

センサーデータストリーム配信における 通信負荷分散方式に関する一考察

A Study of Communication Load Distribution on Sensor Data Stream Delivery

義久 智樹†
Tomoki Yoshihisa

寺西 裕一‡, †
Yuuichi Teranishi

1. はじめに

近年、ライブカメラや環境センサといった、センサーデータを周期的に収集するセンサが普及している。周期的に収集されたセンサーデータは、収集される度に利用者に配信されることが多く、センサーデータストリーム配信と呼ばれる。例えば、移動先の天候を確認したい利用者に対して、ライブカメラから 1 秒毎に画像を収集して配信することが考えられる。センサーデータストリーム配信では、センサーデータの配信に時間がかかると、周期的に収集しているセンサーデータの配信が遅れが生じるため、収集周期より配信にかかる時間が長ならないようにすることが重要になる。センサーデータを送受信する端末の通信負荷を分散させることで、センサーデータの配信が遅れる確率を小さくできるため、センサーデータストリーム配信において、通信負荷を分散させる様々な手法が研究されている[1-5]。

これらの研究では、複数の端末に同じセンサーデータを配信する場合に、配信元となる端末が直接配信するのではなく、センサーデータを受信した端末がさらに他の配信先端末にセンサーデータを送信することで、配信元端末にかかっていた通信負荷を分散させている。しかし、すべての配信先端末に同じセンサーデータを配信する場合を対象としていた。センサーデータストリーム配信では、ライブカメラの再生レートが異なっていたり、処理できる環境センサの収集周期に上限があったりすると、収集周期の異なるセンサーデータを複数の配信先端末に配信することになる。配信元端末の最も速い収集周期のセンサーデータをすべての配信先端末に配信して配信側端末側に必要なセンサーデータのみ取得することで収集周期の異なるセンサーデータを再現でき、既存手法を適用できるが、冗長なセンサーデータを配信することによって通信負荷が大きくなる。

そこで本論文では、収集周期の異なるセンサーデータストリームを配信する場合に、通信負荷を分散する配信方式について考察を行う。

2. 関連研究

センサーデータストリーム配信において通信負荷を分散させる様々な手法が研究されている。これらの研究のほとんどは、あらかじめマルチキャスト木と呼ばれる、データの配信経路を構築している。マルチキャスト木の根が配信元端末を示し、複数の子にデータを配信し、子はさらに孫に配信することで、配信元端末の通信負荷を分散できる。

NICE プロトコルでは、配信先端末で階層的にクラスタを作成し、クラスタの代表端末がクラスタ内の他の配信先

端末にデータを配信する([1])。各配信先端末は、配信遅延の小さいクラスタに属し、クラスタ内で他の配信先端末との遅延の最大値が最も小さい端末が代表端末となる。クラスタ内の配信先端末数に上限を設けることで、通信負荷が大きくなりすぎないようにしている。文献[2]では、通信性能を考慮してマルチキャスト木を構築することで、各配信先端末の通信性能に応じた負荷分散を実現している。

しかし、センサーデータのように収集周期の異なるデータストリームを対象としておらず、収集周期が異なる配信先端末がある場合、収集周期ごとにマルチキャスト木を構築する必要があり、通信負荷が大きくなる。

3. 通信負荷分散方式に関する考察

3.1 想定環境

配信元端末はセンサを備えており、周期 s 毎にセンサーデータを収集している。センサーデータを受信する配信先端末は、受信したいセンサーデータを収集している配信元端末に所望の周期 d 毎のセンサーデータの配信を要求する。ただし、配信元端末が収集していないセンサーデータは配信できないため、 d は s の倍数になる。配信元端末は要求を受信すると、配信経路を決定する。各端末は、受信したセンサーデータをさらに他の端末に送信でき、配信経路上の端末にセンサーデータの送信先を伝えてから配信を開始する。

3.2 問題設定

3.2.1 接続状況のモデル

通信負荷の分散方式を、配信元端末、中継端末、配信先端末の接続状況に分けることで、接続状況に応じた議論が可能になる。ここで、接続状況とはアプリケーション層の通信リンクを指す。中継端末とは、配信元端末でも配信先端末でもないが、センサーデータを中継することで通信負荷の分散に貢献できる端末を指す。以下、端末の接続状況を $l/m/n$ の形式で示す。 l は配信元端末の数、 m は中継端末の数、 n は配信先端末の数である。

● 1/0/1 モデル

1 台の配信元端末 S と 1 台の配信先端末 D がある。端末が 2 台しかなく、接続状況は図 1 のようになる。図 1 において、各ノードが端末を示しており、ノード付近に書かれた値は S のセンサーデータの収集周期 s 、 D の収集周期 d を示す。枝を点線で示したのは、接続はされていてもセンサーデータの経路となるとは限らないためである。1/0/1 モデルでは、 S が D にセンサーデータを直接配信する経路しか構築できない。

● 1/M/1 モデル

†大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University

‡独立行政法人 情報通信研究機構, National Institute of
Information and Communications Technology



図 1 : 1/0/1 モデル

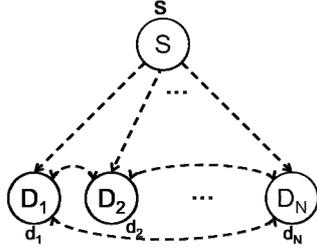


図 2 : 1/0/N モデル

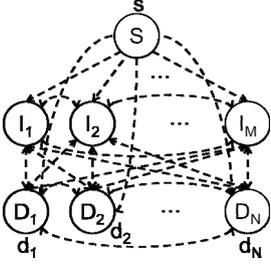


図 3 : 1/M/N モデル

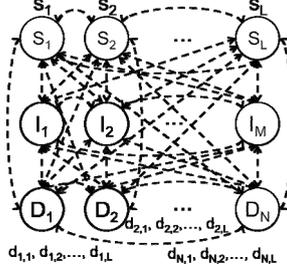


図 4 : L/M/N モデル

M 台の中継端末 I_m ($m=1, \dots, M$)がある。中継端末を使わずに配信元が配信先に直接配信する場合には、1/0/1 モデルと同じ配信経路になる。

● 1/0/N モデル

1/0/N モデルの接続状況を図 2 に示す。 N 台の配信先端末 D_n ($n=1, \dots, N$)がある。 D_n の収集周期を d_n で示す。配信先端末間でセンサデータを再配信することで、配信元端末にかかる通信負荷を分散できる。ある配信先端末にも通信負荷が集中しないように、配信経路を決定する必要がある。

● 1/M/N モデル

1/M/N モデルの接続状況を図 3 に示す。中継端末を用いることで、1/0/N モデルでは配信先端末にかかっていた通信負荷を、中継端末に分散できる可能性がある。

● L/M/N モデル

L/M/N モデルの接続状況を図 4 に示す。 L 台の配信元端末 S_l ($l=1, \dots, L$)がある。配信先端末 D_n ($n=1, \dots, N$)が配信元端末 S_l から受信するセンサデータの収集周期を $d_{n,l}$ で示す。配信元端末間でもセンサデータを中継することで、通信負荷を分散できる場合があると考えられる。

● 他のモデル

上記で説明した他にも $L/0/1$, $L/M/1$, $L/0/M$ といったのモデルが考えられる。

3.2.2 目的関数

端末 N の通信負荷を $C(N)$ で表すと、センサデータストリーム配信システム全体の通信負荷 SL は次式で表される。

$$SL = \sum_{l=1}^L C(S_l) + \sum_{m=1}^M C(I_m) + \sum_{n=1}^N C(D_n)$$

また、負荷分散の指標として、よく用いられる FI (Fairness Index)を用いる。

$$FI = \frac{\left(\sum_{l=1}^L C(S_l) + \sum_{m=1}^M C(I_m) + \sum_{n=1}^N C(D_n) \right)^2}{(L+M+N) \left(\sum_{l=1}^L C(S_l)^2 + \sum_{m=1}^M C(I_m)^2 + \sum_{n=1}^N C(D_n)^2 \right)}$$

FI は 1 に近いほど公平であることを示し、 $FI=1$ であれば $C(S_1)=\dots=C(S_L)=C(I_1)=\dots=C(I_M)=C(D_1)=\dots=C(D_N)$ となる。また配信元端末 P から配信先端末 Q へのデータの配信に伴うホップ数を $H(P,Q)$ とする。本問題は、システム全体の通信負荷を抑えつつ各端末に分散させることである。また、ホップ数を少なくして配信時の遅延を短くすることが望ましい。よって、目的関数は以下になる。

$$\text{minimize } SL, 1 - FI$$

$$\text{minimize } \max_{p \in P, q \in Q} H(p, q)$$

P は配信元端末の集合、 Q は配信先端末の集合を表す。各端末は、受信したセンサデータを他の端末に再配信できる。本問題では、上記を目的として、各端末が配信するセンサデータを決定する。

3.2.2 通信負荷の定義

各端末の具体的な通信負荷は、端末の性能に依存するが、送受信するデータ数に比例すると考えられる。端末 N が単位時間あたりに受信するデータ数を $R(N)$, 単位時間あたりに送信するデータ数を $T(N)$, 定期的な通信負荷を $S(N)$ とすると、 N の通信負荷は次式で与えられる。

$$C(N) = rR(N) + tT(N) + S(N)$$

r, t は比例定数である。端末 U が端末 V に配信するセンサデータの単位時間あたりのデータ数を $A(U, V)$ とすると、

$$R(N) = \sum_{U \in W} A(U, N)$$

$$T(N) = \sum_{V \in W} A(N, V)$$

になる。 W は全端末の集合を表す。配信元端末から直接配信する場合の例を図 5 に示す。図 5 は 1/0/N モデルである。枝付近に示されている数字は単位時間あたりのセンサデータの数を示す。 $r=1, t=1, S(N)=0$ とした。この例では配信元端末からのみセンサデータが配信されているため、 $A(S, D_n)=1/d_n, A(D_i, D_j)=0$ ($i, j=1, \dots, 4$)となる。 $A(S, D_1)=1, A(S, D_2)=0.5, A(S, D_3)=0.333, A(S, D_4)=0.25$ となる。各端末の負荷は、 $C(S)=A(S, D_1)+A(S, D_2)+A(S, D_3)+A(S, D_4)=2.08$, $C(D_1)=A(S, D_1)=1, C(D_2)=A(S, D_2)=0.5, C(D_3)=A(S, D_3)=0.333, C(D_4)=A(S, D_4)=0.25$ となり、 $SL=4.16, FI=0.603$, 最大ホップ数は 1 になる。さらに、1/1/N モデルの例を図 6 に示す。 D_2 と D_3 へのセンサデータの配信を I が担当すると考えた。各端末の負荷は、 $C(S)=1.83, C(I)=1.5, C(D_1)=1, C(D_2)=0.5, C(D_3)=0.333, C(D_4)=0.25$ となる。システム全体の通信負荷は、中継端末が増えたため $SL=5.416, FI=0.695$, 最大ホップ数は 2 になる。

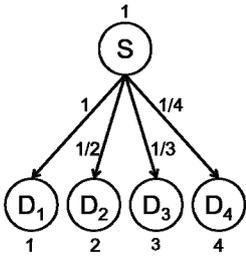


図 5: 配信元端末から直接配信する場合 (1/0/N モデル)

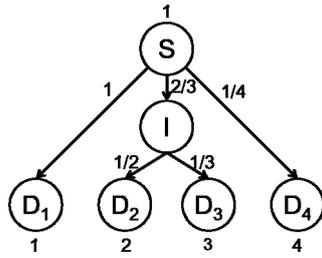


図 6: 配信元端末から直接配信する場合 (1/1/N モデル)

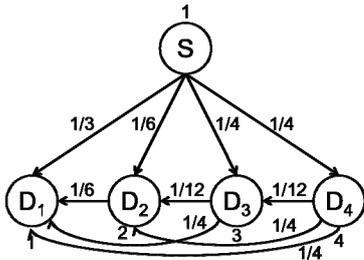


図 7: 配信経路を工夫した場合 (1/0/N モデル)

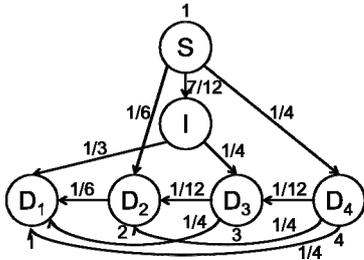


図 8: 配信経路を工夫した場合 (1/1/N モデル)

4. 通信負荷分散方式

センサデータの配信経路を工夫することで、通信負荷を分散できる。配信先端末の収集周期が図 5 と同じで、1/0/N モデルにおいて配信経路を変更して通信負荷を分散させた例を図 7 に示す。図 7 の例では、収集周期の長い配信先端末が、同じデータを収集する他の配信先端末にデータを再配信している。各再生端末には必要最低限のデータのみ配信されており、受信する単位時間当たりのセンサデータの数の合計が収集周期の逆数と等しくなっていることが分かる。この例では、 $C(S)=1$ 、 $C(D_1)=1$ 、 $C(D_2)=0.667$ 、 $C(D_3)=0.667$ 、 $C(D_4)=0.833$ となり、 $SL=4.16$ 、 $FI=0.969$ 、最大ホップ数は 2 になる。最大ホップ数に関して、図を見ると $S \rightarrow D_4 \rightarrow D_3 \rightarrow D_2 \rightarrow D_1$ の 4 ホップに見えるが、 D_4 から D_3 に配信されたセンサデータがさらに D_2 に再配信されるわけではなく、 D_3 から D_2 への枝は S から D_3 に配信されたセンサデータが再配信されることを示しており、 D_2 から D_1 への枝も S から D_2 に配信されたセンサデータを D_1 に再配信することを示している。このため、最大ホップ数は 2 になる。配信元端末が直接配信する場合に比べて、システム

全体の通信負荷を増加させることなく、分散できていることが分かる。ただし、最大ホップ数は増加している。

さらに、1/1/N モデルにおいて配信経路を変更して通信負荷を分散させた例を図 8 に示す。図 8 の例では、 D_1 と D_3 に I がセンサデータを配信することを考えた。 $C(S)=1$ 、 $C(I)=1.17$ 、 $C(D_1)=1$ 、 $C(D_2)=0.667$ 、 $C(D_3)=0.667$ 、 $C(D_4)=0.833$ となり、 $SL=5.33$ 、 $FI=0.959$ 、最大ホップ数は 3 になる。

このように、配信元端末から直接配信するのではなく、配信先端末がさらに他の配信先端末へデータを再配信することで、通信負荷を分散できる。

5. まとめ

本論文では、収集周期の異なるセンサデータストリームを配信する場合に、通信負荷を分散する配信方式について考察を行った。今後、具体的な通信負荷分散方式を考える予定である。

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」による成果である。

参考文献

- [1] Banerjee, S., Bhattacharjee, B. and Kommareddy, C.: Scalable Application Layer Multicast, Proceedings of the 2002 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM'02), pp. 205-217 (2002).
- [2] Tien Anh Le, H. N.: 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): Mobile and Wireless Networks (2012).
- [3] Tran, D. A., Hua, K. A. and Do, T.: ZIGZAG: An Efficient Peer-to-Peer Scheme for Media Streaming, Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM2003), Vol. 2, pp. 1283-1292 (2003).
- [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).