

トルクキャンセリングシステムを用いた歩行ロボットの動揺抑制

Stabilizing Mechanical Sway of a Walking Robot Using a Torque Cancelling System

○正 磯部大吾郎 (筑波大) 学 中山 文平 (筑波大院)
非 近藤 健介 (筑波大院)

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, isobe@kz.tsukuba.ac.jp
Bumpei NAKAYAMA, Graduate School, Univ. of Tsukuba
Kensuke KONDO, Graduate School, Univ. of Tsukuba

A torque cancelling system (TCS) which considers not only the motion torque for objects but also the dynamics of a robotic architecture itself, is developed and equipped on a walking robot. The required torque for the system is computed by the parallel solution scheme which is developed based upon the finite element method. The scheme can compute the dynamics of complex mechanisms constituted with closed-loop mechanism and/or flexible links, and can also compute the moments generated at whichever locations in the mechanism. Experiments on the walking robot with a TCS showed a clear effect on stabilizing the mechanical sway in the walking motion.

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

1. 緒言

ロボットが動作する際に機構内に発生するモーメントを相殺するために、動作トルクだけでなく、機構そのものの動力学も考慮したトルクキャンセリングシステム (以下、TCS) の開発が進められている[1]。TCS のハードウェアはモータにロータを装着した単純なものであるが、ソフトウェアには並列的逆動力学計算法[2] (以下、並列的解法) を使用している。この解法は、有限要素法に基づいて開発されているために、複雑な形状を有する機構の動力学を考慮できるだけでなく、機構内の任意の箇所発生するモーメントを算出可能である。すなわち、機構内に発生するモーメントをキャンセリングするシステムに適した手法であると言える。

先行研究[3]では、単軸回りの剛体リンクおよび柔軟リンクの動作に対する TCS の有効性を確認した。複数の軸回りに対する検証実験も進められているが、本稿では、歩行動作を行うロボットに対して実際に TCS を搭載し、その動揺抑制効果を検証した結果について報告する。

2. TCS の概要

図 1 に示すように機構内に回転動作を起こすと、それに応じた反作用モーメントが機構内に生じる。その場合、一般的には動作の回転軸回りだけではなく、他軸回りにもモーメントが発生する。機構全体の動揺につながるこのモーメントを相殺するためには、反対回りのモーメントを別のトルク発生機構(TCS)で発生させれば良い。またその場合、必ずしも図のように 3 軸回りの TCS を 1 か所に集中して配置する必要はなく、各々の配置箇所に発生しているモーメントを知り、そのモーメントを TCS に入力して相殺すれば良いことが実験により確認されている[4]。

機構内に発生するモーメントの算出、すなわち TCS への入力トルクの算出には、前述のように並列的解法が用いられる。並列的解法ではまず、入力データとして与えられる動作軌道の加速度情報を基に次式に示す増分型運動方程式を解き、系内の非拘束節点における節点力を算出する。

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

ここで $[M]$ 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。次に、ここで得られた節点力を次式によりトルクに変換する。

$$\{\tau^n\} = [L^n][T^n]\{P^n\} \quad (2)$$

ここで $\{\tau^n\}$ は関節トルクベクトル、 $\{P^n\}$ は節点力に関するベクトル、 $[T^n]$ は全体座標系から要素座標系への座標変換マトリクス、 $[L^n]$ はリンク長や系の構成等の情報を含む部材長マトリクスである。並列的解法の詳細については文献[2]などを参照されたい。

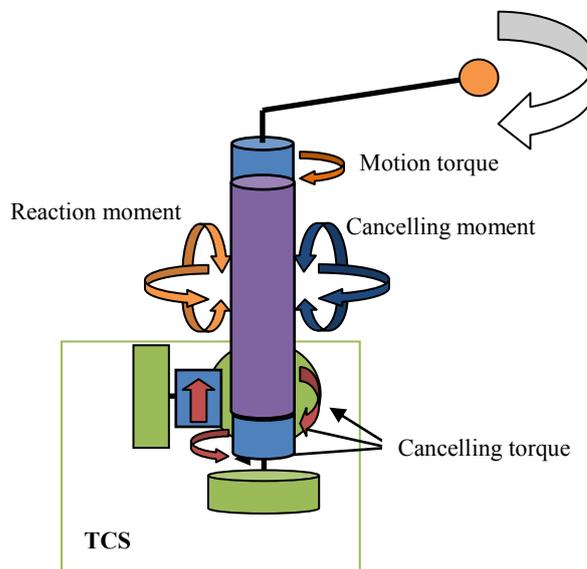


Fig. 1 General concept of a TCS

3. 歩行ロボットへの実装および動揺抑制実験

TCS を搭載した歩行ロボットの概観を図 2 に、諸元を表 1 に示す。中央の 2 つのモータ (J1、J2) は能動関節を駆動し、両端の 2 個のモータはウォームギアを介して脚の上下動を行う。両脚の接地部には電磁ホルダ、中央接地部にはボールキャスターが配置されており、電磁石のオンオフを利用して鉄板上を歩行する。実験では、図 3 に示すような 8.0[s] に 3 歩の

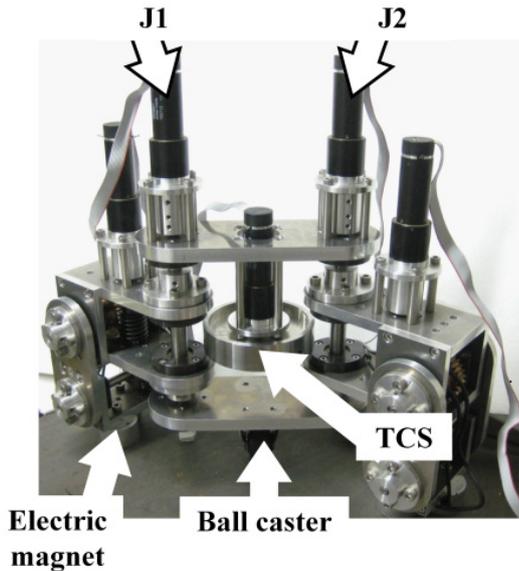


Fig. 2 Overall view of a walking robot

Table 1 General spec of the walking robot

Width [mm]	406
Height [mm]	394
Depth [mm]	141
Weight [kg]	12.0
Inertia of TCS rotor [kg m ²]	0.45

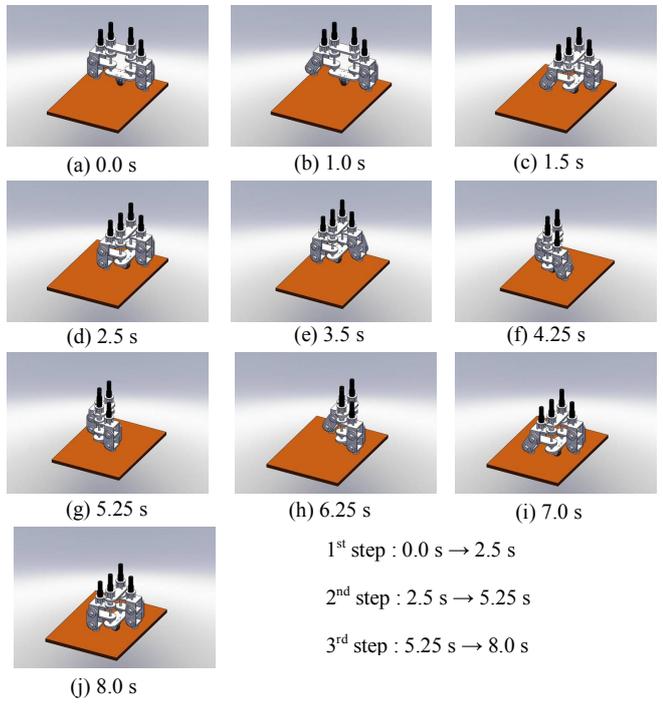


Fig. 3 Three-step walking motion of the robot

歩行を行う目標軌道を設定した。この歩行ロボットを図 4 に示すように有限要素分割を行い、J1、J2、および中央に取り付けた TCS (減速比 $\kappa=100$) について並列的解法を用いて入力トルクを算出する。

J1、J2 に対してはフィードフォワード (FF) 制御とフィードバック (FB) 制御を併用したトルク $\tau_{J1(FF+FB)}$ と $\tau_{J2(FF+FB)}$ を入力し、TCS に対しては同じく FF 制御と FB 制御を併用した場合 ($\tau_{TCS} = \tau_{TCS(FF+FB)}$) とトルクを入力しない場合 ($\tau_{TCS} = 0$) を実施し、両者の相違を検証した。動揺抑制効果を比較するために、まず動力学の影響を無視できる低速歩行を行い、3 歩の歩行後の着地点を基準着地点とした。その後、

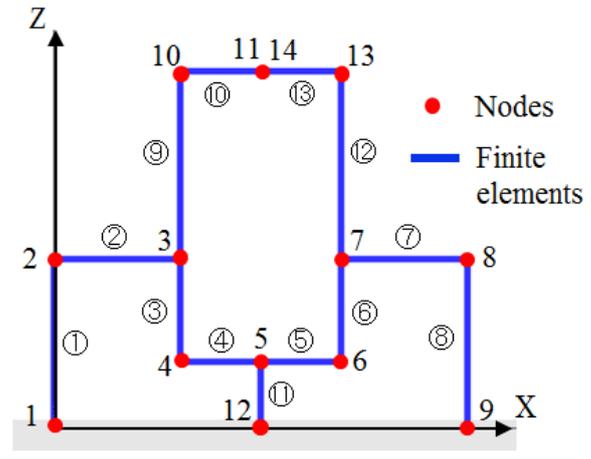
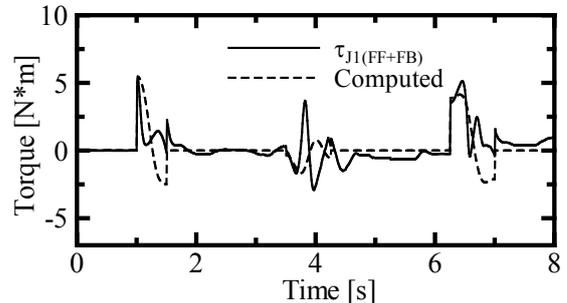
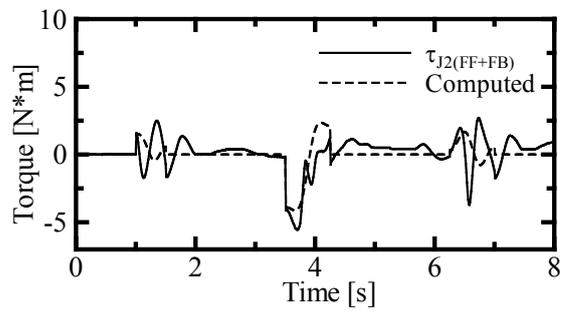


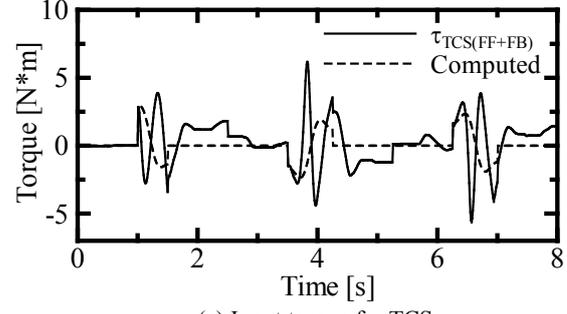
Fig. 4 Finite element subdivision of the walking robot



(a) Input torque for J1



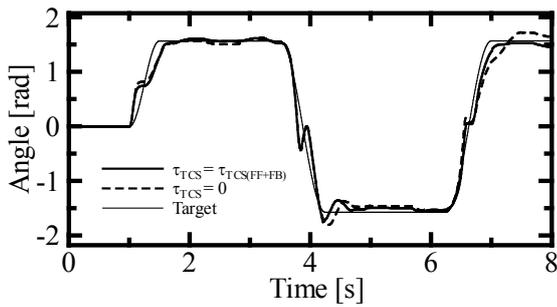
(b) Input torque for J2



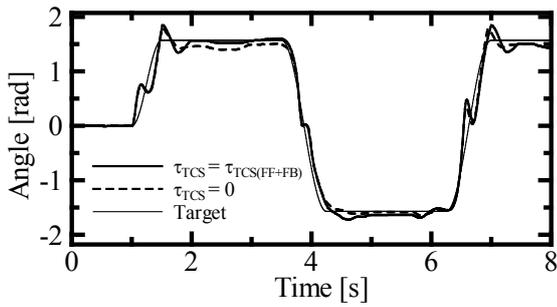
(c) Input torque for TCS

Fig. 5 Input torques for a three-step walking motion

ドバック (FB) 制御を併用したトルク $\tau_{J1(FF+FB)}$ と $\tau_{J2(FF+FB)}$ を入力し、TCS に対しては同じく FF 制御と FB 制御を併用した場合 ($\tau_{TCS} = \tau_{TCS(FF+FB)}$) とトルクを入力しない場合 ($\tau_{TCS} = 0$) を実施し、両者の相違を検証した。動揺抑制効果を比較するために、まず動力学の影響を無視できる低速歩行を行い、3 歩の歩行後の着地点を基準着地点とした。その後、



(a) Rotational angle of J1



(b) Rotational angle of J2

Fig. 6 Rotational angle of the joints

TCS の動作有無の場合について前述の歩容で各々10回の歩行実験を行い、このときの着地点と基準着地点からのずれを測定することで動揺抑制効果を評価した。

J1、J2、TCS への入力トルクを図5に示す。各々並列的解法によって求められた逆動力学計算値とともに示すが、FB トルクが占める割合が大きいものの、両者の傾向は良好に一致している。さらに、J1、J2 のエンコーダで計測された能動関節の回転角情報の一例を図6に示す。回転角については、TCS の動作有無によって大きな差異は生じず、いずれも目標回転角に対し概ね一致している。次に、歩行後の基準着地点からのずれを図7に示す。各々10回ずつの実験の平均値は、TCS を動作させなかった場合は 69.0[mm]、TCS を動作させた場合は 16.9[mm]であった。この結果より、TCS を使用することで歩行後の着地点のずれが約 75%軽減され、ロボットの歩行動作における動揺抑制効果があることが確認された。

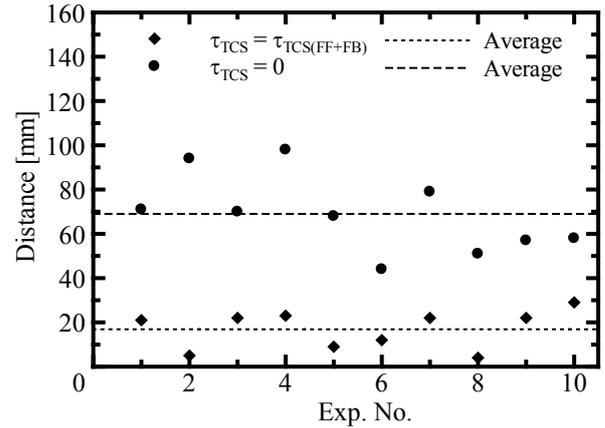


Fig. 7 Gaps from the standard landing point after the motion

4. 結言

本稿では、歩行動作を行うロボットに対して TCS を搭載し、その動揺抑制効果を実験により確認した。今後は、さらに TCS の小型・高トルク化を図り、様々なロボット機構に搭載して検証試験を実施していく予定である。

文 献

- [1] D. Isobe, "A Torque Cancelling System for Quick-Motion Robots", Intelligent Mechatronics (Editor: Ganesh Naik), InTech, ISBN:978-953-307-300-2, pp. 21-40, 2011.
- [2] D. Isobe, "Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics of Robotic Systems", Progress in Autonomous Robot Research (Editor: F.N. Mortensen), Nova Science Publishers, ISBN:978-1-60456-281-1, pp. 125-173, 2008.
- [3] 中山 文平, 近藤 健介, 松井 康将, 磯部大吾郎, "トルクキャンセリングシステムのロボットへの搭載に向けた動揺抑制実験", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11 講演論文集 CD-ROM, No.11-5, 2011.
- [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", 機論C編, vol. 77-775, pp. 785-798, 2011.