

퍼지논리를 이용한 Bin Picking 방법

◦김 태원*, 서 일홍*, 김 기엽**

* 한양대학교 전자공학과 ** 한국기계연구소 자동제어실

A Fuzzy Logic Based Bin Picking Technique

Tae Won Kim*, Il Hong Suh*, and Gi Yeop Kim**

* Dept. of Electronics Eng., ** Automatic Control Lab.
Hanyang Univ. KIMM

Abstract

A novel 2-dimensional matched filter of the parallel-jaw type using fuzzy logics is proposed for bin picking. Specifically, averaged pixel intensity of the windowed region for the filtering is considered to be fuzzy. Also membership function for darkness and brightness are designed by employing the intensity histogram of image. Then a rule is given to know how much a windowed region can be a possible holdsite. Furthermore eight rules are made to determine the part orientation, where Mamadi's reasoning method is applied. To show the validities of our proposed technique, some experimental results are illustrated and compared with the results by conventional matched filter technique.

1. 서 론

상자안에 임의대로 쌓여있는 같은 모양의 물체를 로봇트 나 산업용 매니플레이터를 이용하여 집어내는 Bin-Picking문제는 자동화의 확산에 힘입어 중요한 연구과제가 되어왔다[4-7,9]. Bin-Picking은 기존의 로봇트에 센서정보를 제공하여 환경변화에 유연하게 대처하도록 한 것으로, 일반적으로 근거리 센서와 원거리 센서의 두가지 센서를 필요로한다[5,8,9]. 원거리 센서는 원하는 물체가 어디 있는지를 알아내는데 이용되고, 근거리 센서는 물체를 잡았는지를 판단하는데 이용된다. 원거리 센서로는 카메라, 레이저 거리 감지기(Laser range finder)나 기타 다른 종류의 비전센서가 이용되며, 근거리 센서로는 근접 센서나 하중 센서등이 쓰인다.

대부분의 경우, 비용문제 때문에 원거리 센서로는 레이저를 이용한 고정밀 3차원 거리 측정장치대신 값싸고 부착하기 쉬운 카메라를 주로 이용한다. 카메라를 두대이상 설치하면 3차원 정보를 얻을 수 있으나 노이즈(noise)에 너무 민감하고 계산이 복잡하기 때문에 현대의 카메라와 근거리 센서를 이용한다. 즉, 한

대의 카메라를 이용하기 때문에 잃어버린 거리정보를 근접센서로 보상받는 것이다. 또한 물체를 잡았는지를 판단하기 위하여 힘/토크 하중 센서를 이용하기도 한다. 이들 정보중 원거리 센서인 카메라를 이용하여 로봇트가 잡을 수 있는 물체의 holdsite를 찾는 2차원 Bin-Picking방법이 여러 연구가들에 의해 발표되었다 [1-5]. 이들 방법중 널리 알려진 shrinking algorithm, collision fronts algorithm, matched filter algorithm의 세가지 방법을 살펴보기로 한다.

Shinking algorithm은 평활한 표면과 균일한 반사성을 갖는 물체에 주로 사용된다[1,5]. 이 방법은 먼저 영상을 이진화(binanzation)한 후, 물체의 외곽부분을 줄여나가(shrinking) 남은 부분의 가운데를 로봇트가 잡을 수 있는 곳(holdsite)으로 간주하는 것이다. 이 경우 이진화가 정확하지 않으면 원하는 점을 잡지 못하게 되는데, 하나의 임계치(threshold value)로 실영상을 이진화시킨다는 것은 거의 불가능하다. 또한 조명, 물체의 크기나 밝기 임계치에 따라 줄여나가는 레벨(shrinking level)을 적절히 정해주어야만 한다. 만약 이 레벨이 너무 크면 평활면이 너무 많이 줄게되어 원래의 물체를 표현할 수 없고 아예 제거되는 경우도 있다. 이방법은 vaccum cup gripper를 위해 개발된 것이나 parallel-jaw gripper에도 사용할 수 있다.

Collision fronts algorithm은 shrinking algorithm을 다치 영상(Gray-scale image)으로 확장한 것이다[2,5]. 이 방법은 불규칙적인 표면이나 반사가 불량한 물체를 위해 고안되었으며, parallel-jaw gripper에 적용된다. 이 방법은 영상에서 대칭인 두 에지(edge)를 찾아 그 가운데를 잡는 점으로 간주하는 것인데, 각 에지를 평행하게 전파(propagation)시켜 전파된 에지끼리 마주치는 선을 두 에지의 가운데 선으로 보고 이 선의 중심을 잡는점으로 하는 것이다. 이때 어느 정도까지 전파시킬지는 전파시키는 물체의 크기에 따라 정해주어야하며, 큰 물체의 경우 전파 시간이 너무 많이 걸리고, 직선형태의 에지만 이용 가능하다는 단점이 있다. 또한 두 에지가 만나서 이루는 선의 폭이 두 화소(pixel) 이상이거나 단속적(discontinuous)인 경우가 많아 이를 보완하기 위한 계산이 많이 필요하다.

Matched filter algorithm은 신호처리 분야에서 오래전부터 알려진 방법으로 비전분야에서 널리 쓰이고 있는 template matching과 유사하나 노이즈성분을 포함하여 계산한다는 점이 다르다[3,4,5]. Parallel-jaw filter라고도 불리는 이 필터는 그림1과 같은 형태로 되어있다. 그림1에서 가운데 부분은 물체를 나타내고 양 끝부분은 parallel-jaw gripper가 들어갈 공간을 나타내므로 각 부분의 크기는 물체와 gripper에 따라 조정되어야 한다. 필터는 밝은 영역(물체)의 평균 밝기와 어두운 영역(gripper)의 평균 밝기의 차를 계산한다. 수직과 수평 각 방향의 필터 출력을 재귀적(recursive)으로 빠르게 계산한 후 두 성분을 더하여 전체 필터 출력으로 한다. 공간영역중 극부 최대치(local maxima)를 potential holdsite라 하고 이들 중 가장 큰 값을 원하는 holdsite로 선택한다. 선택된 holdsite로 로봇트를 움직인 후 gripper를 이용하여 물체를 잡을때, 근거리 센서에서 실패했다는 정보가 들어오면 극부 최대치중 다음번 큰것을 holdsite로 삼는다. 이와같은 것을 반복하여 물체를 잡는다. 그러나 이 방법은 물체와 gripper공간의 밝기 차이가 크지 않은 경우에는 정확한 출력을 기대할 수 없고 필터의 특성상 물체의 끝에서 최대 출력을 내는 경우가 있어 물체를 잡는데 실패할 가능성이 많다.

본 논문에서는 앞에서 살펴본 방법 중 밝기에 대한 제약이 비교적 적으며 계산량이 적은 parallel-jaw 필터를 퍼지논리를 이용하여 새로 설계하고자 한다. 필터 내의 각 영역의 평균 화소는 애매한 밝기를 갖고 있다고 보았으며 '밝음'과 '어두움'의 소속함수(membership function)는 밝기 히스토그램(Intensity histogram)을 이용하여 만들기로 한다. 따라서 퍼지규칙(Fuzzy rule)은 선택된 영역이 어느 정도 holdsite에 가까운가를 알기 위하여 사용된다. 또한 Mamdani의 추론 방법을 이용한 8개의 규칙으로 물체의 각도(orientation)를 알아내고자 한다. 제안된 방법의 타당성을 보기 위하여 실험을 통해 기존의 matched filter와 제안한 방법을 비교하고자 한다.

2. 퍼지 matched filter와 퍼지추론을 이용한

parallel-jaw type holdsite의 결정

퍼지논리를 이용하여 그림1과 같은 parallel-jaw type matched filter를 설계하기 위하여 각 영역의 평균화소밝기를 필터의 입력이고 퍼지하다고 하자. 그리고 퍼지 필터의 출력은 필터의 각 영역의 밝음과 어둠의 정도가 된다. 이것을 위해 그림1에서 같이 왼쪽 어두운 영역(A)의 평균화소밝기를 α , 가운데 밝은 영역(B)의 평균화소밝기를 β , 오른쪽 어두운 영역(C)의 평균화소밝기를 γ 로 각각 표기하고, 밝은 영역과 어두운 영역의 소속함수를 그림3에서 같이 각각 μ_{dark} , μ_{bright} 로 하자. 그러면 각영역의 평균화소밝기를 μ_{dark} , μ_{bright} 를 이용하여 계산한다.

필터의 입력이되는 각영역의 평균화소밝기는 반복으로 계산할 수 있다. 구체적으로 설명하면 W , L_m , L_p 를 각각 parallel-jaw type matched filter의 윈도우 폭, 어두운 영역의 길이, 밝은 영역의 길이라고 하고 또한 $G(i,j)$, $M_i(j)$, $P_i(j)$ 는 각각 $N \times N$ 영상의 (i,j) 에서의 화소값, (i,j) 가 중심인 윈도우의 어두운 영역과 밝은 영역의 평균화소밝기이다. 수직필터 처리의 경우, $M_i(j)$ 과 $P_i(j)$ 는

$$M_i(L+j) = M_i(L+j-1) - S_i(j) - S_i(j+L_m+L_p) + S_i(j+L_m) + S_i(j+2L_m+L_p), \quad (1)$$

$$P_i(L+j) = P_i(L+j-1) - S_i(j+L_m) + S_i(j+L_m+L_p), \quad (2)$$

이고 초기값은 다음과 같다.

$$M_i(j) = \sum_{k=1}^{L_m} S_i(k) + S_i(k+L_m+L_p), \quad (3)$$

$$P_i(j) = \sum_{k=1}^{L_p} S_i(k+L_m), \quad (4)$$

여기서 $i = 1, \dots, N + 1 - 2L$, $j = k, \dots, N + 1 - k$ 이고 L 은 필터 길이의 반, 즉 $(L_p+1)/2 + L_m$ 이다. 식(1)과 (2)에서의 $S_i(j)$ 는

$$S_i(j) = S_{i-1}(j) - \{G(i-k,j) - G(i-1+k,j)\} / \{W(L_p+2L_m)\}, \quad (5)$$

이고 초기값은 다음과 같다.

$$S_i(k) = \sum_{i=1}^W G(i,j) / \{W(L_p+2L_m)\}, \quad (6)$$

여기서 $i = K+1, \dots, N + 1 - k$, $j = 1, \dots, N$ 이고 $k = (W-1)/2$ 이다.

어둠과 밝음의 소속함수를 설계하기 위하여 학습단계(Training phase)에서 인간이 holdsite라고 인식하는 여러영역에 윈도우를 씌어 밝기 히스토그램을 바탕으로 밝은 영역과 어두운 영역을 구분하는 임계치를 결정한다. 기존의 이진화 방법은 임계치 이상이면 밝고 이하이면 어두운 크리스프(crisp)한 논리였다 [12]. 그러나 화소밝기가 임계치근처이면 밝은 영역이라고도 어두운 영역이라고도 보기 어렵다. 그러므로 임계치 근처에 있는 화소밝기를 퍼지하게 보는 것이 합리적이다. 이를 위하여 각 영역의 밝기 정도를 표현할 수 있는 소속함수를 표현해보자. 함수 $h(k)$ ($0 \leq k \leq 255$)는 영상에서 밝기 k 를 갖는 화소의 총수이고 Φ 는 임계치라면 h_a , h_b , m_a , m_b 은 다음과 같다.

$$h_b = \max_k \{ h(k), k \leq \Phi \},$$

$$h_a = \max_k \{ h(k), k < \Phi \},$$

$$m_b = \min \{ k \mid k = h^{-1}(h_b), \text{ for } k \leq \Phi \},$$

$$m_a = \max \{ k \mid k = h^{-1}(h_b), \text{ for } k < \Phi \},$$

여기서 $h^{-1}(\cdot)$ 는 $h(\cdot)$ 의 역함수이다. 소속함수 $\mu_{dark}(\cdot)$ 와 $\mu_{bright}(\cdot)$ 는 아래와 같다.

$$\mu_{dark}(k) = \begin{cases} 1, & \text{for } 0 \leq k \leq m_a \\ k/(m_a-m_b) & \\ - m_b/(m_a-m_b), & \text{for } m_a \leq k \leq m_b \\ 0, & \text{for } m_b \leq k \leq 255 \end{cases}$$

이고

$$\mu_{bright}(k) = \begin{cases} 0, & \text{for } 0 \leq k \leq m_a \\ 1/(m_b-m_a) & \\ - m_a/(m_b-m_a), & \text{for } m_a \leq k \leq m_b \\ 1, & \text{for } m_b \leq k \leq 255 \end{cases}$$

Matched filter의 목적이 양 옆이 어둡고 가운데가 밝은 영역을 찾는것이므로, 그림3을 관찰해보면 $\mu_{dark}(\alpha)$, $\mu_{dark}(\gamma)$ 와 $\mu_{bright}(\beta)$ 이 거의 1로 계산된다면 바라는 holdsite이고, $\mu_{dark}(\alpha)$, $\mu_{dark}(\gamma)$ 과 $\mu_{bright}(\beta)$ 이 거의 0으로 계산된다면 거의 잡을 수 없는 영역된다. 이러한 관찰을 통해서 우리는 일정한 규칙을 얻을 수 있다. (규칙 1) 만약 A 영역이 어두운 영역이고 B 영역이 밝은 영역이고 C 영역이 어두운 영역이라면 B 영역이 중심이 possible holdsite이다. 여기서는 Mamdani의 추론법[10,11]을 그림4와 같이 사용하였다.

만약 물체가 영상에서 한쪽 방향으로만 놓여 있다면 규칙 A를 이용하여 쉽게 possible holdsite를 찾을 수 있다. 그러나 대부분의 경우 물체가 인의의 방향으로 놓여있으므로 여러방향의 필터를 적용시켜야 한다. 그러나 이것은 계산의 복잡성을 증가시키는 것이다. 그러므로 단순한 구조의 물체에 대해 2차원의 충분한 정보를 제공할 수 있는 형태라고 생각되는 수직 방향과 수평 방향의 필터 출력을 계산한 후, 두 필터의 결과를 합하여 평균을 내는 방법을 사용한다[5]. 두 필터의 합한 결과에서 극부적 최대치들을 possible holdsite라고 한다.

만약 그림3에 있는 소속함수의 모양을 변화시킨다면 제안한 필터처리과정은 불필요한 밝기의 화소를 제거시킬 수 있다. 너무 어두운 화소와 너무 밝은 화소가 노이즈이거나 바라지 않는 화소인 경우에 소속함수를 그림5와 같이 조정한다면 바라지 않는 화소의 영향을 줄일 수 있다. 기존의 matched filter에서 효과적으로 처리할 수 없는 밝기가 심하지 않은 물체에 적용하면 효과적이다.

3. 퍼지추론에 의한 물체의 각도 결정

로보트 핸드를 이용한 bin-picking 문제를 해결하려면 Holdsite를 찾는것 외에도 물체의 각도를 아는것이 필요하다. 이것을 위해 0°, 45°, 90°, 135° 방향의 필터를 설계하고 적용하였다. 계산의 부담을 줄이기위해 먼저 0°, 90° 방향 필터를 이용하여 possible holdsite를 찾은후에 45°, 135° 필터를 적용하였다. 만약 영상을 모든 방향으로 투영시킨다면 물체의 각도를 알 수 있다[13]. 그러나 제안한 필터는 네방향의 평균 투영값을 이용하므로 직접 물체의 각도를 알 수는 없다. 다행스럽게 비선형 보간법에 이용되는 퍼지추론을 이용하여 물체의 각도를 얻을 수 있다.

물체의 각도를 결정하기 위해 다음과 같은 8개의 규칙을 세웠다.

- (1) 만약 F0가 매우 크고 F45가 중간이고 F90이 매우 작고 F135가 중간이면, 물체의 각도는 0°이다.
- (2) 만약 F0가 크고 F45가 크고 F90이 작고 F135가 중간이면, 물체의 각도는 22.5°이다.
- (3) 만약 F0가 중간이고 F45가 매우 크고 F90이 중간이고 F135가 매우 작으면, 물체의 각도는 45°이다.
- (4) 만약 F0가 중간이고 F45가 크고 F90이 크고 F135가 작으면, 물체의 각도는 67.5°이다.
- (5) 만약 F0가 매우 작고 F45가 중간이고 F90이 매우 크고 F135가 중간이면, 물체의 각도는 90°이다.
- (6) 만약 F0가 작고 F45가 작고 F90이 크고 F135가 크면, 물체의 각도는 112.4°이다.
- (7) 만약 F0가 중간이고 F45가 매우 작고 F90이 중간이고 F135가 매우 크면, 물체의 각도는 135°이다.
- (8) 만약 F0가 크고 F45가 중간이고 F90이 작고 F135가 크면, 물체의 각도는 167.5°이다.

여기서 F0, F45, F90, F135는 각각이 0°, 45°, 90°, 135° 필터의 결과를 의미한다. 각 필터의 결과 크기에 대한 소속함수는 그림6에 있다. 0°부터 167.5°까지 물체의 각도를 나타내는 소속함수는 그림7에 있다. 그림6에서 'VL', 'L', 'M', 'S', 'VS'는 각각 'Very Large', 'Large', 'Medium', 'Small', 'Very Small'을 의미한다.

4. 실험 결과

제안한 방법의 타당성을 보이기 위해 기존의 방법과 비교하는 실험을 하였다. 그림8과 같은 원영상(Original gray-scale image)에 제안한 방법과 기존의 방법을 적용하였다. 그림9는 원

영상의 히스토그램과, 퍼지 추론에 사용된 $\mu_{dark}(\cdot)$ 와 $\mu_{bright}(\cdot)$ 이다. 그림10은 기존의 matched filter 방법을 사용하여 holdsite를 찾은 결과이고, 그림11은 제한한 matched filter를 이용하여 holdsite를 찾은 결과이다. 그림10과 그림11에서 보는 것과 같이 제한된 방법이 기존의 방법보다 우수하다는 것을 알 수 있으며, 기존의 방법을 사용할 경우에 holdsite를 펜의 끝부분에서 찾기때문에 로봇 gripper가 잡기 힘들다는 것을 알 수 있다.

한편 제한된 물체의 각도를 계산하는 퍼지규칙의 능력을 보여주기 위하여 그림12과 같이 각도를 알고있는 물체에 퍼지규칙을 적용하였다. 그림12에서 검정색 십자 커서(Cross cursor)는 제한한 퍼지필터를 사용했을때의 potential holdsite이다. 물체의 각도계산 결과를 표1에 정리하였다. 표1에서 보는바와 같이 물체의 각도를 계산한 최대 오차는 10° 였다. 이 오차는 비록 커보이 지만 그림13에서 보는것 같이 parallel jaw gripper를 사용하는 경우에는 gripper자체의 각도여유때문에 그리 치명적인 것은 아니다. 보통 약 $\pm 10^\circ$ 의 각도여유는 가지고 있기 때문이다[4,5].

따라서 제한한 퍼지논리를 이용한 matched filter가 기존의 matched filter[4,5]보다 우수하며, 실제로 bin picking에 성공적으로 적용시킬 수 있다.

5. 결론

시각장치를 갖춘 로봇트가 임의대로 놓여있는 물체를 잡기위하여 밝은 영역과 어두운 영역의 소속함수를 설계한후, 수직 및 수평 필터를 사용하여 holdsite를 찾고, 네방향의 필터를 이용하여 물체의 각도를 알아내는방법을 제안하였다. 각 방향 필터및 물체의 각도 검출을 모두 퍼지논리를 이용하였다. 실험을 통하여 제한한 방법이 실험을 통하여 기존의 matched filter보다는 성능이 우수하다는 것을 보였다.

표 1. 물체의 각도 추정 결과
Table 1. Results of estimating the part orientation

각도	최대오차	평균오차
0.0	-2.25	0.5
22.5	3.75	3.0
45.0	10.0	6.7
67.5	4.75	2.0
90.0	0.0	0.0
112.5	4.0	2.25
135.0	8.5	2.7
157.5	2.75	1.0

References

- [1] S. Levialdi, "On shrinking binary patterns," *Commun. ACM*, vol.15, no.1, pp.7-10, 1972
- [2] U. Montanari, "Continuous skeleton from digitized images," *J.ACM*, no.16, pp.534-549, Oct. 1969
- [3] W. Pratt, *Digital Image Processing*. New York:Wiley-Interscience, 1979
- [4] J.-D. Dessimoz, J.R.Birk, R.B.Kelley, H.A.S.Martins, and C.L.I, "Matched Filters for Bin Picking," *IEEE Trans. on PAMI*, vol.PAMI-6, no.6, pp.686-697, Nov. 1984
- [5] R.B.Kelley, H.A.S.Martins, J.R.Birk, and J.D.Dessimoz, "Three Vision Algorithms for Acquiring Workpieces from Bins," *Proceedings of IEEE*, vol.71. no.7, pp.803-820, July 1983
- [6] A.Distante, N.Ancona, G.Attolico, L.Caponett, M. Chiaradia, and E.Stella, "A Model-Based 3-D Vision System for Bin-Picking," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol.35, no.5, pp.545-553, May 1988
- [7] H.Wechsler and G.L.Zimmerman, "Distributed Associative Memory(DAM) for Bin-Picking," *IEEE Trans. on PAMI*, vol.PAMI-11, no.8, pp.814-822, Aug. 1989
- [8] D.Vernon and M.Tistarelli, "Using Camera Motion to Estimate Range for Robotic Parts Manipulation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.6, no.5, pp.509-521, Oct. 1990
- [9] E.Al-Hujazi and A.Sood, "Range Image Segmentation with Applications to Robot Bin-Picking Using Vacuum Gripper," *IEEE Trans. on PAMI*, vol.PAMI-20, no.6, pp.1313-1325, Nov./Dec. 1990
- [10] E.H.Mamdani, "Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Single Dynamic Plant," *Proceedings of IEE*, vol.121, no.12. pp.1585-1588, 1974
- [11] E.H.Mamdani and B.R.Gaines (eds.), *Fuzzy Reasoning and its Applications*, London: Academic Press, 1981
- [12] G.A.Baxes, *Digital Image Processing*, Prentice-Hall, Inc., 1984
- [13] J.L.C.Sanz and E.B.Hinkle, "Computing Projections of Digital Images in Image Processing Pipeline Architectures," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Process.*, vol.ASSP-35, No.2, pp.198-207, Feb. 1986

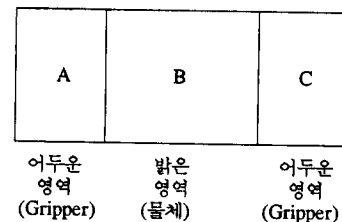


그림 1. Matched filter에 이용되는 패턴 (수직방향)
Fig. 1. Pattern to be matched (for vertical pieces).

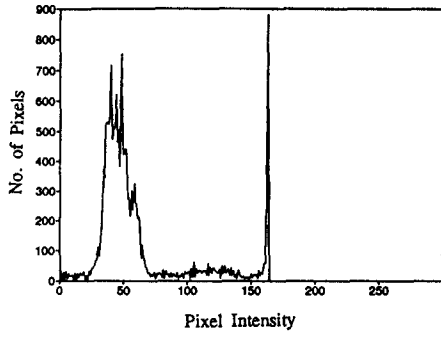


그림 2. 영상의 밝기 히스토그램
Fig. 2. Intensity Histogram of images

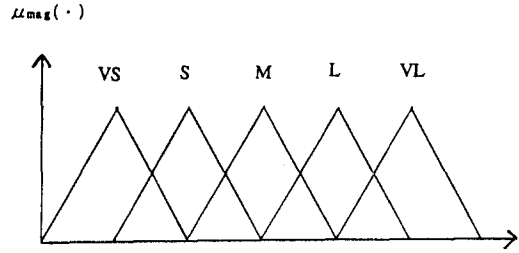


그림 6. 필터출력크기의 소속함수
Fig. 6. Membership Functions for Magnitudes of Filter Outputs

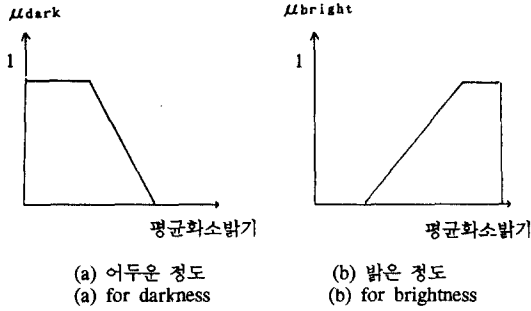


그림 3. 밝음과 어두움의 소속함수
Fig. 3. Membership functions for darkness and brightness

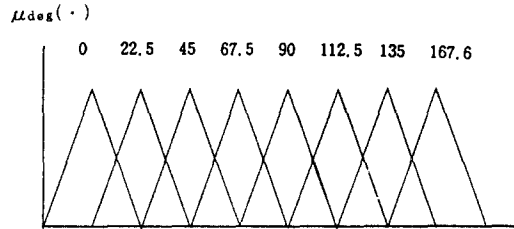


그림 7. 각도의 소속함수
Fig. 7. Membership Functions for Degrees

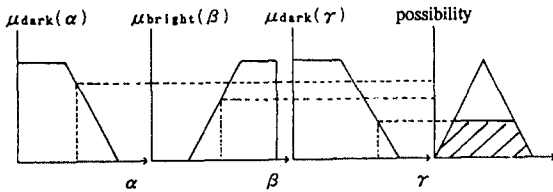


그림 4. 퍼지 추론의 그림표현
Fig. 4. Graphic representation of fuzzy reasoning

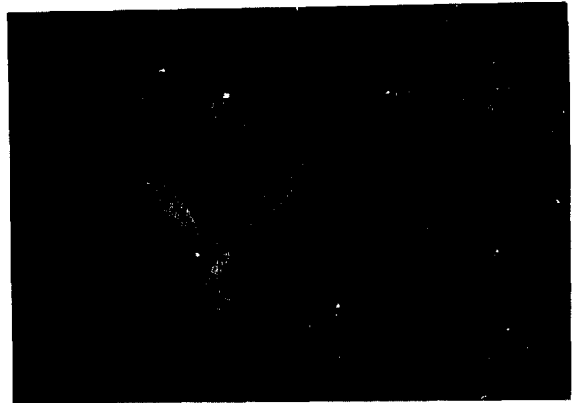


그림 8. 원영상
Fig. 8. Original gray-scale image

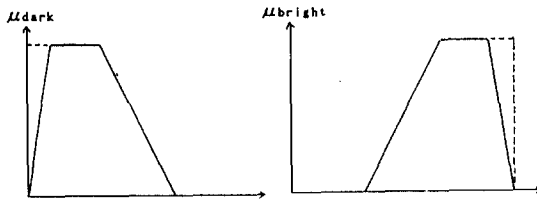


그림 5. 원치않는 밝기의 화소를 제거하기 위한 소속함수
Fig. 5. Membership function to exclude the excessive bright/dark pixels