

画像分析における量子化誤差の特性に関する研究

土居 陽治郎

A Study of quantization noise in kinematic analysis

Youjirou DOI

abstract

The quantization process, such as digitization of coordinates from film or video system, introduces an irreducible error. An average of root-mean-squared error amplitude due to quantization can be calculated,

$$E[\varepsilon] = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = 0.289h$$

with h the spacing in display grid system. The quantization noise with a flat spectral density is called white noise because of its "equal jumbling" of bandwidth frequencies. This paper describes the characteristics of the quantization noise and gives an comprehensive introduction to kinematic analysis by modern statistical communication theory. A signal-to-noise expression for quantization noise appears useful in considering the number of division levels in digitization and determining the frequency responses constructed by Nyquist sampling rate and cutoff frequency.

身体運動やスポーツなどの分析場面で頻繁に用いられている映画やビデオ映像をデジタイズするような行程は、量子化という処理を行うために、誤差が必ず含まれている。この時の誤差（誤差にはプラス/マイナスがあるために、実効値という誤差の大きさだけを対象とする）は、と記述できる。この場合の h は量子化幅（刻み幅：物差しの目盛幅）を示している。この誤差はいわゆるホワイトノイズと呼ばれる性質を有し、全周波数帯域で一様に分布する特徴を持っていることが知られている。本研究では、こうした量子化誤差特性が画像分析などの場面で必ず含まれていることを確率論的に明かにするとともに、この誤差特性を基盤とした画像分析時の諸設定（画面の大きさ、カメラのフレーム速度ならびに時系列データの平滑処理）の決定方法について論じるものである。

キーワード：

スポーツの画像分析、量子化誤差、ナイキスト周波数、遮断周波数、フィルタ、誤差解析

ランニングタイトル：

画像分析における量子化誤差特性

1 はじめに

スポーツ・バイオメカニクスに関する研究で、方法論としての画像分析の持つ役割は大きい。しかしながら、常に問題とされるのが誤差に関する評価である。一般に、誤差にはその原因を特定できる系統的誤差と全くの偶然性が左右する偶然的誤差とに分類される。画像分析における誤差にも、主として装置側に原因があり、確定できる誤差（系統的誤差）と、操作する人間側などに原因があつて、確定が困難な誤差（偶然的誤差）とに分別される。前者については、3次元空間座標を算出するような（DLT法などによる）複数のカメラを利用した場合に生ずるカメラの同期ずれという非同期誤差などが、その代表的なものである。

この非同期誤差の修正法としていくつか検討されているが [2]、現在の画像分析の主流はビデオ装置などの電気的な信号を利用しているので、電気的な同期方法をとることが望ましい。

これまでの画像分析の作業過程で生じるいわゆる「読み取り誤差」は、装置側の限界によるものと人間の特性から出た偶然誤差的な性質という2面性を有する。現在ではビデオなどの画像処理技術の進歩などによって、人間という特性を排除して分析を進めることが可能になってきた。したがって将来的には、従来「読み取り誤差」という扱いを受けていた誤差のうち、装置側で必然的に生じる系統的誤差のみが画像分析における誤差の対象となるであろう。この系統的誤差は、デジタイズ時に生じる量子化誤差と実長換算時に起こるキャリブレーション誤差になる。キャリブレーション誤差の代表的なものが、レンズの歪みなどによる非直線性誤差である [4]。

量子化誤差とは、数値計算時の四捨五入することや電気信号をA/D変換する際に必ず生ずるような、連続量を有限個の離散的数値に変換するときの誤差である [3]。画像分析時にはこの量子化できる限界（分解能）は装置側の特性によるので、実長で精度を上げたい場合には必然的にクローズアップ撮影された映像が要求される。また、画像分析では1枚の写真上での計測だけではなく、時間的に連続した計測を伴うことが多い。特に力学量算出するような分析時には、時系列的な誤差の評価も必要である。いわゆるノイズの問題である。スポーツ・バイオメカニクスに関する分析的研究では、常に悩まされる問題であり、いくつかの解決案が提唱されてきている [1][6]。

しかしながら、画像分析時の量子化誤差の特性については必ずしも十分な検討が行なわれていないのが現状である。例えば、運動対象を画面のどのくらいの大きさに設定すればよいかなどについては、ほとんど経験的な取り扱いがなされている。

そこで本研究では画像分析における量子化誤差特性の確率的記述を行うことを目的とし、さらに、この量子化誤差特性から、撮影範囲の大きさや時系列データ処理段階での遮断周波数についての設定基準を検討した。本研究の成果は、身体運動等での画像分析という計測方法の限界や有効範囲を定めることに貢献できると思われる。

なお本研究では、断りのないかぎり量子化誤差を誤差と表現する。

2 画像分析時の量子化誤差の特性

2.1 量子化誤差が一様分布の確率密度を示す場合

人為的なデジタイズであれ、電気的なものであれ、連続量を離散値で示すかぎり量子化誤差は存在する。この誤差の特徴は、量子化幅 h において確率的に一様なる分布を示すことが知られている。この時の誤差 ε の2乗平均値の平方根の期待値を rms 量子化誤差 $E[\varepsilon]$ と定義すると、

$$E[\varepsilon] = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = 0.289h \quad (1)$$

で与えられる [5]。

また、通常のデジタイズは位置の時間的変化を求めめるために行なわれるが、その値は時間軸においてもビデオなどのフレーム速度によって離散化される（これを標本化という）。そして量子化誤差は、このナイキスト標本化角周波数全域にわたって一様に分布する特徴を持つため、規則性がなく白色ノイズとも呼ばれている。ナイキスト標本化角周波数を ω_N とする。Winter はキネマティック・データの処理方法の中で、ノイズ成分は高い周波数に現われるとしているが [11]、これは量子化誤差の特徴を考慮しておらず、実際の画像分析においては問題を残す記述と思われる。

この誤差の角周波数領域 ω での大きさ（誤差スペクトルの角周波数特性） $H_\varepsilon(\omega)$ は、

$$H_\varepsilon(\omega) = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = 0.289h \quad (2)$$

という、角周波数領域に対しても確率的に一様な分布を示す。

ここで、誤差スペクトルをナイキスト標本化角周波数 ω_N で与えられた有限帯域で規格化するために、角周波数平均誤差 $E[H_\varepsilon(\omega)]$ を次のように定義した。なお、 $H_\varepsilon(\omega)$ 算出時に、rms 量子化誤差 $E[\varepsilon]$ をもとにしているのので、ここに表した角周波数領域での $E[H_\varepsilon(\omega)]$ の大きさは平均実効値としての扱いを受ける。

$$E[H_\varepsilon(\omega)] = \frac{1}{\omega_N} \int_0^{\omega_N} H_\varepsilon(\omega) d\omega \quad (3)$$

したがって誤差の 1 階微分特性、2 階微分特性 の角周波数平均誤差はそれぞれ、

$$E[H_\varepsilon(\omega)] = 0.289h \quad (4)$$

$$E[H_{\dot{\varepsilon}}(\omega)] = \frac{0.289\omega_N}{2} h \quad (5)$$

$$E[H_{\ddot{\varepsilon}}(\omega)] = \frac{0.289\omega_N^2}{3} h \quad (6)$$

となり、量子化幅 h とナイキスト標本化角周波数 ω_N が与えられると、演算処理における誤差スペクトルを確率的に求めることができる。

このことを画像分析にあてはめると、分析装置の分解能は固定であるため、被写体の大きさを画面上でどのくらいの大きさにするかで量子化幅 h が決定され、カメラの撮影速度（ビデオというフレーム速度）でナイキスト標本化周波数が決まることになる。したがって、撮影時には量子化誤差スペクトルが確率的に把握されていることになる。

2.2 量子化誤差が一様分布の確率密度を示さない場合

現在の画像分析時の作業過程におけるデジタイズの方法には、通常ピンポイント指示が用いられているケースが多いようである。この場合、量子化誤差以上のいわゆる「読み取り誤差」を生じる可能性が大きくなる。特に、関節中心位置のデジタイズなどで、「見えないポイント」のデジタイズを行なう必要があるときなどが、最も「読み取り誤差」の可能性が大きい。

このような場合、一様分布を示す確率密度関数を想定することは困難で、誤差の大きさを確率的に推定することは容易でない。しかしながら、誤差の分布を示す確率密度関数が、例えばガウス分布（正規分布）といった関数系の把握が可能な場合には、ある程度計算が可能である（図 1）。

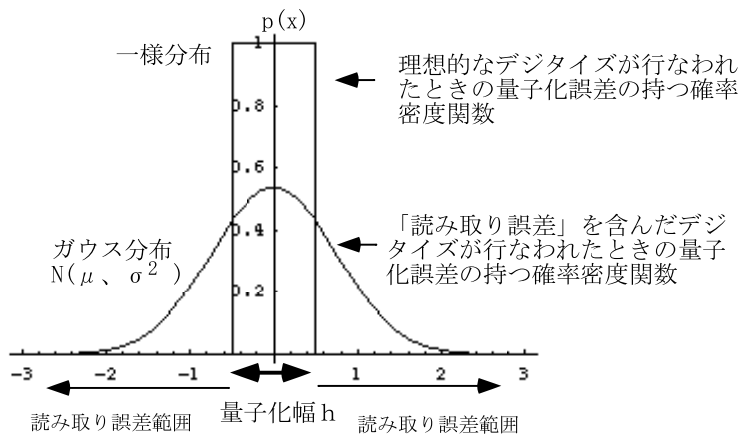


図1 デジタイズ作業における量子化誤差の確率密度関数

例えばピンポイント指示で、量子化幅以外の座標を読み取る確率が0.5と仮定したガウス分布を取るとしたら、rms量子化誤差 $E[\epsilon]$ は $0.447h$ と、一様分布の約1.5倍に増加する。

そこで、コンピュータの画面上に円を描いて円周上をピンポイント指示のデジタイズを行ない、この誤差分布を検討した。このときの装置側の分解能は0.127mmであった。誤差分布の結果を図2に示す。

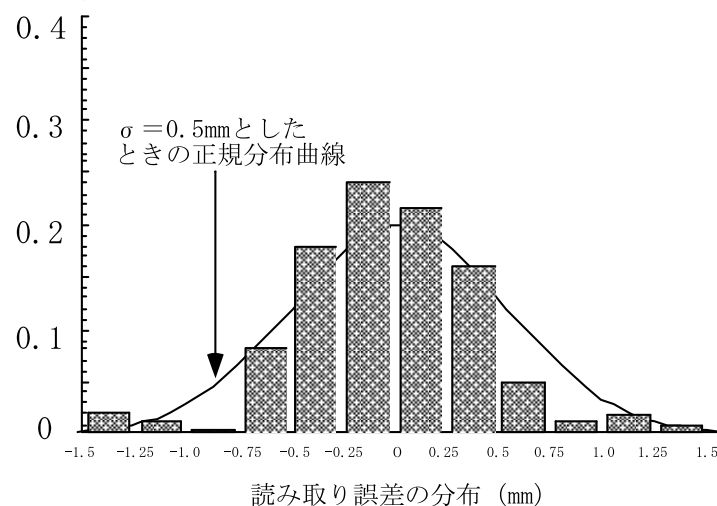


図2 コンピュータ・ディスプレイ上で円周をデジタイズしたときの読み取り誤差の分布

その結果、人がコンピュータ・ディスプレイ上で識別できる分解能は、おおよそ $\pm 0.5mm$ 、つまり量子化幅1.0mm程度と思われる。この結果は大道の報告 [8] に一致した。また誤差分布については、正規分布に近い分布を示した。この結果から人間の目の持つ量子化幅を1.0mmと仮定すると、15インチディスプレイ (W278 * H209[mm]) で640*480の分解能を有していても、実質の分解能は278*209程度に劣化する。大画面で高解像度ディスプレイを用いれば、ある程度の改善は期待できると思われる。

しかし、このようなデジタイズでは、円周上をたどっていくのでかなりの予測がきいていると思われる。また、黒白ディスプレイ上での試行ということで認識しやすい。このような観点から考えてみると、実際のデジタイズにおいて、特に人体の関節中心をデジタイズするような場合にはもう少し誤差の分布は広がることが予想される。

また3次元画像分析では、レンズを通して奥行きのある空間を平面に投影させるが、被写体の奥行きが深ければ深いほど、遠くに映っている物の大きさは小さくなる。けれども画像における量子化幅は手前も遠方も画面上では同じであるため、結果的に遠くの物の量子化が粗くなる。しかし、このような1

つの映像での量子化幅が異なる場合における誤差解析は容易でなく、誤差特性の一般的記述は難しい。奥行きの設定については、経験的に行なわれているのであろう。

現在、スポーツバイオメカニクスの研究分野などでは、キャリブレーション時の誤差を最小とするような3次元座標への変換が行なわれているが、キャリブレーション以前に生じるこのような量子化誤差の問題はほとんど検討されていないようである [11][12]。

3 量子化誤差からみた撮影条件および低域特性の設定方法

量子化誤差スペクトルは白色ノイズの性質を持つため、その影響を抑制するためには適当な低域通過フィルタ (LPF) による平滑化が必要になってくる。しかしながら、 ω_N 以下の角周波数全域に誤差スペクトルを有しているため、理想的な LPF を施しても遮断角周波数 ω_C 以下の周波数帯域には誤差スペクトルが残る。

理想的な誤差の低域特性 $G_\varepsilon(\omega)$ 、低域微分特性 $G_{\dot{\varepsilon}}(\omega)$ 、および低域2階微分特性 $G_{\ddot{\varepsilon}}(\omega)$ から得られた信号に存在する誤差スペクトルを、角周波数平均誤差で表すと、

$$E[G_\varepsilon(\omega)] = 0.289 \frac{\omega_C}{\omega_N} h \quad (7)$$

$$E[G_{\dot{\varepsilon}}(\omega)] = 0.289 \frac{\omega_C^2}{2\omega_N} h \quad (8)$$

$$E[G_{\ddot{\varepsilon}}(\omega)] = 0.289 \frac{\omega_C^3}{3\omega_N} h \quad (9)$$

となり、(4) ~ (6) 式と比較すると、 $\omega_C < \omega_N$ であるから LPF を施すことによって、それらの誤差スペクトルを減少させることが期待できる。LPF 通過後の誤差スペクトルは h 、 ω_N および ω_C が与えられれば確率的に把握できる。

こうして誤差スペクトルの低域特性を確率的に把握できることになるが、逆に、希望する確率的誤差スペクトルを規定することによって、 h 、 ω_N および ω_C の関係を示すことができる。

画像分析から得たい結果は、研究や観察の目的によって異なるが、スポーツ・バイオメカニクスの立場では、運動のキネマティクスやキネティクスを求めることが要求され、2階微分演算項の誤差スペクトルが誤差全体を支配することになる。Yokoi らはこの2階微分演算項のキャリブレーション後の誤差スペクトルに注目して、適切な遮断周波数の設定を提唱しているが [13]、量子化誤差については扱われていない。

量子化誤差の2階微分演算時に、許容できる誤差スペクトルの確率的大きさを設定することで、 h 、 ω_N および ω_C の組み合わせが求められるので、実際の画像分析時に参照できるような関係を計算した。ここでは許容できる誤差スペクトルの確率的大きさについて、信号の SN 比の考えを適用した。信号の SN 比をもとに分解能やサンプリング時間を設定する方法は、アナログ信号の符号化 (A/D 変換や PCM [Pulse Code Modulation] による符号化) においては一般的な方法である [7][9]。

角周波数領域での2階微分演算時の誤差スペクトル (9) は、実効値的に定義しているので、信号の大きさも実効値で表す必要がある。信号を正弦波で表しそのレンジの絶対値を X とすると、その実効値 S_{rms} は

$$S_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} X \quad (10)$$

となり、ノイズの実効値 N_{rms} は (9) で表されるので、結局、2階微分演算時の誤差スペクトルの SN 比 (SNR) は、

$$SNR = \frac{S_{rms}}{N_{rms}} = \frac{3\sqrt{2}\omega_N}{0.577\omega_C^3 h} X \quad (11)$$

となる。

そこで、ナイキスト標本化角周波数全体で、 $SNR = 50$ (2階微分演算時に誤差スペクトル2%の含有率)の場合の h 、 ω_N および ω_C の組み合わせ計算結果を表1と表2に示した。表1の方は加速度にして $2g$ ($19.6m/s^2$: 垂直跳びの重心加速度程度)、表2の方は $5g$ ($48.0m/s^2$: ランニングの着地衝撃時の重心加速度程度)を信号のレンジとした。これらの計算から、小さな加速度レンジを扱う場合には撮影範囲を狭めるとか、より高速度撮影できるカメラの使用を検討することが望ましいという結果を得た。

表1 2階微分データに帯域平均で2%の誤差スペクトルを許容する時の量子化幅 (m)

(希望する加速度レンジを $2g[m/s^2]$ とした時)

$f_c \backslash f_N$	30Hz	50Hz	100Hz
5Hz	0.0175	0.0292	0.0584
10Hz	0.0022	0.0037	0.0073
15Hz	0.0006	0.0011	0.0022
20Hz	0.0003	0.0005	0.0009

(f_N : ナイキスト周波数、 f_C : 遮断周波数)

表2 2階微分データに帯域平均で2%の誤差スペクトルを許容する時の量子化幅 (m)

(希望する加速度レンジを $5g[m/s^2]$ とした時)

$f_c \backslash f_N$	30Hz	50Hz	100Hz
5Hz	0.0438	0.073	0.1460
10Hz	0.0055	0.0091	0.0183
15Hz	0.0016	0.0027	0.0054
20Hz	0.0007	0.0011	0.0023

(f_N : ナイキスト周波数、 f_C : 遮断周波数)

例えば表1を満足するような、加速度にして $2g$ レンジの運動を分析するに当たり、遮断角周波数 ω_C を 20π (rad/s) (遮断周波数10Hz)としたならば、通常家庭用ビデオカメラで撮影する場合(フレーム速度毎秒60フレーム、分析側の分解レベル 640×480)、撮影画面範囲は $1.41(m) \times 1.06(m)$ より小さめに設定しなければ、2階微分演算時の誤差スペクトル含有率2%を実現できないということになる。加速度にして $5g$ レンジの運動では、同様の設定条件で $3.52(m) \times 2.64(m)$ が限界ということになる。

実際には理想的なLPFは不可能なので、この計算結果の設定よりは確率的に量子化誤差スペクトル成分が大きい。デジタルデータの平滑化に用いるデジタル・フィルタを設計し、その伝達関数を求めたならば、理想的なLPFからどの程度誤差スペクトルを多く含んでいるかは計算できる。したがって、SN比を設定することでフィルタ設計の基準を与えることになるので、データ処理過程に統一性ができると思われる。

つまり、撮影時の設定(撮影範囲とフレーム速度)、分析装置の特性(分解能)、および平滑方法(フィルタの伝達関数)によって、量子化誤差スペクトルが確率的にどの程度含まれた分析結果になるものかということ、撮影の段階や分析の時点で把握しながら作業を進められるのである。このことは、画像分析結果の精度を揃える上で重要な役割を果たすと思われる。したがって、画像分析を用いた研究報告においては、どの程度の確率的誤差を含んだ結果なのかを記述していることが望ましい。そのためには、撮影範囲、フレーム速度、分析装置の分解能、およびフィルタの伝達関数という4つの項目の記述で十分であろう。

しかし実際の誤差には、いわゆる「読み取り誤差」やキャリブレーション誤差などが量子化誤差に重畳されていることも多いので、量子化誤差の観点だけから精度を揃えても不十分であろう。画像分析という手法の持つ、計測方法としての一般的記述を行なうにはまだ課題を残している。

4 まとめ

本研究では画像分析時の、特にデジタイズ作業時に生じる量子化誤差の誤差特性を確率統計的に把握し、撮影範囲の大きさや遮断周波数について設定基準について考察したものである。以下にその要約を記す。

- 量子化誤差はデジタイズを行なう限り生じ、その誤差特性は量子化幅とナイキスト標本化周波数で把握できる。そのときの量子化幅は撮影範囲で決まり、ナイキスト標本化周波数は使用するカメラ性能で定められることから、撮影する段階で量子化誤差特性が決定していることになる。
- 人為的なピンポイント指示デジタイズにおけるいわゆる「読み取り誤差」は、量子化誤差よりは大きくなり、分解能の低下した状態と同等な扱いが可能である。
- 量子化誤差を低減させるためには低域通過フィルタ(LPF)を用いる必要があるが、低域特性を表す遮断周波数を定めることでフィルタ処理後の誤差特性を把握できる。
- 画像分析結果に含まれる量子化誤差の割合をSN比で定めることにより、撮影時の設定条件である撮影範囲やカメラのフレーム速度、分析時の分解能や利用すべきLPFの特性が計算から求められる。このことは、画像分析作業における精度の統一に貢献できる方法と考えられる。

参考文献

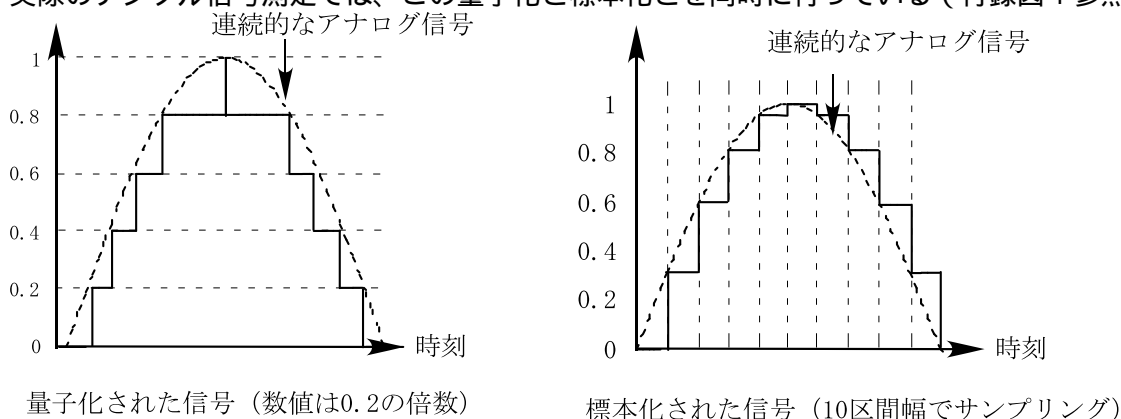
- [1] 阿江通良：画像データによる動作解析法、J.J.Sport Sci., 10 : 196 - 203、1991.
- [2] 阿江通良：スポーツ技術の改善と計測、計測と制御、31 : 430-436、1992 .
- [3] 電気学会通信教育会：測定値の統計的处理、第10版、電気学会、東京、1985、pp.139-148.
- [4] 石島繁・渋川侃二・斎藤慎一：16mmカメラによるレンズの影響について、身体運動の科学IV、杏林書院、東京、1983、pp.336-345.
- [5] 伊東晋：画像情報処理の基礎、東京理科大学出版会、東京、1986 , pp.50 - 74 .
- [6] 小林一敏：映像解析における諸問題、J.J.Sport Sci., 2 :160 - 162、1983.
- [7] 尾知博：デジタル・フィルタ設計入門、CQ出版社、東京、1990、pp.238-247 .
- [8] 大道等：動作計測法、高文堂出版社、東京、1989、pp.137 - 147 .
- [9] Schwartz, M.: Information transmission, modulation, and noise (2nd edition), McGraw-Hill Kogakusha,LTD., Tokyo, 1970,pp.146 - 155.
- [10] Shapiro,R.: The direct linear transformation method for three-dimensional cinematography, Res.Quart., 49 :197 - 205, 1978.
- [11] Winter, D.A.: Biomechanics of human movement, John Wiley & Sons, Inc., New York , 1979,pp.25 - 39.
- [12] Wood, G.A. and Marshall, R.N.: The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis,J.Biomech. 19 : 781 - 785 ,1986.
- [13] Yokoi, T. and McNitt-Gray, J.L. : A threshold to determine optimum cut off frequency in automatic smoothing using digital filter, Proceedings for American Society of Biomechanics 14th Annual Meeting, pp.209-210,1990.

量子化と標本化

いろいろな信号をアナログ-デジタル変換器（A-D 変換器）によって数値化することや、記録された信号を人間が読み取って数値化するようなことを考えてみる。この場合、数値化の段階である数値以下を切り捨てたり、四捨五入するという「丸め操作」が行われる。この操作は、測定対象を小区間に分けて数値化することであるが、この操作を量子化といい、小区間の一つ一つを量子化幅または量子という。日常生活で言えば、列車・バス・タクシーなどの料金制度がわかりやすい事例である。

一方、標本化とは連続する時系列信号を小区間時間幅で離散化して取り出す操作のことを言い、サンプリングともいう。映画の1コマずつの映像や、アニメーションの1カット映像などはその代表格である。

実際のデジタル信号測定では、この量子化と標本化とを同時に行っている（付録図1参照）。

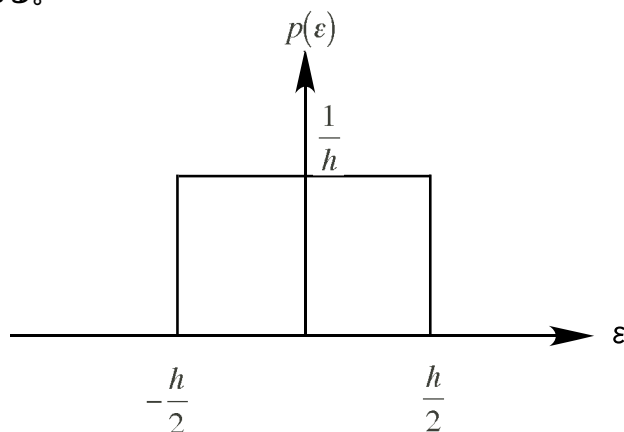


付録図1. 量子化と標本化のモデル図（実際の測定では両者を併用することになる）

なお、量子化幅 h によって生ずる丸め誤差は $\pm \frac{h}{2}$ 内に収まり、かつ、この誤差は $\pm \frac{h}{2}$ の範囲内で一様に分布する雑音であると考えることが多い（付録図2）。この量子化誤差の分布関数 $p(\varepsilon)$ は誤差 ε の確率密度関数であり、一様分布する特徴から量子化誤差の2乗平均値 $\bar{\varepsilon}^2$ は、

$$\bar{\varepsilon}^2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \varepsilon^2 p(\varepsilon) d\varepsilon = p(\varepsilon) \left[\frac{\varepsilon^3}{3} \right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \quad (12)$$

で表される。



付録図2. 量子化誤差の分布関数（確率密度関数）

ここで、量子化誤差の確率密度は $p(\varepsilon) = \frac{1}{h}$ であるから、

$$\bar{\varepsilon}^2 = \frac{1}{12}h^2 \quad (13)$$

となる。したがって、誤差 ε の 2 乗平均値の平方根の期待値を rms 量子化誤差 $E[\varepsilon]$ と定義すると、

$$E[\varepsilon] = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = 0.289h \quad (14)$$

で与えられるという (1) 式に至る。

また、サンプリング (標本化) 定理というものがあり、ある信号 $x(t)$ に含まれる上限の周波数を f_{max} とすると、 $2f_{max}$ より高い周波数、つまり、 $\frac{1}{2f_{max}}$ より小さい周期 T でサンプリングされたデータ系列 $x(nT)$ から、元の信号 $x(t)$ を完全に再生 (復元) できる。このときのサンプリング周波数の限界を与える $2f_{max}$ をナイキスト (Nyquist) 周波数という。

たとえば、50Hz までの成分を含んでいる信号を扱う場合には、少なくともその倍の 100Hz 以上の高い周波数でサンプリングしなければならないことになる。