

합성 HMT를 이용한 도로 속도 표지판 인식

현 영 길^{*} · 도 양 회^{**}

Road Speed Signboard Recognition Using Synthetic HMT

Young-Kil Hyun^{*} and Yang-Hoi Doh^{**}

ABSTRACT

In this paper, we proposed a method to recognize a speed limit signboard for autonomous road vehicles(ARV's) using the synthetic HMT(hit-miss transform). When images are acquired constantly by a camera of a car while ARV drives, it is difficult to detect the signboard in an instant. So, we set a limited range of distance between the camera and the signboard to have time enough to detect the signboard. However, signboard images which are acquired at each location in the limited range have different shapes each other. So, the synthetic HMT is used to detect each different shaped signboard at one time. Using the synthetic HMT, first signboards are detected and secondly signboard images are extracted. Finally speed limit numer is recognized from the extracted signboard images using the synthetic HMT again. Simulation results shows that the proposed method can be used for detection of signboard and recognition of speed limit in the limited range with only one HMT operation.

Key words : Hit-miss transform, Synthetic structuring element, ARV

1. 서 론

여러 가지 배경잡음(background noise)이나 전경잡음(foreground noise)을 갖는 특정 물체의 실시간 인식은 군사적인 목적 뿐 아니라 산업용으로도 매우 중요하다. 이러한 목적의 연구는 주로 디지털 컴퓨터를 이용한 수학적 접근 방법으로 이루어 지고 있어 실

제로 전경 및 배경 잡음을 갖는 물체를 실시간으로 인식하고자 할 경우 인식속도의 문제로 시스템 구현에 많은 어려움이 있다. 반면, 광의 빠른 처리 속도를 이용한 광신호처리는 광학 시스템의 2차원적 푸리에 변환 능력을 이용하여 영상의 실시간 인식 및 분류에 유리한 기능을 제공한다.

본 논문에서는 배경잡음이나 전경잡음을 갖는 제한 속도 표지판과 제한 속도를 인식하기 위하여 수리형 태학적 변환 알고리즘의 하나인 hit-miss 변환(HMT)을 이용하였으며, 이는 광상관 시스템을 이용하여 실시간으로 구현될 수 있다.¹⁾⁻⁶⁾ HMT는 hit 형태소(structuring element, SE)를 사용하여 특정물체

^{*} 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

^{**} 제주대학교 전자공학과

Dept. of Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ.

를 찾고, miss 형태소를 이용하여 물체의 배경을 찾으며, 이를 조합하여 물체가 입력영상내에 존재하는지를 판단하는 방법이다. 즉 HMT를 이용한 영상인식은 인식하고자 하는 영상과 물체주변의 배경을 함께 고려하므로 배경잡음이나 clutter를 갖는 영상인식에 적절하다.⁶⁾⁻⁹⁾ 그러나 관측자가 이동함에 따라 달라지는 모든 영상을 한번에 인식하기에는 부적절하다. 이 문제점을 해결하기 위해 왜곡된 모양의 영상을 한번의 HMT로 인식할 수 있는 SDF(synthetic discriminant function)로 합성된 합성 형태소(synthetic SE)를 사용하였다. 합성 hit 형태소와 miss 형태소는 제한된 범위에서 인식하고자 하는 영상들중 가장 작은 영상과 가장 큰 영상에 대한 hit 형태소와 miss 형태소의 ECP-SDF(equal correlation peak-SDF)로부터 구한다.^{10),11)} 이렇게 구한 합성 형태소를 이용하여 한번의 HMT 연산으로 제한된 범위에서 인식하고자 하는 영상을 인식할 수 있다. 이때, 입력영상에 인식하고자 하는 촬영상과 아주 유사한 거짓영상이 존재할 경우 오인식이 될 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 합성 형태소를 구할 때 MOF-SDF(mutual orthogonal function SDF)를 이용하여 분리해야 할 유사영상의 가중치계수를 "0"으로 하면 된다. HMT 연산은 hit 형태소와 입력영상의 상관 결과와 miss 형태소와 입력영상의 보영상의 상관 결과를 구하여 각각의 상관결과를 적절한 문턱치로 문턱화한 후 이들의 공통성분을 취하여 수행하므로 전통적인 4f 광상관기(optical correlator)를 이용하면 광학적으로 구현할 수 있다.^{8),9)}

제안한 속도 표지판 인식 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 배경 잡음 및 전경 잡음을 갖는 실영상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 표지판의 인식과 추출 및 속도 숫자의 인식이 가능함을 확인하였다.

II. Hit miss 변환(HMT)

HMT는 인식하고자 하는 영상을 형태소로 채택하여 입력영상내에 포함된 여러 가지 영상중 촬영상을 찾아낼 수 있고, 특히 배경잡음이나 전경잡음이 있는

입력영상에서 촬영상을 추출하는데 유용하다.

HMT를 수식적으로 표현하기 위하여 이진 입력영상을 X , 이진 hit 형태소를 H , 이진 miss 형태소를 M 이라 정의하고 $X \otimes (H, M)$ 로 표시하면

$$\begin{aligned} X \otimes (H, M) &= [(X \ominus H) \cap (X^c \ominus M)] \\ &= [(X \star H)_{Th_1} \cap (X^c \star M)_{Th_2}] \end{aligned} \quad (1)$$

와 같이 정의된다.^{5),6)} 여기서 \ominus 은 녹임(erosion) 연산자이다. 그리고 $X \ominus H$ 는 hit 변환(HT)이고, $X^c \ominus M$ 은 miss 변환(MT)이다. 이때 X^c 는 X 에 대한 보영상을 의미한다. \star 는 상관자(correlation operator)를 나타낸다. Th_1 과 Th_2 는 각각 hit 변환과 miss 변환을 문턱화할 때 사용되는 문턱치를 의미하고, Th_1 은 $(N_1 - 1) < Th_1 \leq N_1$, Th_2 은 $(N_2 - 1) < Th_2 \leq N_2$ 의 값이고, 여기서 N_1 과 N_2 는 각각 Hit 형태소와 Miss 형태소의 화소수이다. Hit 형태소 H 를 인식하고자 하는 영상으로 선택하면 HT 연산은 전경녹임(foreground erosion) 연산으로 형태소 H 보다 크거나 같은 물체를 찾아낸다. Miss 형태소 M 을 인식하고자 하는 영상과 주변을 포함한 부분의 보영상 H^c 로 선택하면 MT 연산은 H 보다 작거나 같은 크기의 물체를 찾아낼 수 있다. 따라서 HT와 MT 결과의 공통부분을 취한 HMT 연산은 입력영상내에서 형태소 H 와 일치하는 촬영상의 위치에서 상관침두치가 나타나게 된다. 일반적으로 HMT 연산에서는 M 이 반드시 H^c 일 필요는 없으며, 찾고자 하는 영상의 크기와 형태의 변화나 잡음성분에 따라 H 와 M 을 적절히 선택하면 된다.⁶⁾⁻⁸⁾

HMT 연산의 광학적 구현은 4f 광상관기를 이용하여 실현할 수 있다. 즉, hit 형태소와 miss 형태소의 푸리에 변환을 4f 광상관기의 필터평면에 두어 입력영상과 상관을 취한 후, 출력상관평면에서의 상관결과를 적절한 문턱치로 문턱화를 하여 이들의 공통성분을 취하면 된다. 문턱화과정에서의 문턱치는 물체의 왜곡이나 전경잡음 또는 배경잡음을 고려하여 녹임연산에서 정의된 문턱치보다 작은 값내에서 적절히 정해주면 된다.^{5),6)}

III. 합성형태소를 이용한 HMT

본 논문에서는 관측자가 이동하면서 획득한 크기가 서로 다른 형태의 제한 속도 표지판을 한번의 HMT 연산으로 동일하게 인식할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 크기가 서로 다른 형태의 표지판을 효과적으로 인식하기 위하여 HMT 연산에서 사용될 합성형태소는 SDF 합성법을 이용하여 구성하였다. SDF 알고리즘은 동일한 물체의 예곡 등에 강한 특성을 가지므로 이를 HMT에 적용함으로써 전경과 배경잡음에도 효과적일 뿐만아니라 물체의 예곡에도 강한 특성을 갖게 할 수 있다. SDF는 인식하고자 하는 영상과 분리하고자 하는 영상을 학습영상으로 하여 공간영역에서 적당한 가중치를 곱한 후, 이들을 선형조합하여 만든다. 이때 학습영상들에 곱해지는 가중치는 학습영상들간의 자기상관 첨두치(autocorrelation peak)와 상호상관 첨두치(crosscorrelation peak)로 만들어지는 상관행렬, 즉 VIP(vector inner product) 행렬의 역과 분리와 인식을 제한해 주는 제한벡터와의 곱으로 구한다.⁷⁾⁸⁾

합성 hit 형태소는 인식하고자 하는 참영상들을 학습영상으로 하여 ECP-SDF를 만들어 구성하고, 합성 miss 형태소는 인식하고자 하는 참영상의 보영상을 학습영상으로 하여 ECP-SDF를 만들어 구성한다. 예를 들어, 동일하게 인식하고자 하는 크기가 다른 참영상이 F_1, F_2, \dots, F_k 와 같이 k 개가 존재할 때, 합성 hit 형태소 H_{SDF} 와 합성 miss 형태소 M_{SDF} 는

$$H_{SDF} = \sum_{i=1}^k a_i H_i \quad (3)$$

$$M_{SDF} = \sum_{i=1}^k b_i M_i \quad (4)$$

와 같다. 여기서 H_i 는 i 번째 참영상의 hit 형태소이고, M_i 는 i 번째 참영상의 miss 형태소이며 아래와 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} H_i &= F_i \\ M_i &= F_i^c, \quad \text{where } i = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (5)$$

즉, hit 형태소는 동일하게 인식하고자 하는 참영상으로 하였고 miss 형태소는 참영상의 보영상으로 하였다. 그리고 a_i 는 합성 hit 형태소를 구성하기 위한 가중치벡터이고, b_i 는 합성 miss 형태소를 구성하기 위한 가중치벡터이며

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \mathbf{R}_{hit}^{-1} \mathbf{u} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{R}_{miss}^{-1} \mathbf{u} \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 구성하였다. 합성형태소를 구성할 때 사용된 가중치벡터 \mathbf{u} 의 요소는 k 개의 참영상을 동일영상으로 인식할 수 있어야 하므로 k 개의 "1"로 구성하였다. 그리고 VIP 행렬 \mathbf{R}_{hit}^{-1} 와 \mathbf{R}_{miss}^{-1} 은

$$\mathbf{R}_{hit}^{-1} = \begin{bmatrix} F_1 \star F_1 & F_1 \star F_2 & \dots & F_1 \star F_k \\ F_2 \star F_1 & F_2 \star F_2 & \dots & F_2 \star F_k \\ & & \vdots & \\ F_k \star F_1 & F_k \star F_2 & \dots & F_k \star F_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{miss}^{-1} = \begin{bmatrix} F_1^c \star F_1^c & F_1^c \star F_2^c & \dots & F_1^c \star F_k^c \\ F_2^c \star F_1^c & F_2^c \star F_2^c & \dots & F_2^c \star F_k^c \\ & & \vdots & \\ F_k^c \star F_1^c & F_k^c \star F_2^c & \dots & F_k^c \star F_k^c \end{bmatrix} \quad (8)$$

로 구성되며, 각 요소값은 상관결과의 첨두치이다. 이렇게 구성된 합성 hit 형태소와 합성 miss 형태소를 이용한 HMT는

$$\begin{aligned} &X \otimes (H_{SDF}, M_{SDF}) \\ &= (X \ominus \sum_{i=1}^k a_i H_i) \cap (X^c \ominus \sum_{i=1}^k b_i M_i) \end{aligned} \quad (9)$$

와 같다. 이와 같이 합성형태소를 이용하여 HMT 연산을 수행하면 HT에서 참영상과 크기가 같거나 큰 영상은 모두 인식되고, MT에서 참영상과 크기가 같거나 작은 영상은 모두 인식된다. 이렇게 인식된 상관결과에서 공통성분을 취하면 합성 hit 형태소와 합

성 miss 형태소를 만들때 사용된 학습영상과 같은 영상이 모두 인식된다.

만약, 입력영상에 촬영상과 유사한 모양의 거짓 영상이 존재하면 위에서 언급한 ECP-SDF로 합성한 형태소로는 인식이 불가능하다. 왜냐하면 HT와 MT 연산을 수행하면 유사영상이 존재하는 위치에서 상관 첨두치가 나타나게 되어 공통성분을 취하더라도 유사 영상이 분리되지 않고 촬영상과 같은 영상으로 오인식된다. 이를 해결하기 위해서는 합성형태소를 구성할 때 MOF-SDF 합성법을 사용하여 유사한 거짓 영상에 해당하는 제한벡터의 가중치를 "0"으로 하면 유사영상에 대한 상관 첨두치는 나타나지 않아서 촬영상과 유사영상을 분리인식할 수 있다.¹²⁾

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

4.1. 표지판 인식 및 추출

합성 HMT를 이용한 방법이 도로속도 표지판 인식에 적합한지를 평가하기 위해 관측자가 도로위를 주행하면서 획득한 표지판 영상들을 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

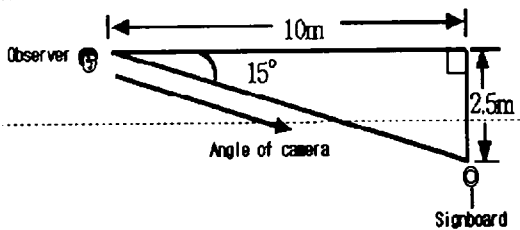


Fig. 1 Method for speed signboard acquisition on the road.

영상의 획득은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 15° 틀어진 방향으로 10m 거리를 기준으로 하였다. 이때 도로의 상황이나 자동차의 속도에 따라 오차가 생길 수 있으므로 본 연구에서는 10m에서 9m 사이의 표

지판을 인식하고 추출할 수 있도록 hit과 miss 형태소를 합성 하였다. 합성 hit 형태소 H_{SDF} 와 합성 miss 형태소 M_{SDF} 는 각각 표지판 테두리와 테두리 안쪽의 원주 모양을 선택하여 ECP-SDF로 만들어 구성하였다.

Fig. 2과 Fig. 3에서는 합성 HMT를 이용하여 배경 잡음과 clutter를 갖는 입력 영상들에서의 표지판의 인식과 추출을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 먼저 제한된 범위중 관측자와 표지판의 거리가 10m인 영상을 이용하여 표지판 인식과 추출을 하였고, 두번째는 9m인 영상을 이용하였고, 마지막으로 9.5m 영상을 사용하였다.

Fig. 2(a)와 (b)는 관측자와 표지판의 거리가 각각 10m, 9m인 입력영상들이다. Fig. 2(c)는 HT연산을 위하여 문턱화된 Fig. 2(a)의 이진 영상이고, 표지판의 검정 테두리 부분을 전경으로 사용하도록 이진화시켰다. Fig. 2(d)는 MT연산을 위한 Fig. 2(c)의 보 영상이다. Fig. 2(e)와 (f)는 각각 10m인 영상과 9m인 영상의 표지판들을 선택하여 ECP-SDF로 만들어 구성한 합성 hit 형태소와 합성 miss 형태소이다. Fig. 2(g)와 (h)는 각각 Fig. 2(e)와 (f) 영상과의 상관을 나타내었고, 표지판 가운데 위치에서 각각 상관 첨두치가 나타나는 것을 보인다. 상관 결과는 hit과 miss를 위하여 적당한 문턱치를 줌으로써 구할 수 있는데, 이를 Fig. 2(i)와 Fig. 2(j)에 나타내었다. 그리고 이 두 상관 결과의 교집합인 HMT의 최종 결과는 Fig. 2(k)에 나타내었다. 이는 표지판 인식을 나타내고 있으며, 인식 위치는 표지판 가운데임을 보이고 있다. 이 인식 위치를 중심으로 표지판을 추출하였고, 추출한 표지판은 Fig. 2(l)에 나타났다.

Fig. 3에서는 제한된 범위의 영상중 9m인 이진영상과 9.5m인 이진영상의 표지판들을 가지고 Fig. 2에서 사용한 것과 동일한 합성 형태소를 사용하여 HMT를 수행하였다. 이 두 영상의 HMT의 최종 결과인 Fig. 3(b)와 (e)에서 보듯이 표지판의 위치에서 "1"의 값을 가져 제한된 범위를 갖는 영상들의 표지판을 한번의 HMT 연산만으로 인식할 수 있음을 보여준다. Fig. 3(c)와 (f)에서는 인식된 위치를 가지고 저장된 이진 영상들에서 표지판 부분을 추출한 것을 보여준다. 위의 결과를 종합해 보면 제한된 범위에서

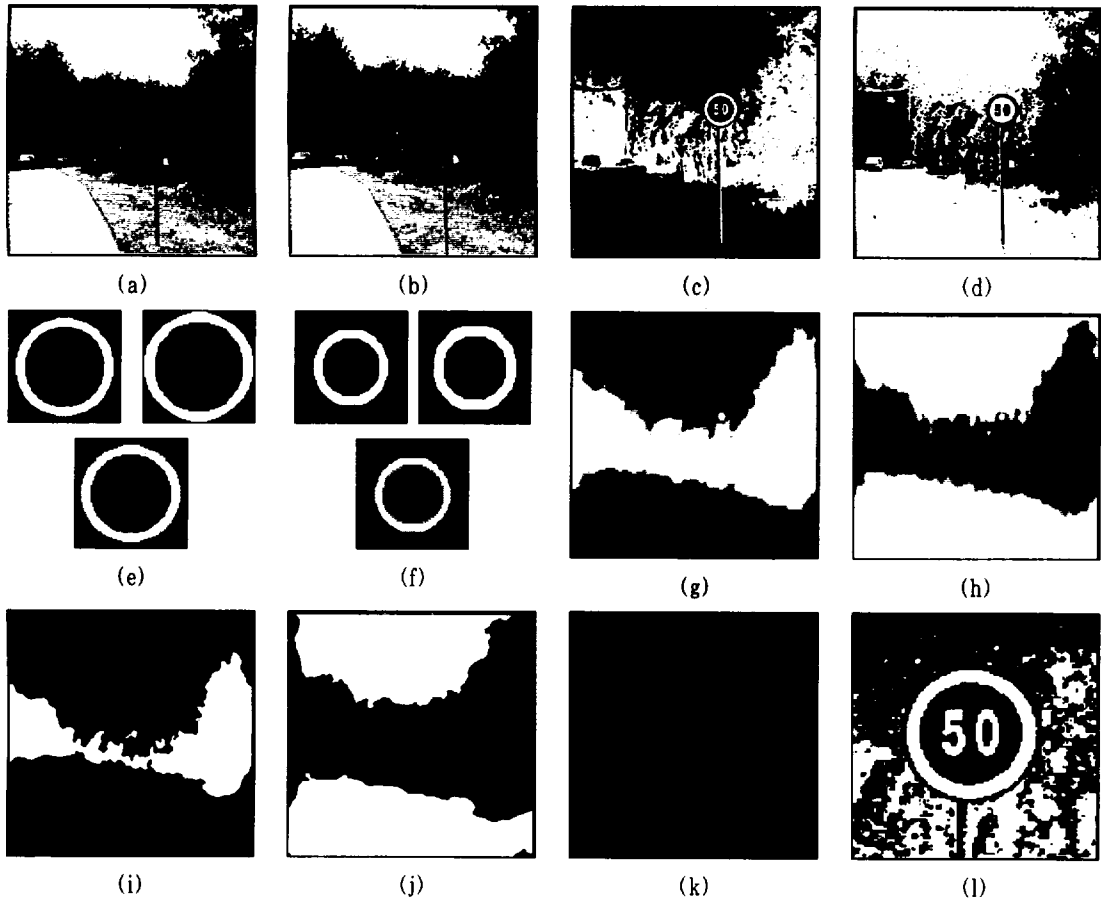


Fig. 2 HMT detection and extraction algorithm example for real image

(a) 10m input image (b) 9m input image (c) Thresholded (a) (d) Complement of (c)
 (e) Reference images and synthetic hit SE (f) Reference complement images and synthetic miss SE (g) Hit correlation (h) Miss correlation (i) Hit result (j) Miss result (k) HMT result (l) Extracted signboard

얻은 영상들의 크기가 달라진 표지판을 동일한 형태소를 이용하여 한번에 인식할 수 있어 제안한 방법이 자율주행차량이 주행하면서 표지판을 인식하기에 적합함을 알 수 있다

4.2. 표지판내의 제한속도 숫자 인식

제한된 범위의 영상들에서 추출한 표지판 영상은 모두 배경잡음을 갖고 있고, 숫자의 크기가 다르므로 이를 한번에 인식하기 위해서는 합성 HMT알고리즘이 효과적이다. 숫자 인식을 위해서도 표지판 인식에

사용한 알고리즘을 마찬가지로 이용하는 방법을 제안한다.

속도 표지판에는 0에서부터 9까지의 숫자가 들어 있다. 그리고 제한된 범위의 영상들에서 추출한 표지판내의 숫자는 크기가 다르고 배경 잡음을 갖고 있다. 이런 상황에서 숫자 인식에 사용되는 각 형태소들은 ECP-SDF필터를 이용하여 합성 형태소를 만들어 구성할 수 있다. 그리고 숫자 5와 6과 같이 비슷한 영상들은 왜곡이 심할 경우 오인식 할 경우가 생기게 된다. 이럴 경우는 크기가 다른 숫자 5와 6 모

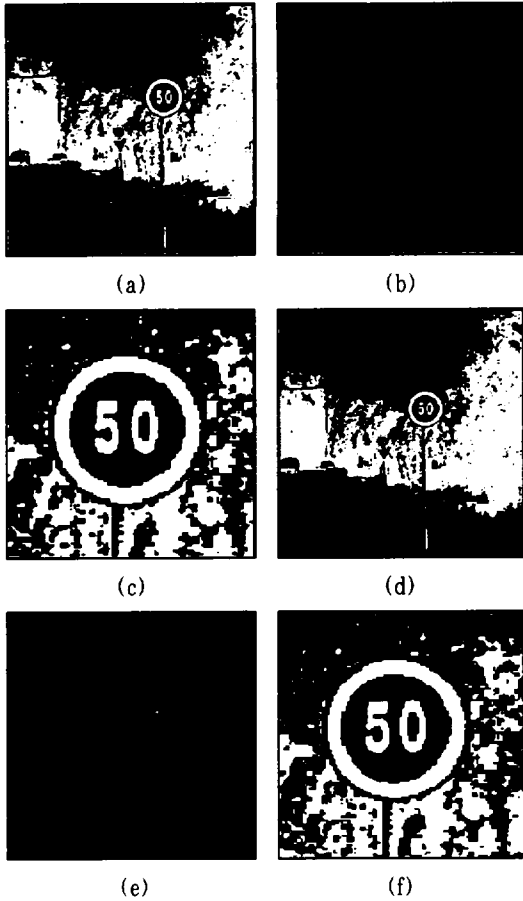


Fig. 3 HMT detection and extraction algorithm example for other real image
 (a) 9m thresholded image (b) HMT result of (a) (c) Extracted signboard
 (d) 9.5m thresholded image (e) HMT result of (d) (f) Extracted signboard

두를 학습 영상에 포함시켜 MOF-SDF필터를 이용한 합성 형태소를 사용하면 분리 인식할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에서는 제한된 범위의 영상들에서 추출한 3개의 표지판 영상을 가지고 제한한 방법이 배경 잡음을 갖는 숫자 인식에 적합한지를 알기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. Fig. 4(a)는 10m인 이진영상에서 추출한 표지판 입력 영상이다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 보영상이다. Fig. 4(c)는 10m인 영상과 9m인 영상에서 추출한 표지판 숫자 5들이고, 이

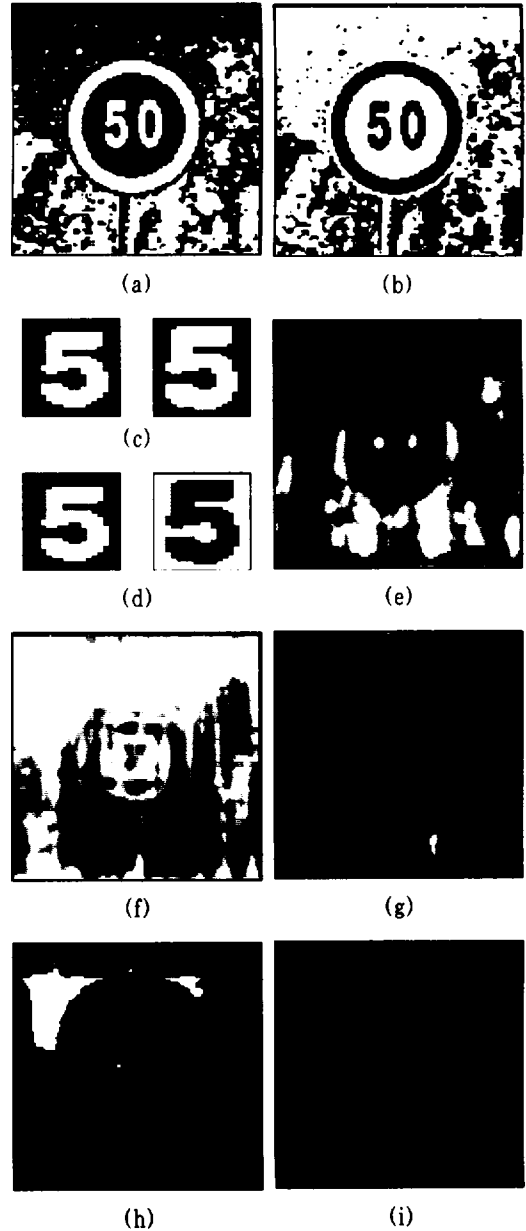


Fig. 4 HMT detection algorithm example for extracted signboard image
 (a) Fig. 2(l) image (b) Complement of (a) (c) Reference images (d) synthetic hit SE and miss SE (e) Hit correlation (f) Miss correlation (g) Hit result (h) Miss result (i) HMT result

들을 선택하여 ECP-SDF필터를 이용하여 합성한 hit 형태소와 miss 형태소를 Fig. 4(d)에 나타내었다. Fig. 4(e)와 (f)는 각각 Fig. 4(d)의 합성 hit 형태소와 합성 miss 형태소와의 상관관을 나타내었고, 숫자 5의 위치에서 각각 상관침두치가 나타나는 것을 볼 수 있다. 상관 결과는 hit과 miss를 위하여 적당한 문턱치를 줌으로써 구할 수 있는데, 이를 Fig. 4(g)와 (h)에 나타내었다. 그리고 이 두 상관 결과의 교집합인 HMT의 최종 결과는 Fig. 4(i)에 나타내었다.

Fig. 5에서는 제한된 범위의 영상중 9m인 이진영상과 9.5m인 이진영상에서 추출한 표지판들을 가지고 Fig. 4에서 사용한 것과 동일한 합성 형태소를 사용하여 HMT를 수행하였다. 이 두 영상의 HMT의 최종 결과인 Fig. 5(b)와 (d)에서 보듯이 숫자 5의 위치에서 "1"의 값을 가져 제한된 범위의 영상들에서 추출한 표지판을 한번에 인식하고 있음을 보여준다.

이는 제한된 범위에서 추출한 크기가 다른 숫자를 동일한 형태소를 이용하여 한번에 인식할 수 있어 제

안한 방법이 제한된 범위의 배경 잡음을 갖는 영상들에서 숫자 인식에 적합함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 배경잡음이나 clutter가 존재하는 입력 영상들에서 속도 표지판을 인식하기 위하여 합성 형태소를 사용한 HMT를 이용하는 방법을 제안하였다. SDF 필터를 이용한 합성 HMT는 제한된 범위에서 표지판의 인식과 추출 및 표지판 내의 숫자 인식을 가능하게 한다. 표지판의 인식과 추출은 제한된 범위의 기준 영상으로부터 얻은 원주 모양의 SDF 합성된 동일한 형태소를 이용하여 수행하였으며, 표지판 내의 숫자 인식은 크기가 다른 숫자를 기준 영상으로 하여 합성된 형태소를 이용하여 수행하였다.

제안한 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 배경잡음 및 전경 잡음을 갖는 실영상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 관측자가 도로위를 주행하면서 속도 표지판을 인식, 추출하고, 표지판 내의 속도 숫자를 인식할 수 있음을 보였다. 또한 이를 전통적인 4f 상관기와 공간 광변조기를 이용하여 광학적으로 구현한다면 실시간 인식을 가능하게 할 수 있으며, 장차 자율 주행 차량을 위한 제한 속도 인식용으로 사용될 수 있을 것이다.

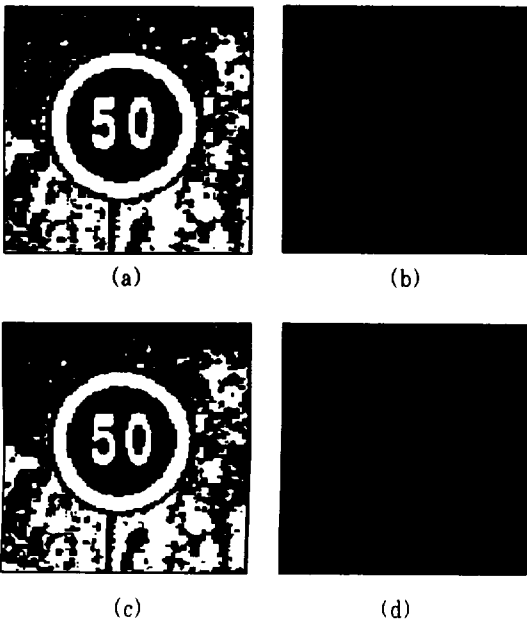


Fig. 5 HMT detection algorithm example for other extracted signboard image

(a) Fig. 3(c) image (b) HMT result
(c) Fig. 3(f) image (d) HMT result

참고문헌

- 1) David Casasent and Elizabeth Botha. 1988. "Optical symbolic substitution for morphological transformations." *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 18, pp. 3806-3810.
- 2) Elizabeth C. Botha and David P. Casasent. 1989. "Applications of optical morphological transformations." *Opt. Eng.*, Vol. 28, No. 5, pp. 501-505.
- 3) Schifu Yuan, Minxian Wu, Gang Cheng, and Guofan Jin. 1996. "Optical morphological hit-miss transform for pattern recognition of

- gray-scale image." *Proc. SPIE*, Vol. 2751, pp. 171-277.
- 4) Zhongbing Yao, Minxian Wu, Guofan Jin, Guoliang Huang, and Yingbai Yan. 1994. "Newoptoelectronic morphological scheme for multiple-object recognition." *Opt. Eng.*, Vol. 33, No. 11, pp. 3727-3732.
 - 5) Schifu Yuan, Minxian Wu, Guofan Jin, Yingbai Yan, and Jianhong Cai. 1995. "Optical implementation of morphological hit-miss transform using complementary encoding." *Proc. SPIE*, Vol. 2564, pp. 336-342.
 - 6) David Casasent, Roland Schaefer, and Rober Sturgill. 1992. "Optical hit-miss morphological transform." *Appl. Opt.*, Vol. 31, No. 29, pp. 6255-6263.
 - 7) Prabir Bhattacharya, Weibin Whu, and Kai Qian. 1995. "Shape recognition method using morphological hit-or-miss transform." *Opt. Eng.*, Vol. 34, No. 6, pp. 1718-1725.
 - 8) Roland Schaefer and David Casasent. 1995. "Nonlinear optical hit-miss transform for detection." *Appl. Opt.*, Vol. 34, No. 20, pp. 3869-3882.
 - 9) Roland Schaefer, David Casasent, and Anqi Ye. 1992. "Optical morphological processors : Gray Scale with Binary Structuring Elements, Detection, and Clutter Reduction." *Proc. SPIE*, Vol. 1825, pp. 427-442.
 - 10) David Casasent, W. Rozzi, and D. Fetterly. 1984. "Projection synthetic discriminant function performance." *Opt. Eng.*, Vol. 23, No. 6, pp. 716-720.
 - 11) David Casasent. 1984. "Unified synthetic discriminant function computational simulation." *Appl. Opt.*, Vol. 23, No. 10, pp. 1620-1627.
 - 12) 김종찬, 김정우, 이하운, 도양희, 김수중. 1998. "이동물체의 광학적 인식을 위한 합성 HMT" 전자공학회논문지, 제35권 3호, pp. 82~90.