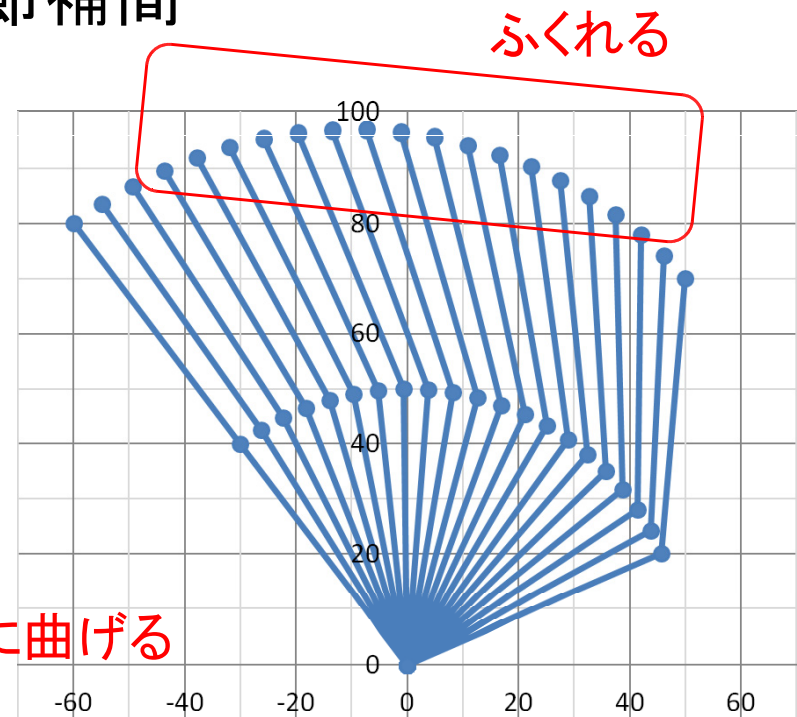
マニピュレータ原理の応用

○ 回転関節のメカを採用してみる

◇ 手先補間 VS 関節補間



手先を直線補間



関節角を直線補間

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）

$\text{入力} \times \text{速度} \times \text{力} = \text{出力} \times \text{速度} \times \text{力}$
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。

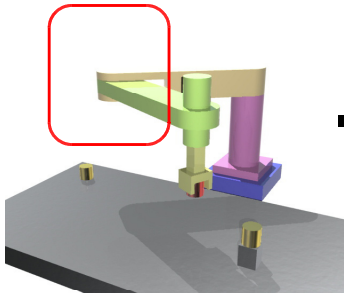
マニピュレータに関わる余談

○ 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 $\leq$ 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。
- ・ 「足の軌道を数値的に設計 → 逆運動学」なので、特異点は問題になる。



◇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。

(引)本田技研

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。

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。