

サイバーフィジカルシステムを用いた最適制御性を保つ ジョブスケジューリングに関する一考察

Job Scheduling to Keep Control Performance by Using Cyber-Physical System

芦名勇太*, 森和好*

Yuta Ashina*, Kazuyoshi Mori*

*会津大学

*University of Aizu

キーワード： サイバーフィジカルシステム (Cyber-physical system), ジョブスケジューリング (Job scheduling), リカッチ方程式 (Riccati equation), 倒立振り子 (Inverted pendulum), CPU シミュレータ (CPU simulator)

連絡先： 〒 965-8580 福島県会津若松市一箕町大字鶴賀字上居合 90 会津大学コンピュータ理工学部 森研究室

芦名勇太, Tel.: (0242)37-2615, Fax.: (0242)37-2747, E-mail: m5201163@u-aizu.ac.jp

1. はじめに

近年コンピュータやネットワークの発展ともに物理システムと情報システムを密接に統合するサイバーフィジカルシステムに大きな関心が高まっている¹⁾。しかしサイバーフィジカルシステムは物理的な実態と直接結びついているために一度乗っ取りやサービスの停止や故障などが発生すると大きな事故を引き起こす可能性がある²⁾。

最近では 2007 年にオーストラリアのマルチーにある水処理施設のシステムが攻撃され大量の下水が多く の場所に流入し生態系に影響を与え住民に大きな被害を与え³⁾、2009 年にはブラジルとパラグアイで大規模な停電が発生し交通と生活に大きな影響を与え⁴⁾、2003 年には米国のオハイオ州にあるデービス・ベッセ原子

力発電所に SQL ワーム攻撃が行われ同施設の SCADA システムが停止させられ施設内のプラントネットワークのパフォーマンスを低下させ、安全管理システムや監視システムを約 5~6 時間にわたって停止させた⁵⁾。

これまでのサイバー攻撃は「情報システム」へのサイバー攻撃が中心でしたが、近年は大規模な施設の「制御システム」に向けられるようになった。施設内の情報のほとんどは電子化され情報システム内に格納されているため、そこから機密が漏洩するとさらなる攻撃の引き金になり、施設内の情報が明らかになると攻撃者はまず情報システムを陥落させ、次に制御システムが狙われ施設に被害が発生します。そのためサイバーフィジカルなシステムを運用するためにはセキュアなシステム構築、運用が求められる。

いままでのサイバーフィジカルシステムを用いたスケジューリングにおいて、外部信号を調整するジョブスケジューラーは遅れが発生したジョブに関しては止められて、遅れのないジョブのみが実行されていた。遅れが発生したジョブは安全性のために止められそのため全体の性能が元の性能よりも低くなってしまふ。

本研究ではサイバーフィジカルシステム概念を用いたジョブスケジューリングを行うことでシステムモデルの運用を安定化させ、外乱などの外部から攻撃信号に対してパフォーマンスをできるだけ落とさずに運用できるようなジョブスケジューリングに関して一考察をする。

2. サイバーフィジカルシステム

2.1 概要

サイバーフィジカルシステムは現実世界の制御対象の様々な状態を数値化し、定量的に分析することでより効率的に制御対象を制御する。

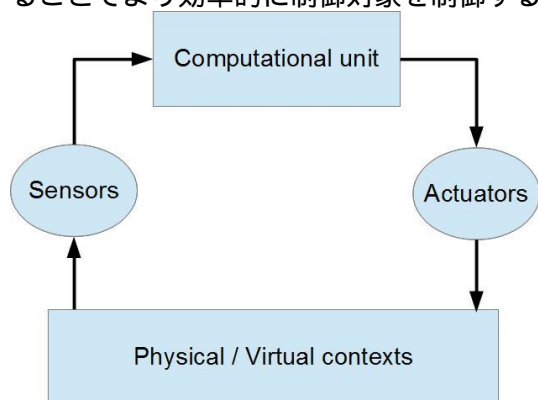


Fig. 1 基本モデル

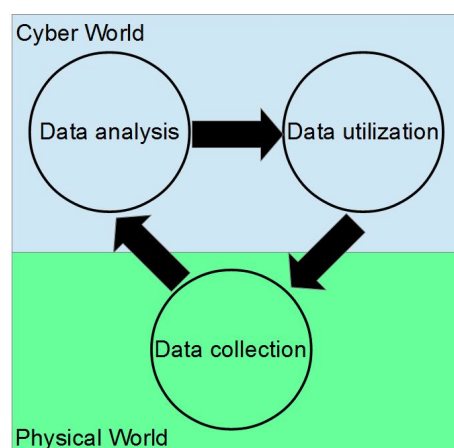


Fig. 2 物理世界との関わり

現実世界から得られるデータを収集し活用することでシステムの効率化の向上に寄与するものであり、交通システムの一つである ITS は道路や信号に埋め込まれたセンサーや車から送られてくる物理世界の情報に基づきコンピュータによって高度な制御を行うことで輸送効率・快適性の向上を実現しようとしている⁸⁾。様々な場所で効率化を進めるためにコンピュータが利用されており農業においてもセンサーから得られる情報を用いて、散水が行うことで生産の効率化上げようとしている。システムがコンピュータにより制御されることで効率化が進められ、人間にとってよりよい社会が実現と考えられる⁹⁾。

本研究では外乱が発生し CPU の性能が落ちたときに別の CPU に割り当ててジョブを続行させるスケジューリングをジョブスケジューラーから送る仕組みをサイバーフィジカル概念を用いることで効率的な制御を行う。本研究ではサイバーフィジカルシステムの理論を用いることで外乱が発生した場合に CPU 性能をなるべく落とさずに運用できるようなジョブスケジューリングを提案する。

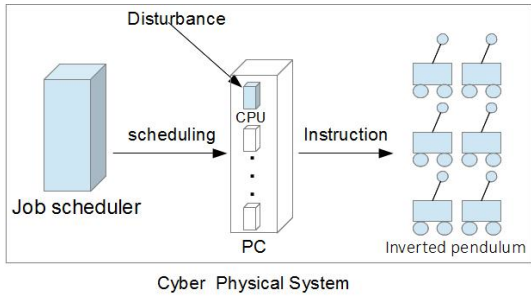


Fig. 3 システム全体

3. 実験方法

3.1 システムモデル

本研究では安定させるシステムモデルとして倒立振子を用いる。倒立振子はフィードバック制御の最も基本的な実験であり、単に逆立ちさせるだけではなく、逆立ちさせたまま自由に移動させたり、下垂状態から起こすなど各種の制御が必要となる。本実験では複数の倒立振子を制御するプログラムを作成し、倒立振子から得られる状態方程式を用いることで制御システムを構築する。

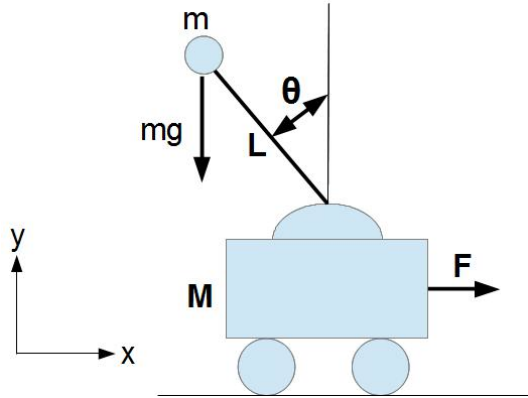


Fig. 4 倒立振子

3.2 実現方法

倒立振子の制御には線形二次最適制御を用いる。最初にシステムに対するコスト関数を定義する。行列 X が 0 とは異なる任意の実ベクトル

ル μ, ν に対して

$$\mu^T X \mu > 0 \quad (1)$$

$$\nu^T X \nu \geq 0 \quad (2)$$

を満たす場合、それぞれ正定行列・半正定行列という。コスト関数 J_d は以下の式により定められる：

$$J_d = \sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{x}_d(k)^T Q_d \mathbf{x}_d(k) + \mathbf{u}_d(k)^T R_d \mathbf{u}_d(k)) \quad (3)$$

但し、行列 Q_d を半正定行列、行列 R_d を正定行列とする。

式を最小とする最適状態フィードバック $\mathbf{u}_d(k) = -F_d \mathbf{x}_d(k)$ のフィードバック係数行列は

$$F_d = (R_d + B_d^T P_d B_d)^{-1} B_d^T P_d A_d \quad (4)$$

により与えられることが知られている。ここで、 P_d は離散系のリカッチ方程式の解である：

$$P_d = Q_d + A_d^T P_d A_d - A_d^T P_d B_d (R_d + B_d^T P_d B_d)^{-1} B_d^T P_d A_d. \quad (5)$$

式を最小にするフィードバックを構成するためには、離散系リカッチ方程式を解く必要がある。この解 P_d は、以下のように算出できる。

適当な正定行列を $P_d(0)$ とする (単位行列でよい)。それより、それぞれの自然数 i について

$$P_d(i+1) = Q_d + A_d^T P_d(i) A_d - A_d^T P_d(i) B_d (R_d + B_d^T P_d(i) B_d)^{-1} B_d^T P_d(i) A_d \quad (6)$$

を反復計算すると $P_d(\infty)$ は解 P_d に収束する。そこで、適当に収束判定を行ない、十分大きな N に対する $P_d(N)$ を解 P_d とみなす。

以上により得られたリカッチ方程式により安定化を行う。

3.3 スケジューリング方法

本研究のスケジューリング方法として一定時間経過するとジョブを割り当てる CPU を変更

するというものを提案する。これにより振り子を倒立させるジョブを分散化させることでCPUの処理を分散化させジョブの遅れを発生させないようにする。Fig.5ではスケジューリングのモデルを表している。

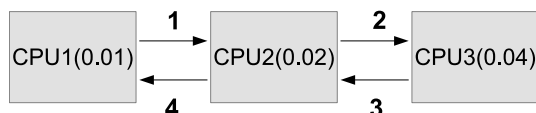


Fig. 5 スケジューリング法

このスケジューリング方式はCPUでジョブを処理する際に過負荷により発生する遅れを発生させないように考察したものであり、振子の状態により発生する負荷については考察されていない。

4. 実験結果

プログラムでは50個の倒立振り子を3つのCPUで制御していると仮定し、サンプリング周期はそれぞれ0.01秒,0.02秒,0.04秒となっている。スケジューリングは初期は1つのCPUでジョブを行い、1秒経過すると別のCPUに移行するようになっており一定時間経過すると最初の場所に戻りまた別のCPUに移動する。これによりCPUに過負荷がかからずに分散化ようになる。

プログラムの実行結果は以下の通りになっており倒立振り子は全て表示せずに6個だけ表示しシミュレーション時間は10秒で行っており、その際に倒立振り子に加わっている力は以下の通りになる。Fig.6ではプログラムの実行結果を示し、Fig.7では実行中に倒立振り子に加わる力を示している。

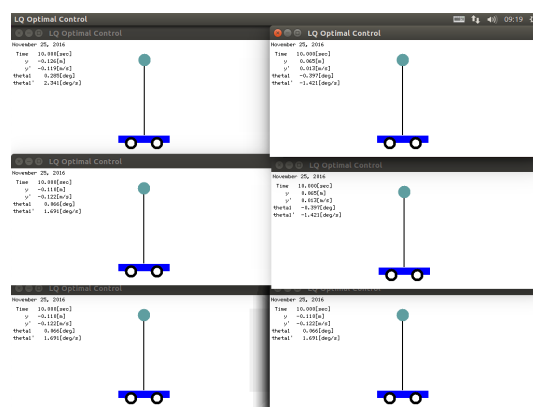


Fig. 6 実行結果

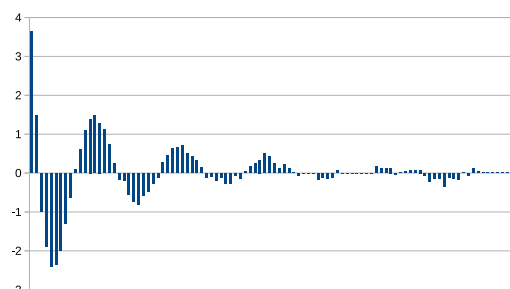


Fig. 7 倒立振り子に加わる力

5. まとめ

本実験ではリカッチ方程式から得られたパラメータと考察されたスケジューリングを用いて倒立振り子の安定化に成功した。しかし振り子の初期状態が異なるものや、シミュレーション中の振り子の状態から発生する負荷に関しては考慮されていないため、これからの研究ではそれらを含めた状態でのスケジューリングを考察しなければならない。

参考文献

- 1) 吉本達也、潮俊光、サイバーフィジカルシステムにおける制御性能の最適化のためのジョブスキッピング, 電子情報通信学会技術研究報告. VLD, VLSI 設計技術 110(87), 53-58, 2010-06-14
- 2) Fabio Pasqualetti, Student Member, "Attack Detection and Identification in Cyber-Physical Systems", IEEE Trans Automan Contr, vol.AC-58.pp.2715-2729,2013.

- 3) J. Slay and M. Miller, " Lessons learned from the Maroochy water breach, " Critical Infrastructure Protection, vol. 253, pp. 73?82, 2007.
- 4) J. P. Conti, " The day the samba stopped, " Eng. Technol., vol. 5, no. 4, pp. 46?47, Mar. 6?Mar. 26 2010.
- 5) S. Kuvshinkova, " SQL Slammer worm lessons learned for consideration by the electricity sector, " North American Electric Reliability Council, 2003.
- 6) J. P. Farwell and R. Rohozinski, " Stuxnet and the future of cyber war, " Survival, vol. 53, no. 1, pp. 23?40, 2011.
- 7) Fumin Zhang, Klementyna Szwaykowska, Wayne Wolf, and Vincent Mooney, " Task Scheduling for Control Oriented Requirements for Cyber-Physical Systems ", IEEE Trans Automan Contr,vol.AC-30.pp.47-56,2008.
- 8) 岩野 和生, 高島 洋典, サイバーフィジカルシステムと IoT (モノのインターネット), 科学技術振興機構研究開発戦略センター, 2015-06-14.
- 9) 「CPS (Cyber Physical Systems) 基盤技術の研究開発とその社会への導入に関する提案」, CDS-FY2012-SP-05 , 科学技術振興機構 , 2013-03