

## 柔軟リンク系の振動・動揺抑制

### Vibration Control and Mechanical Sway Stabilization of Flexible Link System

○非 今井 勇佑 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Yusuke IMAI, Graduate School, Univ. of Tsukuba, s1220855@u.tsukuba.ac.jp

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, isobe@kz.tsukuba.ac.jp

In this paper, we propose a mean of vibration control and mechanical sway stabilization of flexible link systems. This system controls both the vibration generated in a link and the reaction moment generated by motion of an object. Since the vibration is caused by the transition between strain energy and kinetic energy, the mean of vibration control discussed in this paper aims to reduce the strain energy. The reaction moment is canceled by using a torque canceling system (TCS) which is developed in the previous studies. The effect of this vibration control system is shown by carrying out finite element analysis of a simple flexible link system, and a calculated result of the reaction moment generated at the location of a TCS.

*Key Words* : Flexible Manipulator, Trajectory Planning, Vibration Control, Mechanical Sway Stabilization

#### 1. 緒言

近年、エネルギー消費削減を目的としてリンク機構の軽量化が求められる場合がある。その際に、部材剛性が低下し、リンク機構に曲げ振動が発生する問題がある。他方、作業効率を高めるため、動作の高速化も求められている。この際、機構全体が動揺するという問題がある。宇宙空間での利用においてもこの2つの問題は無視できない。宇宙空間では空気減衰のない環境での運用になるため、リンクの曲げ振動が発生しやすい。また、拘束力が小さいために機構全体の動揺が発生しやすい。

ここで、はりの振動現象を表した模式図を図1に示す。リンクが外力により変形すると、その仕事がひずみエネルギーとしてリンク内部に蓄積され、それが運動エネルギーへと変換される。このように、振動はひずみエネルギーと運動エネルギーの移り変わりが繰り返されることで起こる現象である。また、機構全体の動揺は入力トルクの反作用として回転軸回りおよび重心回りにモーメントが生じることで発生する。

柔軟リンク系をモデル化し、その曲げ振動抑制を図る研究が多くなされている<sup>[1][2]</sup>。一方、リンクの振動と共に系全体の動揺抑制を図るためには、系全体のダイナミクスおよび挙動を正確に把握することが必要となる。磯部らが開発した並列的逆動力学計算法(以後、並列的解法と記す)では、従来の動力学方程式ではダイナミクスを正確に導出することが困難な系に対しても、追従性の良い安定したフィードフォワード制御を実現している<sup>[3]</sup>。さらに、本解法では有限要素法のアルゴリズムを用いているため、モデル内の任意の箇所に発生するモーメントを正確に算出できる。この特徴を利用することで、振動と同時に動揺の抑制も行えるシステムの実現に繋がると考えられる。

そこで本研究では、リンク機構に発生する振動と動揺を同時に抑制するシステムを提案する。振動抑制は、柔軟リンク系内に発生するひずみエネルギーを低減させることで行う。動揺抑制は、先行研究で開発されたトルクキャンセリングシステム(以後、TCSと記す)を用いる<sup>[4]</sup>。本稿では、ひずみエネルギーに着目した振動抑制法について示し、その有効性の評価を行うと共に、TCSで動揺を抑制するために必要なモーメントを並列的解法により求めた結果を示す。

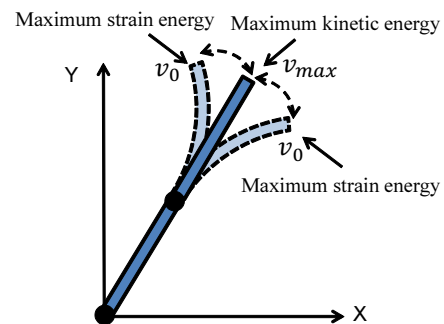


Fig.1 Vibration phenomena of a beam

#### 2. 軌道計算アルゴリズム

本節で述べる軌道計算アルゴリズムは、骨組構造の有限要素解析で用いられている手法を柔軟リンク系の運動学計算に応用したものである。本手法の特徴は、運動方程式を増分型で表現することで解を逐次的に求める近似解法を用いている点、また、それを能動的に動作する機構に適応させた点である。機構の動作によって生じる慣性力を考慮すると、仮想仕事の原理より、時刻  $t + \Delta t$  における増分型運動方程式は次式のように定式化される。

$$[M]\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + [M]\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_d\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\} \quad (1)$$

ここで  $[M]$  は全体質量マトリクス、 $[C]$  は全体減衰マトリクス、 $[K]$  は全体剛性マトリクス、 $\{F\}$  は外力ベクトル、 $\{R\}$  は内力ベクトル、 $\{\ddot{u}_m\}$  はリンクの動作による節点加速度ベクトル、 $\{\ddot{u}_d\}$  はリンクの変形による節点加速度ベクトル、 $\{\dot{u}_d\}$  はリンクの変形による節点速度ベクトル、 $\{\Delta u_d\}$  はリンクの変形量増分ベクトルである。式(1)にNewmarkの $\beta$ 法を適用し、動作量と変形量を足し合わせることで、動作量、変形量、総変位量は次式のように求められる。

$$\{u_d\}_{t+\Delta t} = \{u_d\}_t + \{\Delta u_d\} \quad (2a)$$

$$\{u_m\}_{t+\Delta t} = \{u_m\}_t + \{\Delta u_m\} \quad (2b)$$

$$\{u\}_{t+\Delta t} = \{u_m\}_{t+\Delta t} + \{u_d\}_{t+\Delta t} \quad (2c)$$

$\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t}$  を式 (1) の運動方程式に入力し解くことで逐次的に  $\{\Delta u_d\}$  が算出され、最終的に動作量ベクトル  $\{u_m\}$  と変形量ベクトル  $\{u_d\}$  の和 (式 (2c)) として慣性および減衰、剛性を考慮した軌道が得られる。

### 3. 並列的逆動力学計算法

リンク系に目標軌道を与えた場合に、その追従に必要な関節トルクを算出する並列的解法について述べる。並列的解法は、主に2つの計算過程から成り立つ。まず、モデル化されたリンク系の動作によって各節点に必要な節点力を求める過程である。ここでは、運動学計算で得られた加速度を元以下のような力の次元での増分型運動方程式を解くことで、系内の非拘束点における節点力を算出する。

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (3)$$

次に、式 (3) で算出された節点力を力学的な関係からトルクに換算する過程について説明する。節点力からトルクに換算する過程をマトリクス形式で表すと、次式のようになる。

$$\{\tau^n\} = [L^n][T^n]\{P^n\} \quad (4)$$

ここで、 $\{\tau^n\}$  は要素座標系における関節トルクベクトル、 $\{P^n\}$  は全体座標系における節点力に関するベクトル、 $[T^n]$  は全体座標系を各リンクの要素座標系に変換する座標変換マトリクス、 $[L^n]$  は部材長やリンク構造の情報を含む部材長マトリクスである。 $n$  は対象とする機構の総リンク数である。本解法はマトリクス形式で表記されることから、節点力・トルク換算過程は部材の剛性によらず変化しない。すなわち、部材剛性を考慮した適切な軌道を作成し、節点力算出過程に必要な節点加速度を求めれば、部材剛性を考慮したトルクを算出することが可能となる。

### 4. 振動の抑制方法

系内に蓄積される全ひずみエネルギーの計算は、次式を用いて行う。

$$U = \sum_{i=1}^n \{\epsilon_i\}^T \{\sigma\}_i l_i \quad (5)$$

ここで、 $i, n, \{\epsilon_i\}, \{\sigma\}_i, l_i$  はそれぞれ、要素番号、総要素数、 $i$  番目の要素のひずみベクトル、断面力ベクトル、要素長である。この式より、ひずみエネルギーを低減することは断面力を低減させることによって実現できることが分かる。ここで断面力とは、曲げモーメント、軸力、ねじりなどの断面に発生する応力の積分値のことを言う。系内のひずみエネルギーを低減させる方法としては、系の姿勢を変更する方法と、系の剛性を変更する方法が考えられる。どちらの方法も適切に行えば系内の断面力を低減でき、すなわちひずみエネルギーの低減につながる。柔軟リンク系において、姿勢の変更はリンクの関節を曲げることで実現する。剛性の変更は、リンクの軸力以外の内力を0にし受動関節にすることで実現する。本研究では、振動抑制を行うために以下の2つの動作計画法を提案する。

#### SchemeA:

リンクの関節角を曲げることで姿勢変更を行い、ひずみエネルギーを低減させて振動を抑制する。

#### SchemeB:

リンクの内力を変化させることで受動関節にし、ひずみエネルギーを低減させて振動を抑制する。

この2つの方法はそれぞれ違った特徴を持っている。SchemeA はリンクの軌道を変更するだけで実現できるため、多くのタスクに対応でき、動作中でも振動抑制が可能である。しかし、振動抑制の効果は低く、リンクの軌道が変化し過ぎるとタスクの実現が困難となるといった問題点がある。一方、SchemeB は振動抑制効果は高いが動作中の振動抑制は難しく、使用場面に制限が多い。すなわち、動作中の柔軟リンク系の振動を抑制するには SchemeA が有効で、目標位置到達後の残留振動を抑制するには SchemeB が有効である。したがって、SchemeA と SchemeB を併用することで、柔軟リンク系に発生する振動を効果的に抑制できると考えられる。

### 5. 解析モデルおよび解析条件

提案手法による柔軟リンク系の振動抑制の有効性を検証し、TCS が系全体の動揺を抑制するために必要なモーメントの算出を行う。解析モデルには、図2に示すように水平2関節の柔軟リンク系と受動関節を介して枝分かれする力学的に複雑なリンク系を使用する。解析モデルのパラメータを表1に示す。要素3, 4が水平2関節の柔軟リンク系で、これに節点3を中心に2[s]で $\pi$  [rad]回転させる軌道を初期軌道として与える。座標系は全体座標系をX,Y,Z, 要素座標系をx,y,zとし、図3で示すように定義する。節点2には受動関節を設けているため、柔軟リンク系が動作することで系全体が動揺する。節点1にはTCSが取り付けられており、TCSでこの動揺を抑制する。

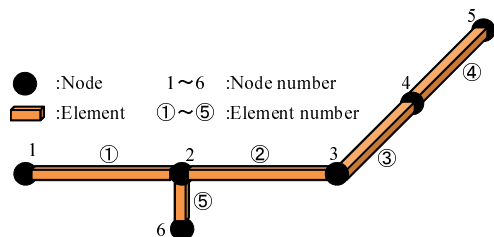


Fig.2 Analytical model

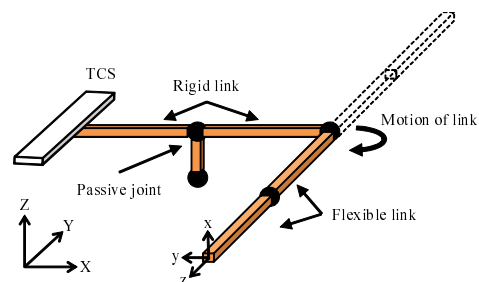


Fig.3 Outline of a link system

Table1 Parameter of link members

Link No.	1	2	3	4	5
Material	Stainless steel		Aluminum		Stainless steel
Length [m]	0.200		0.300		0.100
Section size x [m]	0.040		0.005		0.040
Section size y [m]	0.020		0.030		0.040
Added mass [kg]	0.48	0.48	0.00	2.00	0.00

## 6. 解析結果

### 6.1 振動抑制

SchemeA, SchemeB を用いて柔軟リンク系の振動抑制を行った結果を示す。柔軟リンク系の全ひずみエネルギーを図4, リンク先端の要素座標系 y 軸方向への変位を図5, リンク先端の全体座標系における X 座標を図6 に示す。リンクの動作中 (2[s] まで) は SchemeA で振動抑制, 目標位置到達後 (2[s] 以降) には SchemeB で振動抑制を行っている。振動抑制を行った場合では, 初期軌道のみ与えてタスクを実行した場合と比較して, ひずみエネルギー, 変位が減少していることが分かる。SchemeA で振動抑制を行うことで, ひずみエネルギーは 57.0%, 変位は 43.2% 抑制された。また, 目標位置到達後に SchemeB で振動抑制を行うことで, ひずみエネルギーはほぼ 0[J] になり, 先端変位も徐々に 0[m] に近づいた。SchemeA, SchemeB を組み合わせることによってリンク動作中の振動, 動作後の残留振動を効率的に抑制できた。

### 6.2 動揺を抑制するために必要なモーメントの算出

本節では, 動揺を抑制するために必要なモーメントを算出する。SchemeA, SchemeB を組み合わせて振動抑制を行った場合と初期軌道のみ与えた場合の TCS の位置 (節点 1) に発生するモーメントを図7 に示す。図7 より, 初期軌道のみ与えた場合には柔軟リンク部材の固有周期に応じた振動が現れているが, 振動抑制を行った場合には固有周期に応じた振動が発生していないことが分かる。この結果からも SchemeA, SchemeB により, 振動が抑制されていることが確認できる。今後行う予定の実験では, ここで算出されたモーメントを TCS に入力することで動揺抑制を図る。

## 7. 結言

本研究では, 柔軟リンク系を動作させる際に発生する振動と動揺を同時に抑制するシステムを提案した。振動抑制には SchemeA (姿勢の変更) と SchemeB (剛性の変更) という2つの方法を提案し, 水平2関節の柔軟リンク系を例に有限要素法を用いた解析を行うことで有効性を確認した。今後は, 解析によって求めた動揺を打ち消すモーメントを TCS に入力し, リンクに発生する振動と系全体の動揺を同時に抑制する実験を行う予定である。

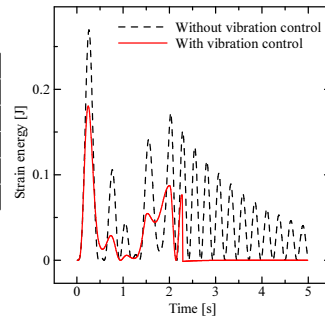


Fig.4 Strain energy

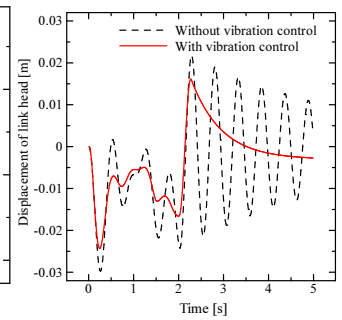


Fig.5 Displacement of link head

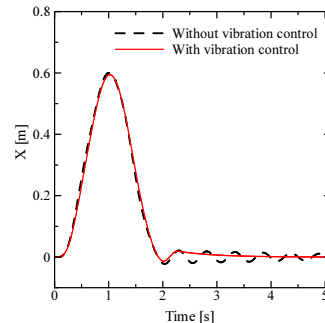


Fig.6 X-coordinate of link head

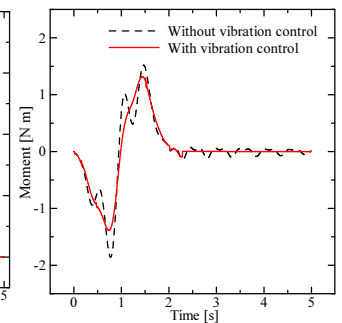


Fig.7 Generated moment at TCS

## 文 献

- [1] 坂和愛幸, 松野文俊, 大澤善樹, 清原誠, 阿部敏久: "3自由度フレキシブル・マニピュレータのモデリングと加速度センサを用いた振動制御", 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.1, pp.42-51, 1988.
- [2] 山浦弘, 渡辺訓夫, 小野右京: "多リンクフレキシブルマニピュレータの制振駆動", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.645, pp.1574-1581, 2000.
- [3] 磯部大吾郎: "有限要素法を用いたリンク機構の逆動力学計算", 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.6, pp.647-653, 2002.
- [4] 磯部大吾郎, 松井康将, 近藤健介: "並列的逆動力学計算法を用いたトルクキャンセリングシステムの開発", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.775, pp.785-798, 2011.
- [5] 磯部大吾郎, 加藤昭博: "フレキシブル・リンク系のモデルベースド・フィードフォワード制御", 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4, pp.625-631, 2007.