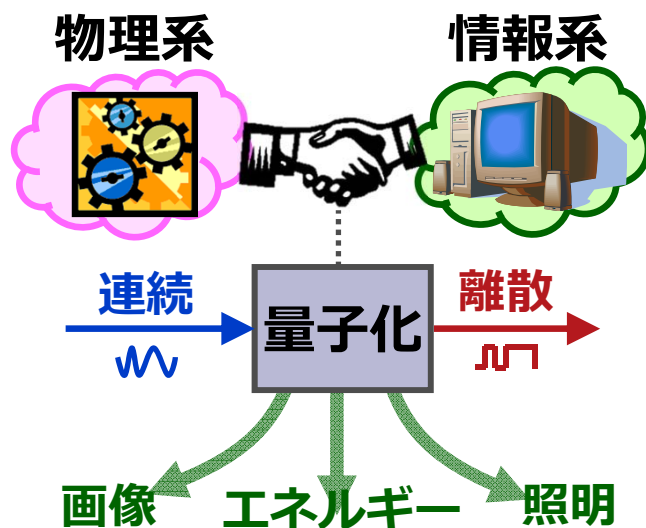


制御のための動的量子化器と 他分野への応用



京都大学 南 裕樹

杉江 俊治 先生
東 俊一 先生

目次

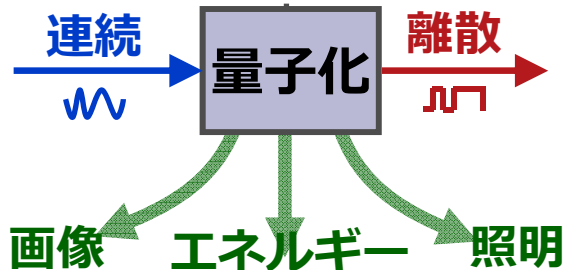


【前半】 制御分野の成果

動的量子化器
の最適設計論



機械システム制御
(離散値入力制御)



動的量子化の
“アイデア”

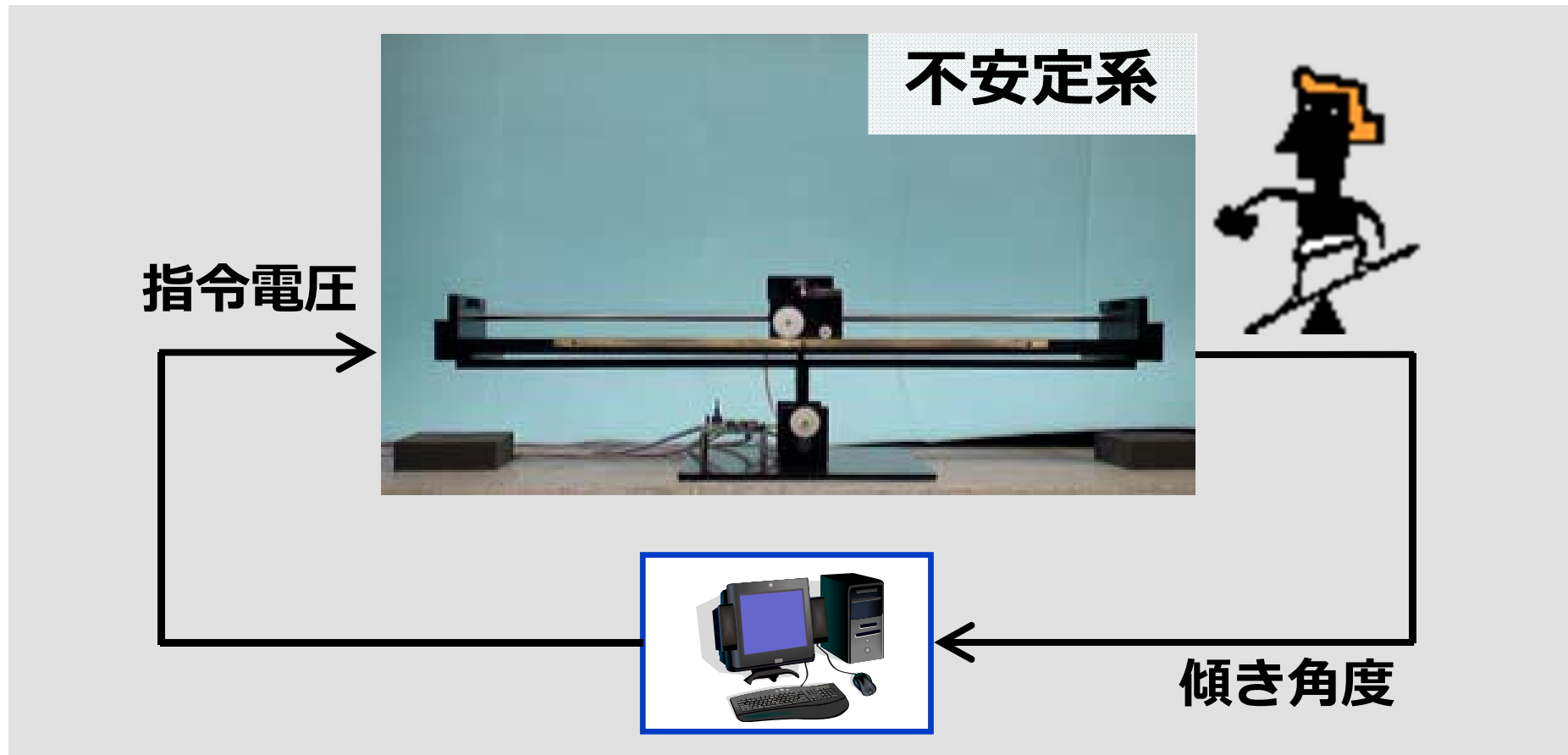
Cyber-Physical
システムの“デザイン”

【後半】 他分野への応用

エネルギー・環境分野
(分散電源の制御)

照明・建築環境分野
(分散照明の制御)

はじめに ～ 離散値信号で制御～



制御系設計

信号が**連続値** ⇒ 教科書レベル

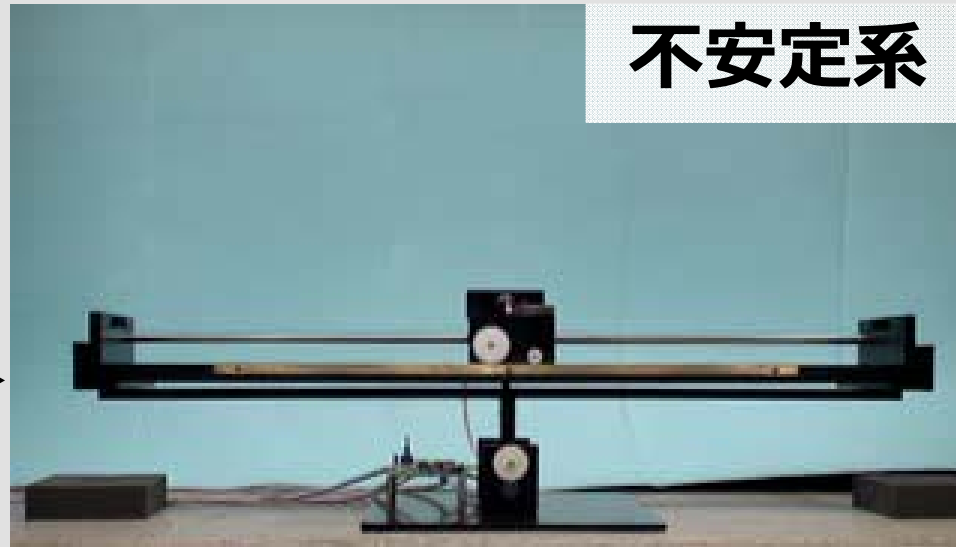
はじめに ～ 離散値信号で制御～



3 値

- CW
- STOP
- CCW

不安定系



離散値

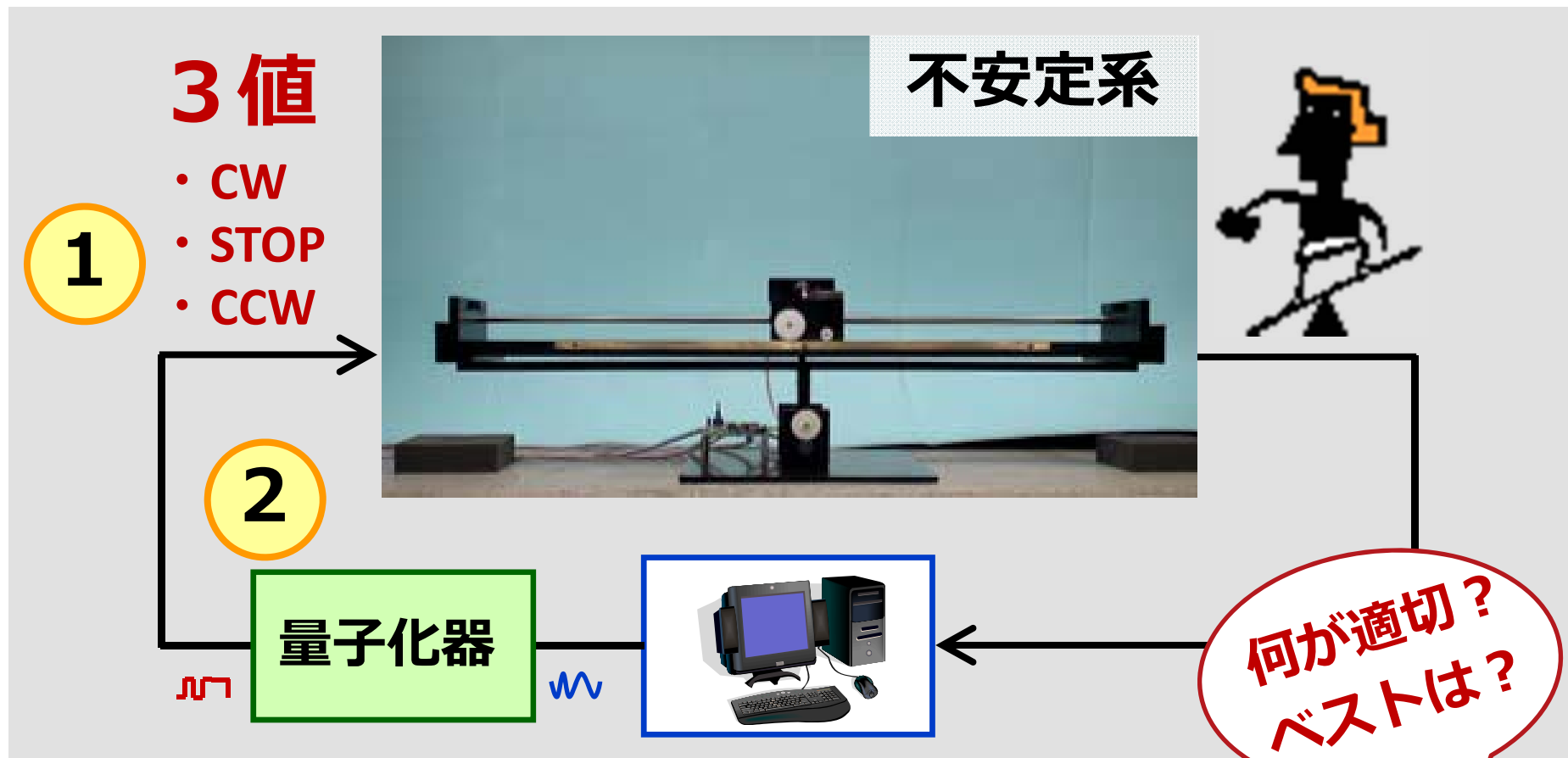


制御系設計

信号が**離散値** ⇒ ちょっと難しい



はじめに ～ 離散値信号で制御～



制御系設計

信号が**離散値** ⇒ ちょっと難しい

ひとつの方法

連続値出力制御器 + **量子化器**

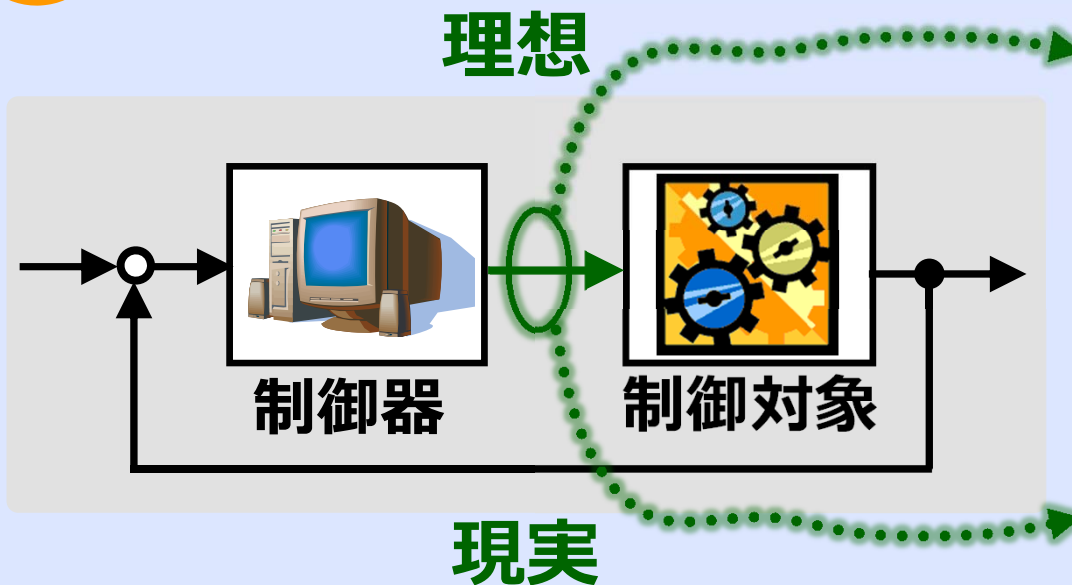
3

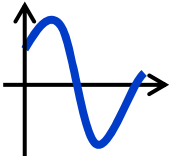


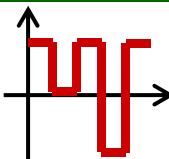
離散値制御は難しい



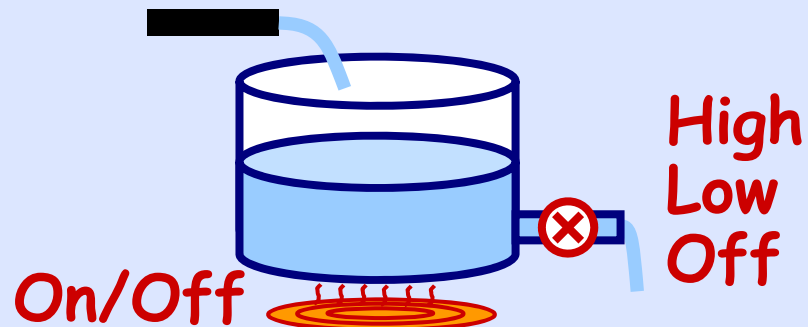
1 身近な離散値システム



連続値 
⇒ 設計は容易

離散値 
⇒ 設計が困難

・ 離散値アクチュエータ



・ ネットワーク通信

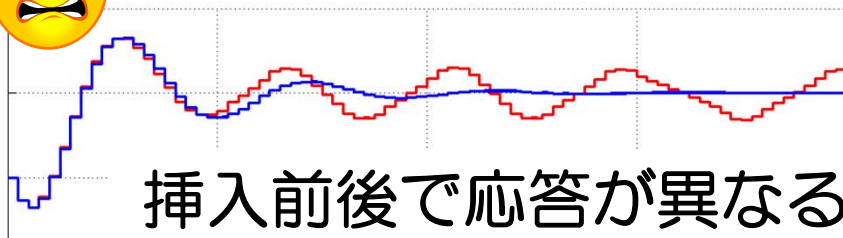
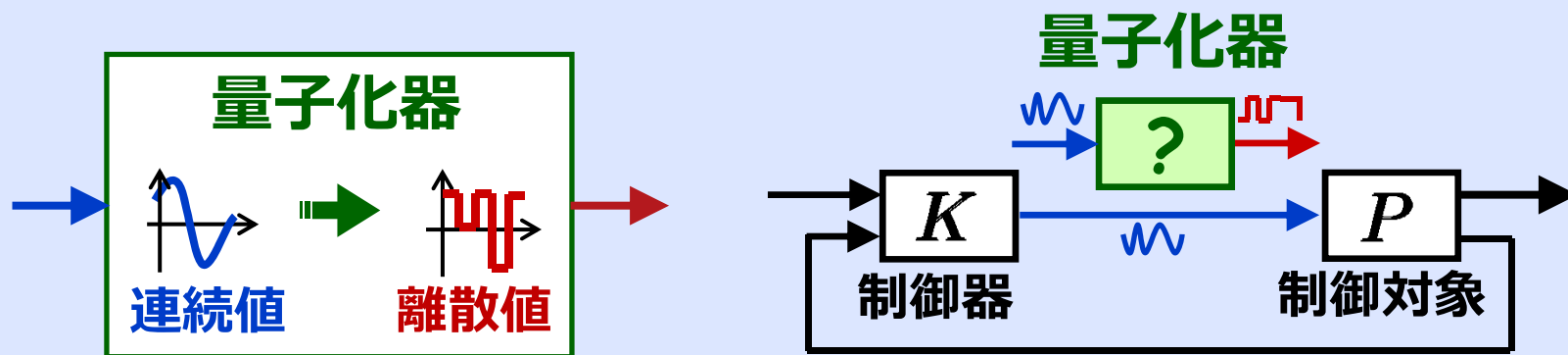


離散値システムの設計

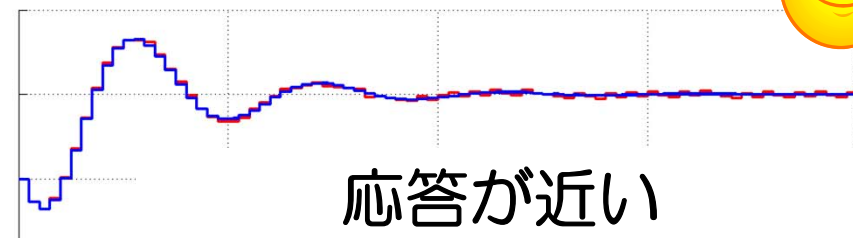


2 ひとつのアプローチ

- (1) 連続値の制御系を構築 **ex. PID制御**
(教科書レベル)
- (2) **量子化器**を挿入



挿入前後で応答が異なる



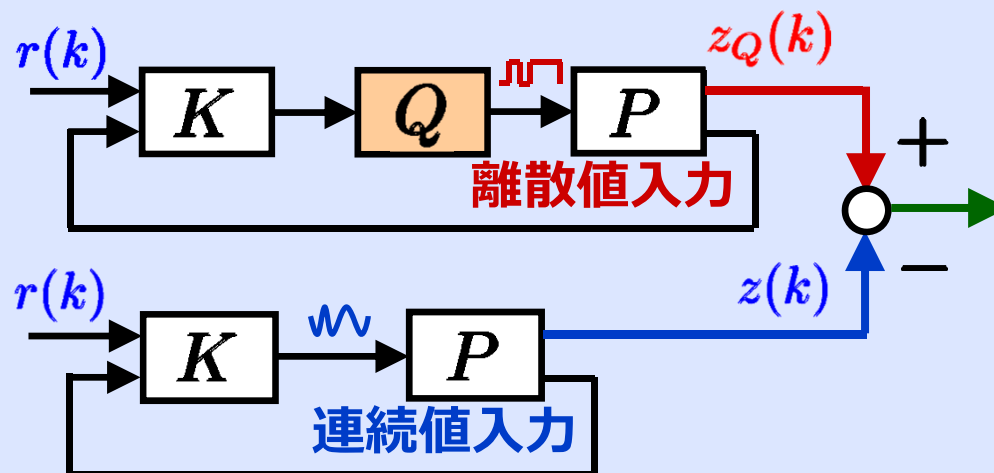
応答が近い

設計方針：出力特性を近似する量子化器が良い

動的量子化器の設計問題

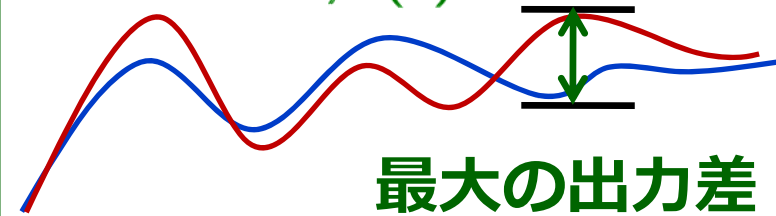


3 “最適”な量子化器の設計



評価関数

$$E(Q) := \sup_{r, x(0)} \|z_Q - z\|_{\infty}$$



$$E(Q) \simeq 0 \iff$$

出力の振る舞いが近い

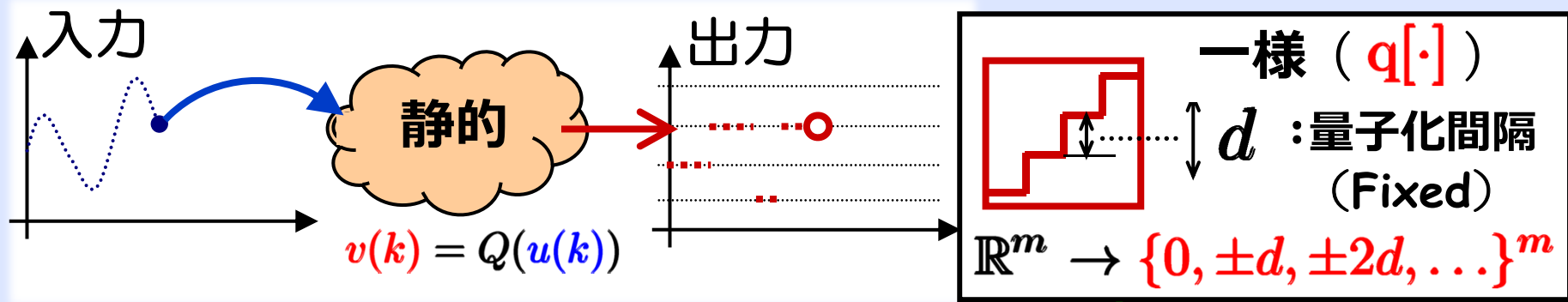
問題

制御対象 P と制御器 K が与えられたとき,
 $E(Q)$ を最小にする量子化器 Q を求めよ.

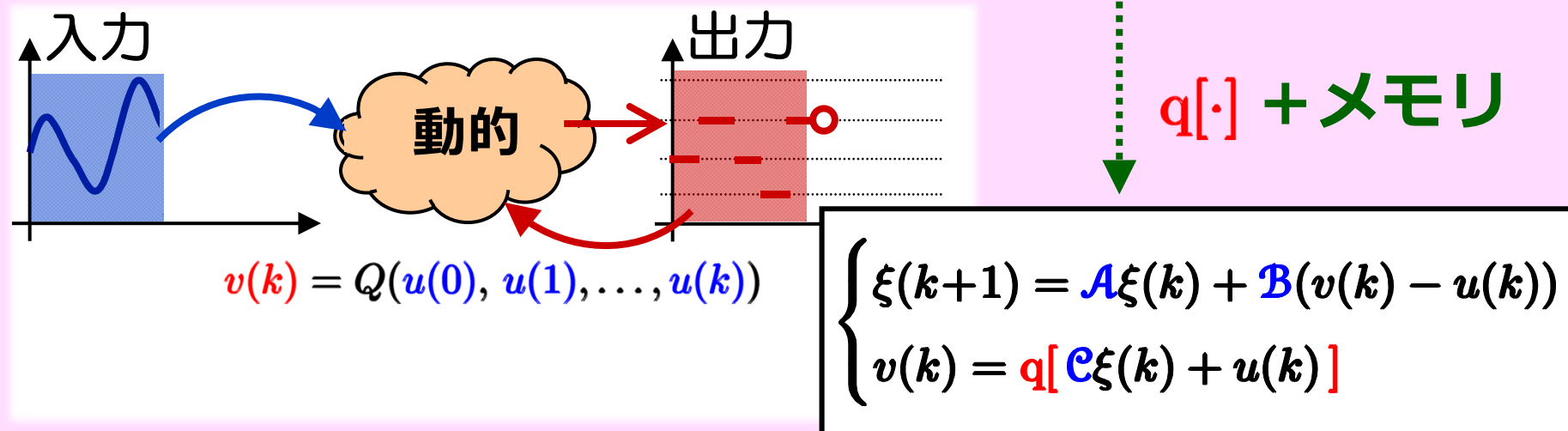
動的量子化器のクラス



静的 | 現在の入力⇒現在の出力



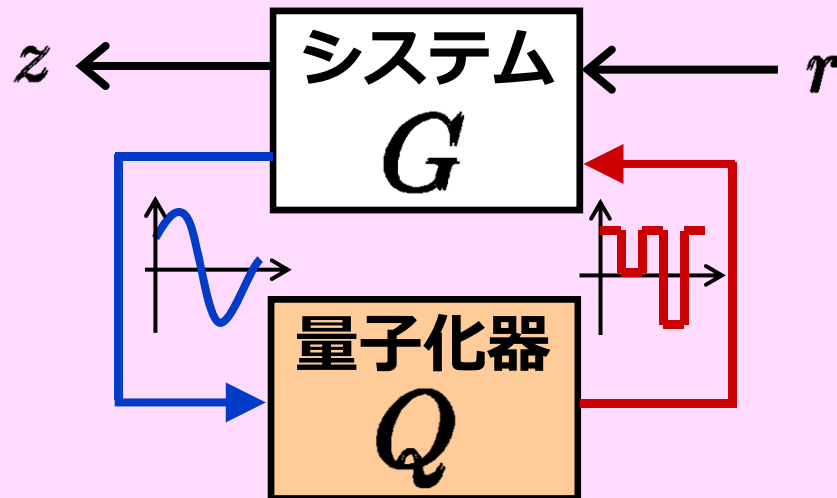
動的 | 過去の入出力⇒現在の出力



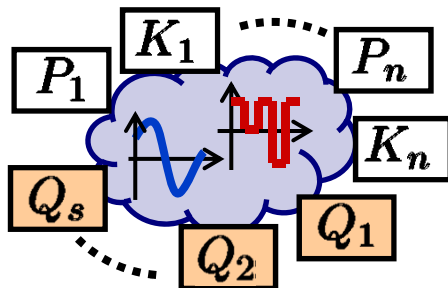
対象とするシステム ～ 統一的な表現 ～



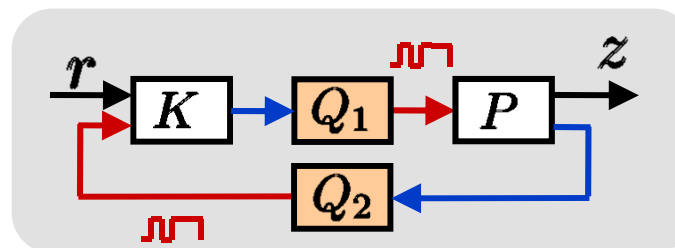
システムと量子化器の結合系



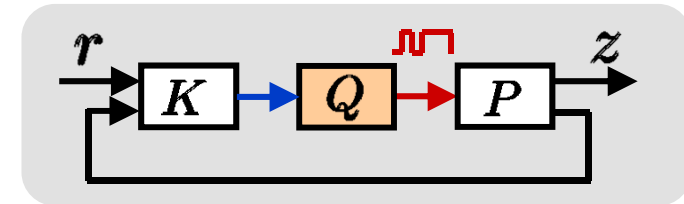
さまざまな制御系



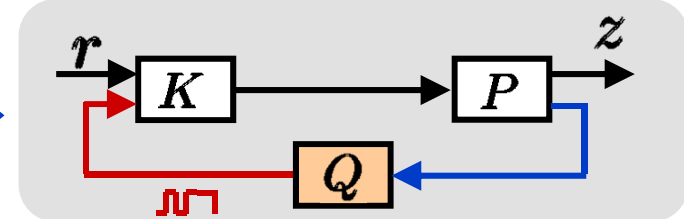
入出力量子化



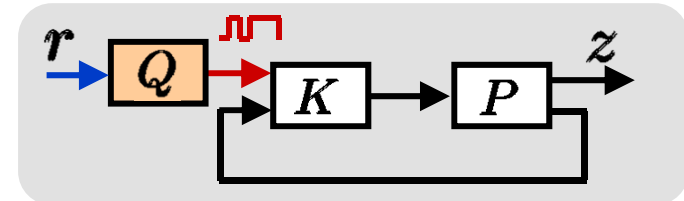
入力量子化



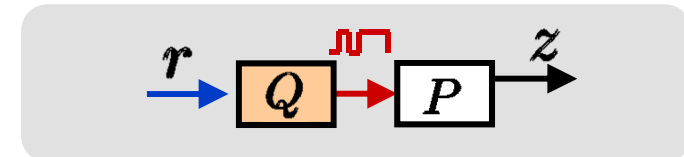
出力量子化



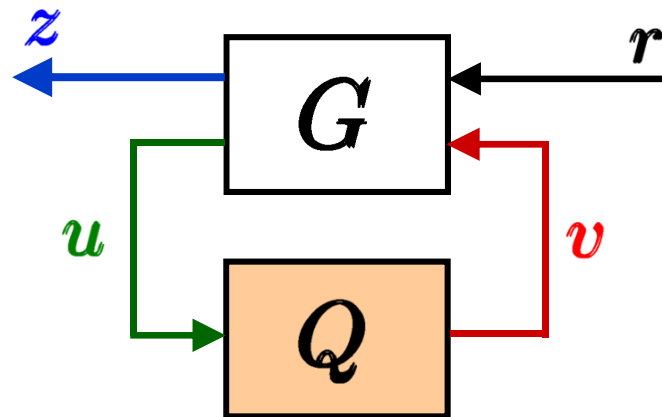
参照入力量子化



F F 制御系



対象システム

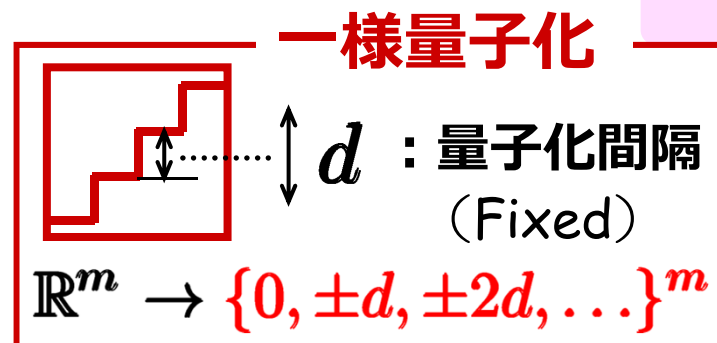


離散時間，線形時不変システム

$$G : \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_1 r(k) + B_2 v(k) \\ z(k) = C_1 x(k) + D_1 r(k) \\ u(k) = C_2 x(k) + D_2 r(k) \end{cases}$$

動的量子化器

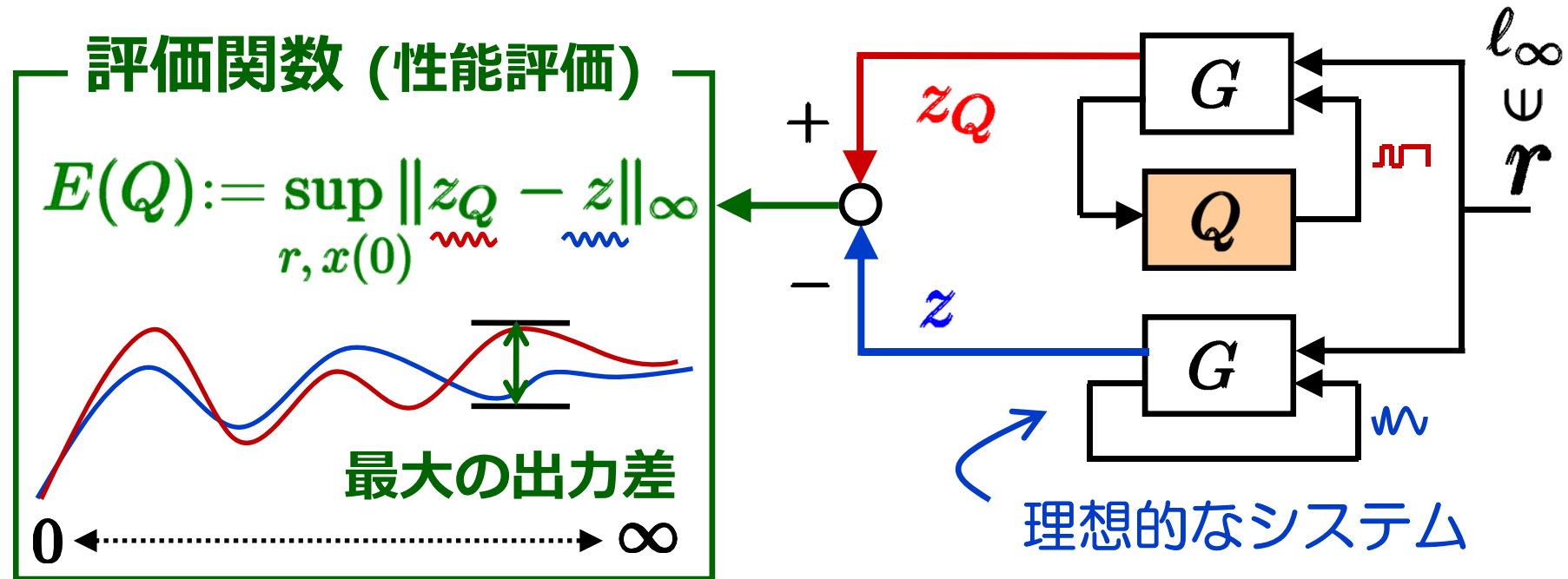
$$Q : \begin{cases} \xi(k+1) = \mathcal{A}\xi(k) + \mathcal{B}(v(k) - u(k)) \\ v(k) = \mathbf{q}[\mathcal{C}\xi(k) + u(k)] \end{cases}$$



設計変数

$\mathcal{A} \ \mathcal{B} \ \mathcal{C}$

評価関数と問題設定



動的量子化器の最適設計問題

システム G , 量子化間隔 $d \in \mathbb{R}$ が与えられたとき,
 $E(Q)$ を最小にする $Q(\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C})$ を求めよ.

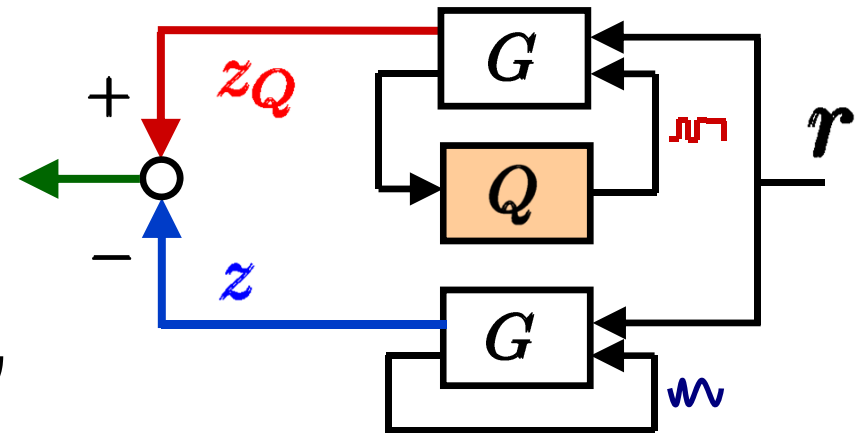
最適動的量子化器



量子化器の性能

$$E(Q) := \sup_{r, x(0)} \|z_Q - z\|_\infty$$

↓ G と Q のパラメータ

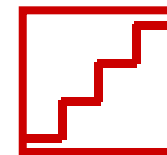


$$E(Q) = \left\| \sum_{k=0}^{\infty} \text{abs} \left(\begin{bmatrix} C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A + B_2 C_2 & B_2 \mathbf{c} \\ 0 & \mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{c} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} B_2 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \right) \right\| \frac{d}{2}$$

絶対値 (要素ごと)

$$\text{abs} \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ -3 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$$

一様量子化



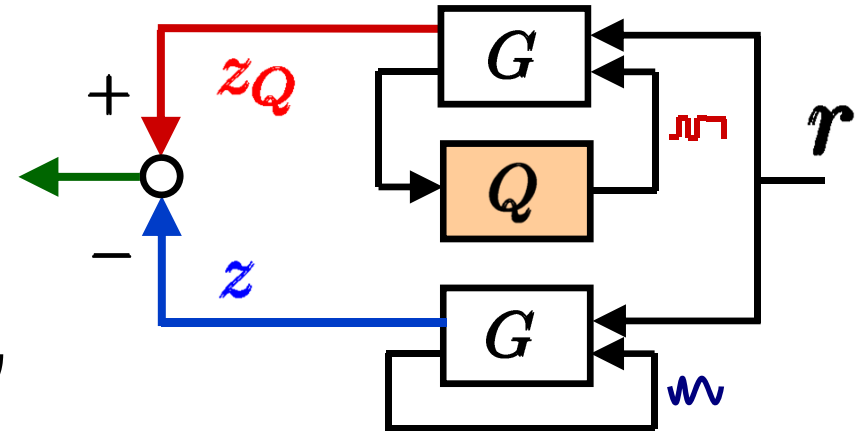
$$\|q[\mu] - \mu\| \leq \frac{d}{2}$$

最適動的量子化器



量子化器の性能

$$E(Q) := \sup_{r, x(0)} \|z_Q - z\|_\infty$$



↓ G と Q のパラメータ

$$E(Q) = \left\| \sum_{k=0}^{\infty} \text{abs} \left(\begin{bmatrix} C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A + B_2 C_2 & B_2 \mathbf{c} \\ 0 & \mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{c} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} B_2 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \right) \right\| \frac{d}{2}$$

$$= \left\| \text{abs}(C_1 B_2) + \sum_{k=1}^{\infty} \text{abs} \left(\begin{bmatrix} C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A + B_2 C_2 & B_2 \mathbf{c} \\ 0 & \mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{c} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} B_2 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \right) \right\| \frac{d}{2}$$

$= 0 \implies$ 最適解 Q^*

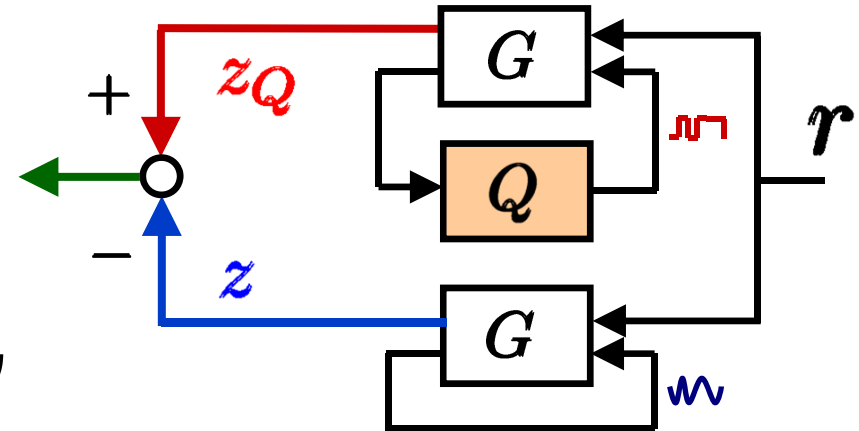
最適動的量子化器



量子化器の性能

$$E(Q) := \sup_{r, x(0)} \|z_Q - z\|_\infty$$

↓ G と Q のパラメータ



$$E(Q) = \left\| \sum_{k=0}^{\infty} \text{abs} \left(\begin{bmatrix} C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A + B_2 C_2 & B_2 \mathbf{e} \\ 0 & \mathbf{A} + \mathbf{B} \mathbf{e} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} B_2 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \right) \right\| \frac{d}{2}$$

最適動的量子化器

↓ $E(Q^*) = \|\text{abs}(C_1 B_2)\| \frac{d}{2}$ (性能限界)

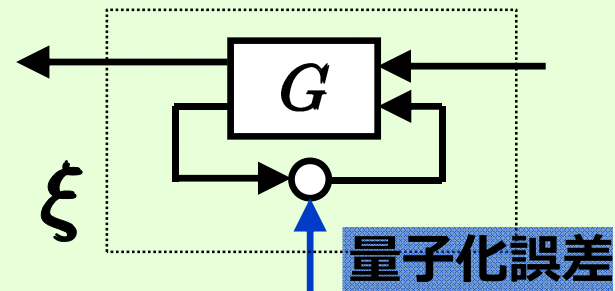
$$Q^* : \begin{cases} \xi(k+1) = (A + B_2 C_2) \xi(k) + B_2 (v(k) - u(k)) \\ v(k) = \mathbf{q} \left[-(C_1 B_2)^{-1} C_1 (A + B_2 C_2) \xi(k) + u(k) \right] \end{cases}$$

最適動的量子化器

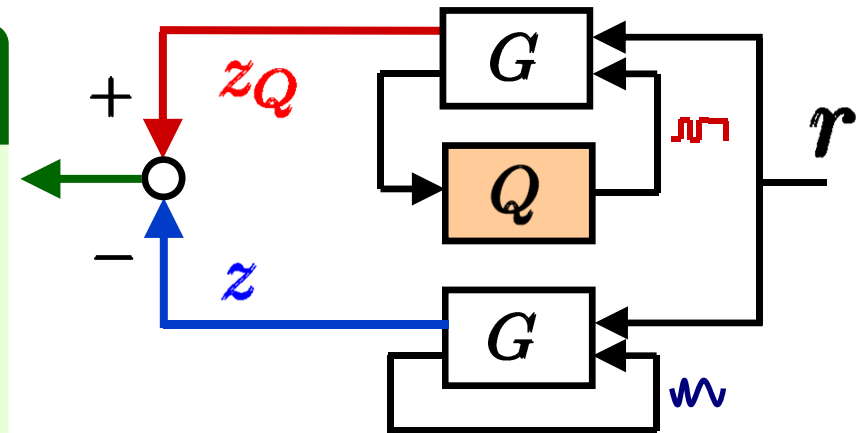


最適量子化器の構造

1) 予測 : 誤差が出力に与える影響



2) 補償 : 1ステップ先の影響を小さくする補償入力を生成



最適動的量子化器

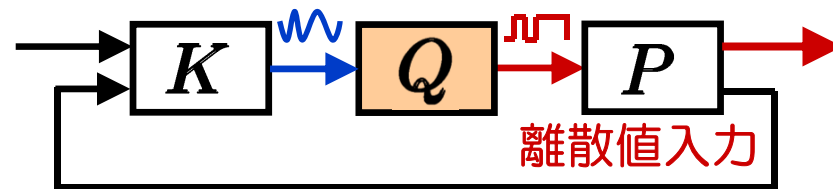
$$\Downarrow E(Q^*) = \|\text{abs}(C_1 B_2)\| \frac{d}{2} \quad (\text{性能限界})$$

$$Q^* : \begin{cases} \xi(k+1) = (A + B_2 C_2) \xi(k) + B_2 (v(k) - u(k)) \\ v(k) = q \left[-(C_1 B_2)^{-1} C_1 (A + B_2 C_2) \xi(k) + u(k) \right] \end{cases}$$

機械システムの離散値入力制御

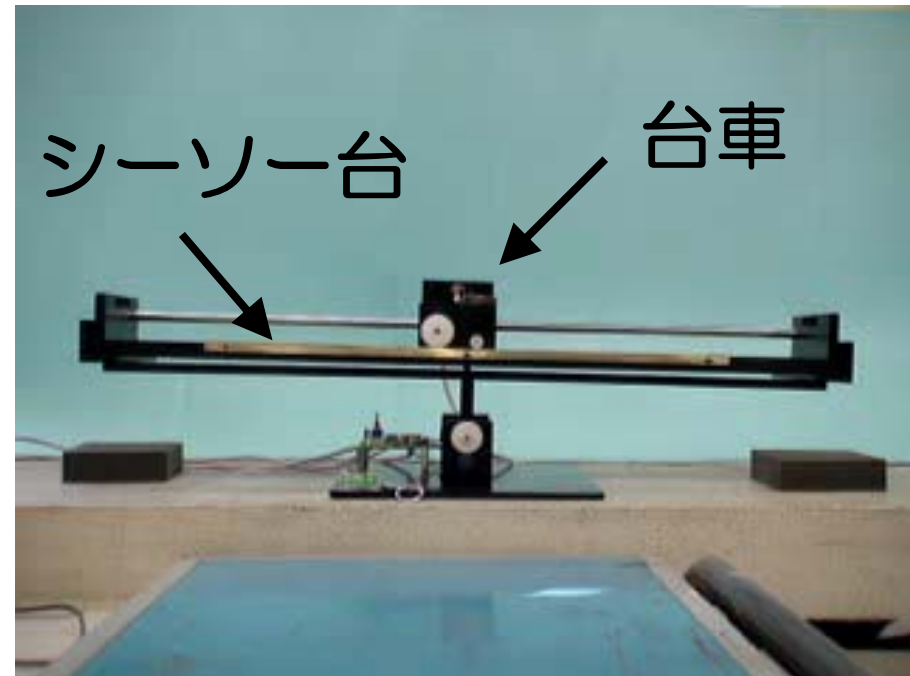
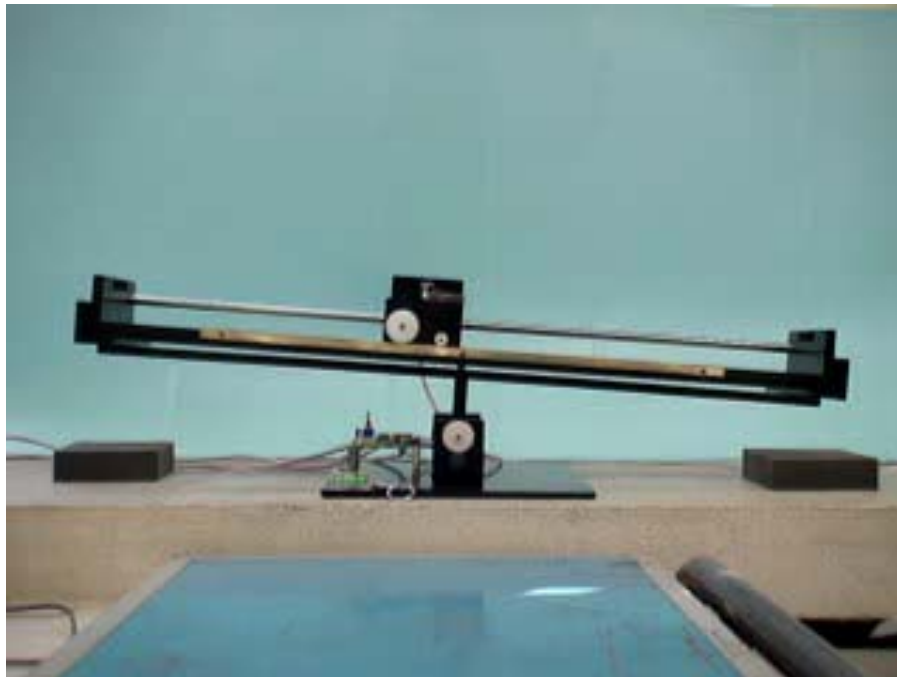


離散値 (3 値; CW, STOP, CCW) で制御

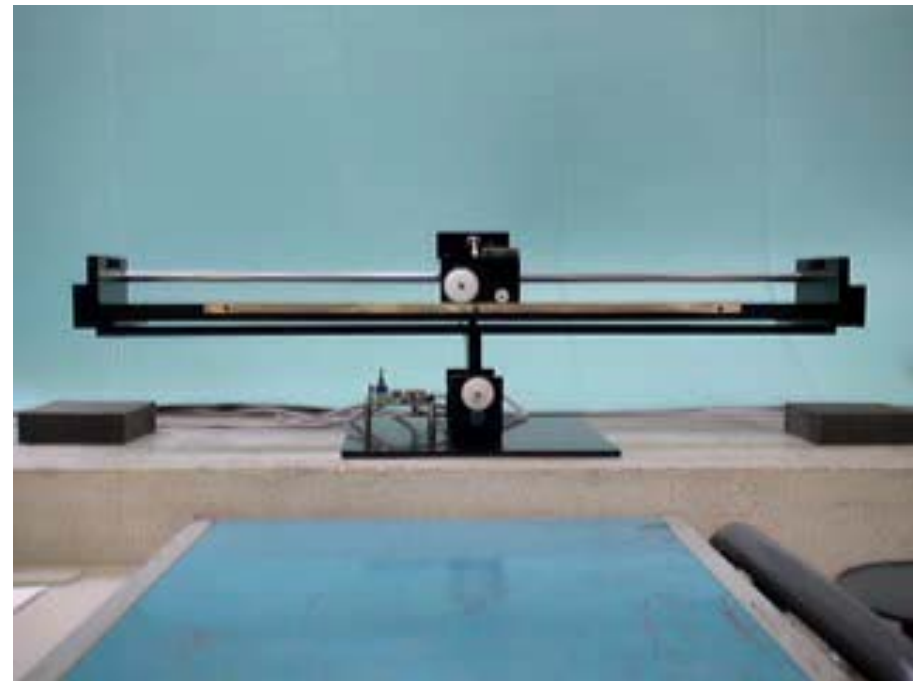
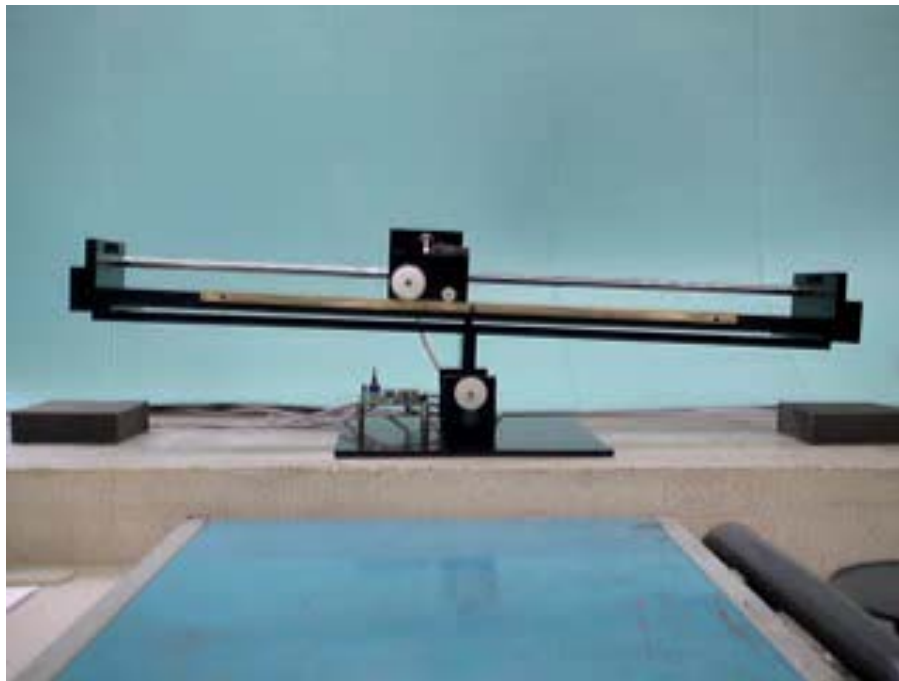
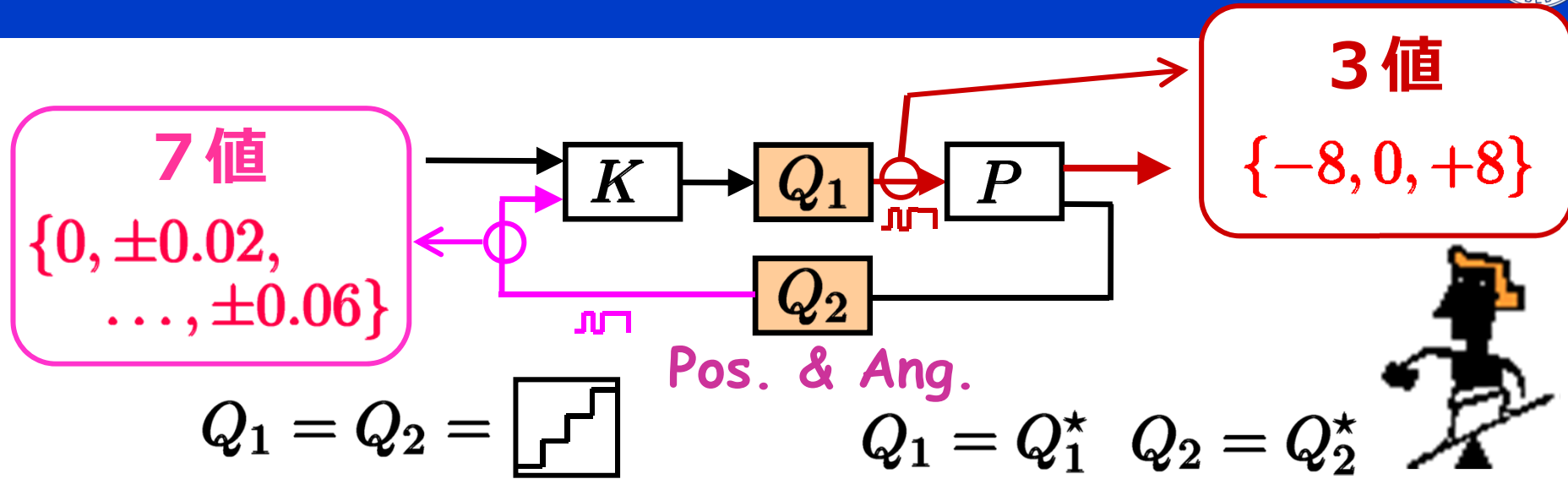


$Q = \begin{array}{|c|} \hline \text{Step Function} \\ \hline \end{array}$ 単純な四捨五入

$Q = Q^*$ 最適動的量子化器



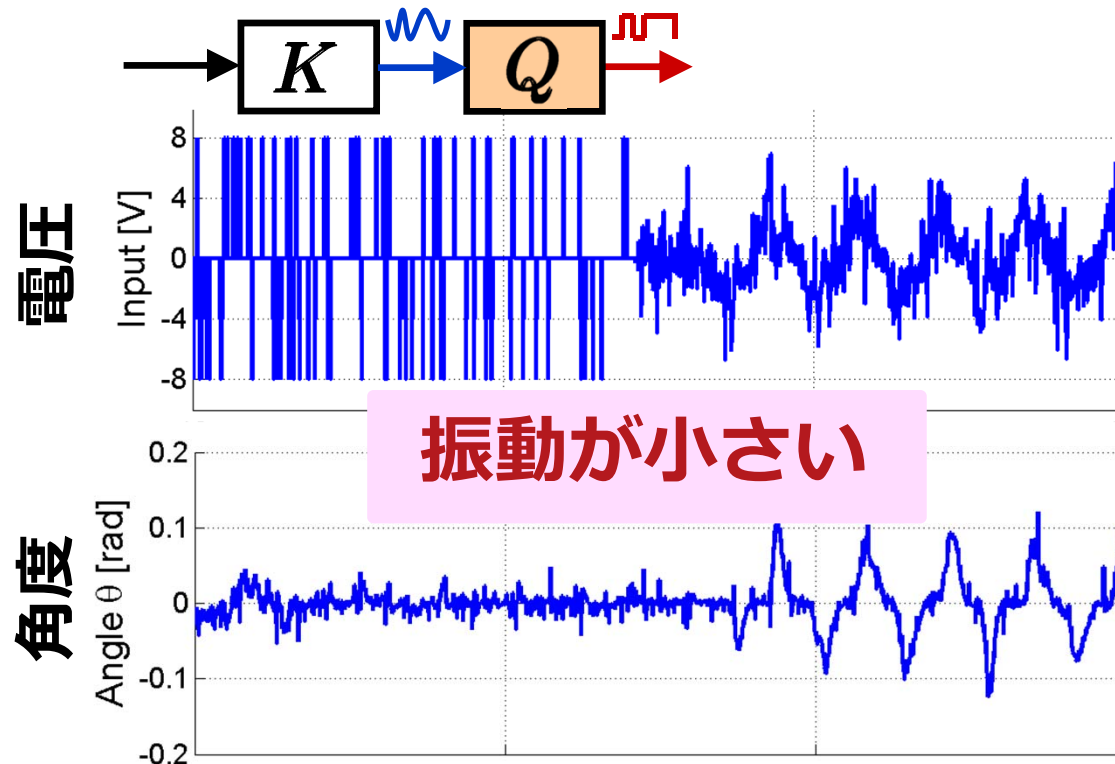
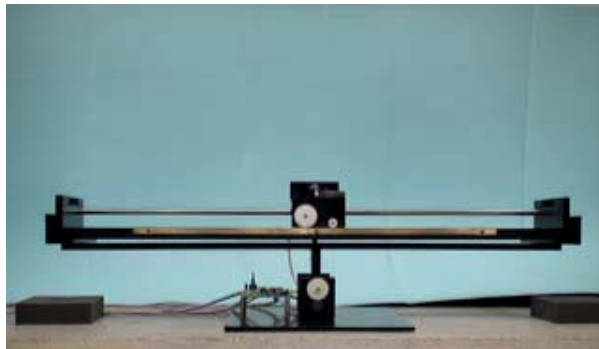
機械システムの離散値入力制御



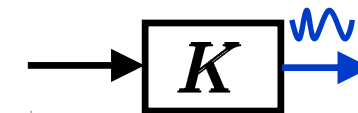
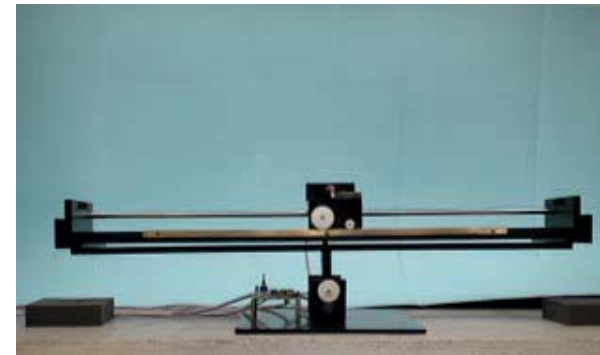
物理系と情報系をつなぐ量子化器



離散値 (CW, STOP, CCW)



連続値



摩擦補償に
なっている



量子化器が
重要な役割

前半のまとめ & 後半に向けて



前半のまとめ 制御のための動的量子化器

1 ハードウェア性能

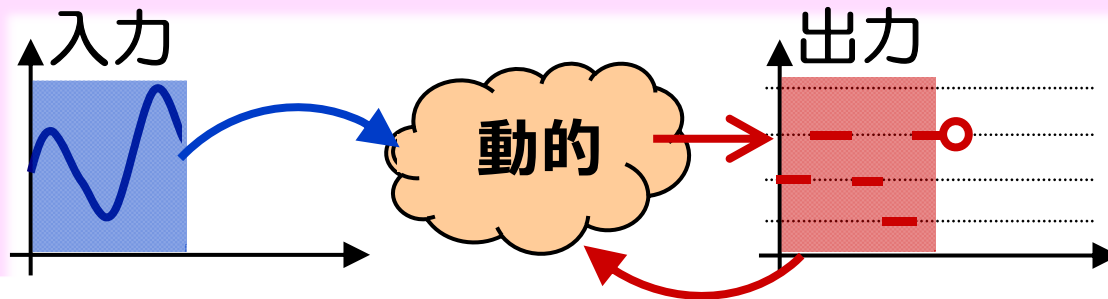
離散値システム
の設計

2 制御の観点

量子化器問題

3 ベストな解

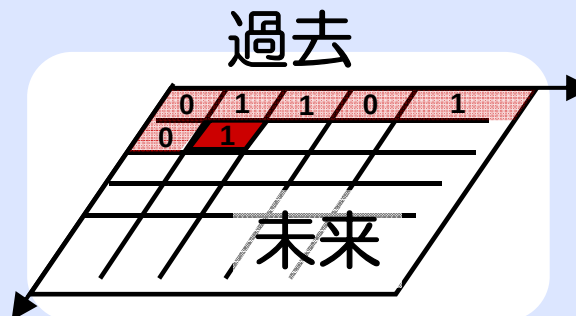
制御対象に特化
した量子化器



- ・ 時間軸 (1D)
- ・ 過去の情報を利用

後半のPoint

動的量子化の
“アイデア”を応用



- ・ 空間的広がり (2D)
- ・ 周辺の情報を利用

目次

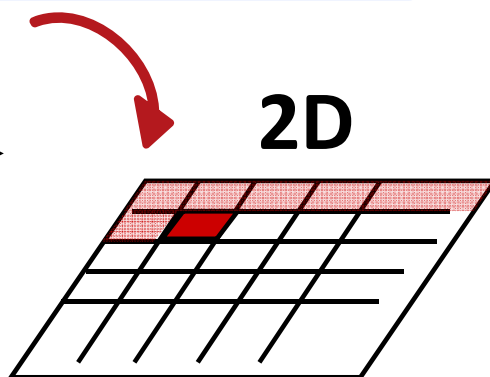
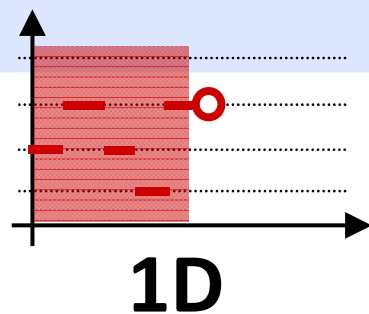


【前半】 制御分野の成果

動的量子化器
の最適設計論



機械システム制御
(離散値入力制御)



動的量子化の
“アイデア”

Cyber-Physical
システムの“デザイン”

【後半】 他分野への応用

エネルギー・環境分野
(分散電源の制御)



照明・建築環境分野
(分散照明の制御)

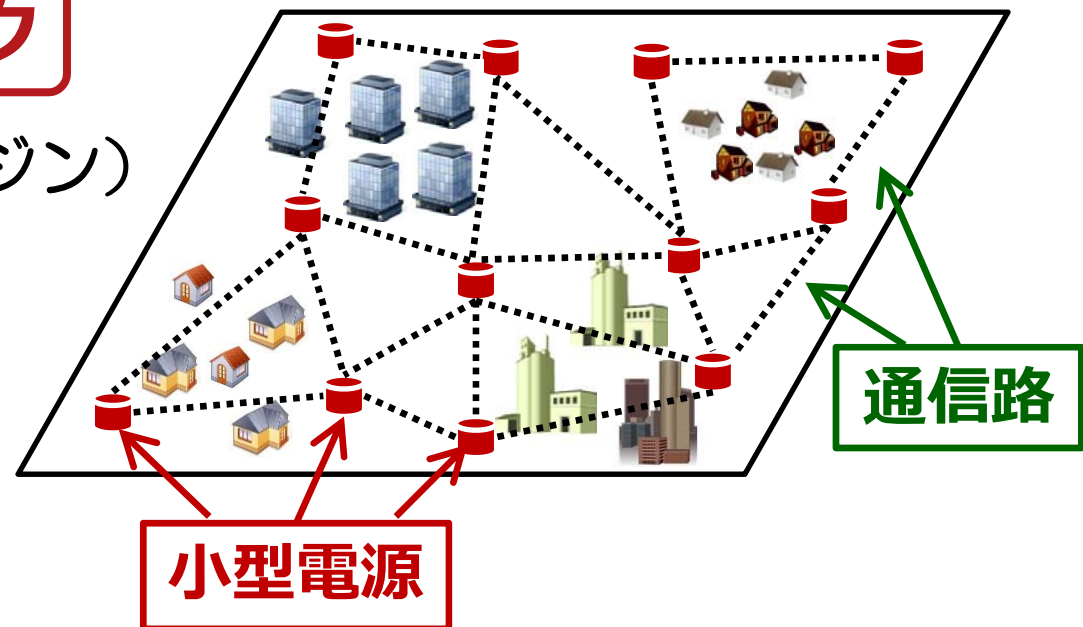
分散電源の運転モード制御



小型電源の運転モードを適切に制御する

分散電源ネットワーク

小型電源（ガスエンジン）



分散電源の運転モード制御

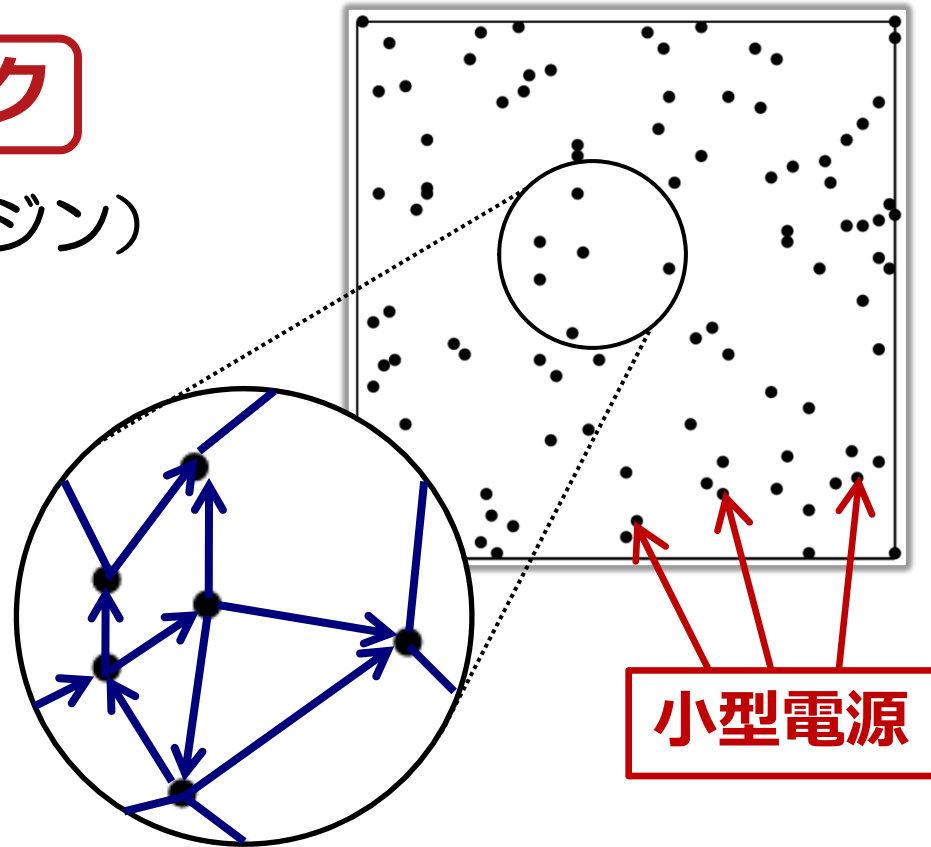


小型電源の運転モードを適切に制御する

分散電源ネットワーク

小型電源（ガスエンジン）

- ・ 分散的に配置
- ・ 通信路で結合



電源間の情報通信

分散電源の運転モード制御



小型電源の運転モードを適切に制御する

分散電源ネットワーク

小型電源（ガスエンジン）

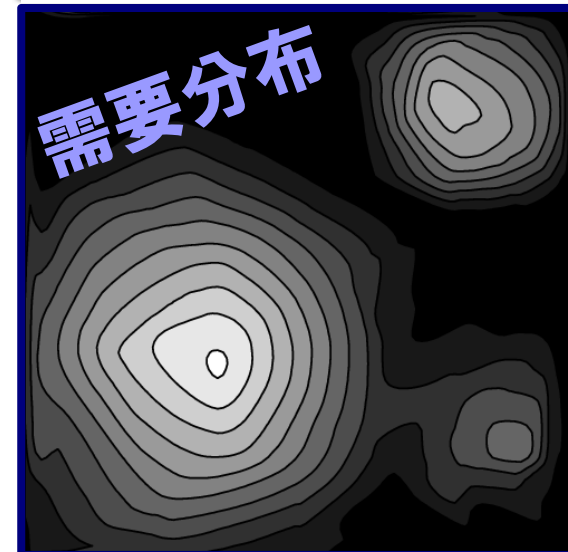
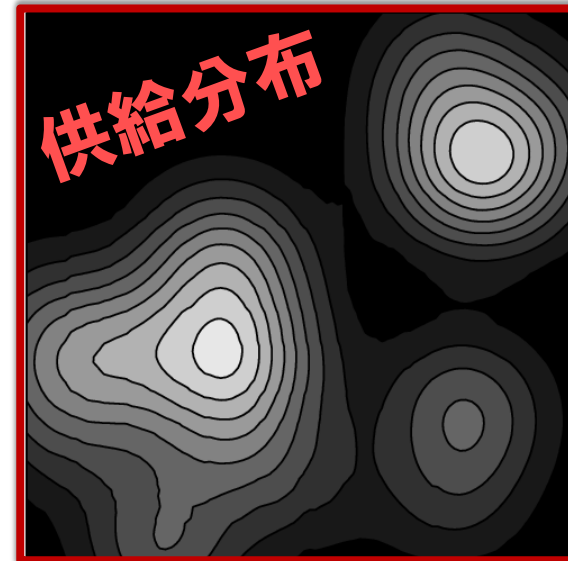
- ・ 分散的に配置
- ・ 通信路で結合

電力エネルギーが
空間的に拡散

⇒ 供給分布が形成

需要家が要求する電力
と供給電力のバランス

⇒ 電源の適切な運転



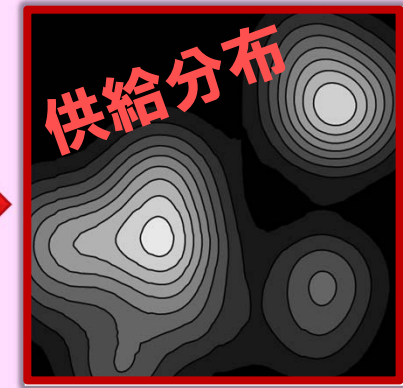
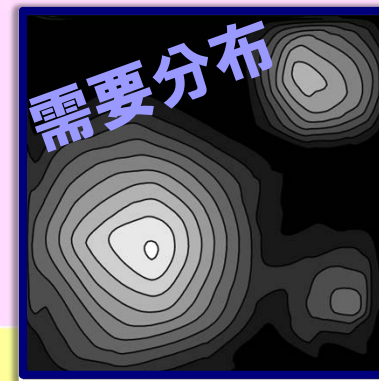
分散電源の運転モード制御



電源の運転モード制御

供給分布が需要分布に
近くなるような運転

運転条件は, **ON/OFF**
「最高効率での稼働」と「停止」



OFF
ON

集中制御

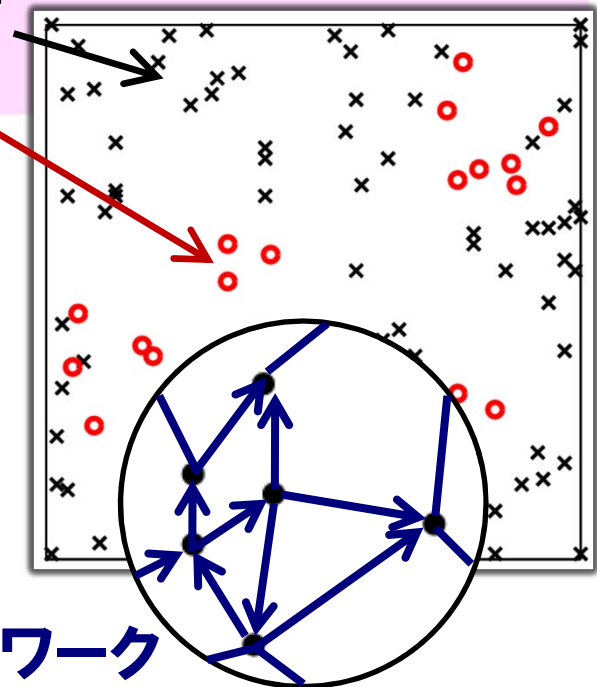


全体の需要量を把握し,
組み合わせ最適化で決定
ex) $2^{100} > 10^{30}$ 計算量爆発

分散制御



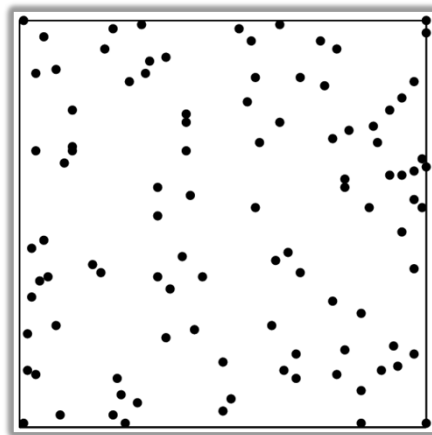
ネットワークを活用し,
自律分散的に決定



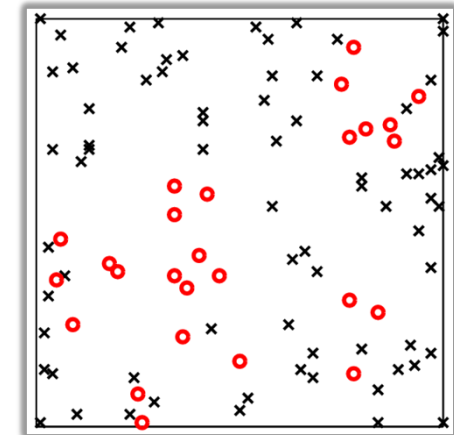
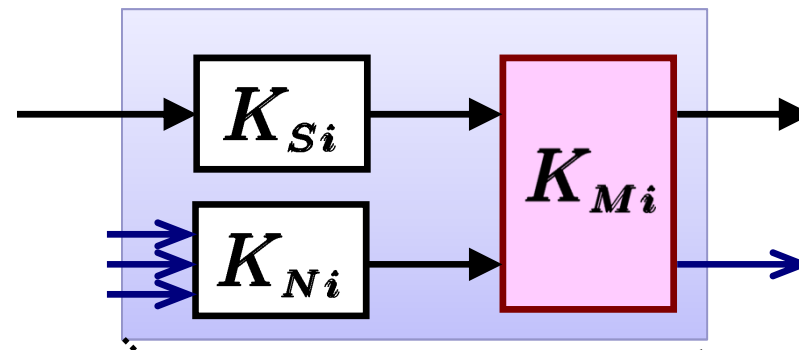
分散電源の運転モード制御



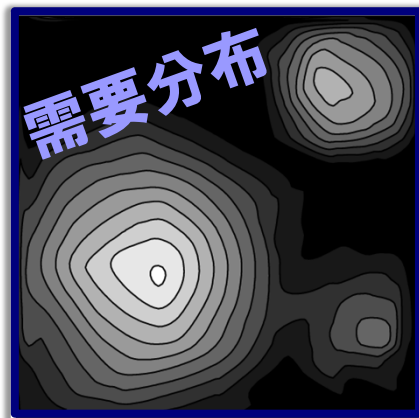
運転モードの決定 $\Rightarrow$ 分散協調的な最適化
 $\Rightarrow$ 分散制御器の設計問題に帰着



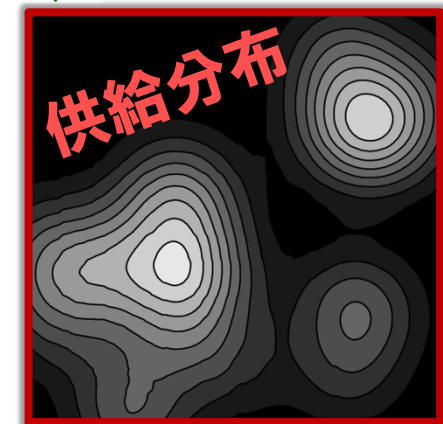
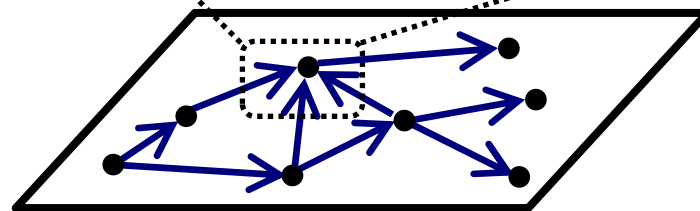
分散制御器



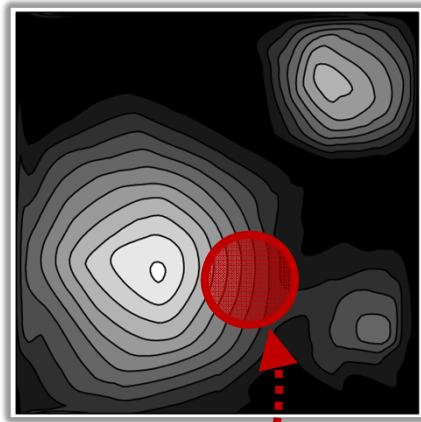
↓ 拡散方程式



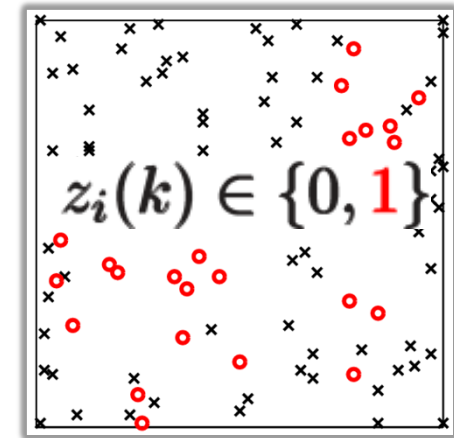
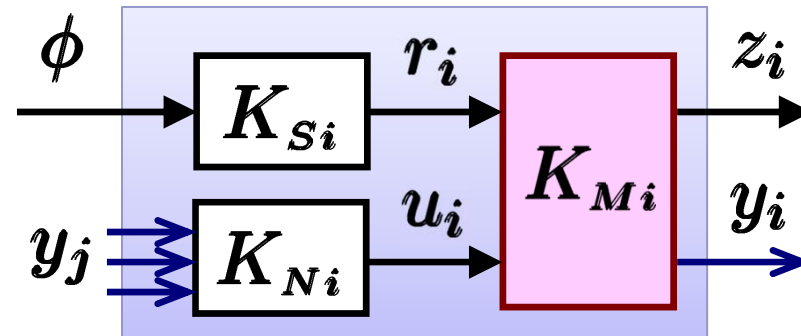
ネットワーク結合



分散制御器



分散制御器



K_{Si} 需要情報の取得

K_{Ni} 送信情報を処理

$$r_i(k) = \int_{\mathbb{B}_i} f(\phi(\tau)) d\tau$$

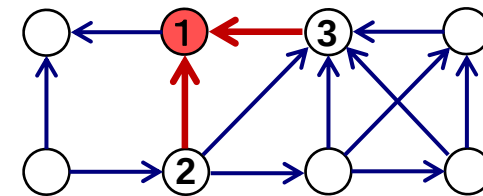
$$u_i(k) = g(y_1(k), y_2(k), \dots, y_n(k), \mathcal{N}_i)$$

K_{Mi} 運転モードと送信情報の決定

$$\begin{cases} x_i(k+1) = ax_i(k) + b_1 r_i(k) + b_2 u_i(k) \\ y_i(k) = c_1 x_i(k) + d_1 r_i(k) \\ \boxed{z_i(k)} = Q(c_2 x_i(k) + d_2 r_i(k)) \end{cases}$$

On/Off $\hookrightarrow Q : \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$

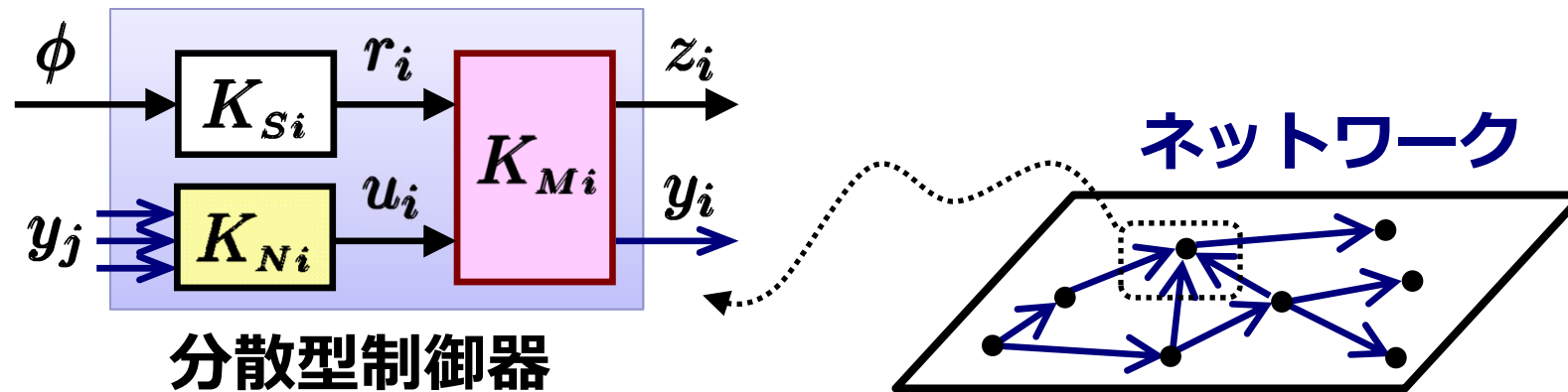
近傍の情報のみ利用



$$\Downarrow \mathcal{N}_1 = \{2, 3\}$$

$$u_1(k) = g(y_2(k), y_3(k))$$

分散電源の運転モード制御 | 提案手法

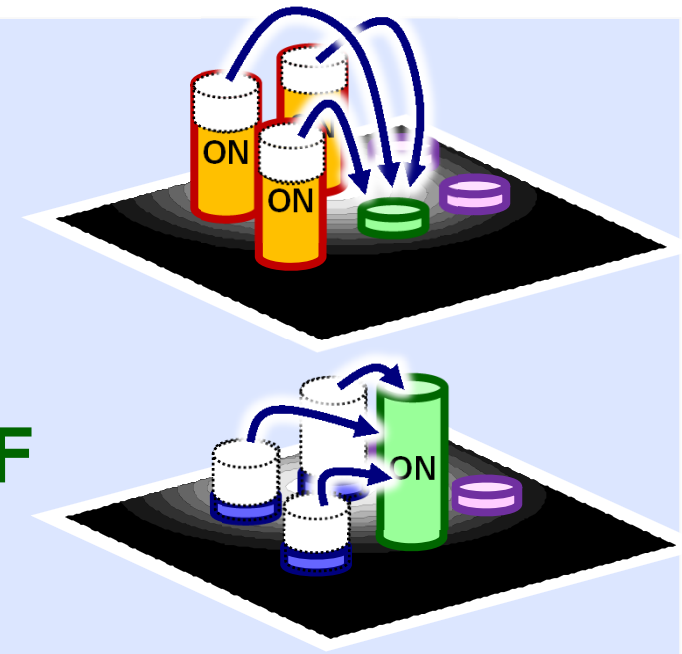


提案手法の考え方

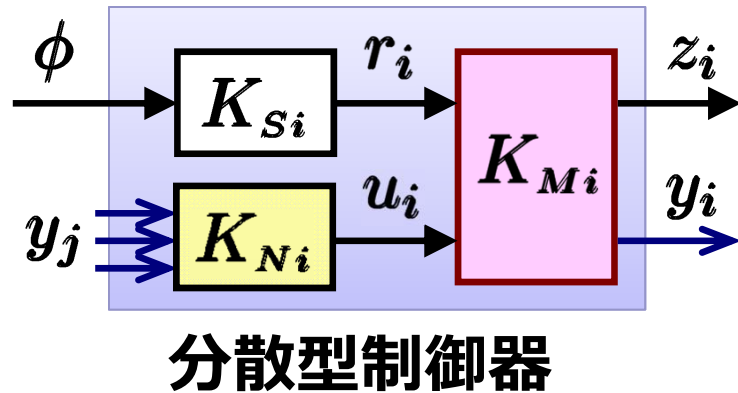
需要が多い $\Rightarrow$ 多くの電源をON

電源間で情報交換 $\Rightarrow$ 電力を補う

- ・ 周囲が**電力余剰** $\rightarrow$ 電源をOFF
- ・ 周囲が**電力不足** $\rightarrow$ 電源をON



分散電源の運転モード制御 | 提案手法



$$K_{Ni} : \quad u_i(k) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ji} (Q(y_j(k)) - y_j(k))$$

誤差の影響を近くの電源が補う

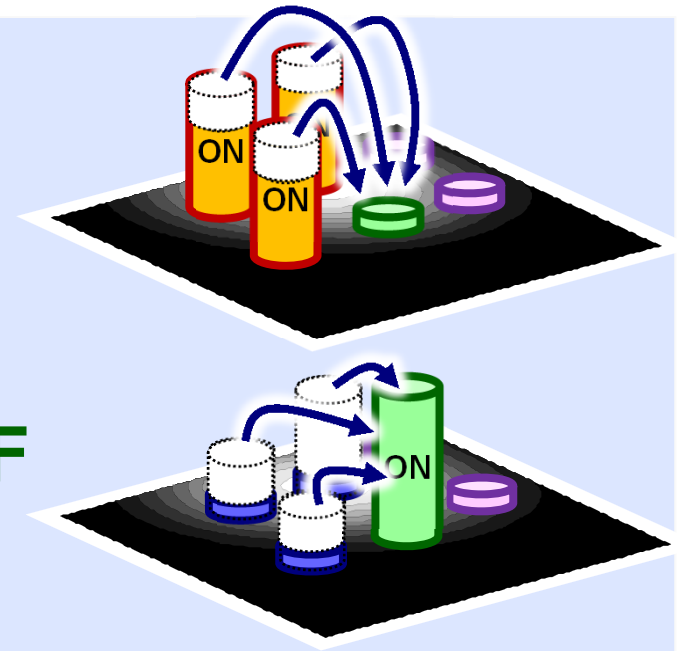
$$a_{ij} := \frac{\exp(\|p_i - p_j\|)}{\sum_{k \in \mathcal{I}_i} \exp(\|p_i - p_k\|)}$$

$Q : \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$

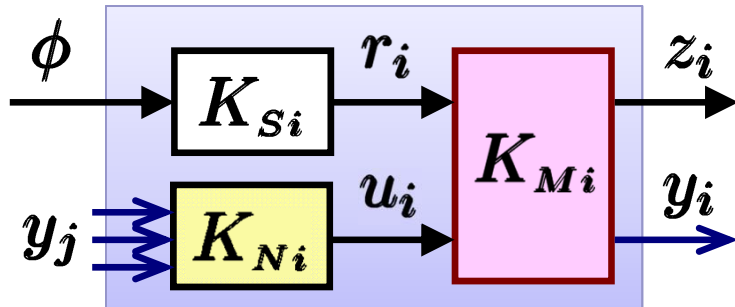
提案手法の考え方

需要が多い $\Rightarrow$ 多くの電源をON
電源間で情報交換 $\Rightarrow$ 電力を補う

- ・ 周囲が電力余剰 $\rightarrow$ 電源をOFF
- ・ 周囲が電力不足 $\rightarrow$ 電源をON



分散電源の運転モード制御 | 提案手法



$K_{Ni} :$

$$u_i(k) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ji} (Q(y_j(k)) - y_j(k))$$

誤差の影響を近くの電源が補う

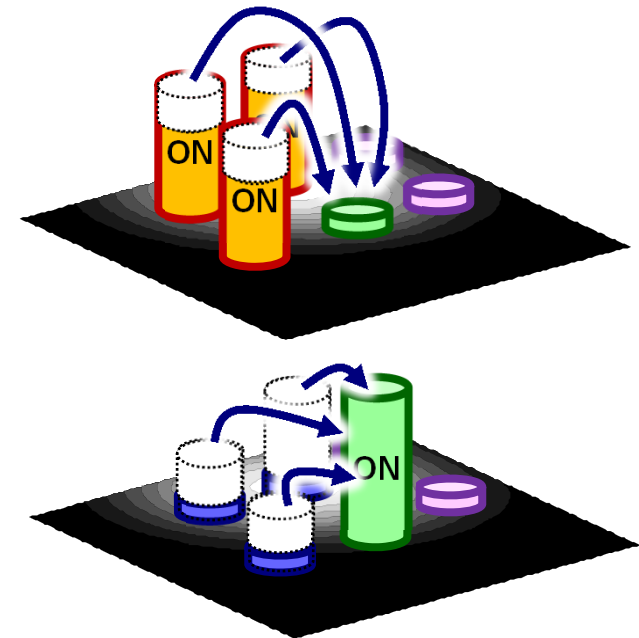
$$a_{ij} := \frac{\exp(\|p_i - p_j\|)}{\sum_{k \in \mathcal{I}_i} \exp(\|p_i - p_k\|)}$$

$K_{Si} : r_i(k) = \phi(p_i)$

各電源の位置での需要量

$$K_{Mi} : \begin{cases} x_i(k+1) = r_i(k) + u_i(k) \\ y_i(k) = x_i(k) \\ z_i(k) = Q(x_i(k)) \end{cases}$$

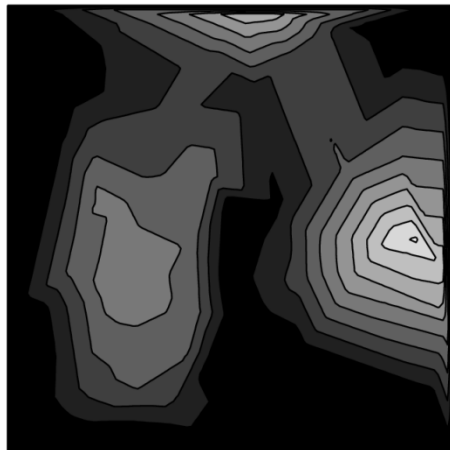
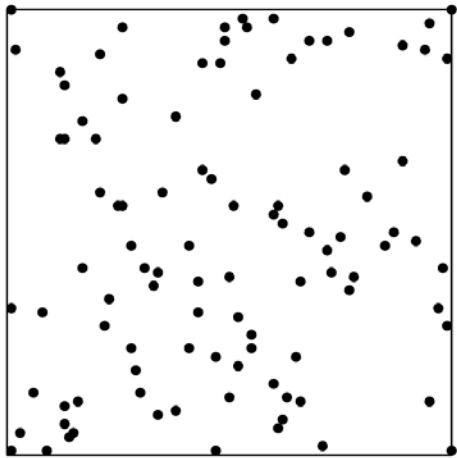
r_i と u_i を保存 $\Rightarrow$ 送信 & ON/OFF



分散電源の運転モード制御 | 数値例

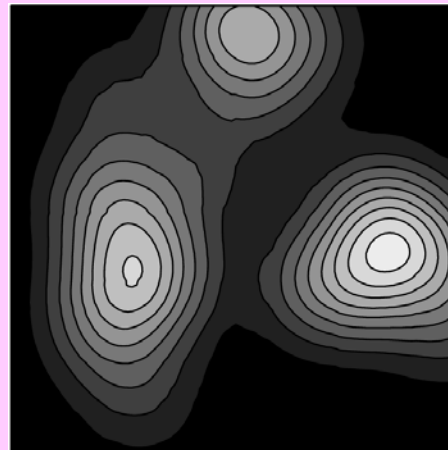
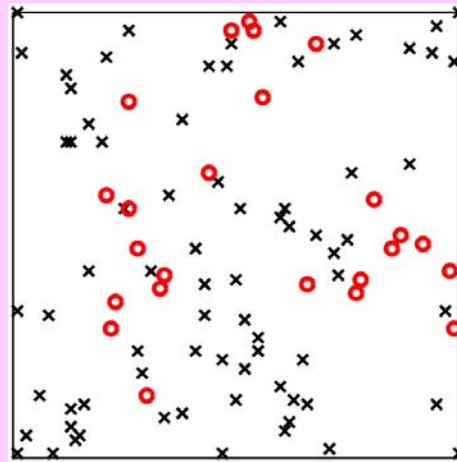


100個の電源



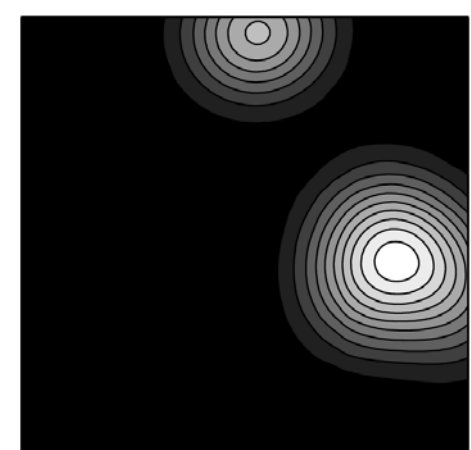
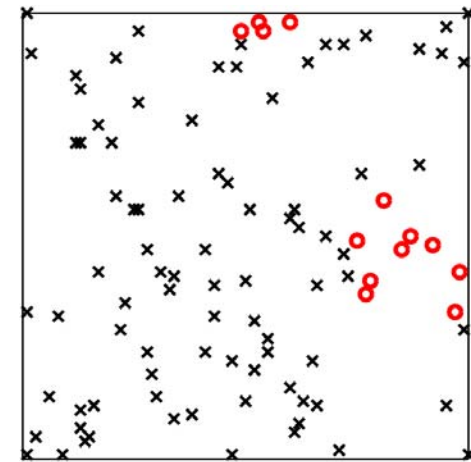
需要分布

提案手法



供給分布

情報交換なし



目次

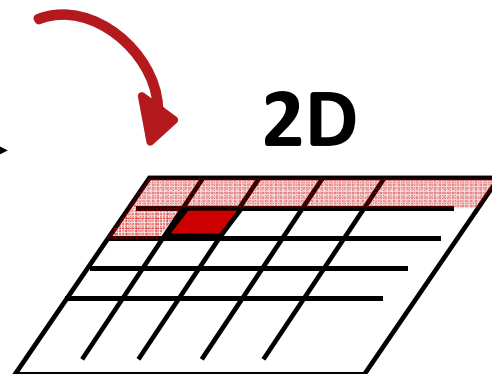
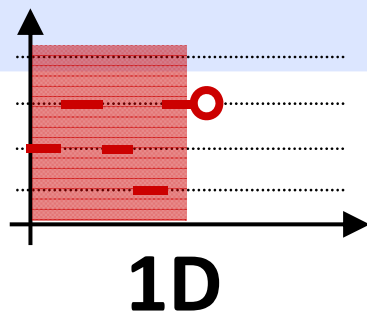


【前半】 制御分野の成果

動的量子化器
の最適設計論



機械システム制御
(離散値入力制御)



動的量子化の
“アイデア”

Cyber-Physical
システムの“デザイン”

【後半】 他分野への応用

エネルギー・環境分野
(分散電源の制御)



照明・建築環境分野
(分散照明の制御)

分散照明の点灯パターン制御



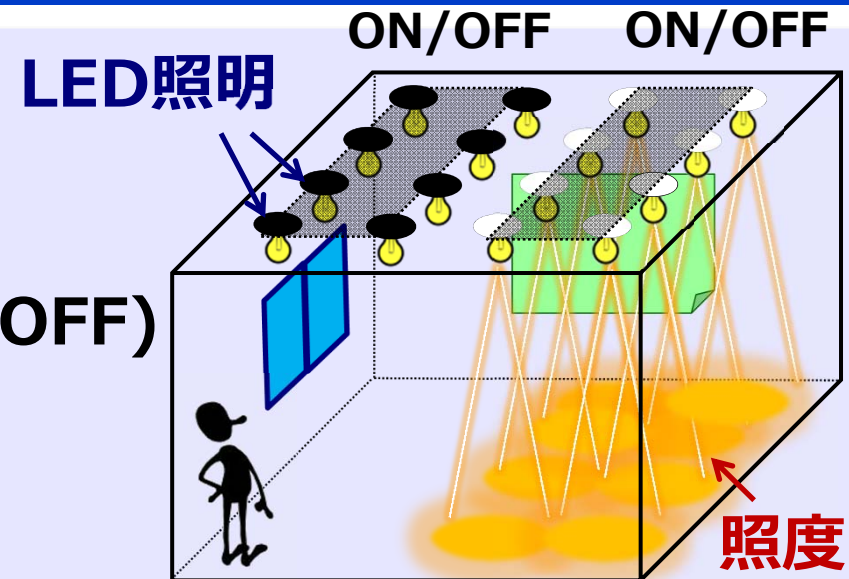
従来の照明

配線に依存した点灯パターン

⇒ ひとくくりで制御 (ON/OFF)

⇒ **適光適所が難しい**

(人の変化, 環境の変化)



分散型照明

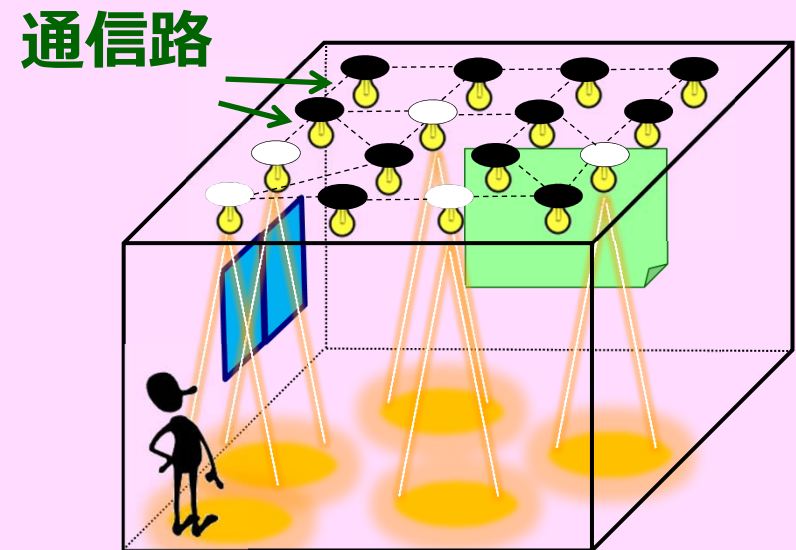
・ 複数の照明を通信路で接続

・ 各照明を個別に制御

⇒ 適光適所

⇒ 省エネルギー

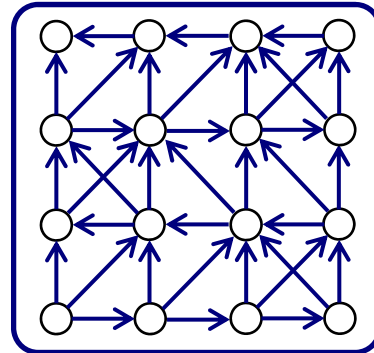
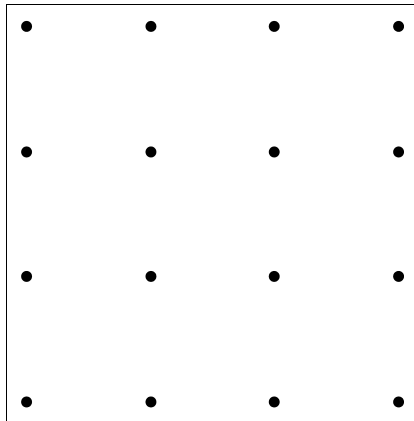
} を実現



点灯パターン制御



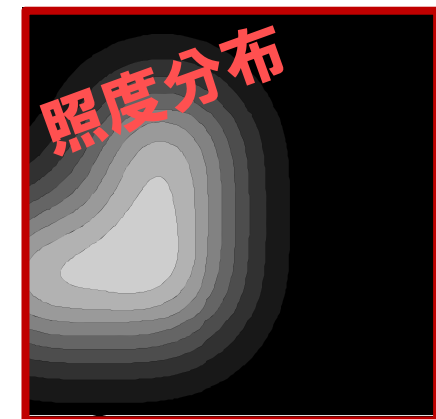
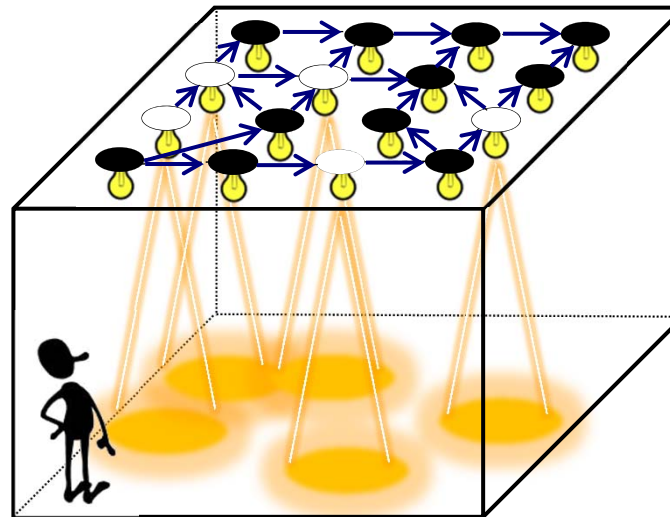
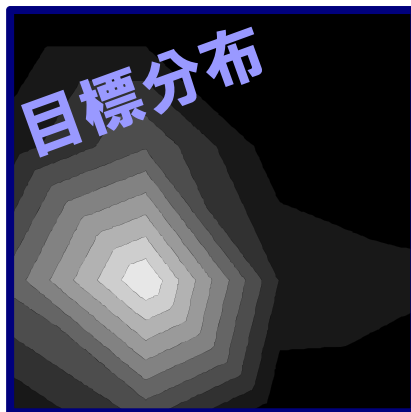
照明の配置



照明間の情報通信

照明近い: 明
照明遠い: 暗

点灯パターン



複数の照明
⇒ 通信路で結合

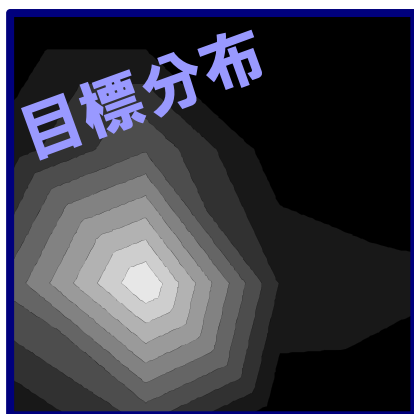
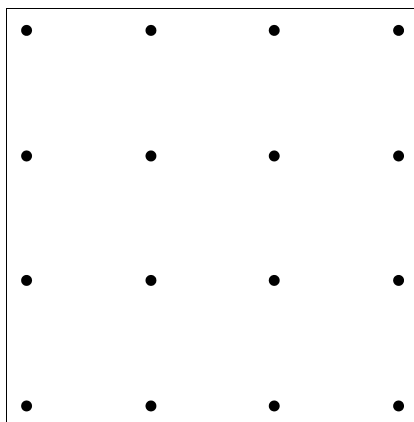
照明のON/OFF
⇒ 照度分布

目標分布に近い
⇒ 点灯パターン

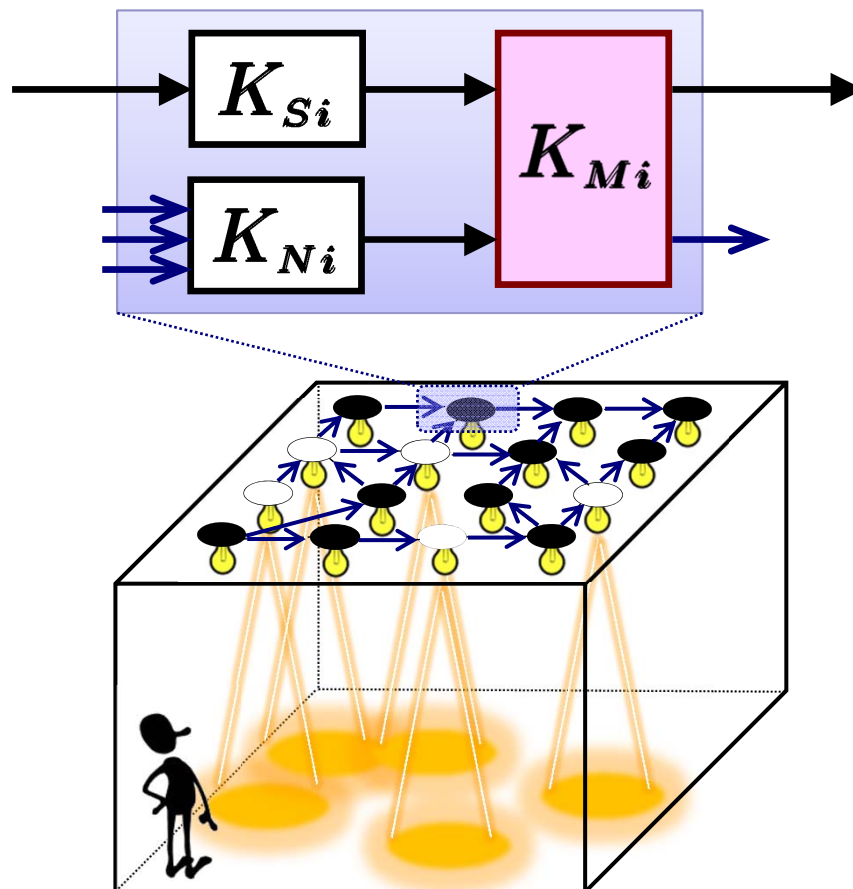
研究目標



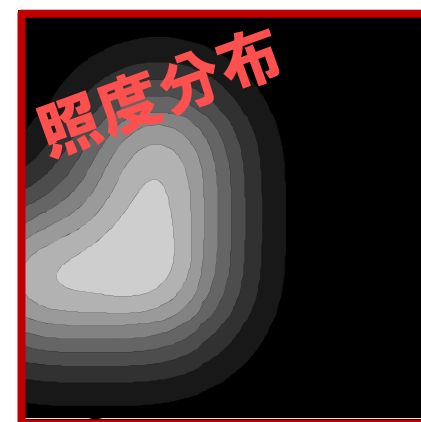
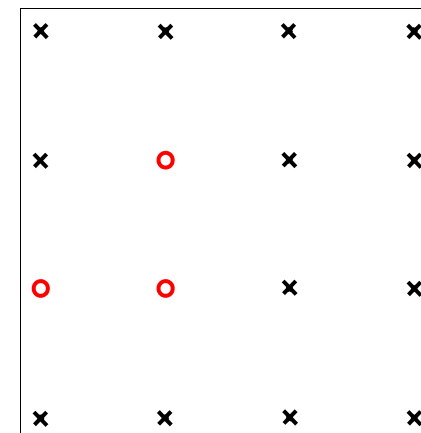
照明の配置



分散制御器



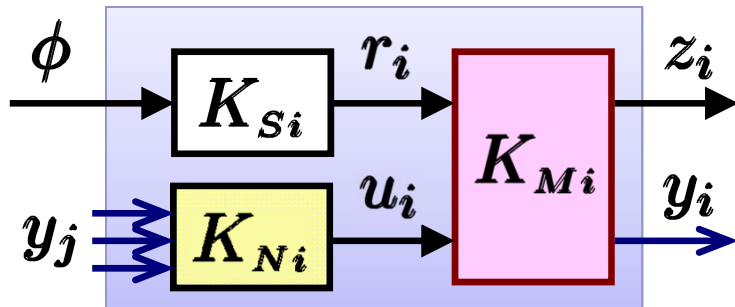
点灯パターン



目標

目標照度分布＝実際の照度分布となるように
各照明のON/OFFを決定する分散制御器の設計

提案手法



$$K_{Ni} : u_i(k) = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ji} (Q(y_j(k)) - y_j(k))$$

誤差の影響を近くの照明が補う

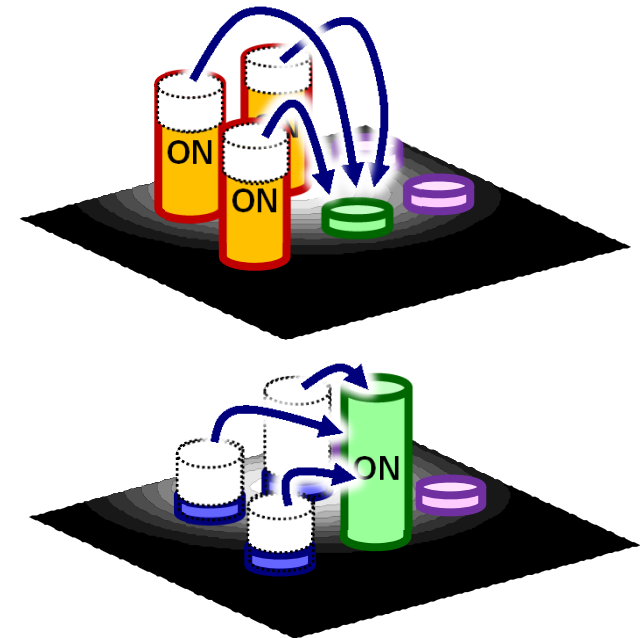
$$a_{ij} := \frac{\exp(\|p_i - p_j\|)}{\sum_{k \in \mathcal{I}_i} \exp(\|p_i - p_k\|)}$$

$$K_{Si} : r_i(k) = \phi(p_i)$$

各照明の位置での目標照度

$$K_{Mi} : \begin{cases} x_i(k+1) = r_i(k) + u_i(k) \\ y_i(k) = x_i(k) \\ z_i(k) = Q(x_i(k)) \end{cases}$$

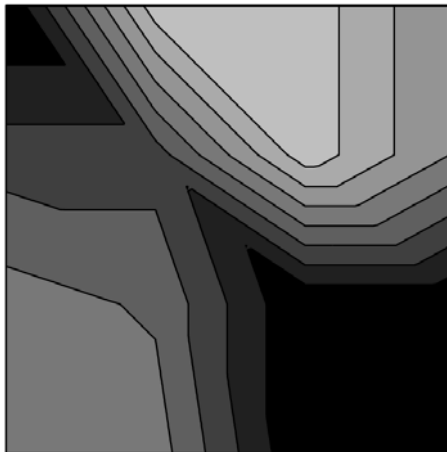
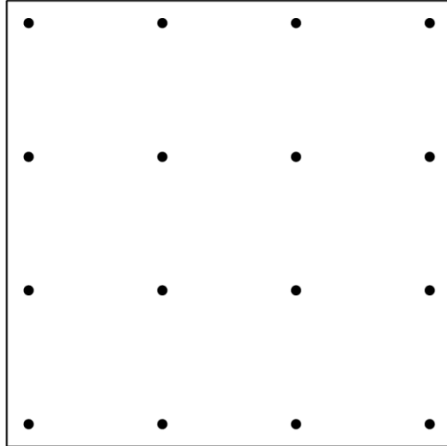
r_i と u_i を保存 $\Rightarrow$ 送信 & ON/OFF



数値シミュレーション, 実験結果

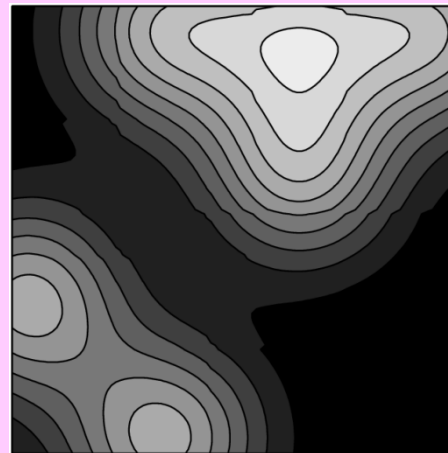
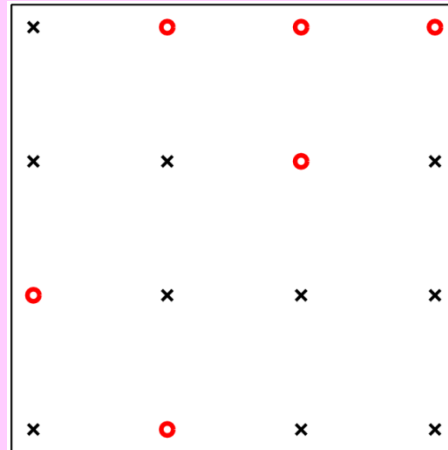


16個の照明

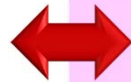
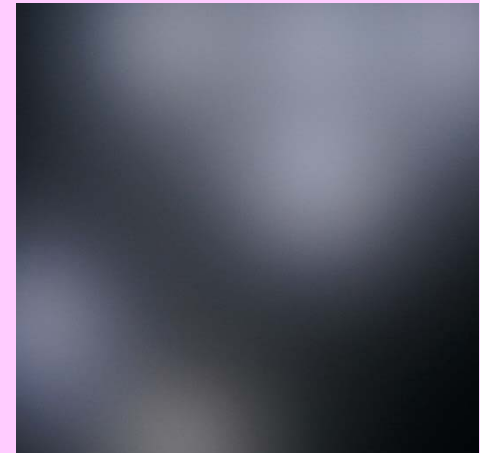


目標分布

シミュレーション



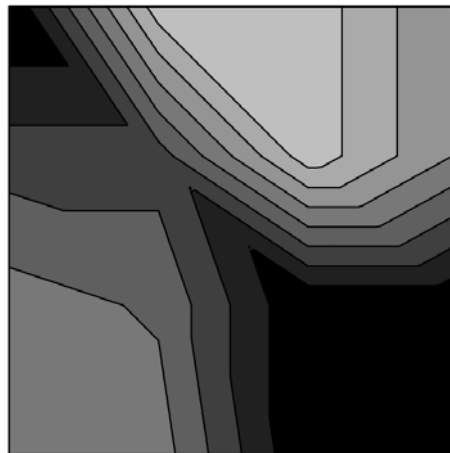
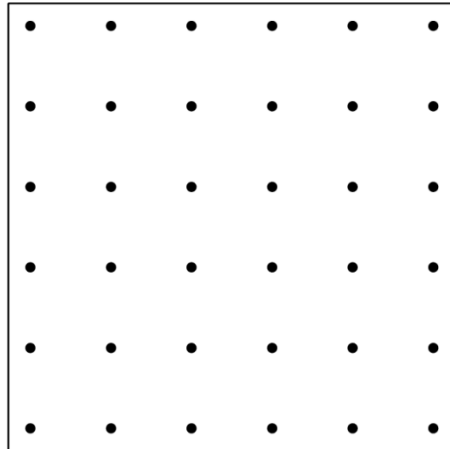
実験



数値シミュレーション, 実験結果

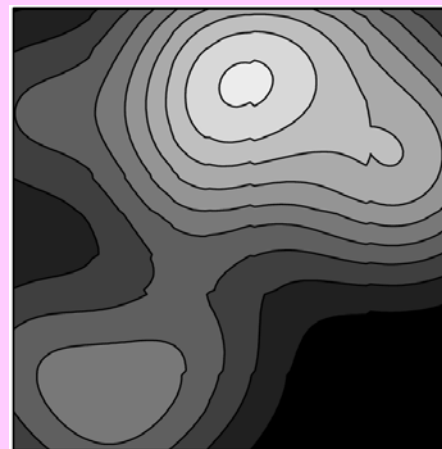
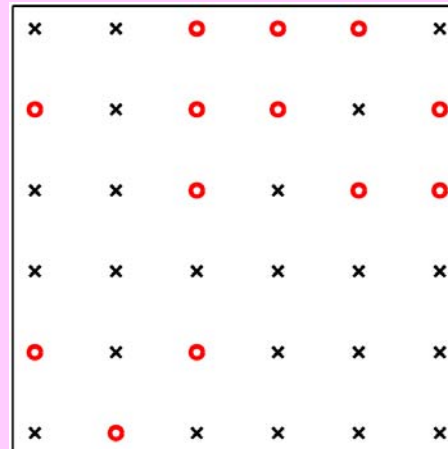


36個の照明

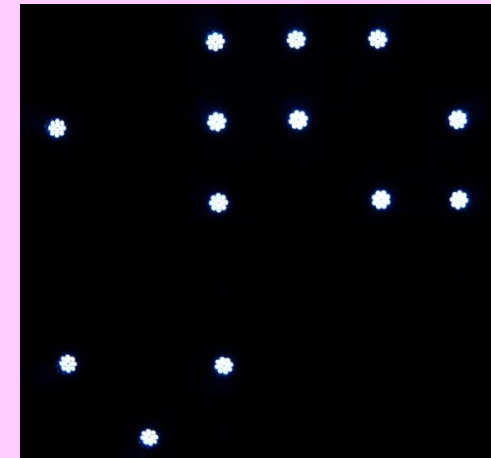


目標分布

シミュレーション



実験



まとめ



前半のまとめ 制御のための動的量子化器

1 ハードウェア性能

離散値システム
の設計

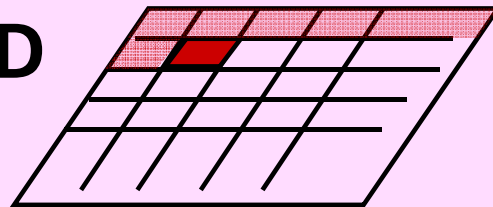
2 制御の観点

量子化器問題

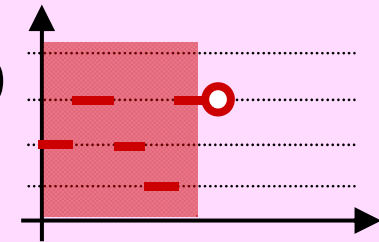
3 ベストな解

制御対象に特化
した量子化器

2D



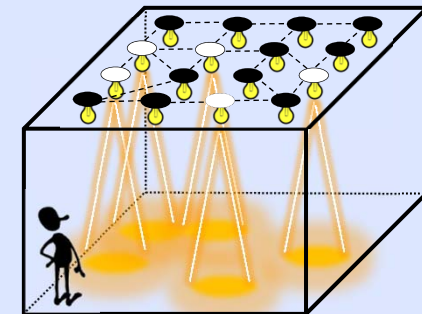
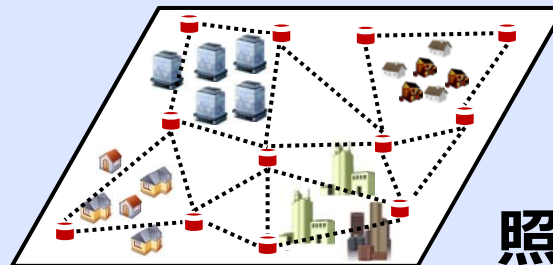
1D



後半のまとめ

電源の運転モード制御

動的量子化の
“アイデア”を応用



照明の点灯パターン制御