

組み込み機器を用いたコンパクトクラスタ計算機の 開発と性能評価

Development and Performance Evaluation of a Compact Cluster Computer

佐々木慶文* , 青木孝文** , 木俣修***

Yoshifumi Sasaki* , Takafumi Aoki** , Shu Kimata***

*石巻専修大学, **東北大学, ***東京エレクトロンデバイス株式会社

*Ishinomaki Senshu University, **Tohoku University, ***Tokyo Electron Device Ltd.

キーワード : 組み込み機器(embedded devices), クラスタ計算機(cluster computer), ユビキタス(ubiquitous), 指紋照合(fingerprint verification), 位相限定相関法(phase-only correlation method)

連絡先 : 〒986-8580 宮城県石巻市南境新水戸1 石巻専修大学理工学部情報電子工学科
佐々木慶文, Tel.: (0225)22-7716, Fax.: (0225)22-7746, E-mail: sasakiy@isenshu-u.ac.jp

1. はじめに

近年,組み込みプロセッサ(CPU)は車載ナビゲーション,携帯電話,デジタルカメラ,家電製品など様々な機器に搭載されている.また,これらの組み込み機器の中には,先進的なOSやネットワーク機能を備え,論理的にハイエンドCPUを搭載したPCと同等の機能を有するものも少なくない.将来的には,このような高性能組み込み機器が相互にネットワーク結合され,並列協調処理を行うようなユビキタスコンピューティング環境が実現されることが予想される¹⁾.今後,組み込み機器を用いた多様な分散協調アプリケーションの開発が重要となり,このためのプロトタイピング環境の整備が必要になると考えられる.しかしながら,従来,並列協調アプリケーションのプロトタイピングにおいては,巨大なラックにマウントされた高価な

PCクラスタなどを用いる必要があり,コストや設置スペースなどの制約から開発環境を整備・利用することが困難であった.

これに対して筆者らは,様々なユビキタスコンピューティング応用のプロトタイピングを極めて低コストで実現することを目的とし,ユビキタスコンピューティングクラスタ(Ubiquitous Computing Cluster: UCC)と呼ぶコンパクトクラスタ計算機を開発した²⁾.

UCCは4台の計算ノードとネットワークHUB(100Mbps Fast Ethernet)がコンパクトなスケルトンラックにマウントされたクラスタ計算機である.UCCの最大の特徴は,コストを抑えるために,構成要素として組み込みCPUを搭載した市販の製品(Commercial Off-The-Shelf: COTS)を用いている点である.計算ノードとしては組み込みCPU,メモリ,ハードディスクドライブ,ネットワークアダプタおよび

USBインタフェースを搭載した市販のNetwork Attached Storage (NAS)を採用した．並列処理のための安定したプロセッサ間通信を実現するため，各計算ノードにはLinux OSとリモート通信サービスなどを搭載している．また，並列処理インタフェースとして，最も典型的なMessage Passing Interface (MPI)³⁾およびParallel Virtual Machine (PVM)⁴⁾の2種類を用意している．

本クラスタ計算機は，組込み型COTS製品を用いることにより，世界最小クラスのサイズ(390mm × 280mm × 150mm)，消費電力(60W)およびコストを実現している．このため，ユビキタスコンピューティング応用のプロトタイピングのみならず，教育機関や企業における並列処理技術の教育プログラムへ容易に導入することが可能である．また，UCCでは，各計算ノードに2ポートのUSBインタフェースを搭載しており，Webカメラや音声入力装置などの様々なUSB入出力機器を接続することが可能である．このため，比較的容易に各種アプリケーションシステムへの拡張が可能である．

本稿の構成を示す．次章で，開発したUCCの構成を示す．第3章では，並列処理における基本的なメッセージパッシング性能の実機による検証結果を示す．第4章では，ユビキタスコンピューティング応用のプロトタイピングの例として，指紋照合システムの開発について言及する．指紋照合アルゴリズムとしては，筆者らがこれまでに提案している位相限定相関関数に基づく手法^{7),8)}を採用し，これを並列化してUCCに実装した．また，実機による指紋照合性能の評価を行った結果について示す．第5章はまとめである．

2. UCCの構成

Fig. 1に開発したUCCのアーキテクチャを示す．開発したクラスタ計算機は，ノード#0，#1，#2

および#3の4台の計算ノードで構成される．これらの計算ノードは，汎用のネットワークHUBを介して，100Mbps Fast Ethernetで相互に接続される．ユビキタスコンピューティング応用のプロトタイピング環境を低コストで実現するため，UCCを構成する機器には，容易に入手可能なCOTS製品を用いた．計算ノードとしては，266MHz動作のSH4 CPU，64MB SDRAM，120GBハードディスクドライブ，100Mbps Fast Ethernetおよび2ポートのUSB 2.0インタフェースを搭載したNetwork Attached Storage (NAS)を採用している．計算ノードの詳細仕様をTable 1に示す．

各計算ノードには，フリーウェアであり，かつ，安定したプロセッサ間通信が供給できるという観点から，Linux OS (Debian Linux 2.4.21 for SH4)⁵⁾を搭載している．また，プロセッサ間通信を行うリモートコマンド(rsh,など)をインストールしている．計算ノード#0は管理サーバを兼ねており，ログインIDの管理(NIS)，ファイル共有(NFS)，リモートログイン(telnet)およびファイル転送(FTP)を行うための各種サービスを提供する．

UCCのアプリケーション開発環境としては，GCC (gcc-3.0.4, g++-3.0.4)およびFortran77コンパイラ，viおよびGNU Emacsエディタ，並列処理インタフェースがプリインストールされており，導入後，すぐにアプリケーション開発が可能である．並列処理インタフェースとしては，最も典型的なMPIであるmpich-1.25とPVM-3.4.2の2種類を用意している．

Fig. 2にUCCを示す．また，UCCの仕様をTable 2に示す．UCCは計算ノードとして組込み機器を用いることにより，実際的なユビキタスコンピューティング環境に近い，プロトタイピング環境を提供する．また，すべての構成機器に組込み型COTS製品を用いたこととOSなどのソフトウェアとしてフリーウェアを用いたことにより，サイズ(390mm × 280mm × 150mm)，消費電力(60W TYP)，コ

ストともに世界最小クラスを達成している．このためUCCは特別な電源や空調などの設備を必要とせず，また，卓上に乗るほどコンパクトであることから，プロトタイピングのみならず，教育機関や企業における並列処理技術の教育プログラムなどに比較的容易に導入することが可能である．

UCCの特長の1つとして，すべての計算ノードがUSB 2.0インタフェースを搭載している点が挙げられる．Webカメラ，音声入力装置などUSBベースの様々な入出力機器やセンサを接続することにより，容易に様々なアプリケーションシステムに拡張することが可能である．Fig. 3はUCCにWebカメラを接続した画像処理システムへの拡張例である．このほかにも，サウンドカードや指紋センサなどの接続が確認されており，指紋照合システムやマイクロフォンアレイシステムなどへの拡張が可能である．

3. UCCの性能評価

本節ではUCCのメッセージパッシング通信性能について基本的な評価を行った結果を示す．評価にはMPI関数による通信性能を評価するための典型的なベンチマークプログラムであるPallas MPI benchmark (PMB)⁶⁾を用いた．本稿では，特に基本的な通信であるping-pong通信とブロードキャスト通信の通信遅延およびバンド幅を測定した．

Fig. 4にping-pongテストの結果を示す．ping-pongテストは，2つのプロセッサが交互にメッセージを送受信する際の通信遅延およびバンド幅を測定する．データサイズが小さい場合には，通信オーバーヘッドのためにスループットが低くなっているが，データサイズが大きくなるにつれて帯域幅は大きくなり，最大で70Mbps程度の性能を示している．UCCでは一般的な100Mbps Fast Ethernetを用いている点と市販の安価なスイッチングHUBを用いている点を考慮すると，十分な性能が出ていると

考えられる．

Fig. 5はブロードキャスト通信テストの結果である．ブロードキャスト通信テストでは，計算ノード#0から計算ノード#1，#2および#3に対してメッセージを送信した場合の，最も遅い通信時間を測定している．結果としてはping-pong通信の場合とほぼ同様な傾向が見られる．ピーク性能は36Mbps程度と，ping-pong通信の場合ほどは性能が出ないが，許容できる範囲の結果が得られている．

以上の性能評価の結果から，UCCは並列処理応用に対して十分な通信性能を有すると考えられる．

4. 指紋照合システムへの拡張

ユビキタス応用のプロトタイピングの例として，指紋照合システムの開発を行った．

Fig. 6に開発したシステムの構成を示す．UCCにUSB指紋センサを接続し，このセンサから取り込まれる指紋画像と予め登録された指紋データベースとの照合を複数のノードにより分散・並列処理するようなシステムを構築している．指紋照合のアルゴリズムとしては，位相限定相関関数に基づく手法を用いた^{7), 8)}．位相限定相関関数は，画像の周波数領域における位相のみを用いた相関関数である．Fig. 7の例に示すとおり，画像の類似度に応じた鋭いピークを発生するという性質から，信頼性の高い照合が可能である．また，信号処理に基づく手法であるため，システムへの実装が容易であるという利点がある．

Fig. 8に位相限定相関法に基づく指紋照合の処理の流れを示す．指紋センサから入力された画像は，2次元離散フーリエ変換され，周波数領域における位相のみが抽出される．登録指紋については，予め位相を計算したものをデータベースとして登録しておく．これらの入力指紋と登録指紋の位相から，位相限定相関関数を計算し，求めた相関値をスコアとする．すべての登録指紋についてスコア

を計算し、このうち最大のものを照合結果として出力する。

以上のアルゴリズムに基づく指紋照合システムを構築し、実機による実験を行った。Fig. 9に構築した指紋照合システムを示す。USB指紋センサとしては富士通製FINGSENSOR(FS-220U)を用い、これを計算ノード#0のUSBインタフェースに接続している。センサから取り込まれた256×256画素のセンサ画像を128×128画素にリサンプリングしたものを入力画像とした。入力画像はMPI関数により、処理に用いるすべての計算ノードに転送される。登録指紋としては、-10度から12度まで2度おきに回転させた12枚の画像について、予め位相を求めたものをファイルに記録しておく。ファイルはNetwork file system (NFS)で共有されており、すべての計算ノードから読み出せる。

本実験では計算ノード数を変化させた場合の処理時間と性能向上率を評価した。処理時間はLinuxのtimeコマンドを用いて測定しており、ユーザプログラムとシステムの実行時間を合計した値となっている。並列処理インタフェースとしては、起動時間が少ないlam-mpiを使用した。

Fig. 10に実験結果を示す。結果より、計算ノード数に比例して処理時間が減少していることが明らかである。また、4台の計算ノードを用いた場合には2秒弱程度の時間で照合が可能である。以上の点からクラスタ技術に基づく分散並列処理を行うことにより、比較的計算性能の劣る組込み機器でも、実用レベルの指紋照合システムを構築することが可能であると考えられる。

5. まとめと今後の展望

本稿では、ユビキタスコンピューティング応用のプロトタイピング環境を低コストで実現するユビキタスコンピューティングクラスタ(Ubiquitous

Computing Cluster: UCC)の開発について報告した。開発したクラスタは、すべての構成要素として市販の製品を採用することにより、世界最小クラスのサイズ、消費電力およびコストを実現している。このため、ユビキタスコンピューティング応用へのプロトタイピングのみならず、教育機関や企業における並列処理技術の教育プログラムへの容易な導入が可能である。

また、ユビキタスコンピューティング応用の一例として、位相限定相関法に基づく指紋照合システムの実現について述べた。実機による性能評価により、2秒弱で指紋照合が可能であることを明らかにした。比較的計算能力の低い組込みCPUでも分散並列処理を行うことにより、実用レベルでのアプリケーション実現が可能であることが示された。UCCは東京エレクトロデバイス株式会社⁹⁾より販売されている。

参考文献

- 1) M. Weiser: Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing, Communications of the ACM, **36-7**, 75/84, (1993)
- 2) Ubiquitous Computing Cluster (UCC), <http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/ucc/>
- 3) MPICH-A Portable Implementation of MPI, <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/>
- 4) PVM: Parallel Virtual Machine, http://www.csm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html
- 5) Debian Distribution for SH3 and SH4, <http://debian.dodes.org/index.en.html>
- 6) Pallas MPI Benchmark, <http://www.pallas.com/e/products/pmb/>
- 7) T. Kenji, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi: High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation, IEICE Trans. Fundamentals, **vol. E86-A-8**, 1925/1934, (2003)
- 8) K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi: A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation, IEICE Trans. Fundamentals, **E87-A-3**, 682/691, (2004)
- 9) Tokyo Electron Device Limited, <http://www.teldevice.co.jp/eng/index.html>

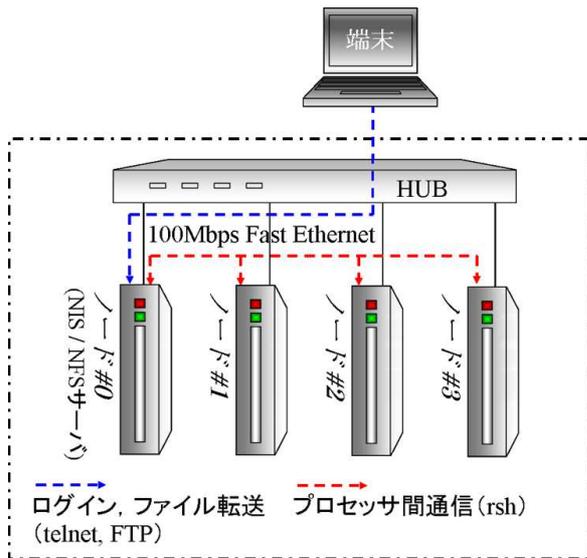


Fig. 1 Architecture of UCC.

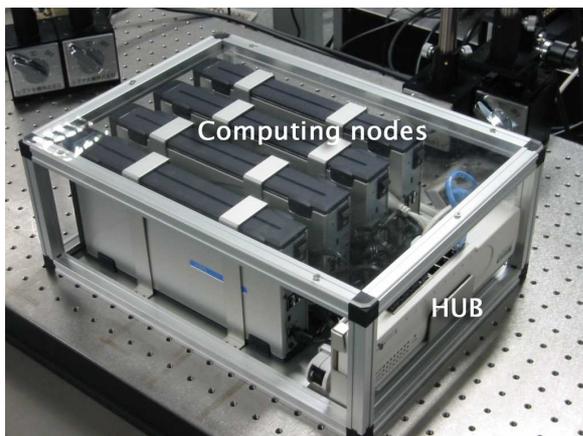


Fig. 2 Photograph of UCC.

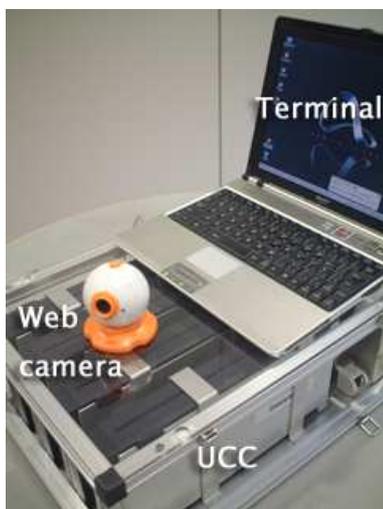


Fig. 3 Example of an image processing system.

Table 1 Specification of the computing node.

CPU	SH4 (SH7751R, 266MHz)
Memory	64MB SDRAM
HDD	120GB, ATA133, 5400rpm
NIC	10/100 BASE-T (RTL-8139C+)
I/F	USB 2.0 x 2port
OS	Debian GNU Linux 2.4.21

Table 2 Overall specification of UCC

Hardware	
Computing nodes	Embedded NAS
Number of nodes	4
Network interface	10/100 BASE-T
Power consumption	60W (TYP)
Size [mm]	W390 x D280 x H150
System software	
OS	Debian GNU Linux 2.4.21
Server functions	NIS, NFS
Communication functionos	telnet,ftp rsh,rexec,rcp
Development environment	
Compilers	GNU C-3.0.4 C++-3.0.4, F77
Editors	vi, GNU Emacs
Parallel processing interfaces	MPI(mpich-1.2) PVM-3.0

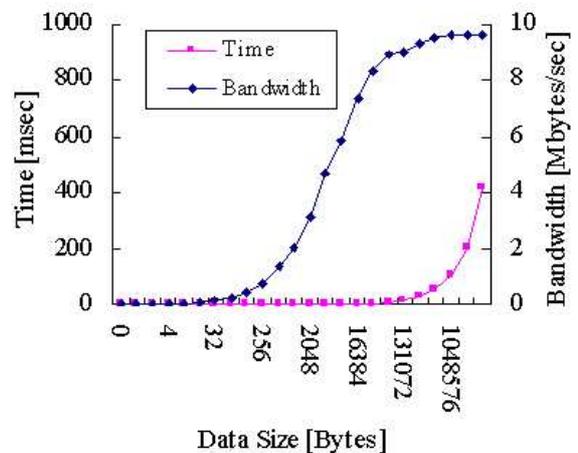


Fig. 4 Performance of ping-pong communication.

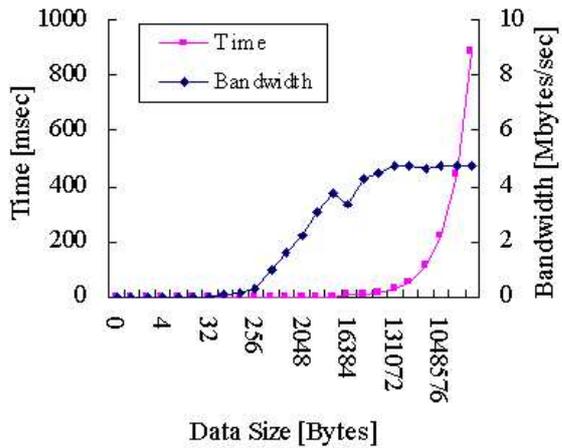


Fig. 5 Performance of broadcast communication.

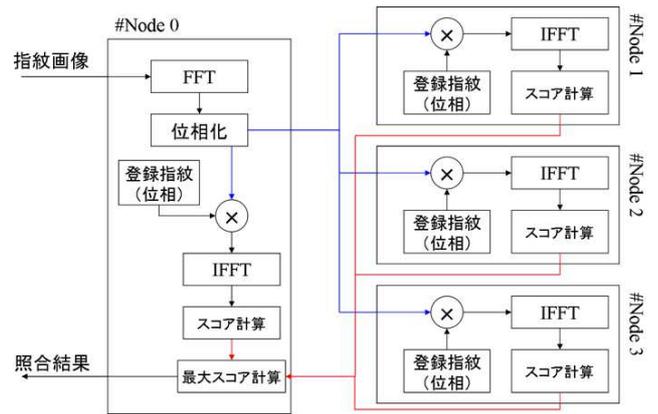


Fig. 8 Dataflow of a fingerprint verification.

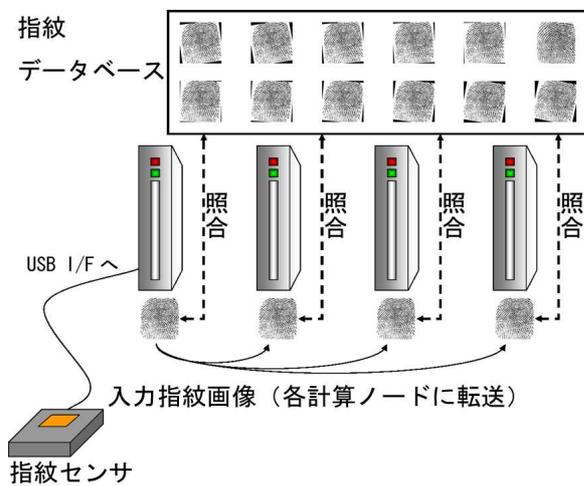


Fig. 6 Structure of a fingerprint verification system.

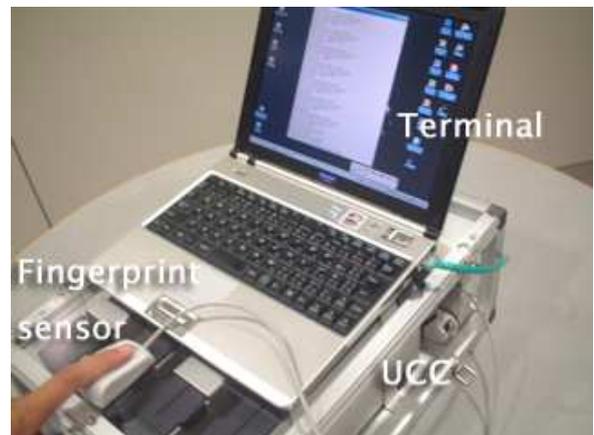


Fig. 9 Photograph of a fingerprint verification system.

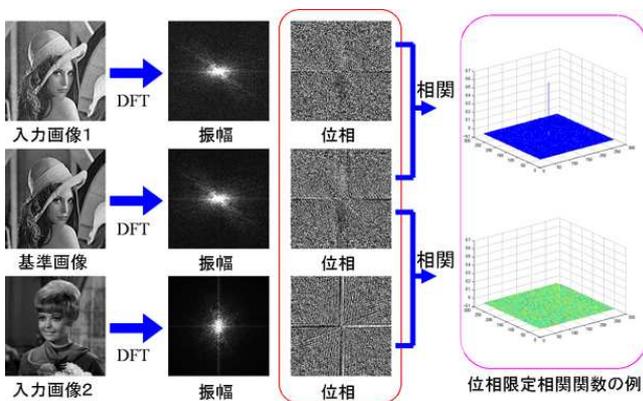


Fig. 7 Principle of phase-only correlation method.

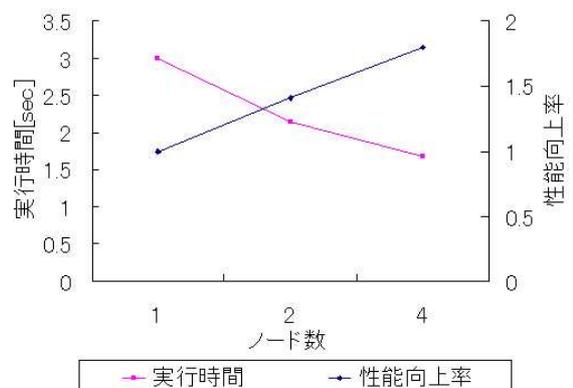


Fig. 10 Processing time of fingerprint verification.