

토공 작업환경의 3차원 모델링 시스템 개발에 관한 연구

A Study on Development of the 3D Modeling System for Earthwork Environment

유 현 석*
Yoo, Hyun Seok

채 명 진**
Chae, Myung Jin

김 정 렬***
Kim, Jung Yeol

조 문 영****
Cho, Moon Young

요 약

건설자동화 장비의 개발에 있어서 주변 사물을 인식하고 효과적으로 모델링하기 위한 노력은 지속적으로 이루어져 왔다. 이 연구는 지능형 굴삭 로봇 개발의 요소기술로서, 3D 레이저 스캐너를 이용하여 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하고, 객체화된 모델링 정보를 이용하여 지능적인 작업 계획을 수립하기 위한 기반 연구이다. 이 연구에서는 먼저 3D 레이저 스캐너의 시장 동향을 분석하였고 토공 작업환경을 대상으로 3D 레이저 스캐너의 성능을 비교 분석하여 토공 현장에서 적합한 3D 레이저 스캐너를 선정하였다. 그리고 3D 모델링 시스템의 하드웨어 구성을 제시하였고 전체 소프트웨어의 컨셉을 설계하였다. 다음으로 소프트웨어 상세 기능 설계 및 사용자 인터페이스 설계를 통해 향후 photogrammetry 및 객체인식 기술의 적용을 위한 프레임워크를 구축하였다. 이 연구에서는 실제 토공현장을 대상으로 개발된 소프트웨어와 토탈 스테이션을 이용하여 타겟간의 상대거리를 측정하고 3D 모델링 시스템의 정확성을 측정하였다.

키워드: 토공(Earthwork), 3D 모델링(3D Modeling), 작업환경(Environment), 3D 레이저 스캐너(3D Laser Scanner)

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설 자동화 장비의 개발에 있어서 작업환경 주변의 사물을 효과적으로 모델링하고 자동으로 인식하는 기술은 자동화 혹은 지능화의 첫걸음이자 필수적인 요소 기술이라 할 수 있다. 간단한 형태의 각종 센서류에서 시작된 이러한 요소 기술들은 카메라를 이용한 비전 시스템, 광대역 3D 레이저 스캐너를 이용한 3차원 모델링 시스템에 이르기까지 많은 변화와 발전을 이루어왔으며 보다 효과적인 환경 인식을 위한 노력은 지속되고 있다.

현재까지 개발된 인식 기술 가운데 가장 실용화된 인식 기술은 단연 비전 시스템(vision system)으로서, 카메라에 촬영된 영상 데이터로부터 수많은 정보를 추출하고 인식할 수 있기 때문에 현재까지 다양한 산업분야에서 널리 사용되어 왔다. 그러나 카메라를 이용하는 비전 시스템은 토공 작업과 같이 넓은 지역을 대상으로 하는 작업 환경에서는 사용하기가 어렵고, 거리 좌표에 대한 신뢰도가 낮기 때문

에 광대역 환경을 정밀하게 모델링하기에는 적합하지 않다. 이에 반해 광대역 3D 레이저 스캐너(terrestrial 3D laser scanner)는 비록 고가이나 넓은 지역을 간편하게 3차원으로 모델링할 수 있고 정밀도도 높을 뿐만 아니라, 필드 환경에서 사용하기에 충분한 내구성을 갖추고 있다는 장점이 있다.

본 연구는 2006년부터 건설교통부의 지원으로 시작된 “지능형 굴삭시스템 개발”의 요소기술 개발로서 지능형 굴삭 로봇의 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하고, 이를 통해 객체화된 정보를 추출하고 가공하여, 유용한 작업정보를 지능형 굴삭 로봇에 전달하기 위한 기반 연구이다. 그러므로 이 연구의 목표는 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하기 위하여 요구되는 하드웨어와 소프트웨어의 기본 컨셉을 설계하고, 향후 연구를 위한 소프트웨어의 프레임워크(framework)를 구성하며, 실제 측정된 3차원 모델링 결과를 통해 토공 작업환경 3차원 모델의 정확성을 측정하는 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 3D 스캐너를 이용하여 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하기 위한 것으로서, 본 논문에서의 연구 범위는 3D 레이저 스캐너의 성능 비교 분석, 3D 모델링 시스템의 컨셉 설계, 3D 모델링 소프트웨어의 기능 설계

* 일반회원, 한국건설기술연구원 연구원, 공학석사
** 일반회원, 한국건설기술연구원 선임연구원, 공학박사
*** 일반회원, 한국건설기술연구원 연구원, 공학석사
**** 종신회원, 한국건설기술연구원 책임연구원, 공학박사
본 연구는 건설교통부 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제 번호 06첨단융합C01 “지능형 굴삭시스템 개발”.

및 사용자 인터페이스 설계, 3D 모델링 결과의 정확성 테스트 등으로 제한된다. 본 연구의 방법은 다음과 같다.

- ① 문헌 조사를 통하여 광대역 3D 레이저 스캐너 세계 시장 현황을 조사하고 국내 활용 현황을 조사한다.
- ② 현장 시연을 통하여 국내 공급 가능한 광대역 3D 레이저 스캐너 성능을 분석하고, 토공 현장에 적합한 3D 레이저 스캐너를 선정한다.
- ③ 3D 작업환경 모델링 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어 컨셉을 설계하고, 실제 현장에서의 3D 데이터 획득을 위한 방법을 제시한다.
- ④ 3D 작업환경 모델링 소프트웨어의 세부 기능을 설계하고 사용자 인터페이스를 설계한다.
- ⑤ 실제 토공 현장을 대상으로 3D 스캐닝 데이터를 획득하여 3차원으로 모델링하고 토달 스테이션과의 비교를 통해 3D 모델링의 정확성을 테스트한다.

2. 3D 레이저 스캐너의 성능 분석

2.1 3D 레이저 스캐너 시장현황

광대역 3D 스캐너 시장은 2004년 \$44.8M(전년대비 65% 성장), 2005년 \$65.9M(전년대비 46%성장) 규모인 것으로 조사되었으며, 소프트웨어 및 서비스를 포함할 경우 2005년 말 \$178M에 육박할 것으로 예측되고 있다. 이 가운데 광대역 3D 스캐너 세계 최대 제조사는 스위스 Leica HDS(舊 Cyrax(美))와 오스트리아 Riegl사, 미국 Trimble 사로 조사되었다. 국내에 수입되고 제어 및 기술지원이 가능한 3D 레이저 스캐너는 Leica HDS와 Riegl, Optech, FARO 등의 제품이 있다. 국외의 경우 플랜트 산업 및 리버스 엔지니어링을 중심으로 구조물, 도시 모델링 등 응용 영역이 점차 다양화되고 있는 편이나, 국내에서는 대부분 문화재 복원 사업이나 연구 용도로 주로 사용되어 왔다. 국내에서는 약 20여대가 수입되었으며 대부분 Leica HDS 제품으로 조사되었다.

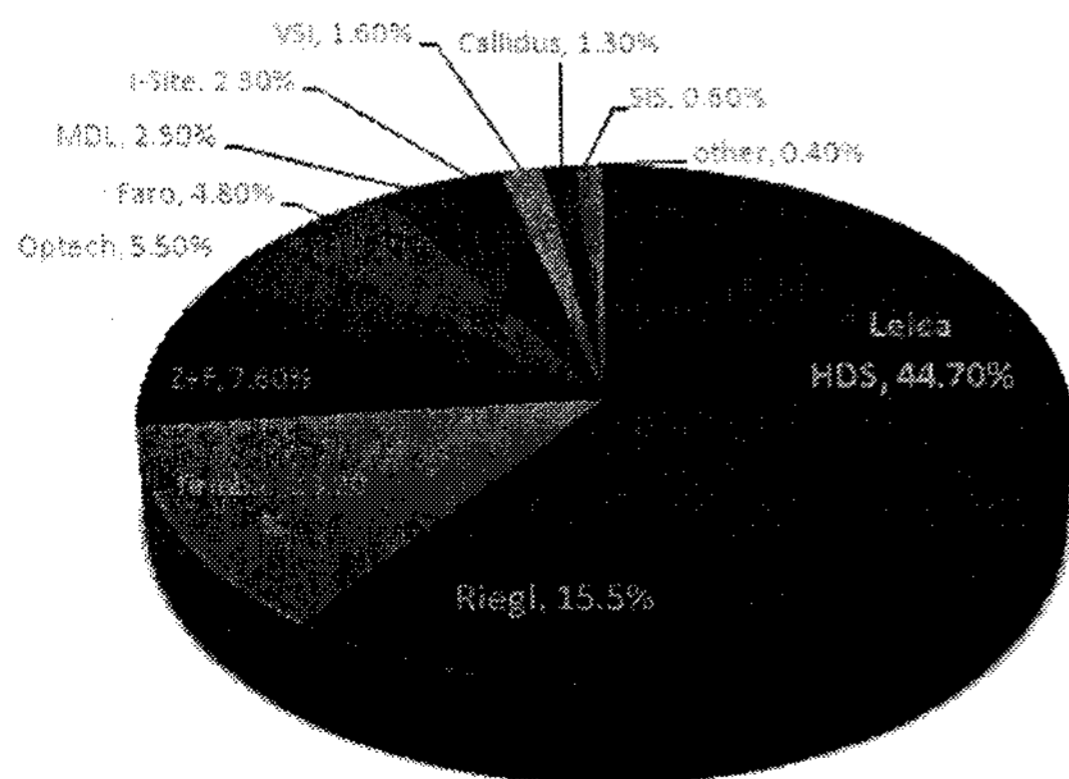


그림 1 광대역 3D 스캐너 Market Share (2005 Spar Point LCC)

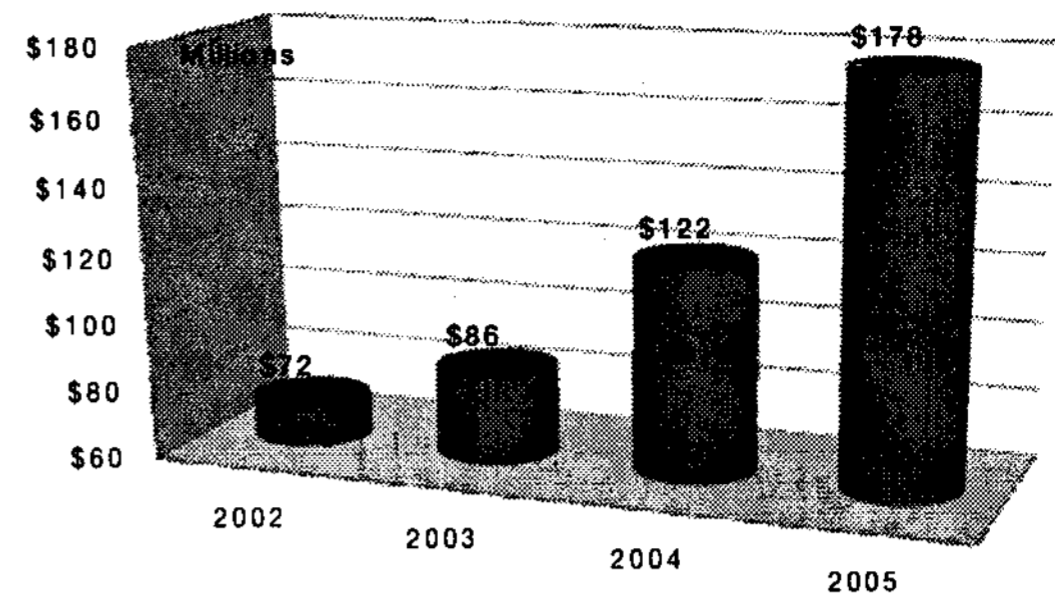


그림 2 광대역 3D 스캐너 Market Forecast (2005 Spar Point LCC)

2.2 광대역 3D 레이저 스캐너 성능 테스트

본 연구에서는 (주)영신토건의 판교 현장에서 국내 3D 레이저 스캐너 벤더를 대상으로 3D 모델링 현장 시연회를 개최하였다. 시연회에 참가한 업체는 Leica(스위스), Riegl(오스트리아), Trimble(미국) 3사의 국내 벤더가 참여했으며, 동일한 현장을 대상으로 각각 시간차를 두고 현장 측정과 3D 모델링을 수행하는 방식으로 진행되었다.



그림 3 현장시연회 사진

시연 결과 Riegl의 LMS-Z210ii는 12,000point/sec의 비교적 빠른 속도와 자체 운영 소프트웨어, 응용 어플리케이션 개발을 위한 API를 제공하고 있었다. 거리는 80%의 반사도에서 650m로 가장 장거리를 지원하나 실제 토공현장 분석 결과 200~300m의 거리이면 충분한 것으로 판단된다. 또한 부피 및 중량이 가장 크고, 정확도가 상대적으로 낮으며(10mm @50m), 객체 인식(object recognition)에 필수적인 Photogrammetry 처리를 위해서는 별도의 카메라 모듈을 구매해야 한다는 단점이 있다.

Leica의 ScanstaionII의 경우는 50,000point/sec의 가장 빠른 속도를 지원하며, 비교적 높은 정확도(4mm @50m), 자체 운영 소프트웨어, 협정기관에 대하여 응용 어플리케이션 개발용 API를 제공한다. 거리는 90%의 반사도에서 300m로 중간 정도이며, 디지털 카메라가 내장되어 있어 별도의 모듈을 구매하지 않아도 Photogrammetry의 지원이 가능하다. Leica의 경우 국내 시장점유율이 압도적이기 때문에 서비스 지원이 원활하다는 장점이 있다.

Trimble(Optech)의 ILRIS-3D는 2,000point/sec로 속도가 가장 느리나, 거리는 80%의 반사율에서 1,500m로 가장 멀리 지원한다. 그러나 운영 소프트웨어, API 등을 지원하지 않으며, 경사 보정 기능도 지원하지 않는다.

결론적으로 실제 토공 현장의 경우 스캔 거리는 200~300m 정도이면 충분하고, 거리보다는 정확도와 속도가 중요하며, Photogrammetry에 유리하고 API까지 제공하는 Leica의 Scanstation II가 가장 적합한 것으로 판단된다.

표 1 3D 스캐너 성능 비교

	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 제공 - API 제공	기본 S/W 제공
Inclination Sensor	내장 및 자동보정	내장 및 자동보정	없음
Measurement Range	650m(80%반사) 200m(10%반사)	300m(90%반사) 134m(18%반사)	1500m(80% 반사) 350m(4%반사)
Scanning Range	360°(H)*360°(V)	360°(H) * 270°(V)	360°(H)*40°(V)
Power Supply	NiMH : 6시간 차량용 : 12시간	8시간 사용 가능 (2개 연결)	5시간 사용 가능
Photogrammetry	SLR (Nikon) 렌즈 (14~180mm)	내장형 카메라 (640만 화소)	내장형 CMOS 센서
Laser	Class 1	Class 3R	Class 1
IP	IP 64 (방수)	IP 52	IP52

3. 3D 작업환경 모델링 시스템 개념 설계

본 연구에서는 토공 현장의 작업환경을 3차원으로 모델링하기 위하여 3D 작업환경 모델링 시스템의 구성과 프로세스, 세부적인 사양을 설계하였다. 3D 작업환경 모델링 시스템의 하드웨어는 그림 4와 같이 현장용 SUV 차량과 3D 스캐너, GPS, 무선 송수신 장치, 산업용 노트북, 삼각대, 배터리팩, 인식 타겟 등으로 구성된다. 이 가운데 현장용 노트북은 3D 스캐너를 제어하고 획득된 3D 점군(point cloud) 데이터를 프로세싱(processing)하며, GPS의 위치 데이터를 이용하여 절대좌표를 결정하는 역할을 담당하며, 최종 프로세싱된 데이터를 무선 송수신 장치로 전송하는 역할을 담당한다. 3D 스캐너는 현장 차량에 루프 오픈(roof open) 장치와 텔레스코핑(telescoping) 장치를 이용하여 운전자의 위치에서 완전히 제어될 수 있도록 장착된다.

소프트웨어 부문에 있어서는 Leica HDS에서 제공하는 Cyclone 5.8 API와 국내 전문회사인 Inus Tech.에서 개발한 RapidForm XOV API를 이용하여 3D 작업환경 모델링 시스템을 구현한다. Cyclone 5.8 API는 국내 처음으로 공개되는 API로서 3D 스캐너에서 기본 제공되는 소프트웨어를 사용하지 않고 3D 스캐너의 완전 제어가 가능하며, 독자적인 토공 모델링 시스템을 개발하기 위한 기초가 된다. RapidForm XOV는 3D 스캐너에서 습득된 3D 점군 데이터를 mesh creating, filtering, registration 등의 3D 프로세싱 기능과 볼륨, 거리, 편차 등의 분석 기능을 포함하고 있다.

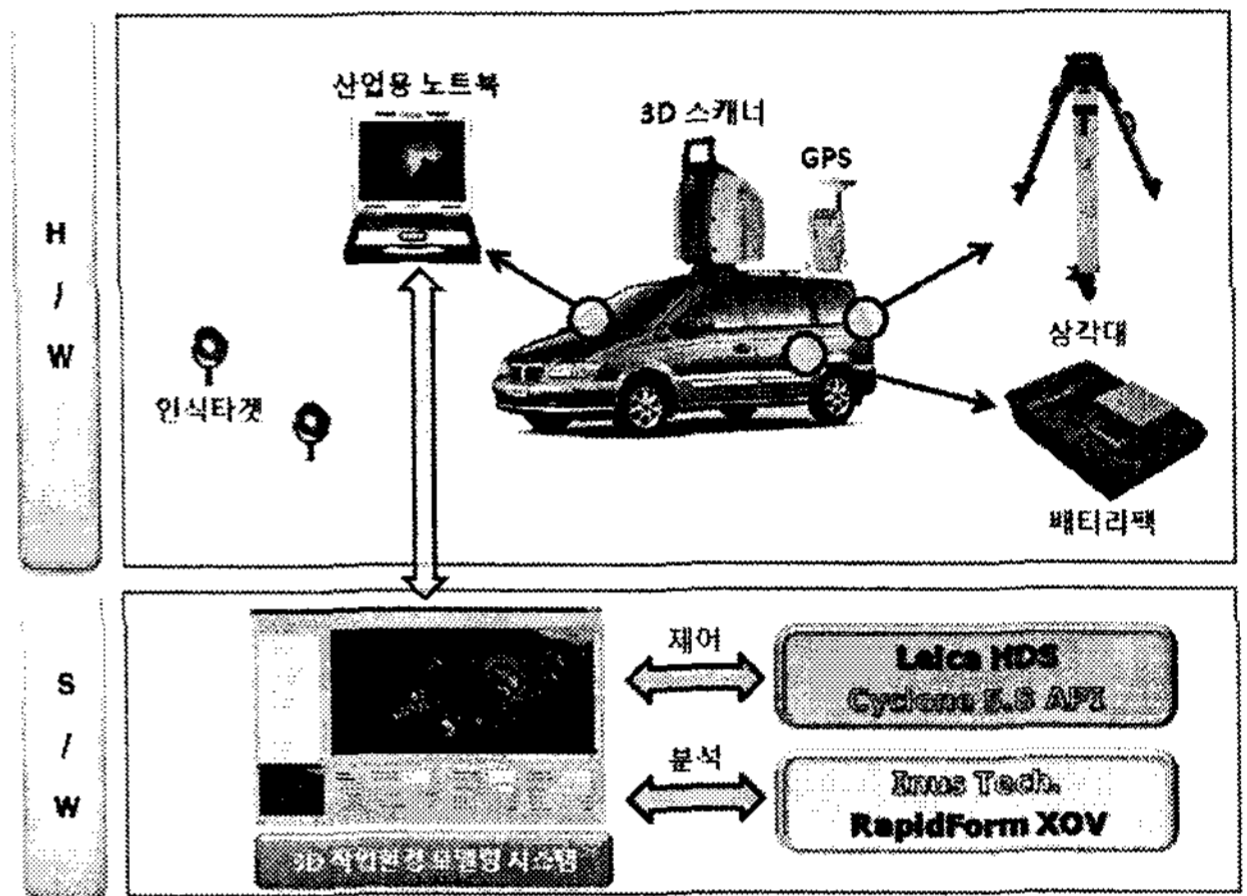


그림 4 3D 작업환경 모델링 시스템 구성

3D 작업환경 모델링 시스템은 아래 그림 5와 같이 1개 현장을 대상으로 1일 2~3회, 1회당 3~5 지점에서 토공 현장의 지형변화를 스캐닝하는 것을 기본 전제로 한다. 기본적으로 각 위치의 스캔 결과를 하나로 병합(registration)하기 위해서는 사전에 각 위치에서 공통적으로 인식할 수 있는 위치에 인식 타겟을 설치하여야 하며, 차량의 운전자가 3D 스캐닝과 프로세싱, 데이터 전송을 모두 담당할 수 있도록 구성된다. 현장 스캐닝 프로세스를 순서도로 표현하면 그림 6과 같다.

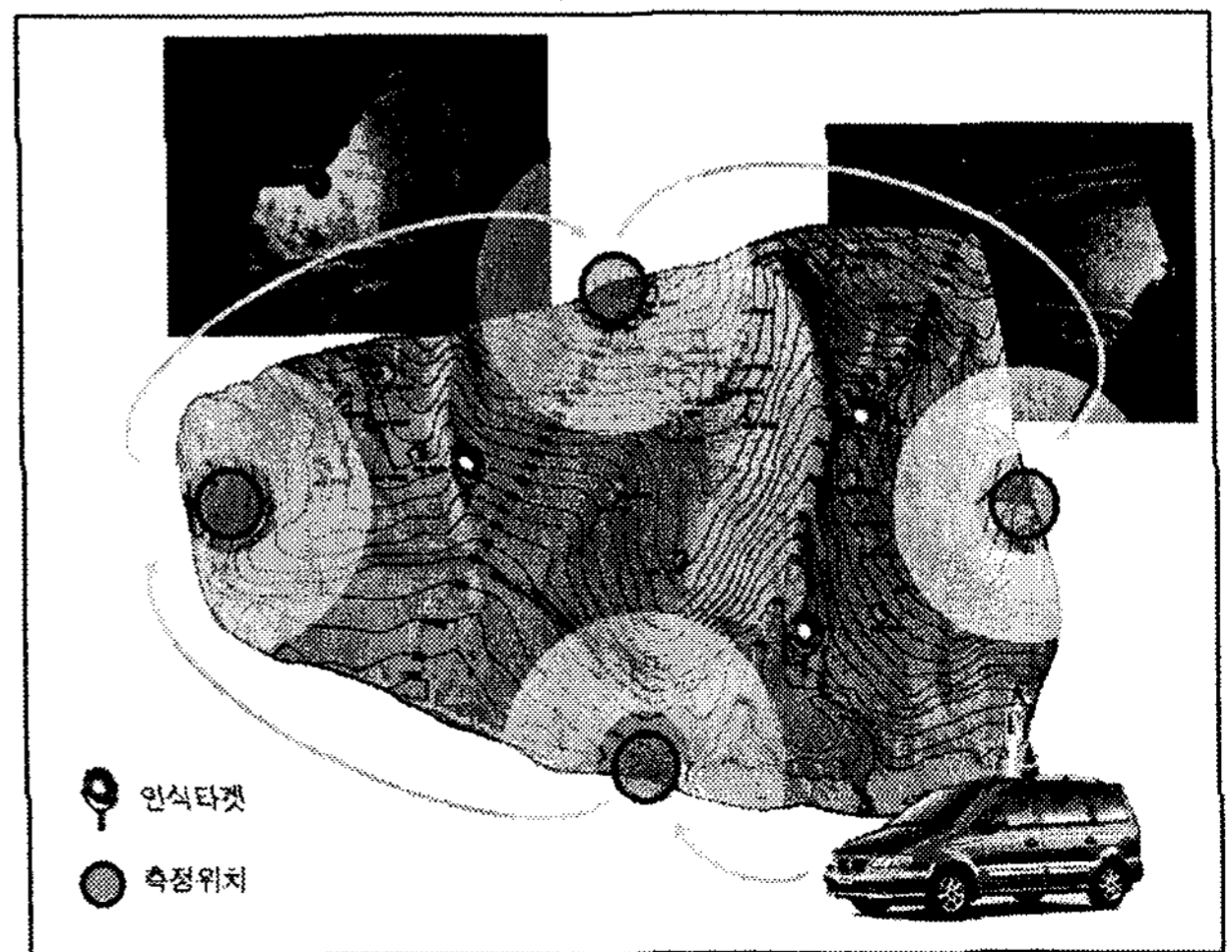


그림 5 현장 3D 스캔 방법

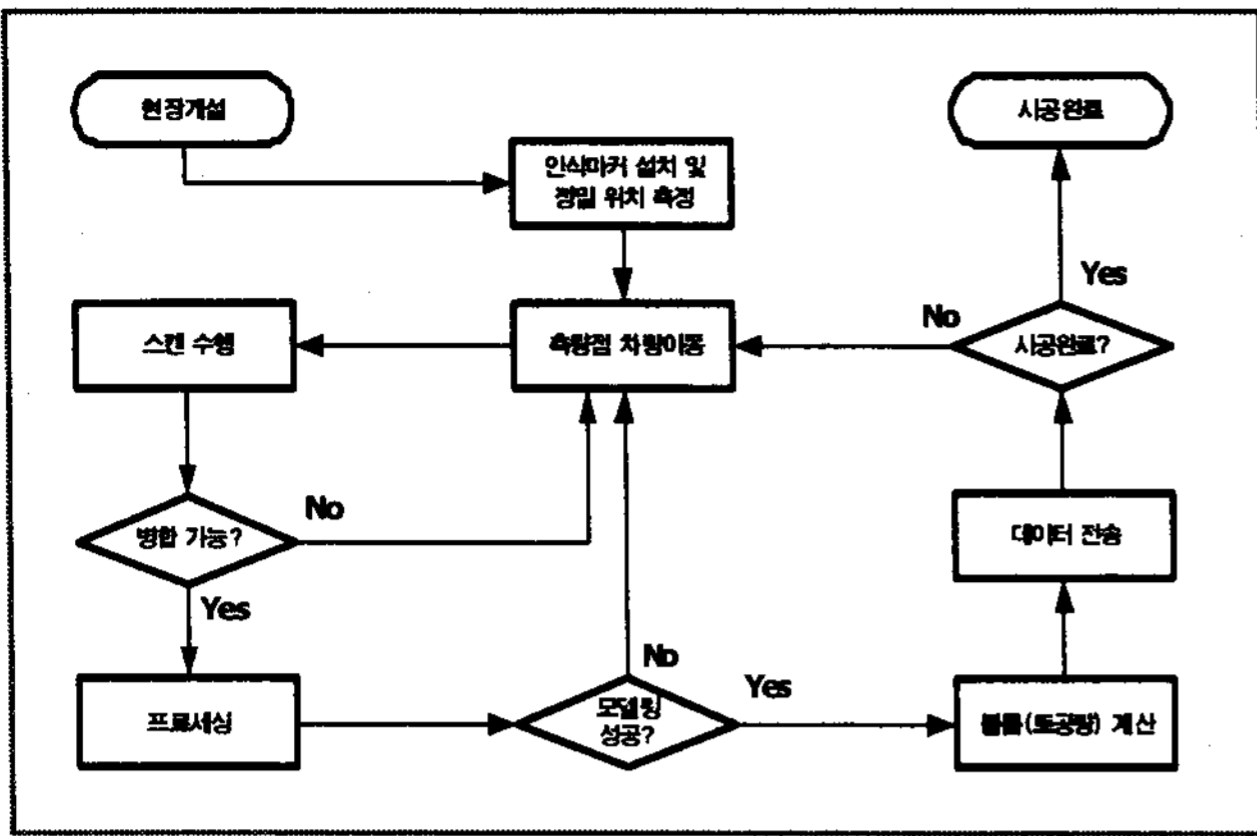


그림 6 현장 스캐닝 프로세스

4. 3D 모델링 소프트웨어 사용자 I/F 설계

본 연구에서는 3D 작업환경 모델링 시스템의 핵심이라 할 수 있는 3D 모델링 소프트웨어의 기능과 사용자 인터페이스를 설계하였다. 다음 그림은 시작화면으로 새 프로젝트의 생성, 저장, 삭제 등의 프로젝트 관리 기능을 포함하고 있다.

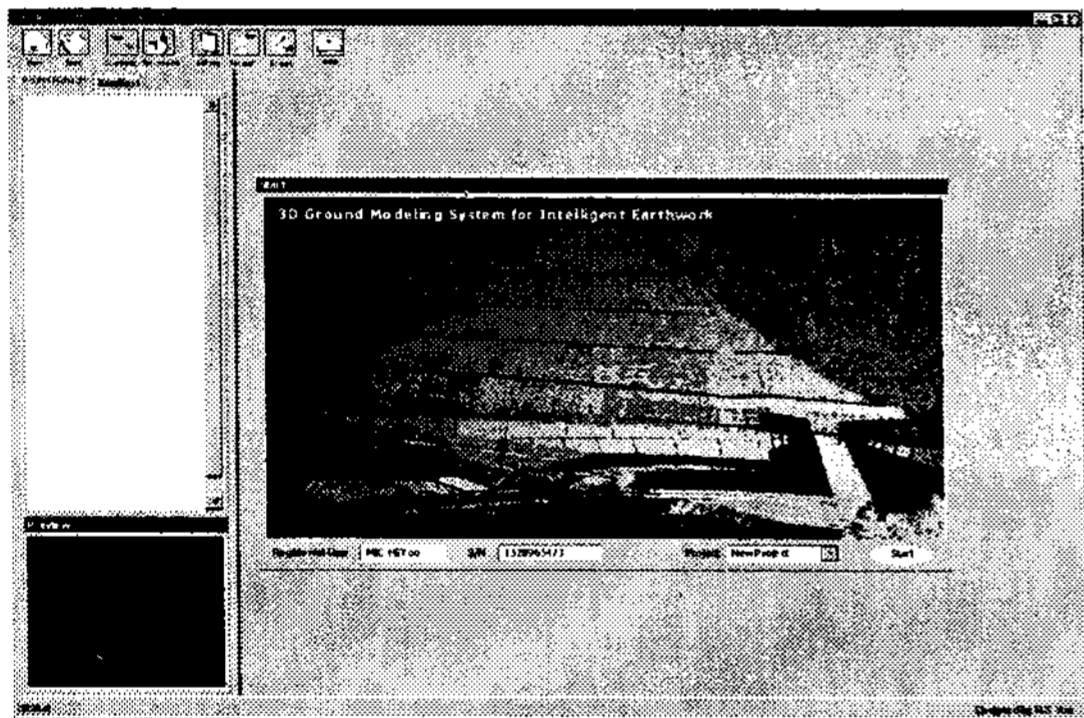


그림 7 시작화면

다음 화면은 초기 프로젝트 설정 모듈로, 새 프로젝트 생성 후 기본적인 현장 정보를 입력할 수 있고, 3D 스캐너의 커넥션, GPS의 상세 설정 등을 포함하고 있다.

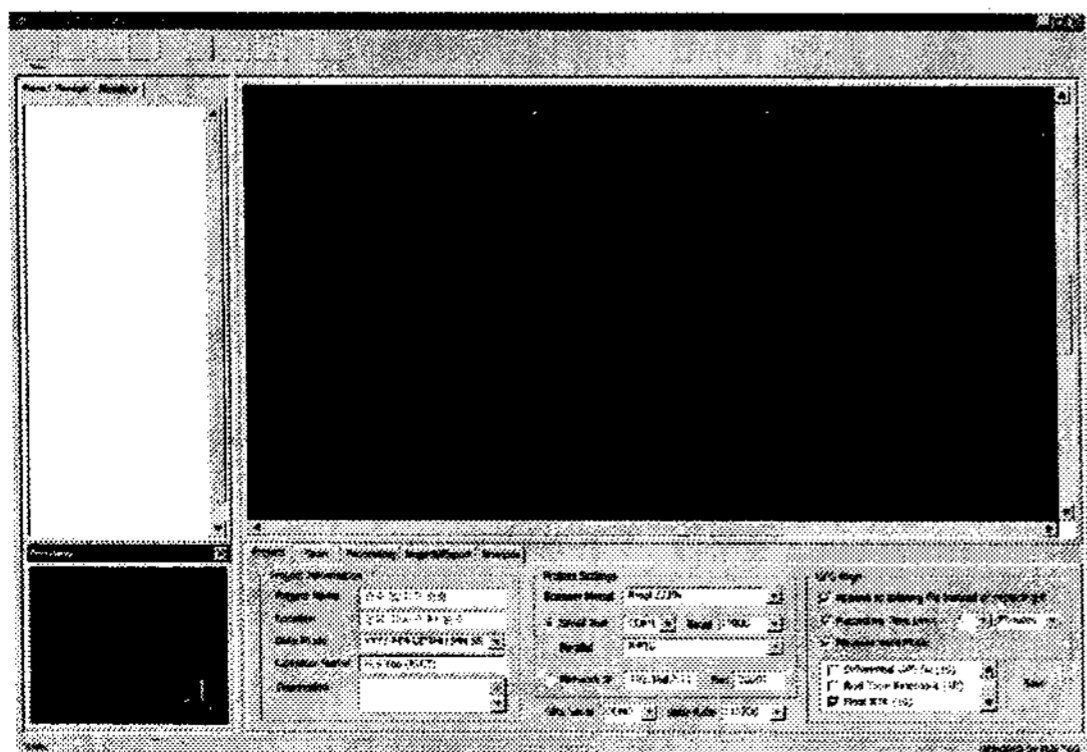


그림 8 프로젝트 설정 모듈

다음 화면은 스캐너를 구동하고 현장에서 스캐닝을 수행하는 기능을 포함하며, 스캔 결과를 표시하고, 스캔범위, 해상도 등 측정 설정값을 제어하고 관리할 수 있는 모듈이다.

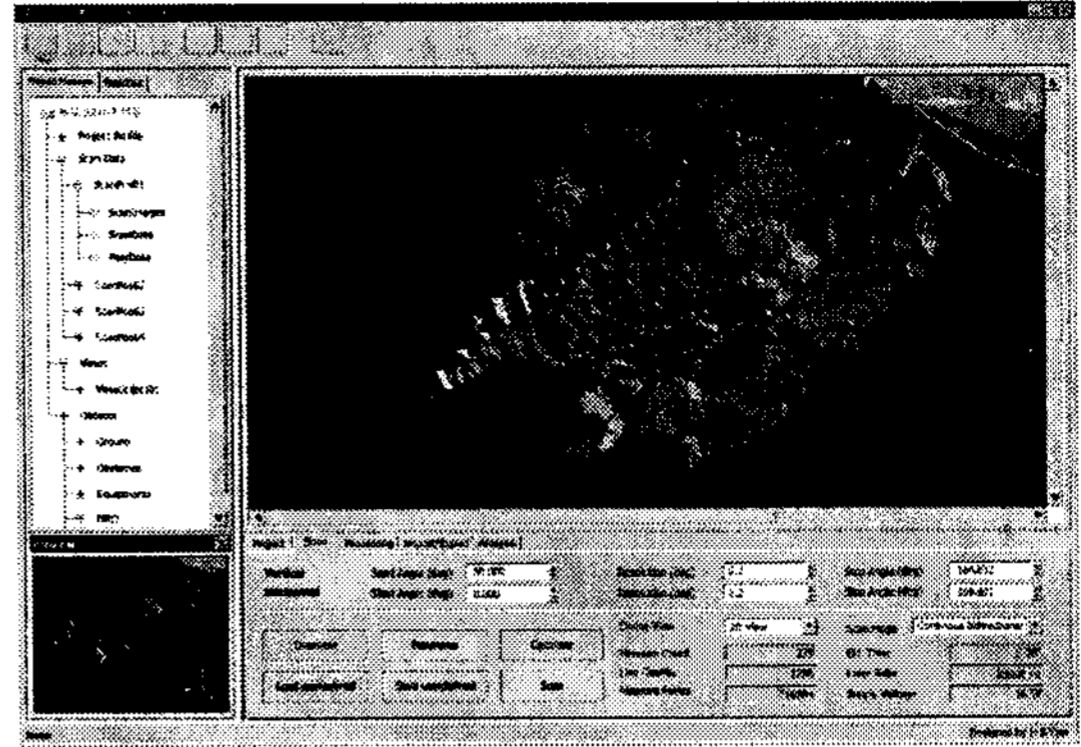


그림 9 스캔 제어 모듈

다음 화면은 스캔된 데이터(Point Cloud)를 필터링하고 프로세싱하는 기능을 수행하며, 여러 각도에서 스캔된 데이터의 통합(Registration)하고, 이를 Mesh Surface, Solid 등으로 변환하는 역할을 수행한다.

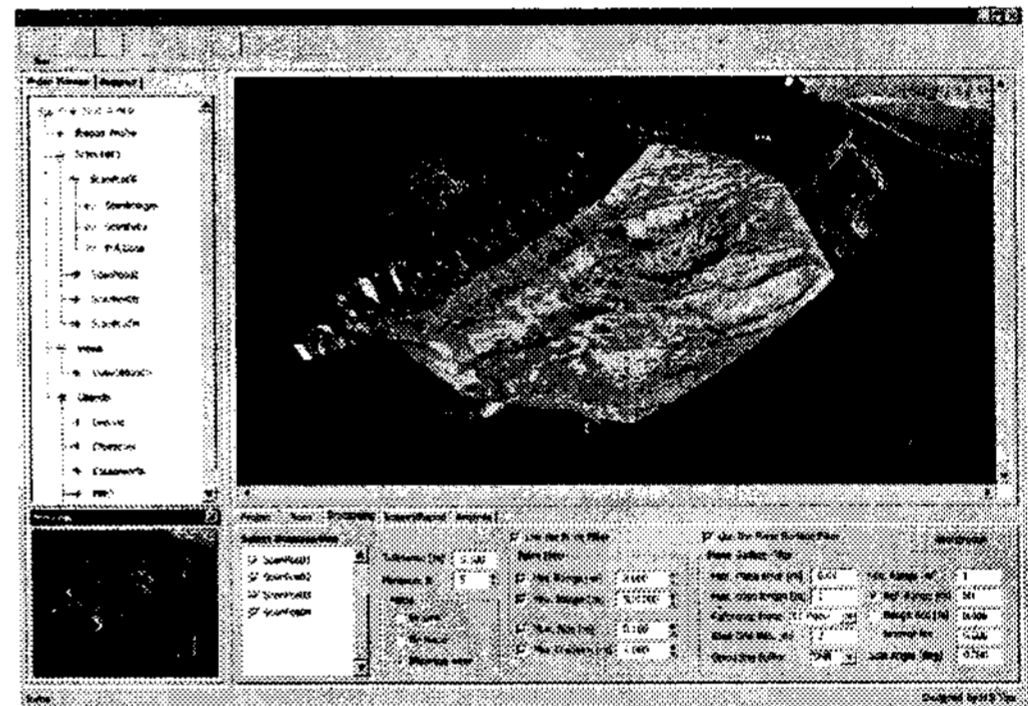


그림 10 프로세싱 모듈

다음 그림은 완성된 지형 데이터의 입출력(data import/export)을 관리하는 부분으로서, 본 소프트웨어에서는 3D CAD (dxf)형식과 ASCII 형식으로 데이터를 입출력할 수 있다.

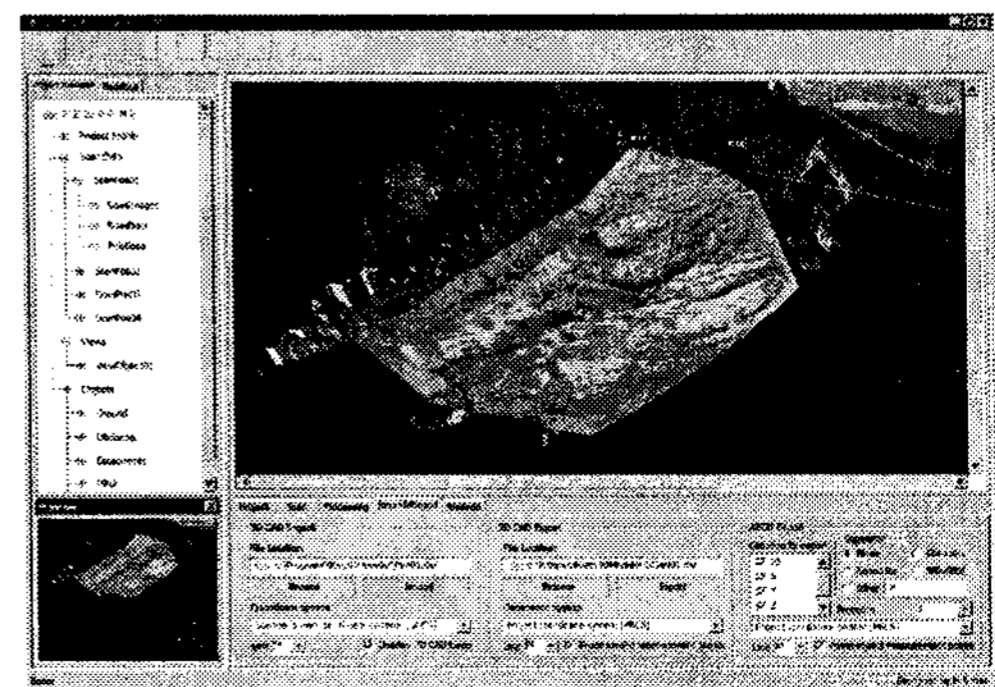


그림 11 데이터 Import/Export

다음 그림은 완성된 데이터를 분석하는 모듈로, 특정 지점의 거리와 토공량(볼륨 측정)을 측정할 수 있다.

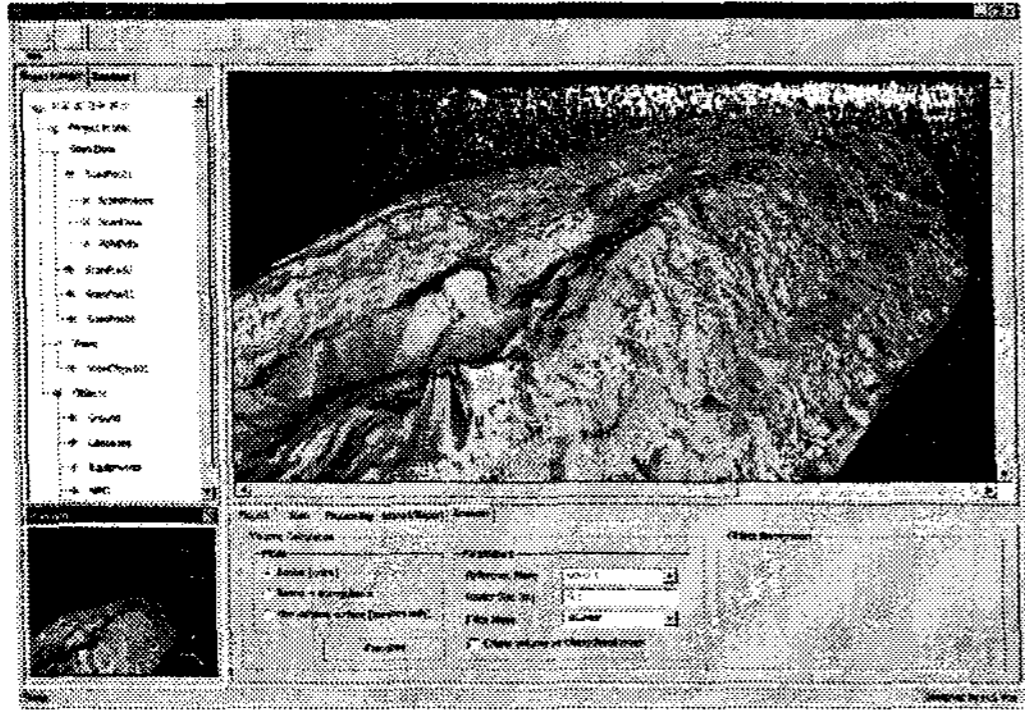


그림 12 데이터 분석 모듈

5. 3D 모델링 정확성 테스트

본 연구에서는 실제 토공 현장(은평 뉴타운 (주)영신토건 토공현장)을 대상으로 3D 모델링 시스템 프로토타입(prototype)의 모델링 정확성 테스트를 실시하였다. 실험 방법은 그림 13과 같이 총 6개의 인식 타겟(Center, A, B, C, D, E)을 설치한 다음 3D 스캐너와 토탈 스테이션(total station)을 이용하여 각각 타겟 간의 상대거리를 측정하여 오차를 측정하는 방식으로 진행하였다. 3D 스캐너는 2개 지점에서 스캐닝을 수행하여 2개의 스캔 데이터를 병합(registration)하여 하나의 3D 모델을 만들고, 타겟을 수동으로 인식하여 각 지점간 거리를 측정하였으며, 토탈 스테이션은 테스트 지역 바깥의 한 지점에서 6개 지점을 각각 측정하여 각각의 상대거리를 측정하였다.

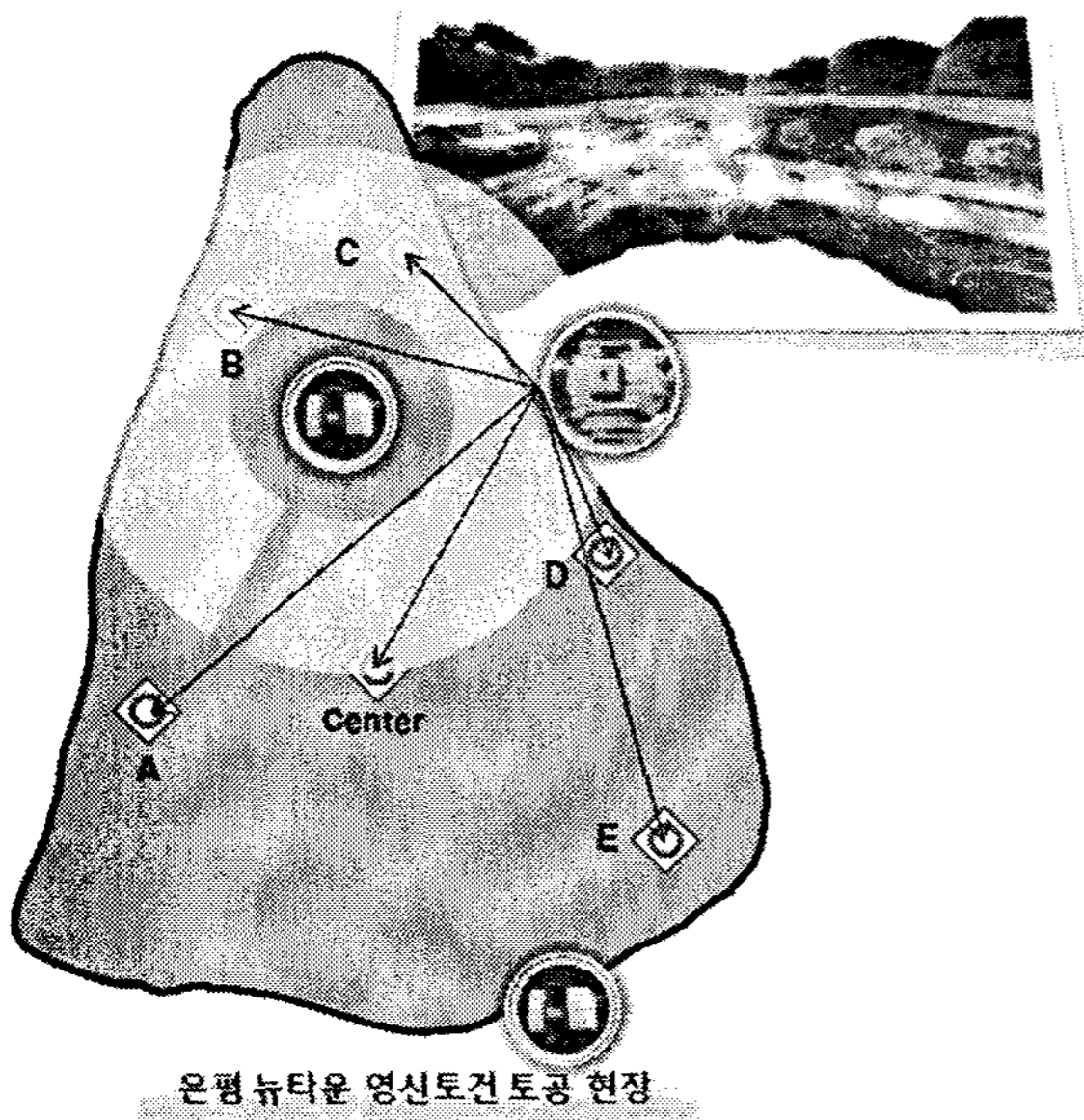


그림 13 현장 실험도

다음의 표 3과 같이 현장실험 결과 타겟간 최대 오차는 76.8 미터에서 29mm의 오차가 발생하였고, m당 평균 오차

는 0.256mm 인 것으로 측정되었다.

표 2 타겟간 거리 측정 결과

거리	total station(m)	scan station(m)	오차(m)	m당 오차(mm)
©-A	34.829	34.838	-0.009	-0.27198
©-B	56.911	56.891	0.020	0.352569
©-C	70.804	70.788	0.016	0.225115
©-D	33.162	33.155	0.007	0.21449
©-E	36.226	36.238	-0.012	-0.33549
A-B	60.725	60.733	-0.008	-0.12465
B-C	27.471	27.467	0.004	0.131137
C-D	76.825	76.796	0.029	0.375151
D-E	39.495	39.511	-0.016	-0.41178
E-A	55.602	55.607	-0.005	-0.08332
합계	492,049	492,024	10.126	10.256

예상보다 높은 오차가 발생한 원인을 분석한 결과, 현재 3D 스캐너에서 사용하는 타겟과 토탈 스테이션에서 사용하는 프리즘(prism) 타겟이 다르기 때문에 각 위치에서 최대한 동일 조건으로 설치한다고 하더라도 오차가 발생할 수 있다는 점이 있고, 정밀도가 상대적으로 낮은 Scan station I을 이용하여 실험에 임한 점 등이 높은 오차의 원인으로 분석되었다. 그러므로 향후 실험에서는 무타겟 방식의 토탈 스테이션과 일정 거리 간격으로 더 많은 수의 타겟을 설치하여 토공 영역에서 선형적인 오차 수치를 테스트할 예정이다. 이 실험에서 획득된 지반 형상 데이터를 이용하여 3차원으로 모델링하고 타겟간의 거리를 측정한 결과는 그림 14와 같다.

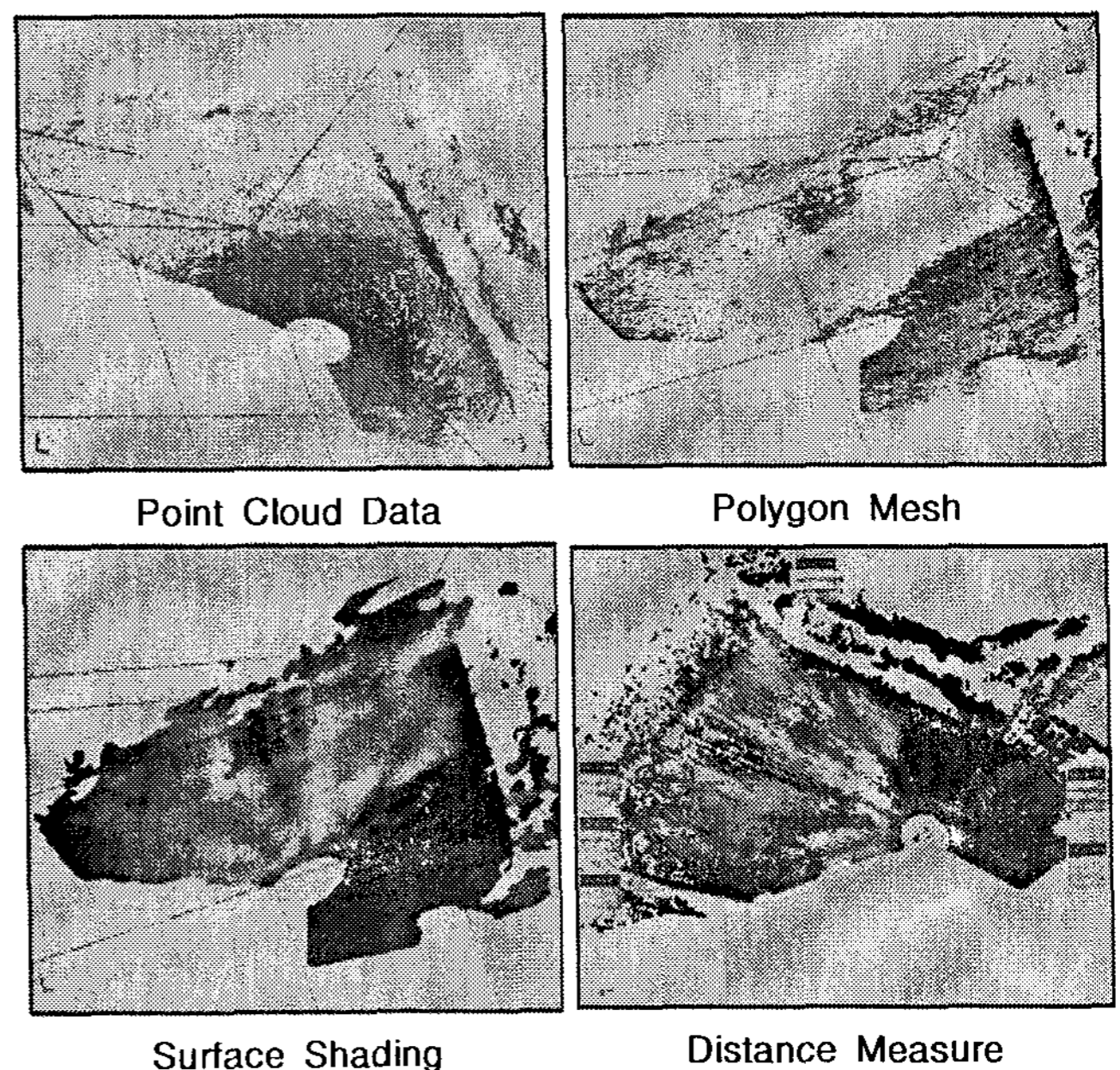


그림 14 지반 3D 모델링 결과

6. 결 론

토공작업 환경을 대상으로 하는 3차원 모델링 시스템 개발을 위한 연구의 결론은 다음과 같다.

- ① 현재 국내에 공급되는 3D 레이저 스캐너의 사양과 현장 시연을 수행한 결과, Leica HDS의 Scanstation II 기종이 가장 성능이 우수하였다.
- ② 3D 작업환경 모델링 시스템의 H/W 구성과 S/W 구조, 현장에서의 3D 스캐닝 프로세스 컨셉을 설계하였다.
- ③ 3D 모델링 시스템의 핵심인 소프트웨어의 기능과 사용자 인터페이스를 설계하였다.
- ④ 실제 토공작업 환경을 대상으로 3D 작업환경 모델링을 수행하였고, 타겟을 설치하여 토탈 스테이션과의 정확성을 측정한 결과 최대 오차는 76.8미터에서 29mm였으며, 미터(m)당 평균 오차는 0.256mm였다.

본 연구는 향후 일정간격의 타겟 설치와 신규 3D 스캐너 기종을 이용한 보다 정확한 테스트가 예정되어 있으며, 2011년까지 photogrammetry 모듈 및 객체 인식 모듈을 개발하여 최종 가상현실 결과물인 3D world model로 발전될 예정이다.

참고문헌

1. Alan M. Lytle, "Development of a Probabilistic Sensor Model for a 3D Imaging System", ISARC 2007 Proceedings, 2007. 9, pp 75~80
2. Cannon, H., Extended Earthmoving with an Autonomous Excavator, Masters Thesis, Carnegie Mellon Robotics Institute, 1999.
3. Corke, P., Hainsworth, D., Winstanley, G., Li, Y., and Gurgenci, H., Automated control of a dragline using machine vision. In Proc. Electrical Engineering

- Congress, Sydney, 1994. 11. Institute of Engineers Australia., pp 597-600
4. Corke, P., Roberts, J., Winstanley, G., 3D perception for mining robotics. In Proceedings Field and Service Robotics, Springer-Verlag, 1999., pp 41-47.
5. Corke, P., Roberts, J., Winstanley, G., Experiments and experiences in developing a mining robot system. In P. Corke and J. Trevelyan, editors, Experimental Robotics VI, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, Sydney, 2000. 6., pp 183-192.
6. Cheok, G., Lipman, R., Witzgall, C., Bernal, J., Stone, W., Field Demonstration of Laser Scanning for Excavation Measurement. In Proceedings of ISARC, 2000.
7. Duff, E., Automated volume estimation of haul-truck loads. In Proceedings of the Australian Conference on Robotics and Automation, Melbourne, Australia, 2000, pp 179-184
8. Yukata Ishimatsu, "Introduction to the General Technology Development Project: Research and Development of Advanced Execution Technology by Remote Control Robot and Information Technology", ISARC 2006 proceedings, 2006. 10, pp 24~29
9. Samir El-Omari, "Hybrid Methodology for Automated Collection of Data from Construction Sites", ISARC 2007 Proceedings, 2007. 9, pp93~97

Abstract

There have been many efforts in automatic object recognition using computing technologies. Especially in the development of automated construction equipment, automatic object recognition is very important issue for the proper equipment maneuvering. 3D laser scanning, which uses (time-of-flight) method to construct the 3-dimensional information, is applied to the civil earth work environment for its high accuracy, quick data collection, and object recognition capability that will be developed by the authors in the future. The 3D earth model is also used as a fundamental information for intelligent earth work task planning. This paper presents the analysis of the 3D laser scanner market and selection of the most optimum 3D scanner for the intelligent earth work planning. As well as the hardware configuration for the automated 3D earth modeling is developed but also the software structure and detailed user interface are designed in this research. In addition, it is presented in this paper that the accuracy comparison test between TotalStation(R) which is a traditional survey tool and ScanStation(R). The accuracy test is done by relative distance measurement using known targets.

Keywords : Earthwork, 3D Modeling, Environment, 3D Laser Scanner
