

1 はじめに

● むだ時間系に対する H^2/H^∞ 制御則は, 原理的には, むだ時間要素の状態変数を組み込んだ拡大Riccati/KYP方程式を解くことで構成できる。

- H^2 制御とは... インパルス応答のエネルギー (2乗面積) を最小化する. 良好な過渡応答を示す制御系を設計するために用いる.
- H^∞ 制御とは... 外乱に対する被制御量の最悪エネルギー比を正数 γ 未満にする. 変動が存在しても安定な制御系を設計するために用いる.

拡大Riccati/KYP方程式の問題点

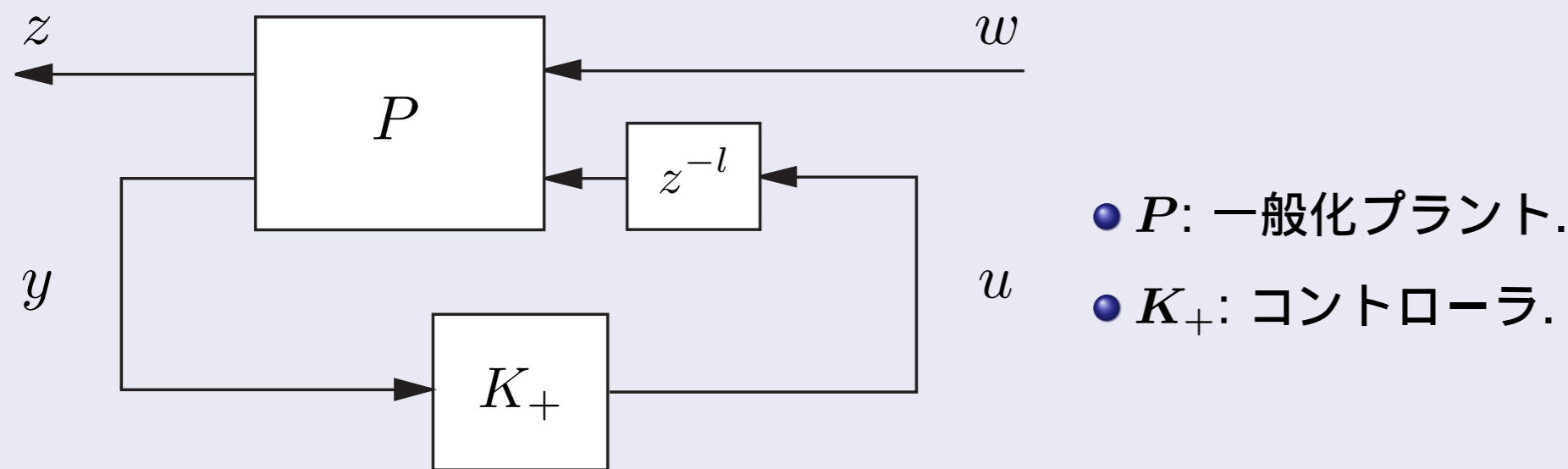
- 連続時間の場合... 非線形の連立偏微分方程式になる. 近似解を用いると安定性や次数の問題を生じる.
- 離散時間の場合... 次の理由から, 高精度な数値解を得ることが難しい:
 - 1) むだ時間の長さに応じて次数が線形に増大する;
 - 2) むだ時間要素のゼロ固有値のために一般化固有値問題を解く必要がある.

● 本研究では, 離散時間入力むだ時間系および連続時間予見制御系における低次元構成問題に対して, 内部状態変数に着目したアプローチを提案した。

低次元構成問題

- 連続時間の場合... 非線形の連立偏微分方程式を解くことなく, またはそれを行列方程式に帰着させることで H^2/H^∞ 制御則を構成する.
- 離散時間の場合... むだ時間に依存しない次数の行列方程式を解くことで, 拡大系のRiccati/KYP方程式の解または H^2/H^∞ 制御則を構成する.

2 状態変数の分解によるアプローチ [1], [2]

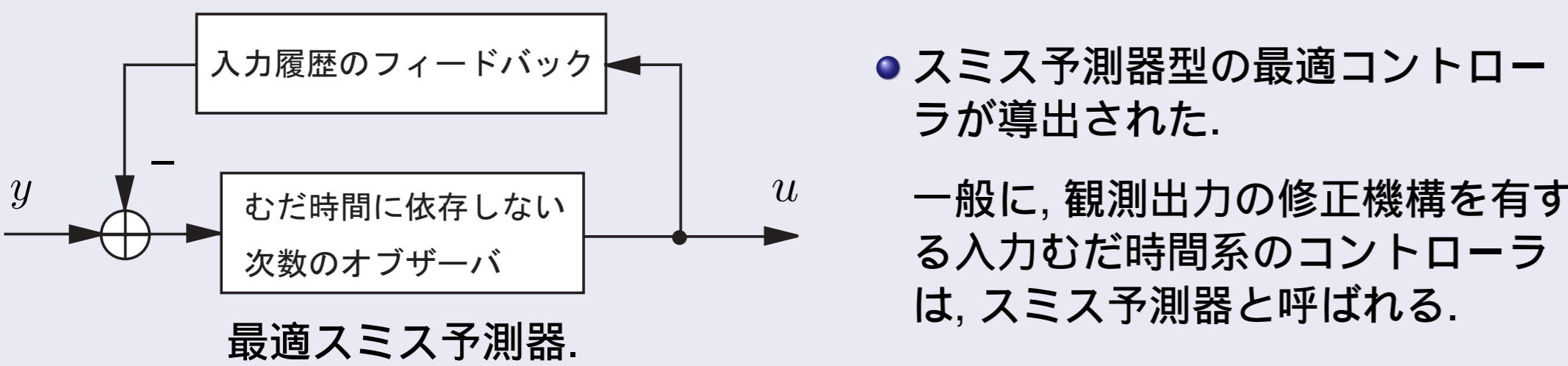


離散時間入力むだ時間系.

P の状態変数 $x(n)$ の分解

$$x(n) = x^R(n) + \epsilon(n).$$

- $x^R(n)$: むだ時間に依存しない次数の動特性をもつ状態変数.
- $\epsilon(n)$: 安定な動特性をもつ状態変数.



最適スミス予測器.

- スミス予測器型の最適コントローラが導出された.

一般に, 観測出力の修正機構を有する入力むだ時間系のコントローラは, スミス予測器と呼ばれる.

3 他のアプローチの検討 [4]

● 文献 [2] では, 入力むだ時間系に対する H^∞ 状態フィードバック則の構成条件を以下のように与えた.

Jスペクトル分解による構成条件

(J1) シンプレクティック行列:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{E}_{11\lambda}(l) & \mathcal{E}_{12\lambda}(l) \\ \mathcal{E}_{21\lambda}(l) & \mathcal{E}_{22\lambda}(l) \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} A - \frac{1}{\lambda^2} B_1 B_1^* A^{-*} C_1^* C_1 & -\frac{1}{\lambda^2} B_1 B_1^* A^{-*} \\ A^{-*} C_1^* C_1 & A^{-*} \end{bmatrix}^l$$

は次の行列式条件を満たす.

$$\forall \lambda \geq \gamma \text{ に対して, } \det(\mathcal{E}_{22\lambda}(l) + X_\lambda \mathcal{E}_{12\lambda}(l)) \neq 0.$$

(J_w2) 条件(J1)より定まる重み行列 $R_{\text{mmc}\gamma}^R$ に関する定値性条件.

● 文献 [4] では, min-max最適化により, 異なった種類の構成条件を導いた.

min-max最適化

$$\text{最適化目標: } \max_{w \in \ell^2[0, \infty)} \min_{u \in \ell^2[0, \infty)} \sum_{n=0}^{\infty} \|z(n)\|_2^2 - \gamma^2 \|w(n)\|_2^2.$$

$$\text{状態方程式制約: } \begin{cases} x(n+1) = Ax(n) + B_1 w(n) + B_2 u(n-l), \\ z(n) = C_1 x(n) + D_{12} u(n-l). \end{cases}$$

min-max最適化による構成条件

(DA1) リカッチ差分方程式 ($\theta = l, l-1, \dots, 1$):

$$X_\gamma(\theta-1) = C_1^* C_1 + A^* \left(I - \frac{1}{\gamma^2} X_\gamma(\theta) B_1 B_1^* \right)^{-1} X_\gamma(\theta) A, \quad X_\gamma(l) = X_\gamma$$

の解 $X_\gamma(\theta)$ は次の定値条件を満たす.

$$\forall \theta \in [1, l] \text{ に対して, } \gamma^2 I - B_1^* X_\gamma(\theta) B_1 > O.$$

(DA2) 条件(DA1)より定まる重み行列 $R_{\text{mmc}\gamma}^+$ に関する定値性条件.

上記構成条件における X_λ ($\lambda \geq \gamma$) は, むだ時間に依存しない次数のKYP方程式を解くことにより定まる.

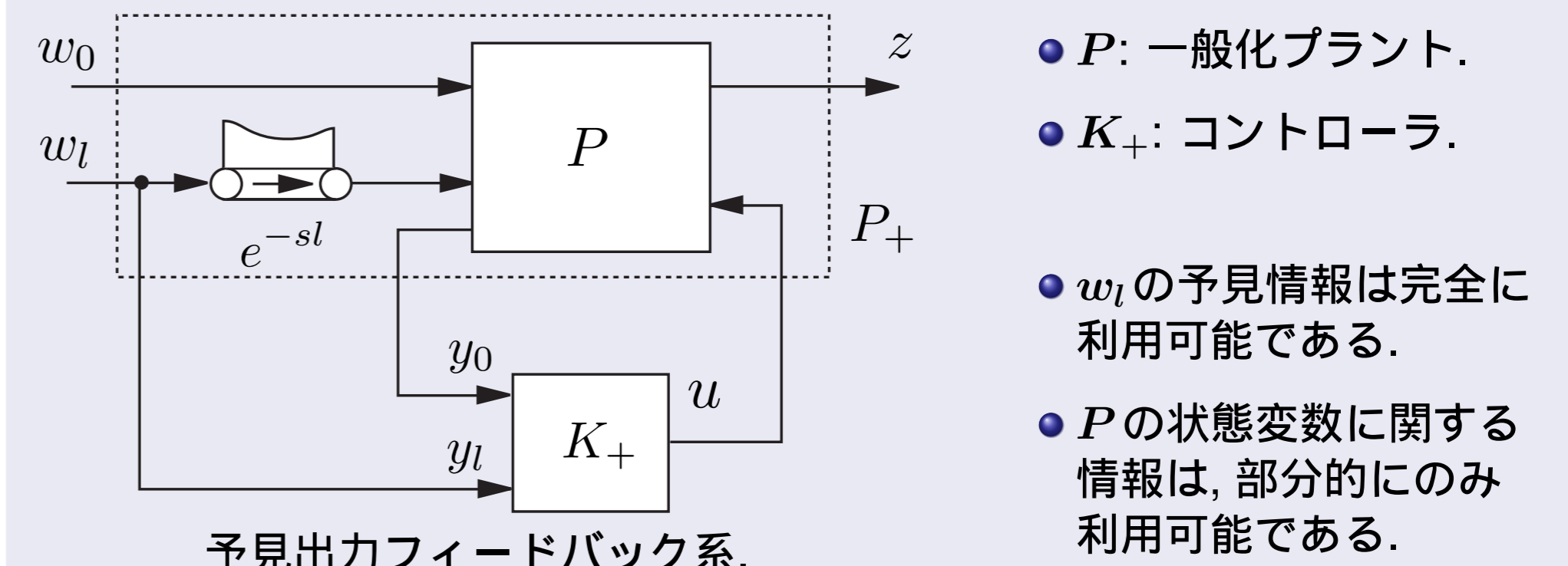
4 予見制御とは

- 目標値または外乱の未来情報を利用することにより, 制御性能の改善を図る制御手法である.
- 多数の応用が報告されている: 車両の乗り心地の改善, 鉄鋼圧延工程の高精度化, 工作機械の軌道計画.
- 予見制御問題は, 外乱が遅れて本来の制御対象に加わるものとして定式化できる. 連続時間系の場合は, 全体の制御対象は無次元系となる.

5 部分情報に基づいた予見制御 [3], [5]

● 厳密に可解な予見出力フィードバック問題のクラスを知ることは, 理論, 応用の両方において重要である.

● 本研究では, 以下のクラスの予見出力フィードバック問題を解いた.



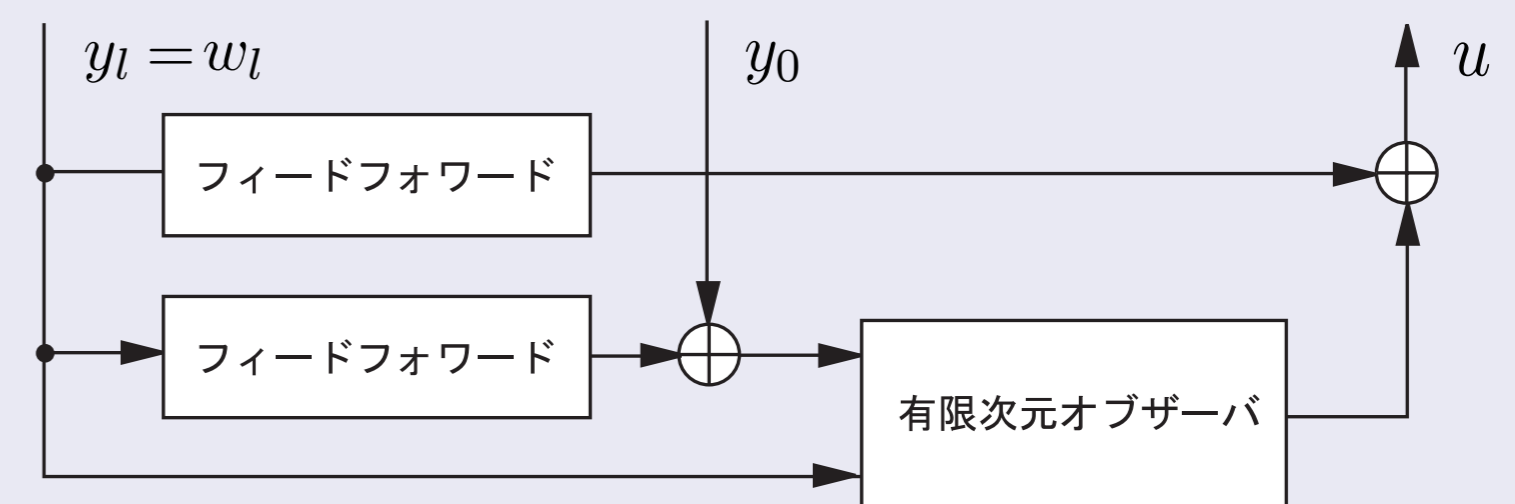
予見出力フィードバック系.

- P : 一般化プラント.
- K_+ : コントローラ.

● w_l の予見情報は完全に利用可能である.

● P の状態変数に関する情報は, 部分的にのみ利用可能である.

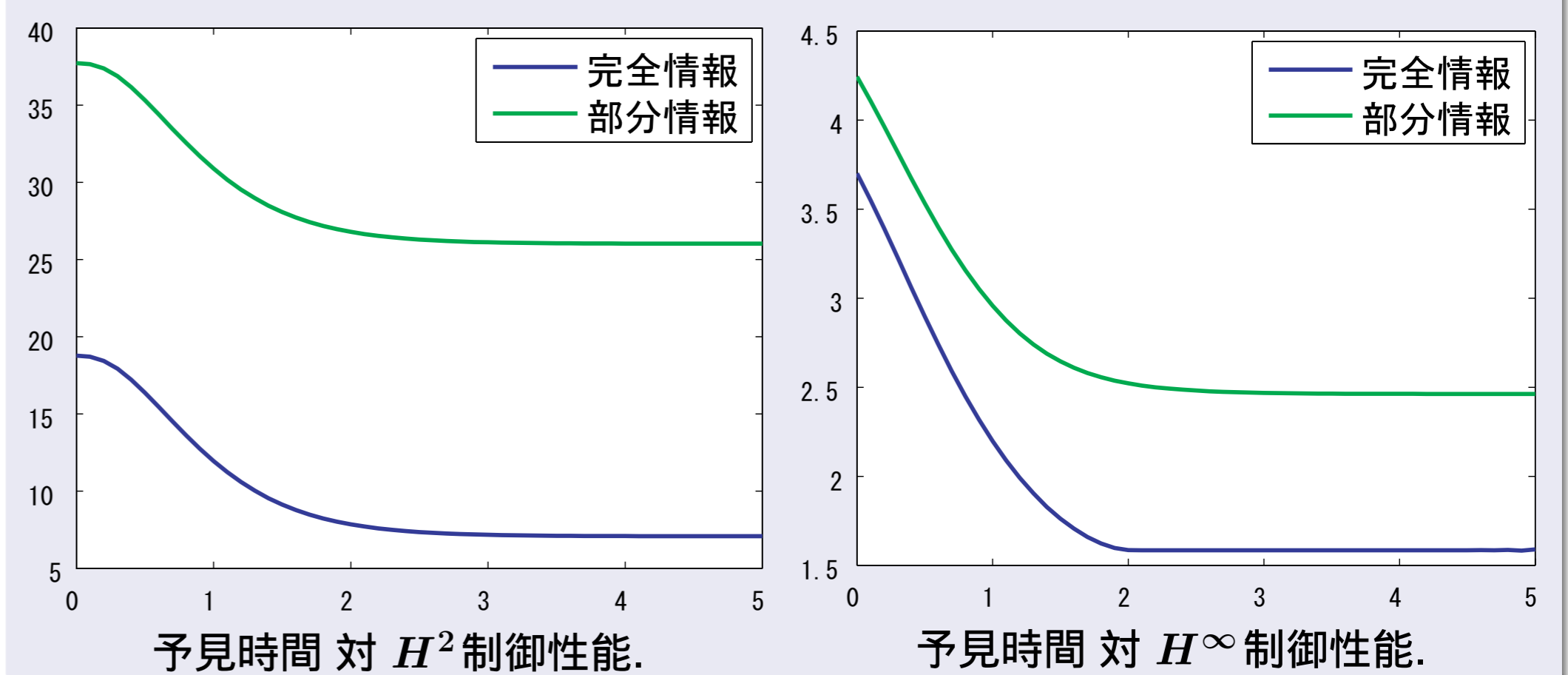
● 離散時間入力むだ時間系に対する状態変数の分解と同様の手法により, 最適コントローラを定めた.



最適予見フィードフォワード.

6 予見による制御性能の改善

$$P_+ : \begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 3 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_0(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} w_l(t-l) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \\ z(t) = \begin{bmatrix} 1 & -0.2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \\ \begin{bmatrix} y_0(t) \\ y_l(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} w_0(t) + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} w_l(t). \end{cases}$$



主要結果

[1] K. Hashikura, Y. Ohta and A. Kojima: An internal state decomposition approach to a discrete-time H^2 control problem with irrational input non-minimum phase property, Systems & Control Letters, Vol. 61, No. 4, pp. 513–520, 2012.

[2] K. Hashikura, A. Kojima and Y. Ohta: On a discrete-time H^∞ control problem with additional input non-minimum phase property, Proc. MTNS 2012, 2012.

[3] K. Hashikura, A. Kojima and Y. Ohta: On construction of an H^∞ preview output feedback law, SICE JCMSI, Vol. 6, No. 3, pp. 167–176, 2013.

[4] K. Hashikura, A. Kojima and Y. Ohta: Reduced-order construction of H^∞ state feedback law for discrete-time single input-delayed systems, Proc. CPDE 2013, 2013.

[5] 端倉, 児島: 部分情報に基づいた H^2 予見制御, 第56回 自動制御連合講演会にて発表予定, 2013.