

# 지능형 굴삭 시스템을 위한 모바일 3D 이미징 시스템 및 자동 정합 알고리즘의 개발

## Development of the 3D Imaging System and Automatic Registration Algorithm for the Intelligent Excavation System (IES)

채명진\* 이규원\*\* 김정렬\*\*\* 박재우\*\*\* 유현석\*\*\*\* 조문영\*\*\*\*\*  
 Chaе, Myung Jin Lee, Gyu Won Kim, Jung Ryul Park, Jae Woo Yoo, Hyun Seok Cho, Moon Young<sup>1)</sup>

### 요약

‘지능형 굴삭시스템 개발’은 센서기술, 로봇기술들을 융합하여 토공 작업환경을 인식하고 작업 계획을 수립하며 굴삭기를 자동 조정하여 토공작업을 자동화 하는 것을 목표로 한다. 본 연구는 지능형 굴삭시스템 개발을 위한 요소기술로서, 광대역 3D 레이저 스캐너를 이용하여 실제 토공 작업환경을 가상의 3차원 공간으로 재현할 수 있는 수학적 모델을 만드는 것이다. 이 연구에서는 광대역 3D 레이저 스캐너를 구동하기 위한 사용자 소프트웨어 및 사용자 인터페이스를 개발하였으며, 3D 레이저 스캐너의 차량 탑재 및 스캐닝 작업의 최적화를 위하여 모바일 3D 이미징 시스템을 개발하였다. 또한 실제 토공 작업환경을 대상으로 스캐닝 실험을 실시하여 스캔 데이터를 획득하였고, 이를 기반으로 각 스캔 데이터들 간의 자동 정합 알고리즘을 설계하였다. 본 연구에서 개발된 시스템은 향후 지능형 굴삭 로봇의 완전 자동화 시스템의 구현을 위하여 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드: 토공, 3D 모델링, 작업환경, LiDAR, 3D 이미징 시스템, 지능형 굴삭시스템

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설공사의 작업환경을 효과적으로 모델링하고 주변 환경 객체를 자동으로 인식하는 기술은 건설 자동화 장비를 개발함에 있어 필수적인 요소 기술이라 할 수 있다(Samir El-Omari,

2007). 현재까지 개발된 환경 인식 기술 가운데 가장 실용화된 인식기술은 컴퓨터 비전 시스템 기술로써, 주변 사물의 행동을 인식하거나 사물을 추적하는 등 컴퓨터로 하여금 인간과 같은 입체적인 인식을 가능하게 할 수 있기 때문에 다양한 건설 시공 분야에서 널리 사용되어 왔다(유현석외3, 2007). 그러나 비디오 카메라에 포착한 정보를 컴퓨터로 처리하는 비전 시스템은 토공 작업 환경과 같이 넓은 지역이나 다량의 노이즈(noise) 및 환경 변수들이 존재하는 필드(field) 환경을 모델링하기에는 적합하지 않은 문제점이 있다(Cannon, H., 1999). 최근 광대역 3D 레이저 스캐너(terrestrial 3D laser scanner)<sup>1)</sup>를 이용하여 필드 환경을 3차원으로 모델링하는 기술이 첨단 환경인식 기술로 각광을 받고 있으며(Cheok, G.외4, 2000), 다양한 산업계에서 실용화되고 있는 시점이다(Alan M. Lytle, 2007). 광대역 3D 레이저 스캐너는 고가라는 단점이 있으나, 토공 환경과 같이 넓은 지역을 높은 해상도 및 정밀도 간편하게 3차원 모델링할 수 있고

\* 일반회원, 한국건설기술연구원 선임연구원, 공학박사  
 채명진 chae@kict.re.kr

\*\* 일반회원, 한국건설기술연구원 연구원, 공학석사(교신저자)  
 이규원 okfreud@naver.com

\*\*\* 일반회원, 한국건설기술연구원 연구원, 공학석사  
 김정렬 jrkim@kict.re.kr

\*\*\*\* 일반회원, 인하대학교 건축공학과 박사과정, 공학석사  
 박재우 Jaewool004@hanmail.net

\*\*\*\*\* 종신회원, 한국건설기술연구원 책임연구원, 공학박사  
 유현석 hsyoo.inha@gmail.com  
 조문영 mycho@kict.re.kr

본 연구는 국토해양부 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제번호 06첨단융합C01 “지능형 굴삭시스템 개발”.

1) LiDAR, LADAR 등으로 불리기도 하며 공식적으로는 3D Imaging System의 한 종류이다.

건설 시공현장에서 사용하기에 충분한 내구성을 갖추고 있다는 장점이 있다(Hashemi, M. and Reinhart, D., 200<sup>9</sup>). 이러한 3D 레이저 스캐너는 현재 항공기 산업, 자동차 산업, 의학 산업, 문화재 복원 사업 등 폭넓은 산업분야에 적용되고 있으며, 최근 많은 변화와 발전을 지속하며 보다 효과적인 환경인식을 위한 기술 개발이 진행되고 있다(Yukata Ishimatsu, 2006).

본 연구의 목표는 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하기 위하여 광대역 3D 스캐너의 구동 소프트웨어와 사용자 인터페이스를 설계하고, 토공 현장에 최적화된 스캐닝을 위한 3D 이미징 시스템 (3D imaging system)을 제작하는 것이다. 그리고 토공 작업환경을 대상으로 실제 측정된 다수의 3D 스캔 데이터간의 좌표계를 자동으로 일치시키기 위한 자동 정합(automatic registration)<sup>2)</sup> 알고리즘을 설계하는 것이다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 광대역 3D 스캐너를 이용하여 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하기 위한 것으로서, 연구 범위는 3D 레이저 스캐너 구동을 위한 소프트웨어 개발 및 사용자 인터페이스 개발, 차량 개조 및 3D 스캐너 장착 작업을 통한 3D Imaging 시스템 개발, 3D 이미징 시스템을 이용한 실제 토공 현장 모델링 실험, 다수의 3D 스캔 데이터 간의 좌표계 일치화를 위한 자동 정합 알고리즘 설계들로 제한된다. 본 연구의 방법은 다음과 같다.

- 1) 광대역 3D 레이저 스캐너의 3D 레이저 스캐너의 구동 및 제어를 위한 소프트웨어(S/W)를 개발하고 사용자 인터페이스를 설계한다.
- 2) 토공 작업환경의 지속적인 데이터 수집을 위하여, 현장 이동형 차량에 3D 스캐너 및 통신 장비, 배터리 등이 장착된 모바일 3D 이미징 시스템을 구축한다.
- 3) 3D 이미징 시스템을 이용하여 실제 토공작업 환경을 대상으로 3D 작업환경 모델링을 수행하고, 최적의 데이터 크기, 스캔 해상도, 스캔 위치 등을 파악하기 위한 기초 테스트를 수행한다.
- 4) 다수 지점에서 획득된 스캔 데이터를 자동으로 정합하기 위한 자동정합(automatic registration) 알고리즘을 설계한다.

2) 자동정합 (Automatic Registration)은 서로 다른 스캔 방향에서 측정된 다중 스캔 데이터들 중에서 형상적으로 서로 공통된 부분의 거리차이를 자동으로 0에 가깝게 하는 상대 위치 계산 방법이다.

## 2. 3D 레이저 스캐너의 구동 S/W 개발 및 사용자 인터페이스 개발

### 2.1 3D 레이저 스캐너의 구동 S/W 개발

본 연구의 선행 연구에서는 국내에 수입되고 제어 및 기술지원이 가능한 3D 레이저 스캐너 가운데 스위스 Leica Geosystems사의 ScanstationII와 오스트레일리아 RIEG 사의 LMS-Z210ii, 미국 Trimble 사의 ILRIS-3D 등 3개 기종을 대상으로 현장 시연회 및 정밀 성능 테스트를 거쳐 최종적으로 스위스 Leica Geosystems사의 Scanstation II 기종을 토공 작업환경의 3D 모델링에 가장 적합한 모델로 선정한다. 주요 고려 요소는 대각선 길이 100미터 이하의 택지 개발 공사 환경에서의 적절한 스캔 거리와 정확성, 스캐닝 속도, photogrammetry 기능 등으로서 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 Scanstation II 기종이 속도와 정확성 면에서 토공자동화 작업에 가장 적합한 기종으로 선정되었다.

표 1. 3D 스캐너 성능비교

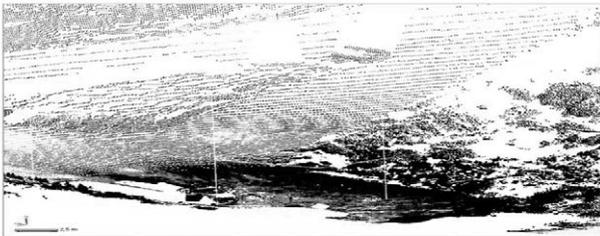
|                    | RIEGL LMS-Z210ii           | Leica Scanstaion2          | Trimble ILRIS-3D            |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Scan Rate          | 12,000 points/sec          | 50,000 points/sec          | 2,000 points/sec            |
| Accuracy           | 10 mm(@50m)                | 4 mm(@50m)                 | 7 mm(@100)                  |
| On / Off Library   | RiSCAN PRO, API 제공         | 기본 S/W 및 API 제공            | 기본 S/W 제공                   |
| Inclination Sensor | 내장 및 자동보정                  | 내장 및 자동보정                  | 없음                          |
| Measurement Range  | 650m(80%반사)<br>200m(10%반사) | 300m(90%반사)<br>134m(18%반사) | 1500m(80% 반사)<br>350m(4%반사) |
| Scanning Range     | 360° (H)*360° (V)          | 360° (H)*270° (V)          | 360° (H)*40° (V)            |
| Power Supply       | NIMH : 6시간                 | 8시간 사용 가능                  | 5시간 사용 가능                   |
| Photogrammetry     | SLR (Nikon)                | 내장형 카메라 (640만 화소)          | 내장형 CMOS 센서                 |
| Laser              | Class 1                    | Class 3R                   | Class 1                     |
| Protection         | IP 64 (방수)                 | IP 52                      | IP52                        |

Leica Geosystems사의 ScanStationII 시스템에서 기본적으로 제공되는 S/W는 토공 작업환경을 3차원으로 모델링함에 있어 사용자 편의성이 낮고, 지능형 굴삭 시스템 개발에 있어 최적화된 사용자 환경이 요구됨에 따라 본 연구에서는 스캐너의 구동과 점군 (point cloud) 데이터의 고속 처리를 위하여 SCR (Scanner Controller and Registration for IES)라는 새로운 S/W를 개발하였다.

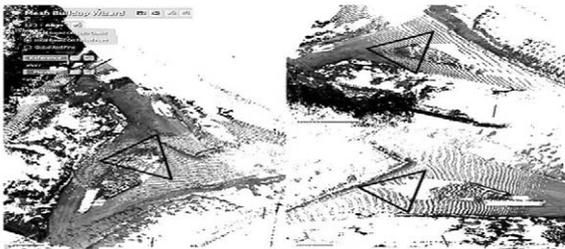
지능형 굴삭 시스템의 지반 형상 모델 생성에 최적화되어 개발된 SCR의 주요기능은 (1) 3D 스캔 데이터의 정합 기능을 통한 통합지반의 글로벌 모델 (global model)<sup>3)</sup> 생성기능, (2) 생성

3) IES 프로젝트에서는 3D 레이저 스캐너에서 생성한 통합 지반모델을 글로벌 모델 (global model)이라 명명하였고, 굴삭기의 스캐너에서 생성한 근접 지반 모델을 로컬 모델 (local model) 이라 명명하였다.

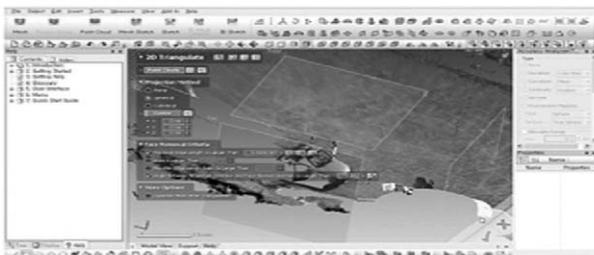
된 지반 모델을 DGPS (Differential Global Positioning System)기반 절대 좌표계로의 정렬기능, (3) 근접 (local) 3D 스캐너의 로컬 모델 (local model)과의 데이터 통합기능 등이 있다. SCR S/W의 세부기능은 그림 1과 같으며 다음과 같이 요약할 수 있다.



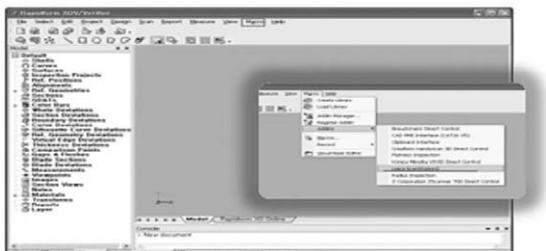
(1) 점군 데이터 생성 및 처리



(2) 정합 기능을 통한 지반모델 생성



(3) Mesh 모델 생성



(4) 다양한 모듈 추가 기능

그림 1. Scanner Controller and Registration for IES (SCR)

- 1) 3D 점군 데이터 생성 및 점군 데이터의 노이즈 필터링, Smoothing, 샘플링 및 삼각형화(triangulation) 기능
- 2) 정합 기능을 통한 통합 지반 모델 생성 기능
- 3) 3D 점군 데이터를 자동으로 매쉬(mesh) 모델로 변환하기 위한 매쉬 생성 마법사(mesh build-up wizard) 기능

4) 애드인 (add-in) 프로그램을 통한 스캔 데이터 처리기능

광대역 3D 레이저 스캐너부터 수집된 3차원 원시 데이터의 프로세싱 과정은, 1) 공간상에 존재하는 객체의 표면에서 3차원 위치 정보(x, y, z)를 갖는 점군 데이터를 형성하고, 2) 이 점군 데이터 가운데 유효한 데이터를 필터링(point filtering)하고, (3) 여러 위치(view point)에서 스캐닝한 데이터를 정합한 후, (4) 하나의 개체 (object)를 병합 (merging)<sup>4)</sup>하는 과정으로 진행된다.

## 2.2 사용자 인터페이스 개발

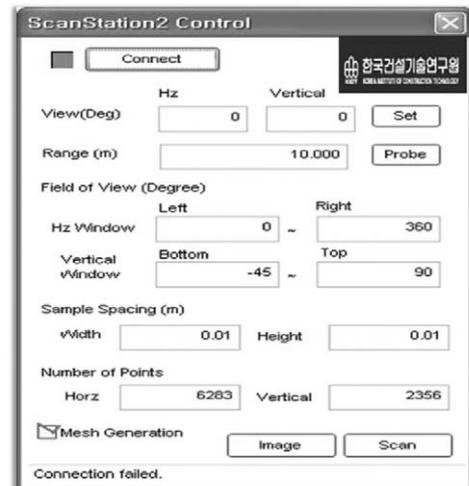


그림 2. 사용자 인터페이스

본 연구에서는 3D 레이저 스캐너를 토공 현장에서 사용하기 위한 인터페이스를 개발하였다. 개발된 사용자 인터페이스 기능은 그림 2와 같이 ScanstationII와 노트북 PC와의 네트워크 연결(network connection) 기능, 스캐너의 수평 및 수직 (horizontal and vertical) 스캐닝 범위 입력 기능, 스캔 간격설정(sample spacing) 기능, 점군 데이터들의 개수 결정 기능 (number of points), 메쉬 데이터 자동 생성(mesh generation) 기능, 스캐닝 수행 기능, 지원되는 파일형식을 CAD(.dxf) 또는 ASCII 형식(.pts)으로 저장하는 기능이다. 본 사용자 인터페이스는 지능형 굴삭 시스템의 현장 작업환경 인식을 최적화하기 위하여 최소한의 정보만을 입력 받으며 스캔 설정이 저장될 수 있도록 설계되었다.

4) 병합 (merging)은 정합 (registration)된 다중의 스캔 데이터를 하나의 데이터 형식으로 재구성하는 것을 의미한다.

### 3. 모바일 3D Imaging system 개발

지능형 굴삭 시스템(IES)은 1) 광대역 3D 스캐너를 이용한 작업환경 모델링 시스템 2) 작업순서를 명령하는 작업순차 관리 시스템(task planning system), 3) 자동 제어가 가능한 굴삭 시스템으로 구성된다. 실제 토공 작업환경이 3차원으로 모델링되고 작업순차가 생성되면 굴삭기가 굴삭작업을 실시하는데, 작업이 진행됨에 따라 지속적으로 변화하는 환경을 측정 및 갱신하기 위해서는 일정 주기마다 반복적인 3D 스캐닝 작업을 수행해야 한다. 이러한 토공 작업환경의 지속적인 스캐닝 작업을 자동화하기 위하여 본 연구에서는 3D 스캐너, 무선 모뎀, 노트북, 배터리 등의 하드웨어를 차량에 장착하였으며, 이를 모바일 3D 이미징 시스템이라 한다.

모바일 3D 이미징 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어는 그림 3과 같이 현장 이동용 차량과 3D 레이저 스캐너, 유압식 실린더, 무선 송수신 모뎀, 산업용 노트북, 배터리팩 그리고 소프트웨어인 SCR 등으로 구성된다. 3D 레이저 스캐너 탑재 및 최적화된 스캐닝 작업을 위한 3D 이미징 시스템은 다음 사항을 고려하여 제작되었다.

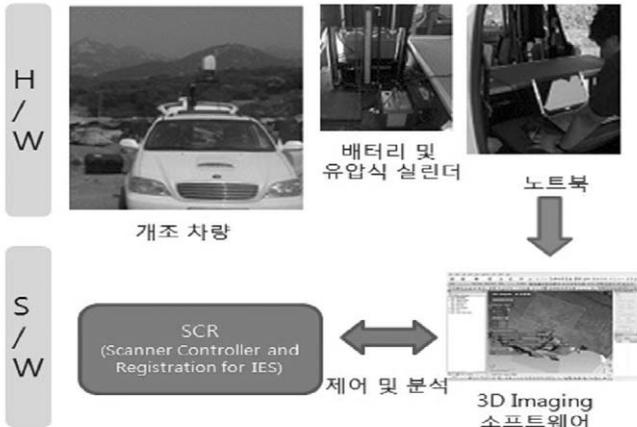


그림 3. 3D Imaging System의 구성도

- (1) 탑승인원 : 2인 이상 (운전자 1명, 작업자 1명)
- (2) 유압식 실린더를 이용한 스캐너 높이 조절기능 (지상으로 부터 최고 약 3m)
- (3) 기후 변화에 대비한 선루프 장착
- (4) 운전자 위치에서 선루프 및 유압식 실린더 자동조절 기능
- (5) 스캔 데이터 처리 및 노트북 설치를 위한 작업여유 공간 확보
- (6) 보조 배터리 사용을 위한 인버터 설치 및 수납공간 확보

본 연구에서는 광대역 3D 레이저 스캐너의 장착을 위해 현장

이동용 차량에 그림 4와 같이 유압식 실린더를 이용한 텔레스코핑 시스템을 설치하였고 탑 슬라이딩 방식의 선루프와 배터리, 스캐너 마운트 등을 설치하였다.

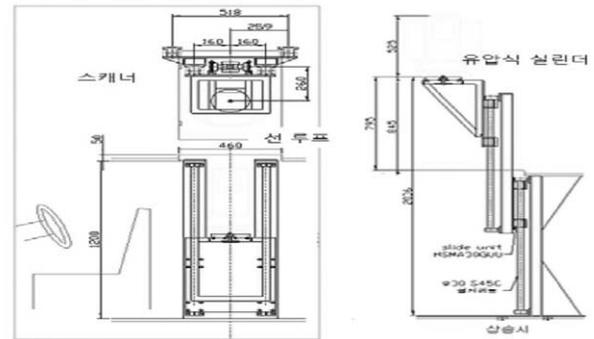


그림 4. 3D 이미징 시스템 차량의 CAD 설계 도면

탑 슬라이딩식 선루프의 넓이는 스캐너 단면적 (265mm×370mm)을 고려하여 518mm×500mm로 설계하였다. 그리고 스캐너의 최고 높이는 지면 기준 약 3m정도로 설계하여 스캔 시 차량에 의한 방해 최소화 하였으며, 스캐너의 진동 감소 및 정확한 수평을 유지하기 위하여 고정식 받침대를 제작하였다. 유압식 실린더에는 열처리된 재료를 사용하여 많은 구동 시에도 침식 및 안전에 내구성을 갖도록 설계하였다. 또한 보조 배터리를 차량에 장착하여 스캐너 구동 및 노트북 사용 시 추가전원을 공급할 수 있게 하였다. 이와 함께 스펙 상 배터리의 정상 구동 온도는 0°~40° 임을 고려하여, 직사광선의 영향을 최대한 피할 수 있도록 수납공간을 제작하였다.

### 4. 모바일 3D Imaging System의 현장 실험

본 연구에서는 지능형 굴삭 시스템(IES)의 글로벌 모델을 생성하기 위하여 실제 토공 현장 (은평 뉴타운 (주)영신토건 토공 현장)을 대상으로 3D 이미징 시스템을 이용한 현장 실험을 실시하였다. 일반적인 택지 개발 현장은 가로, 세로 각100미터 이내의 크기로 구역을 나누어 작업을 한다. 본 연구에서 수행한 현장은 가로, 세로 약 80m의 크기이며, 굴삭기 1대가 작업을 하기에 적합하며, 지능형 굴삭 시스템을 위한 작업환경 모델링 구성에 부합되는 크기이다. 전체적인 실험은 무 타겟 (targetless) 수동 정합 방식으로 진행되었으며, 실험순서는 스캔 → 삼각형화 → 정합 → 병합 순으로 진행하였다. 본 실험의 주된 목적은 모바일 3D 이미징 시스템을 이용하여 작업장 전체의 3D 모델링하는데 소요되는 시간을 측정하고 본 연구에서 개발한 소프트웨어인 SCR을 이용한 데이터의 처리 성능을 확인하는 것이다.

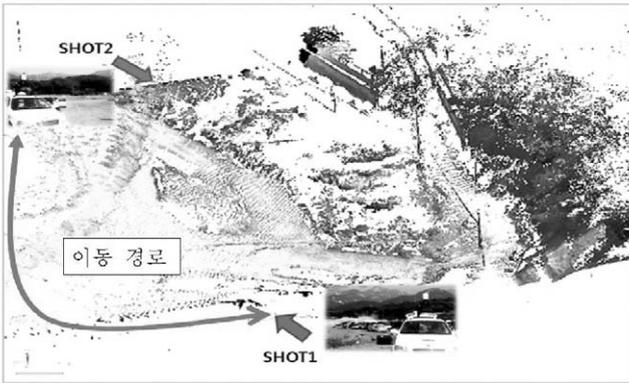


그림 5. 토공 현장 실험도

### 4.1 실험 조건 및 방법

실험방법은 그림 5와 같이 먼저 Shot 1 지점으로 모바일 3D 이미징 시스템을 이동하여 IES 작업영역을 스캔한 후 Shot 2 지점으로 이동하여 다시 동일한 작업영역을 스캔하였다. 3D 레이저 스캐너의 특성상 스캐너의 위치에서 직선으로 보았을 때 언덕의 뒷부분은 측정 할 수 없기 때문에 최소한 2개소 이상에서 스캔작업을 수행해야 한다. 다른 방향에서 측정한 두 개의 스캔 데이터를 정합하고 병합하는 과정은 SCR S/W를 통하여 수행하였으며, 토공 작업 현장의 3D 모델링을 수행하기위한 최적

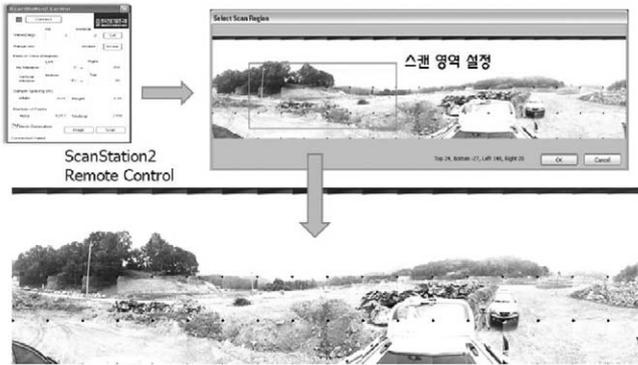


그림 6. 스캔 영역 지정

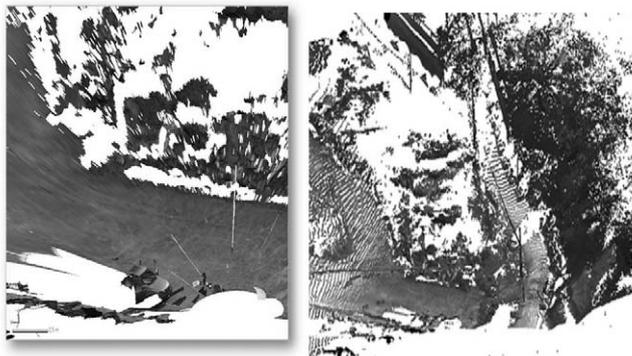


그림 7. Mesh 데이터 생성

표 2. 스캐닝 옵션

| 스캐너 측정 위치        | 2m(지면 기준)  |
|------------------|--|
| 스캔 범위            | Probe : 12,912m<br>Vertical : -45 ~+45<br>Horizontal : 180 |
| Sample Spacing   | 1cm X 1cm (Hori X Vert)                                    |
| Number of Points | Vertical : 1368<br>Horizontal : 4740                       |

조건과 스캔된 데이터들이 병합되는 과정까지 소요된 시간 및 스캔 데이터들의 크기를 측정하는 방식으로 진행하였다.

실험을 실시한 토공 현장의 넓이는 약 80m×80m이며, 현장 실험을 위한 스캐너 설정은 표 2와 같다. 이 설정은 SCR S/W에 저장될 수 있도록 설계되었으며, 보통 현장의 특성에 따라 변화되므로 대상 현장이 바뀌기 전까지는 사용자가 최소한의 컴퓨터 조작만으로 손쉽게 모바일 3D 스캐너를 조정할 수 있도록 설계되었다.

그림 6은 SCR S/W를 이용하여 스캐너를 조정하는 화면으로서, 좌측의 사용자 인터페이스에서 표 2에 해당하는 스캐닝 옵션을 입력하고 화면상에서 스캔영역을 선택하면 스캐너가 해당영역을 스캐닝하게 된다. 최초의 스캔 데이터는 점군을 생성한다. 각각의 점(point)은 스캐너로부터 x, y, z의 3차원 좌표 값을 갖는데, 이러한 점군은 그림 7과 같이 삼각형 매쉬 형태로 변환된다.

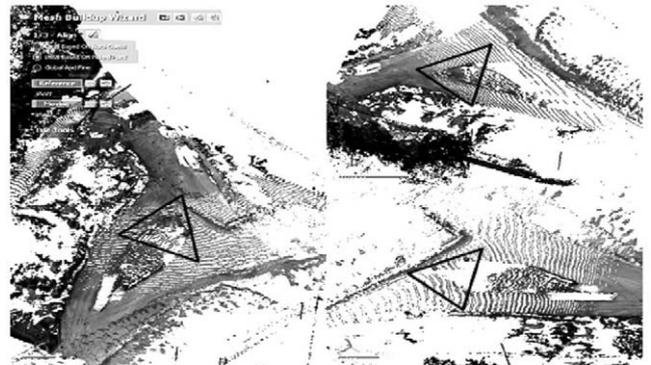


그림 8. 정합 (registration)

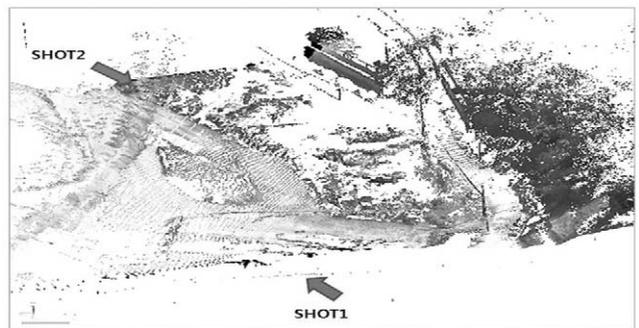


그림 9. 병합 (merge)되어 완성된 데이터

앞서 언급한 바와 같이 2개소 이상의 지점에서 스캔이 이루어 지므로 하나의 3D 모델을 생성하기 위해서는 두 개의 스캔에 공통으로 해당되는 점을 기준으로 정합하는 과정이 반드시 필요하다. 그림 8과 같이 사용자가 적절한 위치를 선택해주면 SCR S/W가 자동으로 그 구역을 검토하여 두 개의 다른 스캔 데이터에서 겹치는 영역을 검색하여 공통적으로 나타나는 점들을 기준으로 두 개의 스캔 데이터가 하나로 정합된다.

마지막 과정은 그림 9와 같이 정합된 스캔 데이터를 하나의 온전한 데이터로 병합하는 과정으로서, 최종적으로 병합 프로세스가 완료될 때 비로소 지능형 굴삭 시스템 작업을 위한 1차 작업환경 모델링이 완성된다. 이러한 스캐닝 및 프로세싱 작업을 반복 수행하여 토공 작업환경의 변화를 지속적으로 측정함으로써, 토공 작업량을 산출하고 계획 대비 진행의 적합성을 판단할 수 있으며 작업진행 상황을 자동으로 갱신할 수 있다.

## 4.2 실험 결과 분석

본 실험을 통하여 토공 작업환경의 3차원 모델링을 위해 필요한 다양한 데이터가 수집되었다. 그 중 효율적인 지능형 굴삭시스템 개발을 위하여 필수적으로 고려해야 할 요소로 3차원 모델링 작업에 소요된 작업 시간을 들 수 있었다. 하지만 전체 작업에 소요되는 시간은 데이터 용량 및 스캔 데이터의 해상도 간의 트레이드오프 (Trade-Off) 관계가 성립됨을 확인할 수 있었으며, 이는 향후 다양한 실험을 통하여 최적화 과정을 거치게 될 것이다.

### (1) 전체 작업 소요 시간

본 연구에서 개발한 모바일 3D 이미징 시스템을 이용하여 가로, 세로 약 80 미터 규모 토공 현장의 작업환경을 3차원 모델로 구현하는데 소요된 시간은 약 80분이었다. 1회 스캔을 위해 약 30분이 소요되었는데 이는 ScanstationII 장비가 제공하는 최고 해상도에 가까운 값으로 작업을 수행했을 경우에 한한 것으로 실제 토공 작업 계획 및 굴삭기 운전이 필요한 해상도를 훨씬 웃도는 수준일 것으로 예상되며 1회 스캔에 필요한 시간 또한 대폭 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

첫 번째 스캔이 완료된 후 스캐너를 내리고 선루프를 닫고 차량을 이동하며 다시 선루프를 열고 스캐너를 올리는데 소요된 시간은 약 10분이 소요되었다.

마지막으로 정합 및 병합에는 20분의 시간이 소요되었다. 본 실험에서는 본 논문에서 제안하고 있는 자동정합(auto

registration) 기능이 포함되어 있지 않고 수동 정합(manual registration)을 수행하였기 때문에 많은 시간이 소요되었으며, 이점은 향후 자동정합모듈이 완성되면 처리 시간을 크게 단축할 수 있을 것으로 예상된다. 이 실험의 결과 값을 바탕으로 최대 4개의 지점에서 스캔을 할 경우 1회 전체 작업환경 모델링은 최대 170분이 소요될 것으로 계산된다. 하지만 이 역시 자동 정합과 해상도 최적화를 통하여 크게 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

### (2) 데이터 용량

토공 3D 작업환경 모델링 데이터의 크기는 매우 중요한 이슈 중 하나이다. 3차원 작업환경 모델링 결과 데이터는 작업순차를 개발하고 굴삭기를 조정하는데 필수적인 입력 데이터로서, 신속하게 작업순차 계획을 업데이트하고 굴삭기 이동 경로를 생성하기 위해서는 매우 원활한 통신이 이루어져야 한다. 파일 크기가 지나치게 커질 경우 데이터 전송 및 처리에 지연(delay)이 발생할 위험은 커질 수 있다.

본 실험에서는 데이터의 호환성을 위하여 스캔한 점군데이터를 ASCII 파일 형식으로 저장하였으며, 1 shot 기준 약 50Mbytes의 용량을 가지는 것으로 나타났다. 이는 프로브(probe)의 거리를 12.9 미터로 하고, 점군의 간격(sample spacing)을 1cm(H)×1cm(V)로 입력한 결과이며, 3D 레이저 스캐너 (Scanstation II)가 제공할 수 있는 최고 밀도의 점군 간격인 1mm×1mm로 스캔할 경우 더 큰 용량의 파일이 생성된다. 본 실험에서는 지능형 굴삭시스템을 위한 최적의 해상도에 대해서는 고려되지 않았으나, 현재 ASCII 데이터는 향후 이진파일(binary file) 형태로 변환되어 파일 크기는 크게 감소할 것이다.

큰 용량의 파일을 무선을 통하여 데이터를 송신할 경우, 반드시 데이터 지연율(data latency)을 고려하여야 하며, 최적의 파일 크기 조합은 지능형 굴삭 시스템에서 요구되는 수준의 해상도와 무선통신 지연율을 고려하여 향후 여러 차례의 스캔 실험, 굴삭기 자동 운전 실험, 무선 통신 실험 등을 통하여 조절될 것이다.

### (3) 스캔 데이터 획득의 세장비 (slenderness)

점군 데이터 생성 후 양질의 메쉬 데이터를 생성하기 위해서는 점군들의 가로/세로 비가 1:1에 가까울수록 유리하다. 그러나 그림 10의 실험 결과와 같이 나타난 표면 점군은 가로 방향으로 매우 균일한 반면 수직방향은 스캔 지점과의 거리에 따라 점간 간격이 커지며 해상도가 낮아지는 현상이 나타난다.

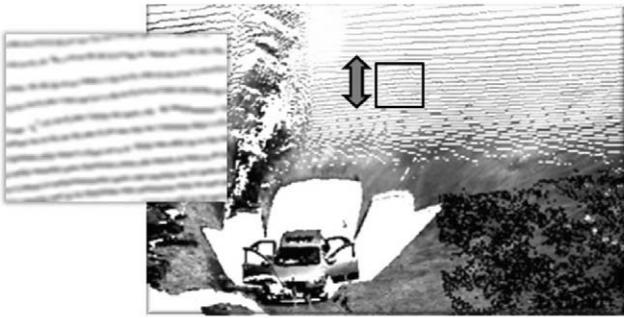


그림 10. 스캔 데이터의 세장비 (slenderness) 문제

세장비(slenderness)라 함은 세 점을 연결하여 삼각형을 이루었을 때 삼각형이 길쭉한 정도를 의미한다. 세장비가 커질수록 장방향의 데이터의 밀도는 낮고, 3D 스캔 데이터의 정확도가 떨어진다고 볼 수 있으며, 세장비가 작을수록 삼각형은 정삼각형에 가까워지기 때문에 매쉬 데이터는 정확해지게 된다.

적절한 세장비의 유지를 위해서는 적절한 유효거리 (반경 50~100m 내외)를 기준으로 매쉬 데이터의 세장비가 1:1이 되도록 하여야 하며 지능형 굴삭시스템 개발과 더불어 적절한 정밀도 확보를 위한 여러 차례의 실험을 통하여 최적의 해상도, 스캔 횟수, 스캔위치 등이 정해진다.

(4) 실험결과에 대한 소결

지능형 굴삭 시스템(IES)을 위한 모바일 3D 이미징 시스템의 현장 실험을 통해, 본 연구에서는 SCR S/W의 성능과 모바일 장치의 실효성, 3차원 작업환경 모델링 작업의 문제점을 파악하였다. 본 실험은 3차원 작업환경 모델링에 소요되는 시간과 3D 모델의 업데이트 주기를 예상할 수 있는 중요한 데이터를 제공하였다.

본 실험에서는 스캔 데이터를 적절한 용량으로 줄이는 것이 중요한 이슈가 되었다. 최적의 파일 크기를 결정하기 위해서는 무선 송수신 모듈의 데이터 처리 속도, 3차원 데이터의 후처리 시간, 지능형 굴삭 시스템의 무리 없는 구동을 위한 요구 해상도가 충분히 고려되어야 한다. 또한 최적의 스캔 위치를 파악하는 것도 최적의 해상력을 얻고 세장비를 줄이는데 영향을 미치는 요소이므로, 3D 모바일 이미징 시스템의 접근이 용이하지 않을 경우 삼각대를 이용한 스캔 방법도 고려하여야 할 것이다. 향후 개발은 앞에 설명된 항목들 간의 조정을 통하여 최적의 조합을 찾아 IES의 효율성을 최대화하는 것이다.

5. 3D 자동 정합 (auto registration) 모듈

5.1 3D 자동 정합 모듈의 개념

모바일 3D 이미징 시스템으로부터 획득된 스캔 데이터의 특성은 상대 좌표의 형태로서 스캐너의 위치에 비례한 3차원 공간상의 x, y, z 좌표 값으로 구성되어 있다. 지능형 굴삭 시스템은 동일한 토공 작업환경을 대상으로 서로 다른 스캔방향에서 주기적인 스캔 작업을 수행한다. 이는 기준이 되는 스캐너의 측정 위치에 따라 같은 공간상에 있는 객체의 좌표 값이 서로 다른 문제점을 안고 있다. 따라서 3차원 데이터들을 공간상의 한 좌표계로 일치화시키는 정합과정을 필요로 한다. 현재 여러 분야에서 수학적인 방법을 동원하여 연구되고 있는 영상정합 방법으로는 거리영상(range-image)을 이용한 방법(Roth, 1999), 구맵(geo-sphere)에 그려지는 깊이(Z-buffer)정보를 이용한 방법(Benjema, R. and Schmitt, F., 1997), 특정한 점에 대한 법선 벡터에서의 상대적인 거리를 영상(spin)의 형태로 나타내어 이 영상을 이용한 방법(Johnson, A. and Hebert, M., 1999), 단위 체적 (volume metric)을 이용한 방법(Curlless, 1996) 등 여러 정합방법이 있다. 본 연구에서는 여러 가지 정합 방법 중 구형 타겟(sphere target)<sup>5)</sup>을 이용하여 각 스캔 데이터 간 거리차이를 자동으로 최소화 하는 방법을 사용하였으며, 측정된 각 스캔 데이터간의 모든 정합 과정을 자동으로 수행할 수 있는 3D 자동 정합 모듈을 설계하였다.

여러 지점에서의 스캔 데이터를 정합하기 위해서는 그림 11과 같은 타겟을 이용하는 방법이 일반적이며, 구형 타겟을 이용함으로써 여러 방향에서도 동일한 형태로 보이게 되어 추가적인 타겟 및 스캐너 조정이 필요하지 않다는 장점이 있다.

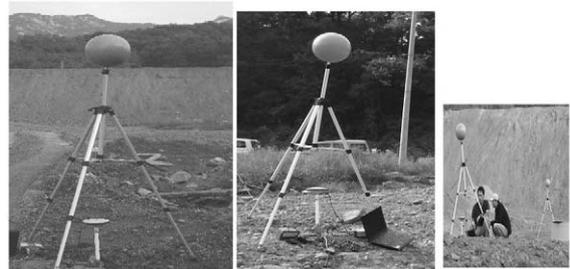


그림 11. 3D 자동 정합을 위한 구형 타겟

5) 구형 타겟을 이용한 정합 방법은 실제 스캐닝 데이터 프로세싱에서 자주 이용되고 있으며, 클러스터링된 3D 점군 데이터로부터 구형 객체 (object)를 추출한 후 정합하는 방식이다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 3차원 스캔 데이터 정보와 구형 타겟 및 DGPS를 이용하여 기준점을 찾아내고, 이를 이용하여 각 스캔 데이터간의 유사도를 검색하여 하나의 3차원 데이터로 정확히 일치시키는 프로세스이다. 기본적으로 IES가 요구하는 최적의 해상도 및 작업 시간을 고려하여 설계된 이 알고리즘은 반복적인 수행이 없기 때문에 기존의 방법보다 훨씬 빠르고 간단하게 정합을 실현할 수 있다.

5.1 3D 자동 정합 모듈 알고리즘

3D 자동 정합 모듈의 과정은 기본적으로 군집 분석(cluster analysis)<sup>6)</sup> 기법으로 진행되며, 모든 진행과정은 S/W적으로 처리된다. 순서도는 그림 12와 같다.

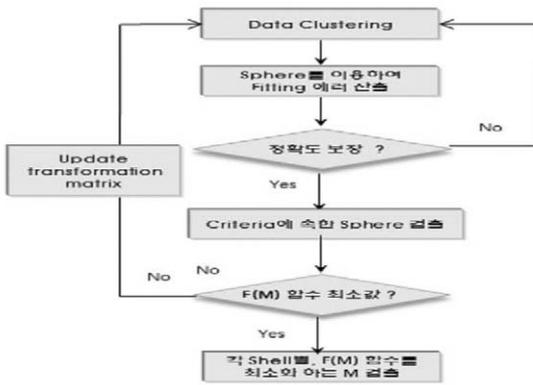


그림 12. 3D 자동 정합 모듈 순서도

첫 번째 단계는 토공 현장의 임의의 지점에 다수의 구형 타겟을 그림 13과 같이 작업 구역 내에 골고루 분포하여 배치하는 것이다. 다수의 스캔 데이터를 정합하기 위해서는 각각의 스캔 섹션이 동일한 공통의 타겟을 최소 3개 이상 공유해야 하므로, 보통의 택지 공사의 경우 약 10개 정도의 타겟이 필요할 것으로 예상된다. 또한 구형 타겟의 설치 위치는 최대한 토공 현장의 외곽쪽에 설치하여 IES 굴삭기의 작업에 영향을 주지 않도록 한다. 그리고 4번의 스캔을 진행하는 동안 타겟의 위치가 변하지 않도록 절대적 고정기 필요하다. 그 후 절대 좌표 생성을 위해 DGPS를 이용하여 각 타겟의 위치정보를 측정한다.

다음 단계는 측정된 스캔 데이터를 총 n개로 클러스터링(cluster)한 후 구형 타겟을 이용하여 피팅(fitting)의 정확도를 산출한다. 피팅 정확도가 허용범위 안으로 들어오게 되면 그림 14와 같이 2개의 클러스터간의 경계(criteria)에 속한 구형 타겟을 검출할 수 있다.

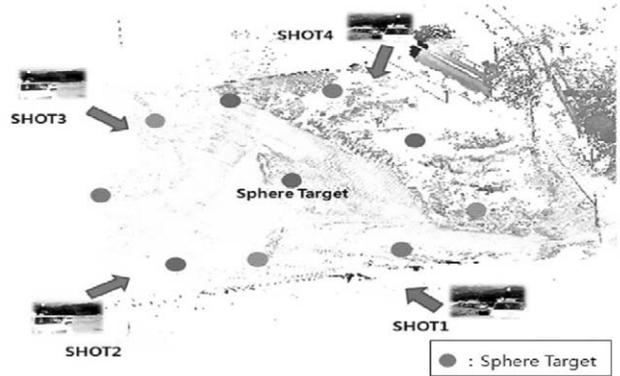


그림 13. Sphere Target을 이용한 정합 개념도

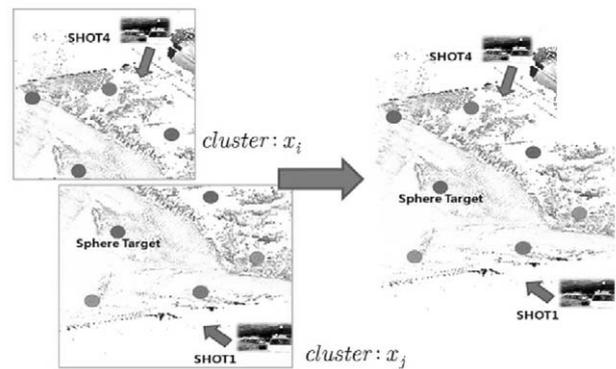


그림 14. Clustering을 통한 정합 (registration)

마지막 단계로 2개의 클러스터 사이의 유사도 행렬(similarity matrix)을 계산하여 수식 (1)의 목적함수 이 최소가 되는 을 찾을 때까지 반복 연산한다.

$$F(M) = \sum_{n=1}^n (Dev_1(M) + Dev_2(M) + \dots + Dev_n(M)) \quad (1)$$

\* $[M]_i = m(x, x)$  : 유사도행렬

\* $Dev_n$  : Deviation between clusters, when transformed with M

이와 같은 순서로 유사도 행렬의 최소값을 가지는 클러스터를 최종적으로 검출하여 정합의 과정이 완료된다. 여러 번의 스캔을 공통의 좌표계로 일치시키는 작업인 정합(registration)과정 이후에는, 3D 작업환경 모델 파일을 제작하기 위한 병합(merging)작업이 필요하며, 병합작업은 여러 개의 파일로 나뉘어 있는 데이터를 하나의 파일, 하나의 좌표계로 통합시킨 최종 완성된 데이터 세트이다.

6) 군집분석 (Cluster Analysis)은 다양한 특성을 지닌 대상들을 유사성에 기초하여 동질적인 집단으로 분류하는데 이용되는 기법이다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구는 국토해양부 연구비 지원에 의한 연구로서 과제번호 06첨단융합C01, 지능형 굴삭 시스템(IES) 개발의 요소기술 개발에 관한 연구이다. 본 연구는 지능형 굴삭 시스템 개발 프로젝트 가운데 토공 작업환경의 3D 모델링에 관한 연구를 기술하고 있으며, 광대역 3D 레이저 스캐너를 이용하여 실제 토공 작업환경을 가상의 3차원 공간속으로 재현할 수 있는 수학적 모델을 만드는 것이 본 연구의 목표이다. 토공작업 환경을 대상으로 하는 3차원 작업 환경 모델링에 관한 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 선행연구에서 선정된 ScanstationII 스캐너를 대상으로 3D 레이저 스캐너의 구동 및 제어 S/W 및 사용자 인터페이스를 개발하였다.
- 2) 토공 작업환경의 지속적인 데이터 수집을 위하여, 현장 이동용 차량에 3D 레이저 스캐너와 유압식 실린더를 이용한 텔레스코핑 시스템, 탑슬라이드 방식의 선루프, 배터리, 스캐너 마운트 등을 장착하였고, 이를 모바일 3D 이미징 시스템이라 하였다.
- 3) 개발한 3D 이미징 시스템을 이용하여 실제 토공작업 환경을 대상으로 3D 작업환경 모델링을 수행하였고, 최적의 데이터 크기, 스캔 해상도, 스캔 위치 등을 파악하기 위한 기초 데이터를 제공하였다.
- 4) 다수 지점에서 촬영된 스캔 데이터를 자동으로 정합하기 위한 자동정합(automatic registration) 알고리즘을 설계하였다.

본 연구에서는 광대역 3D 레이저 스캐너가 토공작업에 응용되기 위해 고려해야 될 사항들로 전체 작업 소요 시간, 데이터의 용량 및 스캔 데이터의 해상도임을 확인하였다. 또한 3D 가상 공간상에 작업환경 모델링을 위한 자동 정합 방법론을 개발하였으며 실험하였다.

향후 연구에서는 모바일 3D 이미징 시스템의 최적화를 위한 연구개발이 필요하며, 작업 구역내의 다양한 객체의 인식을 위하여 사진측량(photogrammetry) 기술을 개발하여 최종 가상 현실 결과물인 3D world model로 발전될 예정이다.

## 참고문헌

1. 유현석, 채명진, 김정렬, 조문영 (2007), '토공 작업환경의 3차원 모델링 시스템 개발에 관한 연구', 한국건설관리학회, pp 977-982.
2. Alan M. Lytle (2007). 'Development of a Probabilistic Sensor Model for a 3D Imaging System', ISARC 2007 Proceedings, pp 75-80.
3. Benjemaa, R. and Schmitt, F. (1997). "Fast Global Registration of 3D Sampled Surfaces Using a Multi-Z-Buffer Technique", In Proceedings IEEE International Conference on Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM '97), Ottawa, Canada.
4. Cannon, H.(1999). Extended Earthmoving with an Autonomous Excavator, Masters Thesis, Carnegie Mellon Robotics Institute.
5. Cheok, G., Lipman, R., Witzgall, C., Bernal, J. and Stone, W.(2000). "Field Demonstration of Laser Scanning for Excavation Measurement". In Proceedings of ISARC, 2000.
6. Curless, B. and Levoy, M.(1996). "A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images", Proc. ACM SIGGRAPH 96, pp 303-312
6. Hashemi, M. and Reinhart, D.(2001). "A New Approach in Plant Physical Documentation and Information Management for Existing Facilities using Laser Scanning, Imaging and Photogrammetry." The 3rd International Conference, ancouver, British Columbia, Canada, <<http://mining.ubc.ca/ipmm/news/image/imarticl.html>> (2001.08.03).
12. Johnson, A. and Hebert, M.(1999). "Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.21, no.5, pp 433-449.
13. Roth, G. (1999). "Registering two overlapping range images", In Proceedings of the Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'99), pp 191-200.
14. Samir El-Omari(2007). "Hybrid Methodology for

Automated Collection of Data from Construction Sites", ISARC 2007 Proceedings, pp 93-97.

15. Yukata Ishimatsu (2006). "Introduction to the General Technology Development Project: Research and Development of Advanced Execution Technology by Remote Control Robot and Information Technology", ISARC 2006 proceedings, pp 24-29.

논문제출일: 2008.07.02

심사완료일: 2008.10.27

---

### Abstract

The objective of the Intelligent Excavation System (IES) is to recognize the work environment and produce work plan and automatically control the excavator through integrating sensor and robot technologies. This paper discusses one of the core technologies of IES development project, development of 3D work environment modeling. 3D laser scanner is used for 3-dimensional mathematical model that can be visualized in virtual space in 3D. This paper describes (1) how the most appropriate 3D imaging system has been chosen; (2) the development of user interface and customization of the s/w to control the scanner for IES project; (3) the development of the mobile station for the scanner; (4) and the algorithm for the automatic registration of laser scan segments for IES project. The development system has been tested on the construction field and lessons learned and future development requirements are suggested.

Keywords : Earthwork, 3D Modeling, Work Environment, 3D Laser Scanner, LiDAR, LADAR, 3D Imaging System, Intelligent Excavation System (IES)