

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

松井 康将^{*1}, 近藤 健介^{*2}, 磯部大吾郎^{*3}

Proposal of Torque Cancelling System Using Parallel Solution Scheme

Yasumasa MATSUI^{*4}, Kensuke KONDO and Daigoro ISOBE

^{*4} Graduate School, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan

We propose a new concept of torque cancelling system which stabilizes mechanical sway in architectures. The torque cancelling system (TCS) cancels the reaction moment generated by 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 torque cancelling is demonstrated using a simple rotor-TCS system. Also, a numerical example of triaxial torque cancelling is shown to verify the use of the scheme.

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

1. 結 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場合に,機構全体に動揺が生じる場合がある.その原因は,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発生するためである.このような動揺を抑制する対策については,様々な分野で研究が行われている.例えば航空宇宙の分野では,人工衛星やISS(国際宇宙ステーション)等にリアクションホイールやCMG(Control Momentam Gyro)といった機器を配備し,衛星本体の角運動量保存則を利用した姿勢制御を行っている⁽¹⁾⁽²⁾.こうした回転体による角運動量の変化を利用した姿勢制御は,宇宙分野では主流となっている.しかし,高速動作を行う機器に対しては,動作対象のダイナミクスを正確に把握し,正確なトルクを供給しないと逆に動揺が激しくなる恐れがある.

他方,磯部らは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⁽³⁾⁽⁴⁾(以後,並列的解法と記す)を開発した.この手法を用いると,従来はダイナミクスを正確に導出することが困難

だった系に対しても,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⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾.さらに,本解法は有限要素法のアルゴリズムに基づいているために,モデル内の任意の箇所(節点)に発生するモーメントを正確に算出できる.すなわち,任意の箇所に加えるべき適切な反転トルクを算出することが可能となる.この特長を利用すると,例えば複雑な動作対象に対するトルクの供給,およびそれに伴う動揺を抑制するための反転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考えられる.

本稿では,動作対象の軌道から,並列的解法により逆動力学および系内に発生するモーメントを計算する過程を示す.そして,その発生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⁽⁹⁾(以後,TCSと記す)の概念について説明し,回転軸回りに発生するモーメントによる動揺を抑制する実験結果を示し,TCSの有効性を示す.

2. トルクキャンセリングシステム(TCS)

2・1 TCSの概念 本節では,TCSの概念について説明する.例えば,物体を振り回した時に発生するモーメントに対する反転トルクをTCSに与えることにより,発生モーメントを打ち消し,動揺を抑制するというものである.

^{*1} 非会員,筑波大学大学院(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

^{*2} 非会員,筑波大学工学システム学類

^{*3} 正員,筑波大学

E-mail: e0712350@edu.esys.tsukuba.ac.jp

2・2 1軸回りのTCS 簡単のために1軸回りのTCSを考える。1軸回りについての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と回転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ようとする。しかし、下部のTCSに反対回りのモーメントを発生させるトルクを入力すると、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。複雑なトルク制御は行っていないが、1軸回りのTCSの具体的な例として、ヘリコプタの同軸回転式ツインロータシステムが挙げられる。一般的なシングルロータシステムの場合、主軸の回転により発生したモーメントが機体自体を回転させてしまうため、胴体後部のプロペラで調整する必要がある。しかし、ツインロータシステムでは、同軸上で主軸の回転と反対回りにもう一つのロータを回転させることで、機体を回転させるモーメントを打ち消している。

2・3 3軸回りのTCS 図2のように偏心性のある物体を回転させる場合には、回転軸回りにモ

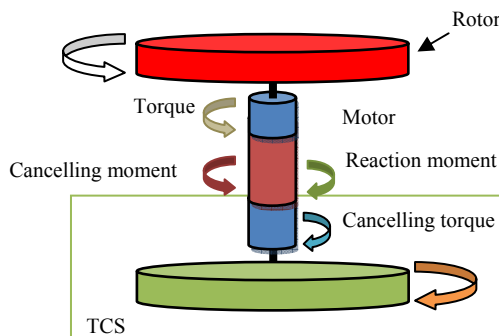


Fig. 1 General concept of uniaxial TCS

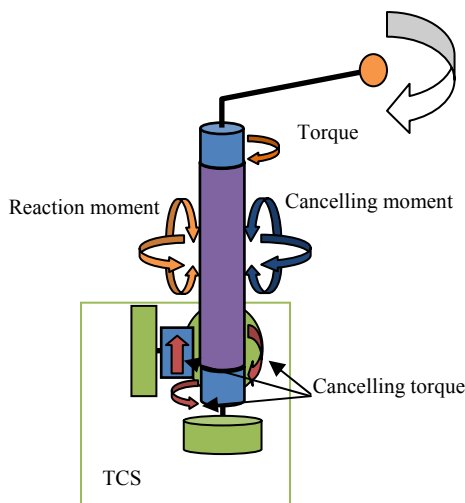


Fig. 2 General concept of triaxial TCS

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トルクキャンセリングシステムと、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。これらを実現するために、本研究室で開発した並列的解法を適用する。

3. 並列的解法

3・1 序 ここでは、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逆動力学計算法について述べる。本研究で用いた並列的解法は、次の2つの過程で成り立つ。まず、モデル化されたリンク系の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。並列的解法では、目標軌道さえ正確に与えられれば系の剛性によらずトルクを算出することができる。なお、リンク系のモデル化には3次はり有限要素を用いる。

3・2 節点力算出過程 節点力の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き、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により実行する。

3・3 節点力の関節トルクへの換算過程 並列的解法では、入力データとして与えられる軌道より陽に算出される節点力を、力学的な関係に基づいてトルクに換算する。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したものが次式である⁽³⁾⁽⁴⁾。

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

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、 $[L^n]$ 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である。 $[T^n]$ 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。

4. 1軸回りTCSに入力するトルクの算出

4・1 解析モデル 回転軸と同一軸上にTCSを配置した場合の実験を行うために、図3のような実機を製作した。また、並列的解法の入力データとして用いた有限要素モデルを図4に示す。最下点では、鉛直軸回りの回転は自由となっている。

4・2 解析条件 実機の回転体に2[s]で 4π [rad]回転させる動作をさせた場合のTCSについて考える。TCSに与えるトルクを算出する前に、この動作によってTCSの位置に発生するモーメントを求める。回転体のパラメータを表1に示す。時間増分 $\Delta t=0.01$ [s]、ステップ数を200として自重を考慮して解析を行った。

4・3 解析結果 解析結果を図5～図7に示す。図中で x , y , z は要素座標系の軸で、回転体のモーメント(図4中の要素3)およびTCS(図4中の要素1)では全体座標系の軸と一致する。図5は回転体を動

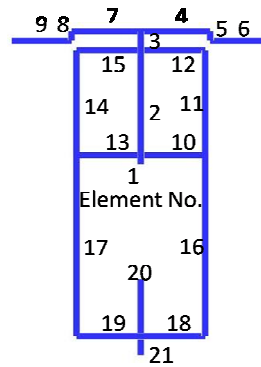


Fig.4 Finite element subdivision

Table 1 Parameter of rotor

	rotor
Material	Aluminum
Length [m]	0.17
Sec. area [m ²]	0.13
Density [kg/m ³]	2.7×10^3
Young's modulus [GPa]	70.3

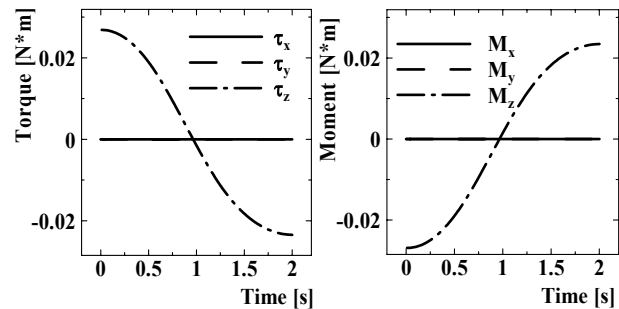


Fig.5 Required torque for rotor

Fig.6 Generated moment at TCS

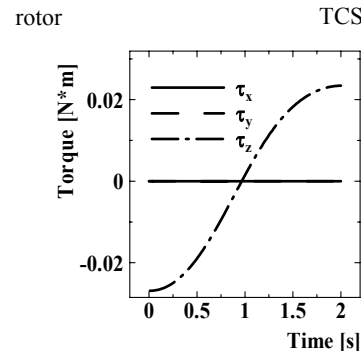


Fig.7 Input torque for TCS

TCS

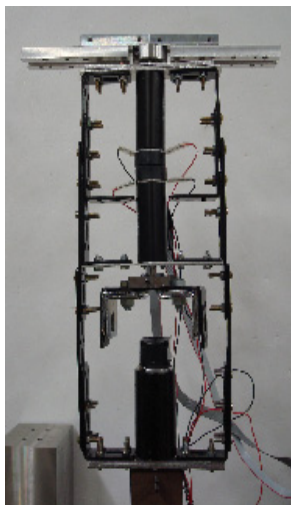
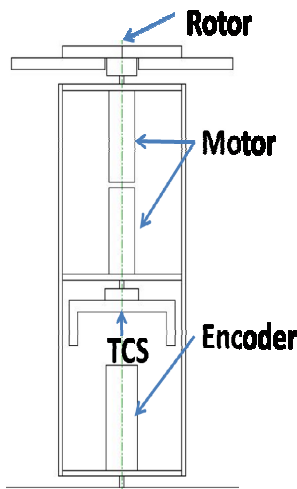


Fig.3 Experimental setup for uniaxial TCS



作させるために必要なトルクである。次に、この動作に伴ってTCSの位置に発生するモーメントを図6に示す。

ここで x 軸、 y 軸回りにモーメントが発生していないのは、回転体が両持ち状態であるためである。今回のモデルではTCSを回転体と同軸上に配置しているため、回転体の動作に必要なトルクと正負逆転させた波形のモーメントがTCSの位置に発生する。このモーメントを打ち消すためには、図6を正負逆転させたモーメントをTCSの位置に発生させれば良く、そのためには結局、図6のモーメントの波形をトルクとしてTCSに供給すれば良いことが分かる。動揺抑制のためにTCSに入力するトルクを図7に示す。

5. 1軸回りTCSの実験

5・1 実験の概要 4章では、並列的解法を用いて、回転体を制御するトルクおよびTCSに入力するトルクを算出した。本章では、算出したトルクについて図3に示す実機により検証を行い、この場合のTCSの有効性を確認する。

回転体の材質は解析時と同じアルミニウムとし、TCSの材質はステンレスとする。モーメントが発生すると、その影響により系全体が回転する。本体の回転量をエンコーダで検知するために、図3下部にモータを配置した。

5・2 実験方法 実機の回転体を2[s]で 4π [rad]回転させる際に、発生するモーメントをTCSで打ち消すことが可能か確認を行う。動揺が抑制されることを確認するために、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、結果を比較する。制御用のトルクとしては、回転体には図5、TCSには図7のトルク曲線を使用する。

5・3 実験結果 1軸回りのTCS実験の結果を図8、図9に示す。図8に、最下部のエンコーダで検知した機構本体の支点（図4の最下点）回りの回転角度を示す。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。以上から、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。

図9は、回転体の全体座標系に対する絶対回転角度である。回転体の目標角度も図に併せて示す。図より、TCSを使用した場合の回転角度が目標角度と一致していることが分かる。一方、TCSを使用しなかった場合、目標角度に対し追従していない。特に、完全に固定されていない機構を正確に動作させる上で、TCSを使用することが有効であることが確認された。

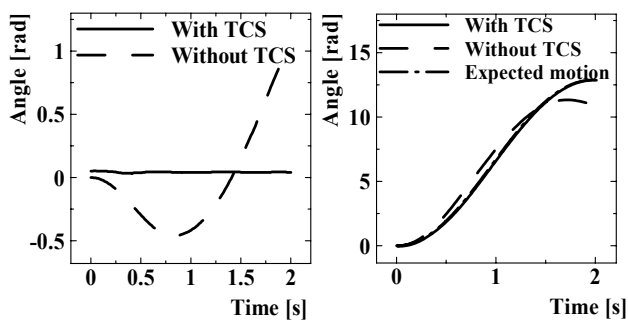


Fig.8 Motion of architecture

Fig.9 Rotational angle of rotor

6. 1軸回りTCSを回転体の軸からずらした位置に配置した場合の解析

6・1 解析目的 軸回りではTCSによってモーメントを打ち消すことが確認された。しかし、軸回りにしかTCSを装着できないのでは実用的とはいえない。本章では、TCSを回転軸からずらした位置に配置したモデルについて考える。

6・2 解析モデル・解析条件 回転軸がずれた場合の実験を行うための実機を製作した。製作した実機を図10に示す。TCSは回転体中心から0.24[m]ずれた位置に配置している。また、図10の実機を解析するために置き換えた有限要素モデルを図11に示す。

解析条件は4章と同一の条件で、回転体を2[s]で 4π [rad]回転させる動作をさせる場合の解析を行う。また、回転体のパラメータは表1と同じとする。

6・3 解析結果 解析結果を図12～図14に示す。解析結果を見ると、回転軸を回転体のものと一致させた場合のTCSに入力するトルクと同一となることが分かる。これは、本機構では回転体の形状が左右対称であるため、軸のずれによるトルクの変化が起こらないためである。

7. 1軸回りTCSを回転体の軸からずらした位置に配置した場合の実験

7・1 実験の概要 6章では、回転軸からずれた位置にTCSを配置した際の入力トルクを並列的解法により算出した。本章では、算出したトルクについて実験による検証を行い、この場合のTCSの有効性を確認する。

7・2 実験方法 実験方法、実験条件等は、5章と同一のもので、実機の回転体を2[s]で 4π [rad]回転させた際に、発生する動揺をTCSで抑制でき

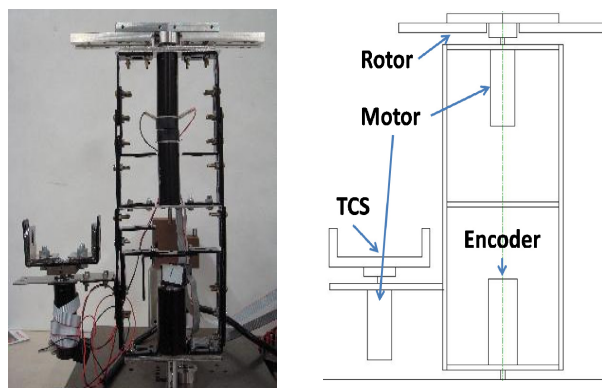


Fig.10 Experimental setup for off-centered uniaxial TCS

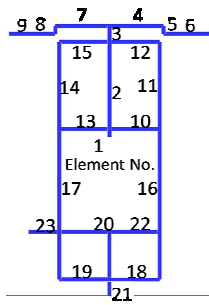


Fig. 11 Finite element subdivision

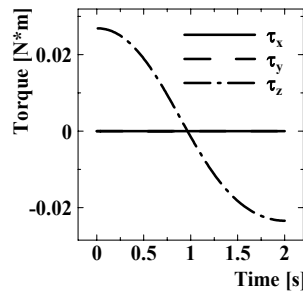


Fig. 12 Required torque for rotor

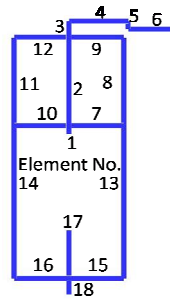


Fig. 17 Finite element subdivision

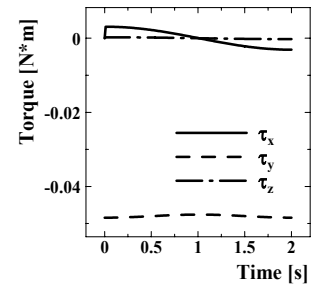


Fig. 18 Required torque for rotor

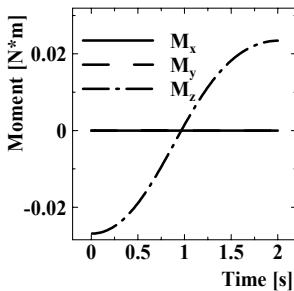


Fig. 13 Generated moment at TCS

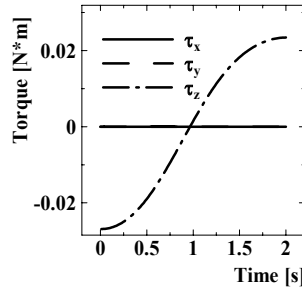


Fig. 14 Input torque for TCS

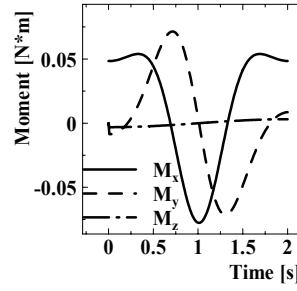


Fig. 19 Generated moment at TCS

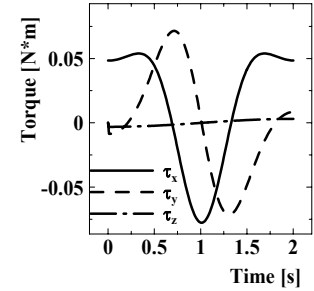


Fig. 20 Input torque for TCS

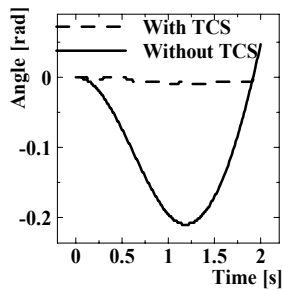


Fig. 15 Motion of architecture

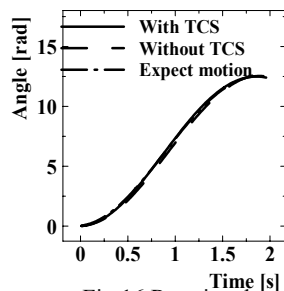


Fig. 16 Rotational angle of rotor

ることを確認する。これを確認するために、TCSを使用しない場合と使用する場合の2種類の実験を行い、結果の比較を行う。制御に使用するトルクは、回転体は図12、TCSは図14のトルク曲線を使用する。

7・3 実験結果 実験結果を図15、図16に示す。図15にモーメントの影響により回転した機構本体の回転角度を示す。図15を見ると、TCSを使用した場合、軸をずらした状態においても本体がほとんど回転していないことが分かる。TCS使用如何に関わらず、図8に比べて回転角度が小さくなっているのは、TCSを回転体の回転軸からずらした位置に配置したことで全体の重心が回転軸から離れ、慣性モーメントが大きくなったためである。

図16に回転体の回転角度と目標角度を示すが、この場合にはTCS使用如何に関わらず、回転体そのものは正確に動作していることが分かる。これも、前述の慣性モーメントが大きくなったため

ある。

以上より、回転体の回転軸からずらした位置にTCSを配置しても、並列的解法により動揺を打ち消すためのトルクを算出でき、発生するモーメントによる動揺を抑制できることが確認された。

8. 3軸回りTCSの解析

実際のロボットでは、回転体のように両持ち状態のものを制御することは少なく、腕のように片持ち状態のものや多リンクのものを制御することが多い。片持ちの場合は両持ちの場合とは違い、重力等の作用による影響がある。その場合に動揺を抑制するためには、回転軸回りだけでなく、3次的に発生モーメントの打ち消しを行わなくてはならない。そこで、図17のモデルを作成し、図中の要素1の位置にTCSを配置し、2[s]で回転体を $2\pi[\text{rad}]$ 回転させる場合に必要なトルクを算出した。このときの回転体のパラメータは表1と同一とする。

図18～図20に解析結果を示す。図18は回転体が回転するために必要なトルクである。 τ_y が大きな値を持っているが、これは自重を考慮したためである。図19に発生するモーメントを示すが、回転軸回りのモーメント(M_z)に比べ、それ以外のモーメントが相対的に大きくなっていることが確認できる。TCSに入力するトルクは、前述と同様に発生するモーメントをトルクとして入力すれば良い。そのトルク曲線を図20に示す。

9. 結 言

本稿では、ロボット機構などが高速動作をする際に発生する動揺を抑制する目的で、機構全体のダイナミクスおよび機構内部に発生する内力を正確に把握可能な、並列的解法を用いたトルクキャンセリングシステムを提案した。具体的には、回転体の動作によって発生するモーメントを並列的解法により算出し、そのモーメントからTCSに入力するべきトルクを求めた。また、算出したトルクを実機に入力して実験を行い、その結果から1軸回りに関してはTCSが動揺の抑制に有効であることを確認した。

今後は、3軸回りのTCSを製作し実機による検証を行う予定である。

文 献

- (1) Y. Ookami, N. Tomita, S. Nakasu and S. Matsunaga: Introduction to the Space Station, University of Tokyo Press, pp.204-208, 2008, in Japanese.
- (2) K. Yoshida, D. N. Nenchev, K. Hashizume: Flight Experiments of ETS-VII for Advanced Space Robot Control, Journal of the Society of Japanese Aerospace Companies, Vol. 50, No. 584, pp. 351-359, 2002, in Japanese.
- (3) D. Isobe: Deriving Inverse Dynamics for Link Mechanisms by Using Finite Element Method, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 20, No. 6, pp. 647-653, 2002, in Japanese.
- (4) D. Isobe: A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics, Advanced Robotics, Vol.18, No.9, 2004, pp.859-880.
- (5) D. Isobe, A. Yagi and S. Sato: General-Purpose Expression of Structural Connectivity in the Parallel Solution Scheme and Its Application, JSME International Journal Series C, Vol.49, No.3, 2006, pp.789-798.
- (6) D. Isobe and A. Kato: Feedforward Control of Flexible Link Systems using Parallel Solution Scheme, International Journal of Robotics and Automation, Vol.23, No.1, (2008), pp.31-39.
- (7) D. Isobe, K. Yamanaka and Y. Kitamura: Inverse Dynamics Calculation of Underactuated Link Systems Using Parallel Solution Scheme, Proceedings of the 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'08), pp.1632-1637, 2008, Orlando, Florida, USA.
- (8) D. Isobe and K. Yamanaka: Development of a Unified Feed-Forward Control System for Robotic Mechanisms

Using Finite Element Approach, CD-ROM Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI, 2007, Kyoto, Japan.

- (9) Y. Matsui and D. Isobe: Proposal of Torque Cancelling System for Stabilizing Mechanical Sway, CD-ROM Proceedings of the JSME Annual Conference on Robotics and Mechatronics '09, No.09-4, 2009, in Japanese.