

低速・低品質無線ネットワークでのグッドプットを
最大化するペイロード長について
—タイムアウト値が往復応答時間より大きい場合—

池川 隆司

[研究論文] 低速・低品質無線ネットワークでのグッドプットを
最大化するペイロード長について
—タイムアウト値が往復応答時間より大きい場合—

池川隆司

神奈川工科大学非常勤講師
東京大学大学院数理科学研究科特任研究員
早稲田大学理工学術院総合研究所招聘研究員

Payload size to maximize goodput for lossy low-speed wireless networks: Case of
timeout value exceeding round trip time

Takashi IKEGAWA

Abstract

In this paper, we discuss several analytical methods to obtain payload size which maximizes goodput for lossy low-speed wireless networks in case of timeout value exceeding round trip time. We show that the values obtained from an approximate model where packet corruption probability is approximately expressed by an exponential function meet well with those from an exact model, and the values obtained from an approximate closed-form yield a large error.

Keywords: Goodput, payload size, timeout value, round trip time

1 はじめに

低消費電力無線 PAN (LoWPAN: Low-Power Wireless Personal Area Network) [1]、低消費電力 WAN (LPWAN: Low-Power Wide Area Network) [2] のような低速で低品質 (つまりビット誤りが頻繁に発生する) 回線から構成される無線ネットワーク (本稿では低速・低品質無線ネットワークと呼ぶ) は、IoT (Internet of Things) の基盤ネットワークの一つとして重要な役割を果たす [3]。

パケット (回線上で転送されるデータ単位) がビット誤りとなる確率 (本稿ではパケット誤り率と呼ぶ) やパケット転送時間は、パケット長にほぼ比例する。そのため、パケット長はグッドプットのような QoS (Quality of Service) に影響を与える [4]。特に、低速・低品質無線ネットワークでは、パケット長が QoS に多大な影響を与える。そこで、低速・低品質無線ネットワークにおいて、ペイロード長 (パケットの情報フィールド長の最大値) が QoS に与える影響や、ペイロード長の QoS に対する最適化問題に関する研究が、近年活発に行われている (例えば [4-10])。

低速・低品質無線ネットワークでは、Stop-and-Wait 方式と呼ばれる簡単な誤り回復方式が実装されている。Stop-and-Wait 方式では、送信局はパケットを送信後、受信局から一定時間 (タイムアウト値)、応答がない場合、送信したパケットが廃棄されたときのみ、そのパケットを再送する。

今までのほとんどの性能解析モデルでは、解析を容易にす

るために、タイムアウト値がパケットの往復応答時間に等しいと仮定している。しかし、実際のシステムでは、無意味なタイムアウトの発生を避けるために、タイムアウト値は往復応答時間より大きな値が設定される。

本稿では、ビット誤りが独立に発生する低速・低品質無線ネットワークにおいて、タイムアウト値が往復応答時間より大きい場合のグッドプットを最大化するペイロード長の厳密解を求める手法と近似解を求める手法を提案するとともに、その近似精度を考察する。

本稿の構成は次の通りである。次節にて、本稿で取り上げたネットワークモデルを説明する。3 節において、グッドプットの厳密解を導出する。本稿では、厳密解のみならず、パケット誤り率を指数関数で近似した解析解も導出する。4 節では、3 節で導出したグッドプットの解析解を用いて、グッドプットを最大化するペイロード長 (本稿では最適ペイロード長と呼ぶ) の厳密解を導出する。4 節で導出された最適ペイロード長の厳密解は、非線形方程式となる。そこで、5 節では、最適ペイロード長の閉鎖型の近似解を導出する。6 節では、低速・低品質無線ネットワークを LoWPAN とし、LoWPAN を使って、EXI (Efficient XML Interchange) と CoAP (Constrained Application Protocol) のデータを含む IPv6 パケットを転送するシナリオのもとで、グッドプットを最大化する各近似解析解の精度を評価する。最後に、7 節で本稿をまとめるとともに今後の課題を述べる。

2 ネットワークモデル

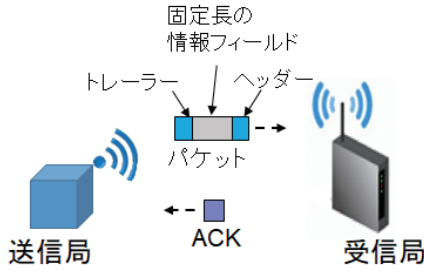


図 1. ネットワークモデル

本稿では、固定長の情報フィールドを含むパケットを、ビット誤りが発生する回線で転送するネットワークを考える (図 1 参照)。

以下の仮定を設ける。

- 情報フィールド長の値は固定であり、その値を ℓ とする。 ℓ はペイロード長と等しいと仮定する。
- ビット誤りが発生したパケットは、次に述べる Stop-and-Wait 方式により再送される。
 - 受信局は、ビット誤りのないパケットを受信した時、送信局に送達確認 (ACK: acknowledgement) を返送する。
 - 受信局は、ビット誤りを含むパケットを受信した時、そのパケットを廃棄する。
 - 送信局はパケットを送信後、タイムアウト値 t_{out} と呼ばれる一定時間待っても、受信局から ACK を受信しない場合、送信したパケットが廃棄されたと判断し、そのパケットを再送する。
- 同一パケットの最大再送回数は無限とする。
- ACK の長さを一定値 $\ell^{(\text{ACK})}$ とする。
- 送信局には、常に送信すべきパケットが存在する。つまり、飽和トラヒック状態を仮定する。
- ヘッダー、トレーラーのような PCI (Protocol Control Information) の長さを一定値 $\ell^{(\text{h})}$ とする。
- 無線回線の伝送速度は固定値 μ_c とする。
- 無線回線では、ビット誤り率 $p_e (< 1)$ で互いに独立にビット誤りが発生する。

無意味なタイムアウトの発生を避けるために、タイムアウト値 t_{out} は往復応答時間 $(\ell + \ell^{(\text{h})} + \ell^{(\text{ACK})})/\mu_c$ より大きいと仮定する。つまり、以下を満たすと仮定する。

$$t_{\text{out}} > \frac{\ell + \ell^{(\text{h})} + \ell^{(\text{ACK})}}{\mu_c}. \quad (1)$$

3 グッドプットの解析解

本節では、まずグッドプットの厳密解を導出する。次に、パケット誤り率を指数関数で近似したグッドプットの近似解を導出する。

3.1 厳密解

G をグッドプットつまり受信局が単位時間あたりに正しく受信した平均ビット数と定義する。 G の解析解の導出にあたって、次の確率変数を導入する。

$L_\kappa^{(\text{pi})}$: κ 番目パケットの情報フィールド長。仮定より常に ℓ となる (つまり、すべての κ において $L_\kappa^{(\text{pi})} = \ell$)。

$T_\kappa^{(\text{p})}$: 送信局が $L_\kappa^{(\text{pi})}$ の情報フィールド長を持つ κ 番目パケットを送信後、 κ 番目パケットに対する送達確認する (つまり ACK を受信する) までの時間

この時、グッドプット G は次式で与えられる。

$$G = \frac{\ell}{E[T_\kappa^{(\text{p})} | L_\kappa^{(\text{pi})} = \ell]}. \quad (2)$$

(2) 式内の $E[T_\kappa^{(\text{p})} | L_\kappa^{(\text{pi})} = \ell]$ は、次式で与えられる。

$$E[T_\kappa^{(\text{p})} | L_\kappa^{(\text{pi})} = \ell] = \frac{\ell + \ell^{(\text{h})} + \ell^{(\text{ACK})}}{\mu_c} + \frac{\text{PER}(\ell) t_{\text{out}}}{1 - \text{PER}(\ell)}. \quad (3)$$

ここで、 $\text{PER}(\ell)$ は、情報フィールド長が ℓ であるパケットがビット誤りとなる確率 (つまりパケット誤り率) であり、

$$\text{PER}(\ell) = 1 - (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}}, \quad (4)$$

として与えられる。

(4) 式を (3) 式に代入すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} E[T_\kappa^{(\text{p})} | L_\kappa^{(\text{pi})} = \ell] &= \frac{\ell + \ell^{(\text{h})} + \ell^{(\text{ACK})}}{\mu_c} + \frac{\{1 - (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}}\} t_{\text{out}}}{(1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}}} \\ &= \frac{(\ell + \ell^{(\text{h})} + \ell^{(\text{ACK})}) (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}} + \{1 - (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}}\} \mu_c t_{\text{out}}}{\mu_c (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}}}. \end{aligned} \quad (5)$$

(5) 式を (2) 式に代入すると、グッドプット G は、

$$G = \frac{\ell \mu_c (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}}}{(\ell + \ell^{(\text{h})} + \ell^{(\text{ACK})}) (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}} + \{1 - (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(\text{h})}}\} \mu_c t_{\text{out}}}, \quad (6)$$

として与えられる。

3.2 近似解

パケット誤り率を表す (4) 式を、次のように近似する。

$$\text{PER}(\ell) \approx 1 - e^{-p_e (\ell + \ell^{(\text{h})})}. \quad (7)$$

(7) 式を (6) 式に代入すると、グッドプットの近似解 \tilde{G} は、

$$\tilde{G} = \frac{\ell \mu_c e^{-p_e (\ell + \ell^{(\text{h})})}}{(\ell + \ell^{(\text{h})} + \ell^{(\text{ACK})}) e^{-p_e (\ell + \ell^{(\text{h})})} + (1 - e^{-p_e (\ell + \ell^{(\text{h})})}) \mu_c t_{\text{out}}}, \quad (8)$$

として与えられる。

4 最適ペイロード長

本節では、前節で導出したグッドプットの厳密解と近似解を用いて、グッドプットを最大化するペイロード長 (最適ペイロード長) の厳密解と近似解を導出する。

4.1 厳密解

グッドプット G の最適ペイロード長を ℓ_{opt} とする。つまり、

$$\ell_{\text{opt}} \triangleq \arg \max_{\ell} G. \quad (9)$$

最適ペイロード長 ℓ_{opt} の必要条件は、 $\frac{\partial G}{\partial \ell} = 0$ を満たす ℓ が ℓ_{opt} となることである。

(6) 式の分母と分子をそれぞれ f, g とする。この時、 $\frac{\partial G}{\partial \ell}$ の分子は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial \ell} \text{ の分子} &= g' f - g f' \\ &= \mu_c (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(h)}} \\ &\quad \times \left[(1 + \ell \log(1 - p_e)) (\ell + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})}) (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(h)}} \right. \\ &\quad \left. + (1 + \ell \log(1 - p_e)) \left\{ 1 - (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(h)}} \right\} \mu_c t_{\text{out}} \right. \\ &\quad \left. - \ell (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(h)}} \right. \\ &\quad \left. \times \left\{ 1 + \log(1 - p_e) (\ell + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) \right\} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

として与えられる。

$\mu_c (1 - p_e)^{\ell + \ell^{(h)}} > 0$ に注意すると、最適ペイロード長 ℓ_{opt} は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} &(1 + \ell_{\text{opt}} \log(1 - p_e)) (\ell_{\text{opt}} + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})}) (1 - p_e)^{\ell_{\text{opt}} + \ell^{(h)}} \\ &\quad + (1 + \ell_{\text{opt}} \log(1 - p_e)) \left\{ 1 - (1 - p_e)^{\ell_{\text{opt}} + \ell^{(h)}} \right\} \mu_c t_{\text{out}} \\ &\quad - \ell_{\text{opt}} (1 - p_e)^{\ell_{\text{opt}} + \ell^{(h)}} \\ &\quad \times \left\{ 1 + \log(1 - p_e) (\ell_{\text{opt}} + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) \right\} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式は、次のように変形できる。

$$\begin{aligned} &(\ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) (1 - p_e)^{\ell_{\text{opt}} + \ell^{(h)}} + \mu_c t_{\text{out}} \\ &\quad + \ell_{\text{opt}} \log(1 - p_e) \mu_c t_{\text{out}} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

4.2 近似解

パケット誤り率を (7) 式を使って近似した時のグッドプットの近似解 \tilde{G} を用いた、最適ペイロード長を $\tilde{\ell}_{\text{opt}}$ で表す。つまり、

$$\tilde{\ell}_{\text{opt}} \triangleq \arg \max_{\ell} \tilde{G}. \quad (13)$$

$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial \ell}$ の分子は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{G}}{\partial \ell} \text{ の分子} &= \mu_c e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} \\ &\quad \times \left[(1 - p_e \ell) (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})}) e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} \right. \\ &\quad \left. + (1 - p_e \ell) \left(1 - e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} \right) \mu_c t_{\text{out}} \right. \\ &\quad \left. - \tilde{\ell}_{\text{opt}} e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} \right. \\ &\quad \left. \times \left\{ 1 - p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) \right\} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

$\mu_c e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} > 0$ に注意すると、最適ペイロード長 $\tilde{\ell}_{\text{opt}}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} &(1 - p_e \tilde{\ell}_{\text{opt}}) (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})}) e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} \\ &\quad + (1 - p_e \tilde{\ell}_{\text{opt}}) \left\{ 1 - e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} \right\} \mu_c t_{\text{out}} \\ &\quad - \tilde{\ell}_{\text{opt}} e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} \\ &\quad \times \left\{ 1 - p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) \right\} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

(15) 式は、次のように変形できる。

$$\begin{aligned} &(\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} + \mu_c t_{\text{out}} \\ &\quad - p_e \tilde{\ell}_{\text{opt}} \mu_c t_{\text{out}} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

注 1 (12) 式と (16) 式は、それぞれ $\ell_{\text{opt}}, \tilde{\ell}_{\text{opt}}$ の非線形方程式であるが、二分法のような数値解析を使うことによって、 ℓ_{opt} と $\tilde{\ell}_{\text{opt}}$ の値を求めることができる。

5 閉鎖型の最適ペイロード長

閉鎖型の最適ペイロード長を ℓ_{closed} とする。

本稿では、(16) 式を使って、閉鎖型の最適ペイロード長を求める。

(16) 式内の $e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})}$ は、次のように近似できる。

$$\begin{aligned} e^{-p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)})} &\approx 1 - p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)}) + \frac{\left\{ p_e (\tilde{\ell}_{\text{opt}} + \ell^{(h)}) \right\}^2}{2} \\ &= 1 - p_e \ell^{(h)} + \frac{p_e^2 \{\ell^{(h)}\}^2}{2} \\ &\quad + p_e (p_e \ell^{(h)} - 1) \tilde{\ell}_{\text{opt}} + \frac{p_e^2 \{\tilde{\ell}_{\text{opt}}\}^2}{2}. \end{aligned} \quad (17)$$

(17) 式を (16) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} &(\ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) \\ &\quad \times \left\{ 1 - p_e \ell^{(h)} + \frac{p_e^2 \{\ell^{(h)}\}^2}{2} + p_e (p_e \ell^{(h)} - 1) \tilde{\ell}_{\text{opt}} + \frac{p_e^2 \{\tilde{\ell}_{\text{opt}}\}^2}{2} \right\} \\ &\quad + \mu_c t_{\text{out}} - p_e \tilde{\ell}_{\text{opt}} \mu_c t_{\text{out}} \\ &= (\ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) \left(1 - p_e \ell^{(h)} + \frac{p_e^2 \{\ell^{(h)}\}^2}{2} \right) + \mu_c t_{\text{out}} \\ &\quad + p_e \left[(\ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) (p_e \ell^{(h)} - 1) - \mu_c t_{\text{out}} \right] \tilde{\ell}_{\text{opt}} \\ &\quad + (\ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}) \frac{p_e^2 \{\tilde{\ell}_{\text{opt}}\}^2}{2} \\ &= A \left(1 - p_e \ell^{(h)} + \frac{p_e^2 \{\ell^{(h)}\}^2}{2} \right) + \mu_c t_{\text{out}} \\ &\quad + p_e \left[A (p_e \ell^{(h)} - 1) - \mu_c t_{\text{out}} \right] \tilde{\ell}_{\text{opt}} + A \frac{p_e^2 \{\tilde{\ell}_{\text{opt}}\}^2}{2} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、(18) 式内の A は、

$$A \triangleq \ell^{(h)} + \ell^{(\text{ACK})} - \mu_c t_{\text{out}}, \quad (19)$$

として定義される。(1) 式と (19) 式より、

$$A < -\ell < 0, \quad (20)$$

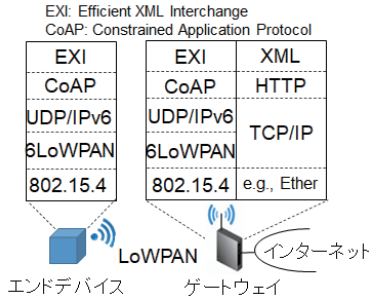


図 2. 数値例での低速・低品質無線ネットワークモデル

である。

よって、 ℓ_{closed} は、

$$\tilde{\ell}_{\text{closed}} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (21)$$

$$a \triangleq \frac{A p_e^2}{2} < 0, \quad (22)$$

$$b \triangleq p_e \left[A \left(p_e \ell^{(h)} - 1 \right) - \mu_c t_{\text{out}} \right] < 0, \quad (23)$$

$$c \triangleq A \left(1 - p_e \ell^{(h)} + \frac{p_e^2 \{\ell^{(h)}\}^2}{2} \right) + \mu_c t_{\text{out}} > 0, \quad (24)$$

として与えられる。

注 2 $a < 0, b < 0, c > 0$ (それぞれ、(22), (23), (24) 式参照) より、

$$\sqrt{b^2 - 4ac} > |b| = -b, \quad (25)$$

となるため、

$$-b - \sqrt{b^2 - 4ac} < -b + b = 0, \quad (26)$$

を得る。上式と $a > 0$ より、

$$\tilde{\ell}_{\text{closed}} > 0, \quad (27)$$

を満たす。

6 数値例と考察

図 2 に、数値例で用いた低速・低品質無線ネットワークモデルを示す。LoWPAN によって、センサーノードとゲートウェイが接続されていると仮定する (図 2 参照)。センサーノードとゲートウェイには、6LoWPAN (IPv6 over LoWPANs) [1] の機能が実装されていると仮定する。図 2 で示したプロトコルスタックは、スマートシティの IoT で用いられている [12]。

本数値例では、以下のパラメータ値を用いた。

- 伝送速度 μ_c : 100 Kbps
- PCI 長 $\ell^{(h)}$: 29 bytes
- ACK 長 $\ell^{(\text{ACK})}$: 15 bytes
- タイムアウト値 timeout value t_{out} : 1 s

表 1 に、異なるビット誤り率において、以下の三つの最適ペイロード長を示す。

- 厳密解 (12) 式によって得られる値
- 近似解 (16) 式によって得られる値
- 閉鎖型近似解 (21) 式によって得られる値

表 1. 異なるビット誤り率において各解析解における最適ペイロード長 [bytes]

方式	ビット誤り率			
	10^{-5}	10^{-4}	2×10^{-4}	5×10^{-4}
厳密解	1303.36	267.16	177.25	103.16
近似解	1303.37	267.17	177.27	103.17
閉鎖型近似解	1280.87	256.09	166.64	92.56

表 1 から、近似解は若干危険側の近似となるが、厳密解によって得られる値と近似解で得られる値は、ほぼ一致することがわかる。これは、(7) 式で示したパケット誤り率を表す解が、良い近似であることに起因する。例えば、ビット誤り率が 10^{-4} の時のパケット誤り率の厳密解 (4) 式の値と近似解 (7) 式によって得られる値は、それぞれ 0.43699 と 0.43696 である。

一方、閉鎖型近似解は、大きな近似誤差が発生し、安全側の近似となることがわかる。例えば、ビット誤り率が 10^{-4} の時の近似誤差 ((厳密解によって得られる値 - 閉鎖型近似解によって得られる値) / 厳密解によって得られる値) は 6.3% となる。

注 3 IEEE 802.15.4 で規定されているペイロード長は 127 bytes である [13]。ビット誤り率が高いネットワーク環境 (例えば、ビット誤り率が 5×10^{-4} の時) では、このペイロード長は妥当である。

7 おわりに

本稿では、ビット誤りが独立的に頻繁に発生する低速・低品質無線ネットワークにおいて、タイムアウト値が往復応答時間より大きい時のグッドプットを最大化するペイロード長を表現する 3 種類の解析解、1) 厳密解、2) パケット誤り率を指数関数で近似した近似解、3) 閉鎖型の近似解を導出した。数値例より、2) の近似解の近似精度は極めて良いが、3) の閉鎖型近似解の近似精度は良くないことが明らかとなった。

本稿では、ビット誤りが独立に発生すると仮定した。実際は、バースト的に発生することが知られている [14]。今後は、バースト的にビット誤りが発生する時のグッドプットを最大化するペイロード長の導出があげられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 22K12002 の支援を受けました。

参考文献

- [1] J. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter and B. Heile: "IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks", IEEE Network, **15**, 5, pp. 12–19 (2001).
- [2] U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara: "Low power wide area networks: An overview", IEEE Communications Surveys & Tutorials, **19**, 2, pp. 855–873 (2017).
- [3] H. Wang and A. O. Fapojuwo: "A survey of enabling technologies of low power and long range machine-to-machine communications", IEEE Communications Surveys & Tutorials, **19**, 4, pp. 2621–2639 (2017).
- [4] 池川隆司: "無線ネットワークにおける動的ペイロード長方式の研究動向", 神奈川工科大学研究報告.B, 理工学編, **44**, pp. 23–28 (2020).

- [5] M. Yigit, H. U. Yildiz, S. Kurt, B. Tavli and V. C. Gungor: “A survey on packet size optimization for terrestrial, underwater, underground, and body area sensor networks”, *Int. J. Communication Systems*, **31**, 11 (2018).
- [6] V. Freschi and E. Lattanzi: “A study on the impact of packet length on communication in low power wireless sensor networks under interference”, *IEEE Internet of Things Journal*, **6**, 2, pp. 3820–3830 (2019).
- [7] T. Ikegawa: “Effect of payload size on mean response time when message segmentations occur: Case of burst packet arrival”, *Proceedings of the 12th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, VALUETOOLS 2019*, New York, NY, USA, ACM, pp. 7–14 (2019).
- [8] 池川隆司: “メッセージ分割が発生する無線ネットワークでのグッドプット解析 —ビット誤りが独立的に発生する回線の場合—”, *神奈川工科大学研究報告.B, 理工学編*, **45**, pp. 17–26 (2021).
- [9] T. Ikegawa: “Goodput analysis for lossy low-speed wireless networks during message segmentation”, *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–7 (2021).
- [10] 池川隆司: “長さが可変であるパケットを転送する低速度・低品質無線ネットワークでのグッドプット解析 —パースト的にビット誤りが発生する場合—”, *神奈川工科大学研究報告.B, 理工学編*, **46**, pp. 7–15 (2022).
- [11] J. W. Hui and D. E. Culler: “Extending IP to low-power, wireless personal area networks”, *IEEE Internet Computing*, **12**, 4, pp. 37–45 (2008).
- [12] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista and M. Zorzi: “Internet of Things for smart cities”, *IEEE Internet of Things Journal*, **1**, 1, pp. 22–32 (2014).
- [13] “IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks”, *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, pp. 1–800 (2020).
- [14] A. Willig, M. Kubisch, C. Hoene and A. Wolisz: “Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical layer”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **49**, 6, pp. 1265–1282 (2002).

研究推進機構運営会議

議長 脇田 敏裕

構成委員 石田 裕昭

小池あゆみ

上平 員丈

高橋 勝美

星野 潤

井上 哲理

岡崎 美蘭

一色 正男

山家 敏彦

新田 晃司

山口 淳一

黄 啓新

兵頭 和人

三枝 亮

井藤 晴久

栗原 誠

高村 岳樹

井上 秀雄

塩川 茂樹

神奈川工科大学研究報告

B-47 理工学編 通巻 47 号

令和 5 年 3 月 1 日 発行

編集兼発行者 神 奈 川 工 科 大 学

〒 243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030

電 話 046-241-6221

印 刷 者 株式会社スクールパートナーズ

当該研究報告に掲載された論文の著作権は本学に帰属する。