

TCS を用いたリンク系における多軸回りの動揺抑制実験

○近藤健介(筑波大院) 磯部大吾郎(筑波大)

1. 緒言

ロボットなどの物体が何らかの動作をする時、その動作を行うために必要な入力トルクの反作用として物体の重心・軸回りに反作用モーメントが発生し系全体に動揺を起こす。この反作用モーメントは、無重力空間の拘束の少ない状況下や、高速動作に伴う入力トルクが増大する際に姿勢制御に対し大きな影響を及ぼすものとなる。この動揺を抑制する対策の一つとして航空宇宙分野では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人工衛星などに搭載され、反作用により発生する動揺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[3]を配置する方法、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のように、モーメントが発生する点で逆方向に物体を等速回転させ、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。いずれの方法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。

筆者らは、独自に開発した並列的逆動力学計算法[5][6]（以後、並列的解法と記す）を使用することで、ダイナミクスの表現を試みた。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表現し、またモデル内の任意の箇所が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上で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）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。本研究室ではこれまで、単軸回りの動揺に関して実験を行うことでTCSの動揺抑制への有効性を確認してきた[8][9]。

本研究では、TCSが多軸回りの動揺を抑制する上でも効果があることを検証するために、実機を製作し、実験を行った。本稿では、TCSの実現に必要な不可欠な並列的解法について概説し、動作対象の部材剛性を考慮する必要がある場合の軌道算出方法を示す。さらに、TCSの原理について説明し、今回行ったTCSを用いた多軸回りの動揺抑制実験結果を示す。

2. 並列的逆動力学計算法（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、 Δt 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。

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

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、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である。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. 部材剛性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。

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

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 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. トルクキャンセリングシステム(TCS)

TCSとは、並列的解法によるトルク算出過程で求められたモーメント値を用いて系内に発生するモーメントをキャンセリングし、動揺を抑制するシステムである。まず、簡単のために図1のように単軸回りに対応したTCSの概念図で説明する。図上側の物体を動作対象とし、それを下のモータが駆動すると、軸回りのモーメントが発生し、動作対象とは反対方向に軸が回転してしまう。しかし、図下側の物体（駆動モータを含む）をTCSとする時、このTCSに逆位相のモーメントを発生させると、双方のモーメントが相殺され、軸の回転が止まる。

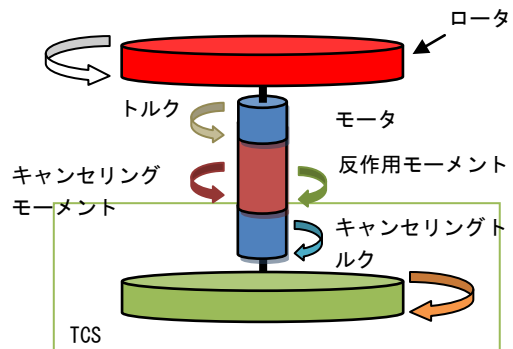


図1 TCSの概念図

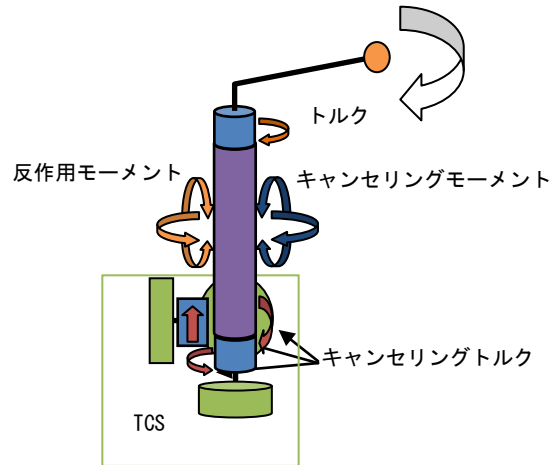


図2 偏心性のある物体を動作させる際のTCSの概念図

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、重力などの作用により、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、この場合に系全体の動揺を抑制するためには、各々の軸回りのモーメントを打ち消す計3つのTCSを配置する必要がある。さら

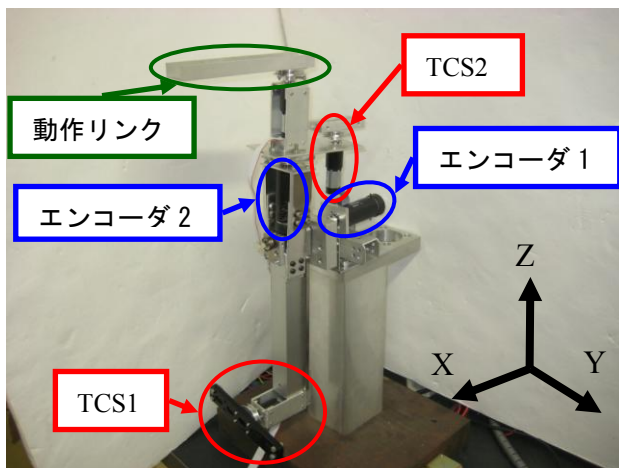


図3 実機部品配置

に、図より、動作対象の動作によって発生する反作用モーメントをTCSが発生するキャンセリングモーメントによって相殺させるためには、反作用モーメントと同値のトルクをTCSの駆動モータに供給すれば良いことが分かる。しかも、系全体の動揺を抑制するためには、TCSを動作対象と同一の回転軸上に配置しておく必要はなく、配置可能な位置に配置し、その点で発生しているモーメントをキャンセリングすれば良い。

5. 多軸回りの動揺抑制を目的とした実験

TCSを2軸回りに設置して動揺抑制実験を行い、多軸回りにおけるTCSの有効性を確認した。実験に用いた実機を図3に示す。動作リンクおよびTCSのモータにはMaxon社のA-max19を用い、減速比14:1のヘッドギアを使用した。回転自由とした支持点にエンコーダ1(X軸回り)・エンコーダ2(Z軸回り)を設置し、動揺の抑制状態をその計測結果から検証した。図4のようにZ軸回りに動作リンクを動作させると、反作用によりエンコーダ2を軸にして上部がZ軸回りに回転し動揺を起こす。また、系全体がエンコーダ1を軸にしてX軸回りに動揺を起こす。この動作時の動揺をTCS1(X軸回り)およびTCS2(Z軸回り)を使用して抑制する。並列的解法に使用した有限要素分割図を図5に示す。リンクには $1.0[s]$ で π [rad]回転する動作を与えた。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、リンク部材の動作に必要な駆動トルクを図6に示し、TCS1およびTCS2の位置に発生するモーメントを図7、図8に示す。前章で述べたように、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TCS1およびTCS2に入力するトルクはそれぞれ図9、図10に示すものとなる。また今回の実験では、並列的解法より求められた動作リンクおよびTCSへの入力トルクを使用してフィードフ

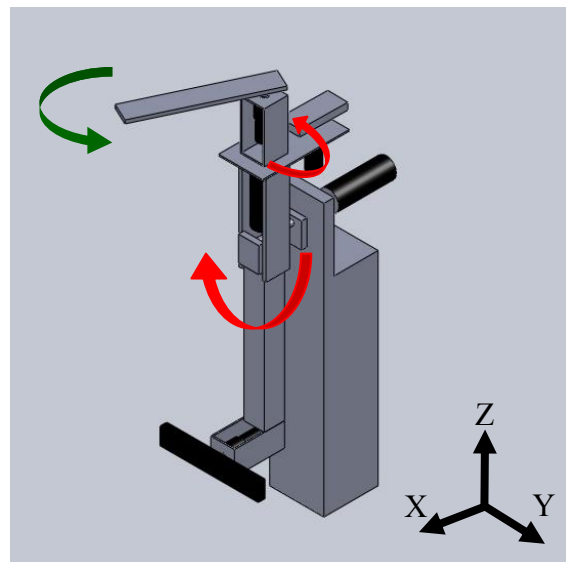


図4 実機動作概要

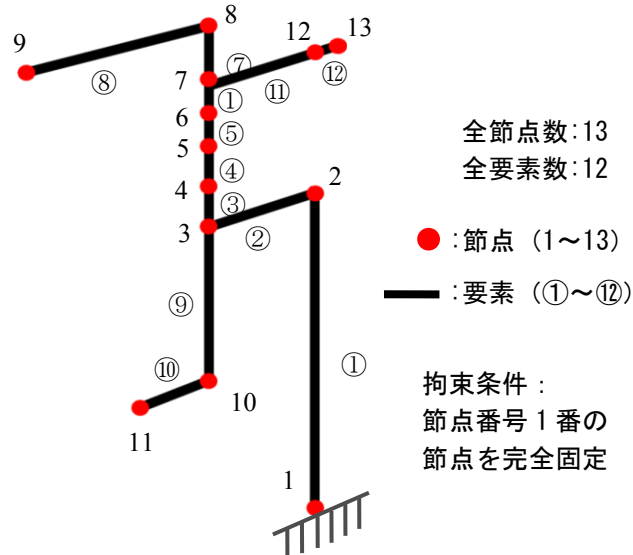


図5 要素分割図

ォワード制御を行い、両者共にフィードバック制御は施していない。

実験結果を図11、図12に示す。図11および図12はそれぞれエンコーダ1、エンコーダ2で検知された回転角である。図より、TCSを使用していない場合には反作用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。以上のことから、リンクの動作によって多軸回りに発生する動揺を各々の軸に配置したTCSにより抑制できることが確認された。

6. 結言

本稿では、系全体のダイナミクスを高精度にモデル化した上で動作に伴う反作用モーメントをキャ

ンセリングするトルクキャンセリングシステム (TCS) を用い、2軸回りででの動揺抑制実験を行った。動作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、単軸回りのみだけでなく、多軸回りの動揺に対してがTCSの有効であること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, pp.204-208, 2008.
- [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, pp.351-359, 2002.
- [3] 例えば 射場大輔, 曾根彰, 増田新: “制御理論を利用したロボスタ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, pp. 2870-2874, 2005.
- [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, pp. 77-86, 2009.
- [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, pp.647-653, 2002.
- [6] D. Isobe: “A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics”, Advanced Robotics, vol.18, no.9, pp.859-880, 2004.
- [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, pp.625-631, 2007.
- [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, pp.226-231, 2010.
- [9] 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.

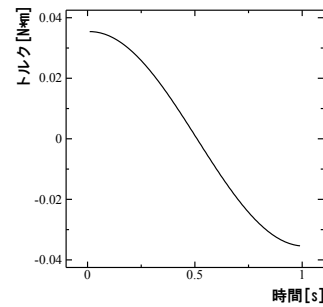


図6 動作リンクへの入力トルク

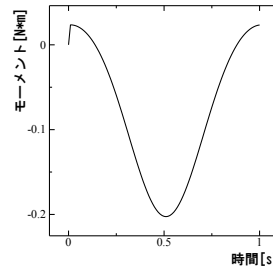


図7 TCS1 設置部に発生するモーメント

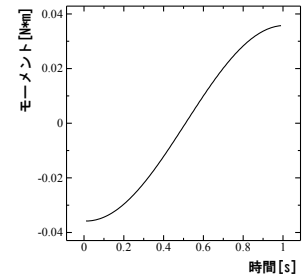


図8 TCS2 設置部に発生するモーメント

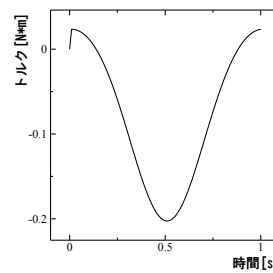


図9 TCS1 への入力トルク

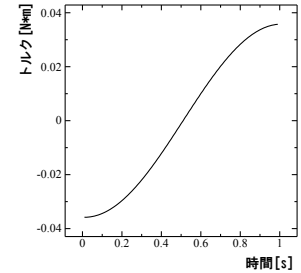


図10 TCS2 への入力トルク

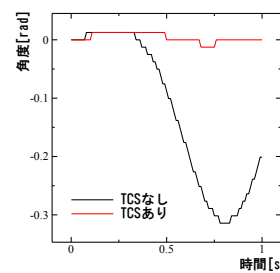


図11 エンコーダ1の回転角情報

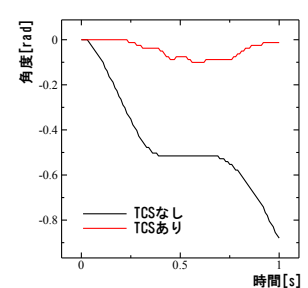


図12 エンコーダ2の回転角情報