

강기둥 시공검측을 위한 증강현실의 적용

Application of Augmented Reality to Steel Column Inspection

신도형*, 송용학**

Do Hyoung Shin, Yonghak Song

요 약

건설시공에서 강기둥은 가장 중요한 요소 중 하나이며 매우 정확한 설치가 요구됨에 따라 이의 시공검측을 위해서는 숙련된 측량사가 필요하다. 또한 정확한 계측을 위해서는 측량기기를 정교하게 다루는 데에 따른 시간이 소요된다. 이에 대한 개선방안으로 기존연구에서 증강현실 프로토타입 시스템인 ARCam을 개발했고 ARCam이 시공검측 시간을 단축시키는 등 검측기기로서 가능성이 있음을 보여주었다. 하지만 ARCam은 여전히 측량사의 시각적 인지와 판단에 기반한 계측을 필요로 한다. 본 연구는 ARCam을 기반으로 한 자동적 계측을 위한 알고리즘을 제안한다. 본 연구의 알고리즘은 디지털 이미지 프로세싱과 컴퓨터 비전을 이용한 자동화 기법에 기반을 두며 강기둥 수직도 검측에 초점을 두었다. 이러한 자동화 검측은 측량사의 판단 없이 강기둥 수직도의 계측이 가능토록 해 줄 것이다. 자동화된 시공검측의 궁극적인 목표는 측량인력을 최소화 하여서 시공검측 시간과 비용을 줄이는 것이다.

키워드: 증강현실, 강기둥 시공검측, 자동화

* 한미파슨스 건설전략연구소 선임연구원, 공학박사, doland93@gmail.com

** Purdue University Civil Engineering 박사과정, song10@purdue.edu

1. 서론

건설시공에서 강기둥은 가장 중요한 요소 중 하나이며 매우 정확한 설치가 요구된다. 강기둥의 시공검측은 일반적으로 다음과 같이 두 단계로 나뉘어진다: (1) 강기둥 설치 전 기둥앵커볼트 위치 검측과 (2) 강기둥 설치 후 강기둥 수직도 검측. 두 단계의 검측 모두에 고정밀 측량 기구인 토털스테이션이 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 토털스테이션으로 시행하는 강기둥 시공검측은 훈련된 측량사가 필요하고 정확한 계측을 위하여 기기를 정밀하게 다루는 데에 따른 시간이 소요 된다. 첨단 컴퓨터 기술인 증강현실 (Augmented Reality 또는 AR)은 가상의 모델과 실제 시공되는 대상물을 작업현장에서 비교할 수 있도록 하기 때문에 시공검측을 위한 대안기술로서 고려될 수 있다.

EI-Tawil and Kamat (2006)은 증강현실이 빌딩 구조물을 위한 검측기기로서 가능성이 있음을 보여주었다. 그러나 그들의 시스템은 구조물의 설계위치와 시공위치가 일치하는지의 여부는 보여주지만 일치하지 않았을 때의 오차 값은 보여주지 않았다. 이에 따라 증강현실의 기능은 구조물이 실제로 설계위치에 정확하게 시공되었는지 여부만 보여주는 것으로 한정되었다. 하지만 강기둥의 시

공검측을 위해서는 시공된 기둥이 설계위치와 정확하게 일치되었는지 여부뿐만 아니라 시공오차 안에 시공되었는지 여부 또한 중요하다. 기존연구 (Shin 2007, Shin and Dunston 2009)는 증강현실 프로토타입 시스템인 ARCam에서 가상모델과 검측대상물의 위치 차이점을 찾아낼 수 있게 함으로서 이러한 문제를 해결하였다. 하지만 ARCam은 여전히 측량사의 시각적 인지와 판단에 기반한 계측을 필요로 한다.

본 논문은 ARCam을 기반으로 디지털 이미지 프로세싱과 컴퓨터 비전을 이용한 자동적 계측을 위한 알고리즘을 제안한다. 본 연구의 알고리즘은 강기둥 수직도 검측에 초점을 두었다. 자동화된 시공검측의 궁극적인 목표는 측량인력의 최소화과 그에 따른 시공검측시간 및 비용 단축에 있다.

2. 강기둥을 위한 시공검측 기기들

토털스테이션은 건설현장에서 강기둥의 시공검측에 일반적으로 사용된다. 그러나 정확한 계측을 위해서 토털스테이션은 정교하게 설치되어야 한다. 따라서 일반적으로 토털스테이션의 설치프로세스 (Setup Process)는 많은 주의를 필요로 하며 시간이 소요된다. 특히 토털스테이션을

여러 번 다시 설치되어야 하는 경우는 이러한 문제가 더욱 부각된다. 또한 거리와 방향계측을 위해서는 측량사가 토털스테이션의 초점을 계측대상물에 정밀하게 맞출 필요가 있는데 토털스테이션은 렌즈를 통한 아주 제한된 시계를 (Field-of-view) 제공한다. 이러한 제한된 시계 때문에 일반적으로 측량사는 우선 Sighting Collimator를 사용하여 토털스테이션의 초점을 계측대상물에 대략적으로 맞춘 후 렌즈를 통하여 View Direction을 정밀조정 한다. View Direction의 정밀조정을 위해서 수직/수평 Clamp들과 Tangent Crew들이 종종 사용되기도 한다. 토털스테이션 계측프로세스 (Measuring Process)에 포함된 이러한 여러 가지의 작업들은 토털스테이션 계측프로세스가 직관적이지 않을 수 있다는 걸 보여준다 (Shin and Dunston 2009).

강기둥 시공검측에서 토털스테이션 대응으로 레이저스캐닝이 고려될 수도 있다. 그 동안 여러 연구에서 시공에서의 지형정보를 위한 계측기술로서 레이저스캐닝의 이점들을 보여왔었다. 예를 들어 Jaselskis et al. (2005)는 레이저스캐닝이 토사부피 및 암반부피, 그리고 교량 범의 캄버를 계측하기에 알맞음을 보여왔다. 그러나 이러한 계측방법은 좌표기준체계 (Coordinate Reference System)의 구축을 필요로 하고 이를 위해선 정해진 위치에 정교하게 설치된 구형표식 (Globe Target)이 일반적으로 사용된다. 또한 여러 스캔의 정밀한 Registration을 위해서는 각각의 스캔에서 최소한 세 개의 표식이 포함되어야 한다. 구형표식의 이러한 정교한 설치에 토털스테이션의 설치와 같이 많은 주의를 필요로 하고 시간이 소요된다. Park et al. (2007)은 구조물의 레이저스캐닝에서 정확한 처짐을 계측하는 모델을 제시했다. 그들의 방법은 Reference용으로 구형 표식 대신에 처짐이 없는 구조물의 원형이미지를 사용했다. 그러나 수직도를 확인할 강기둥을 위하여 해당 강기둥을 완벽하게 수직으로 설치하여 이미지를 얻는다는 것은 비현실적이기 때문에 강기둥 시공검측에 그들의 방법을 적용하는 것은 어렵다. 만약 작업자들이 강기둥이 정확하게 수직으로 설치되었다는 걸 안다면 수직도를 굳이 계측할 필요도 없을 것이다.

위에서 보는 바와 같이 토털스테이션과 레이저스캐닝 모두 강기둥의 수직도 검측을 위해서는 기기를 정교하게 설치하기 위한 작업을 필요로 한다.

3. ARCam

기존의 시공검측을 위한 대안으로 Purdue University의 ACSyL (Advanced Construction Systems Lab)은 증가현실 프로토타입 시스템인 ARCam을 개발하였다 (Shin 2007). ARCam의 시스템 구성요소는 위치/방향 추적시스템 (3rdTech사의 HiBall-3100 Tracker), 비디오 카메라 (Dragonfly2), AR 컴퓨터 그리고 디스플레이 (NEC사의 8.4" 터치스크린 모니터)이다. 시공검측 동안에 ARCam이 정확한 Registration (실상 이미지상에 가상 이미지의 등록)을 유지하기 위해서, HiBall Sensor (추적시스템의 센서)와 비디오 카메라가 하나의 유닛으로 단단히 고정되어 있고 그 유닛은 그림1과 같이 삼각대에 고정되어 있다. 이렇게 일체화 된 유닛은 ARCam Inspection Unit로 이름지어졌다.

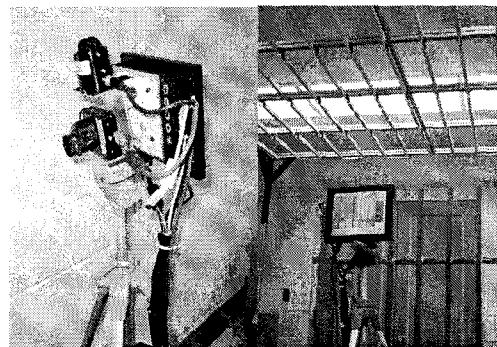


그림 1. ARCam Inspection Unit

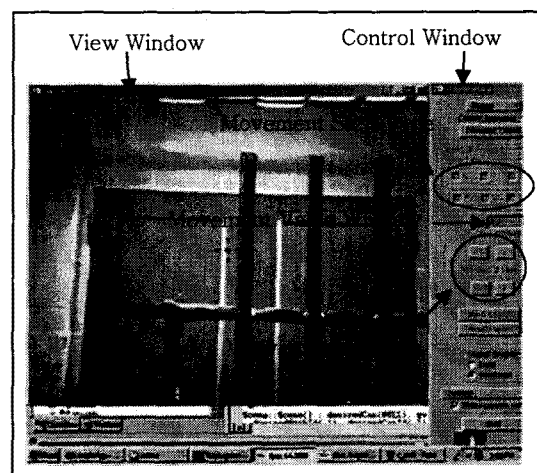


그림 2. View Window 와 Control Window

위에서 언급한 바와 같이 강기둥의 시공검측을 위해서는 강기둥이 설계위치에 정확하게 설치되었나 여부뿐만 아니라 강기둥이 설계위치에서 얼마나 벗어나 있는지 계측하는 것이 필요하다. 이러한 부분을 충족시키기 위해서 ARCam은 다음과 같은 검측기능 (Inspection Function)들

을 갖추고 있다: (1) 가상모델 선택, (2) 가상모델 이동스텝 타입 (Movement Step Type) 선택, (3) 가상모델 이동 (Movement), (4) 가상모델 이동 값 (Movement Value) 디스플레이. 사용자들이 ARCam을 사용 시 증강현실 이미지를 보면서 이러한 기능들의 조작을 가능케 하기 위해서 ARCam은 View Window와 Control Window를 디스플레이상에 보여준다 (그림 2). View Window는 증강현실 이미지를 보여주고 Control Window는 위의 검측기능들을 위한 컨트롤 툴 (Control Tool)을 보여준다.

검측기능 (1)을 위해서 ARCam 사용자는 디스플레이에 나타난 검측대상물의 가상모형을 스타일러스나 손가락을 이용하여 터치클릭 한다. 그런 후 검측기능 (2)를 위해서 가상모델 이동스텝타입 (X, Y, Z, P, T, R)을 선택한다. 스텝타입 X, Y, Z는 3차원 공간에서 각각 검측대상물의 로컬 x, y, z축으로의 가상모델 움직임을 의미한다. 스텝타입 P, T, R은 각각 로컬 x, y, z축으로 가상모델이 회전함을 의미한다. 검측기능 (3)을 위해서 사용자가 가상모델 이동을 위한 버튼들 (Movement Button)을 터치클릭 하면 된다. 선택된 이동스텝타입의 이동 값은 검측기능 (4)를 위해서 Movement Value Window에 표시된다. 사용자가 상단의 플러스(+)나 마이너스(-) 버튼을 클릭할 때마다 가상모델은 각각 양의 방향 또는 음의 방향으로 1 mm 또는 0.01도씩 움직인다. 반면에 사용자가 하단의 플러스(+)나 마이너스(-) 버튼을 클릭할 때마다 가상모델은 각각 양의 방향 또는 음의 방향으로 5 mm 또는 0.1도씩 움직이게 된다. 가상모델이 상응하는 실제대상물과 정확하게 맞추어졌을 때의 표시된 이동 값이 실제대상물이 설계 위치에서 얼마나 벗어나 있는가를 나타내게 된다. 사용자는 저장버튼 (Save Object Button)을 클릭함으로써 검측 값을 텍스트 파일형식으로 저장할 수 있다. ARCam에 대한 더욱 자세한 기술적인 설명은 Shin (2007)의 연구에서 찾아볼 수 있다.

4. ARCam 평가실험

기존연구 (Shin and Dunston 2009)는 강기둥 시공검측에서 토털스테이션과 대비한 ARCam의 이점을 실험평가 하였다. 기존연구의 실험은 일반적으로 시행되는 강기둥 시공검측의 프로세스를 따르기 위해서 다음과 같이 두 가지 타입의 세부실험으로 구성되었다: (1)강기둥 앵커볼트 위치 검측과 (2)강기둥 수직도 검측. Purdue University의 토목과 대학원생 중 측량에 대학 최소한의 기본지식이 있

고 테오도라이트, 트랜시, 또는 토털스테이션을 사용해 본 적이 있는 16명이 실험에 참여하였다.

실험결과에 따르면 ARCam과 토털스테이션을 사용한 앵커볼트 위치 검측의 평균절대편차 (Mean Absolute Deviation: 계측된 위치오차와 미리 설정된 위치오차 차이의 절대값 평균)는 각각 1.25 mm와 0.71 mm였다. 또한 강기둥 수직도 검측의 평균절대편차는 ARCam과 토털스테이션을 사용할 경우 각각 0.68 mm와 0.06 mm 였다. 설치노동시간 (Setup Labor Time)의 경우에 ARCam은 토털스테이션에 비하여 앵커볼트 위치검측 (약 35배 빠름)과 기둥 수직도 검측 (약 30배 빠름) 모두 빨랐다. 계측노동시간 (Measuring Labor Time)의 경우에도 ARCam은 토털스테이션에 비하여 앵커볼트 위치검측 (약 5배 빠름)과 기둥 수직도검측 (약 3배 빠름) 모두 빨랐다.

이런 결과는 증강현실 기반의 ARCam은 토털스테이션에 비하여 설치노동시간과 계측노동시간을 획기적으로 줄임으로써 앵커볼트 위치검측과 기둥 수직도검측에 시간적인 이익을 가져다 줌을 보여준다. 따라서 ARCam은 강기둥 시공검측의 효율성을 높임으로써 공사기간과 공비를 줄여줄 수 있을 것으로 기대된다. 또한 실험결과는 현재의 ARCam에서는 토털스테이션에 비하여 낮은 계측정밀도 때문에 보다 주의가 요구됨을 보여주었다. AISC (American Institute of Steel Construction) 코드의 앵커볼트 위치와 강기둥 수직도의 허용오차를 고려하면 ARCam의 계측정밀도는 과도하게 나쁘지 않으며 앵커볼트 위치검측과 강기둥 수직도검측에 허용될 수준임을 알 수 있다. 실험결과는 계측정확도를 향상시키기 위해서는 위치/방향 추적 시스템 (Tracking System)의 성능 및 시스템 캘리브레이션 (Calibration)의 향상뿐만 아니라 가상모델의 외형이 주의 깊게 고려되어야 함을 보여주었다. 또한 ARCam은 토털스테이션에 비하여 적은 작업부담 (Task Load)를 요구하고 보다 직관적이고 사용하기 편한 사용법을 제공함을 보여주었다. 이러한 평가결과는 ARCam이 토털스테이션만큼 측량사의 숙련도를 요구하지 않음을 나타내며 이에 따라 ARCam은 토털스테이션에 비하여 훈련시간 및 노동비를 줄여 줄 수 있을 것으로 기대된다. 위의 모든 사항을 고려했을 때 정확성 개선과 관련하여 기술 및 인간공학적 측면의 이슈가 여전히 있지만 ARCam은 강기둥 시공검측을 위한 기기로서 유망할 것으로 기대된다. 실험과 관련된 더욱 자세한 설명은 Shin and Dunston (2009)에서 찾을 수 있다.

5. 강기둥 자동추적

앞서 보았듯이 기존연구 (Shin and Dunston 2009)는 ARCam이 강기둥 시공검측 시간을 획기적으로 줄여줄 수 있음을 보여주었다. 하지만 ARCam은 여전히 측량사의 시각적 인지와 판단에 기반한 계측을 필요로 한다. 이러한 수동적인 검측방법은 자동화 기법으로 대체될 수도 있다.

본 연구에서는 ARCam을 기반으로 디지털 이미지 프로세싱과 컴퓨터 비전을 이용한 자동계측 알고리즘을 제안한다. 본 연구의 알고리즘은 강기둥 수직도 검측에 초점을 두었다. 본 알고리즘은 증강현실 이미지상에서 실제 강기둥을 찾아내어서 실제기둥과 가상모델의 위치상 차이점을 계산할 수 있도록 설계되었다. 이러한 방법은 측량사의 인지도나 판단이 필요 없도록 계측프로세스를 자동화 시켜준다.

자동화 알고리즘의 첫번째 단계로 검측 대상 강기둥의 가상모델을 3차원 좌표 시스템에서 (X, Y, Z) 에서 2차원 이미지 좌표시스템 (x, y) 로 투영시킨다. 그런 다음 이미지 좌표 시스템에서 검측 대상 강기둥의 좌측과 우측 경계선을 나타내는 두 개의 직선의 방향 $(\theta_{L}^{ref}, \theta_{R}^{ref})$ 을 계산하는데 이러한 방향들은 Reference Orientation으로 불린다. 또한 강기둥의 4개 코너의 이미지 좌표 $(x_i^{con}, y_i^{con}, \text{when } i = 1, 2, 3, 4)$ 도 계산한다.

두 번째 단계는 이미지상에서 검측대상 강기둥의 좌우 경계선을 추출하고 그것의 방향 $(\theta_{L}^{tar}, \theta_{R}^{tar})$ 을 계산하는데 이러한 방향들은 Target Orientation으로 불린다. 이 단계는 다음과 같이 4개의 스테이지로 구성된다: 대상구역 선택 (Target Region Selection), 모서리 감지 (Edge Detection), 직선 추출 (Line Extraction), 방향 계산 (Orientation Computation).

대상구역 선택은 ARCam 시스템의 비디오 카메라로 얻은 영상으로부터 관심 있는 지역을 추출하기 위한 것이다. 이를 위해서 그림 3와 같은 이미지에서 검측대상 강기둥만 포함한 이미지를 갖기 위해서 원래 이미지를 Bounding Box를 이용하여 잘라 (Crop)낸다. Bounding Box의 좌측상단 코너와 우측하단 코너의 좌표는 식(1)을 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} (x_{UL}, y_{UL}) &= (\min(x_i^{con}) - 20, \max(y_i^{con}) + 20) \\ (x_{LR}, y_{LR}) &= (\max(x_i^{con}) + 20, \min(y_i^{con}) - 20) \end{aligned} \quad \text{식(1)}$$

, when, $i=1, 2, 3, 4$

다음으로 Canny Operator (Canny 1986)을 이용하여

경계 모서리를 (Boundary Edge)를 찾아낸다. 그림 4는 Canny Operator에 의한 모서리 픽셀의 예제를 보여주고 있다.

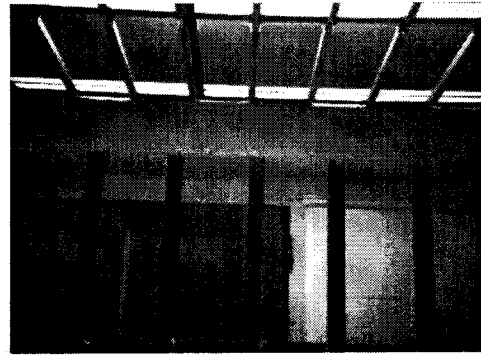


그림 3 강기둥 자동추적을 위한 ARCam 이미지

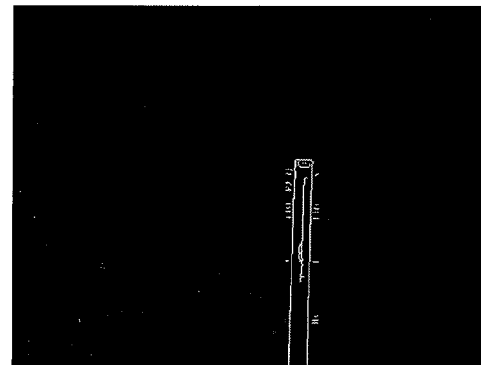


그림 4. Canny Operator에 의한 모서리 픽셀

그러나 추출된 에너지 픽셀들이 항상 강기둥영상의 두 좌우 경계상에 위치하는 것은 아니다. 그러므로 두 좌우 경계상에 속하는 모서리 픽셀을 선별하여 두 직선을 재구성해야만 한다. 본 연구에선 이러한 문제를 Hough Transform (Hough 1962)을 통하여 해결한다. Hough Transform은 본래의 이미지 공간에서 에지의 위치를 매개변수 공간으로 변환한다. 매개변수 공간에서 빈도수를 측정하기 위한 Grid가 생성되고 Grid안의 각 셀에서 에지의 위치로부터 결정된 각 매개변수의 빈도수가 축적된다. 가장 높은 빈도수를 가지는 셀들이 이미지에 투영됨으로써 모서리를 묘사하는데 사용된다. 본 연구는 직선의 매개변수적 표현을 위하여 식(2)에서와 같이 두 개의 극좌표계상의 변수 (ρ, θ) 를 이용하였다. 매개변수 ρ 는 기준점에서 직선까지의 거리를 나타내고 θ 는 직선의 법선 벡터를 표시한다. 두 개의 모서리 선은 가장 큰 숫자를 가진 두 개의 셀을 선택함으로써 추출된다. 그림 5는 추출된 선의 예제를 보여준다.

$$\rho = x \cos\theta + y \sin\theta \quad \text{식(2)}$$



그림 5. Hough Transform에 의한 두 직선

마지막 스테이지로 Extracted Orientation이라 불리는 타겟 방향 $(\theta_L^{tar}, \theta_R^{tar})$ 을 계산한다. 타겟 방향은 선의 매개 변수 θ 에서 바로 계산할 수 있으나 θ 의 Grid 해상도가 정확한 타겟 방향을 얻기엔 충분하지 않을 수가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 각각의 추출된 선의 끝점들의 좌표값을 이용하여서 타겟 방향을 계산한다.

일단 타겟 방향이 계산되면 강기둥의 가상모델과 실사 이미지의 배열이 수행된다. 수직도 오차 ε 은 식(3)을 이용하여 계산된다. 여기서 $\theta_L(k)$ 와 $\theta_R(k)$ 은 k 의 Function들이다. 이 Function들은 강기둥이 3차원 좌표 시스템 (X, Y, Z)에서 Z축으로 k 만큼 돌아가 있을 때 이미지 좌표 시스템상에서 대상 강기둥의 좌우 경계를 나타내는 두 개 직선들의 방향을 나타낸다.

$$\varepsilon = \arg \min \sqrt{(\theta_L^{tar} - \theta_L(k))^2 + (\theta_R^{tar} - \theta_R(k))^2} \quad \text{식(3)}$$

본 섹션에서 제안된 알고리즘의 평가를 위해서 추후에 ARCam에서 얻은 강기둥의 이미지를 바탕으로 알고리즘으로 강기둥 수직도를 검사해 볼 필요가 있다.

자동화된 시공검측은 자동적 계측프로세스와 자동적 설치프로세스 (Setup Process)의 결합으로 구현될 것이다. 자동적 설치프로세스는 본 연구에 포함되지 않았는데 이 또한 후속적으로 연구가 필요한 부분이다. 자동화된 시공검측의 궁극적인 목표는 측량인력을 최소화 하여서 시공검측 시간과 비용을 줄이는 것이다.

6. 결론

기존연구에서 제시된 ARCam은 강기둥 검측에서 토털스

테이션에 비해서 설치프로세스와 계측프로세스의 시간을 획기적으로 줄여줄 수 있음을 보여주었다. 하지만 ARCam은 여전히 측량사의 시각적 인지와 판단에 기반한 계측을 필요로 한다. 본 논문은 ARCam에 기반한 강기둥 수직도 검측의 자동화를 위한 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘은 증강현실 이미지에서 실제 강기둥을 찾아내고 실제 강기둥 위치와 그것의 가상모델 위치 사이의 차이점을 계산할 수 있도록 설계되었다. 이러한 프로세스는 여러 가지 컴퓨터 비전 기술과 자동적 강기둥 추적시스템을 기반으로 자동화가 된다. 추후에 본 연구에서 제안된 알고리즘의 평가를 위해서 ARCam에서 얻은 강기둥의 이미지를 바탕으로 알고리즘으로 강기둥 수직도 검사를 해 볼 필요가 있다.

참고문헌

1. Canny, J., (1986). "A Computational Approach to Edge Detection." IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8:679-714.
2. El-Tawil, S., and Kamat, v. (2006). "Rapid Reconnaissance of Post-Disaster Building Damage Using Augmented Situational Visualization." Proc. 17th Analysis and Computation Specialty Conference, ASCE, St. Louis, MO, pp. 1-10.
3. Hough, P. V. C., 1962. Method and means for recognizing complex pattern, U.S. Patent 3,069,654. Washington: United States Patent Office, December 18.
4. Jaselskis, E.J., Gao, Z., and Walters, R. (2005). "Improving Transportation Projects Using Laser Scanning." Journal of Construction Engineering and Management, 131(3), pp. 377-384.
5. Park, H., Lee, H., and Adeli H. (2007). "A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning." Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22(1), pp. 19-30.
6. Shin, D. (2007). "Strategic Development of AR Systems for Industrial Construction." PhD thesis, Purdue University. West Lafayette, IN.
7. Shin, D. and Dunston, P.S. (2009, In Press, Available online). "Evaluation of Augmented Reality in Steel Column Inspection." Automation in Construction.

Abstract

Inspection of steel columns which is one of the most critical elements in construction requires trained surveyor(s). Also it takes time to handle survey device(s) delicately for accurate measurements. To improve the inspection process of steel columns, the previous studies developed the AR prototype system, ARCam, and showed that ARCam is a promising inspection device that can reduce inspection time. However, ARCam still requires a surveyor to make measurements based on his visual perception and judgment. This study proposes an algorithm for automatic inspection based on ARCam. The algorithm is based on image processing and computer vision and focuses on the inspection of steel column plumbness. This method will make measurements without a surveyor's judgment. The ultimate purpose of the automatic inspection is to minimize the surveying labor, thus reducing inspection time and cost.

Keywords: Augmented Reality, Steel column inspection, Automation
