展 望

米国における次世代産業用ロボットの研究開発

Advanced Research and Development of Industrial Robots in the United States

浅 田 春比古* 梁 富 好* *マサチューセッツ工科大学機械工学科情報化機械システム研究センター

Haruhiko Asada* and Boo-Ho Yang* *Center for Information-Driven Mechanical Systems Dept. of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology

1. は じ め に

「米国製造業の復権」と呼ぶべき現象が最近身近に見られるようになった。半導体の生産量で再び日本を追い越し、世界一の座に復帰したことや、高品質できわめて低コストの自動車ビッグスリーから作り出され、日本製の大衆車市場を席巻していることなど、米国民にとって溜飲のさがる話題も多い。着実な景気の拡大に支えられ、ようやく設備投資も増え、ロボット産業をめぐるビジネス環境も著しく改善された。たとえばゼネラルモーターズ一社だけでも2,000台のロボットを1994年度中に配備する計画が進められており、米国はえぬきのロボットメーカーであるアダプトテクノロジー社でも昨年について今年も大幅な売り上げ増が見込まれている。米国ロボット工業会(Robotic Industries Association)によると、94年1月～6月の半年間で、4,355台のロボットが売られ、売上高も前年上期の25%増の3億8,400万ドルに達している。このように最近米国の製造業、特にロボットを含めた生産設備関係の業界では、積極的な事業展開、技術開発が見られるようになった。そこで本文では、最近の米国産業界におけるロボット技術開発のポイントをまとめるとともに、それをふまえて、次世代のロボット技術をうらない、関連する研究開発動向を紹介する。

2. 次世代ロボット技術開発のポイント

米国における産業用ロボットの歴史は長い。60年代初頭のユニメイトやバーサトラン[1]に始まって、最近のトランジションズ・リサーチ社の移動ロボットまで、様々な変遷を辿ってきている。特に80年代中期からの挫折、ロボット産業の衰退は多くの教訓を残した。大量のロボットが工場に導入されようとしても、労働組合との関係でスムーズに受け入れられなかったり、ロボットの操作やメンテ

ナンスが複雑なため、作業員の教育と訓練に時間と労力がかかり過ぎたり、ロボットを使いこなす生産技術が定着しないなどの問題が生じた。また自動車産業などでは、ロボットを導入したために、ラインのフレキシビリティが低下し、ひいてはモデルチェンジが困難になり、競争力が失われたことなどが知られている。このような80年代の失敗を教訓として、90年代のロボット技術は地道に着実な成果を挙げている。また、今後の技術開発と関連分野の環境整備が広く進められており、特に米国が得意とする先端技術分野と関連させ、広い意味でのロボット技術を発展させる戦略が立てられている。

技術革新の重要項目をまとめると次のように整理される。

2.1 ソフトウェアの充実とヒューマン・マシン
インタフェースの改善

ソフトウェアは今や米国の最も得意とする重要産業であり、国際競争力も高い。このソフトウェア技術を、ロボットを含め広く生産技術に浸透させ、技術革新の核にしたいというねらいがある。ロボットをはじめ加工機、検査機など種々の生産関連機器では、年々ソフトウェアの価値の占める割合が増えており、ソフトウェアの充実は重要な課題になっている。なかでも、機器の使いやすさを高め、特別な教育訓練を受けなくても、誰でも簡単に使えるシステムができれば、労使関係の観点からもプラス面が大きい。ユーザーフレンドリーなシステムの構築、進んだヒューマン・マシンインタフェースの導入[2]をはじめ最近の人間情報処理技術の応用等が将来的な課題とされている。

2.2 情報ネットワークとアジャイル・マニュファクチャリング(Agile Manufacturing)

ゴア副大統領の推進するインフォメーション・データ・ハイウェイ計画は、今後米国の科学技術政策の根幹を形成する重要なもので、ロボットをはじめ生産技術の分野も直接的な影響を受けている。これに呼応して生産技術の分野では、近年情報ネットワークを駆使することを前提とした新しいコンセプトが提唱されている。特にコンカレント・エンジニアリング(Concurrent Engineering)とアジ

原稿受付 1994年9月13日

キーワード: Agile Manufacturing, Learning Control, Skill Acquisition, High Speed Assembly

*Cambridge, MA 02139, USA

ヤイル・マニファクチュアリングは各地に散らばった設計開発チームや生産技術部門、営業部門、研究組織さらには部品業者、加工業者までも、情報ネットワークで高度に結び付ける方法であり、注目を集めている。ロボットや加工、検査機器についても、ネットワークとの結合、プロトコールが重要視され、オープンアーキテクチャーをどのように進めて行くかが重要な問題となっている。

2.3 調整、検査、診断、管理技術の充実

近年、SPC (Stochastic Process Control) をはじめ様々なプロセス管理技術が、米国の製造現場に導入され、成果を挙げている。特にコンピューター、情報通信、電子機器の業界では、Six-sigma の信頼性を確立すべく、積極的にプロセス管理技術の向上に努めている。たとえばロボットや実装機を含む組立ラインでも調整、検査、診断等に様々な技術が導入されており、今後もこの傾向は続くと考えられる。また学習や組合せ最適化の新しい技術も実際に現場で使われる方向にあり、より高度な発展が期待されている。

2.4 ラピッドプロトタイピングと自由形状加工

コンピュータ、ソフトウェアならびに情報通信の分野での技術革新に比べ、メカニズムやその加工法の分野の進歩は遅い。ロボットもハードウェアの観点からみれば、20年前の技術と大差はない。ところが数年前より米国を中心に、ラピッドプロトタイピングと自由形状加工の研究が盛んになり、ロボットや生産システムへの応用が期待されている。日本でもよく知られている光造形技術の他に、各種の3次元自由形状加工法が開発され、単にプロトタイプを迅速に作るだけでなく、従来の加工法では作れない複雑な形状を加工する技術として発展を遂げている[3]。これをロボットに応用すれば、i) 治工具、グリッパーなどの製作日数、工程数が大幅に減少できる、ii) エンドエフェクターや間接部分などの複雑な部品、またアームリンクなどの中空部分を有する部品の加工が簡単に行える、などのメリットが期待できる[4]。

2.5 超高速、超精度化

半導体、光デバイスの加工とその実装技術の進歩に伴い、高速高精度のロボットや位置決め機構の需要は高い。またロボットの高速化を図ることにより、生産性を向上させるだけでなく、多くの工程を1台のロボットで実行させてラインのフレキシビリティを向上させることができる。このように高速化高精度化の要求は根強くあり、今後も技術開発の一つのポイントと考える。

以上、米国における次世代ロボット技術開発のポイントとして五つの項目を挙げた。次章以降ではその具体例を、MITにおける最近の研究成果と動向を中心として紹介する。特に2.1節についてはロボットの教示方法を、2.3節については学習とパラメータチューニング方法を、また

2.5節については高速ロボットの設計方法を述べる。

2.2, 4節については紙面の制約上割愛する。

3. スキルベースド制御

バリ取りや研磨、組立など複雑な生産工程では、熟練作業者のような巧みな動作を必要とするが、それらをロボットに教示するには多大な労力と時間を要し、ロボットの生産システムへの応用の大きな障壁となっている。また、作業現場にロボットを導入するには、ロボットに関する専門知識を持たない作業員でも、容易にロボットの教示を行えるユーザーフレンドリーな教示システムを構築するのが重要な研究課題となっている。本章では、スキルベースド制御を中心に、この問題について具体的な方法を解説する。

スキルベースド制御とは、熟練作業員が有する技能(作業スキル)を計算処理可能な知識としてロボットに教示し、熟練作業員と同様に巧みな作業を可能にする技術である。Liu と Asada は、熟練作業員が有するバリ取り作業の作業スキルをニューラルネットに学習させることによって教示し、このニューラルネットに記憶された作業スキルに基づき、ロボットを適応制御する手法を提案している[5]。本手法では、バリ取り作業における人間のスキルモデルを1) 工具マニピュレーション制御部、2) バリ取り作業プロセスモデルに基づく、作業プロセス同定部、そして3) 作業プロセスと工具マニピュレーションを関連づける連想記憶部に分けて考えている。工具マニピュレーション制御部は、人間が把握する切削工具とバリ間で発生する動的な相互作用(Compliance)を表した部分である。プロセス同定部は、感覚状態に基づき、バリ状態を認識する機能に相当する部分である。そして、連想記憶部はバリの状態に対応した適切な工具マニピュレーションを選択する上での人間の作業戦略を、写像関数として表す部分である。

このようなスキルモデルに基づいて、図1のようなロボットのスキルベースド制御系が提案されている。このようなスキルベースド制御系において、連想記憶部にはニューラルネットが用いられている。このニューラルネット学習に用いられる教師データは、熟練作業員によるバリ取り作業を力覚センサ等でモニターして得られたセンサ情報に基づき、作成される。

作業プロセスを別のニューラルネット(「フォワードモデル」)を用いて適応的に同定し、ロボットの作業結果をフィードバックさせることで、移植した作業スキルを自律的にチューニングする手法も提案されている[6]。この手法を用いることによって、チューニングのための労力と時間を短縮し生産性を高めることができる。

上述の方法では、バリ取りプロセスの物理モデルに基づいて、バリのサイズや硬さ等を反力や工具変位などのデータから推定し、それと工具把握インピーダンスや移動速度

図1 バリ取り作業のスキルベースド制御

図2 レーザー計測器を用いたバリ取りロボットアーム

等の制御動作との関係を同定している。しかしここで用いられているプロセスモデルは完全なものではなく、工具先端部の高速回転によって生じるノイズや外乱により、推定値の精度が著しく劣化することがある。そこで、Shimokura と Asada はバリのサイズをセンサ等を用いて直接計測する手法を提案している[7]。図2に示すように、本手法ではレーザー距離測定器（Laser Displacement Sensor=LDS）を2自由度ダイレクトドライブロボットの第2リンクに据え付け、バリのサイズをリアルタイムで計測することができる。LDSでは対象物との距離を $0.5[\mu\text{m}]$ の精度で計測することができ、その計測値を直接上述の連想記憶に入力することにより、スキルベースド制御をより信頼できるものにしていく。

一方、Delson と West はスキルモデルやプロセスモデルを用いず、人間作業者の動作を直接ロボットに教示する“Programming by Human Demonstration (PHD)”という手法を提案している[8]。PHDではまず、人間作業（プログラマー）が、力と位置を計測できるティーチンググリッパーを用いて組立などの作業を行う。従来のティーチ

ングプレイバック方式では、1回の教示データをロボットに反復させているが、それでは作業環境の変化に対応できない。また、人間の作業には不必要な動作も含まれることがあり、そのままロボットに教示すると、望ましくない軌道が生成されることもある。そこで本手法では、人間が持つ動作の不一致性と環境の変化に対する適応性を識別するために、人間の作業の計測を繰り返しデータを比較している。そして、動作の不一致性を考慮することによって、力と位置の最適な軌道を生成し、また適応性からはロボットのコンプライアンスを定めている。

4. プログレッシブ・ラーニング

前述のように、ロボットを有する生産ラインでは、機器のキャリブレーションとチューニングが重要な問題になっている。品質管理やリードタイムの短縮、生産性の向上のためにも、キャリブレーションとチューニングの自動化、さらに学習や最適化の研究が盛んになっている。ただ学習制御を組立作業など工場での生産工程に適用するためには、安定性の保証が必要で、限られた時間内での収束を保証できない学習アルゴリズムは、実際に用いることはできない。またオンラインの学習を行う場合、たとえ学習が初期の段階だとしても、作業を行ううえで最低レベルの機能は常に保たねばならない。一度システムが作動すると、学習中でも作業に失敗したり不十分な結果を産み出すことは許されない。もし品質の低下を招いたり性能が満足しうるものでなければ、たとえ理論的に収束が保証されていても、学習アルゴリズムは実世界でオンラインの学習に適用できない。

一方人間は、不慣れな作業や知識が不十分な作業を遂行しなければならないときは、ゆっくりと慎重に作業を行う。初期の段階では、不満足な結果や失敗を避けるためまず簡単な作業から始め、学習の進歩や性能の向上に応じて作業の複雑さのレベルを徐々に上げていく。たとえば、実行速度を下げることによって、不慣れな作業を扱いやすく

図3 プログレッシブ・ラーニングシステムのブロック図

し、経験や知識が蓄積されるにつれ、速度を徐々に上げていく。また、作業の条件や範囲を決めることで、作業の複雑さを低めることもできる。簡単な作業を学習したあとで、より困難な条件や広い作業範囲に対応することができる。

Yang と Asada は上述の、タスクの遂行と学習をうまく協調させるという人間の学習戦略をロボットで実現するために、プログレッシブ・ラーニング (Progressive Learning) という新しい学習制御理論を提案している[9]。プログレッシブ・ラーニングとは、学習の進行に応じてタスクの難易度を徐々に高めることにより、パフォーマンスレベルを一定に維持しながら学習の発散を防ぐための学習法である。図3にこの学習法概念図を示す。プログレッシブ・ラーニングシステムは、学習者（一般には制御則）、プラント、パフォーマンス評価関数、そして学習オーガナイザーによって構成される。学習オーガナイザーは、パフォーマンスの評価に基づいて学習者にとって適当なタスクレベルを決定し、「カリキュラム」と呼ばれるタスクプログラムを学習者に与える。その結果、カリキュラム割り当てループと従来の学習フィードバックループという二重のフィードバックループが構成される。プログレッシブ・ラーニングシステムを構築するには、タスクカリキュラムと学習則を個別に設計するのではなく、統合化して最適に設計しなければならない。そうすることによって、システムの安定性や学習の収束性が飛躍的に向上するばかりでなく、学習システムがより実用的になりうる。

Yang と Asada はこのプログレッシブ・ラーニングの概念を高速組立作業ロボットに適用し、インピーダンス制御則を効率的かつ安全に学習する手法を提案している[9]。組立作業ロボットの学習制御例としては、挿入作業におけるコンプライアンス（またはスティフネス）など静的な制御則のパラメータを、学習によって自立的にチューニングする事例がいくつか報告されている[10][11]が、作業が高速化されるにつれ挿入プロセスがより動的かつ複雑になり、静的動作に基づいたこれらの学習法は適用できなくなる。高速組立作業には、動的制御則、つまりダンピング項や慣性項も含めたインピーダンス制御則が必要となるが、学習すべきパラメータの数が膨大となり、最適なインピーダンスを発見するのはきわめて困難である。また、高速作

業での学習不足による失敗は、ロボットやセンサーなどを破損する可能性があり、たとえ学習の初期の段階でも許されない。そこで本手法では、学習の進行に応じて挿入スピードを徐々に高めることによって、インピーダンス制御則を安全に確実に、かつ効率良く学習している。

この手法では、プログレッシブ・ラーニングの概念を動作速度スケジューリングによって実現している。まず初めに、低速度で挿入作業を行うことで学習を始める。低速度作業では、インピーダンス制御則のなかでも、静的な項すなわちスティフネス項のみが最も重要となり、それに付随するパラメータのみが励振 (excite) される。パラメータのチューニングは、強化学習 (Reinforcement Learning) アルゴリズム[12]を適用することによってリアルタイムで行う。この低スピード学習段階では、スティフネスまたはコンプライアンスパラメータの学習が進行するが、ダンピングや慣性項は低スピード動作では十分に励振されないの、意味のある値を獲得することはできない。次に挿入スピードを少しだけ上げ、作業プロセスをより動的なものにする。そして同じ強化学習アルゴリズムを適用し、前回獲得したパラメータ値を初期値として学習を繰り返す。この学習段階では、インピーダンス制御則のなかでも動的な項、すなわちダンピング項や慣性項が重要となり、これらのパラメータの学習が進む。このように、動作速度を徐々に上げていくことによって、全ての制御パラメータを一度に学習する必要がなくなり、前回の学習結果をパラメータ空間内の限られた範囲内で微修正すればいい。すなわち、パラメータ空間を徐々に、ローカルに励振していき、学習が漸進的に進行する。特にインピーダンス制御則のようにパラメータ空間が膨大な場合に、本手法はきわめて有効である。

5. 機構と制御のコンカレント・デザイン

マニピュレータの高速な位置決めを実現するには、制御方式の検討だけでは限界があり、マニピュレータの動的な制御性能をも考慮した機構設計が研究課題となっている。従来のマニピュレータ設計手順では、まず最初にマニピュレータのリンク構成や駆動メカニズムが設計され、続いて制御系の設計が行われていた。しかし、たとえ設計したマニピュレータが機構学的に最適な構造であったとしても、制御の観点から見ると、最適な構造とは言えないことがよくある。そこで、制御と機構を統合化することによって最適化を目指すコンカレント・デザイン（統合化設計）の研究が進められている。

Park と Asada は2リンクマニピュレータを対象として、目標とする高速な位置決め制御性能を確保するためのコンカレント・デザイン法を提案している[13]。本手法では、リンク形状、アクチュエータ位置、及びフィードバッ

クゲインを設計パラメータとして、マニピュレータ先端の位置決めに要する整定時間を最小化するように、機構と制御の最適設計を行う。まず、2リンクマニピュレータをフレキシブルアームとしてモデル化し、位置決め整定時間を最小化するように、最適なPD制御システムを設計する。その後、さらにマニピュレータの位置決め性能の高速化を図るために、前述のPD制御システムにおける代表根の実部を評価指数として、今度は、マニピュレータ機構設計パラメータ値の最適化を行う。そうすることによって、制御及び機構の両面からの最適化が達成でき、非常に高速な位置決め性能を有するマニピュレータを設計することが可能となる。

またCMUのロボティクス研究所では、与えられたタスクに応じて最適なマニピュレータを設計するためのタスクベースドデザインの研究が行われている。たとえば、KimとKhoslaはマニピュレータの機構学的なパラメータだけではなく、動力学的なパラメータも効率良く最適化する手法として、プログレッシブ・デザインという新しい設計法を提案している[14]。プログレッシブ・デザインではまず、マニピュレータの設計問題をデザイン、プランニング、制御の三つのステップに分割する。そしてタスクの仕様を徐々に複雑にすることによって、機構デザインから制御まで効率良く最適化することができる。

6. む す び

米国におけるロボット技術開発のねらいを述べるとともに、いくつかの研究開発例を紹介した。米国では、情報ネットワークなど、先端分野の技術を応用する試みがなされる一方で、生産現場での実際的な課題を真剣にとらえ、地道に改善していく努力がなされている。今後の発展を大いに期待したい。

参 考 文 献

[1] S. Y. Nof, ed.: "Handbook of Industrial Robotics," Wiley, New

York, 1985.

- [2] J. Holusha: "Industrial Robots Make the Grade," New York Times, Business Day Section, D1 and D5, Sept. 7, 1994.
- [3] H. Asada, ed.: "Rapid Prototyping for Robotics and Automation," 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Workshop Notes, San Diego, May, 1994.
- [4] H. Asada: "Rapid Prototyping: Its Impact upon Robotics and Automation," RI/SME 5th World Conf. on Robotics Research, Plenary Session, Boston, September, 1994.
- [5] S. Liu and H. Asada: "Task-Level Robot Adaptive Control Based on Human Teaching Data and Its Application to Deburring," Proc. of American Control Conf., pp. 1414-1417, 1993.
- [6] S. Liu and H. Asada: "Teaching and Learning of Deburring Robots Using Neural Networks," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 339-345, Georgia, May, 1993.
- [7] K. Shimokura and S. Liu: "Programming Deburring Robots Based on Human Demonstration with Direct Burr Size Measurement," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, May, 1994.
- [8] N. Delson and H. West: "Robot Programming by Human Demonstration: The Use of Human Variation in Identifying Obstacle Free Trajectories," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 564-571, San Diego, California, May, 1994.
- [9] B.-H. Yang and H. Asada: "Progressive Learning for Robot Impedance Control," Proc. of 1994 American Control Conference, June, 1994.
- [10] B.-H. Yang and H. Asada: "Reinforcement Learning of Assembly Robots," Proc. of the Third Int. Symp. on Experimental Robotics, 1993.
- [11] V. Gullapalli, R. A. Gruben and A. G. Barto: "Learning Reactive Admittance Control," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1475-1480, France, May, 1992.
- [12] B.-H. Yang and H. Asada: "Adaptive Reinforcement Learning and Its Application to Robot Control," DSC-vol. 49, Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces, ASME Winter Annual Meeting, 1993.
- [13] J.-H. Park and H. Asada: "Concurrent Design Optimization of Mechanical Structure and Control for High Speed Robots," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 116, no. 2, June, 1994.
- [14] J.-O. Kim and P. K. Khosla: "Design of Space Tile Servicing Robot: An Application of Task Based Kinematic Design," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 867-874, Georgia, May, 1993.

浅田春比古 (Haruhiko Asada)

1950年4月2日生。1978年京都大学大学院研究科博士課程修了。マサチューセッツ工科大学助教授、京都大学助教授を経て、マサチューセッツ工科大学機械工学科教授、情報化機械システム研究センター所長。ロボット工学、制御工学、生産工学、及び人工知能応用の研究と教育に従事。(日本ロボット学会正会員)

梁 富好 (Boo-Ho Yang)

1965年10月6日生。1988年京都大学工学部数理工学科卒業。1990年マサチューセッツ工科大学機械工学科修士号取得。現在、同学科博士課程に在籍しながら、情報化機械システム研究センター研究助手としてロボットの知能制御や学習制御、適応制御の研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)