非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータの
障害物回避運動計画*城 間 直 司^{*1}, Kevin M. LYNCH^{*2}
荒 井 裕 彦^{*3}, 谷 江 和 雄^{*3}Motion Planning for a Three-Axis Planar Manipulator
with a Passive Revolute JointNaoji SHIROMA^{*4}, Kevin M. LYNCH,
Hirohiko ARAI and Kazuo TANIE^{*4} Inst. of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba,
Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

Obstacle avoidance motion planning for a three-axis planar manipulator with a passive revolute third joint from one zero velocity state to another is investigated. This kind of manipulator is small-time locally controllable on its zero velocity states and can follow any arbitrarily path in zero velocity states almost exactly. We constructed positioning trajectory by connecting rotational and translational motion segments which are preferred motion of the manipulator considering its dynamics and can be executed at higher speeds. The way of constructing trajectories makes six-dimensional trajectory planning be reduced computationally as simpler three-dimensional path planning and time-scaling on the specified paths. The algorithm for obstacle avoidance motion planning is presented. The experimental result shows that the manipulator can reach the desired configuration according to the planned trajectory.

Key Words: Mechanics and Robotics, Computer Control, Positioning, Obstacle Avoidance Motion Planning, Nonholonomic Constraint, Passive Revolute Joint, Underactuated Manipulator, Path Planning, Time-scaling

1. はじめに

近年, 一般化座標数よりも少ない数の制御入力(アクチュエータ)で駆動される underactuated manipulator の研究が盛んに行われてきている. このようなシステムの実現により, システムの軽量化, 作業装置の単純化, コストダウン, そして, 消費エネルギーの減少などを図ることが可能である.

Oriolo と中村⁽¹⁾は, 非駆動関節を有する水平マニピュレータシステムに対して, その拘束の可積分性についての議論を行い, 特別な形態を除いて非駆動関節による拘束が, 2 階の非ホロノミックになることを導いた. そして, その拘束を利用することにより非駆動関節部にブレーキを搭載しなくともその制御が可能であることを示し, そのようなシステム

が, 滑らかな時不変状態フィードバックにより平衡点へ漸近安定化不可能となることを導いた. その後, この2階の非ホロノミック拘束を利用して, 水平2軸1非駆動関節のマニピュレータの制御⁽²⁾⁻⁽⁵⁾, 水平3軸1非駆動関節のマニピュレータの可制御性の証明⁽⁶⁾および安定化⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾など, いろいろと underactuated manipulator の研究が行われている.

これらの研究では, 自由空間内での underactuated manipulator の運動を考えており, これまでに, 障害物が存在する空間での underactuated manipulator の障害物回避運動計画はほとんど行われてこなかった. しかし, 実環境においては, そのような自由空間の存在はむしろ稀であり, underactuated manipulator に対しても, 障害物が存在する空間内での作業が可能であることが必要とされる. そこで, 本論文では, 障害物空間における非駆動関節を有する水平マニピュレータの障害物回避運動計画法を提案する.

対象とするシステムとして, ベース部の2つの関節が駆動回転関節であり, 第3関節が非駆動回転関節である水平3

* 原稿受付 1999年6月18日.

^{*1} 正員, 筑波大学機能工学系(先端学際領域研究センター)
(☎ 305-8573 つくば市天王台1-1-1).^{*2} Northwestern University (Evanston, IL 60208 USA).^{*3} 正員, 工業技術院機械技術研究所(☎ 305-8564 つくば市並木1-2).

E-mail: naoji@roboken.esys.tsukuba.ac.jp

軸マニピュレータを考え、障害物空間における対象とするマニピュレータのある一般化速度ゼロの状態から他のゼロ速度状態への障害物回避運動計画を行う。この場合、実際の障害物のみならず、自由リンクに力を加えるリンクの存在自体がマニピュレータの運動を拘束する要因となっている。本運動計画法は、そのことも考慮に入れた非駆動関節を有するマニピュレータに対する実際に実行可能な障害物回避経路を与えてくれる。また、本運動計画法は、非駆動関節を有するマニピュレータのみに対するものでなく、ホバークラフトや摩擦のない水平面上での物体の一点接触によるプッシングマニピュレーションなどの同様な力学系となる非駆動関節を有するシステムに対しても適用可能である。

これまでの非ホロノミックシステムに対する障害物回避運動計画問題のほとんどは、移動ロボットなどの1階の非ホロノミックシステムに対するものである。2階の非ホロノミックシステムに対する障害物回避問題としては、BergermanとXu⁽¹⁰⁾のブレーキ付きの非駆動関節を有するマニピュレータによる、ブレーキのOn/Offを切り替えることでその制御を行った障害物回避運動計画が上げられる。本論文で提案する運動計画法では、マニピュレータの非駆動関節部にブレーキを用いず、非駆動関節に起因する2階の非ホロノミック拘束を利用することで対象とするシステムの障害物回避運動計画を行う。

障害物回避軌道は、文献⁽⁶⁾で示した自由リンクの並進運動要素および撃心まわりの回転運動要素を繋ぎ合わせることで構成する。このように位置決め軌道を構成することにより、マニピュレータの6次元状態空間での軌道計画問題を、マニピュレータの3次元形状空間での経路計画問題とその経路に沿った2次元位相空間での時間軸伸縮問題とに問題を分けて簡単化できる。そして、提案した障害物回避運動計画法と文献⁽⁷⁾の非駆動関節を有するマニピュレータに対するフィードバック制御手法を用いて、実際のマニピュレータにより障害物回避制御を行い、提案した運動計画法の有効性を示す。ここで、障害物は既知で静止しているとし、オフラインにより障害物回避運動計画を行う。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、対象とするシステムのモデル化を行う。第3章では、対象とするシステムの可制御性および軌道計画の経路計画と経路に沿った時間軸伸縮への分離による障害物回避運動計画法について述べる。第4章では、提案した運動計画法の検証実験について述べ、そして、第5章で本論文をまとめる。

2. システムのモデル

対象とする第3関節が非駆動回転関節である水平3軸マ

Fig. 1 Three-axis planar manipulator with a passive revolute third joint.

ニピュレータを図1に示す。第1, 第2関節ともに回転駆動関節としているが、第3関節に並進加速度を加えられるならば、回転、直動どちらであってもよい。第3関節は非駆動回転関節となっており、直接は制御できない。同じ第3リンク姿勢を実現する、2つの第1, 第2リンク姿勢が存在し、ここではどちらか一方の姿勢のみをとるとする。つまり、第2リンク角 θ_2 を特異姿勢を越えないように、 $-\pi < \theta_2 < 0$ 、または $0 < \theta_2 < \pi$ のどちらかの範囲内に限定する。

障害物回避運動計画において、第1, 第2リンクの存在およびそれらの角度制限などはマニピュレータの運動を拘束する要因となる。それらも一種の障害物とみなすと、それら新たな障害物を加えた、新たな障害物空間における先端の第3リンク（自由リンク）のみを考えた障害物回避問題としてこの問題を扱うことが可能である。

ここで、自由リンクである第3リンクについて考える。図1において、 Σ_B は、水平面内に固定された基準座標系、 Σ_L は、第3関節を原点とし、第3リンクに固定されたリンク座標系（ x_3 軸はリンクの重心を通る）、 (x_3, y_3) は、基準座標系 Σ_B における第3関節の位置を、 θ_3 は、基準座標系 Σ_B とリンク座標系 Σ_L がなす角度を表す。第3関節の一般化座標は (x_3, y_3, θ_3) で表され、第3リンクの質量およびリンクの重心まわりの慣性モーメントをそれぞれ m_3 , I_3 、第3関節-重心間の距離を r_3 とする。

第3関節の非駆動回転関節に起因する2階の非ホロノミック拘束は、次のように表せる。

$$-\ddot{x}_3 \sin \theta_3 + \ddot{y}_3 \cos \theta_3 + \lambda \ddot{\theta}_3 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\lambda \equiv r_3 + I_3/(m_3 r_3)$ とし、第3関節-撃心間距離

を表す。また、実際の障害物は既知で静止していると仮定する。次章の障害物回避経路計画においては、マニピュレータの運動の拘束をも一種の障害物とみなして、それらを加えた障害物空間内での自由リンクのみを考慮した障害物回避運動計画を拘束(1)を利用して、オフラインで行う。

3. 障害物回避運動計画

3.1 可制御性 通常のマニピュレータは、各関節にアクチュエータを保持しその駆動力により、関節角度制限、作業空間制限などを満足すれば望みの作業を行うことが可能である。しかし、ここで対象とするマニピュレータは、非駆動関節を有するマニピュレータであり、非駆動関節部では駆動力が発生できないため、マニピュレータが運動できる方向には制約があり、望みとする作業が遂行可能であるかどうかは不明ではない。そこで本節では、障害物が存在する空間での対象とする非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータの可制御性について述べる。

対象とするマニピュレータの第1および第2リンクは、アクチュエータ駆動力により望みの姿勢へと制御することが可能である。よって、自由リンクである第3リンクの可制御性が示されれば、この非駆動関節を有するマニピュレータ全体の可制御性を示したことになる。

そこで、ここでは第3リンクのみを考える。その動力学的特性を表す状態方程式は、拘束(1)より次のように表せる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{pmatrix} = \mathbf{g}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})u_1 + \mathbf{g}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})u_2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= (x_3, y_3, \theta_3)^T, \quad u_1 = \ddot{x}_3, \quad u_2 = \ddot{y}_3, \\ \mathbf{g}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= (\dot{x}_3, \dot{y}_3, \dot{\theta}_3, 0, 0, 0)^T, \\ \mathbf{g}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= (0, 0, 0, 1, 0, \sin \theta_3/\lambda)^T, \\ \mathbf{g}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= (0, 0, 0, 0, 1, -\cos \theta_3/\lambda)^T \end{aligned}$$

このシステムは、文献⁽⁸⁾のシステムと同じであり、ここでは、このシステムが微小時間局所可制御であることを証明している(詳しくは文献⁽⁸⁾ Appendix A 参照)。システムが微小時間局所可制御であるとは、大まかにいうと、システムが、その平衡点の近傍のどの点へも、任意の微小時間でその平衡点の近傍を離れずにたどり着くことができることを意味する。システムが微小時間局所可制御であるならば、そのシステムは、そのゼロ速度近傍内ではあるが、任意の経路をたどれ、Sussmann⁽¹¹⁾は、その十分条件を与えた。

システム(2)(第3リンク)は微小時間局所可制御であるので、この非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータ自体微小時間局所可制御となる。これは、対象とする非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータは、全ての関節が駆動される水平3軸マニピュレータのとりうる全ての経路をほぼ正

確にたどれることを示している。すなわち、障害物空間において、もし、全ての関節が駆動される水平3軸マニピュレータに対して初期姿勢から目標姿勢へ到達可能な障害物回避経路が存在するならば、非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータに対してもそのような経路が存在する。

3.2 軌道計画の経路計画と時間軸伸縮への分離 対象とするマニピュレータは、前節で示したように微小時間局所可制御であるため、全ての関節が駆動された水平3軸マニピュレータが実行可能な全ての経路をほぼ正確にたどることができる。このことは、これまでに全ての関節が駆動されるマニピュレータに対して用いられてきた障害物回避運動計画法を、そのまま非駆動関節を有するマニピュレータに対しても用いることが可能であり、それらにより得られた障害物回避経路を、対象とするマニピュレータに対する障害物回避経路として使用できることを意味している。しかしその場合、マニピュレータは、常に一般化速度がほぼゼロとみなせる状態で経路に追従していくため、多くの実行時間がかかる可能性がある。そこで、マニピュレータの動力学を考慮した短時間で実行可能な経路を障害物回避経路として選ぶことにする。

ここで、簡単のため第3リンクのみを考えて話を進める。第3リンクの状態方程式(2)を、

$$\ddot{x}_{3P} = u_t \cos \theta \quad (3)$$

$$\ddot{y}_{3P} = u_t \sin \theta \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_3 = u_n / \lambda \quad (5)$$

のような座標変換により、第3リンクの撃心 (x_{3P}, y_{3P}) について書き直すと次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{pmatrix} = \mathbf{X}_0(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{X}_1(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})u_t + \mathbf{X}_2(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})u_n \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (x_{3P}, y_{3P}, \theta_3)^T, \\ \mathbf{X}_0(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) &= (\dot{x}_{3P}, \dot{y}_{3P}, \dot{\theta}_3, 0, 0, 0)^T, \\ \mathbf{X}_1(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) &= (0, 0, 0, \cos \theta_3, \sin \theta_3, 0)^T, \\ \mathbf{X}_2(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) &= (0, 0, 0, 0, 0, 1/\lambda)^T \end{aligned}$$

ここで、 u_t 、 u_n は、それぞれ非駆動関節部におけるリンク接線方向、リンク法線方向加速度入力である。

対象とするマニピュレータに任意の経路をたどらせた場合、多くの実行時間がかかってしまうのは、自由リンクのほぼゼロ速度状態の運動、例えば、

$$[X_2, [X_0, X_1]] = (0, 0, 0, -\sin \theta_3/\lambda, \cos \theta_3/\lambda, 0)$$

のような、ベクトル場のLie括弧積により生じる新たな方向への運動(Lie bracket motion)を多く含むためである。つまり、ほぼゼロ速度状態の運動である自由リンクのLie bracket

motion を減らすことにより、実行時間の短い障害物回避経路を得ることができる。そこで、自由リンクの動力学を考慮し、Lie bracket motion を少なくしたより短時間で実行可能な軌道を障害物回避経路として用いることにする。

ベクトル場 X_1 および X_2 は、それぞれリンク接線方向およびリンク撃心まわりの回転に関する運動を表すものであり、それらは Lie bracket motion ではない、リンクの動力学的特性を考慮した高速で実行可能な運動となっている。そこで、それらベクトル場 X_1 , X_2 方向のみの運動を用いることで、高速で実行可能な経路を構成することにする。

これらのベクトル場 X_1 , X_2 は、文献 (7) で示したリンクの並進軌道要素および回転軌道要素に対応する。より短時間で実行可能な経路を得るため、リンクの動力学を考慮した短時間で実行可能な運動であるベクトル場 X_1 , X_2 方向への運動（並進運動要素および回転運動要素）の繋ぎ合わせにより障害物回避経路を計画する。この場合、運動要素の切り替え時のみリンクを速度ゼロの状態に持っていけばよく、各運動要素の経路途中の速度歴は任意に指定することが可能である。

このように軌道を構成することで、障害物が存在する6次元状態空間における複雑な障害物回避軌道計画問題を、より簡単で計画が容易な障害物が存在する3次元形状空間における各運動要素により初期姿勢から目標姿勢までを繋ぎ合わせる経路計画問題と、経路上の各運動要素における2次元位相空間での速度歴決定による時間軸伸縮問題とに分けて問題を簡単化できる。

また、このような運動要素の繋ぎ合わせによる障害物回避経路計画では、各運動要素の連結時は、自由リンクの一般化速度はゼロであり、その時点でのシステムのドリフト項の値はゼロとなる。よって、2階の非ホロノミックシステムである対象とするシステムを経路計画の段階においては、ドリフト項の存在しない1階の非ホロノミックシステムとして扱うことが可能である。その時、並進および回転運動要素に対応するベクトル場は、それぞれ、 $X_1' = (\cos \theta_3, \sin \theta_3, 0)$, $X_2' = (0, 0, 1/\lambda)$ となる。このように2階の非ホロノミックシステムを1階の非ホロノミックシステムとして扱えることができることにより、これまでに1階の非ホロノミックシステムに対して研究されてきた障害物回避運動計画法を適用することが可能となる。

3.3 経路計画

3.3.1 経路探索 対象とするマニピュレータは、その経路計画を前節で示したように2つの運動要素の繋ぎ合わせにより構成することで、1階の非ホロノミックシステムとして

Fig. 2 Algorithm of path search.

扱うことが可能である。よって、経路計画に対しては、これまでに開発された運動学的拘束を受ける移動ロボット⁽¹²⁾、ロボット・プッシング⁽¹³⁾の経路計画法の適用が可能であり、それを改良したプランナにより障害物回避経路を探索する。

経路探索は、ある評価基準に基づき評価の良いところから先に探索を行う簡単な最良優先探索により行う。マニピュレータは、各運動要素の切り替え時にその速度をゼロとしなければならない。そこで、より短時間で実行可能な経路を得るための評価基準として、運動要素の切り替え数を用い、それを最小にするように経路探索を行う。ここでは、マニピュレータの運動を拘束する第1、第2リンクの存在、角度制限なども一種の障害物として扱い、それら障害物を加えた新たな障害物空間で第3リンクのみを考えて経路の探索を行う。

プランナによる探索のアルゴリズムは、以下にのようになる（図2）。まず、経路解空間を微小なグリッドセルに分割し、その微小に分割した経路解空間を第3リンクの各運動要素による4方向への速度 $(+X_1', -X_1', +X_2', -X_2')$ の微小時間における4方向への微小移動により、障害物を回避する経路の本探索を行う。微小移動により移動した新たな形状に対し、その評価を行い、いままで訪れた形状の中で最も評価のよいものから先に探索していく。障害物等に接触した場合は、その次に評価のよい形状に戻りそこから探索を再開する。そして、指定されたゴールエリアにたどり着く、あるいは指定した探索ステップ数内に解がみつからない場合、経路の探索を終了する。

経路の探索は、評価によりソートされたリストと木探索により行う。このアルゴリズムによる経路探索では、厳密な解経路を得ることができないが、他の厳密な解を得ることのできるアルゴリズム⁽¹⁴⁾を適用することも可能である。プランナは、探索のステップ幅つまり微少移動距離が十分小さく、かつ障害物回避を行う解経路が存在するなら、それらを探索することが可能である。

3.3.2 プランナ 前小節で述べたアルゴリズムを用いて、プランナにより障害物回避経路を計画する。プランナにおいてマニピュレータおよび障害物は、多角形で表され、それらの多角形の交差により障害物への接触を検知する。また、マニピュレータが関節角度制限、あるいは特異姿勢などに陥った場合も障害物に接触したとみなす。この場合、各関節の角度制限や特異姿勢への許容する接近の度合などを指定できる。

プランナの設定パラメータとして、ゴールエリアの大きさ、探索ステップ幅、経路解空間の微小グリッドセルへの分割の細かさなどを指定できる。これらのパラメータは、相互に依存したものとなっている。各微小グリッドセルの大きさは、1回の探索ステップで別のグリッドセルに移動できる程度に小さくなくてはならず、また、ゴールエリアは、1回の探索ステップでそこを飛び越せない程度に大きくなくてはならない。

探索の計算量は、経路解空間の分割の細かさおよび多角形で表されるマニピュレータや障害物の頂点の数に依存する。経路解空間の3つの一般化座標 (x_3, y_3, θ_3) を簡単のため各座標とも同じように c 分割したとすると、探索すべきその微小グリッドセルは、 c^3 である。マニピュレータおよび障害物の多角形の頂点の数をそれぞれ m 、 n とすると、障害物検出に mn の時間を要し、他の操作には定数時間のみ要する。従って、このアルゴリズムの計算量は、 $O(mnc^3)$ である。また、ゴールエリアの大きさ V は、 c^{-3} に比例するので、このアルゴリズムの計算量はそれを用いて、 $O(mn/V)$ と表せる。経路空間の微小グリッドセルへの分割を細かくすれば、それだけ、ゴールエリアを小さくすることができ、より厳密な解経路を求めることができる反面、探索のための計算量が大きくなってしまふ。

このプランナが使用するアルゴリズムにより得られる経路は、自由リンクのみを考えて計画したものである。しかし、関節角度制限などのマニピュレータの運動の拘束も一種の障害物とみなして計画を行っているため、結果として求まる経路は、マニピュレータの3リンク全てを考慮した障害物回避経路となっている。

3.4 時間軸伸縮 障害物回避経路が決定した後、各運動要素ごとにその経路に沿った時間軸伸縮率を決定することにより、経路全体の実行時間を決定することができる。各運動要素の経路は、第3リンク初期位置および目標位置をそれぞれ、 $\mathbf{x}(0) = (x_{30}, y_{30}, \theta_{30})$ 、 $\mathbf{x}(T) = (x_{3d}, y_{3d}, \theta_{3d})$ とし、経路長を正規化した経路パラメータ $s \in [0, 1]$ を用いて次のように表せる。

(i) 並進運動要素経路

$$x_3(s) = x_{30} + (x_{3d} - x_{30})s \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$y_3(s) = y_{30} + (y_{3d} - y_{30})s \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\theta_3(s) = \theta_{30} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(ii) 回転運動要素経路

$$x_3(s) = x_{3P} - \lambda \cos \theta_3(s) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$y_3(s) = y_{3P} - \lambda \sin \theta_3(s) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\theta_3(s) = \theta_{30} + (\theta_{3d} - \theta_{30})s \quad \dots\dots\dots (12)$$

s は任意に指定でき、マニピュレータの時間最適な障害物回避軌道を求める問題は、求められた障害物回避経路上の各運動要素ごとの2次元位相空間 $(s, \dot{s})$ での時間最適な軌道を求める問題となる。各運動要素ごとの時間最適な経路の時間軸伸縮 $t(s)$ は、アクチュエータの制限より得ることができ、それらを繋ぎあわせた軌道が時間最適な軌道となる。Bobbrowら⁽¹⁵⁾、ShinとMcKay⁽¹⁶⁾による与えられた経路に対するアクチュエータのトルク制限を考慮した時間最適軌道を計算するアルゴリズムなどを用い、時間最適な時間軸伸縮を求めることができる。

しかし、時間最適軌道は、あるアクチュエータが常に飽和状態にあるため、公称軌道から実行軌道がずれた場合の誤差修正のためのフィードバック制御などを行う余地が残されていない。そこで、実際には、時間最適ではないが、誤差修正のためのフィードバック制御が行えるように軌道を選ぶ必要がある。次章の実験においては、高速かつロバストとなるように実験的に実行時間を決定した。

4. 実験

提案した非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータの障害物回避運動計画法により、プランナを用いて障害物回避のための経路を計画し、実機により計画した軌道の実行を行った。図3(a)は、プランナにより計画された障害物回避経路である。図3(a)中、左上の図がマニピュレータ初期姿勢、左下の図がマニピュレータ目標姿勢である。初期姿勢の図において、図中央下部にあるリンクが第1リンクで、第2、第3リンクを連結する第3関節が非駆動回転関節となっている。

(a) Planned trajectory.

(b) Executed result.

Fig. 3 Executed result of planned trajectory.

Fig. 4 Experimental Manipulator.

正方形で表されたものが障害物であり、作業空間上には4つの障害物が存在する。図3(a)中の各図は、マニピュレータ初期姿勢から目標姿勢までを繋ぐ運動要素で、奇数番号の図が回転運動要素、偶数番号の図が並進運動要素をそれぞれ表している。初期姿勢から目標姿勢までの経路は、11の運動要素を繋ぎ合わせることで構成されている。

各運動要素ごとに文献⁽⁷⁾のフィードバック制御により軌道の安定化を図るが、フィードバック制御によって抑制できなかった誤差に対処するために経路の計画段階において、 $0.26[m] \times 0.26[m]$ の大きさの実際の作業空間上の障害物を実際のものより少し大きくして、 $0.3[m] \times 0.3[m]$ の大きさの

Fig. 5 Executed result of planned trajectory (photos).

正方形の障害物として経路計画を行った。また、実際のマニピュレータの第1および第2関節角度制限は、 $-1.57[\text{rad}] < \theta_1 < 1.57[\text{rad}]$, $0 < \theta_2 < 2.356[\text{rad}]$ であるが(θ_1 は基準座標 Σ_B y 軸方向からの角度, θ_2 は第1リンクと第2リンクがなす角度), 経路計画の段階では、各関節角度制限をそれぞれ、 $-1.17[\text{rad}] < \theta_1 < 1.17[\text{rad}]$, $0.5[\text{rad}] < \theta_2 < 1.95[\text{rad}]$ として、実際のものより厳しくした。

図4のような水平3軸マニピュレータを用い計画経路に従ってフィードバック制御による位置決め制御実験を行った。マニピュレータの各リンク長は、全て $0.3[m]$ である。第1, 第2関節はそれぞれ $35[\text{W}]$, $20[\text{W}]$ の減速機付DCサーボモータで駆動される。第3関節は非駆動回転関節であり、アクチュエータもブレーキも有さない。各関節の角度はロータリーエンコーダで検出される。制御には、80486 CPU (50 MHz) のパーソナルコンピュータを用いた。自由リンクの撃心と非駆動関節間の距離は、 $0.205[m]$ である。制御則の実装においては、仮想内部モデル追従制御⁽¹⁷⁾を参考にした制御系を用いた。

図3(b)は、計画した経路を実機にて実行したときの実験結果である。破線で表された正方形は計画に使用した障害物を表し、その内部の正方形が実際の障害物を表している。各運動要素の実行時間は、実機に合わせ制御が高速で、よりロバストとなるように実験的に求めた。例えば、第1および

第2運動要素の実行時間は、それぞれ、約0.36[s]、2.4[s]となる。また、各運動要素の切り替え時において、0.2[s]の小停止期間を設定した。計画した経路を実機により実行した場合、初期誤差、モデル誤差などにより軌道誤差を生じてしまう。そこで、各運動要素ごとに誤差抑制のためのフィードバック制御を行った。マニピュレータは、計画した経路に従い、障害物を回避して目標姿勢に到達しているのがわかる。

図5は、計画した軌道を実行したときの写真である。左上が初期姿勢、右下が最終姿勢である。図5は、図3(b)の実行結果とは反対の角度からの写真である。実験結果より、提案した障害物回避運動計画法により障害物を回避可能な経路が計画でき、文献⁽⁷⁾のフィードバック制御と組み合わせることで、実際に非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータでその経路が実行可能であることが確認できた。

5. まとめ

本論文では、障害物が存在するような実環境への非駆動関節を有するシステムの適用を考え、その時必要とされる障害物空間における非駆動関節を有するシステムの障害物回避運動計画法を提案した。自由リンクの動力学を考慮した、高速で実行可能な運動である並進および回転運動要素を繋ぎ合わせて高速で実行可能な障害物回避経路を構成した。

このようにして位置決め軌道を構成することにより、マニピュレータの6次元状態空間での複雑な軌道計画問題を3次元形状空間での経路計画問題と2次元位相空間でのその経路に沿った時間軸伸縮問題とに分けて問題を単純化することが可能である。

また、マニピュレータの運動を拘束する第1、第2リンクの存在、角度制限なども一種の障害物として扱うことで、自由リンクのみを考えて求めた障害物回避経路が、結果としてマニピュレータの3リンク全てを考慮した障害物回避経路として得られることを示した。

このように経路を構成した場合、経路計画において、自由リンクは、各運動要素の切り替え時には、その一般化速度がゼロであるので、対象とするシステムをドリフト項の存在しない1階の非ホロノミックシステムとして扱えることを示した。よって、経路計画では、これまでの1階の非ホロノミックシステムに対する障害物回避運動計画法を適用可能である。

提案した障害物回避運動計画法と文献⁽⁷⁾の非駆動関節を有するマニピュレータに対するフィードバック制御手法を用いて、第3軸が非駆動関節である水平3軸マニピュレータにより障害物回避制御を行った。マニピュレータは、計画した軌道に従って障害物を回避し、目標姿勢にたどり着くことができ、提案した運動計画法の有効性が確認できた。今回は、

非駆動関節を有するシステムとして非駆動関節を有するマニピュレータを取り上げたが、本障害物回避運動計画法は、ホバークラフトや摩擦のない水平面上での物体の一点接触によるプッシングマニピュレーションなどの同様な力学系をもつ非駆動関節を有するシステムへも適用可能である。

参考文献

- (1) G. Oriolo and Y. Nakamura: "Free-Joint Manipulators: Motion Control under Second-Order Nonholonomic Constraints," *IEEE/RSJ Intl. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp.1248-1253, 1991.
- (2) 中村仁彦, 濃沼雅史, 鈴木高宏: "自由関節を持つ平面アームの力オスの挙動と非線形制御-ドリフトを持つ非ホロノミック機械の制御-", 日本ロボット学会誌, 14-4, pp.602-611, 1996.
- (3) 中村仁彦, 鈴木高宏: "非ホロノミック機械系の平均化法による挙動解析と振幅変調制御-平面2R自由関節マニピュレータの位置制御-", 日本ロボット学会誌, 16-3, pp.407-416, 1998.
- (4) A. De Luca, R. Mattone and G. Oriolo: "Control of Underactuated Mechanical Systems: Application to the Planar 2R Robot", *Proc. 35th Conf. on Decision and Control*, pp.1455-1460, 1996.
- (5) 荒井裕彦, 谷江和雄, 城間直司: "非駆動関節を有するマニピュレータの時間軸伸縮による制御", 日本ロボット学会誌, 15-6, pp.561-568, 1998.
- (6) 荒井裕彦: "非駆動関節を有する3自由度マニピュレータの非ホロノミック拘束下における可制御性", 日本ロボット学会誌, 14-5, pp.751-758, 1996.
- (7) 荒井裕彦, 谷江和雄, 城間直司: "非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータの非ホロノミック拘束下におけるフィードバック制御", 日本ロボット学会誌, 15-6, pp.943-952, 1997.
- (8) H. Arai, K. Tanie and N. Shiroma: "Nonholonomic Control of a Three-DOF Planar Underactuated Manipulator", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 14-5, pp.681-695, 1998.
- (9) 小林啓吾, 井村順一, 吉川恒夫: "自由関節を含む3自由度マニピュレータの非ホロノミック制御", 計測自動制御学会論文集, 33-8, pp.799-804, 1997.
- (10) M. Bergerman and Y. Xu: "Planning Collision-Free Motions for Underactuated Manipulators in Constrained Configuration Space," *Proc. 1997 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, pp.549-555, 1997.
- (11) H. J. Sussmann: "A General Theorem on Local Controllability," *SIAM J. Control and Optimization*, 25-1, pp.158-194, 1987.
- (12) J. Barraquand and J.-C. Latombe: "Nonholonomic Multi-body Mobile Robots: Controllability and Motion Planning in the Presence of Obstacles," *Algorithmica*, 10, pp.121-155, 1993.
- (13) K. M. Lynch and M. T. Mason: "Stable Pushing: Mechanics, Controllability, and Planning," *Intl. Journal of Robotics Research*, 15-6, pp.533-556, Dec. 1996.

- (14) J.-P. Laumond, P. E. Jacobs, M. Taïx and R. M. Murray:
"A Motion Planner for Nonholonomic Mobile Robots,"
IEEE Trans. on Robotics and Automation, **10**-5, pp.577-593, 1994.
 - (15) J. E. Bobrow, S. Dubowsky and J. S. Gibson: "Time-Optimal Control of Robotic Manipulators Along Specified Paths," *Intl. Journal of Robotics Research*, **4**-3, pp.3-17, 1985.
 - (16) K. G. Shin and N. D. McKay: "Minimum-Time Control of Robotic Manipulators with Geometric Path Constraints," *IEEE Trans. on Automatic Control*, **AC-30**-6, pp.531-541, 1985.
 - (17) 小菅一弘, 古田勝久, 横山竜昭: "ロボットの仮想内部モデル追従制御系—メカニカル・インピーダンス制御への応用—," 計測自動制御学会論文集, **24**-1, pp.55-62, 1988.
-