



動作性を用いた作業適応性評価に基づく マニピュレータ機構の設計*

琴坂信哉** 浅間 一*** 高田祥三† 平岡弘之††
幸田武久††† 松元明弘* 遠藤 勲***

Task-Oriented Structural Design of Manipulators based on Operability Evaluation

Shin'ya KOTOSAKA, Hajime ASAMA, Shozo TAKATA, Hiroyuki HIRAOKA,
Takehisa KOHDA, Akihiro MATSUMOTO and Isao ENDO

In this paper, a new method for designing the structure of manipulators based on evaluation of their adaptability to tasks is proposed. In the method, task directions are classified into three kinds of direction; operational direction, constrained direction and free direction. On each direction, condition of constraints by task environment is represented. The tasks are represented by a set of direction and condition of constraints. A new criterion, operability, is defined to quantify adaptability of manipulator to tasks, taking account of mobility in operational directions and immobility in constrained directions. The mobility and immobility is calculated based on the Jacobian matrix of manipulator. The operability evaluation method is implemented, and applied to structural design of manipulators, in which link parameters are optimized by the genetic algorithm. This system can derive suitable structure of manipulator to various tasks. The effectiveness of the system is shown concerning examples of welding tasks.

Key words: robot manipulator, task-oriented design, operability, genetic algorithm, adaptability evaluation

1. はじめに

近年、原子力プラントにおける保全作業のロボット化が検討されるようになってきた。しかし、保全作業は、多種多様で、また不特定の作業から構成されるため、これらすべての保全作業を実行できるロボットを実現しようとする戦略は現実的ではない。むしろ保全作業ごとに、作業に適したロボットを適宜設計・構成し投入することが有効であると考えられる。例えばマニピュレータに関しては、作業内容に応じてその機構を作り替えることのできるモジュール型のマニピュレータが考えられる¹⁾²⁾。しかしながら、垂直多関節型6自由度マニピュレータでも、非常に多くの種類の構造が考え得る。回転関節のみ、連続する2関節のねじれ角が0もしくは±90°、オフセットは各座標軸方向のみに限定した場合でも、984通りもの関節の組合せが存在する³⁾。さらにリンク長も考慮に入れば、無数の組合せが考えられる。そのため、保全に有効なロボットシステムを構築するためには、様々なリンク機構の中から、目的とする作業に有効な機構を効率良く選択する手法が必要となる。

従来から、マニピュレータ機構の評価指標として、吉川⁴⁾の可操作度⁴⁾、橋本の調和平均可操作度⁵⁾、Salisburyの条件数⁶⁾、田所の確率的可操作度⁷⁾などが提案されている。しかし、これらの指標は、主に機構の一般的な性能を評価しようとするものであり、特定の作業への適応性評価という視点から提案されたものではない。また田所は、確率的可操作度における手先動作の期待値の分布を偏らせることにより、単なる機構の性能評価

だけでなく、作業を念頭においた評価方法も提案している⁸⁾。しかし、この手法では作業の要求仕様がどのようなものであるかが考慮されていない。福田⁹⁾、Kim¹⁰⁾らは、いくつかの評価基準を用いて、モジュール型マニピュレータの設計支援を行うシステムを開発している。これらの研究では、適応性の評価にあたって数々の指標を導入しているものの、作業に直接関係する評価指標としては、目標点までの手先の到達可能性のみであり、作業の特徴を十分考慮しているとは言えない。

そこで、本研究では、作業対象物の幾何的拘束条件とマニピュレータ機構の動きやすさから、作業への適応性を評価する関数として動作性を提案する。この動作性を評価関数として、遺伝的アルゴリズムを用い、マニピュレータ機構を評価・選択する手法を開発する。本手法に基づき、作業に適したマニピュレータの関節組合せ、リンク長を求めるシステムを試作し、これについて述べる。

2. 動作性の評価基準

2.1 作業の分類と作業記述

マニピュレータ機構の作業への適応性を評価するためには、作業を定式化する必要がある。作業記述の方法としては、高瀬の動作に関する動詞の分類¹¹⁾や、Mason¹²⁾、Morris¹³⁾、久保田のCFモデル¹⁴⁾などが提案されている。一般に、マニピュレータによる作業対象物の操作は、Masonの研究にも見られるように、作業対象物の持つ6つの自由度に対する拘束条件を用いて定義されることが多い。この拘束条件は、環境と対象物の幾何モデルから算出することが可能であることから、本手法でもMasonの考え方を参考に、作業の特徴を記述することにした。具体的には、自然拘束を作業の特徴と考え、それから導出される人工拘束がロボットに対する作業からの要求仕様であると考えことにする。そして、作業対象物の各座標軸方向への速度、角速度に対する自然拘束条件の“ある”、“なし”を用

* 原稿受付 平成7年2月17日
** 学生会員 埼玉大学大学院(浦和市下大久保255)
*** 正会員 理化学研究所(和光市広沢2-1)
† 正会員 早稲田大学理工学部(東京都新宿区大久保3-4-1)
†† 正会員 中央大学理工学部(東京都文京区春日1-13-27)
††† 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)
* 正会員 東洋大学工学部(川崎市麻生2100)
*** 理化学研究所

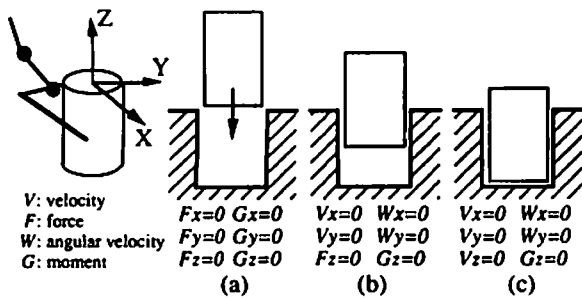


Fig. 1 Natural constraints on Peg-in-Hole operation

いて作業を記述する。また作業中に、ある特定の姿勢を維持することが要求されるような場合には、姿勢を拘束するような仮想的な拘束を想定する。図1にPeg-in-Hole作業におけるPegの自然拘束を記述した例を示す。図中の記号V, F, W, Gは、それぞれ速度、力、角速度、モーメントを表す。各記号の添え字は、移動軸および回転軸を表す。運動の拘束を受けている軸は、その速度または角速度が0でなければならないことを示している。また拘束条件は、図1に示したように作業中に次々と変化する。本研究では、この変化する点を境に作業を分割し、その分割された作業を単位作業と呼ぶことにする。図1の例では、(a), (b), (c)の3段階の単位作業に分割される。

本作業記述は、作業対象物の移動軌跡とその幾何的な拘束条件から¹⁵⁾容易に算出できる。また、例にあげたPeg-in-Hole作業だけでなく、様々な作業を単位作業に分割し拘束条件と組み合わせることにより、一般的に記述することが可能である。

2.2 動作性評価

1) 作業に関する方向の分類

作業内容、および作業対象物の拘束条件に基づいて、作業に関する方向を次のように分類、定義する。

拘束方向：作業対象物の運動が作業環境から拘束される方向
運動方向：作業対象物の運動が作業環境から拘束されていない方向で、さらに以下の2つの方向に分類する。

作業方向：作業の遂行に関係する方向

自由方向：作業の遂行に関係ない方向

例えば、その中に運動、拘束、自由方向を含む簡単な作業例として、図1に示したようなPeg-in-Hole作業がある。図1における単位作業(b)の方向を分類してみると、挿入方向であるZ方向は作業方向、それに直交するXおよびY方向は拘束方向となる。また、Z軸回りの回転方向は、作業の遂行には関係ないので自由方向となる。しかし、それと直交するXおよびY軸回りの回転運動は、拘束方向となる。これらの方向は、作業対象物に設定された座標系(作業座標系)の各軸方向に対して定義される。

これらの作業の方向に対するマニピュレータ機構の動きやすさの評価基準を以下のように仮定する。

- ・作業方向には、機械的に動きやすいことが望ましい。
- ・拘束方向には、機械的に動きにくいことが望ましい。
- ・自由方向は作業の遂行には関係がないため、評価しない。

2) ヤコビ行列を用いた動作性の定義

マニピュレータ機構の動きやすさを次のように定義する。

- ・ある方向に手先速度を発生させようとしたとき、小さな関節角速度しか必要としない方向を動きやすい方向、大きな関節角速度を必要とする方向を動きにくい方向とする。

具体的には、作業座標系の各軸方向に対し、単位速度を発生

させようとしたときの各関節角速度の2乗平均を用いて動きやすさを定義する。

マニピュレータ機構の関節変数ベクトルを $q \in R^m$ (m : マニピュレータの自由度)、手先位置(姿勢を含む)ベクトルを $r \in R^n$ (n : 空間の自由度) とすると手先速度と関節角速度の関係式は、式(1)のようになる。

$$\dot{r} = J\dot{q} \quad (\text{ただし、} J \text{ はヤコビ行列}) \quad (1)$$

よって、マニピュレータの先端が、手先位置ベクトル r の j 方向に速度ベクトル \dot{r}_j を持つ場合の関節角速度の2乗平均 A_j は、式(2)のようになる。

$$A_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \dot{q}_i^2 = \frac{1}{m} (\dot{q}^T \dot{q})$$

$$= \frac{1}{m} \{ \dot{r}_j^T (JJ^T)^{-1} \dot{r}_j \} \quad (2)$$

A_j は、 j 方向への動きにくさの尺度となる。そこで、 $[0, 1]$ で動きやすいと値が高くなるように指数関数を用いて定量化を行った。 j 方向の動きやすさの尺度 μ_j を式(3)のように定義する。

$$\mu_j = \exp[-A_j] \quad (3)$$

例えば、作業座標系のZ軸方向への動きやすさ μ_z は、手先座標系における単位速度ベクトル $\dot{r}_z = (0, 0, 1, 0, 0, 0)^T$ に対して式(2)および(3)を適用して得られる。ここで、ある作業点における作業方向の軸の集合を D_w 、拘束方向の軸の集合を D_c 、そして作業方向の数、つまり D_w の要素数を k_w 、 D_c の要素数を k_c とする。図1の(b)を例にとると、空間の自由度(軸の数)は、6 (x, y, z : 各軸方向の並進、 α, β, γ : 各軸回りの回転)で、

$$D_w = \{d_w | d_w = z\}, \quad k_w = 1,$$

$$D_c = \{d_c | d_c = x, y, \alpha, \beta\}, \quad k_c = 4$$

となる。この作業点における作業方向の総合的動きやすさ w および拘束方向の総合的動きやすさ c を、それぞれ式(4), (5)のように定義した。要素数が0でない場合には μ_j の平均値、要素数が0の場合は0となる。

$$w = \begin{cases} \frac{1}{k_w} \sum_{D_w} \mu_{d_w}, & \text{for } k_w > 0 \\ 0, & \text{for } k_w = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$c = \begin{cases} \frac{1}{k_c} \sum_{D_c} \mu_{d_c}, & \text{for } k_c > 0 \\ 0, & \text{for } k_c = 0 \end{cases} \quad (5)$$

以上の w および c を用いて、“原則として作業方向に動きやすいことが高い評価結果を与える。その上で、拘束方向に動きにくいほうが良い評価を与える。”という評価基準を用いて、動作性 μ を式(6)のように定義することにした。

$$\mu = w(aw + (1-a)(1-c)) \quad (6)$$

a は、作業方向と拘束方向の評価の重みを調節する係数である。例えば、ピンの挿入などの作業においてクリアランスが小さい場合には、 a を小さく設定して拘束方向側への動きにくさを重視して評価を行うことが可能である。 w および c は、1を超えない正の実数である。そこで、式(6)では、まず運動方向の動きやすさ w と、拘束方向の動きにくさを正規化した値 $(1-c)$ を $a : (1-a)$ の比で足し合わせた。そして、「拘束方向に動きにくい」という評価が高くて「作業方向に動きやすい」という評価が高くない限り作業を遂行しにくいということを考慮して w を乗じたものである。

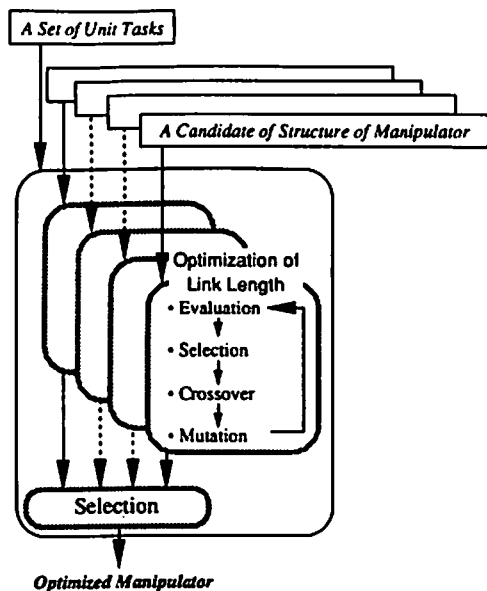


Fig. 2 Optimization flow

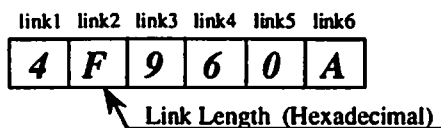


Fig. 3 Structure of gene

3. 動作性を用いたマニピュレータ機構の評価・選択手法

3.1 GAによる関節組合せ、リンク長の選択手法

莫大なマニピュレータ機構の構成の組合せの中から作業に適した関節組合せ、リンク長などを選択するという事は、いわゆる組合せ最適化問題を解くことにほかならない。本手法では、最適化手法として対象とする問題が大規模かつ、その性質が十分明らかになってはいなくとも比較的良い解を導くことができるとして、近年注目を集めている遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: 以下GAと記す)¹⁰⁾を採用した。

機構をあらわすパラメータは、ねじれ角、オフセット量など様々あるが、探索空間の大きさと利用可能な計算機資源から考えて、現在のところすべてのパラメータを同時に最適化するより、段階的に最適化を図るほうが効率的であると考えられる。そこで、本手法では作業に適した関節組合せ、およびリンク長を求めることにした。本手法の処理の流れを図2に示す。

本手法では、一連の単位作業によって記述された作業と、あらかじめ用意しておいた、関節組合せ候補のすべてについて最も高い適応度を持つリンク長を、GA手法を用いて求める。そして、各候補の中から最も高い適応度を持つ機構を作業に適した機構として選択する。このように段階的に、そしてあらかじめ制限を加えた探索空間の中で探索を行うことにより、効率的な解の探索を行うことができる。図3に各マニピュレータ機構を表現する遺伝子の例を示す。機構の各リンク長を0から15までの16段階の正規化された値を用いて表現している。図中の各カラムが、各リンクの長さを表している。GAの遺伝的操作には、適応度比例戦略、エリート保存戦略による選択淘汰、および単純交叉法を用いた。突然変異は、ランダムに選択された個体の遺伝情報を他のランダムな値に置き換えることによって実現されている。

3.2 動作性による適応度評価関数

まず、一連の単位作業からなる作業への適応性を評価する関数 $\bar{\mu}$ を定義した。すなわち、動作性を各単位作業ごとに算出し、その平均値を求め、これを作業への適応性評価点とする。ただし、ここでは単位作業中の位置・姿勢の変化は扱わず、各単位作業の始点の位置、姿勢を保った状態での機構の評価点をその単位作業の代表点とした。従って作業への適応性評価関数 $\bar{\mu}$ は、目的とする作業が k 個の単位作業から構成されている場合、各単位作業における動作性が μ^i であるとする式 (7) のようになる。

$$\bar{\mu} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu^i \quad (7)$$

次に、動作性による評価では、リンク長が長ければ長いほど容易に大きな手先速度を実現できるため、適応性評価点が高くなる。しかし、垂直多関節型のマニピュレータ機構は、機構的に片持ちはりの構造をとるため、リンク長が長くなると動特性、手先位置決め精度、可搬重量などの性能が悪くなる。そこで、リンク長の総和が大きいほど、大きなペナルティを加えることとした。リンク長と適応性評価関数 $\bar{\mu}$ から、GA手法のための適応度関数 E を式 (8) のように定義した。

$$E = \frac{\bar{\mu}}{\sum_{j=1}^m L_j} \frac{P_k}{k} \quad (8)$$

ただし、ある単位作業 i において障害物との干渉などによって、作業点まで手先が到達不能である場合には、 μ^i を0として作業への適応性評価関数 $\bar{\mu}$ を計算する。また、 L_j はリンク j の長さ、 m は機構の自由度、 k は作業を構成する単位作業の個数、 P_k は全単位作業のなかで遂行可能 (手先が到達可能) な単位作業の数である。ここで P_k/k を乗じているのは、手先の届く作業点数に比例した重みづけを行うためである。この係数によって、より多くの単位作業を実現できる候補が、より高い適応度を持つことになる。また、いくつかの単位作業が遂行可能でない候補でも、他の単位作業において高い適応度を持っているのであれば、子孫を残すことができる。これは、後の遺伝子の組替えにより、その候補がより多くの作業を遂行できるようになる可能性を考慮したためである。これにより、各世代における適応度の高い機構の遺伝子の維持と同時に、遺伝子の多様性を維持できるようにしている。

4. 評価・選択システムの構築と評価実験

4.1 評価対象機構と作業内容

前章までに定義した本手法の有効性を評価するために、作業に適した機構を評価・選択するシステムをSunワークステーション上にC言語を用いて構築した。そして、2種類の作業例にマニピュレータ機構の評価・選択を行った。

関節組合せ候補は、固定側3自由度で手先位置、先端側3自由度で手先姿勢を決定する機構を選ぶという方針で選択することにした。特に、先端側3自由度には、器用な手先を実現できるとされている球面対偶関節を用いることにした。浅岡⁹⁾によると、第1章で述べた条件下で連続する3関節の関節組合せは、16種類得られる。この中から評価対象機構の関節組合せを、次のような基準を用いて選択した。

- (1) 解析的な逆運動学解が得られる。
- (2) 固定側3自由度は、移動の3自由度を持つ。
- (3) 広い動作範囲が期待できない機構は除外する。

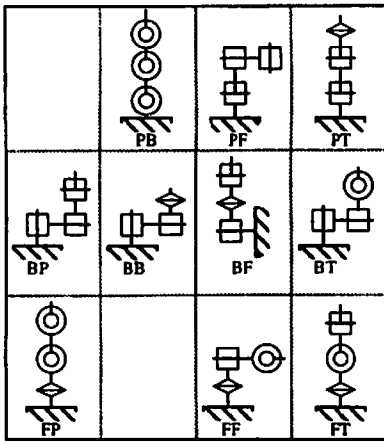


Fig. 4 Evaluated structures of manipulators

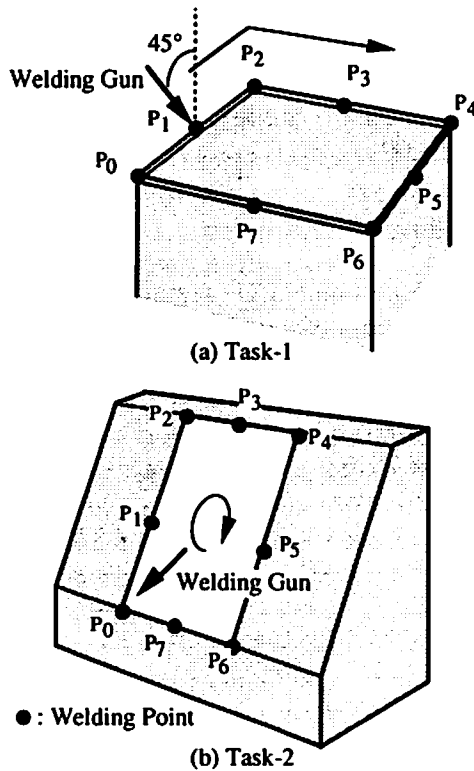


Fig. 5 Welding tasks

こうして得られた関節組合せの候補 10 種類の固定側 3 関節の機構を図 4 に示す。各関節組合せに付した記号は、2 関節間の相対位置関係を表すもので、浅岡⁹⁾の分類に従った。なお、図中の BP 型が PUMA 型マニピュレータに相当する。評価の対象として図 5 に示すような 2 種類の作業を想定した。これらの作業は、溶接作業を想定した作業で、それぞれ P₀ から P₇ までの 8 個の作業目標点を順にアクセスする作業である。Task-1 では水平面内におかれた平面の周囲の点を定められた姿勢でアクセスしなければならないので、マニピュレータは主に左右前後方向への動きやすさが要求される。また Task-2 では、大きく開いた穴の内周の点を定められた姿勢でアクセスしなければならないので、マニピュレータは主に左右上下方向への動きやすさが要求される。そして、狭い環境での作業を想定し、マニピュレータの両側に障害物を配置することとした。マニピュレータは、これらの障害物、作業対象物と干渉すること無く作業を遂行することが要求される。このような作業環境では、大

Table 1 Results of optimization by GA (Task-1)

Type of manipulator	Gene	Maximum fitness value
BP	0 db 000	1.188 424 393 2
BB	276100	0.509 244 467 4
BF	903500	1.179 169 074 5
BT	092101	0.730 252 062 5
*PB	b 05500	1.202 658 615 0
*PF	b 08200	1.202 658 615 0
*PT	b 00 a 00	1.202 658 615 0
FP	0 d 4700	1.188 424 393 2
FF	b 98300	1.106 905 403 1
FT	ab 630 d	0.714 529 303 1

Table 2 Results of optimization by GA (Task-2)

Type of manipulator	Gene	Maximum fitness value
BP	041603	1.995 099 971 6
BB	211703	0.983 483 024 2
*BF	404403	2.010 727 228 9
BT	255103	1.106 368 200 8
PB	401703	1.942 505 056 9
PF	405303	1.942 505 056 9
PT	405303	1.942 505 056 9
FP	283003	1.995 099 971 6
FF	729101	0.992 155 031 3
FT	633302	1.149 775 120 7

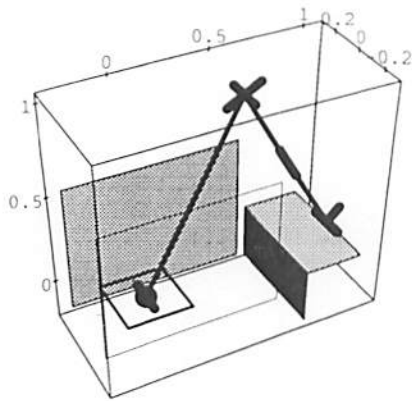
きく肘を突き出した形のマニピュレータは、選択されないことが予想される。マニピュレータの原点は固定とした。またマニピュレータは複数の関節解を持つが、本実験ではすべての関節解についてそれぞれ作業への適応性評価を行い、作業全体を通して最大の適応度を得ることができる関節解を選択する。GA のパラメータとして、1 世代の個体数を 200 個体、そして各世代あたり 30 個体に突然変異が発生することとした。

4.2 評価結果

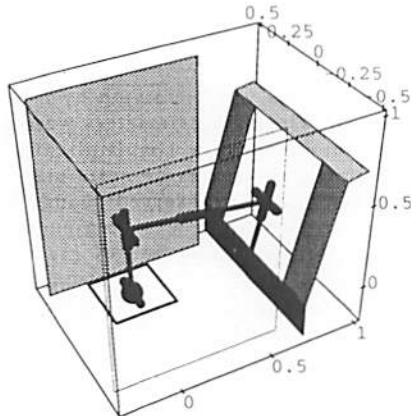
Task-1 および Task-2 について、リンク長を変化させながら 10 種類の機構の評価を行い、表 1 および表 2 に示すような結果が得られた。表には、各作業ごとに固定側 3 関節の種類を表す記号と最適化されたリンク長を表す遺伝子、そしてその時の適応度評価関数 E による適応度の値を示してある。* 印の機構が最大適応度をあげた機構である。表 1 を見てわかるように、Task-1 では、PB, PF, PT 型の 3 種の機構が最大の適応度をあげている。ただし、これら 3 種の機構は第 2 リンク長が 0 となっており、トポロジ的には同じ関節構成の機構とみなせる。また表 2 の結果より、Task-2 では、BF 型の機構が最大適応度をあげていることがわかる。

PB 型および BF 型のマニピュレータが、求められた最適リンク長で作業目標にアクセスしている様子を図 6 に示す。マニピュレータの一部太くなった部分が関節の回転軸を、固定側の太線の四角がマニピュレータの土台の位置を表している。手前側の障害物は、その枠だけを表示した。図 7 には、それぞれの機構における最適化の過程において求められた最大適応度の推移を示した。縦軸は各世代における最大の適応度であり、横軸は世代を表している。次第に適応度の高い個体が発生していることがわかる。両者の機構とも、約 60 世代までに最適解と思われる個体を発生し収束状態となった。ただし、他の機構では収束状態に達するまでに約 360 世代を必要とした場合も存在した。全探索を行うには、約 838 万通りの組合せから最適解を探索する計算が必要となる。しかし、約 60 世代までの場合、すなわち約 96 000 通りの組合せの評価だけで、最適解と思われる解に到達している。360 世代の評価が必要な場合でも、約 580 000 通りの評価だけで解を得ることができる。以上より、GA 手法により探索の効率化が行えることが確認できた。

また、様々な作業について実験を行った結果、いわゆる PUMA 型に相当する BP 機構は、すべての作業において最高点でないにしても比較的良好な適応度を必ずあげており、汎用性に優れた機構であることが確認できた。特に障害物の無い環境で評価を行った結果では、最も高い適応度を得た。ただし、今回の実験で BP 機構が選択されなかったのは、左右に障害物

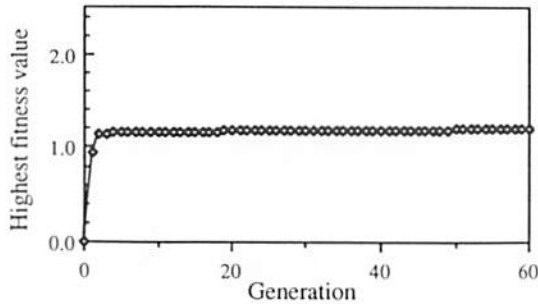


(a) PB type manipulator for Task-1

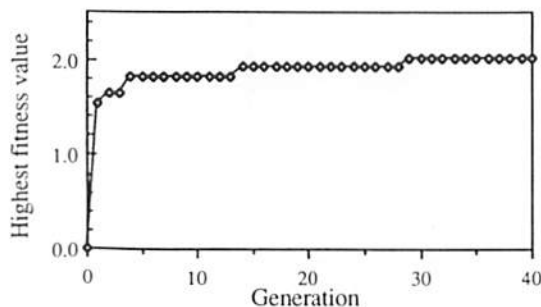


(b) BF type manipulator for Task-2

Fig. 6 Optimized manipulator structure



(a) Transition of the highest fitness values of PB type manipulator for Task-1



(b) Transition of the highest fitness values of BF type manipulator for Task-2

Fig. 7 Highest fitness values of each generation

がある環境下では、肘を大きく突き出した形のBP機構は不利となり、他の種類の機構が優位になったためと考えられる。

5. 結 論

- (1) マニピュレータ機構の作業への適応性評価基準として動作性の提案を行った。
- (2) 動作性を評価基準として、作業に適したマニピュレータ機構を評価・選択する手法を開発した。
- (3) 垂直多関節マニピュレータを対象に、上記手法を用いて作業に適した関節組合せ、リンク長を選択するシステムの構築を行った。
- (4) 例として、2種類の作業をとりあげ、10種類の関節組合せの候補の中から作業に適した関節組合せ、およびそのリンク長を、構築したシステムを用いて求めた結果、効率良く、妥当性の高い解を得ることができた。

ただし、本研究で議論した動作性による作業への適応性評価は、作業の機構学的側面のみを考慮して行っており、制御の影響等は考慮されていない。実用に際しては、動力学的側面や制御面などの特性も考慮する必要がある。今後、よりの確に作業への適応性を評価するために、他の設計指標を取り入れることも検討していきたい。

なお、本研究は、原子力基盤技術クロスオーバー研究「原子力人工知能」における「ロボットシステムの自律型プラントへの適応性評価」の一環として、理化学研究所を中心として行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 福田敏男, 中川誠也: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第1報)——セル間の自動接近・結合・分離制御実験, 日本機械学会論文集, 58, 509, C (1989) 114.
- 2) 琴坂信哉, 浅間 一, 嘉悦早人, 大森 亨, 遠藤 勲, 佐藤勝彦, 岡田 敏, 中山良一, 岡部博之: 機能適応型マニピュレータの開発(その1)——基本設計と内蔵型触覚センサの試作, 日本ロボット学会第2回ロボットシンポジウム, (1992) 157.
- 3) 浅間 一: 保全用マニピュレータ構成論, 博士論文, 東京大学, (1989).
- 4) 吉川恒夫: ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, 2, 1 (1984) 63.
- 5) 橋本亮一: マニピュレータの2次調和平均型可操作性指標について, 計測自動制御学会論文集, 25, 11, (1989) 1172.
- 6) J. K. Salisbury and J. J. Craig: Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues, Int. J. Robot. Res., 1, 1, (1982) 4.
- 7) 田所 諭, 木村一郎, 高森 年: マニピュレータの確率的可操作度, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 97.
- 8) 田所 諭, 高森 年: ロボットマニピュレータの動作の性質を考慮した可操作性の評価法, 計測自動制御学会論文集, 29, 6 (1993) 668.
- 9) 福田敏男, 中川誠也: セル構造を有する自己組織化ロボット——その基本概念とセル間の粗接近制御および形態決定方法について, 電気学会論文集, 107-C, 11, (1987) 1019.
- 10) J. O. Kim and P. K. Kohsla: Design of Space Shuttle Tile Servicing Robot: An Application of Task Based Kinematic Design, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, (1993) 867.
- 11) 高瀬國克: ロボットアームの運動とその定式化, 計測と制御, 25, 1, (1986) 15.
- 12) M. T. Mason: Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernet., SMC-11, 6, (1981) 428.
- 13) G. H. Morris: Robotic: Assembly by Constraints, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Autom., (1987) 1507.
- 14) 久保田一成: ロボット作業の成分特徴モデル, 日本ロボット学会誌, 10, 6, (1992) 817.
- 15) 比留川博久, 松井俊浩, 高瀬國克: 多面体間の接触による拘束条件を幾何モデルから導出する一般的なアルゴリズム, 日本ロボット学会誌, 9, 4 (1991) 15.
- 16) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, (1993).