

MSCS2019 チュートリアル1

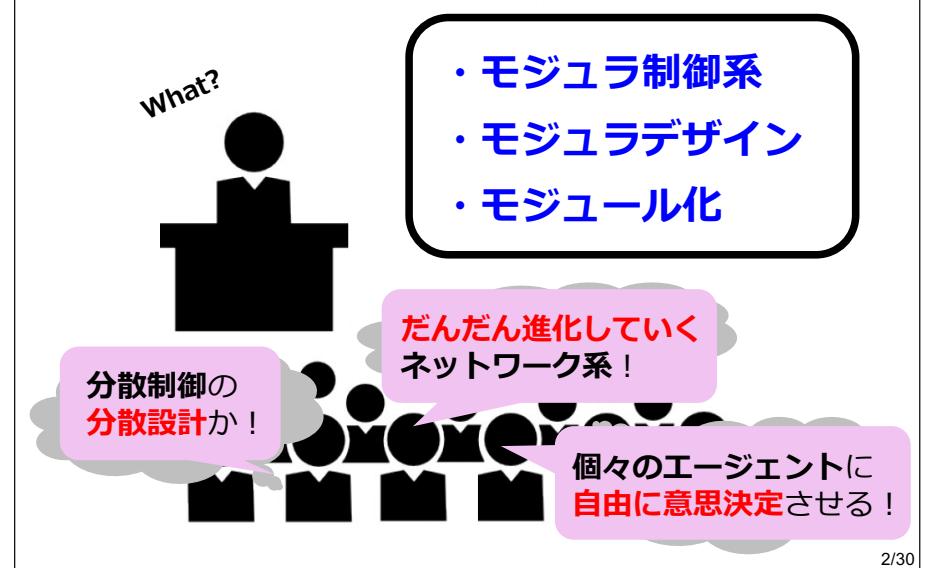
制御系設計のモジュラリティ：大規模複雑化するシステムのための制御理論へ

09:30-10:15 レトロフィット制御：大規模ネットワーク系のモジュラ設計理論構築に向けて（石崎）

10:15-11:00 受動性再訪：モデル集合のみでのシステムの記述から解析・設計まで（井上）

11:00-11:10 オープンディスカッション

制御系設計のモジュラリティとは？



2/30

目次

- 1. モジュラデザインとは？（一般論として）**
 - ・古いようで新しい概念
- 2. システム制御理論におけるモジュラデザイン**
 - ・これまで：自前主義でクローズドなシステム設計
 - ・これから：複数主体によるオープンなシステム設計
 - ・研究事例紹介：電力系のレトロフィット制御
- 3. レトロフィット制御理論（テクニカルパート）**
 - ・定式化、パラメトリゼーション
 - ・内部構造解析、制御性能解析
- 4. まとめと今後の展望**

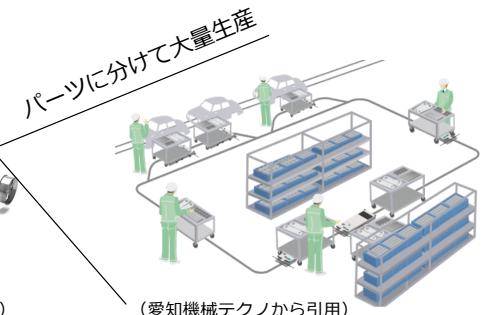
3/30

「モジュラデザイン」の大体のイメージ

自動車の生産



(ニックスター・パートショップから引用)



(愛知機械テクノから引用)



機械製品も電化製品もほとんどがすでにモジュール化されていますよ

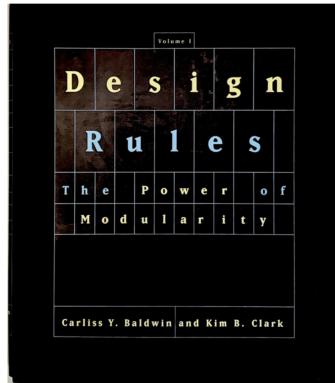
と思う人は「モジュラデザイン」を真に理解していないかもしれません

4/30

「3つのモジュラリティ」の理解が重要

モジュラーデザインのバイブル

著者はハーバードビジネススクールの重鎮



① Modularity-in-Production

② Modularity-in-Use

③ Modularity-in-Design

“最も興味深いにもかかわらず
最も理解されていない”

5/30

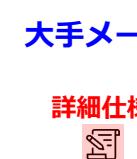
① Modularity-in-Production

自動車の生産

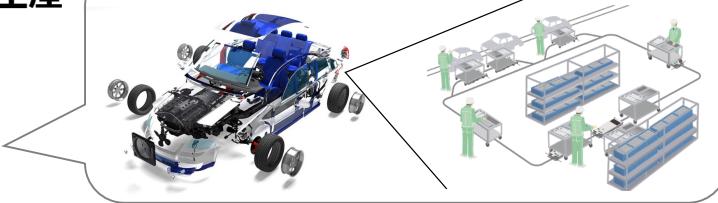
全体設計図



partsに分けて大量生産



大手メーカー



詳細仕様

ひとつの大手メーカーがpartsの組み上げ後を想定して精密に設計

a “copy exactly” rule

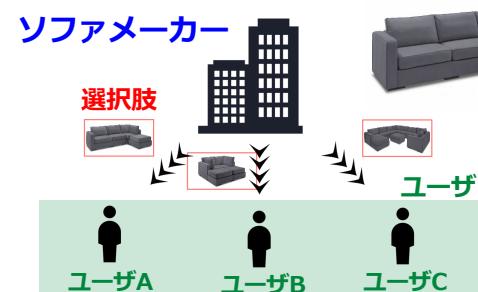


生産業務は分けられて
いるが製品設計は大手
メーカーが自前で実行

6/30

② Modularity-in-Use

parts組み換え式のソファ



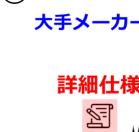
ユーザの好みに応じて
partsを組み替えて
使用可能

ユーザの利用の好みに合わせる自由度が提供されているが
すべての互換partsはメーカーが統一してデザイン

7/30

どちらもModularity-in-Designではない

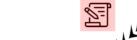
① 中央集権



大手メーカー



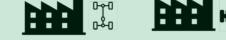
詳細仕様



A社(タイヤ)



B社(シャーシ)



C社(エンジン)

② クローズド



ソファメーカー



選択肢



ユーザA

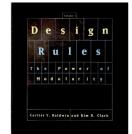


ユーザB



ユーザC

どちらも「中央集権的でクローズドな設計」に依拠



“A complex engineering system is **modular-in-design** if (and only if) the **process of designing it can be split up and distributed across separate modules**.”

8/30

③Modularity-in-Design (メインテーマ)

スマートフォン設計開発

複数の競争的メーカーが並行して
得意なアプリを自由に設計



自前主義からの脱却：複数主体による個々の性能向上が
システム全体の性能向上につながる仕組みづくり

9/30

小まとめ：Modularity-in-Design

モジュール化
の3大目的：

- ・大規模システムの複雑さを管理可能に
- ・複数主体による平行分業を可能に
- ・進化的で不確かな未来のシステム発展への適応



"A fundamental property of design is that at the start of any design process, the final outcome is uncertain.
Once the full design has been specified and is certain, then the development process for that design is over."

【参考】 横幹連合:平成28年度 製造基盤技術実態等調査

(第4次産業革命における「知」のシステム化対応の実態調査) 報告書

"Industrie 4.0 (ドイツ) : 産業全体のモジュール化を展望"

"巨大システムにおいて継続的なイノベーションをビルトインする
ためには、オープンで新技術をモジュール単位で常に入れ替える
ことができる構造を持つことが重要"

10/30

目次

1. モジュラーデザインとは？（一般論として）
 - ・古いようで新しい概念
2. システム制御理論におけるモジュラーデザイン
 - ・これまで：自前主義でクローズドなシステム設計
 - ・これから：複数主体によるオープンなシステム設計
 - ・研究事例紹介：電力系のレトロフィット制御
3. レトロフィット制御理論（テクニカルパート）
 - ・定式化、パラメトリゼーション
 - ・内部構造解析、制御性能解析
4. まとめと今後の展望

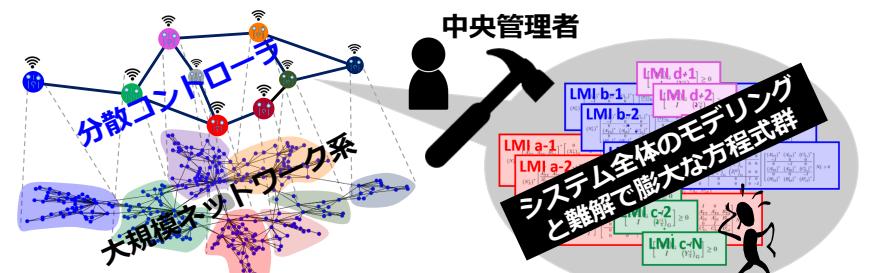
11/30

これまで：自前主義でクローズドな制御系設計

これまでの分散制御理論

インテグラルデザイン

↔ モジュラーデザイン



職人芸

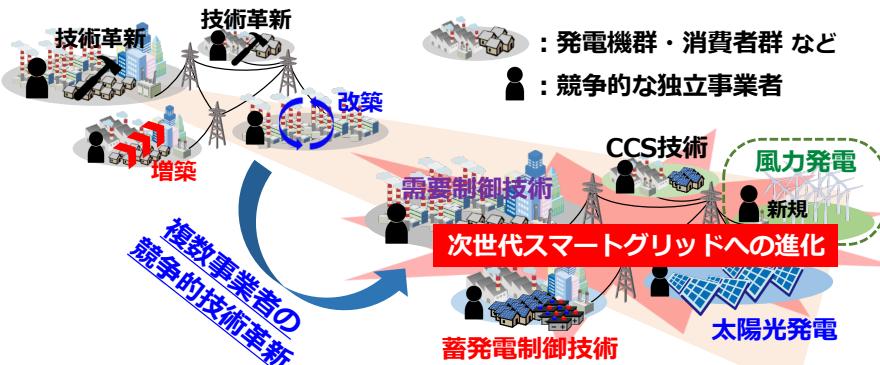
- ☺ 作り込みの精度を追求できる
- ☹ 増築や改築の自由度は高くない
- ☹ 構成要素間の精密なすり合わせ

大規模システムの設計には向き

12/30

これから：複数主体によるオープンなシステム設計

例) 次世代スマートグリッドの開発



サブシステムの増改築によるシステムの段階的アップデート

- ・新規設備の組み込みによる新たな価値の創出（再エネ活用によるCO₂削減）
- ・既存システムの所望の性質を次世代に継承（現在の系統安定度の保持）

13/30

研究事例：電力系のレトロフィット制御

制御の対象とするシステム（電力系全体）が非常に多数のサブシステム（発電機、電力消費者群など）により構成されていたとしても、個々のサブシステム（独立事業者の発電機群など）に適用されるアドオン型の制御則が、互いに悪影響を及ぼすことなくシステム全体の制御性能が向上されることを示した、新しい考え方の制御理論 ※レトロフィット：部分的増改築



Prof. Aranya Chakrabortty
Electrical and Computer Engineering
North Carolina State University



NSFプロジェクト進行中 電力応用 理論構築

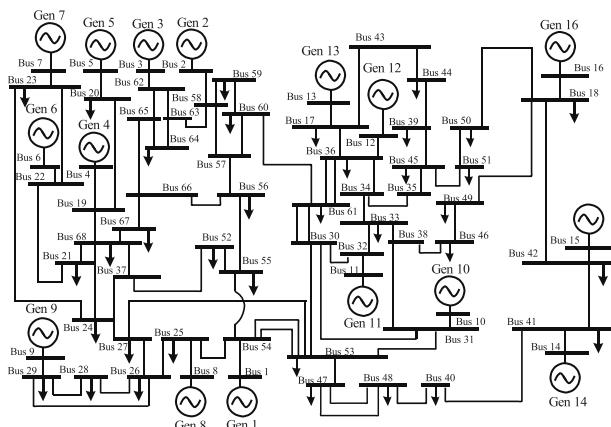
Retrofit Control: A New, Modular Gyrator Control Approach for Integrating Large-Scale Renewable Power (EPCN Grant Award \$323,873 2017/08/01-2020/07/31)



IEEE Trans. on Power Systems (2018)
JSTプレスリリース
報道: 日経新聞など 11+件

14/30

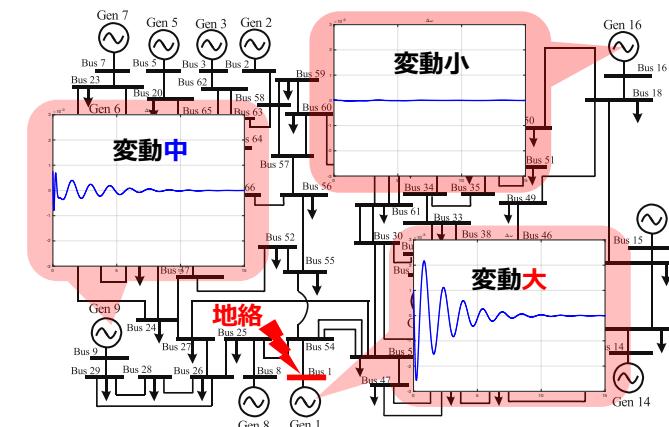
適用例：IEEE68バスモデルの周波数制御



- 16発電機 、35負荷 ↓ 、68バス — から構成
- 各発電機が7次元（動搖2次+電圧1次+AVR2次+PSS2次）の状態をもつ112次元の微分代数方程式システム

15/30

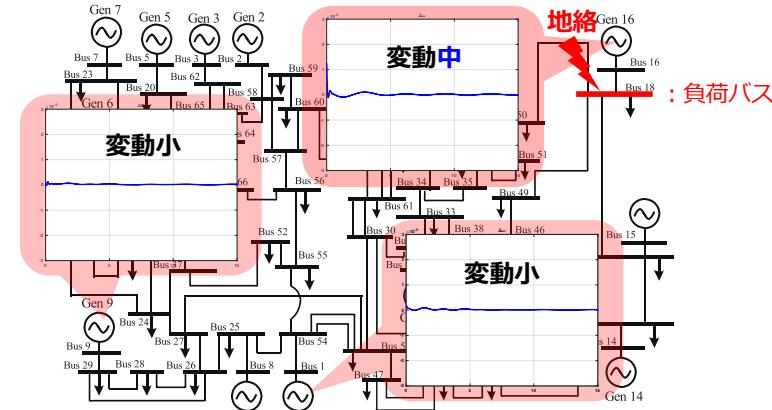
バスに生じる地絡事故による周波数変動



- 発電機バスの地絡では付近の発電機に大きな周波数変動
- 負荷・無負荷バスの地絡では比較的小さな周波数変動
- 68カ所のバスのいずれにも地絡事故が生じる可能性あり

16/30

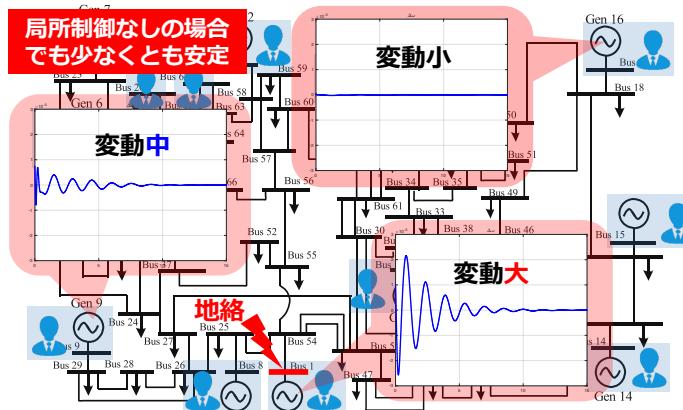
バスに生じる地絡事故による周波数変動



- 発電機バスの地絡では付近の発電機に大きな周波数変動
- 負荷・無負荷バスの地絡では比較的小な周波数変動**
- 68カ所のバスのいずれにも地絡事故が生じる可能性あり

17/30

複数主体による独立した局所制御を仮定

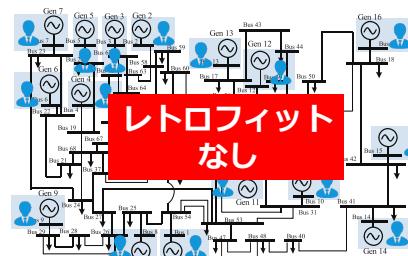


- 各エージェントは**自身が管理する発電機のモデル**とその内部状態、接続されたバスの電圧のみを知っている
- 各々はLQR、 H_∞ 、PIなど好きな設計法を適用してよい

18/30

結果：段階的に安定性が強化されていく

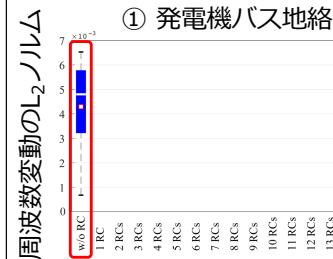
発電機1～16の順にひとつずつレトロフィットコントローラが実装



① 発電機バス16カ所のそれぞれに地絡を発生させ全発電機の周波数変動の L_2 ノルムを計算

$$\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$$

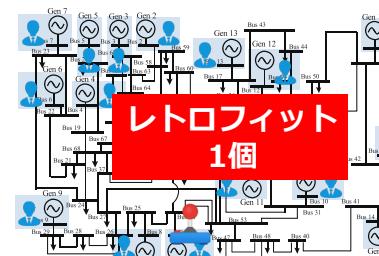
② 負荷・無負荷バス52カ所それぞれに地絡を発生させ同様に計算

$$\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$$


19/30

結果：段階的に安定性が強化されていく

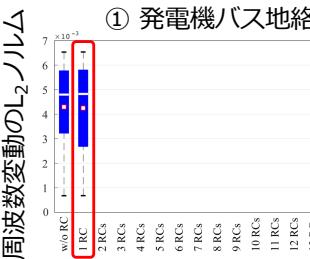
発電機1～16の順にひとつずつレトロフィットコントローラが実装



① 発電機バス16カ所のそれぞれに地絡を発生させ全発電機の周波数変動の L_2 ノルムを計算

$$\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$$

② 負荷・無負荷バス52カ所それぞれに地絡を発生させ同様に計算

$$\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$$


20/30

結果：段階的に安定性が強化されていく

発電機 1～16の順にひとつずつレトロフィットコントローラが実装

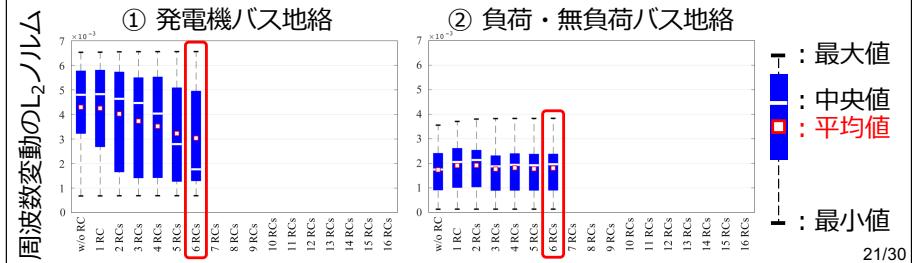


① 発電機バス16カ所のそれぞれに地絡を発生させ全発電機の周波数変動の L_2 ノルムを計算
 $\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$

$$\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$$

② 負荷・無負荷バス52カ所それぞれに地絡を発生させ同様に計算
 $\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$

$$\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$$



結果：段階的に安定性が強化されていく

発電機 1～16の順にひとつずつレトロフィットコントローラが実装

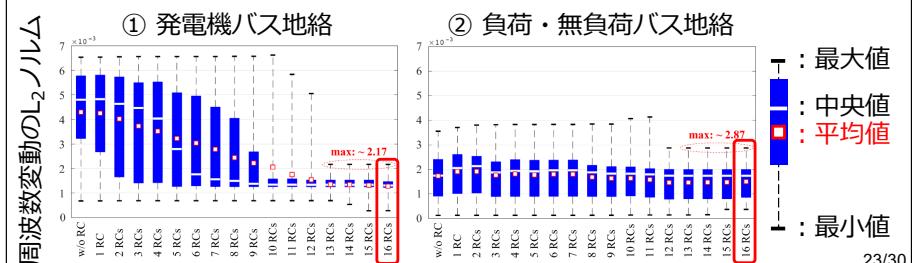


① 発電機バス16カ所のそれぞれに地絡を発生させ全発電機の周波数変動の L_2 ノルムを計算
 $\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$

$$\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$$

② 負荷・無負荷バス52カ所それぞれに地絡を発生させ同様に計算
 $\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$

$$\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$$



結果：段階的に安定性が強化されていく

発電機 1～16の順にひとつずつレトロフィットコントローラが実装

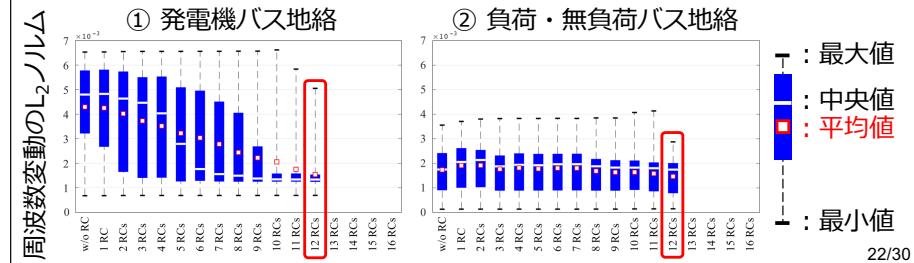


① 発電機バス16カ所のそれぞれに地絡を発生させ全発電機の周波数変動の L_2 ノルムを計算
 $\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$

$$\{\|\omega^{(1)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(16)}\|_{L_2}\}$$

② 負荷・無負荷バス52カ所それぞれに地絡を発生させ同様に計算
 $\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$

$$\{\|\omega^{(17)}\|_{L_2}, \dots, \|\omega^{(68)}\|_{L_2}\}$$



目次

1. モジュラデザインとは？（一般論として）

- 古いようで新しい概念

2. システム制御理論におけるモジュラデザイン

- これまで：自前主義でクローズドなシステム設計
- これから：複数主体によるオープンなシステム設計
- 研究事例紹介：電力系のレトロフィット制御

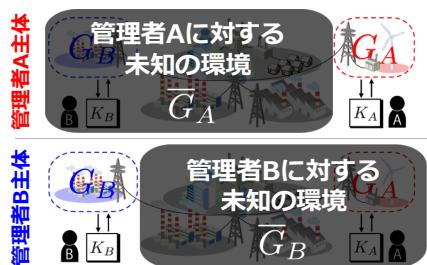
3. レトロフィット制御理論（テクニカルパート）

- 定式化、パラメトリゼーション
- 内部構造解析、制御性能解析

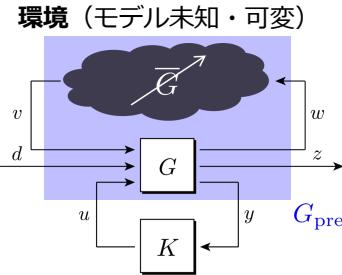
4. まとめと今後の展望

レトロフィット制御：定式化

複数主体による個別制御問題



各主体の制御問題に定式化



【定義】 コントローラ実装前の G_{pre} が安定である任意の環境 \bar{G} に対してフィードバック系の安定性を保持するコントローラ K をレトロフィットコントローラと呼ぶ。

! 通常の口バスト制御とは違い \bar{G} のノルムは制約していない

25/30

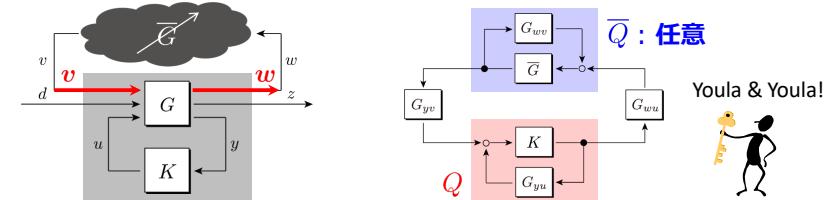
すべてのレトロフィットコントローラのパラメトリゼーション

【定理】 Youlaパラメトリゼーション [井上(慶應大)& 笹原(東工大)]

$K = Q(I + G_{yu}Q)^{-1}$, $Q \in \mathcal{RH}_\infty$ を考える.

K がレトロフィットコントローラである必要十分条件は $G_{wu}QG_{yu} = 0$ である.

拘束条件付きのYoulaパラメトリゼーション



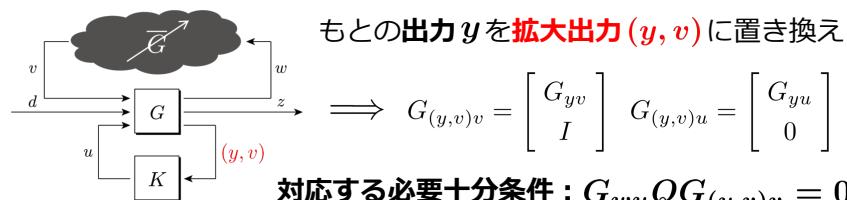
接続入出力特性不变

$$M_{wv}(K) = G_{wv} + G_{wu}K(I - G_{yu}K)^{-1}G_{yu}$$

! 既存の非干渉化制御や外乱（相互作用）抑制制御と働きが違う

簡単に設計できるレトロフィットコントローラ

【仮定】 出力 y に加えて相互作用信号 v もセンシング可能



【定義】 $K = Q(I + G_{(y,v)u}Q)^{-1}$, $Q \in \mathcal{RH}_\infty$ を考える.

$QG_{(y,v)v} = 0$ を満たすとき

K を出力整流型レトロフィットコントローラと呼ぶ.

この十分条件を満たす任意の Q は $Q = \hat{Q} \begin{bmatrix} I & -G_{yv} \\ 0 & R \end{bmatrix} =: R$

27/30

出力整流型レトロフィットコントローラの内部構造

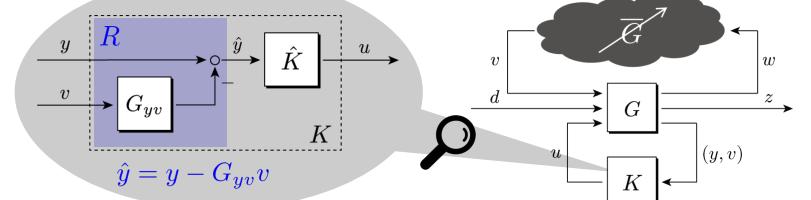
【定理】 すべての出力整流型レトロフィットコントローラは

$$K = \hat{K}R$$

の内部構造をもつ.

ここで \hat{K} は G_{yu} を安定化するコントローラである.

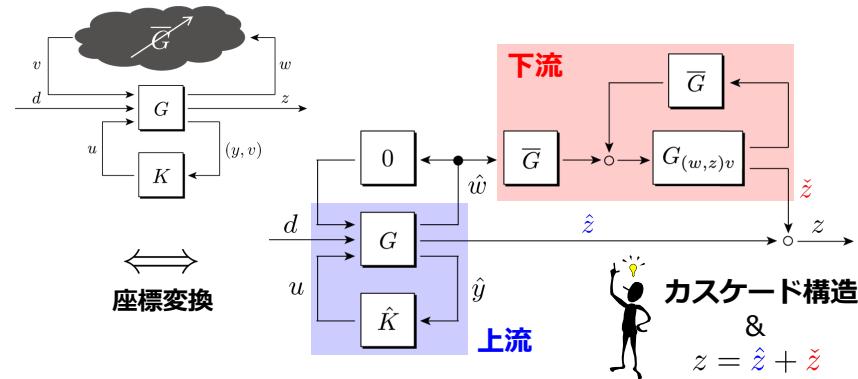
[笹原(東工大)]



出力整流器 R により v が y に与える干渉を取り除く

28/30

制御性能も上界と下界は簡単に解析可能



【定理】 $\hat{\gamma} = \|\hat{T}_{zd}(\hat{K})\|_\infty$, $\check{\gamma} = \|G_{zv}(I - \bar{G}G_{wv})^{-1}\bar{G}\hat{T}_{wd}(\hat{K})\|_\infty$

とするとき、制御性能に関して

$$|\check{\gamma} - \hat{\gamma}| \leq \|T_{zd}\|_\infty \leq \hat{\gamma} + \check{\gamma} \quad \text{が成り立つ。}$$

29/30

文献リスト

東工大 石崎



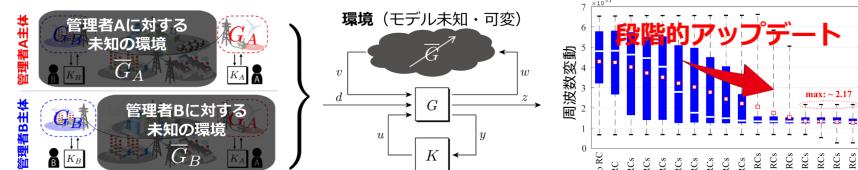
- T. Ishizaki, T. Sadamoto, J. Imura, H. Sandberg, K. H. Johansson: Retrofit Control: Localization of Controller Design and Implementation. *Automatica* (2018) **レトロフィット制御の基礎理論を発表した最初の論文**
- T. Sadamoto, A. Chakrabortty, T. Ishizaki, J. Imura: Retrofit Control of Wind-Integrated Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems* (2018) **風力発電連携系統への応用 (JSTからプレスリリース)**
- T. Ishizaki, H. Sasahara, M. Inoue, J. Imura: Modularity-in-Design of Dynamical Network Systems: Retrofit Control Approach. *arXiv* (2019) **複数のレトロフィット制御を前提に制御系のモジュラデザインを議論**
- T. Ishizaki, T. Kawaguchi, H. Sasahara, J. Imura: Retrofit Control with Approximate Environment Modeling. *arXiv* (2018) **未知環境のモデリング (データベース学習) を組み込んだ一般化を議論**
- T. Sadamoto, A. Chakrabortty, T. Ishizaki, J. Imura: Dynamic Modeling, Stability, and Control of Power Systems with Distributed Energy Resources. *IEEE Control Systems Magazine* (2019) **電力系のシミュレーション方法について詳しく解説**

本日のスライドや上記論文は私の個人Webから入手できます

まとめと今後の展望

レトロフィット制御：制御系のモジュラデザイン

- モジュール化の3大目的：**
- ・大規模システムの複雑さを管理可能に
 - ・複数主体による平行分業を可能に
 - ・進化的で不確かな未来のシステム発展への適応



今後の展望や課題

- ・電力系を例題としてより適切な「モジュール化」の指針を検討
- ・コントローラだけでなく物理的な設備の増築・改築などを含めた系統的なシステムの段階的アップデートの取り扱いを検討
- ・異質なものが「つながること」の価値をシステム理論的に検討