

# 医療機器を支える最新アナログ技術 最先端の課題とソリューションが続々登場

2008年6月25日(水)に「アナログ技術フォーラム2008」(日経エレクトロニクス主催)が東京コンファレンスセンター(東京都港区)で開催された。今回のテーマは、「エレクトロニクスが医療を変える」。医療機器の高度化に伴って、微弱な信号を取り扱うアナログ・フロントエンド部分の重要性がかつてないほど増していることから今回のテーマが選ばれた。特に近年、アナログのデバイス技術の進化によって新たな医療機器が続々と生まれていることから、今回は医療機器の進化を支える先端アナログ技術が数多く登場した。



アナログ技術フォーラム2008では、医療機器ベンダーの立場からオールエフの丸山次郎代表取締役社長、半導体研究および回路研究の立場から群馬大学大学院工学研究科の小林春夫教授と東京工業大学大学院理工学研究科の松澤昭教授、デバイス・メーカーの立場から米Analog Devices, Inc. Healthcare Segment DirectorのPatric O'Doherty氏、ナショナルセミコンダクタージャパンマーケティング本部データコンバージョン&アンプリファイアプロダクト担当課長の山口登氏、米Texas Instruments, Inc. Medical and Hi-Reliability Product GroupでAnalog design engineerを務めるHarish Venkataraman氏、そしてアナログおよびミックスド・シグナルLSI設設用EDAソフトウェアを提供しているシルバコ・ジャパンのIvan Pesic代表取締役社長が登場した。

ここでは、オールエフ丸山社長、群馬大学小林教授、東京工業大学松澤教授の講演を要約して紹介する。他の講演については別頁の抄録を参照いただきたい。

## 体内を巡る小型医療機器を開発

オールエフの丸山社長は「カプセル内視鏡を進化させるエレクトロニクス技術」

と題して講演した。オールエフは長野市に拠点を置く医療機器メーカーで、本講演で触れた小型のカプセル内視鏡のほかに、デジタルX線センサーや口腔内カメラなどを開発している。このうち同社の口腔内カメラは世界シェアの85%を獲得しているという。国内でも同社のブランド認知度は徐々に高まっている。

今回テーマに取り上げたカプセル内視鏡は、患者に負担を与えずに消化器を詳しく診断できる方法として、健康診断市場を中心に最近注目を集めている診断機器のひとつだ。年間で2500万個の市場規模があると予想されている。

同社のカプセル内視鏡(製品名「Sayaka」)は、カプセルの円筒部分にカメラが組み込まれている。このカプセルを口から体内に入れると、カメラを回転させながら消化器の中を進み、小腸と大腸の全長約8メートルにわたる腸壁の画像をくまなく撮影する。この画像を基に腸壁を詳細に観測することができる。小さなカプセルは、ステッピングモーターに似た回転機構を備えており、15度ずつ回転しながら、腸の蠕動(ぜんどう)運動によって時速約1メートルの速度で消化管の中を進む。その間におよそ87万枚の画像を撮影し、その画像データは、



オールエフ  
代表取締役社長  
丸山次郎氏

周波数変調を施した周波数1GHz前後の電波を使って体外に送信する。

回転の発生と画像の撮影および送信に必要な電力は、外部から電磁誘導を使って供給する。現状のSayakaの場合、回路全体の消費電力はおよそ35mW。電磁誘導の状態によってコイルに誘起される電圧が大きく変動するため、電源レギュレータも内蔵している。

送出された画像はパソコン上でタイリング処理を施して、消化管を横に広げたような8メートル分の横長の画像を作成する。このデータを利用して、医師は必要な箇所を拡大して詳しく観察することができるうえに、定期的に撮影した画像を比較して変化を捉えることもできる。「医師は、自然な状態の患者を診断したいと考えています。カプ

セル内視鏡は診断者に与えるストレスが少ないうえに、きわめて微細な画像を消化管の全長にわたって取得できるため、医療機関から高い評価をいただいています」(丸山氏)。

このカプセル内視鏡の技術を応用して同社は、小児用のカプセル内視鏡(φ5.5mm)や、カテーテルサイズの血管センサー(φ0.5mm~1.5mm)も開発中である。

### 「アナログ・ミニマム」が重要

群馬大学の小林春夫教授は、「新世代アーキテクチャがアナログ・デバイスを変える」と題して、半導体プロセスやアナログ回路技術の進化について講演した。

半導体プロセスの微細化に伴って、デジタル回路は、動作の高速化、消費電力の低減、チップの小型化、さらには高集積化が進んできた。しかし、アナログ回路に同じように微細化のトレンドを適用すると、短チャネル効果、狭チャネル効果、スレッショルド電圧のミスマッチなど数々の問題が浮上する。つまりナノ領域に入った半導体プロセスの微細化は、デジタル回路にこそ様々な恩恵を与えるものの、アナログ回路では必ずしも恩恵を受けられない。そこで、デジタル技術を活用してアナログの機能や性能を補完する、「デジタル・リッチ+アナログ・ミニマム」という構成がこれからは重要になると述べた。

そのようなアーキテクチャの例として、 $\Delta\Sigma$ (デルタシグマ)型A-D変換器および $\Delta\Sigma$ 型D-A変換器、逐次比較型A-D変換器、デジタルPLL(phase locked loop)。

デジタルPWM(pulse width modulation)、デジタル制御電源、デジタル制御スペクトル拡散クロックなどの技術を紹介した。

一方で、このような構成には課題も存在する。たとえば、アナログ回路の非線形性をデジタル回路で補正するシステムの場合、アナログ部分に仕様ぎりぎりの不良があっても、出荷時テストではデジタル補正によって良品と判定され、その後市場で不良が顕在化する恐れがあるというものだ。そのため、テスト回路やテスト手法が重要になってくる。

続いてアナログ技術の医療応用について述べた。医療機器が取り扱う人体の信号は、基本的にすべてアナログ信号である。したがって、診断装置の入力段には、計測工学の考え方を応用したセンシング技術や、微弱な信号を取り扱える高度なアナログ回路が必要となる。また、信頼性や安全性の要件が厳しいといった、この分野特有の課題も存在する。「医療機器に向けたアナログ技術における「壁」は常に高いはず。今後は、CMOSプロセスの微細化を背景に、「デジタル・アシスト・アナログ技術」という考え方が一層重要になってくるでしょう」(小林氏)。

### 理論限界に向かうA-D変換器

東京工業大学の松澤昭教授は「A/D変換器の進化は、どこへ向かうのか」と題して、A/D変換器の主要なアーキテクチャとその性能限界について述べた。

まず、現在主流となっているパイプライン型A-D変換器を取り上げた。パイプライン型は、入力信号を参照電圧(基準電圧)と比較する単位変換回路を従属的に接続した方式だ。分解能は10ビットから14ビット、サンプリングレートは数十MHzから200MHz程度が一般的である。A-D変換の精度はそれぞれの段を構成するオペアンプの精度に依存するが、半導体プロセスの微細化によって、必要な利得が得られないといった問題や、ノイズフロアが存在するためコンパレータの感度を確保できないという問題が顕在化しつつある。「半導体の微細化は、とくにパイプライン型のA-D変換器



東京工業大学  
大学院理工学研究科  
電子物理工学専攻教授  
松澤昭氏

には逆に不利に働いてしまいます。いま誰もが苦勞しているのが実状です」(松澤氏)。

このためパイプライン型A-D変換器に代わって、逐次比較型(SA型)A-D変換器に注目が集まっている。逐次比較型は、スイッチ、キャパシタ、コンパレータのみで回路を構成でき、オペアンプを必要としない。そのため微細化の影響を受けにくい。また、定常電流が流れないため消費電力が小さいというメリットもある。欠点としてはNビットの変換にN+2クロックが必要になることだが、いまや回路の高速化で吸収できるようになってきた。

A-D変換器の全体性能を表す指標としてFoM(Figure of Merit)が広く用いられている。FoMは、消費電力を変換周波数と実効変換ステップの積で除した値である。半導体の分野で重要な国際学会ISSCC(International Solid-State Circuit Conference)で発表された逐次比較型A-D変換器のFoMをみていくと、2005年には1pJ(ピコジュール)/conversionが最低だったが、2008年には理論値に近い4.4 fJ(フェムトジュール)/conversionという値が達成されるまでになっている。

松澤氏の研究室では逐次比較型回路の小型化に取り組んでおり、試作レベルだが、分解能10ビットで1 MSPSの回路IPを0.05平方ミリメートルのサイズで実現した。「A-D変換器IPの小面積化は医療機器の小型化に有効と考えて研究を行なっています」(松澤氏)。FoMは設計上の都合からまだ大きい、低減できる見通しはあるという。



群馬大学  
大学院理工学研究科  
電気電子工学専攻教授  
小林春夫氏