

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

C24/Rev 1.0

第24回

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

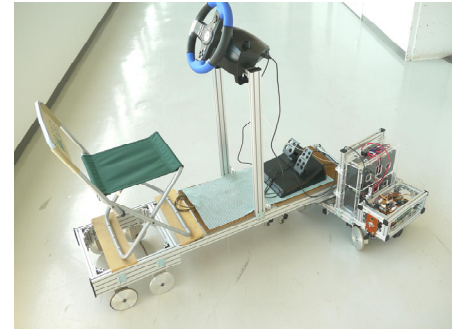
○ 牽引型車両の制御と実機開発

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的一种
- ・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

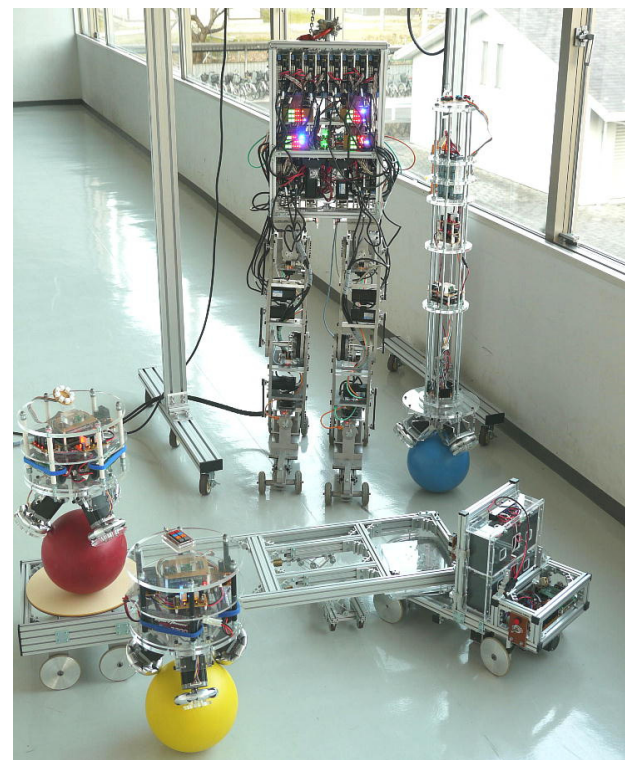
○ 地上を移動するロボット



レスキューロボ Quince (引)東北大田所研



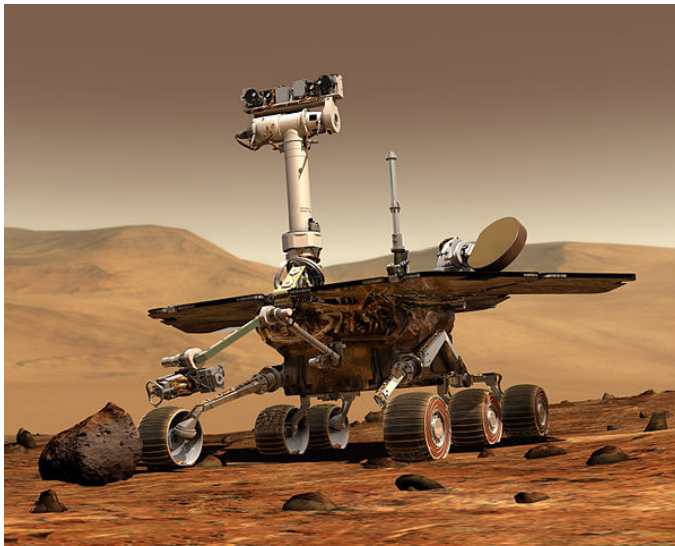
掃除ロボット
(引)iRobot社



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

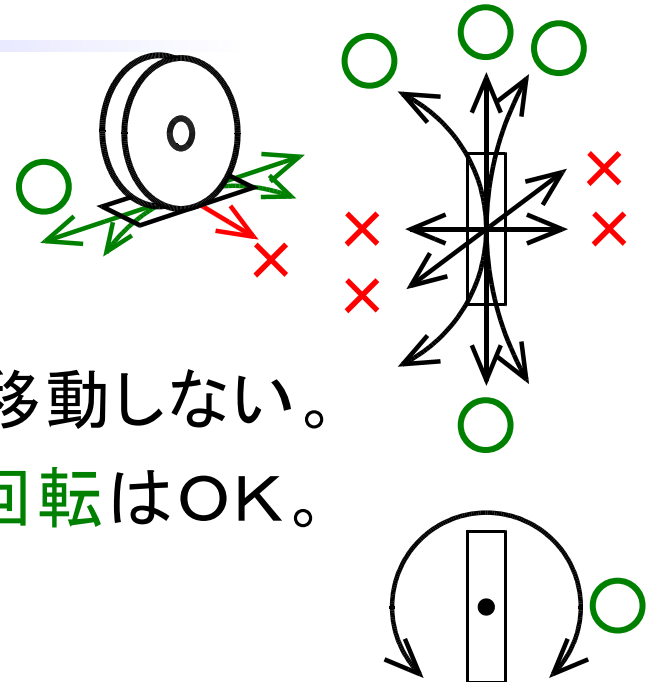
- ・ **平面上のみ**（それでもかなりの用途）

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

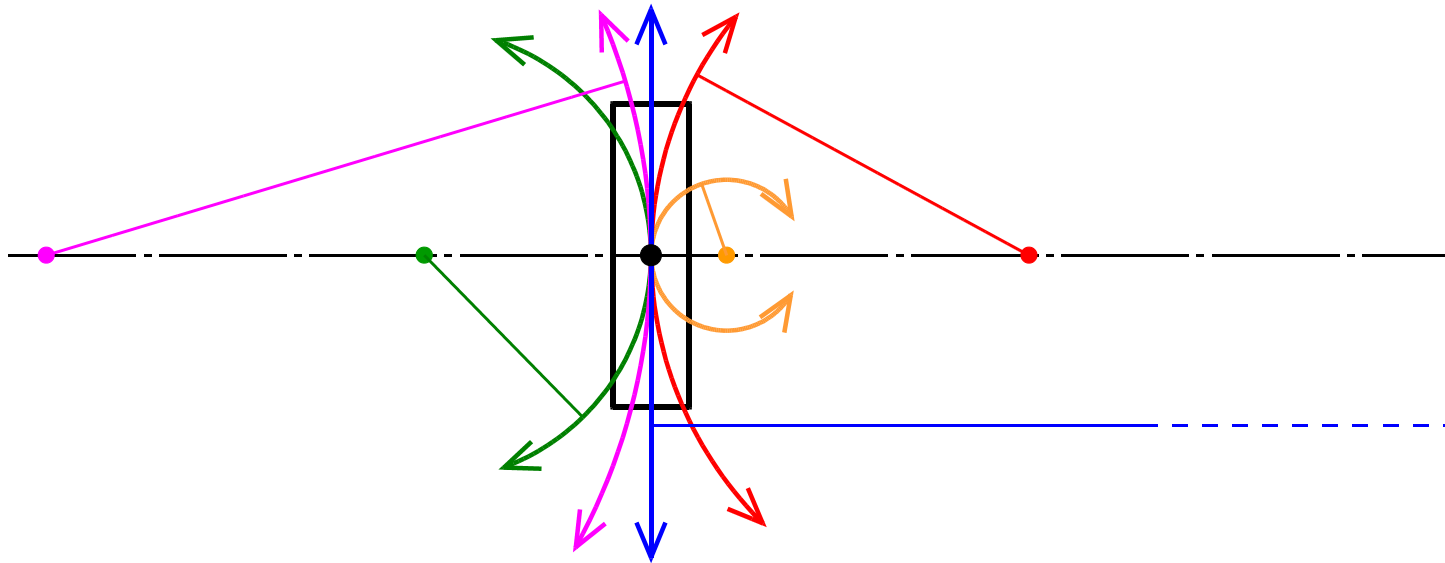
- ・ 運動が不定になる(どう滑るかわからない)。
- ・ 車輪回転による運動計算と差違が生じる。

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

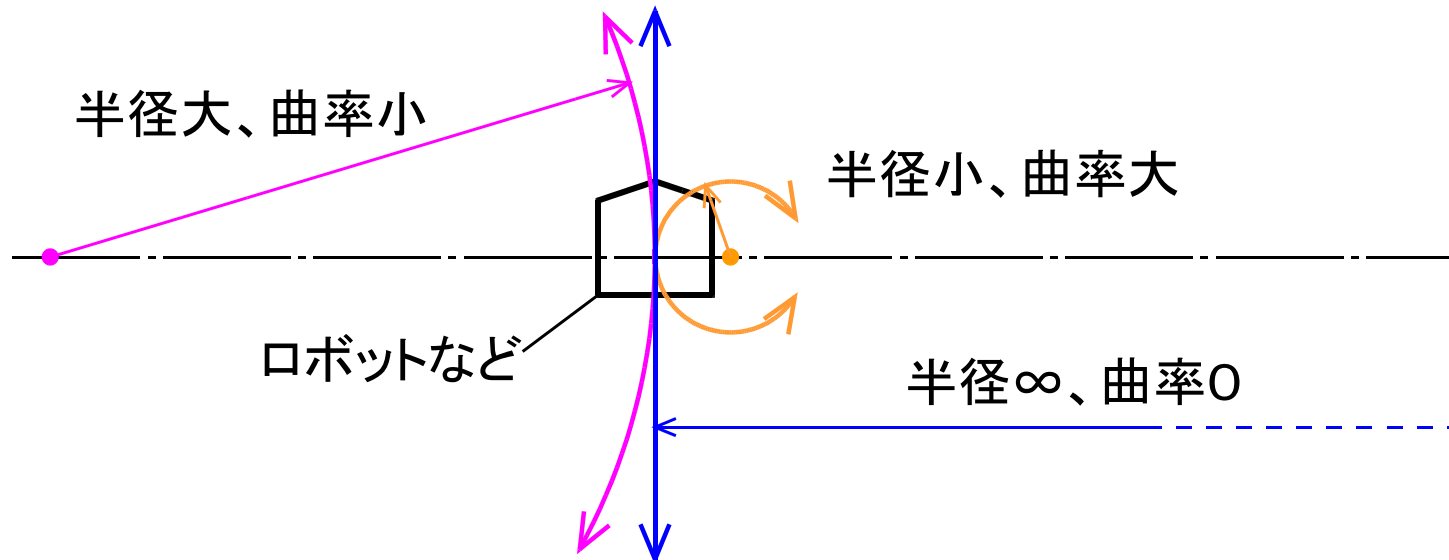
- ・ 直進は半径 ∞ 、その場合は半径0とみなす。



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 = $1 \div \text{半径}$ (直進 = 0、その場 = ∞)



車輪移動ロボット大原則

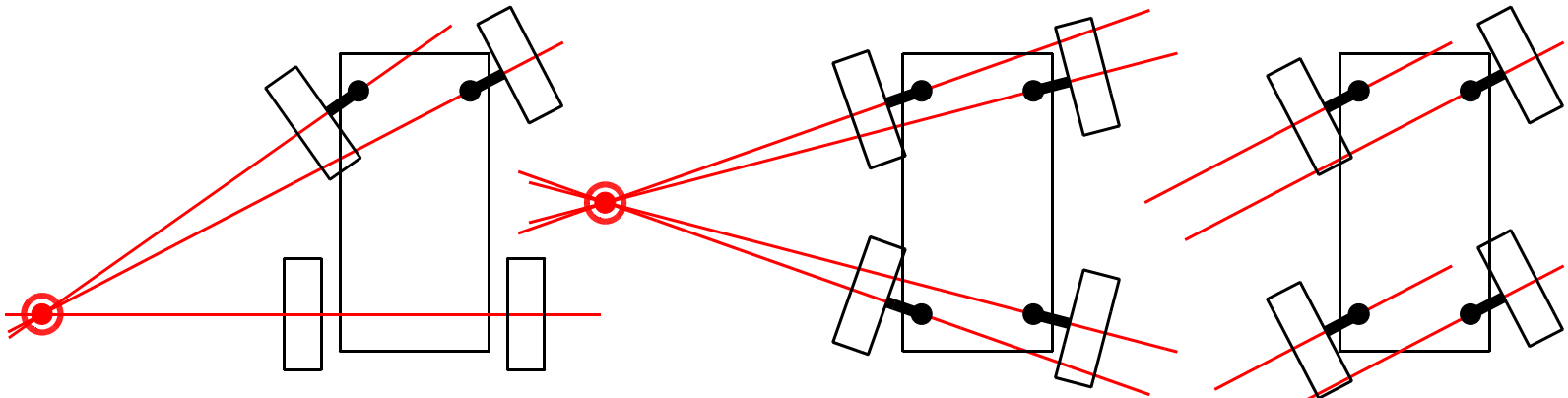
○ 車両の車軸の向きの制約

◇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。

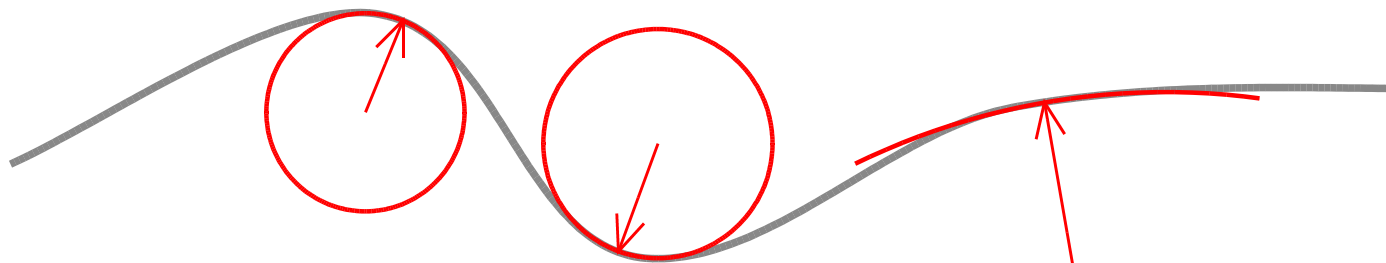
※全て平行＝直線運動



車輪移動ロボット大原則

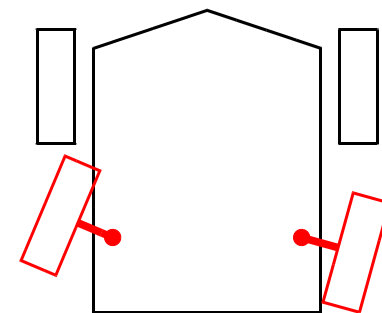
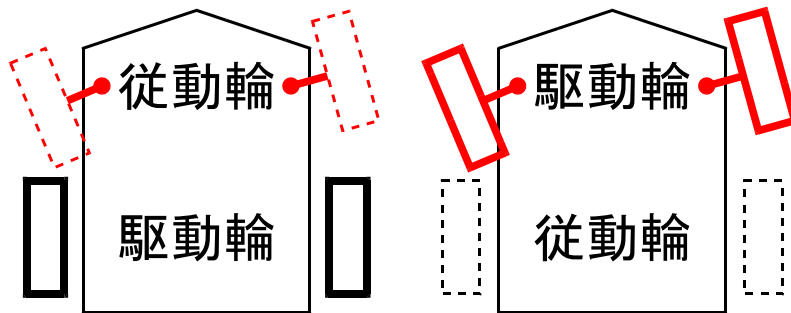
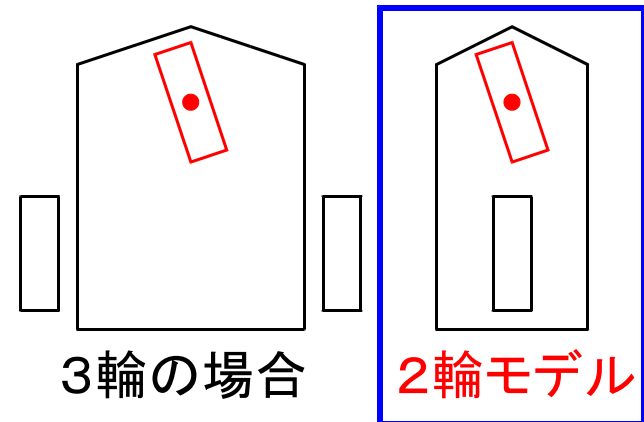
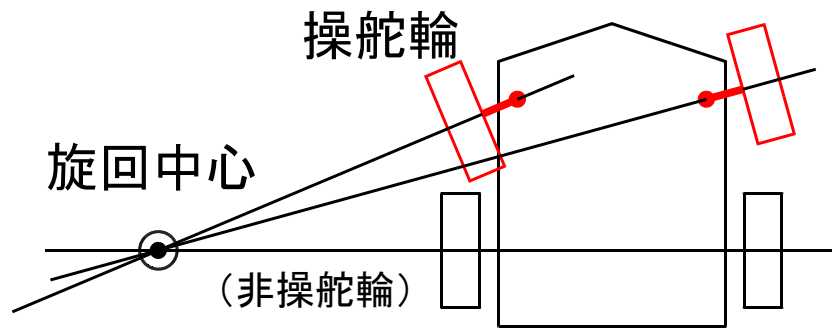
○ 曲線運動と旋回半径

- ・ 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

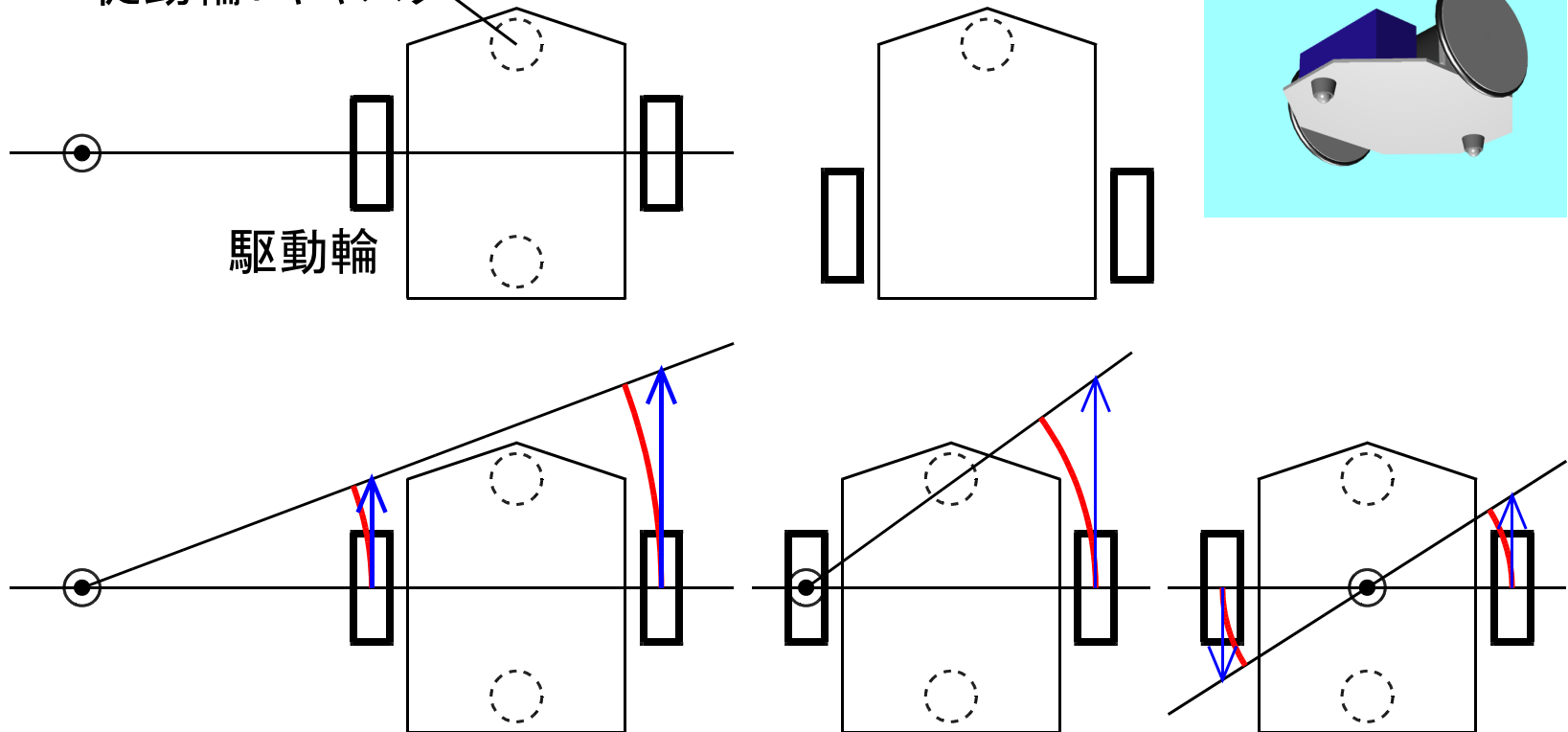
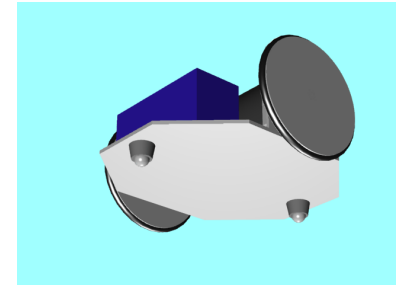
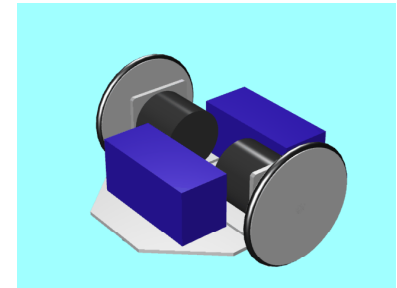
○ ステアリング（操舵輪）型 例）自動車等



車輪移動ロボットモデル

○ 対向2輪(独立2輪)型

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

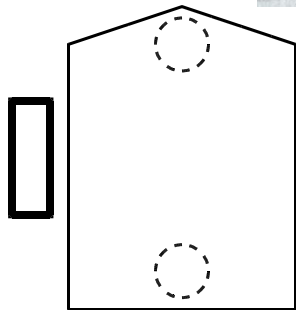
・対2輪：シンプル クロ：複雑

車輪移動ロボットモデル

○ 身の回りの実例



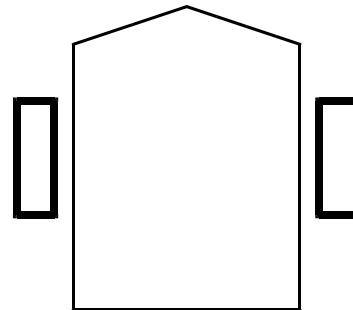
(引)iRobot社



掃除ロボット類



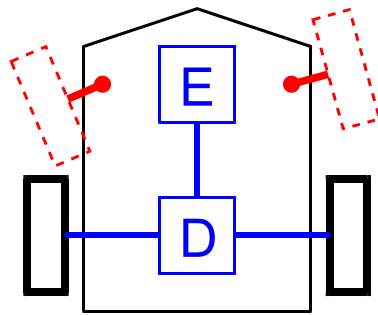
(引)Segway社



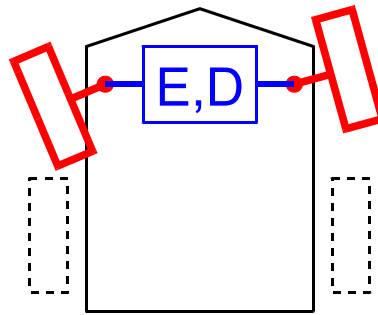
SegwayHT

車輪移動ロボットモデル

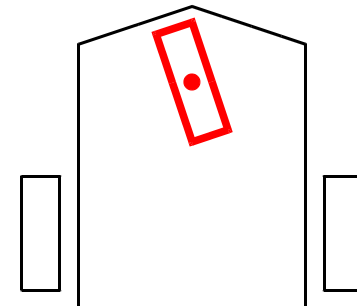
○ 身の回りの実例



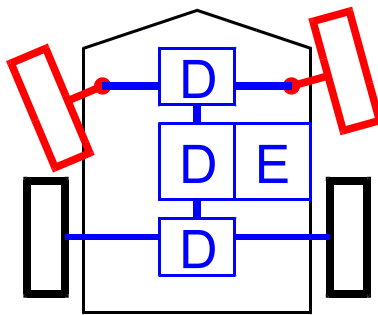
FR車



FF車



3輪車



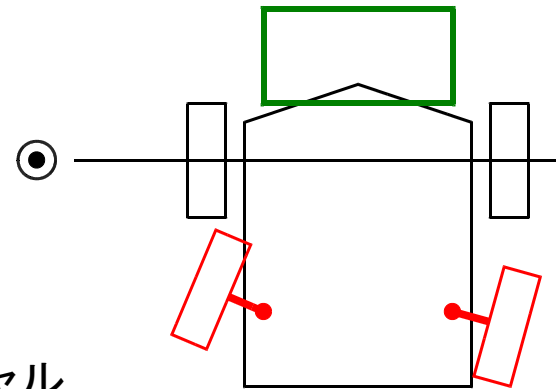
4WD車

自動車

E: エンジン

D: デフギア

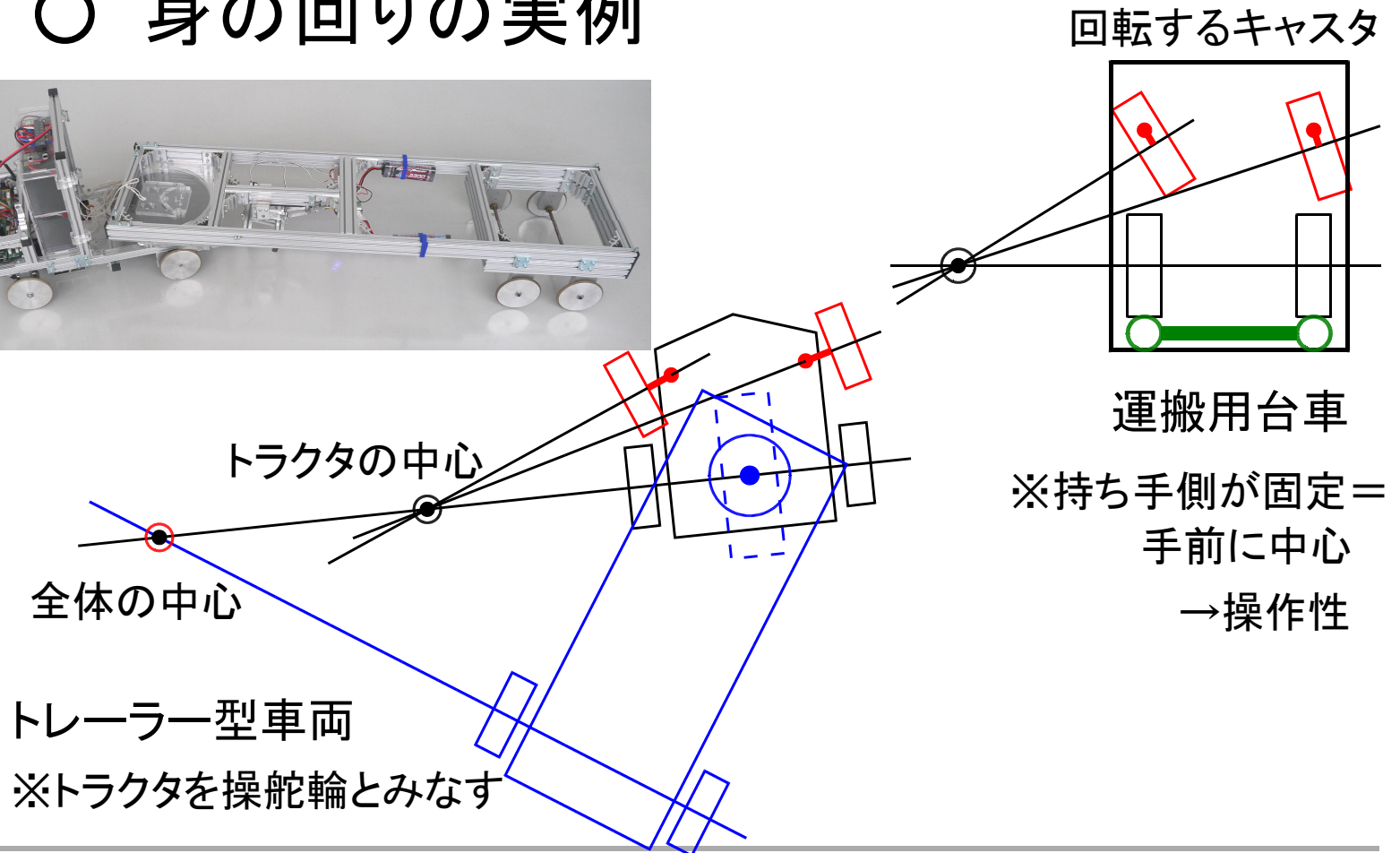
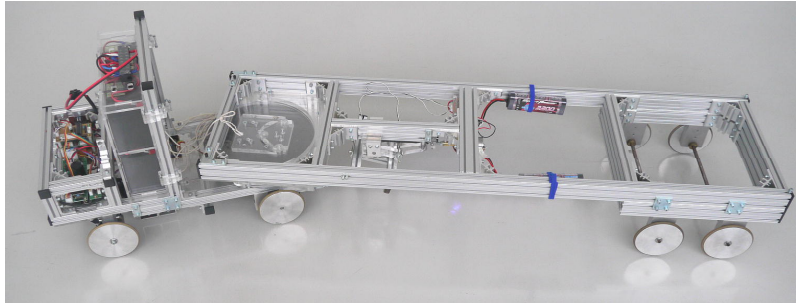
※ディファレンシャル



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



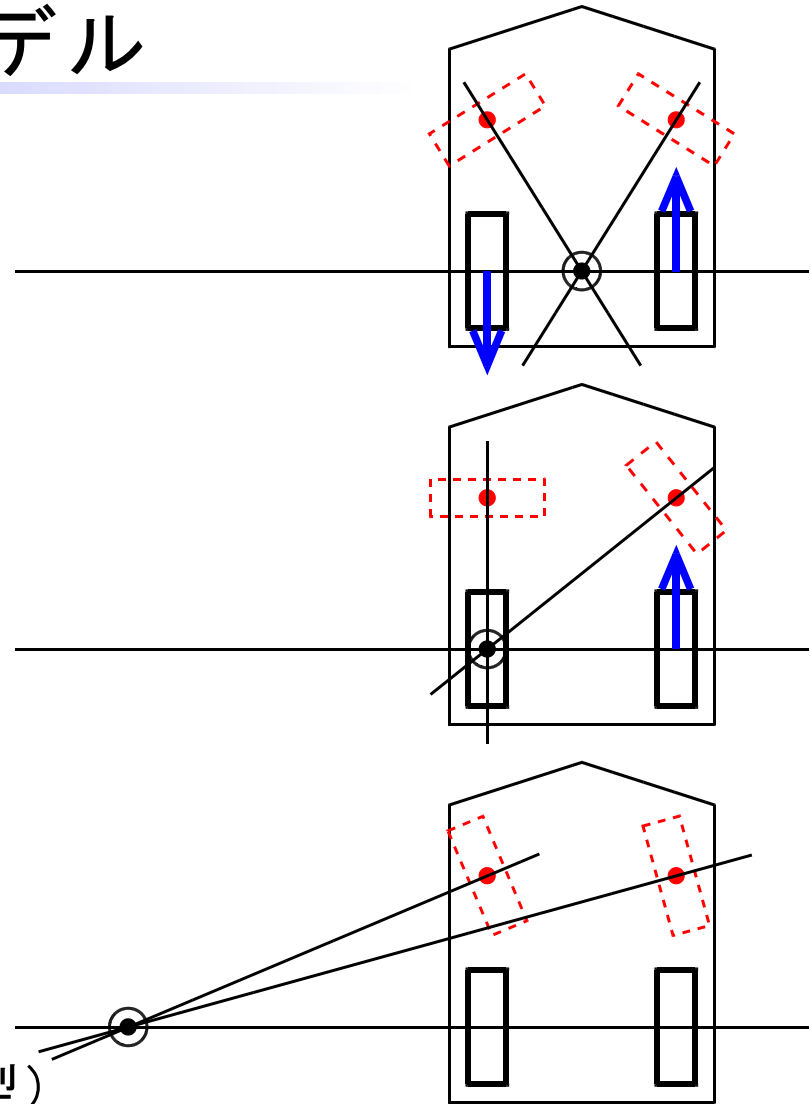
車輪移動ロボットモデル

○ 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)



車輪移動ロボットの構造検討

○ 車輪移動の仕様

◇ 走行性能

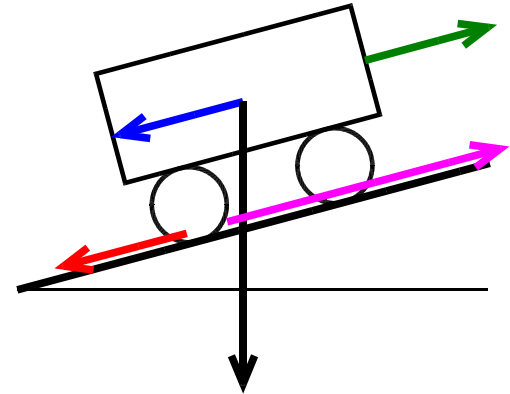
- ・ 最高速度
- ・ 最大推力

≥ 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)

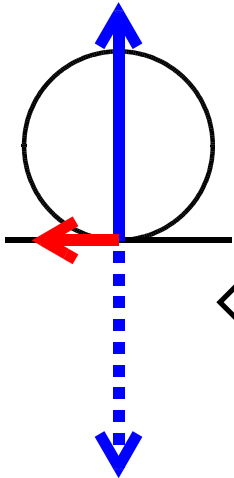


車輪移動ロボットの構造検討

○ 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

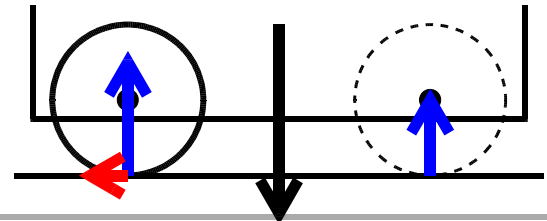
- ・ 摩擦力[N] $\leq$ 摩擦係数 $\times$ 垂直抗力[N]
- ・ 摩擦係数に依存（タイヤ素材などで工夫）



◇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



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

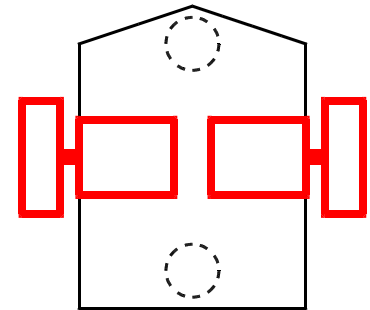
最大推力 ÷ 2

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(ガタ)の影響が大きい。

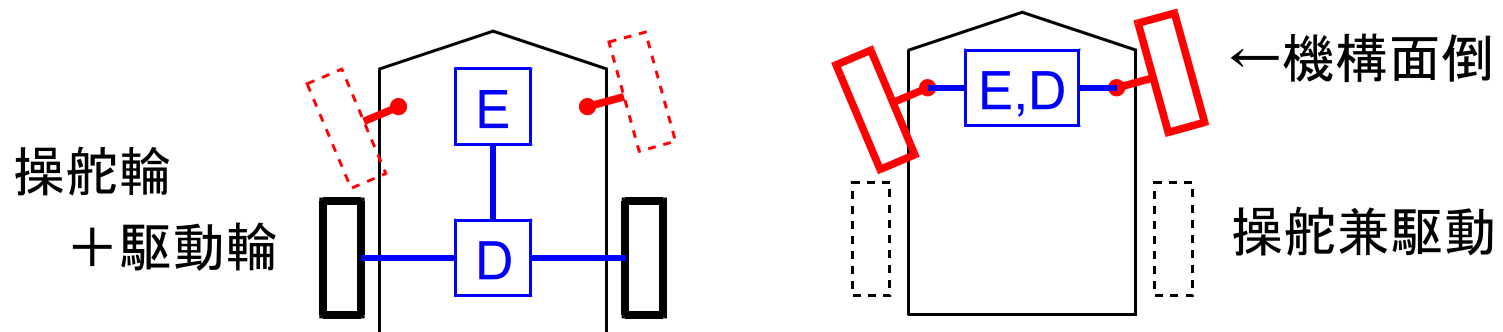


ステアリング型の構造検討

○ 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、

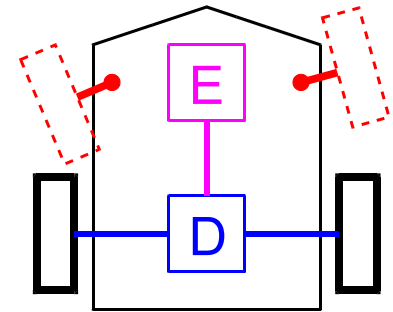
最高速度、最大推力を出せる動力源

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

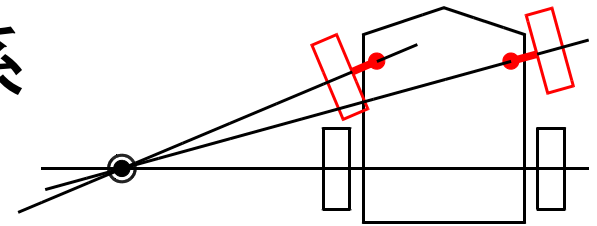


ステアリング型の構造検討

○ 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

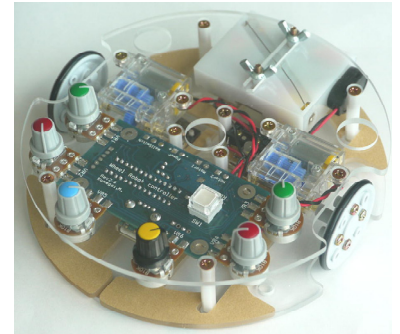
○ 場合による、向き不向き

◇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

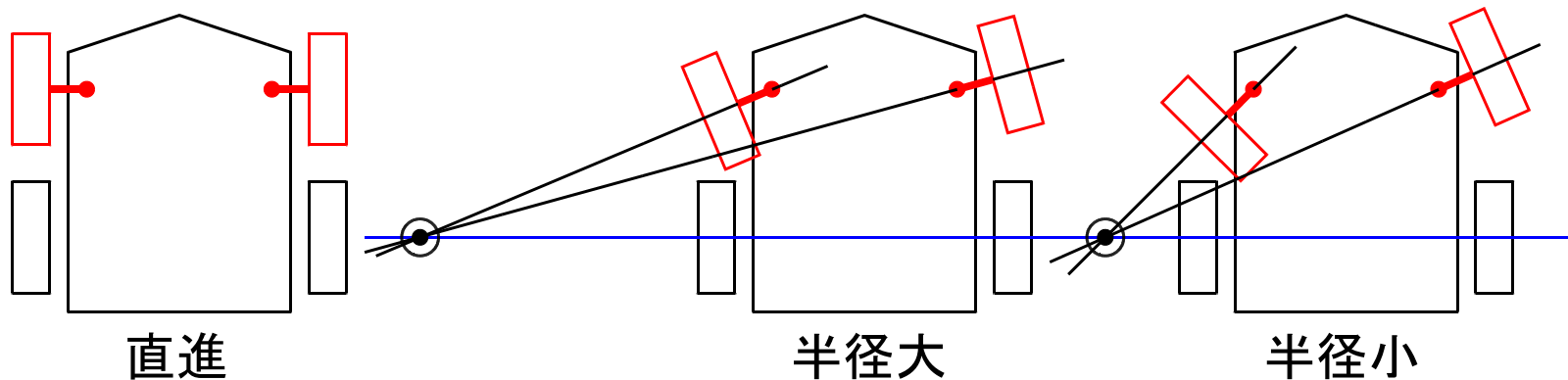
車輪移動ロボット(ステア)の基礎特性

○ 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

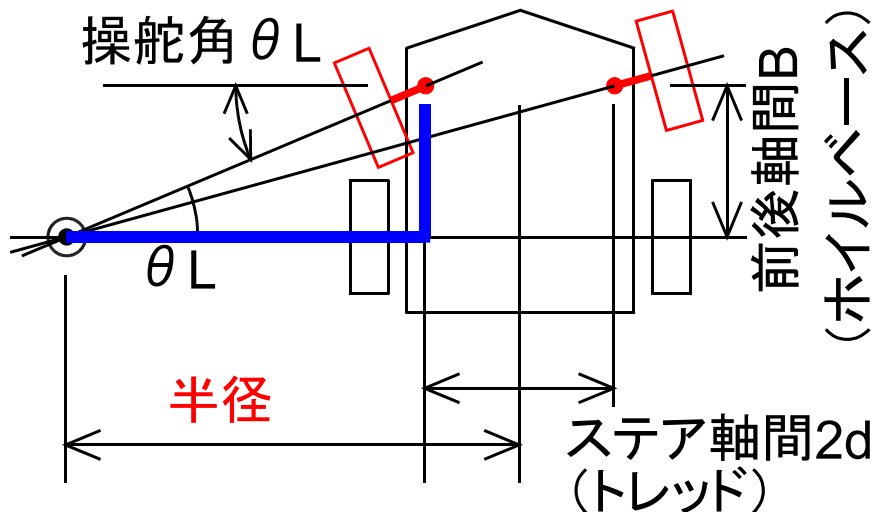
◇ 具体的な計算:

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

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

・ 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

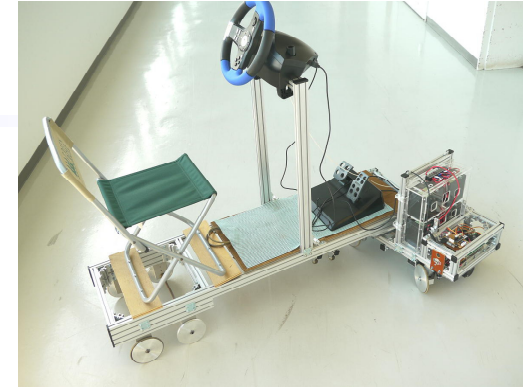
- ・ 移動するロボット
- ・ 車輪移動ロボットの基礎原理

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

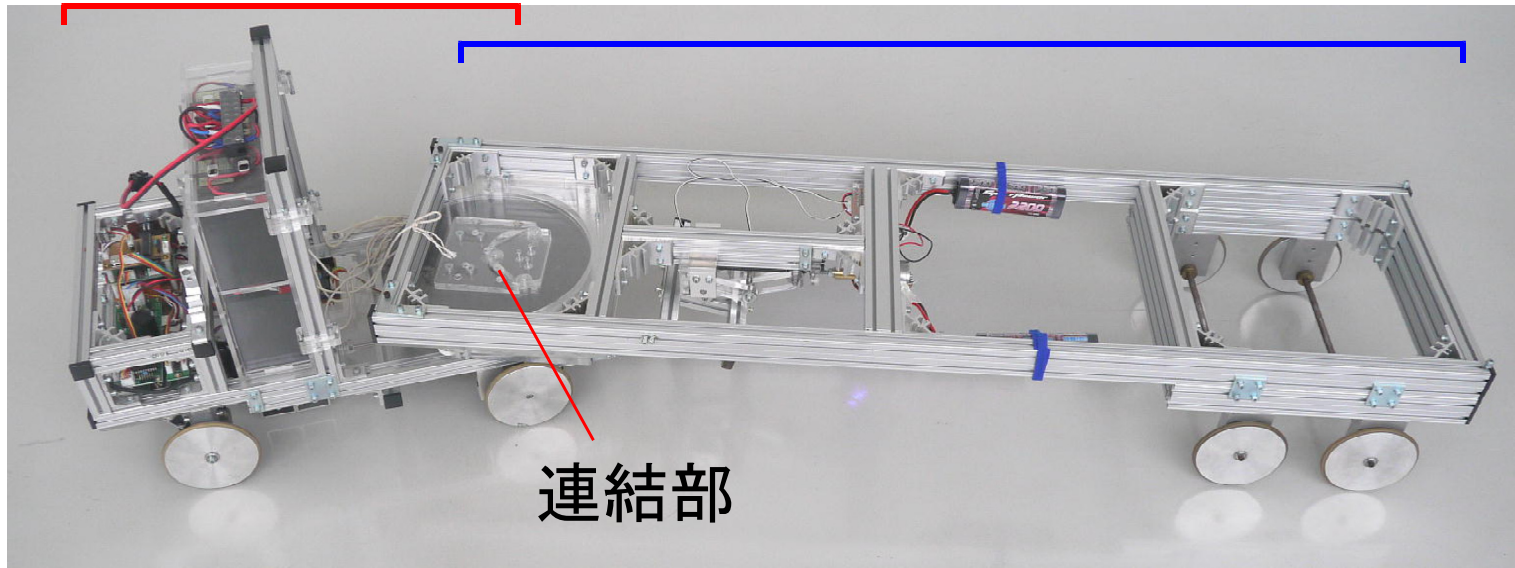
○ 開発したトレーラロボット



手動運転型

トラクタヘッド

トレーラ

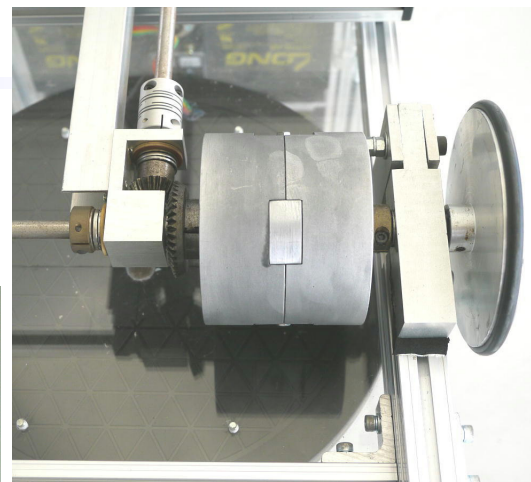
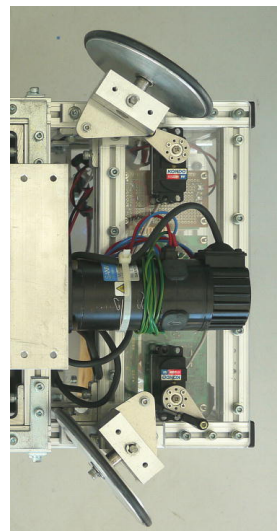
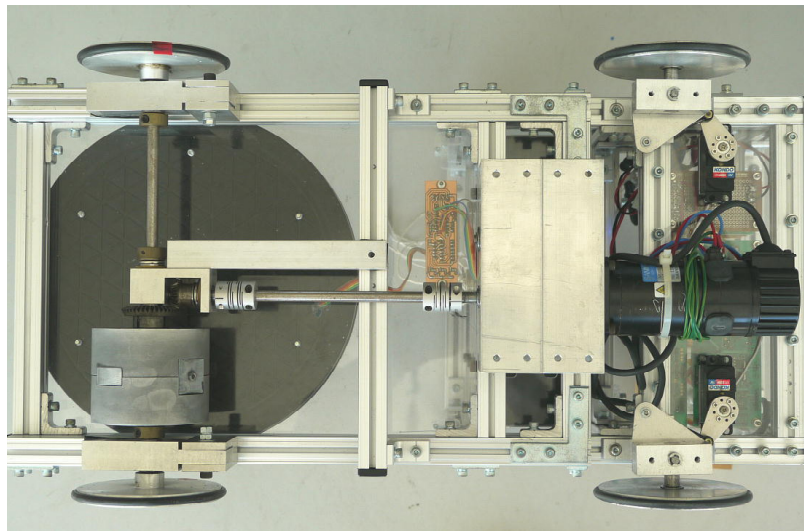


連結部

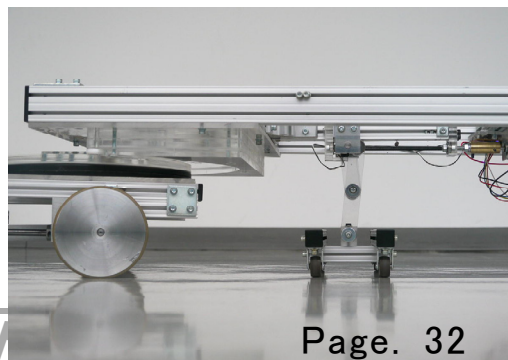
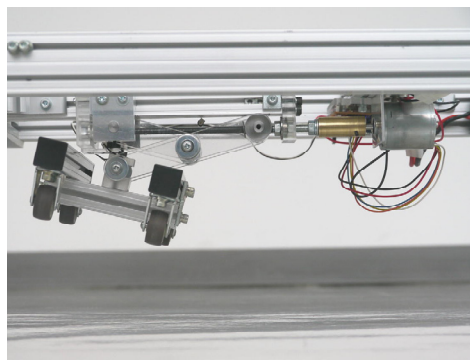
セミトレーラ型ロボット 本体一式

トレーラロボット

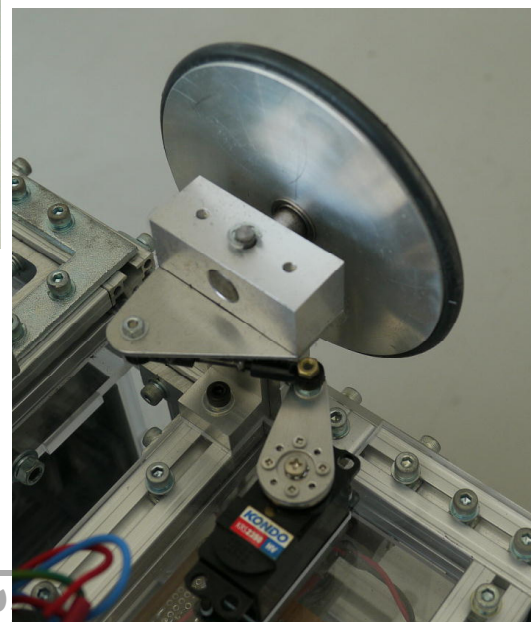
○ 開発したトレーラロボット



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

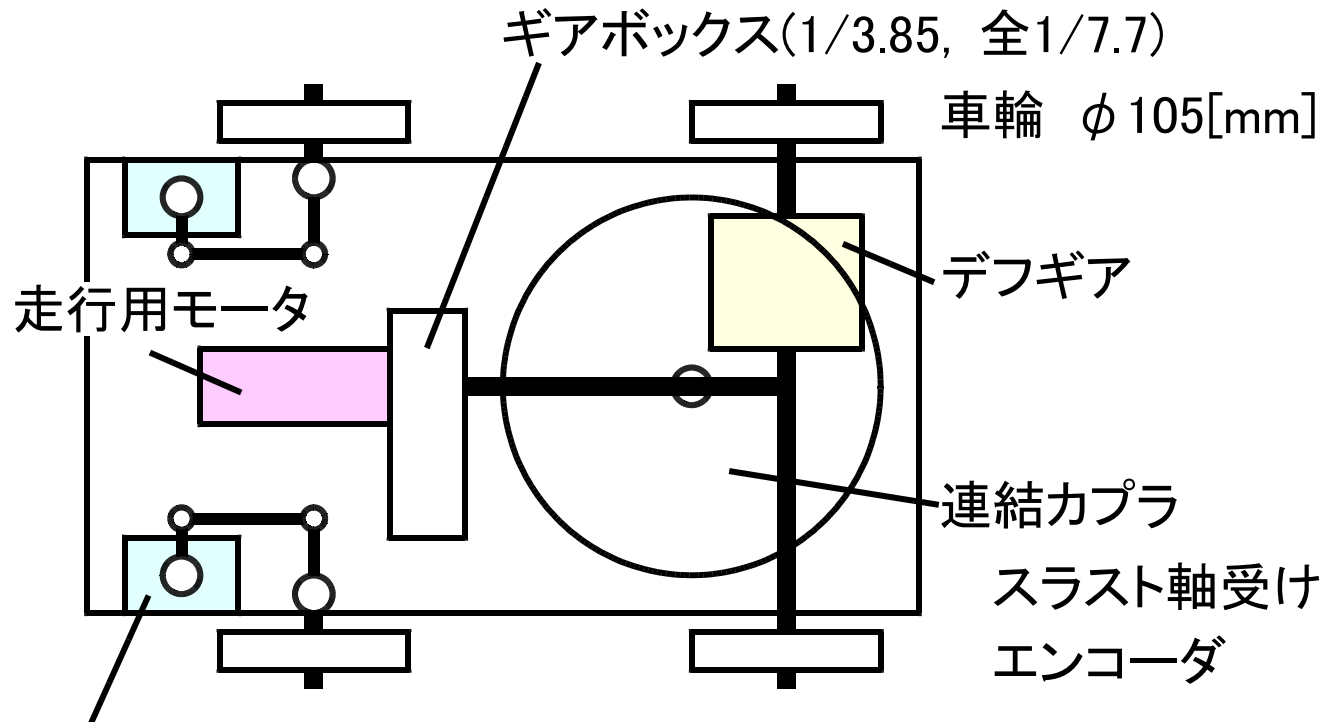
- ・市販品が見当たらない → 開発(最難関)

◇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

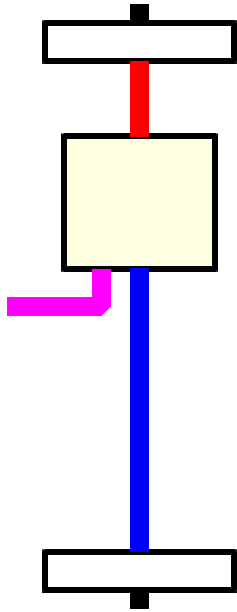
走行: 山洋DCサーボT511 (110W, 75V) ステア: 近藤KRS-2350HV

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。



◇ デフギアの特徴

- ・ $([\text{出力1}] + [\text{出力2}]) / 2 = \text{入力回転}$
※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

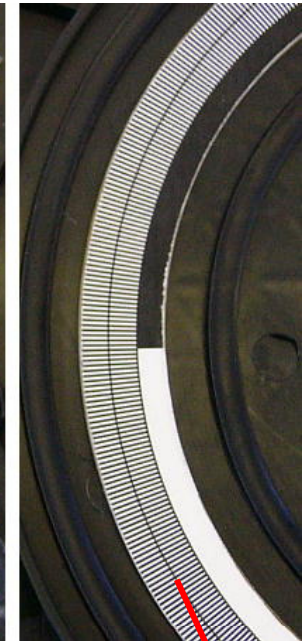
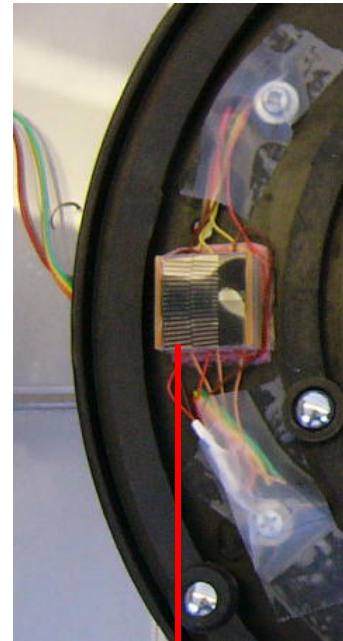
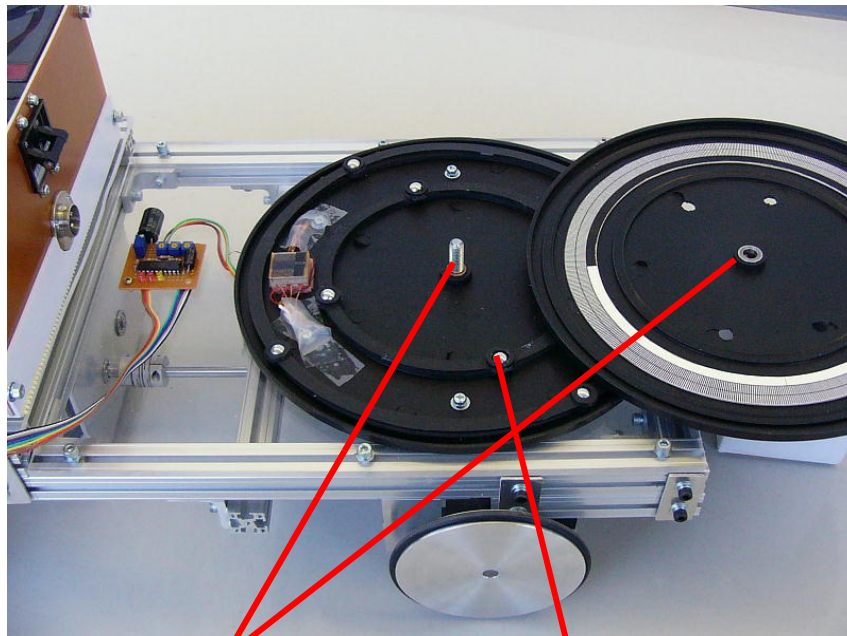
※指令するのみ

- ・ **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逓倍), 荷重20[kg](公称値)



回転軸

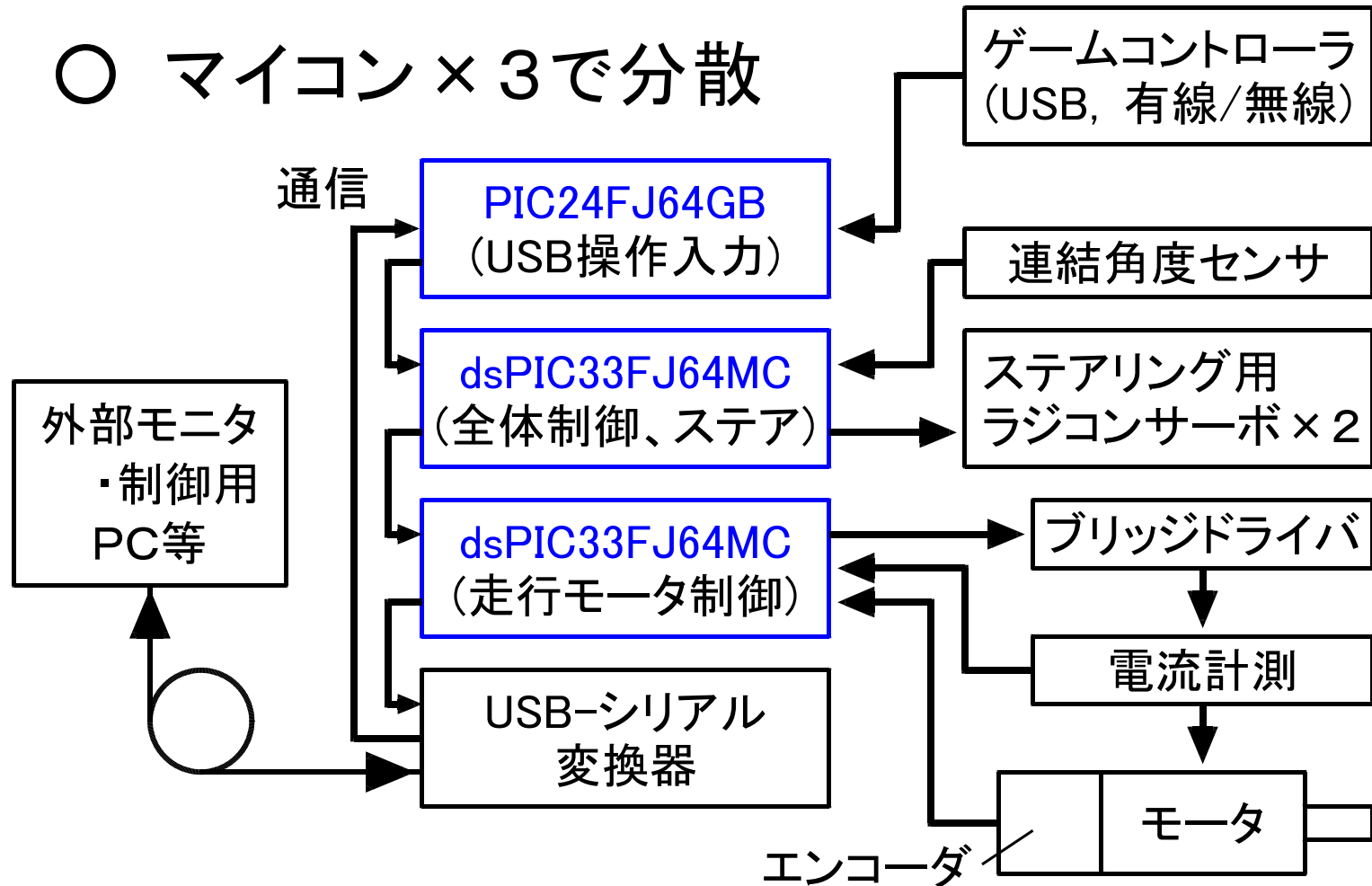
スラスト軸受部

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 $\equiv$ 走行モータの速度制御

◇トラクタの走行制御

- ・車速 + 曲率 ($1 / \text{旋回半径}$) $\rightarrow$ 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

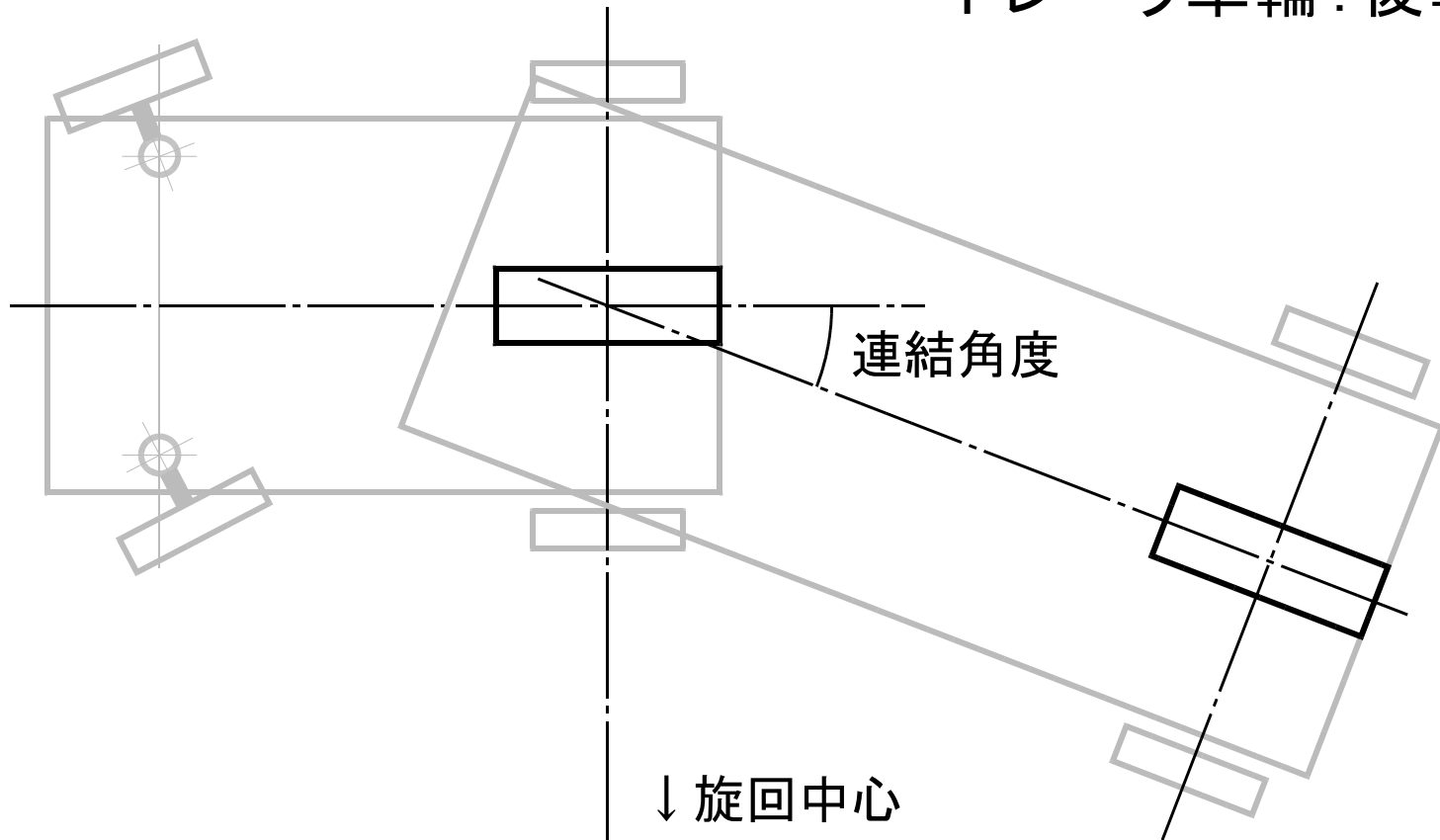
$\rightarrow$ **まっすぐ下がることすら大変**

トレーラロボットの制御

○ トレーラの2輪モデル

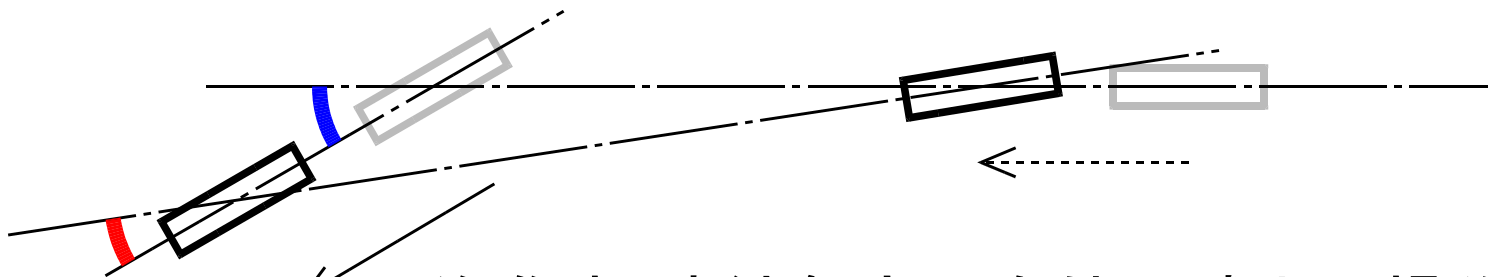
トラクタ: 前輪

トレーラ車輪: 後輪

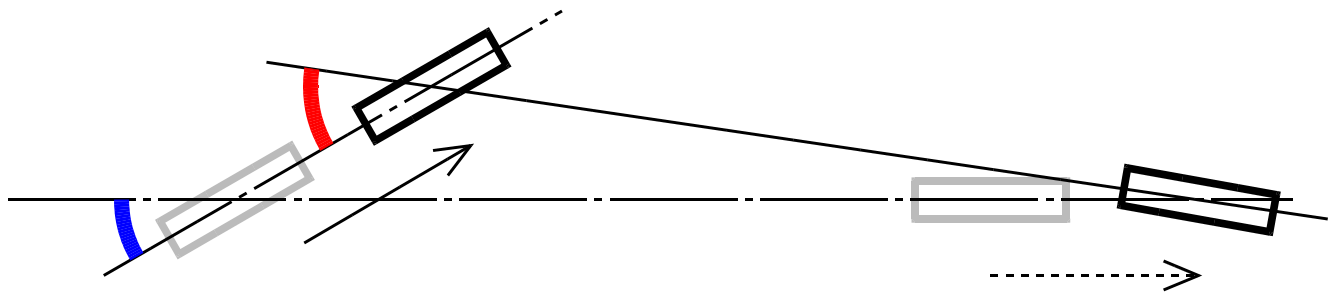


トレーラロボットの制御

○ 前進と後退のモデル (参考: 自転車、バイク)



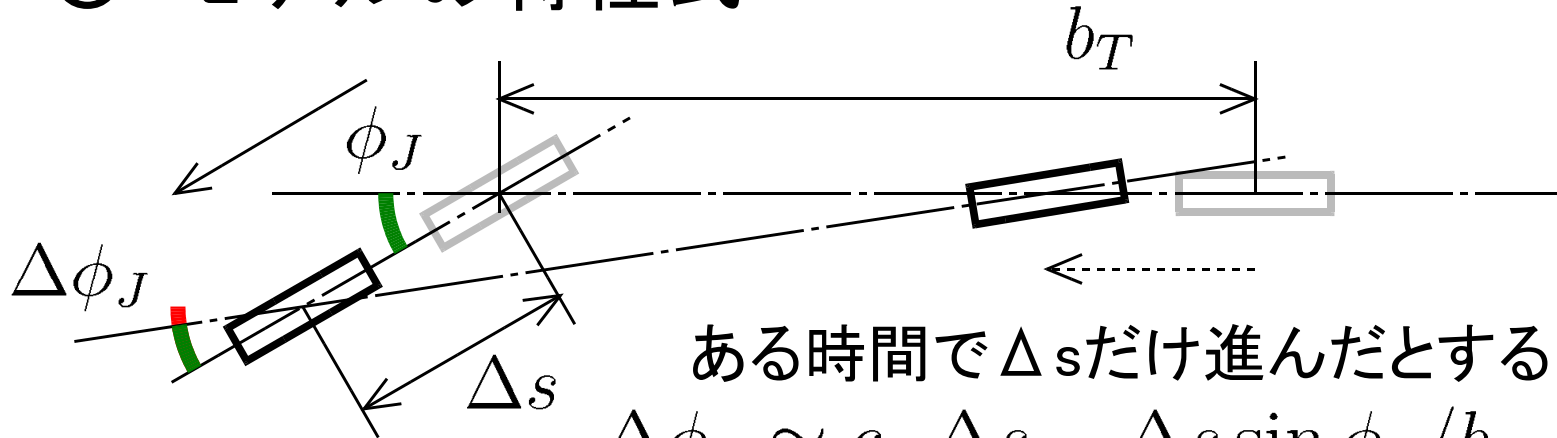
前進時: 連結角度は自然に減少 = 操作易



後退時: 連結角度は自然に増加 = 操作難

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。

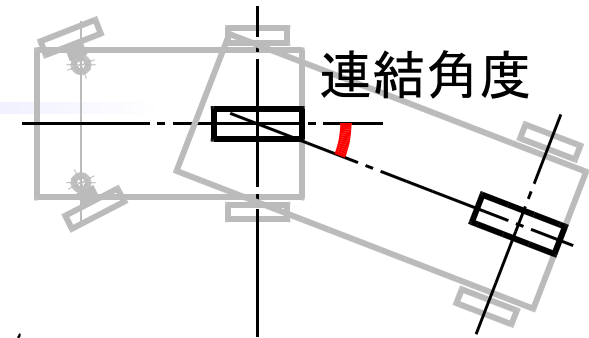
※曲率→Page10

※ $c_H \Delta s$: 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

$$\Delta\phi_J \simeq \underline{c_H} \Delta s - \Delta s \sin \phi_J / \underline{b_T}$$

連結角の変化 は ヘッド曲率 と 現在の角度 で決まる.

$$c_H = \frac{\Delta\phi_J}{\Delta s} + \frac{\sin \phi_J}{b_T}$$

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

◇ヘッド曲率の設定:

- ・ 連結角の目標変化速度 ÷ 車両の速度
- ・ $\sin(\text{連結角}) \div \text{トレーラの長さ}$

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

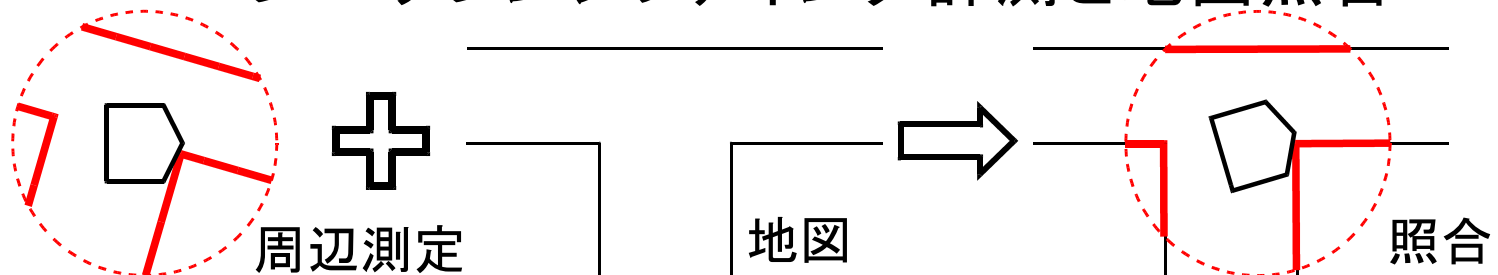
○ 自動走行に必要な技術

◇ 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

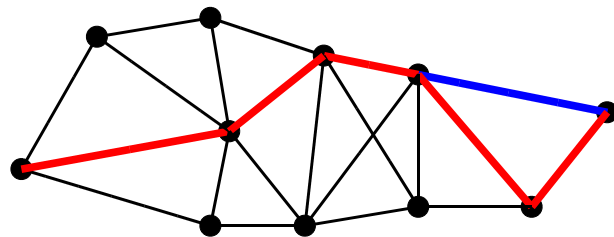


トレーラロボットのアプリケーション

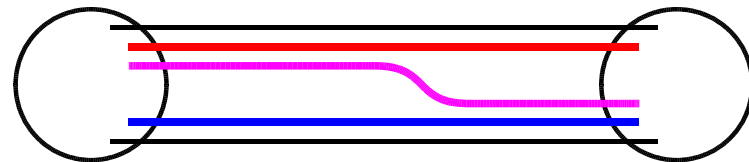
○ 自動走行に必要な技術

◇ 経路計画 (ナビゲーション)

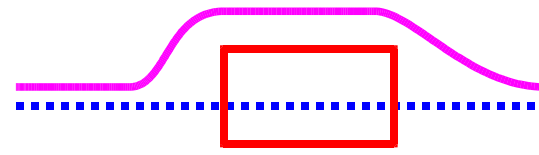
- ・ 現在地から目的地までの経路選択
- ・ 経路内の通行位置 + 障害物の回避



ルート決定



通行位置



障害回避

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