

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24回

C24/Rev 1.0

トレーラー型ロボットの 開発と制御

仙台市地域連携フェロー

熊谷正朗

kumagai@mail.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

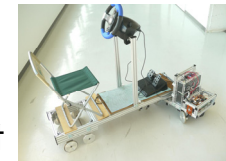
○ 牽引型車両の制御と実機開発

テーマ1:基礎編 ※参考:C20 (ダイジェスト)

- ・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:トレーラロボット

- ・トレーラロボット
- ・トレーラロボットの基礎検討
- ・トレーラロボットの特性と制御



C24 トレーラーロボットの開発と制御 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。

◇移動するロボット

- ・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。

C24 トレーラーロボットの開発と制御 Page. 3 基礎からのメカトロニクスセミナー

ロボットとは？

○ ロボットの要件 (私案)

- 1: メカトロニクス機器であること
- 2a: すでに**類似品がロボット**とされている
- 2b: 類似品が既存しない**新規のもの**に
「ロボット」と名前を付けて発表する
- 2c: 既存品を大幅に**高性能化**して
「ロボット」と名前を付けて発表する
- 3: 消費者に「そんなのロボットじゃない」と
思わせない

C24 トレーラーロボットの開発と制御 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

※(引)とした写真はネット画像の引用です

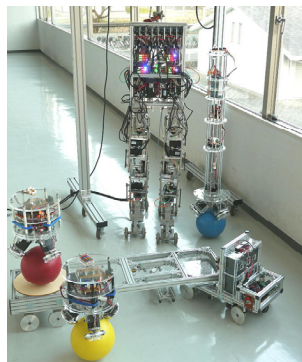
○ 地上を移動するロボット



レスキューロボ Quince (引)東北大田所研



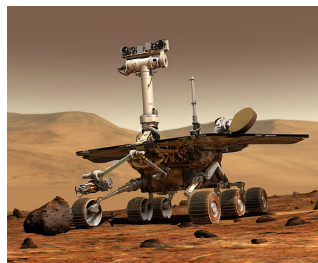
掃除ロボット (引)Robot社



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

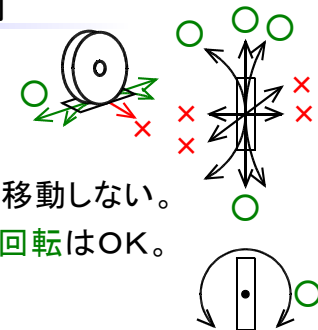
- ・ **平面上のみ** (それでもかなりの用途)

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



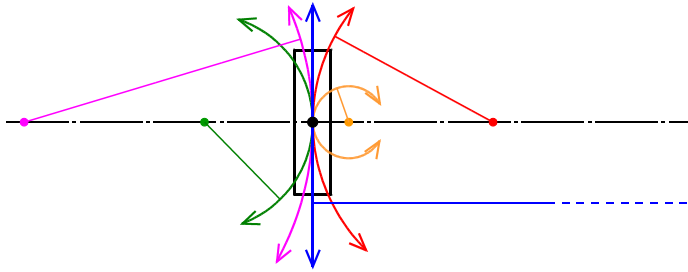
◇もしも滑らせると

- ・ 運動が不定になる(どう滑るかわからない)。
- ・ 車輪回転による運動計算と差が生じる。

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

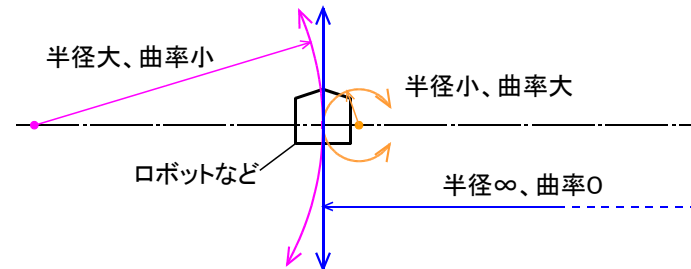
- ◇車輪は車軸の線上の一点を中心に円運動
 - ・直進は半径 ∞ 、その場は半径0とみなす。



車輪移動ロボット大原則

○ 旋回半径と曲率

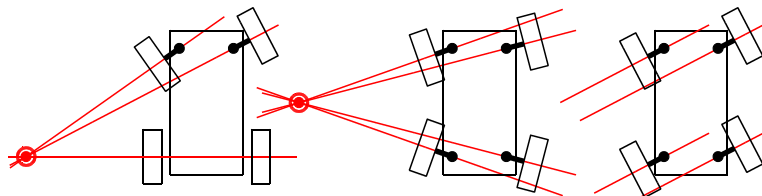
- ・旋回半径=(ロボットの代表点の)円運動の半径 (直進= ∞ 、その場=0)
- ・曲率= $1 \div$ 半径 (直進=0、その場= ∞)



車輪移動ロボット大原則

○ 車両の車軸の向きの制約

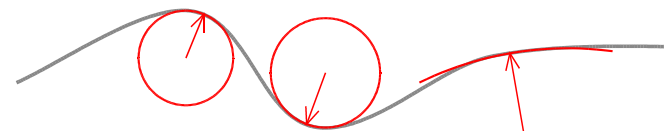
- ◇すべての車輪の車軸は1点で交わる
 - = 旋回中心
 - ・この点を中心に全ての車輪が円運動。
 - ※全て平行=直線運動



車輪移動ロボット大原則

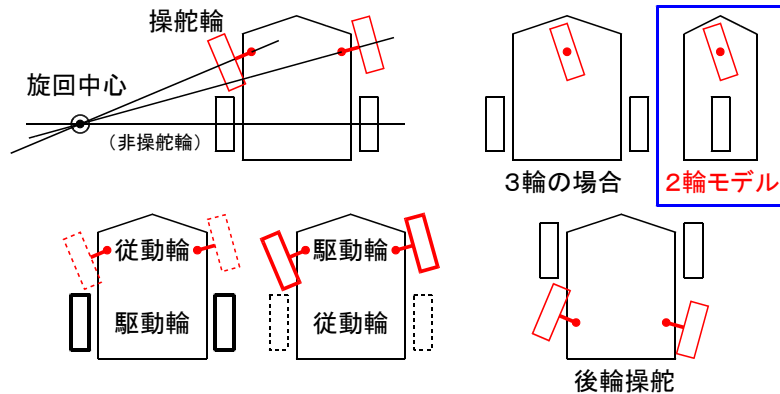
○ 曲線運動と旋回半径

- ・任意の曲線(直線含む)は、極短い部分をみれば、円の一部
 - 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。



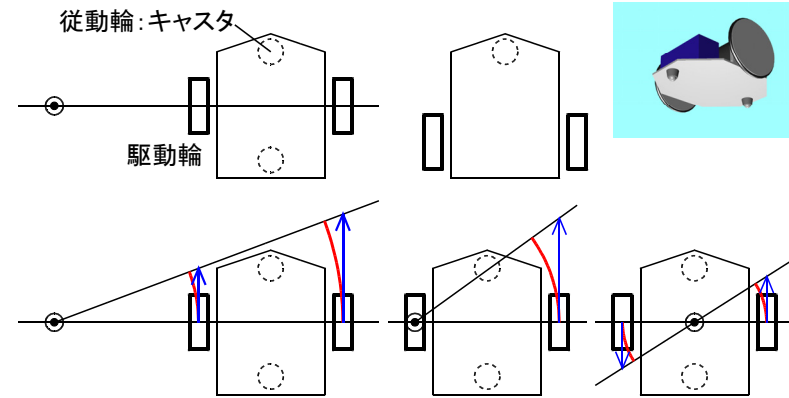
車輪移動ロボットモデル

○ 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)。
- ・駆動輪の速度比で旋回半径が決まる。

いずれも固定の車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

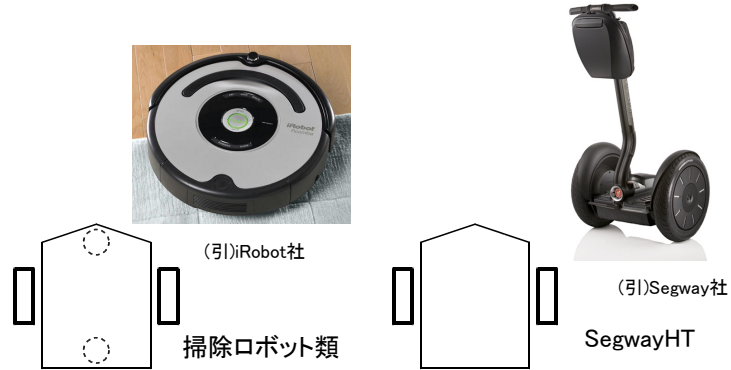
→動作のイメージには良い

◇それ以外は異なる

- ・対2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
- ・対2輪: 点接地に近い クロ: 面接地
- ・対2輪: 支持必要 クロ: クローラのみ
- ・対2輪: シンプル クロ: 複雑

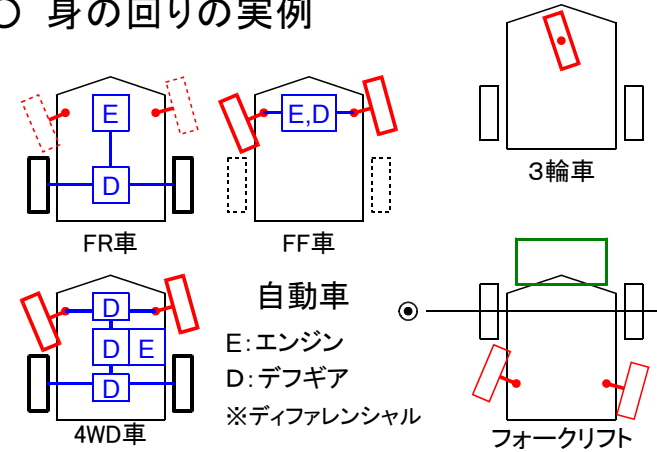
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



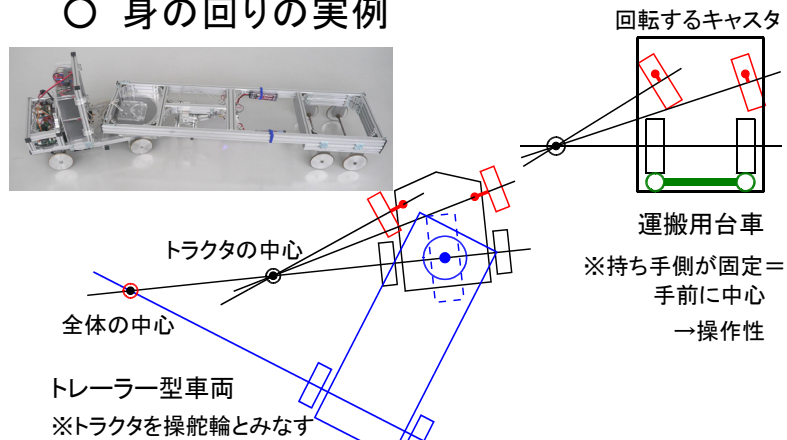
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



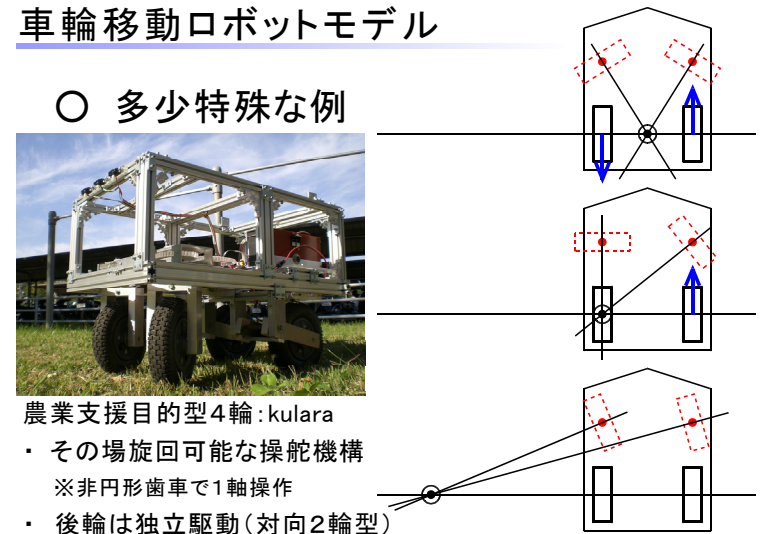
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



車輪移動ロボットモデル

○ 多少特殊な例



車輪移動ロボットの構造検討

○ 車輪移動の仕様

◇ 走行性能

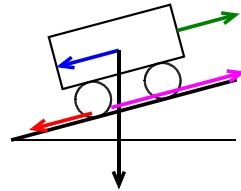
- ・ 最高速度
- ・ 最大推力

≥ 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)

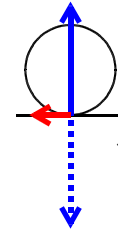


車輪移動ロボットの構造検討

○ 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推力は出せない

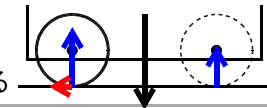
- ・ 摩擦力[N] ≤ 摩擦係数 × 垂直抗力[N]
- ・ 摩擦係数に依存 (タイヤ素材などで工夫)



◇ 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



対向2輪型の構造検討

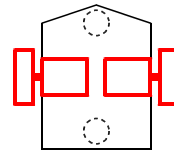
○ 同じ駆動系 × 2 + 支持キャスタ

◇ 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
- ・ バックラッシュ(ガタ)の影響が大きい。

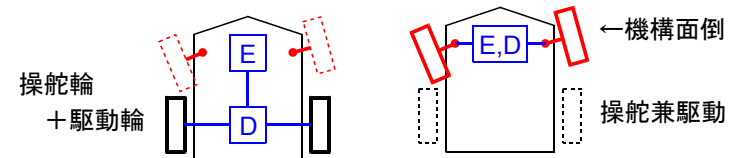


ステアリング型の構造検討

○ 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。

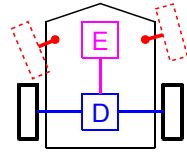


ステアリング型の構造検討

○ 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

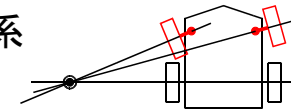


ステアリング型の構造検討

○ 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。

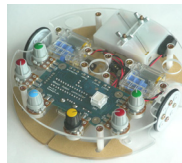


対向2輪型 と ステアリング型

○ 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2個必



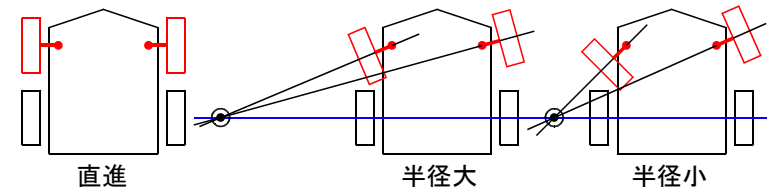
◇ ステアリング型の特徴

- × 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

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:

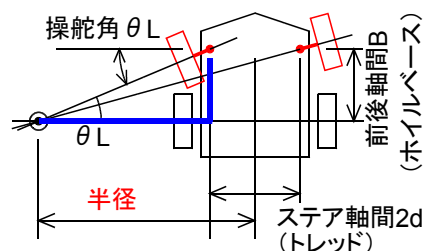


車輪移動ロボット(ステア)の基礎特性

○ 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

今回の目的

○ 牽引型車両の制御と実機開発

テーマ1: 基礎編

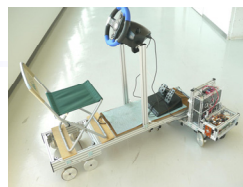
- ・ 移動するロボット
- ・ 車輪移動ロボットの基礎原理

テーマ2: トレーラロボット

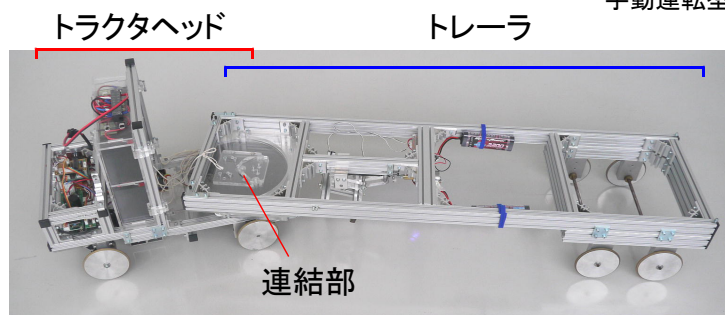
- ・ トレーラロボット
- ・ トレーラロボットの基礎検討
- ・ トレーラロボットの特性と制御

トレーラロボット

○ 開発したトレーラロボット



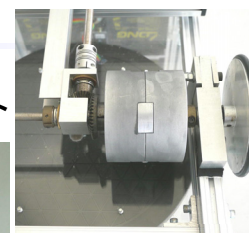
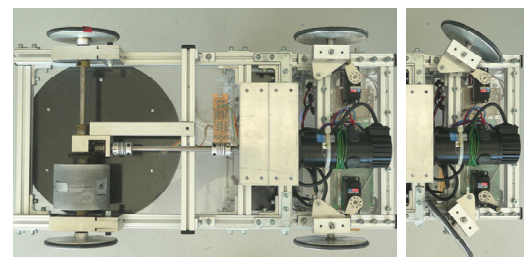
手動運転型



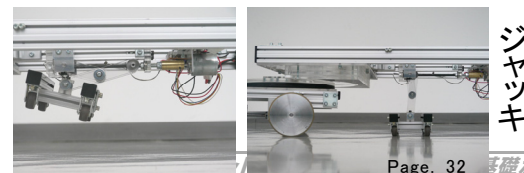
セミトレーラ型ロボット 本体一式

トレーラロボット

○ 開発したトレーラロボット



デフギア/操舵



ジャッキ

トレーラロボットの基礎検討

○ 開発の動機

◇ 学生さんの希望

- ・ある年、トラックをとても好きな学生さんが「**トレーラトラック型のロボットをつくりたい**」と言った。
- ・それ面白そう、と乗った。

◇ 実際の車両の縮小モデル

- ・「対向2輪型で引っ張っていい？」
- ・「先生、トレーラは**エンジン1個っすよ**」

トレーラロボットの基礎検討

○ 開発の技術要素

◇ ステアリング型車輪ロボット

- ・一般には**ステア型ロボットは避ける**。
- ※自己位置推定誤差 → 移動研究難
- ・自動車では一般的 ← 動力がエンジン

◇ デファレンシャルギア

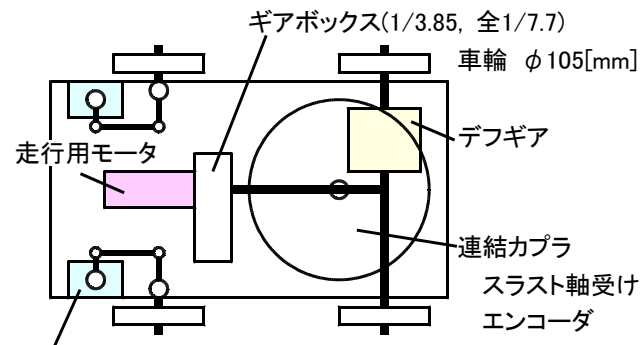
- ・市販品が見当たらない → 開発(最難関)

◇ 制御原理

- ・当の学生さんが**本物の免許**を取得

トレーラロボットの基礎検討

○ トラクタヘッドの構造



ステアリング用ラジコンサーボ

走行: 山洋DCサーボT511 (110W, 75V) ステア: 近藤KRS-2350HV

トレーラロボットの基礎検討

○ デファレンシャルギア(デフギア)

◇ 1動力・ステアリング型に必須

- ・ステア型は**駆動輪の間に**、旋回半径に応じて**速度差**が生じる。
- ・自動的に動力分配する仕掛けが必要。

◇ デフギアの特性

- ・ $([出力1] + [出力2]) / 2 = 入力回転$
- ※このロボだと、左右の車輪の平均がデフへの入力
- ・**1輪浮くと走れなくなる**という弱点

トレーラロボットの基礎検討

○ 必要なセンシング（走行制御用）

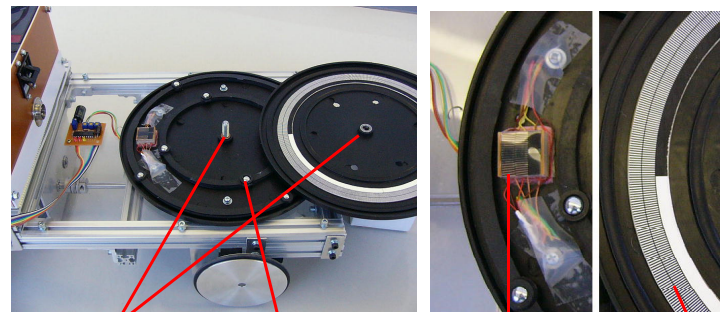
◇なにを制御に用いるか

- ・ 走行モータ(≒車輪)の回転→移動、車速
← モータのロータリーエンコーダ
- ・ ステアリングの操舵角→旋回半径、曲率
← ラジコンサーボ内蔵センサ
※ 指令するのみ
- ・ **トレーラとの連結角度**→**全体の制御**:重要
← 連結部に角度センサ

トレーラロボットの基礎検討

○ 連結角度センサ

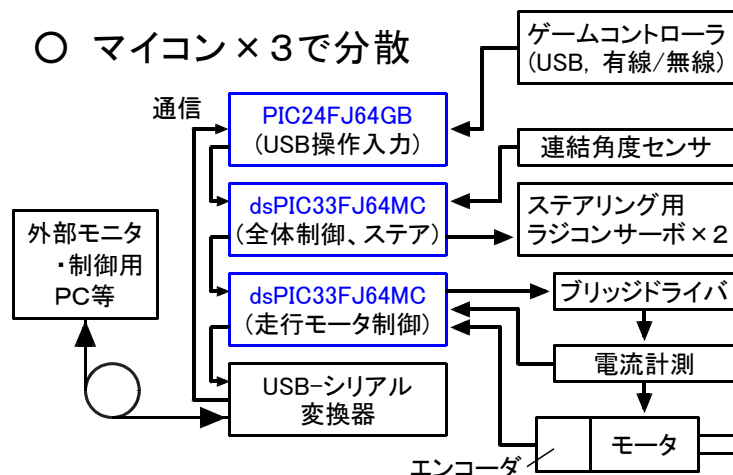
◇分解能 0.15[deg](4通倍), 荷重20[kg](公称値)



回転軸 スラスト軸受部 マスク+反射センサ パターン

トレーラロボットの制御系(ハード)

○ マイコン×3で分散



トレーラロボットの制御

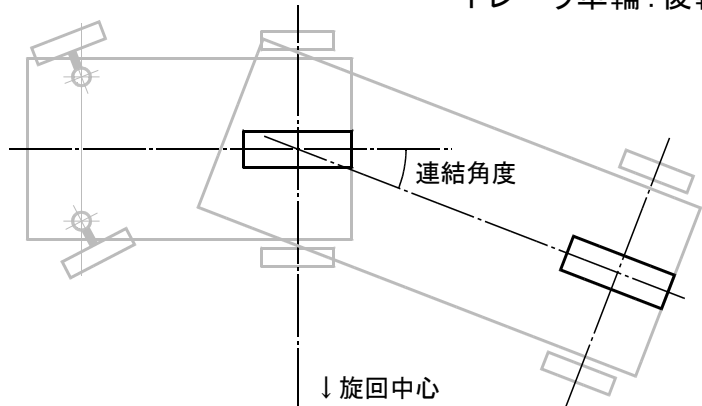
○ 走行に関わる制御

- ◇車速制御 ≒ 走行モータの速度制御
- ◇トラクタの走行制御
・ 車速 + 曲率(1/旋回半径) → 前述
- ◇トレーラ**全体の走行制御**
・ 難しいとされる(実車では「牽引」の免許)
・ 前進: 巻き込みは大きいが付いてくる
後退: 普通の感覚で操作できない
→ **まっすぐ下がることすら大変**

トレーラロボットの制御

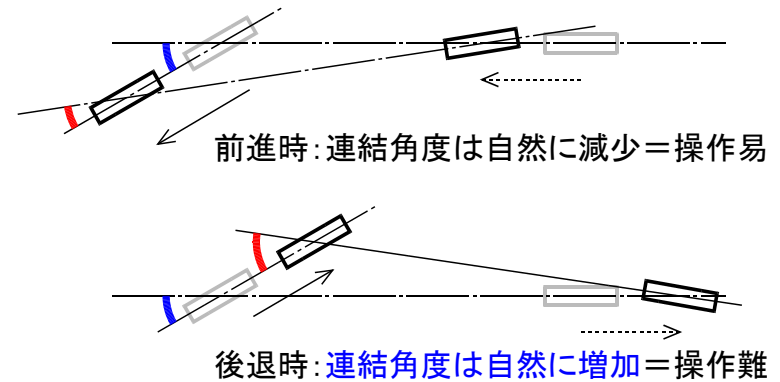
○ トレーラの2輪モデル

トラクタ: 前輪
トレーラ車輪: 後輪



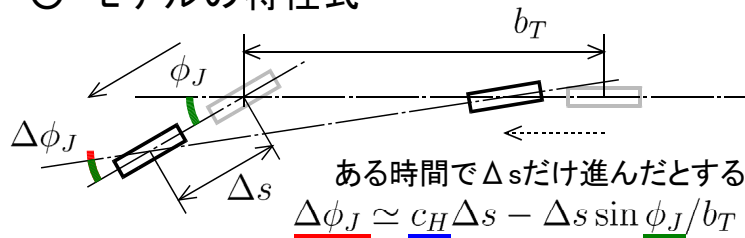
トレーラロボットの制御

○ 前進と後退のモデル (参考: 自転車、バイク)



トレーラロボットの制御

○ モデルの特性式



ある時間で Δs だけ進んだとする

$$\Delta\phi_J \simeq c_H \Delta s - \Delta s \sin \phi_J / b_T$$

連結角の変化は **ヘッド曲率** と **現在の角度** で決まる。
 ※曲率 → Page10

※ $c_H \Delta s$: ヘッドの曲率のためにヘッドの向きが変わる量
 ※ $\sin \phi_J / b_T$: 現在の角度が大きいほど変わりやすい & トレーラ長が短いほど変わりやすい

トレーラロボットの制御

○ モデルの特性式

$$\Delta\phi_J \simeq c_H \Delta s - \Delta s \sin \phi_J / b_T$$

連結角の変化は **ヘッド曲率** と **現在の角度** で決まる。

$$c_H = \frac{\Delta\phi_J}{\Delta s} + \frac{\sin \phi_J}{b_T} \quad c_H = \frac{\dot{\phi}_J}{v} + \frac{\sin \phi_J}{b_T}$$

◇ヘッド曲率の設定:

- ・ **連結角の目標変化速度** ÷ **車両の速度**
- ・ **sin(連結角)** ÷ **トレーラの長さ**

で計算する = **連結角を操作できる**

トレーラロボットのアプリケーション

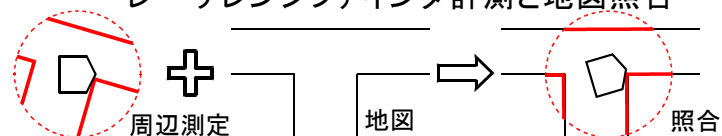
○ 応用先と必要技術

- ◇自動運転化
 - ・物流拠点、港湾内、フェリーへの搭載等
- ◇屋内搬送
 - ・「運んでいって台車ごとおいてくる」用途例)工場内部品供給、病院内配膳
- ◇必要技術
 - ・経路走行、ナビゲーション、障害回避
 - ・自動連結（連結機構+連結方法）

トレーラロボットのアプリケーション

○ 自動走行に必要な技術

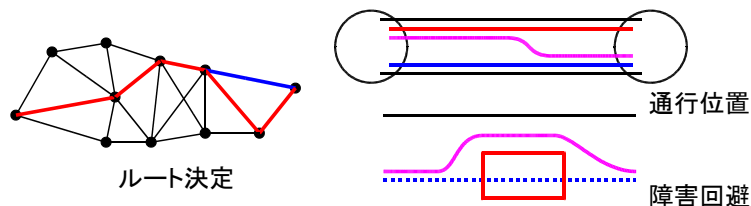
- ◇目標軌道のセンシング
 - ・床面に各種ライン+ラインセンサ
 - ・自己位置推定↓と数値軌道との照合
- ◇自己位置推定
 - ・車輪の回転、センサ等による座標推定
 - ・レーザレンジファインダ計測と地図照合



トレーラロボットのアプリケーション

○ 自動走行に必要な技術

- ◇経路計画(ナビゲーション)
 - ・現在地から目的地までの経路選択
 - ・経路内の通行位置+障害物の回避



トレーラロボットのアプリケーション

○ これまでの開発 (+今年予定)

- ◇自動走行
 - ・レーザレンジファインダを用いた自己位置推定と自動走行、搬送
- ◇自動連結
 - ・連結機構(連結部+ジャッキ)
 - ・トレーラの位置認識→自動連結
- ◇その他
 - ・トレーラに積載機能、手動運転化

まとめ

○ 車輪移動ロボットの原理

- ・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。

まとめ

○ トレーラー型ロボット

- ・牽引型であるという課題
→ 全体を2輪モデルとして表現、制御
- ・ステアリング型の車輪ロボット
→ メカ的な複雑さ
- ・「つくりたい」でつくるロボット開発
→ 目的を果たせるメカを作ること／
それを動かす回路・ソフトを作ること／
動作を表す数学モデルを用意すること