Parallax 환경에서의 파노라마 스티칭을 위한 Grid 기반 Local Homography 연구

순동현[1], 오민석[1], 이태복[2]

대구경북과학기술원[1], 국민대학교[2]

dhsoon@dgist.ac.kr[1], harrymark0@dgist.ac.kr[1], plkj3078@kookmin.ac.kr[2]

Grid-based Local Homography Model for Panorama Stitching under Parallax

Donghyeon Soon[1], Minseok Oh[1] Taebok Lee[2]

School of Undergraduate of Studies, DGIST[1], School of Electrical Engineering, Kookmin University[2]

요 약

전통적인 호모그래피(homography) 기반 파노라마 스티칭은 장면이 단일 평면으로 근사되거나 카메라 운동이 순수 회전(pure rotation)에 가까운 경우 안정적인 성능을 보인다. 그러나 실제 촬영 환경에서는 카메라 이동(translation)이 빈번히 발생하며, 이로 인해 서로 다른 깊이에 위치한 물체들이 영상에서 서로 다른 크기의 변위를 보이는 파라랙스(parallax)가 나타난다. 이러한 파라랙스 환경에서는 영상 전역의 대응 관계를 단일(global) 호모그래피로 모델링할 수 없으며, 구조적 미스얼라인과 스티칭 실패가 발생한다. 본 논문은 파라랙스 환경에서 global homography 모델이 붕괴하는 원인을 깊이 의존 변위 관점에서 분석하고, 이를 극복하기 위한 Grid 기반 Local Homography 모델을 제안한다. 제안 모델은 영상을 공간적으로 분할하여 각 영역에서 국소적으로 유효한 호모그래피를 추정하고, alpha blending 을 통해 영역 간 불연속을 완화한다. 실촬영(회전+이동 포함) 영상 실험 결과, global homography 는 파라랙스 환경에서 정합에 실패하는 반면, 제안한 모델은 중앙 및 주변부를 포함한 전반 영역에서 안정적인 정합을 달성함을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

파노라마 스티칭은 중첩 시야를 갖는 다중 영상을 하나의 넓은 시야 영상으로 정합·합성하는 문제로, 컴퓨터 비전 분야에서 널리 연구되어 왔다. 일반적으로 두 영상 사이의 기하학적 관계를 단일 호모그래피(homography) 변환으로 근사하고 이를 영상 전역에 적용하는 방식이 사용되며, 계산 효율성과 구현의 단순성으로 인해 실용 시스템에서도 널리 채택되어 왔다[2].

그러나 호모그래피 기반 정합은 장면이 (근사)평면이거나 카메라 운동이 순수 회전에 가깝다는 가정에 의존한다. 실제 촬영에서는 회전과 함께 카메라 이동(translation)이 동반되는 경우가 많고, 이때 서로 다른 깊이에 위치한 물체들이 영상에서 서로 다른 크기의 변위를 보이는 파라랙스(parallax)가 발생한다. 결과적으로 파라랙스 환경에서는 영상 전역의 대응 관계를 단일 변환으로 일관되게 설명하기 어려우며, global homography 는 특정 깊이 영역만을 우선적으로 만족시키는 형태로 추정되어 다른 영역에서 구조적 미스얼라인이나 왜곡이 나타날 수 있다.

본 논문은 이러한 현상을 파노라마 스티칭의 degenerated case 로 정의하고, 파라랙스에 의해 global homography 가정이 붕괴하는 원인을 기하학적으로 분석한다. 또한 파라랙스 환경에서도 정합을 안정적으로 수행하기 위해 Grid 기반 Local Homography 모델을 제안하고, 실촬영 데이터 실험을 통해 그 유효성을 검증한다.

Ⅱ. 본론

2.1 Parallax 환경에서의 기하학적 분석

카메라 이동(translation)이 포함된 촬영 조건에서는 한 점의 영상 좌표 변화가 해당 점의 깊이 Z에 의존한다. 핀홀 카메라 모델에서 초점거리 f를 갖는 카메라가 수평 방향으로 baseline B만큼 이동한다고 가정하면, 깊이 Z에 위치한 점의 영상 수평 변위는 1차 근사로 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta u \approx \frac{fB}{Z}$$

위 식은 동일한 카메라 운동이라도 점의 깊이에 따라 영상 상 변위가 달라짐을 의미한다. 즉, 근거리 구조물은 상대적으로 큰 변위를, 원거리 배경은 작은 변위를 보이며, 장면이 다중 깊이 구조를 가질수록 단일 변환으로 모든 대응점을 동시에 일치시키는 것이 어려워진다. 따라서 파라랙스가 유의미하게 존재하는 환경에서는 영상 전역의 대응 관계를 만족시키는 단일 호모그래피 H의 존재가 일반적으로 보장되지 않는다.

2.2 Global Homography 모델의 한계

2.1절에서 논의한 바와 같이, 카메라 이동이 포함된 촬영 조건에서는 깊이에 따라 영상 변위가 달라지므로 전역적으로 단일 변환을 가정하기 어렵다. 이러한 조건을 포함하는 실촬영(회전과 이동이 동시에 포함된) 영상 쌍에 single global homography를 적용할 경우, 전경과 배경처럼 깊이가 크게 다른 영역 사이에서 구조적 미스얼라인이 두드러지며, 영상 전반에서 정합 불일치가 관찰된다. Figure 1은 단일 global homography로 스티칭을 수행했을 때 나타나는 대표적 실패 사례를 제시하며, 한 깊이 영역의 정렬을 만족시키는 과정에서 다른 깊이 영역의 정렬이 동시에 붕괴하는 현상을 확인할 수 있다.
이러한 실패는 특징점 매칭의 수가 부족하거나 RANSAC 파라미터 선택이 부적절해서 발생하는 현상으로 환원되기 어렵다. 오히려 global homography가 영상 전역에 대해 동일한 투영 변환을 강제한다는 점에서, 깊이-의존

Figure 1. Global homography 기반 파노라마 스티칭의 failure case. 왼쪽: 두 원본 이미지. 오른쪽: 단일 global homography를 적용한 스티칭 결과.

변위를 갖는 파라랙스 환경에서는 서로 다른 깊이 층에서 요구되는 상이한 기하 관계를 동시에 만족시킬 수 없다는 모델 표현력의 구조적 한계에 기인한다. 따라서 파라랙스가 유의미한 실제 환경에서 global homography를 전역 정합 모델로 사용하는 접근은 근본적인 제약을 갖는다.

2.3 Inlier-Refined Global Homography

다만, 전역 모델의 한계가 존재하더라도 관측되는 정합 오차는 모델 표현력의 문제뿐 아니라, 추정 과정에서의 inlier 구성과 추정 안정성에 의해 추가적으로 악화될 수 있다. 이에 본 절에서는 global homography 프레임워크를 유지한 채, RANSAC[1] 잔차 임계값 및 특징점 매칭 기준을 조정하여 inlier 집합의 일관성을 강화하는 Inlier-Refined Global Homography 기법을 제안한다. 이러한 inlier 정제는 추정된 호모그래피가 지배적인(dominant) 대응 구조에 더 강하게 적합되도록 유도함으로써, 일부 영역에서의 정합 품질 개선을 기대할 수 있다. 실험적으로, inlier 정제를 적용한 결과 영상 중앙부에서는 정렬이 부분적으로 향상되는 경향이 관찰된다.

Figure 2(좌)는 정제된 inlier 기반 global homography 결과를 보여주며, 중심 영역에서의 미스얼라인이 일정 수준 완화됨을 확인할 수 있다. 그러나 주변부 및 깊이 변화가 큰 영역에서는 여전히 구조적 미스얼라인이 잔존한다. 이는 inlier 정제가 전역 모델의 추정 안정성을 높이는 데에는 기여하지만, 단일 global homography가 본질적으로 깊이-의존 변위를 동시에 설명할 수 없다는 한계를 근본적으로 해소하지 못함을 시사한다. 따라서 파라랙스 환경에서의 안정적인 정합을 위해서는 전역 단일 변환 가정을 완화하고, 공간적으로 변화하는 변환을 허용하는 모델링이 요구된다.

2.4 Grid 기반 Local Homography

본 논문은 앞서 확인한 global homography의 구조적 제약을 보완하기 위해, 공간적으로 변화하는 변환을 허용하는 Grid 기반 Local Homography 모델을 제안한다. 제안 모델은 입력 영상을 $M \times N$ 격자로 분할하고, 각 격자 영역 Ω_{ij} 에서 관측되는 특징점 대응만을 이용하여 국소 호모그래피 H_{ij} 를 독립적으로 추정한다. 이에 따라 영역 Ω_{ij} 에 속한 점 $\mathbf{x} \in \Omega_{ij}$ 는 다음과 같이 영역별 변환을 통해 워핑된다.

$$x' \sim H_{ijx}$$

이 접근의 핵심 가정은 영역이 충분히 작을수록 해당 영역 내부의 깊이 변화가 제한되어 평면(또는 준평면) 근사가 상대적으로 잘 성립한다는 점이다. 즉, 전역적으로는 단일 호모그래피 가정이 붕괴하더라도, 국소 영역에서는 동일한 가정이 근사적으로 유효해질 수 있으며, 이를 통해 깊이-의존 변위로 인한 기하 불일치를 공간적으로 분산시킬 수 있다. 결과적으로 local homography는 파라랙스에 의해 발생하는 위치-의존 정합 오차를 보다 직접적으로 흡수할 수 있다.

한편 영역별 변환을 독립적으로 적용할 경우 격자 경계에서 불연속이 발생할 수 있으므로, 본 논문은 각 영역의 워핑 결과를 alpha blending 으로 결합하여 경계 부근의 시각적 이음새를 완화하고 연속적인 파노라마 출력을 구성한다. Figure 2(우)는 제안한 grid 기반 local homography 결과를 제시하며, 전역 모델에서 잔존하던 미스얼라인이 중앙 및 주변부 전반에 걸쳐 감소함을 보여준다. 이는 파라랙스 환경에서 spatially varying transformation 을 명시적으로 모델링하는 것이 안정적인 파노라마 정합을 위해 필수적임을 뒷받침한다.

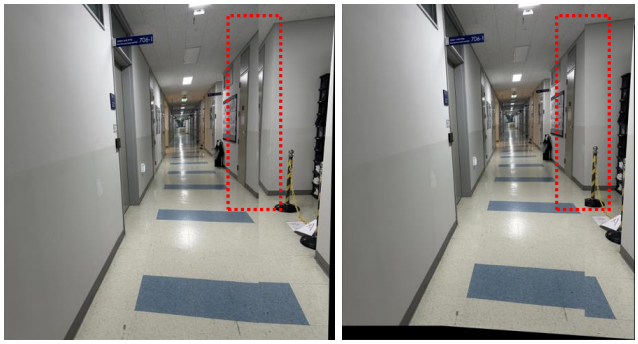

Figure 2. Parallax 환경에서의 global 및 local homography 기반 스티칭 결과 비교. 왼쪽: RANSAC 임계값 및 특징점 매칭 기준을 조정한 global homography 기반 스티칭 결과.

III. 결 론

본 논문은 파라랙스가 존재하는 실촬영 환경에서 파노라마 스티칭이 실패하는 원인을 global homography 가정의 한계로 보고, 깊이 의존 변위 관점에서 이를 분석하였다. 이를 해결하기 위해 영상을 격자로 분할해 영역별로 국소 호모그래피를 추정하는 Grid 기반 Local Homography 모델을 제안하고, alpha blending 으로 경계 불연속을 완화하였다. 실촬영 데이터 실험에서 제안 방법은 global homography 및 inlier 정제 방식보다 전반 영역에서 더 안정적인 정합 성능을 보여, 파라랙스 환경에서는 공간적으로 변하는 변환을 명시적으로 모델링하는 접근이 효과적임을 확인했다.본 연구는 파라랙스 조건에서의 스티칭 실패를 이론적으로 정리하고, 이를 해결하기 위한 단순하면서도 효과적인 local homography 기반 대안을 제시했다는 점에서 의의가 있다.

참 고 문 헌

[1] Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Communications of the ACM, 24(6), 381–395.

[2] Brown, M., & Lowe, D. G. (2007). Automatic Panoramic Image Stitching Using Invariant Features. International Journal of Computer Vision, 74(1), 59–73.