실시간 고정밀 영상 지오레퍼런싱을 위한 고속 연속 번들 조정 알고리즘

최경아 · 이임평[†]

서울시립대학교 공간정보공학과

Fast Sequential Bundle Adjustment Algorithm for Real-time High-Precision Image Georeferencing

Kyoungah Choi and Impyeong Lee[†]

Department of Geoinformatics, The University of Seoul

Abstract : Real-time high-precision image georeferencing is important for the realization of image based precise navigation or sophisticated augmented reality. In general, high-precision image georeferencing can be achieved using the conventional simultaneous bundle adjustment algorithm, which can be performed only as post-processing due to its processing time. The recently proposed sequential bundle adjustment algorithm can rapidly produce the results of the similar accuracy and thus opens a possibility of real-time processing. However, since the processing time still increases linearly according to the number of images, if the number of images are too large, its real-time processing is not guaranteed. Based on this algorithm, we propose a modified fast algorithm, the processing time of which is maintained within a limit regardless of the number of images. Since the proposed algorithm considers only the existing images of high correlation with the newly acquired image, it can not only maintain the processing time but also produce accurate results. We applied the proposed algorithm to the images acquired with 1Hz. It is found that the processing time is about 0.02 seconds at the acquisition time of each image in average and the accuracy is about ± 5 cm on the ground point coordinates in comparison with the results of the conventional simultaneous bundle adjustment algorithm. If this algorithm is converged with a fast image matching algorithm of high reliability, it enables high precision real-time georeferencing of the moving images acquired from a smartphone or UAV by complementing the performance of position and attitude sensors mounted together.

Key Words : Image, Exterior Orientation, Real-time, Georeferencing, High-speed, Sequential, Bundle Adjustment

요약 : 영상 기반의 정밀한 내비게이션이나 증강현실을 구현하기 위해서 고정밀 영상 지오레퍼런싱의 실시간 수행이 필수적이다. 일반적으로 고정밀 영상 지오레퍼런싱은 일괄 번들 조정 알고리즘을 적용하여 성취될 수 있으나 처리시간으로 인해 후처리로만 가능하였다. 최근에 제안된 연속 번들 조정 알고리즘은

접수일(2013년 3월 14일), 수정일(1차 : 2013년 4월 15일), 게재확정일(2013년 4월 16일).

[†] 교신저자: 이임평 (E-mail: implee@uos.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.

이와 유사한 정확도의 결과를 고속으로 산출하여 실시간 처리의 가능성을 열었다. 그러나 처리시간이 영상의 개수에 따라 점진적으로 증가하기 때문에 영상이 아주 많은 경우에 실시간 수행이 보장되지 못하는 한계가 있었다. 이러한 연속 번들 조정 알고리즘을 보완하여 본 연구는 실시간 처리를 위해 영상의 개수와 무관하게 처리시간을 항상 일정 범위로 한정시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기존의 영상들 중에서 새롭게 취득된 영상과 통계적으로 관련성이 높은 영상들만 고려하기 때문에 처리시간을 일정 범위로 한정시키면서도 비교적 정확한 결과를 산출할 수 있다. 제안된 알고리즘을 1Hz로 취득된 영상에 적용한 결과, 평균적으로 영상을 취득할 때마다 0.02 초 이내의 처리시간을 소요하면서 기존의 일괄 번들 조정 알고리즘의 결과와 비교하여 지상점 좌표를 기준으로 ± 5 cm 이내의 정확도로 지오레퍼런싱을 수행할 수 있었다. 신뢰성 높은 고속의 영상 매칭 알고리즘과 결합된다면 스마트폰 또는 UAV 등으로 동영상을 취득하면서 함께 탑재된 위치/자세 센서의 성능을 보완하여 고정밀의 실시간 지오레퍼런싱이 가능할 것으로 판단된다.

1. 서론

내비게이션은 출발지에서 목적지까지 플랫폼의 움직임을 모니터링하고 제어함으로써 경로를 안내하는 시스템으로 항공기, 차량 등에 장착되고 있다. 내비게이션은 경로 안내를 위해 사용하는 베이스 맵(base map)의 종류에 따라 2차원 또는 3차원 지도를 활용하는 그래픽 기반 기술과 정지영상이나 동영상을 활용하는 실사 영상 기반 기술로 나눌 수 있다. 실세계를 요약적으로 표현하는 2차원 지도를 베이스 맵으로 사용하는 경우, 사용자가 지도를 해석하고 정보를 유추하는데 어려움을 겪을 수 있다. 지도에 대한 사용자의 해석과 이해를 높이고자 3차원 모델을 베이스 맵으로 사용하기 위한 노력이 있으나, 여전히 현실감이 떨어지며 3차원 모델을 구축하는데 많은 비용과 시간이 소요된다는 단점이 있다. 현실감을 높이고자 항공 또는 지상에서 취득된 실사 영상 위에 경로를 안내하는 방법이 있으나 대용량의 영상을 빠르게 처리하고 가시화할 수 있어야 하며 정사영상으로의 변환이 요구된다. 고해상도의 항공 및 지상영상으로부터 정밀한 정사영상을 생성하는데 역시 많은 비용과 시간이 소요된다(Cho *et al.*, 2007). 이와 같은 이유로 최근에는 현실감을 높이면서 경제적으로 베이스 맵을 구축하기 위한 방법으로 플랫폼에 비디오카메라를 탑재하여 실시간으로 취득되는 영상 상에 경로를 안내하는 실시간 증강현실(Augmented Reality, AR) 기반의 내비게이션에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Zhenneng and Uchimura, 2004; Tonniss *et al.*, 2005).

비디오카메라로부터 취득되는 영상 상에 경로나 교통 표지 등을 증강시키기 위해서 내비게이션 정보가 정의된 절대좌표계 기준으로 영상이 촬영된 순간에 카메라의 위치와 자세를 정확히 알아야 한다. 카메라의 위치와 자세 즉, 영상의 외부표정요소(exterior orientation parameters)를 결정하는 과정을 지오레퍼런싱(georeferencing)이라고 한다. 실시간 증강현실 기반의 내비게이션을 위해서 이와 같은 영상 지오레퍼런싱 과정이 필수적이며 실시간으로 수행되어야 한다. 영상의 고속 지오레퍼런싱 방법은 카메라 노출 시점의 위치·자세 센서 데이터에 탑재 변수(mounting parameters: lever arm, boresight)를 고려하여 영상의 외부표정요소를 결정하는 직접(direct) 지오레퍼런싱과 지상기준점 또는 위치·자세 센서 데이터를 제약조건으로 영상의 관측값을 활용한 조정계산에 의해 영상의 외부표정요소를 결정하는 간접(indirect) 지오레퍼런싱으로 구분된다(Choi and Lee, 2009a). 간접 지오레퍼런싱은 최근 영상에 대해 기존 일괄 번들 조정(Simultaneous Bundle Adjustment)을 통해 수행하는 방법과 연속 번들 조정에 의한 온라인 항공삼각측량(On-Line Triangulation, OLT)을 수행하는 방법이 있다(Choi and Lee, 2012).

1990년대 중반 항공기에 GPS/INS가 카메라와 함께 탑재되어 촬영과 동시에 항공기의 위치·자세 데이터를 확보할 수 있게 되었고, Schwarz *et al.* (1993)와 Toth and Grejner-Brzezinska (1998)에 의해 직접 지오레퍼런싱의 개념이 정립되었다. 이를 기반으로 Applanix Corporation (Mostafa *et al.*, 2001)는 항공에서 영상 촬영과 동시에 온

보드(on-board) 컴퓨터에서 GPS/INS 데이터를 통합하여 영상의 외부표정요소를 실시간으로 결정하는 솔루션을 정립하였다. Leica RC30 카메라와 영상의 지오레퍼런싱을 목적으로 개발한 Position and Orientation System (POS) AV를 결합한 POS DG 510라는 상용제품을 개발하여 판매하기 시작하였다. GPS/INS와 카메라가 탑재된 항공 매핑 시스템으로부터 취득된 영상에 대한 직접 지오레퍼런싱 수행은 고속 매핑을 가능하게 하여 생산성을 증대시키고 새로운 모니터링 분야에 항공 매핑 시스템의 활용 가능성을 인식시켰다(Skaloud and Legat, 2008). 그러나 지오레퍼런싱의 정확도가 GPS/INS 성능에 의존적이며, 높은 정확도를 위해 고가·고성능의 센서 탑재가 필요하다. 값비싼 센서를 탑재함에도 불구하고 간접 지오레퍼런싱 수행 결과와 비교하여 상대적으로 낮은 정확도를 산출한다. 또한 지오레퍼런싱된 영상으로부터 정사영상과 같은 공간정보를 생성하기 위해서 정확한 외부표정요소 결정뿐만 아니라 y -시차의 제거도 중요하다. 그러나 직접 지오레퍼런싱된 영상 간에는 여전히 y -시차가 존재하여 이와 같은 영상으로부터 정사영상 등의 공간정보 생성이 어렵다.

사진측량 분야에서는 GPS/INS의 성능에 의존적인 직접 지오레퍼런싱에 비해 더욱 정확한 결과물을 산출하기 위하여 영상 간의 공액점과 기준데이터를 활용한 일괄 번들 조정 기반의 항공삼각측량(Aerial Triangulation, AT)을 수행하는 간접 지오레퍼런싱이 선호된다. 기준데이터를 활용한 간접 지오레퍼런싱 방법은 고속 처리가 어려운 일괄 번들 조정(McGlone, 2004)에 기반하기 때문에 실시간 지오레퍼런싱에 적용될 수 없다. 컴퓨터 비전 분야에서는 이동하는 카메라의 주변을 매핑하는 동시에 카메라의 위치를 추정하기 위한 방법으로 Simultaneous Localization and Mapping(SLAM)을 수행한다. SLAM은 용어만 다르게 사용할 뿐 사진측량 분야의 일괄 번들 조정 기반의 AT와 그 방법론은 동일하다. 사진측량의 공선조건식과 유사하게 절대좌표계 상의 지상점과 영상좌표계 상의 영상점을 관계시키기 위한 카메라 모델을 수립하여, 이를 기반으로 영상 트래킹의 결과를 활용하여 카메라의 위치와 카메라 주변 객체의 위치를 추정하는 것이다. 이와 같은 SLAM은 로봇에 탑재된 카메라

로부터 취득된 영상을 기반으로 주변 환경을 인식하고 로봇이 정상적으로 이동할 수 있게 하기 위하여 아주 중요하게 인식되고 있으며 실시간 또는 온라인으로 수행되어야 한다(Kaess *et al.*, 2012). 실시간 처리를 위하여 새로운 영상이 취득될 때마다 최근 n 개의 영상에 대해 SLAM을 수행한다. 컴퓨터 비전에서 실시간 SLAM이 수행되는 상황은, 카메라와 객체가 상당히 가까운 거리 내에 있으면서 카메라의 위치가 크게 변화하지 않는 근접 사진 측량에 가깝기 때문에 최근 소수의 관측값만으로 카메라의 위치를 결정하는 것이 가능하다. 그러나 항공 매핑 시스템을 통해 취득되는 영상의 지오레퍼런싱에서는 객체와 영상 간의 거리가 멀기 때문에 최근 소수의 관측값만으로 정확한 외부표정요소 결정에 어려움이 있다. 따라서 항공 매핑 시스템으로부터 취득된 영상의 실시간 지오레퍼런싱에 SLAM을 적용하는 것은 부적합하다.

관측값을 줄여 AT를 빠르게 수행하겠다는 컴퓨터 비전 분야의 접근과는 다르게 사진측량 분야에서는 연속 추정(sequential estimation) 문제로 AT를 정의하고 접근한 연구들이 있었다. 연속 추정에 기반한 AT는 영상이나 공액점이 추가되는 시점마다 AT를 수행함으로써 영상의 외부표정요소나 공액점에 상응하는 지상점 좌표와 같은 미지수를 갱신 및 추정하는 과정으로 온라인 항공삼각측량이라 부른다. 고해상도 Charge Coupled Device(CCD) 카메라와 컴퓨터의 개발로 영상 취득 및 측정, 조정, 분석에 이르는 과정이 자동화되면서 OLT를 통하여 사진측량학적 프로세스에서 측정값의 품질 평가를 할 수 있게 되었다. AT 수행 중 측정값의 잉여도와 정밀도를 평가함으로써 프로세스의 종료 시점에 예상되는 결과물의 정확도를 향상시킬 수 있기 때문에 산업 분야에서는 OLT를 통한 측정값의 품질 평가가 각광받게 되었다(Kersten *et al.*, 1992). 과거 소수의 영상에 대해 공액점만 추가되어 프로세스 중에 관측값의 품질 평가를 위해 OLT 시스템이 활용되었고, 항공 매핑 시스템으로부터 취득되는 영상의 실시간 지오레퍼런싱에 적용된 사례는 없었다. 대상지의 긴급 매핑(rapid mapping)의 필요성이 증가함에 따라 최근 Choi and Lee(2012)에 의해 실시간 지오레퍼런싱을 위한 OLT의 활용에 대한 검토가 이루어졌다. 그 결과, 정확도와 처리시간 측면에서 Choi and Lee(2009b)에

의해 제안된 관측값 분류에 기반한 정규행렬 역행렬 갱신 방법을 활용한 온라인 항공삼각측량이 영상의 실시간 지오레퍼런싱에 적합한 것으로 검증되었다. 그러나 영상이 취득됨에 따라 추가되는 미지수나 관측값의 개수에 의존적으로 연산량이 증가하기 때문에 처리 시간도 어느 정도 증가하였다. 이는 항공기 또는 자동차 등에 탑재된 카메라로부터 경로를 따라 빠른 속도로 취득되는 수많은 영상을 실시간으로 지오레퍼런싱하기에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 연속해서 수많은 영상이 취득되더라도 새로운 영상이 취득되는 때 시점 취득 주기와 동일한 일정한 시간 내에, 일괄 번들 조정에 의한 결과와 유사한 정확도로 영상을 지오레퍼런싱할 수 있는 고속 연속 번들 조정 알고리즘을 제안하고자 한다. 이를 위하여 기존의 관측값 분류에 기반한 정규행렬 역행렬 갱신 방법을 활용한 온라인 항공삼각측량 과정에서 영상이 추가되는 때 단계 산출되는 연산 결과를 분석하고, 이로부터 매 단계 연산량을 일정하게 유지하여 연산시간을 일정 범위로 한정시킬 수 있는 고속 연속 번들 조정 알고리즘을 개발하였다. 본 논문은 Choi and Lee(2013)에서 기술한 항공 멀티 센서 시스템으로 취득한 영상에 대한 연속 번들 조정 알고리즘 중에서 영상들의 외부표정요소간의 상관관계를 고려하여 고속으로 조정하는 알고리즘을 보다 상세하게 기술하고, 이를 실험데이터에 적용하고 그 결과를 면밀하게 분석하였다.

2. 실시간 영상 지오레퍼런싱

실시간 영상 지오레퍼런싱을 위해 모든 입력 데이터는 실시간으로 결정되어야 한다. 입력 데이터로는 카메라의 내부표정요소, 기준데이터와 관측값으로써

Fig. 1. Output and input of real-time image georeferencing

영상 간의 공액점이 있다. 내부표정요소는 사전에 카메라 캘리브레이션을 통해 결정하고, 실시간 지오레퍼런싱 과정에서는 상수로 설정할 수 있다. 영상 간의 공액점은 Kanade-Lucas-Tomasi feature tracker(KLT), Scale Invariant Feature Transform(SIFT), Speed Up Robust Features(SURF), FAST 등의 강인한(robust) 영상 매칭 알고리즘에 의해 실시간으로 측정 가능하다. 기준데이터는 지상기준점 측량이나 플랫폼에 탑재된 GPS/INS를 통해서 획득될 수 있다. 지상기준점을 활용한 실시간 처리는 사전에 측량된 대공표지가 설치된 대상지역에서만 가능하기 때문에 GPS/INS로부터 실시간 제공될 수 있는 영상의 초기 외부표정요소만을 기준데이터로 활용한다. 이상의 입력 데이터로부터 실시간 영상 지오레퍼런싱에 의해 영상의 외부표정요소와 공액점에 상응하는 지상점을 실시간으로 산출할 수 있다. 실시간 영상 지오레퍼런싱의 입출력 데이터는 Fig. 1과 같이 요약된다.

상기 가정 하에, 실시간 영상 지오레퍼런싱 수행 시점에서 관측값은 Table 1과 같이 요약된다. 기존 영상 간의 공액점과 GPS/INS로부터 제공된 기존 영상의 외부표정요소가 기존 관측값으로 존재하며, 새로운 영상 취득과 함께 기존에 정의된 지상점이 새로운 영상에 나타난 공액점, 새롭게 정의된 지상점이 기존 영상에 나타난 공액점, 새롭게 정의된 지상점이 새로운 영상에 나타난 공액점과 GPS/INS로부터 제공된 새로운 영상의 외부표정요소가 새롭게 추가된 관측값이다. 이때, 새로운 관측값은 기존 및 새로운 미지수와와의 관계성에 따라 기존 미지수와 새로운 미지수 모두와 관

Table 1. Classification of observations associated with image georeferencing

기존 관측값	기존 미지수와 관계	기존 영상 간의 공액점 (v_1)
		GPS/INS로부터 제공된 기존 영상의 외부표정요소 (v_1)
새로운 관측값	기존 / 새로운 미지수와 모두 관계	기존에 정의된 지상점이 새로운 영상에 나타난 공액점 (v_{2a})
		새롭게 정의된 지상점이 기존 영상에 나타난 공액점 (v_{2a})
	새로운 미지수와 관계	새롭게 정의된 지상점이 새로운 영상에 나타난 공액점 (v_{2b})
		GPS/INS로부터 제공된 새로운 n개 영상의 외부표정요소 (v_{2b})

계된 관측값과 새로운 미지수와만 관계된 관측값의 두 그룹으로 나누어 질 수 있다.

가장 효율적인 연속 조정이 되기 위해서는 추가되는 미지수와 관측값에 대한 연산만을 수행하여 앞서 추정된 미지수를 갱신하고 새로운 미지수를 추정하는 것이 이상적이다. 이에 Choi and Lee(2009b)은 연산 효율성을 극대화하기 위해 관측값을 미지수와 관계성에 따라 Table 1과 같이 분류하고 이전 단계에서 계산된 정규행렬의 역행렬을 사용하여 최소한의 연산만으로 현 단계의 정규행렬 역행렬을 갱신하는 방법론을 제안하였다.

3. 고속 연속 번들 조정 알고리즘

실시간 영상 지오레퍼런싱을 위해 관측값 분류에 기반한 정규행렬 역행렬 갱신 방법론(CL update formular)을 채택한 연속 번들 조정(Sequential Bundle Adjustment, SEBA) 알고리즘이 처리속도 및 정확도 측면에서 가장 효율적인 것으로 검증되었다(Choi and Lee, 2012). 실시간 처리를 만족시키기 위해서는 영상의 취득 주기와 동일한 속도로 지오레퍼런싱이 수행되어야 한다. 그러나 SEBA 알고리즘은 취득된 영상의 수가 증가함에 따라 연산시간이 증가하기 때문에 플랫폼에 탑재된 카메라로부터 경로를 따라 취득되는 수많은 영상을 실시간으로 지오레퍼런싱하기 어렵다. 본 절에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 기존 SEBA를 적용하였을 때 영상이 추가되는 매 단계 산출되는 연산 결과를 분석하고, 이로부터 매 단계 연산시간을 일정 범위로 한정시킬 수 있는 방법론을 도출한다.

1) CL update formular에 기반한 연속 번들 조정 (SEBA)

영상이 취득되는 시점마다 새로운 관측값을 활용하여 SEBA를 수행한 결과, 기존 영상의 외부표정요소와 지상점 좌표가 갱신되며 새로운 영상의 외부표정요소와 지상점 좌표가 추정된다. 영상 취득 초반에는 현재까지 취득된 영상 간의 공액점, 기존 데이터를 동시에 적용하여 영상의 외부표정요소와 지상점 좌표를 추정하는 공선조건식 기반의 일괄 번들 조정을 수

행한다. 일괄 번들 조정의 관측방정식은 식(1)과 같이 표현되며, 이에 최소제곱법(Least-Squares Solution, LESS)을 적용하여 추정되는 미지수와 그 분산은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$y_1 = A_{11}\xi_1 + e_1, e_1 \sim (0, \sigma_0^2 P_1^{-1}) \quad (1)$$

y_1 은 관측값벡터, ξ_1 은 미지수 벡터, A_{11} 은 관측값과 미지수의 관계에 따른 설계행렬(design matrix), e_1 은 y_1 에 포함된 오차벡터이다. 오차벡터는 기댓값이 0이고 분산은 인 정규분포를 따르는 것으로 가정하며, 이때 σ_0^2 는 분산 요소를 의미하고 P_1^{-1} 는 여인수 행렬(cofactor matrix)로써 P_1 은 관측값의 가중 행렬로 활용될 수 있다.

$$\hat{\xi}_1 = N_{11}^{-1} c_1, D\{\hat{\xi}_1\} = \sigma_0^2 N_{11}^{-1} \quad (2)$$

$\hat{\xi}_1$ 은 일괄 번들 조정으로 추정된 미지수 벡터로, 기존 영상의 외부표정요소와 기존 영상 간의 공액점에 의해 정의되는 지상점의 3차원 좌표가 이에 해당된다. N_{11} 과 c_1 은 각각 $A_{11}^T P_1 A_{11}$ 과 $A_{11}^T P_1 y_1$ 이다.

일괄 번들 조정에 이어 새로운 영상 취득과 함께 관측값과 미지수가 추가되면, 추가된 관측값을 Table 1에서와 같이 분류하여 식 (3)과 같이 표현되는 관측방정식에 기반한 SEBA를 수행한다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_{2a} \\ y_{3b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{2a1} & A_{2a2} \\ 0 & A_{3b2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_{2a} \\ e_{3b} \end{bmatrix} \sim 0, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_1^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & P_{2a}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & P_{3b}^{-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 기존 관측값과 미지수는 아래첨자 중 첫 숫자를 1로, 새로운 관측값과 미지수는 2로 구분하였으며 새로운 관측값은 아래첨자 중 두 번째 문자를 사용해 미지수와 관계성을 명시하였다. a 는 기존 미지수와 새로운 미지수 모두와 관계된 관측값을 나타내며, b 는 새로운 미지수와만 관계된 관측값을 나타낸다. 따라서 y_1 은 기존 관측값벡터, y_{2a} 은 기존 미지수와 새로운 미지수 모두와 관계된 새로운 관측값벡터, y_{3b} 은 새로운 미지수만 관계된 새로운 관측값벡터이며, ξ_1 은 기존 미지수 벡터, ξ_2 는 새로운 미지수 벡터이다. A_{11} , A_{2a1} , A_{2a2} , A_{3b2} 는 관측값과 미지수의 관계에 따라 수립된 설계행렬로써, 아래첨자 중 첫 숫자 또는 첫 숫자와 문자는 관계된 관측값의 종류를 명시하고, 마지막 숫자는 관계된 미지수의 종류를 명시한다. A_{11} 은 관측값 y_1 과 미지수 ξ_1 의 관계에 의해 수립된 설계행렬이며,

A_{2a1} 는 관측값 y_{2a} 와 미지수 ξ_1 의 관계에 의해 수립된 설계행렬, A_{2a2} 는 관측값 y_{2a} 와 미지수 ξ_2 의 관계에 의해 수립된 설계행렬, A_{2b2} 는 관측값 y_{2b} 와 미지수 ξ_2 의 관계에 의해 수립된 설계행렬이다. e_1, e_{2a}, e_{2b} 은 각각 관측값 벡터 y_1, y_{2a}, y_{2b} 에 포함된 오차벡터이다. 오차벡터 e_1, e_{2a}, e_{2b} 의 기댓값은 0이며 서로 독립적으로 분산 요소만 공유하고 각각의 여인수 행렬은 $P_1^{-1}, P_{2a}^{-1}, P_{2b}^{-1}$ 이다. 이때, y_1, A_{11}, ξ_1, e_1 은 연속 조정 문제에서 이전 단계에서 수립된 결과이며, 나머지 $y_{2a}, y_{2b}, A_{2a1}, A_{2b2}, \xi_2, e_{2a}, e_{2b}$ 은 관측값과 미지수가 추가된 현재의 단계에서 새롭게 정의된다.

관측값과 미지수가 추가된 현재 단계에서 미지수 $\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2$ 를 추정하기 위하여 식 (3)에 최소제곱법을 적용하여 정규행렬식을 유도하고 이로부터 근사식을 결정할 수 있다. 이전 단계의 연산 결과인 $\hat{\xi}_1$ 과 N_{11}^{-1} 및 그 구성요소를 최대한 활용하고, 현재 단계에서 새롭게 요구되는 연산량을 최소화할 수 있는 기존 미지수에 대한 갱신식은 식 (4), 새로운 미지수에 대한 추정식은 식 (5)와 같다(Choi and Lee, 2009b; Choi and Lee, 2012).

$$\hat{\xi}_1 = \hat{\xi}_1 + N_{11}^{-1} A_{2a1}^T [I + \bar{P}_2 A_{2a1} N_{11}^{-1} A_{2a1}^T]^{-1} \{\bar{P}_2 (y_{2a} - A_{2a1} \hat{\xi}_1) + \bar{P}_{23} y_{2b}\}$$

$$\text{where } \bar{P}_{23} \equiv -P_{2a} A_{2a2} (M_{22} + L_{22})^{-1} A_{2b2}^T P_{2b} \quad (4)$$

$$\bar{P}_2 \equiv P_{2a} - P_{2a} A_{2a2} (M_{22} + L_{22})^{-1} A_{2a2}^T P_{2a}$$

$$M_{22} \equiv A_{2a2}^T P_{2a} A_{2a2}, L_{22} \equiv A_{2b2}^T P_{2b} A_{2b2}$$

$$\hat{\xi}_2 = (M_{22} + L_{22})^{-1} (A_{2a2}^T P_{2a} (y_{2a} - A_{2a1} \hat{\xi}_1) + A_{2b2}^T P_{2b} y_{2b}) \quad (5)$$

기존의 일괄 번들 조정 모델을 적용한다면, 기존 미지수의 개수를 n_{ξ_1} , 새로운 미지수의 개수를 n_{ξ_2} 이라 했을 때, 추정 시점마다 ($n_{\xi_1} + n_{\xi_2}$) 크기의 정규행렬의 역행렬 연산을 수행해야 미지수를 추정할 수 있다. CL update formula 기반의 SEBA에 의하면 이전 단계의 연산 결과를 활용하여 추정 시점마다 $(M_{22} + L_{22})^{-1}$ 과 $[I + \bar{P}_2 A_{2a1} N_{11}^{-1} A_{2a1}^T]^{-1}$ 의 역행렬 연산만 수행하면 기존 미지수를 갱신하고 새로운 미지수를 추정할 수 있다.

$(M_{22} + L_{22})^{-1}$ 은 추가된 미지수의 개수에 의존적인 크기의 역행렬 연산으로 계산된다. $(M_{22} + L_{22})^{-1}$ 을 $\bar{P}_2 \equiv P_{2a} - P_{2a} A_{2a2} (M_{22} + L_{22})^{-1} A_{2a2}^T P_{2a}$ 에 대입하여 $\bar{P}_2$ 을 산출한다. 마지막으로 $\bar{P}_2$ 과 이전단계의 연산 결과인 N_{11}^{-1} 을 이용하여 기존 미지수와 새로운 미지수 모두와 관계된 관측값의 개수 $n_{y_{2a}}$ 의 크기를 갖는 $[I + \bar{P}_2 A_{2a1} N_{11}^{-1} A_{2a1}^T]^{-1}$ 을 계산하면 기존 미지수를 갱신하고 새로운 미

지수를 추정할 수 있다.

영상 취득이 진행됨에 따라 총 미지수의 개수, ($n_{\xi_1} + n_{\xi_2}$)는 급격하게 증가하는 반면 SEBA 과정에서는 요구되는 역행렬 연산량은 새로운 미지수의 개수, n_{ξ_2} 나 관측값의 개수, $n_{y_{2a}}$ 에 의존적이므로 거의 일정하고 작은 수치이다. 일반적으로, 조정 계산 과정에서 가장 많은 시간이 소요되는 부분은 역행렬 연산으로, 역행렬 연산이 요구되는 행렬의 크기를 효율적으로 감소시켜 신속하게 연산이 이루어질 수 있다.

또한, 미지수 추정 과정의 연산 결과는 식 (6)에서와 같이 W_1, N_r^{-1}, W_2, W_3 의 연산에 활용되고 정규행렬 역행렬의 블록을 효율적으로 구성할 수 있게 한다. 새로운 관측값과 미지수가 추가된 현재 단계의 정규행렬 역행렬을 효율적으로 산출할 수 있기 때문에 추정 결과의 정밀도를 평가할 수 있다.

$$D \left\{ \begin{bmatrix} \hat{\xi}_1 \\ \hat{\xi}_2 \end{bmatrix} \right\} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} N_r^{-1} & -N_r^{-1} W_1 \\ -W_1^T N_r^{-1} (M_{22} + L_{22})^{-1} + W_1^T N_r^{-1} W_1 \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} N_r^{-1} W_2 \\ W_2^T W_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

where

$$W_1 \equiv M_{12} (M_{22} + L_{22})^{-1}$$

$$N_r^{-1} \equiv (N_{11} + M_{11} - W_1 M_{12}^T)$$

$$W_2 \equiv -N_r^{-1} W_1,$$

$$W_3 \equiv (M_{22} + L_{22})^{-1} + W_1^T N_r^{-1} W_1$$

2) 미지수 간의 상관관계를 이용한 고속 연속 번들 조정 (FSEBA)

영상이 추가될 때마다 추가되는 관측값과 미지수에 의존적인 새로운 연산만으로 기존 미지수와 새로운 미지수 모두와 관계된 정규행렬식의 정규행렬 역행렬을 효율적으로 갱신할 수 있다. 그러나 취득된 영상의 수가 증가할수록 갱신되어야 할 총 미지수의 개수 역시 증가하기 때문에, 역행렬 연산량을 일정하게 한정시켰음에도 불구하고 미지수 갱신에 소요되는 연산 시간이 증가하게 된다. 오랜 시간 영상 취득이 지속된다면, 실시간 영상 지오레퍼런싱에 요구되는 처리 시간 내에 미지수 벡터의 갱신이 불가능할 수 있다. 따라서 많은 수의 영상이 취득되더라도 미지수 벡터의 크기를 일정 범위 내로 한정시킬 수 있는 방법론이 요구된다.

미지수 벡터의 크기를 일정하게 유지시키기 위하여 미지수 벡터에 대한 특정 임계값을 적용하여, 미지수 벡터의 크기가 임계값 이상이면, 취득된 지 가장

오래된 영상과 관련된 미지수를 갱신 대상에서 제외 시킴으로 미지수 벡터의 크기를 한정할 수 있다. 예를 들어, 미지수 벡터에 대한 임계값으로 100을 사용하였다면, 영상이 취득될 때마다 미지수 벡터의 크기를 확인하면서 미지수 벡터의 크기가 100 넘는 순간, 가장 초반에 취득된 영상과 관계된 미지수를 미지수 벡터에서 제외시켜 그 크기가 100을 넘지 않도록 한다. 이와 같이 특정 임계값을 미지수 벡터의 크기에 직접적으로 적용하는 방법은 추정 과정의 원리에 기인하지 않고 직관적이라는 데 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 미지수 벡터의 크기를 합리적으로 제한하기 위해 미지수 간의 상관관계를 활용하고자 한다. 오랜 시간 영상 취득이 지속되었다면 현재 추가된 새로운 영상과 초반에 취득된 영상 간의 상관관계는 상당히 낮을 것이다. 이런 경우, 기존 영상 중 초반에 취득된 영상과 관계된 미지수를 갱신 대상에서 제외시켜 미지수 벡터의 크기를 일정 범위 내로 한정시키는 방법이 특정 임계값을 적용하는 방법보다 합리적인 것으로 판단된다. CL update formula 기반의 SEBA에 의하면 모든 추정 시점마다 영상의 외부표정요소와 지상점 좌표를 추정함과 동시에 추정된 미지수의 분산과 미지수 간의 공분산으로 구성된 여인수 행렬이 산출된다. 여인수 행렬로부터 미지수 간의 상관계수를 계산하여 가장 최근의 미지수와 상관관계가 낮은 미지수는 미지수 벡터에서 제외시킬 수 있다.

실시간 영상 지오레퍼런싱 과정에서 영상의 외부표정요소, 공액점에 상응하는 지상점 좌표와 같이 두 종류의 미지수가 있다. 미지수의 종류에 따라 미지수 벡터에 포함시키기 위한 선별과정이 다르다. 우선, 새로운 영상의 외부표정요소와 기존 영상의 외부표정요소 간의 상관계수를 계산하여 새로운 영상의 외부표정요소와 상관관계가 정해진 수준보다 높은 영상의 외부표정요소를 선별하여 미지수 벡터에 포함시킨다. 그러나 새로운 영상의 외부표정요소와 기존 영상의 외부표정요소 간의 상관계수는 기존 영상의 외부표정요소와 새로운 영상의 외부표정요소 모두에 대해 조정계산이 이루어진 후에 산출되는 여인수 행렬로부터 계산될 수 있다. 새로운 미지수와 상관관계가 낮은 기존 미지수를 갱신 대상에서 제외하기 위해 모든 미지수에 대해 조정계산을 수행하고, 다시 미지

수 벡터를 수정한 뒤 미지수를 추정하는 것은 매우 비효율적이다. 따라서 새로운 영상은 기존 영상 중 가장 최근에 취득된 영상과 가장 유사하기 때문에 새로 취득된 영상 대신에 기존 영상 중 가장 최근에 취득된 영상의 외부표정요소와의 상관계수를 계산하여 활용하고자 한다. 새로운 영상 대신에 기존 영상 중 가장 최근 영상과 이전 영상들 사이의 상관계수를 계산하고, 계산된 상관계수를 임계값(ϵ)과 비교하여 임계값 이상의 상관계수를 갖는 영상의 외부표정요소부터 미지수 벡터에 포함시킨다.

조정 계산에 포함될 외부표정요소가 결정되면, 다음으로 미지수 벡터에 포함될 지상점 좌표의 선별과정이 이루어진다. 영상의 외부표정요소에 대한 선별과정은 상관계수를 활용한 점과 다르게, 지상점 좌표는 갱신 대상이 되는 외부표정요소를 갖는 영상 상에 출현 횟수를 활용하여 선별한다. 미지수 벡터에 제외될 외부표정요소를 갖는 영상 상에만 나타나는 지상점 좌표는 미지수 벡터로부터 제외된다. 몇몇 지상점은 조정 계산에 포함되는 외부표정요소를 갖는 영상 상에 단 한번만 출현할 수도 있다. 이와 같은 지상점은 더 이상 공액점으로부터 유도된 것으로 간주할 수 없기 때문에 미지수 벡터에서 제외시킨다. 조정 계산에 포함되는 외부표정요소와 관계된 영상에 한 번도 출현하지 않거나 단 한번만 출현하는 지상점은 갱신되어야 할 미지수 벡터에서 제외된다. 이상의 방법으로 새로 취득된 영상과 상관관계가 높은 외부표정요소와 지상점이 결정되면 미지수 벡터의 크기는 거의 일정하게 유지될 수 있다.

미지수 간의 상관관계를 이용한 고속 연속 번들 조정(Fast SEquential Bundle Adjustment, FSEBA) 알고리즘은 SEBA에 추정된 영상의 외부표정요소 간의 상관계수를 계산하고, 이 상관계수를 활용하여 다음 추정과정에 포함될 미지수 벡터와 정규행렬 역행렬의 블록행렬을 재구성하는 과정이 추가된다. FSEBA의 과정은 크게 준비, 조정, 정리의 3 단계로 구분되어 Fig. 2와 같은 순서로 수행된다. 정리 단계에서 추정된 미지수 벡터 및 정규행렬 역행렬 재구성의 과정을 거치면, 정규행렬 역행렬의 주요블록인 N^{-1} 로부터 영상의 외부표정요소 간의 상관계수를 계산할 수 있다. 계산된 상관계수는 다음 단계의 입력으로 전달되어, 갱신 대상

Fig. 2. Flow chart of fast sequential bundle adjustment algorithm

이 되는 미지수 선별 과정에 활용된다.

새로운 영상의 외부표정요소와 공액점이 입력되어 다음 단계의 준비 단계가 시작되면, 종전에 전달 받은 기존 영상의 외부표정요소 간의 상관계수를 사전에 정의된 임계값과 비교하기 시작한다. 효율적인 알고리즘 구현을 위해 비교는 취득 영상 중 가장 처음 취득된 영상부터 시작하고, 임계값 이상의 상관계수를 갖는 외부표정요소가 나타나면 더 이상의 비교는 수행하지 않는다. 처음으로 임계값 이상의 상관계수를 갖는 외부표정요소의 영상이 결정되면 그 다음 취득된 모든 영상의 외부표정요소를 미지수 벡터에 포함시킨다.

4. 성능 비교 검증

영상의 실시간 지오레퍼런싱을 위하여 제안된 FSEBA 알고리즘과 함께 기존 정확도와 처리속도 측면에서 가장 효율적이었던 CL update formula 기반의 SEBA 알고리즘과 처리시간은 오래 걸리더라도 가장 정확

한 결과물을 산출하는 일괄 번들 조정 알고리즘을 구현하였다. 구현된 세 가지 번들조정 알고리즘에 동일한 실측 데이터를 적용하여 그 결과를 비교함으로써 FSEBA의 성능을 검증하였다.

1) 실험 데이터 취득

재난·재해와 같은 긴급 상황에서 보다 효율적으로 대처하고자 국토해양부 첨단도시기술개발사업의 일환으로 신속하게 대상지역의 고해상도 공간정보를 취득할 수 있는 저고도 항공기 기반의 근접 실시간 공중 모니터링 시스템(Real-time Aerial Monitoring System, RAMS)이 개발되었다(Choi *et al.*, 2011). RAMS의 항공 부문은 근접 모니터링을 위하여 플랫폼으로는 저고도 무인항공기를 활용하였으며 센서부로 디지털 카메라, 레이저 스캐너, GPS, IMU를 탑재하였다. 기존 시스템과 비교하여 상대적으로 경량 저가 시스템 개발을 목표로 하였기 때문에 중저가 경량의 센서를 채택하였다. 따라서 제안된 알고리즘을 활용하여 실시간 영상 지오레퍼런싱이 얼마나 효율적으로 수행되는지 확인하기에 적합하다고 판단하였다. 카메라는 비측량용 중급 카메라이며 초당 3장의 영상을 획득할 수 있다. GPS와 IMU 역시 중급으로 GPS의 위치 정확도는 수평, 수직이 각각 ± 1.2 m, ± 2.4 m이며, IMU의 가속도계 편이와 자이로스코프 편이는 각각 ± 1 mg, ± 1 deg/h이다. 탑재된 센서의 모델 및 주요 제원은 Table 2에 요약되었다.

RAMS의 항공부문을 운용하여 청주 교원대학교 부근에서 1Hz의 주기로 약 113장의 영상과 함께 GPS/INS 데이터를 취득하였다. 데이터 취득 시 비행 고도는 약 200 m, 비행 속도는 약 60 km/h이었다. 사용된 렌즈의 초점거리가 50 mm이고 지상으로부터 비행체간의 거리가 150 m임을 고려했을 때, 영상의 축척은 1:4000, 공간해상도(Ground Sampling Distance, GSD)는 3 cm이다. 영상매칭(image matching)을 통해 연속 번들 조정을 위한 공액점 측정이 요구된다. 상용소프트웨어인 Socet set v.5.6을 이용하여 자동 매칭을 수행하였으며 총 공액점의 수는 1488개로 연속 영상 간의 평균 공액점의 개수는 약 13개이며 공액점에 상응되는 총 지상점의 개수는 314개이다. 실험 데이터에 대한 보다 자세한 설명은 Choi and Lee (2013)를 참조한다.

Table 2. System specifications

Sensor	Model	Specifications
Camera	XMV-16M (illunis)	weight: 0.47 kg frame rate: 3 fps effective pixels : 4872×3248 pixel size : $7.4 \mu\text{m}$
GPS	OEMV-3 (NOVATEL)	position accuracy: 1.8 m, weight: 0.075 kg data rate : 20 Hz
IMU	HG1700 (Honeywell)	velocity accuracy: 0.02 m/s weight: 3.4 kg data Rate : 100 Hz

취득된 영상 및 GPS/INS 데이터를 활용하여 기존 일괄 번들 조정을 수행한 결과와 CL update formula 기반의 SEBA, 본 연구에서 제안된 FSEBA를 수행한 결과를 비교하여 FSEBA 알고리즘의 성능을 검증하고자 한다. 번들 조정 수행에 있어 측정값의 가중치는 영상점의 경우 한 픽셀 사이즈인 $7.4 \mu\text{m}$ 의 제곱에 반비례하게, GPS/INS로부터 제공된 초기 외부표정요소의 위치·자세의 경우 탑재 센서의 측정오차를 고려하여 각각 0.3 m, 0.1deg 제곱에 반비례하게 설정하였다.

2) 정확도 검증

번들 조정은 영상으로부터의 관측값인 공액점과 기준데이터를 활용하여, 영상의 외부표정요소와 공액점에 상응하는 지상점 좌표를 추정하는 과정으로, 번들조정 수행 결과의 정확도를 검증하기 위해서는 추정된 미지수의 값을 참값과 비교해야 한다. 그러나 실측 데이터를 활용한 실험이므로 영상의 외부표정요소와 지상점좌표에 대한 참값을 모른다. 이러한 상황에서 취득된 센서 데이터로부터 가장 정확한 결과를 산출할 수 있는 방법은 시간이 많이 소요되더라도, 모든 관측값과 기준데이터를 일괄적으로 조정하여 미지수를 추정하는 것으로서 일괄 번들 조정을 적용하는 것이다. 또한 SEBA는 정확도와 처리속도 측면에서 실시간 영상 지오레퍼런싱을 위해 가장 효율적인 알고리즘으로 입증되었다. 따라서 제안된 고속 연속 번들 조정인 FSEBA 알고리즘의 정확도를 검증하기 위하여 일괄 번들 조정의 결과를 기준으로 SEBA와 FSEBA에 의해 추정된 미지수를 비교한다. 일괄 번들 조정과 SEBA에 의해 추정된 미지수 간의 차이와 일괄 번들 조정과 FSEBA에 의해 추정된 미지수 간의 차이가 유사하다면 FSEBA는 SEBA에 버금가는 정확한 결

과를 산출할 수 있는 것으로 간주할 수 있다. 또한, 일괄 번들 조정과 FSEBA에 의해 추정된 미지수 간의 차이의 절대적인 수치가 작다면, 제안된 FSEBA에 의해 일괄 번들 조정에 버금가는 결과를 산출할 수 있는 것으로, FSEBA의 정확도를 신뢰할 수 있을 것이다.

SEBA, FSEBA와 일괄 번들 조정에 적용한 결과 추정된 미지수 간의 차이를 외부표정요소의 위치, 자세, 지상점 좌표의 세 가지 범주로 나누어 살펴보자. Fig. 3(a)는 일괄 번들 조정(그래프에서 Sim으로 명시)에 의해 추정된 영상의 외부표정요소 중 위치를 기준으로 SEBA와 FSEBA에 의해 추정된 위치와의 차이에 대한 RMS를 영상이 취득되는 매 epoch마다 계산한 결과이다. 연속 번들 조정의 초기 일괄 단계에서 연속 결합 단계로 진행되는 시점은 11번째 영상이 취득되는 epoch이다. 따라서 10번째 epoch까지는 알고리즘 간의 차이가 존재하지 않는다. 연속 결합 단계가 시작되는 시점에서 SEBA와 FSEBA에 추정된 위치 차이에 대한 RMS는 급격하게 증가하였다. 이어서 영상이 취득됨에 따라 epoch가 진행될수록 이전 단계의 미지수가 계속해서 갱신되기 때문에 점차적으로 Sim의 결과와 유사해지는 경향을 확인할 수 있다. SEBA에 의해 추정된 위치 차이에 대한 RMS는 6 mm까지 감소하였으며, FSEBA에 의해 추정된 위치 차이에 대한 RMS도 7 mm까지 감소한 것을 확인할 수 있다.

SEBA와 FSEBA에 의해 추정된 외부표정요소 중 자세 차이에 대한 RMS는 Fig. 3(b)와 같다. SEBA에 의해 추정된 자세 차이에 대한 RMS는 파랑색선과 같이 연속 결합 단계의 초반에는 9mdeg까지 증가하지만 epoch가 진행됨에 따라 5mdeg까지 점차적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. FSEBA에 의해 추정된 자세 차이에 대한 RMS도 초반에는 10mdeg를 넘지만, 연속 결합 단계가 진행함에 따라 약 7mdeg까지 감소하였다. 여기서 Sim의 결과를 기준으로 FSEBA로 추정된 결과가 SEBA에 의해 추정된 결과와 차이가 작다는 것도 중요하지만, 영상 취득이 진행되어 이전 단계의 미지수를 계속해서 갱신함에 따라 FSEBA의 RMS가 작아지면서 Sim의 결과와 유사해진다는 것도 상당히 중요한 의미를 갖는다.

SEBA와 FSEBA에 의해 추정된 지상점 좌표에 대한 RMS는 Fig. 3(c)의 그래프와 같다. Sim에 의해 추정된

Fig. 3. RMS differences of (a) EOP positions (top), (b) EOP attitude (middle), and (c) GPs (bottom). Revised from Choi and Lee (2013).

지상점 좌표를 기준으로 SEBA로 추정된 지상점 좌표 차이에 대한 RMS는 파랑 색선으로 약 2 cm이다. 빨강 색선으로 표현되는 FSEBA에 의해 추정된 지상점 좌표 차이에 대한 RMS는 약 5 cm이다. 두 알고리즘 SEBA와 FSEBA 모두 65번째 영상이 취득되는 epoch에서 RMS가 급격히 증가하는 현상을 보인다. 65번째 epoch에서 비행경로가 첫 번째 스트립에서 두 번째 스트립으로 전환하는 시점에 해당한다. 무인 항공기가 회전할 때 GPS/INS 데이터의 자세 정확도가 낮아지는 경향이 있으며, 정확도가 낮은 자세 정보로부터 지상점 좌표를 추정하였기 때문에 지상점 좌표의 RMS가 급격히 증

Table 3. RMS differences of SEBA and FSEBA estimates comparing to Sim estimates at the last (113th) epoch.

Parameters		SEBA	FSEBA
EOP	X (mm)	7.8	8.3
	Y (mm)	5.3	5.7
	Z (mm)	2.2	3.9
	RMSxyz (mm)	5.6	6.2
	ω (mdeg)	4.2	7.4
	ψ (mdeg)	7.3	8.4
	κ (mdeg)	1.2	1.8
	RMS $\omega\psi\kappa$ (mdeg)	4.9	6.5
GP	X (mm)	21.1	48.9
	Y (mm)	10.9	35.1
	Z (mm)	21.4	64.9
	RMSxyz (mm)	18.5	51.1

가하였다. 그러나 다음 epoch로 진행하여 새롭게 추가된 관측값을 반영한 번들조정 수행이 반복될수록 RMS가 감소하였다. 이로부터 번들조정에 의해 GPS/INS의 성능이 보완됨을 확인할 수 있다.

마지막 epoch에서 제안된 SEBA와 FSEBA에 의해 추정된 미지수의 RMS를 계산한 결과는 Table 3와 같다. 외부표정요소의 경우는 FSEBA에 의해 추정된 결과가 최근 영상과 상관관계수가 높은 미지수만 갱신하였음에도 불구하고 모든 미지수를 갱신하는 SEBA의 결과와 위치는 1 cm 이내, 자세는 2mdeg 이내로 거의 유사하였다. 지상점 좌표의 경우에는 두 알고리즘의 결과 모두 지상점 좌표 중 Z변수의 결정이 상대적으로 부정확하다. 이는 약 150 m의 비행고도에서 88%의 중복도로 영상이 취득되었기 때문에 기선 고도비가 좋지 않기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험에서 FSEBA는 최근 영상과 상관관계수가 높은 미지수만 갱신하기 때문에 그 효과가 더 크게 나타나 상대적으로 SEBA보다 지상점 좌표 Z의 결정에 있어 취약하다. 이상으로부터 SEBA와 FSEBA는 Sim의 결과와 비교하여 지상점 좌표 기준 각각 약 ± 2 cm, ± 5 cm의 정확도로 영상이 새롭게 추가되는 시점마다 지상점 좌표를 추정할 수 있다고 분석된다.

3) 실시간성 검증

SEBA와 FSEBA에 의해 1Hz의 주기로 취득된 영상을

Fig. 4. Processing times of Sim, SEBA, FSEBA.. Revised from Choi and Lee (2013)

지오레퍼런싱하였고, 각각의 알고리즘이 매 epoch에서 소요한 처리 시간을 Fig. 4와 같이 Sim의 처리 시간과 비교하였다. 분홍색선은 Sim의 처리 시간을 파랑색선과 빨강색선은 각각 SEBA와 FSEBA의 처리 시간을 보여준다. 일괄 번들 조정에 기반한 Sim은 취득된 영상의 개수가 증가함에 따라 급격하게 처리 시간이 증가한다. 처리 시간이 증가하는 주된 원인은 epoch마다 역행렬 연산이 요구되는 축소정규행렬의 크기가 취득된 총 영상 수의 6배로 증가하고, 공액점에 의해 정의된 총 지상점의 개수만큼 3×3 행렬의 역행렬 연산을 반복해야하기 때문이다. 마지막 영상이 취득된 epoch에서 축소정규행렬의 크기는 $113 \times 6 = 678$ 이고 총 지상점의 개수는 314이므로 마지막 단계에서는 678×678 크기의 역행렬 한 개와 3×3 크기의 역행렬 314개를 연산해야한다. 실시간 지오레퍼런싱을 위해서는 영상의 취득 주기 이내에 영상매칭과 번들조정이 모두 이루어져야 한다. 그러나 Sim의 경우, 마지막 영상의 취득 시점에서 번들조정 수행만으로도 0.9초의 처리 시간이 소요된 것으로 미루어봤을 때, 일반적인 항공 매핑 프로젝트에서는 이보다 훨씬 많은 영상이 취득되므로 실시간 지오레퍼런싱에 활용되기 부적합하다고 판단된다.

SEBA는 Sim과 비교했을 때, 현저히 낮은 속도로 처리 시간이 증가하는 경향을 보였다. 마지막 113번째 영상이 취득되는 시점에 이전 단계의 모든 영상의 외부표정요소와 지상점 좌표를 갱신하고 새로운 113번째 영상의 외부표정요소와 새롭게 정의된 지상점 3개의 좌표를 추정하는데 약 0.1초의 처리시간이 소요되었다. 매 단계 SEBA에 의해 미지수를 추정하기 위해

이전 단계의 연산 결과를 최대한 활용하고, 새롭게 요구되는 역행렬 연산량은 추가된 관측값 또는 미지수의 개수에 의존적이므로 거의 일정하다. 그러나 이전 단계의 연산 결과와 새롭게 도출된 역행렬 결과를 활용하여 계산되는 축소정규행렬 역행렬의 서브블록행렬과 갱신되어야할 미지수 벡터의 크기가 증가하기 때문에 SEBA의 처리 시간에 있어서 어느 정도의 증가를 피할 수 없다.

반면, FSEBA를 적용한 경우에 영상이 취득됨에 따라 처리 시간이 증가하지 않고 약 0.02초 이내로 아주 작게 유지되었다. FSEBA는 SEBA와 다르게 최근 영상의 외부표정요소와 상관계수가 높은 미지수만 갱신함으로 다음 단계에 활용될 축소정규행렬 역행렬의 서브블록행렬과 미지수 벡터의 크기가 일정 범위 이내로 한정되기 때문에 영상이 계속해서 추가되더라도 처리 시간을 일정하게 유지시킬 수 있다. 그러나 51번째 epoch에서 FSEBA의 처리 시간이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 이상점에 기인한 것으로 FSEBA가 SEBA에 비해 상대적으로 이상점에 민감하다고 판단된다. 최근 영상의 상관관계가 높은 영상상의 공액점에 의해 정의되는 지상점만 갱신하기 때문에 지상점에 대한 초기값이 이상점에 의해 잘못 계산되면, 조정 계산 과정에서 반복 연산의 횟수가 증가하기 때문이다.

Sim과 SEBA는 영상이 취득될 때마다 현재까지의 모든 영상의 외부표정요소와 지상점의 좌표를 추정한다. 따라서 취득된 영상의 개수가 증가함에 따라 미지수 벡터에 포함되는 외부표정요소와 지상점 좌표의 개수가 선형적으로 증가한다. 그러나 FSEBA는 최근 영상의 외부표정요소와의 상관계수가 0.1 이하인 외부표정요소는 미지수 벡터에서 제외시킨 결과, Fig. 5(a)에서와 같이 미지수 벡터에 포함된 외부표정요소를 갖는 영상의 개수는 평균 17장이다.

이에 따라 갱신 대상이 되는 외부표정요소를 갖는 영상 상에 두 번 이상 나타나는 지상점 좌표만 미지수 벡터에 포함되므로, Fig. 5(b)에서와 같이 미지수 벡터에 포함되는 지상점의 개수 역시 평균 35개로 한정되었다. 이처럼 FSEBA는 SEBA와 다르게 모든 epoch에서 미지수 벡터와 다음 단계에 넘겨주어야 하는 축소정규행렬 역행렬의 크기를 일정한 범위 이내로 유지시

Fig. 5. No. of (a) images (top) and (b) ground points (bottom) included into the parameter vector.

킬 수 있기 때문에 모든 epoch에서 일정한 처리 시간을 소요하면서 지오레퍼런싱을 수행할 수 있다.

5. 결론

실시간 지오레퍼런싱을 위한 기존의 가장 효율적인 알고리즘은 관측값 분류에 기반한 정규행렬 역행렬 갱신 방법론(CL update formular)을 채택한 연속 번들 조정(SEBA)이다. 그러나 SEBA는 여전히 취득된 영상의 수가 증가함에 따라 선형적으로 연산시간이 증가한다는 문제점이 있다. 실시간 처리에 있어서 영상이 취득될 때 마다 소요되는 연산시간은 절대적으로 짧아야하며 일정 범위로 한정되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 SEBA를 적용할 때 연산시간이 증가하는 원인을 고찰하고, SEBA에 의해 매 단계 산출되는 연산 결과를 분석하여, 영상의 외부표정요소 간의 상관계수를 유도하고, 이를 이용하여 현재 추가된 미지수와 상관관계가 낮은 미지수를 미지수 벡터에서 제외시킴으로 인해 SEBA에 의한 결과와 유사한 정확도를 달

성하면서 매 단계 일정한 연산시간 내에 빠른 속도로 지오레퍼런싱을 수행할 수 있는 고속 연속 번들 조정(FSEBA)을 제안하였다.

제안된 FSEBA 알고리즘의 정확도 및 처리속도를 검증하기 위하여 SEBA와 일괄 번들 조정을 함께 구현하여 이에 실측 데이터를 적용하였다. 가장 높은 정확도를 성취하는 일괄 번들 조정 결과와 비교하여, 지상점 좌표 기준 SEBA와 FSEBA는 각각 2 cm, 5 cm의 정확도로 영상이 추가되는 시점마다 영상의 외부표정요소와 지상점 좌표를 추정할 수 있었다. 반면, 처리시간에 있어서는 SEBA는 취득된 영상의 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였으나, FSEBA의 경우 취득된 영상의 수와 무관하게 매 단계에서 0.02초 이내의 처리시간을 소요하였다. 이를 통해 FSEBA는 기존 SEBA와 비교하여 유사한 정확도를 성취하면서 처리속도 측면에서 실시간 지오레퍼런싱의 요구에 부합한다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 FSEBA 알고리즘은 영상의 실시간 지오레퍼런싱 기술이 요구되는 긴급 매핑, 영상기반 내비게이션, 무인 시스템 개발, 증강현실 구현 등 다양한 분야에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후, FSEBA와 실시간 영상 매칭을 결합하고 이상점 탐지 및 제거와 관련된 추가 연구를 수행하여 FSEBA의 활용성을 증대시킬 것이다.

사사

본 논문은 지식경제부 산업융합원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다[10042808, 도로속성정보와 영상센서, 레이더 정보를 융합하여 차간거리제어, 차선유지지원, 커브사고방지 기능을 개선한 통합운전지원시스템 개발]

참고문헌

- Choi, K. and I. Lee, 2009a. Image georeferencing using AT without GCPs for a UAV-based low-cost multisensor system, *Korean Journal of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 27(2):

- 249-260.
- Choi, K. and I. Lee, 2009b. A sequential AT algorithm based on combined adjustment, *Korean Journal of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 27(6): 669-678.
- Choi, K., J. Lee and I. Lee, 2011. Development of a close-range real-time aerial monitoring system based on a low altitude unmanned air vehicle, *Korean Journal of Spatial Information Society*, 19(4): 21-31.
- Choi, K. and I. Lee, 2012. Comparison and performance validation of on-line aerial triangulation algorithms for real-time image georeferencing, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(1): 55-67.
- Choi, K. and I. Lee, 2013. A sequential aerial triangulation algorithm for real-time georeferencing of image sequences acquired by an airborne multi-sensor system, *Remote Sensing*, 5(1): 57-82.
- Cho, S.I., K.H. Kim, I.H. Joo, J.H. Park, G.J. Chae and S.Y. Lee, 2007. Trends and perspectives of the next-generation navigation technology, *Electronics and Telecommunications Trends*, 22(3): 12-19.
- Hu, Z. and K. Uchimura, 2004. Real-time data fusion on stabilizing camera pose estimation output for vision-based road navigation, *Proc. of SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI: Conference*, San Jose, CA, May 21, vol. 5291. pp. 480-490.
- Kaess, M., H. Johannsson, R. Roberts, V. Ila, J. Leonard and R. Dellaert, 2012. iSAM2: Incremental Smoothing and Mapping Using the Bayes Tree, *International Journal of Robotics Research*, 31: 217-236.
- Kersten, T.P., K.R. Holm and A. Gruen, 1992. *On-line Point Positioning with Single Frame Camera Data*, Final Technical Report, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Report no. 19.
- McGlone, C., 2004. *Manual of Photogrammetry*, 5th Edition, ASPRS, Bethesda, Maryland, USA, pp. 847-870.
- Mostafa, M.M.R., J. Hutton and E. Lithopoulos, 2001. Airborne direct georeferencing of frame imagery: an error budget, *Proc. of The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Cairo, Egypt.
- Schwarz, K.P., M.A. Chapman, M.E. Cannon and P. Gong, 1993. An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data, *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 59(11): 1167-1174.
- Skaloud, J. and K. Legat, 2008. Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(2): 272-282.
- Tönnis, M., C. Sandor, C. Lange and H. Bubbs, 2005. Experimental evaluation of an augmented reality visualization for directing a car driver's attention, *Proc. of the 4th IEEE/ ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Vienna, Austria, Oct. 5-8, pp. 56-59.
- Toth, C. and D.A. Grejner-Brzezinska, 1998. Performance analysis of the airborne integrated mapping system (AIMS™), *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, part. 3, pp. 320-326.