

증강현실을 이용한 건물 모니터링 기법 개발

Development of Building Monitoring Techniques Using Augmented Reality

정 성 수*
Jeong, Seongsu

허 준**
Heo, Joon

우 선 규***
Woo, Sun-Kyu

요 약

건설 프로젝트의 관리 측면에서 공사현장의 현황을 신속하고 정확하게 파악하는 것은 효율적인 자원의 배분을 위해 매우 중요한 작업이다. 또한 정밀 시공을 위한 시공 품질의 관리를 위해 도면과 실제 시공현장을 비교해야 할 경우가 있는데 증강 현실 기술은 이러한 상황에서 간편하고 직관적인 정보를 제공할 수 있다는 장점이 있다. 기존의 건설현장 또는 야외에서의 증강현실의 구현은 카메라의 위치와 방향의 추적을 위해 추가적인 센서나 마커 등의 부착을 필요로 하는 방법들이 주류를 이루었다. 본 연구는 공사 중이거나 시공 완료된 건물의 현황 파악에 응용할 수 있는 증강현실 기법의 개발을 목적으로 하였다. 특히 카메라 이외의 추가적인 장비의 사용을 배제하여 장비의 구성을 간소화 하고 마커의 부착이 불필요하여 접근이 불가능한 지역에 위치한 건물에 사용할 수 있는 증강현실기법을 구현하였다. 이를 위해 사진측량 및 비디오측량 분야에서 카메라의 위치와 방향을 추정하는데 사용되는 외부표정 과정을 통해 카메라의 투영 중심의 좌표와 향하고 있는 방향을 추정한 후 건물 외곽선을 표현하는 가상의 도면을 영상에 투영하였다. 그 결과 수 픽셀 정도의 정확도로 건물 영상과 가상 도면의 정합이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 이 기술은 증강현실의 구현에 있어서 장비의 구성을 간소화 하는 효과가 있기 때문에 건설현장에서 공사현황 파악 및 품질관리 목적의 증강현실 기술의 보급을 보다 용이하게 할 것으로 예상된다. 또한 접근이 불가능한 지역에 대해서도 증강현실의 적용을 통해 효과적인 구조물 현황의 파악이 가능할 것이다. 나아가 이 기술과 4차원 CAD가 결합되면 스케줄에 따른 공정의 진행상황을 간편하게 비교할 수 있어서 공정관리 및 모니터링 작업을 효과적으로 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 증강현실, 외부표정, 3차원 도면, 현장관리, 공정관리

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

공사 현장의 공정을 신속하고 정확하게 파악하는 것은 건설 프로젝트를 진행할 때 매우 중요한 일이다. 프로젝트 관리자는 공정 계획단계에서 수립된 일정과 현장에서 파악된 공정의 진행 상황을 파악하고 비교하여 프로젝트 진행의 완급을 조절한다. 이는 공사 현장에서 자원의 효율적이고 계획적인 사용과 배분의 최적화를 가능하게 한다.

프로젝트 진행에 필요한 현황 정보는 정보로서의 가치를 높이기 위해 신속하게 취득되어야 한다. 또한 이렇게 수집된 정보들이 시계열 차원에서의 가치를 갖기 위해서는 정보의 주기적이고 지속적인 갱신이 필요하다. 때문에 현장 정보 취득 시스템은 충분한 정도의 정확도를 가져야 함은 물론 정보의 획득이 신속하고 사용방법이 간편해야 한다.

한편 최근 중요시되고 있는 건물의 미적 가치의 추구에 따라 직육면체, 사각형 등의 정형화 된 형상이 아닌 직선과 곡선이 조합된 비정형(atypical) 건물의 수요가 늘어나고 있다. 이러한 종류의 건물의 시공은 시공시 발생하는 오차가 건물의 역학적 거

* 일반회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정, seongsu@yonsei.ac.kr

** 일반회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수, 공학박사(교신저자), jheo@yonsei.ac.kr

*** 일반회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정, wsk0419@yonsei.ac.kr

동 특성의 변화에 어떤 영향을 끼칠지에 대한 예측이 어렵고 복잡하기 때문에 일반적으로 정형화된 건물의 시공보다 난이도가 높다. 따라서 이러한 종류의 건축 프로젝트에서는 설계도면에 입각한 정확한 시공이 프로젝트의 성공을 위한 중요한 요소라고 할 수 있다. 즉 점점 까다로워지고 있는 건물의 시공 난이도에 따른 시공 정밀도의 저하를 방지하기 위해 설계도면과 실제 시공 상황을 수시로 비교할 필요가 있다. 이러한 필요성 때문에 최근 건축물 또는 토목 프로젝트에 구조물의 각 요소를 3차원으로 모델링한 객체와 그것들의 체계화 및 분류, 그리고 공정과의 연동을 통한 4차원 CAD 도 그 활용 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(강인석 외, 2005 ; 이재철, 2004).

3차원 건설도면은 그 입체 도면이 가지고 있는 장점을 충분히 살릴 수 있는 방향으로 활용되어야 한다. 이를 위해 입체 건물 모델의 활용 방안으로서 가상현실 기술을 이용한 공정의 시뮬레이션 및 시각화에 대한 연구가 진행되어왔다. Kim et al.(2001)은 건물의 3차원 도면과 시공 스케줄이 연동된 4차원 캐드를 구현하여 공정을 시뮬레이션하였다. 그리고 서종원 외(2006)은 SIGMA (Simulation Graphical Modeling and Analysis system)를 이용하여 토공 현장에서의 프로세스 시뮬레이션을 실시하여 그 결과를 시각화 하였다.

가상현실 기술은 그 구현 과정에 현실세계의 영상이 배제되어 있기 때문에 실제 시공된 현황과 컴퓨터에 저장된 3차원 모델을 직접 비교할 수 없다는 한계점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 최근 증강현실 기술(AR: Augmented Reality)이 입체 도면의 새로운 활용 방안으로서 대두되고 있다. 증강현실 기술은 현실세계의 영상에 컴퓨터에 의해 생성된 정보를 중첩하여 표현하는 기술이다. Behzadan and Kamat(2007)은 건설현장 영상과 컴퓨터에 의해 생성된 3차원 객체를 합성하여 시뮬레이션을 하는 연구를 진행하였으며 증강현실을 이용하면 실공간 정보를 받아들이는 사용자의 시각적 인식환경의 향상을 기대할 수 있을 것으로 보았다. 한편 건설관리 분야를 중심으로 증강현실 기술과 공정, 건물의 3차원 모델을 서로 연계하여 공정 모니터링에 유용한 정보를 사용자에게 효과적으로 제공하는 연구가 진행된 바 있는데 Roh et al.(2009)는 건물 내부 공사 진척상황을 4D CAD에 의해 생성된 3차원 도면과 정합하여 비교함으로써 계획 공정(As-planned schedule)과 실제 공정 진도(As-build progress)를 비교하는 방법에 대해 제시하였다. 그리고 이것을 이용해 당초 공정 진행 계획에 즉각적인 수정을 실시하여 재작업(rework)과 공정 지연을 최소화할 수 있다고 주장하였다. 한편 서준오 외(2005)는 증강현실 기술을 이용하여 계획된 공정을 4D CAD를 이용해 생성한 구조물의 3차원 모델과 실제 공사 현

장의 영상을 합성하여 공정을 모니터링 하는 시스템을 제안하였다. 그리고 이를 통해 기존 모니터링 방법에 비해 모니터링 업무에 소요되는 시간을 단축시키고 공사 관리자에게 앞으로의 공정에 대한 순서를 시각적으로 보여줄 수 있을 것으로 기대하였다. 이처럼 증강현실 기법을 이용하면 현실세계의 영상과 컴퓨터에 저장된 3차원 도면을 서로 겹쳐서 직접 비교해볼 수 있기 때문에 시공 현황과 공정 등에 관한 보다 직관적인 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 정밀한 시공을 위해 현장 상태를 점검할 경우 설계 도면과 실제 시공 상태를 간편하게 겹쳐서 비교해볼 수 있기 때문에 훨씬 간편하고 효율적으로 시공 품질을 점검하고 관리할 수 있다.

본 연구는 이러한 증강현실 기술의 구현에 관한 연구로서 실제 공사현장에 적용을 위한 시스템 구성의 유연성을 향상시키는 데 그 목적이 있다. 또한 보다 정밀한 현장의 영상을 얻기 위해 영상의 왜곡을 최대한으로 보정하고자 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

증강현실 기술은 그 기술이 구현되는 공간의 특성에 따라 크기가 제한된 실내에서 구현되는 실내 증강현실(indoor AR)과 공간의 제한을 두지 않고 야외에서 구현되는 실외 증강현실(outdoor AR)로 구분된다. 이 두 부류의 증강현실 기술은 공간적인 특징 때문에 약간의 차이를 가지고 있다. 실내 증강현실은 실험실이나 강의실 등의 크기가 제한된 공간에서 이루어진다. 그렇기 때문에 피사체와 카메라(사용자)의 거리가 비교적 짧은 특징이 있다. 실제영상과 컴퓨터 영상의 정확한 정합(registration)을 위해서는 카메라의 위치와 방향을 정확하게 추적하는 것이 중요하다. 실내 증강현실 환경에서는 카메라 위치와 방향을 추정할 때 정확도에 영향을 끼치는 요인들을 효과적으로 통제할 수 있기 때문에 보다 안정적인 구현이 가능하다는 장점이 있다. 이 방식의 AR 구현에는 주로 카메라를 이용해 취득한 영상에서 특정한 패턴의 마커를 인식하여 카메라의 위치와 방향을 계산하는 방법이 주로 쓰인다(박소영 외, 2005 ; Kato 외, 2000). 반면 실외 증강현실은 공간의 범위의 제한을 두지 않기 때문에 카메라 시점의 추정에 어려움이 많다. 보통 이 분야에서는 GPS와 자이로 센서 등을 사용하여 카메라의 위치와 방향을 결정하거나(김은미 외, 2006 ; 최태중 외, 2004 ; Behzadan et al., 2008) 특정 위치에 부착된 정사각형 형태의 마커를 인식하여 사영기하학적 방법을 이용하여 카메라의 자세를 추정하는 기법 등이 사용된 바 있다(Kamat and El-Tawil, 2007). 마커는 정해진 패턴의 형상과 텍스처를 가지고 있기 때문에 추적이

용이하다. 카메라는 정형화 된 마커를 인식하여 이를 기준점(control point)로 활용하고, 프레임 변화에 따른 영상 내 마커의 변위를 추적하여 카메라의 위치와 방향의 변화를 역으로 추정하게 된다. 하지만 해상구조물이나 대형 용벽 등과 같이 접근이 쉽지 않은 곳에는 마커를 부착하는 일은 어려울 뿐만 아니라 경우에 따라 위험을 수반한 작업이 될 수 있다. 또한 마커가 구조물의 외벽에 부착될 경우 건설현장의 특성상 야외에 노출되어 분진이나 침출수 등에 의해 오염될 가능성이 있기 때문에 시공 중인 구조물에 마커를 부착하는 방법은 적용하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 사진측량에서 활용되는 기법들을 응용하여 건물 및 구조물의 현황 파악 용도로 활용될 수 있는 기술을 제안하였다. 특히 고해상도(HD) 영상을 이용한 실외 증강현실 시스템을 구현하기 위해 필요한 기술을 연구하고 구현하였다. 실 공간에서 취득된 건물의 영상 위에 가상의 3차원 도면 와이어프레임을 투영하여 정합하는 실험을 수행하였으며 이 때 시스템의 구성을 될 수 있는 한 간소하게 하는데 주안점을 두었다. 이를 위해 사진측량에서 사용되는 기술들을 응용하여 카메라의 위치와 방향을 추정하는 접근방법을 선택함으로써 GPS나 가속도 센서를 필요로 하지 않도록 하였다. 또한 위에서 언급한 마커 사용 AR기술의 한계점을 피하기 위해 별도의 마커 대신 건물 영상의 특징점(feature point)을 활용하여 영상과 3차원 도면의 정합이 가능한 증강현실 기법을 개발하였다.

2. 실험방법

이번 연구를 통해 구현한 증강현실 시스템의 작동 원리를 그림 1에 정리하였다. 실험에 사용하기 위한 영상은 SONY사의 HDR-V1N을 이용해 서울시 신촌동 연세대학교 내의 학술정보관을 촬영하여 사용하였다. 사용한 HD 카메라의 사양은 표 1과 같다.

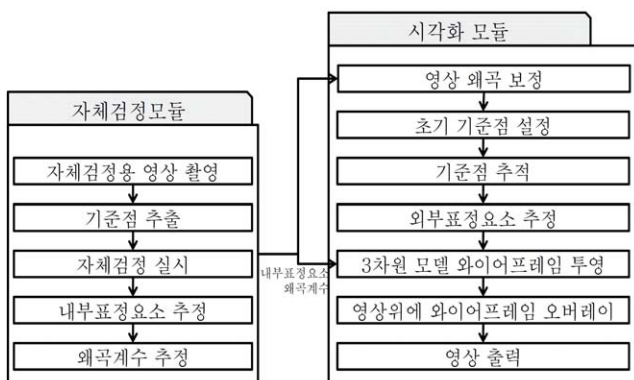


그림 1. 증강현실 모듈의 동작 원리

표 1. SONY HDR-V1N 의 사양

구분	사양
렌즈 성능	f=3.9-78mm, F=1.6-2.8
이미지 센서	1/4inch ClearVid CMOSx 3
HD 촬영 포맷	1080 30p/60i, 720 30p/60p
레코딩 포맷	480/60i, 1080/60i, (NTSC)

실험에 사용한 영상은 세로 1080픽셀의 크기로 취득된 후 데이터의 처리 시간을 줄이기 위해 720 픽셀의 크기로 조정되었다. 한편 취득된 영상에 도면을 겹치기 위해서는 피사체인 연세대학교 학술정보관의 3차원 도면이 필요하다. 이 3차원 도면을 대신하기 위해 무타겟 방식 토탈스테이션을 이용해 건물의 모서리의 좌표를 취득하였다. 측정에 사용한 토탈스테이션의 사양을 표 2에 정리하였다. 그리고 건물의 모서리의 3차원 좌표를 취득한 후 그림 2와 같은 가상의 3차원 모델을 만들었다. 만약 설계 및 기획 단계에서 이미 3차원 도면을 가지고 있다면 이처럼 측량장비 등을 이용해 실제 구조물의 좌표를 취득할 필요는 없다.

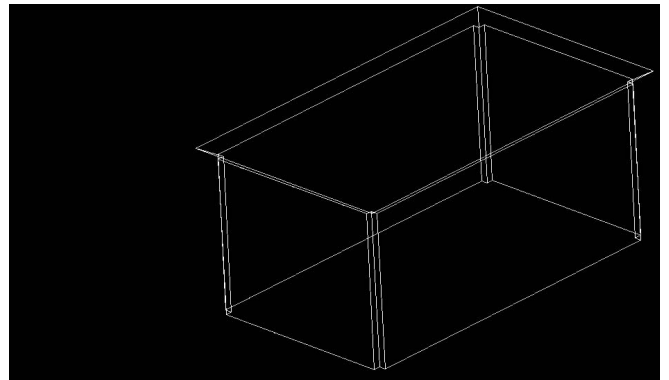


그림 2. 연세대 학술정보관의 3차원 와이어프레임

표 2. 무타겟 토탈스테이션의 사양

구분	설명	
제조사/모델명	Topcon/GPT-90001A	
망원경 분해력	3'	
측거 정확도	프리즘 모드	$\pm(2\text{mm}+2\text{ppm} \cdot D)\text{m.s.e.}$
	무타겟 기본모드	$\pm(5\text{mm})\text{m.s.e.}$
	무타겟 장거리모드	$\pm(10\text{mm}+10\text{ppm} \cdot D)\text{m.s.e.}$
측각 정확도	1'	

2.1 자체검정 및 왜곡보정

측량의 목적으로 설계되지 않은 카메라의 영상에는 일반적으로 상당한 양의 왜곡이 존재한다. 이는 동영상을 촬영하는 장비인 비디오카메라에도 해당된다. 이 왜곡을 고려하지 않으면 취득된 영상을 이용하여 카메라의 외부표정요소, 즉 카메라의 위치와 방향을 추정할 때 그 결과에 영향을 주게 되어 영상 합성의

정확도가 저하된다. 특히 증강현실 기술을 시공품질관리의 용도로 확인하기 위해서는 일반적인 AR기술보다 더 정밀한 영상의 정합이 필요하다. 그렇기 때문에 카메라 영상에서 발생하는 왜곡을 보다 정밀하게 보정해야 할 필요가 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해 캠코더의 자체검정(self calibration)을 실시하여 영상에 발생한 왜곡을 보정하였다. 특히 카메라의 특성을 Tsai모델을 이용해 표현한 기존의 연구(Hua et al, 2007, 이영민 외, 1998)와 달리 Hekkilä and Silvén(1997)에 의해 제안된 보다 정밀한 모델을 사용하여 영상에 발생하는 왜곡을 최대한으로 보정하고자 하였다. 이 모델은 x 축과 y 축 방향으로의 초점거리 (f_x, f_y) , 영상좌표 내에서의 렌즈 중심 좌표 (c_x, c_y) , 렌즈 표면의 곡률이 이상적이지 못함으로써 생기는 방사왜곡계수 (k_1, k_2) , 카메라의 광학계를 이루는 렌즈들의 광축이 제대로 정렬되지 않음으로써 발생하는 편심왜곡 (p_1, p_2) 을 보정한다. 이 모델은 아래의 절차를 통해 구성된다.

실공간에 존재하는 임의의 점의 3차원 좌표 $\bar{P} = [XYZ]^T$ 는 아래의 식(1)처럼 평행이동과 회전변환에 의해 카메라의 투영원점과 방향에 의해 결정되는 좌표계 (x, y, z) 에서의 $\bar{p} = [x y z]^T$ 로 변환된다.

$$\bar{p} = R\bar{P} + \bar{t} \tag{1}$$

여기서 R 은 3차원 회전행렬, \bar{t} 는 $[t_x t_y t_z]^T$ 로 표현되는 평행이동 벡터를 의미한다.

$$\begin{aligned} x' &= x/z \\ y' &= y/z \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} x'' &= x' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2P_1 x' y' + P_2 (r^2 + 2x'^2) \\ y'' &= y' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2P_2 x' y' \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} u &= f_x x'' + c_x \\ v &= f_y y'' + c_y \end{aligned} \tag{4}$$

이렇게 변환된 좌표를 영상 위에 투영한 후 방사왜곡과 편심왜곡을 적용하면 실공간에서의 좌표는 식(2)~(4)에 의해 최종적으로 픽셀을 단위로 하는 영상좌표로 투영된다.

여기서 x', y' 은 왜곡이 존재하지 않는 상태에서 z 로 나누어진 x 와 y 를, r 은 $\sqrt{x'^2 + y'^2}$, x', y' 은 x' 와 y' 에 왜곡이 적용된 값을 의미하며 k_1, k_2 는 방사왜곡 계수, p_1, p_2 는 편심왜곡계수, f_x 와 f_y 는 각각 x 방향과 y 방향에서의 주점거리, c_x 와 c_y 는 픽셀을 단위로 하고 좌측 상단의 좌표를 $(0, 0)$ 으로 하는 영상평면에서 주점의 좌표를 의미한다. 자체검정은 이렇게

계산된 좌표와 실제 영상에 찍힌 점의 좌표간의 차이를 최소화되도록 하는 최적의 주점거리, 주점위치, 왜곡계수를 추정함으로써 이루어진다(Bradski et al, 2006).

2.2 특징점 추적

왜곡이 보정된 영상에서 영상의 프레임의 진행에 따라 추적할 점 요소를 선택한다. 추적하는 점의 영상면에서의 좌표와 실공간에서의 3차원 좌표를 알고 있으면 외부표정요소를 계산하여 카메라의 위치와 방향을 추정할 수 있다. Shi and Tomasi(1994)에 의하면 영상에서 픽셀의 밝기가 급격하게 변하는 곳이나 무늬가 뚜렷하여 텍스처가 선명한 점은 고유값(eigenvalue)의 값이 크기 때문에 높은 신뢰도의 특징점 추적 결과를 기대할 수 있다. 이러한 점은 건물의 외곽이나 창틀 등에 해당한다.

특징 추적 알고리즘은 크게 프레임간의 일치성(correspondence)을 이용한 방법과 텍스처를 이용한 방법으로 분류된다(McCane et al, 2000). 일치성을 이용하는 방법은 각 프레임별로 특징점을 추출하여 프레임간 일치하는 특징점을 찾는 방식의 추적 알고리즘이다. Smith and Brady(1995)는 이 방법을 이용하여 영상에 찍힌 피사체의 형상을 추적하는 프로그램을 구현하였으며 Yoon et al. (2008)은 영상에서 특징선(Line feature)를 추출해 3차원 모델의 와이어 프레임과의 정합을 통해 증강현실 시스템을 구현하였다.

한편 텍스처를 이용하는 알고리즘은 맨 처음 프레임에서 선택된 특징점과 가장 유사한 패턴을 이미지에서 탐색한다. Tomasi and Kanade(1991)는 이러한 접근 방법을 통해 특징점을 추적하는 알고리즘을 제안하고 추적에 유리한 점을 선택하는 방법에 대해 제시하였다. 그리고 Neumann and You(1999)는 이러한 방법론에 기반을 두어 특징점과 특징영역(feature area)의 추적을 통해 optical flow의 성능을 개선하였고 이를 증강현실의 구현에 이용하였다.

전자의 접근 방법은 영상의 모든 프레임에서 특징점을 추출해야 한다. 따라서 매 프레임마다 이미지의 전 영역을 대상으로 연산을 수행해야 하기 때문에 비교적 많은 연산을 필요로 한다. 한편 후자의 접근 방법은 영상의 첫 프레임에서 추출된 특징점 주변의 비교적 좁은 영상의 조각들만을 대상으로 연산을 수행하므로 탐색영역의 측면에서 볼 때 보다 합리적이다. 따라서 본 연구에서는 영상의 텍스처를 이용한 추적방법을 이용하여 증강현실 기술을 구현하였다.

특징점의 추적은 Bouguet(1999)에서 제안된 Pyramidal Lucas-Kanade 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘은 컴퓨터 비전 분야에서 주로 연구되는 optical flow 기술 중 하나로서 널

리 사용되고 있는 Lucas-Kanade 알고리즘을 보다 효율적으로 변형시킨 것이다. 이 알고리즘은 가우시안 필터를 적용한 다운 샘플링을 통해 여러 개의 층으로 이루어진 영상 피라미드 (image pyramid)를 생성하여 계층적으로 특징점을 추적한다는 특징이 있다. 이 방법은 프레임의 변화에 따른 특징점의 변화가 크더라도 추적에 필요한 연산의 양을 효과적으로 줄일 수 있다.

일반적인 Lucas-Kanade 알고리즘에 따라 영상의 프레임 변화에 의한 변위벡터와 각각의 프레임 영상 간에는 식 (5)와 같은 관계식이 성립한다.

$$\sum_{x=p_x-w_x}^{p_x+w_x} \sum_{y=p_y-w_y}^{p_y+w_y} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_x \\ \nu_y \end{bmatrix} = \sum_{x=p_x-w_x}^{p_x+w_x} \sum_{y=p_y-w_y}^{p_y+w_y} \begin{bmatrix} \delta I I_x \\ \delta I I_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 (I_x, I_y) 는 각각 x, y 방향의 영상 밝기의 기울기 (Gradient) 벡터를 의미하며 δI 는 임의의 점에서의 두 영상 프레임간의 차이를, (p_x, p_y) 는 search window의 중심의 좌표, (w_x, w_y) search window의 중심에서 모서리까지의 x, y 방향으로의 거리, 즉 search window의 크기를 의미한다. 위 식에서

$$\sum_{x=p_x-w_x}^{p_x+w_x} \sum_{y=p_y-w_y}^{p_y+w_y} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} = G \quad (6)$$

$$\sum_{x=p_x-w_x}^{p_x+w_x} \sum_{y=p_y-w_y}^{p_y+w_y} \begin{bmatrix} \delta I I_x \\ \delta I I_y \end{bmatrix} = \bar{b} \quad (7)$$

이라고 정의하면 변위벡터 (ν_x, ν_y) 는

$$\bar{\nu} = \begin{bmatrix} \nu_x \\ \nu_y \end{bmatrix} = G^{-1} \bar{b} \quad (8)$$

로 표현할 수 있다.

위의 Standard Lucas-Kanade 알고리즘을 이용해 보다 정확하게 특징점을 추적하기 위해서는 위의 알고리즘을 반복하여 적용하며 이것을 Iterative Lucas-Kanade 알고리즘 이라고 한다. 이 알고리즘은 앞 프레임에 뒤따라오는 프레임을 전 단계의 반복연산에서 계산된 벡터만큼 평행이동 시킨 후 식(8)을 이용해 변위벡터를 다시 구하는 식으로 보다 정밀한 변위벡터의 위치를 구한다. 즉 번째 반복연산에서의 벡터를 $\bar{\nu}^n$, 이전 단계에서의 연산에 의한 벡터를 $\bar{\nu}^{n-1}$, 뒤따라오는 프레임 영상을 \bar{u}^{n-1} 만큼 평행이동 한 후 계산된 변위 벡터를 $\bar{\eta}^n$ 이라고 하면

$$\bar{\nu}^n = \bar{\nu}^{n-1} + \bar{\eta}^n \quad (9)$$

으로 표현할 수 있다. 이 연산을 η^n 이 충분히 작아질 때 까지 수행하면 반복연산이 종료된다. 위의 연산과정을 영상 피라미드에서 크기가 가장 작은 최상의 계층의 영상에서부터 적용하여 크기가 가장 큰 최하층의 영상에까지 순차적으로 적용된다.

이러한 반복적인 Lucas-Kanade 알고리즘의 적용을 통한 특징점의 추적은 Neumann and You(1999)에도 적용된 바 있는데 이 방법은 여러 개의 다른 스케일의 이미지를 이용한 다층적 접근을 통해 동일점을 결정한 후 그 변위를 1픽셀 이하(subpixel)의 정밀도로 얻기 위해 계산된 좌표를 중심으로 한 후 픽셀이하의 단위로 상관계수(correlation)를 계산하여 최종적인 추적 결과의 좌표를 결정하였다. 한편 이 논문에서 사용된 Bouguet(1999)의 방법은 매칭 점의 위치를 픽셀이하의 정밀도로 계산하기 위해 search window의 밝기(intensity)를 결정할 때 공일차보간법 (bilinear interpolation)을 이용하여 정수가 아닌 실수 좌표 위치에 있는 점의 값을 계산하였다.

2.3 외부표정

피사체의 3차원 모델을 영상 위에 합성하기 위해서는 카메라의 위치와 향하는 방향을 알고 있어야 한다. 이러한 카메라 투영 원점의 3차원 좌표와 세 축에 대한 회전각을 사진측량에서는 외부표정요소라고 한다. 외부표정요소를 추정하는 작업은 영상에서의 좌표와 그에 대응하는 실공간 좌표의 관계식인 공선조건식을 이용하여 수행할 수 있으며 이는 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= c_x - f \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{12}(Y-Y_0) + r_{13}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \\ v &= c_y - f \frac{r_{21}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{23}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \quad (10)$$

위의 식에서 (u, v) 와 (c_x, c_y) 는 각각 영상평면에서의 피사체의 좌표와 카메라 렌즈의 주점(principal point)의 위치, (X, Y, Z) 와 (X_0, Y_0, Z_0) 은 피사체의 3차원 좌표와 카메라의 투영원점의 위치, f 는 카메라의 주점거리(principal distance)를 의미하며 r_{11} 부터 r_{33} 은 3차원 직교좌표계에서의 회전행렬의 원소들로서 X 축, Y 축, Z 축을 기준으로 한 회전각인 ω, ϕ, κ 에 의해 표현된다. 따라서 카메라의 위치와 향하는 방향을 추정하는 것은 곧 카메라의 투영원점의 좌표인 (X_0, Y_0, Z_0) 과 회전행렬을 구성하는 ω, ϕ, κ 를 계산하는 것과 같은 의미를 가진다. 이 값들은 위의 식 (10)을 이 6개의 매

개변수에 대하여 편미분 한 후 뉴턴 방법을 통한 반복 계산에 의해 구할 수 있다.

2.4 3차원 모델의 투영

카메라의 위치와 방향이 계산되면 이를 이용해 3차원 모델을 투영한다. 실공간 3차원 좌표와 그에 대응하는 픽셀좌표간의 관계는 위에서 언급한 식 (10)에 의해 표현된다.

2.1 절에서 언급하였듯이 카메라로 취득한 영상은 왜곡이 존재한다. 그렇기 때문에 방사왜곡과 편심왜곡을 반영하지 않은 채 와이어프레임의 정합을 시도하면 많은 양의 불일치가 발생하게 된다. 따라서 자체검정을 통해 계산된 카메라의 내부표정요소를 이용해 영상의 왜곡을 보정한 후, 보정된 영상 위에 건물의 3차원 모델의 와이어프레임을 정합하여 렌즈의 왜곡이 정확도에 영향을 끼치지 않도록 하였다.

3. 실험결과

3.1 자체검정 및 왜곡보정

실험에 사용할 카메라의 자체검정을 위해 그림 3과 같이 체스보드 무늬가 출력된 평면 형태의 모니터를 다른 각도에서 촬영하여 검정을 실시하였다. 검정을 통해 계산된 내부표정요소와 왜곡계수를 표3에 정리하였다. 그림 4는 영상의 각 위치에서 발생한 왜곡량의 등고선과 발생한 왜곡의 방향을 묘사한 것인데 이를 보면 원 영상의 가장자리 부근에서 20~25픽셀 정도의 왜곡이 발생함을 확인할 수 있다. 계산된 렌즈 모델 매개변수들을 이용해 3차원 좌표들을 영상위에 재투영한 결과 통계적으로 가로 0.09픽셀, 세로 0.07 픽셀의 오차를 가짐을 확인하였다. 이렇게 계산된 내부표정요소를 이용하여 왜곡 보정을 실시하였으며 그 결과를 그림 4에 표현하였다. 이 그림에서 검은색과 흰색으로 표현된 부분은 보정 전·후 영상의 차이를 의미한다.

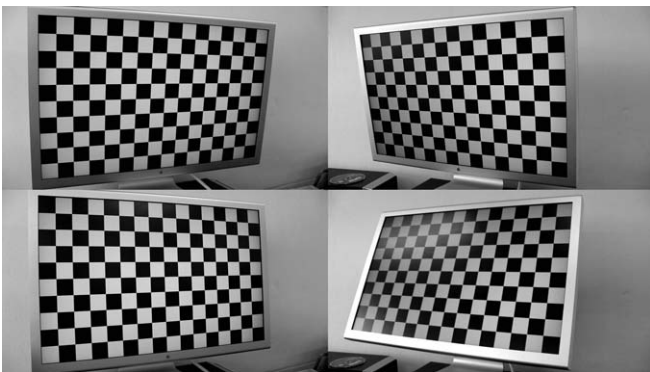


그림 3. 자체검정에 사용한 영상의 예

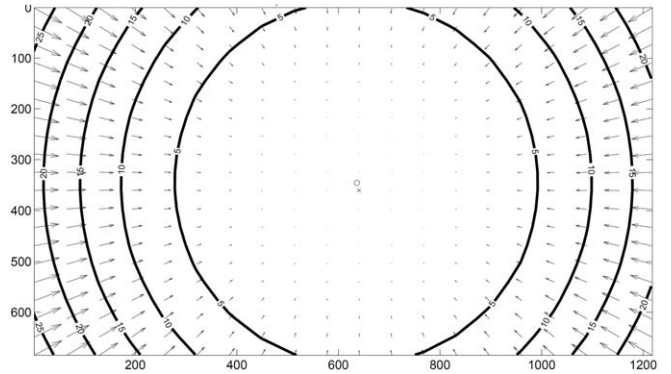


그림 4. 렌즈 왜곡량 분포

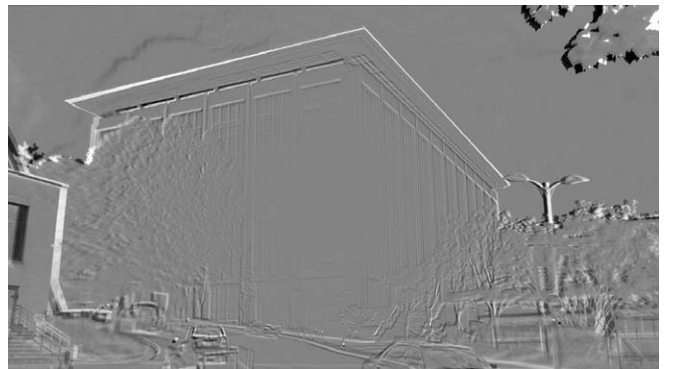


그림 5. 보정 전후 영상 차

표 3. 추정된 카메라의 내부표정요소

종류	구분	값
주점거리	f_x	1281.31481
	f_y	1281.74304
주점위치	c_x	635.40682
	c_y	344.65016
방사왜곡	k_1	-0.19493
	k_2	0.23572
편심왜곡	p_1	-0.00002
	p_2	-0.00004

3.2 특징점 추적 및 외부표정

취득한 영상의 첫 프레임에서 건물 창 모서리를 특징점으로 선택한 후 이들을 2.2절에서 언급한 알고리즘을 이용해 추적하였다. 그 모습은 그림 6의 a와 같다. 한편 프레임이 진행함에 따라 그림 6의 b와 같이 일부 점들의 위치를 제대로 추적하지 못하는 현상이 발견되었다. 이는 영상에 발생한 잡음(Noise)에 의해 optical flow에 사용되는 평가 함수(evaluation function)의 값이 영향을 받았기 때문인 걸로 추측된다. 추적이 불안정한 점들에 의한 영향을 방지하기 위해 이러한 점들은 외부표정에서 제외하였다. 그림 7과 8은 외부표정을 통해 추정된 카메라의 위치와 각도의 변화 양상을 그래프로 표현한 것이다.



a)추적중인 특징점 b)추적에 실패한 특징점

그림 6. 특징점 추적과 추적 실패 결과

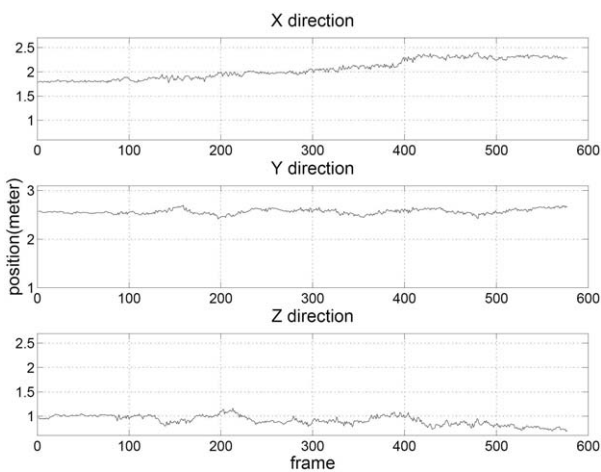


그림 7. 카메라의 위치 추정 결과

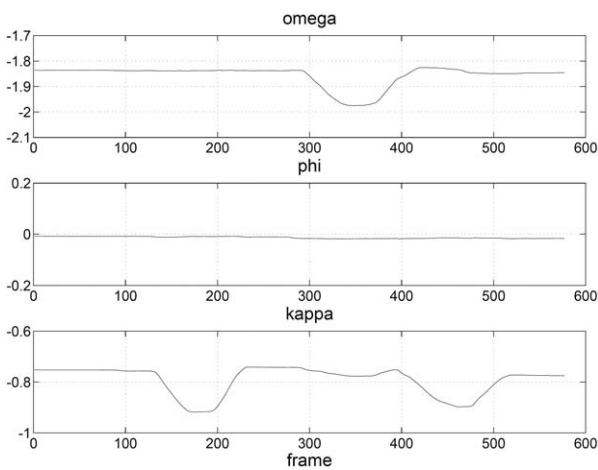


그림 8. 카메라의 각도 추정 결과

3.4 3차원 모델의 투영

계산된 카메라의 외부표정요소를 이용해 그림 9와 10과 같이 건물의 가상도면의 와이어프레임을 영상 위에 투영하였다. 와이어프레임이 영상위에 얼마나 정확하게 정합이 되는지 확인하

기 위해 건물 지붕 구조물의 제 모서리 점들을 optical flow로 추적한 결과와 3차원 도면을 재투영한 결과간의 차이를 분석해 보았다.



그림 9. 와이어프레임이 오버레이 된 영상



그림 10. 시점이 움직인 오버레이 영상

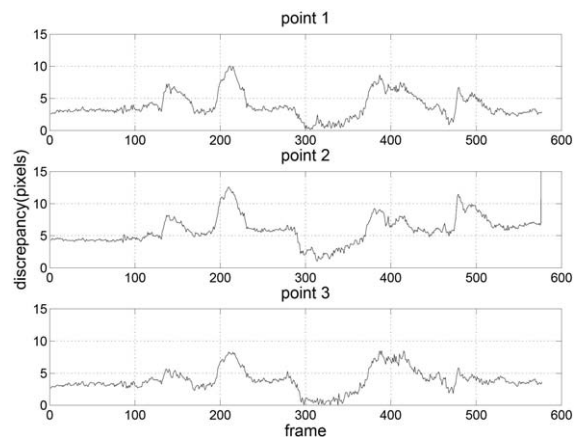


그림 11. 프레임 변화에 따른 불일치정도의 변화

실험결과 영상의 가장 왼쪽 모서리는 평균 3.82픽셀에 표준편차 1.92픽셀, 우측의 모서리는 평균 6.08픽셀에 표준편차 2.16 픽셀, 중앙 상단의 모서리는 평균 3.88픽셀에 표준편차 1.76픽셀의 정확도를 보였다. 특히 오른쪽 모서리에 해당하는 점은 다

른 두 점에 비해 정합 오차가 크게 나타났는데 토달스테이션 측량 및 3차원 모델을 만들 때의 오차와 육안을 이용함에 따른 추적점 선택시의 오차, 특징점 추적시 생기는 오차 등의 복합적인 요인에 발생하는 것으로 추정된다. 각각의 프레임에 따른 3차원 가상 도면과 영상의 정확도 변화 양상을 그림 11에 그래프로 표현하였다. 확인결과 주로 카메라가 움직이기 시작할 때 불일치 정도가 커지는 경향을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 영상의 왜곡을 제거하고 외부표정요소를 추정하는 과정에 사진측량 분야에서 사용되는 기법들을 응용하여 사용하였다. 그리고 이 방법을 이용하여 건물의 가상 3차원 도면을 영상 위에 오버레이하여 와이어프레임과 영상 내의 건물이 잘 겹쳐있는지 확인하였다. 그 결과 수 픽셀 정도의 정확도 내에서 겹쳐지는 것을 확인할 수 있었으며 카메라의 시점이 변함에 따라 와이어프레임의 투영 영상도 따라 변하면서 겹치는 것을 확인하였다.

이번 연구를 통해 개발된 증강현실 기술의 특징은 실외 증강현실의 구현에 사진측량에서 활용되는 기술들 응용하여 활용성을 높였다는 데에 있다. 제안된 방법을 이용하면 별도의 부착물이나 특정한 패턴이 있는 마커를 사용하지 않아도 현실세계 영상과 컴퓨터에 의해 생성된 영상의 정합이 가능함을 확인하였다. 이는 수상(水上)시공현장이나 협곡 등과 접근이 어려운 공사 현장에서도 구조물의 영상에 추적이 용이한 특징점이 충분히 존재하고 카메라의 기하학적 정보인 내부표정요소와 대상 구조물의 3차원 도면을 가지고 있다면 카메라만을 이용하여 간편하게 증강현실을 구현할 수 있다는 것을 의미한다. 자체검정을 통해 카메라의 특성(내부표정요소)을 파악하고, 해당 구조물의 도면과 기준점으로써 사용할 적당한 개수의 특징점을 가지고 있으면 본 논문에서 제안하는 기술을 적용할 수 있다.

그러나 이 기법은 건물 영상의 텍스처를 이용하기 때문에 화면 영상의 노이즈와 장애물에 의한 폐색(occlusion) 등에 취약하다. 실제로 건물 영상에서 특징점 추적시 그 결과가 불안정한 점들이 발견되었다. 그렇기 때문에 이 기술을 실제 현장에 응용하기 위해서는 다양한 현장 조건에 강건(robust)한 추적 알고리즘을 사용할 필요가 있다. 또한 기존의 증강현실 기법에 응용된 다른 렌즈모델에 비해 복잡한 모델을 사용함으로써 연산량이 늘어나고 처리시간이 증가하게 된다. 실용화를 위해서는 처리속도를 향상시킬 필요가 있으며 병렬처리 및 범용 GPU 기술(GPGPU) 기술이 효과적으로 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

향후 이 점들이 보완된 후 이 기술이 건설현장에서의 증강현실 구현에 적용된다면 시스템의 구현을 위한 비용이 상당부분 감소할 것으로 기대된다. 때문에 저렴한 비용으로 프로젝트 관리에 유용하고 사용자의 위치와 목적 구조물 등의 정황에 부합하는, 보다 직관적인 건설 현장의 현황 정보를 신속하게 취득할 수 있을 것이다. 특히 4차원 캐드에 의해 시계열에 따른 건물의 3차원 도면이 제공된다면 증강현실 기술을 이용한 영상의 정합을 통해 계획 공정과 현재 진행상황을 간편하게 비교해볼 수 있기 때문에 공정 관리에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 또한 건물의 3차원 도면과 실제 시공 상황을 직접 비교해볼 수 있으므로 정밀 시공을 위한 시공품질 관리 및 부재를 정확한 위치에 시공하지 위한 지원 용로도서도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C04-측량기술 활용 건설도면 작성 및 검증 기술개발)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강인석, 지상복, 곽중민 (2005), "토목시설 지형정보의 4D 시스템 구현을 위한 객체속성별 삼각망 구축기술, 한국건설관리학회논문집, 제 6권 제 1호, 한국건설관리학회, pp. 65~72.
- 김은미, 임순범, 최윤철, 최민형 (2006), "가상 건축물 시뮬레이션을 위한 GPS와 가속도센서 기반의 증강현실 시스템", 한국시뮬레이션학회 2006년 추계학술대회, 한국시뮬레이션학회, pp. 48~52.
- 박소영, 최진원 (2005), "기존 건축물의 효율적인 정보 관리를 위한 증강현실 기술 응용에 관한 연구", 대한건축학회논문집 계획계, 제 21권 제 8호, 대한건축학회, pp. 37~44.
- 서종원, 김영환, 정평기 (2006), "프로세스 시뮬레이션을 연계한 건설공정 시각화", 한국건설관리학회논문집, 제 7권 제 1호, 한국건설관리학회, pp. 73~79.
- 서준오, 류한국, 박문서, 이현수 (2005) "증강현실(Augmented Reality) 기술을 이용한 공정 진도 모니터링", 대한건축학회 창립 60주년 기념 학술발표대회 논문집, Vol. 25 No. 1, pp. 253~256.
- 이영민, 원광연 (1998), "증강현실을 위한 카메라 영상과 3차원 모델의 정적 합성", 한국정보과학회 봄 학술발표논문집, Vol. 25 No.1, 한국정보과학회, pp. 326~328.

- 이재철 (2004), “4D 시뮬레이션 및 일정별 물량정보검색을 위한 3D모델 정보 활용”, 한국건설관리학회 논문집, 제 5권 제 4호, 한국건설관리학회, pp. 107~114.
- 최태종, 김정국, 허웅, 장병태 (2004), “옥외 증강현실을 위한 관측점 트래킹 시스템 구현”, 전자공학회논문지, 제 41권 SC편 제 4호, 대한전자공학회, pp. 45~54.
- Behzadan A. H. and Kamat, V. R. (2007), “Georeferenced Registration of Construction Graphics in Mobile Outdoor Augmented Reality”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 21(4), pp. 247~258.
- Behzadan, A. H., Timm, B. W., Kamat, V. R. (2008), “General Purpose Modular Hardware and Software Framework for Mobile Outdoor Augmented Reality”, *Applications in Engineering, Advanced Engineering Informatics*, No. 22, Elsevier Science, New York, NY, pp. 90~105.
- Bouguet, J.Y. (1999), “Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker”, *OpenCV Documentation*, Intel Corporation, Microprocessor Research Labs.
- Bradski, G. et al (2006), “OpenCV Documentation” (<http://www.cognotics.com/opencv/docs/1.0/index.html>) (2008.09.27).
- Hekkilä, J., Silvén, O. (1997), “A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction”, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1106~1112.
- Hua, H., Gao, C. Ahuja, N. (2007), “Calibration of an HMPD-Based Augmented Reality System”, *IEEE Transactions on Systems, MAN, and Cybernetics Part A*, 37(3), pp. 416~430.
- Kamat, V. R., El-Tawil, S. (2007), “Evaluation of Augmented Reality for Rapid Assessment of Earthquake-Induced Building Damage”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 21(5), pp. 303~310.
- Kato, H., Poupyrev, I., Imamoto, K. and Tachibana, K. (2000), “Virtual Object manipulation on a Table-Top AR Environment”, *Proc., Int. Symp. on Augmented Reality(ISAR 2000)*, pp. 111~119.
- Kim, W.Y., Lim, H.C., Kim, O.K., Choi, Y.K., and Lee, H.S. (2001), “Visualized Construction Process on Virtual Reality”, *Fifth International Conference on Information Visualization(IV'01)*, pp. 684~689.
- McCane, B. (2000). “Feature Tracking.” (<http://www.cs.otago.ac.nz/research/vision/Research/FeatureTracking/featuretracking.html>) (2009. 01.29).
- Neumann, U., You, S. (1999), “Natural Feature Tracking for Augmented Reality”, *IEEE Transactions on Multimedia*, 1(1), pp. 53~64.
- Roh, S., Peña-Mora F., Fard, M. G. and Han S. (2009) “Visualization Application for Interiors Progress Monitoring in 3D Environment”, *ASCE proceedings of building a sustainable futures*, pp. 51~60.
- Shi, J. and Tomasi, C. (1994), “Good Features to Track”, *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vision and Pattern Recog.*, pp. 593~600.
- Smith, S.M, Brady, J. M. (1995), “ASSET-2: Real-Time Motion Segmentation and Shape Tracking”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(8), pp. 814~820.
- Tomasi, C., Kanade, T. (1991). “Detection and Tracking of Point Features”, *Carnegie Mellon University Technical Report*, CMU-CS-91-132.
- Yoon, Y., Kosaka, A., Kak A. C. (2008) “A New Kalman-Filter-Based Framework for Fast and Accurate Visual Tracking of Rigid Objects”, *IEEE Transactions on Robotics*, 24(5), pp. 1238~1251.

논문제출일: 2008.10.24

논문심사일: 2008.10.31

심사완료일: 2009.06.10

Abstract

In order to effectively distribute the resources, it is very critical to understand the status or progress of construction site quickly and accurately. Augmented Reality (AR) can provide this situation with information which is convenient and intuitive. Conventional implementation of AR in outdoor or construction site condition requires additional sensors or markers to track the position and direction of camera. This research is aimed to develop the technologies which can be utilized in gathering the information of constructing or constructed buildings and structures. The AR technique that does not require additional devices except for the camera was implemented to simplify the system and improve utility in inaccessible area. In order to do so, the position of camera's perspective center and direction of camera was estimated using exterior orientation techniques. And 3D drawing model of building was projected and overlapped using this information. The result shows that by using this technique, the virtual drawing image was registered on real image with few pixels of error. The technique and procedure introduced in this paper simplifies the hardware organization of AR system that makes it easier for the AR technology to be utilized with ease in construction site. Moreover, this technique will help the AR to be utilized even in inaccessible areas. In addition to this, it is expected that combining this technique and 4D CAD technology can provide the project manager with more intuitive and comprehensive information that simplifies the monitoring work of construction progress and planning.

Keywords : *Augmented Reality, Exterior Orientation, 3D drawings, Construction Site Management, Construction Progress Management*
