

어안렌즈 카메라 캘리브레이션 전역 품질 지표에 관한 연구

김한구, 강신재, 차대웅, 한동석*

경북대학교 IT 대학 전자공학부

khangu0729@knu.ac.kr, kangsj129@knu.ac.kr, dwcha@auto-it.co.kr, dshan@knu.ac.kr*

A Study on the Global Quality Metric of Fisheye Camera Calibration

Han Gu Kim, Shin Jae Kang, Dae Woong Cha, Dong Seog Han*

School of Electronics Engineering, Kyungpook National Univ.

Automotive Information Technology Inc.

요약

본 논문은 어안렌즈(fisheye) 카메라 캘리브레이션 과정에서 낮은 재투영 오차(reprojection error)에도 불구하고 이미지에서 전역적으로 왜곡이 존재할 수 있는 함정을 분석한다. 이러한 문제는 캘리브레이션을 위한 데이터가 이미지 중앙에 편중될 때 주로 발생하며, 기존 캘리브레이션 품질 지표로 널리 사용되는 재투영 오차만으로는 실패 여부를 정확히 판단하기 어렵다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 보정된 이미지의 전역 품질을 정량화하는 새로운 지표 GDQI(global distortion quality index)를 제안한다. 이를 통해 어안렌즈 카메라 캘리브레이션의 품질 평가에서 재투영 오차의 한계를 보완하고, 전역적 관점의 보정 품질 평가를 위한 새로운 접근을 제시함으로써 SLAM(simultaneous localization and mapping) 등의 비전 알고리즘에서 은폐된 왜곡 오류로 인한 치명적 영향을 사전에 진단하고 방지할 수 있을 것으로 기대한다.

I. 서론

어안렌즈 카메라는 180° 이상의 매우 넓은 화각을 제공하여 자율주행, AR, VR 등 다양한 비전 분야에서 많이 활용된다. 그러나 광각으로 인한 강한 비선형 왜곡 때문에, 정확한 캘리브레이션을 통한 보정이 필수적이다. 일반적으로 카메라 캘리브레이션의 품질 평가는 재투영 오차(reprojection error, RPE)로 이루어지며, 이는 캘리브레이션 데이터에 대한 적합도를 의미한다. 하지만, 이 지표만으로는 보정의 전역적 성공 여부를 담보하지 못한다. 캘리브레이션 데이터가 영상 전체에 고르게 분포될 경우, RPE가 전역 품질을 잘 반영하지만, 데이터 분포에 편향이 있으면 해당 영역에서는 오차가 잘 보정되더라도 관측되지 않은 영역에서는 왜곡이 크게 남을 수 있다. RPE는 관측된 지점에 대해서만 계산되므로, 보드 외곽이나 이미지 가장자리의 왜곡 상황은 제대로 평가되지 않는다. 이러한 이유로 보정 결과에 대해 잘못된 판단을 할 수 있다.

이에 대해, 본 연구의 목표는 재투영 오차만으로 놓칠 수 있는 보정 실패를 전역 관점에서 진단하는 것으로, 세계의 직선 구조물이 보정 후에도 곧게 유지되고, 화면 전역에 걸쳐 균일한 배율을 갖는지를 정량 평가하는 전역 보정 품질 지표를 개발한다. 이는 기존의 RPE 지표를 보완하여, 어안렌즈 카메라와 같이 왜곡이 큰 광각 카메라의 캘리브레이션 품질을 더욱 엄격하고 신뢰성 있게 평가할 수 있도록 한다.

II. 본론

1. GDQI(Global Distortion Quality Index) 개념

GDQI는 보정 영상의 전역적 왜곡 잔존 여부를 수치화하기 위한 지표로서, 스케일 균일성 오차(scale uniformity error, SUE), 직선 보존 오차(line straightness error, LSE)를 종합한다. 두 값이 모두 낮을수록 이미지 전역에 걸쳐 올바른 보정이 이루어졌음을 의미하며, 반대로 이들 중 하나라도 높으면, 특정 국소 영역에 잔류 왜곡이나 비일관적 축척 변화가 존재함을 의미한다.

1.1. 스케일 균일성 오차

이론상 완벽한 보정에서는 이미지 전역에서 동일한 배율을 가진다. 즉, 왜곡되지 않은 이상적인 카메라에서 서로 다른 두 영역에서 동일한 크기의 물체가 투영될 때 비슷한 크기로 나타나야 한다. 그러나 캘리브레이션이 잘못된다면 보정된 영상에서 위치에 따라 서로 다른 배율로 보정이 이루어져, 어떤 부분은 확대되어 보이고 다른 부분은 축소되어 보이는 현상이 발생한다. 이를 정량화하기 위해, 본 연구에서는 자코비안(jacobian) 행렬과 보정에 따른 국소 면적 변화율을 표현한 행렬식을 사용했으며, 스케일 균일성 오차(SUE)는 보정 영상의 전체 화소들에 대한 값들의 분산으로 정의한다. SUE 값이 클수록 보정 배율이 위치에 따라 심하게 달라짐을 의미하며, 이는 전역적인 왜곡 보정 불균형을 나타낸다.

1.2. 직선 보존 오차

이론상 완벽한 보정에서는 직선 구조물이 보정된 2D 영상에서도 직선으로 표현되어야 한다. 올바르게 보정되었다면, 어안렌즈 렌즈의 왜곡으로 굽어졌던 직선들은 다시 곧게 펴져야 한다는 것이다. 본 연구에서는 보정 결과 영상에서 LSD(line segment detector) 알고리즘을 통해 직선 성분을 추출한 후, 각 직선상의 화소들이 해당 직선 모델에서 벗어나는 평균 거리를 계산한다. 이 값을 직선 보존 오차(LSE)로 정의하며, 단위는 픽셀이다. 여러 직선을 검출한 경우, 전체 LSE는 검출된 모든 직선에 대한 평균 거리를 산출한다. LSE 값이 클수록 보정 후에도 영상 내 일부 직선이 눈에 띄게 굽어있다는 뜻이며, 이는 해당 국소 영역에 왜곡이 잔존하고 있음을 의미한다.

1.3 GDQI 지표 활용

최종적으로 GDQI는 LSE와 SUE를 동시에 고려하기 위해 두 값을 단순 합산하거나 다차원 벡터로 취급할 수 있다. 두 오류가 모두 임계치 이하로 낮을 때만 보정 성공으로 판단하는 게이트 함수로 활용하거나, 혹은

가중합한 형태로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 이해를 돕기 위해 LSE와 SUE 값을 개별적으로 관찰하고 논의하며, 절대적인 GDQI 스코어 산출은 추후 과제로 남겨둔다. 중요한 것은, GDQI의 도입으로 재투영 오차 하나만으로 간과될 수 있던 보정 품질을 다양한 관점에서 평가할 수 있게 되었다는 점이다. LSE와 SUE는 각각 기하학적 정확도(직선성)와 광학적 일관성(배율 균일도) 측면에서 보정 결과를 감지하므로, 두 지표를 함께 사용하면 전역 왜곡에 대한 높은 민감도를 얻을 수 있다.

2. GDQI을 적용한 캘리브레이션 지표 비교 실험

실험을 통해 본 논문에서 제안하는 지표 GDQI가 실제로 재투영 오차로는 드러나지 않는 보정 실패를 잘 식별해 내는지를 확인하였다. 데이터셋 A는 ChArUco 보드 패턴을 이미지 중앙부 위주로 촬영하여 보정 실패를 의도적으로 유도한 경우이고, 데이터셋 B는 ChArUco 보드를 중앙부터 가장자리까지 고르게 분포하도록 촬영한 경우로, 두 데이터셋을 각각 OpenCV 어안렌즈 모델로 캘리브레이션 한 후, 얻어진 카메라 파라미터로 동일한 테스트 이미지를 Balance = 0.5 동일 조건 아래에서 보정하였고, 캘리브레이션 결과의 RPE, 보정 이미지의 SUE, LSE를 각각 계산하여 비교하였다.

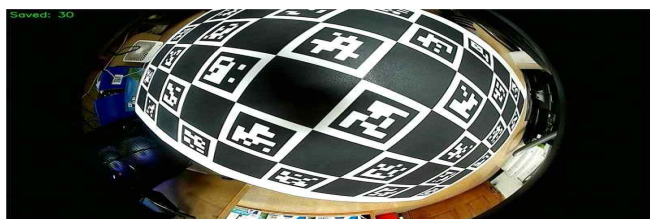
[표 1]에 따르면, 데이터셋 A와 B 모두 RPE는 0.5 픽셀 내외로, 수치상 두 경우 모두 보정이 잘 된 것처럼 나타난다. 특히, 실패 사례 A는 RPE가 0.365 픽셀로 B의 0.472 픽셀보다도 낮은 값을 보여주어, RPE만 보서는 A의 보정이 더 좋아 보인다. 그러나 A의 경우에서 $SUE(var) = 1.199$, $SUE(mean) = 10.709$, $LSE = 16.124$ 픽셀이고, B의 경우에서 $SUE(var) = 0.546$, $SUE(mean) = 2.631$, $LSE = 12.282$ 픽셀이다. 이는 데이터셋 A 캘리브레이션 파라미터로 보정한 영상이 데이터셋 B 캘리브레이션 파라미터로 보정한 영상에 비해, 영상 속 위치별로 픽셀 크기가 심하게 불균일함을, 영상 속 직선들이 더 많이 휘어져 있음을 나타낸다.

원본 영상인 [그림 1]과 보정된 [그림 2], [그림 3]을 비교하면, GDQI 지표가 지정한 품질 차이를 명확히 확인할 수 있다. [그림 2]는 영상의 가장자리 부분이 좌측이 비정상적으로 확대되는 스케일 불균일 현상 및 원본의 많은 부분이 화면 밖으로 밀려 나갔음을, [그림 3]에 비해 ChArUco 보드의 격자선들이 미세하게 더 휘어져 있음을 확인할 수 있다. [그림 3]은 상대적으로 스케일이 균일하고 격자선들이 곧게 유지되어, [그림 2]에 비해 원본 정보를 더욱 보존하며 안정적인 결과를 보여준다.

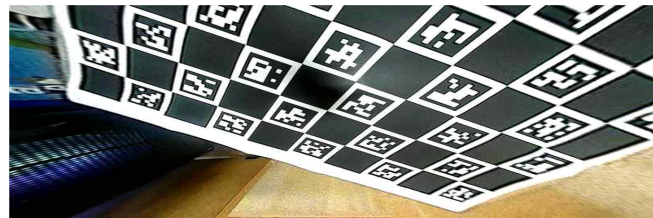
이처럼 GDQI 지표는 두 사례 간 보정 품질 차이를 극명하게 드러낸다. 재투영 오차만으로는 구별되지 않던 차이가, SUE와 LSE를 통해서 명확히 수치화되었다. 이는 전역 왜곡 관점에서 GDQI가 RPE에서 확인할 수 없는 캘리브레이션의 성공과 실패를 가려내는 데 유용함을 뒷받침한다.

[표 1] 데이터셋에 따른 RPE, SUE, LSE 비교표

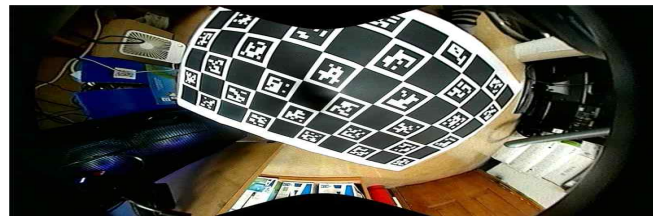
데이터셋	RPE (pixel)	SUE (var)	SUE (mean)	LSE (pixel)
A	0.365	1.199	10.709	16.124
B	0.472	0.546	2.631	12.282



[그림 1] 보정 전 원본 영상



[그림 2] 데이터셋 A 캘리브레이션으로 얻은 파라미터로 보정한 영상



[그림 3] 데이터셋 B 캘리브레이션으로 얻은 파라미터로 보정한 영상

III. 결 론

본 논문에서는 어안렌즈 카메라 캘리브레이션 평가에서 널리 사용되는 재투영 오차(RPE) 지표의 함정을 지적하고, 이를 보완하기 위한 전역 왜곡 품질 지표(GDQI)를 제안하였다. 제한된 영역의 점 오차만을 보는 RPE와 달리, GDQI는 직선 유지 정도(LSE)와 배율 균일도(SUE)를 통해 보정 결과의 전역적 왜곡 수준을 정량화하였으며, 이를 통해 숨겨진 보정 오류를 조기에 발견할 수 있다.

향후 연구로, 본 논문에서 제시한 SUE와 LSE를 통합하여 단일 GDQI 점수를 산출하는 표준화 방안을 마련하고자 한다. 또한, 제안한 접근을 다양한 렌즈 유형(광각, 어안, 파노라마 등)에 적용하여 각 경우에 최적화된 품질 평가 방법을 탐색할 계획이다.

궁극적으로, 본 연구는 카메라 보정 품질을 평가하고 향상하는데 새로운 통찰을 제공하며, 왜곡 보정이 필요한 모든 비전 응용 분야에서 신뢰성 향상에 이바지할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25444562).

참 고 문 헌

- [1] Rameau, F., Park, J., Bailo, O., and Kweon, I. S., "MC-Calib: A generic and robust calibration toolbox for multi-camera systems," Computer Vision and Image Understanding, vol. 217, Art. no. 103353, Jan. 2022.
- [2] Von Gioi, R. G., Jakubowicz, J., Morel, J. M., and Randall, G., "LSD: A fast line segment detector with a false detection control," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, no. 4, pp. 722 - 732, Apr. 2010.
- [3] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., and Marín-Jiménez, M. J., "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion," Pattern Recognition, vol. 47, no. 6, pp. 2280 - 2292, Jun. 2014.