

高速汎用プロセッサを用いたリアルタイム MR 画像再構成システムの開発

巨瀬勝美, 拝師智之

筑波大学物理工学系

はじめに

撮像の高速化とともに、データ収集と並行して画像を再構成・表示する、いわゆる「リアルタイム MRI」が普及しつつある。その最初の試みは、Riederer らによるもので、彼らは、これを MR fluoroscopy と名付けた¹⁾。彼らは、勾配エコー法でデータを収集し、アレイプロセッサを用いて、 128×128 画素の画像を 120ms で再構成することにより、毎秒 1 枚の速度で、MR 画像のリアルタイム表示に成功した。

いっぽう、Kose らは²⁾、エコー・プランナー法でデータを収集し、デジタル信号処理専用のプロセッサ (Digital signal processor: DSP) を用いて、 64×64 画素の画像を 50ms 程度で再構成することにより、毎秒約 7 枚の速度で、MR 画像をリアルタイムに表示することに成功した。また、最近では、リアルタイム MRI として、専用のハードウェアを用いたもの³⁾や、ワークステーションを利用したもの⁴⁾などが報告され、商用のシステムには、MR fluoroscopy として、リアルタイム MRI が装備されつつある。

以上のように、リアルタイム MRI の画像再構成装置として、これまで、さまざまな種類の

システムが発表されているが、それぞれ、長所ばかりでなく、いくつかの欠点も見られる。たとえば、専用のハードウェアを用いた場合は、画像再構成時間は飛躍的に短縮される (128×128 画素の画像に対し 2ms ³⁾) もの、開発に多大の時間とコストを要するという欠点がある。また、高速のワークステーションを用いた場合には、ハードウェアの開発が不要で、かつ十分な処理速度は得られるものの、そのオペレーティングシステム (UNIX) の性格上、時間的応答性に難点がある。

本研究では、以上の状況をふまえて、近年、処理速度の向上と低価格化の著しいパーソナルコンピュータを用いた、画像再構成システムを開発した。その結果、低価格でも十分な処理速度を有し、かつ拡張性にも富むシステムを、短時間で開発することに成功した。以下に、そのシステムの構成と、これを用いて行った実験の結果を述べる。

画像再構成システム

本研究で開発したリアルタイム画像再構成システムを、Fig.1 に示す。このシステムは、クロック周波数が 100MHz のマイクロプロセッサ (Pentium: Intel) を内蔵したパーソナルコ

キーワード real-time MRI, MR fluoroscopy, image reconstruction

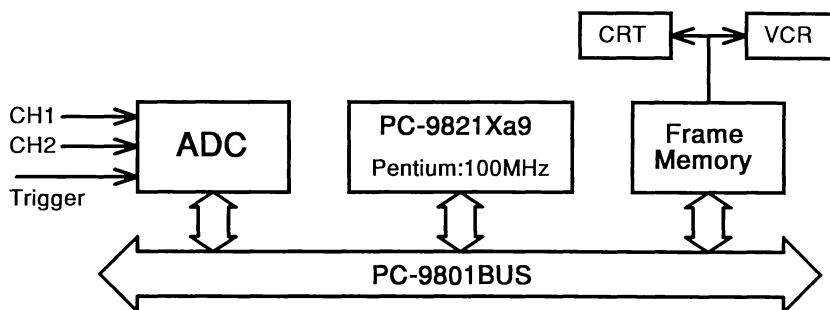


Fig.1. Block diagram of the real-time image reconstruction system. The clock frequency of the PC was raised from 90MHz to 100MHz by changing a jumper connection in the PC. Reconstructed images are stored in a RAM disk in the PC as well as recorded on a vide-cassette tape.

ンピュータ (PC 9821 Xa 9: NEC) を中心として、その拡張バス (通称 C バス) に、AD 変換ボードと、画像表示のためのフレームメモリボードを備えたものである。

AD 変換ボードには、同時に 2 チャンネルの信号を、12 ビットで、最高 500kHz のサンプリングレートでデジタル化できる、マイクロサイエンス社 (東京) の ADM-8498 BPC を用いた。また、フレームメモリとして、256 × 240 画素で、階調が 8 ビットのグレースケールの画面を 2 面もつものを自作した。この 2 画面の表示は、CPU からの信号で瞬時に切り替えられ、かつ画面への書き込みは、表示されていない面にのみなされるため、表示画面のリフレッシュは、スムーズに行われる。なお、このフレームメモリの映像信号出力は、NTSC 規格のビデオ信号になっているため、長期間にわたって、MR 画像をビデオテープに記録することも可能である。

このシステムのソフトウェアの開発は、MS-DOS ver. 6.2 上で、Microsoft 社の C コンパイラ (MS-C ver. 6) を使用して行った。また、プログラムのコンパイルの際には、処理の高速化を最優先にした最適化オプションを選択した。

実験方法

実験に用いた試料は、少量のセルロースを加えて粘性を上昇させた水に、デルリン製の楕円体状の粒子を多数混合した「モデルコンクリート」である。また、この試料に、少量の硫酸銅結晶を加えて、 T_1 を約 25ms、 T_2 を約 15ms に調整した。

この試料の流動を観測するための容器として、内径が、一カ所で 16mm から 8mm へと一様に变化するアクリル製パイプを用いた。そして、RF コイルに鉛直に挿入したこのパイプの中に、上記の試料を流し込み、その内径の变化する部分において、鉛直断層面を撮像した。

MR 画像の撮像には、静磁場強度 4.74T の鉛直な開口をもつ超伝導磁石 (室温開口径 89 mm) と、能動遮蔽型勾配コイルを備えた、自作の MRI システムを用いた。パルスシーケンスには、繰り返し時間 4.72ms、エコー時間 2.70 ms、フリップ角 25° の勾配エコー系列を用いた。信号計測は、20 μ s のサンプリングレートで 128 点をサンプリングして行い、1 画像分の生データをコンピュータのメインメモリに一時的に保存した後、画像再構成計算と画像表示を

行い、さらにその画像データを、RAM ディスクに保存した。

結 果

コンピュータのシステム時間 (MS-DOS では 10ms 単位で計測可能) を用いて計測した画像再構成時間は、約 310ms、画像表示に要した時間は約 30ms であった。この画像再構成時間のうち、DC オフセットの計算と補正に約 30

ms、二次元の高速フーリエ変換に約 250ms、絶対値の計算と画素値の正規化に約 30ms を要した。なお、絶対値の計算と画素値の正規化には、あらかじめ作成した数表を参照することで高速化を行った。ただし、上に示した処理時間には、いずれも、最大±10ms の誤差が含まれている。

パルスの繰り返し時間が 4.72ms の勾配エコー法のシーケンスを用いて、データ収集-画像再構成-画像表示-RAM ディスクへのデータの

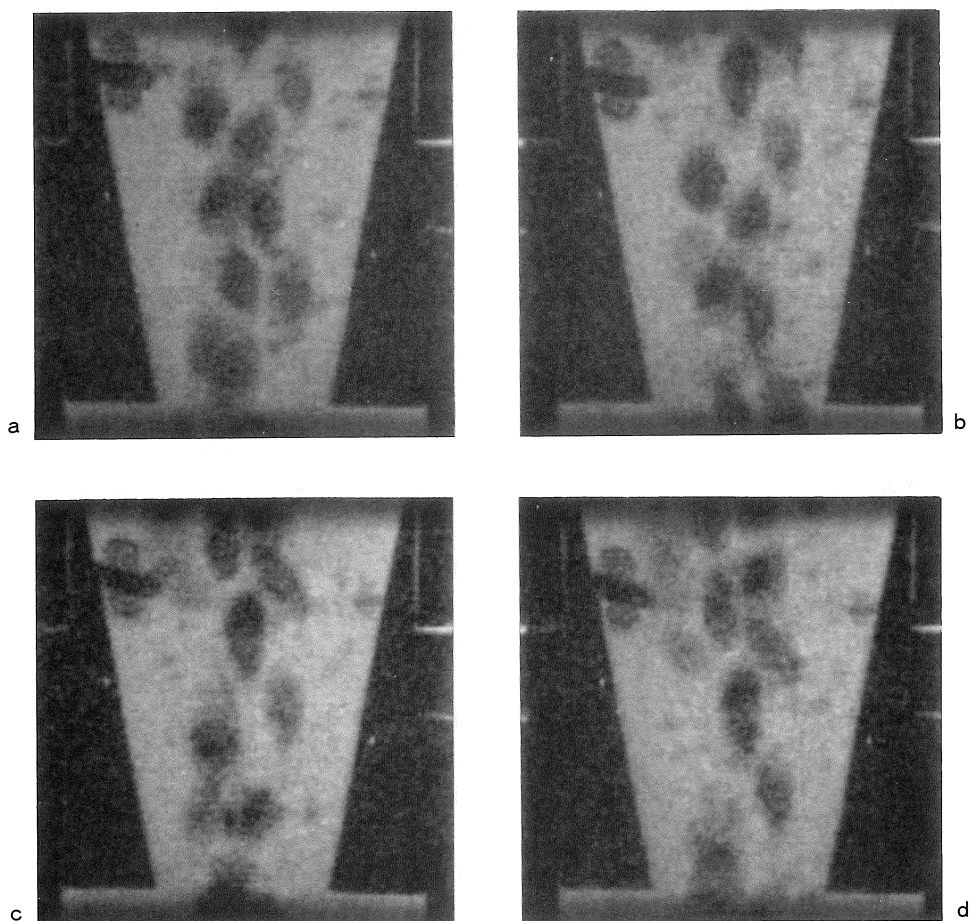


Fig.2. Four consecutive images of “model concrete” flowing downward in the acrylic pipe. The time-intervals between the images were 1.06s. A large bubble is visualized in the upper left of the images. The images of the bubble are clear because the moving speed is slow (about 0.3mm/s). Other low intensity portions are oval plastic particles. The images of the particles are blurred due to their relatively fast downward motions (about 3mm/s).

保存の一連の操作を繰り返したときに、実現できた最短の繰り返し時間は、0.95 秒であった。この時間は、データ収集の時間 604.16ms と、画像再構成と表示に要した時間約 340ms の和とほぼ等しいため、その他のシステムオーバーヘッドはほとんどないものと判断された。

Fig.2 に、この画像再構成システムを用いて、モデルコンクリートの試料を、1.06 秒の時間間隔で連続的に撮像した画像を示す。これらの画像は、1.06 秒の時間間隔で、リアルタイムに画像再構成・表示し、そして保存した 600 枚の一連のデジタル画像データから選んだものである。スライスの厚さは 4mm、撮像領域の大きさは 19.2mm × 19.2mm、画像マトリックスは 128 × 128、画素サイズは 0.15mm × 0.15mm である。

これらの画像において、楕円体状の粒子が、パイプの中央部において、上から下へと比較的速く流れてゆき、流体に含まれた泡が、パイプの壁付近（画面左上）で、ゆっくりと下へ流れていく現象が映像化されている。泡はゆっくりと動いている（約 0.3mm/s）ため、その形状がはっきりと描出されているが、粒子は比較的速く流れている（約 3mm/s）ため、ややぼけたものとなっている。なお、泡（空気）は、よく知られているように、磁気感受率が流体（水）と著しく異なるため、十文字状のシグナルロスとして映像化されており、粒子との識別は容易である。

考 察

本研究で用いた装置では、128 × 128 画素の画像データを勾配エコー法を用いて計測できる最短時間は約 600ms であるので、本研究で達成した画像再構成・表示に要した時間 340ms は、ほぼ満足できる処理速度である。しかし、本研究で使用した C コンパイラは MS-DOS 用であり、処理プログラムは、16 ビットマイクロコンピュータ互換のコード（インテル 80286

用のコード）で動作しているので、その代わりに、32 ビットプロセッサに最適化されたコードを用いれば、より高速な画像再構成が期待される⁵⁾。

本研究では、Fig.2 に示した例のように、磁気感受率に大きな空間分布がある場合でも撮像が可能な勾配エコー法を用いて、撮像実験を行った。より時間分解能を向上させるためには、エコー・プラナー法を用いることが望ましいが、これを用いた場合、特に高い共鳴磁場では、磁気感受率の変化による画像歪が深刻な問題となり、実用的な撮像は非常に困難である。よって、このような場合には、勾配エコー法を用いて、時間分解能を向上させる今回のアプローチが、実用的な選択であると思われる。

本システムでは、画像表示に自作のフレームメモリを使用することにより、約 30ms で 128 × 128 画素の画像表示が可能であった。しかし、システムの開発期間とコストの観点から見ると、ハードウェアを独自に開発するよりも、マイクロソフトウィンドウズなどで使用している画像ウィンドウを用いることが望ましい。すなわち、ウィンドウシステムが搭載されたパーソナルコンピュータに、AD コンバータのボードをインストールし、後はソフトウェアを開発するだけで、リアルタイム画像再構成装置を製作することが可能であると思われる。

ウィンドウシステムを搭載したパーソナルコンピュータ（IBM-PC や Macintosh など）の性能は、これからもますます向上していくと期待されるため、MR 画像の後処理のことまで考慮すると、上に述べたシステムが、リアルタイム画像再構成システムの、1 つの究極の姿になるものと予測される。

む す び

高速なマイクロプロセッサを搭載したパーソナルコンピュータを用いて、リアルタイム MR 画像再構成システムを開発した。繰り返し時間

の短い勾配エコーパルス系列を使用することにより、 128×128 画素の画像を、最高0.95秒に1枚の速度で、再構成・表示・保存することに成功した。

本システムは、検波後の2チャンネルのMR信号と、データサンプリングのためのトリガー信号以外は必要としないため、既設のMRIシステムにも接続することが可能である⁶⁾。今後、MRIの開発現場や実験室などを中心に、このようなシステムが普及していくことが期待される。最後に、試料を提供し、実験に協力していただいた、筑波大学理工学研究科の芹川至史氏に感謝する。

文 献

1) Wright RC, Riederer SJ, Fazaneh F, et al.: Real

-time MR fluoroscopic data acquisition and image reconstruction. *Magn Reson Med*, 12, 407-415, 1989.

2) Kose K, Inouye T: A real-time NMR image reconstruction system using echo-planar imaging and a digital signal processor. *Meas Sci Technol* 3, 1161-1165, 1992.

3) Gmitro AF, Ehsani A, Bercham T: True real-time reconstruction of MR images. Abstract book of 2nd annual meeting of the Society of Magnetic Resonance, 23, 1994.

4) Cox RW, Jesmanowicz A, Hyde JS: Real-time functional magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med*, 33, 230-236, 1995.

5) 拝師智之: 平成7年度筑波大学基礎工学類卒業論文。

6) 市川修, 巨瀬勝美, 瀬尾芳輝: 動物用MRIにおける高速画像再構成実験, 日磁医誌, 15, 216-220, 1995.

Development of a Real-Time MR Image Reconstruction System Using a High-Speed Microprocessor

Katsumi KOSE, Tomoyuki HAISHI

*Institute of Applied Physics, University of Tsukuba
1-1-1, Tennoudai, Tsukuba-City 305*

A real-time MR image reconstruction system has been developed using a personal computer system with a high-speed microprocessor (Pentium 100MHz). The image refresh time of 0.95s for 128×128 matrix images was achieved using a fast gradient-echo sequence with a TR/TE/flip angle of 4.72ms/2.70ms/25°. MR images of "model concrete" were obtained repetitively and digitally recorded on a RAM disk for a long time. The experimental results have demonstrated that an image reconstruction system using high-performance PC could be a best solution for real-time image reconstruction in MRI.