

太陽補償光学系における並列処理技術

○三浦則明、大石明、大芦鷹弥、鈴木貴博（北見工業大学）

概要

我々が開発中の太陽補償光学系および画像回復技術における3つの並列処理技術について報告する。(1) 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で稼働している補償光学系において、要求される処理速度を達成するため開発されたマルチスレッド並列処理技術を解説する。(2) 現在広視野でのシーイング改善を可能にする地表層補償光学系の開発を進めており、そこでの使用を目的として開発中の GPGPU による並列処理について言及する。(3) 補償光学系によって部分補償された太陽像をさらに改善する Phase Diversity 法の開発を行っている。膨大な計算時間を削減するための計算機クラスタによる並列処理について述べる。

1. 太陽補償光学系とマルチスレッド並列処理

我々は、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡用の補償光学系 (AO) の開発を行っている[1]。AO は、大気揺らぎによって乱れた入射波面の位相を波面センサーで計測し、それを打ち消すように可変形鏡の表面形状を変形させ、光波を反射させることで波面の凹凸を補正するものである。このとき、波面計測から鏡面形状の変形を大気揺らぎに比較して十分に速く繰り返す必要がある。太陽観測は、昼間の観測であるためシーイング状態が悪く、かつサイエンスの要求から短波長での観測も必要となるため高性能な AO が必要となる。太陽は大きく広がった物体であるため、Shack-Hartmann 波面センサーにおける波面傾斜計測（対象像のシフト量計測）において、相関演算を用いる必要がある。この相関演算をすべてのサブアパーチャで実施する必要があり、これがシステム全体のボトルネックとなっている。

これに対処するため、複数 CPU コアを用いてサブアパーチャでの画像処理を並列に実行するマルチスレッドプログラミングを行っている[2]。システムの立ち上げ時に、複数の計算スレッドを立ち上げておき待機状態にしておく。AO の動作中は、主スレッドで取得画像の前処理を実行した後、各スレッドに多数のサブアパーチャでの相関計算を分担させ、終了後主スレッドで電圧印加を行っている。現在のシステムでは 1500Hz 以上での波面補償を実現している。

図1に立ち上げる計算スレッド数に対する計算速度を示した。用いた計算機は core-i7-870 を搭載した PC である (AO で使用しているものとは異なる)。計算スレッド数が多くなるに従って計算速度が向上することがわかる。ただし、スレッド数が8の倍数の時は少ない場合でも高い性能を示している。これは、使用した計算機の CPU コア数が4でマルチスレッド数が8であるためである。個々の計算スレッドの計算量を小さくして、より多くの計算スレッドを立ち上げたほうが安定して性能を発揮できると考えられる。

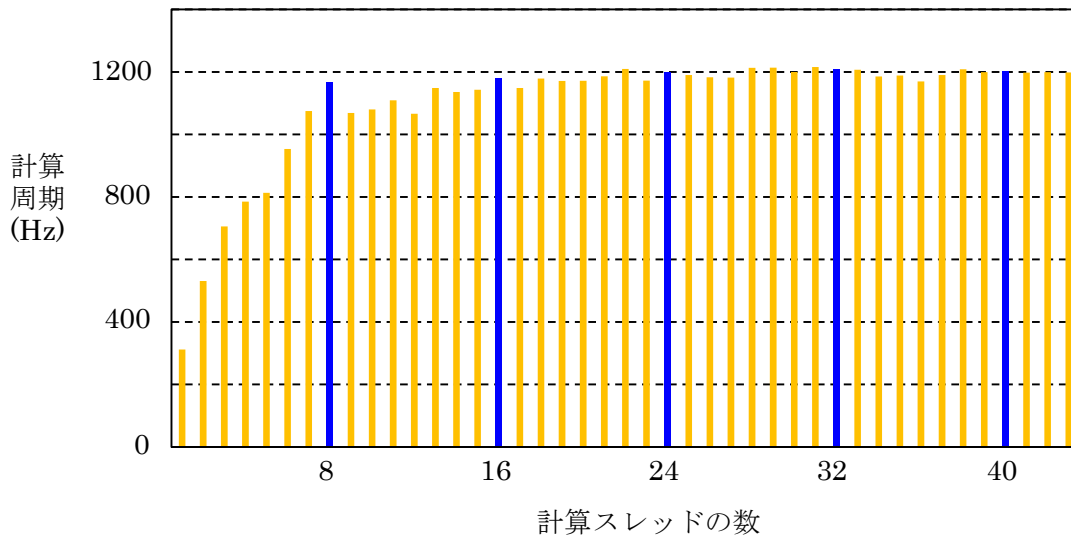


図1 計算スレッドの数を変えた時の計算速度

2. 地表層補償光学系と GPGPU による並列処理

通常の AO では、ある参照物体の方向の地表層から上空層までの揺らぎの積分値を計測し、それを補償している。このため、参照物体から離れると、通過する上空層の領域が異なってくるため波面補償の効果が低下するという問題点がある。これに対して地表層補償光学(GLAO)は、地表層の揺らぎだけを補償することで、広視野での画像改善を実現するものである[3]。GLAO では、地表層と上空層の揺らぎを別個に推定するためのトモグラフィック波面測定技術が必要になる。これは複数の参照点を用いて様々な方向で波面情報を収集し、それらから地表層揺らぎ位相を導出するものである。トモグラフィック波面計測では、参照点の数が増えるとそれに比例して計算量が増大するため、前項で述べたマルチスレッド並列処理を用いても計算時間が不足することが大きな問題となっている。

現在我々は、GPGPU (General Purpose computing on Graphics Processing Unit) を用いた並列処理によってこの問題に対処するための基礎実験に着手している。GPU は画像データの処理を行うためのデバイスであり、多数の演算器を搭載し外規模な並列処理が可能である[4]。GPU にはストリーミングマルチプロセッサ (SM) と呼ばれるユニットが多数存在しており、その中に多数の計算コアが含まれている。波面計測時、各サブアパーチャでの処理を SM に割り当て、位置をずらしながら相関演算を行う処理を計算コアで並列計算するように設計している。

まず、CPU と GPU (グローバルメモリ) のデータ転送にかかる時間を、転送するサブアパーチャの枚数を変えて測定した。サブアパーチャ 1 枚当たりのデータ量は 1764 byte である。1000 回繰り返した平均をとった値をプロットしている。必要枚数 (88 枚) を送るのに 0.25ms かかっているのがわかる。また、転送枚数が少なくても 0.2ms 弱の時間がかかっている。これは、データ転送の関数呼び出しにかかるオーバーヘッドと理解している。実験環境は、ハードウェアが core-i7-6700, win7 64bit, GeForce GTX960, 開発環境は Visual-C++ 2013, CUDA である。

GPU には、グローバルメモリの他に様々なメモリがあり、効率的な計算のためには、これらを効果的に使い分ける必要がある。グローバルメモリは、CPU とデータ交換できる唯一のメモリであり、大

容量であるが、低速である。共有メモリは SM の中に存在しており、SM 中の各コアから使用できる。グローバルメモリに比較して容量は少ないが、高速なアクセスが可能である。レジスタは各コアに付随しており、小容量であるが超高速である。

現在プログラムの最適化を進めているところであり、前段階的な結果であるが、読み込み・書き込み共にグローバルメモリを用いる場合には 4.1ms かかっていた（データ転送含む）ものが、書き込みをレジスタにした場合 2.3ms となった。データを一旦共有メモリにコピーし、そこから読み込む形式にすることでさらなる計算速度の向上が可能になると考えている。

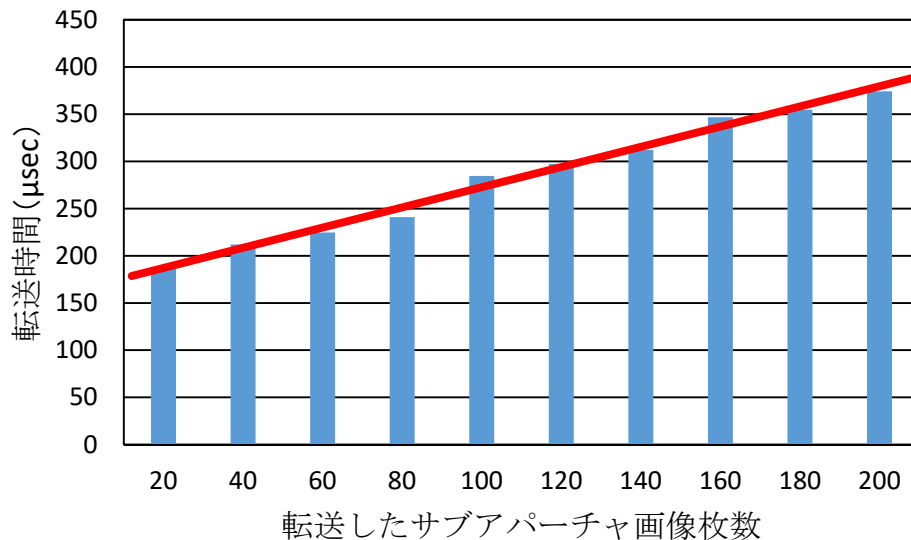


図 2 CPU と GPU 間の転送速度

3. 広視野太陽像回復と計算機クラスタによる並列処理

上述のように、GLAO では上空揺らぎの影響が残っており、原理的に回折限界を達成することはできない。このため、観測像をさらに Phase Diversity (PD) 法によって処理することで画像改善を実現する。PD 法は、on-focus と defocus の 2 枚の画像から、劣化前の物体と波面揺らぎ位相の両方を推定する方法である。GLAO では、計測した上空揺らぎの情報が使用されず捨てられているが、PD 法ではこの情報を利用できる可能性があり、GLAO との相性が非常によいと考えている。

現在開発中の PD 法は Lohdahl & Scharmer によるものである[5,6]。この方法では、ある誤差関数を最小化するように反復処理によってまず波面位相を推定し、これを用いたデコンボリューション処理によって元物体を求めるものである。しかしながら、反復処理の際に勾配の計算が含まれており、非常に時間がかかるという問題点がある。また、大気揺らぎの影響は isoplanatic 領域から外れると一定とみなせなくなるため、PD 法の処理は比較的小さな領域ごとに行う必要がある。

これらの問題に対処するため、我々は計算機クラスタによる並列処理を導入した。処理する画像を isoplanatic 領域内とみなせる部分画像に分割し、それをクラスタ内の各計算機に送って処理し、結果を集めてモザイク画像を作成する。図 3 は処理の例である。(a)はひので SOT で観測した太陽粒状斑である。これに計算機上で人為的な揺らぎを与えて on-focus での観測像を計算したものが(b)である。(b)および defocus での観測像を 7x7 に分割して計算機クラスタによって処理し、1 枚のモザイク画像を作成

したものが(d)である。細かな構造が見えてきているのがわかる。

ここで用いている計算機クラスタは、比較的高性能のもの(A: core-i5、コア数 4、クロック 3.20GHz)が 1 台、中性能のもの(B: core2-duo、コア数 2、クロック 3.00GHz)が 1 台、低性能のもの(C: core2-duo、コア数 2、クロック 1.80GHz)が 3 台の計 5 台からなる。計算機 A 単体で上記の計算を実施した場合 10358.4 秒かかっていたものが、計算機クラスタを用いた場合 1966.8 秒となり、およそ 1/5 に計算時間を短縮することに成功した。将来、回復の精度を上げるために PD 法の処理をマルチフレームに拡張することを計画しており、計算機クラスタでの並列処理がさらに威力を発揮すると考えている。

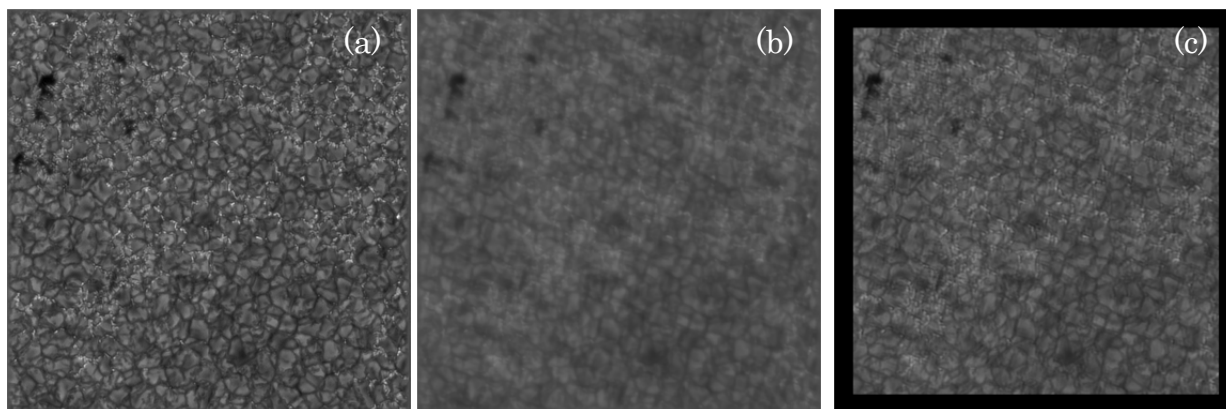


図 3 Phase Diversity 法による画像回復の例 : (a)原画像、(b)観測像、(c)回復像

<参考文献>

- [1] Noriaki Miura, N., Oh-ishi, A., Kuwamura, S., Baba, N., Hanaoka, Y., Ueno, S., Nakatani, Y., Ichimoto, K., “Status of Hida solar adaptive optics system and experiment of tomographic wavefront sensing,” Proc. SPIE, **9909**, 9909-99 (2016).
- [2] 三浦則明、“画像相関を利用した太陽観測のための補償光学,” 光学, **44**, 379-383 (2015)
- [3] Tokovinin, A., “Seeing improvement with ground-layer adaptive optics,” PASP, **116**, 941-951 (2004).
- [4] Cheng, J., Grossman, M., McKercher T., 森野慎也監訳, “CUDA C プロフェッショナルプログラミング,” (インプレス、2015)
- [5] Lofdahl, M. G., Scharmer, G. B., “Wavefront sensing and image restoration from focused and defocused solar images,” A&A suppl., **107**, 243-264 (1994).
- [6] Ohneda, Y., Baba, N., Miura, N., Sakurai, T., “Multiresolution approach to image reconstruction with phase-diversity technique,” Opt. Rev., **8**, 32-36 (2001).