

柔軟リンク系に対する TCS を用いた動揺抑制実験

○松井康将（筑波大院） 近藤健介（筑波大院） 磯部大吾郎（筑波大）

Mechanical Sway Stabilization of Flexible Link System Using a TCS

*Yasumasa MATSUI, Graduate School, Univ. of Tsukuba

Kensuke KONDO, Graduate School, Univ. of Tsukuba

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba

Abstract — 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. An example of the torque cancelling is demonstrated by an experiment using a simple flexible link system.

Key Words : Torque cancelling system, Parallel solution scheme, Mechanical sway

1. 緒言

ロボットが腕や脚、あるいは重量物を高速に振り回したりする際に、系全体に動揺が生じる場合がある。それは、入力トルクの反作用として回転軸回りにモーメントが発生することが原因として考えられる。モーメントによる動揺を機械的に抑制する方法として、入力トルクの反作用モーメントを打ち消すためのモーメントを別の機構により発生させ、お互いを打ち消し合うことで動揺を抑制させる方法が挙げられる。この方法は、ロボットの動作に多い回転運動に対する動揺を抑制できるという利点があるが、モーメントの発生機構に入力するトルクが動作対象のダイナミクスを正確に表現したものでないと逆効果になるという問題点がある。筆者らは、独自に開発した並列的逆動力学計算法[1][2]（以後、並列的解法と記す）を使用することで、この問題点を解決することを試みた[3][4]。並列的解法は、従来の逆動力学計算法のように動作に必要なトルクを算出するだけでなく、有限要素法を基に開発されているため任意の箇所に発生するモーメントを算出できるという特徴を有している。そのため、並列的解法を利用することで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の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、まず並列的解法に入力するための軌道の算出方法を示す。次に、算出された軌道を入力データとする並列的解法の逆動力学計算について述べ、動作により発生するモーメントをキャンセルリングするトルクキャンセルリングシステム[3][4]（以後、TCS と記す）について説明する。最後に、ダイナミクスの影響が大きい柔軟リンク系に対して解析および実験を行い、TCSの有効性を示す。

2. 軌道計算アルゴリズム

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。

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

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, $\{F\}$ は外力ベクトル, $\{R\}$ 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 β 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変位, 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.

$$\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + \{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

このとき, リンクを剛体と仮定する場合には, 変形による加速度ベクトル $\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t}$ の全成分を 0 とすればよい. 算出された加速度ベクトル $\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}$ を次節に示す並列的解法に入力することで, 部材剛性を考慮した節点力を算出することができる.

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, 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, 前節の軌道計算で得られた加速度を基に, 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.

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

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, (3)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.

$$\{\tau^n\}_{3n \times 1} = \begin{bmatrix} L^n \\ T^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^n \end{bmatrix}_{6n \times 1} \quad (4)$$

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, 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, 節点力算出過程に入力すれば, 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.

並列的解法により動作に必要なトルクを算出する際に, 動作節点以外の節点でもトルクが算出される. このトルクは, 動作の反作用として発生するモーメントによって系が目標軌道から逸脱するのを防ぐために必要なトルクである. このトルクの波形を逆位相にしたものが系内に発生するモーメントを打ち消すためのモーメントであり, これをさらに逆位相にしたものが系内に発生するモーメントとなる. すなわち, 並列的解法によって動作節点以外の節点で算出されたトルクは, その点に発生するモーメントと同値となる. このように, 並列的解法では動作に必要なトルクが算出されるのと同時に, 系内に発生するモーメントが同時に算出される. この情報を利用することで, 動揺を抑制するために必要な, TCS に入力するトルクが求められる.

4. TCS

TCS とは, 前節で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。

まず、簡単のために図1の1軸回りに対応したTCSの概念図で説明する。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、回転体を動作させる際に軸回りに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、お互いのモーメントが打ち消し合い、軸は回転しなくなる。

また、図2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求める必要がある。

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。すなわち前節で示したように、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なければならないことになる。

5. 柔軟リンク系の動揺抑制実験

5.1 実験目的

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TCSを用いた動揺抑制実験を行い、このような系に対してもTCSが有効であることを確認することを目的とする。

5.2 実機概要

実験に用いた実機を図3に示す。動作リンクには柔軟な材質であるポリカボネートを使用し、動作リンクの先端に0.1[kg]の重りを配置した。TCSと実機を構成しているリンクの材質はステンレスである。また、動揺の抑制状態を数値的に確認するために、接地部にエンコーダを配置した。解析を行うために、図3の実機を有限要素に分割し数値モデル化した。その要素分割図を図4に示す。

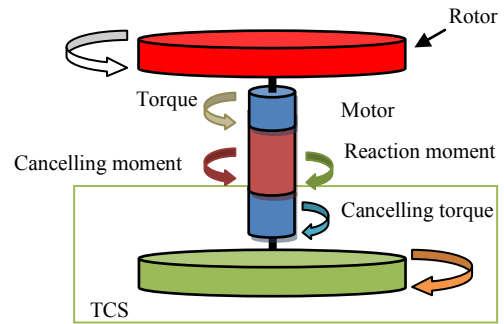


Fig. 1 General concept of uniaxial TCS

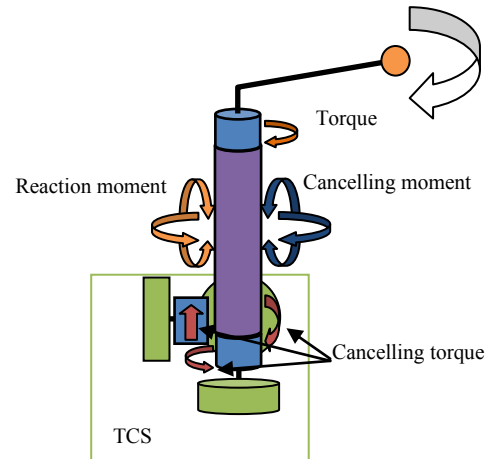


Fig. 2 General concept of triaxial TCS

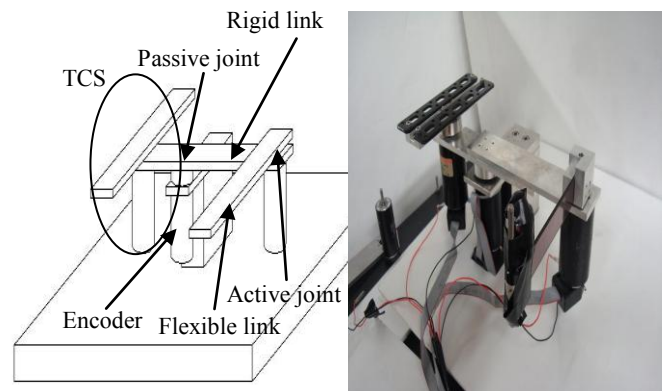


Fig.3 Experimental setup for uniaxial TCS

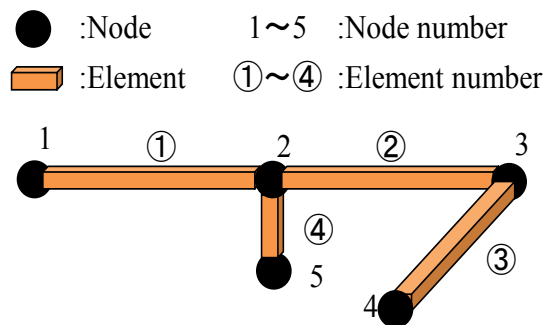


Fig.4 Finite element subdivision

5.3 実験方法

実機の動作リンクを2.0[s]で π [rad]回転させる際に、発生する動揺の抑制実験を行う。動揺の抑制状態を確認するためにTCSを使用しない場合と使用する場合の2種類で実験を行い、結果を比較した。

並列的解法により算出された動作リンクに必要なトルクを図5に示し、動作によりTCS部に発生したモーメントを図6に示す。前節で述べたように、TCSに入力するトルクはTCS部に発生するモーメントと同値で良い。よってTCSに入力するトルクは図7に示すものとなる。

結果的に、先端リンクを動作させるためのトルクとして図5のものを、TCSに入力するトルクとして図7のものを使用した。

5.4 実験結果

柔軟リンク系の動揺抑制実験の結果を図8に示す。図8は最下部のエンコーダで検知した機構本体の支点回りの回転角度である。図より、TCSを使用してい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を使用した場合には本体がほとんど回転していない。このことから、回転体の動作によって発生する動揺をTCSにより抑制できることが確認された。

また、比較のためにTCSに部材の剛性を考慮していないトルク（図9）を入力した場合の動揺抑制実験を行った。剛性を考慮した場合としない場合の支点の回転角度を図10に示す。図から、剛性を考慮していない場合には、TCSを使用していない場合（図8の赤破線）よりは動揺が抑制されているものの、ダイナミクスが厳密に表現されていないため、抑制が不完全であることが確認できる。

6. 結言

本稿では、ダイナミクスの影響の大きい柔軟リンク系において、TCSを用いた動揺抑制実験を行った。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により算出し、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。

今後は、実機を多リンク系に拡張し、さらに3軸対

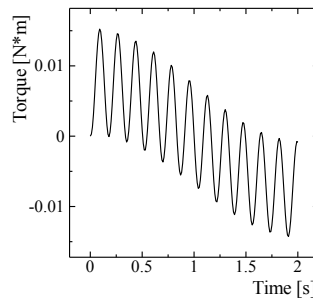


Fig.5 Input torque for active joint

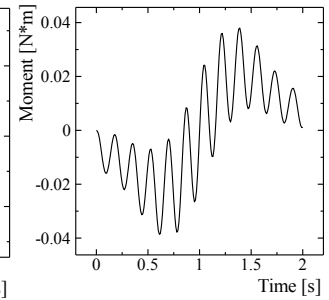


Fig.6 Reaction moment generated at the exact location of TCS

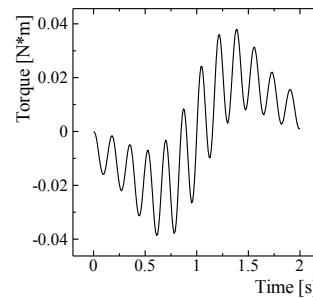


Fig.7 Input torque for TCS

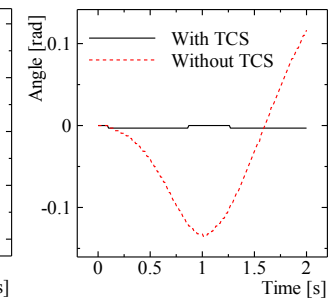


Fig.8 Sway observed at supported joint

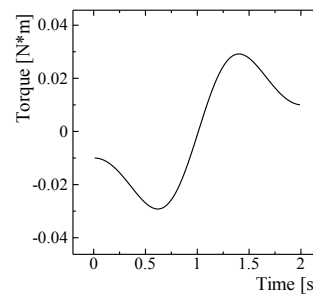


Fig.9 Input torque for TCS (rigid body)

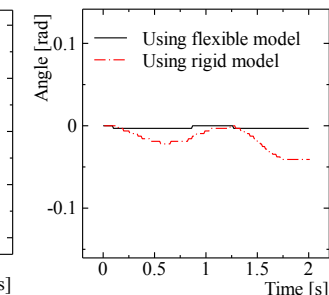


Fig.10 Sway observed at supported joint using TCS

応のTCSを開発して動揺抑制実験を行う予定である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] D. Isobe: A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics, *Advanced Robotics*, Vol.18, No.9, pp.859-880, 2004.
- [3] 松井 康将, 磯部大吾郎: 力学的動揺を安定化させるトルクキャンセリングシステムの提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'09講演論文集CD-ROM, No.09-4, 2009.
- [4] 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, pp.226-231, 2010.