
Global Report

UAV를 이용한 시설물 검사: 대학에서의 사례 연구

1. 개요
2. 방법
 - 2.1 육안검사
 - 2.2 드론 (UAV 프로토콜)
 - 2.3 이미지 프로세싱
 - 2.4 사례조사
3. 결과 및 토론

UAV를 이용한 시설물 검사 : University of Georgia 캠퍼스 사례 연구

1. 개 요

건물의 유지 보수는 안전과 경제적 목적을 위해 중요하다. 시간이 지남에 따라 모든 건물은 노화와 풍화로 인해 지붕과 외부 구조물이 손상되게 된다. 따라서 이러한 건물을 안전하고 효율적으로 유지하려면 구조 상태 모니터링이 필수적이다. 지붕은 건물 검사의 핵심사안이다. 지붕은 풍화 작용으로부터 가장 많은 보호를 제공할 수 있으며, 방치된 지붕은 누수를 통해 손상을 입히거나 열악한 단열재를 통해 에너지가 손실되게 된다. Multi-Rotor Consumer Unmanned Aerial Vehicle (UAV)은 수평 및 수직으로 자유롭게 움직일 수 있는 기능과 경량성 때문에 건물을 신속하게 검사할 수 있는 적합한 대안이 될 수 있다. UAV는 또한 네비게이션 기능을 향상시키기 위해 여러개의 센서와 GPS (Global Positioning System)를 갖추고 있다 (Achille 외 2015, Gheisari 및 Esmaeili 2016, Krawczyk 외 2015, Eschmann 외 2013). 제안된 드론(UAV)은 건물을 검사하기 위해 열화상 카메라와 결합된 고정밀 카메라를 사용한다. 이 UAV를 사용하면 지붕 손상 검사가 가능할뿐 아니라 구조물의 누수 또는 출처를 탐지 할 수 있습니다. UAV로부터의 열화상 이미징은 부적절한 단열 위치 또는 열 손실이나 공기 손실을 막기위한 패치가 필요한 부분을 나타낸다.

시설물 검사를 위한 현재 사용하는 방법은 비용이 많이 들고 여러 건물의 외관을 정기적으로 검사하는 기능을 제한한다. 검사 비용은 2 ~ 3 명의 풀 타임 직원의 급여와 검사에 필요한 시간을 기준으로 산정된다. 이 부서의 유지 보수 직원은 연간 약 3 만 달러의 수입을 얻게된다. 따라서 직원 한 명당 하루의 근무 시간은 약 120 달러이다. 건물의 크기와 지붕 유형에 따라 검사 및 유지 관리에 몇일 또는 몇주가 소요될 수 있다. 대형 지붕의 경우 3 명의 정규직 직원이 검사 및 수리를 완료하는 데 2주가 소요될 수 있다. 이것은 노임만으로도 약 \$ 3,600의 비용이 부과될 것이다. 지붕 꼭대기의 경우 FMD는 하청 업체인 Bone Dry를 사용하여 검사를 수행한다. Bone Dry는 무인 항공기를 사용하여 지붕 손상 이미지를 캡처하여 문제를 분석하고 수리 계획을 세울 수 있다. Bone Dry의 대형 지붕 검사는 피해 수준에 따라 \$ 1,000에서 \$ 15,000의 비용을 지불해야한다(Remen and Perry 2016). 비용 외에도 인력 검사는 검사원에게 상당한 안전 위험을 제기한다. Dong et. al. (2013)은 2014 년 건설 산업의 모든 사망자 중 약 40 %가 낙상에서 비롯된 것으로 나타났다. 그 해에 사망으로 이어진 647 건의 낙상이 있었다 (Dong 외, 2013). 반대로 무인 항공기는 전반적으로 저렴한 비용으로 초기에 지불되며 모든 시설을 검사 할 수 있다. 고화질 비주얼 카메라 및 열 화상 카메라가 장착된 UAV는 제 3자 회사에 필적하는 검사 보고서를 생성 할 수 있습니다. 따라서 UAV 사용에 대한 검사가 보다 효율적으로 이루어질 수 있으며 예방 점검 횟수를 늘리면 구조물의 피해를 피할 수 있다.

이 사례 연구에서 우리는 조지아 대학 (UGA)에서 가장 널리 사용되는 검사 기술로 육안 검사를 관찰하였다. UGA는 5 개 캠퍼스 내내 460 개의 건물을 소유하고 유지한다. 현재 지붕 검사는 필요에 따라 수행된다. UGA의 시설 관리부 (FMD)는 유지 보수가 필요한 건물에 대한 작업 요청을 받는다. FMD는 검사 및 유지 보수 팀을 파견한다 (그림 1). 이 건물을 유지 보수하는 데 투자된 자원은 상당하지만, 이 건물은 건물의 수명을 보존하고 연장할 수 있다. UGA의 여러 지붕은 평평하고 유지 보수 대원이 쉽게 접근할 수 있어 수동 보행 검사를 완료할 수 있다. 그러나 UGA에는 접근이 어려우며 적절한 유지 보수를 받지 못하는 많은 건물이 있다 (Remen and Perry 2016). 가파른 꼭대기로 고층 건물이나 지붕을 검사하는 것은 UAV 사용을 피할 수 있는 장애물이다 (Nikolicetal.2013) .UVV를 사용하면 건물 유지 보수 팀이 옥상의 고화질 사진을 안전하게 수집할 수 있어 시간과 자원을 절약할 수 있다. 이러한 이미지를 통해 유지 보수 팀은 지붕 유지 관리가 필요한지 여부를 판단할 수 있다. 우리는 UAV 캠퍼스를 이 UAV 기술의 테스트 베드로 사용하여 대규모 시설 검사에서의 사용 가능성을 테스트했다.



그림 1. UGA에서의 육안 검사와 UAV를 사용하여 제안된 검사 방법의 비교. 전통적으로 불만사항이 제기되면 피해가 해결되기까지 수개월간 추가 피해가 있을 수 있다. UAV를 사용하면 검사가 더 자주 수행될 수 있으므로 건물 내부 영향을 미치기 전에 외부 손상을 발견할 확률이 높아진다.

2. 방 법

2.1. 공학적인 관찰

프로토 타입 시스템에는 고해상도 카메라 및 열 화상 카메라가 장착된 드론이 있어야 한다. 시스템 전체의 비용은 5000 달러 이상이다. 이 금액은 여러 캠퍼스와 검사원이 기술을 널리 채택할 수 있게 해준다. 표 1에는 우리가 고려한 각 매개 변수의 정확한 값이 나와 있다.

2.2. UAV 프로토 타입

DJI (Dà-Jiāng Innovations) Phantom 4 Advanced는 2,000 달러 미만의 가격과 다른 모바일 장치와 연결할 수 있는 기능 때문에 선택되었다. 이 드론에는 4 개의 회전 프로펠러가 있어 항공기를 높이거나 낮추거나 할 수 있다.

표 1. 감지 시스템 요구 사항.

Criterion	Parameter
Number of operators required	1
Number of collision detection sensors	6
Detection radius	Semi-circle 10 m forward
Manual control	DJI
Semi a control	Mobile device interface
Location display	GPS coordinates
Auto take-off/landing	Yes
Single location hovering	Yes
Minimum flight height	150 m
Minimum flight duration per battery	20 min
Visual camera resolution	4096 × 2160 (4k)
Thermal camera resolution	336 × 256 pixels
Maximum overall cost	<\$5000

피치 (pitch), 롤 (roll) 및 요 (yaw) 또한 센터에 내장된 고화질 4K 카메라가 있다. 이 카메라는 HD 비디오를 캡처하고 고해상도 스틸 이미지를 찍을 수 있다. 짐벌은 카메라를 일시 중지하고 비디오를 녹화하고 이미지를 캡처할 때 갑자기 움직이는 것을 방지하는 모션 보정 기능을 가지고 있다 (Quigley 외, 2005). 이 카메라 패키지는 매우 상세한 사진 촬영을 허용함으로써 지붕 검사 요구사항에 매우 적합하다.

다. 무인 항공기에는 6 개의 근접 센서가 장착되어 있어 장애물이 발생하기 전에 조종사에게 경보를 발령하거나 지면에 너무 낮게 도달할 수 있다 (그림 3). 이 데이터는 조종사의 원격 조종사에게 되돌려 보내어 항공기를 쉽게 조종할 수 있다. 항공기의 내장 기능 외에도 열화상 카메라가 추가되어 무인 항공기 몸체에 장착되었다. 열 화상 카메라는 물체가 방출하는 열 프로파일을 기반으로 이미지를 캡처할 수 있다. 이 기술은 외부 검사 어플리케이션에 매우 유용하다. 물, 균열 및 기타 불일치가 이러한 열 화상에서 발견될 수 있다. 6.8mm 렌즈, 333x256 픽셀 해상도 및 30Hz 프레임 속도의 Flir Vue Pro 열 화상 카메라가 선택되었다 (그림 2) (시스템 2016). 열 화상 카메라는 무인 항공기 뒷면에 3D 인쇄 브래킷과 함께 장착되었다.

2.3. 이미지 처리

FLIR 열 화상 카메라는 가장 차가운 물체가 파란색이고 가장 뜨거운 물체가 주황색인 색상 맵에서 온도를 표시하게 된다. 새로운 열 이미지가 수신되면 이미지는 MATLAB을 사용하여 처리된다. 이미지는 가장 차가운 물체를 가장 뜨거운 물체와 분리하기 위해 RGB 필터로 색상별로 구분됩니다. 이미지를 그레이 스케일링 한 후, 가장 차가운 부분이 검은 색으로 설정되고 대상 영역 내의 가장 어두운 픽셀이 대상으로 선택된다 (Sahoo, Soltani 및 Wong 1988).

$$A_{\text{real}}(\text{m}^2) = \frac{A_{\text{object}} \times A_{\text{sensor}} \times h^2}{1000000 \times A_{\text{image}} \times f^2} \quad (1)$$

방정식 (1)은 객체 (A 객체)의 면적을 결정하는 공식을 보여준다. 이 방정식의 상수 변수는 센서 영역 (Asensor), 이미지 영역 (Aimage) 및 초점 거리(f) 이다 (표 2). 높이 (h)는 무인 항공기가 탐지한 고도 좌표이다. 대상 영역은 MATLAB 이미지 처리 프로그램 (Sonka, Hlavac 및 Boyle 2014, Hengl 2006)으로 분할된 열 이미지의 대상 영역에 의해 결정된다.



그림 2. 그림 (a)는 Flir Vue Pro 열 화상 카메라의 CAD 도면. 그림 (b)는 아래 열 카메라의 렌더링과 함께 DJI Phantom 4.

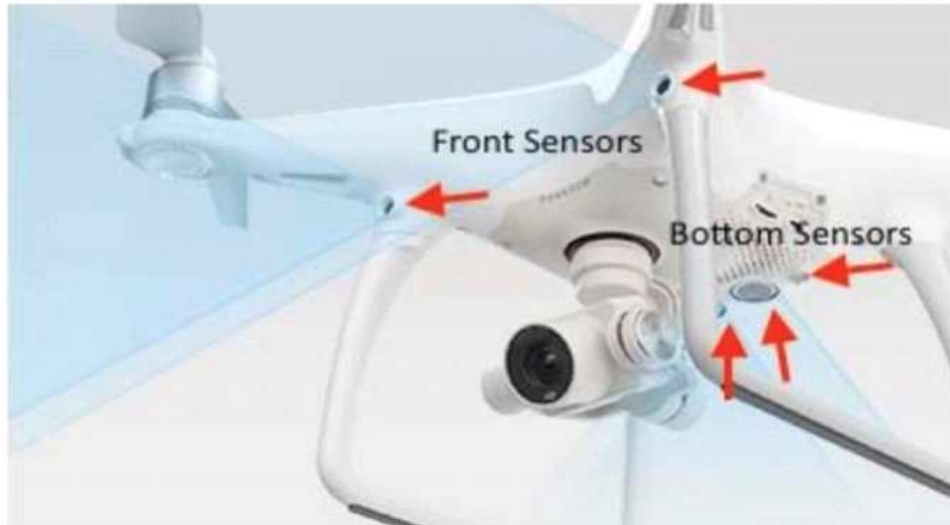


그림 3.이 이미지는 UAV에 내장된 초음파 감지 센서를 시각적으로 보여준다. 두 개의 센서가 앞쪽을 가리키고 네 개는 아래쪽을 가리킨다.

길이의 모든 값은 처음에는 밀리미터로 표시되며 그 다음에 mm²에서 m²로 변환하기 위해 1,000,000으로 나눈 값이다. 검사 영역을 추정하는 것은 수리에 몇 시간의 노동력이 필요한지 평가하는 데 중요하다.

2.4. 사례 연구

UGA는 캠퍼스 내에 다양한 건물을 보유하고 있으며 약 30 개의 건물이 검사 대상으로 선정되었다. 선택 기준에는 지붕 유형, 지붕 소재, 접근성, 노후화 및 알려진 손상이 포함된다. 두 가지 주요 유형은 액세스가 제한된 지붕이 있었으며 이 지붕은 검사관이 접근하기에 적합하지 않았다. 조사된 30 개 건물 중에서 이 사례 연구를 위해 5 개가 선정되었다 (표 3). UAV 프로토 타입을 사용하여 우리는 시스템의 실현 가능성을 증명하고 피해를 찾아 내고 옥상의 전반적인 구조물의 상태를 결정하는 것을 목표로 하였다. 이러한 검사의 대상으로 하는 손상은 HVAC 손상 및 열 및 물 손상으로 구분할 수 있다.

3. 결 과

3.1. 이미지 처리방법

이장에서 정의된 이미지 처리 방법의 성능을 평가하기 위한 테스트가 수행되었다. 실내 온도가 31 ° C 인 따뜻한 날에는 ~ 0.56 ° C에서 측정한 얼음이 담긴 물통을 뜨거운 콘크리트 표면 (~ 48 ° C에서 측정)에 배치하고 UAV 프로토 타입에는 열 카메라, 양동이 위로 흘러 나와 높이 50 미터까지 직접 올라간다. 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 미터의 높이에서 자연색과 열 화상을 촬영했다 (그림 4). 비행 중에는 UAV 모바일 응용 프로그램 창에서 높이 정보를 얻었다. 열화상 이미지는 위의 장에서 설명한대로 MATLAB 알고리즘에 입력되었다. 물체는 0.12 m²의 면적으로 열화상 카메라로 최대 50 미터로 확인되었다. 그림 5의 그래프 결과를 통해 열적으로 고유한 유지 보수 영역을 최대 20 미터까지 감지 할 수 있으며 오류는 25 % 미만이다. 20m 이상은 물 손상의 열 강도와 얼음 통 (이 예에서는 감지하기가 점점 어려워지기 때문에) 오류가 현저히 증가하게 된다. 이것은 주변 온도와 주위의 열에 의해 얼음이 흐려지는 열 프로필에 기인한다.

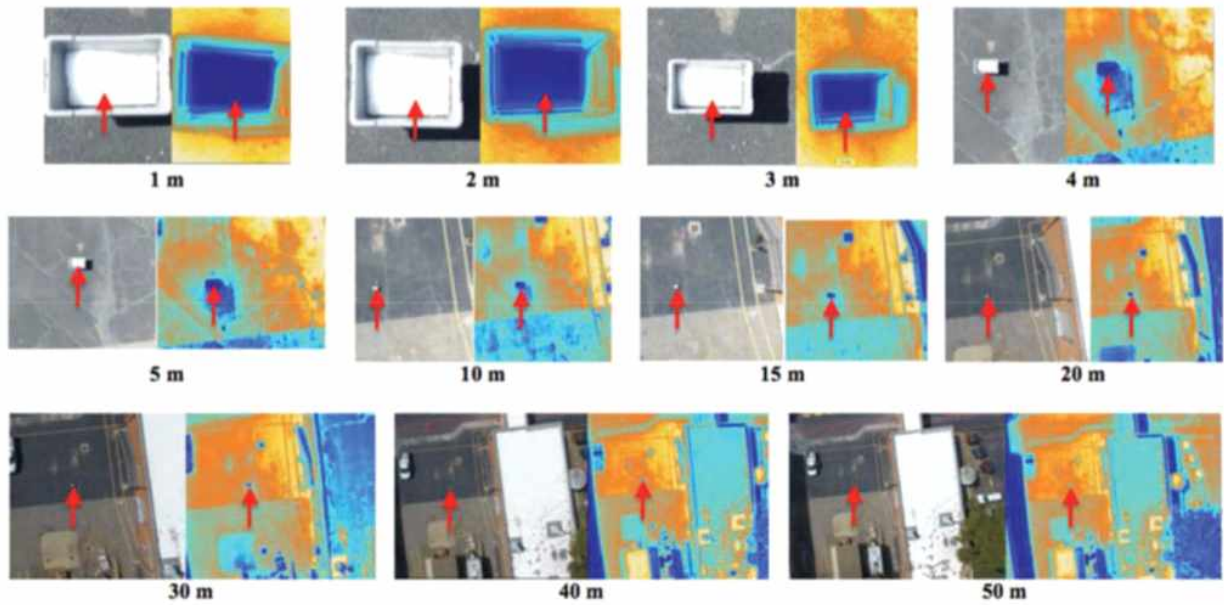


그림 4. 얼음 통 테스트 결과 자연스러운 색상과 열상을 촬영하여 높이가 높아질 때 그 차이를 보여주었다. 각 이미지의 화살표는 얼음 통을 가리킨다. 열 화상의 가장 차가운 물체는 파란색이며 가장 따뜻한 물체는 주황색이다.

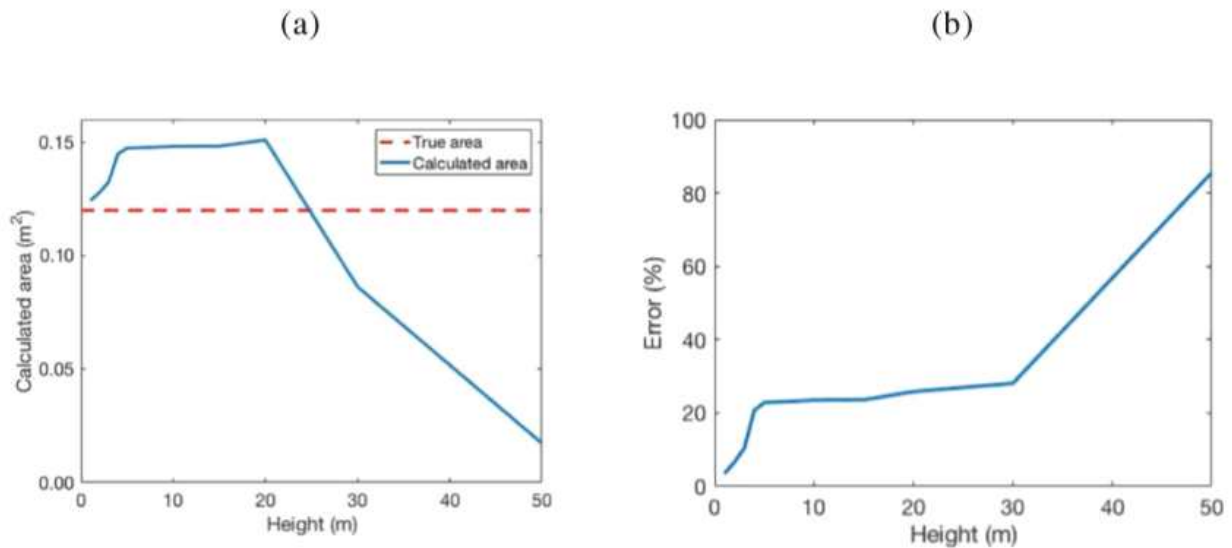


그림 5. 얼음 물통 테스트 결과 왼쪽 그래프는 열화상 카메라가있는 UAV의 높이가 증가함에 따라 버킷의 계산된 영역이다. 오른쪽 그래프는 같은 높이에서 실제 영역에 대한 영역의 오차를 보여준다.

3.2. 사례 연구

3.2.1. 난방, 환기 및 공조 (HVAC) 건물 검사 중 열 화상 이미지를 촬영하면 HVAC 성능에 대한 세부 정보가 표시된다. 열 화상 이미지를 통해 검사관은 건물을 통해 뜨거운 공기 또는 차가운 공기가 어떻게 분포되어 있는지, 환기구에 누출이 있는지를 볼 수 있다. 특히 옥외 HVAC 검사는 날씨가 더 안정적일 때 야간이나 이른 아침에 가장 잘 수행되며 정오(Eads, Epperly and Snell 2000)만큼 벽 및 열팽창의 열용량을 향상시키지 않는다. 캠퍼스에 있는 여러 건물의 HVAC 시스템을 검사했다. 옥상에서 주요 목적은 환기 파이프가 깨끗하고 잔해가 없는지 확인하는 것이다. 그런 다음 열화상 이미지를 모아 손상을 확인했다. 그림 6은 몇 개의 통풍구와 파이프가 있는 Coverdell Center의 옥상을 보여준다. 배출구가 확인되었고 파이프 주변의 녹이 변하기 시작하자마자 뜨거운 공기와 차가운 공기가 시간이 지남에 따라 금속을 녹이는 응축을 남기고 있음을 나타낸다.

3.2.2. 열 및 물 손상

조지아의 따뜻한 기후로 인해 UGA 캠퍼스에서 물과 열이 가장 많이 발생한다. 열 화상 카메라는 옥상의 표면과 표면 아래에 있는 물을 감지할 수 있다. 물이 주변의 표면보다 차갑기 때문이다 (Berdahl 외, 2008). 이 사례 연구에서 물이 가장 흔한 피해 원인 이었다. 여러 가지 지붕 구조와 재료에서 볼 때, 물과 강우가 솟아 오르면 이러한 지붕이 크게 손상되었다. 지붕에 있는 물은 강우 후에 발생하며 문제가 지속되고 수리되지 않으면 지붕을 통해 건물 내부로 새어 나올 수 있다. 그림 7은 1 년 미만의 건물에 착륙하는 작은 옥상을 보여줍니다. 상륙 중간에 작은 물이 솟아 있습니다. 이 검사 이전의 마지막 강우량은 약 일주일 전이었음을 주목하는 것이 중요합니다. 이는 향후에 다시 발생하는 문제가 있음을 나타냅니다. 그림 8 (b)에서 장기적인 물 손상이 보여질 수 있다. 검사에 앞서 이 건물은 종종 누출을 신고 한 것으로 알려졌습니다.



그림 6. Coverdell Center에있는 두 개의 굴뚝의 남쪽. 이 빌딩의 HVAC 시스템을 육안으로 검사하는 동안, 칼 쿨러 실린트 및 통풍구가 관찰되었으며 피뢰침과 주변 벽돌의 전체적인 마모가 관찰되었다.

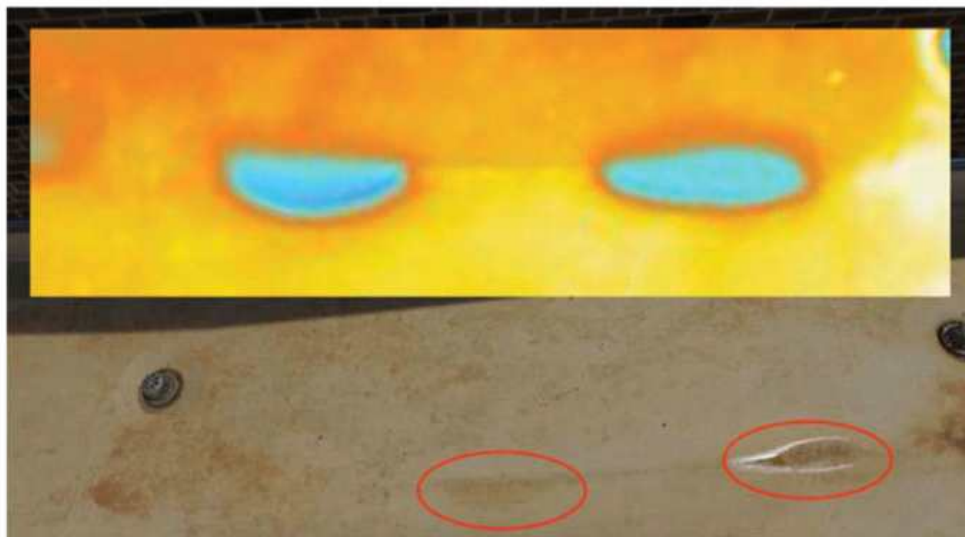


그림 7. Correll Hall 지붕의 단기간의 물 손상에 대한 자연색과 열 화상. 담겨있는 물은 열 화상에서 더 쉽게 발견 할 수 있다.

따라서 특정 검사는 내부의 물 손상 원인을 발견하기 위해 실시되었다. 넓은 지역이 발견되었다. 변색은 이것이 실제로 오래된 손상임을 입증한다. 옥상 주변의 과도한 초목으로 인해 물로 인한 손상이 될 수도 있다. 그림 8 (a)는 옥상의 일부를 덮고 있고 건물 높이를 넘는 나무가 있는 오래된 건물의 예를 보여준다. 나무의 캐노피 아래에는 커다란 수역이 보인다. 이 웅덩이는 과도한 식물과 과도한 배수로 인한

결과이다. 나무는 잎 아래에 물을 모으는 동시에 물이 제대로 증발되지 않도록 그 지역에 그늘을 제공한다. 또한, 지붕의 표면은 물이 거터 안으로 적절히 유입되는 것을 허용하지 않는다. 미네랄 함유 물은 지붕의 얼룩변색을 악화시키고 균열을 일으키는 빗물과 햇빛의 조합에서 발생할 수 있다 (Misra 2012; Hugues, Steiger and Weber 2005). 그림 9는 여러 가지 색소 침착한 얼룩변색 및 이미 부서진 다른 얼룩변색을 보여준다. 땅에 50 미터 이상 떨어지기 전에 얼룩변색을 막을 작은 선반이 있다. 이 옥상은 문제없이 계속 작동 할 수 있다. 그러나 얼룩변색이 얼룩변색 및 / 또는 너무 많은 얼룩변색이 한 곳에서 균열이 생기기 직전에 얼룩변색을 교체해야 한다.

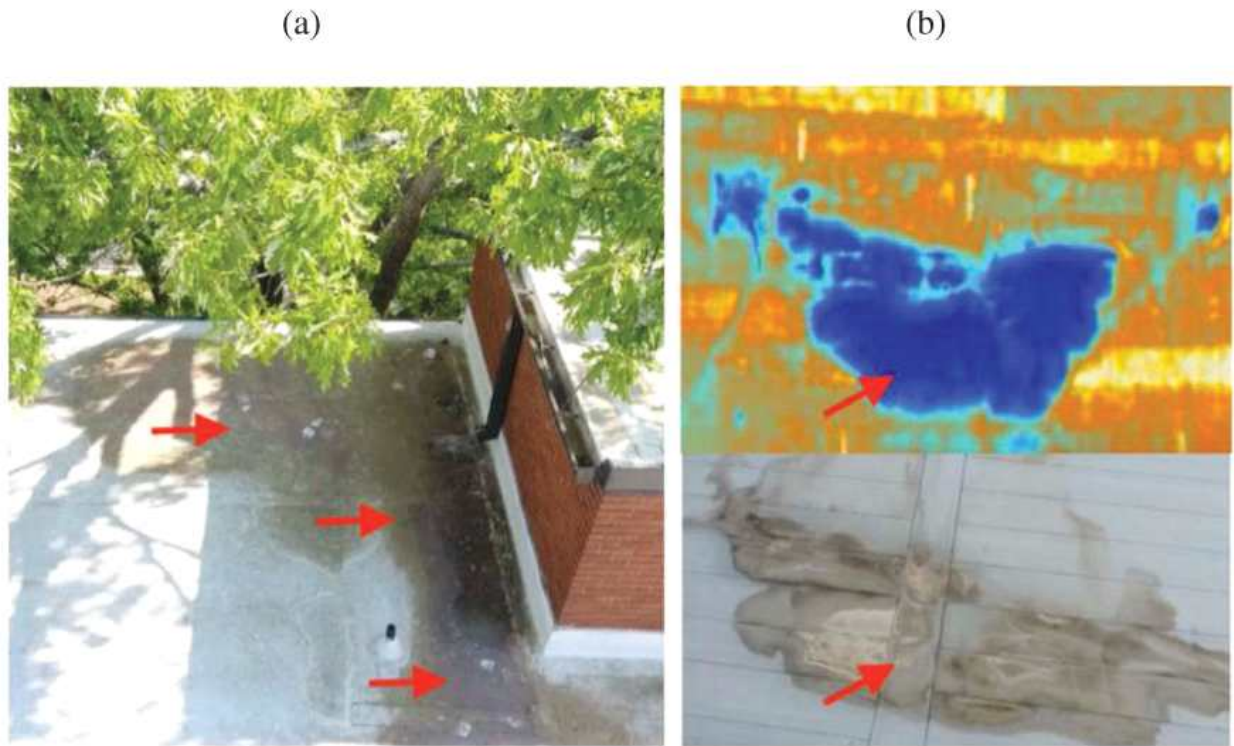


그림 8.이 그림은 장기적인 물 손상의 두 가지 예를 보여준다. 그림 (a)는 모리스 홀 (Morris Hall)이며 그림 (b)는 램지 학생 센터 (Ramsey Student Center)로 손상의 열 화상과 변색의 자연 색상 이미지를 보여준다.



그림 9. Miller Learning Center 지붕의 북쪽. 이 사진은 슬레이트 얼룩변색, 균열 및 파손을 보여준다. 빗물과 열로 인한 미네랄 함유 물은 이러한 피해를 초래할 수 있다. 사진 맨 아래에는 얼룩변색이 떨어지는 것과 비슷한 것으로 보인다.

4. 토 론

인력을 이용한 옥상 검사는 건물 유형 및 손상 유형에 따라 항상 실행 가능한 옵션이 아니다. UGA 캠퍼스의 많은 옥상에는 액세스 포인트가 없는 지붕이 있어 인간에 의한 검사가 거의 불가능하다. 옥상에 접근할 수 없는 건물을 검사할 때, 검사관은 사다리를 사용하여 검사 영역에 도달하며 이는 검사원에게 상당한 안전 위험이 된다. 현재 검사 방법을 개선하기 위한 시스템이 개발된다. 이 시스템은 고해상도 비주얼 카메라와 열 감지 카메라가 장착된 UAV를 사용했다. 촬영된 자연스러운 컬러 이미지는 사람의 검사 중에는 불가능한 지붕 꼭대기를 정확하게 보여준다. 열화상 감지 카메라는 건물의 열 프로파일을 스캔하고 온도의 불일치를 표시한다. 이러한 불일치는 물이 주변 공기의 주변 온도보다 열온도가 다를 수 있음을 통해 물에 의한 손상을 탐지한다. 이 사례 연구에서 UGA는 제안된 시스템의 테스트 베드로 사용되었다. 잠재적인 피해를 분석하기 위해 5개 건물을 선정했다. UAV 프로토 타입은 선택된 건물에 대해 다양한 유형의 손상을 발견했으며(표 4), 대형 옥상 검사에서 제안된 시스템을 사용할 수 있음을 증명했다.

4.1. 제한 사항

이미지의 대상 영역을 결정하는 방법은 여러 가지가 있다. 가장 효과적인 방법은 알려진 크기의 이미지에서 참조 객체를 사용하고 원하는 객체의 크기를 결정하기 위해 스케일링하는 것이다. 이 방법은 우리의 목적을 위해 가능하지 않았다. 다른 환경에서 비행할 때 참조할 객체가 많지 않았다. 면적 계산의 오류는 덜 정밀한 결정 방법을 대상에서 무인 항공기까지의 거리 오차와 함께 사용함으로써 발생한다. 이 가격대에서 가장 우수한 성능을 보였으므로 이 프로토 타입 용으로 선택된 UAV가 선택되었다. 다른 UAV는 검사를 수행하는 것과 비슷하거나 더 직관적인 패키지를 가지고 있지만 가격은 설정된 예산 범위를 벗어났다. UAV는 배터리 당 20분의 제한된 배터리 수명과 같은 고유한 단점을 가지고 있다. 고려해야 할 또 다른 요소는 연방 항공국 (Federal Aviation Administration)이 제정한 규정이다. 첫째, UAV의 조종사는 등록 및 검사를 수행하고 인증을 수행해야 한다. 또한 FAA는 조종사가 UAV를 탈 수 있거나 조종할 수 없는 구역 제한을 설정하고 있다.

4.2. 미래의 일

이미지에서 물체의 영역을 결정하는 데는 여러 가지 방법이 있지만 가장 일반적인 방법은 알려진 크기의 고정된 물체를 사용하는 것이다. 우리의 검사에서 일관된 마커가 사용되지 않으므로 가장 효과적인 방법은 2.3 절에 설명된 이미지 처리를 수행하는 것이다. 이미지 처리 정확도를 높이기 위해 더 높은 해상도의 열화상 카메라를 추가하여 멀리있는 물체에 더 많은 픽셀과 선명도를 제공할 수 있었다.

난방 시스템을 사용하는 동안 이러한 건물의 단열재를 검사하기 위해 겨울과 추운 달에 더 많은 검사가 필요하다. 건물 외부에서 난방 시스템에 대한 가장 정확한 데이터를 수집하려면 외부 공기가 빌딩 온도보다 낮지만 열 화상 이미지를 촬영해야 한다. 이것은 이미지에서 가장 큰 온도 대비를 만들게 된다. DJI GO 모바일 응용 프로그램 (Innovations 2016)의 소프트웨어 개발 키트 (SDK)를 편집하면 열 카메라의 실시간 스트림을 응용 프로그램의 화면에 임베드 할 수 있습니다. 이 추가는 실시간으로 열 화상 카메라로부터 파일럿 피드백을 제공하게 된다. 이렇게 하면 열 화상과 관련하여 중대한 손상이 발견될 경우 검사 중에 성능을 크게 향상시키고 이후의 비행을 방지할 수 있다.

5. 결 론

이 사례 연구에서 UGA의 이전 시설 검사 방법이 관찰되었다. 지붕이 있는 건물은 내부 손상이 발생한 후에 검사를 받았다. 열 화상 카메라가 장착된 무인 공중 차량 프로토 타입을 사용하여 기존의 방법보다 더 자주 그리고 더 빨리 검사를 수행할 수 있었다. 제안된 시스템은 대규모 시설 검사에 대한 새로운 예방적 접근법을 제시했다. 더욱이, UAV 프로토 타입은 신속하게 손상을 발견 할 수 있었지만, 외부 방관자가 비행중에 무인 항공기 근처에 있지 않도록 주의해야 한다.

<원문제목> Facility inspection using UAVs: a case study in the University of Georgia campus

<원문출처> International Journal of Remote Sensing journal