

http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.3.135

JIIBC 2013-3-18

3D 레이저 스캐너를 이용한 매립장의 체적 계측을 위한 모니터링시스템

Monitoring System to Measure the Waste Volume of Landfill Facility using 3D Laser Scanner

조성윤*, 이영대*, 류승기**

Sung-Youn Cho, Young-Dae Lee, Seung-Ki Ryu

요약 본 연구에서는 매립장의 체적관리를 위한 체적 모니터링 시스템 구현에 대한 연구에 대해 논의한다. 레이저 로봇 기술에 기반한 삼차원 스캐너를 제작하여 삼차원 물체의 표면에 대한 포인트 클라우드(point cloud)를 이용한 매립장의 쓰레기 체적 감시 시스템을 제안하였다. 이를 통해 연속적으로 매립장의 쓰레기 체적 변화를 감시할 수 있게 되었으며 매립장 수명의 가용한 쓰레기 매립 수명을 예측할 수 있게 되었다. 그리고 완성된 매립장 체적 감시 시스템은 안성시 매립장에 구현되었다.

Abstract Abstract In this paper, we discussed about the volume monitoring system of a landfill facility. We proposed the waste volume calculation method using the point cloud of the surface of three dimensional object by measurement of the point cloud by the three dimensional scanner, which is based upon the robot technique. This computes not only the quantity of waste volume for continuous monitoring but also it helps not only to predict the evaluation factor of the usable age of a landfill facility. Furthermore, the measuring system of waste volume was applied to the landfill facility in Ansong city.

Key Words : Volume Calculation, Camera Calibration, Landfill Facility

1. 서론

환경과 관련하여 '수질', '대기', '토양' 등의 분야는 최신 기술을 적용한 체계적인 관리(환경TMS)가 이루어지고 있는 반면에 폐기물 매립 관리에서는 아직 이렇다 할 과학적인 관리가 이루어지고 있지 않다. 국가 폐기물 매립지 부피 관리의 신뢰성 및 용량 정보의 정확성 필요하다^[1]. 반입폐기물에 대한 무게(톤) 측정과 매립 후 부피(m^3)로 관리하는 계측 단위의 다름으로 인하여 정확하

매립량 통계에 오차가 발생하고 있으며, 매립가능 연한 산정 등에서 정보의 신뢰성이 떨어지는 문제점이 있다^[2]. 주기적으로 반입되는 폐기물을 중량대신 부피로 파악함으로써 폐기물 매립량, 잔여용량, 폐기물 매립위치·시점 등의 매립 진척 상황의 정보를 알 수 있고 특히 폐기물 매립에 관련된 작업내용과 매립 진행상황 등의 정보는 폐기물의 적정한 매립을 위한 관리자료 또는 매립지 사후 부지를 이용할 경우의 기초자료가 되므로 그 기록을 정리하여 보관하는 것이 필요하다^{[3][4][5]}.

*정회원, 안양대학교 디지털멀티미디어학과

**정회원, 한국건설연구원 연구위원

접수일자 : 2013년 5월 3일, 수정완료 : 2013년 6월 3일

게재확정일자 : 2013년 6월 14일

Received: 3 May 2013 / Revised: 3 June 2013 /

Accepted: 14 June 2013

*Corresponding Author: scho@anyang.ac.kr

Dept. of Digital Media, Anyang University, Korea

본 연구에서 개발한 폐기물 매립지 관리 시스템은 매립장의 실시간 운영을 위한 것으로 매립지의 형상을 측정하여 매립물의 총량을 파악함으로써 폐기물의 효율적인 관리를 하기 위함이다.

본 연구의 목적은 외형정보(매립형상정보) 내적정보(시점의 변화에 따른 차이 분석 및 매립용량·체적 정보) 등을 생산하고 표출하기 위한 '3D 매립형상정보 표출 시스템'을 구축하고 또한 3D 매립형상 정보의 정확성을 분석하고 폐기물매립지가 요구하는 정확도의 수준을 만족하도록 '3차원 매립형상정보의 정확도 유지방안 연구'를 수행하는 데 있다.

본 연구에서는 환경 감시를 위한 쓰레기 매립장에서 쓰레기 매립량을 정량적으로 측정하여 쓰레기 매립의 통계를 행하고 매립량을 계획하는 시스템에 대해 연구한다. 삼차원 매립형상정보체계는 매립상황인식 통합플랫폼을 구성하는 한 분야로서 크게 3차원 형상정보 취득과 3차원 매립형상정보 표출기술로 구분할 수 있다.

본 연구 내용은 다음과 같이 기술된다. 먼저 II장에서는 매립량 측정을 위해 개발된 시스템에 대해 논의하며 III장에서는 레이저 로봇 시스템에 대해 알아보고, III장에서는 제시된 알고리즘에 대해 살펴보고 IV장에서는 구현된 시스템에 의한 매립장 체적 계산 예에 대해 알아본다. V장에서는 특정 매립장을 대상으로 실제 실험을 통해 체적계산을 수행한 결과를 살펴보고 VI장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 기술

사물의 삼차원 형상을 파악하는 데 쓰이는 레이저 스캐너는 정밀하고 음영에 구애받지 않는 특징을 가지고

표 1. 레이저 스캐너의 사양비교

Table 1. Comparison of the Specification of Laser Scanners

스캐너항목	Trimble GX	Leica Scanstation 2	Faro LS 880 HE	Z+F Images 5006	개발품
스캔방법	Time-of-flight		Phase difference		Time-of-flight
FOV(Field-of-view)	360x60	360x270	360x320	360x310	360x320
스캔거리[m]	200m	300m	<76m	<79m	1500m
스캔속도	≤ 5000pts/초	≤ 5000pts/초	120kHz	≤ 5000pts/초	≤ 5000pts/초
수직각해상도[도]	0.0017	0.0034	0.00076	0.018	0.0070
수평각해상도[도]	0.0017	0.0034	0.00076	0.018	0.0070
3D스캔정밀도	12mm@100m	6mm@50m	조사안됨	조사안됨	10mm@100m
카메라	있음	있음	옵션	옵션	있음
경사센서	Compensator	Compensator	있음	있음	있음

있는 데 매우 고가인 수입품인 관계로 본 과제에서는 로봇 기술에 기반한 삼차원 레이저 측정 시스템을 개발하여 사용하였다. 시스템의 동작원리는 다음과 같다.

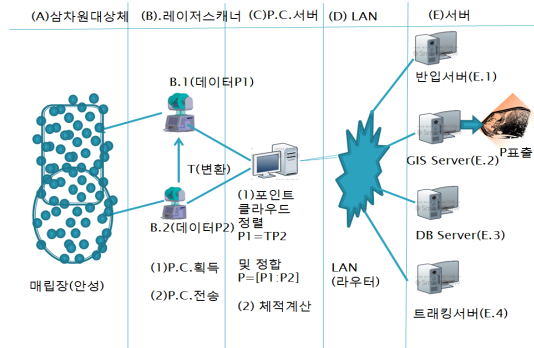


그림 1. 매립장의 쓰레기 매립량 측정을 위한 시스템
Fig. 1. The measurement system of the waste volume in the landfill facility

그림에서 매립장의 매립량 측정을 위한 시스템의 동작은 다음과 같이 이루어진다.

(1) GIS 서버(E.2)에서 주기적으로 매립량 측정을 위한 지시를 하면 (2)이것이 네트워크를 통해 포인트 클라우드 (P.C. : Point Cloud) 서버 (C)로 전송되고 (3) C에서는 레이저 스캐너(B.1와 B.2)에 매립장의 형상 스캐닝 지령을 내려 시작된다. 포인트 클라우드 획득이 스캐너에서 종료되면 데이터를 (C)에 전송하고 (C)에서는 두 포인트 클라우드간의 좌표 변환 T를 행해 정합시킨 후 매립장 형상의 체적을 구한다. 또한 매립장의 체적을 네트워크를 통해 GIS서버 (E.2)에 전송하면 (E.2)에서는 이를 통해 주기적으로 체적값을 DB 서버(E.3)에 기록한다.

III. 레이저 로봇 스캐너

현재 출시되는 레이저 스캐너는 Phase Shift 방식의 스캐너와 Time of Flight 방식의 스캐너가 있으며 외형은 각각 그림 2 및 그림 3과 같다.



그림 2. 위상이동(phase-shift) 기반 방식의 레이저 스캐너
Fig. 2. The laser scanner based on phase-shift



그림 3. Time-of-flight 방식의 스캐너
Fig. 3. The laser scanner based on time-of-flight

본 연구에서 개발하는 삼차원 형상 측정을 위한 레이저 스캐닝 로봇 시스템은 현재 제품이 시장에 나와 있지 않으며 일반적으로 많이 사용되는 1D 레이저 스캐너를 제작될 짐볼(Gymbol) 로봇 메카니즘을 이용하여 이를 제어함으로써 3D 레이저 스캐너로 변환하는 방식으로 이것은 카메라 멀티 측정에 의한 삼차원 영상 취득 방법에 비해 정밀하고 조명에 대해 영향을 받지 않으므로 밤낮에 구분 없이 옥외에서 지형정보 등의 삼차원 형상 측정이 가능한 방법이다.

현재 시판되고 있는 레이저 스캐너들과 본 연구에서 개발한 레이저 스캐너의 사양을 비교하면 표 1과 같다. 전반적인 성능에서 다른 제품들과 유사하며 특히 스캔거리가 크게 제작되는 데, 이는 매립장의 장축거리가 길기 때문에 이 용도에 적합하게 설계되었기 때문이다.

AC 서보모터와 레이저 센서를 장착할 2자유도 시리얼 링크 방식의 매니플레이터의 CAD상예의 설계와 실제 제작된 형태는 각각 그림 3의 좌우와 같다.

Z-Y-X 오일러 각이 주어질 때 x축에 대한 회전이 Yaw이고 y축에 대한 회전이 피치(pitch)이며 z축에 대한 회전이 롤(roll)이다. Z-Y-X 회전의 합성에 의해 계산에 의해 얻어지는 결과적인 회전 행렬은 다음 식 (1)과 같이

표현된다. 여기서는 극좌표(polar) 로봇에서 롤 피치 운동만 행하고 요 운동은 하지 않으므로 그 값은 고정되므로 그림 4와 같은 전형적인 2 자유도 RP(Roll-Pitch)로봇이 된다.

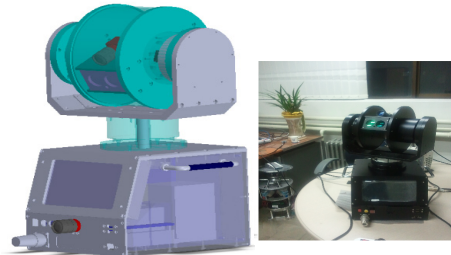


그림 4. 설계된 로봇(좌)와 제작된 로봇(우)의 외형도
Fig. 4. Appearance of the designed robot(left) and the made robot(right)

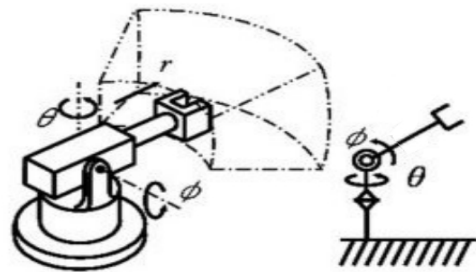


그림 5. 2 자유도 시리얼 RP 로봇, 여기서는 r = 상수
Fig. 5. 2 degree of freedom RP robot, here, r = constant

결과적으로 제작된 로봇의 순기구학 관계는 그림 5와 같은 구조이며 관절각에서 XYZ 좌표계로의 동차변환행렬 (homogeneous transformation matrix)은 식 (1)과 같다.

$$R_A = \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & C_\theta C_\psi S_\psi - S_\theta C_\psi & C_\theta S_\theta C_\psi + S_\theta S_\psi \\ S_\theta C_\psi & S_\theta C_\psi S_\psi + C_\theta C_\psi & S_\theta S_\theta C_\psi - C_\theta S_\psi \\ -S_\theta & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $C \equiv \cos$ 이고 $S \equiv \sin$ 이다.

RP로봇의 위치제어에 사용된 모터는 DD(Direct Drive)모터로 로봇 제어기의 구조는 그림 6과 같다. 예측 제어가 피드백 제어 입력으로 들어가면 그 출력 즉 토크 명령으로 모터를 제어하며 위치 출력을 토크 명령에 피드백하고 또한 피드백 제어기로도 단위 이득 피드백을 하는 구조로 구성되어 있다.

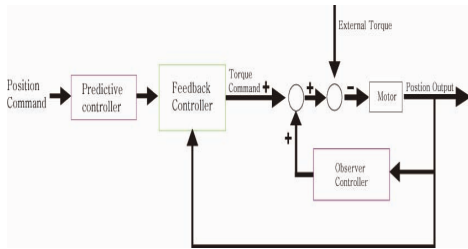


그림 6. DD(Direct Motor) 모터 제어기
Fig. 6. Architecture of the DD motor controller

표 2. 일반 모터와 DD 모터의 특징 비교
Table 2. Comparison of the motor and typical motors

항목	DD 모터	Geared Motors
정도	○ 고정도	X 백래시에 의한 한계
속도	○ 속도	X 저장성에 의한 한계
정도열화	○ 없음	X 기어가 많으면서 열화
유지보수	○ 없음	X 기어의 오일 교환 등
공간절약	○ compact	X 구성부품 많아 공간필요
부하변동	△ 민감	○ 기어에 반비례하여 둔감

DD 모터는 표 2와 같은 특징을 가지고 있다. 백래시가 없으며 속도가 빠르며 정밀하고 유지 보수의 필요성이 없으며 공간을 절약할 수 있는 반면에 부하변동에 민감한 특징을 가지고 있음을 알 수 있다.

IV. 포인트 클라우드 처리

제작된 레이저 로봇 스캐너를 이용하여 삼차원 대상체에 대한 포인트 클라우드를 처리하게 된다. 포인트 클라우드 처리는 그림 7과 같이 하게 된다. 미션을 계획하고 데이터를 획득하면 삼차원 포인트 클라우드 처리를 행하고 체적 계산을 행하게 된다^[9].

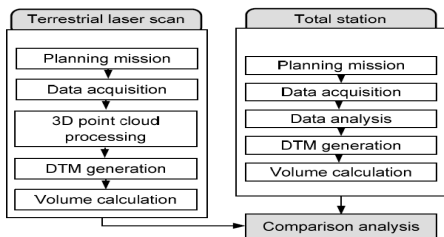


그림 7. 포인트 클라우드의 처리
Fig. 7. The procedure of point cloud processing

V. 구현 결과

그림 8은 표준 PCL(Point Cloud Library)에 대한 것으로 본 논문에서 매립장의 두 지점에서 제작한 레이저 스캐너로 측정된 두 포인트 클라우드 사이의 좌표변환을 위해 ICP(Iterative Closest Algorithm) 라이브러리가 내장되어 있다.

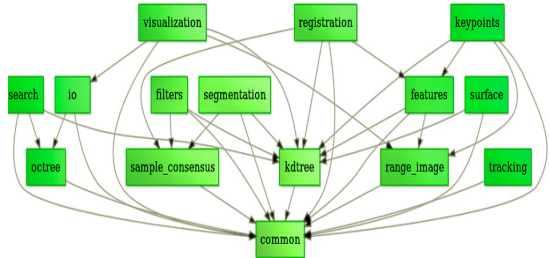


그림 8. PCL의 라이브러리 모음^[6]
Fig. 8. The library set of PCL^[6]

본 논문에서는 표준 ICP를 변형하여 RANSAC과 동적 threshold를 채용한 출력 필터를 탑재하여 사용하였다. 전체적인 변형된 ICP의 구조는 그림 9과 같다.

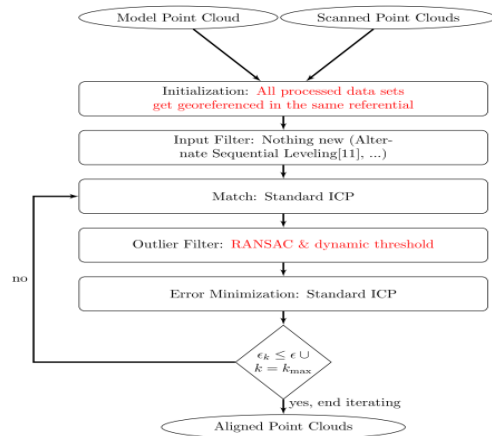


그림 9. PCL에서 사용되는 수정된 ICP 알고리즘의 흐름도
Fig. 9. The flow of the modified ICP used in PCL

그림 10은 안성시 매립장에 대한 포인트 클라우드 획득 결과를 보여준다. (a)안성시 매립장의 전경 사진을 보여주고, (b)와 (c)는 각각 두 지점에서의 레이저 로봇 스캐너에 의한 포인트 클라우드 획득 결과이다. 그림 (d)는 (b)와 (c)의 포인트 클라우드를 병합(merging)한 결과이다

다. 병합은 (b)에서의 음영부분(메이타가 없는 부분)을 반대지점 (c)에서 촬영하여 채우는 방법으로 이루어지며 (b)(c)의 포인트 클라우드 좌표 정렬(align)은 PCL(Point Cloud Library)^[6]의 ICP(Iterative Closest Point)^[7] 라이브러리를 이용하여 행하였다. 결과적으로 두 지점(b)와 (c)사이의 강체 변환 행렬(Rigid Body Transformation Matrix)가 구해지게 된다.

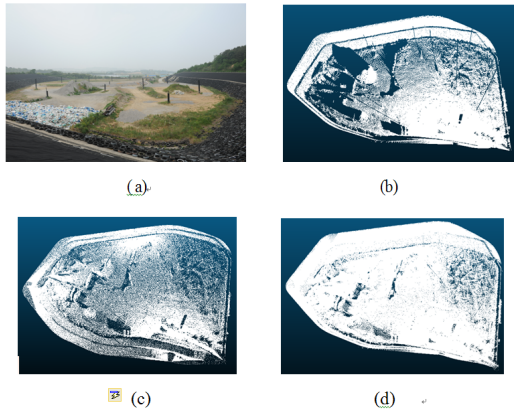


그림 10. 안성시 매립장의 포인트 클라우드 획득 결과
Fig. 10. The results of point cloud of landfill facility in ansung city

VI. 결 론

본 연구에서는 삼차원 물체의 표면에 대한 포인트 클라우드를 측정해 체적을 계산하는 시스템 구현에 대해 기술하였다. 이를 위해 레이저 로봇 스캐너 시스템을 개발하였으며 측정된 포인트 클라우드로부터 체적을 계산하는 시스템의 구현을 제안하였다.

레이저 로봇은 Time of Flight 방식의 일차원 레이저 센서를 시리얼 로봇 매니퓰레이터의 엔드 이펙터(End Effector)에 장착하여 DD(Direct Drive) 모터로 구동되도록 하였으며 PTP(Point to Point)방식으로 모션 제어를 행하도록 하였다.

제시된 시스템은 안성시 매립장에 적용되어 로봇 레이저 스캐너로부터 획득된 포인트 클라우드로부터 주기적으로 체적을 계산하여 매립량을 원격으로 모니터링할 수 있게 되었으며 이를 통해 효율적인 매립장 관리를 할 수 있게 되었다.

References

- [1] Statistics of landfill facilities, Ministry of Environment, 2010
- [2] Research and field measurement of greenhouse gas emission from landfills, Korea Environment Corporation, 2008
- [3] Review of domestic applicability and case studies of domestic and foreign for verification National Greenhouse Gas Emission Factors, 2011
- [4] Waste landfill technologies-based research, SUDOKWON Landfill Site Management Corporation, 2005
- [5] A study on roadmap construction of maintenance project for sustainable landfill, Korea Environment Corporation (Korea Environment & Resources Corporation), 2009
- [6] Radu Bogdan Rusu, Steve Cousins, Willow Garage, "3D is here: Point Cloud Library (PCL)", pointclouds.org
- [7] Rusiniewicz, S. Levoy, M., "Efficient variants of the ICP algorithm, -D Digital Imaging and Modeling", Proc. of the 3rd International Conference on, pp.145-152, 2001
- [8] Fischler, M.A. : Bolles, R.C., "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", Communications of the Association for Computing Machinery, Vol.24, pp.381-395, 1981
- [9] Y.D.Lee, S.Y.Cho, "A Study on the Waste Volume Calculation for Efficient Volume Monitoring in a Landfill Facility", The J. of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication, Vol.12, No.5, pp. 153 -160, 2012
- [10] Do-Kyeong Shin, Eun-Young Ahn "A Method Extracting the Interest Objects from Images using Differences between Frames" J. of Korean Institute of Information Technology, 2013 Summer Conferences, 2013.5, page(s): 411-413
- [11] Donhyung Kim "Image Enhancement Method Using Adaptive Logarithmic Transfer Function" J.

of Korean Institute of Information Technology, Vol.11, No.2, 2013.2, page(s): 185-193

[12] Sung-Hwan Jeong1, Young-Ho Ju, Jong-Tae Lee and Joon-Whoan Lee “Method of Tunnel Incidents Detection Using Background Image” Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 12 pp. 6089-6097, 2012

[13] Sehchan Oh, Yongki Yoon, Jonghyun Baek and Hyunjeong Jo “Train detection in railway platform area using image processing technology” Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 12 pp. 6098-6104, 2012

※ 본 논문은 환경부 환경산업기술원의 차세대 티 사업 연구비 지원-매립지 실시간 계측 및 계량분석-에 의해 수행되었음

저자 소개

조 성 윤(정회원)



- 1987년 2월 : 한양대학교(공학사)
- 1989년 2월 : 한양대학교(공학석사)
- 1989년 2월 : 한양대학교(공학석사)
- 1995년 2월 : Univ. of Wales Cardiff (공학박사)
- 2001년 ~ 현재 : 안양대학교 교수

이 영 대(중신회원)



- 1985년 2월 : 서울대학교(공학사)
- 1987년 2월 : 서울대학교 대학원(공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원(공학박사)
- 1999년 4월 ~ 2009년 3월 : 세명대학교 정보통신학과 교수
- 2012년 ~ 현재 : 안양대학교 교수

류 승 기(정회원)



- 1990년 : 충북대학교 공학사
- 1992년 : 충북대학교 공학석사
- 1999년 : 충북대학교 공학박사
- 1994년 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원