
ETBF의 새로운 다진영역 표현: SA 여파기

송종관

A new multilevel representation of ETBF: Subset averaged filters

Jongkwan Song

이 논문은 2002학년도 경성대학교 학술진흥연구비에 의하여 연구되었음

요약

본 연구에서는 SA 여파기로 불리는 ETBF의 새로운 다진 영역 표현을 제시하고 이 표현이 ETBF의 모든 영역을 포함한다는 사실을 밝혔다. SA 여파기는 다단 여파기의 구조를 가진다. 첫째단(first stage)은 최대, 최소, exclusive-OR와 같은 비선형 연산으로 이루어지며 두 번째 단은 첫째단 출력들의 가중 평균으로 주어진다. 이 구조는 SAM 여파기와 같이 첫째단 여파기 윈도우의 최대수를 제한하는 방식이 가능하여 매우 유연한 구조를 갖지만, SAM 여파기와는 달리 ETBF의 부분군만을 표현하지 않고 ETBF의 전 영역을 표현할 수 있는 장점이 있다.

ABSTRACT

In this paper, a new representations of extended threshold Boolean filter(ETBF), called SA filter, is introduced. The structure of this representations is a one of multistage filters. The first stage is subfilters of nonlinear filters such as maximum, minimum, or exclusive-OR operators. The second stage is linear combination of first stage outputs. Although the structure of this representations is very similar to SAM filters, SA filters encompass all ETBF not subset of ETBF.

Keyword

LWOS filters, ETBF, median filters, nonlinear filters, SAM filters

I. 서론

확장 임계치 부울 여파기(extended threshold Boolean filter; ETBF)^[1]는 임계치 분해 성질(threshold decomposition property)에 기초하여 정의되는 여파기로 임계치 분해 성질을 갖는 모든 여파기를 포함한다. 따라서 ETBF는 선형 FIR 여파기, 가중치 미디언 여파기^[2,3], L- 여파기^[4], 스택 여파기^[5], TBF^[6] 등과 같은 다수의 여파기를 포함한다.

ETBF는 임계치 분해 구조에 근거하므로 이진

영역에서 한 연산자로 완전히 규명된다. 이진 영역 연산자(binary domain operator)를 이용하지 않고 다진 영역(multi-level)에서 직접 ETBF를 정의할 수 있는 ETBF의 다진 영역 표현에 대한 활발한 연구가 이루어져 왔다. 이 중 LWOS 여파기^[7]는 ETBF의 다진 영역 표현으로 최초로 소개되었으며, 선형 FIR 여파기와 순서 통계에 기초한 비선형 미디언 형의 여파기를 통합하여 광범위한 여파기 군에 대하여 통합적인 최적화를 가능케 하였으나 윈도우(window)의 크기가 증가할수록 구현의 복잡도가 매우 빠른 속도로 증가하여 응용에

*경성대학교 전기전자·컴퓨터공학부

접수일자 : 2003. 7. 16

많은 제약을 가진다.

한편, 미디언 여파기의 일반화를 통하여 얻어진 SAM 여파기^[8]는 다단 여파기의 구조를 가지며, 부미디언(submedian) 값들의 선형조합을 출력으로 한다. 이 여파기는 부여파기 윈도우의 최대수를 제한하는 방식으로 성능과 구현의 복잡도를 조절할 수 있는 매우 유연한 여파기 구조를 가지나, ETBF의 전 영역을 표현하지 못하며 확장 self-dual 성질을 갖는 ETBF의 일부 부분군(subset) 만을 표현 할 수 있다^[8].

본 논문에서는 SAM 여파기와 같은 형식을 가지면서, ETBF의 전영역을 표현할 수 있는 새로운 다진 영역 표현을 구한다. 이 여파기는 SAM 여파기에서 사용되는 부여파기인 미디언 연산을 최대(maximum), 최소(minimum), exclusive-OR 연산자로 대체함으로써 이루어진다. SA여파기로 불리는 새로운 ETBF의 다진 영역 표현을 얻기 위하여 먼저 이진영역의 exclusive-OR 연산에 대한 다진 영역 표현을 구한다. 또한 이들과 관련한 이론적 성질을 규명하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 ETBF와 SAM 여파기에 대하여 소개하고, III절에서는 이진영역의 exclusive-OR 연산에 대한 다진 영역 표현을 구한다. IV절에서는 SA 여파기를 소개하고 이들이 ETBF의 다진 영역 표현임을 보인다.

II. ETBF와 SAM 여파기

$X(n)$ 을 입력 신호라 하고 $X(n)$ 을 시간 n 에서의 윈도우(window) 안에 있는 N 개의 입력 샘플로 구성되는 벡터라 하자. 즉,

$$X(n) = [X(n-L_1), \dots, X(n), \dots, X(n+L_2)]^T \\ = [X_1(n), \dots, X_k(n), \dots, X_N(n)]^T.$$

여기서 $N=L_1+L_2+1$ 이며 $X_k(n) = X(n-L_1-1+k)$ 이다. 이 때 입력 샘플 X_k 는 $\{0, 1, \dots, M\}$ 중의 한 값을 갖는다고 가정한다.

앞으로는 표기(notation)를 간단히 하기 위하여 시간 계수 n 을 생략한다.

ETBF는 다음과 같이 정의된다.

$$F(X) = \sum_{m=1}^M f_B(x^m) \tag{1}$$

여기서

$$x^m = [T_m(X_1), T_m(X_2), \dots, T_m(X_N)]^T \text{이며,}$$

$T_m(X_k)$ 는 $X_k \geq m$ 이면 1을 아니면 0을 출력으로 내는 임계 연산자(threshold operator)이다. $f_B: \{0, 1\}^N \rightarrow \mathbb{R}$ 은 이진 입력 벡터 x 를 실수 $f_B(x)$ 로 대응시키는 함수이다. 이 때 $f_B(\cdot)$ 가 부울 함수인 경우 ETBF는 TBF[6]가 되며, $f_B(\cdot)$ 이 양부울 함수(positive Boolean function)인 경우 ETBF는 스택 여파기^[5]가 되고, $f_B(\cdot)$ 이 가중 평균 연산자라면 ETBF는 선형 FIR 여파기가 된다.

표 1. $N=3$ 일 때 확장 진리표.

Table 1. Extended truth table when $N=3$.

x_1	x_2	x_3	$f_B(V_j)$
0	0	0	c_0
0	0	1	c_1
0	1	0	c_2
0	1	1	c_3
1	0	0	c_4
1	0	0	c_5
1	1	0	c_6
1	1	1	c_7

식 (1)의 ETBF는 이진 영역 함수인 $f_B(\cdot)$ 에 의해 완전히 규명된다. 또 다른 방법으로, 식 (1)의 ETBF는 모든 가능한 입력 벡터와 그것에 대응하는 결과 값을 나열하는 확장 진리표에 의해 기술되어질 수 있다. 표 1은 $N=3$ 일 때의 확장 진리표를 보여준다. 확장 이진 함수 $f_B(\cdot)$ 는 $f_B(x) + f_B(\bar{x}) = f_B(1)$ 의 필요 충분 조건을 만족

하면 확장 셀프 듀얼(extended self-dual)이라고 말해진다[8]. 확장 셀프 듀얼한 $f_B(\cdot)$ 를 가진 ETBF를 셀프 듀얼 성질을 가지고 있다고 한다. $f_B(\cdot)$ 가 이진 함수일 때, 확장 셀프 듀얼성은 셀프 듀얼 성을 의미한다. [8]에서 모든 확장 셀프 듀얼 ETBF는 부분 집합 평균 중앙값(subset averaged median ; SAM) 여파기로 표현되어질 수 있음을 보여 주고 있다. SAM 여파기는 다음과 같이 정의된다.

$$SAM(X) = \sum_{k=1}^{\lfloor (N+1)/2 \rfloor} F_{med}^{2k-1}(X) \quad (2)$$

여기서 $[x]$ 는 x 를 넘지 않고 x 에 가장 가까운 정수이고 $F_{med}^i(x)$ 는 다음과 같다.

$$F_{med}^i(X) = \sum_{m_1=1}^N \dots \sum_{m_i=1}^N h_i(m_1, \dots, m_i) \text{ med}(X_{m_1}, \dots, X_{m_i}). \quad (3)$$

III. Exclusive-OR 연산에 대한 다진 영역 연산자

이진 영역의 AND 연산자는 다진 영역에서는 최소(minimum) 연산자이며, 이진 영역에서는 OR 연산자는 다진 영역에서 최대(maximum) 연산자에 해당한다는 사실은 잘 알려져 있다. 그러나 이진 영역의 exclusive-OR 연산자에 해당하는 다진 영역 연산자는 알려져 있지 않다. 본 절에서는 IV절에서의 SA 여파기를 얻기 위하여 exclusive-OR 연산자에 해당하는 다진 영역 연산자를 구한다.

[Lemma] (Exclusive-OR의 다진 영역 표현) Exclusive-OR연산의 다진 영역 표현은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} xor(X_1, \dots, X_N) &= \sum_{m=1}^N (-1)^{m+1} X_{(m)} \\ &= \begin{cases} X_{(1)} - X_{(2)} + X_{(3)} - X_{(4)} + \dots + X_{(N)} & N \text{ is odd} \\ X_{(1)} - X_{(2)} + X_{(3)} - X_{(4)} + \dots - X_{(N)} & N \text{ is even} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $X_{(j)}$ 는 입력 샘플 (X_1, \dots, X_N) 중 j 번째 큰

샘플을 나타낸다. 즉, $X_{(1)} \geq X_{(2)} \geq \dots \geq X_{(N)}$.

증명: 다진 영역 입력에 대한 $xor(\cdot)$ 연산의 출력은 (1)식의 $f_B(\cdot)$ 를 exclusive-OR로 뚫으므로 다음과 같이 구해진다.

$$xor(X_1, \dots, X_N) = \sum_{m=1}^M T_m(X_1) \oplus \dots \oplus T_m(X_N). \quad (5)$$

임계치 분해된 M 개의 이진 입력 $T_m(X_1, \dots, X_N), m=1, \dots, M$,은 Hamming weight(이진 입력의 1의 개수)에 따라 분류할 수 있다. 이진 입력 $T_m(X_1, \dots, X_N)$ 의 Hamming weight를 H_m 라 하면 식 (5)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} xor(X_1, \dots, X_N) &= \sum_{\substack{m=1 \\ H_m=0}}^M T_m(X_1) \oplus \dots \oplus T_m(X_N) + \dots \\ &\dots + \sum_{\substack{m=1 \\ H_m=N}}^M T_m(X_1) \oplus \dots \oplus T_m(X_N) \end{aligned} \quad (6)$$

길이가 N 인 이진 입력에 대한 exclusive-OR연산의 결과는 Hamming wight가 홀수이면 1의 출력을 갖고, Hamming weight가 짝수이면 0의 출력을 갖는다. 따라서 N 이 홀수인 경우 식(6)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} xor(X_1, \dots, X_N) &= \sum_{\substack{m=1 \\ H_m=1}}^M 1 + \sum_{\substack{m=1 \\ H_m=3}}^M 1 + \dots + \sum_{\substack{m=1 \\ H_m=N-1}}^M 1 \\ &= \left(\begin{matrix} \text{the number of binary inputs} \\ \text{whose Hamming weight is 1} \end{matrix} \right) \\ &\quad + \left(\begin{matrix} \text{the number of binary inputs} \\ \text{whose Hamming weight is 3} \end{matrix} \right) \\ &\quad \dots \\ &\quad + \left(\begin{matrix} \text{the number of binary inputs} \\ \text{whose Hamming weight is } N-1 \end{matrix} \right) \\ &= (X_{(1)} - X_{(2)}) + (X_{(3)} - X_{(4)}) + \dots + (X_{(N-1)} - X_{(N)}). \end{aligned} \quad (7)$$

N 이 홀수인 경우 식(7)은 다음과 같다.

$$xor(X_1, \dots, X_N) = (X_{(1)} - X_{(2)}) + (X_{(3)} - X_{(4)}) + \dots + (X_{(N-2)} - X_{(N-1)}) + X_{(N)}. \quad (8)$$

따라서 식(7)과 (8)로부터

$$xor(X_1, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N (-1)^{(i+1)} X_{(i)}. \quad (9)$$

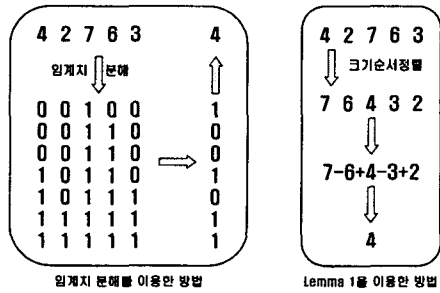


그림 1. $xor(\cdot)$ 다진영역 출력을 구하는 예제.
Fig. 1. An example of $xor(\cdot)$ operation

[예제1] 그림 1에 $xor(\cdot)$ 다진 영역 출력을 구하는 과정을 보였다. Lemma를 이용하면 임계치 분해를 이용하여 이진영역에서 구한 출력과 동일한 결과를 다진 영역에서 직접 구할 수 있다. Lemma를 이용하면,

$$xor(X_1, \dots, X_5) = X_{(1)} - X_{(2)} + X_{(3)} - X_{(4)} + X_{(5)} = 7 - 6 + 4 - 3 + 2 = 4.$$

이 결과는 임계치 분해를 이용하여 구한 결과와 일치한다.

IV. SA 여파기

표 1의 확장진리표(extended truth table)로부터

$$f_B(\mathbf{x}) = c_0 + (c_1 \overline{x_1 x_2 x_3}) \vee (c_2 \overline{x_1 x_2 x_3}) \vee \dots \vee (c_7 x_1 x_2 x_3) \quad (10)$$

여기서 \overline{x} 와 \vee 는 논리 부정(logical negation)과 논리 OR연산을 각각 나타내며, $c_i x_j(x_k)$ 는 $c_i(x_i)$ 와 x_j 의 곱셈연산을 나타낸다. 이 표현식은 $c_i \in \{0,1\}$ 인 경우 부울 함수가 된다. 이 식의 논리 연산자인 부정(negation), \overline{x} ,과 OR 연산, \vee ,을 $\overline{x} = 1-x$ 와 $x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2 - x_1 x_2$ 의 관계를 이용하여 다진 입력(multilevel input)에 대해서 확장할 수 있다. 이는 이들 연산이 다진 영역내지는 실수 입력에 대

한 연산자임을 의미한다. 간단한 계산을 수행하면 식(10)은 다음과 같이 표현된다.

$$f_B(\mathbf{x}) = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_4 x_3 + (c_3 - c_1 - c_2) x_1 x_2 + (c_5 - c_1 - c_4) x_1 x_3 + (c_6 - c_2 - c_4) x_2 x_3 + (c_7 - c_3 - c_5 - c_6 + c_1 + c_2 + c_4) x_1 x_2 x_3 \quad (11)$$

벡터를 이용하면 위 식은 아래와 같이 주어진다.

$$f_B(\mathbf{x}) = h_0 + h_1(1)x_1 + h_1(2)x_2 + h_1(3)x_3 + h_2(1,2)x_1 x_2 + h_2(1,3)x_1 x_3 + h_2(2,3)x_2 x_3 + h_3(1,2,3)x_1 x_2 x_3 = h^t \mathbf{z} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} h_0 &= c_0 \\ h_1(1) &= c_1 \\ h_1(2) &= c_2 \\ h_1(3) &= c_3 \\ h_2(1,2) &= c_3 - c_1 - c_2 \\ h_2(1,3) &= c_5 - c_1 - c_4 \\ h_2(2,2) &= c_6 - c_2 - c_4 \\ h_3(1,2,3) &= c_7 - c_3 - c_5 - c_6 + c_1 + c_2 + c_4 \end{aligned}$$

이며

$\mathbf{h} = (h_0, h_1(1), h_1(2), h_1(3), h_2(1,2), h_2(1,3), h_2(2,3), h_3(1,2,3))^t$, $\mathbf{z} = (1, x_1, x_2, x_3, x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3, x_1 x_2 x_3)^t$ 으로 주어지는 벡터이다. 식(12)의 결과를 식(1)에 대입하면 다음과 같은 ETBF의 다진 영역 표현을 구할 수 있다.

$$F(\mathbf{X}) = h_0 + \sum_{k=1}^3 F_{\min}^k(\mathbf{X}) = \mathbf{h}^t \mathbf{Z} \quad (13)$$

여기서 관측벡터(observation vector)

$$\mathbf{Z} = (1, X_1, X_2, X_3, \min(X_1, X_2), \min(X_1, X_3), \min(X_1, X_2, X_3))^t \text{ 이고,}$$

$$F_{\min}(\mathbf{X}) = \sum_{\substack{m_1=1 \\ m_1 \leq m_2, \dots, m_3}}^3 \dots \sum_{m_1=1}^3 h_1(m_1, \dots, m_4) \min X_{m_1}, \dots, X_{m_4}. \quad (14)$$

이다. 이 여파기는 다단 여파기로 그 출력이 부

여파기 출력의 가중 평균으로 주어진다. 이 결과를 일반적인 윈도우 크기 N 에 대하여 확장함으로써 SAMIN(subset averaged minimum) 여파기를 정의한다.

[property 1] (SAMIN) 모든 ETBF는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F(X) = h_0 + \sum_{k=1}^N F_{\min}^k(X) = \mathbf{h}^t \mathbf{Z} \quad (15)$$

증명:

식(1)의 ETBF에 해당하는 SAMIN 여파기가 존재하는 것을 증명하는 것은 다음의 식을 만족하는 \mathbf{h} 를 항상 구할 수 있다는 사실을 보이는 것이다.

$SAMIN(x) = \mathbf{h}^t \mathbf{Z} = f(x)$ for all 2^N binary input x
즉,

$$\begin{cases} \mathbf{h}^t \mathbf{Z}_{0\dots 00} = f(0, \dots, 0, 0) \\ \mathbf{h}^t \mathbf{Z}_{0\dots 01} = f(0, \dots, 0, 1) \\ \mathbf{h}^t \mathbf{Z}_{0\dots 10} = f(0, \dots, 1, 0) \\ \vdots = \vdots \\ \mathbf{h}^t \mathbf{Z}_{1\dots 11} = f(1, \dots, 1, 1) \end{cases} \quad (16)$$

여기서

$\mathbf{Z}_{0\dots 00}, \mathbf{Z}_{0\dots 01}, \mathbf{Z}_{0\dots 10}, \dots, \mathbf{Z}_{1\dots 11}$ 는 입력이 $(0, \dots, 0, 0), (0, \dots, 0, 1), (0, \dots, 1, 0), \dots, (1, \dots, 1, 1)$, 일 때 관측 벡터(observation vector)이다. 벡터와 행렬 표현을 이용하면 (16)식은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{h}^t [T] = \mathbf{y}^t \quad (17)$$

여기서 $[T] = (\mathbf{Z}_{0\dots 00}, \dots, \mathbf{Z}_{1\dots 11})$ 로 주어지는 $2^N \times 2^N$ 행렬이고, $\mathbf{y} = (f(0, \dots, 0), \dots, f(1, \dots, 1))^t$ 로 주어지는 2^N 차 벡터이다. 이 증명은 $[T]$ 의 역 행렬이 존재함을 보임으로써 완성된다. 행렬의 행과 열에 관한 기본 연산(elementary row and column operation)을 이용하면, $[T]$ 는 아래와 같이 변환된다.

$$[T] \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & & & \\ 0 & \ddots & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

삼각 행렬은 주 대각방향의 원소(diagonal elements)가 모두 0이 아닌 경우 특이 행렬(singular matrix)이 아니다. 따라서 $[T]$ 의 역행렬이 항상 존재한다^[9].

식 (15)의 표현은 실제 응용의 경우 매우 유연한 여파기구조를 제시한다. 부 여파기의 입력샘플의 최대수를 제한함으로써 여파기 성능을 다소 희생하여 계산량을 줄일 수 있는 호환작용(tradeoff)가 가능하다.

위에서 minimum 연산을 이용한 결과와 유사하게 maximum과 exclusive-OR연산을 이용한 ETBF의 다진 영역 표현 또한 가능하다. 아래의 두 Property에서 maximum과 exclusive-OR를 이용한 ETBF의 다진 영역 표현인 SAMAX와 SAXOR 여파기를 유도한다.

[property 2](SAMAX) 모든 ETBF는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F(X) = h_0 + \sum_{k=1}^N F_{\max}^k(X) = \mathbf{h}^t \mathbf{Z} \quad (19)$$

여기서 $F_{\max}^k(X)$ 는 식(15)의 $\min(\cdot)$ 연산을 $\max(\cdot)$ 연산으로 바꿈으로써 정의된다.

[Property 3](SAXOR) 모든 ETBF는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F(X) = h_0 + \sum_{k=1}^N F_{xor}^k(X) = \mathbf{h}^t \mathbf{Z} \quad (20)$$

여기서 $F_{xor}^k(X)$ 는 식(15)의 $\min(\cdot)$ 연산을 $xor(\cdot)$ 연산으로 바꿈으로써 정의된다.

증명은 [Property 1]과 매우 유사하므로 생략한다.

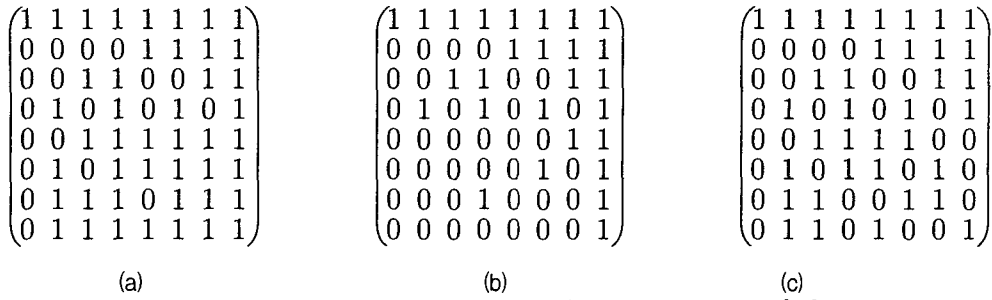


그림 2. $N=3$ 일 때 (a) SAMAX (b) SAMIN, (c) SAXOR 여파기의 $[T]$ 행렬.
 Fig. 2. The matrix $[T]$ of (a) SAMAX (b) SAMIN, (c) SAXOR when $N=3$.

[property 1]-[property 3]은 SA 여파기가 ETBF의 다진 영역 표현임을 보인다. 따라서 임의의 ETBF가 주어지면 그에 대한 SAMAX, SAMIN, SAXOR 여파기 표현을 구할 수 있다. 아래의 Corollary는 ETBF에 대한 SA 여파기 표현을 구하는 방법을 보여준다.

[Corollary 1] ETBF에 대응하는 SA 여파기는 식 (17)에서 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{h} = ([T]^{-1})^t \mathbf{y} \quad (21)$$

[예제 2] 윈도우의 크기가 3인 미디언 여파기를 고려하자. 이 여파기의 \mathbf{y} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = (\text{median}(0,0,0), \text{median}(0,0,1), \text{median}(0,1,0), \dots, \text{median}(1,1,1))^t = (0,0,0,1,0,1,1,1)^t. \quad (22)$$

윈도우의 크기가 3일 때 SAMAX, SAMIN, SAXOR의 $[T]$ 행렬은 그림 2에 주어져 있다. 식 (21)으로부터

$$\begin{aligned} \text{median}(X_1, X_2, X_3) &= (0,0,0,0,1,1,1,-2)Z_{\max} \\ &= (0,0,0,0,1,1,1,-2)Z_{\min} \\ &= (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, 0, 0, -\frac{1}{2})Z_{xor}. \end{aligned} \quad (23)$$

따라서 $\text{median}(X_1, X_2, X_3)$ 는 다음과 같이 세 가지 방식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{median}(X_1, X_2, X_3) &= \max(X_1, X_2) + \max(X_1, X_3) + \max(X_2, X_3) - 2\max(X_1, X_2, X_3) \\ &= \min(X_1, X_2) + \min(X_1, X_3) + \min(X_2, X_3) - 2\min(X_1, X_2, X_3) \\ &= \frac{1}{2}(X_1 + X_2 + X_3 - \text{xor}(X_1, X_2, X_3)) \end{aligned} \quad (24)$$

IV. 결론

본 연구에서는 SA 여파기로 불리는 ETBF의 새로운 다진 영역 표현을 제시하였다. 이 다진 영역 표현은 다단 여파기의 구조를 가지며 첫 번째 단은 비선형 여파기의 구조를 가지는 부여파기이며 두 번째 단은 선형 여파기의 구조를 갖는다. 이 구조는 기존의 SAM 여파기와 동일한 형식을 취한다. 그러나 SAM 여파기가 ETBF의 부분군을 표현하는데 그치는 반면 제안된 SAMAX, SAMIN, SAXOR 여파기는 ETBF의 모든 영역을 표현 할 수 있음을 보였다. 따라서 이 여파기는 기존의 ETBF의 다진 영역 표현으로 제안된 LWOS 여파기의 응용영역에서 모두 사용되어질 수 있으며, SAM 여파기와 같이 여파기의 구현 복잡도를 적절히 조절할 수 있는 유연한 구조를 가진다.

이 여파기는 두 번째 단이 선형 여파기의 형태를 취하고 있으므로, 기존의 선형 여파기의 최적 설계 방식을 그대로 적용할 수 있다. 신호의 성질에 따른 여파기의 최적 설계와 그에 따른 성능 분석에 대한 연구가 활발히 이루어진다면 여파기의 응용 영역을 크게 확대할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] K. D. Lee and Y. H. Lee, "Minimum mean square error filtering over the class of extended threshold Boolean filters," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 3, pp. 97-100, Adelaide, South Australia, 1994.
- [2] O. Yli-Harja, J. Astola, and Y. Neuvo, "Analysis of the properties of median and weighted median filters using threshold logic and stack filter representation," IEEE Trans. Signal Processing, vol. SP-39, pp. 395-410, Feb. 1991.
- [3] M. K. Prasad and Y. H. Lee, "Analysis of weighted median filters based on inequalities relating the weights," Circuits, Systems and Signal Processing, vol. 11, pp. 115-136, Jan. 1992.
- [4] A. C. Bovik, T. S. Huang, and D. C. Munson Jr., "A generalization of median filtering using linear combinations of order statistics," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-31, pp. 1342-1350, Dec. 1983.
- [5] P. D. Wendt, E. J. Coyle, and N. C. Gallagher Jr., "Stack filters," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-34, pp. 898-911, Aug. 1986.
- [6] K. D. Lee and Y. H. Lee, "Threshold Boolean filters," IEEE Trans. Signal Processing, vol. SP-42, pp. 2022-2036, Aug. 1994.
- [7] J. Song and Y. H. Lee, "Linear combination of weighted order statistic filters: Canonical structure and optimal design," IEEE Trans. Circuits Syst.: Part II, vol. 43, pp. 349-362, May, 1996.
- [8] D. H. Kang, J. Song, and Y. H. Lee, "Analysis and optimization of subset averaged median filters," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 44, pp. 742-746, March, 1996.
- [9] I. N. Herstein and David J. Winter, Matrix Theory and Linear Algebra, New York: Macmillan Publishing, 1989.

저자 소개

송종관(Jongkwan Song)

경성대학교 전기전자·컴퓨터공학부