

遺伝的アルゴリズムを用いた直進形クレーンの最適軌道計画と 残留振動抑制制御の実験*

小島 宏行*¹, 羽 廣 賢 一*²

Optimal Trajectory Planning of a Travelling Crane Using with Genetic Algorithm and Residual Vibration Reduction Control Experiments

Hiroyuki KOJIMA*³ and Kenichi HABIRO

*³ Department of Mechanical System Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

In this paper, the residual vibration reduction method of a crane using the optimal trajectory planning is proposed, and the usefulness of the present residual vibration reduction method is confirmed both numerically and experimentally. In the optimal trajectory planning, the velocity profile of the trolley is expressed with two fifth-order polynomials, and it is depicted by two parameters obtained by applying some conditions to the fifth-order polynomials. Then, the trajectory is expressed as a function of the chromosome using the two parameters as the genes of the genetic algorithm, and the optimal trajectory of the trolley is obtained by defining the fitness function for the residual vibrations of the load. Furthermore, the numerical calculations been carried out, and it is confirmed that the residual vibrations can be extremely reduced, and the experimental results agree well with the calculation results.

Key Words: Motion Control, Vibration of Moving Body, Vibration Control, Learning Control, Residual Vibration, Crane, Optimal Trajectory, Genetic Algorithm

1. 緒 言

クレーンは、各種生産工程間における搬送システムとして広く用いられており、クレーンの吊り荷の振動抑制制御に関して多くの研究がなされている。例えば、吊り荷角センサを用いた研究として、吊り荷振れ角センサを開発するとともに、縮小モデルと最適レギュレータ理論も用いた旋回振れ止め制御⁽¹⁾、荷位置情報とロープ長を考慮し、極可変ゲイン制御を用いた三次元天井クレーンの荷位置フィードバック制御⁽²⁾などの研究が報告されている。また、クレーンの熟練オペレータが旋回動作のみによって残留振動を巧みに抑制していることに注目した旋回クレーンの制御⁽³⁾、振れ角と振れ角速度を用いたファジィ推論により、旋回および起伏操作により生じる吊り荷の振れを抑制するファジィ制御⁽⁴⁾などの研究もなされている。さらに、吊り荷振れ角センサが過酷な環境で用いられていることや、コスト削減などの観点から、吊り荷振れ角センサを必要としないクレーンの制御に関する研究も報告されている。例えば、トロリーの移動速度と位置偏差をフィードバックすることにより振動エネルギー

を散逸させる方式の直進形クレーン制御⁽⁵⁾、ブームが瞬間的に旋回させられるものと仮定するとともに、吊り荷の周期に着目し求めた最適旋回パターンによる旋回クレーンの振れ止め制御⁽⁶⁾、終端状態制御により求めたフィードフォワード制御と、吊り荷振れ角センサを用いないフィードバック制御から構成した自由度2のタワークレーンの制御⁽⁷⁾などの研究が報告されている。

一方、柔軟構造物の残留振動抑制を主眼とする軌道計画に関する研究として、生物の進化論的学習機能を工学的に実現した遺伝的アルゴリズム⁽⁸⁾を用いたPTP制御フレキシブルロボットアームの最適軌道計画⁽⁹⁾およびCP制御フレキシブルロボットアームの軌道計画⁽¹⁰⁾に関する研究が報告されており、遺伝的アルゴリズムを用いることにより、複雑な数式処理が不用となり、比較的容易に最適設計問題を解決し得る場合が多い。しかしながら、残留振動抑制を実現するようなクレーンの軌道計画を、遺伝的アルゴリズムを用いて行うことは、実用上、意義あることと思われるが、このような研究は極めて少ないようである。

本研究は、トロリー機構とワイヤ巻き上げ機構とからなる自由度2の直進形クレーンの最適軌道計画を遺伝的アルゴリズムを用いて行うとともに、数値計算と実験を行い、本最適軌道計画法の有用性を検証したも

* 原稿受付 2002年8月26日。

*¹ 正員, 群馬大学工学部(☎376-8515 桐生市天神町1-5-1)。

*² 群馬大学大学院。

E-mail: kojima@me.gunma-u.ac.jp

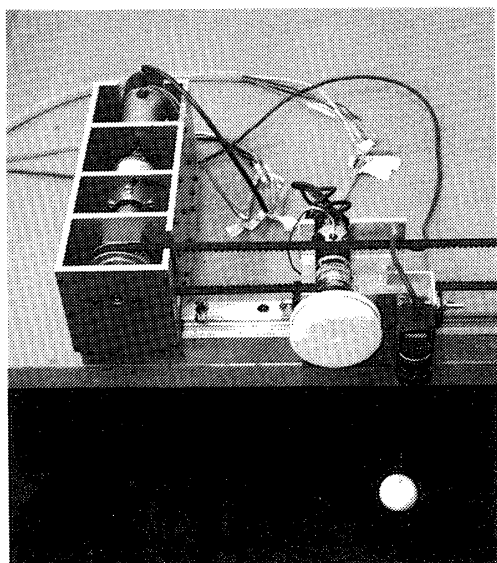


Fig.1 Photograph of traveling crane

のである。最適軌道計画においては、まず、トロリーの速度パターンを5次の多項式で記述するとともに、境界条件などを用いて、この速度パターンを、二つの遺伝子からなる染色体の関数として表現している。さらに、残留振動抑制を実現させるための適応度関数を定義し、遺伝的アルゴリズムを用いて最適軌道計画アルゴリズムを構築している。また、実験においては、吊り荷位置を視覚センサで計測している。

2. 自由度2の直進形クレーンの運動方程式

図1は、本研究で試作した自由度2の直進形クレーンを示したものであり、直進形クレーンは、図2に示されているように、トロリー機構と巻き上げ機構とから構成されている。トロリー機構と巻き上げ機構は、ともにプーリーを用いており、歯車内蔵のDCモータによって駆動されている。また、吊り荷位置は、視覚センサを用いて計測されている。

図3に示されている直進形クレーンの座標モデルの記号を用いると、系の運動エネルギー T 、ポテンシャルエネルギー U および仮想仕事 δW は、ワイヤの長さを l 、吊り荷の振れ角を θ とすると、次式のように書くことができる。

$$T = \frac{1}{2} \left\{ m \dot{r}_m^T \dot{r}_m + \left(M + \frac{N_1^2 J_1 + 2J_{P1}}{r_1^2} \right) \dot{u}^2 + \left(\frac{N_2^2 J_2 + J_{P2}}{r_2^2} \right) \dot{j}^2 \right\} \quad (1)$$

$$U = -mgl \cos \theta \quad (2)$$

$$\delta W = f_1 \delta u + f_2 \delta j \quad (3)$$

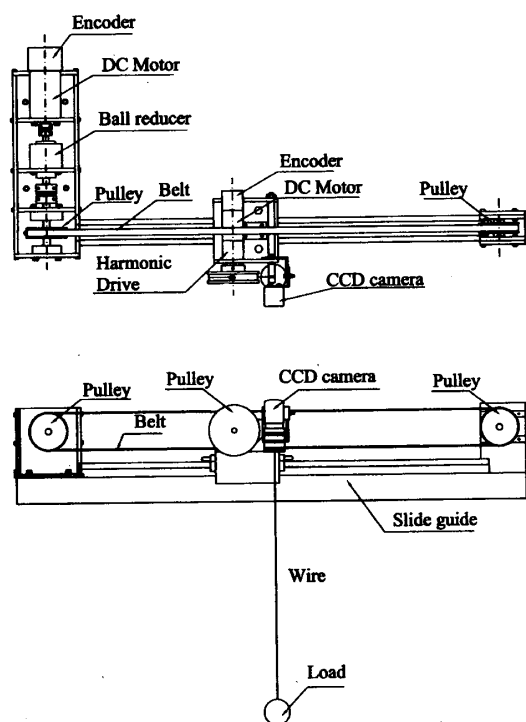


Fig.2 Structure of traveling crane

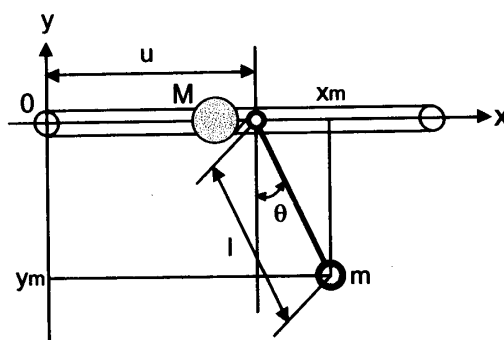


Fig.3 Coordinate system of traveling crane

ここに、

$$r_m = [x_m \quad y_m]^T \quad (4)$$

$$x_m = u + l \cos \theta \quad (5)$$

$$y_m = -l \sin \theta \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{N_1 K_{T1}}{r_1 R_1} \left(e_1 - N_1 K_{E1} \frac{\dot{u}}{r_1} \right) \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{N_2 K_{T2}}{r_2 R_2} \left(e_2 - N_2 K_{E2} \frac{\dot{j}}{r_2} \right) \quad (8)$$

であり、 m は吊り荷の質量、 M はトロリー機構および巻き上げ機構の質量、 u はトロリーの移動量、 J_1 、 J_2 はDCモータ電機子の慣性モーメント、 J_{P1} 、 J_{P2} はプーリーの慣性モーメント、 N_1 、 N_2 は歯車の

減速比, g は重力加速度, f_1, f_2 は DC モータのトルクに基づく力, r_1, r_2 はトロリー機構および巻き上げ機構におけるプーリの半径, K_{T1}, K_{T2} は DC モータのトルク定数, K_{E1}, K_{E2} は逆起電力係数, R_1, R_2 は電機子の抵抗である.

式(1)~(3)をハミルトンの原理

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T-U)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0 \quad (9)$$

に代入すると, 系の運動方程式は次式のように得られる.

$$M_1 \ddot{u} + m \ddot{l} \sin \theta + m l \ddot{\theta} \cos \theta + m \dot{\theta} (2 \dot{l} \cos \theta - l \dot{\theta} \sin \theta) = f_1 \quad (10)$$

$$m \ddot{u} \sin \theta + M_2 \ddot{l} - m l \dot{\theta}^2 - m g \cos \theta = f_2 \quad (11)$$

$$\ddot{u} \cos \theta + l \ddot{\theta} + 2 \dot{l} \dot{\theta} + g \sin \theta = 0 \quad (12)$$

ここに,

$$M_1 = M + m + \frac{2J_{P1} + N_1^2 J_1}{r_1^2} \quad (13)$$

$$M_2 = m + \frac{J_{P2} + N_2^2 J_2}{r_2^2} \quad (14)$$

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた最適軌道計画

ワイヤの長さの目標値 l_d は, 図4中の記号を用いて次式のように定められている.

$$l_d = l_o - \frac{l_m}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi u_d}{u_m} \right) \right) \quad (15)$$

ここに, u_d, u_m はトロリーの移動量の目標値および全移動量である.

吊り荷の残留振動をほぼ消失させるための最適なトロリーの速度パターンを, 遺伝的アルゴリズムを用いて以下の手順で求める.

本研究では, 数値計算が不安定になることを避けるために, トロリーの速度の目標値を, 図5のように二つの区間に分割して記述するとともに, 機構部の運動をより滑らかにすることを意図し, 運動開始時, 運動終了時ならびに中間時点における加速度の値を零に設定する. また, 前半と後半の速度パターンを, 各々一つのパラメータで表現することを考えると, 図5の前半におけるトロリーの速度の目標値は, 次式のように5次の多項式で記述されることとなる.

$$\dot{u}_d = \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 + \alpha_4 t^4 + \alpha_5 t^5 \quad \text{if } 0 \leq t \leq (T_m/2) \quad (16)$$

ここに, T_m はクレーンの動作時間である.

前述の運動開始時ならびに中間時点における条件は,

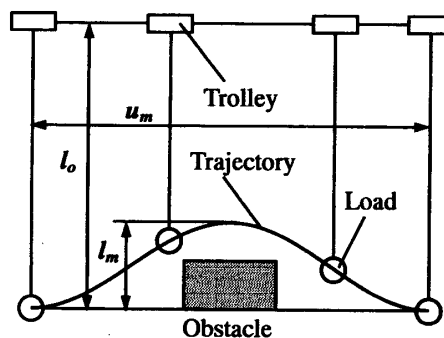
$$\ddot{u}_d(0) = 0 \quad (17)$$


Fig.4 Trajectory of load

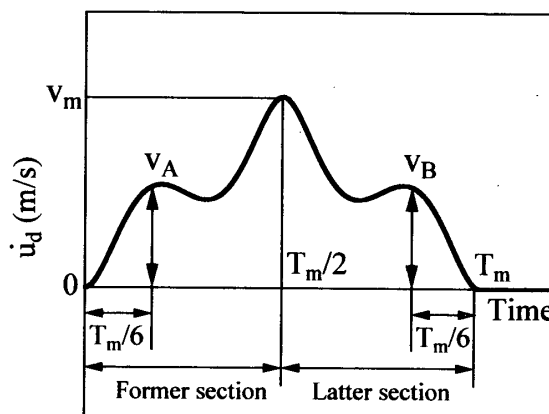


Fig.5 Velocity pattern of trolley

$$\ddot{u}_d \left(\frac{T_m}{2} \right) = 0 \quad (18)$$

また, 前半区間の速度曲線を一つのパラメータで表現するためには, 図5に示されている次式のような節点を用いることが必要となる.

$$v_A = \dot{u}_d \left(\frac{T_m}{6} \right) \quad (19)$$

最適軌道計画の数値計算の安定化を図るために, 次式の拘束条件を課す.

$$\int_0^{T_m/2} \dot{u}_d(t) dt = \frac{u_m}{2} = \frac{v_m T_m}{4} \quad (20)$$

ここに,

$$v_m = \dot{u}_d \left(\frac{T_m}{2} \right) \quad (21)$$

であり, u_m はトロリーの移動量である.

式(16)を式(17)~(20)に代入すると, 式(16)の係数は, 次式のように導かれる.

$$\alpha_1 = 0 \quad (22)$$

$$\alpha_2 = \frac{3}{T_m^2} (81v_A - 17v_m) \quad (23)$$

$$\alpha_3 = \frac{8}{T_m^3}(61v_m - 243v_A) \quad (24)$$

$$\alpha_4 = \frac{180}{T_m^4}(27v_A - 7v_m) \quad (25)$$

$$\alpha_5 = \frac{144}{T_m^5}(7v_m - 27v_A) \quad (26)$$

以上のことから、前半区間におけるトロリーの軌道は、次式であたえられることがわかる。

$$u_d(t, v_A) = \frac{1}{3}\alpha_2 t^3 + \frac{1}{4}\alpha_3 t^4 + \frac{1}{5}\alpha_4 t^5 + \frac{1}{6}\alpha_5 t^6$$

if $0 \leq t \leq (T_m/2)$ (27)

後半区間においても前半区間と同様に、図5に示されている次式の節点

$$v_B = \dot{u}_d\left(\frac{5T_m}{6}\right) \quad (28)$$

を用いるとともに、 $\bar{t} = T_m - t$ とおくと、後半区間のトロリーの軌道は、次式のように書ける。

$$u_d(t, v_B) = u_m - \left(\frac{1}{3}\beta_2 \bar{t}^3 + \frac{1}{4}\beta_3 \bar{t}^4 + \frac{1}{5}\beta_4 \bar{t}^5 + \frac{1}{6}\beta_5 \bar{t}^6\right)$$

if $(T_m/2) \leq t \leq T_m$ (29)

ここに、

$$\beta_2 = \frac{3}{T_m^2}(81v_B - 17v_m) \quad (30)$$

$$\beta_3 = \frac{8}{T_m^3}(61v_m - 243v_B) \quad (31)$$

$$\beta_4 = \frac{180}{T_m^4}(27v_B - 7v_m) \quad (32)$$

$$\beta_5 = \frac{144}{T_m^5}(7v_m - 27v_B) \quad (33)$$

また、クレーンの動作時間 T_m 以後のトロリーの移動量の目標値 u_d は、

$$u_d(t) = u_m, \text{ if } t \geq T_m \quad (34)$$

したがって、トロリーの移動量の目標値 u_d は、パラメータ v_A, v_B を遺伝子とする染色体 λ の関数となる。

トロリーの移動量の目標値 u_d ならびにワイヤ長さの目標値 l_d に対応する吊り荷の振れ角 θ_d は、式(12)を用いることにより、次式のように記述できる。

$$l_d \ddot{\theta}_d = -\ddot{u}_d(\lambda) \cos \theta_d - 2\dot{l}_d \dot{\theta}_d - g \sin \theta \quad (35)$$

ここに、

$$\lambda = [v_A \quad v_B]^T \quad (36)$$

遺伝的アルゴリズムにおける適応度関数 *fitness* は、式(36)を用いるとともに、残留振動抑制を考慮すると、例えば、次式のように定義できる。

$$fitness = \exp(-10\bar{\theta}_{resid}) \quad (37)$$

ここに、

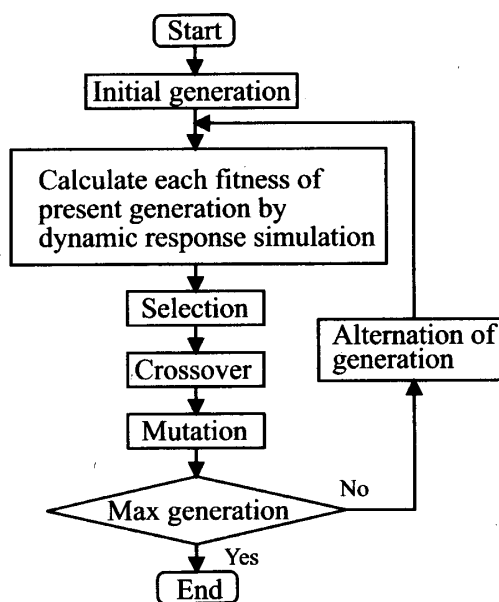


Fig.6 Flow chart of genetic algorithm

Table 1 Dimensions of traveling crane

$M = 2.11 \text{ kg}$	$J_{P1} = 3.97 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$
$m = 0.26 \text{ kg}$	$J_{P2} = 1.11 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
$J_1 = 1.18 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$	$K_{T1} = 6.08 \times 10^{-2} \text{ Nm/A}$
$J_2 = 1.48 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$	$K_{T2} = 4.2 \times 10^{-2} \text{ Nm/A}$
$N_1 = 18$	$K_{E1} = 6.08 \times 10^{-2} \text{ Vs/rad}$
$N_2 = 50$	$K_{E2} = 4.2 \times 10^{-2} \text{ Vs/rad}$
$r_1 = 2.82 \text{ cm}$	$R_1 = 3.4 \text{ } \Omega$
$r_2 = 3.80 \text{ cm}$	$R_2 = 10 \text{ } \Omega$

Table 2 Parameters of genetic algorithm

Maximum of generation	300
Number of individuals	15
Length of individual (bit)	24
Number of genes	2
Length of gene (bit)	12
Crossover ratio	0.5
Mutation ratio	0.03

$$\bar{\theta}_{resid} = \frac{1}{T_m} \int_{T_m}^{T_m+T_l} |\theta| dt \quad (38)$$

であり、 T_l は残留振動の計測時間である。

本研究では、式(37)の適応度関数を用いるとともに、図6に示されているような、選択、交叉、突然変異から構成される遺伝的アルゴリズムを用いて、自由度2の直進形クレーンの最適軌道計画アルゴリズムを構築するとともに、C言語を用いて数値計算プログラムを

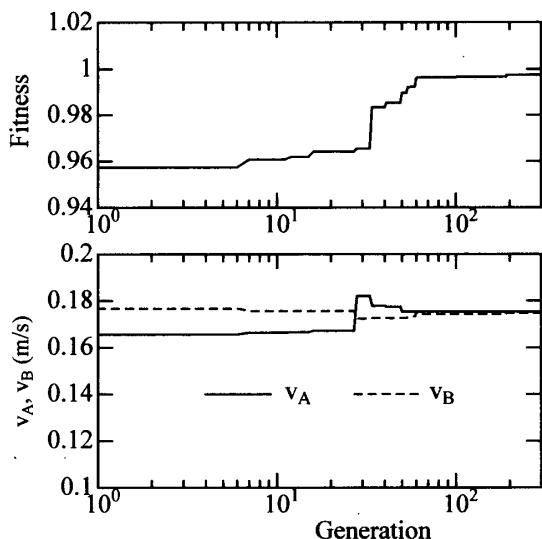


Fig.7 Evolution history

作成している。なお、遺伝子の探索範囲は、試行錯誤の結果、トロリーの速度が正であり、かつ v_m 以下となるよう次式のように定めた。

$$\frac{17}{81} \text{ m/s} \leq v_A \leq \frac{80}{81} \text{ m/s}, \quad \frac{17}{81} \text{ m/s} \leq v_B \leq \frac{80}{81} \text{ m/s}$$

4. 数値計算結果および実験結果

表1に、図1.2の直進形クレーンの主な諸元を示す。図7は、遺伝的アルゴリズムに基づく最適軌道計画の数値計算を、表2のようなパラメータを用いて行った結果を示したものである。図より、適応度関数は、世代数の増加とともに増大し、300世代でほぼ1となっており、残留振動がほぼ消失したトロリーの最適軌道が自動的に計画されていることがわかる。また、遺伝子の値も300世代でほぼ収束しており、300世代の染色体を最適染色体 λ^{opt} と見なすことにより、最適染色体は、次のように得られた。

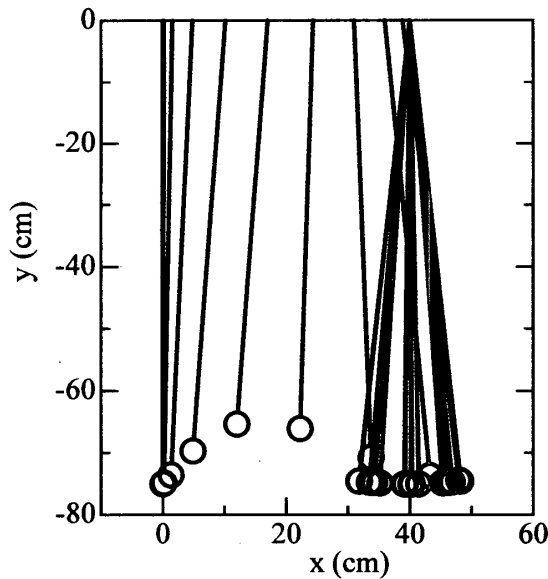
$$\lambda^{opt} = \begin{bmatrix} v_A^{opt} & v_B^{opt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1573 & 0.1747 \end{bmatrix}^T \text{ (m/s)}$$

図8は、最適軌道計画で用いたトロリーの速度曲線と同様の境界条件と三角関数とから求めたトロリーの目標軌道

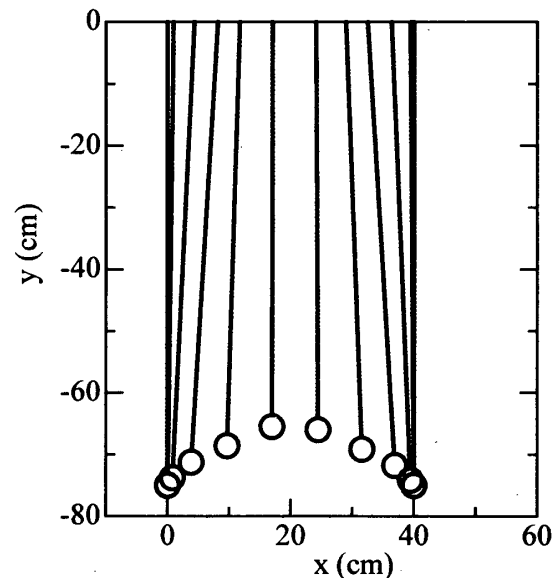
$$u_d(t) = \frac{u_m}{T_m} \left\{ t - \frac{T_m}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_m}\right) \right\}, \quad \text{if } 0 \leq t \leq (T_m/2) \quad (39)$$

$$u_d(t) = u_m, \quad \text{if } t \geq T_m \quad (40)$$

を用いた場合の吊り荷の軌道と、最適染色体 λ^{opt} を用いた場合のそれを比較したものである。図より、三角関数によるトロリーの軌道を用いた場合には、大きな値の残留振動が生起しているが、最適染色体 λ^{opt}



(a) without optimal chromosome



(b) with optimal chromosome

Fig.8 Numerical calculation results of trajectory of load

を用いた場合では、残留振動がほぼ消失していることが視覚的に確かめられる。

直進形クレーンの運動制御の実験では、吊り荷位置は、視覚センサ (キーエンス: CV-100) を用いて計測されており、計測結果は RS-232C インターフェースを介してパーソナルコンピュータに入力されている。視覚センサは、24万画素であり、シャッタースピードは 1/250s としている。

トロリー機構および巻き上げ機構の目標値追従制御

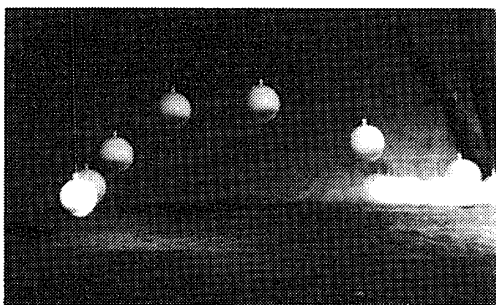
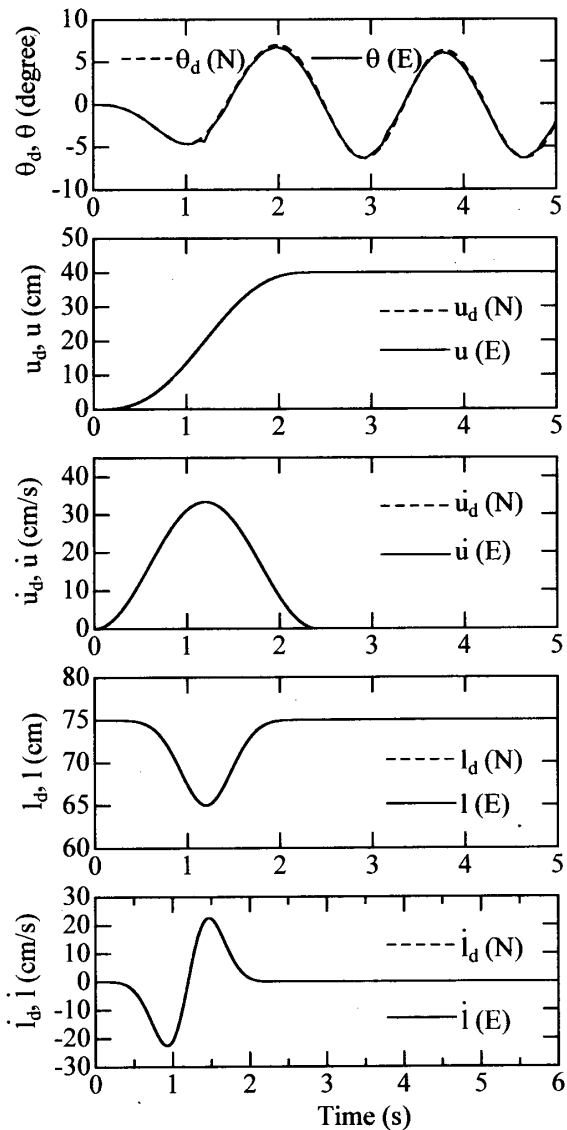


Fig.9 Dynamic response without optimal chromosome

システムを、PD 制御と、振れ角を近似的に零とおいたフィードフォワード制御とからなる自由度2のサーボ制御システムとして構成するとともに、この目標値追従制御システムを、DSP ボード(エムティティ: DSP6031)を内蔵したパーソナルコンピュータ (IBM300PL)とC言語プログラムにより構築した。

トrolley機構および巻き上げ機構の目標値追従制御

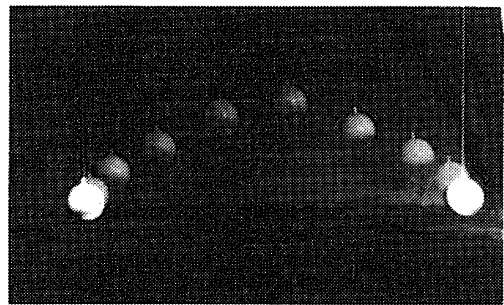
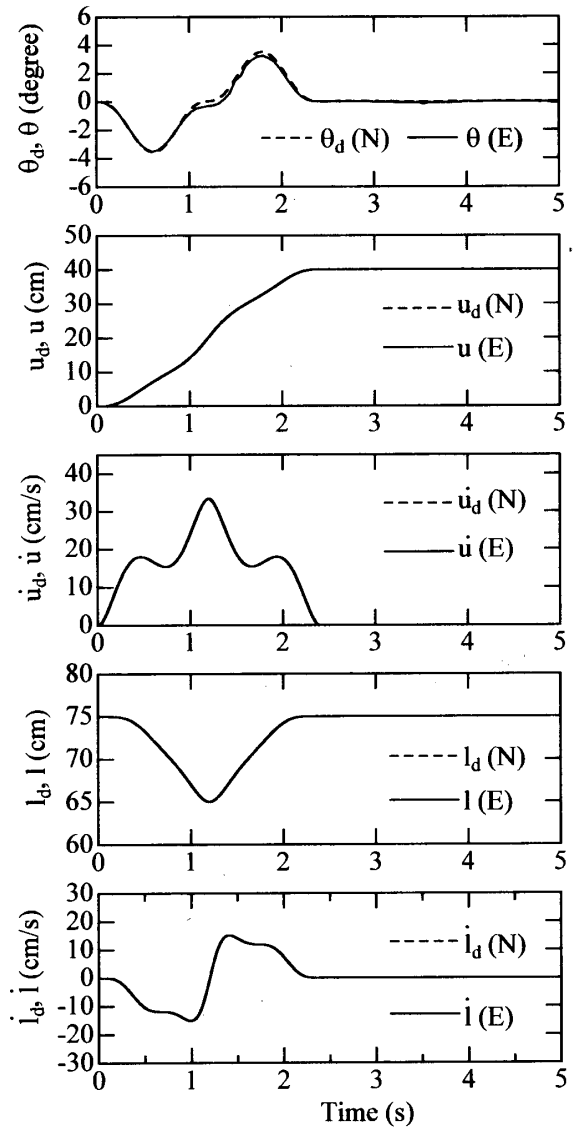


Fig.10 Dynamic response without optimal chromosome

則は次式のとおりである。

$$e_1 = K_{p1}(u_d - u) + K_{D1}(\dot{u}_d - \dot{u}) + e_{1f} \quad (41)$$

$$e_2 = K_{p2}(l_d - l) + K_{D2}(\dot{l}_d - \dot{l}) + e_{2f} \quad (42)$$

ここに、

$$e_{1f} = \frac{r_1 R_1}{N_1 K_{T1}} \left\{ M_1 \ddot{u}_d + \frac{N_1^2 K_{T1} K_{E1}}{r_1^2 R_1} \dot{u}_d \right\} \quad (43)$$

$$e_{2f} = \frac{r_2 R_2}{N_2 K_{T2}} \left\{ M_2 \ddot{j}_d + \frac{N_2^2 K_{T2} K_{E2}}{r_2^2 R_2} \dot{j}_d + mg \right\} \quad (44)$$

であり、 e_{1f} 、 e_{2f} はフィードフォワード制御電圧である。本実験では、フィードバック係数を実験的にチューニングし、 $K_{p1}=254 \text{ V/m}$ 、 $K_{p2}=342 \text{ V/m}$ 、 $K_{D1}=1.13 \text{ Vs/m}$ 、 $K_{D2}=1.52 \text{ Vs/m}$ のように設定した。

図9は、三角関数によるトロリーの軌道を用いた場合の実験結果と数値計算結果を示したものであり、大きな値の残留振動が生起している。実験結果(E)は、数値計算結果(N)、すなわち、目標値に良く一致しており、式(41)、(42)で記述されている目標値追従制御システムの性能が十分な位置制御精度を有していることがわかる。また、ストロボ写真を用いて撮影した吊り荷の軌跡図からは、残留振動が顕著に生起していることが視覚的に認められる。

図10は、最適染色体 λ^{opt} に基づく最適軌道を用いた場合の実験結果と数値計算結果を示したものである。図より、遺伝的アルゴリズムを用いて構築された最適軌道計画法によって、振れ角センサを用いることなく、自由度2の直進形クレーンの残留振動がほぼ消失していることが、数値計算と実験の両面から実証されたものと言える。また、ストロボ写真を用いて撮影した吊り荷の軌跡図からは、残留振動がほぼ消失していることが視覚的に認められる。

5. 結 言

本研究は、遺伝的アルゴリズムを用いた直進形クレーンの最適軌道計画法を提案するとともに、数値計算と実験を行い、本最適軌道計画法の有用性を検証したものである。直進形クレーンは、トロリー機構とワイヤ巻き上げ機構とから構成されている。最適軌道計画においては、トロリーの速度パターンを5次の多項式で記述するとともに、境界条件などを用いて、この速度パターンを、二つの遺伝子からなる染色体の関数として表現し、残留振動抑制を実現させるための適応度関数を定義している。数値計算を行ったところ、本最適軌道計画法により吊り荷の残留振動はほぼ消失し、本最適軌道計画法の有用性が検証された。また、実験

結果と数値結果は良く一致し、本最適軌道計画法の有用性が実験の上からも確かめられた。

謝 辞

本研究は、群馬大学科学技術振興会の研究助成を受けて実施されたことを記して謝意を表します。

文 献

- (1) 多田博夫, 井上善雄, 大嶋真人, 吉村敏夫, 旋回式クレーンの吊り荷振れ止め制御に関する研究 (吊り荷振れ角センサの開発と縮小モデルでの旋回振れ止め制御), 機論, 63-605, C(1997), 47-54.
- (2) 兼重明弘, 寺嶋一彦, 宗利秀和, 定森健, 荷位置情報に基づく3次元天井クレーンのモデリングと搬送制御 (第2報, ロープ長変化を考慮した荷位置フィードバック制御系の構築), 機論, 64-628, C(1998), 4783-4790.
- (3) 大音光博, 安信誠二, 熟練操縦者の制御戦略を考慮した旋回クレーンの制御, 計測自動制御学会論文集, 33-9, (1997), 923-929.
- (4) 日野順市, 藤田邦彦, 吉村敏夫, 旋回および起伏操作時のトラッククレーンの吊り荷のファジィ制御, 機論, 64-626, C(1998), 3798-3804.
- (5) 橋本幸男, 土谷武士, 松田敏彦, 杉岡一郎, 荷振れ情報を必要としないクレーンの吊り荷の振動抑制制御, 計測自動制御学会論文集, 30-2, (1994), 172-180.
- (6) 近藤良, 武田亭, 田口彦衛, 石橋文厚, 振動周期に基づく旋回クレーンの振れ止め制御, 機論, 67-655, C(2001), 725-731.
- (7) 高木清志, 西村秀和, 内田優子, 吊り荷振れ角センサを用いないタワークレーンの制御 (誤差学習による終端状態制御を用いた2自由度制御), 機論, 67-656, C(2001), 999-1007.
- (8) 北野編, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, (1993).
- (9) 小島宏行, 木部哲治, 遺伝的アルゴリズムを用いた最適軌道計画による2関節フレキシブルロボットアームの残留振動抑制制御, 日本ロボット学会誌, 19-7, C(2001), 905-912.
- (10) 小島宏行, 遺伝的アルゴリズムを用いたCP制御フレキシブルロボットアームの軌道計画, 機論, 68-670, C(2002).