

# 효율적인 건설공사와 유지관리를 위한 건설현장에서의 3차원 공간 정보 획득

## 3D Spatial Information Acquisition for Construction Operation and Maintenance on a Construction Site

김 창 완\*  
Kim, Changwan

### 요 약

3차원 모델링은 다양한 safety-enhancement applications 과 프로젝트 관리 시스템에서의 as-built data acquisition에 이용될 수 있다. 본 연구의 목적은 효과적인 방법으로 건설 현장을 3차원 모델로 형상화 할 수 있는 3차원 공간 모델링 방법을 제시하고 실제 건설 현장에서의 실험을 통하여 제시한 방법을 검증하는 것이다. 본 논문에서는 제안된 건설 현장을 형상화하기 위한 모델링 알고리즘들과 여러 장소들로부터 얻는 data를 하나의 coordinate system으로 변환하기 위한 coordinate transformation 알고리즘에 대한 설명을 포함하였다. 제안된 모델링 방법의 건설 현장에 대한 실제 적용성을 검증하기 위해 실제 건설 현장에서의 모델링 실험에 대한 결과가 논의되었으며 이러한 결과는 본 연구에서 제안된 모델링 방법이 건설 현장을 효과적으로 3차원 모델로 형상화하는 것을 보여준다.

키워드: Sparse range point cloud, 3차원 공간 모델링, convex hull, workspace partitioning

### 1. 서 론

건설 현장의 특징인 다이내믹한 환경에서 현장상황을 실시간으로 표현하는 현장 모델링 시스템은 현장에서 변화하는 상황을 빠르게 3차원으로 형상화하기 위해 data acquisition 속도가 빨라야 할 뿐만 아니라 건설 현장 작업 환경의 변화에 적절하게 대처할 수 있어야 한다. 건설 현장의 특성을 고려할 때 건설 현장의 효과적인 3차원 모델링의 필요성은 매우 크며 건설 현장에서의 자동화 실현의 필수적인 전제 조건으로 인식되고 있다.

3차원 CAD (Computer Aided Design) 와 dense 3D 레이저 스캐닝 시스템과 같은 현재 건설 산업에서 사용되고 있는 3차원 모델링 방법은 모델을 형상화하는데 필요한 소요시간이 많이 걸리고, 인력이 많이 필요하며, 고용량의 컴퓨터 능력을 요구하는 등의 문제점들을 가지고 있다. 3차원 CAD에 의해서 구현되는 3차원 모델은 매우 정확하다는 장점을 가지고 있지만 필요한 data에 대한 측정을 인간이 직접 해야 한다는 점 때문에 극히 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 또한 많은 경우에 현장의 3차원 도면은 구할 없는 경우가 많고 3차원 현장 도면이 존재하는 경우에도 현장의 실제 지어지고 있는 상황도 틀린 경우가 많다. 이러한

문제점들은 건설 현장에서 환경이 변화되는 생기는 경우 (예를 들어 작업 중장비가 추가 되거나 또는 옮겨지는 경우)에 이에 대한 수정을 위해서는 또한 많은 시간이 소요된다.

고해상도의 polygonal meshes를 생성하는 dense 3D 레이저 스캐닝 시스템은 건설현장에서의 건설공사와 유지관리를 위해서 사용하기에 여러 문제점들이 있다 (Bernardini et al., 1999). Dense 3D 레이저 스캐닝 시스템으로부터 획득한 data는 일반적으로 많은 noise와 error들을 포함하며 이러한 noise와 error들은 모델을 생성하기 위해 적용되는 모델링 알고리즘을 적용하더라도 원하는 정도의 정확성을 가진 모델을 생성하는데 큰 장애가 된다. 이러한 정리가 되어 있지 않은 data를 이용해 3차원으로 원하고자 하는 물체의 형상화는 위에 언급한 문제점들 때문에 매우 어렵고 아직까지도 완벽하게 해결되지 않고 있다 (Luck et al., 1998). Local geometry를 나타내는 unstructured point cloud를 polygonal 모델로 변환시키는데 며칠 내지 몇 주일이 소요되며 (ENR, 2002) 이러한 변환과정은 pre-processing, determination of the global topology, generation of the polygonal surface, post-processing의 단계를 거친다 (Fabio et al., 2003). Point cloud는 수백만 또는 수천만 점들을 포함하고 있기 때문에 작업자가 원하는 모델의 정확성을 유지하면서 입력자료 복잡도를 줄이는 여러 단계의 변환 과정은 반드시 필요하다. 따라서 이러한 과정이 요구되는 모델링 방법은 많은 시간이 소용된다는

\* 정희원, 중앙대학교 공과대학 건축학부 전임강사, 공학박사  
본 연구는 미국 National Science Foundation 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제번호 CMS-0000137.

문제뿐만 아니라 현재 컴퓨터 용량으로 실시간으로 구현하기엔 너무 큰 고용량의 컴퓨터 능력을 요구한다는 점에서 실시간이 요구되는 분야에는 적용이 매우 어렵다 (Little et al., 1996). 최근의 Jaselskis 등의 연구에 따르면 dense 3D 레이저 스캐닝 시스템은 많은 시간이 소요되는 모델링 작업과정 때문에 건설 중장비 운영과 관련된 모델등과 같은 실시간을 요구하는 분야에서의 적용이 어려우며 또한 dense 3D 레이저 스캐닝 시스템을 이용한 정보 획득이나 이에 대한 분석과정에서의 여러 문제점들도 지적하였다 (Jaselskis et al., 2003).

본 연구의 목적은 workspace partitioning 알고리즘, convex hulls 알고리즘, 그리고 여러 정보 획득 장소로부터 획득한 data를 하나의 coordinate system으로 변환하기 위하여 적용되는 coordinate transformation 알고리즘을 포함하는 새로운 3차원 공간 모델링 방법을 제안하는데 있으며 제안된 방법이 현장 실험을 통해 실제 건설현장 구현에 얼마나 잘 적용되는지를 검증하는 것이다.

## 2. Sparse Range-Point Cloud 방법

앞서 언급한대로 3차원 CAD나 dense 3D 레이저 스캐닝 시스템을 포함하는 dense range point cloud 방법들은 레이저로 현재 공사가 진행되고 있는 건물이나 지형에 대해 매우 정밀한 모델을 생성할 수 있으나 정보 획득과 정보 분석에 소요되는 시간이 길다는 점 때문에 현장에서의 실시간 의사결정에 사용되는 도구로는 부적합하다. 예를 들면 현장에서 자동화된 건설 중장비에 필요한 3차원 모델을 만드는 경우 현장 3차원 모델링 구현은 거의 실시간으로 이루어져야 한다 (Feddema and Little, 1997).

Dense range point cloud 방법이 긴 작업 과정을 거치는데 반해 본 연구에서 제시하는 sparse range point cloud 방법은 3차원 모델을 구현하는데 단지 수 십초 내지 수분만이 필요하다. 또한 인간이 사물을 인지하는 능력이 뛰어나다는 점을 이용하여 모델링 과정에 인간 인지능력을 포함함으로써 전체적인 모델링 과정에서의 소요 시간뿐만 아니라 data의 분석을 위해 요구되어지는 계산상의 복잡함도 줄일 수 있다 (Johnson et al., 1998). 인간의 의사 결정 능력과 일정 부분 일들을 수행하는 기계 능력의 통합은 건설 현장에서의 완전 자동화된 전자동 기계나 장비의 사용보다 보다 효율적이고 경제적이다 (Cho et al., 2002, McLaughlin et al., 2004). <그림 1>은 본 연구에서 제안하는 인간 인지능력을 포함하는 objective driven data acquisition과 기존 연구들에서 제안되어진 fully automated data acquisition의 차이를 보여준다.

또 다른 sparse range point cloud 방식의 특징은 기하학적 원형을 이용한다는 것이다. 그러한 기하학적 원형으로 구성된 모델은 용량이 매우 적기 때문에 쉽게 저장할 수 있고 수정사항이 발생할 시 용이하게 변경이 가능하며 모델링을 구현하기 위해 매우 적은 컴퓨터 능력을 요구한다는 점에서 실시간 건설 현장 모델링에 매우 적합하다 (Luck et al., 1998). 또한 건설 현장 모델링에 있어서 매우 정밀한

모델에 대한 필요성은 극히 제한적이다. 예를 들면 실시간 obstacle avoidance system 경우에는 기하학적 원형으로 구성된 모델을 이용하여 빠르고 효율적인 시스템 구현이 더 바람직하다.

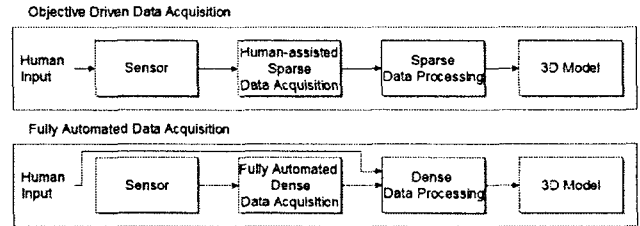


그림 1 objective driven data acquisition과 fully automated data acquisition의 비교

## 3. Human-assisted 3차원 공간 모델링

### 3.1 3차원 공간 모델링 프로세스

공간 정보를 획득하기 위하여 작업자는 우선 작업장 주위의 물체들을 구분하여 모델에 포함되어야 하는 물체를 구분한다. 선택된 물체들에 대해 pan/tile unit을 가진 single axis 레이저 rangefinder를 통해 data를 획득한다. 획득된 data는 기하학적 원형인 convex hull과 workspace partitioning의 사용을 통하여 다양한 범위의 건설현장이 3차원 모델로 형상화된다. 좀더 정교한 모델링이 필요할 경우 object fitting and matching방식이 적용되나 논문의 간결성을 위해 이 논문에서는 설명을 생략한다. 작업자가 한 장소로부터 range point clouds를 획득할 때 정보 획득 장소로부터의 시야가 제한적이어서 완전한 모델의 구현이 어려울 경우 여러 장소로부터의 정보 획득이 필요하다. 이 경우 여러 장소에서 획득한 range point clouds는 현장 모델이 생성되기 전에 하나의 coordinate system을 가진 통합된 range point cloud로 변환되어야 하며 본 연구에서는 coordinate transformation 알고리즘을 통하여 데이터를 통합한다. 현장에서의 3차원 공간 모델링 프로세스는 <그림 2>에서 보이는 바와 같다.

### 3.2 3차원 공간 모델링을 위한 알고리즘들

앞서 언급한대로 건설 현장의 다양한 범위의 장면들은 단지 몇몇의 기하학적 원형들을 이용하여 3차원 모델로서 형상화가 가능하다. 기하학적인 원형들 중 convex hulls과 workspace partitioning은 건설현장을 3차원 모델로 형상화하는데 매우 이상적이다. Convex hull은 pipe racks, building structure, 그리고 여러 타입의 장비들을 모델로 형상화하는데 사용될 수 있고 workspace partitioning은 작업공간과 비 작업공간의 구분을 3차원으로 표현하는데 사용될 수 있다. Convex hull, workspace partitioning 그리고 coordinate transformation에 대한 설명은 아래에서 자세히 나와 있다.

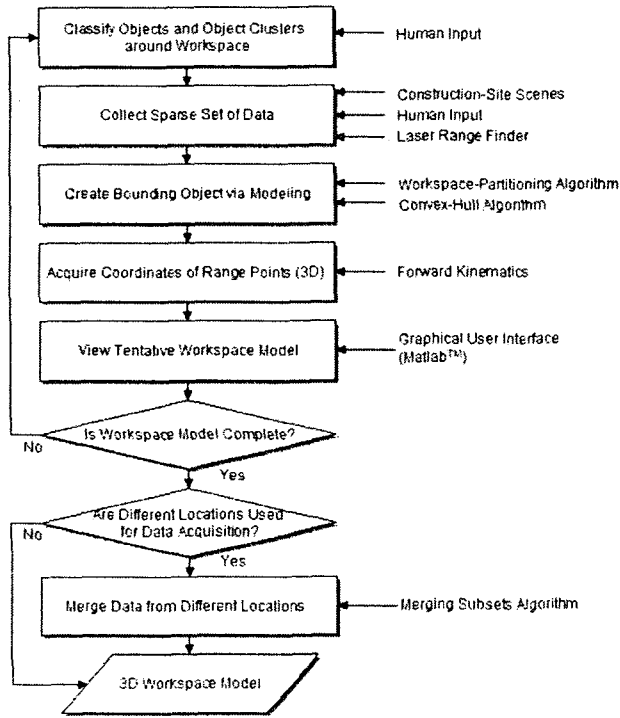


그림 2 공간 정보 획득을 위한 모델링 프로세스

### 3.2.1 Convex hull

3차원 공간에서 점들의 집합으로 구성된 convex hull은 이러한 점들을 포함하는 가장 작은 공간을 구성한다 (Barber et al., 1996). 다음과 같은 이유들로 인하여 convex hull의 3차원 모델링 알고리즘으로서의 사용은 효율적이고 빠른 3차원 공간 모델링에 적합하다 (McLaughlin et al., 2004).

- (1) convex hull로 구성된 공간은 convex의 특성상 획득한 모든 점을 포함하는 모델을 생성하며 생성된 모델은 완벽하게 모델화 하려는 물체를 포함한다.
- (2) 레이저에 의한 data 획득 과정에서 어떤 정해진 순서나 방법에 의해서 data를 획득할 필요가 없이 물체를 충분히 구성할 만큼 점들을 선택하면 convex hull을 구성할 수 있다.
- (3) convex hull은 2차원의 평면으로 구성되어 지기 때문에 obstacle avoidance system과 같이 물체와 물체간의 거리 측정 시 매우 빠른 거리 계산이 가능하다.

본 연구에서 사용된 convex hull 알고리즘은 초기 과정에 형성된 convex hull에 한번에 하나씩의 점을 더해서 새로운 convex hull을 생성하는 Barber 등에 의해서 제안된 incremental 알고리즘이다 (Barber et al., 1996). 알고리즘은 initialization, participation, iteration의 3단계를 포함하며 자세한 convex hull의 알고리즘에 관련된 설명은 Barber 등에 의한 논문에서 나와 있다. <그림 3>은 Convex hull 모델링 프로세스에 대한 예를 보여준다. <그림 3(a)>은 모델로 구현될 실제 물체에 대한 사진, <그림 3(b)>은 레이저 레인지파인더로 스캔한 range points, <그림 3(c)>

은 획득한 range point cloud로 convex hull 알고리즘을 이용하여 만들어진 convex hull로 둘러 싸여진 물체, 그리고 <그림 3(d)>은 최종 convex hull 모델을 나타낸다.

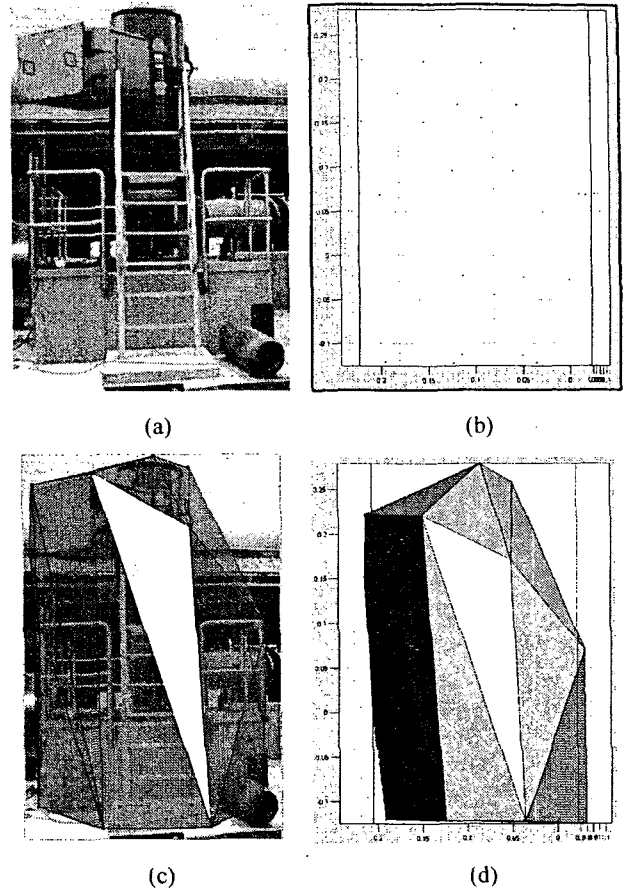


그림 3. Convex hull 모델링: (a) 모델을 구현할 실제 물체 사진, (b) 레이저 레인지파인더로 스캔한 range points, (c) convex hull로 둘러 싸여진 물체, (d) 최종 convex hull 모델

건설 현장 3차원 모델링을 구현하는데 있어서 convex hull 알고리즘을 사용하는 대표적인 장점중 하나는 모델에서 요구되어지는 기준에 맞추어 작업자가 모델의 정확성을 조절할 수 있다는 것이다. <그림 3(a)>에서 보이는 pipe rack의 경우 모델의 정확성에 대한 필요성에 따라 3가지 다른 모델들이 생성되었다. <그림 3(b)>은 하나의 convex hull을 사용해서 생성된 모델이고 <그림 3(c)>은 2개의 convex hulls에 의해 생성된 모델이며 마지막 <그림 3(d)>은 5개의 convex hulls에 의해 생성된 모델이다. 나중으로 갈수록 처음의 모델보다 더 정확하게 표현되었다는 걸 볼 수 있다.

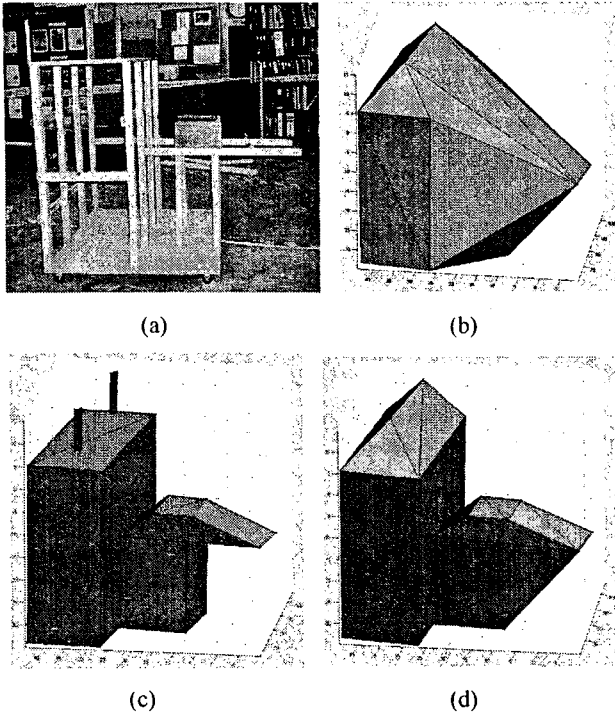


그림 4. convex hull의 수에 따른 모델 정확성의 변화 : (a) 모델을 구현할 실제 물체의 사진, (b) 하나의 convex hull로 생성된 모델 (c) 두개의 convex hulls로 생성된 모델, (d) 다섯 개의 convex hulls로 생성된 모델

### 3.2.2 Workspace Partitioning

작업 공간과 비 작업공간을 분할하기 위하여 얇은 평면을 이용한 workspace partition을 사용하는 것은 매우 효율적이다. 이러한 workspace partition은 기하학적으로 말하자면 동일선상에 있지 않은 세 점으로 구성할 수 있다. 본 연구에서는 least-square 방법을 사용하여 3개 이상의 레이저 rangefinder로 스캔한 range points를 workspace partition으로 모델화한다. 이러한 workspace partition의 safety driven applications 으로서의 적용은 매우 효과적이다. 예를 들면 매우 분주한 도시에 위치한 거리 바로 옆에 건설 현장이 있어 건설 중장비가 운영되고 있다고 하자. 이 시나리오에서 임의로 설정한 workspace partition은 중장비가 침범해서는 안 되는 구역과 중장비 작업 공간 사이를 분할하는 역할을 할 수 있다. Workspace partitioning 에 관련된 자세한 설명은 McLaughlin의 논문에 나와 있다 (McLaughlin, 2003). Workspace partitioning 알고리즘의 예는 <그림 5>에 보이는 바와 같다.

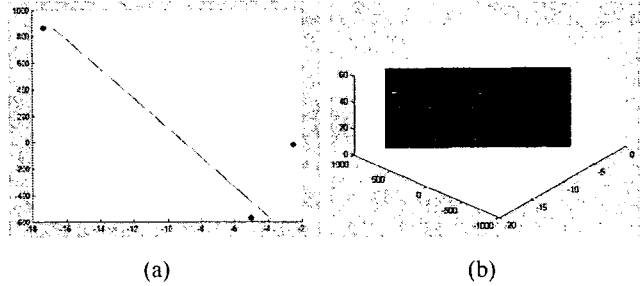


그림 5: (a) 레이저 rangefinder로 스캔한 점들과 least-square 방법의 적용결과 (b) 최종 workspace partitioning 모델

### 3.2.3 여러 장소에서 획득한 data의 통합

한 장소로부터 range point clouds를 획득할 때 작업자의 시야가 한정될 수 있기 때문에 여러 장소에서의 range point clouds의 획득이 건설 현장 3차원 작업 공간 모델링을 위하여 필요할 수 있다. 개별 range point clouds는 각각의 coordinate system을 기반으로 획득되어 지는데 여러 장소에서 획득한 range point clouds는 현장 모델이 생성되기 전에 하나의 coordinate system을 가진 통합된 range point cloud로 변환되어야 하며 본 연구에서는 하나의 coordinate system으로부터 다른 coordinate system으로의 변환에 사용되는 position vector들을 변환하기 위해 coordinate transformation이 사용되며 이 알고리즘에 대한 자세한 설명은 Kim의 논문에 나와 있다 (Kim, 2004).

### 3.3 3차원 공간 모델링을 위한 data 획득 시스템

본 연구에서는 Pan/Tilt kinematics를 가진 레이저를 사용하여 물체에 대한 range points의 coordinate system을 획득한다. 이러한 정보의 획득을 위한 시스템은 1)Laser Rangefinder, 2)Pan and Tilt Unit (PTU), 3)distance data acquisition 소프트웨어, 4)삼각대, 5)PTU로부터 pan 과 tilt의 각도를 계산하는 C로 작성된 프로그램, 6)GUI를 통하여 모델을 입체적으로 나타내는 Matlab™으로 작성된 모델링 프로그램으로 구성된다. Data 획득을 위한 하드웨어의 구성은 <그림 6>에 보이는 바와 같다.

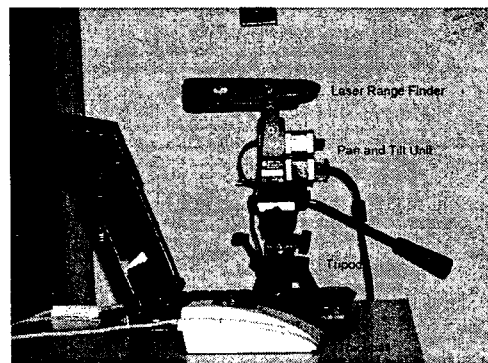


그림 6. 공간정보획득을 위한 시스템

### 3.4 데이터 획득을 위한 Graphical User Interface

제안된 모델링 시스템에서 data를 획득하기 위해서는 사용자는 다양한 컴퓨터 프로그램들을 (예를 들자면 distance data acquisition 소프트웨어, Matlab™ 그래픽 프로그램 등) 다뤄야 한다. 컴퓨터에 익숙지 않은 사람에게는 상당히 어려운 일이고 전문가에게도 여간 까다로운 일이 아니다. 따라서 본 연구는 사용자가 쉽게 현장 data를 획득하기 위한 프로그램들을 다루게 하기 위하여 Matlab™을 이용하여 Graphical User Interface (GUI)를 개발하였다. GUI는 사용자에게 의한 쉬운 data 획득을 위하여 옵션 메뉴 선택 방식을 이용하여 디자인되었다 <그림 7>.

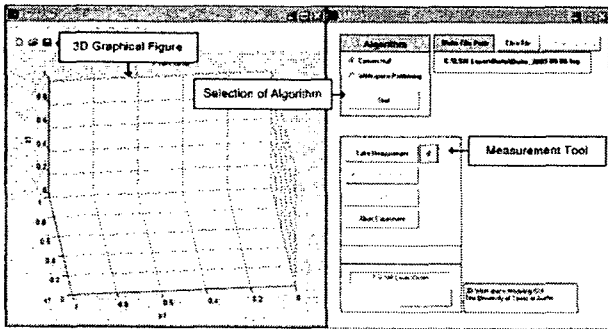


그림 7. Graphical User Interface

## 4. 건설 현장에서의 3차원 공간 모델링 실험

앞서 제시된 모델링 방법이 건설현장을 효율적으로 표현하는가를 검증하기 위해 건설현장의 3차원 공간 모델링에 대한 실험이 행하여졌다. 현장 모델링을 위한 testbed 로 사용된 곳은 오스틴 소재 텍사스 대학 내에 건설 중인 냉각 타워의 건설 현장이다 <그림 8>. 본 건설 현장은 건설이 진행되고 있는 동안 heavy lift로 알려진 건설 중장비가 건설이 되고 있는 냉각탑위로 파이프를 들어 올리는 일을 진행 중이었다.

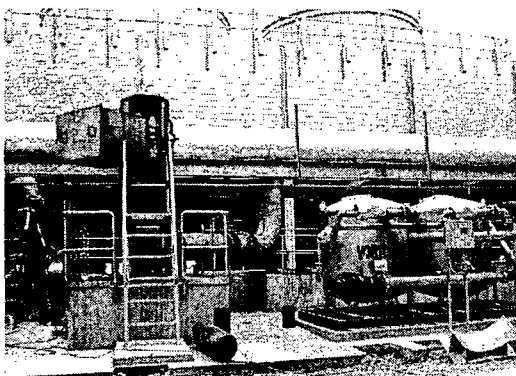


그림 8. 모델이 될 건설 현장 장면

위의 <그림 8>에 보이는 바와 같이 작업 공간이 매우

비좁기 때문에 장애물을 피하고 사고를 미연에 방지하기 위해서는 중장비 운전자의 주의가 필요한 장소이다. 이러한 장소에서의 중장비 운전은 조금의 부주위에도 대형사고로 이어지는 경우가 많다. 이러한 상황에서 현장 3차원 공간 모델링은 중장비의 운전동안 운전자에게 interactive visual feedback 을 제공하거나 3차원 graphical simulation에 대한 도구로서 매우 유용하게 사용될 수 있다.

본 건설 현장에 대한 실험을 통해 convex hulls과 workspace partitioning 을 이용해 건설현장의 3차원 공간 모델을 형상화하였다. 레이저 rangefinder를 이용해 각각의 물체에 대하여 range points를 획득하였으며 각각의 모델링 과정에 대한 소요 시간을 측정하였다. 모델링 과정에서의 시간 측정은 첫 번째 레이저 측정 거리의 등록부터 시작하여 마지막 레이저 측정거리의 등록까지를 기준으로 하였다. 모델링에서의 정확성과 복잡성의 정도에 따라 한 물체 당 대략 15초부터 2분까지 소요되었으며 총 5분 이내의 시간이 전체 모델링을 하는데 걸렸다. 최종 3차원 공간 모델링의 결과는 <그림 8>과 <그림 9>에 보이는 바와 같다.

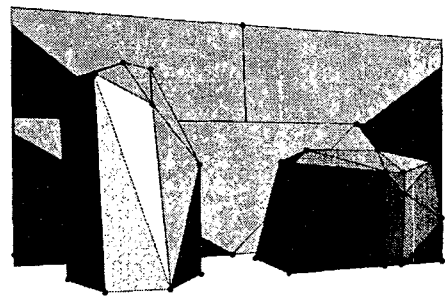


그림 9. 최종 3차원 공간 모델링의 결과



그림 10. 최종 3차원 공간 모델링의 결과

## 5. 결론

Convex hulls, workspace partitioning, coordinate transformation 알고리즘들을 이용한 3차원 공간 모델링이 제안되고 이에 대한 검증을 현장 실험을 통하여 하였다. 제안된 3차원 공간 모델링 방법에서 사용된 알고리즘들은 건설 자동화를 이루는 기계 제어분야의 안전 증진 분야에 적용할 수 있을 만큼 빠르고 효율적이며 as built applications에도 적합하다.

현재 제안된 모델링 방법의 다양한 적용분야에 대한 연구가 진행 중이다. 특히 obstacle avoidance system은 제안

된 3차원 공간 모델링 방법의 빠르고 효율적인 특성 때문에 유망한 적용분야중 하나이다. 본 연구의 진행과 병행하여 3차원 공간 모델링을 이용한 obstacle avoidance 시스템도 진행 중에 있으며 이미 simulation을 통해 성공적으로 적용되었다. 이에 대한 자세한 설명과 본 연구에서 제안한 3차원 공간 모델링을 이용한 obstacle avoidance system에 대한 자세한 설명은 Kim의 논문에 나와 있다 (Kim, 2004). 본 연구에서 제안한 3차원 공간 모델링 방법은 건설 자동화 시스템의 다양한 분야에 효과적인 적용을 기대해 볼 수 있다.

### 참고문헌

1. Barber, B., Dobkin, D., and Huhdanpaa, H., "Quickhull Algorithm for Convex Hulls", ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 22, pp. 469-483, 1996
2. Bernardini, F., Bajaj, C., Chen J. and Schikore, D., "Automatic Reconstruction of 3D CAD Models from Digital Scans", International Journal on Computer Geometry and Applications, Vol. 9, pp 343-356, 1999
3. Cho, Y. Haas, C., Liapi, K. and Sreenivasan, S.V. "A Framework for Rapid Local Area Modeling for Construction Automation", Journal of Automation in Construction, Vol. 11, pp. 629-641, 2002
4. Fabio, R., "From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. XXXIV-5/W10, pp 215-230, 2003
5. Feddema, T. and Little, C. "Rapid World Modeling: Fitting Range Data to Geometric Primitives", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Monterey, CA, 1997), pp. 2807 - 2812, 1997
6. Jaselskis, E. Cackler, E., Andrie, S. and Gao, Z., Pilot Study on Improving The Efficiency of Transportation Projects using Laser Scanning, CTRE Project 02-109 Iowa State Department of Transportation, 2003
7. Johnson, A., Carmichael, O. Huber, D. and Hebert, M. "Toward a General 3D Matching Engine: Multiple Models, Complex Scenes", and Efficient Data Filtering, Proceeding of Image Understanding Workshop, (Monterey, CA, 1998), pp. 1097-1107, 1998
8. Kim, C., Spatial Information Acquisition and Its Use for Infrastructure Operation and Maintenance, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, 2004
9. "Lasers Go into Overdrive, Pushed by Technology Gains", Engineering News Record, Sep. 16 2002, pp.54-55, 2002
10. Little, C. Q. and Wilson, C.W., "Rapid World Modeling for Robotics," Proceedings of World Automation Congress, May 1996, pp. 1201-1220, 1996
11. Luck, J., Little, C., and Roberts, R. "A Human Supervisory Approach to Modeling Industrial Scenes using Geometric Primitives", Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Leuven, Belgium, 1998), pp.875 - 880, 1998
12. McLaughlin, J., Sreenivasan, S.V., Haas, C., and Liapi, K., "Rapid Human-Assisted Creation of Bounding Models for Obstacle Avoidance in Construction", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 19, pp. 3-15, 2004
13. McLaughlin, J., Rapid Human-assisted Creation of Bounding Models for Obstacle Avoidance in Construction, Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2003

---

### Abstract

3D spatial-modeling can be used in various safety-enhancement applications and for as-built data acquisition in project-control systems. The objective of the research reported herein was to provide spatial-modeling methods that represent construction sites in an efficient manner and to validate the proposed methods by testing them in an actual construction environment. Algorithms to construct construction-site scenes and to carry out coordinate transformations in order to merge data from different acquisition locations are presented. Field experiments were conducted to establish performance parameters and validation for the proposed methods and models. Initial experimental work has demonstrated the feasibility of this approach.

**Keywords :** Sparse range-point cloud, 3D spatial-modeling, convex hull, workspace partitioning

---