

논문 2005-42CI-6-11

# 3차원 형상 재구성을 위한 새로운 복셀 칼라링 기법

(A New Voxel Coloring Method for 3D Shape Reconstruction)

예 수 영\*, 김 효 성\*, 주 재 흠\*\*, 남 기 곤\*\*\*

(Sooyoung Ye, Hyosung Kim, Jaeheum Joo, and Kigon Nam)

## 요 약

본 논문에서는 3차원 형상 재구성을 위하여 기존 복셀 칼라링 기법의 색상 일관성에 대한 문턱값 문제를 해결하기 위한 새로운 복셀 칼라링 기법을 제안하였다. 제안 기법에서는 중심카메라의 광선분위에 있는 내부 복셀의 색상 일관성을 비교함으로써 최적의 문턱값을 결정하였다. 즉, 표면 복셀에 대한 색상 일관성과 내부 복셀의 색상 일관성 값을 비교함으로써 표면 복셀에 대한 최적의 문턱값을 찾아가도록 하였다. 또한 그래프 절단 기법을 적용하여 주위 복셀을 제거함으로써 표면 잡음을 감소시켰다. 제안된 방법은 기존의 알고리즘보다 빠르고 정확하게 3차원형상을 재구성 할 수 있었다.

## Abstract

We propose an optimal thresholding method for the voxel coloring in the reconstruction of a 3D shape. Our proposed method is a new approach to resolve the trade-off error of the threshold value on determining the photo-consistency in the conventional method. Optimal thresholding value is decided to compare the photo-consistency of a surface with inside voxel on the optic ray of the center camera. As iterating the process of the voxels, the threshold is approached to the optimal value for the individual surface voxel. And also, graph cut method is reduced to the surface noise on eliminating neighboring voxel. To verify the proposed algorithm, we simulated in the virtual and real environment. It is advantaged to speed up and accuracy of a 3D face reconstruction by applying the methods of optimal threshold and graph as compare with conventional algorithms.

**Keywords :** Voxel coloring, Voxel carving, 3D reconstruction, Photo-consistency, Optimal thresholding.

## I. 서 론

최근 컴퓨터의 급속한 발달과 초고속 인터넷 망의 구축으로 인간의 욕구는 2차원 평면상의 미디어가 아닌 3차원 공간상의 미디어를 갈망하고 있다. 3차원 공간에서 이루어지는 가상현실은 아직 초창기이기는 하지만, 가상현실 기술이 적용된 멀티미디어 콘텐츠, 게임, 영화, 교육/훈련 시뮬레이터 등이 출현하였고, 조만간 경

제, 사회, 문화 등 모든 분야에서 가상현실을 활용하게 될 것으로 기대된다. 가상현실의 기술 중 근본이 되는 것이 가상공간 요소생성 즉 3차원 모델 생성기술이며 영상기반 3차원 형상 복원에 관한 연구가 오랫동안 진행되었다.

Potmesil<sup>[1]</sup>은 원근 투영(perspective projection)과 임의의 시점에서 옥트리 모델을 생성하고자 하였으며 각 시점에 대해 원뿔 볼륨을 옥트리로 표현한 후 모든 옥트리를 교차하였다. Szeliski<sup>[2]</sup>는 낮은 해상도의 옥트리 모델을 빠르게 복원시킨 후 새로운 입력 실루엣과 교차 과정을 반복적으로 수행하여 모델을 세밀화하였다. 일반적으로 실루엣 영상을 입력으로 볼륨 교차 테스트를 수행하는 볼륨 교차 기법(volume intersection)은 빠른 시간 내에 복셀 레벨에서 물체의 형상을 복원할 수 있는 장점을 가지고 있으나 유한한 시점에서의 영상 획득

\* 정회원, \*\*\* 평생회원, 부산대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Engr., Pusan National University, Pusan, Korea)

\*\* 정회원, 부산가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부  
(School of Computer Info. Engr., Catholic University of Pusan, Korea)

\* 본 연구는 교육부에서 주관하는 "차세대블류 IT 기술 연구 사업단"에 의해 지원 받은 연구임.

접수일자: 2005년7월13일, 수정완료일: 2005년10월31일

에 의한 모델 에러와 물체의 오목면에 대한 모델 에러를 유발시킨다. Seitz와 Dyer<sup>[3]</sup>는 색채가 풍부한 물체를 볼륨 교차 없이 색상 일관성(photo-consistency)을 이용하여 형상을 복원할 수 있는 복셀 칼라링(voxel coloring)기법을 제안하여 볼륨 교차 기법에서의 모델 에러를 감소시켰다. 복셀 칼라링 기법은 카메라의 위치가 순서 가지 제약조건(ordinal visibility constraint)을 만족해야하는 단점을 가지고 있다. Culbertson<sup>[4]</sup>, Slabaugh<sup>[5]</sup>은 임의의 카메라 위치에서 복셀 칼라링을 적용할 수 있는 일반화된 복셀 칼라링 기법(GVC : generalized voxel coloring)을 제안하였다. 복셀 칼라링 기법에서의 색상 일관성 판단은 복셀 투영 영역에 대한 비유사도(dissimilarity) 즉 절대 색상 차(absolute color difference)<sup>[6],[7]</sup> 또는 표준편차(standard deviation)<sup>[3],[4]</sup> 등의 계산에 의해 이루어진다.

비유사도의 문턱값(threshold) 적용에 의해 색상 일관성 여부를 판단하게 되며 비유사도가 문턱값보다 클 경우 색상 일관성에 위배되어 해당 복셀을 제거하고, 비유사도가 문턱값보다 작은 경우 해당 복셀을 남겨놓는 방식을 채택하고 있다. 비유사도에 대한 문턱값을 크게 할 경우 복원의 안정성은 유지되나 복원 정밀도가 낮아지며 비유사도에 대한 문턱값을 낮게 설정할 경우 복원 정밀도는 높아지나 복원의 안정성이 떨어지는 문턱값에 대한 trade-off가 발생하게 된다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 영상 기반 3차원 형상 복원을 위한 다중 가변 문턱값을 이용한 복셀 칼라링 기법(MTVC)을 제안한다.

제안 기법에서는 기존 복셀 칼라링 기법에서의 색상 일관성에 대한 문턱값 문제를 해결하기 위한 방법을 제시하며 그래프 절단 기법(graph cuts)을 적용하여 복셀 칼라링의 복원 안정성을 높이고자 한다.

기존의 복셀 칼라링 기법에서는 단일 표면 복셀에 대해 색상 일관성을 측정하고 설정된 단일 문턱값과 비교하여 복셀에 대한 제거 판단을 하였다. 복셀 제거 판단에 사용될 최적의 단일 문턱값을 찾기는 매우 힘든 작업이며 최적의 문턱값을 찾을 경우에도 모든 표면 복셀에 동일하게 적용해야하는 오류를 발생하게 된다.

제안된 복셀 칼라링 기법에서는 단일 표면 복셀 뿐만 아니라 검사 복셀에 대한 광 선분(optical ray)위의 내부 복셀을 동시에 고려하여 색상 일관성을 판단한다. 표면 복셀에 대한 색상 일관성의 문턱값을 내부 복셀의 색상 일관성 값과 비교함으로써 개별 표면 복셀에 대한 최적의 문턱값을 찾아가도록 한다. 또한 기존 알고리즘

에서는 색상 일관성 판단을 개별 복셀에 대해 적용함으로써 복원 표면에 요철 잡음을 유발시켰다.

제안 기법에서는 그래프 절단 기법<sup>[9],[10]</sup>을 적용하여 주위 복셀을 제거함으로써 표면 잡음을 감소시키고자 한다.

## II. 단일 고정 문턱값, 다중 가변문턱값

일반적으로 볼륨 교차 기법은 유한한 시점에서의 영상 획득에 의한 모델 에러와 물체의 오목면에 대한 모델 에러를 유발시킨다. 그림 1의 (a)에서 실제 물체의 표면을 surface\_b, 볼륨 교차 기법의 복원 표면을 surface\_a 라고 가정하자. 기존의 복셀 칼라링 기법에서는 surface\_b를 복원하기 위하여 surface\_a 복셀에 대해 미리 설정된 단일 고정 문턱값에 의한 색상 일관성을 판단하여 표면 복셀을 반복적으로 제거시켰다.

물체 표면의 색상 및 반사율, 조명등에 의해 단일 문턱값을 모든 표면에 적용하기는 어려우며 또한 임의의 물체에 대한 최적의 단일 문턱값을 결정하기란 쉬운 작

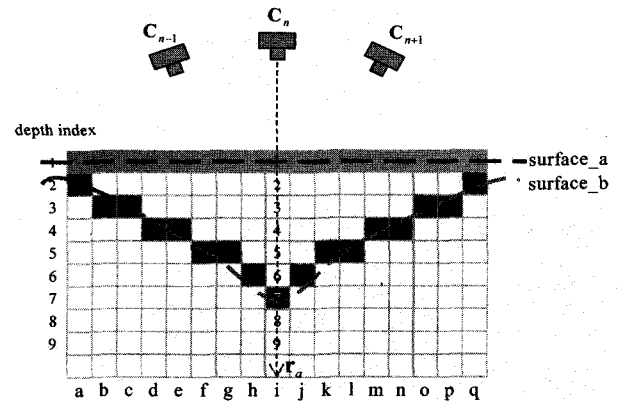


그림 1. 복원된 표면 복셀과 실제 표면 복셀  
Fig. 1. Reconstructed surface voxel and real surface voxel.

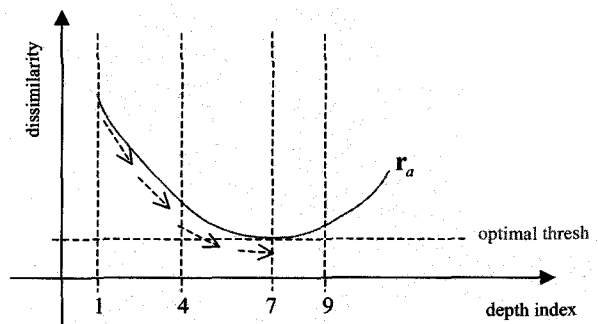


그림 2. 최적의 문턱값 결정  
Fig. 2. Decision of the best threshold value.

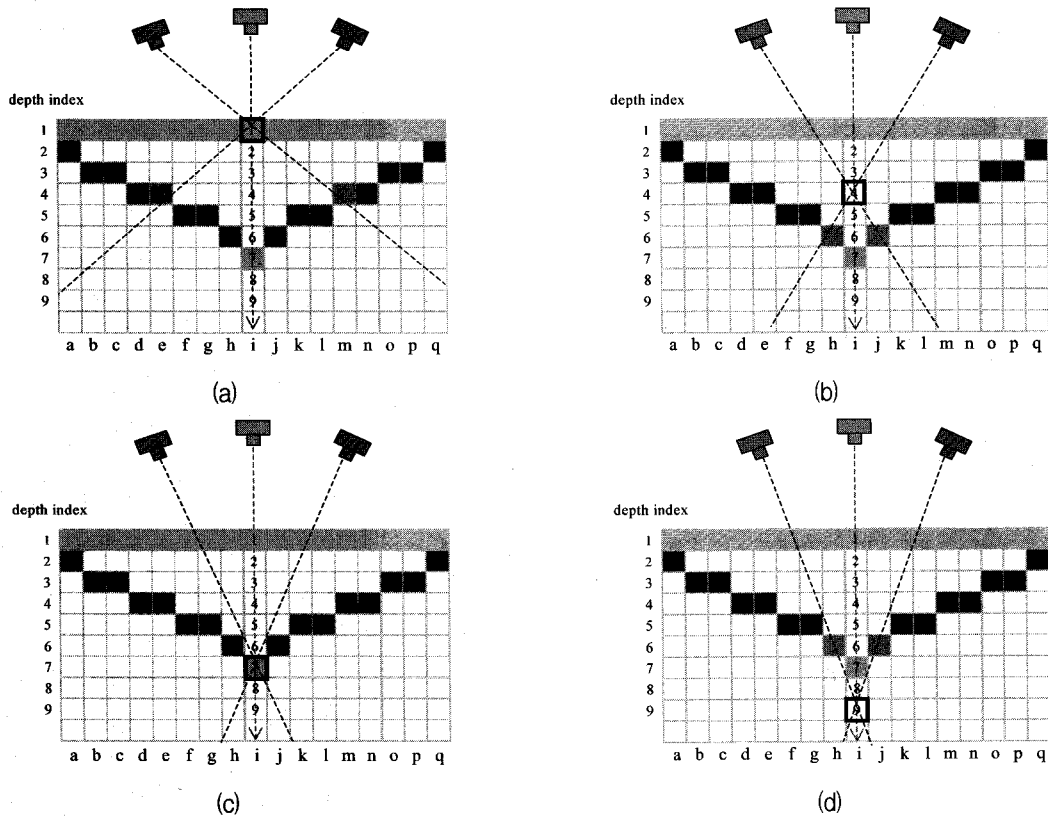


그림 3. 광 선분의 복셀에 대한 비유사도 계산 (a)~(d) 각 복셀에서의 비유사도 적용 영역  
 Fig. 3. Dissimilarity calculation of voxel of optical ray. (a)~(d) Dissimilarity applied area of each voxel

업이 아니다.

그림 1에서 표면 복셀  $V_{r,1}^{i1}$ 이 카메라  $C_{n-1}$ ,  $C_n$ ,  $C_{n+1}$ 에서 보인다고 가정할 때 중심 카메라  $C_n$ 에서 복셀  $V_{r,1}^{i1}$ 으로의 광 선분  $r_a$  위의 복셀에 대한 비유사도 그래프는 그림 2와 같이 나타난다. 즉 그림 3의 (a)의 복셀  $V_{r,1}^{i1}$ 에서의 비유사도는 복셀위치 e4, i7, m4에서 측정되며 실제 표면 복셀인  $V_{r,7}^{i1}$ 에 접근 할수록 비유사도는 낮아진다. 복셀  $V_{r,7}^{i1}$ 에서  $C_{n-1}$ ,  $C_n$ ,  $C_{n+1}$ 의 카메라가 동일 영역인 i7에서 비유사도가 계산되어 가장 낮은 비유사도를 가지며 다시 그림 3(d)의 복셀  $V_{r,9}^{i1}$ 에서는 비유사도가 높아지게 된다. 따라서  $V_{r,1}^{i1}$ 의 색상 일관성의 판단은 단일 고정 문턱값을 적용하지 않고 광 선분위의  $V_{r,2}^{i1}$ 의 비유사도를 문턱값으로 적용함으로써  $V_{r,1}^{i1}$ 의 비유사도가  $V_{r,2}^{i1}$ 의 비유사도 보다 클 경우 해당 복셀을 제거 시킨다.

반복적인 가변 문턱값 적용에 의해 최적의 문턱값에

접근하도록 한다. 상기 방법을 기존의 단일 고정 문턱값에 대하여 다중 가변 문턱값으로 표현한다.

### III. 제안 복셀 칼라링 기법

제안 다중 가변 문턱값을 이용한 복셀 칼라링 기법에 대한 처리 흐름도는 그림 4와 같다.

기본적으로 GVC 알고리즘<sup>[6]</sup>에 제안 다중 가변 문턱값을 적용시킨 형태를 가진다.  $V_p$ 는 볼륨 교차기법에 의해 복원된 복셀 형상을 나타내며  $P_\theta$ 는  $\theta$ 위치에서의 카메라 행렬을,  $I_{obj}^\theta$ 는  $\theta$ 위치에서의 오브젝트 영상을 나타낸다. 먼저 카메라 행렬로부터 카메라 위치를 계산한다. 볼륨 교차 기법에 의한 복원 복셀 데이터에서 표면 복셀을 찾는다. 각 복셀에 대해 보이는 카메라의 위치를 찾는다. 찾은 카메라 중 중심 카메라 위치를 계산한다.

중심 카메라 위치에서 각 복셀의 광 선분을 계산한다. 계산된 광 선분 위의 복셀에 대해 색상 일관성을 계산한다. 계산된 색상 일관성 값은 그래프의 가중치로

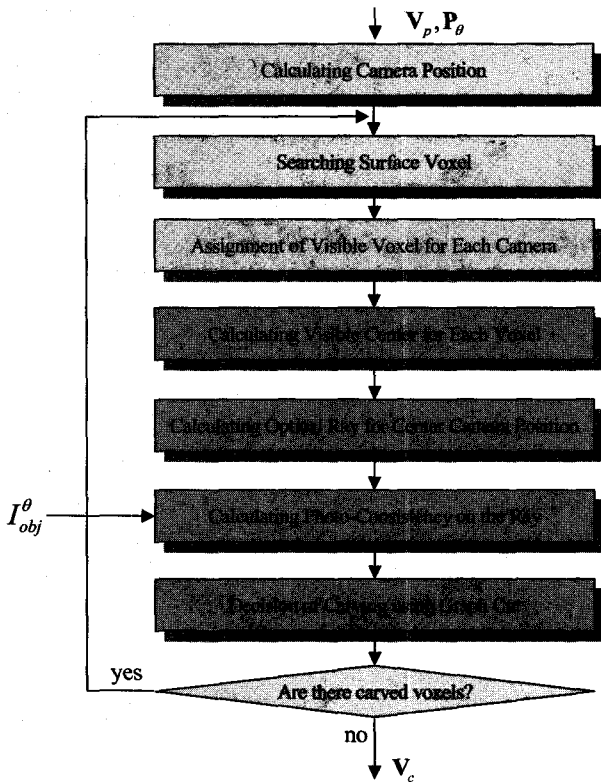


그림 4. 제안 복셀 칼라링에 대한 처리 흐름도  
Fig. 4. The flow chart of proposed voxel coloring.

주어지고 복셀 제거에 대한 판단은 그래프 절단 알고리즘의 결과로 결정한다. 각 표면 복셀의 제거 복셀이 없어질 때 까지 반복 수행한다.

1. 카메라 위치 계산

카메라의 위치  $C$ 는 카메라 행렬로부터  $PC = 0$ 에 의해 계산되어질 수 있다.

2. 표면 복셀 검사

볼륨 교차기법에 의해 복원된 3차원 복셀 배열 중 표면에 놓여진 복셀을 찾는다. 표면 복셀  $V_{sur}^k$ 은 자신의 값이 1을 가지고 6-연결 이웃 복셀이 하나라도 0이면 표면 복셀로 할당한다.

3. 가시 표면 복셀 검사

표면 복셀에 대해 색상 일관성을 계산하기 위해서는 임의의 복셀이 어느 카메라에서 보이는지를 그림 5와 같이 확인하여야 한다.

찾은 표면 복셀을 임의의 영상 평면에 투영한다. 표면 복셀은 각각 자신의 인덱스를 가지며 투영된 영상 평면 영역에 해당 인덱스를 기입한다. 투영된 영상 평

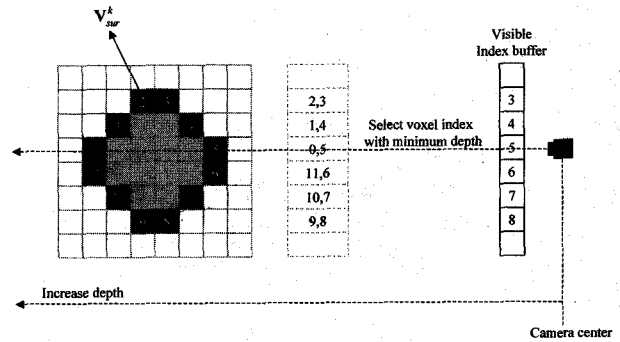


그림 5. 가시 표면 복셀의 추정  
Fig. 5. Visible surface voxel estimation.

면 영역에 다른 표면 복셀의 영역이 겹쳐지게 되면 이미 기입된 복셀과 현재 투영된 복셀과의 카메라 중심점으로부터의 거리를 계산하여 거리가 가까운 복셀의 인덱스로 교체한다. 모든 표면 복셀에 대해 투영 과정을 수행하면 가시 인덱스 버퍼(visible index buffer)에는 임의의 카메라에서 보이는 복셀의 인덱스만이 저장된다. 일련의 과정을 모든 카메라 각도에서 시행하면 임의의 복셀에 대한 가시 카메라에 대한 정보를 가지게 할 수 있다.

4. 중심 카메라 계산

임의의 표면 복셀에 대해 보이는 카메라에서 중심 카메라  $C^k$ 를 찾아낸다.

5. 광선분 계산

임의의 복셀에 대해 가시 중심 카메라에서 검사 복셀에 대한 광 선분을 계산한다. 먼저 중심 카메라 위치를 기준으로 검사 복셀로 향하는 단위 벡터를 다음 수식과 같이 계산한다.

$$n^k = \frac{C^k - V_{sur}^k}{\|C^k - V_{sur}^k\|} \tag{1}$$

광 선분위의 복셀은 검사 복셀을 기준으로 단위 방향 벡터로 정의된 길이를 곱해서 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$V_{r1}^k = V_{sur}^k + e \tag{2}$$

$$V_{r2}^k = V_{sur}^k + e \tag{3}$$

여기서  $e$ 는 복셀의 단위 길이를 나타낸다.

6. 색상 일관성의 계산

기존의 복셀 칼라링 기법은 가시 표면 복셀에 대해 색상 일관성을 계산하였으나 본 논문에서는 단일 고정 문턱값 문제를 해결하기 위하여 가시 표면 복셀 뿐만 아니라 가시 표면 복셀 기준 광 선분 위의 내부 복셀에 대해서도 색상 일관성을 계산한다.

색상 일관성은 검사 복셀에 대해 보이는 영상 면에 투영하여 각 투영된 영역에서의 영상 간 색상의 비유사도를 계산한다. 색상 일관성을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$consist(V_n) = \frac{a}{dissimilarity(V_n) + 1} \quad (4)$$

여기서  $a$  는 임의의 상수이고  $dissimilarity(V_n)$  는 비유사도를 나타내며 다음 식으로 표현된다.

$$dissimilarity(V_r^k) = \sum_{i,j} \{ |\mu_i^{red} - \mu_j^{red}| + |\mu_i^{green} - \mu_j^{green}| + |\mu_i^{blue} - \mu_j^{blue}| \} \quad (5)$$

여기서  $i, j$  는  $V_r^k$  복셀에 대해 보이는 영상 인덱스를 나타낸다.  $\mu_j^{red}, \mu_j^{green}, \mu_j^{blue}$  는 각각  $j$  영상에 대해 투영된 영역에서의 RGB에 대한 평균값을 나타낸다.

광 선분위의 복셀인  $V_{r1}^k, V_{r2}^k$ 에 대해 각각 색상 일관성을 계산해서  $V_{r1}^k$ 의 색상 일관성이  $V_{r2}^k$ 보다 작은 경우  $V_{r1}^k$ 은 모델 에러로 간주한다. 만약  $V_{r1}^k$ 의 색상 일관성이  $V_{r2}^k$ 보다 큰 경우  $V_{r1}^k$ 은 실제 물체의 표면 복셀로 간주한다. 복셀의 최종 제거 판단은 그래프 절단 기법에 의해 수행한다.

7. 복셀 제거 결정을 위한 그래프 절단 기법

표면 복셀에 대한 제거 및 유지의 판단은 표면 복셀을 두 개의 레이블 즉 Opaque, Carving으로 구분하는 것과 동일하다. 따라서 표면 복셀을 노드(node)로 구성하고 Opaque와 Carving 터미널(terminal)을 가지는 그래프를 구성할 수 있다.

에너지 최소화 수식은 다음과 같으며  $f$ 는 복셀이 가질 수 있는 레이블을 의미한다.

$$E(f) = \sum_{V_n \in V_{sur}^k} D_{V_n}(f_{V_n}) + \sum_{\{V_n, V_q\} \in N} V_{\{V_n, V_q\}}(f_{V_n}, f_{V_q}) \quad (6)$$

에너지 함수 중 데이터 항  $D_{V_n}(f_{V_n})$ 에 대한 비용은  $f_{V_n}$ 을 Opaque로 할당할 경우와 Carving으로 할당할 경우로 나눌 수 있다.  $f_{V_n}$ 를 Opaque 레벨로 할당할 경우의 비용은 다음과 같다.

$$D_{V_n}(f_{V_n}) = \begin{cases} 0 & \text{if } consist(V_{n-r1}) > avg\_consist \\ 1 & \text{if } consist(V_{n-r1}) \leq avg\_consist \ \& \ consist(V_{n-r1}) \geq consist(V_{n-r2}) \\ 2 & \text{if } consist(V_{n-r1}) \leq avg\_consist \ \& \ consist(V_{n-r1}) < consist(V_{n-r2}) \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $avg\_consist$ 는 표면 복셀에 대한 평균 색상 일관성 값으로 다음과 같다.

$$avg\_consist = \frac{1}{N} \sum_{V_n \in V_{sur}^k} consist(V_{n-r1}) \quad (8)$$

식 (7)의 각 경우에 대해서 살펴보면  $consist(V_{n-r1}) > avg\_consist$ 의 경우에는  $V_{n-r1}$ 의 색상 일관성이 높으므로 그래프의 에지에 대한 비용을 작게 두어 그래프에서 절단되지 않도록 한다.  $consist(V_{n-r1}) \leq avg\_consist$ 의 경우에는 다시 광 선분위의 복셀의 색상 일관성을 고려하여 비용을 정한다. 즉  $consist(V_{n-r1}) \geq consist(V_{n-r2})$ 의 경우에  $V_{n-r1}$ 의 색상 일관성이  $V_{n-r2}$ 의 색상 일관성이 크므로  $consist(V_{n-r1}) < consist(V_{n-r2})$ 의 경우보다는 낮은 비용을 할당한다.  $consist(V_{n-r1}) < consist(V_{n-r2})$ 의 경우 가장 높은 비용을 할당한다.  $f_{V_n}$ 을 Carving 레벨로 할당할 경우의 비용은 Opaque인 경우와 반대의 비용을 적용한다. 에너지 함수 중 평활화 항  $V_{\{V_n, V_q\}}(f_{V_n}, f_{V_q})$ 에 대한 비용은 다음과 같다.

$$V_{\{V_n, V_q\}}(f_{V_n}, f_{V_q}) = \begin{cases} 0 & \text{if } f_{V_n} = f_{V_q} \\ 1 & \text{if } f_{V_n} \neq f_{V_q} \end{cases} \quad (9)$$

여기서  $V_a$ 는  $V_n$ 에 대한 6-연결 이웃 복셀을 의미한다. 그래프에서 최소 절단을 찾기 위한 알고리즘은 Kolmogrov<sup>[12]</sup>가 제안한 그래프 절단 기법을 도입하였다.

IV. 결과 및 고찰

실험에 사용된 CCD 카메라는 JAI CV-S3300 칼라 카메라이며 획득된 영상의 크기는 640X480의 24비트

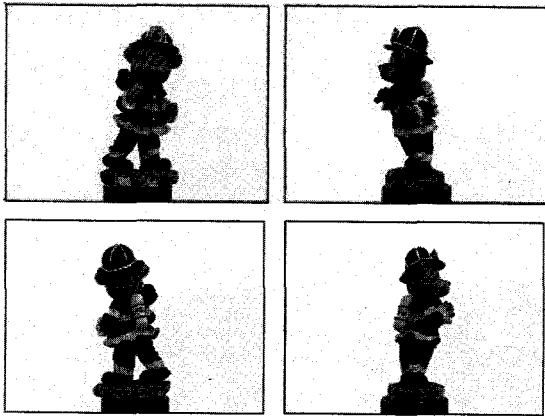


그림 6. 입력영상들  
Fig. 6. Input images.

표 1. 복셀 칼라링 실험 조건표  
Table 1. Conditions for voxel coloring experiment.

	Algorithm	Threshold	Graph Cuts
(a) VI	Volume Intersection	-	-
(b) GVC_Th50	Generalized Voxel Coloring	50	×
(c) GVC_Th25	Generalized Voxel Coloring	25	×
(d) GVC_GC_Th50	Generalized Voxel Coloring	50	○
(e) GVC_GC_Th25	Generalized Voxel Coloring	25	○
(f) MTVC	Proposed Voxel Coloring	×	○

칼라 영상이다. 컴파일러는 Visual C++ 6.0사용하였으며 3차원 디스플레이를 위해 OpenGL을 사용하였다. 구현한 컴퓨터 사양은 펜티엄 IV 프로세서 2.0 GHz이다.

실험에 사용된 실 3차원 형상은 모형 조각상을 사용하였으며 9도의 회전 각도를 가지고 총 40장의 영상을 획득하였다. 그림 6에서 획득된 영상 중 일부를 나타내었다.

제안 복셀 칼라링 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 실험 조건은 표 1에서 제시하였다.

표 1에서 VI는 Szeliski<sup>[2]</sup>의 볼륨 교차 기법을 나타내며 복셀 칼라링의 효과를 평가하기 위한 기준으로 사용한다. 실험 조건 (b), (c)는 Culbertson<sup>[4]</sup>의 일반화된 복셀 칼라링 기법을 사용하고 각각 비유사도에 대한 문턱값을 50, 25로 설정한 경우이다. 문턱값은 비유사도의 값을 나타내며 문턱값이 큰 경우가 색상 일관성이 낮은 경우이며 문턱값이 작은 경우가 색상 일관성이 높은 경우이다. 실험 조건 (d), (e)는 실험 조건 (b), (c)와 동일한 조건에서 그래프 절단 기법을 적용한 경우이다. 실험 조건 (f)는 제안 복셀 칼라링 기법의 경우이다.

그림 7은 표 1의 실험 조건에 대한 각 알고리즘의 복원 결과를 깊이 지도로 보였다. 그림 7의 (a)는 VI에 의

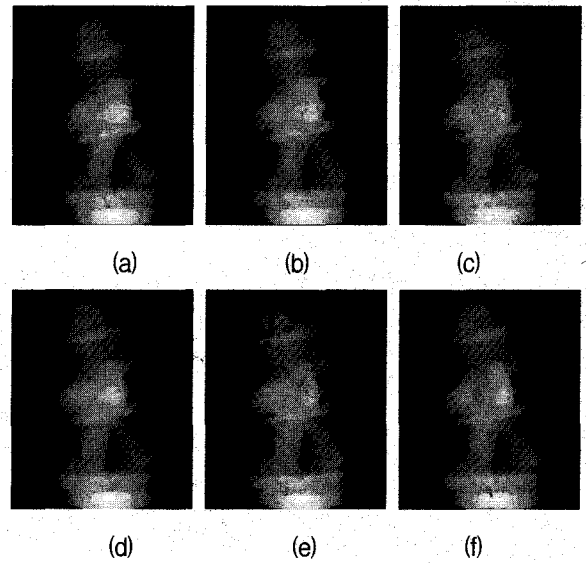


그림 7. 각 실험 조건에 대한 복원된 깊이 지도  
Fig. 7. - Reconstructed depth map of each experimental conditions.

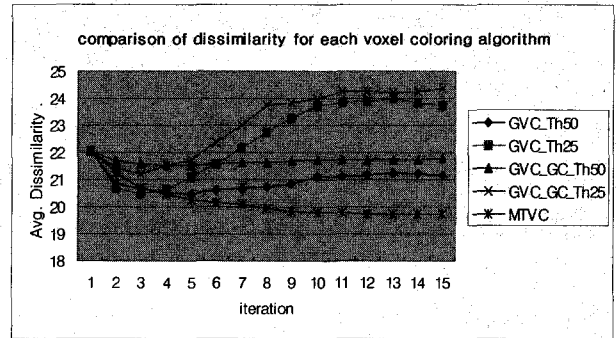


그림 8. 각 복셀 칼라링 기법에 대한 비유사도 비교 그래프  
Fig. 8. Comparison graph of dissimilarity for each voxel coloring algorithm.

한 복원 형상으로 오목면에 의한 모델 에러와 회전 각도의 유한성에 의한 모델 에러가 나타남을 볼 수 있다. 실험조건 (b), (c)의 경우 비유사도의 문턱값이 클수록 모델 에러의 감소 폭이 작은 반면 복원의 안정성이 유지된다.

비유사도의 문턱값이 작을수록 모델 에러의 감소 폭은 크지만 복원이 불안정하게 됨을 그림 7의 (b), (c)에서 확인할 수 있다. 실험조건 (d), (e)의 경우 실험조건 (b), (c)의 환경과 동일하며 그래프 절단법을 도입함으로써 실험조건 (b), (c)의 결과에서 나타나는 표면 잡음이 제거됨을 그림 6의 (d), (e)에서 확인할 수 있다. 그림 7의 (f)의 결과에서 보듯이 제안 알고리즘의 경우 기존의 단일 문턱값 적용 없이 복원의 안정성을 유지시키면서 모델 에러를 제거하였음을 확인할 수 있다.

그림 8에서 각 복셀 칼라링 기법에 의해 생성된 3차원 형상에 대한 평균 비유사도를 비교하였다. 그림 8의 그래프에서 보듯이 제안 알고리즘이 평균 비유사도 측면에서도 우수함을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 영상기반 3차원 형상 복원을 위한 개선된 복셀 칼라링 기법을 제안하였다. 제안 복셀 칼라링 기법에서는 기존 복셀 칼라링 기법에서의 색상 일관성에 대한 문턱값 결정의 문제를 해결하기 위한 방법을 제시하였다. 표면 복셀에 대한 색상 일관성의 문턱값을 내부 복셀의 색상 일관성 값으로 대체하여 복셀 칼라링의 반복 회수가 증가함에 따라 개별 표면 복셀에 대한 최적의 문턱값을 찾아가도록 하였다. 또한 복셀 제거 판단에 대한 복셀 이진 레이블링 문제를 데이터 항과 평활화 항으로 구성된 에너지 최소화 문제로 정의하였다. 에너지 최소화는 그래프 절단 기법을 사용하였으며 에너지의 평활화 항에 의해서 복원 면에 대한 요철 잡음을 제거하였다.

제안 복셀 칼라링 기법에 대한 성능 실험에서는 기존 알고리즘과 제안 알고리즘의 여러 조건을 조합하여 실험하였다. 기존 복셀 칼라링 기법의 결과에서는 색상 일관성의 단일 문턱값에 의해 복원 정밀도와 안정성에 대한 trade-off 문제를 나타내었다. 기존 알고리즘에 그래프 절단 기법을 도입함으로써 복원 형상에서 나타나는 요철 잡음을 제거할 수 있었다. 제안 복셀 칼라링 기법의 결과에서는 다중 가변 문턱값 적용과 그래프 절단 기법을 도입함으로써 기존의 알고리즘에 비해 복원 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

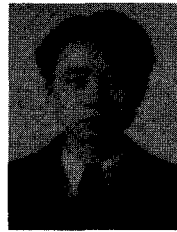
- [1] M. Potmesil, "Generating octree models of 3D objects from their silhouettes in a sequence of image," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 40, pp. 1-29, 1987.
- [2] R. Szeliski, "Rapid Octree Construction from Image Sequences," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 58, no. 1, pp. 23-32, Jul. 1993.
- [3] S. M. Seitz and C. R. Dyer, "Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring," *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Conf.*, pp. 1067-1073, 1997.
- [4] W. B. Culbertson, T. Malzbender and G. Slabaugh, "Generalized voxel coloring," *Proc. of the ICCV*, pp. 100-115, Sep. 1999.
- [5] G. Slabaugh, W. Culbertson, T. Malzbender, M. Stevens and R. Schafer, "Methods for volumetric reconstruction of visual scenes," *Int. J. of Computer Vision*, vol. 57, no. 3, pp. 179-199, 2004.
- [6] P. Eisert, E. Steinbach and B. Grid, "Multi-hypothesis, volumetric reconstruction of 3-D objects from multiple calibrated camera views," *ICASSP'99, Phoenix, USA*, pp. 3509-3512, Mar. 1999.
- [7] P. Eisert, E. Steinbach and B. Grid, "Automatic Reconstruction of stationary 3-D objects from multiple uncalibrated camera views," *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 261-277, 2000.
- [8] Y. Kuau and O. Sinram, "Photorealistic Object Reconstruction Using Voxel Coloring And Adjusted Image Orientations," *ASPRS/ACSM /FIG -Conference, Washington DC., USA*, 2002.
- [9] Y. Boykov and V. Kolmogorov, "An Experimental Comparison of Min-Cut/ Max-Flow Algorithms for Energy Minimization in Vision," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 9, pp. 1124-1137, Sep. 2004.
- [10] V. Kolmogorov and R. Zabih, "What Energy Functions can be Minimized via Graph Cuts?," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Feb. 2004.

저 자 소 개



**예수영(정회원)**  
 1996년 동서대학교 전자공학과  
 학사 졸업  
 1998년 부산대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 2004년 부산대학교 의공학  
 협동과정 박사 졸업.

<주관심분야 : 신호처리, 영상처리, 패턴인식, 의공학>



**김호성(정회원)**  
 1998년 동서대학교 전자공학과  
 학사 졸업  
 2000년 부산대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 2005년 부산대학교 전자공학과  
 박사 졸업.

<주관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 신호처리, 컴퓨터 비전>

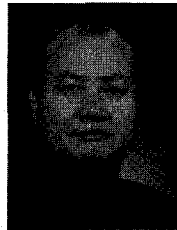


**주재흠(평생회원)**  
 1988년 부산대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1990년 부산대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 2000년 부산대학교 전자공학과  
 박사 졸업.

1990년~1992년 삼성전자 가정종합연구소  
 영상연구실

2001년~현재 부산가톨릭 대학교  
 컴퓨터정보공학부 교수

<주관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 신호처리, 컴퓨터 비전>



**남기곤(평생회원)**  
 1997년 부산대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1981년 부산대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 1989년 부산대학교 전자공학과  
 박사 졸업.

2005년 현재 부산대학교 전자공학과 교수,  
 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소  
 연구원

<주관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 신호처리, 컴퓨터 비전>처리, 반도체>