

《原 著》

ガンマ・カメラ—電子計算機

システムにおける分解時間とその補正法

Ⅱ. ガンマ・カメラ動態システムの分解時間補正

飯 沼 武* 福久健二郎** 松 本 徹*

1. はじめに

前報¹⁾において遅延線型シンチレーション・カメラとオン・ライン計算機システムの計数率特性と分解時間について論じた。本報ではカメラから出力される display event rate がデジタル動態画像として収集される際に生ずる計数損失とその補正法および収集可能な限界について報告する。

現在、シンチレーション・カメラ動態システムのデータ収集法として、(1)リスト・モード (Lモードと略) と、(2)ヒストグラム・モード (Hモードと略) の2種が用いられている。また両モードにおいて具体的なハードウェアの構成が異なり、それによって計数率特性が異なるので、システム毎に検討を加える。

2. シンチレーション・カメラ動態システムの分類

近年、利用されている動態システムを分類するとFig. 1のようになる。同図(A)はVTRやMTを用いたデータ・ストア・プレイバック・システムで、カメラのX, Y信号がA—D変換され、デジタル量としてVTRやMTに記録され、データ収集後、プレイバックすることによってデジタル

像が得られるものである。同図(B)は主に電子計算機を用いたシステムで利用されている方法で、計算機の主コア・メモリー内に2ヶ所のバッファ領域を設け、カメラからのX, Yおよび時間(T)信号を第1バッファの先頭番地より順次書きこみ第2バッファの内容を外部大容量メモリーに転送する。第1バッファが満杯になると、新しい出力は第2バッファに書きこまれ、第1バッファの内容が外部メモリーに転送される。この動作の繰返しによって全情報を時系列として収集する。(A)と(B)はLモードによる収集である。

一方、Fig. 1 (C) と (D) はHモードによる収集を示す。(C)ではカメラのX, Y信号がデジタル化され、コア・メモリーの番地を決定する。その番地の内容に1を加算して行くことによってコア・メモリーにデジタル像を作成する方法で、動態画像としてはデジタル像の収集時間(フレーム時間)を決めておき、その時間が経過すると、画像データを外部メモリーに転送する。固定プログラム方式のデータ処理装置に磁気テープを附けたシステムではこの方法がよく利用されている。図 (D) はデジタル像を作成するメモリー領域を2ヶ所設定し、一方の領域に(C)と同様な方法で像を作っている間に、他の領域の像を外部メモリーに転送する。一定時間(フレーム時間)の経過後、タイマーから信号によってメモリー領域をスイッチし、収集と転送を逆にする。この動作を繰返すことによって一定フレーム時間のデジタル像を外部メモリーに収集する。

この他、流しカメラによってカメラのCRT上

*放射線医学総合研究所 臨床研究部

** 同 技術部

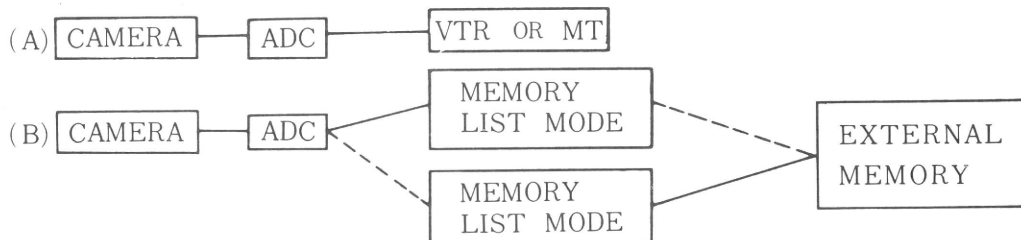
受付: 49年7月5日

別刷請求先: 千葉市穴川4-9-1(〒280)

放射線医学総合研究所

飯沼 武

(I) IST MODE



(II) HISTOGRAM MODE

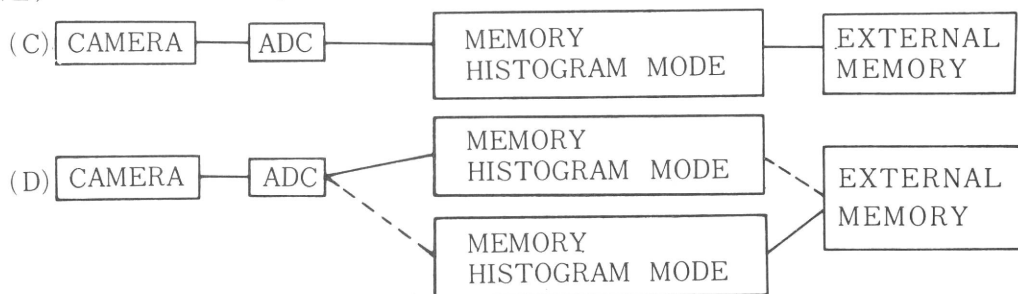


Fig. 1 Various types of scintillation camera-data processor system. (I) List mode acquisition (A) VTR or MT are used for data storage (B) Two buffer memories are used for alternative storage and transfer of the data. External memory of large capacity is used for storage of image data in time sequence. (II) Histogram mode acquisition (C) One buffer memory which stores digital image is used. Digital image is transferred to the external memory by the signal of frame timing. (D) Two buffer memories which store the digital image and transfer the image respectively are employed. Function of the two buffers is switched by the signal of the frame timing. Role of the external memory is the same as (C).

の輝点を連続的に撮影したり、TVカメラによる撮像法があるが、これらは定量的な数値を得ることが困難なのでここではとりあげないことにした。

3. リスト・モードによるデータ収集

本モードによるデータ収集ではカメラの出力信号をA-D変換する時間と、変換後メモリーに書きこむ時間が分解時間となる。Fig. 1 (A) ではカメラからの入力X, Y信号に対して、A-D変換およびVTRまたはMTへの書きこみに要する時間を τ_v 、入力信号の平均計数率を N とすると、書きこまれた計数率 M_v は次式で与えられる。

$$M_v = \frac{N}{1 + \tau_v N} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで分解時間 τ_v は入力X, Y信号の大きさに

よらず一定と仮定している。

次にFig. 1 (B) の2つの高速バッファ・メモリーと外部記憶装置を用いるシステムでは、入力X, Y信号はA-D変換され、バッファ・メモリーの1ワードに書きこまれる。A-D変換とメモリー書き込みに要する時間を、 τ_s とすると、メモリーに書かれる計数率 M_s は次式で表される(放医研のシステムにおいて)¹⁾。

$$M_s = \frac{a \cdot N}{1 + \tau_s N} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで N は(1)式と同じ入力平均計数率、 a は常数で0~1の間の値をとるが、臨床例では $a=1$ であった¹⁾。

一方、バッファ・メモリー1領域のワード数を B_s とすると、1ヶ所のバッファが全て書きこまれる時間 T_w は次のようになる。

$$T_w = \frac{B_s}{M_s} \dots\dots\dots(3)$$

書きこまれたバッファの内容を外部記憶装置に転送する時間 T_t は次の式で表される。

$$T_t = S + t \cdot B_s \dots\dots\dots(4)$$

ここで S はデータを転送する前の割込み処理やハードウェアの始動（特にディスクでの seek time）に要する時間、 t は外部記憶装置へのデータ転送速度、すなわち1ワードの転送に要する時間を表す。

ここで、データ収集が正しく行われるための条件は1つのバッファへの書きこみ中に、他のバッファからのデータ転送が終了していなければならぬ。すなわち、

$$T_w \geq T_t \dots\dots\dots(5)$$

(3)、(4)式を(5)式に代入すると、

$$\frac{B_s}{M_s} \geq S + t \cdot B_s \dots\dots\dots(6)$$

または

$$M_s \leq \frac{B_s}{S + t \cdot B_s} \dots\dots\dots(6')$$

更に(6)'式に(2)式を代入すると、

$$\frac{a \cdot N}{1 + N\tau_s} \leq \frac{B_s}{S + t \cdot B_s} \dots\dots\dots(7)$$

または

$$N \leq \frac{B_s}{aS + B_s(at - \tau_s)} \dots\dots\dots(7')$$

(6)', (7)'式はFig. 1 (B) のシステムによる最高収集可能計数率を与える。前者はバッファ・メモリーに書きこまれる計数率 (M_s)、後者はカメラからの入力平均計数率 (N) における関係を示す。

ここで、実際の数値を入れて、上記2のシステムを比較しよう。Fig. 1 (A) の VTR, MT システムでは、 $\tau_v = 30 \sim 50 \mu\text{sec}$ といわれており、(1)式より、入力平均計数率 N が大きくなると、

$$M_v \longrightarrow \frac{1}{\tau_v}$$

すなわち、 M_v は $3.3 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{cps}$ に漸近し飽和値に達する。このようなシステムでは $M_v = \frac{N}{2}$ 、すなわち $N = \frac{1}{\tau_v}$ 以上の計数率に対しては補正係数 N/M_v が急増するため誤差が大きくなる。

一方、Fig. 1 (B) の例として放医研のオンライン計算機システムの場合を考えると、先ず(7)'式より最大入力計数率 N_{max} が計算できる。(7)'式で $S = 0.1 \text{ sec}$, $B_s = 2,000$, $t = 2 \times 10^{-5} \text{ sec/ワード}$, $\tau_s = 10^{-5} \text{ sec/ワード}$ および $a = 1$ とすると、 $N_{max} = 16,700 \text{ cps}$ となりこれ以上の入力計数率は不可能である。他方、(2)式より、バッファ・メモリーへの書きこみ速度の上限を $N = \frac{1}{\tau_s}$ とすると $\tau_s = 10^{-5} \text{ sec}$ であるから $N = 10^5 \text{ cps}$ となる。すなわち、バッファへの書きこみ速度に比して、外部記憶装置への書きこみ速度は著しくおそい。その原因は(7)'式より判るように磁気ディスクの seek time と転送速度がおそいためである。尚、前記の N_{max} の値についてはパルス発生器でA—D変換器に繰返し異なるパルスを入力して、入力パルス率とバッファ・メモリーでの収集を調べた。その結果、繰返し16,500パルス/sec 以下では入力パルス率と収集率とは完全に等しいが、それ以上では飽和することが判った。すなわち計算した N_{max} および前報でのカメラの入力信号の最高収集率¹⁾ とよく一致する。

4. ヒストグラム・モードによるデータ収集

本モードにおける収集も、先ず高速メモリーへの書きこみとそのメモリーから外部大容量メモリーへのデータ転送とに分けて考える必要がある。前者は(1)式と同様に下記のように表される¹⁾。

$$M_I = \frac{N}{1 + N\tau_I} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 M_I はヒストグラム・モードによって高速メモリーに書きこまれる計数率、 τ_I はA—D変換と指定されたアドレスのメモリーに1を加えるに要する時間、 N は前述と同じく入力平均計数率である。

一方、ディジタル・イメージを収集しているメモリー領域の大きさをと B_I すると、単位フレーム時間毎に B_I 個のメモリーよりデータを外部記憶装置に転送し、メモリーの内容をクリアーしなければならない。メモリーの転送・クリアーに要する時間 T_I は次式で与えられる。

$$T_I = S + B_I(t + t') \dots\dots\dots(9)$$

(9)式で S と t は(4)式で示したものと同一因子であるが、 t' はメモリー1ワードをクリアーするのに要する時間を示し、通常 t よりも小さい値である。

ここで実際の数値を用いて検討する。先ず(8)式の τ_I は放医研のシステムでは前報¹⁾のように 10^{-5} secであり、他の我国におけるガンマ・カメラ用算機システムにおいても略ぼ同様な値であると推測される。従って、前節リスト・モードの場合のように、 $N=10^5$ cps 程度まで入力可能である。一方、 T_I は次のようになる。(9)式の各々の項を $S=0.1$ sec, $t=2 \times 10^{-5}$ sec, $t'=5 \times 10^{-6}$ sec および $B_I=4,096$ とすると、 $T_I=0.2$ sec となる。そこで Fig. 1 (C) および (D) のヒストグラム・モードによるデータ収集を考えよう。(C) の場合はデータ収集時間(フレーム時間(T_F))とデータ転送

クリアー時間(T_I)の関係は Fig. 2 (A) のようになる。すなわち T_F はデータ処理装置のタイマーからの信号 [Fig. 2 (A) の $t_i, t_{i+1} \dots\dots$] によって決められているが、その時間信号が入力されてから、データの転送とクリアーが同じメモリー領域において行われるため、データ収集時間が不正確となる。特に外部記憶装置が磁気ディスクの場合、seek time S は一定でなく、 t と t' の値も異なるため、収集された動態イメージのフレーム時間にばらつきが生ずる。

一方、Fig. 1 (D) の場合はデータ収集とフレーム時間の関係が Fig. 2 (B) に示すような関係となる。例えば現在、第1バッファ領域でデータ収集(フレーム F_i)を行っていて、タイマーからの時間信号 t_i が入ったとすると、データ収集は第2バッファに移り(F_{i+1})、第1バッファのデータは外部記憶装置に転送される。データ転送の時間は

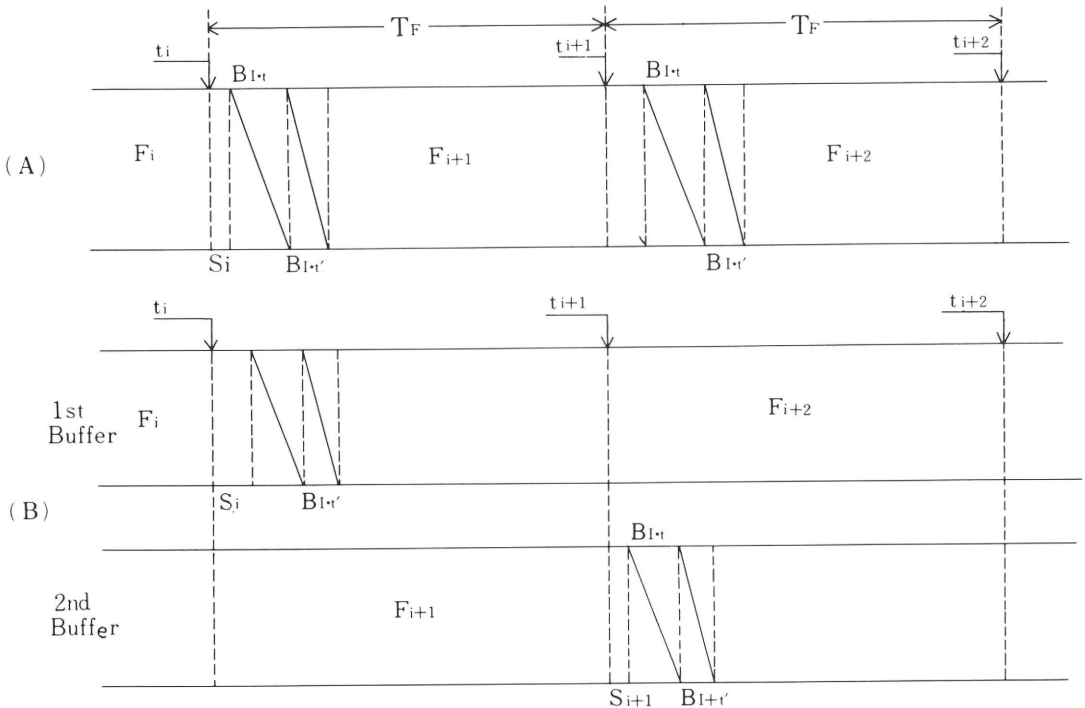


Fig. 2 Timing chart of data acquisition and transfer in histogram mode. (A) One buffer memory system corresponding to Fig.1 (C). (B) Two buffer memory system corresponding to Fig. 1 (D). F_i : Frame number, t_i : timing signal, T_F : frame time interval $= t_{i+1} - t_i$, B_I : size of buffer memory (words), S_i : access time to start data transfer to the external memory, t : transfer speed from core memory to the external memory (sec/word), t' : speed of clearing the core memory (sec/word)

Fig. 2 (A) と同様である。しかし、本データ収集方式の場合、フレーム時間 T_F が次の関係を満足する限り、ばらつきは生じない。

$$T_F \geq \max(T_I) \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 T_I は(9)式に示した因子であるが S が最大値をとる時、最大となるので、 T_F はそれよりも大きいことを意味する。逆にフレーム時間にあいまいさを生じない最小の値は上式が等号の時である。もし、 $T_F < T_I$ の状態ではデータ転送中に、データ収集が行われるようになり、データ収集は全く意味をなさなくなることが判る。

Fig. 1 (C) および (D) の具体的な例として放医研のオンラインシステムの場合を検討した。先ず前者の場合はメモリー領域として4,096ワードを用いているので(9)式に示した関係から前述の如く $T_I = 0.2\text{sec}$ となる。この場合 S は0.1sec として計算しており、我々のシステムでは最大値と考えられるので、上の T_I も最大値と考えてよい。この収集方式では T_I が存在することによってフレームの計数率に統計変動以外のシステムティックな誤差が必ず加わるが、前報¹⁾ で実験的に求めた結果では $T_F = 8\text{sec}$ 以下では無視できなくなることが判った。

一方、後者では1,024ワードバッファ領域を2ケ用いるので、 $B_I = 1,024$ となり、(9)式よりその他の項は全て前者と同一として計算すると、 $T_I = 0.125\text{sec}$ となる。この場合も T_I は最大値と考えてよく、(10)式よりフレーム時間 T_F は0.125sec が最小値である。前報での実測より $T_F = 0.128\text{sec}$ 以下でフレーム計数値のばらつきが急激に増加することを示しており、よく計算値と一致している。

我々のシステムで外部記憶装置として磁気テープを用いる場合は転送速度が現在29Kキャラクタ/secであり、ワード単位に変換すると(1キャラクタ=6ビット、1ワード=4キャラクタ)7Kワード/secの転送速度となる。そこで(9)式より、 $S = 0.05\text{sec}$ (磁気テープの起動までの時間など)とすると、4Kワード・バッファで $T_I = 0.6\text{sec}$ 、1Kワード・バッファで $T_I = 0.2\text{sec}$ となり、ディスクに比して遅くなる。

我国で用いられているガンマ・カメラ計算機システムでは主に Fig. 1 (C) および (D) の収集方式を用いている。Scintipac の NOVA システムでは (C) の方式で、4,096ワードのバッファ1ケ所から磁気ディスクに転送しており、 S の最大値が0.135sec、4Kワードの転送に0.05sec要するので、 $T_I = 0.2\text{sec}$ となり、放医研の1バッファの場合と一致する。従って動態イメージの各フレームの計数値にばらつきを生ずることになる。

一方、医理研のJACシステムでは4Kワードのバッファ2ケ所より Fig. 1 (D) の方式でデータを転送するが、磁気テープを用いる場合、仕様によると4Kワードの転送に1.2secを要すると言われる。磁気ドラムでは0.1sec程度であろうと考えられる。従ってフレーム時間が上記以上の時間であれば正確な収集が可能である。もし外部記憶装置としてカセットMTを用いた場合は転送速度がおそいため、最小フレーム時間はもっと大きくなるであろう。

5. 考 察

ガンマ・カメラと計算機を利用した定量的な動態画像システムの計数率特性は、(1)ガンマ・カメラの detection event から計算機の高速メモリー(バッファ)までの応答特性と、(2)バッファ・メモリーから最終的な動態像を蓄積する外部記憶装置の転送特性の二つに分けて考えねばならないことを明らかにした。特に後者はリスト・モードまたはヒストグラム・モードの2種のデータ収集法によって著しく異なる。

先ず、カメラからの入力計数率と高速メモリーに書きこまれる計数率の関係はリスト・モードにおいても、ヒストグラム・モードにおいても同一であり、(1)、(2)および(8)式によって示された。そこでカメラの detection event rate とメモリーに書きこまれる計数率の関係を求めておこう。

前報¹⁾ で述べた如く、detection event rate N_0 から入力計数率 N を求める関係式は次式で表される。

$$N = RN_0 \exp(-\tau N_0) \dots \dots \dots (11)$$

ここで τ はカメラの見かけの dead time, R は detection event 中で選別されるエネルギー範囲内にあるものの割合を示す。

我々が求めたい真の計数率は RN_0 であるので (11)式を変形して、

$$N = N_i \exp\left(-\tau \frac{N_i}{R}\right) \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{但し, } N_i = RN_0 \dots\dots\dots (13)$$

とおく。

一方, (2)式と(8)式を変形すると、

$$N = \frac{M_s}{a - \tau_s M_s} \dots\dots\dots (2)'$$

$$N = \frac{M_l}{1 - \tau_l M_l} \dots\dots\dots (8)'$$

(2)' および (8)' 式は $a=1.0$ とおけば全く同じ形なので (12)式および (8)' 式より

$$N_i \exp\left(-\tau \frac{N_i}{R}\right) = \frac{M_l}{1 - \tau_l M_l} \dots\dots\dots (14)$$

$\tau \frac{N_i}{R} \ll 1$ の時は

$$N_i \doteq \frac{M_l}{1 - M_l \left(\frac{\tau}{R} + \tau_l\right)} \dots\dots\dots (14)'$$

となる。この (14) および (14)' 式は高速メモリーに書きこまれる計数率 (M_l) と真の計数率 (N_i) の関係を示す。ここで注意すべきことは (2)' および (8)' 式の関係はデータ処理装置の分解時間 (τ_s または τ_l) がカメラの分解時間 (τ) より大きいため生ずるものであり、もし、処理装置の分解時間がカメラのそれよりも小さい場合 ($\tau > \tau_s$ or τ_l) はカメラからの入力パルスは τ 以内には発生しないので、処理装置の分解時間は見掛け上 0 になる。すなわち実効的に τ_s or $\tau_l = 0$ 、つまり $M = N$ となる。現在、ガンマ・カメラと共に用いられているオン・ライン・データ処理装置 (計算機を含めて) の分解時間はカメラのそれよりも普通は大きいので、(2) および (8) 式が成立すると考えられる。またカメラからの入力パルスは完全なポアソン出力ではなく、ある分解時間 τ 以内には出力が発生しない。このことは (2) および (8) 式が厳密には成立せず、あくまで実験式であることを示している。

次に、高速バッファ・メモリーに書かれた計数率 (M) が外部記憶装置に転送される過程は上と全く異なり、容量の大きいバッファによって平均化 (derandomize) された計数率をとり扱うことになる。ここではリストおよびヒストグラム・モードによってデータ収集の特性が異なる。前者では収集可能最高計数率は (7)' 式のようにバッファ・メモリーの容量と転送速度によって決められるが、動態画像のフレーム時間は位置情報と共に時間信号を収集しておくことによっていくらか短くできる。ところが後者では収集可能計数率は A-D 変換および高速バッファ・メモリーへの書きこみに要する時間によって決められ、現状のシステムでは前者の最高計数率よりも大きい。しかし、フレーム時間は (9) 式で規定される T_l よりも短くできない。

以上の解析からガンマ・カメラ計算機システムによる定量的動態画像の収集において、計え落しの補正が可能な範囲は、両モードにおける収集が外部記憶装置の転送速度をこえない時で、(14) および (14)' 式の誤差が許容できる範囲の計数率をさす (例えば $N_i \leq 2M$)。また本解析によって今後ガンマ・カメラのデータ処理システムの設計に際してはどのモードを採用すべきか、その際ハードウェアの速度はどの程度にす可きかが決定できる。更に最終的な像の記憶場所としての外部記憶装置の容量についても両モード別に見積ることもできる。今後の計算機システムとしてはバッファ・メモリーへの書きこみまでの時間がカメラの分解時間よりも小さく、アクセスと転送速度が大きい磁気ディスクをもつものが望ましい²⁾。

6. 結 論

ガンマ・カメラ計算機システムによる定量的な動態画像収集において、その計数率による誤差を検討した結果次の結論を得た。

1. データ収集は先ず、A-D 変換からバッファ・メモリーへの書きこみまでの段階とバッファ・メモリーから外部記憶装置への転送とに分けて考察しなければならない。

2. 前者ではカメラからの入力パルス率を近似的ポアソン過程と考えた実験式によってバッファ・メモリーへ書きこまれる計数率を表すことができた。そしてこの段階ではカメラの真の計数率とメモリーに書きこまれたそれを関係づけることができる。
3. 後者ではリスト・モードおよびヒストグラム・モードの両モードによって動態画像の計数率特性が異なる。リスト・モードでは収集可能な最高計数率は低いがフレーム時間は任意に選べるのに対し、ヒストグラム・モードでは最高計数率は前モードに比して大きい、フレーム時間は或る最小値以下を選ぶことができない。
4. 本報で述べた解析によってガンマ・カメラ—計算機システムによる動態画像収集におけるハードウェアの性能を合理的に評価でき、システム設計に有効であると考えられる。
5. カメラおよびデータ処理装置の分解時間は、

定量的な動態画像収集に大きな誤差をもたらす場合がある。これらの分解時間は個々の装置によって異なるので、各施設において測定する必要のあることを強調すると共に外部記憶装置の性能を充分考慮した動態研究を計画されるよう望みたい

謝 辞

御指導を賜った物理研究部 田中栄一室長および臨床研究部 梅垣洋一郎部長に感謝する。また臨床研究部 有水昇室長には有益な御討論を頂いた。

文 献

- (1) 福久健二郎, 飯沼武, 松本徹: シンチレーション・カメラ電子計算機システムにおける分解時間とその補正法 I. カメラと計算機システムの分解時間. 核医学 11 (6): 605~615, 1974
- (2) Budinger TF: Clinical and research quantitative nuclear medicine system. Medical Radioisotope Scintigraphy 1: 501, IAEA, Vienna, 1973

Summary

Resolving Time of Scintillation Camera-Computer System and Methods of Correction for Counting Loss

II. On the Dynamic Performance of various Types of Camera-Computer Systems

Takeshi IINUMA, Kenjiro FUKUHISA and Toru MATSUMOTO

*National Institute of Radiological Sciences,
Anagawa, Chiba-shi, JAPAN (280)*

Following the previous work, counting-rate performance of camera-computer systems is investigated for two modes of data acquisition. The first is "LIST" mode in which image data and timing signal are sequentially stored onto magnetic disk or tape via buffer memory. The second is "HISTOGRAM" mode in which image data are stored into core memory as a digital image and then the image are transferred to magnetic disk or tape by the signal of frame timing.

Firstly, the counting-rates stored in the buffer memory was measured as a function of display event-rates of scintillation camera for the two modes. For the both modes, stored counting-rates (M) are expressed by the following formula: $M=N/(1-N\tau)$ where N is the display event-rates of the camera and τ is the resolving time including analog-to-digital conversion time and memory cycle time. The resolving time for each mode may be different, but it is about 10 μ sec for the both mode in our computer system (TOSBAC 3400 model

31).

Secondly, the data transfer speed from the buffer memory to external memory such as magnetic disk or tape was considered for the two modes. For the "LIST" mode, the maximum value of stored counting-rates from the camera is expressed in terms of size of buffer memory, access time and data transfer-rate of the external memory. For the "HISTOGRAM" mode, the minimum time of the frame is determined by size of buffer memory, access time and transfer rate of the external memory. In our system, maximum value of stored counting-rates is about 17,000 counts/sec. with the buffer size of 2,000 words, and minimum frame time is about 130 msec. with the buffer size of 1024 words. These values agree well with the calculated ones.

From the present analysis, design of the camera-computer system becomes possible for the quantitative dynamic imaging and future improvements are suggested.