小特集 次世代医療を担う最新映像技術

2. 医用画像センシング

2-1. カプセル内視鏡の現状と将来

笹川 克義[†]

キーワード ■ 内視鏡, カプセル内視鏡, CMOSイメージセンサ, CCDイメージセンサ, 無線

1 ま え が き

カプセル内視鏡はアイデアとしては、遡ること30年以上も以前から考えられていた。そのコンセプトは苦痛がなく、簡単に検査できる夢の内視鏡として位置づけられていた。しかしながらその実現のためには、カプセル内視鏡全体の小型化、中でも画像入力ユニットや無線ユニットの小型化が必要であった。その小型化には、照明、イメージセンサ、無線回路の小型・低消費電力化に多くの課題があり実現が困難であった。

1990年代に入り、さまざまな技術進歩により実現の兆しが見えてきた。通産省の指導の元に、マイクロマシン技術プロジェクト等でも小型化の技術が盛んに研究されるようになった。

その後、2000年にイスラエルのギブニイメージング社がカプセル内視鏡の試作機を発表してから、さらに技術開発は進歩を続け、オリンパスメディカルシステムズ（以下オリンパスと略す）は、このカプセル内視鏡を2005年10月に欧州、アジア・オセアニア地域に導入し、2007年10月にFDAの認可を受けて、北米でも販売を開始している。

2007年10月にパリで開催された消化器分野の学会である第15回欧州消化器病学会週間（UEGW）にカプセル内視鏡を展示している企業は、オリンパス、ギブニイメージング社、韓国のIntromedic社、中国のJinshan Science & Technology社の4社である。

日本においては、ギブニイメージング社が薬事法の承認を得て、販売を開始している。オリンパスは薬事法に則って承認を受けるべく、現在申請中の段階である。他の企業に関しては、日本での薬事法への対応情報は今のところ公開されたものはない。

本稿では、主としてオリンパスのカプセル内視鏡についての技術紹介と今後の展望を述べる。

2 小腸カプセル内視鏡検査の概要

日本で商品化の準備をしているカプセル内視鏡は、小腸を対象とするものであり、比較的容易にその観察像を得ることができる。

典型的な適用症例では通常、患者は検査の8時間前から絶食を行う。当日は、アンテナを体に貼り、カプセル内視鏡を飲み込む。約8時間のカプセル内視鏡検査が完了するまでは、受信装置を携帯する。カプセル内視鏡を飲み込んだ後、2時間は飲食を控え、4時間までは食事を控える。その間は少量の透明な水なら許容されるのが、一般的である（欧州内視鏡学会のカプセル内視鏡のガイドライン参照^{3) 4)}）。

患者は検査の間、カプセル内視鏡の画像伝送に影響を与えないような注意事項はあるが、苦痛なく、楽に検査ができる。

カプセル内視鏡で撮像された画像データは、アンテナを介して受信装置に記録される。この受信装置からの画像データをワークステーションに転送し、ワークステーションで画像を観察して、診断を行い、その結果をレポートに残し検査が終了する。

3 カプセル内視鏡システムの仕様と構造

システムは、主として「小腸カプセル内視鏡」、「受信装置」、「アンテナユニット」、「ビューワー」、「ワークステーション」からなる。

図1に全体像を示し、図2～図6に主要な機器を示す。

3.1 カプセル内視鏡

小腸カプセル内視鏡は、外径11mm、全長26mmのカプセル形状をしている。図3に示すように、主要部品として、6個の照明用LED、小型レンズ、CCDイメージセンサ、電気回路、バッテリーがある。

ここでの電気回路は、カプセル内視鏡のタイミング制御、LEDへの電力供給、CCDイメージセンサの駆動、そこから得られた映像信号の処理と無線送信アンテナへ送出等の全体的な動作を司っている。

撮像から無線による信号送出までを、順を追って説明する。LEDによって照明された人体内の画像は、レンズによ

[†] オリンパスメディカルシステムズ株式会社 撮像技術開発部
"Medical Image Sensing: Current State and the Future of Capsule Endoscopy" by Katsuyoshi Sasagawa (Imaging Technology Department, Olympus Medical Systems Corp., Tokyo)

図1 システム概略図

図2 小腸カプセル内視鏡

図3 小腸カプセル内視鏡の断面

ってCCDイメージセンサに結像され、そこから得られた信号は、電気回路の中でA/D変換され、カプセル内視鏡画像の明るさの制御に使用する系と、観察画像として使用する

系に分岐する。観察画像に使用する信号は、無線通信に適したフォーマットに変換され、無線送信アンテナから体表面に張られている受信アンテナに向けて送出される。画像の明るさを制御する系では、明るさを検知して、明るすぎる画像の次のフレーム画像が適正な明るさになるように、自動的に光量を変化させ、ハレーション画像の発生を防ぐ自動調光機能を実現している。

医療における内視鏡検査は、取得したカラー画像を医師が観察することにより、治療にたる医療行為を支援することを大きな役割としており、カプセル内視鏡も例外ではない。よって、その画質に関しては同様の考えを踏襲し、具体的には以下の要求事項に留意して設計がなされている。

- (1) 適切な画像の明るさ
- (2) 広い視野角 (145°)
- (3) 深い観察深度 (0~20mm)
- (4) 高い色再現性
- (5) 高い解像力

これらは、一般的な電子映像に要求される項目であり、それを決定づけているイメージセンサと映像信号処理技術は、従来の内視鏡で培った技術と、近年発展の著しいデジタルカメラ/携帯電話向けカメラモジュール技術の応用で成り立っている。

カプセル内視鏡では、画素セルの性能が画質にそのまま表れるため、現時点ではCCDを使用している。将来的には消費電力面で有利になるであろうCMOSイメージセンサの画素セル性能の向上に期待するところが大きい。

小腸カプセル内視鏡は、8時間動作を保証するためにフレームレートを毎秒2枚にしたことや、生体適合性試験^{*1}に合格したプラスチック材料を用いる等の制約条件がある。小型化を達成するために電子パーツの低消費電力化と並んで、LED/撮像ユニット/無線ユニット/バッテリー等を効率よく配置することも重要である。

3.2 受信装置

受信装置は着脱可能な、8個のアンテナをもつアンテナユニットと、バッテリーの組合せで動作する。カプセル内視鏡から送信されて来る電波は極微弱であるため、ノイズの混入を最小限にした状態で受信し、復調することが重要である。復調された画像データは所定の処理がなされた後、受信機内のメモリーに記録される。データ量は、8時間分で約6万枚になる。8時間にわたって患者が身につけるため軽量化が重要な要素になっている(図4)。

3.3 ビュワー

ビューワーは、ケーブルで受信装置と接続することで、受信装置が受信しているカプセル内視鏡の画像を表示することができる。検査前および検査の途中に必要なに応じて、画像を確認することができる(図5)。

^{*1} 生体の粘膜に触れる検査機器の安全性を担保するために、人体に影響がないかを確認するための試験。

図4 受信装置とアンテナユニット

図5 ビュワー

3.4 ワークステーション

ワークステーションは専用ソフトがインストールされたPCとモニターとプリンタからなる。ワークステーションへの画像データ転送は、クレードルを介して行われる。

ワークステーションでは、医師が、記録された画像データを観察し、レポート作成までを行う。一般的には、経過や問診、他の検査結果などから、まずは患者の小腸全体の様子を確認し、その後個別の画像を詳細に観察するようである。医師は、選択した画像に注釈を付けてレポートを作成したり、プリンタにより紙に出力したり、選択した画像を外部の記録装置に移動したり、DVDに書込んだりすることもできる。

画像データの観察にあたっては、約6万枚もの画像をい

図6 モニタの表示画面(口絵カラー参照)

(症例提供: J-F.Rey M.D., Department of Hepatology and Gastroenterology, Institute Arnault Tzanck)

かに効率よく行うかが重要になる。そこでは、ソフトウェアによる画像処理技術が重要な役割を果たしている。

例えば、画像を表示するスピードを画像間の動き量に応じて自動的に早くする機能や、血液のような赤色が目立つ画像を自動的に認識・選択する機能が搭載されている。

4 カプセル内視鏡の無線技術

カプセル内視鏡特有の課題として、人体という高誘電率の媒体を介した無線通信であること、電波の使用にあたっては各国の電波法に適合する必要があることがある。

また、カプセル内視鏡検査では、カプセル内視鏡が動作している状態で患者が病院内外を移動すると想定しているため、患者から漏洩した電波が周辺機器に影響を及ぼさず、また周辺機器からの電波の影響を受けないように、対応患者の体内と体表面での閉じた空間でのみの通信が行われることが理想である。

4.1 周波数帯

まず、人体内での通信効率が高い周波数帯の選択と、電波法上でのその周波数帯の利用可能性の整合が重要である。全世界への導入を目論んでいることから、現状の各国の電波法による規制の範囲内で開発する必要があった。候補の一つは、IMS帯として国際調和規格がある2.4GHz帯であり、もう一つは、自動車のキーレスエントリー等に使用されている特定省電力帯であった。

高誘電率の媒体中で、いかに効率よく無線通信を行うかであるが、まず送信側では、アンテナに使えるカプセル内視鏡内での体積に制約があり、目論んだ波長に最適なアンテナが使えるわけではない。カプセル内視鏡の大きさからすれば2.4GHz帯の方が形状からは適していると言える。一方で高誘電体の中では空気中と異なり、距離による減衰が激しい。特に、周波数が高いほど減衰が大きく、この面では周波数が低い方が有利である。今回開発した小腸カプセル

ル内視鏡システムでは、前述の内容を総合的に判断して各国の特定省電力帯に合わせて設計されている。

4.2 画像通信方式

既存の内視鏡は、チューブ内のケーブルで信号伝送を行うので劣化は発生しないが、カプセル内視鏡は、信号伝送に無線を使用するため、その通信状態が大きく影響を及ぼす。

ご存知のように、一般のテレビ放送は、4MHz程度の帯域でアナログ伝送を行っており、伝送状態がよければ帯域あたりの情報量はデジタル伝送より圧倒的に多い。しかしながら、ノイズに対してはほとんどマージンがなく、伝送状態が悪化すると画質が急速に劣化する。したがって、極めて微弱な電力で通信を行っているカプセル内視鏡システムにおいては、デジタル通信方式を採用した。

5 カプセル内視鏡の今後の展開

カプセル内視鏡は、今後も技術開発を続けながら進化していくが、大きくは三つの方向性があると考えている。

5.1 画質の改善

内視鏡画像の本質は、その観察・診断に寄与する画像データであり、より高画質化が求められている。そのためには、イメージセンサの画素セル性能の改善や多画素化が必要である。これらはデータ容量の増大をもたらすので、その恩恵を受けるには、無線でのデータ伝送速度の増大、もしくは最新の画像圧縮等により情報量を増やすことなく、高画質化する技術の開発も同時に必要である。

5.2 ソフトウェアの改良

前述のように、現在のカプセル内視鏡の画像データは約6万枚あり、これを効率よく診断することが求められている。今後の主要なソフトウェア開発は、これを克服する機能の改良・開発を目指している。例えば、画像データから病変を自動認識する技術や、膨大な画像情報データベースから必要な画像情報を高速に検索する技術、ネットワークを介して情報の共有化を進める技術が進展し、より高度なサービスの提供を目指した医療画像の診断支援機能の開発が進むものと予想する。

機能面だけでなく、医師が診断をするときに疲れないように、画像データを見やすくするための工夫に代表される、人間工学を考慮に入れた開発も望まれている。

5.3 適用領域の拡大

小腸用カプセル内視鏡からスタートしたカプセル内視鏡は、他臓器への適用拡大を目指してシステム開発をしていくことになる。近い将来では、見落としを減らすために、より広い範囲を観察できるような光学系、イメージセンサの改良やバッテリーの改良と併せて、更なる低消費電力化を図り、長寿命化も目指して行くことになる。

カプセル内視鏡は、消化管の蠕動運動により体内を移動しているが、これを術者の意思により能動的に思い通りに動かすことのできるカプセル内視鏡を目指していく。そし

図7 カプセル内視鏡の将来イメージ(口絵カラー参照)

て、この能動的な制御を技術の核として、薬の散布や、注射針による穿刺も可能な処置用カプセル内視鏡の実現を目指して開発を進めていく。これらを進めることで、現行の内視鏡に近づいていくと考える。

さらにその先には、スクリーニング^{*2}により自動的に診断が可能となるシステムがあると考えている。これらを開発イメージ図にまとめたものを図7に示す。

6 む す び

現在、実用的なカプセル内視鏡は小腸カプセル内視鏡であり、消化器内視鏡学会では、小腸カプセル内視鏡と通常の小腸内視鏡は、互いに他を補いながら診断に貢献していくとされている。小腸分野においては、この状況を維持しながら進化していくことであろう。

一方で、その他の消化器系統の臓器、例えば胃とか大腸への展開如何では、従来型の内視鏡とカプセル内視鏡では、その役割が大きく変わる可能性も考えられる。カプセル内視鏡はそういう意味でも期待に満ちた製品である。

(2008年1月8日受付)

〔文 献〕

- 1) 日比紀文, 緒方晴彦, 大塚和朗: “カプセル内視鏡カラーアトラス”, 初版, 診断と治療社, 2-8 (2007)
- 2) 日比紀文, 岩男泰: “大腸疾患の内視鏡診断と治療”, 初版, 診断と治療社, 49-53 (2006)
- 3) J.F. Rey, S. Ladas, A. Alhassani, K. Kuznetsov, and ESGE Guidelines Committee: "Video Capsule Endoscopy", Update to Guidelines (May 2006), Endoscopy 38, 1047-1053 (2006)
- 4) J.F. Rey, G. Gay, A. Cruse, R. Lambert, and ESGE Guidelines Committee: "European Society of Gastrointestinal Endoscopy Guideline for Video Capsule Endoscopy", Endoscopy 36: 656-658 (2004)

*2 医学的なふるい分けをすること。

さきがわ かつよし
笹川 克義 1982年, 信州大学工学部電気工学科卒業。同年, オリンパス光学工業(株)入社。電子内視鏡システムやカプセル内視鏡などの映像機器の開発に従事。現在, オリンパスメディカルシステムズ(株)第一開発本部撮像技術開発部長。