

博士學位論文

# 電磁吸着搬送ロボットアームの 準最短時間軌道計画と実験

群馬大学 大学院 工学研究科  
工学専攻 先端生産システム領域

陸 浦 優 輔

2009 年 2 月

# 電磁吸着搬送ロボットアームの準最短時間軌道計画と実験

## 目次

### 第1章 序論

1.1 研究の背景	2
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の概要	5
参考文献	9

### 第2章 電磁吸着ハンドを有する3関節ロボットアームの

#### 準最短時間軌道計画法と搬送制御

2.1 緒言	12
2.2 実験装置概要	13
2.2.1 3関節水平ロボットアームの構造	13
2.2.2 電磁吸着ハンドと磁性搬送体の構造	15
2.3 電磁吸着搬送における直線軌道を用いた軌道計画	17
2.3.1 直線軌道を用いた軌道計画の概要	17
2.3.2 直線軌道を用いた軌道計画の定式化	18
2.4 電磁吸着ハンドの電磁吸着特性	20
2.4.1 実験機における制御方式	20
2.4.2 電磁吸着特性実験	20
2.5 ロボットアームを用いた電磁吸着搬送の 準最短時間軌道計画	22
2.5.1 運動方程式	22
2.5.2 遺伝的アルゴリズムを用いた軌道計画法	23
2.6 数値計算結果と搬送制御実験結果	26
2.6.1 電磁吸着搬送制御数値計算結果	26
2.6.2 電磁吸着搬送制御実験結果	31
2.7 結言	33
参考文献	34

## 第3章 PTP制御を用いた電磁吸着搬送ロボットアームの

### 準最短時間軌道計画

3.1 緒言	36
3.2 実験装置概要	37
3.2.1 ロボットアームの構成	37
3.2.2 電磁吸着ハンド及び磁性搬送体の構造	39
3.3 PTP制御軌道の定式化と電磁吸着性能	41
3.4 PTP制御における準最短時間軌道計画法	43
3.5 PTP制御による電磁吸着搬送の数値計算と実験結果	46
3.5.1 PTP制御による電磁吸着搬送数値計算結果	46
3.5.2 PTP制御による電磁吸着搬送実験結果	49
3.6 結言	51
参考文献	52

## 第4章 経路点と遺伝的アルゴリズムを用いた電磁吸着搬送

### 2 関節ロボットアームの準最短時間軌道計画と実験

4.1 緒言	54
4.2 経路点を用いた電磁吸着搬送軌道の定式化	55
4.2.1 マニピュレータの概要	55
4.2.2 経路点を用いた軌道の定式化	57
4.3 経路点を用いた準最短時間軌道計画	61
4.3.1 ロボットアームの運動方程式	61
4.3.2 遺伝的アルゴリズムを用いた準最短時間軌道計画法	62
4.4 数値計算結果及び実験結果	64
4.5 結言	71
参考文献	72

第5章 結論	74
5.1 本論の成果	75
5.2 今後の課題	78
謝辞	79
関連論文	80

# 第 1 章

## 序 論

## 1.1 研究の背景

ロボットはここ数十年で飛躍的な進歩を遂げており、我々の生活環境に対し身近なものとして様々な製品が市場に供給されている。しかし、現実においてロボットは生産現場で使用されるロボットアームの数が圧倒的に多く、生産現場でのロボットアームを用いたシステムはごく当然のものとなっている。生産システムに組み込まれたロボットアームは、用途に応じた作業用ハンドを取り付けたロボットマニピュレータとして目的に応じて使用されており、生産性向上などへ、大きな役割を担っている。この生産システムに組み込まれたロボットアームに対する要求は、多様化しつつあるものの、高速動作化や高精度化、コスト低減化などは、基本的でありながら、現在でも重要な項目となっている。

実際の生産現場で稼働しているロボットアームはアクチュエータに、主に AC サーボモータなどが使用されており、高精度な位置決めが必要となる場合にはアブソリュートエンコーダなどのセンサを用いてフィードバック制御などで位置決め精度を確保している。一方で、大学などの研究機関では、使用が容易であり低コストで済むなどの観点からロボットの駆動に DC モータを採用する場合が多い。しかし、どのように構築されたロボットアームでも、使用用途に応じながら要求項目を解消させる問題がある。

ここで、ロボットアームを目的に応じて動作させる場合、要求項目を達成するための重要な課題の一つとして軌道計画問題がある。ロボットアームの制御を行うにあたり、アーム先端が把持した棒などの搬送物を、指定された穴に差し込む動作や、ロボットアームの作業空間上に配置された障害物をどのように回避運動させるかなどでは、目的に対してロボットアームの制御システムは要求に基づいた軌道を作り、それに合わせた軌道制御を行わせることが不可欠となる<sup>(1)</sup>。現実によくある問題として、ロボットアームの軌道上に経由点が与えられた場合を例に挙げると、ロボットアームの運転中において経由点での一時停止を避けるために、ロボットハンドの速度やロボットアームの関節角や関節角速度などに、滑らかにつながれた多項式を用いて軌道を生成し、初期位置から終期位置までロボットアームを連続的に駆動させる方法などがある。軌道計画問題では、ロボットアームの総動作距離や関節角度などに対して区間に関する境界条件と連続条件を決定し、これに多項式を用いて各関節を駆動させる。ここで全区間を一つの多項式で与える必要はなく、滑らかにつながれば各区間では異なった多項式でも補える。これは位置、速度、加速度が連続する条件を満たすことである。このような研究報告としては、Bertrand Tondu らによる速度、加

速度などを拘束条件としたオンラインロボットの最適関節軌道生成器についての研究がある<sup>(2)</sup>。これは、**three-cubic**法と呼ばれる方法で、関連した速度と共に位置のポイントが与えられ、その間を補間するロボット軌道を生成する事を提案している。また、軌道計画法のなかでも障害物回避を行う運動計画の問題など、近年では幅広く研究<sup>(3)-(5)</sup>されている。

一方、搬送用途のロボットアームでは、搬送始めから搬送終わりまでの要する時間（タクトタイム）が短い事が望まれることから、最短時間でロボットアームを動作させるための最適化問題として軌道計画は深く関わりを持ってくる。このため、ロボットアームの最短時間軌道に対する様々な研究報告がされている。例えば、ピックアンドプレイス作業のために2自由度の並進運動パラレルロボットについての最短時間軌道計画<sup>(6)</sup>、単一マニピュレータに比べ、より重量のある対象物を搬送できる双腕マニピュレータの経由点なしで、初期位置から終期位置まで動作時間を最短とする軌道計画<sup>(7)</sup>、果物のピッキングにおいて果物の位置を把握し、つみ取るためのオンライン作業最短時間計画<sup>(8)</sup>、などである。

ここで、作業環境や障害物等の情報に基づき移動すべき経路の計画を立てることを経路計画として定義しているのに対し、軌道計画は、時間をパラメータにとって、経路を計画することとされている。経由点を用いた障害物回避などについての研究報告では、経路計画として扱われることが多く、そのような報告では、移動経路に着目した研究となっている。よって経路の考案について、ロボットアーム動作に最短時間動作などの要因が含まれる場合は、ロボットアームの軌道計画問題として取り扱うこととなる。

また、ロボットマニピュレータの障害物回避などに着目した経路計画の主な課題は、初期位置から終期位置までに運動エネルギーを最小とする最適な無衝突の軌道を見つけることであり、このような研究においては、ニューラルネットワークやファジー制御、遺伝的アルゴリズムなどを構築して経路計画がなされている。ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなどの手法は、ロボットアームの軌道計画法にも組み込まれることも多く、ロボットアーム動作の総動作時間を短縮するための最適化などに用いられることがある。そのような手法を用いたロボットアームの研究報告では、例えば、遺伝的アルゴリズムを用いたロボットマニピュレータの障害物回避におけるシミュレーション<sup>(9)</sup>などがある。遺伝的アルゴリズムとは、生物進化(選択淘汰・突然変異)の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索・学習・最適化の一手法である。遺伝的アルゴリズムを用いた研究報告では、障害物がない作業空間におけるマニピュレータの発生経路と目標経路の偏差を最小とする為の遺伝的アルゴリズムを用いた最適化法の提案とシミュレーション<sup>(10)</sup>、知覚情報に基づく遺伝的アルゴリズムを適用した移動ロボットの衝突回避行動<sup>(11)</sup>などがあり、その他にも多数

報告<sup>(12)-(14)</sup>されている。

このような背景を踏まえた上で、ロボットアームの経路計画問題、軌道計画問題についての報告はあるが、ロボットアームにハンドを取り付けた研究報告、とりわけ特殊ハンドの一つである電磁吸着ハンドを用いた研究報告例は、一般的に少ないように思われる。電磁吸着ハンドは、稀土類永久磁石を用いた永電磁石で構成されたものから、磁性金属である鉄を芯として、エナメル線を巻き付けるだけの簡易的な構成のものまで幅広くあり、生産現場などで、磁性体搬送などに用いられている。電磁力は印加電流に比例して吸着力が高まるという特性があり、かつ構造が容易であるため、ボルトやナットなどの小型製品から自動車車体などの大型製品まで様々な搬送用途を持つ。しかし電磁吸着搬送の場合、小型の磁性体の搬送では、搬送中に磁性搬送体に並進力が働くことでロボットハンドの吸着面と磁性搬送体の吸着面に滑りが生じ、この状態からモーメントが作用することで、吸着面同士が点接触となり落下する滑落状態を起こす問題もある。ロボットアーム動作速度を速めるほど、この傾向は高まる。さらに、現実の生産システムで組み込まれた電磁吸着ハンドを取り付けたロボットアームでは、大型の電磁吸着ハンドを取り付け、ワンサイクルでの搬送に複数の磁性体を吸着させて搬送している。しかしこういったロボットアームではハンドの姿勢変化により、磁性搬送体同士で吸着が起こる多重吸着状態を起こすこともあり、この不安定な状態においても滑落状態への傾向が高まってくる。そこで、ロボットアームによる電磁吸着搬送において滑落状態を起こすことなく正常に搬送し、かつ目的に応じて総動作時間を短くするような軌道計画法についての必要性が生じてくる。本論では、このような背景から次節で研究目的を明確に定め、電磁吸着搬送ロボットアームの軌道計画法について、その研究報告を述べていく。

## 1.2 本研究の目的

ロボットアームはアームの使用用途や装着ハンドに応じて軌道計画の要求に違いが生じる。前節の通り、搬送用途は、ワンサイクルでのタクトタイムをより短くすることが求められる場合が多い。例えば、半導体ウエハ搬送の準最短時間軌道計画<sup>(15)</sup>などである。軌道計画でロボットアームの効率的動作の考案を行うことは、生産性向上やコスト低減などの解決に繋がることが見込める。

一方で、前節で述べたとおり、電磁吸着ハンド<sup>(16)-(17)</sup>は、保持吸着力が非常に強く、数あるロボットハンドの中でも構造・制御が容易であり、同じ保持吸着機構である真空吸着と比べると真空源を必要としないという特徴がある。また、



アルミ缶とスチール缶などの仕分けを容易に行うなど、非磁性体と磁性体の仕分けを容易に行うことができる。しかし、ロボットアームによる電磁吸着搬送を考えると、搬送体に慣性による並進力が作用して吸着保持状態が保たれず磁性体に滑りが生じ、さらに滑り状態にある磁性体に対しモーメントが作用し、落下が起こる問題がある。その結果、搬送体が滑落状態になることで搬送体に対して傷やへこみが生じるなどの問題がある。しかし、生産効率などの観点から、搬送時間は、短いことが望まれるが、ロボットのアクチュエータ性能のみを考慮してロボットアームを短時間で動作させることは、磁性搬送体に対しての慣性が大となり滑落の可能性が増加する。一方、電磁吸着ハンドの吸着特性だけを考慮してロボットアームを駆動させた場合は、アクチュエータ性能を有効に活用できず、総動作時間が遅延となり、全体的な生産効率の低下につながる。よってアクチュエータの性能と電磁吸着ハンドの性能についてそれぞれを考慮することが重要となる。

そこで本研究ではこのような問題に対するアプローチとしてアクチュエータ性能と電磁吸着ハンドの電磁吸着特性を有効活用しつつ、総動作時間を短縮して磁性体吸着搬送制御を行えるような軌道計画法及びその搬送制御システムの考案を行うことを目的と定めた。具体的には、実験機として、水平ロボットアームおよび電磁吸着ハンドの設計・試作を行い、ロボットアームの軌道を境界条件及び連続条件を用いて計画に基づいて定式化する。さらに搬送時に重要となる電磁吸着の特性と、使用するアクチュエータのトルク特性について、これら 2 つを考慮して拘束条件として定義する。その後、定式化した軌道を表すパラメータを用いて拘束条件の範囲内で搬送を行い、その総動作時間を短くするための手法を提案する。この時間最適化法に本論では遺伝的アルゴリズムを使用していく。その際に、定義した拘束条件を組み込み、定式化した軌道のパラメータを最適化の対象とする。その結果、最適化された軌道パラメータが求まるが、この生成された軌道には、あらかじめ拘束が加えられたものとなる。したがって拘束条件が満たされ、搬送時間が短い軌道が生成されるものとなる。本論文ではこのような軌道計画法により電磁吸着搬送軌道の数値計算を行うとともに電磁吸着搬送制御実験を行うことによって提案する軌道計画法の有用性を検証していく。

### 1.3 本論文の概要

本論文は電磁吸着ハンドを有する多関節水平ロボットアームの電磁吸着搬送における準最短時間軌道計画について取り上げていく。まず設計・試作した実

験装置の説明を行い、各章ごとで取り扱った軌道について詳細を説明していく。そのとき、定式化した軌道を表現するパラメータを各章ごとで定義している。また、電磁吸着ハンドの電磁吸着特性について拘束条件の最大許容値を決定するため調査実験を行い、条件を定めている。また DC モータトルクの拘束条件は、DC モータトルクの運動方程式を解くことで求まることになる。次いで、搬送動作時間を短縮するために定義したパラメータを最適化し、得られた数値によって軌道を生成する。この軌道に関して数値計算を行い、これらの結果をもとに、関節角軌道追従制御を構築して、各章ごとで定めた軌道について電磁吸着搬送実験を進め、結果を記述していく。

ここで、本研究で提案する軌道計画法は、軌道を多項式で記述し、境界条件や連続条件などを用いて多項式の未定係数を求めるとともに、2つの拘束条件が満たされた軌道を、遺伝的アルゴリズムに基づく最適化手法を用いて最短時間軌道として求めている。軌道計画で最短軌道を求める場合などに使用される最適化法としては以下のような手法がある。

1. 変分法
2. 最大原理
3. 動的計画法
4. 山登り法
5. 最急降下法
6. ニューラルネットワーク
7. 遺伝的アルゴリズム

本来の最短時間軌道を求める手法としては、1. 変分法や2. ポントリャーギンの最大原理、3. 動的計画法などで解析的に解を求めることで軌道を得ることとなる。即ち、これらの手法から求まるトルクなどの入力値を用いて軌道を再計算することによって最適軌道となる。しかしこの手法を本論文におけるケースで考慮すると、まず入力値を用いて非線形系の計算を行う場合には、計算が複雑化される。加えて軌道の拘束条件を考慮する場合や作業平面内に経由点を与えられた場合についても解析的に求めることは困難となり、計算への労力が大となることが予想される。また、搬送用途のロボットアームでは、軌道が変更されることは多々あり、その都度にこの計算を解きなおす必要性があるため、本論のケースでは不向きと考えられる。

次にその他の最適化法では探索型最適化法である4. 山登り法や5. 最急降下法などが挙げられるが、これらの手法はコンピュータによる数値計算への実装が容易であり、探索範囲が狭い場合は計算時間も短くて済むメリットがある。しかし、これら2つの最適化法はどちらも局所解に陥りやすいという問題を抱えているため、本論ではこれらの最適化法については不適としている。

これらに対して進化的アルゴリズムである6. ニューラルネットワークや7. 遺伝的アルゴリズムなどの最適化では、どちらの手法においても、コンピュータ計算への組み込みが比較的容易であり、取り扱える問題の範囲が広く、その

応用に対して変更しやすいなどの利点を持つ。しかし、これらの最適化法では、その共通点として、ある程度取り扱う問題を固定した中で、初期設定を調節することで最適解に近い解を導くこととなり、必ず最適解が求まるわけではなく、また、設定調節に時間がかかることも想定される。ここで、ニューラルネットワークを本論のケースにて考慮した場合は、ニューラルネットワークは構成上、入力を受けてモデル化した部分で計算が行われ、求められた解が出力される手順を繰り返すことで、最適値を求めていく計算法であるため、本研究の軌道計画法で最適化を行う場合は、モデル化する部分で拘束条件などを考慮して出力を返す場合の設定が複雑となり、さらに拘束条件や軌道に関する変更がある場合などは、モデル部の再調節が必要となるのでアルゴリズムの出力される結果の精度を上げるための設定に時間がかかることが予想される。

一方、遺伝的アルゴリズムでは、個体数や世代数、交叉や突然変異の確率などのパラメータの初期設定に、時間を費やす可能性がある。しかし、一度設定が決定されると、ニューラルネットワークに比べ、作業空間上のロボットアームの軌道変更や、軌道に制約として与えられる拘束条件の追加などへの対応が容易であり、これらの変更により費やす改修作業時間が短く済むなどの利点がある。また、遺伝的アルゴリズムの最適解探索法は、初期集団から選択と交叉の組み合わせにより並列的に山登り探索を行い、なおかつ突然変異によりランダムな変化を起こすので、山登り法のような局所安定には陥りにくくなっている。さらに、局所安定解に近づいたとしても、突然変異によりそこから抜け出すことが可能というメリットを持つ。また、広義的な最適化としての最適値が求まるわけではないが、これらの理由もあり最適解ではないが、最適解に近しく工業的な実用性では充分となる解を少ない計算量で得られることが見込める。本論のケースでは、軌道を多項式で定式化した場合にパラメータを決定する必要があるが、この最適化法ではパラメータを直接最適化することができ、拘束条件に関しても容易に組み込むことが出来る。従って得られる解によって生成される軌道は、拘束を含んだ軌道となり、軌道の変更もアルゴリズム内の設定箇所を変更することで容易に再計算が行えて、計算時間も少なく済むことが言える。よって本研究ではこの遺伝的アルゴリズムを採用して軌道計画法を進めることとしたが、前述の通りこの最適化法は従来の最短軌道を求める方法とは異なっているため、本論の最短時間軌道計画について準最短時間軌道計画法と呼ぶこととした。以下に各章に記載する概要を述べる。

まず、第1章は本論文の序論としており、各章での緒言にあたるものであり、研究背景と研究目的について述べた。

次いで第2章では3関節水平ロボットアームの直線軌道を用いた電磁吸着搬送の準最短時間軌道計画を述べる。搬送の際には、境界条件と連続条件を考慮して、アーム

先端速度の加速区間と減速区間に3次多項式における速度形状を適用して動作を行わせている。速度区間は加速区間、等速区間、減速区間で分けられており、この区間同士を滑らかに繋ぐことで、実際の動作で磁性搬送体に作用するモーメントへの影響を考慮している。また、加速区間と等速区間の時間を、軌道最適化のパラメータである遺伝子として定義し、これらを染色体として遺伝的アルゴリズムでの計算結果を数値計算、実験ともに用いて準最短時間軌道計画法の検証を行っている。さらに3関節ロボットアームの先端姿勢は一定としており、直線軌道を用いた電磁吸着搬送を視覚的に検証しやすくしている。

第3章では関節を2関節とした水平ロボットアームをPTP(Point-to-Point)制御で駆動させている。この第3章では、初期位置と終期位置をあらかじめ定め、ロボットアームの作業空間上に障害物がない環境にて動作をさせている。軌道計画としては、前章と同様に境界条件と連続条件の数から1関節と2関節の角速度に台形状速度曲線を与えて関節補間を行っているが、加速時間と等速時間を2つの関節角速度で同時間とせず、総動作時間のみを同時間とするような軌道としている。このような軌道を用いて各関節角速度の加速時間と1関節の最大角加速度を最適化の対象とし、3個の遺伝子として定義することで遺伝的アルゴリズムで計算を行っていく。さらに、その数値計算結果によって電磁吸着搬送制御実験を行い、PTP制御における電磁吸着搬送ロボットアームの準最短時間軌道計画法の結果について検証を行っている。

第4章では第3章で使用した2関節水平ロボットアームを同様に用いているが、この軌道計画では障害物回避の必要などを考慮した場合の対処法の一つである、経由点を与えられた軌道について、その電磁吸着搬送の準最短時間軌道計画の検証を行っている。この章では、作業空間上に障害物がないとき、初期位置と終期位置、さらに2つの経由点位置を定め、初期位置から経由点、経由点から経由点、経由点から終期位置までの3区間において全て3次の多項式を関節角に適用する軌道計画を提案している。このとき、各区間の動作時間を構築した遺伝的アルゴリズムの最適化パラメータとしており、3つの遺伝子を染色体として、準最短時間軌道を生成する。またその数値計算結果を基として経由点を用いた電磁吸着搬送制御実験によって、これらの結果を検証している。

そして、第5章では、結論として、各章ごとに検証した結果について再確認を行いつつ、各章の結言をまとめ、本論における研究報告の成果として記載している。

## 参 考 文 献

- (1) Inagaki, S., Ando, Y., et al, Robot handbook, Japan robot association, pp. 90-113, 2001.
- (2) Tondu, B. and Bazaz, S., The three-cubic method: an optimal online robot joint trajectory generator under velocity, acceleration, and wandering constraints, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.18, No.9 1999, pp. 893-901.
- (3) Perdereau, V. Passi, C., Drouin, M., Real-time control of redundant robotic manipulators for mobile obstacle avoidance, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 41, Issue 1, 31 October 2002, pp. 41-59
- (4) Ozaki, H., Lin, C., A Collision-Free Trajectory Generation of a Manipulator with Dynamic Constraints by using Complex method., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.15, No.1 1997 pp. 139-144.
- (5) Kawarazaki, N., Taguchi, K., Collision-Free Path Planning for a Manipulator Using Free Form Surface., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.6 1996 pp. 860-867.
- (6) Huang, T., Wang, P. F., Mei, J. P., Zhao, X. M., et al, Time Minimum Trajectory Planning of a 2-DOF Translational Parallel Robot for Pick-and-place Operations., *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 56, Issue 1, 2007, pp. 365-368
- (7) Furukawa, T. et al., A Method for Sub-Minimal-Time Trajectory Planning of Redundant Dual Manipulator Systems., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.13, No.4 2001 pp. 532-538.
- (8) Van Willigenburg, L. G., Hol, C. W. J., Van Henten, E. J., On-line near minimum-time path planning and control of an industrial robot for picking fruits., *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 44, Issue 3, September 2004, pp. 223-237
- (9) Baba, N., Kubota, N., Path Planning and Collision Avoidance of a robot manipulator Using Genetic Algorithm., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.11, No.2 1993 pp. 299-302.
- (10) Abo-Hammour, Z. S., Mirza, N. M., et al, Cartesian path generation of robot manipulators using continuous genetic algorithms., *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.41, Issue 4, 31 December 2002, pp. 179-223

- (11) Kubota, N., Morioka, T., Kojima, F., Fukuda, T., Learning of mobile robots using perception-based genetic algorithm, *Measurement*, Vol 29, Issue 3, April 2001, pp. 237-248.
- (12) Chen, J. L., Chang, W., Feedback linearization control of a two-link robot using a multi-crossover genetic algorithm., *Expert Systems with Applications*, Volume 36, Issue 2, Part 2, March 2009, pp. 4154-4159.
- (13) Kiguchi K., Fukuda, T., Watanabe, K., Generation of efficient adjustment strategies for a fuzzy-neuro force controller using genetic algorithms-application to robot force control in an unknown environment., *Information Sciences*, Vol 145, Issues 1-2, August 2002, pp. 113-126.
- (14) Solteiro Pires, E. J., de Moura Oliveira, P.B., et, al, Manipulator trajectory planning using a MOEA., *Applied Soft Computing*, Vol 7, Issue 3, June 2007, pp. 659-667.
- (15) Kojima, H. and Hashimoto, Y., Trajectory Planning of Semiconductor Wafer Transfer Robot Arm Driven by stepping Motors Using Genetic Algorithm and Experiments, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.5, 2007, pp. 102-110.
- (16) Kojima, H. et al., Study on Non-Contact Hold and Transfer Control of Spherical Magnetic Body by Magnetic Robot Hand with Prototype Gap Sensor System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.6 1990, pp. 868-874.
- (17) Kojima, H. et al., Non-contact hold and transfer control with a magnetic robot hand attached to a mobile robot., *Journal of the Japan Society of Applied Elcteromagnetism*, Vol.8, No.3 2000, pp. 386-394.

## 第 2 章

電磁吸着ハンドを有する

3 関節ロボットアームの

準最短時間軌道計画法と搬送制御

## 2.1 緒 言

ロボットアームは今日の産業システムには、必要不可欠の存在となっており、様々な形のロボットアームが使用されている。このような背景にあって、ロボットアームの効率向上を実現するために、軌道計画問題は重要な課題となってくる。このロボットアームの軌道計画に関しては、多くの研究が行われており、たとえば、作業空間の座標で与えられた経路を可変速度で追従するような軌道において、制御系性能を効率よく活用する可変速軌道計画の提案<sup>(1)</sup>、初期姿勢と目標姿勢が与えられた場合の消費エネルギーとトルク制限を考慮した移動動作に関する軌道計画<sup>(2)</sup>、PTP 制御マニピュレータの消費エネルギーが最小となる軌道計画<sup>(3)</sup>などの研究が報告されている。一方で、実用的な最適化計算法として、進化論的学習アルゴリズムの一つである遺伝的アルゴリズムは、局所的最小値を避けることが可能であるなどの利点から多方面で効果的に用いられている<sup>(4)(6)</sup>。さらに、電磁力を用いたロボットハンドに関する研究として、球形磁性体の磁気浮上把持搬送制御<sup>(9)</sup>や電磁吸着ハンドによる鋼球放り投げ操作<sup>(10)</sup>などの研究がなされている。また、永久磁石による磁気吸着力を用いた搬送を行う磁気ホルダーが開発販売されている<sup>(11)</sup>。この永久磁石を用いた磁気ホルダーにおいては、エアシリンダーを用いてワークの吸着・解法を行っている。

本研究では、電流のオン・オフ制御により被吸着物体の吸着・解放を行う電磁吸着ハンドを試作し、電磁吸着特性を実験的に調べている。次いで、電磁吸着ハンドを取り付けた水平 3 関節ロボットアームの効率的軌道計画法を提案している。効率的軌道計画アルゴリズムの構築においては、ロボットアームの軌道を 2 個の遺伝子で定式化すると共に、電磁吸着搬送および DC モータトルク特性に関する拘束条件を満足し、準最短時間制御を可能とする遺伝的アルゴリズムの適応度関数を定義している。さらに数値計算と実験を行い、本効率的軌道計画の有用性を確認する。



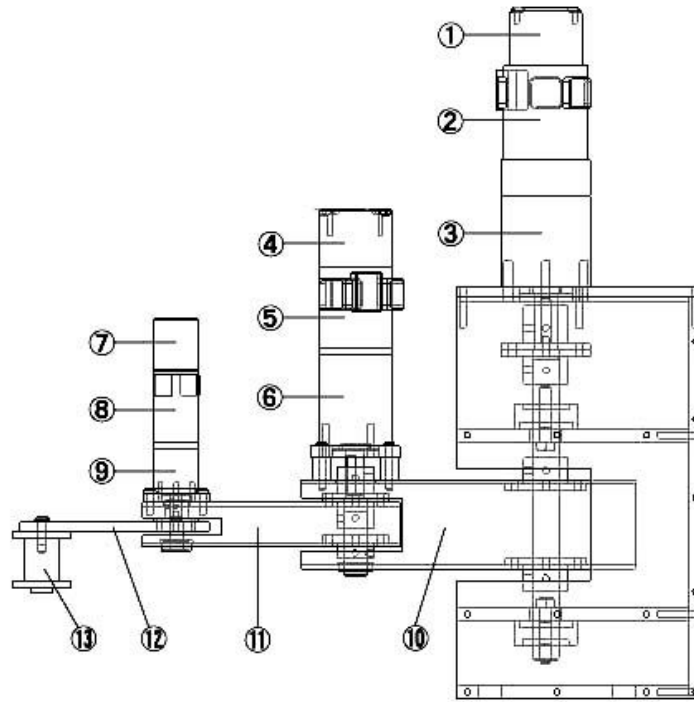
## 2.2 実験装置概要

### 2.2.1 3 関節水平ロボットアームの構造

電磁吸着搬送実験のために、電磁吸着ハンドを有する 3 関節水平ロボットを試作した。Fig.2.1 には、試作した実験装置の外観写真を、Fig.2.2 には、実験装置の概略図を示す。また、Fig.2.3 には本研究で用いたロボットアームの座標モデルを示しており、各リンク長さなどを Table2.1 にロボットアームの各諸量として記載している。Fig.2.2 の番号から示されるように、各関節には、それぞれハーモニックドライブ、光エンコーダが一体型となった DC モータが取り付けられている。これらに DSP からパワーアンプを介しての指令が与えられることによって各関節が駆動する。さらにこのロボットアームの先端に電磁吸着ハンドを取り付けることで電磁吸着搬送を行うこととする。



Fig. 2.1 Photograph of the three-link robot arm with Electromagnetic attraction hand



- ①-④-⑦ encoder    ②-⑤-⑧ DC motor    ③-⑥-⑨ reduction gear  
 ⑩ Link1    ⑪ Link2    ⑫ Link3    ⑬ Electromagnet robot hand

Fig. 2.2 Schematic drawing of three-link robot arm with electromagnetic attraction hand

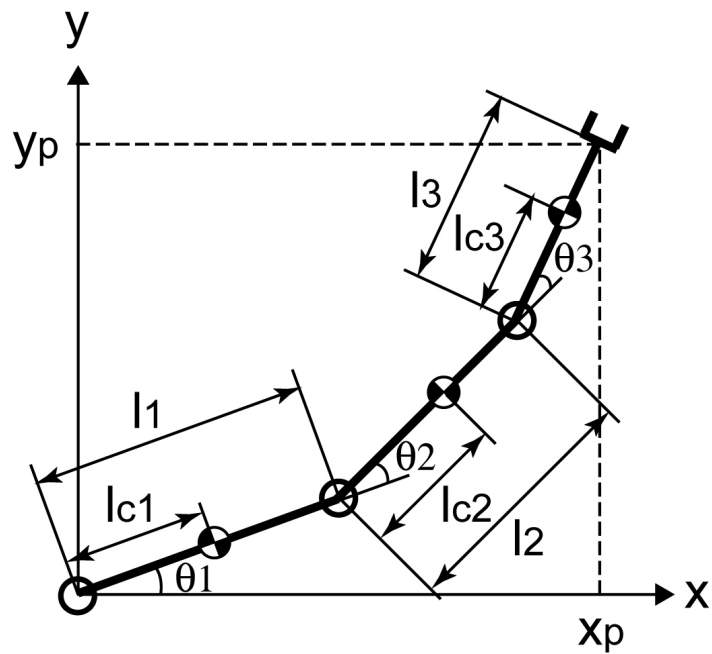


Fig.2.3 Coordinate system of three-link robot arm

## 2.2.2 電磁吸着ハンドと磁性搬送体の構造

試作した電磁吸着ハンドの写真とその概略図を Fig.2.4 に示す. また, 電磁吸着ハンドは, コイル芯に鉄を用いており, この芯の下端が磁性搬送体の吸着面となっている. 製作した電磁吸着ハンドの諸量を Table2.2 に示す. Fig.2.5 は, 電磁吸着ハンドの構造と, 磁性吸着搬送物体である鉄製の M8 ボルトを示したものであり, 搬送中の磁性搬送体の状態についての概要図となっている. ここで, 使用した鉄製ボルトは一般的なものであり, 長さ 40 mm, 質量 22g であった. なお, 磁性搬送体に鉄製ボルトを採用した理由として, 身近な工業製品であり, 磁性体搬送の際にこのような磁性体を実際に搬送するケースなどが考えられるためである. Fig.2.5 において, 実線で示された磁性搬送体は, 正常に電磁吸着された状態での搬送を示している. しかし, 破線で示された搬送体は, 電磁吸着ハンドが吸着搬送に失敗し, 磁性搬送体が滑落を起こした状態を示している.

Table 2.1 Main dimensions of robot structure and control system

$l_1=85.0$ mm	$m_3=0.089$ kg	$K_{p1}=29.7$ Nm
$l_2=80.0$ mm	$m_o=0.022$ kg	$K_{p2}=5.5$ Nm
$l_3=60.0$ mm	$J_{A1}=0.0430$ kgm <sup>2</sup>	$K_{p3}=0.9$ Nm
$l_{c1}=72.8$ mm	$J_{A2}=0.0150$ kgm <sup>2</sup>	$K_{J1}=0.0$ Nm·s
$l_{c2}=63.4$ mm	$J_{A3}=0.0016$ kgm <sup>2</sup>	$K_{J2}=0.0$ Nm·s
$l_{c3}=47.2$ mm	$J_{c1}=52.8\times 10^{-5}$ kgm <sup>2</sup>	$K_{J3}=0.45\times 10^{-5}$ Nm·s
$r_G=15.1$ mm	$J_{c2}=16.3\times 10^{-5}$ kgm <sup>2</sup>	$K_{D1}=104.0$ Nm/s
$m_1=0.499$ kg	$J_{c3}=4.9\times 10^{-5}$ kgm <sup>2</sup>	$K_{D2}=19.3$ Nm/s
$m_2=0.170$ kg	$N_1=N_2=N_3=100$	$K_{D3}=0.45$ Nm/s

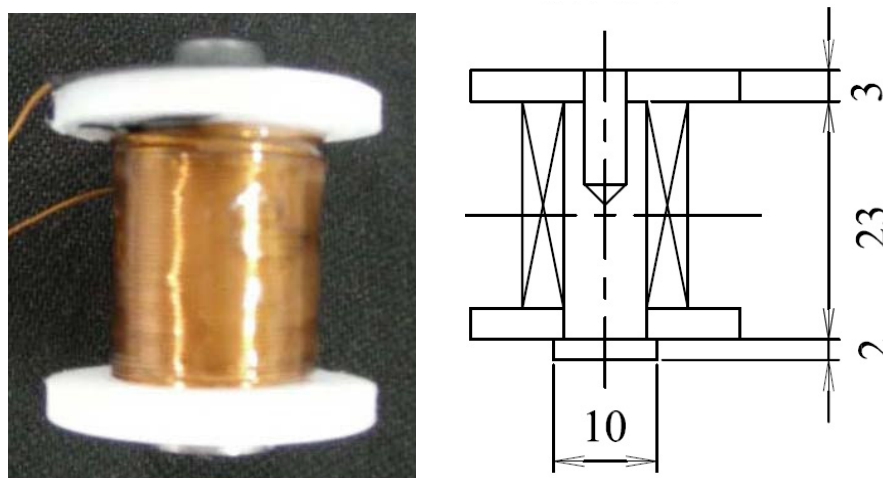


Fig. 2.4 Photograph and dimensions of electromagnetic attraction hand

Table 2.2 Dimension of electromagnet

Outside diameter of coil [m]	$16.5 \times 10^{-3}$
Inside diameter of coil [m]	$7.8 \times 10^{-3}$
Length of coil [m]	$20.0 \times 10^{-3}$
Wire diameter of coil [m]	$4.0 \times 10^{-4}$
Number of turns of coil	420
Resistance of coil [ $\Omega$ ]	2.7

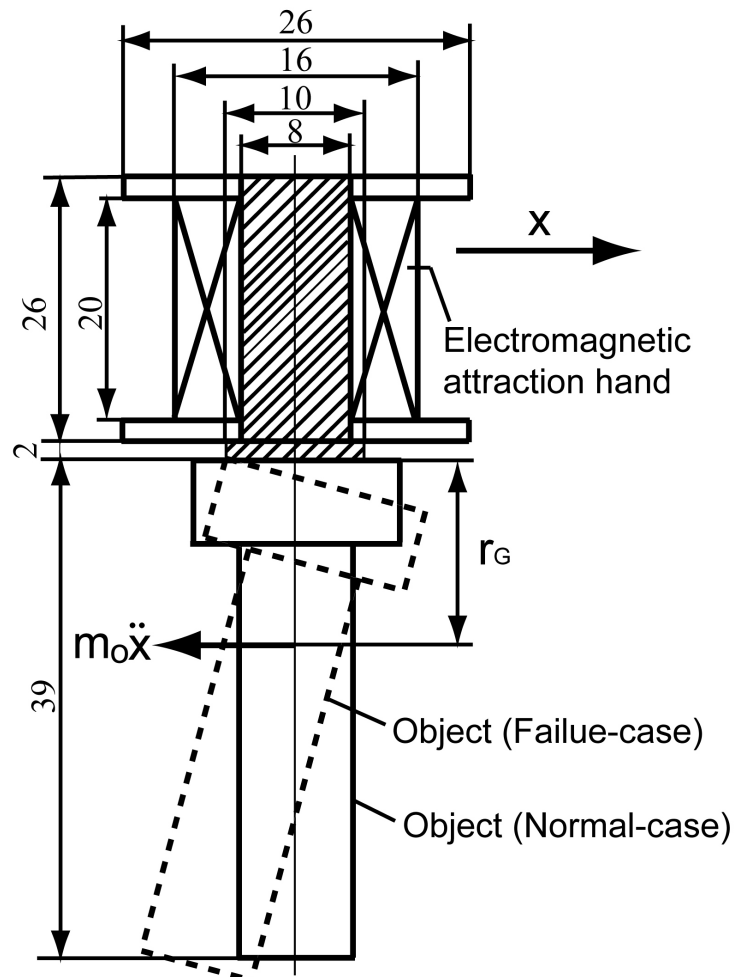


Fig. 2.5 Schematic drawing of electromagnetic attraction hand and magnetic object

## 2.3 電磁吸着搬送における直線軌道を用いた軌道計画

### 2.3.1 直線軌道を用いた軌道計画の概要

本研究では、Fig.2.6 で示すように、アーム先端の初期位置と終期位置を結ぶ直線上に障害物がない場合の電磁吸着搬送制御を取り上げ、アーム先端の軌道として直線軌道を用いるとともに、第3リンクの姿勢角を一定としている。この時、Fig.2.6 の  $(x_{ps}, y_{ps})$  はロボットアーム先端の初期値を示している。さらにFig.2.6 から、用いる軌道は、ロボットアーム先端が  $x$  軸に対して平行であり、正から負の値へ移動していくことが確認できる。

さらに、本ロボットアームの諸量などを Table 2.1 に示す。ここに、 $l_1, l_2, l_3$  は各リンク長さである。また、 $l_{c1}, l_{c2}, l_{c3}$  は各関節からリンク重心までの距離である。 $m_1, m_2, m_3$  は各リンク質量であり、 $J_{c1}, J_{c2}, J_{c3}$  は各リンクにおける慣性モーメントである。さらに、 $J_{A1}, J_{A2}, J_{A3}$  は各関節に取り付けられた、DC モータの慣性モーメントである。

なお、本来、直線軌道は 2 関節のロボットアームでも適用できる軌道ではあるが、実験を行うにあたって視覚的に確認しやすいよう、3 関節のロボットアームとして実験装置を構築している。

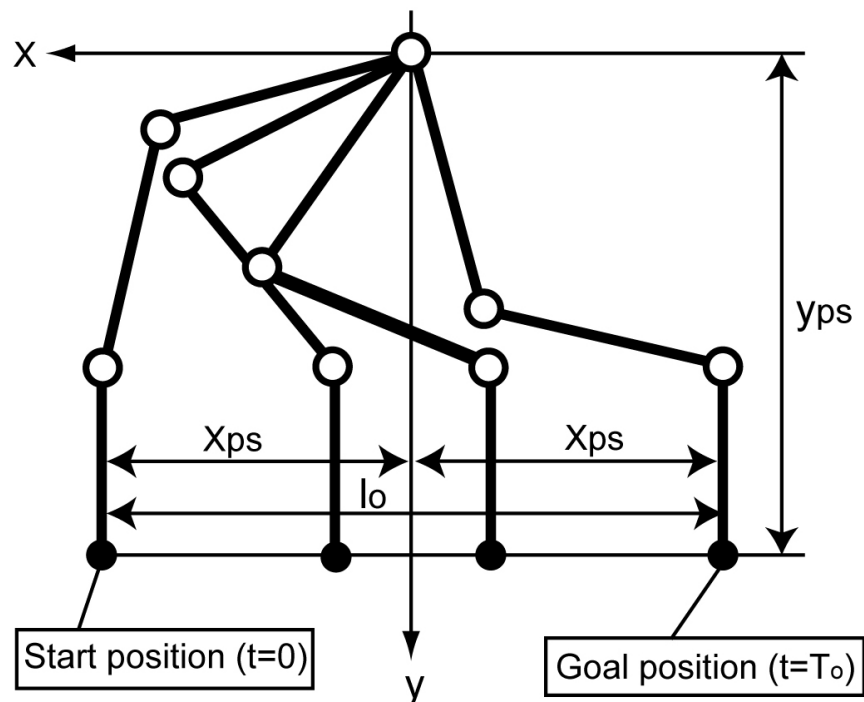


Fig.2.6 Trajectory of robot arm end for electromagnetic attraction transfer

### 2.3.2 直線軌道を用いた軌道計画の定式化

Fig.2.3 中の記号を用いて，アーム先端位置の座標を次式で記述する．

$$r_p = [x_p \quad y_p \quad \theta_p]^T \quad (2-1)$$

ここに，

$$\theta_p = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (2-2)$$

であり， $\theta_p$  は第3リンクの姿勢角， $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  は関節角である．

第3リンクの姿勢角 $\theta_p$ およびアーム先端の $y$ 座標 $y_p$ は次式で与えられる．

$$\theta_p = \frac{\pi}{2}, \dot{\theta}_p = 0, \ddot{\theta}_p = 0 \quad (2-3)$$

$$y_p = y_{ps}, \dot{y}_p = 0, \ddot{y}_p = 0 \quad (2-4)$$

ここに， $y_{ps}$  は $y_p$ の初期値である．また， $x_p$  はロボットアームの先端の $x$ 座標である．ここで， $x_p$ の軌道について2章では以下の様な境界条件及び連続条件を定めた．このときの条件数を考慮して，本章ではFig.2.7のような3次速度曲線を与えることとした．このときFig.2.7で示されるように加速区間，等速区間，減速区間でロボットアーム先端速度は構成されており，このときの各区間の時間をそれぞれ $T_1, T_2, T_3$ とした．

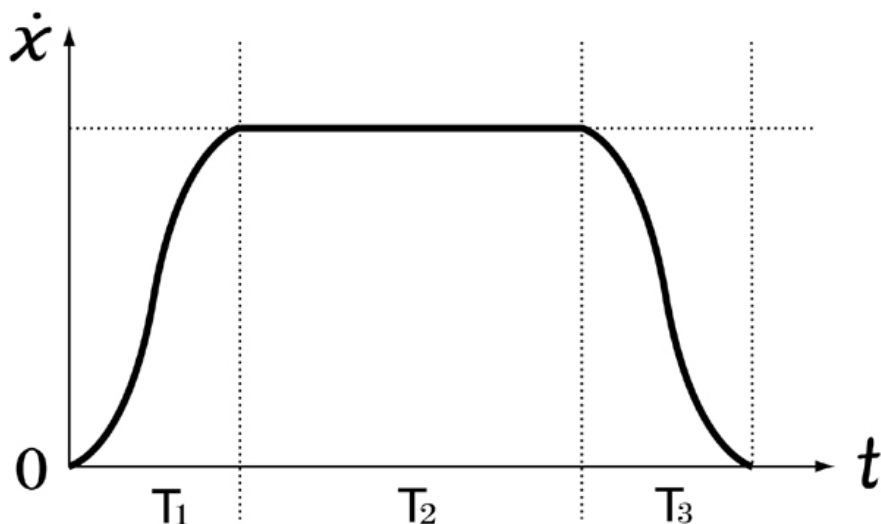


Fig.2.7 Velocity Curve pattern of robot arm end

$$\left[ x_p(t) \right]_{t=0} = x_{ps}, \left[ \dot{x}_p(t) \right]_{t=0} = 0, \left[ \ddot{x}_p(t) \right]_{t=0} = 0, \quad (2-5)$$

$$\left[ x_p(t) \right]_{t=T_0} = x_{pf}, \left[ \dot{x}_p(t) \right]_{t=T_0} = 0, \left[ \ddot{x}_p(t) \right]_{t=T_0} = 0 \quad (2-6)$$

$$\left[ x_p(t) \right]_{t=T_1} = \left[ x_p(\tau_2) \right]_{\tau_2=0}, \quad \left[ x_p(\tau_2) \right]_{\tau_2=T_2} = \left[ x_p(\tau_3) \right]_{\tau_3=0} \quad (2-7)$$

$$\left[ \ddot{x}_p(t) \right]_{t=T_1} = \left[ \ddot{x}_p(\tau_2) \right]_{\tau_2=0}, \quad \left[ \dot{x}_p(\tau_2) \right]_{\tau_2=T_2} = \left[ \dot{x}_p(\tau_3) \right]_{\tau_3=0} \quad (2-8)$$

$$\left[ \dot{x}_p(t) \right]_{t=T_1} = \left[ \dot{x}_p(\tau_2) \right]_{\tau_2=0}, \quad \left[ \ddot{x}_p(\tau_2) \right]_{\tau_2=T_2} = \left[ \ddot{x}_p(\tau_3) \right]_{\tau_3=0} \quad (2-9)$$

$$0 \leq t \leq T_1: \quad x_p = x_{ps} + 2kT_1 t^3 - kt^4 \quad (2-10)$$

$$T_1 \leq t \leq (T_1 + T_2): \quad x_p = 2kT_1^3 t - x_{ps} - kT_1^3 (3T_1 + 2T_2) \quad (2-11)$$

$$(T_1 + T_2) \leq t \leq T_0: \quad x_p = -x_{ps} + 2T_1 k (t - T_0)^3 + k(t - T_0)^4 \quad (2-12)$$

$$t \geq T_0: \quad x_p = x_{ps} + l_o \quad (2-13)$$

ここに,

$$k = \frac{-2x_{ps}}{2T_1^3(T_1 + T_2)}, \quad l_o = 2x_{ps} \quad (2-14)$$

ここに,  $x_{ps}$  は  $x$  の初期値,  $l_o$  は直線軌道の長さである.  $T_1$  と  $T_2$  は 3 次速度曲線の境界条件時間である.  $T_0$  はロボットアームの総動作時間である,

そして, アーム先端の直線軌道に対応する関節角はロボットアームの逆運動学を用いると, 次式のように記述できる.

$$\theta_1 = \arg(x_2, y_2) \pm \arg(l^2 + l_1^2 - l_2^2, \kappa) \quad (2-15)$$

$$\theta_2 = \pm(\pi - \arg(l_1^2 + l_2^2 - l^2, \kappa)) \quad (2-16)$$

$$\theta_3 = \theta_p - \theta_1 - \theta_2 \quad (2-17)$$

$$J_y = \frac{\partial r_p}{\partial \theta}, \quad \theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (2-18)$$

$$\dot{\theta} = J_y^{-1} \dot{r}_p, \quad \ddot{\theta} = J_y^{-1} (\ddot{r}_p - \dot{J}_y \dot{\theta}) \quad (2-19)$$

ここに,

$$\kappa = \left[ \left( l_1^2 + l_2^2 + l^2 \right)^2 - 2 \left( l_1^4 + l_2^4 + l^4 \right) \right]^{1/2} \quad (2-20)$$

$$x_2 = x_p - l_3 \cos \theta_p, \quad y_2 = y_p - l_3 \sin \theta_p \quad (2-21)$$

$$l = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (2-22)$$

なお, 式(2-15),(2-16),(2-17)に示されるように, 2通りのロボットアームの逆運動学解が存在するが, ここでは一つの解を選択し, 後述のような軌道計画の数値計算を行っている.

## 2.4 電磁吸着ハンドの電磁吸着特性

### 2.4.1 実験機における制御方式

本研究では, PID 制御を用いて関節角追従制御システムを構築しており, 関節角追従制御則は, 次式で記述される.

$$\tau_i = K_{Pi} e_i + K_{Ii} \int_0^t e_i dt + K_{Di} \dot{e}_i \quad (2-23)$$

ここに,  $\tau_i$  は関節トルク,  $e_i$  は関節角制御偏差,  $K_{Pi}, K_{Ii}, K_{Di}$  は PID 制御のフィードバック係数である. フィードバック係数は, 実験的にチューニングを行い, Table2.1 に示すような値を用いた.

### 2.4.2 電磁吸着特性実験

ロボットアーム先端の軌道として直線軌道を用いた場合, 被電磁吸着物体に作用するモーメント  $\tau_M$  は, Fig.2.5 の記号を用いると次式のように記述できる.

$$\tau_M = -m_o r_G \ddot{x}_p \quad (2-24)$$

ここに,  $m_o$  は被電磁吸着物体の質量,  $r_G$  は被電磁吸着物体の吸着面から重心までの距離を表している.

また, 軌道パラメータである  $(T_1, T_2)$  を用いると, 磁性物体に作用するモーメント  $\tau_M$  の最大値  $\tau_{MT}$  は, 絶対値として, 次式で表される.

$$\tau_{MT} = \frac{3m_o l_o r_G}{2T_1 (T_1 + T_2)} \quad (2-25)$$



ここで、構築した関節角追従制御システムを用いて、電磁吸着搬送実験の前段階として、磁性搬送体に作用するモーメントを調査するため、電磁吸着ハンドの吸着特性を調査する予備実験を行った。アーム先端の加速区間時間と等速区間時間を変化させて、磁性搬送体に作用するモーメントの値を変化させ、磁性搬送体の状態について観察を行うものである。また、その際にはアーム先端の最大速度  $v_{x,max}$  は一定としている。この実験結果から、磁性搬送体に作用するモーメントが増加すると、Fig.2.8 のように、磁性搬送体が正常に電磁吸着されなくなり、吸着面に沿って滑落する現象が観察された。Table2.3 は、被電磁吸着物体に作用するモーメントの絶対値の最大値  $\tau_{Mf}$  と電磁吸着性能に関する実験結果を示したものである。Table2.3 中の S 欄の success は、正常な電磁吸着性能が得られた場合を示し、failure は、正常な電磁吸着搬送が行われず、滑落状態に移行した場合を示している。この表より、電磁吸着搬送制御を正常に行うための拘束条件を、次式のように記述することができる。本研究ではこのように定めた拘束条件を遺伝的アルゴリズムの準最適探索条件として組み込み、効率的軌道を求めていく。

$$\text{abs}\{\tau_M\} \leq \tau_{M \max} \quad (2-26)$$

ここに  $\tau_{M \max}$  は磁性搬送体に作用するモーメントの最大許容モーメントであり、その値は Table2.3 から  $\tau_{M \max} = 3.168 \times 10^{-5}$  (Nm)となる。

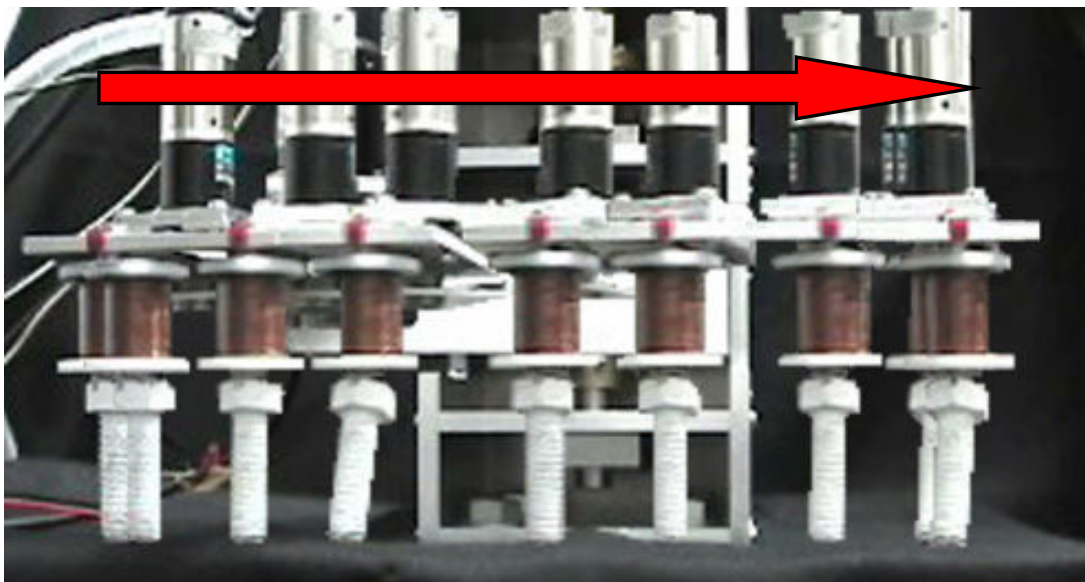


Fig. 2.8 Experimental results in case of unsuccessful electromagnetic attraction transfer

Table 2.3 Performance of electromagnetic attraction transfer

$\tau_{M \max}$	$v_{x \max}$	$T_1$	$T_2$	S
$2.640 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	1.400	1.457	success
$2.816 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	1.313	1.545	success
$2.992 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	1.235	1.621	success
$3.168 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	1.167	1.690	success
$3.344 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	1.105	1.752	failure
$3.520 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	1.050	1.807	failure
$3.696 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	1.000	1.857	failure
$3.872 \times 10^{-5} \text{ Nm}$	0.07	0.955	1.903	failure

## 2.5 ロボットアームを用いた電磁吸着搬送の

### 準最短時間軌道計画法

#### 2.5.1 運動方程式

アーム先端を直線軌道とする軌道計画の理論式(2-1)~(2-22)より, ロボットアーム軌道は, 2個のパラメータ( $T_1, T_2$ )を遺伝子とする染色体 $\lambda$ で記述できる. すなわち, ロボットアームの先端の座標ならびに関節角は, 次式のように記述できる.

$$r_p = r_p(t, \lambda), \quad \dot{r}_p = \dot{r}_p(t, \lambda), \quad \ddot{r}_p = \ddot{r}_p(t, \lambda) \quad (2-27)$$

$$\theta = \theta(t, \lambda), \quad \dot{\theta} = \dot{\theta}(t, \lambda), \quad \ddot{\theta} = \ddot{\theta}(t, \lambda) \quad (2-28)$$

ここに,

$$\lambda = [T_1 \quad T_2] \quad (2-29)$$

また、ラグランジュの方程式を用いて、3リンクロボットアームの運動方程式は以下の通り表される。

$$J(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (2-30)$$

ここに

$$h(\theta, \dot{\theta}) = J(\theta)\dot{\theta} - \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (2-31)$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T J(\theta) \dot{\theta}, \quad \tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T \quad (2-32)$$

$J(\theta)$  は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta})$  はコリオリ力と遠心力を表す。  $\tau$  は関節トルク、 $T$  は運動エネルギーである。

ロボットアームの逆運動学と運動方程式(2-30)を用い、染色体に関する関数として関節トルクを次式に表すことができる。

$$\tau(t, \lambda) = [\tau_1(t, \lambda) \ \tau_2(t, \lambda) \ \tau_3(t, \lambda)]^T = J(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) \quad (2-33)$$

また、ロボットアームの運動方程式を用いると、染色体  $\lambda$  で記述された軌道に対応する DC モータのトルク  $\tau_A$  が次式のように導かれる。

$$\tau_A(t, \lambda) = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \end{bmatrix}^{-1} \tau(t, \lambda) \quad (2-34)$$

ここに、 $\tau_{Ai}$  は DC モータのトルク、 $1/N_i$  ( $i=1,2,3$ ) は減速比である。

## 2.5.2 遺伝的アルゴリズムを用いた準最短時間軌道計画法

本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いた準最短動作時間を求める際に 2 つの拘束条件を使用している。まず、磁性搬送体に作用するモーメントが、式(2-26)で示されように許容最大モーメント以下とすることと、2 つ目の拘束条件に、次式で示される通り、DC モータのトルクを最大トルク以下とするものである。

$$\text{abs}\{\tau_{Ai}(t)\} \leq \tau_{Aimax}, \quad t = [0 \ T_o], \quad i = (1, 2, 3) \quad (2-35)$$

ここに  $\tau_{Ai}$  は DC モータの許容最大トルクである。

本研究では上述した拘束条件のこれら 2 種類を用いて準最短時間軌道計画のための適応度関数 *fitness* を、次式のように定義できる。

$$\text{fitness} = \begin{cases} \exp(-0.05T_o), & \text{if } \forall t \forall i f_{l1} = \text{true} \\ 0, & \text{if } \exists t \exists i f_{l2} = \text{true} \end{cases} \quad (2-36)$$

ここに,

$$f_{L1} = f_{L1A} \wedge f_{L1B}, f_{L2} = f_{L2A} \vee f_{L2B} \quad (2-37)$$

$$f_{L1A} = \text{abs}\{\tau_M(t)\} \leq \tau_{M\max} \quad (2-38)$$

$$f_{L1B} = \text{abs}\{\tau_{Ai}(t)\} \leq \tau_{Ai\max} \quad (2-39)$$

$$f_{L2A} = \text{abs}\{\tau_M(t)\} > \tau_{M\max} \quad (2-40)$$

$$f_{L2B} = \text{abs}\{\tau_{Ai}(t)\} > \tau_{Ai\max} \quad (2-41)$$

ここで, Fig.2.9 は, 式(2-36)の適応度関数を用いた電磁吸着ロボットハンドを有する 3 関節ロボットアームの軌道計画アルゴリズムのフローチャートを示したものである. さらに, 遺伝的アルゴリズム内では, 選択, 交叉, 突然変異などの進化論的演算が行われている. Table2.4 に本研究で構築したアルゴリズムで用いた各数値を示す.

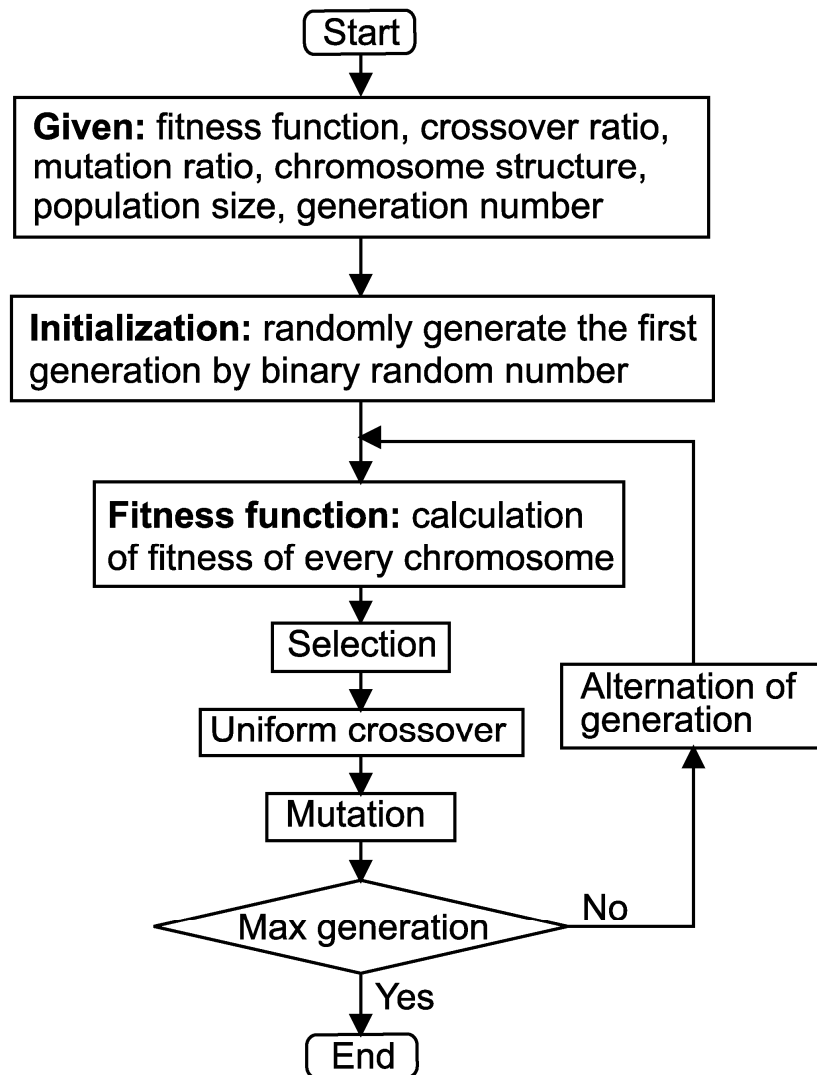


Fig.2.9 Flowchart of quasi-minimum time trajectory planning using genetic algorithm.

Table 2.4 Main dimensions of genetic algorithm

Number of individual	50
Length of chromosome (bit)	36
Number of gene (bit)	12
Crossover ratio	0.5
Mutation ratio	0.05
Maximum of generation	10000

## 2.6 数値計算結果と搬送制御実験結果

### 2.6.1 電磁吸着搬送制御数値計算結果

電磁吸着搬送制御の数値計算および、実験に用いたロボットアームの各諸量と制御システムの諸量を Table2.1 に示す. このとき用いた軌道パラメータは  $x_{ps} = 10.0$  [cm],  $l_0 = 20.0$  [cm],  $y_{ps} = 16.0$  [cm]である. 準最短軌道計画として遺伝的アルゴリズムにおける数値計算の結果を Fig.2.10 に示す.

ここで、本研究で構築した遺伝的アルゴリズムでは、磁性搬送体に作用するモーメントの許容最大値  $\tau_{M \max}$  と DC モータの最大トルク  $\tau_{A1 \max}$ ,  $\tau_{A2 \max}$ ,  $\tau_{A3 \max}$  を遺伝的アルゴリズムに関する拘束条件として用いており、各条件の値は以下のように定めている.

$$\tau_{M \max} = 3.168 \times 10^{-2} \text{ [mNm]}, \quad \tau_{A1 \max} = 0.078 \text{ [Nm]} \quad (2-42)$$

$$\tau_{A2 \max} = 0.035 \text{ [Nm]}, \quad \tau_{A3 \max} = 0.00738 \text{ [Nm]} \quad (2-43)$$

また、遺伝的アルゴリズムの遺伝子であるアーム先端の加速区間時間と等速区間時間の探索範囲は以下のように定めた.

$$0.1(s) \leq T_1 \leq 5.0(s), \quad 0.1(s) \leq T_2 \leq 5.0(s)$$

Fig. 2.10 から、世代数の増加と共に適応度が増加することが見てとれる. 同様に、世代数の増加に従って、ロボットアームの総動作時間  $T_0$  は減少していく. この数値計算結果から、電磁吸着ハンドを有する 3 リンクロボットアームの電磁吸着搬送制御における準最短時間軌道計画を実行するための時間が算出されたことが確認できる. さらに、適応度関数 *fitness* と 2 つの遺伝子の値が 5000 世代の後に一定となっていることが見てとれる. このとき、この 5000 世代目の染色体を準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  とすると、この準最短時間染色体は以下の値となる.

$$\lambda_{q-\min} = [T_{1opt} \quad T_{2opt}] = [1.59 \quad 0.51] \text{ [s]} \quad (2-44)$$

この結果から準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  に対応するロボットアームの総動作時間は  $T_0 = 3.69$  (s) となる.

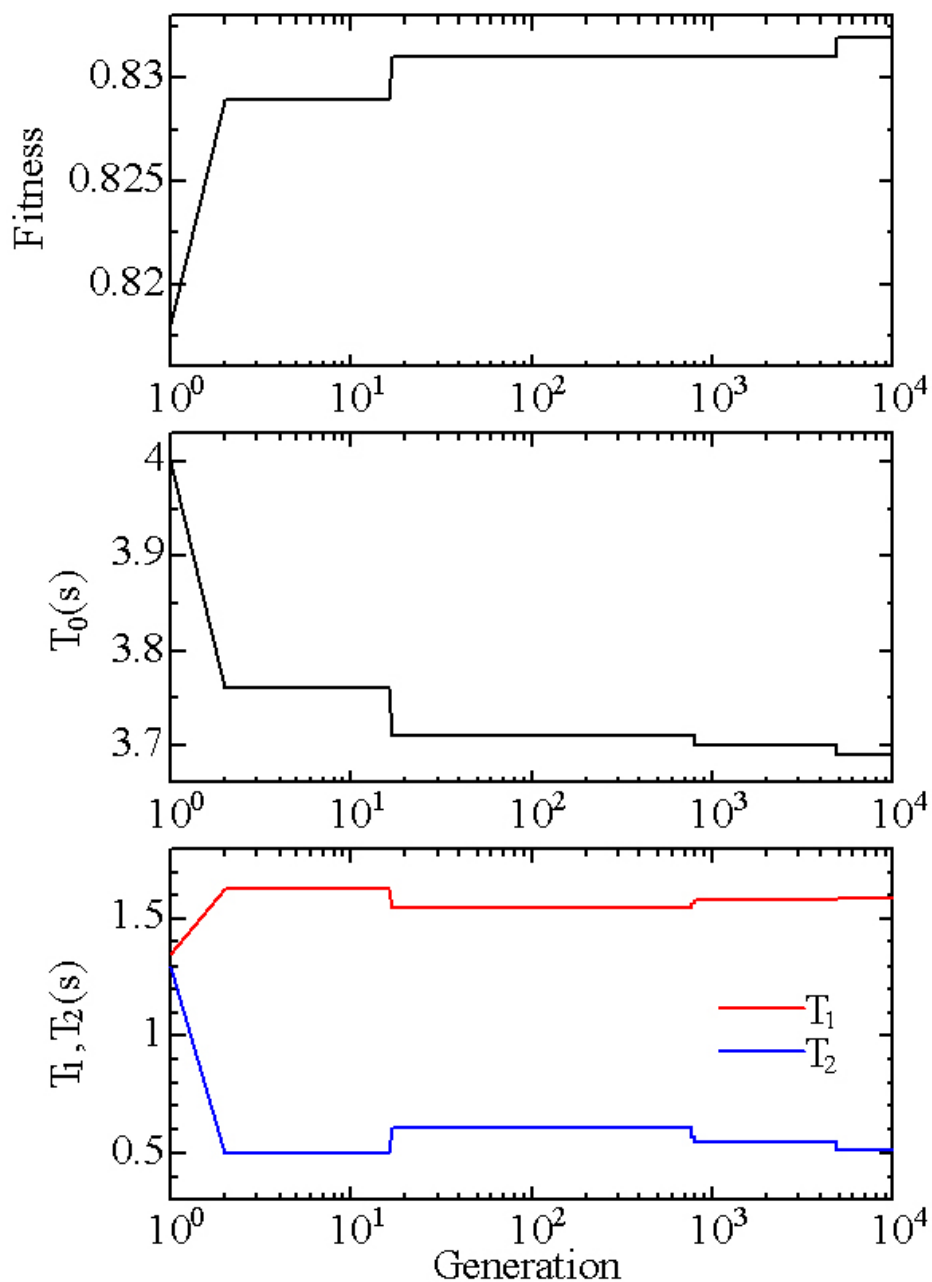


Fig. 2.10 Numerical calculation results of quasi-minimum time trajectory planning using the genetic algorithm.

次に、Fig.2.11 において準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  を用いた各関節の関節角動的応答と磁気搬送体に作用するモーメントの動的応答の数値計算結果を示す。Fig.2.11 上図の黒線が第 1 関節の角度変化、赤線が第 2 関節、青線が第 3 関節の角度変化となっている。また、下図では、黒線で示される磁性搬送体に作用するモーメント  $\tau_M$  の動的応答が、赤の破線で示される許容最大モーメント  $\tau_{M\max}$  に、ロ

ロボットアーム動作の加速区間と減速区間の2箇所で接触したことが確認できる。次に、Fig.2.12 に準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  を用いた軌道でロボットアームを動作した場合の各関節の DC モータトルクの動的応答を示す。各関節では、DC モータトルクが DC モータの許容最大トルクより少ない値をとっており、この結果から本研究での軌道を用いた動作では、各関節に使用する DC モータ性能を下げても動作することが考察できる。これらより、本アルゴリズムを用いることで、軌道によって使用するモータ性能の推定が見込めることが確認できた。したがって、Fig.2.10, Fig.2.11, Fig.2.12 の結果から、本軌道計画では、電磁吸着性能に関する拘束条件によって、準最適軌道が求められていることが確認された。

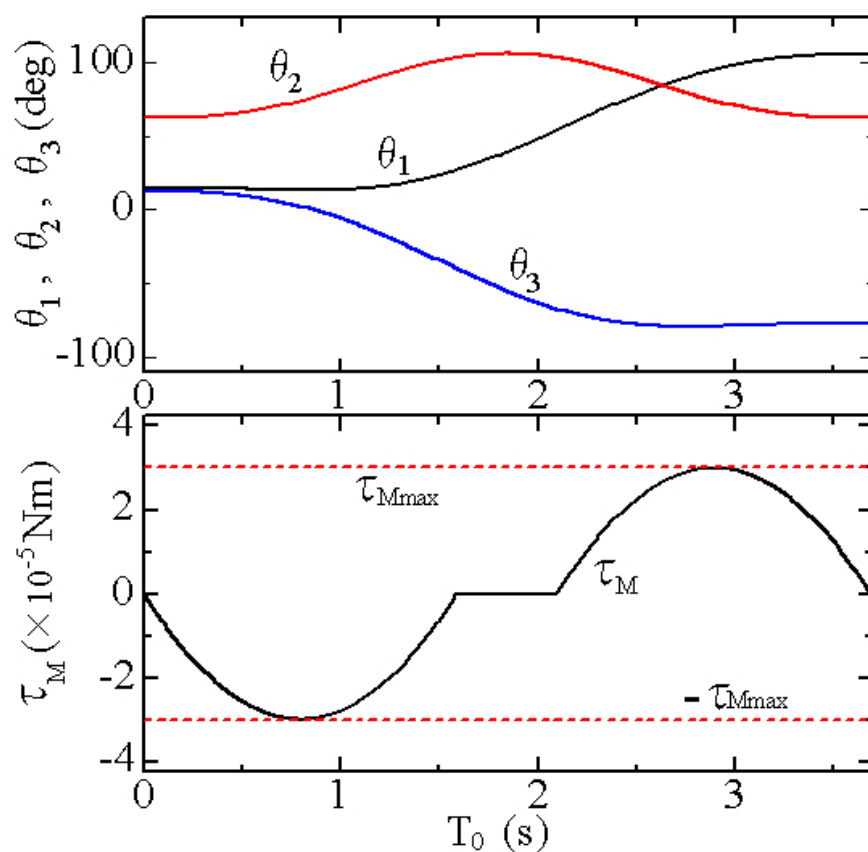


Fig.2.11 Numerical simulation results of dynamic responses of rotational angles and moment  $\tau_M$  with  $\lambda_{q-\min}$



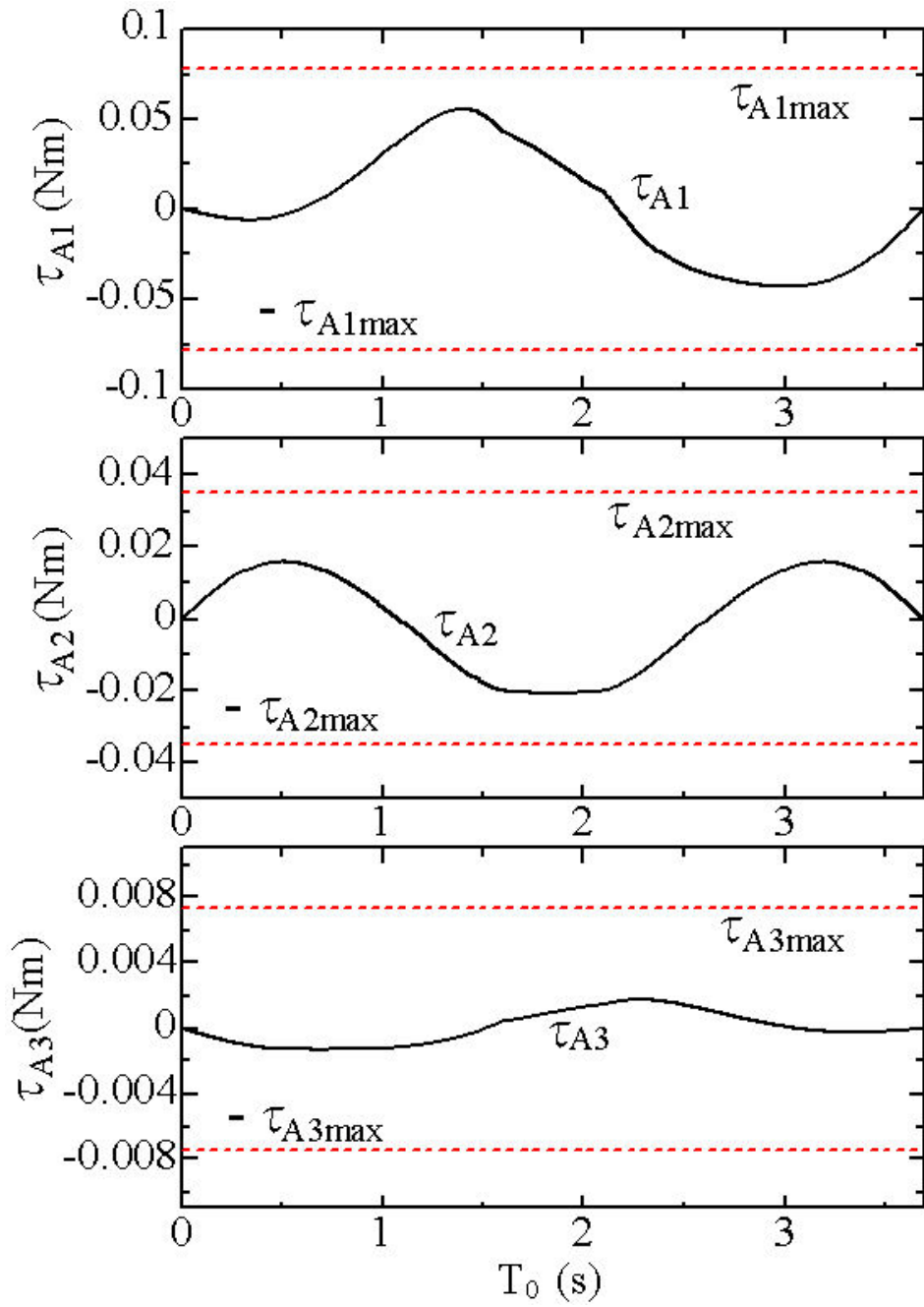


Fig.2.12 Numerical simulation results of dynamic responses of motor torques with  $\lambda_{q-\min}$

次に、Fig.2.13 に Fig.2.11 で示された各関節角の計算結果を用いて求めたロボットアームの動作の軌跡について、数値計算によって求めた結果を示す。この図から、第 3 リンクの姿勢角を一定とした場合の直線軌道に沿ったアーム先端の軌道計画、関節角の軌道計画が良好に実現されていることがわかる。

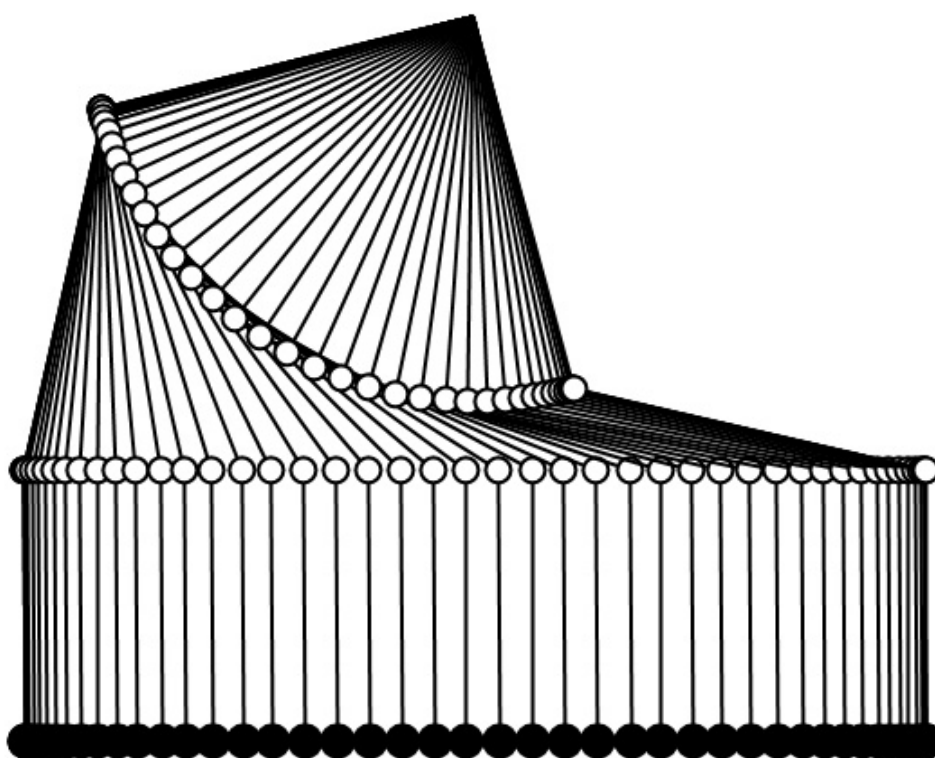


Fig.2.13 Numerical calculation results of loci of electromagnetic attraction transfer control with  $\lambda_{q-\min}$

## 2.6.2 電磁吸着搬送制御実験結果

また、Fig.2.14には、関節角軌道追従システムを用いて行った電磁吸着搬送実験の実験結果を示す。ここで各関節角の目標値は準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  を用いたことによって得られている。  $x_p$  は目標値であり、  $x_{pe}$  は実験値となっている。また  $e_{xp}$  は電磁吸着ハンドの  $x$  方向の制御偏差であり、  $y_{pe}$  は実験結果、そして  $y_p$  は一定値 ( $y_p = 16.0[\text{cm}]$ ) となっている。  $x_{pe}, y_{pe}$  は実験において、エンコーダから得られた関節角の測定値である。さらに、制御偏差  $e_{xp}$  は極めて少なく、関節角追従軌道が精度良く実行されたことが確認できた。

また、Fig.2.15は、デジタルビデオカメラを用いて撮影を行った電磁吸着搬送実験の軌跡を示す。この結果から、関節角軌道追跡制御と電磁吸着搬送制御が首尾良く実行できたことが視覚的に確かめられる。以上のことから準最短時間軌道計画方法と電磁吸着搬送制御の有用性が実験的に確認された。

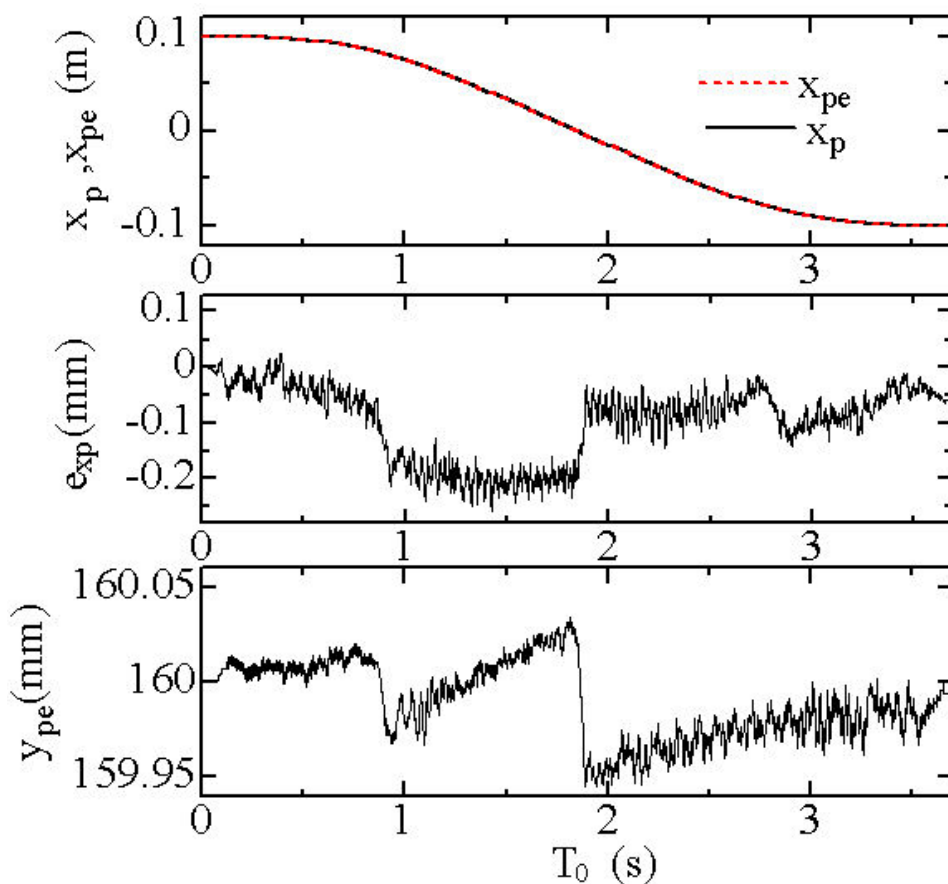
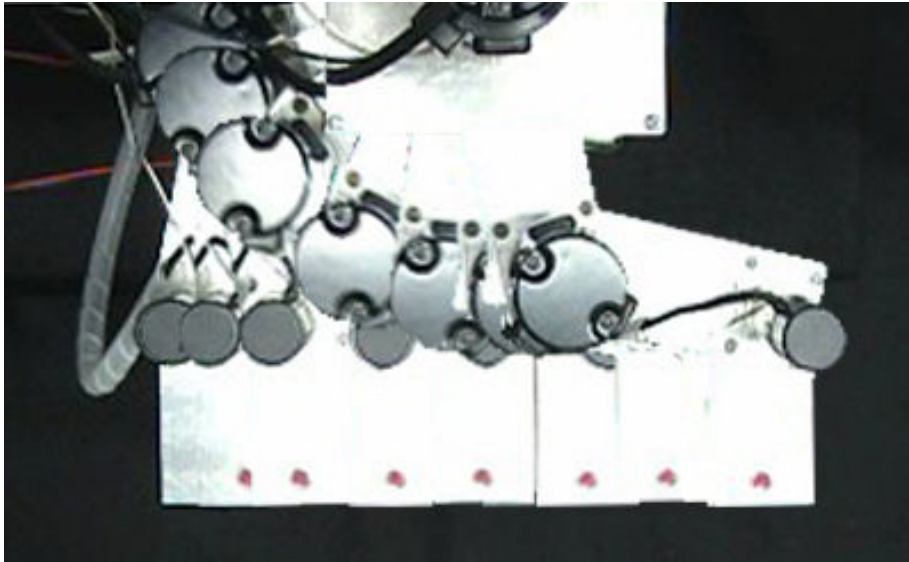
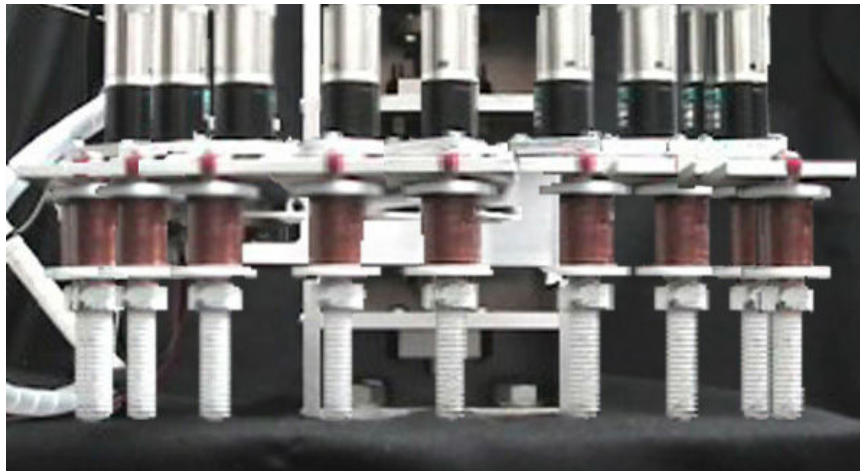


Fig.2.14 Experimental results of electromagnetic attraction transfer with  $\lambda_{q-\min}$



(a) Loci from above



(b) Sideways loci

Fig.2.15 Experimental results of loci of electromagnetic attraction transfer with digital video camera with  $\lambda_{q-\min}$

## 2.7 結 言

本研究は、電磁吸着ハンドを有する水平 3 関節ロボットアームの効率的軌道計画法を提案するとともに、数値計算と実験を行い、本効率的軌道計画法の有用性を検証したものである。得られた内容を要約すると以下のとおりとなる。

- (1) 電磁吸着ハンドを有する水平 3 関節ロボットアームを試作するとともに、電磁吸着性能を実験的に調べ、軌道計画のための電磁吸着性能に関する拘束条件を定めた。
- (2) ロボットアームの軌道を 2 個の遺伝子で記述するとともに、電磁吸着性能および DC モータのトルクに関する拘束条件を定義し、さらに、ロボットアームの動作時間を準最短とさせるような遺伝的アルゴリズムの適応度関数を定義することにより、電磁吸着ハンドを有する水平 3 関節ロボットアームの効率的軌道計画アルゴリズムを構築した。
- (3) 電磁吸着ハンドを有する水平 3 関節ロボットアームの効率的軌道計画に関する数値計算を行ったところ、電磁吸着性能および DC モータのトルクに関する拘束条件を満足し、動作時間を準最短とするような軌道が効率的に得られることが確かめられた。
- (4) 目標関節角軌道追従システムを構築するとともに、効率的軌道計画法によって得られた目標軌道を用いて電磁吸着搬送制御の実験を行ったところ、良好な電磁吸着搬送制御が実現し得ることが確かめられた。

## 参 考 文 献

- (1) Abe, S., Tsuchiya, T., Robot Manipulator Path Control Based on Variable Speed Trajectory planning., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.8, No.1 1996, pp. 1-8.
- (2) Kashima, T., Isurugi, Y., Trajectory Planning of Manipulators on a Minimum-Energy Criterion and Operating Time., *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.15, No.7, 1997, pp. 1012-1018.
- (3) Izumi,T., PathPlanning for Saving Energy of a Manipulator in PTP Motions, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.18, No.7, 2000, pp. 972-978.
- (4) Knjazew, D., OmeGA (A component genetic algorithm for solving permutation and scheduling problems), Kluwer Academic Publishers, 2002.
- (5) Chettibi, T., Synthesis of dynamic motions for robotic manipulators with geometric path constraints., *Mechatronics*, Volume 16, Issue 9, November 2006, pp. 47-563
- (6) Kojima,H. and Kibe, T., Residual Vibration Reduction Control of a Two-Link Flexible Robot Arm Using Optimal Trajectory Planning based on Genetic Algorithm, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2001, Vol.19, No.7, pp. 905-912.
- (7) Zha, X. F., Optimal pose trajectory planning for robot manipulators. echanism and Machine Theory., Vol. 37, Issue 10, October 2002, pp. 1063-1086
- (8) Kojima, H. and Hashimoto, Y., Trajectory Planning of Semiconductor Wafer Transfer Robot Arm Driven by stepping Motors Using Genetic Algorithm and Experiments, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.5, 2007, pp. 102-110.
- (9) Kojima, H. and Itagaki,O. and Okabe,T., and Kobayashi,T., Study on Non-Contact Hold and Transfer Control of Spherical Magnetic Body by Magnetic Robot Hand with Prototype Gap Sensor System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.6, 1996, pp. 868-874.
- (10) Kojima,H., Yuasa,Y. and Kobayashi,T., Non-contact hold and transfer control with a magnetic robot hand attached to a mobile robot., *Jarnal of the Japan society of Applied Electromagnetics*, vol.8, no.3, 2000, pp. 386-394.
- (11) <http://www.sanshin-kk.co.jp/products/unit/magfit.html>

## 第 3 章

PTP 制御を用いた電磁吸着搬送

ロボットアームの準最短時間

軌道計画

## 3.1 緒 言

近年、ロボットアームは生産システムにおける主な役割を果たしており、そのなかで、ロボットアームの高速動作化を達成するためには、効率的な軌道計画は不可欠となっており、ロボットアームの最適軌道計画に関する多くの研究が報告されている。例えば、関節角軌道に三次スプライン補間を使用し、最大トルクと速度の拘束条件によって最短時間最適化問題を、数値シミュレーションによって提案した報告<sup>(1)</sup>、ロボットマニピュレータのジャークに関する条件を用いた滑らかな最適化法の提案<sup>(2)</sup>、ロボットマニピュレータの二地点間動作における3次多項式を用いた最適関節角軌道計画法の報告<sup>(3)</sup>などである。一方で、遺伝的アルゴリズムは局所的な最小値および複雑な理論計算を回避する利点を持つため、実用的な最適化計算手法として広く用いられている。遺伝的アルゴリズムを用いたロボットアームの軌道計画に関する研究報告は、例えば、2自由度のロボット問題において、ポイント障害物がある場合における障害物回避を行いつつ、初期位置から終期位置までロボットを動作させる軌道計画問題をとりあげ、ロボットの軌道を捜し求めるために遺伝的アルゴリズムを構築した<sup>(4)</sup>。これは初期位置と終期位置間で内部ポイントを探索し、経路構成にエルミートの三次補間法を用いている。その他に、遺伝的アルゴリズムを用いた軌道計画に関する研究は、多数報告<sup>(5)(6)</sup>されている。

一方で、電磁力を用いたロボットハンドの研究報告としては、球形磁性体における磁気浮上把持搬送制御<sup>(9)</sup>などが報告されている。本研究では、前章と同様に、磁性体搬送用に構築した電磁吸着ハンドについて、実験的に電磁吸着性能を調べている。

本研究では電磁吸着ハンドを有する水平2リンクロボットアームのための準最短時間軌道計画方法を提案する。そのとき、ロボットアーム動作にはPTP(point-to-point)制御を用いた軌道とし、準最短時間を得るために、3つの遺伝子を用いて軌道を定式化する。本章ではこれらのことについて準最短時間搬送制御の数値計算とその実験を行い、この提案する軌道計画法について検証を行っていく。



## 3.2 実験装置概要

### 3.2.1 ロボットアームの構成

2 関節ロボットアームは各関節で、DC モータ、ハーモニックドライブ、およびエンコーダが取り付けられており、アーム先端には電磁吸着ハンドが取り付けられている。ここで、Fig.3.1 には電磁吸着ハンドを有する 2 関節ロボットアームに関する概要図を示す。前章で用いたロボットアームは 3 リンク、3 関節であるが、本章で用いるロボットアームは関節数、リンク数を共に 2 としている。しかし、本章の実機はリンク長を大幅に長としており、このような構成のロボットアームにおいて PTP 制御を行うこととしている。Fig.3.2 に 2 リンクロボットアームの座標系を示す。また製作した実験装置の各諸量を Table 3.1 に示す。ここに、 $l_1, l_2$  は各リンクの長さ、 $l_{c1}, l_{c2}$  は各関節からリンク重心までの距離、 $m_1, m_2$  は各関節の質量、 $J_{A1}, J_{A2}$  は DC モータの慣性モーメント、 $J_{c1}, J_{c2}$  は各リンクの慣性モーメントである。

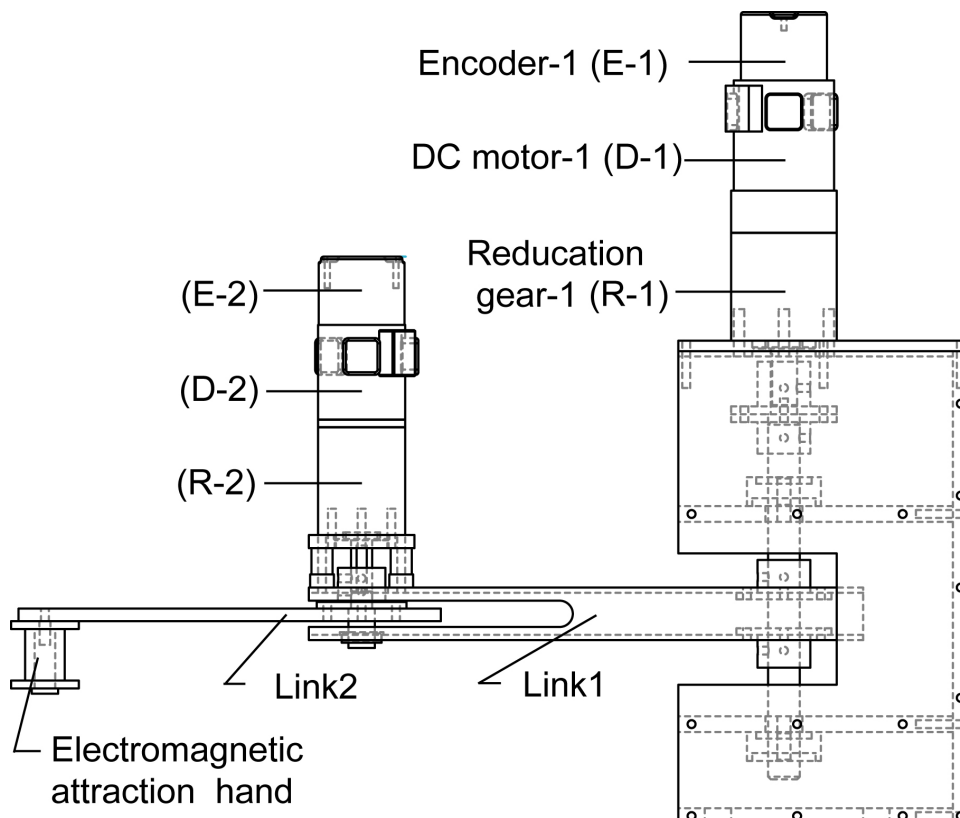


Fig.3.1 Schematic drawing of two-link robot arm with electromagnetic attraction hand.

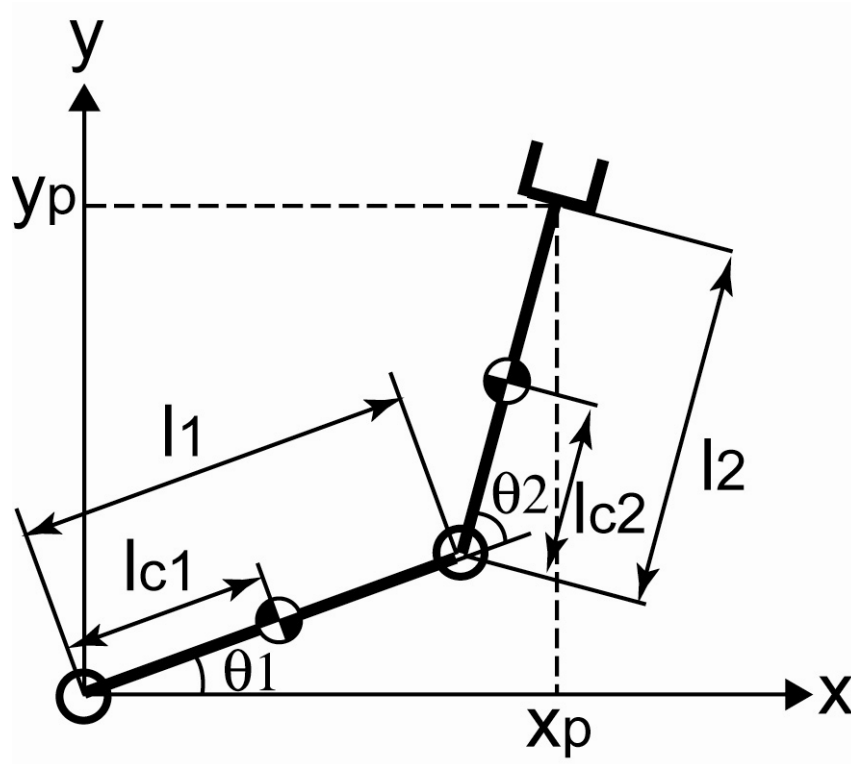


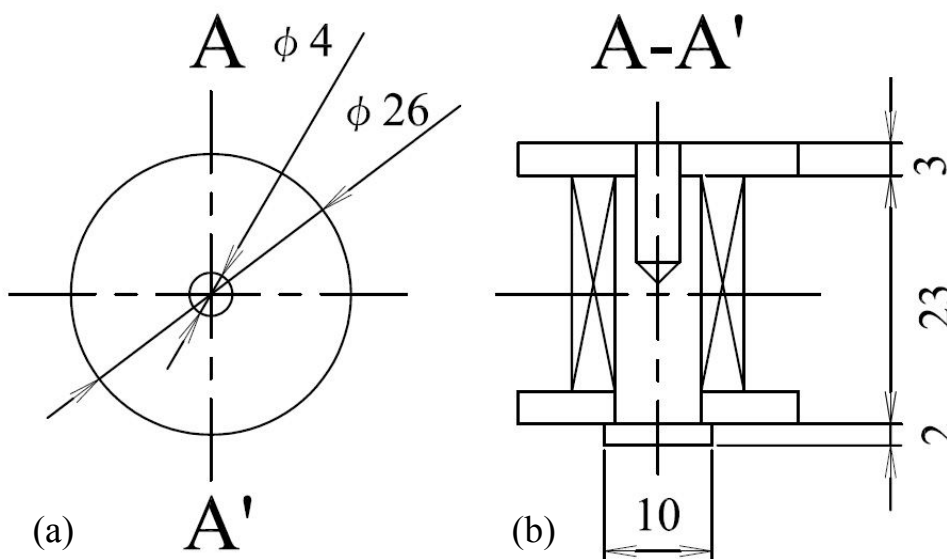
Fig.3.2 Coordinate system of two-link robot arm

Table 3.1 Main dimensions of robot structure

Link 1	$l_1$	0.21	[m]	Link 2	$l_2$	0.16	[m]
	$m_1$	0.104	[kg]		$m_2$	0.066	[kg]
	$l_{c1}$	0.118	[m]		$l_{c2}$	0.08	[m]
	$J_{c1}$	$2.44 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]		$J_{c2}$	$0.361 \times 10^{-3}$	[kgm <sup>2</sup> ]
Motor 1	$J_{A1}$	0.043	[kgm <sup>2</sup> ]	Motor 2	$J_{A2}$	0.015	[kgm <sup>2</sup> ]
	$\tau_{d1}$	3.9	[Nm]		$\tau_{d2}$	2.0	[Nm]
	$N_1$	100	[-]		$N_2$	100	[-]

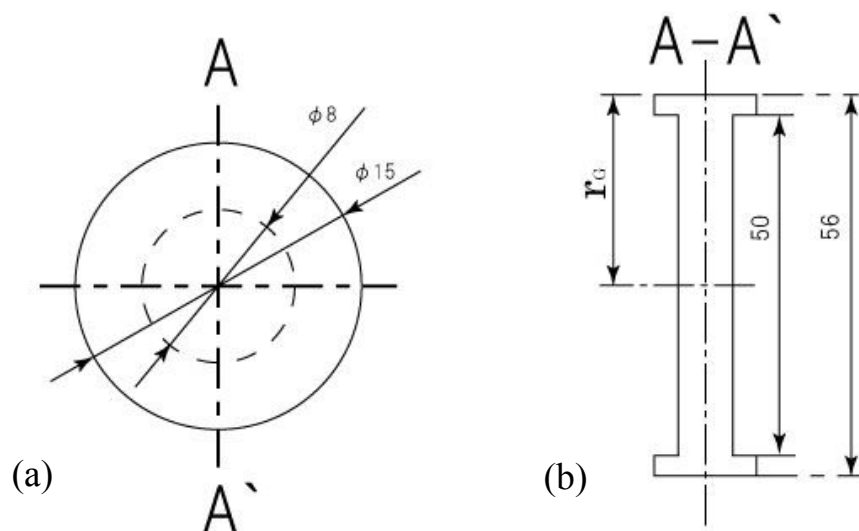
### 3.2.2 電磁吸着ハンド及び磁性搬送体の構造

Fig.3.3 に使用した電磁吸着ハンドの概略図を， Fig.3.4 に使用した磁性吸着搬送体の概略図を， 電磁吸着ハンドの諸量を Table3.2 に示す. さらに搬送体質量は 30[g]となっている.



(a) Downward view of the electromagnetic hand (b) Sideway view of the electromagnetic hand

Fig.3.3 Geometry of Electromagnet



(a) Downward view of the electromagnetic hand (b) Sideway view of the electromagnetic hand

Fig.3.4 Geometry of magnetic transfer object

次に、Fig3.5 に電磁吸着ハンドと磁性搬送体における概略図を示す。Fig.3.5において、実線は、電磁吸着搬送が成功した場合を示している。一方、破線は、ロボットハンドが磁性搬送体の吸着搬送に失敗し、滑落状態にある場合を示している。

Table 3.2 dimension of electromagnet

Outside diameter of coil [m]	$11.35 \times 10^{-3}$
Inside diameter of coil [m]	$7.8 \times 10^{-3}$
Length of coil [m]	$20.0 \times 10^{-3}$
Wire diameter of coil [m]	$0.5 \times 10^{-3}$
Number of turns of coil	156
Resistance of coil [ $\Omega$ ]	1.7

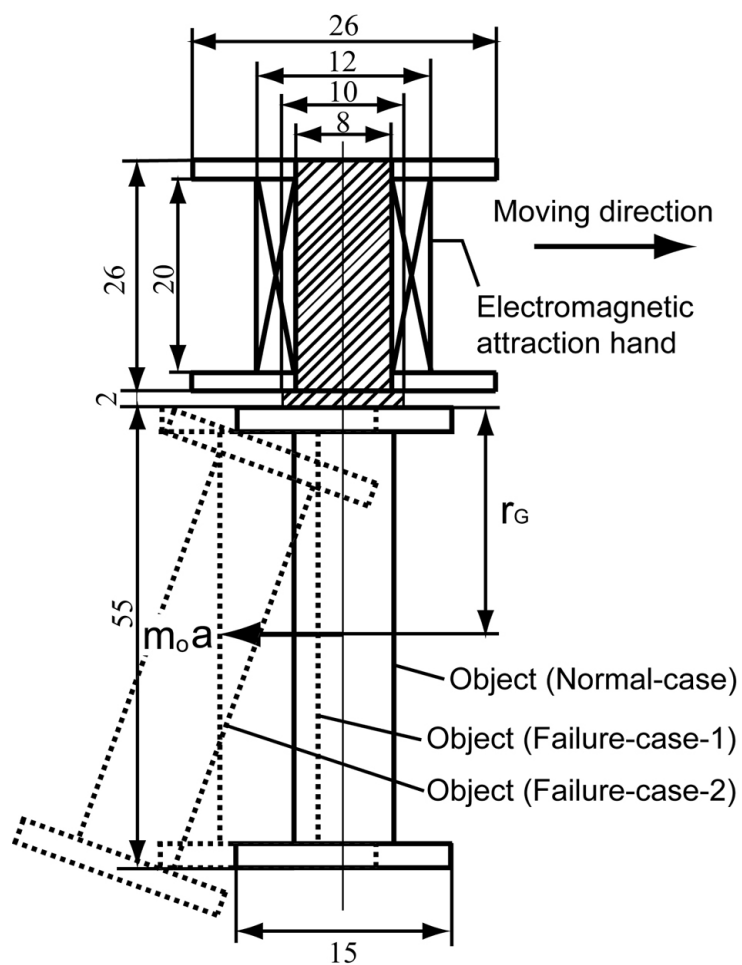


Fig.3.5 Schematic drawing of electromagnetic attraction hand and magnetic object.

### 3.3 PTP 制御軌道の定式化と電磁吸着性能

この研究では、電磁吸着搬送制御の軌道において、Fig.3.6 で示されるように作業空間上に初期位置と終期位置が与えられたとき、この空間上に障害物がない場合について取り扱っている。この Fig.3.6 中に示された軌道のパラメータについて、以下のような値を取っている。

$$P_s(X_s, Y_s) = (0.22, 0.15) [\text{mm}] , P_f(X_f, Y_f) = (-0.25, 0.08) [\text{mm}] \quad (3-1)$$

次に、軌道計画において、本章では境界条件と連続条件を考慮したうえで Fig.3.7 に示されるような台形状速度曲線を用いて PTP 制御を行うこととした。この台形状速度曲線は多項式で表され、各関節空間の補間式として表される。第1関節  $\theta_1$  は加速区間の時間  $T_{11}$  の関数として定式化される。同様に、第2関節  $\theta_2$  は加速区間の時間  $T_{21}$  の関数として定式化される。第1関節の最大角速度を  $\omega_m$  とすると本研究における軌道は以下に示すことができる。

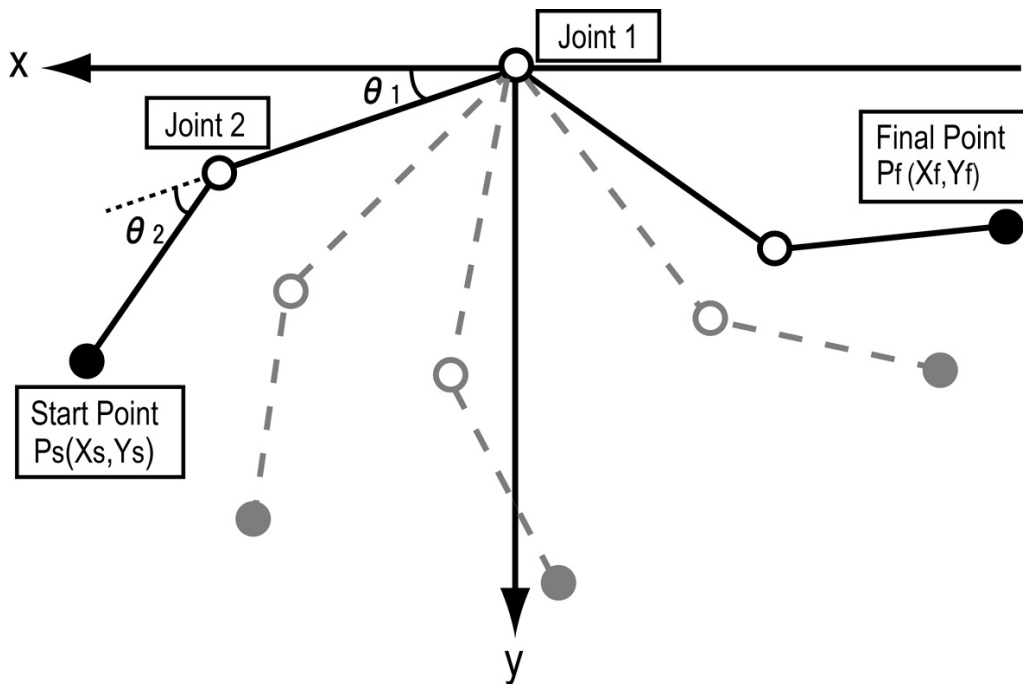


Fig.3.6 Trajectory of robot arm end for electromagnetic transfer

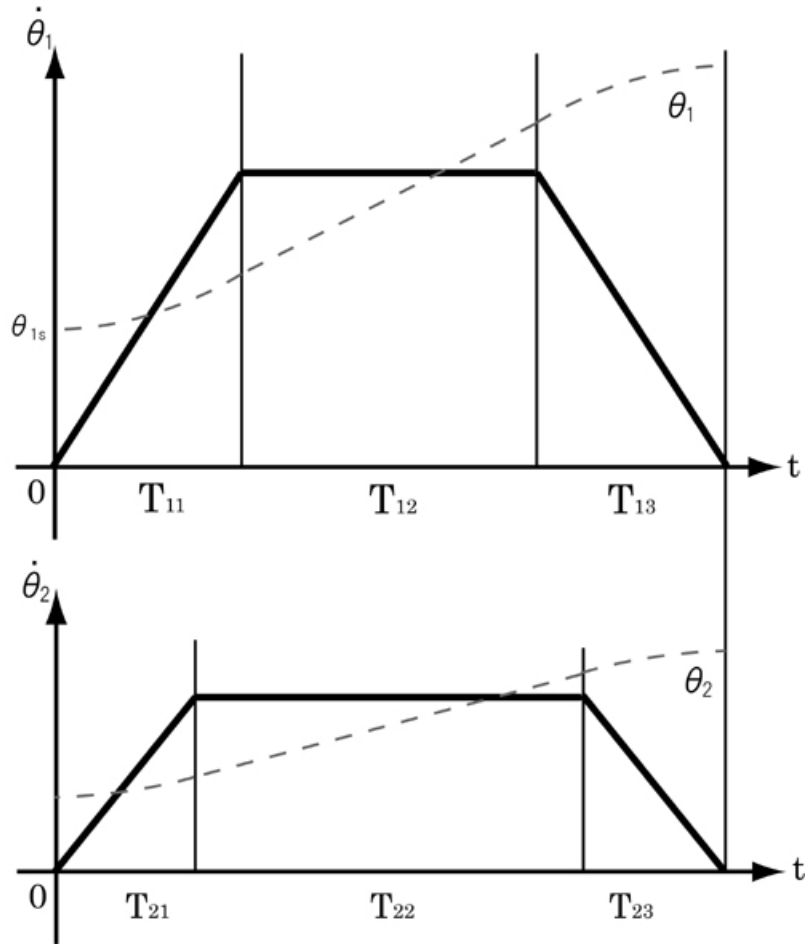


Fig.3.7 Model of trapezoid velocity curve pattern

$$0 \leq t \leq T_{11}, \quad \theta_1(T) = \theta_{1s} + \frac{\omega_{1m}}{2T_{11}} t^2 \quad (3-2)$$

$$T_{11} \leq t \leq (T_{11} + T_{12}) \quad \theta_1 = \theta_{1s} + \omega_{1m} \left( t - \frac{T_{11}}{2} \right) \quad (3-3)$$

$$(T_{11} + T_{12}) \leq t \leq T_0 \quad \theta_1(T) = \theta_{10} - \frac{\omega_{1m}}{2T_{11}} \bar{t}^2 \quad (3-4)$$

ここに

$$T_0 = 2T_{11} + T_{12}, \quad \theta_{10} = \theta_{1G} - \theta_{1s}, \quad \bar{t} = T_0 - t, \quad \omega_{1m} = \frac{\theta_{10}}{(T_{11} + T_{12})} \quad (3-5)$$

$$0 \leq t \leq T_{21}, \quad \theta_2(T) = \theta_{2s} + \frac{\omega_{2m}}{2T_{21}} t^2 \quad (3-6)$$

$$T_{21} \leq t \leq (T_{21} + T_{22}) \quad \theta_2 = \theta_{2s} + \omega_{2m} \left( t - \frac{T_{21}}{2} \right) \quad (3-7)$$

$$(T_{21} + T_{22}) \leq t \leq T_0 \quad \theta_2(T) = \theta_{20} - \frac{\omega_{2m}}{2T_{21}} \bar{t}^2 \quad (3-8)$$

$$T_0 = 2T_{21} + T_{22}, \theta_{20} = \theta_{2G} - \theta_{2s}, \bar{t} = T_0 - t, \omega_{2m} = \frac{\theta_{20}}{(T_{21} + T_{22})} \quad (3-9)$$

$T_0$ はロボットアームの総動作時間、 $T_{12}, T_{22}$ は第1関節と第2関節の等速区間における時間である。また、Fig.3.5中の記号を使用すると磁性搬送体に作用するモーメントは以下のように記すことが出来る。

$$\tau_M = m_o r_G a, \quad a = \sqrt{\ddot{x}_p^2 + \ddot{y}_p^2} \quad (3-10)$$

ここに $m_o$ は磁性搬送体の質量、 $r_G$ は磁性搬送体の吸着面と磁性搬送体の重心との距離である。 $(x_p, y_p)$ はロボットアームの座標先端を示している。

### 3.4 PTP 制御における準最短時間軌道計画法

ロボットアームのPTP制御における準最短時間は、以下に示されるように、遺伝子として $T_{11}, T_{21}$ 、そして、 $\omega_m$ を遺伝的アルゴリズムに組み込むことによって定式化される。

$$\lambda = [T_{11}, T_{21}, \omega_m] \quad (3-11)$$

また、ラグランジュの式を用いるとロボットの運動方程式は以下のように表される。

$$J(\theta)\ddot{\theta} + J(\theta)\dot{\theta} - \frac{\partial T}{\partial \theta} = \tau \quad (3-12)$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T J(\theta) \dot{\theta}, \quad \tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T \quad (3-13)$$

ここに、 $J(\theta)$ は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta})$ はコリオリ力と遠心力項、 $\tau$ は関節トルク項、そして $T$ は運動エネルギーである。式(3-11)とロボットの逆運動学を用いると関節トルクは以下の通り遺伝子の集合である染色体として言い表すことが出来る。

$$\tau(t, \lambda) = [\tau_1(t, \lambda) \quad \tau_2(t, \lambda)]^T = J(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) \quad (3-14)$$

また、染色体によって記述される軌道に対応するDCモータトルクはロボットアームの運動方程式を用いることによって表される。

$$\tau_d(t, \lambda) = \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix}^{-1} \tau(t, \lambda) \quad (3-15)$$

ここに  $\tau_d$  は各関節に取り付けられた DC モータのトルクであり，  $N_1$  と  $N_2$  は減速機の比率である．

また，本研究では，二つの拘束条件を準最短時間軌道に用いている．前章と同様，一つめの拘束条件は磁性搬送体に作用するモーメントの最大許容値であり，以下のような値を持つ．

$$\tau_M \leq \tau_{M \max} \quad , \quad \tau_{M \max} = 0.570 \times 10^{-3} \text{ [Nm]} \quad (3-16)$$

ここに  $\tau_{M \max}$  は電磁吸着搬送性能実験の計測結果から得られた許容最大モーメントである．二つめの拘束条件は，DC モータのトルクが許容定格トルク以下であるという条件で，以下のように定まっている．

$$\tau_{d1} \leq \tau_{d1 \max} = 0.064 \text{ [Nm]} \quad , \quad \tau_{d2} \leq \tau_{d2 \max} = 0.032 \text{ [Nm]} \quad (3-17)$$

ここで  $\tau_{d1}, \tau_{d2}$  は各関節の DC モータトルク，そして  $\tau_{d1 \max}, \tau_{d2 \max}$  は各関節における DC モータの定格トルクである．さらに，二つの拘束条件を用いることで，準最短時間動作軌道計画のための適応度関数を以下のように定義できる．

$$fitness = \begin{cases} \exp(-0.1T_o), & \text{if } \forall t \forall i f_{L1} = true \\ 0, & \text{if } \exists t \exists i f_{L2} = true \end{cases} \quad (3-18)$$

ここに

$$f_{L1} = f_{L1A} \wedge f_{L1B}, \quad f_{L2} = f_{L2A} \vee f_{L2B} \quad (3-19)$$

$$f_{L1A} = \text{abs}\{\tau_M(t)\} \leq \tau_{M \max}, \quad f_{L2A} = \text{abs}\{\tau_M(t)\} > \tau_{M \max}, \quad i=1,2 \quad (3-20)$$

$$f_{L1B} = \text{abs}\{\tau_{di}(t)\} \leq \tau_{di \max}, \quad f_{L2B} = \text{abs}\{\tau_{di}(t)\} > \tau_{di \max}, \quad i=1,2 \quad (3-21)$$

Fig.3.8 に遺伝的アルゴリズムを用いた電磁吸着ハンドを有する 2 関節ロボットアームの準最短動作軌道計画アルゴリズムのフローチャートを示す．ここに適応度関数式(3-18)が使用されており，選択，一点交叉，突然変異などの遺伝子の操作が効果的に行われている．



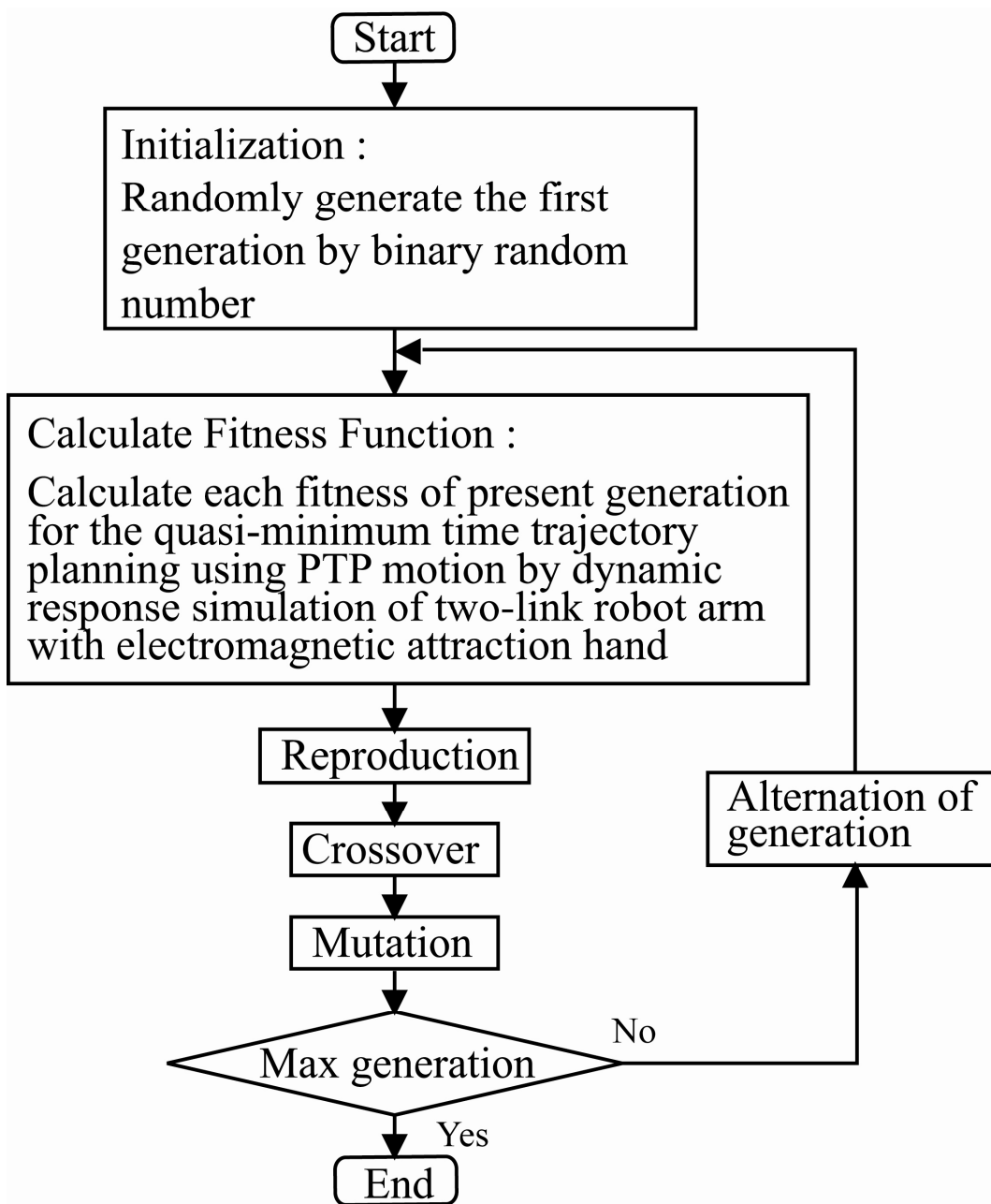


Fig.3.8 Flowchart of quasi-minimum time trajectory planning using genetic algorithm.

## 3.5 PTP 制御による電磁吸着搬送の数値計算と実験結果

### 3.5.1 PTP 制御による電磁吸着搬送数値計算結果

本章で構築した遺伝的アルゴリズムで使用したパラメータを Table3.3 に示す。また、遺伝的アルゴリズム内での遺伝子の探索範囲は以下のように定めている。

$$0.5 \text{ (s)} \leq T_{11} \leq 3.0 \text{ (s)}, 0.5 \text{ (s)} \leq T_{21} \leq 3.0 \text{ (s)} \quad (3-22)$$

$$0.01 \text{ (rad/s)} \leq \omega_{1m} \leq 3.0 \text{ (rad/s)} \quad (3-23)$$

準最短時間軌道計画の数値計算結果は Fig.3.9 に示されている。Fig.3.9 では、世代数が増加すると共に適応度もまた増加し、同時にロボットアーム総動作時間  $T_0$  が減少していく。従って、ロボットアーム電磁吸着搬送制御における準最短時間軌道計画法が構築されたことがうかがえる。さらに、適応度関数と全ての遺伝子の値は 4000 世代以降は一定の値をとっており、このときの染色体を準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  として定義する。このとき準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  は以下の値として与えられる。

$$\lambda_{q-\min} = [T_{11opt} \quad T_{21opt} \quad \omega_{1mopt}] = [0.686 \text{ (s)} \quad 0.565 \text{ (s)} \quad 1.296 \text{ (rad/s)}] \quad (3-24)$$

この結果から、準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  による総動作時間は  $T_0 = 2.382 \text{ [s]}$  となった。Fig.3.10 は準最短時間染色体  $\lambda_{q-\min}$  を用いた結果の磁性搬送体に作用するモーメントと各 DC モータトルクの動的応答の数値計算結果を示している。図からモーメントの動的応答  $\tau_M$  は、最大許容モーメント  $\tau_{M\max}$  に接していることが確認できる。また、各 DC モータトルクの動的応答は全て定格トルク以下の値をとっている。この結果から最大許容モーメントに一存して本ロボットアームの動作時間が決定されている事が確認できる。また一方で、0.56(s)付近でモーメントの応答と第 2 関節のトルク応答に関してピークが現れている。このような波形となる原因は、第 1 関節と第 2 関節の軌道において、加速区間時間と等速区間時間が別となっているためであり、その結果、各関節で、区間の切換時にこのようなピークが現れることとなる。次に、Fig.3.11 は各関節角度の動的応答数値計算結果を用いて描いたロボットアーム動作の軌跡を示している。

Table 3.3 Parameters of genetic algorithm

Number of individual	50
Length of chromosome (bit)	36
Number of gene (bit)	12
Crossover ratio	0.5
Mutation ratio	0.05
Maximum of generation	10000

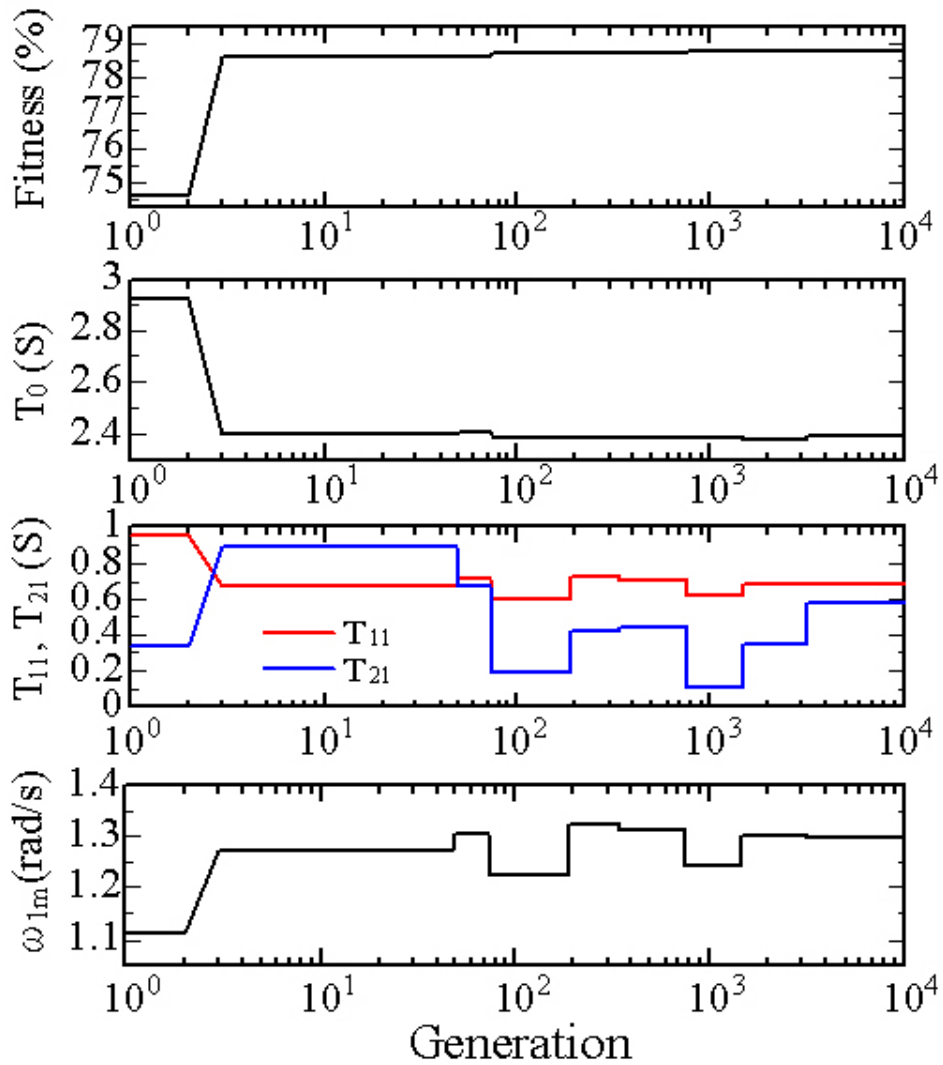


Fig.3.9 Numerical calculation results of quasi-minimum time trajectory planning using the genetic algorithm.

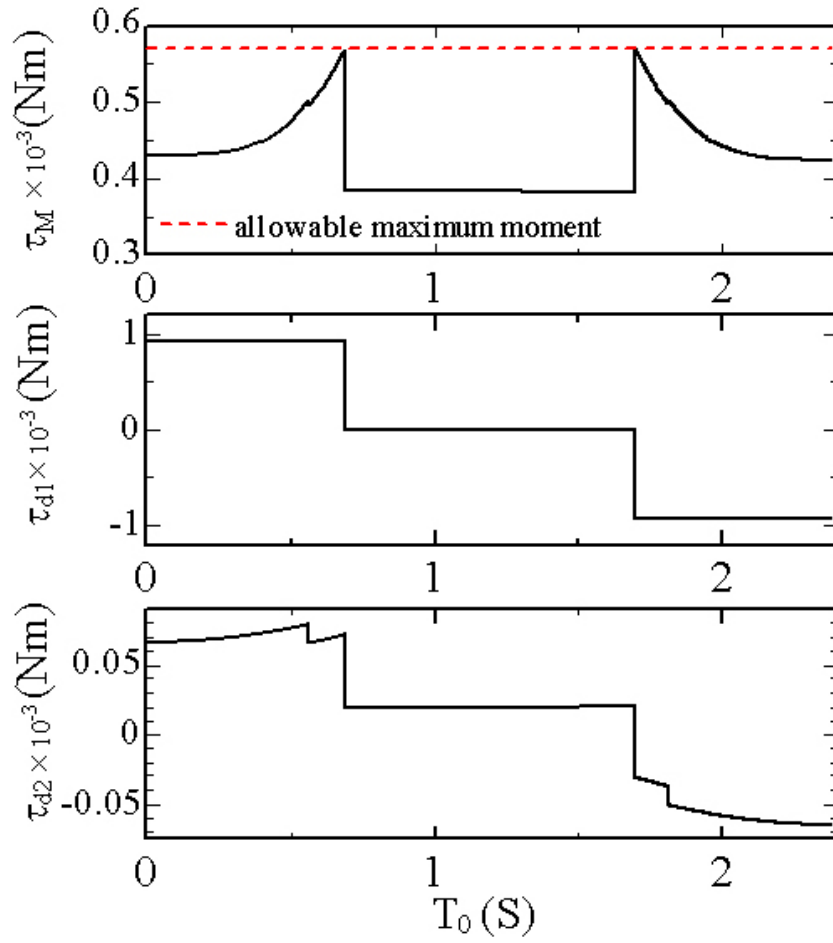


Fig.3.10 Numerical simulation results of dynamic responses of moment  $\tau_M$  and motor torque  $\tau_d$  with  $\lambda_{q-\min}$

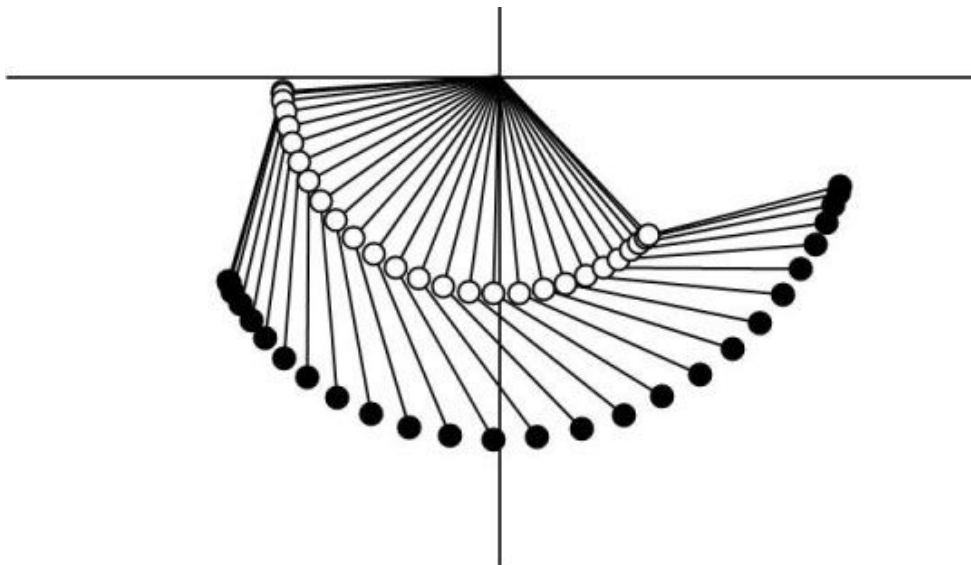


Fig.3.11 Numerical calculation results of loci of electromagnetic attraction transfer control with  $\lambda_{q-\min}$

### 3.5.2 PTP 制御による電磁吸着搬送実験結果

次に、構築した準最短時間軌道計画法による数値計算で得られた値を用いて、電磁吸着搬送制御実験を行った。このときの搬送動作における各関節角変位について Fig.3.12 に示す。なお、上図が第 1 関節、下図が第 2 関節を示している。この図において赤色の破線で示されているのが目標角度となっており、黒色実線で示されたものが関節角応答となっている。この各関節における関節角度変位は、誤差も少なく非常に良い精度で実行されており、この結果から、PD 制御を用いた関節角軌道追従制御が首尾よく行われた事が確認できた。

次いで、Fig.3.13 には、ビデオカメラを用いた連続動作の撮影によって得られた電磁吸着搬送実験におけるロボットアームの連続写真を示す。この結果から視覚的に、正常に磁性搬送体を初期位置から終期位置まで搬送したことが確認できる。この結果から電磁吸着搬送制御の準最短時間軌道計画の有用性が実験的に確認された。

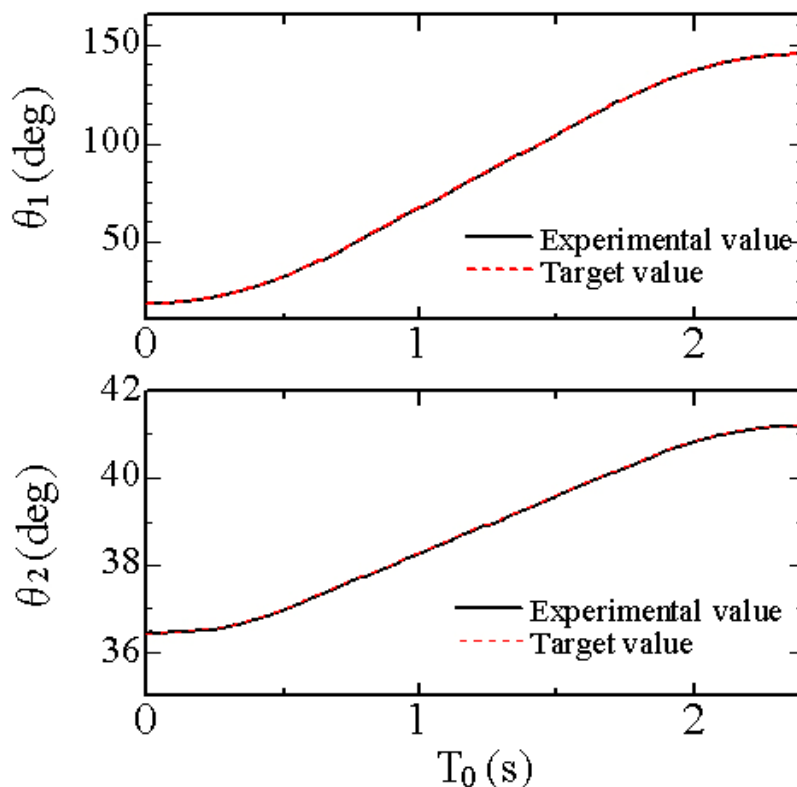


Fig.3.12 Experimental results of dynamic responses of rotational angles with  $\lambda_{q-\min}$

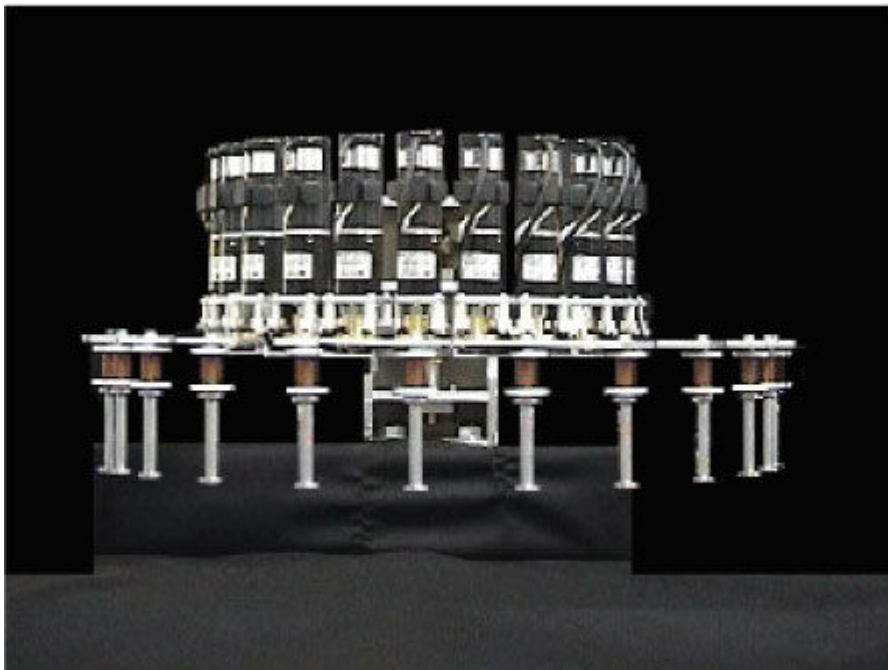
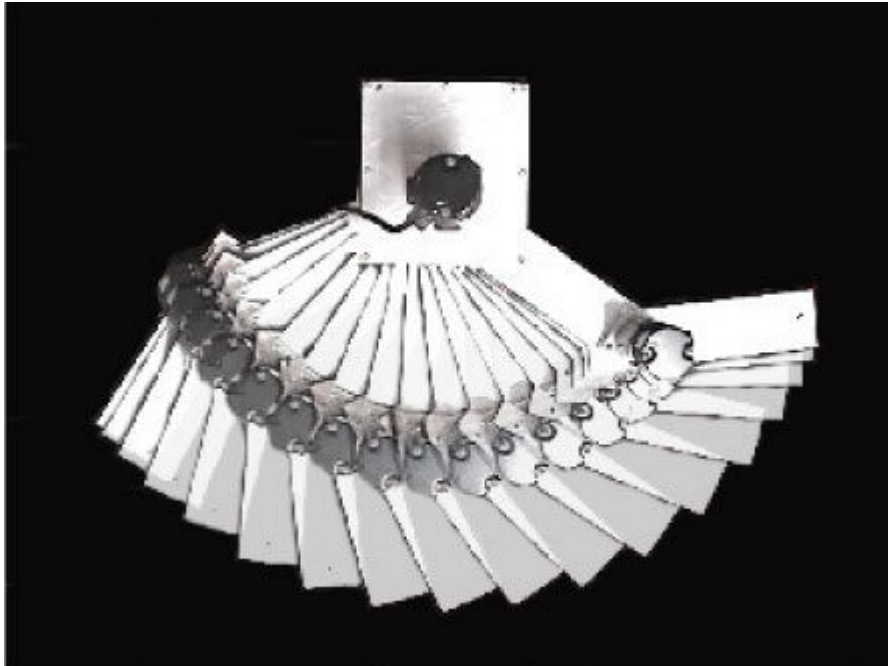


Fig.3.13 Experimental results of loci of electromagnetic attraction transfer with digital video camera with  $\lambda_{q-\min}$

## 3.6 結 言

本研究では電磁吸着ハンドを有する 2 リンクロボットアームの磁性搬送体の PTP 制御を用いた電磁吸着搬送制御における準最短時間軌道計画方法を提案した。本章では遺伝的アルゴリズムを用いる準最短時間軌道計画であり，染色体が 3 つの遺伝子から成り立つことで軌道を定式化し，数値計算を行った結果，準最短軌道を得られることが確認された。さらに，実験において，電磁吸着ハンドによる磁性搬送体の搬送制御が精度良く実行できたことが確認された。要約した内容を次に示す。

- (1) 本研究の有用性を理論計算と共に実験を行うことで検証するため，2 関節水平ロボットアームを製作し，軌道計画によりロボットアーム先端を初期位置から終期位置まで電磁吸着搬送を行う PTP 制御を実現させた。
- (2) 台形状速度曲線を適用した軌道計画を提案するとともに，軌道を表現する 3 つのパラメータ  $T_{11}, T_{21}, \omega_m$  を遺伝子として選定した。さらに搬送物体に作用するモーメントの許容最大値を決定した。
- (3) ロボットハンドの電磁吸着特性におけるモーメントと DC モータの特性である定格トルクを考慮して拘束条件とし，遺伝的アルゴリズムによる効率的な PTP 制御を可能にする電磁吸着搬送制御システムを構築した。
- (4) 本研究で試作した電磁吸着搬送 2 関節ロボットアームを用いて，構成した準最適時間軌道为目标軌道とする関節角追従制御の実験を行ったところ，精度のよい関節角軌道追従制御の性能が得られ，準最短時間軌道による電磁吸着搬送が良好に実現し得ることが確かめられた。

## 参 考 文 献

- (1) Luca, A. D., Lanari, L., Oriolo, G., A sensitivity approach to optimal spline robot trajectories., *Automatica*, Vol. 27, Issue 3, May 1991, pp. 535-539
- (2) Gasparetto, A., Zanutto, V.T., A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators., *Mechanism and Machine Theory*, Vol 42, Issue 4, April 2007, pp. 455-471
- (3) Benhabib, B., Tabarah, E., Optimal joint trajectory planning for coordinated point-to-point motion of two-arm manipulators., *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 24, Issue 1, 1989, pp. 9-17.
- (4) Tian, L., Collins, C., An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm. *Mechatronics*, vol.14, 2004 pp. 455-470
- (5) Capi, G., Kaneko, S. Mitobe, K., et al, Optimal trajectory generation for a prismatic joint biped robot using genetic algorithms., *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 38, Issue 2, 28 February 2002, pp. 119-128
- (6) Kojima, H. and Itagaki,O. and Okabe,T., and Kobayashi,T., Study on Non-Contact Hold and Transfer Control of Spherical Magnetic Body by Magnetic Robot Hand with Prototype Gap Sensor System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.6, 1996, pp. 868-874.
- (7) Marcos, G., et al, Trajectory planning of redundant manipulators using genetic algorithms. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, Issue 7, July 2009, pp. 2858-2869
- (8) Kojima,H. and Kibe, T., Residual Vibration Reduction Control of a Two-Link Flexible Robot Arm Using Optimal Trajectory Planning based on Genetic Algorithm, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2001, Vol.19, No.7, pp. 905-912.
- (9) Kojima, H. and Itagaki,O. and Okabe,T., and Kobayashi,T., Study on Non-Contact Hold and Transfer Control of Spherical Magnetic Body by Magnetic Robot Hand with Prototype Gap Sensor System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.6, 1996, pp. 868-874.



## 第4章

経由点と遺伝的アルゴリズムを

用いた電磁吸着搬送

2 関節ロボットアームの

準最短時間軌道計画と実験

## 4.1 緒 言

ロボットアームは生産システムの中核的機器として広く用いられている。ロボットアームの制御システムは、基本的に関節角軌道計画と関節角軌道追従制御とから構成され、関節角軌道追従制御においては、PID 制御が多用されている。生産システムの生産効率を高めるためには、ロボットアームの高速動作が必要となり、アクチュエータの拘束条件などを考慮した軌道計画に関する研究が数多く報告されている。例えば、最短時間軌道計画<sup>(1),(4)</sup>、省エネルギー軌道計画<sup>(5),(6)</sup>などに関する研究が行われている。これらの研究では、最適化手法として、ポントリャーギンの最大原理などが用いられており、複雑な理論式導出が必須となる。また、多項式を用いた軌道計画に関する研究<sup>(7),(8)</sup>も報告されている。一方、生物の進化論的学習機能に基づく遺伝的アルゴリズムは、汎用性に富む数値的最適化手法として、工学的最適化問題に広く用いられており、遺伝的アルゴリズムを用いたロボットアームの軌道計画に関する研究が行われている。例えば、水中で動作するロボットアームの最小エネルギー軌道計画<sup>(9)</sup>、ロボットマニピュレータの障害物回避軌道計画<sup>(10)</sup>、フレキシブルロボットアームの振動抑制方式軌道計画<sup>(11)</sup>、ステッピングモータで駆動される半導体ウエハ搬送ロボットアームの準最短時間軌道計画<sup>(12)</sup>に関する研究が報告されている。

電磁力は、磁気軸受や磁気浮上列車などにおいて用いられており、磁力支持方式精密自動組立用ハンドに関する研究<sup>(13)</sup>や非接触磁気ロボットハンドに関する研究<sup>(14),(15)</sup>も行われている。また、電磁吸着ハンドを有する3関節ロボットアームの軌道計画に関する研究<sup>(16)</sup>も行われている。この報告では、電磁吸着特性を実験的に調べる観点から、3リンク構造のロボットアーム先端の軌道を直線軌道としている。また、電磁吸着特性と直流モータのトルク特性に関する拘束条件から準最短時間軌道計画のための適応度関数を定義し、遺伝的アルゴリズムを用いた準最短時間軌道計画法を提案している。しかしながら、ロボットアームの作業平面上に障害物が存在するような状況では、障害物回避軌道計画を行うことが必須となる。障害物回避軌道計画の一手法として経路点を用いる方法がある。しかしながら、電磁吸着搬送ロボットアームの軌道計画法として、経路点と遺伝的アルゴリズムを用いた準最短時間軌道計画に関する研究は、実用的に有用であるように思われるが、このような研究は未だなされていないようである。

本研究は、経路点と遺伝的アルゴリズムを用いた、磁気吸着搬送2関節ロボットアームの準最短時間軌道計画法を提案するとともに、数値計算と実験を行い、本準最短時間軌道計画法の有用性を検証したものである。

## 4.2 経路点を用いた電磁吸着搬送軌道の定式化

### 4.2.1 マニピュレータの概要

本章で使用した実験装置は、寸法、形状共に前章と同様の構成となっている。Fig.4.1 は、2 関節ロボットアームの写真であり、Fig.4.2 の概略図に示されているように、アーム先端には電磁吸着ハンドが取り付けられている。Fig.4.3 は、電磁吸着ハンドの構造と、鉄製である被電磁吸着搬送物体を示したものである。実線の搬送体は、正常に電磁吸着されている状態を示しており、破線で示されるものは、電磁吸着が正常搬送されていない場合の状態を示している。また電磁吸着ハンドと磁性搬送体も前章と同じ構成であり、その概略は前章の、Fig.3.3, Fig.3.4, Table3.2 に示されている。

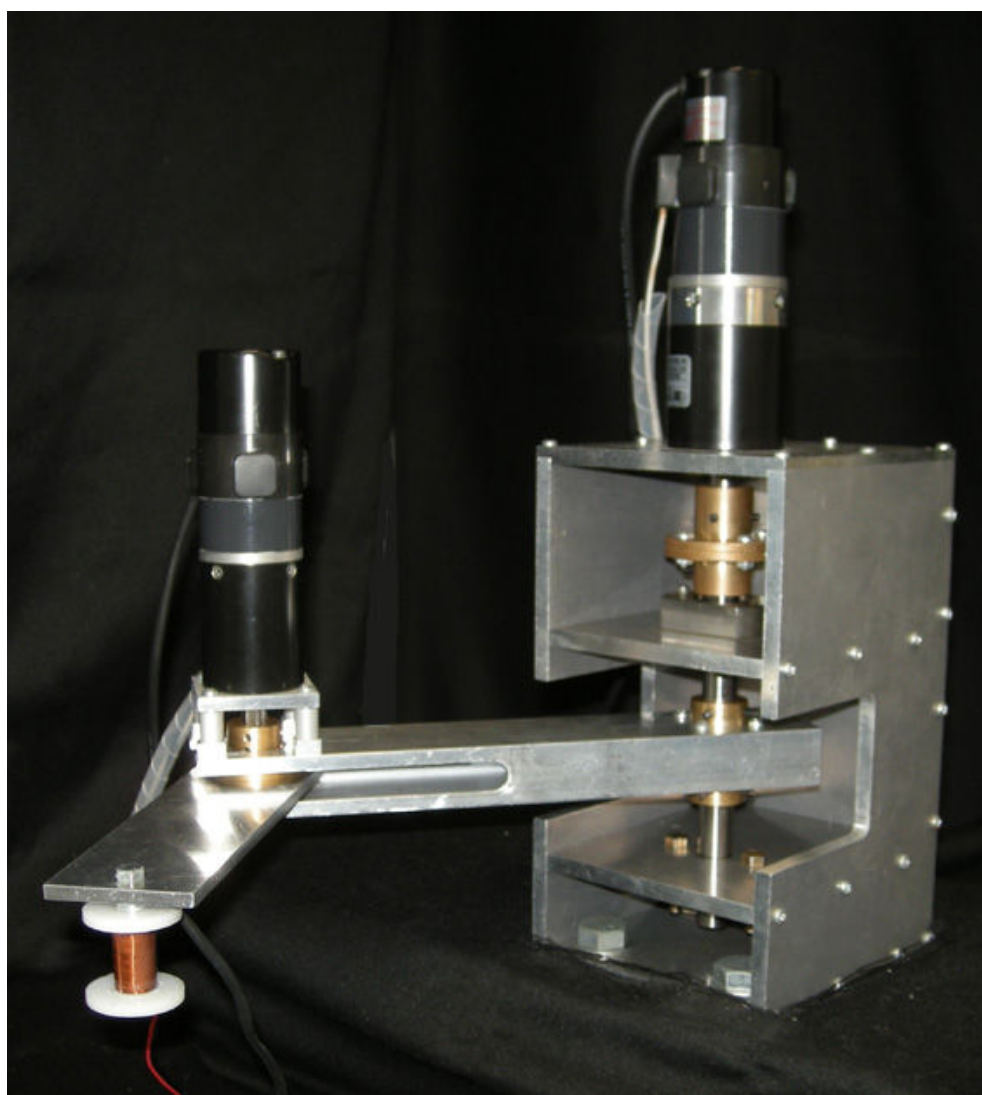


Fig.4.1 Photograph of two-link robot arm with electromagnetic attraction hand

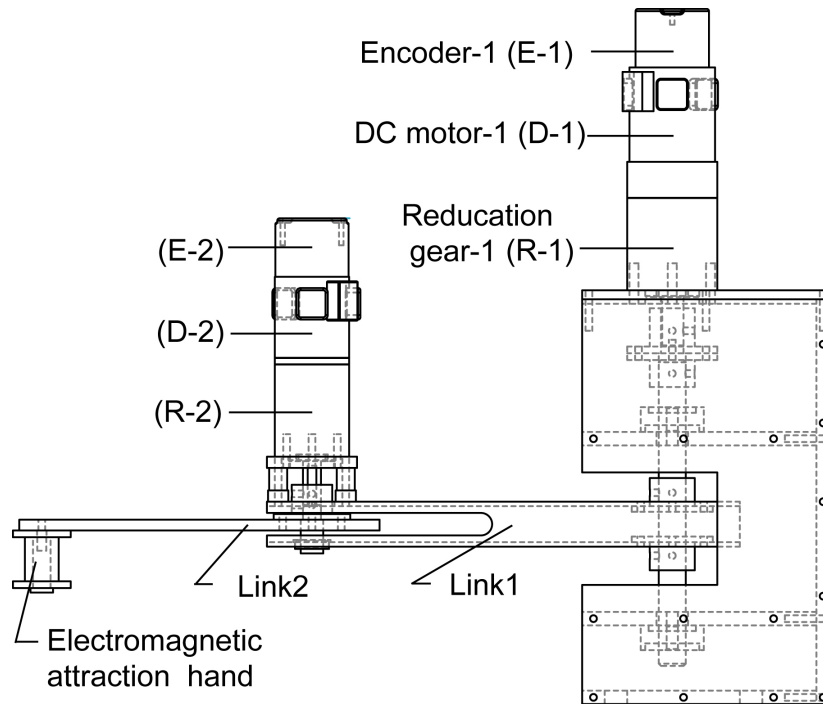


Fig.4.2 Schematic drawing of two-link robot arm with electromagnetic attraction hand

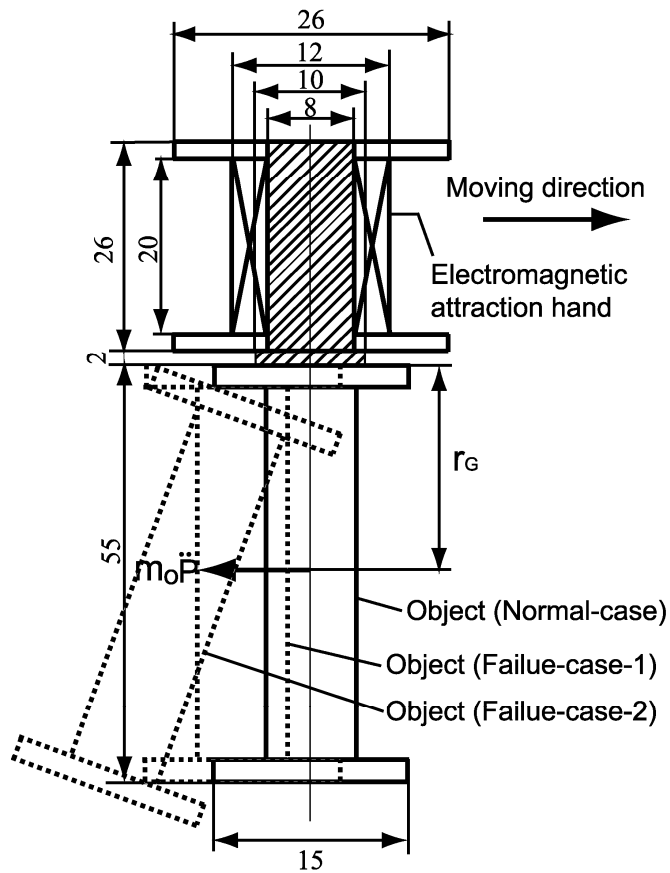


Fig.4.3 Schematic drawing of electromagnetic attraction hand and grasped object

## 4.2.2 経路点を用いた軌道の定式化

本研究では、経路点と多項式を用いた軌道計画の基礎的な場合として、経路点が2個の場合を取り上げている。Fig.4.4 は、ロボットアームの座標モデルを示すものであり、軌道の定式化は、Fig.4.5 中の初期位置  $P_s(x_s, y_s)$ 、2 個の経路点  $P_{k1}(x_{k1}, y_{k1})$ 、 $P_{k2}(x_{k2}, y_{k2})$ 、終期位置  $P_f(x_f, y_f)$  を用いた三つの時間区間で行われている。

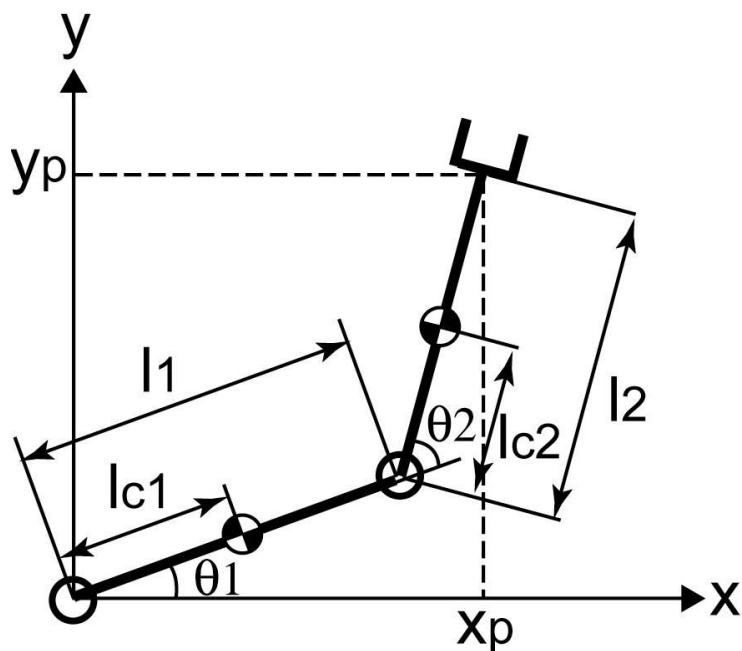


Fig.4.4 Coordinate system of three-link robot arm

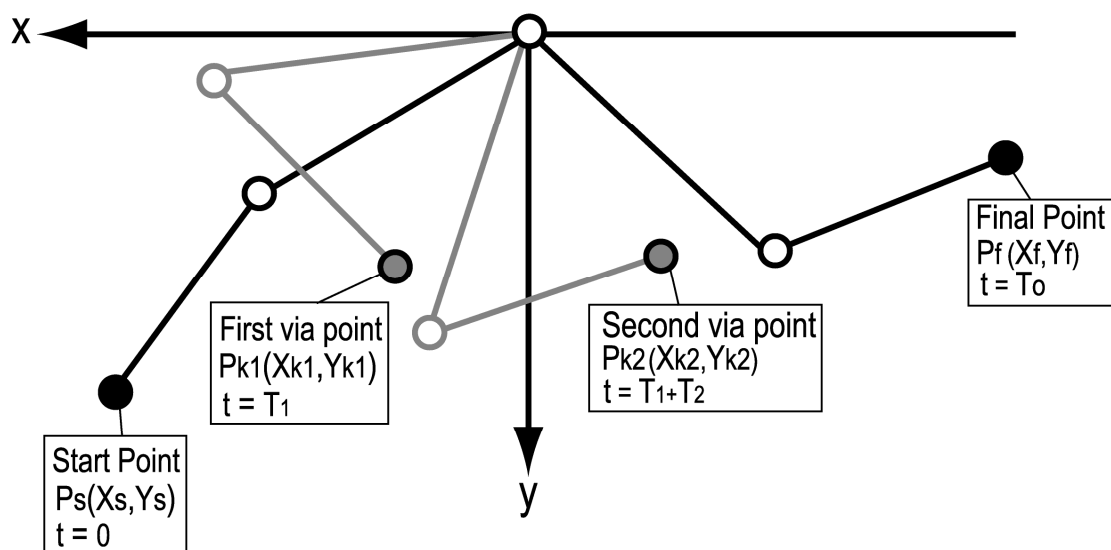


Fig.4.5 Trajectory of robot arm end for electromagnetic attraction transfer

本研究では，初期位置と終期位置における関節角及び関節角速度の初期条件，経路点における関節角，関節角速度及び関節角加速度の連続条件を考慮して軌道の定式化を行っているが，これらの条件の数は12個となることから，各時間区間の関節角 $\theta$ を3次の多項式で次式のように記述している．

$$0 \leq t \leq T_1: \quad \theta(t) = a_{10} + a_{11}t + a_{12}t^2 + a_{13}t^3 \quad (4-1)$$

$$T_1 \leq t \leq (T_1 + T_2): \quad \theta(\tau_2) = a_{20} + a_{21}\tau_2 + a_{22}\tau_2^2 + a_{23}\tau_2^3 \quad (4-2)$$

$$(T_1 + T_2) \leq t \leq T_o: \quad \theta(\tau_3) = a_{30} + a_{31}\tau_3 + a_{32}\tau_3^2 + a_{33}\tau_3^3 \quad (4-3)$$

ここに，

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2]^T, \quad T_o = T_1 + T_2 + T_3 \quad (4-4)$$

$$a_{ij} = [a_{ij1} \quad a_{ij2}]^T, \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 0, 1, 2, 3 \quad (4-5)$$

$$\tau_2 = t - T_1, \quad \tau_3 = t - T_1 - T_2 \quad (4-6)$$

であり， $t$ は時間， $T_1, T_2, T_3$ は各区間の所要時間， $T_o$ はロボットアームの動作時間を表している．

各区間における境界条件を，Fig.4.5中の記号を用いて次式のようにおく．

$$[\theta(t)]_{t=0} = \theta_s, \quad [\dot{\theta}(t)]_{t=0} = 0 \quad (4-7)$$

$$[\theta(t)]_{t=T_1} = \theta_{k1}, \quad [\theta(\tau_2)]_{\tau_2=0} = \theta_{k1} \quad (4-8)$$

$$[\theta(\tau_2)]_{\tau_2=T_2} = \theta_{k2}, \quad [\theta(\tau_3)]_{\tau_3=0} = \theta_{k2} \quad (4-9)$$

$$[\theta(\tau_3)]_{\tau_3=T_3} = \theta_f, \quad [\dot{\theta}(\tau_3)]_{\tau_3=0} = 0 \quad (4-10)$$

また，経路点における関節角速度及び関節角加速度の連続条件を次式のように定める．

$$[\dot{\theta}(t)]_{t=T_1} = [\dot{\theta}(\tau_2)]_{\tau_2=0} \quad (4-11)$$

$$[\ddot{\theta}(t)]_{t=T_1} = [\ddot{\theta}(\tau_2)]_{\tau_2=0} \quad (4-12)$$

$$[\dot{\theta}(\tau_2)]_{\tau_2=T_2} = [\dot{\theta}(\tau_3)]_{\tau_3=0} \quad (4-13)$$

$$[\ddot{\theta}(\tau_2)]_{\tau_2=T_2} = [\ddot{\theta}(\tau_3)]_{\tau_3=0} \quad (4-14)$$

各区間における境界条件式(4-7)-(4-10)，及び経路点における関節角速度及び関節角加速度の連続条件式(4-11)-(4-14)を三つの区間の，関節角の式(4-1)-(4-3)に代入すると，式(4-1)-(4-3)中の未定係数が次式のように導かれる．このとき，各関節空間における多項式で与えられた関節角度変位のモデル曲線について Fig.4.6 に示す．

$$a_{10} = \theta_{s1}, \quad a_{11} = 0, \quad a_{12} = \mu_1 - a_{13}T_1 \quad (4-15)$$

$$a_{13} = \mu_{10}, \quad a_{20} = \theta_{k1}, \quad a_{21} = 2a_{12}T_1 + 3a_{13}T_1^2 \quad (4-16)$$

$$a_{22} = a_{12} + 3a_{13}T_1 \quad (4-17)$$

$$a_{23} = (\theta_{k2} - \theta_{k1} - a_{21}T_2 - a_{22}T_2^2) / T_2^3 \quad (4-18)$$

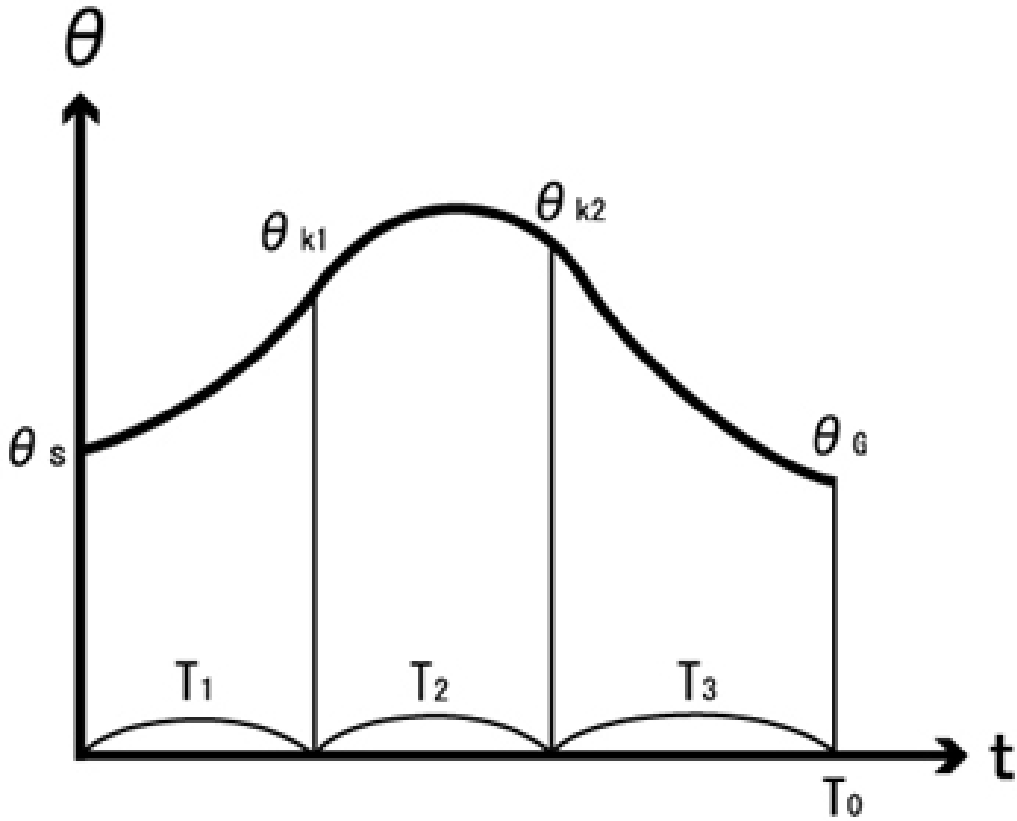


Fig.4.6 Trajectory pattern of joint angle

$$a_{30} = \theta_{k2}, \quad a_{31} = a_{21} + 2a_{22}T_2 + 3a_{23}T_2^2 \quad (4-19)$$

$$a_{32} = a_{22} + 3a_{23}T_2 \quad (4-20)$$

$$a_{33} = (\theta_f - \theta_{k2} - a_{31}T_3 - a_{32}T_3^2) / T_3^3 \quad (4-21)$$

ここに,

$$\mu_1 = (\theta_{k1} - \theta_s) / T_1^2 \quad (4-22)$$

$$\mu_2 = (\theta_{k2} - \theta_{k1} - \mu_1 T_2 (2T_1 + T_2)) / T_2^3 \quad (4-23)$$

$$\mu_3 = -T_1(T_1 + 2T_2) / T_2^2 \quad (4-24)$$

$$\mu_4 = 2\mu_1(T_1 + T_2) + 3\mu_2 T_2^2 \quad (4-25)$$

$$\mu_5 = T_1^2 + 4T_1 T_2 + 3\mu_3 T_2^2 \quad (4-26)$$

$$\mu_6 = \mu_1 + 3\mu_2 T_2, \quad \mu_7 = 2T_1 + 3\mu_3 T_2 \quad (4-27)$$

$$\mu_8 = (-\mu_4 - 2\mu_6 T_3) / 3T_3^2 \quad (4-28)$$

$$\mu_9 = (-\mu_5 - 2\mu_7 T_3) / 3T_3^2 \quad (4-29)$$

$$\mu_{10} = \frac{\theta_f - \theta_{k2} - \mu_4 T_3 - \mu_6 T_3^2 - \mu_8 T_3^3}{\mu_5 T_3 + \mu_7 T_3^2 + \mu_9 T_3^3} \quad (4-30)$$

式(4-11)-(4-14)で記述されている式(4-1)-(4-3)の関節角の多項式の係数は、各区間の所要時間  $T_1, T_2, T_3$  の関数であることがわかる。したがって、関節角  $\theta$  は、 $T_1, T_2, T_3$  を遺伝子とする染色体

$$\lambda = [T_1 \ T_2 \ T_3] \quad (4-31)$$

の関数として記述できることがわかる。すなわち、

$$\theta = \theta(t, \lambda), \quad \dot{\theta} = \dot{\theta}(t, \lambda), \quad \ddot{\theta} = \ddot{\theta}(t, \lambda) \quad (4-32)$$

本研究では、経路点と多項式を用いた軌道計画の基礎的な場合として、経路点が 2 個の場合を取り上げ、多項式の係数の理論式を導き、軌道を 3 個の遺伝子で記述している。本研究を、 $N$  個の経路点の場合に拡張することを想定すると、経路点が 1 個増加する毎に、新たな区間の多項式の係数が未定係数として 4 個増加する。すなわち、 $N$  個の経路点の場合、各区間の多項式の数が  $N+1$ 、未定係数が  $4N+4$ 、連立方程式の次元数も  $4N+4$  となる。したがって、 $4N+4$  元連立方程式の解、すなわち、 $4N+4$  個の未定係数を求めことにより、 $N+1$  個の各区間の所要時間を遺伝子とする染色体によって、軌道が定式化されることとなる。準最短時間軌道は、本研究と同様の適応度関数を適用した遺伝的アルゴリズムによる最適化手法を用いて得られることになる。なお、 $4N+4$  元連立方程式の解を求めるに際して、解の理論式を導くことは、かなり煩雑になることが予想されるので、消去法などの数値計算法を用いて解を求めることの方がより現実的な方法であると思われる。



## 4.3 経路点を用いた準最短時間軌道計画法

### 4.3.1 ロボットアームの運動方程式

電磁吸着物体に作用するモーメント  $\tau_M$  は, Fig.4.3 中の記号を用いると次式のように書くことができる.

$$\tau_M = -m_o r_G \ddot{r}_p \quad (4-33)$$

ここに,

$$\tau_M = \begin{bmatrix} \tau_{Mx} \\ \tau_{My} \end{bmatrix}, \quad r_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (4-34)$$

$$x_p = l_1 C_1 + l_2 C_{12}, \quad y_p = l_1 S_1 + l_2 S_{12} \quad (4-35)$$

$$C_1 = \cos \theta_1, \quad S_1 = \sin \theta_1 \quad (4-36)$$

$$C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2), \quad S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4-37)$$

であり,  $m_o$  は被電磁吸着物体の質量,  $r_G$  は被電磁吸着物体の吸着面から重心までの距離,  $l_1, l_2$  はリンクの長さである.

被電磁吸着物体に作用するモーメント  $\tau_M$  の絶対値  $abs(\tau_M)$  の最大許容値を  $\tau_{M \max}$  とおくと, 電磁吸着搬送を正常に行うための拘束条件は, 式(4-32)を考慮すると次式で記述できる.

$$abs\{\tau_M(t, \lambda)\} \leq \tau_{M \max} \quad (4-38)$$

次に, DC モータのトルクに関する拘束条件を求める. DC モータのトルクの最大許容値を  $\tau_{Ai \max} (i=1,2)$  とおくとともに, ロボットアームの逆動力学を用いると, DC モータのトルクに関する拘束条件は, 次式のように記述できる.

$$abs\{\tau_{Ai}(t, \lambda)\} \leq \tau_{Ai \max}, \quad i=1,2 \quad (4-39)$$

ここに,

$$\tau_A(t, \lambda) = \begin{bmatrix} \tau_{A1}(t, \lambda) \\ \tau_{A2}(t, \lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix}^{-1} \tau(t, \lambda) \quad (4-40)$$

$$\tau(t, \lambda) = J(\theta) \ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) \quad (4-41)$$

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (4-42)$$

$$h(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} h_1(\theta, \dot{\theta}) \\ h_2(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (4-43)$$

$$J_{11} = J_{c1} + J_{c2} + m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_2) \quad (4-44)$$

$$J_{12} = J_{21} = J_{c2} + m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1 l_{c2} C_2 \quad (4-45)$$

$$J_{22} = J_{c2} + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} C_2 \quad (4-46)$$

$$h_1(\theta, \dot{\theta}) = -m_2 l_1 l_{c2} S_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \quad (4-47)$$

$$h_2(\theta, \dot{\theta}) = m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{\theta}_1^2 \quad (4-48)$$

$$C_2 = \cos \theta_2, \quad S_2 = \sin \theta_2 \quad (4-49)$$

であり， $m_i$ ， $J_{ci}$ は各リンクの質量および重心回りの慣性モーメント， $l_{ci}$ は各関節中心と重心位置との距離， $J_{Ai}$ は各関節におけるモータの慣性モーメント， $\tau_i$ は関節トルク， $\tau_{Ai}$ はモータのトルクである．

### 4.3.2 遺伝的アルゴリズムを用いた準最短軌道計画法

本研究では，Fig.4.7に示されているように，遺伝的アルゴリズムの選択，交叉，突然変異の進化論的演算を用いた準最短時間軌道計画アルゴリズムを構築している．準最短時間軌道計画のための適応度関数 *fitness* は，電磁吸着搬送を正常に行うための拘束条件式(4-38)と DC モータのトルクの拘束条件式(4-39)を用いて次式のように定義されている．

$$fitness = \begin{cases} \exp(-0.1T_o), & \text{if } \forall t \forall i f_{L1} = true \\ 0, & \text{if } \exists t \exists i f_{L2} = true \end{cases} \quad (4-50)$$

ここに，

$$f_{L1} = f_{L1A} \wedge f_{L1B}, \quad f_{L2} = f_{L2A} \vee f_{L2B} \quad (4-51)$$

$$f_{L1A} = \text{abs}\{\tau_M(t)\} \leq \tau_{M \max} \quad (4-52)$$

$$f_{L1B} = \text{abs}\{\tau_{Ai}(t)\} \leq \tau_{Ai \max} \quad (4-53)$$

$$f_{L2A} = \text{abs}\{\tau_M(t)\} > \tau_{M \max} \quad (4-54)$$

$$f_{L2B} = \text{abs}\{\tau_{Ai}(t)\} > \tau_{Ai \max} \quad (4-55)$$

$$t = [0 \quad T_o], \quad i = (1, 2) \quad (4-56)$$

である．電磁吸着搬送が正常に行われ，かつ，DC モータのトルクが許容値内である場合，論理式  $f_{L1}$  は真となり，式(4-50)の適応度関数 *fitness* は，ロボットアームの動作時間  $T_o$  が小さくなるほど大きくなる．また，電磁吸着搬送が正常に行われない場合，または，DC モータのトルクが許容値を超える場合においては，論理式  $f_{L2}$  が真となり，式(4-50)の適応度関数 *fitness* は零となる．

本研究で提案した軌道計画法では，軌道を 3 次の多項式で記述し，境界条件や連続条件などを用いて多項式の未定係数を理論的に求めるとともに，電磁吸着搬送を正常に行うための拘束条件と DC モータのトルクの拘束条件とが満た

される場合の最短時間軌道を，遺伝的アルゴリズムに基づく最適化手法を用いて求めている．したがって，軌道の定式化において拘束が与えられており，本研究で提案した最短時間軌道とポントリヤーチンの最大原理などを用いた最短時間軌道とは異なっていることが考えられる．しかしながら，軌道の定式化における拘束のもとでの最短時間軌道を求めていることから，本研究で提案した軌道計画法を準最短時間軌道計画法と呼ぶことにしている．

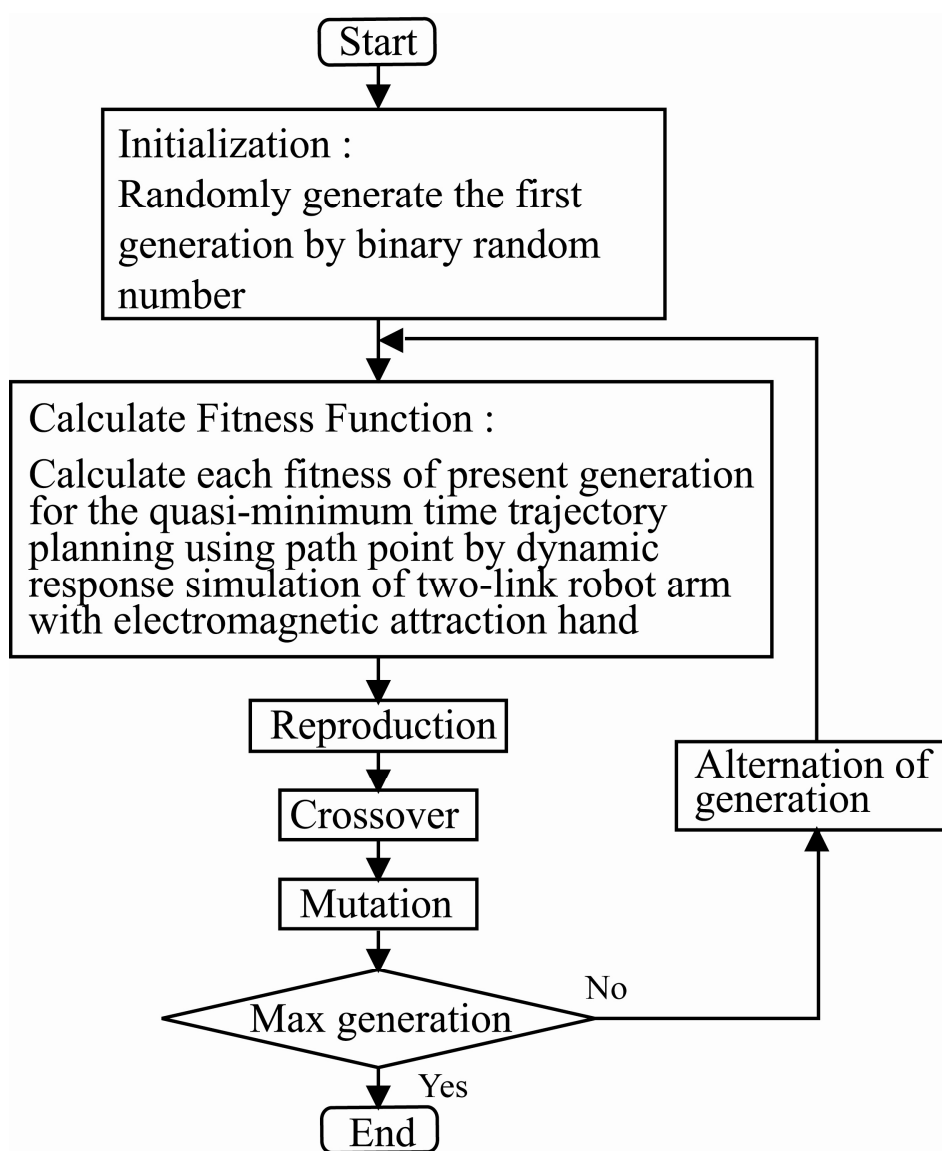


Fig.4.7 Flowchart of trajectory planning by genetic algorithm

## 4.4 数値計算結果及び実験結果

本研究で試作した電磁吸着搬送 2 関節ロボットアームの諸元を Table 4.1 に示す。本実験では関節角追従制御則として PD 制御を用いており、Table 4.1 中の  $K_{p_i}$ ,  $K_{D_i}$  は PD 制御フィードバック係数を表している。なお、このフィードバック制御係数は実験的チューニングを行い定めている。Table 4.2 は、電磁吸着搬送性能の実験結果を示したものであり、表の success は後述の Fig.4.14 に示されているように電磁吸着搬送に成功した場合、failure は、Fig.4.8 に示されているように、物体が正常に吸着されなくなり、滑りが生じ、さらには、落下する場合をそれぞれ示している。この電磁吸着搬送性能の実験結果に余裕を考慮し、被電磁吸着物体に作用するモーメントの最大許容値を次式のように設定した。

$$\tau_{M \max} = 0.570 \times 10^{-3} \text{ [Nm]}$$

また、定格トルクを用いた DC モータに関する拘束条件は次のとおりである。

$$\tau_{A1 \max} = 0.064 \text{ [Nm]}$$

$$\tau_{A2 \max} = 0.032 \text{ [Nm]}$$

Table 4.1 Main dimensions of robot structure and control system

$l_1 = 160.0 \text{ mm}$	$J_{c1} = 2.440 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
$l_2 = 120.0 \text{ mm}$	$J_{c2} = 0.361 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$
$l_{c1} = 118.4 \text{ mm}$	$r_G = 28.0 \text{ mm}$
$l_{c2} = 80.3 \text{ mm}$	$K_{p1} = 29.7 \text{ Nm}$
$m_1 = 0.547 \text{ kg}$	$K_{p2} = 5.5 \text{ Nm}$
$m_2 = 0.146 \text{ kg}$	$K_{D1} = 104.0 \text{ Nm/s}$
$m_o = 0.030 \text{ kg}$	$K_{D2} = 19.3 \text{ Nm/s}$
$J_{A1} = 0.031 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$	$N_1 = 100$
$J_{A2} = 0.012 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$	$N_2 = 100$

Table 4.2 Performance of electromagnetic attraction Transfer

$Max\{abs(\tau_M)\}$	$S$
$0.991 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	failure
$0.843 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	failure
$0.727 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	failure
$0.633 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	success
$0.557 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	success
$0.497 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	success

Table 4.3 Main dimensions of genetic algorithm

Number of individual	50
Length of chromosome (bit)	36
Number of gene (bit)	12
Crossover ratio	0.5
Mutation ratio	0.05
Maximum of generation	10000

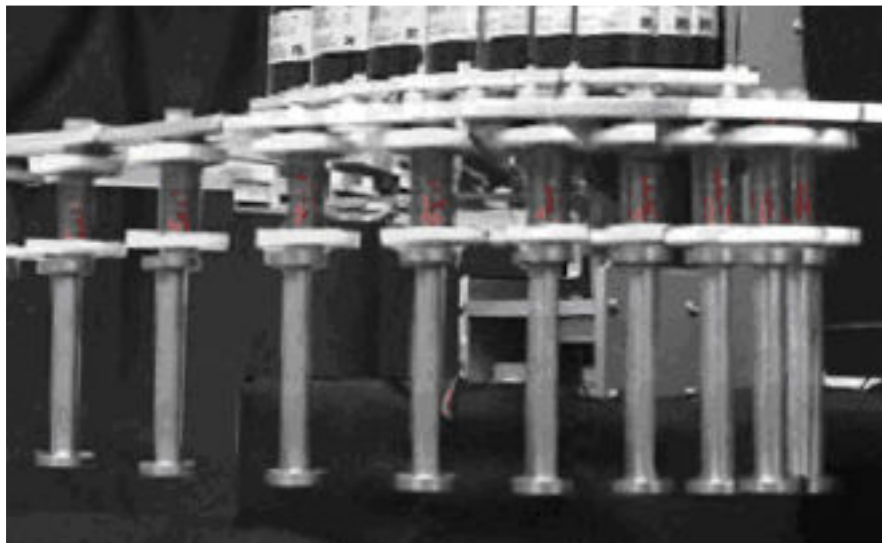


Fig.4.8 Trajectory of robot arm end in case of unsuccessful electromagnetic attraction transfer

Table 4.3 は、準最短時間軌道計画の数値計算に用いた遺伝的アルゴリズムの進化論的演算（選択，交叉，突然変異）に関するパラメータ（個体数，染色体の長さ，遺伝子の数，交叉率，突然変異率，最大世代数）を示したものである。ロボットアームの初期位置，経由点  $k_1, k_2$ ，終期位置の座標は，ロボットアーム先端の軌道をデジタルビデオカメラで良好に撮影したいという観点から，それぞれ以下のような値とした。

$$\begin{aligned}x_s &= 17.0 \text{ cm}, \quad y_s = 20.0 \text{ cm} \\x_{k_1} &= 8.0 \text{ cm}, \quad y_{k_1} = 16.0 \text{ cm} \\x_{k_2} &= -10.0 \text{ cm}, \quad y_{k_2} = 12.0 \text{ cm} \\x_f &= -18.0 \text{ cm}, \quad y_f = 10.0 \text{ cm}\end{aligned}$$

これらの  $x-y$  平面におけるアーム先端の座標とロボットアームの位置の逆運動学を用いて，関節空間の  $\theta_s, \theta_{k_1}, \theta_{k_2}, \theta_f$  の値を求めている。

本研究では準最短時間軌道計画における数値計算において，各遺伝子の探索範囲を以下のように定めた。

$$0.5s \leq T_i \leq 3.0s, \quad i=1, 2, 3$$

Fig.4.9 は，遺伝的アルゴリズムを用いた準最短時間軌道計画の数値計算結果を示したものであり，適応度関数は世代数の増加につれて，大きくなるとともに，6000 世代で一定となっている。Fig.4.10 は，6000 世代に対応する被電磁吸着物体に作用するモーメントの動的応答の数値計算結果を示したものである。図より，被把持吸着物体に作用するモーメントの動的応答は，破線で示されたモーメントの最大許容値  $\tau_{M \max}$  に接しており，この場合の軌道より短時間の軌道は有り得ないことがわかる。したがって，6000 世代の染色体は準最適染色体  $\lambda_{q-opt}$  であることがわかる。

一方，Fig.4.11 は，準最適染色体  $\lambda_{q-opt}$  に対応する DC モータのトルクの動的応答を示したものであり，二つの DC モータは，破線で示されるトルクの最大許容値の範囲内で運転されていることがわかる。本数値計算では，被把持吸着物体に作用するモーメントに関する拘束条件により，準最短時間軌道が得られたが，DC モータのトルクの最大許容値が，被電磁吸着物体に作用するモーメントの最大許容値に比べ，より小さい場合においては，準最短時間軌道は DC モータのトルクの最大許容値により定まることとなる。

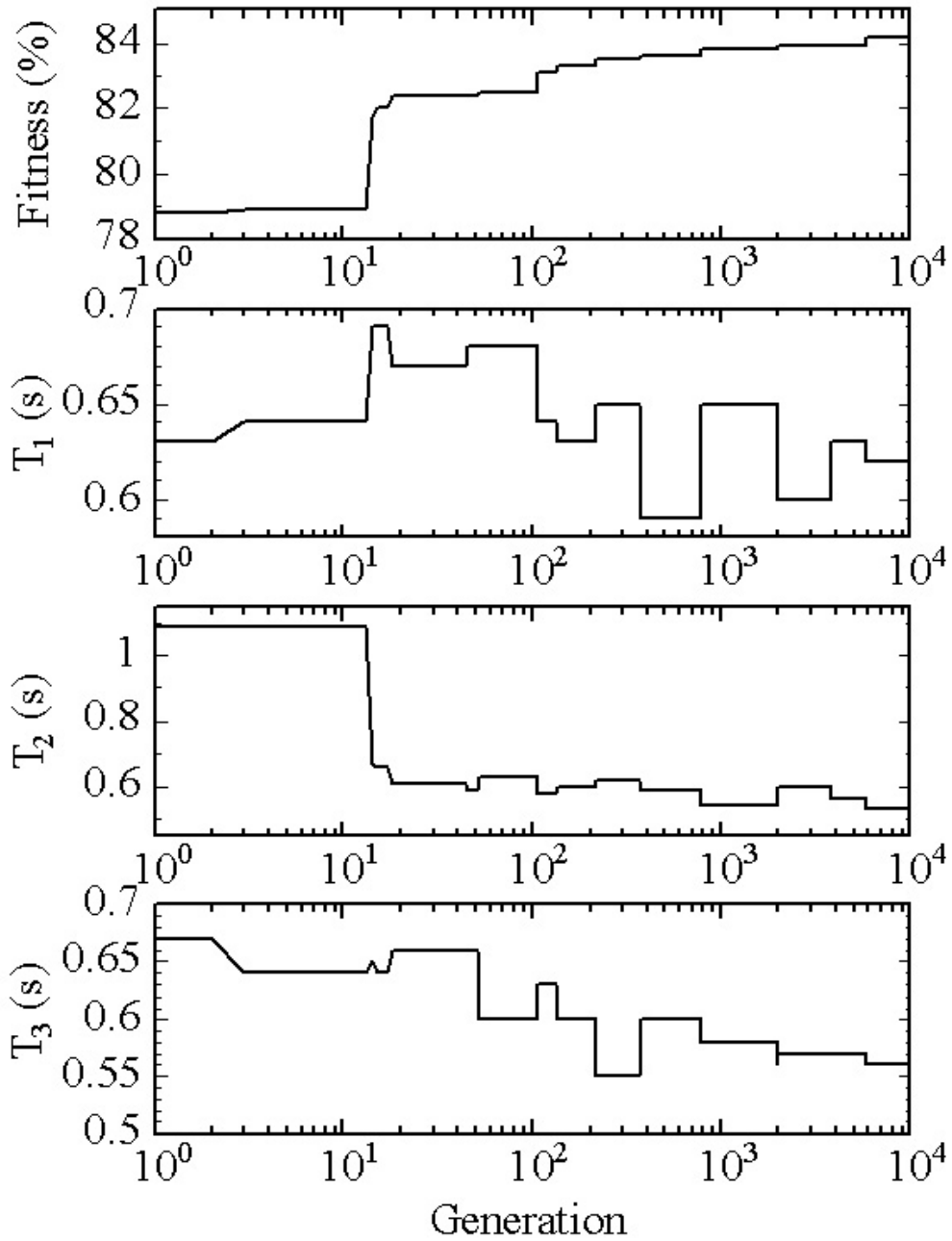


Fig.4.9 Numerical calculation results of trajectory planning by use of genetic algorithm

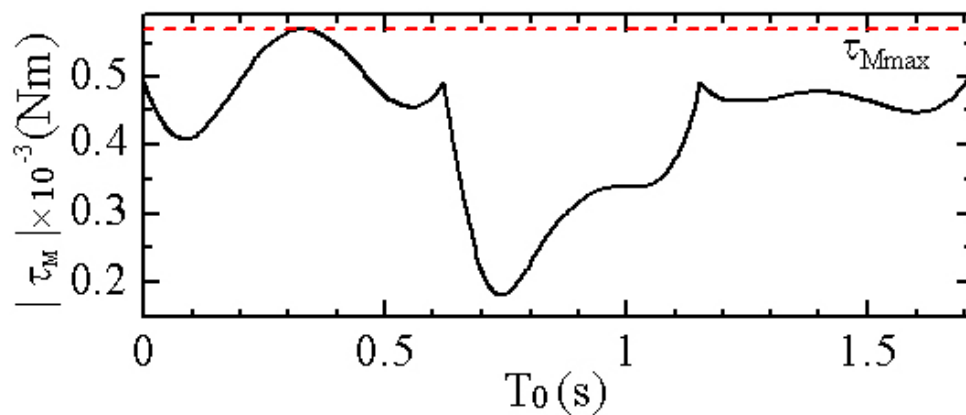


Fig.4.10 Numerical calculation results of dynamic responses of moment  $\tau_M$  with  $\lambda_{q-opt}$

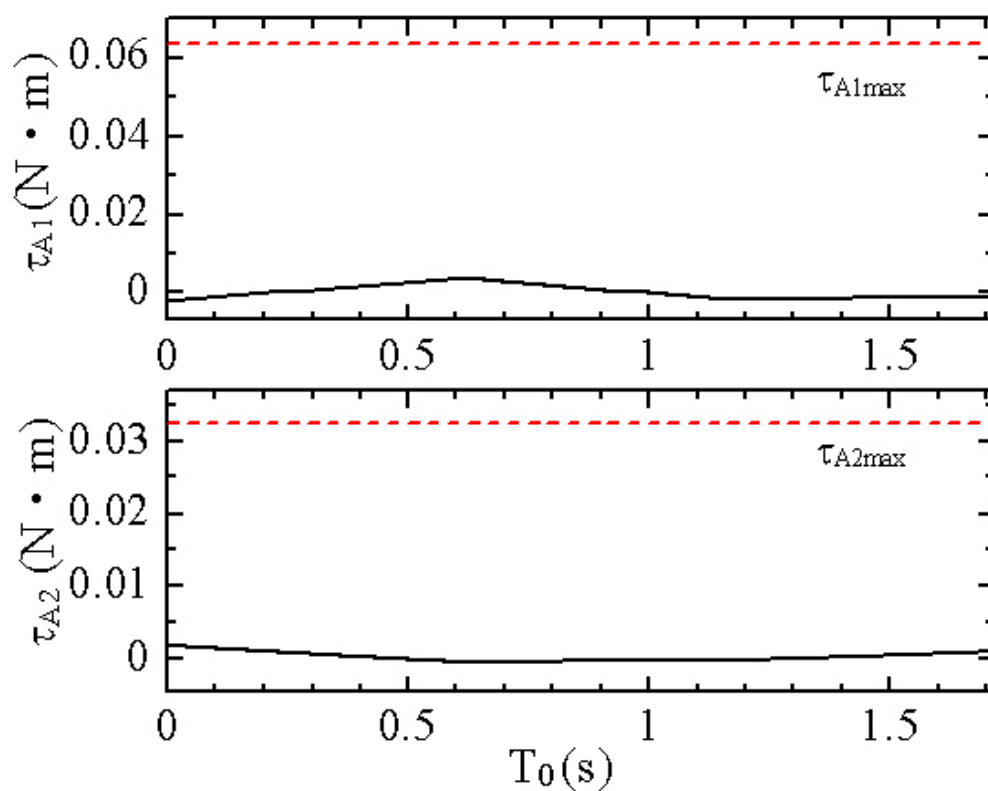


Fig.4.11 Numerical calculation results of dynamic responses of motor torques with  $\lambda_{q-opt}$



また，以上の結果から準最適染色体  $\lambda_{q-opt}$  は，次のような値となった．

$$\lambda_{q-opt}^1 = [T_{1opt} \quad T_{2opt} \quad T_{3opt}]^T = [0.622 \quad 0.532 \quad 0.562]^T (s)$$

この準最適染色体  $\lambda_{q-opt}^1$  に対するロボットアームの動作時間は， $T_o = 1.716 s$  となる．

Fig.4.12 は，準最適染色体  $\lambda_{q-opt}$  に対応する関節角目標値を用いた関節角軌道追従制御の実験結果を示したものであり，精度の良い関節角軌道追従制御が実現されていることがわかる．したがって，準最短時間軌道を用いた電磁吸着搬送が良好に実現し得ることが実験的に確かめられたものと言える．Fig.4.13 は，準最短時間軌道の軌跡の数値計算結果を示したものであり，経由点と遺伝的アルゴリズムを用いた準最短時間軌道計画が良好に実現されていることを示している．Fig.4.14 は，実験により得られた軌跡を示したものであり，磁性物体は電磁吸着ハンドによって正常に把持されており，電磁吸着搬送制御の実験が良好に実現されていることが視覚的に理解できる．

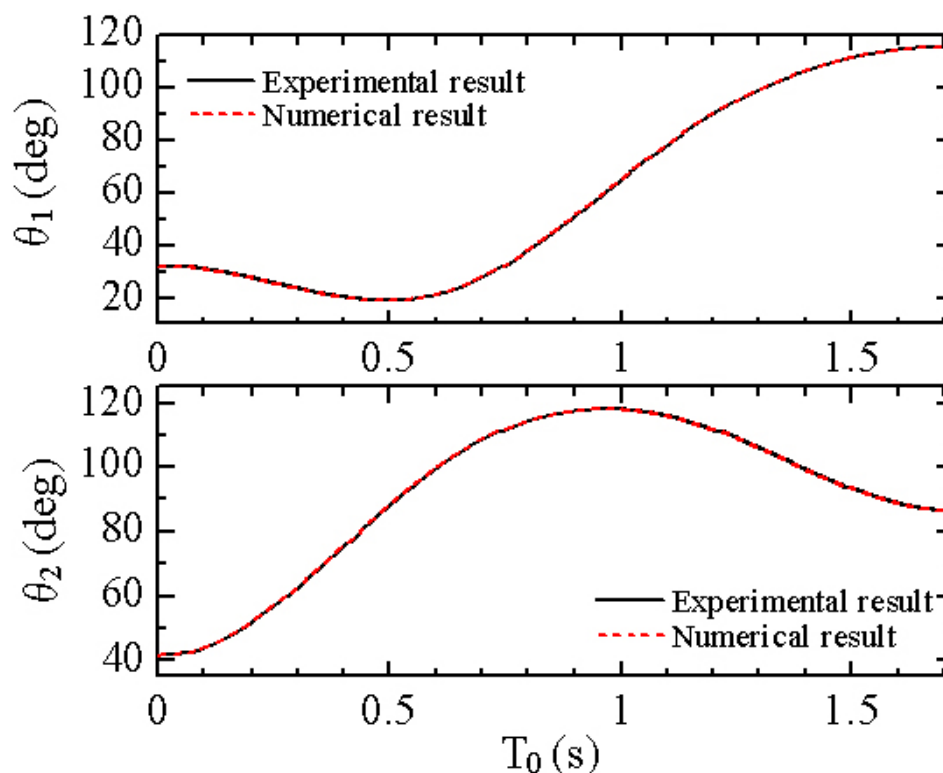


Fig.4.12 Experimental results of joint angles with  $\lambda_{q-opt}$

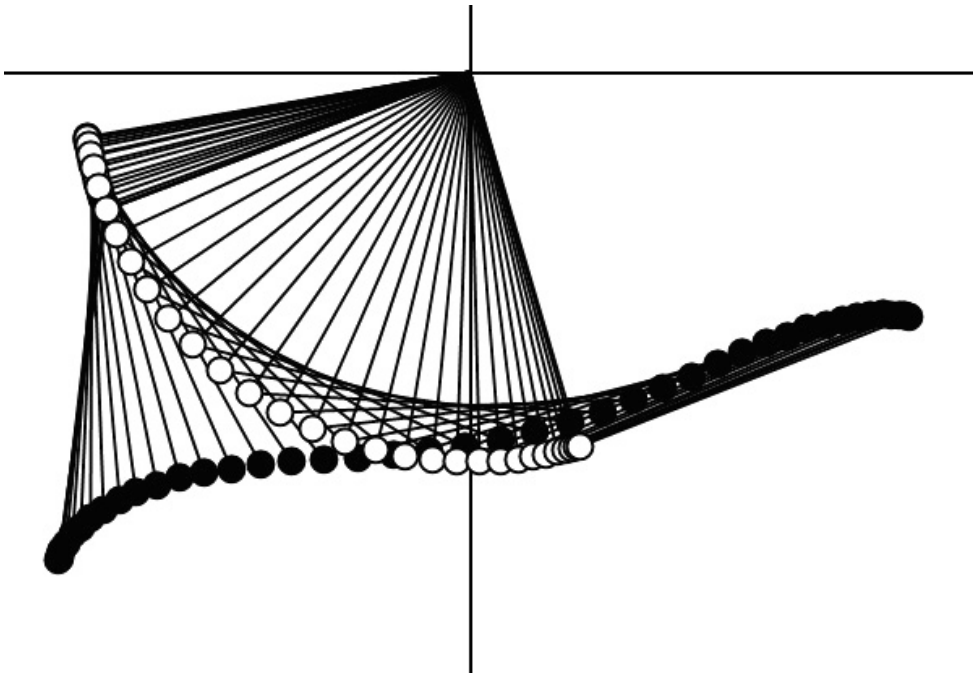


Fig.4.13 Numerical calculation results of loci of electromagnetic attraction transfer with  $\lambda_{q-opt}$

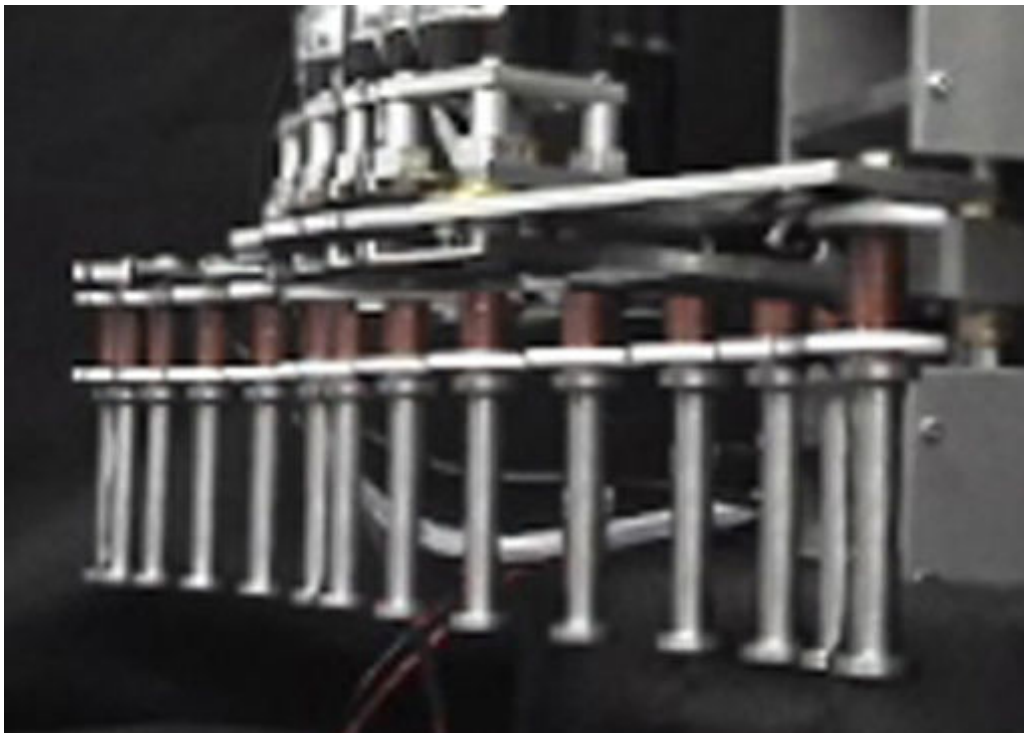


Fig.4.14 Experimental results of loci of electromagnetic attraction transfer with digital video camera with  $\lambda_{q-opt}$

## 4.5 結 言

本研究は、経路点と遺伝的アルゴリズムを用いた電磁吸着搬送2関節ロボットアームの準最短時間軌道計画法を提案するとともに、数値計算と実験を行い、本準最短時間軌道計画法の有用性を検証したものである。得られた内容を要約すると以下のとおりとなる。

- (1) 初期位置、2個の経路点、終期位置に関する境界条件、関節角速度と関節角加速度の連続条件を考慮するとともに、多項式を用いて軌道の定式化を行った。この軌道は、3つの時間区間の所要時間を遺伝子とする染色体の関数として記述されている。
- (2) 電磁吸着性能およびDCモータのトルクに関する拘束条件を用いることにより、準最短時間軌道計画のための適応度関数を定義し、遺伝的アルゴリズムを用いた準最短時間軌道計画法を構築した。
- (3) 数値計算を行ったところ、世代数の増加とともに、適応度関数が大きくなり、電磁吸着性能を最大限に利用した準最短時間軌道が得られることが確かめられ、本準最短時間軌道計画法の有用性が確かめられた。
- (4) 本研究で試作した電磁吸着搬送2関節ロボットアームを用いて、準最短時間軌道を目標軌道とする関節角追従制御の実験を行ったところ、精度のよい目標値軌道追従制御の性能が得られ、準最短時間軌道による電磁吸着搬送が良好に実現し得ることが確かめられた。

本研究は、2個の経路点と遺伝的アルゴリズムを用いた電磁吸着搬送2関節ロボットアームの準最短時間軌道計画法を提案しており、経路点間において、関節空間における補間式を用いている。このため、障害物回避を想定すると、経路点間で、生成された軌道が障害物と衝突する可能性があり、経路点を変更するような繰り返し計算が必要となる場合があるように思われる。これは、経路点の数を大きくすることにより解決される可能性があるように思われる。また、このような問題を解決するような新たな軌道計画法を構築することが、さらなる研究発展につながると考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) Bobrow, J. E., et al., Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.4, No.3 1985, pp. 3-17.
- (2) Croft, E.A., et al., Near-time optimal robot motion planning for on-line applications, *Journal of Robotic Systems*, Vol.12, No.8 1995, pp. 553-567.
- (3) Kim, B. and Shin, K., Minimum-time path planning for robot arms and their dynamics, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-15, No.2 1985, pp. 213-223.
- (4) Sahar, G. and Hollerbach, J., Planning of minimum-time trajectories for robot arms, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.5, No.3 1986, pp. 90-100.
- (5) Izumi, T., Path planning for saving energy of a manipulator in PTP motions, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.18, No.7 2000, pp. 972-978.
- (6) Izumi, T., Trajectory planning for saving energy of 3-link manipulator, *The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol.120-C, No.5 2000, pp. 656-661.
- (7) Lin, C. et al., Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.AC-28, No.12 1983, pp. 1066-1074.
- (8) Tondu, B. and Bazaz, S., The three-cubic method: an optimal online robot joint trajectory generator under velocity, acceleration, and wandering constraints, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.18, No.9 1999, pp. 893-901.
- (9) Shintaku, E., Minimum energy trajectory for an underwater manipulator and its simple planning method by using a genetic algorithm, *Advanced Robotics*, Vol.13, No.2 1999, pp. 115-138.
- (10) Tian, L. and Collins, C., An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm, *Mechatronics*, Vol.14 2004, pp. 455-470.
- (11) Kojima, H. and Kibe, T., Residual vibration reduction control of a two-link flexible robot arm using optimal trajectory planning based on genetic algorithm, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.19, No.7 2001, pp. 905-912.

- (12) Kojima, H. et al., Trajectory planning of semiconductor wafer transfer robot arm driven by stepping motors using genetic algorithm and experiments, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.5 2007, pp. 102-110.
- (13) Higuchi, T. et al., Development of magnetically supported intelligent hand for automated precision assembly, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.7, No.2 1989, pp. 136-144.
- (14) Kojima, H. et al., Study on Non-Contact Hold and Transfer Control of Spherical Magnetic Body by Magnetic Robot Hand with Prototype Gap Sensor System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.14, No.6 1996 pp. 868-874
- (15) Kojima, H. et al., Non-contact hold and transfer control with a magnetic robot hand attached to a mobile robot., *Journal of the Japan Society of Applied Elcteromagnetism*, Vol.8, No.3 (2000), pp. 386-394.
- (16) Mutsuura, Y. et al., Quasi-minimum time trajectory planning method of robot arm with electromagnetic attraction hand using genetic algorithm and experiments, *International Journal of Automation Technology*, Vol.3, No.1 2009, pp. 99-106.

## 第 5 章

### 結 論

## 5.1 本論の成果

本論文は、電磁吸着ハンドを有するロボットアームの電磁吸着搬送制御の軌道計画問題について、最適化法の一つである遺伝的アルゴリズム法を用いて準最短時間軌道計画法を構築することを目的としており、ロボットアームと電磁吸着ハンドの設計・試作、ロボットアーム軌道の定式化、電磁吸着ハンドの特性調査、ロボットアームを動作させるための関節角軌道追従制御の構築、準最短時間軌道アルゴリズムの構築とその数値計算、検証のために、水平ロボットアームにおける電磁吸着搬送実験を行った。各章ごとでまとめとして結言を述べているが、本章ではこれらの結果を再確認して要約する。本論において得られた結論は以下のようになる。

第2章では電磁吸着ハンドを有する3関節水平ロボットアームの電磁吸着搬送制御の問題について、ロボットアーム先端に直線軌道を与えた軌道計画について取り組んでおり、3関節でロボットアーム先端の姿勢を一定としたことで、直線軌道が視覚的に認識しやすいよう構成している。直線軌道では、位置、速度、加速度の境界条件を用いて、ロボットアーム先端速度について、加速区間、等速区間、減速区間の3区間を設け、加速区間と減速区間に3次多項式で定式化を行っている。

次いで、電磁吸着搬送において、直線軌道の準最短時間軌道計画法に2つの拘束条件を組み込むことを考案した。これは磁性搬送体の滑落状態を防ぎ、正常に搬送を行わせる目的と、使用するDCモータの特性を活用しやすくする目的を持っている。まず、試作した電磁吸着ハンドの電磁吸着特性を実験的に調べ、準最短時間軌道計画法の電磁吸着特性に関する拘束条件として定めた。

そして、モータ特性を効率的に活用するため、第2章ではDCモータにおける拘束条件を、モータ特性として定められている最大トルクの値以下で駆動させることと定義した。同時に、数値計算においてDCモータトルクを求めるための運動方程式をロボットアームのモデルから求めている。第2章では、以上の拘束条件を用いて3関節ロボットアームの直線軌道を用いた電磁吸着搬送の準最短時間法を遺伝的アルゴリズムで構築している。

遺伝的アルゴリズムで準最短時間を導くため、探索対象としたパラメータは、軌道区間における加速区間、等速区間、減速区間のそれぞれの区間動作時間とした。またこのアルゴリズム内では、準最短時間動作に近づくための指標として適応度関数が定義されており、数値計算で求まる適応度が上昇するにつれて総動作時間が短縮されるものとなっている。ここで遺伝的アルゴリズムの計算

は 10000 世代まで行われており、計算結果から世代数の増加とともに、適応度も上昇していく傾向が確認された。さらに 5000 世代以降、適応度が一定値となることが確認され、この結果から準最短時間電磁吸着搬送の数値計算と実験においては、この 5000 世代以降の探索結果である染色体  $\lambda_{q-min}$  から、最適化された遺伝子である各区間時間を使用することとした。このとき、得られた数値計算結果による総動作時間は 3.69(s)であった。この  $\lambda_{q-min}$  を用いて各拘束条件の数値計算を行ったところ、電磁吸着性能および DC モータのトルクに関する拘束条件を満足することが確認された。加えて電磁吸着特性の拘束条件である磁性搬送体に作用するモーメントがその最大許容値に接することが確認されており、拘束条件を最大限に利用しつつ、搬送時間も短縮された準最短時間軌道が得られることが確かめられた。また、同時に、構築した準最短時間軌道計画法では拘束条件における数値計算結果によりアクチュエータや電磁吸着に関する特性を次世代機に反映させることが可能で軌道も含めた設定条件に見合った電磁吸着搬送ロボットアームの設計ができることもいえる。

また電磁吸着搬送実験では、 $\lambda_{q-min}$  を用いて数値計算にて求めた各関節角度変位を目標値とし、PID 制御によって構築した関節角軌道追従制御により実験を行ったところ、精度のよい目標値軌道追従制御の性能が得られ、目標値と実験値がよく一致したことが確かめられた。以上のことにより準最短時間での直線軌道電磁吸着搬送についてこの軌道計画法の有用性が確かめられた。

第 3 章では、2 関節水平ロボットアームの PTP (point-to-point) 制御による電磁吸着搬送の準最短時間軌道計画法について取り上げて提案した。第 2 章と同様に、実験機として使用する 2 関節水平ロボットアームと電磁吸着ハンドの設計・試作を行っている。第 3 章では、初期位置と終期位置のみをあらかじめ定めており、ロボットアームの各関節角速度について、境界条件と連続条件を考慮して台形状速度曲線を与えた軌道として PTP で駆動させている。

軌道計画では、角速度にそれぞれの関節で総動作時間は同じであるが、加速区間時間が異なる軌道を与えており、この 1 関節と 2 関節の加速区間時間と 1 関節の最大関節角速度を、第 3 章では準最短時間軌道計画のために構築する遺伝的アルゴリズムのパラメータとして定義した。また、試作した電磁吸着ハンドの電磁吸着特性について、その許容値について定義して拘束条件としてアルゴリズムに組み込んでいる。さらに、使用する DC モータトルクの許容値を定格トルク以下と定め、これも拘束条件としてアルゴリズム内に組み込んでいる。

以上のような構成で遺伝的アルゴリズムを用いて数値計算を行った結果、4000 世代後に一定となり、このときの遺伝子としたパラメータから総動作時間を求めると 2.382(s)となった。この結果を基に生成された軌道において、各拘束



条件を数値計算で求めたところ、得られた結果は、DC モータトルク、磁性搬送体に作用するモーメント共に許容値の範囲内で動作されていることが確認された。さらにモーメントの結果では、その動的応答が最大許容値に接触することが確認されており、条件を有効に活かしつつ時間が短縮された軌道が生成されていることが確認された。加えて、第 3 章の数値計算結果では、このモーメントの拘束条件が搬送時間が決定される大きな要因であるといえ、このシステム系に関しては、例えば、電磁吸着特性を強めることで、さらなる搬送時間の短縮が見込めるなど、軌道システムの見直しが考案できる。

また、生成された軌道に対するロボットアームの関節角度変位の計算結果を用いて、PD 制御で構築した関節角軌道追従制御で、電磁吸着搬送制御実験を行ったところ、目標値に実測値が追従する形で精度のよい結果を得ることができた。さらに搬送制御実験によって PTP 動作での電磁吸着搬送が正常に行われたことが確認できた。

第 4 章では電磁吸着ハンドを有する 2 関節水平ロボットアームの電磁吸着搬送制御についてロボットアーム軌道に 2 つの経由点を与えた軌道計画法を取り上げており、初期位置、終期位置、2 つの経由点の 4 つの位置の間にある 3 区間を関節角変位について 3 次多項式でつなげる軌道計画法を提案している。第 4 章では、経由点数が 2 個という基礎的な場合を取り上げているが、3 次多項式で区間の関節補間を行う理由としては、経由点が 1 つ増加した場合について考えると、境界条件と連続条件の数は、増加のたび 4 つ増えることとなり、これは未定係数を考慮すると、3 次多項式の未定係数の数と合致する。すなわち経由点を  $N$  個与えた場合の  $N+1$  区間を全て 3 次多項式で補間できるといえる。第 4 章では 3 区間についてこのような軌道の定式化を行うとともに、準最短時間軌道計画法として遺伝的アルゴリズム内に組み込む遺伝子をこの 3 区間の区間時間としている。またこの準最短時間軌道計画アルゴリズムに対して、電磁吸着ハンドの特性から得たモーメントの許容値と、駆動する DC モータトルクを定格トルク以下で駆動させることの 2 つの条件を拘束条件として数値計算を行った。

アルゴリズム内では、定義した適応度関数に従って数値計算が行われ、前章と同様に 10000 世代までの計算が行われた。計算結果からは、世代数の上昇と共に適応度の増加も見られ、パラメータが最適化されていくことが確認された。また計算結果では、6000 世代以降、適応度が一定値となることも確かめられた。この結果から準最短時間電磁吸着搬送の数値計算と実験においては、この 6000 世代以降の探索結果であるパラメータを用いて行うこととした。この結果による総動作時間は 1.716(s)であった。この値を基に生成された軌道によって、拘束条件の計算を行ったところ、本論で定めた 2 つの拘束条件をともに満たすこと

が確かめられた。さらに、生成された軌道から得た各関節角度変位を目標値として、第 3 章と同様の関節角軌道追従制御により電磁吸着搬送制御実験を行った結果、目標値によく一致した関節角度変位の実験結果が確かめられた。また電磁吸着搬送が正常に行われたことも確かめられた。以上の結果から第 4 章の経路点を用いた電磁吸着搬送ロボットアームの準最短時間軌道計画法について、その有用性が検証された。

## 5.2 今後の課題

以上のことから本論における提案により、使用するモータの特性を有効に活用し、かつ搬送対象となる磁性体に作用するモーメントを考慮する電磁吸着搬送が正常に行える軌道計画法の有用性が確認され、その搬送時間を準最短とした時間でのロボットアームの運転も可能になった。

しかし、第 4 章で提案した軌道計画法では、2 個の経路点と遺伝的アルゴリズムを用いた電磁吸着搬送 2 関節ロボットアームの準最短時間軌道計画法を提案しており、経路点間において、関節空間における補間式を用いている。このため、障害物回避を想定すると、経路点間で、生成された軌道が障害物と衝突する可能性があり、経路点を変更するような繰り返し計算が必要となる場合があるように思われる。これは、経路点の数を大きくすることにより解決される可能性があるように思われる。

現在、電磁吸着ハンドを用いたロボットアームは数多く使用されており、磁性搬送体の滑落問題と使用するアクチュエータの性能を考慮している本論の準最短時間軌道計画法は、生産性向上の観点から有用性のある提案と思われる。今後、垂直方向の動作も加えたロボットアームの姿勢問題や、磁性搬送体の多重吸着問題などを視野に入れることでさらなる発展が見込めることが予想され、現在提案した水平ロボットアームに関する電磁吸着搬送の準最短時間軌道計画法の適用幅は広がっていくと考えられる。

# 謝 辞

終わりに臨み、本研究を進めるにあたり、終始懇切丁寧な御指導ならびに御鞭撻を賜りました指導教官、群馬大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻 メカトロニクス工学講座第二研究室 小島 宏行 教授に深甚なる感謝の意を表します。

また、本論の作成にあたり、有益なるご助言と御討論を賜り、多大なるご協力を頂いた、群馬大学大学院工学研究科 機械システム工学専攻 永井 健一 教授、山田 功 教授、安藤 嘉則 准教授、松井 利一 准教授、松浦 勉 准教授、村上 岩範 助教、小林 敏雄 技官に、厚く御礼を申し上げます。

さらに、メカトロニクス工学講座第二研究室所属、大学院博士前期課程 2 年生の 井上 祐輔 氏、神山 綾乃 氏、松田 淳 氏、王 樹春 氏、および同研究室 学部 4 年生 市川 悟志 氏、大賀 晃典 氏、小野寺 健太 氏、特に共同研究者である 同研究室 大学院博士前期課程 2 年生 Doan Hai Doan 氏、学部 4 年生 長谷川 広樹 氏、さらに竹内 裕一 氏、斉藤 弘樹 氏、西川 仁寿 氏には多大なる御協力をいただきました。皆様に心から感謝いたします。

## 関連論文

### 発表論文

- [1] Y. Mutsuura, H. Kojima, Y. Takeuchi, H. Saitou, Quasi-Minimum Time Trajectory Planning Method of Robot Arm with Electromagnetic Attraction Hand Using Genetic Algorithm and Experiments, *International Journal of Automation Technology*, Vol.3, No.1 2009, pp.99-106.
- [2] 小島宏行, 陸浦優輔, 竹内裕一, 経由点と遺伝的アルゴリズムを用いた電磁吸着搬送 2 関節ロボットアームの準最短時間軌道計画と実験, 日本機械学会論文集(C 編), 75-755, (2009), pp.2020-2027.

### 参考論文

- [1] 村上岩範, 陸浦優輔, 須藤真行, 高温超電導浮上磁気勾配駆動モータの制振, 日本 AEM 学会誌, Vol.14, No.4, (2006), pp.400-405.

### 研究発表

- [1] 陸浦優輔, 小島宏行, 竹内裕一, 斉藤弘樹, 電磁吸着ハンドを有する 3 関節ロボットアームの効率的軌道計画法と電磁吸着搬送制御の実験, ブロック合同講演会-2008 おやま- 講演論文集, (2008), pp.123-124.
- [2] Y. Mutsuura, H. Kojima, M. Nishikawa, Quasi-Minimum Time Trajectory Planning of Electromagnetic Attraction Transfer Robot Arm Using PTP Motions, *The 14<sup>th</sup> International Symposium on Applied Electromagnetic and Mechanics*, (September 20-24, 2009), Xi'an China, pp.563-564.