

High-Resolution Reconstruction from Low-Resolution Panoramas via ROI-Restricted Inverse Warping

Kwang-Woon Nam*, Che-Won Park*, Ju-Hoon Park**, Hyun-Sung Jang***

*Research Engineer, EO/IR Systems R&D, LIG Defense&Aerospace Co., Ltd., Pangyo, Korea

**Senior Research Engineer, EO/IR Systems R&D, LIG Defense&Aerospace Co., Ltd., Pangyo, Korea

***Chief Research Engineer, EO/IR Systems R&D, LIG Defense&Aerospace Co., Ltd., Pangyo, Korea

[Abstract]

Recently, 360° panorama generation using multiple camera images has been widely adopted in autonomous driving and video surveillance systems. However, when detailed observation of a specific region is required, zooming into a low-resolution panorama generated for real-time processing significantly degrades image quality. This paper proposes an inverse homography-based selective high-resolution Region of Interest (ROI) reconstruction method. The proposed method tracks a user-selected ROI via inverse homography to choose two original 4K images, and reuses the low-resolution homography by applying only a scale transformation. The high-resolution ROI is reconstructed by warping only the coordinates of the final crop region when stitching the two images, a process performed only upon user selection so that it does not burden the real-time main pipeline. Experimental results show that the proposed method reduces computational cost while improving the visual quality of zoomed regions and maintaining real-time performance.

▶ **Key words:** Surround View Panorama, Inverse Homography, Region of Interest(ROI), High-Resolution Reconstruction, Image Stitching, Homography Scaling

[요 약]

최근 자율주행 차량 및 영감시 시스템에서는 다수의 카메라 영상을 이용한 360° 파노라마 생성 기술이 널리 활용되고 있다. 그러나 특정 영역에 대한 상세한 관찰이 필요한 경우, 실시간 처리를 위해 저해상도로 생성된 파노라마를 확대하면 선명도가 크게 저하된다. 본 논문에서는 역호모그래피(inverse homography) 기반의 선택적 고해상도 관심 영역(Region of Interest, ROI) 재구성 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 사용자가 선택한 ROI를 역호모그래피로 추적하여 원본 4K 영상 두 장을 선택하고, 기존 저해상도 호모그래피(homography)에 스케일 변환만을 적용해 재사용한다. 이때 최종 크롭(crop) 영역의 좌표에 대해서만 워핑(warping)을 수행하여 두 영상을 스티칭(stitching)함으로써 고해상도 ROI를 재구성하며, 이 과정은 사용자가 영역을 선택할 때만 수행되어 실시간 메인 파이프라인에 부담을 주지 않는다. 실험 결과, 제안 방법은 연산량을 줄이면서 확대 영상의 화질을 향상시키고 실시간 처리 성능을 유지함을 확인하였다.

▶ **주제어:** 서라운드 뷰 파노라마, 역호모그래피, 관심영역, 고해상도 재구성, 영상 스티칭, 호모그래피 스케일링

-
- First Author: Kwang-Woon Nam, Corresponding Author: Hyun-Sung Jang
 - *Kwang-Woon Nam (kwangwoon.nam@ligdna.com), EO/IR Systems R&D, LIG Defense&Aerospace Co., Ltd.
 - *Che-Won Park (chewon.park@ligdna.com), EO/IR Systems R&D, LIG Defense&Aerospace Co., Ltd.
 - **Ju-Hoon Park (juhoon.park@ligdna.com), EO/IR Systems R&D, LIG Defense&Aerospace Co., Ltd.
 - ***Hyun-Sung Jang (wizytale@naver.com), EO/IR Systems R&D, LIG Defense&Aerospace Co., Ltd.
 - Received: 2026. 08. 18, Revised: 2026. 09. 17, Accepted: 2026. 09. 22.

I. Introduction

최근 자율주행 차량과 영상 감시 시스템에서는 대상 주변을 빈틈없이 관찰하기 위해 다수의 카메라를 배치하고, 이들 영상을 정합(registration)하여 360° 서라운드 뷰 파노라마를 생성하는 기술이 널리 활용되고 있다. 본 논문에서 다루는 시스템 또한 차량 또는 감시 대상 주변을 완전히 커버하도록 6대의 카메라를 고정 배치하고, 이들로부터 입력되는 영상을 정합하여 360° 파노라마를 생성한다. 이러한 시스템은 사각지대를 제거하고 넓은 영역을 단일 화면으로 제공함으로써 상황 인식 능력을 크게 향상시킨다.

그러나 여섯 대의 4K 영상을 매 프레임 스티칭(stitching)하여 완전한 고해상도 파노라마를 생성하는 것은 막대한 연산량을 요구하여 실시간 처리를 어렵게 한다. 이 때문에 실제 시스템에서는 입력 영상을 저해상도로 축소하여 파노라마를 생성하는 방식이 널리 사용된다. 360° 파노라마는 주변의 모든 방향을 한 화면에 담아 상황을 한 눈에 개관할 수 있으나, 넓은 영역을 단일 화면에 표시하기 위해 각 영역이 축소되어 개별 영역의 해상도가 구조적으로 제한되며, 사용자가 특정 영역을 선별해 자세히 관찰하려는 요구가 필연적으로 발생한다. 이때 저해상도 파노라마를 그대로 확대하면 실제 픽셀 정보가 부족하여 화질이 크게 저하되지만, 확대할 때마다 전체 4K 파노라마를 재생성하는 것은 실시간 시스템에 적용하기 어렵다. 특히 여러 카메라 영상을 정합하여 구성되는 파노라마는 단일 카메라와 달리 물리적 줌이 불가능하고 전체를 고해상도로 유지하기도 어려워, 확대 관찰의 요구와 실시간 처리 사이의 상충이 두드러진다.

본 논문에서는 이를 해결하기 위해 역호모그래피(inverse homography) 기반의 선택적 고해상도 관심 영역(Region of Interest, ROI) 재구성 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 실시간 저해상도 파노라마를 그대로 유지하되, 사용자가 확대할 영역을 선택하는 순간에만 해당 ROI를 고해상도로 재구성한다. 구체적으로, 사용자가 선택한 ROI의 위치를 역호모그래피로 원본 영상 좌표에 추적하여 해당 영역을 포함하는 원본 4K 영상 두 장으로 선

별하고, 저해상도 파노라마 생성에 사용된 호모그래피(homography)를 고해상도에 맞게 스케일 변환한 뒤, 최종적으로 필요한 ROI 영역의 좌표에 대해서만 워핑(warping)을 수행하여 고해상도 ROI를 재구성한다.

본 논문의 기여는 두 가지이다. 첫째, 역호모그래피로 선택된 ROI에 대응하는 원본 4K 영상 두 장을 선별하고 저해상도 호모그래피를 스케일 변환하여 재사용하여, 호모그래피 재추정 없이 확대 영상을 생성한다. 둘째, 최종 크롭(crop) 영역의 좌표에 대해서만 워핑을 수행하는 ROI 한정 역워핑(ROI-Restricted Inverse Warping)으로 재구성 연산량을 크게 감소시킨다. 이를 통해 6장의 4K 파노라마 재생성에 근접한 화질을 실시간 성능을 유지하며 확보한다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Surround-View Panorama Generation

다수의 카메라로 대상 주변의 넓은 영역을 하나의 영상으로 통합하는 기술은 자율주행 및 영상 감시 분야에서 오랫동안 연구되어 왔다. 차량용 서라운드 뷰 모니터링 시스템이 대표적이며, Liu 등[2]은 차량 주위의 어안(fisheye) 카메라 영상을 왜곡 보정 후 정합하여 조감도(bird's-eye view) 형태의 파노라마를 합성하는 방법을 제안하였고, 임베디드 환경에서의 실시간 처리를 위한 최적화 연구도 이어졌다[3]. 조감도 방식이 주차나 근접 감지에 적합한 반면, 주변을 수평 방향으로 넓게 관찰해야 하는 경우에는 장면을 하나의 원통면에 투영하여 이어 붙인 원통형(cylindrical) 파노라마가 적합하다. 이러한 360° 원통형 파노라마의 예시는 Fig. 1.과 같다.

본 논문의 시스템은 여섯 대의 카메라 영상을 정합하여 360° 원통형 파노라마를 생성한다. 다만 다수의 4K 영상을 매 프레임 스티칭하는 것은 상당한 연산량을 요구하므로, 실시간 처리를 위해 저해상도로 축소하여 생성하는 것이 일반적이며, 이는 특정 영역을 고해상도로 확대할 때 해상도의 한계를 드러낸다.



Fig. 1. Examples of a 360° surround-view panorama generated from a public dataset[1].

1.2 Image Stitching and Homography Estimation

특징 기반(feature-based) 스티칭은 일반적으로 특징점 검출, 매칭, 호모그래피 추정, 워핑 및 블렌딩(blending)의 단계로 구성된다. 크기와 회전에 강인한 특징점 검출에는 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)[4]가, 잘못된 매칭을 제거하고 변환 관계를 추정하는 데에는 RANSAC(Random Sample Consensus)[5]이 널리 사용된다. 두 영상 간의 기하학적 변환 관계는 호모그래피로 표현되며, 이는 동일 평면상의 점들이 두 영상에 투영된 좌표 간의 대응을 나타내는 3×3 사영변환 행렬이다[6]. 추정된 호모그래피로 영상을 워핑한 뒤 겹침 영역을 블렌딩하여 파노라마가 완성된다[7].

호모그래피 행렬은 비특이(non-singular) 행렬이므로 역행렬이 존재하며, 이를 이용하면 변환된 좌표로부터 원래 좌표를 역산하는 역방향 사상이 가능하다. 이러한 역호모그래피는 파노라마상의 위치가 어느 원본 영상의 어느 좌표에서 비롯되었는지를 추적하는 데 활용되며, 본 논문의 핵심 원리가 된다. 또한 호모그래피는 좌표계에 대해 정의되므로, 저해상도 영상에서 추정된 호모그래피는 해상도 비율에 해당하는 스케일 변환을 통해 고해상도 좌표계의 호모그래피로 환산될 수 있다[6]. 본 논문은 이 성질을 이용하여 저해상도 파노라마 생성 과정에서 얻은 호모그래피를 고해상도 원본 영상에 재사용한다.

특징 기반 스티칭의 대표적 구현으로 Brown과 Lowe[7]의 자동 파노라마 스티칭이 있으며, 본 논문에서는 이 루틴을 따르는 오픈소스 스티처인 OpenPano[8]를 활용한다. OpenPano는 SIFT 기반 검출과 RANSAC 기반 호모그래피 추정, 블렌딩을 제공하며 원통형 투영을 지원한다.

1.3 ROI-Based Selection Processing

전체 영상을 항상 최고 품질로 처리하는 것은 많은 연산을 요구하므로, 사용자가 주목하는 영역만을 선택적으로 고품질 처리하는 접근이 다양한 분야에서 연구되어 왔다. 대표적으로 고해상도 파노라마 및 360° 영상 스트리밍에서는 영상을 타일(tile)로 분할한 뒤 전체 장면은 저해상도로 전달하고 사용자의 시야에 해당하는 타일만 고해상도로 전송하는 뷰포트(viewport) 기반 방식이 널리 사용되며, 이는 관련 국제 표준에서도 채택되어 대역폭과 연산량을 절감한다[9]. 렌더링 분야에서도 사용자의 시선이 집중된 영역만 고해상도로 처리하는 포비티드 렌더링(foveated rendering)[10]과, 이를 영상 합성에 적용하여 주목 영역만 고해상도로 스티칭하는 포비티드 스티칭(foveated stitching)[11]이 제안된 바 있다.

이처럼 ROI 기반 선택적 처리는 사용자가 필요로 하는 영역만 고품질로 처리하여 품질과 비용의 균형을 달성한다는 공통 원리는 갖는다. 다만 기존 연구들이 주로 별도의 고해상도 소스를 선택·전송하거나 렌더링 단계에서 주목 영역만 처리하여 대역폭과 연산을 절감하는 것과 달리, 본 논문은 실시간 저해상도 파노라마로부터 선택된 ROI를 원본 고해상도로 재구성하되 필요한 영상과 영역만을 선별적으로 처리하여 재구성 연산 자체를 축소한다.

III. The Proposed Scheme

1. System Overview

본 논문에서 제안하는 시스템은 두 개의 경로로 구성된다. 하나는 대상 주변의 전체 상황을 실시간으로 제공하는 저해상도 파노라마 생성 경로이고, 다른 하나는 사용자가 특정 영역을 선택하였을 때에만 동작하는 고해상도 관심영역 재구성 경로이다. 전체 구조는 Fig. 2.에 나타내었다.

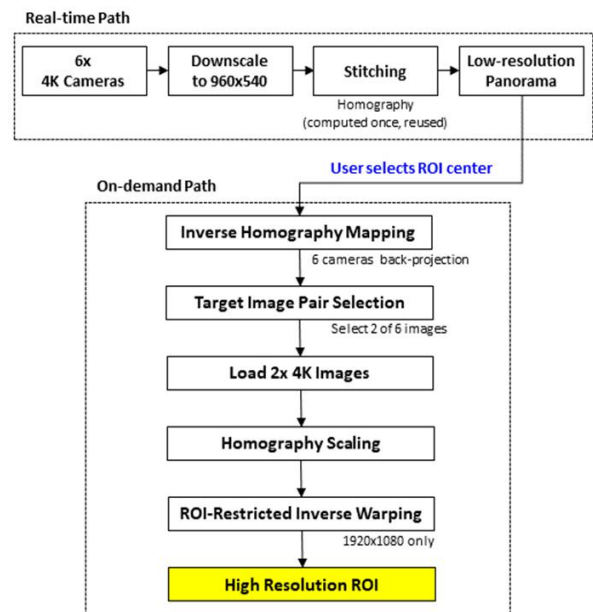


Fig. 2. Overall pipeline of the proposed method.

실시간 경로에서는 여섯 대의 카메라로부터 입력받은 4K 영상을 960×540 으로 축소하여 스티칭함으로써 360° 원통형 파노라마를 생성한다. 이때 정합에 필요한 호모그래피는 초기 정합 단계에서 특징점 검출과 매칭, 호모그래피 추정을 통해 한 번 계산한 뒤, 실시간 단계에서는 매 프레임 이를 재사용하여 워핑과 블렌딩만 수행한다. 다만 장면 변화로 기존 호모그래피가 부적합해지는 경우에는 별

도의 스투드에서 호모그래피를 재추정하여 갱신하므로, 스투딩 파이프라인의 실시간 처리가 중단되지 않는다. 이때 갱신 과정에서 비정상적인 호모그래피가 생성되는 것을 방지하기 위해, OpenPano[8]의 검증 방식에 따라 매칭된 특징점의 개수가 기준값에 미달하면 기존 호모그래피를 유지하고, 추정된 호모그래피로부터 산출되는 출력 영상의 크기가 비정상적으로 큰 경우 해당 갱신을 오류로 처리하여 반영하지 않는다.

이 저해상도 파노라마는 전체 상황 개관에는 충분하지만 특정 영역을 확대하면 화질이 저하되므로, 사용자가 관심 영역을 선택하는 순간에만 고해상도 재구성 경로를 동작시킨다. 이 경로는 먼저 선택된 ROI가 원본 4K 영상의 어느 위치에 대응하는지를 역호모그래피로 추적하여 대상 영상 두 장을 선별하고, 저해상도 호모그래피를 고해상도 좌표계에 맞게 스케일 변환한 뒤, 최종적으로 필요한 ROI 영역만을 워핑·스티칭하여 고해상도 ROI를 재구성한다. 이 재구성은 사용자가 영역을 선택한 경우에만 선택된 두 영상의 필요한 영역에 대해서만 수행되므로, 전체 4K 파노라마를 재생성하지 않으며 실시간 경로에 부담을 주지 않는다.

2. ROI Localization via Inverse Homography

본 논문에서 대상으로 하는 시스템은 여섯 대의 카메라가 좌에서 우로 배열되어 360° 파노라마를 구성하되, 양 끝의 1번과 6번 카메라 영상은 서로 연결되지 않는다.

2.1 Inverse Homography Mapping

i 번째 카메라의 저해상도 영상 좌표를 파노라마 좌표로 변환하는 호모그래피를 H_i 라 하면, 영상의 점 $p_i = (x_i, y_i, 1)^T$ 는 파노라마상의 점 $q = (u, v, 1)^T$ 로 다음과 같이 사상된다.

$$q \simeq H_i p_i$$

사용자가 저해상도 파노라마상에서 ROI의 중심 $q_c = (u_c, v_c, 1)^T$ 를 선택하면, 이 좌표가 각 카메라 호모그래피의 역행렬을 이용하여 원본 영상 좌표로 역사상한다.

$$p_i^c \simeq H_i^{-1} q_c, \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

여기서 $p_i^c = (x_i^c, y_i^c, 1)^T$ 는 선택된 중심을 i 번째 카메라 좌표계로 되돌린 결과이며, 여섯 대 각각에 대해 수

행하여 여섯 개의 후보 좌표를 얻는다.

2.2 Target Image Pair Selection

각 후보 좌표 p_i^c 가 해당 영상의 유효 범위 내에 존재하는지를 검사한다. 저해상도 영상의 너비와 높이를 W, H 라 할 때, 조건 $0 \leq x_i^c < W$ 및 $0 \leq y_i^c < H$ 를 만족하는 카메라가 선택된 ROI의 중심을 담고 있는 카메라이다. 인접 카메라 간 겹침으로 인해 이 조건을 만족하는 카메라는 하나 또는 둘이 된다.

조건을 만족하는 카메라가 두 대인 경우, 중심이 두 카메라의 겹침 영역에 위치함을 의미하므로 해당 두 카메라를 대상으로 선별한다. 한 대뿐인 경우에는 짝이 되는 두 번째 영상을 결정해야 한다. 조건을 만족하는 카메라를 k 번째라 할 때, 역사상된 좌표의 수평 위치 x_k^c 가 영상 중심 $W/2$ 보다 작으면 왼쪽에 인접한 $(k-1)$ 번째를, 크거나 같으면 오른쪽에 인접한 $(k+1)$ 번째 카메라를 선택한다. 다만 양 끝 카메라는 한쪽으로만 인접 영상이 존재하므로, $k=1$ 이면 (1,2)번, $k=6$ 이면 (5,6)번을 선택한다.

원본 영상이 4K인 데 비해 ROI는 1920×1080으로 상대적으로 작으므로, 선별된 두 장으로 ROI 전체를 포함하기에 충분하다. 이상의 선별은 저해상도 좌표계에서 수행되며, 그 결과로 결정된 영상 쌍이 이후 고해상도 재구성에 그대로 사용된다.

3. High-Resolution ROI Reconstruction

2절에서 선별된 두 장의 원본 4K 영상으로부터 고해상도 ROI를 재구성한다.

3.1 Homography Scaling

저해상도 파노라마 생성에 사용된 호모그래피 H_i 는 960×540으로 축소된 원본 영상의 좌표를 입력으로 한다. 고해상도 재구성에서는 4K 원본 영상의 좌표를 입력으로 사용해야 하므로 호모그래피를 4K 좌표계에 맞게 변환한다. 저해상도 영상을 4K로 확대하면 한 픽셀이 가로세로 각각 4픽셀에 대응하므로, 4K 좌표를 기존 호모그래피가 정의된 저해상도 좌표계로 되돌리려면 좌표를 중심 기준으로 1/4로 축소해야 한다. 이 변환 행렬 G 는 다음과 같다.

$$G = T_c^{low} S^{-1} T_c^{high}$$

여기서 T_c^{high} 는 4K 영상의 중심을 원점으로 옮기는 평행이동, $S^{-1} = \text{diag}(1/4, 1/4, 1)$ 은 중심 기준 축소,

T_c^{low} 는 원점을 저해상도 영상 중심으로 되돌리는 평행 이동이다. 이를 이용하여 4K 원본 좌표를 파노라마 좌표로 사상하는 고해상도용 호모그래피는 다음과 같이 얻어진다.

$$H'_i = H_i G$$

역호모그래피는 $H'^{-1}_i = G^{-1}H_i^{-1}$ 로 주어진다. 이와 같이 고해상도용 호모그래피는 고해상도 영상에 대한 특징점 검출과 재추정 없이 기존 저해상도 호모그래피의 스케일 변환만으로 얻어지므로, 재구성 과정에서 호모그래피 추정 연산이 발생하지 않는다.

3.2 ROI-Restricted Inverse Warping

스케일 변환된 호모그래피를 이용하여 선택된 두 영상을 스티칭함으로써 고해상도 ROI를 생성한다. 스티칭은 역방향 사상(inverse warping)으로 동작하여, 결과 영상의 각 픽셀 좌표에 역호모그래피 H'^{-1}_i 를 적용하여 대응되는 원본 영상의 좌표의 픽셀값을 보간(interpolation)하여 가져오고, 두 영상이 겹치는 영역에서는 가중 평균으로 블렌딩한다.

전체 고해상도 파노라마를 생성한 뒤 ROI를 잘라내는 방식은 불필요한 영역까지 모두 처리하여 비효율적이다. 최종적으로 제공되는 것은 1920×1080 크기의 ROI뿐이므로, 본 논문에서는 결과 영상 전체가 아니라 필요한 ROI 영역에 해당하는 좌표에 대해서만 역워핑과 블렌딩을 수행하는 ROI 한정 역워핑을 적용한다. ROI의 중심 좌표를 (x_c, y_c) 라 할 때, 다음 범위에 해당하는 좌표에 대해서만 연산을 수행한다.

$$\begin{aligned} x_c - 960 &\leq x < x_c + 960 \\ y_c - 540 &\leq y < y_c + 540 \end{aligned}$$

이를 통해 ROI 밖의 좌표에 대한 역호모그래피 연산과 픽셀 보간, 블렌딩이 생략되어, 전체 파노라마를 재구성하는 경우에 비해 처리 픽셀 수와 연산량이 크게 감소한다.

IV. Experimental Results

1. Experimental Setup and Dataset

제안하는 방법의 성능을 검증하기 위해 실외 환경에서 직접 촬영한 영상을 이용하여 실험을 수행하였다. 영상 취

득에는 JAI사의 GOX-24505C 카메라 여섯 대를 사용하였으며, 대상 주변을 수평 방향으로 빈틈없이 커버하도록 배치하였다. 카메라의 원 해상도는 4K보다 크지만, 각 영상의 중심을 기준으로 3840×2160 영역을 크롭하여 4K 입력 영상으로 사용하였다. 또한 여섯 대의 카메라는 하나의 물리적 트리거 신호를 공유하여 동시에 촬영되도록 구성함으로써, 카메라 간 촬영 시점 차이로 인한 움직이는 물체의 형상 불일치를 최소화하였다.

촬영은 30 FPS로 이루어졌으며, 인접한 프레임 간에는 장면의 변화가 크지 않으므로 30 프레임 간격으로 샘플링하여 실험 데이터를 구성하였다. 실시간 파노라마 생성을 위해 각 4K 입력 영상은 960×540 해상도로 축소되어 사용되며, 사용자가 관심 영역을 선택하면 그 중심을 기준으로 1920×1080 크기의 고해상도 ROI를 재구성한다. ROI 위치에 따른 편향을 배제하기 위해 파노라마상에서 무작위로 선정한 10개의 좌표를 중심으로 사용하였으며, 해당 영역이 파노라마 범위를 벗어나는 경우 온전히 포함되도록 좌표를 조정하여 총 581개의 ROI를 평가하였다.

화질은 세 가지 방법을 비교하여 평가하였다. 베이스라인(baseline)은 저해상도 파노라마에서 ROI를 크롭한 뒤 이를 1920×1080으로 확대한 결과이고, 제안 방법(proposed method)은 원본 4K 영상 두 장을 스티칭하여 재구성한 후 1920×1080 영역을 크롭한 결과이며, 기준 방법(ground truth, GT)은 여섯 장의 원본 4K 영상을 모두 스티칭한 파노라마에서 동일한 1920×1080 영역을 크롭한 결과이다. GT는 이상적인 결과에 해당하지만 여섯 장의 4K 영상을 모두 스티칭해야 하므로 실시간 처리에는 적합하지 않다.

2. Image Quality Results

제안 방법이 재구성한 고해상도 ROI를, 선택 위치의 재구성 정확도와 기준 영상과의 화질 유사도, 베이스라인의 시각적 비교를 통해 평가하였다.

2.1 Quantitative Results

제안 방법은 저해상도 파노라마 좌표로부터 역호모그래피와 스케일 변환을 거쳐 고해상도 ROI 위치를 계산하는데, 이 과정은 이론적으로는 정확하나 다단계 좌표 변환과 스케일 조정 과정에서 부동소수점 오차가 누적된다. 이를 정량적으로 검증하기 위해, 제안 방법과 기준 영상에서 동일한 좌표를 기준으로 추출한 ROI 간의 위치 오차를 위상 상관(phase correlation)을 이용하여 측정하였다. 그 결과 위치 차이는 중앙값 기준 수평, 수직 각각에서 모두 6

픽셀 이하로, 1920×1080 ROI에 비해 매우 작았다. 이는 제안 방법이 선택 위치를 원본 고해상도 영상 상에서 정밀하게 재구성함을 의미한다.

Table 1. Quantitative comparison of image quality (Baseline vs. Proposed, against GT)

Method	PSNR (dB)	SSIM
Baseline	27.63	0.8632
Proposed	46.16	0.9951

이 미세한 위치 차이를 보정한 뒤 제안 방법과 기준 영상을 비교하였으며, 그 결과는 Table 1.과 같다. 한편 저해상도 파노라마를 확대한 베이스라인은 다단계 좌표 변환을 거치지 않아 위치 오프셋이 발생하지 않으므로, 별도의 정렬 보정 없이 기준 영상과 직접 비교하였다. 제안 방법은 베이스라인 대비 PSNR과 SSIM이 모두 크게 향상되어, 저해상도 확대로는 확보할 수 없는 화질을 원본 고해상도 영상으로부터 재구성함을 정량적으로 확인할 수 있다.

한편 평가에 사용된 관심 영역은 파노라마 전역에서 무작위로 선정되었으므로, 두 영상의 접합부에 걸쳐 고스트 현상(ghosting)이 존재하는 영역도 포함되어 있다. 그럼에도 전체 평균 PSNR과 SSIM이 높게 유지되었다는 것은, 접합부의 고스트 현상이 존재하더라도 제안 방법의 재구성 화질을 전반적으로 저하시키지 않음을 의미한다.

2.2 Qualitative Results

Fig. 3.는 베이스라인과 제안 방법의 재구성 결과를 비교한 것이다. 두 결과는 사용자가 선택한 동일한 관심 영역을 보여주지만, 화질에서 뚜렷한 차이를 보인다. 저해상도 파노라마를 크롭한 뒤 확대한 베이스라인은 세부가 뭉개져 흐릿하게 나타나는 반면, 제안 방법은 원본 4K 영상의 실제 픽셀 정보를 활용하여 선명한 세부를 유지한다. 특히 표지판이나 펜스의 기둥들과 같이 미세한 고주파 정보가 포함된 영역에서 이러한 차이가 두드러져, 베이스라인에서는 문자나 경계선을 식별하기 어려운 반면 제안 방법에서는 명확하게 볼 수 있다. 이는 제안 방법이 단순 확대로는 복원할 수 없는 세부 정보를, 실시간 성능을 유지하면서도 재구성할 수 있음을 보여준다.

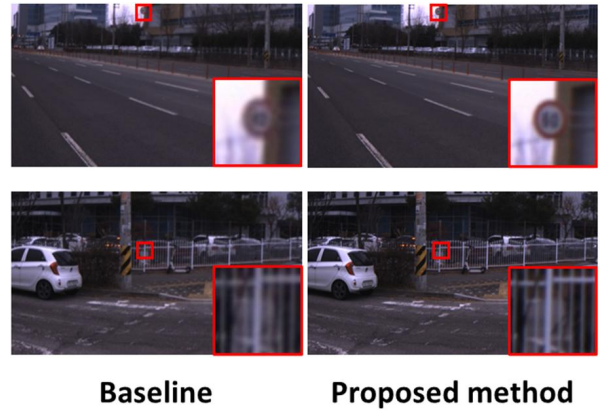


Fig. 3. Qualitative comparison between the baseline and the proposed method.

또한 Fig. 4.는 관심 영역이 두 영상의 접합부에 걸치는 경우에 대한 베이스라인과 제안 방법의 비교이다. 접합부에서는 스티칭 과정에서 두 영상이 겹쳐 약간의 고스트 현상이 관찰되나, 이 고스트는 여섯장을 모두 스티칭한 기준 영상에도 동일하게 나타난다. 이는 제안 방법과 기준 영상이 동일한 저해상도 호모그래피를 스케일 변환하여 사용하기 때문으로, 접합부의 고스트는 제안 방법이 새로 유발하는 것이 아니라 스티칭에 사용된 호모그래피의 본질적 특성이 반영된 결과이다. 이러한 접합부에서도 제안 방법은 저해상도를 확대한 베이스라인에 비해 문자 등 세부 정보를 더 선명하게 재구성한다.

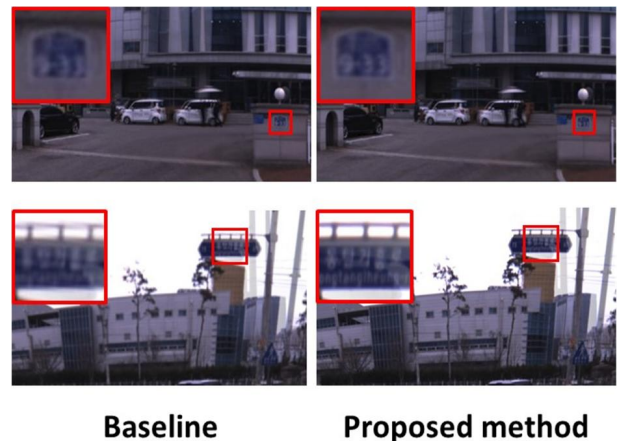


Fig. 4. Qualitative comparison at a boundary ROI spanning the stitching seam, between the baseline and the proposed method.

3. Computational Cost Analysis

제안하는 방법의 연산 효율을 확인하기 위해, 여섯 장의 4K 영상을 스티칭하여 전체 고해상도 파노라마를 재구성한 뒤 ROI를 크롭하는 이전 방법과, 두 가지 최적화를 개별 및 동시에 적용한 결과의 처리 시간을 비교하였다. 실험은

Intel Core i9-14900K (24코어, 32스레드) CPU 환경에서 수행하였으며, OpenMP를 이용하여 32개 스레드에 작업을 분할하여 병렬 처리하였다. 각 방법은 동일한 병렬화 조건에서 10회 측정된 평균값이다. 측정한 처리 시간은 입력 영상이 메모리에 로딩된 이후부터 최종 ROI가 출력되기까지의 시간으로, 각 방법에서 수행되는 역호모그래피 기반 좌표 추적과 영상 쌍 선별, 호모그래피 스케일 변환, 워핑, 블렌딩, 크롭에 소요된 시간을 포함한다. 다만 여섯 장을 모두 스티칭하는 Previous와 ROI-Restricted 방법에는 좌표 추적과 영상 쌍 선별 과정이 포함되지 않는다.

Table 2. Ablation study on processing time

Method	Stitched Images	Processing Area	Time (ms)
Previous	6	7604×3231	182.82
Pair Selection	2	4877×2564	96.24
ROI-Restricted	6	1920×1080	11.15
Proposed	2	1920×1080	6.31

Table 2.에 결과를 나타내었다. 최적화를 적용하지 않은 이전 방법(Previous)은 182.82 ms가 소요된 반면, 두 최적화를 모두 적용한 제안 방법(Proposed)은 6.31 ms로 처리 시간을 96.6% 단축하였다. 특히 ROI-Restricted 최적화만으로도 93.9%가 단축되어, 이 최적화가 처리 시간 감소의 주된 요인임을 알 수 있다. 이는 전체 파노라마의 대부분을 차지하는 불필요한 영역에 대한 역호모그래피 연산과 픽셀 보간-블렌딩이 생략되기 때문이다. 처리 영역이 동일한 ROI-Restricted(11.15 ms)와 Proposed(6.31 ms)의 차이는 스티칭 대상 영상 수(여섯 장 대 두 장)에서 비롯된다.

V. Conclusion

본 논문에서는 실시간 서라운드 뷰 시스템에서 저해상도 파노라마를 확대할 때의 화질 저하를 해결하기 위해, 역호모그래피 기반의 선택적 고해상도 ROI 재구성 기법을 제안하였다. 제안 방법은 선택된 ROI를 역호모그래피로 추적해 원본 4K 영상 두 장을 선별하고, 저해상도 호모그래피를 스케일 변환하여 재추정 없이 재사용하며, ROI 한정 역워핑으로 재구성 연산량을 줄인다. 실험을 통해 제안 방법이 여섯 장을 모두 스티칭한 기준 영상과 거의 동일한 화질을 두 장만으로 재구성하고, 저해상도 확대 대비 세부 정보를 뚜렷하게 복원하며, 처리 시간을 96.6% 단축하여

실시간 성능을 유지함을 확인하였다.

향후 연구에서는 제안하는 ROI 재구성 기법을 가상현실(VR) 환경으로 확장하여, 사용자의 시점에 대응하는 영역을 실시간으로 고해상도 재구성하는 방향으로 발전시키고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

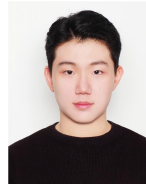
This research was supported by the Advanced Research Program of LIG Defense & Aerospace under Grant H00701. This research used datasets from The Open AI Dataset Project (AI-Hub, S. Korea). All data information can be accessed through 'AI-Hub (www.aihub.or.kr)'.

REFERENCES

- [1] National Information Society Agency, "Road Environment Panorama Image," AI-Hub, <https://aihub.or.kr/aihubdata/data/view.do?dataSetSn=181>
- [2] Y.-C. Liu, K.-Y. Lin, and Y.-S. Chen, "Bird's-eye view vision system for vehicle surrounding monitoring," International Workshop on Robot Vision (RoboVis 2008), LNCS vol. 4931, pp. 207-218, Auckland, New Zealand, Feb. 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-78157-8_16
- [3] M. Al-Hami, R. A. Casas, S. El-Salhi, S. Awwad, and F. Hussein, "Real-time bird's eye surround view system: an embedded perspective," Applied Artificial Intelligence, vol. 35, no. 10, pp. 765-781, 2021. DOI: 10.1080/08839514.2021.1935587
- [4] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," International Journal of Computer Vision, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
- [5] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, vol. 24, no. 6, pp. 381-395, 1981. DOI: 10.1145/358669.358692
- [6] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple view geometry in computer vision," 2nd ed., Cambridge University Press, 2004. DOI: 10.1017/CBO9780511811685
- [7] M. Brown and D. G. Lowe, "Automatic panoramic image stitching using invariant features," International Journal of Computer Vision, vol. 74, no. 1, pp. 59-73, 2007. DOI: 10.1007/s11263-006-0002-3
- [8] Y. Wu, "OpenPano: Automatic Panorama Stitching From Scratch," GitHub, <https://github.com/ppwwyyxx/OpenPano>

- [9] A. Zare, A. Aminlou, M. M. Hannuksela, and M. Gabbouj, "HEVC-compliant tile-based streaming of panoramic video for virtual reality applications," *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Multimedia*, pp. 601-609, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2016. DOI: 10.1145/2964284.2967292
- [10] B. Guenter, M. Finch, S. Drucker, D. Tan, and J. Snyder, "Foveated 3D graphics," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 31, no. 6, pp. 1-10, 2012. DOI: 10.1145/2366145.2366183
- [11] W.-T. Lee, H.-I. Chen, M.-S. Chen, I.-C. Shen, and B.-Y. Chen, "High-resolution 360 video foveated stitching for real-time VR," *Computer Graphics Forum*, vol. 36, no. 7, pp. 115-123, 2017. DOI: 10.1111/cgf.13277

Authors



Kwang-Woon Nam received the B.S. and M.S. degrees from the Department of the Software, Soongsil University, Seoul, South Korea, in 2024. He is currently working with the EO/IR Systems Research and

Development Laboratory, LIG Defense& Aerospace, Pangyo, South Korea. His research interests include Image Stitching, Real Time OS, VLM(Visual-Language Model), object detection, object tracking in EO/IR systems.



Che-Won Park received the B.S. and M.S. degrees from the Department of Geoinformatics, University of Seoul, Seoul, South Korea, in 2022 and 2024, respectively. From 2022 to 2024, she conducted research

on remote sensing at the GeoAI Remote Sensing Laboratory. During this period, her research focused on AI-based object detection, instance segmentation, and size estimation using electro-optical/infrared (EO/IR) satellite imagery. Since 2025, she has been with LIG Defense&Aerospace, Seongnam, South Korea, where she develops and optimizes real-time image processing algorithms for defense systems. Her research interests include computer vision, remote sensing, real-time image processing, and multi-camera/multi-sensor integration.



Ju-Hoon Park received the B.S. degree from the Department of Industrial Management Engineering and the Department of Computer Engineering (double major), Hansung University, Seoul, South Korea, in 2021, and

the M.S. degree from the Department of Computer Science and Engineering, Sogang University, Seoul, South Korea, in 2023. He is currently working with the EO/IR Systems Research and Development Laboratory, LIG Defense&Aerospace, Pangyo, South Korea. His research interests include Real Time OS, object detection, object tracking in EO/IR System.



Hyun-Sung Jang received the B.S. and M.S. degrees in electrical and computer engineering from Pusan National University, Busan, South Korea, in 2007 and 2009, respectively. He is currently prusing the ph.D. degree in

electrical and electronic engineering with Yonsei University, Seoul, South Korea. He is a Chief Research Engineer with the EO/IR Systems Research and Development Laboratory, LIG Defense&Aerospace, Pangyo, South Korea. His research interests include computer vision and machine learning.