

## 論文の内容の要旨

論文題目 Nonlinear Digital Signal Processing Oriented for Hardware Implementation and Its Applications to Image Communication  
(和訳 ハードウェア化に適した非線型デジタル信号処理とその画像通信への応用)

氏名

渡部 宏 明

画像信号をはじめとする実際の信号は急峻に変化する成分を持つ非定常・非ガウス性であることから、雑音除去などのフィルタ処理には非線形デジタル信号処理が適している。しかし、一般に非線形デジタルフィルタは広く用いられている線形デジタルフィルタと比較して処理が複雑であり、その実装にあたっては既存の線形信号処理を主目的としたハードウェアでは処理速度の面で問題となることが多い。また高速化のために非線形アルゴリズムの専用 LSI 化が必要となると、システム構成の柔軟性、ハードウェア化への開発コストといった観点から好ましくない。したがって、マルチメディア端末の各家庭・職場への普及や小型な携帯機器などへの搭載に向けて、現在用いられている信号処理専用プロセッサ (DSP: Digital Signal Processor) とコスト・消費電力などの点でほぼ同等でありながら、多様な信号処理を実現する方法を確立することが必要である。

本研究では現在主流となっている線形デジタルフィルタを非線形的に拡張した構造で実現される、ハードウェア化に適した非線形デジタルフィルタの構成

を提案する。次にこの非線形デジタルフィルタの画像通信への応用例を示し、さらに既存のハードウェア技術をもとに実用レベルを踏まえた上での実装化を行う。

図1は線形フィルタ演算が非線形関数によって接続された構成を持つ非線形フィルタで、これを非線形-線形組み合わせ型デジタルフィルタと呼ぶ。この構成はニューラルネットワークをはじめ多くの非線形フィルタの一般型を表すものである。こうした非線形システム的设计では自由度が大きくその最適化は非常に困難である。そこで、このフィルタの基本要素を定め、この基本要素に基づいて非線形-線形組み合わせ型フィルタの構成を検討する。

この基本要素に、信号処理において一般的に要求されるエッジを保存しながら雑音を除去する機能を持つε-フィルタを取り入れる。ε-フィルタは $x(n)$ を入力、 $y(n)$ を出力とすると、非線形関数 $F$ を用いて

$$y(n) = x(n) + \sum_{k=-N}^N a_k F(x(n-k) - x(n)),$$

$$|F(x)| \leq \varepsilon \quad : \quad -\infty \leq x \leq \infty$$

で与えられ、非線形-線形組み合わせ型デジタルフィルタに含まれる構成を有する。このε-フィルタ演算のハードウェア構成に着目すると図2のように表され、一般的な線形フィルタとの違いは乗算器の前段に非線形変換器 $F$ と減算回路が入っている点だけである。したがって、広く利用されている線形フィルタ演算を行う場合には変換回路をコントロールして出力特性を線形に切り替えるだけでよい

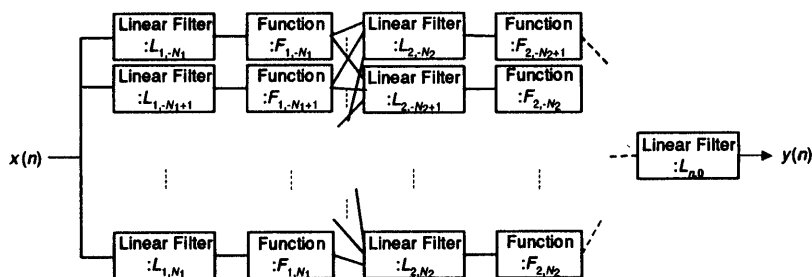


図1 非線形-線形組み合わせ型デジタルフィルタの一般型

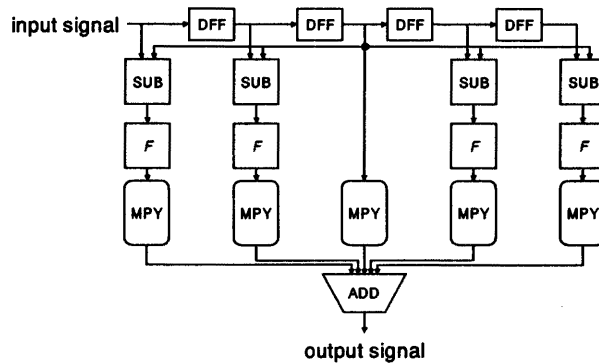


図2  $\epsilon$ -フィルタのブロック構成図

ため、新たなハードウェアの追加はわずかである。この性質は DSP のアーキテクチャと同様にひとつの減算、非線形変換、積算をパイプライン化してコアを構成した場合も同様にあてはまる。このように従来の線形演算の構成に非線形演算器を拡張した構造を有するプロセッサを非線形デジタル信号処理プロセッサと呼び、この構成で実現できるフィルタを以下での非線形-線形組み合わせ型フィルタの基本要素とする。

この基本要素を複数用いた非線形-線形組み合わせ型フィルタとしてカスケード型・成分分離型の2通りの構成を検討する。

まず図3に示すように前段、後段のフィルタがそれぞれ線形あるいは非線形のフィルタで接続された Cascaded Nonlinear (CN) フィルタを考える。非線形フィルタではカスケード接続した場合、それぞれの層で異なる働きを持たせることが可能である。例として線形歪み及び加法性ガウス雑音によって劣化した信号の推定問題を考える。従来の Wiener フィルタなどの MSE (Mean Square Error) を最小化する線形フィルタでは、原信号の非定常性に関しては考慮されない。そこで、CN フィルタでは、推定問題を劣化過程の復元と雑音除去の2種類の問題と捉え、カスケード接続された2つのフィルタがそれぞれの役割を担うように設計し、急峻な変化成分を持つ信号に対しての復元特性の改善を図った。

各段のフィルタ係数の設計にあたっては CN フィルタ全体をひとつの多層ネットワークモデルで表すことが可能であることから、Back Propagation アルゴリズム

を用いた最適化手法を適用した。また非線形関数に対しては区分線形関数によって近似し、同様に学習による最適法を用いた。図4の1次元信号に対する実験結果より、信号の復元推定が非線形基本要素のカスケード構成により向上していることがわかる。

次に、フィルタ基本要素によって信号を分離する Component Separating (CS) フィルタの構成を考える。CS フィルタは図5(a)に示すように入力信号を非線形フィル

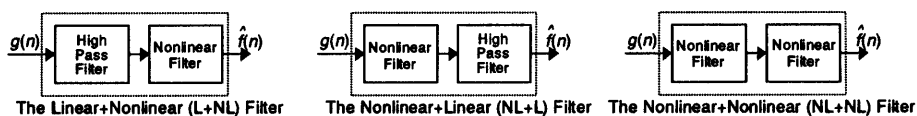


図3 CN フィルタの構成

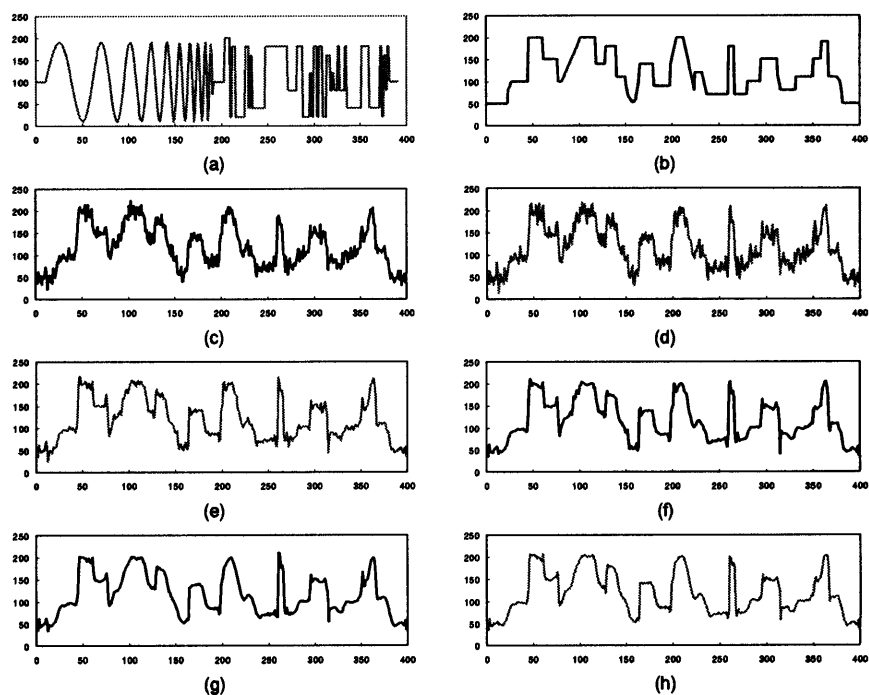


図4 CN フィルタによる実験結果 (a) トレーニング信号、(b) 原信号、(c) 入力劣化信号 (MSE = 134.8)、(d) 最適線形フィルタ (MSE = 187.0)、(e) 最適非線形フィルタ (MSE = 97.6)、(f) CN フィルタ(NL+L) (MSE = 83.1)、(g) CN フィルタ(L+NL) (MSE = 74.6)、(h) CN フィルタ(NL+NL) (MSE = 62.9).

タの出力信号とその入力信号との差分信号に分割する非線形成成分分離器(NSS: Nonlinear Signal Separator)を用いて、図 5(b)のように信号を複数の成分に分割し、その分割された各成分に対して異なるフィルタで信号処理を行う構造になっている。この信号成分の分離により、入力信号中に含まれる特定の成分のみの除去や保存といった信号処理が可能になる。

図 6 は NSS を 3 層用いて信号を分離した例である。ε-フィルタの非線形関数  $F$  に閾値型の形状を利用して信号を分離すると一定振幅以下の高周波成分の抽出が可能である。そこで NSS を図 6(a)のように接続し、各 NSS で抽出する振幅成分を変えると、図 6(b)の各分離信号成分の出力結果に見られるように周波数のみでなく振幅の大きさにも依存した信号成分の抽出が可能である。

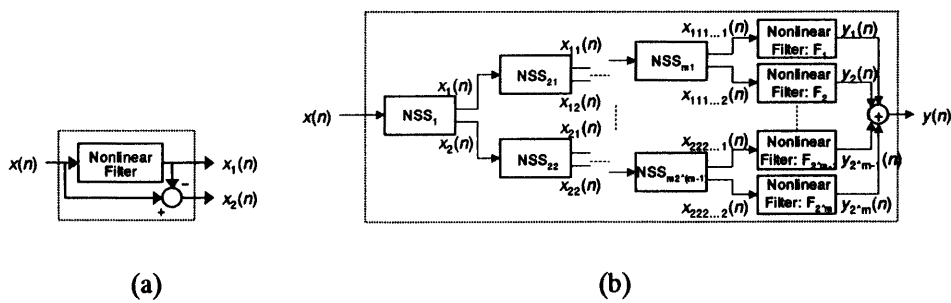


図 5 CS フィルタの構成 (a) 非線形成成分分離器 (b) CS フィルタの一般型

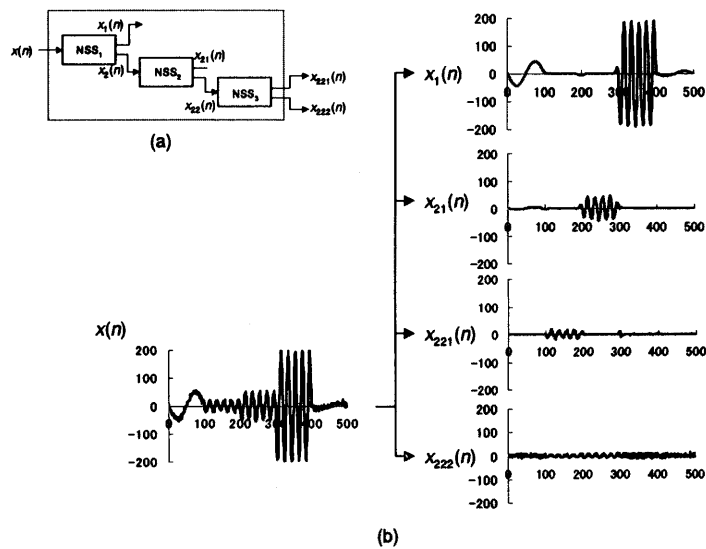


図 6 多層 NSS 構成の例 (a) 多層 NSS の構成 (b) 多層 NSS の出力結果

以上の非線形-線形組み合わせ型フィルタの構成をもとに画像通信における3種類の応用例を提案する。

最初に基本要素の $\epsilon$ -フィルタを JPEG、MPEG などの離散コサイン変換を用いて圧縮符号化された画像に生じる歪みの除去を行う方法を示す。ブロック符号化による歪みにはブロック間及びブロック内で生じる2種類の雑音があり、いずれの場合も画像の平坦領域における微小変化は目立ちやすいという視覚効果に起因して目障りなものとなっている。そこで復号された画像の局所領域における分散値から評価した雑音の大きさと処理する画素のブロック内における位置に応じて $\epsilon$ -フィルタの非線形関数の形状を適応的に変化させ、平滑化する振幅成分の大きさを制御するフィルタを設計した。実験の結果、図7に示すように主観的評価、客観的評価の双方で大きな画質の改善が得られた。

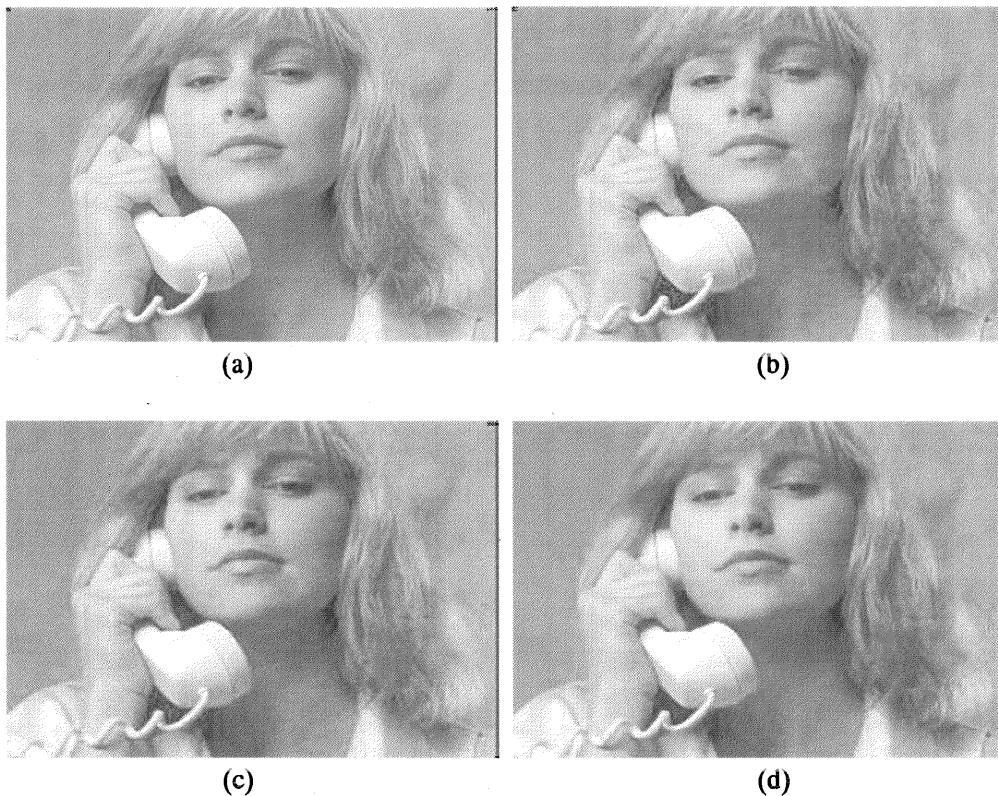


図7 ブロック雑音除去処理結果 (a) 原画像、(b) 入力劣化画像 (JPEG 符号化 bit rate = 0.367bit/pixel, PSNR = 33.23 dB)、(c) 3×3 ガウシアンフィルタ (PSNR = 33.61 dB)、(d) 提案手法 (PSNR = 34.00 dB)

次に CN フィルタを用いた例として劣化した画像の復元処理法を示す。CN フィルタを構成する非線形フィルタの係数を人間の視覚効果を反映するようにフィルタ窓内での位置、入力信号値との差分値、及び局所分散の3つのパラメータに依存するように選択し、各係数の非線形関数の形状を学習させて設計した。実験より図8にみられるように、CN フィルタによって MSE の向上が確認された。また、主観的評価においては後段に非線形フィルタを接続した CN フィルタにおいて優れた結果が得られた。

3 番目の応用例は顔画像処理である。従来、通信システムにおいては送り手側の持っている情報をいかに正確に受けて側に伝えるかが性能として問われた。しかしテレビ電話、ビデオ会議などの顔画像通信システムでは、人間の心理を考慮する必要がある。すなわち、人間誰しも自分の顔をできるだけ美しくみせたいと

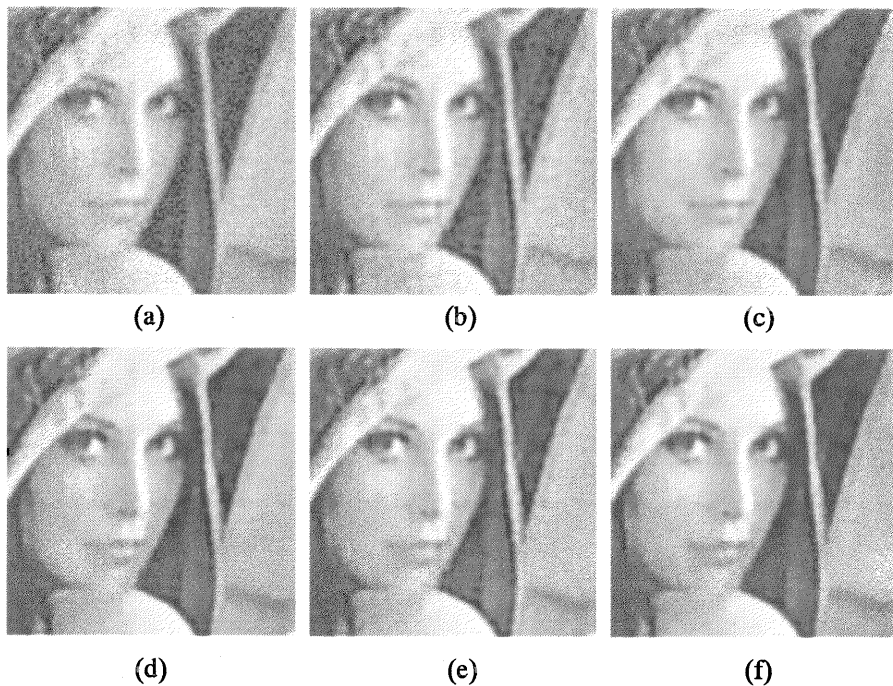


図8 画像修復処理結果 (a) 入力劣化画像 (MSE = 192.48)、(b) 最適線形フィルタ(MSE = 113.72)、(c) 最適非線形フィルタ (MSE = 104.09)、(d) CN フィルタ(NL+L) (MSE = 99.38)、(e) CN フィルタ(L+NL) (MSE = 95.83)、(f) CN フィルタ(NL+NL) (MSE = 95.74)

いう欲求があるため、自分の顔を美観化して相手方に伝えるシステムへの需要が高まると考えられる。そこで顔画像において心理的欲求上望ましくない肌の皺やしみに、にきびや湿疹といった成分を隠すことを目的に、非線形フィルタを利用した。

一般に顔を主体とした画像において不必要な成分は肌などの平坦部における小さな変化である。一方で、人間の自然な肌の質感には微弱な振幅成分が重要である。そこで、輪郭及微弱な振幅の信号成分を保存しながら小振幅成分を除去するCSフィルタを設計し顔画像に適用した。また、入力画像の肌部以外の領域において歪みが加わらないことが望ましいことから、カラー入力画像に対しては肌色領域検出によって処理領域を抽出した。図9に示される実験結果から、元の顔画像の表情を十分に残しながら不必要な成分が自然に除去され、自然な顔画像の美観化が可能であることが明らかになった。

こうした応用例から、提案した非線形フィルタ構成が画像通信の前処理および後処理の双方で有用であることを確認した。

最後に提案した線形-非線形組み合わせ型デジタルフィルタを、実際のデジタルカメラでの利用をふまえてDSPへの実装作業を行った。一般に携帯型ディジ

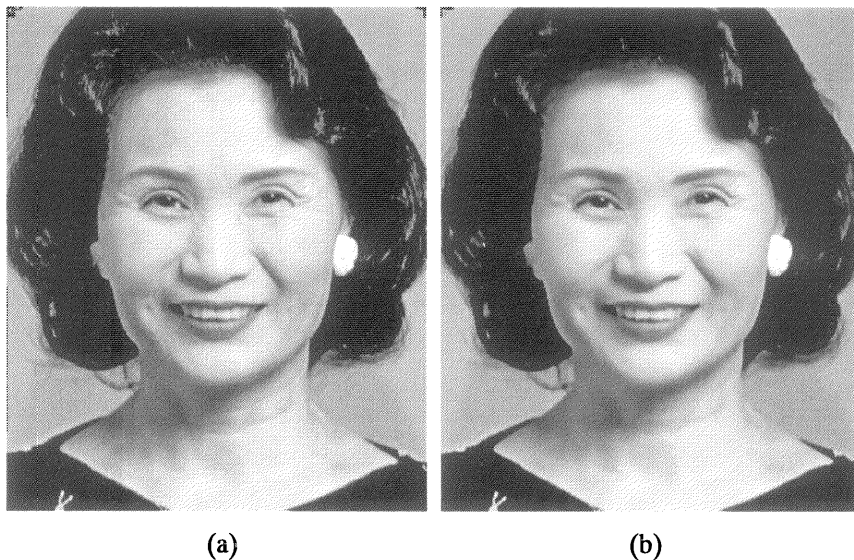


図9 顔画像美観化処理結果, (a) 原画像, (b) CSフィルタによる処理結果



デジタルカメラ用 CCD で撮影した画像では画素間の色補間処理等に伴って画像の鮮明さが失われるため、それを補正するエッジ強調処理が必要となる。そこで CN フィルタの構成を利用してエッジ強調を主な目的とした非線形フィルタを、撮影した画像データを JPEG ファイルに変換するパイプライン処理部に図 10 に示すように導入した。

実装にあたっては Texas Instruments 社製のデジタルスチルカメラ用プロセッ

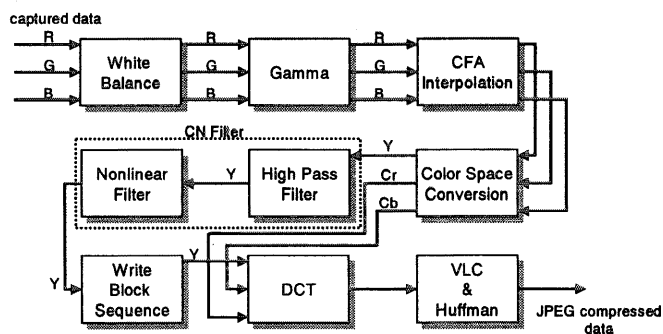
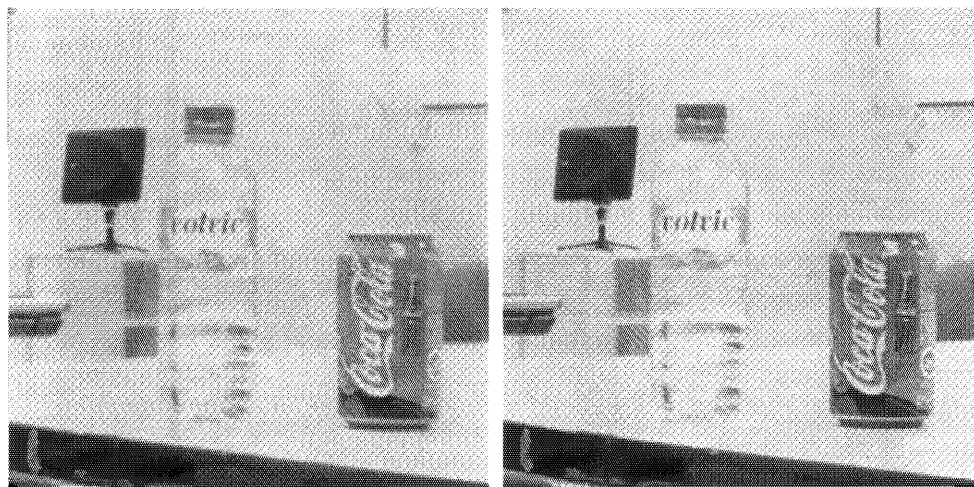


図 10 デジタルカメラ用パイプライン処理のブロック構成図



(a)

(b)

図 11 TMS320DSC21EVM によって撮影された JPEG 画像 (a) フィルタ処理を含まないパイプラインでの処理結果 (b) CN フィルタによる処理を含むパイプラインでの処理結果

サ TMS320DSC21 の評価ボードを用いた。この TMS320DSC21 は TMS320C5000 シリーズの DSP とハードウェアエンジン及びコントロール用 RISC を持つ低消費電力型プロセッサであり、処理能力は 500MIPS である。実際のコード設計ではハードウェアエンジン部を用いることにより、フィルタ処理全体の高速化を行った。実験では画素数 1280×960 の CCD カメラを接続して撮影を行い、処理結果の評価を行ったところ図 11 の例のように JPEG で高圧縮化された画像においても画質の鮮明化が確認された。また、全パイプライン処理に要するシャッター間スピードは約 1.5 秒と実用的な範囲で実現することができた。

以上、情報・通信分野において求められる「心地よいコミュニケーション」に必要な信号処理として非線形-線形組み合わせ型デジタルフィルタを提案し、その構成と画像通信への応用例、及び DSP による実装例を示した。実装例に示されるように提案した非線形デジタルフィルタは演算量を大きく増加させることなく実現可能であり、今後のマルチメディア通信において求められる多様なアプリケーションを処理する手法として有用であると期待される。