

# Bluetooth パケット 種別の連続メディア同期品質への影響

加藤 正美<sup>†</sup> 大倉 浩嗣<sup>†</sup>  
田中 靖浩<sup>†</sup> 田坂 修二<sup>††</sup>

本論文では、Bluetooth による LAN アクセスシステムにおいて、蓄積された連続メディアを送送する場合を考える。そして、Bluetooth のパケット種別の違いがメディア同期品質に及ぼす影響を実験により明らかにする。Bluetooth では、ARQ (Automatic Repeat Request) と FEC (Forward Error Correction) の組み合わせ方と、1 パケットが占有するスロット数に応じて、複数のパケット種別を規定している。これらのパケット種別は、無線通信環境に応じて、それぞれ得られる性能が異なる。特に、連続メディアを送送する場合には、使用するパケット種別や無線通信環境によっては、再送による遅延の増加やその揺らぎが連続メディアの時間的構造を乱し、メディア同期品質を低下させるおそれがある。そのため、無線通信環境に応じて、どのようにパケット種別を選択するかが重要な課題となる。そこで、筆者らは、Bluetooth を利用したホットスポットにおけるストリーミングサービスを想定し、メディアサーバに蓄積されたビデオや音声を Bluetooth の LAN アクセスポイントを介してモバイル端末に伝送する実験システムを構築した。そして、無線 LAN システムなどからの電波の干渉を模擬するために白色雑音を付加し、各パケット種別において無線通信環境が通信品質、特に、メディア同期品質に及ぼす影響を実験により評価した。また、筆者らが既提案のメディア同期制御方式を実装し、その有効性も確認した。そして、無線通信環境に応じて Bluetooth のパケット種別を適応的に選択するための指針を明らかにした。

## The Effect of Bluetooth Packet Types on Media Synchronization Quality

MASAMI KATO,<sup>†</sup> HIROTSUGU OKURA,<sup>†</sup> YASUHIRO TANAKA<sup>†</sup>  
and SHUJI TASAKA<sup>††</sup>

This paper examines the effect of Bluetooth packet types on the media synchronization quality by experiment. Bluetooth specifies many packet types that differ in the use of Forward Error Correction (FEC) and the number of time slots occupied by a packet. The performance of Bluetooth communications depends on the selected packet type, which should be suitable for the channel quality provided. In the experiment, we consider a situation where a server transfers stored video and audio streams to a terminal on a point-to-point channel with white noise, which simulates interference from DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) systems. We apply the slide control scheme for media synchronization control and confirm its effectiveness.

### 1. ま え が き

携帯電話をはじめ、ノート型パーソナルコンピュータ(PC)やPDA(Personal Digital Assistant)などのモバイル端末の普及にともない、これらの端末が既存の移動体通信ネットワークなどのインフラストラ

クチャを利用せず、その場に応じて自律分散的に無線ネットワークを構築するアドホックネットワークが注目を集めている<sup>1)</sup>。なかでも Bluetooth<sup>2)</sup> は、モバイル端末間や周辺機器とを無線接続するアドホックネットワークの1つであり、省電力、かつ小型、安価という特長を活かし、モバイル端末などへの搭載が急速に進められている。また、アドホックネットワークを活用したホットスポットサービスの実現も期待されており、Bluetooth を利用したホットスポットにおけるインターネットアクセスやストリーミングサービスの提供が検討されている。

Bluetooth は、1台のマスタと最大7台までのスレー

<sup>†</sup> 三洋電機株式会社デジタルシステム技術開発センター  
Digital Systems Development Center, SANYO Electric Co., Ltd.

<sup>††</sup> 名古屋工業大学大学院工学研究科  
Department of Computer Science and Engineering,  
Nagoya Institute of Technology

ブからなるグループ(文献2)では Piconet と呼ぶ)を形成し、マスタのポーリング制御に従って通信を行う TDD( Time Division Duplex )システムである。周波数帯として 2.4 GHz 帯、いわゆる ISM( Industrial, Scientific and Medical )帯を使用する。そのため、同じ周波数帯を使用する IEEE 802.11 標準無線 LAN システムや電子レンジなど他の多くのシステムから電波の干渉を受ける。この影響を軽減するために Bluetooth では、周波数ホッピングによるスペクトル拡散通信方式を採用するとともに、ARQ( Automatic Repeat reQuest )や FEC( Forward Error Correction )による誤り制御方式を適用している。

Bluetooth では、伝送される情報が要求する品質に柔軟に対応するために、ARQ と FEC の組み合わせ方と、1 パケットが占有するスロット数に応じて、性質の異なる複数のパケット種別を定義し、多様な通信サービスを実現している。たとえば、ARQ だけを適用すれば、無線通信環境が良好なときには高いスループットが得られる。ARQ に加えて FEC を適用すれば、FEC のオーバーヘッドによりスループットが低下するものの、伝送誤りが発生しても誤り訂正により再送の発生頻度を低減でき、遅延の増加が抑えられる。

このように Bluetooth では、使用するパケット種別と無線通信環境に応じて得られる性能が異なる。さらに、ビデオや音声のような連続メディアを伝送する場合には、再送による遅延時間の増加やその揺らぎが連続メディアの時間的構造(メディア同期<sup>3),4</sup>)を乱し、アプリケーションレベルのサービス品質(QoS: Quality of Service<sup>5</sup>)を大きく損なう可能性がある。そのため、無線通信環境に応じて、どのようにパケット種別を選択するかが重要な課題となる。

Bluetooth の性能評価に関するこれまでの研究として、文献6)は遅延やスループット特性をシミュレーションにより評価している。また、文献7)は各パケット種別におけるスループット特性を実使用環境で測定し、文献8)は Bluetooth と IEEE 802.11b 無線 LAN の相互干渉が通信品質に及ぼす影響を疑似無線通信環境を利用した実験により評価している。しかし、いずれの研究においてもパケット種別と無線通信環境の影響に対する系統的な性能評価はなされておらず、無線通信環境に応じてパケット種別を適応的に選択するための指針を明確に与える研究はない。さらに、これらいずれの研究においてもパケットレベルの評価尺度を使用しており、メディア同期品質のようなアプリケーションレベルのサービス品質をも含めた性能評価はなされていない。

一方、メディア同期に関しては、筆者らはすでにメディア同期制御方式として VTR( Virtual Time Rendering )アルゴリズム<sup>9</sup>)や、これに基づくスライド制御<sup>10</sup>)を提案し、有線ネットワークだけでなく無線 LAN や PHS( Personal Handy phone System )などの無線ネットワークにおいても、その有効性を確認している<sup>11),12</sup>)。しかし、性質の異なる複数のパケット種別を提供する Bluetooth においては、その有効性を確認していない。

そこで本論文では、無線通信環境に応じて Bluetooth のパケット種別を適応的に選択することをめざし、その第1段階として、パケット種別の違いや無線通信環境が Bluetooth の通信品質に及ぼす影響を明らかにする。特に、ホットスポットにおけるストリーミングサービスを想定し、メディアサーバに蓄積されたビデオと音声を、Bluetooth の LAN アクセスポイントを介してモバイル端末に伝送する実験システムを構築する。そして、他システムからの電波の干渉を模擬するために白色雑音を付加し、各パケット種別において無線通信環境が通信品質に及ぼす影響を、メディア同期品質も含めて実験により明らかにする。また、筆者らが既提案のスライド制御方式を実装し、その有効性も確認する。そして、これらの議論を通じ、無線通信環境に応じて Bluetooth のパケット種別を適応的に選択するための指針を明らかにする。

本論文の以下の構成は次のとおりである。2章では Bluetooth の通信サービスについて、3章では実験システムの構成について述べる。4章では測定結果と性能評価を報告する。

## 2. Bluetooth の通信サービス

本章では、まず、Bluetooth の通信サービスで利用されるパケット種別と誤り制御方式を説明する。そして、ホットスポットにおけるストリーミングサービスなどを可能にする LAN アクセスシステムの構成を述べる。

### 2.1 パケット種別と誤り制御方式

Bluetooth のタイムスロット構成とパケットフォーマットを図1に示す。Bluetooth は  $625 \mu\text{s}$  のタイムスロットを基準に TDD による通信を行う。マスタは偶数スロットから下りパケットの送信を開始し、これを受信したスレーブは引き続き奇数スロットから上りパケットの送信を開始する。各パケットはパケット種別に応じて、1, 3, 5 スロットを連続的に占有できる。なお、上りと下りで必ずしも同じスロット数を占有するわけではない。また、使用する周波数はパケットを送信するごとに 79 チャンネルの中でホッピングする。

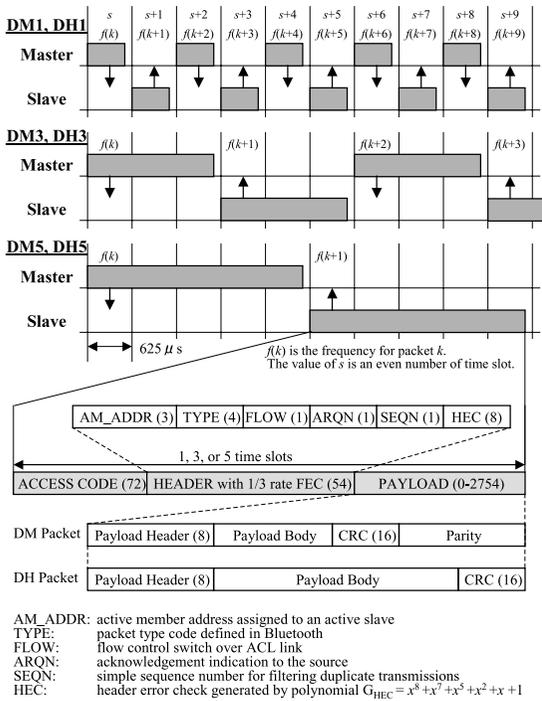


図 1 タイムスロット構成とパケットフォーマット  
Fig. 1 Structure of time slot and packet format.

Bluetooth では、無線リンクとして SCO (Synchronous Connection Oriented) リンクと ACL (Asynchronous Connection Less) リンクの 2 種類を規定している。SCO リンクは回線交換に相当し、音声情報のポイントツーポイント接続に利用される。一方、ACL リンクはパケット交換に相当し、データ伝送に使われる。特に、1 台のマスタに対して最大 7 台までのスレーブをポイントツーマルチポイント接続することが可能である。本論文では LAN アクセスシステムを検討の対象とするため、ACL リンクを使用する。また、条件を単純化するため、ポイントツーポイント接続する場合のみを扱う。マスタにおけるポーリングアルゴリズムの影響も含めたポイントツーマルチポイント接続時の性能評価は、今後の課題である。

ACL リンクでは、適用する誤り制御方式により DH (Data High) パケットと DM (Data Medium) パケットが定義され、さらに、占有するスロット数 (1, 3, 5) に応じて 6 種類 (DM1, DM3, DM5, DH1, DH3, DH5) のパケット種別が定義される (表 1)。DH パケットは ARQ のみを適用し、16 bit CRC (Cyclic Redundancy Check) により誤り検出を行う。一方、DM パケットは、ARQ に加えて (15, 10) 短縮化ハ

表 1 パケット種別  
Table 1 Packet type.

Packet Type	Number of slot	Application of FEC	Application of ARQ	Size of Payload Body	Maximum Transmission Rate	
					Symmetric	Asymmetric
DM1	1 slot	2/3 rate	yes	0- 17 bytes	108.8 kb/s	---
DM3	3 slots	2/3 rate	yes	0-121 bytes	258.1 kb/s	387.2 kb/s ( 54.4 kb/s)
DM5	5 slots	2/3 rate	yes	0-224 bytes	286.7 kb/s	477.8 kb/s ( 36.3 kb/s)
DH1	1 slot	no	yes	0- 27 bytes	172.8 kb/s	---
DH3	3 slots	no	yes	0-183 bytes	390.4 kb/s	585.6 kb/s ( 86.4 kb/s)
DH5	5 slots	no	yes	0-339 bytes	433.9 kb/s	723.2 kb/s ( 57.6 kb/s)

Note that each value of transmission rate is obtained when a point-to-point connection is established. Symmetric means that the up link and the down link use the same packet type. Asymmetric means that one way link uses the designated packet type, while the opposite link uses only the corresponding packet type of 1 slot, whose maximum transmission rate is shown in the parenthesis.

ミング符号による 2/3 レート FEC を適用する。すなわち、ペイロードヘッダ、ペイロードボディ、CRC に対して FEC を適用し、パリティビットを付加する。このように DH パケットでは FEC によるオーバーヘッドがないため、同じスロット数を占有する DM パケットよりも高い最大転送レートが得られる。また DM パケットでは、伝送誤りが発生しても、FEC により再送要求の発生頻度を軽減することが期待できる。なお、表 1 に示した最大転送レートは、ポイントツーポイント接続において、上りと下りが同じパケット種別を使用する場合の値 (Symmetric)、および、1 方向は指定したパケット種別、逆方向は対応する 1 スロットのパケット種別を使用する場合の値 (Asymmetric) である。上りと下りが帯域を共有していることに注意されたい。また、ポイントツーマルチポイント接続では、さらにこれを最大 7 台の端末が共有する。

誤り制御は以下の手順で行われる。パケットを受信した端末は、ヘッダ部に 1/3 レート FEC による誤り訂正を行い、さらに、HEC (Header Error Check) によりヘッダ誤りの有無を確認する。ヘッダに誤りがなければ、これに含まれるパケット種別情報に応じ、DM パケットなら 2/3 レート FEC による誤り訂正を行った後に、また、DH パケットならそのまま、CRC によりペイロードの誤り検出を行う。そして、返送するパケットの ARQN ビットにより誤りの有無を通知する。なお、順序制御は 1 ビットの SEQN ビットで行っており、stop-and-wait ARQ として動作する。またデフォルトの設定では、再送は無線リンクが切断されなければ、正しく受信されるまで何度も繰り返し行われる。

ACL リンクでは、オプションで再送のタイムアウト値が設定でき、等時性を確保することも可能である。再送のタイムアウトが通信品質やメディア同期品質に及ぼす影響は、今後の課題である。

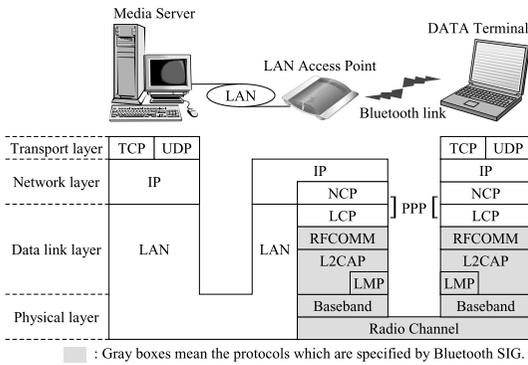


図 2 LAN アクセスシステムの構成とプロトコルスタック  
Fig. 2 Configuration of the LAN access system and its protocol stack.

2.2 LAN アクセスシステムとプロトコルスタック

本論文では、ホットスポットにおけるストリーミングサービスなどを可能にする LAN アクセスシステムを検討の対象とする。LAN アクセスシステムの構成とプロトコルスタックを図 2 に示す。なお、この構成は LAN アクセスプロファイルとして文献 2) に規定されている。

Bluetooth は、データリンクレベルのプロトコルとして L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) と RFCOMM を適用する。L2CAP は論理リンクの管理や上位レイヤパケットの分割・再構成を行う。また、その上位の RFCOMM はシリアルポートのインタフェースを上位レイヤに提供する。モバイル端末 (文献 2) では Data Terminal と呼ぶ) は、この RFCOMM を利用して LAN アクセスポイントに PPP (Point-to-Point Protocol) 接続する。これによりモバイル端末は、LAN アクセスポイントを介して LAN 上のメディアサーバと IP による通信が可能となり、トランスポートレベルのプロトコルとして TCP や UDP が利用できる。

無線リンクの設定や制御は、LMP (Link Manager Protocol) が行う。使用するパケット種別は、L2CAP、および L2CAP を介してその上位層から LMP に指示される。このとき、LMP に対し 1 つのパケット種別を指定するだけでなく、複数のパケット種別を通知し、LMP が適応的に選択することも可能である。ただし、LMP がどのように適応的にパケット種別を選択するかは実装依存であり、文献 2) には規定されていない。

2.3 メディア同期制御方式

本論文では、メディア同期制御方式として、筆者らが既提案のスライド制御<sup>10)</sup>を適用する。スライド制御は VTR アルゴリズム<sup>9)</sup>に基づく方式であり、特に、

PHS のような回線速度が比較的低い場合を想定し、音声への影響を考慮した制御方式である。本論文においても、Bluetooth の回線速度が比較的低いことからスライド制御を採用した。なお、他のメディア同期制御方式との比較については、文献 4) を参照されたい。

ここで各メディアは、その出力単位であるメディアユニット (MU) で構成されるものと仮定する。そして、メディア発生源  $i$  における  $n$  番目の MU の発生時刻を  $T_n^{(i)}$ 、メディアの出力先におけるメディア  $i$  の  $n$  番目の MU の目標出力時刻を  $t_n^{(i)}$ 、到着時刻を  $A_n^{(i)}$ 、実際の出力時刻を  $D_n^{(i)}$  と定義する。以下、 $i = 1$  はビデオ、 $i = 2$  は音声を示すことにする。

メディア内同期は、単一メディア  $i$  を構成する MU 間の発生間隔  $T_n^{(i)} - T_{n-1}^{(i)}$  を、メディアの出力先においても出力間隔として維持することである。さらに、メディア間同期は、メディア 1 の  $n$  番目の MU と、これに対応するメディア 2 の  $m$  番目の MU との発生間隔  $T_n^{(1)} - T_m^{(2)}$  を、メディアの出力先において同様に維持することである。スライド制御では  $A_n^{(i)} - t_n^{(i)}$  の値を閾値と比較し、その関係に応じて  $t_n^{(i)}$  を意図的にスライド時間  $\Delta S_n^{(i)}$  だけ変更し、メディア同期品質の維持を図る。

たとえば、 $n$  番目のビデオ MU が目標出力時刻より遅れて到着した場合、ビデオ MU の到着遅れ時間  $(A_n^{(1)} - t_n^{(1)})$  の大きさに応じて gradual recovery と fast recovery の 2 種類の変更方法を適用する。gradual recovery は、目標出力時刻の変更が音声に及ぼす影響を小さくするために、 $t_n^{(i)}$  を少しずつ変更して徐々にメディア間同期を修復する。また fast recovery は、音声への影響は大きいけれども、 $t_n^{(i)}$  を一度に大きく変更し、早急にメディア間同期を回復する。ここで gradual recovery を実行するための  $A_n^{(1)} - t_n^{(1)}$  の閾値を  $T_{h1}$ 、そのスライド時間を  $\theta_1$ 、スライド制御を実行できる最小許容時間間隔を  $\omega_1$  と定義する。また、fast recovery を実行するための  $A_n^{(1)} - t_n^{(1)}$  の閾値を  $T_{h2}$ 、そのスライド時間を  $\theta_2 (\gg \theta_1)$ 、スライド制御を実行できる最小許容時間間隔を  $\omega_2$  と定義する。

また、 $m$  番目の音声 MU が目標出力時刻より遅れて到着した場合、音声の中断は主観的に大きな影響を及ぼすため、音声 MU の到着遅れ時間  $(A_m^{(2)} - t_m^{(2)})$  をもとに目標出力時間を一度に大きく変更し、遅れた音声にビデオを再同期させて早急にメディア間同期を回復する。

以上より、スライド制御は以下の条件に従って実行されることになる<sup>12)</sup>。

$$(a) \quad A_m^{(2)} \leq t_m^{(2)}, \text{ かつ } T_{h2} \leq A_n^{(1)} - t_n^{(1)} :$$

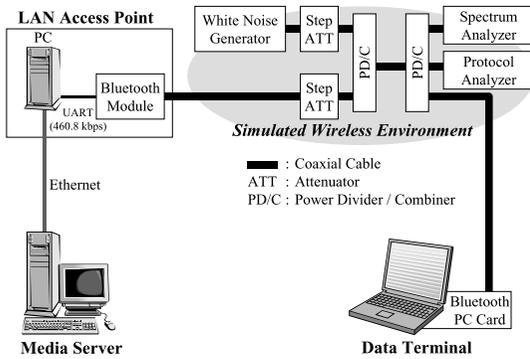


図 3 実験システムの構成

Fig. 3 Block diagram of the experimental system.

- (a)  $\Delta S_n^{(1)} = \Delta S_m^{(2)} = \theta_2$  (fast recovery)
- (b)  $A_m^{(2)} \leq t_m^{(2)}$ , かつ  $T_{h1} \leq A_n^{(1)} - t_n^{(1)} < T_{h2}$ :  
 $\Delta S_n^{(1)} = \Delta S_m^{(2)} = \theta_1$  (gradual recovery)
- (c)  $A_m^{(2)} \leq t_m^{(2)}$ , かつ  $A_n^{(1)} - t_n^{(1)} < T_{h1}$ :  
 $\Delta S_n^{(1)} = \Delta S_m^{(2)} = 0$
- (d)  $t_m^{(2)} < A_m^{(2)}$ :  
 $\Delta S_n^{(1)} = \Delta S_m^{(2)} = A_m^{(2)} - t_m^{(2)}$

### 3. 実験システム

本論文では、Bluetooth のパケット種別の違いや無線通信環境が通信品質、特に、連続メディアの同期品質に及ぼす影響を定量的に評価するために、実験システムを構築した。

#### 3.1 実験システムの構成

図 3 に実験システムの構成を示す。Bluetooth PC カード (Cambridge Silicon Radio 社製デバイス使用) を装着したモバイル端末 (Pentium III 850 MHz, Windows Me) は、Bluetooth の無線通信環境をシミュレートする擬似電波伝播環境を介して LAN アクセスポイントと接続される。LAN アクセスポイントは Ethernet (100BASE-T) を介してメディアサーバ (Pentium III 850 MHz, Windows 2000) とつながる。メディアサーバは、H.263 ビデオ情報とそれに対応する G.726 音声情報を格納している。そして、各 MU を発生間隔に従って MU 単位でモバイル端末に送信する。メディアサーバとモバイル端末間のトランスポートプロトコルとして UDP を適用する。

LAN アクセスポイントは、PC (Celeron 700 MHz, Linux kernel 2.4.2) に、LAN アクセスプロファイルによるサービスを提供する Bluetooth プロトコルスタック (AXIS 社製 OpenBT Stack 0.0.8<sup>13)</sup>) を実装して実現し、これに最適化を施した<sup>14)</sup>。PC は Blue-

tooth モジュール (ERICSSON 社製デバイス使用) を UART Universal Asynchronous Receiver / Transmitter) を介して接続する。本 Bluetooth モジュールが提供する UART の最大通信速度は 460.8 kb/s である。そのため、LAN アクセスポイントが処理するメディアサーバとモバイル端末間のトラフィックに対しては、UART がボトルネックになる可能性がある。しかしながら、この値は 1 組のビデオ情報と音声情報を伝送するには十分な値である。

また、使用するパケット種別は、Bluetooth モジュールが UART を介して PC と交換する HCI (Host Controller Interface) コマンドのうち、*Create Connection* コマンド、または *Change Connection Packet Type* コマンドを使用して指定した。

一方、擬似電波伝播環境では、モバイル端末と LAN アクセスポイントを可変減衰器 (1 dB 単位で変更可能) を介して同軸ケーブルで接続する。また、直接拡散方式を採用した無線装置からの干渉波を模擬するために、白色雑音発生器を分配/合成器と可変減衰器 (0.2 dB 単位で変更可能) を介して接続する。これにより無線キャリアの伝送路損失レベル、および白色雑音の出力レベルを変更できる。モバイル端末側における無線キャリアの受信レベルおよび白色雑音の受信レベルは、スペクトラムアナライザにより測定し、*CNR* (Carrier to Noise Ratio) を算出する。実験に際しては、モバイル端末側の熱雑音の影響が無視できるように、すなわち、無線キャリアの受信レベルが十分大きくなるように、可変減衰器の値を選択した。Bluetooth PC カードの最大出力は 20 dBm (文献 2) で規定された Power Class 1 に相当)、LAN アクセスポイントのそれは 4 dBm (Power Class 2 に相当) である。また、プロトコルアナライザにより Piconet 内のパケットの捕捉およびロギングを行う。

なお、周波数ホッピング方式を採用した他の無線装置からの干渉波の影響、フェージングの影響、Ethernet における干渉トラフィックの影響は、今後の課題とする。

#### 3.2 メディアの仮定

メディアサーバに蓄積されたビデオと音声の作成に関し、以下の仮定を置く。

A1. 音声は符号発生レートが 24 kb/s の G.726 により符号化され、300 byte のデータ量をもって 1 音声 MU とする。したがって音声の MU レートは 10 MU/s となる。

A2. ビデオは H.263 により符号化され、1 ビデオフレームを 1 ビデオ MU とする。ビデオの目標 MU レー

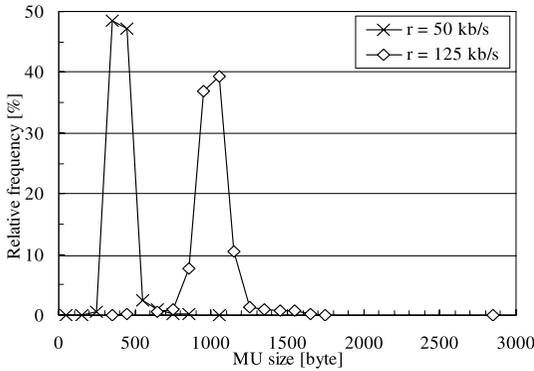


図 4 ビデオの MU サイズの分布  
Fig. 4 Distribution of video MU size.

とを 15 MU/s とし、また、目標符号発生レート  $r$  を与え、レート制御を適用して符号化を行う。なお、ビデオの目標符号発生レートは、パケット種別により最大転送レートが異なることを考慮し (表 1)、シングルスロットパケット (DM1, DH1) では  $r = 50 \text{ kb/s}$ 、マルチスロットパケット (DM3, DM5, DH3, DH5) では  $r = 125 \text{ kb/s}$  と、それぞれ異なる値を選択した。シングルスロットパケットでは、最大転送レートが小さい DM1 でも音声とビデオの伝送が可能な値で、かつ各レイヤのオーバーヘッドを考慮して選択した。また、マルチスロットパケットでは、最大転送レートが最も小さい DM3 を使用して音声とビデオの双方向通信が可能な値を選択した。加えて、ポイントツーマルチポイント接続で複数のビデオを伝送する場合も想定し、あまり大きな値にならないように選択した。なお、ビデオの MU サイズは可変長となる。その分布を図 4 に示す。

また、後述する最大スループットの測定実験では、 $r = 350 \text{ kb/s}$  として符号化したビデオ情報を使用する。この値は、最大スループットが達成するのに十分な入力レートとするために、音声の符号発生レートや各レイヤのオーバーヘッドを加えると、LAN アクセスポイントのトラヒック処理能力を超えるように、すなわち、過負荷になるように選択された。

A3. 生成した連続メディアの諸元は以下のとおりである。

- メディアソース 人の上半身の画像
- 取り込み時間 120s
- 画像サイズ sub-QCIF (128 × 96 pixel)
- ビデオの平均 MU レート  
15.38 MU/s ( $r = 50 \text{ kb/s}$ )  
15.36 MU/s ( $r = 125 \text{ kb/s}$ )

● ビデオの平均 MU サイズ

- 406.1 byte ( $r = 50 \text{ kb/s}$ )
- 1016.7 byte ( $r = 125 \text{ kb/s}$ )

3.3 メディア同期制御のパラメータ

メディア同期制御の各パラメータを以下のように定める。

P1. スライド制御の各パラメータの値は、文献 [12] と同じ値とする。すなわち、 $T_{h1} = 100 \text{ ms}$ 、 $\theta_1 = 100 \text{ ms}$ 、 $\omega_1 = 1,000 \text{ ms}$ 、 $T_{h2} = 2,000 \text{ ms}$ 、 $\theta_2 = 4,000 \text{ ms}$ 、 $\omega_2 = 60,000 \text{ ms}$  とする。gradual recovery に関する値 ( $T_{h1}$ ,  $\theta_1$ ,  $\omega_1$ ) は、目標出力時刻の変更により繰り返し出力される音声が増減感の少ないエコーに聞こえ、かつ  $\theta_1$  が音声の MU 発生間隔に相当するように選んだ。 $T_{h1}$  も実装を簡単にするため、音声の MU 発生間隔に相当する値とした。また、fast recovery に関する値 ( $T_{h2}$ ,  $\theta_2$ ,  $\omega_2$ ) は、目標出力時刻の変更によるビデオの出力停止時間、および 1 回の fast recovery により増加が期待される受信バッファのデータ量を考慮して選択した。なお、各パラメータの値が性能に及ぼす影響の評価は、今後の課題である。

P2. 第 1 ビデオ MU の到着時刻  $A_1^{(1)}$  をもって、メディア同期の基準時刻と定める。したがって、第 1 ビデオ MU の目標出力時刻は  $t_1^{(1)} = A_1^{(1)} + \tau_1^{(1)}$  となる。なお、 $\tau_1^{(1)}$  は第 1 ビデオ MU の出力待ち時間であり、 $\tau_1^{(1)} = 500 \text{ ms}$  とする。ただし、メディア同期制御を適用しない場合は、 $\tau_1^{(1)} = 0 \text{ ms}$  とする。

3.4 評価尺度

本論文では評価尺度として、スループット、メディア内同期の平均二乗誤差、メディア間同期の平均二乗誤差、平均 MU 出力レート、MU 欠落率を用いる。

スループットは受信側で 1 秒あたりに受信したビデオのビット数と音声のビット数の和である。したがって、UDP や IP などの付加されたヘッダのビット数は含んでいない。また、メディア内同期の平均二乗誤差は、メディア発生源  $i$  の  $n$  番目の MU と  $n + 1$  番目の MU の出力間隔 ( $D_{n+1}^{(i)} - D_n^{(i)}$ ) と発生間隔 ( $T_{n+1}^{(i)} - T_n^{(i)}$ ) の差の二乗平均である。メディア間同期の平均二乗誤差は、 $n$  番目のビデオ MU と、それに対応する  $m$  番目の音声 MU の出力間隔 ( $D_n^{(1)} - D_m^{(2)}$ ) と発生間隔 ( $T_n^{(1)} - T_m^{(2)}$ ) の差の二乗平均である。これらは、単一メディア内、もしくは複数メディア間において、いかに時間的構造を正確に保持できたかを表す評価尺度であり、その値が小さいほど同期品質が高いといえる。平均 MU 出力レートは受信側で 1 秒あたりに出力した MU 数の平均値、MU 欠落率は送信した総 MU 数に対する欠落した MU 数の割合を示す。

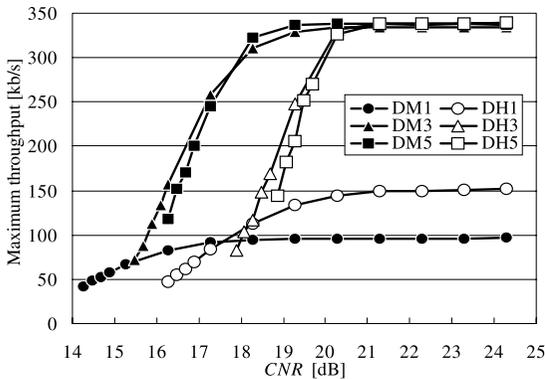


図5 最大スループットと CNR の関係  
Fig. 5 Maximum throughput versus CNR.

なお、MU 欠落率が高くなれば、平均 MU 出力レートはおのずと低くなる。

#### 4. 実験結果

本論文では、Bluetooth のパケット種別の違いや無線通信環境が、通信品質や連続メディアの同期品質に及ぼす影響を実験により評価した。その結果を以下に示す。

##### 4.1 パケット種別と最大スループットの関係

最初に、Bluetooth のパケット種別の違いや無線通信環境が最大スループットに及ぼす影響を調べる。

図 5 に、最大スループットと CNR の関係を示す。なお、使用した各パケット種別 DM1, DM3, DM5, DH1, DH3, DH5 を、それぞれ印、印、印、印、印、印で示す。各シンボルは、3 回の測定結果の平均値である。また本実験では、目標符号発生レート 350 kb/s で符号化したビデオ情報と、符号発生レート 24 kb/s で符号化した音声情報を使用した。

まず、FEC の適用の有無が最大スループットに及ぼす影響を調べる。DM1 と DH1 を比較すると、CNR が大きければ、FEC によるオーバーヘッドのない DH1 のほうが高いスループットを示していることが分かる。また、CNR が低下するにつれて両者の最大スループットも低下するが、CNR が小さくなると 2 つの最大スループットが逆転していることが分かる。これは、CNR が低下すると伝送誤りが発生し、再送がスループットを低下させるものの、DM1 では FEC により再送の発生頻度を低減できたためである。

一方、マルチスロットパケットにおいては、同じスロット数を占有するパケット種別を比較すると、CNR が小さいときには、FEC を適用しない DH パケットのほうが、最大スループットの低下が著しいことが分かる。しかしながら、CNR が十分大きくなると、

いずれも約 340 kb/s に収束している。これは LAN アクセスポイントにおいて、UART の最大通信速度 (460.8 kb/s) がボトルネックになっているためである。すなわち、UART では、8 ビットデータの転送にスタートビットとストップビットの 2 ビットが付加されるため、実効速度は 368.64 kb/s となる。また、UDP や IP などのヘッダも付加されるため、約 340 kb/s で頭打ちになったと考えられる。UART のボトルネックが解消されれば、CNR が十分大きいときには、表 1 の最大転送レート (Asymmetric) で示した値が得られると考えられる。以上より、占有するスロット数が同じパケット種別では、CNR が大きければ DH パケットのスループットが高くなるが、CNR が低下すると性能が逆転し、DM パケットのスループットが高くなるといえる。

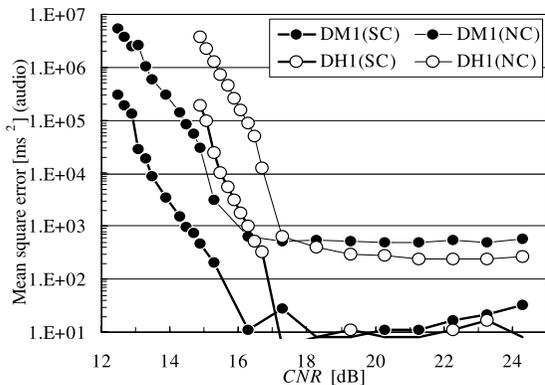
次に、1 パケットが占有するスロット数の差が最大スループットに及ぼす影響を調べる。DH パケットで比較すると、CNR が小さいときには、スロット数が多いパケット種別が必ずしも高い最大スループットを示すわけではないことが分かる。また、DM パケットにおいても同様の傾向がある。これらは、再送時にも同じスロット数のパケットを送信するため、スロット数が多いほど、再送による影響が大きく現れたためである。なお、UART のボトルネックが解消されれば、CNR が十分大きいときには、スロット数が多いパケット種別ほど最大スループットも高くなる。

ところで、図 5 のデータを測定する際には、各パケット種別において CNR の値を順次低下させていき、再送がきわめて頻繁に発生したなどの理由により測定ができなくなるまで実験を行っている。ここで、測定ができた CNR の最小値に着目すると、パケット種別により、その値が異なることが分かる。すなわち、DM パケットのほうが、また、占有するスロット数が少ないパケット種別ほど、CNR が低下しても、ある程度スループットが得られやすいといえる。

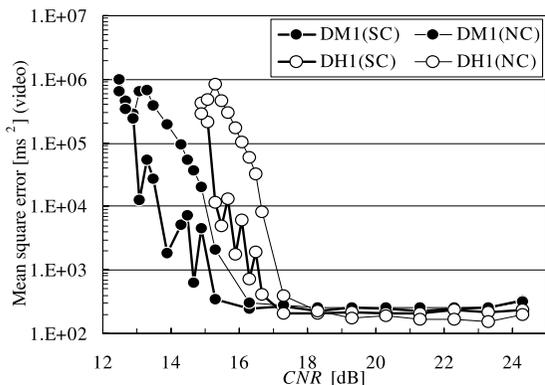
##### 4.2 パケット種別と連続メディア同期品質の関係

次に、パケット種別の違いや無線通信環境が連続メディアの同期品質に及ぼす影響を調べる。ここでは、パケット種別により最大スループットが異なることを考慮し、シングルスロットパケットとマルチスロットパケットに分け、それぞれ異なる目標符号発生レートで符号化されたビデオ情報を使用して評価する。

本実験では、LAN アクセスポイントからモバイル端末への通信では選択したパケット種別が使用されるが、逆方向の通信では ACK 情報を含むシングルスロットパケットしか送信されない。



(a) Audio



(b) Video

図 6 メディア内同期の平均二乗誤差と CNR の関係 (1 slot packet)

Fig. 6 Mean square error of intra-stream synchronization versus CNR for single slot packets.

(1) シングルスロットパケット

まず、シングルスロットパケットにより連続メディアを伝送する場合の性能を評価する。本実験で使用したビデオの目標符号発生レートは 50 kb/s である。

図 6 に音声とビデオのメディア内同期の平均二乗誤差と CNR の関係を示す。ここで、DM1 を使用した場合を 印で、DH1 を使用した場合を 印でプロットする。また、スライド制御 (SC: Slide Control) を適用した場合を太線で、適用しない場合 (NC: No Control) を細線で示す。各シンボルは、3 回の測定結果の平均値である。

まず、音声のメディア内同期品質を調べる。NC の場合、CNR が十分大きいときには、DH1 よりも DM1 のほうが値が大きくなっている。これは、以下の理由による。メディアサーバから MU 単位で UDP により送信されたビデオと音声は、LAN アクセスポイントにおいて、MU ごとに順次 PPP で処理される。すなわち、1 つの MU が LAN アクセスポイントからモバ

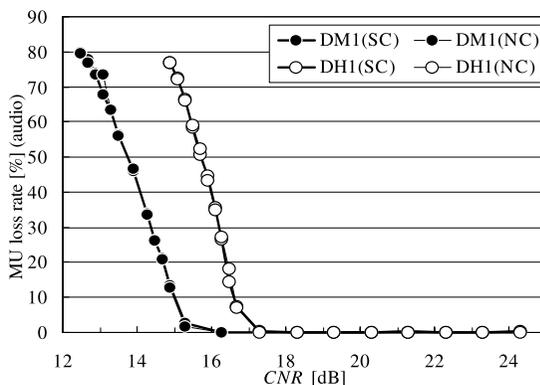


図 7 音声の MU 欠落率と CNR の関係 (1 slot packet)  
Fig. 7 MU loss rate of audio versus CNR for single slot packets.

イル端末に送信されている間は、他の MU は LAN アクセスポイントで送信を待たされることになる。ここでビデオ MU は、音声よりも MU サイズが大きいものが多く (図 4)、ビデオ MU の送信により音声 MU の送信が比較的大きく待たされ、音声の時間的構造が乱れた。特に、最大スループットが小さい DM1 では、その影響が大きく現れた。

また DH1 では、CNR が低下するにつれて、値が徐々に大きくなっている。これは、CNR が低下すると伝送誤りが発生し、再送による遅延が時間的構造を乱したためである。一方、DM1 では、DH1 よりも値の変化は小さい。また、CNR が低下していくと、CNR が約 17.5 dB のところで、DM1 と DH1 の性能が逆転する。これは、FEC により、再送の発生頻度が抑えられたためである。なお、CNR が小さくなると、両者ともその値が急激に大きくなっている。これは、ACL リンクのデフォルトの設定では、再送はタイムアウトせず、LAN アクセスポイントでのバッファ溢れにより欠落が発生したためである (図 7)。

また、スライド制御を適用すれば、DM1、DH1 のいずれにおいても、音声のメディア内同期品質が改善できることが分かる。なお CNR が低下した場合、DM1、DH1 のいずれにおいても、SC と NC の MU 欠落率がほぼ同じ値であるにもかかわらず (図 7)、SC では音声のメディア内同期品質が大きく改善されている。これは、MU の欠落が頻繁に発生する状況では MU が遅れて到着することが多くなり、スライド制御がこれを検出して目標出力時刻を変更し、同期の維持を図ったためである。

一方、ビデオのメディア内同期品質に関しても、音声とほぼ同様の傾向を確認できる。また、ビデオと音声と比較すると、NC の場合、CNR が十分大きいとき

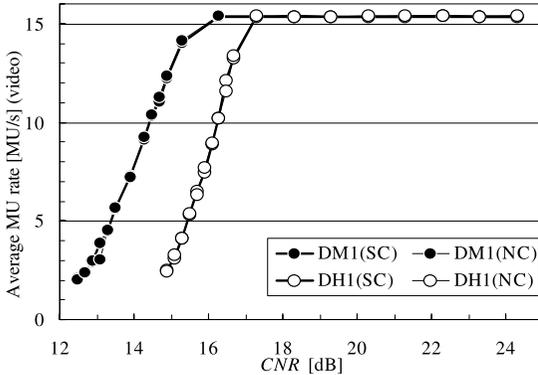


図 8 ビデオの平均 MU 出力レートと CNR の関係 (1 slot packet)

Fig. 8 Average MU rate of video versus CNR for single slot packets.

には、音声の値がビデオよりも大きい。これは、MU サイズの大きなビデオ MU の送信が、音声の時間的構造をより大きく乱したためである。なお SC の場合、CNR が小さいときにビデオのメディア内同期の平均二乗誤差の変動が大きくなることもあるが、これは以下の理由による。ビデオの MU サイズは可変長であり (図 4)、どのサイズの MU が欠落したかによって遅延の分布も影響を受ける。特に、回線速度が低いシングルスロットパケットではその影響が顕著に現れ、スライド制御の実行内容にばらつきが発生したためである。

次に、ビデオの平均 MU 出力レートと CNR の関係を図 8 に示す。これによれば、DM1 では CNR が小さくなくても、DH1 より大きな値を示していることが分かる。これは、FEC の適用により、CNR が小さくなくても高いスループットが得られたためである。また、CNR が小さいときには、CNR の低下とともに、両者の値が急激に低下している。これは、音声と同様に、LAN アクセスポイントでのバッファ溢れにより欠落が発生したためである。

図 9 にメディア間同期の平均二乗誤差と CNR の関係を示す。これによれば、CNR が低下すると、いずれの場合も値が増加する傾向にあることが分かる。また、CNR がおおよそ 17dB より小さいときには、DM1 のほうが DH1 よりも値が小さくなる。

ここで文献 15) では、 $80^2 \text{ ms}^2$  以内であればメディア間同期は良好な状態であり、 $160^2 \text{ ms}^2$  以上であれば同期外れの状態であると報告している。この値を用いて同期品質を評価すると、スライド制御を適用すれば、CNR が極端に低下した場合を除き、メディア間同期品質をきわめて良好に改善できるという。なお、

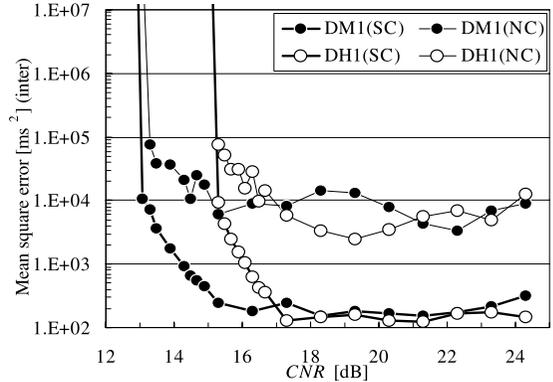


図 9 メディア間同期の平均二乗誤差と CNR の関係 (1 slot packet)

Fig. 9 Mean square error of inter-stream synchronization versus CNR for single slot packets.

NC においても、CNR が大きければ、DM1、DH1 とともに同期はずれになることはない。

以上より、シングルスロットパケットを使用して連続メディアを NC で伝送する場合、メディア同期品質の観点からも CNR が約 17.5 dB より大きい場合には DH1 パケット、CNR が約 17.5 dB より低下した場合には DM1 パケットを選択するのが望ましいと言える。

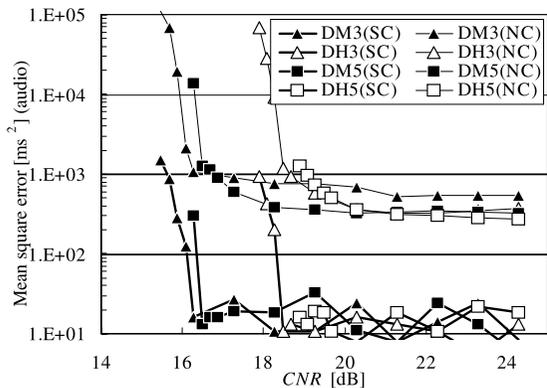
## (2) マルチスロットパケット

次に、マルチスロットパケットにより連続メディアを伝送する場合の性能を評価する。本実験で使用したビデオの目標符号発生レートは 125 kb/s である。

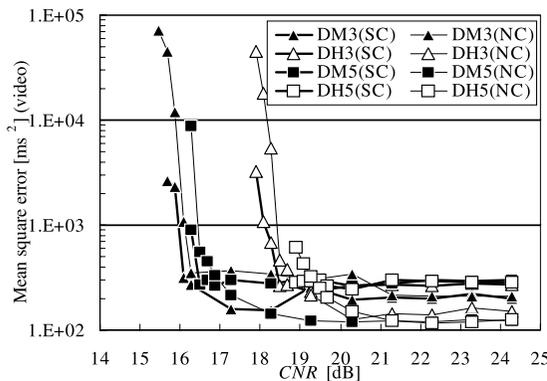
図 10 に音声とビデオのメディア内同期の平均二乗誤差と CNR の関係を示す。ここで、使用したパケット種別 DM3、DH3、DM5、DH5 を、それぞれ印、印、印でプロットする。また、SC を太線で、NC を細線で示す。各シンボルは、3 回の測定結果の平均値である。

音声のメディア内同期品質は、シングルスロットパケットと同様の傾向を確認できる。すなわち、NC において同じスロット数を占有する DM パケットと DH パケットを比較すると、CNR が大きい場合には DH パケットの性能が優れるが、CNR が低下すると性能は逆転する。たとえば、DM3 パケットと DH3 パケットでは CNR が 19 dB 付近で、DM5 パケットと DH5 パケットでは CNR が 21 dB 付近で性能が逆転している。

次に、NC においてスロット数による性能の差を比較すると、CNR が大きい場合には、5 スロットを占有する DM5 や DH5 の性能が高いが、CNR が低下するとその性能は逆転する。たとえば、DM3 パケットと DM5 パケットでは CNR が 16.5 dB 付近で、DH3



(a) Audio



(b) Video

図 10 メディア内同期の平均二乗誤差と CNR の関係 ( multi slot packet )

Fig. 10 Mean square error of intra-stream synchronization versus CNR for multi slot packets.

パケットと DH5 パケットでは CNR が 21 dB 付近で性能が逆転している。これは、再送時にも同じスロット数のパケットを送信するため、スロット数が多いほど、再送による影響が大きく現れたためである。

また、スライド制御を適用すれば、いずれのパケット種別においても、音声のメディア内同期品質が改善できる。

一方、ビデオのメディア内同期品質に関しても、音声とほぼ同様の傾向を確認できる。ただし、CNR が大きいときには、スライド制御を適用した場合の性能が若干低下している。

次に、ビデオの平均 MU 出力レートと CNR の関係を図 11 に示す。これによれば、DM パケットのほうが、また、スロット数が小さいほど、CNR が低下

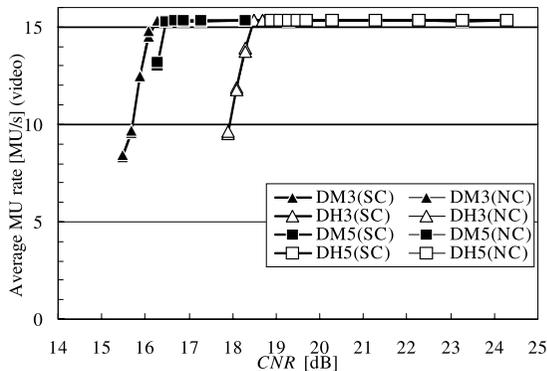


図 11 ビデオの平均 MU 出力レートと CNR の関係 ( multi slot packet )

Fig. 11 Average MU rate of video versus CNR for multi slot packets.

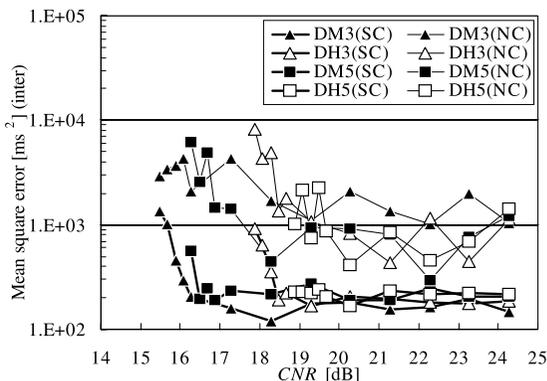


図 12 メディア間同期の平均二乗誤差と CNR の関係 ( multi slot packet )

Fig. 12 Mean square error of inter-stream synchronization versus CNR for multi slot packets.

しても高い出力レートを維持できることが分かる。なお、出力レートの低下は、LAN アクセスポイントでのバッファ溢れにより欠落が発生したためである。

図 12 にメディア間同期の平均二乗誤差と CNR の関係を示す。これによれば、CNR が小さいときには、DM パケットのほうが、また、スロット数が小さいほど、値が小さくなる事が分かる。また、スライド制御を適用すれば、どのマルチスロットパケットにおいても、誤差を  $80^2 \text{ ms}^2$  未満に抑えられ、高いメディア間同期品質が得られることが分かる。一方、NC においても、CNR が大きければ、どのパケット種別においても同期はずれになることはない。なお、NC では、CNR が大きいときでもメディア間同期の平均二乗誤差の変動が大きくなっているところがあるが、これは以下の理由による。LAN アクセスポイントでは、1 つの MU がモバイル端末に送信されている間は、他の

シングルスロットパケットにおいて観測された平均二乗誤差の変動(図 6(b))は、マルチスロットパケットでは回線速度が高いため確認されなかった。

MU は送信を待たされることになる。ここで、ビデオ MU と音声 MU の発生時刻が同じになることが多いため、また、音声の MU サイズは固定長であるが、ビデオの MU サイズは可変長かつ大きいものが多いため (図 4)、モバイル端末においてはビデオと音声の時間的構造が大きく乱れて各 MU が到着する。NC では、各 MU はモバイル端末に到着後ただちに出力されるため、メディア間同期品質が劣化したままとなる。特に、ビデオと音声のどちらの MU 送信時に再送が発生したか、また、どのサイズの MU 送信時に再送が発生したかによりその影響が大きく異なる。各 CNR での測定回数が 3 回であったこともあり、他の評価尺度に比べてメディア間同期品質の変動が大きくなった。

以上より、マルチスロットパケットを使用して連続メディアを伝送する場合には、CNR が約 21 dB より大きいときには DH5 パケット、CNR が約 16.5 dB より小さいときには DM3 パケット、それ以外の場合は DM5 パケットを選択するのが望ましいと言える。しかしながら、シングルスロットパケットの結果と比較すると、マルチスロットパケットでは、比較的大きな CNR の値で性能が低下している。したがって、CNR が極端に低下した場合 (おおよそ 15.5 dB 未満) には、CNR が小さくても、ある程度のスループットが得られる (図 5 参照) シングルスロットパケット (特に DM1 パケット) を選択することも有効な手段である。このようなパケット種別の選択を、無線通信環境に応じて適応的に行うためのアルゴリズムの開発は、今後の課題である。

また、本実験では、モバイル端末から LAN アクセスポイントへは、ACK 情報を含むシングルスロットパケットしか送信されていない。モバイル端末からのトラヒックがある場合には、これが干渉トラヒックとなり性能に影響を及ぼす。さらに、マルチスロットパケット使用時には、回線容量に余裕があるため、ポイントツーマルチポイント接続を使用して複数のモバイル端末に連続メディアを送信する利用形態も可能になる。このとき、他の干渉トラヒックの影響や、Bluetooth のポーリングアルゴリズムが性能に大きな影響を及ぼす。これらの問題は今後の重要な課題である。

## 5. む す び

本論文では、Bluetooth のパケット種別の違いや無線通信環境が、通信品質、特に、連続メディアの同期品質に及ぼす影響を実験により評価した。

最大スループットによる性能評価実験では、次の結果が得られた。CNR が大きければ DH パケット、また、スロット数が多いパケット種別が高い性能を示す。しかしながら、CNR が低下すると性能が逆転し、DM パケットが有効となる。また、スロット数が多いパケット種別が、必ずしも高い性能を示すわけではない。

また、メディア同期品質の評価実験からも、同様の結果が得られた。すなわち、シングルスロットパケットを使用する場合、CNR が約 17.5 dB より大きければ DH1 パケット、CNR が約 17.5 dB より低下すれば DM1 パケットを選択したほうが、メディア同期品質を向上できる。また、マルチスロットパケットを使用する場合には、CNR が約 21 dB より大きいときには DH5 パケット、CNR が約 16.5 dB より小さいときには DM3 パケット、それ以外の場合は DM5 パケットを選択すると、パケット種別を固定した場合に比べて、メディア同期品質を向上できる。さらに、CNR が極端に低下した場合 (おおよそ 15.5 dB 未満) には、CNR が小さくても、ある程度のスループットが得られるシングルスロットパケット (特に DM1 パケット) に切り替えることも有効な手段である。

また、メディア同期制御は、特に、メディア間同期品質、音声のメディア内同期品質を大きく改善でき、有効であることも明らかとなった。

無線通信環境に応じて Bluetooth のパケット種別を適応的に選択するためのアルゴリズムの開発は、今後の課題である。また、ポイントツーポイント接続時における逆方向の干渉トラヒックの影響、さらに、ポイントツーマルチポイント接続における他の干渉トラヒックの影響や、Bluetooth のポーリングアルゴリズムの影響も、今後の重要な検討課題である。

謝辞 本研究の一部は、平成 14 年度科学研究費補助金基盤研究 (B)(2)(課題番号 12555109) によって行われた。関係各位に感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 間瀬憲一、中野敬介、仙石正和、篠田庄司：アドホックネットワーク、信学誌、Vol.84, No.2, pp.127-134 (2001).
- 2) Bluetooth SIG: Specification of the Bluetooth System version 1.1 (2001).

---

マルチスロットパケットからシングルスロットパケットに切り替えるときには、最大スループットが小さくなるため、トラヒック制御の適用も必要である。これらのパケット種別の切替えは、たとえば、物理層で測定した CNR の値をアプリケーション層などの上位層に通知し、この上位層から LMP に使用するパケット種別を指示することによって実現できる。

- 3) Blakowski, G. and Steinmetz, R.: A media synchronization survey: Reference model, specification, and case studies, *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, Vol.14, No.1, pp.5–35 (1996).
- 4) 田坂修二: ネットワーク環境におけるメディア同期, *信学誌*, Vol.84, No.3, pp.177–183 (2001).
- 5) Tasaka, S. and Ishibashi, Y.: Mutually compensatory property of multimedia QoS, *Conf. Rec. IEEE ICC 2002*, pp.1105–1111 (2002).
- 6) Das, A., Ghose, A., Razdan, A., Saran, H. and Shorey, R.: Enhancing performance of asynchronous data traffic over the Bluetooth wireless Ad-hoc network, *Proc. INFOCOM 2001* (2001).
- 7) Famolari, D.: Link performance of an embedded Bluetooth personal area network, *Conf. Rec. IEEE ICC 2001* (2001).
- 8) Chandrashekhar, M.V.S., Choi, P., Maver, K., Siever, R. and Pahlavan, K.: Evaluation of interference between IEEE 802.11b and Bluetooth in a typical office environment, *Proc. PIMRC 2001* (2001).
- 9) Ishibashi, Y. and Tasaka, S.: A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications, *Proc. IEEE INFOCOM '95*, pp.1010–1019 (1995).
- 10) 加藤正美, 白井憲義, 田坂修二: PHS による蓄積メディア伝送時のメディア同期性能評価, *信学論 (B-II)*, Vol.J80–B–II, No.9, pp.749–759 (1997).
- 11) Tasaka, S., Ishibashi, Y. and Imura, H.: Stored media synchronization in wireless LANs, *Conf. Rec. IEEE GLOBECOM '96*, pp.1904–1910 (1996).
- 12) Tasaka, S., Kato, M. and Nakamura, K.: Stored media synchronization in PHS Internet access, *Conf. Rec. IEEE GLOBECOM '98*, pp.113–119 (1998).
- 13) Axis Communications AB.  
<http://developer.axis.com/software/bluetooth/index.html>
- 14) 大倉浩嗣, 加藤正美, 田坂修二: Bluetooth 連続メディア伝送におけるセグメンテーション不整合の実験的評価, *信学技報 CQ2001-96* (2002).
- 15) Steinmetz, R.: Human perception of jitter and media synchronization, *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, Vol.14, No.1, pp.61–72 (1996).

(平成 14 年 8 月 1 日受付)

(平成 15 年 5 月 6 日採録)



加藤 正美 (正会員)

昭和 59 年名古屋大学理学部物理学卒業。同年三洋電機入社。現在、同社技術開発本部デジタルシステム技術開発センタービジネスユニット主管研究員。工学博士。モバイルマルチメディア通信、アドホックネットワーク、マルチメディア QoS の研究に従事。電子情報通信学会会員。



大倉 浩嗣

昭和 61 年名古屋工業大学工学部電子工学科卒業。平成元年名古屋工業大学大学院電気情報工学専攻修士課程修了。同年三洋電機入社。現在、技術開発本部デジタルシステム技術開発センタービジネスユニット主任研究員。モバイルマルチメディア通信、アドホックネットワーク、マルチメディア QoS の研究に従事。電子情報通信学会、IEEE 各会員。



田中 靖浩

平成 12 年名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業。平成 14 年名古屋工業大学大学院電気情報工学専攻博士前期課程修了。同年三洋電機入社。現在、技術開発本部デジタルシステム技術開発センタービジネスユニット勤務。モバイルマルチメディア通信の研究に従事。電子情報通信学会会員。



田坂 修二 (正会員)

昭和 46 年名古屋工業大学電気工学科卒業。昭和 51 年東京大学大学院工学系研究科電子工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年、名古屋工業大学情報工学科勤務。現在、同大学大学院工学研究科情報工学専攻教授。昭和 59 年～60 年カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員。マルチメディア QoS, メディア同期, 無線情報ネットワーク等の研究に従事。電子情報通信学会フェロー, IEEE, ACM 各会員。