

発見的手法を用いた多自由度マニピュレータの軌道決定 (鋼板搬送用マニピュレータの動的トルク抑制の実現)

林 道大^{*1}, 立矢 宏^{*2}, 浅川直紀^{*2}

Determination of Trajectory for a Multi-DOF Manipulator by Heuristic Algorithms (Implementation Approach for the Suppression of Dynamic Torque of a Steel Sheet Handling Manipulator)

Michihiro HAYASHI^{*3}, Hiroshi TACHIYA and Naoki ASAKAWA

^{*3} Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa city, Ishikawa Pref., 920-1192 Japan

This paper proposes a method to determine a trajectory with suppressed dynamic torque for a multi-DOF manipulator by a heuristic algorithm. Generally, optimization for a trajectory considering dynamic property of a multi-DOF manipulator is difficult since it has nonlinear and multi-peak characteristics. Although a lot of studies proposed the methods to optimize its trajectory, they often need complicated operation and calculation. Those methods are not always adapted to actual multi-DOF manipulators. Thus, a practical method using a heuristic algorithm that does not need complicated mathematical calculations is presented. In this paper, we aim to suppress required torques of the input joints of a manipulator in the solution. As a case study, we apply the method to an actual steel sheet handling manipulator over 1500kg in weighs with 5-DOF. From the experimental result, it is found to be effective to determine the trajectory with suppressed torques of the input joints for the manipulator maintaining the required working conditions.

Key Words : Manipulator, Trajectory, Dynamic Torque, Heuristic Algorithm

1. 緒言

工業用マニピュレータには高速化とともに環境に配慮した省力化が求められている。しかし、大型マニピュレータなどでは、高速化に伴い慣性力の影響で駆動力が増大し、その結果、大容量のアクチュエータが必要となり消費電力も増加する。そこで、多軸機構であるマニピュレータの力学特性が、その動作により大きく変化する⁽¹⁾⁽²⁾ことを利用し、トルク、消費エネルギーなどを軽減させるマニピュレータの位置、姿勢の時間に対する変化、すなわち、軌道の生成法が従来より多数検討されている⁽³⁾⁻⁽¹¹⁾。

一般にマニピュレータの運動方程式は非線形であり、トルクなどを最小化する軌道を解析的に得ることは困難である。そこで、マニピュレータにバランスを取り付け重力による影響を無くすと同時に、動作を制限してコリオリ力など非線形力の影響を無くし運動方程式を線形化して最適な軌道を求める手法⁽³⁾が検討されている。しかし、マニピュレータの入力軸数が増加した場合、バランスの機構が複雑になる⁽⁴⁾とともに、

非線形力の影響をなくすための動作制限も厳しくなる。

これに対し、マニピュレータの機構および動作に厳しい制限を付加せず、最適な軌道を2点境界値問題として求める方法が検討されている⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。しかし、同問題を解くためには、マニピュレータの状態方程式を求め、複雑な偏導関数の演算が必要⁽⁵⁾であり容易でない。マニピュレータの動作を関数で近似して数値処理を容易にする方法も提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾が、入力軸数を増加させ、動作範囲を拡大すれば、必要な定式化はやはり複雑になり、決定すべき未知数も増加し、解を得ることは困難になる。

このように従来の軌道生成法の多くは入力軸数が少ない比較的単純なマニピュレータを対象としており汎用的でない。多自由度なマニピュレータの取り扱いも可能にする、状態方程式およびその偏導関数の容易な演算手法に基づく軌道生成⁽⁸⁾も検討されているが、実用的な解の探索が困難な場合があり⁽⁸⁾、適用範囲は未だ限られている。

また、従来の方法のほとんどが繰り返し計算を伴う数値解法を用いるため、初期値の決定が容易でなく、得られる解は局所的な最適値であることが多い。そこで、大域的な最適値の探索に有効な遺伝的アルゴリズム

* 原稿受付

*1 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*2 正会員 金沢大学理工研究域機械工学系
E-mail : mhayashi@stu.kanazawa-u.ac.jp

$\Delta(GA)^{9(10)}$ を用いた軌道生成も検討されているが、対象が2~3自由度のマニピュレータに限られている。GAを用いるためには設計変数の2進数化などのコーディングが必要⁽¹²⁾であり、また、探索に必要なパラメータの調整が難しい。したがって、マニピュレータの入力軸数が増加し、決定すべき変数が増えるにつれプログラムの作成・処理が複雑となる。

以上のように、これまで提案されている軌道生成法は、複雑な解析、数値処理を必要とするものが多い。実用的な観点からは、高度な数値解析等の知識を必要とせず、稼働中、または、製造中である入力軸が多数で、複雑な構造を有するマニピュレータを対象とし、構築済みの運動方程式をそのまま利用して最適な軌道が生成可能な汎用的手法の確立が強く望まれる。そこで、本論文ではマニピュレータの運動方程式の複雑な処理、設計変数のコーディングなどを必要としない、発見的手法を用いた汎用性の高い軌道生成法を示す。また、同手法を既存の大型マニピュレータに適用して、高速な動作を保ちながら、トルクの低減を実現した事例を報告する。

2. 対象機構

対象とするマニピュレータは、大型の鋼板を真空吸着で把持し加工機間を搬送するために用いられている。マニピュレータの機構は図1に示すように平面5自由度機構であり、同図中にベース側から $J_i(i=1 \sim 5)$

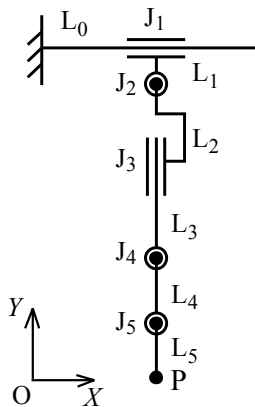


Fig.1 Schematic of the objective manipulator

で示す5つの関節で構成される。 J_1, J_3 は直動関節、他は回転関節であり、それぞれアクチュエータが連結されている。アクチュエータにはサーボモータを用いており、各モータはあらかじめ決定されている指令値に従って動作する。

以上の関節 $J_i(i=1 \sim 5)$ の変位をそれぞれ $j_i(i=1 \sim 5)$ と表し、各関節で連結される節を図1に示すように $L_i(i=0 \sim 5)$ 、出力点をPと記す。 L_0 がベース、 $L_i(i=1 \sim 5)$ が動節である。各節の長さ、質量、質量中心位置、質量中心まわりの慣性モーメントを表1に記す。なお、ベース L_0 の節長は、ベース端から節 L_1 との連結点までの距離であり直動関節 J_1 の変位と一致する。 L_3 は関節 J_4 の回転中心から節 L_2 と L_3 の連結点までの距離であり直動関節 J_3 の変位と一致する。他の節長は回転関節の回転中心間の距離である。ただし、関節間の距離が図1の紙面奥行き方向のみの場合(L_1, L_2, L_5)には節長を零と記している。各節の質量中心位置は、ベース側の節との連結点からの距離で示す。なお、節長が変化する節 L_3 に関しては、節長が最大時の値を示している。

マニピュレータの従来の搬送経路の概略を図2に示す。点Oは搬送動作の開始点である。出力点の運動は原点を点Oとする絶対座標系O-XYを用いて表す。マニピュレータの出力点Pは、動作開始後、点Oから出発し点Iを経由して点IIで停止し鋼板を吸着する。その後、点III、点O、点IVを経由して点Vで停止し鋼板を解放する。さらに、点VIを経由し点Oに戻る。

マニピュレータの運動は、X軸およびY軸方向の運動をそれぞれ独立して表し、X軸方向の運動をフィード、Y軸方向の運動をリフトと呼ぶ。フィードに関して、点IIでワークを吸着し点Oを経由して点Vへの運動を F_1 運動、点Vでワークを解放した後、点Oへ戻る運

Table 1 Specification of the manipulator

Link name	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
Link length [m]	0.0~1.0	0.0	0.0	1.4~2.4	0.9	0.0
Link mass [kg]	n/a	854.6	473.3	233.1	38.6	63.4
Center of mass [m]	n/a	0.0	0.3	1.1	0.4	0.1
Moment of inertia [kg m ²]	n/a	n/a	45.6	323.6	2.3	1.6

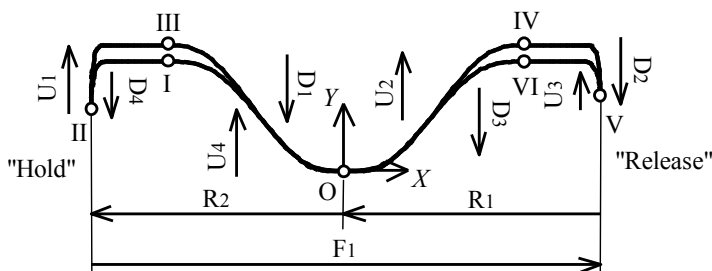


Fig.2 Work path of the objective manipulator

Table 2 Working conditions of the objective manipulator

Feed distance [m]	5
Maximum lift distance [m]	0.2
Handling cycle time [sec]	3.75
Workpiece mass [kg]	30

動を R_1 運動, 点Oからワーク吸着位置点IIへ向かう運動を R_2 運動とする. リフトに関しては, 図2に示すとおり点O ~ VIで8つに分割される各区間のY軸正方向の運動を U_n ($n=1 \sim 4$)運動, 負方向の運動を D_n ($n=1 \sim 4$)運動とする.

作業の詳細は表2に示すとおりであり, 5.0 mの距離(フィード距離)を4sec未滿で往復する. なお, ワークである鋼板の質量は30kgであり, マニピュレータの総質量約1600kgに比して小さいが, 機構の先端で把持するため, 力学的影響は無視できないと考え, 同質量を機構の先端に付加して入力値を解析する. また, マニピュレータは単一方向への送り装置として用いられるため, ワークである鋼板を把持しているのは図2のX軸正方向動作を行う往路のみであるが, 異常発生時など, 復路においてもワークを把持したまま動作することがあるため, 常にワークを把持しているとする.

対象とする図1のマニピュレータは平面5自由度の冗長機構であり, その位置と姿勢を一意に決定できない. そこで, 関節 J_1 および J_2 の並進変位 j_1 および回転変位 j_2 がそれぞれ, 出力点PのX軸方向並進変位に対して常に線形に変化するとし, 結果的に冗長性のない平面3自由度機構として制御している.

マニピュレータの位置・姿勢には保守, 加工機との干渉などを考慮して, さらに, 以下の条件を課している. まず, 出力点Pが点Oに一致する場合, 図1で示すように, 全ての回転関節の中心および点Pが常にY軸方向一直線になるとする. 同姿勢を本論文では基準姿勢と呼ぶ. また, 出力点Pが点O, 点II, 点Vに一致するときの関節 J_1 および J_2 の変位をそれぞれ $\theta_{j1}, \psi_{j1}, \psi_{j1}$ および $\theta_{j2}, \psi_{j2}, \psi_{j2}$ として以下の条件を課している.

$$\theta_{j1} - \theta_{j1} = -(\psi_{j1} - \psi_{j1}) \quad (1)$$

$$\theta_{j2} - \theta_{j2} = -(\psi_{j2} - \psi_{j2}) \quad (2)$$

すなわち, 点IIと点Vにおける姿勢はY軸に関して対称である. なお, 回転関節の変位は反時計回りを正とする.

3. 軌道の表現

フィード, リフトの運動は, 正規化多項式形の運動曲線で表し, それぞれをフィード運動曲線, リフト運動曲線と呼ぶ. 運動曲線は上述の F_n, R_n で表されるフィード, U_n, D_n で表されるリフトの各動作, それぞれに適用される. すなわち, マニピュレータの動作開始時を零として, 各動作を開始する「動作開始時刻」, 各動作の開始から完了までに必要な「動作所要時間」, 同時間に出力点Pが移動する「動作距離」を設定し, これらの値より各動作において動作開始からの経過時

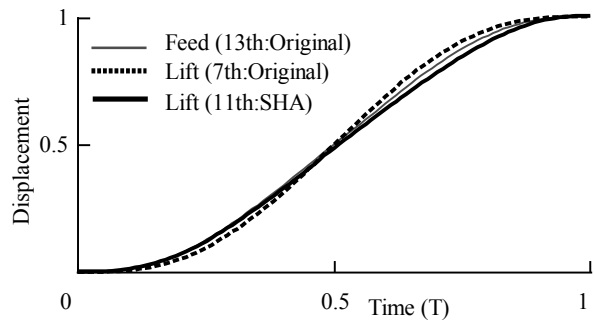
間を算出して次式に示す運動曲線を表す多項式に代入し出力点Pの運動を決定する.

$$S = \sum_{i=0}^N C_i T^i \quad (3)$$

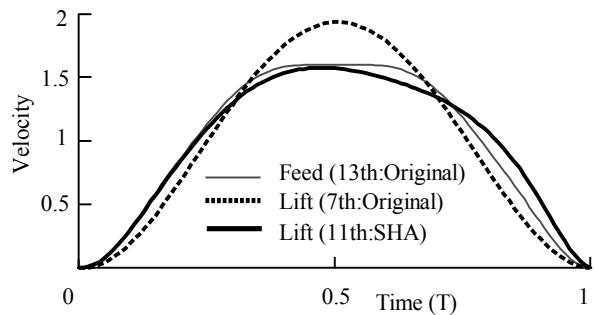
$$0 \leq T \leq 1 \quad (4)$$

$$0 \leq S \leq 1 \quad (5)$$

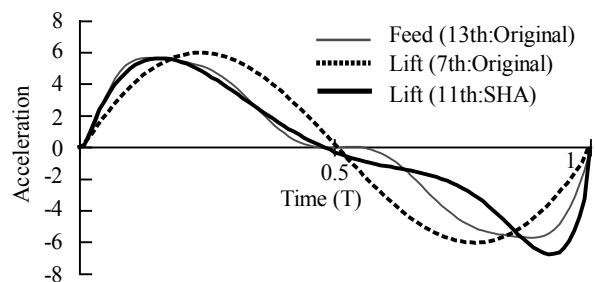
T は各動作の開始からの経過時間を動作所要時間で除した無次元時間, S は各動作の開始からのXまたはY軸方向の変位を動作距離で除した無次元変位である. 例として, リフトに関する D_1 運動では, 出力点Pが点IIIに一致する時刻を動作開始時刻とし, 同時刻からの経過時間を点IIIから点Oまでの移動に要する動作所要時間で除した値を T とする. また, 点IIIからのY軸方向変位の絶対値を点IIIから点OまでのY軸方向の動作距離で除した値を S とする. 他の U_n, D_n 動作においても同様に, それぞれ値が式(4)(5)の範囲となるように正規化した T, S を用いて出力点Pの運動を表す. た



(a) Normalized displacement



(b) Normalized velocity



(c) Normalized acceleration

Fig.3 Motion curves

だし、無次元変位 S は、リフトに関する U_n, D_n 運動では Y 軸方向、フィードに関する F_n, R_n 運動では X 軸方向の変位を表すことになる。

なお、式(3)において N は多項式の次数、 C_i は i 次の項の係数であり、本論文では運動曲線が適切となるように同係数の値を決定する。また、式(3)を微分することで出力点 P の無次元速度、加速度を得る。

これまでフィード動作 F_1, R_1, R_2 には同一の13次多項式、リフト動作 $U_n(n=1 \sim 4), D_n(n=1 \sim 4)$ には同一の7次多項式を用い、いずれも始点と終点において速度、加速度が零となる両停留運動曲線⁽¹³⁾としている。また、多項式の係数は動作中の速度が常に一方向となるように決定されている。

従来の運動曲線による変位、速度および加速度の変化を、それぞれ図3(a) (b)および(c)に細実線と破線で示す。これまで運動曲線は、アクチュエータの容量を低減するため、主にトルクの最大値が低くなるように試行錯誤的に係数を調整し決定していた。しかし、取り扱いが比較的簡単な多項式で示された運動曲線の係数を決定することであっても、動力学特性を考慮し、人為的に最適化するには限界がある。

4. 探索方法

4.1 SHA 緒言で述べたように軌道の探索には発見的手法を用いる。発見的手法としてはGAが代表的であるが、本論文ではS.Linら⁽¹⁴⁾が提案し、著者らがマニピュレータの機構設計⁽¹⁵⁾や比較的低自由度の

マニピュレータの軌道決定⁽¹¹⁾に用い、その有用性を確認しているSHAを用いる。

SHAは設計変数行列と呼ぶ、各列が決定すべき変数の種類、各列の要素が各変数の取り得る離散値を示す行列を構築し、同行列を操作することで評価関数が最小となる変数の組合せを探索する。設計変数行列の例、図4に示す。同図の i 行 j 列の要素 S_{ij} は j 番目の変数の i 番目の離散値を表す。

具体的な設計変数行列の操作手順を図4, 5を用い以下に示す。

Step1: 決定すべき設計変数の数が n である場合、各列の要素が設計変数の離散値である n 列の設計変数行列を作成する。なお、各設計変数の離散値の数は同じとする。図4は設計変数が6、それぞれが取り得る離散値の数が9である場合の設計変数行列である。

Step2: 設計変数行列の各列において乱数を用い離散値の値を1つ選択し初期経路を決定する。決定された初期経路を基準経路 T_0 とする。図5(a)では T_0 として実線で結ばれた要素 $S_{61} \sim S_{56}$ が選択されている。

Step3: 設計変数行列の1列目から順に要素選択の操作を行っていく。まず、基準経路 T_0 として選択されている要素の他に一定数の要素を乱数を用いて選択する。図5(a)では白丸の要素が選択されている。これらの要素をLook-ahead-Base Point(LBP)と呼び、新たな設計変数の候補とする。

Step4: LBPとした各要素に続く次列の要素を乱数にて選択し、図5(b)に細線で示すように複数の経路を生成する。

Step5: Step2で決定した基準経路およびStep4であらたに生成した複数の経路から最も評価値の良い設計変数の組合せを新たな基準経路とする。図5(b)では S_{41} を含む経路を新たな基準経路 T_1 として選択している。

以後、対象とする列を順に次列へ進め評価値の良い経路を基準経路として更新する操作(Step3 ~ 5)を $n-1$ 列目まで繰り返す。図5(c)では2列目を対象に操作を行い、基準経路 T_2 を選択している。

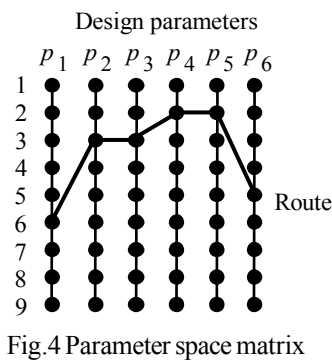


Fig.4 Parameter space matrix

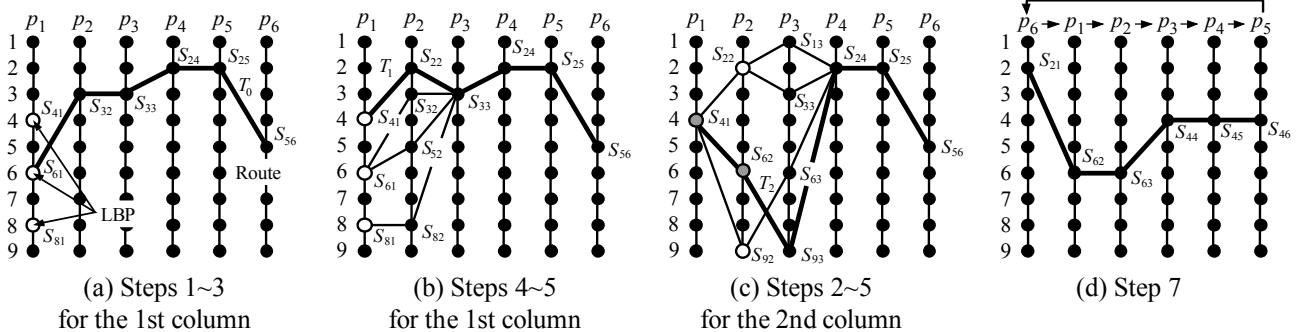


Fig.5 Diagrams of the procedures by the SHA

Step6:最終列(n 列)では要素の選択を行わず, n 列に含まれる全ての要素を対象として離散値と同数の経路を生成し,最も評価関数値の良い離散値の組を基準経路として更新する.

Step7:図5(d)に示すように,設計変数行列の最終列を第1列へ移動させ,その他の列は次列へと移動させ設計変数行列を再構築する.得られた行列に対し以上の操作を繰り返す.なお,Step3~7の操作を繰り返し,最初に1列目であった設計変数が再び1列目となった時点で操作を終了する.以上の繰り返し操作で,最も評価関数値が良い値となった経路(設計変数の組合せ)を解とする.

なお,発見的手法は乱数を用いて解を探索するため,繰り返し計算時において最適解近傍の結果が得られたとしても,同結果近傍のさらに良好な解を探索するとは限らない.また,離散値の幅を細分割するほど,より評価関数値が良い解が得られると予想されるが,離散値の数を増やすと行数が膨大となり探索が困難となる.そこで本論文では,まず,離散値の幅を比較的粗く設定した設計変数行列を対象に,以上の操作で良好な要素の組合せを求め,さらに,得られた要素の値を中央値として刻み幅を細分割した設計変数行列を,行数は同じとして再構築し,探索処理を再度実行する.この探索により最終的に得られた基準経路を解とする.なお,初めの探索を「予備探索」,その探索結果近傍での刻み幅を細分割した設計変数行列を用いた探索を「絞込探索」と呼ぶ.

以上述べたSHAはGAと比較して次のような利点を有する.

- (1) GAでは設計変数を2進数列で表現される遺伝子モデルへ変換する必要があるが,SHAでは設計変数として実値を直接取り扱える.
- (2) GAでは世代数,交叉率,突然変異率など解の探索の実行を左右する複数のパラメータの調整が必要である.これらの値は解の探索結果に大きな影響を及ぼすが,その決定は主として経験に頼らざるをえない.これに対し,SHAでは調整が困難なパラメータは特ない.
- (3) 繰り返し探索時において,GAでは毎回,多数の解の候補について評価値の算出が必要であり,評価関数の

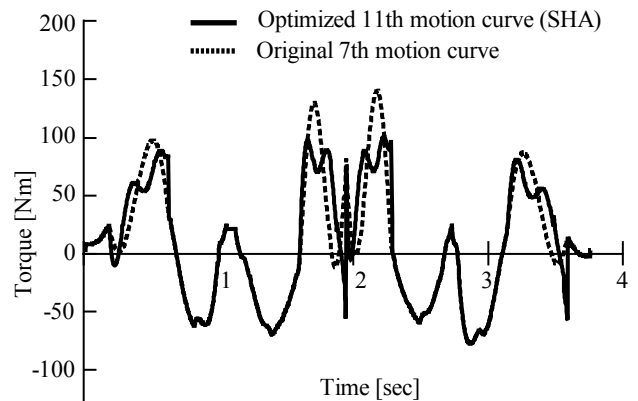
計算が複雑である場合は計算量が膨大となる.これに対し,SHAで評価する解の候補は少数であるため1回毎の計算時間は短く,全体の計算時間を短縮できる可能性がある.

特に(1)(2)より,形式の異なるマニピュレータに対しても,既存のプログラムを容易に適用可能である.なお,本論文ではGAを用いた軌道生成に関しても同様に検討しSHAとの比較を行う.

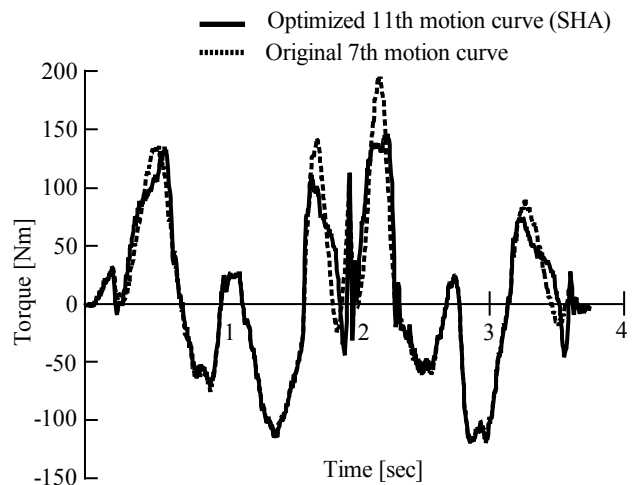
4.2 入力値の解析 マニピュレータの入力の解析は次式に基づく⁽¹⁶⁾.

$$T = H\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + T_g \tag{6}$$

T は各入力部のトルクまたは並進力, θ は変位を要素とするベクトルであり,“ \cdot ”は時間微分を表す. H は慣性行列, $C(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力,コリオリ力, T_g は重力を表す列ベクトルである.さらに,駆動部の減速機効率,関節部の伝達効率を考慮し,対象とするマニピュレータを動作させるために必要な入力値を求め評価関数とする.



(a) Calculated values



(b) Measured values

Fig.6 Changes in the torque of J_3

Table 3 Maximum value of each joint

Motion curve	J_1 [N]	J_2 [Nm]	J_3 [Nm]	J_4 [Nm]	J_5 [Nm]
7th	7940	44.9	135.1	11.5	0.87
11th (SHA)	7940	44.9	101.3	11.5	0.87
11th (GA)	7940	44.9	104.4	11.5	0.87

5. 軌道の探索

5.1 探索条件 本論文では軌道生成により、マニピュレータの入力を軽減し、機械の長寿命化、消費エネルギーの低減を図るとともに、同機種を新たに製作する場合にモータ容量の低減を可能にする。

図3に示す従来の運動曲線を用いた場合に要するマニピュレータの入力を式(6)に基づき求め、その最大絶対値を表3に示す。関節 J_3 は直動関節であり、ボールねじで駆動されるため、入力値はトルクで示す。同表より、入力値がトルクで示される関節については、 J_3 部分で大きなトルクが生じている。次元が異なるため比較はできないが、直動関節 J_1 を駆動するアクチュエータはベースに配置され、その質量はマニピュレータの入力に影響しない。そこで、本論文では J_3 部分のトルクの最大値を抑制する軌道の決定を検討する。なお、往路および復路に要する時間は従来と同じく表2に示す値とする。

図2に示した経路概略において、区間I-II, II-III, IV-V, V-VIは搬送機が鋼板を加工機に受け渡す区間であり、鋼板の姿勢を常に水平に保つ必要がある。また、同区間は加工機とマニピュレータが最も接近する個所であるため、干渉などを考慮して軌道はあらかじめ限定されている。そこで、これらの区間では従来の運動曲線を用いることとし、区間O-I, III-O, O-IV, VI-Oにおける軌道の探索を検討する。したがって、対象となる運動はリフトに関する U_2, U_4, D_1, D_3 となる。

これらの運動に対する入力値の傾向を検討するため、図6(a)にマニピュレータの1往復動作における関節 J_3 の入力トルクの計算値を破線で示す。同図より動作開始から約2秒後にトルクが最大となっている。この区間は出力点Pが図2に示す点Oから点IVにいたる間であり、フィードが F_1 運動、リフトが U_2 運動となる。すなわち、リフト動作 U_2 の運動曲線を検討することで入力値の低減が期待できる。なお、マニピュレータの仕様より、出力点Pの軌跡は図2に示すようにY軸に関して対称とするため、リフト動作 U_2, U_4, D_1, D_3 に

は、それぞれ同一の運動曲線を用いる必要がある。以上のことから本論文では、リフト動作 U_2 、さらに、 U_4, D_1, D_3 を含む区間の全てで関節 J_3 の入力トルクの最大値を式(6)を基に求めて評価値とし、その値が最小となるように、これらのリフト動作を表す運動曲線を探索する。

先述のようにリフト動作の運動曲線は、これまで7次多項式を用いていたが、より複雑な曲線が表現できるようにさらに高次の多項式を用いる。複数の次数の多項式を検討した結果、およそ11次程度で評価値が収束した。そこで、リフト動作の運動曲線は無次元時間 T による11次多項式とし、同式の i 次の項の係数 $C_i(i=0 \sim 11)$ を決定する。運動曲線は両停留とするため、無次元時間 T が零の時の境界条件より C_0, C_1, C_2 は零となる。したがって、運動曲線は次式で表される。

$$S = C_3 T^3 + C_4 T^4 + \dots + C_{11} T^{11} \quad (7)$$

上式で係数 $C_6 \sim C_{11}$ が得られれば、 $C_3 \sim C_5$ は T が1の時の境界条件を満足するための連立方程式を解くことで得られる。したがって軌道決定時にはトルクの最大値を抑制する $C_6 \sim C_{11}$ を探索する。なお、運動曲線で決定される速度は T が0から1の範囲において常に一方向になるとし、SHAのStep2, 3, 4, 6で選択された経路による運動曲線が同条件を満たさない場合、その経路を破棄し新たな経路を条件が満たされるまで選びなおす。

予備探索および絞り込み探索時の変数の範囲、刻み幅は表4(a)(b)に示す値とした。これらは著者らが先

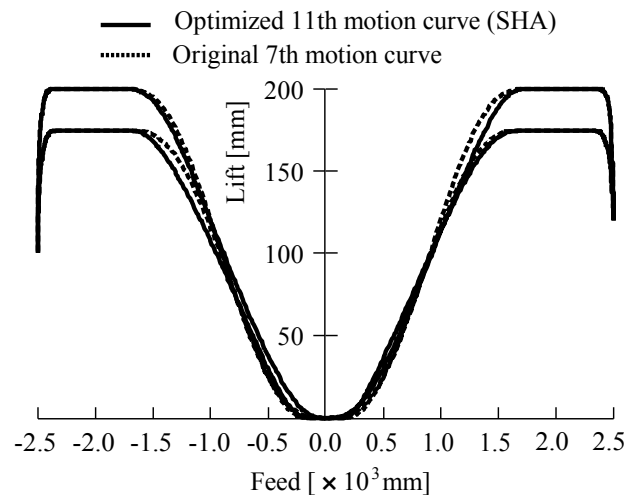


Fig.7 Comparison of work paths

Table 4 Ranges and step size of the design parameters

(a) Preliminary search			(b) Refined search	
Parameter	Range	Step	Parameter	Step
$C_6 \sim C_{11}$	-30 ~ +30	0.3	$C_6 \sim C_{11}$	0.04

Table 5 Polynomial coefficients

Coefficients	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
SHA	15.48	-41.56	50.20	-29.56	2.08	2.04	18.32	-26.40	10.40
GA	17.3	-44.5	43.5	-15.5	2.5	-9.7	21.7	-23.7	9.4

Table 6 Operating parameters for GA

Population	Generation	Crossover rate	Mutation rate
25	100	0.3	0.002

に行った2および3自由度マニピュレータの軌道生成の検討結果⁽¹¹⁾を参考に決定した。また、各列においてランダムに選択する要素の数LBPは5とした。なお、SHAは乱数を用いる発見的手法の一つであり一度の探索で最適な解の組合せが探索されるとは限らない。そこで、同一の条件で探索を100回繰り返す、その中で評価関数値が最も良好となる係数の組合せを解とした。

5.2 探索結果 SHAにより探索された運動曲線の係数を表5に、同係数を用いた運動曲線による無次元化された変位、速度、加速度を図3に太実線で示す。探索に要した時間はOSがLinuxであるコンピュータ(AMD製Sempron3000+搭載AT互換機)で、C言語を用い約20分であった。

得られた運動曲線を U_2, U_4, D_1, D_3 のリフト動作にそれぞれ用いた場合の関節 J_3 の入力トルクの変化を図6(a)に実線で示す。同結果より、関節 J_3 に生じるトルクの最大絶対値を求め表3に示す。参考のため、他の関節の入力値の最大値も示す。図6(a)および表3より、探索した運動曲線を用いれば、従来に比べ、関節 J_3 のトルクの最大値が約25%抑制されることがわかる。

探索された運動曲線は、図3(b)に示すように従来に比べ動作中間部付近で速度をほぼ一定とし速度の最大値を抑えている一方、動作所要時間を従来と等しくするため、動作開始および終了時の速度を上昇させている。したがって、図3(c)に示すとおり動作開始および終了時の加速度は増加しているが、動作中間部付近の加速度は零付近となっており、結果的に式(6)の右辺第1項の加速度に起因するトルクを抑制していると考えられる。

以上で決定された運動曲線による出力点Pの軌跡を図7に実線で、また、従来の軌跡を破線で示す。鋼板を加工機に受け渡す区間I-II, II-III, IV-V, V-VIの経路は探索条件のとおり従来と同一であり、それ以外の区間で経路が変更されている。なお、経路の変更は図7に示すようにわずかであるが、上述のとおりトルクは大幅に低減され、速度、加速度の変化傾向の調整が入力値の抑制に大きく影響することが確認される。

比較のため、GAを用いた探索に関して検討する。表6に示すパラメータを用いた単純GA⁽¹⁷⁾によって、リフト動作 U_2, U_4, D_1, D_3 を表す運動曲線の係数をSHAと同様に探索した。探索する6つの係数の表現には、各係数を8bitの2進数列の遺伝子で表した、48bitの染色

Table 7 Measured maximum torque of J_3

Motion curve	Maximum torque of J_3
Original 7th	195 [Nm]
Optimized 11th (SHA)	146 [Nm]

体を用いた。評価関数はSHAと同じく J_3 部分のトルクの最大絶対値である。用いたコンピュータ、プログラム言語はSHAの場合と同一である。なお、GAにおいても探索毎に結果が異なるため、SHAと同じく100回の探索で得た結果の最良値を解とした。得られた運動曲線の係数を表5に、また、同曲線を用いた場合の各関節の最大入力値を表3に示す。探索は約1時間を要した。得られた係数が類似した傾向を示し、実際に比較したところ、ほぼ同じ形状であった。また、表3に示すようにSHAによる探索と同程度に評価値を抑制する軌道が決定されている。

GAによる軌道生成はプログラムを見直すことにより探索時間の短縮も期待できる。しかし、前章で述べたように、GAを用いる場合、設計変数の2進数列へのコーディング方法、探索のためのパラメータの検討、調整が困難であった。すなわち、本論文で取り扱った軌道生成に関しては、GAと比較しSHAが適する。

6. 実験による確認

以上で探索された軌道を用いて、実際に対象とするマニピュレータを動作させて関節 J_3 のトルクを測定した。マニピュレータの諸元および作業条件は、以上と同じく表1および2に示すとおりである。トルクは、関節 J_3 を駆動するACサーボモータ(三菱電機株式会社製、15kW)の電流値を測定し、モータ電流-トルク特性表を参照することで求めた。

関節 J_3 のトルク変化の測定結果を図6(b)に実線で示す。測定値は図6(a)に実線で示した解析値と、波形、ピークトルクの発生位置がよく一致している。また、比較のため、従来の軌道を用いた場合の測定値も図6(b)に破線で示す。さらに、これらの測定結果からトルクの最大絶対値を求め表7に示す。図6より測定値は解析値に比べ正負方向ともに大きな値を示している。これは式(6)に基づく解析では考慮していない摩擦の影響であると考えられる。しかし、全体的なトルクの変化は類似した傾向を示しており、また、表7より、先の解析結果の比較で述べたように、測定結果においても関節 J_3 のトルクの最大値が約25%抑制され、期待した効果が得られている。

以上、本論文で示した手法によれば、多軸のマニピュレータのトルクを抑制する軌道を簡単に探索できる。また、評価関数に他の軸の入力値、また、消費工

エネルギーなどを加えることも容易であり，今後，種々の応用が期待できる．

7. 結 言

本論文で得られた結果を以下に要約する．

- (1) 多数の入力軸を有するマニピュレータを対象として，構築済みの運動方程式がそのまま利用でき，複雑な数値処理を必要としない，発見的手法SHAを用いた最適軌道生成法を提案した．
- (2) 実在のマニピュレータを対象として，入力軸トルクのピーク値を抑制する軌道を，提案した手法により関節の入力変位を表す運動曲線を決定することで生成した．その結果，実用的な時間で，入力最大の絶対値を抑制する軌道が探索された．
- (3) 得られた軌道生成結果を用いて実際にマニピュレータを駆動して入力値を測定した．その結果，解析結果で期待されたように入力の最大絶対値が約25%低下し，提案した手法が実際のマニピュレータの軌道生成に対し有効であり，実用性が高いことを確認した．

謝 辞

最後に，本研究を進めるにあたり研究室にて様々な協力をしていただいた，平成17年度本学修士の松原氏，平成18年度の河村氏への感謝の意を記す．

文 献

- (1) Tachiya, H., Characteristic Evaluation of Robotic Parallel Crank Mechanisms Using Dynamic Characteristic Charts (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.60, No.569(1994), pp. 343-349.
- (2) Tachiya, H. et al., Evaluation of Robotic Open Loop Mechanisms using Dynamic Characteristic Charts (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.63, No.606(1997), pp. 613-619.
- (3) Amano, J. et al., Design of the Counterbalances Minimizing the Dissipated Energy of a Vertically Articulated Manipulator (in Japanese), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.22, No.7(2004), pp. 924-932.
- (4) Amano, J. et al., Design for Saving Energy of a Vertically Articulated Manipulator Using Spring and Mass Balancers (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.70, No.700(2004), pp. 3456-3462.
- (5) Kashima, T. et al., Trajectory Planning of Manipulators Based on a Minimum-Energy Criterion and Operating Time (in Japanese), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.15, No.7(1997), pp. 1012-1018.
- (6) Shintaku, E. et al., Study on Identification of Dynamics of Underwater Manipulator and its Trajectory Planning Based on Minimum Energy Consumption (in Japanese), *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, No.180(1996), pp. 695-703.
- (7) Okubo, H. et al., Optimal Path Planning for Space Robots with Joint Friction Torque (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.64, No.620(1998), pp. 1368-1374.
- (8) Iwamura, M. et al., Study on Optimal Control Algorithm for Link Mechanisms (The Case of Open-Link Mechanisms) (in Japanese), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.5(2007), pp. 717-726.
- (9) Kojima, H., Trajectory Planning of CP Control Flexible Robot Arm Using Genetic Algorithm (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.68, No.670(2002), pp. 1784-1790.
- (10) Kojima, H. et al., Trajectory Planning of Semiconductor Wafer Transfer Robot Arm Driven by Stepping Motors Using Genetic Algorithm and Experiments (in Japanese), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.5(2007), pp. 752-760.
- (11) Hayashi, M., et al., Determination Method for Power-saved Driving Motions of Manipulators by Heuristic Algorithms (In Case of PTP Control), *The 4th International Symposium on Mechatronics and its Applications*, 28-77023(2007), CD pressed.
- (12) Furukawa, T. et al., Genetic Algorithms for Real Search Space and Their Use for Nonlinear Inverse Problems (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series A, Vol.61, No.586(1995), pp. 1409-1415.
- (13) The Japan Society of Mechanical Engineers, Kinematics of Machinery (JSME Textbook Series) (in Japanese), (2007), p. 92, MARUZEN Co.,Ltd.
- (14) S., Lin, B., Kernighan, An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem, *Operations Research*, Vol.21, No.2(1973), pp. 498-516.
- (15) Tachiya, H. et al., A Synthesis of Robotic Mechanisms Suitable for Specified Usage Based on the Evaluation of the Plural Mechanism-Characteristics (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.67, No.655(2001), pp. 880-887.
- (16) John J., Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control 3rd ed., (2005), Chapter 6, Pearson Education, Inc.
- (17) The Institute of System, Control and Information Engineers ed., Genetic algorithms and optimization, (in Japanese), (1998), p. 16-19, Asakura Publishing Co., Ltd.