

[特別招待論文]

新世代のロボティクスとVLSI技術への期待

川村貞夫

立命館大学工学部ロボティクス学科

525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

tel: 077-561-2758

kawamura@se.ritsume.ac.jp

あらまし

現在までのロボティクスの研究の発達を説明し、その問題点などを指摘する。次に、今後のロボティクスの展開を予想し、特に統合化理論・技術の重要性が強調される。最後に、今後のロボティクスにとって、どのようにVLSI技術が重要かを具体例を挙げて説明する。

キーワード ロボットの歴史、統合化技術、ロボティクス、

New Generation of Robotics and Expectation to VLSI Technique

Sadao Kawamura

Department of Robotics, Ritsumeikan University

1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

tel: 077-561-2758

kawamura@se.ritsume.ac.jp

Abstract

The progress of robotics up to now is explained and several problems on robotics are pointed out. At next, the future of robotics is expected and the importance of integrated technology in robotics is claimed through some examples. Finally, it is explained how important VLSI technique is for future robotics.

key words history of robotics, integrated technology, robotics,

1. はじめに

ロボットは、センサ、計算機、アクチュエータを統合したシステムである。ロボット研究の始めは、単一種類のセンサ、冗長性のない駆動メカニズムが主流であった。しかし、次第に1台のロボットに使われるセンサ、アクチュエータの数と種類が増大した。また、それらを実時間で制御する計算機的能力も急速に向上した。このような背景で、複雑なシステムとならざるを得ないロボットを如何に創るかという統合化技術の必要性が自然に浮かび上がっている。

本報告では、まずロボティクスのこれまでの歩みを述べ、今後の方向を議論する。また、特にVLSI技術とロボティクスの関係を考察し、今後のロボティクスがVLSI技術に期待する内容などを報告する。

2. ロボティクス概説

2.1 ロボティクス近代史

近年のロボティクスの歴史的な変化を図1のようにまとめてみよう。

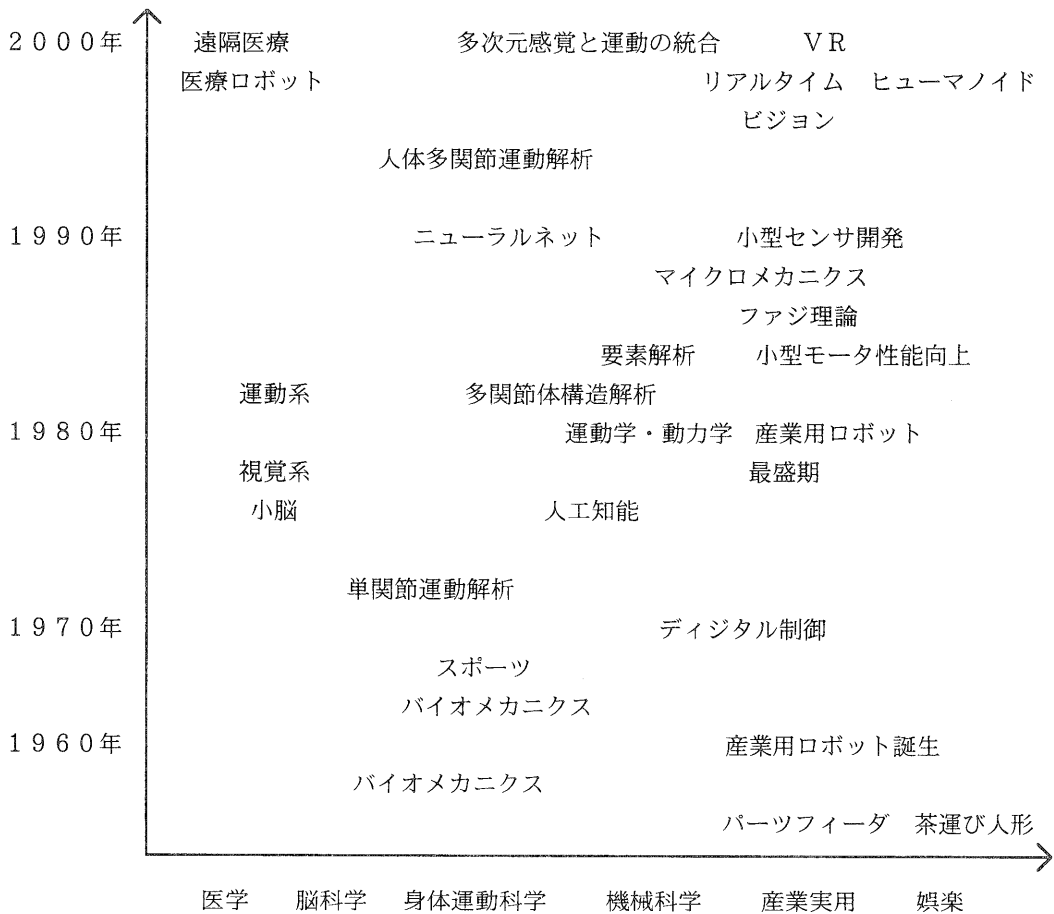


図1 ロボティクス近代史

2.2 人間型機械への憧れ

ロボット実現の動機の一つは、人間や動物と同じ形状の機械を作りたいという夢であった。これらは、古くから自動人形として世界各地で作られている。

日本では茶運び人形などが有名である。最近、話題となっているヒューマノイドやペットロボットなども動機としては、この延長と考えられる。

2.3 産業用ロボット

産業用ロボットは、位置フィードバック制御を基礎として、1960年代から開発されている。日本では1980年代に入り、最盛期を迎え現在に至っている。現在では数十cm程度のアーム長のロボットの先端精度は数十マイクロメートルであり、高速なロボットでは5m/sec程度の速度を実現している。従って、産業用ロボットは高速化・高精度化の方向に進化したと言える。一方で、知能化はそれほど進まず、基本的な駆動システムは、位置制御であり、開発当時からは変わっていない。しかし、次第に視覚情報・力情報との融合化が図られている。

2.4 産業用機器

人間の先端精度を考えると、多くの生産現場を思い浮かべる。例えばパーツフィードなどは、ロボット研究とは縁遠い存在のように思われがちである。しかし、人間の形状をしていない機器も物体を巧妙にハンドリングする技術としては、ロボティクス分野の一部である。多くの場合、生産現場での技術は経験的に処理されたり、ノウハウで終わることが多く、体系化・理論化されることは少ない。しかし、人間の物体ハンドリングを機械知能で実現することは、ロボティクスの理論と成り得る。残念ながら、このような視点でハンドリングの研究を行う研究者は少ない。例えば、柔軟物は一般に広く取り扱われているにも関わらず、モデリングやハンドリングの技術は理論化・体系化されるに至っていない。限定した対象と作業に関しては、柔軟物を機械知能により操作することが試みられている。[1]

2.5 機械科学

ロボティクスの中心をなす学問分野を機械科学と呼ぼう。これは既に完成されたものでなく、現在その方向が模索されている。まず、ロボットが登場した当初は、ロボットのような剛体系の力学が良く分かっていたいなかった。ニュートン力学で説明できるはずではあるが、ロボットの必要がなかったためにそのダイナミクスは不明であった。また、ロボットの関節変数から、手先の位置と姿勢(方向)を決める座標変換に関する解析も進み、キネマティクスとして整理された。即ち、80年代までは解析が中心で

あったといえる。運動を制御して高度な知的作業をロボットに行わせる目的では、人工知能が期待された。20年ぐらい前の予想では、人工知能によって人間の行うほとんどの作業はロボットで実現できると思われた。しかし、実際には作業対象に依存した技量を人工知能とは別の方法で明確にすることの必要性が逆にクローズアップされた結果となっている。

2.6 身体運動科学

人間の筋肉単体や単関節の運動についての科学は、従来より医学、スポーツバイオメカニクス分野で研究されてきた。ロボティクスにおいて、多関節構造体の力学的特徴が明らかになるに従って、その成果は身体運動科学分野に応用されている。[2]また、ロボティクスで開発されたアクチュエータやセンサを利用して、腕や皮膚の機械的インピーダンスを計測する研究も活発になった。[3]

2.7 脳科学

視覚系を中心とした脳研究に対して、運動系を対象とする脳研究がロボティクスの成果を基に発達している。[4]運動系ではロボットも人間も同じ運動方程式に支配されるために、物理特性に基づいて脳機能を議論できる優位性がある。今後もこの分野にロボティクスが貢献できると思われる。ロボティクスにおける脳研究は、前述の機械科学として得られた統合理論を人間の脳の理論として再構築することも考えられる。

3. 現在までのロボティクスのまとめ

3.1 ハードウェア

ロボットのハードウェアとして当初利用されていたものは、ほとんどが他分野で既に開発された要素である。電動モータと回転系のセンサを組み合わせ、計算機制御を行うなどがその例である。また、センサとしても画像処理分野で利用されたものをロボットアームに加えるシステムが主流であった。

しかし、ロボットを合理的に設計するためには、センサ・アクチュエータ・計算機を組み合わせる際に高い機能を果たすことが重要である。そのために統合化を目的として、各要素が満たすべき条件を検討する必要がある。例えば、ロボットアームではア

クチュエータの自重を小さくすることが、高速・高加速性能には必要となり、ロボットのためにモータの重量を軽くすることが強く求められた。その結果、産業用ロボットでは小型、軽量で高出力なタイプが開発されつつある。現在、ロボットとして統合した際に有効に働く要素開発の重要性が認識されている。

3. 2 理論

3. 2. 1 要素還元主義的設計の限界

ロボティクスには分析・解析と統合・総合の二つの面がある。人間科学はロボティクスとして人間を理解するために、分析、解析することが目的であり前者となる。しかし、ロボットを実現する観点からは、前者も後者を目的として行う場合が多い。それ故に、ロボティクスとしてのオリジナリティーの中心は、統合技術や統合理論にあると思われる。

従来の伝統的な統合技術（または理論）では、まず統合すべき対象を要素に分解し、各要素の特性を徹底的に分析（解析）する。その後、各要素を組み合わせて全体を統合する。この方法論によって、多くの科学技術の成果が得られたことは間違いない。しかし、対象とするシステムが、非常に複雑で各要素を完全に解析できない場合や各要素の解析結果に少しずつ誤りが含まれる場合には、上述の方法論は有効でなくなる。ロボットはセンサ、計算機、アクチュエータを組み合わせた巨大なシステムと考えるべきであり、このような例にあたる。

従来のロボティクス研究では、ロボットの各要素を分析する方向には活発であった。しかし、全体を統合化する理論や技術に関しては、（１）各要素が未熟である。（２）ハード的表現に多くの費用が必要である。（３）統合的理論体系が形成し難い。などの理由で、十分な成果が得られていない。今後、統合化されたハードウェアを数多く製作していく過程で、統合化技術を体系化・一般化することに努力する時期にきている。

3. 2. 2 剛体系の力学と制御の例題

前述の剛体系の運動を例題として、システム化技術の重要性を述べる。剛体系の力学は、もちろんニュートン・オイラーの方程式、ラグランジュの方程式によって記述される。記述する段階に留まれば、古典力学の応用となろう。問題は、この解析に基づ

いて、どのように制御を含むシステムを設計するかである。1980年台から、アメリカを中心に提案された方法は、運動方程式のパラメータを全て同定し、そのパラメータ値に基づいて、ニュートン・オイラーの運動方程式を計算するものであった。まさに、この方法は、対象を要素に分解して、その要素を再合成することによって、必要とされる入力を求めるものである。この方法では、同定すべきパラメータを全て求める必要があること、パラメータ値が変化することに対応できないことなどの不都合が生じる。当初、ロボットが6関節程度であれば、パラメータ値の数も取り扱えるオーダーであった。しかし、今後100関節のロボットを動かそうとする場合には、別の統合化技術が必要と思われる。

ここで、重要な点は解析的に明らかになった事実でも、設計や統合の視点では何もできていない状態と同じ場合があることであろう。統合化の観点では、既に明らかになっている事柄でも、別の記述や表現が必要になるとと思われる。例えば、生産技術の中で、困難な対象として残されている柔軟物体のハンドリングでは、従来の剛体に対するトルクという概念は適用できない。

4. 新世代のロボティクス

4. 1 統合化を考慮したハードウェア開発

4. 1. 1 視覚・触覚情報処理

統合化したときに有用に作用する特性をもつ要素を考えることが今後のロボティクスには必要である。視覚情報は、いわゆるビデオレートの速度に限界があり、ロボットのリアルタイム制御に視覚情報を用いることは困難であった。これに関して、石川は、1msecのサンプリングで、画像処理を行うシステムをハードウェアとして構築した。[5]これは、既存要素の寄せ集めではなく、ロボットとして統合化するための要素技術を実現した例である。触覚センサも各触覚センサを2次元状に配置すると、基本的には画像情報と類似の構造となる。ロボット作業に適した情報処理を高速に行うことが必要となっている。また、その際センサ数が莫大となり、これらを効率的・機能的に結ぶ信号経路もハード的・ソフト的にどのように実現するか問題となる。

4. 1. 2 アクチュエータ

ロボット用アクチュエータとしては電動モータの利用が最も多い。ただし、 W (出力 (仕事率)) / kg (自重) の比率は、人間の筋肉に比べて低い。近年、ACサーボモータは W/kg の意味でもかなり向上している。一方、空気圧駆動は小型のアクチュエータで、大きな力を出せる。しかし、一般に制御が困難であり、電動モータに替わるには至っていない。全体として、人間が行う作業の多くをロボットで実現するには、アクチュエータに関して大きなブレークスルーが必要となっている。

一般に、アクチュエータ分野は計算機の発達の恩恵を直接的に受けず、急速な進歩は見られない。基本的な駆動原理と異なるアクチュエータはそれほど多くない。新しい試みとして、超音波モータや静電駆動型のアクチュエータなどが提案されている。静電アクチュエータでは、従来のアクチュエータよりも大きな力を出せる利点がある。[6] 今後、絶縁破壊や駆動電圧を下げるなどの改良が加えられれば新しい技術となりえよう。また、既存の駆動原理の空気圧駆動と電磁駆動のハイブリッド化も研究が開始されている。[7]

4. 2 統合化理論・技術

4. 2. 1 統合化方法論についての考察

ロボットや環境を精密にモデル化し、そのモデルのパラメータを正確に同定した後に、作業を実行するという方法論では、今後ロボットがより複雑かつ巨大なシステムとなっていく際に、種々の不都合が発生すると考えられる。この問題を解決するためには、シンプルなモデルで、パラメータ値の変動があっても、目的を達成できるような方法が必要となる。

ここで考える方法論の基本的な考え方を以下に要約する。

(1) 物理特性を反映し、目的を満足するに十分な精度であり、かつ出来る限り簡単なモデルを利用する。

メモリベースド制御やニューラルネットでは、確かにモデルが不要な簡単なニューロンモデルのみで構成できるので、この条件を満足しているように思

える。しかし、これらは物理的特性を反映していない。そのような手法で複雑で巨大なシステムを構成すれば、全体の働きを捉えることは困難となる。従って、統合化理論とはならないと思われる。ただし、物理的特性を明確にして、特定の部分に限定して利用することは有効と思われる。

(2) できる限り粗いパラメータ推定

理論的に如何に美しくともパラメータの変動に対してロバスト性が保証できない方法は、現実的には利用できない。従って、ロボティクスにおいて、ロバスト性に関する問題は、本質的である。さらに、どの程度ロバストかという定量的議論も、より重要である。パラメータの推定が極めて大雑把でも、システム全体としてうまく機能するような手法が必要とされている。

以上の論点から、種々の方法を比較検討する際に、どの方法が上述の2つの条件をより満足しているかを考えることによって、評価が可能となろう。

また、具体的な方法を検討する際に次の2点が重要である。

(1) 最終的目的のためにどのような物理量に着目するか？何を変数とするか？入力と出力は何か？

複雑なシステムにおいて、内部の全ての変数を正確に制御することが現実的でない場合も多い。そこで、目的遂行のために最少限度必要な変数は何かを明確にする。

(2) 目的を達成できる基本原理は何か？

着目する物理量に基づく方法によって、目的が達成できることを理論的に保証する。この中で、その方法が有効に働く基本的な原理が明らかにされる。

以上の2点を明確にすれば、システムが複雑、巨大になっても、見通しのよい設計論が作れるということが、一つの考えである。仮に分析や解析を厳密にするために、複雑なモデルになっても、システムの統合化としては、その複雑なモデルを直接用いずに、統合化として有用な方式を独立に考えることが重要である。

4. 2. 2 従来研究における例

(1) 局所線形フィードバック制御 [8]

各関節に独立に設定された局所的なフィードバックによって、ロボットシステム全体がうまく動作し、

ロボットの手先は目的の位置と姿勢に達する。この方法の証明ではロボットダイナミクスの剛体モデルを利用している。しかし、パラメータを知る必要はなく、どのようなロボットでもこの方法で、目標位置、姿勢に収束させることができる。この場合、速度信号によるダンピング効果が重要である。また、基本原理の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの考えから、種々の類似の方式が自然な形で導かれる。

(2) 学習制御 [8]

前述のように、フィードフォワード入力を構成するために、当初はロボットの運動方程式のパラメータを計測し、それに基づいて制御入力を計算した。しかし、統合化の観点では、必ずしもダイナミクスのパラメータを正確に推定する必要はなく、最終的に必要な入力トルクが求まれば十分である。この考えかたから、ロボットの繰り返し動作を利用する学習制御が生まれた。学習制御では、パラメータを推定する必要なく、繰り返し動作によって、入力パターンを修正することによって、目標運動パターンを実現できる。

この場合、重要な変数は速度、加速度とトルク(力)である。即ち、非線形で2階の微分方程式で記述できるロボットのダイナミクスにおいては、速度とトルクのペアか加速度とトルクのペアが、システムの受動性を満足する事実に基づいている。

(3) 時間軸変換

この方法では、新しい速度パターンについて学習する必要はなく、既に学習によって獲得されている入力パターンを組み合わせることによって、新しい入力が形成される。運動スピードを変化させる基本的原理は、時間軸を圧縮・伸展させることによる。そのとき、時間微分が含まれない項は、単純に時間軸を圧縮・伸展させればよい。デジタル計算機であれば、サンプリングタイムを操作すれば、圧縮・伸展は容易である。次に、時間微分を含む項は時間軸に関する変換係数を掛ける必要があり、非線形で2階の微分方程式で表現されるロボットダイナミクスに関しては、加速度項と非線形系項が、時間変換係数の2乗項、粘性項が1乗項、重力項とクーロン摩擦項が0乗項となる。非線形で複雑なダイナミクス

も、時間軸変換の観点からは、簡単に以上の3つの線形項に分けられる。この時間軸変換は、むしろ学習制御との組み合わせによって、パラメータ推定不要な入力パターン実現と考えれば、システムの統合化としての意義が大きい。学習制御と時間軸変換の研究は、川村・宮崎・有本 [9] の研究に始まる。ただし、この場合時間軸は線形変換のみを仮定しており、スピードパターンを単純に定数倍にする変換のみが達成された。この方式では、上述の時間軸に関する3つの項に対応した3つの基本運動パターンについて、入力トルクを学習しておけば、時間軸の定数倍で作られる速度パターンを学習なしで実現できる。ただし、ゆっくりとスタートして、途中から速度を上げるようなパターンはこの方法では実現できない。その後、[10], [11]によって、非線形時間軸変換の問題が解決した。これによって、任意の非線形時間軸変換が可能となった。

5. コンピュータ・VLSIへの期待

5. 1 位置制御・軌道制御

1980年ごろのLSIの能力では、機械系の完全なデジタル制御ではサンプリングタイムが長すぎて、不安定現象を起こす場合が多かった。特に、自由度(ロボットの関節数)が多くなり複雑な計算を必要とする制御方式は、サンプリングタイムが長すぎて、実現出来なかった。当時は、計算量を如何に少なくするかという研究も多かった。また、適応制御は計算量の多さから、実現が困難であった。学会などでも、「計算機のスピードが上がればこの方法も実現できる。」という発言が何度も聞かれた。しかし、現在では6自由度程度のロボットアームの適応制御でもサンプリングタイムの長さが、制御性能に影響することは無くなった。従って、6自由度程度のロボットの運動制御の意味では、VLSI技術は十分な能力に達している。今後、ロボットの自由度が増大して、100自由度を制御するような対象となったとしても、サンプリングタイムだけが問題となるような場合は少ないように思える。むしろ、ロボットの作業や動作ごとに、どのような戦略や制御方式で目的を達成するかという問題が重要となる

う。どのように、アルゴリズムを構成するか、ハード的・ソフト的にどのようにシステムを構築するかなどである。さらに、100自由度にもなれば、ハード的・ソフト的なメンテナンスも深刻な問題である。従って、実現だけではなく、メンテナンスの観点からも計算機のハードとソフトを設計する必要があろう。

5.2 力制御

力制御とは、ロボットが対象物と機械的に接触する際に、発生する力を制御することをいう。多くの場合、力のフィードバック制御、力の時間積分のフィードバック制御などが利用される。人間の作業の多くが、対象物との接触を伴うことから、この制御の重要性が理解されよう。一般に位置制御よりも力制御の方が、不安定現象を誘発し易く、ロボット研究者の悩みの種であった。特に、計算機の計算スピードが遅い時代は、VLSIの高速化が望まれた。実際には機械系の持つ固有振動数と力信号のサンプリング周波数との関係で、不安定現象が発生するかが決まる。従って、固有振動数の低いシステムで、ゆっくりとした力変化だけを行うのであれば、特にサンプリングタイムを早くする必要はない。現状では、6自由度程度の産業用ロボットに動ひずみ式の6軸力センサを取り付けて制御する場合、VLSIのサンプリングタイムが長いことだけが原因で、不安定現象と引き起こすことはないと思われる。事実、我々人間は現在の計算機のサンプリングタイムよりも長い神経伝達の時間を持ちながら、力制御を達成している。ただし、人間の場合は、分布的な力を測定している点が、ロボットの力センサとは異なる。従って、今後求められるべきは、対象のハードウェアの特質、例えば、対象物体の硬さ、ロボット指の組織の粘弾性特性、信号処理の時間などを考慮して、分布的、適応的に適切なフィードバックが達成できるシステムである。即ち、汎用のVLSIを利用するのではなく、対象の特性を考慮して専用のVLSIを作ることが望まれる。

5.3 視覚情報・触覚情報処理

最近のVLSI技術の進歩に伴って、従来ではサンプリングタイムに問題となっていた画像処理を、運動と組み合わせることが、可能となった。近年、ビジュアルサーボイングはロボットの研究の一分野となっている。ただし、研究が始まったばかりで、運動系と視覚系の効率的な融合方法などについての検討が不足している。VLSIの能力としては、より高速性は望まれる。前述の石川の研究に見られるように、従来の寄せ集めのハードではなく、ロボットとして統合化を目的とした視覚情報処理が重要である。しかし、この場合も人間との対比が示唆に富んでいる。即ち、人間の視覚フィードバックはそれほど早くなく、そのようなハードウェア的制約をもちながらも、人間は現在のロボットよりも高度な作業を実行している事実である。作業ごとにどのような物理的条件がもっとも大切であるかを明確にすること、他のセンサ例えば触覚センサーなどとのセンサフュージョンによって問題を解決することなどが今後重要となろう。その際、高度な作業の実現、ハードウェアの低価格化、メンテナンスの容易さなどに関して、VLSI技術への期待が大きい。

5.4 分布型アクチュエータ

駆動原理は基本的には従来型と同じでも、多くのアクチュエータを分布的に配置し、それらを協調的に制御することによって、従来にない性能を引き出すことが可能となっている。例えば、小西らは、マイクロシニングを利用して、4方向に空気の流れを制御するアクチュエータユニットを実現している。[12] このユニットから吹き出す空気の力によって、対象物体を浮上させ、目的の位置に搬送する。この目的のために、ユニットを2次元的に多数配置し、自律分散的に制御している。このように、アクチュエータを分布的に配置し、それらを協調動作させる分野は今後も研究が進むと期待される。このような分野では、多くのアクチュエータを制御することから、そのエネルギー供給と伴に信号線の配置、分散制御などを研究する必要があり、VLSI技術との協力が大いに期待されている。

5.5 アミューズメント

最近、ヒューマノイドやペットロボットが一般にも知られるようになり、産業化が期待されている。アミューズメントとしてこれらを捉えると、その価格が最も大きな問題となる。音声認識がVLSI化され、低価格となったようにアミューズメント専用の画像処理チップが安く供給されることによって、テレビゲームとは異なる娯楽産業が拡大するとの予測もある。また、この分野では、皮膚状に配置された触覚センサ、腕や脚の力覚センサ、視覚センサとの情報の融合に基づく行動決定が重要となり、これらの信号処理を高速に安価に実現できるVLSI技術が必要不可欠となっている。

6. おわりに

1960年台に産業用ロボットが発売されてから、約40年がたった。ロボットと言う物の完成目標を100年と見た場合、残り60年で、ライト兄弟のグライダーから、ジャンボジェットの発達に匹敵する技術革新がロボティクスにおいて達成できるであろうか？

大学の研究では、分析と解析の割合が多く、総合・統合が少ないとの指摘もある。今後、産学連携や実学指向と言われる状況では、分析よりは統合化・システム化が重要視される時代になろう。このようなとき、ロボティクスが統合化技術として、有用であり理論的にも深い内容があると言われることが筆者の夢である。特に、今後のロボティクスとして重要なポイントは、多種類センサ・多チャンネルセンサの情報融合とそれに基づく多自由度アクチュエータによる運動(行動)の実現となる。この目的のために、VLSI技術が大きな役割を演じることは疑う余地はない。

参考文献

- [1] 日本ロボット学会誌「柔軟物操作特集」Vol.16 No.2, 1998または和田隆広「伸縮柔軟物体のモデリングとハンドリング」立命館大学博士論文1999
- [2] 伊坂忠夫「多リンク機構特性に基づく身体運動の計測と解析」立命館大学博士論文 1999
- [3] 韓鉉庸「手先の力学的技量の計測と人工指による手先技量の実現」立命館大学博士論文1999
- [4] 川人光男「脳の計算理論」産業図書1996
- [5] M.Ishikawa, T.Komuro, A.Namiki, I.Ishii "1ms Sensory-Motor Fusion System" Proc. of the ISRR 1999pp.291-296
- [6] 「特集 ニューアクチュエータ」日本ロボット学会誌15巻3号1997年
- [7] 永瀬康亘, S.R.Pandian, 武村史朗, 水谷元, 川村貞夫, 早川恭弘「空気圧モータの性能向上と電動・空気圧駆動ハイブリッド化の試み」SICE第17回流体計測/第14回流体制御 合同シンポジウム(1999)
- [8] S.Arimoto "Control theory of Nonlinear Mechanical Systems" Clarendon Press, Oxford 1996
- [9] S. Kawamura, F. Miyazaki, and S. Arimoto "Intelligent Control of Robot Motion based on Learning Method" Proc. of the IEEE Intelligent Controlpp.365-370, 1987
- [10] 深尾典久, 川村貞夫「学習制御で得られたロボットの入力トルクパターンの時間軸変換法」計測自動制御学会論文誌, vol.32, no.7, pp.1107-1112, 1996
- [11] S. Kawamura and N. Fukao "A Time - Scale Interpolation for Inputs Torque Patterns obtained through Learning Control on Constrained Robot Motion" Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Nagoya, Japan 1995 または深尾典久「Realization of Feedforward Inputs for robotic Manipulators based on Time and Space Transformation」立命館大学博士論文 1999
- [12] S. Konishi and H. Fujita, 「A Conveyance System using Air Flow based on the concept of Distributed Micro Motion Systems」IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.3, No.2, pp. 54-58, 1994 または「System Design for Cooperative Control of a Microactuator Array」IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.42, No.5, pp. 449-454, 1995.