複合制御理論に基づくマニピュレータの制御及び学習法の提案

Proposal on the manipulator control and learning based on compound control

○旭岳史 (名古屋工業大学) 下田真吾 (理化学研究所)
木村英紀 (理化学研究所) 藤本英雄 (名古屋工業大学・理化学研究所)

Takefumi ASAH, Nagoya Institute of Technology
Shingo SHIMODA, RIKEN
Hidenori KIMURA, RIKEN
Hideo FUJIMOTO, Nagoya Institute of Technology, RIKEN

This paper proposes the control and the learning method for a manipulator based on compound control. Compound control is the novel concept of biomimetic control and learning scheme. The most important feature for controls of living things is that controls concepts of simple and homogeneous elements and its networks. In this paper, compound control is applied to a redundant manipulator control. The hierarchical network of calculation elements is used to learn the desired angles and controllers of all joints using the position of endeffector and the desired position of endeffector. The simulation and experiment results show the effective of proposal method.

Key Words: Compound Control, Neural network, Self-Organizing

1. はじめに

産業用ロボットの動作の精密さ、速度、そしてその動作の再現性などは、人間の能力をはるかに凌駕し、人工知能はチェスの世界王者に勝利するに至った。このように、整えられた環境と限定されたタスクにおいて人工物の制御は、人間以上の能力を発揮するものが出現した。一方で、人間のように環境に合わせた柔軟な判断力や行動は未だ満足に達成されたとは言い難い。しかしながら人間より下等な動物であっても、環境に適した行動をとることが可能である。また、それら個体の置かれた環境の複雑さは、我々の生活する環境と比較してもその多様さは遜色ないと思われる。すなわち、人工物の制御に対して生物制御の優位点の一つは、予測不可能な環境の変化に対する適応の巧みさにあると言える。このような生物の高い適応能力は、脳、細胞、個体、臓器などといった様々な視点から見て取ることが可能である。それら生物による制御を統一的に扱う概念として「複合制御⁽³⁾⁽⁴⁾」が提案されている。

複合制御の特徴は単純で同質な情報処理素子の階層的なネットワークを用いて情報処理素子の自律的な活動の結果として、複雑な行動を学習することが可能な点にある。本論文では、複合制御の中でも特に脳による運動の制御に着目し、そのロボットへの応用を考える。ニューロン（神経細胞）の自律的な活動方式に関する生理学的知見⁽¹⁾⁽²⁾に基づいて、自律的に活動する情報処理素子を構築し、それらとそのネットワークを用いたロボットの制御と学習を行う。

さらにこれまでに行われてきた複合制御に基づくロボットの運動制御の研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾では、主に1つの階層をもつネットワークに目標値を入力することでそれを実現する制御器の学習を行ってきた。本論文では階層を増やし、目標値を生成することが可能なネットワーク

の構築を目指す。具体的には水平3自由度の冗長マニピュレータを用いて、手先位置の目標から各関節角度の目標値と、その目標値に収束するための制御器を階層構造にして学習することを目指す。

Fig.1 The model for simulation

制御対象として図1に示すような水平3関節型ロボットアームを考える。ここで、全システムの運動は水平2次元平面内に限定するものとし、重力の影響はないものとする。また、各関節に働く摩擦は無視する。今、手先位置 (x, y) の情報からマニピュレータの姿勢 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を決定することを考える。すると作業空間次元よりも関節数が多いので、不良設定問題⁽⁷⁾となり、逆運動量の解が一意に定まらない。このような不良設定問題を解くために、様々な指標を導入し、何らかの最適化を行うことにより解を一意に求める研究が多くなされてきた⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかしながらこの種の最適化計算は非常に処理能力の高いPCを必要とするような、複雑な計算を必要とする。人間の運動を考えた場合、感覚

Fig.2 Initial Network Structure

受容器で刺激を受け取ってから行動に移るまでに、随意運動では 100[msec] 程度の時間を必要とする。そのため人間はもっと効率よく効果的な手段を用いていると思われる。本研究では情報処理素子が自律的に活動した結果、この運動が達成される事を目指す。

2. 複合制御に基づくロボット制御器の設計

複合制御では情報処理素子の自律的活動がネットワークの変化を生み、それにより得られる行動が学習された行動となる。すなわち複合制御における学習とは、評価関数や教師信号により導かれるものではなく、情報処理素子の自律的活動とネットワークの状態より生まれるものである。したがって複合制御に基づくロボット制御器を設計するには、

1. 情報処理素子の活動則
2. ネットワーク初期状態

の 2 つを定義する必要がある。

2.1 情報処理素子の活動則

本研究では複合制御における同質な情報処理素子としてニューロンを参考にした。情報処理素子間では意味のある信号のやり取りはされず、情報処理素子同士が協働することはない。情報処理素子の活動を数式で表すと次式となる⁽¹¹⁾。

$$\frac{dx}{dt} = -y + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + I + T \quad (1)$$

$$= f_1(x, y) + I - T$$

$$\frac{dy}{dt} = -y + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \quad (2)$$

$$= f_2(x, y)$$

$$\frac{dT}{dt} = c_1 \left(\frac{1}{1 + e^{-c_2 x}} - c_3 \right) \quad (3)$$

$$= f_3(x)$$

x : 膜電位に相当する変数

y : イオン電流コンダクタンスに相当する変数

I : 流入電流に相当する変数

T : 閾値に相当する変数

a_* , b_* , c_* : 定数

以上のように情報処理素子は自身の活動によって閾値を変化させる。このような自身の発火の有無によって行われる素子の自律的活動こそが本手法における学習であり、予め用意された正解へ近づくようにネットワークを変更するような学習方法とは異なる。

2.2 初期ネットワーク

図 2 に示すような初期ネットワークを用いることを考える。素子、あるいは素子群をその役割に応じて、1～7 の Area に分けることにした。信号は図中の上から下へ順に流れるような階層構造となっている。ネットワークの初期状態とはニューラルネットの結合荷重に相当する。本研究では結合荷重が学習により変化しないので予め適切に決定しておく必要がある（参考文献引用）。なお図中の小さな四角形の一つ一つが、2.1 節で説明した活動則で働く情報処理素子であり、ある同じ役割を当てられた素子群を中括弧で括っている。一つの中括弧に含まれる素子の数は Area1,3 ではそれぞれ 100 個、それ以外では 200 個の素子が含まれている。また図中の中括弧同士の接続は中括弧に含まれる全ての素子同士が接続していることを示している。また図が煩雑になるため省略されているが、図 2 はモーターの正転に関わるものだけを描いてある。

3. 数値シミュレーション

2 節で述べた到達運動を行うためには、目標手先位置を達成可能な各関節の目標角度を決定し、制御によりそこへ近づけるという論理的思考の展開が必要である。

Fig.3 Before Learning

Fig.4 After Learning

ここでは図2のようなネットワークによって結びついた素子の自律的な活動により実現する。各自由度はそれぞれ、図1の座標原点に近いほうから順に $\theta_1 \sim \theta_3$ と定めた。現在の手先位置を目標の手先位置へ近づけるためには、図1中のベクトル $\mathbf{P}$ が小さくなればよい。そこで図2中のArea2には $\mathbf{R} - \mathbf{R}_d$ と $\mathbf{\Theta} - \mathbf{\Theta}_d$ が入力されるものとした。これらは手先位置 $x = (x, y)$ が得られたならば幾何学的な計算により得ることができる。なお手先位置は順運動学計算により得た。表1にシミュレーションで用いた各物理パラメータパラメーター、および手先の初期位置と目標位置を示す。表1に示した初期位置から目標位置までの到達運動を計算機シミュレーションにより100回行った。

Table 1 Link Parameter

link	Length [m]	Mass [kg]	Inertia $\times 10^{-2} [kg \cdot m^2]$
l_1	0.30	0.50	0.75
l_2	0.30	0.40	0.75
l_3	0.10	0.30	0.04

Table 2 Initial and desired points

Initail point [m] $(x, y) = (0.70, 0.0)$
Desired point [m] $(x, y) = (0.50, 0.20)$

3.1 結果

学習前のシミュレーションのスティック線図を図3に、学習後を図4に示す。なお図中の丸印は手先の目標位置を示している。

図5に学習前後での手先軌道の変移を示す。学習前は一度手先が目標位置を大きく超えてしまい、2秒の試行時間内には手先を目標位置へ近づけることができなかったのに対して、学習後は学習前と比較すると、手

Fig.5 Trajectory

Fig.6 Rotation Angle and Desired Angle

先をスムーズに目標位置へ近づけるようになっていることが分かる。

各自由度における関節角度の時間変移、及びそれぞれの目標角度を図6に示す。目標角度は図2のArea5の素子の発火の荷重和である。図からわかるように、学

習前は試行時間内に一定の値に収束しなかったり、振動的であったものが、学習後には一定の目標値へ収束するようになったことが分かる。これは目標値生成を担当する Area5 の素子の発火の荷重和が、一定の値へ収束したことを意味している。また図 6 より、どの自由度に関して目標角度の変化に対して応答できていることが分かる。

4. 実験

図 7 に示した水平 3 自由度のマニピュレータを用いて、シミュレーションと同様の実験を行った。なお制御には必要ないが、物理パラメータは表 1 のものとほぼ等しい。各自由度における関節角度の時間変移、及び

Fig.7 Overview of the Manipulator

それぞれの目標角度を図 8 に示す。実機を用いた実験においてもシミュレーションと同様に、情報処理素子の自律的な活動によって目標角度を設定し、そこへ収束することが出来た。

Fig.8 Rotation Angle and Desired Angle

5. 結論と今後の課題

本研究では、予測不可能な環境の変化に対する高い適応能力を備えた生物の制御を統一的に扱う複合制御理論に基づいたコントローラの設計を行った。複合制御の中でも脳による運動制御に着目し、ニューロンを参考にした同質な情報処理素子を用いた制御と学習法を提案した。具体的には水平 3 関節型ロボットアームを用いて、水平面での到達運動に関して計算機シミュレーションを行った。このような運動を行うためには、目標手先位置を達成可能な各関節の目標角度を決定し、制御によりそこへ近づけるという論理的思考の展開が必要であるが、本研究では素子の自律的な活動と階層化されたネットワークを用いて実現を図った。その結果、手先の現在位置と目標位置との差及び現在の各関節角度を入力とする領域の素子の発火の荷重和が一定に収束し、これを目標値とすることで、結果的に手先を目標位置へ到達させることが可能となった。また実機による実験においても、提案手法による制御と学習が行えることを確認した。今後は得られる軌道がどのような範囲に収束するか、得られた目標角度や手先軌道の意味等の検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 伊藤正男, 塚原伸見: “新生理科学体系 8 神経生理学総論”, 医学書院, 1989.
- 2) 宮川博義, 井上雅司: “ニューロンの生物物理”, 丸善株式会社, 2004.
- 3) R. J. Tanaka, H. Okano, and H. Kimura: “Mathematical description of gene regulatory units”, Biophysical Journal, 2006.
- 4) R. J. Tanaka, and H. Kimura: “General description of gene regulatory units from compound control viewpoint”, 第 6 回計測自動制御学会制御部門大会, 2006.
- 5) 下田真吾, 旭岳史, 藤本英雄, 木村英紀: “複合制御におけるロボット制御”, 第 11 回ロボティクス・シンポジウム, 2006
- 6) 下田真吾, 木村英紀: “初期状態と細胞活動の定義に基づく脳型ロボット制御”, 第 6 回計測自動制御学会制御部門大会, 2006
- 7) N. A. Bernstein: “The problem of the interrelation of coordination and localization”, Arch. Biol. Sci. Vol. 38, pp.15-59, 1935
- 8) J. M. Hollerbach and K.C. Suh: “Redundancy resolution of manipulators through torque optimization”, IEEE J. Robot. Autom. Vol. RA-3, No.4, pp.308-316, 1987
- 9) N.Hogan: “An organizing principle for a class of voluntary movements”, J. Neurosci., Vol. 4, No.11, pp.2745-2754, 1984
- 10) M. Kawato, Y. Maeda, Y.Uno and R.Suzuki: “Trajectory formation of arm movements by cascade neural network model based on minimum torque-change criterion”, Biol. Cybern., Vol. 62, No.4, pp.275-288, 1990
- 11) 下田真吾, 木村英紀: “複合制御に基づくロボット制御則の理論的検討” 第 12 回ロボティクス・シンポジウム, (2007)