

環境適応に関するハイブリッド制御を使用した ロボットの組立作業の安定実現

Stable Execution of Assembly Tasks with Robot Using Hybrid Control Adaptive to Environmental Changes

孟正大[†], 安藤英由樹[‡], 平松誠治, 加藤厚生
Zheng-da Meng, Hideyuki Ando, Seiji Hiramatsu, Atsuo Kato

Abstract A improved hybrid control approach is presented in this paper. The control approach is based on external force and force tracking loops which are closed around the robot position system. An Adaptive algorithm is given when robot is interacting with environment with parameter uncertainties. For a well designed robot position system, external force loops can be designed and controlled easily with good performance. The approach is discussed in detail. In addition, non-circular peg-into-hole assembly tasks are performed with robots using this approach.

1. まえがき

今まで、工業用ロボットで最も成功している応用分野は位置制御に立脚している。しかし、工業用ロボットにとって多くの実際の作業（例えば、組立、研磨、ドリルなど）は基本的に環境との動的相互作用を必要とする。この場合位置制御だけでは不十分なので、位置制御を行うとともに力制御を行わなければならない。この十数年来、ロボットが接触作業を行うための制御問題について、多くの研究者が関心を持ち、ロボット工学の分野での重要な課題として活発な研究が行われた。

通常力制御方法を主に以下の二種類に分けてい

る：明示された制御と暗黙のうちの制御である。明示された制御では、タスクの描き方が手先の目標位置軌道だけを含めていて、一般化剛性行列あるいは一般化粘性行列によって、計測力と目標位置あるいは速度の関係而建てており、カフィードバックを行う。この方法の主な欠陥は、タスクを描くことと制御実現の間に干渉があることである。なお、剛性行列や粘性行列をどのように設定するかの問題点がある。Hogan¹⁾らが提案したインピーダンス制御は、位置と力の関係を含めているが、作業要求と環境ダイナミクスからロボットの目標慣性、目標粘性、目標弾性を設定することが複雑な問題になる。ハイブリッド制御は前後して Paul²⁾, Mason³⁾, Raibert と Craig⁴⁾ などによって発展された。中でも Mason のコンプライアンス曲面理論は最も代表的である。この方法の特徴は、力制御と

[†] 中国東南大学自動制御系（南京市）

[‡] 愛知工業大学 電気電子工学専攻（豊田市）

位置制御を並列させて, タスク描くことと制御計画生成を簡単に実現できる. Mason の理論は, 理想領域に立脚している. Schutter と Brussel⁵⁾ は Mason の理論をさらに発展し, 非理想環境 (たとえば有限な剛性を持ち, 摩擦があり, 環境構造とパラメータが不完全にしかわからず, あるいはその精度がひどいなど) 中の改良したハイブリッド制御方法を提案した. 一般的な方法と比べて, この方法でロボットが非理想環境中対象の表面形状を扱うために力制御方向と位置制御方向の他にもう一つ扱う方向を提案している.

本論文は Schutter & Brussel の方法に基づいて改善した力制御アルゴリズムを検討して特に作業環境のダイナミクスが未知の場合における接触作業のためのロボットの環境適応問題について考察する. 接触時にロボット手先の位置及び環境反作用力を計測して, 計測されたデータから環境ダイナミクスのパラメータを同定する. 同定結果により力制御アルゴリズムを調整し, ロボットの適応性を改善する. この方法を利用して, ロボットにおいて非円形シャフトの組立を実現した.

2. 力制御系の設計

2.1 力制御系の構成

Fig.1 は環境ダイナミクスを含めた接触作業ロボットの力制御系の構成を示している.

ここに F_d と F はそれぞれ作業空間で記述されたロボットの目標作用力入力と環境の反作用力, X_d と X はそれぞれ作業空間で記述されたロボットの目標位置と手先の実位置, X_0 は環境の位置, $P(s)$ は非線型補償により単純化されたロボット位置系の伝達関数 (ロボットのダイナミクスと位置制御コントローラを含む), $G_E(s)$ は環境ダイナミクス, $C_F(s)$ は力制御コントローラである.

普通, カセンサの構造共振周波数が位置ループの帯域幅より, ずっと高いので, カセンサのダイナミクスを無視できる. したがって, 力制御系の閉ループ伝達関数は次のようになる.

$$G_f(s) = \frac{C_F(s)P(s)G_E(s)}{1 + C_F(s)P(s)G_E(s)} \quad (1)$$

ただし, $P(s)$ は規範モデルで, 適切に設計すれば, 一例として次のように与えられる.

$$P(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

ただし, ω_n は位置ループの帯域幅である. 環境ダイナミクスは次式のようなものである.

$$M_0(\ddot{X} - \ddot{X}_0) + B_0(\dot{X} - \dot{X}_0) + K_0(X - X_0) = F \quad (3)$$

ここで, M_0, B_0, K_0 はそれぞれ環境の慣性, 粘性, 弾性行列である. 簡単化のために, $X_0=0$ とすれば, (3)式は次のようになる.

$$M_0 \ddot{X} + B_0 \dot{X} + K_0 X = F \quad (4)$$

また, 環境の伝達関数は次式のようなものである.

$$G_E(s) = M_0 s^2 + B_0 s + K_0 \quad (5)$$

2.2 力制御コントローラの設計

力制御系にとって力制御コントローラの設計はキーポイントになる. そこで, まず既知環境ダイナミクスに対して力制御コントローラ $C_F(s)$ を設計する. $C_F(s)$ は次のように与えられる.

$$C_F(s) = \frac{G_C(s)}{G_E(s)} \quad (6)$$

ただし, $G_C(s)$ は力制御アルゴリズムである. $1/G_E(s)$ は環境ダイナミクスを補償するための項である.

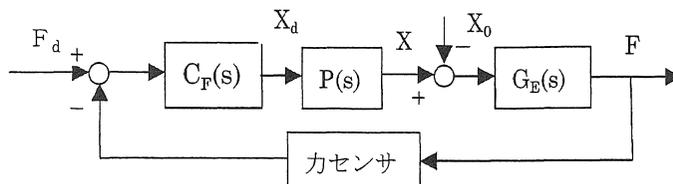


Fig.1 力制御系の構成

上式を式(1)に代入すると

$$G_f(s) = \frac{G_c(s)P(s)}{1 + G_c(s)P(s)} \quad (7)$$

となる。次に $G_c(s)$ を設計する。

2.2.1 比例制御

最も簡単なアルゴリズムは比例制御で、すなわち $G_c(s) = K_p$ である。すると、力制御系の開ループ伝達関数は次のようになる。

$$G_0(s) = G_c(s)P(s) = \frac{K_p \omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

この時、 s 平面上に分布する開ループ伝達関数の極が Fig.2 のように示される。閉ループ根軌跡において K_p が 0 あるいは任意の正数をとるとき力制御系のステップ応答は減衰振動になる。また、 K_p が大きいほど、振動の幅が大きく、振動の時間が長くなることがわかる。この外に力定常偏差が残るという欠点がある。

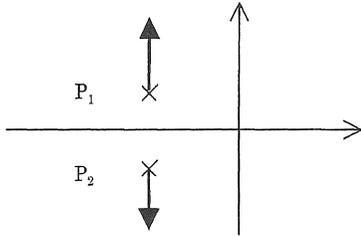


Fig.2 比例制御の根軌跡

2.2.2 積分制御

積分制御では $G_c(s) = K_I / s$,ここに K_I は積分係数である。したがって、力制御系の開ループ伝達関数は次式のようにになる。

$$G_0(s) = \frac{K_I \omega_n^2}{s(s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (9)$$

閉ループ根軌跡を Fig.3 に示す。三つの極 P_1, P_2 , および P_3 (座標原点) から出発する根軌跡が 3 本ある。

根軌跡によって、 K_I が小さいとき、実軸上の閉ループ極が動的応答特性に対して主な影響を与える。 K_I が大きくなるとともに、共役極が主導的極に代わる。

この方法は適当な K_I を選択すれば期待した動的応答特性が得られるだけでなく力定常偏差が零になる利点がある。

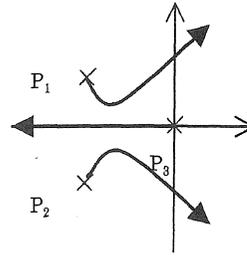


Fig.3 積分制御の根軌跡

環境の運動が $X_0(t) = V_0 t$ とする、このとき力定常速度偏差が次式で与えられる。

$$\Delta F_{SS} = \frac{V_0}{K_{VX}} \quad (10)$$

ただし、 K_{VX} は速度偏差定数と呼ばれ次式となる。

$$K_{VX} = \lim_{s \rightarrow 0} s C_F(s)P(s) \quad (11)$$

$G_c(s) = K_I / s$, 式(5), 式(6)を上式に代入すると

$$K_{VX} = K_0^{-1} K_I \quad (12)$$

自由空間で運動する時はカフィードバックが零で $\Delta F_{SS} = F_d$ である。故に、式(10)は力指令 F_d と速度指令 V_0 の関係を表す。したがって自由空間で環境に近づくときに力指令 F_d を速度指令 V_0 に代えて接触段階と同様な制御スキームを利用できる。この方法では物体接触時に制御方法を切替える必要はない。

規範制御設計方法を利用すれば最適ゲインは $K_I^* \cong 0.5 \omega_n$ で与えられる。すなわち、力制御系の閉ループの帯域幅は位置ループの帯域幅の半分である。

2.2.3 比例積分制御

比例積分制御は

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (13)$$

で与えられる。この方法は積分制御の長所がある同時にさらに力制御系の閉ループの帯域幅とは積分制御の 2 倍に増える。

3. 環境ダイナミクスのパラメータの同定および適応アルゴリズム

3.1 環境パラメータの同定

以上の討論は環境ダイナミクスを既知と仮定しておこなった。現実には、接触作業を実行するまえに環境ダイナミクスのパラメータを知らない場合も多い。環境に対してロボットの適応性を改善するために、実際の環境パラメータを同定しなければならない。本稿ではコンピュータで離散的にサンプリングされたロボットの手先の位置および環境反作用力のデータから、逐次最小2乗法を用いて、環境のパラメータ M_0, B_0, K_0 を同定する方法を採用した。

あらかじめ零次ホルダの近似を考え、式(4)で表した連続な環境ダイナミクスを離散的に書き換えると次式の差分方程になる。

$$\begin{aligned} X(i) + a_1 X(i-1) + a_2 X(i-2) \\ = b_1 F(i-1) + b_2 F(i-2) + r(i) \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $X(i), F(i)$ はそれぞれ時刻 It でサンプリングされたロボットの手先位置、および環境反作用力で、 $r(i)$ は誤差である。Tはサンプリング周期である。また、

$$a_1 = -(\alpha_1 + \alpha_2)$$

$$a_2 = \alpha_1 \alpha_2$$

$$b_1 = \left[\frac{1}{s_1 s_2} + \frac{\alpha_2}{s_2 (s_2 - s_1)} - \frac{\alpha_1}{s_1 (s_2 - s_1)} \right] \times \frac{1}{M_0}$$

$$b_2 = \left[\frac{\alpha_1 \alpha_2}{s_1 s_2} + \frac{\alpha_1}{s_2 (s_2 - s_1)} - \frac{\alpha_2}{s_1 (s_2 - s_1)} \right] \times \frac{1}{M_0}$$

$$\alpha_1 = e^{-s_1 T}$$

$$\alpha_2 = e^{-s_2 T}$$

$$s_{1,2} = \frac{-B_0 \pm \sqrt{B_0^2 - 4M_0 K_0}}{2M_0}$$

ここに s_1, s_2 は環境ダイナミクス式(4)の固有値である。計測したデータ $\{X(i), F(i)\} (i=1, 2, \dots, N)$ から逐次最小2乗法を用いて、 (a_1, a_2, b_1, b_2) を同定し、さらに上式によって環境ダイナミクスのパラメータ同定値 m_0, b_0, k_0 を次式のように計算する。

$$m_0 = \left[\frac{1}{s_1 s_2} + \frac{\alpha_2}{s_2 (s_2 - s_1)} - \frac{\alpha_1}{s_1 (s_2 - s_1)} \right] \times \frac{1}{b_1}$$

$$b_0 = (s_1 + s_2) m_0$$

$$k_0 = s_1 s_2 m_0$$

ただし、

$$\alpha_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}{2}$$

$$s_{1,2} = -\frac{\log \alpha_{1,2}}{T}$$

3.2 適応アルゴリズム

以上の結果を利用して、接触作業中に、ロボットが自動的に未知の環境に適応するアルゴリズムを次のように与える。

1) 環境パラメータの初期値を設定する

ただし、環境パラメータが未知の時は従来の経験パラメータからパラメータの初期値を選ぶ。

2) 力制御コントローラを設計する

2章に提案した方法を用いて、力コントローラを設計する。ここでは、力制御アルゴリズムは比例積分とする。

3) 接触のデータを計測する

接触作業を行い、作業中のロボット手先の位置及び環境反作用力を計測する。

4) 環境パラメータを同定する

計測したデータから、上の式によって環境のパラメータを同定してステップ1)に戻る。

4. 実験結果

以上の方法およびアルゴリズムの有効性を確認するために、4自由度 SCARA ロボット及び5自由度関節形ロボットをそれぞれ使用して実験を行った。テスト作業に関して、硬い環境を置き、ロボットが設定した速度で環境へ接近して、接触したあと環境平面に沿って直線的に做う運動を実行するという単純作業を選んだ。この作業は、自由運動の間、手先の経路を制御する能力、拘束運動の接触力を制御する能力、そして作業の二つの状態の遷移を制御する能力、未知の環境に適応する能力をわかりやすくテストできる。実験の結果を Fig.4, Fig.5, と Fig.6 に示す。システムは自由運動、拘束運動の両方の作業全体を通して安定を保持している。

Fig.4 は環境に適応するアルゴリズムを利用せず、2

章の力制御コントローラだけを用いた実験結果である。この結果によって、環境パラメータの初期値を合理的に選択すると、最大接触力を抑えて拘束表面に安定に適應するのに適應アルゴリズムを必要としない。しかしながら、システムは安定しているが、その性能はより低下している。環境に衝突すると、エンドポイントは表面に衝突を与えながら数度バウンドする。

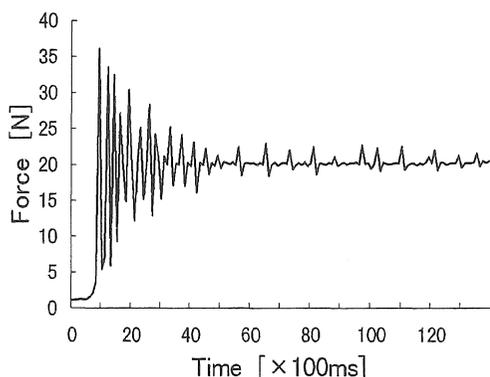


Fig.4 環境適応アルゴリズムがない時の接触力の時間履歴

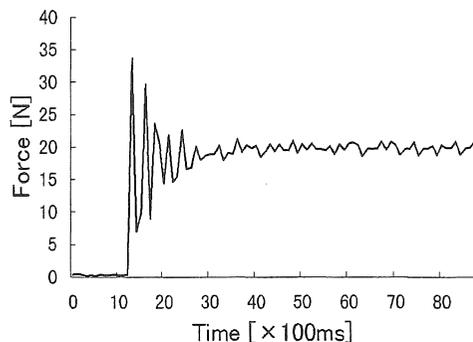


Fig.5 環境適応アルゴリズムがある時の接触力の時間履歴

Fig.5 は 2 章の力制御コントローラに適應アルゴリズムを加えた方法を用いる実験結果である。前図と比較すると、環境適応アルゴリズムを有効に使用することによって、力制御コントローラは数度バウンドを明らかに抑えて環境に適應する能力を増大できることが明確である。

Fig.6 はそれまでの実験で適應した環境のパラメータをパラメータの初期値として力制御コントローラ及び適應アルゴリズムを用いる実験結果である。この結果から、力制御の性能を更に改善できることがわかる。また、こ

の方法を利用して非円形シャフトの組立作業⁶⁾を実現した。

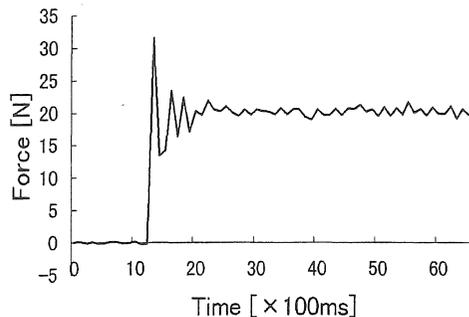


Fig.6 それまでの実験で適應した環境のパラメータを初期値として力制御コントローラおよび適應アルゴリズムを用いる時の接触力の時間履歴

5. まとめ

本論文は Schutter & Brussel の方法に基づいて接触作業中に安定に適應する力制御コントローラを設計することを検討した。特に作業環境のダイナミクスが未知の場合における接触作業中のロボットの環境適応アルゴリズムを考察した。この方法は、自由空間で環境に近づくときに力指令 F_d が速度指令 V_0 に代わって接触段階と同様な制御スキームを利用できる。物体接触時に制御方法を切換える必要はない。ほかに最大接触力を自動的に限定することができた。環境のパラメータが未知の場合には、接触時にロボット手先の位置及び環境反作用力を計測して計測されたデータから環境ダイナミクスのパラメータを同定する。同定結果により力制御アルゴリズムを調整し、ロボットへの適應性を改善する。実際の接触作業を行なって、実験の結果から、提案した方法の有効性が確認された。それに、この方法を利用して、ロボットにおいて非円形シャフトの組立を実現した。

参考文献

- 1) N.Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I -Theory, Part II -Implementation, Part III-Applications," *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol.107, pp.1-24, Mar.1985.
- 2) R.Paul, *Robot Manipulators: Mathematics,*

- Programming, and Control, M.I.T. Press, Cambridge, MA., 1983.
- 3) M.T.Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators." IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.11, No.6, pp.418-432, 1981.
 - 4) M.H.Raibert and J.J.Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," Trans. of ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 102, pp.126-133, 1981.
 - 5) J.D.Schutter and H.V.Brussel, "Compliant Robot Motion I. A Formalism for Specifying Compliant Motoin tasks, II. A Control Approach Based on External Control Loops." The International Journal of Robotics Research, Vol.7, No.4, pp. 3-22, Aug. 1988.
 - 6) Meng Zhengda, Lu Zhaomei, Yan Xuegao, "Non-Circular Peg-into-Hole Assembly Completed with the Improved Force Control Scheme," Journal of Najing University of Aeronautics & Astronautics, Vol.26 Suppl., pp.105-110, Nov.1994.
 - 7) Z.W.Luo and Masami Ito, "Control Design of Robot for Compliant Manipulation on Dynamic Environments," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.9, No.3, pp.286-296, June, 1993.

(受理 平成11年 3月20日)