

モノのインターネットにおける異なる端末環境に対応可能な P2P 型センサデータストリーム配信システムの一実装

真子 広大¹ 石 芳正² 川上 朋也² 義久 智樹² 寺西 裕一^{3,2}

概要: 小さなデバイス, モノ, センサ等がネットワーク接続されるモノのインターネット (Internet of Things) では, 観測データが連続的に流れるセンサデータストリームを扱う必要がある. 我々の研究グループでは, 複数の配信先がそれぞれ異なる周期のセンサデータを要求する環境を想定し, P2P 技術により通信負荷を分散する LLF 手法を研究してきたが, この手法では配信先の端末能力を考慮せずに配信を行うため, 異なる端末環境が混在するモノのインターネット環境においては, 端末の稼働時間の減少や異常停止に繋がる恐れがある. そこで本稿では, LLF 手法で構築された配信ネットワークに端末の状況情報を通知することで, それぞれの端末の状況に即したセンサデータストリームを配信するシステムを構築する.

1 はじめに

近年, 小さなデバイス, モノ, センサなどがネットワーク接続されるモノのインターネット (Internet of Things) に注目が集まっている. モノのインターネットでは, ネットワーク接続されたセンサデバイスから得られるセンサデータを共有・活用するアプリケーションやアクチュエータデバイスが多数登場すると考えられている. そしてこれらのモノのインターネットに接続されたセンサからは, 多くの場合, 周期的にセンサデータが収集され, 収集される度にセンサデータの利用者に配信され, 利用者に応じた処理がなされることとなる. 例えば, ライブカメラなどでは, 1秒間に数枚から 60 枚程度の画像がカメラから送り出され, 利用者はそれらを受け取って視聴や解析処理をすることとなる. IoT 環境下においては, このセンサデータの利用者は家電やアクチュエータデバイスにまで広がることとなる. 例えば, 電動シャッターであれば, 既に設置されていた家庭用防犯カメラの画像を受け取り, シャッター周辺に人やペットなどの障害物の有無を確認しつつ安全な開閉を実現できる. また, 普及が進みつつあるルンバに代表される自走式掃除機であれば, 自身が持っているセンサ以外に外部

のセンサデータも活用することで, どこにもぶつかることなく効率的な経路で掃除をすることも可能となるだろう.

センサを活用したシステムやサービスを構築する場合, 1つのセンサから得られるセンサデータは複数の利用者で共有することにより, 例えば, ライブカメラの場合では, 視聴サービス, 天候確認サービス, 防犯カメラサービスといった複数のサービスを 1つのセンサを設置するだけで実現できる. また, センサデータストリームと呼ばれるセンサから周期的に送出される一連のセンサデータをそのセンサデータを必要としている利用者に逐次配信することによりリアルタイム性が求められるサービスが実現できることから, センサデータストリームを複数の利用者に配信するセンサデータストリーム配信への注目が高まっている. データストリーム配信では, 複数の配信先にデータを送信する必要があることから, これまでビデオストリームの配信を中心として配信時に配信元に生じる通信負荷を分散させる様々な手法が研究されている [1-6]. これらの研究では, 複数のノードに同じストリームを配信する場合に, ストリームを受信したノードが他のノードに再配信することで, ストリームの配信元に集中していた通信負荷を分散させている. これらの手法では, 全ての配信先に同内容のデータストリームを配信することを前提としているが, センサデータストリーム配信においては例えば, 次の例のように, 同じセンサが収集したセンサデータに対して周期の異なるセンサデータストリームが要求される場合が考えられる.

- 室内に置かれた気圧センサを, ドアの開閉による入退室の検出・記録に用いる場合は毎秒 5 個, 気圧の変化

¹ 大阪大学工学部電子情報工学科
Division of Electrical, Electronic and Information Engineering,
School of Engineering, Osaka University,
Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University,
Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

³ 独立行政法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology,
Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

を用いたお天気メーターには 10 分間隔で配信する。

- ライブカメラの映像を、映像を直接表示するモニタリングサービスには 30 fps で配信し、画像解析により自動車交通量監視サービスには 10 fps で配信する。

これらのように、それぞれの配信先で異なる収集周期が要求される場合でも、最も短い収集周期によるセンサデータストリームをすべての端末に配信し、各端末で必要とする周期のデータのみを抽出することで所望の収集周期を再現できる。この場合では、既存の配信手法を適用できるが、不要なデータを受信することとなる配信先やそのデータを配信するネットワーク経路に不必要な通信負荷がかかることとなる。これは IoT 環境下においてはデバイスの過熱による機器寿命の短縮や、バッテリーを浪費することによる稼働時間の短縮、ひいてはメンテナンスコストの増大に繋がる。

我々の研究グループでは、配信先がそれぞれ異なる配信周期を要求する場合において、不必要なセンサデータの配信を避けつつ、配信元・配信先の送受信負荷を分散させるセンサデータストリーム配信経路を構築する手法として、LCF (Longest Cycle First ; 最長周期優先) 法 [7] と LLF (Lowest Load First ; 最小負荷優先) 法 [8], LLF-H (Lowest Load First considering Hops) 法 [9,10] を提案してきている。

しかしながら、これらの手法では配信網に参加している各ノード間での通信負荷の均一化を主眼としており、最終的にセンサデータを受け取る端末やデバイスの能力や、途中経路となるネットワークの環境の差異は考慮していない。そのため、端末やデバイスの要求通りに配信を行った場合、端末の処理能力を超えた過剰なデータ配信が行われ、データの取りこぼしが生じたり、バッテリー残量が少ないにも関わらず高負荷を与えて端末の稼働時間を縮めてしまう可能性がある。そこで本研究では、センサデータストリームの配信には LLF 手法で構築された配信ネットワークを利用し、センサデータストリームの配信を受ける端末の状況情報を通知することで、それぞれの端末に即したセンサデータストリームを配信可能とする手法を提案し、その一実装について述べる。

2 IoT 環境におけるセンサデータストリーム配信

IoT 環境においては、センサデバイスやアクチュエータデバイス、ユーザ端末といった様々なデバイスが、ネットワークを介して相互接続される。これらのデバイスは、これまでインターネットに接続されてきた機器と比較して能力の限られた端末が多く、その処理能力も各デバイスが行う処理により大きく異なることとなる。また、これらのデバイスの多くは、設置の容易さから WiFi や IEEE 802.15.4 による無線による接続が主体となると考えられる。このた

め、これらのデバイスをセンサデータストリーム配信ネットワークに直接組み込んだ場合、処理能力や通信帯域に制約があることから、配信ネットワークのボトルネックとなる可能性が高い。したがって IoT 環境において、センサデータの配信を必要とするアクチュエータデバイスなどは、配信ネットワークの 1 ノードとして参加するのではなく、配信ネットワークに参加しているノードを介してセンサデータを受け取る形態が望ましい。

通常、配信ネットワークにはそれぞれ収集周期が異なるセンサデータストリームを扱うノードが属しているが、アクチュエータデバイスやユーザ端末が配信ネットワークからセンサデータストリームを受信する場合、それらのデバイスは配信ネットワーク上のノードの 1 台を選び接続することとなる。その際、デバイスが必要とするセンサデータの収集周期やデバイスの処理能力、電力状態、通信状態に応じたノードを選択しなければならないが、接続先の候補となる全ノードの情報をデバイス側に事前に持たせておくことは、配信ネットワークの構成変更に必要なコストが必要となるため適切ではない。同時に、構成変更時に要するコストにより配信ネットワークの柔軟な運用を妨げることもなる。これに対して、Well-known な中継サーバを用意し、デバイスからの接続を適切なノードに中継する手法も考えられるが、この手法では中継サーバが配信ネットワークからデバイスへの通信を全て中継することから、中継サーバに大きな通信負荷が加わることとなる。そこで、Well-known なサーバが通信を中継するのではなく、デバイスからの問い合わせに応じて適切な配信ネットワーク上のノードの情報をデバイスに応答し、そのノード情報を元にデバイスが配信ネットワーク上のノードに直接接続するモデルを提案する。このモデルでは、サーバに加わる負荷はデバイスが配信ネットワークに接続する際の問い合わせのみであり、配信ネットワークに構成変更が生じた場合には、この紹介サーバ内の情報を更新するだけで構成変更に対応することができ、低コストな運用が実現できる。

3 センサデータストリーム配信手法

3.1 配信モデル

図 1 に、我々のグループが想定しているセンサデータストリーム配信のモデルを示す。図中 S は、センサが繋がったノードを示しており、配信元ノードと呼ぶ。配信元ノードに繋がれるセンサは、一定の周期で周囲の状況を観測し、その観測値、センサデータを生成する。配信元ノードは、センサ 1 個に対して 1 台が対応しており、センサが周期的に生成するセンサデータを受け取る。 D_x は、センサデータの受信端末を示しており、配信先ノードと呼ぶ。配信先ノードは相互にセンサデータを受け渡すことができる。これらのノード間は、オーバーレイネットワークにより接続さ

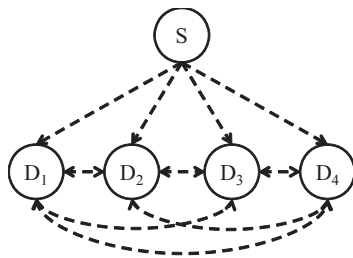


図1 想定モデル
Fig. 1 Assumed model.

表1 収集するセンサデータの例
Table 1 An example of the sensor data collection.

Time	0	1	2	3	4	5	6	7	...
D_1 (Cycle=1)	○	○	○	○	○	○	○	○	...
D_2 (Cycle=2)	○		○		○		○		...
D_3 (Cycle=2)	○		○		○		○		...
D_4 (Cycle=3)	○			○			○		...

れ、相互に通信可能かつオーバーレイネットワークの機能による探索可能な状態とする。

表1は、配信先ノード $D_1 \sim D_4$ が収集するセンサデータの収集周期 (Cycle) と、受信するセンサデータを○で示している。 D_1 は、収集周期が1であり、配信元ノードが収集した全てのセンサデータを要求している。 D_2 と D_3 は、収集周期が2であり、時刻2毎のセンサデータを要求している。同様に D_3 は、時刻3毎のセンサデータを要求する。

収集周期は各配信先ノードが保持しており、センサデータストリームの配信を開始する前に配信先ノードが配信元ノードに自身の収集周期を通知する、あるいは配信元ノードが自身のセンサデータを必要としている配信先ノードから収集周期を収集する。これらは、ノード間を接続しているオーバーレイネットワークを介して対象のノードを探索することにより実現する。各配信先ノードの収集周期を取得した配信元ノードは、それら配信先ノードの収集周期を元に配信経路を決定し、各配信先ノードに通知するとともに、センサデータストリームの配信を始める。これにより、配信先ノードは希望する周期のセンサデータを配信元ノードまたは他の配信先ノードから受け取る。

3.2 LLF 法

LLF (Lowest Load First; 最小負荷優先) 法は、各配信先ノードが要求する収集周期から各ノードに生じる通信負荷を事前に推定し、ある時刻のセンサデータを受け取る際には、同時刻のセンサデータを受信しているノードの中から負荷の推定値が最小となるノードを選択し、そのノードからセンサデータを受け取ることで通信負荷の均等化を図る手法である。

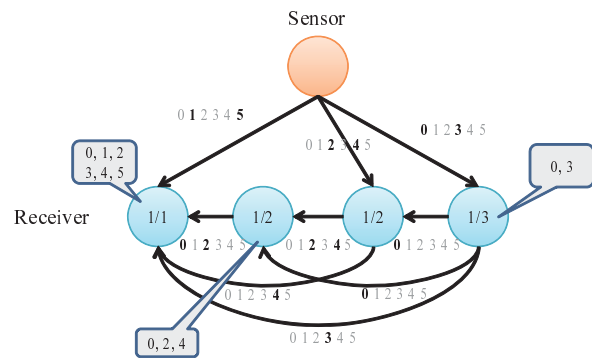


図2 LLF 法による配信経路
Fig. 2 The delivery route by the LLF method.

表1の場合、配信先ノードの収集周期の最小公倍数の6が全体の周期となる。この全体の周期内の各周期での配信経路を求め、全体の周期6で繰り返し各配信経路を用いることとなる。各ノードに生じる負荷を、センサデータの送受信数とした場合では、まず、各ノードが受信しなければならないセンサデータにより生じる負荷を求めると、6, 3, 3, 2となる。各周期において、最長周期の配信先ノードは、配信元ノードからセンサデータを受け取り、2番目に長い周期の配信先ノードに再配信するため、次にそれらによる送信負荷を求める。例えば、周期0では D_4 が配信元ノードからセンサデータを受け取り、 D_3 に再配信する。これらの最長周期の配信先ノードに生じる送信負荷を加算すると、各配信先ノードの負荷は6, 3, 5, 4となる。最後に、各周期においてセンサデータの取得元が決定していない配信先ノードの取得元を決定してゆく。例えば、ここまでの手順で、周期0では D_4 は配信元ノードから受け取る、 D_3 は D_4 から受け取るに決定している。 D_2 は、この時点で経路が決定している負荷が最小のノードを選択し、周期0のセンサデータを受け取る。これは D_4 となる。この再配信による送信負荷を加算すると、各配信先ノードの負荷は6, 3, 5, 5となる。同様に D_1 は D_2 から受け取り、各配信先ノードの負荷は6, 4, 5, 5となり、周期0の経路が決定される。以降、残りの周期2, 4についても負荷が最小のノードを選択することで経路を決定することで、表1の場合におけるLLF法による配信経路は図2の通りとなる。

4 ストリーム配信システムの構成

本研究で実装したストリーム配信システムの構成を図3に示す。本実装では、センサデータとして画像データを対象とし、従来より用いているセンサデータストリーム配信システムに、ディスパッチサーバと端末側のストリーム再生アプリケーションを加えた構成としている。ストリーム配信システムで扱う画像は、ネットワークカメラで一般的に利用されているMotion JPEGを用いる。ディスパッチサーバは、端末からの要求に応じて、その端末が接続する

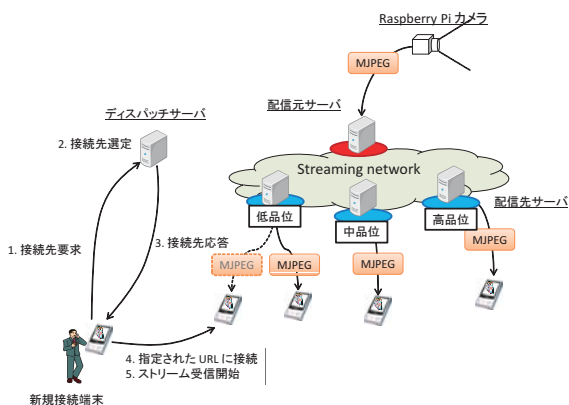


図3 ストリーム配信システムの構成
Fig. 3 Structure of the stream delivery system

べき配信先サーバのストリーム配信 URL を応答する。端末上で動作させるストリーム再生アプリケーションは、端末の状態を取得する機能を持たせた Motion JPEG プレーヤーアプリケーションであり、ストリーム再生を行う際にはディスパッチサーバよりストリーム配信 URL を受け取り、その URL より Motion JPEG over HTTP 形式の映像ストリームを取得して端末上で再生する。ストリーム再生アプリケーションは Android 端末用と iPhone/iPad 用をそれぞれ実装した。

ユーザがストリーム再生アプリケーションを用いてストリーム配信を開始する際には、まず端末の状態をディスパッチサーバに通知する(図中1)。本実装では、端末の処理能力の上限を示す指標として端末の最高 CPU クロック周波数 (MHz)、端末の現状態を示す指標としてバッテリーの残容量 (0 ~ 100) をそれぞれ端末からディスパッチサーバに通知する。ディスパッチサーバは、ストリーム再生アプリケーションからのストリーム配信 URL の要求に対応するため、Web API を実装している。ストリーム再生アプリケーションは、Web API の URL に対して、端末の最高 CPU クロック周波数 `maxclock` とバッテリー残容量 `batt` を与え、例えば、端末の最高 CPU クロック周波数が 1 GHz、バッテリー残容量が 53% の場合、URL `http://(APIEndpoint)?batt=53&maxclock=1000` に対して GET 要求を行う。ディスパッチサーバは、この要求で与えられた端末の性能・状態から、その端末に適したストリームを配信している配信先サーバを選択し、その配信先サーバのストリーム配信 URL を応答する(図中2,3)。この時、Web API の応答は `{"url": "http://mid.1.example.com/videofeed"}` という選択された配信先サーバのストリーム配信 URL を含む JSON 文字列で返される。

ディスパッチサーバよりストリーム配信 URL を受け取ったストリーム再生アプリケーションは、その URL に接続し、サーバより送られてくる Motion JPEG ストリームを再生する(図中4,5)。

センサデータストリーム配信システムは、1つの配信元サーバと異なる配信周期を持つ配信先サーバから構成されており、ネットワークカメラ等より得られる Motion JPEG ストリームを構成している個々の JPEG フレームを1つのセンサデータとして扱い配信を行う。配信元サーバは、カメラに接続し HTTP を介してカメラより Motion JPEG ストリームを取得した後に、個々の JPEG フレームに切り分けて配信先ノードの周期に応じた配信を行う。配信先サーバは、配信元サーバや他の配信先サーバから受け取った個別の映像フレームから Motion JPEG を再構成し、内部に持っている HTTP サーバを介して Motion JPEG over HTTP としてプレイヤーなどにストリーム配信を行う。また、配信先サーバは他の配信先サーバが必要としている周期時刻の JPEG フレームの中継動作も行う。これらの配信先サーバは、それぞれが扱う配信周期に応じて高品位サーバ、中品位サーバ、低品位サーバとして動作する。例えば、高品位サーバは全ての JPEG フレームを含むストリーム配信を行い、中品位サーバではフレーム数を $\frac{1}{3}$ としたストリーム、低品位サーバでは $\frac{1}{15}$ としたストリームを扱う。

ディスパッチサーバには、これらの配信先サーバのストリーム配信 URL と、その配信品位を予め与えておき、ストリーム再生アプリケーションからの要求に応じて適した配信先サーバのストリーム配信 URL を応答することとなる。

5 まとめ

本稿では、我々のグループが研究開発してきた LLF 手法を元にして、モノのインターネットにおける異なる端末環境に対応可能な P2P 型センサデータストリーム配信システムの一実装を示した。今後は、実端末を用いてバッテリーの消費状況や通信負荷などの評価を進めていく予定である。

謝辞 本研究の一部は、NICT・大阪大学共同研究「大規模分散コンピューティングのための高機能ネットワークプラットフォーム技術の研究開発」、科学研究費補助金(若手研究 A)「次世代オンデマンド型視聴形態のためのコンテンツ配信方式」(課題番号: 23680007) および(挑戦的萌芽研究)「移動型カメラを用いた任意地点ライブビューの実現」(課題番号: 26540045) による成果である。

参考文献

- [1] Magharei, N. and Rejaie, R.: PRIME: peer-to-peer receiver-driven mesh-based streaming, *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, Vol. 17, No. 4, pp. 1052-1065 (2009).
- [2] Yu, L., Liao, X., Jin, H. and Jiang, W.: Integrated buffering schemes for P2P VoD services, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, Vol. 4, No. 1, pp. 63-74 (2011).
- [3] 坂下 卓, 義久智樹, 原 隆浩, 西尾章治郎: ストリーミング環境における分割データの重要度を考慮した視聴中止端末数削減手法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 52, No. 11, pp. 3008-3017 (2011).
- [4] Jin, X., Yiu, W.-P. K., Chan, S.-H. G. and Wang, Y.: On Maximizing Tree Bandwidth for Topology-Aware Peer-to-

- Peer Streaming, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 9, No. 8, pp. 1580–1592 (2007).
- [5] Silawarawet, K. and Nupairoj, N.: Locality-Aware Clustering Application Level Multicast for Live Streaming Services on the Internet, *Journal of Information Science and Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 319–336 (2011).
- [6] Le, T. A. and Nguyen, H.: Application-Aware Cost Function and Its Performance Evaluation over Scalable Video Conferencing Services on Heterogeneous Networks, *Proceedings of the 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012)*, pp. 2185–2190 (2012).
- [7] Kawakami, T., Ishi, Y., Yoshihisa, T. and Teranishi, Y.: A Delivery Method considering Communication Loads for Sensor Data Stream with Different Collection Cycles, *Proceedings of The 28th ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2013)*, pp. 611–618 (2013).
- [8] Kawakami, T., Ishi, Y., Yoshihisa, T. and Teranishi, Y.: A P2P Delivery Method for Sensor Data Stream Based on Load Estimation from Collection Cycles, *Proceedings of The 4th IEEE International Workshop on Enablers for Ubiquitous Computing and Smart Services (EUCASS 2013) in conjunction with The 37th Annual International Computer Software & Applications Conference (COMPSAC 2013)*, pp. 289–294 (2013).
- [9] 川上朋也, 石 芳正, 義久智樹, 寺西裕一: P2P 型センサーデータストリーム配信システムにおけるホップ数を考慮した負荷均等化手法, 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2013-39), Vol. 113, No. 140, pp. 19–24 (2013).
- [10] 石 芳正, 川上朋也, 義久智樹, 寺西裕一: ホップ数を考慮した P2P 型センサーデータストリーム配信システムの PIAX テストベッドを用いた評価, 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2014) 論文集, pp. 1421–1427 (2014).