

コードレスカセット型DR “AeroDR”の開発

Development of a Wireless Cassette Digital Radiography Detector: the AeroDR

徳 弘 修* 儀 同 智 紀* 樫 野 昭 雄*
Osamu TOKUHIRO Tomonori GIDOU Teruo KASHINO

要旨

X線撮影のデジタル化が進み、年間のCR (Computed Radiography) 出荷台数は2万台を超えるようになった。DR (Digital Radiography) は従来の専用機タイプに加えて、近年、可搬型のカセットDRが加わり、市場が急速に伸張し始めている。我々はその流れを予測し、カセットDRに求められる要素を徹底的に追求して、有線/無線双方で利用可能なカセットDR、AeroDRを開発した。DRの利点である即時性を活かしながら、カセットでの撮影に配慮したさまざまな新規技術を盛り込んでいる。高鮮鋭画質を実現するCsI (ヨウ化セシウム) 柱状結晶シンチレータとセンサーパネルの直接貼り合わせ技術、必要な機械的な強度を保持しながらコードレスタイプでは世界最軽量の筐体設計、新型バッテリーと省電力技術を組み合わせたバッテリー駆動技術など、各技術が相互に調和した完成度の高いシステムを作り上げた。

Abstract

Over the years, digitalization in X-ray photography has greatly progressed, with the number of annual shipments of CR (computed radiography) units today totaling over 20,000 units. In recent years, the DR (digital radiography) market has rapidly expanded due to the addition of portable DR cassettes to existing built-in DR detectors. Forecasting the trend toward portable DR cassettes and thoroughly investigating what these products would require, we developed the AeroDR, a cassette DR detector which can be used in both wired and wireless systems. The AeroDR is a highly complete system in which various technologies, which are appropriate to X-ray photography using a cassette, are combined and harmonized. These include the intimate contact between the columnar CsI (cesium iodide) scintillator and the sensor panel for fine sharpness, the world's lightest cassette case of all wireless X-ray detectors while providing exceptional mechanical strength, and a novel battery with power-saving technology.

* コニカミノルタエムジー(株)
開発センター 開発部

1 はじめに

1990年代後半から急速な成長を遂げたCRシステムはX線撮影のデジタル化を推進したが、撮影後の画像確認に時間がかかるという課題を抱えていた。このような背景の中、コニカミルタは、2008年、撮影後、即時に画像を確認できる専用機タイプDR “PLAUDR”¹⁾を発売し、大病院を中心に市場で好評を得ているが、カセット撮影は、まだCRで実施されているのが現状である。カセットDRも徐々に普及してきているが、重量がまだまだ重く、電力供給や通信用のケーブルがつながっているなど、必ずしも使い勝手が良いとはいえない。特にケーブルの存在は、頻忙なX線撮影業務の作業性を悪化させ、また、手助けを必要とする高齢の患者においては転倒の危険性を無視できないなど、多くの課題が指摘されている。

今回開発したAeroDRは上述の課題を解決するとともに、現市場で活躍するカセット型CRの操作性・作業性を継承し、更にCRの課題である即時性の改善や画質の大幅向上を目標に掲げて開発した。これにより、カセットDRが抱える多くの課題を克服し、低線量域でも高診断画像を提供できる本格的なカセットDRを実現した。さらにCRと同等の広いダイナミックレンジの実現、新開発のバッテリーシステムの採用によるバッテリーの安全性の確保、高寿命化、高速充電など、さまざまな改善を行った。以下、開発技術の詳細について紹介する。

2 高画質性能

2.1 画質要求

X線を用いた画像診断装置では、画質と線量の関係が最も重視される。一般的に線量を増せば画質は向上するが、患者の被曝が増加するため、適正な線量で適切な画質を得られることがX線受像器の性能に要求される。このX線受像器の画質を示す指標としてDQE (Detective Quantum Efficiency: 検出量子効率) が良く使われている。DQEが高いことは、入射した画像情報として再現していることを示しており、少ないX線量でも高画質な画像が得られることを意味する。

X線受像器の性能を左右するもう1つの重要な指標に、ダイナミックレンジがある。ダイナミックレンジとはX線受像器がX線情報を適切に画像情報として再現可能な線量範囲を示すパラメータであり、ダイナミックレンジ

が広いことは撮影時に広い線量域を選択できることを意味する。例えば、スクリーンフィルムでは約2桁であったダイナミックレンジをCRでは4桁（約10 μ R～100mR）まで広げたため、再撮影のリスクを大幅に低減させた。

2.2 DQE

Fig. 1 に間接変換型DRにおけるシンチレータとTFTパネル間の断面模式図を示す。従来の間接変換型DRでは、CsIシンチレータの柱状結晶表面に保護膜を設け、それを介してTFTセンサーパネルと接触させる構造が多かった。今回、我々は保護膜を介さずにCsIシンチレータをTFTセンサーパネル上に直接接触させる直接貼り合わせ技術を開発した。この技術により、シンチレータで発した光をTFTとの接触面で拡散させることなくフォトダイオードまで導くことを可能にした。

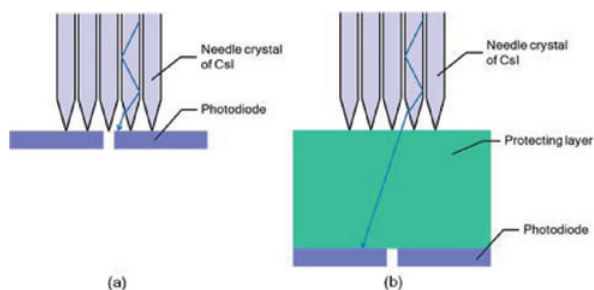


Fig. 1 Schematic cross section of scintillator and TFT-panel. (a) AeroDR, (b) Conventional DR.

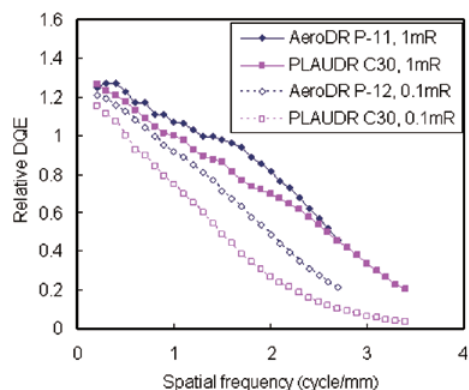


Fig. 2 DQEs of the AeroDR and its predecessor, the PLAUDR.

また、シンチレータの結晶成長技術の最適化により、シンチレータ発光の伝達効率を改善し、Fig. 2 に示すように従来機に対してDQE (0.1mR, 1cycle/mm) を20%向上させることに成功した。この技術により、AeroDRでは低線量でも高いDQEを維持することが可能となるため、被曝線量低減に有効であると考えられる。

2.3 ダイナミックレンジ

Fig. 3 に AeroDR と従来機 PLAUDR C30 の入出力特性を示す。RQA5の線質において、PLAUDR C30では約3.5桁 (2 μ R～7mR) のダイナミックレンジであるのに対

し、AeroDRではCRに近い約4桁 (1.4 μ R～12mR) の広いダイナミックレンジを実現できた。また、AeroDRでは、高線量側で飽和する線量がPLAUDR C30の約1.7倍高線量となっているため、例えば肩関節撮影などで撮影条件が変動してもスキンラインを正確に描写することが可能となった。

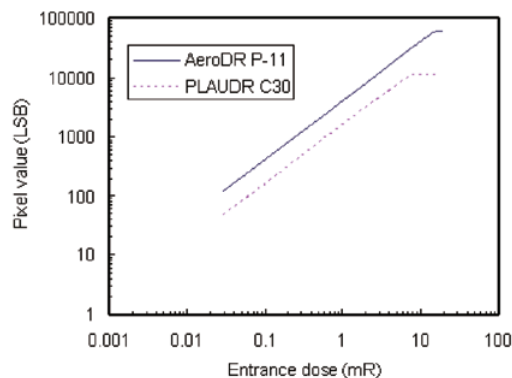


Fig. 3 Digital characteristic curves of AeroDR and PLAUDR.

3 軽量・堅牢性

3.1 カセット筐体要求

カセット撮影をより安全かつ軽快にストレスなく行うためには、カセットから延びる電源ラインや通信ケーブルを無くすことは無論のこと、軽量であり、かつ、カセットに加わる衝撃や加重に対しても故障することなく使用できる耐久性が必須であると考えた。軽量化を図りながら必要な耐衝撃性、耐荷重性を備えるカセットを設計するにあたって、鍵となるのはカセット筐体構造と材料選択である。

3.2 筐体構造

Fig. 4 に今回採用したモノコック形状の筒型筐体を示す。PAN系のカーボン繊維を使用した積層板をオートクレーブ成型で形成している。バッテリーはカセットに内蔵するため (バッテリーの交換不要)、剛性の低下を招く交換用の切り欠き部を筐体に設ける必要がない。これにより、軽量でありながら十分な剛性を保持することができる。内蔵しているバッテリーの緩衝効果とも相まって耐荷重性能は弊社CRカセットと同一の80 ϕ 100kgを達成している。

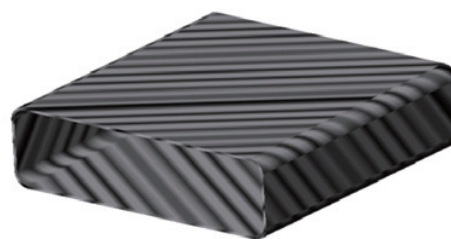


Fig. 4 Monocoque-structured carbon chassis.

3.3 CsIシンチレータ保護構造

外部から加わる荷重については、CsIシンチレータの結晶保護という観点からも特別な設計が求められる。Fig. 5は初期のCsI結晶の状態と荷重によって結晶先端が変形した状態のそれぞれを電子顕微鏡で観察した結果である。CsI結晶内でX線に光に変換して効率的に出射させるためには、CsI柱状結晶の秩序性と先端形状が重要であるが、荷重によって柱状結晶の先端が押し潰れた形状になると鮮鋭性 (MTF: Modulation Transfer Function) が低下することが実験的に確かめられている。

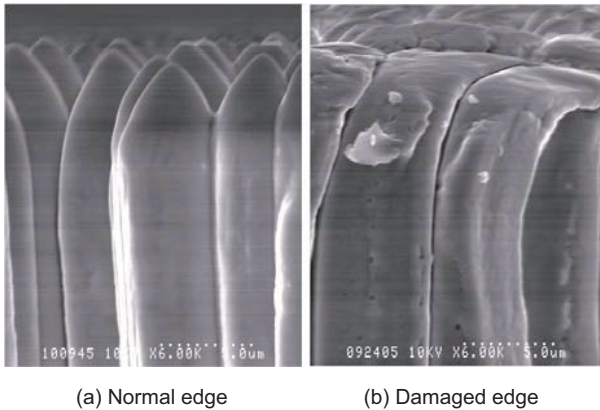


Fig. 5 SEM photograph of CsI crystal edge.

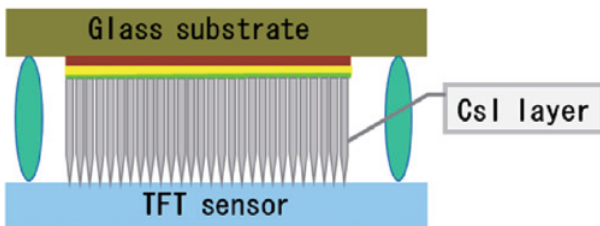


Fig. 6 Glass seal structure for CsI scintillator.

AeroDRでは、外力の局所的な集中によるCsI結晶の変形を防護するために、CsIシンチレータのガラス基板をTFTパネルのガラス基板に重ね合わせて封止する2重ガラス構造をとっている。Fig. 6はその構造を模式的に示したものである。ガラス2重構造は耐荷重性能の向上ばかりでなく、カセットの落下や衝突等の機械的衝撃によってシンチレータ先端が変形するのを防止すると共に、TFTセンサーパネルのガラス基板が破損することも防いでいる。

3.4 耐衝撃性能

落下衝撃耐性に関して筒型カーボン筐体の課題は、角部を衝撃から保護することである。角部を下にして落下させた場合に、床との衝突で角部に応力が集中するため、辺部分よりも一層高い強度を確保する必要がある。剛体や弾性体で角部を被覆保護する方法は、衝突時のエネルギーが被覆する物体を通してカーボン筐体に伝達され、

結果として筐体破壊につながるため、AeroDRでは塑性変形によって衝突エネルギーの吸収を行う構造を適用した。Fig. 7 (a)にカーボン筐体辺部の構成を示す。カーボン筐体の開口部は、Mg合金でできた蓋と合成樹脂でできた蓋の2重構造で保護されている。Mg合金の端の形状 (Fig. 7 (b)) は、大きく“H”状の切れ込みを中央部に設けており、落下衝撃を塑性変形で吸収しカーボン筐体の破損を回避している。Fig. 7 (c)は落下時の応力伝播と部材変形を有限要素法でシミュレーション解析した結果である。種々の切れ込み形状やサイズを解析した結果から最適化を図っている。Fig. 7 (d)は落下後の部材の写真である。設計で意図した通りに切れ込み部分に変形し、衝撃エネルギーが吸収されていることが分かる。なお、AeroDRの落下衝撃試験は、弊社CRカセットの落下衝撃試験と同条件で実施している。

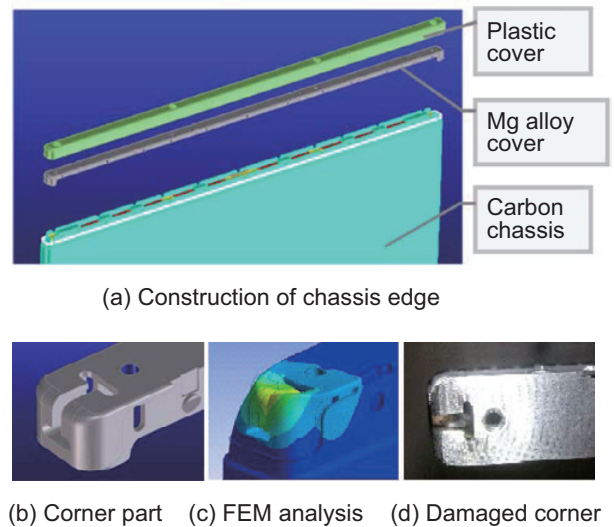


Fig. 7 Mg alloy cover.

AeroDRでは、耐久性と軽量性に加え、外形寸法から-20mm以内の有効撮影領域を確保しつつ、カセット外形サイズをJIS (ISO) 半切サイズ規格に準拠させて設計した。これにより、既に医療施設に設置されている既存の撮影台に対して、CRカセットを装填するのと同じ要領でAeroDRを装填してX線撮影することができる。また、AeroDRに専用I/Fケーブルをつないで使用する場合は、有線ケーブルから常時電力供給されるので、内蔵バッテリーの充電切れを心配する必要が無い。このため、AeroDRを既存の撮影台に装填し続けた状態で、専用機タイプのDRとして使用することもできる。

4 コードレス

4.1 コードレス仕様要求

AeroDRでは、コードレスでの撮影を可能にするために、カセットDR本体とコンソール間の通信に無線LANを採用し、撮影デバイスへの電力供給をバッテリーで

行っている。コンソールからカセットDRへの制御コマンドの伝達、カセットDRからコンソールへのステータス通知や画像データ転送など、全て無線LANを通じてリアルタイムに実施している。AeroDRを単なるカセットDRに止まらせることなく、本格的なコードレスカセットの運用を実現するために、我々は、各種撮影での運用シーンやワークフローを想定しながら、使用者側からの要求事項とそれぞれの技術に対する要件の洗出しを行った。無線通信は、PCや携帯ゲーム機で採用されているIEEE 802.11b/gでは干渉電波による速度低下、通信障害の発生頻度が高いと考えられたため、IEEE 802.11aを採用した。

4.2 新型バッテリー

バッテリーの選定では、第1に発煙発火に対する安全性を重視し、次にカセットに内蔵できるように、薄型であることを求めた。さらに、十分な駆動時間が得られる充電容量、充電の手間の極小化、バッテリー寿命が長いことを基本要件としてバッテリー種類の選定を行った。

リチウムイオン2次電池はエネルギー密度が高く、高速充電が可能などの利点からノートPCや携帯電話などの用途に幅広く使われており、他社の無線カセットDRでも、このリチウムイオン2次電池が採用されている。しかしながら、リチウムイオン2次電池の製造品質不良に起因するノートPCや携帯音楽プレーヤーの発火事故が未だに後を絶たない。リチウムイオン2次電池に製造不良品が混入した場合、受け入れ検査で見分けることは困難であり、また、パネル側の設計上の工夫で対策を行うこともできない。従って、患者に直接に接触する医療機器として安全性を重視する場合、リチウムイオン2次電池を使用することは不適切と判断した。

我々は、患者への安全性を第1とし、さらに上記要件を満たすバッテリーとしてリチウムイオンキャパシタを採用した。エネルギー密度はリチウムイオン2次電池の5分の1程度に小さくなるため、省電力設計が必須となるが、万一電極間がショートする事故が起きた場合でも発煙発火の心配はなく、患者との接触する部位の温度は41°C以下と国際規格²⁾に適合している。Table 1に両者の比較をまとめた。

Table 1 Characteristics of lithium-ion battery and lithium-ion capacitor.

Characteristics	Lithium-ion battery	Lithium-ion capacitor
Charge/discharge principle	Electrochemical reaction	Electro double layer on positive electrode Electrochemical reaction on negative electrode
Energy density by weight (Wh/kg)	100 - 140	15 - 27
Self discharge rate	5 - 10% per month	1 - 2% per month
Cycle life (40% decrease in power capacity)	300 - 500 times	Greater than 10,000 times
Safety risks		
Overheated/overcharged Max. temperature in overcurrent	Thermal runaway. Explosive greater than 180°C	No thermal runaway Less than 78°C

リチウムイオンキャパシタは充放電サイクル寿命が、リチウムイオン2次電池に比べて100倍以上長く、5、6年間使い続けても著しい容量低下を招かないため、カセットDR本体にバッテリーを内蔵して使用することができる。一方、リチウムイオン2次電池は300～500回程度の充放電でバッテリー交換となるため、カセット内部にバッテリーを内蔵することは困難で、カセットDR本体にバッテリーパックの交換機構が必須となる。この場合、筐体構造が複雑化し、カセットの軽量化や機械的強度面で十分なメリットを得ることができない。

リチウムイオンキャパシタはエネルギー容量が小さいためにバッテリー駆動時間や撮影枚数への影響が懸念されるが、AeroDRでは、後述の省電力技術により十分な駆動時間と撮影枚数を確保している。反対にエネルギー容量の小さいことが利点となって充電時間が短くなり、フル充電に要する時間は専用のクレードルを使用した場合で30分以内と他社機の4分の1以下を可能にした。さらにリチウムイオン2次電池と異なり、常時ケーブルで給電しても劣化が少なく、充電開始時点から大電流の充電が可能のため、うっかりしてバッテリーを使い切った場合でも、緊急時には3分程度の充電で5、6枚の撮影が可能である。

5 省電力

バッテリー駆動で十分な撮影時間／撮影枚数を可能とするためには、省電力設計が鍵となる。AeroDRでは、低消費電力の部品を選択するのは無論のこと、撮影動作中のディテクターの駆動制御やワークフローを考慮したうえで体系的な観点でも電力消費を抑えるように設計した。その結果、ディテクター部の消費電力は従来品に比べて5分の1以下を実現することができた。以下、特徴的な省電力技術のいくつかを紹介する。

5.1 低消費電力制御システム

Fig. 8は、ディテクター部における動作時とスリープ時の消費電力を、AeroDRと従来機で比較したものである。X線を変換して蓄積された電子を読み出すIC (Readout IC)は、その電気ノイズが最終画像の品質を左右する重要部品である。電気ノイズを低減させるには初段増幅回路の電力を増やすことが効果的であるが、Readout ICでは通常2000本以上(両側読み出し方式ではその2倍の数)存在する信号ライン毎に増幅回路を構成しなくてはならないため、初段増幅回路の電力増加はその数千倍のインパクトを消費電力に与える結果となる。これがReadout ICの省電力設計を非常に難しくしている。このため、一般的なDRでは、Readout ICが占める消費電力の割合が大きく、ディテクター全体の約3分の1を占めている。IC内のトランジスタの数が増加すると、上述した理由により消費電力が劇的に増加するため、新開発のReadout ICでは電気ノイズに配慮しながらトランジスタ

の数を出来る限り少なくしている。さらに、Readout ICで電子を読み出す期間と、読み出した信号をAD変換する期間をずらすことで、ピーク消費電力を下げる工夫をしている。

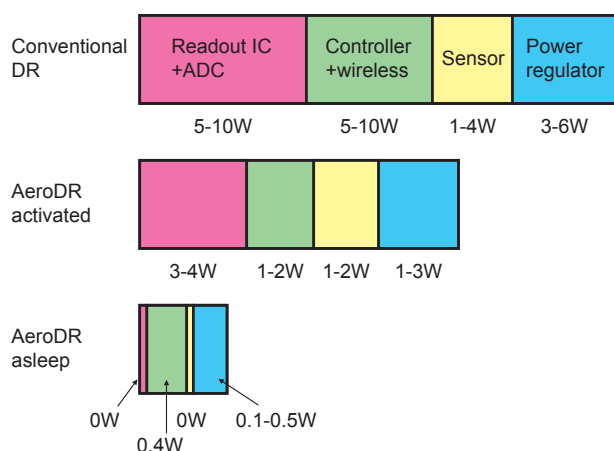


Fig. 8 Power consumptions of conventional DR and AeroDR.

無線LANモジュールや通信用CPUも省電力駆動が可能な機能を持ち、かつWoWLAN (Wake on Wireless LAN) に対応しているため、動作が不要な期間はスリープ状態に移り、ダイナミックに電力を制御している。通信用CPUはさらにタスク実行中であっても回路内の非動作ブロックを部分的に休止させるクロックゲーティングも使用して消費電力を低減している。

システムレベルでの工夫として、撮影と撮影の間の休止期間が短い場合はセンサー部分への電力供給を維持し、その他の部分への電力供給をストップする「センサーオン待機」状態を採用した。一方、休止期間が長くなる場合は、定期的に無線通信を行う以外はすべて休止状態になる「スリープ待機」状態へと遷移させる。この2つのモードを状況に応じて自動的に切り替えることで、さらなる省電力を実現している。

5.2 省電力効果

消費電力の削減はバッテリー駆動時間を延ばすだけの効果に留まらない。消費電力が大きくなると相関して発熱量が増え、前述のようなダイナミックな電力制御を行うと温度変動の幅や変化速度が大きくなる。センサーとして用いられている光電変換デバイスのアモルファスシリコンセンサーは、その暗電流が温度によって大きく変化するため、温度変動が激しくなるとセンサーのオフセットレベルの変動も大きくなって、撮影画像にムラを発生させる。Fig. 9は電源オン後の経過時間に対するオフセット量の変動を示している。従来機に比べ、AeroDRは短時間でオフセット量が安定化していることがわかる。この性能によって電源立ち上げ後やスリープからの復帰後に短時間で使用可能な状態に遷移できるのが、AeroDRの大きな特徴になっている。

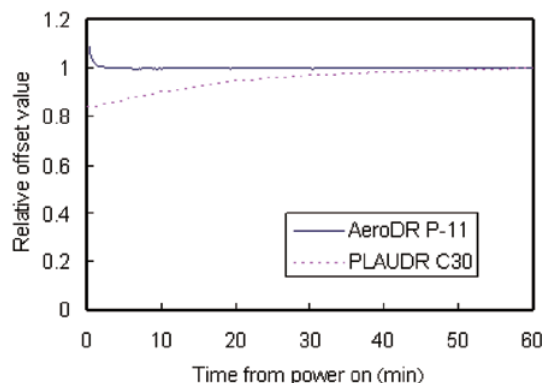


Fig. 9 Change of relative offset value over elapsed time after power on.

6 まとめ

JIS (ISO) 規格に準拠し、軽量で、耐荷重性能、耐衝撃性能に優れた、バッテリー内蔵無線カセットDR、AeroDRを開発した。

本製品の開発に当たっては、技術的な制約から製品の仕様を決めることはせず、カセットDRのあるべき姿を使用するお客様の視点で考え、そこで見出した答えを全てAeroDRの設計に盛り込んだ。重要視した患者の安全性では、発煙発火の危険性があるバッテリーを避け、安全性の高い新型バッテリーを採用した。そのために大幅な省電力設計にチャレンジし、これに成功した。また、単なる無線式のカセットDRに止まらず、様々な運用シーンやワークフローに適用可能な、本格的カセット型DRを完成させた。

本製品が臨床の現場で活用され、コニカミノルタが提案する新たなカセットDRの魅力を、お客様一人一人に感じて頂ければ幸いである。コニカミノルタは本製品に満足すること無く更に革新的な製品開発に挑戦を繰り返す、今後も世界の医療の質の向上に貢献していく。

●参考文献

- 1) 冠城光男, 他: DRシステムPLAUDRの開発, KONICA MINOLTA Tech.Rep.,6, 77 (2009)
- 2) IEC60601-1:1988 Ed.2