

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的一种
- ・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

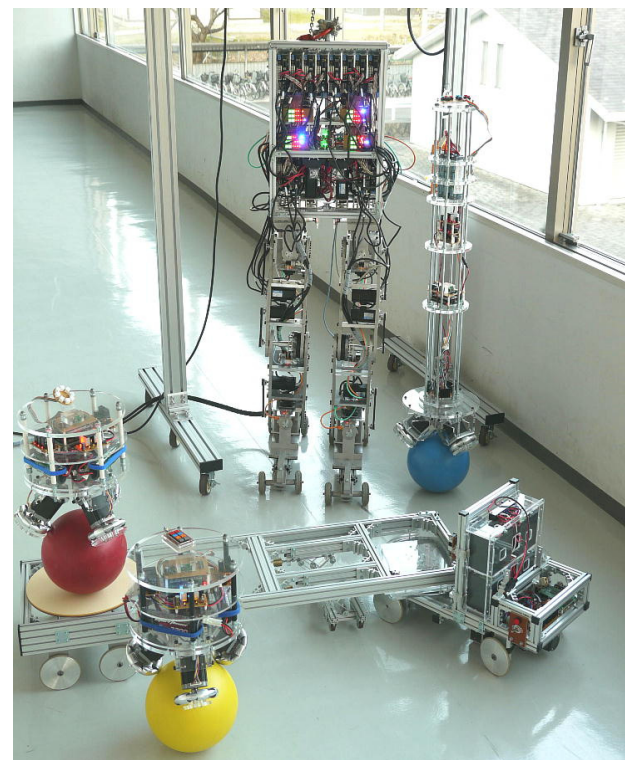
○ 地上を移動するロボット



レスキューロボ Quince (引)東北大田所研



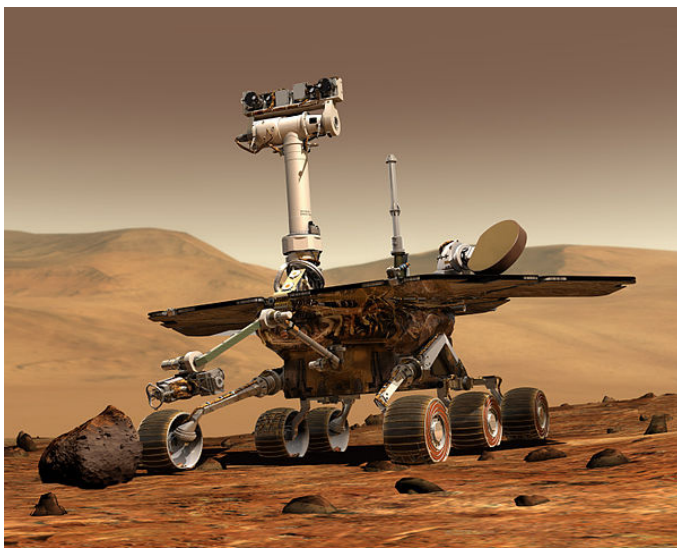
掃除ロボット
(引)iRobot社



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）

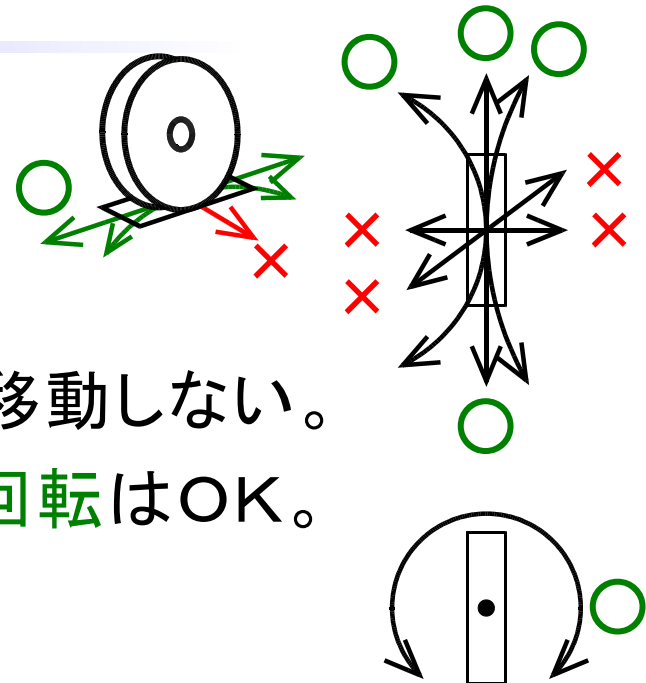
以下では車輪移動を中心に

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

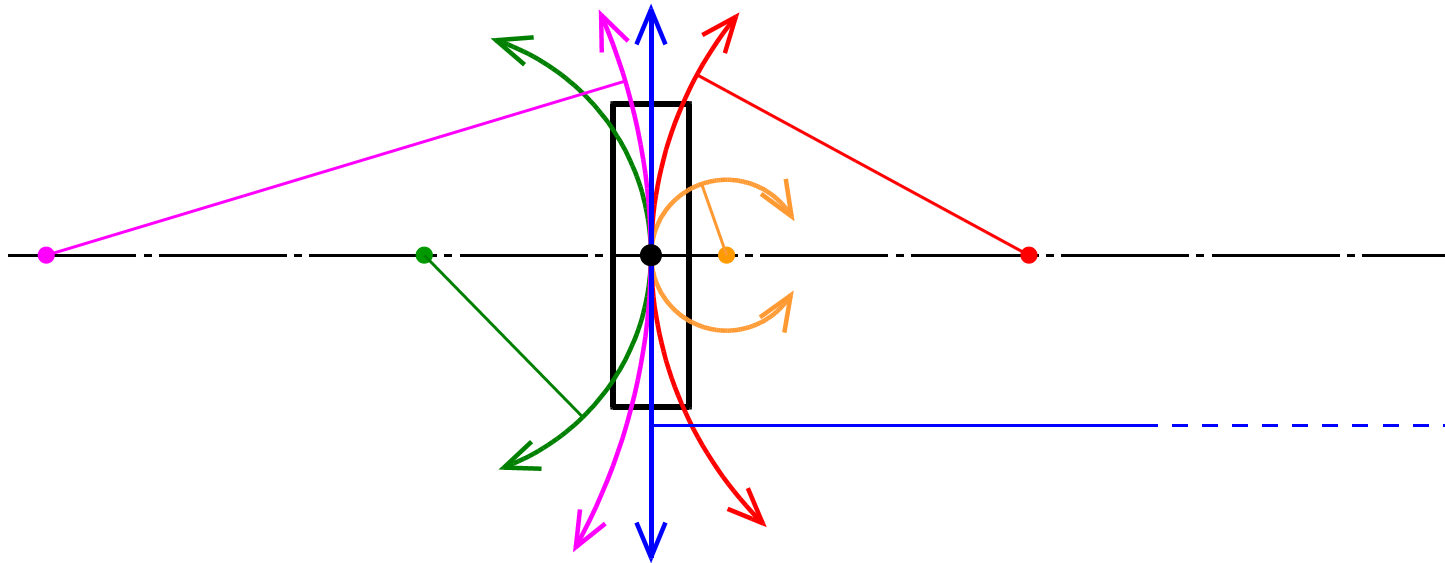
- ・ 運動が不定になる(どう滑るかわからない)。
- ・ 後述の運動計算ができなくなる。

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

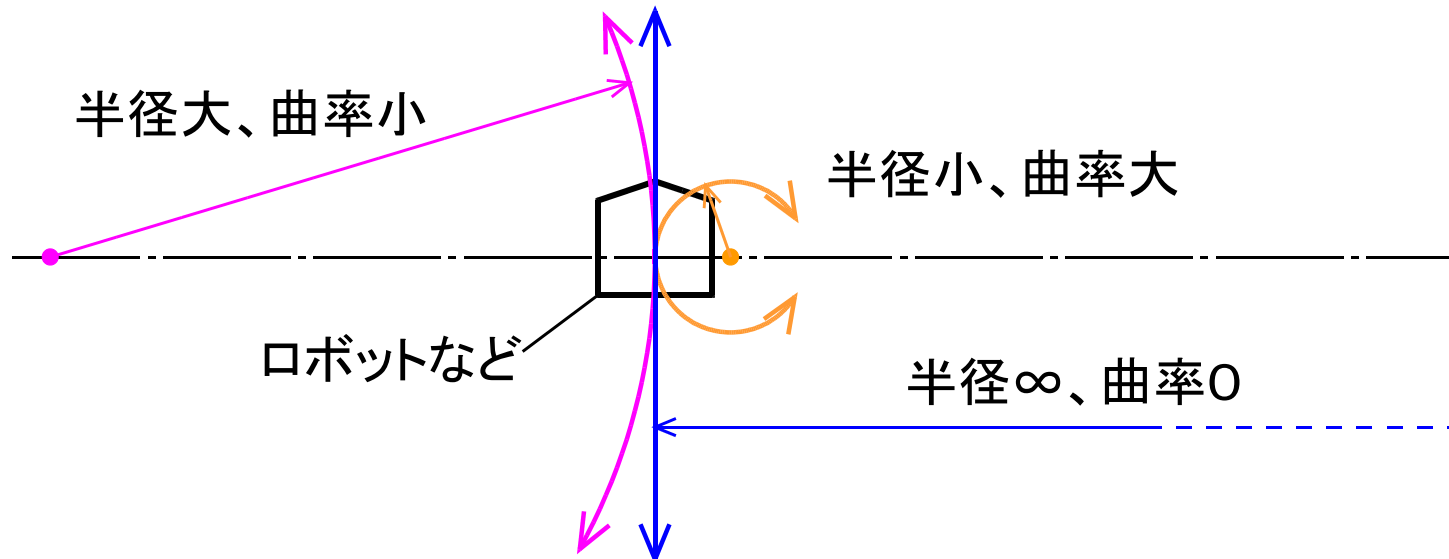
- ・ 直進は半径 ∞ 、その場合は半径0とみなす。



車輪移動ロボット大原則

○ 旋回半径と曲率

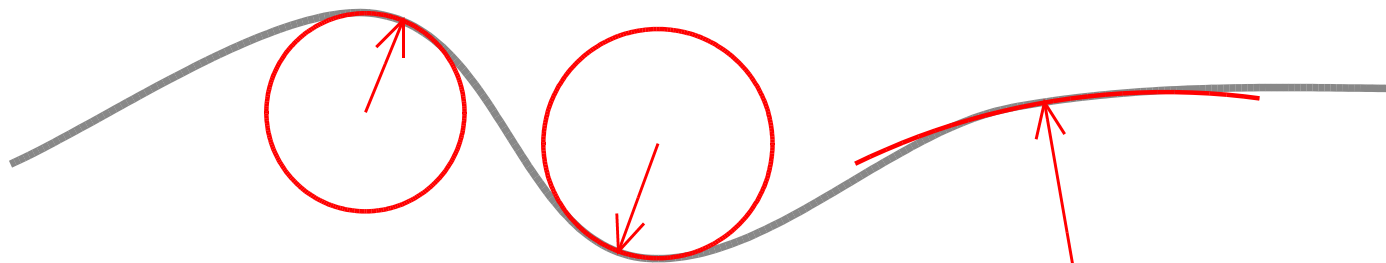
- ・ 旋回半径 = (ロボットの代表点の)
円運動の半径 (直進 = ∞ 、その場 = 0)
- ・ 曲率 = $1 \div$ 半径 (直進 = 0、その場 ∞)



車輪移動ロボット大原則

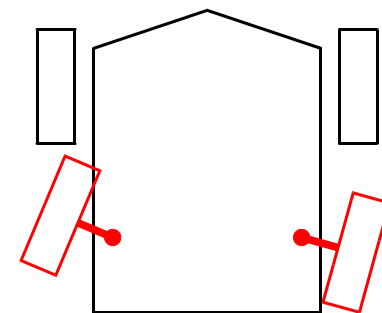
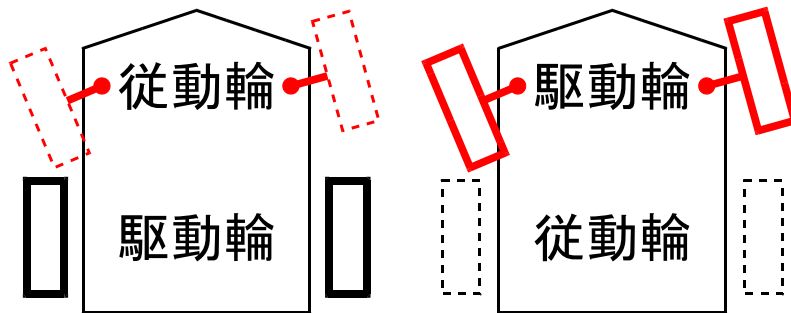
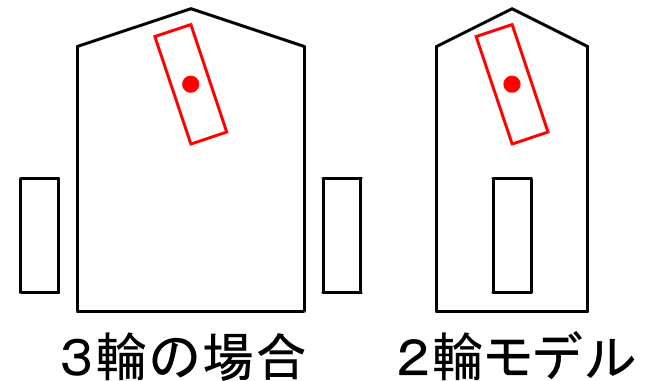
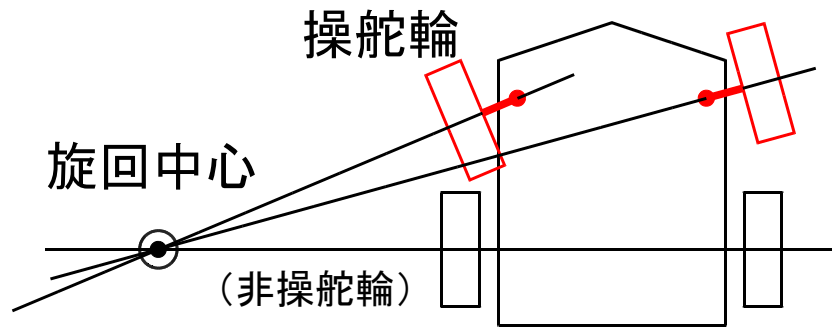
○ 曲線運動と旋回半径

- ・ 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

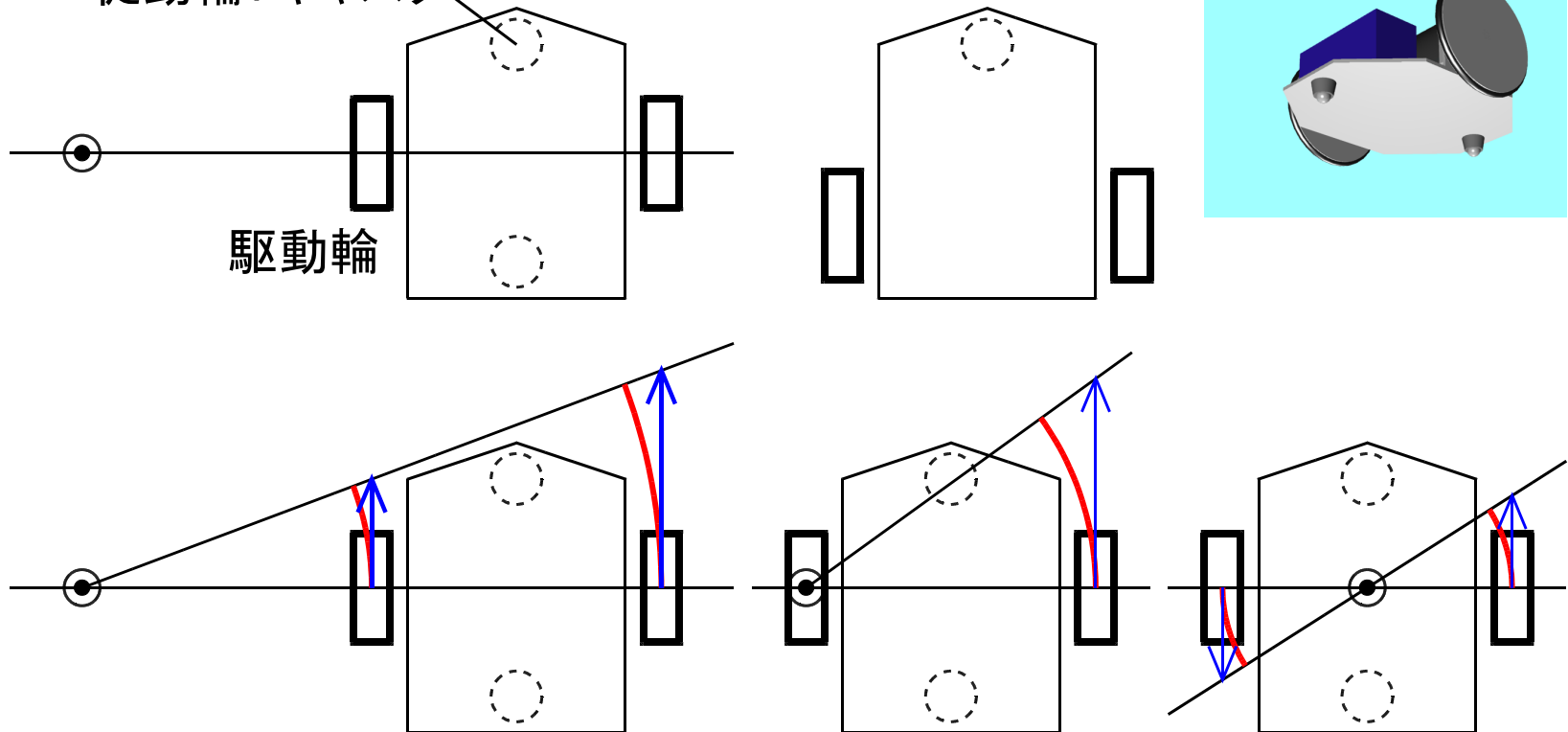
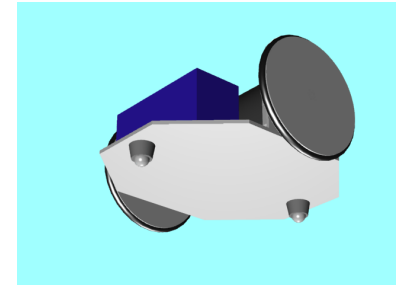
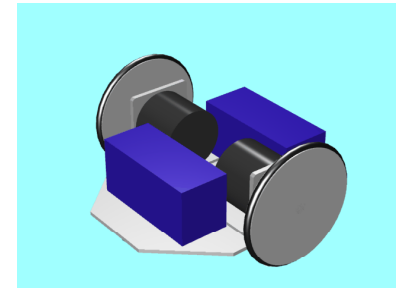


後輪操舵

車輪移動ロボットモデル

○ 対向2輪(独立2輪)型

従動輪: キャスタ



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

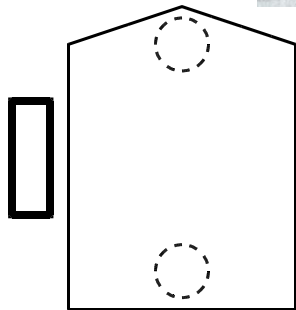
- クロ：複雑

車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



(引)iRobot社

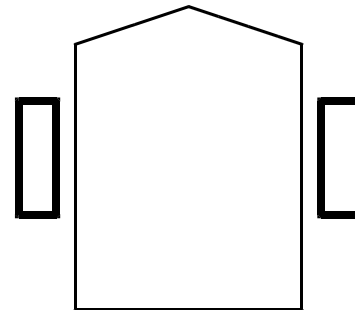


掃除ロボット類



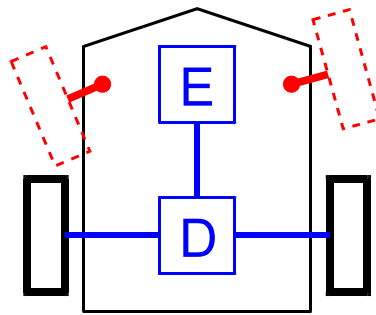
(引)Segway社

SegwayHT

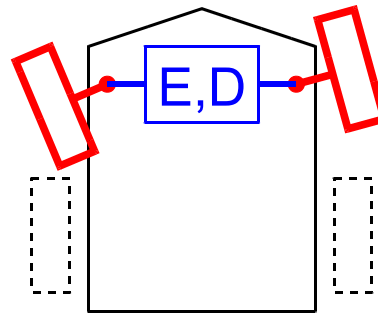


車輪移動ロボットモデル

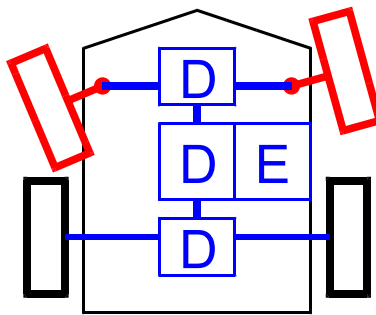
○ 身の回りの実例



FR車



FF車



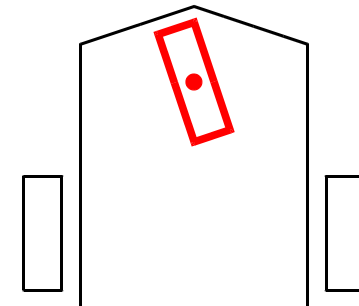
4WD車

自動車

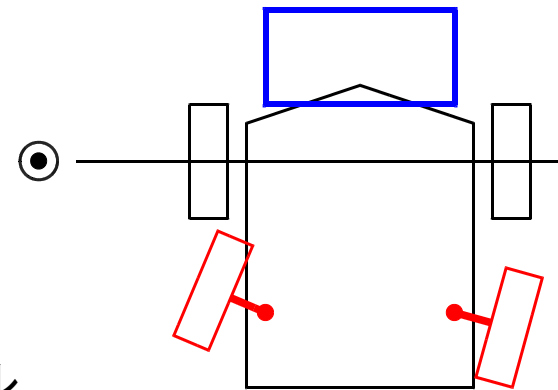
E: エンジン

D: デフギア

ディファレンシャル



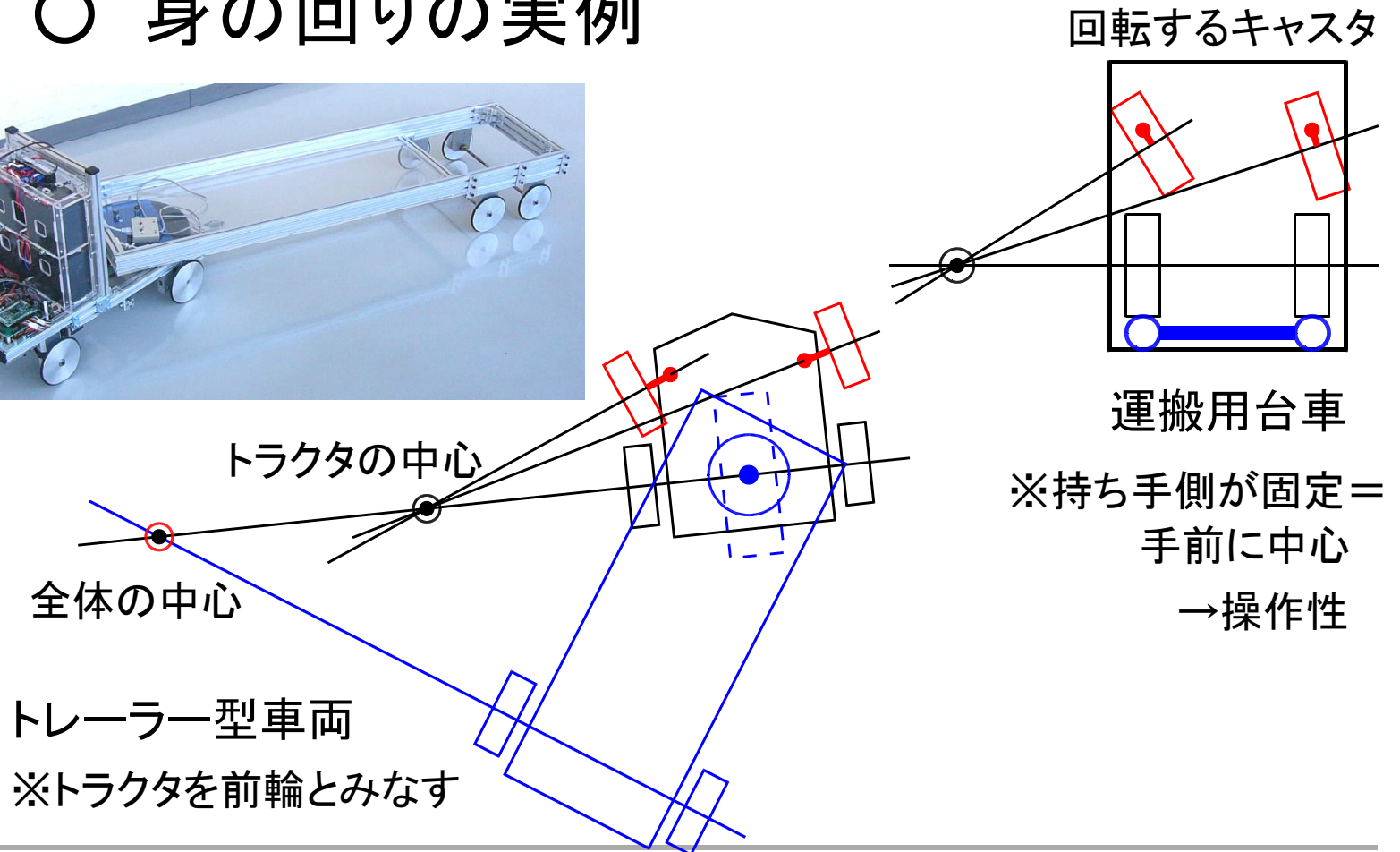
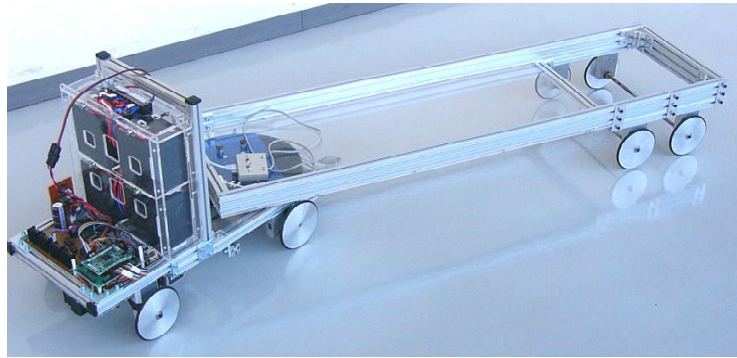
3輪車



フォークリフト

車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



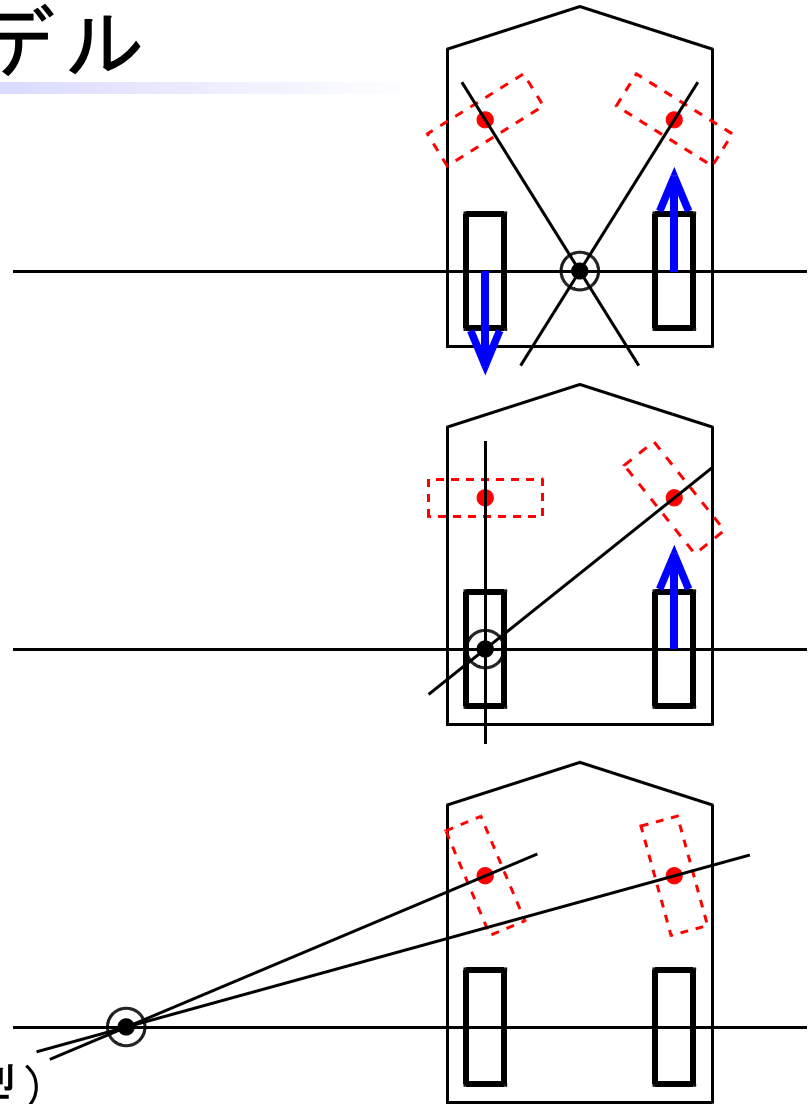
車輪移動ロボットモデル

○ 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

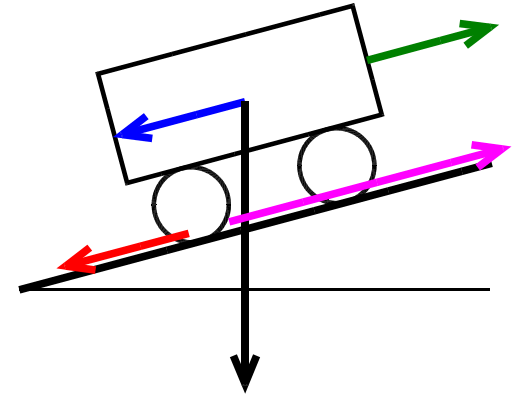
- ・ 最高速度
- ・ 最大推力

≥ 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

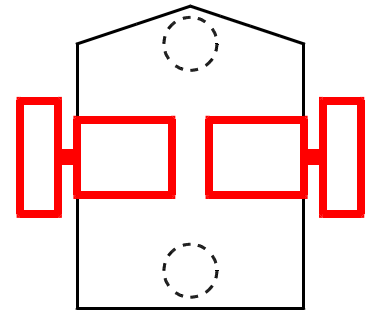
最大推力 ÷ 2

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

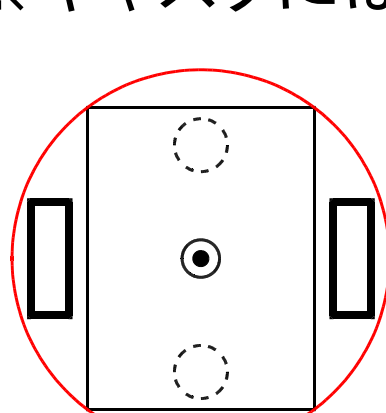
◇ 駆動輪の配置と運動性

- ・ 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。

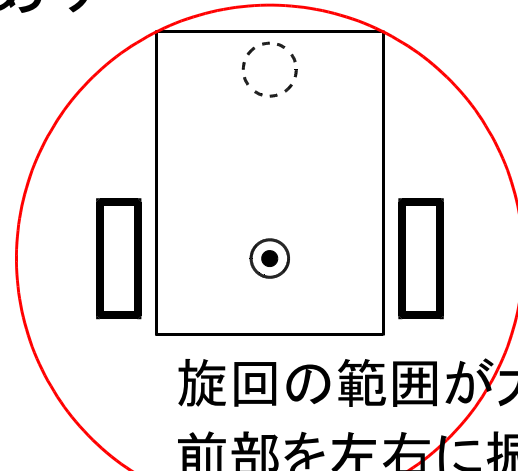
※キャスタには難あり

※質量も

中心に集める



車体寸法内で回る



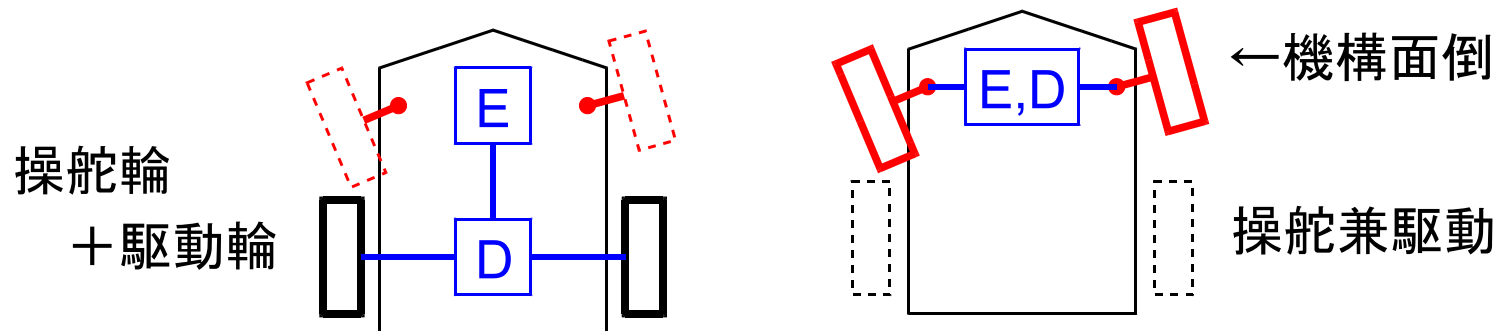
旋回の範囲が大きい
前部を左右に振る

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、

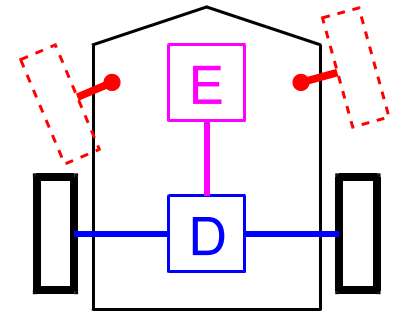
最高速度、最大推力を出せる動力源

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

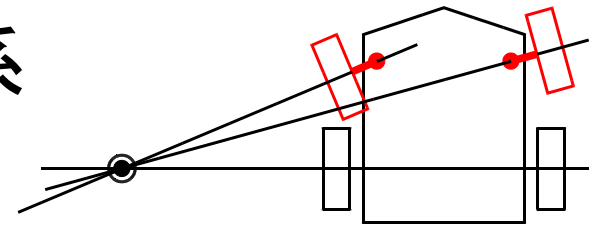


ステアリング型の構造と設計

○ 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

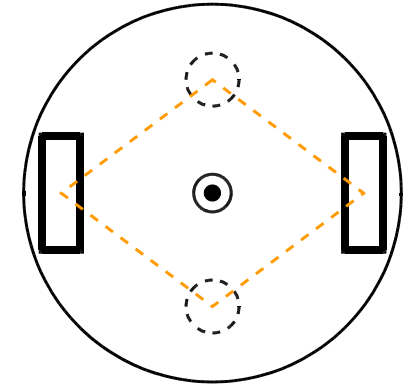
- ・ 作りやすさと制御性。
- ・ その場で旋回もできる小回りの良さ。

※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]

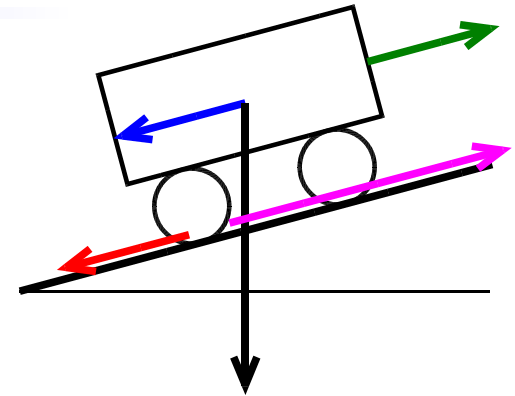
- ・路面の**抵抗**（整地だと小さい、悪路だと大きい）

- ・移動経路の傾斜による**重力の影響**

$$\text{質量[kg]} \times g(9.8) \times \sin(\text{傾斜角})$$

- ・**慣性力**＝加減速に必要な力

$$\text{質量[kg]} \times \text{加速度[m/s}^2\text{]}$$



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）

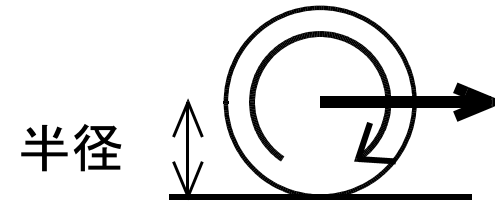
＝必要な動力 ÷ 減速機などの伝達効率

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

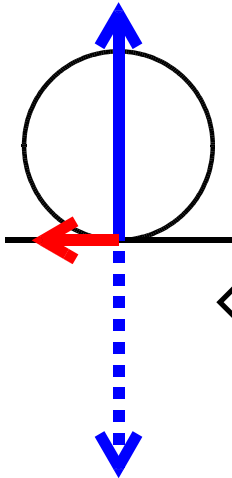
- ・ 減速比 = 車輪角速度[rad/s]
÷ モータ定格角速度[rad/s]

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

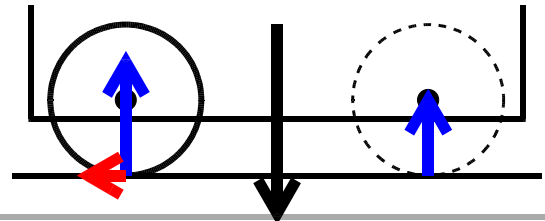
- ・ **摩擦力**[N] $\leq$ 摩擦係数 $\times$ **垂直抗力**[N]
- ・ 摩擦係数に依存（タイヤ素材などで工夫）



◇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 $\times g(9.8)$
- ・ 車輪が複数あると？

駆動輪の摩擦だけ推進に使える



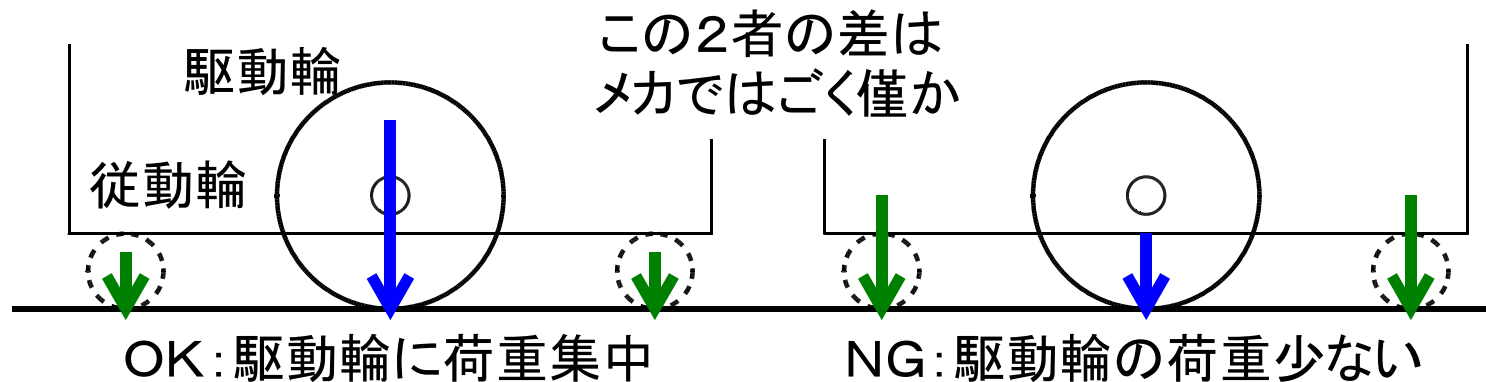
車輪移動ロボットの動力計算

○ 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。

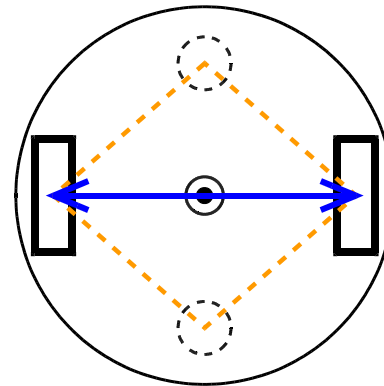
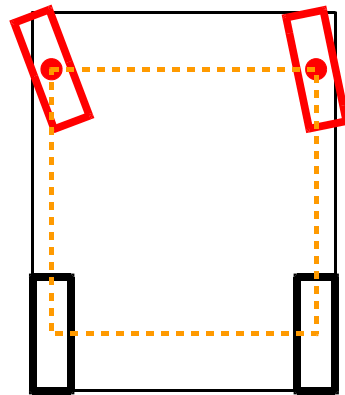


その他の検討事項

○ 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

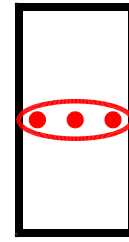
- ・幅は狭いほどよい、点接地するように。

◇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



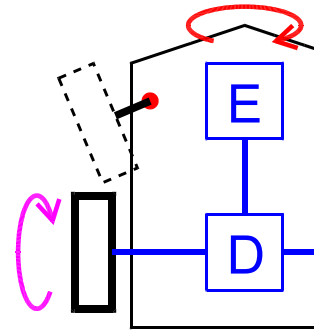
点と
みなせる



場所が
安定せず

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

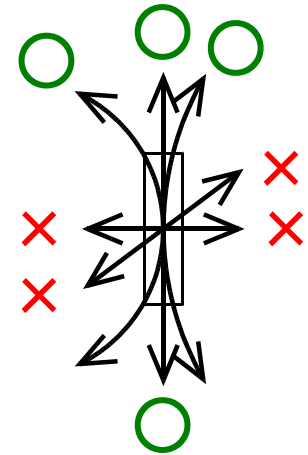
○ おさらい

◇ 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

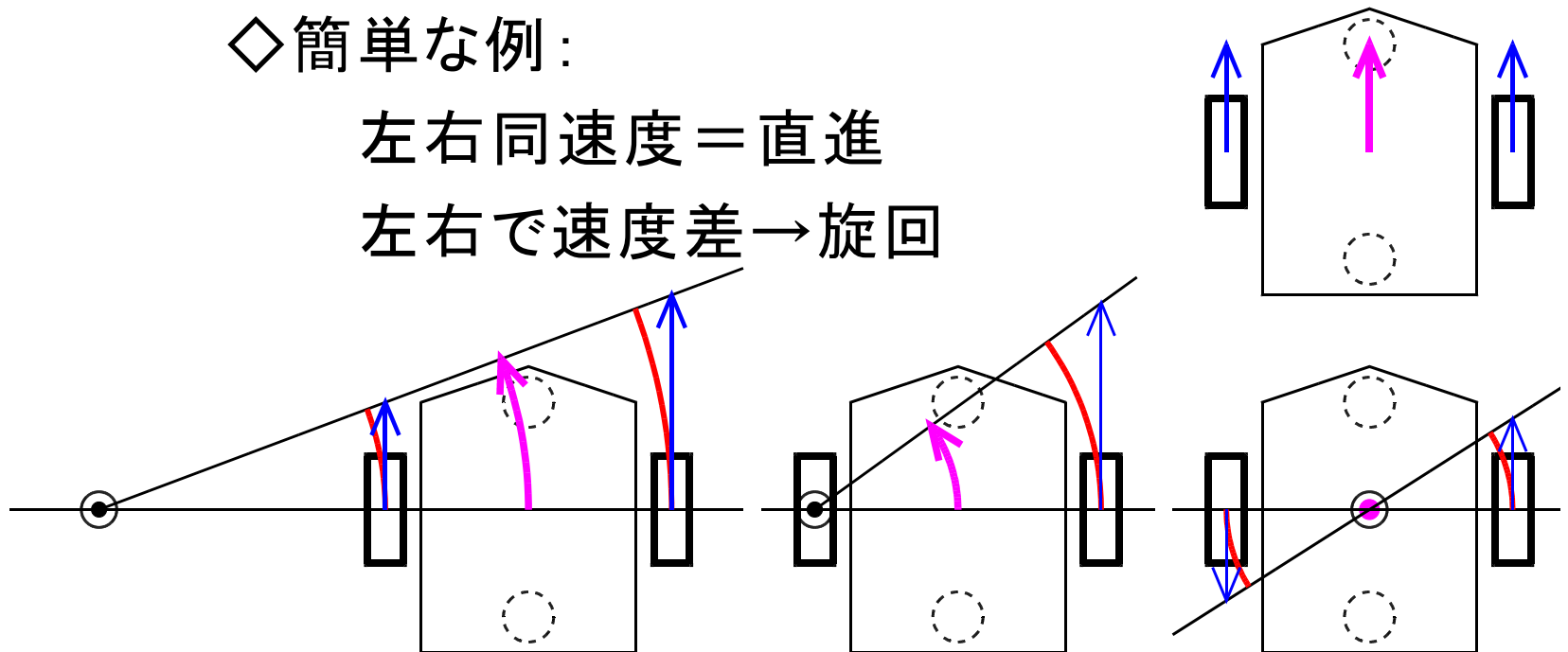
○ ポイント: 2輪の速度だけで決まる

◇ 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

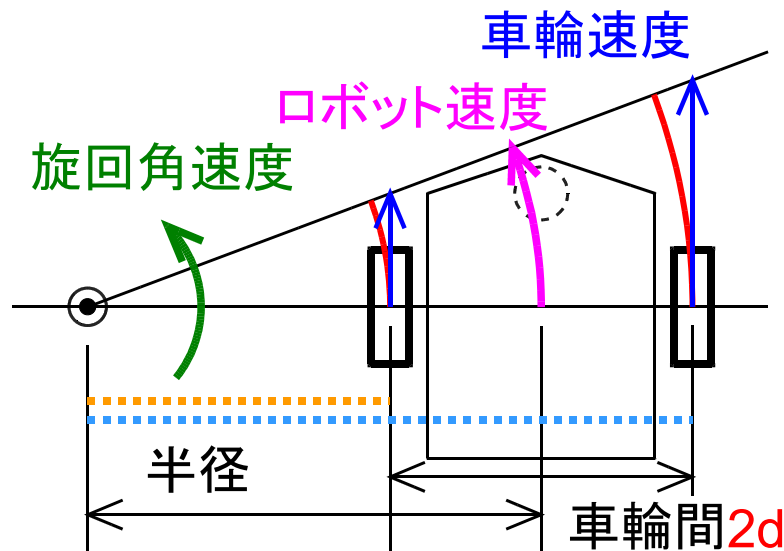


車輪移動ロボット(対向2輪)の基礎特性

○ 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

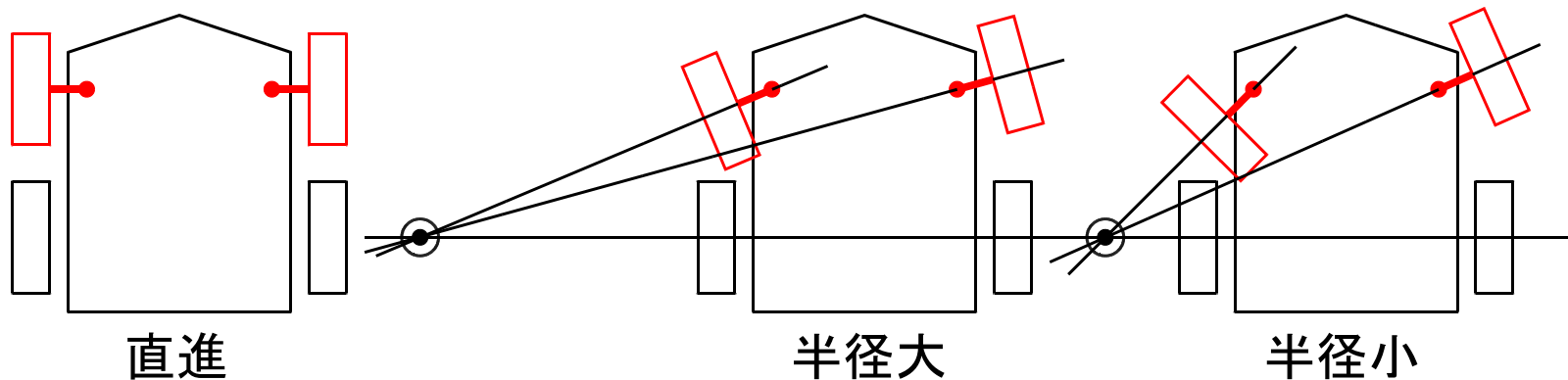
車輪移動ロボット(ステア)の基礎特性

○ 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

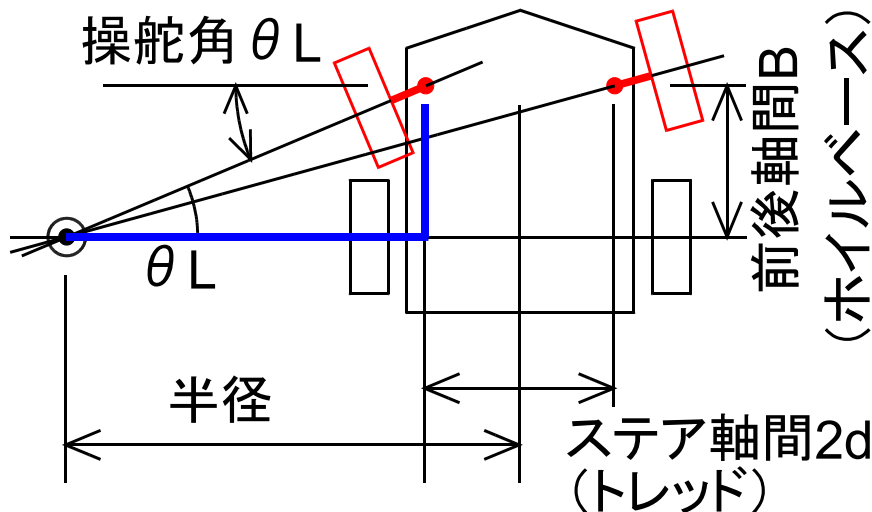
◇ 具体的な計算:

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

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

・ 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

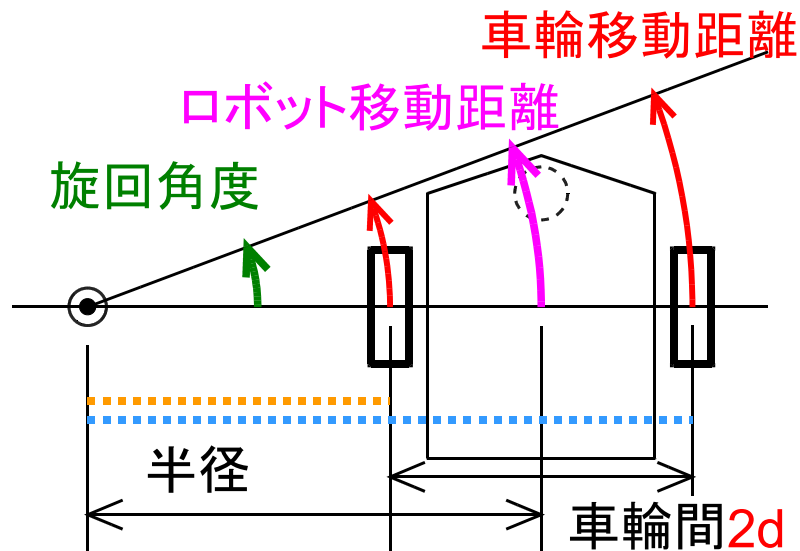
◇推定の考え方

- ・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

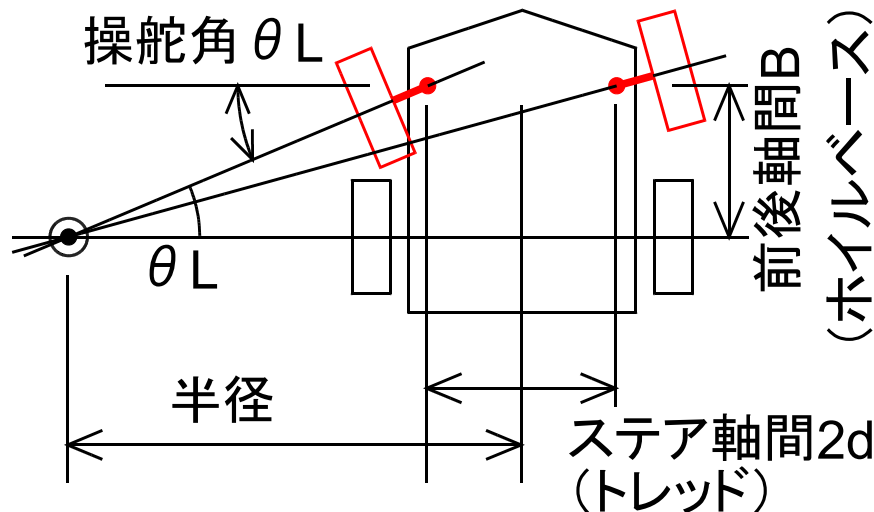


- ・ 円弧＝半径×中心角（公式）
- ・ 左車輪移動距離＝
(半径－d)×旋回角度
- ・ 右車輪移動距離＝
(半径＋d)×旋回角度
- ・ (左距離＋右距離)／2＝
半径×旋回角度＝ロボット移動
- ・ 旋回角度＝(右－左)／2d
- ・ 半径＝ロボット移動／旋回角度

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

・ 移動距離は一般的デフ
では、デフの入力で
計算

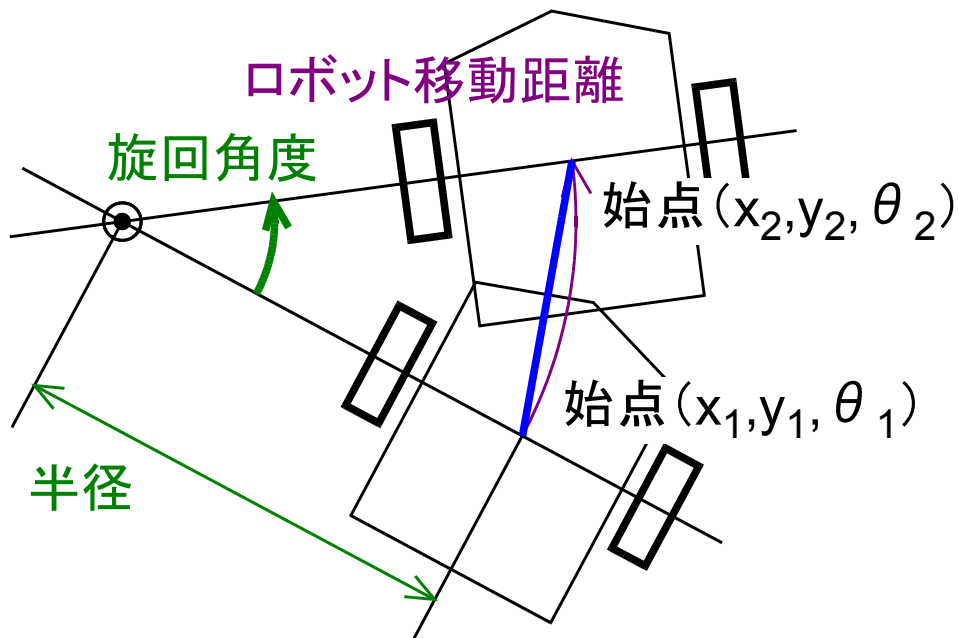
・ **旋回角度** $= \text{距離} / \text{半径}$

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：



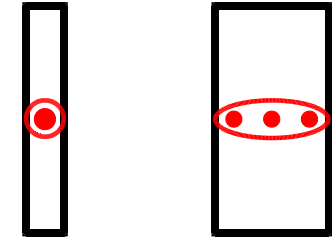
- ・座標 (x, y) 進行方向 θ
- ・ $\theta_2 = \theta_1 + \text{旋回角度}$
- ・ θ_1 , 旋回角度、半径から、
座標変化を計算、
→ x_2, y_2
※詳細は略
- ・直進のときは、別途座標変化を計算

車輪移動ロボットの自己位置推定

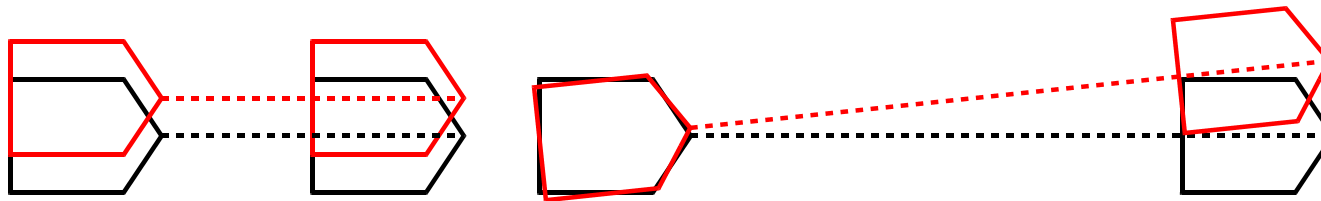
○ 推定の精度

◇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

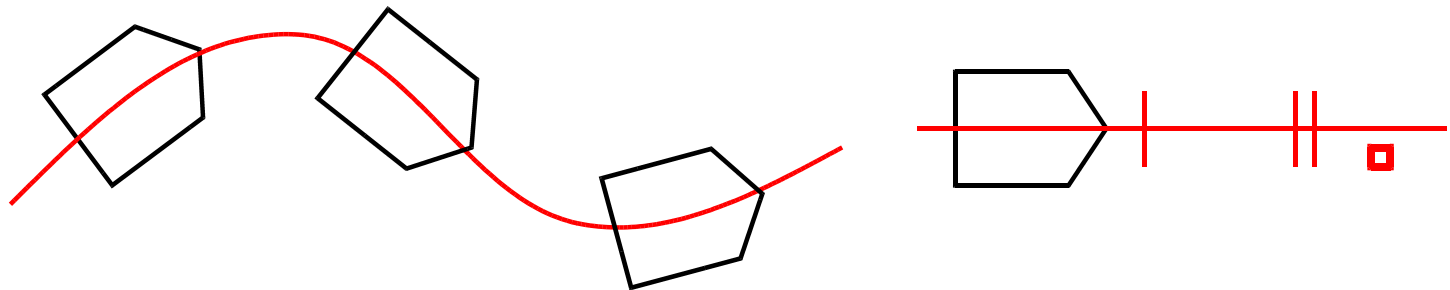
- ・ 高分解能で短距離なら十分有効。
※ロボットの制御には応答性と分解能が重要
- ・ 少し長くなると誤差が増大 → 壁に衝突etc

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

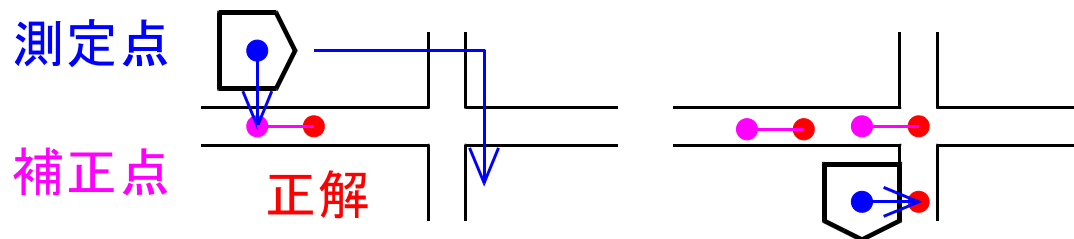
- ・車両の制御には精度、頻度が不足。
- ・建物の影などで誤差が出やすい。
- ・何らかの補正が必要。

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。

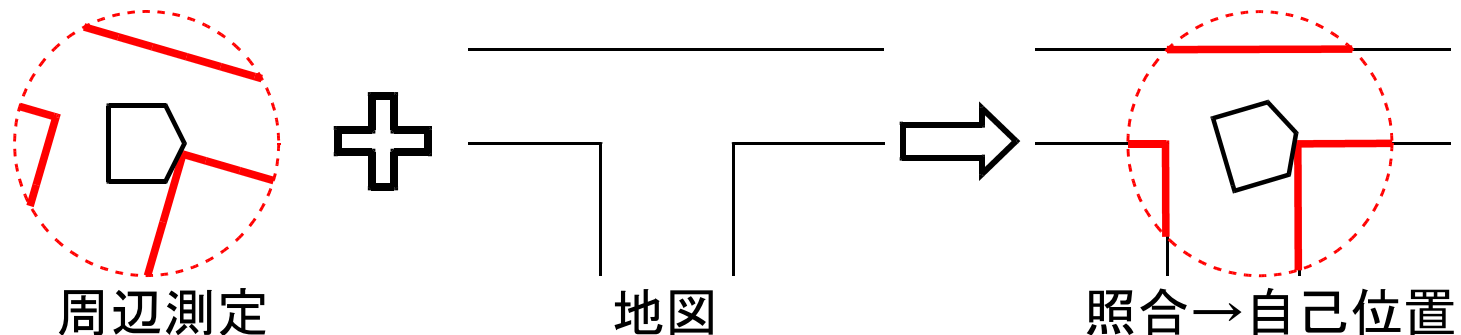


移動ロボットの位置情報

○ 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。

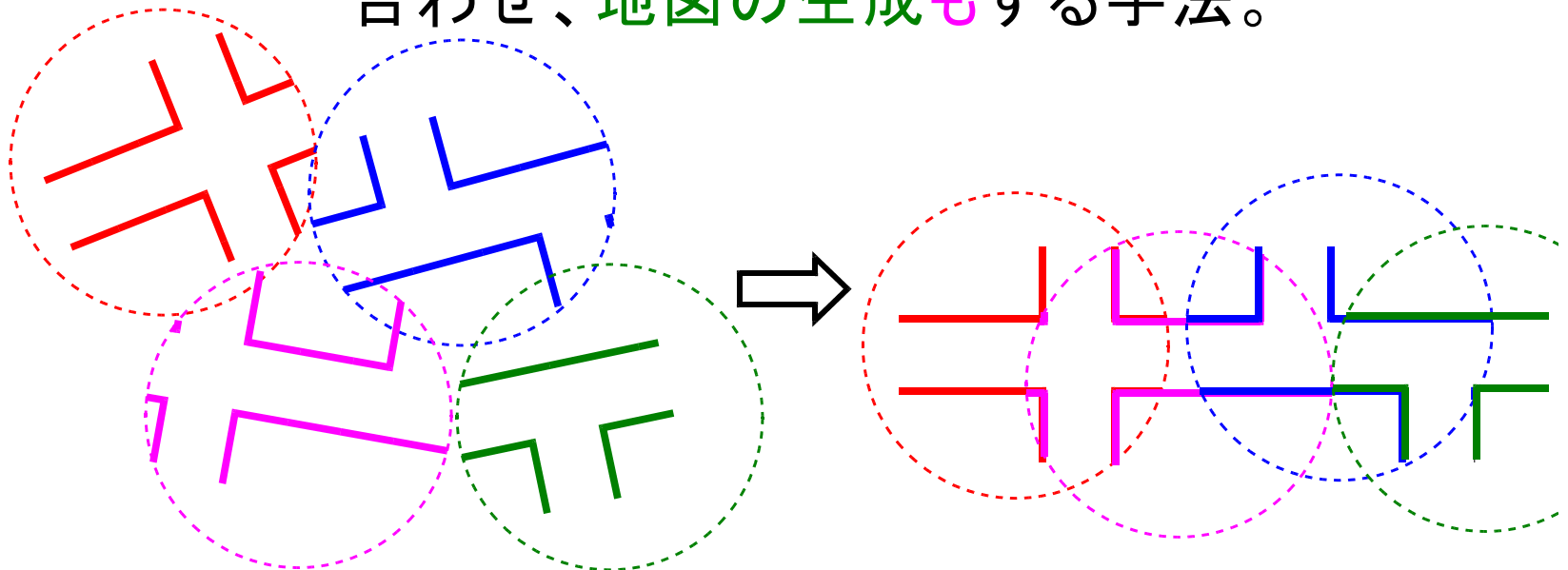


移動ロボットの位置情報

○ 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。

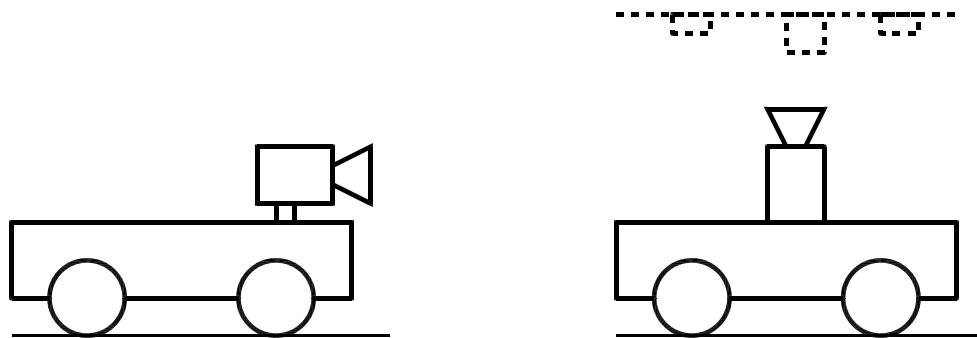


移動ロボットの位置情報

○ 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

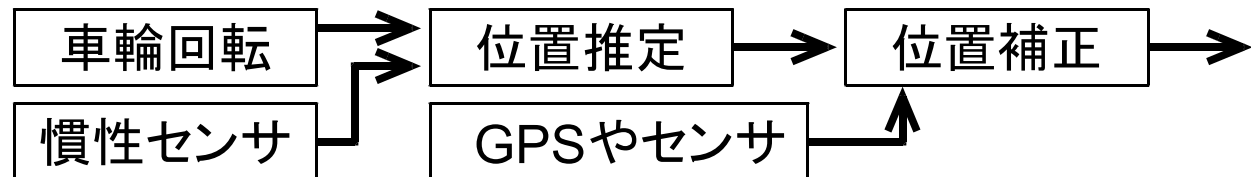
○ 絶対的な位置情報を併用する

◇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

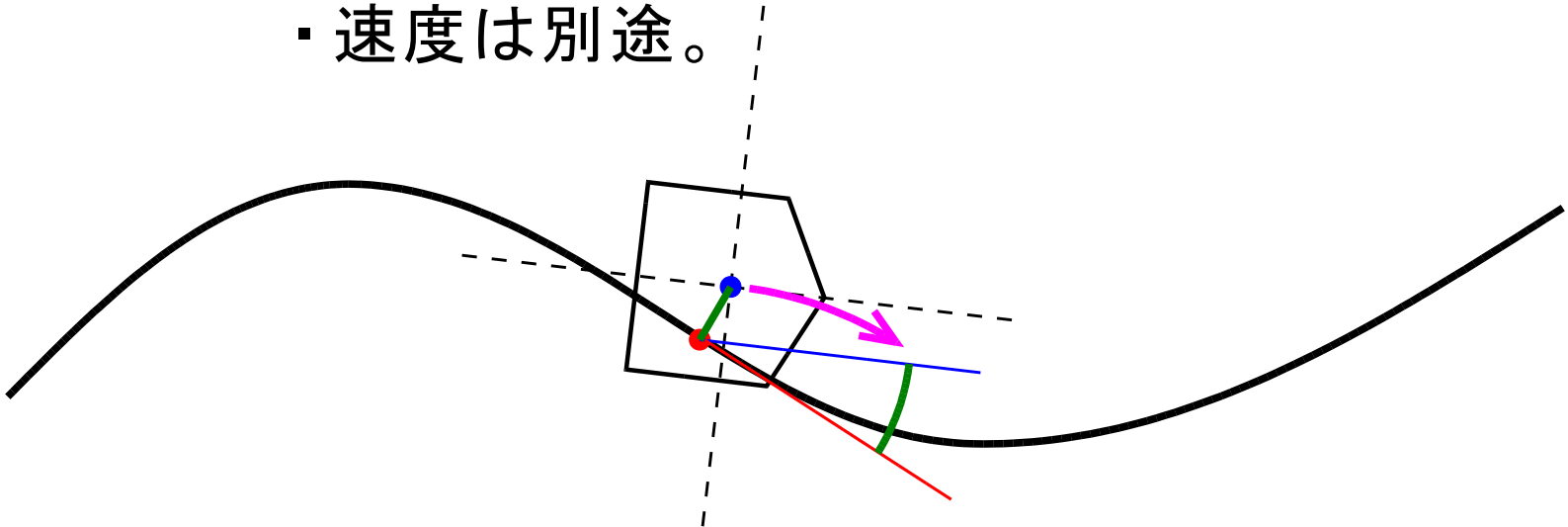
→ 局所的な走行制御

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。

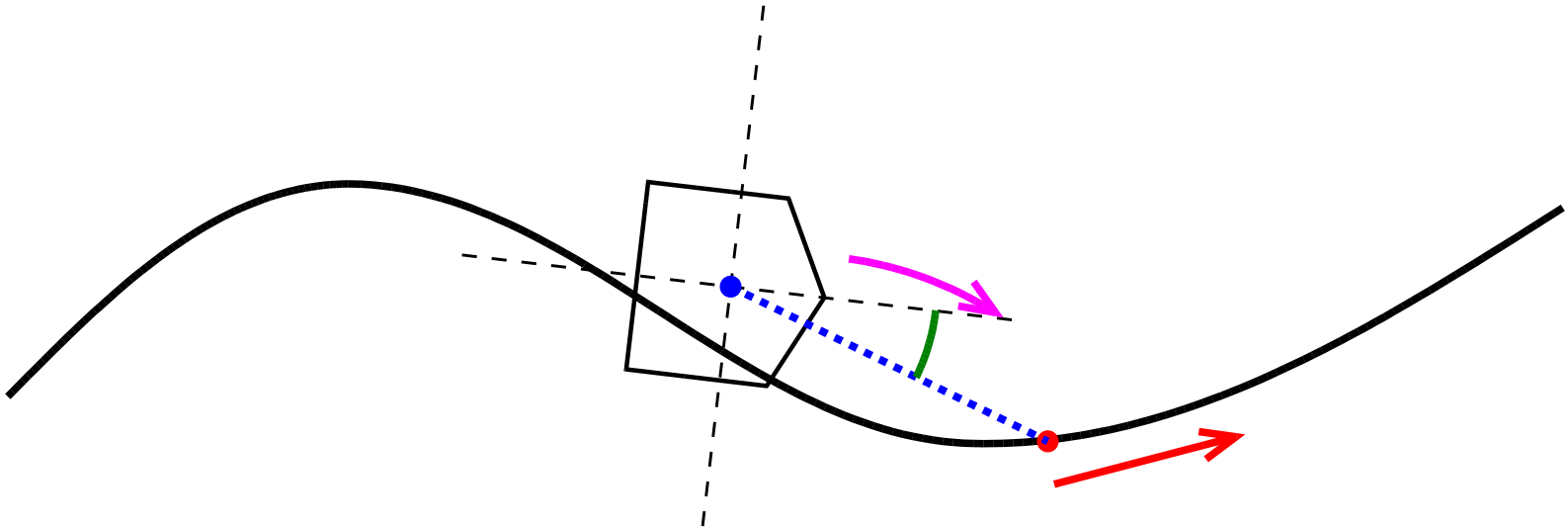


移動ロボットの制御

○ 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

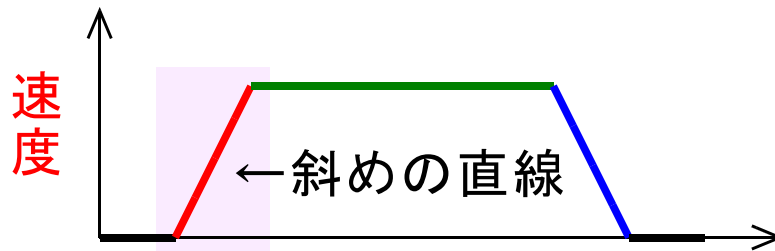


移動ロボットの制御

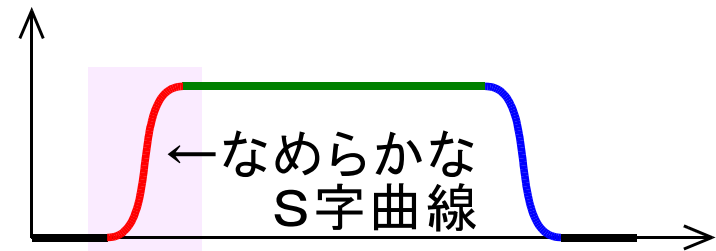
○ 経路に沿った走行

◇ 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



台形加減速



S字加減速

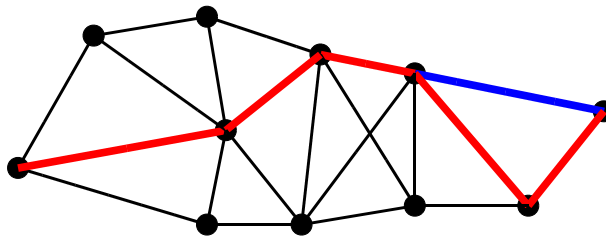
参考→C17 メカトロ基本法則

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

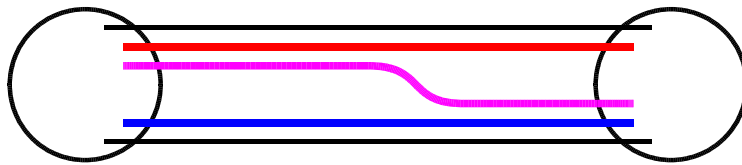
○ 経路の決定

◇指定した目的地までの経路（2）

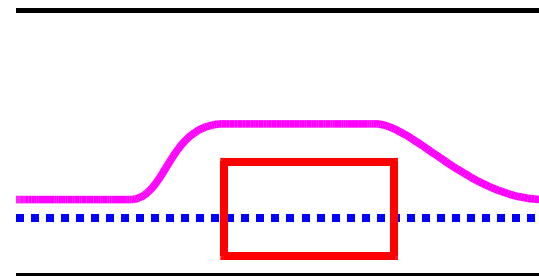
- ・経路情報のなかで、どこを通るのか。

※座標レベルの経路決定

- ・障害物があつたときの回避軌道の生成。



どこを通る？



障害物が予定経路上に

移動ロボットの制御

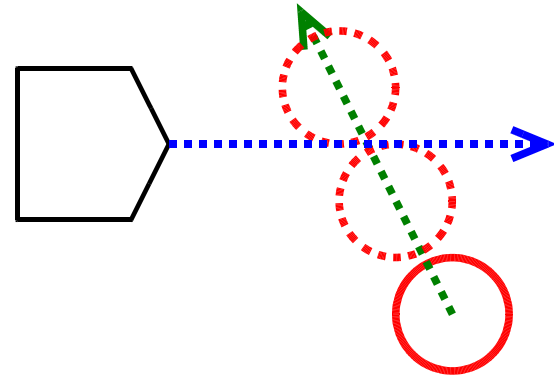
○ 障害物への対応

◇ 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。