

マルチ GPU を用いた三次元 MRI 圧縮センシング再構成の高速化

小野寺 有太[†] 伊藤 聡志[†] 山田 芳文[‡]宇都宮大学 大学院工学研究科情報システム科学専攻[†] 宇都宮大学 名誉教授[‡]

1. はじめに

磁気共鳴映像法(MRI)の課題として撮像時間の短縮が挙げられる。近年、撮像時間を短縮する方法として圧縮センシングの MRI 応用が盛んに検討されている[1]。圧縮センシングとはサンプリング定理を満たさない少数の観測データから画像復元を行う方法である。圧縮センシングによって撮像時間を大幅に短縮できる可能性があるが、画像再生に要する計算時間が長くなる問題がある。本研究では MRI のマルチスライス撮像に圧縮センシングを応用し、かつ、高い並列演算性能を有する画像処理プロセッサ(GPU)を圧縮センシングの計算に利用することによる画像再構成処理の高速化について検討を行った。これまでは、単一の GPU を使用した高速化の検討を行ってきたが[2]、複数の GPU を並列に使用するマルチ GPU 環境下であれば、さらなる高速化が期待できる。そこで本研究では、科学技術計算用に特化した 2 基の GPU を使用することにより再構成処理のさらなる高速化について検討を行った。

2. 圧縮センシングの MRI 応用

圧縮センシングは、観測対象に疎性(スパース性)が存在する前提のもとサンプリング定理で求められるデータ数よりも少量の観測データから信号を復元する手法である。 ρ を系列長 N のベクトル、 s を系列長 M のベクトルからなる観測データ、 Φ を $M \times N$ の観測行列とする。 $s = \Phi\rho$ の関係式から ρ を復元しようとするとき、 $M < N$ の場合であると、解は一意に定まらない。しかし、 ρ のベクトルを構成する成分のうち、その要素にゼロを多く含んでいるスパース性がある場合には、 ρ を復元することができる。

MR 画像は一般に ρ の要素にゼロを多く含んでいないが、適切な基底を持つ変換関数 Ψ を施した場合に、スパース性を与えることができる。観測信号には雑音が含まれていることを考慮し、 $\tilde{\rho} = \Psi\rho$ として、式(1)の拘束条件付き最適化問題を解く。

$$\tilde{\rho} = \operatorname{argmin} \|\tilde{\rho}\|_1 \quad \text{subject to} \quad \|s - (\Phi\Psi^{-1})\tilde{\rho}\|_2 < \varepsilon \quad (1)$$

式(1)から $\tilde{\rho}$ を求める方法には、いくつかあるが、本研究では比較的計算コストが少ない反復的閾値法を

使用した。反復的閾値法は、次の式(3)、(4)に示す閾値処理と射影を反復的に行う方法である。

$$\tilde{\rho} = \Psi\rho^{(i)} \quad (2)$$

$$\check{\rho}^{(i)} = \rho^{(i)} + \frac{1}{\gamma} \Psi F_u^T (s - F_u \rho^{(i)}) \quad (3)$$

$$\check{\rho}^{(i+1)} = \begin{cases} \check{\rho}^{(i)} & \left(\left| \check{\rho}^{(i)} \right| - \tau^{(i)} \right) \left| \check{\rho}^{(i)} \right| \geq \tau^{(i)} \\ 0 & \left| \check{\rho}^{(i)} \right| < \tau^{(i)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho^{(i+1)} = \Psi^{-1} \check{\rho}^{(i+1)}, \quad \tau^{(i+1)} = \eta \tau^{(i)} \quad (5)$$

ここで F_u はフーリエ変換後に間引きを行う関数であり、 F_u^T は間引きを行った軌道にゼロデータを充填して逆フーリエ変換を行う関数、 η は 1 未満の定数、 i は反復回数を表すインデックス、 τ は反復 i 回時の閾値である。

3. マルチスライス撮像法

MRI は生体内のプロトンを励起し、信号を収集した後に緩和と呼ばれる一定の待ち時間を経てから次の信号収集を行う。そのため、一般に撮像時間が長くなる問題がある。その解決法として複数枚の 2 次元撮像を連続して行うマルチスライス撮像法がある。マルチスライス撮像は緩和を待つ間に別のスライス面の信号計測を行うので、実効的な待ち時間を少なくし、3 次元画像の撮像時間を実質的に短縮することができる。この撮像法に圧縮センシングを応用するには、信号をランダムに間引く方法が取られる。

4. GPGPU による再構成処理の高速化

本研究では、GPGPU 開発環境として NVIDIA 社が提供する CUDA(Compute Unified Device Architecture)を使用した。CUDA には CUFFT ライブラリと呼ばれる GPGPU 用に最適化されたフーリエ変換ライブラリが用意されており、強力な浮動小数点演算と GPU の並列性を活用することができる。本研究ではこの CUFFT ライブラリを使用し、フーリエ変換処理の並列化を行った。また、本研究では 2 つの GPU を利用したマルチ GPU についても検討を行い、再構成処理のさらなる高速化を試みた。マルチ GPU 環境では、CPU の処理をマルチスレッド化し、各スレッドが 1 つの GPU を制御する。本研究では、マルチスレッドプログラミング向け API である OpenMP を CUDA と併用し、GPU 間の並列化を図った。

Accelerating Magnetic Resonance Three-Dimensional Imaging using Compressed Sensing and Multi-GPU Computing

[†]Yuta Onodera, Satoshi Ito (Utsunomiya Univ.)

[‡]Yoshifumi Yamada (Utsunomiya Univ. professor emeritus)

Tesla 4 計算時間の内訳(データの入出力処理等を除く)

処理	計算時間 [ms]		
	CPU	single-GPU	multi-GPU
フーリエ変換処理	298,571	1,286	653
フーリエ変換に伴うデータスワップ	77,298	1,060	524
スパース化変換(eFREBAS 変換)	24,251	1,021	538
置換処理	15,282	75	41
閾値処理	19,655	62	35
CPU-GPU 間のデータ転送	-	30	30
GPU 内のデータ転送	-	1,740	1,615
その他	34,661	30	19
総計算時間	469,718	5,304	3,455

5. 評価実験

5.1 画像再生精度評価

承諾を得られた健常ボランティアに対し、東芝 1.5T 製 MRI を使用して得られたマルチスライス像を用いて画像再生実験を行った。画像サイズは 256×256 マトリクスであり、スライス枚数 32 枚で画像再生を行った。本研究では、計算機の CPU のみを使用して計算した場合と、GPU を適用した場合の再生像の品質比較を行った。評価に用いた計算機環境と GPU の仕様をそれぞれ Table 1, 2 に示す。本研究では C 言語によりコーディングを行った。

Fig.1 に信号データ量を 30%、反復回数を 30 回としたときの再生像の一部を示す。CPU と GPU による再生像を比較したところ、大きな差異は見られなかった。また本研究では、再生像の画質を定量的に評価するため、再生誤差の平均二乗誤差を振幅の最大値の比で評価する PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)を使用した。各条件における PSNR の比較結果を Table 3 に示す。Table 3 より、CPU と GPU による PSNR の値はほぼ同等であった。

5.1 再構成時間

圧縮センシングの画像再構成に対し、計算機の CPU をシングルスレッドで利用した場合と、単一の GPU を利用した場合、さらに 2 つの GPU を利用した場合とで計算時間の比較を行った。Table 4 に結果を示す。Table 4 の結果より、CPU のみの使用で約 469.7 秒を要した計算を、単一の GPU の使用によって約 53 秒に短縮され、2 つの GPU の導入によって約 35 秒にまで短縮することができた。GPU を圧縮センシングの計算に利用することによって、各プロセスの計算時間を大幅に短縮することができた。特に、計算時間の大部分を占めていたフーリエ変換処理を CUFFT ライブラリで行うことによって大幅に短縮することができた。また、マルチ GPU の導入によって、CPU-GPU 間のデータ転送を除いた各プロセスの計算時間をさらに短縮することができた。GPU コンピューティングを行う際、CPU-GPU 間のデータ転送に時間を要し、この転送を多用したプログラムでは性能の向上が難しい。本研究では、圧縮センシングのほとんど全ての処理を GPU 内で連続的に行わせるようプログラムを

Table 1 計算機の仕様

CPU	Intel Core i7 3960X 3.30GHz
RAM	64 GB
GPU	NVIDIA Tesla K20c ×2
Soft ware	CUDA 6.5

Table 2 Tesla K20c の仕様

CUDA cores	2496
Core Clock	706 MHz
Device memory	5 GB
Memory Clock	2.6 GHz
Memory bandwidth	208 GB/s

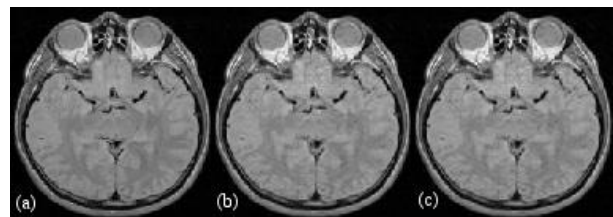


Fig.1 再構成画像の一部(信号量 30%、反復 30 回)、(a)目標となるフルデータ像、(b) CPU、(c) GPU

Table 3 再生像の PSNR 平均値

CPU	24.77
single-GPU	24.75
multi-GPU	24.75

作成した。その結果、各反復処理において CPU-GPU 間のデータ転送を行う必要がなくなり、実効的な計算時間への影響をきわめて小さく抑えることができた。

6. おわりに

本研究では、圧縮センシングの MRI 応用において問題となる画像再構成時間の短縮化について検討を行った。2 つの GPU を利用したマルチ GPU の導入によって CPU のみで約 469.7 秒を要した再構成処理を約 3.5 秒にまで短縮することができた。今後は、CPU と GPU の連携を強化し、さらなる高速化を図る予定である。

謝辞 本研究の実施に当たり画像データの提供をいただいた東芝メディカルシステムズ様に感謝の意を表します。

参考文献

[1] M Lustig, et al., Magn Reson Med., vol.58, no.6, pp.1182-1195, 2007.
 [2] 小久保潤 他, Med Imag Tech, vol.30, pp.167-175, 2013.