運動物体追跡のためのロボットの実時間軌道生成法

植之原 道 宏^{*1} 飯 倉 省 一^{*1} 小 松 督^{*2}
三 浦 宏 文^{*3} 下 山 勲^{*3}

Real-Time Robot Trajectory Planning for Track of Moving Object

Michihiro Uenohara^{*1}, Shoichi Iikura^{*1}, Tadashi Komatsu^{*2}
Hirofumi Miura^{*3} and Isao Shimoyama^{*3}

In this paper, a real-time trajectory planning method which is effective for a robot to track a moving object is derived. This method generates the optimal trajectory based on the minimum acceleration criterion whose position and velocity are coincident with those of a moving object at predefined time. Therefore, this method is effective for reliable capture of a moving object. First, the optimal trajectory for a moving object with constant velocity is derived. The problem is formulated as an inhomogeneous regulator problem, and the optimal trajectory to minimize a cost function is solved analytically. Next, the way to generate the trajectory when the maximum speed or acceleration is limited is discussed. Optimal trajectory planning for a moving object with acceleration or rotation is developed also. Finally, results of experiments to capture moving objects are presented. The experimental system consists of a 3-DOF manipulator, a dummy object, a CCD hand-eye camera and a vision processing system. The manipulator and dummy object are floating on a plate base using air bearings. The vision system can detect the position/direction of the dummy object every 17 [msec].

Key Words: Trajectory Planning, Moving Object, Capture, Robot

1. は じ め に

産業用ロボットの生産性を高める要求とも結びつき、マニピュレータの各種軌道を計画する研究が従来からなされている。最短時間軌道を計画するものはその代表的なものであり[1]、スプライン曲線を用いることにより指定した経由点を通り目標点まで到達する最短時間軌道を求める研究もなされている[2][3]。

これらの軌道計画はあらかじめロボットに要求される動作が完全に規定されている工場内での規格大量生産に対応したものである。しかし、今後は治具により正確に位置決めされていない部品を扱うことや宇宙や原子力発電所内の保守作業などのように非定型の作業に対する要求も高まってくることが想定される。それらの作業ではビジョン等により検出された部品位置の値をもとにリアルタイムにロボットの軌道を生成することが要求されてくる。また、静止している対象物だけでなく動いている対象物を扱うことも考えられる。運動している物体の位置や速度をビジョンにより検出しつつ追跡・捕獲を行うためには、

あらかじめ目標物体まで到達する軌道をすべて計算するのではなく、運動物体の動きに対応して時々刻々の軌道を生成するのが望ましい。また、捕獲時の衝撃を小さくし、確実な捕獲動作を実現するためには、捕獲時にロボットの運動速度を目標物体と等しくするのが重要であるが、そのような観点からの軌道の生成法に関する研究も見当たらない。

本研究は、目標物体を追跡し到達する軌道をリアルタイムに生成する方法に関するものである。捕獲時の衝撃をなくし確実な捕獲動作を実現するためには、捕獲時にロボットの運動速度を目標と等しくすることが重要である。本研究ではあらかじめ指定した時刻における運動物体とロボットの相対位置・相対速度が0となる無駄のないスムーズな軌道を求めることを、システムの状態方程式のもとで2次形式の評価関数を最小にする軌道を求めるという非斉次のレギュレータ問題として定式化している。生成される軌道は加速度二乗総和が最小の軌道になるために、十分に滑らかな軌道が生成される。また評価関数を最小にする軌道を解析的に解いているために、リアルタイムに実行すべき軌道生成式が簡単な式になり、リアルタイムな軌道生成を容易にしている。さらに、本軌道生成法は目標まで到達する軌道をあらかじめすべて計算するのではなく、その時刻での目標物体の位置と速度から、その時刻の軌道の値を毎制御周期計算しているので、運動物体の動きの変化にも即座に対応した軌道が生成される。

原稿受付 1993年7月28日

^{*1}東芝研究開発センター

^{*2}関東学院大学工学部

^{*3}東京大学工学部

^{*1}TOSHIBA Corporation Research & Development Center

^{*2}College of Engineering, Kanto Gakuin University

^{*3}Faculty of Engineering, University of Tokyo

2章では運動物体が等速直線運動しているとすれば、評価関数を最小にする解は解析的に求められることを示している。3章ではロボットの最大速度あるいは最大加速度の値が設定されたときに、軌道の速度や加速度がその制限を越えないような軌道の生成のしかたについて検討を行っている。4章及び5章では一定の加速度で運動している物体や回転している物体に対しての軌道の生成法について示している。最後に6章では空気軸受けによる3自由度スカル型のマニピュレータを用いることにより運動物体の捕獲実験を行い、以上に提案した軌道生成法の有効性を検証する。

2. 等速度運動物体に対する最小加速度 規範による最適接近軌道

運動物体への接近軌道で、捕獲時の相対速度を0とする軌道の中で滑らかで無駄のない軌道として以下のような2次形式の評価関数を最小にするものを考える。

$$J = \frac{1}{2}(XS_fX)_{t_f} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} a_m^2 dt \quad (1)$$

x_p : 運動物体の位置

x_m : ロボットのエンドエフェクタの位置

t_0 : 初期時刻

t_f : 捕獲指定時刻

$$X = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix}, \quad x = x_p - x_m$$

$$S_f = \text{diag}(c_1, c_1, c_1, c_2, c_2, c_2)$$

$$(c_1, c_2 \rightarrow \infty)$$

$$a_m = \ddot{x}_m$$

上記の評価関数は捕獲指定時刻における位置偏差及び速度偏差の二乗に、捕獲までの軌道の加速度の二乗総和を加えた形になっており、上記の評価関数を最小にする軌道は、行列 S_f の対角要素である c, c_2 を無限大とすると、捕獲指定時刻 t_f において運動物体とエンドエフェクタとの位置偏差及び速度偏差が0になる。また、その条件を満たすものの中で軌道の加速度の二乗総和が最小の軌道が求められるので、無駄のない滑らかな軌道となる。

運動物体が等速度運動している場合には、その加速度が0となるので、 a_m を系への入力とみなすと次のような状態方程式が成り立つ。

$$\dot{X} = FX + Ga_m \quad (2)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

したがって、式(1)を最小にする軌道を求めることは、非斉次のレギュレータ問題となる。非斉次のレギュレータ問題の一般解は以下のような[4]。

$$\dot{x} = F(t)x + G(t)u + C(t) \quad (3)$$

$$J = \frac{1}{2}(x^T S_f x)_{t_f} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T A x + u^T B u) dt \quad (4)$$

$$u(t) = -B^{-1}G^T S_f x - B^{-1}G^T K \quad (5)$$

$$\dot{S} = -SF - F^T S + SGB^{-1}G^T S - A \quad (6)$$

$$S_f = S(t_f)$$

$$\dot{K} + (F^T - SGB^{-1}G^T)K + SC = 0 \quad (7)$$

$$K(t_f) = 0$$

式(3)が状態方程式、式(4)が評価関数で式(5)が評価関数を最小にする入力である。今回の場合、式(2)、(1)と式(3)、(4)を比較すると F, G は式(2)の通りであり、 x, u, B, A, C は以下の通りになる。

$$x = X, \quad u = a_m$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A = C = 0$$

以上の値を式(5)~(7)に代入すると評価関数を最小にする解が解析的に求められ、以下ようになる。

$$a_m = \frac{4}{(t_f - t)^2} \dot{x} + \frac{6}{(t_f - t)^3} x \quad (8)$$

各時刻での運動物体と軌道との位置偏差及び速度偏差を用いた非常に簡単な式になっており、上式から算出される加速度を数値積分することにより軌道を算出することができる。なお、マニピュレータの場合には本軌道生成式によりマニピュレータ先端の目標軌道を生成することになるが、式(1)の評価関数にはマニピュレータのダイナミクスが含まれないので動力学的考慮した最適軌道にはならない。しかし、加速度の二乗総和最小の制約により十分に滑らかな軌道が生成される。

Fig. 1 及び Fig. 2 にシミュレーション結果を示す。Fig. 1 は 100[mm/s] で等速直線運動する物体に追跡接近する軌道を生成した例である。 t_f は 10[sec] である。指定した時刻で位置

Fig. 1 Trajectory for moving object with constant velocity

Fig. 2 Trajectory for accelerating object

及び速度偏差が0になっており、しかも非常に滑らかな軌道が生成されているのがわかる。

Fig. 2は運動物体が加速度を有する場合に軌道を生成させた結果である。運動物体はX方向に $-100[\text{mm/s}]$ で等速運動するとともにY方向には初期速度は $0[\text{mm/s}]$ 、加速度 $20[\text{mm/s}^2]$ で加速度運動している。Fig. 1と同様に指定した時刻で位置・速度偏差が0になっており、滑らかな軌道が生成されているのがわかる。これは毎計算周期における運動物体の位置と速度の値を用いて式(8)の計算を行っているためであり、加速度運動を行う運動物体にも対応した軌道が生成されることがわかる。

3. 許容速度・加速度を越えない軌道の算出

ロボットマニピュレータにはアクチュエータ・減速機等の制約から通常、最大速度が設定されている。また、自立飛行する宇宙ロボットなどではスラスト等の推進装置の推力の制限により最大加速度が設定されるものと考えられる。生成された軌道の最大速度や最大加速度はこれらのロボットの制約を満たしたものである必要がある。

前章では、ロボットの初期位置及び速度の値を初期条件とし、式(8)で算出される加速度を数値積分していくことにより軌道を生成することとしたが、式(8)は2階の微分方程式であるので、境界条件のもとで解くと時間の3次関数になることがわかる。文献[5]では、運動物体の終端条件を与えたときの解を求めているが、ビジョン等のデータを直接利用するには初期条件を与えたときの解の方が都合である。初期条件を与えたときの解は以下になる。運動物体は等速度運動してい

るものとする。

$$\begin{aligned} x(t) &= \alpha\tau^3 + \beta\tau^2 - v_{p0}\tau + (x_{p0} + v_{p0}t_f) \\ \alpha &= \{2(x_{p0} - x_{m0}) + t_f(v_{p0} - v_{m0})\}/t_f^3 \\ \beta &= \{-3(x_{p0} - x_{m0}) - t_f(v_{p0} - v_{m0})\}/t_f^2 \\ x_m(t_0) &= x_{m0} \quad \dot{x}_m(t_0) = v_{m0} \\ x_p(t_0) &= x_{p0} \quad \dot{x}_p(t_0) = v_{p0} \\ \tau &= t_f - t \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)は時間に関する3次式であるから、式(9)を時間微分することにより軌道の速度と加速度が以下のように求められる。

$$\dot{x}(t) = -3\alpha\tau^2 - 2\beta\tau + v_{p0} \quad (10)$$

$$\ddot{x}(t) = 6\alpha\tau + 2\beta \quad (11)$$

上式により初期条件をもとに軌道を生成したときの軌道の最大速度あるいは最大加速度の値がロボットの制約を満足するかどうか容易に算出することができる。

3.1 最大速度を越えない軌道の生成

本軌道生成法において、ロボットの許容最大速度の値を越えないで最短時間で到達する軌道を生成するためには、軌道の最大速度の値が許容最大値となるような捕獲指定時刻 t_f を算出し、その t_f の値から式(8)により軌道を生成すればよい。

ロボットの許容最大速度の値が各自由度ごとに設定されるものとする、許容最大速度の値からの t_f の計算は各自由度独立に以下になる。

本軌道生成法により生成される軌道の速度は時間に関する2次関数となるので、最大速度をとるのは

- ・初期時刻
- ・終端時刻
- ・追跡途中($\tau = -\beta/3\alpha$)

の3通りが存在する。ただし、初期時刻の軌道速度は初期条件により v_{m0} と決まっており、終端時刻の速度は運動物体の速度 v_{p0} と決まっている。したがって、ロボットの許容最大速度 $v_{\max}$ が v_{m0} 及び v_{p0} より大きい場合には、その最大速度をとる時刻は追跡途中($\tau = -\beta/3\alpha$)となるので

$$\begin{aligned} \dot{x}(\tau = -\beta/3\alpha) &= v_{p0} + \beta^2/(3\alpha) = v_{\max} \\ (v_{p0} - v_{m0})(4v_{p0} - v_{m0} - 3v_{\max})t_f^2 &+ 6(x_{p0} - x_{m0}) \\ (-v_{\max} - v_{m0} + 2v_{p0})t_f &+ 9(x_{p0} - x_{m0})^2 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

上式より t_f の値を求め、その t_f の値が初期時刻から終端時刻の間に含まれれば、追跡軌道の最大速度が $v_{\max}$ となる t_f が求まったことになる。ただし、通常、最大速度が問題にされるのは、その絶対値であるので式(12)の $v_{\max}$ の符号を反転させて再び t_f の値を求める必要がある。その t_f の値が初期時刻から終端時刻の間に含まれれば、追跡軌道の最大速度が $(-v_{\max})$ となる t_f が求まったことになる。以上の結果、複数の解が求められた場合には、それらの値の中から最も小さい値を選択することにより、最大速度の絶対値が $v_{\max}$ となる軌道の中で最も到達時刻が早いものが求められる。

また、最大速度の値が v_{m0} あるいは v_{p0} と等しい場合にも、軌道の最大速度の値がロボットの許容最大値と等しくなるものの中で t_f が最も小さな値になるのは、 $\tau = -\beta/3\alpha$ が初期時刻あるいは終端時刻となり、その時刻で最高速度をとるときである、やはり式(12)により求めればよいことになる。なお、

Fig. 3 Trajectory considering acceleration

許容最大速度の絶対値が v_{m0} あるいは v_{p0} の絶対値より小さい条件では軌道が生成できないのは明らかである。

3.2 ロボットの最大加速度を越えない軌道

やはり各自由度独立に考えるとすると、軌道の加速度は時間に関する1次式となるので、最大値は初期時刻あるいは終端時刻でとることになる。初期時刻及び終端時刻での加速度の値は以下のようになる。

$$\ddot{x}(t_0) = 6at_f + 2\beta \quad (13)$$

$$\ddot{x}(t_f) = 2\beta \quad (14)$$

ロボットの許容最大加速度の値を $a_{\max}$ とすると、最大加速度の値が $a_{\max}$ となる捕獲指定時刻 t_f の中で最短のものは以下の二つの2次方程式から求められる t_f の値の中で最小の正の値を求めることにより求められる。

$$a_{\max} t_f^2 - (4v_{p0} - 4v_{m0})t_f + 6(x_{m0} - x_{p0}) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} a_{\max} t_f^2 + (v_{p0} - v_{m0})t_f + 3(x_{p0} - x_{m0}) = 0 \quad (16)$$

4. 一定加速度で運動する物体に対する最適接近軌道

運動物体が一定の加速度を有する場合には状態方程式が以下のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{K} + \mathbf{G}\mathbf{a}_m + \mathbf{H}\mathbf{a}_p \quad (17)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{a}_p$ は運動物体の加速度である。この状態方程式のもとで評価関数(1)を最小にする軌道を求めると以下のようになる。

$$\mathbf{a}_m = \frac{4}{(t_f - t)} \dot{\mathbf{x}} + \frac{6}{(t_f - t)^2} \mathbf{x} + \mathbf{a}_p \quad (18)$$

Fig. 3 に一定の加速度で運動する物体に対して軌道を生成させたシミュレーション結果を示す。白丸は式(8)により特に加速度を考慮しないで軌道を生成した軌道であり、黒丸は式(18)により加速度を考慮して生成した軌道である。式(8)により生成した軌道も運動物体の動きに追従しているものの、式(18)で生成した軌道の方がより加速度運動に対応した軌道となっているのがわかる。

5. 回転運動している物体に対する最適接近軌道

宇宙空間での人工衛星の回収作業などにおいては、回転しな

Fig. 4 Trajectory planning for accelerating object

Fig. 5 Trajectory for rotating object

がら運動している物体を扱うことが考えられる。回転している物体の回転中心からずれた箇所に存在する把持部を把持するためには、加速度運動している把持部に対する接近軌道を生成する必要がある。また、回転以外にもさまざまな加速度運動をしている物体を扱うことが想定されるが、運動物体の加速度が時間とともに変化する場合には、評価関数(1)を最小にする軌道を解析的に求めることは困難な場合が多い。

一方、評価関数(1)は捕獲時 t_f に相対位置誤差及び速度誤差として運動物体の位置や速度が評価対象に含まれるものの、それ以外の時刻においては運動物体の動きは評価に含まれてこない。

そこで、捕獲時 t_f に運動物体が存在する位置に運動物体の速度で到達する等速度運動している仮想運動物体を考え、この仮想運動物体に対する軌道を生成することにより、任意の加速度運動をする運動物体に対して評価関数(1)を最小にする軌道を生成することができるとわかる。Fig. 4 に軌道の生成手順を示す。また、Fig. 5 に回転運動している物体に対する軌道を生成したシミュレーション結果を示す。運動物体の中心は $-X$ 方向に $100[\text{mm/s}]$ で等速直線運動しており、中心のまわ

りに $36[^\circ/\text{s}]$ で回転している。

6. 実験結果

6.1 実験用マニピュレータ装置

実験装置は3軸スカラ型で空気軸受けにより水平定盤上を動くマニピュレータ、やはり空気軸受けにより浮上させた模擬の運動物体及びハンドアイカメラ・画像処理回路・制御用計算機・コントローラから構成される。

Fig. 6 に実験用のマニピュレータ装置を示す。マニピュレータは3軸スカラ型であり、二つのリンクを有する。全長は $1.5[\text{m}]$ であり、各関節部には DC サーボモータと遊星歯車減速機 (減速比 100) で構成されるアクチュエータを配している。基部を除く全体を定盤上で空気軸受けにより浮上させた状態で動作する。模擬の運動物体として、やはり空気軸受けにより浮上させた箱を用いている。空気軸受けにより浮上させているために、慣性運動を実現することが可能である。

Fig. 7 に実験装置のシステム構成を示す。マニピュレータの先端には CCD カメラが取り付けられており、模擬の運動物体の把持部の上方には長方形に配された4個の LED からなるターゲットマークが取り付けられている。CCD カメラのビデオ信号は画像処理回路に送られ LED の画面内での位置を検出する。これらの値はバスを介して制御用計算機のメモリに読み込まれる。したがって、制御用計算機で扱う画像データは各 LED 及び少数のノイズとなりデータ数として非常に少なくなるために、リアルタイムな物体の位置・姿勢検出が可能となる。また、4個の LED の画面内の位置が求められると、投影の逆変換計算を行うことによりターゲットの位置・姿勢を算出することができる。検出周期はフィールド周波数である $17[\text{msec}]$ であり、検出精度はターゲットマークから離れた距離が $100[\text{mm}]$ で、位置が $1[\text{mm}]$ 、姿勢が 1° である [6]。

6.2 実験結果

本実験装置を用いて運動物体の捕獲実験を行った。

Fig. 8 はほぼ等速度運動している物体を捕獲した結果である。マニピュレータ先端位置及び運動物体把持部の軌跡を示している。なおマニピュレータ先端位置は関節角度から計算したものである。捕獲してから停止させるまで以下のような手順で軌道生成・動作するようにあらかじめプログラムされている。

1. 運動物体を約 $5[\text{cm/s}]$ で放出
2. $t_f=6.0[\text{sec}]$ として式 (8) により軌道を生じ、目標位置として運動物体把持部前方 $1[\text{cm}]$ を指定
3. 6 秒経過後、目標位置を運動物体把持部とし、 $t_f=7.0[\text{sec}]$ として式 (8) により軌道を生じ
4. 10 秒経過後にグリップを閉じることにより捕獲
5. 各関節の制御系のダンピングにより運動物体を停止させる
空気軸受けで水平定盤上を浮上させているので、運動物体は放出後、ほぼ等速度で運動を続けている。ステップ 2 においては、画像処理システムにより算出される運動物体のターゲット位置・姿勢の値から、ターゲットマーク前方 $1[\text{cm}]$ の位置を算出して、軌道生成における運動物体の位置として用いている。

その結果、捕獲指定時刻として設定した 6 秒後に運動物体のターゲットマーク前方 $1[\text{cm}]$ の位置に、運動物体と速度を等

Fig. 6 Manipulator system

Fig. 7 System configuration

Fig. 8 Capture of object with constant velocity

Fig. 9 Capture of rotating object

しくして到達する軌道が生成される。

ステップ3においては、軌道生成の際に用いる運動物体の位置として、画像処理システムにより算出されるターゲットマーク位置・姿勢の値をそのまま用いる。また、時間をリセットして $t_f = 7.0$ [sec] として軌道を生成することにより、7秒経過後に運動物体の把持部にマニピュレータ先端が到達する軌道が生成される。

ステップ4において、グリッパを閉じることにより運動物体を捕獲し、ステップ5においては、各関節の制御を、目標速度が0の速度制御とすることにより、制御的な減衰によって運動物体を停止させている。

Fig. 9は回転しながら移動している物体を捕獲させた実験結果である。運動物体の放出時に回転を与えることにより、重心はほぼ等速度運動しながら重心のまわりにほぼ一定の角速度で回転している。やはり、まず運動物体の前方に到達する軌道を生成させた後に捕獲動作に移行しグリッパにより捕獲後に制御的な減衰により停止させている。運動物体の速度はビジョンにより検出される運動物体の位置をデジタルフィルタにより微分することにより算出している。

なお、式(8)を用いたマニピュレータの軌道計算において、 x_m として実際のマニピュレータ先端位置を用いずに、マニピュレータ先端の目標位置を用いている。つまり、式(8)によりマニピュレータ先端の目標加速度の値を求め、その値を数値積分することにより求められた目標先端位置の値はつぎの制御周期においてロボットのエンドエフェクタ位置 x_m として用いら

れる。このような計算とすることにより、マニピュレータの追従性の不足等の原因で $t \rightarrow t_f$ において過大な目標加速度を生成するのを防いでいる。したがって、生成される軌道は、もし運動物体が等速度運動しているとすれば、マニピュレータの追従性に関係なく初期条件において、加速度二乗総和が最小になる軌道となり、制御系によりその軌道にできるだけ追従するように制御している。

7. まとめ

ロボット技術の進展、特に画像認識技術の発展とともに、ロボットがビジョン等により検出された物体位置をもとにリアルタイムに軌道を生成しながら作業を行うことが増大していくものと思われる。また、静止している物体だけではなく運動している物体を扱うことも考えられる。本論文では、捕獲時の衝撃の低減や確実な捕獲動作を実現するためには、捕獲時にロボットの運動速度を運動物体と等しくすることが重要であるとの観点から、運動物体を追跡し相対速度を0として捕獲するための実時間軌道生成法を導出した。また、本軌道生成法は各時刻での物体位置・速度からその時刻での目標軌道の値を毎制御周期計算しているため、運動物体の動きの変化にも即座に対応した軌道が生成される。

本軌道生成法は運動物体と目標軌道の位置偏差及び速度偏差を用いた非常に簡単な式になっており、実時間に軌道を生成することが可能である。本軌道は等速度運動している物体に対してはシステムの状態方程式のもとで2次形式の評価関数を最小にする解として求められたものであるが、回転運動などの加速度運動している物体に対しても、捕獲時の運動物体の位置・速度と等しくなる仮想的な等速度運動物体を考えることにより同様に軌道を生成することが可能である。

また、空気軸受けにより水平定盤上を移動する3自由度スカラ型のマニピュレータを用いることにより運動物体の捕獲実験を行い、軌道生成法の有効性を検証した。マニピュレータ先端にはハンドアイカメラを取り付け、専用の画像処理回路を用いることによりリアルタイムな運動物体の位置検出を実現している。

ビジョンにより検出される運動物体の位置や姿勢の値の精度は、一般に運動物体からの距離が大きくなるに従って悪くなり、ビジョンで検出されたデータに従って生成されるマニピュレータの目標位置の値の変動が定常位置偏差の値より大きくなってくるとマニピュレータの運動に影響を及ぼすようになる。

しかし、本軌道生成法によればビジョンデータから生成される運動物体の位置や速度の値にノイズが含まれていても、運動物体の位置や速度の値を用いて直接算出されるのは目標軌道の加速度であり、その加速度の値を数値積分していくことにより速度や位置を算出するので、積分による平滑化の効果があり、ビジョンを利用したシステムに対して特に有効である。

参考文献

- [1] M. E. Kahn and B. Roth: "The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains," Trans. ASME, J. of Dyn. Sys. Meas. and Contr., G-93-3, pp.164-172, 1971.
- [2] V. T. Rajan: "Minimum-Time Trajectory Planning," Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics & Automation, pp.759-764, 1985.

- [3] 尾崎, 山本, 毛利: “B スプラインを用いたマニピュレータ近似最短時間軌道の計画”, 計測自動制御学会論文集, vol. 23, no. 11 pp.1199-1205, 1987.
- [4] V. Carber: “Optimal Intercept Laws for Accelerating Targets,” AIAA Journal, vol. 6 no. 11 pp.2196-2198, 1968.
- [5] 片山, 野村, 藤井, 佐藤: “視覚情報を用いたマニピュレータによる移動物体の捕獲 ～高精度位置計測と最適捕獲軌道～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集 pp.195-198, 1991.
- [6] 植之原, 小松, 飯倉, 三浦, 下山: “ハンドアイカメラを用いたフレキシブルマニピュレータによるペイロードの自動捕獲”, 日本機械学会創立90周年記念事業第950回講演会オプトメカトロニクス予稿集, pp.61-63, 1987.
- [7] 植之原, 小松, 三浦, 下山: “速度を持って浮遊するペイロードの柔軟アームによる捕獲”, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集 pp.17-20, 1988.
- [8] 植之原, 小松, 三浦, 下山: “速度を持つ浮遊するペイロードの柔軟アームによる捕獲”, 第2回宇宙用人工知能/ロボット/オートメーションシンポジウム講演集 pp.37-40, 1988.
- [9] 植之原, 小松, 三浦, 下山: “速度を持って浮遊するペイロードの柔軟アームによる捕獲 (第2報) —回転するペイロードの捕獲—”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集 pp.389-390, 1989.
- [10] T. Komatsu, M. Uenohara, S. Iikura, H. Miura and I. Shimoyama: “Capture of Free-Flying Payloads with Flexible Space Manipulators,” NASA Conference on Space Telerobotics, pp.35-44, 1989.

植之原道宏 (Michihiro Uenohara)

1962年10月26日生。1985年東京大学工学部計数工学科卒業。同年(株)東芝入社, 総合研究所(現研究開発センター)にてロボットの自律化の研究に従事。1993年から米国CMUに留学中。計測自動制御学会, 日本航空宇宙学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

小松 督 (Tadashi Komatsu)

1958年1月26日生。1983年大阪大学大学院前期課程修了。同年(株)東芝入社, 総合研究所(現研究開発センター)にて宇宙ロボットの制御の研究に従事。1994年4月関東学院大学工学部助教授, 現在に至る。工学博士。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本航空宇宙学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

下山 勲 (Isao Shimoyama)

1955年1月6日生。1982年東京大学大学院博士課程修了。同年同大学工学部講師。1983年同大学助教授。工学博士。マイクロロボットの研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

飯倉省一 (Shoichi Iikura)

1948年8月16日生。1971年東京工業大学工学部機械物理工学科卒業。同年(株)東芝入社, 総合研究所(現研究開発センター)にて原子力機器の研究開発に従事。現在特殊ロボットの機構及びシステムの研究開発を担当。日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

三浦宏文 (Hirofumi Miura)

1938年3月17日生。1965年東京大学大学院博士課程修了。同年同大学工学部講師。1966年同大学助教授。1978年同大学教授。工学博士。宇宙ロボット, マイクロロボットの研究に従事。日本機械学会, 日本システム工学会, IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)