

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560448

研究課題名(和文) 不規則に発生するシンボルに対する符号化の遅延最小化

研究課題名(英文) Minimization of coding delay for symbols with irregular intervals

研究代表者

西新 幹彦 (NISHIARA, Mikihiro)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：90333492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では情報源符号化の遅延を抑制する方法を研究した。符号器は一般に、入力系列を比較的短い文字列に分解し、分解された各文字列を符号語に変換することで符号化を行う。系列の分解には分節木という構造が用いられる。本研究では分節木の内部ノードにも符号語を割り当てることによって遅延特性を改善できることを明らかにした。さらに、必ずしも語頭フリー条件を満たさない符号語を用いることによって遅延特性が最善されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we investigated how to reduce the delay of source coding. An encoder generally parses the source sequence into words and transforms each word into codewords. A parsing tree is employed to parse the sequence. We found that assigning codewords also to internal nodes of the parsing tree can improve the delay. Moreover, we found that using a set of codewords that does not have the prefix-free property can improve the delay.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：通信・ネットワーク工学

キーワード：情報理論

1. 研究開始当初の背景

高度な情報処理が求められる現在の社会では、情報伝達の正確さとともにその早さも社会的に重要な役割をもっている。情報伝達の「速さ」も重要な指針の一つであるが本研究で主に扱うのは「早さ」である。早さとはレスポンスのことであり、社会ではスループットよりもレスポンスが重要な場面がある。一例として、緊急地震速報がある。地上デジタル放送はアナログ放送より約 2 秒遅れており、緊急地震速報も遅れていることが当初問題となった(「緊急地震速報の送信、地デジの遅れ解消へ」, 読売新聞, 2008 年 9 月 12 日)。この問題は緊急信号の処理を映像信号と分けることにより改善された。

一般に、情報伝達における符号化効率と符号化に伴う遅延はトレードオフの関係にある。しかし、トレードオフの数理科学的解析や即時性を重視する通信のための符号化法は一般には明らかにされていない。

情報源の符号化にブロック符号を用いる場合、そのブロック長はその符号化遅延を表している。したがってブロック長を短くすることが遅延の抑制にもつながる。しかし、ブロック符号を含む一般の概念として逐次符号がある。逐次符号は入力系列の先頭部分から符号系列の先頭部分を生成できることから、ブロック符号よりも符号化遅延を小さくできると認識されている。よってブロック符号の議論だけでは遅延に対する考察としては不十分である。

2. 研究の目的

情報源系列を固定した長さの文字列に分節し、各文字列を符号化するのが固定長ブロック符号である。このときの符号語長は可変長である。符号語はその長さに比例する時間で送信されると仮定する。符号語の送信中にも情報源シンボルは次々と到着し、次の符号語が生成される。一般に、ブロック長が長いほど符号化効率が高い。したがって、送信機の状態によってブロック長を変えることによって遅延と符号化率のバランスを制御することが可能になると考えられる。ブロック長を変化させるということは、情報源系列の分節のために分節木を導入することを意味する。

このことから、本研究の目的は、符号器の分節木とその上に割り当てる符号語をどのように設計したら遅延を抑制することができるか調べることである。

3. 研究の方法

本研究では、次のような符号化の過程を想定している。シンボルの到着は確率過程でモデル化され、到着したシンボルは符号器に入られる。符号器は入力されたシンボルの内

容ばかりでなく送信機の状態をも監視しながらどの時点でどのような符号語を出力するのかを決める。符号語はその長さに比例する時間で送信される。符号語が送信されている間にもシンボルは到着し、新たな符号語が生成される。送信機が動作中は新たな符号語は送信バッファに入れられる。送信機は送信バッファが空になるとアイドル状態になる。

本研究では以上のように、単に符号語長を調節するだけでなく、システムの現在の状態をリアルタイムに監視しながら符号語を生成することによって遅延をコントロールする。すなわち、単に符号語長を調節するだけでなく、システムの現在の状態をリアルタイムに監視しながら符号語を生成することによって遅延をコントロールする。

それを可能にするため、調査の基礎データとして、システムの状態に対する符号器の動作を観測した。符号器は入力系列を分節する機能をもつが、分節木は語頭フリー条件を満たすものに限定しないことによって、送信機の現在の状態をリアルタイムに監視しながら符号語を生成することを可能にした。

具体的には、送信バッファが空になることによって送信機がアイドル状態になるとするとき、符号器はそのときまでに入力されたシンボルから符号語を生成して送信機を稼動状態にする。符号器が任意の状態で符号語を生成するためには、入力系列の分節木の任意のノードに符号語を割り当てる必要があり、このとき分節木は語頭フリー条件を満たさない。このような符号化モデルに基づいてシミュレーション実験を行なった。

次の段階として、上記の枠組みを深く考え直すところから研究を進めた。上記の枠組みでは、入力系列の分節木の任意のノードに符号語を割り当てていた。このとき、割り当てる符号語は実際に分節される頻度など、確率分布とみなされるものに従って通常の情報源符号化のテクニックを使用して決定した。したがって、割り当てられた符号語の集合は語頭フリー条件を満たす。ところが、算術符号の状態遷移と出力される符号語の関係をみると、算術符号の状態遷移を表す木のノードに割り当てられた符号語は必ずしも語頭フリー条件を満たさない。ただし、状態遷移を表す木を分節木とみなす場合、内部ノードを割り当てられた符号語が出力されても、状態はルートノードには戻らず、そのままの状態に留まる。ルートノードに戻るのにはノードが葉である場合のみである。さらに、一意復号のためには符号語が割り当てられたノードに状態が遷移した場合、その符号語は必ず出力しなくてはならない。これを一般化して考えると、分節木の内部ノードにも符号語を割り当てる場合、符号語の集合が語頭フリー条件を満たすことは一意復号のための必要条件ではないことが導かれる。この事実に着目することによって、さらに遅延を改善できる可能性があることがわかる。

そこでこの可能性と効果を確認するため、符号語の集合が語頭フリー条件を満たさないにもかかわらず一意復号可能となるような符号化モデルを作成し、これに基づいてシミュレーション実験を行なった。

ここまでの状況は次のようにまとめることができる。送信機の状態に応じて入力系列の分節に柔軟性を持たせるためには、分節木は語頭フリー条件を満たさない。すなわち、分節木の内部ノードにも符号語が割り当てられる。一般には、ルートノードを除く任意のノードに符号語を割り当てることができる。一方、割り当てられる符号語は互いに語頭フリーの関係になっていなくてもよい場合がある。

以上のことから、分節木の設計とその上に割り当てる符号語の設計が遅延の制御のために重要であることがわかる。そもそも符号語の集合が語頭フリー条件を満たさなくてもよいというのは、算術符号の性質から導かれたものであるので、算術符号に基づいて性能の良い符号を設計するための分節木への符号語の割り当て方を調べた。

4. 研究成果

本研究の成果は3段階に分けられる。

最初の段階は、語頭フリー条件を満たさない分節木を用いて情報源系列を分節することによって遅延を抑制することができるかどうかの検証である。分節木が語頭フリー条件を満たさないということは、本来分節木の葉だけに符号語を割り当てれば済むところ、符号語を増やして内部ノードにも割り当ててを意味している。復号器からみれば、同じ情報源系列に復号される符号語系列が複数存在することになり、明らかに符号化効率が落ちる。したがって懸念事項は、効率の悪化が逆に遅延の増加を招くのではないかということである。

シミュレーション実験の結果、分節木が語頭フリー条件を満たす標準的な符号（ハフマン符号、タンストール符号）に比べて遅延特性が改善されることが確認された。これにより、分節の柔軟性が遅延の抑制に効果的であることが明らかになった。

次の段階は、語頭フリー条件を満たさない符号語の集合を用いて分節された文字列を符号化することによって遅延を抑制することができるかどうかの検証である。この場合、分節木上で状態遷移するとき、内部ノードで符号語を出力しても状態はルートノードに戻らない。このことから、語頭フリー条件を満たさずに一意復号可能な符号語の生成方法が導かれる。共通の親を持つすべてのノードが共通する語頭をもつ符号語をもっていれば、その語頭は親ノードの状態で出力してもよい。このとき復号器で受け取る符号語系列には変化がないからである。しかし、分節木に割り当てられた符号語が多少早く出力

されたとしても、それが早く復号器に届くことは必ずしも意味しない。したがって、有意な改善が得られるかどうかを確認することが大きな動機である。

シミュレーション実験の結果、符号語の集合が語頭条件を満たす場合に比べて遅延が有意に改善されることを確認した。このことは、分節木上の状態遷移規則の変更を意味する。

最後の段階は、いままで得られた知見を総合して遅延特性のよい符号を構成する方法を見つけることである。符号の設計とは、言い換えれば分節木の設計とその上に割り当てる符号語の設計である。そもそも、分節木が与えられたもとで符号語を設計すること自体が難しい問題である。なぜなら、分節木のノードに対して割り当てる符号語を決定するためには、その状態で送信機がどのような状況にあるのかを考えなくてはならない。ところが、送信機の状態は符号語に依存しているのである。つまり、符号語と送信機が互いに依存している。数理科学的にこの問題を解くためには、ある種の方程式を代数的に解かなくてはならない。しかし、この複雑な方程式の解法は困難である。

そこで、得られた知見のもとにもなっている算術符号を応用して、遅延特性のよい符号の構成方法を考えた。通常、算術符号器を実装する場合は、算術演算の精度は高い方がよいと思われている。これは符号化率をよくするためである。しかし、演算精度を高くすると逐次符号としての内部状態数が増加し、多くのシンボルを符号器の内部に留めておくことが可能となる。これは遅延の増加の原因になりうる。したがって、遅延を抑制するためにあえて演算精度を下げることによって、符号器内部にシンボルを留めておくことができないようにした。

演算精度を固定したもとで算術符号のもつすべての状態を洗い出し、状態遷移表を作成し、定常状態を求めることによって、符号化率と平均遅延を求めた。その結果、算術符号器の演算精度を意図的に下げることによって遅延を抑制する比較的効率の良い符号器が得られることが分かった。算術符号器の演算精度は高い方がよいというのがこれまでの常識であったが、本研究で得られた結果は、遅延を抑制するという観点からは必ずしもそうではないことを意味している。

本研究で得られた構成法が最適符号を与える保証はない。さらに遅延特性の良い符号の構成法を与えることが今後の課題として挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

(1) 西新幹彦, 岩井祐斗, 到着期限のある閉

ループ伝送システムにおけるひずみ最小化アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J96-A, no.1, pp.49-55, 2013年1月, 査読有.

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) 西新幹彦, 金澤秀樹, 到着期限とデータ量制約のある伝送システムにおけるひずみ最小化アルゴリズム, 電子情報通信学会 SITA サブソ, 第36回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.417-421, 2013年11月28日, 静岡県伊東市.
- (2) 西新幹彦, 算術符号の演算精度と状態数と遅延に関する考察, 電子情報通信学会 SITA サブソ, 第8回シャノン理論ワークショップ予稿集, pp.35-40, 2013年10月11日, 広島県広島市.
- (3) 西新幹彦, 藤山直貴, パケット間隔で情報を送る通信路の悲観的な符号化について, 電子情報通信学会 SITA サブソ, 第35回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.590-595, 2012年12月14日, 大分県別府市.
- (4) Mikihiko Nishiara, Achievability of Maximum Decoding Rate on Sequential Coding, 2011 IEEE Information Theory Workshop (ITW2011), pp.472-475, October 19, 2011, Paraty, Brazil, 査読有.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西新 幹彦 (NISHIARA, Mikihiko)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号: 90333492