

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月7日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560415

研究課題名（和文） 全域通過・多次元・可変非整数遅延フィルタの安定性保証と高精度画像補間

研究課題名（英文） Stability Guarantee of All-Pass Multi-Dimensional Variable Fractional-Delay Filter and High-Accuracy Image Interpolation

研究代表者

伊藤 登（ITO NOBORU）

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：00237041

研究成果の概要（和文）：

デジタル画像を構成する画素数はしばしば変更する必要がある。例えば、デジタルカメラのズーム機能を実現するために画像補間による解像度変換が要求される。従来の画像補間では、線形補間、2次と3次多項式による補間が主流であったが、解像度変換後の画像の画質が著しく劣化してしまう。本研究では、高精度画像補間を実現するため、全域通過型・多次元・可変非整数遅延フィルタに基づく高精度画像補間法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Image interpolation is required in various digital signal processing (DSP) applications. For example, if one wants to increase the resolution of an image, an image interpolator must be used to interpolate the image. A practical example is the zooming operation used in digital camera, where the image resolution is to be frequently adjusted. In this research, we developed a new interpolation technique that utilizes a new type of digital filter called variable fractional-delay (VFD) filter to achieve high-accuracy image interpolation. As long as an accurate all-pass VFD filter can be designed, more accurate image interpolation than the conventional methods like linear interpolation and cubic interpolation can be achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：可変非整数フィルタ、全域通過フィルタ、安定性保証、画像補間

## 1. 研究開始当初の背景

デジタル画像を構成する画素数はしばしば変更する必要が生じる。例えば、画像の一部を切り出し、その画像を拡大し、その画像の解像度を増やして画像の細部までもっと細かく見てみたい。このような操作は解像度変換とも呼ばれる。このような解像度変換の過程で画質の劣化が生じてしまう。これまでに種々の解像度変換法が提案されているが、線形補間、2次多項式と3次多項式補間による手法が主流であった。多項式補間を用いれば、与えられたデジタル画素の任意中間点における画素を補間によって得ることができるが、解像度変換後の画像の画質が著しく劣化してしまう。それは周波数領域でこの問題を考える場合、補間多項式の周波数特性は理想の sinc 関数の周波数特性から大きく外れているからである。補間の精度を上げるため、多項式の次数を高くしなければならないが、空間領域で再生画質と多項式の係数に対する制約条件を見つけることは極めて困難であるため、現時点では、有効な解決法が見当たらない。

## 2. 研究の目的

画像補間に補間器が必要である。周波数領域で考えると、その補間器の周波数特性はどれほど理想の補間器 (sinc 関数) の周波数特性 (理想の低域通過フィルタの特性) に近いかが重要である。本研究では、従来の空間領域の多項式補間で実現できなかった画像の高精度補間を実現するため、全域通過・多次元・可変非整数遅延 (VFD) デジタルフィルタの最適設計法を開発し、フィルタリングという新しい補間手法の確立を目指す。高精度の全域通過 VFD フィルタを設計できれば、高精度・低コストの画像補間が可能となる。

## 3. 研究の方法

本研究は従来のアプローチ (空間領域での多項式補間) と違って、周波数領域で可変非整数遅延 (VFD) 特性をもつ全域通過可変フィルタを設計し、高速フィルタリングを行って画像の高精度補間を目指す。VFD フィルタには FIR 形と全域通過形のものがあるが、本研究の目的は更に高精度・低演算量・低実現コストの画像補間が可能となる全域通過 (all-pass) VFD フィルタの最適設計法を開発し、画像の高精度補間を実現する。全域通過 VFD フィルタを用いれば、従来の FIR 形 VFD フィルタより非常に低い次数で高精度・低コ

ストの画像補間が可能となる。また、多次元全域通過 VFD フィルタを実現するため、1次元全域通過 VFD フィルタの設計は基本となる。画像のような多次元信号の補間を行う際に、それぞれの方向にそって個別に補間を行えば多次元信号の補間も可能となる。つまり、高精度の1次元全域通過 VFD フィルタの最適設計法を確立できれば、多次元全域通過 VFD フィルタは複数の1次元全域通過 VFD フィルタの縦続接続と考えることができ、画像のような多次元信号の高精度・高速・低コスト補間を実現できる。

## 4. 研究成果

全域通過 VFD フィルタの最適設計問題は非線形最適化問題であるため、如何にこの非線形問題を線形化してから設計を行うかが重要である。本研究では、主に2つの新しい設計法を提案し、設計例を用いてそれぞれの有効性を実証した。1つ目は全域通過 VFD フィルタの可変周波数応答の誤差関数を線形化してから可変周波数応答の誤差の最大絶対値誤差を最小化する設計法を提案した。この設計法は minimax 設計法と呼ばれ、得られた可変周波数応答誤差は準等リップルとなる。この minimax 設計を行うため、全域通過 VFD フィルタの minimax 設計問題をよく知られている線形計画法 (linear programming: LP) による LP 問題に帰着させることができ、LP 手法を用いて設計を行った。その結果、従来の最小自乗 (least squares: LS) 設計法や重み付き最小自乗 (weighted least squares: WLS) 設計法より非常に平坦な可変周波数応答誤差が得られた。つまり、従来の LS 設計法と WLS 設計法より可変周波数応答の最大絶対値誤差を抑えることができた。この研究成果は情報科学の分野での一流国際学会誌 IEEE Trans. CAS-I: Regular Papers に掲載された。

もう1つの設計法は全域通過 VFD フィルタの可変周波数応答誤差の自乗誤差を最小化しながら、VFD 誤差の最大値 (Peak Value) を抑える設計法である。この方法では、著者が可変周波数応答誤差の自乗誤差と VFD 応答の自乗誤差の組み合わせによる複合誤差関数を導入し、その相対的な重みを調整することによって、できる限り可変周波数応答誤差の自乗誤差を大きくせず VFD の誤差を抑えた。また、全域通過 VFD フィルタの高速演算と低コストを実現するため、次数の最適化アルゴリズムと VFD の可変最適範囲を最適化アルゴリズムを提案した。設計例を用いて従来の様々な設計法との比較を行い、この複合誤差による設計法の有効性を実証した。この研

究成果も情報科学の分野の一流学会誌 IEEE Trans. CAS-I: Regular Papers に掲載された。

上記の全域通過 VFD フィルタは再帰形可変フィルタであるため、その安定性保証が不可欠である。LP 設計法では、安定条件を付加することで設計した全域通過 VFD フィルタの安定性は必ず保証される。また、複合誤差関数による設計法では、理想の位相仕様を非常に精度よく近似できるため、得られた全域通過 VFD フィルタの安定性が保証される。これは得られた全域通過 VFD フィルタの極分布を調べ、すべての極が単位円の中にあることが分ったからである。要するに、本研究で提案した全域通過 VFD フィルタの安定性は必ず保証されている。

更に、全域通過 VFD フィルタとの比較を行うため、本研究では、FIR 形の VFD フィルタの新しい設計法を提案し、それらの結果も IEEE Trans. CAS-I: Regular Papers と IEEE Trans. CAS-II: Express Briefs に掲載された。

結論として、本研究では、著者は精力的に全域通過 VFD フィルタの最適設計法を多数開発し、その研究成果を世界のトップの論文誌に掲載され、非常に満足できる研究成果が得られたと確信している。このような高精度の全域通過 VFD フィルタの最適設計法を開発することによって高精度・低コスト・高速 VFD フィルタリングを実現でき、画像のような多次元信号の高精度補間を実現できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① T.-B. Deng, “Minimax design of low-complexity even-order variable fractional-delay filters using second order cone programming,” IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs, vol. 58, no. 10, pp. 692-696, Oct. 2011. 査読有 DOI: 10.1109/TCSII.2011.2164160

② T.-B. Deng, “Decoupling minimax design of low-complexity variable fractional delay FIR digital filters,” IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular Papers, vol. 58, no. 10, pp. 2398-2408, Oct. 2011. 査読有 DOI: 10.1109/TCSI.2011.2123510

③ T.-B. Deng, “Closed-form mixed design

of high-accuracy all-pass variable fractional-delay digital filters,” IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular Papers, vol. 58, no. 5, pp. 1008-1019, May 2011. 査読有

DOI: 10.1109/TCSI.2011.2089558

④ T.-B. Deng, “Minimax design of low-complexity allpass variable fractional-delay digital filters,” IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular Papers, vol. 57, no. 8, pp. 2075-2086, Aug. 2010. 査読有

DOI: 10.1109/TCSI.2009.2037407

[学会発表] (計 8 件)

① T.-B. Deng, “Low-complexity and high-accuracy odd-order variable fractional-delay digital filters,” Proc. the 37th (2012) IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (IEEE ICASSP 2012), vol. 1, pp. 1589-1592, Kyoto, Japan, Mar. 29, 2012.

② T.-B. Deng, “Odd-order variable fractional-delay filters with generalized polygonal constraints,” Proc. 8th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (IEEE ICICS 2011), FMI.3-P0108.pdf, Singapore, Dec. 16, 2011 (最優秀論文賞受賞論文).

③ T.-B. Deng, “Accurate minimax design of variable fractional-delay filters using linearized octagonal constraints,” Proc. 19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2011), pp. 1534-1538, Barcelona, Spain, Sept. 1, 2011.

④ T.-B. Deng, “Simple minimax design of variable fractional-delay filters using linear programming,” Proc. 2011 3rd International Conference on Signal Acquisition and Processing (ICSAP 2011), pp. 22-25, Singapore, Feb. 27, 2011.

⑤ T.-B. Deng, “Efficient design of two-dimensional diamond-shaped filters,” Proc. 2010 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (IEEE ISPACS 2010), pp. 193-196, Chengdu, China, Dec. 6, 2010.

⑥ T.-B. Deng,

“Wide-band length-6 cubic interpolator,”  
Proc. 2010 IEEE International Symposium  
on Circuits and Systems (IEEE ISCAS 2010),  
pp. 445-448, Paris, France, May 31, 2010.

⑦ T.-B. Deng, “Farrow structures using  
different transformation matrices,”  
Proc. the 2nd International Conference on  
Computer Engineering and Applications  
(ICCEA 2010), vol. 1, pp. 33-36, Bali  
Island, Indonesia, Mar. 20, 2010.

⑧ T.-B. Deng, “Multidimensional  
filtering approach to high-resolution  
image interpolation,”  
Proc. 2009 International Technical  
Conference on Circuits/Systems, Computers  
and Communications (ITC-CSCC 2009),  
vol. 1, pp. 123-126, Jeju, Korea, Jul. 7,  
2009.

[その他]

IEEE ICICS 2011 の最優秀論文賞受賞

<http://www.lab.toho-u.ac.jp/sci/is/deng>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 登 (ITO NOBORU)

(T.-B. Deng)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：00237041

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし