카메라 모델링과 3차원 공간 분석에 기반한 CCTV 시스템 감시 성능의 정량적 평가

Quantitative Evaluation on Surveillance Performance of CCTV Systems Based on Camera Modeling and 3D Spatial Analysis

최경아¹⁾ · 이임평²⁾

Choi, Kyoungah · Lee, Imyeong

Abstract

As CCTVs are widely utilized in diverse fields, many researchers have continuously studied to improve the surveillance performances of a CCTV system. However, an quantitative evaluation approach about the surveillance performance has rarely been researched. Therefore, we set up the research for suggesting a quantitative evaluation approach to determine the effectiveness of CCTV coverages. We firstly defined the surveillance resolution as that varies according to object's positions and orientations. Based on the definition, we computed surveillance resolution values at all three-dimensional positions with the orientations of interests in the specified space. By comparing these values to the required reasonable resolution, we determined the surveillance performance index indicating how well a CCTV system monitor a target space for specific surveillance objectives. This proposed approach evaluates the surveillance performance of a CCTV system quantitatively, so as examines the CCTV system design before its installation based on precise 3D spatial analysis.

Keywords : CCTV, Surveillance Performance, Surveillance Resolution, Quantitative Index

초 록

다양한 분야에서 CCTV가 널리 활용되고 있으며, CCTV의 감시 성능을 개선하기 위한 노력들이 지속되고 있다. 그러나, 정작 감시 성능을 정량적으로 평가하는 방법은 상당히 미비하다. 이에 본 연구는 CCTV 시스템이 대상 공간을 주어진 감시 목적에 부합하게 잘 감시하는가를 정량적으로 평가하는 방법을 제안한다. 먼저 대상 공간의 특정한 위치에서 특정한 방향을 바라보는 객체가 CCTV로 얼마나 정밀하게 관측되는 가를 정량적으로 나타내는 감시 해상도를 정의한다. 정의된 감시 해상도를 대상 공간에서 관심 있는 모든 위치와 방향에 대해 계산하여 감시 목적에 따라 요구되는 최적의 해상도 이상이 성취되는 비율로써 대상 공간에 대한 감시 성능 지수를 산출한다. 제시된 방법을 적용하여 대형 건물 지하주차장에 설치된 CCTV 시스템의 감시 성능을 평가하고 가시화하여 분석하고 개선하는 사례를 기술한다. 제안된 방법은 대상 공간이 감시 목적에 맞게 효과적으로 감시되고 있는지 정량화하여 평가하고, 대상 영역을 요구 성능으로 감시하기 위한 CCTV 시스템 설계의 최적화에 기여한다.

핵심어 : CCTV, 감시 성능, 감시 해상도, 정량적 지표

Received 2014. 03. 21, Revised 2014. 04. 23, Accepted 2014. 04. 30

1) Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail : shale@uos.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail: iplee@uos.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

TV(Television)은 크게 개회로시스템(open circuit system)과 폐회로시스템(closed circuit system)으로 나눌 수 있다. 개회로시스템은 영상 정보를 불특정 다수에게 전달하는 것을 목적으로 하고, 일반적인 TV 방송이 이에 속한다. 반면, 폐회로시스템은 영상 정보를 특정의 목적으로 특정 사용자에게만 전달하는 방식으로 CCTV(Closed Circuit Television)가 이에 해당한다. CCTV는 영상의 송수신을 위하여 유선 또는 무선으로 연결하여 특정한 대상 이외에는 영상을 임의로 수신할 수 없도록 되어있으며, 1990년대 영국에서 안전 및 방범 목적으로 사용되기 시작하였다(Ji, 2010). CCTV를 도처에 설치함으로써 인해 사생활침해가 우려되고, 설치비용 대비 효율성에 대한 논의는 끊임없이 이루어짐에도 불구하고(Harris *et al.*, 1998; Smithsimon, 2003), 범죄 예방 및 대처, 교통 모니터링, 보안 등에 있어 매우 중요한 역할을 하고 있기 때문에 그 활용이 급격히 확대되어 왔다(Teague *et al.*, 2010). 현재 국내에서는 서울시의 구청과 지방자치단체에서 독립적으로 CCTV 통합관제센터를 운영하고 있으며, CCTV 영상에 녹화된 범행 장면을 이용하여 범인을 검거하는 등의 뉴스를 쉽게 접할 수 있다(Seo *et al.*, 2012). 또한, 대형 쇼핑몰, 아파트 단지, 지하 주차장 등의 실내의 공간에 CCTV를 설치함으로써 절도, 폭행, 사기와 같은 범죄 예방 효과를 얻을 수 있다는 연구 결과도 있다(Chang, 2009). 국외에서는 범죄 분야 이외에도 CCTV 영상을 철도역사 근로자들이 플랫폼에서 승객들의 안전을 보호하고 이상행동을 하는 승객들을 감시하는 데 활용하기도 하였으며, 병원에서 환자들을 모니터링하는 데 활용하기도 하였다(Goold, 2004; Teague and Leith, 2008).

CCTV의 감시 및 모니터링 성능이 널리 인지되어, 사회적 약자들의 사회활동과 생활안전을 위한 편의 증진, 안전사고 및 범죄 예방 등 수많은 사회적 문제들을 해결하기 위하여 CCTV 기반의 주택가 및 공공시설의 안전감시를 위한 모니터링 체계 구축이 제안되었다(Kim, 2013). 이에 따라 가능한 많은 곳에 CCTV를 설치하여 사각지대를 줄이고, 기존에 설치된 CCTV의 사양을 업그레이드하여 감시 및 모니터링 성능을 개선하기 위해 노력하였다(Park, 2013). 이와 같은 하드웨어 측면의 성능 개선 이외에도 CCTV 영상 분석을 통하여 이상행동을 하는 사람을 탐지 및 트래킹하거나, GIS를 기반으로 목적에 부합하는 CCTV의 최적 위치 선정과 같이 소프트웨어적으로 신기술과 융합을 통하여 감시 성능을 향상시키고자 한다(Ha, 2012; Cho, 2012). 그러나 정작 CCTV의

감시 성능에 대한 평가에 있어서는 대상 영역이 CCTV에 관측되는지 아닌지에 따라 사각지대의 비율을 산출하는 정도로 정량적인 지표가 부재한 현실이다. 이와 같은 대상영역의 관측여부에 대한 판단 역시도 실내의 공간의 2차원 평면도에 대략적인 CCTV 위치를 배치하고 카메라의 화각(FOV, Field of View)을 고려한 작도로 초보적인 수준에 그치고 있다. 이는 3차원 공간에 대한 분석이 아니기 때문에 CCTV 설치 후 취득되는 영상에 있어서 CCTV 영상 간의 불필요한 중복 커버리지 또는 사각지대가 발생할 확률이 높다.

최근 건설 분야에서는 BIM(Building Information Modeling) 기술의 발전으로 건물 공간의 물리적 특성과 기능적 특성을 함께 디지털 포맷으로 표현할 수 있게 되었다(Park *et al.*, 2011). 이에 따라 실내 공간에 있어서는 BIM 소프트웨어를 이용하여 3차원 모델을 생성하고 이를 가시화하는 것이 용이해졌다(Kim and Shin, 2011; Eastman *et al.*, 2011). BIM 모델 상에서 관측 지점 및 방향(viewpoints)을 다양하게 바꿔가며 모델을 가시화할 수 있기 때문에, BIM을 기반으로 CCTV의 커버리지를 시뮬레이션 하여 감시 성능을 확인할 수 있을 것이라는 아이디어가 제안 및 검증되기도 하였다(Wang *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013). 이와 같은 방법을 통하여 CCTV 설치 전에 CCTV의 커버리지를 3차원으로 도식화해봄으로써 중복 커버리지를 효과적으로 방지할 수 있었지만, 여전히 대상 영역에서 객체를 식별 가능한 해상도로 얼마나 완벽하게 감시할 수 있는지에 대한 평가는 불가능한 상태이다. 예를 들어, 범피용의자를 파악하기 위하여 범죄 현장에 설치된 CCTV 영상을 확인해보았더니 용의자의 얼굴이 포착된 영상이 없거나 얼굴이 나타난 영상이 있더라도 얼굴인식이 가능한 해상도에는 미치지 못할 수 있다. 이는 감시 영역에 설치된 CCTV의 위치와 방향뿐만 아니라 감시하고자 하는 객체의 위치와 객체 표면이 향하는 방향에 대한 고려가 없이 CCTV 감시 성능을 판단하고 설치하였기 때문이다. 이처럼 객체의 위치와 방향에 따라 CCTV 영상 상에 어느 정도로 자세히 보이는 지가 다르다는 사실에 착안하여, 본 연구에서는 CCTV 카메라들에 의한 감시면적, 객체의 위치 및 방향을 고려하여 구획별로 감시 성능을 정량화하고 이를 시각적으로 표현하기 위한 방법론을 제안하고자 한다.

2. 감시 성능 평가를 위한 정량적 지표

설치된 CCTV에 의하여 공간이 얼마나 효과적으로 감시되고 있는지, CCTV의 감시 성능을 평가하기 위해서는 Fig. 1에서와 같이 CCTV 카메라의 내·외부 특성과 관련된 카메라

라 변수(c), 객체의 위치(p), 객체의 방향(n)을 입력으로 본 연구에서 제안하는 정량적 지표들에 기반하여 감시 성능 지수를 산출한다.

Fig. 1. Input and output of the proposed surveillance performance evaluation process

감시 성능 평가를 위한 정량적 지표로는 (1) 특정 3차원 위치에서 객체의 방향에 따른 감시 해상도와 (2) 공간 내 모든 위치에서 감시 해상도를 고려한 감시 성능이 있으며, 각각은 다음과 같이 정의하였다.

2.1 감시 해상도

객체가 영상 상에 투영되었을 때, 객체가 어느 정도로 자세히 표현되었는가를 평가하는 지표로는 4가지 해상도가 있으며, 각각은 공간(geometric), 복사(radiometric), 분광(spectral), 시간(temporal) 해상도이다. 이 중에 영상으로부터 객체의 위치 및 형태 등과 같은 기하학적 특성을 파악하는 과정에 있어서는 영상의 공간 해상도가 가장 큰 영향을 미친다. 영상의 공간 해상도는 주로 영상 상의 단위 길이 또는 한 픽셀(pixel)에 투영되는 지상 상의 길이를 의미하는 GSD(Ground Sampling Distance)로 표현된다. 이와 같은 맥락에 따라 CCTV의 감시 성능은 관측하고자 하는 객체를 얼마의 GSD로 살펴볼 수 있는가로 판단할 수 있을 것이다. 따라서 감시 영역 내 임의의 길이가 CCTV 영상 상에 얼마의 길이로 투영되었는가를 계산하고, 이 수치를 감시 해상도로 정의하여 감시 성능을 평가하는 데 활용하고자 한다.

CCTV 카메라의 초점거리, 주점의 위치, 왜곡변수 등과 같은 내부특성을 나타내는 내부표정요소와 CCTV 카메라 위치, 자세를 나타내는 외부표정요소를 포함하는 카메라 변수, 객체의 위치와 방향을 알고 있다고 가정하자. 카메라 변수는 공간 내 CCTV 설치 직후, 취득 영상과 기준데이터를 활용하여 셀프 캘리브레이션(self-calibration)과 같은 카메라 모델링 과정에 의하여 산출될 수 있으며, 동일 카메라로부터 취득된 영상에 대해서는 산출된 카메라 변수를 상수로 적용할 수 있다. 따라서 감시 영역 내 특정 위치에 특정 방향을 향하고 있는 객체에 대한 하나의 카메라에 의한 감시 해상도(r_{ijk})는 Fig. 2를 참고하여 실제 객체(A)가 위치하는 표면에서의 단위 길이 dL 과 dL' 이 영상으로 투영된 길이 dI 의 비율로 Eq. (1)과 같이 정의할 수 있다. A 의 위치(p_i)에 의하여 CCTV 카메라

라의 투영의 중심으로부터 객체까지의 수직거리(H_{ik})와 광학축으로부터 벗어난 각(α_{ik})이 결정되고, 방향(n_j)에 의하여 A 의 실제 방향(n_j)과 가장 높은 해상도로 CCTV 영상 상에 관측될 수 있는 방향(n_{ik}^{max})간의 사잇각(β_{ijk})이 결정된다. n_j 와 n_{ik}^{max} 는 각각 A 가 실제 위치하는 표면의 법선벡터(normal vector), A 가 가장 높은 해상도로 영상 상에 투영될 수 있는 표면의 법선벡터와 같다. f_k 는 카메라 모델링 과정에 의하여 산출된 카메라의 초점거리이다.

$$\begin{aligned} r_{ijk} &= f(p_i, n_j, c_k) = \frac{dI}{dL} = \frac{\cos \beta_{ijk}}{dL'} \frac{dL'}{\cos \alpha_{ik}} \\ &= \frac{\cos \beta_{ijk}}{\cos \alpha_{ik}} \frac{f_k}{H_{ik}} \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 2. Definition of surveillance resolution

동일한 위치에 객체가 존재하더라도 객체가 바라보는 방향이 n_{ik}^{max} 이라면 최대의 해상도로 영상 상에 A 가 나타나지만, n_{ik}^{max} 을 법선벡터로 하는 평면을 기준으로 β_{ijk} 만큼 기울어진 표면에 A 가 존재할 때 그 해상도는 최대 해상도보다 낮은 해상도로 영상 상에 나타날 것이다. β_{ijk} 의 크기가 점점 커져 90° 에 이르면 객체는 n_{ik}^{min} 의 방향을 바라보는 상황이 되어 영상 상에서 관측이 불가능해질 것이다. 또한, β_{ijk} 가 90° 보다 큰 경우에 대해서는 감시 해상도가 음의 부호를 갖게 되지만 이는 감시하고자 하는 객체면의 반대 방향이 영상 상에 투영되는 경우와 같다. 예를 들면, 범죄 용의자의 얼굴을 관측하고 싶으나 CCTV 영상 상에는 용의자의 뒷모습만 관측되는 경우이다. 이때의 감시 해상도는 의미가 없으므로 음의 해상도 대신에 0으로 감시 해상도를 결정한다.

Eq. (1)와 같이 특정 위치에서 특정 방향을 바라보는 객

체에 대한 감시 해상도를 결정하기 위해서는 $\alpha_{ik}, \beta_{ijk}, H_{ik}$ 을 알아야 한다. 카메라 모델링과 감시 영역의 공간 모델링을 통하여 CCTV 카메라의 내·외부표정요소와 객체의 위치와 방향을 알고 있다고 가정하였으므로, 이를 이용하여 $\alpha_{ik}, \beta_{ijk}, H_{ik}$ 을 다음과 같이 산출할 수 있다. 우선 동일한 3차원 공간좌표계를 기준으로 표현되는 카메라의 외부표정요소($X_{ck}, Y_{ck}, Z_{ck}, \omega_{ck}, \phi_{ck}, \kappa_{ck}$)와 객체의 위치 $p_i(X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi})$ 로부터 객체에서 카메라 투영의 중심까지의 거리(D_{ik})와 카메라 광학축의 단위벡터(u_{ck})를 계산한다. 이를 이용해서 CCTV 카메라를 통해 객체가 가장 높은 해상도로 관측될 수 있는 표면의 법선 벡터 n_{ik}^{max} 를 Eq. (2)처럼 계산한다.

$$n_{ik}^{max} = \frac{1}{D_{ik}} [X_{ck} - X_{pi}, Y_{ck} - Y_{pi}, Z_{ck} - Z_{pi}] \quad (2)$$

다음으로 CCTV 카메라의 광학축으로부터 객체가 벗어난 각, off-axis angle α_{ik} 는 Eq. (3)와 같은 관계를 이용하여 결정하고, 이로부터 Eq. (4)처럼 H_{ik} 를 계산한다. 또한, 객체가 실제 위치하는 표면과 CCTV 카메라를 통해 객체가 가장 높은 해상도로 관측될 수 표면이 이루는 각 β_{ijk} 는 Eq. (5)과 같은 관계로부터 결정할 수 있다.

$$\cos \alpha_{ik} = n_{ik}^{max} \cdot u_{ck} \quad (3)$$

$$H_{ik} = D_{ik} \cos \alpha_{ik} \quad (4)$$

$$\cos \beta_{ijk} = n_{ik}^{max} \cdot n_j \quad (5)$$

한 대의 CCTV 카메라와 한 개의 객체 간의 상대적인 위치와 자세에 의하여 Eq. (3)~(5)과 같이 $\alpha_{ik}, \beta_{ijk}, H_{ik}$ 가 달라지고, 이에 따라 Eq. (1)과 같이 정의되는 감시 해상도가 달라질 것이다. 그러나 보통은 CCTV 감시 영역 내 다수의 카메라가 설치되고, 경우에 따라 하나의 객체가 다수의 카메라 영상에 나타날 수 있다. 해당 객체에 대한 감시 해상도는 각각의 CCTV 카메라와 객체 간의 상대적인 위치와 자세에 의하여 결정되기 때문에 각각의 카메라 영상마다 다른 감시 해상도가 성취될 것이다. 한 개의 객체가 서로 다른 감시 해상도로 다수의 카메라 영상에 나타나더라도 그 객체에 대한 감시 해상도는 다양한 감시 해상도 중 가장 큰 값으로 정의할 수 있다. 이와 같은 사실을 고려하여, 다수의 카메라로 구성되는 CCTV 시스템의 감시 영역 내 하나의 객체의 위치와 방향에 따른 감시 해상도(r_{ij})는 최종적으로 Eq. (6)과 같이 표현할 수 있다. l 은 CCTV 시스템의 총 카메라 개수를 의미한다.

$$r_{ij} = \max(r_{ijk} | 1 \leq k \leq l) \quad (6)$$

2.2 감시 성능

공간 내 객체의 위치와 방향에 따라 $\alpha_{ik}, \beta_{ijk}, H_{ik}$ 가 결정되고, 이에 의해 객체에 대한 감시해상도 r_{ij} 가 산출된다. CCTV에 의해 감시가 얼마나 잘되고 있는지 평가하고자 하는 공간에 대한 감시 성능(η)은 공간 내 모든 위치에서, 객체의 방향에 따른 감시해상도를 산출하여 그 감시해상도가 일정한 임계값(r_{th}) 이상이 되는 비율을 Eq. (7)와 같이 산출하여 정량화할 수 있다. n 은 대상 공간에서 샘플링된 위치의 개수이며, m 은 특정 위치에서 객체가 취할 수 있는 방향의 개수이다. 여기서 $N()$ 은 가로 안의 조건을 만족하는 샘플의 개수를 의미한다.

$$\eta = \frac{N(r_{ij} \geq r_{th})}{n \times m} \quad (7)$$

감시해상도를 기반으로 관심 영역에 대한 감시 성능 지수를 산출할 때, 중요한 것은 대상 공간 전체 범위를 포함하면서 객체가 존재할 수 있는 3차원 위치와 각각의 위치에서 객체가 바라볼 수 있는 방향을 샘플링(sampling)하는 것이다. 공간에서 3차원 위치에 대한 샘플링은 공간상에 임의의 3차원 직교좌표계를 정의하고 각 축을 따라 일정 간격으로 분할하여 Fig. 3와 같이 3차원 격자를 형성하는 것이다. 공간 내 형성된 모든 3차원 격자의 위치 즉 $p_i = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 에서 감시해상도를 정의할 수 있다. 예를 들어, $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ 크기의 공간 내 각 축 방향으로 10 cm 간격으로 위치에 대한 샘플링을 수행하면, 총 1,000 개의 위치가 정의될 수 있다.

Fig. 3. Three dimensional grid

임의의 3차원 위치에서 객체가 바라볼 수 있는 방향은 수평범위로 360° , 수직범위로 180° 이며 이에 대한 입체각(solid

angle)은 4π 이다. 이 모든 범위를 포함하도록 방향에 대한 샘플링을 위하여 임의의 3차원 위치를 중심으로 Fig. 4와 같이 일정한 수평각과 고도각으로 분할한다. 임의의 위치에서 객체가 취할 수 있는 방향 즉 $n_j = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 에서 감시해상도를 정의할 수 있다. 예를 들어, 1° 의 간격으로 방향에 대한 샘플링을 수행한다면, 한 위치마다 취할 수 있는 방향은

Fig. 4. Horizontal and vertical angle system (sampling interval: 45°)

총 $360 \times 180 = 64800$ 개이다. 샘플링된 방향의 개수를 줄이기 위하여 수평각과 고도각 간격을 $10^\circ, 45^\circ$ 를 늘린다면, 각각 648개, 32개의 방향이 정의될 수 있다. 1 m^3 공간 내 정의되는 1,000개의 위치마다 $8 \times 4 = 32$ 개의 방향에 대한 감시해상도를 산출하더라도 총 연산 횟수는 32,000번에 이른다.

이와 같이 특정 위치에서 모든 방위로 일정한 수평각과 고도각으로 방향에 대한 샘플링을 수행할 때, 정의된 방향을 직관적으로 인지하는 것이 용이하다는 장점이 있지만, 정의된 개별 방향이 커버하는 입체각이 모두 동일하지 못하다는 단점이 있다. 고도각이 커질수록 개별 방향이 커버하는 입체각은 작아진다. 정의된 모든 방향이 동일한 크기의 입체각의 범위를 대표하도록 하기 위하여 특정 위치를 중심으로 하는 구에 내접하는 정다면체의 꼭짓점 또는 개별 면의 중심점을 고려할 수 있겠다. 정다면체는 정사면체, 정육면체, 정팔면체, 정십이면체, 정이십면체로 총 5가지이며 각각이 갖는 꼭짓점과 면의 개수는 Table 1에서와 같다. 예를 들어, 특정 위치를 중심으로 하는 구에 내접하는 정이십면체를 가정하고, 중심으로부터 각각의 정이십면체 꼭지점으로 향하는 방향에 대하여 샘플링을 수행한다면, 샘플링된 방향은 12개로 줄고 모든 방향이 대표하는 입체각의 크기도 동일해질 것이다.

Table 1. Vertex and face number of regular polyhedrons

tetrahedron		hexahedron		octahedron

vertex	face	vertex	face	vertex	face
4	4	8	6	6	8

dodecahedron		icosahedron

vertex	face	vertex	face
20	12	12	20

3. 감시 성능 평가 및 가시화

2장에서 정의된 감시 해상도와 감시 성능을 활용하여 Fig. 5과 같은 절차에 따라 CCTV에 의한 대상 공간의 감시 성능 평가를 수행한다. 감시 성능을 평가하고자 하는 대상 공간에 대한 3차원 모델과 CCTV 카메라의 내·외부특성을 나타내는 변수를 이용하여 감시 대상 영역을 정의한다. 다음으로 대상 영역의 전체 범위를 포함하도록 영역 내 3차원 위치를 샘플링하고, 개별 위치마다 객체의 방향을 명시할 수 있도록 방향에 대한 샘플링을 수행한다. 이어서 Eq. (1)으로부터 샘플링을 통해 정의된 모든 위치에서 객체의 방향에 따른 감시 해상도를 산출한다. 마지막으로 Eq. (7)로부터 목표 성능을 기준으로 대상 공간에 대한 감시 성능 지수를 산출하여 감시 성능 평가를 수행한다. 본 장에서는 대상 공간에 대한 감시 성능을 산출하는 예시를 통하여 감시 성능 평가 절차에 대한 이해를 돕고자 한다. 이때, CCTV 카메라의 내부특성에 관한 변수로써, 초점길이, 픽셀크기, 감지기(detector) 크기는 각각 10 mm, 5 μ m, 4000 $\times$ 3000로 가정하였다.

Fig. 5. Process of performance evaluation

일상 공간에서 가장 쉽게 CCTV 시스템을 발견할 수 있는 곳은 아파트나 여타 건물들의 지하주차장이다. 따라서 제안된 감시 해상도의 개념을 기반으로 공간에 대한 감시 성능을 평가하기 위한 대상 공간으로써 일반적인 주차 공간의 구성과 주차 구역의 크기를 참조하여 Fig. 6과 같은 지하주차장을 모의 생성하였다. 생성된 주차장의 평면적은 104.1 $\times$ 34 m^2 이고, 높이는 3 m이다. 또한, 지하주차장 내 CCTV는 주로 자동차나 사람이 이동하는 통로를 따라 천장에 서로 반대방향을 바라보도록 쌍으로 설치되는 점을 반영하여 개별 CCTV

카메라의 위치 및 방향을 정하였다. 이때 카메라 쌍 간의 거리는 x 축 방향으로 약 20 m, y 축 방향으로 17 m이며, y 축 방향으로 각각 $\pm 12^\circ$ 씩 회전되어 설치된 것으로 가정하였다.

Fig. 6. Arrangement of CCTV cameras in an underground parking area

정의된 공간 내에서 객체가 존재할 수 있는 위치는 50 cm 간격의 3차원 격자점마다 샘플링하고, 객체가 바라볼 수 있는 방향은 수평각·고도각 체계에서 90° 마다 샘플링하여, 지하주차장에서 임의의 객체가 가질 수 있는 위치와 방향에 대하여 배치된 CCTV 카메라를 통하여 관측되는 감시해상도를 산출하였다. Fig. 7는 객체가 바닥에 위치하면서($z=0$) 천장을 바라볼 경우, 배치된 CCTV 카메라 영상 상에 0보다 큰 감시해상도로 관측될 수 있는 객체의 수평위치를 표현한 것이다. 총 14421 개 중, 10138 개의 바닥 위치가 CCTV 영상 상에 관측되어, 바닥면의 약 70.3 %가 감시영역으로 산출되었다. 이와 같은 감시 성능 평가 결과는 기존의 2차원 평면도 상에 개별 CCTV 카메라의 커버리지를 작도하여 사각지역을 산출하는 방식의 결과와 유사하다.

Fig. 7. Areas with surveillance resolution greater than 0 when objects are on the bottom and their orientations are upper vertical (white: resolution > 0 pixels/cm, black: resolution = 0 pixels/cm)

예를 들어, 주차장을 통해 침입했던 범죄용의자의 신원을 CCTV 카메라 영상으로부터 파악하고자 한다면, 용의자가 영상 상에 나타나야함은 물론 영상으로부터 용의자의 얼굴 인식이 가능해야 할 것이다. 그러나 기존의 평면도 기반의 사각지역 산출에 의한 감시 성능 평가로는 이와 같은 목적 달성 여부를 가늠할 수 없다. 사용되는 CCTV 카메라의 특성변수에 따라 차이는 있겠지만, 보통 CCTV 영상으로부터 세부적으로 객체를 감시하고자 한다면 60 pixels/ft, 일반적인 감시를 위해서는 20 pixels/ft의 해상도가 요구된다고 한다(Theia Technologies, 2009). 따라서 CCTV 영상으로부터 일면식이 없는 용의자의 이목구비를 구체적으로 인지하기 위해서는 감시해상도가 약 2 pixels/cm 이상이어야 한다. Fig. 8은 객체가 연직상방을 바라본다고 가정할 때, 공간 내 바닥면에서의 감시해상도를 표현한 것이고, Fig. 9은 이로부터 감시해상도가 2 pixels/cm 이상 성취되는 바닥면에서의 위치를 나타낸 것이다. 이 결과는 총 14421 개 중, 3678 개의 위치에서 2 pixels/cm 이상의 해상도가 나타난 것으로, 용의자의 얼굴이 바닥 높이에 있을 때 약 25.5 %의 비율로 관측이 가능하다는 것을 의미한다. 이처럼 제안된 CCTV에 의한 감시 성능 평가 방법을 통하여 CCTV 영상이 감시 목적 달성을 위한 해상도를 어느 정도의 비율로 성취할 수 있는지 판단할 수 있게 된다.

Fig. 8. Surveillance resolutions when objects are on the bottom and their orientations are upper vertical (blue: resolution = 0 pixels/cm, red: resolution = 8 pixels/cm)

Fig. 9. Areas with surveillance resolution greater than or equal to 2 pixels/cm when objects are on the bottom and their orientations are upper vertical (white: resolution ≥ 2 pixels/cm, black: resolution < 2 pixels/cm)

뿐만 아니라 제안된 방법은 감시 대상 객체의 기하학적 특성 및 이동 경향을 반영하여 공간에 대한 3차원 정밀 감시 성능 평가를 수행할 수 있도록 한다. 예를 들어, Fig. 6에서 붉은색으로 표현된 영역은 주차장에서 건물로 사람이 진입할 수 있는 에스컬레이터나 승강기가 위치하여, 보다 면밀한 감시가 요구되는 영역이다. 이러한 특정 영역에 대하여 현재 범죄 예방 및 대처에 있어서 CCTV 감시 성능이 얼마나 취약한지 확인해 볼 수 있다. 감시 성능 평가 대상 공간은 대상 영역의 수평적 전체 범위에서 수직적으로 200 cm 이하로 한정하였으며, 대상 객체의 방향은 전체 방위로 설정하였다. 이와 같은 범위 내에서 객체의 위치에 대한 샘플링 간격은 40 cm, 객체의 방향에 대한 샘플링 간격은 30°로 설정하여 위치와 방향에 따른 감시해상도를 산출하였다. Fig. 10은 객체가 연직상방으로 향하고 있을 때, 객체의 높이에 따른 평면 위치에서의 감시해상도를 나타낸 것이다. 객체의 높이가 높아짐에 따라 대상 영역에 대한 감시 성능이 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 기존 방식처럼 붉은 영역의 평면 도면에 CCTV 카메라의 화각을 고려하여 커버리지를 산출한다면 Fig. 10(a)와 유사한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 성인의 평균 신장을 고려한다면, 얼굴의 위치는 주로 160 cm의 높이에 있을 것이다. Fig. 10(e)를 살펴보면 실제로는 붉은 영역에 대해 CCTV 영상으로부터 사람의 신원 파악이 매우 어렵다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10. Surveillance resolutions according to the elevation when objects have upper vertical orientation

이와 같은 현재의 감시 성능을 개선하고자, CCTV 카메라 1대를 추가 설치하려고 한다. 그 후보 위치로써 (26.6, 17, 3)에 y 축에 대하여 -12° 만큼 회전시켜 카메라를 설치했을 때, 붉은 영역에 대한 감시 해상도의 변화를 살펴보고자 한다. Fig. 11은 카메라 추가 후, 객체의 방향이 연직상방일 때, 높이에 따른 감시해상도를 보여준다. Fig. 10과 비교하여 카메

라를 해당 위치에 추가 설치함으로써, 붉은 영역에 대한 감시 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다. 또한 얼굴면이 주로 향하는 방향을 고려하여 객체의 방향이 $+x$ 축 방향과 같을 때, 카메라 추가 설치 후, 객체의 높이에 따른 감시해상도는 Fig. 12와 같다.

Fig. 11. Surveillance resolutions according to their elevation when objects have upper vertical orientation(after adding a camera)

Fig. 12. Surveillance resolutions according to their elevation when objects have $+x$ axis orientation(after adding a camera)

Fig. 13은 대상 객체의 높이가 160 cm일 때, 객체의 주요 방향에 따른 감시해상도를 나타낸다. 동일한 위치에 객체가 존재하더라도, 이처럼 객체가 향하는 방향이 다름에 따라 대상 영역에서의 감시 성능이 확연하게 다른 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 13(f)와 같이 객체가 $-z$ 축 방향으로 바라볼 때 카메라를 추가 설치하였더라도 CCTV 영상 상에 전혀 나타나지 않는다. 이는 의도적으로 바닥을 바라보면서 이동하는 사람에 대해서는 CCTV 영상으로부터 얼굴을 전혀 인식할 수 없음을 의미한다. 이러한 경우까지 감시하고자 한다면 CCTV 카메라가 낮은 높이에도 예를 들어, 0 ~ 50 cm의 범위에 설

Fig. 13. Surveillance resolutions according to the orientation when objects are at an elevation of 160 cm (after adding a camera)

위치와 방향에 대한 샘플링 간격에 따라 붉은 영역에 대하여 총 $37(x) \times 20(y) \times 6(z) \times 12(\text{수평각}) \times 7(\text{고도각}) = 372,960$ 개의 감시 해상도가 산출되었다. 카메라를 추가로 설치하기 전에는 감시 해상도가 2 pixels/cm 이상인 비율이 0.362 %, 1 pixels/cm 이상인 비율이 0.388 %이었으나, 설치 후에는 2 pixels/cm 이상인 비율이 9.156 %, 1 pixels/cm 이상인 비율이 10.213 %로 감시 성능이 약 25 % 개선되었다.

4. 결론

본 연구에서는 CCTV에 의하여 대상 공간이 얼마나 효과적으로 감시되고 있는지 정량적으로 평가하기 위한 방법론을 제안하였다. 대상 공간 내 존재하는 객체의 위치와 방향에 따라 CCTV 영상 상에 나타나는 객체의 세밀도(LOD, Level of Detail)가 달라진다는 사실에 착안하여, 객체의 위치와 방향이 고려된 감시 해상도를 감시 성능 평가를 위한 정량적 지표로써 정의하였다. 다음으로 공간 내 모든 3차원 위치에서의 감시 해상도를 계산하고, 이들 중 감시 목적에 부합하는 해상도 이상이 성취되는 위치의 비율, 즉 감시 성능 지수를 산출하여 감시 성능을 판단하는 근거로 활용하였다. 이 과정에서 개별 위치에서 방향에 따른 감시 해상도와 대상 공간 전체에 대한 감시 성능 지수를 효과적으로 가시화하기 위한 방법도 도출하였다.

제안된 방법을 적용하여 대상 공간에 대한 감시 성능을 평가하기 위해서는 공간 내 설치된 CCTV 카메라의 내·외부 특성 변수와 대상 공간의 모델이 요구된다. 새롭게 정의된 감시 해상도와 감시 성능 지수를 활용하여 대상 공간에 대한 CCTV의 감시 성능 평가를 수행하는 방법에 대한 이해를 돕기 위하여 대상 공간과 카메라 내·외부 특성 변수를 모의 생

성하여 이를 시범 적용하였다. 그 결과, 공간 내 카메라와 객체의 상대적인 위치와 방향에 따라 객체에 대한 감시 해상도가 달라지며, 동일한 위치라도 객체가 카메라의 투영의 중심과 객체를 잇는 직선 방향으로 향할 때 객체에 대한 최대 해상도가 성취되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 제안된 방법을 적용하여 공간에 대한 3차원적인 분석이 가능하기 때문에 감시 대상 객체의 기하학적 특성과 이동 경향까지 구체적으로 반영하여 다각적으로 대상 공간에 대한 감시 성능 평가를 수행할 수 있었다.

향후 제안된 CCTV의 감시 성능 평가 방법을 실내·외의 3차원의 정밀 모델에 적용한다면, 대상 공간이 감시 목적에 부합하도록 효과적으로 감시되고 있는지 정량화하여 평가할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 대상 영역에 CCTV를 설치하기 전에 대상 영역을 요구 성능으로 감시하기 위한 최적의 CCTV 배치 위치, 방향 등을 결정함으로써 효율적인 설비를 방지할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

- Chang, I. (2009), *A Study on the Effects of CCTV installation for Larceny Incident Prevention within Apartment Complex*, Master's thesis, Wonkwang University, Iksan, Korea, 155p. (in Korean with English abstract)
- Chen, H.T., Wu, S.W. and Hsieh, S.H. (2013), Visualization of CCTV coverage in public building space using BIM technology, *Visualization in Engineering*, Vol. 1, No. 5.
- Cho, C. (2012), *A Study on Performance Improvement on CCTV video conference using Auto Calibration Algorithm application*, Master's thesis, Konkuk University, Seoul, Korea, 56p. (in Korean with English abstract)
- Eastman, C., Liston, K., Sacks, R., and Teicholz, P. (2011), *BIM Handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers & contractors (2nd ed.)*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Goold, B. J. (2004), *CCTV and policing: Public area surveillance and police practices in Britain*, Oxford University Press, Oxford.
- Ha, S. (2012), *Intelligent CCTV System Application for Security & Surveillance System Reinforcement*, Construction Technology Trends & Research Report, SsangYong Institute of Construction Technology, Seoul, Korea, Vol. 62, pp. 50-54.
- Harris, C., Jones, P., Hillier, D. and Turner, D. (1998), CCTV surveillance systems in town and city centre management. *Property Management*, Vol. 16, No. 3, pp. 160-165.
- Ji, C. (2010), *CCTV System Construction*, Infothebooks, Seoul, Korea.
- Kim, I. and Shin, H. (2011), A Study on Development of Intelligent CCTV Security System based on BIM, *Journal of the Korean Institute of Electronic Communication Sciences*, Vol. 6, No. 5, pp. 789-795. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y. (2013), Design of CCTV-based Monitoring System for Constructing of Societal Security Network, *Proceedings of the Summer KIIT Conference*, Korean institute of information technology, 31 May – 1 June, Asan, Korea, pp. 175-177.
- Park, J., Pyeon, M., Jo, J. and Lee, G. (2011), Case Study of Civil-BIM & 3D Geographical Information, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 6, pp. 569-576. (in Korean with English abstract)
- Park, S. (2013), A Study on the Effective Disposition of Indoor CCTV Camera, *Proceedings of the Summer KICS Conference*, Korean institute of communications and information sciences, 19-21 June, Jeju, Korea, unpaginated CD-ROM.
- Seo, T., Lee, S., Bae, B., Yoon, E. and Kim, C. (2012), An Analysis of Vulnerabilities and Performance on the CCTV Security Monitoring and Control, *Journal of the Korea Multimedia Society*, Vol. 15, No. 1, pp. 93-100. (in Korean with English abstract)
- Smithsimon, M. (2003), Private lives, public spaces: The Surveillance State. *Dissent*, Vol. 50, No. 1, p. 43.
- Teague, C. and Leith, D. (2008), Who guards our guardians? The use of ethnography to study how railway transit officers avoid injury, *Proceedings of PATREC Conference*, Planning and Transport Research Centre, Perth, Australia, unpaginated CD-ROM.
- Teague, C., Green, L. and Leith, D., 2010, Watching me watching you: the use of CCTV to support safer work places for public transport transit officers, *Proceedings of Australian and New Zealand Communication Association Conference*, Australian and New Zealand Communication Association, Canberra, Australia, unpaginated CD-ROM.
- Theia Technologies (2009), *How to calculate image resolution*,

Technical Report, Theia Technologies, Wilsonville, Oregon, http://www.theiatech.com/papers/Resolution_calculation.pdf (last date accessed: 30 April 2014).

Wang, J., Li, J., Chen, X., and Lv, Z. (2010), Developing indoor air quality through healthcare and sustainable parametric method, *Proceedings of the 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering(iCBBE 2010)*, IEEE, Chengdu, China, pp. 1-4.