

소형 다중분광 항공촬영 시스템(PKNU 3호) 개발에 관한 연구 Research for development of small format multi-spectral aerial photographing system (PKNU 3)

이은경¹⁾ · 최철웅²⁾ · 서영찬³⁾ · 조남춘⁴⁾

Lee, Eun Khung · Choi, Chul Uong · Seo, Young Chan · Cho, Nam Chun

¹⁾ 국립부경대학교 위성정보과학과 석사과정(E-mail: a4004@mail.pknu.ac.kr)

²⁾ 국립부경대학교 위성정보과학과 조교수(E-mail: cuchoi@pknu.ac.kr)

³⁾ 국립부경대학교 위성정보과학과 석사과정(E-mail: dromond@hanmail.net)

⁴⁾ 국립부경대학교 위성정보과학과 석사과정(E-mail: pkphoto78@hotmail.com)

ABSTRACT

Researchers seeking geological and environmental information, depend on remote sensing and aerial photographic datum from various commercial satellites and aircraft. However, adverse weather conditions as well as equipment expense limit the ability to collect data anywhere and anytime. To allow for better flexibility in geological and environmental data collection, we have developed a compact, multi-spectral automatic Aerial photographic system (PKNU2). This system's Multi-spectral camera can record visible (RGB) and infrared (NIR) band (3032*2008 pixels) images. Visible and infrared band images were obtained from each camera respectively and produced color-infrared composite images to be analyzed for the purpose of the environmental monitoring. However, this did not provide quality data. Furthermore, it has the disadvantage of having the stereoscopic overlap area being 60% unsatisfied due to the 12 seconds of storage time of each data. The PKNU2 system in contrast, photographed photos of great capacity. Thus, with such results, we have been proceeding to develop the advanced PKNU2 (PKNU3) system that consists of a color-infrared spectral camera that can photograph in the visible and near-infrared bands simultaneously using a single sensor, a thermal infrared camera, two 40G computers to store images, and an MPEG board that can compress and transfer data to the computer in real time as well as be able to be mounted onto a helicopter platform.

KEY WORDS: Multi-spectral camera, thermal infrared camera, PKNU3 development

1. 서론

원격탐사 전공자들은 항공사진과 위성영상을 이용하여 영상자료를 처리해왔다. 이러한 영상자료처리에 있어 가장 기본이 되는 것이 영상자료획득이다. 기존의 모든 영상자료는 위성 영상이나

국립지리원과 각급 지방자치단체에서 촬영한 항공사진이 대부분이다.

이러한 영상은 기관별로 사용목적에 따라 촬영방식이나 촬영시기가 각각 다르다. 만약, 연구자가 원하는 시기와 장소를 촬영하는 경우, 경제적 부담이 많았다. 그리하여 원격탐사 전공자들은 보다 저렴하고, 신속 정확한 자료획득을 위하여 노력하여 왔다. 이러한 동향에 발맞추어 지난 2001년 6월 대학자체연구로 다중분광 항공촬영 시스템(PKNU2호)을 개발하기 시작하여 2003년 6월까지 총 6차 실험까지 완료하여 시스템의 기초성능 실험(1차), 대용량 촬영가능성 평가(2차), 흑한 기 촬영성능 실험(3차), 다중분광 촬영성능 실험(4차), 스틸 항공사진과 비디오의 연계성 실험(5차), 카메라 검보정 실험과 정밀 GPS 측량(6차)을 거쳐 정사영상지도(수평정확도:0.78m, 수직정확도:0.83m)를 제작하였다. 지상해상도 면에 있어서는 0.3m로 고해상도의 수직사진을 획득할 수 있었으나, 칼라, 적외 영상을 각각의 카메라로 따로 획득하여 후처리 과정에서 합성영상을 생성하였기 때문에 만족스러운 결과물을 얻지 못한 아쉬움이 있었다. 고해상도에 중점을 두고 진행된 개발연구의 결과물이 PKNU 2호라고 한다면 다중분광에 초점을 맞춰 진행되는 연구는 PKNU 3호의 몫이다.

그리하여 가시대역과 적외선 대역(RGB and infrared)의 영상을 동시에 촬영할 수 있는 분광카메라와 열 적외 카메라로 이루어진 센서 부와 자료 저장을 위한 영상저장시스템 부로 구성된 소형 다중분광 자동 항공촬영 시스템 (PKNU 3)을 개발하였다.

국내에서는 일반 항공촬영 및 일반 전경사진 촬영에 대한 수요가 많으며 향후 그 활용도 및 발전가능성이 높은 것으로 사료된다. 그러나 기반기술 개발의 미비로 아직은 정형화된 사진촬영부분은 대규모 항공사진기를 이용한 부분이 주를 이루고 있으며 과학적 관독을 위한 항공촬영은 거의 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 최첨단 기법을 이용한 연구로서 그 활용가능성이 매우 높은 분야이다. 해외의 경우, 과학적 탐사와 환경변화 탐지를 위한 다중분광대역 촬영이 고 부가사업으로 등장하고 있다. 임업분야에서 항공사진을 이용하여 죽은 나무와 쓰러진 나무를 분류하고 정량화한 사례가 있었다. 해충이 급증한 지역의 썩은 나무의 분포도를 제작한 연구(Nu'sslein et al., 1997)가 있었으며, 바람에 쓰러진 나무의 분포도를 제작한 연구 (Scherrer, 1993; Schmidtke, 1993; Koch et al., 1998)가 행해졌다. 해양분야에서는 그리고 전자기파의 visible 과 infrared 대역에서 반사된 복사에너지를 측정함으로써 물밑 클로로필 양을 산정하기 위하여 항공 촬영한 사례 (Riethmuller et al. 1998; Hakvoort et al., 1998; Hagerthey et al., 2002) 도 있었다. 그리고 간조 시에만 관측이 가능하기 때문에 시간적, 공간적으로 제한된 갯벌지역의 클로로필 농도를 측정함으로써 미세조류를 관측하는 연구(R. J. Murphy et al., 2004) 에서 일정한 주기로 같은 지역의 미세조류의 시간적 변화를 정량화하기 위해서 실험대상지역을 훼손하지 않는 방법이 필요하였다(Underwood and Kromkamp, 1999). 연구지역을 훼손하게 되면, 갯벌 토양과 미세조류 군의 특성을 변화시킬 수 있으며, 다른 실험에도 영향을 미칠 수가 있기 때문에 비행기에 카메라나 센서를 장착하여 촬영하는 방법을 이용하였다.

또한 적외선 대역의 항공사진은 기상상태에 상관없이 어떤 날씨상태에서 획득된 영상이라도 지상의 온도분포 분석에 이용된다. 그러므로, 적외 영상은 토양이나 곡식의 수분함량과 해양의 수온조사, 지질학적 연구 및 도심지의 토지분류 등과 같은 분야에서 광범위하게 이용될 수 있다(L. Shukai, 1992).

2. 실제 예

2.1 연구연표

본 연구는 지난 2004년 1월부터 대학자체연구로 진행되었으며, 현장 실험은 해양수산부와 환경 정책 평가 연구원의 지원을 받아 2004년 9월 현재 2차 항공촬영을 마쳤으며, 각 실험 단계별 실험 목적은 table 1과 같다.

표 1 연구연표

	연구내용	연구목적
2004.01	문헌조사 및 국내외 자료조사	시스템개발 자료조사
2004.03	REDLAKE MS 4000 다중분광 센서 도입	연구장비구입
2004.03~07	영상저장 시스템 개발	대용량 동영상 및 스틸 항공사진
2004.05	개발 시스템의 헬기 탑재 가능성 평가	안정성 있는 시스템 개발
2004.05~09	센서 부 짐벌 및 촬영각도 조절 짐벌 제작	헬기 진동 방지
2004.06~09	센서 부와 영상저장 시스템 연결 케이블 및 전원 케이블 제작	안정성 및 편의성 추구
2004.07~08	센서의 기하보정 및 방사보정	센서 특성 평가
2004.09.09	1차 항공촬영 테스트	시스템의 기초성능 평가
2004.09.14	2차 항공촬영	대용량 촬영 가능성 및 다중분광

2.2 PKNU 3호 항공촬영 시스템

본 항공촬영 시스템은 센서 부와 영상저장 시스템 부, 그리고 탑재 체로 구성된다. 센서 부는 REDLAKE MS4000 다중분광카메라(R,G,B,IR)와 Raytheon IRPro 열적외 카메라(thermal IR)로 이루어져 있으며 방진 설계하여 카메라의 촬영각도를 조절할 수 있는 짐벌에 장착하였다. 영상저장 시스템 부는 동영상을 압축하여 실시간 고화질로 저장할 수 있는 MPEG Board와 대용량 스틸 항공사진을 저장할 수 있는 120G 컴퓨터 2대로 이루어져 있다. 탑재 체는 활주로 없이 이착륙이 가능하며 매우 느린 속도로 날 수 있으며 360도 회전할 수 있기 때문에 일반 비행기로는 접근하기 힘든 지역까지 갈 수 있는 헬리콥터를 이용한다 (그림 1).

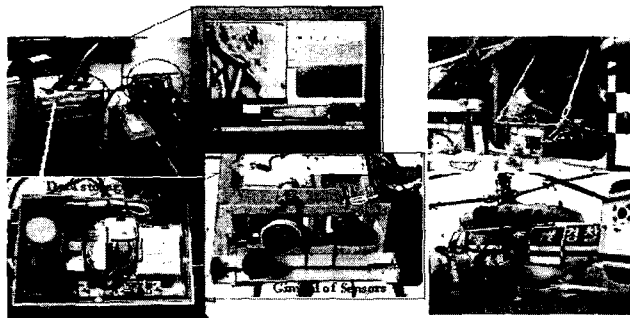


그림 1 다중 분광 항공촬영 시스템 및 탑재 체

2.2.1 센서 부

본 항공촬영 시스템은 자체 제작하였으며, 가시대역 및 근 적외선 대역의 동시촬영이 가능한 카메라(REDLAKE MS 4000), 열 적외선 대역 촬영이 가능한 카메라(Raytheon IRPro)로 구성되어 있고, 헬기의 진동을 방지하기 위해 특수 제작된 진동, 충격 흡수용 방진 장치를 설치하여 안정성을 기하였다. PKNU2호에서 사용된 Kodak DCS460 칼라, 적외선 카메라는 짐벌에 각각 따로 부착되어 촬영하기 때문에 정확하게 동일한 지역의 영상을 4-band(R,G,B,IR)로 획득하는데 한계가 있었다. 그리고 저장시간 간격이 12s로 최소 중복 률(60%)을 맞추는 데에도 한계가 있었다. 그리하여 이러한 단점을 보완하면서, 또한 동영상 데이터도 획득 가능한 REDLAKE MS4000센서를 도입하게 되었다.

가시대역과 근 적외 대역의 동시 촬영으로 RGB영상과 CIR영상을 획득할 수 있는 REDLAKE MS 4000은 3-CCD 카메라로 픽셀수가 1600×1200 이며 한 픽셀당 크기는 $7.4\mu\text{m}$ 이다. 렌즈를 통해 들어오는 빛에 대한 반응을 전자적으로 gain값과 전자식 셔터를 통해 조정해줄 수 있다.

다중분광 영상을 획득이라는 PKNU3호의 취지에 맞추어 열적외 센서를 함께 탑재하였다. 본 연구에서 사용된 열적외 센서, Raytheon IRPro는 $7\sim 14\mu\text{m}$ 파장 대역의 에너지를 감지하는 센서로서 동영상 및 스틸사진을 촬영하여 LCD viewer를 통해 디스플레이 한다. 5색 칼라 LCD이기 때문에 화상의 열 분포를 5색 칼라(red, orange, yellow, green, blue)로 나타낼 수도 있고 밝기 값으로 온도를 나타낼 수도 있다.

두 대의 센서를 내 외부에서 특수 방진 설계한 짐벌에 장착하였으며, 센서의 촬영각도를 조절할 수 있는 짐벌을 따로 제작하였다. MS4000센서는 자동으로 초점을 조절하도록 설계되어 있으나 열적외 센서는 자동초점조절 기능이 없어 수동으로 조절해야 한다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 외부짐벌에 원격 초점조절장치를 제작하여 부착하였다.

2.2.2 영상 저장 시스템

MS4000 센서를 이용하면, 영상이 최고 1s간격으로 저장이 되기 때문에 대용량 데이터 수신을 위하여 영상저장시스템을 따로 제작할 필요가 있었다. 헬기에 탑재하기 때문에 전력공급을 배터리로 하여야 함을 고려하여 12V전원 공급이 가능한 소형 컴퓨터 2대를 영상저장 시스템의 기축으로 제작하였다. 컴퓨터 2대를 밀착, 고정시키고 헬기의 진동을 방지하기 위하여 방진케이스에 컴퓨터를 넣고 특수 설계된 방진장치로 안전을 기하였다. 동영상 압축 및 실시간 저장을 위한 MPEG Board와 열적외 영상 저장을 위한 디지털 카메라를 연결시켜 모든 항공촬영 자료를 저장할 수 있는 시스템을 구축하였다.

방진을 위하여 센서 부와 영상저장 시스템과의 각종 연결선들을 40핀 굵은 통 케이블로 제작하려 하였으나, 연결선 중 영상을 구성하는 색 데이터를 송수신하는 케이블은 통 케이블로 제작하여 실험한 결과 데이터 송수신에 문제가 발생하여 본 선 그대로 연결하였다(figure 4). 따라서 아날로그 비디오선, 시리얼 포트, 트리거선 을 굵은 통 케이블로 제작하였다. 또한 안전을 위하여 컴퓨터, 모니터 및 MS4000의 전원(12V)선과 7.2V의 열적외 센서의 전원 선을 따로 빼내어 작업하였다.

2.2.3 GPS

최근 사진촬영용 항공기에 여러 가지 센서를 결합하여 외부표정요소를 직접 구하는 기법이 실용화

되고 있다(Ackermann, 1993). GPS 및 GPS/INS를 이용한 항공사진측량 방법에서는 항공기에 탑재한 GPS 및 GPS/INS로 촬영 순간의 노출 점의 위치와 회전각을 정확히 결정함으로써 외부표정요소 결정을 위한 지상기준점 측량을 생략하거나 또는 최소한의 기준점만을 사용하여 외부표정요소를 결정할 수 있다(박운용 등, 2004). GIS(Geographical Information System)와 항공 원격 탐사, 자원 분포도 제작 등 다양한 분야에서 저렴하고 신속한 방법으로 획득된 정확도가 높은 디지털 자료를 요구한다. 그리하여, 디지털 자료획득과 방법이 통합된 시스템이 개발되었다(Cramer et al., 1997; Mostafa et al., 1997; Toth. and Grejner-Brzezinska 1998).

비행경로와 탑재 체의 비행속도 및 고도를 산정하고, 지상 x, y, z값을 산정하여 센서의 속성정보를 획득하기 위하여 GPS안테나를 헬기에 장착하였다. 본 연구에 이용된 GPS수신기는 Ashtech Z-FX와 Ashtech Z-surveyor를 이용하였으며, 부경대학교 대 운동장에 기준점을 설치하고 DGPS측량을 하였다.

2.3 1차 항공촬영 테스트

1차 실험의 목적은 시스템의 기초성능 평가였다. 김해공항 내 항공대에서 2004년 9월 9일 오후 2시 24분 27초에 이륙하여 오후 3시 48분 47초에 착륙하여 총 1시간 24분 항공촬영 하였다.

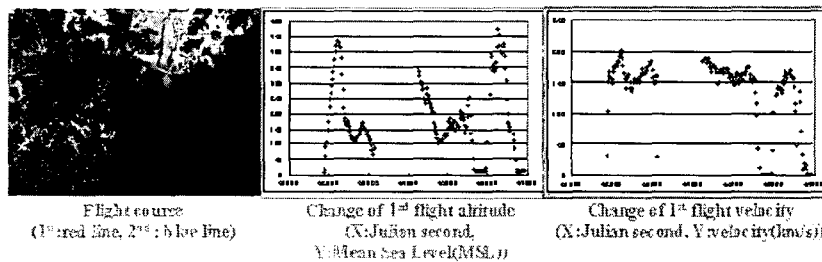


그림 2 1차 항공촬영 코스, 고도 및 속도

GPS 수신 데이터를 분석한 결과, 1차 항공촬영 고도는 해발고도 최저 약 100m에서 최고 450m의 범위였으며, 비행속도는 최고 시속 200km로 촬영하였음을 알 수 있었다. 일반적으로 GPS 데이터를 1s간격으로 수신해야 탑재 체의 촬영 당시 자세요소(ω, ϕ, κ)와 촬영 시 헬기의 정확한 x, y, z값을 산정할 수 있으나, 1차 항공촬영 실험에서는 GPS 수신기 조작 실수로 인하여 20s간격으로 GPS 데이터를 수신하였다. 그리하여 1차 실험에서는 정확한 외부표정요소($\omega, \phi, \kappa, x, y, z$) 산정에 실패하였다.

1차 항공촬영 영상을 분석한 결과, 촬영 시 날이 흐리고 비가 내려 대체적으로 광량이 부족하였으며, 최장 노출시간을 계산할 때 탑재 체의 속도가 느릴 것으로 예상하고 산정하여 적정 노출 시간 산정에 다소 문제가 있어 대체로 영상의 초점이 맞지 않았다. 그리고 렌즈를 통해 들어오는 빛에 대한 반응을 전자적으로 조정 (Gain값 조정을 통해)하여 CCD센서의 R, G, B, IR 파장대역 감도를 적절하게 맞춰주어야 하지만, 광량이 부족하여 영상이 어둡게 나타나 Gain값의 R,G,B,IR 비율조정에 어려움이 많았다. 그리하여 영상의 R, G, B, IR band 밸런스를 맞추는 데에 실패하였다.

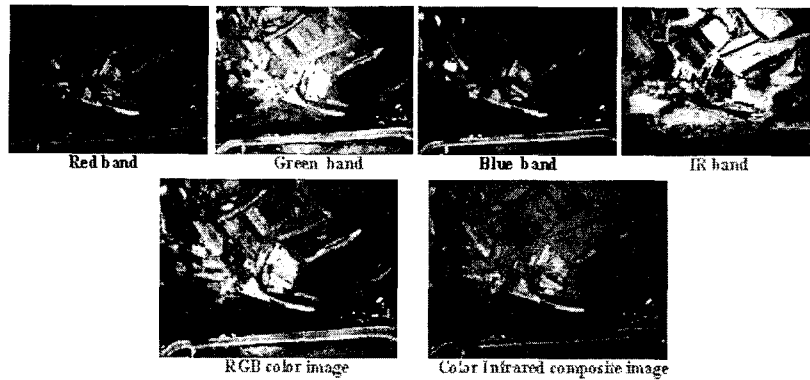


그림 3 1차 항공촬영 결과 (스틸사진 4밴드(R,G,B,IR))

1차 항공촬영 결과, BSQ포맷의 4band 스틸 영상 278장×7510Kb=1.96Gb, 동영상(72분) 722Mb, 열적외 동영상 2.4Gb를 획득하였다.

2.4 2차 항공촬영

2차 항공촬영은 대용량 다중분광 촬영 가능성 평가를 위한 실험이었다. 오후 1시 40분 20초에 부산 해운대 달맞이 고개 헬기장에서 이륙하여 거제도, 통영을 지나 가덕도에서 대변 항까지 촬영을 마치고 3시 25분 30초에 같은 장소에 착륙하였다. 시스템 제작 및 촬영에 동원된 인원은 총 8명이며 항공촬영 시스템 운영 인원 2명과 보조인원 1명이 헬기에 탑승하여 항공촬영을 주관하였다.

국립부경대학교 대운동장에 GPS 기준점을 세우고 DGPS측량을 실시하였다. DGPS처리는 Trimble Geomatics Office V1.5를 이용하였으며 Ashtech계열의 GPS 수신기는 Ashtech Receiver communication프로그램의 RINEX변환기를 이용하여 처리하였다. 처리결과, 비행고도가 해발고도 100m에서 400m범위였으며, 비행속도는 시속 100~220km로 촬영한 것으로 나타났다.

MS4000다중분광 센서는 자동초점조절이 되지만, 열적외 센서는 수동으로 초점을 조절해주어야만 한다. 1차 실험에서 열적외 센서를 수동으로 초점을 조절하는 데에 위험부담이 커서 원격초점조절장치를 센서부의 외부침벌에 장착하여 원격으로 조정할 수 있도록 보완하였다. 그러나, figure 9에서 보는 바와 같이 헬기의 비행고도가 100m에서 400m까지 넘나들어 초점을 맞추는 데에 어려움이 있었다.

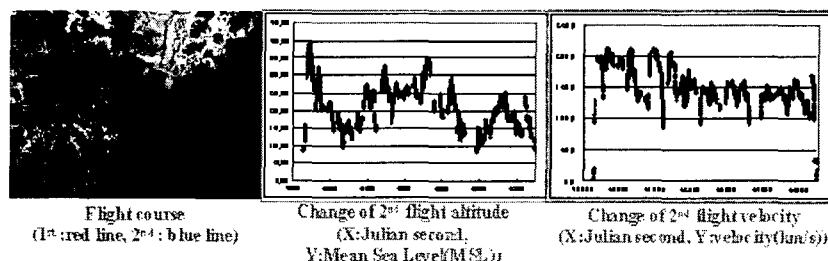


그림 4 2차 항공촬영 코스, 고도 및 속도

총 1시간 45분 항공 촬영하였으며, BSQ포맷의 4band 스틸 영상 6200장×7510Kb=46.56Gb,

동영상 4.16Gb(108분), 열적외 동영상 4.3Gb를 획득하였다. 1장당 촬영 면적은 0.022 km^2 ($0.17\text{km} \times 0.13\text{km}$)이며, 탑재 체의 고도가 그리 높지 않아 지상해상도는 0.11m을 획득할 수 있었다.

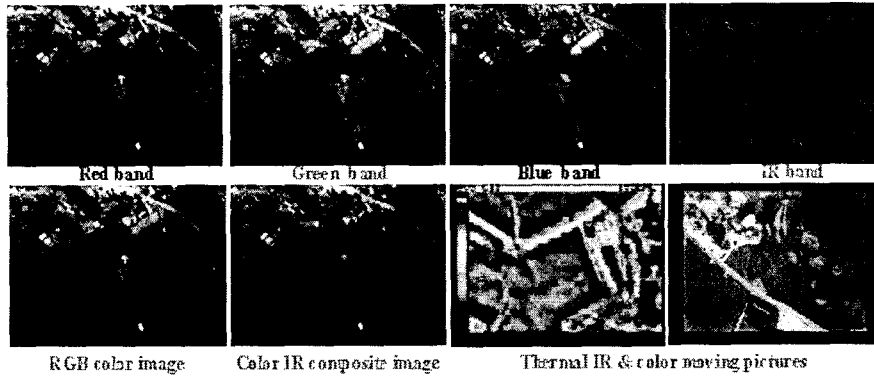


그림 5 2차 항공촬영 결과(4밴드 스틸사진 & RGB/CIR합성사진 & 칼라/열적외 동영상)

항공촬영 영상을 1s간격으로 자동 저장하여 중복률 60%~70%의 영상을 획득할 수 있었다. GPS 데이터의 수신상태가 좋지 않아 촬영시간 동안 연속적인 데이터를 획득하지 못하였다. 게다가 2차 항공촬영실험은 적조 녹조 탐지를 위하여 주로 바다를 촬영하였기 때문에 육지 부분의 영상은 총 영상의 촬영된 영상의 약20%에 불과하였다. 외부표정요소를 산정하기 위해서는 육지부분 영상이 필요하기 때문에 GPS 수신상태가 좋은 시간대와 육지부분 촬영 시간대가 일치하는 영상을 선별하였다. 그 결과, 촬영시간 중 14시 30분 31초에서 14시 38분 11초사이의 408장의 영상을 선별하였다. 표 2는 408장의 영상에 대한 촬영 시 x, y, z값과 탑재 체의 자세요소 값이다. 당시, 렌즈를 통해 들어오는 빛에 대한 반응을 전자적으로 조정해준 gain값은 R,G,B,IR 모두 4였으며, 노출시간은 모두 3ms였다.

표 2 카메라 속성값(x, y, z, omega (ω), phi (ϕ), kappa (κ))

time	x	y	z	ω	ϕ	κ
14:30:31	148233	143953	269	22	17	-342
14:30:32	148223	143976	271	22	17	-338
14:30:33	148211	143999	272	22	17	-334
14:30:34	148198	144020	274	22	17	-331
14:30:35	148183	144042	275	22	17	-328
...
14:38:09	151429	155238	303	22	17	-65
14:38:10	151460	155257	301	22	17	-65
14:38:11	151491	155276	299	22	17	-63

2.5 영상 활용 방안

본 연구의 결과로 획득된 영상은 표 3에서 보는 것처럼 다양한 분야에서 활용될 것으로 전망된다.

표 3 영상 활용 방안

분류	적용분야	활용방법
기하학적 분석	소규모 수치영상취득 주제도 제작(해안선도, 지형도)	정사투영을 통한 정사영상지도 제작 해양GIS에 활용 가능한 data구축
환경감시	적조 녹조 탐지 백화현상 탐지 환경변화탐지	센서의 분광특성을 이용한 알고리즘 개발 및 기존 알고리즘 적용
기타	재해 모니터링 및 구난	시스템의 기동성 및 정확성 이용

3. 결론

본 연구는 이미 개발된 고해상도 항공촬영 시스템 PKNU2호의 중복률 문제와 칼라 적외 영상을 정확하게 동일한 지역에서 동시에 획득할 수 없었던 한계를 극복하면서 또한 동영상 자료까지 획득할 수 있는 다중분광 항공 촬영 시스템 PKNU 3호 개발에 관한 연구이다. 2004년 9월 현재 제작에서 2차 항공촬영 실험까지 완료하였으며 각종 실험 및 장비개선 작업 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 하나의 센서로 R, G, B, IR 대역의 스틸 및 동영상 자료를 동시에 획득할 수 있는 센서를 도입하고 열적외 센서를 함께 탑재하여 다중분광 항공촬영 시스템의 기초를 구축하였다.

둘째, 1s간격 자동저장 기능을 추가하여 중복률 60~70%의 영상을 획득하였으며, 동영상 압축 및 실시간 저장 시스템을 추가하여 대용량 장기선 촬영이 가능하였다.

셋째, 대용량 자료를 저장하기 위한 영상저장 시스템과 센서부의 연결 케이블을 하나의 통 케이블로 작업하여 진동에 대한 안정성 및 시스템 기동성을 도모하였다.

넷째, MS4000 다중분광 센서는 자동 초점조절 기능이 있으나, Raytheon IRPro 열적외 센서는 수동으로 초점을 조정해야 하기 때문에 탑재 체 밖으로 장착되어 있는 센서의 초점을 수동으로 조정하는 것이 위험하여 원격 초점 조절 장치를 제작하여 센서 부 외부짐벌에 장착하였다.

다섯째, 우천시 무리하게 1차 항공촬영을 시행하여 광량이 부족하여 영상이 어둡게 나타나 Gain값의 R, G, B, IR 비율조정에 어려움이 많았다. 또한 탑재 체의 비행속도가 느릴 것으로 예상하고 최장노출시간을 산정하여 영상의 초점이 잘 맞지 않는 결과를 초래하였다.

여섯째, 2차 항공촬영에서는 1차 항공촬영 실패요인을 분석하여 노출시간 및 Gain값 조정에 성공하였으며, 수평정확도 0.001m, 수직정확도 0.002m의 GPS 수신기를 헬기에 탑재하여 DGPS측량을 하고 수신자료를 처리하여 항공촬영 당시의 탑재 체 x, y, z값 및 자세요소(ω, ϕ, κ)를 산정하였다. 이러한 외부표정요소 값과 카메라 내부표정 요소 값(카메라 렌즈 왜곡 보정, 초점거리)을 이용하여 영상을 자동 스트립 구성하는 데에 성공하였다.

본 연구는 환경감시의 일환으로 적조 녹조 탐지를 위하여 해안 및 섬 지역에서 실험 촬영을 하였다. 시스템의 개선 및 질 좋은 영상획득을 위한 연구를 진행 중이다. 향후 정밀 gyro, IMU 등의 장비를

도입, 연계하여 보다 정밀한 검, 보정 단계를 거쳐 실용성 있는 자료 획득을 위한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구를 지원하여 주신 부경대학교와 해양 수산부에 감사드립니다.

참고문헌

- 박운용, 이강원, 이재원, 정공운, 2004, GPS/INS 에 의한 항공사진측량의 블록조정, 한국측량학회지, 제 22 권 제 3 호, pp. 285-291.
- Cramer, M., Stallmann, D., Haala, N.(1997) High precision georeferencing using GPS/INS and image matching. *Proc. International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada*, pp. 453-462.
- F. Ackermann, and H. Schade, 1993, Application of GPS for Aerial Triangulation, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 59, No. 11, pp. 18-39
- Hagerthey, S.E., Paterson, D.M., Kromkamp, J., (2002). Monitoring estuarine ecosystems: the Eden Estuary and the BIOPTIS programme. *Estuarine and Coastal Sciences Association*, 2003. *Coastal Zone Topics, 5. The Estuaries and Coasts of North-East Scotland. Aberdeen, Estuarine and Coastal Sciences Association*, pp. 89-97.
- Hakvoort, J.H.M., Heineke, M., Heyman, K., Kuhl, H., Riethmuller, R., Witte, G., 1998. A basis for mapping the erodibility of tidal flats by optical remote sensing. *Marine and Freshwater Research* 49, pp. 867-873.
- Koch, B., Münch, D., Pröbsting, T.,(1998) Totholz als ökosystemare Eingangsgröße. In: Fischer, A. (Ed.), *Die Entwicklung von Wald-Biozönosen nach Sturmwurf*. Landsberg, Baden-Württemberg, pp. 64-73.
- L. Shukai, *Analysis of Remote Sensing of Global Environment and Resources*, Surveying and Mapping Press, Beijing, 1992.
- Mostafa, M.M.R., Schwarz, K.P., Gong, P., 1997. A fully digital system for airborne mapping. *Proc. International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics, and Navigation, Banff, Alberta, Canada, June 3-6*, pp. 463-471.
- Nüsslein, S., Greune, A., Adler, H., Troycke, A., Faisst, G., Reimeier, S., Dietrich, R.,(1997). Totholzflächen und Waldstrukturdaten im Nationalpark Bayerischer Wald (1996/1997). Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Dfreising.
- Riethmuller, R., Hakvoort, J.H.M., Heineke, M., Heymann, K. Kuhl, H., Witte, G.,(1998). Relating erosion shear stress to tidal flat surface colour. In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A.

- (Eds.), *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone*. Special Publications 139. Geological Society, London, pp. 283–293.
- Scherrer, H.U., 1993. Projekt zur flächenhaften Erfassung und Auswertung von Sturmschäden. *AFZ/Der Wald* 14, 712–714.
- Schmidtke, H., (1993). Die fraktale Geometrie von Sturmschaden-flächen im Wald. *AFZ/Der Wald* 14, 710–712.
- Toth, C., Grejner-Brzezinska, D.A. (1998) Performance analysis of the airborne integrated mapping system AIMSe. *Int. J. Arch. Photogr. Remote Sens.* 32 Part 2, pp. 320–326.
- Underwood, G.J.C., Kromkamp, J. (1999). Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. *Advances in Ecological Research* 29, pp. 93–153.