

YP-Spurのモーションコントロール (モータトルク制御からロボット速度制御まで)

渡辺 敦志

筑波大学 システム情報工学研究科
知能ロボット研究室



移動ロボットを動かすには

2

人間追従
地図による走行

アプリケーション
プログラム

直線追従制御
ロボットの速度・角速度制御

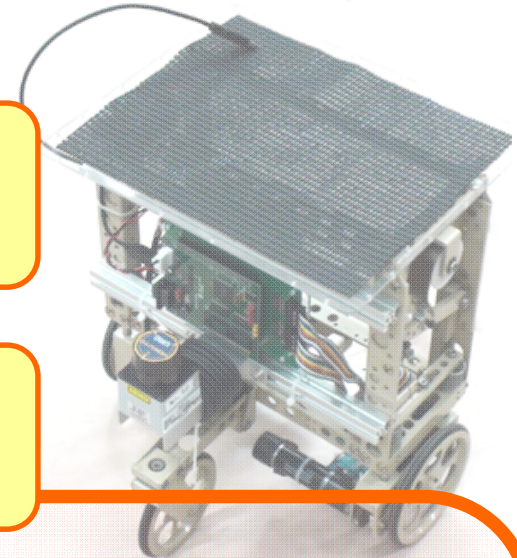
軌跡追従制御

PID制御
フィードフォワード制御

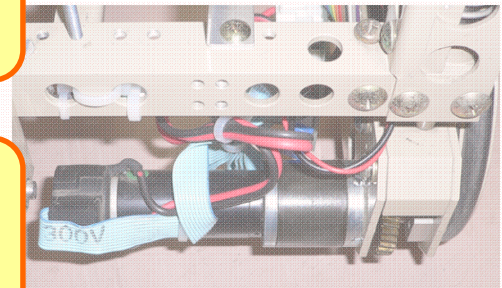
モータの速度制御
界磁制御

PWM駆動
フィードフォワード
電流制御

モータの電流制御
トルク制御



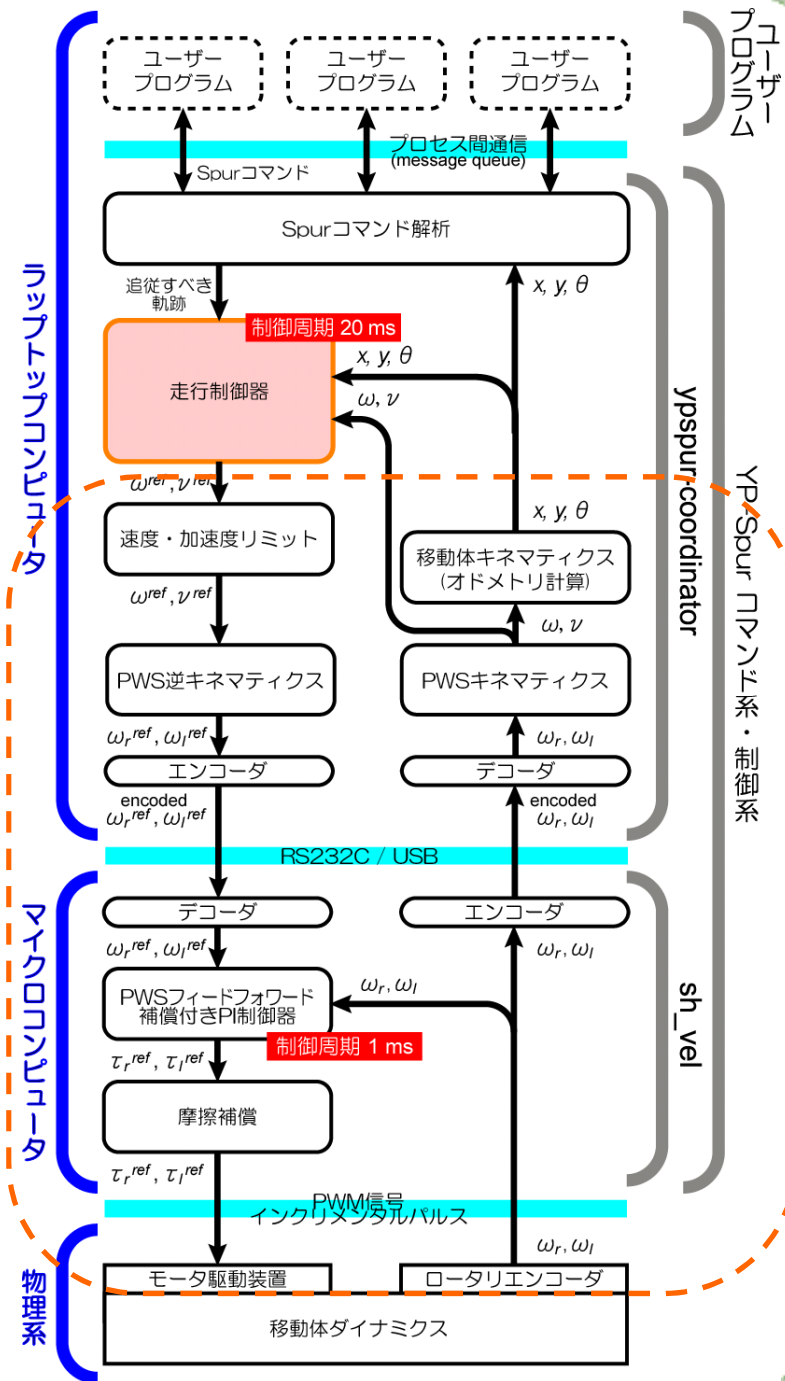
小型移動ロボット
“山彦 LR-1”



小型移動ロボットに
搭載のモータ

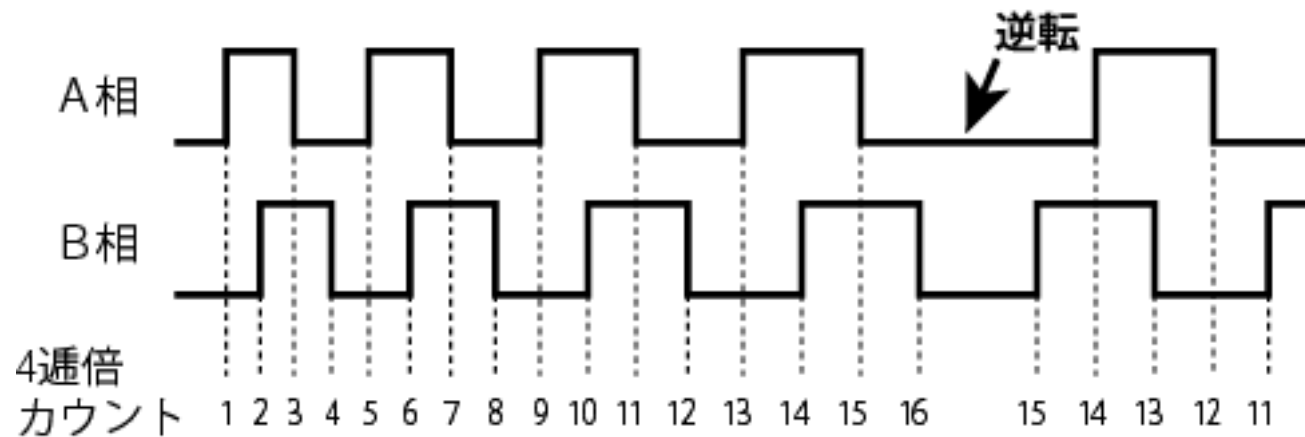
ロボット走行制御系 全体のシステム構成

- 自己位置推定
- 座標系
- 各種軌跡追従制御
- ロボットの速度・角速度制御
- モータの速度制御
- モータの駆動



モータ回転数の取得

- モータに取り付けられた
2相インクリメンタルエンコーダを使用



- カウント値を相対角度
1ミリ秒中の角度変化を角速度として利用

与えたいトルクからPWMを発生

- トルクに比例した電流を流す

$$I_{ref} = \frac{\tau_{ref}}{k_{\tau}}$$

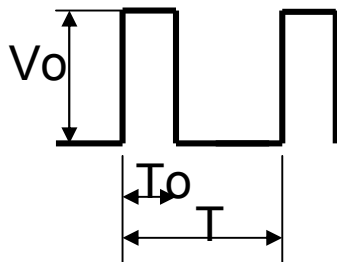
- モータの起電力に逆らって電圧を印加する

$$pwm = \frac{1}{V_0} (RI_{ref} + k_e \omega_{cur})$$

(pwm: PWMデューティー比)

- PWMによりモータに加える平均電圧を変化させる

$$pwm = \frac{T_0}{T}$$



τ_{ref} : 与えるトルク

I_{ref} : 与える電流

k_{τ} : モータのトルク定数

R : モータの端子間抵抗

k_e : モータ誘導起電力定数

V_0 : 電源電圧

ちなみに: トルク定数と誘導起電力定数の関係

※誘導起電力: 電流を流す力 = 電圧 (powerではなくforce)

- トルク定数[Nm/A]と誘導起電力定数[V sec./rad]は単位は違うが物理的に等価

モータが角速度 ω で回転しているとき

コイルに発生する逆起電力は
 $E = K_E \omega$

コイルに発生するトルクは
 $T = K_T I$

コイルに注入された電力は
 $P = E I$

コイルが発した動力は
 $P = T \omega$

エネルギー保存則より

$$E I = T \omega$$

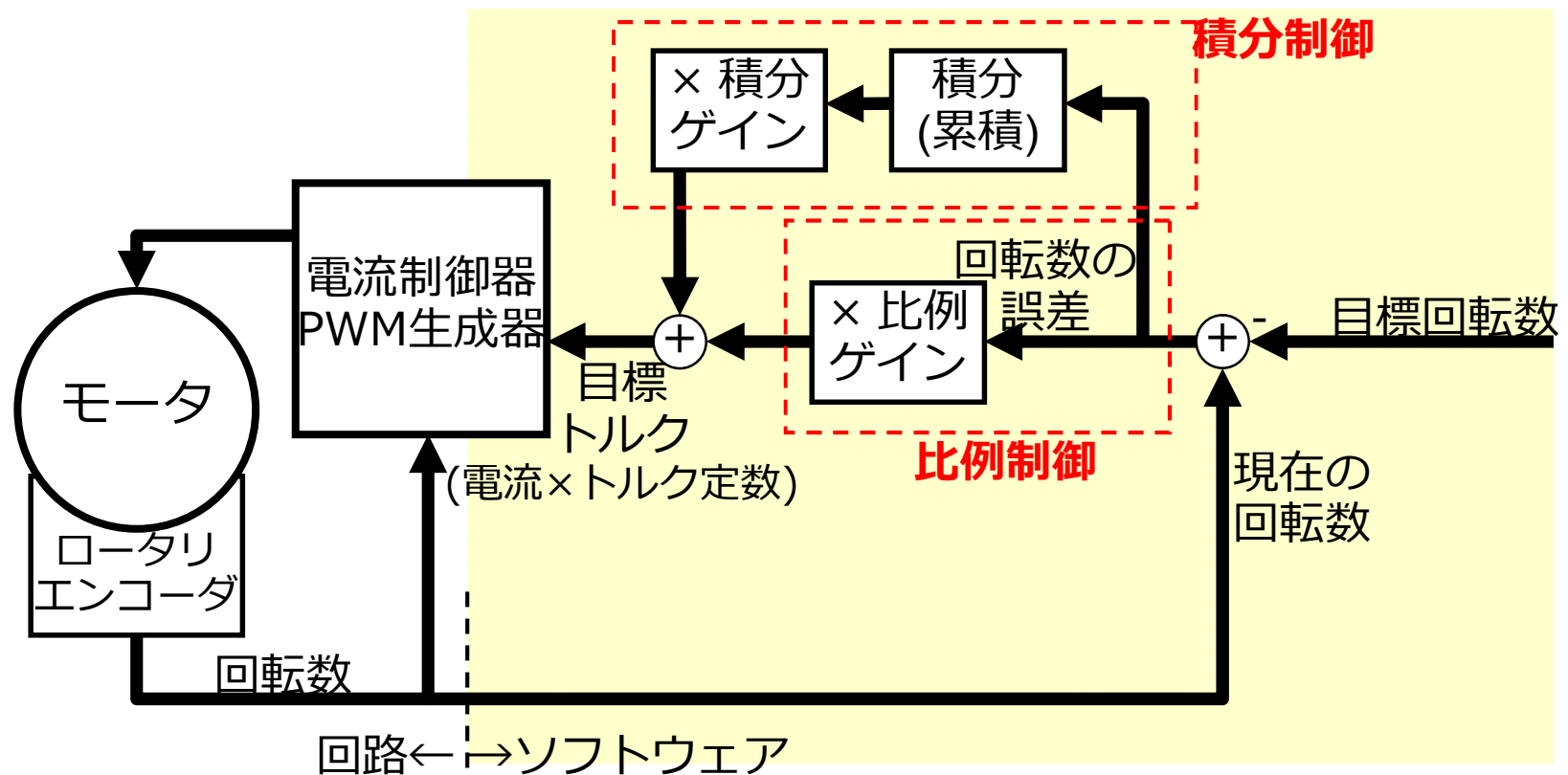
$$K_E \omega I = K_T I \omega$$

$$K_E = K_T$$

詳細不明なモータに出会ったら、回転させて電圧を測ればいい

モータの速度 PI制御

- 7 回転数の誤差に比例したトルクを与える
(比例制御/P制御)
- 誤差が残り続けたときには更にトルクを与える
(積分制御/I制御)

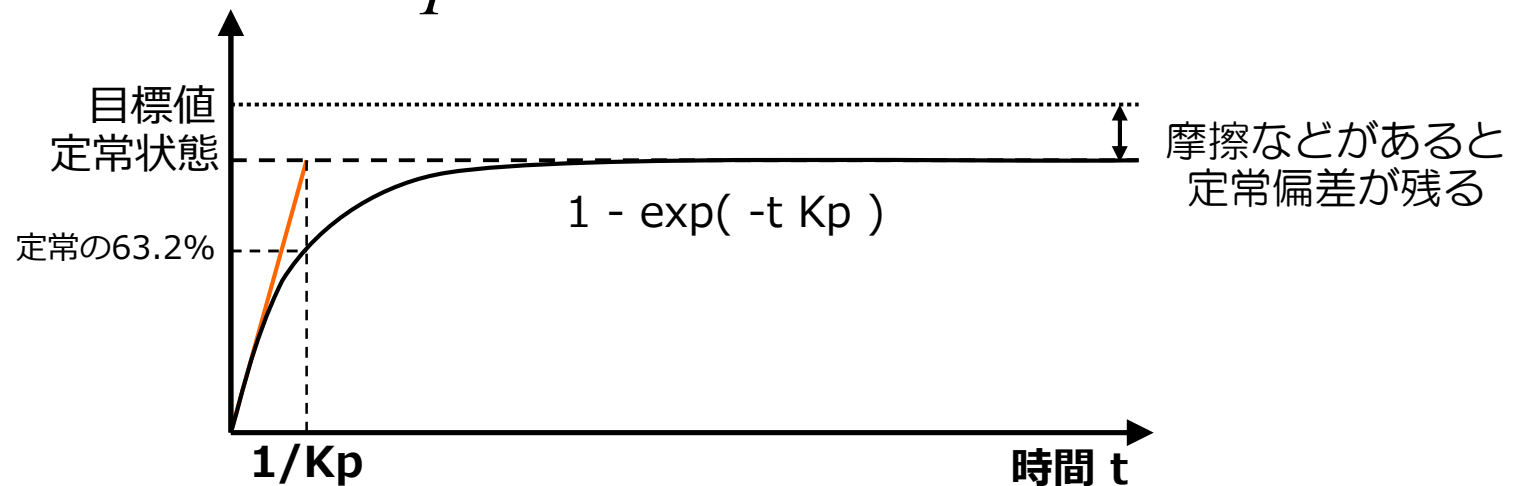


PI制御ゲイン

- 比例ゲインの意味

$\tau = -(\omega - \omega^{ref}) I K_p$ でフィードバックを与える場合

この微分方程式 $\frac{\tau}{I} = \alpha = -(\omega - \omega^{ref}) K_p$ を解くと…

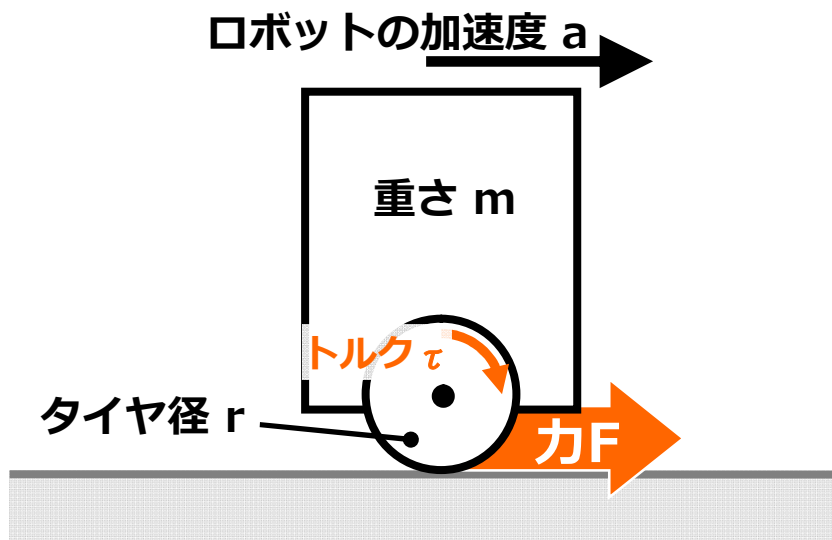


$$(\text{ゲイン})^{-1} = (\text{時定数}[\text{sec.}])$$

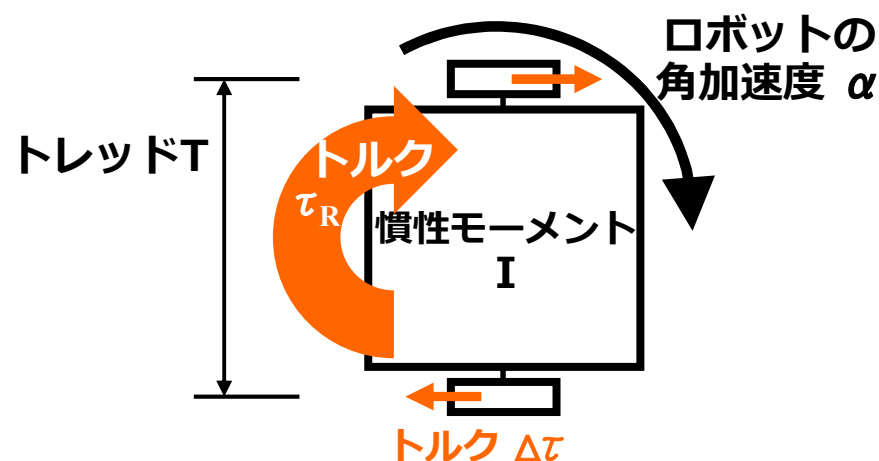
ゲインを決める = 制御が何秒で応答してほしいか決める

モータの速度 フィードフォワード制御 力学を考える

Side-view



Top-view



- 運動方程式 $F = ma$
- 必要トルク $\tau = F r$ (両輪で)

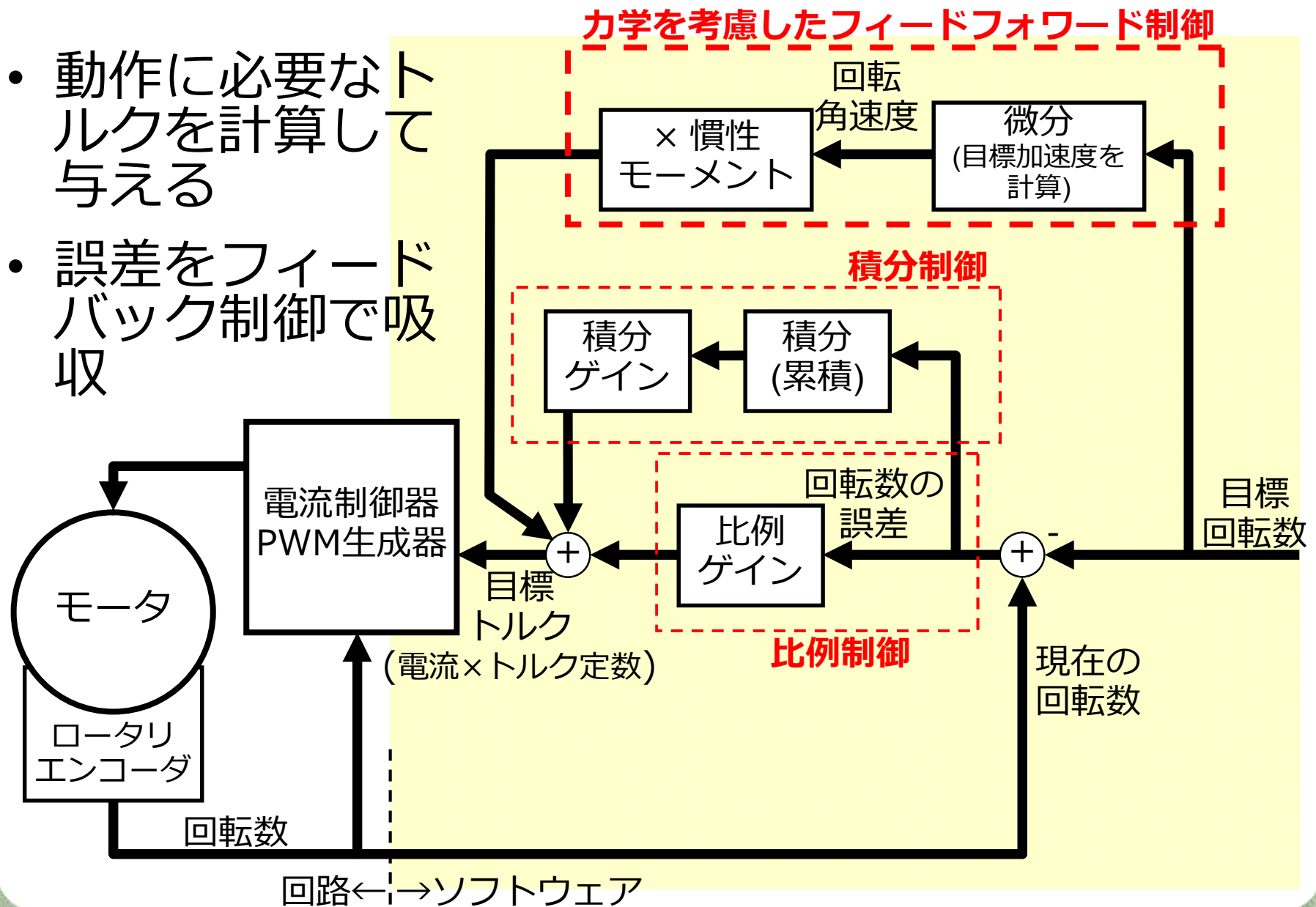
- 運動方程式 $\tau_R = I \alpha$
- 必要トルク $\Delta \tau = \tau_R r / T$

いま行おうとしている運動に必要なトルクを
予め計算して与えることで制御を高精度に

※実際のSpurの中では、左右の車輪間相互作用、タイヤとモータの慣性モーメントなども考慮している。

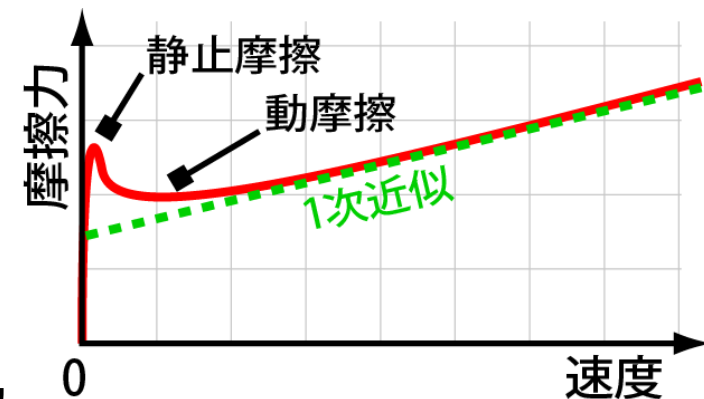
モータの速度 フィードフォワード制御

- 動作に必要なトルクを計算して与える
- 誤差をフィードバック制御で吸収



摩擦補償

- ギア・ベアリングの摩擦
タイヤの受ける転がり抵抗
 - 小型移動ロボットでは、
ギアの摩擦が支配的
- 速度によって摩擦が変化
 - 今回の走行制御系では1次近似



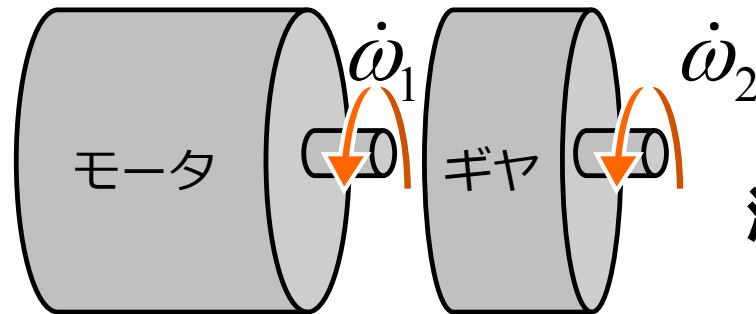
タイヤの回転している向きに
速度に応じて摩擦力に相当する
トルクを上乗せする

※摩擦係数を大きく設定して摩擦補償すると暴走

→ 余分にトルクを発生 → 加速 → 更にトルクを発生 → 加速

ギヤがある時

- 減速比 η のギヤが、モータに付いているとき



減速比 η :

減速器を1回転させると
モータが η 回転する

トルク τ_1 τ_2

慣性モーメント I_1 I_2

$$\tau_1 = I_1 \dot{\omega}_1 \qquad \tau_2 = I_2 \dot{\omega}_2$$

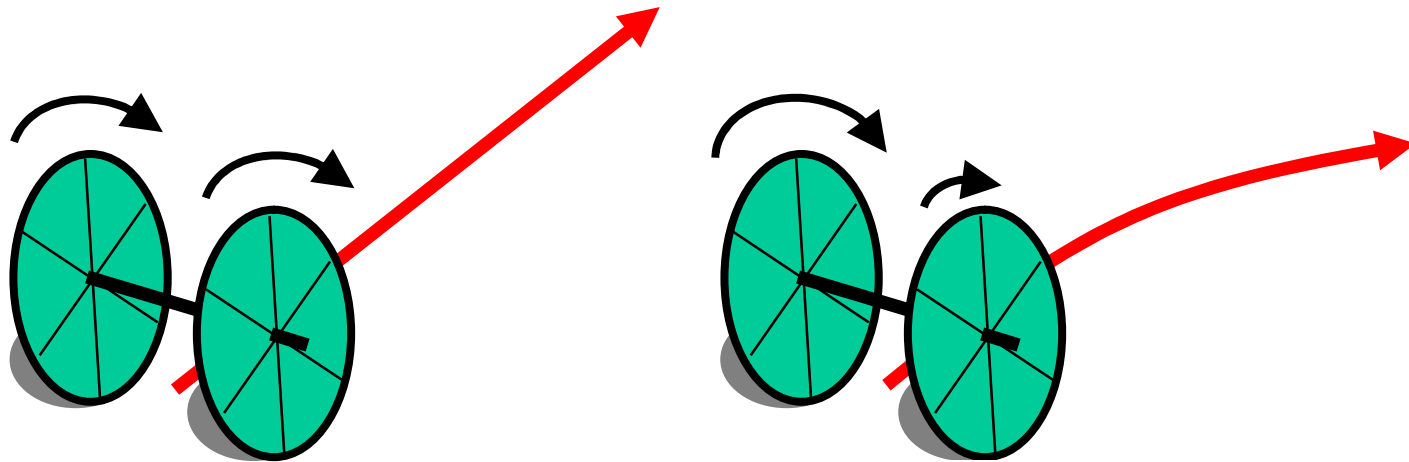
- モータ軸から見た慣性モーメントは :

$$\dot{\omega}_2 = \dot{\omega}_1 \cdot \eta \quad \text{より} \quad I_1 = \frac{I_2}{\eta^2} \quad 1/\eta^2 \text{倍に減少}$$

ロボットの速度・角速度制御

13

- 左右動輪の平均回転数で、並進速度が発生
- 左右動輪の回転数の差で、角速度が発生



- v, ω から左右車輪の角速度 ω_L, ω_R を計算

$$\begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_R}{2} & \frac{r_L}{2} \\ \frac{r_R}{T} & -\frac{r_L}{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

ロボットの速度・角速度制御 速度・角速度リミット

- 速度・加速度・角速度・角加速度の制限
 - ハードウェアの限界に到達しないように制限
 - スリップしないように、加速・遠心加速度を制限
- トルクの制限
 - 主に衝突時の安全のため、一定以上のトルクを出さないように最大トルクを設定

ロボット走行制御系 全体のシステム構成

- 自己位置推定
- 座標系
- 各種軌跡追従制御
- ロボットの速度・角速度制御
- モータの速度制御
- モータの駆動

