

# 分散リアルタイム・ワイヤレス技術

慶應義塾大学理工学部

中川 正雄 nakagawa@nkgw.ics.keio.ac.jp

低レイテンシーのハードリアルタイム通信と、高速転送用のソフトリアルタイム通信の両方を実現するワイヤレス通信システムを 5.2GHz 帯でのシミュレーション結果を交えて解説する。

## ◆はじめに

近年、携帯電話などに代表される通信と放送のデジタル化がなされている。デジタル化のメリットはよく知られているように、対干渉、対雑音特性の向上、情報圧縮、秘話性が挙げられるが、そのデメリットについては語られることが少ない。デジタル通信は、アナログ通信を圧倒し、デメリットのないかのような錯覚さえ起こすかのようである。確かに放送のように一方的な伝送に関してはメリットだらけといえる。携帯電話のような双方向通信において、雑音は少なくなったが、話のタイミングがとりにくいなど、時間遅延の影響が気になることがある。

携帯電話の遅延の原因は2つある。1つはアナログ音声を変換する音声符号化による遅延。もう1つはデジタル符号の誤りを訂正するための符号化による遅延であり、これだけでも数10ミリ秒の遅延がある。本稿では、前者の符号化の遅延は特別に触れないで、後者の符号化による遅延に焦点を当てていく。その理由は前者の符号化は無線通信に特有とはいえないこと、後者は無線通信の雑音や干渉、フェージングといった無線通信が持つ過酷な状況を克服するために用いられるからである。

これからの無線通信の適用範囲は、携帯電話が広めた無線通信技術の普及によって、広がっていくと思われる。無線通信の接続対象は人間対人間、機械対人間、機械対機械であるが、現在までは圧倒的に人間対人間であ

る。しかしながら、今後のロボット技術の進展とともにロボットの制御のような機械対人間の接続のためにも無線通信技術が普及するものと思われる。その中で、ロボットの果たす動作には、人間がロボットの手を遠隔地から操作するリモートコントロールに重要な動作が含まれている。最も高度なロボットリモートコントロールは医療用の手術ロボットであるが、現在利用されているものは、視覚のみを利用して制御し、さらに、無線を利用せずに、有線を利用している。

ロボットの手の動作として、最も微妙で精巧なものは触覚情報によるものである。視覚情報により手の動作を制御できるのは、対象物に近づけるような、大きな動きのある場合である。対象物の位置を確認し、その方向に手を向けるのに視覚情報を利用する。対象物に触れて、対象物をつかんだり、こまやかな情報を取得するのは触覚情報によっている。

触覚情報は他の視覚や聴覚の情報によるものと異なり、こちらから何らかの力を加えて、はじめてその情報が得られる。力学の作用と反作用の法則のもとに、触覚を感じるのである。図-1には触覚情報のメカニズムをブロック図にしたものを示す。入力では、手によって力を加え、出力ではその手に応答が返ることを意味する。この応答が速く強ければ硬いものであり、これが遅く弱ければ、軟らかいものであろうと判断できる。応答の速さ、強さが大切な情報であることが分かる。ロボットの手を利用する場合でもこのメカニズムによらねばならない。もしも、情報伝達に時間的遅延が挿入されれば、触覚情報は誤りを持つことになる。一般には、遅延に関して1ミリ秒以内しか許されず、こうした厳しいリアルタイム情報をハードリアルタイム情報と呼ぶ<sup>1)</sup>。そうではない、一般にテレビ会議などでリアルタイムとして許される範囲の画像伝送情報などをソフトリアルタイム情報と呼ぶ。

本稿では、ロボットハンドを無線操縦するシステムを提案する。その場合のハードリアルタイム情報としては触覚情報を仮定し、ソフトリアルタイム情報としては画像情報を仮定する。無線システムとしては、最近開発の著しい5.2GHzのブロードバンド無線LANを利用した場合を想定する。



図-1 触覚情報のメカニズム

◆無線によるロボットリモートハンドシステム

《ロボットリモートハンドシステムを無線化した場合のメリット》

たとえば、手術用ロボットであれば、救急車上での手術が可能になったり、いつでもどこでも手術が可能になる。地雷除去のリモートハンドも、安全な場所にいる操作人まで有線ケーブルを敷設する必要がない。例を挙げればきりが無い応用が考えられるが、今後のモバイル時代、移動ロボット時代に大きなジャンルを提供するであろう。

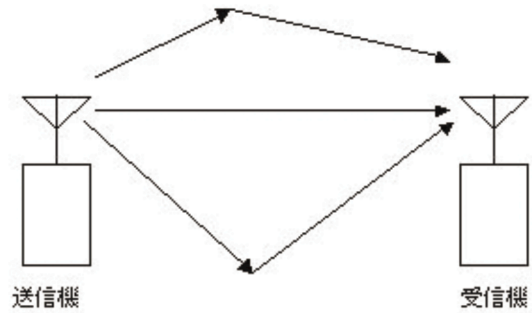


図-2 無線通信の伝送

《なぜデジタル無線通信には長い遅延が付きものか？》

無線通信の伝送路は空間であり、送信側から、そこを電波が通過し、受信側に至る。

図-2に空間での無線通信の伝送路が示される。ケーブルなどと異なり、空間では、アンテナから輻射された電波は異なる複数のパスに沿って伝搬され、受信アンテナに到達する。それぞれのパスの長さは異なるものであり、そのために、パス間の位相差によって、受信電波は強めあったり、弱めあったりして、フェージング現象をもたらす。大きいときと小さいときで、30dB（千倍）もの電力比になる場合もある。図-2で送信機が固定され、受信機が移動する場合に、受信機がゆっくりと動けば、フェージング変動はゆっくりであり、速ければ速い。また、利用される搬送波周波数が高ければ速くなり、低ければゆっくりになる。

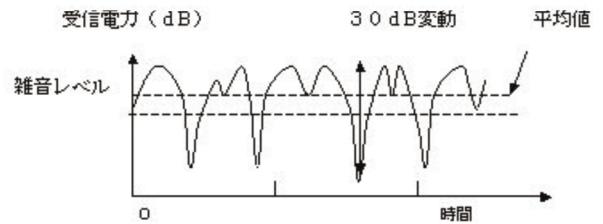


図-3 フェージングによる受信電力変動

フェージングによる受信電力変動を図に示すと図-3のようになる。平均受信電力は雑音レベルを上回るものの、ところどころで、雑音レベルを下回る。このような受信電力低下時には、ある時間間隔にわたりデジタルデータは誤りが多く、情報はこの区間においてほとんど伝達されない。

このような区間にわたり連続する誤りをバースト誤りと呼んで、訂正しにくい誤りの1つになっている。誤り

が時間的に分散しているランダム誤りは一般の訂正符号が有効である。バースト誤りには符号系列の順序を入れ替えて誤りを分散させ、ランダム誤りにして、訂正符号が効くようにするインターリーブが有効であるが、欠点は順序入れ替えによる時間遅延が大きくなることである。この方法は一般の携帯電話にも採用されているが、ハードリアルタイムを要求するような応用にはとうてい受け入れられない。かといって、無線通信において頻繁に見られるバースト誤りをそのままにするのでは、ハードリアルタイム情報による制御は大きく劣化するだけである。

《ブロードバンド無線通信》

今までは、携帯電話のような無線通信といえば音声

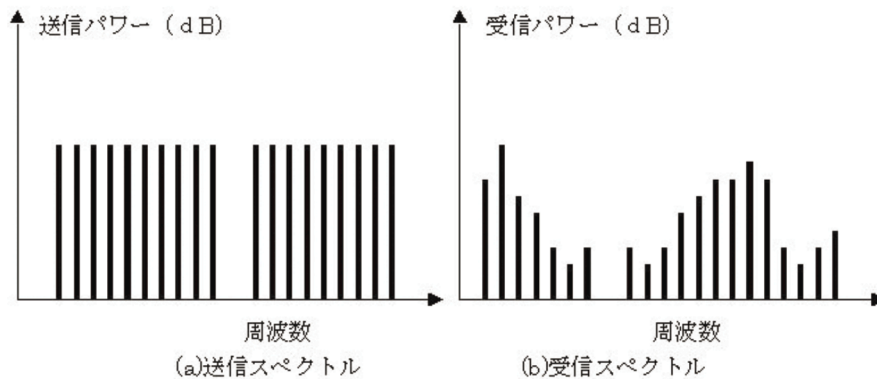


図-4 OFDM のスペクトル

中心で、低いデータレートで、狭い周波数帯域で通信するというのが常識であった。しかし、ここにきてセルラー移動通信は 3G（第三世代）に入り、最高 2Mbps（屋内環境）までのサービスを打ち出し、2010 年頃に実施予定の第 4 世代のセルラー移動通信は最高 100Mbps を目指している。製品化され始めた 5.2GHz の無線 LAN（Local Area Network）が最高 54Mbps（Option）まで高速化されるようになり、将来の PAN（Personal Area Network）無線アクセスでは 1Gbps との方向も出ている。無線もブロードバンド時代にはいるようになった。

無線によるリモートコントロール（ラジオコントロール）、しかも触覚情報を制御するようなハードリアルタイム伝送を目指すものは、狭帯域の伝送ではインターリーブの大きな遅延から脱却できない。しかし、時代はブロードバンド時代であり、この方向をいかに利用するかがここでの主題である。

《OFDM 変調》

5.2GHz の無線 LAN である IEEE802.11 標準や Wireless1394 標準では OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplex）変調が利用されている<sup>2)</sup>。これは互いに直交した複数の異なる周波数の搬送波による多重伝送変調である。5.2GHz では 52 本の搬送波が利用されている。図-4 (a) は送信側で複数の搬送波を観測したもの、図-4 (b) は受信側で観測したものの概念図である。送信側は当然ながら、搬送波の電力を揃えて、1 本 1 本をデータで変調し並列的に空間に送り出す。複数のパスを通過して受信側に到着するとパスの時間遅延差によって、(b) のような搬送波電力がばらついてしまうフェージングが生じ、これを周波数選択性フェー

ジングという。OFDM では複数本の搬送波のおかげで、1 本 1 本のデータレートはきわめて低下しているので、パス間の遅延差に応じたガードタイムを利用して、データの符号間干渉を大きく減らすことができる。

《ハードリアルタイム情報のための搬送波選択法》

ハードリアルタイムを要求する触覚情報のようなデータの速度は、幸いなことに 1 チャンネルあたり、数 10kbps 程度であり、高速の伝送とはいえない。それを 5.2GHz の 20MHz 帯域の OFDM で伝送すると、マルチチャンネルな触覚情報伝送にしても搬送波の一部しか利用しない。この事実を利用すると、バーストエラーを回避できて、常に高い受信電力の搬送波で伝送できる搬送波選択法の考案に結びつく。

この方法を図-4 の (b) の中で説明すると、受信電力の高い搬送波を選んで、そこにハードリアルタイム情報を伝送させるのである。こうすることで、受信電力の低い状態を避けることができ、その結果バースト誤りを回避できるので、遅延の原因となる時間インターリーブの必要性が薄れる。本来、ハードリアルタイム情報のみ無線伝送するならば、さらに、無線伝送路が安定したものであれば、無線 LAN のような広帯域伝送を利用する必要性はない。しかし、現実の伝送路はマルチパスによってバーストエラーを生じる。それを克服するために、訂正符号と時間インターリーブが組み合わせられる。時間インターリーブは大きな時間遅延をもたらすのである。一方、広帯域の搬送波の中から、適したものを適応的に選択し、バーストエラーを逃れ、誤り訂正に時間インターリーブを利用しないのが著者らが提案する本手法である<sup>3), 4)</sup>。

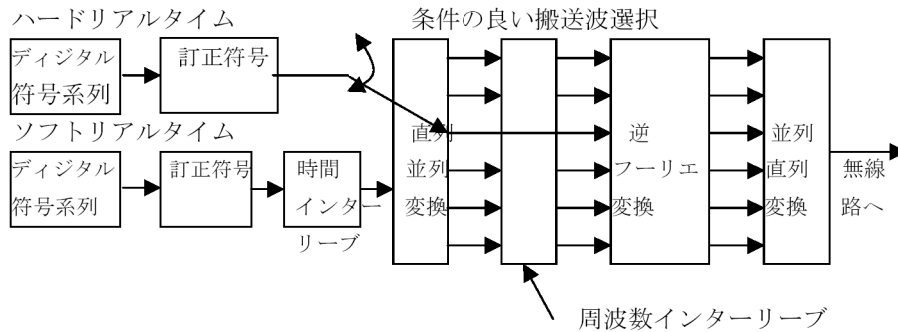


図-5 提案 OFDM 変調システム

《ソフトリアルタイム情報の伝送》

以上の方式は広い帯域の一部を利用することで、可能になるが、残された帯域は利用されないままであろうか。無線伝送においては、周波数は貴重な資源であるので、残された周波数は有効に利用されるべきである。ロボットのハンドを利用して遠隔操作をするような作業は操作者からロボットハンドとその対象がよく見えるとは限らない、移動ロボットが操作者の視界から遠ざかることも多いと思われる。ロボットにカメラを装置して、そのような場合に備えると、無線伝送によって動画の伝送が必要になり、残された帯域を有効に利用することになる。この画像は1chのみならず、ステレオ画像だったり、手先だけでなく、他の部分も監視するために複数のチャンネルが考えられる。しかし、触覚情報のように厳しいリアルタイム条件を必要としないソフトリアルタイムな情報であるので、残りの搬送波にこれらを変調し伝送する。バーストエラーの影響がでるが、時間インターリーブと訂正符号で緩和できる。

図-5にはそうした、ハードリアルタイム情報伝送と、ソフトリアルタイム情報伝送の2種類を多重伝送するOFDM変調システムである。

◆ 5.2GHz 無線 LAN 想定でのシミュレーション

以上の提案方式を検証するために、5.2GHzの無線LANを想定した計算機によるシミュレーションをしている。シミュレーション条件は  
OFDMの搬送波への変調：QPSK  
搬送波の数：48本（52本が本来だが、4本は制御用）

ビットレート：13.3Mbps

訂正符号：畳込み符号（符号化率0.5，拘束長7）ソフト判定

ガードインターバル：400n秒

RMS遅延分散：50n秒（オフィス環境）

最大ドップラー周波数：10Hz

時間インターリーブ：ゼロの場合（ハードリアルタイム情報には常にゼロ）と25m秒

ロボットのような緩慢に移動する物には5.2GHzにおいても上記の周波数で十分であろう。

図-6は搬送波選択のない基本的な場合のBER（ビットエラーレート）とEb/N0 dB（1ビットのエネルギーと雑音のパワースペクトル密度比）を示している。訂正符号を入れない場合●，入れるがインターリーブのない場合□，訂正符号と周波数インターリーブの組合せ△，訂正符号と時間インターリーブ（25m秒）の組合せ▲が示されている。

特性の最も悪いのが、当然であるが、訂正符号なしである。これでは実用性はないであろう。次にインターリーブなしの訂正符号。次が、訂正符号と周波数インターリーブであり、訂正符号と時間インターリーブの組合せである。訂正符号と周波数インターリーブによる方法は時間遅延も少ないし（数μ秒以内程度）、有効そうに見えるが、十分な能力はない。この結果では、やはり訂正符号と時間インターリーブによる方法が最適であるが、情報伝送の時間遅延は大きい。こうして、OFDMを利用する場合でも時間インターリーブの威力を見せつけられたわけであるが、同じような特性を時間インターリーブなしに、搬送波選択法で可能かを次のシミュレーションで確認する。

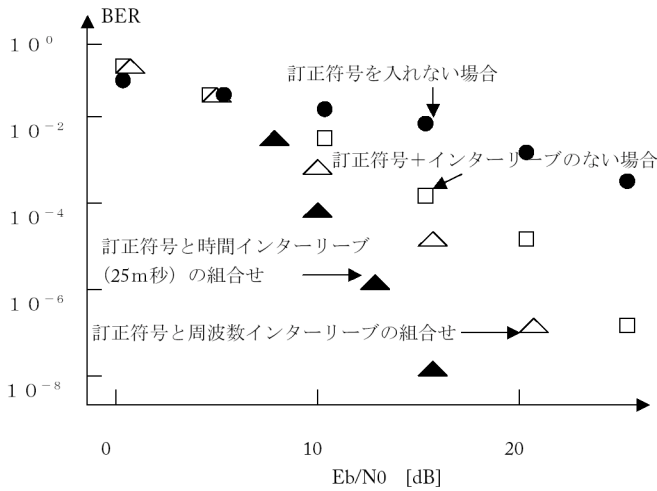


図-6 訂正符号，インターリーブの組合せとビットエラーレート

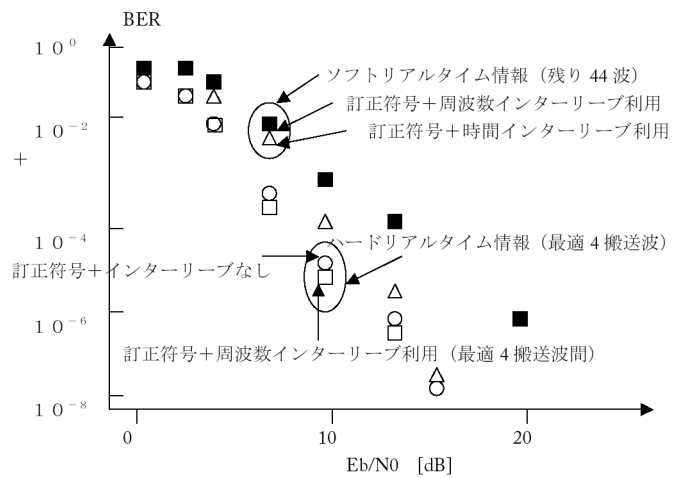


図-7 ハードリアルタイムとソフトリアルタイム情報を異なる搬送波で伝送する場合

一部の搬送波，ここでは最適な4搬送波にハードリアルタイム情報の伝送を，残りの44波の搬送波でソフトリアルタイム情報伝送を送る提案システムの特徴を図-7に示す。

この図では，ソフトリアルタイム情報の訂正符号+周波数インターリーブ利用の特性が最も悪い。ただし，時間遅延は少ない。乱雑になるので，この図に示さないが周波数インターリーブも入れないとさらに悪化する。次にソフトリアルタイム情報の訂正符号+時間インターリーブ利用の特性を見ると，さすがに時間インターリーブの威力があることをみせている。実用的にはこの方法がソフトリアルタイム情報には必要と思われる。ただし，ここでは25m秒の遅延が付加される。ハードリアルタイム情報に関しては，訂正符号+インターリーブなしも訂正符号+周波数インターリーブ利用も同様な良好な特性であるが，周波数インターリーブ利用の方が多少よい。4つの良好な搬送波を選んだために，時間遅延が少なく，かつBER特性がよいことが搬送波選択法の特徴である。

この図の搬送波選択法と図-6の訂正符号+時間インターリーブの結果はほぼ同様であることが分かる。

### ◆ 結論

無線通信においてはマルチパスによるフェージングが，特性劣化に大きな影響をする。ある一定の時間にわたり，符号が連続して誤るバースト誤りを生じるからで

ある。それを訂正するには，訂正符号と時間インターリーブの組合せが強力な手法であるが，時間インターリーブによって大きな時間遅延が生じる。この時間遅延は数10m秒以上になることが多く，ハードリアルタイム情報の伝送には適していない。本稿では，ブロードバンド無線LANに適した遅延時間の少ないハードリアルタイム伝送法として，搬送波選択法を示し，さらにそれと，多重できる動画像などのソフトリアルタイム情報伝送法を示し，それらの優れた特性を計算機シミュレーションで示した。

これまでは，アイデアと計算機シミュレーションによる検討であったが，今後ロボットハンドを用いた室内の無線リモートコントロールなどの実験に基づく検討をしていく。

**謝辞** 本稿で紹介した研究の一部は文部科学省の科学技術振興調整費の支援による。

### 参考文献

- 1) 山崎信行：リアルタイム制御のための並列/分散システム，電気学会技術研究報告，IIC-00-27，pp.19-24 (March 2000)。
- 2) Bahai, A. R. S. and Saltzberg, B. R.: Multi-Carrier Digital Communications, Plenum Publishers (1999)。
- 3) 岡田，中川：OFDM伝送における適応サブキャリア選択方式を用いたリアルタイム通信に関する検討，電子情報通信学会総合全国大会B-5-240 (March 29, 2002)。
- 4) Okada, N.: Real-Time Communication Systems using Separate Codings for Local and Global Information, Master Thesis, Faculty of Science and Technology, Keio University (March 2002)。

(平成14年12月11日受付)

