

ホップ数を考慮した P2P 型センサデータストリーム 配信システムの PIAX テストベッドを用いた評価

石 芳正¹ 川上 朋也² 義久 智樹¹ 寺西 裕一^{3,1}

概要：我々の研究グループでは、センサの観測データが連続的に流れるセンサデータストリームの配信に際し、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 P2P 型センサデータストリーム配信システムを研究してきた。従来、配信系全体の負荷の公平性のみに着目した LCF 法、LLF 法を提案してきたが、それらの手法では同一周期の配信先が多数存在する場合に配信時のホップ数が大きくなり、配信遅延が増大する問題があった。この問題に対し、昨年度に配信ホップ数に上限を設ける LLF-H 法を提案し、シミュレーション評価を行ってきた。本稿では、PIAX テストベッドを用いた実機環境での評価を行い、LLF-H 法に与える上限ホップ数に対する配信遅延・公平性の挙動を計測し、上限ホップ数を制限した場合であっても既存手法である LLF 法と比較して負荷の公平性を大きく損ねることなく配信遅延時間が抑制できることを確認した。

An Evaluation of a P2P Sensor Data Streaming System Considering the Number of Hops on the PIAX testbed

YOSHIMASA ISHI¹ TOMOYA KAWAKAMI² TOMOKI YOSHIHISA¹ YUICHI TERANISHI^{3,1}

1 はじめに

近年、センサデバイスの小型化・低廉化・高機能化に伴い、気象センサやネットワークカメラといった環境観測機器が様々な場面で導入されるようになった。多くの場合、これらのセンサは周期的に観測値を収集しており、たとえば、ネットワークカメラでは、1 秒間に 30 枚から 60 枚の画像が収集されている。これらのセンサから逐次送られる一連のセンサデータは、一般にセンサデータストリームと呼ばれ、これらの観測値を直接監視したり解析処理をすることでリアルタイム・準リアルタイムでの監視業務や環境モニタリングなどに利用されている。また、1 台のセンサから得られるセンサデータストリームを複数の利用者で共用することにより、気象状況や交通渋滞状況等に基づい

て情報推薦や警告通知を行なうサービス、地球温暖化や大気汚染などを監視する環境サービス、商店街等でユーザの行動を解析するマーケティングサービスなど、多岐にわたるサービスへの展開が期待できる。設置コストやメンテナンスコストを考えると、同一センサを複数の利用者で共有することになるため、センサ機器や観測範囲の重複を省き、効率のよい観測網を構築できる。

センサから出力されるセンサデータストリームをネットワークを介して複数の利用先に送り届けることはセンサデータストリーム配信と呼ばれており、これまでビデオストリームの配信を中心として配信時の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、あるデータストリームを複数の利用先に配信する場合には、データを受信した配信先がさらに他の配信先に再送信することで、データ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る手法が主となっており、全ての配信先に同一のデータストリームを配信することを想定している。しかしながら、たとえば街頭に設置されている屋外カメラが出力する映像ストリームを用いて動体検出を行う場合、自

¹ 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

² 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University,
Kobe, Hyogo 657-8501, 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

動車を検出対象とする場合にはその移動速度が速いことから検出処理に必要となるフレームの取得間隔は短くなる。その一方で、検出対象が人物の場合は車と比べて移動速度が遅いため、必要とするフレームの取得間隔は長くてもよくなる。このように同じセンサが収集したセンサデータであっても、その用途や配信先、状況に応じて収集周期の異なるセンサデータストリームの配信が必要となる場合も考えられる。これには、同一のセンサデータストリームを全ての配信先に配信しつつ、各配信先で不要なセンサデータを破棄する手法も考えられるが、端末によっては不必要なセンサデータまで配信することとなり、その端末には本来不必要な負荷が加わることとなる。

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、各配信先が必要としない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。なかでも LLF-H 法では、LCF 法と LLF 法で主眼とした各ノード間の通信負荷の均一化に加えて、配信時の最大ホップ長に制限を設けることで再配信にともなう配信遅延時間を抑制することも目的としている。しかしながら、上限のホップ数を極端に小さく設定した場合やセンサデータのサイズが大きい場合などに、再配信で生じる負荷が大きくなり逆に配信遅延が増加する場合が生じると考えられる。本研究では、LLF-H 法を用いた場合の配信遅延の変化について、情報通信研究機構により運用されている PIAX テストベッドを用いた評価結果を述べる。

2 センサデータストリーム配信手法

2.1 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、センサが繋がったサーバを示しており、センサから周期的に観測値を収集している。以下、このサーバを配信元ノードと呼ぶ。配信元ノードは、センサごとに存在し、センサと 1 対 1 で対応している。また、センサから取得する観測値はセンサデータと呼ぶ。 D_x は、センサデータの受信端末を示しており、 D_x 同士は相互にセンサデータを受け渡すことができる。以下、これら受信端末を配信先ノードと呼ぶ。これらの配信元ノードと配信先ノードは、オーバーレイネットワークにより接続され、相互に探索可能な状態とする。

表 1 は、配信先ノード $D_1 \sim D_6$ 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 \bigcirc で示している。 D_1 から D_3 は、収集周期が 1 であり、配信元

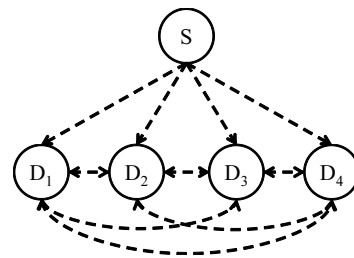


図 1 想定モデル

Fig. 1 Assumed model.

表 1 収集するセンサデータの例

Table 1 An example of sensor data collection.

Time	0	1	2	3	4	5	6	...
D_1 (Cycle=1)	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	...
D_2 (Cycle=1)	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	...
D_3 (Cycle=1)	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	...
D_4 (Cycle=3)	\bigcirc			\bigcirc			\bigcirc	...
D_5 (Cycle=3)	\bigcirc			\bigcirc			\bigcirc	...
D_6 (Cycle=3)	\bigcirc			\bigcirc			\bigcirc	...

ノードが収集した全てのセンサデータを受け取る。同様に D_4 から D_6 は、時刻 3 ごとにセンサデータを受け取る。

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。

2.2 通信負荷モデル

多くの場合、各ノードの通信負荷は送受信するセンサデータストリームにおける単位時間あたりのセンサデータの数に比例すると考えられる。ここで、ノード D_x がノード D_y に送信する単位時間あたりのセンサデータ数を $R(x, y)$ と表すと、ノード D_r が他のノードにセンサデータストリームを送信することによる単位時間あたり負荷、送信負荷 O_r は式 1 となる。なお、 D_0 は S を表すものとし、 β は送信処理の重み係数、 N は配信先ノードの数とする。

$$O_r = \beta \sum_{i=0}^N R(r, i) \quad (1)$$

同様に、ノード D_r が他のノードからセンサデータストリームを受信することによる単位時間あたり負荷、受信負

荷 I_r は式 2 となる． α は受信処理の重み係数を表す．

$$I_r = \alpha \sum_{i=0}^N R(i, r) \quad (2)$$

以上より， ノード D_r の単位時間あたり通信負荷 L_r は， 送信負荷 O_r と受信負荷 I_r の合計となる（式 3）．

$$L_r = O_r + I_r \quad (3)$$

2.3 基本的なアイデア

基本的な方針として， 配信先ノードが受信したセンサデータストリームに含まれるセンサデータのうち， 他の配信先ノードが要求する周期に合致するセンサデータをそれらの配信先ノードに再配信することにより通信負荷を分散する． 例えば， 表 1 では， 時刻 0 と時刻 6 のセンサデータは全ての配信先ノードが要求しており， ある配信先ノードが他の配信先ノードにセンサデータを再配信することで， サーバが直接配信することなくそれらのセンサデータを必要としている配信先ノードに配信できる． 同様に時刻 2 と時刻 4 のセンサデータについては収集周期 1 の配信先ノードと収集周期 2 の配信先ノード， 時刻 3 については収集周期 1 の配信先ノードと収集周期 3 の配信先ノードが相互に再配信が可能である． サーバから直接配信する場合， 通信負荷がサーバに集中するが， この例のように， センサデータを受信した配信先ノードが他の配信先ノードに再配信することで， 通信負荷の分散が期待できる．

ノード間の負荷分散の指標としては， 公平性の評価として一般的に用いられる Jain's fairness index を採用している（式 4）． 配信元ノードの負荷を L_0 ， 配信先ノードの負荷を L_i で示している． FI は $\frac{1}{N+1}$ から 1 の間の値をとり， 1 に近いほど公平な状態であると言える．

$$FI = \frac{\left(\sum_{r=0}^N L_r\right)^2}{(N+1) \cdot \sum_{r=0}^N L_r^2} \quad (4)$$

2.4 配信経路構築手法

ここでは， LLF 法と LLF-H 法の経路構築手順について述べる．

2.4.1 LLF 法

LLF（Lowest Load First；最小負荷優先）法は， 各ノードの収集周期から各ノードに加わる通信負荷を 2.2 節の負荷モデルにより推定し， 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を分散する．

表 1 の場合， 配信先ノードの収集周期の最小公倍数の 3

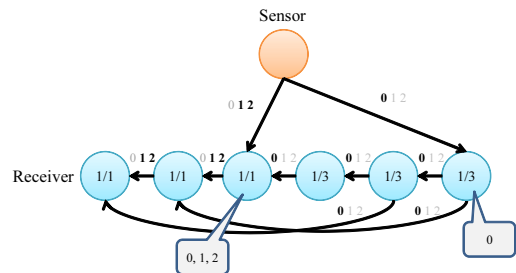


図 2 LLF 法による配信経路

Fig. 2 The delivery route in the LLF method.

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 3 で繰り返し各配信経路を用いることとなる． センサデータ 1 個あたりの送信負荷を 1， 受信負荷を 1 とする（ $\alpha = \beta = 1$ ）． まず， 各ノードが受信しなければならない周期のセンサデータによる受信負荷を求めると， 3, 3, 3, 1, 1, 1 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こととなるため， 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_6 が配信元ノードからセンサデータを受け取り， D_5 に再配信する． 周期 1 では D_3 が配信元ノードからセンサデータを受け取り， D_2 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 3, 3, 4, 1, 1, 2 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_6 は配信元ノードから受け取る， D_5 は D_6 から受け取る と決定している． D_4 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_5 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 3, 3, 4, 1, 2, 2 となる． 同様に D_3 は D_4 から受け取り， 各配信先ノードの負荷は 3, 3, 4, 2, 2, 2 となる． これを D_2 ， D_1 についても行い， 周期 0 の経路が決定される． 以降， 残りの周期 1, 5 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．

2.4.2 LLF-H 法

LLF 法では， 各ノードの負荷の均等化に主眼を置いており， あるセンサデータが配信元ノードから配信先ノードまで届く配信遅延については考慮されていない． このため， 配信先ノードの収集周期によっては配信先までのデータのホップ数が大きくなり， 配信遅延が累積する可能性がある． 特に， 同一の配信周期のノードが数多く存在する場合には， それらのノード間でデータをリレーするように配信経路を構築するため， 末端のノードまでのホップ数が増大し， 配信遅延時間が長くなる傾向がある [11]．

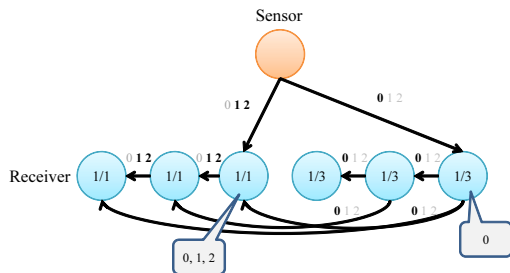


図 3 LLF-H 法による配信経路

Fig. 3 The delivery route in the LLF-H method.

LLF-H (Lowest Load First considering Hops) 法では、センサデータの再配信を許すホップ数に上限を設けることで、配信遅延の抑制を目指す。具体的には、LLF 法において負荷が最小のノードを選択する過程において、候補となる配信先ノードから再配信を受けた場合に事前に与えられたホップ数の上限を越えないか判定を行う。ホップ数の上限を越える場合は、次の候補で同じ判定を行い、条件を満たす配信先ノードが無い場合は各周期で最長の周期を持つノードから受け取る。

LLF-H 法による配信経路は、ホップ数の上限を 3、配信先の周期を表 1 とした場合、図 3 の通りとなる。LLF 法で構築した経路(図 2) と異なり、周期 0 時の D_4 から D_3 への配信経路がホップ数上限を越えるために消失し、変わって D_3 は D_6 から同センサデータを受け取るようになる。これをうけて、 D_1, D_2 への経路にも変化が生じている。

3 PIAX テストベッドを用いた評価

これまでに LCF 法、LLF 法を実装してきたセンサデータストリーム配信システム [12] に、新たに LLF-H 法による配信経路構築機能を追加実装し、情報通信研究機構が提供している PIAX テストベッドを用いて評価を行った。

3.1 PIAX テストベッドの概要

PIAX テストベッド*1は、PIAX エージェントを用いたシステムの動作検証や性能評価を容易に行うためのテストベッドとして NICT により整備・運営されているサービスであり、同機構の新世代ネットワーク技術の研究開発テストベッド JGN-X の一部として提供されている。PIAX テストベッドでは、国内 5 拠点に置かれた計 492 台*2の仮想マシン上に PIAX エージェントを用いたプログラムの実行基盤が用意されており、ユーザにはそれらの仮想マシンが複数台割り当てられる。ユーザは、ブラウザを用いて自身の PIAX エージェントプログラムをアップロードし、その評価を行うことができる。各仮想マシンは JGN-X L2 サービスを介して接続され、実験用ネットワークを構成している。各仮想マシン間の通信において、同一拠点内では 1ms

*1 PIAX テストベッド <https://piax.jgn-x.jp/>

*2 2014 年 3 月時点

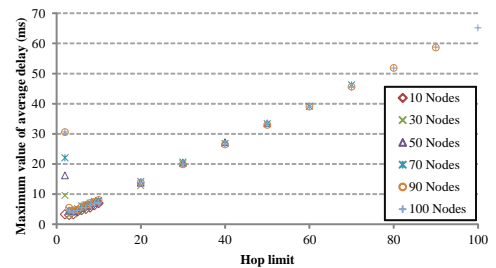


図 4 最大平均受信遅延時間の変化

Fig. 4 Maximum value of average delay.

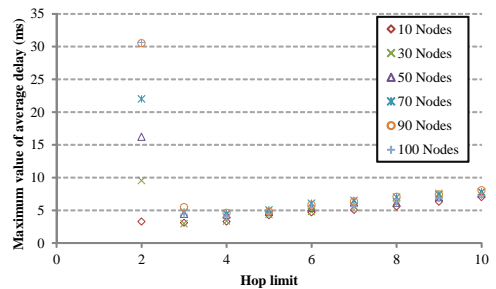


図 5 最大平均受信遅延時間の変化 (2 ~ 10 ホップ)

Fig. 5 Maximum value of average delay (2 to 10 hops).

未満、異なる拠点との通信では約 2ms から 26ms の通信遅延が生じ、広域分散システムの検証にも対応している。

3.2 ホップ数制限による配信遅延時間とノード間公平性の評価

LLF-H 法においてパラメータとして与える上限ホップ数と配信先ノード数が配信遅延時間とノード間の公平性に与える影響を検証するために評価を行った。

配信元ノードとして 1 ノード、配信先ノードとして 100 ノードを割り当てる。これらのノードにはノード間の通信遅延時間の差異を極力排除するため、すべて NICT けいはんなに置かれたノードを利用する。負荷推定に用いるパラメータ α と β は、送受信の負荷が同一であると仮定し、 $\alpha = \beta = 1$ とした。LLF 法において問題となる収集周期が同じノードが多数存在する場合を想定し、全配信先ノードに同一の収集周期を与える。この評価においては収集周期として 1 を与え、配信元ノードが送出する全データを受信する形とした。また、これにより全てのセンサデータが各配信先ノードまで同じ経路を用いて配信されることとなる。センサデータには、実際の観測値の代用として 0 パディングされた 1024 バイトのダミーデータを用い、このセンサデータを 50ms 間隔で 5 分間配信元ノードから送出することで計測を行う。LLF-H 法により、配信経路を構築する際に指定する上限ホップ数は 2 から 10 まで 1 刻みとし、以降 100 ホップまでは 10 刻みとした。また、配信先ノードの数による影響を評価するため、配信先ノード数が 10, 30, 50, 70, 90, 100 ノードの状態それぞれ評価を行った。

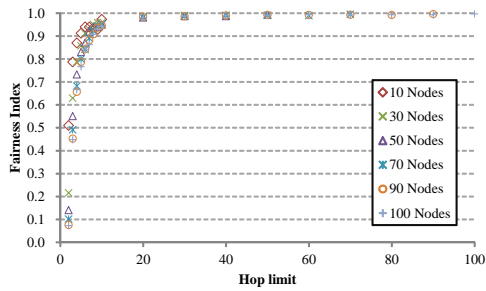


図 6 CPU 負荷による Fairness Index
Fig. 6 Fairness Index by CPU load.

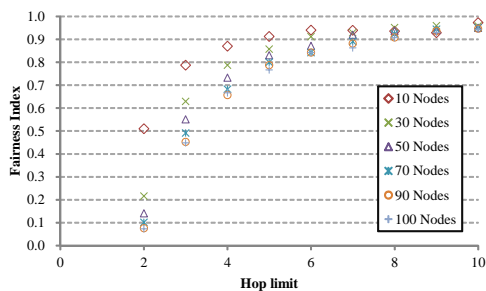


図 7 CPU 負荷による Fairness Index (2 ~ 10 ホップ)
Fig. 7 Fairness Index by CPU load (2 to 10 hops).

配信遅延時間の評価値として、最大平均受信遅延時間を用いる。これは、配信元ノードがあるセンサデータを送信してから配信先ノードがそのセンサデータを受信するまでに要する受信遅延時間の平均値が最大となったノードの値を意味する。これは、あるセンサデータが到達するまで最も時間を要する配信先ノードまでの平均遅延時間を表すこととなる。図 4 は、横軸をホップ数の上限、縦軸を最大平均遅延時間としてプロットしたグラフを示している。また、図 5 は図 4 より先頭 10 ホップまでの部分を切り出し、拡大したグラフとなっている。

ノード数が 10, 30 の場合では、上限ホップ数を 3 とした場合において配信遅延時間が最小となり、それ以降のノード数 50 から 100 の場合では 4 ホップを上限とした場合が最小となり、3ms から 5ms の遅延となっている。上限ホップ数を 2 ホップに制限した場合、配信元ノードからセンサデータを直接受信した 1 ノードが他の全配信先ノードに再配信する経路となることから、ノード数にほぼ比例した配信遅延時間となっている。配信遅延時間の最小部より右側では、上限ホップ数の制限を緩和すると、その上限ホップ数にほぼ比例して増加することがわかる (図 4)。また、上限ホップ数が配信先ノード数以上になる場合、LLF 法とほぼ同値となる。これはその配信経路が LLF 法と同経路となることによる。

計測期間中の平均 CPU 負荷 (CPU 利用率) から求めた Fairness Index の変化を図 6 と図 7 に示す。図 7 は図 6 より先頭 10 ホップまでの部分を切り出し、拡大したグラフ

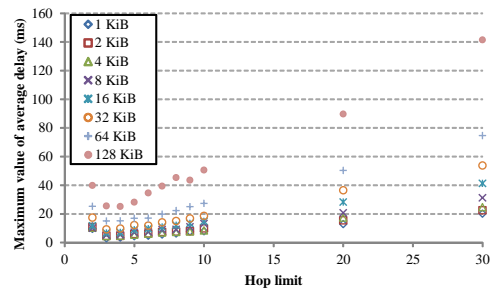


図 8 センサデータサイズによる配信遅延時間の変化
Fig. 8 Maximum value of average delay by sensor data size.

となっている。図 6 から読み取れるように、上限ホップ数の緩和に対して Fairness Index は早期に立ち上がり、以降の変化は少なくなっている。0.9 を閾値とすると、10 ノード時には 5 ホップ、30 ノード時には 6 ホップ、50 ノード時には 7 ホップ、それ以降は 8 ホップにおいて閾値を超えておりほぼ公平と言える状態となっている。ノード数が大きい場合において、Fairness Index の立ち上がりが遅れるのは、配信先ノードが多いことから再配信に要する負荷も大きくなり、上限ホップ数が小さい場合では再配信を行う少数のノードに負荷が偏ることにより生じていると考えられる。また、遅延時間と同様に、上限ホップ数が配信先ノード数以上になる場合、配信経路は LLF 法と同経路となるため、LLF 法での Fairness Index とほぼ同値となる。

3.3 センサデータサイズによる配信遅延時間の評価

センサデータサイズが配信遅延時間に与える影響を検証するため、配信するセンサデータのサイズと上限ホップ数を変化させて計測評価を行った。

センサデータには 0 パディングされたダミーデータを用い、1 KiB から 128KiB まで 2 の累乗単位 of データサイズを与える。配信経路を構築する際に指定する上限ホップ数は 2 から 10 まで 1 刻み、以降は 20, 30 とする。配信先ノードは 30 ノードとし、その他の条件は、3.2 節の評価時と同条件で計測を行う。

図 8 は、横軸を上限ホップ数、縦軸を最大平均遅延時間として計測結果をプロットしたグラフを示している。グラフより 3.2 節での評価と同様に、上限ホップ数を 3 とした場合に配信遅延時間が最小となり、以降では上限ホップ数にほぼ比例する形で配信遅延時間が増加している。また、データサイズに対しても配信遅延時間は比例して増加している。

3.4 複数の収集周期での評価

LLF-H 法が想定している異なった収集周期を持つ配信先ノードに対して配信する際の配信遅延時間とノード間の公平性に与える影響を検証するため、表 2 に示す収集周期割当てパターンでの評価を行った。

表 2 収集周期ごとの配信先ノード数

Table 2 The number of nodes for each collection cycle.

周期	割当てノード数
1	5
2	8
5	8
10	27
20	2

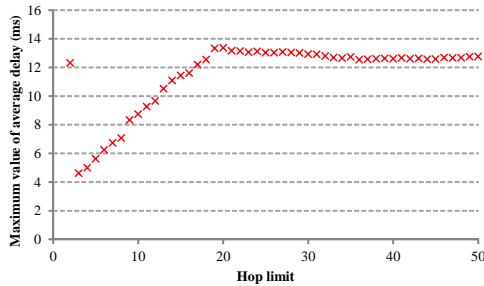


図 9 平均遅延時間の最大値の変化

Fig. 9 Maximum value of average delay.

表 2 は、各収集周期に対して割り当てる配信先ノード数を示している。配信先ノードは 50 ノードとし、その他の条件は、3.2 節の評価時と同じ条件とする。LLF-H 法により配信経路を構築する際に指定するホップ数の上限は 2 から 50 まで 1 刻みで変化させる。

図 9 は、横軸をホップ数の上限、縦軸を最大平均遅延時間として計測結果をプロットした図を示している。上限ホップ数 2 の場合では、3.2 節の評価と同様に、配信元ノードから直接センサデータを受け取る 1 ノードが他の全配信先ノードに再配信することから配信遅延時間が大きくなっている。上限ホップ数 3 から 19 にかけて、上限ホップ数に比例する形で配信遅延時間が増加しており、上限ホップ数 20 以降は 12 ~ 13ms のほぼ一定値をとっている。この配信遅延時間の変化は各試行での最大ホップ数の変化と一致しており、上限ホップ数 20 以降については経路生成時に与えた上限ホップ数パラメータによらず一定の最大ホップ数 (20) となっている。この部位では、最大ホップ数が上限ホップ数パラメータと一致しないが、これは上限ホップ数を 20 とした時点で LLF 法により構築される配信経路と同等の配信経路となっており、それ以降は上限ホップ数を増やしても配信経路が変わらない事による。

次に Fairness Index を計測期間中の平均 CPU 負荷 (CPU 利用率) と送受信メッセージ数から求めた結果を図 10 に示す。グラフより、送受信メッセージ数から求めた Fairness Index (Message) に比べて、平均 CPU 負荷 (CPU Load) から求めた Fairness Index が全体にわたって良好な結果となっている。これは実際の処理において、送受信による負荷に影響を受けない固定的な負荷が存在することにより、

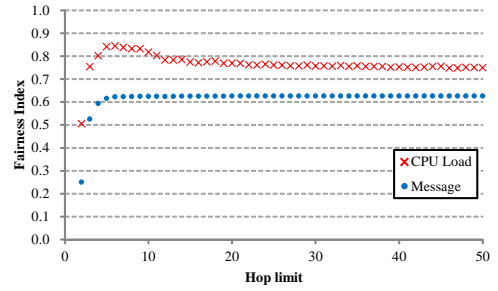


図 10 Fairness Index の変化

Fig. 10 Fairness Index.

相対的に送受信による負荷の影響が軽減されたためと考えられる。また、上限ホップ数 5 の場合を中心として送受信メッセージ数から求めた場合では現れないピーク値が生じていることがわかる。これは送受信により生じる CPU 負荷が必ずしも送受信メッセージ数と比例しておらず、特に送受信メッセージ数が比較的少ないノードにおいて CPU 負荷が送受信メッセージ数と比較して高めになることで生じていると推測している。

3.5 考察

3.2 節での評価において、上限ホップ数を 2 とした場合では、配信元ノードから直接センサデータを受け取ったノードが他の全ノードに再配信することから、1 ノードに負担が集中し、遅延、公平性の両面において不適当な状態といえる。その一方で、上限ホップ数の制限を緩和した際の推移より、配信時の遅延時間はホップ数からの影響が大きく、あるノードが複数のノードに再配信することによる遅延の影響は比較的小さいことがわかる。また、Fairness Index が示す公平性は、上限ホップ数の増加に対して素早く改善し、LLF 法を用いた場合の公平性に近づく。このため、上限ホップ数を数ホップ程度に制限した場合であっても Fairness Index は 0.9 程度と高い公平性を示している。LLF 法は、LLF-H 法の上限ホップ数を無制限とした場合と同等であることから、公平性は確保されるが、同一収集周期の配信先ノードが多数存在する場合においては、センサデータの配信経路がチェーン状になることからホップ数が増え、配信遅延時間が増加する点が問題であった。しかしながら、3.2 節、3.4 節の評価より、LLF-H 法において上限ホップ数の制約を設けたとしても公平性は LLF 法に対して大きく損なわれることなく、配信遅延時間は抑制できることがわかる。これらより、LLF-H 法ではユーザが許容できる公平性に応じた上限ホップ数を指定することで、LLF 法での配信より低遅延でのセンサデータ配信が実現できると考えられる。

4 まとめ

本研究では、PIAX テストベッドを用いた実機環境での

評価を行い、同一周期を要求するノードが多い環境における LLF-H 法による配信遅延・公平性の挙動を計測し、上限ホップ数を数ホップ程度に制限した場合であっても既存手法である LLF 法と比較して負荷の公平性を大きく損ねることなく配信遅延時間が抑制できることが確認できた。

今後は、本計測で得られた結果を元として、配信遅延時間のモデル化を進め遅延時間の事前推測、ノード間遅延時間が不均一な環境への適用、検証を行っていく。

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」による成果である。検証環境として JGN-X 上の PIAX テストベッド（プロジェクト番号 JGNX-A12005）を利用した。

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 型センサデータストリーム配信システムの配信遅延に関する評価, *情報処理学会研究報告 (2013-DPS-156)*, pp. 1–7 (2013).
- [11] 石 芳正, 川上朋也, 義久智樹, 寺西裕一: 収集周期の異なるセンサデータストリームのための P2P 型配信システム, 第 5 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2013) 論文集 (E6-6) (2013).
- [12] 石 芳正, 川上朋也, 義久智樹, 寺西裕一: 収集周期の異なるセンサデータストリームのための P2P 型配信システムとその評価, *情報処理学会論文誌*, Vol. 55, No. 2, pp. 707–720 (2014).