◆◆◆ 技術論文 ◆◆◆

IoT を指向したシングルボードコンピュータの
食品成分分析およびセンシングへの応用

小 林 敬

京都大学大学院農学研究科食品生物科学専攻

Application of IoT to the Analysis of Food Constituents
and Sensing Using a Single-Board Computer

Takashi KOBAYASHI

*Division of Food Science and Biotechnology, Graduate School of Agriculture, Kyoto University
Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

Analog output from the HPLC detector was digitized using a single-board computer (SBC), and the processed data were distributed through a local area network by using the SBC as a web server. Results for the HPLC analysis of coconut oil was recorded on a client computer (PC). The output from two SBCs could be processed simultaneously in real time using a single PC. This system was also applied to the recording of temperature and relative humidity at a remote location. Data were acquired through the internet using a slower connection. Temperature and humidity could be recorded without their loss for three months by setting the acquisition interval longer.

Keywords: data acquisition system, Internet of Things, real-time monitoring, single-board computer

1. 緒 言

近年、シングルボードコンピュータ (SBC) が安価に販売されるようになってきた。これらの中にはかつてのパーソナルコンピュータの性能を上回るパフォーマンスを有するものもある。そして、低電力、省スペース、可搬性などの特長を生かして、小型の各種機器に組み込み、従来は不可能であったデータ収集や機器の制御などを安価かつ容易に実現しうるポテンシャルを有する [1-3]。

近年、家庭用電化製品 (家電) を初めとした各種工業製品において、インターネット上で操作できる機能が盛んに実装されるようになってきた。これらは一般に「もののインターネット」 (Internet of Things, IoT) とよばれ、各種機器をネットワークでつないで連携させ、所期の機能を実現する。IoT は家電からスマートハウス、社会基盤に至るまで、種々の機能の実装に必須のものとなりつつある [4-7]。

一方、産業分野では、機器の更新間隔が長く、その

更新にも多大なコストが必要となる。結果として導入時期が古い機器は、古い規格のままで使用されている例が多い。分析機器に目を向けると、パーソナルコンピュータによる低速なシリアル通信規格 (RS-232C) など、レガシー規格を用いた機器制御が、現在も広く見受けられる。

本論文では主たる分析機器の対象として、食品成分の分析用途に広く用いられている高速液体クロマトグラフィー (HPLC) におけるデータ取得と処理を取り上げる。HPLC についても、一部の機器については、ネットワークを介したデータ収集ならびに制御が行われるようになってきた。しかし、これらのシステムは、専用のパーソナルコンピュータ (PC) 一式を必要とし、高価でもある。そして、多くの機器については、依然としてスタンドアロンでの制御が大勢を占めている。近年、安価なデータロガーを用いた HPLC 用データ処理システムも各種市販されるようになってきたが、それらは USB 経由でのデータ取得が主体である。また、安価な Web サーバを内蔵したデータロガーも市販されているが、これらの機器は汎用的用途に開発されており、HPLC 分析・処理には必ずしも適していない。これらの製品にも専用の PC を必要とするものもあり、システムとしてやや大がかりな場合がある。

(受付 2019 年 7 月 17 日, 受理 2019 年 8 月 31 日)

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

Fax: 075-753-6285; E-mail: tkoba@kais.kyoto-u.ac.jp

本論文では、HPLC のデータ収集システムにおいて、安価に構築でき、ローカルエリアネットワーク (LAN) またはインターネット経由でのデータ取得が可能な機器を構築した。ここでは、HPLC のアナログ出力データを SBC でデジタル処理し、LAN を介してクライアント PC で収集するシステムとした。これにより、システムの軽量化を図り、PC 側での処理を軽減することで、オフィス用 PC でのデータ処理を試みた。一方、本システムの汎用的データロガーとしての可能性を検討するため、インターネット上で温湿度を長期間にわたり記録するシステムも試作した。

2. 方 法

2.1 HPLC 構成

HPLC 機器には、LC-20AD HPLC ポンプ (島津製作所、京都) および SPD-20A 紫外可視吸光検出器 (島津) を用いた。カラムには Cosmosil 5C18-AR-II カラム (3×

150 mm, ナカライテスク, 京都) を用い、移動相としてメタノールを 0.4 mL/min で送液した。分析対象物質はココナツ油 (富士フイルム和光純薬, 大阪) とし、測定波長を 220 nm に設定して各トリグリセリド種を検出した。

2.2 HPLC 出力のネットワーク配信機器

HPLC の検出器からの出力はアナログ信号の 1 つである電圧である。この出力をデジタル化し、ネットワークで配信するために、Fig. 1A に示す構成の機器 (サーバ) を 2 台製作した。電圧のデジタル化は AD コンバータ IC により行い、その制御には代表的な SBC である Raspberry Pi Zero W (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK) を用いた。Raspberry Pi 上では、Linux ディストリビューションの 1 種である Raspbian Jessie を OS として用いた。

検出器からの出力は正または負の電圧であることから、それに対応できる AD コンバータを使用した

Fig. 1 Schematic diagram for the data acquisition system of (A) HPLC analog output and (B) output from the temperature-humidity sensor using a single-board computer.

(MAX186, 12 bit 逐次比較型, 8 チャンネル, Maxim Integrated, San Jose, CA, USA). AD コンバータと Raspberry Pi の間の通信は SPI (Serial Peripheral Interface) 規格に準じたシリアル通信により行い, 電圧をテキストデータに変換するプログラムを作成した [8]. 変換プログラムは C 言語で作成し, GPIO (汎用入出力, General-Purpose Input/Output) のライブラリである Wiring Pi を併用した [i]. 本プログラムにより, AD 変換されたデータをテキストファイルの形で Raspberry Pi 上の RAM ディスクに保存した. この操作は, クライアントからの要求の有無にかかわらず, 約 20 ms ごとに実施した.

次いで, それを Web サーバ (以下, サーバ) によりネットワークで配信できるようにした. Web サーバソフトウェアには `lighttpd` と `FastCGI` を使用し, HTTP プロトコルの GET メソッドにより RAM ディスク上のテキストファイルの内容を LAN を通じて配信する形とした. 本検討においては, 1 回のリクエストに対して 1 回分の変換データを送信した. データ配信の際のフォーマットおよび送信例を以下に示す.

```
year month day hour minute second millisecond ch1
ch2 ch3 ch4 ch5 ch6 ch7 ch8 trigger
2019 04 26 13 36 56 417 488000 80000 -1000 -1000 4000
2000 0 0 0 (送信例)
```

ここで, `chn` はチャンネル n の変換結果を μV 単位で示した数値である. なお, MAX186 での変換結果は 1 mV 単位であり, その範囲は $-2048 \sim 4095$ mV (バイポーラまたはユニポーラモード) であるため, 変換結果の 1000 倍の数値をテキストとした. 本検討においては, アナログデータは UV 検出器の出力のみであるため, チャンネル 1 のみを記録の対象とし, その他のチャンネルについては記録しなかった. また, `trigger` は HPLC インジェクタからのオートスタート信号の入力 “O” (open) または “S” (short) として利用した. 全く同じ構成の配信用サーバを 2 台製作し, それぞれから配信されたデータを 1 台のクライアントコンピュータ (PC) から読み込むことにより, データを記録した.

なお, サーバにおける AD 変換のプログラムは OS の起動時に自動的に起動させ, 常時アナログ電圧を測定し, RAM ディスク上にテキストファイルとして書き出す形とし, 任意の時点でのデータ取得要求に応えられるようにした. そして, クライアントからの要求に対して, 要求時点におけるアナログ電圧を返すようにした.

2.3 PC 側のクロマトグラム記録ソフトウェアの作成

Fig. 1A のサーバから配信されたデータを PC 上でクロマトグラムとして記録・可視化し, ピーク面積の計算などのデータ処理を行うソフトウェア (以下, クロ

マトグラム処理ソフト) を作成した. 本ソフトウェアは Windows 上で動作するものとし, C++ Builder 10.3 (Embarcadero Technologies, Austin, TX, USA) を用いて開発した. ソフトウェアの実装に当たっては, サーバに 20~200 ms ごとにアクセスし, HTTP の GET メソッドによりアクセス時点におけるアナログ電圧を取得し, クロマトグラムとして表示するようにした. そして, クロマトグラムにおける保持時間並びにピーク面積をマニュアル積分により計算できる仕様とした.

2.4 温湿度記録機器

試作した機器およびクロマトグラム処理ソフトの, 汎用的なデータロガーとしての可用性を検討した. ここでは, サーバの設計を変更した上で, 遠隔地 (兵庫県内) の農業用倉庫における温湿度の変化を, インターネットを通じて京都府内に計測した (Fig. 1B). なお, インターネット回線には, LTE の SIM カードを用いた最高 128 kbps の低速ワイヤレス回線を利用した.

温湿度センサと Raspberry Pi を接続し, 温度および湿度をデジタル化した (Fig. 1B). 温湿度センサにはデジタルデータの出力可能な DHT11 (Aosong Electronics, 広州, 中国) を用いた [9]. HPLC 用のサーバに準じて, テキストデータを Web サーバからインターネットを通じて配信するようにした. テキストデータのフォーマットは 「year month day hour minute second millisecond temperature humidity 0 0 0 0 0 0 O」とし, クロマトグラム処理ソフトのチャンネル 1 (温度) および 2 (湿度) のみを使用する形の出力とした. これにより, クロマトグラム処理ソフトの改変を回避し, 無改造で使用した. そして, 2018 年 9 月 1 日から 3 ヶ月間にわたり温湿度を記録した. なお, 3~4 日おきに記録を一時停止し, データを保存した.

3. 結 果

3.1 サーバによる変換結果の配信と HPLC クロマトグラムの記録

2 台の SBC により電圧をデジタル化したのち, テキスト化し, Web サーバを通じて LAN 上で配信できるようにした (Fig. 1A). ネットワークが低速の場合, 高頻度でデータ通信を行うと, 本来取得できるデータを取り込めないことがある (取りこぼし). HPLC 分析では取り込み間隔 (サンプリングレート) は長く, 数回 /s でデータを取り込めば十分と考えられた. そこで取り込み間隔を 200 ms に設定し, データの取得を試みた. その結果, 取りこぼしは認められず, ネットワーク経由でのデータ取得が可能であることが示された. そして, HPLC によりココナッツ油の組成を分析し, クロ

マトグラム処理ソフトにより出力を記録したところ、正常なクロマトグラムを表示でき、各トリグリセリドのピーク面積の測定も実施できた (Fig. 2)。

超高速 LC 用カラムを用いる場合には、20 Hz 程度のサンプリングレートが必要となる。そこで、データの取り込み間隔を 50 ms に設定してクロマトグラムを記録したが、不具合は生じず、最小間隔の 20 ms に設定しても取りこぼしは生じなかった。このことから、一般的なローカルネットワーク環境では、HPLC 分析において問題は起こりにくいと考えられる。一方、HPLC 以外の用途に応用する場合で、大幅に取り込み間隔を短くする必要がある場合 (オシロスコープなど) には、データの送受信方式を変更するなど、取りこぼし対策を施す必要がある。

本検討は HPLC を用いて実施した。そして、実験室における汎用的分析機器のうち、ガスクロマトグラフィーや pH メータなど、データ取り込み間隔が数十 ms 以上である機器からのアナログデータの出力については、同様の手順でリアルタイムに取り込むことが可能と考えられる。

なお、本検討において、SBC の CPU 負荷が高くなる場合があった (約 20%)。高負荷は、シリアル通信における待ち時間 (ウェイト) が原因であると考えられる。通信を行う際には、SBC と AD コンバータ IC 間のやりとりのタイミングを合わせるために、一定時間のウェイトが必要となる。WiringPi ライブラリにおけるウェイトは、空ループのプログラムを用いて実装されている [ii]。そのため、SBC の CPU 負荷が高かったと考えられる。本来であれば、ループによるウェイトの確保は避けるべきである。しかし、ウェイトが 1 μ s のオーダーであり、ms オーダーの遅延もあり得る割り込みを

用いる方法では対処は困難と考えられる。また、SBC はデータ取得と配信に特化しているため、HPLC 分析に用いる限り、実質的な問題は起こりにくい。しかし、機器の制御など、将来的な機能拡張を考えると低負荷であることが望ましい。そこで、より低負荷を求めるための対処法として、ワンチップマイコンを用いる方法が考えられる。ワンチップマイコンには μ s オーダーの時間の厳密さが必要な AD 変換を任せ、SBC はその変換結果をテキストファイルとし、サーバから配信するのみとする手法である。

3.2 遠隔地からの温湿度データの受信と記録

前節の例では、HPLC におけるクロマトグラムの出力を記録できた。データをサーバから取得する際のデータフォーマットは、日付および測定結果をテキストで並べた単純なものであり、汎用的な出力形式である。そのため、本研究で試作した機器およびソフトウェアはクロマトグラムの記録以外にも容易に転用でき、インターネット経由の汎用的なデータロガーとしても利用できると考えられた。そこで、本機の応用の 1 つとして、遠隔地における農業用倉庫の温湿度変化を記録した。

インターネットを通じて温湿度の変化を 10 分ごとに取得し、クロマトグラム処理ソフトで記録した。その結果、遠隔地の温湿度変化を 3 ヶ月間にわたり連続して記録できた (Fig. 3)。そして、測定場所の湿度が 60 ~ 90 % と、比較的高いことが示唆された。この記録操作は 128 kbps の低速回線を通じて実施したが、データ取得間隔が長いこともあり、データを取りこぼすことはなかった。以上のことから、次の点が示唆された。

①本計測システムにおいて、センサを変更することで

Fig. 2 Illustration of the data recording software for the HPLC analog output. Coconut oil was used as the model compound for the HPLC analysis.

Fig. 3 Time courses for the temperature and relative humidity obtained through the internet. Solid curve represents relative humidity, and dashed curve does temperature.

種々のデータ取り込みに対応できる。②取り込み間隔を調整することで、低速なインターネット回線においても連続したデータ取り込みが可能である。③クロマトグラム処理ソフトのデータ取得機能の汎用的利用性が示された。

SBC側のCPU負荷を測定したところ、最高で0.7%程度であり、サーバの動作パフォーマンスへの影響はなかった。これは、データの取り込みが低速であること、温湿度センサとSBCの間の通信方式がHPLC測定の場合と異なるためであると考えられる。本検討例では、デジタルデータへの変換アルゴリズムがデータシートとして公開されている[9]。しかし、測定機器の中には、測定データのフォーマットが未公開、または極めて複雑な処理を施す必要がある場合もある。それらへの対応は今後の課題としたい。

4. 考 察

本論文で実装した手法では、観測データのデジタル化およびテキストへの変換はすべてサーバにて行うことができた。これらの操作は比較的長い時間を要し、かつ、 μ sオーダーでのウェイトが必要となるなど、時間経過に厳密に従うべき制約がある。この操作をPCで行うことも可能であるが、クロマトグラム記録用の専用PCを用意する必要があり、やや冗長な装備が必要になるとともに、当該PCを他の目的に使用できない制約がある。また、接続できるHPLCの台数が制限されることもある。本研究の方法では、これらの煩雑な操作

を安価なSBCに専念させることができた。そして、クライアントPCで行うのは、ネットワークを通じてテキストデータを取得し、加工して記録するのみであった。これにより、PCのクロマトグラム処理ソフトによるCPU使用率は概ね0.6%以下(Intel Core i7-4790, 3.60 GHz使用時)、メモリ使用量は約6 MBとなり、PCには余分な負荷がほとんどかからなかった。そして、Office系ソフトウェアなどを使用しながら、並行して2台の機器(サーバ)からのクロマトグラムを1台のPCで取りこぼしなく記録できた。また、1台のクライアントPCが接続できるサーバの台数には仕様上の制限はない(Fig. 1A)。これらの効果は、IoTの活用によるSBCとPCの役割の分離(データ取得のためのサーバとデータ記録のためのクライアント)によって得られたと考えられる。

リアルタイムモニタリングを必要とする場面では、この仕様が効果を発揮する。HPLCの機器類を遠隔地に設置してデータを取得する可能性は低いため、実際の運用はローカルなネットワーク内での使用が主になるであろう。一方、農業用倉庫での遠隔モニタリングの例は、実際に必要となる場面が想定される。例えば、食品の保存環境などのリアルタイムのモニタリングを通じて、食品の品質管理に応用できる可能性がある。このような場合には、同時に多数箇所での測定がニーズとして上がるであろう。その場合にも、本検討に用いたシステムは、サーバの台数に制限がなく、かつ、低価格であるため、トータルのコスト削減に大きく寄与すると考えられる。

一方、課題もある。サーバから送信するテキストデータは日付および電圧に多少の情報を付与した短いもの(数十バイト)である。一方、HTTP プロトコルでは、ヘッダサイズが大きいなどの理由により、余分なデータ(オーバーヘッド)が相対的に多くなる。その結果、やりとりするデータ量が増加する。そこで、MQTT などオーバーヘッドの少ない軽量プロトコルの使用が考え得る[10-12]。また、温湿度の記録など、高度なタイミングを要さない場合には、サーバ側でデータを蓄積し、まとめてクライアントに転送することも一案である。これにより、オーバーヘッドは相対的に小さくなり、取りこぼしやネットワーク切断などのトラブルにも強くなる。本研究においては、クロマトグラム処理ソフトの都合でこの方式は実装しなかったが、データの種類や取り扱い方法を検討していく上で、今後の課題としたい。

IoT にセキュリティ対策は欠かせない[13,14]。しかし、現時点では情報が暗号化されないままネットワーク上を流通するため、機器の制御機能など、安全性に関わる実装はしなかった。また、運用はローカルネットワーク上に限定することが望ましい状態でもある。本格運用をめざして、セキュリティ対策を施し、弱点を克服することで、今後の機能拡張を図りたい。

5. 結 論

シングルボードコンピュータを用いてアナログ信号をデジタル化し、Web サーバにより送信することで、ネットワークを通じて PC にクロマトグラムを記録することができた。また、1 台のクライアント PC から複数台のサーバにアクセスすることができ、同時にクロマトグラムを取得できた。さらに、クロマトグラム処理ソフトを汎用ロガーとして利用し、遠隔地における温湿度データをインターネット経由で連続的に取得し、記録できた。これらの結果から、本手法によりアナログ信号を汎用的にネットワークを通じて取得し、記録できる IoT ベースのシステムが構築できた。

謝 辞

本研究の一部(ココナッツ油の分析)は、JST, COI, JPMJCE1307 の支援を受けて実施した。

References

- 1) M. Ambrož; Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human powered vehicles. *Measurement*, **100**, 7-18 (2017).
- 2) S. Solak, E. D. Bolat, A. Tuncer, M. Yildirim; A low cost single board computer based mobile robot motion planning system for indoor environments. *Intl. J. Intelligent Syst. Appl. Eng.*, **4**, 95-102 (2016).
- 3) A. Gómez, D. Cuiñas, P. Catalá, L. Xin, W. Li, S. Conway, D. Lack; Use of single board computers as smart sensors in the manufacturing industry. *Proc. Eng.*, **132**, 153-159 (2015).
- 4) I. Lee, K. Lee; The internet of things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Bus. Horiz.*, **58**, 431-440 (2015).
- 5) S. Madakam, R. Ramaswamy, S. Tripathi; Internet of things (IoT): A literature review. *J. Comput. Commun.*, **3**, 164-173 (2015).
- 6) J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami; Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Gener. Comput. Syst.*, **29**, 1645-1660 (2013).
- 7) V. Vujović, M. Maksimović; Raspberry Pi as a sensor web node for home automation. *Comput. Electr. Eng.*, **44**, 153-171 (2015).
- 8) Maxim Integrated; Max186/188 datasheet.
- 9) Y. Zhou, Q. Zhou, Q. Kong, W. Cai; Wireless temperature & humidity monitor and control system, *Proceedings of 2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, IEEE, 2246-2250 (2012).
- 10) T. Yokotani, Y. Sasaki; Comparison with HTTP and MQTT on required network resources for IoT. *Proceedings of 2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, IEEE, 1-6 (2016).
- 11) Y. Upadhyay, A. Borole, D. Dileepan, MQTT based secured home automation system. *Proceedings of 2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN)*, IEEE, 1-4 (2016).
- 12) N. Naik, Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. *Proceedings of 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, IEEE, 1-7 (2017).
- 13) Z. -K. Zhang, M. C. Y. Cho, C. -W. Wang, C. -W. Hsu, C. -K. Chen, S. Shieh, IoT security: Ongoing challenges and research opportunities. *Proceedings of 2014 IEEE 7th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications*. 230-234 (2014).
- 14) S. Babar, A. Stango, N. Prasad, J. Sen, R. Prasad, Proposed embedded security framework for internet of things (IoT), *Proceedings of 2011 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems*

Technology (Wireless VITAE), IEEE, 1-5 (2011).

URLs cited

- i) <http://wiringpi.com> (July 3, 2019).
- ii) <http://wiringpi.com/reference/timing> (July 3, 2019).

要 旨

シングルボードコンピュータを Web サーバとして利

用して, HPLC 機器からのアナログ出力をデジタル化し, ローカルエリアネットワークを通じて配信した. ココナッツ油の HPLC 分析結果について, クライアントコンピュータ (PC) で出力内容を記録し, グラフ化した. 2 台のサーバからの出力を, 1 台の PC を用いて同時に, リアルタイムに取りこぼしなく処理できた. このシステムを遠隔地における温湿度の記録にも適用した. 低速回線を用いたインターネットを通じてデータを取得したが, 取得間隔を長く設定することで, 3 ヶ月間にわたり取りこぼしなく温湿度を記録できた.