

アプリケーション主導のリンク速度調整による 有線イーサネット消費電力量削減

吉田 慎吾^{1,a)} 嶋田 創^{2,b)} 山口 由紀子^{2,c)} 高倉 弘喜^{3,d)}

概要：近年では、情報機器の消費電力量削減は重要な課題となっている。ネットワーク機器の省電力制御手法として ALR や EEE などがあるが、頻繁なリンク速度切替やスリープ状態からの復帰方針により、少量の通信時には電力量の無駄を生じてしまう課題がある。本論文では、確実な電力量削減のための省電力制御として、アプリケーションから通知されるデータ容量を用いて適切なリンク速度を決定する手法を提案する。提案手法では、リンク速度切替をアプリケーションが主導することにより、アプリケーションに応じた通信安定性が保証されることや、先行手法よりも効率的な電力量削減につながるリンク速度決定を可能としている。提案手法の有効性を確かめるため、10BASE-T、100BASE-TX、1000BASE-T の切り替えにおける評価を行った。単一通信および複数通信を模した評価において、転送するデータ容量に応じたリンク速度切替が実施することにより、リンク速度を固定した場合よりも電力量を削減できることを確認した。電力量の削減は、リンク速度を固定した場合に比べ最大 24.5% となった。

1. はじめに

近年では、多くの分野で省電力化の実現を求められている。情報機器の分野においても、これまで省電力化を目指した多くの取り組みが行われてきたが、スマートフォンなどデバイスの多様化やインターネットユーザの増加などによって、総消費電力は依然として増加傾向にある。また、通信量の増加に伴った消費電力増加も懸念されている。通信量は今後もインターネットユーザが増加するというだけでなく、それぞれのネットワーク機器の性能向上も相まって非常に高い成長率で増加していくとみられている。

ネットワーク機器は使用するときのみ電源を入れる一般的な家電製品とは異なり、常時稼働する機器であることから少量の消費電力削減でも効果は大きいと考えられている。また、ネットワーク機器が使用するイーサネットリンクではデータパケットの伝送を待つ通信待機状態である時間の割合が非常に大きいにも関わらず、その間も常に電力

を消費し続けており、こうした非通信時における消費電力の削減が求められている。例えば、電力変換や冷却も含めたデータセンタにおける消費電力の内訳 [1] において、ネットワークに関して 12% と軽視できない割合で電力が消費されている。ネットワークの省電力化は冷却設備やサーバやストレージにおける省電力化に比べ、取り組みが行われてから日が浅く、今後の研究が期待されている。

こうした問題に対して本論文では、アプリケーション主導のリンク速度調整によるネットワーク機器の省電力化を提案する。提案手法では、ネットワーク機器に通信が発生していない場合、もしくはデータ容量が少量の通信の場合に転送速度の低いリンク速度に切り替えを行っていくことで電力量削減を行う。リンク速度の決定にはアプリケーションから通知される転送するデータ容量を用いて判断を行うことで、電力量が確実に削減できるようなリンク速度制御を可能にしている。

以下に、本論文の構成を述べる。2 節ではネットワーク機器に関する既存の省電力制御手法に関して述べ、それぞれの特徴と課題をまとめる。3 節ではリンク速度に応じた消費電力の変化に関する予備評価と、本稿で提案するリンク速度制御手法について述べる。4 節では提案手法の有効性を評価するために行った実験とその結果を示し、考察を行う。5 節では本論文の内容をまとめる。

¹ GK 株式会社
GK Inc., 1100 Takatomi, Yamagata-shi, Gifu-ken, 501-2105, Japan

² 名古屋大学情報基盤センター
Information Technology Center, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya-Shi, 464-8602, Japan

³ 国立情報学研究所
NII, 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0062, Japan

a) shingo@net.itc.nagoya-u.ac.jp

b) shimada@itc.nagoya-u.ac.jp

c) yamaguchi@itc.nagoya-u.ac.jp

d) takakura@nii.ac.jp

2. 既存の省電力制御手法とその課題

2.1 Energy Efficient Ethernet (EEE)

イーサネットリンクの大半はデータパケットの伝送を待つアイドル状態であるが、アイドル状態においても電力を消費し続けている。この、アイドル状態の消費電力削減を目的として、Energy Efficient Ethernet (EEE)[3] が提案され、2010年11月に IEEE 802.3az として標準化された。

EEEの根本的な概念は「通信リンクは実際にデータが送信される時のみ電力を消費すべき」というものである。それまではデータ転送に常時対応できるよう最大の帯域幅におけるシグナリングでリンクを保持していたが、データストリームが空白である場合にエネルギーを節約するため、EEEでは送信側で「データ間に空きがあるためアイドル状態へ遷移してよい」ことを示すシグナリングプロトコルを使用する。これにより、EEEはリンクをスリープ状態に移行させ、また、事前に定義された時間によってリンクを再開させることで省電力化を図っている。

EEEにおいては Low Power Idle(LPI) と呼ばれる、データパケットの間に送信される通常のアイドル信号を変更したものを利用している。送信側はアイドル信号の代わりに LPI を送信し、リンクがアイドル状態へ移行可能であることを示す。送信側は LPI を一定時間流した後、すべての信号の送信を停止し、リンクを休止状態に移行する。その後、送信側は定期的に信号を送信し、リンクが長期間停止状態に陥ることがないようにする。リンクの全機能を再開させる場合には LPI ではなく通常のアイドル信号を送信する。リンク活性化まで事前定義された時間が経過した後、リンクはアクティブ状態に移行しデータ送信を再開する。アイドル状態の間に定期的に送信されるリフレッシュ信号には重大な役割が存在する。リフレッシュ信号はイーサネットにおけるリンクパルスの役割を持ち、リフレッシュ信号により送信側、受信側の双方にリンクの存在を示し、リンク切断時には速やかに通知が行われる。また、リフレッシュ信号をチャネルのテストに使用することで、チャネルの特性が変更された場合に受信側がデータの整合性を失うことなくフルスピードのデータ転送へ迅速に移行できる。

EEEでは、最終的に LPI によるスリープ状態移行を採用したが、初期の段階では、リンク速度の変更に時間を要するオートネゴシエーションよりも迅速な速度変更プロトコルの開発に注力していた。初期段階では速度変更によってさらなる省電力化が見込まれると考えられていたが、LPI を採用したことで現在の EEE では速度変更を行わない仕様になっている。つまり、1000BASE-T でリンクアップした場合には LPI によってリンクがスリープ状態に移行したとしても 1000BASE-T であることに変わりはない。また、EEE を使用するためには、送信側と受信側の双方が EEE

に対応している必要がある。EEE をサポートする各物理デバイスではリンクアップ時にオートネゴシエーションを通じて EEE 機能のサポートをアドバタイズする。相手が EEE のサポートをアドバタイズしなかった場合、EEE を使用せずに通信が開始される。

2.2 Rapid PHY Selection(RPS)

RPS は物理層のチップを制御することで消費電力を削減する手法である。前述の EEE 標準化への過程で当初は RPS も議論されていた。しかし、処理が複雑ですべてのネットワーク通信機器で標準化することは難しいことや、チップを制御するための電力消費がチップを制御したことで得られる恩恵を上回ってしまうこともあって LPI のみが採択された。

RPS は通信データ流量が少ない場合に通信速度を変更し、消費電力を低減させる手法である。データ流量が少ない場合には順々に転送速度が低いリンク速度に変更し、データ流量が多くなった場合には転送速度が高いリンク速度に変更する。RPS はハンドシェイクとリンクの再同期によってリンクを中断、もしくはブロックすることでパケットが送信できないようにしている。しかし、転送を中断することは大きな障害でもある。スイッチのバッファサイズによってはバッファ溢れが発生し、パケット損失が生じてしまうことがある。

Christensen ら [5] によると RPS が誘起するパケット損失はバッファサイズに起因し、バッファサイズが 256KB の場合、2Gb/s のデータ転送でおよそ 20% のパケット損失が生じるとしており、6Gb/s のデータ転送においてはおよそ 70% ものパケット損失が生じてしまう。バッファサイズを 4MB まで拡張した場合は、2Gb/s のデータ転送においてもおよそ 30% のパケット損失まで抑えることが可能だが、依然として大きな問題である。そこで PAUSE フレームを用いて通信をコントロールする手法 [6] が提案され、パケット損失を抑えることができるとされているが、その伝送方法や PAUSE フレームを転送することによる影響などが課題となっている。結果として RPS のように通信速度を変更する手法では、一度リンクを切断する必要があり、それに伴ってデータが欠落、遅延することが問題視されている。

2.3 Adaptive Link Rate(ALR)

通信トラフィックに応じてリンク速度を変更する事で省電力化を図る Adaptive Link Rate (ALR) が提案され、リンク速度切替の際のリンク速度決定のための手法が研究されている。上述の RPS が高速なリンク速度切替を目指す研究であることに対して、ALR はリンク速度切替決定手法であり、より適切なリンク速度の決定手法を研究してい

る [7][8] .

ALR では、転送するデータ容量が小さい場合はリンク速度を落として通信を行い、データ容量が大きくなった場合にはリンク速度を上げて通信を行う。リンク速度切替の決定手法で単純なものとしては、送信バッファのケット量をもとにしてリンク速度を決定するというものがある。送信バッファには事前にケット量に応じた High と Low の閾値が設定されており、送信バッファのケット量が High を超えた場合はリンク速度を上げ、Low を下回った場合はリンク速度を下げる。

リンク速度切替の手法としては、他にもマルコフ連鎖を用いてリンク速度を決定する手法が提案されるなど [9]、効率的かつ最適なリンク速度を決定するための様々なポリシーの研究がなされているが、リンク速度切替についても RPS 同様、リンク速度切替に時間を要するため、リンク速度切替に起因するケットの到達遅延や、ケット損失が生じてしまう。こうした問題に対してケット損失が生じないように仕組みも提案されている [10]。2 つの通信機器間を複数のリンクで接続することを前提とし、それぞれのリンク速度を事前に設定する。通常は 1 つのリンクのみを利用して通信を行うがリンク速度の変更を行う際には利用されていないリンクを活性化し、その後、送信するリンクを切り替えることでケット到達遅延とケット損失を防いで省電力化を実現するものである。

2.4 既存手法における課題

EEE に関する問題点・改善点

EEE はネットワークスイッチとクライアント双方のネットワークコントローラが EEE 対応しており、かつ設定を有効にしている場合のみ動作するが、小型の PC や組み込み機器ではまだ EEE に対応していないものも多い。また、ネットワークスイッチやネットワーク機能付きの監視カメラのような機材は壊れるまで長期間使われる場合が多いため、EEE 対応するまでに時間を要してしまう。こうした問題に対処するため、EEE 対応が普及するまで、もしくは EEE とは別の方法で実現可能な省電力化のための手法が依然として求められている。また、EEE の LPI によるスリープ状態ではリンク速度の変更ができないため、どんなに小さなデータ容量の転送であっても、再度通信状態に戻した時は設定された通信速度で通信を開始してしまう。ここにリンク速度変更による省電力制御を加えることができればさらなる省電力化が見込めると予想される。

RPS, ALR に関する問題点・改善点

リンク速度切替による省電力化では、ケット到達遅延やケット損失が生じてしまうことが重要な課題となる。こうした点からケット到達遅延やケット損

失がシステムの性質上、重要な問題となってしまう環境においては実用化が難しい。また、リンク速度切替によるリンク速度決定手法に関しても改善の余地が残されている。特に、過度なリンク速度切替による消費電力量の増加に関して改善していかねばならない。リンク速度切替時にはリンクを一度切断してから再度リンクを確立するため、少なからず通信不可状態が生じてしまう。通信不可状態であっても消費電力は発生するため、過度なリンク速度切替は電力量の無駄を生じてしまうことがある。リンク速度切替には通信に最適なリンク速度を選択、かつ、リンク速度切替を行わない場合と比べて電力量が必ず少なくなる場合にリンク速度切替を行うことが重要となってくる。

3. アプリケーション主導のリンク速度調整による電力量削減手法

本節では、まず、リンクアップ速度に応じて消費電力がどの程度異なるのかを調べた予備評価の結果を示す。そして、予備評価の結果をもとに消費電力量の削減を目的としたリンク速度制御手法を提案する。

3.1 予備評価

クライアントからサーバに向けた通信を発生させ、リンク速度に応じて消費電力がどのように変化するかを測定した。また、クライアントからリンク速度を切り替えた場合に生じる通信不可時間を計測し、それによって発生する無駄な消費電力を算出した。

実験には、汎用品かつ省電力を考慮している EEE 対応 BUFFALO 製スイッチングハブ LSW4-GT-8NS を用いた。クライアントには Intel 製 NUC DN2820FYKH に接続し、サーバへの送信を想定した実験を行った。クライアントのネットワークコントローラは RTL8111G であり、10BASE-T から 1000BASE-T まで切り替えることが可能である。消費電力の測定はハブ側の電源ラインで行った。

3.1.1 リンク速度に応じた消費電力

10BASE-T から 1000BASE-T のそれぞれでリンクアップした待機時と通信時の消費電力の測定結果を表 1 に示す。この時、リンクアップしていない状態でのハブのベースとなる消費電力は 0.42W であった。

表 1 リンク速度に応じた待機時、通信時の消費電力

物理層	待機時 (W)	通信時 (W)
10BASE-T	0.49	0.55
100BASE-TX	0.56	0.73
1000BASE-T	0.66	0.83

表 1 より、消費電力はリンク速度を上げるにつれて上昇していくことが示された。また、待機時、通信時の間にも消費電力の差が見られた。よって、省電力化のためにはリ

リンク速度による消費電力とリンク速度の転送速度を考慮して、最終的に消費電力量が最少なくなるように最適なリンク速度を導出することが必要である。

3.1.2 リンク速度切替によるオーバーヘッド

リンク速度をクライアント側から切り替えた場合に再度通信が行われるまでの遅延時間を測定した。また、リンク速度切替によって発生する通信不可状態で消費される電力量を各 10 回測定した。それぞれの平均値を表 2 に示す。通信の有無は受信側のトラフィックで判断し、表 2 中の“10BASE-T/1000BASE-T”はリンク速度を 10BASE-T から 1000BASE-T に切り替えたということを示す。

表 2 リンク速度切替に要する遅延時間と電力量

物理層切替	遅延時間 (s)	電力量 (Ws)
10BASE-T/100BASE-TX	2.02	1.09
10BASE-T/1000BASE-T	4.68	2.72
100BASE-TX/10BASE-T	3.76	1.93
100BASE-TX/1000BASE-T	3.60	2.07
1000BASE-T/10BASE-T	3.89	2.21
1000BASE-T/100BASE-TX	3.30	1.91

表 2 の結果より、リンク速度切替によって異なる遅延時間、無駄な電力量が発生することが示された。過度なリンク速度切替は遅延時間と無駄な電力量を多く発生させてしまうため、考慮することが必要となる。リンク速度切替の際には無駄な電力量を考慮し、総電力量が削減される場合のみリンク速度切替を行っていくことが求められる。

3.2 リンク速度制御手法

予備評価の結果を踏まえ、アプリケーション主導のリンク速度調整によるネットワーク消費電力量削減手法を提案する。本研究では一時的な消費電力の増加ではなく、通信全体にかかる電力量を削減するため、評価基準を電力量とした。

本研究で想定している環境は、アプリケーションからの通知によって通信量があらかじめ予測可能な状況を想定している。また、リンク速度切替には遅延時間が発生するため、表 2 で示した遅延時間を許容でき、省電力化が求められる環境が適している。具体的には、カメラによる動画のライブ配信といった特定のビットレートで通信が継続される事が予測されるような場合が望ましい。3.1 節よりリンク速度が低い方が消費電力は少なくなるため、例えば特定のビットレートを満たす最も低いリンク速度で通信を行うのが適切と考えられる。従って連続した通信の場合は、通信の最大容量を転送できる、最も消費電力の低いリンク速度を選択することとする。

3.2.1 単一の通信

単一の通信が間欠的に発生するといった場合、アプリケーションから通知されるデータ容量を用い、通信にどの

リンク速度を用いるのが適切かを決定する必要がある。そこで 3.1.1 節のリンク速度ごとの通信時消費電力と 3.1.2 節のリンク速度切替時に発生する無駄な電力量を用いて式 (1)、(2) によってリンク速度を決定することとする。

$$E_{stay} = W_{link} \frac{D}{S_{link}} \quad (1)$$

$$E_{change} = W_{next} \frac{D}{S_{next}} + E_{link/next} + E_{next/min} \quad (2)$$

ここで、

E_{stay} : リンク速度を変更しない場合の消費電力量

E_{change} : リンク速度を変更した場合の消費電力量

W_{link} : 現在のリンク速度による通信時の消費電力

W_{next} : 変更後のリンク速度による通信時の消費電力

S_{link} : 現在の転送速度

S_{next} : 変更後の転送速度

D : 転送データ量

$E_{link/next}$: リンク速度切替によって発生する電力量

$E_{next/min}$: 通信後、最も低いリンク速度に切り替える際に発生する電力量

である。

$E_{change} < E_{stay}$ の場合、リンク速度切り替えを実行し、通信の終了後は表 1 の結果を踏まえてリンク速度を最も低いものに切り替えることとする。また、 $E_{link/next}$ 、 $E_{next/min}$ には表 1 の値を使用する。

10BASE-T、100BASE-TX、1000BASE-T の 3 つのリンク速度を指定できるとして、式 (1)、(2) と 3.1.1 節をもとに、初期状態のリンク速度が 10BASE-T の時のデータ量に応じた速度選択と消費電力量の関係を図 1 に示す。ここでは、 $S_{10} = 1.25(\text{MB/s})$ 、 $S_{100} = 12.5(\text{MB/s})$ 、 $S_{1000} = 125(\text{MB/s})$ と、10BASE-T、100BASE-TX、1000BASE-T、それぞれの規格における理論値を用いた。

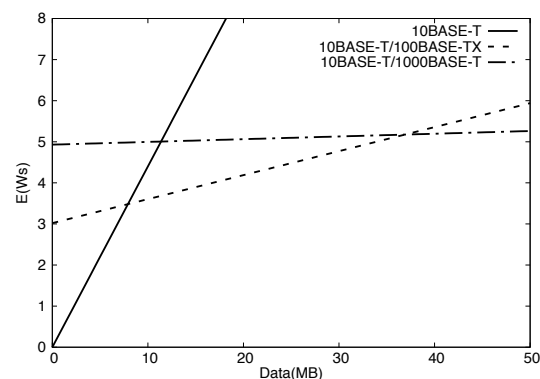


図 1 リンク速度選択と電力量の関係 (10BASE-T)

図 1 の縦軸は消費電力量を表し、横軸はアプリケーションから通知されるデータ容量を示す。図 1 上の各線の交点を求める事により 7.91MB 以上、36.9MB 未満のデータを転送する際にはリンク速度を 10BASE-T から 100BASE-TX

にリンク速度を切り替え、36.9MB 以上のデータを転送する際には 10BASE-T から 1000BASE-T にリンク速度を切替えた方がより少ない電力量で通信可能なことがわかる。提案手法を適用した際のリンク速度の遷移は図 2 のようになる。

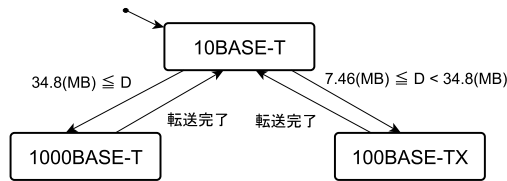


図 2 単一通信におけるリンク速度の遷移

図 2 に示した通り、開始状態では最も低いリンク速度である 10BASE-T でリンクアップを行う。アプリケーションからデータ容量の通知を受けた時、データ容量に応じて 100BASE-TX、もしくは 1000BASE-T へのリンク速度遷移が生じ、転送完了後に 10BASE-T に遷移する。

3.2.2 複数の通信

提案手法で複数の通信に対応するため、取得するデータ容量は、取得までに発生した複数の通信要求によるデータ容量の総和とする。つまり、いくつかの通信をまとめて 1 つの通信と見立て、提案手法を適用する。

複数通信への対応に伴い、式 (1)、式 (2) を以下のように変更した。

最も低いリンク速度でリンクアップしている場合

$$E_{stay} = W_{link} \frac{D}{S_{link}} \quad (3)$$

$$E_{change} = W_{next} \frac{D}{S_{next}} + E_{link/next} + E_{next/min} \quad (4)$$

上記以外のリンク速度でリンクアップしている場合

$$E_{stay} = W_{link} \frac{D}{S_{link}} \quad (5)$$

$$E_{change} = W_{next} \frac{D}{S_{next}} + E_{link/next} \quad (6)$$

変数の示す内容は単一通信時と同じである。

次に、複数通信に対応した際のリンク速度制御を図 3 に示す。図 3 中のリンク速度は最も低いものから順にリンク速度 1、リンク速度 2、...、リンク速度 n とする。データ容量に応じたリンク速度の決定は上記の数式を用いて行う。特に 10BASE-T、100BASE-TX、1000BASE-T を選択可能な環境を例にとると、リンク速度が 10BASE-T の場合は、式 (3) と式 (4) を用いる。従って図 1 と同様の図となり、図 1 上の各線の交点を求める事により 7.91MB 以上、36.9MB 未満のデータを転送する際にはリンク速度を 10BASE-T から 100BASE-TX にリンク速度を切り替え、36.9MB 以上のデータを転送する際には 10BASE-T から 1000BASE-T にリンク速度を切替えた方がより少ない電力量で通信可能

なことがわかる。

リンク速度が 100BASE-TX の場合は、式 (6) を用いる。図 1 と同等の図を描いて電力量の交点を求める事により 40.0MB 以上のデータを転送する際にはリンク速度を 100BASE-TX から 1000BASE-T にリンク速度を切替えた方がより少ない電力量で通信可能なことが確認できた。

以上のことを踏まえ、データ容量に応じたリンク速度切替のリンク速度遷移を以下の図 4 に示す。

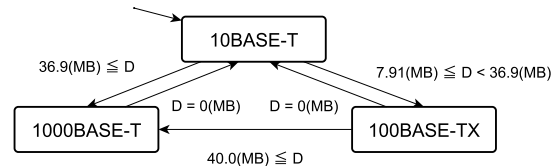


図 4 複数通信のリンク速度遷移

図 4 に示した通り、開始状態では最も低いリンク速度である 10BASE-T でリンクアップを行う。アプリケーションからデータ容量の通知を受けた時、データ容量に応じて 100BASE-TX、もしくは 1000BASE-T へのリンク速度遷移が生じる。図 3 に示した手順で制御を行うため、図 2 に示した単一通信のリンク速度遷移に比べ、100BASE-TX から 1000BASE-T へのリンク速度切替が追加されている。また、100BASE-TX および 1000BASE-T から 10BASE-T へのリンク速度切替には転送完了ではなく、データ容量が 0MB であるかどうかで判断を行う。

4. 評価実験および考察

本節では、3 節で提案した手法に関して、定常的な通信と非定常的な通信が発生する組み込みシステムとして想定される環境を構築し、提案手法の有効性を評価するため実際に消費電力量の測定を行った結果とその考察を記す。

4.1 評価実験方法

評価実験では、提案手法のリンク速度切替が適切に動作し、かつ、電力量削減効果を測定するための環境として監視カメラを想定した環境を用いた。監視カメラは常時稼働することが前提であり、転送するデータ容量に応じてリンク速度を切り替えることが重要となる。例えば、監視カメラでは 1 時間ごとなどの定常的な静止画の撮影が行われ、かつ、動体を検知した場合には非定常な動画撮影を行うといった動作が想定される。こうした状況では転送を行わない場合、もしくは静止画や短時間の動画のようにデータ容量の小さいデータの場合には転送速度の低いリンク速度で通信を開始し、長時間の動画のようなデータ容量の大きいデータの場合には転送速度の高いリンク速度で通信を行うべきであるため、評価実験の環境として選択した。単一通信の評価実験ではカメラ 1 台の監視カメラを想定し、複数

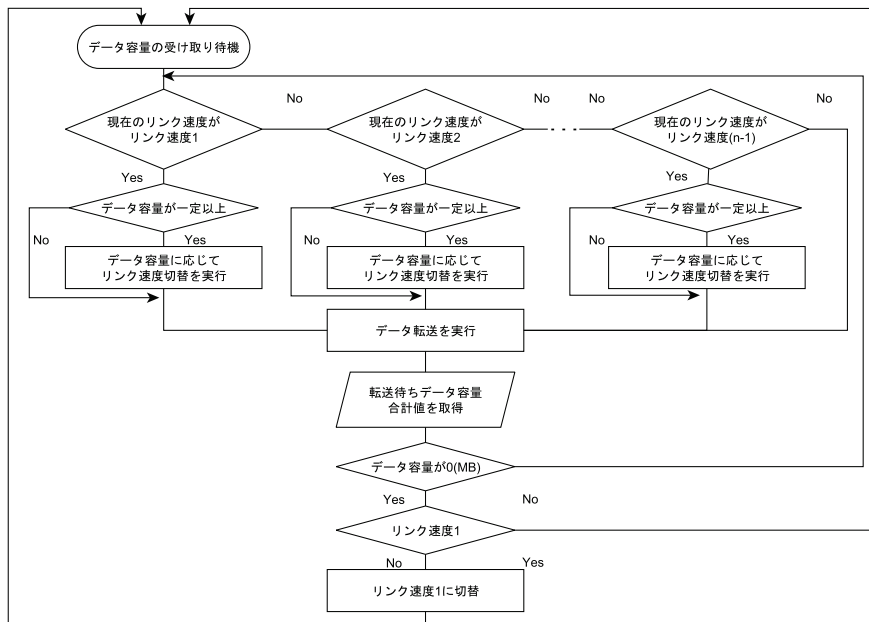


図 3 複数通信のリンク速度決定手順

通信の評価実験にはカメラ 3 台による 3 方向の撮影を想定した。カメラは動体検知等の処理を行うカメラサーバに接続され、撮影したデータはカメラサーバからログサーバに転送される。

評価において、カメラサーバには Intel 製 NUC DN2820FYKH を用いた。カメラで動体検知による動画撮影を行うため、Ubuntu Linux 上で 1 台以上のカメラからの映像信号を監視し、動体検知によって各種動作を設定できるプログラムである Motion[11] を動作させている。今回の実験では実験結果の考察を簡略化するため静止画の撮影は行わず、動体検知によって動画撮影を開始、カメラ内で動体検知が反応しなくなるまで動画の撮影を行うこととする。ログサーバへのデータ転送は動画ファイル生成後に行うようにした。また、対照実験において同一条件で測定できるようにするため、監視カメラの動作を想定した異なる長さの動画を、それぞれのカメラの前に間欠的に流れるようにした。これによって動体検知で撮影された動画が短時間の動画でデータ容量の小さなデータの場合には転送速度の低いリンク速度で、長時間の動画でデータ容量の大きなデータの場合には転送速度の高いリンク速度で通信を行うためリンク速度切替が行われる。この一連の動作の中で消費する電力を 3.1 節と同様の方法を用い、カメラサーバ側のハブで測定を行った。

実験環境においてカメラサーバ、ログサーバ間の転送速度を測定したところ、 $S_{10} = 1.17(\text{MB/s})$ 、 $S_{100} = 11.7(\text{MB/s})$ 、 $S_{1000} = 117(\text{MB/s})$ となった。これを踏まえ 3.2.1 節、3.2.2 節の式を用いたリンク速度の遷移条件の D の値は、10BASE-T から 1000BASE-T が 36.9MB、10BASE-T から 100BASE-TX が 7.46MB、100BASE-TX から 1000BASE-

T が 37.7MB となった。また、複数通信に対する評価実験において図 3 に示す制御手順を用いた。

4.2 評価結果

4.2.1 消費電力量削減結果

提案手法 (単一通信) に関する評価実験

単一通信に対して提案手法を適用した場合の、計測ポイントとなるハブでの電流値推移を図 5 に示す。

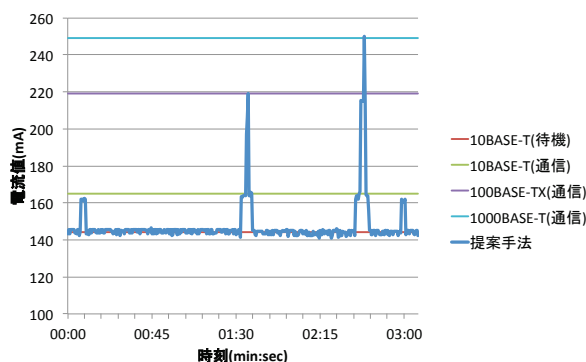


図 5 単一通信での計測ポイントにおける電流変化

図 5 における縦軸は電流値を、横軸は時間を示している。ここで、参考として各リンク速度における消費電力の平均値を表 3 に示す。

表 3 リンク速度に応じた待機時/通信時の消費電力

物理層	待機時 (W)	通信時 (W)
10BASE-T	0.485	0.545
100BASE-TX	0.554	0.723
1000BASE-T	0.653	0.822

表 3 を参考に図 5 を確認すると、データ容量に応じてリンク速度を 10BASE-T から切り替えを行ったことが電流値から確認でき、通信終了後には 10BASE-T で待機しており、結果として通信時電力量が最も低くなるようにリンク速度を切り替えて制御されていることが確認できる。例えば図 5 の 10 秒付近では 10BASE-T で通信を行い、2 分 35 秒付近ではリンク速度を 10BASE-T から 1000BASE-T に切り替えて通信を行っていることが確認できる。

次にカメラ 1 台でカメラサーバを 1 時間稼働させた場合の電力量に関する結果を図 6 に示す。

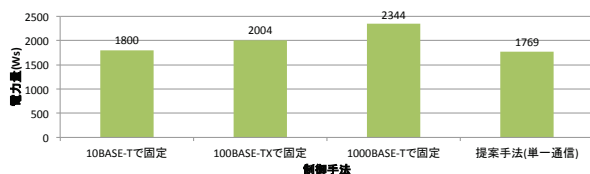


図 6 単一通信に対する提案手法による実験結果 (電力量)

図 6 より提案手法 (単一通信) が電力量を最も低く制御できていることが確認でき、提案手法 (単一通信) とリンク速度を 1000BASE-T で固定した場合と比較を行うと 24.5% の電力量削減に成功している。図 6 の各値に対する考察は 4.3 節で述べる。

提案手法 (複数通信) に関する評価実験

複数通信に対して提案手法を適用した場合の、計測ポイントとなるハブでの電流値推移を図 7 に示す。

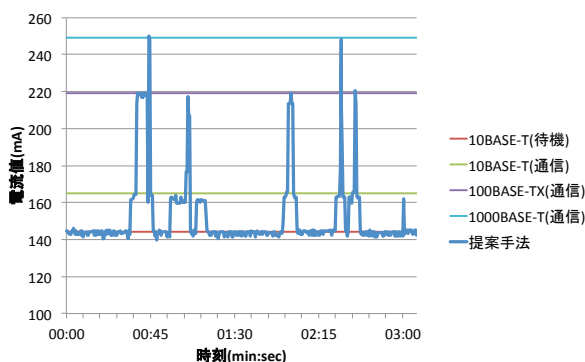


図 7 複数通信での計測ポイントにおける電流の変化

表 3 を踏まえ、図 7 よりデータ容量に応じてリンク速度が切り替えられている様子が確認できる。単一通信とは異なり、次の通信に備えてリンク速度を 10BASE-T に戻さず、100BASE-TX から 1000BASE-T へ切り替えて通信を行っている様子もみられ、複数の通信に対してもデータ容量に応じてリンク速度を制御できている。例えば、45 秒付近では 100BASE-T で通信を行っていたが、途中で 1000BASE-T に切り替えて通信を行ったことが確認できる。

次に、カメラを 3 台としてカメラサーバを 1 時間稼働させた場合の電力量に関する結果を図 8 に示す。

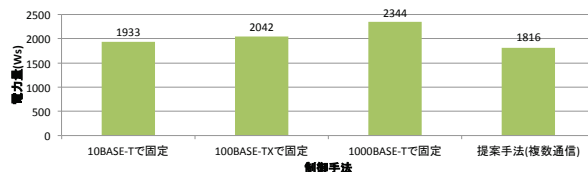


図 8 複数通信に対する提案手法による実験結果 (電力量)

図 8 より、複数通信においても提案手法 (複数通信) によって電力量が最も低くなるようにリンク速度を制御できていることが確認でき、提案手法 (複数通信) によって制御した場合と、リンク速度を 1000BASE-T で固定した場合とを比較すると、22.5% の電力量削減に成功している。図 8 の各値に対する考察も 4.3 節で述べる。

4.2.2 各リンク速度での動作状況

前節で示した実験結果より電力量の削減が実現されたことを確認できた。本節では評価実験において各機器の動作状況や、また、カメラサーバにおけるデータ容量に関してなど、考察に必要な実験データを示す。

単一通信における各機器の動作状況

カメラ 1 台をカメラサーバで稼働させ、単一通信を 1 時間行った際のリンク速度切替回数を表 4 に示す。

表 4 単一通信におけるリンク速度切替回数

リンク速度切替	切替回数 (回)
10BASE-T/100BASE-TX(10/100)	51
10BASE-T/1000BASE-T(10/1000)	31
100BASE-TX/10BASE-T(100/10)	51
100BASE-TX/1000BASE-T(100/1000)	0
1000BASE-T/10BASE-T(1000/10)	31

表 4 より、図 2 で示したリンク速度遷移が実現されていることが確認できる。単一通信においては 100/1000 のリンク速度切替は行われなため、0 回が正常な動作である。また、10/100 と 100/10、10/1000 と 1000/10 のように対応しているリンク速度切替の回数は同一となっている。

データ容量で分類した動画ファイル数は、7.46MB 未満が 16 個、7.46MB 以上 34.8MB 未満が 51 個、34.8MB 以上が 31 個であった。様々なデータ容量の転送が行われていたことが確認できる。また、これは表 4 における 10/100 と 10/1000 のリンク速度切替回数と等しくなっている。このことからデータ容量をもとに確実なリンク速度切替が行われたことと、電力量が最も低くなるよう適切なリンク速度が選択されたことが確認できる。

複数通信における各機器の動作状況

カメラ 3 台をカメラサーバで稼働させ、複数通信を 1 時間行った際のリンク速度切替回数を表 5 に示す。

表 5 複数通信におけるリンク速度切替回数

リンク速度切替	切替回数 (回)
10BASE-T/100BASE-TX(10/100)	88
10BASE-T/1000BASE-T(10/1000)	41
100BASE-TX/10BASE-T(100/10)	77
100BASE-TX/1000BASE-T(100/1000)	11
1000BASE-T/10BASE-T(1000/10)	52

表 5 より、図 4 で示したリンク速度遷移が実現されていることが確認できる。また、複数通信においては単一通信と異なり、100/1000 のリンク速度切替が行われていることが確認できる。

データ容量で分類した動画ファイル数は、7.46MB 未満が 37 個、7.46MB 以上 34.8MB 未満が 127 個、34.8MB 以上が 58 個であった。単一通信同様様々なデータ容量の転送が行われていたことがわかる。また、この結果と表 5 の値を比較すると、全く同じ値となった単一通信の結果と大きく異なり、複数通信における各値は等しくない。このことから複数のデータ容量をまとめてリンク速度を決定、リンク速度切替を実行していることがわかる。

4.3 リンク速度制御手法に対する考察

提案手法では待機状態ではリンク速度を可能な限り低くして、通信状態では転送するデータ容量に合わせたリンク速度を選択して変更を行っている。このことから通信量が多く、常に 1000BASE-T を利用するような環境では提案手法の効果は薄い。逆に、転送量が著しく少ない場合においても常に 10BASE-T のみを利用する制御と同等となってしまうため提案手法の効果は薄くなってしまふ。提案手法が最も効果的に使用されるのは、様々なデータ容量の通信が混在する状況であり、こうした状況では常にリンク速度を一定として制御することで電力量の無駄を生じてしまふ機会が増えるため、提案手法が有効である。

また、リンク速度切替には表 2 に示した遅延時間が発生する。遅延時間は切り替えるリンク速度によって様々だが、最大で 5 秒弱の遅延が発生している。提案手法においてはリンク速度切替を頻繁に実施するため、データ転送のたびに遅延時間が発生する。こうしたリンク速度切替で生じる遅延時間によるデータ転送の遅れは、遅延の許されない状況において致命的となる場合があるため注意しなければならない。しかし、提案手法における最大の焦点は電力量の削減であり、電力量削減のために多少のデータ到達遅延を許容できるシステムにおいては、データ容量を考慮しての適切なリンク速度選択によるアプリケーション主導のリンク速度切替が実施できるため有用と考えられる。

5. まとめ

ネットワーク機器の省電力化の方法として、クライアント側のアプリケーション主導のリンク速度制御という手法を提案し評価を行った。想定環境として監視カメラを用いた評価実験によって、リンク速度を制御しなかった場合と提案手法との比較を行った。実験結果から、提案手法とリンク速度を 1000BASE-T で固定した場合とを比べ、単一通信の場合は 24.5%の電力量削減、複数通信の場合は 22.5%の電力量削減が可能であることを示せた。

今後の課題としては、より幅広い環境に対応できる制御方法とすることと通信状況の学習などによる投機的なリンク速度制御での効率的な制御が挙げられる。また、提案手法ではアプリケーションから通知されるデータ容量を用いてリンク速度を決定しているが、さらなる電力量削減のためには通信状況をアプリケーション特有のパラメータを用いて推測し、リンク速度を決定することや、通信状況を学習して定常的な通信を予期したリンク速度切替を実行することが必要となる。

参考文献

- [1] T. Asami, et al., "Energy consumption targets for network systems," *34th European Conference on Optical Communication*, pp. 1-4, 2008.
- [2] Kurt Roth, et al., "Energy consumption by office and telecommunications equipment in commercial buildings volume i: energy consumption baseline," *National Technical Information Service (NTIS), US Department of Commerce, Springfield, VA*, 2002.
- [3] K. Christensen, et al., "IEEE 802.3az: the road to energy efficient ethernet," *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 48, No. 11, pp. 50-56, 2010.
- [4] Cisco and Intel, "IEEE 802.3az Energy Efficient Ethernet: より環境に配慮したネットワークの構築," 2011.
- [5] F. Blanquicet, et al., "An Initial Performance Evaluation of Rapid PHY Selection (RPS) for Energy Efficient Ethernet," *LCN 2007*, pp. 223-225, 2007.
- [6] K. Christensen, "Rapid phy selection (rps): Emulation and experiments using pause," *Presentation at IEEE*, Vol. 802, 2007.
- [7] B. Zhang, et al., "Real-time performance analysis of adaptive link rate," *LCN 2008*, pp. 282-288, 2008.
- [8] H. Anand, et al., "Ethernet Adaptive Link Rate (ALR): Analysis of a MAC Handshake Protocol," *LCN 2006*, pp. 533-534, 2006.
- [9] C. Gunaratne, et al., "Reducing the Energy Consumption of Ethernet with Adaptive Link Rate (ALR)," *IEEE Trans. on Computer.*, Vol. 57, No. 4, pp. 448-461, 2008.
- [10] 大森幹之ら, "トラフィックに応じた通信機器の給電制御に関する研究," *電子情報通信学会技術研究報告. インターネットアーキテクチャ*, Vol. 110, No. 417, pp. 1-6, 2011.
- [11] <http://www.lavrsen.dk/foswiki/bin/view/Motion/WebHome>