

## まえがき

本書は、倒立振子を共通の題材として書かれた制御工学の教科書である。

倒立振子は「手のひらの上の棒を倒さないようにする遊び」を自動制御により実現する実験装置であり、大学や高専の学生実験でよく使われている。その理由は、倒立振子によって制御工学の重要な基礎概念がすべて学べるからである。たとえば本書では、伝達関数を使った古典制御 (PID 制御) から状態空間表現に基づく現代制御、そして大学院レベルの非線形制御までいろいろな技術を使って倒立振子を制御することを学ぶ。世の中に制御工学の教科書は数多く存在するが、このように多岐にわたる内容を倒立振子という共通の制御対象を想定して扱った教科書は、筆者の知るところ存在しない。その意味で本書はたいへんユニークな制御工学の教科書であるといえる。

倒立振子の制御技術は、ロケットやロボットなどに応用されており、倒立振子の実験で学んだアイデアを実践に活かすことも可能である。また、制御の研究者が見つけた新しい理論を試すための実験装置としても倒立振子はよく使用される。要するに、倒立振子は初学者からベテランまで各レベルの実験に使用される標準的なツールなのである。本書を通読することにより、制御理論の基礎知識が得られるとともに、実際に倒立振子を動かすノウハウを学ぶこともできる。

本書のもっとも効果的な学び方は、実際に倒立振子の実験装置を使いながら本書に掲載されている実験例を試してみることである。しかし、倒立振子がなくても心配は不要である。本書に掲載されている例を計算機シミュレーションとして実行するための MATLAB/Simulink 用プログラムがサポートページ

- <https://www.morikita.co.jp/books/book/3110>
- [https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book\\_ip/book\\_ip\\_page.html](https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book_ip/book_ip_page.html)

にすべて公開されている。これらのシミュレーションプログラムを動作させながら本書を学ぶことにより、制御工学の深い理解が可能になる。

より安全に、より精密に、そしてより効率的にモノを動かしたい。そのような動機から生まれた制御理論は、いまや膨大な学問体系となった。最近話題の自動運転車やロボット、無人航空機 (ドローン) など、うまく動かすためには制御理論が欠かせない。制御

## 注意書き

### 配布する MATLAB/Simulink ファイルと環境設定

本書で使用した MATLAB/Simulink 等のファイル群 (“mfiles.zip”)

```
mfiles
├── p1c2 ..... 基礎編の第 2 章で使⽤したファイル群
│   └── ⋮
├── p1c8 ..... 基礎編の第 8 章で使⽤したファイル群
├── p2c1 ..... 発展編の第 1 章で使⽤したファイル群
├── p2c2 ..... 発展編の第 2 章で使⽤したファイル群
├── p2c3 ..... 発展編の第 3 章 (3.2 節) で使⽤したファイル群
└── AutoGenU_InvPend ..... 発展編の第 3 章 (3.3 節) で使⽤したファイル群
```

は、サポートページ

- [https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book\\_ip/book\\_ip\\_page.html](https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book_ip/book_ip_page.html)

で公開する (Windows 版の R2013a から R2016a までのバージョンで動作確認済み).

配布するファイルを利用するには、まず、サポートページから “ip\_toolbox\_1.0.2.zip” をダウンロードして解凍する. このとき、以下のフォルダが生成される.

```
ip_toolbox_1.0.2
├── iptools ..... 台車型/アーム型倒立振子の物理定数の値を定義する M ファイルやシミュレーションを行うための Simulink モデルを含むファイル群
├── odqlab_2.1.3 ..... ODQ Toolbox/Lab (発展編の 2.3 節で必要)
├── cdip_sample ..... 台車型倒立振子に対するサンプルファイル群
└── adip_sample ..... アーム型倒立振子に対するサンプルファイル群
```

たとえば、C ドライブのフォルダ “hoge” 内にフォルダ “ip\_toolbox\_1.0.2” が生成されているのであれば、“iptools” および “odqlab\_2.1.3” にパスを通すために、

```
>> addpath('C:\hoge\ip_toolbox_1.0.2\iptools')  ←
>> addpath('C:\hoge\ip_toolbox_1.0.2\odqlab_2.1.3')  ←
```

のように入力する. iptools に含まれるファイル群やその使用方法については、基礎編の 3.4 節 (p. 56) を参照されたい. また、ODQ Toolbox/Lab は動的量子化器を設計するために必要なツールボックスであり、発展編の 2.3 節 (p. 173) で利用する. 詳細は

- <https://github.com/rmorita-jp/odqlab>

を参照されたい.

つぎに、発展編の第 1 章 (p. 135) や 2.3 節 (p. 173) では最適化のためのソルバやパーサが必要なので、SeDuMi および YALMIP をインストールする. インストール方法の詳細は

- <https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/iscie/install.html>

を参照されたい.

りデジタル実装することが多い。デジタル実装では、コントローラが連続時間系で設計されている場合、双一次変換などによりそれを離散化する。また、信号処理においては、ローパスフィルタを用いたノイズ除去や高周波信号の平滑化 (チャタリング除去) を行う。

実装されたコントローラの妥当性は、実機実験により確認する。実験結果がシミュレーション結果と大きく異なるようであれば、コントローラの実装方法を再検討するか、ステップ 0～2 のいずれかに戻る。

本書では、倒立振子を題材として、

- 古典制御理論によるコントローラ設計 (PID 制御) ..... 基礎編：第 2 章
- を学んだ後、以下のトピックスについて系統的に学習する。
- ステップ 1：実験装置のモデリングと解析 ..... 基礎編：第 3, 4 章
  - ステップ 2：現代制御理論によるコントローラ的设计 ..... 基礎編：第 5～7 章
  - ステップ 3：コントローラの実装 ..... 基礎編：第 8 章
- さらに、発展的内容として
- アドバンストな制御理論によるコントローラ設計 ..... 発展編：第 1～3 章
- を用意しているので、ぜひ、チャレンジしてほしい。

## 第 1 章の参考文献

- 1) 川谷亮次, 外川一仁: 現代制御理論を使った倒立振子の実験 [1]–[3], トランジスタ技術 (CQ 出版社), Vol. 30, No. 5, pp. 315–322, No. 6, pp. 367–373, No. 7, pp. 363–370 (1993)
- 2) 有本 卓, 伊藤正美, 木村英紀, 示村悦二郎, 砂原善文, 久村富持, 藤井省三, 古田勝久, 伊藤宏司, 大住 晃, 西村敏充, 早勢 実, 美多 勉, 宮崎文夫, 須田信英: 制御理論家が実験をすれば ..... — 第 8 回制御理論シンポジウムから —, 計測と制御, Vol. 18, No. 12, pp. 1029–1040 (1979)
- 3) 中浦茂樹, 三平満司: 学生のやる気を引き出す制御実験 — MATLAB と LabVIEW を併用した倒立振子実験 —, 計測と制御, Vol. 46, No. 9, pp. 705–708 (2007)
- 4) Segway Inc.: <http://www.segway.com/>
- 5) iBOT - Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/IBOT>
- 6) ムラタのロボット: <https://corporate.murata.com/ja-jp/about/mboyngirl>
- 7) 渡辺 亮: NXTway (LEGO Segway) の走行制御 — LEGO Mindstorms NXT を用いた制御実験 —, 第 7 回 SICE 制御部門大会資料, 63-1-4 (2007)
- 8) NXTway-GS (2 輪型倒立振子ロボット) C API: [http://lejos-osek.sourceforge.net/jp/nxtway\\_gs.htm](http://lejos-osek.sourceforge.net/jp/nxtway_gs.htm)

18 第 1 章 倒立振子の概要と制御系設計の流れ

- 9) EV3way-ET 走行体組立図: <https://sourceforge.net/projects/etroboev3/files/BuildingInstructions/EV3wayET03.pdf/download>
- 10) 川田昌克: MATLAB/Simulink と実機で学ぶ制御工学 — PID 制御から現代制御まで —, TechShare (2013)
- 11) 川田昌克: LEGO MINDSTORMS を利用した回転型倒立振子の開発, 計測と制御, Vol. 54, No. 3, pp. 192–195 (2015)
- 12) Quanser Consulting Inc.: <https://www.quanser.com/>  
.....倒立振子などの実験装置や出力ボードは日本ナショナルインスツルメンツ (<https://www.ni.com/ja-jp.html>) やアルテックス (<http://altexcorp.co.jp>) から購入でき, ソフトウェア QuaRC はアルテックスから購入できる
- 13) リアルテック: <http://www011.upp.so-net.ne.jp/realtec/>
- 14) Solutions 4U: <https://www.solutions4u-asia.com/>  
.....ピーアイディーコーポレーション (<https://www.pid-control.com/>) から購入できる
- 15) サーボテクノ: <http://www.servotechno.co.jp/>
- 16) アドウィン: <https://www.adwin.com/>
- 17) ヴイストーン: <http://www.vstone.co.jp/>
- 18) Power Functions motors presentation — Philo's Home Page: <https://www.philohome.com/pf/pf.htm>
- 19) 回転型倒立振子用モータ・エンコーダセット: <https://www.mbd-shop.jp/product/217>  
.....2020 年 10 月時点で販売は終了している
- 20) K. J. Aström and K. Furuta: Swinging up a Pendulum by Energy Control, Automatica, Vol. 36, No. 2, pp. 287–295 (2000)
- 21) H. Kajiwara, P. Apkarian and P. Gahinet: LPV Techniques for Control of an Inverted Pendulum, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 19, No. 1, pp. 44–54 (1999)
- 22) 松本 治, 梶田秀司, 谷 和男: 移動ロボットの内外界センサのみによる姿勢検出とその制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 5, pp. 541–550 (1990)
- 23) ET ロボコン公式サイト: <https://www.etrobo.jp/>
- 24) 藤木信彰, 神崎一男, 松田隆一: 慣性ロータを用いた振子の振り上げ動作と倒立制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 667, pp. 810–816 (2002)
- 25) 逸見知弘, 明聡, 井上 昭, 植木信幸, 平嶋洋一: 台車型直列二重倒立振子の振り上げ制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 704, pp. 1269–1275 (1993)
- 26) 川谷亮治, 山口尊志: 並列型 2 重倒立振子系の解析とその安定化, 計測自動制御学会論文集, Vol. 29, No. 5, pp. 572–580 (1993)
- 27) 松日楽信人, 大明準治: わかりやすいロボットシステム入門 (改訂 2 版), オーム社 (2010)
- 28) 高森 年: メカトロニクス, オーム社 (1999)
- 29) 岡田養二, 渡辺嘉二郎: メカトロニクスと制御工学, 養賢堂 (2003)
- 30) 情報機器と情報社会のしくみ素材集 (1302 マウスの動作原理): <http://www.sugilab.net/jk/joho-kiki/1302/>

- 31) 吉田幸作ほか：モータ制御 & メカトロニクス技術入門，トランジスタ技術 SPECIAL (CQ 出版社)，No. 61 (1998)
- 32) ハーモニックドライブの原理：[http://www.hds.co.jp/products/hd\\_theory/](http://www.hds.co.jp/products/hd_theory/)
- 33) 大須賀公一，足立修一：システム制御へのアプローチ，コロナ社 (1999)
- 34) 足立修一：システム同定の基礎，東京電機大学出版局 (2009)
- 35) 須田信英ほか：PID 制御，朝倉書店 (1992)
- 36) 小郷 寛，美多 勉：システム制御理論入門，実教出版 (1979)
- 37) 藤森 篤：ロバスト制御，コロナ社 (2001)
- 38) 蛭原義雄：LMI によるシステム制御 — ロバスト制御系設計のための体系的アプローチ，森北出版 (2012)
- 39) 「初学者のための図解でわかる制御工学 II — 発展編」特集号，システム/制御/情報，Vol. 56, No. 6, pp. 275–312 (2012)
- 40) 岡田昌史：システム制御の基礎と応用 — メカトロニクス系制御のために —，数理工学社 (2007)

このページの先頭は文献 31) となるので，  
このページも改訂が必要です

### 3.4 MATLAB/Simulink 用シミュレータ

本章で説明した台車型、アーム型倒立振り子実験装置の非線形シミュレーションを行うための MATLAB/Simulink 用シミュレータは、

- <https://www.morikita.co.jp/books/book/3110>
- [https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book\\_ip/book\\_ip\\_page.html](https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book_ip/book_ip_page.html)

で配布する。ファイル“ip\_toolbox\_1.0.2.zip”を解凍したときに生成されるフォルダ“iptools”には MATLAB/Simulink 用シミュレータを含む図 3.15 のファイル群が含まれている。これを利用するために、“iptools”にパスを通す。たとえば、“C:\hoge\ip\_toolbox\_1.0.2\iptools”にパスを通すためには、

```
>> addpath('C:\hoge\ip_toolbox_1.0.2\iptools') ↵
```

と入力する。そして、

```
>> ip_model ↵
```

と入力すると、図 3.16 のように四つの Simulink ブロックが表示される。これらは、

ip_toolbox_1.0.2	
└─ iptools	
└─ ip_model.slx	..... 倒立振り子の非線形シミュレータ用ライブラリ
└─ cdip_para.m	..... 台車型倒立振り子の物理パラメータの定義 (表 3.5 (a), (c))
└─ cdip_anime.m	..... 台車型倒立振り子のシミュレーション結果のアニメーション表示
└─ cdip.jpg	..... 台車型倒立振り子の非線形シミュレータ用画像
└─ cdip_photo.jpg	..... 台車型倒立振り子の非線形シミュレータ用画像
└─ adip_para.m	..... アーム型倒立振り子の物理パラメータの定義 (表 3.7 (a), (c))
└─ adip_anime.m	..... アーム型倒立振り子のシミュレーション結果のアニメーション表示
└─ adip.jpg	..... アーム型倒立振り子の非線形シミュレータ用画像
└─ adip_photo.jpg	..... アーム型倒立振り子の非線形シミュレータ用画像
└─ odqlab_2.1.3	..... ODQ Toolbox/Lab <sup>16), 17)</sup>
└─ cdip_sample	..... 台車型倒立振り子に対するサンプルファイル群
└─ adip_sample	..... アーム型倒立振り子に対するサンプルファイル群

図 3.15 iptools

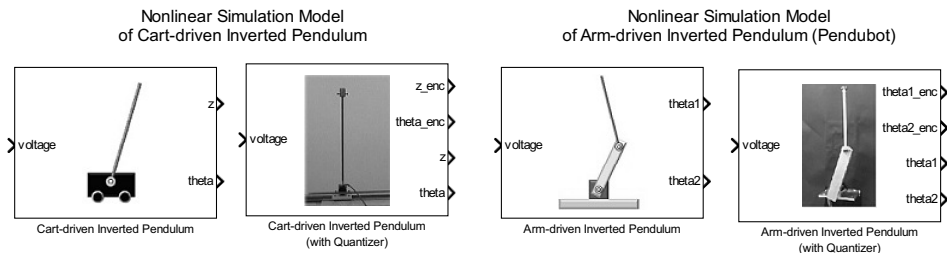


図 3.16 ip\_model.slx

である．(4.42) 式より  $\omega_{np}$  と  $\zeta_p$  はともに正であり，(4.41) 式より自励系 (4.40) 式の右辺の行列の固有値はともに負であることがわかる．したがって，定理 4.2 より，自励系 (4.40) 式は漸近安定であることがわかる．

一方，図 4.9 のように  $\theta = 0$  の近傍で線形化したモデルは，

$$(J_p + m_p l_p^2) \ddot{\theta}(t) = -\mu_p \dot{\theta}(t) + m_p g l_p \theta(t) \quad (4.43)$$

で与えられ，状態空間表現は  $x(t) = [\theta(t) \ \dot{\theta}(t)]^\top$  として，

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\mu_p}{J_p + m_p l_p^2} & \frac{m_p g l_p}{J_p + m_p l_p^2} \end{bmatrix} x(t) \quad (4.44)$$

で与えられる．このとき，(4.44) 式の右辺の行列の二つの固有値は

$$\lambda_{\pm} = (-\zeta_p \pm \sqrt{\zeta_p^2 + 1}) \omega_{np} \quad (4.45)$$

となり，固有値  $\lambda_+$  は必ず正となる．したがって，定理 4.2 より自励系 (4.44) 式は不安定であることがわかる．

## 第 4 章の参考文献

- 1) 井村順一：システム制御のための安定論，コロナ社 (2000)
- 2) 小郷 寛，美多 勉：システム制御理論入門，実教出版 (1979)
- 3) J. ラ サール，S. レフシェッツ 著 (山本 稔 訳)：リヤプノフの方法による安定性理論，産業図書 (1975)
- 4) E. D. Sontag: Mathematical Control Theory, 2nd Edition, Springer (1998) (available from [http://www.sontaglab.org/FTPDIR/sontag\\_mathematical\\_control\\_theory\\_springer98.pdf](http://www.sontaglab.org/FTPDIR/sontag_mathematical_control_theory_springer98.pdf))
- 5) J. C. Willems: The Behavioral Approach to Open and Interconnected Systems, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 27, No. 6, pp. 46–99 (2007)

8.5 サンプル値  $H_\infty$  制御理論による最適離散化

0 次ホールドによる離散化や双一次変換による離散化には、本章で述べたようにそれぞれいくつかのよい性質をもつ。しかし、それらの離散化により、もとのコントローラ  $\Sigma_C$  とデジタル実装された  $\mathcal{H}\Sigma_K\mathcal{S}$  との間に近似式である (8.5) 式が成り立つかどうか、いい換えればそれらのシステムの間の「誤差」が小さくなっているのかどうかは、実は何もいえていない。

この「誤差」を正しく見積もるためには、サンプル値制御理論の知識が必要となる。もし連続時間コントローラ  $\Sigma_C$  が安定ならば、サンプル値制御理論を援用して、評価関数

$$J(\Sigma_K) = \|(\Sigma_C - \mathcal{H}\Sigma_K\mathcal{S})\mathcal{W}\|_\infty = \sup_{\substack{w \in L^2 \\ \|w\|_2=1}} \|(\Sigma_C - \mathcal{H}\Sigma_K\mathcal{S})\mathcal{W}w\|_2 \quad (8.51)$$

を最小化する最適デジタルコントローラ  $\Sigma_K$  を求めることが可能となる。ここで、 $\mathcal{W}(s)$  は厳密にプロパーかつ安定な周波数重み伝達関数である。

サンプル値制御理論の基礎については、発展編の第2章で簡単に述べる。また、上記の最適デジタルコントローラを求める方法の詳細については、文献4)を参照されたい。さらに、スパースモデリング<sup>7)</sup>のアイデアを導入して、離散化コントローラを低次元化する手法も近年、提案されている<sup>8)</sup>。

## 第8章の参考文献

- 1) T. Chen and B. Francis: Optimal Sampled-data control systems, Springer (1995)
- 2) G. F. Franklin, J. D. Powerll, and M. L. Workman: Digital Control of Dynamic Systems, 3rd edition, Addison-Wesley (1998)
- 3) 川田昌克: Scilab で学ぶわかりやすい数値計算法, 森北出版 (2008)
- 4) M. Nagahara and Y. Yamamoto: Optimal Discretization of Analog Filters via Sampled-data  $H^\infty$  Control Theory, The 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC 2013), pp.527–532 (2013)
- 5) T. ニーダム 著 (石田 久ら 訳): ヴィジュアル複素解析, 培風館 (2002)
- 6) 酒井英昭: 信号処理, 新世代工学シリーズ, オーム社 (1998)
- 7) 永原正章, スパースモデリング, コロナ社 (2017)
- 8) M. Nagahara and Y. Yamamoto: Sparse representation for sampled-data  $H^\infty$  filters, Athanasios Antoulas 70th Festschrift, Springer (2020; to appear)

本章では、連続時間コントローラのデジタル実装に必要な離散化の方法として、0 次ホールドによる離散化と双一次変換による離散化について説明した。定理 8.1 の証明は文献 1) の 3.1 節を参考にした。また定理 8.2 の証明は文献 2) の 6.1 節を参考にした。



れを実行可能領域と呼ぶ.  $(\xi_1, \xi_2)$  は領域として存在するので, 問題は可解であり,  $\lambda$  は  $\alpha$ -安定領域に含まれていると判定することができる. 実行可能解を一つも見つけることができれば問題は可解であり, そうでなければ問題は非可解である.

フリーウェアの LMI ソルバ <sup>セデュミ</sup>SeDuMi (Ver. 1.32 (20130724)) と LMI パーサ <sup>ヤルミップ</sup>YALMIP (Release 20150918) を利用し (注3),  $P \succ 0$  および (1.9) 式 ((1.11), (1.12) 式) を制約条件とする LMI 可解問題を解くための M ファイルは以下のようになる.

```
M ファイル “p2c112_ex1_alpha_stability.m”
1 clear; format compact ..... 初期化
2 % -----
3 A = [ 0      1 ..... A = [ 0      1
4      -2.25 -2.25 ]; ..... -2.25 -2.25 ]
5 n = length(A); ..... n : x(t) の次元
6 alpha = 1; ..... α = 1
7 ep = 1e-6; ..... 十分小さな正数 ε = 10-6
8 % -----
9 xi1 = sdpvar(1); xi2 = sdpvar(1);
10 P = [ xi1 xi2 ..... ξ1, ξ2 の定義し, P = [ ξ1 ξ2
11      xi2 1 ]; ..... ξ2 1 ] とする (注4)
12 % -----
13 LMI = [ P >= ep*eye(n) ]; ..... P ≽ εI (ε > 0) を制約条件に追加
14 LMI = LMI + [ A'*P + P*A + 2*alpha*P <= - ep*eye(n) ];
15 % ----- ..... ATP + PA + 2αP ≼ -εI (ε > 0) を制約条件に追加
16 solvesdp(LMI) ..... LMI 可解問題の求解
17 % -----
18 P = double(P) ..... 実行可能解 P を表示
```

YALMIP の最近のバージョンでは, LMI を等号が入った形式で記述しなければならない. そこで, 十分小さな  $\varepsilon > 0$  を用いて,  $F(\xi) \succ 0$  を

$$F(\xi) \succeq \varepsilon I (\varepsilon > 0) \quad (1.13)$$

のように記述している. この M ファイル “p2c112\_ex1\_alpha\_stability.m” を実行すると,

```
SeDuMi 1.32 by AdvOL, 2005-2008 and Jos F. Sturm, 1998-2003.
Alg = 2: xz-corrector, theta = 0.250, beta = 0.500
eqs m = 2, order n = 5, dim = 9, blocks = 3
nnz(A) = 7 + 0, nnz(ADA) = 4, nnz(L) = 3
it :      b*y      gap      delta rate   t/tP*   t/tD*   feas cg cg   prec
0 :              9.31E+00 0.000
..... 略 .....
15 :   0.00E+00 2.68E-12 0.000 0.0874 0.9900 0.9900   1.00 1 1 2.4E-10
```

(注3) SeDuMi は <https://github.com/SQLP/SeDuMi/> から, YALMIP は <https://yalmip.github.io/> から入手可能である. また, SeDuMi と YALMIP のインストール方法は <https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/iscie/install.html> を参照されたい.

(注4)  $P = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 \\ \xi_2 & \xi_3 \end{bmatrix}$  とする場合は, 9~11 行目の代わりに,  $P = \text{sdpvar}(n,n, 'sy')$ ; と記述する ('sy' は対称行列であることを意味する).

に, パラメータ  $\rho(t)$  およびその変化率  $\dot{\rho}(t)$  はいずれも設計の際に考慮した範囲で動作していることがわかる. これらの範囲を超える使い方をしない限り, 安定性や制御性能が保証される.

## 第 1 章の参考文献

- 1) 杉江俊治, 藤田政之: フィードバック制御入門, コロナ社 (1999)
- 2) 川田昌克, 西岡勝博: MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学, 森北出版 (2001)
- 3) 蛭原義雄: LMI によるシステム制御 — ロバスト制御系設計のための体系的アプローチ —, 森北出版 (2012)
- 4) M. Chilali and P. Gahinet:  $H_\infty$  Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, No. 3, pp. 358–367 (1996)
- 5) 川田昌克: 制御系解析・設計における数値計算/数式処理ソフトウェアの活用, システム/制御/情報, Vol. 55, No. 5, pp. 159–164 (2011) (see also <https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/iscie/iscie.html>)
- 6) 陳 幹: LMI による制御, システム/制御/情報, Vol. 56, No. 6, pp. 287–290 (2012)
- 7) 穴井宏和: 数値最適化の実践ガイド, 講談社 (2013)
- 8) 延山英沢, 瀬部 昇: システム制御のための最適化理論, コロナ社 (2015)
- 9) S. Boyd and L. Vandenberghe: Convex Optimization, Cambridge University Press (2004) (available from <https://stanford.edu/~boyd/cvxbook/>)
- 10) S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan: Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, SIAM (1994) (available from <https://stanford.edu/~boyd/lmibook/>)
- 11) 佐藤和也, 下本陽一, 熊澤典良: はじめての現代制御理論, 講談社 (2012)
- 12) 藤井隆雄, 辻野太郎: 最適制御の実用設計法, 森北出版 (2015)
- 13) 浅井 徹: ロバスト制御,  $H_\infty$  制御, システム/制御/情報, Vol. 56, No. 6, pp. 283–286 (2012)
- 14) 和田信敬, 佐伯正美: 入力飽和システムの Anti-windup 制御, システム/制御/情報, Vol. 46, No. 2, pp. 84–90 (2002)
- 15) 木山 健: セクター条件に基づく飽和を有する制御系の解析と制御— 飽和要素の出力から入力への直達成分の考察, システム/制御/情報, Vol. 47, No. 11, pp. 532–539 (2003)
- 16) K. Sawada, T. Kiyama and T. Iwasaki: Generalized sector synthesis of output feedback control with anti-windup structure, System & Control Letters, Vol. 58, No. 6, pp. 421–428 (2009)
- 17) S. Tarbouriech, G. Garcia, J. M. Gomes da Silva Jr. and I. Queinnec: Stability and Stabilization of Linear Systems with Saturating Actuators, Springer (2011)

## 第2章の参考文献

- 1) T. Chen and B. Francis: *Optimal Sampled-Data Control Systems*, Springer (1995)
- 2) 山本 裕, 原 辰次, 藤岡久也: サンプル値制御理論 I–VI, システム/制御/情報, Vol. 43, No. 8, 10, 12 (1999), Vol. 44, No. 2, 4, 6 (2000)
- 3) 西村敏充, 狩野弘之: 制御のためのマトリクス・リカッチ方程式, システム制御情報ライブラリー, 朝倉書店 (1996)
- 4) S. Azuma, Y. Minami, and T. Sugie: Optimal Dynamic Quantizers for Feedback Control with Discrete-level Actuators: Unified Solution and Experimental Evaluation, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 133, No. 2, Art. 021005 (2011)
- 5) S. Azuma and T. Sugie: Stability Analysis of Optimally Quantized LFT-Feedback Systems, International Journal of Control, Vol. 83, No. 6, pp. 1125–1135 (2010)
- 6) 大日方五郎, B. アンダーソン: 制御システム設計 — 制御器の低次元化 —, 朝倉書店 (1999)
- 7) 東 俊一, 森田亮介, 南 裕樹, 杉江俊治: 制御のための動的量子化器開発ソフトウェアと実験検証, システム制御情報学会論文誌, Vol. 21, No. 12, pp. 408–416 (2008)
- 8) R. Morita, S. Azuma, Y. Minami, and T. Sugie: Graphical Design Software for Dynamic Quantizers in Control Systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 4, No. 5, pp. 372–379 (2011)
- 9) J. F. Sturm: Using SeDuMi 1.02, A MATLAB Toolbox for Optimization over Symmetric Cones, Optimization Methods and Software, Vol. 11–12, No. 1, pp. 625–653 (1999)
- 10) 川田昌克, 蛭原義雄: LMI に基づく制御系解析・設計, システム/制御/情報, Vol. 55, No. 5, pp. 165–173 (2011) (available from [https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/iscie/doc/install\\_sedumi.pdf](https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/iscie/doc/install_sedumi.pdf))
- 11) 萩原朋道: デジタル制御入門, コロナ社 (1999)
- 12) 荒木光彦: デジタル制御理論入門, システム制御情報ライブラリー, 朝倉書店 (1991)

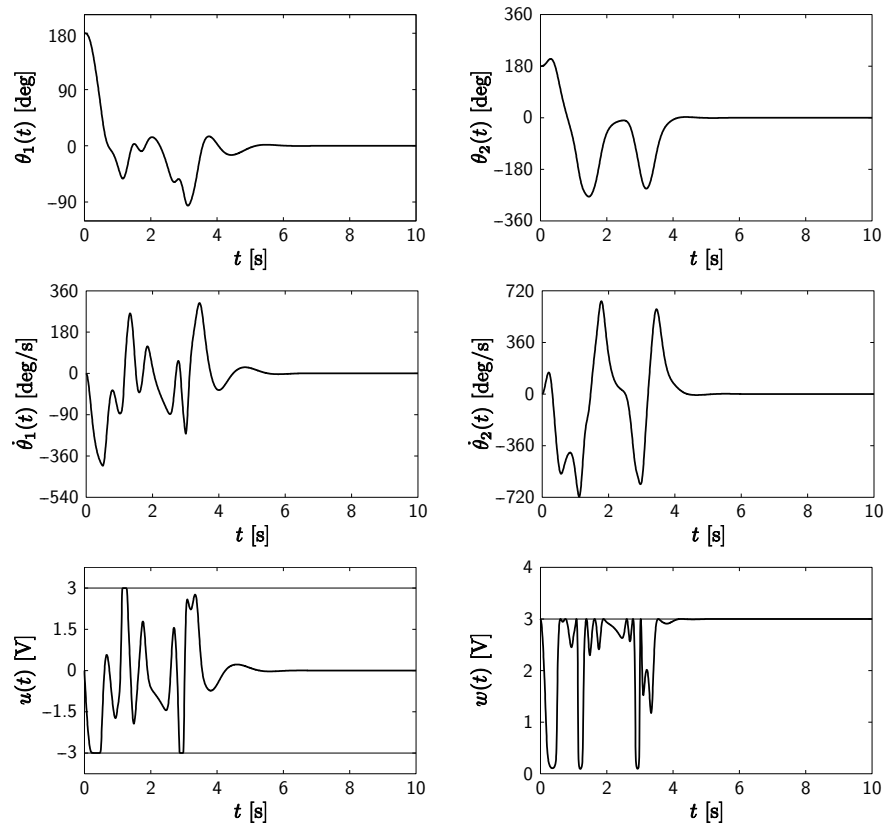


図 3.15 アーム型倒立振子の振り上げ安定化制御

なお、シミュレーション用の C プログラムは、数式処理言語 Mathematica を利用した自動コード生成システム AutoGenU<sup>10)</sup> によって生成した。これは、状態方程式と評価関数などを Mathematica の書式で記述すると、自動的に C プログラムを生成する Mathematica ノートブックである。1 回の操作量更新にかかる計算時間は、Core i7 (2.9 GHz) の CPU をもつノート PC で 0.2 [ms] 以下なので、サンプリング周期 1 [ms] の実装が十分に可能である。AutoGenU のファイルおよび生成された C プログラムは、何通りかの最大指令電圧  $u_{\max}$  に対するシミュレーション結果のアニメーションとともに

[https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book\\_ip/book\\_ip\\_page.html](https://www.maizuru-ct.ac.jp/control/kawata/study/book_ip/book_ip_page.html)

で公開する。

ここでは非線形システムを考えたが、線形システムなど特殊な問題設定に限定すれば、問題の特徴を利用した計算方法の工夫や安定性の保証なども考えられる。それらに関する

## 著者略歴（５０音順）

### 東 俊一（あずま・しゅんいち）

1999 年 3 月 広島大学工学部第 2 類電気電子工学課程卒業  
2001 年 3 月 東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了  
2004 年 3 月 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士後期課程修了  
(博士 (工学) 取得)  
2004 年 4 月 日本学術振興会特別研究員  
2005 年 9 月 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻助手  
2007 年 4 月 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻助教  
2011 年 6 月 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻准教授  
2017 年 4 月 名古屋大学大学院工学研究科機械システム工学専攻教授  
現在に至る

### 市原 裕之（いちはら・ひろゆき）

1995 年 3 月 明治大学理工学部精密工学科卒業  
1997 年 3 月 明治大学大学院理工学研究科博士前期課程修了  
2000 年 3 月 明治大学大学院理工学研究科博士後期課程修了  
(博士 (工学) 取得)  
2000 年 4 月 明治大学理工学部助手 (任期制)  
2001 年 4 月 茨城大学大学院理工学研究科 SVBL 非常勤研究員  
2002 年 4 月 九州工業大学情報工学部制御システム工学科助手  
2007 年 4 月 九州工業大学情報工学部システム創成情報工学科助教  
2010 年 4 月 明治大学理工学部機械情報工学科講師  
2013 年 10 月 明治大学理工学部機械情報工学科准教授  
**2019 年 4 月 明治大学理工学部機械情報工学科教授**  
現在に至る

### 浦久保 孝光（うらくぼ・たかてる）

1996 年 3 月 京都大学工学部航空工学科卒業  
1998 年 3 月 京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻修士課程修了  
2001 年 3 月 京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士後期課程単位認定退学  
2001 年 4 月 神戸大学工学部情報知能工学科助手  
2001 年 7 月 京都大学博士 (工学) 取得  
2007 年 4 月 神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻助教  
Carnegie Mellon University 客員研究員 (2007/10～2009/3)  
2010 年 4 月 神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻助教  
2016 年 11 月 神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻准教授  
2018 年 4 月 神戸大学大学院システム情報学研究科情報科学専攻准教授  
現在に至る

### 大塚 敏之（おおつか・としゆき）

1990 年 3 月 東京都立科学技術大学工学部航空宇宙システム工学科卒業  
1992 年 3 月 東京都立科学技術大学大学院工学研究科力学系システム工学専攻修士課程修了  
1995 年 3 月 東京都立科学技術大学大学院工学研究科工学システム専攻博士課程修了  
(博士 (工学) 取得)  
1995 年 4 月 筑波大学構造工学系講師  
1999 年 4 月 大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻講師  
2003 年 3 月 大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻助教  
2005 年 4 月 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻助教  
2007 年 4 月 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻教授  
2013 年 4 月 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻教授  
現在に至る

永原 正章 (ながはら・まさあき)

1998 年 3 月 神戸大学工学部システム工学科卒業  
2000 年 3 月 京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻修士課程  
2002 年 4 月 日本学術振興会特別研究員  
2003 年 3 月 京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻博士後期課程  
(博士 (情報学) 取得)  
2003 年 4 月 京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻助手  
2007 年 4 月 京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻助教  
2012 年 10 月 京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻講師  
2016 年 4 月 北九州市立大学環境技術研究所教授  
現在に至る

南 裕樹 (みなみ・ゆうき)

2003 年 3 月 舞鶴工業高等専門学校電子制御工学科卒業  
2005 年 3 月 舞鶴工業高等専門学校専攻科電気・制御システム工学専攻修了  
2007 年 3 月 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻修士課程修了  
2008 年 4 月 日本学術振興会特別研究員  
2009 年 3 月 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻博士後期課程修了  
(博士 (情報学) 取得)  
2009 年 4 月 舞鶴工業高等専門学校電子制御工学科助教  
2013 年 4 月 京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻特定研究員  
2013 年 7 月 京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻特定助教  
2014 年 10 月 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教  
2017 年 1 月 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻特任講師  
2017 年 4 月 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻講師  
2019 年 3 月 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻准教授  
現在に至る

倒立振子で学ぶ制御工学

© 東 俊一・市原 裕之・浦久保 孝光  
大塚 敏之・甲斐 健也・川田 昌克  
國松 禎明・澤田 賢治・永原 正章  
南 裕樹 2017

2017 年 ?? 月 ?? 日 第 1 版第 1 刷発行

【本書の無断転載を禁ず】

著 者 東 俊一・市原 裕之・浦久保 孝光  
大塚 敏之・甲斐 健也・川田 昌克  
國松 禎明・澤田 賢治・永原 正章  
南 裕樹

発 行 者 森北博巳

発 行 所 森北出版株式会社

東京都千代田区富士見 1-4-11 (〒102-0071)

電話 03-3265-8341 / FAX 03-3264-8709

<http://www.morikita.co.jp/>

日本書籍出版協会・自然科学書協会・工学書協会 会員

**JCOPY** <(社) 出版社著作権管理機構 委託出版物>

落丁・乱丁本はお取替えいたします

印刷/??????・製本/??????

Printed in Japan / ISBN???-?-???-????-?