

大型宇宙マニピュレータの残留振動抑制に関する研究 Study of Residual Vibration Suppression for A Large Robotic Manipulator in Space

総合技術研究本部 システム誘導技術グループ
Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group
Institute of Space Technology and Aeronautics

澤田弘崇, 上野浩史, 小田光茂
Hirotaka Sawada, Hiroshi Ueno, Mitsushige Oda

Abstract : This paper describes a method for operating large robotic manipulators, which generally has flexible links and joints in space. Vibration induced by flexibility is a serious problem when operating a long manipulator in orbit. Once vibration has occurred while a manipulator is handling a payload, the operator must wait for the vibration to be damped before proceeding, which decreases working efficiency. We studied a control method to suppress vibration during both manual and automatic operations. We investigated an Input Shaping feed-forward control method for damping residual vibration during operation. We discuss in detail the results of the pre-shaping vibration suppression and manual operation experiments in this paper.

1. はじめに

現在, 建設が進められている国際宇宙ステーション(ISS)では宇宙ステーション用大型ロボットアーム(Space Station Remote Manipulator System : SSRMS)がその建設作業において大きな役割の担っており, 日本の実験モジュール(JEM)においても JEM 用ロボットアーム(JEMRMS)を用いて多くの作業が行われる予定である. 軌道上で大型ロボットアームを用いる場合には関節などの剛性に起因する振動が非常に深刻な問題であり, 作業中にアームに振動が生じると収まるまで次の作業に移ることができず作業効率の低減につながる. また, 物資運搬中には振動によって予期せぬ衝突が起こる可能性があり, 特に宇宙飛行士の船外活動(EVA)との共同作業時には非常に危険である.

このようなロボットアームの振動を抑制する手法は古くから研究されているが, 我々は Input Shaping というフィードフォワード型制御法[1][2]に注目し, 実験によって長大アームへの適用実現性について検証を行っている. Input Shaping は固有振動数などのパラメータが既知であればセンサなど必要とせず既存の制御システムに直接適用することができる. このことは既にフライト品が完成している JEMRMS や, スペースシャトルで予定されている検査用延長ブーム (OBSS) を用いた作業時へ適応できる可能性があり本研究は非常に意義のあるものであると考えている.

本研究の一部は東京工業大学松永研究室との共同研究「再構成多肢マニピュレータによる構造物組立作業技術の研究」の一環として実施されたものである.

2. 研究の概要

2.1 実験システム

Fig.1 に本研究で使用する地上実験用長大アームの概観を示す. アームのリンク部は約 4m と JEMRMS と同等の長さを持つが, 重量は地上実験用に約 10kg となっている. 根元の Roll 軸のみ AC モータで駆動 (速度制御モード) できるようになっている 1 自由度構成であり, 関節軸にモーメントがかからぬようカウンターマスによってバランスをとっている. 他の関節角度は 45° , 90° , 45° に固定して実験を行った. 手先の振動は加速度センサおよびレーザー変位センサによって測定する.

また, アームの操作は速度指令履歴を読み込んで追従させる自動操作モードとジョイスティックを用いたマニュアル操作モードの 2 つの制御モードで操作を行う.

2.2 長大アームのモーダル試験の実施

長大アームの振動特性については過去に測定した情報を使用して実験を行っていたが, 1 次の振動モードしか考慮していなかった. 平成 16 年度では, 構造や機構の劣化によって過去に測定した振動特性と比べて多少の変化があると思われるため, 振動特性の再計測および 2 次以降の振動モード計測を目的としてモーダル試験を実施した.

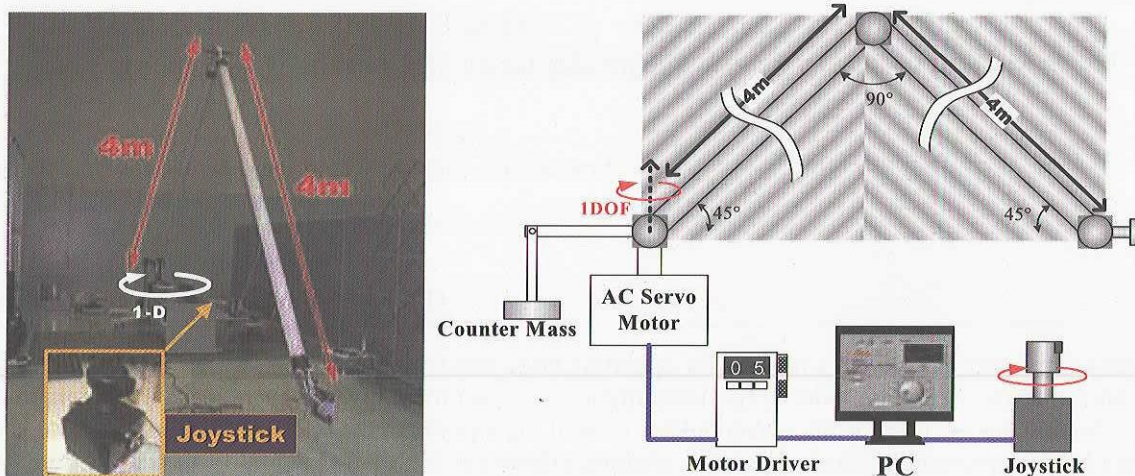


Fig.1 Experimental Setup

2.3 自動操作モード実験の実施

平成 15 年度に実施した長大アームの制振実験では、ある設定した操作角および操作時間に対する速度指令プロファイルに **Input Shaping** を適用したプロファイルを予め計算しておく (**Pre-Shaping**)、それによって自動的にアームを動かした場合に **Rest-to-Rest** モーション時の残留振動抑制に関して検証した。平成 16 年度では、モーダル試験の結果を踏まえ 2 次の振動モードまでを考慮して **Input Shaping** を適用することで、1 次までしか考慮しなかった場合と比べ制振率への影響を検証した。

2.4 マニュアル操作実験の実施

軌道上でアームを用いたミッションを考えた場合、あるプロファイルに沿って自動的に操作するのではなく、その大半は宇宙飛行士がモニタ等を確認しながらコントローラを用いて操作するマニュアル操作モードであろう。平成 16 年度は実験システムを整備しなおし、ジョイスティックを用いてマニュアル操作した場合においても **Input Shaping** を適用できる用、制御プログラムを再構築した。

本実験システムではジョイスティック入力により関節の回転速度指令を与えて操作する。マニュアル操作ではジョイスティックからの入力は操作者が現在の状況を確認しながら適時変化させるため、予め入力プロファイルに **Input Shaping** を適用することはできない。このため Fig.2 に示すように、現在の入力履歴から **Input Shaping** を適用したプロファイルを予定プロファイルとしてプログラム内に保有し、ジョイスティックからの入力に変化する度に過去の予定プロファイルと新しい予定プロファイルを重ね合わせることでマニュアル操作モード時に **Input Shaping** を適用する (**Post-Shaping**)。

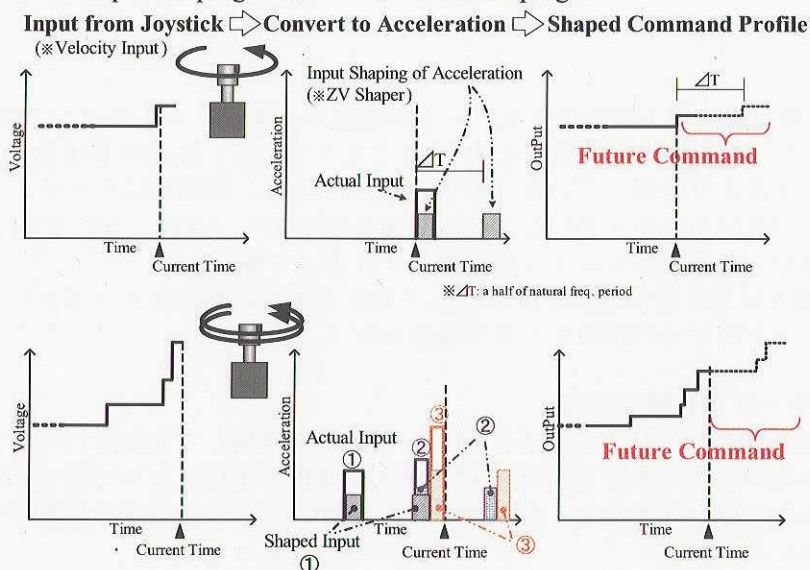


Fig.2 Input Shaping Application to Manual Operation Mode

3. 成果の概要

3.1 モーダル試験

モーダル試験結果について Fig.3 に示す。

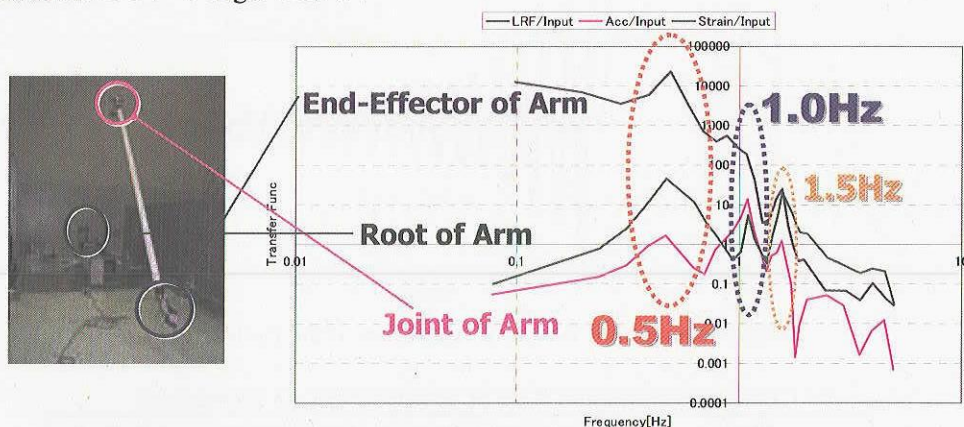


Fig.3 Result of Modal Test

手先に関しては 0.5Hz 付近が支配的であるが、中央の関節及び根元の部分ではそれぞれ 1.0Hz, 1.5Hz 付近の振動モードの影響が無視できないことが確認された。今までは手先の残留振動のみに注目し、手先でみられた 0.5Hz の振動モードのみを考慮してきたが、本稿で示す実験では 1 次の 0.5Hz および 2 次の 1.0Hz の振動モードまで考慮して Input Shaping を適用することとした。

3.2 Pre-Shaping 実験

3.2.1 台形波速度入力実験

まず、台形波速度入力で操作した場合の実験結果について示す。台形入力は地上のロボットでは一般的に使われる入力波形である。1 次モードを対象とした ZV Shaper と 2 次モードまで対象とした ZVZV Shaper を用いて指令プロファイルを整形した。Fig.4 に Input Shaping を適用した場合の速度および加速度入力プロファイルを示す。Input Shaping を適用しない場合の速度指令入力は立ち上がり時間 3sec の台形状をしており、動作角度は 20 度であり、平均速度は 2deg/sec である。Input Shaping を適用することで最大速度入力値が大きくなっているが、どのプロファイルも平均速度指令は 2deg/sec となっている。

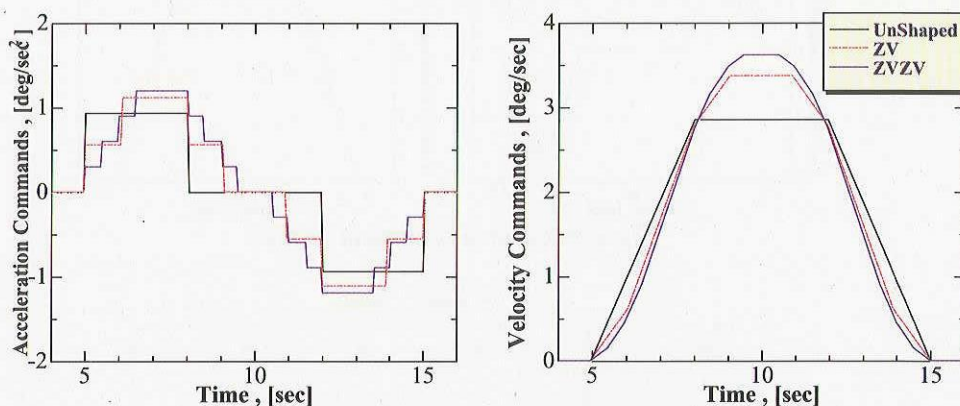


Fig.4 Trapezoid Velocity Command profiles

Fig.5 に手先の残留振動測定結果を示す。1 次モードのみを考慮した ZV を適用することで残留振動をかなり抑えることができているが制振率は 25% 程度となっている。これに対し 2 次モードまでの振動を考慮した ZVZV を適用すると残留振動がほとんど生じていないことが分かり、Input Shaping を適用しない場合と比べて 3% 以下まで制振することができている。

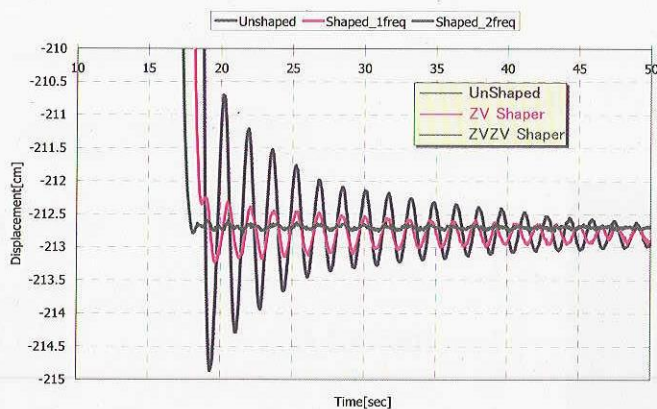


Fig.5 Experiment Result of Alteration of the End-Effector

Table 1 Suppression Rate of Trapezoid-Shape Experiment

Shaper	Residual Vibration, [cm]	Suppression Rate, [%]
Trapezoid UnShaped	4.20	100
Trapezoid ZV	0.95	22.6
Trapezoid ZVZV	0.10	2.4

3.2 正弦波速度入力実験

次に振動を抑えるために一般的に用いられる Sin カーブで速度入力を与えた場合の実験結果について示す。Fig.6 に Input Shaping を適用した場合の速度および加速度入力プロファイルを示す。

Fig.7 に手先の残留振動を示す。この実験も 3.1 節と同様に平均速度 2deg/sec で 20 度回転させている。速度指令に Sin 波を用いると台形波と比べて格段に残留振動を抑えることができ、Input Shaping を適用しない場合でも振幅が 4mm 程度と非常に小さくなっている。Sin 波入力に対して Input Shaping を適用することで更に残留振動を抑えることが可能となり Input Shaping を適用しない場合と比べて更に 40%以下まで制振できていることが分かる。Table 2 に制振率をまとめる。Input Shaping を適用することで作業時間および動作範囲を変えることなく残留振動を抑えることが可能である。

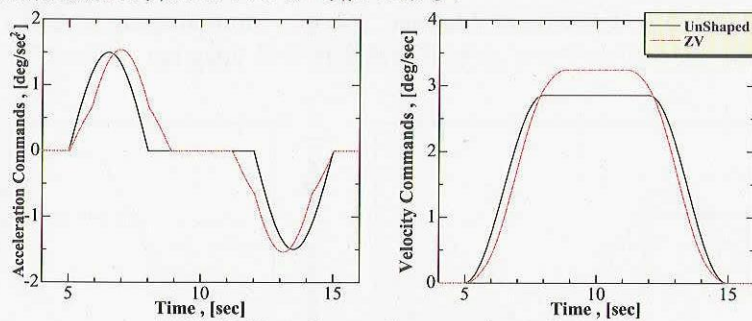


Fig.6 Sine-Curve Command Profiles

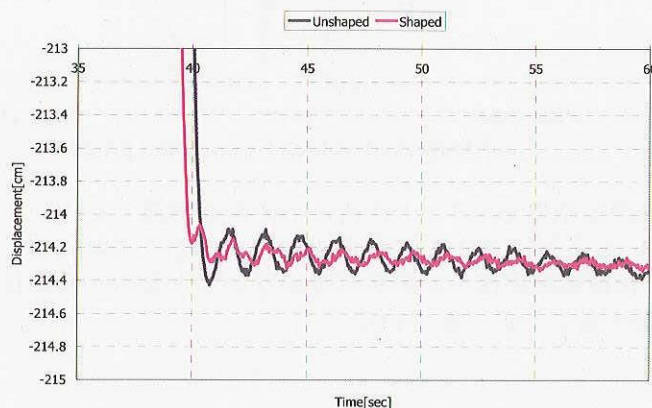


Fig.7 Experiment Result of Alteration of the End-Effector

Table 2 Suppression Rate of Sine-Curve Experiment

Shaper	Residual Vibration, [cm]	Suppression Rate, [%]
Trapezoid UnShaped	4.20	100
Sin Wave UnShaped	0.36	8.6
Sin Wave ZV	0.18	4.3

3.3 Post-Shaping 実験

手先に搭載されたカメラ画像を見ながら操作者が初期位置から目標位置までジョイスティックでマニュアル操作した場合の実験結果について示す。目標位置は初期位置から関節を 30 度回転させた位置にあり、オペレータが何度か練習を重ねた後に、操作時間が 15 秒程度になるように操作を行った（平均速度：2deg/sec）。ジョイスティックを使ってオペレータが操作する場合、振動が生じないように手先の揺れを見ながら自然とスプラインカーブのような速度入力を行うが、それでも Input Shaping を適用しない場合には最大振幅が約 5cm 程度の残留振動が生じてしまう。これに対し、Input Shaping を適用すると同じように操作した場合でも残留振動をかなり抑えることが可能である。各 Shaper を適用した場合の残留振動と制振率を Fig.8 および Table 3 にそれぞれまとめる。手先の変位のみを見ると最大で 3% まで振動抑制できていることが分かる。ただし、Input Shaping を適用することでオペレータが操作応答性が遅く感じるという問題点がある。例として ZV Shaper を適用した場合を考えると、実際の加速度入力を 1 とすると、現時刻で 0.5 の入力、固有振動数の 1/2 秒後（この長大アームでは $\Delta t=0.86$ 秒）に 0.5 の入力を入れるため操作者が実際に指令を与えた速度に達するのは Δt 秒後ということになるため、当然それだけの時間遅れを感じるようになる。実際に ZV, ZVZV を適用した場合の実験時の指令履歴について Fig.12 から Fig.14 にそれぞれ示す。グラフを見て明らかなように ZVZV を適用した場合には操作者が速度指令を 0 にしても実際に 0 になるのは 1.86 秒後となっている。ただ、速度 0 付近では手先の移動速度も非常に遅く止まるまでに 1.86 秒遅れても移動する距離はわずかであるため、操作に慣れることで問題ないと考ええる。

また、作業効率の面から考えると Input Shaping を適用しない場合には手先の位置変動が 1cm 以下に減衰するまで約 15 秒間かかっているため操作応答が 1.86 秒遅れたとしても作業効率は向上しているといえる。

本稿で示した実験結果では本来は ZVZV と比べて ZVDZV の方がロバスト性が高いため残留振動が小さくなるはずであるが、逆の結果となっている。Pre-Shaping と異なり加速度入力が生じる度にプロファイル作成の処理をするため、Shaping された入力が重なって打ち消し合ってしまう可能性などが考えられるが、詳細については今後の課題である。

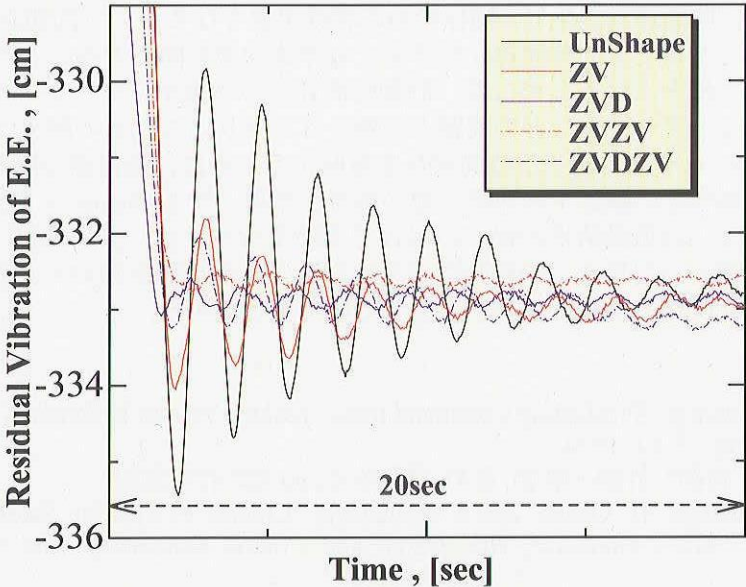


Fig.8 Experiment Result of Alteration of the End-Effector

Table 3 Suppression Rate of Sine-Curve Experiment

Shaper	Residual Vibration, [cm]	Suppression Rate, [%]
UnShaped	5.58	100
ZV	2.16	38.7
ZVD	0.39	7.0
ZVZV	0.17	3.0
ZVDZV	1.18	21.1

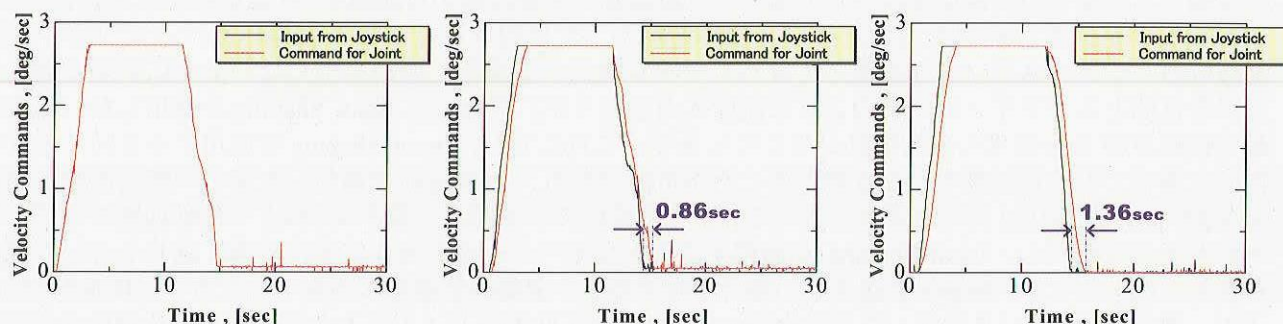


Fig.9 Command Profiles of Manual Operation Experiment

4. まとめ

長大柔軟アーム作業時の残留振動抑制法として Input Shaping を自動操作およびマニュアル操作モード双方に適用し、地上実験によって効果を実証した。

自動操作モードでは予め指令プロファイルを Pre-Shaping しておくことで台形波入力で操作した場合には 2 次の振動モードまで考慮することで最大で 2.4% まで残留振動を抑えられることを実証した。速度入力波形を Sin 波にするなど工夫することで残留振動を小さくすることが可能であるが、Input Shaping を用いることで更にその 50% 以下まで制振することが可能であることを示した。

マニュアル操作モードでは予め入力プロファイルを Shaping することができないため、現在時刻の入力変化を基に Shaping を行い、予定プロファイルを作成することで Input Shaping を適用し、制御プログラムの再構築およびアルゴリズムの実装を行った。予定プロファイルを Shaping するため実際の速度指令値に関節の速度が達するまでに時間遅れが生じ、操作者が応答性が悪くなるという問題点があるが、最大で 3% まで残留振動を抑制することができ、時間遅れを考慮しても作業効率を向上することができることを実証した。

更に制振のロバスト性を上げるためには、制御時間遅れの考慮や、マニュアル操作時に本来あるべきはずの入力が打ち消し合ってしまうなどの問題点が残されており、これらの解決は今後の課題である。

平成 17 年度ではオペレータが感じる時間遅れを軽減するために、操作開始時および操作終了時などのアーム操作速度が遅い場合と、操作中の速度は速い場合とで適用する Shaper を変更するなど適用方法について改善する。また、今回は振動特性が単一の場合で実験を行ったが、アームがペイロードを把持した場合や、アームの姿勢が変わった場合に振動特性の変化をモータ電流値を用いることで同定し、振動パラメータの変化にも対応した操作アルゴリズムを実装していく予定である。

[参考文献]

- [1] N. Singer and W. Seering, "Preshaping Command Inputs Reduce System Vibration", Trans. ASME J.Dyn. Meas. Control, vol.112, no.1, pp.76-82, 1990.
- [2] 山浦, "制振シーク制御", 計測と制御, 第41 巻, 第6 号, pp.422-427, 2002
- [3] W. Singhose, E. Biediger, H. Okada, and S. Matunaga, "Control of Flexible Satellites Using Analytic On-Off Thruster Commands", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2003, AIAA Paper 2003-5333.
- [4] 此上一也, 松永三郎, 上野浩史, 稲葉一幸, 小田光茂, "柔軟宇宙ロボットの振動抑制を考慮した制御法の実験的検討", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2004, 名古屋, 2004 年6月.
- [5] H.Sawada, S.Matunaga, H.UENO, M.ODA "Dynamics and Control of Space Robotic Manipulator on the Flexible Structure and 2-Dimensional Micro Gravity Experiments", 24th International Symposium on Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, May 30-June 6