

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

荒井 裕彦^{*1} 谷江 和雄^{*1} 城間 直司^{*2}

Time-scaling Control of an Underactuated Manipulator

Hirohiko Arai^{*1}, Kazuo Tanie^{*1} and Naoji Shiroma^{*2}

Position control of an underactuated manipulator that has one passive joint is investigated. The dynamic constraint caused by the passive joint is second-order nonholonomic. Time-scaling of the active joint trajectory and bi-directional motion planning from the initial and the desired configurations provide an exact solution of the positioning trajectory. The active and passive joints can be positioned to the desired angles simultaneously by swinging the active joints only twice. Feedback control constrains the manipulator along the planned path in the configuration space. Simulation and experimental results show the validity of the proposed methods.

Key Words: Underactuated Manipulator, Passive Joint, Nonholonomic Constraint, Time-scaling

1. はじめに

ロボットマニピュレーションにおいて、ある与えられたクラスの仕事を行う際に、作業固有の力学的特性を有効に活用すれば、従来よりも単純な構成の装置を用いて作業を実現することが可能となる。特に、作業に付随する一般化座標の数よりも制御入力数が少ない underactuated mechanism の制御については、非ホロノミック系の観点からの研究が盛んになりつつある。その一例として、アクチュエータの数よりも多くの軸数を有するマニピュレータが制御できるようになれば、マニピュレータの軽量化・コストダウン・省エネルギー化・耐故障性等に貢献できると考えられる。

アクチュエータを持たない非駆動関節を有するマニピュレータ (underactuated manipulator) は、非駆動関節におけるトルク = ゼロという条件による力学的な拘束を受ける。特殊な関節配置のマニピュレータを除き、この拘束は積分不可能な微分方程式で表される非ホロノミック拘束となる。この拘束を利用すれば、非駆動関節がブレーキ等を備えない完全な自由関節であっても、能動関節の運動によってマニピュレータ全体を目標の形状に位置制御できる可能性がある。

非駆動関節を有するマニピュレータにおける非ホロノミック拘束は、これまで典型的な非ホロノミック系として研究が進められてきた車輪型移動体や浮遊リンク系などとは異なる特徴をもつ。これらにおける拘束は、滑りのない転がり接触または角

運動量保存則に起因し、変位 q および速度 \dot{q} を含む積分不可能な 1 階の微分方程式 $H(q)\dot{q} = 0$ として表される。また状態方程式は、速度入力 u をもちドリフト項がゼロの対称アフィン系 $\dot{q} = G(q)u$ となる。一方、非駆動関節を有するマニピュレータにおける動力学的拘束は、 $M_p(q)\ddot{q} + b_p(q, \dot{q}) = 0$ という形で表され、加速度 \ddot{q} までを含む積分不可能な 2 階微分方程式 (2 階の非ホロノミック拘束) となる。また状態方程式は $\frac{d}{dt}[q^T, \dot{q}^T]^T = f(q, \dot{q}) + G(q)u$ となり、変位 q および速度 \dot{q} を状態変数として、加速度または力/トルクを入力 u とする、ドリフト項 $f(q, \dot{q})$ を含み対称ではないアフィン系となる。

対称アフィン系については、chained form や Caplygin form などのいわゆる標準形式への変換や、それに基づく軌道計画・フィードバック制御の研究が現在ではかなり進んでいる。しかしそれらの多くはドリフト項を含むアフィン系には直接適用できない。そのため非駆動関節を有するマニピュレータの統一的な制御手法はいまだ確立されておらず、個別の力学系の性質に大きく依存した手法をとらざるを得ないのが現状である。

ここで、非駆動関節を有するマニピュレータを非ホロノミック系として扱った研究を概観しよう。まず、Oriolo と中村 [1] は非駆動関節による拘束条件が積分不可能で非ホロノミックとなる条件を導いた。また同文献では、非駆動関節に重力などのポテンシャル項が作用しない場合は、滑らかな状態フィードバックによる平衡点への漸近安定化が不可能であることが示されている。こうしたマニピュレータの力学の一次線形近似系は不可制御となる。これに対して、倒立振り子などの鉛直平面内で非駆動関節を有する機構 (これらも 2 階の非ホロノミック系である) の線形近似系は、重力の作用によって可制御となり、滑らかな状態フィードバックを用いて平衡点へ安定化できる。

非駆動関節を有するマニピュレータの最も単純な形態として、

原稿受付 1997 年 8 月 12 日

^{*1}機械技術研究所

^{*2}筑波大学

^{*1}Mechanical Engineering Laboratory, AIST, MITI

^{*2}University of Tsukuba

第1軸が能動, 第2軸が非駆動の二つの回転関節からなる水平2軸マニピュレータが考えられる. 文献[1]における不可積分性の判定法によれば, 先端の自由リンク重心位置が非駆動関節上にないときには拘束は2階非ホロノミックである. De Lucaら[5]によれば, この構造のマニピュレータは局所可到達ではあるが, Sussmannによる局所可制御性の十分条件[14]は満たさない. 大域的な可制御性も解析的には証明されていない.

この形式のマニピュレータの位置制御については, まず中村ら[2]が, 能動関節に与える周期入力の振幅を非駆動関節の角度・角速度に応じて変化させることにより, 非駆動関節の角度を $\pm\pi/2$ に漸近安定化した. 中村ら[3]はさらに, 能動関節に周期入力を与えた際の非駆動関節の挙動をPoincaré写像で表し, 周期入力の振幅変調によるフィードバック制御を構成して非駆動関節を任意の角度に位置制御した. 鈴木ら[4]は周期入力を与えた系の時間平均をとって簡単な形に近似する平均化法を適用し, リアプノフ関数を用いて解析的にフィードバック則を設計している. またDe Lucaら[5]は, 系のnilpotent近似に基づいて状態を目標点に近づける開ループ制御を繰り返すことによる位置制御を提案した.

この他に, 水平面内で3軸をもち, 第3関節が非駆動の回転関節であるマニピュレータの制御についても研究が行われている. 文献[6][7]ではこのマニピュレータと等価な系の平衡点における局所可制御性が証明されている. 筆者[8]は自由リンク撃心の挙動に着目し, 任意の二つの状態を結び軌道を実際に構成することで, このマニピュレータの大域的な可制御性を証明した. また筆者ら[9]は位置決め軌道を構成する並進および回転軌道要素を安定化するフィードバック制御則を提案した. 一方, 小林ら[10]は同じ構造のマニピュレータの動力学から座標変換および入力変換により2階のchained formを導出し, 任意の初期状態から目標点への安定化を行う区分解析的な時変フィードバック則を提案している.

本論文では, 重力の作用しない1軸の非駆動関節をもつマニピュレータの位置制御のための軌道計画およびフィードバック制御手法を提案する. 前節で述べたように, すでに文献[2]~[5][8]~[10]ではこの形式に属するマニピュレータの制御手法が提案されている. しかし文献[2]~[5]の手法は能動関節の反復運動に基づいており, 一般に位置決めにかかる. また文献[8]~[10]の手法の適用範囲は終端軸である非駆動関節が水平面内で自由に運動できる場合に限られる. 本論文では, 能動関節に与える軌道の時間軸伸縮と, 初期位置・目標位置からの双方向の軌道計画により, 位置決めを実現する軌道を求める. この方法では近似ではなく厳密な解軌道を得ることが可能で, 能動関節の2回のスイングのみで能動関節と非駆動関節を同時に位置決めできる.

本論文の構成は以下の通りである. 第2章ではマニピュレータをモデリングし, 非駆動関節による動力学の拘束を示す. 第3章では, 能動関節に与える軌道の時間軸を伸縮した場合の挙動について述べ, 初期位置・目標位置それぞれからの双方向の軌道計画による位置決め軌道の構成方法を説明する. 第4章ではマニピュレータの形状を目標経路に追従させるためのフィードバック制御について述べる. 第5章では提案した軌道計画およびフィードバック制御手法によって目標位置への位置決めが実現できることをシミュレーションと実験により示す.

2. マニピュレータのモデル

本論文では, $n-1$ 個の能動関節と1個の非駆動関節からなる n 軸の直列マニピュレータを扱う. 非駆動関節は角度制限のない回転関節で, 重力等のポテンシャル力は作用せず, 非駆動関節における摩擦力も無視できるとする. 鉛直軸周りに回転する1軸の非駆動関節をもつ水平マニピュレータは, その代表的な例である. $\theta_a = [\theta_1, \dots, \theta_{n-1}]^T \in \mathbb{R}^{n-1}$ を能動関節の角度, $\theta_p = \theta_n \in \mathbb{R}$ を非駆動関節の角度とすると, マニピュレータの運動方程式は,

$$M_{aa}(\theta)\ddot{\theta}_a + m_{pa}^T(\theta)\ddot{\theta}_p + b_a(\theta, \dot{\theta}) = \tau_a \quad (1)$$

$$m_{pa}(\theta)\ddot{\theta}_a + m_{pp}(\theta)\ddot{\theta}_p + b_p(\theta, \dot{\theta}) = 0 \quad (2)$$

と表される. 非駆動関節は先端の第 n 関節とは限らないが, ベクトルや行列の要素を並べ替えれば上式のような表現が可能である. 式(2)は非駆動関節のトルクがゼロであることによる動力学の拘束である.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{aa}(\theta) & m_{pa}^T(\theta) \\ m_{pa}(\theta) & m_{pp}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$(M_{aa} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}, m_{pa} \in \mathbb{R}^{n-1}, m_{pp} \in \mathbb{R})$$

は慣性行列を表す.

$$b(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} b_a(\theta, \dot{\theta}) \\ b_p(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix} \quad (b_a \in \mathbb{R}^{n-1}, b_p \in \mathbb{R})$$

はコリオリ・遠心力項で, 一般に

$$\begin{aligned} b(\theta, \dot{\theta}) &= \dot{M}\dot{\theta} - \left[\frac{1}{2}\dot{\theta}^T \frac{\partial M}{\partial \theta_1} \dot{\theta}, \dots, \frac{1}{2}\dot{\theta}^T \frac{\partial M}{\partial \theta_n} \dot{\theta} \right]^T \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j c_{jk}(\theta) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \end{aligned} \quad (3)$$

という形で表すことができる.

このマニピュレータは, 文献[1]に示された第1積分可能な条件を満たさないと仮定する. すなわち, 慣性行列 $M(\theta)$ は非駆動関節の角度 θ_p を陽に含むとする. このとき式(2)の拘束は角度 θ と角速度 $\dot{\theta}$ の関数である第1積分を持たず, 角加速度 $\ddot{\theta}$ を含む2階の非ホロノミック拘束となる.

慣性行列の性質より $m_{pp}(\theta) \neq 0$ であるから, 式(2)より非駆動関節の角加速度 $\ddot{\theta}_p$ は,

$$\ddot{\theta}_p = -m_{pp}(\theta)^{-1} \{ m_{pa}(\theta)\ddot{\theta}_a + b_p(\theta, \dot{\theta}) \} \quad (4)$$

と求められる. ここで, 能動関節の角加速度を新たな入力 u として, $u = \ddot{\theta}_a$ とおくと, 系の状態方程式は, アフィン系

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_a \\ \theta_p \\ \dot{\theta}_a \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ \dot{\theta}_p \\ 0 \\ -m_{pp}^{-1} b_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I \\ -m_{pp}^{-1} m_{pa} \end{bmatrix} u \quad (5)$$

として表される. 右辺第1項がドリフト項である.

3. 軌道計画

本章では前章で示したマニピュレータの位置決めのための軌道を計画する。すなわち、マニピュレータがある初期位置で静止している状態から、与えられた目標位置で再び停止するような軌道および入力を見出す。非駆動関節を有するマニピュレータでは、運動している状態から能動関節を停止させ加速度入力をゼロとしても、状態方程式に含まれるドリフト項のため、一般に非駆動関節は運動し続ける。したがって、能動関節と非駆動関節が同時に停止するような軌道を選ぶ必要がある。

ここでは、まず能動関節の加減速軌道の時間軸を伸縮させた場合のマニピュレータの挙動を調べる。次に、初期状態から実現可能な軌道群と、目標状態に到達可能な軌道群を考え、それらの間を非駆動関節の自由回転による軌道で接続する（初期状態・目標状態の両方から軌道を考える点は、双方向アプローチによる宇宙ロボット軌道計画 [11] からヒントを得た）。この方法によれば近似ではない厳密な解軌道が求められる。また計画された軌道においては、能動関節を2回スイングするだけで全関節を目標角度に位置決めできる。

3.1 時間軸伸縮

本節では、能動関節にある決まった形の加減速軌道を与え、その時間軸を一定の倍率で伸縮させた際の非駆動関節の運動について議論する。軌道前後の非駆動関節の角度変化は時間軸の伸縮に関係なく一定であり、軌道両端における角速度は時間軸の伸縮率に比例することを明らかにする。能動関節に対し時刻 t ($0 \leq t \leq 1/\kappa$) の関数

$$\theta_a = f(\kappa t) = [f_1(\kappa t), \dots, f_{n-1}(\kappa t)]^T \quad (6)$$

で表される加減速の軌道を与える。 $f_1(\cdot), \dots, f_{n-1}(\cdot)$ はそれぞれ2階微分可能なスカラー関数である。定数 κ は時間伸縮率で、 $\kappa > 0$ とする。 t に代わる新たな変数 s を $s = \kappa t$ とおくと、

$$\dot{\theta}_i = \kappa \frac{d\theta_i}{ds}, \quad \ddot{\theta}_i = \kappa^2 \frac{d^2\theta_i}{ds^2} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

である。式(7)を式(4)に代入し、式(3)を考慮すると、

$$\frac{d^2\theta_p}{ds^2} = -m_{pp}(\theta)^{-1} \left\{ m_{pa}(\theta) \frac{d^2\theta_a}{ds^2} + b_p \left(\theta, \frac{d\theta}{ds} \right) \right\} \quad (8)$$

となる。式(8)は t も κ も陽に含まない、 s を独立変数とする微分方程式である。入力である $d^2\theta_a/ds^2$ も $f(s)$ の s に関する2階微分であり、 s のみに依存する。この微分方程式の解 θ_p は s の関数 $\theta_p(s)$ と表すことができる。したがって、マニピュレータは κ の値に関係なく同一の経路上を運動する[†]。非駆動関節は、 s に関する同一の初期状態 $\theta_p|_{s=0}, d\theta_p/ds|_{s=0}$ から出発して能動関節に同じ軌道 $\theta_a = f(s)$ ($0 \leq s \leq 1$) を与えれば、やはり同一の最終状態 $\theta_p|_{s=1}, d\theta_p/ds|_{s=1}$ に到達する。すなわち、時間伸縮率 κ をどんな値としても、 $t = 1/\kappa$ における $\theta_p, \dot{\theta}_p/\kappa$ は一定の値をとる。

能動関節に与える軌道 $f(s)$ に対して、

$$f(0) = \theta_{a0}, f(1) = \theta_{a1}, \frac{df}{ds}(0) = \frac{df}{ds}(1) = \mathbf{0}$$

[†]ここで経路 (path) とは形状空間における時間に依存しない幾何学的な曲線をさす。それに対し、時間変化も考慮した運動の表現を軌道 (trajectory) と呼んで区別する。

という境界条件を加える。このとき、どんな時間伸縮率 κ に対しても、能動関節は θ_{a0} で静止している状態から出発し、 θ_{a1} で再び停止する。このような運動を以下では能動関節のスイングと呼ぶ。初期状態 ($s = 0$) において非駆動関節が角度 θ_{p0} で静止していたとする。 $s = 1$ において能動関節は角速度ゼロとなり停止するが、非駆動関節については式(5)のドリフト項の作用により停止せず、ある角度 θ_{p1} で有限の角速度 $\dot{\theta}_{p1}$ をもつ。それらの値は式(4)に能動関節の加速度 $\ddot{\theta}_a$ を与え、初期状態から軌道の区間内 ($0 \leq t \leq 1/\kappa$) で積分すれば求めることができる。ところが、任意の時間伸縮率 κ に対して、軌道終了時の非駆動関節角度 θ_{p1} は同じ角度となり、また角速度 $\dot{\theta}_{p1}$ は κ に比例する。

逆に、スイング終了時 ($s = 1$) において非駆動関節が角度 θ_{p1} で角速度ゼロとなるような、 $s = 0$ における角度 θ_{p0} 、角速度 $\dot{\theta}_{p0}$ も考えることができる。これらは式(4)の時間軸を逆転させて $t = 1/\kappa$ から $t = 0$ まで積分すれば求められる。この場合も上と同様に、初期状態における非駆動関節角度 θ_{p0} は時間伸縮率 κ にかかわらず常に同じ角度であり、角速度 $\dot{\theta}_{p0}$ は κ に比例する。

3.2 双方向軌道計画

上記の時間軸伸縮の性質を利用して、このマニピュレータの2点間の位置決め軌道を計画する。この方法では、初期位置と目標位置のほかに能動関節が途中で停止する位置を考える。初期位置から中間位置への能動関節のスイングによって、初期状態から実現可能な軌道の集合を求め、また中間位置から目標位置へのスイングによって、目標状態に到達可能な軌道の集合を求め、それらは各区間の時間伸縮率および能動関節の中間位置をパラメータとして表現される。能動関節が中間位置で止まっている間、非駆動関節は自由回転する。その軌道によって初期状態からの軌道と目標状態への軌道とが滑らかに接続できるようにパラメータを選択し、全体の軌道を構成する。

マニピュレータの初期位置を $[\theta_{a0}^T, \theta_{p0}^T]^T$ 、目標位置を $[\theta_{ad}^T, \theta_{pd}^T]^T$ とする。能動関節に適当な中間位置 θ_{am} を与える。まず能動関節を、境界条件

$$f_A(0) = \theta_{a0}, f_A(1) = \theta_{am}, \frac{df_A}{ds}(0) = \frac{df_A}{ds}(1) = \mathbf{0}$$

を満たす軌道 $\theta_a = f_A(\kappa_A t)$ ($0 \leq t \leq 1/\kappa_A$) に従って初期位置 θ_{a0} から中間位置 θ_{am} まで動かす (スイング A)。この角度で能動関節をある時間停止する。最後に、

$$f_B(0) = \theta_{am}, f_B(1) = \theta_{ad}, \frac{df_B}{ds}(0) = \frac{df_B}{ds}(1) = \mathbf{0}$$

という境界条件を満たす軌道 $\theta_a = f_B(\kappa_B t)$ ($0 \leq t \leq 1/\kappa_B$) に従って能動関節を目標位置 θ_{ad} まで動かす (スイング B)。Fig. 1, Fig. 2 はマニピュレータが2軸の場合の状態空間における能動関節・非駆動関節の軌道をそれぞれ模式的に表す。

スイング A において時間伸縮率 $\kappa_A = 1$ のとき、能動関節が θ_{am} に到達した瞬間の非駆動関節の角度を $\theta_{pA}^{\kappa_A=1}$ 、角速度を $\dot{\theta}_{pA}^{\kappa_A=1}$ とする。式(7)より、これらの値は式(8)を $0 \leq s \leq 1$ で数値積分すれば容易に求めることができる。同様に、スイング B において $\kappa_B = 1$ のとき、能動関節が θ_{ad} に到達した瞬間に非駆動関節が θ_{pd} で停止するような、スイング直前の非駆

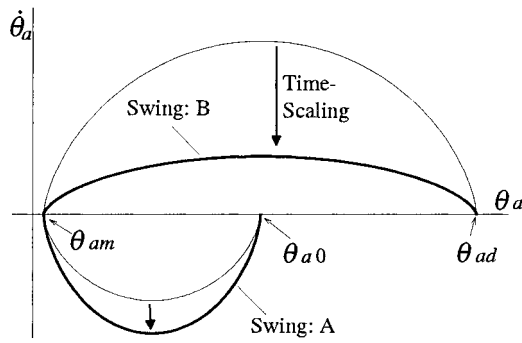


Fig. 1 Trajectory of active joint

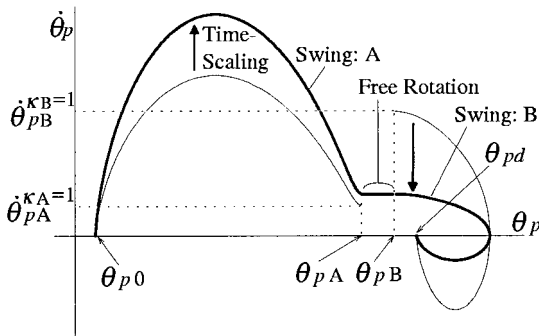


Fig. 2 Trajectory of passive joint

動関節の角度 $\theta_{pB}^{\kappa_B=1}$, 角速度 $\dot{\theta}_{pB}^{\kappa_B=1}$ も , 時間軸を逆転させた式 (8) の数値積分により逆算することができる (Fig. 2 細線).
 スイング A で時間伸縮率 κ_A が任意の値をとる場合 , 時間軸伸縮の性質よりスイング直後の非駆動関節角度 θ_{pA} は κ_A に依存せず一定である . 一方 , 角速度 $\dot{\theta}_{pA}$ は κ_A に比例する .

$$\theta_{pA} = \theta_{pA}^{\kappa_A=1}, \quad \dot{\theta}_{pA} = \kappa_A \dot{\theta}_{pA}^{\kappa_A=1} \quad (9)$$

またスイング B においても , スイング直前の非駆動関節角度 θ_{pB} は κ_B に依存せず , 角速度 $\dot{\theta}_{pB}$ は κ_B に比例する .

$$\theta_{pB} = \theta_{pB}^{\kappa_B=1}, \quad \dot{\theta}_{pB} = \kappa_B \dot{\theta}_{pB}^{\kappa_B=1} \quad (10)$$

能動関節が中間位置で停止している間 , 非駆動関節の慣性座標系における位置は固定される . また非駆動関節よりも先端側の能動関節も固定されるため , この部分を 1 本の剛体リンクとして扱える . したがって能動関節の停止中 , 非駆動関節は一定角速度で回転し続ける . 非駆動関節は回転関節であるから , $\dot{\theta}_{pA} \neq 0$ ならば必ず角度 θ_{pB} を通過する . $\dot{\theta}_{pA} = \dot{\theta}_{pB}$ ならば角度 θ_{pB} において角速度 $\dot{\theta}_{pB}$ となる瞬間が存在し , このときスイング B を開始すれば , スイング A とスイング B を滑らかに接続できる . $\dot{\theta}_{pA}^{\kappa_A=1}$ と $\dot{\theta}_{pB}^{\kappa_B=1}$ の回転の向きが同じになるような能動関節の中間位置 θ_{am} を見出すことができれば , 時間軸の伸縮によりスイング A 直後とスイング B 直前の非駆動関節の角速度を等しくすることが可能である . そのためには式 (9)(10) より ,

$$\kappa_A / \kappa_B = \dot{\theta}_{pB}^{\kappa_B=1} / \dot{\theta}_{pA}^{\kappa_A=1} \quad (11)$$

とすればよい . この κ_A, κ_B を用いて各スイングにおける能動関節軌道の時間軸を Fig. 1 太線のように伸縮すれば , 非駆動関節の状態は Fig. 2 太線の軌道をたどり , 目標角度に到達して停止する . 中間角度 θ_{am} における能動関節の停止時間は , n を整数として $(\theta_{pB} - \theta_{pA} + 2n\pi) / \dot{\theta}_{pA}$ のうち最小の正の値とする .

上記の方法で目標軌道が構成できるための必要条件は , $\dot{\theta}_{pA}^{\kappa_A=1}$ と $\dot{\theta}_{pB}^{\kappa_B=1}$ が同じ符号をもつような能動関節の中間位置 θ_{am} が存在することである . このような θ_{am} がいかなる初期位置と目標位置の組に対して存在するかを解析的に示すことは容易ではない . ただし , 第 5 章では , 水平 2 軸マニピュレータに関してかなり広い範囲でこうした中間位置が存在することを数値計算結果から示す . この条件を満たす範囲での中間位置 θ_{am} , 自由回転区間における非駆動関節角速度 $\dot{\theta}_{pA}$, さらに能動関節の加減速軌道 $f_A(\cdot), f_B(\cdot)$ の形状については軌道設計の自由度として残されている . これらを最短時間等の軌道最適化に利用することも可能である . 軌道計画に必要な計算負荷は , 主にスイング A, B における式 (8) の数値積分にある . 一つの中間位置 θ_{am} に対して 1 回ずつ積分計算を行うのみで , 位置決めの実現可能性 ($\dot{\theta}_{pA}^{\kappa_A=1}$ と $\dot{\theta}_{pB}^{\kappa_B=1}$ が同符号) の判定と , 時間伸縮率 κ_A, κ_B の計算が可能である . θ_{am} の探索方法にもよるが , 計算量はさほど大きいものではない . また , 位置決め可能な θ_{am} が見つければ , 直接それから厳密な解軌道が得られる . 繰り返し計算によって次第に解の精度を上げていくのではない .

4. フィードバック制御

本論文のマニピュレータにおいては非駆動関節に重力等のポテンシャル力が作用しないから , 滑らかな状態フィードバックを用いて平衡点へ漸近安定化することはできない [1] . しかし初期位置から目標位置への位置決めを実現する開ループの軌道および入力 , 前章の軌道計画により厳密に求められている . そこで各スイング中にこの目標軌道を規範としたフィードバック制御を構成すれば , マニピュレータは目標位置の近傍に到達できると考えられる .

実際のところ , 2 回のスイングのうちスイング A については , スイング終了時の非駆動関節角度 θ_{pA} , 角速度 $\dot{\theta}_{pA}$ が計画された値と完全に等しくなる必要はなく , θ_{pA} がスイング B 開始時の角速度 $\dot{\theta}_{pB}$ と同じ符号を持ちさえすればよい . スイング B の時間伸縮率 κ_B は , 非駆動関節が自由回転によって目標軌道のスイング開始角度 θ_{pB} に到達した瞬間の角速度 $\dot{\theta}_{pB}$ の実測値から , $\kappa_B = \dot{\theta}_{pB} / \dot{\theta}_{pB}^{\kappa_B=1}$ と修正される . この κ_B をもとに目標位置で停止可能なスイング B の軌道を再計算することができる . したがって , フィードバック制御が特に重要な意味を持つのは , スイング B の区間である .

前章では式 (8) に基づき , 能動関節に与える軌道の時間軸を定数倍に伸縮しても , マニピュレータが形状空間において幾何学的に同一の経路上を運動することを指摘した . 逆に , 運動中のマニピュレータの形状を目標経路上に拘束すれば , 各瞬間において時間軸の伸縮が自動的に行われ , 経路に沿った加減速の軌道は目標軌道の時間軸を定数倍に伸縮したものになると考えられる . 目標軌道は軌道終端において全関節の速度がゼロとなるよう計画されているから , どのように時間軸が伸縮されたとしてもマニピュレータは目標位置で停止すると期待できる .

本章では , まず準備として $n - 1$ 個の能動関節のスイングが

一つの座標で表現できることを示す。次に、この座標の加速度を入力としてマニピュレータを目標経路に追従させるフィードバック制御について述べる。筆者らはすでに文献 [12] で 1 軸の非駆動関節を持つマニピュレータの経路追従制御手法を提案している。しかしその手法では目標経路に基づき経路座標系を空間に設定することが必要だった。本論文では経路座標系を用いることなく目標軌道のデータのみに基づく経路追従のフィードバック制御則を提案する。

4.1 能動関節の単軸表現

スイング中の $n-1$ 個の能動関節の運動は式 (6) のように関数 $f(\cdot)$ で互いに拘束されているから、これらをまとめて 1 自由度の運動として表現できる。この運動を表す中間的な座標を $x_a \in \mathcal{R}$ とし、能動関節の角度 θ_a が

$$\theta_a = g(x_a) = [g_1(x_a), \dots, g_{n-1}(x_a)]^T \quad (12)$$

と表せるとする。 x_a を能動関節の経路に沿った道のりと考えてもよい。関数 $g(\cdot)$ は x_a から θ_a への座標変換を意味する。能動関節速度 $\dot{\theta}_a$ 、加速度 $\ddot{\theta}_a$ は、

$$\dot{\theta}_a = \frac{dg}{dx_a} \dot{x}_a, \quad \ddot{\theta}_a = \frac{d^2g}{dx_a^2} \dot{x}_a^2 + \frac{dg}{dx_a} \ddot{x}_a \quad (13)$$

となる。これを式 (2) の拘束に代入すると、

$$m_{pa} \frac{dg}{dx_a} \ddot{x}_a + m_{pp} \ddot{\theta}_p + b_p + m_{pa} \frac{d^2g}{dx_a^2} \dot{x}_a^2 = 0$$

この式は

$$m_a(x_a, \theta_p) \ddot{x}_a + m_p(x_a, \theta_p) \ddot{\theta}_p + b(x_a, \theta_p, \dot{x}_a, \dot{\theta}_p) = 0 \quad (14)$$

という形に整理できる。ただし、

$$m_a = m_{pa} \frac{dg}{dx_a}, \quad m_p = m_{pp}, \quad b = b_p + m_{pa} \frac{d^2g}{dx_a^2} \dot{x}_a^2 \quad (15)$$

式 (14) は能動関節の運動を代表する座標 x_a と非駆動関節角度 θ_p の間の動力的拘束を表す。これは能動・非駆動関節各 1 軸からなるマニピュレータにおける拘束と同じ形をしている。

4.2 経路追従フィードバック

さて、形状空間における幾何学的な目標経路を

$$\theta_p = \theta_{pd}(x_a) \quad (16)$$

と表す。すなわち能動関節の位置 x_a に対して非駆動関節の角度 θ_p が一意に決定されるとする。式 (16) は θ_p と x_a との幾何学的な関係を表すもので、時間には依存しない。これは各スイングの軌道計画によって得られた目標軌道

$$\theta_p = \theta_{pd}(s), \quad x_a = x_{ad}(s)$$

から s を消去したものである。経路が式 (16) のように表現できるためには、目標経路に沿って x_a が単調に増加または減少し、 x_a と s とが 1 対 1 で対応しなくてはならない。 x_a が途中で止まったり逆戻りすることは許されない(軌道計画の段階でこの条件を満たすように能動関節のスイングの加減速軌道を与えればよい)。非駆動関節の目標経路からの角度偏差 e_p は

$$e_p = \theta_p - \theta_{pd}(x_a) \quad (17)$$

と定義される。上式を時間に関して微分すると、

$$\dot{e}_p = \dot{\theta}_p - \frac{d\theta_{pd}}{dx_a} \dot{x}_a \quad (18)$$

$$\ddot{e}_p = \ddot{\theta}_p - \frac{d\theta_{pd}}{dx_a} \ddot{x}_a - \frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2} \dot{x}_a^2 \quad (19)$$

ところで、非駆動関節の角加速度 $\ddot{\theta}_p$ は式 (14) の動力的拘束より、

$$\ddot{\theta}_p = -m_p^{-1}(m_a \ddot{x}_a + b)$$

である。これを式 (19) に代入すると、

$$\ddot{e}_p = -\left(m_p^{-1}m_a + \frac{d\theta_{pd}}{dx_a}\right) \ddot{x}_a - m_p^{-1}b - \frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2} \dot{x}_a^2 \quad (20)$$

$m_p^{-1}m_a + \frac{d\theta_{pd}}{dx_a} \neq 0$ ならば、非駆動関節の偏差の加速度を \ddot{e}_p とするためには能動関節に

$$\ddot{x}_a = -\frac{\ddot{e}_p}{m_p^{-1}m_a + \frac{d\theta_{pd}}{dx_a}} - \frac{m_p^{-1}b + \frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2} \dot{x}_a^2}{m_p^{-1}m_a + \frac{d\theta_{pd}}{dx_a}} \quad (21)$$

という加速度を与えればよい。ここで位置ゲインを k_p 、速度ゲインを k_v とする PD フィードバック

$$\ddot{e}_p = -k_v \dot{e}_p - k_p e_p \quad (22)$$

により \ddot{e}_p を求める。これを式 (21) に代入して能動関節加速度 \ddot{x}_a を決定すれば、偏差は $\ddot{e}_p + k_v \dot{e}_p + k_p e_p = 0$ となり、ゼロに収束する。すなわちマニピュレータは目標経路上に拘束される。

式 (21) 右辺第 2 項は、 $e_p = 0$ であれば目標経路に沿った運動を生じさせる入力を与えるという意味でフィードフォワード項である。しかし $\frac{d\theta_{pd}}{dx_a}$ 、 $\frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2}$ は x_a のみの関数、 m_a 、 m_p は x_a と θ_p の関数、 b は x_a 、 θ_p 、 \dot{x}_a 、 $\dot{\theta}_p$ の関数であって、全体として時間に依存しない状態フィードバックの形式で表されている。単に能動関節の加速度を時間の関数として与えているのではない。

制御のための式 (17)(18)(21)(22) の計算において、 x_a の関数 $\theta_{pd}(x_a)$ 、 $\frac{d\theta_{pd}}{dx_a}(x_a)$ 、 $\frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2}(x_a)$ の値が実時間で必要となる。しかし目標軌道の計画において、式 (8) およびその積分の計算により s の関数として $\theta_{pd}(s)$ 、 $\frac{d\theta_{pd}}{ds}(s)$ 、 $\frac{d^2\theta_{pd}}{ds^2}(s)$ の値が得られている。また、 $x_a(s)$ 、 $\frac{dx_a}{ds}(s)$ 、 $\frac{d^2x_a}{ds^2}(s)$ もその際の能動関節の運動として計算されている。これらの値を配列として記憶しておけば、 $\frac{d\theta_{pd}}{dx_a}(s)$ 、 $\frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2}(s)$ は

$$\frac{d\theta_{pd}}{dx_a} = \frac{\frac{d\theta_{pd}}{ds}}{\frac{dx_a}{ds}}, \quad \frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2} = \frac{\frac{d^2\theta_{pd}}{ds^2} - \frac{d\theta_{pd}}{ds} \frac{d^2x_a}{ds^2}}{\left(\frac{dx_a}{ds}\right)^2}$$

により計算できる。 x_a は s に関して単調増加または単調減少であるから x_a の値から s が一意に決定できる。この s を用いてテーブルルックアップ等により、 θ_{pd} 、 $\frac{d\theta_{pd}}{dx_a}$ 、 $\frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2}$ を求める。

目標経路上に拘束されたマニピュレータの経路に沿った加減速は、経路の形状と初期速度によって決定される。能動関節の加速度 \ddot{x}_a は、式 (21) において $\ddot{e}_p = 0$ とおき、

$$\ddot{x}_a = -\frac{m_p^{-1}b + \frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2} \dot{x}_a^2}{m_p^{-1}m_a + \frac{d\theta_{pd}}{dx_a}} \quad (23)$$

と表される． $\frac{d\theta_{pd}}{dx_a}$ ， $\frac{d^2\theta_{pd}}{dx_a^2}$ は x_a の関数である．また経路上で非駆動関節角度 θ_p は x_a の関数であるから， m_a ， m_p も x_a のみの関数である．さらに $\dot{\theta}_p = \frac{d\theta_{pd}}{dx_a} \dot{x}_a$ であり，式(3)(13)(15)を考慮すれば， b は x_a の関数と \dot{x}_a^2 との積となる．したがって，式(23)は，

$$\ddot{x}_a = a(x_a)\dot{x}_a^2 \quad (24)$$

という形に書き直せる． $a(x_a)$ は経路の形状で定まる x_a のみの関数である．ここで時間伸縮率を $\kappa > 0$ として $s = \kappa t$ とおくと，

$$\dot{x}_a = \kappa \frac{dx_a}{ds}, \quad \ddot{x}_a = \kappa^2 \frac{d^2x_a}{ds^2}$$

より，

$$\frac{d^2x_a}{ds^2} = a(x_a) \left(\frac{dx_a}{ds} \right)^2 \quad (25)$$

式(25)は t も κ も含まず，式(24)とまったく同じ形になる．すなわち，式(24)を満たす軌道の時間軸を定数倍した軌道はまた式(24)の解軌道になる．計画された目標軌道も式(24)の解の一つであるから，微分方程式の解の一意性より，マニピュレータが目標経路上に拘束された場合の能動関節の加減速軌道は目標軌道の時間軸を定数倍に伸縮したものである．

ところで，

$$\dot{x}_a = \frac{dx_a}{dt} \frac{dx_a}{dx_a} = \frac{1}{2} \frac{d(\dot{x}_a)^2}{dx_a} \quad (26)$$

とおけるから，式(24)は x_a を独立変数， \dot{x}_a^2 を未知変数とする線形微分方程式とみなせる．初期条件として $x_a = x_{a0}$ において $\dot{x}_a = \dot{x}_{a0}$ とすれば，式(24)は

$$\dot{x}_a^2(x_a) = \dot{x}_{a0}^2 \exp\left(\int_{x_{a0}}^{x_a} 2a(z)dz\right) \quad (27)$$

と解ける． $\exp(\int_{x_{a0}}^{x_a} 2a(z)dz)$ は x_a の関数で， $x_a = x_{a0}$ において1となり，常に正の値を持つ．式(27)からも解軌道の時間軸伸縮が成立することは明らかである．

4.3 制御則の切り替え

$e_p = 0$ ， $\dot{x}_a = 0$ ， $\dot{\theta}_p = 0$ のとき，式(21)から得られる能動関節加速度 \ddot{x}_a はゼロとなる．すなわち初期位置で停止している状態から，前節の経路追従制御則のみでマニピュレータの運動を開始することはできない．そこで，少なくともスイング A の最初の部分については，軌道計画から得られた能動関節の目標軌道 $x_{ad}(t)$ ， $\dot{x}_{ad}(t)$ ， $\ddot{x}_{ad}(t)$ に従ったフィードフォワード制御でマニピュレータを初期加速する必要がある．

一方，式(21)において $m_p^{-1}m_a + \frac{d\theta_{pd}}{dx_a} = 0$ となる点は特異点であり，この点でも前節の制御則を適用することはできない．式(14)において， $\dot{x}_a \rightarrow 0$ ， $\dot{\theta}_p \rightarrow 0$ のとき $b(x_a, \theta_p, \dot{x}_a, \dot{\theta}_p) \rightarrow 0$ となるから， $m_p^{-1}m_a + \frac{d\theta_{pd}}{dx_a} \rightarrow 0$ となる．したがって，目標軌道において初期位置および目標位置は特異点となる．また $\frac{dx_a}{ds} = 0$ ， $\frac{d\theta_{pd}}{ds} \neq 0$ となる点では $\frac{d\theta_{pd}}{dx_a}$ が定義できないため式(18)(21)の計算ができない．スイング A の終了点およびスイング B の開始点は，能動関節が停止し非駆動関節が回転しているのでこの場合に該当する．これらの点の近傍では式(21)の制御則を用いることができない．ところが，この制御則は時間に依存しない形で与えられ，時間軸の伸縮が自動的に行われる．したがって，そこから能動関節の目標軌道を時間の関数と

して与えるフィードフォワード制御則には切り替えられない．式(24)によれば，目標経路上の能動関節加速度 \ddot{x}_a はその点における速度 \dot{x}_a の2乗に比例する．そこで，能動関節の目標軌道を位置 x_a の関数として表し，目標加速度を $\ddot{x}_{ad}(x_a)$ ，目標速度を $\dot{x}_{ad}(x_a)$ とする．また，制御則を切り替える瞬間の位置を x_{a0} ，速度を \dot{x}_{a0} とする．能動関節加速度を

$$\ddot{x}_a = \frac{\dot{x}_{a0}^2}{\dot{x}_{ad}^2(x_{a0})} \ddot{x}_{ad}(x_a) \quad (28)$$

とすれば，切り替えの瞬間に式(24)を満たす滑らかな切り替えが可能である． $\ddot{x}_{ad}(x_a)$ はすべての区間で得られるので常に制御入力が求められる．また式(28)は時間に依存しない状態フィードバックの形となっているため，前節の制御則による時間軸伸縮とも整合する．

5. シミュレーションおよび実験

第1軸が能動，第2軸が非駆動で，ともに鉛直軸まわりの回転関節である水平2軸マニピュレータ(Fig. 3)を用いたシミュレーションおよび実験により，提案した軌道計画およびフィードバック制御の有効性を確認した．

m を第2リンクの質量， I を第2リンク重心周りの慣性モーメント， l を非駆動関節-第2リンク重心間の距離， L を第1リンク長とすると，非駆動関節による動力学的拘束は，

$$(L \cos \theta_p + \lambda)\ddot{\theta}_a + \lambda\ddot{\theta}_p + L \sin \theta_p \dot{\theta}_a^2 = 0 \quad (29)$$

と表される．ただし， $\lambda \equiv l + I/(ml)$ とおいた． λ は非駆動関節-第2リンク撃心間の距離である．

はじめに，このマニピュレータにおいて位置決め可能な軌道が第3章の手法で計画できることを確認した．式(6)の $f(\kappa t)$ に相当する各スイングの軌道として，

$$\begin{cases} \theta_a(t) &= \theta_{a1} + (\theta_{a2} - \theta_{a1})(\kappa t - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi\kappa t) \\ \dot{\theta}_a(t) &= \kappa(\theta_{a2} - \theta_{a1})(1 - \cos 2\pi\kappa t) \\ \ddot{\theta}_a(t) &= 2\pi\kappa^2(\theta_{a2} - \theta_{a1}) \sin 2\pi\kappa t \end{cases}$$

を能動関節に与えた．スイング A においては θ_{a1} は初期角度 θ_{a0} ， θ_{a2} は中間角度 θ_{am} である．またスイング B においては θ_{a1} は中間角度 θ_{am} ， θ_{a2} は目標角度 θ_{ad} である．能動関節の最大角加速度には制限を設けた．2回のスイングのうち一方で角加速度のピーク値 $2\pi\kappa^2(\theta_{a2} - \theta_{a1})$ が最大値と等しくなり，他方の角加速度は制限内におさまるように，各スイングの時間伸縮率 κ_A ， κ_B を決定した．

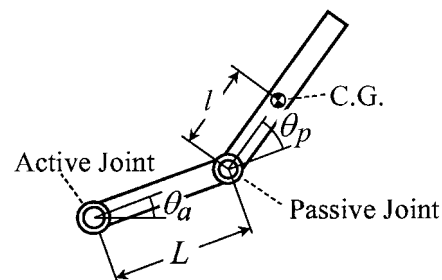


Fig. 3 Two-axis planar underactuated manipulator

初期位置 $\theta_a = 0[\text{rad}]$, $\theta_p = 0[\text{rad}]$ から様々な目標位置への位置決め軌道を計画し、位置決めに要する時間を調べた。目標位置は $0 \leq \theta_a \leq \pi$, $-\pi \leq \theta_p \leq \pi$ の範囲でそれぞれ $\pi/12$ 刻みで角度を変化させた。能動関節の中間角度は初期角度 $\pm\pi$ の範囲で $\pi/180$ 刻みで変化させ、位置決め時間が最短となる角度を探索した。式 (29) においてマニピュレータのパラメータは、 $L = 0.3[\text{m}]$, $\lambda = 0.2[\text{m}]$ とした。能動関節の角加速度制限は $|\ddot{\theta}_a| \leq 4\pi[\text{rad}/\text{sec}^2]$ とした。Fig. 4 は目標位置への位置決め時間 (sec, 小数点以下切り捨て) を示したものである。+ で示した目標位置では位置決めに 10 [sec] 以上かかる。- で示した点は、スイング A 直後とスイング B 直前の非駆動関節角速度の符号が等しくなる中間角度が見い出せず、軌道計画が不可能だった目標位置である。ほとんどの目標位置に対して 10 [sec] 以内で位置決めが可能なが分かる。

計画された軌道の例を Fig. 5, Fig. 6 に示す。初期位置は

θ_a	π	533427421111111233444444445
		64342342211112236234444446
		7726312221111224765334337
		781633222111124766532567
		7213133332211124776666667
		761142333222124776666677
		761153333322122655664577
		6221141444333313254664476
		4132233465443331444455354
		323333347754332144455353
		232223335+84333112445332
		12111123335+7433311122211
0	π	211111133346-643331111112
	$-\pi$	
	0	
	θ_p	

Fig. 4 Positioning time

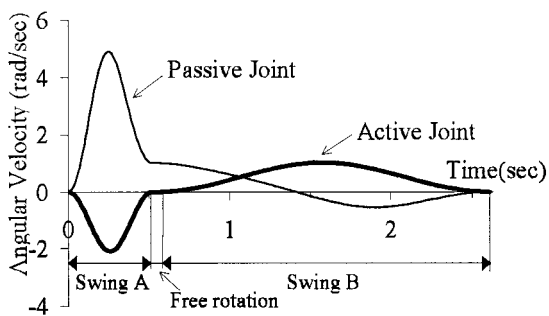


Fig. 5 Planned trajectory

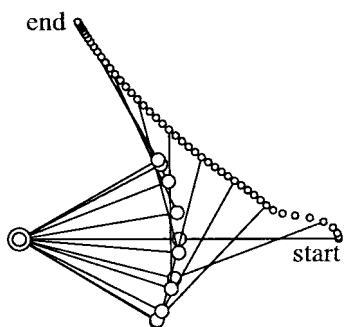


Fig. 6 Planned motion of manipulator

$\theta_a = 0[\text{rad}]$, $\theta_p = 0[\text{rad}]$, 目標位置は $\theta_a = 0.524[\text{rad}]$, $\theta_p = 1.571[\text{rad}]$ である。能動関節の中間位置は $\theta_a = -0.541[\text{rad}]$ である。スイング A は 0.520 [sec], 自由回転区間は 0.018 [sec], スイング B は 2.077 [sec] で、位置決めには合計 2.615 [sec] がかかっている。なお、軌道計画において式 (8) の積分にはルンゲ・クッタ法を用いた。各スイングの軌道を 256 分割して数値積分を行い、中間角度を 40 通りとった場合、一つの軌道の計画にはパーソナルコンピュータ (80486CPU, 50 [MHz]) で 8.8 [sec] を要した。

次に、第 4 章のフィードバック制御で経路追従が実現できることをシミュレーションにより確認した。能動関節は 1 軸であるから、 x_a は θ_a と等しい。目標経路は Fig. 5 の位置決め軌道のうちスイング B の部分とした。スイング B の開始点において非駆動関節に 0.1 [rad] の角度誤差を与えた。Fig. 7 は追従誤差 e_p の変化およびその際の入力 $\ddot{\theta}_a$ を表す。フィードバック制御においては 4.3 節に述べたように制御則を切り替えた。a の区間は初期加速のためのフィードフォワード制御、b の区間は式 (21) (22) による経路追従制御則、c の区間は式 (28) の制御則を適用した。フィードフォワード制御 (細線) では誤差が拡大され、軌道終端でも非駆動関節は停止しない。一方、フィードバック制御 (太線) では誤差が抑制され、マニピュレータは目標経路上に拘束される。また、マニピュレータは $\theta_a = 0.524[\text{rad}]$, $\theta_p = 1.571[\text{rad}]$ でほぼ停止し、位置決め自体も達成されている。

さらに、実際のマニピュレータを用いて位置決め軌道を実行した。Fig. 8 の水平 3 軸マニピュレータのうち第 1 軸を固定し、

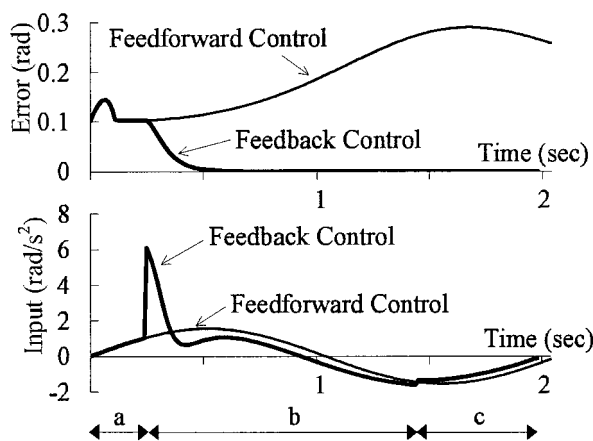


Fig. 7 Tracking error and input (simulation)

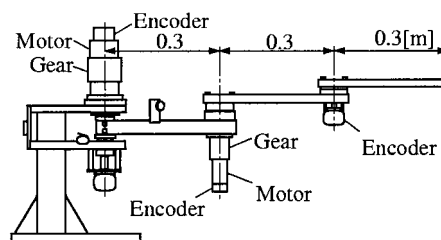


Fig. 8 Experimental setup

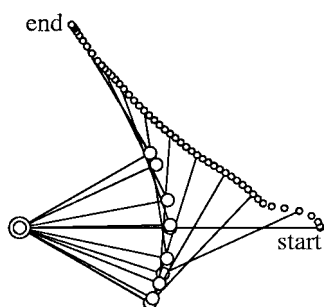


Fig. 9 Motion of manipulator (experiment)

先端の2軸を用いて実験を行った。リンク長はすべて0.3[m]である。能動関節は20[W]の減速機付DCサーボモータで駆動される。各関節の角度はロータリーエンコーダで検出される。制御にはパーソナルコンピュータ(80486CPU, 50[MHz])を用いた。経路追従のフィードバック制御はスイングBの部分のみに適用した。Fig. 9は初期位置 $\theta_a = 0.000[\text{rad}]$, $\theta_p = 0.000[\text{rad}]$ から目標位置 $\theta_a = 0.524[\text{rad}]$, $\theta_p = 1.571[\text{rad}]$ への位置決め結果である。マニピュレータは2.55[sec]で $\theta_a = 0.523[\text{rad}]$, $\theta_p = 1.594[\text{rad}]$ に到達して停止した。

6. ま と め

重力の作用しない1軸の非駆動関節をもつマニピュレータの位置制御のための軌道計画およびフィードバック制御手法を提案した。初期位置と目標位置の双方向から数値計算された軌道を、時間軸の伸縮により自由回転区間で接続することによって、位置決めを実現する軌道を求めた。この方法では近似ではなく厳密な解軌道を得ることが可能で、能動関節の2回のスイングのみで能動関節と非駆動関節を同時に位置決めできる。また、マニピュレータの形状を目標経路に追従させるためのフィードバック制御について述べた。提案した軌道計画およびフィードバック制御手法によって目標位置への位置決めが実現できることを実験により示した。

参 考 文 献

[1] G. Oriolo and Y. Nakamura: "Free-Joint Manipulators: Mo-

tion Control under Second-Order Nonholonomic Constraints," Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '91), pp.1248-1253, 1991.

- [2] 中村, 岩本: "ドリフト項をもつ非ホロノミック機械の制御", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.6, pp.830-837, 1995.
- [3] 中村, 濃沼, 鈴木: "自由関節を持つ平面アームのカ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, vol.14, no.4, pp.602-611, 1996.
- [4] T. Suzuki and Y. Nakamura: "Nonlinear Control of A Nonholonomic Free Joint Manipulator with the Averaging Method," Proc. 35th IEEE Int. Conf. on Decision and Control, pp.1694-1699, 1996.
- [5] A. De Luca, R. Mattone and G. Oriolo: "Control of Underactuated Mechanical Systems: Application to the Planar 2R Robot, Proc. 35th IEEE Int. Conf. on Decision and Control, pp.1455-1460, 1996.
- [6] K.M. Lynch: "Nonprehensile Robotic Manipulation: Controllability and Planning," Tech. Rep. CMU-RI-TR-96-05, Carnegie Mellon University, 1996.
- [7] A.D. Lewis and R.M. Murray: "Configuration Controllability of Simple Mechanical Control Systems, SIAM J. Control and Optimization, vol.35, no.3, pp.766-790, 1997.
- [8] 荒井: "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, vol.14, no.5, pp.751-758, 1996.
- [9] 荒井, 谷江, 城間: "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, vol.15, no.6, pp.943-952, 1997.
- [10] 小林, 井村, 吉川: "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, vol.33, no.8, pp.799-804, 1997.
- [11] Y. Nakamura and R. Mukherjee: "Nonholonomic Path Planning of Space Robots via a Bidirectional Approach," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.7, no.4, pp.500-514, 1991.
- [12] 荒井, 館: "非駆動関節を有するマニピュレータの経路追従制御", 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.7, pp.800-805, 1991.
- [13] R.W. Brockett: "Asymptotic Stability and Feedback Stabilization," in Differential Geometric Control Theory (R.W. Brockett, R.S. Millman, and S.J. Sussmann, eds.), pp.181-191, Birkhäuser, Boston, 1983.
- [14] H.J. Sussmann: "A General Theorem on Local Controllability," SIAM J. Control and Optimization, vol.25, no.1, pp.158-194, 1987.



荒井裕彦 (Hirohiko Arai)

1959年7月9日生。1982年東京大学工学部計数工学科卒業。同年本田技研工業(株)勤務。1984年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。現在ロボット工学部バイオロボティクス研究室主任研究官。マニピュレータの動的制御, パワーアシストなどの研究に従事。工学博士。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)



谷江和雄 (Kazuo Tanie)

1946年11月6日生。1971年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。現在ロボット工学部長, 筑波大学大学院工学研究科教授, 早稲田大学理工学総合研究センター特別研究員。ロボットの機構と制御, センサなどの研究に従事。工学博士。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)



城間直司 (Naoji Shiroma)

1971年5月21日生。1994年琉球大学工学部電子・情報工学科卒業。同年筑波大学大学院工学研究科博士課程入学, 現在に至る。倒立振り子, 非ホロノミック系制御の研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)