

광삼각법 측정 원리를 이용한 금석문 가독성 향상 방법*

이근호** · 고선우** · 최원호***

A Technique to Improve the Readability of Ancient Inscription by Using Optical Triangulation Measurement Principle*

Geun-Ho Lee** · Sun-Woo Ko** · Won-Ho Choi***

■ Abstract ■

In epigraph field to study ancient scripts, alternative readability improvement technologies have been developed to replace existing rubbing method which has low resolution and causes surface pollution of heritages from the viewpoints of extraction process and used materials. Recently many methods which are based on analysis of pixel data for extracting outlines of the specific image have been developed with advancement of image processing techniques. But these methods are not applicable and the results are not satisfied in the damaged inscriptions which are weathered by wind and rain for a long time and in the narrowed one. In this paper laser scanning techniques which uses optical triangulation measurement principle are developed to minimize scanning error. The proposed techniques are consisted of 3 parts : (1) the understanding of optical triangulation measurement principle to find scanning guideline (2) determinations of points interval, scanning distance and scanning angle to guarantee scanning data quality (3) identification of valid point data area which will be used in registration process. The proposed character identification method contributed in decoding an ancient inscription on SeukBingGo in Kyungju.

Keyword : Ancient Inscription, Readability, Optical Triangulation Measurement, Resolution

논문투고일 : 2012년 09월 14일

논문수정완료일 : 2012년 10월 26일

논문게재확정일 : 2012년 11월 18일

* 본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2012년도 콘텐츠 산업기술지원사업의 연구결과로 수행되었음.

** 전주대학교 스마트미디어학부

*** 인하대학교 융합고고학과

1. 서 론

금석문이란 철이나 청동 같은 금속성 재료와 비석처럼 석재에 기록한 문장을 말한다. 금석문은 문헌에 비해 원본이 오래 보존된다는 특징 때문에 20세기 이래로 역사연구에서 보조과학으로서의 중요성을 인정받고 있다. 고대 문헌이 풍부하지 못한 우리나라의 경우 금석학은 한결 중요하게 평가받고 있다[5]. 금석학연구에 널리 사용되어 온 탁본은 문자나 문양이 새겨져 있는 금석각 표면에 종이를 밀착시킨 후 먹물을 문헌 문진을 두드려서 상대적 음각 또는 양각정보를 종이에 묻어 나오도록 하는 본뜨기 작업이다. 하지만 탁본은 작업자에 따라 품질에 큰 차이가 존재할 뿐 아니라 문화재 오염의 문제로 탁본이 금지됨에 따라 대체기술 개발이 필요한 상황이다. 최근에 문화재 연구에 IT기술이 적용되는 사례가 늘어나면서 금석문 연구에서도 이미지프로세싱 기술 및 3차원 측정 방법이 적용되고 있다.

본 논문은 광삼각 3차원 레이저스캐닝 방법을 이용한 금석문의 판독에 필요한 스캐닝 기법과 그 기준을 제시하였다. 제안된 방법은 그동안 판독 불가능[6]으로 분류되어 있던 경주석빙고비의 판독에 적용하여 금석문 연구에 기여하였다.

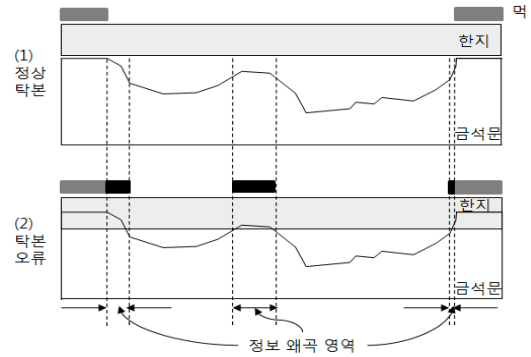
2. 관련 연구

2.1 탁본에 의한 판독

탁본의 주 재료로 사용되는 한지를 구성하는 나무 인피섬유는 물에 함침 되었을 때 닥섬유 사이의 공간이 균일하지 않아 타원형의 먹피집이 발생한다는 것이 알려져 있다[3]. 이러한 현상은 탁본에 표출된 문자나 도형의 크기가 실제 금석문의 크기보다 확대될 수 있음을 의미하며 미세한 폭의 문자 및 형상에 대한 정보 추출에 한계가 있음을 의미한다.

또한 탁본을 위해 문진을 두드릴 때 필요 이상

의 강한 힘이 가해지거나 전체 면에 대한 힘이 균일하지 않을 때 [그림 1]과 같이 탁본시 오류가 발생한다.



[그림 1] 탁본의 오류의 예

2.2 2차원 영상분석에 의한 판독

금석문의 2차원 영상분석 방법은 탁본을 디지털 영상화한 후 이 영상을 여러 개의 픽셀 집합으로 나누는 영상분할을 통해 금석문에 담겨진 문자 및 도형 이미지를 추출하는 방법을 사용하는 것이다.

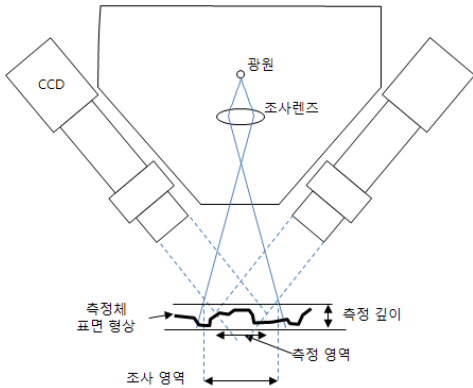
영상분할을 위해 스레쉬홀딩 기술에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Sankur 등은 영상을 스레쉬홀딩할 때 이용하는 정보에 따라 6가지(스레쉬홀딩 방법과 히스토그램 이용방법, 측정공간의 근집화에 의한 방법, 엔트로피 이용방법, 객체의 속성 이용방법, 공간 상관에 의한 방법, 국부적 회색표면을 이용하는 방법)로 분류하였다[8].

영상분석 방법은 많은 경우에 문자 및 도형 판독에 유용한 방법이지만 각자된 영역이 좁고 깊거나 각자된 문자 부분과 바탕부분의 색이 명확히 구별되지 않는 경우, 풍화 등에 의해 금석각 자체가 심하게 훼손된 경우, 금석각의 표면 요철 등으로 탁본에 많은 노이즈가 개입되는 경우 등에 판독력이 저하되는 문제를 가지고 있다.

2.3 3차원 입체분석을 이용한 판독 연구

3차원 입체분석을 이용한 금석문 판독 연구로는

존스홉킨스대학이 수행한 디지털 함무라비 프로젝트가 있다. 이 연구에서는 진흙덩이 위에 표현된 스펀의 썬기문자를 판독하기 위해 [그림 2]에 제시된 Fringe Projection 방법을 사용하였다[7].



[그림 2] Fringe Projection 측정방식

국내의 연구로는 마모된 팔만대장경판에 각자된 문자를 복원하기 위하여 이동형 3차원 레이저스캐너를 이용하여 경판을 정밀 3D 스캐닝한 후 Z-map과 모폴로지 필터를 이용한 방법[2]과 부분 마모등으로 판독이 어려운 문자의 추측 능력 향상을 위해 금석문을 3D 스캐닝하여 획득된 3차원 데이터의 깊이 정보를 인위적으로 증폭하여 판독력을 높이는 연구가 진행되었다[1].

Fringe Projection 방법은 매우 정밀한 3D 데이터의 획득이 가능하다는 장점이 있으나 측정에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 측정대상체의 크기 제한이 있다는 문제점을 가지고 있다. 또한 Z-Map을 사용한 사례의 경우 마모된 각자와 동일한 각자가 팔만대장경 내에 존재한다는 가정을 하고 있어 일반적으로 사용할 수 없다. 깊이 정보를 증폭하는 방법은 금석문의 특정 문자를 추측하기 위한 방법으로 획득된 데이터를 인위적으로 왜곡한다는 점에서 일반적으로 작용하기에는 한계가 있는 방법이다.

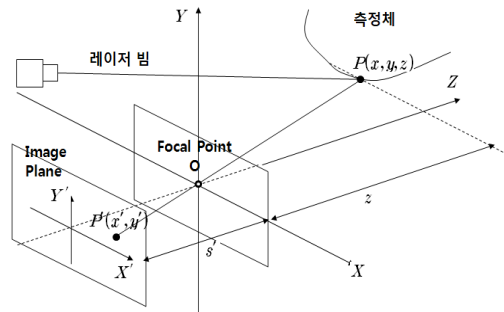
본 연구에서는 문화재 정밀 형상 측정에 널리 사용되고 있는 이동형 3차원 측정장비 중 레이저

광원과 CCD 카메라를 이용한 광삼각 측정방법에서의 3차원 좌표정보를 도출하고 금석문의 데이터 확보과정인 스캔단계에서 측정데이터 품질을 보장하기 위한 스캔 시준을 제시한다.

3. 3차원 데이터의 깊이 정보에 의한 판독

3.1 측정체의 3차원 형상 좌표

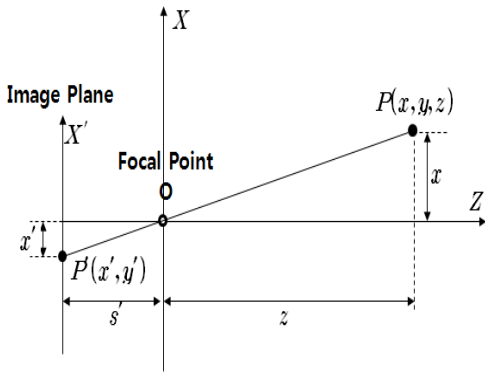
광삼각 레이저측정장치의 기본 원리는 [그림 3]에서와 같이 측정체의 표면에 조사된 레이저 Spot Point $P(x, y, z)$ 에 대해, 레이저 빔축과 일정 각도로 기울어져 설치된 카메라의 영상렌즈를 통과하여 CCD에 맺힌 상 $P'(x', y')$ 의 좌표정보와 레이저 빔과 카메라의 기하학적 관계를 이용하여 $P(x, y, z)$ 의 좌표정보를 추출하는 것이다.



[그림 3] 광삼각 레이저 측정원리

[그림 3]에서 측정체 상의 임의의 점 $P(x, y, z)$ 는 측정하고자하는 실물 좌표계 (X, Y, Z) 의 한 점이고 $P'(x', y')$ 는 카메라 영상이 포착되는 평면좌표계 (X', Y') 좌표계의 한 점이다. 카메라의 광학축과 깊이 방향의 Z축을 일치시키고 렌즈의 Focal Point를 실물좌표계의 원점으로 정하면 s' 는 렌즈에서 카메라 영상면까지의 거리이고 z 는 렌즈에서 측정점 P까지의 깊이가 된다.

$P(x, y, z)$ 의 각 좌표값을 구하기 위해 [그림 5]를 Y축 방향으로 투영하면 [그림 4]를 얻을 수 있다.



[그림 4] x 와 x' 과의 관계

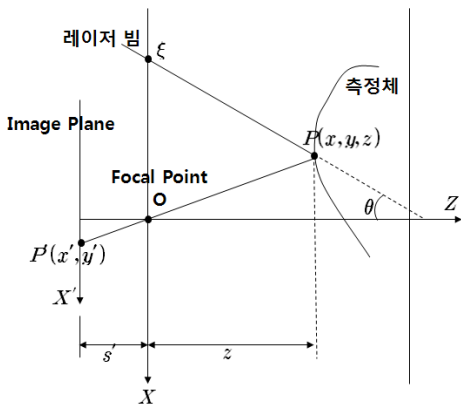
[그림 4]에서 $z : x = s' : x'$ 이 성립하여

$$x = \frac{z}{s'}x' \tag{1}$$

같은 방법으로 $z : y = s' : y'$ 이 성립하여

$$y = \frac{z}{s'}y' \tag{2}$$

[그림 4]에 레이저 빔의 방향 축과 광학축과 형성하는 각도 θ 를 고려하면 [그림 5]와 같다.



[그림 5] 슬릿광 주사방법의 3차원 좌표 추출

[그림 5]의 $P(x, y, z)$ 에서 X 축에 수선을 내린 [그림 6]로부터 다음과 같은 관계가 성립함을 확인할

수 있다.

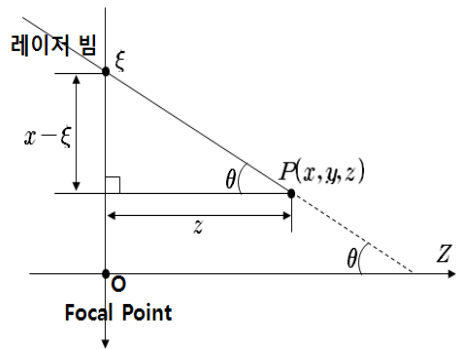
$$\tan\theta = \frac{x-\xi}{z} \tag{3}$$

위의 식 (1)~식 (3)으로부터 측정체 표면의 임의의 측정점 P 에 대한 공간좌표값 x, y, z 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = \frac{\xi x'}{x' - s' \tan\theta} \tag{4}$$

$$y = \frac{\xi y'}{x' - s' \tan\theta} \tag{5}$$

$$z = \frac{\xi s'}{x' - s' \tan\theta} \tag{6}$$



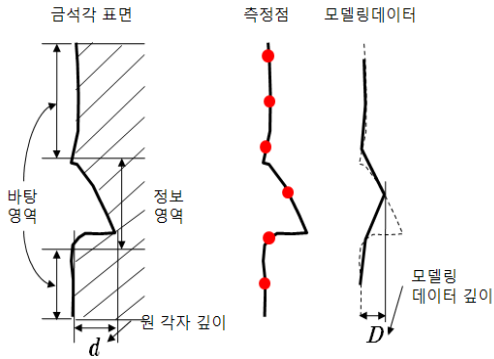
[그림 6] 깊이 z 와 θ 의 관계

3.2 측정 포인트 간격의 결정과 데이터 품질

레이저 슬릿빔을 구성하는 레이저 Spot Point의 간격은 각자된 부분(정보영역)의 판독성과 큰 관련성이 있다. [그림 7]의 금속각의 최대 깊이를 d , X 축 방향의 레이저 빔의 Spot Point 간격을 d_x , Y 축 방향의 레이저 빔의 Spot Point 간격을 d_y 라고 할 때 모델링 데이터의 깊이정보 D 는 $d > D$ 관계를 가지게 된다.

깊이 측정오차 $\epsilon (= d - D)$ 을 최소화하기 위해서는 포인트 간격 d_x 와 d_y 가 최소가 되도록 설정해야하는데 실제 스캐닝 환경에서는 장비의 성능, 스캔 작업성, 스캔 및 모델링 데이터의 크기를 고

려하여 d_x 와 d_y 를 결정하게 된다. 특히 각자된 부분이 좁고 깊을 경우 d_x 와 d_y 를 가능한 작게 설정하는 것이 중요하다.



[그림 7] 측정 포인트 간격에 따른 깊이 정보 왜곡

측정 간격 결정에서 고려하여야 할 또 다른 관점으로는 “서로 떨어져 있는 두 물체를 서로 구별할 수 있는 능력”으로 정의할 수 있는 분해능이다. 즉, 측정체의 표면에 조사된 인접한 Spot Point들이 위치측정 센서인 Image Plane상의 영상점으로 구분이 가능한가?의 문제를 고려하여야 한다. 이러한 분해능이 높다는 의미는 측정체에 조사된 인접한 두 Spot Point가 구분할 수 있음을 의미하고 분해능이 낮다는 의미는 인접한 두 Spot Point를 하나의 점으로 오인식함을 의미한다.

m 을 카메라의 배율이라할 때, 측정점 P 에서의 X, Y 각 방향으로의 분해능은 다음과 같다[4].

$$R_x = \frac{p_x}{m} = \frac{s' p_x}{z} \quad (7)$$

$$R_y = \frac{p_y}{m} = \frac{s' p_y}{z} \quad (8)$$

X 축방향의 분해능과 Y 축 방향의 분해능은 측정점까지의 거리 z 의 함수로 측정점 P 가 깊이 방향으로 멀어지면, 즉 z 의 값이 커지면 R_x 및 R_y 의 값이 작아지게 되며 분해능이 저하됨을 알 수 있다. 깊이 방향 Z 축으로의 분해능 R_z 를 구하기 위

해 식 (6)의 z 값을 보면 z 는 위치측 정상인 Image Plane에서 x' 만의 함수임을 알 수 있다. 따라서 R_z 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_z = z(x' + p_x) - z(x') \quad (9)$$

$$= \frac{-\xi s' p_x}{(x' + p_x - s' \tan \theta)(x' - s' \tan \theta)}$$

식 (7)~식 (9)를 통해 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 레이저 슬릿빔을 측정체 표면에 조사할 때 X 축 방향으로의 레이저 Spot Point간의 간격 d_x 와 Y 축 방향으로의 레이저 Spot Point간의 간격 d_y 는 다음 조건을 각각 만족하여야 한다.

$$d_x \leq \frac{p_x s'}{z} \quad (10)$$

$$d_y \leq \frac{p_y s'}{z} \quad (11)$$

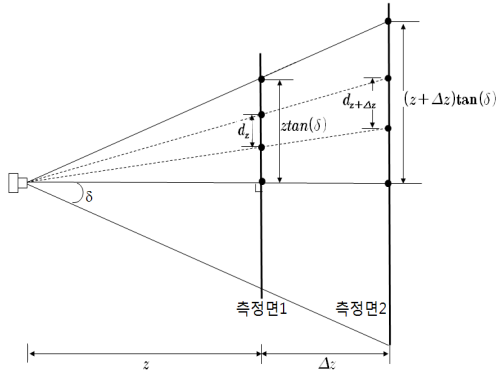
조건 식 (10)과 식 (11)을 만족하는 d_x 와 d_y 의 값 중 장비가 허용하는 최대값 d_x^* 와 d_y^* 로 설정할 때 식 (9)의 깊이 방향으로의 분해능 R_z 의 최대 분해능을 보장 받으며 스캔 작업의 작업성을 확보하게 된다.

3.3 스캔 거리와 획득 데이터 품질

한 번에 조사되는 레이저 포인트 수가 n 개이고 조사각도가 2δ 인 스캐너를 사용한다고 하자. [그림 8]과 같이 요구 해상도 d_z 를 만족시키는 스캐너와 금속각의 표면까지의 거리가 z 라고 할 때 측정면 1의 포인트간격 d_z 는 $z \tan(\delta)/n$ 가 되고 측정면까지의 거리가 $z + \Delta z$ 로 멀어질때 측정면 2의 포인트 간격 $d_{z+\Delta z}$ 는 $(z + \Delta z) \tan(\delta)/n$ 가 되어 식 (10), 식 (11)에서 요구하는 측정간격을 유지하지 못하게 된다.

즉, 하나의 대상체에 대해 일정한 데이터 품질을 확보하기 위해 행해지는 여러 번의 스캐닝 과정에서 대상체까지의 거리를 항상 일정하게 유지하는 스캐

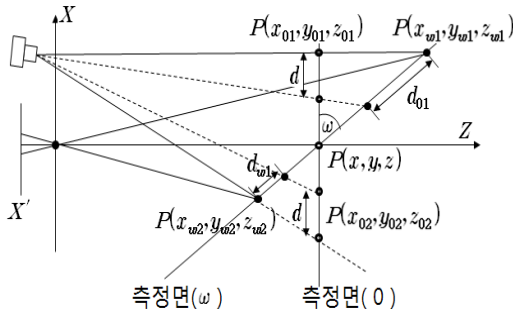
닝이 측정 데이터 품질을 확보하는 중요한 포인트가 된다.



[그림 8] 스캔 거리

3.4 스캔 각도의 결정과 데이터 품질

광삼각 레이저측정장치를 이용한 스캔에서 측정 대상체인 금속각과 측정장치가 이루는 각도는 획득 데이터의 품질에 큰 영향을 미친다.

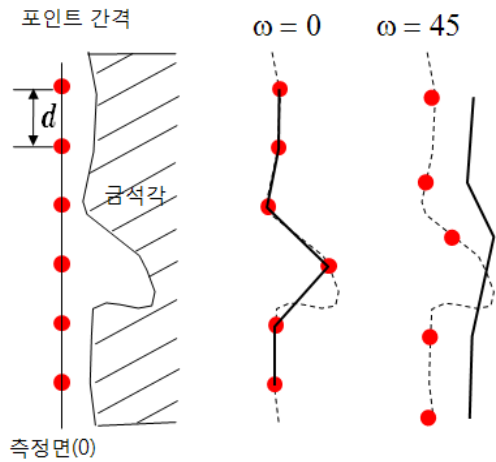


[그림 9] 스캔 각도에 따른 측정점의 변화

[그림 9]에서 측정면(0)은 스캐너의 광학축과 수직을 이루는 면이고 스캐너의 카메라가 물체까지의 기준거리를 $P(x, y, z)$ 까지로 설정하여 측정을 한다고 할 때, 레이저 Spot Point를 발생시키는 레이저 발생장치는 $P(x, y, z)$ 를 기준으로 측정면(0) 상에 일정 간격의 Spot Point를 발생시킨다.

스캔작업시 [그림 9]의 측정면(0)와 같이 광학축에 수직이 아닌 ω 만큼 기울어진 면을 측정하는 경

우, 첫 번째 문제로는 측정면(0) 위의 점과 같은 일정 간격 d 의 Spot Point를 측정하는 대한 점간의 간격이 d_{01} 로 더 길거나 $d_{\omega 1}$ 으로 더 가까운 불균등 간격의 점을 측정하게 되어 식 (10), 식 (11)의 조건을 만족하지 못하게 된다. 두 번째 문제로는 $P(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ 와 $P(x_{02}, y_{02}, z_{02})$ 의 좌표정보 대신에 더 깊이 방향으로 더 멀거나 가까운 점 $P(x_{\omega 1}, y_{\omega 1}, z_{\omega 1})$ 와 $P(x_{\omega 2}, y_{\omega 2}, z_{\omega 2})$ 의 좌표정보를 획득하게 되어 식 (7), 식 (8)에 의해 불균일한 분해능을 가지는 좌표정보를 획득하게 되는 문제가 발생한다. 세 번째 문제로는 [그림 10]과 같이 깊이 방향의 형상 변화가 큰 대상체에 대해서는 깊이 방향 형상에 대해 왜곡된 형상을 획득하게 된다.



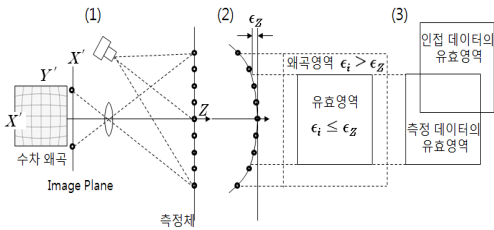
[그림 10] 스캔 각도에 따른 깊이정보의 왜곡

고품질의 데이터를 얻기 위해서는 측정체의 측정면과 카메라의 광학축이 90도를 유지하는 정각 스캐닝을 하여야 하며, 스캔 거리를 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다.

[그림 10]은 정각스캔과 비정각스캔에 따른 획득 포인트 데이터의 차이를 보여주는 예로 비정각 스캐닝의 경우 포인트 간격이 일정하지 않은 경우 포인트 간의 간격 또는 메쉬 구조가 일정하지 않아 명문의 해상도가 균일하지 않은 문제가 발생하게 되어 문자의 판독 때 오독의 원인이 될 수 있다.

3.5 유효데이터 구간의 파악

스캐너에 내장된 카메라의 렌즈를 통해 CCD 면에 맺힌 상 $P'(x', y')$ 는 렌즈 왜곡수차의 문제로 [그림 11]의 Image Plane상의 x' 과 y' 에 대해 왜곡된 데이터를 얻게 되고 이에 따라 식 (6)에 의해 결정되는 z 값 역시 [그림 11]의 (2)와 같이 광축에서 먼 측정점에 대해 z 좌표 값이 실제 값보다 짧게 측정되는 들뜸현상이 나타난다.



[그림 11] 유효데이터구간과 정합

이러한 문제의 해결방법은 한 스캔 데이터에서 나타나는 Z방향의 허용오차의 최대치를 ϵ_z 라 할 때 [그림 11]의 (2)와 같이 각 스캔 데이터에 대해 유효데이터영역($\epsilon_i \leq \epsilon_z$)과 왜곡영역($\epsilon_i > \epsilon_z$)으로 구분한 후 ϵ_z 이상의 오차를 가지는 데이터를 제거한 유효영역의 데이터만을 활용하는 것이다.

[그림 12]는 왜곡구간을 제거하지 않은 스캔 데이터를 활용한 정합을 수행하였을 때 발생하는 정합오차의 예이다. 들뜸현상이 존재하는 데이터 영역을 연속적으로 정합하면 [그림 12]의 (2)와 같이 오차 누적으로 실제 형상보다 내부 쪽으로 말림현상이 나타나 전체 형상이 왜곡된다.



[그림 12] 정합 오차

3.6 석빙고비 문자 판독의 예

경주시 인왕동 월성 북쪽에 위치한 경주석빙고(보물 제66호)는 풍화 등에 의한 많은 문자가 미판독 문자로 남아 있는 비석중의 하나이다.

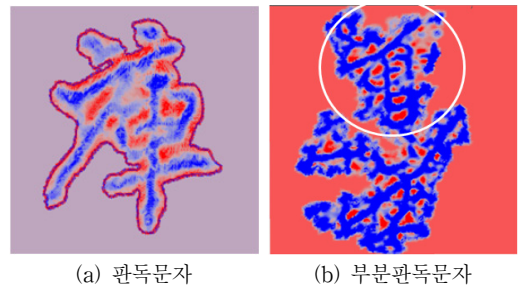
본 논문에서 제안된 방법을 활용하여 석빙고비의 미판독 문자를 판독하기 위해 비접촉레이저 스캐너인 미놀타사의 Vivid910 장비를 사용하였다. <표 1>은 스캔시 주요 작업 조건을 나타낸 것이다.

<표 1> 작업조건

항목	스캔 작업조건
측정방법	광삼각법
수광렌즈	TELE(focal Distance = 25mm)
측정거리	1m
측정간격	0.5mm
스캔각도	90°
Pixels	3D 데이터 : 340,000

경주석빙고비의 판독결과 총 253자로 구성되어 있으며 영조 14년(1738년)에 부운 조명겸에 의해 석빙고로 개축되었다는 것 등이 확인되었다.

[그림 13](a)는 제안된 스캔 방법으로 판독된 문자의 예이며 [그림 13](b)는 부분 판독된 문자의 예이다.



[그림 13] 문자 판독 예

4. 결론

본 논문에서는 기존의 탁본 및 영상분할 방법의

대안으로 적용할 수 있는 광삼각 3차원 레이저스캐닝 방법을 이용한 금석문의 판독에 필요한 스캐닝 기법과 그 기준을 제시하였다. 이를 위해 광삼각 측정방식에서의 3차원 좌표정보 유도방법과 스캐닝 가이드라인을 제시할 수 있는 기반을 마련하였다.

특히 광삼각측정방식을 통해 획득되는 3차원 데이터의 왜곡을 방지하기 위한 측정체에 조사하는 레이저 Spot Point 간격의 결정 방법, 스캔장비와 측정체까지 스캔거리의 결정방법, 스캔장비와 측정체의 스캔각도의 결정 방법들을 제시하였다.

본 논문에서 제시된 방법들은 그동안 미판독 금석문으로 분류되어 있던 경주 석빙고 비문의 판독에 적용하여 금석문 연구에 기여하였다.

참 고 문 헌

- [1] 고선우, “3차원 레이저스캐닝 기술과 정보처리 기술을 활용한 금석문 가독성 향상방법”, 『인문콘텐츠학회지』, 제21권(2011), pp.177-198.
- [2] 문호석, 손명호, “Z-map과 모폴로지 필터를 이용한 문화재의 문자분석”, 『한국컴퓨터정보학회 동계학술발표논문집』, 제14권, 제2호(2006), pp. 141-146.
- [3] 민춘기, 조중연, 이석호, “화상분석을 통한 삼국 수륙지의 서화 특성비교”, 『한국펄프·종이공학회 학술발표논문집』, 제1권(2000), pp.30-35.
- [4] 박현구, 김승우, 박준호, “슬릿광 주사방법에 의한 자유고건의 삼차원 형상측정”, 『대한기계학회논문집』, 제17권, 제5호(1993), pp.1202-1207.
- [5] 최영성, “한국금석학의 성립과 발전”, 『동양고전연구』, 제26편(2007), pp.381-412.
- [6] 한국 금석문 종합 영상정보시스템, <http://gsm.nricp.go.kr>.
- [7] <http://www.jhu.edu/digitalhammurabi/>.
- [8] Sankur, B. and M. Sezin, “Survey over image thresholding technique and quantitative and quantitative performance evaluation”, *Journal of Electronic Imaging*, Vol.13, No.1(2004), pp.146-165.

◆ 저 자 소 개 ◆

**이 근 호 (ghlee@jj.ac.kr)**

전북대학교 전기공학과를 졸업하고 동대학에서 회로 및 시스템 공학석사와 공학박사를 취득 후 미국 콜로라도주립대학 교환 교수 후, 현재 전주대학교 스마트미디어학부 부교수로 재직 중이며, 관심분야는 디지털신호처리, 스마트시스템 등이다.

**고 선 우 (godfriend@jj.ac.kr)**

고려대학교 산업공학과 졸업하여 한국과학기술원 산업공학과 공학석사 및 공학박사 취득하여, 현재 전주대학교 스마트미디어학부 조교수로 재직중이며, 관심분야는 문화원형복원, 3D Scanning 등이다.

**최 원 호 (wonhosori@hanmail.net)**

목원대학교 경영학과 졸업하여 상명대학교 디지털영상학과 이학석사 후 현재 인하대학교 융합고고학과 박사과정중이며, 관심분야는 문화유산 보존복원, DB 구축, 3D Scanning 등이다.