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
C20/Rev 1.0

第20回

移動するメカ・ロボットと制御の基礎

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

○ 主に車輪移動ロボットのメカと制御

テーマ1：
- 移動するロボット
- 車輪移動ロボットの基礎原理

テーマ2：
- 車輪移動ロボットの構造と設計

テーマ3：
- 車輪移動ロボットの基本的な制御
- 局所移動から自動運転自動車まで

移動ロボット

○ 腕型ロボットと並ぶ一大ロボット分野

◇ロボットの定義 （日本ロボット学会用語より）

自動制御によるマニピュレーション機能
又は移動機能をもち、各種の作業を
プログラムにより実行できる機械。

※→C18

◇移動する機械
- たとえば自動車は移動するための機械
  → 自動運転自動車はロボットの一種
- 歩行ロボットも移動ロボット。

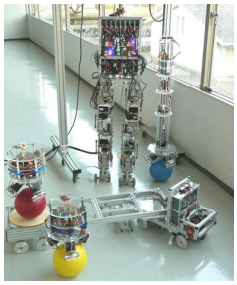
移動ロボットの形態

※(引)とした写真はネット画像の引用です

○ 地上を移動するロボット


レスキューロボ Quince (引)東北大田所研


掃除ロボット
(引)iRobot社


熊谷研 玉乗り、トレーラ、2脚

移動ロボットの形態

○ 海・空・宇宙


火星探査ロボット (引)Wikipedia


クアッドローター (引)Wikipedia


水中ロボット RTV-100 (引)Robonable

車輪移動ロボット

○ 汎用性・実用性を考慮すると、車輪

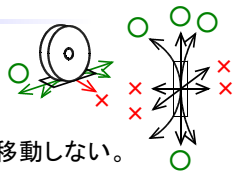
◇車輪移動の優位性
- シンプル →確実性、低コスト、効率
- 計測制御の扱いやすさ
- 事例豊富 （ロボット・非ロボット）

◇車輪移動の限界
- 平面上のみ （それでもかなりの用途）

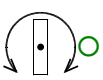
以下では車輪移動を中心に

車輪移動ロボット大原則

○ 車輪を滑らせない



◇転がるのみ
- 車輪の軸方向には移動しない。
- その場での鉛直軸回転はOK。
- 円運動もOK
  ＝曲線運動もOK

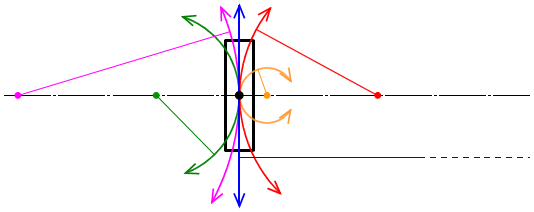


◇もしも滑らせると
- 運動が不定になる(どう滑るかわからない)。
- 後述の運動計算ができなくなる。

車輪移動ロボット大原則

○ 車輪を滑らせない場合の運動制限

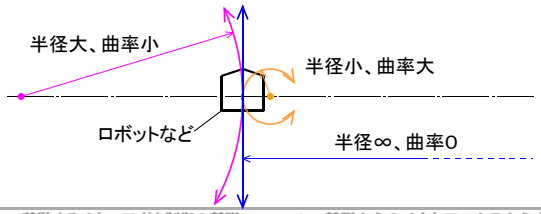
◇車輪は車軸の線上の一点を中心に円運動
- 直進は半径∞、その場は半径0とみなす。



車輪移動ロボット大原則

○ 旋回半径と曲率

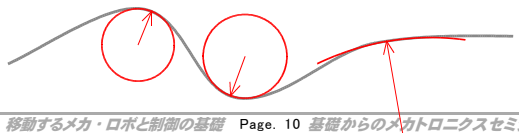
・旋回半径＝(ロボットの代表点の)
円運動の半径 （直進＝∞、その場＝0）
・曲率＝1÷半径 （直進＝0、その場∞）



車輪移動ロボット大原則

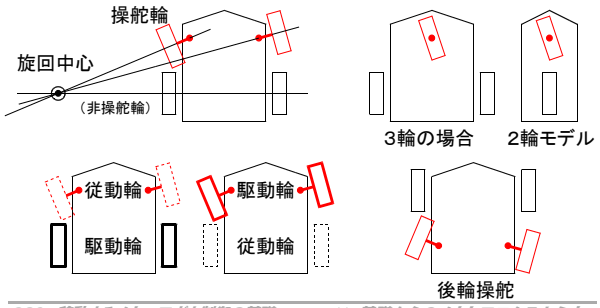
○ 曲線運動と旋回半径

・任意の曲線(直線含む)は、極短い部分を
みれば円に近似
→ 微小な円弧の連続とみなす
・車輪、ロボットが円運動できる
＝ 任意の軌道に沿って移動できる。



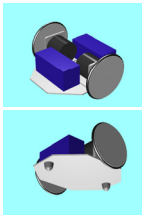
車輪移動ロボットモデル

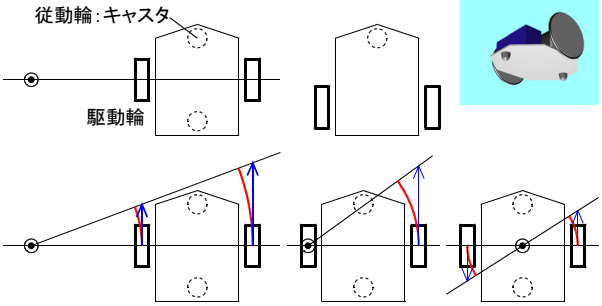
○ ステアリング（操舵輪）型 例）自動車等



車輪移動ロボットモデル

○ 対向2輪(独立2輪)型





車輪移動ロボットモデル

○ ステアリング型 と 対向2輪型

◇ステアリング型
・操舵輪がある。 車軸は旋回中心を向く。
・操舵輪の方向で旋回半径が決まる。

◇対向2輪型
・車軸が同軸で固定の駆動輪が2個。
・車体を支えるための従動輪(キャスタ)。
・駆動輪の速度で旋回半径が決まる。

いずれも固定輪の軸上に中心がある。

車輪移動ロボットモデル

○ 対向2輪型 と クローラ(キャタピラ)

◇両輪の回転と走り方は似ている
→動作のイメージには良い

◇それ以外は異なる
・車輪：滑らせない クロ：滑る
→以降の話はクローラには使えない
・車輪：点接地に近い クロ：面接地
・車輪：支持必要 クロ：クローラのみ
・車輪：シンプル クロ：複雑

車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



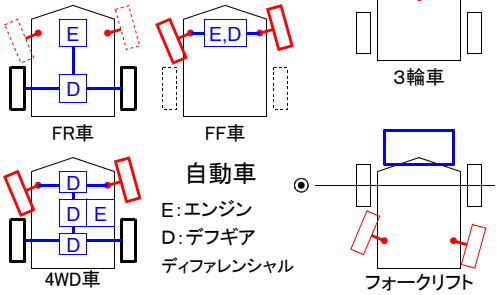
(引)iRobot社
掃除ロボット類



(引)Segway社
SegwayHT

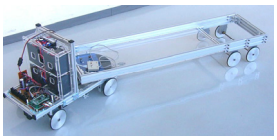
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例

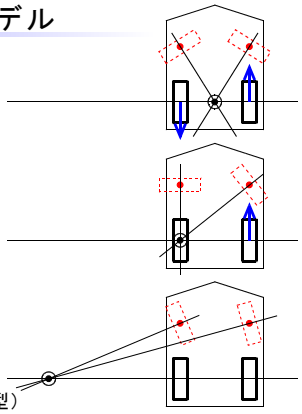


車輪移動ロボットモデル

○ 多少特殊な例



農業支援目的型4輪：kulara
- その場旋回可能な操舵機構
  ※非円形歯車で1軸操作
- 後輪は独立駆動（対向2輪型）



今回の目的

○ 主に車輪移動ロボットのメカと制御

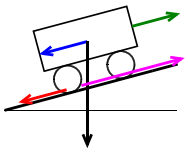
テーマ1：
- 移動するロボット
- 車輪移動ロボットの基礎原理

テーマ2：
- 車輪移動ロボットの構造と設計

テーマ3：
- 車輪移動ロボットの基本的な制御
- 局所移動から自動運転自動車まで

車輪移動ロボットの構造と設計

○ 車輪移動の仕様



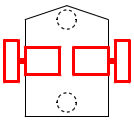
◇走行性能
- 最高速度
- 最大推力
  ≧ 走行時に生じうる力
  ＝ 各種抵抗、慣性力、登坂時重力

◇旋回性能
- 曲線(円弧)の最小旋回半径
  （・曲率変化の応答性）

対向2輪型の構造と設計

○ 同じ駆動系×2 ＋ 支持キャスタ

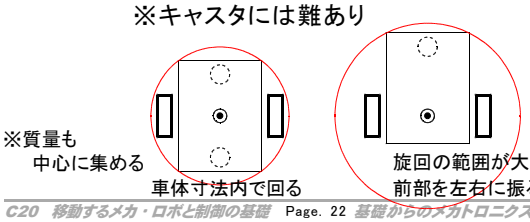
◇必要な走行動力系
- 概ね、
  最高速度＋αの車輪速度
  最大推力÷2
  の同等な駆動系を左右に対称配置。
- 速度制御の細かさ、滑らかさが必要
  ← 速度差で走り方が変わる(後述)
- バックラッシ(ガタ)の影響が大きい。



対向2輪型の構造と設計

○ 同じ駆動系×2 ＋ 支持キャスタ

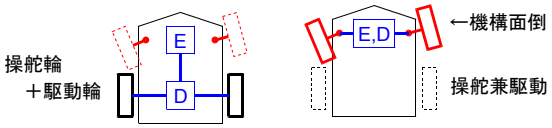
◇駆動輪の配置と運動性
- 車軸上に回転の中心ができる
  ＝車体の図形的重心とそろえると小回り。
  ※キャスタには難あり



ステアリング型の構造と設計

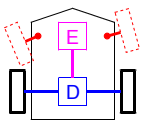
○ 走行動力系 ＋ 操舵系

◇役割分担
- 走行のための動力と、方向を変える操舵が独立している ＝ 大きな動力源は一つ
- 車輪でも分担させたほうが構造は楽。
- 操舵の正確さと速さが重要。



ステアリング型の構造と設計

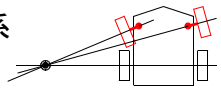
○ 走行動力系 ＋ 操舵系



◇必要な走行動力系
- 概ね、
  最高速度、最大推力を出せる動力源
  動力を駆動輪に分配する機構
  を用意する。
- 駆動輪が2個以上ある場合は、車輪の速度差に対応できる分配機構。
  例）ディファレンシャルギヤ

ステアリング型の構造と設計

○ 走行動力系 ＋ 操舵系



◇必要な操舵機構

・すべての車軸が1点で交わるように。

・単純には操舵輪ごとに駆動装置
→ いろいろ楽だがコスト増

・リンク機構などで連結
例）アッカーマン・ジャントー（自動車）

・平坦路面なら大きな力は不要。

対向2輪型 と ステアリング型

○ 場合による、向き不向き

◇対向2輪の特徴 → モータ駆動向き

◎ メカの構造が簡単

？ 駆動輪まわりにメカが集中

△ 応答性よい大型動力源が2個必要

◇ステアリング型の特徴

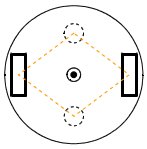
× メカが複雑（ステア、デフギア）

？ 駆動輪と動力を離しやすい（ガタに強い）

○ 走行用の動力は1個でよい

対向2輪型 と ステアリング型

○ 場合による、向き不向き



◇ロボットでは対向2輪型が大半

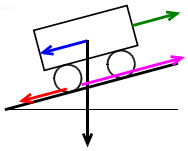
・作りやすさと制御性。

・その場で旋回もできる小回りの良さ。
※ステア型は最小半径が厳しい
＋ ロボットを丸く作る
← 引っかかりにくい、逃げやすい

・ただし、支持や安定には課題あり。

車輪移動ロボットの動力計算

○ 速度と推進力



◇ロボットの移動速度 [m/s]

◇必要な推進力 [N]

・路面の抵抗（整地だと小さい、悪路だと大きい）

・移動経路の傾斜による重力の影響
質量[kg]×g(9.8)×sin(傾斜角)

・慣性力＝加減速に必要な力
質量[kg]×加速度[m/s^2]

車輪移動ロボットの動力計算

○ 速度と推進力 → 動力

◇ロボットの移動速度 [m/s]

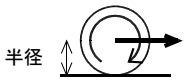
◇必要な推進力 [N]

◇必要な動力 [W]
＝移動速度[m/s]×推進力[N]

◇モータの必要動力[W] （≒必要な電力）
＝必要な動力 ÷ 減速機などの伝達効率

車輪移動ロボットの動力計算

○ 減速比の計算



◇速度の変換

・車輪角速度[rad/s]
＝ 移動速度[m/s] ÷ 車輪半径[m]

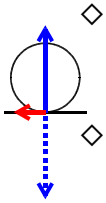
・モータ定格角速度[rad/s]
＝ モータ定格[rpm]÷60×2×3.14

◇減速比

・減速比＝車輪角速度[rad/s]
÷モータ定格角速度[rad/s]

車輪移動ロボットの動力計算

○ 大事な鉄則＝駆動輪の摩擦で推進



◇車輪と路面の摩擦力以上の力は出せない

・摩擦力[N]≦摩擦係数×垂直抗力[N]

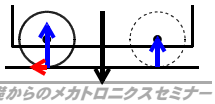
・摩擦係数に依存（タイヤ素材などで工夫）

◇垂直抗力

・車輪が地面を押す力（に対して地面が押す力）

・1輪車なら、全体質量×g(9.8)

・車輪が複数あると？



駆動輪の摩擦だけ推進に使える

車輪移動ロボットの動力計算

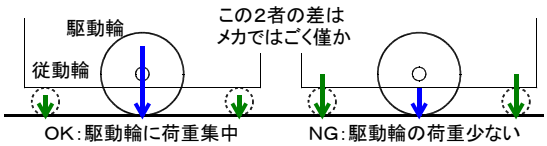
○ 大事な鉄則＝駆動輪の摩擦で推進

◇摩擦力[N]≦摩擦係数×垂直抗力[N]

◇垂直抗力[N]

・車輪が地面を押す力（に対して地面が押す力）

・駆動輪に重さをなるべく集中させる。

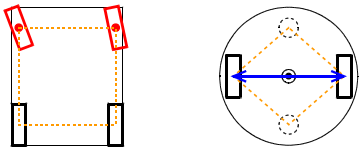


その他の検討事項

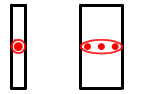
○ ロボットの形と車輪の配置

◇ステアリング型： 四角、なるべく車輪は端に
→ 安定性 と 有効面積 に有効

◇対向2輪型：丸形、車輪は前後中央で間隔大
→ 形状の対称性と走行特性



その他の検討事項

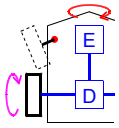


○ 車輪・タイヤの幅

◇理想的には
・幅は狭いほどよい、点接地するように。

◇現実的には
・ある程度の幅が必要。
・平滑面、低荷重ならOリングを使える(狭い)
・凹凸面、不整地、大荷重
→ 幅(および表面のパターン)が必要
→ 滑りが避けられず、誤差要因

その他の検討事項



○ メカのバックドライバビリティ

◇バックドライバビリティとは
・出力側を動かしたときに、入力側が動くか
・車輪移動ロボットの場合：
車輪を回す→駆動モータが回るか
操舵輪を動かす→モータが回るか

◇バックドライバビリティがあると
・電源切れても動かせる（動いてしまう）
・想定外の外力から逃げられる、回生できる

今回の目的

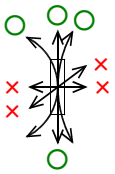
○ 主に車輪移動ロボットのメカと制御

テーマ1：
・移動するロボット
・車輪移動ロボットの基礎原理

テーマ2：
・車輪移動ロボットの構造と設計

テーマ3：
・車輪移動ロボットの基本的な制御
・局所移動から自動運転自動車まで

車輪移動ロボットの基礎特性



○ おさらい

◇車輪はすべらない
・転がる、その場での回転はOK。
・瞬間ごとに円運動、車軸の線上に中心。

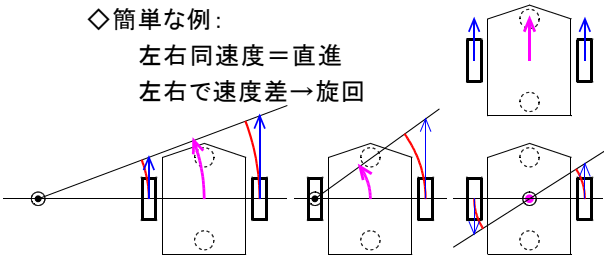
◇車両の車軸は一点で交わる
・全ての車輪がその点を中心に回る。
・各車輪の速度は、その半径に比例。
・車両をある速度、ある半径で走行させる
＝ 車軸を中心に向ける、速度決める。

車輪移動ロボット（対向2輪）の基礎特性

○ ポイント：2輪の速度だけで決まる

◇中心の位置：2輪の共通の車軸線上

◇簡単な例：
左右同速度＝直進
左右で速度差→旋回

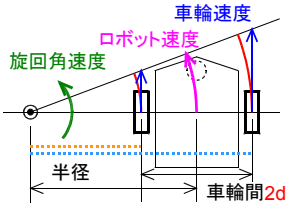


車輪移動ロボット（対向2輪）の基礎特性

○ ポイント：2輪の速度だけで決まる

◇中心の位置：2輪の共通の車軸線上

◇具体的な計算



・速度＝半径×角速度（公式）
・左車輪速度＝
（半径−d）×旋回角速度
・右車輪速度＝
（半径＋d）×旋回角速度
・（左速度＋右速度）／2＝
半径×旋回角速度＝ロボ速
・旋回角速度＝（右−左）／2d
・半径＝ロボ速／旋回角速度

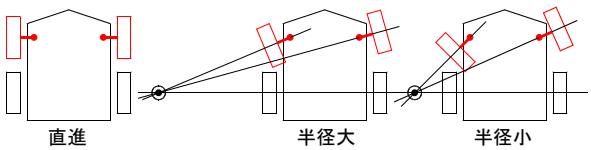
車輪移動ロボット（ステア）の基礎特性

○ ポイント：操舵輪の角度で決まる

◇中心の位置：後輪(非操舵輪)の車軸線上

◇移動速度：駆動輪の速度

◇簡単な例：

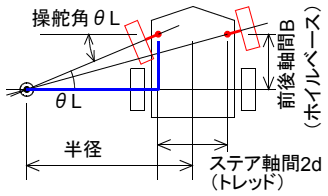


車輪移動ロボット(ステア)の基礎特性

○ ポイント:操舵輪の角度で決まる

◇中心の位置:後輪(非操舵輪)の車軸線上

◇具体的な計算:



・tan(左操舵角θL)=
B/(半径−d)

・θL=tan^{-1}(B/(半径−d))

・右も同じ(+d)

・一般的なデフの場合
(右速度+左速度)/2
=デフ入力速度
=車両速度

車輪移動ロボットの自己位置推定

○ 車輪の状況から、移動を推定

◇推定の考え方

・ある短い時間において、

・車輪の回転量(モータの回転量) および操舵角度(ステアリング型の場合)

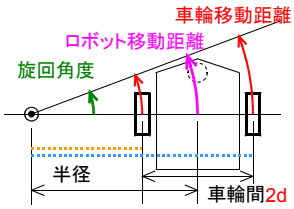
→ 円弧運動を仮定すると、ロボットの移動量と方向変化が計算できる。

・最初から、時々刻々と積み重ねると位置が推定できる。

車輪移動ロボットの自己位置推定

○ 対向2輪の場合の移動量

・ある時間での車輪の移動距離を測定



・円弧=半径×中心角(公式)

・左車輪移動距離=
(半径−d)×旋回角度

・右車輪移動距離=
(半径+d)×旋回角度

・(左距離+右距離)/2=
半径×旋回角度=ロボ移動

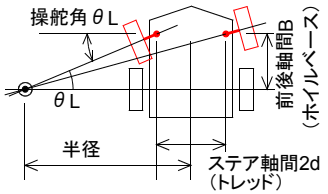
・旋回角度=(右−左)/2d

・半径=ロボ移動/旋回角度

車輪移動ロボットの自己位置推定

○ ステア型の場合の移動量

・操舵角情報→旋回半径, 旋回角度



・tan(左操舵角θL)=
B/(半径−d)

・半径=B/tan(θL)+d
※θL=0、直進の例外

・移動距離は一般的デフでは、デフの入力で計算

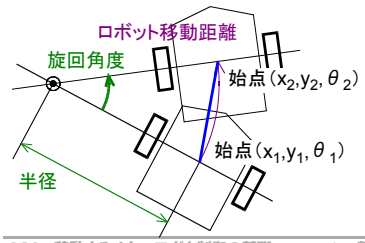
・旋回角度=距離/半径

車輪移動ロボットの自己位置推定

○ 移動量の積み重ね方法(共通)

◇短い時間ごとの円弧運動による変化を考える

◇具体的計算:



・座標(x,y) 進行方向θ

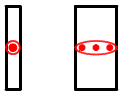
・$\theta_2=\theta_1$+旋回角度

・θ_1, 旋回角度、半径から、
座標変化を計算、
→x_2,y_2
※詳細は略

・直進のときは、別途座標変化を計算

車輪移動ロボットの自己位置推定

○ 推定の精度



◇精度への影響要因

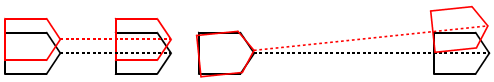
・滑るとそのまま誤差になる。

・ステア角の誤差は影響しやすい(ガタ等)。

・対向2輪の車輪間隔は影響しやすい。

→ 幅のある車輪は精度を出しにくい。

◇位置誤差より角度誤差のほうが影響大



各種移動ロボットの自己位置推定

○ 自身の行動から推定(例)

◇歩行ロボット

・ロボットの精度が良く、足裏・脚先に滑りがなければ、1歩ごとに積算。

◇飛行ロボット

・モデルと慣性センサ(IMU)から推定。

◇不整地クローラ

・姿勢センサと走行距離距離から推定。

移動ロボットの位置情報

○ 位置情報の重要さ と その限界

◇位置情報の使用例

・目標地点を数値座標で

・移動すべき経路を座標や関数で

・障害物情報などを座標で

◇(車輪の)自己位置推定の有効性

・高分解能で短距離なら十分有効。
※ロボットの制御には応答性と分解能が重要

・少し長くなると誤差が増大 →壁に衝突etc

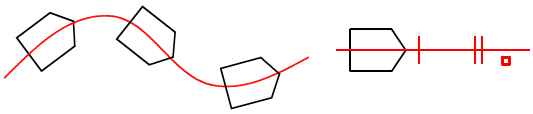
移動ロボットの位置情報

○ 絶対的な位置情報を併用する

◇明確な軌道情報の提供

・路面にラインを設け、ラインに沿って走行。
＝ライントレース

・ラインに停止位置などの情報を付随させる



移動ロボットの位置情報

○ 絶対的な位置情報を併用する

◇GPSを併用（もしくは類似手法）

・地球上全域（屋外限定）で座標が出る。

・精度：数m～数十cm～数cm（方式による）

・測定頻度 1Hz～20Hz程度

◇GPSの弱点

・車両の制御には精度、頻度が不足。

・建物の影などで誤差が出やすい。

・何らかの補正が必要。

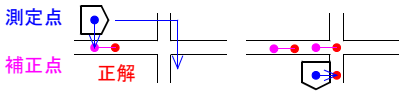
移動ロボットの位置情報

○ 絶対的な位置情報を併用する

◇地図情報による補正(1)

・車両の走行が何らかの手段で、特定の路線に拘束されている場合に、その線上に補正する。

・原始的なカーナビ補正手法。



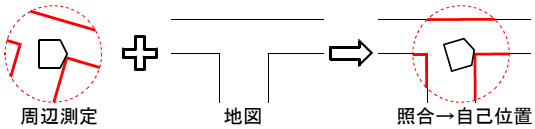
移動ロボットの位置情報

○ 絶対的な位置情報を併用する

◇地図情報による補正(2)

・車上の周辺センサ(主にレーザレンジファインダ)で取得した周辺情報と、地図情報を照合して、位置を特定する。

・屋内環境向き。

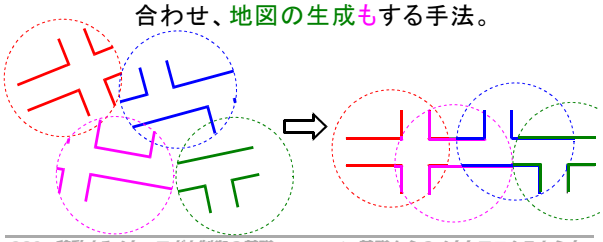


移動ロボットの位置情報

○ 絶対的な位置情報を併用する

◇地図情報による補正(2')「SLAM」

・周辺情報を、位置特定と同時につなぎ合わせ、地図の生成もする手法。



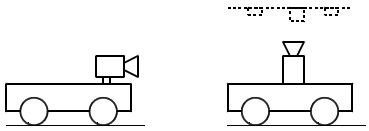
移動ロボットの位置情報

○ 絶対的な位置情報を併用する

◇画像情報による補正（例）

(A)走行中の光景と、事前に教育した際に撮影した画像を照合して、軌道を補正。

(B)天井の画像をつかって位置の特定。



移動ロボットの位置情報

○ 絶対的な位置情報を併用する

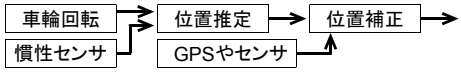
◇いずれの方法でも、車輪等の積算が必須。

・応答性が不足する
・分解能が不足する
→車輪やIMUが得意

◇情報の融合

・ベースを車輪による自己位置推定にする。

・これを他の絶対的情報で補正していく。



車輪移動ロボットの制御

○ 走行に関する制御

◇速度・半径(or 旋回速度)指令を実現

・先の方法でステア・車輪速度を決定。

・走行モータは速度制御

・操舵モータは位置制御

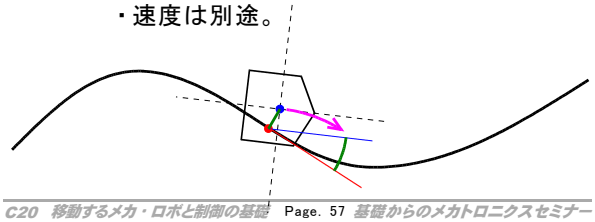
◇モータのセンサで自己位置推定

→ 局所的な走行制御

移動ロボットの制御

○ 経路に沿った移動

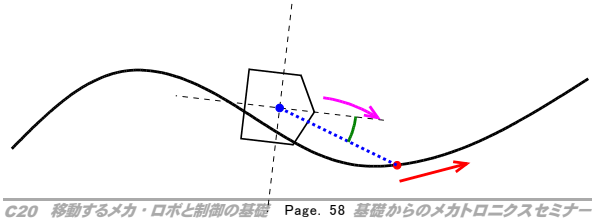
◇実在・仮想のライントレース（1）
- 線からの距離、相対角度から車両の旋回を指令する。
- 速度は別途。



移動ロボットの制御

○ 経路に沿った移動

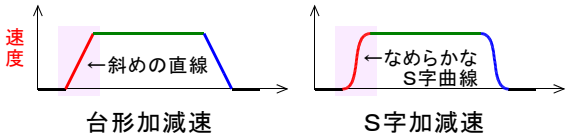
◇実在・仮想のライントレース（2）
- 線上に仮想の目標を走らせ、追跡させる。
- 目標までの距離→速度、角度→旋回



移動ロボットの制御

○ 経路に沿った走行

◇経路上の速度指定
- 適切な加減速
- 障害物発見時の減速など

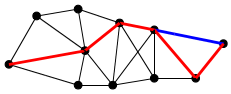


参考→C17 メカトロ基本法則

移動ロボットの制御

○ 経路の決定

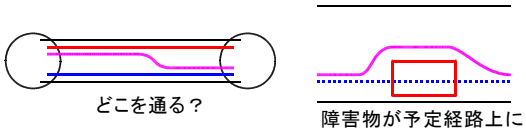
◇指定した目的地までの経路（1）
- メッシュ状の経路データから、どの経路を通るかを選定する。
- カーナビ
- 例）ダイクストラ法



移動ロボットの制御

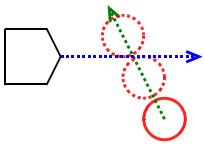
○ 経路の決定

◇指定した目的地までの経路（2）
- 経路情報のなかで、どこを通るのか。
  ※座標レベルの経路決定
- 障害物があったときの回避軌道の生成。



移動ロボットの制御

○ 障害物への対応



◇障害物の検出
- 静止している障害物
- 動いている障害物→その後の予測

◇対応の計画
- 減速→停止→待ち
- (減速→)回避行動

移動ロボットの制御

○ どこまで、限定環境にできるか

◇ここまでの制御課題は、「理想」
- 人間は行っている(歩くとき、乗り物運転)。
- 特に後半の「認識」ものが難しい。

◇実現するには限定必須
- レールを引いてしまう。
- 床面にラインを引く。
- 人が入らない環境を作る。
  (環境側で監視＋全停止)

移動ロボットの制御

○ 自動運転自動車は？

◇既存の環境での運転が必須(限定できない)
- GPSでは不足なので「自動車自身」が、道路をみて走る必要。
- 環境にヒントを用意しきれない。
  過去の例）高速道路の自動運転技術で、道路に等間隔に磁石を埋めて、磁気でライントレース
- 人間並を超える認識、判断力は可能か？
- (社会的に)人と桁違いの安全性確保必須。

移動ロボットの制御

○ 自動運転自動車は？

◇目処は？ （私見を含みます）

・技術としては、かなりそろってきている。
（実はわりと昔から）

・高速道路限定なら、OKそう。

・課題は一般道路。
環境の複雑さ、判断の複雑さ。
車線変更の意思の疎通が人とできるか？
※全てがロボット車なら、実は簡単。

まとめ

○ 移動ロボット

・場所、用途に応じて様々な形態があるが、
車輪移動が大半。

・移動ロボットとしては対向2輪型が多い。

・制御において、(1)希望する方向への移動、
(2)位置の推定、(3)指定経路への追従、
(4)経路の決定 という要素がある。

・実用化案件は、いかに単純化できるか。

まとめ

○ 車輪移動の原理

・車輪はすべらない、すべらせない

・対向2輪型は、二つの駆動輪の速度の
調整で、その場旋回も含め、運動の
制約が少ない。

・ステアリング型は、運動制約があり移動の
精度を出しにくいが、支持が安定しやすく、
既存車両との親和性が高い。