

で、たとえば、12)–15) から購入することができる。四輪車のタイプ¹³⁾以外に、台車がラックピニオンを介して駆動するタイプ^{12), 13)}、レール上の台車がタイミングベルトを介して駆動するタイプ^{14), 15)}、ボールねじで台車が駆動するタイプ¹³⁾などがある。ラックピニオンやレール、ボールねじを用いる場合、台車の可動範囲はその長さに制限される。

■ 回転型倒立振子²⁰⁾

図 1.4 に示す回転型倒立振子は、水平面を回転するアームの先端に振子が取り付けられたものである。回転型は、台車型と比べてコンパクトな構造であり、アームの可動範囲が広いという利点がある。発案者の古田勝久氏（東京工業大学名誉教授、東京電機大学元学長）の名にちなんで Furuta Pendulum と呼ばれることがある。この実験装置は、たとえば、12)–14), 16) から購入することができる。また、図 1.5 に示すように、LEGO MINDSTORMS NXT/EV3 と LEGO PowerFunctions の XL モータ¹⁸⁾および TechShare のロータリエンコーダ¹⁹⁾を利用することにより、比較的安価に自分で製作することもできる^{10), 11).}

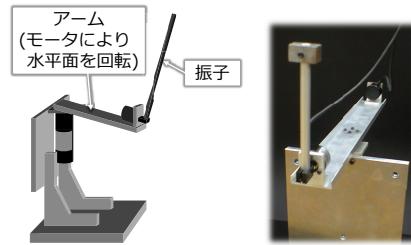


図 1.4 回転型倒立振子



図 1.5 LEGO MINDSTORMS を利用して製作した回転型倒立振子

■ アーム型倒立振子²¹⁾

図 1.6 に示すアーム型倒立振子は、鉛直面を回転するアームの先端に振子が取り付けられたものであり、Pendulum Robot (振子ロボット) を略した Pendubot とも呼ばれる。図 1.7 に示すように、アームが水平に近づくにつれ、振子に伝わる力の大きさが 0 に近くという特徴があり、台車型や回転型よりも制御が困難である。実験装置は、12), 14) から購入することができる。

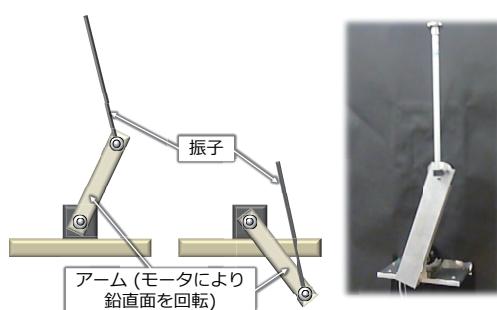


図 1.6 アーム型倒立振子

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://github.com/ETrobocon/etroboEV3/wiki>
- 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.: <http://www.quanser.com/>
.....倒立振子などの実験装置や入出力ボードは日本ナショナルインスツルメンツ (<http://japan.ni.com/>) から購入でき, ソフトウェア QuaRC は NEAT (<http://www.neat21.co.jp/>) 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: <http://www.solutions4u-asia.com/>
.....ピーアイディーコーポレーション (<http://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WIN : <http://www.adwin.com/>
- 17) ヴイストン : <http://www.vstone.co.jp/>
- 18) Power Functions motors presentation — Philo's Home Page: <http://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 : <http://www.mbd-shop.jp/product/217>
- 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 : <http://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, 明聰, 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)

118 第7章 可観測性とオブザーバ

と思うが、 $A + LC$ を任意に極配置できない場合でも、 $A + LC$ を安定化できる場合は存在する（たとえば、 A が安定行列な場合、 $L = 0$ とすればよい）。このように、 $A + LC$ が安定化可能である場合を「 (C, A) は可検出である」という。この可検出性は H_∞ 制御を代表とする、より一般的な出力フィードバック制御を行ううえで重要な役割を果たすが、本書の範囲を超えるため、興味ある読者は文献 4), 5) などを参照されたい。

なお、例 7.2において、 $z(t)$ もしくは $\theta(t)$ のみ観測可能な場合は、 $A + LC$ の安定化すらできない（すなわち、 (C, A) は可検出ではない）ことに注意されたい。

例 7.3 不可検出な台車型倒立振子

(M ファイル “p1c75_ex3_cdip_detectability.m”)

- (1) $z(t)$ のみ観測可能な場合 ($y(t) = z(t)$)、 $L = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]^\top$ とおくと、
(7.17) 式および $C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ より $A + LC$ の特性多項式が

$$|sI - (A + LC)| = (s^2 - a_3s - a_1)\{s^2 + (a_c - l_1)s - l_1a_c - l_3\} \quad (7.23)$$

のように因数分解できる。 $a_1 > 0$ なので、 $s^2 - a_3s - a_1 = 0$ が必ず不安定根（実部が正の根）をもち、 $A + LC$ を安定化することができない。したがって、この場合、不可検出である。

- (2) $\theta(t)$ のみ観測可能な場合 ($y(t) = \theta(t)$)、 $C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$ なので、同様の計算により特性多項式 $|A + LC|$ が s を因数としてもつ（特性方程式が 0 を根にもつ）ので、 $A + LC$ を安定化することができない。したがって、この場合も不可検出である。

第7章の参考文献

- 1) 小郷 寛、美多 勉：システム制御理論入門、実教出版（1979）
- 2) 吉川恒夫、井村順一：現代制御論、コロナ社（2014）
- 3) 岩井善太、井上 昭、川路茂保：オブザーバ、コロナ社（1988）
- 4) 美多 勉： H_∞ 制御、昭晃堂（1994）
- 5) K. Zhou, J. C. Doyle and K. Glover: Robust and Optimal Control, Prentice Hall (1995) (原著) (劉 康志, 羅 正華：ロバスト最適制御、コロナ社 (1997) (訳本))