

教育用 FPGA ベース HILS 環境の構築

2220028 村上勘太郎 成見研究室

1 はじめに

制御システムの開発では、実機を用いた検証が欠かせない。しかし、実機を用いた試験は高コストで、繰り返し試験や故障検出試験、条件変更が困難という問題がある。そこで多くの開発現場では、まずソフトウェアシミュレーションで制御アルゴリズムを検証し、その後、実機での試験を行うという段階的なアプローチが採用されている。まず制御対象と制御装置の両方をモデル化し、机上でシミュレーションを行う開発手法を Model-in-the-Loop-Simulation (MILS) と呼ぶ(図 1)。

次に制御器には実機を用い、制御対象は数値モデルとして模擬して検証を行う Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) がある(図 2)。HILS は MILS で得られたモデルを実ハードウェアで置き換えることで、より現実的な環境で制御アルゴリズムを検証できる手法である。HILS は安全かつ効率的に制御アルゴリズムを検証できる手法として、自動車、ロボティクス、航空宇宙などの分野で活発に用いられている。

HILS 研究の一つとして、教育分野への応用がある。制御工学教育における大きな課題はすべての学生に十分な実験環境を提供することが困難である点である。物理的な実験環境の構築やスペース、高価な測定器、メンテナンスなどの大きなコストが現場では伴う。多くの大学教育における制御工学実験では、一つの実験環境を複数の学生で共有することが一般的であり、学生一人ひとりが十分な実験経験を積むことが難しい。教育分野の HILS 研究では、低コストな HILS プラットフォームを構築し、多くの学生に十分な実験機会を提供することが求められている。

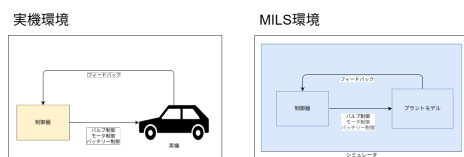


図 1 MILS 環境の概要

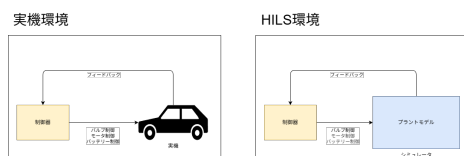


図 2 HILS 環境の概要

2 関連研究

S. Ojeda-Mancera らの研究 [1] では、教育用途における HILS の普及を妨げる要因として、既存の商用 HILS プラットフォームが高価である点を指摘している。同研究では、微分方程式、システムダイナミクス、制御工学などの科目での利用を目的として、Raspberry Pi Pico を用いた低コストかつオープンアクセスな教育用 HILS プラットフォームを提案している。一方で、提案プラットフォームはプロセッサベースで構成されており、リアルタイム性は演算レイテンシに依存する。そのため、線形モデルを中心とした比較的低次・低速なシステムを主対象としており、非線形性や高速ダイナミクスを含むシステムの高精度エミュレーションには制約があることが述べられている。

J.Sobota らの研究 [2]. では、制御対象プラントの物理モデルが実験室から消え、その代わりにそれらの制御の動作を示すためのソフトウェアシミュレーションモデルに置き換わっていく傾向に懸念を示している。制御を学ぶ学生が最初からシミュレーション環境の中で作業することで、実際の物理システムの挙動を理解する能力が低下する可能性があるとして指摘している。そこで彼らは GUI 上で実際のプラントモデルの挙動を体験できる教育用 HILS プラットフォームを提案している。

3 研究目的

本研究では、FPGA を用いて、実機に近い挙動を示す、FPGA ベースの台車型倒立振子の HILS 実験環境の構築の実現を目指す。シミュレーションと実機とのギャップを埋めるために、FPGA の柔軟な IO 制御能力を活用することで、センサなどのエミュレータを高精度に実現する。これにより物理モデルのシミュレーションだけでなく、システム全体の模擬を実現し、より実機の挙動を学習することができる教育用 HILS プラットフォームを構築する。

4 開発したシステム

4.1 MILS

MILS 環境は MATLAB/Simulink を用いて構築した。構築した MILS システムの全体のブロック図を図 3 に示す。台車型倒立振子の数値モデルは、参考文献 [3] に基づいて作成した。

4.2 実機

作成した台車型倒立振子の実機を図 4 に示す。

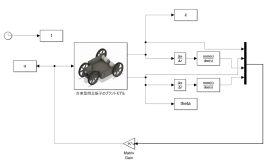


図 3 MILS システムの全体のブロック図

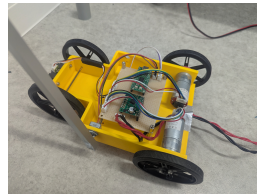


図 4 実機システム

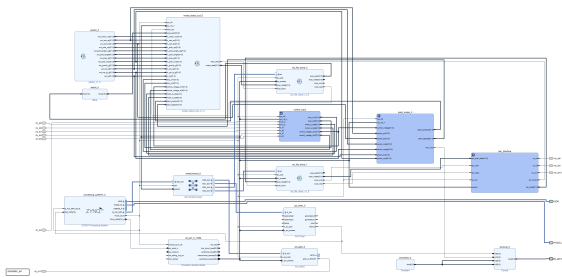


図 5 HILS システムの全体のブロック図

4.3 HILS

Arty Z7 FPGA ボードと DA コンバータ MCP4922 を用いて、台車型倒立振子の HILS 環境を構築した (図 5)。

5 評価

台車型倒立振子の制御を行い、各システムの挙動を比較した。その結果を図 6 に示す。

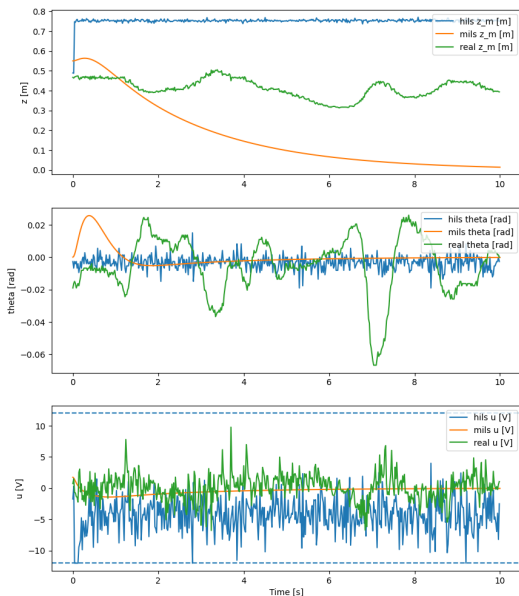


図 6 各システムの挙動比較

実機と MILS では振子が倒立することを確認した。しかし、HILS 全体としては期待した入出力関係が得られず、シミュレータとしての評価は実施できなかった。一方で、HILS の入力、出力インタフェースに関しては、センサ特有の更新レートを正確にエミュレーションすることができた。MILS 環境と実機環境の比較では、応答の定性的な傾向は一致したも

の、MILS は摩擦・バックラッシュ・センサノイズ等の非理想要因を十分に反映しないため、実機に比べて理想的な挙動を示した。

6 まとめ

本研究では、FPGA を用いた教育用倒立振子 HILS プラットフォームの構築を試みた。台車型倒立振子の数学モデルに基づき、実機環境、MILS 環境、FPGA ベース HILS 環境を構築し、プラントモデルの妥当性を評価できる土台を構築することができた。実機実験では MILS で作成した制御器が安定に動作し、倒立維持を達成した。MILS 環境では理想的なプラントモデルに基づくシミュレーションが可能であり、制御器設計段階における成立性確認やパラメータ探索に有用であることを確認した。一方、FPGA ベース HILS 環境では、センサ信号のエミュレーション、PWM 検出器は高精度かつ安定に動作したものの、HILS 全体として閉ループで期待した挙動を再現するには至らなかった。FPGA はセンサやアクチュエータなど入出力系のハードウェア特性を高いタイミング精度でエミュレートする用途に適している一方で、複雑な数値演算を含むプラントモデルを閉ループで安定動作させるためには、段階的な検証フローの整備が不可欠であることがわかった。

7 今後の課題

今後の課題として、HILS におけるプラントモデルを閉ループで安定動作させつつ高精度に実装する手法の確立が挙げられる。特に、MILS や実機での結果との数値照合や ILA による内部信号観測を含む体系的な検証手順を確立することが重要である。本研究では UART 経由で PC にデータ転送を行ったが、リアルタイムでの可視化・解析を実現するには、Ethernet 等の高速かつ大容量な通信インタフェースを用いたデータ収集基盤の整備が課題となる。これと併せて、教育現場での利便性向上を目的に、シミュレーション結果や実験ログを直感的に理解できる GUI の開発も検討すべきである。

参考文献

- [1] S. Ojeda-Mancera, J. A. Morales-Sandoval, J. A. Morales-Sandoval, "Didactic Hardware-in-the-Loop Platform: A Low-Cost Open-Source Approach," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123456-123465, 2025.
- [2] J. Sobota, M. Goubey, J. Kónigsmarkóvá, and M. Čech, "Raspberry Pi-based HIL simulators for control education," *IFAC PapersOnLine*, vol. 52, no. 9, pp. 68-73, 2019.
- [3] 川田昌克, 東俊一, 市原裕之, 浦久保孝光, 大塚敏之, 甲斐健也, 國松禎明, 澤田賢治, 永原正章, 南裕樹, "倒立振子で学ぶ制御工学," 講談社, 2017.