

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	多関節マニピュレータの慣性モレイ駆動
Title	
著者(和文)	広瀬茂男, 横島潔, 馬書根
Authors	SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	第1回日本ロボット学会ロボットシンポジウム, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	1991, 5
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 1991 The Robotics Society of Japan.

1101 多関節マニピュレータの慣性モレイ駆動

東京工業大学 広瀬 茂男 ○横島 潔

小松製作所 馬 書根

The Inertia Moray Drive of Multi-Joint Manipulators

Tokyo Institute of Technology Shigeo HIROSE ○Kiyoshi YOKOSHIMA

1 はじめに

象の鼻の様な超多自由度多関節アームはその冗長な自由度をマニピュレータ全体の姿勢制御に利用することで、優れた特性を発揮する。例えば、障害物が多数ある空間や非常に狭い空間で有効に利用できる。しかし実用的な多関節マニピュレータを実現するには、大きな障害が残されている。たとえば関節数が非常に多いためにアクチュエータの自重が過大となり、全体の重量が増大してしまうという点である。すでに筆者らは多関節マニピュレータのこの様な問題点を克服するため、モレイ駆動 [1] と呼ぶ新しい駆動法を提案した。本論文では既に提案されているモレイ駆動をさらに拡張した慣性モレイ駆動の提案とその実現法について検討する。

2 モレイ駆動と慣性モレイ駆動

2.1 モレイ駆動

モレイ駆動とは図 1 のように、多自由度アームの根元に強力な直動駆動系 (スライダ) を装備したアーム機構 [2] により実現する。動き回る多関節アームの各関節には軽量化のためそれほど大きい出力のモータを装備できない。しかしこのスライダは基台部に装備され、駆動系の重量にはほとんど制約がない。そのため、実用的にも強力なアクチュエータを使用できる。よってスライダの運動を積極的に利用すれば、関節出力に制限のある多関節アームでも優れた運動性能を発揮できることが期待できる。なお、スライダ部には格納器としての機能も有する。

モレイ駆動の動作を具体的に示す。通常のマニピュレータはアーム先端を A 点から B 点に移動する場合、図 2 の破線の様に、アーム先端に AB を結ぶ直線等の適当な軌道を与え、それにアーム先端が沿うように動かす。それに対し、モレイ駆動では図 2(b)(c) のようにアームを引き込む動作と、伸展する運動の組合せでこの移動動作を実行する。

この様な動作では、マニピュレーションのための駆動力は大部分スライダに負担できる。またアームは引き込む過程の軌道と押出す過程の軌道をそれぞれ

辿るように動き、アーム全体を振り回す動作は生じない。そのため障害物回避を行なう場合に有効である。

モレイ駆動を障害物の無い空間で行なう場合、運動学レベルでの最適軌道はクロソイド曲線である事はすでに誘導した [1]。クロソイド曲線の軌道に沿った運動を行なうと、全ての関節の屈曲運動が最も滑らかになるためである。しかし姿勢が激しく拘束されるため、動力学的效果を考えると必ずしも最適な運動であるとは言えない。

2.2 慣性モレイ駆動

強力なスライダの出力をできる限り有効に使用しながらしかも多関節アームが有する慣性効果をも利用し、より効率の高い運動を実現することを目的として慣性モレイ駆動を提案する。慣性モレイ駆動とは図 2 の (a) の様なアーム全体を振り回す運動と (b) のスライダの引き込み押し運動を最適に組み合わせる様な運動により、限定された関節出力の範囲内で、できる限り効率の良い高速運動を実現しようとするものである。慣性モレイ駆動の具体的な生成法は次章で論ずる。

3 慣性モレイ制御

図 2(a) のような関節運動はエンドエフェクターの運動の逆運動学解として求まる。この逆解は冗長性を有するため、例えば擬似逆行列、ゼロ空間法、RDC [3] などの手法を用いることで誘導できる。また図 2(b) のモレイ駆動の場合では、関節は全てクロソイド曲線

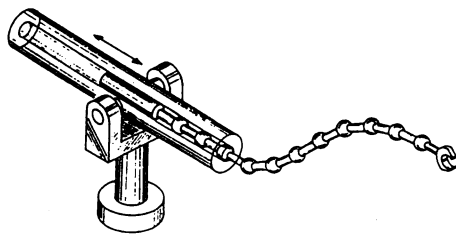


図 1: モレイ型アーム [1][2]

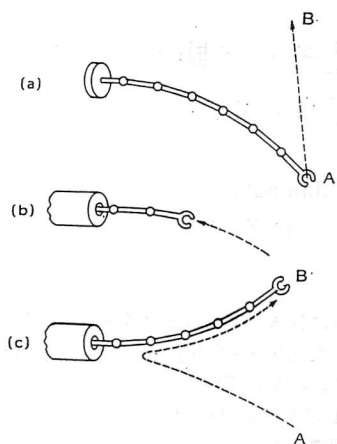


図 2: 通常の基本軌道 (a) とモレイ駆動の軌道 (b)(c)

等の与えられた軌道をたどる。よって軌道が与えられれば、アームの全ての関節運動は決定できる。

しかし、本論文で対象とする慣性モレイ駆動では、運動の初めと終りのみは与えられるものの、途中の運動の選択は任意である。そのため慣性モレイ駆動を実現する慣性モレイ制御はこの任意に選択できる運動をいくつかの評価基準と制約条件を基に具体的に確定するという、著しく取扱いの困難な問題を残している。この問題に対処するために、本論文では多関節アームを慣性モレイ駆動の過程で、単純な 2 自由度アームと考える仮定を導入することにする。つまり、アームは格納器出口より常にクロソイド曲線などの一定の曲率変化率をとる曲線をとし、格納器より出ているアーム部分の長さ、クロソイド曲線の曲率の変化率の 2 変数をアーム運動の制御変数とするというものである。この仮定はアームが格納器にスムーズに格納できるため、また大局的な最適性に近づけるため、そしてアームの屈曲運動を全体としてできるだけ滑らかにするために導入するものである。

この様に 2 自由度運動に拘束した慣性モレイ制御の順運動学解は以下に示すようにフーリエ解析と最急勾配法を組合せた手法で誘導する。

3.1 使用する変数

- θ_i : リンク i の変位角
- s_i : リンク i の曲線座標
- ϕ : アーム振り回し角
- i_0 : 穴から出ている、一番根元のジョイント番号
- x_0 : ジョイント i_0 の座標
- x_s : スライダー座標

- M : スライダー質量
- m : リンク質量
- I : リンク慣性モーメント
- L : リンク長さ
- T : 最終時間

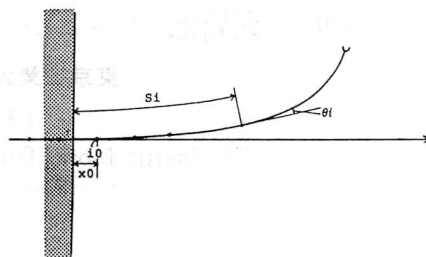


図 3: 変数設定

3.2 拘束付き関節運動の定式化

慣性モレイ制御を 2 自由度的に取扱うため、設定する拘束された関節運動は以下の様に定義する。

$$\theta_i = \begin{cases} \phi(t)f(s_i) & (i \geq i_0) \\ 0 & (i < i_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$s_i = \begin{cases} (i - i_0) + \frac{x_0}{L} & (i \geq i_0) \\ 0 & (i < i_0) \end{cases} \quad (2)$$

$$x_0 = \begin{cases} (i_0 - 1)L + x_s, & (x_s < 0) \\ x_s, & (x_s \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで関数 $f(s)$ はアーム姿勢を決定する項で、以後姿勢関数と呼ぶ。この姿勢関数は、リンク i の曲線上の座標 s の関数である。 $f(s) = \text{const.}$ のときアーム形状は円弧であり、 $f(s) = s$ のときはクロソイド曲線である。また、 ϕ は曲率に対応する変数であり、この値を時間制御することでアーム全体を振り回すことができる。

この様に変数 s_i は x_s に依存しているので、系全体は 2 変数 (ϕ, x_s) で記述される。よって制御上は非冗長な 2 リンク系として扱うことができる。

リンク長さ L を非常に小さい値としてアームを連続体と考えると、ジョイント変位 θ_i はアーム座標系 s 上の点 s_i における曲率と考えることができる。従って、姿勢関数 $f(s)$ の境界条件を

$$f(0) = 0 \quad (4)$$

とする事で収納穴入口付近においてアームの曲率が 0、つまり $\theta_i = \dot{\theta}_i = 0$ になり格納穴に滑らかに収納される曲線となる。

4 フーリエ級数による近似最適軌道

2 自由度と設定した多関節アームの順運動学問題を解くことにする。この様な問題は通常直接的に解くことは困難である。ここではフーリエ級数を用いた近似

的な最適軌道生成法を導入する。この手法はアームの初期姿勢と終端姿勢の各関節変数の値を境界条件として、この間の各関節の軌道をフーリエ級数で補間するものである。

終了時間を T とした時制御変数 $x_i(t) (0 \leq t \leq T)$ の軌道を次の様にフーリエ級数に展開する。

$$\begin{aligned} x_i(t) = & \phi(t) \\ & + A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + \dots \\ & + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

$$\omega = \frac{\pi}{T} \quad (6)$$

また、 $\phi(t)$ は x_i, \dot{x}_i の境界条件を満たす基本軌道関数とする。

この時、フーリエ級数部の境界条件は以下の式で与えられる。

$$A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots = 0 \quad (7)$$

$$A_0 - A_1 + A_2 - A_3 + A_4 - \dots = 0 \quad (8)$$

$$B_1 + 2B_2 + 3B_3 + 4B_4 + \dots = 0 \quad (9)$$

$$-B_1 + 2B_2 - 3B_3 + 4B_4 - \dots = 0 \quad (10)$$

これは境界条件にかかわらず一定である。

フーリエ級数を無限に展開すれば任意の関数を得られるが、現実にはこれを有限の次数までしか展開できない。この時、級数展開の次数を n とすると係数の数は制御変数 1 つにつき全部で $2n+1$ である。よって境界条件を考慮すると自由に操作できるパラメータは 1 制御変数当たり $2n+1-4=2n-3$ になる。例えば 4 次の項まで扱う場合は 5 つのパラメータを扱うことになる。

A_i, B_i などの関数パラメータは次の様に計算する。

制御変数 $x_i(t)$ の関数パラメータを $q_k (k=1 \dots 2n-3)$ とする。この時、係数ベクトル q を次の様に定義する。

$$q = (q_1^1, q_2^1, q_3^1, \dots, q_1^2, q_2^2, q_3^2, \dots)^T \quad (11)$$

$t=0 \sim T$ におけるアームの運動は全てベクトル q に依存する。そこで、あるグローバルな評価関数を I とすると関数 I は係数ベクトル q の関数である。従って、最適軌道生成問題は関数 $I(q)$ の最小値探索問題となる。そこで I が最小になるように係数ベクトル q を最急勾配法等の最小値探索アルゴリズムで求める。

なお、グローバルな評価関数には (1) 消費したトルクの二乗和の総計、(2) 全消費パワーの内のピーク値、(3) 全消費エネルギー、などが考えられる。

5 シミュレーション実験

導入した慣性モレイ駆動のための制御法の有効性を検証する計算機シミュレーションを行なった。その結果を以下に示す。使用したパラメータは以下の通りである。

アーム自由度	: 7
アーム長さ	: 0.5m
アーム直径	: 0.1m
アーム質量	: 1.0kg
スライダ質量	: 1.0kg
終了時間	: 1.0 秒
初期条件	: $(x_s, \theta) = (0.5, 0.03)$
終端条件	: $(x_s, \theta) = (0.5, -0.03)$

姿勢関数は

$$f(s) = s \quad (12)$$

とした。これはアームが常にクロソイド曲線をなすことを表わしている。

クロソイド曲線を採用したのは、式 (4) を満たしている最も基本的な関数であること、モレイ駆動で明らかにされたようにクロソイド曲線はモレイ駆動において、運動学レベルで $\theta^T \theta$ を最小化する解であることの 2 つの理由による。

慣性モレイ制御では、グローバルな最適化をするため、4 章で述べたフーリエ級数による近似最適軌道を最急勾配法を用いて求めた。初期状態は図 5 のような単純な振り回し運動とした。また、収束計算の回数は 10 回とし、評価関数は各関節に発生するトルクの自乗和の総計つまり、

$$I = \int_0^T \tau^T \tau dt \quad (13)$$

とした。

5.1 モレイ駆動との比較

慣性モレイ制御において、

$$\phi = const. \quad (14)$$

とすればモレイ駆動になる (図 6)。

同じ境界条件で慣性モレイ制御とモレイ駆動をした場合の結果を表 1、図 7 に示す。この様に慣性モレイではモレイ駆動に比べて、瞬間最大消費パワーが 1/1000、基本軌道と比較すると 1/20 になっている。この事より、慣性モレイ制御が非常に有効であることが分かる。

モレイ駆動ではアーム全体がクロソイド曲線を必ず辿るという、姿勢による拘束が大きく、そのためにパワー消費が多い。慣性モレイ制御ではそのような拘束がなく、より効率良くなったためと考えられる。

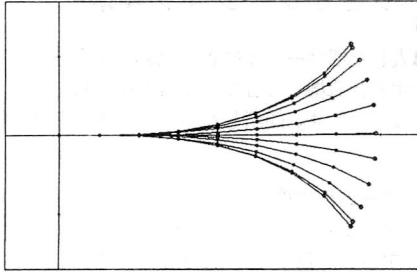


図 5: 基本軌道。

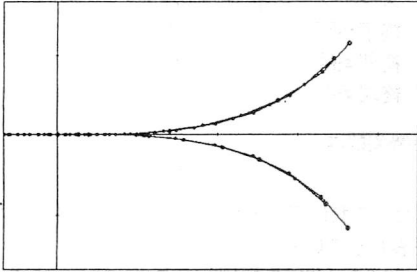
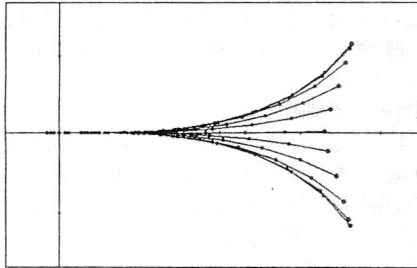
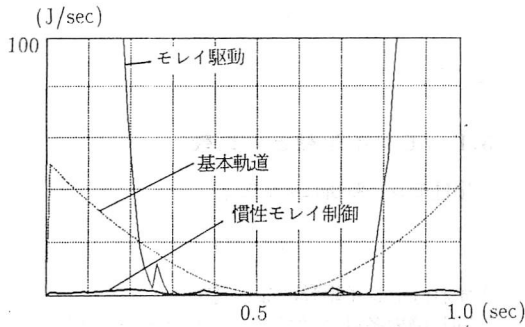


図 6: モレイ駆動。



(a) フーリエ級数による最適軌道。



(b) 各場合の消費パワー。

図 7: 慣性モレイ制御

表 1: モレイ駆動とのパワー比較。

	瞬間最大消費パワー (J/sec)
モレイ駆動	832.21
基本軌道	49.95
慣性モレイ	2.644

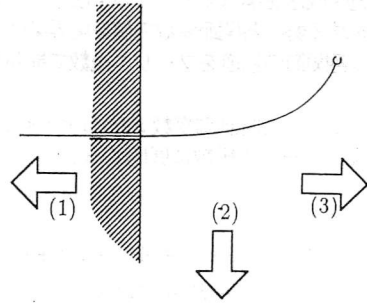


図 4: 重力の方向。

5.2 姿勢による最適アーム運動の変化

多関節アームを重力環境化で使用する場合、姿勢によって重力を利用する効果が変化し生成される運動も異なってくる事が考えられる。そこで図 4 に示すように重力方向が異なる 3 つの例についてシミュレーション実験を行なった。この場合の最適軌道計算の結果を、表 2、図 8 に示す。

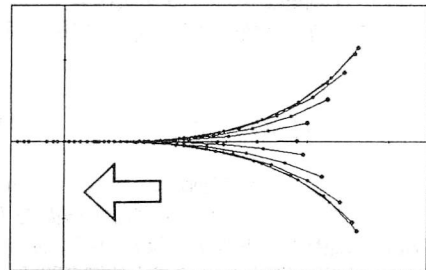
倒立振子的に立った (1) の場合にはスライダを有効に使用する運動が生成され、振り子の様に懸下ろされた (3) の場合にはアームの慣性を利用するような運動が生じる、などのことが分かる。

また、全体的に基本軌道に比べて 1/4 ~ 1/6 のパワー消費ですんでいる。従って、重力のある場合でも慣性モレイ制御が有効であることが分かる。

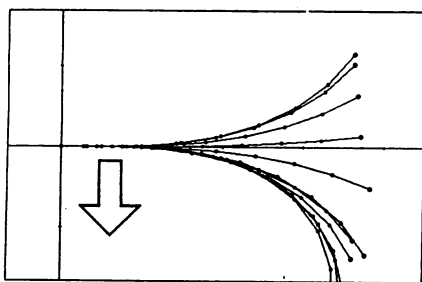
表 2: 重力環境下でのパワー比較 (単位: J/sec)。

パワー比=(最適軌道パワー)/(基本軌道パワー)

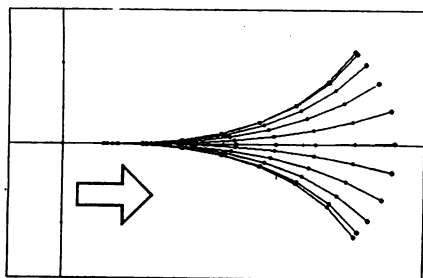
重力方向	基本軌道	最適軌道	パワー比
1	256.43	37.18	0.145
2	11.32	2.231	0.197
3	223.4	57.83	0.259



(a) 重力方向が (1) の場合



(b) 重力方向が(2)の場合



(c) 重力方向が(3)の場合

図8: 重力がある場合の最適軌道。

5.3 水中作業環境での比較

慣性モレイ制御は流体中で使用すると、実行時の流体抵抗を減少できるという効果が期待できる。そこで、これを定量的に検討する為に簡単な流体抵抗の評価手法を導入する [4]。

前提として、アームの各節は円柱形状とし、運動を考える平面は水平で流体は静止しているとする。流体運動に特有の付加質量の効果等は無視し、大まかな傾向のみを求める。第*i*節の軸方向と法線方向の力及び、平面に垂直な軸周りのモーメントを、それぞれ絶対座標系で、 F_{ti}, F_{ni}, M_i とすると、

$$F_{ti} = -\frac{1}{2}C_{Dt}\rho\pi d^2v_{ti} \quad (15)$$

$$F_{ni} = -\frac{1}{6}C_{Dn}\rho Ld(3v_{ni}^2 + \omega_i^2 L^2 + 3v_{ni}\omega_i L) \quad (16)$$

$$\times \frac{v_{ni} + L_i \times \omega_i}{\|v_{ni} + L_i \times \omega_i\|}$$

$$M_i = -\frac{1}{24}C_{Dn}\rho L^2 d(L\phi_i + 2v_{ni})\omega_i \quad (17)$$

となる。ただし

C_{Dt} : リンクの軸方向の流体抵抗係数

C_{Dn} : リンクの法線方向の流体抵抗係数

v_{ti} : リンク*i*の軸方向の速度

v_{ni} : リンク*i*の法線方向の速度

ϕ : リンク*i*の傾き角

ω_i : リンク*i*の角速度

ρ : 流体密度

表3: 水中での作業特性。

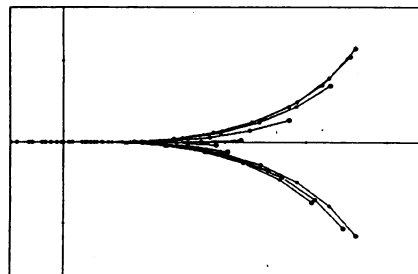
	瞬間最大消費パワー (J/sec)
モレイ駆動	824.7
基本軌道	7234.9
慣性モレイ	357.3

これらの流体抵抗を各リンクの運動方程式に代入すると、流体中での運動が解析できる。

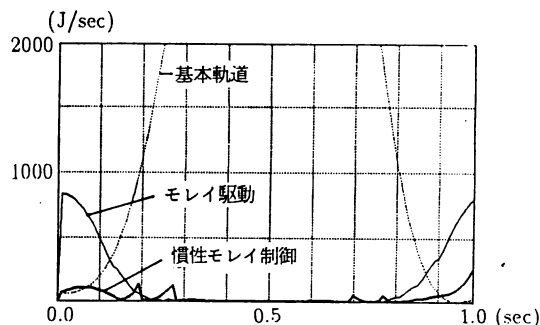
水中で作業した際のシミュレーション結果を表3、図9に示す。基本軌道よりもモレイ駆動の方が良いことはすでに指摘した通りであるが、さらに慣性モレイではモレイ駆動に比べて、瞬間最大消費パワーが約1/12になっている。

また慣性モレイ制御で得られる軌道は粘性力が支配的な環境においては純粋なモレイ駆動により近い動作に収束することがわかる。

なお、この動作中の流体抵抗の影響は非常に少ない。このことから、モレイ駆動的な動きが水中での作業に適していることが分かる。



(a) 最適軌道。



(b) 各パワー消費。

図9: 水中作業環境の場合。

6 まとめ

本研究ではモレイ型多関節アームの制御法として、モレイ駆動を拡張した慣性モレイ制御を提案した。慣性モレイ制御はモレイ駆動と振り回す動作を組合せ、より最適性の高い動作を行なうことができる。

慣性モレイ制御には以下の様な特徴が挙げられる。

- アームの変位を姿勢関数で表わし、アームの姿勢自体を制御できる。また、姿勢関数の取り方によって、任意の姿勢を取ることができる。
- 姿勢制御しているため、モレイアーム特有の収納穴による拘束もうまく対応できる。
- 制御変数の数が少ないので、最適軌道計算が比較的容易に導出できる。

また、姿勢を制御しているためモレイ駆動と同様、狭い空間や障害物のある空間での作業に容易に適用できる可能性がある。

今回は姿勢関数をクロソイド曲線に限定したが、今回は様々な姿勢関数を扱い、より最適性の高い姿勢関数を検討していく予定である。また、試作機(MORAY-1)を用いて、実際にその有効性を確認していく予定である。

参考文献

- [1] 広瀬、馬:多関節マニピュレータのモレイ駆動、日本ロボット学会誌 8-1 /16(1989)
- [2] 広瀬、馬、横島:モレイ駆動型多関節ロボットアームの開発、第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集 681/682(1990)
- [3] 広瀬、馬:多関節マニピュレータの冗長性分解制御、計測自動制御学会論文集 Vol.24 No.9 954/959(1988)
- [4] 広瀬、馬:多関節マニピュレータの水中作業特性、第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集 33/34(1988)