

# 並列的解法を用いた トルクキャンセリングシステムの開発

Development of Torque Cancelling System Using Parallel Solution Scheme

近藤健介<sup>1)</sup>, 松井康将<sup>2)</sup>, 磯部大吾郎<sup>3)</sup>

Kondo Kensuke, Yasumasa Matsui and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, e0611350@edu.esys.tsukuba.ac.jp)

2) 四国電力(株) (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, y.matsui0226@gmail.com)

3) 博(工) 筑波大学准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, a new concept of torque cancelling system which stabilizes mechanical sway in architectures is presented. The torque cancelling system (TCS) cancels the reaction moment generated by the motion of an object. The reaction moment can be calculated accurately using the parallel solution scheme, which handles the dynamics of various robotic architectures by modeling them with finite elements. Once knowing the reaction moment, it can be cancelled by applying an anti-torque to the TCS. In this paper, an outline of the parallel solution scheme is first described. An experiment is carried out for verification, on a flexible link system where difficult assumptions are normally required to consider the accurate dynamics.

**Key Words :** *Torque Cancelling System, Parallel Solution Scheme, Mechanical Sway*

## 1. はじめに

アクチュエータを有する物体が動作する際に、トルク入力に対する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発生し、系全体が動揺してしまう場合がある。このような現象は特に拘束力が小さくなる無重力空間では顕著に現れるため、宇宙飛行士は、物体を操作する際には余計な加速度を発生させないように注意深く作業する必要がある。また、軌道上の人工衛星などには Control Momentum Gyro[1]やリアクション・ホイール[2]と呼ばれるシステムが搭載され、反作用によって発生する動きをフィードバック的にキャンセリングしている。他にも、このような動揺をパッシブに抑制する方法として動吸振器を配置する方法[3]、アクティブな方法としてはヘリコプターのツインロータシステムなどに代表されるような、モーメントが発生する点に逆方向に物体を回転させ、トルクをキャンセリングする方法[4]などがある。しかし、前者はあくまでもセンサに頼るフィードバック的な方法で、後者は動作対象のダイナミクスを正確に把握していないと逆効果となる恐れがある方法であり、いずれも複雑なダイナミクスを有するロボットの高速動作には適用が困難である。他方、磯部らはこれまでに柔軟リンクや劣駆動リンク、閉リンクなど様々なリンク系の逆動力学を正確に算出可能な並列的逆動力学計算法[5][6] (以後、並列的解法と記す)を開発してきた。従来の動力学方程式を用いた逆動力学計算法では、閉ループ系および枝分かれ系、柔軟リンク系などが混在した複雑な機構のダイナミクスを計算することは困難である。一方、並列的解法は、有限要素法を基に開発されているために、

複雑な機構でも数値モデル化することでそのダイナミクスを正確に把握でき、またモデル内の任意の箇所に発生するモーメントなどの断面力を算出できるなどの大きな特長を有している。さらに、系内に発生するたわみや振動を考慮することも可能であるため、柔軟リンク系に対しても剛体リンク系の場合と全く同じ過程でトルクを算出し、そのフィードフォワード制御に適用することができる[7]。以上のことから、並列的解法は、力学的に複雑な機構のフィードフォワード制御を行うのに適しているだけでなく、その動作によって発生してしまう反作用モーメントをフィードフォワード的にキャンセリングするシステムに適用可能であると考えられる。本研究では、ロボット機構の高速安定動作に寄与する上記のようなシステムをトルクキャンセリングシステム (以下、TCSと記す) [8][9]と呼び、並列的解法を用いてこれを開発することを目的とした。並列的解法では、ロボット全体をモデル化した上でそのダイナミクスを計算し、かつTCSへの入力トルクを算出することが可能なため、TCSが搭載されているロボット本体が行う動作の影響も算出トルクに反映されることとなる。そのため、複雑な機構の複雑な動作に対するトルク供給、およびそれに伴う動揺を抑制するためのトルク供給が単一のシステムで実現され、ロボット機構の高速動作における安定性の向上に大きく貢献できるものと思われる。

本稿では、続く第2章でTCSの実現に必要な不可欠な並列的解法について概説し、第3章では、動作対象の弾性たわみを考慮する必要がある場合の軌道の算出方法を示す。第4章にTCSの原理、第5章には柔軟リンク系にTCSを適

用した実験例を示し、その有効性について検証する。第6章には結言を述べる。

## 2. 並列的逆力学計算法（並列的解法）

リンク系に目標軌道を与えた場合、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、およびそれによって得られた節点力をその力学的関係から関節トルクに換算する過程である。なお、リンク系のモデル化には曲げ変形精度の高い3次はり有限要素を用いる。

まず、節点力算出過程について説明する。並列的解法では、運動学計算で得られた加速度を元に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、系内の非拘束節点における節点力を算出する。

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (1)$$

ただし、 $[M]$ は全体質量マトリクス、 $\{F\}$ は外力ベクトル、 $\{\ddot{u}\}$ は節点加速度ベクトル、 $t$ は時刻、 $\Delta t$ は時間増分である。本解法では、直交座標系に基づく全体座標系で節点力を定義しているため、回転座標系に特有の見かけの力（コリオリ力）などの非線形項と呼ばれる力について独立に考える必要はない。また、重力補償については、質量マトリクス内の鉛直方向成分に対して重力加速度をかけることで考慮することができる。

次に、(1)式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。

$$\begin{Bmatrix} \tau^n \\ \vdots \\ \tau^n \end{Bmatrix}_{3n \times 1} = \begin{bmatrix} L^n \\ \vdots \\ L^n \end{bmatrix}_{3n \times 6n} \begin{bmatrix} T^n \\ \vdots \\ T^n \end{bmatrix}_{6n \times 6n} \begin{Bmatrix} P^n \\ \vdots \\ P^n \end{Bmatrix}_{6n \times 1} \quad (2)$$

ここで、 $\{\tau^n\}$ は求めるべき関節トルクベクトル、 $\{P^n\}$ は節点力に関するベクトルである。また、 $[T^n]$ 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、 $[L^n]$ はリンクの長さなどの情報を含む部材長マトリクスである。なお、変数右上の添字 $n$ は対象とするリンク系の総リンク数を示し、例えば $3n$ は直交要素座標系3軸回りの自由度の総数を表す。また、計算式が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である。また、任意の節点に発生するモーメントは、その節点でのトルク値として求められる。次節では、部材剛性を考慮した軌道計算アルゴリズムについて説明する。

## 3. 弾性たわみを考慮した軌道計算

リンク系の目標軌道から部材剛性を考慮した節点加速度を計算する方法について説明する。軌道計算アルゴリズムは本来、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。この手法の特徴は、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、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。

$$[M]\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + [M]\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_d\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \quad (3)$$

ここで、 $\{u_m\}$ 、 $\{u_d\}$ はリンクの動作量および変形量、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ は減衰マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{\ddot{u}_m\}$ はリンクの動作による節点加速度ベクトル、 $\{\ddot{u}_d\}$ 、 $\{\dot{u}_d\}$ はリンクの変形による節点加速度ベクトルおよび節点速度ベクトル、 $\{\Delta u_m\}$ 、 $\{\Delta u_d\}$ はそれぞれリンクの動作量増分ベクトルおよびリンクの変形量増分ベクトル、 $\{R\}$ は要素内力ベクトルである。この運動方程式を時間積分法である Newmark の  $\beta$  法を用いて解くことで、 $\{\Delta u_d\}$ 、 $\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t}$  等の各節点の動作および変形による速度、加速度ベクトルを算出することができる。これらを利用することで、次式により部材剛性を考慮した加速度ベクトル  $\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}$  を求めることができる。

$$\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + \{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} \quad (4)$$

算出された加速度ベクトル  $\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}$  を並列的解法に入力することで、部材剛性を考慮した入力トルクを算出することができる。

## 4. TCS

TCSとは、並列的解法により算出されたモーメントを用いて動揺を抑制するシステムである。

TCS の概念図を図1に示す。図上の物体を回転体、図下の物体をTCS、上下の物体をつないでいるものを軸とするとき、回転体を動作させる際に軸回りに反作用モーメントが発生する。そのため、軸は回転体とは反対回りに回転してしまう。しかし、下のTCSから逆位相のモーメントを発生させることで、互いのモーメントが打消し合い、軸は回転しなくなる。

また、図1のように偏心性のある物体を動作させる際には、回転軸回りにモーメントが発生するだけでなく、他軸回りにもモーメントが発生する。つまり系全体の動揺を抑制するためには、3軸回りのモーメントを打ち消すことが可能なTCSを配置し、ダイナミクスを考慮した正確な

モーメントをあらかじめ求めておく必要がある。

次に、TCSに入力するトルクについて説明する。動揺は、前節で示されたモーメントが原因となり引き起こされる。この動揺を抑制するためには、動作のために入力するトルクに対して発生する、反作用モーメントと逆位相のモーメントをTCS部に発生させれば良い。TCSに入力すべきトルクは、TCS部に発生させるべきモーメントのさらに逆位相にしたものとなる。すなわち、TCSに入力するトルクとしては、TCS部に発生するモーメントを用いれば良いことになる。

### 5. オフセット位置に配置した単軸TCSを用いた柔軟リンク系の動揺抑制実験

ダイナミクスの影響を大きく受ける柔軟リンク系に対してもTCSが有効であることを確認するため、図2に示すように受動関節を介して枝分かれするような、力学的に複雑な柔軟リンク系に対し動揺抑制実験を行った。動作対象のリンク部材に柔軟なポリカボネート材を使用し、たわみ量を大きくする目的でリンク先端に0.1 kgの錘を配置した。なお、系内の他の部材およびTCSの材質はステンレスとした。回転自由な接地部にエンコーダを配置し、動揺の抑制状態を計測結果から検証した。並列的解法に使用するモデルの分割図は図3に示す通りで、総要素数4、総節点数5と簡単なモデルとなる。動作対象のリンク部材を2.0 sで $\pi$  rad回転させた。並列的解法により算出された、リンク部材の動作に必要な駆動トルクを図4に示し、TCSの位置に発生するモーメントを図5に、TCSに供給するトルクを図6に示す。いずれも柔軟なリンク部材の固有周期に応じた振動が現れていることに注目されたい。また、前述の理由により図5および図6は完全に一致したものである。

図7は最下部のエンコーダで検知した機構本体の支持点回りの回転角度である。図より、TCSを動作させない場合にはモーメントの影響により本体が大きく回転していることが分かる。一方、TCSを動作させた場合には本体がほとんど回転していない。また、比較のために動作対象のリンク部材を剛体と仮定してTCSへの入力トルクを計算し(図8参照)、それをTCSに入力した場合の実験結果を図9に示す。図より、リンク部材の剛性を正確に考慮したものに對し、剛体と仮定した場合には抑制が不完全であることが確認できる。これはすなわち、TCSによる動揺抑制をする上では、系のダイナミクスを正確に表現する必要があることを示している。

### 6. 結言

本稿では、並列的解法を用いたTCSを開発し、これを用いてダイナミクスの影響の大きい柔軟リンク系において動揺抑制実験を実施した。具体的には、先端リンクの動作に必要なトルクおよびその動作により発生するモーメントを、並列的解法ならびに軌道計算アルゴリズムによ

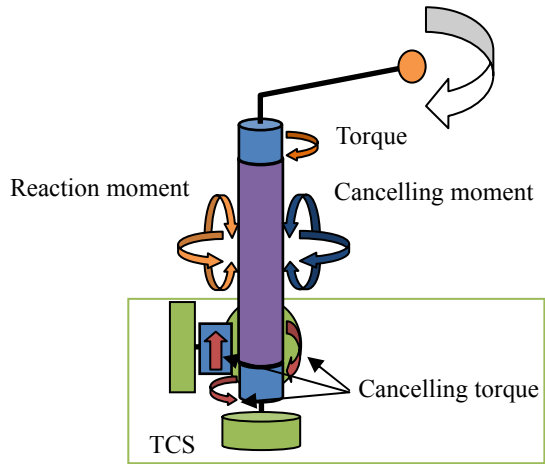
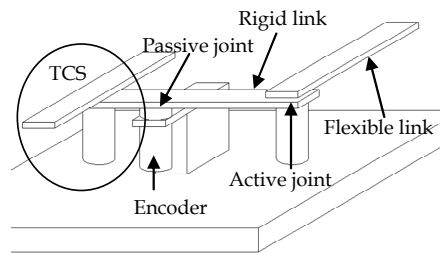


Fig. 1 General concept of triaxial TCS



(a) Experimental setup



(b) Configuration of the setup

Fig. 2 Experimental setup for uniaxial TCS

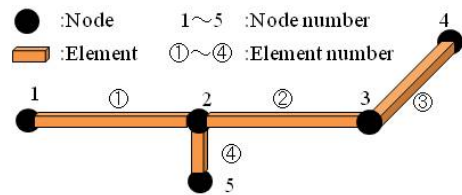


Fig. 3 Finite element subdivision of the setup

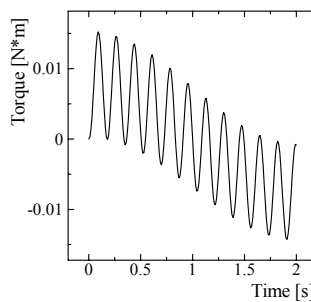


Fig.4 Input torque for active joint

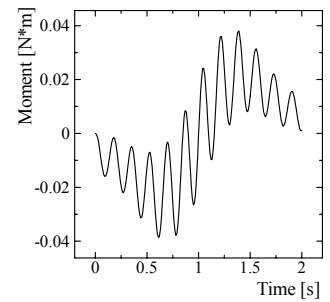


Fig.5 Reaction moment generated at the exact location of TCS

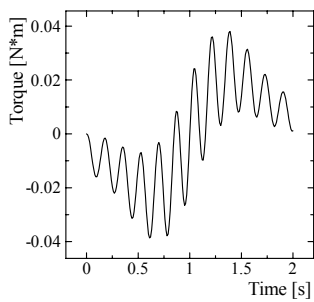


Fig.6 Input torque for TCS

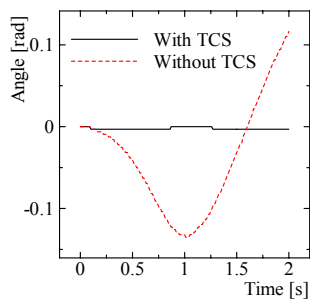


Fig.7 Sway observed at supported joint

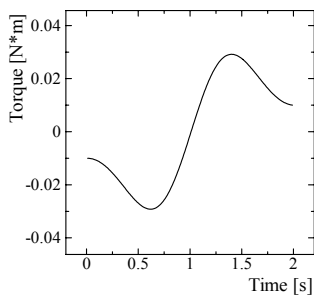


Fig.8 Input torque for TCS (rigid body)

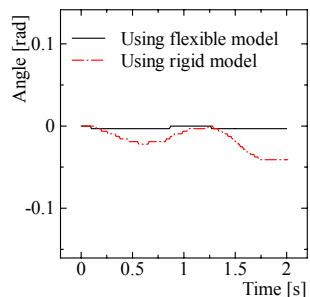


Fig.9 Sway observed at supported joint using TCS

り算出し、そのモーメントからTCSに入力するトルクを求めた。また、算出したトルクを実機に入力して実験を行った結果、動揺を十分に抑制できることを確認し、TCSの有効性を示すことができた。

## 参考文献

- [1] 例えば 狼嘉彰, 中須賀真一, 富田信之, 永三郎: 宇宙ステーション入門, 東京大学出版会, (2008), pp. 204-208.
- [2] 例えば 吉田和哉, ドウラゴミル N. ネンチェフ, 橋詰健一, 安孫子聡子, 小田光茂: ETS-VIIを用いた宇宙ロボット制御実験, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 50, No. 584, (2002), pp. 351-359.
- [3] 例えば 射場大輔, 曾根彰, 増田新: 制御理論を利用したロバスト性能を有するパンプ型動吸振器の設計, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 71, No. 710, (2005), pp. 2870-2874.
- [4] 例えば 和田信敬, 南昌行, 松尾祥也, 佐伯正美: ツインロータヘリコプタモデルの目標信号追従制御 -ロータの推力制限を考慮した方法-, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 2, (2009), pp. 77-86.
- [5] 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, (2002), pp.647-653.
- [6] D. Isobe: A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics, Advanced Robotics, Vol.18, No.9, (2004), pp.859-880.
- [7] 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, (2007), pp. 625-631.

- [8] 松井康将, 近藤健介, 磯部大吾郎: 並列的解法を用いたトルクキャンセリングシステムの提案, 第15回ロボティクスシンポジウム予稿集, (2010), pp.226-231.
- [9] 磯部大吾郎, 松井康将, 近藤健介: 並列的解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, (2011), pp. 785-798.