

컴퓨터를 사용한 고대 유물 복원

김진태* · 문상호** · Andrew Willis***

1. 서 론

일부분만 남아 있는 물체를 자동으로 복원해주는 시스템은 많은 문명 연구에 커다란 도움이 되며, 다른 영역에도 잠재적인 적용 가능성이 있다. 예를 들어, 과학수사에서 부러진 뼈조각들의 복원이나 조각난 유리를 복원한 후 충격이 가해진 순간 유리 조직에 가해졌을 법한 에너지를 추정하는데 사용될 수도 있다. 자동 복원 시스템은 조각난 유물들을 최소 몇 달에서 수 년동안 손으로 조립하고 있었어야 할 고고학자들로 하여금 엄청난 시간을 절약할 수 있게 해준다. 더불어 파편들과 복원된 물체 모두를 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 도구를 선사함으로써 이전에는 불가능했던 해석을 가능케 해준다. 사실 대부분의 경우 조각난 그릇과 유물은 파편들의 형태가 유사하고 시공간적으로 가까운 상황에서 발견된 경우가 아니면 재조립되지 않는다. 디지털화된 조각들의 거대한 데이터베이스를 가지고 수행되는 이 자동화된 복원 시스템은 같은 발굴 현장에서 수년의 차이를

두고 얻어졌거나, 아니면 완전히 다른 장소에서 발견된 부분적인 혹은 완전한 형태의 무수한 유물들에 대해 밝혀낼 수 있다. 이처럼 복원 시스템은 조사원들의 시간을 절약해줄 뿐만 아니라, 충분한 데이터베이스만 있다면 유물을 복원해주는 역할까지 할 수 있다.

상징적이며 기하학적인 꽃무늬가 표현되어 있는 타일이나 벽 같은 경우, 보다 정확한 복원이 이루어져야만 고고학자들은 도상학적 그리고 명시적, 함축적인 메시지에 관한 중요한 정보들을 얻을 수 있다. 텍스트가 씌어 있는 석판이나 여타 유물들의 경우, 복원을 통해 금속학자들이 완전한 텍스트, 문장, 구절, 심지어 개별 단어까지 읽을 수 있게 됨으로써, 그 글자들의 형태와 스타일, 추론된 연대 및 다른 중요한 정보들을 통해 유적에 관한 새로운 통찰이 가능해진다.

이러한 시스템은 신호처리를 기반으로 설계되어진다. 결국 유물 복원의 문제는 잡음이 뒤섞여진 데이터를 복원해야 하는 가장 어려운 형태의 신호 복원과정이다. 이때 신호는 다수의 2차원 혹은 3차원 곡선과 3차원 표면(surface)이 결합된 형태이다. 카오스는 무질서한 파편 조각들에서 들어나는 신호로서, 잡음은 신호의 뒤뜰림에 더해 측정 과정에서 발생하는 변칙적인 섭동(perturbation)에서 드러난다. 혹은 복잡한 데이터 세트(이미지)의 조

※ 교신저자(Corresponding Author) : 김진태, 주소 : 충남 서산시 해미면 대곡리 360(356-756), 전화 : 041)660-1364, FAX : 041)660-1119, E-mail : jtkim@hanseo.ac.kr

* 한서대학교 컴퓨터정보공학과

** 영남이공대학 모바일과
(E-mail : shmoon@ync.ac.kr)

*** University of North Carolina at Charlotte
(E-mail : arwillis@unc.edu)

각들로 분해하고 왜곡과 잡음으로 변형시킨 후 그 조각들을 재조립할 방법이 썩어진 부가 정보를 잊어버린다고 볼 수도 있다. 더 일반적으로 말하면 조각의 형태 배열법이 없다. 그 조각들의 표면에 또한 패턴이 있을지도 모른다.

퍼즐 풀이에 관한 최초의 작업은 1960년대[1] 중엽까지 거슬러 올라가는 논의에서부터 1980년대의[2,3] 몇몇 추가 작업에까지 이르는 컴퓨터 사용 기반 직소(jigsaw) 퍼즐 자동 복원까지 거슬러 올라가야 한다. 하지만 그 문제에 관한 방대한 성과들은 최근에서야 나타났고 현재의 시스템을 사용하면 수백 개의 조각을 가진 직소 퍼즐을 자동 조립하는 것이 가능하다[4,5].

현실 세계의 고고학적 퍼즐 조각의 재조직, 즉 조각들의 치수를 바탕으로 무정형의 부서진 물체를 재구성하는 문제는 최근까지 거의 아무런 주목을 받지 못했다. 이 문제는 상업적으로 생산된 퍼즐을 조립하는 것보다 더 어렵다. 최대 난점은 조각들의 형태가 불규칙하여 전체의 어느 부분이나 들어맞을 수 있다는 것이다. 더욱이 전형적인 현실 세계의 퍼즐들은 혼란을 초래할 수 있는 소지가 다분한데 그 중 몇몇을 살펴보면 다음과 같다. (1) 부서짐: 이 빠짐으로 인한 물리적 손상, 또한 비바람, 침식에의 노출 (2) 해결된 퍼즐의 숫자를 알 수 없음 즉, 우리가 가지고 있는 조각들이 몇 개의 물건들에서 나온 건지 알 수 없음 (3) 아직

발견되지 않았거나 혹은 어떤 물리적 현상에 의해 파괴된 까닭에 조각들을 찾아낼 수 없을지도 모른다. 그림 1은 상업적인 퍼즐과 부러진 파편을 재구성하는 차이점을 보여준다.

2. 문제를 2D로 변환하기

복원하려는 모든 현실 세계의 사물들은 3차원이다. 그러나 석판처럼 평평한 물체의 경우, 위나 아래에서 본 석판 조각의 윤곽을 사용하여 단순화하는 방식으로 2차원 평면 커브에 적합한 방식으로 전환하기도 한다. 통상적으로 위쪽 면이 복원에 사용된다. 그 이유는 얇은 판이나 고른 형태의 파손면을 가진 판의 경우, 이렇게 단순화하면 복원의 정확도를 떨어뜨리지 않으면서 계산상의 복잡함을 줄일 수 있기 때문이다[6]. 이론적으로 (1)slab geometry를 가진 경우와 (2) 극도로 얇은 경우, 누락되는 것은 판의 두께에 관한 정보뿐이다. 이 경우, 판의 완전한 3D 형상은 온전한 경계면과 부서진 경계면을 그 판의 두께에 상응하는 양만큼 수직으로 추출하여 산출해낼 수 있다. 즉, 완벽한 3D 표면은 두께와 2D 평면 변수 측정값의 양함수이다.

파편의 접합부의 이용 - 어떤 연구자들은 세 조각의 파편이 만나는 특별한 지점이 복원시 유용하다는 사실에 주목했다[7-10]. 이 지점은 세 파편이 만나는 지점의 상대적인 각도에 따라 T 혹은 Y 정선(junction)이라 불린다. 실험에 사용된 모든 판의 70~90%의 내부 정선은 T, 나머지 중 6~10%는 Y 정선이었다고 연구자들은 보고했다[7]. 복원을 위해 이러한 위치를 알아내는 것의 유용성은 그림 2에 나타나 있다. 몇 가지 방식의 경계부 매칭을 통해 이 위치를 식별해내는 작업이 행해지고 있다. 관계된 정선이 3조각 이상인 경우

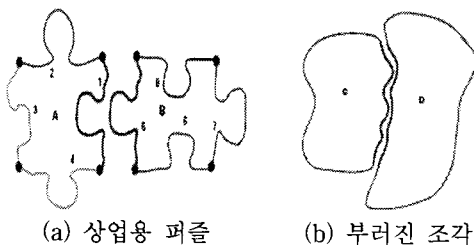


그림 1. 상업적 퍼즐과 부러진 조각의 재구성

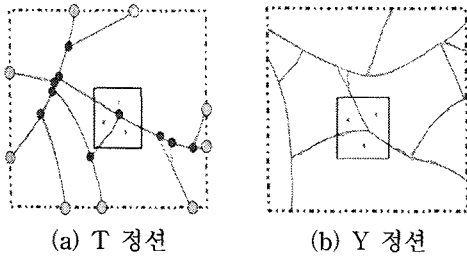


그림 2. 기하학적 접합부의 특징

도 있긴 하지만, 경험적으로 볼 때 그러한 상황의 상대적인 발생 빈도수는 낮다.

온전한 경계부의 처분 - 대부분의 복원은 온전한/파손된 면의 질감이 다르다는, 내지는 경계부가 수동으로 확인되었거나 그렇지 않다면 제거되었을 거라는 가정 하에 자동적 혹은 반자동적으로 외부 경계부를 분류하는 접근 방식을 취한다 [6,7,11,12].

3. 2D 재구성을 위한 접근법

두 가지의 대표적인 최첨단 컴퓨터 판 복원 방식은 [6]과 [7]이다. 이것은 그림 3에서 개략적으로 표현된 일반적인 조립 방식을 따르고 있는데 예외가 있다면 [6]의 저자들은 꼭지점을 사용해 프랙처 커브(fracture curve)를 다시 조각들로 나누고 있지 않다는 것이다. 이 방식들에 수반되는 차이점은 크게 (i) 매칭을 위해 선택된 특징 (ii) 커브 매칭 함수 작업 (iii) 어떻게 정확한 짝이 찾아지고 그것이 큰 그림 속에서 그것이 드러나는가의 문제이다.

3.1 특징 선택

[6]에서는 재구성을 위해 단편 단면 곡선(fragment fracture curve) 만이 사용된다. 이들 곡선은 곡선 호 길이의 함수로서 곡률로 표시된

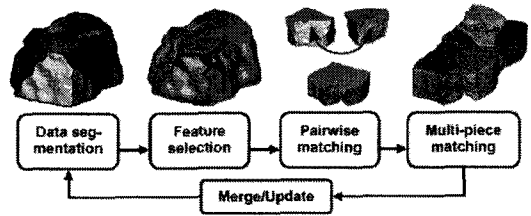


그림 3. 물체 재구성의 일반적 과정

다. 이산 샘플링 경계를 위해 이 표현은 호 길이의 균등 구간에서 샘플링할 때 단편 경계(fragment boundary)의 국부적 곡률을 계산함으로써 구해진다. 산출된 이산 1차 함수를 곡률 서명(curvature signature)이라 칭한다[13].

충분한 밀도로 샘플을 취했다면 이 표현은 다음의 두 가지 미분 기하 정리로부터 도움을 받는다. (i) 기본 존재와 유일성 정리(fundamental existence and uniqueness theorem)는 평면 곡선에 대해 알려지지 않은 위치와 방향까지 곡률 서명이 원래의 경계 곡선과 완전히 동일함을 보증한다 [14]. (ii) 오직 동일한 곡률 서명을 가질 때에만 두 개의 평면 곡선은 합동이다[15]. 곡률 서명은 경계의 고유 속성이므로 좌표로부터 자유롭다. 즉, 유클리드 변환에 대해 불변이다. 이것은 자신의 곡률 서명을 직접 정합시킴으로써 단편 경계 모양이 정합되도록 한다.

불행히도 곡률 서명이 가능하도록 위치와 방향이 자유로운 표현은 곡률을 계산할 때(특히 단편 경계의 경우) 얻어지는 본질적인 잡음 값에 의해 거슬러진다. 정확한 곡률 값을 얻을 때 발생하는 문제는 다음 두 가지에서 기인할 수 있다. (1) 곡률은 단편 경계의 2차 도함수에 의해 결정된다. (2) 단편 경계는 일반적으로 표면 도함수가 국지적으로 불연속이며 이들 영역에서의 측정이 더욱 가변적이고 덜 정확한 영역을 묘사한다. 이들 영향은 문헌에서 널리 인정되고 있으며, 곡률 서명

(또는 비틀림 같은 다른 미분량)을 사용하는 거의 모든 기법은 저주파 통과 필터링(즉, 곡선 평활화)을 수행하여 추정되는 곡률 가변성을 제어한다 [6,13,16-18]. 가변성의 다른 중요 소스는 추정 기법에 존재하는 치우침이다. 추정 접근법 및 그 상대적 장점에 대한 세부 사항은 2D[19,20] 및 3D [20-25] 모두에서 널리 이용할 수 있다.

[6]은 단편 단면 곡선과 정점을 사용하여 재구성을 수행한다. 이들 곡선은 대다수의 곡선 비교를 위한 곡률 서명으로 표현된다. 하지만 이 방법 역시 소수의 매우 유사한 후보로부터 최상의 정합 후보를 결정하는 최종 정합 단계에서 측정된 2D 경계점에 의존한다.

이런 특징이 2D 경계 곡선에 대한 표현이라면 이 두 가지 접근법은 해당 단편으로부터 정합하는 단편 곡선 부분을 반드시 식별해야 한다. 각 곡선 부분은 완전한 단편 단면 곡선의 연속적인 부분 집합이며 해당 단편이 떨어져 나갈 때 생성된 알 수 없는 길이의 곡선 호 길이를 갖는다. 이들 단편 곡선 부분의 대응과 길이는 완전한 단편 곡선의 임의의 부분을 따라 곡선이 정합하도록 하는 곡선 정합 과정의 일부로써 추정된다. 대조적으로 [7]은 탐지된 단편 정점의 더 작은 집합을 통해 검색하여 상당히 적은 연산을 포함하는 정합 단편 곡선 부분을 확인한다.

3.2 성과함수 정합

고고학적 단편은 종종 풍화되거나 부서지며 곡선의 호 길이와 측정된 미분량 모두 거칠며 정확히 일치하지 않는다. 따라서 교차 상관 및 최소 제곱 오차와 같은 고전적 곡선정합기법이 실패하기 쉽다. 이런 이유로 고고학적 곡선정합 접근법은 탄성 곡선정합법(elastic curve matching method)을 사용한다. 이런 방법은 생물학적 서열

정합, 조정된 스테레오 이미지 쌍 사이의 조밀 픽셀 정합 및 음소 인식(speech phoneme recognition) 등과 같은 다양한 분야에서 오랫동안 응용되어 왔다.

참고 문헌 [6]은 (i) 경계 상의 대응점은 동일한 곡률을 가져야 하며 (ii) 곡선 사이의 대응은 가능한 1대1에 가까워야 한다는 두 개의 제약을 시행하고자 하는 곡선정합 성과함수(curve matching performance functional)를 정의한다. 첫 번째 제약은 대응 위치에서 정합된 곡선의 곡률 제곱 차를 합하는 가중 거리 측정법에 의해 실시되며 정합된 곡선 샘플 지수에서 순차적 차를 취함으로써 얻어지는 호 길이의 근사값으로 이 차를 측정한다. 두 번째 제약은 대응 곡선과 1대1 대응에 의해 정의된 대응 곡선 즉, 직선 대각선 사이의 맨해튼(Manhattan) 거리를 측정함으로써 시행된다.

앞에서 언급한 바와 같이 [7]은 (i) 곡률 서명 정합과 (ii) 미세한 상세 사항에 대한 유클리드 정합의 두 가지 곡선정합 성과함수를 사용한다. (i)의 경우 편집 거리(edit distance)라 부르는 성과함수를 정의한다. (ii)의 경우 다른 동적 프로그래밍 곡선 정합 기법을 사용하여 측정된 경계점 사이의 대응을 구한다. 이 대응을 이용하여 두 개의 단편 경계를 정렬하면서 대응점 사이의 제곱 거리를 최소화하는 유클리드 변환을 빨리 계산하기 위해 [26]과 [27]의 기법을 사용한다. 이 경우 곡선 정합을 위한 성과함수는 수동 지정 파라미터에 의해 가중된 세 가지 항, 즉 (1) 정렬 후 정합점 사이에서 관찰된 제곱 오차, (2) 정합된 곡선의 길이, 그리고 (3) 경계에서의 변화량 즉, 복잡성의 측정 또는 정합된 곡선의 들쭉날쭉함의 합이다.

3.3 해 검색

자동화 시스템의 최종 목표는 퍼즐 내에서 일

부 정합을 확인하는 것이다. 따라서 시스템이 대역 해를 제공하는 지배적 제약은 없다. 사실 일반적인 상황에서 시스템이 단편을 누락하고 있고 일부 경우에는 기타 무관한 조각을 포함하고 있다면 이러한 해의 존재를 정의하는 것은 문제가 있다. [6]에서는 이러한 관점을 염두에 두고 각 단편 경계의 일부 연속적 부분 집합에 대해 유일한 단편정합을 얻을 때까지 각 축척에서 후보 정합의 수를 줄이는 곡선정합 성과함수를 사용하는 다중 축척 절차를 명시한다. 이 점에서 단편의 본질적 속성 정합이 제공하는 쌍 대응(pairwise correspondence)은 퍼즐 해인 단일 대역 좌표계 내에서 정렬될 단편 경계를 허용한다.

[7]에서는 최상 대역 우선(best-global-first)이라 부르는 최상 우선(best-first) 전략에 대한 변화를 사용한다. 이 기법은 T와 Y 분기점을 관찰하며 열린 정점 즉, 3조각 미만이 정합하는 곳에서의 단편 경계 정합을 추구한다. 곡선정합 성과함수를 적용하여 가능한 정합 후보 단편의 짧은 목록을 찾는다. 이 짧은 목록의 각 후보는 열린 정점에서 공간을 채우는 단편을 선호하는 지정된 대역 신뢰 점수(global confidence score)이다. 그런 다

음 곡선 정합과 대역 신뢰 점수가 최상으로 결합된 단편이 조각의 구성에 더해진다. 잠재적인 부정확 정합을 고려하기 위해 다른 초기 단편을 갖는 검색 프로세스를 시작함으로써 다른 해를 병렬로 고려한다. 그 결과는 최종 대역 해와 일치하거나 일치하지 않을 수 있는 퍼즐에 대한 해의 집합이다(그림 4 참조).

4. 3D 재구성을 위한 접근법

3D 대상 구성을 위해 10개 이상의 다른 접근법이 존재하지만 해당 접근법에 대한 최근의 변형인 3D 대상 재조립을 위한 현재의 첨단 기법을 대표하는 네 가지 접근법에만 주목한다[9,11,12,28,29]. 일반적인 자유 형식 3D 기하 재구성을 위해 논의된 네 가지 접근법 중 두 가지만을 논의한다 [11,12]. [29]의 접근법은 축 대칭 표면의 재구성 즉, 물레에서 만들어진 도자기에 중점을 두며, [28]은 완전한 재조립 시스템이라기보다는 로마의 대리석 지도 즉, 로마의 분할 대리석 계획(Severan Marble Plan of Rome) 또는 Forma Urbis Roma에 새겨진 태블릿의 정렬을 위해 적용된 실험적인 정렬 기법의 모음이다.

[9], [10], [29] 및 [30]의 논문 순으로 도자기 단편 외부면의 측정으로부터 재구성을 위한 시스템을 기술한다. 이 시스템은 세 가지 점에서 독특한데 (1) 재구성된 해가 회전 표면이 되도록 함으로써 즉, 단일 성과함수 내에서 지역 및 대역 기하 정보가 극대화 되도록 결합함으로써 전체 단편 외부면을 사용하는 유일한 접근법이고, (2) 추정을 위해 베이지안(Bayesian) 프레임워크를 사용하는 유일한 접근법이며, (3) 여러 퍼즐의 동시 해결 문제를 다루는 유일한 해이기 때문이다.

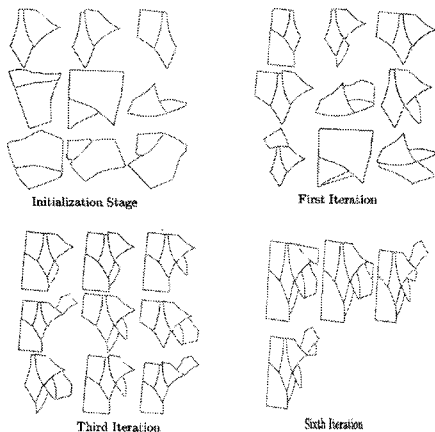


그림 4. 9개의 부러진 파편들의 조립 가능한 경우

4.1 단편 측정으로 도기 조립

과거에 대한 이해에 있어 도기의 중요성을 전제로 도기 단편 해석을 위한 상당한 연구 노력이 행해져 왔다. 하지만 단편 측정으로 실제 부서진 도자기 재구성을 추구하는 접근법은 거의 없다.

[16]의 접근법은 유형학에서 제공하는 알려진 선형적 모양 집합으로부터 나오는 도자기 단편의 분류를 추구한다. 유형은 주어진 용기의 특징적 모양 역할을 하는 사전 정의된 원형(prototype) 모양의 집합으로 구성된다. 원형은 단지 외륜, 기부 또는 전체 도기 용기 모양일 수 있을 것이다. 유형에 대한 도기 단편의 분류가 고고학자에게 꽤나 유용하기는 하지만 이런 기법은 깨어지지 않은 도자기 용기의 모양을 추정하기 위해 실제 측정된 단편과 일치하도록 설계되지는 않았다. 따라서 이런 기법은 재구성을 위한 시스템이라기 보다는 분류 시스템으로 본다.

다른 접근법은 체적 접근법(volumetric approach)인 [30]를 포함한다. 여기서 저자들은 도자기 중심 축 부근의 도자기 단편을 회전시켜 정의한 공간적 체적을 성형함으로써 도자기의 체적 모델 계산을 추구한다. [31]와 [32]에서 저자는 단편의 측정된 3D 기하를 사용하여 가상 환경에서 수동 조립을 위한 3D 모델을 만든다.

4.2 특징 선택

이 접근법에 사용된 특징은 (1) 중심 축 관점에서 회전 표면과 이 축에 대한 프로파일 곡선에 의해 적합해지는 단편 외부면, 그리고 (2) 외부 중단곡선(break curve)이 도자기의 축 대칭 표면 상에 존재하도록 제약되어있기 때문에 2D 태블릿 정합으로부터의 단편 곡선 경계와 많은 면에서 유사한 외부 중단곡선으로 이루어졌다. 외부 중단곡선은

도자기 축에 대한 3D 점의 연속으로 모델링되며 그 좌표는 외부 중단곡선의 변수를 구성한다. [7]의 접근법과 유사하게 외부 중단곡선 구간은 분기점에서 만난다. 이들 분기점은 2D 축 대칭 표면에 위치하도록 제약된 3D 점이므로 이 위치를 외부 정점(outer vertex)이라 하며 단편 외부면 경계를 따라 일반적으로 곡률 위치에 대응한다(그림 5, 6, 7 참조). 프로파일 곡선은 도자기 축을 따른 높이의 함수로써의 도자기 반경 곡선이라 부른다. 프로파일 곡선은 6차 대수 곡선 즉, 6차 음함수 다항식의 zero set으로 모델링된다. 이 표현은 하나의 단

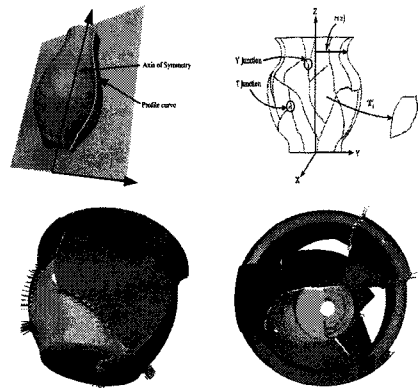


그림 5. 대칭축이 있는 3차원 깨어진 물체의 재구성

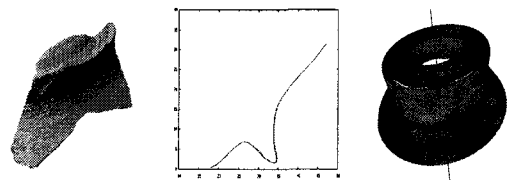


그림 6. 프로파일 곡선이 있는 3차원 물체의 재구성

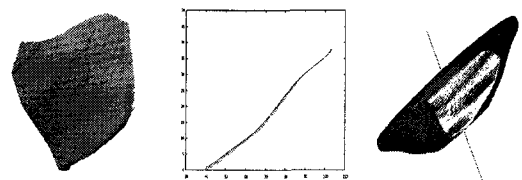


그림 7. 빗살 무늬가 있는 3차원 물체의 재구성

편은 손상되고 나머지는 거의 평면인 외부면 모델을 효과적으로 포착한다.

4.3 정합과 해 검색

이 문제에 대한 초기 접근법은 도자기의 기하 구조를 측정된 모든 단편 데이터의 확률을 최대화 하는 일치된 외부면 중단곡선과 대역 축/프로필 곡선 기하의 모음을 찾고자 하는 최대 가능성 추정 문제로 시도했다. 단편 쌍을 정렬하기 위해 각 단편에서 하나씩 외부 정점 쌍(외부 중단곡선 상의 고곡률점)을 정렬한 후 바로 곁에 이 정점을 유지하면서 단편을 정렬한다. 단편 당 대략 4개의 정점이 있으므로 100개의 단편이 있다면 단편 쌍의 비교에 필요한 정렬 횟수는 32이고, 5,000쌍의 단편의 경우 정렬 횟수는 160,000이다. 검색 알고리즘은 두 단편의 가능한 모든 구성으로 시작하여 확률이나 동적 감소순, 에너지 증가 순으로 이들을 스택에 배열한 후, 각 반복에서 하나의 단편을 더해 구성을 스택의 최상위 구성으로 성장시킨 다음, 적절한 경우 결과 구성을 스택의 최상위에 유지하거나 새로운 위치로 이동시킨다. 이런 식으로 높은 확률의 구성이 성장하고 구성은 다른 도자기에 대해 자동으로 성장할 것이다. 구성 확률이나 에너지는 여기서 반드시 적절히 정규화되어야 하는데 이는 다른 구성은 다른 수의 데이터 점을 포함하기 때문이다.

이 방법이 유효하게 작동하기는 하지만 검색 문제의 계산 복잡성 즉, 정확한 단편 일치 찾기와 각 단편 비교의 계산 비용 때문에 소수의 단편만을 다룰 수 있다. 여기서 획기적 계산 방법(computational killer)은 이 접근법이 원시 범위 데이터를 매번 두 번씩 처리한다는 것 또는 더 많은 표면 단편이 정렬되고 각 단편에 대한 데이터 점의 수가 보통 수천 개라는 것이다. 이 접근법

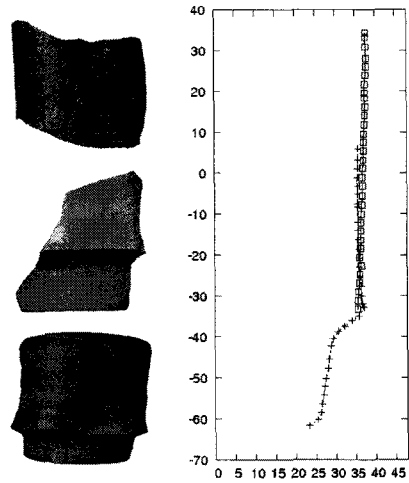


그림 8. 고대 유물로부터 표면 측정 결과

에 대한 최근의 변형은 동일한 원시 데이터를 반복적으로 사용하기보다는 해당 단편 기하 구조에 대한 간결한 확률 분포를 사용하여 정합 프로세스를 가속화하고 적절한 일치에 대해 더 빠르거나 더 포괄적인 검색을 허용한다[9]. 또한 중단곡선 정점 정렬에 의한 정렬 시작 보다는 단편 그룹에 대해 축/프로필 곡선을 먼저 정렬하는 크기 우선 순이다. 마지막 평은 축 대칭의 대역 구조 이용은 외부 중단곡선의 침식 및 부스러짐에 대한 견고함을 제공한다는 점이다. 축/프로필 곡선 추정은 이러한 변형에 덜 민감하고 축/프로필 곡선 추정은 도자기 단편이 만나는 곳에서 외부 중단곡선의 완벽한 조립이 더 이상 절대적이지 않은 단편 재조립에 대해 이런 강력한 정보를 제공하기 때문이다(그림 8참조).

5. 결 론

본 논문은 자동 및 반자동 인공물 재구성 시스템 모두의 첨단 기술에 대한 내용을 제공한다. 퍼즐 재구성 문제를 2D 및 3D 인공물 재구성 문제에 대해 논했다. 2D 테블릿 재구성을 위한 접근법과

3D 물체 재구성을 위한 접근법을 이런 시스템이 의존하는 여러 가지 알고리즘에 대한 부분적인 설명을 포함하였다. 엄격히 기하 구조만 정합하는 것을 넘어서는 문제를 일반화하는, 단편 외부면 상에서 명백한 패턴을 사용한 기하학적 정합으로 확장된 몇몇 문제에 대해서도 논했다. 이 문제를 해결하기 위해 필요한 모델은 새롭고 도전적인 것이며, 신호 처리 커뮤니티에서 대부분 크게 연구하지 않은 3D를 포함한다. 이 연구는 원격 몰입 (tele-immersion) 등을 위해 어렵듯이 나타나고 있는 새로운 3D 신호 처리와 깊은 관련이 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. Freeman and L. Garder, "A pictorial jigsaw puzzles: The computer solution of a problem in pattern recognition," *IEEE Electron. Comput.*, Vol.13, pp. 118-127, 1964.
- [2] H. Wolfson, E. Schonberg, A. Kalvin, and Y. Lambda, "Solving jigsaw puzzles using computer vision," *Ann. Oper. Res.*, Vol.12, pp. 51-64, 1988.
- [3] G. Radack and N. Badler, "Jigsaw puzzle matching using a boundary-centered polar encoding," *CGIP*, Vol.19, pp. 1-17, 1982.
- [4] D. Goldberg, C. Malon, and M. Bern, "A global approach to automatic solution of jigsaw puzzles," in *Proc. Computational Geometry*, 2002, pp. 82-87.
- [5] S. Li, *Markov Random Field Modeling in Image Analysis*, Springer-Verlag, 2001.
- [6] J. Stolfi and H. Leitao, "A multiscale method for the reassembly of two-dimensional fragmented objects," *IEEE PAMI*, 2002.
- [7] J. McBride, *Archaeological fragment re-assembly using curve matching*, M.S. thesis, Brown Univ., Sept. 2002.
- [8] B. Kimia and J. McBride, "Archaeological fragment re-assembly using curve matching," in *Workshop Computer Vision Applications in Archaeology*, 2003.
- [9] A. Willis and D. Cooper, "Estimating a-priori unknown 3-D axially symmetric surfaces from noisy measurements of their fragments," in *Proc. 3-D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2006, pp. 334-341.
- [10] A. Willis, *Stochastic 3-D geometric models for classification, deformation, and estimation*, Ph.D. dissertation, Brown Univ., 2004.
- [11] G. Papaioannou, E-A. Karabassi, and T. Theoharis, "Reconstruction of three-dimensional objects through matching of their parts", in *Proc. PAMI*, 2002.
- [12] Q-X. Huang, S. Floy, N. Gelfand, M. Hofer, and H. Pottmann, "Reassembling fractured objects by geometric matching," *ACM Graph.*, Vol.25, No.3, pp. 569-578, 2006.
- [13] H. J. Wolfson, "On curve matching," *IEEE PAMI*, Vol.12, No.5, pp. 483-489, 1990.
- [14] M. M. Lipschutz, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Differential Geometry*, New York: McGraw-Hill, 1969.
- [15] H. W. Guggenheimer, *Differential Geometry*, New York: Dover, 1977.
- [16] A. Gilboa, A. Karasik, I. Sharon, and U. Smilansky, "Towards computerized typology and classification of ceramics," *J. Archaeological Sci.*, pp. 681-694, 2004.
- [17] W. Kong, *On solving 2-D and 3-D puzzles using curve matching*, M.S. thesis, M.S. thesis, Brown Univ., May 2002.
- [18] J. Stolfi and H. Leitao, "Measuring the information content of fracture lines," *Int. J. Comput. Vis.*, pp. 163-174, 2005.
- [19] S. Hermann and R. Klette, "A comparative study on 2-D curvature estimators," in *Proc. ICCTA*, 2007, pp. 584-589.
- [20] S. Manay, B-W. Hong, D. Cremers, A. J. Yezzi, and S. Soatto, "Integral invariants for shape matching," *IEEE PAMI*, Vol.28, No.10, pp.

1602-1618, 2006.

[21] X. Tang, "A sampling framework for accurate curvature estimation in discrete surfaces," *IEEE Visual. Comput. Graphics*, Vol.11, No.5, pp. 573-583, 2005.

[22] S. Rusinkiewicz, "Estimating curvatures and their derivatives on triangle meshes," in *Proc. 3-D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2004, pp. 486-493.

[23] S. Petitjean, "A survey of methods for recovering quadrics in triangle meshes," *ACM Comput. Surv.*, Vol.34, No.2, pp. 211-262, 2002.

[24] M. Desbrun, M. Meyer, P. Schoder, and A. H. Barr, "Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow," in *Proc. 26th SIGGRAPH*, 1999, pp. 317-324.

[25] G. Taubin, "A signal processing approach to fair surface design," in *Proc. 22nd SIGGRAPH*, 1995, pp. 351-358.

[26] B. Horn, "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions," *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol.4, No.4, pp. 629-642, 1987.

[27] S. Umeyama, "Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns," *PAMI*, Vol.13, No.4, pp. 376-380, 1991.

[28] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm," in *Proc. Intl. Conf. 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001, pp. 145-152.

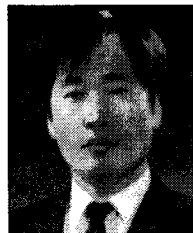
[29] A. Willis and D. Cooper, "Bayesian assembly of 3-D axially symmetric shapes from fragments," in *Proc. Conf. CVPR*, 2004, pp. 82-89.

[30] M. Kampel and R. Sablatnig, "Virtual reconstruction of broken and unbroken pottery," in *Proc. Conf. 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003, pp. 318-325.

[31] I. Marie and H. Qasrawi, "Virtual assembly of pottery fragments using moir surface profile measurements," *J. Archaeological Sci.*, Vol.32, pp. 1527-1533, 2005.

[32] Y. Lu, H. Gardner, H. Jin, N. Liu, R. Hawkins, and I. Farrington, "Interactive reconstruction of archaeological fragments in a collaborative environment," in *Proc. DICTA*, 2007, pp. 23-29.

[33] A. R. Willis and D. B. Cooper, "Computational Reconstruction of Ancient Artifacts," *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008.



김진태

- 1987년 2월 중앙대학교 전자공학과(공학사)
- 1989년 2월 중앙대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1993년 8월 중앙대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2008년 1월~2009년 1월 Univ. of North Carolina at Charlotte (UNCC) 교환교수
- 1995년~현재 한서대학교 컴퓨터정보공학과 교수
- 관심분야 : 영상처리, 3차원비전, 얼굴인식, 멀티미디어 등



문 상 호

- 1982년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1984년 4월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1998년 2월 경상대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1983년 10월~1995년 2월 삼성종합기술원
- 1989년 11월~1991년 10월 Univ. of Washington 교환연구원
- 2008년 3월~2009년 2월 Univ. of North Carolina 교환교수
- 1995년 3월~현재 영남이공대학 모바일과 교수
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 컴퓨터구조, 멀티미디어 등



Andrew R. Willis

- 1995 Worcester Polytechnic Institute (BS)
- 2001 Brown University (MS)
- 2004 Brown University (Ph.D)
- 1995~1998 Morgan Construction Co.
- 2005~Present University of North Carolina at Charlotte (assistant professor)
- Interesting fields : 3-D computer vision, computer graphics, and stochastic inference for geometric problem