遺伝的アルゴリズムによる活線作業ロボットシステムの ロボットベース制振に関する基礎実験

正員 中島盛之 (九州電力)
 正員 丸山佳長 (九州電力)
 非会員 梅田信弘 (安川電機)
 正員 久良修郭 (安川電機)
 正員 長谷川 勉 (九州大)

Basic Experiments on Robot-Base Vibration Control of the Hot-Line Work Robot System using Genetic Algorithm

Moriyuki Nakashima, Member, Yoshinaga Maruyama, Member (Kyushu Electric Power Co., Inc.),
 Nobuhiro Umeda, Non-member, Nobuhiro Kyura, Member (Yaskawa Electric Corporation), Tsutomu
 Hasegawa, Member (Kyushu University)

The past studies on hot-line robot systems have focused on the execution of various hot-line works such as the cutout/connection of electric wires and replacement of insulators. Robot base vibration control methods, however, have seldom been discussed^{(1)~(5)}. The high-speed operation of the hot-line work robot system, Phase II in tasks is being worked on with the goal of practical utilization in the near future. Speed increases in boom and manipulator movements are a key part of this. The Phase II system's boom has a natural frequency of 1.0 Hz in commonly used angles. If the boom or the manipulator is rapidly accelerated, the robot base vibrates violently, hampering task execution.

This paper proposes a vibration control method, in which control gain and position command acceleration/deceleration time are optimized for the movement of the robot base. In conjunction with the vibration control, the paper also focuses on the optimization for positioning accuracy and preventing overshoot of the manipulator. These three issues are simultaneously solved with use of genetic algorithm (GA). The proposed method has been determined for use in a preliminary experiment for the Phase II system development. A simplified test-bed manipulator of the two-axis horizontal scalar type was employed for simulation and experimentation in order to reduce modeling error. The initial effects brought about by the proposed method are verified.

キーワード：活線作業ロボットシステム，ロボットベース制振，遺伝的アルゴリズム

1. ま え が き

変電所から需要場所までの電力供給にかかわる，電線，電柱，開閉器，変圧器といった諸設備の総称を配電設備という。活線作業ロボットシステム Phase II（以下，Phase II システムという）は，図 1 に示すように，高所作業車のブーム上にロボットベースを設け，地上十数 m の高所で，配電設備にかかわる各種機器類の新設，更新作業を活線状態（無停電）で行うシステムである。

従来の活線作業ロボットシステムの研究では，電線の切断・接続，がいしの取り替えといった活線作業の実行そのものが研究目標であり，本論文のテーマであるロボット

ベースの制振について述べられていなかった^{(1)~(5)}。現在，Phase II システムでは至近年の実用化に向けての作業の高速化に取り組んでおり，そのための主要手段の一つとしてブームやマニピュレータの動作の高速化を考えている。Phase II システムのように高所作業車のブーム上にロボットベースを設けた場合，一般的に大型の構造物であるブームが柔軟となる。Phase II システムのブームの場合，最伸時全長約 11 m，重量約 1.4 t，頻繁に使用する姿勢での固有振動数 1.0 Hz 程度であり，ブームやマニピュレータを高加速度で動作させると，ロボットベースが大きく振動する。このロボットベースの振動は，ロボットベース上に設置しているレーザ/カメラ方式距離計測センサの計測

図 1 Phase II システムの外観
Fig.1. External appearance of the "Phase II" system.

確率低下、マニピュレータの位置決め精度低下などをもち、作業実行時に問題となる。

Phase II システムのような一種のマクロ/マイクロマニピュレータシステム⁽⁶⁾の制振手法として、マイクロ系を積極的に動作させてその反力によりマクロ系の振動を抑制する手法⁽⁷⁾や、制振に効果的な目標関節軌道を計画し制御する手法⁽⁸⁾などが提案されている。しかし、前者⁽⁷⁾は、マクロ系の動作内容によってはマイクロ系のアクチュエータに大きな力を必要とし、効率的でないばかりか、公道で作業を行う活線作業ロボットシステムの制振手法として安全性に問題が残る。また、後者⁽⁸⁾は、作業内容から所定の目標関節軌道を計画する必要がある活線作業ロボットシステムの制振手法として採用し難い。

実用化の観点から、Phase II システムに要求される制振性能は以下のようなものであればよい。

- (1) 動作終了時のロボットベース部の振動加速度が 0.4 G 程度以下

これはレーザ/カメラ方式距離計測センサの計測確率の低下による繰返し計測を抑制するための条件である。

- (2) 動作終了時のマニピュレータの位置決め精度が 30 mm 程度以下

これは作業対象である電線直径に対する 2 指ハンドの開口幅余裕を考慮した条件である。

これらの条件を満たす方法として、例えば多数の加速度センサを付加した制振制御などは、実用システムとしての信頼性とコストを考慮すると適切でない。一方、産業用ロボットに広く採用されている制御方式は長期の使用実績で信頼性がありコスト的にも満足できるが制振にはそのままでは使えない。そこで、

- (a) PI 制御方式：位置の比例と速度の比例積分
- (b) 加速と減速の時間が同一、かつ一定の位置指令生成方式を変更せず、制御ゲインと加減速指令時間を最適化す

ることにより振動を抑制する手法を採用した。ただし、Phase II システムでは、

- (i) ブームやマニピュレータの姿勢変化により固有振動数が変化すること、
- (ii) 頻繁に使用する姿勢でのマニピュレータの固有振動数が 8.0 Hz 程度であるのに対し、ブームの振動数が 1.0 Hz 程度であり極端に柔軟であること、
- (iii) マニピュレータとブーム間のトルク干渉が大きいこと、
- (iv) マニピュレータ先端の目標点への位置決めだけでなく、動作軌跡も制御する必要があり、オーバーシュートは許されないこと、

などの特徴や制約があり、最適化の解空間は複雑で極めて多峰性に富んでいると考えられる。特に上記 (i) と (ii) とのために周波数特性に基づく従来のゲイン調整方法は適用できない。そこで本論文では、この最適化に遺伝的アルゴリズム⁽⁹⁾（以下、GA という）を用いる。GA を用いる理由として、解空間の多点で確率的に最適解を探索するため解空間の構造に関する先験的な知識を直接的に必要としない、突然変異などの遺伝オペレータを用いることにより局所解からの脱出が期待できるなどがあげられる。

また、今回の取り組みは、Phase II システム開発の基礎実験に位置付けされるものであり、モデルを単純化した実験用マニピュレータ（2 軸の水平スカラ形マニピュレータ）を導入し、これを対象としてシミュレーションおよび実験を行い、提案する手法の基本的な制振効果を確認する。

2. 実験用マニピュレータ

まず最初に、マクロ系とマイクロ系の慣性比を Phase II システムのものと同一とした実験用マニピュレータを導入する。

〈2・1〉 実験用マニピュレータ 実験用マニピュレータは、図 2、図 3 に示すような 2 軸の水平スカラ形マニピュレータである。図 2 において、 M_1 は Phase II システムのブームおよびロボットベースの合計に相当する質量、 M_2 はロボットベース上のマニピュレータ（単腕）およびそのペイロードの合計に相当する質量で、スケール比はいずれも約 1/500 である。 L_1 は Phase II システムのブーム原点からブーム質量およびロボットベース質量を合わせた重心までに相当する長さ、 L_2 はロボットベース原点からマニピュレータ（単腕）およびそのペイロード質量を合わせた重心までに相当する長さで、スケール比はいずれも約 1/10 である。各リンクは、PI 制御方式により DC サーボモータで駆動される。この実験用マニピュレータの固有振動数は、実測で、マクロ系で約 1.0 Hz、マイクロ系で約 18.0 Hz、姿勢により異なるがシステム全体の系で約 0.8~1.0 Hz であった。ここで、マイクロ系の固有振動数が Phase II システムのもの約 8.0 Hz と異なるのは、スケールモデル製作上の都合である。

図 2 実験用マニピュレータの解析モデル
Fig. 2. Simplified analysis model of the test-bed manipulator.

図 3 実験用マニピュレータの外観
Fig. 3. External appearance of the test-bed manipulator.

〈2・2〉 数学モデル 柔軟マニピュレータのモデル化研究は、偏微分方程式による分布定数系モデル⁽¹⁰⁾、有限要素モデル⁽¹¹⁾、ばね質量系などの集中定数系モデル⁽¹²⁾に大きく分けられる。ばね質量系などの集中定数系モデルは、他の二つのモデルと比較して、強制力によるリンクの変形を組み込みづらいためモデル化誤差は大きいものの、計算時間が短く、最適化のための繰り返し計算を必要とする今回の手法に適することから、基本的にこれを用いることとする。ただし、第1章で述べたように Phase II システムは PI 制御方式で動作しており、直接的にはアクチュエータに取り付けたセンサ以外のセンサを使用していないため何らかの方法でリンクの弾性変位の置き換えが必要である。また、大型の構造物であるブームのモデル化においては、柔軟なリンク部分の振動と減速機などの動力伝達機構の剛性不足による柔軟な関節部分の振動の両方を考慮することが望ましいことなどから、具体的には次のようなモデルを使用する。図4に示すようなモータからリンクへのトルク伝達機構のモデル化を行い、剛体リンクとモータの2慣性系からなり、かつその関節に集中ばねなどをもつ、柔軟関節を有するモデル⁽¹³⁾（以下、柔軟関節モデルという）を使用する。今回使用する柔軟関節モデルにおける仮定として以下のものがある。

(1) ペイロードが支配的であり、各リンクはマスレスと考える。

図 4 トルク伝達機構の構成ブロック
Fig. 4. Block diagram of the torque transfer mechanism.

(2) 水平方向の運動のみを考え、リンクのねじれなどは無視する。

このような仮定のもとで、実験用マニピュレータの運動方程式は次のように与えられる。

$$T_{li} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{li}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_{li}} \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

ただし、 T_{li} : リンク駆動トルク、 θ_{li} : リンク位置 (相対角度)、 L : ラグランジアン

これを展開して次式を得る。

$$T_{li} = \sum_{j=1}^2 D_{ij} \ddot{\theta}_{lj} + d_i \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

$$D_{11} = (M_1 + M_2)L_1^2 + M_2L_2^2 + 2M_2L_1L_2 \cos \theta_{12}$$

$$D_{12} = D_{21} = M_2L_2^2 + M_2L_1L_2 \cos \theta_{12}$$

$$D_{22} = M_2L_2^2$$

ただし、 d_i : コリオリカ、遠心力を含むリンク外乱

また、図4のトルク伝達機構で、モータに発生する力のつり合いから次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} T_{li} &= K_{ci} \left(\frac{1}{N_i} \theta_{mi} - \theta_{li} \right) + D_{li} \left(\frac{1}{N_i} \dot{\theta}_{mi} - \dot{\theta}_{li} \right) \\ &\quad + K_{ci} d_{oi} + D_{li} \dot{d}_{oi} \\ K_{Ti} I_i &= J_{mi} \ddot{\theta}_{mi} + D_{li} \dot{\theta}_{mi} + \frac{1}{N_i} T_{li} \quad (i=1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 I_i : 電機子電流、 θ_{mi} : モータ位置、 N_i : 減速比、 K_{Ti} : モータトルク定数、 J_{mi} : モータイナーシャ、 D_{mi} : モータ減衰係数、 K_{ci} : リンクばね定数、 J_{li} : リンクイナーシャ、 D_{li} : リンク減衰係数、 d_{oi} : 関節部外乱

次に、状態方程式を求める。状態変数は、アクチュエータに取り付けたセンサにより求めることができるもののみを選択する。これに伴い、リンクの弾性変位に変わる状態量として関節内のねじり角を次式のように定義する。

$$\theta_{si} = \frac{1}{N_i} \theta_{mi} - \theta_{li} + d_{oi} \quad (i=1, 2) \quad (4)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} X &= \left[\int \theta_{m1} dt \quad \theta_{m1} \quad \dot{\theta}_{m1} \quad \theta_{s1} \quad \dot{\theta}_{s1} \quad \int \theta_{m2} dt \quad \theta_{m2} \quad \dot{\theta}_{m2} \quad \theta_{s2} \quad \dot{\theta}_{s2} \right]^T \\ U &= \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{12} \end{bmatrix} \quad U_{do} = \begin{bmatrix} -\ddot{d}_{o1} \\ -\ddot{d}_{o2} \end{bmatrix} \quad U_d = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と置くと、状態方程式は、

$$\begin{cases} \dot{X} = A \cdot X + B \cdot U + B_{do} \cdot U_{do} + B_d \cdot U_d \\ Y = C \cdot X \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

となり、(2)～(6)式より、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & 0 & a_{47} & a_{48} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_{83} & a_{84} & 0 & 0 & a_{86} & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix}^T$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_{12} & 0 & b_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{26} & 0 & b_{28} \end{bmatrix}^T$$

$$B^{do} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T$$

$$B^d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & f_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{18} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{28} \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & c_{11} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

..... (7)

ただし、 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , f_{ij} : システムの構成で決まる係数

を得る。ただし、簡略のため B_{do} , B_d は無視する。

〈2・3〉 制御系 実験用マニピュレータの制御系には、Phase II システムのものと同様の位置制御ベースのPI制御方式を用いる。このとき、モータの制御則は次式のように表せる。

$$u_i = K_{Vi} \{ K_{Pi} (\theta_{mrefi} - \theta_{mi}) - \dot{\theta}_{mi} \} + K_{Ii} t_s \sum \{ K_{Vi} \{ K_{Pi} (\theta_{mrefi} - \theta_{mi}) - \dot{\theta}_{mi} \} \} \quad (i=1, 2) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 θ_{mrefi} : 指令 (モータ位置), t_s : サンプルングタイム, K_{Pi} : 位置ループゲイン, K_{Vi} : 速度ループゲイン, K_{Ii} : 積分ゲイン

以上の(4)～(8)式に、ルンゲ・クッタ法などの適当な数値積分アルゴリズムを組み合わせることによって、実験用マニピュレータの動作シミュレーションが可能となる。

3. GA の適用

制振問題へGAをを適用する場合、GAの探索過程では、制御的に安定でない解も発生していると考えられ、実機のみを用いることは好ましくない。そこで、第2章で示した実験用マニピュレータ、その数学モデル、制御系を図5に示すように配置して最適化を行うこととする。最適化するパラメータは、第1章で述べたとおり、PI制御方式における位置ループゲイン K_{Pi} 、速度ループゲイン K_{Vi} 、積分ゲイン K_{Ii} および加減速一定、かつ加減速時間が同一の位置指令、つまり速度パターンが等脚台形となる位置指

図 5 制振最適化のためのシステム構成
Fig. 5. System structure for vibration optimizing.

図 6 初期集団生成 (コーディング)
Fig. 6. Generating of initial population (cording).

令の加速 (=減速) 時間 t_{ai} (以下、加減速時間という) とする。動作の始点、終点および動作時間が決められている場合の等脚台形速度指令は、その加減速時間によって一意的に定められる。従って、使用するパラメータの総数は8、実験用マニピュレータの2軸それぞれの各制御ゲインおよび加減速時間である。

〈3・1〉 初期集団の生成 図6に示すように、計算機内での確率的操作が容易となるよう、使用する各パラメータを二進数 (ビット列) で表現し、それらをつなぎ合わせて各個体を生成する。ここで、探索幅、探索密度を可変とするため、各パラメータのコーディングは次式により行うものとする。

$$L = \sum_{j=1}^8 l_j = \sum_{j=1}^8 \text{round} \left\{ \log_2 \left(\frac{P_{en \max j} - P_{en \min j}}{P_{en \text{ step } j}} \right) \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 L : 個体の長さ, l_i : パラメータの長さ, $P_{en \max j}$: パラメータの仮の最大値, $P_{en \min j}$: パラメータの最小値, $P_{en \text{ step } j}$: パラメータの刻み幅

そして、初期集団の生成に際しては、乱数などを用いて、ランダムに個体を M 個 (任意の自然数) 発生させる。

〈3・2〉 デコード ビット列で表現されている個体を十進数化する。制御ゲインなどの各パラメータの取出しは、次式により行うものとする。

$$P_{de j} = \alpha_j P_{en \text{ step } j} + P_{en \min j} \quad 0 \leq \alpha_j \leq 2^{l_j} \quad (j=1, \dots, 8) \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 α_j : ビット列の単純十進換算値, $P_{de j}$: パラメータのデコード値

ここで、(9)、(10)式を用いてパラメータ値のまるめ処理を行っているため、パラメータの真の最大値が(10)式より

得られることに留意する必要がある。

〈3・3〉 適応度計算 まず、簡単な評価関数で整定目標を表現することができるように、また、動作途中で位置のオーバーシュートがないように導くために次に示す二次おくれ系近似モデルを規範モデルとしてを導入する。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{mst\ i} &= \frac{\omega_{nst\ i}^2}{s^2 + 2\zeta_{sti}\omega_{nst\ i}s + \omega_{nst\ i}^2} \theta_{mref\ i} \\ \theta_{lst\ i} &= \frac{1}{N_i} \theta_{mst\ i} \quad (i=1, 2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $\theta_{mst\ i}$ ：規範モータ位置、 $\theta_{lst\ i}$ ：規範リンク位置（相対角度）、 $\omega_{nst\ i}$ ：規範固有角周波数、 ζ_{sti} ：規範減衰比

ここでは、規範減衰比 ζ_{sti} を1として非振動的な応答とし、位置の整定時間の目安に用いる。次に、システムの構成要素ごとに整定の目安をもつことができるよう、評価関数においてリンク1、リンク2それぞれに、規範モデルの位置応答と実験機の位置応答の差の二乗和の項および実験機のリンク先端の加速度の二乗和の項を設ける。

$$\left. \begin{aligned} J_s &= K_1 \sum_{t=t_0}^{t_e} (\theta_{lst1} - \theta_{l1s})^2 + K_2 \sum_{t=t_0}^{t_e} (\theta_{lst2} - \theta_{l2s})^2 \\ &\quad + K_3 \sum_{t=t_0}^{t_e} \ddot{\theta}_{l1s}^2 + K_4 \sum_{t=t_0}^{t_e} \ddot{\theta}_{l2s}^2 \quad (s=1, 2, \dots, M) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 J_s ：評価値、 K_1, K_2, K_3, K_4 ：重み係数、

t_0 ：動作開始時刻、 t_e ：観測終了時刻

この評価関数では、振動は主に第3項および第4項が評価されて抑制されることになる。そして、この評価値 J_s に対し、適応度 F_s は、

$$F_s = \frac{1}{J_s} \quad (s=1, 2, \dots, M) \dots\dots\dots (13)$$

とする。

〈3・4〉 遺伝オペレータ 遺伝オペレータは、計算時間を短縮するために、代表的かつ効果的な選択とうた、交叉、突然変異の三種類を用いることとする。選択とうたは、各個体の適応度 F_s に比例したルーレット選択により行う。交叉は、単純交叉を用いることとする。これはすべての個体をランダム選択によりペア化し、あらかじめ設定した交叉確率 P_c の割合で、個体中の任意の位置からビット列を互いに交換するものである。突然変異では、個体群のすべてのビットに対し、あらかじめ設定した突然変異確率 P_M の割合で、符号(0 or 1)の反転を行う。他の処理として、エリート保存を行う。これは、現在よりも過去の世代において最も高い適応度を有する個体を選択とうた、交叉、突然変異の操作中に消滅させられないよう常に優先的に保存するものである。

4. シミュレーションおよび実験

対象動作を図7のように定め、動作時間を3.0sとしてシミュレーションを行った。この動作は、実験用マニピュレータの種々の動作の中で最も固有振動数の変化が大きいうえ、Phase IIシステムで頻繁に使用される動作の中で

図7 対象動作
Fig. 7. Example of motion.

最もロボットベースの振動が大きい動作を模擬している。このときの実験用マニピュレータのシステム全体の固有振動数は動作開始時で約1.0 Hz、動作終了時で約0.8 Hzである。また、動作中および動作終了後の残留振動がうまく抑制されるように、動作開始時刻から6.0sまでのふるまいを評価して制御ゲインと加減速時間とを最適化する。この最適化では上述の固有振動数の変化を織り込んだものになっており、ロバスト性があるものといえる。

〈4・1〉 シミュレーション 第2章に示した実験用マニピュレータの数学モデルで使用するリンク、モータなどの各係数を表1に示す。ここで、リンク減衰係数 D_{li} が支配的であるとし、モータ減衰係数 D_{mi} は0とした。リンク減衰係数 D_{li} 、リンクバネ定数 K_{ci} は、実験用マニピュレータの動作の実測から求めた。ただし、リンク2減衰係数 D_{l2} は、マイクロ系を剛体と見なし、過減衰となるよう十分大きな値を用いた。最適化を行う各パラメータの最小値、最大値、刻み幅を表2に示す。計算時間の短縮のため、他のパラメータと比較して影響が少ない積分ゲイン K_{fi} は一定値とした。集団を構成する個体数を30、収束世代数を50（ただし、集団の適応度が変化しなくなった時点で終了）とした。

評価関数(12)式において、使用する規範モデル(11)式の各係数は表3に示す値とした。また、各項の重み係数 K_1, K_2, K_3, K_4 は以下の方針のもとに決めた。

- (1) 制振性を重視して、振動を評価している第3項と第4項（以下、振動の項という）の和が、位置を評価している第1項と第2項（以下、位置の項という）の和より大きくなるように、振動項の重み係数と位置の項の重み係数との比を決める。ただし、位置の応答性を考慮して、規範モデルの位置の軌跡から大きくずれない（大きく下回らない）範囲内で振動の項の重み係数を大きくするものとする。
- (2) マクロ系とマイクロ系では、マクロ系の方が固有振動数が小さい、リンク長が長いことから、振動、位置の両方に関してマクロ系を重視した方がよいことは明らかで、マクロ系を評価している第1項と第3項（以下、マクロ系の項という）の和が、マイクロ系を評価している第2項と第4項（以下、マイクロ系の項という）の和より大きくなるように、マクロ系の項の

表 1 数学モデルの各係数
Table 1. Characteristics of math-model.

Item	Link1	Link2
L_i (m)	0.400	0.100
M_i (kg)	1.000	0.200
N_i (-)	80	100
K_T (N·m/A)	0.70	1.20
J_{mi} (kg·m ²)	1.89×10^{-4}	7.90×10^{-6}
D_{mi} (N·m·s/rad)	0	0
K_{ci} (N·m/rad)	6.70	25.6
D_{li} (N·m·s/rad)	0.01	10
t_s (sec)	0.003	0.003

表 2 最適化するパラメータのリスト
Table 2. Parameter list for optimizing.

Parameter	Minimum	Maximum	step
K_{P1}	0	5.11	0.01
K_{V1}	0	51.1	0.1
K_{I1}	20(fixed)	----	----
I_{a1}	0	1.50	0.01
K_{P2}	0	25.5	0.1
K_{V2}	0	204.7	0.1
K_{I2}	20(fixed)	----	----
I_{a2}	0	1.50	0.01

表 3 規範モデルの各係数
Table 3. Characteristics of reference model.

Item	Link1	Link2
ω_{nsti} (rad/sec)	8.00	16.00
ζ_{sti} (-)	1.00	1.00

重み係数とマイクロ系の項の重み係数との比を決める。

以上の方針に基づき、位置の項の重み係数と振動の項の重み係数との比を 1:20、マクロ系の項の重み係数とマイクロ系の項の重み係数との比を 10:1 とし、具体的には、 $K_1=0.0005$, $K_2=0.00005$, $K_3=0.01$, $K_4=0.001$ とした。

遺伝オペレータ関係の係数は、それぞれ、交叉確率 $P_c=0.80$ 、突然変異確率 $P_M=0.02$ とした。今回、エリート保存戦略を用いており、ある程度積極的にビット反転を行った方が最適解への到達が速くなると考え、各個体の長さは(9)式より 2^{53} となるので、1 個体当たりおおよそ 1 ビット反転するように突然変異確率を 0.02 とした。

図 8 に採用した突然変異確率 0.02 とこれより一けた小さい 0.002 それぞれのケースで最適化を行った際の、各世代における適応度を示す。ただし、両方のケースとも突然変異確率以外の各係数はこれまでに示した値を用いてい

図 8 各世代における適応度
Fig. 8. Fitness of each generation.

表 4 最適化後の各パラメータ値
Table 4. Parameter values with optimizing.

Parameter	Link1	Link2	
K_{P1}	3.84	8.5	
K_{V1}	49.2	98.4	
K_{I1}	20(fixed)	20(fixed)	
I_{a1}	1.16	0.70	

表 5 最適化前の各パラメータ値 1
Table 5. Parameter values-1 without optimizing.

Parameter	Link1	Link2	
K_{P1}	4.00	18.0	
K_{V1}	24.0	108.0	
K_{I1}	20(fixed)	20(fixed)	
I_{a1}	1.50	1.50	

る。突然変異確率 0.02 のケースでは、世代交代に際して適応度が頻繁に向上しているのに対し、突然変異確率 0.002 のケースでは、適応度が向上する世代交代が少なく、集団の多様性が失われていることなどが考えられる。突然変異確率 0.02 のケースで、最終世代 (50 世代) で選定された各最適化対象パラメータの値 (以下、最適化後パラメータ値という) を表 4 に示す。

比較のため、Phase II システムで行われている調整方法と基本的に同じ方法により決定した各最適化対象パラメータの値 (以下、最適化前パラメータ値 1 という) を表 5 に示す。ここで、各制御ゲインの調整には、根軌跡法の知識などを用いながら計算と実験的調整により行う方法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ (以下、従来の制御ゲイン調整方法という) を用いており、具体的には、以下のように調整した。

(a) マイクロ系の調整では、まず、速度ループゲイン K_{V2} を実験的に調整して 108.0 とし、次に、位置ループゲイン K_{P2} は、速度ループの特性が二次系と見なせる場合、オーバーシュートがないようにするためには速度ループ K_{V2} の 6 分の 1 程度以下であることが望ましいことから 18.0 とした。

(a) リンク1のモータ位置応答

(b) リンク2のモータ位置応答

図9 モータ位置応答 (シミュレーション結果)
Fig. 9. Position response of motors (simulation).

- (b) マクロ系の調整では、リンクが柔軟なために、速度ループゲイン K_{v1} の調整による発振した際の影響 (リンクの変形など) が問題となった。そこで、安全サイドに考えて K_{v1} をやや小さめの 24.0 とし、位置ループゲイン K_{p1} はその 6 分の 1 の 4.00 とした。
- (c) 指令の加減速時間は、マクロ系、マイクロ系共に加速度の絶対値が最も小さくなるよう、最長時間の 1.50 s とした。

これら最適化後および最適化前の各パラメータ値を用いた動作シミュレーションの結果を図9～図12に示す。

図9(a), (b)は、それぞれ、リンク1, リンク2のモータ位置応答を示している。ここで、最適化後パラメータ値を用いた位置応答は、図9(a), (b)ともに規範モデル(11)式の応答によく合致しており、評価関数(12)式の位置の項の評価にそった最適化が行われていることがわかる。また、規範モデル(11)式の応答は、制御ゲインを実験的に調整した最適化前パラメータ値1を用いた応答をほぼ上回らない応答であり、実験用マニピュレータ実機で実現可能な応答となっている。なお、(b)図で最適化前パラメータ値1を用いた位置応答がやや振動的な応答となっているのは、従来の制御ゲイン調整方法において、柔軟なリンク1の変形の懸念からゲインを十分大きくしていないためと考えられる。

図10(a), (b)はともにリンク2先端の動作軌跡を示しており、(a)図はモータ軸から計算した、つまり、実験用マニピュレータのリンク1を仮に剛体と見なした場合のリンク2先端の動作軌跡で、(b)図は減速機軸から計算し

(a) モータ軸からの計算値

(b) 減速機軸からの計算値

図10 リンク2先端の軌跡 (シミュレーション結果)
Fig. 10 Link 2-tip trajectory (simulation).

表6 最適化前の各パラメータ値2

Table 6. Parameter values-2 without optimizing.

Parameter	Link1	Link2
K_{p1}	4.00	4.00
K_{v1}	24.0	24.0
K_{p2}	20(fixed)	20(fixed)
t_{a1}	1.50	1.50

た実験用マニピュレータ本来のリンク2先端の動作軌跡である。ここでは、従来の制御ゲイン調整方法により調整した最適化前パラメータ値として表6に示す別の値 (以下、最適化前パラメータ値2という) を用いる。従来の制御ゲイン調整方法では、多軸モデルの先端で動作軌跡のズレ (形状の誤差) を少なくするために、各軸の周波数特性をそろえるという観点から、各軸の制御ゲインを等しく設定しており、最適化前パラメータ値2では各軸の制御ゲインを等しくした。最適化前パラメータ値2を用いたリンク2先端の動作軌跡は、リンク1を仮に剛体と見なした(a)図の場合、位置指令とよく一致するが、リンク1を柔軟とし

図 11 リンク 1 先端に生じる加速度
(シミュレーション結果)

Fig. 11 Link 1-tip acceleration (simulation).

図 12 リンク 2 先端位置の誤差 (シミュレーション結果)

Fig. 12. Link 2-tip position error (simulation).

た(b)図の場合、オーバーシュートが発生しており、実験用マニピュレータで用いる制御ゲインの値としてふさわしくないことがわかる。一方、最適化後パラメータ値を用いたリンク 2 先端の動作軌跡は、評価関数(12)式内でオーバーシュートのない二次おくれ系の規範モデルを用いているため、(b)図においてもオーバーシュートが発生していない。

図 11 はリンク 1 先端に生じる加速度である。最適化後パラメータ値を用いた場合、最適化前パラメータ値 1 の場合と比較して、動作終了後 3.0 s 以降の残留加速度の振幅が約 1/10 になっており、評価関数(12)式の振動の項の評価にそった最適化が行われていることがわかる。図 12 は、リンク 2 先端の位置指令に対する誤差の絶対値を示している。これより、最適化前パラメータ値 1 に対し最適化後パラメータ値を用いた場合、振動が抑制されるため、結局、動作終了後 3.0 s 以降の位置決め精度も良くなっていることがわかる。

GA により選択された各最適化後パラメータ値の意味について考察する。位置ループゲイン、速度ループゲインとしては、使用する規範モデル(11)式の応答によく合致するものが選択される。その際に、評価関数(12)式の各項の重み係数は振動の項が支配的となるように設定されているので、リンク 1 先端に生じる加速度を抑制するため、リンク 1、リンク 2 ともに最適化前の位置ループゲインと比較して小さな値が選択されている。指令の加減速時間として

図 13 加速時間と最大加速度の関係

Fig. 13. Acceleration time and Link 1-tip maximum acceleration.

図 14 リンク 1 モータの単独トルクと
干渉トルク

Fig. 14. Link 1-motor original torque and interference torque from Link 2.

は、リンク 1、リンク 2 ともに加速度の絶対値が最も小さくなる最長時間の 1.50 s より小さい値が選択されている。この理由について考えるため、探索した解空間の形状の一部を調べてみた。図 13 は、指令の加減速時間以外のパラメータを GA が最終的に選択した表 4 の値に固定し、リンク 1 およびリンク 2 の指令の加減速時間を、それぞれ、取りうる最小値 0.0 s から最大値 1.50 s まで変化させた際の、リンク 1 に生じる動作中の最大加速度の絶対値を表している。ここでは、リンク 1 の指令の加減速時間の変化による影響が大きい。動作中の最大加速度は、リンク 1 の指令の加減速時間が 1.20 s 近辺で極小、1.00 s 近辺で極大、0.70 s 近辺で極小となる。1.20 s 近辺には、システム全体の系の反共振点 (計算値 1.11 s) があり、GA がリンク 1 の指令の加減速時間を 1.16 s としたのはこのためと考えられる。しかし、0.70 s 近辺に反共振点がないことは、マイクロ系を剛体として設定しているので単純な 2 自由度系でないことから明らかで、GA がリンク 2 の指令の加減速

表 7 リンクの構造仕様
Table 7. Structural characteristics of links.

Item	Link 1	Link2	
Length (m)	0.4	0.1	
Width (m)	0.05	0.05	
Thickness(m)	0.0015	0.0015	
Material	aluminum	aluminum	

時間を 0.70 s とした理由は別にある。そこで、(2)式の第 1 項：リンクが単独の場合のトルク（以下、単独トルクという）と第 2 項：他のリンクからの干渉トルク（以下、干渉トルクという）の関係について調べた。図 14 は、リンク 1 の単独トルクを横軸に、リンク 2 からの干渉トルクを縦軸にとったものである。リンク 2 の指令の加減速時間が 0.70 s のケースでは、すべての点が左上平面および右下平面に存在していることから、単独トルクと干渉トルクが互いに打ち消しあうタイミングで生じており、動作中にモータに生じるトルクの総量を小さくしていることがわかる。GA がリンク 2 の指令の加減速時間を 0.70 s とした理由はこのためと考えられる。

〈4・2〉 実 験 ここでは、実験用マニピュレータを動作させて、前項のシミュレーション結果について確認する。実験用マニピュレータの対象動作や仕様に関する各係数はシミュレーションの場合と基本的に同じである。その他の仕様としてリンクの構造仕様を表 7 に示す。図 15、図 16 に最適化後パラメータ値および最適化前パラメータ値 1 を用いた実験結果を示す。図 15(a), (b) は、それぞれ、リンク 1、リンク 2 のモータ位置応答を示している。実験では、最適化前パラメータ値 1 を用いた場合、最適化後パラメータ値を用いた場合とも、シミュレーションで無視している摩擦などの影響を受けてやや遅れた応答となっているが、シミュレーション結果とよく一致している。図 16 は、リンク 1 先端に生じる加速度を示している。実験では、1 mG オーダの小さな加速度を計測しているため、シミュレーションで無視しているリンクのねじれ、取付け誤差などの影響を受けている。実験結果における各波形のピーク値がシミュレーション結果と比較して大きいのは、リンクのねじれによる加速度増分である。このリンクのねじれは 0.9 Hz 程度の振動であり、実験中容易に視認できる。また、負の方向の加速度が特に大きいのは、実験用マニピュレータの設置面に対するリンクの回転面の傾きによる影響である。また、高周波の振動のように見えるものは減速機のバックラッシュであり、ランダムに発生していることおよび計測しようとしている本来の振動に対してかなりの大きさであったことなどから、低域フィルタなどを用いたが、そのすべてを取り除くことができなかった。しかし、実験結果は、シミュレーション結果の基本的な特徴をとらえている。実験結果では、最適化後パラメータ値を使用した場合の残留加速度が最適化前パラメータ値 1 を

(a) リンク 1 のモータ位置応答

(b) リンク 2 のモータ位置応答

図 15 モータ位置応答（実験結果）

Fig. 15. Position response of motors (experiment).

図 16 リンク 1 先端に生じる加速度（実験結果）

Fig. 16 Link 1-tip acceleration (experiment).

使用した場合と比較して 1/5 程度になっている。この比率は、リンクのねじれによる加速度増分が最適化後、最適化前ともに存在することを考えると、シミュレーション結果における比率 1/10 へ更に近づく。実験結果から、GA により選択された最適化後パラメータ値を用いることによって、リンク 1 先端の加速度、つまり、マイクロ系ロボットベースの振動が抑制されることが確認された。

5. ま と め

マクロ系が柔軟で、その動作などに応じて、マイクロ系のロボットベースに振動が生じる実験用マニピュレータにおいて、制御系をシンプルな PI 制御方式とし、そこで用いる制御ゲインおよび指令の加減速時間を最適化すること

により振動を抑制する手法を提案した。本手法では、その最適化アルゴリズムとしてGAを用い、使用目的を明確にした評価関数のもと、制御ゲインおよび指令の加減速時間を統一的に扱うことができた。そして、シミュレーションおよび実験でその有効性を確認した。

現在、開発中のPhase IIシステムでは全体の系の固有振動数を考慮せず、全軸一律に加減速時間を0.5sとしている。振動が生じたときは自然減衰するのを待ってオペレータが次の動作ステップの実行を指示するという方法をとっており、制振最適化することにより振動を数分の1以下にすることが期待される。振動を現状の数分の1以下とすれば第1章で示した目標を達成可能であり、提案した手法によりPhase IIシステムのロボットベースの制振が実現できると考えられる。

提案した手法では、実現すべき一つの動作に対し、あらかじめオフラインで制御ゲインおよび指令の加減速時間からなる最適パラメータセットを選定しておく。そして、ロボットシステムには適切な数のパラメータセットを用意しておき、実行すべき動作に応じてパラメータを切り替える。このとき用意すべきパラメータセット数を決定するため、一組のパラメータセットが、最適化対象の動作と異なる動作にどの程度有効であるかを調べるのが今後の課題である。また、実験で無視した、ねじれ、摩擦、がたなどをどのように取扱うかなども課題として残されている。

本論文は活線作業ロボットシステムの制振について述べたものである。ただし、活線作業ロボットシステムは産業用ロボットに広く採用されている制御方式を用いており、その制御方式の変更なしに振動を抑制する今回の提案手法は、他の多くのシステムに対しても適用可能と考えられる。(平成8年7月4日受付, 同9年1月6日再受付)

文 献

- (1) Ohnishi & Yamamoto, et. al.: "Manipulator System for Constructing Overhead Distribution Lines", *IEEE Transaction on Power Delivery*, 8, No. 2, April, 567~572 (1993)
- (2) Yoshimi & Mukaida, et. al.: "Task planning experiment toward an autonomous robot system for the construction of overhead distribution lines", *Proc. of IROS*, 448~455 (1995)
- (3) Nakashima & Maruyama, et. al.: "Application of Semi-Automatic Robot Technology on Hot-Line Maintenance Work", *IEEE Proc. of ICRA*, 843~850 (1995)
- (4) Nakashima & Maruyama, et. al.: "The Hot-Line Work Robot System Phase II and its Human-Robot Interface MOS", *Proc. of IROS*, 116~123 (1995)
- (5) Nakashima & Hasegawa, et. al.: "Development of a Robot Language for Hot-Line Work", *The Int. Journal of the RSJ Advanced Robotics*, 10, No. 4, 355~375 (1996)
- (6) Sharon & Hogan, et. al.: "High Band-width Force Regulation and Inertia Reduction Using a Macro/Micro Manipulator System", *IEEE Proc. of ICRA* (1988)
- (7) Yurkovich & Tzes: "Experiments in Identification and Control of Flexible Link Manipulators", *IEEE Control System Magazine*, February, 41~46 (1990)
- (8) 吉川・細田・土井: 「マクローマイクロシステムによるフレキシブルアームの準静的軌道制御」, ロボット学誌, 11, No. 1, 140~147 (1993)
- (9) 北野編: 遺伝的アルゴリズム, (平5) 産業図書
- (10) Cannon & Schmitz: "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot", *Int. Journal of*

Robotics Research, 3-3, 62~75 (1984)

- (11) Sunada & Dubowsky: "On the Dynamic Analysis and Behavior of Industrial Robotic Manipulators with Elastic Member I", *Trans. ASME, Journal of MTAD*, 105, 42~51 (1983)
- (12) 吉川・村上・細田: 「2本のフレキシブルリンクを有する3自由度マニピュレータのモデリングと制御」, ロボット学誌, 9, No. 1, 1~10 (平3)
- (13) Spong: "Modeling and Control Elastic Joint Robots", *Trans. ASME, Journal of DSMC*, 109, 310~319 (1987)
- (14) 久良: 「サーボ技術・コントローラ(上)」, 日経メカニカル, 8, 11, 95~100 (昭63)
- (15) 久良: 「サーボ技術・コントローラ(下)」, 同上, 8, 26, 135~140 (昭63)

中 島 盛 之 (正員) 1964年1月5日生。86年3月九州大学工学部電気工学科卒業。同年九州電力(株)入社。現在、配電部工法技術開発担当。活線作業ロボットシステムの作業計画、制御などの研究・開発に従事。日本ロボット学会会員。

丸 山 佳 長 (正員) 1943年4月29日生。59年九州電力(株)入社。現在、配電部工法技術開発担当課長。活線作業ロボットシステムのシステム設計、作業計画など各種配電作業用ロボットシステムの研究・開発に従事。IEEE, 日本ロボット学会会員。

梅 田 信 弘 (非会員) 1970年4月16日生。93年3月九州大学理学部数学科卒業。同年(株)安川電機入社。現在、基礎研究所モータードライブ研究室に所属。ロボットの制御技術研究に従事。日本ロボット学会会員。

久 良 修 郭 (正員) 1942年2月12日生。66年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年(株)安川電機入社。研究所、技術開発センター、基礎研究所部長を経て、現在、基礎研究所制御技術担当顧問。工学博士。計測自動制御学会、日本ロボット学会会員。

長谷川 勉 (正員) 1950年2月18日生。73年東京工業大学電子物理工学科卒業。同年電子技術総合研究所勤務。92年より九州大学工学部情報工学科教授。現在、同大学院システム情報科学研究科教授。知能ロボットの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会、日本ロボット学会会員。