展 望

ロボット制御理論概論

On Robot Control Theory

山 北 昌 毅* *東京工業大学

Masaki Yamakita* *Tokyo Tech.

1. はじめに

1980年代以前には、ロボットマニピュレータの制御は1入力1出力のサーボ系設計問題として扱われ、特にロボット制御理論という特別な制御分野は存在していなかったように思われる。それ以後モデルを積極的に導入した多変数制御系の制御系設計理論がロボットの制御に持ち込まれ、さらに扱うべきロボットの多様化に従いロボット制御理論と呼ぶべきものが発達してきた。本展望では、ロボット制御理論の変遷を概観し、今後のロボット制御理論が進むと考えられる方向を展望してみたい。ただし、FAN (Fuzzy, AI, Neural Net) 技術を用いた制御系設計手法や多指ハンドの操り問題などに触れないことを御容赦いただきたい。

2. ロボット制御理論の分類

(1) 一般の制御理論をロボット用に拡張したもの

- コントローラベースド制御
- モデルベースド制御

(2) 主にロボットシステム用に開発され発展しているもの

- 繰り返し学習制御
- ビジュアルフィードバック系の制御
- 歩行ロボット用制御
- マルチエージェント制御
- ネットワークロボット用制御
- 劣駆動系の技能制御

以下では、それぞれの項目について簡単に記述し、今後のロボット制御理論に必要とされることについて考えてみたい。

3. 一般の制御理論をロボット用に拡張したもの

1980年代の初期のロボット制御理論はロボットマニピュレータの制御用として発展してきたが、それらは次のように、コントローラの構造を固定して、その条件下にパラメータをチューニングすることにより所望の性能を得る、コン

トローラベースド制御と、モデルや不確定性を正確に記述することにより、評価指標を最適することでコントローラを設計するモデルベースド制御に分類することができると考えられる。

3.1 コントローラベースド制御

コントローラベースド制御のもっとも典型的なものは、現在でも産業用のコントローラとしてもっともよく用いられているPID制御器であり、ロボットの制御は各関節に取り付けられているアクチュエータを制御する関節独立制御であった。これらの制御では、モータ駆動のロボットマニピュレータの場合、対象の特性を以下のようなものと仮定して制御を行うものである。

$$(J_i + n^2 J_m) \ddot{q}_i + n^2 \mu_m \dot{q}_i = nKv - f_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (1)$$

ただし、 q_i は i 番目の関節の値であり、 J_i はリンク i の慣性モーメント、 J_m 、 μ_m 、 K はそれぞれ駆動モータの慣性モーメント、粘性、トルク定数で、 n はギヤ比（一般に数十の値）であり $f_i(\cdot)$ は他のリンクなどからの干渉項である。そこでは、各関節の干渉は外乱として扱われ、主にPIDパラメータのチューニングによりコントローラが設計されていた。この手法をベースにした場合、ロボット制御理論として考えられるものは、PID制御により構成される1入力1出力の速度サーボ系に対する参照軌道の生成法であり、その最初のもはWhitneyによる分解速度制御であると考えられる[1]。PID制御系は現在でももっとも実用されていると思われるが、局所漸近安定になるPIDパラメータのチューニングに関しては文献[5]に詳しい。また、PID制御系で軌道追従系を構成する場合の一樣有局収束性を保証した制御系設計はWenら[3]によって与えられている。また、モータの特性を考慮したPID制御系の安定性はGuzmanら[4]により議論されている。さらに、ジョイントモードでの制御については文献[5]によくまとめられている。もう一つ、現在でも盛んに用いられているものに外乱オブザーバをベースにした手法がある。外乱オブザーバの応用に関しては、本誌に以前解説があるので、ここでは詳しくは触れない[6]。

原稿受付 2009年2月2日

キーワード: Control Theory, Modeling, Passivity, Adaptive Control, Limit Cycle

*〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1

*Meguro-ku, Tokyo

3.2 モデルベースド制御

モデルベースド制御は、基本的にはロボットの運動方程式が以下に示すような形で記述されることに基づく制御である。

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = E\tau \quad (2)$$

ただし、 n, m はそれぞれリンク数、アクチュエータ数で、 $q \in R^n$ は一般化座標ベクトル、 τ はそれに双対な一般化力であり、 $D(q)\ddot{q}$ は慣性項、 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ は中心・コリオリ力項、 $G(q)$ は重力（ポテンシャル）項である。 E は適当な定数ゲイン行列で、 $\tau(t) \in R^m$ で、 $n = m$ の場合フルアクチュエートなシステム、 $m < n$ の場合劣駆動系と呼ばれる。メカニカルシステムのモデルベース制御で使われる、モデルの性質は次のものである。この運動方程式に関する性質をまとめると次のようになる [2] [7]。

[性質 1] $D(q)$ は正定対称行列であり、次の不等式を満足する正の定数 D_m が存在する。

$$0 < D_m \leq \Delta(D(q)) \quad (3)$$

特に、関節がすべて回転ジョイントである場合には次の不等式を満足する正の定数 D_M も存在する。

$$\bar{\lambda}(D(q)) \leq D_M < \infty \quad (4)$$

ただし、 $\Delta(D)$ は行列 D の最小固有値、 $\bar{\lambda}(D)$ は最大固有値を表す。

[性質 2] $C(q, \dot{q})$ は $\dot{q}$ に関して有界、つまり

$$\|C(q, \dot{q})\| \leq C_M \|\dot{q}\| \quad (5)$$

[性質 3] $C(q, \cdot)$ は次の性質を満たす。

$$C(q, x)y = C(q, y)x \quad (6)$$

$$C(q, x + \alpha y) = C(q, x) + \alpha C(q, y) \quad (7)$$

[性質 4] $K := \dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})$ は歪対称、つまり

$$K + K^T = 0 \text{ または } x^T K x = 0 \text{ for } \forall x \quad (8)$$

[性質 5] 重力項 $G(q)$ は有界な q に対して有界となる。

[性質 6] 適当なパラメータベクトル a を選択することにより、式 (2) の左辺は、既知関数を要素とする行列 Y と a との積で表現することができる。つまり、

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q})a = E\tau \quad (9)$$

モデルベースド制御系は以下に述べるように、上記の運動方程式を基本として、システムから得られる情報量が多い場合から、少ない場合でも所望の制御性能が得られるように発展してきた。ロボットマニピュレータのモデルベースド制御で特筆すべきものは Takegaki と Arimoto らによる重力補償付き PD 制御である [8]。この制御則では、参照軌道が一定の場合に、各関節の PD 制御と重力項の補償だけで大域的な安定性が得られることを示したもので画期的なものであったとともに、その収束証明で用いられたシステムの受動性は後の制御アルゴリズム開発に大きな影響を与えた。受動性を利用した時変参照軌道への大域的軌道追従制御は Paden らによって与えられている [10]。一方、モデルの情報を最大限に利用して、システムを関節座標空間、または作業座標空間でシステムを入力状態線形化して、線形制御理論の設計法を用いるものが計算トルク法や分解加速度制御である [9]。これらの制御では、システム状態、つまり関節座標とその時間微分がすべて観測可能という条件が付いていたが、関節座標値のみ観測される場合のいわゆる出力フィードバック系については Berghuis らが提案している [20]。文献 [20] では、コントローラとオブザーバ（状態観測器）をそれぞれ受動性をもつものと前提として、閉ループ系が安定となるように修正する形で、偏差系が局所指数安定となる軌道追従制御のための出力フィードバックコントローラが与えられている。また、実際のロボットでは、関節にハーモニックギアを用いているものが多いが、そのような場合ジョイント部でのフレキシビリティが問題となる。そのような場合に対する制御系設計の手法は文献 [14] に与えられている。

次いで、システムの動的パラメータが未知の場合の制御系としてメカニカルシステムの適応制御系が提案された。これは、運動方程式が [性質 6] をもつことを利用したもので、一般の LTI システムの適応制御のもっともシンプルなものとなっている。このように表現されるシステムに対して、対象のシステムの出力を位置と速度偏差の和として考えることにより、局所的に強正実ブロックとみなし、積分型パラメータ調整則により目標の軌道追従を行える制御則が Slotine らによって与えられた。パラメータ適応則と制御則を加えた等価的な閉ループ系は図 1 となる [17]。

図 1 古典的な適応制御系の構成

4. 主にロボットシステム向けに開発され発展しているもの

前章で見た制御則は、ロボットマニピュレータを非線形多変数としてとらえて、従来の制御理論をその系に適用できるように拡張したものである。この章では、それとは異なり、主にロボットシステムのために開発し、さらに、それを一般化した制御について見ていくことにする。

4.1 繰り返し学習制御

初期の産業用ロボットの多くは停止位置から同じ軌道を繰り返し動作することが要求された。そのため、初期状態を常に一定と仮定して、動作を繰り返すうちにシステムの追従特性を向上させる制御として繰り返し学習制御が提案され、一般のシステムにも適用できるように拡張された。繰り返し学習制御系の一般的な構成は図2のようなものである。この繰り返し学習制御は日本の研究者により提案され、その発展には Arimoto らの大きな貢献があった [25] [26]。

4.2 ビジュアルフィードバック系の制御

一般のフィードバック系において、センサは非常に重要な構成要素であるが、インテリジェントなロボットシステムにおいては、センサはなくてはならない存在である。特に、視覚情報は人間の脳においてもその受容野が大きいように、その重要性は明らかである。視覚情報を扱う画像処理はその情報量の多さや扱う情報の複雑さから、画像処理自身だけで非常に大きな研究分野が存在し、その処理の理論的並びに実際の応用が進展してきている。ロボットシステムにおけるビジュアルフィードバックでは、その運動制御部と視覚処理部が独立して開発され、それらが直列結合的に組み合わされて用いられている場合がほとんどである。それはモジュラリティの観点からは好ましいものと考えられる一方、全体のシステムの安定性を証明することを難しくしていた面がある。近年、Kawai や Fujita らによって、視覚系を含めた安定性やノミナルパフォーマンスの解析が行われ、制御分野では高い評価が与えられている [31] [32]。ただし、構成が少し複雑で、複雑な動作をする対象には追従できないなどの問題がある。内部モデルの導入や、完全

図2 繰り返し学習制御系の構造

微分器のアイデアの導入など、今後の発展に期待したい。

4.3 歩行ロボット用制御

ロボットシステムの開発の場合、必ずしも安定性証明が得られる制御系が実際の応用面においてより有用でない場合がある。その典型的な例が歩行ロボットである。特に、2足歩行の歩行制御はその典型であると考えられる。2足歩行の研究の歴史は長いですが、Honda が 1996 年 12 月に発表した P2 が社会に与えた影響としては最も大きなものであると思われる。Honda の制御では、ZMP という指標が取り入れられ、巧妙に姿勢の制御が行われている。しかし、歩行をリミットサイクルとしてとらえたときに、その理論的な安定性は証明されてはいない。一度システムとして構成されてしまえば、特定の軌道に対する安定性は従来の解析手法により示すことができるが、安定性を保証した制御系の構成法が存在していなかった。そのような制御系設計理論の弱点を克服したものが Grizzle らの一連の研究である [34] ~ [36]。彼らの研究では、有限時間整定という実機では難しい仮定を含んでいるものの、1 自由度の簡単なダイナミクスの安定性を保証するだけで、安定性を保証した 2 足歩行の制御系が構成可能であることを示した点で画期的であった。しかしながら、これらの理論が実際の 2 足歩行ロボットの発展にあまり寄与していないことは残念である。その理由には、理論で取り扱うシステムのモデルと実際のロボットシステムの複雑さのギャップや、理論の仮定している条件が厳しいことがあり、理論、システム構成の両方からの歩み寄りが期待される。また、本特集にも関連の解説があるが、モデルを直接的に用いた非線形系システムの制御系の構成法である、非線形モデル予測制御がメカニカルシステムにおいても有効であることが実証されるつつある。この手法を用いた、実用的で安定性を保証した制御系設計理論が生まれることが期待される [37]。

4.4 ネットワークロボット用制御

ネットワークを用いたロボット制御の典型的な例はテレオペレーションを伴うロボットシステムである。そのなかでも、安定性が特に問題となるのは、遠隔に置かれたサブシステムが互いにフィードバック系を構成する場合で、テレオペレーションの場合には、バイラテラル・マスタ・スレーブシステムがその典型的なものである。バイラテラル・マスタ・スレーブシステムでは、位置または速度がマスターシステム側から送られ、スレーブシステムが接触力情報を返送するという形でフィードバック系を構成しており、通信路のむだ時間によりシステムが簡単に不安定になることが知られていた。この問題を簡単な形で解決したのが Spong らの論文である [38]。彼らの手法は、回路網を仮想的に受動化するというアイデアで構成されていた。それ以後、インターネットの発達とともに、有線・無線のネットワークを積極的に利用したネットワークロボットシステムが盛ん

図3 完全グラフを構成するネットワークロボットの例

に研究されている．また，近年ネットワークに流れる情報を極力少なくした場合の符号化について効率的なアルゴリズムが Azuma らにより提案されており，今後のロボットシステムへの応用が楽しみである [41] [42] ．

4.5 マルチエージェントシステム制御

ネットワークロボティクスの発展したものがマルチエージェントシステムと考えられるが，その分野での重要な問題がシステム間の同期や，フォーメーションの実現である．Spong らは図3のような完全グラフを構成しているマルチエージェントの同期運動制御問題を考え，システムの受動化の観点から簡単な同期制御アルゴリズムを提案している [40] ．マルチエージェントの協調やフォーメーション制御は制御理論の分野でも関心が高まっており，文献 [43] のような特集号も組まれている．また，Hybrid システムの解析や設計法が発展してきており，それらの応用も今後期待されるところである．特に，文献 [44] [45] のようなダイナミクスに切り替えを伴うようなシステムに対する受動性の理論はメカニカルシステムの制御にとって応用しやすいものであると考える．

4.6 劣駆動系の技能制御

ロボットシステムを含む，通常のメカニカルシステムでは，自由度の数とアクチュエータの数は一般に同じである．これに対して，自由度の数よりもアクチュエータのシステムの数が多いものを劣駆動系と呼ぶ．動かさなければならない自由度よりもアクチュエータの数が多いシステムは一見有用性がないように思われるが，我々が日常使っている自動車は劣駆動系の典型であり，非常に便利なシステムである．しかし，自動車を運転するためには運転免許証が必要であり，その免許証を得るには通常教習所に通って，運転技能をマスターしなければならない．一方，我々は普段2本の足を使って巧みに歩行をしているが，歩行のための教習を行うことはない．この違いは，前者が劣駆動系であるのに対して，後者はそうではないことに起因していると考えることができる．一般に，劣駆動系は操ること，つまり，制御することが難しいシステムである．劣駆動系の制御は，非ホロノミック系の制御として近年盛んに研究されてきたが，自動車に匹敵するようなシステムは残念ながら開発されていない．しかし，文献 [47] のようなメカニズムも提案されており，理論に基づく新しい有用なメカニズムの開発

が期待される．劣駆動系の制御に関しては，文献 [46] が今もなお最適な入門書である．

5. おわりに

ロボット工学が成立しつつあった黎明期においては，制御理論はその当時までに培ってきた理論的並びに実用的側面の下，ロボット工学の発達に大きく貢献してきた．しかし，産業ロボットなどの実用的なロボットシステムに対して，ロボット制御理論が果たした役割はあまり大きいものとは言えない．また，ロボットシステムの発展が急速になった現在，制御理論が十分それらのシステムの解析や設計に貢献しているとは言い難い．しかし，現在機械学習の分野では，従来の強化学習の手法が，ADP (Approximate Dynamic Programming) として統一的に議論され注目が集まっている [48] ~ [50] ．ロボット制御理論が貢献できる一つの方向ではないかと考えている．特に，モデルを用いない制御手法に対して，モデルを用いた厳密な安定性の証明並びにそれを基礎としたアルゴリズムの改良が与えられるのではないかと考えている．

現状ではロボットシステム設計の諸々の問題から，一般の制御問題を定式化しそれを解くことによって制御理論研究者が恩恵を受けている状況ではないだろうか．つまり，ロボット制御の現場は制御理論の研究者にとっては，制御問題のゆりかごの一つとなっている．近い将来，そこから生まれ育ったロボット制御理論が，ロボットシステムに対するシステムティックな最適化，ロバスト化の手法を提供することによって，さらにゆりかごを快適にすることに貢献することを期待している．

謝 辞 本特集に当たって，ロボット制御理論を展望として執筆する機会を与えていただいた本特集編集者の方々に礼申し上げます．

参 考 文 献

- [1] D.E. Whitney: "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses," IEEE Trans. on Man-Machine Systems, MMS-10, pp.47-53, 1969.
- [2] R. Kelly: "A tuning procedure for stable PID control of robot manipulators," Robotica, vol.13, pp.141-148, 1995.
- [3] J.T. Wen and S. Murphy: "PID control for robot manipulator," CIRSSE and document #54 (Rensselaer Polytechnic Institute) May, 1990.
- [4] V.M. H-Guzman, V. Santibanez and V. Carrillo: "PID Controllers for Robots Equipped with Brushed DC-Motors Revisited," Proc. of IFAC Congress 2008, 2008.
- [5] R. Kelly, V. Santibanez and A. Loria: "Control of robot manipulators in joint space," Springer, London, 2005.
- [6] 大西: "外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール," 日本ロボット学会誌, vol.11, no.4, pp.486-493, 1993.
- [7] M. Zribi and S. Ahmad: "Robust Adaptive Control of Multiple Robots in Cooperative Motion Using σ Modification," IEEE Int. Conf. on R. & A., pp.2160-2165, 1991.
- [8] M. Takegaki and S. Arimoto: "A new feedback method for dynamic control of manipulators," Trnas. ASME, J. of Dynamic

- Sytems, Measurement, and Control, vol.103, pp.119–125, 1981.
- [9] J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R.P.C. Paul: “On-line computational scheme for mechanical manipulators,” ASME J. of Dynamic, System, Measurement, and Control, vol.102, no.2, pp.69–76, 1980.
 - [10] B. Paden and R. Panja: “Globally asymptotically stable PD+controller for robot manipulators,” Int. J. of Control, vol.47, pp.1697–1712, 1988.
 - [11] P.Y. Li and R. Horowitz: “Passive velocity field control of mechanical manipulators,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Autoation, pp.2764–2770, 1995.
 - [12] P.Y. Li and R. Horowitz: “Passive velocity field control of mechanical manipulator,” Tans. on TR, vol.15, no.4, pp.751–763, 1999.
 - [13] H. Berghuis and H. Nijmeijer: “A Passivity Approach to Controller-Observer Design for Robots,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.9, no.6, pp.740–752, 1993.
 - [14] R. Ortega, R. Kelly and A.Loria: “A Class of Output Feedback Globally Stabilizing Controllers for Flexible Joints Robots,” IEEE Trans. on AC, vol.11, no.5, pp.766–770, 1995.
 - [15] J.J. Craig: “Adaptive Control of Robot Manipulators,” Addison-Wesley, 1988.
 - [16] H. Seraji: “Adaptive Independent Joint Control of Manipulators: Theory and Experiment,” IEEE Int. Conf. on R. & A., pp.854–861, 1988.
 - [17] J.J. Slotine and W. Li: “On the Adaptive Control of Robot Manipulators,” Int. Jounal on Robotics Research, vol.6, pp.49–59, 1987.
 - [18] G. Niemeyer and J.J. Slotine: “Computational Algorithms for Adaptive Computation,” IEEE CDC, pp.566–571, 1989.
 - [19] M.W. Walker: “Adaptive Control of Manipulators Containing Closed Kinematic Loops,” IEEE Trans. on R. & A., vol.6, no.1, pp.10–19, 1990.
 - [20] H. Berghuis, R. Ortega and H. Nijmeijer: “A Robust Adaptive Controller for Robot Manipulators,” Int. Conf. on R. & A., pp.1876–1881, 1992.
 - [21] P.R. Pagilla and M. Tomizuka: “An adaptive output feedback controller for robot arms: stability and experiments,” Automatica, vol.37, pp.983–995, 2001.
 - [22] C. Liu, C.C. Cheah and J.-J.E. Slotine: “Adaptive Task-Space Regulation of Rigid-Link Flexible-Joint Robots with Uncertain Kinematics,” IFAC Automatica, 2008.
 - [23] M. Yamakita, J.H. Suh and K. Hashiba: “Decentralized PVFC for Cooperative Mobile Robots,” Trans. IEE of Japan, vol.120-C, no.10, pp.1485–1491, 2000.
 - [24] 申, 田村: “ロボットシステムのロバスト追従制御”, 計測自動制御学会論文誌, vol.35, no.3, pp.326–332, 1999.
 - [25] S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki: “Bettering operation of robotics,” J. of Robotic Systems, vol.1, no.2, pp.123–140, 1984.
 - [26] 古田, 山北: “線形多変数システムに対する学習制御系設計”, 計測自動制御学会論文誌, vol.22, no.12, pp.6–13, 1986.
 - [27] G. Heininger et al.: “Stability of Learning Control with Disturbances and Uncertain Initial Conditions,” IEEE Trnas. on AC, vol.37, no.1, pp.110–114, 1992.
 - [28] Z. Bein and J.X. Xu: Iterative Learning Control-Analysis, Design Integration and Applications. Kluwer, 1998.
 - [29] M. Yamakita and K. Furuta: “Iterative generation of virtual reference for a manipulator,” Robotica, vol.9, pp.71–80, 1991.
 - [30] K. Fujimoto and T. Sugie: “Iterative Learning Control of Hamiltonian Systems: I/O Based Optimal Control Approach,” IEEE Trans. on AC, vol.48, no.10, pp.1756–1761, 2003.
 - [31] H. Kawai and M. Fujita: “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Traget Tracking: Stability and L_2 -gain Performance Analysis,” Proc. of ACC04, 2004.
 - [32] H. Kawai, M. Fujita and M. Spong: “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Traget Tracking: Stability and L_2 -gain Performance Analysis,” IEEE Trans. on control systems technology, vol.15, no.1, 2007.
 - [33] M. Yamakita et al.: “Impedance Control of Robot Manipulators Using Euler Parameters,” Proc. CDC96, 2006.
 - [34] J.W. Grizzle et al.: “Asymptotically stable walking for biped robots: analysis via systems with impulse effects,” Trans. on AC, vol.46, pp.51–64, 2001.
 - [35] E.R. Westervelt et al.: “Hybird zero dynamics of planar biped walkers,” Trans. on AC, vol.48, pp.42–56, 2003.
 - [36] J.W. Grizzle et al.: “Nonlinear control of mechanical systems with an unactuated cycleic variable,” Trans. on AC, vol.50, pp.559–576, 2005.
 - [37] T. Ohtsuka: “Continuation/GMRES method for fast computation of nonlinear receding horizon control. Automatica,” vol.40, no.4, pp.563–574, 2004.
 - [38] R.J. Anderson and M.W. Spong: “Bilateral control of teleoperators with time delay,” IEEE Trans. on Automatic Control, pp.494–501, 1989.
 - [39] M. Yamakita, M. Negi and K. Ito: “Tele-Bilateral Impedance Control for Master-Slave Systems,” Trans. of the SICE, vol.35, no.3, pp.370–377, 1999.
 - [40] M.W. Spong and N. Chopra: “Synchronization of Networked Lagrangian Systems,” Proc. of 3rd IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Method for Nonliner Control, 2006.
 - [41] S. Azuma and T. Sugie: “Optimal Dynamic Quantizers for Discrete-Valued Input Control,” IEEE Trans. on AC, vol.53, no.9, pp.2064–2075, 2008.
 - [42] 南, 東, 杉江: “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.
 - [43] 特集「協調とフォーメーションの制御理論」, 計測と制御, vol.46, no.11, 2007.
 - [44] M. Zefran et al.: “A notion of passivity for hybrid systems,” Proc. of CDC 2001, 2001.
 - [45] J. Zhao and D.J. Hill: “Passivity and stability of switched systems: A multiple storage function method,” systems & control letters, 2008.
 - [46] 美多: 非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御—. 昭晃堂, 2000.
 - [47] M. Ishikawa and Y. Kinouchi: “Modeling and control of sperical ultrasonic motor based on nonholonomic mechanics,” Proc. of IROS2008, 2008.
 - [48] F.L. Lewis et al.: “Special issue on adaptive dynamic programming and reinforcement learning in feedback control,” IEEE Trans. on SMC, vol.38, no.4, pp.913–917, 2008.
 - [49] W.B. Powell: Approximate Dynamic Programming. Wiley, 2007.
 - [50] D. Vrabie and F.L. Lewis: “Adaptive Optimal Control Algorithm for Continuous-Time Nonlinear Systems Based on Policy Iteration,” Proc. of CDC08, 2008.

山北昌毅 (Masaki Yamakita)

1989 年東京工業大学制御工学専攻修士 (工学博士)。1989 年同制御工科学大学助手, 1993 年豊橋技術科学大学情報工学系講師, 1995 年より東京工業大学制御システム工学科助教授。2000 年より同大学院機械制御システム専攻助教授 (2007 年より准教授)。ロボット工学, 適応学習制御, 非線形ロバスト制御などの研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)