

ヘテロクラスタの構築とハイブリッドスペクトル解析法の並列処理

鈴木 宏* 大日向大地**

Construct of Heterogeneous Cluster and Parallel Processing of Hybrid Spectral Analysis Method

Hiroshi SUZUKI and Daichi OBINATA

In a large scale information processing, the parallel processing is useful for a load balancing and reduction of processing time. SMP system and cluster system are platforms for parallel processing, but with high cost to introduce those systems. This paper describes construct of Heterogeneous cluster system, and solution of a load balancing. This cluster system is applied to spectral analysis with a hybrid of Wigner Distribution and Fourier Transform. This spectral analysis offers higher frequency resolution with neither interference terms nor aliasing, but the calculation necessary takes time. This problem can be solved with proposed cluster system. Then we propose this system is available to the high-speed calculation.

キーワード: フーリエ変換, ハイブリッドスペクトル解析法, クラスタ, 並列処理, 動的割当

1. はじめに

コンピュータが発明されて以来その処理性能の向上は常に求められてきており、その時代の技術力や製品のニーズに合わせてさまざまな高速化技術が誕生してきた。その中でマルチプロセッサおよびその上での並列処理が、高速化技術の一つとして有効であり、近年注目を集めている。これは処理をスレッドに分割し、複数のプロセッサで同時に処理をさせるものであり、このマルチプロセッサシステムは、大きく二種類に大別できる。ひとつはSMPなどの共有メモリ型であり、もうひとつはクラスタなどの分散メモリ型である。クラスタは、単独で稼動可能な複数の計算機をネットワーク接続し、単一の計算資源として扱えるようにしたものであるが、計算機本体の高性能化・低価格化に伴う普及と、ネットワーク機器の高速化・低価格化・周辺技術の進歩があり、最近ではマルチプロセッサシステムの多くで使用されている。

本稿では、既存のシステムを利用して、低コストなクラスタシステムを構築し、それに対応する

ソフトウェアを開発した。またその並列処理システムを、時変信号の解析法の一つであるハイブリッドスペクトル解析法（以下HS法）^[1]に適用した。このHS法は、フーリエ変換と比較して高い分解能が得られる反面、演算量が膨大であり処理時間がかかるという問題点がある。この問題の解決のために、HS法の並列化手法を考え、それを適用したクラスタの性能についての評価を行い、さらにシステムの利用価値について検討した。

2. クラスタについて

2.1 クラスタとは

クラスタは、単独で稼動可能な計算機をネットワーク接続して、単一の計算機資源として利用可能にした分散メモリ型マルチプロセッサシステムのことである。クラスタは、同一計算機あるいは同一性能の計算機で構成されたホモジニアスと、計算機の性能が統一されていないヘテロに分類できる。ヘテロクラスタによって実現された並列システムには、

1. 既存のシステムを拡張することで、より高い演算能力が手に入る。

* 電子制御工学科助教授
** 新潟大学工学部情報工科学学生
原稿受付 2002 年 5 月 17 日

2. 導入・運用コストを極力下げることができる。
3. 古い計算機が有効活用できる。
4. 技術進展にあわせてシステムのバージョンアップができる。

の利点がある。本システムは、実際の多くの場合と同じように、既存の計算機を利用し実行するためと上記利点を加味してヘテロクラスタでの構成を考えた。

2.2 負荷不均衡の解決法

並列処理では、処理対象の問題域を分割し、各計算機へ分割した問題域を割当てて処理を行うが、ヘテロクラスタの場合、構成計算機の処理能力がそれぞれ異なるため、問題域を単に分割して均等に割当てただけでは、負荷分散の不均衡が起こりクラスタの処理性能の低下を招く。すなわち、問題域を単に分割して割り当てると、高速計算機に遊休時間が生じ、システム全体が低速計算機の速度に依存してしまい高速演算が行われない。

この問題の解決法として、処理対象の分割数を構成計算機台数よりはるかに大きくし、分割された処理対象を各計算機へ順番に割当て、処理を完了した計算機に対して未処理の処理対象を割当てていく方法を考えた^[2]。この方法であれば、各計算機はその性能に応じた処理量を処理することになり、クラスタの能力を最大限に引き出すことができる。

2.3 構築したクラスタ

クラスタを構成する計算機は、Tbl.1に示す8台の異なるCPUとメモリを持ち、Fig.1に示すように、最新機種まで様々なタイプの計算機で、Ethernet 100BASE-Tで接続されている。また、いずれの計算機もOSはWindows2000を使用している。

並列計算機の通信APIを提供する並列ライブラリには、MPI^[4] (MPICH.NT.1.2.2:Argonne National Laboratoryより提供)を使用した。また、2.2で述べた処理の動的割当てを行うフレームワークとして、DYPRASY-SX^[3]を考えた。これは計算をしていないプロセスが、処理の割り当てを管理するプロセスに対して新しい処理の割り当てを要求し、処理が割り当てられ、終了したら結果を返し、つぎの処理を要求するというシーケンスの繰り返しにより実現している。これらの動作シー

Tbl.1: クラスタ構成PCの性能

No.	CPU	Memory
1	PentiumIII 866MHz	256MB
2	PentiumII 266MHz	192MB
3	Celeron 400MHz	320MB
4	Celeron 400MHz	256MB
5	Celeron 433MHz	256MB
6	PentiumII 266MHz	128MB
7	PentiumPro 200MHz	96MB
8	Celeron 800MHz	128MB



Fig.1: クラスタを構成するPC

ケンスの流れをFig.2に示す。

3. ハイブリッドスペクトル解析法

離散ウィグナー分布 (以下 DWD) は、離散フーリエ変換 (以下 DFT) のすべての成分を畳込んで求めることができる。例えば DWD の偶数周波数成分 $W(nt_0, 2l\omega_0)$ は、

$$W(nt_0, 2l\omega_0) = \frac{4}{M} (A_l^2 + \cdots + 2A_{(l-i)}A_{(l+i)} + \cdots + B_l^2 + \cdots + 2B_{(l-i)}B_{(l+i)} + \cdots) \quad (1)$$

ここで、 M は、サンプリング点数

A_l, B_l は、DFT の成分

で計算することができる。この畳込む成分の数を

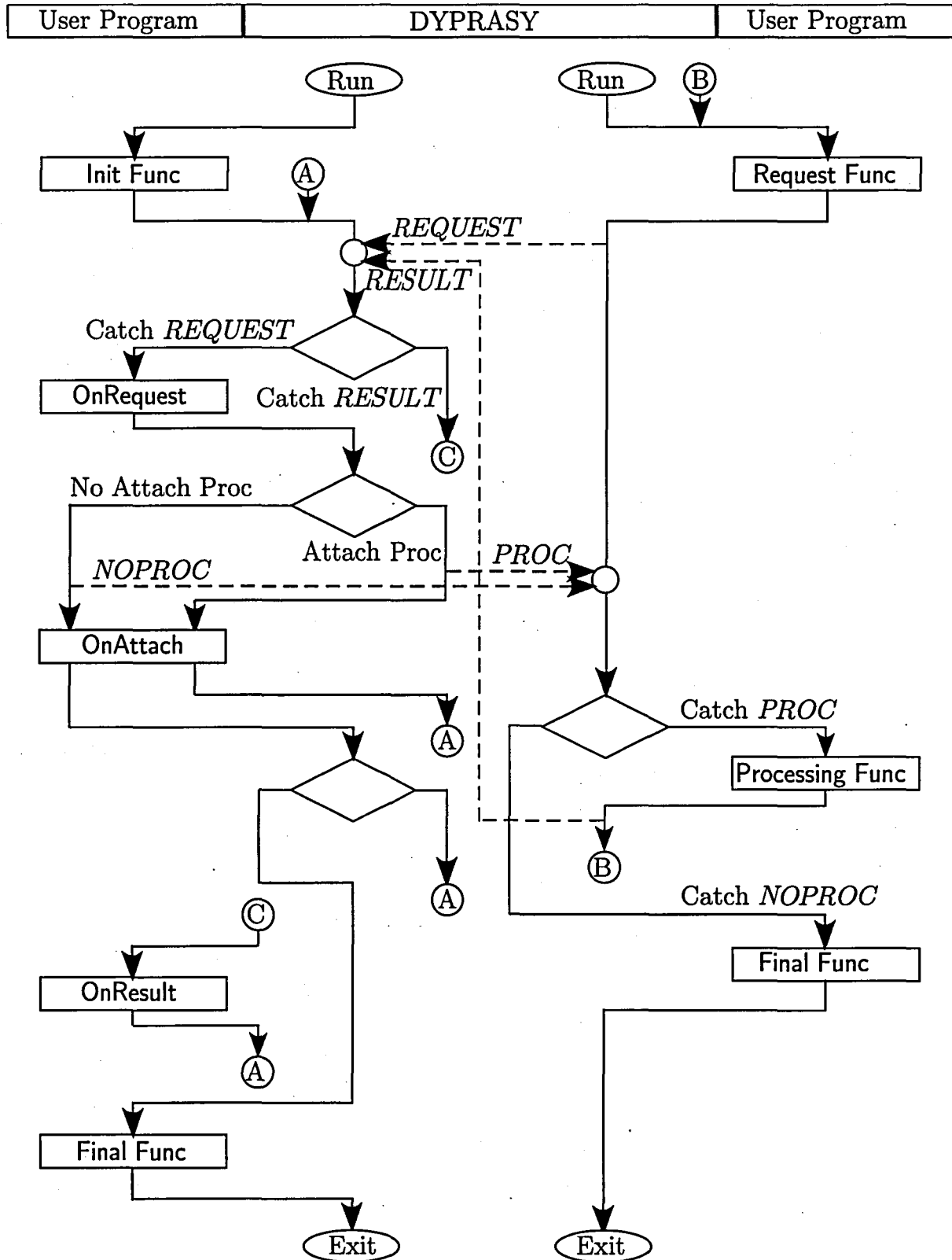


Fig.2: DYPRASY-SX の動作シーケンス

$1 \dots \frac{M}{2} - 1$ まで変化させると,

$$CS_{(2l, C_N)} = \frac{2}{C_N + 1} \sum_{r=-\frac{C_N-1}{2}}^{\frac{C_N-1}{2}} (A_{l-r}A_{l+r} + B_{l-r}B_{l+r}) \quad (2)$$

ただし, $C_N = 1, 3, 5, \dots, \frac{M}{2} - 1$

で畳込むDFTの成分数

と表すことができる。 $C_N = \frac{M}{2} - 1$ ならばDWDとなり, 高分解能を得ることができるが, 成分間に干渉項が生じる。 $C_N = 1$ ならば, パワースペクトルとなり, 周波数分解能は低い干渉項は生じない。すなわち, C_N を変化させたときの(2)式の値の中に, 両者の特徴を生かした常に高分解能に作用する値がある。この特性を利用して, C_N の変化に対する最小値をスペクトルとした解析法が提案されている^[1]。最小値を求めることで, 不要な干渉項が取り除かれ, DWDの高分解能効果はそのままのスペクトル分布を得ることができる。ここで, C_N の変化に対する畳込みスペクトルの最小値を求めるスペクトル解析法を,

$$CMS(nt_0, kw_0) = \min [CS_{(k, C_N)}] \quad (3)$$

$\min[]$ は $[]$ 内の最小値を表す。

と定義する^[1]。

この解析法を用いることで, 小さなウィンドウで低周波数域のスペクトル解析や, 時変信号の局所的な周波数変化の解析ができる。

しかしこの解析法は, 1回のDFTと $(\frac{1}{12}M^3 + \frac{3}{8}M^2 + \frac{5}{12}M)$ 回の掛算が必要となり, DFTの $M \log_2 M$ 回に比べて膨大な演算が必要となる。そのためこの解析法を応用するには, 膨大な量の演算によって生じる長い処理時間を短縮する必要がある。そこでヘテロクラスタを用いた並列処理による手法の適用を考えた。

4. 解析法のクラスタへの適用

この解析法の演算を並列化するに当たって, $[C_N = A$ のときの畳込み結果は, $C_N \neq A$ における畳込み結果に依存しない]という点に注目した。すなわち, $CS_{(k, C_N)}$ は C_N により独立している。このため, あらかじめ $CS_{(k, 1)} (C_N = 1$ の畳込みスペクトルを計算しておき, $C_N = 2, 4, \dots, \frac{M}{2}$ を P_N 個に分割する。Fig. 3に示すように, ルートプ

ロセスは n を P_N から 1 まで変化させながら,

$$C_N(n) = \left[\frac{(n-1)M}{2P_N} + 2, \frac{(n-1)M}{2P_N} + 4, \dots, \frac{nM}{2P_N} - 2, \frac{nM}{2P_N} \right] \quad (4)$$

$(n = 1, 2, \dots, P_N)$

の畳込み数のリストを計算プロセスに渡し, 計算プロセスはこの数で畳込みを行い, $C_N = 1$ の結果を含めて各成分の最小値を探して畳込みスペクトルを計算し, ルートプロセスへ返す。ルートプロセスは計算された各々の畳込みスペクトルの各成分の最小値を探して, 最終的にCMSの値を計算する。すなわち, Fig. 4に示すような方法により演算を並列化する。ここで, $C_N(n)$ の m 番目の要素を $C_N(n, m)$ と表す。

n の変化を 1 から P_N でなく, P_N から 1 としたのは, n が小さくなると畳込みスペクトル計算の処理量は少なくなるので, 計算機間の負荷の不均衡が起これにくくなるためである。

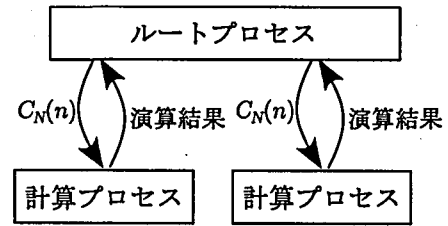
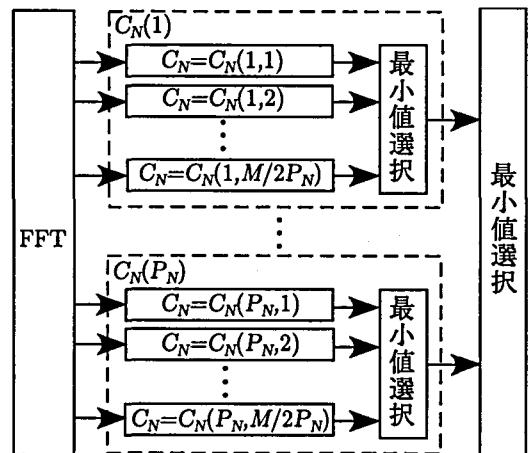


Fig. 3: ルートプロセスと計算プロセス



5. 処理時間 (実験結果)

5.1 サンプルング点数による処理時間

サンプルング点数 M を 2048, 4096, 8192 とし、それぞれの M に対して分割数 P_N を変化させたときの処理の所要時間を測定した。各々の M で最高性能を示した P_N の処理時間 (秒) を Tbl.2 に、そのグラフを Fig.5 にそれぞれ示す。また、PentiumIII 933MHz で処理したときの各 M における処理時間を併せて示す。ここで、Ratio は PentiumIII 933MHz との性能比 (処理時間比) である。

Tbl.2: サンプルング点数による処理時間性能

M	P_N	Cluster	PIII	Ratio
2048	32	1.90	5.61	2.95
4096	64	12.76	45.66	3.57
8192	64	98.44	371.06	3.77

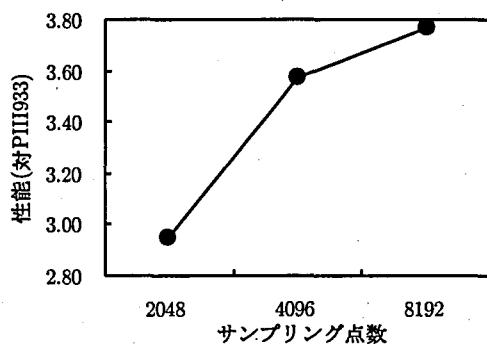


Fig.5: サンプルング点数による処理時間性能

PentiumIII での処理結果と比較すると、クラスタの性能は一目瞭然であり、3 倍以上の高速化ができ、処理の並列化の効果がいかに大きいかわかる。

5.2 分割数による処理時間

$M = 8192$ において、 P_N を 32, 64, 128, 256, 512, 1024 としたときの処理時間性能を Tbl.3 に、そのグラフを Fig.6 にそれぞれ示す。ここで、WR は各計算機の平均プロセッサ稼働率である。

P_N が小さいときは、負荷の不均衡が生じやすくなるのでプロセッサの稼働率が下がり、クラスタの能力を十分に引き出せない状態になっているた

Tbl.3: 分割数による処理時間性能

P_N	Time	WR	Ratio
32	111.89	90.0	1.66
64	98.44	99.7	1.88
128	99.57	99.5	1.86
256	102.53	99.7	1.81
512	109.02	99.8	1.70
1024	124.19	99.8	1.49

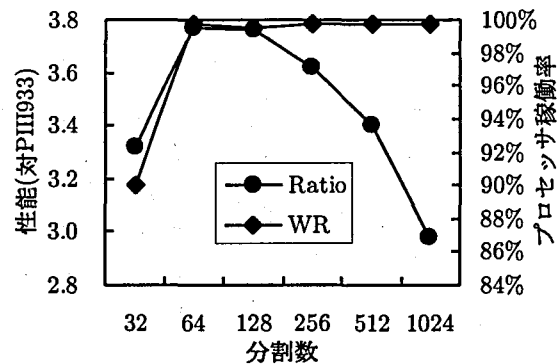


Fig.6: 分割数による処理時間性能

め、性能が低下し処理に時間がかかってしまう。逆に、 P_N が増すと見かけ上の不均衡は生じなくなるが、計算機間の通信回数が増えて負荷に対する主計算の割合が減り、実質的なプロセッサ稼働率の低下を招いてクラスタの性能が低下し、処理に時間がかかってしまう。

今回の環境および並列アルゴリズムでは $P_N = 64$ で最高性能を示した。

システムの拡大により処理時間の短縮が期待できるが、 P_N が適切な値でなければクラスタの性能は十分に引き出すことはできず、十分な処理時間短縮はできない。それぞれの条件ごとに最適な P_N が存在するので、それを見つけ出すことが重要となる。

5.3 計算機台数による処理時間

$M = 8192$ においてクラスタの構成計算機を Tbl.1 から No.1 と No.7 と No.8 の 3 台を除いた 5 台として処理を行い、続いて No.8, No.1, No.7 を順に追加したときのクラスタの性能の変化を測定し、計算機台数の変化の影響から、並列化の効果

を考えた。Tbl.4・Fig.7 に、各台数において最高性能を示した P_N の処理時間性能を示す。

Tbl.4: 計算機台数による処理時間性能

CPU's	Time	P_N	Ratio
5	215.69	32	1.72
6	144.18	32	2.57
7	105.57	64	3.51
8	98.44	64	3.77

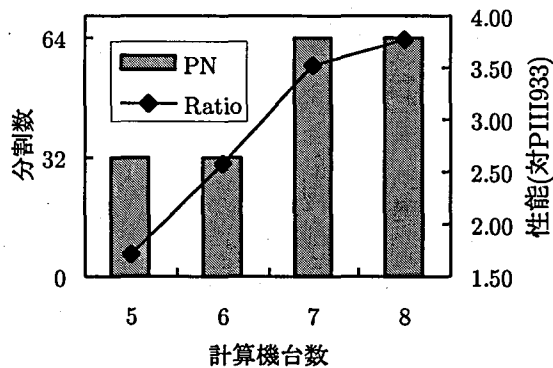


Fig.7: 計算機台数による処理時間性能

台数が多くなると、性能の向上を見ることができ。また、クラスタの性能に比べてはるかに劣る No.7 を追加しても負荷がうまく分散しているため、その性能が足枷になることはなく、性能向上に貢献していることがわかる。また、構成台数によって最適な P_N も変化する。一般的に構成プロセッサ数が増加すれば、最適な P_N は大きくなる。

クラスタを構成する計算機をさらに追加していけば、より高い性能・高速な演算が実現可能であるが、通信負荷は分散できないため、性能の向上率は次第に減少していき、性能はいずれ飽和状態に達して性能向上は頭打ちになると思われる。しかし、現状ではその兆候は見られないので、まだまだプロセッサ台数を増やすことができる。

上限があるにしろ、計算機を追加していくことで更なる性能の向上が見込まれる。そのため、クラスタの規模拡大が更なる高速化の最も確実な方法といえる。さらに、ネットワークポロジーマも含めた全体のアルゴリズム最適化を行えば、さらなる性能向上は見込められると思われる。

6. おわりに

クラスタでの並列処理により、従来のシステムにはない性能が実現できた。そしてそのシステムを利用することにより、ハイブリッドスペクトル解析法の高速演算も実現することができた。この結果から、他の計算式へも適応が可能であり、本システムの有効性も確認できた。新規に高級な計算機環境を導入せずとも既存の環境で、低コストな高速演算環境が実現できた意義は非常に大きい。

しかし、まだ十分高速であるとは言いがたいし、リアルタイム処理を可能にするには、まだまだ高速化のための工夫が必要である。

参考文献

- [1] 鈴木宏, 小林史典: 「ウィグナー分布とフーリエ変換のハイブリッドスペクトル解析法による表面波動現象の解析」, 機論, 掲載予定, (2002)
- [2] 大日向大地, 鈴木宏: 「ヘテロクラスタを用いた画像処理システムの開発」, 日本機械学会北陸信越学生会第 31 回卒業研究発表講演会講演論文集, pp.143-144 (2002.3)
- [3] 大日向大地: 「ヘテロクラスタリングによる並列分散処理システムの開発」, 平成 13 年度 長野工業高等専門学校卒業研究論文 (2002)
- [4] Peter S. Pacheco: 「Parallel Programming with MPI」 (1997)