

## 컴퓨터 그래픽스 및 영상처리를 이용한 문화 원형 복원 전문가시스템 개발

문 호 석\*, 손 명 호\*\*

### Developing Expert System for Recovering the Original Form of Ancient Relics Based on Computer Graphics and Image Processing

Ho Seok Moon \*, Myung Ho Sohn \*\*

#### 요 약

본 논문에서는 컴퓨터 그래픽스와 영상 처리를 통해서 훼손된 문화재 조각들을 복원하는 전문가 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 글자가 새겨져 있는 평평한 면이 있는 조각들을 대상으로 하여 구축하였고, 조각들간의 상대적인 정확한 위치를 찾아 복원한다. 조각난 물체들을 정합하는 과정은 세 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 조각난 물체의 정면을 찾고, 정면에 새겨져 있는 글자들을 추출하여 최소자승법을 통해 조각의 방향을 정렬하는 과정이다. 두 번째 단계에서는 조각들이 정합될 대략적인 방향을 벡터 내적을 통해서 결정한다. 세 번째 단계에서는 기하학적인 에러 및 RGB에러 등을 통해서 조각의 세부적인 방향을 결정한다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 조각을 정합하는데 있어서 3차원 물체를 정합 전에 정렬하는 방법을 통해서 2차원적인 이동 연산만으로 정합될 수 있도록 하여 계산량을 줄였다. 또 한 구체적인 문화재를 대상으로 실험을 하여 그 성능을 입증하였다.

#### Abstract

We propose a new expert system for recovering the broken fragments of relics into an original form using computer graphics and image processing. This paper presents a system with an application to tombstones objects of flat plane with letters carved in for assembling the fragments by placing their respective fragments in the right position. The matching process contains three sub-processes: aligning the front and letters of an object, identifying the matching directions, and determining the detailed matching positions. We apply least squares fitting, vector inner product, and geometric and RGB errors to the matching process. It turned out that 2-D translations via fragments-alignment enable us to save the computational load significantly. Based on experimental results from the damaged cultural fragments, the performance of the proposed method is illustrated.

▶ Keyword : 최소자승법(Least Squares Fitting), 벡터유사도(Vector Similarity), 기하학적 에러(Geometric Error), RGB 에러(RGB Error), 문화 콘텐츠(Cultural Contents)

• 제1저자 : 문호석

• 접수일 : 2006.09.18, 심사일 : 2006.10.20, 심사완료일 : 2006. 11.18

\* 육군사관학교 전자정보학과 조교수 \*\* 명지전문대학 경영과 조교수(교신저자)

※ 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-041-B00177).

## 1. 서론

디지털 시대를 맞이하여 각종 자료를 디지털로 저장하고 이것을 이용하여 가치를 창출하는 콘텐츠 기술은 점점 더 각광을 받고 있는 분야이다. 특히 콘텐츠의 대상이 되는 자료의 가치가 높으면 높을수록 더욱 주목을 받게 된다. 이와 관련하여 우수한 문화 원형을 디지털 자료로 변환하면 영구적인 보존이 가능하며, 유용성이 높은 자료가 될 것이다. 발굴된 문화재는 조각난 경우가 많은데 조각난 문화재 원형을 복원하는 데에는 세심한 주의가 요구된다. 일반적으로 조각난 문화재를 정합하기 위해서 여러 사람의 수작업에 의지하여 직관적으로 모든 조각을 보고 맞추어야 한다. 특히 맞추어야 할 조각의 개수가 많아질 경우에는 기하급수적으로 계산 시간이 증가하고, 세밀한 수준의 복원은 힘들다. 또한 물체를 직접 조작하고 움직이면서 복원해야 하므로 오래되어 부서지기 쉬운 물체의 경우 문화 원형의 조각을 훼손할 가능성이 있어서 작업에 여러 가지 제약이 있다[1, 2].

조각난 물체를 정합하는 것에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다. 이러한 연구들의 대상이 되는 물체는 대부분 2차원 퍼즐이었다. 그러나 실생활에서 다루어야 하는 실제적인 문제는 3차원과 연관되어 있다. 또한 퍼즐은 훼손된 부분이 없는 대상이어서 실생활의 조각에 비하여 비현실적인 대상이다[3, 4, 5, 6].

Ucoluk과 Toroslul[7]은 일부 조각이 손실된 경우도 고려하여 조각 정합을 할 수 있는 알고리즘을 제시했다. 이 연구에서는 3차원 조각들을 경계 부분의 곡선으로 나타내고 있다. 이 곡선들은 이산적으로 변환된 3차원 경계 곡선으로부터 각 곡선의 곡률과 비틀림 수치를 계산하여 매개 변수화 된다. 이렇게 얻은 이산 경계 곡선 데이터를 이용하여 각각의 3차원 조각을 표현하는 구조를 생성한다. 각각의 연결되는 조각 쌍에 대하여 특징 부위 간의 Euclidean Distance를 이용한 유사도 값을 계산하여 조각 쌍에 대한 정합 연산을 수행한다. 이 연구는 3차원 물체에 대한 연구이며, 이산적인 특징 부위의 매개변수로 나타내어지는 두 개의 곡선을 안정적으로 정합하는 방법을 제시했다. 그러나 물체 복원을 위한 위치 탐색 과정의 곡선 정합 기법이 모든 조각에 대하여 수행되어 비교하므로, 상당한 연산 시간이 소요되는 단점이 있다.

Brown 대학의 SHAPE 연구실[8]에서는 3차원 스캐닝을 통해 얻은 조각 데이터로부터 축 중심의 대칭이 되는 모습을 가진 수학적 모델을 자동으로 복원하는 기법을 연구하

였다. 조각을 정합하고 기하학적으로 조각들을 정렬하는 이 작업은 break-curve를 정합하는 것에 그 기반을 두고 있다. 이 연구에서는 물체의 정합을 위해 bottom-up maximum likelihood performance-based 탐색 기법을 적용하였다. 이 알고리즘은 비교적 안정적인 결과를 얻어낼 수 있는 반면에 물체의 손실된 부분에 대한 고려가 거의 되지 않았다는 단점이 있다.

Kong[9]은 퍼즐 조각의 기하학적인 특징 부위를 정합함으로써 2차원 및 3차원의 퍼즐 문제를 해결하는 방법을 제시했다. 이 연구는 두 단계로 나누어진 접근 방식을 택하고 있는데, 첫 번째 단계에서는 모든 조각들이 비교적 단순한 곡선 표현을 통해 기본적인 레이아웃이 구성되어 그에 따라 정렬된다. 두 번째 단계에서는 첫 단계를 통해 정합의 가능성이 판단된 조각 쌍들에 대하여 좀 더 세밀한 곡선 정합 기법을 근거로 하여 상대적인 정합 위치를 찾아낸다. 이 연구도 퍼즐에 초점이 맞추어져 있는 한계로 인해 손실된 부분에 대한 고려가 거의 되지 않았다는 것이 단점이다.

본 논문에서 사용될 대상은 (그림 1)에서 보는 바와 같이 문화재청에서 관리하고 있는 보물 1040호 화엄석경이다[10]. 화엄석경은 기존 연구자들에 의해서 조각 정합으로 연구되었던 조각들과는 달리 몇 가지 특징이 있다. 조각 정면에 글자가 음각으로 새겨져 있고 좌우 측면이 조각난 후에 마모되어 훼손되었다. 훼손된 부분이 있기 때문에 최초 조각난 상태의 원형과는 다른 모습이다. 훼손된 부분으로 인해서 퍼즐을 대상으로 한 기존 연구나 훼손을 고려하지 않았던 방법으로는 연구에 한계가 있다. 또한 화엄석경과 같이 글자가 정면에 있고 조각의 정면이 평평한 물체의 특징을 잘 이용하면 보다 효율적이고 정확한 정합 방법을 제시할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이러한 점을 중심으로 하여 기존 연구에서 다루지 않았던 방법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 2장에서는 조각 정합 시스템에 대해서, 3장에서는 제안하는 알고리즘을, 4장 5장에서는 각각 실험 결과와 결론 및 향후 과제를 서술하는 순서로 이루어져 있다.

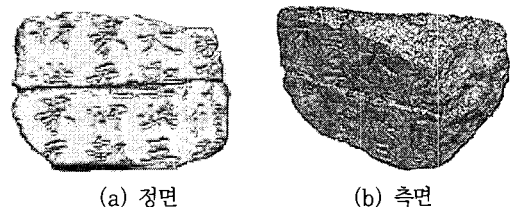


그림 1. 훼손된 문화재 조각  
Fig. 1 Examples of Broken Cultural Assets

## II. 조각 정합 시스템

조각 정합 시스템은 (그림 2)에서 보는 바와 같다. 입력 받은 3차원 문화재 조각은 3차원 스캐너를 이용하여 획득된다. 이 조각 정보는 동일한 스캐닝 장비와 동일한 조건하에서 획득하여야 한다. (그림 1)에서와 같이 이 논문에서 사용되고 있는 문화재 조각의 특징을 보면, 음각으로 글자가 새겨져 있는 부분이 있다. 이 부분이 조각의 정면이 된다. 이 특징을 이용해서 글자가 새겨져 있는 정면 부분을 찾아 정렬(이하 '조각 정렬')을 하게 되면 조각 정합간 x축과 y축으로 회전되어 있는 상태를 고려하지 않아도 된다.

대부분 조각가들이 비석이나 돌에 글자를 새길 시에는 가로 세로로 큰 방향은 정해 놓고 작업을 하기 때문에 조각의 글자 정보로 조각의 수직 방향을 찾아 정렬(이하 '글자 정렬')을 할 수 있게 된다. 3차원 데이터로 저장된 조각 정보는 입력 받을 시에 임의의 방향으로 입력되므로 조각 정면과 글자의 수직 배열을 찾지 않은 상태에서 정합을 하는 것은 곤란하다. 이렇게 정렬된 조각들에서 특징 벡터들을 추출하고 영상처리를 통해 조각들을 정합한다.

## III. 제안하는 알고리즘

### 3.1 조각 정렬

글자가 새겨져 있는 조각의 정면을 찾아 정렬하는 것은 x, y 평면상으로 조각 정면을 정렬시키는 것이기 때문에 조각 정합 시에 y축과 z축으로 회전되어 있는 상태를 고려하지 않아도 된다. 이를 통해서 조각 정합을 위한 조각간 비교 횟수를 줄일 수 있다.

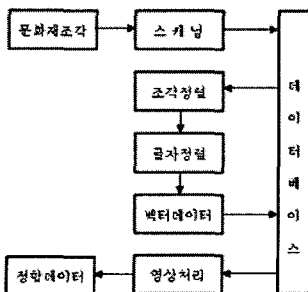


그림 2. 조각 정합 시스템 블록도  
Fig. 2 Flow of Matching System

조각 정면을 정렬하는 방법으로 글자가 새겨져 있는 조각 정면은 면이 일정하며 평평하다는 사실을 기초로 한다. 조각의 삼각형 면들과 가장 평행한 임의의 평면을 구한 후, 이 평면을 이용해서 y축과 z축으로 평면이 회전되어 있는 각도를 구해 조각을 회전시키는 방법이 있다. 이 방법은 이론적으로 가능하나 실제 적용 시에 임의의 평면을 x, y, z축으로 일정한 각도로 회전시켜 가며 만들어 조각의 삼각형 면들의 법선 벡터와 평면의 법선 벡터와의 관계를 계산하여야 하므로 조각의 삼각형 면의 개수에 따라 그 계산의 복잡도가 기하급수적으로 늘어난다. 본 논문에서는 계산의 효율성과 조각 정면의 특성을 이용 조각 정면의 임의의 세 점을 선택하고 이 세 점으로 평면을 만들어 회전 각도를 구하는 방법을 적용하였다.

(그림 3)에서와 같이 법선 벡터와 투영 평면과의 각도를 구하여, 각도만큼 조각을 회전시켜 정렬시킨다.

식 (1)은 법선 벡터가  $V = (a, b, c)$ 이고, 원점에서 거리가  $d$  만큼 떨어져 있는 평면의 방정식이다. 식(3), (4), (5)를 이용해서 조각을 회전시킨다. 식 (2)에서  $[x \ y \ z \ 1]$ 은 원래 조각의 점들을 나타내며  $[x' \ y' \ z' \ 1]$ 은 임의의 축으로 회전한 후의 조각의 점들을,  $[TR]$ 은 임의의 축으로 회전하기 위한 행렬이며  $\theta$ 는 회전할 사이각을 나타낸다.

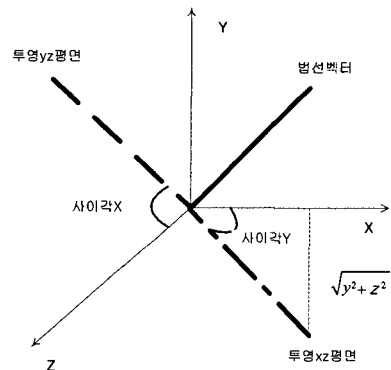


그림 3. 법선벡터를 이용한 회전각 구하기  
Fig 3 Calculation of Rotation Angle Using the Normal Vector on the Plane

$$ax + by + cz + d = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$[x' \ y' \ z' \ 1] = [x \ y \ z \ 1] [TR] \dots\dots\dots (2)$$

$$T_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$T_{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

$$T_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

3.2 글자 정렬

글자 정렬은 정면이 정렬된 조각의 글자 정보를 추출하는 과정과 추출된 글자 정보를 가지고 least squares fitting(LSF)을 이용하여 최적의 직선을 구하는 과정이다. LSF를 통해 구한 직선과 x축 방향과의 회전 각도를 구하여 그 각도만큼 조각을 회전시키는 것이다[11].

글자는 음각으로 조각 정면에 새겨져 있기 때문에 글자 정보를 얻기 위해서 조각 정면과 평행한 평면을 만든다. 이 평면을 조각과 교차시켜 평면과 조각이 만나는 부분의 교선을 구한다. 조각이 음각이므로 평면을 조각 정면보다 글자가 새겨져 있는 깊이만큼 이동시켜 교선을 구하면 글자 정보를 (그림 4)와 같이 얻을 수 있다.

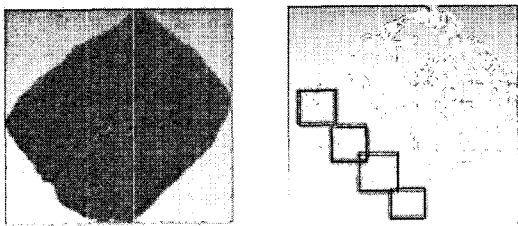


그림 4. 조각 정면과 평면을 이용한 글자정보 추출  
 Fig. 4 Extraction of Letter Data Using the Cross  
 (Overlapped) Lines between the Front of the Fragments and the Plane

얻어진 글자 정보들은 크기가 일정하지 않으나 어느 정도 방향성을 유지하고 있다. 이 방향성을 LSF를 이용하여 찾게 된다. 각 글자 정보들은 선분 정보로 얻게 되는데 이 정보를 이용 각 글자 별로 최소, 최대가 되는 점들로 (그림 4)의 오른쪽과 같이 글자 별로 bounding box가 만들어 지고, bounding box에 중심이 되는 점을 얻어(각 글자 정보

의 x, y 좌표 값을 평균하여 얻음) 이 점들을 지나는 최적의 직선을 구한다.

이 단계까지 마치면 조각 정보들은 조각 정렬과 글자 정렬이 된 상태로 되기 때문에 정합 시에 조각을 회전시키지 않고 x, y축으로 이동 연산만을 고려하게 된다.

3.3 대략적인 정합위치 결정

이 과정은 조각 정렬과 글자 정렬이 된 조각들의 외곽선 정보를 이용하여 조각의 특징 벡터 정보를 얻고, 벡터 내적을 이용하여 벡터 유사도를 계산하고 대략적인 정합 위치를 결정하는 단계이다. 먼저 정렬된 조각에 평행한 평면을 만들어 조각과의 교선을 구한다. 조각 전체의 교선 정보 가운데 사용자가 네 끝점을 정하여 상하 좌우 벡터 정보를 구분하여 저장한다.

각 조각 별로 상하 좌우의 벡터 정보를 이용하여 정합될 방향을 결정한다. 정합될 방향 결정 시에 회전은 고려하지 않아도 되기 때문에 임의의 한 조각의 오른쪽 벡터 정보는 나머지 조각의 왼쪽 벡터 정보 중에 유사도가 가장 높은 조각과 결합되게 된다. 위쪽 벡터 정보는 나머지 조각의 아래쪽 정보와 결합되게 된다. 유사도는 벡터 내적을 이용한 cosine 절대 값의 합을 사용한다. 이 값이 클수록 유사도가 높은 것으로 정합될 두 조각이 결정된다.

$$Value_j = \sum_{i=0}^{M-1} \left| \frac{\vec{A}_i - \vec{B}_{i+j}}{|\vec{A}_i| \times |\vec{B}_{i+j}|} \right|, j=0, 1, \dots, N-1 \dots\dots\dots (6)$$

$$S(A, B) = Max(Value_j), j=0, 1, \dots, N-1 \dots\dots\dots (7)$$

식 (6)이 유사도를 나타내는 식으로 A와 B는 각각 두 조각의 한 방향을 나타내고 Ai와 Bj는 각 방향의 벡터 정보들을 나타낸다. 예로 A조각의 오른쪽 벡터(i개)와 B조각의 왼쪽 벡터(j개, B 벡터의 개수가 더 많다고 하면)의 유사도를 계산 시에는 식 (6)을 이용하여 j개의 유사도 값을 구하고 식 (7)을 이용해서 그 중 가장 큰 부분의 유사도 값이 A 벡터와 가장 유사한 B 벡터를 나타낸다. 이것을 나머지 조각에 적용하면 비교할 조각 별로 유사도가 가장 높은 부분이 선택되고 각 조각 별로 선택된 유사도 중 가장 높은 유사도를 나타내는 조각의 방향이 정합 방향이 된다. 이 때 최종 결합 시에 최 외곽 조각들의 외곽 벡터들은 결합될 조각이 없기 때문에 이 부분들은 식 (8)에서와 같이 정합 방향을 결정시에 사용된 최고 유사도 값이 일정한 문턱값(T) 이하 값 일 경우 정합될 조각의 방향이 없는 것으로 결정한다.

$$S(A, B) < T \dots\dots\dots (8)$$

### 3.4 세부적인 정합위치 결정

앞 단계까지 각 조각 별로 정합할 조각과의 대략적인 정합 위치가 결정되었으나 세부적인 부분을 조정할 필요가 있다. 대략적인 위치가 정해진 조각의 순서대로 조각 정합 방향에 따라 세부 정합 부위를 탐색하고 탐색 중 가장 작은 오차를 가진 부위끼리 정합한다. 본 논문에서는 각 조각의 정합 부위를 탐색하는 경우 대상 조각 간의 틈새 영역 크기를 계산하여, 틈새 영역의 크기가 가장 작은 위치를 정합 위치로 정한다.

(그림 5)는 두 개 조각의 세부적인 위치를 결정하는 예를 보인 그림이다. 왼쪽 조각을 고정시키고 오른쪽 조각을 상하로 이동시키며 기하학적인 오차와 색상(RGB) 오차가 제일 작은 부분을 찾아 가는 과정을 표현한 그림이다.

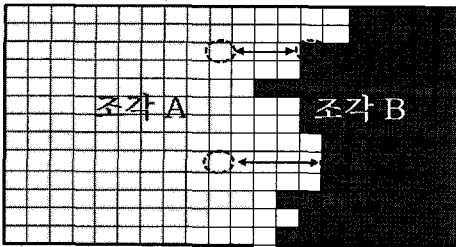


그림 5. 기하학 및 RGB 오차  
Fig. 5 Geometric and RGB Errors

기하학적 오차는 (그림 5)에서 보는 바와 같이 대략적인 정합 위치가 결정된 조각을 대상으로 한 조각은 고정시키고 다른 조각을 이동시키며 연결점까지 조각들을 근접시킨 뒤에 중간에 배경색이 보여 지고 있는 픽셀의 수로 계산된다. 색상 오차는 정합하는 두 조각의 대칭되는 점들의 색상 차이를 말한다. (그림 5)에서 보면 조각의 원형과 화살표로 표시된 두 부분의 색상 차이를 나타낸다. 색상 차이가 적을수록 두 조각이 같은 부분이었을 것으로 볼 수 있다. 조각의 색상은 명암도를 중시하여 밝기 성분만을 고려하였다.

세부적인 정합 위치 결정 시에 기하학 오차만으로는 정확한 위치를 찾기 어렵다고 보고되었다(12). 조각에 훼손이 없다면 기하학적인 오차만으로도 정확한 위치를 찾을 수 있으나, 훼손이 있기 때문에 기하학적인 오차 이외의 다른 요소가 필요하다.

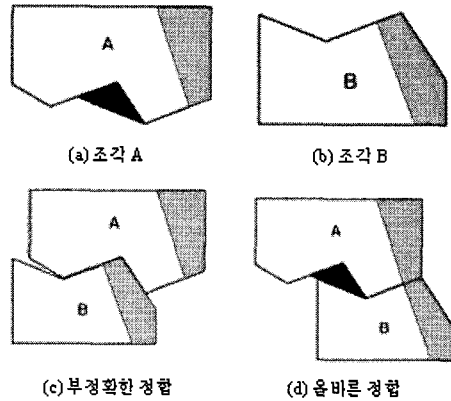


그림 6. RGB 정보의 중요성  
Fig. 6 Importance of RGB Information

(그림 6)은 색상 정보의 중요성을 보여주는 예이다. 훼손된 부분으로 인해서(조각의 검은 면) 기하학적인 오차만으로 정합을 할 경우, 잘못 정합될 수 있는 조각을 색상 정보를 이용할 때 올바르게 정합할 수 있는 예를 보여 준다. 조각으로 분리되기 전에 한 면이었던 부분은 색상이 비슷할 것이다. 이것을 고려하여 정합 시에 반영한 것이다. 기하학 오차와 색상 오차 중 어느 것이 더 중요한지는 일정하지 않고 대상 조각에 따라 다를 수 있다. 그러나 일관되게 기하학적인 오차만으로 정합 조건을 찾는 것보다 더 정확도를 높일 수 있는 방법이 색상 정보를 고려하는 것이 될 것이다.

$$E = \alpha E_{geo} + (1 - \alpha) E_{rgb} \dots\dots\dots (8)$$

식 (8)은 기하학 오차( $E_{geo}$ )와 색상 정보( $E_{rgb}$ )를 고려하여 전체 에러( $E$ )를 구한 식이다. 여기서  $\alpha$ 는 기하학 오차와 색상 정보의 비율을 결정하는 사용자 지정 변수이다.

## IV. 실험 결과

본 논문에서는 9개의 화염석경 조각을 사용하여 제안하는 방법을 평가하였다. 실험은 크게 두 가지로 실시되었다. 첫 번째는 전처리 과정 중의 하나인 글자 정렬을 위해 LSF를 이용한 방법이 얼마나 정확한가를 실험하였다. 두 번째는 벡터 내적과 기하학 및 색상 오차를 이용한 조각 정합 방향 및 세부적인 정합 위치를 결정하는 실험이다. (그림 7)은 실험에 사용된 9개의 조각이다.

4.1 글자 정렬 실험

글자 정렬 실험을 위해 전문가에 의해서 글자 정렬된 샘플 조각을 각각 30° 와 60°가량 회전시켜 사용하였다. 글자 정렬 실험은 크게 세 가지로 실시하였다. 첫 번째 실험은 사용자가 수동으로 글자의 중심점이라고 생각되는 곳을 마우스로 선택하여 이 두 점을 이용하여 직선을 만들어 회전 정도를 측정하는 방법이다. 두 번째 실험은 3장 2절에서 언급했던 평면과 조각과의 교선 정보를 이용하여 글자 정보를 얻고, 수직 열에 있는 글자 정보 가운데 임의의 두 글자를 뽑아 이 글자들의 중심들을 이용해서 회전 정도를 구하는 방법이다. 세 번째 실험은 제안하는 방법으로 수직 정렬될 글자들의 정보를 다 얻어 이 정보를 이용하여 LSF를 적용한 방법이다. 조각 자체가 크면 수직 열에 많은 글자 정보가 있을 수 있다. 실험에서는 수직 열에 4개의 글자가 있는 조각(No.2)을 이용하여 LSF방법을 적용하였다.

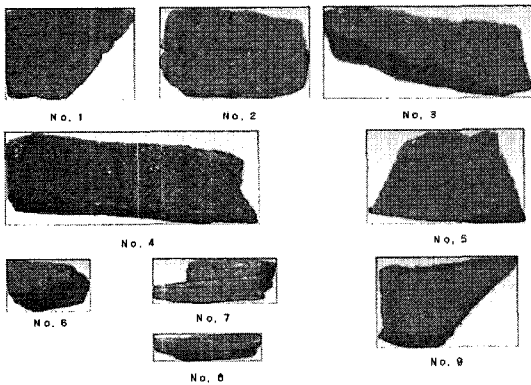


그림 7. 화엄석경 조각들  
Fig. 7 Fragments of Hwaomseokgyeong

(표 1)은 방법 별, 조각 별로 글자 정렬을 10번씩 적용했을 시의 자료이다. most는 정렬이 가장 잘 되었을 때이고 least는 잘 안되었을 때, average는 평균을 variance는 분산을 나타낸다. 각 숫자는 회전 각도와와의 차이를 나타내는 것으로 적을수록 좋은 결과를 나타낸다. 수동 선택 방법은 다른 방법에 비해 기복이 심하고 평균적으로도 좋지 않았는데 손 떨림이나 마우스의 사용으로 인한 제한 요소가 많고, 사용자의 시각에 따라 차이도 많이 나기 때문이다. 제안하는 LSF 방법은 글자 정보 중에 돌출된 정보(outlier)가 없기 때문에 사이각을 구하는 부분에 효과적이었으며 글자 정보 중에 2자만 이용하는 것보다 안정적이다(분산이 작다).

4.2 조각 정합 실험

제안하는 알고리즘의 효과를 입증하기 위해 비교적 마모가 되지 않은 샘플과 실제로 마모가 있는 9개의 화엄석경 조각을 대상으로 조각 정합 실험을 하였다. (그림 9)는 비교적 마모가 되지 않은 세 개의 조각으로 이루어진 물체에 대하여 본 연구에서 개발한 방법으로 복원한 결과이다. 각 조각은 이미지 상에서 대략 2내지 3 화소 내외의 작은 오차 내로 정합되었다. 여기서 나타나는 오차를 발생시키는 원인 중 한 가지는 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 정합방향이 가로 아니면 세로로만 한정해 놓았기 때문에 (그림 8-b)의 원으로 둘러싸인 부분과 같이 concave 영역이 존재할 경우 (그림 8-c)에서처럼 약간 밀린 모습으로 정합되어 오차를 발생시키게 된다. (그림 9)는 실제 정합 시 그런 부분이 발생한 모습을 확대한 결과이다.

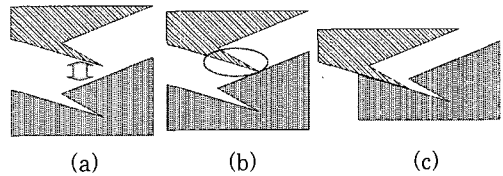
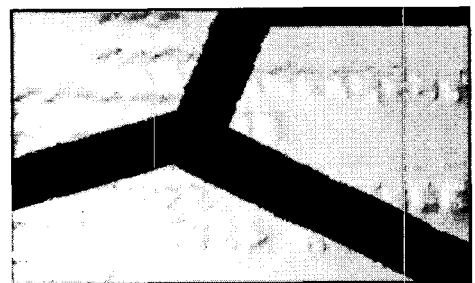
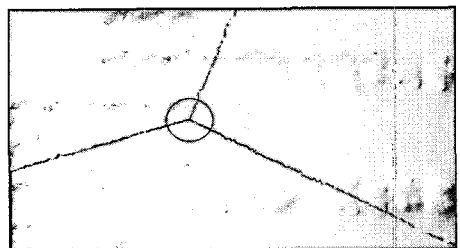


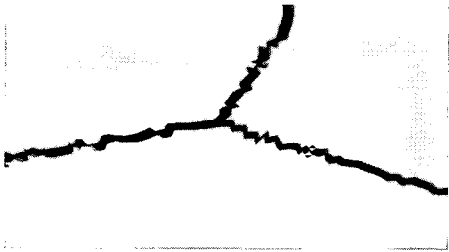
그림 8. concave 영역에 의한 정합 오차  
Fig 8 Merging error due to the concave region



(a) 입력받은 조각난 3차원 물체(Input fragment mode)



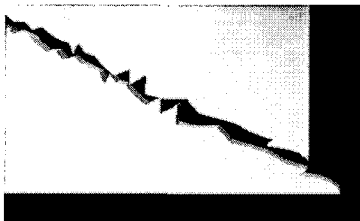
(b) 정합 결과(The reconstructed result)



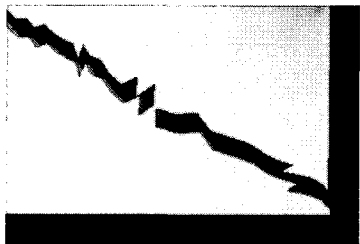
(c) (b)의 원 부분을 확대한 이미지  
(The enlarged image of figure(b))

그림 9. 마모가 되지 않은 경우에 대한 정합결과  
Fig. 9 The reconstructed result of well-preserved fragment

(그림 10)은 정합적도에 RGB 오차를 포함시킨 것과 그렇지 않은 경우에 물체가 복원되는 정확도의 차이를 보여준다. (그림 10-a)의 경우 두 조각의 틈새 영역의 크기는 작게 나타나지만 실제로 모델 표면의 무늬나 법선벡터의 차이에 의해 발생하는 렌더링된 RGB 값의 차이는 크다. (그림 10-b)에서는 이러한 RGB 오차까지 감안한 결과 좀 더 정확도가 향상된 위치에 물체가 정합되었음을 볼 수 있다.



(a) distance only



(b) distance(0.5), RGB(0.5)

그림 10. 정합부위 탐색 척도에 따른 정합 결과  
Fig. 10 The reconstructed result according to the different error metric

(그림 11)은 내적을 이용한 대략적인 정합 위치와 기하학 및 색상 오차를 이용한 세부적인 정합 위치를 결정하기 위해 사용된 시스템의 프로그램 화면이다. 조각 정렬과 글자 정렬을 마친 데이터가 입력으로 들어가고, 화면 상단 왼

쪽 부분에서 정합하려고 하는 조각과 방향을 선택하면 화면 상단 오른쪽에 대략적인 정합 위치를 결정하기 위해 계산된 유사도 값 중 가장 큰 값의 조각과 방향이 결정된다. 중앙 상단에 있는 9개의 값들은 선택된 조각과 비교되는 나머지 조각들의 유사도를 나타내고 있다. 유사도 비교 시에 전처리 과정을 통해서 조각을 상하 좌우로만 이동시켜서 정합할 수 있으므로 정합 방향을 결정하는 계산량을 많이 줄일 수 있었다. 또 선택된 조각과 나머지 조각을 비교 시에도 조각의 회전을 고려하지 않아도 되기 때문에 계산량을 많이 줄일 수 있었다. 즉, 1번 조각의 오른쪽 방향은 나머지 조각들의 왼쪽 방향과만 유사도를 계산하면 되고, 1번 조각의 다른 방향도 나머지 조각들의 대칭되는 부분과만 유사도를 계산하면 된다.

표 1. 글자 정렬을 위한 실험  
Table. 1 Results from letters alignment experiment

회전각도	수동 선택	2글자 이용	LSF이용	
30°	most	0.03	0.28	0.65
	least	7.70	4.91	2.10
	average	3.07	2.08	1.26
	variance	3.86	2.20	0.21
60°	most	1.11	0.56	0.15
	least	4.90	4.00	1.57
	average	3.16	2.37	1.02
	variance	1.84	1.29	0.20

중앙 하단에 점선으로 표시되어 있는 부분이 기하학 오차와 색상 정보가 각각 세부적인 정합 위치 결정 시에 어느 정도의 비중으로 고려되는 지를 사용자가 선택할 수 있도록 만든 GUI(Graphic User Interface)이다.

화면 하단 왼쪽 그림은 최초 선택된 조각이고 화면 하단 오른쪽 그림은 기하학 오차와 색상 정보를 고려하여 세부적인 위치를 찾아 결과를 보여주는 화면이다.

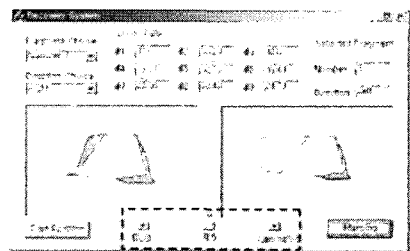
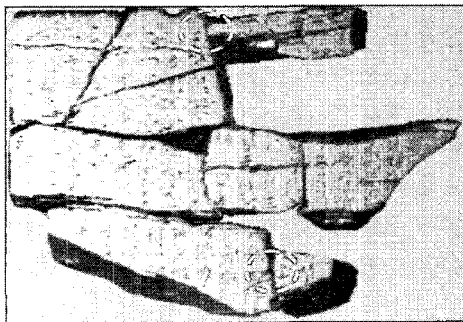
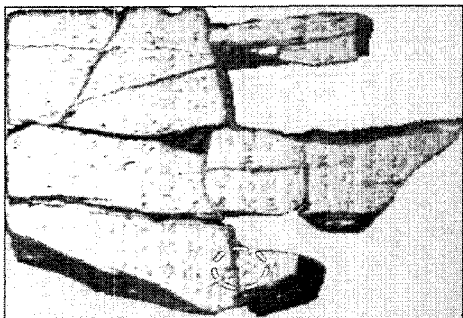


그림 11. 조각 정합 시스템 프로그램 화면  
Fig 11 Picture of Matching System Program

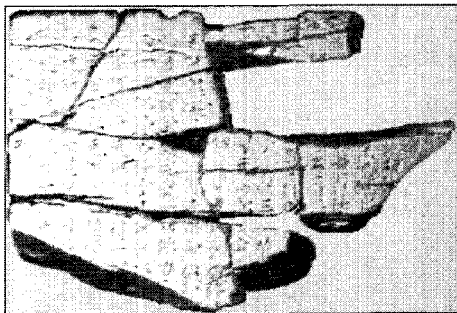
(그림 12)는 제안하는 방법으로 9개의 화엄석경 조각을 정합한 모습이다. 정합 결과는 문화재 전문가에 의해서 정합된 조각들의 글자 패턴을 보고 평가된 것이다. 결과의 정확도는 글자들의 수직 정렬과 수평 정렬을 기준으로 평가되었다. 원형으로 표시된 부분은 잘못 정합된 부분을 나타내고 있다. 기하학 오차만으로 정합했을 때와 색상 정보만으로 정합했을 때에는 오차가 있었으나, 두 가지 정보를 균등하게 고려했을 때에는 보다 정확한 결과가 나왔다.



(a)  $\alpha = 1.0$  (기하학 오차만 고려)



(b)  $\alpha = 0.0$  (색상 정보만 고려)



(c)  $\alpha = 0.5$  (기하학 오차와 색상 정보 동시 고려)

그림 12. 조각 정합 결과  
Fig 12 Results of Matching Fragments

## V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 3차원 데이터로 입력 받은 훼손된 문화재 조각을 정합하는 전문가 시스템을 개발하였다. 조각 정합을 위해서 대상 조각의 특성을 이용하여 조각 정렬과 글자 정렬 한 뒤, 조각의 부위별로 탐색하여 정확한 정합 부위를 탐색해 내었다. 기존의 수동으로 조각난 문화재를 복원하는데 있어서의 여러 가지 문제점을 해결할 수 있는 방향을 제시할 수 있었고 조각 정합을 위한 기존 연구와는 독창적인 방법을 제시하였다.

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 조각 정합을 하는 방법에 있어서 다음과 같은 점에서 기여를 하였다. 첫 번째로, 실험 대상이 되는 물체가 문화재라는 점에서 문화 콘텐츠나 IT 적용 분야에서 가치가 높고 고부가가치를 창출할 수 있다. 두 번째로, 기존의 연구에서 잘 다루지 않았던 훼손된 조각을 정합하는 방법을 다루고 있어서 실제 세계에서 적용되는 분야와 밀접하다. 세 번째로, 제안하는 방법은 기존의 방법보다 계산의 복잡도를 상당히 줄일 수 있었다. 즉, 3차원 이동과 회전 변환을 2차원의 이동 변환만으로 줄일 수 있었다.

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 표면에 글자가 있는 조각을 대상으로 했다는 면에서 모든 물체에 적용하는 면에서는 제한이 있다. 실제 모든 물체에 적용하기 위해서는 다루지 않은 부분이 많다. 본 논문에서 다루었던 것 보다 더 복잡하고 글자뿐 만 아니라 그림이 새겨져 있는 조각을 다루는 분야를 연구하는 것이 다음 과제일 것이다.

## 참고문헌

- [1] Cooper, D.B. et. al., "Assembling virtual pots from 3-D measurements of their fragments," Proc. of the 2001 Conference on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage, pp.241-254, 2001.
- [2] Cooper, D.B. et. al., "Bayesian pot-assembly from fragments as problems in perceptual-grouping and geometric-learning," Proc. of the 16th International Conference on Pattern



Recognition, Vol.3, pp. 30927-30931, 2002.

[3] Goldberg, D., Malon, C., and Bern, M., "A Global Approach to Automatic Solution of Jigsaw Puzzles," Proc. of the Eighteenth Annual Symposium on Computational Geometry, pp.82-87, 2002.

[4] Radack, G.M. and Badler, N.I., "Jigsaw puzzles matching using a boundary-centered polar encoding," Proc. of Computer Graphics Image, Vol.19, pp.1-17, 1982.

[5] Wolfson, H., "On curve matching," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.2, pp.483-489, 1990.

[6] Wolfson, H., Schonberg, E., Kalvin, A., and Lambdan, Y., "Solving jigsaw puzzle using computer vision," Annals of Operations Research, Vol.12, pp.51-64, 1998.

[7] Ucoluk, G. and Toroslu, I. H., "Automatic Reconstruction of Broken 3-D Surface Objects," Computers and Graphics, Vol.23, No.4, pp.573-582, 1999.

[8] The SHAPE Lab., "Assembling Virtual Pots from 3D Measurements of Their Fragments," VAST Conference, 2001.

[9] Kong, X. and Kimia, B.B., "On Solving 2D and 3D Puzzles Using Curve Matching," Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.2, pp.583-590, 2001.

[10] Cultural Properties Administration, Cultural Properties Yearbook," Daejeon, Korea, 1991.

[11] Dyer, S.A. and He, X., "Least Squares Fitting of Data by Polynomials," IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, Vol.4, No.5, pp.46-51, 2001.

[12] 문호석, 손명호, "문화재 원형 복원 시스템 구축", 한국경영정보학회 춘계학술대회 논문집, pp. 907-911, 2005.

**저자 소개**



**문 호 석**

2001년 2월 : 육군사관학교 화학과 졸업  
 2003년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사  
 2006년 8월 : 고려대학교 산업시스템 정보공학과 박사  
 2006년 3월 : 육군사관학교 전자정보학과 전임강사  
 관심분야 : 컴퓨터 비전, 워터마크



**손 명 호**

1985년 2월 : 서울대학교 산업공학과 졸업  
 1999년 2월 : 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 2003년 8월 : 한국과학기술원 테크노경영대학원 박사  
 2002년 3월~현재 : 명지전문대학 경영과 조교수  
 관심분야 : CAD/CAM, 전문가 시스템, 마케팅