

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20回

C20/Rev 1.0

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

C20 移動するメカ・ロボと制御の基礎 Page. 2 基礎からのメカトロニクスセミナー

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。

C20 移動するメカ・ロボと制御の基礎 Page. 3 基礎からのメカトロニクスセミナー

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

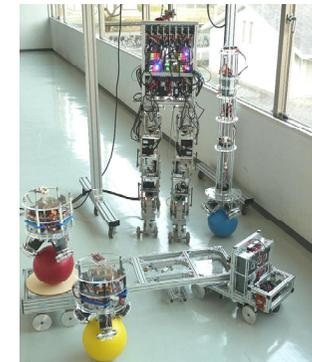
○ 地上を移動するロボット



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

C20 移動するメカ・ロボと制御の基礎 Page. 4 基礎からのメカトロニクスセミナー

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 (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)

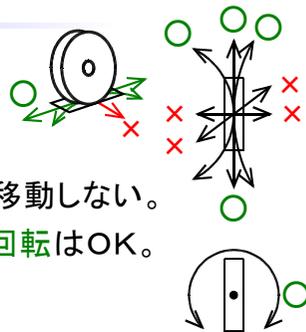
以下では車輪移動を中心に

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

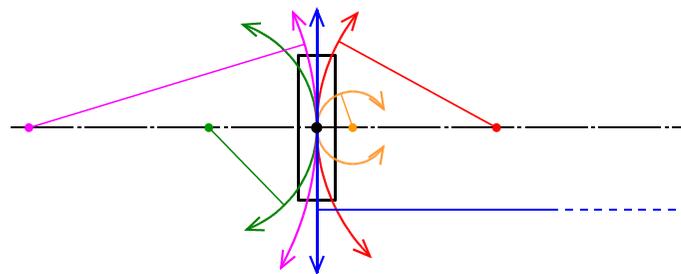
- ・ 運動が不定になる(どう滑るかわからない)。
- ・ 後述の運動計算ができなくなる。

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

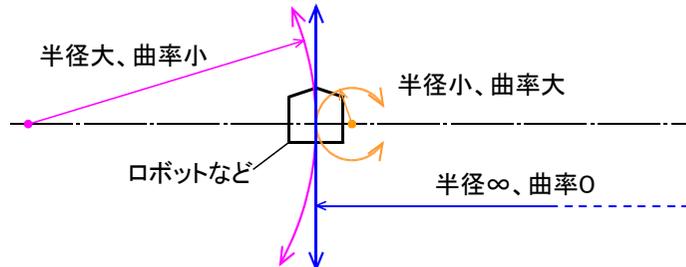
- ・ **直進** は半径 ∞ 、その場合は半径0とみなす。



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

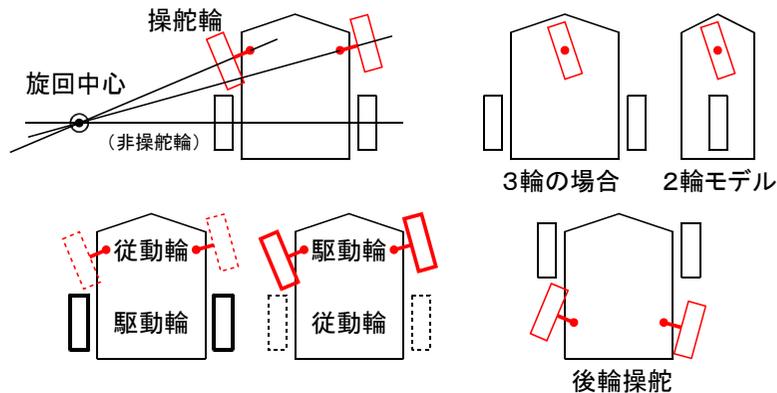
○ 曲線運動と旋回半径

- ・ 任意の曲線(直線含む)は、極短い部分を見れば円に近似
→ 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。



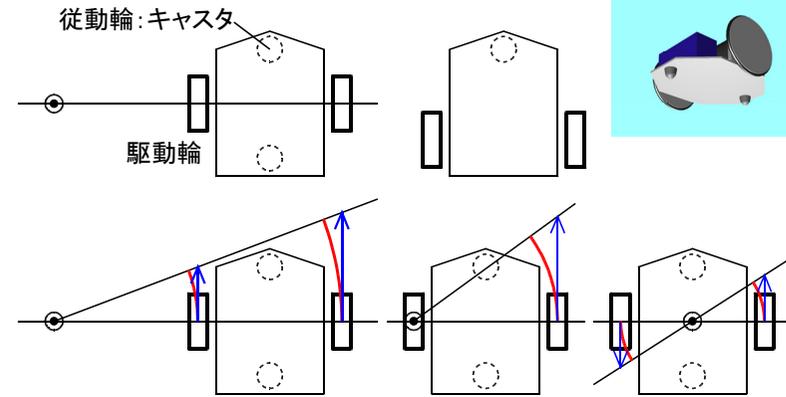
車輪移動ロボットモデル

○ 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

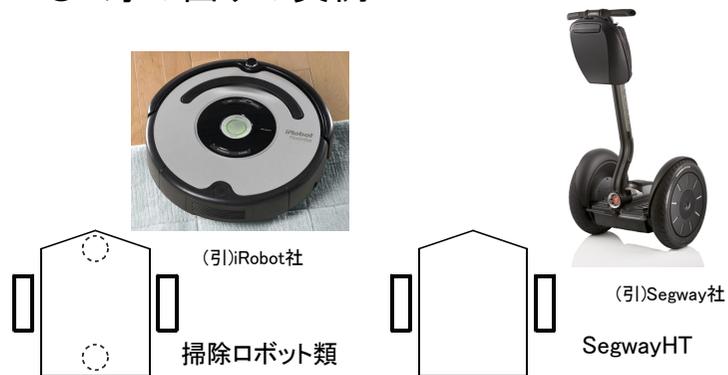
→動作のイメージには良い

◇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 |

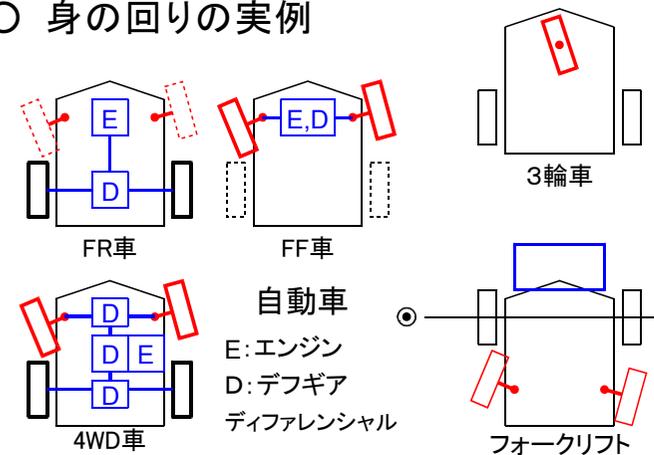
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



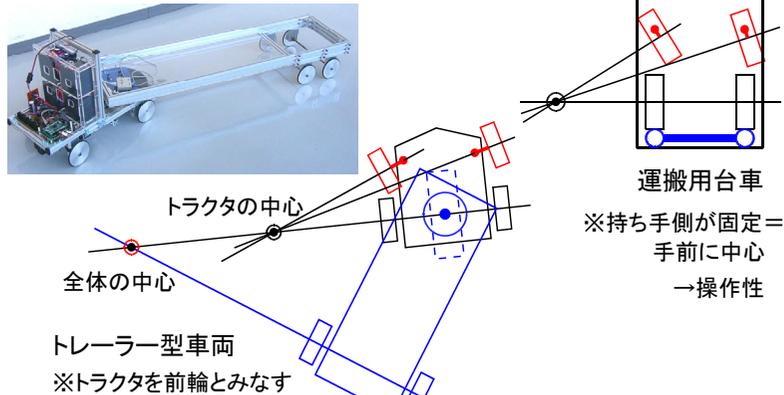
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



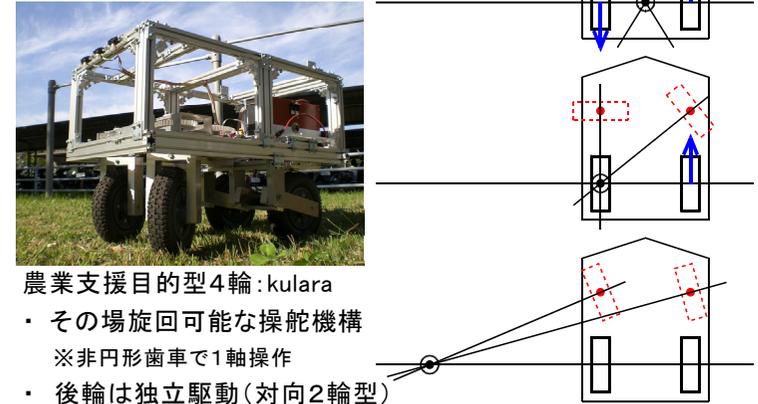
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



車輪移動ロボットモデル

○ 多少特殊な例



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

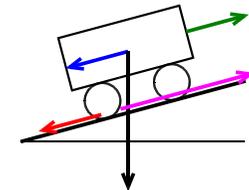
- ・ 最高速度
- ・ **最大推力**

≥ 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)

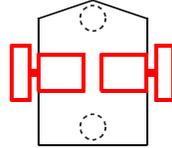


対向2輪型の構造と設計

○ 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 $\div 2$



の同等な駆動系を左右に対称配置。

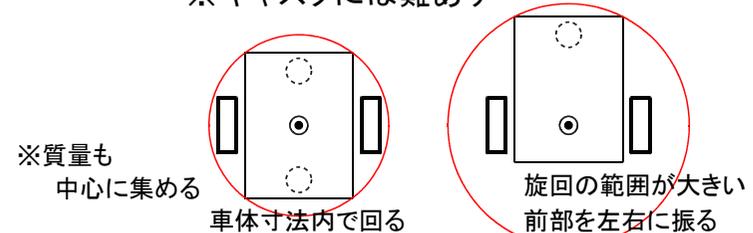
- ・速度制御の細かさ、滑らかさが必要
← 速度差で走り方が変わる(後述)
- ・バックラッシュ(ガタ)の影響が大きい。

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

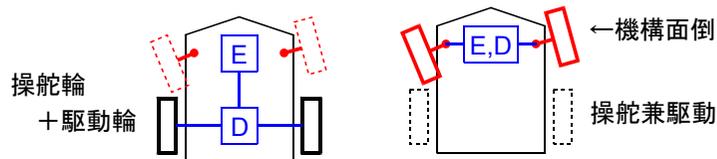


ステアリング型の構造と設計

○ 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。

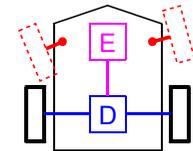


ステアリング型の構造と設計

○ 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

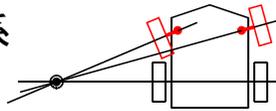


ステアリング型の構造と設計

○ 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

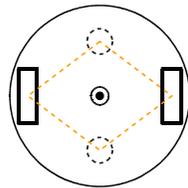
- × メカが複雑(ステア、デフギア)
- ? 駆動輪と動力を離しやすい(ガタに強い)
- 走行用の動力は1個でよい

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。



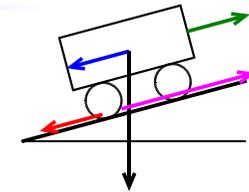
車輪移動ロボットの動力計算

○ 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/s²]



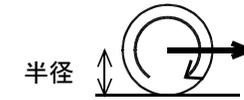
車輪移動ロボットの動力計算

○ 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

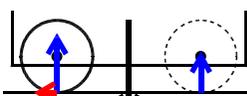
○ 減速比の計算



- ◇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

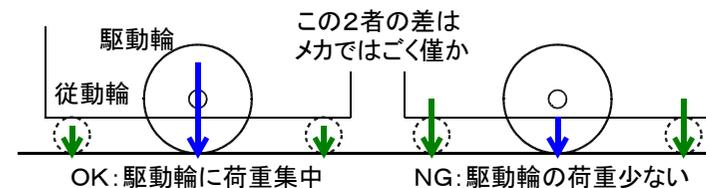
○ 大事な鉄則 = 駆動輪の摩擦で推進

- ◇車輪と路面の摩擦力以上の力を出せない
 - ・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。

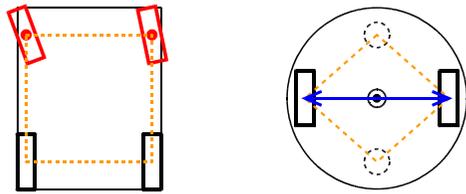


その他の検討事項

○ 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

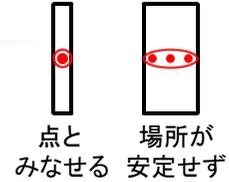
・ある程度の幅が必要。

・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:

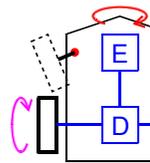
車輪を回す→駆動モータが回るか

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

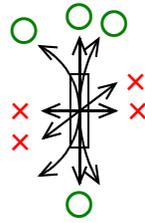
○ おさらい

◇ 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。



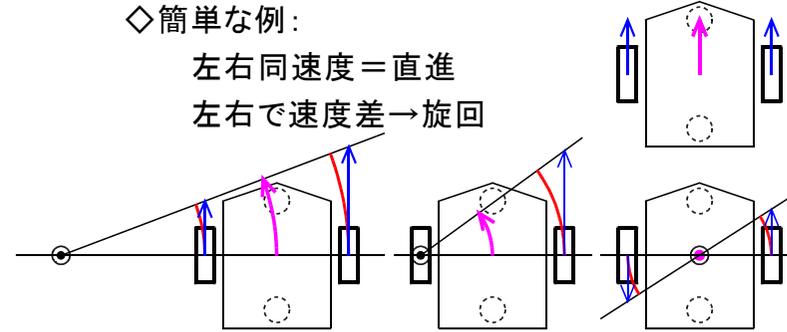
車輪移動ロボット(対向2輪)の基礎特性

○ 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



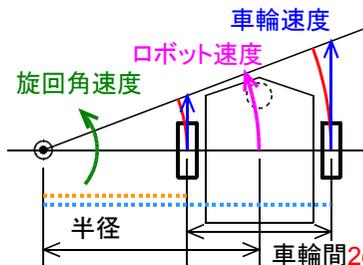
車輪移動ロボット(対向2輪)の基礎特性

○ 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



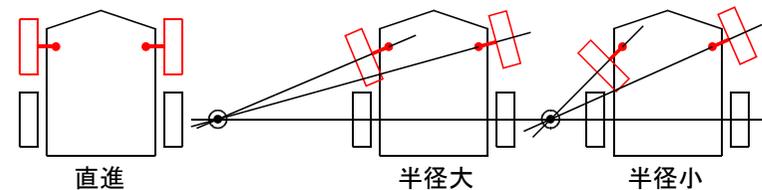
車輪移動ロボット(ステア)の基礎特性

○ 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:

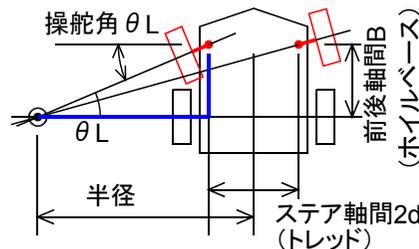


車輪移動ロボット(ステア)の基礎特性

○ 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:



- ・ $\tan(\text{左操舵角 } \theta_L) = B / (\text{半径} - d)$
- ・ $\theta_L = \tan^{-1}(B / (\text{半径} - d))$
- ・ 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

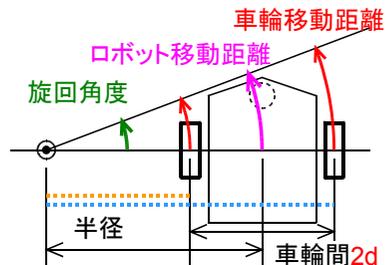
◇推定の考え方

- ・ 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

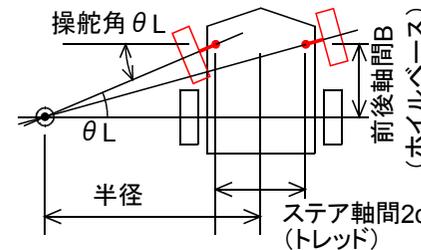


- ・ 円弧 = 半径 × 中心角 (公式)
- ・ 左車輪移動距離 = (半径 - d) × 旋回角度
- ・ 右車輪移動距離 = (半径 + d) × 旋回角度
- ・ (左距離 + 右距離) / 2 = 半径 × 旋回角度 = ロボ移動
- ・ 旋回角度 = (右 - 左) / 2d
- ・ 半径 = ロボ移動 / 旋回角度

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



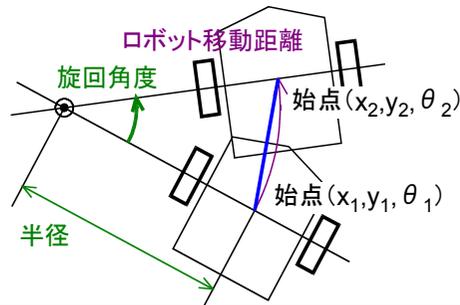
- ・ $\tan(\text{左操舵角 } \theta_L) = B / (\text{半径} - d)$
- ・ 半径 = $B / \tan(\theta_L) + d$
※ $\theta_L = 0$, 直進の例外
- ・ 移動距離は一般的なデフでは、デフの入力で計算
- ・ 旋回角度 = 距離 / 半径

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

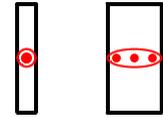
◇具体的計算:



- ・座標(x,y) 進行方向 θ
- ・ $\theta_2 = \theta_1 + \text{旋回角度}$
- ・ θ_1 , 旋回角度、半径から、座標変化を計算、 $\rightarrow x_2, y_2$
- ※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。
 \rightarrow 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

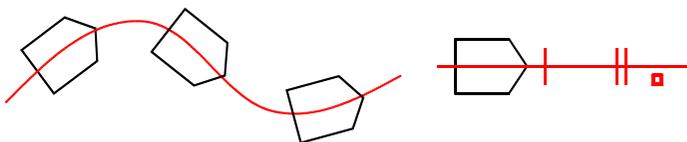
- ・高分解能で短距離なら十分有効。
※ロボットの制御には応答性と分解能が重要
- ・少し長くなると誤差が増大 \rightarrow 壁に衝突etc

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

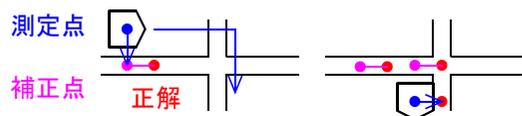
- ・車両の制御には精度、頻度が不足。
- ・建物の影などで誤差が出やすい。
- ・何らかの補正が必要。

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。

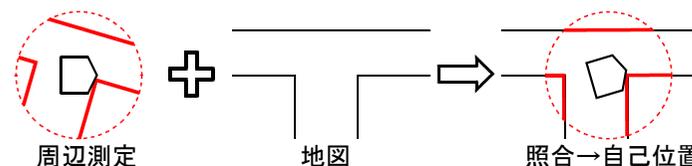


移動ロボットの位置情報

○ 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。

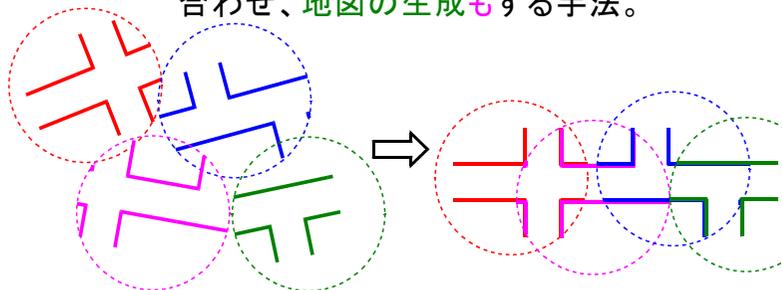


移動ロボットの位置情報

○ 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。

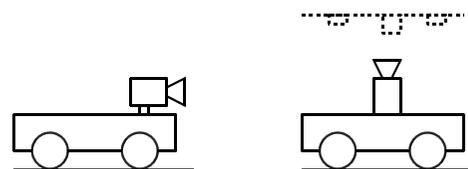


移動ロボットの位置情報

○ 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 → 車輪やIMUが得意
- ・分解能が不足する

◇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

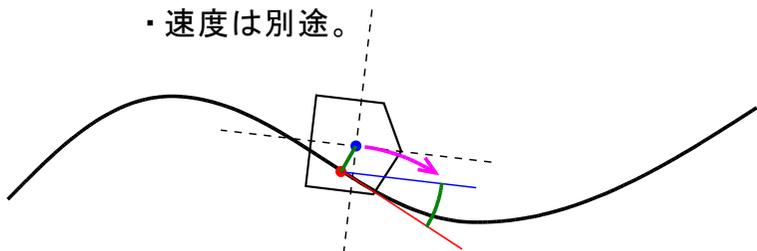
→ 局所的な走行制御

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。

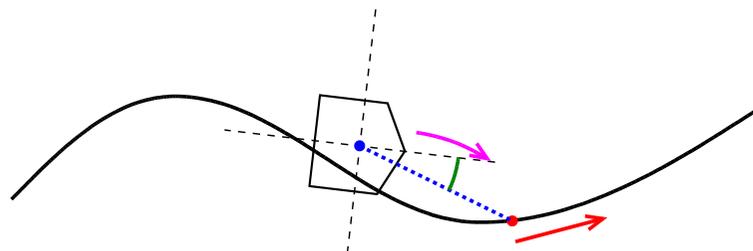


移動ロボットの制御

○ 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

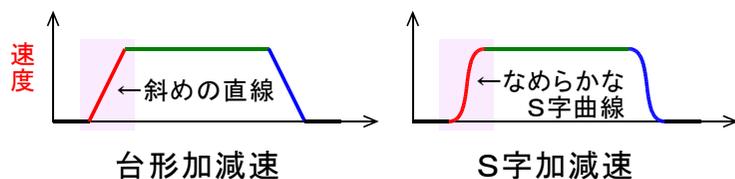


移動ロボットの制御

○ 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

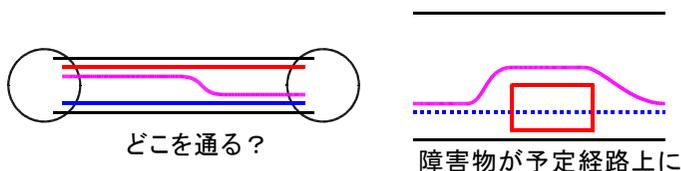


移動ロボットの制御

○ 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。

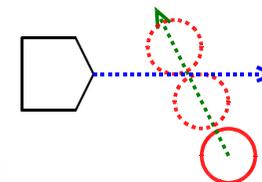


移動ロボットの制御

○ 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ですが、支持が安定しやすく、既存車両との親和性が高い。