

令和元年5月30日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06842

研究課題名（和文）サイバーフィジカルシステムを用いたスマート化学プロセスの設計

研究課題名（英文）Development of smart chemical process using the cyber physical systems

研究代表者

松田 圭悟（Matsuda, Keigo）

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：60415792

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、IoT技術とマルチセンサを用いたサイバーフィジカルシステム（CPS）を開発し、プロセスの一例として気液接触型蒸留装置を対象に流動状態の計測をおこない、内部状態の推定を試みた。CPSでは流動状態の加速度データを収集し、従来法として圧力損失データとの比較を行い、開発したシステムの有用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
安心かつ安全な化学プロセスを運用するための技術としてIoTに着目し、これまででない計測、評価、運転技術の確立につながる基礎的研究を実施した。

研究成果の概要（英文）：Cyber physical system of chemical process has been developed using internet of things such as multi sensors. Using this system, the fluid dynamics of distillation were modeled and analyzed. Cyber physical system has rigorously analysis of distillation process compared with conventional system.

研究分野：化学工学

キーワード：システム設計 化学システム 計測 解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

スマート社会システム構築のために、インターネットを介した情報通信技術が広く用いられるようになり、スマートグリッドに代表されるエネルギーマネージメントや Apple Watch のようなスマートウォッチによるヒューマンマネージメントなどが産業分野から民生分野まで非常に速い速度で普及し始めている。我が国においても、経済産業省 産業構造審議会が 2015 年 5 月に「CPS（サイバーフィジカルシステム）によるデータ駆動型社会の到来を見据えた変革」の中間取りまとめをおこない右図に示すように、IoT（インターネットによるものづくり）・ビッグデータ・AI（人工知能）等の IT（情報技術）の技術革新によって、実世界から得られたデータを分析・解析し、その結果を再び実世界にフィードバックするというサイバーフィジカルシステム（CPS）が現実のものになっており、これにより、全ての産業でデータを核としたビジネスモデルの革新が産業の垣根を越えて生じ今後は産業構造の大変革が予想されるとしている。一方で、化学プラントの運転・制御システムは、90 年代に確立されたハイブリッド制御システムに代表されるフィールドバスを用いることで、稼動している現場機器（測定器、操作器）とコントローラ間の信号のやり取りをデジタル通信にて行っており、物理世界の情報のみのやり取りがなされ技術革新が停滞し、スマート化（エネルギー消費削減、無人化、安全化など）に繋がる技術開発が望まれている。

2. 研究の目的

化学プラントの未来像として、エネルギー消費のネットゼロ化、無人運転化、超安全化などが求められているが、現状の技術ではこれを達成するのは困難である。そこで、本研究では、未来のスマートな化学プラントを設計するために、蒸留分離プロセスを対象としてサイバーフィジカルシステムを構築する。その基盤研究の第一歩として、スマート化学プロセスに求められる物理社会の機能とサイバー社会の機能を定量化し、「機能」単位の明確化とインターフェイスの共通化をシステムの観点から明らかにする。具体的には、リボイラやコンデンサといった機器全てがインターネットに繋がる IoT 型センサーを開発し、これをパイロットスケールの蒸留塔に実装し、実験・プロセスシミュレーションから挙動を解析する。

3. 研究の方法

本研究では、パイロットスケールの大型蒸留プロセスを対象とし、サイバーフィジカルシステム構築のための機能メカニズムを解明する。現在、工場単位を単位としたヒト、モノ、カネを機能対象とする検討がなされているが、化学プラントに必至な収支、平衡、速度や安全などを機能化する取り組みはほとんどなく、未来の化学プラントを構築するためにも本研究は重要である。この分離プロセスを構成する要素の機能について、その単位とマクロプロセス等との関係について明らかにする。「機能」の単位（バウンダリー）は、これを構成する要素を意味するが、この単位（バウンダリー）を小さくすれば、幅広い操作の可能性が期待される。しかしながら、サイバー世界のインターフェイスとの接続が困難になるため、実験とモデルを並列した研究を進める。特に、高度に化学プロセスを運転する機能の実装のために、物理世界とサイバー世界のインターフェイスを開発する。迅速に対応可能な CPS 構造および環境を実現するために、数秒単位で新しいコードをデプロイ（展開）可能なようにシステムとソフトウェアの構造を設計・構築する。

4. 研究成果

システムの設計

Fig. 1 に本研究で開発したシステムの概略を示している。Fig. 2 (a) は本実験で用いたマルチセンサである Texas Instruments 社製 SensorTag 2 を示している。Fig. 2 (b) はゲートウェイに用いたラズベリーパイ財団製 Raspberry Pi 3 Model B (以下 RPi3) を示している。マルチセンサから計測データが Bluetooth で接続されているゲートウェイに送信されデータが保存される。ゲートウェイはインターネットに接続されており、制御用 PC からアクセスすることでデータの管理と解析を行っている。また、流動状態を記録するため Web カメラで撮影を行っている。

モデル化

本システムは IoT 向けプログラミングソフトウェアである Node-Red によって制御プログラムを作成している。このソフトはブラウザ上の Flow エディタであらゆる Node をワークスペースに配置して接続することで簡単にプログラミングを行うことができる。Fig. 3 に設計したプログラムを示している。プログラムは、

Node 1 : Parameter (計測パラメータと測定間隔の設定)

Node 2 : Extraction (必要なデータの抽出)

Node 3 : csv (データを整理し、csv 形式ファイルに変換)

Node 4 : Storage (内臓 MicroSD カードにセンサデータを保存)

Node 5 : [Cloud]Freeboard (クラウドアプリによるリアルタイムモニタリング)

の 5 つのノードで構成されている。

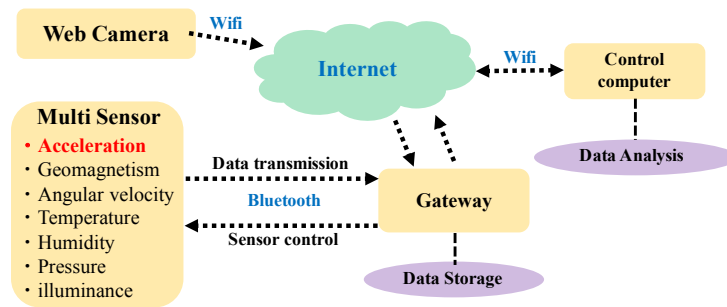
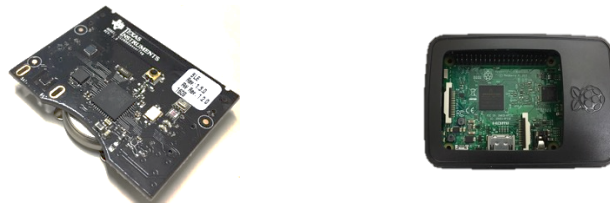


Fig. 1 システム



(a) SensorTag 2 (b) Raspberry Pi 3 Model B

Fig. 2 マルチセンサとゲートウェイ

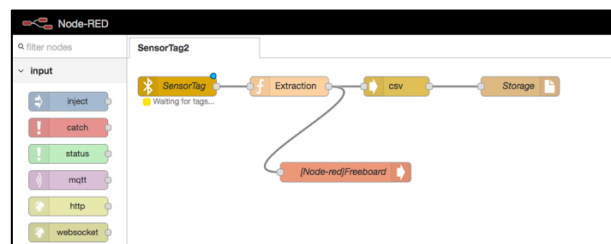


Fig. 3 システムフロー

Node 1 : Parameter (計測パラメータと測定間隔の設定)

このノードではパラメータと計測間隔を設定することができる。Devices でマルチセンサの検索と接続を行なう。Sensors で測定パラメータを設定する。本実験で使用した SensorTag 2 では温度、湿度、圧力、地磁気、加速度、角速度、照度の計測を行うことができる。パラメータを選択後、測定間隔を設定することができる。

Node 2 : Extraction (必要なデータの抽出)

このノードでは関数を用いることで抽出するデータを指定することができ、ここではタイムスタンプを付与している。また、加速度データを x, y, z 軸ごとに取得している。関数を書き換えることで、他パラメータのデータを取り扱うことができる。

Node 3 : csv (データを整理し、csv 形式ファイルに変換)

Node 4 : Storage (内臓 MicroSD カードにセンサデータを保存)

Node 5 : [Cloud]Freeboard (クラウドアプリによるリアルタイムモニタリング)

このノードでは、センサデータをクラウドにアップロードし、Web 上でグラフを作成し、リアルタイムにモニタリングを行うことができる。ここでは、計測時間と加速度情報に加え、Web カメラ映像を一括して見るできるようになっており、プロセスの挙動変化（フィジカルデータ）によるデータ変化（サイバデータ）をリアルタイムに把握することが可能となっている。

実験

Fig. 4 に実験装置である気液接触型装置（蒸留塔）の概略を示す。装置本体は透明なアクリル素材のため中の様子を視認することができる。塔本体の直径は 110 mm である。

実験は水-空気系で行い、装置上部から供給量一定で水 0.1 l/min、下部からはコンプレッサーで圧縮した空気を 10 l/min から 50 l/min の範囲で供給し、シーブトレイ上で気液接触させた。供給ガス量増加に伴う流動状態の変化の確認を行った。このときのプロセス特性は圧力損失のみに着目し、これを差圧計にて計測した。測定間隔は 0.3 sec とした。

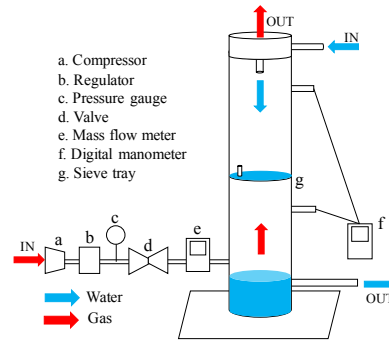


Fig. 4 実験装置概略

Fig. 5 に流動状態別に計測した加速度情報の z 軸の変化を示した。ローディング状態のときは加速度が激しく変動していた。フラッシング状態のときも同様に加速度は激しく変動していたが、ローディング状態よりも振幅の変化が大きくなっていた。これは、供給ガス量の増加に伴い流体の挙動が激しくなったためであると考えられる。一方で、均一流動状態のときの加速度変化には、ローディング、フラッシング状態と比較してある程度の周期性を確認することができた。以上の結果より、流動状態別に加速度データを計測することができていると考えられる。

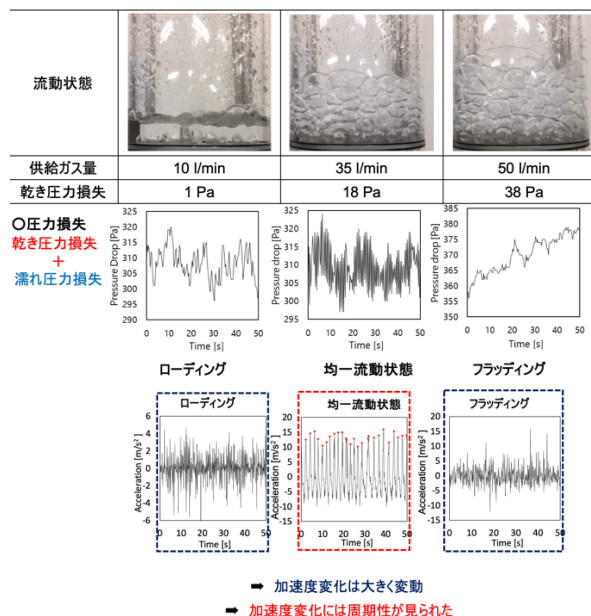


Fig. 5 流動状態と圧力損失

それゆえ、均一流動状態における加速度情報について考察する。圧力損失データと同様に高速フーリエ変換を行った結果を Fig. 6 に示した。加速度は 0.3 sec ごとデータを抽出し、サンプリング点数は 128 である。グラフより、0.52 Hz に強いピークを確認することができた。ピークの小さい周波数をノイズと考えて、式(1)で sin 波を作成しもとのデータに重ねた結果もして

いる。

$$f(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

A : 振幅 f : 周波数 t : 測定間隔

sin 波は赤い点線で示している。グラフより高速フーリエ変換の結果から作成した波と高い確率で一致していることが分かった。すなわち、加速度は周期的な変化をしている。同時に高速フーリエ変換を用いることで波の周期性を同定することが可能であることが分かった。圧力損失データと加速度データを比較すると、どちらのデータも均一流動状態のときは周期的な変化をしている。また、二つのデータの時定数が異なることが分かった。そのため、加速度情報から圧力損失を推定するためには、フィルタリングによる時定数の調整が必要であると考えられる。

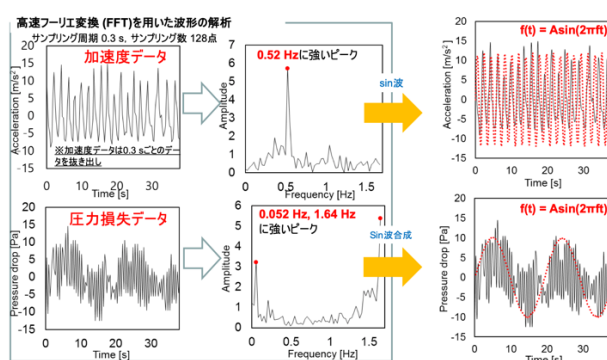


Fig. 6 ビッグデータ解析

5. 主な発表論文等

- ① Yamaki, T*, K. Takane, R. Akimoto and K. Matsuda; "Operation Range of Modified Petlyuk Process for Separation of Benzene, Toluene and p-Xylene Mixture," J. Japan. Petrol. Inst., 62(1), 45-51 (2019) 査読有
- ② Ladadok C., T. Yamaki, K. Matsuda, H. Matsumoto and D. Na-Ranong*; "Kinetics, Isotherm and Thermodynamics of Sterol Adsorption on Styrene-Divinylbenzene Anion-Exchange resins," ScienceAsia, 44, 346-354 (2018) 査読有
- ③ Suzuki, K., K. Takane, Y. Yamaki, T. Wakabayashi, J. A. Rafael, H. Matsumoto, T. Horie, M. Nakaiwa and K. Matsuda*; "Economic Evaluation of the Heat Pump assisted Distillation Systems," Kagaku Kogaku Ronbunshu, 44(5), 303-307 (2018) 査読有
- ④ Suzuki, Y., Y. Yamaki, R. Akimoto and K. Matsuda*; "Separation of 2-Propanol/Water/n-Hexane Ternary System using the Batch Distillation Commercial Plant," Kagaku Kogaku Ronbunshu, 44(6), 350-354 (2018) 査読有
- ⑤ Takehiro Yamaki, Keigo Matsuda*, Duangkamol Na-Ranong and Hideyuki Matsumoto : Intensification of Reactive Distillation for TAME Synthesis based on Analysis of Multiple Steady State Conditions, Processes, Vol. 6, No.12, 241(1-11), 2018 査読有
- ⑥ Yamaki, T., K. Matsuda*, D. N. Ranong, H. Matsumoto; "Energy-saving Performance of Reactive Distillation Process for TAME Synthesis through Multiple Steady State Conditions," Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 130, 100-109 (2018) 査読有
- ⑦ Yamaki, T., K. Matsuda*, D. N. Rannong and H. Matsumoto; "Energy Saving Characteristics of an Internal Heat Integrated Reactive Distillation for Methyl Acetate Synthesis," Kagaku Kogaku Ronbunshu. 42(2), 56-59 (2016) 査読有

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① K. Takane, Y. Suzuki, K. Matsuda* : Energy-saving and Cost analysis of Distillation, Membrane Separation and Membrane Distillation Hybrid Separation Processes, 2018 International Symposium on Chemical-Environmental-Biomedical Technology, CP-2, (2018)
- ② M. Otani, Y. Suzuki, K. Matsuda* : Multiscale Analysis for the Inner Structure of Porous TiO₂ Using FIB-SEM, 2018 International Symposium on Chemical-Environmental-Biomedical Technology, CP-2, (2018)
- ③ 松田圭悟, 高根慧; “プロピレン/プロパン 2 成分系分離を対象とした蒸留-膜ハイブリッドプロセスの経済性評価, E123, 関西大学 (2018.3)
- ④ 高根慧, 松田圭悟; “蒸留, 膜分離ハイブリッド分離技術の経済性評価,” 分離技術会年会 2018, S2-5, 日本大学 (2018.5)
- ⑤ 大谷雅輝, 鈴木泰彦, 松田圭悟; “触媒担体を指向した多孔質 TiO₂ の 3 次元構造解析,” 化学工学会第 50 回秋季大会, ED115, 鹿児島大学, (2018.9)
- ⑥ K. Takane, K. Suzuki, T. Yamaki, K. Matsuda* : Energy Saving Performance of Heat Pump assisted Distillation-Membrane Hybrid Process in Propylene-Propane Separation, Proceedings of 11th International Conference on Separation Science and Technology, BP-10, (2017)
- ⑦ M. Otani, K. Matsuda* : Design to the D Structures of Porous TiO₂ by using Machine Learning via Multiscale Structure Analysis, Proceedings of 11th International Conference on Separation Science and Technology, GP-12, (2017)
- ⑧ 秋元良祐, 松田圭悟; “二成分系熱媒を用いた多段カスケード型バイナリーサイクルの開発,” 第 8 回福島地区 CE セミナー, P-1, 日本大学 (2017.12)
- ⑨ 大谷雅輝, 松田圭悟; “マテリアルズインフォマティクスを用いた粒子構造体材料設計手法の開発,” 第 8 回福島地区 CE セミナー, P-2, 日本大学 (2017.12)
- ⑩ 高根慧, 鈴木健太, 山木雄大, 松田圭悟; “プロピレン/プロパン 2 成分系分離を対象としたヒートポンプ型蒸留-膜ハイブリッドプロセスの開発,” 第 8 回福島地区 CE セミナー, P-3, 日本大学 (2017.12)
- ⑪ 高根慧, 鈴木健太, 山木雄大, 松田圭悟; “蒸留-膜ハイブリッドプロセスの経済性評価,” 化学工学会第 49 回秋季大会, AE116, 名古屋大学 (2017.9)
- ⑫ 大谷雅輝, 松田圭悟; “マルチセンサを用いた蒸留塔内流動状態計測システムの開発,” 分離技術会年会 2017, S2-P2, 明治大学 (2017.5)
- ⑬ 高根慧, 鈴木健太, 山木雄大, 松田圭悟; “理想系混合物の分離を対象とした蒸留-膜ハイブリッドプロセスの分離性能に関する検討,” 分離技術会年会 2017, S2-P4, 明治大学 (2017.5)
- ⑭ 高橋理沙, 松田圭悟; “触媒担体を指向したフラクタル多孔質 TiO₂ の合成とその微細構造解析,” 化学工学会第 48 回秋季大会講演要旨集, LP211, 徳島大学 (2016.9)
- ⑮ 鈴木健太, 山木雄大, 松田圭悟; “C3 splitter を対象とした蒸留-膜ハイブリッドプロセスの操作・設計条件に関する検討,” 化学工学会第 48 回秋季大会講演要旨集, IP205, 徳島大学 (2016.9)

[学会発表] (計 15 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://matsuda.yz.yamagata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。