

자동차 부품 형상 결함 탐지를 위한 측정 방법 개발

박홍석^{a*}, 우펜드라 마니 툴라다르^b, 신승철^b

Development of An Inspection Method for Defect Detection on the Surface of Automotive Parts

Hong-Seok Park^{a*}, Upendra Mani Tuladhar^b, Seung-Cheol Shin^b^a Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93, Daehak ro, Nam-gu, Ulsan, 680-706, Republic of Korea^b Mech. and Automotive Eng., Graduate School, Univ. of Ulsan, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	31	March	2013
Revised	10	May	2013
Accepted	14	May	2013

Keywords:

Feature extraction
Inspection system
Laser sensors
Kd-tree
Segmentation
3D point cloud

ABSTRACT

Over the past several years, many studies have been carried out in the field of 3D data inspection systems. Several attempts have been made to improve the quality of manufactured parts. The introduction of laser sensors for inspection has made it possible to acquire data at a remarkably high speed. In this paper, a robust inspection technique for detecting defects in 3D pressed parts using laser-scanned data is proposed. Point cloud data are segmented for the extraction of features. These segmented features are used for shape matching during the localization process. An iterative closest point (ICP) algorithm is used for the localization of the scanned model and CAD model. To achieve a higher accuracy rate, the ICP algorithm is modified and then used for matching. To enhance the speed of the matching process, aKd-tree algorithm is used. Then, the deviation of the scanned points from the CAD model is computed.

1. 서론

제품의 품질 검사 공정은 제조 공정에서 가장 중요한 공정 중의 하나이다. 시장에서의 무결함 제품 요구의 증가로 인해 제조 산업은 우수한 품질 검사 시스템을 도입해야 하는 의무를 가지게 되었다. 이에 따라 품질 검사 시스템의 수요는 급격히 증가하였다.

또한 제조 기술의 발전으로 우수한 성능을 낼 수 있도록 하는 복잡한 형상을 가지는 제품을 생산할 수 있게 되었다. 이러한 제조 기술의 발전에 따라 복잡한 형상을 가지는 제품에 대한 품질 검사 시스템의 개발이 요구되고 있다.

최근 몇 년간 품질 검사 시스템 개발에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 특히 CMM (Coordinate Measuring Machine) 장비와 3차원 레이저 스캐너는 품질 검사 시스템 분야에서 널리 사용되고 있다^[1]. 이러한 장비들은 자유 형상 표면의 측정과 비전 센서를 이용한 비교 과정에 있어 높은 정확성을 보이지만, 레이저 스캐너와 비교하여 상대적으로 느린 측정 속도를 보인다^[2].

또한 비접촉식 시각적 장비들을 이용한 검사 시 자유 형상 표면 비교를 위한 레지스트레이션을 위하여 다양한 기술들이 연구되었다. Marshall과 Martin은 밀도 범위 데이터를 이용하여 전체 기하학적 특징을 검사하는 시스템을 연구했으며, 이 시스템은 평면, 원

* Corresponding author. Tel.: +82-52-259-2294

Fax: +82-52-259-1068

E-mail address: phosk@ulsan.ac.kr (Hong-Seok Park).

통, 그리고 구의 형태를 가지는 물체를 검사했으나 대응 관계 분석을 위해 측정 대상품과 설계 모델의 평면만을 사용하였다^[3]. Prieto 등에 제안된 방법은 일반적인 기계 부품의 시각적 검사를 수행하여 측정 표면과 그들의 CAD 모델과의 비교를 실시했다. 대응 관계는 수정된 ICP (Iterative Closest Point) 프로세스로부터 수집되었으며, 수집된 포인트 클라우드와 CAD 모델의 곡률 값의 거리 차이에 기반 하였다^[4]. Pottmann, Wallner, 그리고 Leopoldseder는 레이저 스캐닝으로 수집되어진 3차원 포인트 클라우드 데이터의 국부화를 통해 CAD 모델과 비교를 실행하여 표면 검사를 수행하였다^[5].

그리고 메쉬 및 포인트 클라우드의 세그멘테이션은 형상의 단순화, 압축, 인식 및 해석과 같은 다양한 분야에서 응용되어져왔으며^[8], 적용된 컴퓨터 비전 종류에 따라 총 곡률에 따른 표면 세그멘테이션의 방식을 다르게 나타내어졌다^[9]. 그리고 레이저 시각 센서 데이터의 화상처리를 이용하여 실시간 품질 평가 방법이 소개되어졌으며^[10], 평균 이동 알고리즘을 이용한 표면 세그멘테이션, 계층 표면 클러스터링이 소개되어져 왔다^[11].

CAD 메쉬 모델과 포인트 클라우드와의 매칭 작업은 CAD 모델에 근접한 다각형 메쉬로부터 3D 모델을 추출하여 실행 한다. Thompson 등에 의해 가공품으로부터 표면 정보와 가공 특징 등의 다양한 데이터를 수집하는 리버스 엔지니어링이 연구되었다^[12]. Osada 등의 방법은 모델의 형상함수로부터 표본 확률 분포를 이용하여 가상의 3D 모델을 생성하였다^[13]. Novotni와 Klein은 3D Zernike descriptors를 증명하였으며^[14], Kazhdan 등은 spherical harmonics를 적용하여 3D 모델을 비교하였다^[15].

한편 일반적인 3D 모델을 목표로 한 기술들은 CAD 모델의 형상과 형상함수와의 비교에 주안점을 두고 있다^[16-17]. Iyer 등에 의해 형상, 3D 화소 및 다른 접근 방식을 기반으로 하는 CAD 지향 검색 시스템이 발표되었다^[18]. Pal 등은 유전 알고리즘을 이용하여 CAD 모델의 특징을 추출하였다^[19]. Cardone 등은 가공 특징들을 이용하여 프리즘 가공품을 비교하였다^[20].

본 논문에서는 자동차 부품의 형상 품질 검사 시스템 개발을 위해 기존의 CAD 데이터와 레이저 스캔 시스템으로부터 수집되어진 포인트 클라우드 데이터를 매칭 시키는 과정에 주안점을 둔다.

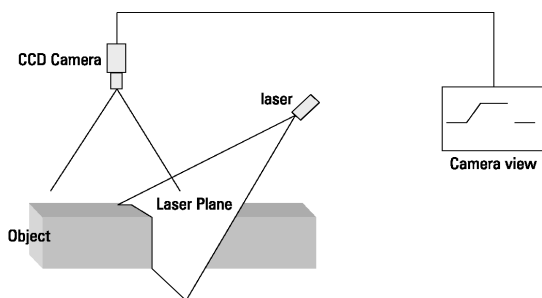


Fig. 1 Triangulation based laser measurement mechanism

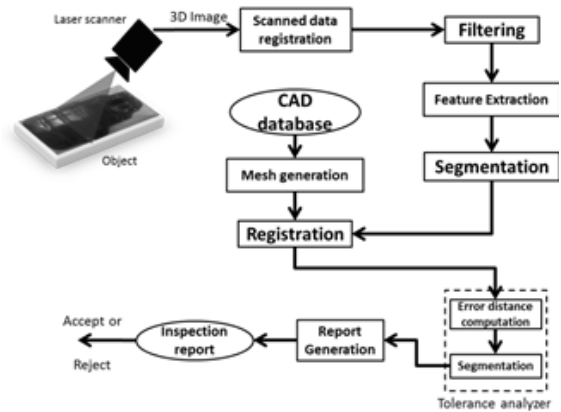


Fig. 2 Block diagram of the inspection system

또한 품질을 검사하기 위하여 수집되어진 가공되지 않은 포인트 클라우드 데이터의 자동 처리를 위한 기술을 제안한다.

2. 측정 프로세스

본 논문의 최종 목표는 측정 대상품으로부터 수집되어진 포인트 클라우드의 여러 부분으로부터 완전한 3차원 포인트 클라우드를 획득하여 기존의 CAD 모델과 비교하는 것이다. 포인트 클라우드와 CAD 모델과의 매칭 작업을 위한 전체적인 프로세스는 몇 단계로 수행된다. 스캔되어진 표면은 3D 포인트로 표현되어지기 때문에 이를 세그멘테이션 하기 위하여 각 표면들에 대하여 구분해야 한다. 그리고 두 데이터를 매칭 시키기 위하여 각각의 좌표계를 레지스트레이션 과정을 통해 하나의 좌표계로 변환해야 한다. 하나의 좌표계에 놓여진 두 데이터로부터 전체적인 기하학적 형상의 특징을 나타내는 일부 표면들에 대하여 CAD 모델과 포인트 클라우드 간의 표면 매칭을 실행한다. 이러한 전체적인 프로세스는 Fig. 2와 같다.

3. 측정을 위한 알고리즘 개발

3.1 Segmentation (세그멘테이션)

Segmentation의 목적은 각각의 포인트 클라우드 데이터의 법선 방향을 기반으로 하여 각기 다른 특징의 표면들을 분류하기 위하여 채택되었다. 이 방법은 먼저 각 포인트 클라우드 데이터들의 점선 방향을 이용하여 각기 다른 표면들 사이의 모서리를 탐지하며, 이 모서리를 이용하여 표면을 추출한다. 이 알고리즘은 하나의 표면에 위치한 임의의 포인트 클라우드 데이터를 선택하여 세그멘테이션을 실행하며 이웃한 포인트 클라우드 데이터들에 대해서 확장시켜 나간다. 이 과정은 포인트 클라우드 데이터의 법선 방향이 달라지

는 부분을 탐지될 때까지 실행하여 표면을 추출 및 분류하게 된다. 이러한 과정들은 모든 표면들을 추출할 때까지 반복하게 되며 Fig. 3과 같다.

3.2 Registration (레지스트레이션)

대상품의 측정은 측정 시스템의 좌표계와의 상대적인 비교를 통해 이루어지며, CAD 모델은 설계되어 있는 좌표계의 임의의 좌표 프레임 상에서 상대적인 비교를 통해 정의되어 진다. 이는 두 좌표계 사이의 대응 관계를 구축하기 위해 필요한 과정이며 이러한 과정을 레지스트레이션(Registration)이라고 한다.

본 논문에서 레지스트레이션 과정을 위하여 측정된 표면과 CAD 모델과의 대응 관계 구축을 위하여 수정된 ICP (Iterative Closest Point) 프로세스 사용을 제안한다. 수정된 ICP 프로세스는 잠재적인 대응점들과 이 점들의 법선 방향에 위치한 점들과의 거리를 계산한 결과를 기반으로 대응점들을 선택한다.

Besl, P.J.와 Mackay에 의해 제안된 ICP 알고리즘¹⁶⁾은 이미 잘 알려진 알고리즘이며 단순함으로 인해 이미지들의 각각의 부분들의 레지스트레이션뿐만 아니라 스캔되어진 이미지와 CAD 모델과의 레지스트레이션을 위해 널리 사용되어지고 있다. 이 알고리즘은 두 개의 표면에서 가장 가까운 점들을 찾아내고 표면들 사이의 평균 거리 오차를 계산하여 두 개의 다른 표면을 기록한다.

Fig. 6은 모델 데이터 M 과 스캔으로 수집되어진 포인트 클라우드 데이터 S 를 나타내었다.

다음 식 (1)을 가정하고,

$$N_M = N_S \tag{1}$$

각각의 점 s_i 는 m_i 에 대응되며, MSE (Mean Squared Error) 함수는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$f(R, T) = \frac{1}{N_S} \sum_{s_i=1}^{N_S} \| m_i - Rot(s_i) - Trans \|^2 \tag{2}$$

정렬 함수는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$(rot, trans, d_{mse}) = \Phi(M, S) \tag{3}$$

이 알고리즘은 두 표면의 점과 점 사이의 오차 거리를 계산하는 것이기 때문에 다음과 같은 몇 가지 단점들이 존재한다. 첫 번째, 정확한 대응점들을 알아야만 이에 대한 정확한 병진 및 회전 값을 찾을 수 있다. 두 번째, 만약 시작점의 위치가 충분히 가깝지 않다면 정확한 정렬 함수를 찾기가 어렵다. 세 번째, 국부적으로 매칭이 된 후 다른 부분이 고정되어 버리는 문제점이 발생한다.

이러한 단점들 때문에 본 논문에서는 스캔되어진 포인트 클라우드 데이터들과 CAD 모델의 표면과의 자동적인 레지스트레이션을 위해 개선된 ICP 알고리즘¹²⁾을 제안하고자 한다.

수정된 알고리즘의 MSE 함수는 식 (4)와 같다.

$$f(R, T) = \frac{1}{N_S} \sum_{s_i=1}^{N_S} (\| m_i - Rot(s_i) - Trans \|^2 + \lambda \| n_{mi} - Rot(n_{si}) - Trans \|^2) \tag{4}$$

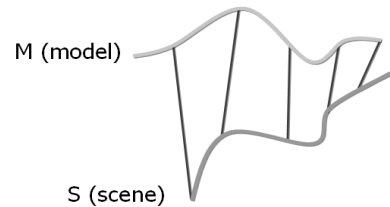


Fig. 4 Model point set and scanned object point set

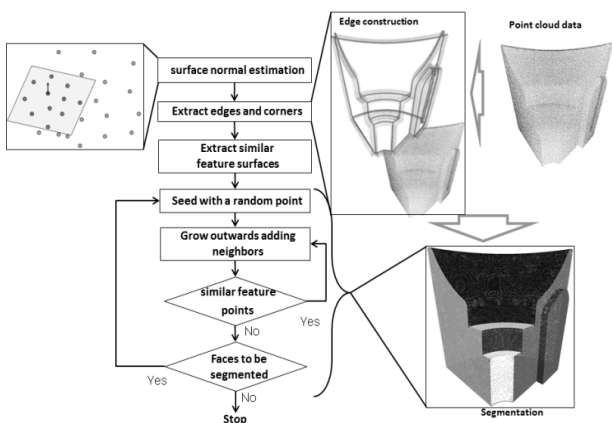


Fig. 3 Representation of the region growing algorithm

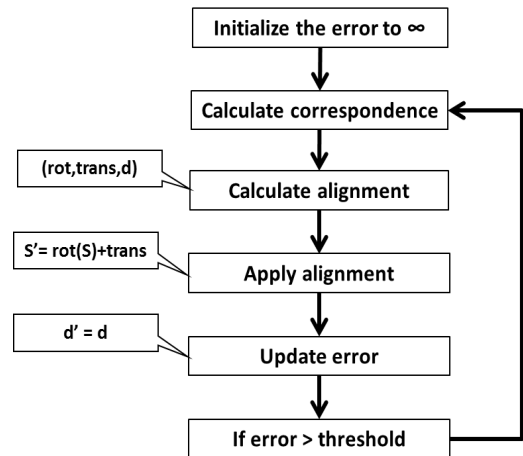


Fig. 5 Representation of ICP algorithm

식 (4)에서 $\|n_{mi} - Rot(n_{s_i}) - Trans\|^2$ 은 점 m_i 의 법선방향으로 표면 S 에 대응되는 점까지의 거리이며, λ 는 대응점들 간의 거리의 차이에 대한 가중치 계수이다.

3.3 Finding corresponding points

본 논문에서는 가까운 포인트의 검색 속도를 향상시키기 위하여 kd-tree 알고리즘을 추가하였다. ICP 알고리즘의 단순함으로 인해 대응점 검색의 보다 빠른 속도 구현을 위한 kd-tree 알고리즘 적용이 용이하다. kd-tree 알고리즘은 포인트를 구조화하기 위한 공간 분할 자료 구조이다. 이는 포인트의 존재 여부를 효율적으로 검색하며 hyper-dimensional의 직사각형 영역 내부에서 가장 가까운 이웃한 포인트를 검색하는데 사용할 수 있다.

포인트 클라우드 데이터와 CAD 메쉬의 다양한 부분들은 세그멘테이션 프로세스로부터 획득되어지며, 각 포인트 클라우드의 부분들은 표면 구역별로 정렬되어 CAD 메쉬 모델의 부분들과 매칭되어진다. 일반적으로 스캔되어진 N_s 데이터들과 CAD 모델의 N_M 데이터들은 하나의 가까운 포인트 검색하기 위한 complexity는 $O(N_s N_M)$ 이지만, kd-tree를 적용하면 가까운 포인트 검색의 평균 complexity는 $O(N_s \log N_M)$ 로 감소한다. kd-tree를 이용하여 가까운 포인트 검색을 위한 계산을 수행하는 것은 이진 트리를 이용하여 계산을 수행하는 방식을 개선한 것이며, 트리의 각 노드들은 가까운 포인트가 초평면에 포함되는지 여부를 결정한다. 이 방식을 이용하면 검색하고자 하는 평면의 넓은 영역에 대해서 포인트가 포함되지 않는 평면을 제거하여 빠른 속도로 수행하기 위한 보다 효율적인 검색을 수행한다.

정합 알고리즘 기반 kd-tree에서 임의의 데이터 포인트 s_i 는 CAD 모델 데이터의 꼭지점 V_i 이다. CAD 모델 데이터는 삼각형 메쉬 표면으로 표현되기 때문에 데이터 포인트의 대응점을 검색하기 위한 계산의 추가적인 절차가 요구된다. 메쉬 모델의 포인트 m_i 는 가장 가까운 꼭지점으로 주어지며 삼각형의 내부에 있거나 경계, 또는 꼭지점 중의 하나이다. 그러므로 정확한 모델 포인트 m_i 를 정의하기 위해 삼각형 평면 위로 s_i 를 투영시켜야 한다. 투영된 포인트들의 결과물은 주어진 삼각형의 내부 또는 외부에 있게 된

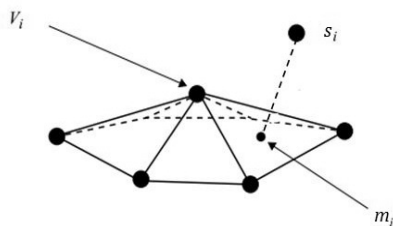


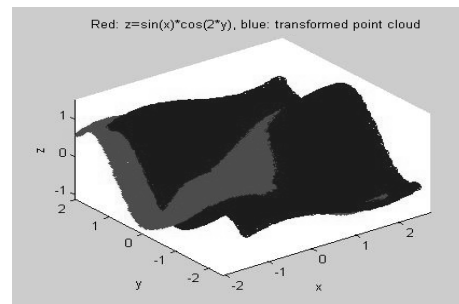
Fig. 6 Projection of point s_i on mesh surface to find closest surface point m_i

다. 이러한 각 삼각형들은 투영된 포인트 m_i 가 삼각형 내부에 존재한다면 두 포인트 s_i 와 m_i 의 거리를 계산하게 되며, 삼각형 외부에 존재한다면 s_i 와 삼각형의 가장 가까운 모서리까지의 거리를 계산한다.

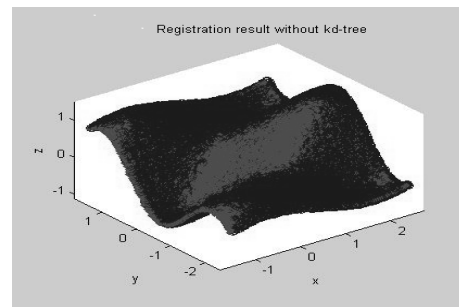
4. 실험 및 결과

Matlab을 이용하여 kd-tree를 적용한 ICP 알고리즘과 kd-tree를 적용하지 않은 ICP 알고리즘간의 레지스트레이션의 소요시간을 비교하였다. 다음과 같이 3차원 표면으로 나타내어진 포인트 클라우드를 만든 후 변환 행렬을 이용하여 병진 및 회전변환을 실시한다. Fig. 7은 포인트 클라우드에 kd-tree를 적용하지 않은 일반적인 ICP 알고리즘을 이용하여 레지스트레이션 실행 결과이며, Fig. 8은 kd-tree를 적용한 ICP 알고리즘을 이용하여 레지스트레이션을 실행한 결과이다.

Kd-tree 알고리즘의 적용 유무에 따른 레지스트레이션 시뮬레이션 비교를 위해 Fig. 7과 Fig. 8에 동일한 3D를 사용하였다. Fig. 7과 Fig. 8의 (a)는 레지스트레이션 이전의 포인트 클라우드의 표면이며, (b)는 kd-tree를 적용 및 미적용한 ICP 알고리즘을 이용하여 레지스트레이션을 실행한 결과이다. Fig. 7의 (b)에서 모델이 균일하게 겹쳐져 있지 않는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 8의 (b)에서는 보다 균일하게 겹쳐져 있어 kd-tree 알고리즘을 적용한 결과

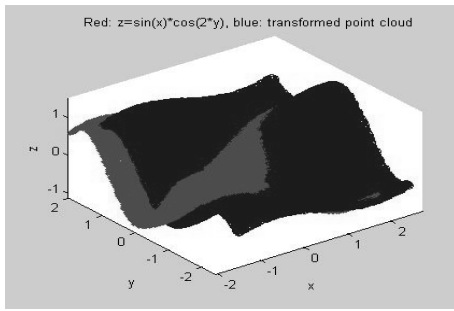


(a)

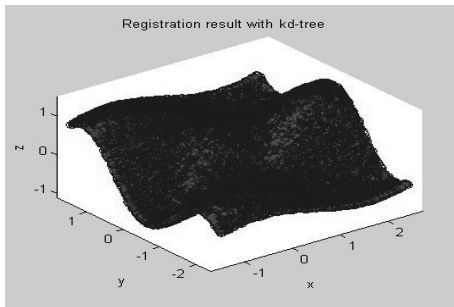


(b)

Fig. 7 (a) Initial position of surfaces (b) Registration result without kd-tree

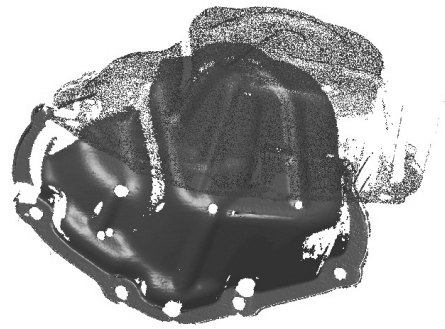


(a)

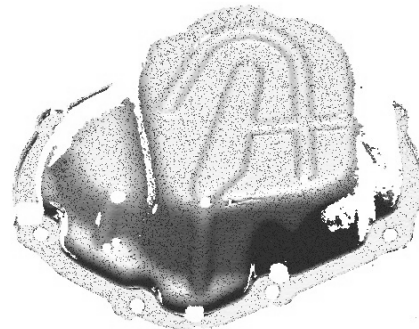


(b)

Fig. 8 (a) Initial position of surfaces (b) Registration result using kd-tree

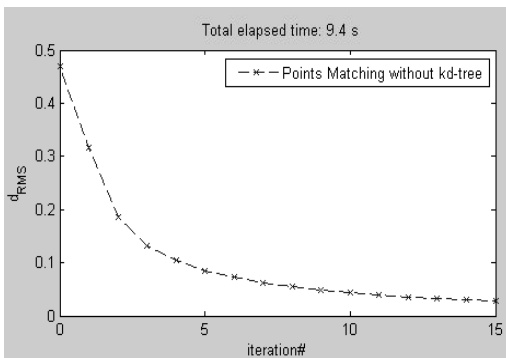


(a)

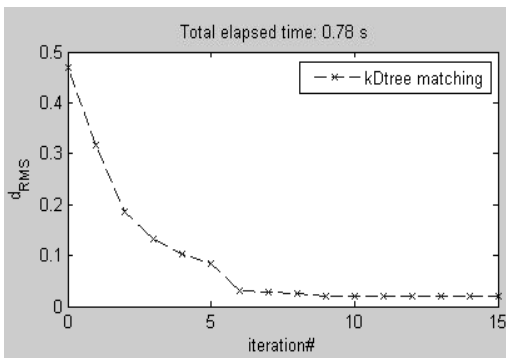


(b)

Fig. 10 (a) Initial position of CAD model and point cloud model (b) Alignment of CAD Model and point cloud



(a)



(b)

Fig. 9 (a) dRMS Vs. iteration # graph for registration with out kd-tree algorithm (b) dRMS Vs. iteration # graph for registration with kd-tree algorithm

의 에러 값이 더 작은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9은 kd-tree 알고리즘의 유무에 따른 15회 레지스트레이션 반복횟수 동안의 총 소요 시간과 에러 값을 나타내고 있다. kd-tree 알고리즘이 미적용된 (a)의 경우 반복횟수 15회 만에 최소 에러 값에 도달하였으며, kd-tree 알고리즘이 적용된 (b)의 경우 10회 만에 최소 에러 값에 도달하였다.

또한 Matlab을 이용하여 레지스트레이션 과정동안 소요 시간을 계산한 결과 kd-tree를 적용하지 않은 알고리즘의 경우 9.4초가 소요되었으며, kd-tree를 적용한 알고리즘의 경우 반복횟수 6회 만에 (a)와 비슷한 결과를 도출하였을 뿐만 아니라 15회 동안 소요 시간이 0.78초로 현저하게 감소한 것을 확인하였다.

그리고 레지스트레이션 알고리즘을 적용하여 실제 자동차 프레스 가공품에 대하여 테스트를 실행하였다. Fig. 10의 (a)는 CAD 모델과 포인트 클라우드 모델의 초기 위치를 나타내며 (b)는 레지스트레이션 알고리즘을 적용하여 CAD 모델과 포인트 클라우드 간의 매칭 작업 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 레이저 스캔으로 수집되어진 포인트 클라우드 데

이터를 이용한 세그멘테이션, kd-tree를 적용하여 수정된 ICP 알고리즘을 이용한 레지스트레이션, 이를 통하여 자동차 부품 형상 결함 탐지를 위한 측정 기술을 제안하였다. 제안되어진 기술은 다음과 같은 특성을 가진다.

- (1) 포인트 클라우드 데이터의 세그멘테이션을 할 수 있으며 이를 통해 복잡한 표면 형상으로부터 특징들을 추출할 수 있다.
- (2) 추출된 특징들을 이용하여 포인트 클라우드 데이터와 CAD 모델을 매칭 시킬 수 있으며 하나의 좌표계로 일치시켜 두 데이터 간의 비교 과정을 보다 쉽게 할 수 있다.
- (3) 스캔되어진 오차 수준을 계산하여 표면의 포인트 간의 거리를 계산할 수 있다.
- (4) 계산된 결과들을 디스플레이할 수 있으며 이를 통해 결함을 식별할 수 있는 정확한 결정을 내릴 수 있다.

제안된 기술은 스캔되어진 데이터와 CAD 모델 간의 오류를 최소화하는 보다 정확한 매칭 과정을 가능하게 하며, 자동차 부품의 형상 표면을 탐지함에 있어 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있다. 뿐만 아니라 대용량의 데이터 처리 속도를 향상 시킬 수 있으며, 측정에 소요되는 시간을 최소화함으로써 생산성 향상을 위한 기여를 할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 울산광역시와 교육과학기술부에 의해 투자된 울산과학연구단지 연구개발의 지원으로 수행하였습니다.

References

- [1] Park, H. S., Tuladhar, U. M., 2013, Development of a failure inspection system for oil pan using 3D laser scanned data, Proc. of the Society of CAD/CAM Conference, South Korea.
- [2] Chang, M., Lin P. P., 1999, On-line free form surface measurement via a fuzzy-logic controlled scanning probe, Int. J. Machine Tools and Manufacture, 39 539-552.
- [3] Marshall, A.D., Martin, R.R., Hutber, D., 1991, Automatic inspection of mechanical parts using geometric models and laser range finder data, Image and Vision Computing, 9 385-405.
- [4] Prieto F., Redarce T., Lepage, R., Boulanger P., 2002, An automated inspection system, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19 917-925.
- [5] Pottmann, H., Wallner, J., Leopoldseder, S., 2001, Kinematical methods for the classification, reconstruction and inspection of surfaces, Proc. of SMAI 2001, Pompadour, France.
- [6] Besl, P. J., McKay, N. D., 1992, A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14 239-256.
- [7] Yadong, L., Piehua, G., 2006, Automatic Localization and Comparison for Free-Form Surface Inspection, Journal of Manufacturing Systems (SME), 25 251-268.
- [8] Mangan, A. P., Whitaker, R. T., 1999, Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5 308-321.
- [9] Attene, M., Katz, S., Mortara, M., Patane, G., Spagnuolo, M., Tal, A., 2006, Mesh Segmentation - A Comparative Study, Proc. of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications, Japan.
- [10] Lee, J. B., Koh, B. K., 2007, Application of Image Processing on the Laser Welded Defects Estimation, Korean society of Machine Tool Engineers, 16 22-28.
- [11] Garland, M., Willmott, A., Heckbert, P., 2001, Hierarchical Face Clustering on Polygonal Surfaces, Proc. of the 2001 symposium on Interactive 3D Graphics, 49-58.
- [12] Thompson, WB., Owen, J., de St. Germain, H., Jr. Stark, S., Henderson, T., 1999, Feature-based reverse engineering of mechanical parts, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12:1 57-66.
- [13] Osada, R., Funkhouser, T., Chazelle, B., Dobkin, D., 2002, Shape distributions, ACM Transactions on Graphics ACM Transactions on Graphics, 21:4 807-832.
- [14] Novotni, M., Klein, R., 2004, Shape retrieval using 3d zernike descriptors, Computer Aided Design, 36:11 1047-1062.
- [15] Kazhdan, M., Funkhouser, T., Rusinkiewicz, S., 2003, Rotation invariant spherical harmonic representation of 3d shape descriptors, Symposium on Geometry Processing, 156-164.
- [16] Ip, C. Y., Lapadat, D., Sieger, L., Regli, W. C., 2002, Using shape distribution to compare solid models, Symposium on Solid Modeling and Applications.
- [17] Ip, C. Y., Sieger, L., Regli, W. C., 2003, Automated learning of model classifications, Symposium on Solid Modeling and Applications.
- [18] Iyer, N., Jayanti, S., Lou, K., Kalyanaraman, Y., Ramani, K., 2005, Shape-based searching for product lifecycle application Computer Aided Design, 37:13 1435-1446.
- [19] Pal, P., Tigga, A., Kumar, A., 2005, Feature extraction from large cad databases using genetic algorithm, Computer Aided Design, 37:5 545-558.
- [20] Cardone, A., Gupta, S.K., Deshmukh, A., Karnik, K., 2006, Machining

feature-based similarity assessment algorithms for prismatic machined parts, *Computer Aided Design*, 38:9 954-972.

- [21] Daniel, M., Benoit, C., Sylvain, P., 2010, A modified ICP algorithm for normal-guided surface registration, *Proceeding of SPIE 7623 76231A-2*, USA.
- [22] Frederick, P., Micheal, B., Robert, Z., 2009, Automatic Segmentation of 3D Laser Point Clouds by Ellipsoidal Region Growing, *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*.
- [23] David, A.S., 1996, Fast and Accurate Shape-Based Registration, A Thesis for a Doctorate, *Carnegie Mellon University, United States of America*.