

ロボット制御技術 の最近の動向

Control Technologies for
Robots of Next Generation

キーワード

Robot, Coordinated Motion Control,
Robot-Human Cooperation,
Mechanical Aid, Teleoperation,
Parallel Link Mechanism

東北大学 教授
工学博士
小菅一弘

1. はじめに

技術の発展と共に、ロボットは産業用ロボットとして、いろいろな分野で用いられるようになった。ご存知のように、産業用ロボットは、一種の汎用多自由度自動機械であるが、単なる自動化機械と違うのは、制御という観点からすると、

- (1) プログラム次第では、どこにでも利用できる汎用性を備えている。
- (2) 教示作業を通して、作業者の持つノウハウをロボットの運動に翻訳しロボットにプログラムできる。

という点に特徴があり、これが産業用ロボットをここまで発展させた理由であると思う。

今日では、従来の意味での産業用ロボットとしての技術はほぼ完成し、一部の分野では、激しいコスト競争の時代に入っている。急激な円高にともない、海外からの製品と、品質だけではなく、コスト的にも強い競争力が求められており、一見すると、ロボットの行く手は厳しそうであるが（そのように言われているが）はたしてそうであろうか。労働人口の高齢化、コストダウンの中での品質の追求など、日本の製造業をとりまく環境から見ても、ロボットはこれから真に開花しなければならない産業である。

ロボットの今後の展開を考えると、2つの方向が考えられる。1つは、ある意味で完成した既存のロボット技術を、未開拓の分野に適用し、あたらしいアプリケーションを見つけることであり、もう1つは、ロボットに新しい機能を付加し、従来のロボット技術では不可能であった分野に進出することである。近年注目されているパラレルリンク型ロボットの工作機械への応用などは前者の例であるが、今後、ますます、いろんな分野でのロボット技術の利用が進むと思われる。

ロボットは、プログラマブルな多自由度リンク機構であり、制御技術なしでは単なるリンク機構にしかすぎないという意味で、制御技術は新しいロボットを創造する際のキーテクノロジーである。本稿では、次世代のロボット制御技術として、複腕ロボットの協調制御技術、メカニカル・エイド技術、遠隔操作技術、パラレルリンク型ロボットの制御技術を紹介する。本稿が、多少なりともロボットの新しい可能性へのヒントにつながれば幸いである。

2. 双腕ロボットの協調制御技術

ロボットを何台も用いて作業を行うこともあるが、通常は、各ロボットは力学的には独立しており、独立に制御されている。しかし、応用分野によっては、複数のロボットを協調的に用いて、互いに力学的に干渉するような作業を行う必要がある場合があり、こうした問題を扱う複数のロボットの協調制御問題は、ロボットの重要な制御問題の一つである。

複数のマニピュレータを協調的に用いると、単一のマニピュレータでは不可能ないろいろな作業を行うことができる。例えば、図1 (a) に示すように、複数のマニピュレータを用いることによって、システムの可搬重量を大きくすることができ、単一のマニピュレータでは扱えない重量物のハンドリングが可能になる。また、複数のマニピュレータで、単一の対象物を操る場合、マニピュレータは対象物とともに閉リンク機構を構成するので、システム全体の機械的剛性を高めることもできる (図1 (b))。人間が両手を用いて行うような器用さを要求される作業は、2台のマニピュレータの協調制御ではじめて可能になる (図1 (c))。

双腕ロボットの協調制御の研究は、いろいろと行われてきたが、従来の制御系では、単一物体 (剛体) を、複数の

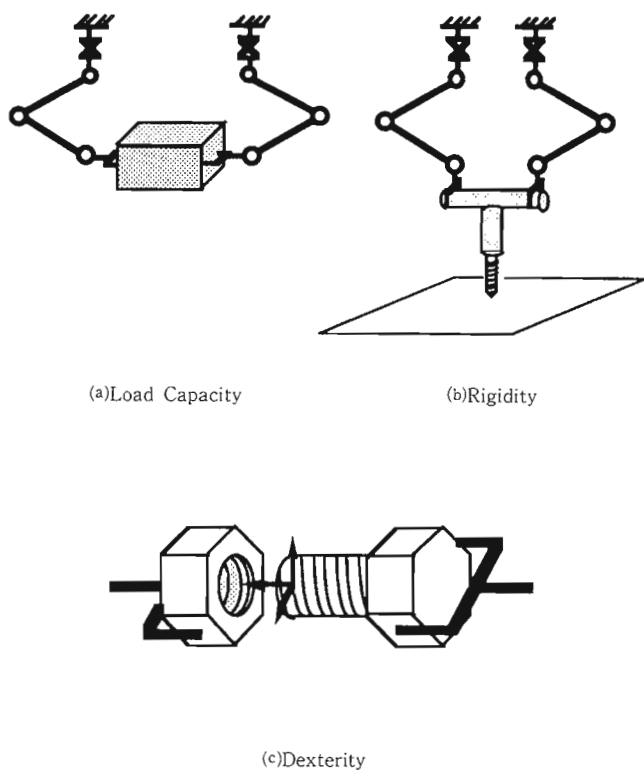


図1. 複数のマニピュレータを用いた作業

ロボットで協調的に扱う問題しか取り扱っていない。しかし、複数のロボットを用いることによって、一番メリットがあるのは、単一のロボットにはできない作業を行うことであり、その一例として、部品の搬送と組付けに適用できる制御系を (株) 不二越ロボット開発部とともに開発した¹⁾²⁾。

双腕ロボットを用いた組み付け作業を考えてみよう。2つの部品の組付けは、通常は、1個の部品をジグに固定し、もう一個の部品をそれに挿入することによって行われる。

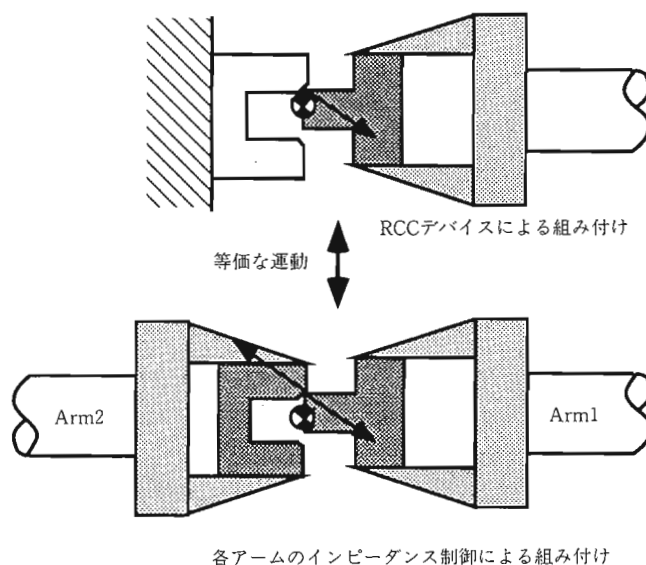


図2. 双腕アームによる組み付けの原理

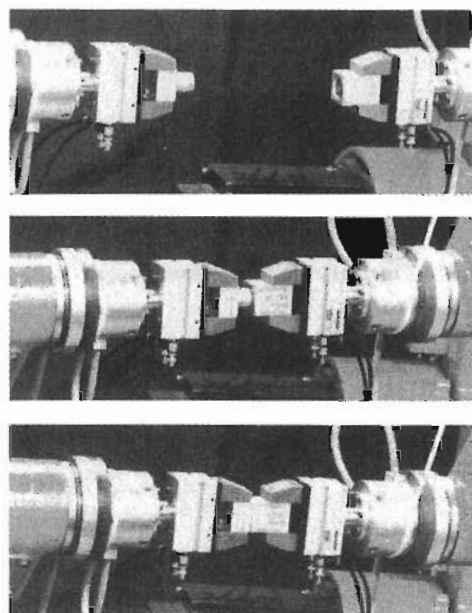


図3. 部品の組み付け

このような場合、RCCデバイス (Remote Center Compliance Device) が有効なことが知られている。RCCデバイスの特徴は、組み付ける部品同士のジャミングを避けるように、部品の運動を制御することにある。しかし、作業できる姿勢が限られるなど、双腕ロボットに用いて作業することはできない。

そこで、提案する制御系では、組み付け作業が行われるとき、2台のマニピュレータによって把持された部品間に働く力に応じて、それぞれのロボットに把持された部品の

3. メカニカルエイド技術

ロボットのほとんどは、人間から隔離された状態で、予め決められた作業を行う自動機械として用いられている。生産現場以外にもロボットを必要としている分野は多く、人間と共存・協調して作業を行う、新しいロボットの開発が望まれている。人間とロボットとの協調にはいろいろな形態がある。人間のような知能を持ち、人間に代わって自律的に作業を行う知能ロボットもその一例であろう。

しかし、現在のロボット技術では、完全な知能ロボットを実現するにはまだまだ解決しなければならない問題も多く、完全な知能ロボットの登場には時間がかかると思われる。そこで、人と共存し、人と協調することを前提としたロボットの知能化を目指し、図4に示すように、人間とロ

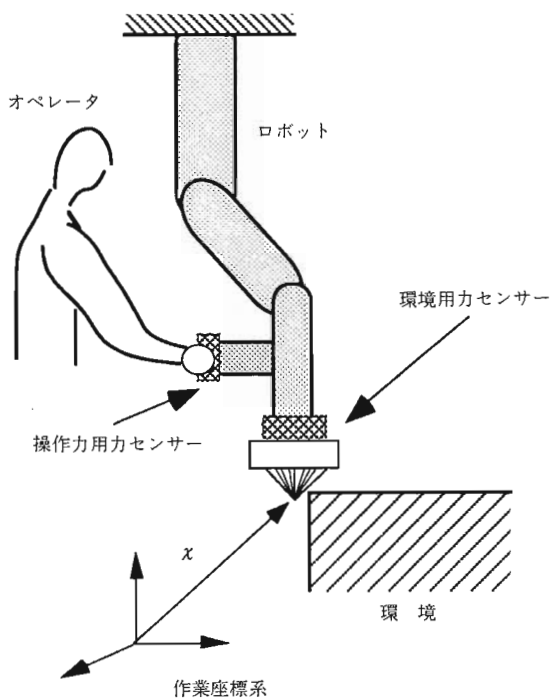


図4. メカニカルエイドの概念図

運動を、それらの相対的な運動が、部品の組み付けに適した運動となるように制御することによって、組付けを行うとするものであり、産業用ロボット (Nachi-Fujikoshi 7603-APJ) を用いて実験でその有効性を確認した (図2, 図3)。本技術によって、例えば製造ラインに双腕システムを導入することによって、部品の搬送と作業が同時に行えることになる。これは、従来のロボットにはないメリットであり、組み付け以外の作業にも応用できると考える。

ロボットが、力学的に協調して作業を行うのに有効な、ロボットの基本的な制御系の構成法について紹介する。

人間とロボットが力学的に協調して作業を行う研究では、1960年代に提案された、Exoskeleton Amplifierと呼ばれる、パワースーツの研究が良く知られている。従来の制御方法では、まず、人間や環境をモデル化し、それに基づいて制御系を設計するという方法がとられていた。

しかし、一般には、人間や環境の特性が分からないことが多く、人間や環境の特性に基づき制御系を安定に構成することは難しい。そこで、ロボットに、人間が使用する道具のような力学的特性 (一種のインピーダンス特性) を仮想的に持たせることによって、人間や環境の特性に拘わらず、安定に制御系を構成できるロボットの制御系を紹介する。

本稿では、図4に示すように、ロボットをうまく制御することによって、ロボットが、人間の操作力をうまく調節して環境に伝え、人の作業を補助するようなシステムについて考える。このようなシステムでは、環境や人間の特性が未知の場合が多く、

- (1) いかにして、力を調節 (増幅・減衰) するか。
- (2) いかにして、作業しやすいようにロボットを制御するか。

が問題となる。人間や環境の特性に基づき、制御系を構成することで、この問題を解く方法もあるが、前述したように、あまり実現的ではない。

一方、日常生活を考えて見ると、人は未知の環境に対して、道具を用いて安定に作業を行っている。人間が道具を用いて作業を行う場合、システムは図5に示すように、人間-道具、環境-道具の間にそれぞれ相互干渉が生じるシ

システムと考えることができる。本稿で考えている、人間-ロボット系は、図6に示すように、人間-ロボット系、環境-ロボット系の間にそれぞれ力学的に相互作用を持つシステムである。図5と図6からわかるように、両者のシステムは、人間と環境の間に相互干渉が生じるという点において同じ構造をしていることがわかる。

図6に示す人間-ロボット-環境系において、もしも、ロボットを、図5に示すような道具と同様の力学的性質を持つように制御することができれば、環境、人間の特性が分からなくても安定な制御系を構成することが期待できる。つまり、ロボットを道具と同じ力学的特性を持つように制御することによって、前述した(1)、(2)の問題を解決できることがわかる。ここでは、道具と同一の特性を持つシステムを仮想的に考え、これを仮想ツールと呼ぶことにする。

人間が道具を用いて作業を行う場合を考えてみよう。人間が道具を用いる場合は、力の増幅と道具の操作し易さを考慮して、作業に適した道具を選び作業を行っている。力の増幅を行いたい場合であるならばこのような道具を選ぶ。図7に示すように、これはレバーの長さによって、力

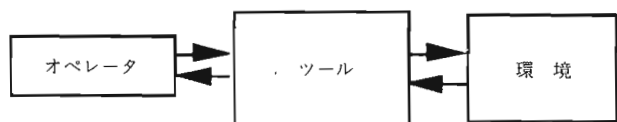


図5. 人間-道具-環境系

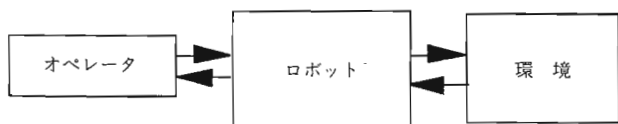


図6. 人間-ロボット-環境系

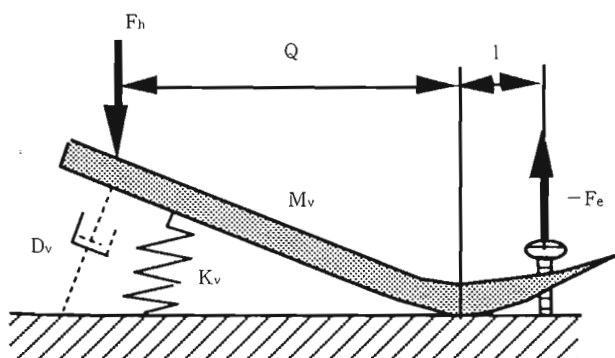


図7. 仮想ツールの概念図

の増幅率を変えることができる。また、作業に応じた大きさや重さの道具を選んでいる。

そこで、仮想ツールとして、人間の力の増幅、操作性が自由に指定できる次式のモデルを考える。

$$M_v \ddot{x} + D_v \dot{x} + K_v x = QF_h + F_e \quad (3)$$

M_v , D_v , K_v はそれぞれ $n \times n$ 行列で、仮想ツールの慣性行列、粘性係数、ばね定数を表す。 Q は力の増幅率を表す定数行列である。なお、通常 $K_v = 0$ であることが多いので以下では $K_v = 0$ の場合について考える。

まず、道具が拘束されていない場合について考えよう。このとき、環境力はシステムには働かないので、 $F_e = 0$ となり、

$$M_v \ddot{x} + D_v \dot{x} = QF_h \quad (4)$$

が成立する。また、 M_v , D_v の調節によって、仮想ツールの操作性が指定できる。

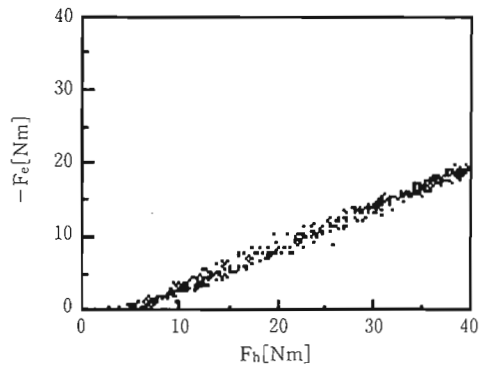
次に、ツールが拘束されている場合を考えよう。ツールが拘束されている状態(運動が止まっている状態)では、 $\ddot{x} = 0$, $\dot{x} = 0$ となるので、(3)式で $K_v = 0$ とした関係が成り立つので、

$$QF_h = -F_e \quad (5)$$

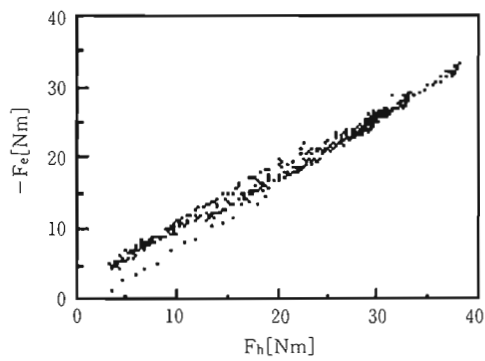
が成立し、 Q によって力の増幅(減衰)率を変えることができる。

実験結果の一例を図8に示す。人間がロボットを操作するのに要した力と実際にロボットが環境に加えた力の関係が、ほぼ指定したようになっていることがわかる。図9に、産業用ロボット(Nachi-Fujikoshi 7603-APJ)に適用した例を示す。

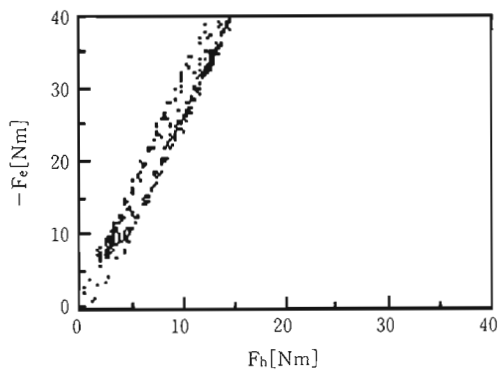
本システムは、工具を用いた各種の重作業から、建設現場、医療現場などへの応用が考えられ、従来からの”きつい”作業を行う作業者の負担を低減することができる。安全性についての研究もいろいろと行われており、新しい形式のロボットとしての利用も間近である。また、この考え方を、ロボットの協調制御に応用すると、複数のロボットと人との協調作業が実現できる(図10, 図11)。



(a) $Q=0.5$



(b) $Q=1.0$



(c) $Q=3.0$

図8. メカニカルエイドを用いた力の調節

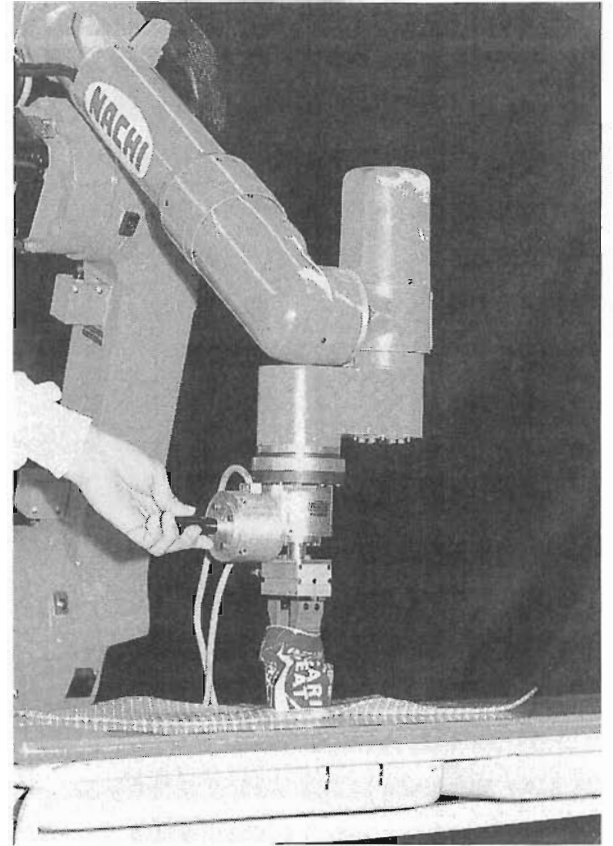


図9. 産業用ロボットを用いたメカニカルエイド

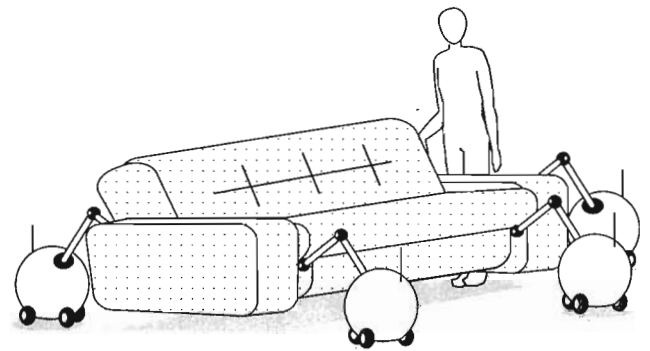


図10. 人とロボットとの協調作業の概念

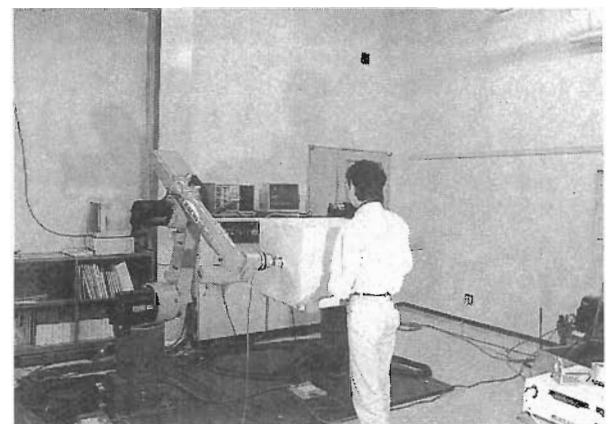


図11. 人とロボットとの協調作業の一例

4. 遠隔操作技術

マスタースレイブ型ロボットとしての遠隔操作技術の研究は古く、1940年代に遡る。当初のものは、マスターアームとスレイブアームが機械的に結合された、いわゆる機械式マスタースレイブアームであったが、その後、マスターアームとスレイブアームとを電氣的に結合した、現在の形式のマスタースレイブマニピュレータの開発が開始され、1965年頃に実用化されている。

マスタースレイブマニピュレータは、このように長い歴史を持ち、すでに完成された技術であるかのような気がするが、操作性が機械式のマスタースレイブマニピュレータと比べると悪いなど解決すべき問題も多い。また、情報スーパーハイウェイ計画に見られるような情報インフラストラクチャの整備も開始され、遠隔操作技術が再び脚光を浴びている。

遠隔操作技術の基本である、マニュアル式遠隔操作技術として、マスタースレイブシステムを考えると、

- (1) 作業するオペレータの動特性がわからない。
- (2) 作業環境の動特性がわからない。

という問題がある。

制御系の構成法に、オペレータと作業環境の動特性を計測し、それに基づいて制御系を構成する方法と、作業環境が受動的であり、オペレータが故意にシステムを不安定にしないという仮定のもとに制御系を構成することによって、オペレータや環境の特性がわからなくても、システムを安定に保つような制御系を構成する方法がある。

前者の方法は、作業環境やオペレータの動特性が多少変動しても安定性が保てるように、通常はロバスト制御系を構成するが、著者の経験では、オペレータの動特性の変化は、予想以上に大きく、うまくいかないようである。我々は、後者の方法を用いた制御方法を研究してきた。

従来のマスタースレイブマニピュレータの研究では、マスタースレイブ系の動特性を打ち消し、いかにして、素手で遠隔操作しているかのような感覚を操作者に与えるようなシステムを構成できるかということを中心に研究が進められてきたが、実存するマスタースレイブ系の動特性を打ち消すということは、物理的にはかなりの無理がある。そこで、著者らは、メカニカル・エイドの設計で提案した仮想ツール特性をマスタースレイブ系に持たせ、マスタースレイブの打ち消せない動特性を仮想ツールとして利用することによって、作業性を高められることを明らかにした⁹⁾。また、従来の制御系は、力や運動を増幅したり減少したりすることが難しかったが、仮想ツールの考え方を用いることにより、簡単に増幅・減衰することもできる¹⁰⁾。

マスタースレイブ型遠隔操作システムは、メカニカル・エイド的な利用法も考えられるし、機械系は物理エネルギーを情報に、情報を物理エネルギーに変換する唯一のシステムであると考ええると、情報インフラストラクチャの整備と共に、次世代のロボット技術にはなくてはならない技術である。

5. パラレルリンク型ロボット

パラレルリンク型ロボットは、通常、ベースとムービングプラットフォームと、球面ジョイントを介してそれらを結合するアクチュエータとからなり、アクチュエータによって、ジョイント間の距離を制御することで、ムービングプラットフォームの位置・姿勢を制御する構造をしている。通常のシリアルリンク型産業用ロボットと異なり、その構造から、作業範囲は小さいが剛性が高く、各関節での位置決め誤差が、ロボットの手先にいくに従って蓄積されるようなことがないので、精度が高いという特徴がある。このような特徴を生かして、最近では、工作機械などの高剛性・高精度が要求される分野や、建設機械などのように高剛性

高出力を必要とする分野で利用しようとする動きが高まっている。

従来のシリアルリンク型の産業用ロボットでは、各関節（アクチュエータ）の変位から、手先の位置・姿勢を計算する順運動学の計算は容易であったが、与えられた手先の位置・姿勢に対して各関節の変位を計算する逆運動学の計算は、解析的に求めることが難しかった。

パラレルリンク型のロボットでは、与えられた手先の位置・姿勢に対して、各アクチュエータの変位を計算する逆運動学の計算は簡単にできるが、各アクチュエータの変位から手先の位置・姿勢を計算する、順運動学の計算は解析

的に求めることは難しい。そこで、数値計算をすることになるが、一般には収束計算を行うことになり、計算に時間がかかる。そこで、仮想的な制御系を考え、そのシミュレーションを行うことによって順運動学を計算すると、一度誤差が収束すると、あとは、理論的に誤差は生じないので、高速に計算することができる⁹⁾。また、パラレルリンク機構は、シリアルリンク機構に比べて機構の設計の自由度が大きく、何らかの方法で、機構の最適化を行うことが必要になる。機構が出しうる力やモーメントをもとに機構の設計

を行うことも可能である⁹⁾。

パラレルリンク機構は、従来のシリアルリンク機構になり特徴をいくつか備えているが、その制御には、少し工夫が必要である。通常のロボットと同様の制御は可能であるが、従来のロボットと異なるアプリケーションが想定されるため、アプリケーションによっては、新しい制御系を開発する必要がある。今後いろいろな応用分野を想定し、研究を進めていきたいと考えている。

6. おわりに

本稿では、次世代のロボット制御技術として、複腕ロボットの協調制御技術、メカニカル・エイド技術、遠隔操作技術、パラレルリンク型ロボットの制御技術を紹介した。冒頭でも述べたが、制御技術は新しいロボットを創造する際のキーテクノロジーである。本稿が、多少なりともロボットの新しい可能性へのヒントにつながれば幸いである。

最後に、本稿をまとめるきっかけをいただき、いろいろとご協力いただいた株式会社不二越の皆様、この場をおかりして感謝申し上げます。

文 献

- (1) 小菅一弘, 石川潤, 吉田勝久, 針木和夫, 酒井勝, "シングルマスタ・マルチスレイブ・マニピュレータシステムのTask-oriented制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 7, pp. 793-801, (1994).
- (2) 小菅一弘, 吉田英博, 福田敏男, 蟹谷清, 酒井勝, 針木和夫, "インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 404-410, 1995.
- (3) 小菅一弘, 藤澤佳生, 福田敏男, "仮想ツールダイナミクスに基づくマン・マシン系の制御", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 60, No. 572, pp. 1337-1343 (1994).
- (4) 小菅一弘, 藤澤佳生, 福田敏男, "環境と相互作用が生じるマン・マシン系の制御", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 59, No. 562, pp. 1751-1756 (1993).
- (5) K. Kosuge, Y. Yoshida, T. Fukuda, "Dynamic Control for Robot-Human Collaboration", Proc. of 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 398-401 (1993).
- (6) 小菅一弘, 川俣裕行, 福田敏男, 小塚敏紀, 水野智夫, "Stewart Platform型パラレルリンクマニピュレータのForward Kinematics計算アルゴリズム", 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 849-855 (1993).
- (7) 小菅一弘, 竹尾光治, 福田敏男, 甲斐勝巳, 水野智夫, 富松宏明, "スチュワート型パラレルリンクマニピュレータの動力学計算法", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 60, No. 569, pp. 218-224 (1994).
- (8) 小菅一弘, 奥田実, 川俣裕行, 福田敏男, 小塚敏紀, 水野智夫, "パラレルリンクマニピュレータの力解析", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 60, No. 575, pp. 2338-2344 (1994).
- (9) K. Kosuge, T. Itoh, T. Fukuda, and M. Otsuka, "Tele-manipulation System Based on Task-oriented Virtual Tool", Proc. 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 351-356, 1995.
- (10) K. Kosuge, T. Itoh, T. Fukuda, and M. Otsuka, "Scaled Tele-manipulation System Using Semi-autonomous Task-oriented Virtual Tool", Proc. 1995 International Conference on Intelligent Robot and Systems, to appear, 1995.



小菅 一弘

東北大学 教授 工学博士
(東北大学 大学院 工学研究科
機械知能工学専攻)