計測自動制御学会東北支部 第165回研究集会 (1996.12.13)
資料番号 165-11

フレキシブルベースロボットの力学の定式化と制御

Modeling and Control of Flexible Base Robots

○吉田和哉，D. ネンチェフ，内山勝

○ Kazuya Yoshida, Doragomir Nenchev, Masaru Uchiyama

東北大学 工学部 機械航空工学科

Dept. of Aeronautics and Space Engineering
Tohoku University

キーワード： フレキシブルベース (Flexible Base), 一般化ヤコビ行列 (Generalized Jacobian Matrix), 一般化慣性行列 (Generalized Inertia Matrix), 無反動軌道 (Reactionless Path), 制振制御 (Vibration Suppression Control)

連絡先： 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉東北大学工学部 機械航空工学科 吉田和哉
Tel: (022)217-6992, Fax: (022)217-7027, E-mail: yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. まえがき

到達範囲の広いロングリーチアームの先端に器用な作業をする精細マニピュレータを搭載するシステムは，宇宙ステーションにおけるSSRMS/SPDMシステムにおいて，あるいは日本モジュール用親子型マニピュレータ（JEMRMS）として開発がすすめられている．また，同様の構成のものは，建築現場や柱上作業，原子炉内メインテナンスなどの手の届きにくいところで作業をするシステムとして，有望視されている．しかしながら作業ベースであるロングリーチ部は構造的振動を生じやすく，ベースの揺れは作業性能の劣化をもたらす．

このようにベースが固定されていないロボットの制御は，新しい課題として注目されている[1]．特に，ここで問題とするシステムは，ロングリーチアームの部分にもアクチュエータを持ち精細マニピュレータと同時に協調的に作業すると考えれば，いわゆるマクロ・ミニマニピュレータの問題としてとらえることができる．しかし実際の作業においては，ロングリーチアームはラフな位置決めに使用しそこでロックしてしまい，あとは精細マニピュレータのみで作業を行う，という考え方が現実的である．その場合，精細作業中はロングリーチアームは受動的なフレキシブル構造物，すなわち振動的な足場として振る舞い，その振動および構造的インピーダンス特性を考慮に入れた制御法が必要となる．

本研究では，このようなシステムに対する一般的な基礎方程式を明らかにし，位置決め作業のような自由空間運動，および環境との接触を伴う作業の両面から，有効な制御法を示すことを目的とする．

2. 基礎方程式

まず一般的な定式化として，**Fig.1** のように慣性，粘性，剛性パラメータがそれぞれ $\mathbf{H}_b, \mathbf{D}_b, \mathbf{K}_b$ で表わされるフレキシブルベースの先端に n 自由度のマニピュレータが搭載されているシステムを

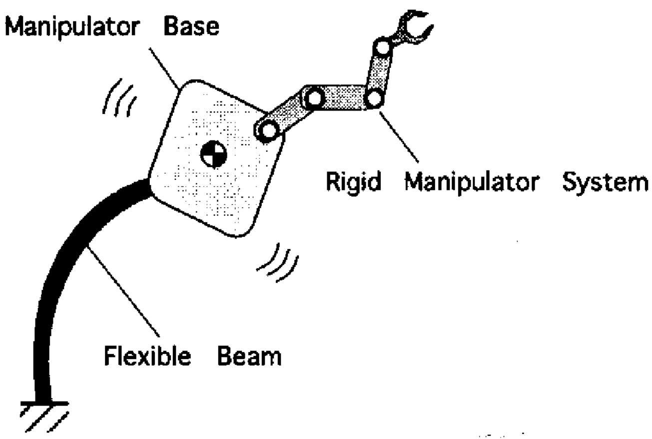


Fig.1 General model of Flexible Base Robot

考える．重力の影響を無視すると，このシステムのダイナミクスの基礎式は以下のように書ける．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_b & \mathbf{H}_{bm} \\ \mathbf{H}_{bm}^T & \mathbf{H}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_b \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b \\ \mathbf{c}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_b \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_b^T \\ \mathbf{J}_m^T \end{bmatrix} \mathbf{F}_h \tag{1}$$

ここで $\mathbf{x}_b$ は位置・姿勢を含むベースの変位，$\boldsymbol{\phi}$ は関節変位，$\mathbf{F}_b$ は柔軟ビームからベースに作用する力，$\boldsymbol{\tau}$ は関節力，$\mathbf{F}_h$ はマニピュレータハンドに作用する力である．

また，ここに登場するヤコビ行列は以下の関係を満たす．

$$\dot{\mathbf{x}}_h = \mathbf{J}_m\dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{J}_b\dot{\mathbf{x}}_b \tag{2}$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_h = \mathbf{J}_m\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \dot{\mathbf{J}}_m\dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{J}_b\ddot{\mathbf{x}}_b + \dot{\mathbf{J}}_b\dot{\mathbf{x}}_b \tag{3}$$

(1) の上式を整理し直すと，

$$\mathbf{H}_b\ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{D}_b\dot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{K}_b\Delta\mathbf{x}_b = -\mathbf{F}_m + \mathbf{J}_b^T\mathbf{F}_h \tag{4}$$

と書くことができる．柔軟ビームからベースに作用する力 $\mathbf{F}_b$ は粘弾性力であり

$$\mathbf{F}_b = -\mathbf{D}_b\dot{\mathbf{x}}_b - \mathbf{K}_b\Delta\mathbf{x}_b \tag{5}$$

のように書くことができ，マニピュレータからベースに作用する力は $\mathbf{F}_m$ は動的な反力であり

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{H}_{bm}\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \dot{\mathbf{H}}_{bm}\dot{\boldsymbol{\phi}} \tag{6}$$

である．

一方 (1) 式の上下より $\mathbf{x}_b$ に関する変数を消去すると次式を得る．

$$\mathbf{H}^*\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \bar{\mathbf{c}} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^{*T}\mathbf{F}_h + \mathbf{R}\mathbf{F}_b \tag{7}$$

ここで，$\mathbf{H}^* = \mathbf{H}_m - \mathbf{H}_{bm}^T\mathbf{H}_b^{-1}\mathbf{H}_{bm}$，$\mathbf{J}^* = \mathbf{J}_m - \mathbf{J}_b^T\mathbf{H}_b^{-1}\mathbf{H}_{bm}$ はそれぞれ，一般化慣性行列および一般化ヤコビ行列である．これらはもともと運動量が保存されるフリーフライング系に対して定義されたものであるが，非運動量保存系に対しても成り立つことは容易に示される．また，$\mathbf{R} = \mathbf{H}_{bm}^T\mathbf{H}_b^{-1}$ である．

以上が本稿で考える基礎式である．

3. 無反動軌道制御

先端力 $\mathbf{F}_h$ がゼロ，すなわち自由空間を運動する場合をまず考える．

(6) 式は一般に積分可能であり，次式を得る．

$$\mathcal{L} = \mathbf{H}_{bm}\dot{\boldsymbol{\phi}} \tag{8}$$

ここで $\mathbf{H}_{bm}$ はマニピュレータとベースとの間の動的干渉を表わす慣性行列であり，$\mathcal{L}$ は干渉運動量である．

(8) 式において $\mathcal{L}$ が一定であれば，(6) 式の $\mathbf{F}_m = \mathbf{0}$ でありベースには反力を生じない．ベースの運動自由度数 m に比べてマニピュレータの関節自由度数 n が大きいとき，$\bar{\mathcal{L}}$ =const を満たす関節動作は，(8) 式の一般解として以下のように求めることができる．

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{H}_{bm}^{+}\bar{\mathcal{L}} + (\mathbf{E} - \mathbf{H}_{bm}^{+}\mathbf{H}_{bm})\boldsymbol{\xi} \tag{9}$$

ここで $(\cdot)^+$ は疑似逆行列，$\boldsymbol{\xi}$ は任意の n 次元ベクトルである．$(\mathbf{E}-\mathbf{H}_{bm}^{+}\mathbf{H}_{bm})$ は慣性行列 $\mathbf{H}_{bm}$ の零空間射影であり，この空間を反動零空間 (reaction null-space) と呼ぶ．

特に初期角運動量 $\bar{\mathcal{L}}$ がゼロのとき，上式は第 2 項の反動零空間のみとなり，

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}_{ns} = (\mathbf{E} - \mathbf{H}_{bm}^{+}\mathbf{H}_{bm})\boldsymbol{\xi} \tag{10}$$

この式に従ってマニピュレータを操作する限り，ベースに反力は作用せず，振動も励起されない．

一例として y 軸方向に伸びる直線柔軟ビームの先端に 2 自由度マニピュレータを取り付けたシステム (TREP) において，x 軸方向に反動を生じない軌道は **Fig.2** のように求めることができる．この軌道を利用して任意の PTP（位置決め）制御が可能となる．詳細は文献[2)3)]を参照いただきたい．

4. 振動抑制制御

フレキシブルベースに振動が生じたとき，それを吸収する制振制御について述べる．

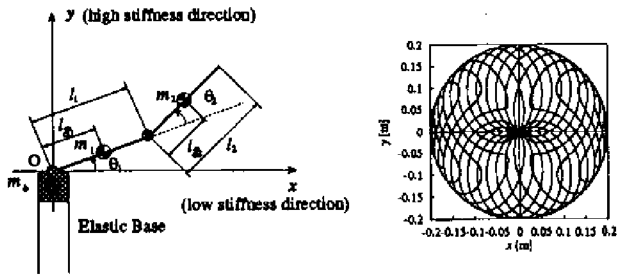


Fig.2 The TREP and Reactionless paths

(9) 式の第 2 項は，上に述べてたようにベースに反動を生じない反動零空間運動を与えるが，一方第 1 項はこれと直交する解空間，すなわちマニピュレータとベースが最大に干渉する運動を与える．マニピュレータの動作によりベースの振動エネルギーを吸収するためには，このような最大干渉状態が好ましく，ベースの変位 $\Delta\mathbf{x}_b$ を用いて次のような制振制御を考える．

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_v = g\mathbf{H}_{bm}^{+}\Delta\mathbf{x}_b \qquad (11)$$

ここで g は制御ゲインである．反動零空間との直交性より，この制振制御は無反動軌道追従制御と干渉することなく重畳することができる．

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_c = \dot{\boldsymbol{\theta}}_v + \dot{\boldsymbol{\theta}}_{ns}$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_c = g\mathbf{H}_{bm}^{+}\Delta\mathbf{x}_b + (\mathbf{E} - \mathbf{H}_{bm}^{+}\mathbf{H}_{bm})\boldsymbol{\xi} \qquad (12)$$

5. 実験

5.1 実験システム：TREP

以上の理論的検討結果を検証するために TREP と名付ける実験システムを開発した．**Fig.3** に写真を示すように，TREP は，ねじれを防ぐために板バネを 2 枚平行にした柔軟ビームの先端に，2 自由度剛体マニピュレータを搭載している．関節に高さ方向のオフセットを持たせることにより，第 2 関節は 360 度回転可能である．

5.2 無反動動作実験

まずはじめに，(10) 式により計算される無反動軌道動作を検証する．**Fig.4** に (a) 無反動動作と (b) 第 2 関節のみを回転する通常動作の比較を示す．無反動動作については 2 つの速度について実験結果を重ね書きしているが，同じ無反動軌道を通過する限り，低速であろうが高速であろうが，ベースはほとんど振動しない．一方 (b) では動作反動によりベースの振動が励起され，やがて自然減衰してゆく様子が観察される．

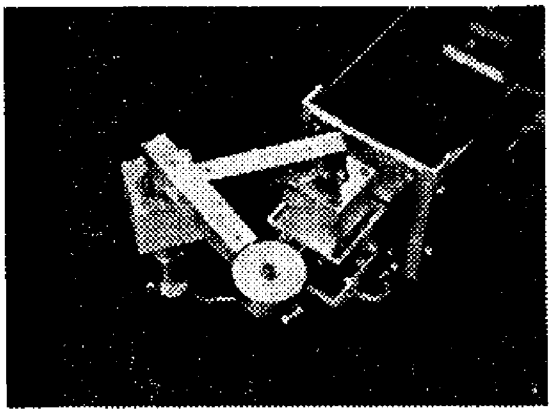


Fig.3 The experimental setup TREP

5.3 制振制御実験

次に無反動軌道追従と制振制御との重畳実験を示す．**Fig.5** では，無反動軌道を周期的に何度も繰り返すマニピュレータ動作を行い，$t = 2.0$[s] にベースに外力を加え強制的に振動を生じさせている．(a) では (12) 式に基づく重畳制御を行っており，外乱振動はただちに吸収され無反動状態が回復する．(b) では (10) 式に基づく無反動制御のみを行っており，無反動軌道とベース運動の非干渉化が実現されているので，ベースはあたかもマニピュレータが付いていない単純梁であるかのように自然減衰振動する．

6. まとめ

本研究では，柔軟ベース上に剛体マニピュレータが取り付けられるロボットシステムについて，柔軟ベースとマニピュレータ動作との間の干渉ダイナミクスを明らかにし，(1) ベースに反動を全く生じない無反動軌道，(2) ベースに反動が生じてもそれをすみやかに吸収する制振制御を提案し，その有効性を実験によって検証した．

謝辞

本研究は文部省科学研究費補助金・重点領域（知能ロボット） No.08235202 の補助のもとに実施された．実験装置 TREP の設計・製作にあたっては東北大学工学部 内山勝研究室の諸氏の協力を得た．

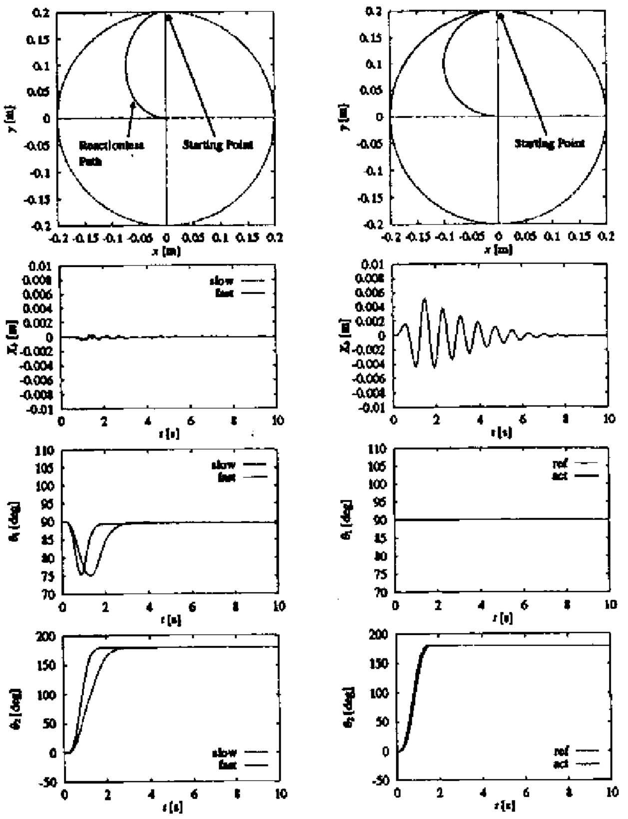
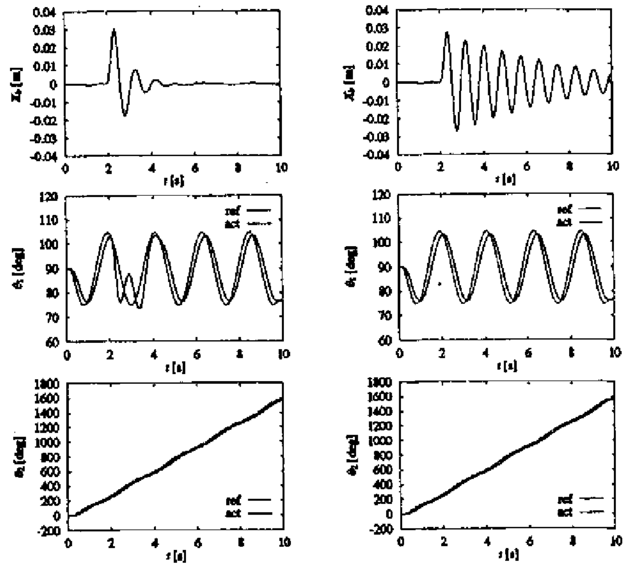


Fig.4 (a) Reactionless motion; (b) conventional motion



(a) (b)

Fig.5 Reactionless motion and base vibration: (a) with vibration suppression; (b) without vibration suppression

参考文献

1) K. Yoshida, D.N. Nenchev and M. Uchiyama, "Moving base robotics and reaction management control," in Preprints of the 7th Int. Symposium on Robotics Research, Munich, Germany, Oct. 1995. (published in Robotics Research 7, pp.100-109, Springer 1996.)

2) 吉田ほか；柔軟ベースに上に搭載されるロボットマニピュレータの反動最小化制御，RSJ/SICE/JSME 第1回ロボティクスシンポジア, pp.191-196, 1996.

3) Yoshida et al, "Experiments on the PTP Operations of a Flexible Structure Mounted Manipulator System," Proc. IROS96, Osaka, Japan, Nov. pp.246–251, 1996.