



分散協調型マルチエージェントシステム

- Distributed Cooperative Control for Multi-Agent Systems -

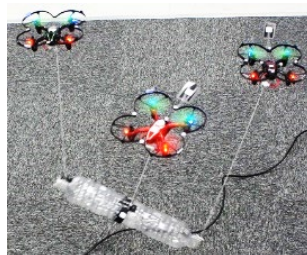
Multi-Agent Systems

ネットワーク接続された複数機エージェントが情報交換を通し、協調的にタスクを行うシステム

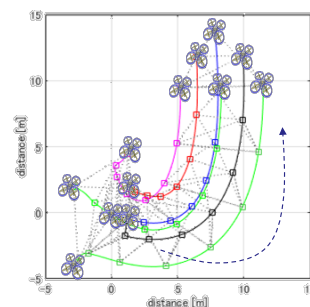
- 優れた効率性 - 短時間等, 作業効率の向上
- 優れた耐故障性 - タスク遂行力の向上

応用例

- フォーメーション制御への応用
- 動物の群れ行動の再現
- 環境認識問題への応用



マルチUAV (無人航空機)
システムによる協調搬送

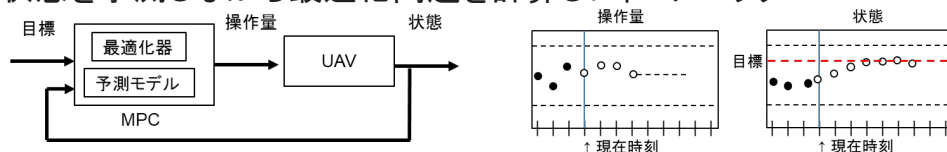


マルチUAVシステムの
フォーメーション

① Distributed MPC(Model Predictive Control) Formation

分散MPCを用いたUAV群のフォーメーション制御

- 未来の状態を予測しながら最適化問題を計算しフィードバック



制御入力 $\tilde{M}_i$
を最適化

$$\min_{\tilde{M}_i} J_i = \frac{1}{2} \left[\underbrace{\hat{r}_i(k+N_p)^T P_i \hat{r}_i(k+N_p)}_{\text{Terminal Cost Func.}} + \sum_{j=1}^{N_p-1} \underbrace{\hat{r}_i(k+j)^T Q_i \hat{r}_i(k+j)}_{\text{State Cost Func.}} + \sum_{j=0}^{N_c-1} \underbrace{\tilde{M}_i^T(k+j) R_i \tilde{M}_i(k+j)}_{\text{Input Penalty}} \right]$$

$$\text{s.t. } \hat{r}_i(k+1) = \hat{A} r_i(k) + \hat{B} \tilde{M}_i(k)$$

状態の
目標偏差

$$\hat{r}_i(j) = r_i(j) - r_{\text{ref}}(j)$$

$\tilde{M}_i$: 制御入力

J_i : 評価関数

r_i : 状態

r_{ref} : 参照状態

N_p : 予測ホライズン

N_c : 制御ホライズン

P_i, Q_i, R_i : 重み行列

② Distributed Event-Triggered Formation

フォーメーション制御入力の更新頻度を減らす

- 安定性を保証しながらエージェントの計算・通信負荷を低減

エージェント
モデル

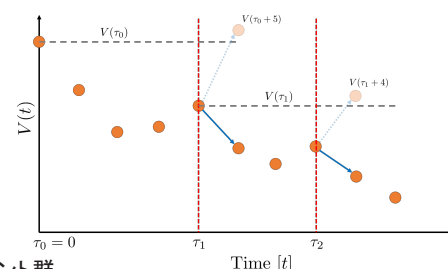
$$x_i(k+1) = Ax_i(k) + Bu_i(k), \quad i \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$$

他エー
ジェント
情報を
用いた
制御入力

$$\begin{cases} u_i(k) = -K \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\hat{x}_i(\tau_l) - \hat{x}_j(\tau_l)), & k \in \{\tau_l, \tau_l+1, \dots, \tau_{l+1}-1\} \\ \hat{x}_i(k) = x_i(k) - d_i \end{cases}$$

制御入力
更新条件

$$\begin{cases} V(k) = (x(k) - (x_{N+1} + d))^T (k) (I_N \otimes P) (x(k) - (x_{N+1} + d)) \\ \tau_{l+1} = \min\{t : V(t+1) \geq V(\tau_l), t > \tau_l\} \end{cases}$$



$\mathcal{N}$: エージェント群

N : エージェント数

K : 制御ゲイン

$\mathcal{N}_i$: 隣接エージェント集合

τ_l : l 番目の制御入力更新時刻

d_i : 目標偏差

x_{N+1} : リーダーの状態

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 小谷 健人, 豊田 凌 / 学部生 林 由貴寿

お問合せ先

Email: namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL: 045-566-1731

URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>

Keio University



CPSにおけるサイバーセキュリティ

—Cyber Security for Cyber-Physical Systems—

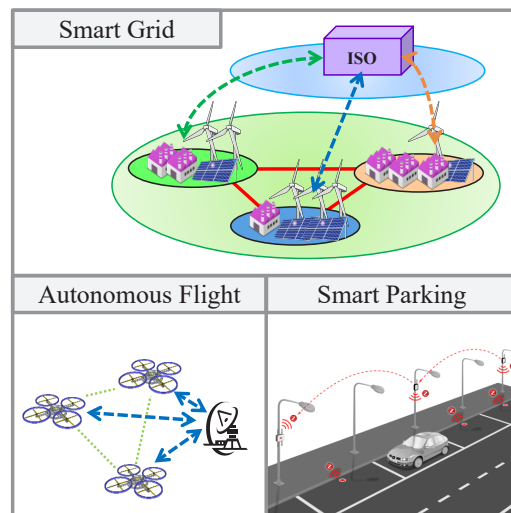
サイバーフィジカルシステム(CPS)

- ICTの深化に伴うネットワーク化やサイバー空間利用の飛躍的発展
- 現実世界に点在する「もの」がIoTの技術革新により「システム化」

ICT・IoT技術を最大限活用し、サイバー空間と実空間との融合

- ネットワーク依存性が高く、**サイバー攻撃を受ける**可能性
- 制御システムに対する攻撃が増加するため、**地球環境**や**生命活動の破壊**に繋がる恐れ
- システムの大規模化に伴う安定運用のための**フォールトトレラント設計**

CPSにおけるサイバー攻撃に対する頑健性の確立

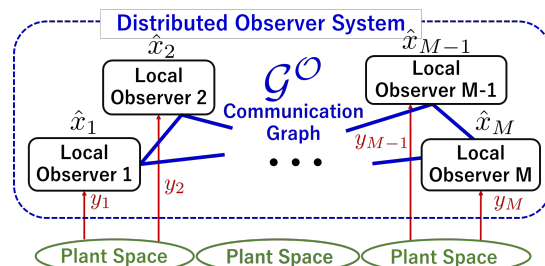


Examples of Cyber-Physical Systems

分散オブザーバセキュア状態推定問題

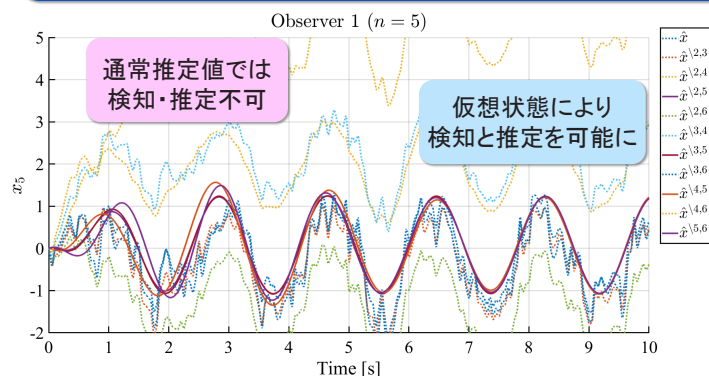
- 大規模システムは複数のローカルシステムから構成
 - ➡ 本質的には**分散システム**
- 各オブザーバは**局所観測値**のみ観測可能
 - ➡ 他のオブザーバと**通信**することでシステム全体の状態を推定
- 攻撃が存在する環境における**状態推定問題**

アプローチ → **仮想状態(Virtual-State) + グラフィカル分散オブザーバ**

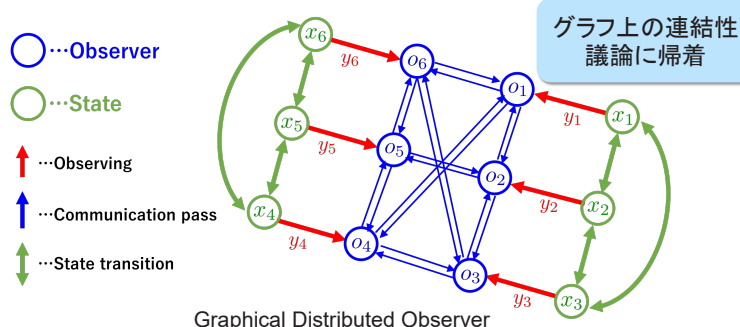


- あるオブザーバ e を除外した上での**状態推定値** $\hat{x}^{\setminus e}$
- 各分散オブザーバ上に**複数の仮想状態**を生成
- 仮想状態を比較することで**被攻撃オブザーバの特定**と**状態真値の推定**

- **オブザーバ通信構造**と**可観測性**をグラフで一括表現
- 分散オブザーバ問題を**グラフ連結性**に落とし込むことが可能
- **状態行列**と**出力行列**によって**状態パス**と**観測パス**が決定



仮想状態 $\hat{x}^{\setminus 2,5}, \hat{x}^{\setminus 3,5}, \hat{x}^{\setminus 4,5}, \hat{x}^{\setminus 5,6}$ が一致



Graphical Distributed Observer

被攻撃オブザーバの**特定(攻撃検知)**と**セキュア状態推定**を達成

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 佐藤 正太郎

お問合せ先

E-mail : namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL : 045-566-1731
URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>



スマート交通システム

-Smart Transportation System-

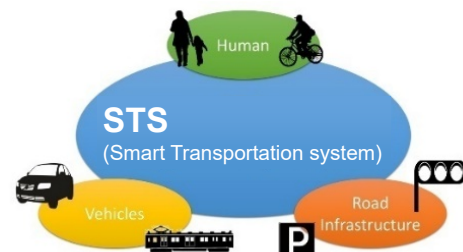
交通渋滞

- ・ 経済損失
- ・ 環境汚染
- ・ 交通事故要因

ITS

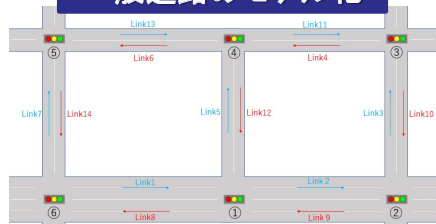
人・乗り物・自動車間で
情報交換して渋滞抑制

ソフト面からの交通渋滞抑制施策



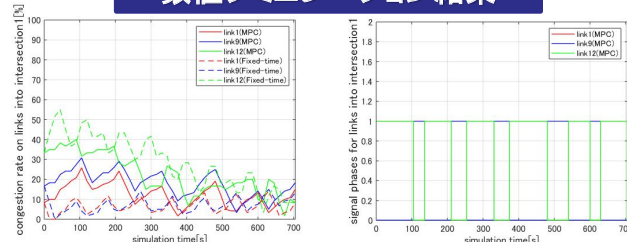
一般道路信号制御

一般道路のモデル化



青信号時間／切り替えのタイミングを考慮して
最適な入力決定

数値シミュレーション結果

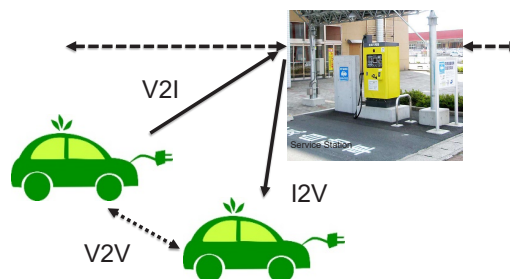


交通量の平準化を実現

電気自動車の充電スケジューリング

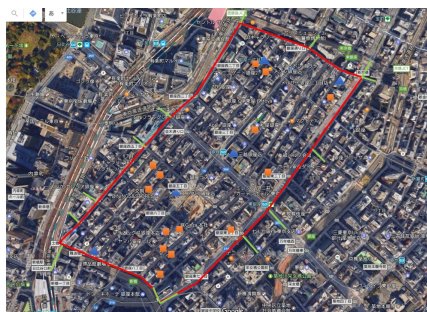
- 誰が／いつ／どのくらい充電するかを計画するアルゴリズムの開発
- 各電気自動車は利己的な行動をする（現実的なシチュエーション）
- 充電ステーションの利益を考慮する

マッチング理論／ゲーム理論を用いた
アルゴリズムの提案



スマートパーキングシステム

駐車場探索に伴う車両速度の低下による交通渋滞

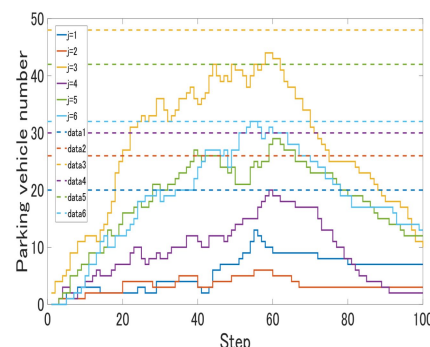


スマートパーキングシステム

- ・ ドライバーに駐車場を割り当て、
駐車場探索時間を短縮
- ・ ドライバー、駐車場管理者の要望を
考慮して駐車場割当を決定

マッチング理論

ドライバーと駐車場管理者の
独立した意思決定を反映



適切な駐車場割り当てを実現

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 吉原 美祐 / 学部生 佐々木 駿, 中里 拓哉

お問合せ先

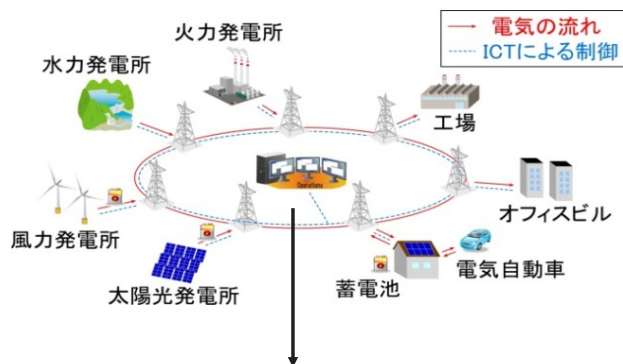
E-mail : namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL : 045-566-1731
URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>



エネルギーネットワークの制御

- Control in Energy Network -

電力系統の周波数制御



周波数変動を検知し、発電機と蓄電池に出力指令値変更

再生可能エネルギー電源の導入拡大
問題点: 天候状況による発電量の変動

需給バランスの維持が困難 = 周波数変動

周波数制御の必要性

$$J_i = \beta_i (E_{B,i}(t+T) - E_{B,i}^*)^2 + \int_t^{t+T} \left\{ x_i^T Q_i x_i + \text{sat}[u_i]^T R_i \text{sat}[u_i] \right\} dt$$

評価区間最終値の蓄電容量を
目標蓄電容量に近づけるための終端ペナルティ項

- 制約を設けた発電機と蓄電池
- 蓄電池容量を考慮
- 周波数変動の抑制

電気自動車(EV)スケジューリング算出

スケジューリング・・・EVがいつどれだけのエネルギーを充電するかを決定する

EVの普及台数が世界的に拡大している
問題点: EVは一度の充電に多くの時間と電力を要する

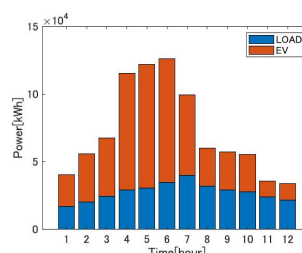
本研究

- ピークシフトをすることで電力需要を均一化する
- 各EVが分散的にスケジューリングを算出

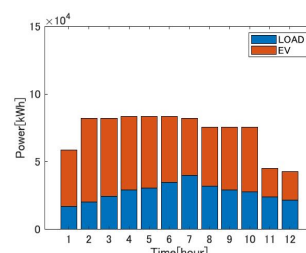
各EVが独立して、非協力に
スケジューリングを算出する



シミュレーション結果



従来手法



提案手法

ピークシフトによって電力需要の集中を抑制

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 関根 徹也, 水野 敬介 / 学部生 玉井 知樹

お問合せ先

E-mail : namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL : 045-566-1731
URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>



エネルギーマネジメントシステム

- Energy Management System -

Energy Management System

建物内のエネルギーマネジメント (BEMS & HEMS)

建物内のエネルギーを無駄なく運用するためのシステム

◆ BEMS ...

ビルにおけるエネルギーマネジメント

◆ HEMS ...

家庭におけるエネルギーマネジメント

快適温度の維持

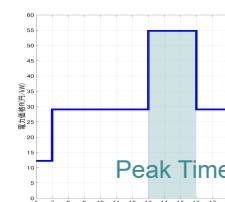
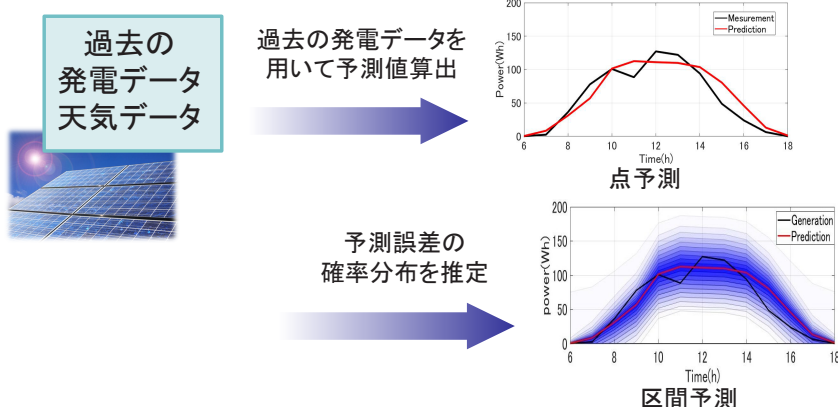
電気料金の削減

ピークカット, ピークシフトの実施

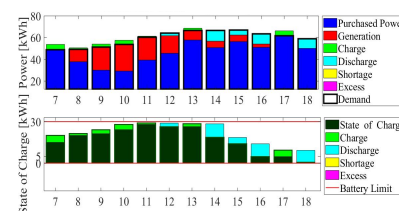
これらを両立させる
制御の提案

BEMS 太陽光発電量予測 + バッテリマネジメントシステム

- 過去のデータから1日先の太陽光発電量を予測
- バッテリーを活用してピークカットを達成することで、電力料金を削減



電力料金

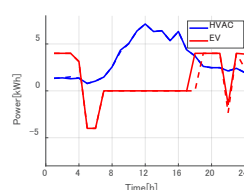
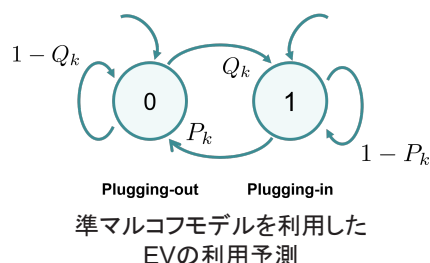


太陽光発電量区間予測を用いた
バッテリーマネジメントシステム

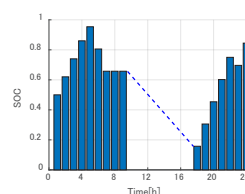
HEMS 空調管理 + バッテリマネジメントシステム

- 家庭内のエネルギーマネジメントを最適に行うためにEV(電気自動車)のバッテリーを蓄電池として活用
- EVのバッテリーの充放電にはある程度の時間が必要

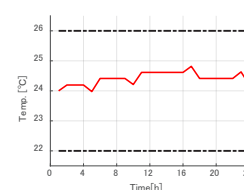
EVの利用予測を導入したHEMS手法の提案



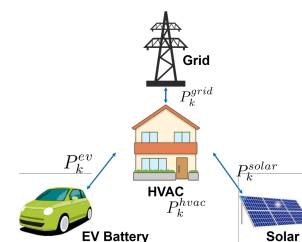
電力量



バッテリーの充電状態
(SOC)



室内温度



研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 小方 裕貴 / 学部生 山内 賢

お問合せ先

E-mail : namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL : 045-566-1731

URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>

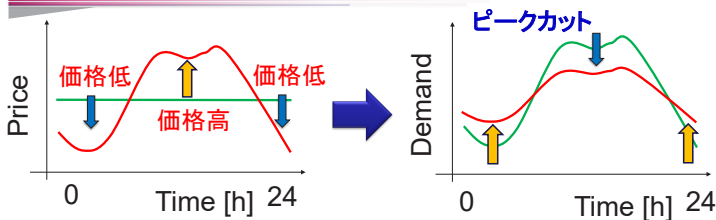
Keio University



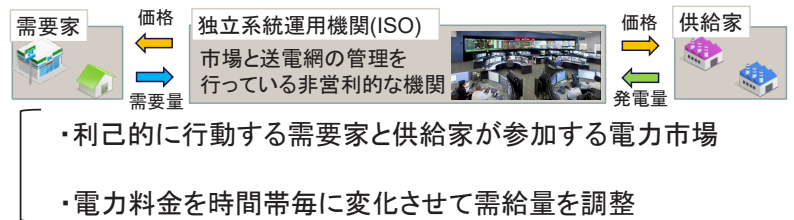
電力網のダイナミックプライシング

-Dynamic Pricing for Power Network-

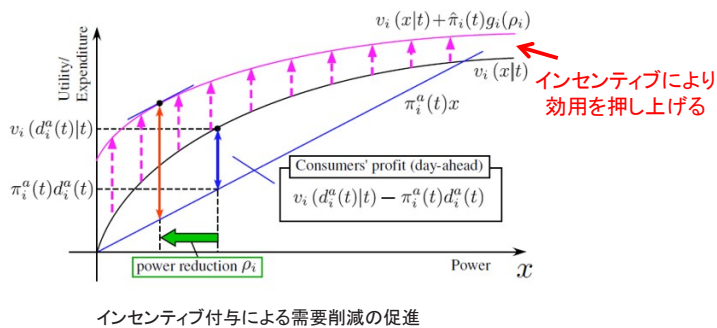
ダイナミックプライシングとは?



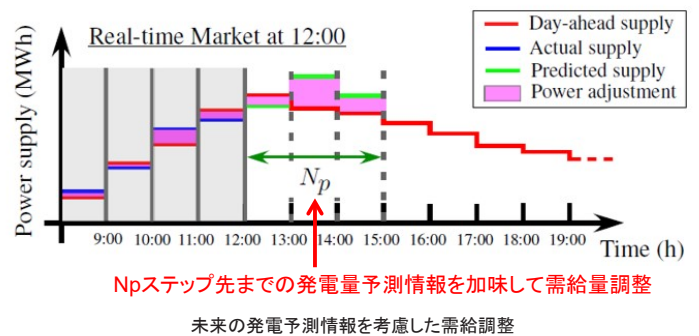
3つの参加者(プレーヤー)



ポイント1 ネガワット取引に基づく需要調整



ポイント2 発電予測に基づく蓄電池による需給調整



受動性に基づく安定性解析

主問題

$$\max_{P_L, P_G, \theta} \sum_{l \in A} \left\{ \sum_{i \in L_i} v_i^l(P_{L_i}^l) - \sum_{i \in G_i} c_i^l(P_{G_i}^l) - f^l(\theta_l) \right\}$$

電力消費による需要家の効用 (Utility of consumer)
供給者の発電費用 (Generation cost)
電力潮流に関するペナルティ (Penalty for power flow)

s.t. $P_G + B\theta = P_L$ 電力網における地域間潮流を含む電力需給バランス (Power balance including regional power flow)

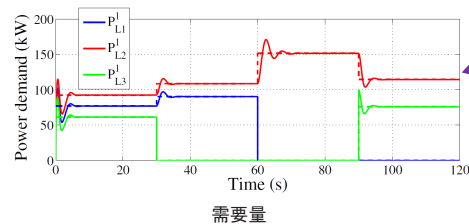
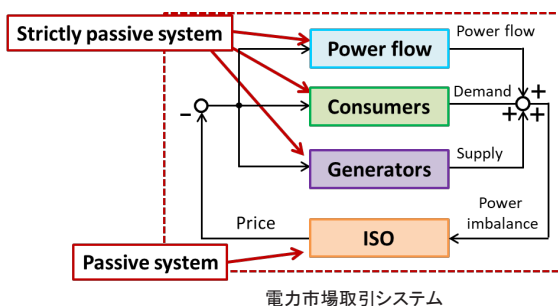
$P_{L_i}^{\min} \leq P_{L_i}^l \leq P_{L_i}^{\max}, \forall i \in L_i, \forall l \in A$ 需要量制約 (Demand constraint)
 $P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i}^l \leq P_{G_i}^{\max}, \forall i \in G_i, \forall l \in A$ 供給量制約 (Supply constraint)
 $P_{lk}^{\min} \leq P_{lk} \leq P_{lk}^{\max}, \forall (l, k) \in \mathcal{E}$ 送電電力制約 (Transmission power constraint)

双対問題

$$\min_{\lambda_0} \max_{P_L, P_G, \theta} \sum_{l \in A} \left\{ \sum_{i \in L_i} v_i^l(P_{L_i}^l) - \sum_{i \in G_i} c_i^l(P_{G_i}^l) - f^l(\theta_l) \right\} + \lambda_0^T (P_G + B\theta - P_L)$$

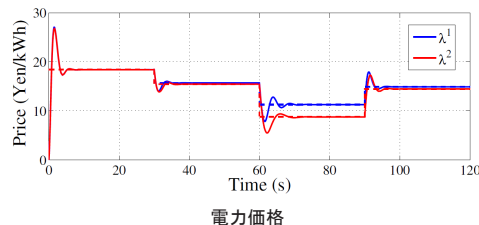
上記の問題に対して双対分解を適用し、最適解を分散的に導出 (Apply dual decomposition to the above problem and derive the optimal solution in a distributed manner)

システムに対する受動性に基づく安定性解析



市場参加者数の動的な変動を想定

各値が最適解へ収束



社会全体の利益最大化を分散的に達成

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 武藤 啓太 / 学部生 加藤 佑介

お問合せ先

E-mail : namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL : 045-566-1731
URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>

Keio University