

論文内容の要旨

博士論文題目 **Efficient MAP Decoding Algorithms for Linear Block Codes**
(線形ブロック符号に対する効率的な MAP 復号アルゴリズム)

氏名 渋谷 竜二郎

ターボ符号に代表されるように、比較的単純な符号を繰り返し行うことによって誤り訂正を行うタイプの符号が、その復号性能の高さから注目を浴び、盛んに研究されている。本研究の対象である最大事後確率 (MAP: maximum a posteriori probability) 復号はそのような繰り返し型復号法における基本要素として必要不可欠な役割を果たしている。繰り返し型復号法においては一組の受信語の復号に対して MAP 復号器が何度も繰り返し使用されるため、MAP 復号器の効率の僅かな差が復号全体に与える影響は大きい。したがって、高効率な MAP 復号アルゴリズムは、実用的な繰り返し型復号器の実現、および高速かつ信頼性の高い通信システムの実現に貢献するものと考えられる。

本論文では二種類の MAP 復号アルゴリズムを提案する。そのひとつである再帰的 MAP 復号 (rMAP) アルゴリズムは、線形ブロック符号の持つ構造的性質を利用し、分割統治法を用いて MAP 復号を実現している。これまで広く用いられてきた MAP 復号アルゴリズムとして BCJR アルゴリズムがあるが、提案アルゴリズムはこれと比べて幾つもの利点を持つ。例えば、提案アルゴリズムは並列処理、パイプライン処理に適したアルゴリズムであるため、符号長の長い符号に対しても復号遅延を最小限に抑えられる。また、rMAP アルゴリズムでは、BCJR アルゴリズムにおいて不可欠であったトレリス線図の構築が不要である。これは、復号器の実装上重要な利点となる。なぜならば、符号のトレリス線図を構築し、さらにそれを用いて復号計算をするのは、時間計算量および空間計算量の両面において、大きな負担となるためである。計算機模擬により提案手法の計算量を評価したところ、rMAP アルゴリズムは BCJR アルゴリズムに比べ、低符号化率の符号に対しては計算複雑度の面で非常に優れていることが示された。たとえば (64,10) 拡張 BCH 符号を例にとり、計算量の指標として確率の乗算回数を考えると、rMAP アルゴリズムの計算量は BCJR アルゴリズムと比べ、4.1% にまで削減されている。

提案するもう一方のアルゴリズムは、上記の rMAP アルゴリズムと BCJR アルゴリズムのハイブリッド型のアルゴリズムである。このハイブリッドアルゴリズムでは BCJR アルゴリズムで用いられるトレリス線図の代わりに、セクショントレリス線図を用いる。セクショントレリス線図はトレリス線図の構造を簡略化したものであり、その実現はさほど困難ではない。提案法の計算複雑度を評価したところ、符号化率の高低に依らずハイブリッドアルゴリズムは BCJR アルゴリズム、rMAP アルゴリズムより効率的であることが示された。rMAP アルゴリズム、ハイブリッドアルゴリズムとも、計算複雑度は、トレリス線図に対するセクション分割に依存するが、本論文では最適なセクション分割位置を組織的に算出する手法についても議論している。

(論文審査結果の要旨)

本論文では、MAP 復号 (事後確率最大化復号) を実現するためのアルゴリズムの提案を行っている。近年、計算機ネットワークや有線・無線通信系の発達に伴って、デジタル通信に対する需要が急速に増加している。通信系を介してやりとりされる情報の中には付加価値の高い情報も含まれているため、従来にも増して、情報伝送の信頼性の向上が強く要求されるようになってきた。したがって、次世代通信系における誤り制御機構には、高速性と高信頼性の双方を両立することが強く求められる。高信頼性を実現するための有効な技術として、ターボ符号と呼ばれる誤り訂正符号が盛んに研究されている。ターボ符号はシャノン限界に近い誤り制御特性を発揮する半面、その復号にはかなりの計算量と復号遅延を要することが指摘されている。本論文で取り扱う MAP 復号はターボ符号の復号装置の中核をなすものであり、MAP 復号の効率改善は、次世代の高速通信系実現のための重要な鍵となる課題である。MAP 復号を実現するアルゴリズムとしては、Bahl らによる BCJR アルゴリズムが広く知られている。BCJR アルゴリズムの実現のためには符号のトレリス線図と呼ばれるある種の状態遷移図が必要となるが、実用的な符号では、トレリス線図が巨大かつ複雑となるため、BCJR アルゴリズムの効率が極端に悪化することになる。また、BCJR アルゴリズムでは、受信系列の最後の記号を受け取るまで復号操作の一部を開始できないため、復号遅延が無視できないほど大きくなる点も問題である。

本論文では、線形ブロック符号の持つ構造的な性質を利用することで、BCJR アルゴリズムの持つ問題点の克服を目指し、2種類の異なるアルゴリズムを提案している。論文の前半部分では、MAP 符号のある種の確率表の構築問題としてとらえ、確率表の計算を、分割統治法によって再帰的に行うようなアルゴリズムの提案を行っている。近年の Forney らの研究により、ある性質を持った部分符号によって線形ブロック符号を剰余類展開すると、非常に規則的で取り扱いやすい構造を示すことが明らかになっているが、本論文ではそのような最新の研究成果を採り入れ、効果的に問題の分割を行う方法を提案している。たとえば、 n を符号 C の符号長とし、 x, y を $0 \leq x < y \leq n$ であるような整数とする。符号 C の符号語の $x+1$ 文字目から y 文字目までを取り出して、長さ $y-x$ の新しい系列の集合を考えると、その集合もまた線形ブロック符号 (区間符号) となっている。区間符号をさらに小さな区間に分割することで、より短い区間符号を得ることが可能である。各区間符号を剰余類展開して各剰余類に対する MAP 復号を行い、得られた確率表に対してある種の合成操作を行うことで、より長い区間符号 (の剰余類展開) に対する確率表の構築、すなわち MAP 復号が可能になる。以上の操作を再帰的に繰り返すことで、符号 C に対する MAP 復号が可能となる。本論文では、計算機シミュレーションによって提案アルゴリズムの計算量評価を行っている。その結果によると、符号化率の比較的低い符号に対しては、提案アルゴリズムの計算量は BCJR 法に比べて非常に小さくなっている。その半面、符号化率の大きな符号に対しては、BCJR 法のほうが効率的となる場合がある。

論文後半で提案しているアルゴリズムは、この問題に対処するためのものであり、前半部で提案したアルゴリズムと BCJR アルゴリズムとのハイブリッド型のアルゴリズムとなっている。後半部での提案アルゴリズムでは、区間長がある程度の長さになるまでは、前半部のアルゴリズムを適用して確率表を構築する。次にセクション化されたトレリス線図を考え、得られた確率表を用いて各枝の遷移確率を与えて、BCJR アルゴリズムを適用する。提案アルゴリズムの計算量は、どのような符号に対しても、常に BCJR アルゴリズムよりも優れていることが示されている。

以上の結果は誤り訂正符号の MAP 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。