

PET 画像誘導放射線治療を可能とする

リアルタイムイメージング手法の開発

放射線医学総合研究所 分子イメージング研究センター

田島英朗

1. 背景

OpenPET によって、放射線治療中の PET 計測が可能になった[1, 2]。放射線治療中の PET 計測には 2 つ目的がある。まず、重粒子線がん治療に適用した場合、重粒子線が照射された場所には PET トレーサーである陽電子放出核種が生成されるため、治療中に PET 撮影を行うことで治療ビームがどこにどのくらい当たったかを確認できるようになる。次に、がんの腫瘍を PET でリアルタイムに見ながら、その腫瘍を追跡して治療ビームを照射する、画像誘導放射線治療の実現が考えられる (図 1)。特に、本研究の最終的なゴールである後者の目的は、リアルタイムの画像化が必須であるが、通常 PET の撮影は数分から数十分掛けて行われており、それを 1 秒以下のサイクルで行うという非常にチャレンジングなものである。本研究では、リアルタイムイメージングが可能な新しいシステムアーキテクチャの提案をし、放医研において開発された OpenPET 小型試作機に実装することで、世界に先駆けて PET による腫瘍追跡のコンセプト実証を行った[3]。

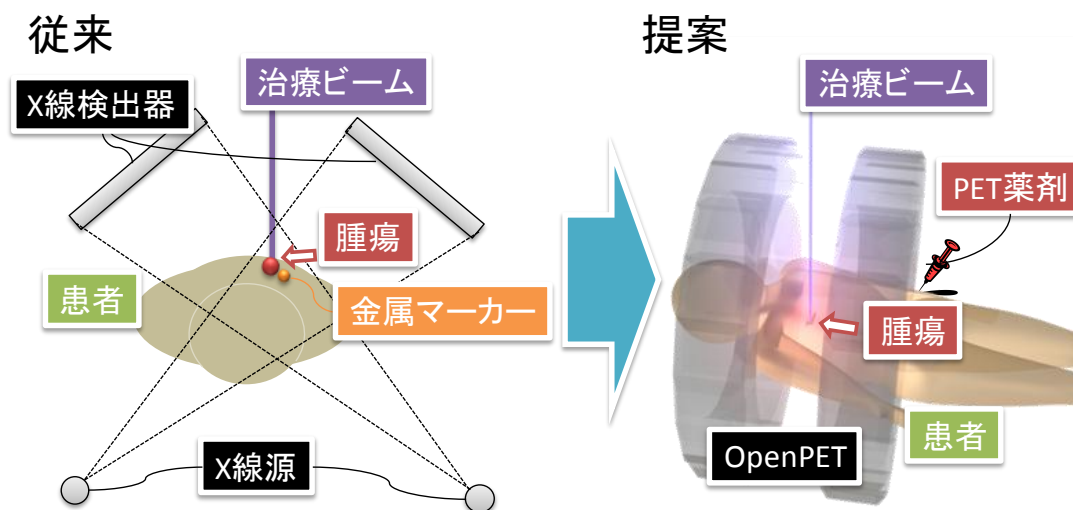


図 1. 従来の腫瘍追跡放射線治療と OpenPET による腫瘍追跡放射線治療の概念図。

従来技術では腫瘍近傍に埋め込まれた金属マーカーを撮影して間接的に腫瘍の位置を捕えている (左) が、OpenPET とリアルタイムイメージングにより、腫瘍の位置や大きさを直接見ながらの治療が可能になる (右)。

2. 方法

2. 1. システムアーキテクチャ

通常の PET 計測では、収集したデータを反復的な画像再構成手法（ML-EM：Maximum Likelihood Expectation Maximization、OS-EM：Ordered Subset Expectation Maximization 等）によって 3次元画像化している。線量分布確認のための PET 画像化であれば、重粒子線の照射から数十秒程度の遅れがあっても十分実用的であると考えられるが、腫瘍追跡を PET 画像で行おうとする場合には、データ収集から画像化までにかかる時間をほぼ 0 に近づける必要がある。画像再構成の高速化は長年取り組まれてきたが、実際に PET を腫瘍追跡に用いた例はこれまでにない。しかしながら、近年のハードウェアの進歩や画像再構成手法の進歩、特に、従来グラフィック演算に用いられてきた GPU（Graphics Processing Unit）を汎用計算に用いる GPGPU（General-Purpose computing on GPU）の登場と、PET で収集された生のデータであるリストモードデータから 1 回の反復で収束し、十分な画質を得ることが可能な 3D One-pass List-mode DRAMA（Dynamic Raw-Action Maximum Likelihood Algorithm）の開発によって、リアルタイム再構成の実現が現実味を帯びてきた[4]。本研究では、3D One-pass List-mode DRAMA を GPGPU の技術を用いて実装し[5]、さらにデータ転送を工夫することで定量性のある程度保ちつつ、フレームレートを安定化させる新しいシステムアーキテクチャを提案した。

提案するアーキテクチャの基本コンセプトを図 2 に示す。リストモードデータの再構成処理は、元のデータ量が多くなるほど処理時間が増えるため、提案するアーキテクチャでは、時間フレーム内で処理できるだけの量のみを使うように、データ転送制御によって調整し、再構成処理の後で、元のデータ量と使用したデータ量の割合である転送率によって、画素値を補償する。この基本コンセプトの元、実際に構築したシステムアーキテクチャの詳細を図 3 に示す。また、以下に処理の流れを述べる。

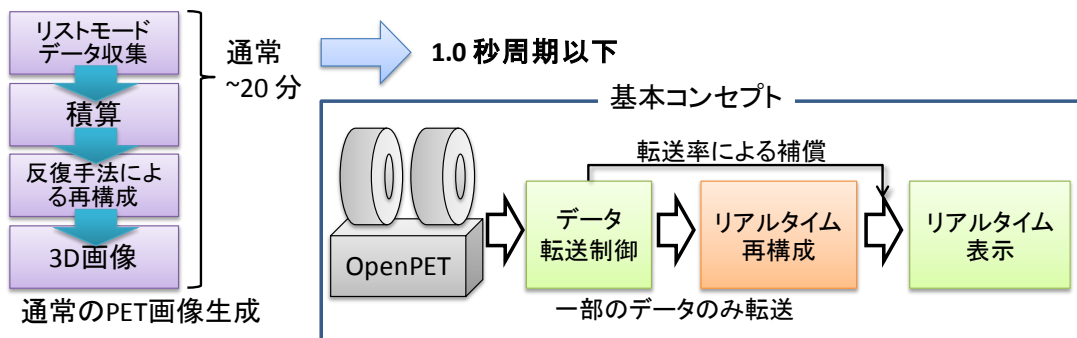


図 2. リアルタイムイメージングシステムの基本コンセプト。リアルタイム再構成で処理可能なデータ量のみを転送し、画像生成後に転送率による補償を行うことで定量性のある程度確保しつつリアルタイムイメージングを実現する。

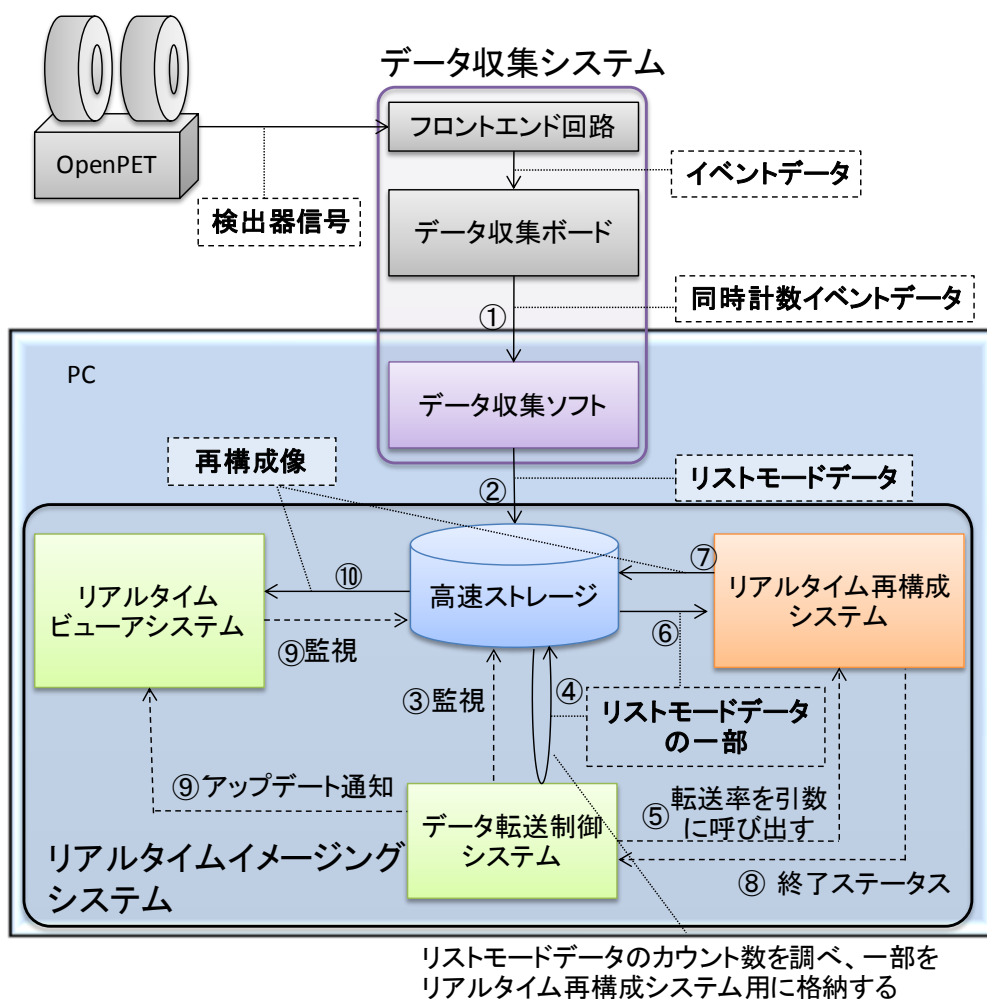


図 3. OpenPET リアルタイムイメージングシステムのシステムアーキテクチャ。再構成速度安定化のために、取得したデータの流れをデータ転送制御システムにより制御してリアルタイム再構成システムの負荷をコントロールする。

①OpenPET で計測された同時係数イベントデータを、②データ収集ソフトによってリストモードデータとして PC 上の高速ストレージに格納する。③データ転送制御システムがそれを監視し、④データ量制限に基づいてリストモードデータの一部を再構成用に転送し、⑤その割合を転送率として引数にし、リアルタイム再構成システムを呼び出す。⑥リアルタイム再構成システムは転送された一部のデータを読み込み、⑦画像再構成を行い、必要に応じて転送率による補償を行った後、高速ストレージに再構成像を格納する。⑧終了ステータスはデータ転送制御システムによってチェックされる。リアルタイムビューシステムの画像アップデートは、⑨ビューア自身が高速ストレージを監視して新しいファイルの作成を自動的に検知するか、⑨データ転送制御システムからのアップデート通知によって、⑩リアルタイムビューシステムが高速ストレージシステムから再構成像を読み込むことで行われる。

2. 2. OpenPET による点線源追跡の実証実験

PET 画像誘導放射線治療を目指したリアルタイム OpenPET イメージングのコンセプト実証のために、OpenPET 小型試作機と光学カメラによる点線源追跡実験を行った (図4)。 ^{22}Na 点線源が OpenPET の開放空間に位置するように X ステージに棒を取り付け、20 秒周期、そして、20 秒周期のサインカーブにしたがって上下するように制御しながら動かした。点線源は OpenPET 小型試作機と光学カメラによって同時に撮影され、その際に、PC スクリーン上に表示されたものをスクリーンキャプチャソフトによって動画として取得した。また、再構成像が表示されたフレームレートを記録した。なお、今回はリアルタイム再構成システムで処理を行うカウント数の最大値を 5,000 とした。

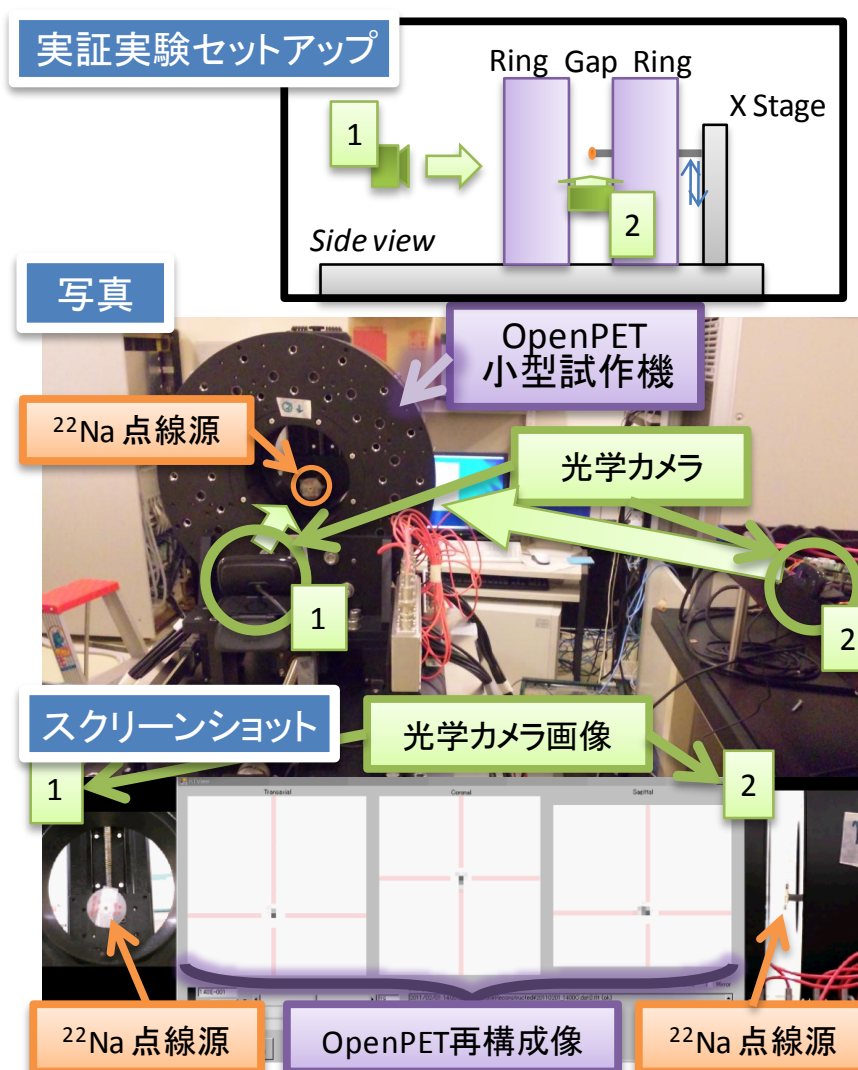


図4. リアルタイム PET イメージングのコンセプト実証実験。OpenPET の開放空間で点線源を上下させ、データ収集、画像再構成、表示までをリアルタイムに行った。フレームレートは毎秒2フレームで、同時に撮影した光学カメラの映像におよそ2秒の遅延で追隨していることを確認した。

3. 結果

点線源追跡の実証実験の結果、例として図4下のようなスクリーンショットが得られた。そしてその際、毎秒2フレームで画像が更新されていることを確認した。また、キャプチャされた動画から、光学カメラ上の点線源の位置と、再構成像の点線源の位置を抽出し、サインカーブにフィッティングした結果、1~3秒、平均して2.1秒の遅延が発生していることが分かった(図5)。

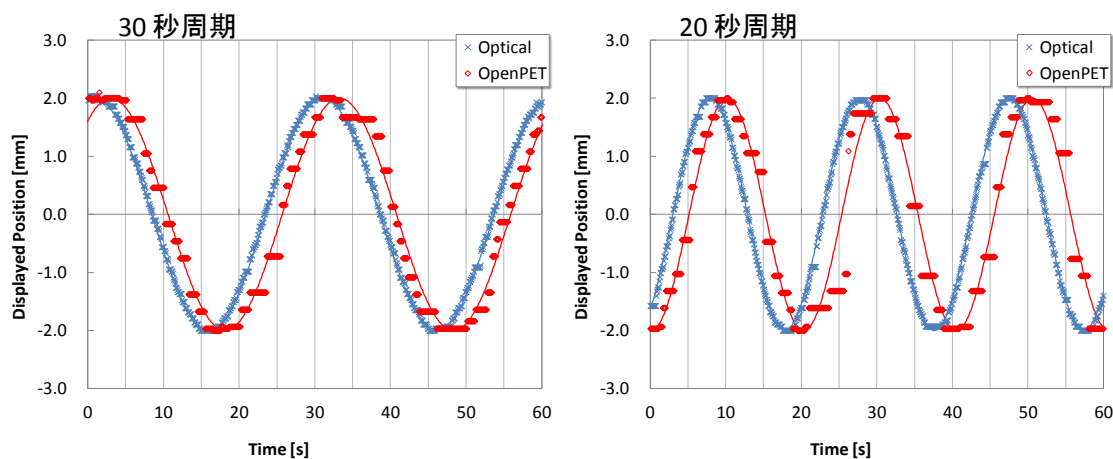


図5. 実証実験中の光学カメラ画像と OpenPET 再構成像上での点線源の位置を抽出した。遅延はともに 2.1 秒で、平均誤差はそれぞれ 2.0 mm (30 秒周期) と 3.3 mm (20 秒周期) であった。

4. 結論

本研究では、OpenPET と開発したリアルタイムイメージング手法によってリアルタイムの PET 画像誘導放射線治療が実現できる可能性を示した。また、放射線治療以外にも、OpenPET のリアルタイムイメージングによって、例えば針生検などを、その場で腫瘍を PET で見ながら行えるようになるなど、診断と治療の融合がさらに発展するものと期待している。

参考文献

- [1] Yamaya T, Inaniwa T, Minohara S, et al.: *Phy Med Biol* **53**: 757-775, 2008
- [2] Yamaya T, Yoshida E, Inaniwa T, et al.: *Phy Med Biol* **56**: 1123-1137, 2011
- [3] Tashima H, Yoshida E, Kinouchi S et al.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59**, 40-46, 2012
- [4] 工藤博幸, 伊東将行, 小林哲哉 et al. : 究極の PET 画像再構成法 DRAMA—新しい緩和パラメータ制御法とワンパス DRAMA の提案. 平成 21 年度第 1 回次世代 PET 研究会, 2009
- [5] S. Kinouchi, T. Yamaya, E. Yoshida, et al.: *IEEE Med. Imag. Conf.*, Oct. 30 - Nov. 6, 2010, M09-281.