

3차원 레이저 스캐닝 점 좌표 데이터로부터 CAE 유한 요소 메쉬 생성 알고리즘 개발

장순석*, 양해정**, 이제형*

Finite Element Mesh Generation from 3D Laser Scanned Data

Jamg, S. S.*, Yang, H. J.** and Lee, J. H.*

ABSTRACT

A 3D solid element mesh generation algorithm was newly developed. 3D surface points of global rectangular coordinates were supplied by a 3D laser scanner. The algorithm is strait forward and simple but it generates mixed solid elements such as hexagonal, pyramid and prism types. Then, the surface triangular or rectangular elements were generated from the solid elements. The key of the algorithm is elimination of elements and 3D adaptive surface smoothing using given 3D surface point data.

Key words : 3D, Laser Scan, CAE Solid Element, Mesh Generation, Surface Smoothing

1. 서 론

캐드 분야에서 역설계(Reverse engineering) 기술 중 전산 역설계 기술이란 물리적인 물체의 형태에서 형상 모델을 얻는 것을 말한다. 예술가의 창작품이나 초기의 형상모델이 없는 경우, 혹은 빈번한 설계 변경을 위한 경우 등 형상모델이 필요한 경우에 사용된다¹⁾. 이렇게 얻어진 형상모델은 단순한 디자인 변경에서부터 최적설계에 이르기까지 넓은 분야에 응용된다. 물체 외형의 측정과 측정된 데이터의 전처리를 통하여 형상모델을 얻는 것이 전산 역설계 기술의 목표이다.

물체의 외형을 측정하는 방법은 크게 접촉식 방법과 비접촉식 방법으로 나뉜다. CMM을 사용하는 접촉식 방법은 정확한 외형의 정보를 얻을 수 있다. 레이저 스캐너, 간섭측정기, CT, MRI 등의 비접촉식 방법은 접촉식 방법에 비하여 보다 적은 측정시간을 요구된다²⁾. 특히 레이저 스캐너의 경우는 빛을 사용하기 때문에 표면 재질의 특성이 중요하다. 그러나 장비의 발달로 인하여 산업현장의 많은 곳에 사용되어지고 있다³⁾.

형상모델을 생성하는 방법은 직접 생성, 폴리곤 생성, 영역화를 통한 방법들이 있다. 측정된 데이터로부터 직접 생성하는 방법은 고품질의 모델을 얻을 수 있으나 자동화가 곤란하며 많은 시간과 소요 경비가 필요하다. 자동화가 가능한 방법은 영역화를 통한 방법이나 폴리곤의 생성을 통한 방법으로 나뉜다⁴⁾. 점 데이터를 영역화 하는 방법은 모서리에 의존하는 모서리 중심(Edge-based) 방법과 면 중심(Face-based) 방법이 있다. 모서리에 의존하는 방법은 측정된 점들의 면 법선 벡터의 변화가 큰 영역을 모서리로 정하는 것이다. 면 중심 방법은 점들의 변화가 작은 영역을 중심으로 성장시켜 모델을 생성하는 것이다. 폴리곤의 생성을 통한 방법은 실험적으로 얻어진 점들로부터 먼저 폴리곤들을 생성한다. 이 생성된 폴리곤들의 근사화를 통하여 형상 모델을 생성하게 된다. 대부분 삼각형 형태의 폴리곤을 생성하게 된다⁵⁾.

역설계 기술은 형상모델의 생성을 중심으로 발전하고 있다. 형상모델을 강도, 소음, 진동 등에 시뮬레이션에 적용하려면 CAE용용 소프트웨어가 필요하다. 이때 형상모델은 편분방정식을 적용하여 풀 수 있는 일정한 형태의 유한한 개수의 요소들로 분할되어 있지 않기 때문에 바로 적용할 수 없다. 때문에 해석을 하기 위해서는 CAE 소프트웨어에 내장되어진 캐드 도구를 사용하는 것이 일반적이다. CAE에서 사용되는 유한 요소는 보통 삼각형, 사각형, 사면체, 육

*정회원, 조선대학교 정보제어계측공학과

**조선대학교 물리학과

- 논문투고일: 2004. 05. 19

- 심사완료일: 2004. 09. 24

면체의 형태를 지니고 있다. 이들 유한 요소는 수치 해석에 사용되어 자가 때문에 적절한 길이 비율 (Aspect ratio)의 조건을 만족하도록 형태가 생성 되어야 한다¹¹⁾. 만약 만족하지 않으면 올바른 CAE 수치 해석을 기대할 수 없다. 그러므로, 본 논문에서는 3차원 점 좌표들로부터 3차원 구조의 임의의 자유 형상 모델을 생성시키는 새로운 알고리즘을 소개하고, 이러한 알고리즘을 도입한 이유로서 CAE에 직접 적용이 가능한 육면체의 유한 요소들을 자동 생성하려는 것임을 보여주고자 한다. 2장 전반부는 임의의 자유 형상 모델 생성 알고리즘을 소개하고, 2장 후반부는 길이 비율(Asspect ratio)을 고려하여 육면체 유한 요소의 형태가 각 축의 길이에 있어 적절한 비율 이내에 있어야 함을 설명하고 있다.

본 논문에서 3차원 레이저 스캐너로부터 얻어진 점 데이터를 이용하여 유한 요소를 생성하고자 하는 이유는, 표면요소로부터 부피요소를 생성하지 않고 외부의 점을 이용하여 곧 바로 부피요소를 생성하고, 표면 요소로부터 부피요소를 생성하는 기존의 알고리즘에 비해 적은 수의 부피 요소를 생성하여, 빠른 CAE 해석을 얻고자 하는 것에 목적을 두고 있다. 이것은 유한 요소 기법이나 경계 요소 기법의 단계 중 많은 시간을 차지하는 전처리 단계의 시간을 줄일 수 있어 전체 시뮬레이션 시간을 단축할 수 있게 된다¹²⁾. 본 논문의 목적은 이러한 3차원 레이저 스캐너를 사용한 물체의 표면 점 데이터를 활용하여 사각형으로 이루어진 표면요소와 육면체 형태의 솔리드 유한 요소를 자동 생성하려는 것이다.

2. 3차원 격자를 이용한 CAD, CAE 모델의 생성

3차원 구조 형상 측정도구로부터 얻은 데이터의 형식은 비구조화(Unstructured)와 구조화(Structured)로 구분된다. 보통의 3차원 레이저 스캐너로부터 얻은 데이터는 구조화로 되어 있다. Hand-held 스캐너, Portable CMM 등의 이동 가능한 장비로부터 얻은 측정 데이터들은 비구조화로 되어 있다. 데이터의 형식에 의존하지 않기 위해서 모두 비구조화 된 점으로 간주하고 처리한다. 또한 이렇게 측정되고 수집된 표면 3차원 좌표 점들은 닫힌(Closed) 물체의 표면을 구성한다는 가정을 하였다. 본 연구에서는 3차원 격자를 이용하는 간단한 알고리즘을 이용하여 빠른 시간에 방대한 표면 점들로부터 형상모델과 CAE 모델을 생성하였다. 이는 형상모델을 다시 유한 요소로 분할하는 중간과

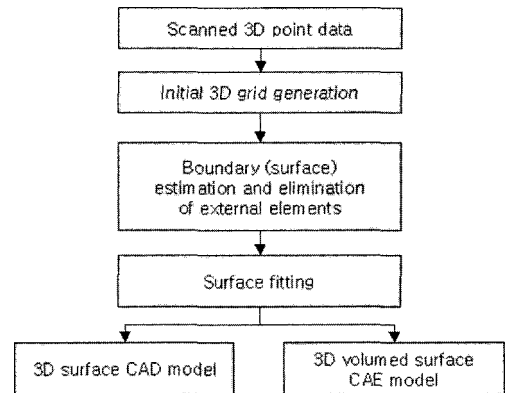


Fig. 1. Procedure of the proposed algorithm.

정 없이 곧바로 CAE에 적용할 수 있음을 보여주고 있다¹³⁾.

본 연구에 사용되어진 알고리즘이 적용된 과정은 Fig. 1과 같다. 측정된 데이터의 선체규모에 맞추어 직육면체로 이루어진 3차원 격자를 생성한 후 데이터블 포함하지 않은 격자 요소를 바깥쪽에서 제거한다. 남은 격자 요소 중 측정된 점들을 포함하는 격자의 각 노드들을 지역적으로 이동하여 형상모델과 CAE 요소를 함께 생성한다.

2.1 직육면체로 이루어진 3차원 구조의 격자 생성

측정된 3차원 직각좌표 점 데이터들로부터 x, y, z 각각의 가장 긴 축의 크기를 파악한다. 사용자의 판단에 따라 가장 긴 축의 초기 격자 개수를 입력 받는다. 가장 긴 축의 크기를 입력 받은 격자 개수로 나뉘기 본단위요소의 크기를 정하고, 다른 2개의 축에도 같은 요소 크기를 적용하여 직육면체의 전체 격자 크기

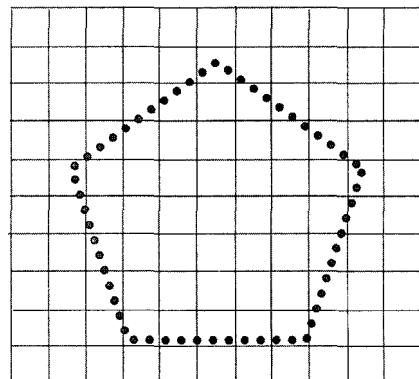


Fig. 2. Initial grids: 11 × 10.

를 얻는다. 초기 생성되는 격자는 입력 받은 값보다 x, y, z 각각의 축으로 2개 많이 추가 생성한다. 이는 측정된 점 데이터를 포함하지 않은 격자의 각 요소들을 자동적으로 제거하기 위한 편의를 위해서이다¹¹⁾.

Fig. 2는 2차원 상에 생성된 초기 격자를 인레로 보여주며, 가장 긴축의 초기 격자 개수를 9로 입력 받은 경우이다.

실제로 전체 격자 모델은 3차원상에 직육면체 형태이며, 전체 격자는 정육면체의 집합으로 구성된다.

2.2 경계 영역의 결정과 외부 영역 제거

경계 영역의 결정과 외부 영역의 제거는 동시에 이루어진다. 이는 마치 얼음 조각을 하는 것과 같은 과정을 따른다. Fig. 3과 같이 초기 시작점으로부터 경계 영역 결정과 외부 영역 제거가 수행된다¹⁶⁾. 외부 영역의 제거는 Fig. 3의 화살표 방향으로 동시에 진행된다. 본 모델은 3차원 형상이므로, x, y, z 축의 3방향으로 제거할 요소를 모두 검색 하게 된다¹⁷⁾. 이때 격자 내부의 측정 데이터의 개수가 사용자의 초기설정 개수 보다 적으면 요소를 제거함으로써 노이즈 제거 효과를 보았다. Fig. 4는 경계 영역의 결정과 외부 영역

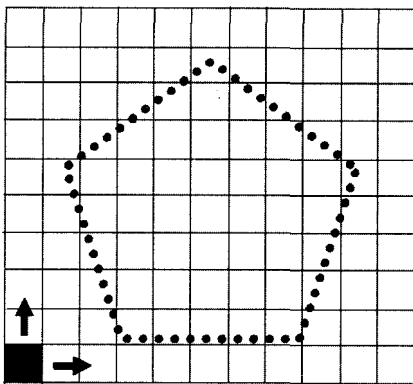


Fig. 3. Boundary search and elimination.

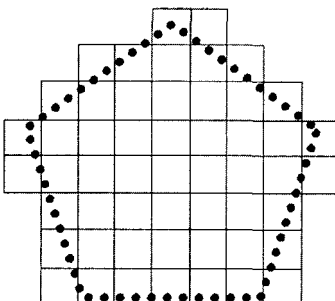


Fig. 4. Grid elements after the elimination.

이 모두 제거된 것을 보여주고 있다.

2.3 표면 피팅(Surface Fitting)

외부의 요소가 제거되고 남은 요소들은 측정데이터가 가지는 원래 형태와 다른 블록 형태이다. 따라서 격자 요소의 꼭지점 노드들을 측정 데이터의 좌표점들과 근접한 곳으로 부분 이동해야 한다.

외부 요소가 제거되면서 생성된 3차원 모델의 형상은, 3차원 점 데이터의 형태와 전체적인 형상이 거의 유사하기 때문에, 내부의 요소들은 형태를 그대로 유지하고, 표면 요소들의 각 노드 좌표를 조절하여 원본 형상에 가깝도록 피팅을 하는데, 이러한 작업을 표면 피팅이라 정의한다¹⁸⁾.

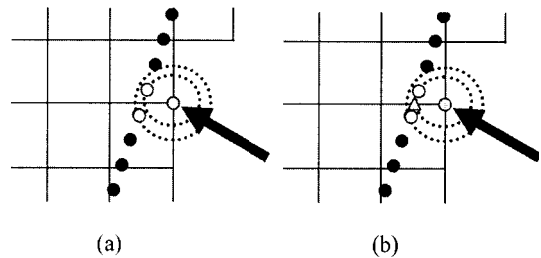


Fig. 5. Surface fitting: (a) selection nodes with minimum length, (b) Candidate position.

격자 요소의 노드 중 인접한 격자와 최단거리의 측정데이터 들에 대한 평균값을 후보자로 선택한다. Fig. 5(a)는 피팅 되어야 할 격자 요소의 꼭지점 노드를 화살표로 지시하고있다. 노드의 꼭지점을 공유하는 2개의 요소가 있다. 선택되어지는 3차원 레이저 스캐너의 점들은 꼭지점 노드에 가장 가까운 두 점이 된다. 가까운 점들의 평균점을 후보자로 선택한다. 이 후보자 위치는 Fig. 5(b)에 삼각형으로 표시되고 있다. 격자 요소의 노드를 후보자 점으로 이동하면 원래 형태에 근사한 형상 모델을 얻을 수 있다¹⁹⁾.

격자 요소의 노드와 후보자 점이 만드는 직선을 생각해 보자. 격자 요소의 노드를 직절한 길이 비율(Aspect ratio)에 만족하는 직선 위의 위치로 이동하게 되면, 최종적으로 원하는 CAE모델을 얻을 수 있다.

2.4 CAE 해석에서 적절한 길이 비율(Aspect ratio)

CAE 해석에서, 각 요소들의 길이 비율(Aspect ratio)이란 각 노드간의 길이의 최대값과 최소값의 비율을 뜻한다. 유한 요소 기법에 의한 해석시, 구조적인 문제를 일으키지 않는 적절한 길이 비율은 최대값과 최소값의 비율이 10:1 보다 작아야 한다²⁰⁾.

Fig. 6에서, 한 육면체 요소에 대하여, 각 변의 길이의 크기가 $B > A > C$ 와 같은 경우, 이때 변의 길이의 최대값은 B, 최소값은 C가 된다. 따라서, 이 요소에 대한 길이 비율은 B:C가 되고, 올바른 유한 요소 해석을 위해서 이 비율은 10:1보다 작은 값이 되어야 한다(예: 5:1 또는 3:1 등).

본 논문에서는 생성된 각 요소들에 대하여 각각의 길이 비율을 구하고, 그 비율이 10:1보다 클 경우에는 강제적으로 최대 길이를 축소하여 10:1의 길이 비율을 갖도록 자동으로 조절하였다.

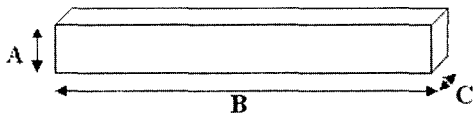


Fig. 6. 길이 비율을 설명을 위한 예제.

3. 결 과

본 알고리즘은 VC++ 6.0과 비주얼 포트란 6.5로 프로그래밍 하였다. 3차원 그래픽을 표현하기 위해서는 OpenGL 라이브러리를 사용하였다. 3차원 레이저

스캐너로 측정된 입력데이터는 로봇 개 의 모양을 지닌 실제 형상으로부터 얻었다.

Fig. 7(a)는 로봇 개 의 형태를 보여주는 비구조화된 240,000의 3차원 직각 좌표 점데이터 들이다. 이 점들의 집합에서, x, y, z축 별로 각각 최대, 최소값을 구하고, 여기서 구한 최대값과 최소값의 차가 가장 큰 값을 구하고, 이를 55로 나눈 값을 각 정육면체 요소 의 한 변의 길이로 설정한다. 이 분할 개수는 사용자가 임의로 지정할 수 있다. 분할 개수가 많아지면 그만큼 정밀한 형태의 유한 요소 모델을 생성할 수 있지만, 노드 수와 피팅에 소요되는 시간도 증가되므로, 사용자의 용도에 적절한 분할 개수를 지정하는 것이 좋다. 여기서 구한 각 정육면체의 한 변의 길이를 L이라고 할 경우, 전체 격자 요소 집합의 x, y, z축 별 요소의 개수는 (최대값-최소값) \div L이 되고, 이와 같은 요소 개수에 의한 Fig. 7(b)와 같은 직육면체 형태의 초기 격자 요소의 집합을 제작할 수 있다. Fig. 7(b)와 같이 개의 형상을 수용할 수 있는 초기 격자 요소 집합의 x, y, z축 별 각각의 분할 요소 개수는 53, 38, 55이다. 여기서, 2.2절의 경계 영역 결정과 외부 영역 제거 알고리즘에 의해, 입력데이터를 내포하지 않는 격자 요소를 모두 제거한 개의 유한 요소 모델은

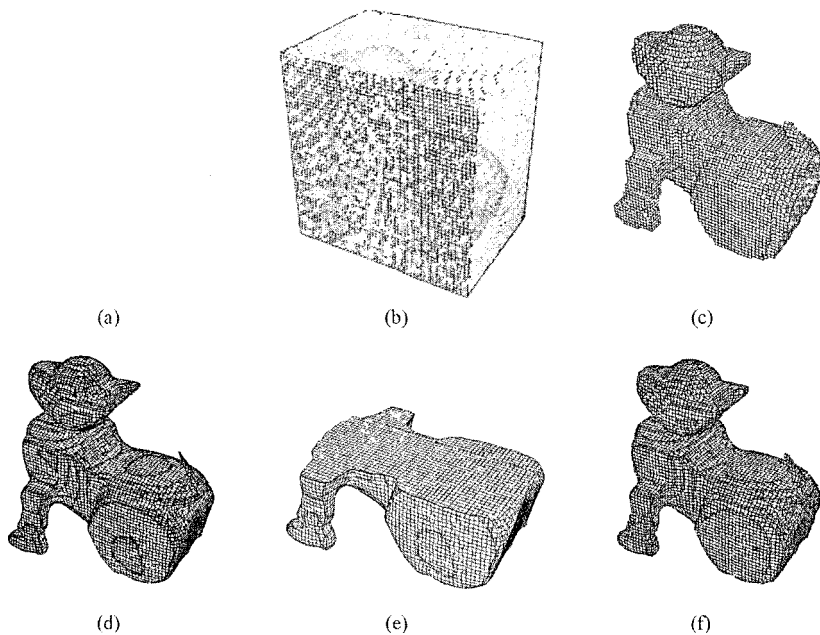


Fig. 7. 3D structural mesh generation of a 3D laser scanned robot dog: (a) laser scanned points are figured in 3 dimensions, (b) Initial solid brick element grids, (c) remained grid elements after unnecessary bounded element elimination, (d) 3D surface curve fitted CAE mesh model without the aspect of ratio consideration, (e) 3D cross section view of (d), (f) 3D surface curve fitted CAE mesh model with the aspect of ratio consideration.

Fig. 7(c)과 같이 생성된다. 이와 같이 생성된 유한 요소 데이터에 2.3절의 표면 피팅 알고리즘을 적용하여, 내부의 요소들의 형상은 유지하고, 표면 요소의 노드를 이동 조절하여 원본 점 데이터의 형상과 근접한 모델을 만들어 낸 결과를 Fig. 7(d)에서 보여준다. Fig. 7(c)는 이 모델의 단면을 보여주며, 여기서 내부의 요소는 표면 요소와 달리 균일한 정육면체의 배열로 되어있음을 확인할 수 있다. 이 모델을 2.4절에서 설명한 바와 같이 CAE 해석을 위해 10:1보다 작은 길이 비율을 만족하는 유한 요소 모델로 교정한 결과는 Fig. 7(f)와 같다. 최종적으로 생성된 CAE모델의 각 요소는 20노드(꼭지점 8개와 각 면의 중점 12개)로 이루어진 육면체 형태이며, 총 9848개의 육면체 유한 요소와 총 70845개의 노드로 구성된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지역적 평균법을 사용하여 3차원 점 좌표 데이터로부터 유한 요소 모델을 생성하는 알고리즘을 개발하였다. 일반적인 전산 역설계 기술은 형상모델의 생성에 주력하지만, 본 연구는 3차원 격자틀 이용해 형상모델과 CAE 요소 생성을 동시에 이루었다. 역설계 기술을 CAE에 활용하기 위해서는 형상모델을 CAE모델로 변환하는 기술이 필요하다. 그러나 3차원 입력 점좌표 데이터로부터 형상모델(CAD)을 생성하지 않고 직접 모델을 생성하면, 변환기술의 필요성이 적어지므로 실제 물체의 빠른 시뮬레이션이 가능할 것이다. 또한 본 연구는 평면으로 이루어진 물체보다는 자유형상의 모델(예: 구멍이 뚫린 형태의 형상모델)에 적용하면 더 좋은 효과를 얻을 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. Tomas Varady, Ralph R Martin, Jordan Cox, "Reverse Engineering of Geometric Models an Introduction", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
2. Tomas Varady, Ralph R Martin, Jordan Cox, "Special Issue: Reverse Engineering of Geometric Models", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 253-254, 1997.
3. Wohlers, Terry, "3D Digitizing for Engineering", *Computer Graphics World*, Vol. 18, No. 3, Mar, 1995.
4. H. Woo, E. Kang, Semyung Wang, Kwan H. Lee, "A New Segmentation Method for Point Cloud Data", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 2, pp. 167-178, Jan, 2002.
5. M. Yang and E. Lee, "Segmentation of Measured Point Data Using a Parametric Quadric Surface Approximation", *Computer-Aided Design*, Vol. 31, pp. 449-457, 1999.
6. S. Liu and W. Ma, "Seed-growing Segmentation of 3-D Surface from CT-contour Data", *Computer-Aided Design*, Vol. 31, pp. 517-536, 1999.
7. Seok-Hee Lee, Ho-Chan Kim, Sung-Min Hur, and Dong-Yol Yang, "STL File Generation form Measured Point Data by Segmentation and Delaunay Triangulation", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 10, pp. 691-704, Sep, 2002.
8. Steven J. Owen, *A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology*, <http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/survey/index.html>.
9. Donald Hearn, M. Pauline Baker, *Computer Graphics C version*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 127-130, 1997.
10. Constantine C. Spyarakos, *Finite Element Modeling in Engineering Practice*, Algor Publishing Division, Pittsburgh, PA, pp. 54, 1996.
11. Lorensen, W.E. and Cline, H.E., *Marching Cubes: a High Resolution 3D Surface Reconstruction Algorithm*, *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 166-169, Proc. of SIGGRAPH, 1987.
12. 이철수, 박병렬, 이태경, "솔리드 모델을 기반으로 한 사출 금형용 전극 형상의 모델링", *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제6권, 제1호, pp. 9-16, 2001.
13. 하종성, "구 볼록 다각형들의 최대 교차를 찾기 위한 효율적인 구 분할 방식", *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제6권, 제2호, pp. 101-110, 2001.
14. 이원경, 이상현, 인정재, "셀 유한 요소 모델의 라운딩 기능 개발", *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제6권, 제2호, pp. 111-124, 2001.
15. 이제열, 안용진, 김영진, "입의형상의 비 발생 메커니즘의 기하학적 해석", *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제6권, 제4호, pp. 222-228, 2001.
16. 김덕수, 정재열, 김 현, "삼차원 메쉬 모델의 압축 및 점진적 전송을 위한 가수부 분할 기법", *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제7권, 제2호, pp. 81-88, 2002.
17. 박시형, 이성수, "분할 Delaunay 삼각화 알고리즘 개발", *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제7권, 제4호, pp. 248-253, 2002.
18. 김도현, 양현익, "다양한 2차원 형상에서의 외부 경계 절집 오프셋 방법을 이용한 자동 사각 요소 및 요소망 생성", *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제8권, 제4호, pp. 270-277, 2003.



장 순 석

1984년 한양대학교 전자공학과 졸업
1985년 영국 힐 공과대학교에서 전자공학과 석사 졸업
1988년 영국 버밍엄 의과대학교에서 생리학 석사 졸업
1991년 영국 버밍엄 공과대학교에서 전자전기공학과 박사 졸업
1992년~현재 조선대학교 정보제어계측공학과 교수로 재직



양 해 정

2004년 조선대학교 물리학과 이학박사 졸업
현재 조선대학교 물리학과 시간강사



이 재 형

2003년 조선대학교 정보제어계측공학과 공학박사 졸업
현재 조선대학교 정보제어계측공학과 박사후과정