

ネットワーク化制御

博士(情報学) 永原 正章 編著

博士(工学) 岡野 訓尚

Ph.D. 小蔵 正輝 共著

博士(情報学) 若生 将史

コロナ社

まえがき

ネットワークは現代の科学技術における最も重要なキーワードである。通信工学だけでなく、ほぼすべての分野でネットワークを基礎とした研究課題がホットトピックとなっている。思いつくままに例を挙げてみると

- 深層ニューラルネットワーク（機械学習）
- ブロックチェーン（情報工学）
- グラフ信号処理（信号処理）
- 分散最適化（最適化理論）
- センサネットワーク（計測）
- スマートグリッド（電気工学）

などがある。さらには、これらの諸分野を超えて、サイバーフィジカルシステムやIoT（Internet of Things）、インダストリー 4.0、超スマート社会といったコンセプトも近年話題になっている。これらの研究課題に対して、本書は、制御の視点から問題をとらえたいという読者を対象としている。

IoT などのようにネットワークに接続されたモノ（動的システム）を制御するためには、ネットワークを介して制御のための情報をやり取りする必要がある。このようなシステムをネットワーク化制御システムと呼ぶ。ネットワーク化制御システムでは、情報通信にインターネット回線や無線通信などが使われるが、現実の通信ではつねに通信帯域に制限があり、その制約のもとで安定化できるかどうかは非常に重要な問題となる。また、IoT や超スマート社会では、多数のモノを連携させながら分散協調的に制御し、大域的な目標や全体最適化を達成することが大きな技術的課題である。

これらの問題を解決する制御理論、すなわちネットワーク化制御の理論について、本書では、その初歩から最先端の話題までを、初学者にもわかりやすく記

述した。本書を読むために必要な前提知識は、大学教養課程の線形代数と微積分、および状態空間モデルに基づく現代制御理論の基礎である。大学学部の卒業研究や大学院での研究に取り掛かるために必要な知識を得たい学生や、ネットワーク化制御の理論を概観したい研究者、技術者に本書をおすすめしたい。本書を最後まで勉強すれば、2000年代以降のネットワーク化制御に関する学術論文を読む基礎は十分身につく。定理の証明も省略せずにはっきり追って、じっくり勉強してほしい。

本書は、ネットワーク化制御理論を専門とする4人の研究者によって執筆された。本書の章の構成と各章の執筆者は下記のとおりである。

- | | | |
|----|-------------|------------|
| 1章 | はじめに | 永原正章 |
| 2章 | 量子化信号を用いた制御 | 岡野訓尚, 若生将史 |
| 3章 | イベントトリガ制御 | 若生将史 |
| 4章 | 複雑ネットワークの制御 | 小蔵正輝 |

それぞれの章は独立に書かれており、どの章から読みはじめていただいてもかまわない。

本書を通じて、ネットワーク化制御の理論の基礎を学び、理論研究を進めるとともに、超スマート社会のような実社会における理論の実装や実現にもぜひ取り組んでいただきたい。より良い社会を実現するために制御理論が重要な役割を果たすことを筆者らは確信している。

2019年6月

著者を代表して 永原正章

目 次

1. はじめに

1.1 IoT の時代に必要な制御理論	1
1.2 ネットワーク化制御とは	3
1.3 マルチエージェントシステム	6
1.4 ネットワーク化制御の実応用	7
1.4.1 インダストリー 4.0	8
1.4.2 スマートグリッド	10
1.4.3 超スマート社会 (Society 5.0)	12

2. 量子化信号を用いた制御

2.1 通信ネットワークを含む制御システムにおける量子化	14
2.2 量子化器を含むフィードバックシステム	15
2.3 有限データレート制御	17
2.3.1 有限データレート信号を用いた安定化の考え方	18
2.3.2 漸近安定化可能性	22
2.3.3 漸近安定化に最低限必要なデータレート	23
2.3.4 漸近安定化を達成するコントローラ	24
2.4 静的量子化器を用いた制御	35
2.4.1 量子化器の粗さ	36
2.4.2 最も粗い安定化量子化器	37
2.4.3 粗さの最大値	42
2.5 DoS 攻撃のもとでの有限データレート制御	45

2.5.1	ズーミングアウト, ズーミングイン機構をもつ一様量子化器	46
2.5.2	DoS 攻撃によるパケットロスのモデル化	53
章 末 問 題		57

3. イベントトリガ制御

3.1	状態フィードバックイベントトリガ制御	59
3.1.1	イベントトリガ制御の基本的な考え方	59
3.1.2	一般的なイベントトリガ条件と安定性解析	67
3.1.3	種々のイベントトリガ条件	72
3.2	出力フィードバックイベントトリガ制御	75
3.2.1	出力のイベントトリガ則	75
3.2.2	入出力のイベントトリガ則	88
3.3	セルフトリガ制御	95
章 末 問 題		106

4. 複雑ネットワークの制御

4.1	複雑ネットワークの例	110
4.1.1	グラフ理論	112
4.2	合意制御	113
4.2.1	マルチエージェントシステムの合意	113
4.2.2	平均合意	117
4.2.3	最速合意	123
4.3	中心性の制御	129
4.3.1	さまざまな中心性	129
4.3.2	幾何計画問題	133
4.3.3	中心性の最適化	134
4.4	伝播の制御 (1): 最適資源配置	137

4.4.1 抑え込み問題	138
4.4.2 線形システムによる上界	140
4.4.3 幾何計画問題への帰着	142
4.4.4 数 値 例	146
4.5 伝播の制御 (2) : 適応ネットワーク	148
4.5.1 適応的な SIS モデル	148
4.5.2 正多項式制約	151
4.5.3 数 値 例	157
章 末 問 題	158
引用・参考文献	159
章末問題解答	165
索 引	175

本書で用いる記法

本書を通して、以下の記法を用いる。

- \mathbb{N} : 自然数の集合 $\{1, 2, 3, \dots\}$
- \mathbb{Z} : 整数の集合 $\{\dots, -1, 0, 1, 2, \dots\}$
- \mathbb{Z}_+ : 非負整数の集合 $\{0, 1, 2, \dots\}$
- \mathbb{R} : 実数の集合
- \mathbb{R}_+ : 非負実数の集合
- \mathbb{R}_{++} : 正の実数の集合
- \mathbb{C} : 複素数の集合
- \emptyset : 空集合
- j : 虚数単位
- $\log_a x$: a を底とする x の対数
- $\ln x$: x の自然対数
- $|z|$: 複素数 z の絶対値
- $\lceil x \rceil$: x 以上の最小の整数
- $\mathcal{S}^{m \times n}$: 集合 \mathcal{S} の要素で構成される $m \times n$ 行列の集合
- \mathcal{S}^n : 集合 \mathcal{S} の要素で構成される n 次元列ベクトルの集合
- $\mathcal{S}_1 \subset \mathcal{S}_2$: 集合 \mathcal{S}_1 は集合 \mathcal{S}_2 の部分集合
- $\mathcal{S}_1 \cup \mathcal{S}_2$: 集合 \mathcal{S}_1 と \mathcal{S}_2 の和集合
- $\mathcal{S}_1 \setminus \mathcal{S}_2$: 集合 \mathcal{S}_1 から \mathcal{S}_2 を引いた差集合
- $\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2$: 集合 \mathcal{S}_1 と \mathcal{S}_2 の直積
- $\text{vol}(\Omega)$: 集合 Ω のルベーグ測度
- $E[x]$: 確率変数 x の期待値
- 0 : 零ベクトル, または零行列

- $\mathbf{1}_n$: 要素がすべて 1 の n 次元列ベクトル。 $\mathbf{1}$ と略記する場合がある。
- \top : ベクトルまたは行列の転置を表す記号 (x^\top や A^\top のように使う)
- $\langle x, y \rangle := y^\top x$: 二つのベクトル $x, y \in \mathbb{R}^n$ の標準内積
- $\|x\| := \sqrt{\langle x, x \rangle}$: ベクトル $x \in \mathbb{R}^n$ のユークリッドノルム
- $\|x\|_\infty := \max_{i=1, \dots, n} |x_i|$: ベクトル $x = [x_1, \dots, x_n]^\top \in \mathbb{R}^n$ の最大値ノルム
- $B_\infty(z, r)$: 中心 z , 幅 $2r$ の超立方体
- $x \perp y$: 二つのベクトル $x, y \in \mathbb{R}^n$ は直交, すなわち $\langle x, y \rangle = 0$
- $I_n : \mathbb{R}^{n \times n}$ の単位行列 (添え字 n はサイズが明らかなきときは省略する)
- $[a_{ij}]$: 第 (i, j) 要素が a_{ij} である行列
- $\ker(A)$: 行列 A の零化空間 (カーネル)
- $\text{rank}(A)$: 行列 A の階数
- $\det(A)$: 正方行列 A の行列式
- A^{-1} : 正方行列 A の逆行列
- $A^{1/2}$: 正方行列 A の平方根
- $A^{-1/2}$: 正方行列 A の平方根の逆行列
- $\text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_n)$: 行列 A_1, A_2, \dots, A_n を対角ブロックにもつブロック対角行列
- $\text{col}(A_1, A_2, \dots, A_n)$: 等しい列数をもつ行列 A_1, A_2, \dots, A_n を縦に並べた行列
- $\|A\|$: 行列 A の最大特異値
- $\|A\|_\infty$: 行列 $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ の最大絶対値和, すなわち

$$\|A\|_\infty = \max_{i=1, \dots, m} \sum_{j=1}^n |a_{ij}|$$

ただし, a_{ij} は行列 A の第 (i, j) 要素である。

- $A \succ 0$: 正方行列 A は正定値
- $A \succeq 0$: 正方行列 A は半正定値

- $A \prec 0$: 正方行列 A は負定値
- $A \preceq 0$: 正方行列 A は半負定値
- $A \geq 0$: 行列 A は非負 (すべての要素が非負)
- $\sigma(A)$: 正方行列 A の固有値の集合
- $\lambda_{\max}(A)$: 対称行列 A の最大固有値
- $\lambda_{\min}(A)$: 対称行列 A の最小固有値
- $L^2[0, \infty)$: 区間 $[0, \infty)$ 上のルベーグ 2 乗可積分関数の集合。 L^2 と省略する場合がある。
- $\|x\|_2$: 関数 $x \in L^2[0, \infty)$ に対して, その L^2 ノルムを

$$\|x\|_2 = \sqrt{\int_0^{\infty} \|x(t)\|^2 dt}$$

で定義する。

1 | はじめに

1.1 IoTの時代に必要な制御理論

1960年代、複数のコンピュータシステムがネットワークに接続され、パケット交換による通信が始まった。インターネットの始まりである[†]。コンピュータどうしがつながることにより、スタンドアロンのコンピュータでは想像もつかなかった応用や製品、ビジネスが数多く生まれた。Google や Amazon, Facebook, Apple などの IT 企業がこれほど大きくなることを、1960年以前のインターネットがなかった時代に想像できた人はいない。

インターネットは仮想空間（サイバー空間）で閉じた世界である。コンピュータの外側で何が起きようとも、基本的には仮想空間の内部には影響しない（落雷によりサーバがダウンすることなどはあるが）。仮想空間の中から外部（物理空間）にアクセスし、また外部の情報を仮想空間に取り込むためには、物理空間とサイバー空間の間にインターフェースが必要である。仮想空間から外部に向かって働き掛けるインターフェースをアクチュエータと呼び、逆に外部の情報を仮想空間に取り込むインターフェースをセンサと呼ぶ。インターネットにつながったプリンタで遠隔からプリントアウトしたり（アクチュエータの例）、インクの残量などプリンタの状態をインターネット経由でチェックする（センサの例）ことは、古くから行われている。

[†] ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) と呼ばれる。

しかし、最近、もっと積極的に仮想空間と物理空間をつなげようという動きが盛んである。マイクロプロセッサが劇的に小型化、高性能化し、コンピュータを埋め込んだシステム（組込みシステムと呼ばれる）が容易に製作できるようになると、家電製品や工業機械、自動車などに取り付けられたセンサやアクチュエータがインターネットにつながるようになった。センサからのデータは時々刻々インターネットを通してサーバ（仮想空間）に送られる。サーバではそれらのデータを分析し、必要であればアクチュエータを通して物理空間に働き掛ける。しかも、インターネットにつながる家電製品などのモノは膨大な数にのぼる。インターネット上のウェブページのネットワークと同様に、モノ^{†1}どうしが情報をやり取りする巨大ネットワークが形成されるのである。このようなシステムを **IoT** (Internet of Things) またはサイバーフィジカルシステム (cyber-physical system) と呼ぶ。また、インターネットに接続されたモノを **IoT デバイス** と呼ぶ^{†1)†2}。

インターネットに接続された多数の IoT デバイスから時々刻々、大量に送られてくるデータはビッグデータ (big data) と呼ばれる。ビッグデータでは、データの背後にあるネットワーク構造やデータに含まれるノイズでさえも積極的に利用しようとする。従来のオーソドックスな統計分析法では対応できず、最先端の機械学習や人工知能の手法が総動員される²⁾。

ビッグデータのおもな目的は、膨大なデータの中から法則を見つけたり、現象を見える化したりすることである。そこから得られた法則をどう活用するかという点は、ビッグデータの枠組みの中ではあまり議論されてこなかった。しかし、データから得られた知見を活かして、環境に積極的に働き掛けていくアクチュエーションに関する技術も IoT では同様にきわめて重要である。物理世界から得られたセンサデータの分析結果に基づいて、アクチュエータにより物理世界に影響を及ぼすとき、そこにフィードバックループが生じる。フィードバックループを含むシステムをフィードバックシステムと呼ぶ。図 1.1 に IoT

^{†1} カタカナの「モノ」は、「インターネットに接続されたもの一般」を意味する。

^{†2} 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

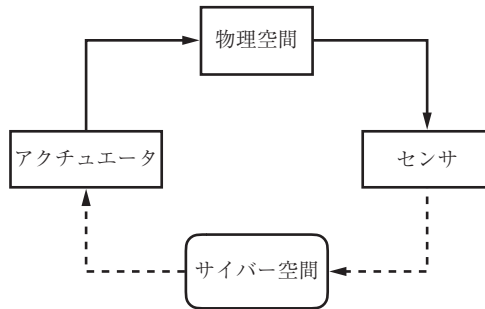


図 1.1 IoT におけるフィードバックループの概念図

におけるフィードバックループの概念図を示す。物理空間は現実のわれわれを取り巻く世界であり、自動車やロボットなどの工業製品だけでなく、人間を含む社会システムや動植物も含む生態系（エコシステム）までもが考察の対象となる。一方、サイバー空間はバーチャルな世界であり、すべてがデジタル機器の上に実装される。そこでは、得られたデータの分析、分析結果からの予測、学習、意思決定などがアルゴリズムにより実行される。図 1.1 のようなフィードバックの視点から IoT をとらえることはきわめて重要である[†]。

制御工学の最も基本的かつ本質的な問題は、フィードバックシステムが安定であるかどうかを調べることに、安定でなければフィードバックシステムを安定化することである。フィードバックシステムの安定性の判定や安定化に関しては膨大な研究成果が存在する。本書の大きな目的は、図 1.1 のようなフィードバックシステムにおける安定性を議論することである。そのためには、ネットワーク化制御という考え方が重要となる。

1.2 ネットワーク化制御とは

図 1.1 において、センサとサイバー空間の間、またアクチュエータとサイバー空間の間は点線でつながれている。これは、これらの中でデジタルデータが

[†] このような視点を日本語のひらがな「わ」で表したコンセプトが注目を集めている。詳しくは文献 3) を参照。

4 1. はじめに

やり取りされることを強調するためである。IoT のシステムでは、サイバー空間は通常、クラウドサーバに実装され、物理空間の制御対象とは離れた場所にある。

センサから得られる物理空間のデータはデジタル化され、サーバに送られる。デジタルデータを送信する手段として無線と有線があり、どちらも IoT では使用される。例えば、自動車に搭載されたセンサデータをサーバに送信する場合は無線が必須である。一方、工場に設置されている産業用ロボットアームからのセンサデータは有線回線で送られてくるかもしれない。

いずれの場合でも、通信におけるさまざまな制約により、データを遅延なく完全な形で送信することはまず不可能である。ネットワーク化制御では、データ通信ネットワークにおける特性や制約を陽に考慮して、フィードバックシステムの安定性や安定化などを議論する^{4)~6)}。具体的には、データ通信における以下のような制約を考える。

- 遅延 (communication delay)
- データレート制約 (communication data rate limitation)
- パケットロス (packet loss)

まず、どのような通信路でも物理的な制約から遅延は必ず生じる。また、IoT のシステムでは、受信データを人工知能アルゴリズムで分析し、その分析結果に基づいて制御信号を生成するといった一連の計算にもある程度の時間がかかり、それも遅延として扱われる。ネットワーク化制御の枠組みで遅延を扱う場合、二つの考え方がある。一つは、遅延の最大値があらかじめわかっているものとして、最悪ケース (最大の遅延が生じるケース) で安定性などを議論する方法である。しかし、無線通信やインターネット回線において、最大遅延の長さがあらかじめわかっているということは期待できず、また最悪ケースを考慮した場合、保守的になりすぎて通常時の性能が出ないことも考えられる。したがって、確定的に遅延時間を扱うのではなく、確率分布によって遅延をモデル化する方法もある。この場合、安定性の議論も確率的にならざるを得ないが、より現実的であるともいえる。いずれにしても、遅延はフィードバックシステムの

安定性に大きな影響を与えるため、IoTにおいても非常に重要な課題である⁷⁾。

データレート制約[†]とは、時間当りに送信できるデータ量に対する制約のことであり、ビット毎秒 (bit per second, BPS) という単位で測られる。1秒間に送受信できるデータのビット数のことである。スマートフォンでデータ通信量が上限値に達して、急に通信速度が制約されることがある。これはデータ通信量を下げするために、故意に通信業者がデータレートを低下させたためである。このようにデータレートはわれわれの普段の生活でもなじみ深い。

物理世界の物理量はアナログであり、連続値を取る。しかし、そのデータをデジタル通信路でやり取りするためには、連続値を離散化しなければならない。離散化には時間軸を離散化する標本化 (またはサンプリング) と信号値を離散化する量子化の二つの操作が必要である。標本化および量子化の精度は通信路のデータレートに収まるように決める必要がある。しかし、特に量子化を粗くしすぎると安定化ができなくなる恐れがある。ネットワーク化制御では、フィードバックシステムが安定化できる最低限のデータレートを求めたり、制御対象の性質をうまく使ってデータを圧縮してデータレート制約に対処するといった研究が行われている^{8)~11)}。本書の2章では、データレート制約のもとでのネットワーク化制御の基礎を学ぶ。また、3章では、必要なときだけ通信を行うことによりデータレート制約に対応するインベントリガ制御^{12), 13)}を紹介する。

パケットロスとは、データ通信において情報の一部が欠損することである。インターネット回線におけるルータなどのネットワーク機器にデータが極度に集中したり (これを^{ふくろ}輻輳と呼ぶ)、無線通信でノイズが大きすぎてデータが損傷したときにパケットロスが起きる。パケットロスが起きる頻度をパケットロス率と呼ぶ。高速で移動しているときに携帯電話の音声途切れたり、動画が止まったりするのは、パケットロスが原因である。パケットロスが発生する状況でのネットワーク化制御は、2.5節でその一部を扱うだけで、基本的に本書では扱わないが、興味のある読者は文献 4), 14)などを参照されたい。

[†] ビットレート制約とも呼ぶ。

索 引

【あ】	【く】	
アクチュエータ 1	組合せ最適化 135	指数的に合意 114
安定化 3	組込みシステム 2	次世代送電網 10
	クラウドコンピューティング 8	シュール安定 25
	グラフ 112	状態推定値 26
【い】		情報の透過性 9
一様量子化 17	【け】	【す】
一般化幾何計画問題 134	減衰率 139	ズーミングアウト 46
一般化正多項式 134		ズーミングイン 47
イベントトリガ条件 61	【こ】	スマートグリッド 10
イベントトリガ制御 59	合意 113	スマートコミュニティ 10
インダストリー 4.0 8	合意制御 6	スマートメータ 10
	合意問題 116	
【え】	コグニティブコンピューティング 8	【せ】
エージェント 113	コネクテッドインダストリー 8	正多項式 133
枝 (グラフの) 110	固有ベクトル中心性 131	切断率 150
エンコーダ 17		セルフトリガ制御 95
	【さ】	遷移確率行列 140
【お】	再接続率 150	漸近安定 23
オブザーバ 25, 80, 86, 91	最速合意問題 124	線形行列不等式 69
	最適レギュレータ 45, 86	センサ 1
【か】	サイバーフィジカルシステム 2	【そ】
回分式反応炉 85	座標変換行列 27	相互接続性 9
外乱 72, 96	サンプリング 5	【た】
カツ中心性 132		対数量子化 39
空手ネットワーク 110	【し】	第4次産業革命 8
感染率 138	資源配分問題 140	単項式 133
【き】	時刻同期 116	【ち】
幾何計画問題 133	次数中心性 129	遅延 4
幾何合意 114		中心性 129
技術アシスタンス 9		治療率 138
近接中心性 130		

超スマート社会	12	ピークシフト	11	【む】	
頂点 (グラフの)	110	ビッグデータ	2	無向グラフ	112
【て】		ビット毎秒	5	無向ネットワーク	112
定常カルマンフィルタ	86	ビットレート制約	5	【め】	
データレート	17	被覆制御	6	メッラー行列	132, 142
データレート制約	4, 5	標本化	5	【ら】	
適応的な SIS モデル	148	【ふ】		ラプラシアン	112
デコーダ	17	フィードバックシステム	2	【り】	
デマンドコントロール	11	フィードバックループ	2	リアプノフ関数	36
伝播	137	複雑ネットワーク	110	リアプノフ不等式	69, 90
伝播制御	6, 7	輻輳	5	リアプノフ方程式	62
テンポラルネットワーク	148	符号化	17	離散化	5
【と】		プロトコル	117	リーダフォロア合意	114
透過性 (情報の)	9	分散意思決定	9	リッカチ方程式	43, 97, 105
動的なコントローラ	80	分散最適化	6, 7	量子化	5, 14, 17
凸最適化問題	125	【へ】		—の粗さ	37
【ね】		平均合意	114	量子化器	26
熱システム	115	ページランク	129	量子化誤差	14
ネットワーク	110	辺 (グラフの)	110	量子化セル	17
ネットワーク化制御	3	【ほ】		量子化中心	27
【は】		ポアソンカウンタ	141	量子化領域	17
媒介中心性	130	歩道 (グラフの)	112	隣接行列	112
パケットロス	4, 5, 53	【ま】		【れ】	
パケットロス率	5	マイクログリッド	10	連結 (グラフの)	112
【ひ】		マルコフ過程	140		
ピークカット	11	マルチエージェント			
		システム	6, 113		

【D】		【L】		【S】	
DoS 攻撃	53	L^2 安定性	96	SDGs	12
【I】		L^2 ゲイン	97	SIR モデル	138
IoT (Internet of Things)	2	L^2 ノルム	97	SIS モデル	138
IoT デバイス	2	【R】		Society 5.0	12
		RC 回路	115	S-procedure	69

永原 正章 (ながはら まさあき)

愛媛県生まれ。2003年、京都大学大学院情報学研究科博士課程修了。博士(情報学)。京都大学助手、助教、講師を経て、2016年より北九州市立大学環境技術研究所教授。また、同年よりインド工科大学ムンバイ校(IIT Bombay)の客員教授を兼任。現在に至る。専門は自動制御と人工知能。IEEE制御部門より国際賞である Transition to Practice Award(2012年)および George S. Axelby Outstanding Paper Award(2018年)を受賞。そのほか、計測自動制御学会や電子情報通信学会の論文賞など、受賞多数。IEEEの上級会員(Senior Member)。著書に「スパースモデリング」(コロナ社)、「マルチエージェントシステムの制御」(コロナ社、共著)などがある。

岡野 訓尚 (おかの くにひさ)

2013年、東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員、カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員、東京理科大学工学部嘱託助教を経て、2016年より岡山大学大学院自然科学研究科助教。現在に至る。ネットワーク化制御系、センサネットワーク、通信を含む動的システムに興味を持ち研究を行っている。

小蔵 正輝 (おぐら まさき)

2014年、テキサス工科大学博士課程修了。Ph.D. (Mathematics)。ペンシルベニア大学博士研究員を経て、2017年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科(2018年より先端科学技術研究科)助教。現在に至る。専門分野はネットワーク科学、動的システム、およびそれらの最適化。2012年計測自動制御学会論文賞。2019年 IEEE Transactions on Network Science and Engineering の準優秀論文賞。

若生 将史 (わかいき まさし)

2014年、京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了。博士(情報学)。カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員、千葉大学大学院工学研究科特任助教を経て、2017年より神戸大学大学院システム情報学研究科講師。現在に至る。無限次元システムや通信ネットワークを介したシステムの制御理論に関する研究に従事。

ネットワーク化制御

Networked Control

© Masaaki Nagahara, Kunihisa Okano, Masaki Ogura, Masashi Wakaiki 2019

2019年8月5日 初版第1刷発行

★

検印省略

編著者 永原正章
著者 岡野訓尚
小蔵正輝
若生将史
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 · 電話 (03) 3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03227-7 C3053 Printed in Japan

(中原)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。