

Siemens star를 이용한 드론 영상의 품질 평가 Quality Evaluation of Drone Image using Siemens star

이재원¹⁾ · 성상민²⁾ · 백기석³⁾ · 윤부열⁴⁾

Lee, Jae One · Sung, Sang Min · Back, Ki Suk · Yun, Bu Yeol

Abstract

In the view of the application of high-precision spatial information production, UAV (Unmanned Aerial Vehicle)-Photogrammetry has a problem in that it lacks specific procedures and detailed regulations for quantitative quality verification methods or certification of captured images. In addition, test tools for UAV image quality assessment use only the GSD (Ground Sample Distance), not MTF (Modulation Transfer Function), which reflects image resolution and contrast at the same time. This fact makes often the quality of UAV image inferior to that of manned aerial image. We performed MTF and GSD analysis simultaneously using a siemens star to confirm the necessity of MTF analysis in UAV image quality assessment. The analyzing results of UAV images taken with different payload and sensors show that there is a big difference in σ_{MTF} values, representing image resolution and the degree of contrast, but slightly different in GSD. It concluded that the MTF analysis is a more objective and reliable analysis method than just the GSD analysis method, and high-quality drone images can only be obtained when the operator make images after judging the proper selection the sensor performance, image overlaps, and payload type. However, the results of this study are derived from analyzing only images acquired by limited sensors and imaging conditions. It is therefore expected that more objective and reliable results will be obtained if continuous research is conducted by accumulating various experimental data in related fields in the future.

Keywords : UAV photogrammetry, Modulation Transfer Function, Ground Sample Distance, Image quality

초 록

고정밀 공간정보제작 분야의 활용 측면에서 무인항공사진측량은 촬영된 영상의 정량적인 품질 검증 방법과 인증에 대한 절차와 세부 규정이 미흡한 문제점이 있다. 또한, 영상에 대한 검증 수단이 해상도와 명암의 대비 정도를 동시에 분석할 수 있는 MTF (Modulation Transfer Function) 분석이 아닌 GSD (Ground Sample Distance) 만으로 품질을 평가하고 있어 유인항공영상보다 품질이 떨어지는 경우도 있다. 이에 본 연구에서는 드론 영상 품질 분석에서 MTF 분석의 필요성을 확인하기 위해 Siemens star를 이용하여 GSD와 MTF 분석을 동시에 실시하였다. 서로 다른 드론 기체와 센서로 동일한 해상도로 타겟을 촬영한 영상을 분석한 결과, GSD에서는 약간 상이한 결과를 나타내었지만, 영상의 해상도와 명암의 대비 정도를 동시에 분석할 수 있는 σ_{MTF} 수치는 큰 차이를 나타내었다. 이와 같은 결과로 MTF 분석이 보다 객관적이며 신뢰도 높은 품질분석 방법이라고 결론지을 수 있다. 아울러 작업자가 카메라 센서의 성능, 중복도 및 기체의 성능을 적절하게 판단하여 촬영을 실시하여야만 높은 품질의 드론 영상을 획득할 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 본 연구는 제한된 기체와 촬영 조건하에서 취득된 영상으로만 분석을 수행한 결과이다. 따라서 향후 관련 분야의 다양한 실험 데이터를 축적하여 지속적인 연구를 수행하면 보다 객관적이고 신뢰성 있는 결과를 도출할 것으로 기대된다.

핵심어 : 무인항공사진측량, MTF, 지상표본거리, 영상 품질

Received 2022. 06. 08, Revised 2022. 06. 14 Accepted 2022. 06. 15

1) Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University (Email: leejo@dau.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Researcher, CCZ Forest Management Office, Korea Forest Conservation Association (Email: sungsm@kfca.re.kr)

3) Adjunct Professor, School of Building & Environment Design, Ulsan College (Email: back08970@daum.net)

4) Member, Professor, Dept. of Real Estate, Chang-Shin University (Email: yby915@cs.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

드론 영상은 비측량용 카메라, 저가의 항법장치 사용 및 기체의 불안정한 거동과 문제점으로 인하여 품질 확보가 어려운 문제점이 있다. 이러한 요소들로 품질의 저하가 발생하면 재촬영 시 추가적인 인력과 비용, 시간이 소요된다. 또한, 현재 드론을 이용한 공간정보 데이터 구축 시 정량적인 품질 검증 및 인증에 적용 가능한 규정이 없어 데이터 품질의 신뢰성 확보가 어려운 문제점이 있으며, 영상 품질에 대한 검증 수단은 GSD 분석으로만 품질을 평가하는 실정이다(Sung, 2019).

한편, 공간해상도란 영상에서 보이는 미세한 세부사항을 포착할 수 있는 영상 시스템의 능력을 나타낸다(ISO 12233). 공간해상도를 측정하는 방법에는 GSD, MTF, 경계반응 및 선명도(sharpness) 등 다양한 기법이 있다. GSD (Ground Sample Distance)는 하나의 픽셀 범위가 실제 지상에서 나타내는 거리를 의미한다. MTF (Modulation Transfer Function), 즉 변조전달함수는 영상의 GSD와 명암정보를 동시에 분석하여 영상의 품질을 객관적이며 정량적으로 측정할 수 있는 기법이다(Sung, 2019).

항공영상의 품질 분석에 대한 연구 동향은 다음과 같다. Liang *et al.*(2011)은 유인항공영상의 품질 검증 기법과 검증 지표를 주관적 및 객관적 방법으로 연구하여 제시하였다. 주관적인 방법은 구름과 그림자, 영상의 노이즈를 작업자의 시각으로 판단하는 방법이다. 객관적인 방법은 영상의 최대변위량과 선명도, 영상의 대비 정도 및 Red, Green, Blue 색상의 밝기 등을 S/W를 이용하여 판단하는 방법이다. Jiang *et al.*(2010)은 유인항공영상에 대한 국가별 관련 표준 및 규정 등에 따른 품질 검사 기술의 현황을 분석하고 품질검사 시스템을 제시하였다. 제시한 시스템은 데이터의 품질, 영상의 품질, 비행 품질 등으로 나누어 제시하였다. 드론 영상에 대한 품질 분석 연구동향을 살펴보면 Sieberth *et al.*(2016)은 카메라의 움직임에 의해 발생한 무인항공영상의 흐림 현상을 자동으로 필터링하는 기법을 개발하였다. 개발된 기법은 흐림 현상을 자동으로 감지 및 제외할 수 있어 객관적인 분석이 가능한 방법이다. Dabrowski와 Jenerowicz(2015)는 드론에 탑재된 카메라 센서를 검증하기 위해 PIQuAT라는 휴대용 품질 평가 테스트 시트를 제작하였다. PIQuAT는 나무판으로 제작하였다. 현장조건에 따라 테스트 시트의 구성을 결합 및 분리할 수 있다. 또한 공간해상도, 분광해상도 및 방사해상도를 동시에 평가하여 다양한 센서의 검증을 용이하게 하였다. 국내에서는 Lee(2012)가 유인항공영상을 해상도 타겟을 이용하여, GSD, 경계반응, MTF 분석을 실시하였다. Lim *et al.* (2018)은 지상식별도인 GRD (Ground

Resolved Distance)의 개념을 도입하여 경계 타겟을 이용한 분석을 통해 드론 영상의 선명도 지표를 추출 및 평가하였다. Lee *et al.* (2019)은 균질한 품질의 영상 확보가 어려운 드론 영상에 대해 Bar target과 Siemens star를 이용하여 공간해상도와 MTF를 평가하는 방안을 제시하여 영상 품질에 대한 객관성과 신뢰도를 검증하고자 하였다. Lee *et al.* (2020)은 무인항공 영상 품질 분석에서 경계반응 분석의 필요성을 확인하기 위해 GSD 분석과 함께 Slanted edge target을 이용한 경계반응 분석을 실시하였다. 이와 같이 항공영상의 품질 분석은 대체로 해상도 타겟을 이용하여 실시하거나 분석 S/W가 고가이거나 외국산이어서 작업자가 이용하기에는 어려움이 있다. 또한, 항공영상의 품질 검증 방법은 MTF, 경계반응 분석과 같은 다양한 방법이 있다. 이에 본 연구에서는 촬영대상지에 항공사진측량 작업규정에서 시각적 해상도를 분석하는 Siemens star를 설치하고 총 4가지의 드론과 1가지의 유인항공기를 이용하여 촬영을 실시하고 촬영한 Siemens star를 이용하여 GSD와 MTF 분석을 실시하였다. 분석한 결과를 토대로 드론 영상 품질 분석에서 MTF 분석의 필요성을 확인하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 GSD 분석

원격탐사 영상의 해상도 정량화는 대개 공간해상도를 분석하여 사용한다. 인공위성영상과 유인항공영상에서는 공간해상도를 정의하기 위하여 GSD를 사용하며 GSD란 아래의 Fig. 1과 같이 영상에서 하나의 픽셀 크기가 실제 지상에서 나타내는 거리를 의미한다(Sung, 2019).

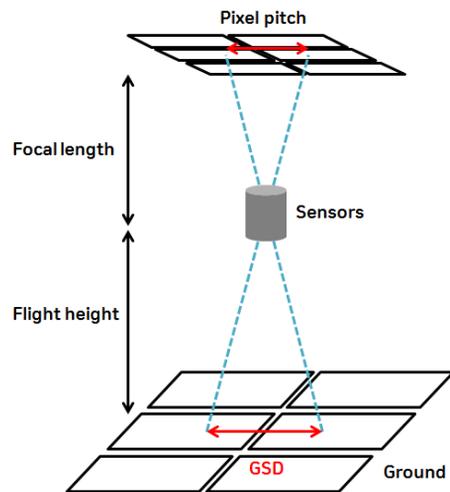


Fig. 1. Theory of GSD

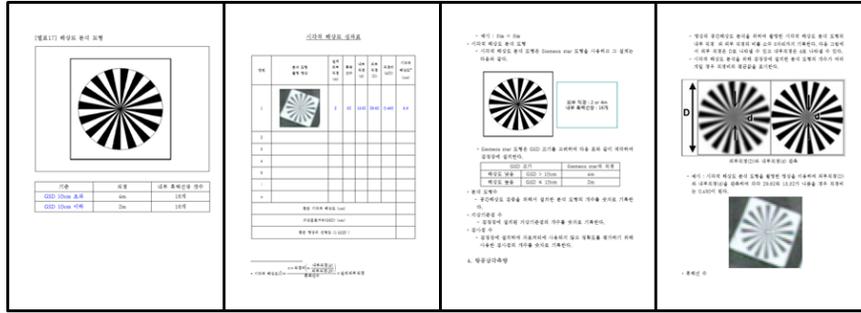


Fig. 2. Airborne photogrammetry Operation Regulations

이러한 공간해상도의 측정방법은 항공기의 비행고도, 카메라의 초점거리, CCD (Charge-Coupled Device)센서가 가지는 셀의 크기를 이용하여 계산하는 이론적인 GSD 계산법과 아날로그 카메라에 적용하던 Bar target과 Siemens Star를 이용한 분석 등이 있다(Lee, 2012). 한편, Siemens star를 이용한 공간해상도 분석방법은 아래의 Fig. 2와 같이 현재 국토지리정보원의 “항공사진측량작업규정”의 영상품질 평가에 적용되어 유인항공사진측량 성과물의 해상도 검증에 사용되고 있다(NGIL, 2020).

2.1.1 Siemens star를 이용한 GSD 분석

Siemens star를 이용한 영상의 공간 해상도 분석은 Siemens star가 촬영된 영상에서 Siemens star의 직경과 중심부의 흐릿해지는 경계부분까지의 직경을 이용하여 분석을 수행한다(Sung, 2019). 아래의 Fig. 3에서 공간 해상도는 Eq.(1)로 계산할 수 있다.

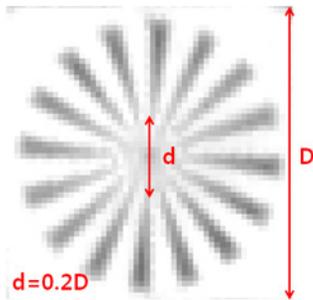


Fig. 3. Resolution analysis using Siemens star

$$l = \frac{\pi \left(\frac{d}{D}\right)}{n} \times R \tag{1}$$

여기서, d는 Siemens star의 내부직경, D는 Siemens star의 외부직경, n은 흑백선수, R의 실제외부직경이다.

위의 Fig. 3과 같이 직경 1m이며 흑백선의 개수가 32개인 Siemens star의 경우 흐릿해지는 경계부분까지 직경이 전체 직경 D의 0.2배인 경우에 GSD는 아래의 Eq. (2)와 같이 된다.

$$l = \frac{\pi \cdot 0.2D}{32} = 0.02D = 2cm \tag{2}$$

하지만, Siemens star를 이용하여 시각적 해상도 분석 시, 육안으로 중심부의 흐릿해지는 경계 부분을 정확히 규명하기는 쉽지 않으며 작업자의 주관적인 판단의 차이로 인하여 객관적인 분석이 어려운 문제점이 있다(Sung, 2019).

2.2 MTF 분석

MTF는 실제의 피사체를 카메라의 렌즈를 통해 영상에 재현한 정도를 분석하여 카메라의 성능을 판단하는 기준이다. MTF 수치는 해상도 타겟의 실제 Modulation 값과 영상 속 타겟의 Modulation 값의 상대 비율로 나타낸다. 여기서 Modulation은 Siemens star의 중심을 기준으로 한 동심원의 반경에 따라 달라지는 흑백선 주파수의 변화값이다. 또한, MTF는 흑백 라인이 한 쌍(lp: line pair)을 이루었을 때, 1 pixel안에 몇 쌍의 lp가 들어가느냐를 나타내는 단위인 공간주파수를 이용하여 그래프로 나타내어 분석할 수 있다(Lee, 2012). MTF 그래프에서 횡축은 공간주파수(spatial frequency), 종축은 MTF 수치로 표현한다(Lee, 2012).

Fig. 4는 흑백선 쌍으로 이루어진 영상에서 추출된 DN (Digital number)를 나타내고 있다(Sung, 2019). 이 그래프에서 Modulation 값은 Eq.(3)로 나타낸다(Neumann, 2003).

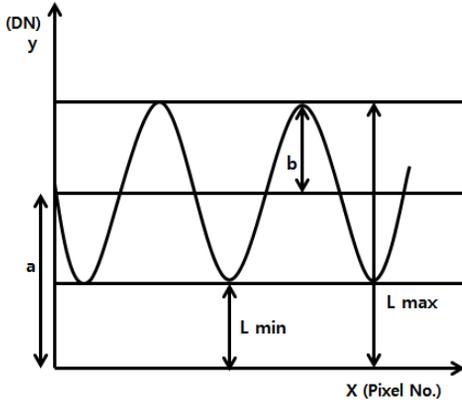


Fig. 4. DN of image with black and white linepairs

$$Modulation = \frac{l_{max} - l_{min}}{l_{max} + l_{min}} = \frac{a + b - (a - b)}{a + b + (a - b)} = \frac{2b}{2a} = \frac{a}{b} \quad (3)$$

MTF 값은 Eq.(4)로 나타낼 수 있다.

$$MTF = \frac{Modulation_{Image}}{Modulation_{object}} \quad (4)$$

여기서, $Modulation_{image}$ 는 영상에서 나타난 Modulation 값을 의미하며 $Modulation_{object}$ 는 실제 촬영된 도형에서 추출된 Modulation 값을 의미한다. 횡축인 공간주파수는 lp/pixel 또는 lp/mm로 나타낼 수 있다. 여기서 공간주파수는 빛의 회절과 매우 큰 관계가 있으며 아래의 Fig. 5와 같이 하나의 피사체에서 오는 빛은 카메라 센서의 렌즈를 통하여 회절되어 나타난다. 중앙부의 가장 밝은 원판을 Airy disk라 하고 Airy ring과 같은 회절무늬가 발생하게 된다.

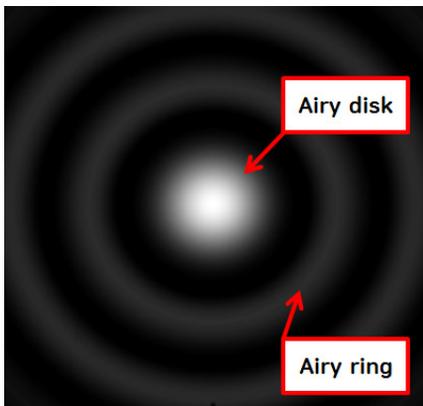


Fig. 5. Airy disk and Airy ring

아래의 Fig. 6은 두 피사체의 회절이 나타난 그림이다. (a)는 두 피사체의 식별이 가능하며 (b)는 두 피사체 회절 패턴의 거리가 짧아 식별이 불가능한 상태이다. Fig. 6의 Airy disk는 원판의 중심으로 갈수록 밝아져 백색이 되며, 경계로 갈수록 어두워져 흑색이 된다. 따라서 이러한 회절 패턴의 구별이 가능한 최소 조건을 레일리 기준(Rayleigh's criterion)이라 한다 (Rayleigh, 1879).

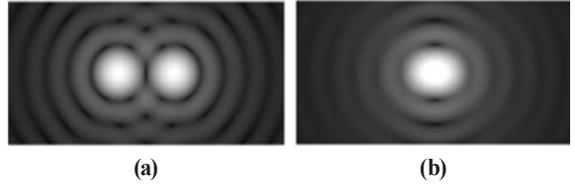


Fig. 6. Airy disk spacing near Rayleigh's criterion

레일리 기준은 두 개의 Airy disk가 떨어진 거리가 Airy disk의 반경과 같을 때 겨우 식별되는 것으로 한다. 여기서 Airy disk의 반경은 아래의 Eq.(5)에 의하여 계산된다.

$$r_A = 1.22\lambda f/d \quad (5)$$

λ 는 빛의 파장, f 는 렌즈의 초점거리, d 는 조리개의 직경, f/d 가 렌즈의 f -수를 나타낸다. 즉, 레일리 기준은 아래의 Fig. 7처럼 두 피사체의 회절 패턴의 정점이 Airy disk의 반경 (r_A)보다 가까울 때 두 피사체의 식별이 불가능하다고 판단한다(Rayleigh, 1879).

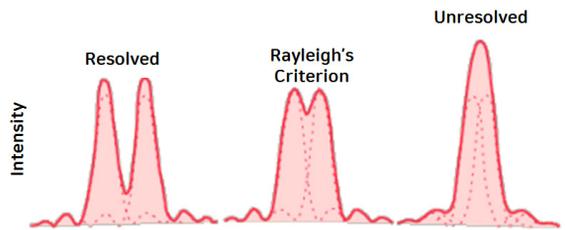


Fig. 7. Airy disk detach and Rayleigh's criterion

Fig. 8과 같이 iXM-100 센서로 촬영한 드론 영상에서 추출된 DN 수치를 이용하여 Eq.(6)을 이용해 선형화하여 MTF 그래프를 생성하였다.

$$MTF = e^{-2\pi^2\sigma_{MTF}^2 K^2} \quad (6)$$

여기서, K는 MTF의 종축에 해당하는 공간주파수를 의미

하며 σ_{MTF}^2 은 MTF에 대한 분산을 의미한다(Sung, 2019).

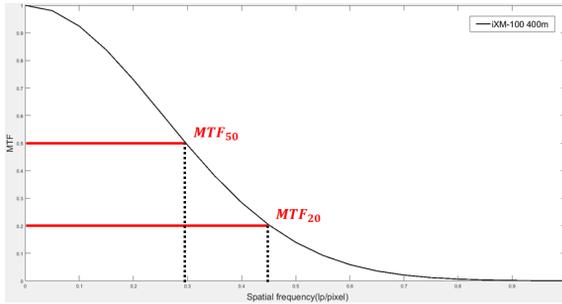


Fig. 8. MTF graph (iXM-100 400m)

본 연구에서는 MTF에 대한 표준편차인 σ_{MTF} 수치를 계산하여 비교 분석을 실시하였다. Fig. 8은 본 연구에서 분석한 iXM-400 센서의 400m 고도의 MTF 분석 그래프이다. 여기서 MTF 그래프의 50%에 해당하는 공간주파수 수치인 MTF_{50} , MTF 그래프의 20%에 해당하는 공간주파수 수치인 MTF_{20} 을 계산하여 비교 분석하였다(Sung, 2019). MTF_{50} 이란 많은 연구를 통한 경험적인 기준으로 작업자의 육안으로 경계의 선명함이 흐려지기 시작할 때의 공간주파수 수치를 의미한다(Sung, 2019). MTF_{20} 은 작업자의 육안으로 경계를 구별할 수 있는 최소한의 공간주파수 수치를 말한다(Sung, 2019). 이 또한 많은 연구를 통한 경험적인 기준이다.

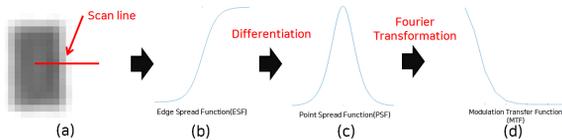


Fig. 9. MTF analysis using slanted edge target

또한, 지상의 인공적인 해상도 타겟이나 자연적인 지형·지물을 이용하여 MTF를 분석하는 방법이 있다. 첫 번째 단계는 위의 Fig. 9(a)와 같이 흑백의 경계가 뚜렷한 위치를 찾는 것이다. 경계를 찾을 때 주의해야 할 점은 ESF 그래프와 PSF 그래프를 안정적으로 생성하기에 충분한 DN 수치의 개수를 정하는 것이다. 너무 많은 DN 수치를 추출하여 분석하게 되면 영상에서의 노이즈가 MTF 분석에 영향을 미치게 되어 대개 약 16개의 DN 수치를 사용한다. 따라서 본 연구에서도 15~16개의 DN 수치를 이용하였다. 두 번째 순서는 Fig. 9(a)와 같이 각각의 라인에서 추출한 DN 수치 평균값으로 (b)의 ESF를 생성한다. 세 번째 순서는 (c)와 같이 ESF 그래프를 미분하여 PSF 그래프를 생성한다. 이 단계에서 가우시안 함수로 그래프 평

활화를 한다면 노이즈가 미치는 영향을 줄일 수 있다. 최종적으로 PSF 그래프에서 후리에 변환 공식을 사용하여 (d)와 같이 MTF 그래프를 생성하게 된다(Sung, 2019). 본 연구에서는 공간주파수와 Modulation을 측정할 수 있는 Siemens star를 촬영하여 DN 수치를 추출하여 MTF를 분석하였다.

2.2.1 Siemens star를 이용한 MTF 분석

Siemens star를 이용한 MTF 분석은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 모든 방향에서 MTF 분석이 가능하며 Bar target과 Edge target에 비해 연속적인 MTF 수치를 이용할 수 있다는 장점이 있다(Sung, 2019). 또한, 시각적 해상도 분석과는 다르게 해상도 타겟의 DN 수치를 이용하여 객관적인 분석이 가능하다.

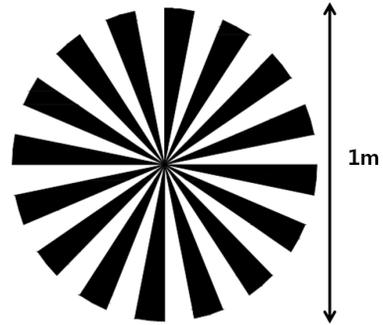


Fig. 10. Siemens star specifications

Siemens star에서 MTF를 계산하기 전에 그 수치에 따른 공간주파수부터 계산하여야 한다. 공간주파수 계산을 위해 Siemens star의 중심으로부터 떨어진 반경(pixel 단위)에 대한 동심원을 결정한다(Sung, 2019). 결정된 동심원에 대한 반경(r)을 이용하여 계산된 원주를 Siemens star에 존재하는 16개의 흑백선 쌍에서 나누어 공간주파수를 구하게 되며 Eq.(7)로 계산된다(Sung, 2019).

$$spatial\ frequency = \frac{16lp}{2 \times \pi \times r(Pixel)} \quad (7)$$

영상에서 촬영된 Siemens star의 픽셀 개수만큼의 동심원이 생성되며 동심원의 수만큼 MTF의 수치가 분석 가능하다(Lee, 2012).

3. 실험 및 자료처리

3.1 Siemens star의 제원

본 연구에 사용한 Siemens star는 Fig. 10과 같이 직경 1m

크기의 원형이며 총 32개의 흑백선이 중심에서부터 방사형으로 11.25°의 일정한 각도로 배열되어 있는 형태이다. Siemens star는 현재 국토지리정보원의 “항공사진측량작업규정”에서 유인항공영상의 시각적해상도 분석 방법으로 이용되고 있다. Siemens star의 가장자리 부분에서 공간주파수는 매우 낮고, Siemens star의 중심에서 반지름의 길이가 감소할수록 공간주파수는 증가하게 된다. Bar target과 마찬가지로 공간주파수가 증가하게 되는 중심 부분으로 갈수록 영상의 대비 요소는 0에 가까워지고 경계 구분의 식별이 불가능하게 된다. 이러한 현상이 발생하는 반경을 측정하여 해상도를 계산할 수 있다. 아래의 Fig. 11은 Siemens star 반경의 크기들에 대응하는 Bar-pattern을 보여주고 있다(Sandau, 2010).

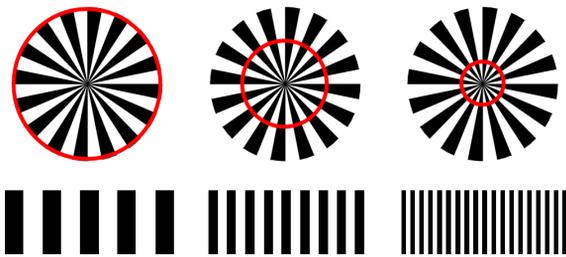


Fig. 11. Bar-pattern corresponding to siemens star radius magnitudes²⁵⁾

Siemens star를 이용한 해상도 분석은 우선 Siemens star의 중심을 정확하게 측정하여야 한다. 중심 측정의 정확도는 해상도 분석에 영향을 미치게 된다. 정확한 중심 측정을 위하여 본 연구에서는 GNSS (Global Navigation Satellite System) 네

트워크 RTK(VRS) 방법을 이용한 지상 측량 결과값을 사용하였다. 이와 같은 방법은 Siemens star를 이용한 해상도 측정의 신뢰도에 도움이 된다.

다른 해상도 타겟과 비교하여 Siemens star는 비교적 복잡한 형상을 가지고 있다. 하지만 이러한 형상은 기체의 비행경로와 관련하여 모든 방향에서 해상도를 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 장점으로 기체 자세각 변화가 상당하고 저가의 항법장치를 사용하여 일정한 방향으로 비행할 수 없는 드론에 탑재된 센서를 평가하는데 Siemens star가 이상적인 해상도 타겟임을 나타낸다. 또한 Bar target에 비하여 타겟의 크기가 작아 저고도에서 촬영하는 드론 사진에 이상적인 해상도 타겟이며 지상에 설치가 간단한 장점이 있다(Sung, 2019).

3.2 영상 취득 및 처리

자료취득에 사용한 드론은 아래의 Table 1과 같으며 각 기체별로 탑재된 센서의 초점거리, pixel 및 CCD 센서 사이즈를 함께 수록하였다. 또한, 유인항공기체에 UltraCAM Eagle M2 센서를 탑재하여 해상도 타겟을 촬영하여 결과를 비교하였다.

드론 사진과 성과물의 품질에 촬영고도, 탑재된 카메라의 성능, 촬영조건 등이 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 아래의 Table 2와 같이 촬영요소를 설계하였다. 여기서 Overlap은 드론영상 촬영 시 경로의 중복도이다. 또한 성과물의 제작을 위한 S/W는 Agisoft사의 Metashape를 이용하여 제작하였으며 S/W 내 변수들은 모두 동일하게 설정하여 제작하였다.

Table 1. Specifications of UAVs and the cameras

UAV model	FireFLY 6 PRO	Inspire 2	Phantom pro 4	Matrice 600	-
Appearance					
Camera model	a6000	FC 6520	FC 6310	iXM-100	UltraCAM Eagle M2
Focal length	20mm	15mm	8.8mm	35mm	100mm
Pixel size	4×4μm	3.28×3.28μm	2.41×2.41μm	3.76×3.76μm	6×6μm
CCD Sensor size	6000×4000 (24MP)	5280×3956 (21MP)	5472×3648 (20MP)	11664×8750 (100MP)	17,310×11,310 (193MP)

Table 2. Flight parameters for acquiring UAV images

Camera model	Flight height	Overlap	Area	Number of image	Wind velocity	Flight date
a6000	150m	P=60% Q=75%	720	451	0.9m/s	19.04.11
FC 6520	150m	P=60% Q=70%	422	371	1.9m/s	18.05.22
FC 6310	80m	P=60% Q=70%	894	632	1.9m/s	18.05.22
	100m	P=60% Q=70%	894	556	1.9m/s	18.05.22
	150m	P=60% Q=70%	894	422	1.9m/s	18.05.22
iXM-100	150m	P=60% Q=70%	462	231	1.3m/s	19.03.28
	200m	P=60% Q=70%	462	115	1.3m/s	19.03.28
	400m	P=60% Q=70%	462	52	1.3m/s	19.03.28

4. 결과 분석

Table 3에서 FC 6310 센서의 촬영고도별 GSD를 살펴보면 촬영고도가 높아질수록 3.9cm(80m), 4.9cm(100m), 6.5cm(150m)로 저하되었다. iXM-100 센서의 촬영고도별 GSD 또한 촬영고도가 높아질수록 2.4cm(150m), 3.3cm(200m), 6.6cm(400m)로 저하되었다. 또한 동일한 고도인 150m의 촬영 고도에서는 센서의 성능이 매우 우수한 iXM-100 센서의 결과가 2.4cm로 가장 좋았으며 GSD는 센서 성능이 좋은 순서대로 3.5cm(a6000), 5.2cm(FC 6520), 6.5cm(FC 6310)의 결과를 나타내었다.

MTF 수치의 표준편차인 σ_{MTF} 는 수치가 낮을수록 좋은 품질의 영상을 의미한다. σ_{MTF} 를 살펴보면 MTF 분석에서도 GSD 분석과 마찬가지로 촬영고도가 높아질수록 영상의 품질이 나빠지는 결과를 나타내었다. 하지만 촬영당시의 기상

Table 3. GSD and MTF analysis using Siemens star

Camera model	Flight height	Siemens star	Measured GSD	σ_{MTF}	MTF_{50}	MTF_{20}
a6000	150m		3.5cm	0.408	0.458	0.698
FC 6520	150m		5.2cm	0.501	0.375	0.572
FC 6310	80m		3.9cm	0.433	0.433	0.660
	100m		4.9cm	0.521	0.363	0.554
	150m		6.5cm	0.712	0.265	0.404
iXM-100	150m		2.4cm	0.319	0.600	0.915
	200m		3.3cm	0.397	0.469	0.715
	400m		6.6cm	0.632	0.297	0.453
UltraCAM Eagle M2	1000m		7.2cm	0.713	0.263	0.400

조건과 탑재된 센서의 성능에 의하여 해상도 타겟의 빛 번짐 현상이 발생한 150m 고도의 FC 6520, FC 6310 센서의 σ_{MTF} 수치는 다른 기체의 σ_{MTF} 수치보다 모두 낮은 결과를 나타내고 있다. 이는 영상의 해상도뿐만 아니라 명암의 대비 정도도 측정하여 분석하는 MTF 분석의 특성 상 빛 번짐 현상이 σ_{MTF} 수치에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다(Sung, 2019). 또한 이와 같은 결과로 드론 사진과 성과물의 품질 검증 시 GSD 분석보다는 영상의 해상도와 명암의 대비 정도를 동시에 분석할 수 있는 MTF 분석이 보다 객관적이며 신뢰도 높은 분석 방법이라 판단된다.

아래의 Fig. 12는 Siemens star를 이용하여 분석한 MTF 그래프이다. MTF 그래프의 y축은 카메라 센서의 MTF 수치를 나타내며 x축은 공간주파수를 나타낸다. 여기서 공간주파수의 단위는 line pair per pixel이며 백색과 흑색의 라인이 한 쌍을 이루었을 때 흑백의 한 쌍이 영상의 1 pixel안에 몇 쌍이 들어가는지를 나타내는 단위이다. 만약 한 쌍이 들어가면 1 lp/pixel이고 0.5쌍이 들어가면 0.5lp/pixel이 된다. 즉, 공간주파수가 커질수록 반복되는 흑백의 쌍이 1pixel에 많이 들어간다는 의미이다. y축의 MTF 수치는 앞에서 설명한 바와 같이 측정된 하여 해상도 타겟의 실제 Modulation 값과 영상에 촬영된 타겟의 Modulation 값의 상대 비율로 얻어지게 된다. 만약 MTF 수치가 0이라면 영상에서 흑백의 대조 차이가 없어 피사체의 구분이 어려운 상태이며 수치가 1에 가깝다면 흑백의 구분이 뚜렷함을 나타낸다(Sung, 2019). 또한, 공간주파수가 점점 커지게 된다면 흑백선 쌍의 구분이 어려워져 MTF 수치가 떨어지게 된다. 즉, MTF 그래프에서는 x축의 공간주파수가 커질수록 y축의 MTF 수치가 1에 가깝게 유지된다면 피사체를 자세히 구분하는 해상도가 뛰어난 성능이 우수한 카메라 센서라고 판단할 수 있다(Sung, 2019).

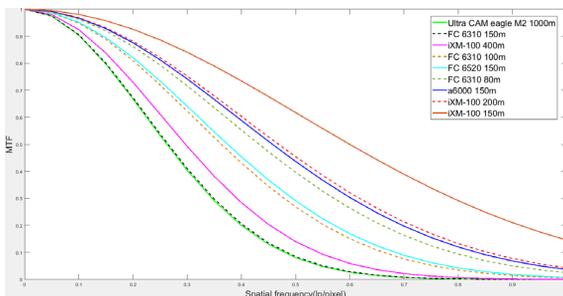


Fig. 12. Comparison of MTF curves by cameras using siemens star

Siemens star를 이용하여 분석한 MTF 그래프는 iXM-100

센서 150m고도에서 가장 좋은 결과를 나타내었다. σ_{MTF} 는 0.319, MTF_{50} 은 0.600 lp/pixel, MTF_{20} 은 0.915 lp/pixel의 결과를 나타내었다. iXM-100 센서의 150m 고도에서 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선이 지상에 위치해 있다면 약 6.00cm의 GSD일 때부터 흑백선의 경계가 흐려지기 시작하며 GSD가 9.15cm 이상이 되면 흑백선의 경계를 인식할 수 없게 된다. 마찬가지로 동일한 150m 고도일 때, a6000 센서는 4.58cm, FC 6520 센서는 3.75cm, FC 6310 센서는 2.65cm부터 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선의 경계가 흐려진다고 판단할 수 있으며 각각 6.98cm, 5.72cm, 4.04cm 이상이 되면 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선의 경계를 인식할 수 없다고 판단할 수 있다. 또한 가장 나쁜 품질을 나타낸 UltraCAM Eagle M2센서는 GSD가 2.63cm 일 때 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선의 경계가 흐려지기 시작하며 GSD가 4.00cm일 때 흑백선의 경계를 인식할 수 없다.

5. 결론

본 연구에서는 촬영대상지에 항공사진측량작업규정에서 시각적 해상도를 분석하는 Siemens star를 설치하고 총 4가지의 드론과 1가지의 유인항공기를 이용하여 촬영을 실시하고 촬영한 Siemens star를 이용하여 GSD와 MTF 분석을 실시하였다. 분석한 결과를 토대로 드론 영상 품질 분석에서 MTF 분석의 필요성을 확인하고자 하였다. 연구 결과, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

첫째, Siemens star를 이용한 시각적 해상도 분석은 육안으로 중심부의 흐릿해지는 경계 부분을 정확히 규명하기는 쉽지 않으며 작업자의 주관적인 판단의 차이로 인하여 객관적인 분석이 어려운 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 Siemens star를 이용하여 객관적인 분석이 가능한 MTF 분석을 실시하였다. 분석 결과, 탑재된 센서의 성능과 촬영 당일 기상조건에 의해 백색 피사체의 빛 번짐 현상이 발생한 150m 고도의 FC 6310 센서의 GSD는 6.5cm의 결과를 나타내었고 400m 고도의 iXM-100 센서의 GSD 또한, 6.6cm로 유사한 결과를 나타내었다. 하지만 각각의 σ_{MTF} 수치는 0.712, 0.632로 큰 차이를 나타내었다. 이와 같은 결과로 Siemens star를 이용한 드론 사진과 성과물의 품질 검증 시 GSD 분석보다는 영상의 해상도와 명암의 대비 정도를 동시에 분석하는 MTF 분석이 더 객관적이며 신뢰도 높은 분석 방법이라 판단된다.

둘째, GSD와 MTF 분석 결과, FC 6310 센서와 iXM-100 센서의 경우 드론 기체의 촬영고도가 높아질수록 GSD와 σ_{MTF} 수치가 나빠짐을 확인할 수 있었으며, 동일한 150m의

고도로 촬영한 드론 영상을 비교한 경우에는 탑재된 센서의 성능이 가장 좋은 iXM-100 센서가 나은 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과로 드론 기체의 촬영고도와 센서의 성능이 드론 영상의 품질에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 각각의 센서의 MTF_{50} 과 MTF_{20} 을 분석한 결과, iXM-100 센서의 150m 고도에서 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선이 지상에 위치해 있다면 약 6.00cm의 GSD일 때부터 흑백선의 경계가 흐려지기 시작하며 GSD가 9.15cm 이상이 되면 흑백선의 경계를 인식할 수 없게 된다. 마찬가지로 동일한 150m 고도일 때, a6000 센서는 4.58cm, FC 6520 센서는 3.75cm, FC 6310 센서는 2.65cm부터 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선의 경계가 흐려진다고 판단할 수 있으며 각각 6.98cm, 5.72cm, 4.04cm 이상이 되면 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선의 경계를 인식할 수 없다. 또한 가장 나쁜 품질을 나타낸 UltraCAM Eagle M2 센서는 GSD가 2.63cm 일 때 폭이 10cm인 한 쌍의 흑백선의 경계가 흐려지기 시작하며 GSD가 4.00cm일 때 흑백선의 경계를 인식할 수 없다.

셋째, 본 연구에서는 유인항공센서와 무인항공센서로 제작한 영상의 품질을 비교 검증하였다. UltraCAM Eagle M2의 유인항공센서는 GSD와 MTF 분석결과로 영상의 품질이 가장 떨어지는 결과를 나타내었지만, FC 6310 센서 150m 고도에서의 결과는 GSD와 MTF 분석결과에서 UltraCAM Eagle M2 센서 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과로 드론 기체로 촬영을 하더라도 작업자가 드론 사진측량을 실시할 때 촬영고도뿐만 아니라 카메라 센서의 성능, 중복도, 기체의 성능을 적절하게 판단하여 촬영을 실시하여야만 높은 품질의 드론 영상을 획득할 수 있음을 나타낸다.

본 연구에서는 제한된 촬영조건으로 분석을 수행하였다. 향후 분석 데이터를 축적하여 탑재한 센서의 픽셀 사이즈, 조리개 값, 초점거리, 노출시간, 촬영고도, 촬영 중복도, 풍량, 자세각의 변화, 일광량 등을 고려하여 연구한다면 더욱 객관적인 결과를 도출할 것으로 기대된다. 또한 영구적인 무인항공 사진측량용 해상도 타겟이 설치된 테스트베드를 구축하여 동일한 조건으로 영상의 품질을 분석할 수 있다면 보다 정량적이며 객관적인 분석이 가능하고 데이터의 축적도 가능하여 신뢰성 높은 분석이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 교신저자 성상민의 박사학위논문을 바탕으로 작성되었습니다.

References

- Agisoft, (2020), Metashape user manual: Professional edition, ver 1.5.
- Dabrowski, R. and Jenerowicz, A. (2015), Preliminary results form the portable image quality assessment test field(PIQuAT) of UAV imagery for imagery reconnaissance purposes, ISPRS Workshop, 30 August-02 September, 2015, Toronto, Canada, pp.111-115.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-1-w4-111-2015>
- Jiang, W., Li, Y., Liang, Y., and Zeng, Y. (2010), Research on quality index system of digital aerial photography results, 4th Computer and Computing Technologies in Agriculture, CCTA, Oct 2010, Nanchang, China, pp. 381-391.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-18336-2_47
- Lee, J.O. and Sung, S.M. (2019), Quality evaluation of UAV images using resolution target, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol.22 No.1, pp.103-113. (in Korean with English abstract)
<https://doi.org/10.11108/KAGIS.2019.22.1.103>
- Lee, J.O. and Sung, S.M. (2020), Edge Response Analysis of UAV-Images Using a Slanted Target, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol.38 No.4, pp.317-325. (in Korean with English abstract)
<https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.4.317>
- Lee, T.Y. (2012), *Spatial Resolution Analysis of Aerial Digital Camera*, Ph.D. dissertation, Dong-A University, Busan, Korea, 50p. (in Korean with English abstract)
- Lim, P.C., Seo, J.H., and Kim, T.J. (2018), Extraction of UAV image sharpness index using edge target analysis, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol.34, No.6-1, pp.905-923. (in Korean with English abstract)
<https://doi.org/10.7780/kjrs.2018.34.6.1.6>
- Liang, Y., Zeng, Y., Jiang, W., and Wang, X. (2011), Research on automatic inspection methods of image quality of digital aerial photography results, 5th Computer and Computing Technologies in Agriculture, CCTA, Oct 2011, Beijing, China, pp. 320-331.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-27275-2_37
- Lord Rayleigh, F.R.S. (1879), *Investigations in Optics, with Special Reference to the Spectroscope*. The London,

Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5, 8, 261-274.

<https://doi.org/10.1080/14786447908639684>

National Geographic Information Institute, Airborne photogrammetry Operation Regulations, Suwon. pp.55, 2016.

Neumann, A., (2003), *Verfahren zur Auflösungs-messung Digitaler Kameras*, Diplomarbeit, University of Applied Sciences Cologne, Cologne, Germany, 70p.

Sandau, R., (2010), *Digital Airborne Camera, Introduction and Technology*, Springer, Heidelberg.

Sieberth, T., Wackrow, R., and Chandler, J. (2016), Automatic detection of blurred images in UAV image sets, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol 122, pp.1-16.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.010>

Sung, S.M. (2019), *A Study on Spatial Resolution Analysis Methods of UAV Images*, Ph.D.dissertation, Dong-A University, Busan, Korea, 49p. (in Korean with English abstract)