

気象衛星 NOAA 画像の並列処理

Parallel Processing of Meteorological Satellite NOAA Imagery

根本利弘*・喜連川 優**・高木幹雄**

Toshihiro NEMOTO, Masaru KITSUREGAWA and Mikio TAKAGI

気象衛星 NOAA より送信される AVHRR 画像は、データが大量であり、補正処理には膨大な処理時間を必要とする。そこで、この補正処理システムを並列計算機 Symmetry 上に実装し高速化を図った。実装は補正処理全体を5つの処理に分割、パイプライン化するとともに、各処理内においてもデータを並列に処理するという方法で行った。本報告では、並列実装法を示すとともに、実際に処理を行った結果に基づき、処理能力の評価を行った。

1. はじめに

人工衛星によるリモートセンシングは、観測範囲の広域性、観測の同時性、反復性、データ取得の即時性などの特徴を有し、その観測データは気象学・海洋学などのさまざまな分野に有意義な情報を提供可能である。一般に、気象衛星より送信される観測データを利用するためには、センサの較正や地球が球形であることなどに起因するひずみの除去などの補正処理が不可欠である¹⁾。

気象衛星 NOAA による観測データは、その観測範囲の広域性のため1シーン当たり100M byte と膨大であるため、大量の計算、I/O 処理を必要とし、処理に時間がかかる反面、実際にデータを解析する際には数百シーン以上ものデータを処理しなければならない場合も少なくなく、高速な補正処理システムが望まれている。

そこで、この補正処理の時間を短縮すべく、並列計算機 Symmetry に補正処理システムを構築している。この気象衛星 NOAA の補正処理プログラムの並列実装法について報告する。

2. 気象衛星 NOAA および補正処理の概要

2.1 NOAA の概要

気象衛星 TIROS/NOAA シリーズは、米国海洋大気庁 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) による気象衛星である²⁾。NOAA の軌道は毎日変動しているが、その情報は米国海洋大気庁より気象庁を通じて、専用テレタイプ回線で送られてくる。NOAA に搭載されている AVHRR (改良型高解像度

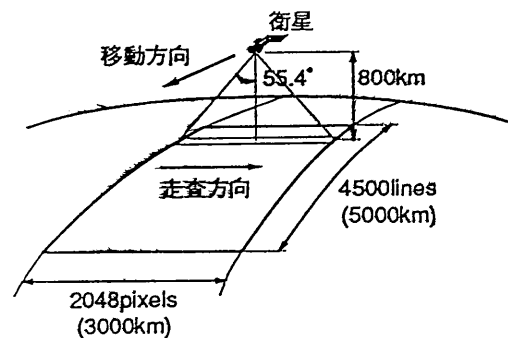


図1 AVHRR センサの走査

放射計: Advanced Very High Resolution Radiometer) は、可視2チャンネル、赤外3チャンネルの計5チャンネルより構成されるマルチチャンネルセンサである。走査方向は、衛星の進行方向に垂直であり、直下点から55.4度の範囲を2048点で走査している(図1)。

2.2 放射量補正

地球表面は表面の温度およびその放射率に応じて赤外熱放射をしており、この放射量および放射率を測定することにより、逆に地球表面の温度を求めることが可能である。衛星観測ではこの原理を利用して地表面温度を求めるが、NOAA より送信されるデータはセンサによるカウント値であり、実際に利用するためには地表面温度等の物理量に変換する必要がある。この処理を放射量補正という。

放射量補正は、NOAA より送信されるデータ内に含まれる50ライン分の較正用データを元に変換式のパラメータを求め、この変換式を用いてセンサのカウント値を反射率・輝度温度に変換する(図2)。

*東京大学生産技術研究所 第3部

**東京大学生産技術研究所 附属機能エレクトロニクス
研究センター

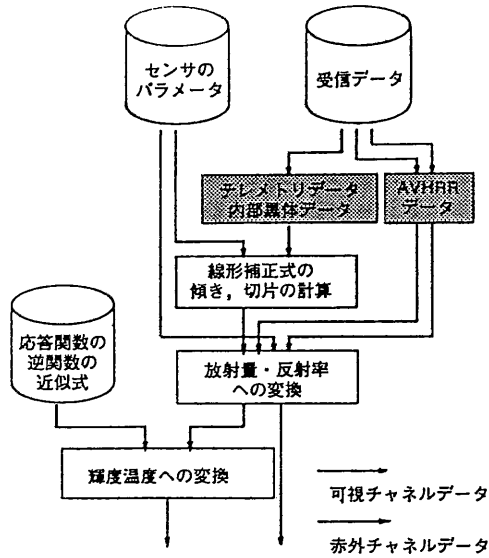


図2 放射量補正のながれ

2.3 幾何学的ひずみ補正

NOAAにより観測される衛星画像は、走査方法および地球の形状に起因する周辺部の解像度の低下、衛星の姿勢の変動、走査中の地球の自転等の原因によりひずみを含んでいる。よって、実際に利用するためにはこれらのひずみを補正し、利用に適した地図座標系に変換する必要がある。この処理を幾何学的ひずみの補正（幾何補正）という。

幾何学的ひずみの補正には、いくつかの方法が提案されているが、本システムでは、すべてのシーンに適用でき、比較的高精度の補正が可能である、地球の楕円体モデルを用いた幾何計算による補正法を採用している³⁾。

幾何学的ひずみの補正は、衛星画像の各画素の緯度・経度と地図画像の各画素の緯度・経度を計算し、この計算結果より地図画像の画素と衛星画像の画素との対応をとるが、本システムでは、衛星画像の緯度・経度の計算の高速化のために衛星画像をメッシュに分割し、各メッシュの格子点のみ、幾何学的計算をし、メッシュ内の画素の緯度経度は補間により求める（図3）。

3. 並列計算機 Symmetry

Symmetry は Sequent 社の並列計算機であり、キャッシュを備えた i80386 CPU を使用したバス結合型共有メモリをもつ対称・密結合型マルチプロセッサシステムである（図4）⁴⁾。補正処理の実装を行ったものは、18台のCPUと40M byteのメモリをもつ。

並列プログラミングは、Sequent社が提供しているパラレルライブラリを用いてC言語により記述した。このC言語では自動並列化はサポートされていないため、

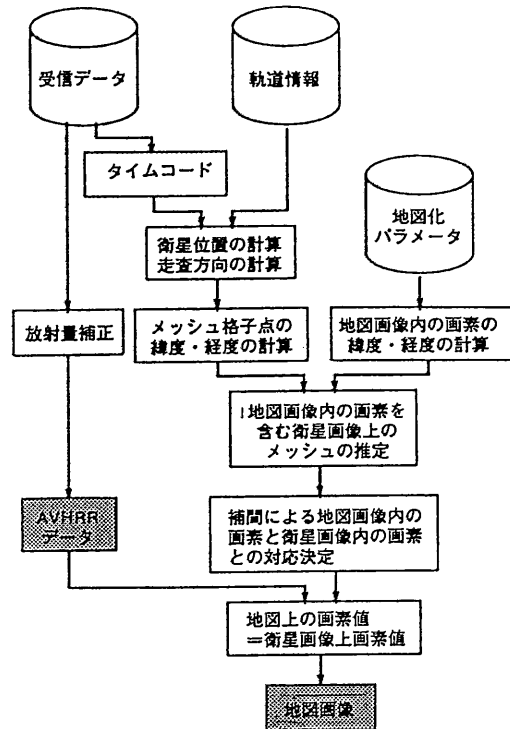


図3 幾何学的ひずみ補正のながれ

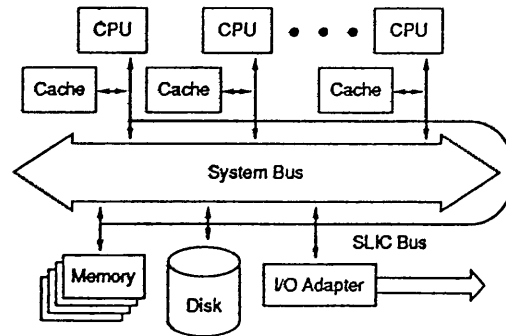


図4 Symmetry

プロセスのフォークと共有データに基づいたプロセス指向により、明示的に並列プログラムを記述した⁵⁾。

4. 補正処理の並列化

4.1 補正処理の並列化方針

並列処理には大きくデータ分割と機能分割の2つの方法がある。

データ分割は、複数のデータに対して行われる処理を、データを分割して複数のプロセッサにより同時に行うものである。文献6)では、この方法により放射量補正を並列化しているが、I/Oがネックとなり十分な並列度が得られず、並列動作するプロセッサ数4~5台が限度と

なり、さらにプロセッサ数を増やしても処理時間は短縮されていない。

機能分割によるアプローチは、処理を機能毎に分割し、各機能を同時に実行させる方法であり、補正処理の場合は各機能が互いに関連しているため、パイプラインにより並列処理を行うこととなる。このアプローチを補正処理に適用すると、中間ファイルの作成をなくすことが可能であるが、各機能間で同期が必要であり、また、全体の処理速度が分割された操作のうち、もっとも処理の遅いものの処理速度に依存することになる。

以上の点を考え合わせると、データ分割および機能分割単体でのアプローチでは十分な処理速度の向上は望めない。そこで、本システムではデータ分割および機能分割の両者のアプローチを統合することで高速化をはかる。すなわち、処理全体を機能毎に分割してパイプライン化するとともに、パイプラインにおいて負荷の大きい処理をデータ分割し、パイプラインを流れるデータの速度を高め、処理速度を上げる。

4.2 再配列の並列化への対応

衛星原画像を地図画像にする際、一般には出力すべき地図座標 (x, y) に対応する衛星原画像の座標 (p, l) を求め、その画素を出力画像へ並べる方法をとる。この処理を再配列という。補間による再配列の方法は、地図領域内の画素 (x, y) における緯度・経度を求め、その緯度・経度が衛星画像上のどのメッシュ内にあるかを探し、メッシュの端点の緯度・経度を用いて補間することにより、 (x, y) に対応する衛星画像上の座標 (p, l) を求め、その座標における画素を地図画像の (x, y) における値とする。この操作を地図領域内の全画素に対して順に行うことで地図画像を作成する。

この再配列処理をそのままパイプラインに組み入れることは容易ではない。なぜなら、パイプライン内のデータは、放射量補正など他の処理のため、原データの順に流れる反面、再配列では地図領域を順に見ていくことになるため、衛星画像上を斜めに走査することになるためである。

そこで、本システムでは、以下の手順により再配列を行うことでパイプラインへの組み込みを行っている (図 5)。

1. メッシュの 4 端点に対応する地図画像上の位置を求める。
2. 地図画像上で 4 端点を含む最小の長方形を定める。
3. 2 で求めた長方形内の画素が、もとのメッシュ内に含まれるかどうかを判断する。これは、地図画像上で 4 端点がつくる四角形領域内に含まれるかどうかで判定する。
4. 四角形領域内に属する場合には、画素の緯度・経度を求め、さらに、補間により対応する衛星画像

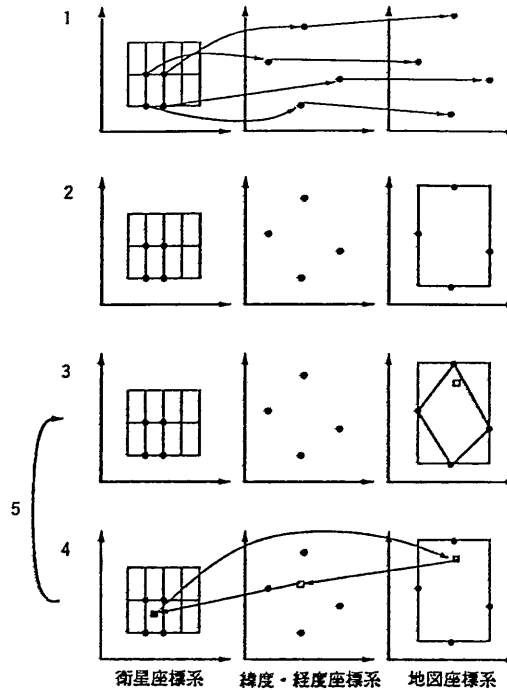


図5 再配列法

上の位置を求め、その値を地図画像上に配置する。

5. 3以降を長方形内のすべての画素について繰り返す。

5. 並列実装法

5.1 モジュール・パイプライン化

放射量補正・幾何学的ひずみの補正を並列実装するにあたり、補正処理全体を、機能、扱うデータの単位、入力データ等に基づき

1. 原データの読み込み
2. 放射量補正のためのパラメータ (傾き, 切片) の計算
3. カウント値から反射率・輝度温度への変換
4. メッシュ端点の緯度・経度の計算
5. メッシュの補間, 再配列

のモジュールに分割し、各モジュールをリングバッファにより連続させ、パイプライン化した (図 6)。

原データの読み込みを行うモジュールおよび放射量補正のためのパラメータを求めるモジュールはそれぞれ 1 つのプロセッサにより処理を行う。この理由は、原データの読み込みに関しては、ディスクおよびバスなどの出力周辺機器が並列には動作しないため、複数のプロセッサで処理を行っても速度の向上が期待できず、むしろ排他制御を必要とするためにかえって遅くなってしまふ場合さえありえるためである。放射量補正のためのパ

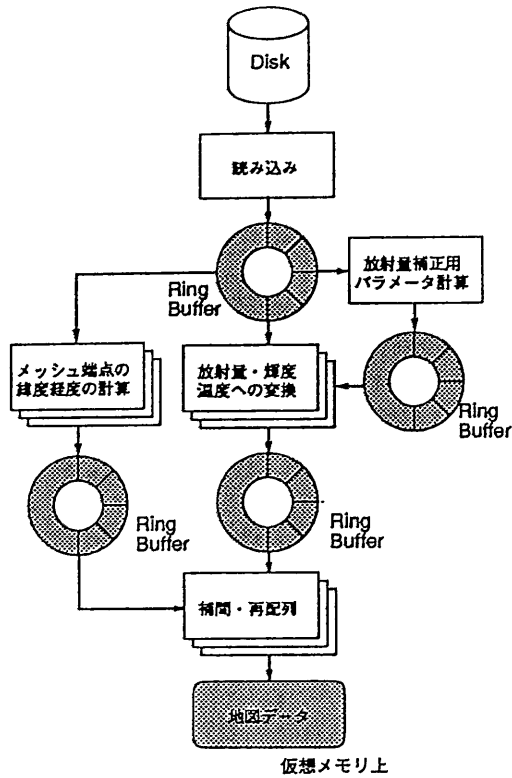


図6 並列実装法

ラメータの計算のモジュールは、パラメータに必要なデータが雑音などの影響のためにそろわない場合があるため、必ずしも50ライン毎に切りわけができず、複数プロセッサによる分担が困難であり、また、この処理の負荷はディスクのアクセスの処理に比べて十分小さく、この部分がネックとなることはないと考えられるためである。一方、カウント値から反射率、輝度温度への変換モジュール、メッシュ端点の緯度・経度の推定モジュール、メッシュの補間、再配列モジュールは複数のプロセッサにより処理される。

モジュールからモジュールへの必要なデータの受け渡しは、モジュール間にリングバッファを設けることにより行う。

5.2 データの順序性の保持

データ順序の保持は、モジュール内にグローバルなカウンタを用意することにより行う。このカウンタはそのモジュールが現在までに読み込みバッファより読み込んだライン数の合計を保持している。各プロセッサはバッファよりデータを順に読み込むとともに、カウンタの値をローカルな変数にコピーし、カウンタに1を加える。カウンタのアクセスは排他制御を行い、同時に複数のプロセッサがアクセスできないようにする。処理が終了出力をする際には、ローカル変数の値より

$$output_position = local_variable \bmod buffer_size$$

により出力バッファのどの位置に出力すべきかを定める。このようにすることで、各プロセッサは他のプロセッサの処理を待つことなしデータの順序性を保持することが可能である。

5.3 モジュール間の同期

モジュール間の同期は、リングバッファ内の各セルに対してフラグを設けることで行う。このフラグは、リングバッファ内のデータの状態について表し、

DATA_USED データはすでに使用済みであり、新たなデータの書き込みは許されるが、読み込むことは許されない。

DATA_USING データは現在、使用中であり、処理を行っているプロセッサ以外は、データへのアクセスが許されない。

DATA_READY データは未使用状態である。データを読み込むことはできるが、新たなデータを書き込むことは許されない。

DATA_END データの処理が完了し、この後、データはもうないことを表す。

のいずれかの値をとりうる。

前段のモジュールは、処理後のデータをリングバッファ内のセルに書き込む際に、そのセルのフラグを読み、その値が DATA_USED ならばデータを書き込む。DATA_USING あるいは DATA_READY であるならば、データを出力せずスピンし、フラグが DATA_USED になるまで待ち、その後出力を行う。後段のモジュールは、処理を行うため、リングバッファ内のセルよりデータを読み込む際に、そのセルのフラグをまず読み、その値が DATA_READY の時のみデータを読み込む。このような方法により前段と後段のモジュール間の同期を行う。

5.4 動的負荷分散

カウント値から反射率、輝度温度への変換モジュール、メッシュ端点の緯度・経度の推定モジュール、メッシュの補間、衛星座標系から地図座標系への変換モジュールはそれぞれ、複数のプロセッサによって処理を行う。この時、各モジュールに対し、いくつのプロセッサを配分するのが最適であるかを決定するのは困難である。そこで、各モジュールの負荷状況によって動的にプロセッサ配分を変化させる。動的負荷分散は以下の方法で実現する。

1. 各モジュールの入力バッファ内の未処理データ数および出力バッファ内の空きセル数より、各モジュールにおいて要求されるプロセッサ数を求める。
2. 要求されるプロセッサ数のもっとも多いモジュールが現在、何台のプロセッサで処理されているか

を求める。

3. 現在処理を行っているプロセッサ数が要求されるプロセッサ数未満ならばそのモジュールの処理を行う。そうでない場合は1に戻る。
4. 各モジュールの処理を一定量行う。
5. すべての処理が終わっていない場合は1に戻る。

以上の操作を繰り返すことで、動的な負荷分散を行う。

5.5 出力画像

出力画像を実メモリに置くことは困難であるため、仮想空間上に置くことにする。このため、ページングのための入出力処理が必要となるが、パイプライン内のデータが衛星データの順にながれるため、出力画像領域へのアクセスは局所的になり、ページフォルトはほとんど生じず、ページングによる影響は少なくてすむ。

6. 処理 実験

6.1 実験結果

実験は1991年11月2日14時に受信した画像に対し、全画素について放射量補正、幾何補正を行い地図画像を出力するのに要する時間を並列動作するプロセッサ数を変えて測定を行った。

実験時の出力地図画像の投影法、地図化領域、サイズは表1の通りである。

図7は、処理時間を元に、並列に動作するプロセッサ数と処理性能（処理全体を1としたときの1秒間の処理量）の関係を表したグラフである。固定プロセッサ配分というのは動的負荷分散をとりいれず、各モジュールのプロセッサ数を固定にした場合であり、処理性能値はそのプロセッサ数における最良値である。

6.2 考察

6.2.1 並列処理

並列処理プログラムでは地図化サイズによらず、プロセッサ数が十数台以下の場合には、プロセッサ数に対して処理性能はほぼ線形に上昇している。動的負荷分散時には、原データの読み込みモジュールと放射量補正のための傾き、切片の計算モジュールを処理するプロセッサ2台を除くすべてのプロセッサが実際にはデータ分割による並列処理を行っており、この2台のプロセッサを除いたプロセッサ数と処理性能はほぼ完全に比例していることより、データ分割による処理が効果的に行われていることがわかる。

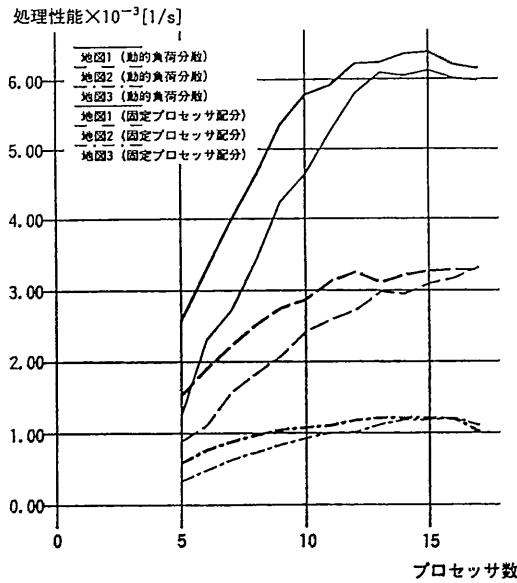


図7 プロセッサ数 vs. 処理性能

一方、プロセッサ数が12~13台以上になると、プロセッサ数を増やしても、処理性能は向上していない。特に、プロセッサ数が15台以上になるとわずかではあるが処理性能が低下している。この原因は、プロセッサ数が増加したために共有メモリ、バスの使用回数が増加し、排他制御のためのオーバーヘッドが増えたためであると考えられる。

6.2.2 動的負荷分散

動的負荷分散を行ったときと、動的負荷分散を行わずに各モジュールのプロセッサ配分を固定にしたときを比べると、処理性能がプロセッサ数に対して線形に上昇しているところでは、いずれの場合でも動的負荷分散を行ったときの方がよい値を示している。これは、入力側のバッファにデータが存在しない場合や出力側のバッファにデータを出力するためのスペースがない場合には、固定プロセッサ配分では、プロセッサは入力データや出力スペースができるのを待つのにに対し、動的負荷分散時にはこのようなモジュールの処理は行わずに他の処理を行うことができるためである。

また、プロセッサ数が増加したときにおいても、動的負荷分散を用いた場合と各モジュールのプロセッサ数を

表1 実験での出力地図

	投影法	サイズ	地図化領域	
			緯度(北緯)	経度(東経)
地図1	等緯度・等経度図法	512 × 512	45.24° ~ 24.76°	129.76° ~ 150.24°
地図2	等緯度・等経度図法	1024 × 1024	45.24° ~ 24.76°	129.76° ~ 150.24°
地図3	等緯度・等経度図法	2048 × 2048	45.24° ~ 24.76°	129.76° ~ 150.24°

固定にした場合とでは、処理時間に大きな差はなく、ほぼ同程度の処理性能を示している。

地図化条件はユーザにより大きく異なり、固定プロセッサ配分によりすべての場合において効果的な配分を定めるのは困難であるが、実験を行ったすべての地図化条件において、動的負荷分散は固定プロセッサ配分と同程度かそれ以上の処理性能を示しており、動的負荷分散が十分効果的であることが示されている。

7. お わ り に

衛星画像を利用する際に必要とされる補正処理に対し、入出力回数の削減、パイプライン処理、並列計算を導入することにより、並列計算機上で高速に補正処理を行う方式についてまとめ、実際に処理を行い、その有効性を確かめた。

今後の課題としては、ユーザの要求する処理形態に柔軟に対応するために、また、より高精度の補正を必要とするユーザのために、地上基準点を用いた幾何学的ひずみ補正、今までに提案された数種類の大气補正なども統合し高速処理することなどがあげられる。

(1992年9月1日受理)

参 考 文 献

- 1) W.J. Emery, J. Brown, and Z.P. Nowak. "AVHRR image navigation: summary and view". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55 (8): 1175-1183, 1989
- 2) Walter G. Planet, editor. "Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers". NOAA Technical Memorandum NESS 107-Rev
- 3) 孫衛東 and 高木幹雄. "楕円体モデルを用いた NOAA 衛星画像の幾何学的歪補正法". 第17回画像工学コンファレンス, pages 241-244, 1986
- 4) 平尾延夫. "汎用並列計算機Symmetry/Balance". *bit 並列コンピュータ・アーキテクチャ*, 21 (4): 597-605, 1989
- 5) Anita Osterhaug, editor. "Guide to parallel programming on Sequent computer systems". Prentice Hall, 1989
- 6) 鈴木慎司, 喜連川優, and 高木幹雄. "NOAA 衛星画像処理の並列化—センサー較正—". 情報処理学会第38回全国大会論文集, pages 200-201, 1989
- 7) 笠原博徳. "並列処理技術". コロナ社, 1991
- 8) T. Nemoto and M. Takagi. "Radiometric correction of NOAA AVHRR data with parallel processing". *the 12th Asian conference on remotesensing*, 1991