

エコなフォグコンピューティングモデルの研究



滝沢 誠 (工学博士 Dr.Eng.)

法政大学 創生科学科 教授(～2021年3月) 情報メディア教育研究センター 客員研究員(2021年4月～)

(Professor, Hosei University, Advanced Sciences)

IEEE Computer Society 情報処理学会

受賞: IEEE TCDP Outstanding Service Award (2019年) 日本政府観光局 国際会議誘致・開催貢献賞(2008年) 情報処理学会 学会活動貢献賞(2004年). 情報処理学会フェロー(1999年) Best paper 賞(IEEE AINA 等) 他

著書: 滝沢、榎戸, 分散システム P2P model, コロナ社 (2014年) 他

研究専門分野: 情報工学 分散システム

あらまし

IoT(Internet of Things)*1は、従来の情報通信ネットワークと較べて、コンピュータのみならず自動車、家電、家等の各種の「もの」が相互接続された大規模なシステムである。IoTでは、大規模性から従来のデータセンタのように、集中的な管理が行うことが困難となる。このため、各フォグノードが自律的に、センサからのデータの処理と行い加工されたデータを他のフォグノードに渡しながら処理を行う自律分散型のフォグコンピューティング(FC: Fog Computing)*2モデルが着目されている。本研究では、ソフトウェアの観点から、IoTのFCモデル全体で消費される電力を低減できる木構造FC(TBFC)モデルを新たに提案している。評価を行い、従来のクラウドコンピューティングモデルに対して、TBFCモデルにより消費電力を低減できることを示している。

1. 研究の目的

二酸化炭素排出量を減少ディ、地球温暖化を防止することが、あらゆる分野で求められている。情報シ

テムでも、性能、信頼性等を向上させることに加えて、消費される電力を低減することが新たに求められている。特に、数百万台以上のデバイス、コンピュータが相互接続された大規模なIoTでは、システム全体で消費される電力を低減することが重要な課題となっている。CPU等のハードウェア要素の低消費電力化に加えて、各種の応用で必要とされるソフトウェアを実行したときにコンピュータで消費される電力を考えることが重要である。本研究では、ソフトウェアの観点から、IoTで消費される電力を低減することを目的としている。

2. 研究の背景

IoTでは、サーバ、クライアント等のコンピュータに加えて、センサ、アクチュエータを備えた各種の「もの」(デバイス)がネットワークで相互接続されている。IoTでも、性能の向上に加えて、システム全体で消費される電力量を低減することが求められている。こうした、省電力な情報通信システムを設計、実装、評価、実現するためには、応用プロセスを実行したときにコンピュータ全体で消費される電力を与える**電力消費(power consumption)モデル**とプログラムの実行時間を与える**計算(computation)モデル**が必要である[6, 7]。これらのモデルを基に、従来からの性能面についてのアルゴリズムに対して、システム全体の消費電力量を低減する各種の新しいモデル、アルゴリズムを研究し、評価することができる。また、本研究課題で研究する電力消費モデルは、国内外で最初のものである。

IoTでは、多種多様な「もの」がネットワークにより相互接続されることにより、これまでの情報通信システムとは異なったレベルの大規模なものとなってくる。センサから生じる膨大な量のセンサデータを有効に処理するために、データと処理プロセスをフォグノードに分散化させるフォグコンピューティング(FC)モデルが提案されてきている[図1]。FCモデルでは、処理プロセスを複数のフォグノードに分散化させることにより、性能面を向上できる。一方、応用プロセスを実行するフォグノード数の増加により、システム全体で消費される電力量も増加してしまう。このように、IoTでは、性能向上に加えて、システム全体で消費される電

エコなフォグコンピューティングモデルの研究

力量[J]を低減することが新たに問題となる。本研究は、省電力な IoT を実現するためのソフトウェアの観点からモデルとアルゴリズムを研究し、評価に取り組むものである。さらに、IoT のような大規模システムでは、全体の構成ノードのメンバーシップ管理、状態監視等を集中的に行うことは困難である。このために、本研究課題では、各フォグノードが他のフォグノードと自律的に協調動作しながら、処理を行っていく自律分散型の FC モデルを新たに提案している。このモデルは、エコな大規模 IoT を実現するための基盤技術となるものである。

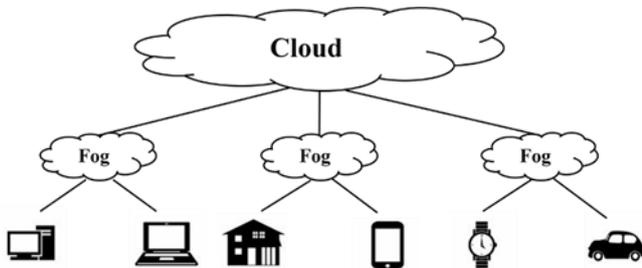


図 1. IoT の FC モデル

3. 研究の方法

3.1 TBFC モデル

IoT のコンピューティング (FC) モデルは、センサ、アクチュエータ等のデバイス、サーバ集合としてのクラウドの間に、デバイスとサーバ間の通信とともに、センサデータの処理を行うフォグ (fog) ノードから構成される。クラウドコンピューティング (CC)^{*3} モデルでは、センサからのセンサデータを、サーバにネットワークより送信し、処理が行われる。サーバで、センサデータを処理し、デバイスのアクチュエータに対する動作を決定し、デバイスに動作命令を送信する。IoT ではセンサから構成され、センサデータの通信よりネットワークの負荷が増大し、サーバの処理負荷も増大し、一定時間内にアクチュエータに動作命令を送ることが困難になってしまう問題がある。このために、FC モデルでは、センサデータを処理するプロセスを、サ

ーバのみならずフォグノードに分散することにより、ネットワークとサーバの負荷を低減している。一方で、フォグノードでデータ通信のみならずデータ処理も行われることから、フォグノードで消費される電力が増大してしまう。

本研究では、フォグノードを木構造化することにより、IoT 全体で消費される電力の低減化をはかるものである。図 2(1) は、温度と湿度を計測するセンサとこれを処理するプロセスの例を示している。温度と湿度センサは、10 秒毎に湿度と温度のデータを創始するとする。t-aggregate は、各温度センサで得られた温度データを集め、1 分当たりの平均値を計算し、h-aggregate は湿度データの毎分の平均値を求めるプロセスである。t-merge は、各温度センサの 1 分当たりの平均値を集め、h-merge は湿度データを集めるプロセスである。こうして処理されたデータをプロセス join に送り、時刻(分)毎に、温度と湿度をまとめる。こうして得られたデータを、プロセス store は、データベースに格納する。CC モデルでは、これらのプロセスはすべてクラウド内のサーバにより実行されていた。FC モデルでは、プロセスは、サーバのみならず、フォグノードでも分散して実行される。

図 2(2) は、aggregate、merge、join のプロセスの各々は、一つのフォグノードで実行され、プロセス store はサーバで実行される例を示している。温度センサ s_1 と s_2 は、検知した温度データをフォグノード f_{11} と f_{12} に送信する。各フォグノードでは、センサから送られてくる温度データを集め、毎分の平均温度を t-aggregate プロセスにより計算し、フォグノード f_{11} に送信する。フォグノード f_{11} と f_{12} で温度データを 1 分毎の平均値にまとめていることから、センサが直接温度データを送ることに対して、送信されるデータ量を低減できる。フォグノード f_{11} では、 f_{11} と f_{12} からのデータを時間系列に t-merge プロセスでまとめ、フォグノード f_1 に送信する。湿度データも同様に、フォグノード f_{21} と f_{22} で、分単位の平均値を求め、フォグノード f_{12} に送信する。フォグノード f_{12} は、湿度の時系列データを作成し、フォグノード f_1 に送信する。フォグノード f_1 では、温度データと湿度データを join プロセスで併合し、時刻毎の温度と湿度データの系列

エコなフォグコンピューティングモデルの研究

を生成し、サーバに送信する。サーバでは、送られてきたデータを、データベースに格納する。このように、FCモデルでは、サーバの処理負荷を軽減し、ネットワークに送信されるデータ量を低減できる。また、aggregate等のプロセスを複数のフォグで並列に実行できる利点もある。一方で、フォグノードでプロセスが実行されることからこれらのノードで消費される電力が増大する問題点がある。

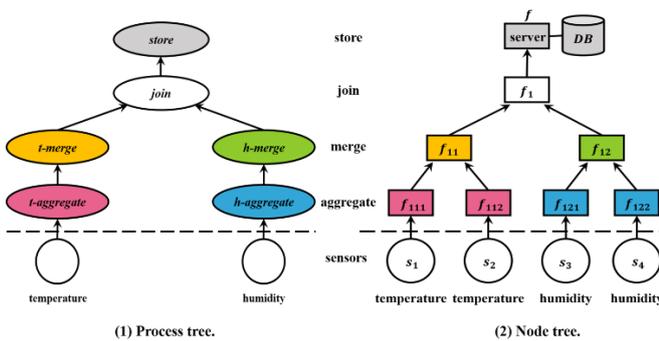


図2 FCモデル

これまでに、著者の研究グループでは、プロセスを実行したときにコンピュータ全体で消費される電力[W]を与える電力消費モデルを提案してきている。この中で、フォグノードの電力消費モデルとして、単純電力消費(SPC)モデル[6, 7]を考える[図3]。時刻 τ にコンピュータ s_i で消費される電力 $E_t(\tau)$ は、一つでもプロセスが実行されていれば $maxE_t[W]$ で、一つもプロセスが実行されていなければ $minE_t[W]$ である。例えば、サーバでは $maxE$ は301[W]で、Raspberry PIでは3.7[W]である[1, 2]。

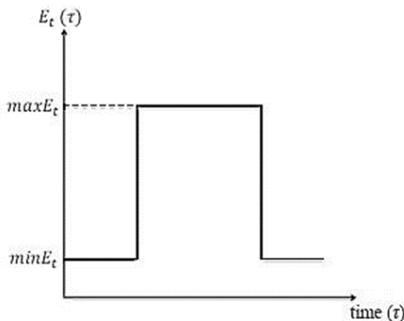


図3. SPCモデル

TBFCモデルでは、フォグノードは木構造で構成される。各フォグノード f_i は、子フォグノード $f_{i1}, \dots, f_{in}(n \geq 0)$ を持つ。各子ノード f_{ij} から送られてきたデータ d_{ij} を受信する。受信した入力データ d_{i1}, \dots, d_{in} を、プロセスにより処理を行い、出力データ d_i を生成し、 f_i の親ノードに送信する。各入力データ d_{ij} のサイズを s_{ij} とする。フォグノード f_i は、サイズ $s_i = s_{i1} + \dots + s_{in}$ の入力データから、サイズ s_i の出力データを生成することとなる。出力データに対する入力データのサイズ比 $s_i / (s_{i1} + \dots + s_{in})$ を、フォグノード f_i の減少率 r_i とする。たとえば、4つの子ノードから送られてきた温度データの平均値を求めるフォグノードを考えると、減少率は1/4となる。

サイズ x の入力データのフォグノード f_i での処理時間と消費電力を考える。本研究では、フォグノード f_i のプロセスによる処理時間 $ET_i(x)$ はサイズ x 又はこれの二乗 x^2 に比例するとする。すなわち、計算量 4 は、 $O(x)$ 又は $O(x^2)$ である。例えば、図2に示した平均値を求めるプロセスaverageの処理時間は $O(x)$ であり、joinは $O(x^2)$ である。従って、処理時間 $ET_i(x)$ は、 $c_i \cdot x$ 又は $c_i \cdot x^2$ となる。 c_i は定数である。入力データを処理するためには、SPCモデルにより、フォグノード f_i は、最大電力 $maxE_i[W]$ を消費する。従って、フォグノード f_i の消費電力 $EE_i(x)$ は、 $maxE_i \cdot ET_i(x_i)$ [J(=W sec)]となる。TBFCモデルの葉ノードはデバイスで、デバイスから親フォグノードに送られてくる。木構造内の子ノードからのデータサイズを基に、親ノードの消費電力と、出力データのサイズが求まる。これを根ノード(サーバ)まで繰り返すことにより、TBFCモデル全体の消費電力を求めること出来る。

3.2 評価

TBFCモデルを、Raspberry pi3をフォグノードとして評価を行う。サーバとフォグノードの各々の電力と性能を表1に示す。CRは、各ノードの計算速度の比を示している。フォグノードの計算速度CRは、サーバの18.5%である。これらのデータは、実測により求めている。 xE と mE は、各々最大消費電力 $maxE$ と最小消費電力 $minE$ [W]である。

エコなフォグコンピューティングモデルの研究

表 1. サーバとフォグノード

Parameters	DSLab (Cloud)	Raspberry Pi (Fog)
CPU	Intel Xeon E5-2667 v2	Broadcom BCM2837
xE [W]	301.3	3.7
mE [W]	126.1	2.1
CR	1	0.185 (= 0.879/4.75)

フォグノードの木の高さ h で、各ノードは k 個の子ノードを持った均衡木 TBFC(k, h) を考える。ノード間の転送速度 b は 200[Kbs] とし、各センサからのデータは 1[MB] とする。センサデータは、プロセス p_m, p_{m-1}, \dots, p_0 ($m > 0$) により、順々に処理されるものとする。各フォグノードでは一つのプロセスが実行され、同一高さ(レベル)のフォグノードは同じプロセスを実行する。高さ h の木では、プロセス $p_m, p_{m-1}, \dots, p_{m-h+1}$ はフォグノードで実行され、他のプロセス p_{m-h}, \dots, p_0 はサーバで実行される [図 4]。ここでは、 $m = 10$ とする。 f_0 は根ノードでサーバである。サーバ f_0 は、子のフォグノード f_{01}, \dots, f_{0k}

を持っている。クラウドコンピューティング(CC)モデルでは、全プロセスがサーバで実行される。各プロセス p_i の計算量は、入力データサイズ x に対して、 $O(x)$ と $O(x^2)$ の場合を考える。

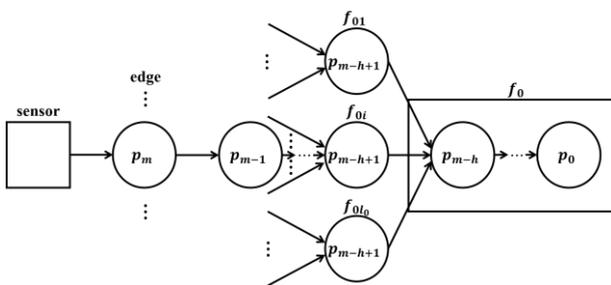
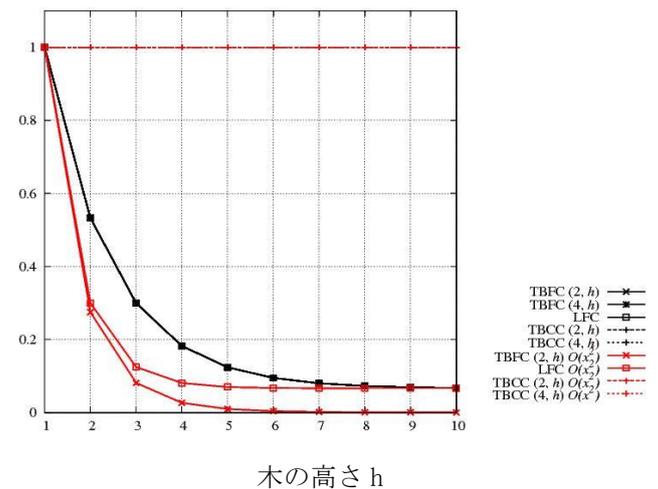


図 4. TBFC モデル

図 5 は、TBFC(k, h)モデルの総消費電力率を示している。TBCC(2, 1)は、フォグノードの存在しないクラウドコンピューティング(CC)モデルで、サーバで全プロセスを実行したときの消費電力である。TBFC(1, h)は、各ノードは子ノードを一つ持つもので、線形チェーン

(LC)モデルとする。これに対する各 TBFC(k, h)モデルのフォグノードとサーバの全消費電力の比率を示している。各プロセスの計算量が $O(x)$ の場合は、各 TBFC(k, h)モデル($k > 0$)の総消費電力は同じになる。これに対して、プロセスの計算量が $O(x^2)$ のときは、総消費電力量を低減できることを示している。木の長さ h が増加することは、サーバで処理されるプロセス数が少なくなることを示している。このため、フォグノードで実行されるプロセス数が増加し、フォグノード数も増加する。サーバで実行されるプロセス数を減少させることにより、全体で消費される電力を低減できることを示している。

総電力消費率



木の長さ h

図 5. 総消費電力量

4. 将来展望

本研究では、IoT で消費される電力を低減するために、フォグノードを木構造に構成した TBFC モデルを提案し、評価をシミュレーションにより行なった。今後は、フォグノードの故障に対する対処方法、センサデータの負荷に対して動的にフォグノード間の構造を変化させるモデルの研究が必要である。

IoT では、特にデバイスのセキュリティが重要である。デバイスは、Raspberry pi のような低性能なもの

エコなフォグコンピューティングモデルの研究

であるので、サーバのような高度な暗号化技術を含めたセキュリティ技術の実装は難しい。このため、IoTのセキュリティを高めるために、不正利用者からのデバイスへの不正アクセスを防止する研究として、ケーパビリティに基づいた方式を提案している[3, 4, 5]。ケーパビリティアクセス制御を、フォグノードに実装し、セキュリティの実験を行う予定である。

おわりに

本研究では、IoTで消費される電力を低減するために、フォグノードを木構造に構成したTBFCモデルを提案し、評価をシミュレーションにより行なった。これにより、従来のCCモデルに対して、センサデータを処理するためのプロセスを、フォグノードに分散、多重化することにより、消費電力を低減できることを示した。最後に、本研究の成果は、テレコム先端技術研究支援センターの研究支援によるもので、深く謝意を表したい。

用語解説

- *1 IoT (Internet of Things): コンピュータに加えて、センサ、アクチュエータを備えた「もの」(例えば、家電製品)が相互接続されたネットワーク。
- *2 FC(Fog Computing): デバイスとサーバクラウド間で、センサデータの処理を分担するIoTのモデル。
- *3 CC(Cloud Computing)モデル: センサデータはネットワークでクラウド内のサーバに送信され、処理が行われるIoTのモデル。
- *4 計算量(computation complexity): 入力データのサイズに対するプロセスの実行時間。

参考文献

- [1] Oma, R., Nakamura, S., Duolikun, D., Enokido, D., Takizawa, M.: An energy-efficient model for fog computing in the Internet of Things (IoT). *Internet of Things*, vol.1-2, pp.14-26 (2018).
- [2] Oma, R., Nakamura, S., Duolikun, D., Enokido, T., Takizawa, M.: A fault-tolerant tree-based fog computing model, *International Journal of Web and Grid Services*, vol.15, no.3, pp. 219-239

(2019).

- [2] Oma, R., Nakamura, S., Enokido, T., Takizawa, M.: Fault-Tolerant Strategies in the Tree-Based Fog Computing Model, *International Journal of Distributed Systems and Technologies*, vol.11, no.4, pp.72-91 (2020).
- [3] Nakamura, S., Enokido, T., Takizawa, M.: Implementation and evaluation of the information flow control for the Internet of Things, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol.33, no.19 (2021).
- [4] Nakamura, S., Enokido T., Takizawa, M.: Information Flow Control Based on Capability Token Validity for Secure IoT: Implementation and Evaluation, *Internet Things*, vol. 15: 100423 (2021).
- [5] Nakamura, S., Enokido, T., Takizawa, M.: Time-based legality of information flow in the capability-based access control model for the Internet of Things, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol.33, no.23 (2021).
- [6] Enokido, T., Aikebaier, A., Takizawa, M.: Process allocation algorithms for saving power consumption in peer-to-peer systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.58, no.6, 2097-2105 (2010).
- [7] Enokido, T., Aikebaier, A., Takizawa, M.: An extended simple power consumption model for selecting a server to perform computation type processes in digital ecosystems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol.10, no.2, pp.1627-1636 (2014).

この研究は、平成30年度SCAT研究費助成の対象として採用され、平成元年度～令和2年度に実施されたものです。