

# 가변 윈도우의 투영왜곡을 고려한 스테레오 정합 알고리즘

김 경 범\* · 정 성 종†

(2000년 6월 27일 접수, 2001년 1월 22일 심사완료)

## A Stereo Matching Algorithm with Projective Distortion of Variable Windows

Gyung-Bum Kim and Sung-Chong Chung

**Key Words :** Depth Discontinuity(깊이불연속), Local Deformation(국소변형), Potential Matching Point(정합가능점), Robust Estimator(강건추정자), Stereo Matching(스테레오정합), Variable Window(가변윈도우)

### Abstract

Existing area-based stereo algorithms rely heavily on rectangular windows for computing correspondence. While the algorithms with the rectangular windows are efficient, they generate relatively large matching errors due to variations of disparity profiles near depth discontinuities and doesn't take into account local deformations of the windows due to projective distortion. In this paper, in order to deal with these problems, a new correlation function with 4 directional line masks, based on robust estimator, is proposed for the selection of potential matching points. These points is selected to consider depth discontinuities and reduce effects on outliers. The proposed matching method finds an arbitrarily -shaped variable window around a pixel in the 3d array which is constructed with the selected matching points. In addition, the method take into account the local deformation of the variable window with a constant disparity, and perform the estimation of sub-pixel disparities. Experiments with various synthetic images show that the proposed technique significantly reduces matching errors both in the vicinity of depth discontinuities and in continuously smooth areas, and also does not be affected drastically due to outlier and noise.

### 1. 서 론

최근, CAD/CAM 기술이 생산현장에 폭넓게 적용되고 있어 역공학(reverse engineering)의 역할은 더욱 중요해지고 있다. 역공학에서 중요한 기술 중 하나는 기존 부품 또는 목형을 위한 CAD 모델을 구하는 것이다. 이 경우 고품질의 3 차원 측정 데이터가 얻어져야만 물체의 정확한 기하학적 모델을 추출할 수 있기 때문에, 3 차원 좌표 측정은 역공학에서 매우 중요하다. 이에 따라 접촉식에 비해 저비용, 고속 측정 등의 장점을 가진 비접촉식 3 차원 측정은 널리 생산 시스템에 적용되

고 있다.<sup>(1)</sup> 이들 중에서 스테레오 비전은 서로 다른 관점(viewpoint)에서 취득된 두 장의 영상을 이용하여 3 차원 형상을 측정하는 방법으로, 3 차원 데이터 취득속도와 정확성, 적용 측면에서 효율적으로 사용되는 방법이다. 스테레오 비전에서 해결해야 될 가장 중요한 문제점은 좌우 영상에서 대응되는 점을 찾아서 변이(disparity)를 추정하는 스테레오 정합(stereo matching)이다. 이에 관한 연구는 크게 특징기반, 영역기반, 화소기반 정합으로 분류되는데,<sup>(2,3)</sup> 실제 시스템에서는 영역기반정합이 주로 적용되고 있다.<sup>(4,5)</sup>

영역기반정합은<sup>(4-6)</sup> 정합영역 안에서 밝기 변화가 뚜렷하고 변이가 연속적으로 완만하게 변하는 경우에, 정합의 정확도가 우수하다는 장점이 존재한다. 이를 위해서는 적절한 정사각형의 정합영역의 크기 선정이 필수적이다. 일반적으로, 정합영역의 크기가 클수록 충분한 밝기 변화를 포함하게 되어 정합의 정확도를 개선할 수는 있으나 투영왜

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과/삼성전기주

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과부

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

TEL : (02)2290-0444 FAX : (02)2298-4634

곡(projective distortion)의 영향은 더욱 커져 평활화 현상이 발생하게 된다. 특히, 이 방법은 변이가 정합영역 안에서 상수라는 가정에 기반을 두고 있어 변이가 정합영역 안에서 급격하게 변하는 깊이불연속 영역에서는 상대적으로 많은 정합오차를 발생시킨다. 즉, 차폐(occlusion)로 인한 영역에서는 투영왜곡으로 인해 정합영역이 변형되고 밝기차가 커지게 된다. 따라서 대응점을 찾기가 어려워지고 그 결과 정합오차는 크게 발생하게 된다.

위의 문제점을 해결하기 위해 다양한 연구가 시도된 바 있다. 투영왜곡의 영향을 감소하기 위해 밝기와 추정된 변이의 변화가 최소가 되는 방향으로 정합영역의 크기 및 모양을 반복적으로 변경시키는 방법이 제안되었다.<sup>(6)</sup> 이 방법은 깊이불연속 영역에서 우수한 결과를 주나 정합영역의 국소 변형(local deformation)이 고려되지 않았고 과도한 계산비용이 요구되는 단점이 있다.

반면, 영역기반 정합에 의해 추정된 초기 변이를 변경된 기존의 영역기반 상관함수에 적용하여 변이를 반복적인 방법으로 갱신하는 차동정합(differential matching)은 정합영역의 국소 변형을 고려함으로써 연속적으로 완만한 영역에서 비교적 정확한 결과를 주나 깊이불연속 영역에서 상대적으로 많은 정합오차를 발생시키는 상충성이 존재한다.<sup>(7)</sup>

이상의 문제로부터, 본 논문에서는 깊이불연속과 연속적으로 완만한 영역에서 정합 오차를 동시에 감소하고 잡음에 대한 강건성을 증대시키는 알고리즘을 시도하고자 한다. 기존의 정사각형 정합영역이외에 깊이 불연속이 고려되는 4 방향의 직선 정합영역을 고안하여 강건추정자 기반의 영역기반 상관함수를 제안한다. 또한, 스테레오 영상의 행과 열, 변이로 구성되는 3 차원 배열을 생성하고, 제안된 상관함수를 적용하여 추정된 변이에 해당되는 배열 안에 정합가능점을 선정하는데, 이 정합가능점은 깊이불연속을 유지시키고 잡음에 둔감한 변이를 추정한다. 이 3 차원 배열의 각 변이에 따른 평면에서 정합가능점이 최대로 연결되어 있는 가변 윈도우(동일한 변이를 갖고 임의의 형상인 정합영역)를 탐색함으로써 기존 영역기반정합의 가정을 만족시키고, 투영왜곡으로 인한 국소 변형을 고려하기 위해 가변 윈도우를 이용한 차동정합을 재정식화하여 서브픽셀의 정확한 변이를 추정한다.

제안된 방법은 효율적이며 구현이 용이하고, 정합의 정확도를 개선시킬 수 있고 잡음에 대한 강건성이 있다. 제안된 방법의 정확도와 효율성을 검증하기 위해, 합성영상을 이용하여 기존의 정합

방식과 비교 검토한다.

## 2. 영역기반 스테레오 정합

스테레오 비전에서 일반적으로 사용되는 영상 취득 구조는 Fig. 1 과 같은 평행 광학축 구조이다. 이 구조는 두 카메라의 광학축이 평행하며 두 영상면의 수평축  $u$  가 두 광학축이 이루는 평면 위에 놓이게 된다. 결국, 스테레오 영상의 대응점(correspondence points)은 동일한 수평 주사선상에 있게 된다. 따라서, 정합을 수행하는 과정이 간편해져 대부분의 스테레오 정합 알고리즘은 이러한 구조를 가정하고 있다. 실제로 스테레오 영상을 획득할 경우는 카메라 보정을 통해 카메라의 기하학적 구조와 광학 매개변수를 규명한 다음 취득된 스테레오 영상이 평행광학축 구조를 가지도록 영상 교정(rectification)을 수행하게 된다. Fig. 1 에서는 3 차원 형상 위의 점  $P$  가 영상면에 투영될 경우, 대응점의 위치 변화와 3 차원 깊이와의 관계를 보여 주고 있다. 이때, 카메라 광학계가 핀홀인 경우를 가정하면 3 차원 깊이는 다음 식과 같이 유도된다.<sup>(8)</sup>

$$z = \frac{bf}{u_l - u_r} = \frac{bf}{d} \quad (1)$$

여기서,  $b$  는 카메라 사이의 간격,  $f$  는 카메라의 초점거리를 나타낸다. 스테레오 정합은 스테레오 영상에서 대응점의 위치 차이, 즉 변이  $d$  를 추정하는 과정이므로 정확한 변이 추정은 3 차원 형상 측정에 필수적인 요소임을 알 수 있다. 스테레오 정합에서 어려운 점은 반복적인 패턴, 국소적으로 균일한 밝기, 잡음 등에 의한 정합 모호성(matching ambiguity)을 포함하고 있다.

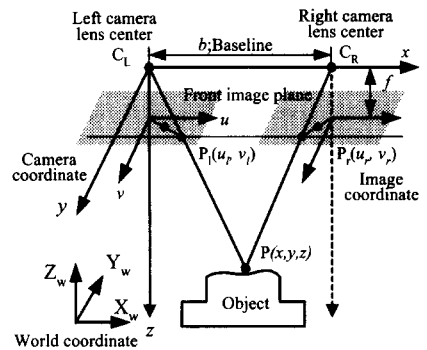


Fig. 1 Parallel-axis stereo geometry

또한, 영상 안의 물체는 무광택인 곡면으로 구성되고 이것의 밝기는 카메라의 각도가 아닌 조명의 각도에만 의존된다. 이 경우에 스테레오 영상의 대응점은 동일한 밝기임을 가정하고 있다.<sup>(6)</sup> 그러나 실제로는 물체의 반짝임(specularities)과 반사(reflections) 등과 같은 여러 가지 문제가 뒤따르게 되며 위의 가정이 유효할지라도 카메라 광학계의 내부 변수가 다르게 설정된다면, 대응점의 밝기차는 커지게 된다. 게다가 차폐 영역과 경계선과 같은 깊이 불연속 영역에서 대응점의 밝기는 투영왜곡으로 인해 많은 차이가 발생하게 된다.

$n(u, v)$  는 이러한 모호성을 반영하는 잡음이고 좌우 영상의 밝기를  $I_L, I_R$  이라 하면 스테레오 영상의 밝기 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$I_L(u, v) = I_R(u + d(u, v), v) + n(u, v) \quad (2)$$

영역기반 정합에서 주로 적용되는 정합 척도는 밝기차의 제곱합<sup>(4,6)</sup>(SSD; sum of squared difference)과 정규화 상관함수<sup>(5)</sup>(NCC; normalized cross correlation)를 이용한 것으로, 전체 영상에서 대응점을 찾을 수 있고 구현의 용이성으로 인해 실시간 스테레오 비전 시스템에 응용되고 있다. SSD 는 기준 영상 좌표  $(u, v)$  를 중심으로 정사각형 정합영역  $\Omega$  을 설정하고, 이 정합영역을 상대영상의 변이범위 안에서 이동시키면서 밝기차의 제곱합이 최소가 되는 위치, 변이  $\hat{d}$  를 추정하는 것으로 식 (3)과 같다. 이때, 서브픽셀의 변이 추정은 최소의 제곱합 주변의 변이들을 이차 다항식으로 근사 시킨 다음, 이 근사 함수의 최소 위치를 찾는 방법으로 수행한다.

$$n(u, v) = I_L(u + i, v + j) - I_R(u + d + i, v + j)$$

$$SSD(d) = \sum_{(i, j) \in \Omega} n^2(u, v) \quad (3)$$

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

이 방식에서 정합영역  $\Omega$  의 적절한 크기 선정은 완만하고 세밀한 변이를 얻는데 있어 매우 중요하다. 일반적으로 작은 정합영역을 이용하면 평활화를 피할 수 있게 된다. 그러나 밝기 변화가 뚜렷하지 않은 영역에서 신뢰성 있는 정합을 수행하기 위해서는 충분한 밝기 변화를 포함할 만큼 보다 큰 정합영역이 필요하게 되는데, Fig. 2 의 영역 a, b 와 같이 변이가 정합영역 안에서  $d_i$  에서

$d_h$  로 급격히 변하는 깊이불연속 영역에서, 이 방법은 변이가 정합영역 안에서 상수라는 가정에 기반을 두고 있기 때문에 상대적으로 많은 정합오차를 발생시킨다.<sup>(6)</sup> 즉, 정합영역은 평면으로 가정한다는 의미를 가진다. 따라서, 차폐영역과 깊이불연속 영역에서는 투영왜곡으로 인해 정합영역이 국소적으로 변형되어 대응되는 점의 위치가 변하게 되므로 대응점의 밝기차는 더욱 커지게 된다. 투영왜곡은 왼쪽 영상에서의 정사각형 정합영역이 오른쪽 영상에서는 정사각형이 아닌 왜곡된 정합영역으로 보이게 되는 현상이다.<sup>(7)</sup>

SSD 는 식 (3)과 같이 제곱 추정자를 이용하여 변이를 구하는 방법인데, 이 추정자는 밝기차의 분포가 정규분포인 경우 정확한 변이를 추정하게 된다. 그러나 투영왜곡으로 인해 국외자(outlier)가 발생하게 되어 밝기차의 분포는 정규분포를 만족하지 못하게 되고 Fig. 3(a)와 같은 제곱추정자의 특성으로 밝기차가 증가함에 따라 높은 가중값이 SSD 상관함수에 부가된다. 또한, 제곱추정자의 미분에 의해 유도되는 영향함수(influence function)를 고려하면, Fig. 3(b)와 같이 밝기차가 증가함에 따라, SSD 에 미치는 영향이 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있다. 따라서, SSD 는 국외자의 영향을 더 크게 받게 됨을 예상할 수 있으며 정사각형 정합영역을 이용함으로써 잡음과 투영왜곡으로 인해 깊이불연속 영역에서 정합오차가 크게 발생할 것이다.

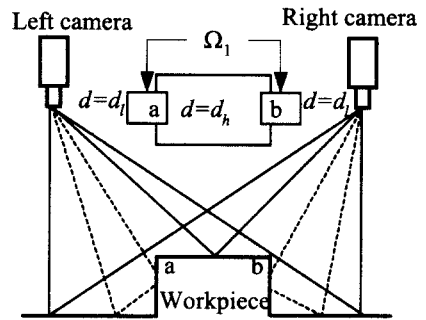
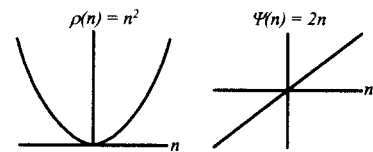


Fig. 2 Depth discontinuities due to occlusion



(a) Weighting function (b) Influence function

Fig. 3 Shapes of quadratic estimator

### 3. 새로운 스테레오 정합 알고리즘

#### 3.1 정합가능점(potential matching points) 선정

국외자는 정규분포를 따르지 않고 임의로 분포되어 있는 데이터를 말하며, 이러한 국외자와 잡음이 다수 존재하는 경우의 추정 기법으로 강건추정자가 사용되어 왔다.<sup>(9)</sup> 이 추정 방법은 Fig. 4(a)와 같은 함수를 가중함수로 사용하는데, 이 함수는  $n$ 이 증가에 따른 영향이 점차 줄어드는 특성을 가지게 되어 그 미분은 Fig. 4(b)와 같은 형태를 가지게 된다. 따라서  $n$  값의 증가에 따라 그 영향이 지속적으로 증가하는 제곱 추정자와는 다르게 국외자의 영향이 어느 한도 이상으로 증가하지 않는 특성을 가진다.

깊이불연속 영역에서 스테레오 영상의 밝기차분포는 기본적으로 잡음과 투영왜곡으로 인한 국외자의 영향이 크게 나타나므로 강건추정자의 특성을 이용하여 그의 영향을 줄이는 방법을 모색하였다. 제안된 강건추정자와 그의 미분인 영향함수는 다음 식과 같다.

$$\rho_{\sigma}(n) = \log \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{n}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

$$\psi_{\sigma}(n) = \frac{d\rho_{\sigma}(n)}{dn} = \frac{2n}{2\sigma^2 + n^2}$$

이와 같은 강건추정자의 특성을 이용하면 잡음과 국외자의 영향을 감소시킬 수는 있으나 깊이불연속 영역에서의 평활화를 억제하기가 다소 어려운 점이 따르게 된다. 따라서 특정한 직선 방향에서 변이가 상수가 될 가능성이 높다는 물리적 특성을 이용하여 4 방향의 직선 정합영역을 Fig. 5와 같이 고안하여 차폐영역에서 평활화를 감소하고자 한다.

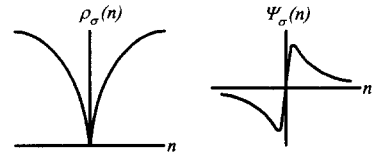
본 논문에서는 국외자의 영향을 감소하고 깊이불연속을 유지시킬 수 있는 정합가능점 선정을 위해 다음 식과 같이 정합영역  $\Omega_1 \sim \Omega_5$ 을 이용하여 새로운 상관함수 NSSD를 도입한다.<sup>(10,11)</sup> 여기서,  $k=2,3,4,5$  이고  $\lambda$ 는 가중 비율을 조절하는 상수이다.

$$NSSD(d) = \sum_{(i,j) \in \Omega_1} \rho_{\sigma}(n(u,v)) + \lambda \sum_{(i,j) \in U\Omega_k} \rho_{\sigma}(n(u,v))$$

$$\hat{d}_p = \arg \min NSSD(d) \quad (5)$$

제안된 상관함수의 검증은 0~20의 변이범위 안

에서 급격한 변이를 갖는 케익 모양의 합성영상을 Fig. 6과 같이 생성하여 기준 변이와 추정된 변이와의 비교를 통해 수행한다. Fig. 7은 합성영상의 행 128의 불연속 근처(82 화소)에서만 변이를 추정한 그림인데, 식 (5)에 의한 정합가능점이 기존 영역기반정합에 비해 상대적으로 기준 변이를 제대로 추종하고 있으며 평활화가 다소 감소됨을 알 수 있다. 그러나 정합가능점은 깊이불연속에서 큰 오차가 존재함을 알 수 있다. 이것은 식 (5)에 의한 정합가능점 선정이 정합영역 안에서 상이한 변이가 존재하고 투영왜곡을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 동일한 변이를 갖는 정합영역을 고안하고 그것의 투영왜곡을 고려하는 스테레오 정합의 정식화를 시도하고자 한다.



(a) Weighting function (b) Influence function

Fig. 4 Shapes of robust estimator

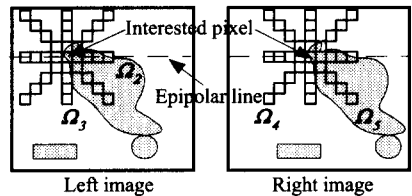


Fig. 5 Proposed line masks for depth discontinuities

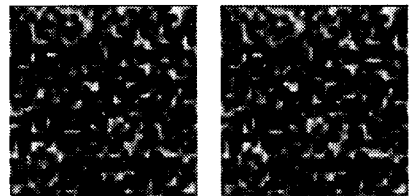


Fig. 6 Cake-shaped stereograms with discontinuities

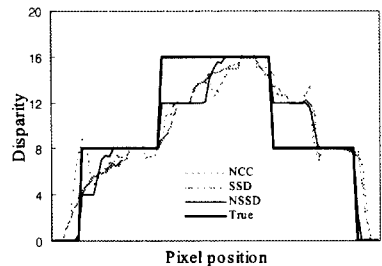


Fig. 7 Profiles of estimated disparities

3.2 3 차원 배열 생성 및 정수형 변이 추정  
 정합가능점의 3 차원 배열은 영상의 행과 열, 변이범위로 구성되는  $3dPMP[u][v][d]$ 으로 정의한다. 3 차원 배열은 식 (5)의 정합가능점에 대응되는 좌표  $(u, v, \hat{d}_p)$ 에 “1”을, 나머지는 “0”으로 할당함으로써 생성한다. Fig. 8 은 생성된 3 차원 배열을 나타내며 검정색으로 표현된 화소의 정합가능점은 최소 변이  $d_{min}$ 에 해당하는 화소임을 의미한다.

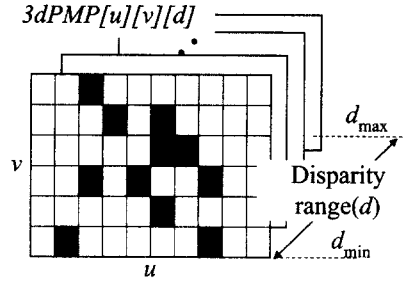


Fig. 8 Configuration of three-dimensional array

3 차원 형상이 스테레오 영상에 투영될 경우 관심 화소를 중심으로 동일한 변이가 존재할 가능성이 매우 크기 때문에, 이러한 3 차원 형상의 물리적인 의미를 고려하기 위해서는 각 변이에 대응되는 배열 평면에서 레이블링(labeling)<sup>(12)</sup>을 통해 각 화소에 대해 4 방향의 연결성(4-connectivity)을 조사함으로써 3 차원 배열을 갱신한다. 이때 관심 화소  $(u, v)$ 에서 연결된 정합가능점을 찾아 그 개수를 구할 수 있다. 갱신된 3 차원 배열 안의 관심 화소에서 정수형 변이 추정은 변이범위 안에서 각 변이에 따른 연결된 정합가능점의 개수가 최대가 되는 변이를 식 (6)을 이용하여 결정한다.

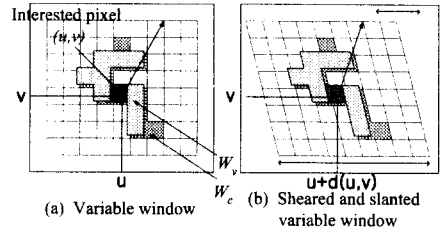


Fig. 9 Proposed matching area

$$\hat{d} = \arg \max_{d_{min} \leq d \leq d_{max}} \text{Number of connected pixels of } 3dPMP[u][v][d] \text{ at } (u, v) \quad (6)$$

3.3 가변 윈도우의 정의

가변 윈도우는 식 (6)에 의해 결정된 변이에 대응되는 3 차원 배열 평면 안에서 연결된 정합가능점 중에 대응점의 밝기값이 아닌 밝기의 변화가 일치하는 정합가능점 만을 선택하여 식 (7)과 같이  $W_v$ 로 정의한다.

야만 한다. 이 척도의 첫 번째 항은 대응점의 밝기구배 크기의 평균을 나타내고 두 번째 항은 대응점의 밝기구배 차이의 크기를 나타낸다. 식 (5)의 정합가능점 선정은 대응점의 밝기만을 고려하여 선정하였으나 제안된 가변 윈도우를 선정함에 있어 구배기반의 유사도의 적용은 대응점의 밝기 변화 또한 고려함으로써 정합에 사용되는 정합영역의 신뢰성을 증대 시키기 위함이다.

Fig. 9(a)는 관심 화소에서 추정된 정수형 변이에 대응되는 3 차원 배열 평면의 가변 윈도우를 보인 것인데, 이것은 정사각형이 아닌 임의의 형상이며 동일한 변이를 갖는다. 가변 윈도우의 크기는 연결된 정합가능점의 개수와 구배기반의 유사도에 의존함을 알 수 있다.

$$W_v = \{w | w \in W_c, S_G > 0\} \quad \text{at } (u, v)$$

where

$W_c$ : Set of connected pixels of  $3dPMP[u][v][\hat{d}]$

$$S_G(u, v) = \frac{|\nabla I_L(u, v)| + |\nabla I_R(u + \hat{d}, v)|}{2} - |\nabla I_L(u, v) - \nabla I_R(u + \hat{d}, v)| \quad (7)$$

$$\nabla I_L = \begin{bmatrix} \partial I_L / \partial u \\ \partial I_L / \partial v \end{bmatrix}, \nabla I_R = \begin{bmatrix} \partial I_R / \partial u \\ \partial I_R / \partial v \end{bmatrix}$$

3.4 투영왜곡을 고려한 서브픽셀 변이 추정

식 (1)에서는 임의의 3 차원 좌표에 있는 점이 정확하게 스테레오 영상의 정수형 좌표상에 투영된다는 가정을 포함하며 이때 정수형 변이는 식 (6)을 통해 추정하는데, 실제로는 임의의 점이 스테레오 영상에 투영될 경우 영상의 각 좌표상에서  $\pm 1/2$  화소의 모호성이 존재하게 된다.<sup>(13)</sup> 이 모호성은 스테레오 영상에서 서로 다른 관점에서 기인한 투영왜곡, 잡음에 의한 국외자 등을 포함하고 있다. 이들 문제로 인해 스테레오 정합을 수행할 경우 많은 어려움이 뒤따르게 된다.

여기서, 밝기변화에 대한 척도는 식 (7)과 같이 구배기반의 유사도(gradient-based similarity)  $S_G$ 이 대응되는 정합가능점의 유사도는 적어도 양수이어

본 논문에서는 고안된 가변 윈도우의 투영왜곡을 고려한 정식화를 시도하여 서브픽셀의 변이추정을 수행한다. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)와 같은 가변 윈

도우가 투영왜곡으로 인해 전단 변형되고 비스듬하게 기울어진 왜곡된 형태로 정합영역이 대응될 수 있음을 보인 것이다. 이 왜곡된 형상의 근사화는 변이의 미분으로부터 계산될 수 있으며 이때 고차항의 변형을 무시하면 관심 화소에서 가변 윈도우안의 대응점의 밝기관계는 식 (2)로부터 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_L(u, v) &\approx I_R(u + \hat{d} + d_0 + d_u u + d_v v, v) + n(u, v) \\ &\approx I_R(u + \hat{d}, v) + (d_0 + d_u u + d_v v) \frac{\partial I_R}{\partial u}(u + \hat{d}, v) \\ &\quad + n(u, v) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{where } d_u = \frac{\partial d(u, v)}{\partial u}, d_v = \frac{\partial d(u, v)}{\partial v}$$

서브픽셀 변이  $d_0$ 의 추정 은 가변 윈도우 안의 대응점에서 잡음의 제곱 합  $E$ 를 목적함수로 정의한 다음, 목적함수  $E$ 가 매개변수(서브픽셀 변이, 변이의 1차 미분)에 대해 최소가 되는 해를 Newton' Method<sup>(14)</sup>을 이용하여 결정한다. 이에 대한 정식화는 식 (9)와 같고 구현과정에서 매개변수의 초기값은 각각 0으로 할당하고 식 (6)에서 추정된 정수형 변이는 대응점의 밝기값과 미분값을 참조하기 위한 초기값으로 이용한다. 또한, 서브픽셀 변이를 구하는 과정에서 수렴하지 않는 화소에서는 이미 추정된 정수형 변이로 설정한다.

Find  $d_0$

minimize

$$E(u, v; d_0, d_u, d_v) = \sum_{(\alpha, \beta) \in \mathcal{W}} \rho_\sigma(n(u + \alpha, v + \beta)) \quad (9)$$

여기서, 가변 윈도우를 이용하여 스테레오 정합을 수행함으로써 기존 영역기반 정합의 기본적 가정을 충분히 만족시키고 식 (9)를 통한 정식화를 통해 투영왜곡을 고려함으로써 미지의 모호성이 규명되어 신뢰성 있는 서브픽셀의 변이가 추정될 수 있다. 제안된 방법은 깊이불연속과 연속적으로 완만한 영역이 존재하는 영역에서 동시에 상대적으로 많은 정합오차를 감소시킬 수 있고, 잡음으로 인해 밝기차가 큰 영역에서도 우수한 결과를 얻는다. 제안된 방법의 특성에 대한 검증은 다음 절의 실험을 통해 확인한다.

#### 4. 실험 및 고찰

제안한 방법의 효율성을 검증하기 위해 합성영상을 생성하고 실제영상을 취득하여 기존의 방식과 성능을 비교하였다. 정합가능점 선정에서는  $\Omega$ 를  $9 \times 9$ ,  $\Omega_1 \sim \Omega_3$ 를 25 화소의 영역 그리고 식 (5)의  $\sigma$ 를 3,  $\lambda$ 를 1로 설정하였다.

Fig. 10은 기존 방식과 제안된 방법에 의해 추정된 변이를 3차원적으로 나타낸 것이다. 변이가 클수록 밝게 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 깊이불연속 영역에서 제안된 방법이 상대적으로 평활화가 없으며 경계선의 윤곽이 뚜렷하게 묘사되고 있다. 오정합(false matching) 또한 감소됨을 알 수 있다. 이것은 깊이불연속을 고려한 직선 마스크와 강건추정자 기반으로 정합가능점을 선정하여 정합오차를 줄일 수 있음을 보여준다.

Fig. 11은 변이 범위가 0~25로 생성되고, 정합영역 안의 변이가 각각 다르고 완만한 형상을 가진 실린더와 반구 형태의 변이 구조를 보인 것이다. Fig. 12와 Fig. 13를 보면, 제안된 방법이 정합영역 안에서 동일한 변이를 갖는 가변 윈도우의 투영왜곡을 고려함으로써 깊이불연속영역 뿐만 아니라 실린더와 반구 형상에서도 기존 방법에 비해 실제 변이를 자세히 추종하는 것을 알 수 있다.

Fig. 14~16은 추정된 변이와 실제 변이의 절대오차를 그림으로 표현한 것인데, 오차가 클수록 밝게 나타내었다. 경계선과 같은 불연속영역에서 오차가 크게 발생하고 있으며 제안된 방법이 오차가 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 15와 같이 거의 선형적으로 변이가 증가하는 실린더 형상에서는 동일한 변이인 가변 윈도우의 투영왜곡을 고려함으로써 정합오차가 확연하게 감소함을 알 수 있다.

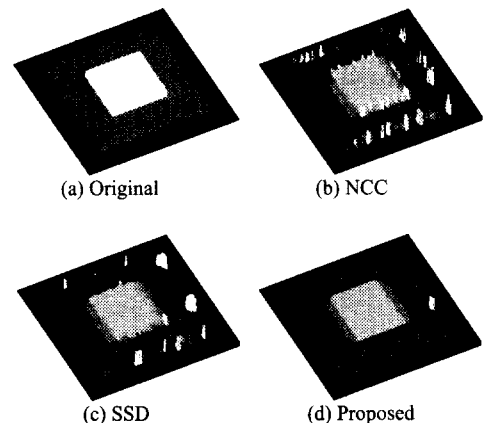
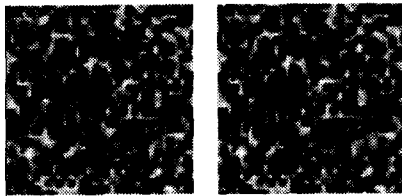
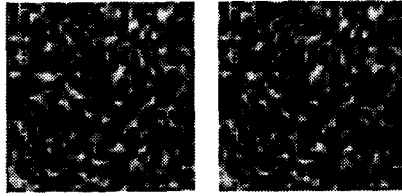


Fig. 10 Comparisons of computed disparity

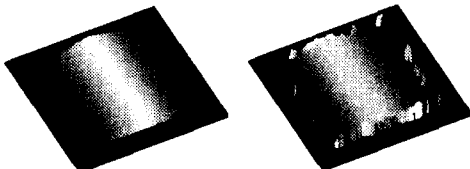


(a) Cylinder-shaped



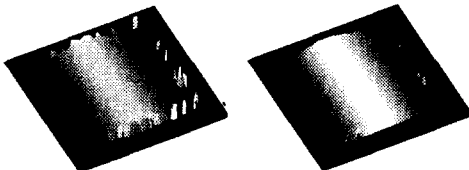
(b) Hemisphere-shaped

**Fig. 11** Stereograms with piecewise continuous area



(a) Original

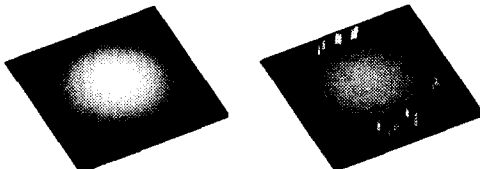
(b) NCC



(c) SSD

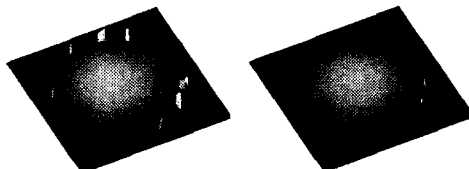
(d) Proposed

**Fig. 12** Comparisons of computed disparity for Fig. 11(a)



(a) Original

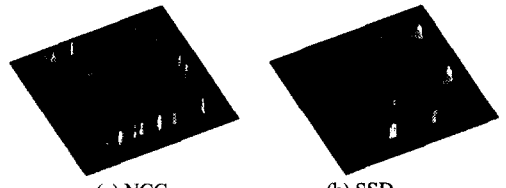
(b) NCC



(c) SSD

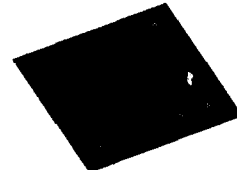
(d) Proposed

**Fig. 13** Comparisons of computed disparity for Fig. 11(b)



(a) NCC

(b) SSD



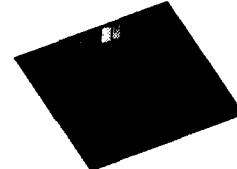
(c) Proposed

**Fig. 14** Absolute matching errors for Fig. 10



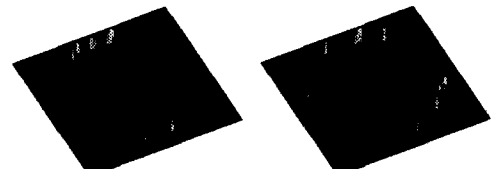
(a) NCC

(b) SSD



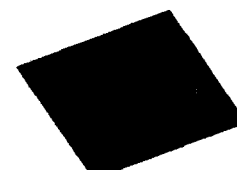
(c) Proposed

**Fig. 15** Absolute matching errors for Fig. 12



(a) NCC

(b) SSD



(c) Proposed

**Fig. 16** Absolute matching errors for Fig. 13

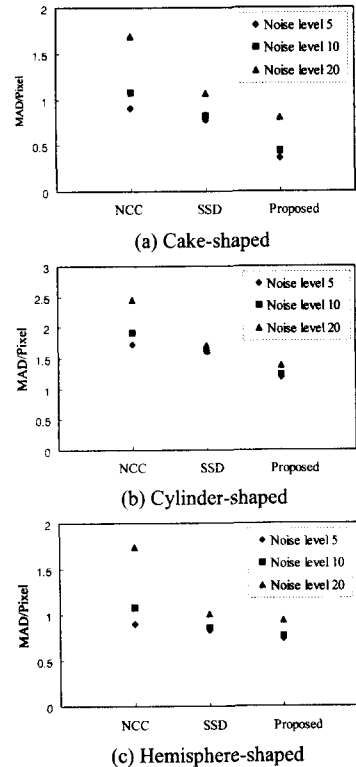
**Table 1** Means of absolute matching error per a pixel

	Cake	Cylinder	Hemi- sphere
NCC(9×9)	0.85	1.72	0.85
SSD(9×9)	0.76	1.61	0.82
SSD(11×11)	0.83	1.67	0.86
SSD With $\Omega_1 \sim \Omega_3$	0.84	1.65	0.85
Proposed	0.29	1.11	0.68

Table 1 은 이상의 결과를 정량적으로 분석하기 위해서 추정된 변이와 실제 변이를 비교하여 화소당 평균절대오차(MAD; Mean of Absolute Difference)를 보인 것이다. SSD는 NCC에 비해 정확한 정합 결과를 주었으며, 제안된 방법의 정합오차는 SSD에 비해 케익, 실린더 그리고 반구 영상에서 각각 61%, 31%, 17% 감소됨을 알 수 있다. 제안된 방법이 정합가능점 선정에 사용되는 정합영역이 단지 많기 때문에 정합오차를 감소시킨다는 것이 아니라는 점을 보이기 위해, 정합영역  $\Omega_1 \sim \Omega_3$ 를 이용하여 SSD에 의한 정합을 수행하였으나 오히려 정합오차는 증가하였다. 결국, 정합영역이 커지면 변이가 상수인 가정을 만족시키지 못해 투영왜곡이 더 심해지고 잡음 등으로 인한 국외자의 영향이 크게 나타난다. 따라서 SSD에 의한 정합오차는 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 17은 각 정합 알고리즘에 대해서 잡음에 대한 강건성을 조사하기 위하여 평균절대오차를 비교한 그림이다. 이때, 잡음은 최대 밝기(255)의 5%, 10%, 20%에 해당되는 최대의 범위로 생성된 균일 분포(uniform distribution)를 이용한다. 그림에서 알 수 있듯이, 제안된 방법에 의해 발생한 정합오차는 기존 방식보다 각 잡음의 수준에 따라 작게 발생되고 있음을 알 수 있다. Fig. 17(b)의 실린더 영상의 정합 오차는 다른 영상보다 약 1/2 감소 만큼 큰 것을 볼 수 있는데, 이것은 정합영역 안에서 변이가 상대적으로 많이 변하고 투영왜곡 등으로 인한 모호성의 영향이 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

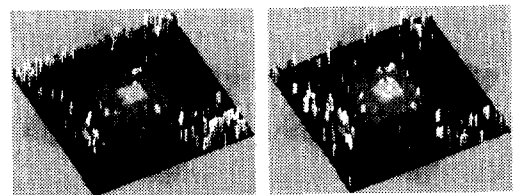
Fig. 18은 계단 형태의 블록(254×200×t40mm)을 공작기계상에서 가공한 다음, 81mm의 카메라 간격으로 취득한 스테레오 영상이다. Fig. 19는 Fig. 18의 스테레오 영상을 각 스테레오 알고리즘에 의해 추정된 변이를 삼차원적으로 나타낸 것이다. 제안된 방법은 물체의 배경 부분에서 오정합이 다소 감소되었고 10mm의 깊이차를 갖는 깊이



**Fig. 17** Comparisons of robustness to noise

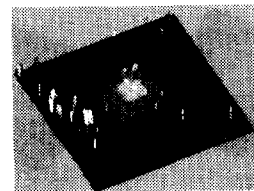


**Fig. 18** stereo images of a machined block(Step-shaped)



(a) NCC

(b) SSD



(c) Proposed

**Fig. 19** Comparisons of computed disparity for Fig. 5.18



불연속 영역을 세밀하게 표현하였다. 반면, 기존 영역기반 정합은 물체의 경계부분에서 정합 오차가 상당히 많이 발생함을 확인하게 알 수 있다. 이것은 차폐와 그림자 등으로 인한 투영왜곡으로 인해 대응점의 밝기차가 커지기 때문으로 판단된다.

게다가, Fig. 18의 스테레오 영상의 행 230에서 스테레오 알고리즘에 의해 추정된 변이를 이용하여 계산된 깊이값을 비교함으로써, 제안된 방법의 검증을 정량적으로 수행하였다. 물체의 기준 깊이는 프로브를 이용하여 측정하였고 추정 깊이는 스테레오 정합 후 카메라 보정 결과를 토대로 계산하였다. 여기서, 420 점에 대한 절대깊이오차의 평균은 각각 2.39, 4.20, 1.89mm로 제안된 방법은 기존 방법보다 21%가 감소하였다. 결국, 제안한 스테레오 알고리즘은 깊이불연속에서 가변윈도우의 투영왜곡을 고려함으로써 기존 정합 방식보다 정확하고 강건한 정합을 수행하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

스테레오 영상에서 깊이불연속과 연속적으로 완만한 영역이 존재하는 경우 가변 윈도우의 투영왜곡을 고려하여 정합오차를 개선하기 위한 새로운 스테레오 정합 알고리즘을 제안하였다.

강건추정자와 직선마스크를 이용한 상관함수를 적용하여 깊이불연속영역에서 국외자와 잡음의 영향이 감소되는 정합가능점을 선정하고, 이 정합가능점을 이용하여 3차원 배열을 생성하였다. 정수형 변이 추정을 위해 3차원 배열의 변이 평면 안에서 각 화소의 4방향 연결성을 조사하여 연결된 정합가능점의 개수가 최대가 되는 비용함수를 제안하였다. 또한, 구배기반의 유사도를 만족하는 가변 윈도우를 창안함으로써 영역기반 정합의 기본가정을 충분히 만족시켰으며, 투영왜곡으로 인해 변형된 정합영역을 고려하기 위한 가변 윈도우 기반의 차동정합 정식화를 통해 서브픽셀 변이를 추정함으로써 투영왜곡 등의 영향을 최대한 감소시켰다. 서브픽셀 변이를 추정된 결과, 제안된 방식은 SSD에 비해 케익, 실린더, 반구 영상에서 각각 61%, 31%, 17%의 정합오차가 감소하였으며 전체 합성영상에 대한 잡음에도 평균 24%의 강건성이 존재함을 알 수 있었다. 또한 실제영상을 이용한 실험에서는 절대깊이오차의 평균이 기존 방법보다 21%가 감소하였다.

이상의 실험을 통해 제안된 알고리즘의 우수성과 효율성을 확인하였다. 또한, 제안된 알고리즘은

구현이 용이하고 기존 영역기반 정합에 비해 정확도와 잡음에 대한 강건성이 개선되어 3차원 측정 분야에 널리 적용될 수 있다.

## 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) Dhond, U. R. and Aggarwal, J. K., 1989, "Structure from Stereo: A Review," *IEEE Trans. Syst. Man Cybernetics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1489~1510.
- (3) Wei, G. Q., Brauer, 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) Kanade, T., Yoshida, A., Oda, K., Kano, H. and Tanaka, M., 1996, "A Stereo Machine for Vidio-rate Dense Depth Mapping and Its New Applications," *In Proc. of Computer Vision and Pattern Recog.*, pp. 196~202.
- (5) Faugeras, O., Hotz, B. and Mathieu, H. et al, 1993, "Real Time Correlation-based Stereo: Algorithm, Implementations and Applications," *INRIA Tech. Rep. 2013*.
- (6) 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.
- (7) Dervermay, F. and Faugeras, O., 1994, "Computing Differential Properties of 3D Shapes from Stereoscopic Images without 3D Models," *In Proc. of Computer Vision and Pattern Recog.*, pp. 208~213.
- (8) Faugeras, O., 1993, *Three-Dimensional Computer Vision*, MIT. Press.
- (9) Meer, P., Hintz, D., Rosenfeld, A. and Kim, D. Y., 1991, "Robust Regression Methods for Computer Vision: A Review," *Int. J. Computer Vision*, Vol. 6, No. 1, pp.59~70.
- (10) 김경범, 김낙현, 정성종, 2000, "강건추정자와 직선마스크를 이용한 스테레오 정합," *대한기계학회논문집(A)*, 제 24 권, 제 4 호, pp. 991~1000.
- (11) Kim, G. B. and Chung, S. C., 2000, "A New Area-Based Stereo Algorithm for Measurement of 3D Shapes," *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 28, pp. 383~388.
- (12) Gonzalez, R. C., 1993, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley.
- (13) Rodrigue, J. J. and Aggarwal, J. K., 1990, "Stochastic Analysis of Stereo Quantization Error," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 12, No. 5 pp. 467~470.
- (14) Arora, J. S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill.