評価関数形ニューラルネットワークによる 3本指のは持制御に関する研究*

弘 津 聡 彦^{*1}, 原 文 雄^{*2}

Grasping Control of 3-Fingered Hand by Criterion Function Neural Network

Akihiko HIROTSU and Fumio HARA

Many grasping control methods for multifingered endeffector, such as the compliance control method or hybrid position/force control method, have been studied. There still remain some problems in the subtle control of finger motion as in human fingers. In this paper, we describe the grasping motion of a 3-fingered endeffector with each finger having 4 degrees of freedom. In order to derive the dynamics of the system, we formulated the equation of motion for 3 fingers grasping a stiff object with their tips. Then the neural network controller, which has a criterion function learning algorithm, is applied for the 3-fingered endeffector motion control. Simulation results show the effectiveness of this control method for grasping, and finger motion is characterized by a properly designed criterion function in the NN control.

Key Words: Grasping Control, Three-Finger Model, Motion Characterization, Neural Network, Simulation

1. 緒 言

多指ハンドによるは持繰り制御問題については、従来よりコンプライアンス制御⁽¹⁾や位置と力のハイブリッド制御⁽²⁾による方法をはじめ、さまざまな方法が提案されてきた。しかし、いかにすれば実際に人間の指が行うような「優しい」動きをはじめとし、さまざまな動き特性をもつ動作を実現できるかという点について課題が残っており、指の動きを介しての人とロボットとのインタフェースという観点からこの研究は重要である。

本論文では、3本指による摘み形の動作を対象とし、指の先端で点接触により対象物をは持するものと仮定し、その運動をモデル化する。この3本指のモデルに評価関数形ニューラルネットワーク(以下N. N.)を用いた制御系を適用し、各種の評価関数を導入することによって3本指の摘み動作においてさまざまな運動特性を発揮する制御を実現させる方法をシミュレーションを用いて研究する。

2. モ デ ル 化

2・1 1本指の系のモデル化 まず人間形の指1本のモデルとして、図1の4自由度のリンク系モデルを用いる。

この系をモデル化する時の条件を以下に示す。

図 1 指モデル

* 原稿受付 平成5年1月13日。

^{*1} 学生員, 元: 東京理科大学大学院。

^{*2} 正員, 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

(1) 指は4個の回転関節によって結ばれる5本の十分に細いまっすぐで剛なリンクからなるものとし、各リンクの長さは根元のほうからそれぞれ、 l_0, l_1, l_2, l_3, l_4 であるものとする。また各関節はアクチュエータを持つものとする。

(2) 各関節の質量は無視できるものとし、各リンクはその中心に質点を持つものとし、その質量は根元のほうからそれぞれ、 m_0, m_1, m_2, m_3, m_4 であるものとする。

(3) 関節の回転軸はリンクと直角を成すものとし、指の先端側の3関節の回転軸は平行であるとし、また先端側の3関節の回転軸と最も根元側の関節の回転軸とは直角を成すものとする。

以上の系の運動方程式は、基準座標系と i リンク座標系の座標変換行列 ${}^0T_i \in R^{4 \times 4}$ 、リンク i の疑似慣性行列 $H_i \in R^{4 \times 4}$ および重心位置ベクトル ${}^iS_i \in R^4$ によって次のマニピレータの運動方程式の一般式⁽³⁾で求められる。

$$t_i = \sum_{k=i}^n \sum_{j=1}^k \text{tr} \left(\frac{\partial^0 T_k}{\partial \theta_j} H_k \frac{\partial^0 T_k^T}{\partial \theta_i} \right) \ddot{\theta}_j + \sum_{k=i}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^k \text{tr} \left(\frac{\partial^2 T_k}{\partial \theta_j \partial \theta_m} H_k \frac{\partial^0 T_k^T}{\partial \theta_i} \right) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_m - \sum_{j=i}^n m_j g^T \frac{\partial^0 T_j}{\partial \theta_i} {}^jS_j, \dots (1)$$

ただし t_i 、 θ_i はそれぞれ関節 i の関節トルク、関節変数を表す。この式をマトリックス形式に変形すると

$$t = M\ddot{\theta} + H\dot{\theta} + g \dots (2)$$

となる。ただし、

$t \in R^4$: 関節トルクベクトル

$\theta \in R^4$: 関節変数ベクトル

$g \in R^4$: 重力項マトリックス

$M \in R^{4 \times 4}$: 慣性項マトリックス

$H \in R^{4 \times 4}$: 遠心力・コリオリ力の項マトリックスである。

図2 対象物をは持した3本指の系

2.2 対象物をは持する3本指の系のモデル化

以上で述べた自由度の指を3本で対象物をは持させたものとして図2に示すような系を考える。この系のモデル化の条件は、前述した指のモデル化の条件に加えて、以下のとおりである。

(1) は持対象物は剛体であるものとする。

(2) 各指はその先端では持対象物と摩擦点接触をする。

(3) 各指の先端は対象物から離れたり滑ったりしない限り接触点は移動しない。

この系は閉リンク系となるが、その運動方程式は仮想木構造⁽⁴⁾を用いて次の手順(①, ②, ③)で求めることができる。

①この閉じた系を図3に示すように、指2・3の先端で切って図4のような3本の開リンクからなる仮想

図3 対象物をは持した3本指の系と切断点

図4 仮想木構造

木構造をつくり、その運動方程式

$$\tau = M_{12}\ddot{q} + H_{12}\dot{q} + g_{12} \dots\dots\dots (3)$$

を求める。ただし

$\tau \in R^{15}$: 関節トルクベクトル

$q \in R^{15}$: 関節変数ベクトル

$g_{12} \in R^{15}$: 重力項ベクトル

$M_{12} \in R^{15 \times 15}$: 慣性項マトリックス

$H_{12} \in R^{15 \times 15}$: 遠心察・コリオリカマトリックス

である。

②は持したときの系は9自由度なので、 q とのうち9成分から成る q_1 の関係を表す

$$\dot{q} = W\dot{q}_1 \dots\dots\dots (4)$$

なるヤコビ行列 $W \in R^{15 \times 9}$ を、各仮想木構造の先端に生じるよう束条件より求める。

③上記①②で求められた式より、次の運動方程式が求められる。

$$W^T \tau = W^T M_{12} W \dot{q}_1 + W^T (M_{12} W + H_{12} W) \dot{q}_1 + W^T g_{12} \dots\dots\dots (5)$$

また、それぞれの指先では静止摩擦力により、は持条件式

$$\eta_i |f_i|^2 - e_i^T f_i \leq 0, \quad \eta_i = 1/\sqrt{\mu_i^2 + 1} \dots\dots\dots (6)$$

が成り立つ。ただし、

μ_i : 指 i の先端とは持対象物との接触点の静止摩擦係数

$f_i \in R^3$: 指 i の指先力ベクトル

$e_i \in R^3$: 指 i の先端とは持対象物接触点での単位内向き面法線ベクトル

である。

3. 制 御 方 法

本論文では図5に示すような N. N. 制御系を用いる。この制御系は、対象物を連続的には持する制御と3本指の運動特性を、適切な評価関数によって学習される N. N. の出力によって補償するものである。

すなわち、この図において、 f , t , y , y_d はそれぞれ、3本指についての指先力ベクトル、関節トルク、

図5 評価関数を用いた N. N. 制御系

関節変数ベクトルおよびその目標値である。また、 t_r , t_n は PID 制御器および N. N. から出力される3本指について関節トルクベクトルである。この制御系の特徴は、制御入力が各指の関節角度、角速度をフィードバックして PID 制御器でもとめた成分と、各指の関節角度、角速度、目標角度、目標角速度、指先力を入力として、ニューラルネットワーク制御器で求めた成分との和として与えられることであり、PID 制御器をニューラルネットワーク制御器が補う形態となっていることである。これは、3本指が対象物をは持した系は冗長駆動系となり、解として無数の組合せが存在して、各指の関節角度、角速度をフィードバックして PID 制御をしただけでは、それら無数の組合せのうち、は持条件をはじめとする諸条件を満たす制御入力の組合せが得られる保証はない。そのため、PID 制御器と並列にニューラルネットワーク制御器を置き、これをは持条件などの条件を表現した評価関数によって学習することで、目標値とは持条件などを与えた時、その双方を満足する実現することを図っている。

また、N. N. は図6に示すように、3本指についての関節角、関節角速度のベクトル y 、それらの目標値 y_d および3本指の指先力 f を入力とし入力層57ユニット、出力層12ユニットのネットワークで、バックプロパゲーション法で学習される。

本論文では、より複雑な入力・出力関係に対応できるように、4層のネットワークを用いる。N. N. 内の各ユニットのシグモイド関数としては、入力層・中間層については

$$f(x) = 1/(1 + \exp(-x/t_{\text{emp}})) \dots\dots\dots (7)$$

を、また出力層については

図6 ニューラルネットワーク図

$$f(x) = 2a / \{1 + \exp(-x/t_{\text{emp}})\} - a \quad \dots\dots\dots (8)$$

を用いる。ただし

t_{emp} : シグモイド関数の傾きを表す係数

である。以上を図7に示す。これは、通常制御入力に正負両方の値をとり得ることに対応したもので、これにより出力層ユニットは $-a \sim +a$ の値を取るようになる。

評価関数としては、次の二つの場合を考える。すなわち①ペナルティ関数を持つは持条件の項と制御入力の N. N. 成分 t_n を互いに打ち消し合い、運動に寄与しないように修正する項から成る次の評価関数1

$$c_i = \left(\eta_i |f_i| - e_i^T f_i - \frac{\zeta^2}{\eta_i |f_i| - e_i^T f_i} \right) {}_i J_f^T e_i - \left\{ {}_i t_n - \frac{({}_i J_f^T e_i)^T {}_i t_n ({}_i J_f^T e_i)}{|{}_i J_f^T e_i|^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

を用いる。ただし

${}_i J_f \in R^{3 \times 4}$: 指 i のヤコビ行列

$e_i \in R^3$: 指 i の接触点の内向き法線方向ベクトル

$f_i \in R^3$: 指 i の指先力ベクトル

である。または、

$$\zeta(t) = \zeta_{\min} + (\zeta_{\max} - \zeta_{\min}) \exp(-\gamma t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表される時間 t の関数である。これにより図8に示すように、N. N. の結合係数の初期値によってはは持条件が不安定になる制御開始直後に、 $\zeta_{\max}$ を大きく取ることによって、は持条件を満足し、 $\zeta_{\min}$ を小さく取ることによって、その後は持力を抑えた制御が可能になる。

能になる。

次に、以上の評価関数1に運動特性を特徴化させるために、②例えば指先力を低減させる項を加えた評価関数2や、

$$c_i = \left(\eta_i |f_i| - e_i^T f_i - \frac{\zeta^2}{\eta_i |f_i| - e_i^T f_i} \right) {}_i J_f^T e_i - \left\{ {}_i t_n - \frac{({}_i J_f^T e_i)^T {}_i t_n ({}_i J_f^T e_i)}{|{}_i J_f^T e_i|^2} \right\} - {}_i J_f^T f_{ci} \quad \{f_{ci}\}_j = \sigma\{f_i\}_i^{\delta} \quad (\delta=1, 3, 5, \dots) \quad \dots\dots\dots (11)$$

③関節トルクを低減させる項を加えた評価関数3

$$c_i = \left(\eta_i |f_i| - e_i^T f_i - \frac{\zeta^2}{\eta_i |f_i| - e_i^T f_i} \right) {}_i J_f^T e_i - \left\{ {}_i t_n - \frac{({}_i J_f^T e_i)^T {}_i t_n ({}_i J_f^T e_i)}{|{}_i J_f^T e_i|^2} \right\} - {}_i t_c \quad \{t_c\}_j = \sigma\{t\}_j^{\delta} \quad (\delta=1, 3, 5, \dots) \quad \dots\dots\dots (12)$$

を採用して指の運動特性を検討した。

ただし δ, σ は任意に決められるパラメータである。またここで、ベクトル t の i 要素を $\{t\}_i$ であるなどとする。

4. シミュレーション方法と結果

4.1 諸元 制御対象の系のおもな諸元は次のとおりである。

各指のリンクの長さ・質量

$l_0 = 0[\text{cm}]$

$l_1 = 0[\text{cm}] \quad m_1 = 0[\text{g}]$

$l_2 = 4[\text{cm}] \quad m_2 = 4[\text{g}]$

$l_3 = 2[\text{cm}] \quad m_3 = 2[\text{g}]$

$l_4 = 2[\text{cm}] \quad m_4 = 2[\text{g}]$

は持対象物(一様剛体の球)

半径: $1[\text{cm}]$ 質量: $3[\text{g}]$

指 i の先端とは持対象物との接触点の静止摩擦係数

$\mu_i = 1$

ただし、各指の最も根元側のリンクは固定で、その

(a) 出力層

(b) そのほかの層

図7 シグモイド関数

図8 関数 $\zeta(t)$ 概念図

質量 m_0 は対象物をは持した3本指の系の運動に影響しないので特に指定しない。

以上の諸元を持つ指とは持対象物を用いて、図9に示すような、基準座標系の原点を中心に対称になるように指を配置し、図10のようには持対象物の中心について対称になるように球をは持させた系を構成する。そして、球の中心が z 軸上に来るようには持して、 z 軸方向に各指が全く同じ動作をする運動を目標とするシミュレーションを行う。

4.2 学習付き制御シミュレーション z 軸方向に各指が全く同じ動作をする運動を目標として、毎ステップごとにN. N.の学習を行う学習付き制御のシミュレーションを行った。

評価関数1を用いて、N. N.の学習付き制御を行った場合の結果を図11に示す。この図には、3本指のそれぞれについて、関節角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ と指先力 f_x, f_y, f_z およびは持条件の満足性の時間的変化が示されている。図11に示すように、常にはは持条件(式(6))を満たした制御が実現される。

図9 基準座標系上の指の配置

図10 は持対象物座標系上の指先位置

評価関数2を用いて、N. N.の学習付き制御を行った場合の結果を図12に示す。この図には3本指のそれぞれについて、指先力 f_x, f_y, f_z およびその合力の大きさ f が示してある。図11と12とを比較すると、評価関数2を用いた場合、 f_x が約半分に小さくなっており、また、 f_z もやや小さくなっていることがわかる。

関節トルクの低減を実現する評価関数3を用いた制御結果を、評価関数1を用いた場合の関節トルクと比較すると、図13の(a), (b)のようになる。第2, 3関節では、評価関数3を用いると、明らかに関節トルクが小さくなっている。しかし、第4関節トルク t_4 はやや大きくなる。全体として、確かに、評価関数3を用いると、関節トルクは低減される。

また、評価関数1, 2, 3を用いて学習付き制御を行ったときの各指先の基準座標系 z 方向の速度の変化を示したものが図14(a)~(c)である。これを見ると、評価関数1を用いたときに比べ、評価関数3を用いたときの結果は全体に速度の変化はゆるやかになり、長い時間をかけて運動を行っており、評価関数2を用いたときの結果は運動の前半では速度の変化はゆるやかになっているが、逆に後半は速度は急激に変化していることがわかる。以上により、評価関数に運動特性を特徴化する項を付加することによって、さまざ

図11 評価関数1による制御結果

まな運動特性を持った指のは持運動が実現されることがわかる。

4・3 学習付き制御で得られた N. N. を用いた学習なし制御シミュレーション

学習付き制御で得られ

た N. N. を用いて、(学習なし)制御のシミュレーションを評価関数 1 の場合について実行した結果を図 15 に示す。この図からわかるように、は持条件を満たした制御が可能となるが、その運動特性は学習付き制御の結果(図 11)と異なったものとなることがわかる。

図 12 評価関数 2 による制御結果(指先力)

(a) 評価関数 1

(b) 評価関数 3

図 13 評価関数 1・3 による制御結果の比較
(関節トルク)

(a) 評価関数 1

(b) 評価関数 2

(c) 評価関数 3

図 14 評価関数 1・2・3 による制御結果の比較
(指先速度)

図 15 学習なし制御による制御結果

5. 結 言

本研究より以下のことが明らかになった。

(1) 3本指が対象物をは持したときの系のモデル化を行い、仮想木構造を用いてその運動方程式を明らかにした。

(2) 対象物をは持した3本指の制御系として、評価関数形ニューラルネットワーク制御系を提案した。そして適切に設計した評価関数を用いて上記のモデルを制御するシミュレーションを行い、3本指の運動特性を特徴化することができた。

(3) 学習付き制御で得られたN. N.を用いた学習なし制御を行い、対象物の姿勢の情報を用いなくて

も連続的に対象物をは持して制御できる可能性を示した。

文 献

- (1) 吉川・鄭, 拘束運動下にある対象物の複数台ロボットによる協調ハイブリッド制御, 第7回日本ロボット学会学術講演会, (1989), 833-836.
- (2) 金子・ほか3名, 摩擦を考慮した多指ハンドの剛性モデルによる安定把握解析, 日本ロボット学会誌, 7-3(1989), 161-170.
- (3) 吉川, ロボット制御基礎論, (1988), 238, コロナ社.
- (4) 中村, 閉リンクロボットのダイナミクス計算法と駆動冗長性の最適化, 計測自動制御学会論文集, 25-5 (1989), 600-607.