進化プログラムを用いた多指ロボットハンドの
操り動作の生成*長谷川 泰久^{*1}, 間瀬 健一郎^{*2}, 福田 敏 男^{*3}Generation of Regrasping Motion for Multi-Fingered Robot Hand
by Evolutionary ProgrammingYasuhisa HASEGAWA^{*4}, Kenichiro MASE and Toshio FUKUDA^{*4} Nagoya University, Dept. of Micro System Engineering,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603 Japan

The control of multi-fingered robot hands has been the subject of recent interest. To manipulate some object with regrasping motion, there are many parameters to be determined; the grasping points, grasping forces, regrasping phases, finger allocation and so on. It is difficult to optimize such manipulation parameters for achieving effective manipulation. In this paper, we propose a generation algorithm of regrasping motion for a four-fingered robot hand using Evolutionary Programming (EP). Evolutionary optimization method is generally able to find optimal solutions without supervisor after much iteration, which makes it almost impractical to apply a real robot in online learning process. Therefore we apply the controller generated in numerical simulations to the real robot hand. We show effectiveness of the proposed generation algorithm for the regrasping motion with experimental results.

Key Words: Multi-Fingered Robot Hand, Regrasping, Evolutionary Programming

1. は じ め に

多指ハンドに関する研究はその機構やセンサや制御手法等, ハードウェアおよびソフトウェアの双方から実用化に向けて盛んに行われている。これは, 自由度の少ない従来型のグリップタイプハンドに対し, 多指ハンドは人の手のように多自由度を利用した巧みな把持およびハンドリングが可能になると考えられるためである。多指ハンドの制御手法に関する従来の研究として, 把持点の決定方法⁽¹⁾⁽²⁾ や把持点の転がり接触⁽³⁾, 転がり制御⁽⁴⁾, 力制御⁽⁵⁾ や剛性制御⁽⁶⁾ といった研究がなされている。また, 滑り接触を考慮した把持に関する研究も行われている⁽⁷⁾。このように従来の研究では, 物体を安定に把持したり, 把持物体の姿勢を変えろといった操り動作に関して着目されてきた。しかし, ロボットハンドをより有効に用いることを考えた際に, 指を把持物体から離して別の把持位置へ移動するといった持ち替え操作が, 物体の位置・姿勢を大き

く変えることに対して有効となる。この持ち替え操作を扱った研究として, Fearing⁽⁸⁾ は3指ロボットハンドによって棒状物体の回転操作を行っているが, 持ち替えを行う指はほぼ決定されている。小俣⁽⁹⁾ は, 4指以上のロボットハンドによって持ち替え指および持ち替え位置の決定を探索木によって順次探索する方法を提案している。これは数回先の持ち替え操作を考慮しつつ探索時間が比較的速い反面, 把持物体が最終姿勢に到達するまでの全体動作における行動計画となると, 探索空間が大きくなり持ち替え操作が得られ難くなる。また, 初期把持位置はあらかじめ与えられており, 初期把持位置を含む持ち替え計画は行われていない。

本論文では, 初期把持位置の決定を含む持ち替え操作の計画問題に進化プログラミング [以下 EP (Evolutionary Programming)] を用いる。EP では個体として実数を直接用いることができ, また多目的最適化問題に対して有効である⁽¹⁰⁾。よって, 複数の拘束条件のもとで EP を用い, 初期把持位置および, 持ち替え位置および持ち替え姿勢を決定する。さらに把持物体の目標姿勢到達までの持ち替え回数も自動的に決定する。しかし, 一般にこのような進化的探索手法では, 多大な探索試行回数が必要となるため, あらかじめシ

* 原稿受付 1999 年 12 月 20 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)。^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科機械情報システム工学専攻。^{*3} 正員, 名古屋大学先端技術共同研究センター。

E-mail: hasegawa@mein.nagoya-u.ac.jp

ミュレーション上で解の探索を行い、その後、実機への適用を行う。本論文では持ち替え操作として円柱物体の軸の回転操作を扱う。

2. 物体の持ち替え操作生成アルゴリズム

2.1 目標動作 通常、目標姿勢までの回転角が大きく、把持指の移動範囲を越えるような場合には、把持指を物体から離し新たな把持位置へ指を移すといった持ち替え操作を繰り返すことによって目標姿勢まで到達させることが可能となる。そこで、本論文で対象とする動作は、図1に示すような円柱物体を常に3指で安定把持を行い、持ち替え操作を繰り返すことによって水平姿勢から垂直姿勢まで回転させる行動を取扱う。このような持ち替え操作を行うためには、把持物体の形状、摩擦係数、把持位置、把持力、把持指、持ち替え位置、持ち替え時期(姿勢)等の多くのパラメータを決定しなくてはならない。そこで、本論文では、EPを用いることにより、把持位置、持ち替え位置、持ち替え時期、持ち替え回数を自動的に決定するアルゴリズムを提案する。あらかじめ用意するパラメータとしては、対象物体の形状、摩擦係数、物体の初期姿勢および最終姿勢、把持力の総和のみとしている。把持力については、把持条件から求め、把持指は、持ち替え点を含む初期把持位置と各指との距離を最小になるよ

Fig. 1 Objective motion

Fig. 2 Coding of individual

うに決定する。

2.2 コーディング方法 EPに用いる遺伝子は、図2に示すような物体上の初期把持位置、持ち替えの位置と持ち替え姿勢から構成されている。把持対象物体が円柱であるため把持位置は、図3に示すように高さ(Height on Cylinder)と角度(Angle on Cylinder)の組で表され、持ち替え位置も同様に高さで表される。また、持ち替え姿勢は、把持対象物体の初期姿勢における円柱の軸と最終姿勢における円柱の軸とを通過する平面上の回転角(Object Angle) ϕ を用いる(図1参照)。そこで初期把持位置3点で6個、また1回めの持ち替えで3個、さらに次の持ち替えで3個、最後に最終把持状態での持ち替えで2個、最大持ち替え回数3回の場合には個体長は14個となる。最大持ち替え回数を一つ増やすごとに3個、個体長が増す。最終把持状態での持ち替えは、その後の作業のためにより安定した把持を行うためである。また、持ち替え姿勢を示す角度が、以前の持ち替え時の角度より大きくない場合には、その持ち替え情報は無効と見なされ持ち替えは行われない。よって、最大持ち替え回数5回の場合には、2~5回の持ち替え回数となる行動が解として探索される。図4にフローチャートを示す。

指と対象物体との相対位置関係から把持指が決定されるため、一般に各指の関節角をパラメータとして用いる場合よりも、物体上の把持位置をパラメータとして使用することによって遺伝子長が指の数に応じて無

Fig. 3 Contact point on the cylinder

Fig. 4 Regrasping algorithm

駄に多くなることがなく、解の収束性がよくなっている。

2・3 評価方法 EP に用いる評価関数を式(1)に示す。

$$E = w_1 \sum_{r=1}^N \left(\sum_j (f_j(t_r^+) - f_{avg}(t_r^+))^2 + \sum_j (f_j(t_r^-) - f_{avg}(t_r^-))^2 \right) + w_2 \int_T \sum_j |\tau_{ji}(t)| dt + \int_T p dt \dots \dots \dots (1)$$

第1項の f_j は把持指 j の内力ベクトルのスカラー値を示しており、その平均値は f_{avg} である。3指把持を原則としているので、 J は把持指の集合である。この項は各指先力とその平均の差分を取ることで、一つの指に過度な力が掛からないようにするためであり、これによって各指が均等な配置となるようにする効果がある。また、 t_r^+ は持ち替え回数 r 回めの持ち替え直後の時間を示し、 t_r^- は持ち替え回数 r 回めの持ち替え直前の時間を示す。 N は総持ち替え回数である。第2項の τ_{ji} は把持指 j の関節を駆動させる i 番目のモータのトルク値を示しており、特異点付近での作業を避け、また効率のよい自然な把持の実現を目的としている。第3項の p は、各個体の持ち替え操作が、下記の把持条件および把持指条件を満たさない場合にペナルティとして課せられる定数である。よって、望ましい持ち替え操作は、この評価値を最小とするものである。 T は、目標動作終了までの時間を示す。

把持条件は、EP が決定した把持位置において、以下の3条件を満たすような把持力が計算により得られた場合である。条件を満たす把持力が得られない場合には、評価にペナルティが課せられる。詳細な計算式は文献(11)を参照。

条件1) 指先力と重力の合力が零である

条件2) 指先力と重力の合モーメントが零である

条件3) 各指先力が摩擦円すい内にある

把持指条件として、各指先端が決定された把持位置に到達できない場合には、同様に評価値にペナルティとして定数が加えられる。初期把持点における指の割当ては、初期把持点(3点)と初めの持ち替え点(1点)を含む、計4点の把持位置 x と把持指の根元位置 b の距離の和が最小となるように(式(2))決定される。

$$\min_j \sum_{k=1}^4 (x_k - b_j)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 k は把持位置番号を示し、 j は指番号を示す。

持ち替え回数を増やすと、把持位置や把持姿勢がより理想的な状態を取りやすくなり、式(1)の評価関数

において第1項および第2項が小さくなる傾向があり、持ち替え回数の多い行動が獲得されやすくなる。しかし、持ち替え操作に時間がかかるため、作業時間の点では持ち替え回数が少ない方が望ましい。そこで、考慮する把持力を持ち替え直前と直後の値を加算することによって、持ち替え回数が増えると総和が増え、関節トルクと持ち替え回数のバランスを取っている。

Fig. 5 Four-fingered robot hand

Object Angle[deg.]

(a) 3 times regrasp

Object Angle[deg.]

(b) 4 times regrasp

Object Angle[deg.]

(c) 5 times regrasp

Fig. 6 Simulation results of various regrasping times

3. シミュレーション

3・1 シミュレーション条件 進化的探索アルゴリズムは、一般的に目的の解が見つかるまでに、多くの繰返し試行回数を必要とするため、直接実機を用いた解の探索は、実機の耐久性や、時間的な効率の点で困難である。そこで、まずシミュレーションにおいて持ち替え操作の獲得を行い、次に実機への適用を行う。よって、シミュレーションに用いるリンク長さやモータトルク等のスペックは図5に示す実機に基づき決定した。

このロボットハンドは4指各4関節のロボットハンドであるが、指先2関節が連動作動するように設計されている⁽¹²⁾。これは人間の指先関節が連動している

ことを模倣し、そのような拘束状態にすることにより、4関節を3アクチュエータで駆動させることができ、それにより指の機構をより簡便にするためである。ここでロボットハンドの指の各関節角を θ_i で表し、 i を

Fig. 7 Evaluation value

Fig. 8 Joint angle, grasping force and motor torque

Fig.9 Regrasping motion

根元の関節から 1, 2, 3, 4 とすると、指先 2 関節 θ_3 , θ_4 は

$$\theta_4 = k\theta_3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

と示される。ここで k は関節連動比であり、 $k=1.6$ となっている。各関節の作動角は以下のである。

$$\begin{aligned} -\pi/4 < \theta_1 < \pi/4 \\ -\pi/2 < \theta_2 < \pi/2 \\ 0 < \theta_3 < (\pi/2)/k \\ 0 < \theta_4 < \pi/2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

把持物体と指との静止摩擦係数 μ_i を、 $\mu_i=0.577$ (摩擦角 $\alpha_i=\pi/6$) とし、また、把持力の総和は 1.0 N、各モータの限界トルクは 5.37 mNm とした。

操り動作は静的な状態で行うものとし、持ち替え作業は回転操作を止めて行う。また、把持を行っていない指は物体表面の把持平面上に添えられているものとする。

把持条件および把持指条件を満たさない場合に加えられるペナルティ p を、 $p=100$ とした。これにより、条件を満たさない場合は満たしている場合に対して評価が悪くなり、解候補から削除されやすくなる。評価関数の重み係数である w_i は $w_1=1.0$, $w_2=0.1$ とした。最終状態まで把持物体の回転角度を 1.0 degree ごとに評価関数の第 2 項の計算を行った。また EP についての各パラメータは個体数 200, 1 000 世代まで行うとした。

3・2 シミュレーション結果 初めに、持ち替え

Fig.10 Block diagram

回数を 3 回から 6 回までに固定した場合の、その持ち替え操作の探索を行った。図 6 は横軸を把持物体の回転角とし、初期姿勢(回転角 0°)から、最終姿勢(回転角 90°)までの間に使用する指番号および持ち替え操作時期を示している。例えば、図 6(a)では、初め指番号 1, 3, 4 の指を用いて物体把持を行い、回転角が 29.3° において指 1 から指 2 へ持ち替えが行われ、さらに回転角 51.87° と 90° において、指 1 と指 2 を切り替えて持ち替え動作を行っている。また、この持ち替え回数の変化に対する評価関数中の評価項目の値を図 7 に示す。図 7 の Ef は評価関数の第 1 項の評価値を $E\tau$ は第 2 項の評価値を示している。結果として持ち替え回数 4 回の解が最適であると評価された。また、最大持ち替え回数を 6 回として(個体長 23)、目標動作を満たす最適な把持動作の探索を行ったところ、前回と同様に持ち替え回数が 4 回となる行動が得られた。得られた把持動作の例として、把持回数が最も少ない 3 回のときの、各指関節角軌道、指先力、モータトルクを図 8 に示す。また、その動作を図 9 に示す。

Fig. 11 Experiment of manipulation

Fig. 12 Grasping force

図9中の(a)～(g)は図6(a)中のa～g)に対応している。得られた持ち替え動作は、すべて最大発生可能トルクの限界を超えることなく、持ち替えを行っている。

このようなシミュレーションにより、物体の持ち替え操作に必要な各指の指先位置および持ち替え姿勢および各把持力を決定することが可能となる。

4. 実機実験

シミュレーションによって得られた持ち替え操作を実機に適用する。図10に示すように、シミュレーションにより得られた、把持位置、持ち替え位置から、逆運動学を用いて各モータ角に変換し、また、 J^T を用いて把持力からモータトルクを求め、コンプライアンス制御によって各モータを制御する。コンプライアンス制御により物体とロボットハンドとの相対位置のずれから起こる把持位置のずれや、モデル誤差を若干吸収することができる。また、制御周期は2msである。

把持状態を図11に示し、そのときの把持力を図12

に示す。図11中の(a), (e), (g)は、図9の(a), (e), (g)に対応している。よってシミュレーションとほぼ等しい結果となっている。

5. まとめ

本論文ではEPを用い、持ち替え操作の自動化を行った。ここでは解析的な決定が難しい各指の対象物体上の把持点と持ち替えを行う際の持ち替え点および持ち替え姿勢を決定するだけでなく、持ち替え回数の決定も自動化が可能となる。シミュレーションで得られた把持情報を用いて、実機により行動の有効性の確認を行った。しかし、本手法では、シミュレーションにより把持手法の探索が必要であり、実時間での把持計画には適さない。よって、得られた把持手法のデータベース化等によって計画時間の短縮手法の確立が今後の課題となる。

文 献

- (1) 小俣透, 多指ハンドによる3次元つりあい把持のための

- 指先位置計算アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, **27**-10(1991), 1152-1158.
- (2) Hasegawa, T., Murakami, K. and Matsuoka, T., Grasping Planning for Precision Manipulation by Multifingered Robotic Hand, *Proc. Int. Conf. Systems, Man Cybernetics*, (1999), VI 762-767.
- (3) 中村仁彦・永井清・吉川恒夫, 複数のロボット機構による協調的操りの力学, 日本ロボット学会誌, **14**-5(1986), 489-498.
- (4) Mason, M. T. and Salisbury, J. K., *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*, (1985), 189-251, The MIT Press.
- (5) Kerr, J. and Roth, B., Analysis of Multifingered Hands, *Int. Journal of Robotics Research*, **4**-4(1986), 3-17.
- (6) 前川仁・谷江和雄・小森谷清, 指先での転がり接触を考慮した足しハンドによる3次元把握の運動学・静力学および剛性効果, 日本ロボット学会, **16**-2(1998), 71-79.
- (7) 吉川恒夫・横小路泰義・永山敦朗, 3本指ハンドによる対象物の操りにおける滑り運動の解析, 日本ロボット学会誌, **10**-3(1992), 394-401.
- (8) Fearing, R. S., Implementing a Force Strategy for Object Reorientation, *IEEE Conf. Robotics Automat.*, (1986), 96-102.
- (9) 小俣透・永田和之・岩槻重伸・柿倉正義, 持ち替えによる多指ハンドの物体回転操作の計画, 日本ロボット学会誌, **12**-5(1994), 751-758.
- (10) Fogel, D. B., *Evolutionary Computation*, (1995), IEEE Press.
- (11) Yoshikawa, T. and Nagai, K., Manipulation and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hand, *Trans. Robotics Autom.*, **7**-1(1991), 67-77.
- (12) Fukuda, T., Mase, K. and Arai, F., The Design and Development of a Four-Fingered Robot Hand (Adjustment of Grasping Position by Using Slip Motion on Passive Closure), *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots & Systems*, (1998), 482-487.