

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



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の一種
- ・歩行ロボットも移動ロボット。

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

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

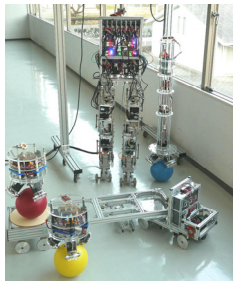
○ 地上を移動するロボット



レスキューロボ Quince (引)東北大田所研



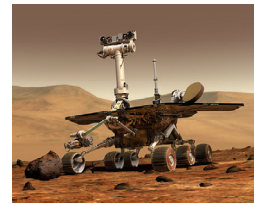
掃除ロボット
(引)Robot社



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

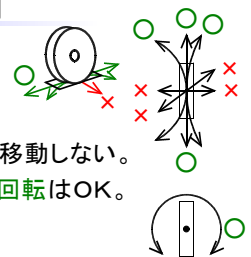
- ・**平面上のみ** (それでもかなりの用途)

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

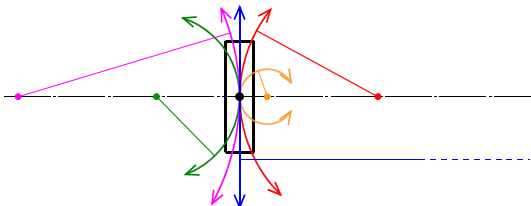


◇もしも滑らせると

- ・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違が生じる。

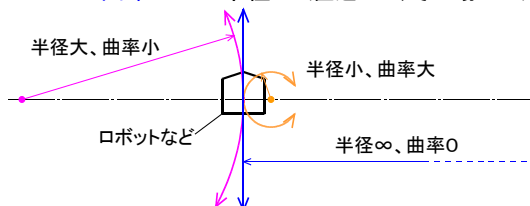
車輪移動ロボット大原則

- 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。



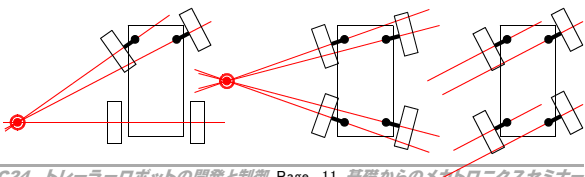
車輪移動ロボット大原則

- 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



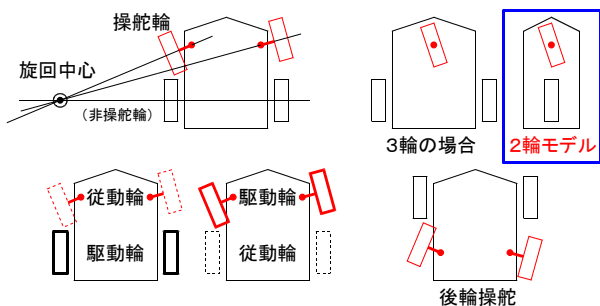
車輪移動ロボット大原則

- 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。



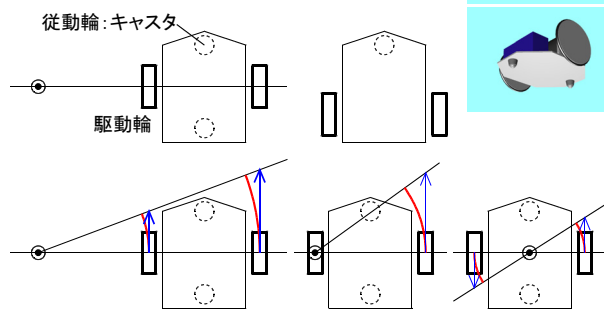
車輪移動ロボットモデル

- 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

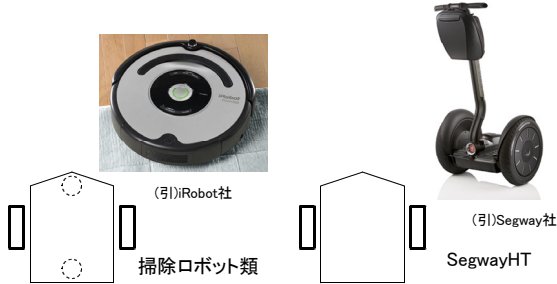
- ステアリング型 と 対向2輪型
 - ◇ ステアリング型
 - ・ 操舵輪がある。車軸は旋回中心を向く。
 - ・ 操舵輪の方向で旋回半径が決まる。
 - ◇ 対向2輪型
 - ・ 車軸が同軸で固定の駆動輪が2個。
 - ・ 車体を支えるための従動輪(キャスタ)。
 - ・ 駆動輪の速度比で旋回半径が決まる。
- いずれも固定の車輪の軸上に中心がある。

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

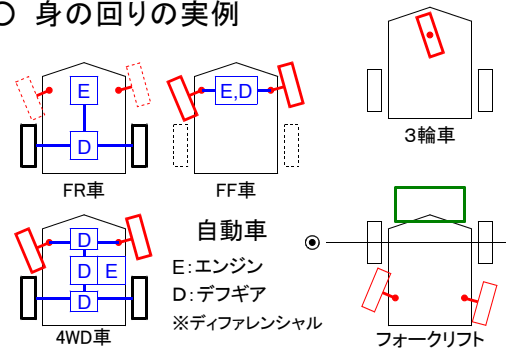
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの事例



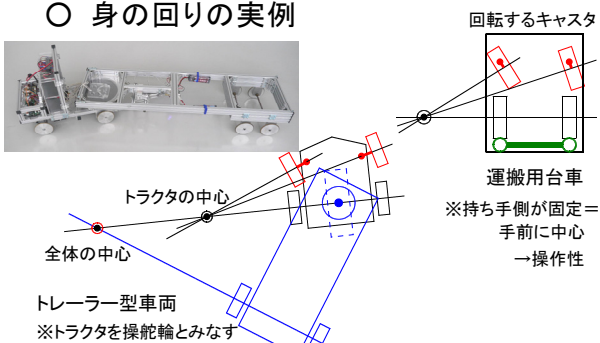
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの事例



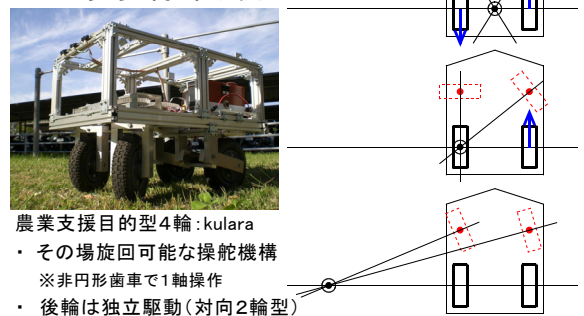
車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの事例



車輪移動ロボットモデル

○ 多少特殊な例

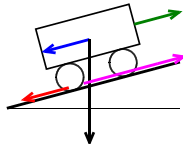


車輪移動ロボットの構造検討

○ 車輪移動の仕様

- ◇ 走行性能
 - ・ 最高速度
 - ・ 最大推力
$$\geq \text{走行時に生じる力}$$

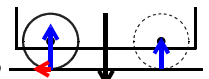
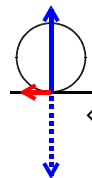
$$= \text{各種抵抗、慣性力、登坂時重力}$$
- ◇ 旋回性能
 - ・ 曲線(円弧)の最小旋回半径
 - (・ 曲率変化の応答性)



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

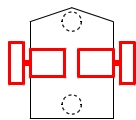
- ◇ 車輪と路面の摩擦力以上の推力は出せない
 - ・ $\text{摩擦力}[\text{N}] \leq \text{摩擦係数} \times \text{垂直抗力}[\text{N}]$
 - ・ 摩擦係数に依存 (タイヤ素材などで工夫)
 - ◇ 垂直抗力
 - ・ 車輪が地面を押す力 (に対して地面が押す力)
 - ・ 1輪車なら、全体質量 $\times g(9.8)$
 - ・ 車輪が複数あると?
- 駆動輪の摩擦だけ推進に使える



対向2輪型の構造検討

○ 同じ駆動系×2 + 支持キャスタ

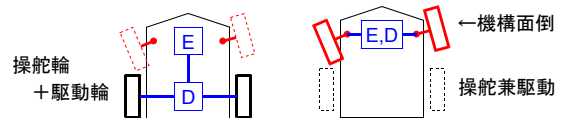
- ◇ 必要な走行動力系
 - ・ 概ね、
 - 最高速度 $+ \alpha$ の車輪速度
 - 最大推力 $\div 2$
 の同等な駆動系を左右に対称配置。
- ・ 速度制御の細かさ、滑らかさが必要
 - ← 速度差で走り方が変わる
- ・ バックラッシュ(ガタ)の影響が大きい。



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。

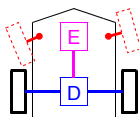


ステアリング型の構造検討

○ 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

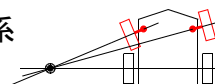


ステアリング型の構造検討

○ 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



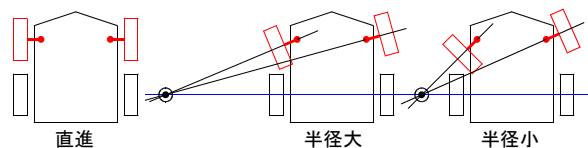
◇ ステアリング型の特徴

- × メカが複雑(ステア、デフギヤ)
- ? 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:

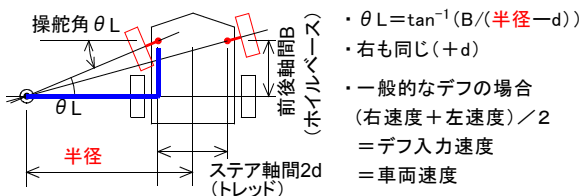


車輪移動ロボット(ステア)の基礎特性

○ 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

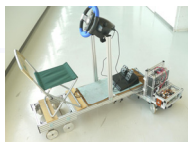
- ・ 移動するロボット
- ・ 車輪移動ロボットの基礎原理

テーマ2: トレーラロボット

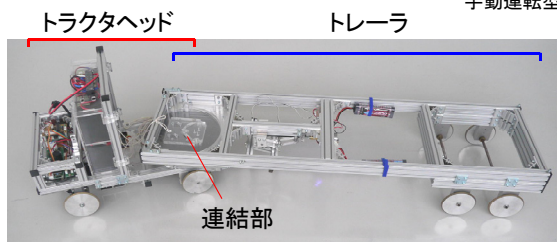
- ・ トレーラロボット
- ・ トレーラロボットの基礎検討
- ・ トレーラロボットの特性と制御

トレーラロボット

○ 開発したトレーラロボット



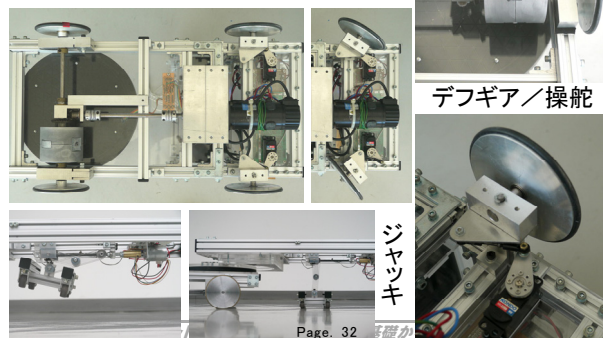
手動運転型



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



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

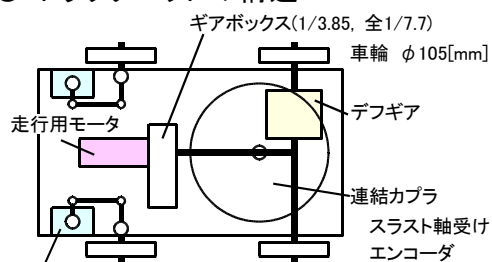
- ・市販品が見当たらない → 開発(最難関)

◇ 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

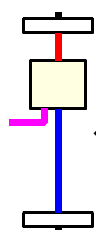
走行:山洋DCサーボT511 (110W, 75V) ステア:近藤KRS-2350HV

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。



◇ デフギアの特徴

- ・ $([出力1] + [出力2]) / 2 = 入力回転$
- ※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)

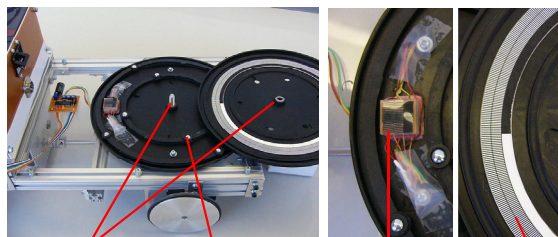
◇ なにを制御に用いるか

- ・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

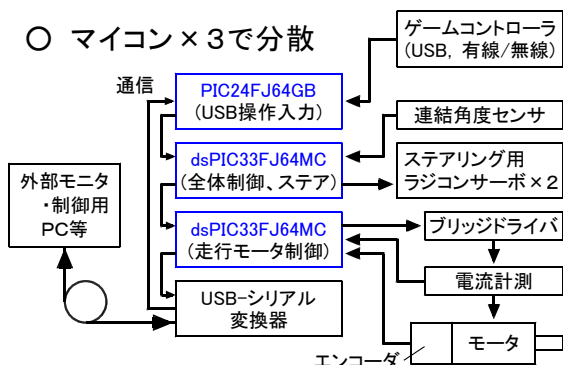
◇ 分解能 0.15[deg](4通倍), 荷重20[kg](公称値)



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

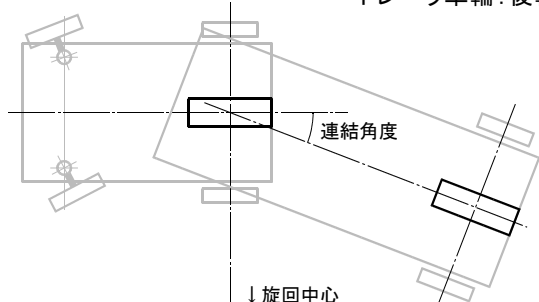
- ・難しいとされる(実車では「牽引」の免許)
- ・前進: 巻き込みは大きいが付いてくる
- ・後退: 普通の感覚で操作できない

→**まっすぐ下がることすら大変**

トレーラロボットの制御

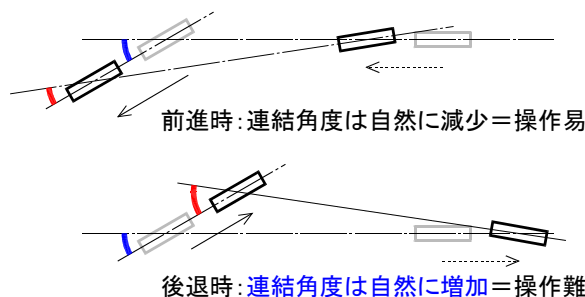
○ トレーラの2輪モデル

トラクタ: 前輪
トレーラ車輪: 後輪



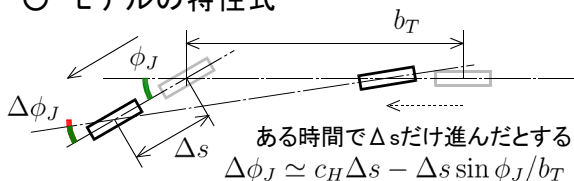
トレーラロボットの制御

○ 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

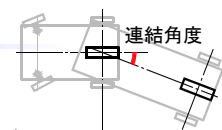
$$\Delta\phi_J \simeq c_H \Delta s - \Delta s \sin \phi_J / b_T$$

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かほど変わりやすい & 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

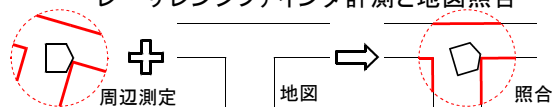
○ 応用先と必要技術

- ◇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

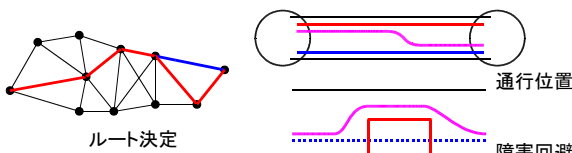
- ◇目標軌道のセンシング
 - ・ 床面に各種ライン + ラインセンサ
 - ・ 自己位置推定 ↓ と数値軌道との照合
- ◇自己位置推定
 - ・ 車輪の回転、センサ等による座標推定
 - ・ レーザレンジファインダ計測と地図照合



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、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