

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

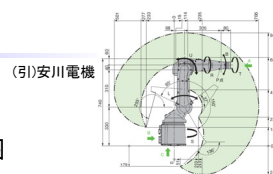
※本資料のロボット写真は各社WEBサイト等から引用しました→(引)印
C18 マニピュレータの構造・特性・制御 Page. 3 基礎からのメカトロニクスセミナー

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)

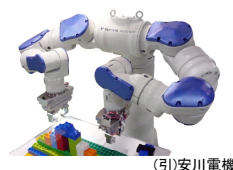
- ・根元から、手先までの間に、
複数の関節ーリンクのつながりが
並列に入る。

C18 マニピュレータの構造・特性・制御 Page. 5 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

直列型の例



(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

C18 マニピュレータの構造・特性・制御 Page. 6 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。



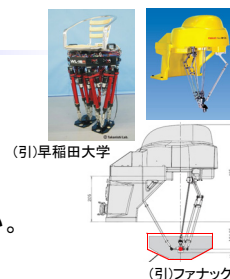
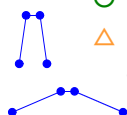
C18 マニピュレータの構造・特性・制御 Page. 7 基礎からのメカトロニクスセミナー

マニピュレータの区分

○ 直列型と並列型

◇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。



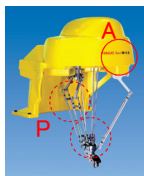
C18 マニピュレータの構造・特性・制御 Page. 8 基礎からのメカトロニクスセミナー

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。

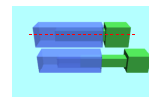
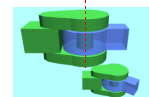


マニピュレータの関節

○ 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

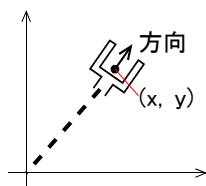
- ・ 他と連動すること無く、自由に設定できる
位置、姿勢、角度など の数
- ・ 空間の自由度： 6自由度（次に説明）
- ・ マニピュレータの(能動)自由度：
関節(モータ)の数、軸数
- ・ 手先の自由度 ≤ マニピュレータの自由度
不足 → なにがの動作ができない / 連動

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

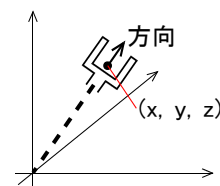


マニピュレータと自由度

○ 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

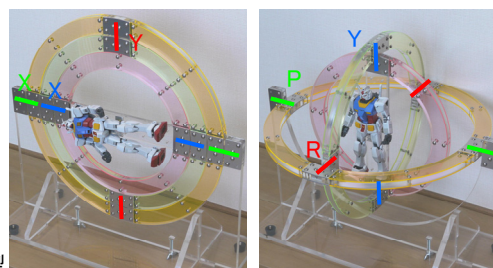
◇ 空間の回転は3自由度

- ・ 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

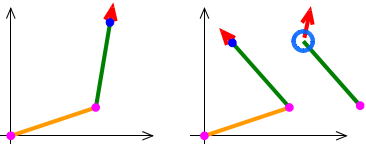


マニピュレータと自由度

○ 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
- 向きも決めたいければ、もう1関節

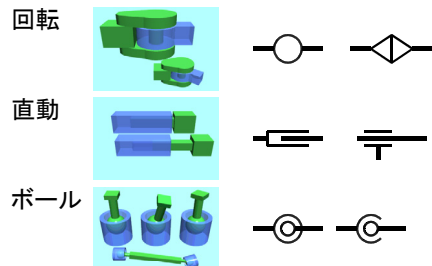


マニピュレータの機構

○ 関節の記号化

※いくつかの表記法がある中の一部

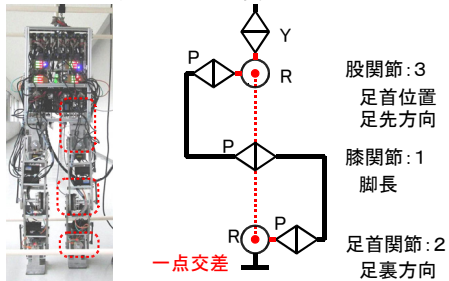
◇機構検討のための単純化イラスト



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

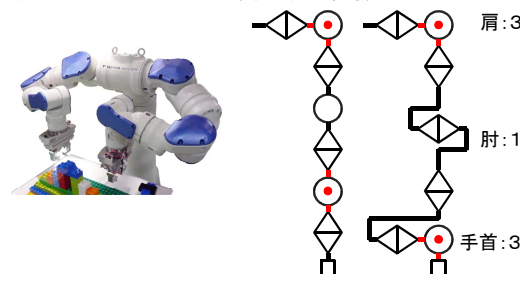
◇脚ロボット（一般的6自由度）



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

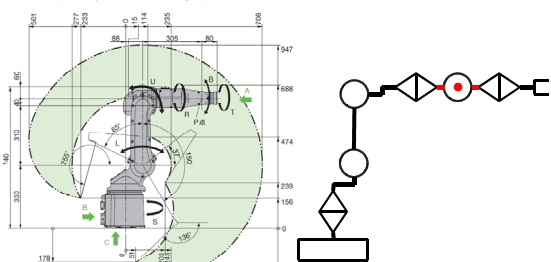
◇腕ロボット（7自由度型、人模擬）



マニピュレータの機構

○ 関節の向きとロボットの特徴

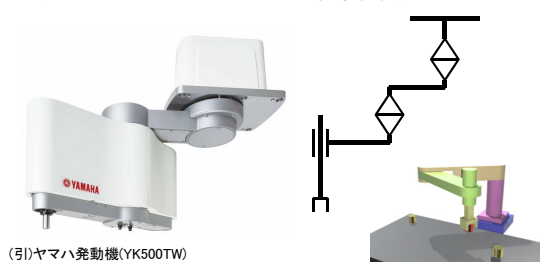
◇5, 6自由度の産業用ロボット



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）

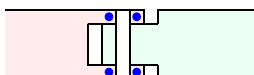


マニピュレータの機構

○ 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 ≤ 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

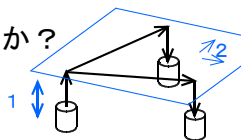
○ 自由度は いくら必要か？

◇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

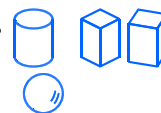


マニピュレータの機構選定

○ 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

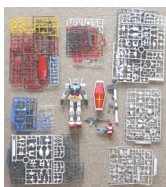
Intermission プラモデルの自由度

○ ロボットプラモの機構がすごい

◇ガンブラ=ガンダムのプラモデル



MG 1/100
RX-78-2 ガンダム
Ver 3.0

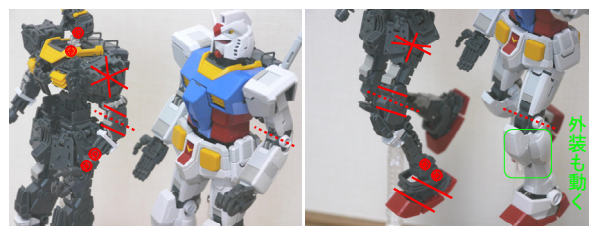


Intermission プラモデルの自由度

○ 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。

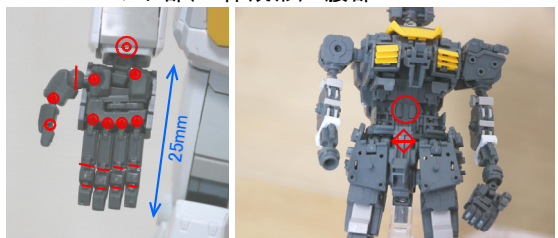


Intermission プラモデルの自由度

○ 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

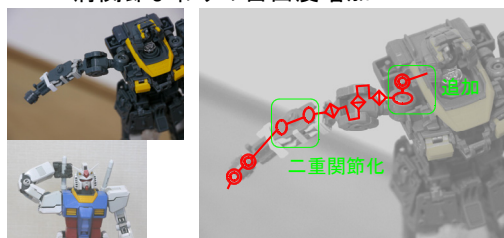


Intermission プラモデルの自由度

○ 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**】

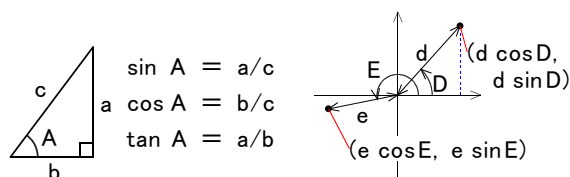
- ・ 手先の位置と姿勢を実現する関節角度を
算出する。
- ・ 同、数式では直接求まらない場合もある。

数学のおさらい

○ 三角関数

◇角度と座標の関係を表せる

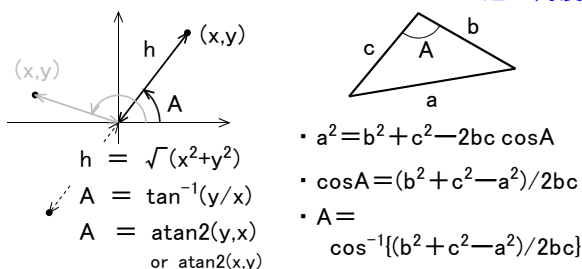
- ・ $\sin$ (正弦)、 $\cos$ (余弦)、 $\tan$ (正接)
- ・ および逆関数 $\sin^{-1}$ 、 $\cos^{-1}$ 、 $\tan^{-1}$ (atan)



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**

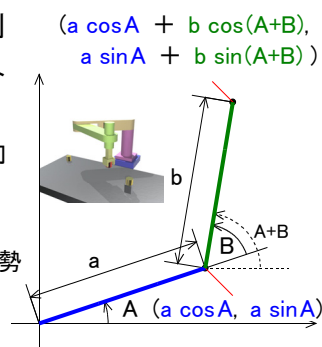


順運動学 と 逆運動学

○ 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



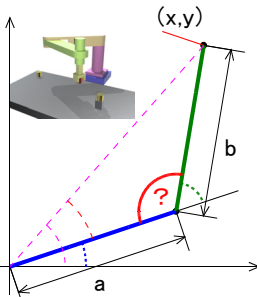
順運動学 と 逆運動学

○ 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と、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

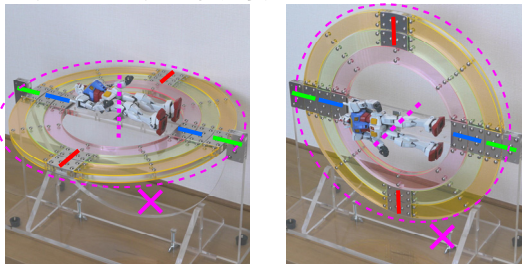
- ・特異点に近いロボットの関節状態で、手先の動作のために、一部の関節が非常に早い動きを求められる
→ 駆動速度制約、過速度エラー

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

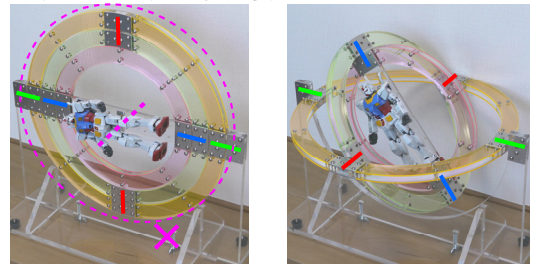


特異点・特異姿勢

○ 特異点の実例

一旦複数の軸を大きく回転しないと
○方向に回らず

◇オイラー角の特異姿勢



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。

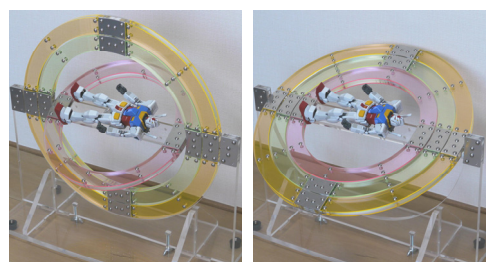
◇同じ動作を、異なる関節で実現できる

- ・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

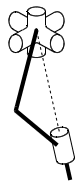
◇同じ動作を、異なる関節で実現できる: 例)



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。



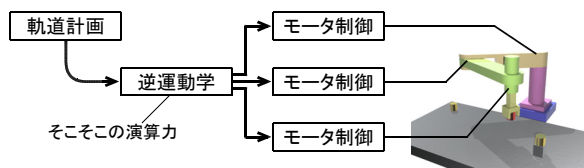
- ◇ロボットの自由度の配置に注意
 - ・動作中に、回転軸がそろうような形態になることはないか？
 - ※最終自由度が手首ねじりも多分要注意

- ◇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

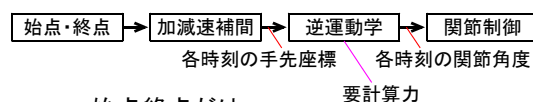
○ 回転関節のメカを採用してみる

- ◇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にか？

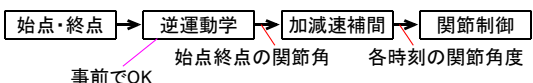
マニピュレータ原理の応用

○ 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:



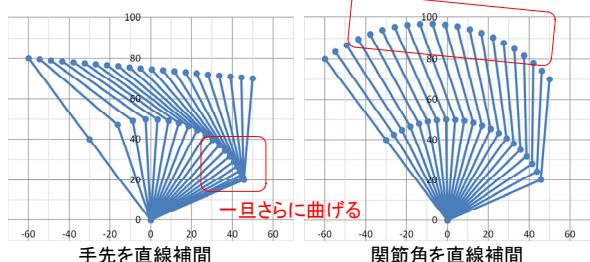
- ・始点終点だけ:



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

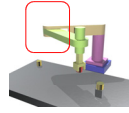
○ 特異点(死点)の力的な活用

- ◇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)
入力速度×力=出力速度×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。



(51)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時は留意する。