

반복적 영역분할법을 이용한 대용량의 점데이터로부터의 형상 재구성

유동진[#]

Shape Reconstruction from Large Amount of Point Data using Repetitive Domain Decomposition Method

Dong-Jin Yoo[#]

ABSTRACT

In this study an advanced domain decomposition method is suggested in order to construct surface models from very large amount of points. In this method the spatial domain of interest that is occupied by the input set of points is divided in repetitive manner. First, the space is divided into smaller domains where the problem can be solved independently. Then each subdomain is again divided into much smaller domains where the problem can be solved locally. These local solutions of subdivided domains are blended together to obtain a solution of each subdomain using partition of unity function. Then the solutions of subdomains are merged together in order to construct whole surface model. The suggested methods are conceptually very simple and easy to implement. Since RDDM(Repetitive Domain Decomposition Method) is effective in the computation time and memory consumption, the present study is capable of providing a fast and accurate reconstructions of complex shapes from large amount of point data containing millions of points. The effectiveness and validity of the suggested methods are demonstrated by performing numerical experiments for the various types of point data.

Key Words : Shape reconstruction(형상재구성), Large amount of point data(대용량의 점데이터), Repetitive domain decomposition method(반복적 영역분할법)

1. 서론

최근 CAD(Computer Aided Design) 및 CG(Computer Graphics) 분야에서는 3 차원 공간상에 존재하는 무수한 점 데이터로부터 형상을 재구성하려는 일련의 연구가 진행되어 왔다. 특히 3D 스캐너(scanner)와 같은 비접촉식 측정장치의 발달로 비

교적 짧은 시간에 수 백, 수 천만 개에 이르는 스캐너 데이터를 획득할 수 있는 기술적 단계에 와 있지만 스캐너 시스템으로부터 생성된 폴리곤 모델에는 다수의 복잡한 형상의 홀(hole) 및 삼각형간의 겹침 등과 같은 많은 기하학적 결함들이 존재하기 때문에 지루한 수작업에 엔지니어의 많은 노력이 투입되고 있는 것이 현실이다. 본 연구의 주

☞ 접수일: 2006년 5월 24일; 게재승인일: 2006년 9월 25일

교신저자: 대전대학교 컴퓨터응용 기계설계공학과

E-mail djyoo@daejin.ac.kr Tel. (031) 539-2031

요한 목표는 이러한 기하학적 결함을 가지고 있는 대용량의 점 데이터로부터 완전한 하나의 곡면모델을 수작업의 개입 없이 정확하고 신속하게 얻고자 하는 것으로 이의 실현을 위하여 반복적 영역분할법(Repetitive Domain Decomposition Method)을 제안한다. 초기의 연구들은 주로 레이디얼 기초함수(Radial Basis Function)에 기초한 음함수곡면기법을 이용한 형상 재구성에 관한 것으로 Turk¹ 및 Carr² 등에 의하여 시도되어 다양한 데이터에 성공적으로 적용되었으나 입력된 점의 개수가 수 만, 수 십만에 달하면 보간에 소요되는 계산시간이 비약적으로 증가하게 되고 수 백만, 수 천만 개의 점 데이터에 대해서는 시도 자체가 거의 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 레이디얼 기초함수의 한계를 극복하기 위하여 Kojekine³ 등은 컴팩트리서포티드 레이디얼 기초함수(Compactly Supported Radial Basis Function)를 제안하여 계산시간 및 메모리 사용에 있어 효율성을 증대시키려 하였으나 입력된 점들의 분포가 불균일 해지면 해가 강건하지 못하다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 영역분할법을 이용한 곡면보간에 관한 연구가 Ohtake⁴ 등에 의하여 시도 되었는데 입력된 점들이 점유하고 있는 3 차원 공간을 옥트리 기법에 의하여 분할한 후 각 영역마다 적합한 이차함수를 선택적으로 사용하고 각 영역에 가중치를 부여하여 전체형상에 대한 곡면방정식을 구성하는 MPU(Multi-level Partition of Unity) 방법을 제안하여 다양한 점 데이터에 성공적으로 적용한 바 있다. 저자의 선행연구결과⁵를 통하여 보고된 적응적 영역분할법(Adaptive Domain Decomposition Method)도 전체영역을 분할하고 분할된 각 영역마다 서로 다른 형상함수를 선택적으로 사용한다는 점에서 Ohtake⁴ 등의 연구와 유사하다. 하지만 2 차 함수 외에 3 차 함수 및 레이디얼 기초함수를 혼합하여 사용함으로써 영역의 과도한 분할을 억제하고 2 차 함수만의 사용으로 인한 입력된 점 데이터의 노이즈(noise)에 대한 해의 불완전성을 크게 줄일 수 있다는 점에서 큰 차이가 있다. 본 연구는 이러한 적응적 영역분할법의 기초하에 수십만, 수백만개의 점데이터를 효율적으로 처리할 수 있도록 반복적으로 관심영역을 분할해 들어가는 새로운 개념의 영역분할법을 제안하고자 한다.

2. 적응적 영역분할법에 의한 형상 재구성

본 연구에서는 무수한 점 데이터를 통과하는 부드러운 곡면을 하나의 새로운 음 함수 곡면으로 정의하는 방법을 사용하였다. 또한 곡면보간 및 가시화에 소요되는 시간을 단축시키기 위하여 세부영역마다 선택적으로 서로 다른 형상함수를 사용하는 적응적 영역분할법⁵을 이용하였다. 적응적 영역분할법은 Table 1 에서 보는 바와 같이 세부영역의 점들의 분포특성에 따라 2 차 다항식과 3 차 다항식 및 레이디얼 기초함수를 적절히 혼합해서 전체 곡면 식을 구성하는 방법으로서 곡면보간 및 가시화에 소요되는 시간을 크게 단축시킬 수 있다. 곡면의 생성과정에 관한 자세한 수치해법은 저자의 선행연구^{5,6}에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 생략하도록 한다.

Table 1 Various types of shape functions

<p>Quadratic polynomial</p> $f(\mathbf{X}) = w - (a_0 + a_1u + a_2v + a_3u^2 + a_4uv + a_5v^2) \quad (1)$
<p>Cubic polynomial</p> $f(\mathbf{X}) = w - (a_0 + a_1u + a_2v + a_3u^2 + a_4uv + a_5v^2 + a_6u^3 + a_7u^2v + a_8uv^2 + a_9v^3) \quad (2)$
<p>Radial basis function</p> $f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\mathbf{x} - \mathbf{c}_j) + P(\mathbf{x}) \quad (3)$ <p>where,</p> $\phi(\mathbf{x}) = \mathbf{x} ^2 \log(\mathbf{x})$ $P(\mathbf{x}) = P_0 + P_1x + P_2y + P_3z$

분할된 각 영역에서의 음함수 곡면식이 구해지면 혼합함수에 의하여 전체 곡면방정식을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 C² 이상의 영역간 연속성이 보장되도록 다음과 같은 혼합함수를 사용하였다.

$$d_i(\mathbf{P}) = 1 - \prod_{r \in x,y,z} \frac{4(\mathbf{P}_r - \mathbf{S}_r)(\mathbf{T}_r - \mathbf{P}_r)}{(\mathbf{T}_r - \mathbf{S}_r)^2} \quad (4)$$

$$w_i(\mathbf{P}) = -6d_i^5 + 15d_i^4 - 10d_i^3 + 1 \quad (5)$$

$$w_i(\mathbf{P}) = \frac{W_i(\mathbf{P})}{\sum_{j=1}^{ND} W_j(\mathbf{P})} \quad (6)$$

$$F(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^{ND} f_i(\mathbf{P})w_i(\mathbf{P}) \quad (7)$$

여기서,

S: 각 영역의 최소 x,y,z 값

T: 각 영역의 최대 x,y,z 값

P: 구하고자 하는 점의 좌표값

w_i : i 번째 영역의 가중치

F(P): 점 **P** 에서의 음함수값

이다.

주어진 점 데이터가 식(7)과 같은 하나의 음함수 곡면으로 정의 되었으므로 여러 형태의 가시화가 가능하다. 본 연구에서는 음함수 곡면의 가시화 방법으로 널리 사용되고 있는 marching cube algorithm 과 요소의 세분화 및 smoothing 을 통하여 홀 등의 불완전한 요소를 제거하는 것은 물론이고 양질의 삼각망을 재생성함으로써 여러 용도로 사용될 수 있도록 하였다.

3. 반복적 영역분할법에 의한 형상 재구성

3.1 반복적 영역분할법

본 연구에서 제안하고자 하는 반복적 영역분할법은 점데이터가 점유하고 있는 3 차원 공간을 분할한다는 점에서 기존의 적응적 영역분할법과 유사하다고 생각할 수 있으나 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 전체 영역을 독립된 몇 개의 부 영역으로 나누고 각 부 영역을 다시 세부영역으로 나눈 후 세부영역의 해들을 구하여 부 영역의 해를 독립적으로 구하고 모든 부 영역의 해들을 접합시킴으로써 전체 곡면모델을 구성한다는 점에서 큰 차이가

있다. 따라서 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 세 개의 부 영역으로 분할한 경우 세대의 컴퓨터에서 병렬처리가 가능하기 때문에 계산시간은 부 영역의 분할개수에 비례해서 줄어들게 되고 소요되는 메모리의 양도 크게 감소하게 되어 대용량의 점데이터의 처리가 용이해진다.

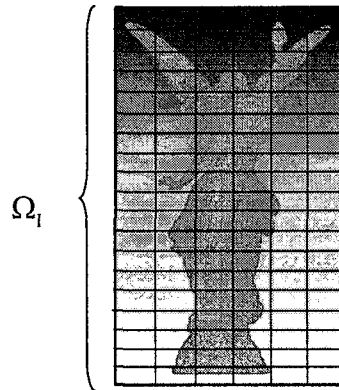


Fig. 1(a) Adaptive domain decomposition method

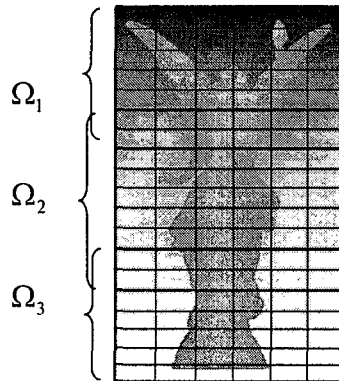


Fig. 1(b) Repetitive domain decomposition method

Fig. 1(a)의 적응적 영역분할법의 경우는 1 개의 부 영역에 114(6 X 19)개의 세부영역을 갖게 되는 것이고 Fig. 1(b)의 반복적 영역분할법의 경우는 3 개의 부 영역에 각각 42(6 X 7)개, 54(6 X 9)개, 42(6 X 7)개의 세부영역을 갖게 되는 것이다. 즉 적응적 영역분할법은 부 영역이 한 개인 반복적 영역분할법의 특수한 경우라고 생각할 수 있다. 일단 이런 분할법이 성립된다고 가정하면 점 데이터가 현재 사용하고자 하는 컴퓨터의 메모리 용량을 크게 벗어난다든지 또는 계산시간이 수 일이 걸릴 정도로

큰 문제라서 시일이 촉박할 경우 본 연구에서 제안한 반복적 영역분할법이 효율적으로 이용될 수 있다. 한 컴퓨터에서 여러 부 영역으로 나누어 계산함으로써 메모리 문제를 해결할 수도 있고 여러 대의 컴퓨터에 분산하여 처리함으로써 계산시간도 획기적으로 단축시킬 수 있다. 그러나 아직 해결해야 할 중요한 문제가 남아있는데 그것은 어떻게 부 영역간의 연속성을 확보하느냐 하는 문제이다.

3.2 부영역간의 연속성을 위한 중첩알고리즘

반복적 영역분할법은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 부 영역 1 의 내부에 존재하는 점들을 보간하는 경우에 부 영역 3 에 있는 점들은 해에 영향을 줄 수도 없고 주어서도 안 된다는 생각에서 출발한 것으로 이는 기존의 NURBS 나 B-spline 곡면의 경우에서와 같이 각 patch 의 조정점들의 영향을 knot vector 나 order 등을 이용하여 조절해서 patch 간의 연속성 및 곡부수정의 용이성 등을 꾀한 개념과 유사하다고 볼 수 있다. 하지만 이 경우에는 조정점들이 규칙적인 형태로 존재하는 것이 아니고 불규칙적으로 3 차원 공간상에 산재되어 있으므로 부 영역간의 연속성을 보장하기 위한 다른 개념의 도출이 필요하였다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 전체 영역을 단순히 몇 개의 부 영역으로 분할하여 점들을 보간한 후 한 모델로 합친다고 생각해 보면 그림에서 보는 바와 같이 부 영역간의 연속성은 기대하기 힘들 것이다. C^1 연속성은 고사하고 C^0 즉 부 영역간의 경계부위에서의 기하학적 mismatch 가 발생할 것이 분명하다. 따라서 본 연구에서는 부 영역간의 연속성 확보를 위하여 부 영역들을 분할 경계면에서 일부 중첩시키는 알고리즘을 제안하고자 한다. 논문 후반부에 기술하게 될 다양한 데이터에 대한 수치해석 결과를 통하여 부 영역의 분할방향으로 2 개 이상의 세부 영역들이 인접한 부 영역들간의 공동영역으로 존재하고 부 영역간의 세부영역 분할 mechanism 이 일치한다면 C^1 이상의 연속성을 확보할 수 있음을 확인하였다. Fig. 3 에서 보는 바와 같이 부 영역간에 중첩영역을 갖게 하되 2 개 이상의 세부영역이 공유되어야 하고(이 경우는 2 개), 세부영역의 분할 mechanism(이 경우는 부 영역들의 가로방향의 분할개수가 2 로서 서로 일치함)이 서로 같아야 한다는 것이다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 2 개 이상의 세부영역이 공유되어도 분할 mechanism 이

다르면 부 영역간에 mismatch 가 발생할 수 있음을 의미한다. Fig. 3 에서와 같이 음함수 곡면보간은 부 영역 전체 범위에 대해서 수행하고 중첩된 영역의 절반까지만 곡면을 가시화함으로써 부 영역간의 연속성을 확보할 수 있었다. 물론 조금 더 정확한 중첩영역의 크기를 해석적으로 구하기 위한 시도^{7,8}도 생각해 볼 수는 있으나 보간 하고자 하는 점 데이터들의 분포특성 및 형상자체의 복잡성 등 여러 요인 때문에 사전에 이를 정확히 수학적으로 구해 계산에 반영한다는 것은 쉽지 않을 뿐더러 실용적이지도 못할 것으로 판단된다. 더 많은 개수의 세부영역들이 공동영역으로 존재하게 되면 C^1 이상의 영역간 연속성도 얻을 수 있겠으나 이는 계산시간의 증가를 의미하므로 사용하고자 하는 모델의 용도에 따라 적절한 선택이 요구된다. 제안한 알고리즘의 검증은 4 장에서 계산결과와 함께 자세히 기술하기로 한다.

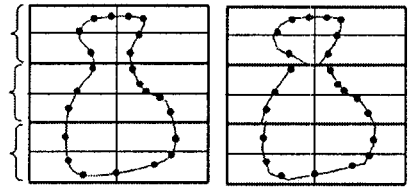


Fig. 2 Mismatch between subdomains

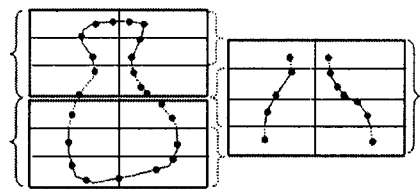


Fig. 3 Continuity between subdomains can be obtained by overlapping subdomains

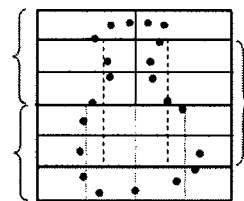


Fig. 4 Discontinuity can be occurred by different subdivision mechanism

4. 적용 결과

본 연구에서 제안한 반복적 영역분할법의 효용성 및 타당성을 확인해 보기 위하여 다양한 대용량의 점 데이터들에 대하여 개발된 프로그램을 적용해 보았다. 곡면보간을 비롯한 주요 프로그램들은 IBM RS 43P 140 w/s 에서 C 언어로 작성하였으며 생성된 곡면모델의 가시화를 위한 프로그램은 PC 에서 Visual C++ 언어와 OpenGL 을 이용하여 작성하였다. 계산을 위하여 최대 10 대의 w/s 을 사용하였으며 부 영역의 개수만큼의 별도 프로그램을 준비한 후 각 w/s 에서 동시에 프로그램을 실행시키는 가장 단순한 형태의 병렬처리 방법으로 해석을 수행하였다. Fig. 5 는 본 연구에서 제안한 부 영역간 연속성을 확보하기 위한 중첩 알고리즘의 타당성을 검증해 보이기 위하여 여러 영역분할형태에 대한 계산결과를 정리해 놓는 것이다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 부 영역간에 중첩영역이 존재하지 않으면 육안으로도 인지할 수 있는 mismatch 가 발생함을 알 수 있었으며 Fig. 5(b)~(c)에서와 같이 2 개 이상의 세부영역이 부 영역간의 공동영역으로 존재하게 되면 C¹ 이상의 부 영역간 연속성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 6 은 약 25 만개의 점데이터로 구성된 여성모델⁹ 을 본 연구에서 제안한 반복적 영역분할법을 이용하여 재구성해 본 결과로서 완성된 곡면모델에서 보는 바와 같이 부 영역간의 경계선을 육안으로 구별하기가 어려울 정도로 부 영역간의 연속성이 확보될 수 있음을 확인하였다. Fig. 7 은 부 영역 1 과 부 영역 2 의 경계부위를 확대하여 부 영역 사이의 연속성을 좀 더 자세히 살펴본 그림이다. 부 영역간의 경계선의 확실한 가시화를 위하여 부 영역 1 의 z 방향의 mesh 크기를 부 영역 2 의 mesh 크기보다 작게 하여 계산하였다. Fig. 7(b) 에서 보는 바와 같이 mesh 크기의 불연속성으로 인해 영역간의 경계부위를 시각적으로 감지할 수는 있으나 Fig. 7(a) 의 경우 화살표를 의식하면서 관찰해도 경계선을 파악하기가 쉽지 않다. 더욱이 영역들을 개발된 자동 접합 프로그램을 이용하여 하나의 삼각망으로 만든 후 smoothing 과정을 거친 후의 최종모델에서는 Fig. 7(c) 와 Fig. 7(d) 에서 보는 바와 같이 shading 모드나 mesh 모드에서 보아도 영역간의 연속성이 완벽함을 확인할 수 있었다. 세 개의 별도 프로그램을 준비하여

3 대의 컴퓨터에서 동시에 실행시켰는데 부 영역 1 의 계산에 4 분 37 초, 부 영역 2 의 계산에 4 분 13 초, 부 영역 3 의 계산에 2 분 31 초가 소요되었다. 한 컴퓨터에서 순차적으로 실행 시킬 경우 총 11 분 21 초의 계산시간이 소요되므로 Table 2 에서 보는 바와 같이 부 영역을 나누지 않고 세부영역으로만 분할했을 때 보다 계산시간이 늘어나는 것 같지만 병렬처리가 가능하므로 가장 많은 시간이 소요된 부 영역 1 을 기준으로 하고 각 부 영역의 계산결과들을 가져오고 접합하는 부수적인 시간을 감안하더라도 100% 이상의 계산시간 절감효과가 있다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 65 만여 개의 점 데이터로 구성된 손의 뼈모델¹⁰ 을 재 구성해 본 결과로서 부 영역의 분할방향을 모델의 기하학적 특성과는 무관한 방향으로 설정하였음에도 불구하고 최종모델에 있어서 부 영역들 간의 연속성이 양호함을 확인할 수 있었다. 그러나 Table 2 에서 보는 바와 같이 각 부 영역에 할당된 점들의 개수의 불균일로 인하여 계산시간에 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 가장 많은 시간이 소요된 부 영역 2 를 기준으로 하더라도 300% 이상의 계산시간 절감효과가 있음을 알 수 있다. Fig. 10 은 387 만여 개의 점 데이터로 구성된 Lucy 모델¹¹ 을 재 구성해 본 결과로서 기존의 적응적 영역분할법만으로는 컴퓨터 메모리의 부족으로 인하여 계산의 시도 자체가 불가능하였으나 10 개의 부 영역으로 나누고 10 개의 별도 프로그램들을 이용하여 동시에 10 대의 컴퓨터에서 계산한 결과 영역당 평균 10 여 분 만에 전체모델을 완성할 수가 있었다.

5. 결론

대용량의 점 데이터로부터 하나의 완전한 곡면 모델을 재구성하기 위해서 수 십만, 수 백만 개에 이르는 점 데이터를 효율적으로 처리할 수 있는 반복적 영역 분할법을 제안하였다. 이 방법은 전체영역을 독립된 몇 개의 부 영역으로 분할한 후 각 부 영역에서 구한 해들을 단순히 접합하여 하나의 일체화된 삼각망으로 만들어 전체 곡면모델을 구성하기 때문에 계산시간이 단축되고 필요한 메모리의 양도 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 각 부 영역간의 연속성 확보를 위하여 부 영역의 분할방향으로 두 개 이상의 세부영역을 중첩시키고 부 영역간의 세부 영역 분할형식을 일치

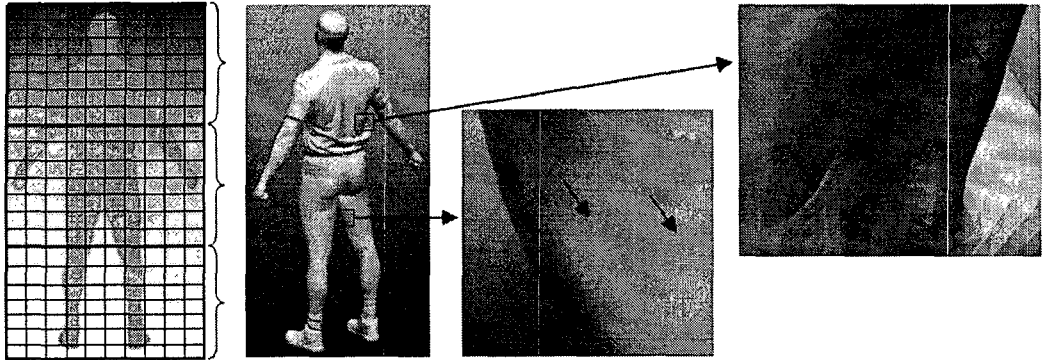


Fig. 5(a) Subdivision mechanism-1(number of overlapping leaf domain : 0)

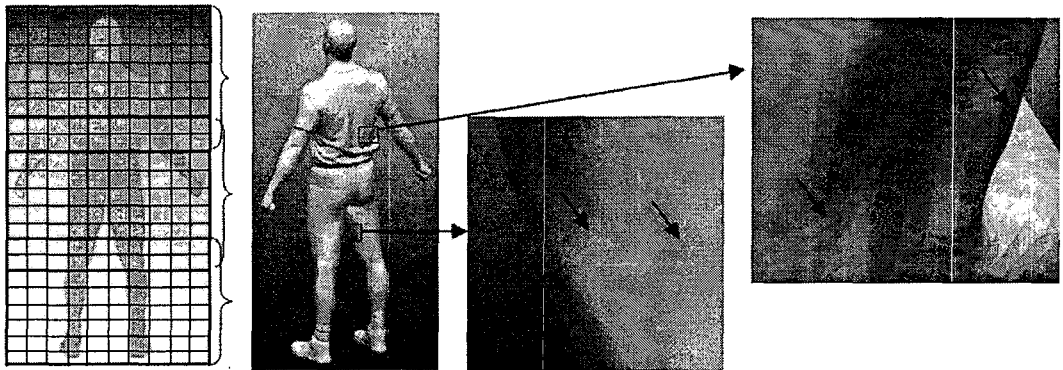


Fig. 5(b) Subdivision mechanism-2(number of overlapping leaf domain : 2)

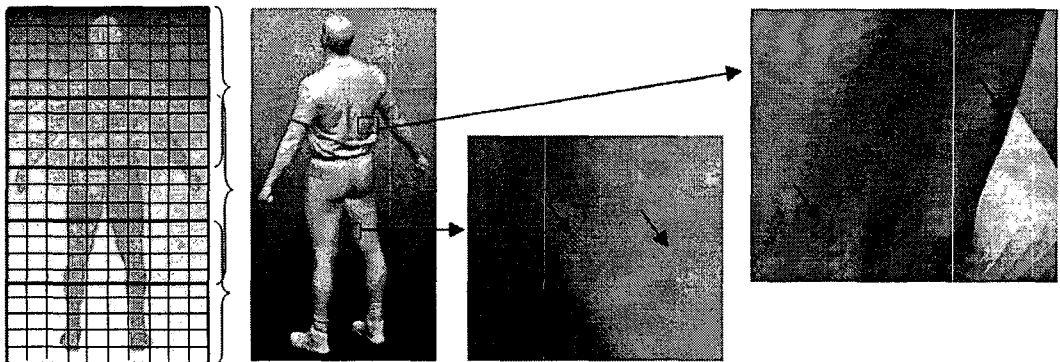


Fig. 5(c) Subdivision mechanism-3(number of overlapping leaf domain : 4)

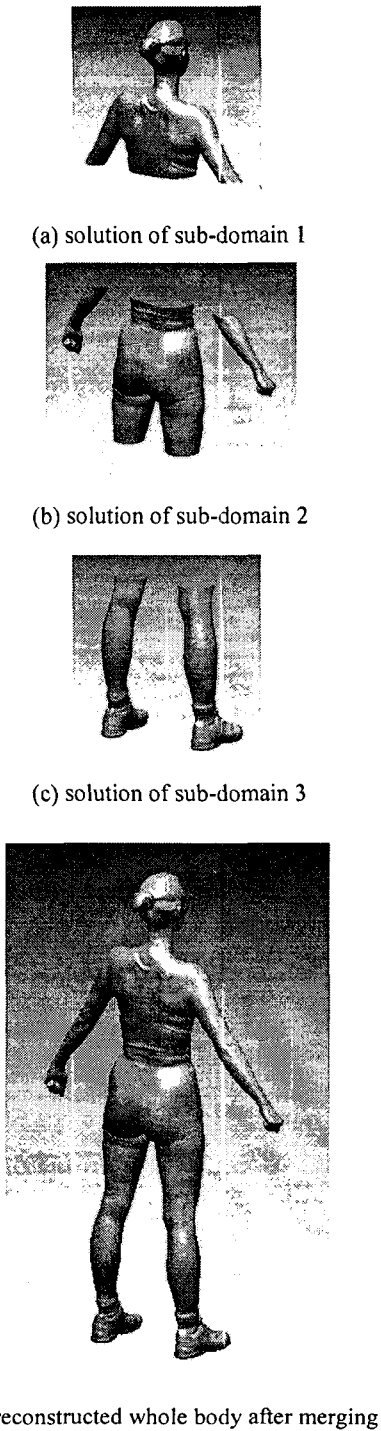


Fig. 6 Reconstructed shape of human body

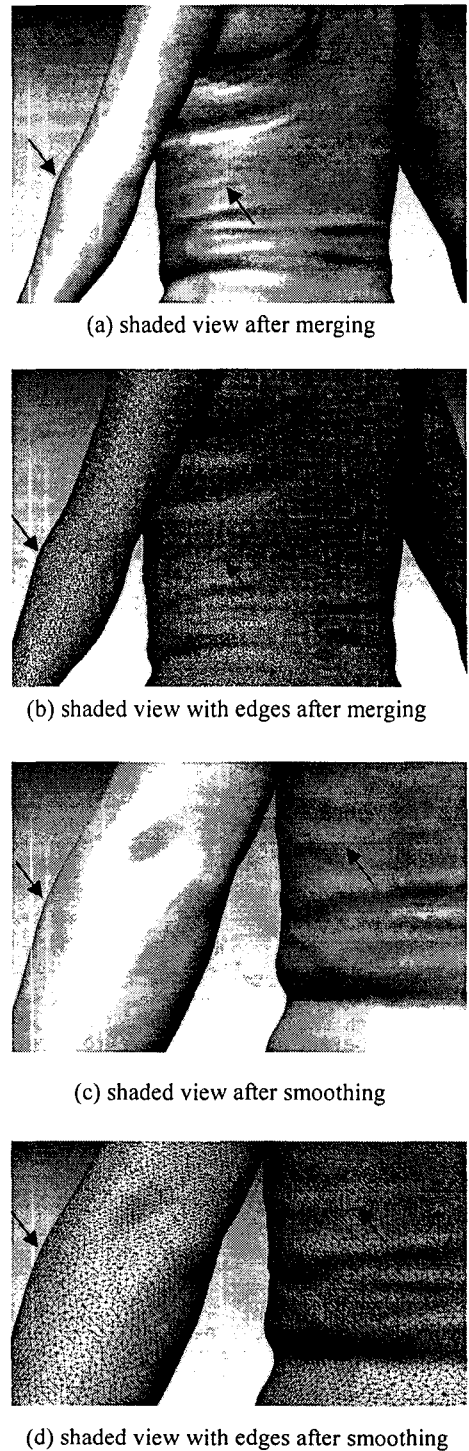


Fig. 7 Detailed view of boundary zone between domains

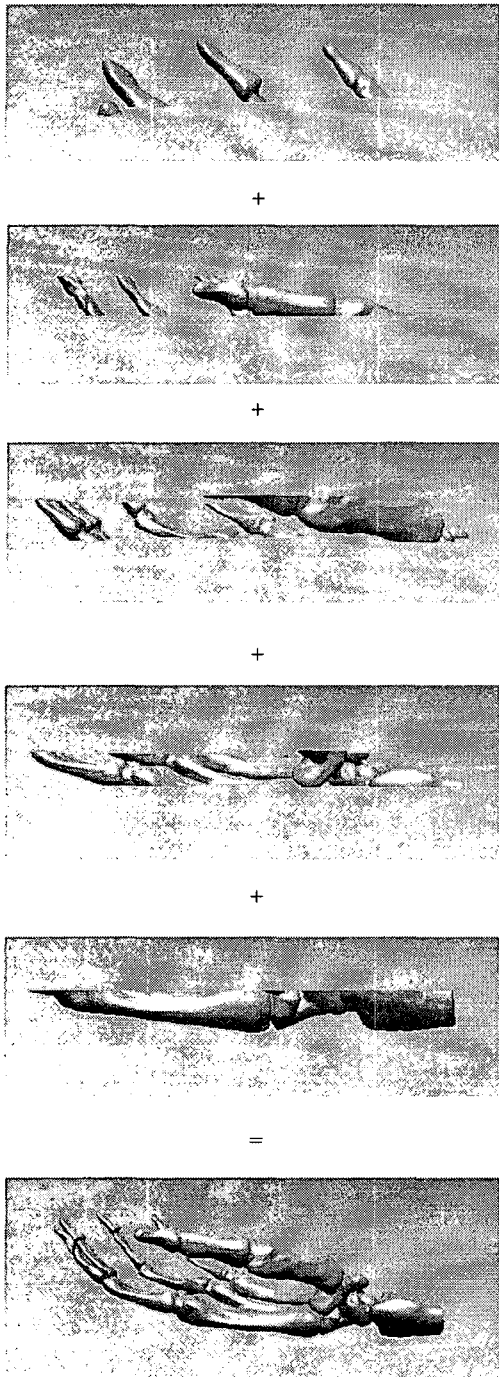
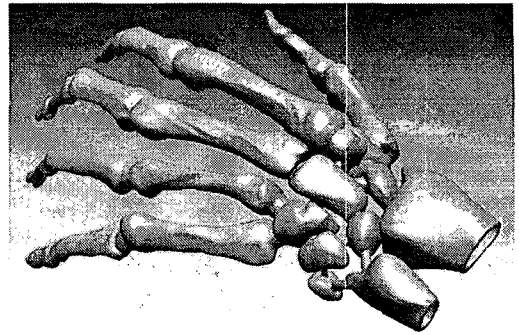
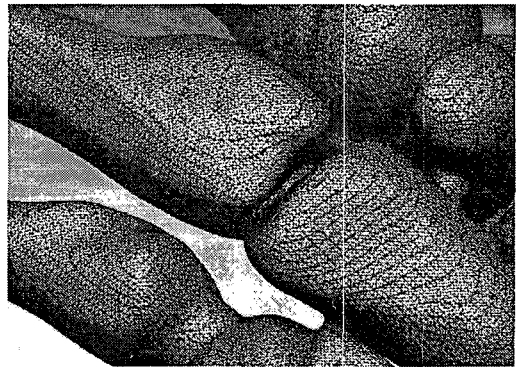


Fig. 8 Reconstructed shape of skeleton hand



(a) shaded view after smoothing



(b) shaded view with edges before smoothing



(c) shaded view with edges after smoothing

Fig. 9 Detailed view after smoothing

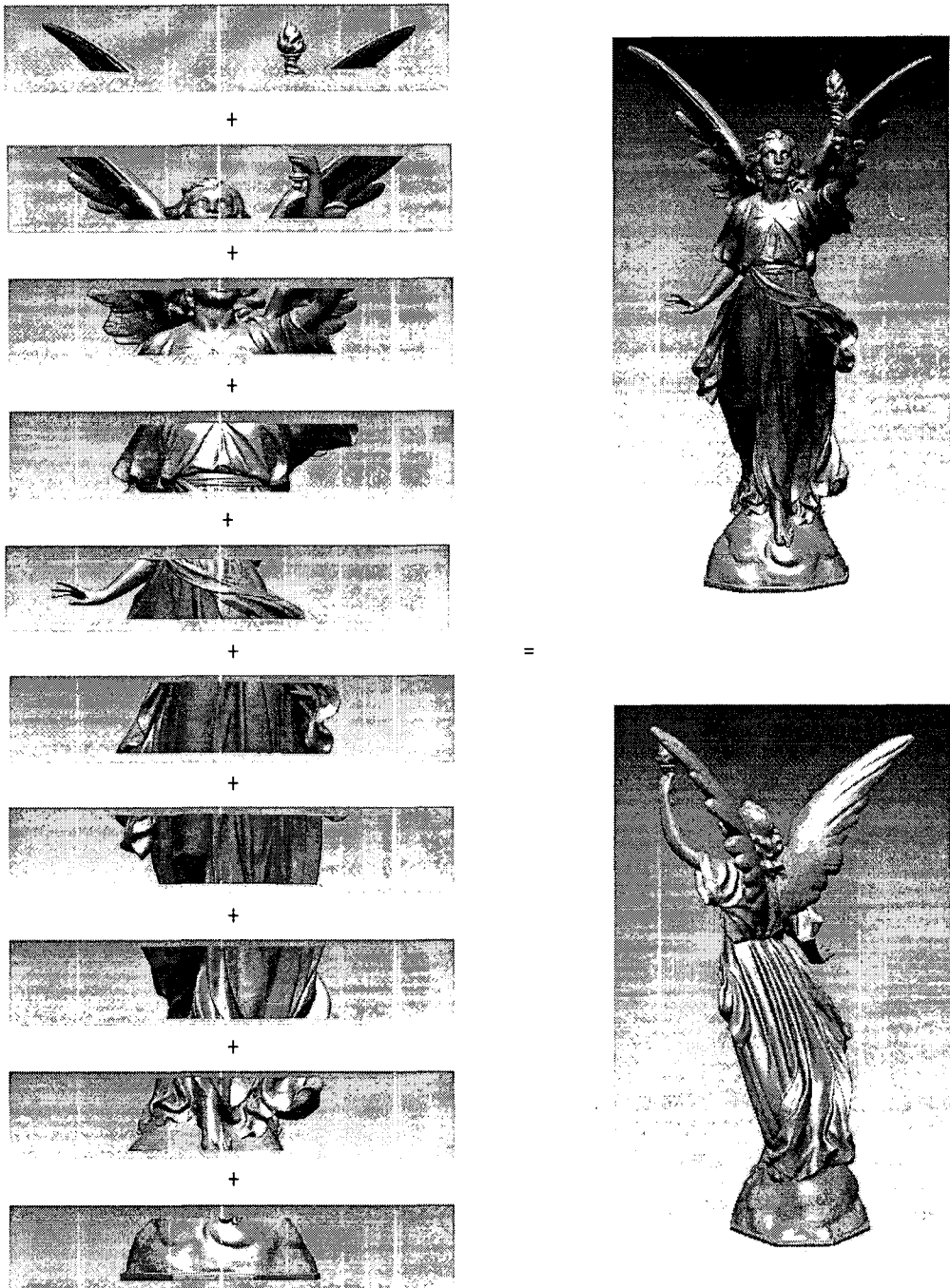


Fig. 10 Reconstructed shape of Stanford Lucy

Table 2 Computational time measurements
(H/W : IBM RS 43P 140 W/S)

Model	Number of points	ADDM	RDDM
Female body	263,980	10 : 30	D1;4:37 D2;4:13 D3;2:31
Skeleton hand	654,666	21 : 10	D1;5:25 D2;6:50 D3;4:10 D4;3:25 D5;2:33
Stanford Lucy	3,871,384	impossible	D1 ;4:30 D2 ;8:43 D3 ;9:27 D4 ;9:23 D5 ;10:21 D6 ;12:27 D7 ;12 :24 D8 ;11:43 D9 ;10:22 D10;8:37

시키는 방법을 제안하였으며 다양한 형태의 점 데이터들에 대하여 적용해 본 결과 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 모델에 따라서 점 데이터의 분포특성이 다양해질 수 있는데 이를 고려한 보다 일반화되고 지능적인 분할방법의 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 단순한 프로그램들의 분리에 의한 매우 기본적인 병렬처리기법을 다루었지만 다양한 형태의 컴퓨터구성에도 적용될 수 있는 진정한 의미에서의 병렬처리계산방법을 연구할 계획이다.

참고문헌

1. Turk, G and O'Brien, J. F., "Variational implicit surfaces," Tech. Rep. GIT-GVU-99-15, Georgia Institute of Technology, 1999.
2. Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C. and Evans, T. R., "Reconstruction and representation of 3D objects with

- radial basis functions," In Proceedings of SIGGRAPH 2001, pp. 67-76, 2001.
3. Kojekine, N., Hagiwara, I. and Savchenko, V., "Software tools using CSRBFs for processing scattered data," Computer & Graphics, Vol. 27, pp. 311-319, 2003.
4. Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G and Seidel, H. P., "Multi-level partition of unity implicits," ACM Transactions on Graphics(TOG), Vol. 22, pp. 463-470, 2003.
5. Yoo, D. J., "Shape Reconstruction from Unorganized Cloud of Point using Adaptive Domain Decomposition Method," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 8, pp. 89-99, 2006.
6. Yoo, D. J., "A Study on Filling Holes of Large Polygon Model using Implicit Surface Scheme and Domain Decomposition Method," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 174-184, 2006.
7. Garbey, M. and Kaper, H. G., "Heterogeneous domain decomposition for singularly perturbed elliptic boundary value problems," SIAM J. Numer. Anal., Vol. 34, pp. 1513-1544, 1997.
8. Zhou, X., Hon, Y. C. and Jichun, L., "Overlapping domain decomposition method by radial basis functions," Applied Numerical Mathematics, Vol. 44, pp. 241-255, 2003.
9. <http://www.cyberware.com/samples>
10. Stereolithography Archive at Clemson University (<http://lodbook.com/models>)
11. Stanford 3D scanning repository (<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>)