

강건추정자와 직선마스크를 이용한 스테레오 정합

김경범* · 김낙현** · 정성중***
(1999년 7월 20일 접수)

Stereo Matching Using Robust Estimators and Line Masks

Gyung-Bum Kim, Nak-Hyun Kim and Sung-Chong Chung

Key Words: Corresponding Point(대응점), Disparity Map(변이영상), Depth Discontinuity(깊이 불연속), Line Mask(직선마스크), Outlier(국외자), Projective Distortion(투영왜곡), Robust Estimator(강건추정자), Stereo Matching(스테레오정합)

Abstract

Previous area-based stereo matching algorithms find the disparity by first computing the sum of squared differences (SSD) between corresponding points using a rectangular window, and then searching the position of the minimum SSD within the disparity range. These algorithms generate relatively many matching errors around depth discontinuities, since the SSD function may fail to search for the minimum because of varying disparity profiles in such areas. In this paper, in order to improve the matching accuracy around the depth discontinuities, a new correlation function based on robust estimation technique is proposed for stereo matching. In addition, while previous stereo algorithms utilize a single rectangular window for computing the correlation function, the proposed matching algorithm utilizes 4-directional line masks additionally to reduce the matching errors further. It has been turned out that the proposed algorithm reduces matching errors around depth discontinuities significantly. Experimental results are presented in this paper, comparing the performance of the proposed technique with those of previous algorithms using both synthetic and real images.

1. 서 론

스테레오 비전은 서로 다른 관점(view point)에서 얻어진 좌우 두 장의 영상으로부터 수동적으로 3차원 형상의 깊이를 측정하는 방법으로써 역공학(reverse engineering), 3차원 시각검사, 자동항해와 같은 자동화 분야와 가상현실(virtual reality) 등에 응용된다.^(1,2)

스테레오 비전에서 핵심기술은 좌우 영상에서 대응점을 찾아 변이값(disparity)을 추출하는 정합과정인데, 크게 특징기반, 영역기반, 화소기반 정합으로 분류된다.⁽³⁾

특징기반 정합^(4,5)은 영상의 밝기값을 다양한 필터링에 의해 추출된 특징점을 사용하여 정합가능점을 선정한 후, 정합이 가능한 화소 중에서 변이 연속성과 같은 물리적 제한조건을 부가하여 대응점을 찾는 방법이다. 이 방법의 장점은 밝기 변화에 대한 강건성(robustness)과 반복적인 패턴에 대해서도 적용될 수 있는 점 등이 있다. 그러나 정합의 정확도는 특징을 추출하는 필터링 방법에 영향을 많이 받고, 특징점이 영상내의 일부분에만 있기 때문에 정합과정 후에 별도의 보간과정이 필요하게 된다.

영역기반 정합⁽⁶⁻⁹⁾은 기준 영상에서 정합하려는 화소를 중심으로 정사각형의 윈도우 영역을 설정한 다음, 상대영상에서 이 영역을 변이범위 안에서 이동시키면서 상호상관관계(cross correlation)를 계산하여 그 값이 최대가 되는 화소의 위치를 찾음으로써 변이값을 구하는 방법이다. 이 방법은

* 한양대학교 대학원 기계설계학과/삼성전기(주)

** 한국외국어대학교 제어계측공학과

*** 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : chung@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0444 FAX : (02)2290-4634

밝기 변화가 뚜렷하고 변이가 연속적으로 완만하게 변하는 경우에 정확한 정합결과를 얻게 된다는 장점이 있으나, 영상내 반복적인 패턴에 대해서는 상대적으로 많은 정합오차를 발생시키는 단점이 있다.⁽⁶⁾ 또한, 영역기반 정합은 윈도우 안에서 변이값이 상수라는 가정에 기반을 두고 있기 때문에 깊이가 불연속적으로 변하는 3차원 형상에서는 상대적으로 많은 정합오차를 발생시킨다. 즉, 차폐(occlusion)로 인한 깊이불연속 영역에서는 좌우 영상에서 윈도우 안의 밝기차이가 투영 왜곡현상으로 인해 커지게 되는데, 이로 인해 많은 정합오차가 발생되거나 경계주변에서 측정된 변이값이 평활화(smoothing) 되는 현상이 나타난다.⁽⁷⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구가 진행되어 왔는데, Kanade⁽⁷⁾ 등은 밝기와 추정된 변이값의 변화가 최소가 되는 방향으로 윈도우의 크기 및 모양을 반복적으로 변경시키는 방법을 제안함으로써, 정합의 정확도를 개선하는데는 어느 정도 성과가 있었으나 계산시간이 지나치게 많다는 단점이 있다.

화소기반 정합^(10,11)은 깊이불연속 영역에서 발생하는 영역기반 방법의 단점을 해소하기 위해 정합영역의 크기를 정사각형 윈도우가 아닌 한 화소로 제한하는 방법이다. Cox⁽¹⁰⁾ 등은 차폐와 정합비용을 결합한 비용함수를 유도한 다음 스테레오 영상의 각 주사선(scanlines)을 따라서 비용함수가 최소가 되도록 하는 동적계획법(dynamic programming)을 제안하였고, Boykov⁽¹¹⁾ 등은 상수의 변이값을 갖는 최대 영역을 가설과 검증 방식을 통해 설정하는 가변 윈도우 방법을 제안하였다. 이 방법들은 공통적으로 깊이불연속 영역에서 정확한 변이값을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 잡음에 대한 강건성이 부족하여 정합 밀도가 낮은 단점을 가진다.

본 논문에서는 깊이불연속 영역에서 영역기반 정합에 의한 정합오차를 줄이고 잡음에 대한 강건성을 증대시키기 위해 강건추정자에 기반을 둔 상관함수를 채용하고, 기존의 정사각형 정합영역 이외에 4 방향의 직선마스크의 정합영역을 이용하는 새로운 영역기반 스테레오 정합 알고리즘을 제안한다.

기존의 상관관계함수는 좌우 영상의 윈도우 안에서 밝기차의 자승합(SSD)이 최소가 되는 최소 자승추정자를 사용하였는데, 이 추정자는 밝기차

의 분포가 정규분포라는 가정아래서는 최적이라고 할 수 있다. 그러나, 서로 다른 관점에서 취득된 스테레오 영상의 밝기차는 차폐로 인한 깊이 불연속 영역에서 투영왜곡 등과 같은 잡음으로 인해 커지게 되어 잡음의 특성이 정규분포를 따르지 않게 된다. 이와 같이 통계적으로 국외자(outlier)의 영향을 줄이고 내부자(inlier)의 영향을 크게 하여 잡음에 대한 강건성을 증가시키는 추정 기법이 강건 통계학 분야에서 개발되어 영상 플로우(image flow) 추정분야 등에서 활용되어왔다.^(12,13)

깊이불연속 영역에서의 밝기차 분포에서는 잡음과 국외자의 영향이 크게 나타나므로 이러한 강건추정자를 이용하여 국외자의 영향에 비해 상대적으로 내부자의 영향을 크게 함으로써 정합오차를 감소시킨다. 또한, 깊이 불연속 영역에서 특정한 직선 방향으로의 변이값이 상수가 될 가능성이 높다는 물리적 특성을 이용하여, 4개의 방향성을 갖는 직선마스크를 제안하고 각 직선마스크의 내부에서는 변이값이 상수라는 가정을 만족 시킴으로써 정합오차를 낮추는 정합 알고리즘을 제안한다.

제안된 방법은 효율적이며 구현이 용이하고, 깊이불연속 영역에서 정합의 정확도를 개선시킬 수 있다. 이 방법의 정확도와 효율성을 검증하기 위해, 합성영상과 카메라 보정을 통해 공작기계상에서 측정된 물체의 실제 영상에 대해 기존의 정합방식과 비교하였다. 본 논문에서는 제안하는 알고리즘을 설명한 다음 유용성을 검증하는 실험 결과를 제시한다.

2. 영역기반 스테레오 정합

2.1 스테레오 비전의 기하학적 구조

스테레오 비전에서의 정합은 극상선 제한조건(epipolar line constraint)을 만족하는 두 장의 영상을 이용하여 수행된다. Fig. 1은 평행축 스테레오 구조를 보여주고 있으며 편홀 카메라를 가정하였을 때의 3차원 깊이 z 는 다음식과 같이 유도된다.⁽¹⁴⁾

$$z = \frac{bf}{x_l - x_r} = \frac{bf}{d} \quad (1)$$

여기서, b 는 카메라 사이의 간격, f 는 카메라의 초점거리를 나타내며, x_l 과 x_r 은 좌·우 영상좌표계의 수평축을 의미한다. 스테레오 정합은 좌우 영상에서 대응점을 찾은 후, 대응점의 차이인 변이값을 구하는 과정이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 대응점의 차이값 $x_l - x_r$ 은 변이값 d 로 정의되고, 3차원 깊이의 정확도는 변이값에 의존하기 때문에 정확한 깊이 정보를 얻으려면 변이값 추정이 정확하게 수행되어야 한다.

2.2 기존의 영역기반 상관관계 함수

좌·우 스테레오 밝기 영상을 $I_L(x, y)$, $I_R(x, y)$ 라 하면 두 영상은 다음과 같은 관계를

$$I_L(x, y) = I_R(x + d(x, y), y) + n(x, y) \quad (2)$$

가지며, 여기서 $d(x, y)$ 는 각 화소 (x, y) 에서의 변이값을 나타내고, $n(x, y)$ 는 양쪽 영상에 섞인 잡음성분을 의미한다.

기존의 영역기반 정합에서 주로 적용되는 상관관계함수는 정규화된 상호 상관관계(NCC; normalized cross correlation)와 밝기차의 SSD 등이 다.^(6,9)

NCC는 다음 식과 같이 정의된다.

$$NCC(d) = \frac{Cov[I_L(x, y), I_R(x + d, y)]}{\sigma_{I_L(x, y)}\sigma_{I_R(x + d, y)}} \quad (3)$$

$$\hat{d} = \arg \max NCC(d)$$

이 정합방식에서는 화소 (x, y) 를 중심으로 정사각형 윈도우 Ω_1 을 설정하고, 이 윈도우를 변이 범위(disparity range)안에서 이동시키면서 $NCC(d)$ 가 최대가 되는 위치 \hat{d} 를 결정함으로써, 변이값을 구하게 된다. NCC는 스테레오 영상의 상관 영역의 공분산(covariance)이 클수록, 그리고 각 상관 영역의 표준편차가 작을수록, 큰 값을 갖게 된다. 이 방법은 잡음에 대한 강건성이 부족한 단점이 있으나, 평균과 표준편차가 고려되어 두 스테레오 영상간의 밝기 차이가 보상될 수 있으므로 많은 스테레오비전 시스템에서 사용되고 있다.⁽⁸⁾

SSD는 최소자승추정자를 이용하여 식 (2)에서 화소 (x, y) 에서의 밝기차 $n(x, y)$ 의 자승합이 최소가 되는 위치를 찾아 변이값을 구하는 방법으로 다음과 같이 정의된다.

$$n(x, y) = I_L(x + i, y + j) - I_R(x + d + i, y + j)$$

$$SSD(d) = \sum_{(i, j) \in \Omega_1} n^2(x, y) \quad (4)$$

$$\hat{d} = \arg \min SSD(d)$$

이 방법은 잡음에 대한 강건성과 정합의 정확도와 정밀도면에서 NCC보다 우수한 결과를 보이고, 상대적으로 연산량이 적어서 현재 실시간 스테레오 비전 시스템에 응용되고 있다.^(6,9)

이상의 영역기반 방법은 스테레오 영상에서 윈도우 안의 밝기 변화가 변형없이 이동된다는 가정에 기반을 두고 있으며, 이것의 의미를 수식으로 표현하면 다음 식과 같이 된다.

$$I_L(x + i, y + j) = I_R(x + d_0 + i, y + j), (i, j) \in \Omega_1 \quad (5)$$

여기서, 식 (2)와 식 (5)를 비교해 보면, $d(x, y) = d_0$ 즉, 변이함수가 윈도우 안에서 상수인 경우에 정확하게 변이값을 추정할 수 있다는 의미를 가진다. 그러나 Fig. 2와 같이 깊이불연속을 갖는 영역에서는 변이함수가 계단모양으로 나타나게 되는데, 이와 같이 변이값의 변동이 심한 영역에서는 정합오차가 크게 된다. 일반적으로 영역기반 방법에서는 정합오차를 줄이기 위해 윈도우 크기가 충분한 밝기 변화를 포함할 만큼 커야 되지만, 윈도우 크기가 증가하면 변이값이 상

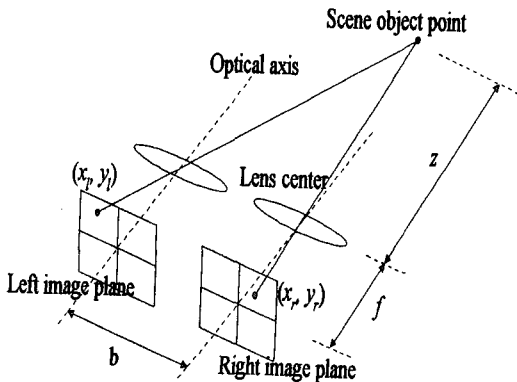


Fig. 1 Parallel axis stereo geometry

수라는 가정이 타당하지 않게 되어 왜곡이 증가하는 상충성을 갖는다.

3. 강건추정자와 직선마스크를 이용한 스테레오 정합

3.1 강건추정자를 이용한 상관관계 함수

기존의 영역기반 정합에서는 식 (4)와 같이 윈도우 Ω_1 안에서 최소자승추정자를 이용하여 변이값을 구하는데, 최소자승추정자는 밝기차의 분포가 정규분포일 경우 정확한 변이값을 추정한다.

Fig. 2는 차폐로 인한 깊이불연속 영역을 나타낸다. 점 a,d,g는 양쪽 카메라에서 측정이 가능하므로 대응점이 존재하지만, 차폐영역 b,c와 e,f는 한쪽 카메라에서만 측정이 가능하기 때문에 스테레오 영상을 취득할 경우, 대응점이 존재하지 않아 좌·우 영상의 밝기차가 크게 발생한다. 이 현상을 투영왜곡이라 하는데 밝기차의 분포가 정규분포를 벗어나게 된다. 이 경우, Fig. 3(a)의 왼쪽과 같이 최소자승추정자의 특성에 의해서 밝기차가 증가함에 따라 높은 가중값이 SSD 상관관계 함수에 부가된다. 또한, 최소자승추정자의 미분에 의해 유도되는 영향함수(influence function) Ψ 를 고려하면, Fig. 3(a)의 오른쪽과 같이 밝기차가 증가함에 따라서 SSD에 미치는 영향이 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있다. 따라서, 기존의 영역기반 정합은 잡음과 차폐로 인한 깊이불연속 영역에서 정합오차가 크게 발생할 것임을 예상할 수가 있다.

통계학에서는 정규분포를 따르지 않고 임의로 분포되어 있는 데이터를 국외자(outlier)라 하는데, 이러한 국외자가 다수 존재하는 경우의 추정 기법으로 강건추정자가 사용되어 왔다. 이 방법에서는 Fig. 3(a)의 왼쪽과 같은 최소자승추정자 대신 Fig. 3(b)의 왼쪽에서 보인 바와 같은 함수를 가중함수(ρ_σ - 함수)로 사용하는데, ρ_σ - 함수는 n 값(밝기차)의 증가에 따른 영향이 점차 줄어드는 특성을 가지게 되어 그 미분은 Fig. 3(b)의 오른쪽과 같은 형태를 가지게 된다. 따라서 n 값의 증가에 따라 그 영향이 지속적으로 증가하는 최소자승추정자와는 달리 국외자의 영향이 어느 한도 이상으로 증가하지 않는다는 특성을 가진다.

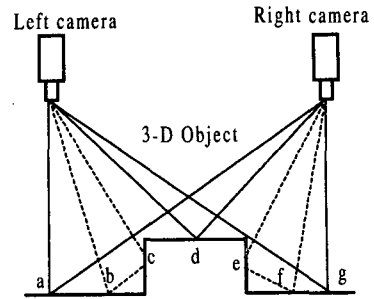


Fig. 2 Depth Discontinuity areas due to occlusion

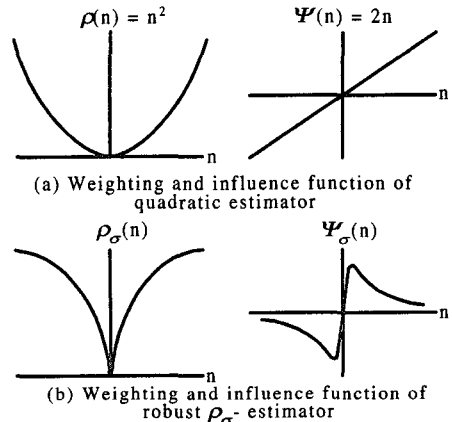


Fig. 3 Shape of quadratic and robust estimator

이러한 특성에 의해 국외자의 영향을 줄이고 내부자(inlier)의 영향을 크게 하는 강건추정 기법에 ρ_σ - 함수가 사용되어 왔고, 최근에는 동영상 해석시 영상 플로우 추출에 효율적인 수단으로 사용되고 있다.^(12,13)

깊이불연속이 존재하는 영역에서 스테레오 영상의 밝기차 분포는 기본적으로 잡음과 국외자의 영향이 크게 나타나므로 강건추정자를 이용하여 그 영향을 줄이는 방법을 모색하였다. 본 논문에서 제안하는 강건추정자와 그의 미분인 영향함수는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_\sigma(n) &= \log \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{n}{\sigma} \right)^2 \right\} \\ \Psi_\sigma(n) &= \frac{d\rho_\sigma(n)}{dn} = \frac{2n}{2\sigma^2 + n^2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 영향함수의 경우 n 값이 증가함에 따라 점차 0으로 수렴하는 특성을 가지므로 밝기

차가 증가하고 잡음이 존재하더라도 그 영향이 어느 한도 이상으로 커지지 않는다는 특성을 가지게 된다.

본 논문에서는 이 추정자를 이용하여 기존의 SSD 상관관계함수 대신 다음 식과 같은 상관관계 함수를 제안한다.

$$\rho_{\sigma}SSD(d) = \sum_{(i,j) \in \Omega_1} \rho_{\sigma}(n(x,y)) \quad (7)$$

$$\hat{d} = \arg \min \rho_{\sigma}SSD(d)$$

여기서, $n(x,y)$ 는 식 (2)에서와 같이 스테레오 영상의 잡음성분, Ω_1 은 정합영역을 나타낸다. 식 (7)과 식 (4)를 비교하면, 제안된 방법의 정합영역은 기존의 방법과 동일하지만 최소자승추정자가 아닌 강건추정자를 기반으로 하고 있다.

그러므로 제안된 방법은 변이값이 완만하게 변하는 영역(smooth deformation)에서 비교적 정확한 정합결과를 얻게 되는 기존의 장점은 그대로 유지하면서, 잡음과 차폐 등으로 인해 발생하는 영향을 최소화함으로써 정합오차를 줄일 수 있게 된다.

3.2 깊이불연속을 고려한 직선마스크와 강건추정자를 이용한 상관관계 함수

강건추정자의 특성으로 인해 정합오차를 기존 방법에 비해 어느정도는 줄일 수 있지만, 깊이불연속영역에서의 평활화 현상과 오정합(false matching)은 많이 감소시킬 수 없게 된다. 만약, 정합 영역의 크기를 작게 한다면 평활화는 줄지만 정합오차는 크게 나타나고, 반대로 정합영역을 크게 한다면 정합오차는 감소하지만 평활화는 크게 나타나는 상충성이 있다.

본 논문에서는 평활화와 오정합을 동시에 줄이기 위해, 식 (7)의 $\rho_{\sigma}SSD$ 뿐만 아니라 Fig. 4와 같은 수평, 수직, 대각선 방향의 직선마스크

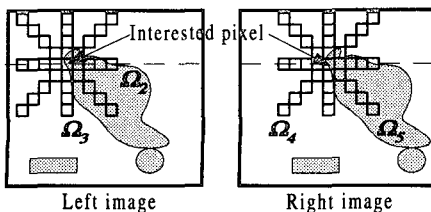


Fig. 4 Proposed line mask for depth discontinuity

$\Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$ 를 이용하여 이 직선마스크의 영역 안에서 강건추정자 기반의 상관관계 함수 LSSD를 적용하는 새로운 상관관계 함수 NSSD를 다음 식과 같이 정의한다.

$$LSSD(d) = \sum_{(i,j) \in \cup \Omega_k} \rho_{\sigma}(n(x,y)), \quad k=2,3,4,5$$

$$NSSD(d) = \rho_{\sigma}SSD(d) + \lambda LSSD(d) \quad (8)$$

$$\hat{d} = \arg \min NSSD(d)$$

여기서, λ 는 가중 비율을 조절하는 상수이다. 제안된 직선마스크는 각 직선마스크 방향에 대해 수직인 방향으로 식 (5)와 같은 영역기반 정합의 기본적 가정, 즉 변이가 상수라는 것을 부분적으로 만족시키게 되며, 이에 따라 차폐 등으로 인한 깊이불연속 영역에서 직선마스크 영역안의 밝기차가 작아지게 된다. 따라서, 내부자의 영향을 크게 하는 강건추정자의 특성 때문에 변이값을 정확하게 추정할 수 있게 된다.

그러므로 제안된 상관관계 함수 NSSD를 이용하면, 변이값이 불연속적으로 변하는 영역에서 정합오차를 감소시킬 수 있고, 잡음으로 인해 밝기차가 큰 영역에서도 우수한 결과를 얻게 된다. 이들의 결과는 다음절에서 실험을 통해 확인된다.

4. 실험 및 고찰

제안된 스테레오 정합 방식의 효용성을 검증하기 위해 다양한 합성영상과 공작기계상에서 측정된 실제영상에 대해 기존의 방식과 성능을 비교한다. 제안된 방법에서는 Ω_1 을 9×9 , $\Omega_2 \sim \Omega_5$ 를 25화소의 영역 그리고 식 (6)의 σ 를 3, λ 를 1로 설정하였다. 기존 방식의 경우는 정합오차를 고려하여 Ω_1 을 9×9 , 11×11 영역을 이용하여 실험하였다.

4.1 합성영상

깊이불연속 영역에 대한 제안된 방법의 정확도를 검증하기 위해서, 정사각형 또는 마름모 모양으로 계단형태의 변이 구조가 존재하는 합성영상을 Fig. 5와 같이 0~20 화소의 변이범위로 생성하였다.

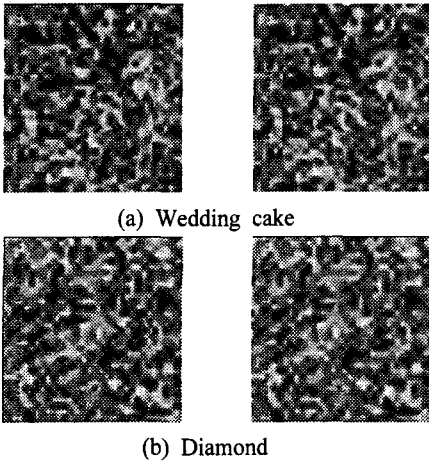


Fig. 5 Random dot stereograms

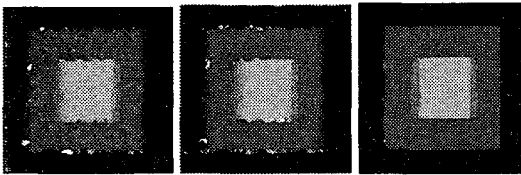


Fig. 6 Matching results for the image of Fig. 5(a)

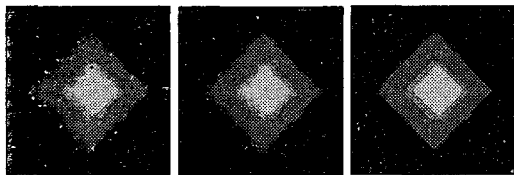


Fig. 7 Matching results for the image of Fig. 5(b)

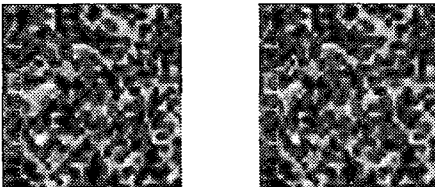


Fig. 8 Stereogram with hemisphere-shaped disparity

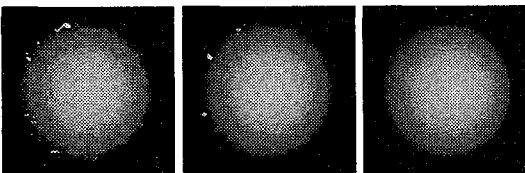


Fig. 9 Matching results for the image of Fig. 8

Fig. 6~7은 기존 방식과 제안된 방법으로 정합 후의 변이영상을 보인 것이다. 변이값이 클수록 밝게 나타내었다. 여기서 보듯이, 깊이불연속 영역에서는 제안된 방법이 상대적으로 평활화가 없고 오정합이 감소됨을 알 수 있다. 이것은 깊이 불연속을 고려한 직선마스크와 강건추정자 기반의 스테레오 정합이 정합오차를 줄일 수 있음을 보여준다.

Fig. 8은 변이 범위가 0~25이고, 반구의 변이 구조를 갖는 합성영상인데, Fig. 5와 같은 계단형태의 변이 구조와는 달리 정합 영역 안에서 변이값이 연속적으로 변하는 변이 구조를 가지는데, 제안된 방법이 깊이불연속성이 존재하지 않는 영역에서도 정확한 정합이 수행됨을 입증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험 결과인 Fig. 9를 검토해보면, 제안된 방법이 기존방법에 비해 반구의 경계 영역에서 오정합을 감소시킴을 알 수 있다.

Table 1은 이상의 결과를 정량적으로 분석하기 위해 정합과정에 의해 추정된 변이값과 실제 변이값을 비교하여 한 화소당 평균절대오차(mean of absolute error)를 보인 것이다.

SSD는 NCC에 비해 정확한 정합결과를 주었으며, 동일한 정합 영역 Ω_1 에서 식 (7)에 의해 추정된 정합오차는 기존 SSD에 비해 깊이불연속성을 포함한 cake와 diamond 영상에서 평균 40%, 반구영상에서 10% 감소됨을 알 수 있다. 또한, 제안된 방법은 단지 정합에 사용되는 정합영역이 크기 때문에 정합오차를 감소시키는 것이 아니라 는 점을 보이기 위해 직선마스크를 포함한 원도

Table 1 Mean of absolute matching error per pixel

(Unit: Pixel)	Cake	Diamond	Hemisphere
NCC	0.92	0.58	0.88
SSD (9x9)	0.79	0.49	0.76
SSD (11x11)	0.87	0.52	0.77
Proposed (Eq.(7))	0.40	0.33	0.71
SSD with $\Omega_1 \sim \Omega_5$	0.81	0.55	0.77
Proposed (Eq.(8))	0.32	0.30	0.70
Additive 25 noise level			
NCC	1.11	0.83	1.09
SSD (9x9)	0.84	0.54	0.79
Proposed (Eq. (8))	0.44	0.38	0.74

우영역 $\Omega_1 \sim \Omega_5$ 에 대해 식 (4)와 식 (8)에 의해 실험한 결과, 제안된 방법이 최소자승추정자를 이용한 경우보다 정합오차가 훨씬 작아짐을 볼 수 있다. 전체적으로는 cake과 diamond 영상에서 정합오차가 48%, 반구 영상에서 10% 감소함을 알 수 있다.

Table 1을 통해 제안된 강건추정자 함수 방식은 기존의 방식에 비해 정합오차를 줄이고, 깊이 불연속을 고려한 직선마스크를 적용하면 정합오차가 더욱 감소하게 됨을 알 수 있다. 또한, 잡음이 존재하는 경우도 정합의 정확도와 강건성을 확인하기 위해 최대범위가 25 (최대 밝기의 10%에 해당)인 균일분포(uniform distribution) 잡음이 실린 각 영상에 대해 실험한 결과, 정합오차는 기존 방법보다 우수한 결과를 보였다.

4.2 실제 영상

4.2.1 실험장치

Fig. 10은 공작기계상에서 깊이불연속 영역과 변이가 점차적으로 변하는 영역이 존재하는 물체 (190 × 190 × 40mm)의 카메라 보정과 스테레오 영상을 획득하기 위한 실험장치이다. 물체는 탈로써 I-DEAS를 이용하여 모델링한 다음, 가공코드를 생성하여 수직형 머시닝센터에 의해 가공을

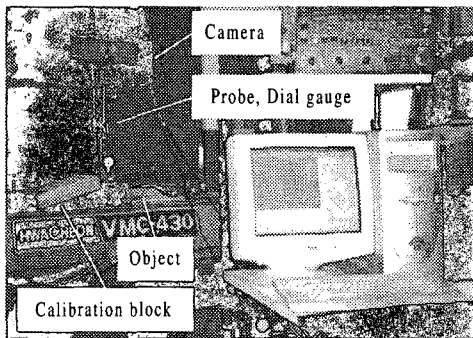
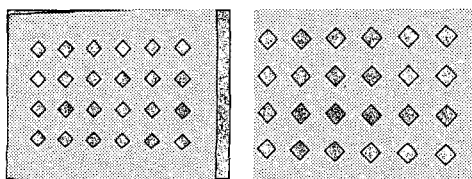


Fig. 10 Experimental setup



(a) $Z_w=0$ (b) $Z_w=135$ mm
Fig. 11 Camera calibration patterns

수행하였다. 카메라는 최대한 수직 변이(vertical disparity)가 발생하지 않도록 카메라 좌표계에 대해서 회전이 조절되어 고정될 수 있도록 하였고, 공작기계 테이블은 좌우로 이동하여 스테레오 영상을 획득한다. 접촉식 프로브는 공작기계상에서 가공된 물체의 기준 깊이값을 측정하고 보정 불력에 대한 기준 위치를 파악하기 위해 사용하였다.⁽¹⁵⁾

4.2.2 카메라 보정

카메라 보정은 크게 내부파라미터(intrinsic parameters)와 외부파라미터(extrinsic parameters)를 결정하는 과정이다. 내부파라미터는 카메라의 초점거리, 중심점(principal point), 렌즈왜곡, scale factor 등을 말하고, 외부파라미터는 전체 좌표계에 대하여 카메라 좌표계의 위치와 자세(orientation)를 말한다.

본 논문에서는 카메라의 내·외부 파라미터를 추출하기 위해 보정패턴의 제어점을 이용한 Tsai 방법(16)을 이용하였다. Tsai의 non-coplanar 방법을 적용하기 위해서는 Fig. 11과 같이 24개의 제어점이 35mm 간격으로 일정하게 인쇄된 보정블럭을 앵글게이지(angle gauge)를 이용하여 15° 만큼 기울인 다음, 카메라를 15mm 간격으로 수직 이동하면서 10장의 영상을 획득하여 전체 240개의 제어점을 이용하였다. 카메라 보정의 입력값은 각 보정패턴에 대한 중심점의 실제 3차원 좌표값과 보정패턴 영상에서 이진화를 수행하고 각 제어점 주변에서 수평·수직 방향으로 밝기값을 투영한 다음, 최소값이 되는 위치를 추출함으로써, 이 위치를 각 제어점의 영상좌표로 이용하였다. 이상의 과정을 통한 카메라 보정 결과는 Table 2에

Table 2 Results of camera calibration

	Result	Unit
Focal length f	16.77	mm
Image origin (C_x, C_y)	284.27, 191.50	pixel
Lens distortion coefficient χ_1	8.4174287577e-004	1/mm ²
Uncertainty scale factor S_x	1.03	
Translation vector (T_x, T_y, T_z)	-121.6, 121.8, 718.7	mm
Rotation angle (R_x, R_y, R_z)	-3.16, 0.00893, 0.00403	°

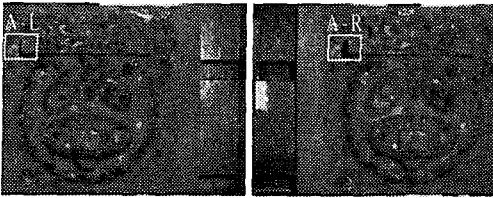
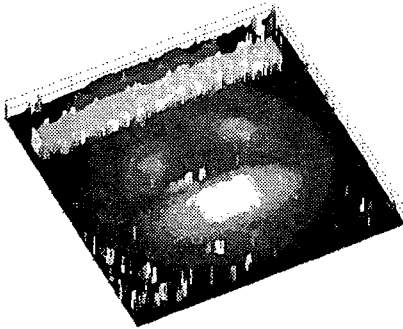
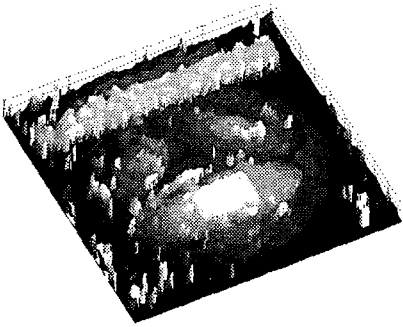


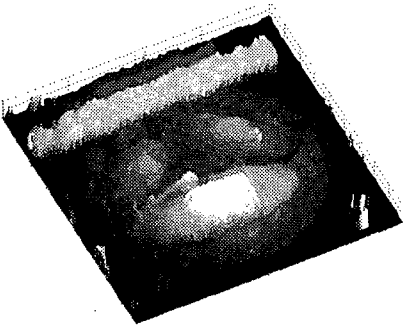
Fig. 12 Stereo images(640 × 480)



(a) NCC



(b) SSD



(c) Proposed

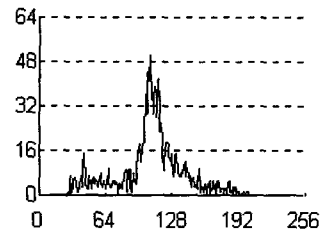
Fig. 13 3-D plot of disparity map

나타내었다. 카메라 보정의 정확도를 알아보기 위해 카메라 보정에서 얻은 매개변수를 입력하여 보정 패턴을 취득한 영상으로부터 3차원 좌표값을 계산한 결과, 실제 입력한 3차원 좌표값과는 최대 0.32mm 차이를 보였다.

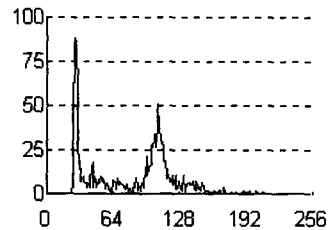
4.2.3 실험결과

Fig. 12는 식 (1)의 거리 b 가 82mm가 되도록 카메라를 이동시켜 공작기계상에서 취득한 탈의 스테레오 영상이다. Fig. 13은 Fig. 12의 스테레오 영상을 정합한 다음 변이 영상을 3차원적으로 나타낸 것인데, 제안된 방법은 기존 방법에 비해 배경부분에서 강건추정자의 적용으로 오정합을 줄일 수 있었으며, 깊이불연속 영역이 존재하는 탈의 머리와 코 부분에서 3차원 형상을 보다 잘 표현해 주고 있다. 이것은 직선마스크를 적용함으로써 인해 정합이 더 정확하게 수행되어 정합오차가 감소하는 것을 의미한다.

Fig. 12에서와 같이 탈의 머리부분에 해당하는 영역 A 에서는 차폐와 그림자로 인한 투영왜곡 때문에 좌우 영상의 밝기차가 크게 나타남을 Fig. 14의 영상 히스토그램 분포를 통해 알 수 있다. 이러한 깊이불연속 영역에서의 정합오차를 정량적으로 비교하기 위해, 영역 A 안에서 20개 점을 선택하여 Table 2의 카메라 보정 결과를 토



(a) Area A-L in the left image of Fig. 12



(b) Area A-R in the right image of Fig. 12

Fig. 14 Comparisons of gray level histogram

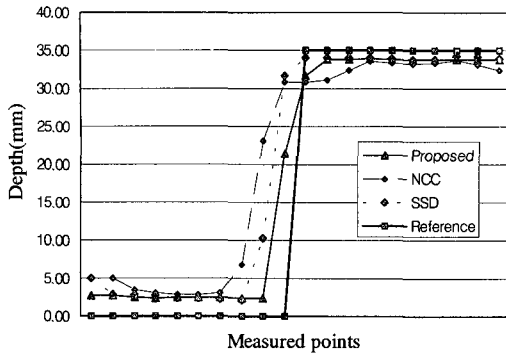


Fig. 15 Comparison of depth profile in area "A" of Fig. 12

대로 Fig. 15와 같이 계산된 물체의 깊이를 비교하였다. 전체적으로 깊이 오차는 존재하나 제안된 방법이 기존 방법에 비해 기준 깊이를 보다 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 이때, 깊이 기준값은 접촉식 프로브를 이용하여 측정된 깊이를 사용하였고, 20개 점에 대해서 평균깊이 오차를 비교하면 NCC는 5.45mm, SSD는 3.71mm 그리고 제안된 방법은 2.90mm로 기존방법에 비해 20% 감소하였고, 이 결과는 합성영상의 실험결과와 일치함을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 깊이불연속을 고려한 강건 추정자 기반의 영역기반 스테레오 정합 방식이 기존 방식에 비해 우수함을 알 수 있다.

5. 결론

깊이불연속이 존재하는 경우 정합오차를 줄이기 위한 새로운 영역기반 스테레오 정합을 제안하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 차폐와 물체의 경계선에서 투영왜곡현상과 잡음에 효율적으로 대응하기 위해, 강건추정자 기반의 스테레오 정합을 제안하였다.

(2) 깊이불연속성 영역에서의 평활화와 오정합을 줄이기 위해, 기존의 정합 영역외에 각 방향으로의 4개의 직선마스크를 도입하여 강건추정자 기반의 상관관계 함수를 제안하였다.

(3) 제안된 방법을 합성영상에 적용한 결과, 깊이불연속이 존재하는 영상에서는 정합오차가 기존방법에 비해 40% 감소하였고, 변이가 다양하게 변하는 영상에서도 10% 감소하였다. 또한, 잡음

에도 강건한 특성이 있음을 보였다.

(4) 동작기계상에서 깊이불연속 영역이 존재하는 물체의 깊이를 측정된 결과, 제안된 방법은 접촉식을 이용한 깊이값을 기준으로 기존방법에 비해 깊이오차를 20% 감소시켰다.

참고문헌

- (1) Igarashi, S., Shibukawa, K. and Kaneta, M., 1993, "3D Measurement of Shape Using Differential Stereo Vision Algorithm," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 27, No. 3, pp. 247~252.
- (2) Singh, S. and Digney, B., 1999, "Autonomous Cross-Country Navigation Using Stereo Vision," *Carnegie Mellon Univ. Tech. Rep. CMU-RI-TR-99-03*.
- (3) Wei, Guo-Qing., Braucher, W. and Hirzinger, G., 1998, "Intensity- and Gradient-Based Stereo Matching Using Hierarchical Gaussian Basis Functions," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 20, No. 11, pp. 1143~1160.
- (4) Grimson, W. E. L., 1985, "Computational Experiments with a Feature Based Stereo Algorithm," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, pp. 17~34.
- (5) Kim, N. H. and Bovik, A. C., 1988, "A Contour-Based Stereo Matching Algorithm Using Disparity Continuity," *Patt. Recog.*, Vol. 21, pp. 505~514.
- (6) Okutomi, M. and Kanade, T., 1993, "A Multiple-Baseline Stereo," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 15, No. 4, pp. 353~363.
- (7) Kanade, T. and Okutomi, M., 1994, "A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window: Theory and Experiment," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 16, No. 9 pp. 920~923.
- (8) Faugeras, O., Hotz, B. and Mathieu, H., et al, 1993, "Real Time Correlation-Based Stereo: Algorithm, Implementations and Applications," *INRIA Tech. Rep.* 1013.
- (9) William, Todd A., 1998, "A High-Performance

- Stereo Vision System for Obstacle Detection," *Carnegie Mellon Univ. Tech. Rep.*, CMU-RI-TR-98-24.
- (10) Cox, I. J., Hingorani, S. L. and Rao, S. B., 1996, "A Maximum likelihood stereo algorithm," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 63, No. 3, pp.542~567.
- (11) Boykov, Y., Veksler, O. and Zabih, R., 1998, "A Variable Window Approach to Early Vision," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 20, No. 12, pp. 1283~1294.
- (12) Black, M. J. and Anandan, P., 1993, "A Framework for the Robust Estimation of Optical Flow," *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Computer Vision*, pp. 231~236.
- (13) Lee, K. H. and Wahn, K. Y., 1996, "Robust Estimation of Optical Flow Based on the Maximum Likelihood Estimators," *IEEE Trans. Inf. & Syst.*, Vol. 79, No. 9, pp. 1286~1295.
- (14) Faugeras, O., 1993, *Three-Dimensional Computer Vision*, MIT. Press.
- (15) 정성중, 김경돈, 1999, "접촉식 측정프로브를 이용한 2차원 온더머신 측정 및 검사시스템의 설계 및 해석," *대한기계학회논문집(A)*, 제23권, 제1호, pp. 37~46.
- (16) Tsai, R. T., 1987, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lens," *IEEE J. Robot. Automa.*, Vol. 3, pp. 323~344.