



信頼性の高い通信システムをめざして

—— 坂庭研究室 ~ 電気電子工学科 集積システムコース ——



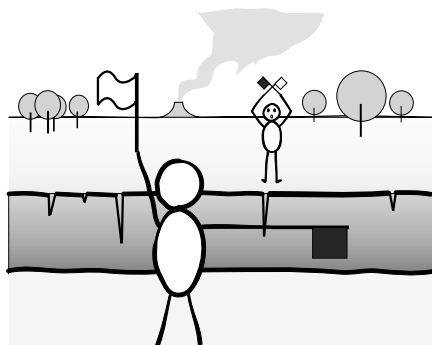
(左) 渋谷 智治 助手 (右) 坂庭 好一 教授

近年、非常に多様な通信の手段ができて、大変便利になってきている。私たちLANDFALL編集部員の中にもPHSを利用している者やパソコンを使って電子メールをやりとりするのが毎日の習慣になっているような者がいる。そんな中で私は、普段使用している通信機器、もっと広くいえば情報通信システムが一体どのような理論や技術に支えられているのか、ということに興味を感じた。そこで今回、情報通信システムについて研究をされている坂庭好一先生の研究室を訪ね、お話をうかがった。



情報を遠くの人とやりとりしたい

通信ということについて一般の人が抱いているイメージはどんなものだろう。私なら、無線機や携帯電話、パソコン通信や手旗信号などによる方法が思い浮かぶ。いずれも遠く離れた特定の相手と情報をやりとりする行為である。だが、情報通信というと電気を使ったデータのやりとりのことを意味する場合が多い。ところで、電気を使う、あるいは電波を使う、ということはなかなか難しい。電気を使うからこそ生じる問題があるからだ。このことを少し考えてみよう。



情報の交換という点から見れば、人が互いに向かい合って話をするという行為の中にも情報を交換するという意味がある。この場合は主に言葉が情報を担っている。けれども、情報を担うのは言葉だけではない。間の置き方、表情や身振り手振り、お互いの距離など、様々な要素があってそれぞれが何らかの意味(情報)を持っている。私たちはそれらを総合的にとらえて相手を理解する材料としている。つまり、互いに向かい合っただけの会話には言葉を補う要素が存在し、情報がより正確に伝わるための手助けをしていることになる。

一方、通信の場合は、電波の帯域や単位時間に送信可能な情報の量など数々の制限がある。それゆえ、電気の性質をうまく利用して効率的に情報を伝達することが求められる。さらに、遠く離れた顔の見えない相手と情報を交換するため、情報が正確に伝達されたかどうかを確認する手段が限られているということがある。しかし、情報は正確に伝達されなければならない。このような条件があるので、多くの工夫が必要になる。実際、これまでに様々な理論や技術が築き上げられてきた。それらをこれから見ていくことにしよう。

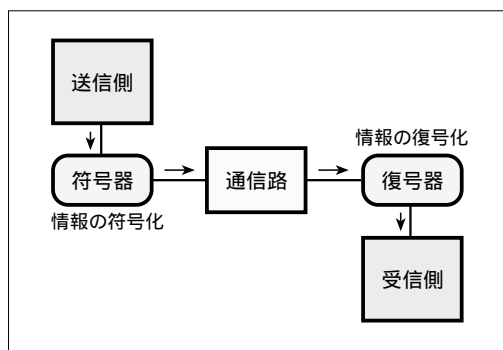


図1 通信のモデル

工学の世界では、ある対象を学問として取り扱うときに、まずモデル化という作業を行う。これは、ある対象を特徴づけるいくつかの要素を見つけ出し、それらの相互の関係を図式化する、という作業である。これによって、研究に様々な可能性が生まれてくる。

図1を見て欲しい。通信のモデルはこの図のようなプロセスから成り立っている。まず、情報は送信側（情報源）を出て、符号器というものによって加工される。これを符号化という。符号化された情報は、通信路というところを経て受信側へと向かう。受信側には復号器というものがあって、変換された情報を元の形に戻す。この変換作業を復号という。そして最後に、復号された情報を受信者が受け取る。このモデルは非常に明快であるため、よく使われている。

この通信のモデルでは、空間的に離れた点を結ぶものだけではなく、時間的に離れた点を結ぶものをも扱うことができる。音楽用CDやパソコンの磁気記憶装置などがその例で、その場合は記憶媒

体が通信路に相当する。

ここで実際に問題なのは、通信路の部分に雑音が入ることである。雑音といっても音だけを意味するのではなく、通信路を妨害するものすべてをここでは雑音といっている。それはたとえば雷や高圧電線からのスパーク、磁気・光ディスク表面のキズ、などといったものである。また、フェージングという、建物などに反射して異なる方向から届いた複数の電波が干渉し合う現象もその一つである。これらはみな、送信された情報を別の情報に置き換えてしまう。そのため、受信側が単独で元の情報を推定できるような仕組みが必要になる。

その一般的なものとして、無線通信などに用いられている次のような方法がある。まず、送り手側が送りたい情報の中に、あらかじめ送り手と受け手の間で確認しておいた特定の信号を、一定間隔で埋め込む。この信号をパイロットシンボルという。パイロットシンボルは一定の間隔で送られるので、受け手側では受け取った情報のどの部分がパイロットシンボルなのか分かる。

受け手側では、受け取った情報の中のパイロットシンボルを、あらかじめ決まっていたものと比較する。もし異なっているようであれば、どの程度異なっているかを調べる。

あらかじめ決めておいたパイロットシンボルが1というもので、受信した信号が0.5となっていたならば、その比は1/2である。この比はパイロットシンボルの周辺の情報とも共通であると考えられるので、パイロットシンボルの周辺の情報を2倍してやる。そうするともとの情報が得られる。このようにして、すべてのパイロットシンボルからフェージングの様子を推定していく。それが確実に

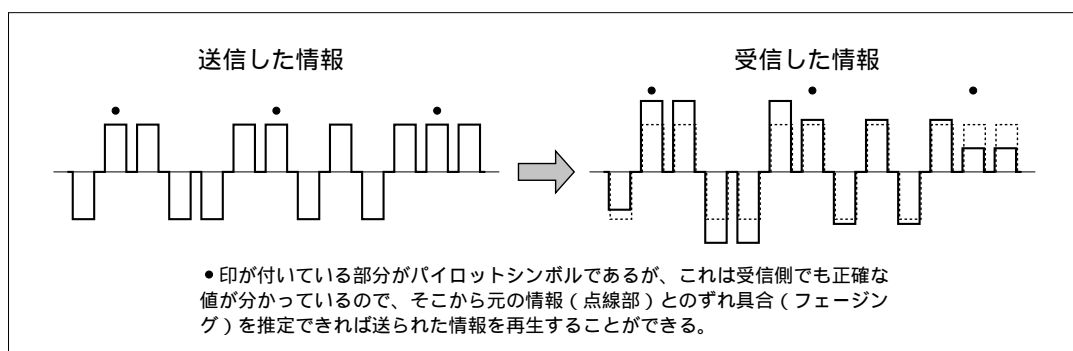


図2 パイロットシンボルのイメージ図

できれば、送信された情報を正確に再現することが可能になるだろう、という考えである。

この方式では、パイロットシンボルが多ければ多いほど受け手が正確な情報を得られる。例えば、都会のビルの谷間を自動車で走行中に携帯電話を使うときなどは、電波があちこちのビルに反射するためフェージングの状態が刻一刻と変化する。このような場合はフェージングの状態を常に知りたいので、パイロットシンボル同士の間隔はできるだけ短いほうがいい。しかし、パイロットシンボルというのは本来送りたい情報と比べれば余計な情報である。そういう意味ではパイロットシンボルはできるだけ少なくしたい。そのようなジレン

マがある。

この問題に関して、坂庭研究室ではパイロットシンボルでないものをパイロットシンボルとして利用するという方法を考案している。パイロットシンボル以外の信号をデータシンボルというが、これに対するフェージングがどのようになっているかを推定し、その推定値を用いて次の部分のフェージングを推定するという方法だ。これによって元の情報をより正確に再現することが可能になるというもので、コンピュータによるシミュレーションでもその正確さが保証されたという。この研究はパイロットシンボルを有効に利用するという点で大きな意味を持っている。



ダメージを受けた情報を復元する方法

さて、再び通信のモデルに戻ろう。このモデルの意味することで特に重要なのは、通信路の両側で符号化と復号化という、情報の変換が行われていることだ。しかし、ここでの「変換」は電話機で音声信号を電気的な信号に変えるような過程を意味しているのではない。ここでいう符号化とは簡単にいえば、送信された情報に誤りが生じて受信側でそれを発見したり訂正したりすることが可能ように、情報を加工することである。

それを見ていくために、ここからは情報が全て0と1で表されたものだと考えよう。これは、実際は電気信号のONとOFFに対応している。それから、情報を担うものとして各成分の値が0または1であるベクトル(二元ベクトルという)を使う。

今、アルファベットのaからzまでの文字をベクトルで表そうとすると、

00000, 00001, 00010, ..., 11111

のような成分が5つの、合計32個のベクトルを用いて表せる。アルファベットは26文字あるので、32個のベクトルのうち、26個を使えばよい。

(これは5桁の二進数と見することもできる。そうすれば全部で $2^5 = 32$ 種類あるということがわかるだろう。)

そして、aからzまでをこのベクトルに一つ一つ順番に対応させる。言葉を表すときは幾つかのベクトルをただ順番に並べることにする。

今、遠くにいる相手に通信によってLOVEという言葉を送りたい。それはこの0と1の言葉では

01011 01110 10101 00100

と表せる。(これが嘘だと思う人は調べてみてほしい。00000がA、00001がB、...である。)

しかし、これをそのまま送ると妨害にあった場合に再現のしようがない。そのため、例えば、ある決まったやり方でそれぞれのベクトルに新しい成分を1つずつ付け加えるという方法が考えられる。これが符号化という作業に当たる。

その成分の値は、値が1である成分が奇数個存在する場合には1とし、偶数個ある場合には0とする。あるいは、別の言い方をすると、その新たな成分を含めた6個の成分の中に1が偶数個存在するようにその値を決める。この成分のことをパリティビットという。ビットとは情報の最小単位のこと、2進数の一桁のことを意味する。また、パリティ(parity)とは、偶奇性という意味の英語である。

今、パリティビットをLOVEを表す0と1の言葉の右側に付けると

010111 011101 101011 001001

となる。(パリティビットがすべて1になったのは偶然である。)

これを通信路を通して送ると、受信側ではある確率で誤った情報を受け取ることになる。例えばEを表すベクトルの左から3つ目の成分が0に置き換わってしまい、受信側で000001というベクトルを受け取ったというようなことが起こる。この場合、このベクトル中の1の個数は奇数個なので、

どれか一つの成分が誤っているということが受信側で確認できる。誤りが確認できたベクトルについては、送り手に要求して再度送信してもらえばよい。

さらに考えていくと、ベクトル中の成分が奇数個だけ誤っていた場合は1の数が奇数個になるので、受信側で誤りの存在を確認できるということがわかる。しかし、誤りが偶数個である場合は、ベクトル中の1の個数は偶数個のままなので、受信側ではこのベクトルが誤りのない正しいものに見えてしまう。

このように、パリティビットを一つだけ付ける方式では奇数個の誤りの存在を検出することは可能だが、ベクトル中のどこが誤りなのかを見つけることはできない。この方法は単一パリティ検査符号と呼ばれ、最も簡単な誤り検出符号（誤りの存在を見つけたすことのできる符号）である。

これとは別の符号で、繰り返し符号というものがある。これは単に送りたい情報を奇数回連続して送るとする方法だ。たとえば1なら1を3回連続して送信する。これを受信したとき、(1,1,0)となっていたとしたら、3番目の成分の0はもとは1であったものと考えて、1という情報を採用する。それは、0が2度も1に置き換わって

(0,0,0) (1,1,0)

となる確率より、1が一度だけ0になって

(1,1,1) (1,1,0)

となる確率の方が大きいからである（図2）。

この符号は受信した情報のどこが誤りかということが分かるので受信側が単独で（つまり送信側にいちいち確認せずに）その誤りを訂正できる。

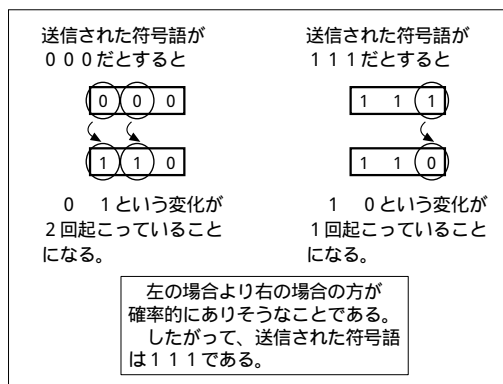


図3 繰り返し符号のしくみ

しかし、1という情報を送るだけなのに、同じものを何度も送らなければならないというのは少々問題がある。この符号では、例えば上の(1,1,1)というのが一つの符号語であるが、一つの符号語の中に情報を担う成分が一つしかない。その割合は1/3である。したがってかなり効率が悪い。

次に、ハミング符号という、50年ほど前に考案された符号を見てみよう。ハミング(Hamming)というのは考案した人の名前である。図4にハミン

まず、行列 H を次のように決める。

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

この行列に関して、次の式を満たすベクトル

$$x = (a \ b \ c \ d \ e \ f \ g)$$

の集合をハミング符号という。

$$(a \ b \ c \ d \ e \ f \ g) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = (0 \ 0 \ 0) \quad (x * H = 0)$$

今、送信側が符号語の一つ $x_1 = (1001100)$ を送信し、その一部に誤りが生じて $x_1' = (1001101)$ となったものが受け手側に届いたとする。

この x_1' は x_1 との間に次のような関係がある。

$$x_1 + e = x_1', \quad e = (0000001)$$

受け手にとっては、 e を知ることは誤りの場所を知ることなので、ぜひ e を知りたい。

そこで、受信したベクトルを先程の行列 H にかけてみる。すると、

$$\begin{aligned} x_1' * H &= x_1 * H + e * H \\ &= e * H \quad (x_1 * H = 0) \end{aligned}$$

が成り立つことが分かる。

ここで $x_1' * H$ を計算してみると次のようになる。

$$x_1' * H = e * H = (1 \ 1 \ 1)$$

これはすなわち初めの行列 H の 7 行目に等しい。

このように、第 i 成分に誤りが生じたときには $x_1' * H$ は行列 H の第 i 行に等しくなる。したがって、受信したベクトルを H にかけて得られたベクトルが行列のどの成分に一致するかを調べれば、誤りの位置がわかるわけである。

図4 ハミング符号のしくみ

グ符号の符号化と復号化の例をまとめる。簡単な行列の計算を知っていれば容易に試してみることができると思う。ハミング符号は、通信路で生じた一つの誤りを訂正できる符号である。

しかし、ハミング符号を用いて訂正できる誤りは一つの符号語につき一つだけであり、二つ以上の誤りがある場合は役に立たない。したがって、ハミング符号は一つの符号語中の誤りが一つ以下であるような通信路でしか用いることができないのである。

今挙げたこの3つ以外にもまだまだ符号はある。現在では、さらに多くの誤りを訂正できて、かつ効率の良い符号が幾つも発見されている。坂庭研究室でも、このような符号について研究が行われている。

だが、それらは上のハミング符号のような0と1

だけからなる2元の符号ではなく、0と1以外に他の要素のある、多元のもっと複雑な符号である。これらを考えるには数学的に少し高度な知識が要求されるので、ここに紹介することはできないが、これらの研究がより信頼性の高い、そして効率の良い情報通信システムを担っているのである。

以上の話題は符号理論という理論のごくごく基本的な部分である。符号理論は現在でも盛んに研究が進められている。また、ここに紹介した符号(誤り訂正符号)は実際に各種の機器に利用されており、情報の信頼性を高めるのに役立っている。ちなみに、私たちにとって今ではすっかり身近なメディアとなったCDは、この誤り訂正符号があって初めて可能になったものである。



モデルは人間の脳? ~ニューラルネットワーク

坂庭研究室ではニューラルネットワークに関する研究も行われている。ここではこのニューラルネットワークというものについて少し紹介しよう。

ニューラルネットワークというのは生体の神経回路網をモデル化し、電子回路などで模擬したものである。このニューラルネットワークは、人間の感性に働きかけるような情報を処理する場合に、従来のコンピュータにはなかったような力を発揮することが期待されている。従来型のコンピュータでは、コンピュータに計算をさせる前にアルゴリズムと呼ばれる計算の仕組みを考える必要があった。しかし、これでは、定式化できない対象について計算する際に困ってしまう。そこで、コンピュータが対象の特徴を自分で学習し、その内容に合わせ

て構造を変えていく、というようなものが考えられた。この方法の利点は人間が計算に関する全ての手順を考えなくてもよいことである。最初にある程度の知識を与えれば後は様々な対象に応じて自己の構造を変化させる。これは、従来型のコンピュータとは全く異なる発想に基づいたものであり、大きな可能性を秘めている。

ニューラルネットワークは、たとえば画像処理や音声処理などでの利用が考えられているほか、たくさんの組み合わせが可能な中から最適な組み合わせを選ぶというような問題にも有用であるとされている。このように、ニューラルネットワークは現在の(従来型の)コンピュータが苦手とする分野でこれから活躍するだろうと予想されている。

坂庭研究室では、理論的な研究を中心に行っていて、いわゆる「もの」は扱っていない。それゆえ研究の主な道具は紙と鉛筆だという。現在、携帯電話でも何でも、モノばかりが注目されているが、元々は人の頭の中で考えられた原理的な事柄が紙の上に書かれ、理論として検討され、場合によって製品として実現する。そのような流れを思い浮かべ、非常に面白いと思った。

さて、今回は情報通信システムに対する興味から

取材にうかがったわけだが、それ以外の様々なテーマについても研究をされているということが分かった。情報通信システムが解決すべき問題だけではなく、ニューラルネットワークのような新たな可能性を持った話題にも接することができた。

私の力不足で紹介できなかったことがまだまだあって残念ではあるが、ここでペンを置きたいと思う。

長竹 茂紀