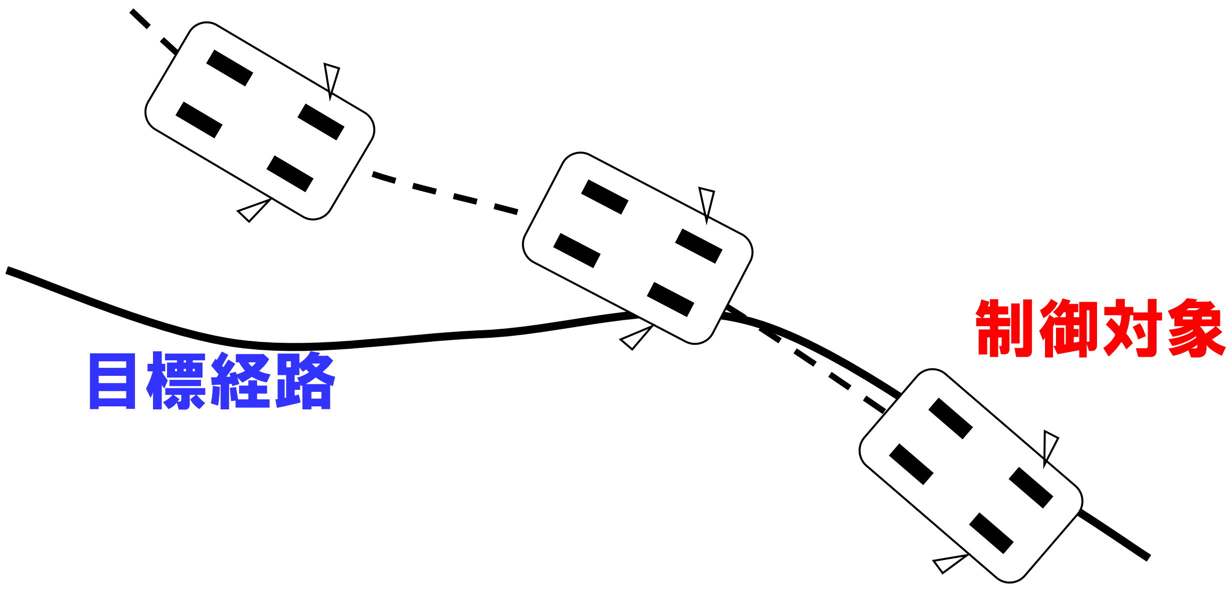
経路追従問題における最適速度制御

○岡島　寛，浅井　徹，川路　茂保

追従制御問題

制御対象の出力を目標とする信号や経路に追従する制御入力を決定する問題



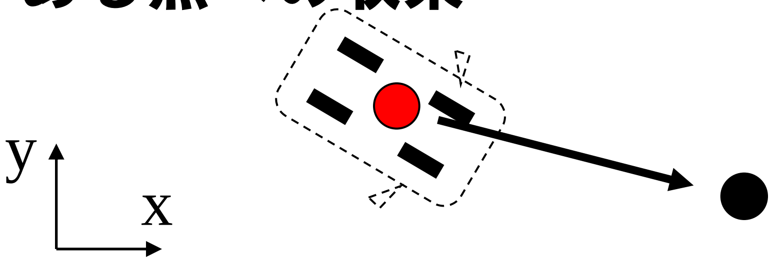
例：自動走行車両，産業用ロボットの手先の制御

追従制御の分類

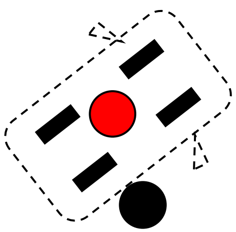
1. ある点への収束

● 制御対象位置

● 目標位置

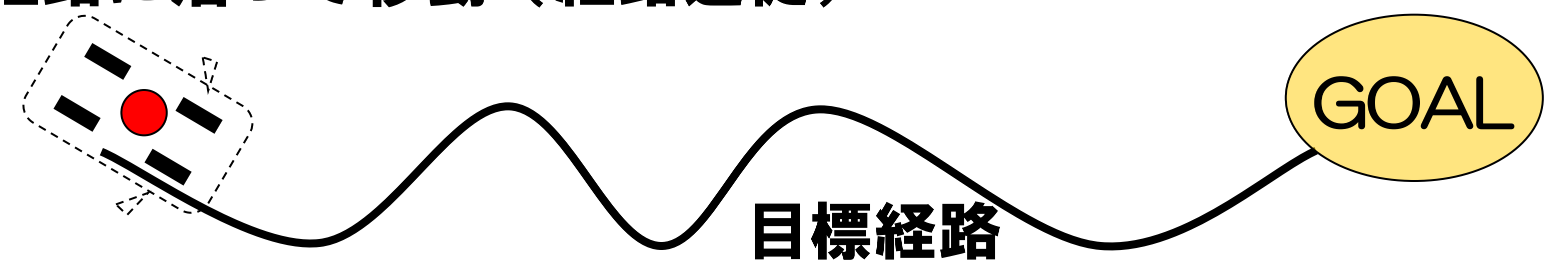


2. 動く目標位置への収束（軌道追従）



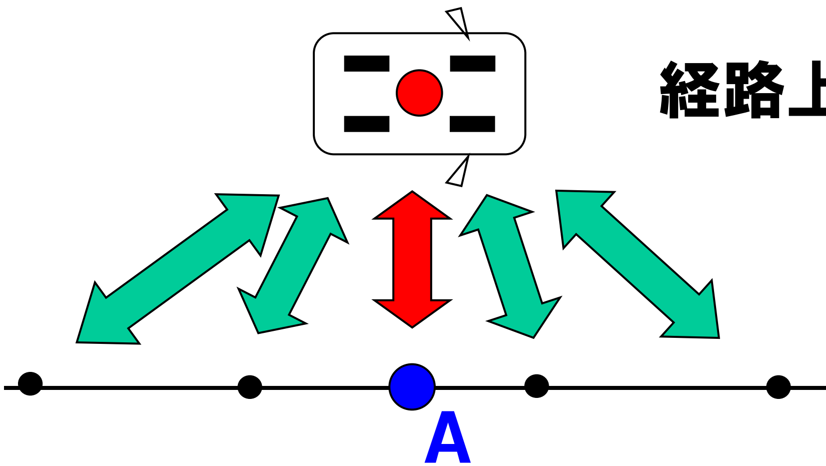
本発表で考える枠組み

3. 経路に沿って移動（経路追従）



経路追従の従来研究紹介

直線経路[三平 1993], 任意経路[Altafini 2002]

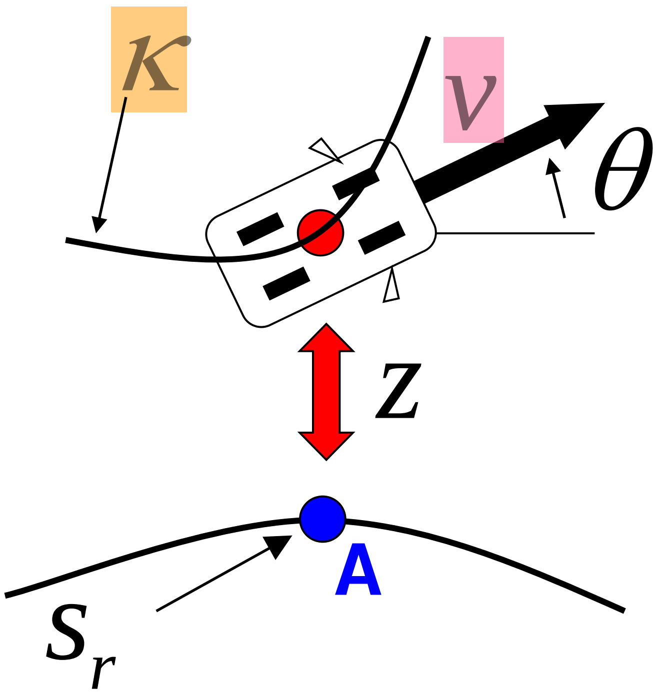


経路上の最小距離となる点Ａを考える

1. 点Ａと制御対象の距離が常に小さければ，制御対象は目標経路に近い軌道を描く（距離零の場合は一致）

2. 点Ａ（最小距離となる点）は制御対象の移動に伴って移動する

経路追従の従来研究紹介



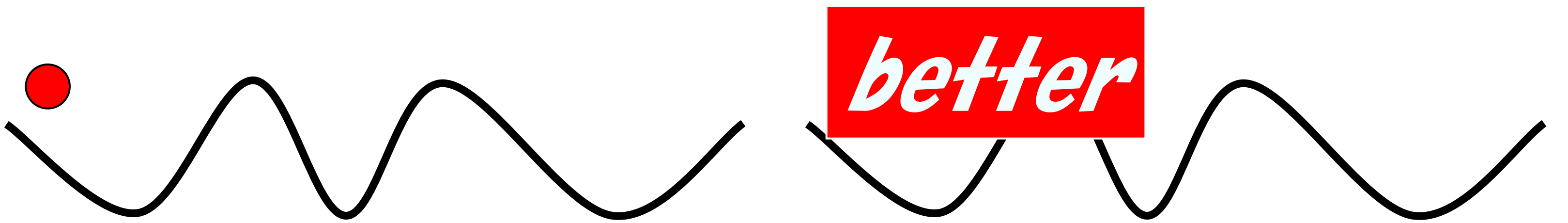
点Aのダイナミクス

$$\frac{dx_{re}}{dt} = f(x_{re}, v, \kappa)$$

$$x_{re} = \begin{bmatrix} \theta & s_r & z \end{bmatrix}^T$$

- $\lim_{t \to \infty} z = 0$ とする制御がなされている
- 数値例において，速度一定とされている

制御対象の速度と移動時間



速度が遅い場合　　　　　速度が速い場合

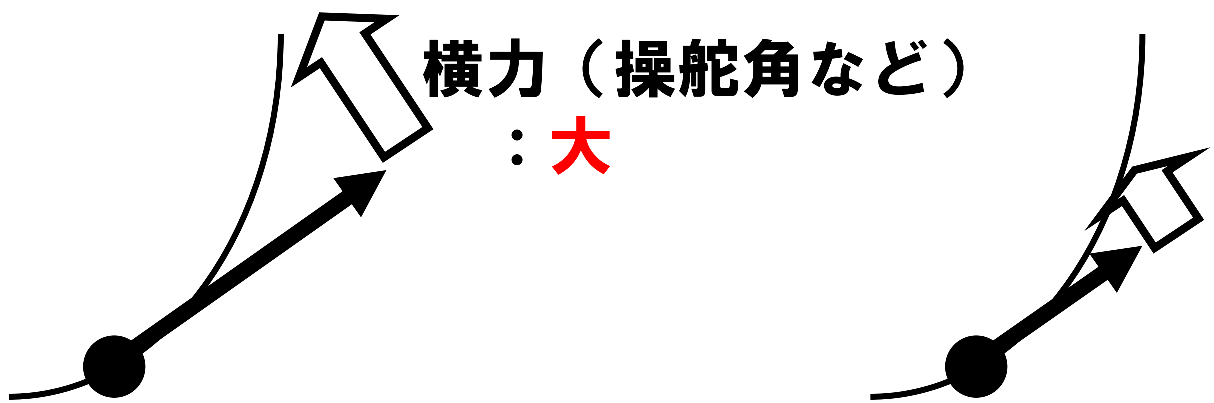
速度が速い方が移動時間を短くする意味では良い

移動に要する時間

（自動車やバイクのレース，高速のマニピュレータ動作では重要となる）

制御対象の速度と横力の関係

速度が速い **速度が遅い**



・大きな横方向の力が必要　・小さな横力で済む

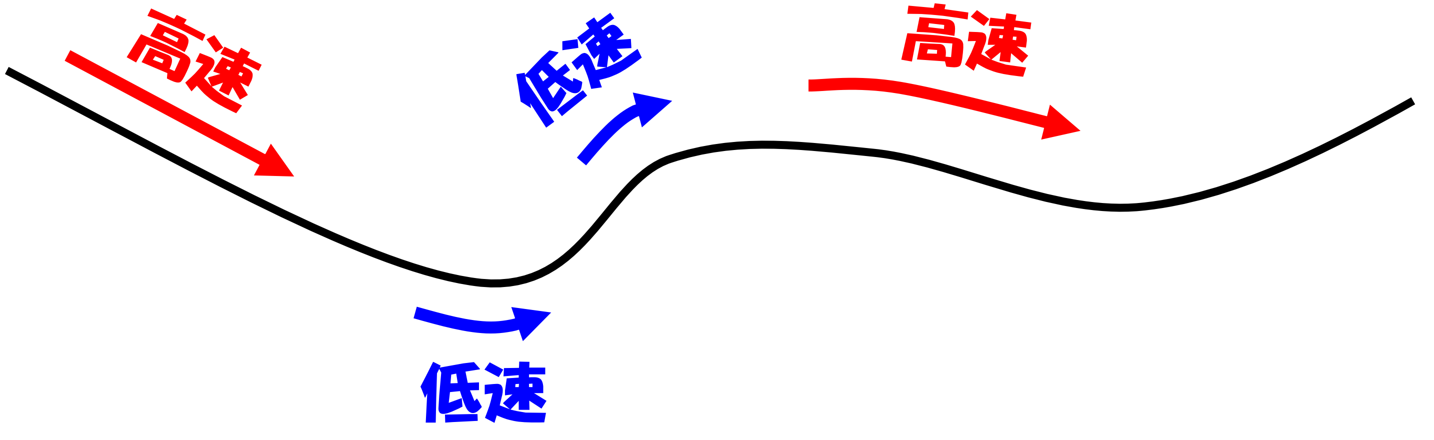
（・短時間での移動が可能　・移動に要する時間大）

移動時間と必要となる横力との間にはトレードオフ

制御対象の速度について

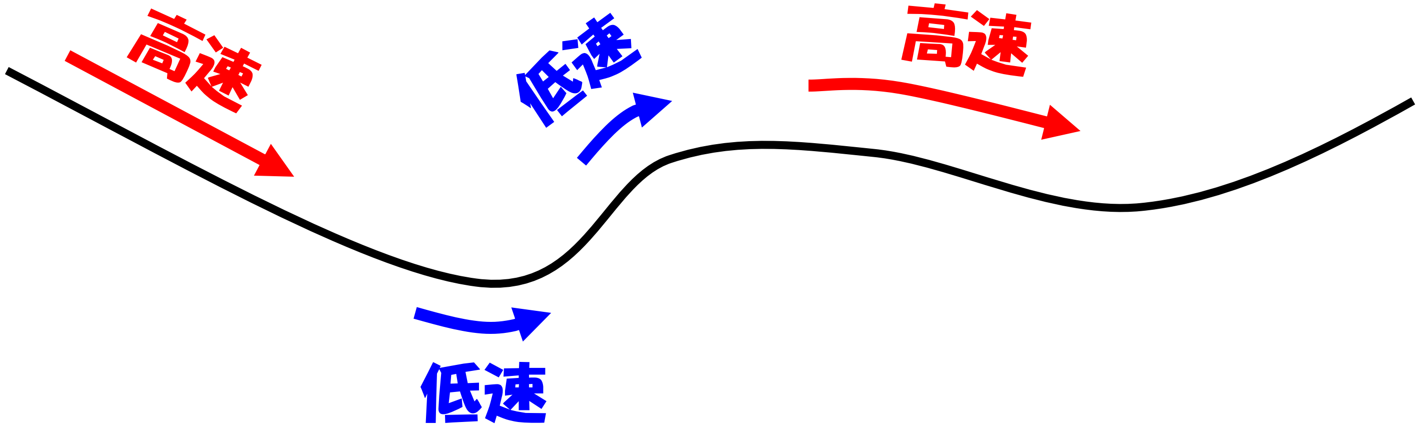
発生できる横力が決まっている場合

目標経路の形状によって，旋回時に可能な
最大速度は変化する．



（速度一定では**保守的**な結果になる）

本研究の目的



本研究の目的

目標経路の形状に合わせて**適切に加減速**を行う制御則の提案

アイディア

研究目的

目標経路の形状に合わせて**適切に加減速**を行う制御則の提案

方法およびアイディア

- 区間の**移動時間**，**入力の大きさ**（横力に関係）をそれぞれ評価する評価関数を考えその**最適化問題**として定式化
- 経路への追従は**最適化問題**において**制約条件**を付加することで達成

（以後，詳細について述べる）

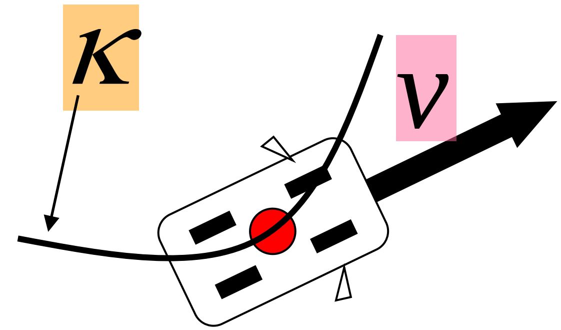
問題設定

制御対象：

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = f(x) + g(x)u$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 & \cdots & u_m \end{bmatrix}^T$$

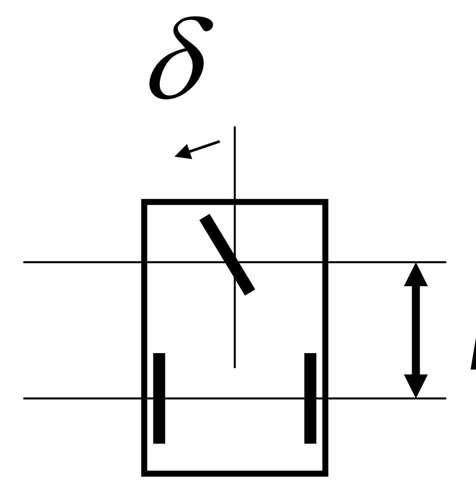
$m \geq 2$ とする



$$\kappa = h_{11}(x) + h_{12}(x)u_1$$

$$v = h_{21}(x)$$

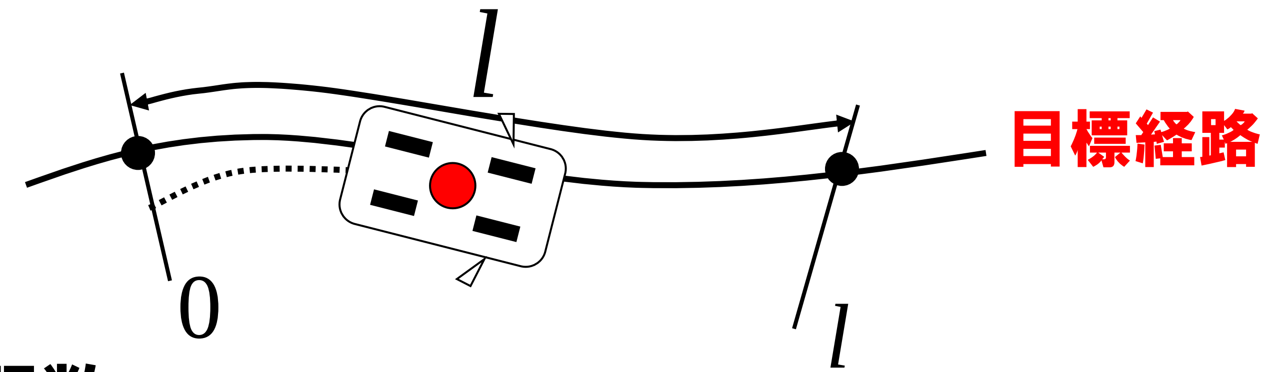
例：横滑りしない車両



$$\kappa = \tan\delta / l$$

最適制御の評価関数

評価区間：有限の区間 l を考える



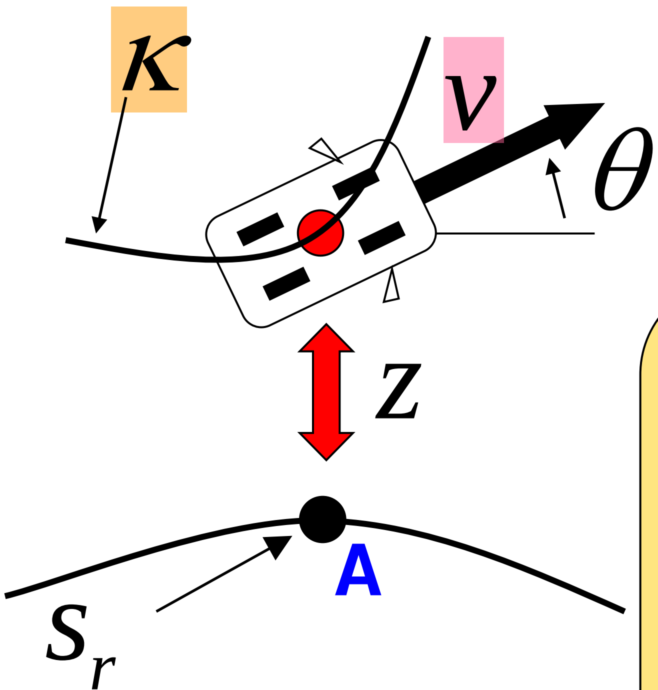
評価関数

$$J = \int_{t(0)}^{t(l)} \underbrace{\sum_{i=1}^{m} g_i \left(u_i(t)^2 \right) \mathrm{dt}}_{\text{入力の大きさを評価する項}} + \underbrace{g_T(t(l) - t(0))}_{\text{区間の移動時間}}$$

入力の大きさを評価する項

区間の移動時間

目標経路への追従



$$\kappa = h_{11}(x) + h_{12}(x)u_1$$

$\ddot{z} + a_1\dot{z} + a_2 z = 0$ を満足

するように

$$u_1 = f(x, u_2, \cdots, u_m)$$

を決定

経路追従のための制約条件

$u_2(t), \cdots, u_m(t)$ に依らず

$\lim_{t\to\infty} z = 0$ が成り立つ

最適制御問題

$$\min_{u_2 \cdots u_m} J \quad \text{subject to} \quad \Sigma$$

これらの入力で速度時系列を制御

評価関数

$$J = \int_{t(0)}^{t(l)} g_1 \boxed{f(x, u_2 \cdots u_m)^2} + \sum_{i=2}^{m} g_i \left(u_i(t)^2 \right) \mathrm{d}t + g_T (t(l) - t(0))$$

制約条件 Σ

$$\frac{\mathrm{d}\, x_{re}}{\mathrm{d}\, t} = f(x_{re}, v, \kappa) \qquad \frac{\mathrm{d}\, x}{\mathrm{d}\, t} = f(x) + g(x) u$$

$$v = h_{21}(x) \quad \kappa = h_{11}(x) + h_{12}(x) u_1$$

$$\boxed{u_1 = f(x, u_2, \cdots, u_m)}$$

経路追従用の入力

数値解の導出の流れ

前ページで与えた最適制御問題

↓

２点境界値問題に帰着

↓

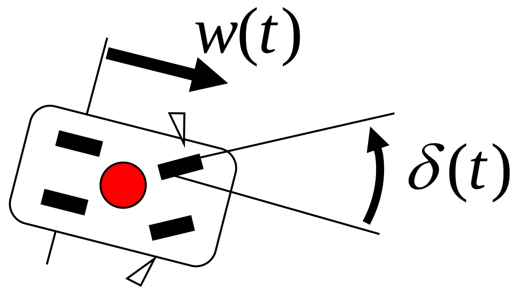
MATLABで数値解の導出

$$u_2(t), \cdots, u_m(t)$$

$$u_1 = f(x, u_2, \cdots, u_m)$$

数値例

制御対象　標準的に用いられる自動車運動モデル [安部]



状態
- すべり角　：$\beta(t)$
- ヨー角速度：$\dot{\psi}(t)$
- 車速　　　：$v(t)$

入力
- 操舵角　：$\delta(t)$
- アクセル
- ブレーキ　：$w(t)$

$u_1 = \delta$

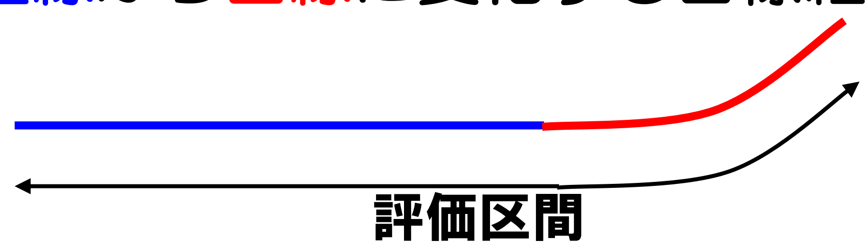
$u_2 = w$

→ **制御対象に関する条件を満たす**

曲率 $\kappa = \dfrac{a_{11}}{v^2}\beta + \dfrac{a_{12}}{v^3}\dot{\psi} + \dfrac{a_{13}}{v^2}\delta$

目標経路

直線から曲線に変化する目標経路



Kumamoto University

数値例①（車速一定と比較）

□ 車速一定

- $\lim_{t\to\infty} z = 0$ とする制御
- 速度一定となる入力 $w(t)$

● 提案手法

- 評価重み g_* を定める
- 制約条件 $\delta = f(x, w)$ の下で評価関数 J の最小化問題を解く

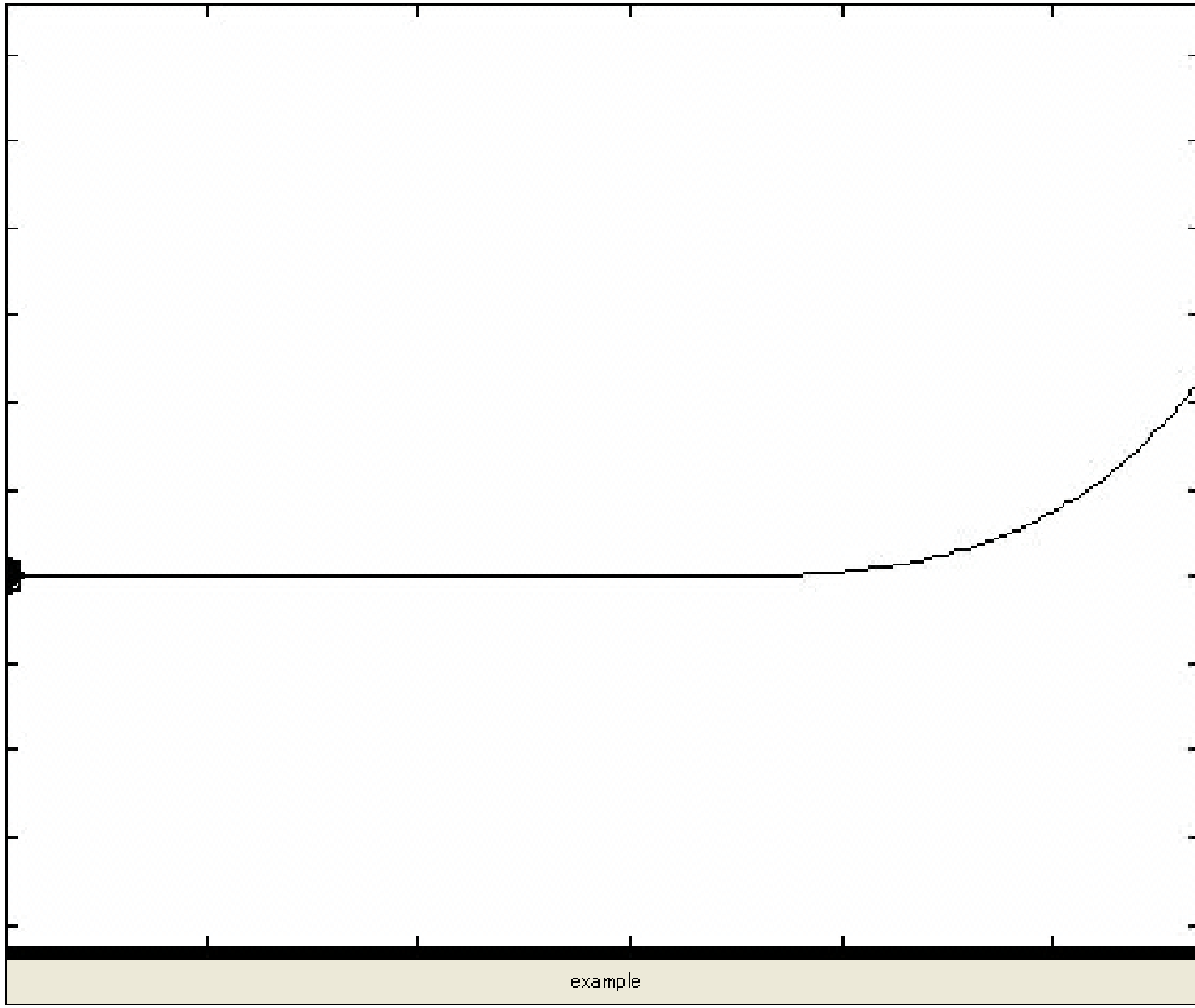
$$J = \int_{t(0)}^{t(l)} g_1\delta(x,w)^2 + g_2 w^2 \,\mathrm{dt} + g_3(t(l) - t(0))$$

数値例①（車速一定と比較）

● 提案手法

移動時間が□と同じになるような重み g_*

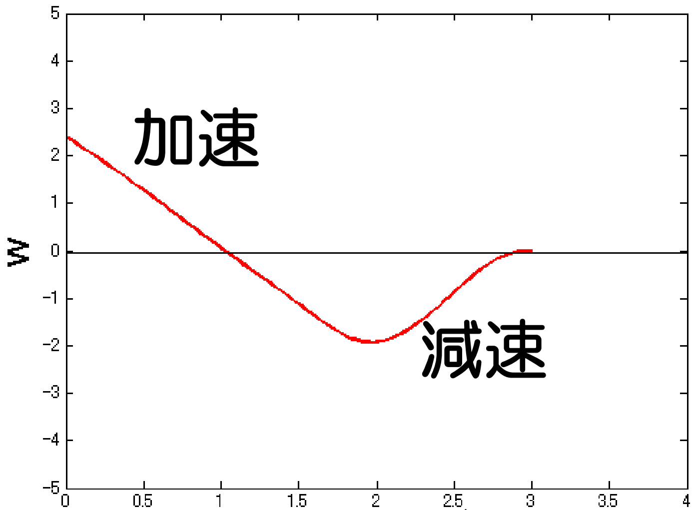
□ 車速一定



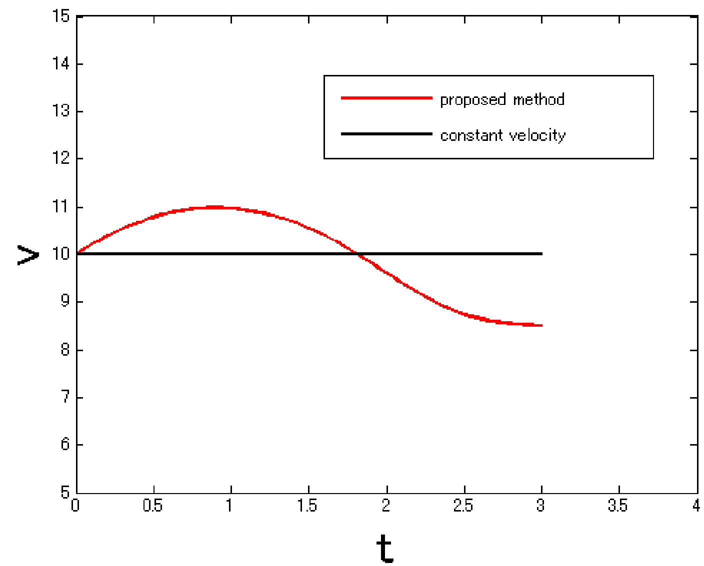
数値例①（車速一定と比較）

提案手法

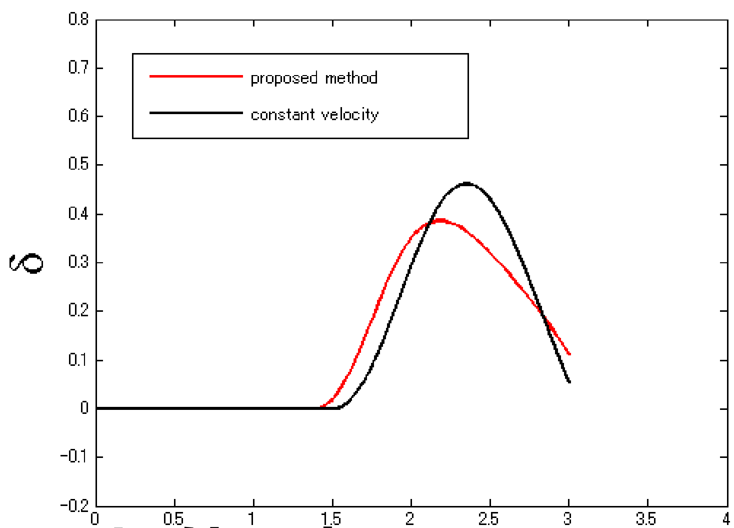
車速一定



アクセル, ブレーキ



制御対象速度

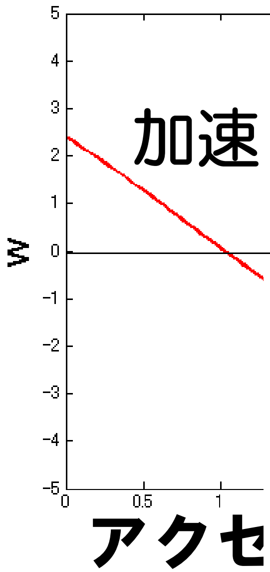


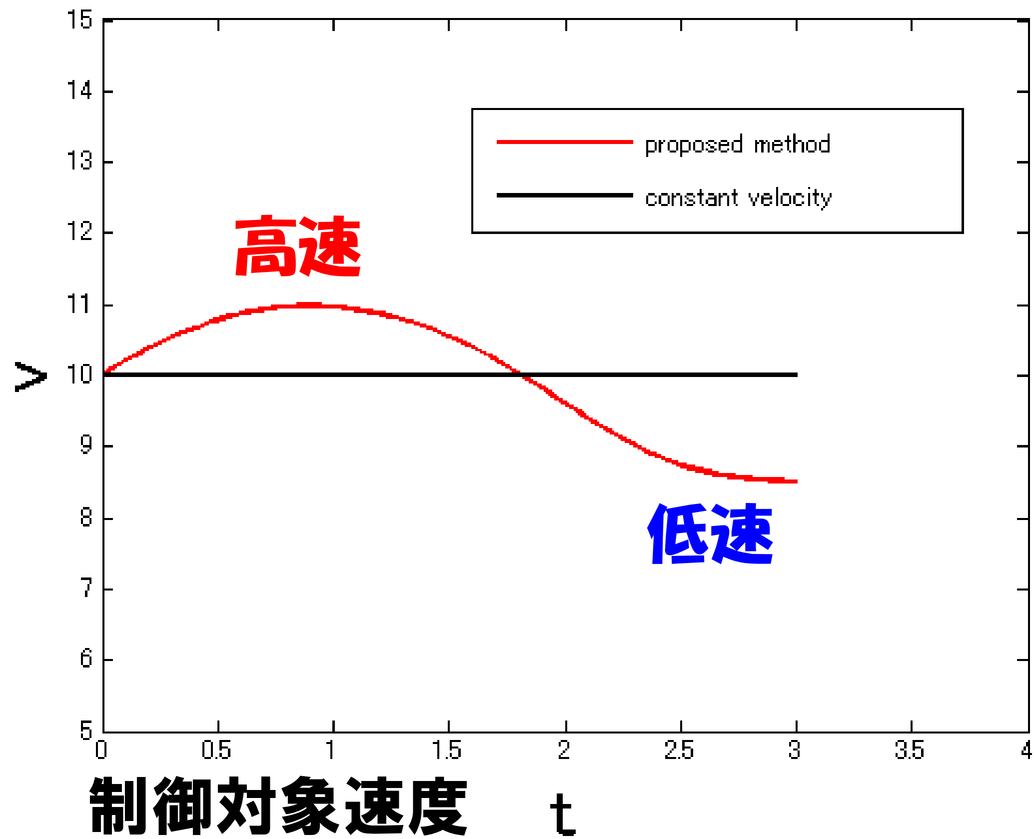
操舵入力　t

数値例①（車速一定と比較）

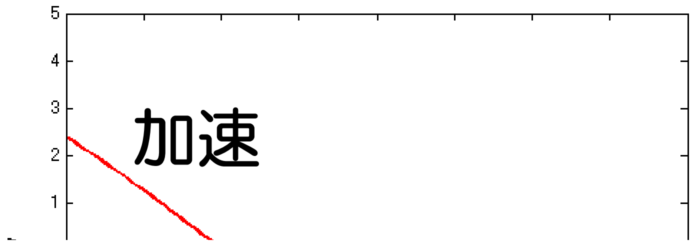
提案手法

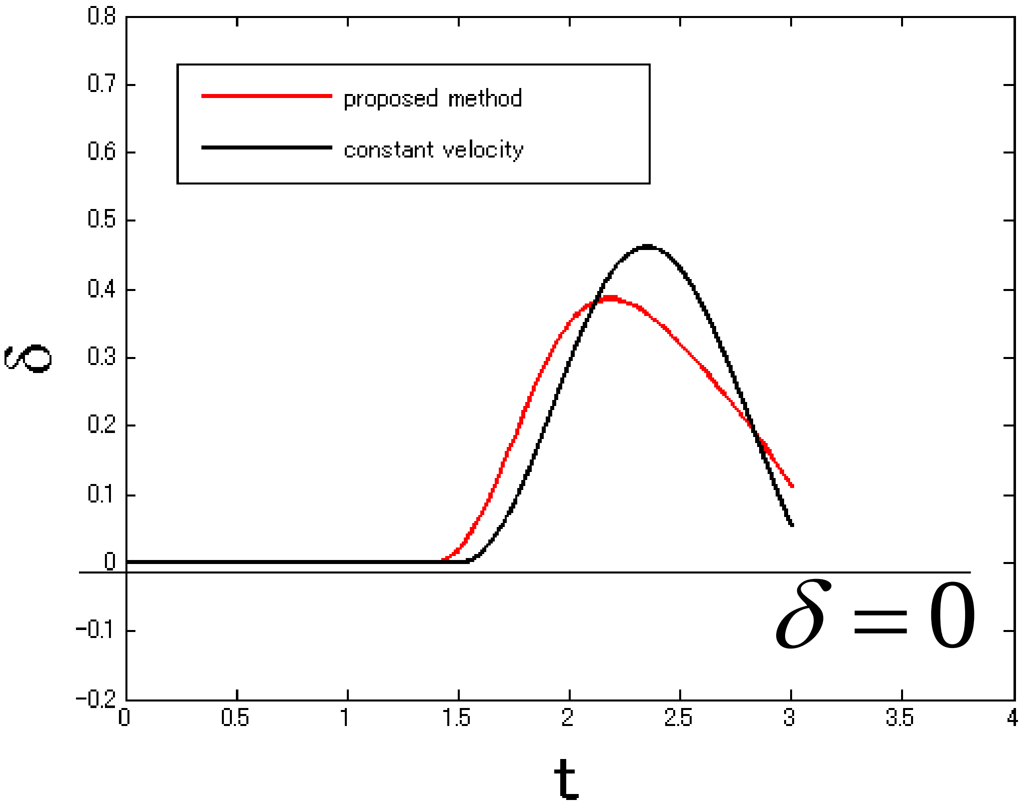
車速一定





数値例①（車速一定と比較）

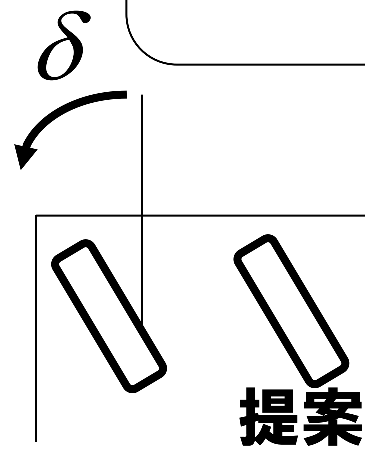




操舵入力

提案手法

車速一定



提案手法の方が
小さな操舵角δで
目標経路に追従

車速一定の場合よりも
良いといえる

Kumamoto University

数値例②

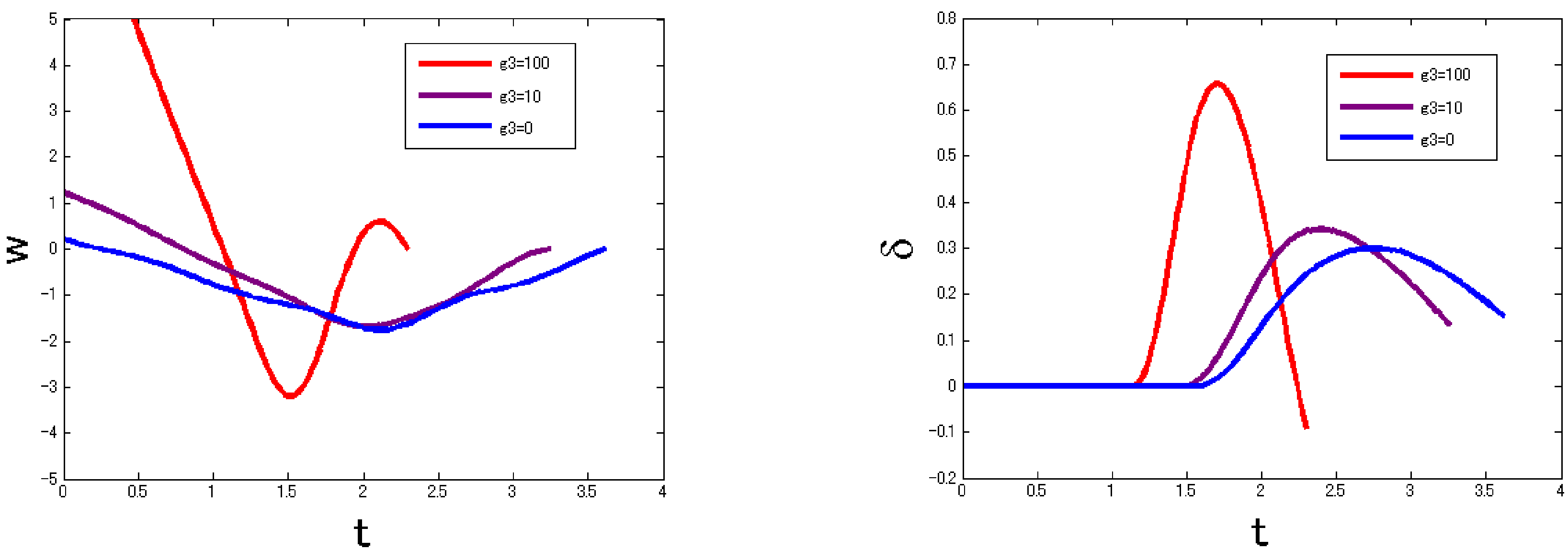
$$J = \int_{t(0)}^{t(l)} g_1 \delta(x,w)^2 + g_2 w^2 \, \mathrm{dt} + g_3 (t(l) - t(0))$$

目標経路は数値例①と同じ

g_1, g_2：固定

様々な g_3 に対する解

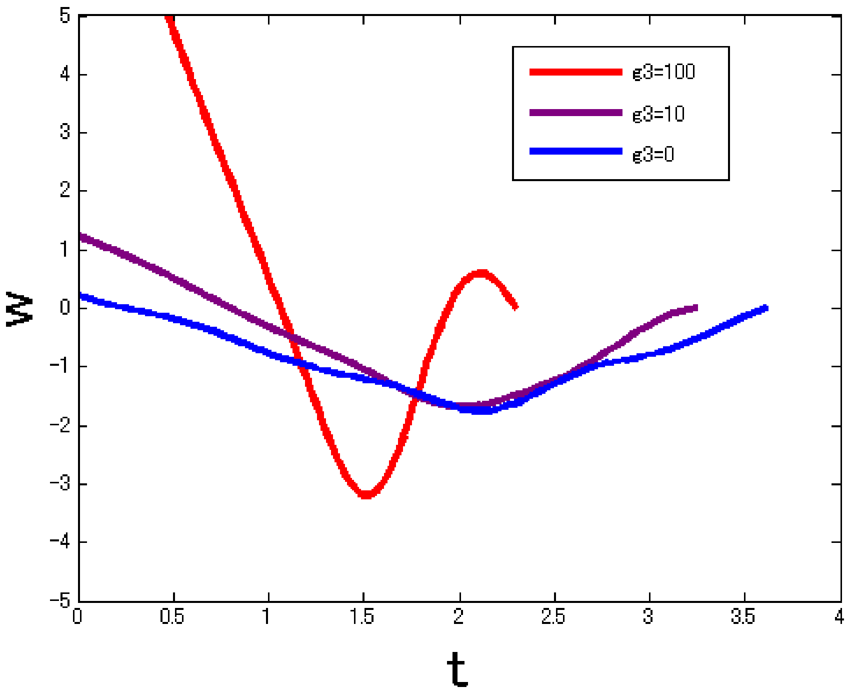
$g_3 = 0,\ 10,\ 100$



数値例②（$w(t)$, $v(t)$）

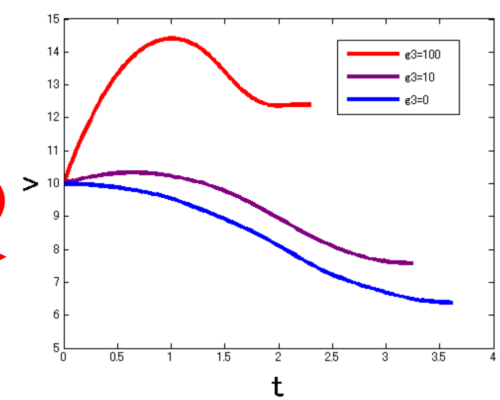
$$J = \int_{t(0)}^{t(l)} g_1 \delta(x, w)^2 + g_2 w^2 \, \mathrm{dt} + g_3 (t(l) - t(0))$$

$$g_3 = 0,\ 10,\ 100$$



g_3が大きいと加速するような入力 $w(t)$

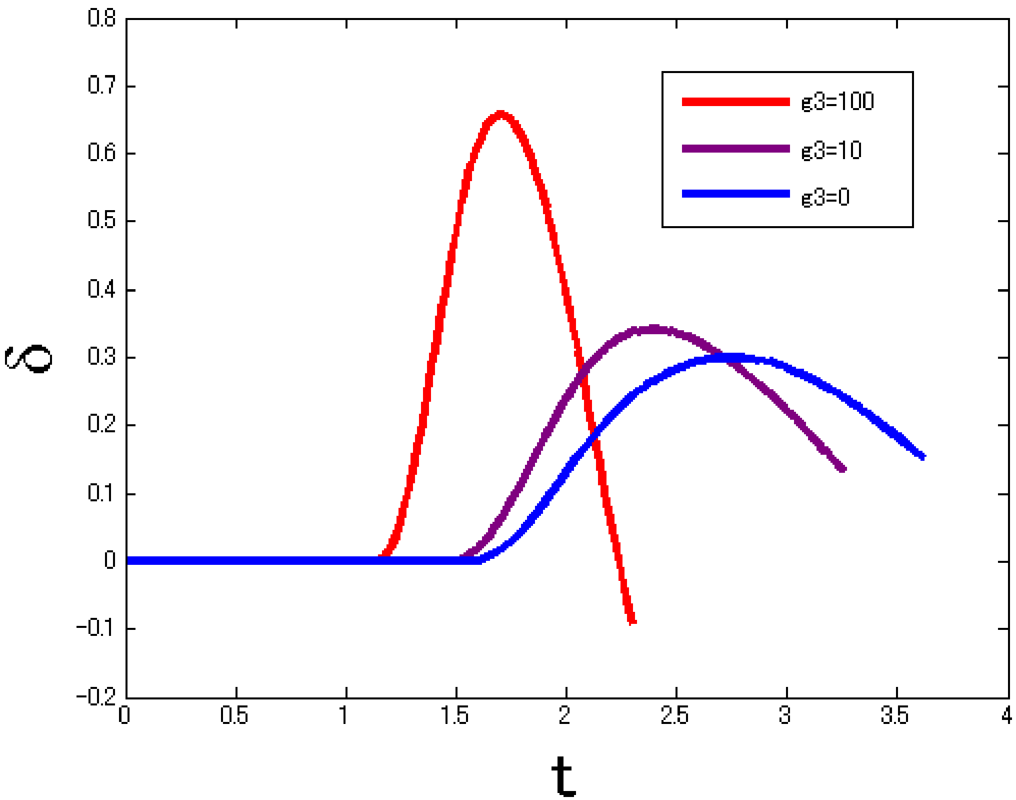
１００の場合は速度が速い（移動時間小）



数値例②（ $\delta(t)$ ）

$$J = \int_{t(0)}^{t(l)} g_1 \delta(x, w)^2 + g_2 w^2 \, \mathrm{dt} + g_3 (t(l) - t(0))$$

$g_3 = 0,\ 10,\ 100$



g_3 が大きいと操舵角 $\delta(t)$ が大きくなってしまう

本手法によって，
入力と移動時間の
トレードオフが扱える

おわりに

•経路追従問題において，最適制御問題の枠組みで適切に加減速を行う速度制御則を提案した

評価関数（移動時間，入力の大きさ評価）

$$J = \int_{t(0)}^{t(l)} g_1 f(x, u_2 \cdots u_m)^2 + \sum_{i=2}^{m} g_i \left(u_i(t)^2 \right) \mathrm{dt} + g_T (t(l) - t(0))$$

制約条件（経路に追従するような条件）

$\lim_{t \to \infty} z = 0$ **となる入力** $u_1 = f(x, u_2, \cdots, u_m)$