

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS USANDO FILTROS ADAPTATIVOS

RESUMEN

Se presentan esquemas de caracterización dinámica aplicados sobre señales electromiográficas utilizando una estructura de bancos de filtros con variación de parámetros adaptativos. Los bancos de filtros son calculados a partir de esquemas de actualización. Los criterios de adaptabilidad utilizados para la caracterización dinámica son momentos estadísticos y vector gradiente. Para la selección de características se utiliza el módulo máximo. Los resultados de clasificación con los métodos adaptativos son superiores en un 9 % a los resultados obtenidos con bancos de filtros de parámetros fijos. Se utiliza para la clasificación un clasificador bayesiano con la distancia de Mahalanobis.

PALABRAS CLAVES: Filtros adaptativos, esquemas de actualización adaptativos, caracterización, electromiografía.

ABSTRACT

We present schemes for electromyographic dynamic characterization using adaptive filter banks. Filter banks are calculated using lifting schemes. We use statistical moments and gradient vector for adaptability criteria. For feature selection we use modulus maxima. We obtain classification results with adaptive methods 9 % better than with fixed filter banks. For classification we use a Bayesian classifier with Mahalanobis distance.

KEYWORDS: Adaptive filters, adaptive lifting schemes, feature extraction, electromyography.

1. INTRODUCCIÓN

La adquisición de las señales eléctricas producidas por los músculos durante una contracción se conoce como electromiografía. Estas señales son producidas por el intercambio de iones a través de las membranas de las fibras musculares que producen una contracción. Las señales electromiográficas (EMG) pueden ser medidas utilizando elementos conductivos o electrodos de plata – cloruro de plata ($Ag - AgCl$) sobre la superficie de la piel y este procedimiento puede ser realizado con un mínimo de riesgo. Las señales electromiográficas han sido utilizadas para el control de prótesis considerando como características de interés únicamente la amplitud de las señales, o la envolvente de la señal rectificada. Sin embargo, el análisis de señales no estacionarias de diversas naturalezas que presentan comportamiento oscilatorio requiere el uso de métodos más especializados [1]. Entre estos métodos, el análisis de señales por banco de filtros es uno de los métodos de caracterización más utilizados para la aplicación del análisis wavelet [2, 3]. Una importante modificación de este análisis utilizando bancos de filtros consiste en cambiar los parámetros de

los filtros tales como el número de momentos de desvanecimiento, lo que permite revelar ciertas características de las señales analizadas, y adaptar el análisis de acuerdo a la estructura de la señal [4, 5]. La implementación de estos esquemas adaptativos se realiza a través de los esquemas de actualización (*lifting schemes*). Estos esquemas de actualización, no sólo disminuyen el tiempo de cálculo sobre los bancos de filtros de parámetros fijos, sino que también permiten que la adaptabilidad se aplique sobre cada muestra [6]. Para esto es necesario aplicar criterios de variación dinámica que indiquen el comportamiento de la señal. Los criterios de adaptabilidad aplicados sobre las señales son momentos estadísticos y transformaciones sobre el vector gradiente [7]. Estos métodos requieren que algunos de sus parámetros se seleccionen de forma heurística. Se proponen por tanto métodos automáticos para la variación de los parámetros de los filtros.

En este trabajo se utilizan los esquemas de actualización para el cálculo de banco de filtros y se introducen esquemas adaptativos para la variación dinámica de los filtros. Adicionalmente, se presentan los criterios de

ÁLVARO OROZCO

Ingeniero Electricista, M.Sc
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
aaog@utp.edu.co

EDUARDO GIRALDO

Ingeniero Electricista, M.Sc
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
egiraldos@ohm.utp.edu.co

Grupo de Investigación en Control e Instrumentación.

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto: "Sistema automatizado efectivo y apropiado para la caracterización y clasificación de señales electromiográficas para el control de prótesis y brazos robóticos", aprobado por Colciencias, radicación 2073

adaptabilidad y se propone la selección automática de parámetros relacionados con la variación dinámica de los filtros. En la sección 2 se presentan brevemente las topologías de bancos de filtros y su cálculo a través de esquemas de actualización. En la sección 3 se introducen las diferentes topologías para el cálculo de los esquemas de actualización adaptativos. En la sección 4 se presentan los criterios de adaptabilidad y de selección automática de parámetros, y en la sección 5 se presentan los resultados obtenidos sobre las señales EMG orientados a la clasificación de movimientos.

2. BANCOS DE FILTROS

Un banco de filtros de dos canales consta de un par de filtros de síntesis o reconstrucción (h el pasabajo y g el pasaalto), y otro par de filtros de análisis o descomposición (\hat{h} el pasabajo y \hat{g} el pasaalto), como se muestra en la figura 1. La salida de la etapa de análisis se obtiene al partir la entrada en dos canales, aplicando la convolución de cada canal con el filtro correspondiente, y submuestreando cada canal por un factor de dos. El proceso se invierte en la etapa de síntesis, sobremuestreando cada canal por un factor de dos, aplicando la convolución de cada canal con el filtro correspondiente y sumando los dos canales [3]. Los filtros h y g se asumen filtros con respuesta finita al impulso FIR. Tal estructura es un banco de filtros con reconstrucción perfecta si los filtros son escogidos de forma que la salida de la etapa de síntesis es igual a la entrada en la etapa de análisis.

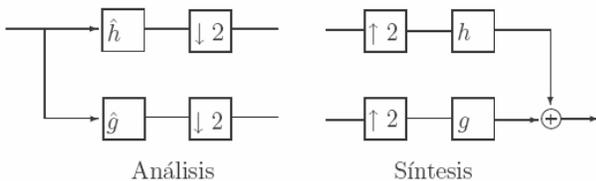


Figura 1. Forma directa de un banco de filtros de dos canales.

El filtrado se puede considerar como la proyección de la señal de entrada en un subespacio de señales con ancho limitado de banda de acuerdo a la frecuencia de corte del filtro. En el análisis de señales por banco de filtros es necesario seleccionar los filtros de tal forma que se pueda obtener una representación de la señal de entrada en términos de las proyecciones en cada uno de los subespacios generados por los filtros [2].

La implementación directa de un banco de filtros como se ilustra en la figura 1 es ineficiente, puesto que la mitad de las muestras calculadas por la convolución en la etapa de análisis son descartadas por las operaciones de submuestreo, y existen deficiencias similares en la etapa de síntesis. En la representación polifásica, el equivalente del filtrado seguido por el submuestreo se obtiene al sumar las contribuciones de las convoluciones de los

términos pares de la sucesión de entrada con los términos pares del filtro (\hat{h}_e y \hat{g}_e), y los términos impares de la entrada con los términos impares del filtro (\hat{h}_o y \hat{g}_o), tal como se observa en la figura 2.

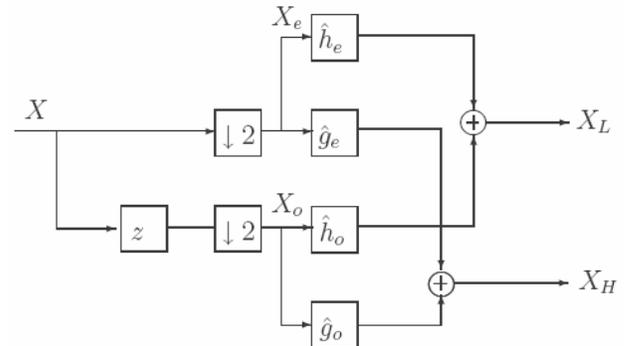


Figura 2. Estructura polifásica de un banco de filtros de dos canales para la etapa de análisis.

Al aplicar estas operaciones se obtienen las proyecciones X_L y X_H que corresponden a las proyecciones de la señal de entrada X sobre los filtros pasabajo \hat{h} y pasaalto \hat{g} . De acuerdo a la representación de la figura 2, la descomposición polifásica se puede expresar en el dominio de la transformada z y de forma matricial como [8]:

$$\begin{bmatrix} X_L(z) \\ X_H(z) \end{bmatrix} = \mathbf{P}_a(z) \begin{bmatrix} X_e(z) \\ X_o(z) \end{bmatrix}$$

donde $\mathbf{P}_a(z)$ está dada por

$$\mathbf{P}_a(z) = \begin{bmatrix} \hat{H}_e(z) & \hat{H}_o(z) \\ \hat{G}_e(z) & \hat{G}_o(z) \end{bmatrix}$$

Esta representación polifásica se muestra en la figura 3.

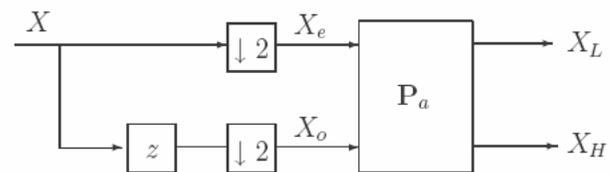


Figura 3. Representación polifásica para la etapa de análisis.

2.1. Esquemas de actualización

Los esquemas de actualización (*Lifting Schemes*) son una modificación al par de filtros con reconstrucción perfecta (h, g) que pueden ser usados para cambiar las propiedades de los filtros [6, 8, 9].

Definición:

Se dice que un par de filtros \hat{h} , \hat{g} son complementarios cuando la matriz $\mathbf{P}_a(z)$ tiene determinante 1.

2.1.1. Esquema de actualización primaria

Sean h , g complementarios. Entonces la transformada z de cualquier otro filtro finito \hat{h}' complementario a \hat{g} es de la forma

$$\hat{H}'(z) = \hat{H}(z) - \hat{G}(z)S(z^2)$$

donde $S(z)$ es un polinomio de Laurent. Usando la representación polifásica se tiene que la matriz polifásica en la etapa de análisis es

$$\mathbf{P}'_a(z) = \begin{bmatrix} 1 & -S(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}_a(z)$$

Esta operación no cambia el determinante de la matriz polifásica.

2.1.2. Esquema de actualización dual

Sean h , g complementarios. Entonces la transformada z de cualquier otro filtro finito \hat{g}' complementario a \hat{h} es de la forma

$$\hat{G}'(z) = \hat{G}(z) - \hat{H}(z)T(z^2)$$

donde $T(z)$ es un polinomio de Laurent. Usando la representación polifásica se tiene que la matriz polifásica en la etapa de análisis es

$$\mathbf{P}'_a(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -T(z) & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}_a(z)$$

Esta operación no cambia el determinante de la matriz polifásica.

Adicionalmente, cualquier par de filtros h, g se pueden descomponer en pasos de actualización primaria y dual sucesivos, como se muestra en la figura 4. Usualmente la actualización primaria se denota por $U = -S(z)$, mientras que la actualización dual se denota por $P = T(z)$.

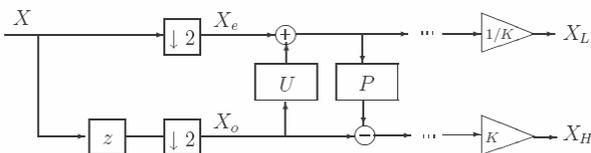


Figura 4. Esquemas de actualización primaria y dual.

3. ESQUEMAS DE ACTUALIZACIÓN ADAPTATIVOS

Los esquemas de actualización adaptativos fueron descritos por [10, 11] y se emplean para cambiar entre filtros de interpolación de alto y bajo orden en los esquemas de actualización. La razón para cambiar entre filtros mientras se procesan los datos es que aunque los filtros de orden alto son deseables para datos con variaciones pequeñas, las singularidades se verían suavizadas en los coeficientes resultantes del esquema. En la vecindad de tales irregularidades es deseable reducir el orden de interpolación o el orden del filtro, tal que estas características significantes sean registradas.

Los esquemas de actualización permiten incluir etapas adaptativas al seleccionar los filtros de actualización primaria $S(z)$ y los filtros de actualización dual $T(z)$ con algún criterio de adaptabilidad D el cual dependa de las características locales de la señal de entrada $X(z)$.

3.1. Esquema de actualización primaria adaptativo

Sea el esquema de la figura 5 en el cual la señal X_e es actualizada con el operador U con el fin de obtener los coeficientes de aproximación X_L mientras que la señal X_o es actualizada con el operador P para obtener los coeficientes de detalle X_H . En este esquema de actualización, el operador de actualización primaria U es adaptativo y depende de la decisión d tomada por el operador de decisión D , mientras que el operador de actualización dual P es fijo [7, 12].

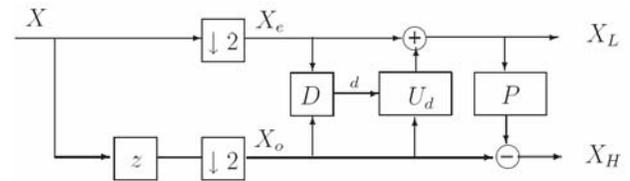


Figura 5. Esquema de actualización primaria adaptativa.

La decisión d permite cambiar entre los filtros U_0, U_1, U_2 donde cada filtro tiene un orden distinto. La forma del operador de decisión se describe en la sección 4.

3.2. Esquema de actualización dual adaptativo

El esquema adaptativo propuesto se muestra en la figura 6. La señal X_e es actualizada con la función U (actualización) con el fin de obtener los coeficientes de aproximación X_L mientras que la señal X_o es actualizada con la función P para obtener los coeficientes de detalle X_H . En este esquema de

actualización, la función de actualización dual P es adaptativa, mientras que la de actualización U es fija [10].

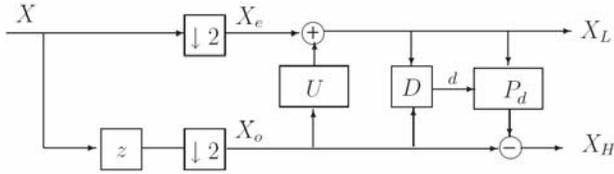


Figura 6. Esquema de actualización dual adaptativa.

De manera similar al esquema de actualización primaria, la adaptabilidad se consigue a partir de un operador de decisión D , el cual depende del valor obtenido al aplicar el criterio de adaptabilidad s (características locales de la señal). Este operador de decisión puede tomar dos o más valores, lo que permite escoger entre dos o más filtros de actualización dual. El operador de actualización U es fijo y de orden bajo.

3.3. Operador de decisión

El operador de decisión D determina el valor de la decisión en la muestra n la cual selecciona cual debe ser el operador de actualización que se debe utilizar [12, 13]. Los criterios de adaptabilidad utilizados están basados en las características locales de la señal, y realizan una transformación de \mathbb{R}^N en \mathbb{R} . Para obtener la decisión d es necesario determinar si el valor entregado por el criterio de adaptabilidad s se encuentra dentro de un rango dado por los umbrales γ y γ' . La forma generalizada de este operador de decisión D y cuyo valor de salida es d_n está dado por

$$D = \begin{cases} d_0 = 0, \gamma'_0 \leq s < \gamma_0 \\ d_1 = 1, \gamma_0 \leq s < \gamma_1 \\ \vdots \\ d_k = k, \gamma_{k-1} \leq s < \gamma_k \end{cases}$$

donde s depende de los valores de X_e y X_o y corresponde al valor entregado por alguno de los criterios de adaptabilidad de la sección 4, y los umbrales γ son seleccionados de acuerdo a

$$\gamma = \sigma_n \sqrt{2 \log_{10} n}$$

donde n es el número de valores discretizados de la norma calculada sobre el vector gradiente y σ_n es la desviación estándar del ruido.

4. CRITERIOS DE ADAPTABILIDAD

Los criterios de adaptabilidad s dependen de las características locales de la señal, los cuales se calculan

sobre una ventana de análisis de tamaño fijo o variable. El tamaño de esta ventana de análisis depende del orden del filtro o del criterio de decisión. Para obtener una medida de las características locales de la señal se tienen en cuenta momentos estadísticos y la norma sobre el vector gradiente.

4.1. Momentos estadísticos

Los momentos estadísticos dan una medida del comportamiento de la señal en la ventana de análisis que se encuentra alrededor de la muestra sobre la que se están aplicando los operadores de actualización primaria o dual.

4.1.1. Varianza

La varianza indica el valor de la divergencia de la variación de la señal con respecto a la media. Esto indica si los datos varían mucho uno contra otro. La varianza se calcula sobre una ventana de análisis variable del mismo tamaño del filtro, así

$$s = \sigma[n] = \frac{\sum_{k=-L_1}^{L_2} (x[n-k] - \bar{x})^2}{L_1 + L_2 + 1}$$

donde \bar{x} es la media de la señal sobre la ventana de análisis.

4.1.2. Energía

Una forma de calcular la energía de la señal es a través del algoritmo de Teager dado por [14]

$$s = E[n] = x[n]^2 - x[n-1]x[n+1]$$

4.2. Vector gradiente

El vector gradiente es otra forma de determinar la dinámica de cambio de la señal. La j -ésima componente del vector gradiente está dada por [7, 13]

$$v_j[n] = x_e[n] - x_o[n+j]$$

Puesto que el vector gradiente $v \in \mathbb{R}^N$ es necesario aplicar una transformación de \mathbb{R}^N en \mathbb{R} . Esto se hace al aplicar la norma sobre el vector gradiente. Se utiliza la norma definida por

$$s = \|v\|_1 = \sum_j |v_j|$$

De esta forma se puede comparar el criterio de adaptabilidad con los valores de γ en el operador de decisión D .

5. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para una señal electromiográfica proveniente del bíceps durante un movimiento de flexión. Las figuras 7 y 8 muestran los resultados obtenidos aplicando el esquema de actualización primaria adaptativo y dual adaptativo utilizando filtros de orden 2, 4, y 6, y aplicando la norma sobre el vector gradiente como criterio de adaptabilidad.

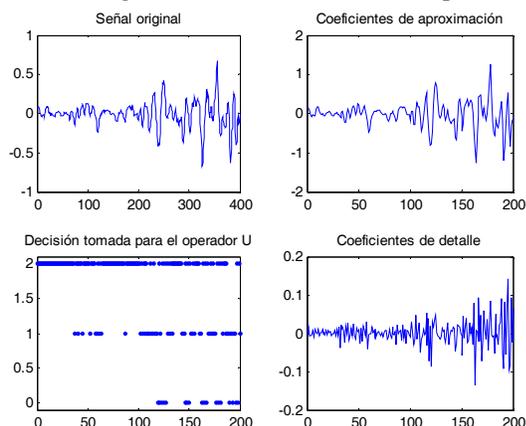


Figura 7. Descomposición de una señal EMG usando el esquema de actualización primaria adaptativo.

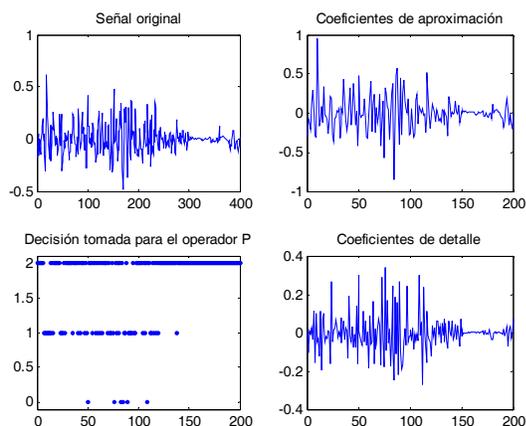


Figura 8. Descomposición de una señal EMG usando el esquema de actualización dual adaptativo.

En el cuadro inferior izquierdo de las figuras 7 y 8 se pueden observar las decisiones tomadas para cada muestra de la señal utilizada, donde la decisión $d = 0$ corresponde a la selección del filtro de orden 2, la decisión $d = 1$ corresponde al filtro de orden 4, y finalmente la decisión $d = 2$ corresponde al filtro de orden 6. Las características seleccionadas de cada nivel de descomposición son los coeficientes máximos (*modulus maxima*). Se obtienen 2 coeficientes por señal, uno para el nivel de aproximación y otro para el nivel de detalle. Se aplicó la misma metodología para un conjunto de 30 señales EMG para cada uno de los 4 movimientos seleccionados (flexión, extensión, supinación y

pronación) con sensores de superficie ubicados únicamente sobre el bíceps.

Los resultados de clasificación usando un clasificador Bayesiano se muestran en la tabla 1, para el caso de actualización primaria adaptativa con filtros de orden 2, 4, 6, y 8, utilizando como criterio de adaptabilidad la norma sobre el vector gradiente.

	Flexión	Extensión	Supinación	Pronación
Flexión	30	0	0	0
Extensión	0	30	0	0
Supinación	0	1	29	0
Pronación	0	0	1	29

Tabla 1. Resultados de clasificación para las señales EMG usando el esquema de actualización primaria adaptativa.

Los resultados obtenidos al utilizar la misma metodología con filtros de parámetros fijos de orden 2, se observan en la tabla 2.

	Flexión	Extensión	Supinación	Pronación
Flexión	25	0	5	0
Extensión	0	26	2	2
Supinación	1	0	24	5
Pronación	1	2	1	26

Tabla 2. Resultados de clasificación para las señales EMG usando filtros de orden 2 con parámetros fijos.

Los resultados de clasificación utilizando los esquemas adaptativos para los diferentes criterios de adaptabilidad se muestran en la tabla 3.

Esquema de caracterización	Criterio de Adaptabilidad	% Acierto
Actualización primaria adaptativa	Varianza	96.7
Actualización primaria adaptativa	Energía	97.5
Actualización primaria adaptativa	Norma de ν	98.3
Actualización dual adaptativa	Varianza	93.3
Actualización dual adaptativa	Energía	95.0
Actualización dual adaptativa	Norma de ν	95.8
Banco de filtros orden 2	Fijo	84.1

Tabla 3. Resultados comparativos de clasificación para las señales EMG para todos los esquemas usados.

En la tabla 3 se puede observar que los esquemas de actualización adaptativos de manera general presentan un mejor comportamiento en cuanto a porcentajes de acierto que los esquemas fijos. Además, los esquemas de actualización primaria adaptativa tienen porcentajes de clasificación superiores que los esquemas de

actualización dual adaptativa, puesto que las características de las señales EMG se encuentran en la etapa de aproximación. Por tal razón, el esquema de actualización dual adaptativa presenta mejor desempeño en aplicaciones de segmentación de señales, donde las características se encuentran en la etapa de detalle.

6. CONCLUSIONES Y ANÁLISIS

La caracterización de señales EMG utilizando banco de filtros adaptativos calculados por esquemas de actualización presentan mejores resultados en la clasificación que los esquemas con parámetros fijos. La implementación de los esquemas de actualización adaptativos puede ser hecha más eficiente que los bancos de filtros convencionales pues utiliza operaciones simples (suma, resta, máximo, etc). Esto permite mejorar la eficiencia computacional.

La selección automática de los umbrales para el operador de decisión hace que el método de caracterización sea robusto a la dinámica de cambio de las señales. Esto convierte la descomposición por banco de filtros implementados por esquemas de actualización adaptativos en un método de caracterización dinámica, el cual está completamente relacionado a las características de la señal, especialmente aquellas que se encuentran en las vecindades del dato analizado.

Para tareas específicas de caracterización sobre señales EMG, los esquemas de actualización primaria adaptativa ofrecen un mejor desempeño que los otros esquemas adaptativos pues estos mejoran la etapa de aproximación de la señal, que para el caso de estas señales es donde se encuentra la información de interés. En otras tareas, tales como la segmentación, la detección de perturbaciones y el filtrado, la utilización de esquemas de actualización dual adaptativos mejoran el desempeño de los bancos de filtros para estas tareas.

Es posible generalizar los criterios de cambio no sólo al número sino también a los coeficientes del filtro. Además, todo el desarrollo presentado en este trabajo se puede extender a la construcción de bancos de filtros por esquemas de actualización con filtros IIR. Aunque todo el desarrollo se hizo orientado a la caracterización de señales, los esquemas de actualización adaptativos pueden ser utilizados en aplicaciones de filtrado y compresión en señales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Akay, M. "Time Frequency and Wavelets in Biomedical Signal Processing," IEEE Press, 1998.
- [2] Mallat, S. "A wavelet tour of signal processing", Academic Press - Elsevier, 1999.
- [3] Strang, G., Nguyen, T., "Wavelets and Filter Banks," Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, MA, USA, 1996.

- [4] Claypoole, R., Davis G., Sweldens, W., Baraniuk, R. "Nonlinear wavelet transforms for image coding," Proceedings 31st Asilomar Conf. Signals Systems, Computers, vol. 1, pp. 662-667, 1997.
- [5] Shui, P., Bao, Z., "Recursive biorthogonal interpolating wavelets and signal adapted interpolating filter banks," IEEE Transactions on Signal Processing, 48:2585-2593, 2000.
- [6] Sweldens, W. "The lifting scheme: A construction of second generation wavelets". SIAM, J Math. Vol. 29, pp. 186-200, 1996.
- [7] Piella, G., Heijmans, H., "Adaptive lifting schemes with perfect reconstruction," IEEE Trans. Signal Processing, 50(7):2204-2211, Julio 2002.
- [8] Daubechies, I., Sweldens, W. "Factoring wavelet transforms into lifting steps," Journal of Fourier Analysis and Applications, 4:247-269, 1998.
- [9] Jensen, A., Cour-Harbo, A. "Ripples in Mathematics: The discrete wavelet transform," Springer, 2001.
- [10] Claypoole, R., Baraniuk, R., Nowak, R. "Adaptive wavelet transform via lifting," Proc. IEEE Int. Conf. Acoustic, Speech, Signal Processing, Seattle, WA, 1998.
- [11] Claypoole, R., Baraniuk, R., Nowak, R. "Lifting constructions of nonlinear wavelet transforms", in proc. IEEE, Int Symp. Time Frequency Time Scaling analysis, pp. 49-52, 1998.
- [12] Heijmans, H., Pesquet-Popescu, B., Piella, G. "Building nonredundant adaptive wavelets by update lifting," Applied and Computational Harmonic Analysis, pp. 252-281, 2005.
- [13] Piella, G. and Pesquet-Popescu, B., "Adaptive wavelet decompositions driven by a weighted norm of the gradient," In Proc. 3rd IEEE Benelux Signal Processing Symposium (SPS-2002), Belgium, 2002.
- [14] Kaiser, J., "On a simple algorithm to calculate the energy of a signal," Proc. IEEE ICASSP, Albuquerque, 1:381-384, 1990.