

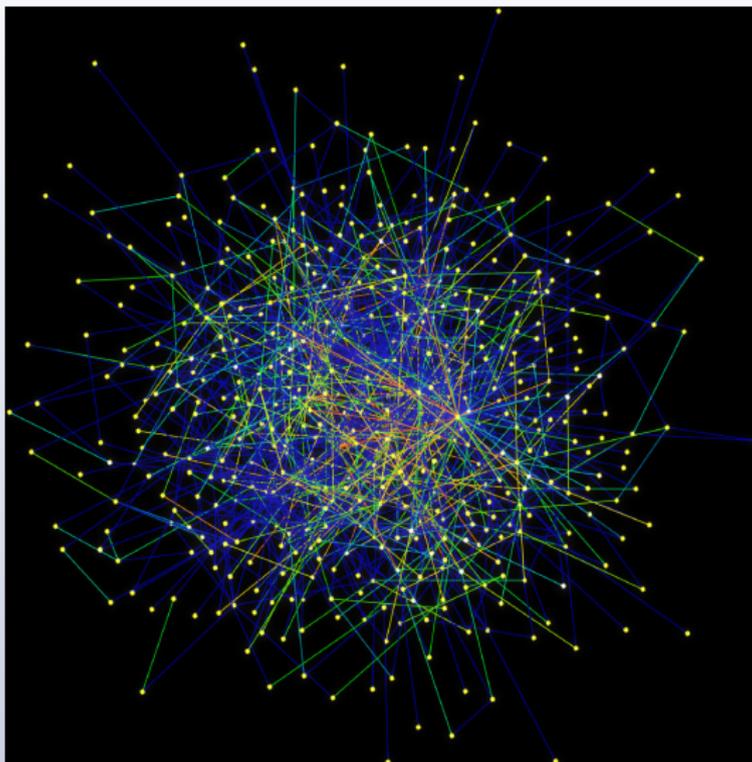
大規模ネットワークの 設計・モデル化・制御

大崎 博之

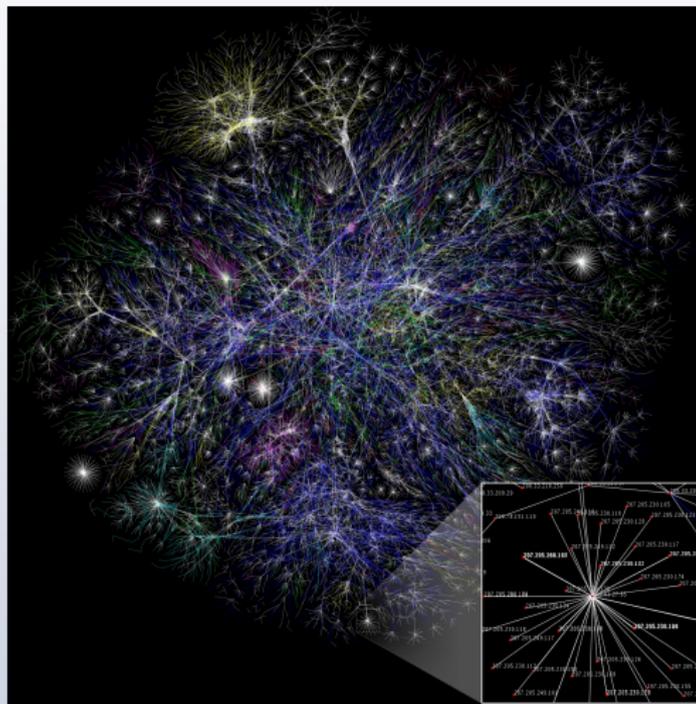
関西学院大学 理工学部 情報科学科

ohsaki@kwansei.ac.jp

大規模ネットワークの例 (1/2)



大規模ネットワークの例 (2/2)



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Internet_map_1024.jpg

講演の概要 (1/2)

大規模ネットワークの設計・モデル化・制御のための、**制御理論によるアプローチ**を紹介する

- ▶ ネットワーク研究者から見た制御理論の概要を紹介するとともに、ネットワーク研究への制御理論の応用例を紹介する
- ▶ さらに、ネットワーク研究で広く用いられている待ち行列理論と制御理論の対象領域を比較することにより、今後のネットワーク研究に求められる解析手法について議論する

講演の概要 (2/2)

- ▶ 流体近似法によるフローのモデル化
 - ▶ ネットワークの複雑さの要因
 - ▶ パケットからフローへ
- ▶ (ネットワーク研究者から見た) 制御理論の紹介
 - ▶ 制御理論の概要
 - ▶ ネットワーク研究への応用例
- ▶ ネットワーク研究のための解析手法に関する議論
 - ▶ 待ち行列理論の対象領域について
 - ▶ 制御理論の対象領域について
 - ▶ 今後求められる解析手法について

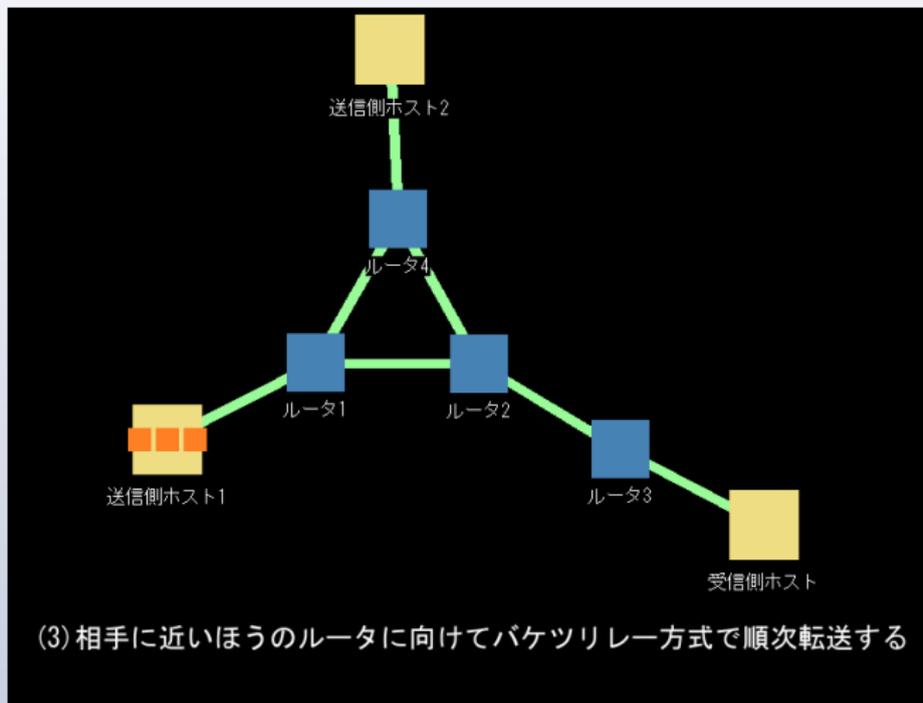
流体近似法によるフローのモデル化

ネットワークの複雑さの要因

- ▶ 数
 - ▶ ノード数 大、リンク数 大
 - ▶ 階層数 大 (マルチレイヤ化)
- ▶ 量
 - ▶ 帯域 (通信速度) 大
 - ▶ ノードの処理能力 大
- ▶ 質
 - ▶ 不均一性 大
- ▶ 時間
 - ▶ 通信遅延 大
 - ▶ ダイナミクス (例: モビリティ) 大

パケット交換方式

最近のネットワークの大半は **パケット交換方式**



ネットワークレイヤと各レイヤにおける情報の粒度

- ▶ アプリケーション層
 - ▶ サービス
- ▶ セッション層
 - ▶ セッション
- ▶ トランスポート層
 - ▶ フロー、メッセージ、コネクション
- ▶ ネットワーク層
 - ▶ パケット、データグラム
- ▶ データリンク層
 - ▶ フレーム
- ▶ 物理層
 - ▶ バイト (オクテット)、信号

パケットからフローへ

- ▶ 記号の定義
 - ▶ ノード数: N
 - ▶ 平均次数: k
 - ▶ 帯域: C
 - ▶ リンク遅延: τ
- ▶ ネットワーク全体での複雑さ
 - ▶ リンク数: $O(kN)$ ($O(N^2)$ ではない)
 - ▶ パケット数: $O(kN\tau C)$
 - ▶ ホップ数: $O(\log N)$
 - ▶ フロー数: $O(\alpha N)$
 - ▶ サービス数: $O(\beta N)$

パケットの流れ (フロー) を流体としてモデル化

モデルの複雑さを大幅に下げることができる

(ネットワーク研究者から見た) 制御理論の紹介

制御理論とは?

制御理論とは、制御工学の一分野で、数理モデルを対象とした、主に数学を用いた制御に関する理論である。いずれの理論も「モデル表現方法」「解析手法」「制御系設計手法」を与える。(Wikipedia)

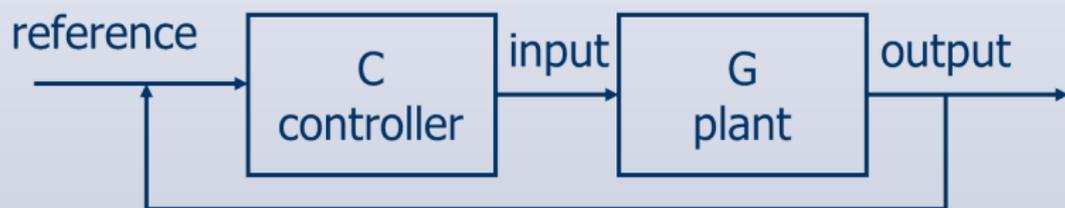
制御理論とは? (ネットワーク研究者の視点から)

制御理論とは、ネットワークのモデル化・ダイナミクス分析・フィードバック制御設計に利用できる理論である。待ち行列理論は統計的な挙動に着目するが、制御理論は **決定的な挙動に着目する** という違いがある。

制御理論の基礎

簡単な制御システムの例

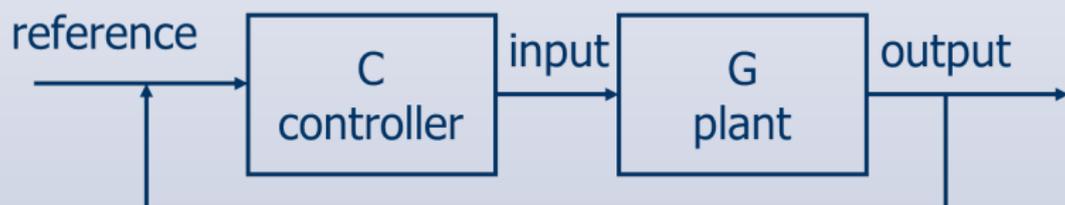
- ▶ G : 制御対象 (プラント)
- ▶ C : 制御器 (コントローラ)
- ▶ 制御対象からの出力 (output) を用いて、目標値 (reference) へと制御する



制御理論でできること (1/3)

システムのモデル化ができる

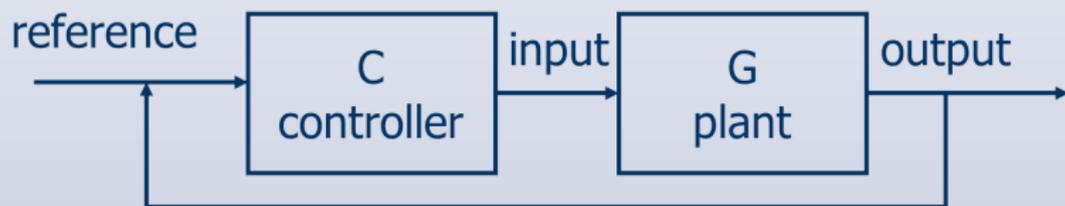
- ▶ モデル化のためのノウハウがある
 - ▶ 入出力・状態変数をどう選ぶか?
 - ▶ システムの挙動をどう記述するか?
 - ▶ どう簡単化するか? (例: 外乱の扱い)



制御理論でできること (2/3)

システムの特徴が解析できる

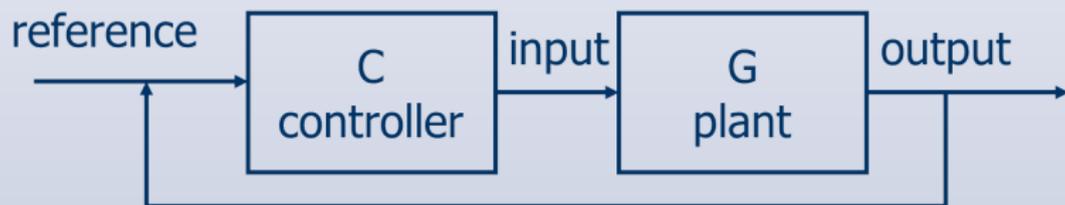
- ▶ 定常特性 (安定性・平衡状態)
- ▶ 過渡特性 (収束特性・ダイナミクス・応答性)
- ▶ ロバスト性 (外乱への耐性)



制御理論でできること (3/3)

適切なコントローラが設計できる

- ▶ コントローラの設計手法が確立されている
 - ▶ 安定性を保証できる制御
 - ▶ 過渡特性を最適化する制御
 - ▶ コスト関数を最小化する制御



制御理論でできること (ネットワーク研究者の視点から) (1/3)

(待ち行列理論ではできない) ダイナミクスモデル化ができる

- ▶ 微分 (差分) 方程式に落とすノウハウがある
- ▶ 状態変数の選び方にはコツがいる
- ▶ 離散的なイベントの記述にもコツがいる
- ▶ 興味がないものは外乱として記述してしまう

もともと物理的な系をモデル化するものなので、それ以外の系はテクニックが必要

制御理論でできること (ネットワーク研究者の視点から) (2/3)

(待ち行列理論ではできない) ダイナミクスの解析ができる

- ▶ 定常特性 (安定性)
- ▶ 平衡状態は他の手法でも簡単に求まる
- ▶ 過渡特性 (収束特性・ダイナミクス・応答性)
- ▶ ロバスト性 (外乱への耐性)

ただし、解析できるモデルのクラスは限定される (線形・時不変・集中・遅れなし等)

制御理論でできること (ネットワーク研究者の視点から) (3/3)

(待ち行列理論ではできない) 制御手法の設計ができる

- ▶ 制御目標がはっきりしていれば、理論的に最適な制御手法が設計できる (こともある)
 - ▶ 安定性を保証する制御
 - ▶ 過渡特性を最適化する制御
 - ▶ コスト関数を最小化する制御

さまざまな制御理論

- ▶ 古典制御
- ▶ 現代制御
 - ▶ 線形システム
 - ▶ システム同定
 - ▶ 最適制御
- ▶ ロバスト制御
- ▶ 非線形制御
- ▶ 知的制御

さまざまな制御理論: 時代による分類

~ 1950 年代

- ▶ 古典制御

~ 1970 年代

- ▶ 現代制御
 - ▶ システム同定・最適制御

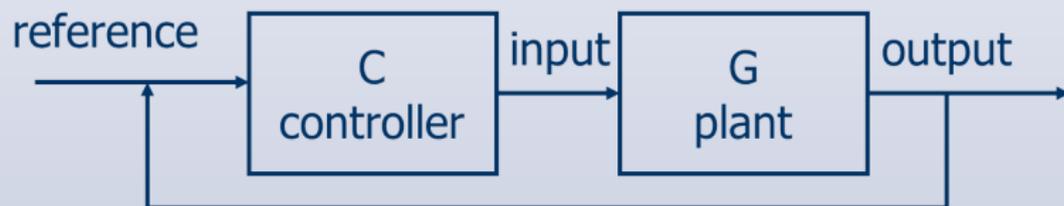
1980 年代 ~

- ▶ ロバスト制御・非線形制御・知的制御

現実に利用されているのは古典制御が中心?

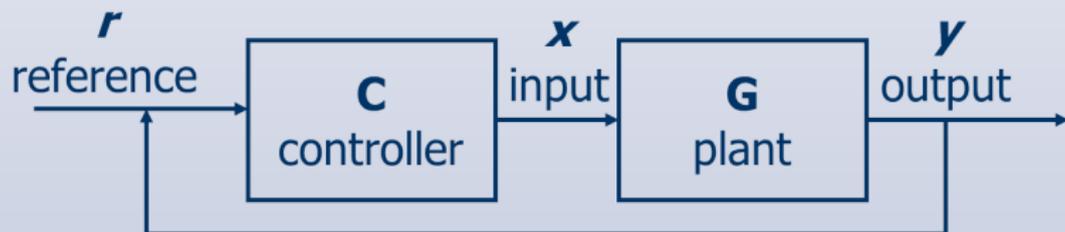
古典制御理論

- ▶ 入出力: 1 入力 1 出力
- ▶ 記述方法: 伝達関数
- ▶ 特徴: システムの時間的な変化 (ダイナミクス) を周波数領域でとらえる。ボード線図、ナイキストの安定判別法などの周波数領域での解析手法を用いる。



現代制御理論

- ▶ 入出力：多入力多出力
- ▶ 記述方法：微分方程式
- ▶ 特徴: システムの状態をベクトル、その時間的な変化(ダイナミクス)を微分方程式として記述する。非線型な系も平衡点近傍で線形化して扱う。可制御性、可観測性という概念も登場。



現代制御理論 (システム同定)

- ▶ システムの入出力を測定し、その数学的なモデルを構築 (モデルのパラメータを同定) する手法
 - ▶ システムの次数が低い (システムが複雑ではない) 場合に特に有効
 - ▶ 通常は制御対象のモデル構築に用いられる



現代制御理論 (最適制御)

(あるコスト関数を最小化するという意味で) 最適な制御系の設計手法

- ▶ コスト関数の例

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

- ▶ 入力のずれと出力のずれの重みつき和の積分
 - ▶ なかなかネットワークの問題にうまくマッチしない

その他の制御理論: ロバスト制御

外乱を (明示的に) 含んだシステムの解析・制御手法

- ▶ ロバスト制御理論の例
 - ▶ H_∞ 制御 (外乱の大きさ (ノルム) が既知の場合に、システムを安定化させるための制御手法)
 - ▶ レート制御へ応用した論文があるが、なかなかネットワークの問題にうまくマッチしない

その他の制御理論: 非線形制御

非線型システム (非線型微分方程式で記述される系) の解析・制御手法

- ▶ 非線型制御理論の例
 - ▶ 安定性解析 (システムに応じたリアプノフ方程式を探して、系が安定であることを証明する)
 - ▶ スライディングモード制御 (制御入力を切り換えることによりロバスト性を実現する)
 - ▶ ネットワークへの応用はあまり検討されていないよう (これからの領域?)

その他の制御理論: 知的制御

- ▶ ファジイ制御
 - ▶ ファジィ集合論に基づいて制御モデルや制御系を構成する方法
- ▶ ニューラルネットワーク制御
 - ▶ システムの入出力信号をもとにしてニューラルネットによって非線形な入出力関係を再現し、それを制御対象とする制御手法

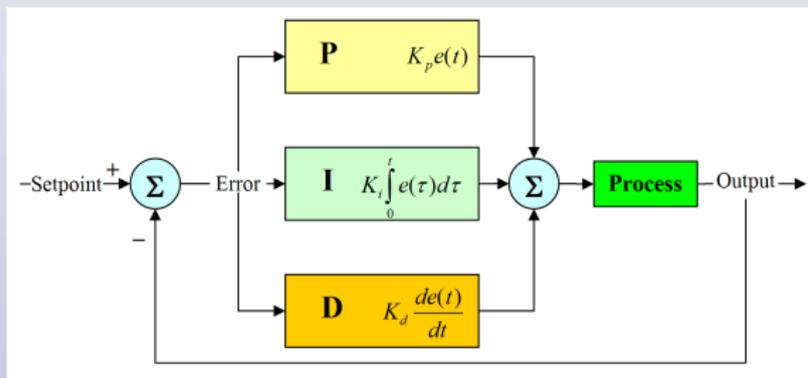
ネットワークへ応用した研究もあるが、性能 (特に安定性) を保証できないという苦しさがある

ネットワーク研究に「使える」制御理論

制御理論の考え方や結果のうち、ネットワーク研究に使えると思われるものを紹介します。

古典制御理論: PID (Proportional-Integral-Derivative) 制御

- ▶ 代表的なフィードバック制御手法の一つ
- ▶ 出力と目標値のずれ・積分・微分から入力を決定
- ▶ (対象とする系によるが) P、I、D すべての成分が必要であることが分かっている
 - ▶ P、I、D いずれかの成分だけの制御ではダメということ



古典制御理論: 周波数領域への変換

時間領域の系を、周波数領域に変換して扱うという考え方

- ▶ 信号処理ではおなじみの概念 (ラプラス変換)
- ▶ 時間領域での畳み込みが、周波数領域では乗算になる
 - ▶ 周波数領域であれば、インパルス応答・ステップ応答が簡単に計算できる

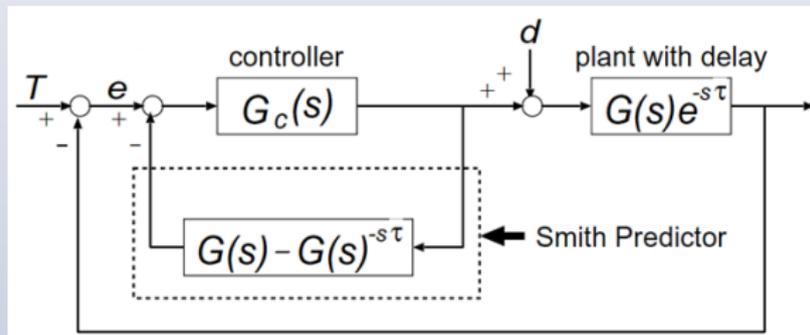
ネットワークの過渡状態解析に利用できる

古典制御理論: スミス予測器

時間遅れを含むシステムのための制御手法

- ▶ 出力を予測することにより時間遅れの影響を打ち消す
- ▶ 時間遅れのない等価なシステムに変換できる

遅延の大きいネットワークの制御に利用できる



現代制御理論: 線形化

非線形なシステムであっても、平衡点の近傍では線形システムとみなすことができる、という考え方

- ▶ 現実に存在する系のほとんどは非線形なシステム
- ▶ ただし、非線形の系のままでは、ほとんど解析できない
 - ▶ 平衡点の近傍で線形化し、線形システムの分析・制御手法を用いる

ネットワーク制御はほとんど非線形であるが、線形システムの解析方法が使える

現代制御理論: システム同定

システムの入出力を測定し、その数学的なモデルを構築 (モデルのパラメータを同定) する手法

- ▶ 次数の低い場合 (3 ~ 4 次程度?) であればうまくモデル化できる
- ▶ 白色ノイズを入力した時の出力が分かれば正確に同定できる (白色ノイズはすべての周波数成分を含んでいる)

ネットワークでも物理的な特性によって決まるシステムには使える

ここまでのまとめ

制御理論の概要

- ▶ 制御理論とは?
 - ▶ モデル化・ダイナミクス分析・フィードバック制御設計のための理論
- ▶ さまざまな制御理論
 - ▶ 古典制御・現代制御・ロバスト制御・非線形制御
- ▶ ネットワーク研究に「使える」制御理論
 - ▶ PID 制御・周波数変換・スミス予測器・線形化・システム同定

ネットワーク研究への応用例

ネットワーク解析への応用

- ▶ **トランスポートプロトコルの解析**
 - ▶ **TCP Reno** の解析 (安定性・平衡状態・過渡特性)
 - ▶ **TCP Vegas** の解析 (安定性・平衡状態)
 - ▶ **XCP** の解析 (安定性・平衡状態)
 - ▶ **DCCP (TFRC)** の解析 (安定性・平衡状態)
- ▶ **アクティブキュー管理機構の解析**
 - ▶ **RED** の解析 (安定性・平衡状態・過渡特性)
 - ▶ **DRED** の解析 (安定性・平衡状態)
- ▶ **大規模ネットワークの解析**
 - ▶ **フローレベルシミュレーション**
 - ▶ **複雑ネットワーク上のフロー特性解析**

ネットワークモデル化への応用

- ▶ ネットワーク遅延ダイナミクスのモデル化
- ▶ ネットワークサービス応答時間のモデル化

ネットワーク制御への応用

- ▶ 遅延ベースのウィンドウ制御方式設計
- ▶ ECN ベースのウィンドウ制御方式設計
- ▶ 広域ネットワークのための AQM 設計
- ▶ 広域ネットワークのための動的資源管理機構設計

ここまでのまとめ

- ▶ ネットワーク解析への応用
 - ▶ トランスポートプロトコル解析
 - ▶ アクティブキュー管理機構解析
 - ▶ 大規模ネットワーク解析
- ▶ ネットワークモデル化への応用
 - ▶ 遅延ダイナミクスのモデル化
 - ▶ 応答時間ダイナミクスのモデル化
- ▶ ネットワーク制御への応用
 - ▶ ウィンドウ制御方式設計
 - ▶ アクティブキュー管理機構設計

ネットワーク研究のための 解析手法に関する議論

待ち行列理論の対象領域は?

対象

- ▶ 小規模システム

仮定

- ▶ マルコフ過程 (間隔が指数分布)
- ▶ ランダムさ

興味

- ▶ 定常状態における分布

制御理論の対象領域は?

対象

- ▶ 小規模 ~ 中規模システム

仮定

- ▶ 線形・時不変・集中型・遅れなし

興味

- ▶ 安定性・ダイナミクス
- ▶ 制御系設計 (なかなかうまく使えない)

今後求められる解析手法は?

対象

- ▶ 大規模システム

仮定

- ▶ 非ポアソン過程 (間隔が一般分布)
- ▶ 非線形・時変・分散型・遅れあり

興味

- ▶ 定常状態・過渡状態における分布
- ▶ 安定性・ダイナミクス
- ▶ 制御系設計

まとめ

- ▶ 流体近似法によるフローのモデル化
 - ▶ モデルの複雑さを大幅に下げることができる
- ▶ (ネットワーク研究者から見た) 制御理論の紹介
 - ▶ 古典制御・現代制御・ロバスト制御・非線形制御
 - ▶ PID 制御・周波数変換・スミス予測器・線形化・システム同定
 - ▶ モデル化・ダイナミクス分析に有効
 - ▶ フィードバック制御設計も可能
- ▶ 今後求められる解析手法
 - ▶ 大規模システム、非線形・時変・分散型・遅れあり