

UAV를 이용한 돔형 원자력 격납건물 외관조사를 위한 3차원 모델기반 비행 좌표 생성 방법

3-D Model-based UAV Path Generation for Visual Inspection of the Dome-type Nuclear Containment Building

김봉근¹⁾
Kim, Bong-Geun¹⁾

Received September 8, 2015; Received March 15, 2016 / Accepted March 15, 2016

ABSTRACT: This paper provides a method for generating flight path of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) that is intended to be used in visual inspection of dome-type nuclear containment building. The method basically employs 3-D model to extract accurate location coordinates. Two basic route patterns that provide guide lines in defining moving locations were defined for each side wall and dome section of the containment. The route patterns support sequential capturing of images as well. In addition, several simple equations and an algorithm for calculation of the moving location on the route were developed on the basis of 3-D geometric characteristics of the containment building. A prototype computer program has been implemented to validate the proposed method, and a case study shows the method can visualize covering area in 3-D model as well.

KEYWORDS: Nuclear Containment Building, Visual Inspection, Unmanned Aerial Vehicle, 3-D Model

키워드: 원자력 격납건물, 외관조사, 무인항공기, 3차원 모델

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

원자력 격납건물은 중요 국가기반시설로서 주기적인 외관조사가 실시된다. 돔 형식의 원자력 격납건물의 경우 돔의 최상단의 정점을 기준으로 일정 반경에 걸쳐 점검자가 직접 육안조사를 실시하는데 돔의 하부 지역은 점검자의 안전에 큰 위협요소를 가지고 있어 접근이 어렵다. 이와 같이 점검자가 직접 육안조사를 실시하기 어려운 구역의 경우 대체 수단으로서 망원 렌즈를 사용하기도 하지만 손상의 크기를 검출할 수도 없고, 시야를 확보하지 못하는 사각지대가 발생되기도 한다. 이에 본 연구에서는 육안점검이 어려운 고소지역에 대하여 효율적으로 고해상도의 이미지를 취득하기 위한 방안으로 소형 무인항공기를 활용하고자 하였다.

건설 분야에서 무인항공기와 관련하여 수행된 기존 연구 사례들(Rathinam et al., 2008; Harwin and Lucieer, 2012; Monographs et al., 2015)은 주로 시설물의 거시적 형상을 파악하는데 중점을

두고 있다. 따라서 시설물의 외관조사 목적에서 무인항공기의 경로를 작성하는 본 연구와는 세부 내용에서 차이가 있다. 무인항공기 또는 로봇과 같은 이동기기의 경로와 관련한 연구사례는 제조 또는 정보통신 분야에서 쉽게 찾을 수 있는데, 장애물을 회피하기 위한 경로 최적화 방법(Jun and D'Andrea, 2003), 3차원 지역모델에서 비행경로를 최적화하기 위한 경로 네트워크를 생성하는 방법(Tran et al., 2016), 그리고 이동기기가 조사하여야 하는 영역을 포괄하기 위한 경로 생성 방법(Englot and Hover, 2012)을 그 사례로 들 수 있다. 이들 연구 중 Tran 등(2016)의 연구는 3차원 모델 정보를 활용하는 측면에서 본 연구에서 접근하고자하는 개념과 유사하나 구조물의 국부영역을 촬영하기 위해 구조물의 표면을 따라 비행하는 경로 생성에 적용할 수 없다. 한편, Englot and Hover(2012)는 복잡한 기하형상을 가진 구조물의 점검을 위한 경로 생성 기법을 제시하고, 선체 하부 점검에 수중 음파 탐지 로봇의 이동 경로 생성에 적용한 바 있다. 그러나 이 기법은 원자로 격납건물의 단순한 기하형상을 고려할 때에 비교적 복잡한 처리 과정을 거쳐야 하며, 주어진

¹⁾정회원, 태성에스엔아이 이사 (bgkim@tssni.com) (교신저자)

공간 내에서 최적화된 경로를 찾기 때문에 구조물과 이동기간의 간격을 일정하게 유지하지 못한다.

앞서 설명한 원자력 격납건물의 외관조사는 구조물에 발행한 균열과 같은 열화현상을 발견하고 관리하는데 그 목적이 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 거시적인 형태를 파악하기 보다는 구조물 표면에 발생한 세부적인 열화현상을 파악하기 위한 이미지 취득에 무인항공기를 활용하고자 하였다. 특히 본 연구에서는 무인항공기를 통하여 취득한 이미지가 손상의 크기를 판독하기 위한 이미지 처리과정에서도 사용될 수 있도록 이미지를 취득할 때에 카메라 렌즈와 피사체 사이에 일정한 거리를 유지해야 하는 조건을 고려하였다. 조정사가 직접 무인항공기 비행을 조정하는 경우 카메라 렌즈와 피사체 사이의 거리를 일정하게 유지하도록 조정하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 본 연구에서는 3차원 모델을 활용하여 무인항공기의 이동 경로가 카메라와 피사체가 일정한 거리를 유지할 수 있는 좌표를 계산하기 위한 방법을 개발하였다.

본 논문의 2장에서는 동형 원자력 격납건물의 형태적 특성을 고려하여 무인항공기의 이동 경로를 산정하기 위한 방법을 설명하였으며, 3장에서는 2장에서 제시된 이론적 방법의 검증을 위해 개발한 시범 프로그램에 관하여 기술하였다. 4장에서는 개발된 프로그램의 효용성 검토를 위한 사례연구의 하나로써 시범 3차원 모델을 대상으로 무인항공기와 피사체와의 거리에 따른 촬영 가능한 영역을 비교한 사례에 대하여 설명하였다.

2. 무인항공기의 이동 위치 결정 방법

2.1 연속촬영 경로 설정

본 연구에서는 고해상도 이미지의 취득을 위해 해당 좌표에서 무인항공기가 고정 비행 중인 상태인 것으로 가정하였다. 따라서 본 논문에서 의미하는 연속촬영은 서로 인접한 구역에 대하여 차례대로 이미지를 촬영하는 것을 의미하며, 이동 중의 촬영을 의미하지는 않는다.

콘크리트 구조물 표면의 손상을 검출하기 위한 이미지 프로세싱 과정 중에는 구조물 영역별로 촬영된 여러 이미지를 하나로 붙이는 작업이 수행된다. 이미지를 하나로 붙이는 작업은 프로그램에 의해 수행된다. 이때에 프로그램이 임의의 사진을 검사하여 연속된 이미지를 찾는 것보다는 연관된 이미지를 연속적으로 배열함으로써 불필요한 이미지 분석 과정을 줄이는 것이 보다 효율적이다. 또한 무인항공기의 비행시간은 배터리 용량에 의해 제약을 받는다. 따라서 무인항공기의 비행시간을 좀 더 효율적으로 사용하기 위해서는 최소한의 촬영 회수로 많은 면적에 대한 이미지를 취득하는 것이 필요하다.

연속된 촬영을 위한 기준 이동 방향은 두 가지로 나눌 수 있는데 첫째는 수평 방향으로 이동하면서 이미지를 연속적으로 취득

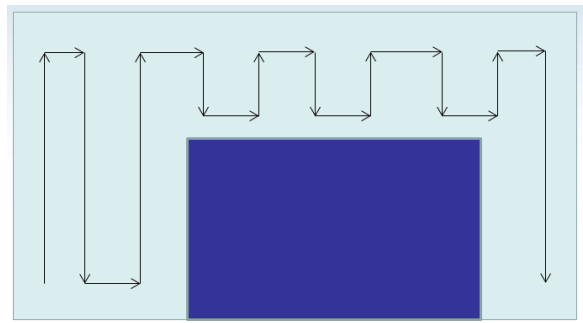


Figure 1. Basic flight pattern for external wall section

하는 것이고, 둘째는 수직 방향으로 이동하면서 이미지를 취득하는 것이다. 동형 원자로 격납건물의 특성을 고려할 때에 원통형 벽면 부위와 상부 돔 부위는 그 구조적 특성에 의해 연속적인 촬영을 위한 기준 이동 경로를 다르게 적용하여야 한다.

먼저 원통형 벽면을 촬영하는데 있어 Figure 1에 나타난 바와 같이 벽면에 설치된 일부 구조물과 주변 구조물과의 간섭이 발생된다. 따라서 수평 방향으로 이동하면서 연속된 이미지를 촬영하려 하는 경우 방해 구조물을 우회하여야 하는 불필요한 비행을 시간을 필요로 한다. 한편, 수직 방향을 기준으로 이동하며 이미지를 취득하는 하는 경우 Figure 1과 같이 목표가 되는 영역에서 인접한 구역에 대하여 연속적인 이미지 취득이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 벽면 구역의 이미지 취득을 위한 경로 생성 시 수직 방향을 기본 이동 방향으로 설정하였다.

한편, 상부 돔 구역의 경우 비행을 수행하는데 있어 방해 요소가 없기 때문에 이동 중 우회를 위한 방법을 고려할 필요는 없다. 다만 돔 구조의 특성에 따라 다음의 Figure 2에 나타난 바와 같이 수직 방향을 고정 기준으로 설정하는 경우 상부로 올라갈수록 불필요하게 중복된 이미지 영역이 많아진다. 따라서 본 연구에서는 상부 돔 영역의 촬영을 위한 비행경로의 경우 수평방향을 연속 촬영의 기준으로 하였으며, 이에 따라 상부로 올라갈수록 이미지 취득을 위한 대기 상태가 적어질 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

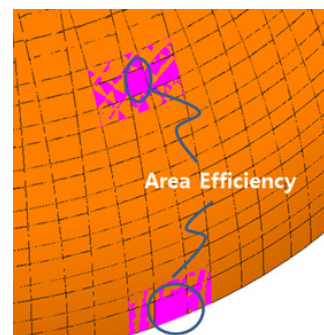


Figure 2. Variation of area efficiencies in dome section

2.2 이미지 크기 계산

본 논문의 2.3절에서 제시하는 무인항공기의 이동 좌표는 무인항공기의 위치에서 취득하는 이미지 영역을 기준으로 결정된다. 따라서 이동에 대한 좌표를 산정하기에 앞서 이미지 영역의 크기를 계산하는 과정이 필요하다. 이미지 영역의 크기는 무인항공기에 장착되는 카메라와 렌즈의 특성에 따라 다르며, 무인항공기와 구조물 간의 거리에 따라 변화된다. 카메라의 경우 빛을 받아 유효 이미지로 생성하는 가로와 세로의 비율에 대한 특성과 렌즈의 화각에 대한 특성은 이미지의 취득 영역에 영향을 미치며, 그 개념도를 그림으로 나타내면 다음 Figure 3과 같다. Figure 3에서 d 는 카메라 렌즈 끝단과 피사체 간의 거리, 그리고 α 는 렌즈의 특성 값 중 하나인 화각을 각각 나타내며, Case 1과 Case 2는 $d=5\text{m}$, $d=10\text{m}$ 의 경우에 대하여 취득되는 이미지 영역을 동일한 크기의 블록을 대상으로 비교하여 나타낸 것이다.

무인항공기를 통해 취득되는 이미지가 실제 구조물에서 차지하는 수직 방향의 영역 크기를 S_v 라 하고 수평 방향의 영역 크기를 S_h 라 할 때, S_v 와 S_h 는 각각 다음의 식 (1) 및 식 (2)에 따라 구할 수 있다.

$$S_v = 2 \times d \times \tan(\alpha/2) \quad (1)$$

$$S_h = S_v \times r \quad (2)$$

식 (2)에서 r 은 카메라 특성 값 중 하나인 취득되는 이미지의 가로와 세로방향 크기의 비율이다.

2.3 무인항공기의 기본 이동 각 계산

돔 형식 원자로 격납건물의 중심 축을 원점으로 할 때에 무인항공기가 이동해야 하는 위치를 그림으로 나타내면 Figure 4와 같다. 이에 따라 원점을 기준으로 무인항공기가 임의의 위치에서 다음 위치로 옮겨가기 위한 회전 각은 식 (2)에 의해 구해진 수평 방향의 촬영 영역을 참조하여 구할 수 있다. 무인항공기의 수평방향 회전 각을 θ_h 라 할 때에 θ_h 는 다음의 식 (3)에 따라 구할 수 있다.

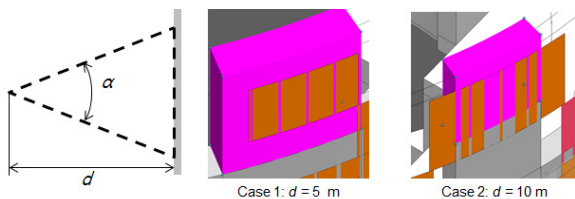


Figure 3. Variation of area efficiencies in dome section

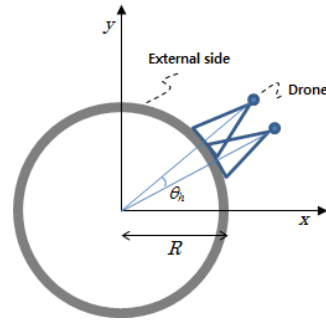


Figure 4. Horizontal moving angle

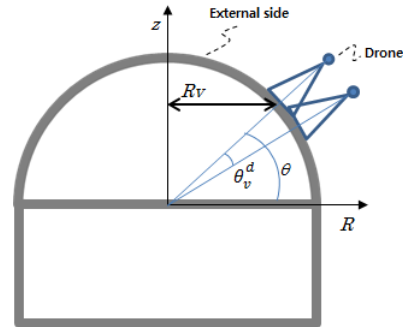


Figure 5. Vertical moving angle in dome section

$$\theta_h = 2 \times \arcsin\left(\frac{\gamma S_h}{2Rv}\right) \quad (3)$$

여기서, γ 는 연속된 이미지의 중첩 영역을 고려하기 위한 비율로서 본 논문의 4장 사례연구에서는 이미지 처리를 위해 필요로 하는 중첩비율이 30%인 것으로 가정하여 0.7의 값을 사용하였고, Rv 는 Figure 5에 나타난 바와 같이 돔 중심으로부터 외곽까지의 거리로서 식 (4)에 따라 변화된다.

$$Rv = \cos\theta \times R \quad (4)$$

여기서, R 은 원자로 격납건물의 반지름을 나타내고, θ 는 돔 상부의 수직 방향 이동 각인 θ_v^d 의 누적으로 구할 수 있으며, θ_v^d 는 식 (3)과 같은 방법으로 다음의 식 (5)에 따라 산정한다.

$$\theta_v^d = 2 \times \arcsin\left(\frac{\gamma S_v}{2R}\right) \quad (5)$$

한편, 3차원 공간 직교좌표계에서 Z 축을 수직 방향으로 정의할 때에 벽체 구역에서 수직방향으로 이동하는 경우 Z 축에 대한 이동 거리를 산정하며, 이를 d_v 라 할 때에 식 (1)에 의해 구한 수직 촬영 영역 참조하여 다음의 식 (6)에 따른 값을 사용한다.

$$d_v = \gamma S_v \quad (6)$$

2.4 무인항공기의 이동 위치 산정 프로세스

앞서 설명한 이미지 크기 산정 방법 및 회전 각 계산 방법을 이용하여 무인항공기의 이동 좌표를 산정하는 과정은 Figure 6 과 같다. Figure 6에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 무인항공 기의 이동 좌표를 산정하는 과정을 크게 돔 구역과 벽체 구역으 로 나누었다. 돔 구역을 대상으로 Figure 6의 계산과정을 받지 를 $R=28m$, $d=3m$, $\alpha=46^\circ$ 로 가정한 사례 들면 다음과 같다.

먼저 이미지 영역에 대한 크기 S_v 와 S_h 는 각각 식 (1)과 (2)에 의해 약 2.5468m와 3.8202m를 얻을 수 있다. 이후 $\theta=0^\circ$ 인 첫 시작점에서 다음 촬영 위치의 이동 각 위치 θ_h 는 식 (3)에 의해 산정될 수 있는데 이 때 $\theta=0^\circ$ 이므로 식 (4)에 의해 $Rv=28m$ 를 식 (3)에 대입할 수 있고, 이에 따라 계산된 θ_h 는 약 5.470° 가 된다. 이후 돔의 중심축을 기준으로 한 극좌표계 상에서의 무인 항공기의 위치를 R , d , 그리고 θ_h 의 값을 이용하여 산정하고, 이를 다시 원자로 격납건물 중앙에서 촬영 시작점 방향을 X축,

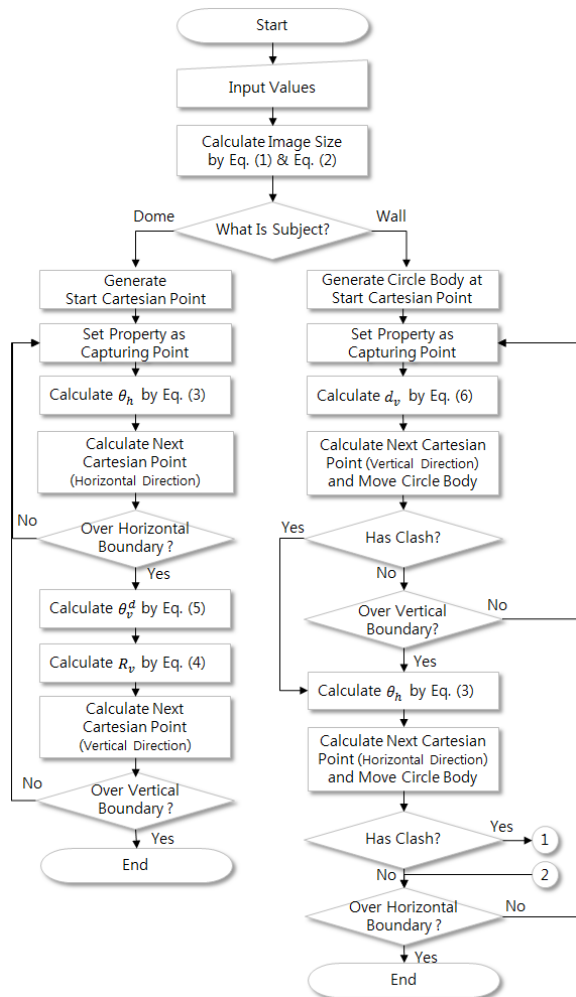


Figure 6. Basic flowchart for calculating image capturing points

높이 방향을 Z축으로 하는 직교좌표계의 좌표로 변환한다. 이러한 과정은 해당 위치의 수평 평면에 대하여 돔 주위를 한 바퀴돌 때까지 수행하며, 이후 돔의 상부 쪽 방향으로 이동하기 위한 회전 각 θ_v^d 는 식 (5)에 의해 산정한다. 앞서 가정한 사례에서 θ_v^d 는 약 3.649 가 된다.

격납건물 벽체의 경우 벽체에 인접한 구조물에 의해 무인항공기가 비행할 수 없는 경우가 발생된다. 이와 같이 비행할 수 없는 경우를 검사하기 위해 본 연구에서는 솔리드 연산 중 Intersection 함수를 이용하였다. Figure 6에서 벽체에 관한 프로세스 중 'Circle Body'는 충돌을 검출하기 위해 생성하는 임시 솔리드 객체를 의미한다.

2.1절에서 설명했던 벽체에 관한 무인항공기 기본 이동 경로를 고려할 때에 두 가지의 제약 상황이 발생되는데 첫째는 수평 방향 이동에 제약되는 경우이며, 둘째는 수직 방향 이동에 제약되는 경우이다. 본 연구에서는 수직 방향 이동에 제약되는 경우 Figure 6에 나타난 바와 같이 수평 방향으로 이동하도록 하였으며, 수평 방향 이동에 제약되는 경우 Figure 7에 나타난 방법에 따라 해당 위치에서 최상부로 이동 후 수평 방향으로 이동하는 프로세스로 알고리즘을 구성하였다. 이와 같은 프로세스에 의해 무인항공기가 지장물을 회피하는 경로를 나타내면 Figure 8과 같다.

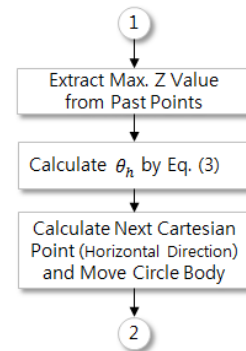


Figure 7. Sub-process for avoiding horizontal limitation

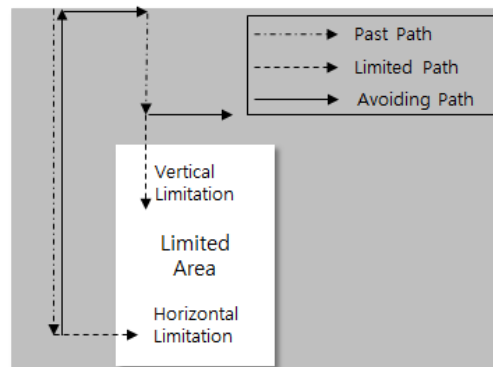


Figure 8. Avoiding points for each limitation case

3. 검증을 위한 프로그램 설계 및 구현

앞서 설명한 방법의 구현 가능성을 검증하기 위해 Bentley MicroStation에서 구동되는 Add-in 형식의 프로그램을 개발하였다. 프로그램이 점검 대상 영역을 구분하고 점검 대상체의 기하학적 특성을 자동으로 추출하기 위해 몇 가지 모델링 조건이 필요하였으며, 3.1절에 세부적으로 설명하였다.

3.1 3차원 모델링 조건 설정

모델에서 높이 방향은 모델 전체 좌표계에서 Z 축인 것으로 정의하였다. 이에 따라 수평방향은 X-Y 평면에 존재하며, 식 (3)을 이용하여 산정한 수평 이동 각에 대한 좌표는 극 좌표계에서 직교 좌표계로 변환하여 최종 무인항공기의 위치를 표현한다.

한편, 점검 대상체를 구분하기 위한 방법으로서 본 연구에서는 MicroStation의 'Level'명을 이용하였다. 일반적으로 본 연구에서 대상으로 하는 동형 원자력 격납건물의 안전점검 구역은 벽체와 돔 구역으로 크게 구분되며, 벽체는 다시 텐돈(Tendon) 정착을 위한 버팀대를 기준으로 A, B, 그리고 C의 3개 구역으로 구분된다. 실제 안전점검 실무에서 각 벽체는 Figure 9에 나타난 바와 같이 다시 격자화하여 구분되며, 손상이 어느 구역에 존재하는지를 세부적으로 표현한다. 그러나 본 연구 범위인 무인항공기의 이동 경로 산정만을 고려하는 경우 각 구역의 매스 모델(mass model)만 있으면 무인항공기의 이동 범위를 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 모듈 구동에 필요한 대상 모델을 Figure 10과 같은 모델로 설정하였다. 시범 모듈 개발 시 Figure 10의 각 매스 모델 객체는 'Dome', 'Wall_A', 'Wall_B', 'Wall_C'의 Level 명칭에 의해 구분될 수 있도록 하였고, 충돌 검토를 위한 3차원 객체들은 'Clash'의 Level 명칭에 의해 구분될 수 있도록 하였다.

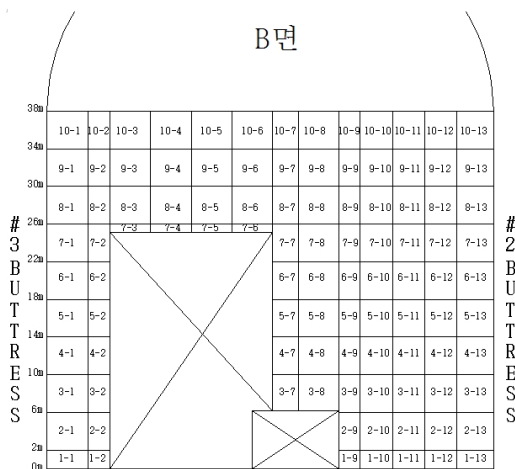


Figure 9. Representation of target section in practice

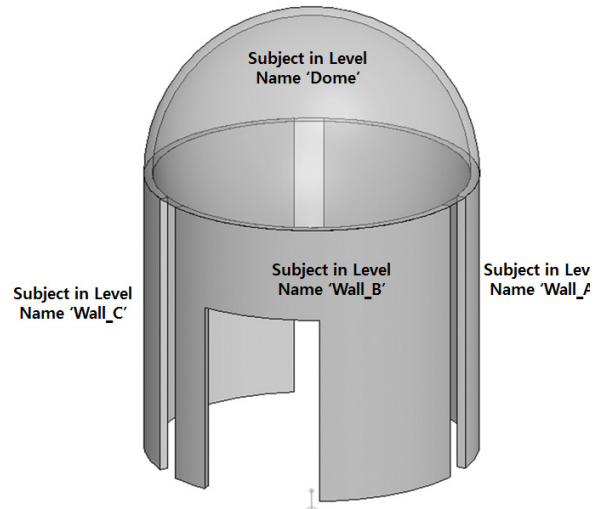


Figure 10. 3-D model condition for target inspection area

3.2 기준 중심 좌표 및 반지름 추출 방법

식 (4)에서 무인항공기의 이동 좌표를 산출하는데 가장 기본이 되는 돔의 중심점 좌표는 돔 매스모델의 기하학적 특성 분석을 통해 산정할 수 있다. 본 연구에서는 중심점 좌표의 Z축 좌표는 돔의 최 하단과 같은 높이로 설정하고, X-Y 평면상에서의 중심점 좌표는 돔의 매스모델이 차지하는 최대 및 최소 X, Y 영역에 대한 좌표의 평균을 구하여 산정하였다. 한편, 반지름 R 값은 앞서 구한 최대 및 최소 영역의 차이를 이용하여 계산할 수 있다.

3.3 모듈 구성 및 구현 사례

Figure 11은 2장에서 제시한 방법의 검증을 위해 개발된 프로그램의 주요 모듈을 기능별로 나누어 나타낸 것이다. Figure 11

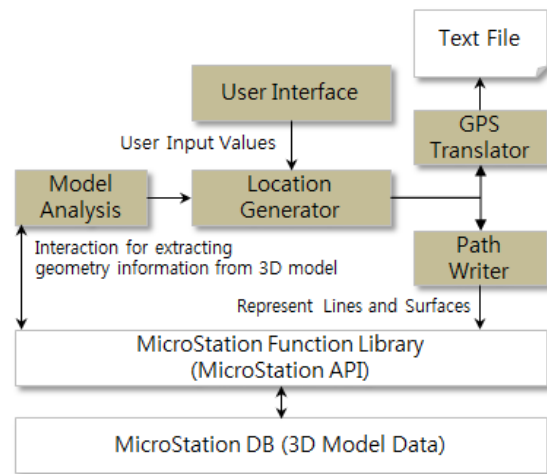


Figure 11. Implemented program modules

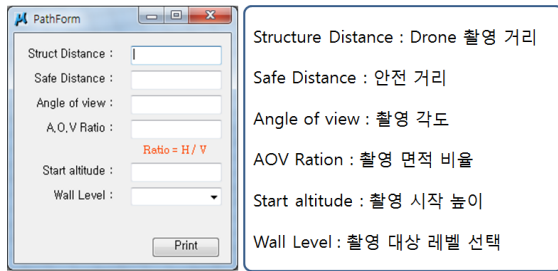


Figure 12. User interface for initial data input

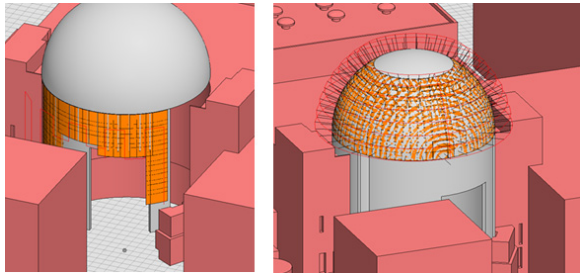


Figure 13. Example of path visualization in 3-D model space

에서 'Model Analysis' 모듈을 앞서 3.2절에 설명된 내용을 처리하는 모듈이며, 'Location Generator'는 2장에서 제시된 내용을 처리하는 모듈이다. 2장에서 설명된 방법을 처리하기 위해 필요한 기본 데이터를 입력받기 위한 사용자 인터페이스는 Figure 12와 같다.

최종 산출된 결과는 3차원 모델과 텍스트 형식으로 출력될 수 있도록 개발하였다. Figure 110에서 'Path Writer'는 Figure 13에 나타난 바와 같이 무인항공기의 이동 경로에 대한 선과 무인항공기가 이동하면서 취득하는 촬영 영역을 가시화하기 위한 기하형상 데이터를 작성하여 MicroStation 상에서 표출시키는 기능을 제공한다. 또한 'GPS Translator'는 모델 내의 특정 좌표와 매핑되는 GPS 좌표를 사용자로부터 입력 받아 직교 좌표계로 정의된 무인항공기의 위치 좌표를 경위도 형식의 GPS 데이터로 변환하여 텍스트 파일로 출력한다.

4. 시범 사례 연구

목표 점검구역 주변에 복잡하게 구조물들이 배치된 상황을 모사하기 위해 신월성 1, 2호기를 사례 연구 대상으로 선정하였다. 신월성 1, 2호기의 경우 Figure 14에 나타난 바와 같이 무인항공기가 비행하는데 있어 주변에 지장요소로 작용되는 구조물이 복잡하게 설계되어 있다. 특히 Figure 15에 나타난 바와 같이 무인항공기와 피사체와의 거리에 따라 무인항공기를 통하여 취득할 수 있는 이미지의 영역이 달라질 수 있는 조건을 가지고 있다.

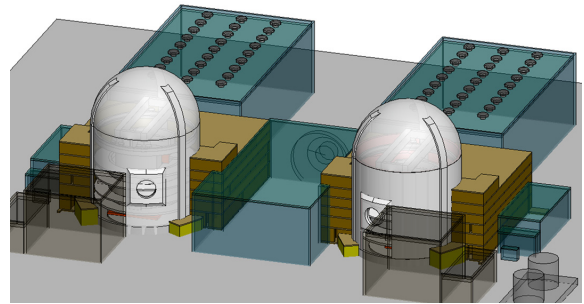


Figure 14. Overall look of test model

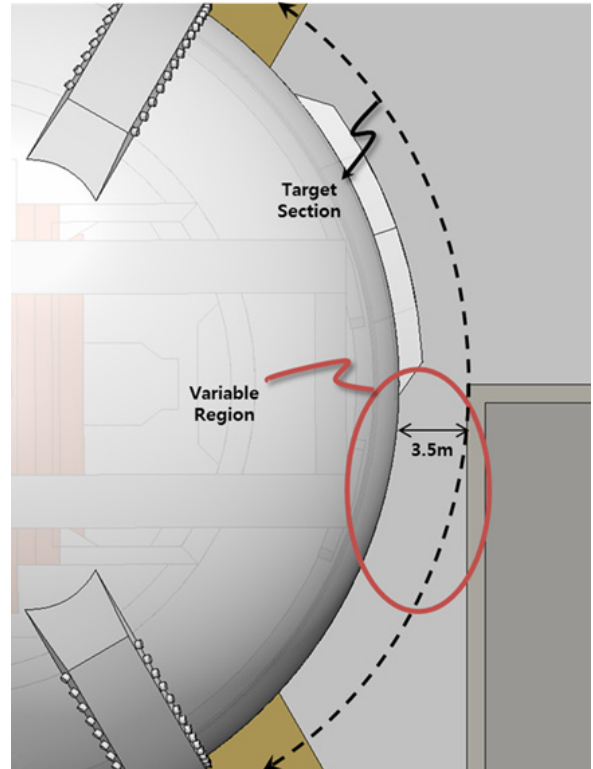


Figure 15. Details of test model

Figure 16부터 Figure 18은 무인항공기와 피사체와의 거리를 2m, 3m, 5m로 변화하면서 무인항공기가 취득할 수 있는 이미지의 영역을 경로와 함께 나타낸 것이다. 이때 카메라 렌즈의 화각은 46도, 안전거리는 1m, 가로/세로의 비율은 1.5로 설정하였으며, 이는 표준형 카메라 및 렌즈 특성에 준하는 값이다.

Table 1은 앞서 도출된 촬영 영역을 각 거리에 따라 나타낸 것이다. 돔 구역의 경우 회피할 영역이 없으므로 목표의 영역 전체를 소화할 수 있었으며, 벽면의 경우 일부 회피 과정에서 촬영의 사각 지대가 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 개발된 모듈이 단순히 무인항공기의 이동 경로만을 텍스트로 출력하는 것뿐만 아니라 무인항공기에 설치되는 카메라의 조건을 설계하는데도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

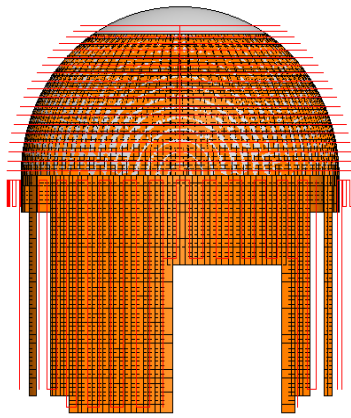


Figure 16. UAV path and covering area (distance = 2m)

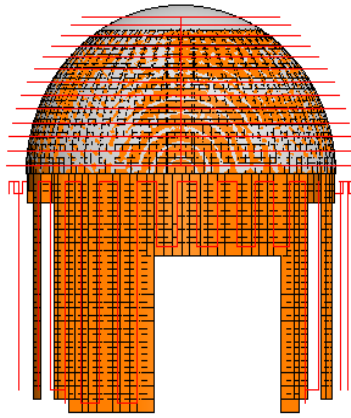


Figure 17. UAV path and covering area (distance = 3m)

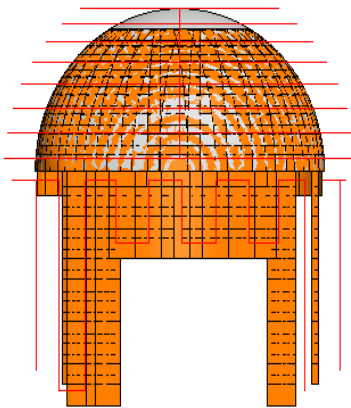


Figure 18. UAV path and covering area (distance = 5m)

5. 결론

본 논문에서는 동형 원자력 격납건물의 외관조사를 수행하는데 있어 점검자가 접근하기 어려운 고소지역 점검에 무인항공기를 활용하기 위해 필요한 요소기술의 하나로서 무인항공기의 이동 좌표를 자동으로 생성하기 위한 방법을 제시하였다. 특히

Table 1. Comparison of target areas and estimated image areas for each camera distance

Camera Distance	Target Section	Target Area (m ²)	Image Area (m ²)	%
2m	Dome	2,789	2,789	100.00
	A	599	472	78.80
	B	1,244	1,236	99.36
	C	594	526	88.55
3m	Dome	2,789	2,789	100.00
	A	599	456	76.13
	B	1,244	1,219	97.99
	C	594	508	85.52
5m	Dome	2,789	2,789	100.00
	A	599	441	73.62
	B	1,244	1,169	93.97
	C	594	501	84.34

본 연구에서는 기존의 상용 모델에서 제공하는 GIS 기반의 맵에서 사용자가 포인팅하는 데이터를 사용하기 보다는 3차원 모델을 이용하여 좀 더 정밀한 좌표를 생성할 수 있도록 하였다. 이와 같이 수행된 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

본 연구에서는 무인항공기를 통해 연속적인 이미지를 획득하는데 기준이 되는 이동방향을 벽체 구역의 경우 수직방향 그리고 돔 구역의 경우 수평방향인 것으로 정의하였다. 다만 벽체 구역의 경우 이동 중 제약조건이 존재한다는 가정 하에 정의한 것으로서 이동 중 제약조건이 없는 경우 카메라가 획득하는 사진의 가로와 세로 비율에 따라 그 효율성이 달라질 수 있다. 이에 대한 조건 판별식은 추가 연구로 수행될 예정이다.

무인항공기에 탑재되는 카메라 및 렌즈의 조건이 같다면 무인항공기와 건물과의 거리가 멀수록 이동 길이가 짧아질 수 있다. 그러나 벽체의 경우 인접한 건물에 의해 촬영이 불가능한 영역이 발생될 수 있다. 본 연구에서 개발된 모듈의 경우 카메라 및 렌즈의 특성을 고려할 수 있어 점검 전 무인항공기의 이동 거리와 촬영 영역에 대한 간접적인 평가가 가능하므로 무인항공기 운영 계획을 수립하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 동형 원자력 격납건물의 표면과 일정한 거리를 유지하면서 무인항공기를 이동하기 위해 필요한 좌표 산정방법을 이론적인 측면에서 제시한 것이다. 따라서 실제 구조물과 무인항공기의 이동좌표를 연계한 추가의 실험 연구를 통해 그 결과의 추가 검증이 필요하다. 이를 위해서 3차원 모델의 기준점과 매핑되는 현장의 기준점에 대하여 정밀 GPS 측정이 수행되고, 3.3절에서 설명하였던 좌표변환 모듈을 이용하여 무인항공기에 입력될 GPS 좌표를 생성할 수 있다. 그러나 무인항공기에 탑재된 GPS는 오차를 포함하고 있기 때문에 무인항공기의 실제 위치가 계획된 위치에서 벗어날 수도 있다. 본 논문에서는 이미지

의 중첩 비율을 계산법에 고려하였으므로 이미지 취득에 누락될 여지는 방지할 수 있지만 후속 연구에서는 충돌 안전성 확보를 위해서라도 GPS 오차를 보정하기 위한 방안이 마련되어야 할 것이다. 또한 본 논문에서는 무인항공기를 통해 수집된 이미지를 다시 3차원 모델의 표면에 매핑하는 방법을 제시하고 있지는 않다. 따라서 촬영된 이미지와 해당 이미지에 의해 추출된 손상의 기하학적 형상이 다시 3차원 모델에 매핑 될 때의 오차 발생 여부와 그 범위에 대한 추가 연구 또한 필요하다. 마지막으로 본 연구는 동형의 원자력 격납건물을 대상으로 수행하였으나 추후 댐, 사면, 케이블 교량의 주탑 상부와 같은 기하 형상이 비교적 단순하면서 인력의 접근이 용이하지 않은 구조물의 점검을 위한 일반화된 방법 개발에 참조될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 에너지기술개발사업(과제번호: 20131520100 720)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

References

Englot, B., Hover, F. S. (2012). Sampling-based coverage path planning for inspection of complex structure, Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Automated Planning and Scheduling, pp.

29-37.

Harwin, S., Lucieer, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, Remote Sensing, Vol. 4, No. 6, pp. 1573-1599.

Jun, M., D' Andrea, R. (2003). Path planning for unmanned aerial vehicles in uncertain and adversarial environments, in Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms, eds. Butenko, S., Murphey, R., and Pardalos, P. M., Springer, pp. 95-111.

Monographs, J. J., Lin, K. K., Han, M., Golparvar-Fard, M. (2015). A Framework for Model-Driven Acquisition and Analytics of Visual Data Using UAVs for Automated Construction Progress Monitoring, Proceedings of Computing in Civil Engineering 2015, pp. 156-164.

Rathinam, S., Kim, J. W., Sengupta, R. (2008). Visionbased monitoring of locally linear structures using an unmanned aerial vehicle, Journal of Infrastructure Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 52-63.

Tran, C., Ullah, F., Lee, S. (2016). A roadmap creation algorithm based on visibility graph for flight path planning, Proceedings of KICS Conference 2016, Vol. 59, pp. 657-658.