

# 論 文

## PHSにおけるビデオ伝送方式の性能評価

加藤 正美<sup>†</sup> 白井 憲義<sup>†</sup> 田坂 修二<sup>‡‡</sup>

Performance Evaluation of a Video Transmission Scheme for PHS

Masami KATO<sup>†</sup>, Noriyoshi USUI<sup>†</sup>, and Shuji TASAKA<sup>‡‡</sup>

あらまし PHSによる無線伝送では、ランダム誤りに加えて、フェージング等によるバースト誤りも発生する。特に、誤りに弱い圧縮ビデオ情報の伝送には、誤り制御の適用が必須である。また、有線系既存ビデオ端末との相互接続性の観点からは、64 kbit/sのH.261ビデオ情報を移動局と基地局間で2スロットを使用して伝送するシステムが都合がよい。このとき、どのようなプロトコルを適用してスループットを向上するか、メディア内同期をいかに制御するかが重要な課題となる。本研究では、PHSによるビデオ伝送プロトコルとして、FEC/SR-ARQハイブリッド方式を提案する。これは、無線区間の受信局側で、H.261の誤り訂正手段の能力を超えた誤りの発生を、誤り訂正結果にPHSの誤り検出手段を適用して検出し、誤りスロットを選択的に再送するものである。更に、ビデオフレーム廃棄によるメディア内同期メカニズムを適用する。そして、ランダム誤りとバースト誤りの各環境下で、ビデオ伝送における系統的な性能評価、特にメディア内同期まで含めた性能をシミュレーションにより明らかにする。また、SR-ARQ方式との比較により本提案方式の有効性を示す。

キーワード PHS, ビデオ伝送, ARQ, FEC

### 1. まえがき

デジタル通信を特長とした第2世代移動通信システム[1]が急速に普及しつつある。なかでもPHS(Personal Handy Phone System)[2]は、TDMA/TDD(Time Division Multiplex Access/ Time Division Duplex)方式を採用し、1スロットで32 kbit/sの伝送能力を有し、更に複数スロットを使用すればそれ以上の伝送が可能である[3]。そのためPHSは、音声やデータ、静止画だけでなくビデオも伝送可能であり、モバイル・マルチメディア・コミュニケーションを実現するインフラストラクチャとして大きく期待されている。

特に、PHSでビデオを伝送するには、画像圧縮技術が重要である：低ビットレート対応の動画像圧縮方式として、既にH.261(p×64 kbit/s)[4]がITU-Tで標準化され、更なる低ビットレートを目指したMPEG4(Moving Picture Experts Group 4)も検討が進められている。このような圧縮ビデオ情報は、フレーム間予測符号化方式の適用や可変長符号の多用により、ひとたび伝送誤り

が発生すると、その影響が連続したビデオフレームに現れる可能性がある。そのため、例えばH.261では、BCH符号(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem Code)による誤り訂正技術(FEC:Forward Error Correction)を適用し、エラー耐性を向上している。しかし、PHSでは、ランダム誤りに加えて、フェージング等によるバースト誤りの影響が大きく、FECによる誤り訂正能力を超えた誤りが発生する可能性がある[5]。

この問題を解決するために、ARQ(Automatic Repeat Request)の適用が考えられる。しかし、2スロットをビデオ伝送に用いるとしても、H.261による情報発生量とPHSの伝送容量がほぼ等しいため、限られた伝送容量のなかでどのようなプロトコルを適用してスループットを向上するかが大きな課題である。

またH.261では、画像の複雑さや動きの激しさに伴う符号発生量の変動を量子化特性やフレームスキップ等により制御（いわゆる時間・空間的解像度制御）し、送信端末と受信端末とが固定速度で情報交換を行う。そして、これにより送信側でのビデオ発生間隔と受信側でのビデオ表示間隔との同期、いわゆるメディア内同期を維持している。しかし、ARQを適用すると再送により固定速度で情報交換できず、メディア内同期が乱れてしまう。このため、メディア内同期をどのように制御するかも重要な課題である。

† 三洋電機株式会社ハイバーメディア研究所、岐阜県  
Hypermedia Research Center, SANYO Electric Co., Ltd., Gifu-ken,  
503-01 Japan

‡‡ 名古屋工業大学電気情報工学科、名古屋市  
Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of  
Technology, Nagoya-shi, 466 Japan

PHSによるビデオ伝送に関するこれまでの研究としては、1スロット上にHDLC(High-level Data Link Control Procedure)によるARQを適用し、再送回数に応じてビデオの時間・空間的解像度を制御する方式の実験による性能評価が報告されている[6]。しかし、さまざまな誤り環境における系統的な性能評価、特にメディア内同期まで含めた性能評価は行われていない。また、ARQによりビデオ伝送する場合、ビット誤り率(BER)が悪い環境ではパケットサイズが小さいほうが伝送効率を高くできると報告されており[7]、HDLCより高効率なビデオ伝送プロトコルが求められている。更に、ARQに加えてFECを有効に活用すれば、スループット等の向上が見込まれる。この点については、これまでデータ通信における検討[8]が見られるだけで、ビデオ伝送における検討は行われていない。

そこで本論文では、H.261を採用した有線系既存ビデオ端末との相互接続性を重視し、2スロットを使用して64 kbit/sのH.261ビデオ情報を、移動局と基地局間で伝送するシステムを前提に評価を行う。

特に、PHSにおけるビデオ伝送プロトコルとして、H.261に採用された誤り訂正手段と、PHSの各スロットに付加された誤り検出手段とを有効に活用することを考える。すなわち、無線区間の受信局側で、H.261の誤り訂正手段の能力を超えた誤りが発生したことを、誤り訂正結果にPHSの誤り検出手段を適用して検出し、誤りスロットを選択的に再送する方式を提案する。これをFEC/SR-ARQハイブリッド方式(SR: Selective Repeat)と呼ぶ。更に、ビデオフレーム廃棄によるメディア内同期メカニズムを適用する。また、ランダム誤り環境だけでなく、歩行時を想定したバースト誤り環境における評価も重要であると考えた。そのため、それぞれの通信環境において、H.261で圧縮符号化された実際のビデオ情報を使用したシミュレーションを行い、その性能を評価する。また、2スロットを使用したSR-ARQ方式との比較も行う。

本論文の構成は次のとおりである。2.では提案方式について述べる。3.ではシミュレーションの仮定について述べる。4.では数値結果と性能評価を報告する。

## 2. ビデオ伝送方式の提案

### 2.1 TDMA/TDD方式とH.261のFECフレーム

PHSはTDMA/TDD方式を採用している。5 ms周期の1フレームは8スロットに時分割され、前半の4スロットが基地局から移動局への下りスロット、後半の

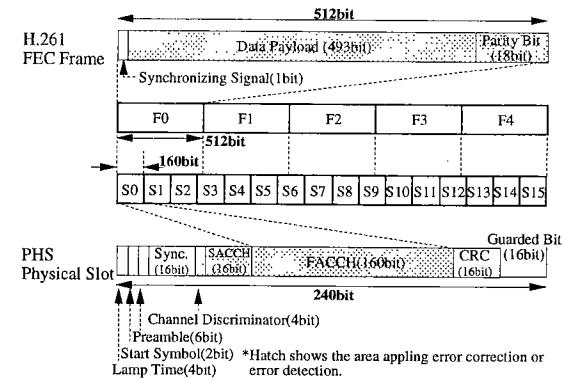


図1 PHSの物理スロットとH.261のFECフレームの構成  
Fig. 1 Structure of a physical slot for PHS and FEC frame for H.261.

4スロットが移動局から基地局への上りスロットに定義されている。移動局は対応する上下スロットを一つ又は複数使用して双方向通信を行う。

図1にPHSのスロット構成とH.261のFECフレーム構成を示す。240ビットで構成される各スロットには、データ伝送用チャネルとしてFACCH(Fast Attendant Control Channel:160ビット)とSACCH(Slow Attendant Control Channel:16ビット)が定義され、これらを利用すればビデオ伝送が可能である。また16ビット-CRC(Cyclic Redundancy Check)(生成多項式: $1+X^5+X^{12}+X^{16}$ )が定義され、チャネル識別子(Channel Discriminator)、SACCH、FACCHに対して誤り検出が可能である。

H.261は512ビットのFECフレームを伝送単位とする。フレーム同期ビット(Synchronizing Signal)に続き、圧縮符号化されたビデオ情報(Data Payload:493ビット)が定義される。更に、BCH(511, 493)誤り訂正符号(生成多項式:  $(1+X^4+X^9)(1+X^3+X^4+X^6+X^9)$ )を採用しており、18ビットのparityビットが付加される。これにより2ビットまでのランダム誤りか、6ビットまでのバースト誤りを訂正できる。

### 2.2 FEC/SR-ARQハイブリッド方式

H.261は、有線伝送では誤り訂正結果に誤りが残する確率が十分小さいとし、誤り検出手段を適用していない。しかし、PHSでH.261のビデオ情報を伝送する場合、フェージング等の影響により、誤り訂正能力を超えた誤りが発生する可能性がある。そのため、誤り検出手段を適用したARQを行う必要がある。

このとき、送信端末のH.261符号化部が付与した誤り訂正符号を、受信端末のH.261復号化部が利用するだけでなく、基地局等無線区間の受信局でも活用すること

を考える。すなわち、無線区間で誤り訂正能力を超えた誤りが発生したことを、受信局が誤り訂正結果に誤り検出手段を適用して検出し、再送を行えば、ARQを適用しても高いスループットが得られると考えた。

一方、誤り検出手段にも誤り訂正効果が得られるよう、FECフレームの内部に誤り検出手段を定義することも考えられる。しかしPHSでは、誤り検出手段として各スロットにCRCが定義されており、情報の冗長を避け、かつ有線系既存ビデオ端末との相互接続性を考慮し、PHSの誤り検出手段の活用を考えた。

そこで本論文では、無線区間の受信局側で、H.261の誤り訂正手段の能力を超えた誤りが発生したことを、誤り訂正結果にPHSの誤り検出手段を適用して検出し、誤りスロットのみを選択的に再送するFEC/SR-ARQ方式を提案する。以下にその動作原理を示す。なお、ビデオ情報はFACCHで伝送され、ACK/NACKやスロット番号等の制御情報はSACCHに相当するチャネルで伝送される。また図1から明らかなように、5個のFECフレームをちょうど16個のスロットで伝送でき、FECフレームとスロットの対応が容易に特定できる。

A:送信局は同一フレーム内の2スロットを使用し、FECフレームとスロットとの対応を示すスロット番号(0~15)と、ビデオ情報とを送信する。

B:受信局は同一フレーム内の2スロットを受信し、かつスロット番号により一つのFECフレームを受信し終えたと判断した時点で、以下の処理を行う。

b1: FECフレームを構成する各スロットに対し、CRCによる誤り検出を行い、誤りが検出されなければ、受信済みスロット番号を含むACKを返送する。

b2: CRCにより誤りが検出されれば、FECフレームに対し誤り訂正を行う。

b3: 誤り訂正されたFECフレームを構成する各スロットのうち、b1で誤りを検出したスロットだけに対し、再度CRCによる誤り検出を行う。誤りが検出されなければ、受信済みスロット番号を含むACKを返送する。ここで、b1で誤りを検出したスロットだけを対象としたのは、誤り訂正能力を超えた誤りの発生により、b1で誤りを含まなかつたスロットまでも誤訂正してしまうことを避けるためである。

b4: 誤りが検出されれば、そのスロット番号を含むNACKを返送する。但し、引き続くFECフレームにまたがるスロット（図1ではS3, S6, S9, S12）に誤りが検出された場合、次のFECフレームで訂正される可能性があるため、そのスロットの再送要求は行わず、その直前までの各スロットに対しACK/NACKの返送を行う。

C: NACKを受信した送信局は、以下の手続きにより再送を行う。

c1: 1スロットだけの再送が要求された場合、スロットダイバーシチ[3]を適用し、次の2スロットに同じ情報を乗せて再送する。

c2: 2スロットの再送が要求された場合、次の2スロットを使用して再送する。

c3: 3スロット以上の再送が要求された場合、まず先頭の2スロットに対してc2と同様の処理を行い、更に、送信が完了しないスロット数に応じて、c1, c2, c3と同様の処理を行う。

D: 再送スロットを受信した受信局は、Bと同様の処理を行う。なお、スロットダイバーシチが適用された再送スロットを受信した場合、Bと同様の処

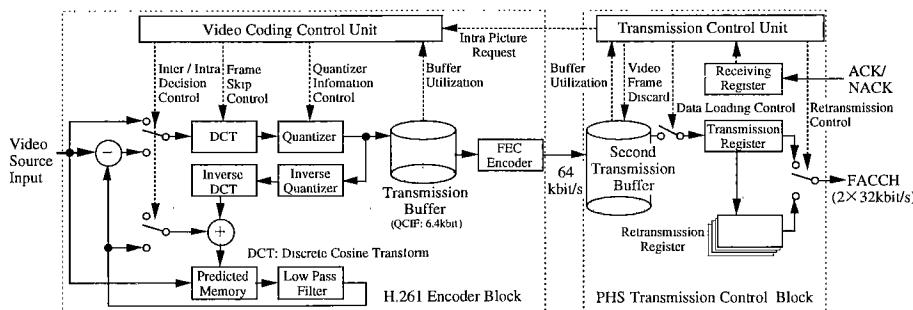


図2 送信機構成図  
Fig. 2 Block diagram of the transmitter.

理により、誤りが検出されない再送スロットを選択する。

### 2.3 メディア内同期メカニズム

ARQを適用したビデオ伝送では、再送等の影響により、送信側で各ビデオフレームが発生した時間間隔と、受信側でこれを表示する時間間隔が大きく異なることがある。この場合、動きが不自然なビデオとして表示されてしまう。そのため、送信側での各ビデオフレームの発生時間間隔を受信側でも再現するメディア内同期が必要となる。

ところでH.261は、メディア内同期を維持するため、送受信端末が固定速度で情報交換することを前提とする。そのため、符号発生量の変動は、H.261符号化部の送信バッファの使用率に応じた量子化特性の制御、およびフレームスキップの適用により吸収される。従って、ARQを適用する場合においても、H.261符号化部の送信バッファから固定速度でビデオ情報を読み出す必要がある。

そこで本論文では、H.261の送信バッファの後段に、より大きな2次送信バッファを設け、常に一定速度(64 kbit/s)で2次送信バッファにビデオ情報を読み出し、これをFEC/SR-ARQ方式により伝送するシステムを考える。図2に、送信機構成図を示す。

更に、本論文では、再送等により乱れたメディア内同期を制御するために、2次送信バッファにおいて、大きな送信遅延が生じたビデオフレームを強制的に廃棄するメディア内同期メカニズムを適用する。

例えば図3に示すように、送信側で、あるビデオフレーム(n)の送信が完了するスロット終了時に、既にビデオフレーム(n+2)以降が発生した場合を考える。このとき、同じスロットで、ビデオフレーム(n+1)の先頭部分も送信されているため、ビデオフレーム(n+2)以降をビデオフレーム廃棄の対象とする。そして、ビデオフレーム(n+1)の送信が完了するまでの間に発生した最新のビデオフレーム(m)の直前のビデオフレーム(m-1)ま

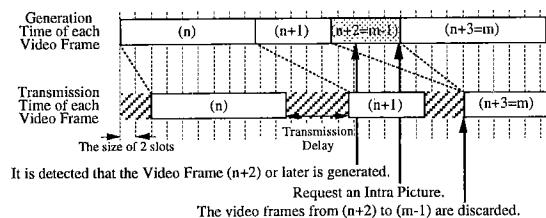


図3 メディア内同期メカニズム

Fig. 3 Intra-media synchronization mechanism.

でを強制的に廃棄することにより、メディア内同期を維持する。なお、ビデオフレーム(m+1)の最後の部分と次のビデオフレームとにまたがったスロットでは、次のビデオフレームに相当する部分にダミーコードを挿入し、受信側でこれを読み捨てるものとする。

このようなビデオフレーム廃棄を行った結果、フレーム間予測符号化方式を適用したビデオ情報は乱れるため、H.261符号化部に対しフレーム内符号化の適用を要求する。また、FECフレームも再構築する必要があるが、大きな処理負荷にはならない。

### 3. シミュレーションの仮定

本研究では、ランダム誤りとバースト誤りの両方の通信環境において、H.261で圧縮符号化された実際のビデオ情報を使用してシミュレーションを行う。

#### 3.1 ランダム誤り環境における仮定

ランダム誤り環境におけるシミュレーションを行うにあたり、以下の仮定を置く。

A1. 幾何分布によりビット誤りが発生するビット位置を決める。

A2. ビット誤りは、H.261のビットストリームを伝送するFACCH(160ビット期間)のみに発生し、CRCやACK/NACK等の制御情報には発生しない。

A3. ACKやNACKは、これらの返送要求が発生した直後の対応するスロットで速やかに返送する。また、再送要求の廃棄はしない。

A4. ビデオの2次送信バッファサイズは無限大。

A5. PHS基地局のゾーン半径は数百mであり、移動局と基地局間における電波伝搬遅延を無視する。

A6. シミュレーション時間は1時間とする。また、各測定値の95%信頼区間を求める。なお、以後に示す各グラフにおいて、95%信頼区間もあわせて示す。但

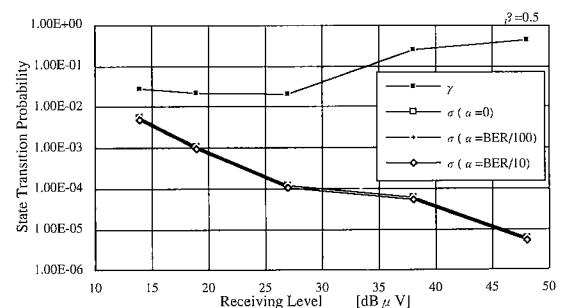


図4 バースト誤り環境における状態遷移確率

Fig. 4 Transition probability in burst error environment.

し、プロットするシンボルの大きさより小さい場合は、これを明記しない。

### 3.2 バースト誤り環境における仮定

バースト誤り環境に対するシミュレーションを行うあたり、以下の仮定を置く。

A1. バースト誤り環境として2状態マルコフ連鎖モデル[9]を適用し、バースト状態から良好状態への遷移確率を $\gamma$ 、良好状態からバースト状態への遷移確率を $\sigma$ と定義する。また全体のBERを $B_e$ 、バースト内BERを $\beta$ 、バースト外BERを $\alpha$ と定義し、平均バースト長を $L_b$ 、平均バースト発生間隔を $L_g$ と定義する。これにより $t$ 時間内での状態遷移確率 $\gamma$ と $\sigma$ は、次式で与えられる。

$$\gamma = 1 - \exp(-t/L_b)$$

$$\sigma = 1 - \exp(-t/L_g) = 1 - \exp[-t \times (B_e - \alpha)] / \{L_b \times (\beta - B_e)\}]$$

図4に状態遷移確率 $\gamma$ 、 $\sigma$ と受信レベルの関係を示す。これは文献[10]に記載された歩行時(フェージング周波数8Hz)における各受信レベルと $L_b$ 、 $B_e$ の関係をもとに算出した。なお $\sigma$ は、 $\alpha$ の値を変えてもほぼ同じ確率を示している。

A2. 幾何分布によりバースト状態に遷移するビット位置および良好状態に遷移するビット位置を決める。

A3. 良好状態でランダム誤りを付加する場合、 $\alpha = B_e \times 10^{-1}$ 又は $\alpha = B_e \times 10^{-2}$ と仮定し、幾何分布によりビット誤りが発生するビット位置を決める。

A4. 他はランダム誤り環境の仮定A2~A6と同様。

### 3.3 評価システム

図5に実際のビデオ情報を使用する評価システムの構成を示す。インターフェースボードは、H.261で圧縮符号化されたビデオ情報からビデオフレーム先頭情報PSC(Picture Start Code)を検出するたびに、PSCを検出したFECフレーム識別番号、FECフレームにおけるPSC検出ビット位置を送信タイムスタンプとしてワークステーションに通知する。ワークステーションは通信プロトコルやエラー環境等のシミュレーションを行い、送信タイムスタンプから求めたビデオフレームサイズをもとにビデオフレーム伝送遅延時間を計算する。そして、これを受信タイムスタンプとしてインターフェースボードに返送する。インターフェースボードは受信タイムスタンプに従い、H.261復号化部にビデオ情報を与える。

### 3.4 ビデオソースの特性

シミュレーションで使用したH.261符号化・復号化部

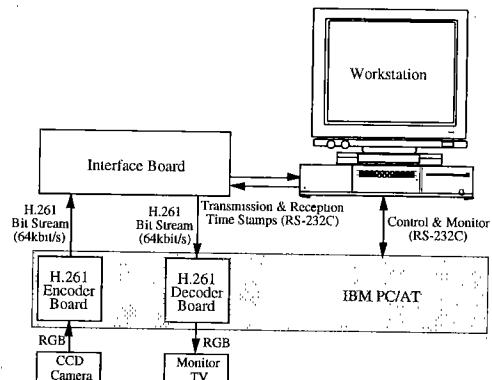


図5 評価システムの構成

Fig. 5 Block diagram of the evaluation system.

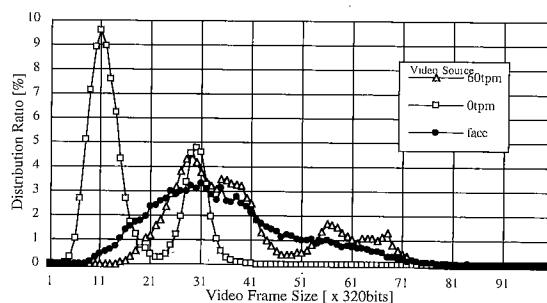


図6 ビデオフレーム長の分布

Fig. 6 Distribution of video frame size.

の各種パラメータを以下に示す。

- ・画像サイズ : QCIF (176×144ピクセル)  
QCIF:Quarter Common Intermediate Format

- ・送信バッファサイズ : 6,400ビット

- ・量子化ステップサイズ $Q$  :  $Q = 2 \times \{\text{int}(n/200) + 1\}$   
 $n$ は送信バッファ使用ビット数を示す。  
 $\text{int}(x)$ は $x$ の整数值を求める関数を示す。

- ・フレームキップ条件 :  $n/6,400 \geq 1.0$

- ・動き補償 : 有り

シミュレーションでは、人物の顔のビデオソースを使用した。このフレーム長分布を図6に●で示す。また参考として、人物の顔の代わりに60 tpm(times/min)で振動するメトロノームを用いた場合を△で、静止したメトロノームの場合を□で示す。

図によれば、人物の顔と振動するメトロノームの分布は近似しており、人物の顔に適度な動きが含まれていることを示す。また、静止したメトロノームの場合、フレーム長が11×320ビットにおけるピークはフレーム間予測符号化、30×320ビットにおけるピークは

周期的に挿入されるフレーム内符号化に対応すると考えられる。従って、人物の顔のピークが $30 \times 320$ ビット付近であることから、人物の顔にフレーム内符号化が頻繁に適用されていると考えられる。

ここで、ビデオフレーム廃棄に伴う強制的なフレーム内符号化要求を行わないと仮定しても、既にフレーム内符号化が頻繁に適用されているため、ビデオフレーム長の分布は強制的なフレーム内符号化要求を行った場合を十分良く近似できると考えられる。よって、本シミュレーションでは、ビデオフレーム廃棄に伴う強制的なフレーム内符号化要求を省略する。

#### 4. 数値結果と性能評価

ランダム誤りとバースト誤りの両方の環境におけるビデオ伝送の性能を、2スロットを使用したSR-ARQ方式との比較により評価する。

##### 4.1 ランダム誤り環境における評価

ランダム誤り環境における評価結果を以下に示す。

###### 4.1.1 スループット

本論文では、評価基準としてスループット、FECによるエラー訂正率を採用する。スループットは、単位

時間当たりに送信が完了したビット数と定義する。しかし、SR-ARQ方式を適用し、FECを行わない場合においても、伝送するビデオ情報に誤り訂正パリティビットを含ませるものとする。これは、H.261がFECの適用を標準としており、H.261を採用した有線系既存ビデオ端末との相互接続性の観点から、より適切な比較の前提条件と考えたためである。一方、FECによるエラー訂正率は、誤りが発生したスロットのうち、FECによる誤り訂正結果に誤りが残留しないことをCRCにより確認したスロットの割合と定義する。

###### (1) スループット

図7にスループットとBERとの関係を示す。●はFEC/SR-ARQ方式によるスループットである。また比較対象として、PHSで定義されたCRCを利用し、2スロットを使用したSR-ARQ方式によるスループットを□で示す。図によれば、BERが $1.0 \times 10^{-4}$ 以上で、FEC/SR-ARQ方式が高いスループットを示す。例えばBERが $2.0 \times 10^{-3}$ において、スループットは60 kbit/sであり、SR-ARQ方式より43%向上する。

###### (2) FECの効果

図8にFECによるエラー訂正率とBERの関係を示

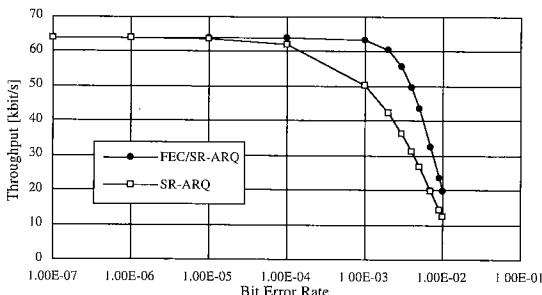


図7 スループット（ランダム誤り環境）

Fig. 7 Throughput in random error environment.

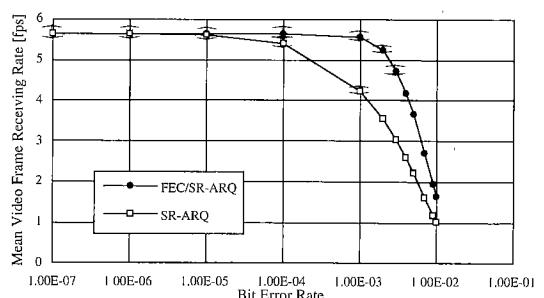


図9 平均受信ビデオフレームレート（ランダム誤り環境）

Fig. 9 Mean video frame receiving rate in random error environment.

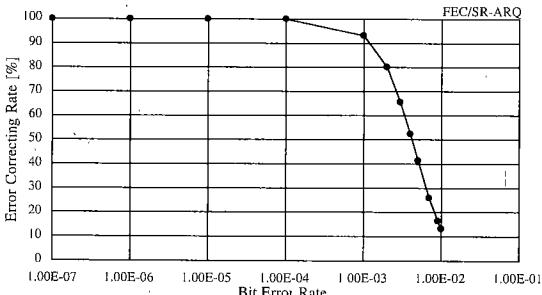


図8 FECによるエラー訂正率（ランダム誤り環境）

Fig. 8 Error correcting rate of FEC in random error environment.

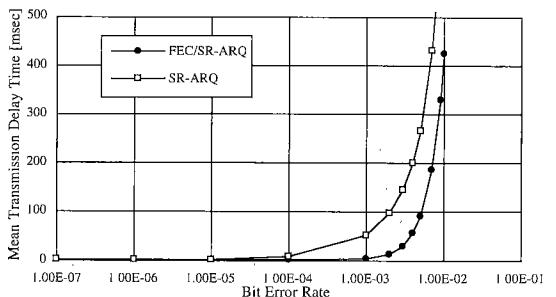


図10 ビデオフレームの平均伝送遅延時間（ランダム誤り環境）

Fig. 10 Mean transmission delay time in random error environment.

す。図によれば、 $2.0 \times 10^{-3}$ 以下のBERにおいて、80%以上のエラー訂正率を示しており、無線区間におけるH.261の誤り訂正手段の活用が、スループットの向上に非常に効果的であると言える。

また、 $1.0 \times 10^{-4}$ 以上のBERにおけるエラー訂正率の低下は、FECによる誤り訂正結果に誤りが残留する確率の増加を意味する。PHSではBERが $1.0 \times 10^{-4}$ より悪くなることが十分考えられる。従って、誤りに弱いビデオ情報をPHSで伝送するには、FECによる誤り訂正結果に対してCRCによる誤り検出を行い、誤りが残留したスロットの再送を行うことが不可欠と言える。

#### 4.1.2 ビデオのメディア内同期

本論文では、ビデオ伝送およびメディア内同期の評価基準として、平均受信ビデオフレームレート、ビデオフレームの平均伝送遅延時間、メディア内同期ずれ時間の平均値、平均2乗誤差、累積分布を採用した。平均受信ビデオフレームレートは、単位時間当たりに受信が完了したビデオフレーム数の平均とし、fps (frame per second)で定義する。ビデオフレームの平均伝送遅延時間は、各ビデオフレームの送信開始時刻と受信完了時刻の差からビデオフレームの情報量に相当する時間を差し引いた時間の平均値と定義する。メディア内同期ずれ時間は、各ビデオフレームの発生完了時刻と受信完了時刻との差と定義し、その平均値と平均2乗誤差を求めた。また、メディア内同期ずれ時間の累積分布は、メディア内同期ずれ時間がある値以下となる確率と定義した。

##### (1) ビデオ伝送性能

図9に平均受信ビデオフレームレートとBERの関係、図10にビデオフレームの平均伝送遅延時間とBERの関係を示す。図によれば、FEC/SR-ARQ方式(●でプロット)はSR-ARQ方式(□でプロット)よりも単位時間当たりに多くのビデオフレームを、少ない平均伝送遅延時間で伝送できる。例えばBERが $2.0 \times 10^{-3}$ において、平均受信ビデオフレームレートは5.2 fps (SR-ARQ方式の147%)、平均伝送遅延時間は14 ms (SR-ARQ方式の15%)である。

##### (2) メディア内同期

ビデオのリアルタイム伝送では、伝送遅延がメディア内の同期を乱し、その累積により受信側に遅れたビデオ情報を提供してしまう。図11にメディア内同期ずれ時間の経過例を示す。破線はメディア内同期ずれ時間が0の理想値であり、この理想値との差がメディア内同期ずれ時間を示す。但し、最初のビデオフレームの

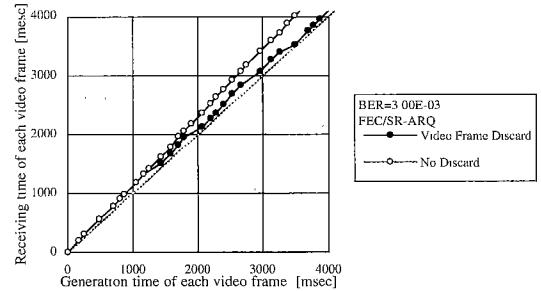


図11 メディア内同期ずれ時間の経過(例)  
Fig. 11 Progress of intra-media synchronization error.

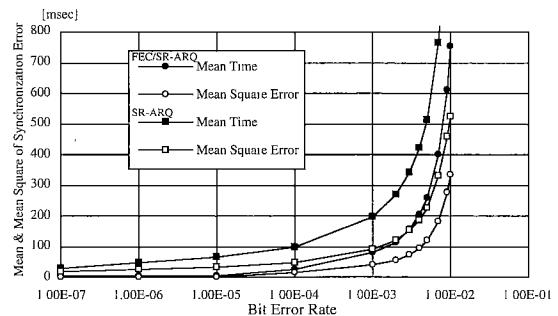
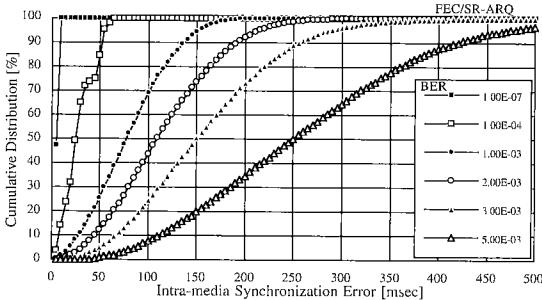


図12 メディア内同期ずれの平均および平均2乗誤差  
(ランダム誤り環境)  
Fig. 12 Mean and mean square of intra-media synchronization error in random error environment.

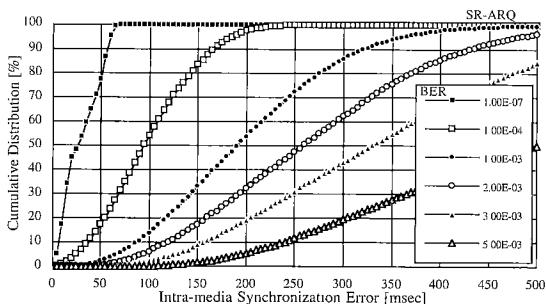
発生完了時刻と受信完了時刻を0とする。メディア内同期メカニズムを適用しなければ(○でプロット)、メディア内同期ずれ時間は時間の経過と共に順次大きくなる。これは各ビデオフレームの伝送遅延が累積するためである。しかし、ビデオフレーム廃棄によるメディア内同期メカニズムを適用すれば(●でプロット)、ビデオフレームを廃棄することで、メディア内同期ずれ時間を小さく保つことができる。このように、ビデオフレーム廃棄によるメディア内同期メカニズムは、メディア内同期を維持するのに効果的と言える。

図12にビデオフレーム廃棄によるメディア内同期メカニズムを適用した場合における、メディア内同期ずれ時間の平均値、平均2乗誤差とBERの関係を示す。FEC/SR-ARQ方式(●、○でプロット)は、SR-ARQ方式(■、□でプロット)よりも同期ずれ時間の平均値が小さいだけでなく、平均2乗誤差も小さく、メディア内同期が良好に改善されていると言える。例えばBERが $2.0 \times 10^{-3}$ では、平均値は115 ms (SR-ARQ方式の43%)、平均2乗誤差は56 ms (SR-ARQ方式の46%)である。

更に、図13(a)にFEC/SR-ARQ方式によるメディア内



(a) FEC/SR-ARQ



(b) SR-ARQ

図13 メディア内同期ずれ時間の累積分布（ランダム誤り環境）  
Fig. 13 Cumulative distribution of intra-media synchronization error in random error environment.

同期ずれ時間の累積分布とBERの関係、図13(b)にSR-ARQ方式によるそれを示す。文献[11]によれば、ビデオと音声のメディア間同期ずれ時間が80 ms以内であればメディア間同期は最適な状態であり、160 ms以上であれば同期はずれの状態であると報告している。ここでは便宜上、これらの結果がメディア内同期についても近似的に成立すると考える。そして、これらの値を用いて、メディア内同期の品質を調べる。

例えばBERが $1.0 \times 10^{-3}$ において、80 ms以内の同期ずれしか発生しないビデオフレームは、SR-ARQ方式では全体の8%しか発生しないのに対し、FEC/SR-ARQ方式では全体の52%を占める。またBERが $2 \times 10^{-3}$ において、160 ms以上の同期ずれが発生するビデオフレームは、SR-ARQ方式では全体の80%を占めるのに対し、FEC/SR-ARQ方式では全体の22%しか発生しない。すなわち、FEC/SR-ARQ方式を適用すれば、BERが $2.0 \times 10^{-3}$ 以下のランダム誤り環境において、良好なメディア内同期を維持できる。

## 4.2 パースト誤り環境における評価

つぎにパースト誤り環境における評価結果を示す。

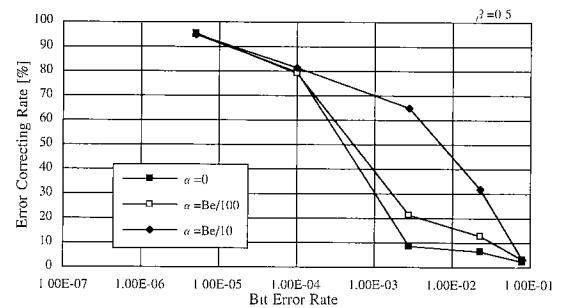


図14 FECによるエラー訂正率（パースト誤り環境）  
Fig. 14 Error correcting rate of FEC in burst error environment.

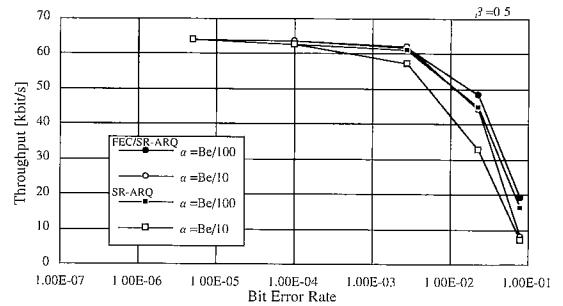


図15 スループット（パースト誤り環境）  
Fig. 15 Throughput in burst error environment.

### 4.2.1 スループット

ランダム誤り環境ではFECがスループットの向上に大きく寄与したので、ここではまずFECの効果について考察する。

#### (1) FECの効果

図14にFECによるエラー訂正率とBERの関係を示す。パースト誤りのみ( $\alpha=0$ )を与えた場合(■でプロット), BERが $1.0 \times 10^{-4}$ 以下において80%以上の高いエラー訂正率を示すが、BERが $2.8 \times 10^{-3}$ より悪くなると9%以下になる。これは、BERが $2.8 \times 10^{-3}$ 以上では平均パースト長約40ビットのパースト誤りが多発し、パースト誤りに対する訂正能力を超えてしまうためである[10]。このようにパースト誤り環境では、特にBERが高いときにFECが効果的であると言える。また、パースト誤りと共にランダム誤りも付加したより現実的な環境では、ランダム誤りに対する訂正効果が顕著となる。例えは $\alpha=Be/10$ (◆でプロット)とした場合、BERが $2.8 \times 10^{-3}$ でもエラー訂正率は65%まで向上する。

つぎに、ランダム誤り環境におけるエラー訂正率(図8)との比較を行う。パースト誤り環境では、BERが $1.0 \times 10^{-4}$ 以下の値であっても、ランダム誤り環

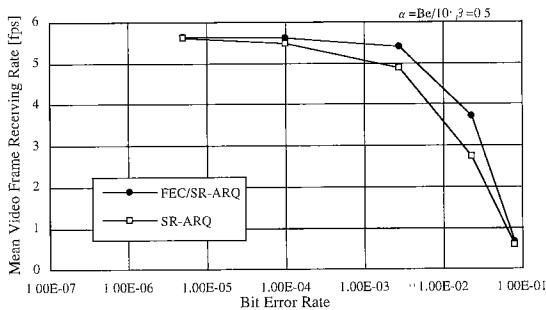


図16 平均受信ビデオフレームレート（バースト誤り環境）  
Fig. 16 Mean video frame receiving rate in burst error environment.

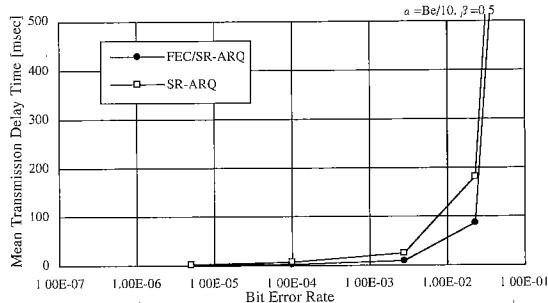


図17 ビデオフレームの平均伝送遅延時間（バースト誤り環境）  
Fig. 17 Mean transmission delay time in burst error environment.

境のような99%以上の高いエラー訂正率は得られないことがわかる。このことは、バースト誤り環境では、低いBERであっても、FECによる誤り訂正結果に誤りが残留する確率が、ランダム誤り環境よりも高いことを意味する。従って、バースト誤り環境では、BERが $1.0 \times 10^{-4}$ 以下であっても、FECによる誤り訂正結果に対してCRCによる誤り検出を行い、誤りが残留したスロットの再送を行うことが、より効果的であると言える。

## (2) スループット

図15にスループットとBERの関係を示す。図においてFEC/SR-ARQ方式で $\alpha = B_e/100$ の場合を●、 $\alpha = B_e/10$ の場合を○、またSR-ARQ方式で $\alpha = B_e/100$ の場合を■、 $\alpha = B_e/10$ の場合を□でプロットする。図によれば、比較的高いエラー訂正率を示した $\alpha = B_e/10$ において、FEC/SR-ARQ方式とSR-ARQ方式との差が顕著であり、FECが効果的と言える。

しかし、ランダム誤り環境におけるスループット（図7）と比較すると、バースト誤り環境のほうがエラー訂正率が低いにもかかわらず高いスループットを示している。例えばBERが $2.8 \times 10^{-3}$ におけるスル

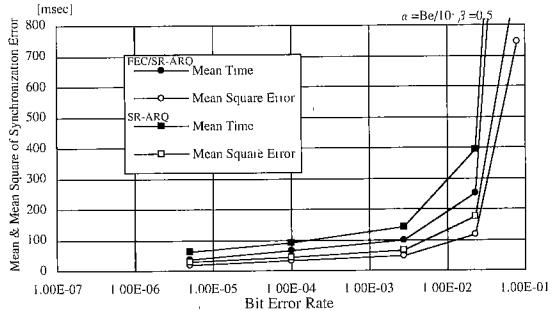


図18 メディア内同期ずれの平均および平均2乗誤差  
(バースト誤り環境)  
Fig. 18 Mean and mean square of intra-media synchronization error in burst error environment.

プットは、バースト誤り環境( $\alpha = B_e/10$ )で62 kbit/s、ランダム誤り環境で56 kbit/sである。

バースト誤り環境では、BERが $2.8 \times 10^{-3}$ 以上において、平均バースト長約40ビットのバースト誤りが発生する。そのため、同じBERであっても、発生する誤りスロット数はランダム誤り環境よりも少なくなる。従って、FECによる誤り訂正能力を超えたバースト誤りが発生し、FECによるエラー訂正率が低くても、ランダム誤り環境よりも少ない再送スロットしか発生しない。また、一つの再送スロットで複数のビット誤りを一度に修復できる可能性も高いため、ランダム誤り環境よりも高いスループットが得られたと考える。

## 4.2.2 ビデオのメディア内同期

### (1) ビデオ伝送性能

図16に平均受信ビデオフレームレートとBERの関係、図17にビデオフレームの平均伝送遅延時間とBERの関係を示す。図によれば、バースト誤り環境においても、FEC/SR-ARQ方式(●でプロット)はSR-ARQ方式(□でプロット)よりも単位時間当たりに多くのビデオフレームを、少ない平均伝送遅延時間で伝送できる。例えばBERが $2.8 \times 10^{-3}$ において、平均受信ビデオフレームレートは5.4 fps (SR-ARQ方式の110%)、平均伝送遅延時間は9 ms (SR-ARQ方式の37%)である。

また、ランダム誤りにおける結果も考慮すると、 $2.0 \times 10^{-3}$ 以下のBERを確保すれば、平均5.2 fps以上、平均伝送遅延時間14 ms以下でビデオ伝送でき、歩行時でも良好な伝送が可能であることがわかる。

### (2) メディア内同期

図18にビデオフレーム廃棄アルゴリズムを適用した場合のメディア内同期ずれ時間の平均値、平均2乗誤差とBERの関係を示す。図によれば、バースト誤り環

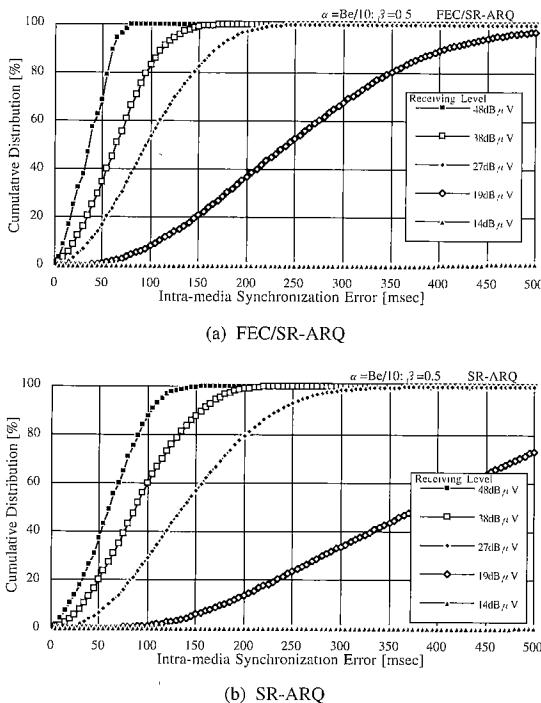


図19 メディア内同期ずれ時間の累積分布（バースト誤り環境）  
 Fig. 19 Cumulative distribution of intra-media synchronization error in burst error environment.

境においても、FEC/SR-ARQ方式(●および○でプロット)は、SR-ARQ方式(■および□でプロット)よりも同期ずれ時間の平均値が小さいだけでなく、平均2乗誤差も小さいため、メディア内同期が良好に保たれていると言える。例えばBERが $2.8 \times 10^{-3}$ において、平均値は99 ms (SR-ARQ方式の70%)、平均2乗誤差は49 ms (SR-ARQ方式の74%)である。

また図19(a)にFEC/SR-ARQ方式によるメディア内同期ずれ時間の累積分布とBERの関係、図19(b)にSR-ARQ方式によるそれを示す。図によれば、例えば受信レベル38 dB $\mu$ V( $B_e=1.0 \times 10^{-4}$ )において、80 ms以内の同期ずれしか発生しないビデオフレームは、SR-ARQ方式では全体の43%しか発生しないのに対し、FEC/SR-ARQ方式では全体の66%を占める。また受信レベル27 dB $\mu$ V ( $B_e=2.8 \times 10^{-3}$ )において、160 ms以上の同期ずれが発生するビデオフレームは、SR-ARQ方式では全体の38%を占めるのに対し、FEC/SR-ARQ方式では全体の13%しか発生しない。すなわち、FEC/SR-ARQ方式を適用すれば、受信レベルが27 dB $\mu$ V以上のバースト誤り環境において、良好なメディア内同期を

維持できる。

更に、ランダム誤り環境における結果も考慮すると、 $2.0 \times 10^{-3}$ 以下のBERを確保すれば、メディア内同期ずれ時間を平均で115 ms以下に抑えることができ、良好なメディア内同期を維持できる。

## 5. 結 論

本研究では、PHSにおけるビデオ伝送プロトコルとして、無線区間の受信局側で、H.261の誤り訂正手段の能力を超えた誤りの発生を、誤り訂正結果にPHSの誤り検出手段を適用して検出し、誤りスロットを選択的に再送するFEC/SR-ARQ方式を提案した。更に、ビデオフレーム廃棄によるメディア内同期メカニズムを適用し、ビデオ伝送における性能を評価した。

その結果、FEC/SR-ARQ方式は、SR-ARQ方式に比べて高いスループットを実現できることを確認した。特に、BERが $1.0 \times 10^{-4}$ 以上のランダム誤り環境では、H.261の誤り訂正能力を超えた誤りが発生する。更に、バースト誤り環境では、BERが $1.0 \times 10^{-4}$ 以下であっても、誤り訂正能力を超えた誤りが発生する。従って、誤りに弱いH.261のビデオ情報をPHSで伝送するには、誤り訂正能力を超えた誤りスロットを、無線区間において再送することが非常に効果的である。

更に、 $2.0 \times 10^{-3}$ 以下のBERを確保すれば、ランダム誤り環境だけでなく、歩行時を想定したバースト誤り環境においても、平均5.2 fps以上、平均伝送遅延時間14 ms以下でビデオ伝送できることがわかった。特に、ビデオフレーム廃棄によるメディア内同期メカニズムを適用すれば、メディア内同期ずれ時間を平均115 ms以下に抑えることができ、歩行時においてもメディア内同期を維持した良好なビデオ伝送が可能であることがわかった。

今後、蓄積系メディアのビデオ伝送にFEC/SR-ARQ方式を適用し、ビデオフレームサイズが既知であることを活用したプロトコルの改良、およびメディア内同期について検討を行う。また、ビデオに加えて音声も伝送する場合におけるビデオと音声のメディア間同期についても検討を行う。

謝辞 本論文の改善に有益な御意見を下さった査読委員の方々に深謝致します。

## 文 献

- [1] “パーソナル移動通信小特集,” 信学誌, vol.78, no.2, pp.122-178, Feb. 1995.
- [2] 財団法人電波システム開発センター, “第二世代コード

- レス電話システム標準規格,” RCR STD 28, Aug. 1993.
- [3] 山本竜治, 丹田 剛, 中村能章, “TDMA/TDD 2スロット使用時における誤り再送制御法の検討,” 信学'95春大, B-498, March 1995.
- [4] CCITT Recommendation H.261, “Video Codec for Audiovisual Services at  $p \times 64 \text{ kbit/s}$ ”.
- [5] 萩木 久, 中野慎夫, “携帯形映像通信サービスと技術課題,” 信学'94春大, SB-4-1, pp.431-432, March 1994.
- [6] A.Kurobe, “Cordless Videophone Applications and Technologies,” Technical Forum paper in Telecom '95, pp.367-371, Oct. 1995.
- [7] 後藤 勇, 萩木 久, 藤本 強, “無線通信における誤り制御法に関する一検討,” 信学'94秋大, B-326, Sept. 1994.
- [8] 佐藤裕明, 青木孝泰, 館石 亨, 野村勝巳, 林 克彦, “デジタル無線通信におけるデータ誤り制御の一検討,” 信学'94春大, B-373, March 1994.
- [9] クライロック, “待ち行列システム理論(上),” マグロウヒル好学社.
- [10] 藤本宜子, 山口 淳, 小林卓也, 游木貴之, “PHSにおけるデータ通信方式の検討,” 信学技報, CS94-77, pp.23-28, Aug. 1994.
- [11] R.Steinmetz and C.Engler, “Human perception of media synchronization,” IBM European Networking Center Technical Report, 43.9310, Oct. 1993.

(平成7年12月1日受付, 8年3月26日再受付)

### 加藤 正美 (正員)



昭59 名古屋大・理・物理卒。同年三洋電機入社。現在、同社ハイパームディア研究所主任研究員。移動通信システム、無線・有線統合型マルチメディアネットワークの研究に従事。

### 臼井 憲義 (正員)



昭46 岐阜大・工・電気卒。同年三洋電機入社。現在、同社ハイパームディア研究所通信研究部担当部長。移動通信システム、無線・有線統合型マルチメディアネットワークの研究に従事。

### 田坂 修二 (正員)



昭46 名工大・工・電気卒。昭51東大大学院博士課程了。同年、名工大情報勤務。現在、名工大・電気情報教授。昭59～60 UCLA客員研究員。マルチメディア通信、無線LANの研究に従事。工博。IEEE, ACM, 情報処理学会各会員。