

MPI와 OpenMP기반 하이브리드 모델을 이용한 항공 레이저 스캐닝 자료의 병렬 처리

Parallel Processing of Airborne Laser Scanning Data Using a Hybrid Model Based on MPI and OpenMP

한수희¹⁾ · 박일석²⁾ · 허준³⁾

Han, Soohee · Park, Ilsuk · Heo, Joon

Abstract

In the present study, a parallel processing method running on a multi-core PC-Cluster is introduced to produce digital surface model (DSM) and digital terrain model (DTM) from huge airborne laser scanning data. A hybrid model using both message passing interface (MPI) and OpenMP was devised by revising a conventional MPI model which utilizes only MPI, and tested on a multi-core PC-Cluster for performance validation. In the results, the hybrid model has not shown better performances in the interpolation process to produce DSM, but the overall performance has turned out to be better by the help of reduced MPI calls. Additionally, scheduling function of OpenMP has revealed its ability to enhance the performance by controlling unequal overloads charged on cores induced by irregular distribution of airborne laser scanning data.

Keywords : Airborne Laser Scanning; LiDAR; Parallel Processing; MPI; OpenMP

초 록

본 연구에서는 대용량 항공 레이저 스캐닝 자료로부터 DSM(Digital Surface Model) 및 DTM(Digital Terrain Model)을 효율적으로 생성하기 위하여 다중 코어 피씨클러스터(PC-Cluster)에 기반한 병렬처리방식을 제안하였다. 이를 위하여 MPI(message passing interface)만을 사용하는 기존 MPI 모델을 변형하여 MPI와 OpenMP를 병용한 하이브리드(hybrid) 모델을 제작하였으며 다중 코어 피씨클러스터에서 그 성능을 평가하였다. 결과적으로, 하이브리드 모델과 기존 모델을 비교하였을 때 DSM을 생성하기 위한 보간에서는 다소 불리하지만 MPI 호출을 줄임으로써 전반적인 성능을 향상시킬 수 있었다. 아울러, 불규칙한 항공 레이저 스캐닝 자료의 분포로부터 발생하는 코어간 부하불일치를 OpenMP의 scheduling 기능을 통해 조절함으로써 하이브리드 모델의 성능을 향상시킬 수 있었다.

핵심어 : 항공 레이저 스캐닝, 라이더, 병렬처리, MPI, OpenMP

1. 서 론

최근 공간정보 취득 기술이 발전함에 따라 자료의 양이 증가하고 고품질의 공간정보에 대한 사회적 요구 증가함에 따라 분석 방법이 복잡해지고 있다. 이에 공간정보의 처리 성능에 대한 관심이 고조되었으며 병렬처리가 중요한 해법으로 부각되었다(Healey 등, 1997; Clematis 등, 2003;

Yang 등, 2000; Plaza 등, 2007). 한수희 등(2008)은 대용량의 항공 레이저 스캐닝 자료를 효율적으로 처리하기 위하여 병렬처리 기법과 가상격자(virtual grid) 구조를 도입하였으며 제안한 방법의 실효성을 평가하기 위하여 피씨클러스터(PC-Cluster, Personal Computer based cluster) 상에서 IDW(Inverse Distance Weighting) 방식으로 정규격자 DSM(Digital Surface Model)을 생성하였다. 이어 Han 등

1) 교신저자 · 정희원 · 경일대학교 위성정보공학과 조교수(E-mail : scivile@kiu.ac.kr)

2) 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정(E-mail : mon_cher@naver.com)

3) 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수(E-mail : jheo@yonsei.ac.kr)

(2009)은 피씨클러스터의 각 노드에서 생성된 DSM 및 DTM(Digital Terrain Model)의 경계 불일치 문제를 인식하고 이를 효율적으로 극복할 수 있는 방법론을 제시하였다. 한수희 등(2008)과 Han 등(2009)이 사용한 병렬처리 시스템은 1개의 마스터 노드(master node)와 8개의 슬레이브 노드(slave node)로 구성된 피씨클러스터로서 각각의 노드에는 단일 코어(single core) CPU를 1개씩 장착하였다. 즉, 해당 시스템은 분산 메모리(distributed memory) 방식으로 마스터 노드와 슬레이브 노드간 자료 전송이 필요하며 이를 MPI(Message Passing Interface) 표준(Argonne National Laboratory, 2012)을 통해 수행하는 구조이다. 따라서 Han 등(2009)이 제안한 자료 처리 방식 역시 단일 코어 피씨클러스터 및 MPI에 기반하여 개발되었다. 최근 두 개 이상의 코어가 장착된 다중 코어(multi core) 씨피유가 씨피용 씨피유 시장에서도 주류를 이루게 되었고 최대 8개의 코어가 장착된 씨피유도 사용되고 있다(AMD Inc., 2012). 다중 코어 씨피유는 단일 피씨 내에서도 공유 메모리(shared memory) 방식의 병렬처리를 지원하며 OpenMP 표준(The Open MPI Development Team, 2012)에 따라 MPI에 비하여 비교적 쉽게 병렬처리 코드를 작성할 수 있다. 이와 같은 다중 코어 씨피유가 장착된 피씨클러스터는 여전히 MPI만을 사용하는 모델(이후, MPI 모델이라 칭함)의 활용이 가능하지만 MPI와 OpenMP를 함께 사용하는 모델(이후, 하이브리드(hybrid) 모델이라 칭함)을 활용하는 방식이 보편화되고 있다(Quinn, 2004; Jin 등, 2011; Chorley 등, 2010; Hager 등, 2009; Tang 등, 2010). 특히, Jin 등(2011)은 MPI 모델의 경우 씨피유 수가 증가함에 따라 메모리 및 MPI 호출(call) 가중 사용에 의한 문제점을 지적하였으며, 하이브리드 방식의 경우에도 공유 메모리 사용에 의한 병목현상이 OpenMP에 의하여 발생하므로 성능 향상에 한계성이 있다고 지적하였다.

본 연구에서는 Han 등(2009)이 제안한 MPI 모델 기반 DSM 및 DTM 생성 코드를 개선하여 하이브리드 모델을 제작하였으며 두 가지 모델의 성능을 다중 코어 피씨클러스터에서 비교, 분석하였다. 아울러, 기존 모델에서 해결하지 못했던 부하 불균형(imbalanced overload) 문제를 완화시키기 위하여 OpenMP의 scheduling 기능을 적용한 하이브리드 모델도 함께 평가하였다. 본 논문은 2단원에서 기존 MPI 모델 및 하이브리드 모델에 관해 설명하고, 3단원에서 실험 설정 및 결과에 관한 고찰을 제시하며, 4단원에서 결론 및 향후 연구 과제를 제시하는 것으로 구성하였다.

2. 항공 레이저 스캐닝 자료로부터 DSM 및 DTM 생성을 위한 병렬처리 기법

2.1 기존 MPI 모델

Han 등(2009)이 제시한 MPI 모델은 대용량 항공 레이저 스캐닝 자료로부터 IDW 보간 방식으로 DSM을 생성하고 국부최소필터링(local minimum filtering)을 통해 지형, 지물을 제거한 DTM을 생성하기 위해 고안하였다. 전체적인 연구의 흐름은 그림 1과 같다. 마스터 노드에서는 포인트 자료를 동일한 크기의 기하학적 영역으로 나누어 각 슬레이브 노드에 분배하였으며, 불규칙적으로 분포된 포인트 클라우드로부터 인접 포인트의 검색을 빠르게 수행하기 위하여 노드별로 가상격자를 사용하였다. 각 슬레이브 노드에서는 IDW 보간 방식을 이용하여 정규격자 DSM을 생성하고 여기에 국부최소필터링을 적용하여 DTM을 생성하였다. 생성된 정규격자 DSM과 DTM은 마스터 노드로 취합하여 대규모의 단일 DSM 및 DTM을 생성하였다.

그러나 단일 노드에서 작업을 수행하는 경우(sequential process)와 달리, 병렬처리를 위해 각 노드에서 작업을 수행하는 경우 그 결과가 달라질 수 있다. 즉 그림 2와 같이, 두 개 이상의 노드에서 보간을 수행할 경우 인근 노드에 존재하는 자료에 대한 접근이 제한되어 각 노드에서 생성된 DSM 간 경계 불일치 문제가 발생한다. 이 문제는 DTM 생성 시에도 마찬가지로 발생한다. Han 등(2009)은 이러한 문

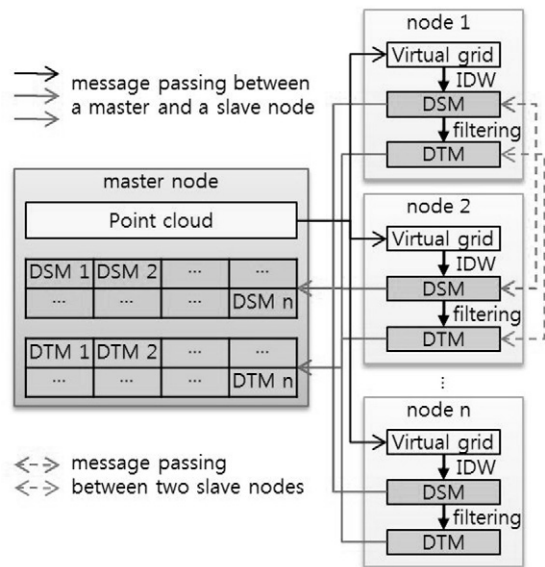


그림 1. 기존 MPI 모델 (Han 등, 2009)

제를 해결함과 동시에 MPI 호출을 최소화하기 위하여 경계부의 원 자료(포인트)를 교환하는 대신 1차적인 보간 및 필터링을 통해 계산된 값만을 교환하여 다시 합산하는 방식(이후, 부분합 방식이라 칭함)을 사용하였다(그림 3). 아울러, 경계부 보간 중심 위치를 인접 노드간에 일치시킴으로써 추가적으로 발생하는 경계 불일치 문제를 해소하였다. 보다 상세한 내용은 Han 등(2009)을 참고하도록 한다.

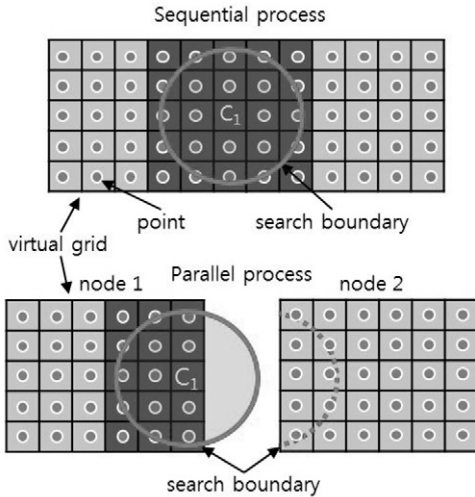


그림 2. 노드간 경계 불일치 문제 (Han 등, 2009)

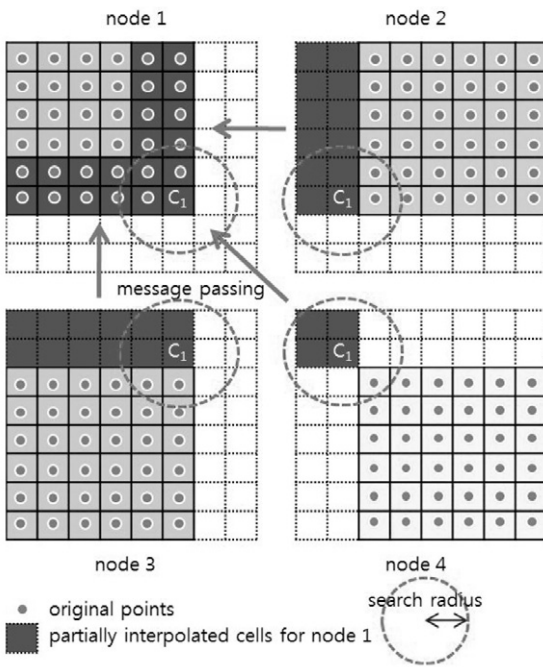


그림 3. 부분합 방식 (Han 등, 2009)

Han 등(2009)이 사용한 피씨클러스터는 1개의 마스터 노드와 8개의 슬레이브 노드로 구성되어 있고 각 노드에는 단일 코어 씨피유가 한 개씩 장착하였으며 MPI 라이브러리는 MPICH2(Argonne National Laboratory, 2012)를 사용하였다. 만약, 2개의 슬레이브 노드로 구성되어 있고 각 노드에는 4개의 코어를 가진 씨피유가 한 개씩 장착된 다중 코어 피씨클러스터에 Han 등(2009)의 모델을 적용한다고 가정하면 그 형태는 그림 4와 같다. 즉, 각 노드 안에는 한 개의 씨피유와 공유 메모리가 장착되어 있지만 코어들은 논리적으로 독립적인 노드로 인식되기 때문에 마치 8개의 노드로 구성된 단일 코어 피씨클러스터에 적용하는 것과 마찬가지로 작업이 수행된다. 따라서 노드 내부에서도 코어간에 메모리를 공유하지 못하여 그림 2와 같은 노드간 경계 불일치 문제가 발생하며 이를 부분합 방식을 통해 해결해야 한다. 결과적으로 MPI 호출이 여전히 빈번하게 발생하여 다중 코어 피씨클러스터 적용의 장점을 충분히 활용할 수 없게 된다.

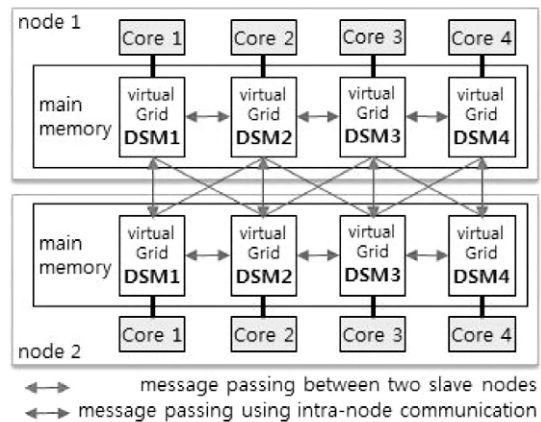


그림 4. 기존 MPI 모델의 다중 코어 클러스터 적용

2.2 하이브리드 모델

다중 코어 씨피유를 탑재한 시스템에서는 OpenMP 규약을 통하여 메인 메모리를 공유하면서 각 코어는 서로 다른 작업을 수행할 수 있다. 특히, for 문과 같이 반복 횟수가 명확한 루틴(routine)을 일정하게 나누어 각 코어에 배정함으로써 병렬처리를 수행하기에 적합하다. Han 등(2009)의 MPI 모델은 IDW 보간 및 필터링 과정을 OpenMP를 통해 병렬화함으로써 하이브리드 모델로 변환할 수 있다. 2.1 단원에서 가정한 다중 코어 피씨클러스터에 하이브리드 모델을 적용한다고 가정하면 그 형태는 그림 5와 같다. 즉, 각

노드에는 단일 가상격자가 형성되어 노드 내 어느 코어에 서나 자유로운 자료 접근이 가능하며 각 코어는 주어진 부분의 자료에 대해서만 보간 및 필터링을 수행한다. 따라서 노드 내에서는 코어간 경계 불일치 문제가 발생하지 않으며, 실제 노드 경계 불일치 문제만 부분합 방식을 통해 해결함으로써 MPI 호출을 최소화하였다.

아울러, OpenMP는 scheduling이라는 기능을 이용하여 각 코어에 할당된 부하를 능동적으로 조절할 수 있다. 즉, 각 코어에 같은 양의 작업을 할당하더라도 작업의 복잡도에 따라 그림 6(a)와 같이 작업을 마치는 시간은 다를 수 있다. 이러한 경우 그림 6(b)와 같이 scheduling 기능을 사용하면 작업을 먼저 마친 코어가 다른 코어의 작업의 일부를 수행함으로써 전체적인 작업 시간을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서 사용한 가상 격자의 경우 수평 공간을 동일한 크기의 격자로 분할한 자료구조로서 각 격자에 포함된 포인트 자

료의 수가 일정하지 않다. 따라서 보간 시 각 코어에 주어지는 부하의 차이가 발생하므로 scheduling 기능의 적용을 통해 성능 향상을 도모하였다.

3. 적용 및 고찰

본 연구에 적용한 항공 레이저 스캐닝 자료의 제원과 자료 취득 지역은 표 1, 그림 7과 같다. 다중 코어 피씨클러스터의 제원과 형태는 표 2, 그림 8과 같다.

표 1. 항공 레이저 스캐닝 자료의 제원

레이저 스캐너	ALTM 3070 (Optech, Inc.)
대상 지역	대전광역시 서구 및 대덕구 일대
전처리	계통적 에러 제거
포인트 수(밀도)	1억 3370만개(3.7개/m ²)
자료 취득 면적	10.7 × 3.4 km ²

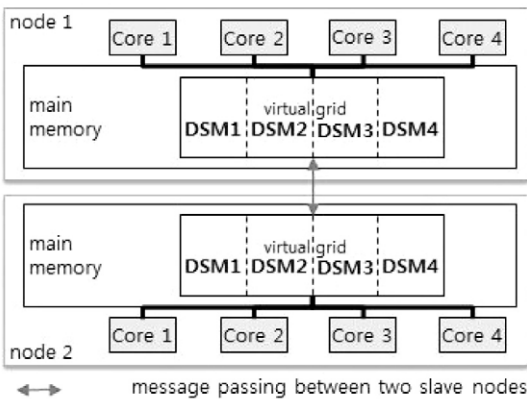


그림 5. 하이브리드 모델의 다중 코어 클러스터 적용



그림 7. 자료 취득 지역

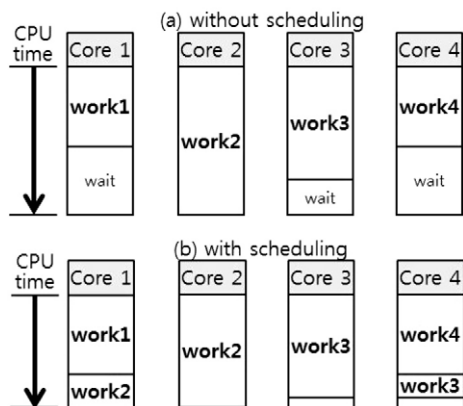


그림 6. Scheduling을 이용한 능동적 작업 분배, (a) 적용 전, (b) 적용 후

표 2. 다중 코어 피씨클러스터의 제원

노드 수	1(마스터) + 8(슬레이브)
씨피유	1 Intel core i7 2600k (4 cores @ 3.4GHz)
램	DDR3 16GB
하드디스크	2TB (7200rpm)
GPU	NVIDIA GeForce GTX460
네트워크	1Gbps Ethernet & 1Gbps 스위치 허브
운영체제	Windows server 2003 64bit
컴파일러	Visual Studio 2010
MPI 라이브러리	MPICH2
OpenMP 라이브러리	Visual Studio 제공

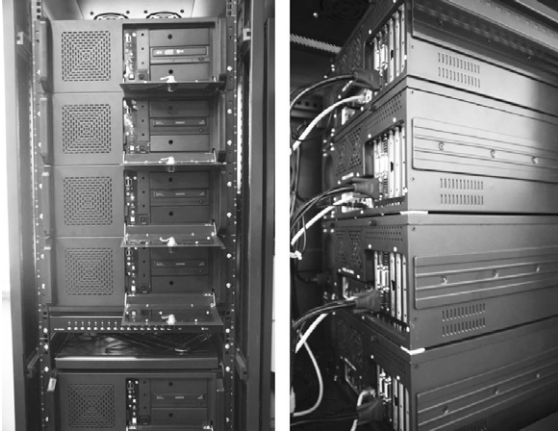


그림 8. 다중 코어 피씨클러스터

먼저, 적은 수의 노드를 사용할 경우의 실험을 원활히 하기 위하여 전체 자료의 일부분인 약 3200만개의 포인트 자료에 대하여 MPI 모델, 하이브리드 모델, scheduled 하이브리드 모델을 적용하였다. IDW 보간의 탐색 반경과 거리가 중차수는 각각 10m와 2차, 국부최소필터링의 탐색 원도 크기는 30m×30m로 고정하고 슬레이브 노드수를 변화시키

며 보간, 필터링, MPI에 의한 전송 및 파일 I/O로 구분하여 시간을 측정하였다. 표3, 표4, 표5에는 보간 및 필터링 시간의 평균과 표준편차, 전송 및 I/O 시간의 평균, 작업이 가장 늦게 종료된 노드의 총 처리 시간을 기록하였다. 여기서, 보간 및 필터링 시간의 표준편차는 노드간 자료 분배의 불균형 정도를 나타내며, 작업이 가장 늦게 종료된 노드의 총 처리 시간은 병렬처리시스템 전체의 처리 시간으로 인정된다. MPI모델의 경우 각 코어가 논리적인 노드로 인식되어 논리적 노드별로 시간을 측정하였으며, 하이브리드 모델 및 scheduled 하이브리드 모델의 경우 물리적 노드별로 시간을 측정하여 노드수가 1인 경우에는 표준편차 값이 존재하지 않는다.

표 3과 표 4의 비교에서 알 수 있듯이, 보간 시간은 하이브리드 모델이 MPI 모델에 비해 전반적으로 30% 가량 크게 측정되었으나 노드수가 증가함에 따라 그 차이가 점차 감소하였다. 반면 필터링 시간은 하이브리드 모델이 미소한 차이로 작게 측정되었으며, 전송 및 I/O 시간은 하이브리드 모델이 전반적으로 작게 측정되었다. 결국 적은 노드가 투입된 경우에는 하이브리드 모델이 MPI 모델에 비해 불리하나 노드수가 많아짐에 따라 점차 유리해짐을 확인

표 3. MPI 모델의 처리 시간(단위:초)

노드수(코어수)	보간	표준편차	필터링	표준편차	전송, I/O	총계
1(4)	86.759	4.383	6.848	0.083	22.922	131.108
2(8)	43.333	2.194	3.460	0.042	21.996	81.194
4(16)	21.670	2.969	1.734	0.022	33.806	74.453
8(32)	10.733	1.483	0.884	0.013	35.199	61.296

표 4. 하이브리드 모델의 처리 시간(단위:초)

노드수(코어수)	보간	표준편차	필터링	표준편차	전송, I/O	총계
1(4)	121.140		6.770		24.627	155.998
2(8)	60.620	5.310	3.408	0.034	25.209	101.664
4(16)	30.267	2.245	1.719	0.022	28.780	72.819
8(32)	14.906	1.099	0.869	0.011	32.572	56.307

표 5. Scheduled 하이브리드 모델의 처리 시간(단위:초)

노드수(코어수)	보간	표준편차	필터링	표준편차	전송, I/O	총계
1(4)	93.812		6.712		25.106	128.306
2(8)	46.703	2.973	3.374	0.047	25.818	88.214
4(16)	23.315	1.220	1.696	0.023	33.185	70.663
8(32)	11.576	0.628	0.858	0.011	33.175	54.031

할 수 있다. 하이브리드 모델이 MPI 호출이 적게 발생함에도 불구하고 MPI 모델에 비하여 보간 시간이 많이 소요되는 이유는 다음과 같이 해석된다. 기본적으로 다중 코어가 장착된 시스템에서는 두 개 이상의 코어가 메모리를 동시에 사용할 수 없도록 설계되어 있다. 이로 인한 성능 저하를 완화시키기 위하여, 최근 각 코어가 공유 메모리를 분할하여 관찰함으로써 메모리를 동시에 사용하도록 하는 Non-Uniform Memory Access(NUMA)(Wikipedia, 2012) 기능을 적용하고 있다. 그러나 NUMA보다 먼저 제정된 OpenMP에서는 기본적으로 이 기능을 사용하지 않으므로 하이브리드 모델의 성능 저하가 발생하는 반면, MPI 모델에서는 메모리를 독립적으로 나누어 가상 노드를 형성하므로 NUMA 기능의 사용과 유사한 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

한편, 표 4와 표 5의 비교에서 알 수 있듯이, 보간 시간은 scheduling을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다 전반적으로 30% 가량 감소하였으며 표준편차도 50~60% 수준으로 감소하였다. 결국 포인트 자료의 불균등한 분배로 인한 코어간 부하 차이를 scheduling을 통해 감소시킬 수 있으며 이로 인해 성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

다음으로, 전체 자료 및 여러 가지 부분 자료에 대하여 포인트 수의 변화에 따른 세 가지 모델의 총 처리 시간을 측정하였다(표 6). 위 실험과 마찬가지로 IDW 보간의 탐색 반경과 거리 가중차수는 각각 10m와 2차, 국부최소필터링의 탐색 윈도우 크기는 30m×30m로 고정하였다. 세 모델 중 scheduling 기능을 적용한 하이브리드 모델이 가장 우수한 성능을 보였으며 그 다음으로 하이브리드 모델이 MPI 모델보다 다소 높은 성능을 보였다. 한편, 자료 처리 성능을 평가하기 위한 기준 중 하나인 load scalability(또는 lineari-

ty)(Han 등, 2009)는 그림 9와 같이 세 가지 모델이 모두 우수한 결과를 보였다. 즉 세 가지 모델이 부하대비 처리시간이 예측가능하여 대용량 자료 처리에도 적합하다는 것을 의미한다.

표 6. 포인트 수 변화에 따른 총 처리 시간(단위:초)

포인트 수 (×1,000,000)	MPI	하이브리드	Scheduled 하이브리드
4.8	16.196	11.271	10.482
9.4	21.455	18.738	18.107
17.9	35.653	32.113	30.240
31.7	59.855	58.088	52.668
79.3	110.304	109.733	110.320
133.7	195.5964	182.3115	174.3653

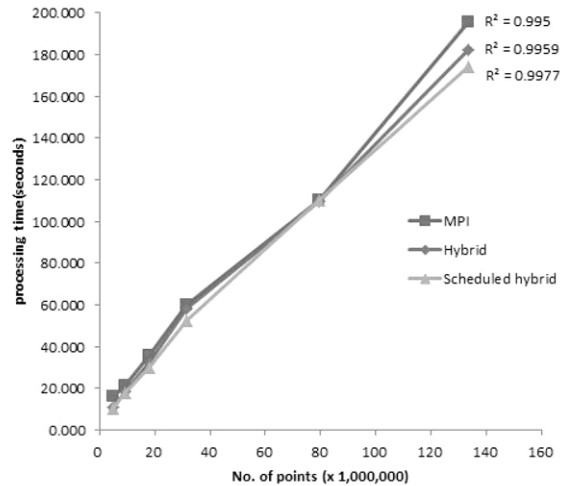


그림 9. 세 가지 모델의 scalability

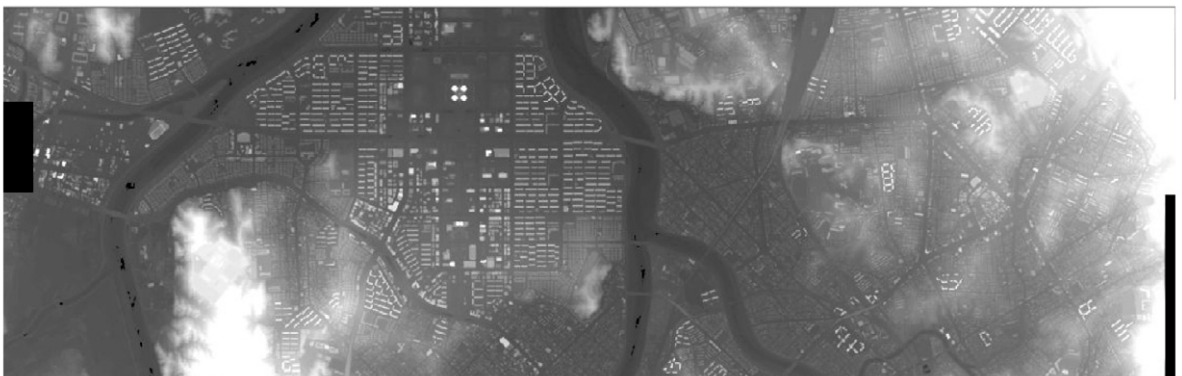


그림 10. 1억 3370만 포인트에 대한 DSM(하이브리드 모델)

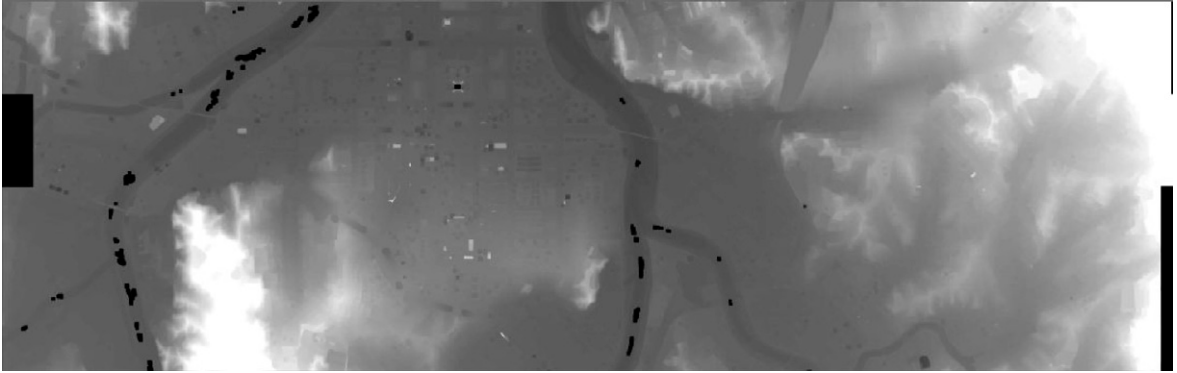


그림 11. 1억 3370만 포인트에 대한 DTM (하이브리드 모델)

약 1790만 개의 포인트에 대한 세 가지 모델에 의한 DSM 및 DTM 결과물을 비병렬처리(sequential processing) 결과물과 화소 대 화소로 값을 비교하였다. 세 가지 병렬처리 모델은 4개의 노드를 사용하였으며 그 외의 설정은 이전 실험들과 동일하게 유지하였다. 결과적으로, 화소 값의 차이를 소수 10째 자리까지 측정하여 동일한 결과물임을 확인할 수 있었다. 전체 1억 3370만 포인트에 대하여 하이브리드 모델로 생성한 DSM과 DTM의 형태는 그림 10, 그림 11과 같다.

4. 결론

본 연구에서는 항공 레이저 스캐닝 자료에서 DSM 및 DTM을 생성하기 위해 MPI와 OpenMP를 병용한 하이브리드 모델을 제작하였으며 다중 코어 피씨클러스터에서 그 성능을 평가하였다. 실험으로부터, 본 연구에서 제시한 하이브리드 모델은 MPI 모델과 비교하였을 때 보간 측면에서는 불리하지만 필터링에서는 미소한 차이로 유리하며 전송 및 I/O에서도 유리함을 확인할 수 있었다. 아울러, OpenMP의 scheduling 기능은 불규칙한 공간적 분포의 항공 레이저 스캐닝 자료의 특성으로부터 발생하는 코어간 부하를 조절하여 전체적인 처리 성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 결론적으로 처리 성능은 scheduling 기능을 적용한 하이브리드 모델이 가장 우수하며 다음으로 하이브리드 모델이 MPI 모델보다 다소 높음을 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 Non-Uniform Memory Access(NUMA) 기능을 OpenMP에서도 구현하여 하이브리드 모델의 성능을 향상시키고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0005758).

참고 문헌

- 한수희, 허준, 영호바타르 (2008), 병렬처리와 가상격자를 이용한 대용량 항공 레이저 스캔 자료의 효율적인 처리, 한국공간정보시스템학회지, 제10권, 제4호, pp. 21-26.
- Advanced Micro Devices, Inc. (2012), AMD FX Processors, <http://www.amd.com/us/products/desktop/processors/amd/fx/Pages/amd/fx.aspx>
- Argonne National Laboratory (2012), MPICH2, <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/>
- Argonne National Laboratory (2012), The Message Passing Interface (MPI) standard, <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpl/>
- Chorley, M. and Walker, D. (2010), Performance analysis of a hybrid MPI/OpenMP application on multi-core clusters, *Journal of Computational Science*, Vol. 1, Issue 3, pp. 168-174.
- Clematis, A., Mineter, M. and Marciano, R. (2003), High performance computing with geographical data, *Parallel Computing*, Vol. 29, Issue 10, pp. 1275-1279.
- Hager, G., Jost, G. and Rabenseifner, R. (2009), Communication Characteristics and Hybrid MPI/OpenMP Parallel Programming on Clusters of Multi-core SMP Nodes, *Proceedings of the Cray Users Group Conference 2009*, Vol.

- 4, Issue d, pp. 54-55.
- Han, S. H., Heo, J., Sohn, H. G. and Yu, K. (2009), Parallel Processing Method for Airborne Laser Scanning Data Using a PC Cluster and a Virtual Grid, *Sensors*, Issue 9, pp. 2555-2573.
- Healey, R., Dowers, S., Gittings, B. and Mineter, M. J. (1997), *Parallel Processing Algorithms For GIS*, CRC Press.
- Jin, H., Jespersen, D., Mehrotra, P., Biswas, R., Huang, L., and Chapman, B. (2011), High performance computing using MPI and OpenMP on multi-core parallel systems, *Parallel Computing*, Vol. 37, Issue 9, pp. 562-575.
- Plaza, A. J. and Chang, C. (2007), *High Performance Computing in Remote Sensing*, Chapman & Hall/CRC.
- Quinn, M. J. (2004), *Parallel Programming in C with Mpi and Openmp*, McGraw-Hill Companies.
- Tang, G., D' Azevedo, E. F., Zhang, F., Parker, J. C., Watson, D. B. and Jardine, P. M. (2010), Application of a hybrid MPI/OpenMP approach for parallel groundwater model calibration using multi-core computers, *Computers & Geosciences*, Vol. 36, Issue 11, pp. 1451-1460.
- The Open MPI Development Team (2012), The OpenMP® API specification for parallel programming, <http://openmp.org/wp/>
- Wikipedia (2012), Non-Uniform Memory Access, http://en.wikipedia.org/wiki/Non-Uniform_Memory_Access
- Yang, C. and Hung, C. (2000), Parallel Computing in Remote Sensing Data Processing, *ACRS 2000 proceedings*.

(접수일 2012. 03. 02, 심사일 2012. 04. 07, 심사완료일 2012. 04. 24)