

時間解像度と量子化レベルを関連付けた 適応的信号表現アルゴリズムのハード化

Hardware Implementation of Adaptive Signal Expression Based on Equivalence of Time Resolution and Quantization Level

研究代表者 京都大学大学院工学研究科 准教授 久門 尚史

[研究の目的]

音声や画像などの信号を表現する場合、多くは機械による処理が容易な均一サンプリング、均一量子化レベルが用いられる。しかし、人間の感覚では動きの早い場合は粗い認識しかできず、動きの遅いものは精度良く認識できる。このように、従来の均一な信号表現は人間の感覚とのミスマッチがあったために、無駄な情報を送ったり、必要な情報が不足したりしていた。それに対して、人間の感覚に近い信号表現として、時間解像度と量子化レベルの対称性に注目した信号表現を提案した。

本研究では、デルタシグマ変調された信号に対して時間解像度を量子化レベルに変換することにより、この効率的な信号表現が実現できることを提案し、そのアルゴリズムをハードウェア化することにより、この方法の有効性を示すことを目的とした。

[研究の内容、成果]

1. 時間解像度と量子化レベル

1.1. デルタシグマ変調

デルタシグマ変調の一般的な仕組みを図1に示す。連続時間アナログ信号が Oversampler によって高速サンプルされた後、Modulator によって1

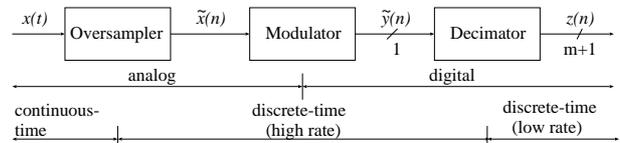


図 1: General Structure for $\Delta\Sigma$ -modulation

ビットに量子化される。この信号は量子化レベルは1ビットであるが、高速サンプリングにより時間方向に情報を展開した形になっており、時間解像度を下げることで、多ビットの情報を取り出すことができる。Decimator ではこの多ビット化と時間解像度を下げる役割を行なう。

1.2. 各レベルの単位

時間解像度を下げて多ビットデータを得る方法を考える。信号を表現する時間ステップの大きさを q_t とし、量子化ステップの大きさを q_z とする。例えば、2つのデータの平均をとることは、量子化ステップ q_z が半分になり、時間ステップ q_t が2倍になるとみることができる。つまり、この場合は積 $q_t \cdot q_z$ が一定となるような単位の集合によって信号を表現することになる(図2)。ここでは規格化により、レベル m の信号とは単位ステップ

$$q_t^{(m)} = 2^m, \quad q_z^{(m)} = 2^{-m}. \quad (1)$$

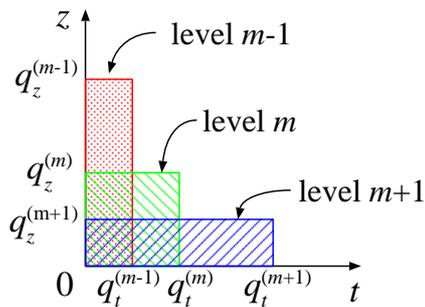


図 2: Units of levels.

により表現されるものとする。

1.3. レベルと誤差の関係

どのような信号に対してどのレベルを用いて表現すれば誤差を減らすことができるかを考える。一般的には変化の大きい信号に対しては時間ステップ q_t を小さくとり、変化の小さい信号に対しては量子化ステップ q_z を小さくとれば、誤差を小さくできると考えられる。実際に傾きの大きい場合と小さい場合に異なるレベルを用いて表現した様子を図 3 に示す。左図のような傾きの小さい場合は、量子化ステップ q_z を小さく取ったほうが誤差を示す斜線部の面積が小さくなり、右図のような傾きの大きい場合は時間ステップ q_t を小さく取ったほうが誤差を小さくできることが確認できる。

次にレベル m とレベル $m+1$ による信号表現の比較を考えるため、サンプリングと量子化の対称性に注目して図 4 のような規格化を行なう。ここで、面積に対応する 1 ノルムによって誤差を評価すると図 5 のようになる。これは規格化された傾き 1 を境界として、1 より大きいときはレベルを下げ、1 より小さいときはレベルをあげたほうが良いことを示している。

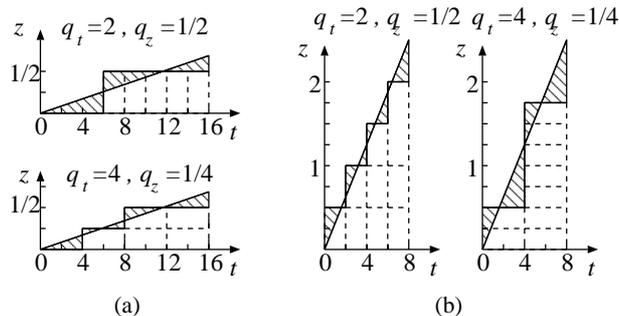


図 3: Relation between the level and error.

2. レベルの決定

2.1. アルゴリズム

信号の傾きに基づいて表現レベルを決定する方法は、周波数領域における処理とは異なり、信号が入ってきた時点で局所的な情報に基づいてレベルを決定できるため、実時間で実行する信号処理にとって極めて有効となる。本研究では、実時間でこのレベル決定を行なうアルゴリズムを提案した。図 6 に示すように再帰的な構成をとることにより、ハードウェア実装しやすいアーキテクチャとなっている。各ステップでは、前のステップから出力されたデータの平均をとり、規格化した傾きと信号の傾きの大きさを比較することにより、適切なレベルかどうかを判断し、さらにレベルをあげる必要があるときは次のステップに受け渡す。

2.2. データの表現

提案手法の出力データは、実際の値に加えてどのレベルを用いているかを与える必要がある。このためデータ量が増加するようにも考えられるが、レベルが大きい場合は時間ステップが大きいいため、データが圧縮されるという性質ももつ。後に示すようにシミュレーションデータからは、圧縮効果が有効に働き、通常よりもデータ量を少なくできることが確認できた。

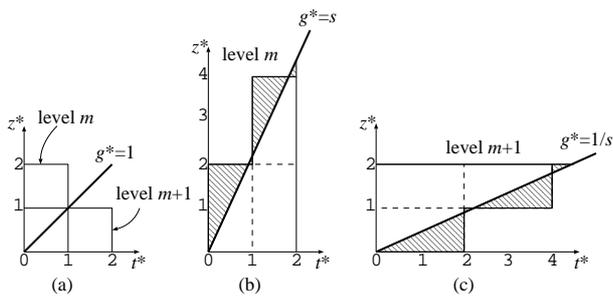


図 4: Symmetric property of level m and level $m+1$ on the t^*z^* -plane. The area with vertical lines and horizontal lines illustrate the error for level m and level $m+1$, respectively.

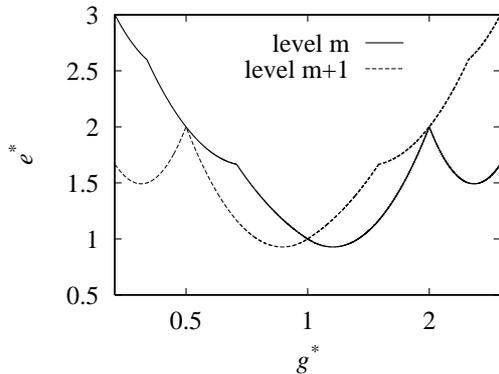


図 5: Relation between error e^* and slope g^* for level m and level $m+1$.

3. アルゴリズムの検証と実装

3.1. 具体例による検証

提案手法を傾きの大きい部分と小さい部分をもつ信号に対して適用した結果を図 7 に示す。一方、レベルを固定した場合を図 8 に示す。提案手法は傾きが大きい部分も小さい部分も適切な誤差で表現できていることがわかる。また、表 1 に誤差とデータ量について提案手法と固定デシメーションと比較したものを示す。誤差についてはどの固定デシメーションの場合よりも小さくできており、またデータ量についても時間ステップを大きく

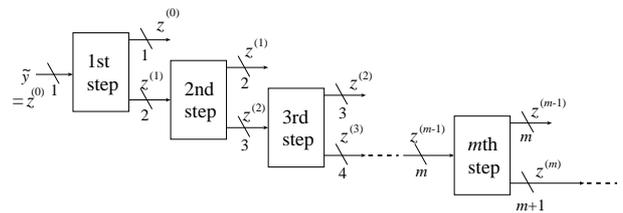


図 6: Block diagram of level determination and decimation

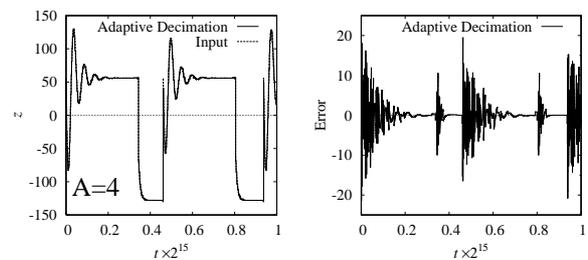


図 7: The output and error of the adaptive decimator.

とったときと同程度に抑えられている。

3.2. ハードウェア化

提案アルゴリズムの実現性を確認するために、再構成可能な LSI である FPGA(Field Programmable Gate Array) を用いたハード化を行なった。デシメーションフィルタとしては乗算器を必要としない sinc フィルタを用いた。動作検証には ALTERA 社製 STRATIXII を用いた。その結果、ロジックセル数 4062 個、最高動作周波数 236MHz で動作することが確認できた。また、データ量をさらに削減する差分表現を用いた信号表現を考えると、ADPCM のようなデータ量圧縮効果が得られることを確認した。差分表現の場合はロジックセル数 5647 個、最高動作周波数 228MHz となった。これらの実装結果から、提案アルゴリズムは実際のデルタシグマ変調 A/D 変換器に適用するために十分な速度で動作させることができ

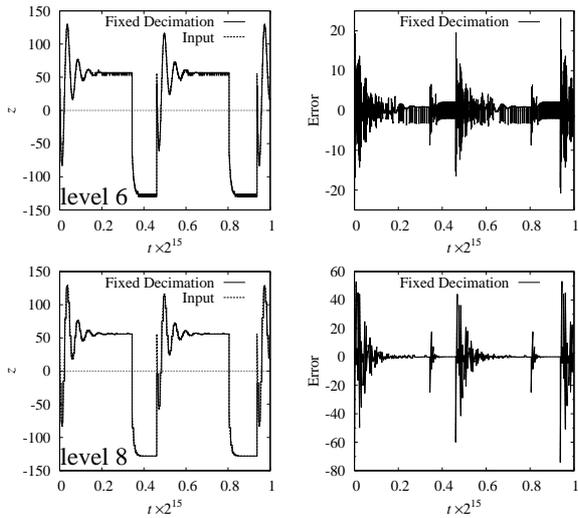


図 8: The output and error of the fixed rate decimator.

表 1: Data amount and average error for the adaptive decimation and fixed rate decimation.

	Adaptive Decimation	Fixed rate Decimation			
		$N = 2^2$	$N = 2^6$	$N = 2^7$	$N = 2^8$
誤差	1.261	2.515	1.949	2.041	3.306
データ量	1869	6144	3584	2048	1152

ることを確認した。

4. 実際的な応用への改良

4.1. 高次デルタシグマ変調への拡張

多くの実際のデルタシグマ変換器では、高次のデルタシグマ変換と高次の sinc フィルタで実装される。この場合は時間解像度と量子化レベルの対称性は 1 ノルムでは表現できない。そこで、デルタシグマ変換された信号の S/N 比に基づいて、傾きに対応したレベルを求める方法を提案した。

4.2. 非同期化

デルタシグマ変調された信号の処理は高い周波数で動作するために消費電力が大きくなる傾向が

ある。これを解消するために、非同期式 $\pm 2^k$ 演算器の開発を行なった。この場合、通常の 2 進数では非同期化により回路規模が大きくなるため、グレイコードを利用した非同期化を行なった。その結果、同期式演算器と同等の回路規模で極めて低消費電力で動作する非同期式の演算器を実現することができた。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では 1 次元信号に対して量子化レベルと時間解像度を関連づけて変化させる方法を提案した。さらに画像などの 2 次元情報に対応するためには時空間解像度に対して同様の考え方を拡張する必要がある。

また、今回提案したデータ (data) における量子化レベルと時間解像度の対応を、処理 (processing) に対して適用すると、演算精度と速度のバランスという考え方ができる。適切な時間で適切な結果を出力する上位桁からの演算アルゴリズムと組み合わせることにより、データと処理とともに適切なシステムという考え方ができる。

[成果の発表、論文等]

- [1] 松山晋也, 久門尚史: 非同期式 ± 1 グレイコード演算器の設計, 電子情報通信学会 技術報告, ICD2008-124, pp.113-118, 2008.
- [2] Takashi Hisakado and Kazuma Hayashi: Adaptive Decimator for Delta-Sigma Modulated Signals Based on Equivalence of Time Resolution and Quantization Level, 電子情報通信学会 技術報告, CAS2008-88, pp.137-141, 2009.
- [3] 松山晋也, 久門尚史: 非同期式 $\pm 2^k$ グレイコード演算器の設計, 電子情報通信学会 技術報告, VLD2008-155, pp.171-176, 2009.