

□□□□□□□□□ ま え が き □□□□□□□□□

1990年代から始まった、計算や通信における情報処理技術の著しい発展により、自動車、航空機、ロボット、鉄鋼や化学プラント、交通システム、電力システムなどに対して、無人運転などの完全自律化や環境に配慮した高効率化など、飛躍的な高機能化や高性能化への期待が高まってきた。このような現代社会の要請を反映して、これまで別々に研究・開発されてきた、論理に代表される離散事象システムと力学系に代表される連続事象系を統一的にモデリング・解析・設計するための新しい理論として、ハイブリッドシステムの理論が誕生した。

ハイブリッドシステムとは、離散値信号と連続値信号が混在した動的システムのことである。あるいは、事象駆動システムと時間駆動システムが混在したシステムなどと説明されることもある。ハイブリッドシステムの理論は、そもそも計算機科学分野の研究者が、実世界の連続値信号と相互作用する離散事象システムを研究したことが契機となっている。それ以降、システム制御分野でもハイブリッドシステムのモデリングや制御への関心が高まり、現在では二つの分野が課題を共有しつつ連携して発展してきている。また、工学分野に留まらず、非線形科学、脳科学、システムバイオロジなどさまざまな学問領域との融合により、対象する研究分野を拡大しつつある。

本書の目的は、こうした背景を踏まえて、近年研究されてきたハイブリッドシステムの制御に関する基礎理論を、体系的にわかりやすく講述することにある。すでに洋書では、ハンドブックをはじめ数多くの書籍が出版されているが、和書では初めてである。そのため、本書は本分野の入門書と位置付け、全体像を容易に把握できるように章立てに配慮し、また、個々の概念が直感的に理解できるように例を数多く採用した。さらに、7章で五つの応用例を解説し、多様な制御問題の設定方法・解法を効率良く習得できるようにした。本書が本格

的な洋書に取り組む契機になることを期待したい。

本書は、古典制御や現代制御を学んだ学生あるいは研究者をおもに対象にしている。古典制御や現代制御の事前知識は、必要が生じれば、その都度専門書にて確認されたい。各章のおもな分担は下記のとおりである。

- 井村：3.1 節, 3.2.1 項, 3.2.2 項, 6 章, 7.3 節, 7.6 節, 付録 A.3 節
- 東：1 章, 2 章, 5.1 節, 5.3 節, 7.1 節, 7.2 節, 7.4 節, 7.5 節
- 増淵：3.2.3 項, 4 章, 5.2 節, 付録 A.1 節, A.2 節

最後に、本書を執筆する機会を与えてくださった「システム制御工学シリーズ」編集委員会の委員各位に厚く感謝します。特に、編集委員長である大阪大学の池田雅夫先生、そして、編集委員の一人である京都大学の杉江俊治先生には、日頃よりご指導を賜り、心より感謝します。また、ハイブリッドシステムの研究において、これまでいろいろとアドバイスをくださり、本書を執筆する契機を与えてくださった大阪大学の潮俊光先生にも感謝します。4.4 節と 5.2 節に関して、「ハイブリッドシステムの制御-V:スイッチドシステムの解析と制御」, システム/制御/情報, Vol. 52, No. 1, pp. 25-31 (2008) の著者の一人であり、その一部を加筆・修正することを許可くださった、芝浦工業大学の翟貴生先生に感謝します。さらに、原稿の校正をしていただいた京都大学大学院情報学研究科機械システム制御分野の田中洋輔君、藤本悠介君に、そして原稿の完成を辛抱強く待ってくださったコロナ社にも心から感謝します。

本書の作成にあたり、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラム (FIRST 合原最先端数理モデルプロジェクト) により日本学術振興会を通して一部助成いただいたことを記します。

2013 年 10 月

井村 順一
東 俊一
増淵 泉

1. 序 論

1.1	ハイブリッドシステムとは	1
1.2	本書のねらいと構成	7
1.3	本書で用いる記法	10

2. ハイブリッドシステムのモデル

2.1	一般的なモデル	12
2.2	具体化したモデル	17
2.2.1	ハイブリッドオートマトン	18
2.2.2	区分的アファインシステムモデル	22
2.2.3	線形相補性システムモデル	24
2.2.4	混合論理動的システムモデル	26
2.2.5	スイッチドシステムモデル	28
2.3	離散時間モデル	29
2.4	モデルの等価性	31
	演習問題	35

3. システムモデルにおける解の振る舞い

3.1	解の振る舞い	38
3.2	解の定義	46
3.2.1	フィリポフ解	46

3.2.2	拡張カラテオドリ解	53
3.2.3	エグゼキューション	59
演習問題		63

4. 安定性解析

4.1	区分的アファインシステムの安定性解析	65
4.1.1	安定性の特徴	65
4.1.2	システムの記述と安定性の定義	68
4.1.3	2次形式リアプノフ関数	71
4.1.4	区分的2次リアプノフ関数	74
4.1.5	区分的アファインリアプノフ関数	79
4.1.6	区分的多項式システムへの拡張	81
4.2	微分包含の安定性解析	83
4.3	ハイブリッドオートマトンの安定性解析	87
4.4	スイッチドシステムの安定性解析	90
4.4.1	安定性の定義	91
4.4.2	リアプノフの方法による安定性解析	92
4.4.3	行列の可換性に関するリー代数による安定性解析	95
演習問題		98

5. スイッチドシステムの制御

5.1	制御系設計問題の分類	100
5.2	線形スイッチドシステムの制御	103
5.2.1	時間駆動スイッチングによる制御	103
5.2.2	状態駆動スイッチングによる制御	107
5.3	離散値入力システムの制御	110
5.3.1	離散値入力システム	110
5.3.2	動的量子化器を用いた制御	114
演習問題		121

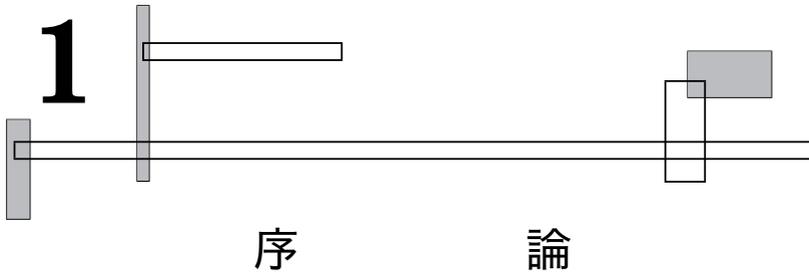
6. 混合論理動的システムの制御

6.1	混合論理動的システムモデル	122
6.1.1	論理条件の不等式表現	122
6.1.2	混合論理動的システムモデルによる表現	131
6.2	モデル予測制御	141
6.2.1	モデル予測制御と混合整数2次計画問題	142
6.2.2	オンライン解法	148
6.2.3	オフライン解法	151
	演習問題	155

7. 制御応用

7.1	応用にあたって	157
7.2	DC/ACインバータの電力スイッチ制御	160
7.2.1	DC/ACインバータ	160
7.2.2	動的量子化器を用いた制御器	161
7.2.3	シミュレーション	164
7.3	鋼材装入スケジューリングと燃焼制御の同時最適化	165
7.3.1	ホットストリップミル	165
7.3.2	混合論理動的システム表現に基づくモデル予測制御	166
7.3.3	シミュレーション	169
7.4	センサネットワークにおける分散情報処理	172
7.4.1	センサネットワーク	172
7.4.2	ネットワーク構造が変化する環境での平均合意	173
7.4.3	シミュレーション	176
7.5	遺伝子ネットワークの入力選択	177
7.5.1	遺伝子ネットワーク	177
7.5.2	入力選択と可制御性	178

7.5.3	緑膿菌感染症の抑制	180
7.6	移動ロボットの判断と運動の同時最適化	186
7.6.1	判断と運動に着目したモデリングと制御	186
7.6.2	リアルタイムモデリングとリアルタイム最適制御	186
7.6.3	シミュレーション	190
	付 録	193
A.1	微 分 包 含	193
A.2	線形行列不等式	197
A.2.1	対称行列と 2 次形式	197
A.2.2	線形行列不等式と凸最適化	198
A.2.3	線形行列不等式の双対問題	200
A.3	混合整数計画問題	201
	引用・参考文献	203
	演習問題の解答	210
	索 引	223



連続値信号と離散値信号が混在した動的システムのことをハイブリッドシステムという。本章では、まず、ハイブリッドシステムのイメージといくつかの具体例を紹介する。つぎに、これまでの研究の流れを簡単に振り返り、本書のねらいと構成について述べる。

1.1 ハイブリッドシステムとは

ハイブリッドシステム (hybrid system) †とは、連続値信号 (continuous-valued signal) と離散値信号 (discrete-valued signal) が混在した動的システムのことである。例えば、図 1.1 に示すように、オートマトン‡の各ノードに微分方程式 (あるいは差分方程式) が割り当てられたものをイメージすればよい。五つのノードは、モードと呼ばれるシステムの離散状態 (離散値の状態) を表し、オートマトンによってその遷移 (ダイナミクス) が表現されている。また、 x はシステムの連続状態 (連続値の状態) を表し、おのおののノードに割り当てられた微分方程式でそのダイナミクスが記述されている。離散状態は、自動車のマニュアル変速機のように外的な要因で切り替わったり、もしくは、連続値をとる物理量が閾値を超えるなど、内的な要因によって切り替

† ハイブリッドダイナミカルシステム (hybrid dynamical system) とも呼ばれる。

‡ 有限個の状態値を有し、ある規則に従って状態が遷移するシステムのこと。有限オートマトンとも呼ばれ、ラベル付きグラフなどで表現される。

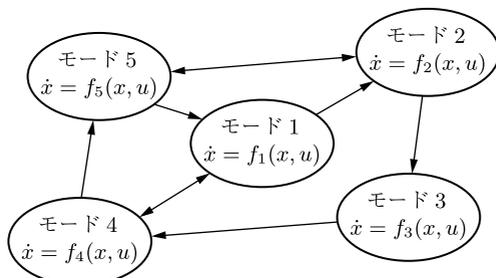


図 1.1 ハイブリッドシステムのイメージ

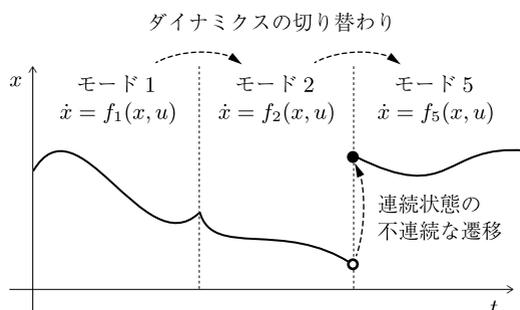


図 1.2 ハイブリッドシステムの振る舞い

わったりする。これに伴って、図 1.2 のように、連続状態の振る舞いを支配するダイナミクスが切り替わり、さらには、その値が不連続に変化することもある。

ハイブリッドシステムにおいて、連続値信号は位置や速度などの物理系の状態量に対応する。一方、離散値信号は、衝突や摩擦などの不連続な物理現象の発生状態、スイッチの ON/OFF、コンピュータプログラムの変数、高/中/低のように量子化された信号などを表す。そのほかにも、表 1.1、表 1.2 に示されるような例が挙げられる。連続値信号と離散値信号に関するダイナミクスは、それぞれ連続ダイナミクス (continuous dynamics) と離散ダイナミクス (discrete dynamics) と呼ばれる。連続ダイナミクスは、運動方程式や回路方程式で表される動特性に相当し、離散ダイナミクスは、不連続な物理現象、オートマトン、

表 1.1 連続値信号の例

システム	信号
機械系	位置, 速度, 力
電気系	電流, 電圧, 電力, 電磁力
化学系	温度, 圧力, 濃度, 物質質量, 液量, 流量
生体系・生物系	濃度, 流量, 膜電位

表 1.2 離散値信号の例

システム・制約	信号
不連続物理	発生状態 (接触状態, 静摩擦/動摩擦の状態など)
スイッチ	スイッチの状態 (ON/OFF, 高/中/低など)
プログラム	プログラム変数, 論理変数
離散計画	スケジューリングパラメータ
量子化	量子化された信号, パルス信号
整数制約	個数

コンピュータプログラムなどに対応する。ハイブリッドシステムでは、このような2種類のダイナミクスが混在していたり、もしくは、連続ダイナミクスに離散値信号が混在、あるいは、離散ダイナミクスに連続値信号が混在していたりする。

ハイブリッドシステムは、われわれの身近に多数存在している。例えば、自動車、航空機、ロボットなどの機械系、電力系統やスイッチング電源などの電気系、鉄鋼や化学プラントなどのプロセス系、計算機ネットワークなどの情報系といった今日の工学システムの多くが、ハイブリッドシステムと見なせる。また、閾値作用など不連続な非線形性が重要な役割を果たしている生体系や生物系、さらには人間の認識や判断に左右される経済系や社会系などもその例である。つまり、ハイブリッドシステムは工学、自然科学、社会科学など幅広い分野で見られ、「システム」を対象とするあらゆる分野に共通する概念である。

さて、ハイブリッドシステムの例を見てみよう。

例 1.1 (自動車) 図 1.3 の自動車を考える。このシステムには

- 連続値信号：位置，速度，アクセル開度，ブレーキ量
 - 離散値信号：変速機の値 (1 速, 2 速, …, 5 速, 後進, ニュートラル)
- が混在しており，この意味において自動車はハイブリッドシステムである。

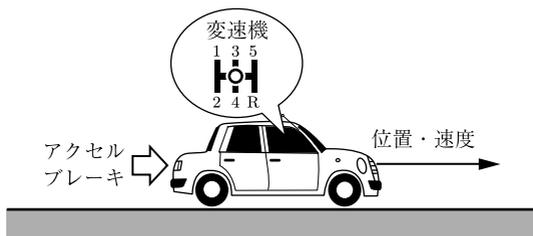


図 1.3 自動車

このシステムの連続ダイナミクスは変速機によって切り替わる。この様子を図 1.1 の形式で表したのが図 1.4 である。この図において，変速機がマニュアルの場合は，運転手からの外生的な指令によって変速機の値は切り替わる。一方，オートマチックの場合は，システムの内部状態に依存して自律的に切り替わる。

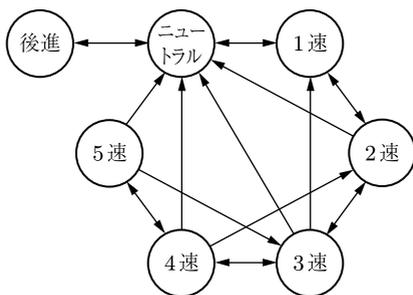


図 1.4 自動車における離散値信号の遷移

例 1.2 (歩行ロボット) 図 1.5 の歩行ロボットを考えよう。歩行ロボットは、モータが備えられた機械系であるが、有限個の脚の接地状態を切り替えながら移動を実現するために、その連続ダイナミクスは、片脚だけ接地しているときと、両脚ともに接地しているときとで異なる。つまり、歩行ロボットもハイブリッドシステムであり

- 連続値信号：重心の位置・速度，姿勢（関節の角度），関節の角速度
- 離散値信号：脚の接地状態（右脚接地，両脚接地，左脚接地）

となる。また、このシステムにおける離散値信号の遷移は図 1.6 のようになる。

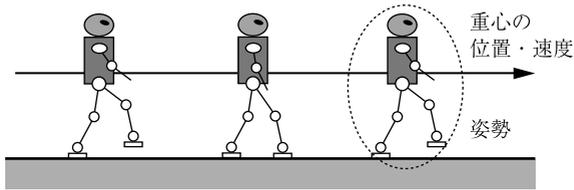


図 1.5 歩行ロボット



図 1.6 歩行ロボットにおける
離散値信号の遷移

例 1.3 (整流回路) 図 1.7 (a) に示すダイオードを用いた整流回路もハイブリッドシステムである。実際、ダイオードは図 1.7 (b) のように電流を一方向にのみ流す性質があり、これによってシステムの連続ダイナミクスが切り替わる。すなわち、整流回路は

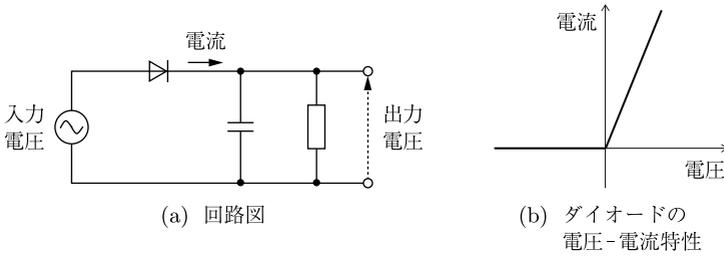


図 1.7 整流回路

- 連続値信号：入力電圧，出力電圧，電流
- 離散値信号：ダイオードの動作モード（順電圧，逆電圧）

が混在したハイブリッドシステムであり，その離散値信号の遷移は図 1.8 のように表せる。



図 1.8 整流回路における離散値信号の遷移

例 1.4（鉄鋼プロセス） 図 1.9 に示すホットストリップミルと呼ばれる鉄鋼プロセスでは，鋼材（スラブ）を加熱炉に装入して加熱し，その後，圧延機列に入れて製品厚に圧延する。鋼材ごとに加熱炉装入時温度，目標温度が異なり，また，鋼材幅などによって装入順には，例えば図 1.10 に示す

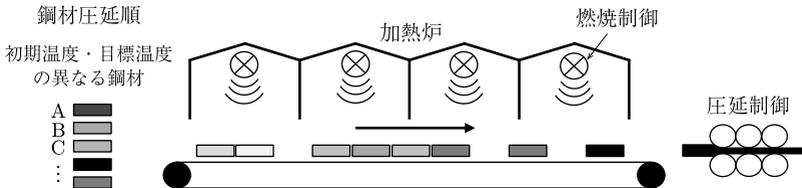


図 1.9 ホットストリップミル

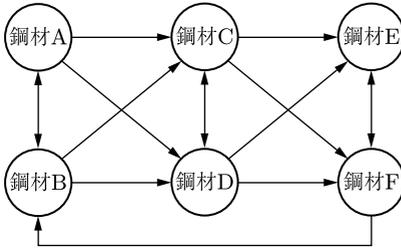


図 1.10 ホットストリップミルにおける鋼材装入順（離散値信号）に課される制約の例

ような制約条件がある。そのため、効率良く燃焼制御を行うためには、装入スケジューリングと燃焼制御や圧延制御を同時に最適化することが求められる。すなわち、この鉄鋼プロセスは

- 連続値信号：鋼材温度，加熱炉内温度，ローラ圧力，板厚
- 離散値信号：鋼材の装入順

が混在したハイブリッドシステムである。

1.2 本書のねらいと構成

ハイブリッドシステムに対する研究の流れを簡単に振り返り、本書のねらいと構成について述べる。

ハイブリッドシステムの問題が生まれたのは最近のことではない。学界では、1960年代にウィットセンハウゼンによって、ハイブリッドシステムの問題が提案されている^{1)†}。しかし、それ以降、散発的に研究が行われてはきたものの、ハイブリッドシステムを統一的に扱って体系化するような動きは見られなかった。一方で、実システムを対象とする産業界では、ハイブリッドシステムという概念を意識することなく、古くからハイブリッドシステムを扱い実問題の解決を図ってきた。例えば、精密位置決め制御では、機械駆動部に生じる不連続な摩擦現象や、デジタル化によって発生する量子化誤差への対処が不可欠となるが、

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

【あ】

安定 69
安定性 65

【い】

一様安定 91
一様大域的指数安定 92
一様大域的漸近安定 91
一様量子化器 113
遺伝子ネットワーク 177
イベントトリガード制御 103
イベントベースト制御 102
インデックス変数 124
インバリエント 19

【う】

上半連続 193

【え】

エグゼキューション 59, 60

【お】

オフライン解法 151
オンライン解法 148

【か】

ガード 19
拡大制御対象 100
拡張カラテオドリ解 55
確率的ハイブリッドシステム 17
可制御状態集合 179
可制御性 178
カルーシュ・キューン・タッカー条件 151

含意 123

【き】

キャンベル・ペーカー・ハウスドルフの公式 105
強可解 147
強双対性 201
強連結 174
局所リプシッツ連続 84
極大 62
切替え超面 47
切替え面 47
近傍 174

【く】

区分的アフラインシステム 8, 17, 22, 29, 65
区分的線形システム 23
区分的多項式システム 81
グラフラプリアン 175
繰り返し可解 147

【こ】

混合整数計画問題 202
混合整数線形計画問題 202
混合整数不等式 26
混合整数 2 次計画問題 144
混合論理的システム 8, 17, 26, 29, 122, 131
混合 0-1 整数 2 次計画問題 201

【さ】

サイバーフィジカルシステム 158

【し】

時間オートマトン 8
時間駆動スイッチング 103
事象 13
事象生起ルール 16
指数安定 69
弱安定 70
弱漸近安定 70
ジャンプ 13
シュール行列 104
シュールの補題 198
状態 13
状態駆動スイッチング 103
自律ジャンプ 16
自律スイッチ 16

【す】

スイッチ 13
スイッチ信号 28
スイッチドシステム 8, 17, 28, 29, 90
スイッチング回路 160
スーパーバイザ制御 102
スライディング動作 40, 63
スライディングモード 48
スライディングモード制御 102

【せ】

制御ジャンプ 17
制御スイッチ 16
正不変集合 70
切除平面法 202
ゼノン解 40, 63

- | | | | | | |
|--------------|-------------------|--------------|-------------|-------------|----------|
| 遷移ルール | 16 | ハイブリッドシステム | 1 | | |
| 漸近安定 | 69 | ハイブリッド状態 | 13 | | |
| 線形行列不等式 | 72, 197 | ハイブリッドペトリネット | 17 | | |
| 線形相補性システム | 8, 17, 24, 29 | 半正定値計画 | 199 | | |
| センサネットワーク | 172 | | | 【め】 | |
| センサノード | 172 | | | 命題 | 122 |
| | | | | 命題変数 | 123 |
| | | | | 命題論理 | 122 |
| 【そ】 | | 【ひ】 | | 【も】 | |
| 相補性条件 | 24 | 左ゼノン解 | 40 | モード | 13 |
| 相補性変数 | 24 | 否定 | 123 | モデル予測制御 | 143 |
| | | 微分包含 | 49, 83, 193 | | |
| 【た】 | | 【ふ】 | | 【ゆ】 | |
| 大域的指数安定 | 69 | 不安定 | 69 | 有限時間最適制御問題 | 142 |
| 大域的漸近安定 | 69 | フィリポフ解 | 49 | 有向グラフ | 174 |
| ダイクストラ法 | 190 | 複数解 | 39, 62 | | |
| 代用法 | 125, 126 | 複数事象 | 39, 63 | 【よ】 | |
| 滞留時間 | 93 | フルビッツ行列 | 67 | 予測ステップ数 | 144 |
| 単純凸法 | 49 | 分枝限定法 | 202 | | |
| | | 分枝切除法 | 202 | 【ら】 | |
| | | | | ライブロック | 40, 63 |
| 【て】 | | 【へ】 | | ラグランジュ双対問題 | 201 |
| ディニ微分 | 83 | 平均合意 | 173 | | |
| デッドロック | 39, 62 | 平均システム | 105 | 【り】 | |
| | | 平衡 | 174 | リアクティブシステム | 8 |
| 【と】 | | 平衡点 | 68 | リアプノフ関数 | 71 |
| 等価 | 123 | | | リアルタイム最適制御 | 186, 187 |
| 等価制御入力 | 51 | 【ほ】 | | リアルタイムモデリング | 186, 187 |
| 等価制御法 | 51 | 方程式法 | 130 | | |
| 動的量子化器 | 114 | 補助変数 | 26 | リー代数 | 96 |
| 凸多面集合 | 68 | ホットストリップミル | 165 | 離散時間モデル | 29 |
| 凸多面体 | 68 | | | 離散事象システム | 8 |
| | | 【ま】 | | 離散状態 | 13 |
| 【な】 | | 前向き動的計画法 | 190 | 離散遷移 | 13 |
| 滑らかな接続集合 | 56 | マルチパラメトリック混合 | | 離散ダイナミクス | 2 |
| 滑らかに接続可能 | 56 | 整数線形計画問題 | 153 | 離散値出力システム | 102, 138 |
| | | マルチパラメトリック混合 | | | |
| 【ね】 | | 整数2次計画問題 | 151 | 離散値信号 | 1 |
| ネットワーク化制御 | 103 | マルチパラメトリック2次 | | 離散値入出力システム | 102 |
| | | 計画問題 | 151 | 離散値入力システム | 110, 140 |
| 【は】 | | | | | |
| 排他的論理和 | 123 | 【み】 | | 離散値入力集合 | 111 |
| ハイブリッドオートマトン | 8, 17, 18, 59, 87 | 右ゼノン解 | 40 | リプシッツ連続 | 39 |
| | | | | 領域分割 | 47 |

量子化器	114	連続ダイナミクス	2	論理和	123
量子化入力システム	110	連続値信号	1		
【れ】		【る】			
レベル集合	73	論理積	123		
連続状態	13	論理変数	123		

【D】		MIP 問題	202	PWL システム	23
DC/AC インバータ	160	MIQP 問題	144, 202	【W】	
【L】		MLD システム	18, 141	well-posed	49, 55
LC システム	18	M-MIQP 問題	151	well-posed なスイッチ列	90
LMI 最適化問題	199	M-QP 問題	151	~~~~~	
【M】		【N】			
max-plus 代数システム	17	NP 困難	148, 202	【数字】	
MILP 問題	202	【P】			
		PWA システム	18	0-1 線形不等式	124
				2 乗和計画	81
				2 乗和多項式	82

— 著者略歴 —

- | | |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 井村 順一 (いむら じゅんいち) | 東 俊一 (あずま しゅんいち) |
| 1988年 京都大学工学部精密工学科
卒業 | 1999年 広島大学工学部第2類電気電子
工学課程卒業 |
| 1990年 京都大学大学院工学研究科
修士課程修了(応用システ
ム科学専攻) | 2001年 東京工業大学大学院理工学研究
科修士課程修了(制御工学専攻) |
| 1992年 京都大学助手 | 2004年 東京工業大学大学院情報理工学
研究科博士後期課程修了(情報環
境学専攻), 博士(工学) |
| 1995年 博士(工学) 京都大学 | 2004年 日本学術振興会特別研究員 |
| 1996年 広島大学助教授 | 2005年 京都大学助手 |
| 2001年 東京工業大学助教授 | 2007年 京都大学助教 |
| 2004年 東京工業大学教授
現在に至る | 2011年 京都大学准教授
現在に至る |

- 増淵 泉** (ますぶち いずみ)
- 1991年 大阪大学基礎工学部制御工
学科卒業
- 1996年 日本学術振興会特別研究員
- 1996年 大阪大学大学院基礎工学研
究科博士後期課程修了(物
理系専攻), 博士(工学)
- 1996年 北陸先端科学技術大学院大
学助手
- 1998年 神戸大学助手
- 2001年 広島大学助教授
- 2007年 広島大学准教授
- 2011年 神戸大学准教授
現在に至る

ハイブリッドシステムの制御

Control of Hybrid Systems

© Jun-ichi Imura, Shun-ichi Azuma, Izumi Masubuchi 2014

2014年1月6日 初版第1刷発行



検印省略

著者 井村 順一
東 俊一
増淵 泉
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

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 978-4-339-03320-5 (新宅) (製本: 愛千製本所) G

Printed in Japan



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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします