

정규논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제17권 제4호, 2012년 7월 (JBE Vol. 17, No. 4, July 2012)

<http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2012.17.4.684>

깊이 영상을 이용한 수중 스테레오 영상의 가시성 개선

신형철^{a)}, 김상훈^{b)}, 손광훈^{a)†}

Visibility Enhancement of Underwater Stereo Images Using Depth Image

Hyoungchul Shin^{a)}, Sanghoon Kim^{b)}, Kwanghoon Sohn^{a)†}

요약

수중 환경에서 물과 부유물에 의한 빛의 감쇄와 산란은 수중 영상의 색상을 열화시키고 가시성을 저하시키는 주요 원인이 된다. 이러한 수중 산란광은 피사체와의 거리의 함수로 표현되므로 깊이 정보는 빛의 전달률을 계산하기 위한 중요한 정보를 제공한다. 본 논문에서는 깊이 영상을 이용하여 전달률을 측정하고 이를 기반으로 영상의 각 화소에 존재하는 산란에 의한 열화값을 제거함으로써 수중 스테레오 영상의 가시성을 개선하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 제거해야 하는 열화값이 영상의 화소값 보다 크지 않도록 보정하여 가시성 개선 시 나타날 수 있는 부분적인 영상 왜곡을 방지한다. 또한 수중 스테레오 영상의 심각한 문제점 중의 하나인 색상 불균형을 효과적으로 보정하여 가시성 개선 후 좌, 우 영상의 동일성을 유지한다. 실험 결과는 다양한 환경의 수중 영상에 대하여 제안하는 가시성 개선 후 색대비가 영상에 따라 5%에서 14%이상 향상되었음을 보여준다.

Abstract

In the underwater environment, light is absorbed and scattered by water and floating particles, which makes the underwater images suffer from color degradation and limited visibility. Physically, the amount of the scattered light transmitted to the image is proportional to the distance between the camera and the object. In this paper, the proposed visibility enhancement method utilizes depth images to estimate the light transmission and the degradation factor by the scattered light. To recover the scatter-free images without unnatural artifacts, the proposed method normalizes the degradation factor based on the value of each pixel of the image. Finally, the scatter-free images are obtained by removing the scattered components on the image according to the estimated transmission. The proposed method also considers the color discrepancies of underwater stereo images so that the stereo images have the same color appearance after the visibility enhancement. The experimental results show that the proposed method improves the color contrast more than 5% to 14% depending on the experimental images.

Keyword : underwater imaging, visibility enhancement, stereo images, 3D contents, half-mirror

a) 연세대학교 전기전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

b) 제주한라대학교 방송영상과 (Department of Broadcasting and Video, Cheju Halla College)

† 교신저자 : 손광훈 (Sohn, Kwanghoon)

E-mail: khsohn@yonsei.ac.kr

Tel: +82-2-2123-2879 Fax: +82-2-2123-7712

· 접수일(2012년5월22일), 수정일(1차:2012년6월11일, 2차:6월19일), 게재확정일(2012년6월19일)

1. 서론

최근 3차원 텔레비전의 보급과 3차원 영화의 성공으로 전 세계적으로 3차원 입체영상에 대한 관심이 높아졌으며, 우리나라는 현재 3차원 디스플레이 시장 분야에서 세계적인 제품들을 생산하며 시장을 선도하고 있다. 그러나 다양한 3차원 콘텐츠 확보를 위한 많은 노력에도 불구하고, 3차원 영화, 방송 등 3차원 콘텐츠 분야에서는 높은 점유율을 확보하지 못하고 있다. 지표의 3/4을 차지하고 있는 바다에는 화려한 색깔과 특이한 모양을 가지는 다양한 해양 생물과 심해의 미개척지 등 육상에서는 볼 수 없는 많은 촬영 소재들이 존재한다. 이러한 촬영 소재들은 영화, 다큐멘터리, 해양 개발 등과 같이 다양한 분야에서 활용할 수 있으며, 전 세계적으로 수중 3차원 콘텐츠 제작과 관련된 연구가 시작되고 있다.

수중 3차원 콘텐츠 제작 과정에서는 수중이라는 특수성으로 기존 육상 3차원 콘텐츠 제작 과정에서 발생하지 않던 문제들이 발생한다. 일반적으로 물과 물에 존재하는 수중 부유물 등은 대기보다 많은 양의 빛을 산란시키기 때문에 수심이 깊어질수록 영상 획득에 필요한 광량이 절대적으로 부족하며, 이를 극복하기 위하여 대부분의 경우 추가적인 조명 장치를 사용한다. 그러나 조명 장치에 의한 빛도 멀리 나아가지 못하며, 색상 왜곡, 선명도 저하와 같은 콘텐츠의 품질 저하를 가져온다. 특히, 스테레오 영상의 경우에는 부족한 광량 때문에 제한된 촬영 거리를 가지게 되고, 이 때문에 발생하기 쉬운 과도한 시차에 의한 시정 피로도를 줄이기 위하여 매우 좁은 카메라간 거리(baseline distance)를 가질 수 있는 직교식 스테레오 카메라 시스템을 사용하게 된다^{[1][2]}. 그러나 직교식 스테레오 카메라에 사용되는 반투명 거울(half mirror)은 좌, 우 카메라에 도달하는 빛의 경로 차이를 발생시키고, 촬영된 영상에 심각한 색상 불균형을 가

져온다. 특히 수중인 경우에는 산란광(scattered light)으로 인해 이러한 색상 불균형 현상이 더욱 심각하게 나타난다. 그림 1은 직교식 스테레오 카메라 시스템으로 촬영한 수중 스테레오 영상의 예를 보여준다.

기존의 수중 영상의 가시성 개선 방법들은 대부분 단일 카메라 영상의 가시성 개선을 목표로 하며, 가시성이 개선된 스테레오 영상을 획득하기 위한 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 단일 수중 영상에 대한 가시성 개선 연구로 편광필터를 이용해 동일한 위치에서 산란광의 최대, 최소 크기를 측정 후 그 비를 이용하여 빛의 전달률(transmission)을 예측하여 영상의 가시성을 개선하는 방법이 있다^{[3][4]}. 또한, 다양한 영상 개선 필터를 연속적으로 적용하여 수중 영상의 화질을 개선하는 방법도 제안되었다. 이 방법은 파라미터 조정이 필요 없다는 장점이 있으나 수중 영상 모델에 기반을 두지 않았다는 한계점이 있다^[5]. 스테레오 영상에 대한 연구로는 수중 스테레오 영상을 이용하여 깊이 영상을 획득하기 위하여 수중 영상 감쇄 모델을 이용하여 영상을 보정하는 방법이 제안되었다. 그러나 이 방법은 미리 측정된 파라미터를 기반으로 제약된 실험 조건에서 이루어진 연구라는 단점이 있다^[6]. 최근에는 산란광에 의해 열화되지 않은 영상의 경우 열화되지 않은 구간 내의 한 화소 값은 채널 내에 매우 어두운 값을 가진다는 통계적 특성을 이용하여 대기 영상의 가시성을 개선하는 방법이 제안되었다^[7]. 이 방법은 수중 영상에도 적용되었으나 조명이 균일하지 않거나 흰 색 또는 산란광과 유사한 색상의 피사체가 존재할 경우에는 사용할 수 없다는 통계적 특성의 조건을 극복하지는 못하였다^[8].

본 논문은 깊이 영상을 이용한 수중 스테레오 영상의 가시성 개선 방법을 제안한다. 스테레오 영상은 깊이 영상을 추출할 수 있는 장점이 있고, 수중 산란광은 피사체와의 거리에 비례하게 존재한다. 따라서 제안하는 방법에서는 깊이 영상을 빛의 전달률로 사용하며, 기존 방법과 같은 제약 조건 없이 안정적으로 산란광에 의한 열화값을 예측할 수 있다. 또한 영상의 화소 값을 이용하여 예측한 열화값을 보정함으로써 왜곡이 없는 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 논문의 2장에서는 수중 스테레오 영상 획득 환경을 설명하고, 3장에서는 제안하는 수중 스테레오 영상의 가시성 개



그림 1. 직교식 스테레오 카메라로 촬영한 수중 스테레오 영상
Fig. 1. Underwater stereo images acquired by a half-mirror-based stereo camera

선 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 제시하며, 5장에서 본 논문의 결론을 서술한다.

II. 수중 스테레오 영상 획득 환경

수중 환경에서 빛은 물이라는 매질을 통해 전파된다. 물은 대기보다 밀도가 높고 다양한 수중 부유물들이 존재하기 때문에 빛이 물을 통해 전파 될 때, 대기보다 강한 감쇄와 산란 과정을 거치게 된다. 이러한 수중 산란광은 영상을 획득할 때 피사체 고유의 색을 왜곡시키며, 특히 직교식 스테레오 카메라를 사용했을 경우에는 강한 색상 불균형을 발생시킨다. 그림 2는 직교식 카메라를 이용하여 수중 스테레오 영상이 형성되는 과정을 보여준다. 수중 환경에서 카메라에 들어오는 빛(total irradiance: E_T)은 다양한 광원이 피사체 표면에서 직접 반사되어 들어오는 직접광(direct component: E_d)과 피사체 표면에서 산란되어 들어오는 전방 산란광(forward scattered component: E_f) 그리고 물과 수중 부유물에 의해 산란되어 간접적으로 들어오는 후방 산란광(Backward scattered component: E_b)의 합으로 표현된다^[9].

$$E_T = E_d + E_f + E_b \quad (1)$$

일반적으로 전방산란광 E_f 는 매우 적은 양이 존재하므로 식 (1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다^[10].

$$E_T \approx E_d + E_b \quad (2)$$

여기서 빛은 지수함수 형태로 감쇄하며 전파되므로 E_d 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[10].

$$E_d = E_{obj}e^{-\eta z} \quad (3)$$

이 때, E_{obj} 는 피사체 표면에서의 빛의 크기이며, η 는 빛의 감쇄 상수를, z 는 카메라와 피사체 사이의 거리를 나타낸다. 후방 산란광 E_b 는 카메라와 피사체 사이에 존재하는 산란을 발생시키는 매질의 양에 비례하며, 다음과 같이 표

현된다^[10].

$$E_b = E_{\infty}(1 - e^{-\eta z}) \quad (4)$$

이 때, E_{∞} 는 피사체와 카메라와의 거리가 무한대일 때의 산란광의 크기를 나타내며, 직접광과는 다르게 피사체와의 거리가 멀어질수록 후방산란광의 크기는 커진다. 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 식 (2)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$E_T = E_{obj}e^{-\eta z} + E_{\infty}(1 - e^{-\eta z}) \quad (5)$$

직교식 스테레오 카메라에 들어오는 빛 E_T 를 반투명 거울이 정확히 반으로 나누어 좌, 우 카메라에 전달한다고 가정하면, 각 카메라에 들어오는 에너지는 $E_T/2$ 이 되고 다음과 같이 표현된다.

$$E_r = E_l = \frac{1}{2}(E_{obj}e^{-\eta z} + E_{\infty}(1 - e^{-\eta z})) \quad (6)$$

카메라가 획득한 원본 영상을 $I_{\lambda}(x, y)$, 열화되지 않은 영상을 $J_{\lambda}(x, y)$, 빛의 전달률을 $t(x, y)$, 수중산란광에 의한 열화값을 $A_{\lambda}(x, y)$ 라 할 때, 식 (6)의 각 성분은 식 (7)과 같은 대응관계를 가지며, 식 (8)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$E_r = E_l = I_{\lambda}(x, y), E_{obj} = J_{\lambda}(x, y), E_{\infty} = A_{\lambda}(x, y), e^{-\eta z} = t(x, y), \{\lambda = r, g, b\} \quad (7)$$

$$I_{\lambda}(x, y) = J_{\lambda}(x, y)t(x, y) + A_{\lambda}(x, y)(1 - t(x, y)), \{\lambda = r, g, b\} \quad (8)$$

가시성 개선의 목표가 열화되지 않은 영상 $J_{\lambda}(x, y)$ 를 복원하는 것이므로, 수중 산란에 의한 열화값 $A_{\lambda}(x, y)$ 와 수중 영상에서 전달률 $t(x, y)$ 를 예측할 수 있다면 식 (8)로부터 다음과 같이 열화되지 않은 원영상 $J_{\lambda}(x, y)$ 를 복원할 수 있다^[7].

$$J_{\lambda}(x, y) = \frac{I_{\lambda}(x, y) - A_{\lambda}(x, y)}{t(x, y)} + A_{\lambda}(x, y), \{\lambda = r, g, b\} \quad (9)$$

이 때, 전달률 $t(x, y)$ 는 식 (7)에서 알 수 있듯이 카메라

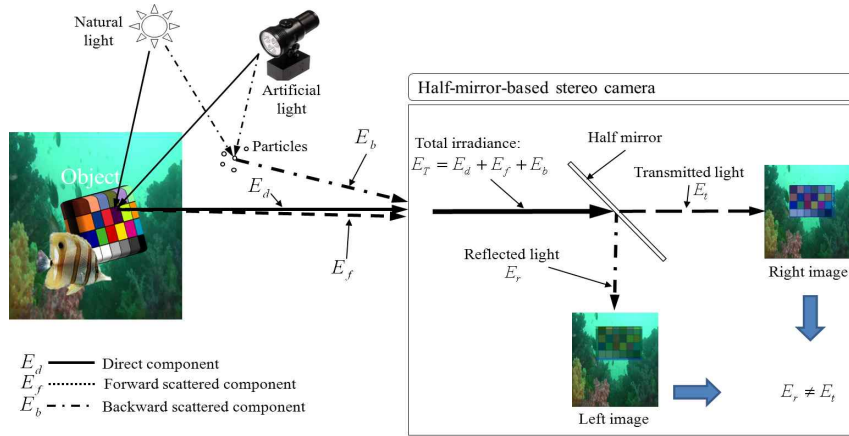


그림 2. 직교식 카메라를 이용한 수중 스테레오 영상의 형성
 Fig. 2. Image formation of underwater stereo images for a half-mirror-based stereo camera

와 피사체와의 거리의 함수 이므로, 스테레오 영상으로부터 얻을 수 있는 거리 영상은 수중영상의 가시성 개선을 위한 중요한 정보를 제공한다.

한편, 가시성 개선을 수행하기 위해서는 정확한 색상 불균형 보정이 필요하다. 빛의 특성에 의해 산란된 빛은 부분적인 편광(partially polarized light)으로 변하며, 반투명 거울 또한 편광 방향에 따라 서로 다른 반사율과 투과율을 가지므로 산란된 빛은 산란되지 않은 빛과는 다르게 두 카메라로 균등하게 분배되지 않는다^[3]. 그러므로, 식 (6)에서 세운 가정과는 다르게 실제로는 직교식 스테레오 카메라의 좌, 우 카메라에 전달되는 빛의 양은 서로 다르다.

$$E_r \neq E_t \quad (10)$$

일반적으로 수중 환경에는 매우 강한 산란광이 존재하므로 직교식 스테레오 카메라로 획득한 수중 스테레오 영상은 가까운 피사체를 촬영한 영상이라도 그림 1과 같이 심각한

한 색상 열화와 좌,우 색상의 불균형을 가지게 된다.

III. 제안하는 가시성 개선 방법

그림 3은 제안하는 수중 영상 가시성 개선 방법의 흐름도를 보여준다. 직교식 스테레오 카메라로 획득한 수중 스테레오 영상을 이용하여 깊이 영상을 획득하기 위한 전처리로 색상 불균형 보정을 수행한다. 획득한 깊이 영상의 거리 정보로부터 산란에 의한 열화값을 예측하고 깊이 영상을 이용하여 빛의 전달률을 측정하여 가시성 개선 알고리즘을 수행한다.

1. 수중 스테레오 영상의 색상 불균형 보정

수중 스테레오 영상의 가시성 개선을 위하여 색상 불균형 보정이 필요한 첫 번째 이유는 보다 정확한 깊이 영상을

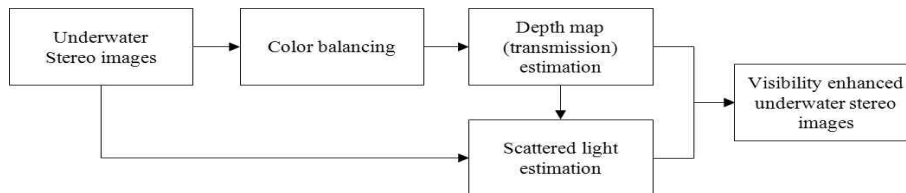


그림 3. 제안하는 수중 스테레오 영상 가시성 개선 흐름도
 Fig. 3. Flow chart of the proposed visibility enhancement method for underwater stereo images

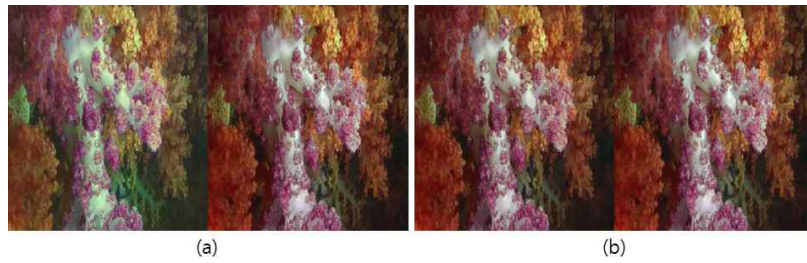


그림 4. 제안하는 방법에서 사용한 3차원 점 정합을 이용한 스테레오 영상의 색상 불균형 보정 [12], (a) 색상 불균형 보정 전, (b) 색상 불균형 보정 후
 Fig. 4. Color balancing method applied for the proposed visibility enhancement [12], (a) before color balancing, (b) after color balancing

획득하기 위해서이며, 두 번째 이유는 가시성 개선의 목표가 스테레오 영상 콘텐츠 제작에 있으므로 가시성 개선 후 좌, 우 영상의 색이 균형 있게 복원되도록 하기 위함이다. 직교식 카메라로 획득한 수중 영상은 색상 불균형이 지역적으로 분포하는 경우가 많으므로 제안하는 알고리즘에서 필요한 색상 불균형 알고리즘은 이러한 지역적 특성을 고려하고 색감까지 정확하게 보정해야만 한다. 이를 위하여 제안하는 방법에서는 3차원 점 정합을 이용한 스테레오 영상의 색상 보정 알고리즘을 이용한다^[12]. 3차원 점 정합을 이용한 스테레오 색상 보정 알고리즘은 좌, 우 영상의 색을 색 공간에 존재하는 두 개의 점집합으로 생각하고 두 점집합을 정합하여 좌, 우 영상에 존재하는 모든 색의 대응점을 찾아내는 방법이다. 또한, 영상의 색감까지 정확히 보정될 수 있도록, 채널별로 독립된 보정을 수행하지 않고 채널 간 상관관계를 고려한 보정을 수행한다. 그림 4는 3차원 점 정합을 이용한 스테레오 색상 보정을 이용한 수중 스테레오 영상의 색상 보정 전, 후의 영상을 나타낸다.

3. 수중 산란에 의한 열화값 예측 및 깊이 영상을 이용한 전달률 계산

수중 산란광은 피사체와의 거리의 함수로 표현할 수 있으므로, 깊이 영상을 이용하면 수중 산란광에 의한 열화값과 빛의 전달률을 획득할 수 있다. 제안하는 방법에서는 깊이 영상 획득을 위한 시차 예측 알고리즘으로 비등방성 확산(anisotropic diffusion)을 이용한 비용 합산(cost aggregation) 방법을 사용하였다^[13]. 본 논문에 적용한 시차 예측 방법이 매우 안정적인 성능을 보여 주지만, 영상의 경계 또는

평활한 영역에서 부정확한 깊이 값을 가지는 경우가 발생한다. 이러한 영상 경계에서의 깊이 오류는 라플라시안(Laplacian)을 이용한 매팅(matting)을 적용하여 영상 경계와 좀 더 정확히 일치하는 깊이 영상을 구할 수 있다^[14]. 깊이 영상을 이용하여 수중 산란에 의한 열화값을 예측하는 방법은 다음과 같다. 식 (6)로부터 카메라와 피사체의 거리 z 가 무한대로 수렴할 때, 영상에는 산란광 성분만 남게 된다.

$$z \rightarrow \infty, E_r = E_t = \frac{1}{2} E_\infty \quad (11)$$

마찬가지로 $z \rightarrow \infty$ 일 때, $D(x,y) \rightarrow 0, t(x,y) \rightarrow 0$ 이므로 식 (8)로부터 다음과 같은 관계를 도출할 수 있다.

$$D(x,y) \rightarrow 0, t(x,y) \rightarrow 0, A_\lambda(x,y) = I_\lambda(x,y), \{\lambda = r, g, b\}, \quad (12)$$

식 (12)를 이용하여 열화값 $A_\lambda(x,y)$ 를 얻기 위해서는 영상에 $z \rightarrow \infty$ 인 화소가 존재해야 한다. 그러나 수중 영상에 항상 $z \rightarrow \infty$ 인 화소가 존재하는 것이 아니므로, 제안하는 방법에서는 시차 영상 $D(x,y)$ 의 값이 최소값을 가질 때, 해당하는 $I_\lambda(x,y)$ 의 값 중 가장 큰 값을 수중 산란에 의한 열화값으로 근사하여 선택하였다.

$$D(i,j) = \min_{x,u}(D(x,y)), I_\lambda(i,j) \approx A_\lambda(x,y), \{\lambda = r, g, b\}, \quad (13)$$

가시성 복원은 개념적으로 원본 영상 $I_\lambda(x,y)$ 에서 수중 산란광 $A_\lambda(x,y)$ 를 전달률에 따라 제거하는 과정이므로 $A_\lambda(x,y)$ 가 $I_\lambda(x,y)$ 보다 매우 클 경우 영상의 화소값 보

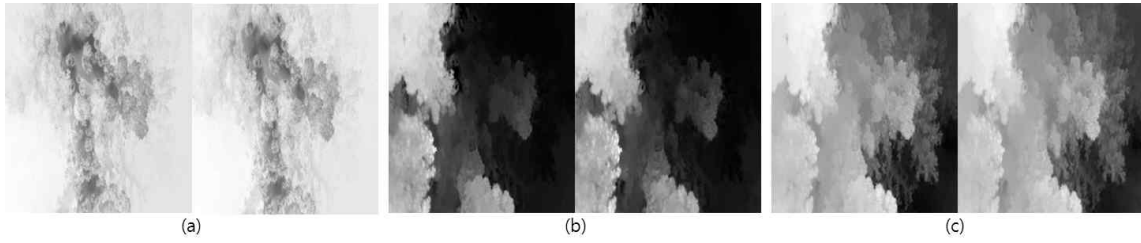


그림 5. 그림 4의 영상에 대한 전달률 획득 결과 비교, (a) 영상의 통계적 특성을 이용한 방법을 이용하여 획득한 전달률 [8], (b) 시차 영상, (c) 제안하는 방법을 이용하여 획득한 전달률

Fig. 5. Comparison of estimated transmission for the image in Fig.4, (a) transmission using dark channel prior [8], (b) disparity images, (c) transmission using the proposed method

다 큰 값을 제거해야 하는 경우가 발생한다. 이 경우 가시성 개선을 수행하면 영상에 부분적인 왜곡이 일어날 수 있다. 따라서 본 논문에서는 $A_\lambda(x,y)$ 의 값을 $I_\lambda(x,y)$ 의 값보다 작게 제한하기 위하여, 식 (14)를 이용하여 보정된 산란광 $\hat{A}_\lambda(x,y)$ 를 획득한다. 이 때, $A_\lambda(x,y)$ 와 $I_\lambda(x,y)$ 는 0에서 1 사이의 값을 가지도록 화소값 범위를 변환하여 사용한다.

$$\hat{A}_\lambda(x,y) = A_\lambda(x,y)I_\lambda(x,y), \{\lambda = r,g,b\}, \quad (14)$$

빛의 전달률을 계산하기 위하여 예측된 시차 영상 $D(x,y)$ 는 다음의 관계식으로 피사체와의 거리 $z(x,y)$ 로 변환될 수 있다.

$$z(x,y) = \frac{f}{D(x,y)}B \quad (15)$$

이 때, f 는 카메라의 초점거리, B 스테레오 카메라의 카메라간 거리를 나타낸다. 식 (7)과 식 (15)를 이용하면 전달률 $t(x,y)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, $D(x,y)$ 를 알고, 전달률 상수 $k = \eta f B$ 의 값을 예측할 수 있다면 빛의 전달률 $t(x,y)$ 를 계산할 수 있다.

$$t(x,y) = \exp\left(-\frac{\eta f B}{D(x,y)}\right) = \exp\left(-\frac{k}{D(x,y)}\right), k = \eta f B, \quad (16)$$

최소자승법(least square method)을 이용하여 다음 에너지 함수가 최소가 되는 $k_{i,j,\lambda}$ 를 찾아서 전달률 상수 k 를 얻을 수 있다.

이 때, i,j 는 영상의 히스토그램에서 상위 0.5%의 크기를 가지는 화소들을 의미하며, 이 화소들은 회색계 가정 (Gray-world assumption)에 의해 열화 되지 않은 영상 $J_\lambda(i,j)$ 가 흰색을 가진다고 가정한다, $J_\lambda(i,j) = 1$.

그림 5는 영상의 통계적 특성을 이용한 방법^[8]을 이용하여 계산한 전달률(그림 5(a))과, 제안하는 방법에서 획득한 시차영상(그림 5(b)), 그리고 제안한 방법으로 계산한 전달률(그림 5(c))을 비교한 것이다. 그림 5에서 확인할 수 있듯이 이 영상에 흰 색 또는 산란광과 유사한 색의 피사체가 존재하면 영상의 통계적 특성을 이용한 방법의 경우 정확한 전달률을 예측하는데 실패한다. 제안한 방법으로 얻은 전달률은 시차영상과는 다르게 정확한 깊이 분포를 나타낸다. 반면에 시차영상의 경우 그림 5(c)와는 다르게 깊이의 분포가 왜곡되어 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 가시성 향상 영상의 복원

제안하는 수중 스테레오 영상의 가시성 개선 방법은 보정된 산란에 의한 열화값 $\hat{A}_\lambda(x,y)$ 와 깊이 정보를 이용하여 예측한 전달률 $t(x,y)$ 를 이용하여 다음과 같은 방법으로 수행된다.

$$\epsilon = \operatorname{argmin}_k \sum_{\lambda=r,g,b} \sum_{i,j \in W} \left\| I_\lambda(i,j) - (J_\lambda(i,j) - \hat{A}_\lambda(i,j)) \exp\left(-\frac{k_{i,j,\lambda}}{D(i,j)}\right) - \hat{A}_\lambda(i,j) \right\|, \quad (17)$$

$$J_{\lambda}(x,y) = \frac{I_{\lambda}(x,y) - \widehat{A}_{\lambda}(x,y)}{\max(t(x,y), t_h)} + \widehat{A}_{\lambda}(x,y) \quad (18)$$

이 때, 복원되는 영상에 약간의 산란광 성분을 남겨 두는 것이 더 자연스러운 영상을 얻을 수 있으므로^[7], $t(x,y)$ 가 설정한 전달률의 최소값 t_h 보다 작아지지 않도록 조절한다. 본 논문에서는 t_h 를 $t(x,y)$ 의 하위 5%가 되도록 설정하였다.

그림 6(a)는 가시성 개선을 하기 전의 원본 영상을 나타내며, 그림 6(b)는 제안한 방법을 이용하여 복원한 가시성 개선 결과를 보여준다. 결과를 살펴보면 원본 영상에서 산

란광에 의해 가려져 보이지 않던 배경 부분의 사물을 구분할 수 있으며 전체적인 색상 대비(color contrast)도 개선되었음을 알 수 있다. 이것은 제안하는 방법이 수중 스테레오 영상에서 문제가 되는 색상 불균형과 산란에 의한 영상 열화를 효율적으로 제거한다는 것을 의미한다.

IV. 실험 결과

제안하는 수중 스테레오 영상의 가시성 개선에 사용된 실험 영상은 제주도 근해에서 직교식 스테레오 카메라를

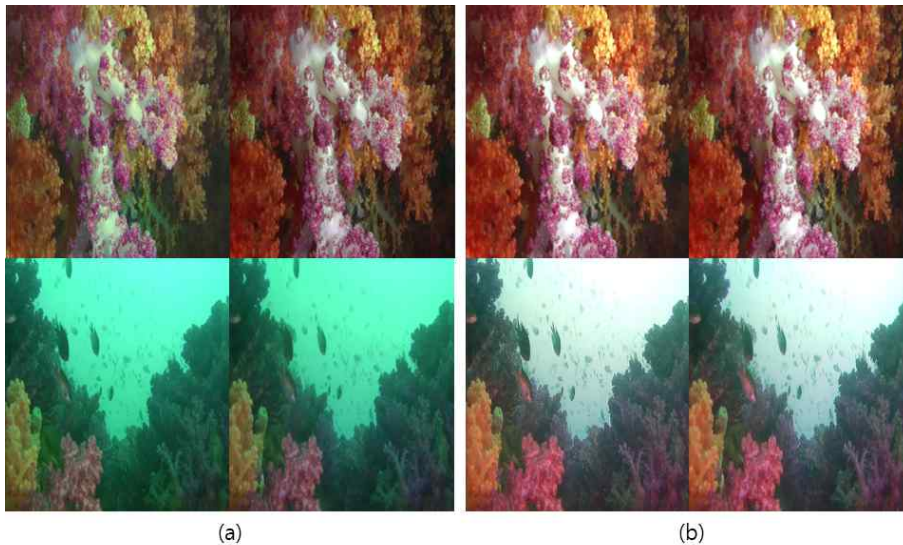


그림 6. 제안하는 방법을 이용한 수중 스테레오 영상의 가시성 개선 결과, (a) 원본 영상, (b) 가시성 개선 영상
 Fig. 6. Results of the proposed visibility enhancement method, (a) original images, (b) visibility enhanced images

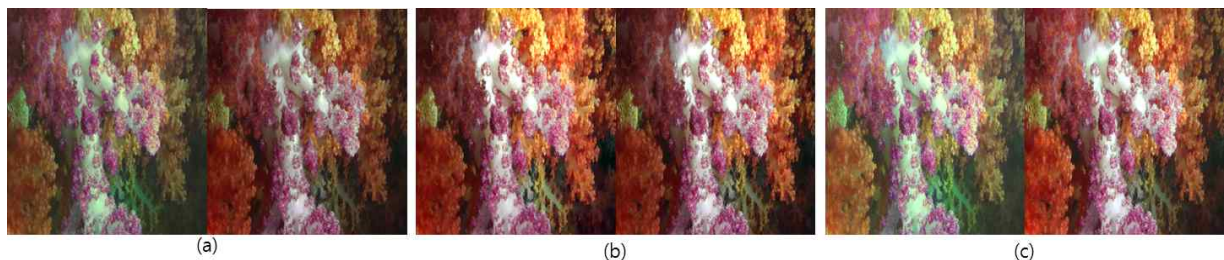


그림 7. 색상 불균형 보정 유무에 따른 수중 스테레오 영상의 가시성 개선 결과, (a) 원본 영상, (b) 색상 불균형 보정을 사용한 가시성 개선 영상, (c) 색상 불균형 보정을 사용하지 않은 가시성 개선 영상
 Fig. 7. Comparison of visibility enhancement results, (a) original images, (b) with color balancing, (c) without color balancing

사용하여 획득한 영상을 사용하였다. 먼저 색상 불균형 보정의 효과를 검증하기 위하여 색상 불균형 보정을 수행하지 않았을 때의 가시성 개선 영상을 색상 불균형 보정을 수행한 결과와 그림 7에서 비교하였다. 그림 7(a)는 원본 영상을, 그림 7(b)는 색상 불균형 보정을 수행한 가시성 개선 결과를 나타내고, 그림 7(c)는 색상 불균형 보정을 수행하지 않은 가시성 개선 결과를 나타낸다. 그림 7에서 확인할 수 있듯이 색상 불균형 보정을 수행하지 않았을 때는 오히려 가시성 개선 적용 후 두 영상의 색상 차이가 더 확연해지는 결과를 보여준다. 이것은 직교식 스테레오 카메라의 반투명거울에 의해 발생한 색상 불균형 요인이 산란광에 의한 가시성 열화값과 다른 분포를 가지고 있어서 산란광 제거에 의한 가시성 개선 방법으로는 효율적으로 제거할 수 없다는 것을 의미한다.

그림 8은 제안하는 열화값 보정 방법의 성능을 보여준다. 그림 8(a)는 원본 스테레오 영상의 좌 영상을 보여주고 그림 8(b)는 그림 8(a)에 대한 전달률을 보여준다. 그림 8(c)는 보정 되지 않은 열화값을 나타내며, 그림 8(e)는 그림 8(a)의 화소값으로 그림 8(c)를 보정한 열화값을 나타낸다. 그림 8(e)와 그림 8(a)의 열화값으로 가시성 개선을 수행한 결과들을 그림 8(d)와 그림 8(f)에 나타내었다. 그림 8(d)를 보면 보정 하지 않은 열화값이 영상이 가지는 화소값 보다 너무 밝은 값을 가질 때, 가시성 개

선을 수행한 결과에 부분적인 영상 왜곡이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 반면에 제안하는 방법으로 열화값을 보정하면 자연스러운 가시성 복원이 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 다양한 수중 스테레오 영상에 제안하는 수중 스테레오 가시성 개선 방법을 적용한 결과이다. 그림 9는 조명 조건, 피사체의 색, 카메라로부터의 거리가 다양한 환경의 영상에 대하여 제안하는 방법을 이용하여 효과적으로 가시성 개선을 수행할 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 제안하는 방법을 이용하면 기존의 방법에서 보여 지는 부분적 영상 왜곡이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 9의 세 번째 행에 있는 다이버 영상의 경우 다이버 등 쪽 부분의 전달률이 시차 영상의 오류로 인해 정확히 계산되지 못한 것을 확인할 수 있다.

제안하는 방법을 보다 객관적으로 평가하기 위하여 본 논문에서는 가시성 개선 전과 후의 색 대비(color contrast)를 비교하였다^[3]. 이 방법은 다음과 같이 영상의 색 대비를 화소값의 표준편차를 이용하여 측정하는 방법이다.

$$C(I) = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\lambda} \sum_{x,y} (I_{\lambda}(x,y) - \bar{I})^2}, \quad (19)$$

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{\lambda} \sum_{x,y} I_{\lambda}(x,y)$$

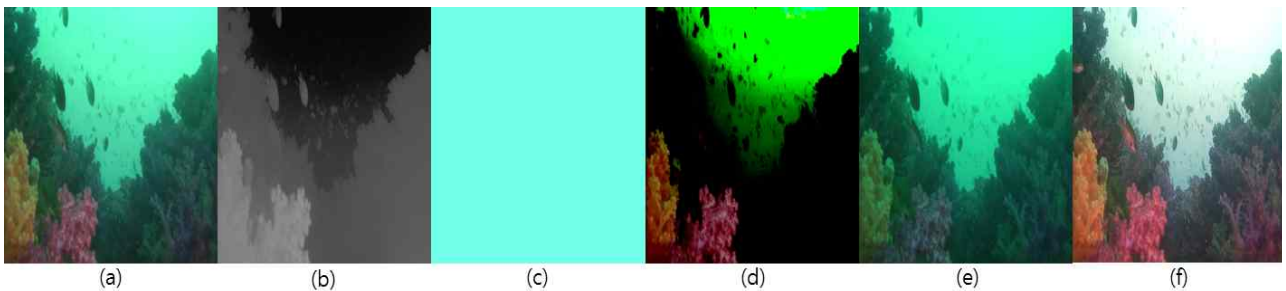


그림 8. 제안하는 열화값 보정 방법의 성능. (a) 원본 스테레오 영상(좌 영상), (b) (a)에서의 전달률, (c) 보정 되지 않은 산란 열화값, (d) (c)를 이용한 가시성 개선 결과, (e) 제안하는 방법으로 보정 된 산란 열화값, (f) (e)를 이용한 가시성 개선 영상
 Fig. 8. The performance of the proposed normalization of degradation factor of scattered light, (a) original image(left), (b) transmission of (a), (c) degradation factor of scattered light without the proposed normalization, (d) visibility enhancement using (c), (e) degradation factor of scattered light with the proposed normalization, (f) visibility enhancement using (e)



그림 9. 다양한 수중 스테레오 영상에 대한 제안 방법을 이용한 가시성 개선 결과, (a) 원본 스테레오 영상(좌 영상), (b) 가시성 개선 영상, (c) 제안하는 방법으로 계산한 전달률, (d) 제안하는 방법으로 예측한 산란광에 의한 열화값

Fig. 9. The proposed visibility enhancement results for various underwater stereo images , (a) original stereo images(left image), (b) visibility enhanced images, (c) transmission using the proposed method, (d) degradaton factor of scattered light using the proposed method

이 때, N 은 영상에 포함된 모든 채널의 화소수를 합한 수이다. 표 1은 그림 9의 실험 영상들로부터 예측한 전달률 상수 k 와 식 (19)를 이용하여 가시성 전, 후의 색 대비를

비교한 결과를 보여준다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 가시성 개선 후 영상의 색 대비가 영상에 따라 5%에서 14%이상 개선되었음을 확인할 수 있다. 또한, 실험 영상이 카메라의

표 1. 제안하는 가시성 개선 전, 후 영상의 색 대비(color contrast) 평가
 Table 1. Comparison of color contrast before and after the proposed visibility enhancement

실험 영상	전달률 상수 $k = \eta f B$	원본 영상의 색 대비, $C(I_o)$	개선 영상의 색 대비, $C(I_E)$	개선도(%), $100 \times (C(I_E)/C(I_o) - 1)$
1	12.05	0.1728	0.1984	14.78
2	13.98	0.2312	0.2618	13.24
3	18.88	0.2079	0.2330	12.07
4	19.97	0.2209	0.2414	9.27
5	23.37	0.2603	0.2754	5.77

초점거리와 카메라간 거리를 일정하게 유지시켜 촬영한 영상이므로 수중 영상의 가시성이 낮은 영상일수록 예측한 전달률 상수 k 가 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 색 대비 기반으로 측정된 가시성 개선도는 가시성이 낮은 영상일수록 적은 양이 개선되었음을 알 수 있다. 이와 같은 결과의 원인 분석을 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

V. 결론

수중 스테레오 영상의 가시성 개선은 단일 영상으로 가시성을 개선하는 방법에 비해 깊이 영상과 같은 중요한 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있지만, 색상 불균형과 같이 추가적으로 극복해야 하는 문제도 존재한다. 또한 3D 콘텐츠를 위한 가시성 개선을 목표로 할 때에는 가시성 개선 시 발생하는 영상의 부분적인 왜곡도 효과적으로 제어해야 한다. 본 논문에서 제안하는 가시성 개선 방법은 직교식 스테레오 카메라로 획득한 수중 스테레오 영상의 색상 불균형 문제를 효율적으로 제거하고 깊이 영상을 이용하여 전달률을 계산함으로써 안정적인 수중 산란에 의한 열화값을 계산한다. 또한 열화값을 영상 화소값으로 보정 시켜 줌으로써 가시성 개선 시 발생하는 부분적인 왜곡도 효과적으로 제어한다. 실험 결과에서는 가시성 개선 후 영상의 색 대비가 영상에 따라 5%에서 14%이상 개선되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 측정된 가시성 개선도에서는 가시성이 낮은 영상일수록 가시성 개선 후 적은 양의 색 대비가 개선되었음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과의 원인을 분석하기

위해서는 향후 보다 체계적인 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] F. Kooi and A. Toet, "Visual comfort of binocular and 3D displays," Display vol 25, pp. 99-108, 2004.
- [2] F. Speranza, W. Tam, R. Renaud, and N. Hur, "Effect of disparity and motion on visual comfort of stereoscopic images," in Proc. of SPIE. vol. 6055, pp. 94-103, 2006.
- [3] Y. Y. Schechner and N. Karpel, "Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 30, no. 3, pp. 570 - 587, 2005.
- [4] T. Treibitz and Y. Y. Schechner, "Active polarization descattering," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 31, no. 3, pp. 385 - 399, 2009.
- [5] S. Bazeille, I. Quidu, L. Jaulin, and J. P. Malkasse, "Automatic underwater image pre-processing," in Proc. of the Caracterisation du Milieu Marin (CMM '06), 2006.
- [6] J. Queiroz-Neto, R. Carceroni, W. Barros, and M. Campos, "Underwater stereo," in Brazilian Symp. Comp. Graphics Image Processing, pp. 170 - 177, 2004.
- [7] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior," in Proc. of CVPR '09, pp. 1956-1963, 2009.
- [8] C. Liu and M. Wang, "Removal of water scattering," In Proc. of IEEE International Conference on Computer Engineering and Technology (ICET'10), vol. 2, pp. 35-39, 2010.
- [9] J. S. Jaffe, "Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 15, no. 2, pp. 101 - 111, 1990.
- [10] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, "Vision and the atmosphere. Int. J. Computer Vision," vol. 48 no. 3, pp. 233 - 254, 2002.
- [11] F. A. Jenkins and H. E. White, "Fundamentals of optics. McGraw-Hill," 1997.
- [12] H. Shin, U. Yang and K. Sohn, "Local Color Correction with 3D Point Set Registration for Underwater Stereo Images," Optical Engineering, vol. 51, no. 4, Apr. 2012.

[13] B. Ham, D. Min and K. Sohn, "Cost Aggregation with Anisotropic Diffusion in Feature space for Hybrid Stereo Matching," in Proc. IEEE ICIP 2011, September 2011.

[14] A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss, "A closed form solution to natural image matting," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 30, no. 2, pp. 228-242, 2008.

저 자 소 개



신 형 철

- 2000년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
- 2006년 2월 : 연세대학교 생체인식협동과정 석사
- 2006년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
- 주관심분야 : 3차원 영상처리, 컴퓨터 비전



김 상 훈

- 1999년 : 인하대학교 전자공학과 학사
- 2002년 : 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학석사
- 2008년 : 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학박사
- 2008년 ~ 2009년 : 성균관대학교 ISRC 연구원
- 2009년 ~ 2010년 : 연세대학교 TMS기술사업단 연구원
- 2010년 ~ 현재 : 제주한라대학교 방송영상과 교수
- 주관심분야 : 3D 입체영상, 증강현실(AR), 영상처리, 컴퓨터 비전 등



손 광 훈

- 1983년 : 연세대학교 전자공학과 공학사
- 1985년 : University of Minnesota, MSSE
- 1991년 : North Carolina State University, Ph.D
- 1993년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1994년 : Georgetown University, Post-doctor fellow
- 1995년 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수
- 2002년 9월 ~ 2003년 8월 : Nanyang Technological University, Visiting Professor
- 주관심분야 : 3차원 영상처리, 영상 통신