

# 피라미드 구조를 이용한 계층적 Hausdorff distance 정합

## (Hierarchical Hausdorff Distance Matching Using Pyramid Structures)

權五奎\*, 沈東圭\*, 朴來弘\*

(Oh-Kyu Kwon, Dong-Gyu Sim, and Rae-Hong Park)

### 요 약

본 논문에서는 coarse-to-fine 정합 방법에 기반을 둔 계층적 HD 정합 방법을 제안하였다. 이 방법은 distance transform (DT) map 피라미드와 에지 피라미드를 사용하여 정확한 정합 위치를 찾기 위한 계산량을 크게 감축시킨다. 또한 제안한 계층적 HD 정합 방법에서는 정합 오차를 줄이기 위해 thresholding 방법을 사용하는데, 각 레벨에서의 문턱값은 이웃하는 DT map 피라미드의 두 레벨 사이의 성질을 이용하여 결정된다. 컴퓨터 모의 실험에 의해 잡음이 포함된 이진 영상에 대하여 정합 위치 오차를 평가 기준으로 하여 기존의 방법과 피라미드 구조에 의한 정합 방법의 성능을 비교하였다.

### Abstract

This paper proposes a hierarchical Hausdorff distance (HD) matching algorithm based on coarse-to-fine approach. It reduces the computational complexity greatly by using the pyramidal structures consisting of distance transform (DT) and edge pyramids. Also, in the proposed hierarchical HD matching, a thresholding method is presented to find an optimal matching position with small error, in which the threshold values are determined by using the property between adjacent levels of a DT map pyramid. By computer simulation, the performance of the conventional and proposed hierarchical HD matching algorithms is compared in terms of the matching position for binary images containing uniform noise.

### I. 서 론

물체 정합은 컴퓨터 비전, 영상 해석, 패턴 인식에 있어서 중요한 문제중의 하나로 여러 가지 방법을 이용한 물체 정합 방법이 제안되어 왔다.<sup>[1-3]</sup> 물체 정합 방법중 비교적 간단하면서도 좋은 성능을 나타내는 영상의 에지와 같은 저수준의 특징을 이용하는 많은 방법들이 제안되었는데, hierarchical chamfer matching algorithm (HCMA),<sup>[4]</sup> Hausdorff distance (HD)를 이용한 정합 방법<sup>[5-9]</sup> 등이 그 대

표적인 예라고 할 수 있다.

HCMA는 물체의 에지로부터 특징점을 얻은 후 특징점 사이의 유사도에 의해 물체 정합을 수행하는 방법이다. 이에 비하여 HD 정합 방법은 에지로부터 특징점을 구하지 않고 전체 에지점 집합들 사이의 HD에 의해 물체의 유사도를 판단하는 방법이다. HD는 물체들의 특징 대상의 대응없이 물체 정합을 할 수 있다는 장점이 있지만, 이진 영상 내의 모든 점에 대한 거리 계산 과정을 수행해야 하므로 많은 계산량을 필요로 한다. 이를 위하여 기존의 HD 정합 방법은 에지점 집합들 사이의 거리 계산을 효과적으로 할 수 있는 distance transform (DT)을 사용하였다.<sup>[10]</sup> 또한 물체 모델과 비교 영상의 정확한 정합 위치를 찾는 데에도 많은 계산량이 필요하다. 이 문제의 해결을 위해

\* 正會員, 西江大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Sogang Univ.)

接受日字: 1996年12月4日, 수정완료일: 1997年11月18日

인간의 시각적 특성에 기초한 다해상도 방법이 사용되는데, 이러한 방법의 연구 방향은 크게 2가지 형태로 분류할 수 있다. 하나는 스케일을 변화시키는 다해상도 방법이고,<sup>[5] [8]</sup> 다른 하나는 영상의 피라미드 구조를 이용하는 피라미드 구조를 이용한 방법이다.

본 논문에서는 고정 영상의 크기 대신에 영상의 크기를 줄여서 여러 해상도의 피라미드 영상을 이용한 계층적 HD (hierarchical Hausdorff distance: HHD) 정합 방법을 제안하였다.<sup>[11]</sup> 제안한 계층적 HD 방법은 해상도가 낮은 피라미드 단계에서는 대략적인 후보 정합 위치를 찾고 해상도가 높은 피라미드 단계에서 정확한 위치를 찾는 coarse-to-fine 방법에 기초한다. 제안한 방법은 여러 해상도의 피라미드를 만드는 과정이 추가되지만, 이 과정에 의해 계산량이 크게 증가하지 않고, 알고리즘의 적용이 간단하며 잡음에 대해서도 좋은 성능을 나타낸다. 제안한 계층적 HD 정합 방법은 이진 영상의 특성 평면인 DT map 피라미드와 에지 피라미드를 사용한다. DT map 피라미드는 거리값을 포함하는 DT map을 평균 피라미드 방법에 의해 줄여 나가기 때문에 이진 영상을 피라미드 구조로 만드는 방법에 비하여 낮은 해상도에서도 정확한 물체 정보를 포함하고 있다. 에지 피라미드는 half 피라미드 방법에 의해 이진 영상의 크기를 줄여 나가는데 이진 영상의 잡음 화소를 제거하는 장점을 가진다. 또한 이웃하는 DT map 피라미드의 두 레벨 사이의 성질을 이용한 thresholding 방법을 사용하여 정합 성능을 개선하였다.

본 논문은 II장에서는 기존의 HD 정합 방법에 대해 언급하고, III장에서는 제안한 계층적인 HD 정합 방법을 설명하고, IV장에서 컴퓨터 모의 실험에 의해 기존의 방법과 제안된 방법의 성능을 비교하였고, 마지막 V장에서 결론을 맺었다.

## II. 기존의 HD 정합 방법

HD는 물체 모델과 비교 영상의 에지점 집합들 사이의 거리값을 계산하는 척도이다. 에지점의 개수가 각각  $N_A$ 와  $N_B$ 인 점집합  $A = \{a_1, \dots, a_{N_A}\}$ 와  $B = \{b_1, \dots, b_{N_B}\}$ 사이의 거리값을 계산하는 기존의 HD 척도는

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (1)$$

로 정의되고, 여기서  $h(A, B)$ 와  $h(B, A)$ 는 점집합  $A$ 와  $B$  사이의 directed HD를 나타낸다.<sup>[5]</sup> 한 점  $a$ 로부터 점집합  $B$ 의 점들에 대한 거리를  $d_B(a) = \min_{b \in B} \|a - b\|$ 로, 한 점  $b$ 로부터 집합  $A$ 의 점들에 대한 거리를  $d_A(b) = \min_{a \in A} \|b - a\|$ 로, 정의하면, directed HD,  $h(A, B)$ 와  $h(B, A)$ 는

$$\begin{aligned} h(A, B) &= \max_{a \in A} d_B(a), \\ h(B, A) &= \max_{b \in B} d_A(b) \end{aligned} \quad (2)$$

로 정의된다. 그러나 이 기존의 HD 척도는 잡음이나 점침 등의 영상 훼손에 민감하다. 따라서 물체 정합을 위한 개선된 HD 척도들이 제안되었다.

Huttenlocher 등은 잡음에 의해 손상되었거나 겹쳐 있는 물체의 정합을 위하여 유사도 측정을 위해 partial HD 척도를 제안하였다.<sup>[5]</sup> 이 척도는 손상된 물체의 나머지 부분의 유사도를 판단한다. Partial HD의 directed HD  $h_K(A, B)$ 는

$$h_K(A, B) = K^{th}_{a \in A} d_B(a) \quad (3)$$

와 같이 정의되고,  $K^{th}_{a \in A}$ 는 순차적으로 정렬된  $d_B(a)$  값의 집합들중에  $K$ 번째에 해당하는 순서의 값을 나타낸다. 이 척도에서 물체의 훼손된 정도에 따른 물체의 유사도 판단을 위하여 partial fraction  $f$ 를 정의했는데,  $f$ 는 0부터 1사이의 값을 갖고,  $K = fN_A$ 로 주어진다. 또한 partial HD의 변형된 형태로 Azencott 등은 잡음으로 인한 영상의 훼손 문제를 해결하기 위하여 censored hausdorff distance (CHD)를 제안하였다.<sup>[6]</sup> CHD의 directed HD  $h_{CHD}(A, B)$ 는

$$h_{CHD}(A, B) = K^{th}_{a \in A} L^{th}_{b \in B} \|a - b\| \quad (4)$$

가 되고  $K^{th}_{a \in A}$ 는 순차적으로 나열된  $L^{th}_{b \in B} \|a - b\|$  값들 중에서  $K$ 번째에 해당하는 순서의 값을 나타내고  $L^{th}_{b \in B}$ 는 순차적으로 나열된 유클리안 거리값  $\|a - b\|$ 의  $L$ 번째의 값을 나타낸다. 여기서는 영상의 훼손 정도에 따른 유사도 판단을 위해 파라미터  $\beta$ ,  $\gamma$ 를 정의했는데,  $\beta$ 는 0부터 1사이의 값을 갖고,  $K = \beta N_A$ 로 주어지고,  $\gamma$ 는 0부터 1사이의 값을 갖고,  $L = \gamma N_B$ 로 주어진다.

Dubuisson과 Jain은  $d_B(A, B)$ 의 거리값들을 평균

낸 형태의 modified hausdorff distance (MHD)를 제안하여 4가지 형태의 잡음에 의해 손상된 합성 영상들에 대해 실험했다.<sup>[7]</sup> MHD의 directed HD  $h_{MHD}(A,B)$ 는

$$h_{MHD}(A,B) = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} d_B(a) \quad (5)$$

가 된다. Partial HD가 1개의 파라미터를, CHD가 2개의 파라미터를 가지는 것에 비해, MHD는 파라미터가 없는 것이 장점이다.

CHD를 제외한 partial HD나 MHD는 HD값을 구하기 위해서는 에지 연산자에 의해 얻어진 모델 영상과 비교 영상의 한 점으로부터 점집합에 대한 최소 거리

$$d_B(a) = \min_{b \in B} \|a - b\|, \quad d_A(b) = \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (6)$$

를 계산하는 과정이 필요하다. 이 과정은 매우 간단한 연산에 의해 가능하지만 많은 계산량을 필요로 한다. 따라서 기존의 HD 정합 방법에서는 DT map을 이용하여 집합 A의 한 점 a로부터 집합 B의 최소 거리를 효과적으로 구하는 방법이 사용되었다.<sup>[10]</sup> 기존의 HD 정합 방법중에서 CHD는 유클리안 거리의 rank 값을 구하는 형태이므로 DT를 사용할 수 없고, 따라서 계산 시간에 있어서 partial HD나 MHD에 비해 좋지 못하다.

### III. 제안한 계층적 HD 정합 기법

본 장에서는 물체 모델과 비교 영상의 정합 위치를 효과적으로 찾기 위한 계층적인 HD 정합 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 DT map 피라미드와 에지 피라미드를 사용하여, 전체적으로 정합 위치를 찾는 방법에 비해 성능면에서 거의 차이가 없으면서도 적은 계산량을 가진다.

#### 1. 제안한 계층적 HD 정합 방법

HD 정합 방법은 정합 위치를 찾기 위해 비교 영상에 물체 모델을 겹치는데 실험에서는 평행 이동만을 고려하여 HD 정합을 수행하였다. 겹쳐진 한 위치에서 directed HD는 비교 영상의 이진 영상과 물체 모델의 DT map과, 비교 영상의 DT map과 물체 모델의 이진 영상 사이에서 구해지고, 구해진 directed HD로부터 최종적인 HD 값이 결정된다. 각각의 위치마다 구해진 HD값들중 최소가 되는 위치를 최적의 정합

위치로 선택하게 된다.

HD 정합 방법은 물체 모델과 비교 영상의 정확한 정합 위치를 찾기 위한 효과적인 방법이지만 계산량이 많은 단점이 있다. 계산량을 줄이기 위해 2가지 관점에서의 접근 방법이 있는데, 모델 영상과 비교 영상의 에지 집합 사이의 최소 거리를 효과적인 계산량으로 구하는 것과 전체 비교 영상에서의 정합되는 위치를 빠르게 찾는 것이다. 기존의 HD 정합 방법에서는 첫 번째의 문제를 해결하기 위해 DT에 최소거리를 구하는 방법을 사용하였다. 두 번째 문제의 해결을 위한 방법으로는 영상의 크기는 그대로 둔 채, 탐색 영역의 스케일을 변화시키는 다해상도 방법에 근거한 방법을 사용하였다.

제안한 계층적 HD 정합 방법은 영상을 피라미드 구조로 만들어 정합시키는 방법이다. 즉 탐색 영역은 그대로 둔 채 영상의 크기를 줄여 계산 시간을 단축하는 방법이다. 따라서 제안한 방법에서는 낮은 해상도에서도 좋은 정합 성능을 나타내는 피라미드를 구성하는 것이 중요한 문제가 된다. Borgefors에 의해 제안한 HCMA에서는 이진 영상의 피라미드 구성을 위하여 OR 피라미드를 사용하였다.<sup>[4]</sup> OR 피라미드는 높은 해상도의 4개의 화소중 하나라도 에지가 되면 낮은 해상도의 한 점이 에지가 되는 피라미드 구조이다. 이 구조에서 영상은 해상도가 낮아져도 에지점의 정보를 잃어버리지 않는 장점이 있다. 하지만, 낮은 해상도에서 에지 정보들이 두꺼워지는 효과를 나타내어 낮은 해상도의 HD 정합성능에 좋은 못한 영향을 주게 된다. 제안한 계층적 HD에서는 이런 단점을 보완할 수 있는 피라미드의 구조인 DT map 피라미드와 에지 피라미드의 구조를 제안하였다.<sup>[11]</sup>

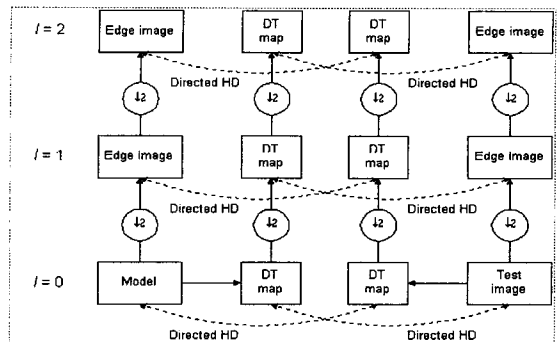


그림 1. 제안한 계층적 HD 정합 방법의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of the proposed HHD matching algorithm.

그림 1은 계층적 HD 정합을 위한 3 레벨의 DT map 피라미드와 에지 피라미드의 구조를 보인다. 여기서 ↓2는 수평, 수직 방향의 2:1 줄임을 나타낸다. 계층적 HD 정합 방법에 구현하기 위한 DT map 피라미드는 4개의 화소값의 평균값을 취하는

$$D(i, j) = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^1 \sum_{v=0}^1 D_{l-1}(2i+u, 2j+v) \quad (7)$$

와 같은 형태가 된다. 여기서  $D_l$ 은  $(i, j)$ 에서의 거리 값을 나타내고  $l$ 은 레벨의 index를 나타낸다.  $l$ 은 0에서  $L-1$ 까지의 범위를 갖고  $L$ 은 피라미드의 전체 레벨수를 표시한다. 레벨  $(l-1)$ 의 4개 화소의 평균값은 레벨  $l$ 에서의 1개의 화소값으로 결정되고 이 과정은 피라미드에서 반복된다. 제안한 DT map 피라미드 구조는 DT map의 화소값이 실수값을 가지기 때문에 해상도가 낮아져도 정확한 정보를 가지게 되어 좋은 정합 성능을 나타내게 된다. 또한, 이진 영상의 피라미드의 구성을 위하여 계층적 HD 방법에서는 half 피라미드 방법을 제안하여 사용하였다. 이 방법은 레벨  $(l-1)$ 의 4개의 화소중 반 이상이 에지일 경우, 즉 2개 이상의 화소가 에지일 경우에 레벨  $l$ 에서의 화소값이 에지로 결정된다. 이 피라미드 구조는 영상에서 낮은 해상도로 갈수록 약간의 에지 정보들을 잃어버리는 단점이 있지만, 낮은 해상도에서 에지점들이 뭉쳐지는 효과가 나타나지 않고 독립된 에지들을 제거하는 효과가 있어 잡음이 첨가된 영상에서의 계층적 HD 정합의 성능을 향상시킨다. 이것을 순차적 알고리즘 형태로 표현하면 다음과 같다.

1. 피라미드 구성
2.  $l = L-1$
3. 레벨  $l$ 에서  $H_l^{\min}$ 을 계산
4. 레벨  $l$ 에서 문턱값에 따라 후보위치를 결정
5.  $l$ 이 0이 아니면  $l = l-1$ , goto 3

그림 2는 제안한 계층적 HD 정합 방법의 흐름도를 보인다. 우선 DT map 피라미드와 에지 피라미드가 구축되고, 낮은 해상도에서 잘못된 정합의 결과를 피하기 위하여 thresholding 방법을 적용하였다. 레벨  $l$ 에서 최소의 HD값이 계산되면, 최소 HD값과의 차이가 레벨  $l$ 에서의 문턱값  $\tau_l$ 보다 작은 HD 값을 갖는 위치는 후보 위치로 선택된다. 즉

$$0 \leq H(A_l, B_l \oplus t) - H_l^{\min}(A_l, B_l \oplus t) \leq \tau_l \quad (8)$$

을 만족하는 HD 값을 갖는 위치는 후보 위치로 선택된다. 여기서  $\oplus$ 는 standard Minkowski sum, 즉  $B \oplus t = \{B+t | b \in B\}$ 를 나타내고,<sup>[5]</sup>  $A_l, B_l$ 은 레벨  $l$ 에서의 에지점 집합의 원소의 개수를 나타낸다. 또한  $H_l^{\min}$ 에서  $H_l$ 은 레벨  $l$ 에서 HD값을 나타내고 윗첨자  $\min_l$ 은 레벨  $l$ 에서의 최소값을 나타낸다. 이 과정은 레벨  $l=L-1$ 에서 시작하여  $l=1$ 일 때까지 반복된다. 최종  $l=0$ 일 때는  $l=1$ 에서 구해진 후보 위치중 가장 작은 HD값을 갖는 위치가 최적의 위치로 결정된다.

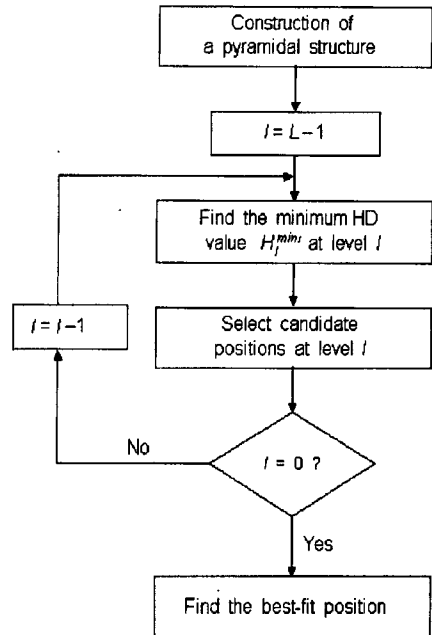


그림 2. 제안한 계층적 HD 정합 방법의 흐름도  
Fig. 2. Flowchart of the proposed HHD matching algorithm.

제안한 계층적 HD의 계산량은 레벨  $l$ 에서의 문턱값  $\tau_l$ 과 관계가 있다. 만약  $\tau_l$ 이 크게 결정되면 후보점의 개수가 많아지고, 따라서 계산량이 많아지게 된다. 반대로  $\tau_l$ 이 작게 결정되면 후보점의 개수가 적어지고 계산량이 적어지지만 HD 정합의 성능이 좋지 못하게 된다. 따라서 적절한 문턱값을 결정하는 것이 중요한 문제가 된다.

### 2. 문턱값 $\tau_l$ 의 자동 결정

본 논문에서는 DT map 피라미드의 이웃하는 레벨 간의 성질을 근거로 하여, 실험에 의한 몇가지의 가정

과 분석적 방법으로 자동적인 문턱값을 유도하였다.

우선 레벨  $l-1$ 에서 4개의 HD값이 레벨  $l$ 에서 한 HD값으로 표현된다고 할 때, 레벨  $l-1$ 에서 4개의 HD값을 son HD 값으로, 레벨  $l$ 에서 한 HD 값을 father HD로 정의한다. 또한  $H_l^{\min_0}$ 을 레벨 0일 때의 계산된 최소 HD 값의  $l^{\text{th}}$  father라고 정의하고,  $H_l^{\min_0}$ 에서  $H_l$ 은 레벨  $l$ 에서 HD 값을 나타내고 윗첨차  $\min_0$ 은 레벨 0에서의 최소값을 나타낸다. 마찬가지로  $H_l^{\min_l}$ 은  $H_l$ 은 레벨  $l$ 에서 HD 값을 나타내고 윗첨차  $\min_l$ 은 레벨  $l$ 에서의 최소값을 나타낸다. 문턱값  $\tau_l$ 은 레벨  $l$ 에서 최소 HD값  $H_l^{\min_l}$ 과 레벨 0일 때 계산된 최소 HD 값의  $l^{\text{th}}$  father  $H_l^{\min_0}$ 의 차이로 결정되고

$$0 \leq H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l} \leq \tau_l \quad (9)$$

가 된다. HD의 계산은 비선형적이므로, 정확하게  $\tau_l$ 을 구하기는 어렵다. HD값은 에지 영상의 화소가 에지일 때 DT map의 값에 의해 결정되므로 제안한 방법에서 HD값은 DT map의 값에 의해서만 결정된다고 가정하면 레벨  $l$ 일 때  $H'_l$ 과 레벨  $l-1$ 일 때  $H'_{l-1}$ 과의 차이의 절대값은

$$|H'_l - H'_{l-1}| \leq \max(|D_l - D_{l-1}|) \quad (10)$$

로 주어지고  $D_l$ 과  $D_{l-1}$ 은 각각 레벨  $l$ 에서 DT값과 레벨  $l-1$ 에서의 son DT 값이 된다. 레벨이 증가함에 따라,  $\max(|D_l - D_{l-1}|)$ 을 분석적 방법으로 쉽게 구할 수 없다. 따라서 제안한 방법에서는 실험에 의해 몇가지의 가정과 분석적 방법을 병행하여 사용하였다. 우선 실험적으로

$$\max(|D_l - D_{l-1}|) \approx 2^{l-1} \zeta \quad (11)$$

이 가정되고 여기서  $\zeta$ 는  $\max(|D_1 - D_0|)$ 가 되고, 분석적 방법에 0.853553이 된다 (부록 A 참조). 실제 실험에서 식 (10)에서  $|H'_l - H'_{l-1}|$ 의 75%가  $\max(|D_l - D_{l-1}|)$ 보다 작게 된다. 따라서 식 (10)과 식 (11)에 의해

$$|H'_l - H'_{l-1}| \leq 2^{l-1} \zeta \quad (12)$$

이 주어지고 결론적으로

$$0 \leq H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l} \leq 2(2^l - 1) \zeta \quad (13)$$

이 된다 (부록 B 참조).

#### IV. 실험결과 및 토의

본 장에서는 평행 이동만을 고려하여 uniform 잡음이 첨가된 이진 영상<sup>[7]</sup>에서 정합되는 위치 오차 관점에서 제안한 계층적 HD 방법과 기존의 방법을 비교하였다. 실험에서 이진 영상 잡음에 uniform 잡음을 만들기 위한 방법은 이진 영상의 각 화소값을 랜덤하게 변화시킨다. 본 논문은 Hausdorff 정합에 대한 연구로 이것의 입력은 이진영상임으로 여기에 오차를 섞는 방법을 채택하였다. 오차를 원영상에 섞을 경우 이진화 방법에 따라 다른 결과를 낼 수 있기 때문이다. 즉, 화소값이 1이면 0으로 0이면 1로 변화시킨다. 첨가된 잡음의 양을  $U$ 로 표현하면  $U=100R/(P \times Q)$ 로 주어지고 여기서  $R$ 은  $P \times Q$  크기의 이진 영상에 첨가되는 uniform 잡음의 양을 나타낸다.

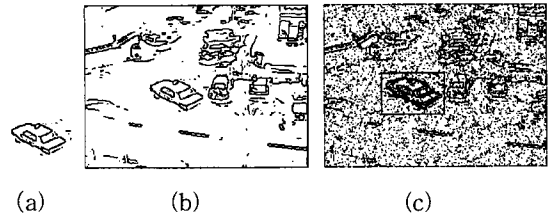


그림 3. 제안한 계층적 HD 정합 방법에 의한 Taxi 영상 정합 결과 (L=3)

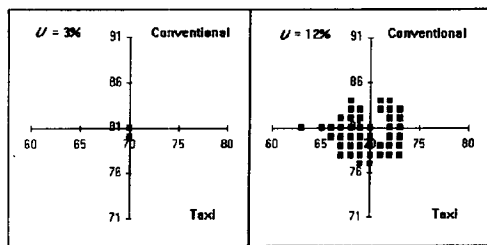
(a) 물체 모델 (b) 비교 영상 (c) 정합 결과

Fig. 3. Matching result of the Taxi image by the proposed HHD matching algorithm (L=3). (a) Object model, (b) Test image, (c) Matching result.

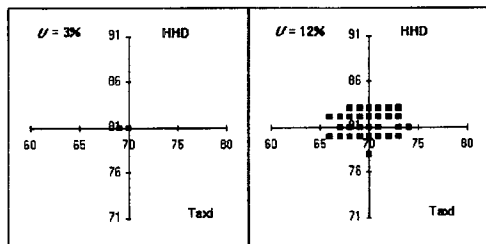
그림 3(a), (b)는 Canny 에지 연산자<sup>[12]</sup>에 의해 얻어진 각각 Taxi 영상의  $72 \times 48$  물체 모델과  $256 \times 190$  비교 영상이다. 그림 3(a)는 (b)의 비교 영상에서 얻어진 것으로 그림 3(a)의 (0, 0)은 (b)의 (70, 81)에 해당한다. 그림 3(c)는  $U = 12\%$ 일 때, 제안한 계층적 HD 방법에 의한 Taxi 영상에 대한 정합 결과이다. 여기서 HD 척도로는 partial HD를 사용하였는데 HD 정합 척도로 CHD를 사용할 경우 계산량과 파라미터를 결정하는 것이 큰 문제가 되고 MHD를 사용

할 경우 좋지 못한 정합 결과를 나타내었다. 사용된 partial HD의 파라미터  $f$ 는 정합 결과가 좋게 나오는 0.7에서 0.8정도의 값을 사용하였고 파라미터의 변화에 따른 결과도 거의 비슷하였다. 마찬가지로 그림 4(a), (b)는 Canny 에지 연산자에 의해 얻어진 각각 Aerial영상의 82×112 물체 모델과 256×256 비교 영상이다. 그림 4(a)는 (b)의 비교 영상에서 얻어진 것으로 그림 4(a)의 (0, 0)은 (b)의 (62, 70)에 해당한다. 그림 4(c)는  $U = 24\%$ 일 때, 제안한 계층적 HD 방법에 의한 Aerial 영상에 대한 정합 결과이다. 앞과 비슷하게 사용된 partial HD의 파라미터  $f$ 는 정합 결과가 좋게 나오는 0.7에서 0.8정도의 값을 사용하였다.

그림 5는 Taxi 영상에 대한 정합성능을 알아보기 위하여 위치평면에 정합위치를 점으로 표시한 scatter diagram이다. 그림 5(a)는 기존의 방법에 의한 scatter diagram이고 (b)는 제안한 계층적 HD 방법에 의한 scatter diagram이다. 정합 위치의 관점에서, 잡음이 첨가되더라도 (70, 81)이 될 때 올바른 정합 결과라고 볼 수 있다. 그림 5(a), (b)의 왼쪽은  $U = 3\%$ 일 때의 정합 결과를 보이고 있고 오른쪽은  $U = 12\%$ 일 때의 정합 결과를 보이고 있다. 중점으로부터의 분산이 제안한 계층적 방법이 기존의 전체를 다 찾는 것보다 좋은 것을 볼 수 있는데 이는 에지 피라미드 구성시 half 피라미드에 의해 이진 영상의 독립된 잡음 화소들이 제거되었기 때문이다. 여기서 HHD는 제안한 계층적 HD (hierarchical HD) 정합에 의한 결과를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 5. Taxi 영상에 대한 실험 결과 분석

- (a) 기존의 방법에 의한 scatter diagram
- (b) 제안한 계층적 HD 방법에 의한 scatter diagram

Fig. 5. Analysis of matching results of the Taxi image.

- (a) 기존의 방법에 의한 scatter diagram,
- (b) 제안한 계층적 HD 방법에 의한 scatter diagram.

그림 6은 Aerial 영상에 대한 실험 결과 분석으로 (a)는 기존의 방법에 의한 scatter diagram이고 (b)는 제안한 계층적 HD 방법에 의한 scatter diagram이다. 정합 위치의 관점으로 볼 때 잡음이 첨가되더라도 (62, 70)이 될 때 올바른 정합 결과라고 볼 수 있다. 그림 6(a), (b)의 왼쪽은  $U = 6\%$ 일 때의 정합 결과를 보이고 있고 오른쪽은  $U = 24\%$ 일 때의 정합 결과를 보이고 있다. 중점으로부터의 분산이 제안한 계층적 방법이 기존의 전체를 다 찾는 것보다 좋은 것을 볼 수 있다. 따라서 제안한 방법의 성능이 우수함을 볼 수 있다. 본 영상의 경우 특징이 Taxi영상에 비하여 명확하여 많은 오차에서도 좋은 성능을 낼 수 있다. 또한 오차가 수평방향으로 약간 더 많은 오차를 보이는 것은 입력영상의 특성에 따른 것으로 수직 방향으로의 특징이 더욱 명확하기 때문이다.

그림 7은 영상에 대한 RMS 위치 오차를 히스토그램 분석에 의해 보였다. 실험에서의 RMS 위치 오차

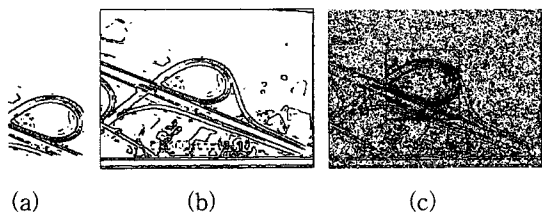


그림 4. 제안한 계층적 HD 정합 방법에 의한 Aerial 영상 정합 결과 (L=3)

- (a) 물체 모델 (b) 비교 영상 (c) 정합 결과

Fig. 4. Matching result of the Aerial image by the proposed HHD matching algorithm (L=3).

- (a) Object model, (b) Test image, (c) Matching result.

$\eta$ 는

$$\eta = \sqrt{\sum_{i=1}^I (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}, \quad 1 \leq i \leq I$$

로 주어지고 여기서  $(x_c, y_c)$ 은 실제 정확한 정합 위치이고  $(x_i, y_i)$ 는  $I$ 번째의 실험에 의한 정합 위치이다.  $I$ 는 실험의 횟수를 나타내며 200이 된다.

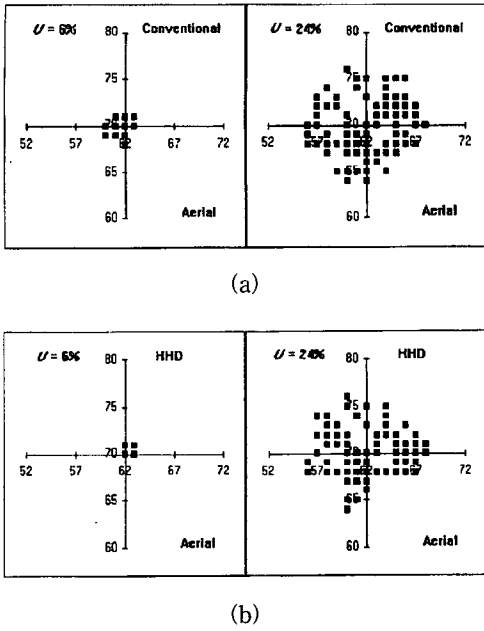


그림 6. Aerial 영상에 대한 실험 결과 분석  
 (a) 기존의 방법에 의한 scatter diagram  
 (b) 제안한 계층적 HD 방법에 의한 scatter diagram

Fig. 6. Analysis of matching results of the Aerial image.  
 (a) 기존의 방법에 의한 scatter diagram,  
 (b) 제안한 계층적 HD 방법에 의한 scatter diagram.

그림 7(a)는 Taxi 영상에 대한 RMS 위치 오차를 히스토그램 분석이며  $(x_c, y_c)$ 의 값은 (70, 81)이고, 그림 7(a)에서  $U = 3\%$ 와  $U = 12\%$ 일 때의 기존의 HD 정합과 제안한 계층적 HD 정합 방법의 결과를 보인다.  $U = 3\%$ 일 때의 성능은 거의 같지만  $U = 12\%$ 일 때는 제안한 계층적 HD 정합 방법의 결과의 RMS 위치 오차가 더 많음을 볼 수 있다.  $U = 3\%$ 일 때는 정확한 위치를 찾는 횟수는 기존의 HD 정합 방법이 124번이고 제안한 계층적 HD 정합 방법이 127번이다. 그림 7(b)는 Aerial 영상에 대한 RMS 위치 오차의 히스토그램 분석에 의해 보인다. 그림

7(b)에서  $(x_c, y_c)$ 의 값은 (62, 70)이 되고,  $U = 6\%$ 와  $U = 24\%$ 일 때의 기존의 HD 정합과 제안한 계층적 HD 정합 방법의 결과를 보인다.  $U = 6\%$ 와  $U = 24\%$ 일 때의 제안한 계층적 HD 정합 방법에 의한 정합 결과의 RMS 위치 오차가 더 많음을 볼 수 있다.  $U = 6\%$ 일 때는 정확한 위치를 찾는 횟수는 기존의 HD 정합 방법이 39이고 제안한 계층적 HD 정합 방법이 194번이다.

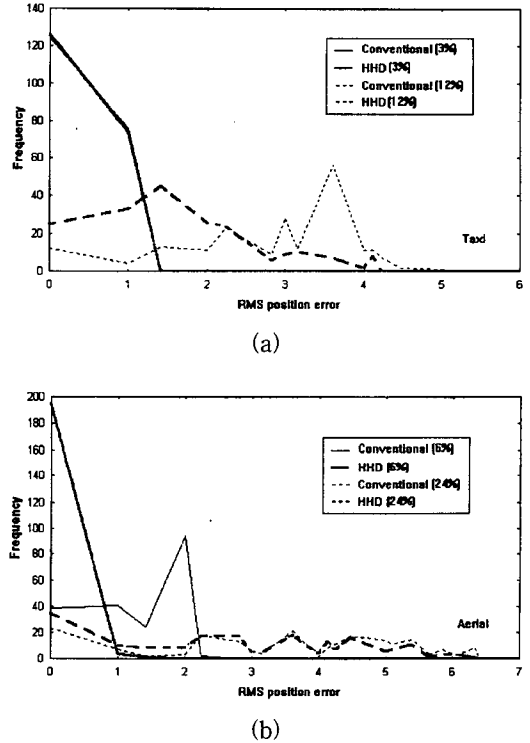


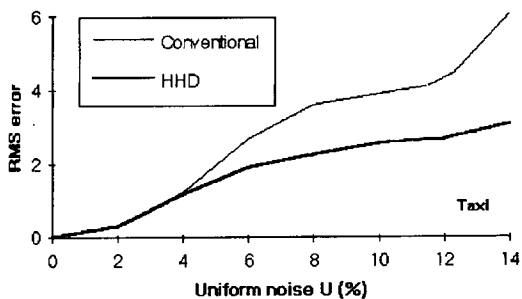
그림 7. RMS 위치 오차 히스토그램  
 (a) Taxi 영상 (b) Aerial 영상  
 Fig. 7. Histogram of the RMS position error.  
 (a) Taxi image, (b) Aerial image.

그림 8(a), (b)는 잡음 정도에 따른 Taxi 영상의 RMS 위치 오차와 Aerial 영상의 RMS 위치 오차를 보인다. Uniform 잡음이 증가함에 따라 RMS 위치 오차가 커지게 되고 기존의 방법에 비해 제안한 방법이 좋은 결과를 나타낸다.

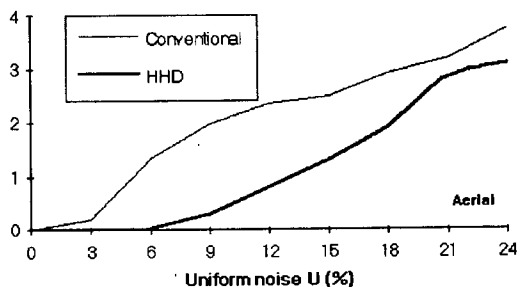
제안된 계층적 HD 정합 방법의 피라미드의 레벨은 영상의 크기와 관계있다. 영상의 크기가 커질수록 피라미드의 레벨수는 커지게 된다. 그림 9(a), (b)는 Canny 에지 연산자에 의해 얻어진 각각 Pentagon 영상의 160×160 물체 모델과 제안된 계층적 HD 방

법에 의한 Pentagon 영상에 대한 정합 결과이다. 영상의 크기가 큰 Pentagon 영상의 정합의 피라미드 레벨 수는 실험적으로 4가 적당하였다. 제안한 계층적 HD 정합 방법의 피라미드의 레벨은 영상의 크기와 관계있다. 영상의 크기가 커질수록 피라미드의 레벨수는 커지게 된다. 실험에 의해 영상의 크기가 큰 영상의 정합 피라미드 레벨 수는 커짐을 확인할 수 있다.

한다. 또한 제안한 방법에서는 DT map 피라미드와 에지 피라미드를 만드는 추가적인 계산량이 필요하다. 예로  $L=3$ ,  $P=Q=256$ ,  $p=q=80$ ,  $N_A=N_B=1000$ ,  $N_0=N_1=100$ 이고 피라미드 구조를 만드는 계산량을 무시할 때, 계산량의 이득은 49배 정도가 된다. 실험에서 전체적인 계산 시간의 측면에서 보면 MIPS 4400 (175MHZ) workstation에서 Taxi 영상의 정합은 기존의 전체를 찾는 방법이 140초 정도가 걸리고 피라미드의 레벨이 3인 제안한 계층적 HD 정합 방법은 5초 정도로 약 47배의 계산 시간 이득이 있다. Aerial 영상의 정합은 기존의 전체를 찾는 방법이 370초 정도가 걸리고 피라미드의 레벨이 3인 제안한 계층적 HD 정합 방법은 9초 정도로 약 41배의 계산 시간 이득이 있다.



(a)

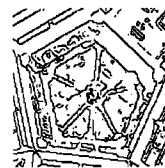


(b)

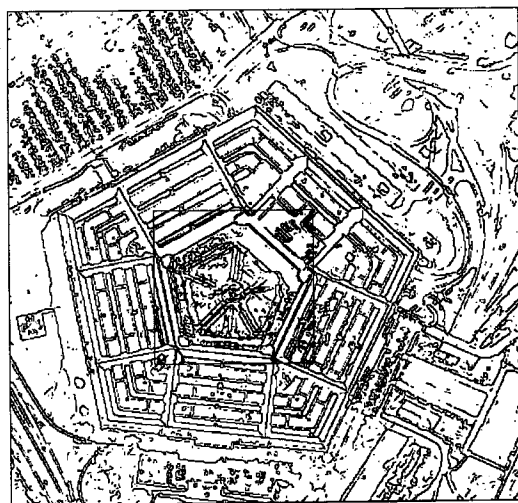
그림 8. Uniform 잡음 정도에 따른 RMS 위치 오차  
(a) Taxi 영상 (b) Aerial 영상

Fig. 8. RMS position error as a function of the noise level U  
(a) Taxi image, (b) Aerial image.

$N_A$ 의 에지점 개수를 가지는 물체 모델의 크기가  $p \times q$ ,  $N_B$ 의 에지점 개수를 가지는 비교 영상의 크기가  $P \times Q$ 일 때 변수들에 대한 directed HD 계산이 되는 회수를 계산량이라고 정의할 때, 기존의 HD 정합 방법과 여기서 피라미드의 레벨이  $L$ 이고 각 레벨에서의 후보 위치의 개수가  $N_i$ 인 제안한 계층적 HD 정합 방법의 계산량을 표 1에 나타내었다. 여기서 레벨이 1 증가할 때마다 영상의 크기는 4배만큼 줄어들게 되고 에지점  $N_A$ 의 개수와  $N_B$ 의 개수는 half 피라미드에 의해 해상도가 낮아질 때마다 반으로 줄어든다고 가정



(a)



(b)

그림 9. 제안된 계층적 HD 정합 방법에 의한 Pentagon 영상 정합 결과 ( $L=4$ )  
(a) 모델 영상 (b) 정합결과

Fig. 9. Matching result with Pentagon image by the proposed hierarchical HD  
(a) Model image (b) Matching result.



표 1. 기존의 HD와 제안한 계층적 HD정합 방법의 계산량 비교

Table 1. Comparison of Computational Complexities of Conventional HD and Hierarchical HD and Hierarchical HD Matching Algorithms.

	HD 계산량
기본의 방법	$(N_A+N_B)[(P-p) \times (Q-q)]$
제안한 방법	$(N_A+N_B) \left[ \sum_{i=0}^{l-1} \frac{1}{2^i} N_i + \frac{1}{2^{l-1}} \frac{1}{4^{l-1}} (P-p)(Q-q) \right]$

## V. 결론

HD에 의한 정합 방법은 물체들의 특징점 사이의 대응없이 물체 정합을 할 수 있는 비교적 간단하면서도 좋은 성능을 나타내는 방법이다. 본 논문에서는 기존의 HD 정합 방법에서 문제가 되었던 계산량을 줄이기 위해 계층적 방법을 제안하였다. 아울러 제안한 방법의 후보점을 구하기 위한 문턱값도 분석적 방법과 실험적 방법을 사용하여 유도하였고, 컴퓨터 모의 실험에 의해 제안한 계층적 HD 정합 방법과 제안한 robust HD 척도에 의한 정합의 성능을 확인하였다.

추후 과제로는 제안한 계층적 HD 방법과 robust HD 척도<sup>[13]</sup>를 결합하여 잡음 상황에서도 좋은 성능을 가지면서 계산 시간 면에서도 효과적인 HD 정합 방법을 구축하는 것이다.

## 附錄 A

$\zeta$ 는  $l=1$ 일 때,  $|D_1 - D_0|$ 의 최대값은 분석적 방법에 의해 구해진다.  $D_l(i, j)$ 를 레벨  $l$ 에서  $(i, j)$ 로부터 가장 가까운 점까지의 유클리안 거리라고 하면,  $l=0$ 일 때의  $D_0(i, j)$ 의 값은  $D_0(i, j) = \sqrt{i^2 + j^2}$  이 되고, 또한  $l=0$ 일 때,  $(i, j)$  위치의 DT값  $D_1(i, j)$ 은 4개의 son DT값의 합으로 정의되고  $D_1(i, j)$ 은

$$\begin{aligned} D_1(i, j) &= \frac{1}{4} \sum_{u=0}^1 \sum_{v=0}^1 \sqrt{(2i+u)^2 + (2j+v)^2} \\ &= \frac{1}{4} (\sqrt{(2i)^2 + (2j)^2} + \sqrt{(2i)^2 + (2j+1)^2} \\ &\quad + \sqrt{(2i+1)^2 + (2j)^2} + \sqrt{(2i+1)^2 + (2j+1)^2}) \\ &= \frac{1}{4} (D_0^{00} + D_0^{01} + D_0^{10} + D_0^{11}) \end{aligned} \quad (A1)$$

이 된다. 여기서 윗첨자 00, 01, 10, 11은  $u$ 와  $v$ 를 나

타낸다.

$|D_1 - D_0|$ 의 최대값은  $D_1$ 과  $D_1$ 의 son들과의 차이로 결정되고

$$\zeta = \max(|D_1 - D_0^{00}|, |D_1 - D_0^{01}|, |D_1 - D_0^{10}|, |D_1 - D_0^{11}|) \quad (A2)$$

과 같이 4개의 절대 차이의 최대값으로 결정된다. 또한 주어진 가정  $i, j \geq 0$ 일 때, 4개의 차이값들은 다음의 특성을 가진다.

$$\textcircled{1} D_1 - D_0^{00} > D_1 - D_0^{01} > D_1 - D_0^{10} > D_1 - D_0^{11}$$

$$\textcircled{2} D_1 - D_0^{00}, D_0^{11} - D_1 > 0$$

특성  $\textcircled{1}$ 과  $\textcircled{2}$ 를 사용하여 식 (A2)는  $\zeta = \max(D_1 - D_0^{00}, D_0^{11} - D_1)$ 이 되고  $D_1 - D_0^{00}$ 과  $D_0^{11} - D_1$ 은

$$D_1 - D_0^{00} = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^1 \sum_{v=0}^1 [\sqrt{(2i+u)^2 + (2j+v)^2} - \sqrt{(2i)^2 + (2j)^2}] \quad (A3)$$

$$D_0^{11} - D_1 = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^1 \sum_{v=0}^1 [\sqrt{(2i+1)^2 + (2j+1)^2} - \sqrt{(2i+u)^2 + (2j+v)^2}] \quad (A4)$$

로 주어진다. 식 (A3)와 식 (A4)는  $i$ 와  $j$ 에 관계없이 0보다 큰 4개의 항으로 이루어지므로

$$f_1(X_1, Y_1) = \sqrt{(X_1+a)^2 + (Y_1+b)^2} - \sqrt{(X_1)^2 + (Y_1)^2} \quad (A5)$$

$$f_2(X_2, Y_2) = \sqrt{(X_2+c)^2 + (Y_2+d)^2} - \sqrt{(X_2)^2 + (Y_2)^2} \quad (A6)$$

으로 변형되고,  $X_1, Y_1, X_2, Y_2$ 의 범위는 각각  $X_1 = 2i \geq 0, Y_1 = 2j \geq 0, X_2 = 2i+u \geq 0, Y_2 = 2j+v \geq 0$ 이 된다. 또  $a, b, c, d$ 는 0 또는 1을 갖는다. 식 (A5)에서  $(X_1, Y_1)$ 은 1차 평면 위에 있고 0보다 큰 상수  $m$ 에 의해  $Y_1 = mX_1$ 이 되면 식 (A5)는

$$\begin{aligned} f_1(X_1, mX_1) &= \sqrt{(X_1+a)^2 + (mX_1+b)^2} - \sqrt{(X_1)^2 + (mX_1)^2} \\ &= \sqrt{(m^2+1)X_1^2 + 2(a+bm)X_1 + a^2 + b^2} - \sqrt{m^2+1} X_1 \end{aligned} \quad (A7)$$

이 된다.  $f_1$ 을  $X_1$ 에 대해 미분하면  $f'_1(X_1, mX_1)$ 은

$$\begin{aligned} f'_1(X_1, mX_1) &= \frac{(m^2+1)X_1 + (a+bm)}{\sqrt{(m^2+1)X_1^2 + 2(a+bm)X_1 + a^2 + b^2}} - \sqrt{m^2+1} \\ &= \frac{A-B}{\sqrt{(m^2+1)X_1^2 + 2(a+bm)X_1 + a^2 + b^2}} \end{aligned} \quad (A8)$$

이 되고, 여기서  $A, B$ 는 각각

$$A = (m^2 + 1)X_1 + (a + bm),$$

$$B = \sqrt{m^2 + 1} \sqrt{(m^2 + 1)X_1^2 + 2(a + bm)X_1 + a^2 + b^2}$$

로 표현된다.  $f_1(X_1, mX_1)$ 의 부호는  $A$ 와  $B$ 가 0보다 크기 때문에  $A^2 - B^2$ 와 같고

$$A^2 - B^2 = -(am - b)^2 \leq 0 \tag{A9}$$

로 주어진다.  $f_1(X_1, mX_1)$ 은  $m$ 에 관계없이 0보다 크므로  $X_1$ 과  $Y_1$ 이 0이 될 때, 즉  $i, j$ 가 0일 때, 식 (A 8)은 최대값을 가진다. 식 (A 6)은  $X_2$ 와  $Y_2$ 가 1사분면에 있으므로 0보다 큰  $n$ 에 대해  $Y_2 = nX_2$ 로 놓을 수 있다. 위와 같은 방법에 의해  $f_2(X_2, mX_2)$ 는  $n$ 에 관계없이 0보다 크게 되고  $X_2$ 와  $Y_2$ 가  $u$ 와  $v$ 가 될 때, 즉  $i, j$ 가 0일 때, 최대값을 가진다. 문턱값  $\zeta$ 는  $D_1 - D_0^{00}$ 과  $D_1^{11} - D_1$ 의 최대값으로 주어지고 즉

$$\zeta = \max\left(\frac{2 + \sqrt{2}}{4}, \frac{3\sqrt{2} - 2}{4}\right) = 0.853553 \tag{A10}$$

이 된다.  $(i, j)$ 가 1사분면이 아닌 다른 분면에 있을 때에도 같은 결과를 가진다. 결론적으로 레벨  $l$ 에서의 문턱값  $\tau_l$ 은  $2^{l-1}\zeta$ 가 되고 이 때  $\zeta$ 는 0.853553이 된다.

### 附 錄 B

실험에 의해 몇가지의 가정에 의해, 레벨  $l$ 의 father HD 값  $H'_l$ 과 father HD의 레벨  $l-1$ 에서의 son HD 값  $H'_{l-1}$ 이  $|H'_l - H'_{l-1}| \leq 2^{l-1}\zeta$ 를 만족하면  $H_l^{\min_0} - H_{l-1}^{\min_0}$ ,  $H_l^{\min_l} - H_{l-1}^{\min_l}$ 은 각각

$$-2^{l-1}\zeta \leq H_l^{\min_0} - H_{l-1}^{\min_0} \leq 2^{l-1}\zeta \tag{B1}$$

$$-2^{l-1}\zeta \leq H_l^{\min_l} - H_{l-1}^{\min_l} \leq 2^{l-1}\zeta \tag{B2}$$

이 되고 식 (B 1)에서 식 (B 2)를 빼면

$$-2^l\zeta + H_{l-1}^{\min_0} - H_{l-1}^{\min_l} \leq H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l} \leq 2^l\zeta + H_{l-1}^{\min_0} - H_{l-1}^{\min_l} \tag{B3}$$

이 주어진다. 만약  $H_l^{\min_l}$ ,  $H_l^{\min_0}$ 이 같으면, 그 HD 값을 가지고 있는 위치는 후보 위치로 선택된다. 그렇지 않다면 각각의 레벨에서  $H^{\min_l} - H^{\min_0}$ 는

$$-2^l\zeta + H_{l-1}^{\min_0} - H_{l-1}^{\min_l} \leq H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l} \leq 2^l\zeta + H_{l-1}^{\min_0} - H_{l-1}^{\min_l}$$

$$-2^{(l-1)}\zeta + H_{l-2}^{\min_0} - H_{l-2}^{\min_l} \leq H_{l-1}^{\min_0} - H_{l-1}^{\min_l} \leq 2^{(l-1)}\zeta + H_{l-2}^{\min_0} - H_{l-2}^{\min_l}$$

$$\vdots$$

$$-2^2\zeta + H_1^{\min_0} - H_1^{\min_l} \leq H_2^{\min_0} - H_2^{\min_l} \leq 2^2\zeta + H_1^{\min_0} - H_1^{\min_l}$$

$$-2\zeta + H_0^{\min_0} - H_0^{\min_l} \leq H_1^{\min_0} - H_1^{\min_l} \leq 2\zeta + H_0^{\min_0} - H_0^{\min_l} \tag{B4}$$

로 표현된다. 또한 식 (B 4)에 의해

$$-\sum_i 2^i\zeta + H_0^{\min_0} - H_0^{\min_l} \leq H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l} \leq \sum_i 2^i\zeta + H_0^{\min_0} - H_0^{\min_l} \tag{B5}$$

$$-2(2^{l-1})\zeta + H_0^{\min_0} - H_0^{\min_l} \leq H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l} \leq 2(2^{l-1})\zeta + H_0^{\min_0} - H_0^{\min_l} \tag{B6}$$

이 유도된다. 또  $H_l^{\min_l}$ 는 레벨  $l$ 에서 최소값이므로,  $H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l}$ 는 항상 0보다 크고,  $H_0^{\min_0}$ 는 레벨 0에서 가장 작은 값이므로  $H_0^{\min_0} - H_0^{\min_l}$ 은 0보다 작다. 따라서 식 (B 6)는

$$0 \leq H_l^{\min_0} - H_l^{\min_l} \leq 2(2^{l-1})\zeta \tag{B7}$$

이 된다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. Persoon and K. S. Fu, "Shape discrimination using fourier descriptors," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-7, no. 3, pp. 170-179, Mar. 1977.
- [2] B. Bhanu and O. D. Faugeras, "Shape matching of two dimensional objects," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-6, no. 2, pp. 137-156, Mar. 1984.
- [3] N. Ayache and O. D. Faugeras, "HYPER: A new approach for the recognition and positioning of two-dimensional objects," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-8, no. 1, pp. 44-54, Jan. 1986.
- [4] G. Borgefors, "Hierarchical chamfer matching: A parametric edge matching algorithm," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-10, no. 6, pp. 849-865, Nov. 1988.
- [5] D. P. Huttenlocher, G. A. Klanderman, and W. J. Rucklidge, "Comparing images using the Hausdorff distance," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol.

- PAMI-15, no. 9, pp. 850-863, Sep. 1993.
- [6] R. Azencott, F. Durbin, and J. Paumard, "Multiscale identification of buildings in compressed large aerial scenes," in *Proc. 13th Int. Conf. Pattern Recognition*, vol. 3, pp. 974-978, Vienna, Austria, Aug. 1996.
- [7] M.-P. Dubuisson and A. K. Jain, "A modified Hausdorff distance for object matching," in *Proc. 12th Int. Conf. Pattern Recognition*, pp. 566-568, Jerusalem, Israel, Oct. 1994.
- [8] D. P. Huttenlocher and W. J. Rucklidge, "A multi-resolution technique for comparing images using the Hausdorff distance," in *Proc. Comput. Vision, Patt. Recog.*, pp. 705-706, New York, NY, USA, June 1993.
- [9] J. H. Yi, "Target indexing in SAR images using scattering centers and the Hausdorff distance," 제8회 영상처리 및 이해에 관한 워크샵 논문집, pp. 305-310, 부산 해운대, 1996년 1월.
- [10] G. Borgefors, "Distance transformations in digital images," *Comput. Vision, Graphics, Image Processing*, vol. 34, no. 3, pp. 344-371, June 1986.
- [11] 권오규, 심동규, 박래홍, "계층적 Hausdorff distance를 이용한 영상내의 물체 정합," 제1회 뉴미디어 기술 워크숍 논문집, pp. 144-148, 서울대학교, 1996년 6월.
- [12] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679-698, Nov. 1986.
- [13] O.-K. Kwon, D.-G. Sim, and R.-H. Park, "New Hausdorff distance based on robust statistics for comparing images," in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, vol. 3, pp. 21-24, Lausanne, Switzerland, Sep. 1996.

---

 저 자 소 개
 

---

權 五 奎(正會員) 第 35卷 B編 第 11號 參照  
현재 주식회사 MJL 근무

沈 東 圭(正會員) 第 35卷 B編 第 11號 參照  
현재 서강대학교 박사과정 재학중

朴 來 弘(正會員) 第 35卷 B編 第 11號 參照  
현재 서강대학교 전자공학과 교수