학위논문요약서		
성명	**학과**	**해당 학위**
김준호	**기계공학과**	**석사**
학위개요	○ 논문제목 • 국문제목: 광각 카메라-프로젝터 시스템의 정밀 3D 계측을 위한 Generic 캘리브레이션 • 영문제목: Generic calibration of wide-FOV camera-projector system for precision 3D measurement • 논문심사합격일: 2025.12.19 • 지도교수: 박용화 교수	

주요 내용 요약

Ⅰ. 연구목적

본 장에서는 본 연구의 배경과 필요성, 그리고 본 논문에서 제안하는 방법의 개요를 서술한다. 최근 로봇 비전, 공정 자동화, 역설계, 문화재 복원, 증강현실 등 다양한 응용 분야에서 객체의 3차원 형상을 정밀하게 계측하려는 요구가 급격히 증가하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 여러 종류의 능동 광학 계측 기법이 제안되어 왔으며, 그 중 구조광(Structured Light)에 기반한 방법은 비교적 간단한 하드웨어 구성과 높은 공간 해상도를 동시에 달성할 수 있다는 점에서 널리 사용되고 있다. 구조광 시스템은 일반적으로 카메라와 프로젝터로 구성되며, 프로젝터가 투영하는 패턴과 카메라가 관측하는 영상 사이의 대응 관계를 이용하여 물체 표면의 3차원 좌표를 복원한다.

실제 산업 현장이나 로봇 작업 공간은 단일 시야각으로 포착하기 어려울 정도로 넓은 경우가 많다. 이 경우 좁은 시야각을 갖는 카메라–프로젝터 쌍을 여러 대 사용하는 방식은 시스템 구성과 보정 과정이 복잡해지고, 각 장비 간 좌표계 정합에 따른 추가 오차가 발생하는 단점이 있다. 따라서 하나의 시스템으로 넓은 영역을 계측하기 위해서는 필연적으로 광각 카메라와 광각 프로젝터와 같은 광각 광학계를 도입해야 한다. 광각 광학계를 사용하면 단일 설치로 넓은 작업 공간을 커버할 수 있고, 로봇 팔이나 공정 라인에 부착했을 때도 높은 유연성을 확보할 수 있다.

그러나 광각 광학계를 사용할 경우 이미지 중심부에 비해 주변부에서 매우 큰 비선형 왜곡이 발생한다는 심각한 문제가 존재한다. 기존의 핀홀 모델과 소수의 왜곡 계수를 사용하는 전통적 카메라 보정 방식은 화각이 상대적으로 좁은 경우에는 충분한 성능을 보이지만, 화각이 크게 증가할수록 주변부에서 깊이 오차와 형상 왜곡이 급격히 커지는 한계를 드러낸다. 특히 구조광 기반 3차원 계측에서는 카메라와 프로젝터의 기하학적 모델이 동시에 정확해야 하므로, 광각 카메라와 광각 프로젝터에서 발생하는 복합적인 왜곡을 정밀하게 보정하지 못하면 전체 계측 시스템의 3차원 정합성이 크게 저하된다. 이는 넓은 영역을 대상으로 하는 정밀 계측이나 로봇 작업 계획과 같이 높은 신뢰도가 요구되는 응용에서 치명적인 요소가 된다.

요약하면, 본 연구의 목표는 광각 카메라–프로젝터 구조광 시스템에서 발생하는 주변부 왜곡과 3차원 정합성 저하 문제를 B-spline 기반 제네릭 캘리브레이션과 통합 최적화 기법을 통해 해결하는 것이다. 이를 위해 광각 카메라와 광각 프로젝터에 공통으로 적용 가능한 B-spline 제네릭 모델을 설계하고, 구조

광 패턴을 활용한 통합 보정 절차와 3차원 구조 파라미터의 동시 최적화 알고리즘을 제안한다. 이후 장에서는 관련 연구를 정리하고, 제안 모델의 수학적 정식화를 제시한 뒤, 구현 세부사항과 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 제안 방법의 우수성과 실용성을 검증한다.

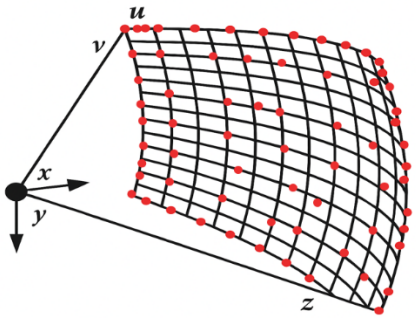

Fig1. B-spline generic calibration model

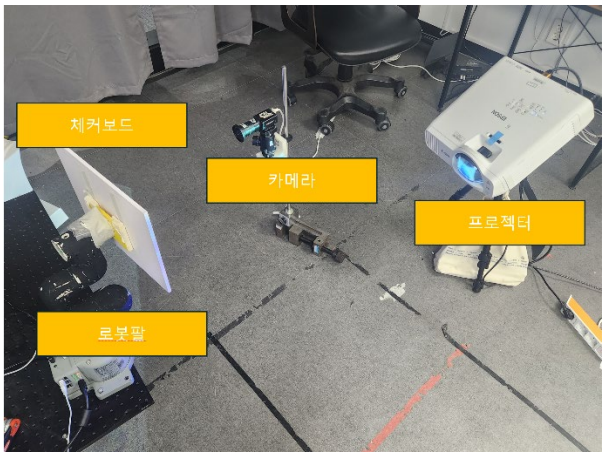

Fig2. 제안하는 광각 structured-light system 구성

Ⅱ. 연구내용

본 연구에서는 카메라–프로젝터 스테레오 계측 시스템을 대상으로, B-spline 기반의 stereo-constraint calibration 기법을 도입하여 기존 핀홀(pinhole) 기반 캘리브레이션 모델의 한계를 보완하고자 하였다. 제안한 B-spline 캘리브레이션 모델은 영상 좌표계에서의 재투영 오차와 3차원 계측 오차(3D error)를 동시에 최소화하도록 설계되었으며, 스테레오 기하 제약을 명시적으로 활용함으로써 카메라와 프로젝터 간의 일관된 광학 모델을 확보하는 데 중점을 두었다.

실험 결과, 동일한 데이터셋과 계측 조건에서 비교하였을 때 B-spline stereo constraint calibration은 기존 핀홀 기반 방법에 비해 재투영 오차와 3D error를 모두 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 특히 재투영 오차의 평균 및 최대값이 전반적으로 감소하였고, 3D error 역시 평균, 표준편차, 최대값의 관점에서 모두 개선되었다. 이는 제안된 B-spline 캘리브레이션 모델이 복잡한 광학계에서 발생하는 고차 왜곡 및 비이상성을 보다 유연하게 표현하며, 카메라와 프로젝터의 스테레오 구성 전반에 걸쳐
기하학적 일관성을 효과적으로 보장한다는 점을 의미한다. 또한 에러 분포가 특정 영역에 집중되는 것이 아니라 시야 전역에 걸쳐 균일하게 감소하는 양상을 보였다는 점에서, 제안 기법이 전체 측정 영역의 품질을 동시에 향상시키는 글로벌한 성능 개선을 달성했음을 확인할 수 있었다.

종합하면, 본 연구에서 제안한 B-spline stereo constraint calibration 기법은 복잡한 광학계를 사용하는 카메라–프로젝터 스테레오 계측 시스템에서 기존 핀홀 기반 캘리브레이션 모델을 대체할 수 있는 유효하고 실용적인 대안임을 확인하였다. 재투영 오차와 3차원 계측 오차의 동시 감소를 통해 정밀도와 신뢰도를 크게 향상시키는 동시에, 넓은 영역을 한 번에 고해상도로 스캔할 수 있는 운용상의 장점을 제공함으로써, 산업용 정밀 계측, 로봇 비전, 역설계(reverse engineering), 의료 및 문화재 계측 등 다양한 응용 분야에서 높은 활용 가능성을 가진다고 판단된다. 향후에는 동적 환경에서의 온라인 재캘리브레이션, 다중 스케일 B-spline 모델의 도입, 다수의 카메라·프로젝터가 포함된 확장형 스테레오 시스템으로의 적용 등을 통해 제안 기법의 활용 범위를 더욱 넓혀 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

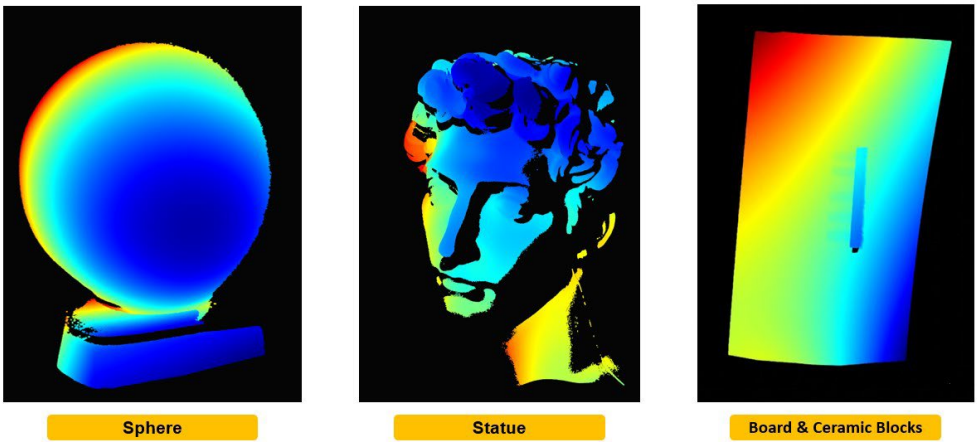

Fig3. 제안한 structured-light system을 활용한 3차원 복원 결과