双方向クランパーによるレベル設定

非会員 金 端 利 典 (大日本印刷)
正員 田 口 耕 造 (福 山 大 学)
正員 溝 尻 勲 (立命館大学)

Base Level Estimator Using Bilateral Clamper

Toshinori Kanahashi, Non-member(Dai Nippon Printing),
Kozo Taguchi, Member(Fukuyama University), Isao Mizoshiri, Member (Ritsumeikan University)

We often encounter with a signal composed of a base level signal slowly varying in time and a relatively fast varying signal of interest, such as electrocardiogram and video signal of cars running on a road. In order to set the base level signal, we usually estimate the base level signal by a lowpass filter using difference of characteristics in frequency domain between these two signals. However, a base level estimator of the linear filter is directly affected by amplitude of the signal of interest.

We propose the new base level signal estimator using a bilateral clamper that consists of two linear filters and a non-linear element, moreover, analyze precisely and give roughly design criteria. This estimator has nice response to the change of the base level signal, and well protects the affection of the signal of interest.

Finally, we demonstrate usefulness of this estimator showing some examples.

キーワード：基準レベル，線形フィルタ，非線形演算子，双方向クランパー

1. まえがき

時系列信号には，時間的にゆるやかに変動する基準レベルの信号に比較的早く変動する信号成分が加わっているものがある．この様な信号の基準レベルを設定することは，時間的に変動する画像中から移動物体を抽出^[1]したり心電図のベースレベル設定など様々な場面で利用される．しかし基準レベル以外の成分が特別な性質を持たない場合には，その設定は一般に困難である．

現在までに，基準レベル設定の一例として線形フィルタを用いる方法が提案されている^[2]．この方法は，基準レベルはその変動がゆるやかであり，周波数領域では他の信号成分に比べ低域に存在することに着目し，線形の低域通過フィルタ(low pass filter)を用いて，基準レベルの信号を推定している．低域通過フィルタを用いる方法の利点は，簡単なフィルタで推定可能であることから処理が高速であること，雑音成分がランダムであっても基準レベルの信号が推定できることが挙げられる．しかし，基準レベルの信号スペクトルと他の信号成分の帯域が明確に分離できず，基準レベル成分以外の影響を受け正確にレベルを設定できないといった問題がある．それゆえ，荒川らは信号の予測誤差に着目することにより信号の定常成分と非定常成分を分

離する機能を持った非線形デジタルフィルタシステム^{[3][4]}を提案している．

本論文では，予測フィルタ(prediction filter)を用いず，線形フィルタ(平滑化フィルタ)に，しきい値によって出力が変化する非線形演算子を組み合わせた双方向クランパーを作成し，基準レベルの設定を行う．

提案する双方向クランパーは，非線形演算子の出力が変化することによって次の2通りの出力特性を持つ．一つは，振幅の小さな変動とみなせる基準レベルの変動には，線形フィルタと同じ特性となり，その変動に追従する．他の一つは，振幅の大きな変動とみなせる基準レベル以外の変動には，非線形演算子で出力を相殺することによって影響を受けにくい，という特性である．

本論文では，基準レベル設定に用いられる線形フィルタと比較しながら，双方向クランパーの検討を行う．また，シミュレーション実験と基準レベル設定の一例である時系列画像からの背景推定実験を行うことによって，本手法の有効性を示す．ただし仮定として，推定目的とする基準レベルの信号が雑音や基準レベル以外の成分に比べ変動がゆるやかであるものとし，また入力信号は，基準レベルの成分に比べ基準レベル以外の成分が現れる頻度が少ないものとする．

以下2章では提案する双方向クランプの各部の性質について述べ、3章では双方向クランプの出力を解析によって求める。さらに4章で実験と検討を行い、5章でまとめを述べる。

2. 双方向クランプの構成図

双方向クランプは、線形フィルタを線形演算子 $\mathcal{L}$ で、非線形部分を演算子 $\mathcal{N}$ で表わすと、図1のように構成している。図1において $x(t)$ は入力、 $y_1(t)$ は1つ目の線形フィルタの出力、 $y_2(t)$ は2つ目の線形フィルタの出力、 $g(t)$ は提案した双方向クランプの出力(Output)である。

双方向クランプの各部の入出力関係は式(1)のようになる。

$$\begin{cases} y_1(t) = \mathcal{L}x(t) \\ y_2(t) = \mathcal{L}\mathcal{N}(x(t) - g(t)) \\ g(t) = y_1(t) - y_2(t) \end{cases} \tag{1}$$
$$\mathcal{L}x(t) = \int_0^\infty x(t-\tau)h(\tau)d\tau$$

$h(t)$: 線形演算子 $\mathcal{L}$ のインパルス応答関数

双方向クランプの出力 $g(t)$ は式(1)より

$$g(t) = \mathcal{L}x(t) - \mathcal{L}\mathcal{N}(x(t) - g(t)) \tag{2}$$

となる。

図1 双方向クランプの構成図

Fig.1 A schematic diagram of bilateral clamper

3: 双方向クランプの解析

<3・1> 非線形演算子の性質 非線形演算子 $\mathcal{N}$ は、しきい値 ε により式(3)のような入出力関係を持つように定める。ここで $f(t)$ は $\mathcal{N}$ の入力、 $\mathcal{N}f(t)$ は $\mathcal{N}$ の出力であり、 ε は正の定数である。つまり $\mathcal{N}$ は ε によって幅 2ε の不感帯を持つ。図2に非線形演算子 $\mathcal{N}$ の入出力関係を示す。

$$\mathcal{N}f(t) = \begin{cases} f(t) + \varepsilon & , f(t) < -\varepsilon \\ 0 & , |f(t)| \leq \varepsilon \\ f(t) - \varepsilon & , f(t) > \varepsilon \end{cases} \tag{3}$$

ここで解析に便利ように、非線形演算子 $\mathcal{N}$ を式(4)で表される新たな非線形演算子 $\mathcal{N}'$ と恒等演算子1を用いて

$$\mathcal{N} = \mathcal{N}' + 1 \tag{4}$$

と表わす。 $\mathcal{N}'$ の入出力関係を図3に示す。 $\mathcal{N}'$ は(5)のような入出力関係を持つ。

$$\mathcal{N}'f(t) = \begin{cases} \varepsilon & , f(t) < -\varepsilon \\ -f(t) & , |f(t)| \leq \varepsilon \\ -\varepsilon & , f(t) > \varepsilon \end{cases} \tag{5}$$

図2 $f(t)$ と $\mathcal{N}f(t)$ の関係

Fig.2 Input-Output relation of $\mathcal{N}$

式(2)から、出力 $g(t)$ は $\mathcal{N}'$ を用いて式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} g(t) &= \mathcal{L}x(t) - \mathcal{L}(\mathcal{N}' + 1)(x(t) - g(t)) \\ &= \mathcal{L}(g(t) - \mathcal{N}'(x(t) - g(t))) \end{aligned} \tag{6}$$

図3 $f(t)$ と $\mathcal{N}'f(t)$ の関係

Fig.3 Input-Output relation of $\mathcal{N}'$

<3・2> 解析 双方向クランプは線形演算子 $\mathcal{L}$ と非線形演算子 $\mathcal{N}$ により構成しており、その出力 $g(t)$ は式(6)で求められる。しかし $\mathcal{N}$ は式(3)に示したように入力によって特性が変化するため、 $\mathcal{N}$ の入力について場合わけを行い $g(t)$ を求める。

(i) $|x(t) - g(t)| \leq \varepsilon$ のとき

$$\begin{aligned} \mathcal{N}'(x(t) - g(t)) &= -(x(t) - g(t)) \text{ から } g(t) \text{ は,} \\ g(t) &= \mathcal{L}(g(t) - \mathcal{N}'((x(t) - g(t))) \\ &= \mathcal{L}x(t) \\ &= y_1(t) \end{aligned} \tag{7}$$

となる。したがって、非線形演算子の入力の絶対値 $|x(t) - g(t)|$ がしきい値 ε 以下のとき、双方向クランプの出力 $g(t)$ は線形演算子 $\mathcal{L}$ の出力 $y_1(t)$ と等しくなる。

(ii) $|x(t) - g(t)| > \varepsilon$ のとき

$\mathcal{N}'(x(t) - g(t)) = \pm \varepsilon$ から $g(t)$ は、

$$\begin{aligned} g(t) &= \mathcal{L}(g(t) - \mathcal{N}'(x(t) - g(t))) \\ &= \begin{cases} \mathcal{L}g(t) + \mathcal{L}\varepsilon & , \quad x(t) - g(t) > \varepsilon \\ \mathcal{L}g(t) - \mathcal{L}\varepsilon & , \quad x(t) - g(t) < -\varepsilon \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

より、

$$g(t) = \pm(1 - \mathcal{L})^{-1} \mathcal{L}\varepsilon \quad (9)$$

となる。ここで式(9)を演算子のNeumann展開を用いて表せば

$$g(t) = \pm(\mathcal{L} + \mathcal{L}^2 + \mathcal{L}^3 + \cdots)\varepsilon \quad (10)$$

である。

次に、双方向クランプの一部分である線形演算子 $\mathcal{L}$ として、式(11)で表される一次の伝達関数 $H(s)$ を用いる。

$$H(s) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha}s + 1} \quad (11)$$

そのとき式(9)は、

$$G(s) = \pm \frac{\varepsilon\alpha}{s^2} \quad (12)$$

となる。よって $g(t)$ は、式(12)の逆ラプラス変換から

$$g(t) = \pm \varepsilon \alpha t \quad (13)$$

となる。すなわち、非線形演算子の入力の絶対値 $|x(t) - g(t)|$ がしきい値 ε より大きいとき、双方向クランプの出力 $g(t)$ は、入力 $x(t)$ に関係なくパラメータ α と ε の積を係数に持つ時間 t の一次関数になる。

提案する双方向クランプは、振幅の小さな変動とみなせる基準レベルの変動には、平滑化フィルタと同じ特性となり、その変動に追従し、振幅の大きな変動とみなせる基準レベル以外の変動には、非線形演算子で出力を相殺することによって背景の緩やかな変動のみの抽出が可能である。ただし、現実には標準 z 変換を用いて s 領域におけるアナログフィルタの伝達関数 $H(s)$ を z 領域へ変換し離散伝達関数 $H(z)$ を求め、非線形デジタルフィルタにより双方向クランプを構成している。

4. 実験結果

<4・1> シミュレーション実験 計算機シミュレーションによってデジタルフィルタにより構成している双方向クランプの出力 $g(t)$ と、線形演算子 $\mathcal{L}$ の出力 $y_1(t)$ を求めた結果を示し、比較および検討を行う。ただし、全てのシミュレーション実験で、パラメータは $\alpha = 0.05$ 、 $\varepsilon = 5$ と設定している。

(i) ステップを入力した結果

図4は入力を $x(t) = 3$ 、および $x(t) = 25$ のステップとしたときの、双方向クランプの出力 $g(t)$ と線形演算子 $\mathcal{L}$ の出力 $y_1(t)$ である。図の実線はしきい値 $\varepsilon (= 5)$ 以下の $x(t) = 3$ のステップを入力したときの出力、破線は ε より大きい $x(t) = 25$ のステップを入力したときの出力である。また、黒点は出力 $g(t)$ 、黒三角は出力 $y_1(t)$ である。

結果から、常に $|x(t) - g(t)| \leq \varepsilon$ である $x(t) = 3$ の場合は、 $g(t) = y_1(t)$ となっており、これは<3.2>(i)の解析結果である式(7)に等しい。一方、 $x(t) = 25$ のステップを入力した場合、 $g(t)$ は $y_1(t)$ に比べ出力が遅くまた出力が直線となっている。これは<3.2>(ii)の解析結果である式(13)に等しい。ただし $x(t) = 25$ のとき、 $g(t)$ が $t = 85$ 付近で直線から曲線に変化しているのは、ここで $|x(t) - g(t)| > \varepsilon$ から $|x(t) - g(t)| \leq \varepsilon$ になるからである。

図4 $x(t) = 3$ および 25 のステップのときの出力の比較
Fig.4 Comparison of responses between bilateral clumper and liner filter $\mathcal{L}$ as $x(t) = 3, 25$

(ii) パルス信号を加えた結果

図5は基準レベルの信号にパルス成分を加えたものを入力 $x(t)$ とし、双方向クランプの出力 $g(t)$ 、線形演算子 $\mathcal{L}$ の出力 $y_1(t)$ を求めた結果である。ただし $x(t)$ は次式で表わされるもので、 $x_b(t)$ は基準レベル成分、 $x_p(t)$ はパルス成分である。

$$x(t) = x_b(t) + x_p(t) \quad (14)$$

図5において、 A はパルスの振幅、 T_p はパルス幅、 T は入力 $x(t)$ の周期、 E_{max} は出力の最大誤差つまり基準レベルからのずれの最大値、また、細線は入力 $x(t)$ 、破線は線形演算子 $\mathcal{L}$ の出力 $y_1(t)$ 、太線は双方向クランプの出力 $g(t)$ である。ただし、パルスの振幅 A は常に $A > \varepsilon$ が成り立つようにする。

図6は周期 $T = 100$ 、基準レベル $x_b(t) = 0$ の信号に、幅 $T_p = 40$ 、振幅 A がしきい値 ε より大きい6から100までの式(14)で表される入力 $x(t)$ を加え、出力 $g(t)$ 、 $y_1(t)$ の最大誤差 E_{max} を求めたものである。ただし、この実験においては $|x(t) - g(t)| > \varepsilon$ となるようにパルス幅 T_p を設定している。

図5 基準レベルにパルスを加えたときの入出力
Fig.5 Input-Output relation as $x_b(t) = 0, x_p(t) = A$

図6 パルスの振幅と $y_1(t), g(t)$ の最大誤差 E_{max} の関係
Fig.6 Relation between E_{max} and magnitude of pulse as
 $T = 100, x_b(t) = 0, T_p = 40$

図7 $x(t)$ の duty 比と $y_1(t), g(t)$ の最大誤差 E_{max} の関係
Fig.7 Relation between E_{max} and duty factor as
 $T = 100, x_b(t) = 0, A = 40$

図8 基準レベルを変動させたときの出力 $g(t)$ と $y_1(t)$
Fig.8 Simulated behaviors of $y_1(t), g(t)$

図6において横軸はパルスの振幅 A 、縦軸は出力の最大誤差 E_{max} である。実験結果から、双方向クランパーの出力 $g(t)$ の最大誤差 E_{max} は、パルスの振幅 A によらず一定である。一方、線形フィルタの出力 $y_1(t)$ の最大誤差は、パルスの振幅 A に比例し誤差が増大している。つまり A が大きいほど出力 $y_1(t)$ に影響を受ける。これらは、式(13)に示した解析結果に一致する。したがって、 $g(t)$ は基準レベル以外の成分であるパルスの振幅が増大するほど、 $y_1(t)$ に比べ良好に基準レベルを推定できることがわかる。

図7は周期 $T = 100$ 、基準レベル $x_b(t) = 0$ の信号に、振幅 $A = 40$ 、duty 比 $= n_p/n_c$ が 0 から 0.5 まで変化させた式(14)で表される入力 $x(t)$ を加え、 $g(t), y_1(t)$ の最大誤差 E_{max} を求めたものである。図の横軸は $x(t)$ の duty 比、縦軸は出力の最大誤差 E_{max} である。

結果から、duty 比が大きくなるに従い、線形フィルタの最大誤差 E_{max} は増大し、また双方向クランパーの出力 $g(t)$ の最大誤差 E_{max} も増加する。これは <3.2>(ii) の解析結果である式(13)に一致する。duty 比が大きくなると $g(t), y(t)$ とともに誤差が大きくなるが、duty 比によらず、 $g(t)$ の最大誤差 E_{max} は $y(t)_1$ の最大誤差 E_{max} に比べ十分小さい。このことから、双方向クランパーの方が良好に基準レベルを設定できていることが解る。ただし、 $g(t)$ の E_{max} が duty 比 = 0.5 付近で急激に増大しているのは、duty 比 > 0.5 ではパルス波頭が基準レベルとみなされ $g(t)$ が方形パルス波頭を推定するからである。また本論文では、入力信号は基準レベルの成分に比べ基準レベル以外の成分が現れる頻度は少ないと仮定しているので、duty 比が 0.5 以上のものは考えない。

図8は基準レベルをゆるやかに正弦波状に変動させ、これにパルスを加えた信号を入力 $x(t)$ とし、出力 $g(t), y_1(t)$ を求めた結果である。パルスの振幅は $A = 10$ 、幅は $n_p = 10$ 、duty 比は 0.5 以下でランダムにしている。

この結果から、線形フィルタの出力 $y_1(t)$ は基準レベルのゆるやかな変動には追従しているが、パルスの影響を受け、正確な基準レベル推定は行われていない。これに対して双方向クランパーの出力 $g(t)$ は、パルスの影響をほとんど受けず基準レベルの推定が行われている。つまり双方向クランパーはゆるやかな変動に追従し、一方で ϵ より大きい変動の影響はほとんど受けない。これより、本手法は線形演算子に比べ基準レベル設定に有効であることが解る。

<4・2> 実信号に対する適用例 双方向クランパーの有効性を示す実例として、背景の輝度信号を基準レベルとする実験を行った。

図9は入力信号を抽出した画像の1フレームであり、車の走行する道路を撮影したものである。また、入力信号は撮影した画像の×印で示した所の輝度時系列信号 $x(t)$ である。実験では、しきい値 ϵ は 1 とし、 α は文献(2)より 0.05 とする。入力信号において、基準レベルである背景成分は輝度値が 90 付近で変化している部分であり、細かく変化している部分はカメラの振動などによる画像の雑音成分である。また、

インパルス状に振幅が大きく変化している部分は車両の通過を表している。

図10から、破線で示される線形フィルタの出力 $y_1(t)$ は、車両が存在しない $t = 25$ 付近では良好に背景を推定しているが、車両が通過する時点では背景推定に大きな誤差が生じている。これは線形フィルタが、基準レベル以外の成分の振幅の大きさに比例し誤差が生じるからである。さらにこの誤差が、背景部分における推定にも影響をおよぼし、 $t = 75$ 付近では大きな誤差を生じているのが解る。

これに対し双方向クランプの出力 $g(t)$ は、車両部分においても背景部分においても良好に背景推定を行っている。また車両が通過する時点においても、良好に背景推定を行っている。この結果から、基準レベル設定に本手法が有効であることがわかる。

図9 画像における入力信号を抽出した位置
Fig.9 Time series signal acquisition point

図10 画像の時系列信号の実測値と推定値
Fig.10 Comparison with two estimated base levels

5. むすび

雑音や突発的な成分を含んだ信号から、基準レベル設定を行うために双方向クランプを用いる方法を提案した。双方向クランプは、一次系の簡単な線形フィルタに非線形素子を組み合わせたもので、特性が非線形素子の入力に伴って変わることから場合わけを行い解析をし、その出力を求めた。また、シミュレーション実験を行い双方向クランプの出力と今回用いた線形フィルタの出力の比較することによって有効性を示し、さらに双方向クランプの適

応例として、環境変動による輝度変化や車両による隠蔽などによって変化する画像中の背景輝度を推定し、本方法の有効性を示した。

(平成8年3月11日受付, 平成8年10月1日再受付)

文 献

- [1] 金端, 田口, 溝尻: 双方向クランプによるレベル設定, 平成7年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, pp.G26(1995)
- [2] 田口, 金端, 中西, 溝尻: デジタル動画画像処理による移動物体抽出, 電気学会論文誌, Vol.114-c, No11, pp.1148-1153(1994)
- [3] K.Arakawa, et.al. "Separation of a Nonstationary Component from the EEG by a Nonlinear Digital Filter", IEEE Trans. Biomed. Eng., BME33-7, pp.724-726(1986)
- [4] 荒川, 原島, 大野, 毛利: 呼吸音における crackle 分離抽出を目的としたデジタルフィルタシステム, 医用電子と生体工学, 27-2, pp.112-116(1989)

金端 利典

(非会員) 1969年11月21日生まれ。1996年3月立命館大学大学院理工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年4月大日本印刷株式会社入社。在学中, 非線形フィルタ, 動画画像処理に関する研究に従事。

田口 耕造

(正員) 1968年12月18日生まれ。1996年3月立命館大学大学院理工学研究科博士課程電気工学専攻修了。博士(工学)。同年4月福山大学工学部電子電気工学科助手。画像計測, 信号処理, 光トラッキング, 光機能回路に関する研究に従事。電気学会, 応用物理学会などの会員

溝尻 勲

(正員) 1941年10月6日生まれ。昭和40年大阪府立大学工学部電子卒業。同年三洋電機(株)入社。47年大阪府立大学大学院博士課程修了。のち, 福井大学講師, 助教授を経て, 現在, 立命館大学理工学部教授。電子回路, 画像処理, 生体システムに関する研究に従事。工学博士。電気情報通信学会, ME学会, IEEE会員。