

## 論文内容の要旨

博士論文題目      An Algebraic Maximum Likelihood Decoding Algorithm  
and a Sub-Optimum Decoding Algorithm for Linear Codes  
(線形符号の代数的最尤復号法及び準最尤復号法)

氏名                      Daisuke Ikegam (池上 大介)

本論文では、誤り訂正符号に対する復号アルゴリズムの提案を行う。誤り訂正符号は数学的に興味深い研究対象であるだけでなく、工学的にも重要な基礎技術であり、実際、高い信頼性の要求されるデジタル通信方式やデジタル情報の記録方式等において広く利用されている。これらの方式の高速性および信頼性向上のためには、高い誤り訂正能力を有し、復号効率に優れた復号アルゴリズムの実現が不可欠である。しかし一般にこれら2条件はトレードオフ関係にあり、たとえば、最良の誤り訂正能力を有する最尤復号には、かなり大きな計算量が必要となってしまう。一方、この問題に対し、訂正能力を若干犠牲にすることで復号計算量を大幅に削減した、いわゆる準最尤復号方式が盛んに研究されている。

本論文前半では、新しい準最尤復号アルゴリズムを提案する。これまでも多くの準最尤復号アルゴリズムが提案されているが、その中でも Fossorier らによって提案された順序統計量に基づく復号法 (OSD 法) は、比較的小さな復号計算量で、かなり高い誤り訂正能力を発揮するという意味で特筆に値する。一方、OSD 法では復号パラメータの取り方に関する自由度が低いため、その利用者は、誤り訂正能力や復号計算量を、必ずしも意図したとおりに制御することはできない。提案手法では、符号語内の信頼度の高いビットの推定に OSD 法を用い、残りの信頼度の低いビットの推定には最尤復号の技法を利用する。最尤復号の対象となる符号の規模はかなり小さくなるため、最尤復号自体の計算量はそれほど問題にならないこと、信頼度の低いビットの推定には、最尤復号の高い誤り訂正能力が有効に発揮されることが期待できる。計算機模擬の結果、提案手法の誤り訂正能力や復号計算量は OSD 法に匹敵することが明らかとなった。提案法ではパラメータ選択の自由度が高いことを考慮すると、提案法のほうが OSD 法よりも優れていると考えられる。

本論文後半では、最尤復号の方式について議論する。適当な仮定と近似を行うことで、最尤復号は整数計画問題の一種としてとらえることができる。整数計画問題自身もかなり難しい問題であるが、ある種の条件を満たす整数計画問題に対しては、Conti らにより、Grobner 基底を利用して効率的に問題を解く手法が提案されている。最尤復号に対応する整数計画問題は上記の条件を満たさないため、Conti らのアプローチをそのまま適用することはできないが、証明や手続きを拡張することで、Grobner 基底を利用した最尤復号アルゴリズムを提案する。現状では、提案手法は計算量の面では他の最尤復号アルゴリズムに比べて優れているとは言えないが、最尤復号と他のタイプの問題との関連性を示唆するという意味で、きわめて興味深いものである。

### (論文審査結果の要旨)

本論文では、誤り訂正符号に対する新しい準最尤および最尤復号手法の提案を行っている。誤り訂正符号（以下、単に符号と呼ぶ）は、事故や障害によって発生し得る情報の損失を最小限にとどめるための基礎技術であり、高い信頼性が要求されるデジタル通信やデジタル情報の記録等において広く用いられている。一連の通信系や記録系において誤り訂正符号を用いる際には、誤り訂正能力と復号効率の双方が重要な課題となる。ただし、誤り訂正符号の復号とは、受信した系列から誤りの影響を取り除き、送信された系列（符号語）を推定することをいう。一般に、誤り訂正能力と復号効率とはトレードオフの関係にあり、これらを両立することはきわめて困難である。たとえば、確率的に最も尤度の高い符号語を推定する「最尤復号」を用いることにより、誤り訂正能力（送信符号語を正しく推定する確率）は最大となるが、復号に必要な計算量はかなり大きなものとなる。そこで、誤り訂正能力を若干犠牲にすることで、復号にかかる計算量を大幅に削減した「準最尤復号」の方式が盛んに研究されている。

本論文前半部では、新しいタイプの準最尤復号方式の提案を行っている。提案されている手法は、Fossorier らの提案した順序統計量を利用した復号法（OSD 法）と、最尤復号で利用される技法との組合せによって構成されるものである。これまでの研究の結果、OSD 法は比較的小さな復号計算量で高い誤り訂正能力を達成することが知られており、他の準最尤復号アルゴリズムと比較しても優れていると考えられる。OSD 法では、復号パラメータを変化させることによって誤り訂正能力と復号計算量のトレードオフ点のある程度制御することが可能であるが、パラメータの取り方に関する自由度は小さく、利用者が意図したとおりに誤り訂正能力や復号計算量を制御することは困難である。本論文で提案されているアルゴリズムでは、符号語の中の  $\tau$  ビット（ただし  $\tau$  は符号の次元よりも小さな任意の正整数）の推定に OSD 法を用い、残りのビットの推定に最尤復号の手法を利用している。最尤復号の計算量は符号規模に対して指数的に変化するため、少数ビットの推定に最尤復号手法を利用したとしてもその計算量はあまり大きくならない。この点に着目し、計算量の問題を巧みに回避しつつ、最尤復号の性能を効果的に利用するアルゴリズム構成となっている。パラメータ  $\tau$  の選択自由度が大きいこと、誤り訂正能力や復号計算量は OSD 法に匹敵することなどが、計算機模擬の結果として示されており、きわめて興味深い結果となっている。

一方、本論文後半では、最尤復号法に対する新しいアプローチが提案されている。従来の最尤復号アルゴリズムでは、たとえば符号のトレリス線図等、符号構造と直接的に結び付くモデルを用いて計算を行うことが考えられていた。これに対して本論文では、最尤復号を線形計画問題として定式化し、Conti らの先行研究で提唱されている手法、すなわち、Groebner 基底というきわめて数学的な技法を用いて問題を解く手法を提案している。これまでも、特定の符号クラスに対して代数的に復号を行う方式等は知られていたが、一般の線形ブロック符号の軟判定最尤復号に代数的手法を導入することは、斬新かつユニークで他に類をみない独創性が認められる。論文内で著者も指摘しているように、現段階では復号効率の問題等が未解決であるが、最尤復号という問題に対して従来とは全く異なる方向から取り組んでおり、将来的にも広く発展する見込みのある研究成果を挙げている点は高く評価できる。

以上の結果は誤り訂正符号の復号法における重要な知見を与えており、その発展に寄与するところが大きい。よって博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。