

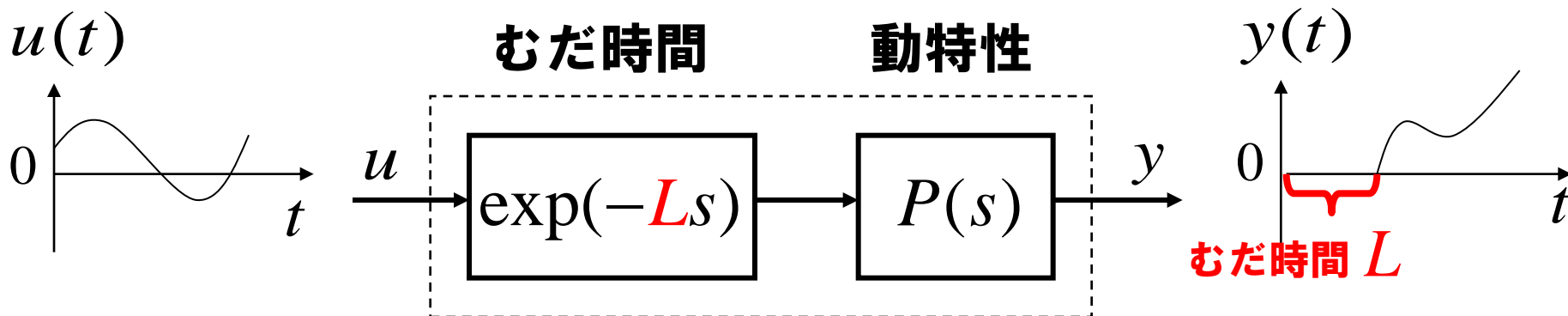
# むだ時間系の内部モデル制御 における動的量子化器の構成

熊本大学大学院自然科学研究科

○岡島 寛 , 梅本 達也

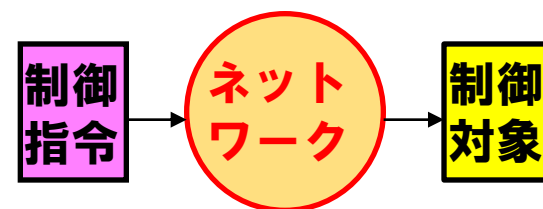
松永 信智, 川路 茂保

---



## 入力むだ時間系の例

- 圧延プロセス, ベルトコンベア (センサ・アクチュエータ非同期系)
- ネットワークを介した制御系
- 熱制御系 (半導体製造プロセスなど)

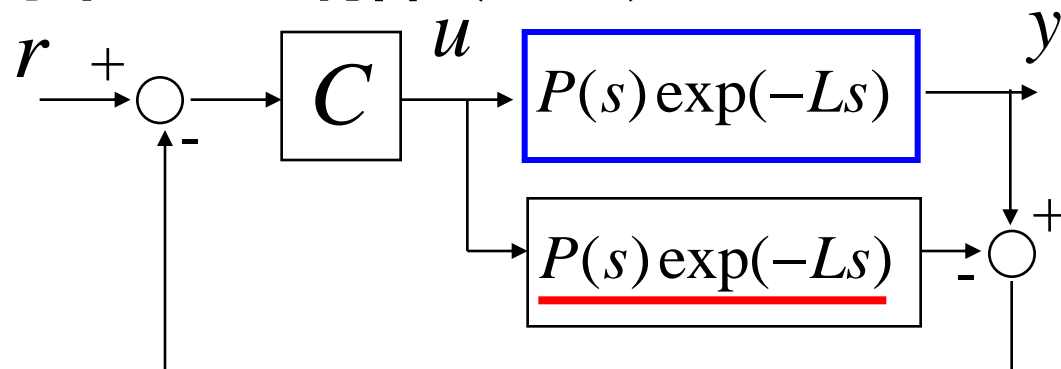


むだ時間を持つ制御系は  
制御が難しい系として知られている

# 研究背景

入力むだ時間に対する有効な制御手法

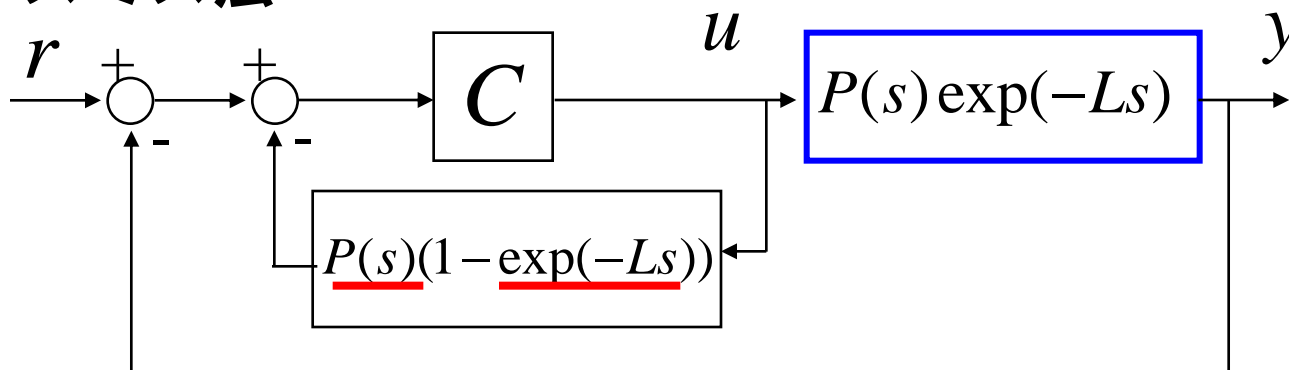
## 内部モデル制御 (IMC)



## □ 制御対象

$P(s)$  は安定

## スミス法

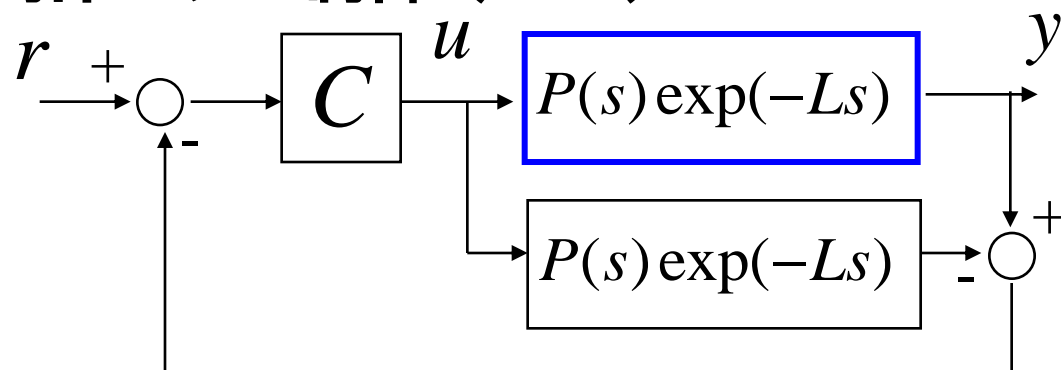


制御器内部に制御対象と同じモデルを含む

# 研究背景

入力むだ時間系に対する有効な制御手法

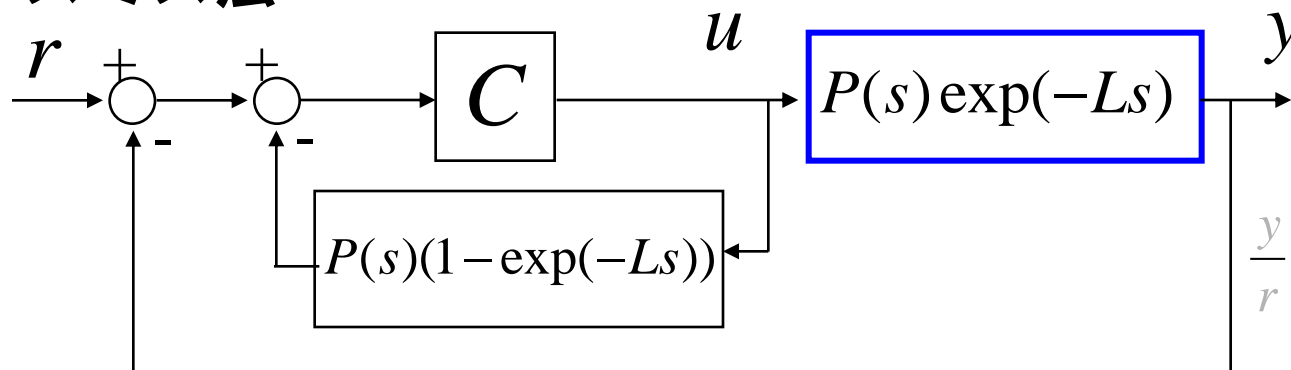
## 内部モデル制御 (IMC)



## □ 制御対象

$$\frac{y}{r} = PC \exp(-Ls)$$

## スミス法



$$\frac{y}{r} = \frac{PC}{1+PC} \exp(-Ls)$$

入出力伝達関数が有理関数とむだ時間の積で表される

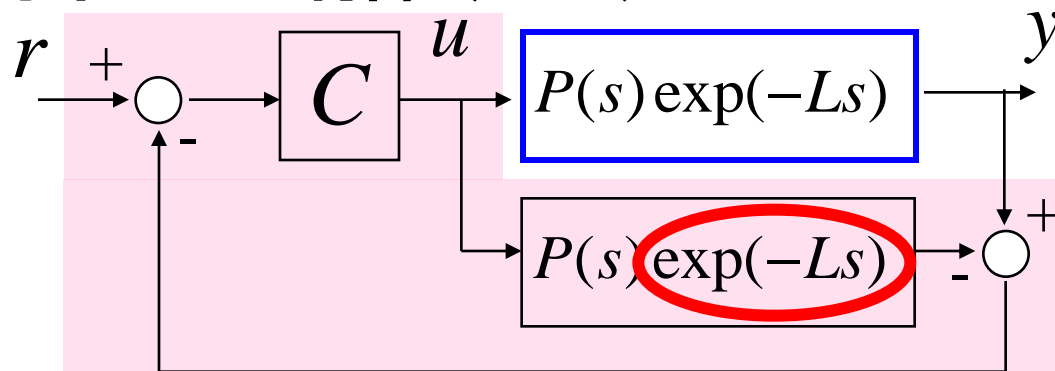
コントローラ的设计が容易, 良い過渡特性が実現可能

# 研究背景

入力むだ時間系に対する有効な制御手法

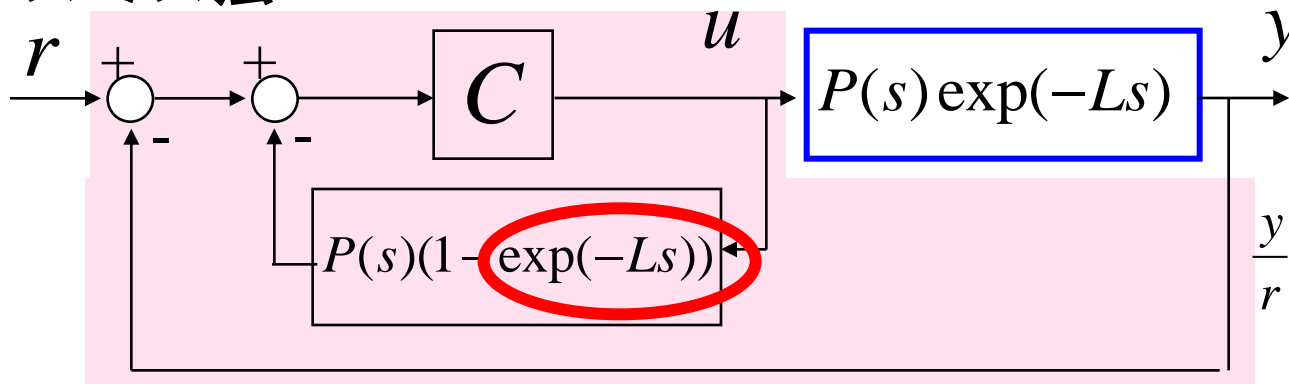
## 内部モデル制御 (IMC)

### □ 制御対象



$$\frac{y}{r} = PC \exp(-Ls)$$

## スミス法



$$\frac{y}{r} = \frac{PC}{1+PC} \exp(-Ls)$$

制御器内部でむだ時間を実現しなければならない

MCU(マイコン)において内部モデル制御, スミス法を  
実装する場合



系を**離散化**し, メモリでむだ時間  $1/z^N$  を実現:

むだ時間長さ分のデータを**メモリ**にキュー構造で保持

むだ時間の実現に必要なメモリ: \_\_\_\_\_

**むだ時間長さ**  
—————  
**サンプリング時間**

× **(1 サンプリング当たりのメモリ)**

例えば8ビットなら**分解能256**

メモリは有限なので, **制御周期** (サンプリング時間) と  
**分解能**との間にトレードオフが存在

# 従来のむだ時間実現手法

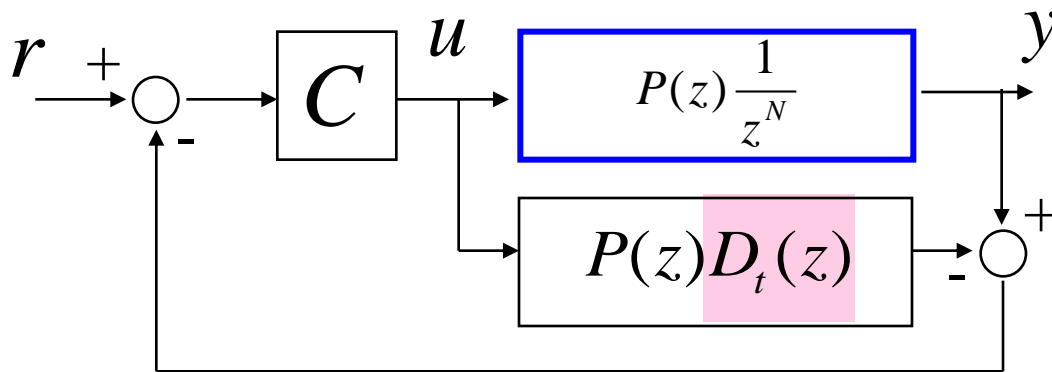
## 1. サンプリング時間を調整

各時刻のデータが低分解能なものにならないように、  
**制御周期を長くする**

**問題点**：速い制御周期が要求される系で実現できない

## 2. パディ近似などの有理関数近似により実現

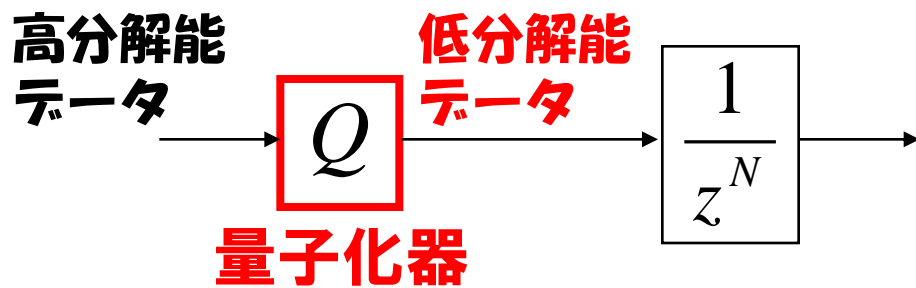
$$\frac{1}{z^N} \approx D_t(z)$$



**問題点**：速い信号に対応できない

# 本研究でのむだ時間の実現

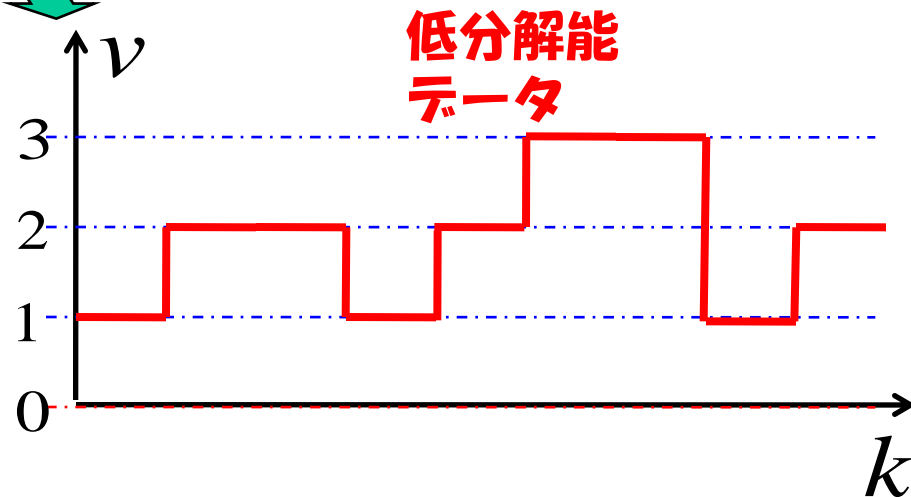
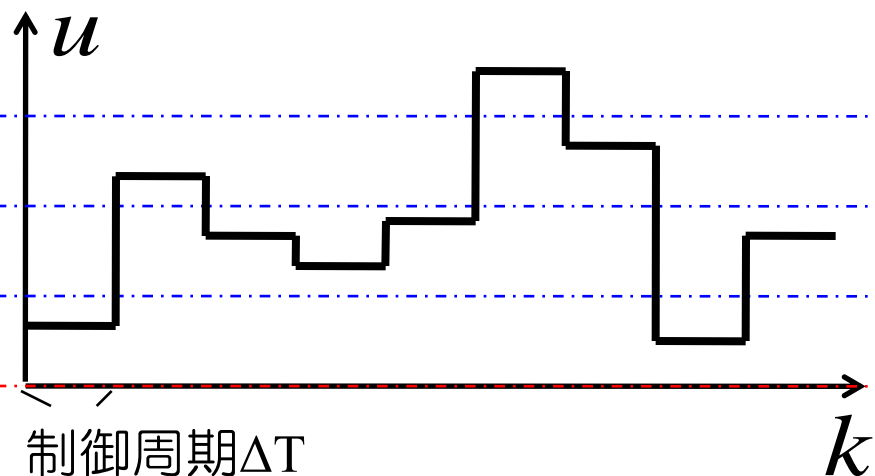
「短い制御周期」, 「低分解能データ」での実現



必要メモリ：

$N \times$  低分解能データ

量子化の例 (四捨五入)

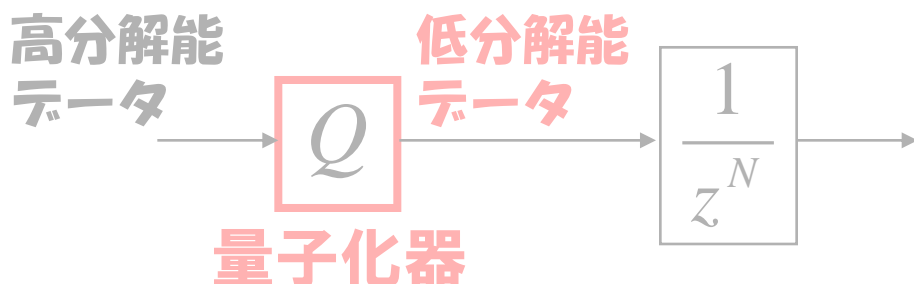




# 本研究でのむだ時間の実現

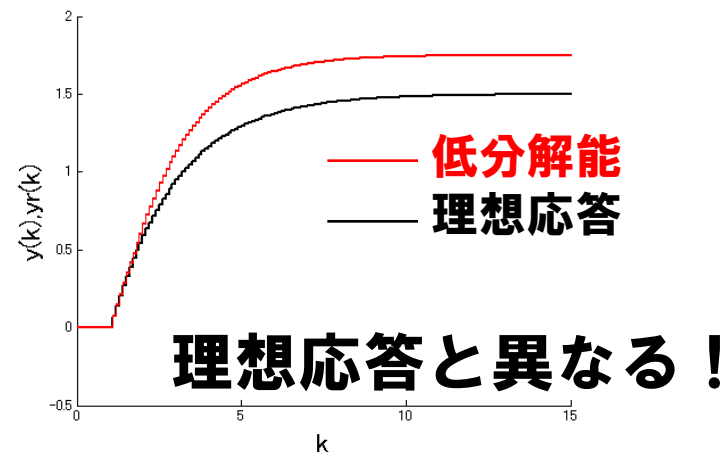
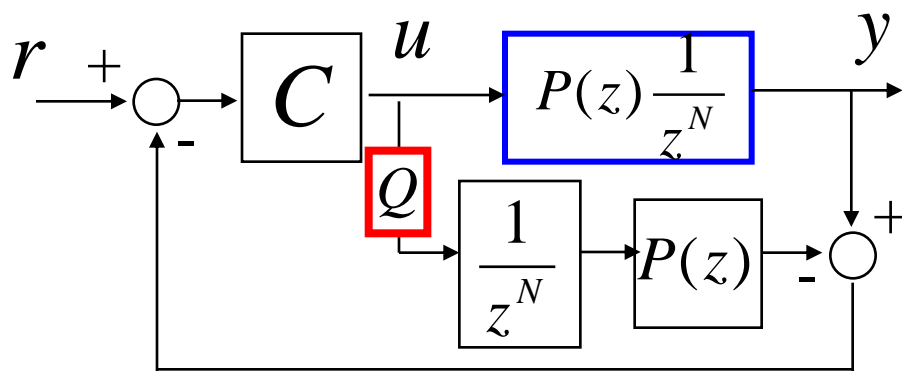
9

「短い制御周期」，「低分解能データ」での実現



必要メモリ：

$N \times$  低分解能データ



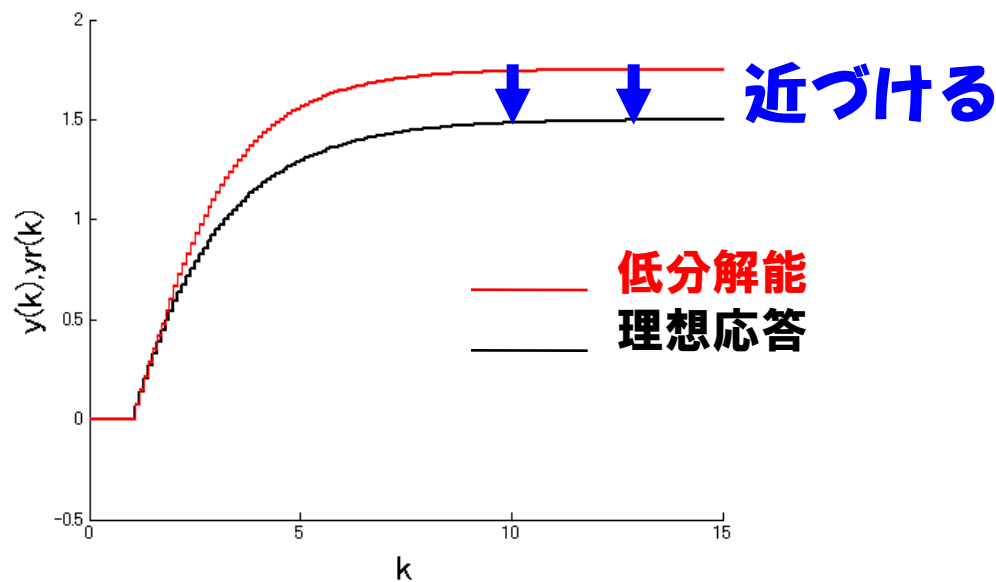
問題点

➡ 量子化ノイズの発生に伴い，性能劣化が生じる

内部モデル制御のためのむだ時間実現

「短い制御周期」，「低分解能データ」での実現

量子化手法を工夫することで、  
出力に現れる量子化ノイズの影響を低減する



## 内部モデル制御のためのむだ時間実現

「短い制御周期」，「低分解能データ」での実現

量子化手法を工夫することで、  
出力に現れる量子化ノイズの影響を低減する

### 動的量子化器

- ・動的量子化器と静的量子化器との出力比較

### 量子化器配置問題

- ・量子化器の配置に起因する性能解析

量子化手法を工夫することで、  
出力に現れる量子化ノイズの影響を低減する

## 動的量子化器

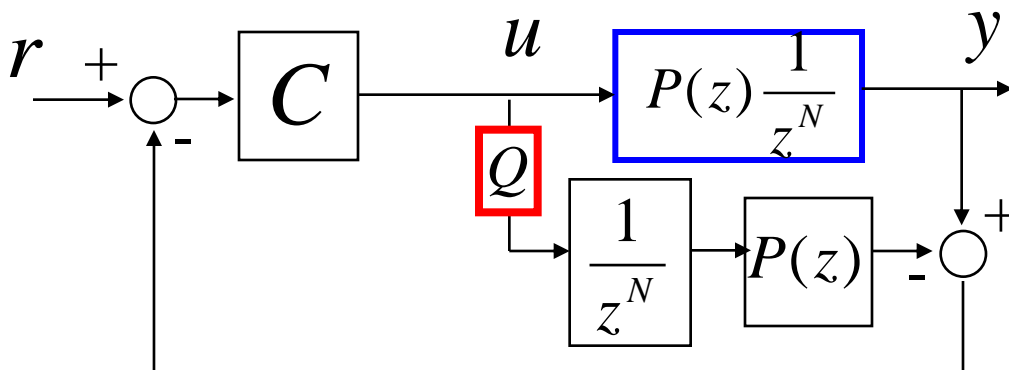
- ・動的量子化器と静的量子化器との出力比較

## 量子化器配置問題

- ・量子化器の配置に起因する性能解析

$$\boxed{Q} \begin{cases} \xi(k+1) = A \xi(k) - B u(k) + B v(k) \\ v(k) = Q_{stat} [C \xi(k) + u(k)] \end{cases}$$

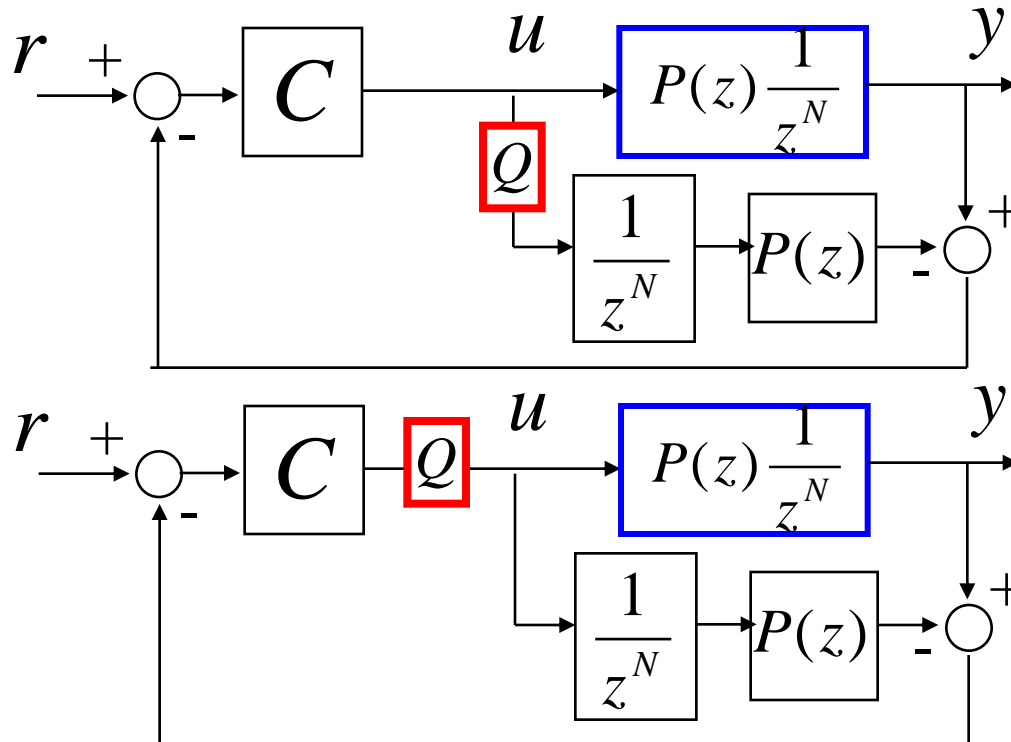
過去の量子化情報を  
フィードバック  
( $\Delta\Sigma$ 変調など)



量子化手法を工夫することで、  
出力に現れる量子化ノイズの影響を低減する

## 量子化器配置問題

- 量子化器の配置に起因する性能解析



異なる配置

研究の背景, 目的

(IMCにおけるむだ時間実現)

**問題設定**

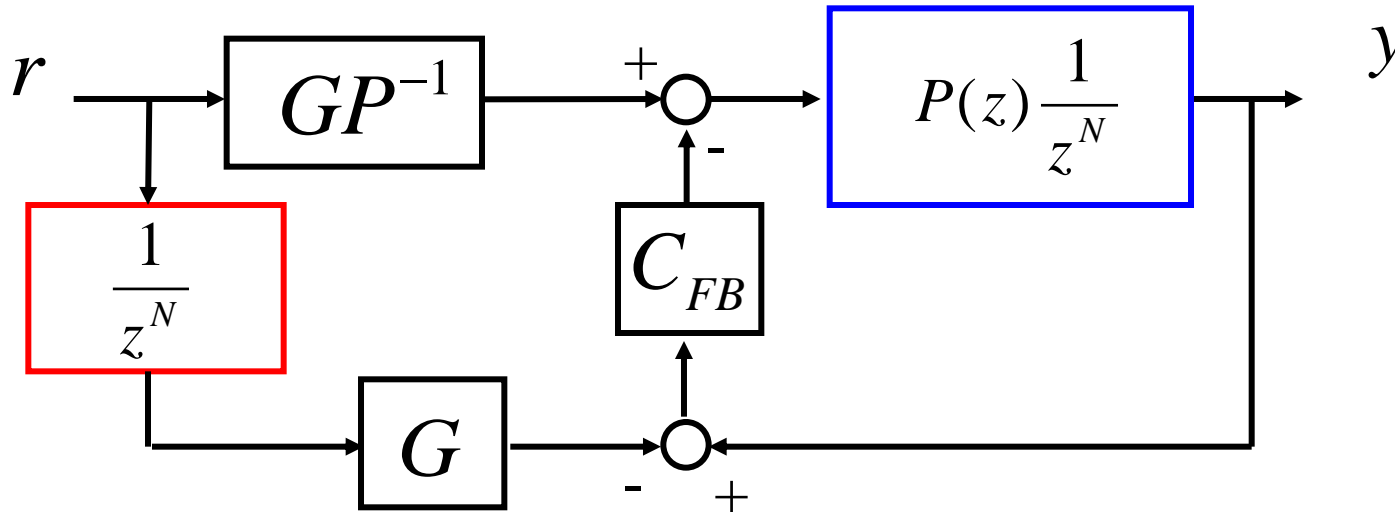
動的量子化器設計および配置による性能解析

まとめ

## 本発表で扱う制御系

### 2自由度内部モデル制御系 (岡島SCI08)

SISO



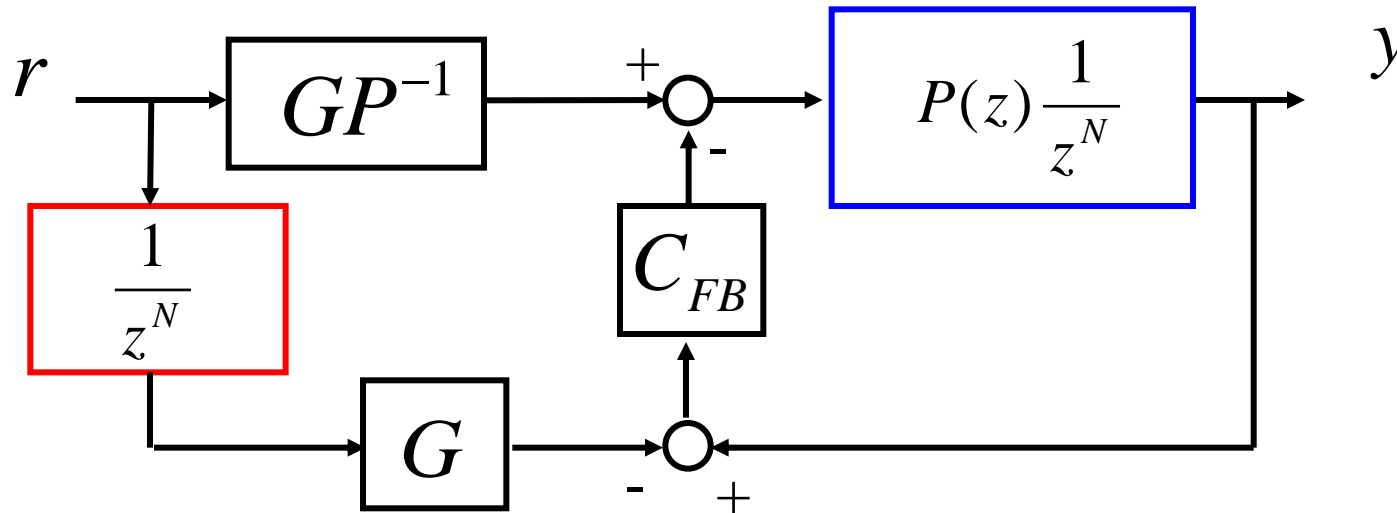
$$\frac{y}{r} = G(z) \frac{1}{z^N}$$

: 有理関数とむだ時間の積で表現

## 本発表で扱う制御系

### 2自由度内部モデル制御系 (岡島SCI08)

SISO



2自由度IMCの特徴：

不安定な  $P(z)$  も扱える

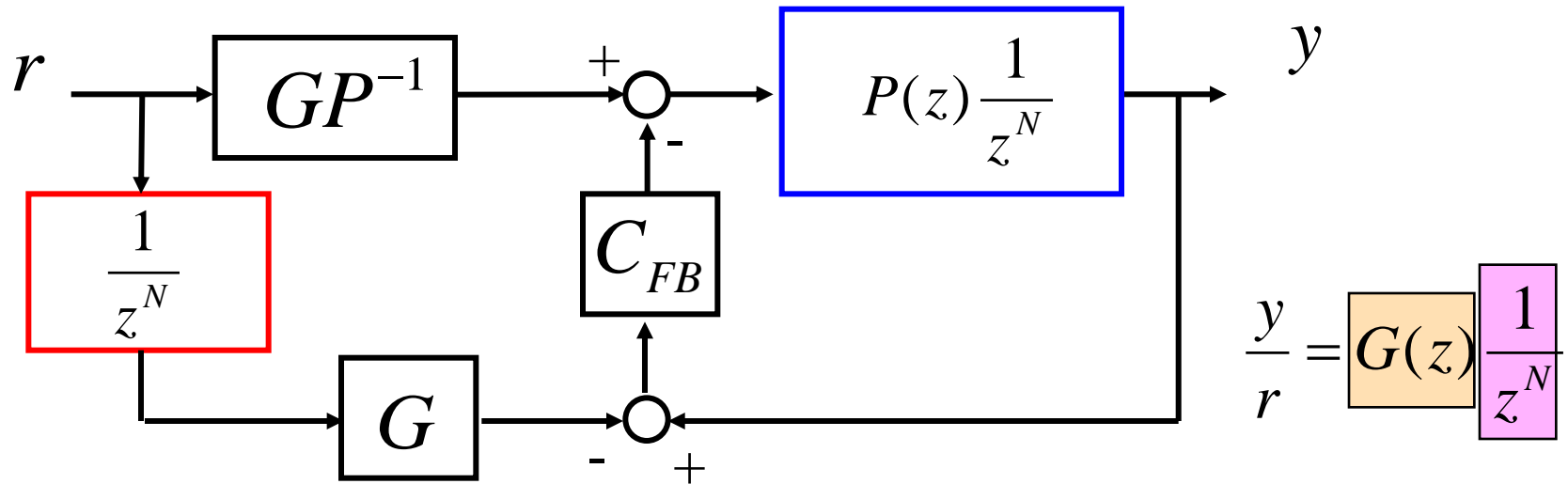
スミス法, IMCとの等価変換が可能  
むだ時間がFF項に含まれる



# 問題設定

## 2自由度内部モデル制御系

SISO

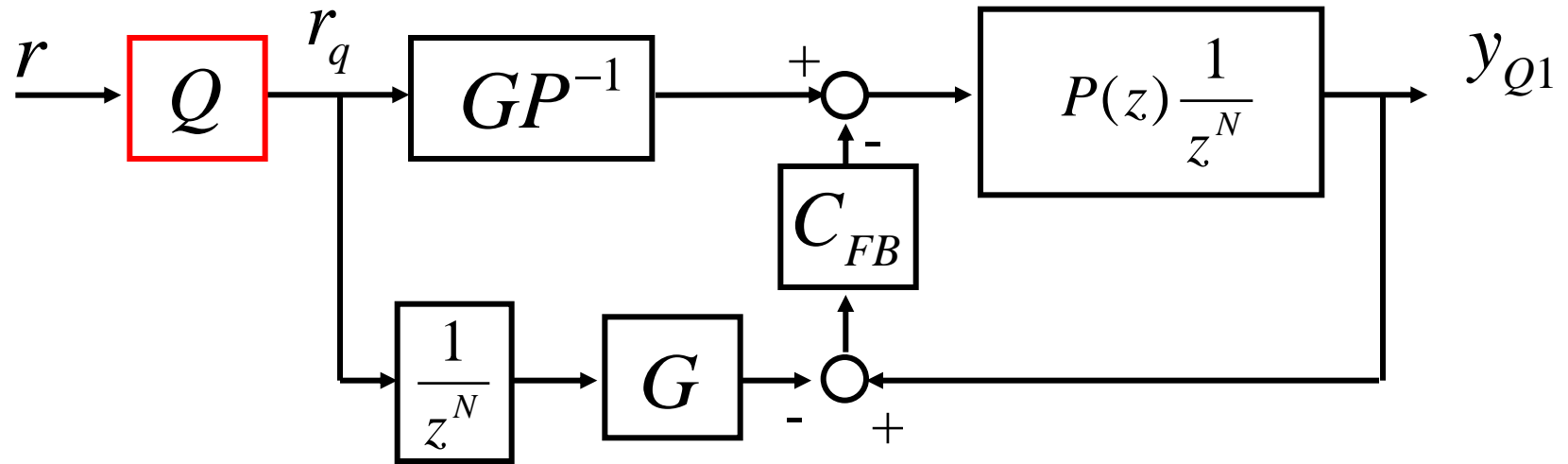


$P, C_{FB}, G$  はそれぞれ与えられていると仮定

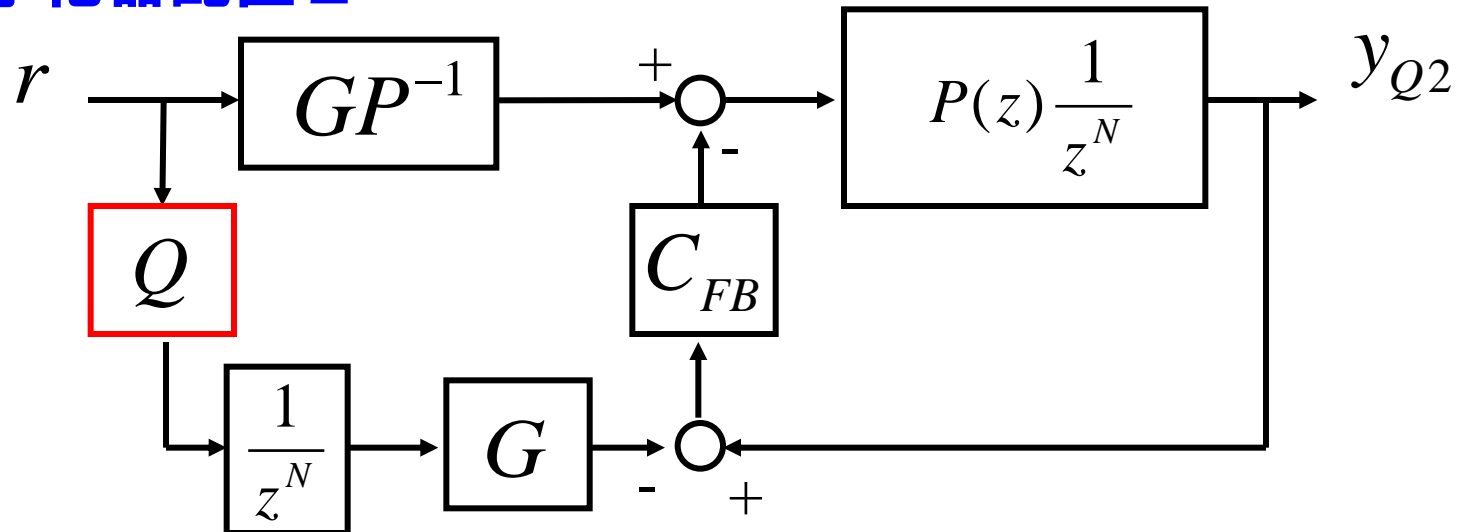
$$G \begin{cases} x[k+1] = A_G x[k] + B_G u[k] \\ y[k] = C_G x[k] \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{最小位相} \\ C_G B_G \neq 0 \end{array}$$

# 問題設定

## 量子化器配置 1



## 量子化器配置 2



研究の背景, 目的

問題設定

動的量子化器設計および配置による性能解析

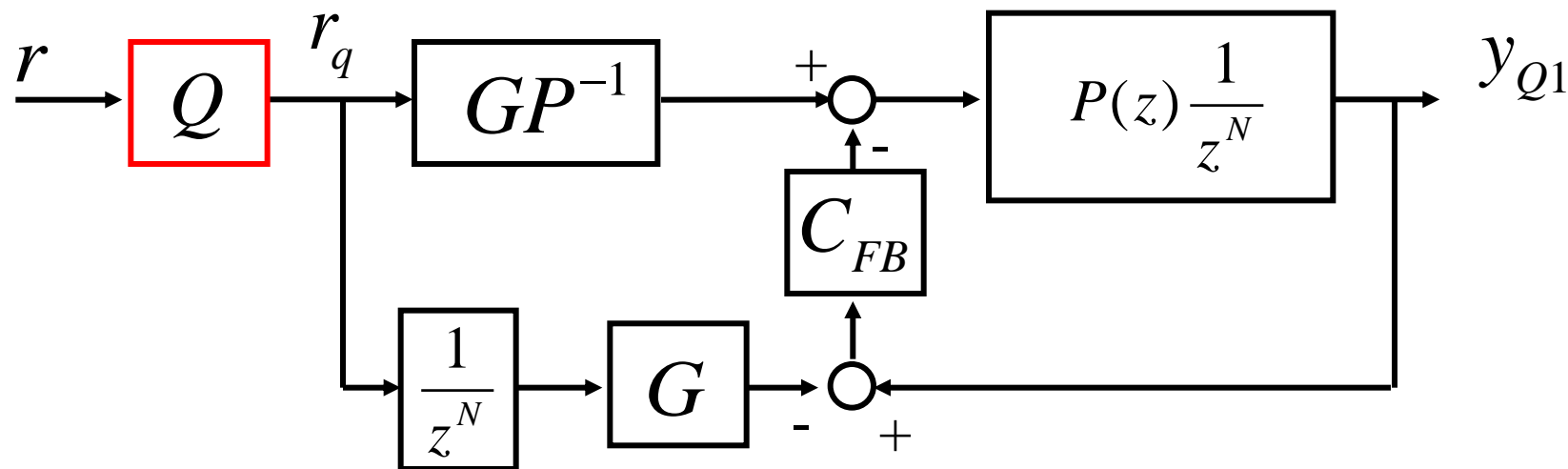
- **動的量子化器の設計と性能解析**  
(量子化器配置1)
- 量子化器配置1と量子化器配置2の比較

まとめ

# 動的量子化器の設計

20

量子化器配置 1 に対する設計 (SICE九州にて発表)



$$\boxed{Q} \begin{cases} \xi(k+1) = \mathbf{A} \xi(k) - \mathbf{B} u(k) + \mathbf{B} v(k) \\ v(k) = q[\mathbf{C} \xi(k) + u(k)] \end{cases}$$

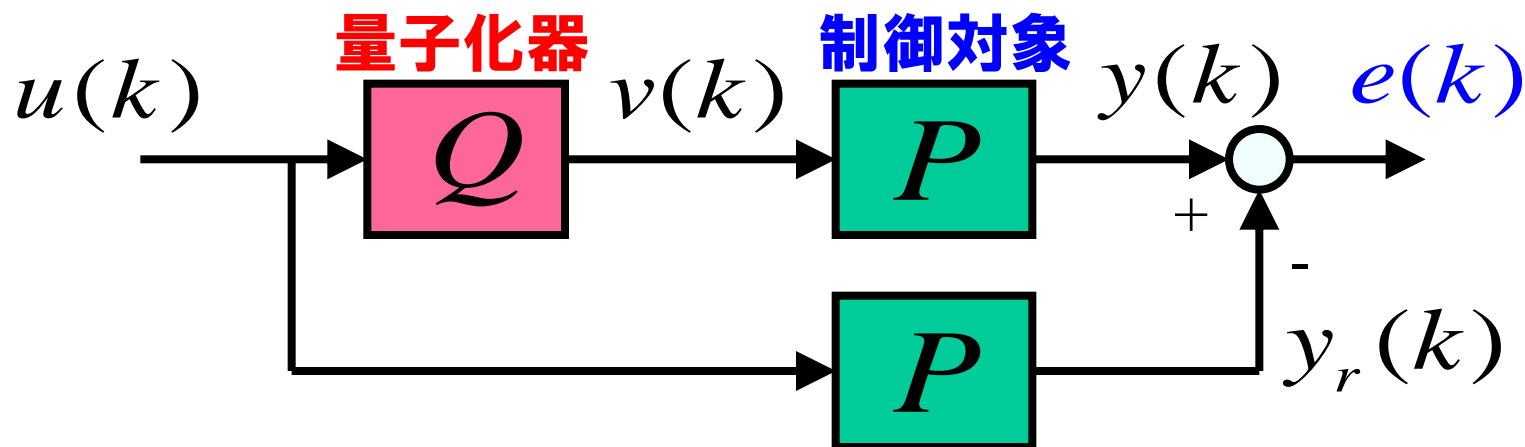
量子化器パラメータ

動的量子化器  $Q$  のパラメータ設計には最適動的量子化器 (東, 杉江2006) の設計手法を利用

# 動的量子化器の設計

最適動的量子化器（東，杉江2006）

$u(k)$  を適切な値に丸めて離散値入力  $v(k)$  にする  
量子化器の設計を考える



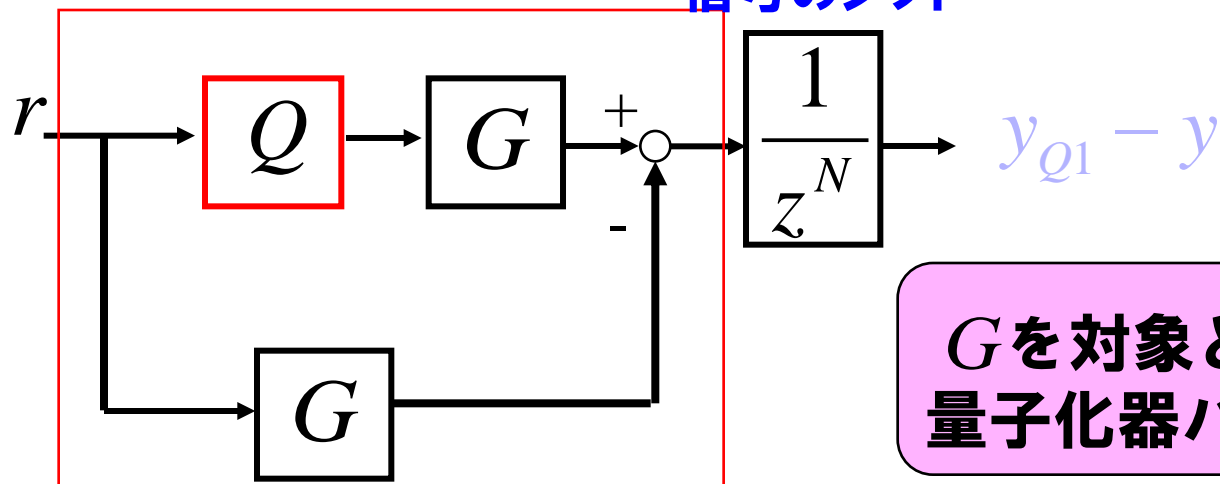
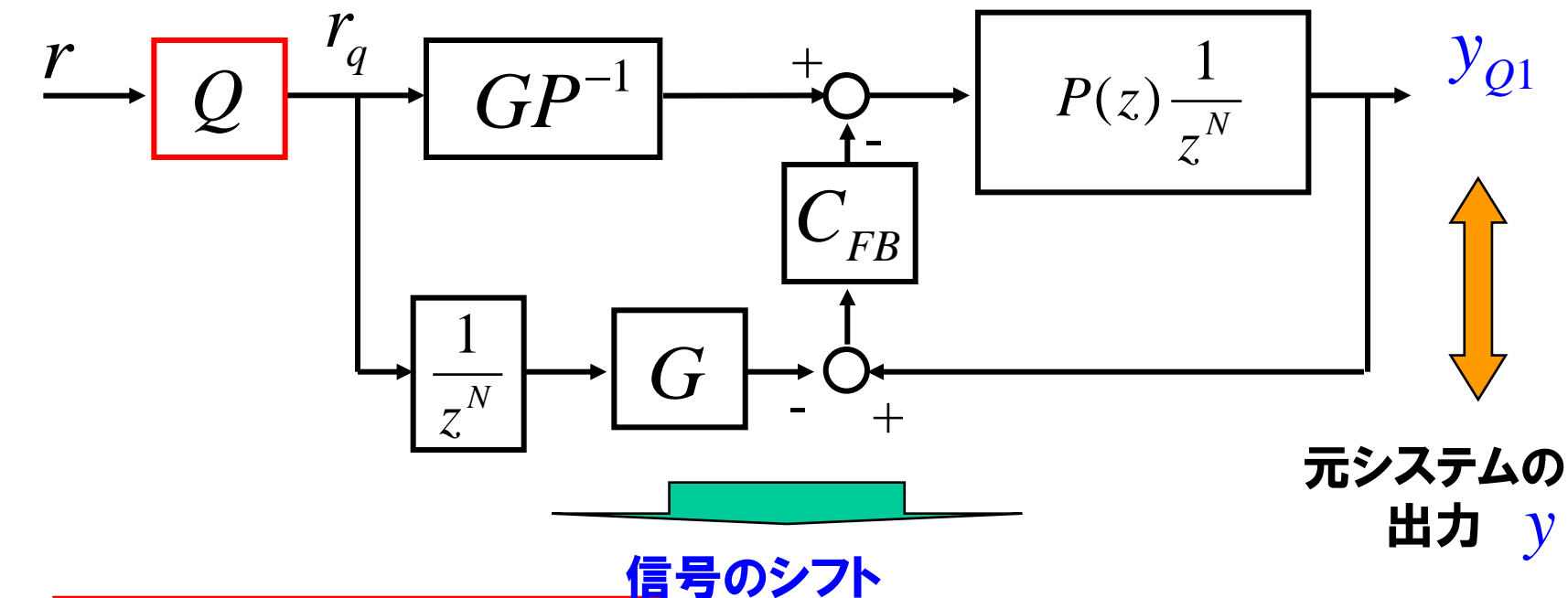
誤差  $e(k)$  が小さくなる  
量子化器  $Q$  が良い入出力  
近似を与える

誤差の  $l_\infty$  ノルムの最悪値を評価

$$\text{評価関数} : E(Q) = \max_{k, u \in l_\infty} \|e(k)\|$$

# 動的量子化器の設計

## 量子化器配置 1



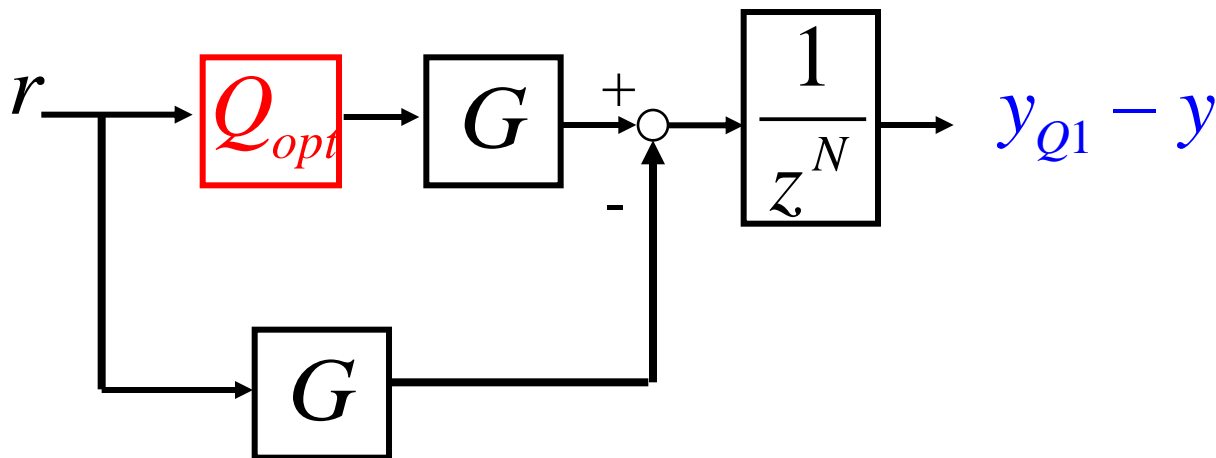
**$G$ を対象として  
量子化器パラメータ  $Q$  を設計**

## 設計した動的量子化器

$$Q_{opt} : \begin{cases} \xi(k+1) = A_G \xi(k) - B_G u(k) + B_G v(k) \\ v(k) = Q_{stat} [-(C_G B_G)^{-1} C_G A_G \xi(k) + u(k)] \end{cases}$$

## 誤差の $l_\infty$ ノルムの最悪値

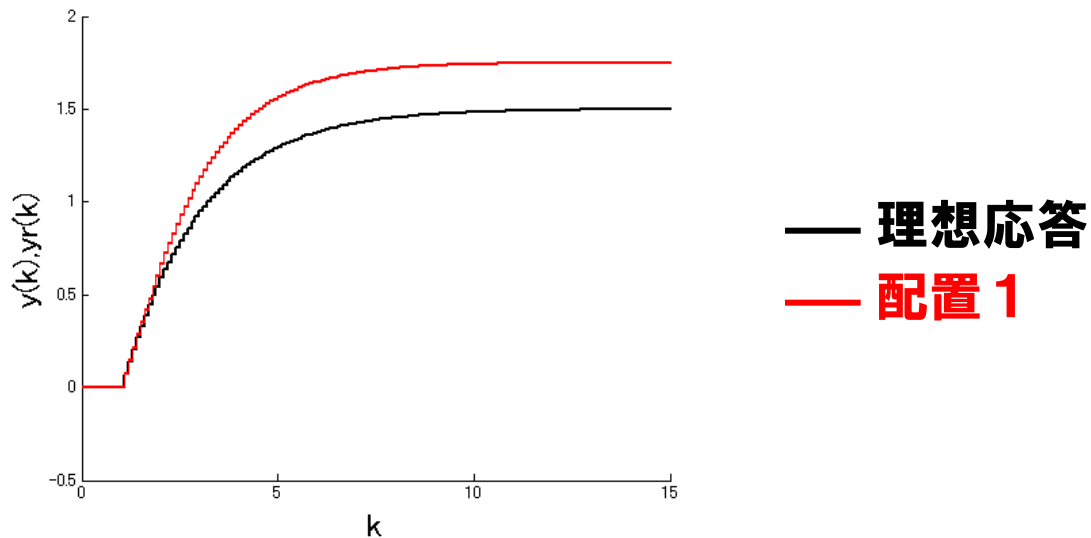
$$E(Q) = \max_{k, u \in l_\infty} \|y_{Q1}(k) - y(k)\| = |C_G B_G| \frac{d}{2}$$



# 静的量子化器との比較

## 数値例

ステップ信号 ( $r = 0.75$ ) を印加



$Q_{stat}$  : 静的量子化器

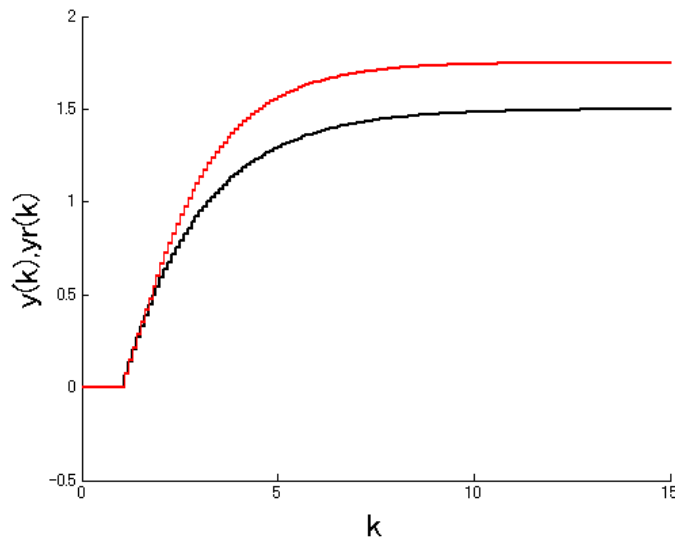


# 静的量子化器との比較

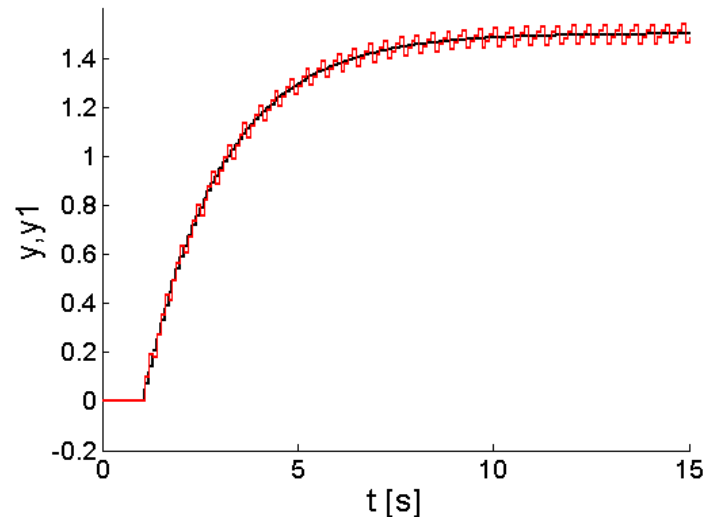
25

## 数値例

ステップ信号 ( $r = 0.75$ ) を印加



$Q_{stat}$  : 静的量子化器



$Q_{opt}$  : 提案手法

提案した動的量子化器により，量子化ノイズの影響が低減された

## 定量的な解析

$G(z)$  の次数が 1 のとき

### 定理 1

出力誤差に関して次式が成り立つ

$$E(Q_{stat}) = \frac{1}{1 - |A_G|} E(Q_{opt}) > E(Q_{opt})$$

c.f. 評価関数 (誤差の  $l_\infty$  ノルムの最悪値)

$$E(Q) = \max_{k, u \in l_\infty} \|y_{Q1}(k) - y(k)\|$$

短い制御周期で、動的量子化器の優位性が顕著に現れる

研究の背景, 目的

問題設定

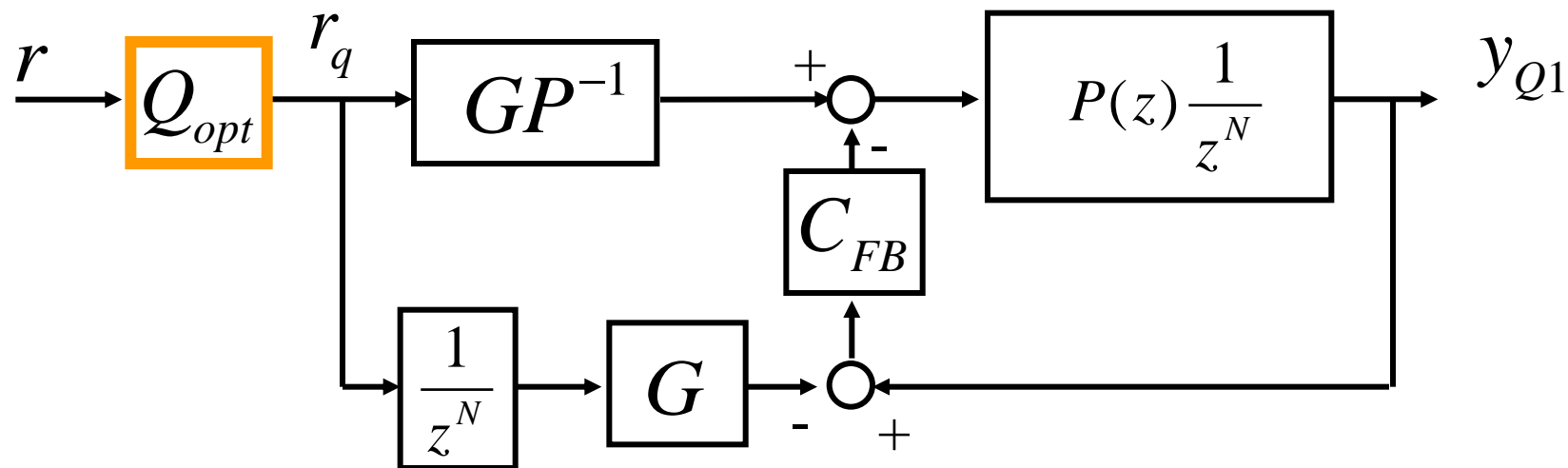
動的量子化器設計および配置による性能解析

- **動的量子化器の設計と性能解析**  
(量子化器配置1)
- **配置1と配置2との比較による解析**

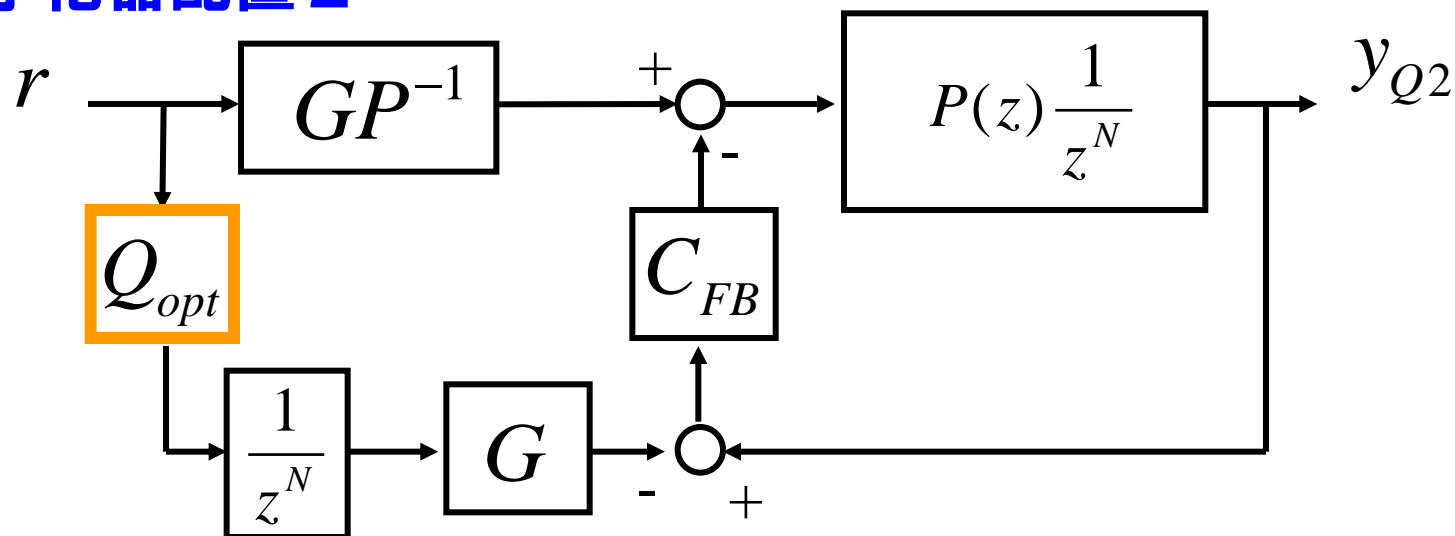
まとめ

# 量子化器配置の比較

## 量子化器配置 1



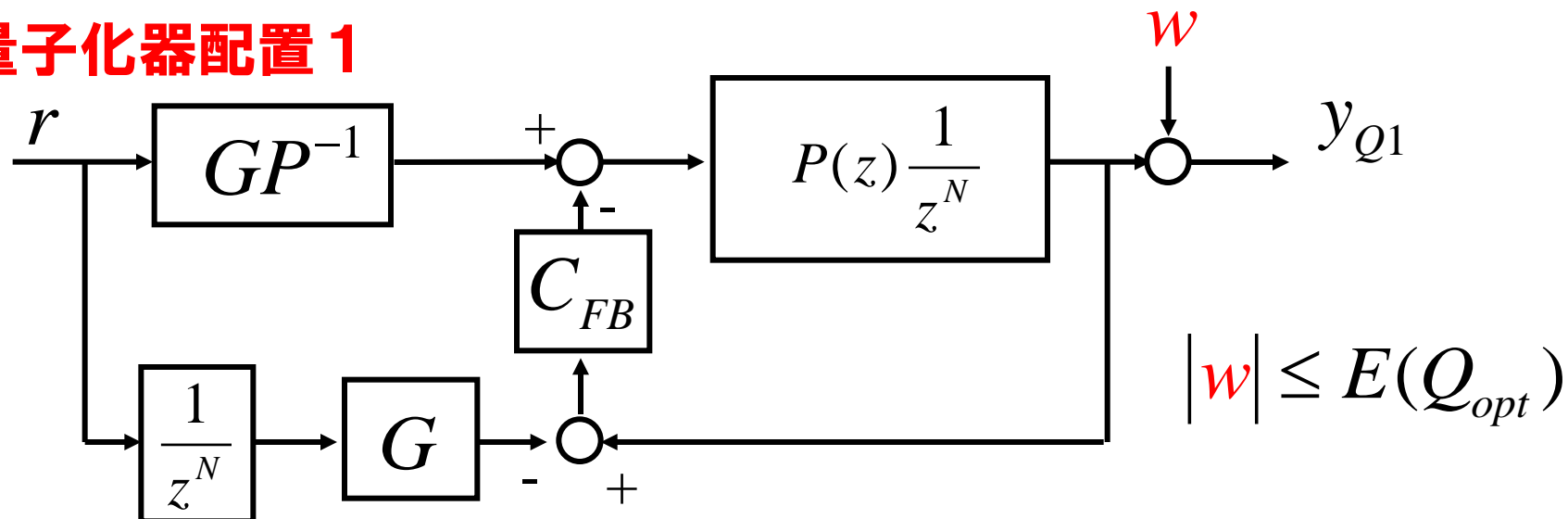
## 量子化器配置 2



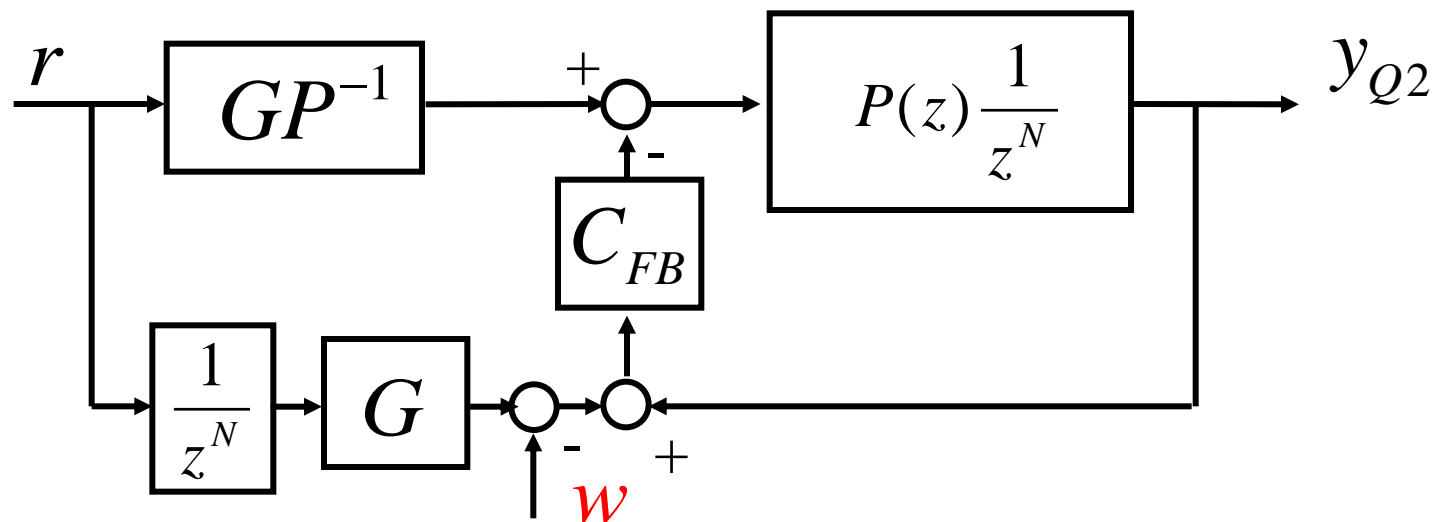
# 量子化器配置の比較

## 等価な入出力システム

### 量子化器配置 1



### 量子化器配置 2

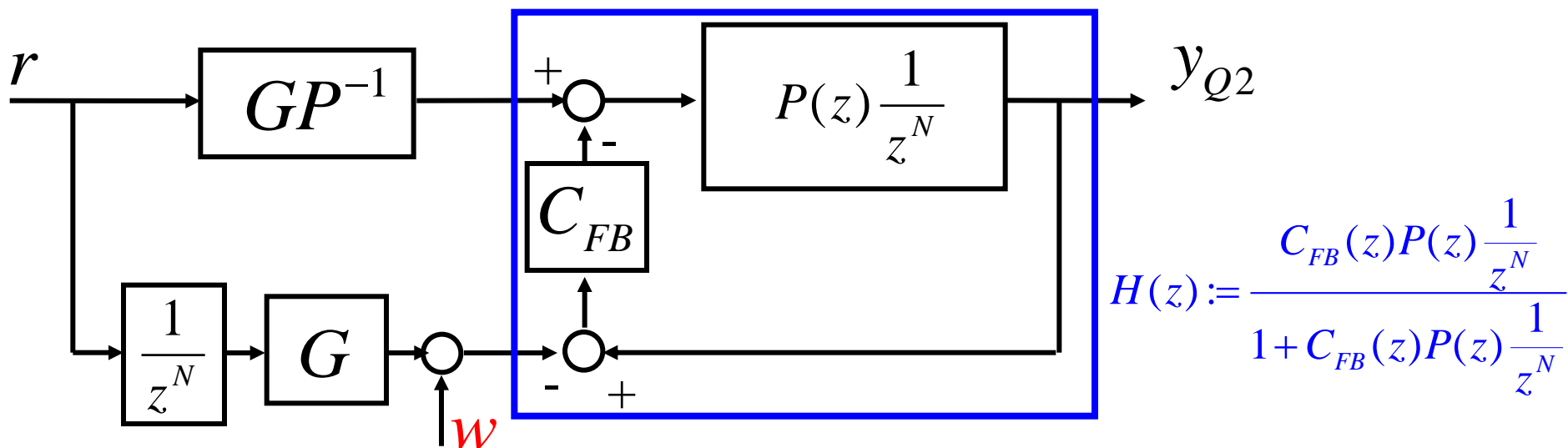


データ量子化に起因する出力誤差

量子化器配置 1  $e_{Q1} = w$

量子化器配置 2  $e_{Q2} = h^* w$

$$|w| \leq E(Q_{opt})$$

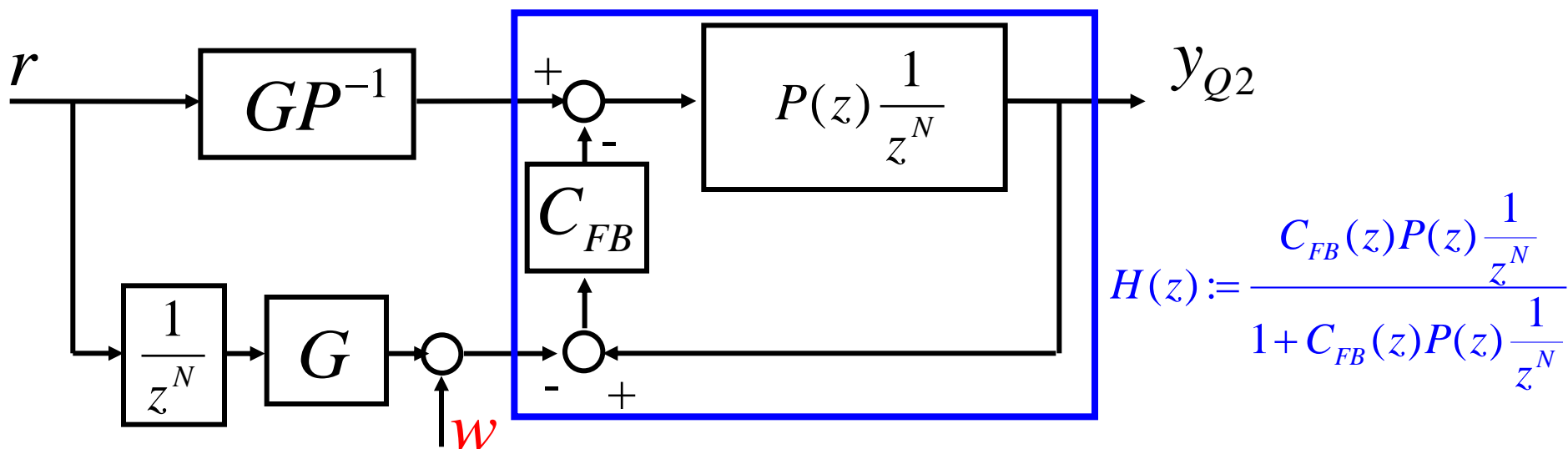


## データ量子化に起因する出力誤差

**量子化器配置 1**  $e_{Q1} = w$

**量子化器配置 2**  $e_{Q2} = h^* w$

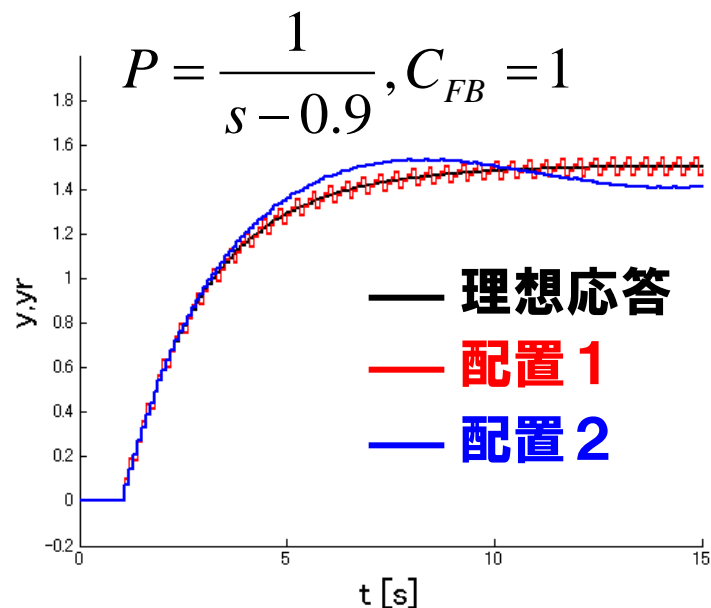
**量子化器配置 2**では、  
出力誤差は設計  
する量子化器だけでなく  
 $P(z)$ ,  $C_{FB}(z)$  にも依存



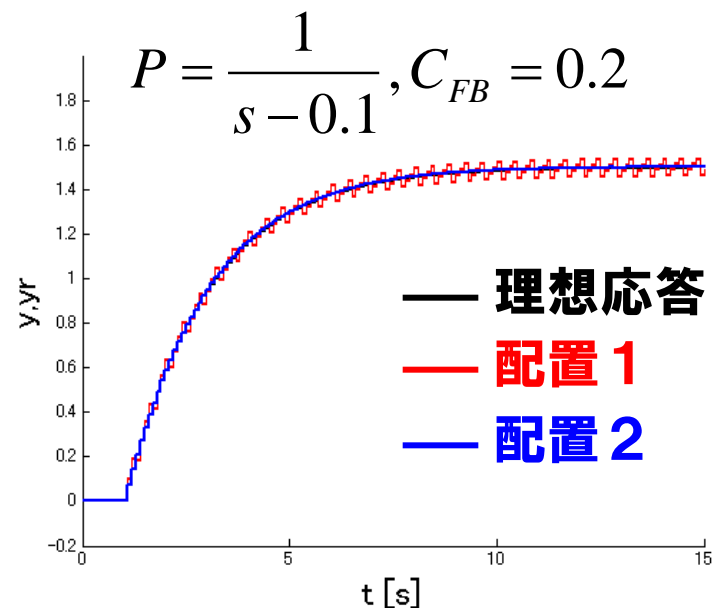
# 量子化器配置の比較

## 数値例

### 配置 1 と配置 2 との比較



**配置 1 が良い**



**配置 2 が良い**

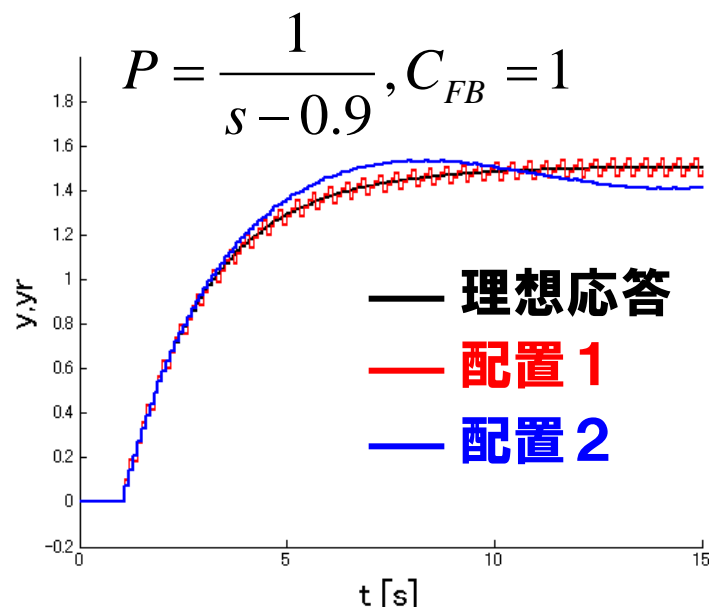


# 量子化器配置の比較

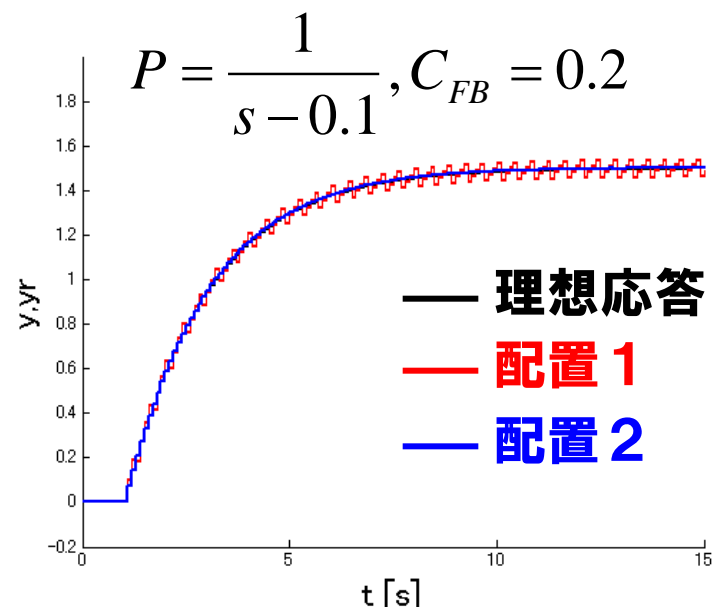
33

数値例

**配置 1 と配置 2 との比較**



**配置 1 が良い**



**配置 2 が良い**

•与えられる組  $(P, C_{FB}, G)$  に対して,  
適した量子化器配置が異なる



**量子化器配置を個別に考えることが有効**

内部モデル制御系について

「**短い制御周期**」，「**低分解能データ**」でのむだ時間実現

量子化手法を工夫することで，  
出力に現れる**量子化ノイズの影響を低減する**

## 得られた結果

### 動的量子化器

- ・動的量子化器の設計手法の提案
- ・静的量子化器との比較により有効性を検証

### 量子化器配置問題

- ・与えられた系に対し，それぞれ量子化器配置を考えることが重要

## 今後の課題

実験による検証