

# 多関節ロボットの挙動を単一関節試験器で解析可能な Hardware-in-the-Loop Simulatorの開発

野田 悠介 (都市大), 木村 哲也 (芝浦工大), 辻田 哲平 (防衛大),  
安孫子 聡子 (芝浦工大), 佐藤 大祐 (都市大), 金宮 好和 (都市大)

## Development of a Hardware-in-the-Loop Simulator That Can Analyze the Motion of a Multi-DoF Robot with a Single Test Device

Yusuke NODA (Tokyo City University), Tetsuya KIMURA (Shibaura Institute of Technology),  
Teppei TSUJITA (National Defense Academy), Satoko ABIKO (Shibaura Institute of Technology),  
Daisuke SATO (Tokyo City University), and Yoshikazu KANAMIYA (Tokyo City University)

Abstract : In general, a multi-degree of freedom (DoF) robot comprises multi joints which are difficult to model precisely in numerical simulation. This paper proposes a Hardware-in-the-Loop Simulator (HILS) to analyze the motion of the multi-DoF robot by using a single physical joint test device. In this paper, we verify the proposed algorithm with numerical simulation.

### 1. 緒言

近年,人型ロボットの研究が盛んに行われており, Honda 社の ASIMO[1] や, 産業技術総合研究所の HRP-2 改 [2] など, 人間と協働するためのロボットが開発されている.

その中で, ロボットの課題の 1 つとして, ロボットに衝撃力に耐性をもたせ, 人や障害物, ロボット自身を損傷させないための設計が必要となる. 例えば, 理化学研究所が開発した介護用ロボット ROBEAR は, 外装に柔軟物であるゴム製の触覚センサを搭載することで, 人と接触した際の柔軟性を確保している [3]. このように, 人と共存できるロボットの設計をする上で, ロボット自身の柔軟性も重要な要素となる. そのため, 柔軟なロボットについては, 数多くの研究がされてきた. M. Jin らは, 柔軟関節を有する人型ロボットの制御理論を提案した [4]. また, J. Park らは, ロボットのための柔軟な関節を設計した [5].

しかし, ロボットに求められる作業に対してどのような特性をもった柔軟物を組み込めば良いのかといった議論は少ない. その原因として, 柔軟関節に用いられる多くの材料が非線形粘弾性特性を有するため, 柔軟関節を搭載したロボットの挙動を数値シミュレーションで解析する際に, 数値モデル化が難しく, 数値シミュレーション上で得られた解析結果と実際の実験機での実験結果が異なってしまうことが挙げられる. そのため, 柔軟物を含んだロボットの解析手法として, 有限要素法を用いた解析手法や実験によって動力学パラメータを同定する手法が提案されてきた [6][7]. しかし, いずれの手法においても, 解析に手間がかかる, 実際の実験機を用意するためのコストがかかるなど,

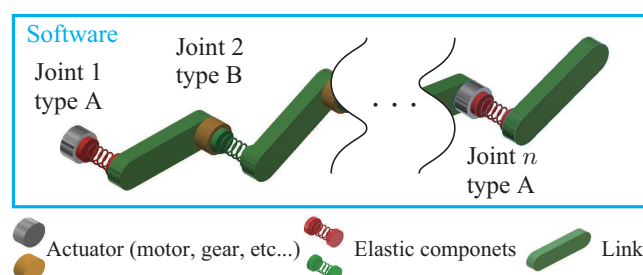


Fig. 1: Concept of the numerical simulation.

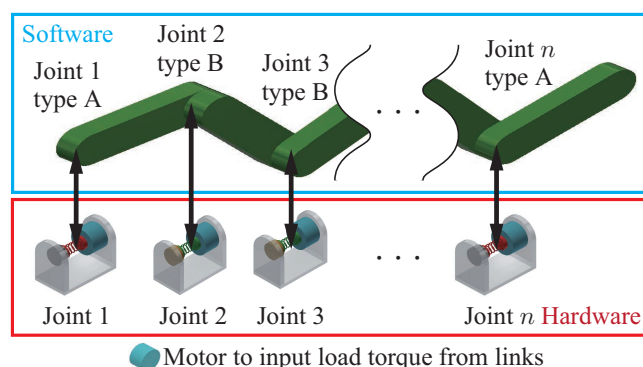
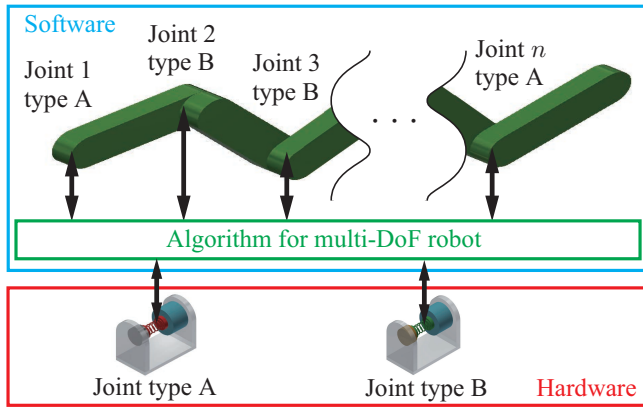


Fig. 2: Concept of the HILS.

モデルベース開発に適さない.

そこで, 本研究では, Hardware-in-the-Loop Simulator (HILS) と呼ばれるハードウェアとソフトウェアを組み合わせた解析手法を適用し, 数値モデル化が困難な柔軟関節部分に関しては実機と試験装置を用いることでモデル



※ If the robot consist of only two types of motors

Fig. 3: Concept of the HILS with the algorithm for multi-DoF robot.

化を避け、比較的モデル化が容易なリンクの慣性モーメント等の力学的特性に関しては数値モデルによってソフトウェア的にシミュレーションを行う方法を提案する。特に、Fig. 3 同し関節特性を有する関節の挙動を 1 つの試験器で再現するアルゴリズムを提案する。

本稿では、本研究で用いる HILS と呼ばれる手法について説明した後、HILS のシステム構成および制御方法について述べる。また、実際にはハードウェアを用いて行う実験を簡易モデルで置き換えた数値シミュレーションで本稿で述べる制御方法の有用性を確認する。

## 2. ロボット関節用 HILS の開発

一般的なロボットの解析手法では、Fig. 1 に示すような、数値シミュレーションと呼ばれる、試験対象を数値モデルに置き換える解析手法を用いる。よって、高精度な解析結果を得るためには、数値モデルの正確さに依存する。ロボットにはリンクと関節の要素からなり、ロボット全体の挙動をシミュレーションするため、これらのモデル化が必要となる。一般的なロボットのリンクは剛体で構成される場合が多く、各動力学パラメータを算出するための物理パラメータが一定であり、推定しやすいため、比較的モデリングが容易である。一方でロボットの関節の特性をモデル化することは困難である。一般的なロボットの関節は、アクチュエータ、減速器、潤滑剤、ベアリングからなり、これにアクチュエータの制御回路も含めると極めて複雑な機械システムであり、モデル化が難しい。さらに、柔軟関節においては、非線形粘弾性特性を示す材料が使われることが多く、さらにモデル化を困難にしている。このような場合、実験機に組み込んだ際の動力学パラメータを推定する手法があるが、関節の試作のたびに実験機に組み込む必要があるため、非常にコストや時間がかかってしまう [7]。

そこで、本研究では、Fig. 2 のように、HILS と呼ばれ

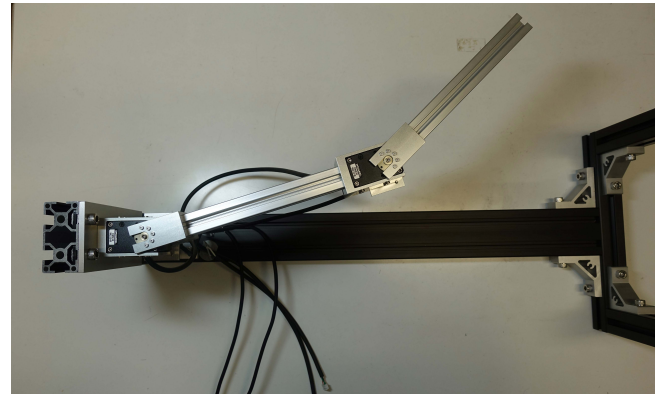


Fig. 4: Overview of the 2R manipulator.

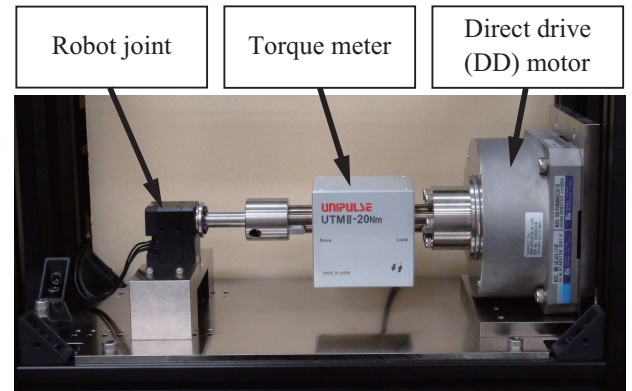


Fig. 5: Overview of the HILS test device.

るソフトウェアとハードウェアを組み合わせた解析手法をロボット関節に応用することで、この問題を解決する手法を提案する。HILS とは、ハードウェアとソフトウェアを組み合わせた解析手法のことで、主に自動車の開発や宇宙ロボットシステムの検証に使用されている。自動車開発の例を見ると、車載デバイスの検証を行うために実際に車を走行させたときの状態を再現させ、デバイスの応答を検証するということが行われている [8]。また、宇宙ロボットシステムでは、微小重力下での複雑な運動を地上で再現し、実証実験を行う目的で HILS が使用されている [9]。ロボット関節用 HILS では、解析するロボットのうち複雑な機械要素を有する関節部分を被試験体として実際に用意し、関節部の動作で取得される関節の状態をリンクパラメータ等を含むロボットの数値モデルに入力、動力学解析を行い、その結果を試験器側の関節部に負荷として加えることにより、多関節ロボット全体の動作を解析することができる。この手法により、複雑な関節部分の数値モデル化が不要となり、また関節の各出力は実測値を使用するため、正確な解析を行うことができると考えられる [10]。

$n$  自由度ロボットの全体の挙動を HILS を用いて解析するためには、同様の試験器が関節の自由度分必要となってくるため、試験器のコストが非常にかってしまうという

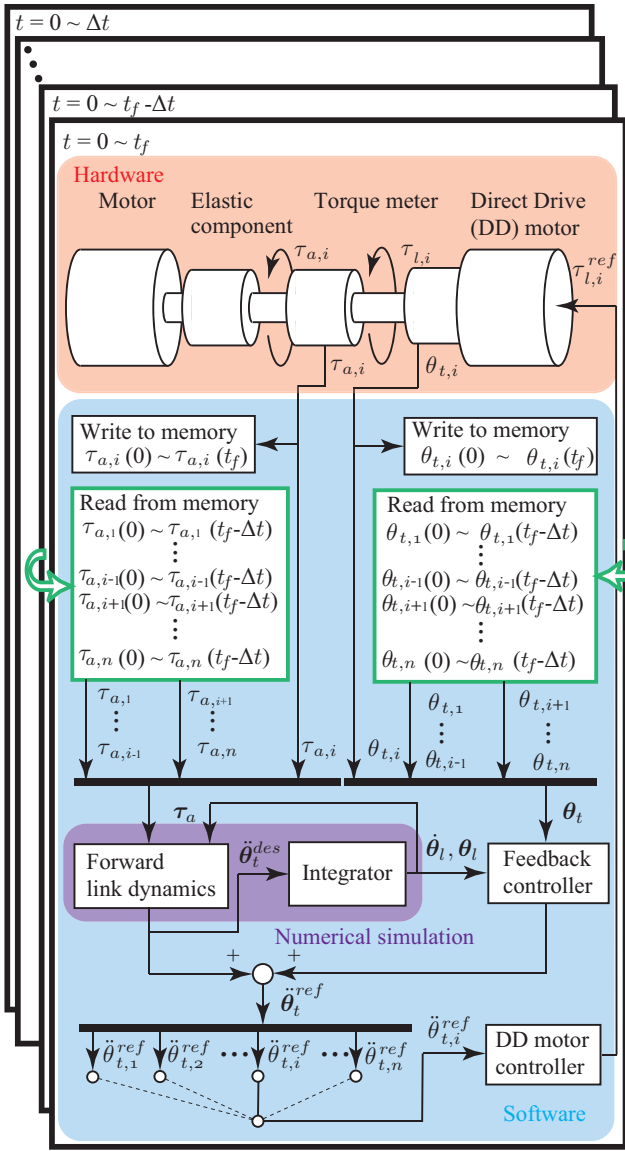


Fig. 6: System configuration of the HILS for robot joints.

問題点がある．そこで，本研究では，一般の多関節ロボットでは一つのロボットには同じ型式のアクチュエータが複数使用されていることに着目し，一つの試験器で複数の関節を有する多関節ロボット全体の挙動が解析できるアルゴリズムを開発する．これにより，HILS の解析にかかるコストを減らすことができると期待できる．

## 2.1 多関節ロボット用 HILS 開発の流れ [10]

本研究で提案するロボット関節用 HILS の性能を評価し，有用性を検証するために，簡易的なロボットとして，Fig. 4 に示すような平面 2 自由度マニピュレータを設計した．

被試験体となるロボット用関節として，小型ロボット用スマートアクチュエータである ROBOTIS 社の Dy-

namixel XM430-W210-R を使用する．このアクチュエータの出力軸の先に対して柔軟関節を設計する．また，本稿で述べる多関節ロボット用 HILS アルゴリズムの検証をするため，同じ型式のモータを 2 台搭載した．なお，柔軟物を取り除いた検証を終えた後に，このマニピュレータおよび関節試験器に柔軟物を取り付け検証する．このマニピュレータの全長は 450 [mm] とし，重力の影響を受ける方向とそうでない方向に設置できるようにした．

現在開発中の関節試験器を Fig. 5 に示す．被試験体となるロボット用関節として，小型ロボット用スマートアクチュエータである Dynamixel XM430-W210-R を使用する．このアクチュエータの出力軸の先柔軟関節を搭載し，柔軟関節を含めたロボットの挙動を解析する．

ロボット関節用 HILS では，シミュレーションするロボットの関節に対して負荷をかける機器が必要となる．そこで，ギアがないため，高い応答が得られるダイレクトドライブ (DD) モータであれば，負荷用のモータとして十分に機能することが期待できる．DD モータは，日機電装社製の ND-s シリーズを選定した．この DD モータの定格トルクは 4.2 [Nm]，瞬時最大トルクは 10.5 [Nm] であり，21 [bit] のアブソリュートエンコーダを搭載している．このモータの試験をするためのロボット用関節は，この DD モータの定格トルクおよび瞬時最大トルク以内であれば変更可能である．

動力学を考慮した解析を行う場合，ロボットの自己位置だけでなく，関節の負荷トルクも計測する必要がある．そこで，トルクメータとして，ユニパルス社製の UTM11-20Nm を選定した．このトルクメータの定格容量は 20 [Nm] である．これらの機械部品の軸をつなぐための継ぎ手カップリングのように緩衝材を使用せず，エネルギー損失を極力抑える．

## 2.2 多関節ロボット用 HILS アルゴリズムの提案

第 2 章で述べた通り，本研究では，一般の多関節ロボットでは一つのロボットには同じ型式のアクチュエータが複数使用されていることに着目し，一つの試験器で複数の関節を有する多関節ロボット全体の挙動が解析できるアルゴリズムを開発する．これにより，HILS の解析にかかるコストを減らすことができると期待できる．

単一関節試験器で複数の自由度のロボットの挙動を解析する場合， $n$  自由度のロボットリンクからの負荷を計算する際， $n$  関節分の関節の状態が必要となってくるが，計測値として入力可能な関節の状態は 1 関節分のみである．よって，解析を行っていない関節部分の状態を補完する必要がある．そのため，試験対象関節の解析時に，関節の状



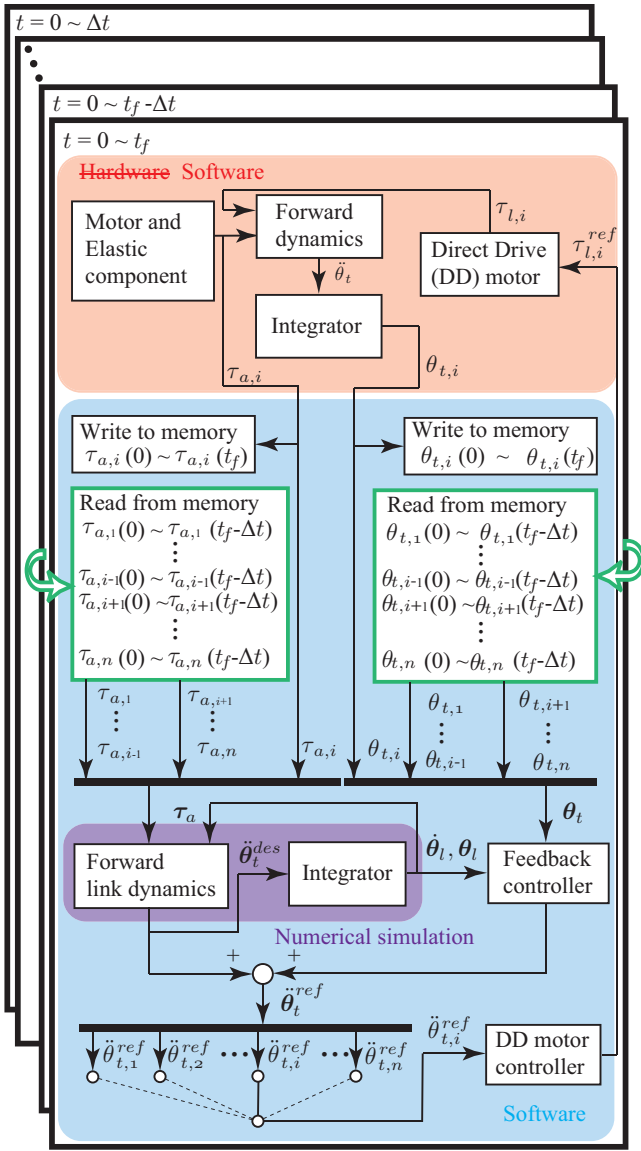


Fig. 7: Simulation settings to check the algorithm.

態の時系列データを動力学計算用コンピュータのメモリに格納し、動力学計算時のデータとして利用する。また、試験対象のロボットの状態を更新するためには、関節 1～ $n$  の状態がすべて最新である必要がある。そのため、ある時刻  $t$  のリンク負荷を計算する際に、1 サンプリグ周期前の時刻  $t + \Delta t$  の関節 1～ $n$  の状態を取得する必要があるため、1 サンプリグごとに関節 1～ $n$  の解析を行う必要がある。その際、単一関節試験器で複数の関節の解析をするため、解析中の関節試験器の状態が保持されない。そのため、試験対象の関節を切り替えた際は、試験対象の関節状態初期値に戻し、解析したい時刻  $t$  まで、アクチュエータの指令と DD モータからの負荷を加えることで、再度時刻  $t$  の関節の状態を再現することができる。

以上のことを踏まえ、多関節ロボット用 HILS アルゴリズムを考案する。Fig. 6 に多関節ロボット用 HILS アルゴ

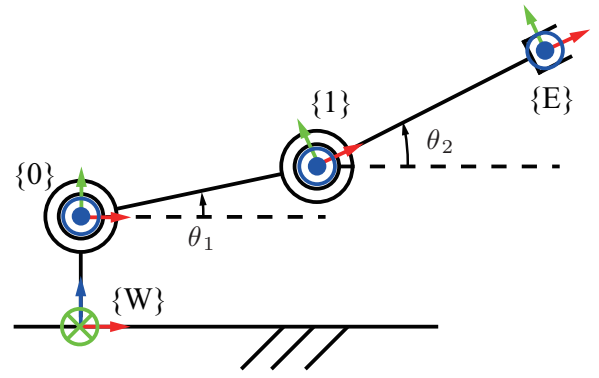


Fig. 8: Simulation model coordinates.

リズムのシステム構成を示す。以下に、単一関節試験器で複数の関節の挙動を解析する手順を示す。

- (1) 関節 1～ $n$  までの初期状態を既知情報として、動力学計算用コンピュータのメモリに格納
- (2) 関節 2～ $n$  の初期状態を利用し、関節 1 について  $0 \sim \Delta t$  の解析を実行
- (3) 手順 (2) で計測された時系列データをメモリに格納
- (4) 手順 (2)～(3) を関節 2～ $n$  についても同様に実行、 $0 \sim \Delta t$  までの各関節の解析データを取得
- (5) 関節 2～ $n$  の  $0 \sim \Delta t$  までの解析データを利用し、関節 1 について  $0 \sim 2\Delta t$  の解析を実行
- (6) 手順 (5) で計測された時系列データをメモリに格納
- (7) 手順 (5)～(6) を関節 2～ $n$  についても同様に実行、 $0 \sim 2\Delta t$  までの各関節の解析データを取得
- (8) 手順 (5)～(7) の手順をシミュレーション終了時間  $t_f$  まで繰り返し

## 2.3 対象多関節ロボットの挙動に基づく負荷トルクの導出

試験対象である  $n$  自由度のリンクの運動方程式は、関節試験器から計測したアクチュエータの出力トルクの計測値を  $\tau_a \in \mathbb{R}^n$ 、シミュレーション上のリンクの関節角度を  $\theta_l \in \mathbb{R}^n$ 、慣性行列を  $M(\theta_l) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、コリオリ、遠心力に関する行列を  $C(\dot{\theta}_l, \theta_l) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、重力項を  $g(\theta_l) \in \mathbb{R}^n$ 、とすると (1) と表せる。

$$M(\theta_l)\ddot{\theta}_l + C(\dot{\theta}_l, \theta_l)\dot{\theta}_l + g(\theta_l) = \tau_a \quad (1)$$

関節試験器で計測できる試験対象関節の関節角度を  $\theta_t \in \mathbb{R}^n$  とし、初期状態が同じとき、シミュレーション上のリン

Table. 1: Simulation model parameters.

Name	Value
Simulation time $t_0 \sim t_f$ [s]	0 ~ 10
Sampling time $\Delta t$ [ms]	1
Link mass $(m_1, m_2)$ [kg]	(1, 1)
Link length $(l_1, l_2)$ [m]	(1, 1)
Link inertia $(I_{l1}, I_{l2})$ [kgm <sup>2</sup> ]	$(\frac{1}{12}, \frac{1}{12})$
Test device inertia $I_t$ [kgm <sup>2</sup> ]	1
Test device viscous friction $b$ [Nms]	0.5
Input torque angular amplitude $a$ [Nm]	3
Input torque angular frequency $\omega$ [rad/s]	1
Joint viscous friction $d$ [Nms]	1

クと関節試験器が同様の運動をするための条件は、 $\ddot{\theta}_t = \ddot{\theta}_l$  であるため、角速度目標値  $\dot{\theta}_t^{des}$  は (2) で表される。

$$\ddot{\theta}_t^{des} = (M(\theta_l))^{-1} (\tau_a - C(\dot{\theta}_l, \theta_l) \dot{\theta}_l - g(\theta_l)) \quad (2)$$

(2) において、 $\tau_a$  のみを試験器から得られる計測値を用いて、その他の値は数値シミュレーション上で用意した計算値を用いる。負荷を加えるための DD モータへの指令は、一般的に速度制御がトルク制御である。

速度制御の場合は、角速度指令  $\dot{\theta}_t^{ref}$  は (3) で表される。

$$\dot{\theta}_t^{ref} = \dot{\theta}_t^{des} + K_p(\theta_l - \theta_t) \quad (3)$$

なお、 $\dot{\theta}_t^{des}$  は  $\ddot{\theta}_t^{des}$  を 1 回、 $\theta_l$  は  $\ddot{\theta}_t^{des}$  を 2 回積分した値である。速度制御の場合、試験器に関する動力学パラメータを導出することなく指令を算出することができるため、トルク制御に比べて簡単であるが、加速度目標値を積分する必要があるため、追従性が悪く、摩擦など外乱の影響を受けやすい可能性がある。

トルク制御の場合、角加速度指令  $\ddot{\theta}_t^{ref}$  は、比例ゲイン  $K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、微分ゲイン  $K_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$  を用いて (4) で表される。

$$\ddot{\theta}_t^{ref} = \ddot{\theta}_t^{des} + K_p(\theta_l - \theta_t) + K_d(\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_t) \quad (4)$$

関節試験器の特性を  $f(\ddot{\theta}_{t,i}, \dot{\theta}_{t,i}, \theta_{t,i})$  とし、運動方程式を (5) としたとき、 $i$  番関節の DD モータのトルク指令  $\tau_{l,i}^{ref}$  は (6) で表せる。

$$f(\ddot{\theta}_{t,i}, \dot{\theta}_{t,i}, \theta_{t,i}) = \tau_{a,i} + \tau_{l,i} \quad (5)$$

$$\tau_{l,i}^{ref} = f(\ddot{\theta}_{t,i}^{ref}, \dot{\theta}_{t,i}, \theta_{t,i}) - \tau_{a,i} \quad (6)$$

トルク制御の場合、速度制御に比べ、指令を算出するために試験器に関する動力学パラメータを導出する必要があるが、試験器の固有の影響を打ち消すことができるため、高い追従性が得られることが期待できる。

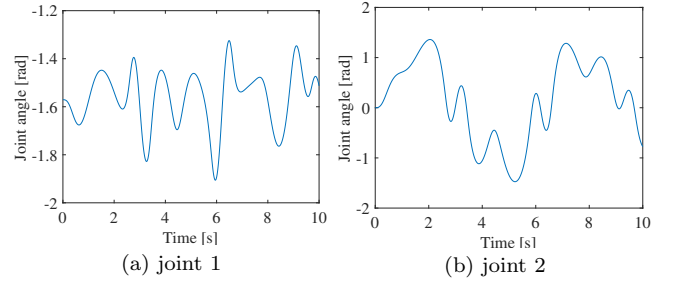


Fig. 9: Simulation results 1: the real 2R manipulator model.

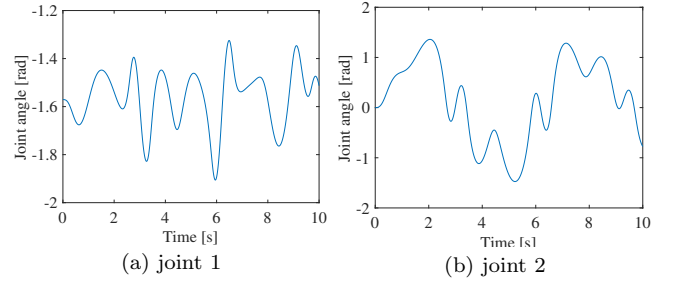


Fig. 10: Simulation results 1: the HILS model.

### 3. 数値シミュレーションによる評価

前章で述べた多関節ロボット用 HILS アルゴリズムの動作を確認するため、Fig. 8 に示すような設計した平面 2 自由度マニピュレータを数値モデル化して解析結果の比較対象用実機モデルとし、Fig. 7 に示すように、本来ハードウェアを用いる試験器部分をここでは簡易モデルに置き換えて数値シミュレーションを行った。

HILS 試験器がもつ慣性モーメントを  $I_t$ 、試験器がもつ粘性摩擦を  $b$  とする。試験器の運動方程式は、関節角度を  $\theta_{t,i}$ 、関節の出力トルクを  $\tau_{a,i}$  DD モータの出力トルクを  $\tau_{l,i}$  を用いて、(7) と表せる。

$$I_t \ddot{\theta}_{t,i} + b \dot{\theta}_{t,i} = \tau_{a,i} + \tau_{l,i} \quad (7)$$

このとき、DD モータの出力トルクとして算出するトルク指令値  $\tau_{l,i}^{ref}$  は、(8) で表せる。

$$\tau_{l,i}^{ref} = I_t \ddot{\theta}_{t,i}^{ref} + b \dot{\theta}_{t,i} - \tau_{a,i} \quad (8)$$

Fig. 8 にシミュレーションモデルの座標系を、Table. 1 にシミュレーションで用いた定数表を示す。以上のシミュレーション条件において、以下の 2 パターンのシミュレーションを行った。まず、初期角度  $\theta_{init}$  が  $(-\frac{\pi}{2} \ 0)^T$  [rad] として、最終的なアクチュエータのトルクの実測値  $\tau_a = (a \sin \omega t \ a \sin \omega t)^T$  となるように指令を与え、ロボットモデルの示す軌道と簡易試験器モデルが示す挙動の比較をした。次に、初期角度  $\theta_{init}$  が  $(0 \ 0)^T$  [rad] として、アクチュエータの入力がなく、粘性の素材が関節部分に入っているものとして、(1) 式の運動方程式を解くことに

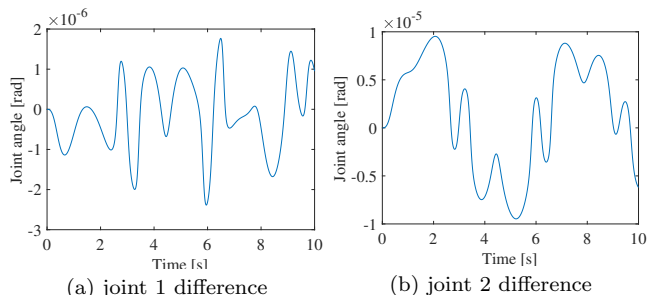


Fig. 11: Simulation results 1: difference between the real 2R manipulator model and the HILS model.

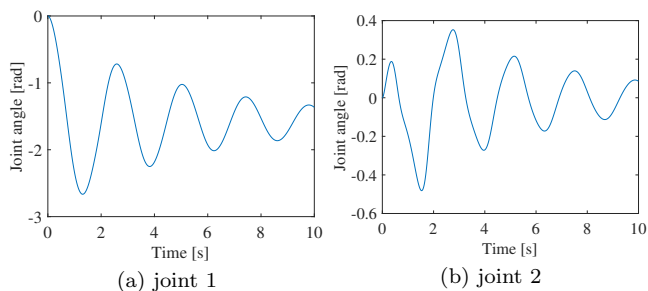


Fig. 12: Simulation results 2: the real 2R manipulator model.

よって得られる関節軌道を真値として、本提案手法によって得られた関節軌道を比較した。このとき、計測される関節トルクの実測値は  $\tau_a = -b\dot{\theta}_t$  となる。Fig. 9 ~ Fig. 11 にシミュレーション 1 の結果を示す。Fig. 9 と Fig. 10 より実機モデルと試験器を介したモデルの軌道は概ね一致している。Fig. 11 より両者の差分をとり、各軸ともに誤差が  $1 \times 10^{-5}$  [rad] の範囲で収まっている。Fig. 12 ~ Fig. 14 にシミュレーション 2 の結果を示す。シミュレーション 1 と同様に実機モデルと試験器を介したモデルの軌道は概ね一致し、両者の差分も  $1 \times 10^{-3}$  [rad] の範囲で収まっている。

## 4. 結言

本稿では、ロボット関節用 HILS の解析手法と、制御系、多自由度に対応するためのアルゴリズムについて述べ、試験器の簡易モデルを構築し、シミュレーションを用いて、アルゴリズムの有用性を検証した。

今後の課題として、実験機による検証と、本稿で提案したアルゴリズムの計算コストを抑える改良を行う。

## 謝辞

本研究は、競輪 2017M-141 の補助を受けて実施した。

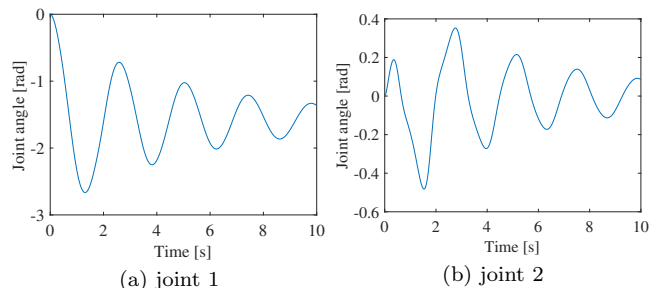


Fig. 13: Simulation results 2: the HILS model.

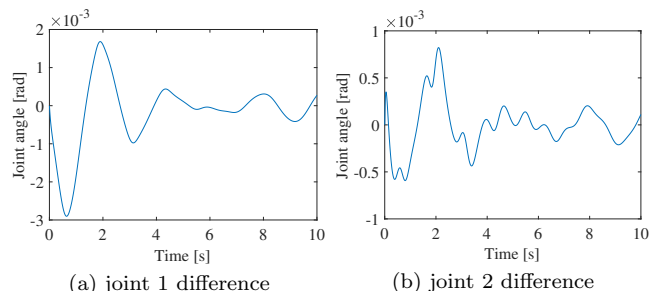


Fig. 14: Simulation results 2: difference between the real 2R manipulator model and the HILS model.

## 参考文献

- [1] K. Hirai *et al.*, “The Development of Honda Humanoid Robot,” Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1321–1326, 1998.
- [2] 森澤 他, “遠隔操作による災害対応ヒューマノイドロボット HRP-2 改”, 通信ソサイエティマガジン, No. 39, pp. 173–178, 2016.
- [3] 人と柔らかに接しながら力仕事をこなす高機能ロボット— 理化学研究所. [Online]. Available: [http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150223\\_2/](http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150223_2/), Accessed on: Aug. 29, 2018.
- [4] J. Maolin *et al.*, “Model-Free Robust Adaptive Control of Humanoid Robots with Flexible Joints,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 2, pp. 1706–1715, 2017.
- [5] J. Park *et al.*, “Safe Robot Arm with Safe Joint Mechanism using Nonlinear Spring System for Collision Safety,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3371–3376, 2009.
- [6] X. Wang *et al.*, “A FEM Model for Active Vibration Control of Flexible Linkages,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4308–4313, 2004.
- [7] 井上 他, “柔軟指による物体把持と操作における力学の実験的解明”, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 951–959, 2007.
- [8] Z. Hu *et al.*, “Hardware-In-the-Loop Simulation of Robust Mode Transition Control for a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 65, No. 3, pp. 1059–1069, 2016.
- [9] 高橋 他, “双腕宇宙ロボットによる回転体把持作業のハイブリッドシミュレーション”, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 6, pp. 590–598, 2008.
- [10] 木村 他, “柔軟関節を有するロボット設計のための Hardware-In-the-Loop-Simulator の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'18 講演論文集, 2P1-F14, 2018.