

係数図法

制御系設計の理論と応用

真鍋舜治

金永喆

まえがき

本書は二つの目的で執筆されたものである。第 1 の目的は「係数図法」と呼ばれる、簡単ではあるが大変有力な制御系設計手法を紹介することである。これにより制御を専門としない技術者でも、通例の制御系設計問題ならば、制御の専門家と同じように、良い制御器設計することができる。また制御の専門家しか扱わないような複雑な設計問題についても、見通しのよい設計を進めることができる。

第 2 の目的は、係数図法を用いて、各種制御理論の意味を明らかにすることである。係数図法は非常に一般的なものなので、各種の制御理論による設計は、等価な係数図法による設計に置き換えることができる。このような等価設計の結果、係数図法の共通の言葉を用いて、それぞれの制御理論の「意味」が説明され、その本質が明らかになるのである。その結果専門家夫々が、自分が使用している制御理論の長所と短所を正しく知ることができ、実際の問題への適用を賢明に行うことができるようになる。

各種の制御理論は今までに開発され、多数の教科書・専門書が出版されている。しかしこれらは制御系設計者の期待に十分応えているとは言い難いように思われる。第 1 に制御理論は高い数学の素養を必要とし、解析に重点がおかれて、設計・シミュレーション問題は十分に論じられていない。また線形不時変系に重点が置かれすぎていて、時変系・非線形系についての配慮が、適切になされていない。これらの理由により、このような制御理論を基にして設計された制御器は、実用的には必ずしも良い制御器にはならないことが挙げられる。

第 2 に制御理論はその時代での工業社会の特別の要請に応えるため、どちらかと言えば、その場限りのような方法で開発されてきた。更にその時代に可能な計算能力の強い影響を受けている。その結果、これらの制御理論は大変多様性に富むものになり、統一性・一貫性に欠けることになる。教科書にはこれらの理論が網羅的に記述されており、それらの意味を統一的に捉えることが難しい。本書はこのような状況を少しでも改善することを意図して、企画されたのである。

係数図法は、1991 年に新しい制御系設計手法として発表されたが、その基本的な考え方は、実用的な設計分野で、1950 年代から色々提案され、実地で確認されてきたものである。係数図法は唯これらの考え方に対して、便利な表現形式を与え、また数学的基礎を与えた

ものである。良い制御特性を示す特性多項式の一つにケスラー標準形 (Kessler, 1960) と呼ばれるものがある。これらは鉄鋼業界で 1960 年代から広く使われてきたが、係数図法ではこれに改良を加えたものを、特性多項式的设计規範としている。また学界では余り知られていないが、ラウスの安定条件を簡略化した、リパトフの安定十分条件 (Lipatov, 1978) と呼ばれるものがある。これが特性多項式的设计規範を与えるものであり、係数図法の数学的基礎となっている。

係数図法の中心は「係数図」である。係数図では、特性多項式の係数を対数目盛りで縦軸に、その係数の次数を線形目盛りで横軸にとる。それらを繋ぐ図形の曲率が安定度を表し、その傾斜が応答の速さを表している。またあるパラメータの変化に対する、図形の変形の度合いがロバスト性の尺度である。このように制御系の 3 個の重要要素、安定性・応答性・ロバスト性が一つの図形で表されることになる。特性多項式は、開ループ伝達関数の分母多項式と分子多項式の和であるから、これらの多項式も係数図上には示されている。これらの多項式を用いれば、周波数特性と時間特性を概略推定することができる。このように係数図は一つの図の中に非常に豊富な情報を包含しており、しかもそれらを直感的で理解し易い形で図式表現している。すなわち係数図は、設計・シンセシス問題でボード線図が果たしている役割を、さらに効果的な形で果たしているのである。

係数図法は代数的設計法の一つであり、代数的設計法は古典制御と現代制御の中間に位置する、第 3 の制御系設計法である。さらに詳しく言えば、係数図法は「多項式の環の上での代数的設計法」であり、多項式を用いているが、有理関数は用いていないのが特徴である。その結果、微分方程式そのままを使うことができ、ラプラス変換が不要になる。

本書を企画するに当たり、2 種類の読者を想定しており、本書の構成もこれに従っている。第 1 の読者は、自分が専門とするプラントについては十分な知識を持っているが、制御や数学については必ずしも十分な知識を持っていない、制御系設計の実務者である。第 2 の読者は制御系設計の専門家で、複雑なプラントの制御器設計に携わっていて、現在の制御理論をさらに深く理解することによって、新しい制御理論を開発しようと心掛けている研究者である。

第 1~3 章は第 1 の読者のためのものであって、通例の制御系設計問題は容易にまた効率よく解くことができる。とくに「1.2 節、簡単な設計問題」を見れば係数図法による設計の全体像を明確に把握することができる。第 4~7 章は第 2 の読者のためのものである。高度な

制御問題が扱われ、各種の安定理論が検討され、また他の設計手法との比較がなされている。第 8 章は別個の問題で、学生に実際に制御系の模型を製作させて、制御系設計の「感覚」を身に付けるように配慮したものである。著者は、制御理論より実際の経験の方が、遙かに重要と考えているからである。

本書は制御教育のための、標準的な教科書を指向したものではない。むしろ教育の課程が設計・シンセシスにはいったときに、副教科書と用いるのがよい。執筆にあたっては、Franklin (Franklin, 1994) と Chen (Chen, 1993) の教科書を参考としており、幾つかの例題につき、係数図法との比較を示している。係数図法は代数的手法であるから、そのための基礎数学は必要であるが、ラプラス変換やマトリックス代数は使わないように配慮している。これは制御に関心のある、化学や生物学専門のエンジニアに過度の負担をかけないためである。

付録では、係数図法の計算に便利な CAD (計算プログラム) と係数図法に特有の線形代数の説明を行った。さらにマクスウェルの「On Governors」の論文を解説付きで訳出した。係数図法は基本的には「On Governors」を発展させたものであること、この論文で感じられるマクスウェルの息吹こそ、新しい制御を開く原動力になると考えるからである。

本書は 50 年にわたって、色々な場面で著者を支えて下さった多数の方々のご援助の賜物であり、それらの方々に厚く感謝の意を表したい。特に若い時代に制御への眼を開いて下さったオハイオ州立大学の Warren, Weimer 先生、三菱電機に在職中にご指導頂いた横須賀正寿・武田英夫・森川洋・三谷尚正の各氏、係数図法の基礎としてのマクスウェルとラウスの業績の意味について貴重な示唆を頂き、研究の方向付けに貴重な助言を頂いたケンブリッジ大学の A.G.J. MacFarlane 教授、また係数図法に興味をもって下さり、色々な機会にご助言を頂いた東京大学堀洋一先生始め電気学会のモーションコントロール委員会の方々、また東海大学での講義・演習を通じて理論の完成に参画された学生諸君と野坂康雄・飯田達彦教授はじめ同僚各位の方々、さらに係数図法に強い興味を持って頂き、その普及に心を砕いて下さった韓国忠北大学の金永喆教授と学生の方々に心からの感謝の意を表したい。

真鍋舜治

2006 年 9 月

(金永喆教授のまえがき)

金永喆

xxxx 年 xx 月

目次

1. 序論
 - 1.1 基本的な考え方
 - 1.2 簡単な設計問題
 - 1.3 システムの表現
 - 1.4 設計の概要
 - 1.5 制御構造
 - 1.6 歴史的背景
 - 1.7 まとめ

2. 係数図法の基礎
 - 2.1 数学的關係
 - 2.2 係数図
 - 2.3 安定条件
 - 2.4 正準伝達関数
 - 2.5 標準形
 - 2.6 ロバスト性への配慮
 - 2.7 まとめ

3. 制御器設計
 - 3.1 設計仕様の解析
 - 3.2 基本的制御構造の決定
 - 3.3 ロバスト性の解釈
 - 3.4 設計の進め方
 - 3.5 速度制御系の設計
 - 3.6 位置制御系の設計
 - 3.7 PID 制御系の設計
 - 3.8 まとめ

4. 係数図の高度利用法
 - 4.1 係数図の因数分解と極配置
 - 4.2 周波数応答

- 4.3 正準伝達関数のステップ応答
- 4.5 分子多項式の影響
- 4.6 感度特性とロバスト性解析
- 4.7 二乗係数図
- 4.8 係数図の同定設計問題への応用
- 4.9 まとめ

- 5. 複雑な設計問題
 - 5.1 係数成形法による設計
 - 5.2 低価格倒立振り子
 - 5.3 二慣性系
 - 5.4 人工衛星の姿勢制御、振動系
 - 5.5 ACC ベンチマーク問題
 - 5.6 高次系
 - 5.7 非最小位相零、不安定極をもつ系の制御
 - 5.8 まとめ

- 6. 安定性
 - 6.1 安定条件の初等的導出
 - 6.2 ラウス安定条件の物理的解釈
 - 6.3 安定論
 - 6.3.1 クレーマレ・レオンハード・ミハイロフ の安定条件
 - 6.3.2 ラウスの安定条件
 - 6.3.3 ナイキストの安定条件
 - 6.3.4 リアプノフの安定条件
 - 6.4 リパトフの安定・不安定十分条件
 - 6.4.1 安定条件
 - 6.4.2 不安定十分条件の証明
 - 6.4.3 安定十分条件の証明
 - 6.5 まとめ

- 7. 他の設計手法との比較
 - 7.1 設計手法の分類

- 7.2 PID 制御
- 7.3 周波数応答法
- 7.4 根軌跡法
- 7.5. 極配置法
- 7.6 最適制御、LQR
- 7.7 最適制御、LQG
- 7.8 ロバスト制御、H-inf
- 7.9 まとめ

8. 模型設計の実際

- 8.1 デジタル制御器への配慮
- 8.2 位置制御モデル
- 8.3 低価格倒立振子モデル

付録 A

CDM-CAD (係数図法設計プログラム)

付録 B

線形代数

付録 C

On Governors

References

- Bode, H. W. (1945). *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, Van Nostrand, New York, 1945.
- Bose, N. K., E. I. Jury, and E. Zaheb (1988). "On robust Hurwitz and Schur polynomials," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, no. 12, 1988, pp.1166-1168.
- Brandenburg, G. and S. Brueckel (1960). "The damping optimum and analytical pole assignment approach using double ratios," unpublished, refer to Zaeh (1987).
- Chen, C. T. (1987). "Introduction to the linear algebraic method for control system design," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 7, no.5, 1987, pp. 36-42.
- Chen, C. T. (1993). *Analog and Digital Control System Design: Transfer-function, State-space, and Algebraic Methods*, Saunders College Publishing, 1993
- Chestnut, H and R. W. Mayer (1951). *Servomechanism and Regulating System Design*, vol. 1, chap. 14, John Wiley, 1951.
- Djafaris, T. E. (1995). *Robust Control Design: A polynomial Approach*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- Franklin, C. F., J. D. Powell, and Abbas Emami-Naeini (1994). *Feedback Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley, 1994.
- Fuller, A. T. (1975). *Stability of Motion*, London: Taylor and Francis, 1975
- Graham, D. and R. C. Lathrop (1953). "The synthesis of "optimum" transient response: criteria and standard forms," *AIEE Transactions*, vol. 72, pt. II, pp.273-288, Nov. 1953.
- Hamamci, S.E., I. Kaya, and D. P. Atherton (2001). "Smith predictor design by CDM," *European Control Conference*, Sept. 4-7, 2001, Porto, Portugal, pp. 2365-2369.
- Hamamci. S. E., M. Koksal, and S. Manabe (2002). "Robust position control of a RADAR antenna with the coefficient diagram method," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TM8-3, pp. 1785-1790.

- Hamamci, S. E., M. Koksak, and S. Manabe (2002). "On the control of some nonlinear systems with the coefficient diagram method," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TM8-4, pp. 1791-1796.
- Hara, S. and Y. Hori. "MATLAB base system for CDM and design example of vibration suppression controller for 2-inertia system," *3rd ASCC*, July 3-7, 2000, Shanghai, TD-9-6, pp. 2085-2090.
- Hirokawa, R., K. Sato and S. Manabe (2001). "Autopilot design for a missile with reaction-jet using coefficient diagram method," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Aug., 2001, Montreal, Canada, pp. 739-746.
- Hori, Y. (1994). "2-mass system control based on resonance ratio control and Manabe polynomials," *Proc. of First Asian Control Conference*, Tokyo, July 27-30, 1994, vol. 3, pp. III-741-744.
- Hunt, K. J. (1993). *Polynomial Methods in Optimal Control and Filtering*, London: Peter Peregrinus, 1993.
- Hwang, C., J. H. Hwang, and L. F. Hwang (2002). "Design of PID-deadtime control for time-delay systems by coefficient diagram method," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TA1-5, pp. 1178-1182.
- Ikeda, H, K. Kubo, Y. Yano, H. Inami, and Y. Wakamiya (2002). "A new tension control method for hot strip mill based on CDM," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TM8-2, pp. 1780-1784.
- Isarakorn, D., S. Panaudomsup, T. Benjanarasuth, J. Ngamwiwit, and N. Komine (2002). "Application of CDM to PDFF controller for motion control system," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TA1-4, pp. 1173-1177.
- Kailath, T. (1980). *Linear Systems*, pp.306-310, Prentice-Hall, 1980.
- Kessler, C. (1960). "Ein Beitrag zur Theorie mehrschleifiger Regelungen," *Regelungstechnik*, vol. 8, no. 8, pp. 261-266, 1960.
- Kim, D. K and H. S. Kim (2002). "A study of the controller design for pendubot using CDM," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TA1-1, pp. 1155-1160.

- Kim, Y. C. et al. (1998). "Coefficient diagram method: a survey," *13th KACC*, October 15-17, 1998, Pusan, Korea, pp. 772-775.
- Kim, Y. C., T. S. Cho, and H. S. Kim (2000). "Comparative studies of control design method," *3rd ASCC*, July 3-7, 2000, Shanghai, TD-9-2, pp. 2061-2066.
- Kim, Y. C., D. K. Jung and M. J. Hur (2000). "Application of CDM to MIMO systems: control of hot rolling mill," *3rd ASCC*, July 3-7, 2000, Shanghai, TD-9-7, pp. 2091-2096.
- Kim, Y. C. and S. Manabe (2001). "Introduction to coefficient diagram method," *1st IFAC Symposium on System Structure and Control*, Aug. 29-31, 2001, Prague, Czech, A-128.
- Kim, Y. C., L. H. Keel, and P. Bhattacharyya (2003). "Transient response control via characteristic ration assignment," *IEEE Trans. Automat. Contr.*
- Kitamori, T. (1979). "A method of control system design based upon partial knowledge about controlled process," *Transaction of SICE*, vol. 15, no. 4, pp549-555, 1979.
- Kitamori, T. (2001). "Partial model matching method conformable to physical and engineering activities," *1st IFAC Symposium on System Structure and Control*, Aug. 29-31, 2001, Prague, Czech, A-127.
- Komine, N., K. Shibata, T. Benjanarsuth, and J. Ngamwiwit (2002). "Weighting matrices selection of derivative state constrained control by CDM," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TM8-1, pp. 1774-1779.
- Kumpanya, D., S. Panudomsup, T. benjanarasuth, J. Ngamwiwit, and N. Komine (2002). "PI controller designed by CDM for process with dead time," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TA1-3, pp. 1167-1172.
- Kuo, B. C. (1995). *Automatic Control Systems*, Prentice Hall, 1995.
- Lai, Y. G., Y. Y. Lin, and C. Z. Hung (2002). "Control laws comparison via real-time stabilization of two-link inverted pendulum," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TA1-6, pp. 1183-1188.
- Lipatov, A. V. and N. I. Sokolov (1978). "Some sufficient conditions for stability and instability of continuous linear stationary systems," translated from *Automatika i Telemekhanika*, no. 9,

- pp. 30- 37, 1978; in *Automat. Remote Contr.*, vol. 39, pp. 1285-1291, 1979.
- Manabe, S. (1960a). "The non-integer integral and its application to control systems," *Journal of Institute of Electrical Engineers of Japan*, vol. 80, no. 860 (May), 1960, pp. 589-597, (Japanese). *ETJ of Japan*, vol. 6, no. 3/4, 1961, pp. 83-87, (Shorter English version).
- Manabe, S., T. Tsuchiya, and M. Inoue (1981). Zero PID control for bias momentum satellites. *IFAC 8th World Congress*, Kyoto, Japan, August 24-28, 1981, Paper 76.4, pp. XVI-20-25.
- Manabe, S. (1983). "Control theory from the user side," *Japan Society of Mechanical Engineers, Lecture Course*, no. 560, June 23-24, 1983, pp. 31-45.
- Manabe, S. and T. Tsuchiya (1984). Controller design of flexible spacecraft attitude control. *IFAC 9th World Congress*, Budapest, Hungary, July 2-6, 1984, 12.0/A-6, pp.30-35.
- Manabe, S. (1990). "An unified interpretation of classical, optimal, and H-infinity control," *SICE 7th Symposium on Guidance and Control in Aerospace*, Nov. 28-29, 1990, Tokyo, pp. Toku1-10.
- Manabe, S. (1991). "An unified interpretation of classical, optimal, and H-infinity control," *Journal of SICE*, vol. 30, no. 10, 1991, pp. 941-946.
- Manabe, S. (1994a). "A low-cost inverted pendulum system for control education," *IFAC 3rd Symposium on Advances in Control Education*, Tokyo, August 1-2, 1994, pp. 21-24.
- Manabe, S. (1994b). "Coefficient diagram method as applied to the attitude control of controlled-bias-momentum satellite," *13th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, Sept. 12-16, 1994, Palo Alto, CA, pp. 322-327.
- Manabe, S. (1996). "A solution of the ACC benchmark problem by coefficient diagram method," *6-th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics*, Sagami-hara, ISAS, July 15-16, 1998, pp. 237-246.
- Manabe, S. (1997). "The application of coefficient diagram method to the ACC benchmark problem," *2nd Asian Control Conference*, July 22-25, 1997, Seoul, pp. II-135-138.
- Manabe, S. (1998a). "Analytical weight selection for LQ design," *8-th Workshop on*

- Astrodynamics and Flight Mechanics*, Sagamihara, ISAS, July 23-24, 1998, pp. 237-246.
- Manabe, S. (1998b). "The coefficient diagram method," *14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, Aug. 24-28, 1998, Seoul, Korea, pp. 199-210.
- Manabe, S. (1999). "Sufficient condition for stability and instability by Lipatov and its application to the coefficient diagram method," *9-th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics*, Sagamihara, ISAS, July 22-23, 1999, pp. 440-449.
- Manabe, S. and Y. C. Kim (2000). "Recent development of coefficient diagram method," *3rd ASCC*, July 3-7, 2000, Shanghai, TD-9-1, pp. 2055-2060.
- Manabe, S. (2001). "Application of coefficient diagram method to dual-control-surface missile," *15th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, Sept. 2-7, 2001, Bologna, Italy, pp. 499-504.
- Manabe, S. (2001). "Diophantine equations in coefficient diagram method", *1st IFAC Symposium on System Structure and Control*, Aug. 29-31, 2001, Prague, Czech, A-130.
- Manabe, S. (2002a). "Application of coefficient diagram method to MIMO design in aerospace," *15th IFAC World Congress*, July 21-26, 2002, Barcelona, Spain, T-Tu-M062.
- Manabe, S. (2002b). "Brief tutorial and survey of coefficient diagram method," *4th Asian Control Conference*, September 25-27, 2002, Singapore, TA1-2, pp. 1161-1166.
- Manabe, S. (2002c). A suggestion of fractional-order controller for flexible spacecraft attitude control., *Nonlinear Dynamics*, vol. 29, nos. 1-4, July 2002, pp. 251-268.
- Manabe, S. (2003). "Early Development of Fractional Order Control," *ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences*, Chicago, Illinois, USA, September 2-6, 2003, DETC2003/VIB-48370.
- Manabe, S. (2004a). "Comparison of H-inf and coefficient diagram method in aerospace," *16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, June 14-18, Saint-Petersburg, Russia, pp. 394-399.

- Manabe, S. (2004b). "Design of fractional order control system under strong influence of saturation," *First IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Application*, July 19-21, 2004, Bordeaux, France, pp. 676-681.
- MSS (2000). Mitsubishi Space Software Home Page.
http://www.mss.co.jp/techinfo/cdmcad/cdm_progam.htm
- Maxwell, J. C. (1868). "On governors," *Proc. R. Soc. London*, vol. 16, pp. 270-283, 1868.
- Naslin, P. (1968). *Essentials of Optimal Control*, pp. 30-51, Illifebook, 1968
- Pang, G. K. H.(2000). "Coefficient diagram method toolbox for use with MATLAB," *3rd ASCC*, July 3-7, 2000, Shanghai, TD-9-5, pp. 2079-2084.
- Photong, P., D. Kampanaya, N. Komine, and J. Ngamwiwit (2000). "Application of CDM to PIDA control," *3rd ASCC*, July 3-7, 2000, Shanghai, TD-9-4, pp. 2073-2078.
- Routh, E. J. (1905). *Dynamics of a System Rigid Bodies*, London: MacMillan, 1905.
- Takeda, H. and S. Manabe (1959). "The effects of mechanical resonance systems on control loop." *Journal of Institute of Electrical Engineers of Japan*, vol.79, no. 848 (May), 1959, pp. 611-618, (Japanese).
- Takeda, H., S. Manabe, S. Sakagami, and I. Hosono (1961). "Control equipment for transonic wind tunnel drives," *Mitsubishi Denki Giho (Mitsubishi Electric Technical Journal)*, vol. 35, no. 6, June 1961, pp. 1-11, (Japanese).
- Tanaka, Y and M. Ashikaga (1992a). "A low-sensitive robust a gas turbine," *Transaction of SICE*, vol. 28, no. 2, 1992, pp. 255-263.
- Tanaka, Y (1992b). " α parameter for robust control design," *Transaction of SICE*, vol. 28, no. 12, 1992, pp. 1501-1503.
- Terasaki, R. M. (1967). Dual reaction wheel control of spacecraft pointing. *Symposium on Attitude Stabilization and Control of Dual-Spin Spacecraft*, SAMSO and Aerospace Corporation, El Segundo, California, August 1967, pp.185-196.
- Tesfaye, T. and Y. Ochiai (2000). "Application of coefficient diagram method to motion control," *3rd ASCC*, July 3-7, 2000, Shanghai, TD-9-3, pp. 2067-2072.

Tustin, A, et al. (1958). "Position control of massive objects," *Proc. IEE*, vol.105, part C, Supplement no. 1, Nov. 1958, pp.1-57.

Weinberg, L. (1962). *Network Analysis and Synthesis*, Macgraw-Hill, 1962.

Wolovich, W. A. (1974). *Linear Multivariable Systems*, Springer-Verlag, 1974.

Wolovich, W. A. (1994). *Automatic Control Systems: Basic Analysis and Design*, Holt, Rinehart and Winston, 1994.

Zaeh, M. and G. Brandenburg (1987). "Das erweiterte Daempfungsoptimum," *Automatisierungstechnik*, vol. 35, no. 7, 1987, pp. 257-283.