

柔軟関節を有する平面マニピュレータの Hardware-In-the-Loop-Simulation

木村哲也 (芝浦工業大学),
辻田哲平 (防衛大学校),
佐藤大祐 (東京都市大学),

○野田悠介 (東京都市大学),
安孫子聡子 (芝浦工業大学),
金宮好和 (東京都市大学)

Hardware-In-the-Loop-Simulation of a Planar Manipulator with Flexible Joints

T. Kimura (Shibaura Institute of Technology), Y. Noda (Tokyo City University),
T. Tsujita (National Defense Academy), S. Abiko (Shibaura Institute of Technology),
D. Sato (Tokyo City University), Y. Kanamiya (Tokyo City University)

Abstract— This paper presents a Hardware-In-the-Loop-Simulation (HILS) for a planar robot with a elastic joint. The HILS consists of a hardware part, which is a flexible joint in this research, and numerical simulation, which calculates forward dynamics of whole robot system. By combining real hardware and numerical model, we do not need to model complex hardware system in the numerical model, but still we can design and analyze whole motion of the robot system including the effect of the complex hardware part. In this paper, we evaluate the validity of the proposed system by comparing with the motion of a real planar manipulator system.

Key Words: Hardware-In-the-Loop-Simulator (HILS), 柔軟関節, ロボット開発

1 はじめに

人間と同じ作業空間内で、人間と協働作業を行うロボットが注目されている。特に ASIMO¹⁾, WABIAN-2²⁾, HRP-2 改³⁾ 等、人間の形を模擬したヒューマノイドロボットの開発が進められている。このようなロボットを開発する際に重要な課題として、人や障害物とロボットが衝突した際に、ロボットと人の双方に危害が及ばないようにしなければならないことが挙げられる。その解決策として、関節部分にねじりばねや弾性要素を組み込むことで衝突の衝撃を吸収するロボットが開発されている⁴⁾。一方で、そのような柔軟関節を有するロボットの開発プロセスに注目すると、ばねの非線形特性や摩擦などモデル化が困難な機械要素が多いために、数値解析と実際の動作に大きな違いが生じる。そのため、ロボットの設計開発に多大な時間とコストを要する。

その対策の一つとして、木村らは関節を持つロボットの挙動を、Hardware-In-the-Loop-Simulation (HILS) を導入することで、実際にロボットを組み立てることなく再現する手法を提案した⁵⁾。これは、実際の柔軟関節を用意するだけでロボット全体の挙動を高精度に解析するものであり、ロボットの設計開発におけるコストを抑えることができると考えられている。また、野田らの研究より複数の関節を持つロボットに対して、関節と同数の HILS を用意することで挙動を解析するアルゴリズムを提案した⁶⁾。本稿では柔軟関節を有するロボットについて HILS による解析を行い、実際に柔軟な関節を有する 1 リンクロボットを用いた比較検証を行った結果について述べる。

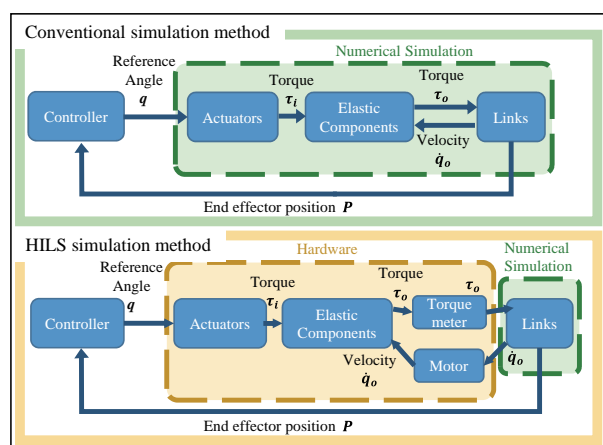


Fig. 1: Conventional method v.s HILS method

2 関節モデルを用いないロボットの動作解析手法

本研究ではロボットの動作解析に HILS を適用する。HILS とは、ソフトウェアとハードウェアを組み合わせた解析手法のことを言い、主に自動車の車載デバイスの動作検証や宇宙ロボットの地上での動作検証に使用されている。HILS は解析するモデルのうち、モデリングが困難な部分を実際に動作させ、その挙動をもとに他の部分を数値シミュレーションする手法である。本研究では、木村らの研究⁵⁾と同様に、Fig. 1 に示す構成のように柔軟関節を有するロボットマニピュレータのうち、柔軟関節部分を実際に動作させ、その際にかかるトルクをもとにリンク部分の挙動を順動力学計算することにより実挙動を再現する。この手法により、ロボットに組み込まれた柔軟関節の挙動を HILS 上で再現することができるため、柔軟関節の検証をロボッ

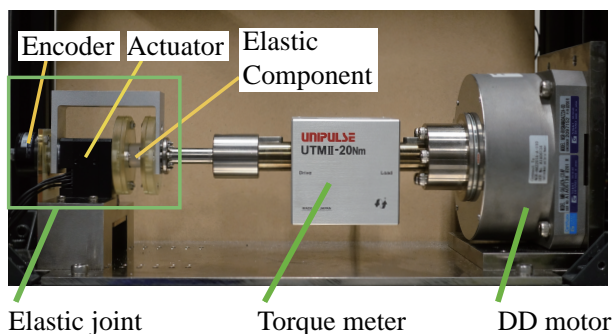


Fig. 2: Hardware-In-the-Loop-Simulator

トを組み立てずに行うことができ、ロボット設計の時間短縮及びコスト削減が見込まれる。実際に柔軟関節を HILS に取り付けた際の様子を Fig. 2 に示す。

3 柔軟関節を有する 1 リンクマニピュレータの HILS

3.1 柔軟関節を有する 1 リンクマニピュレータ

柔軟関節における HILS の解析精度を検証するため、実際に柔軟関節及びそれを有する 1 リンクマニピュレータを製作、実験し、HILS による解析結果と比較検証を行った。Fig. 3 に製作した柔軟関節を示す。また、Fig. 4 下部に実機を動作させたときの様子を示す。関節のアクチュエータとして、ROBOTIS 社の Dynamixel XM430-W210-R を使用しており、柔軟要素はアクチュエータの出力軸とリンクの回転軸の間に組み込む。柔軟要素部分は直径 16 [mm]、高さ 13 [mm] の円筒形のゴムの両端を、アクリル樹脂でできた円盤状の治具で挟んだものとなっている。また、ゴムは 3 種類（低弾性ゴム、シリコンゴム、ニトリルゴム）を使用しており、硬度はそれぞれショア A30（約 620 [MPa]）、ショア A50（約 1115 [MPa]）、ショア A70（約 1950 [MPa]）となっている。本稿ではそれぞれ柔軟関節 A、柔軟関節 B、柔軟関節 C とする。また、柔軟関節 A が最も柔らかく、柔軟関節 B、柔軟関節 C の順に硬度が増していく。リンクの回転軸にエンコーダ（マイクロテック・ラボラトリー社、MAH-19）が取り付けられており、これを用いてリンクの回転角度を測定する。また、リンク先端には、錘を取り付け、対象とするマニピュレータの慣性モーメント等の動力学パラメータを調整可能としている。

3.2 実験条件

実験条件としては、まずリンクを鉛直に下した状態を初期状態とし、反時計回りに 10 [s] 間で、アクチュエータの出力軸を 90 [°] まで回転させる 5 次のスプライン補間軌道を目指値とし、制御制御する。その際のリンクの回転角度 θ を、HILS、実機双方について測定し、比較した。また、1 つの柔軟要素につき、実機の場合は 10 回、HILS の場合は 5 回ずつ測定し、比較した。HILS による解析では、Fig. 2 のように柔軟関節を取り付け、外部にあるコントローラで関節を動作させ解析した。数値解析部分では予め算出したリンクの慣性質量などの動力学パラメータを設定した。

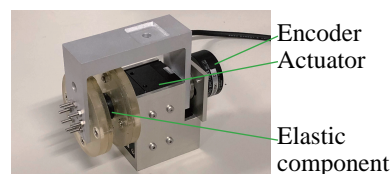
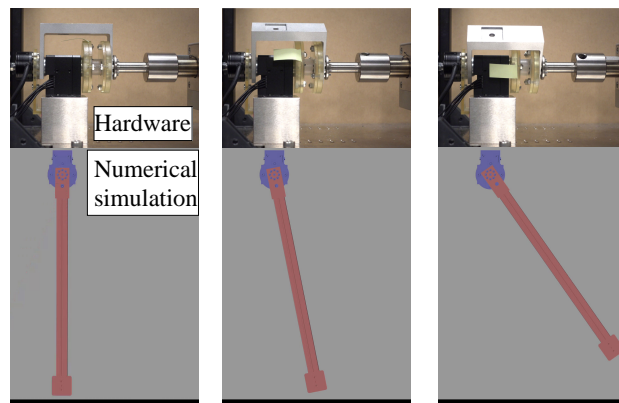


Fig. 3: Elastic joint

HILS



Real manipulator



Fig. 4: 1 link manipulator with elastic joint 2

3.3 検証結果

HILS で実際に関節を動作させたときの関節の様子と解析結果をもとに挙動を図で表したものの、実機で関節を動かしたときの様子を Fig. 4 に示す。各材質の柔軟要素について、アクチュエータの回転角度に対する実際のアームの回転角度と HILS による解析結果とをそれぞれ比較したものを Fig. 5(a), (b), (c) に示す。HILS および実機について、複数回実験を行い平均値を算出し、最終値が平均値に最も近いものを代表値とした。また、各柔軟関節について、実際に動かした際のリンク角速度と HILS による解析結果の差（HILS 解析結果代表値 - リンク角速度代表値）を Fig. 6 にそれぞれ示す。Fig. 5 より、柔軟要素があるため、リンクの負荷が増大するにつれてアクチュエータの出力軸の回転角度とリンクの回転角度に差が生じることがわかる。これは柔軟関節にかかるトルクに応じて柔軟要素が伸縮することが原因であると考えられる。また、その差が柔軟要素の種類によって違い、より柔らかい柔軟要素を持つ方が差が大きくなるのは、柔軟要素の弾性係数が小さいほど伸縮する割合が大きいためであると考えられる。、リンクの回転角度と HILS の解析結果を比較すると、どの柔軟関節においても両者の軌道

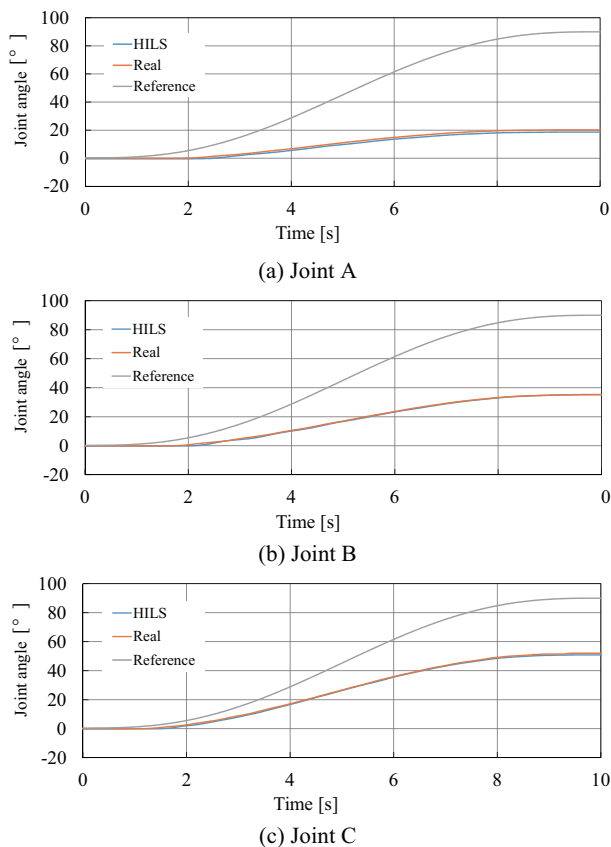


Fig. 5: Joint angle of elastic joints

はほぼ一致している。つまり、HILSにおいても柔軟要素によるリンク角度と指令値との差が再現されている。しかし、Fig. 6を見ると、各柔軟要素における HILS 解析誤差の最大値は柔軟要素 A で約 $1.5[^\circ]$ 、柔軟要素 B で約 $1.3[^\circ]$ 、柔軟要素 C で約 $1.3[^\circ]$ となった。また、柔軟関節 A、C は時間とともに誤差が増大するのに対して、柔軟関節 B は誤差が増大した後、減少している。これは、剛性の大きさを表すショア値では表せない柔軟要素の特性や粘性要素などが影響していると考えられる。

4 おわりに

本稿では柔軟関節を有するロボットのための HILS について、実際に柔軟関節を持つ 1 リンクロボットアームを用いて解析精度の比較検証を行った結果について述べた。検証結果より、HILS によるロボット開発の可能性を示すことができた。今後の課題は、HILS の性能向上と複数関節に対して HILS を導入する手法に発展させる必要があると考えられる。

5 謝辞

本研究は、競輪 2017M-141 の補助を受けて実施した。

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, 1321/1326 (1998)
- 2) Y. Ogura et al. : Development of a New Humanoid Robot WABIAN-2, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 76/81 (2006)

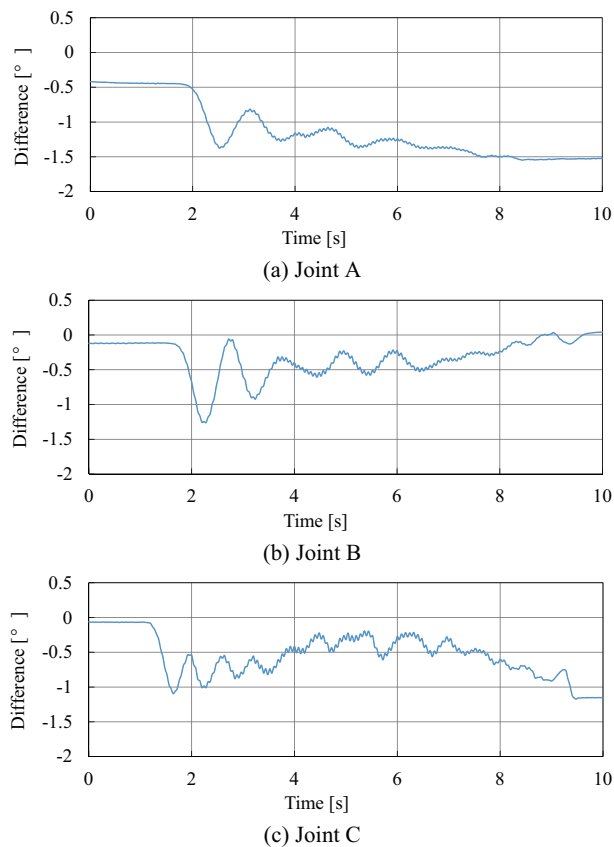


Fig. 6: Difference between HILS and a real manipulator

- 3) 森澤光晴, 中岡慎一郎, 金子健二, シスネロス ラファエル, 梶田秀司, 阪口健, 金広文男 : 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, **39**-冬号, 173/178 (2016)
- 4) J. Maolin et al. : Model-Free Robust Adaptive Control of Humanoid Robots with Flexible Joints, IEEE Transactions On Industrial Electronics, **64**-2, 1706/1715 (2017)
- 5) 木村哲也, 野田悠介, 辻田哲平, 佐藤大祐, 安孫子聡子, 金宮好和 : 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, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2P1-F14 (2018)
- 6) 野田悠介, 木村哲也, 辻田哲平, 安孫子聡子, 佐藤大祐, 金宮好和 : 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, 第 19 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2018), 2251/2256 (2018)