

컴퓨터 비전을 이용한 정밀 측정 장비의 줌 렌즈 캘리브레이션

Zoom Lens Calibration for a Video Measuring System

한 광 수*
Hahn, Kwang Soo

최 준 수**
Choi, Joon Soo

최 기 원***
Choi, Ki Won

요약

본 논문에서는 컴퓨터 비전을 이용하는 정밀 측정 장비인 VMS(video measuring system)에서 줌을 서보 모터(servo motor)로 제어하는 자동화된 줌 렌즈를 보정하기 위한 효율적인 방법을 소개한다. VMS에서 사용하는 줌 렌즈는 초점과 조리개가 고정되어 있기 때문에 줌의 변화에 영향을 받는 이미지의 중심과 픽셀의 가로, 세로 크기에 대하여 보정한다. 줌 렌즈의 모든 줌 제어 단계에 대하여, 모든 카메라 변수 값들을 계산하기 위해서는 많은 계산량과 저장공간이 필요하다. 이런 문제점들을 해결하기 위하여, 효율적인 계산과 저장공간을 위하여 최소 단계의 줌 단계에 대한 보정으로도 모든 영역의 줌 단계에 대한 보정 값들을 계산할 수 있는 방법을 사용해서 VMS에서 효율적이고 간단한 줌 렌즈 캘리브레이션 방법을 제안한다.

Abstract

Precise visual measurement applications, like video measuring system (VMS), use camera systems with motorized zoom lens for fast and efficient measurement. In this paper, we introduce an efficient calibration method for zoom lens of VMS controlled by servo motor. For the automated zoom lens calibration of the VMS, only zoom lens setting needs to be calibrated and parameters calibrated by zoom lens settings are image center and pixel size changed by zoom levels. The extrinsic parameters, like focus and iris, do not need to be calibrated since the parameters are usually fixed. It needs a lot of time and effort to calibrate the camera for all the different zoom levels. In this paper, we also propose an efficient and fast zoom lens calibration method, which calculates the calibration parameters of the zoom lens settings for the minimum number of zoom levels and estimates other parameters for the uncalculated zoom levels using the interpolation of the calculated parameter values.

□ Keywords : Zoom Lens Calibration, Video Measuring System

1. 서론

영상처리 분야에서 이미지들로부터 3차원 형상을 복원[1,2,3]하거나, 특정 물체를 추적하기 위한 시각 추적[4,5] 등과 같이 줌 렌즈를 통하여 획득된 이미지를 처리하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이런 연구들을 수행하기 위

해서는 줌 렌즈의 보정이 필수적으로 이루어져야 한다. 완전한 렌즈를 만들지 못한다는 한계 때문에 렌즈를 통해서 얻은 이미지들은 광학 수차(optical aberrations)가 발생하고, 정확한 이미지들을 얻기 위해서는 광학 수차에 대한 보정이 필요하다. 줌 렌즈는 고정 렌즈와는 다르게 렌즈 군이 움직이면서 배율을 조절할 수 있고, 배율마다 다른 이미지 특징들을 가지고 있기 때문에 실제 물체와 획득한 영상의 물체의 관계에서 고정 렌즈에서 보다 훨씬 복잡한 관계를 보여준다. 따라서 고정 렌즈를 이용하는 카메라 시스템의 보정 작업에 비하여 줌 렌즈를 이용하는 카메라 시스템의 보정 작업은 줌 렌즈 시스템의 복잡성

* 정 회 원 : 국민대학 컴퓨터학부 교수
kshahn@kookmin.ac.kr(제 1저자)

** 정 회 원 : 국민대학 컴퓨터학부 교수
jschoi@kookmin.ac.kr(공동저자)

*** 준 회 원 : (주)브이에스테크 R&D팀 선임연구원
kwchoi@vstech.co.kr(공동저자)

[2005/01/13 투고 - 2005/03/16 심사 - 2005/08/31 심사완료]

으로 인하여 상대적으로 어려운 편이다[6].

일반적으로 복잡한 줌 렌즈를 보정하기 위하여 자동화된 줌 렌즈의 세 가지 렌즈 제어장치인 조리개, 초점 그리고 줌을 모두 보정 영역으로 고려하여야 하며, 이 세 가지 렌즈 제어장치와 카메라 변수들 사이의 상호관계를 모델링하고, 이를 기반으로 보정값을 계산하여야 한다. 줌 렌즈의 모든 줌 제어 단계에 대하여, 모든 카메라 변수 값들을 계산하기 위해서는 많은 계산량과 저장공간이 필요하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 이변량 다항식 함수(bivariate polynomial function)를 이용하여 렌즈 제어 단계와 카메라 변수 값들 사이의 관계식을 모델링하는 방법이 연구되었고[6], 최소 단계의 렌즈 제어장치에서 카메라 변수값들을 계산하기 위하여 렌즈 제어장치에 대한 보정 절차에 대하여 연구가 수행되었다[7].

본 논문에서는 기존의 고정렌즈를 설치한 측정장비보다 상대적으로 많은 기능을 제공할 수 있도록 줌 렌즈를 장착한 정밀측정장비를 위하여 자동화된 줌 렌즈를 보정하기 위한 방법을 제안한다. 정밀측정장비는 설치된 줌 렌즈들이 렌즈 자체에서 줌에 대한 초점을 보정하고, 조리개 제어를 통하지 않고 직접 빛의 세기를 조절함으로써 측정 대상물의 빛 반사율을 조절하기 때문에, 자동화된 줌 렌즈의 세가지 렌즈 제어장치인 조리개, 초점 그리고 줌 제어 중에서 줌 제어만을 자동으로 조절할 수 있도록 설계되어 있다. 따라서, 조리개와 초점에 대해서는 보정할 필요가 없기 때문에, 기존의 연구에서 개발된 복잡한 과정을 통하여 줌 렌즈를 보정하는 방법보다는 상대적으로 보정작업을 단순화시킬 수 있다. 또한 카메라가 X축과 Y축 그리고 Z축 방향으로 매우 정밀하게 움직이는 정밀 스테이지 평면에 수직으로 고정되어 있기 때문에 카메라의 외부 변수인 카메라의 회전과 이동과는 상관없이 렌즈의 내부 변수만으로 줌 렌즈를 보정할 수 있다. 그러나 정밀측정장비는 고 배율의 영상

을 통해서 대상을 측정하기 때문에, 줌 렌즈나 카메라가 아주 미세하게 회전되어 있거나 스테이지 평면에 수직으로 설치되어 있지 않다면 측정 대상물의 측정값이 크게 달라질 수 있다. 아무리 기계적으로 카메라와 렌즈를 설치한다고 하더라도 얼마간의 오류가 있기 때문에 이에 대한 보정작업도 수행하여야 한다. 그리고 줌 렌즈를 모든 줌 단계에 대해서 보정작업을 수행하기 위해서는 모든 줌 단계에 대한 보정값을 계산하고 저장해야 한다. 본 논문에서는 효율적인 계산과 저장공간을 위하여 최소 단계의 줌 단계에 대한 보정으로도 모든 영역의 줌 단계에 대한 보정 값들을 계산할 수 있는 방법을 사용하여 정밀측정장비에서 효율적이고 간단한 줌 렌즈 보정 방법을 제안한다.

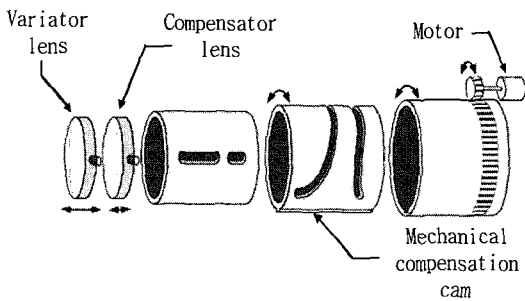
2. 줌 렌즈 및 줌 렌즈 캘리브레이션

2.1 줌 렌즈

줌 렌즈는 고정된 초점거리를 가지는 고정 렌즈와는 달리 초점거리를 변화시키는 기능을 가진 렌즈로서 초점거리를 변화시키면 줌 렌즈를 통하여 볼 수 있는 시야 범위가 변하게 된다. 이러한 특성을 이용하여 배율을 변경할 수 있다.

줌 렌즈는 일반적으로 초점 렌즈(focus lens), 변배기 렌즈(variator lens), 보정기 렌즈(compensator lens), 일렉터 렌즈(elector lens) 및 중계기 렌즈(relay lens) 그룹으로 구성되어 있다[8]. 초점 렌즈는 초점거리 변화에 관계없이 변배기에 동일한 물점을 형성시키고, 변배기 렌즈는 위치를 앞뒤로 움직여 줌 배율을 변화시킨다. 보정기 렌즈는 위치를 앞뒤로 움직여 변배기 렌즈는 움직임의 의한 줌의 변화에 따른 초점 수차를 보정시킨다.

줌 렌즈에서 제어 가능한 요소는 조리개, 초점 및 줌 제어가 있으며, 그 특징은 다음과 같다. 조리개는 줌, 초점과 같이 렌즈의 특성을 변



〈그림 1〉 줌 렌즈 가동부의 구조

화시킨다. 조리개를 조절하면 f-number를 변화시켜 렌즈로 들어오는 빛의 양을 조절할 수 있고, 조리개를 열면 피사계 심도가 얕아지고 조이면 피사계 심도를 높일 수 있다.

렌즈의 특성 중에서 피사계 심도는 초점을 맞출 수 있는 범위를 의미하고, 줌 렌즈에서는 줌 단계에 따라서 초점을 맞출 수 있는 초점 범위가 달라진다. 줌 렌즈는 일반적으로 그림 1에서와 같이 줌 배율을 변화할 때 초점으로 맞추기 위한 기계 장치를 가지고 있다.

일반적으로 1개의 렌즈 군을 사용하는 고정 렌즈에서 피사체의 크기를 바꾸기 위해서는 물체와 렌즈의 거리를 변화시키면 되지만 결상 위치까지 변화된다. 따라서 줌 렌즈에서는 2개의 렌즈 군을 서로 따로 움직여서 피사체의 크기를 바꾸면서 초점까지 유지할 수 있도록 한다. 줌 렌즈는 2매의 렌즈로 만들 수 있지만 일반적으로 여러 장의 렌즈 군으로 구성되어 있어서 일부의 렌즈 군이 이동하면서 렌즈의 초점거리를 변화시키고 초점을 보정한다. 줌 렌즈의 이러한 특성으로 인하여 고정 렌즈에서 고정되어 있는 특성들이 줌 렌즈에서는 초점거리의 변화에 따라서 변동된다.

줌 렌즈는 초점 거리가 변할 때, 그림 1과 같이 변배기와 보정기 렌즈가 비선형적인 움직임으로 렌즈의 초점 거리가 변하여도 렌즈와 피사체를 고정 거리에 위치할 수 있도록 보정한다[6]. 이런 비선형적인 움직임은 줌 배율을 조정하기 위해 그림 1에서와 같이 모터로 기계적인 보정

캠(mechanical compensation cam)을 회전하게 되고 두 개의 슬라이딩 홈에 의해서 변배기와 보정기 렌즈가 서로 다르게 비선형적으로 움직이도록 만들어서 초점 거리가 변경되어도 결상 위치가 변경되지 않도록 보정하고 있다 .

2.2 줌 렌즈 캘리브레이션

카메라 보정에 관한 연구는 초기에 고정 렌즈를 장착한 카메라 시스템을 보정하기 위한 연구로 시작해서 줌 렌즈를 장착한 카메라 시스템을 보정하기 위한 연구로 발전되었다. 고정렌즈나 줌렌즈를 장착한 카메라를 보정하기 위하여 필요한 변수로서, Tsai[9]는 외부 파라미터인 카메라의 이동과 회전에 관한 행렬과 내부 파라미터인 렌즈의 초점 거리, 왜곡 계수, 픽셀 스케일 보정 값과 중심값을 정의하였다.

고정 렌즈에서는 하나의 렌즈 군에 대하여 카메라와 렌즈를 모델링하여 보정을 하였지만 줌 렌즈 보정에 대한 연구에서는 줌 렌즈들이 여러 개의 렌즈 군으로 구성되어 있고 이 렌즈 군들이 이동하면서 렌즈의 3가지 설정인 줌과 초점, 조리개를 조절할 수 있기 때문에 카메라와 렌즈를 모델링하기 어려워졌고 렌즈의 설정들과 카메라 파라미터들과의 관계들도 상당히 복잡해졌다. 이런 복잡한 줌 렌즈의 설정들과 카메라 파라미터들과의 관계를 밝히기 위하여 광학 기기들을 배열하는 방법, 각 렌즈의 설정들을 고정시키고 고정 렌즈처럼 보정을 하는 방법을 연구하였다. 줌 렌즈의 설정들과 카메라 파라미터들과의 정확한 관계를 밝히기 위한 연구와 효율적으로 줌 렌즈를 보정하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었다.

줌 렌즈를 보정하기 위해서는 줌 렌즈의 렌즈 설정에 따른 카메라 파라미터와의 관계를 도출하는 것이 중요하다. Tarabanis[10] 등은 광학 기기들을 특별하게 배치하여 줌 렌즈의 렌즈 설정과 카메라 변수들 사이의 관계를 밝히기 위한 연구를 하였다. 줌과 초점 설정에 대한 5가지의 이미

지 변수들과의 관계를 밝혀서, 검색 테이블에 저장하고 중간 값들을 계산하기 위해 보간하였다. 그러나 이 방법은 실제의 초점 거리(effective focal length)와 주점의 앞, 뒤의 위치(location of the front and back principal points)를 계산하기 위하여 카메라로부터 렌즈를 분리하고 광학 기기들을 특별하게 배열하였기 때문에 일반적인 줌 렌즈를 보정하기에는 어렵다는 단점이 있다.

Tarabanis는 광학 기기들을 특별하게 배치하여 줌 렌즈의 이미지 변수들을 계산하였지만, 줌 렌즈의 렌즈 설정들을 고정시킨 후 고정 렌즈 보정을 할 수 있다. 그러나 이 방법도 모든 렌즈 설정들에 대한 카메라 파라미터들을 저장하여야 하므로, 계산량과 저장공간이 커지게 된다. Willson[6]은 Tsai의 고정 렌즈 보정 방법으로 일정 간격의 각 렌즈 설정들과 카메라 변수들 사이의 관계를 이변량 다항식을 이용하여 모델링하였다. 고정렌즈 보정방법으로 모든 렌즈 설정에 대한 카메라 파라미터들을 저장하기 위해서는 많은 저장공간이 필요하게 되지만, 이변량 다항식으로 모델링하였기 때문에 다항식의 계수만으로 연속된 렌즈 설정 단계들의 파라미터 값들을 계산할 수 있다. 렌즈 설정에 대해 계산된 모든 카메라 파라미터들을 저장하는 것보다 다항식의 계수만을 저장한다면 저장공간을 상당히 절약할 수 있다.

줌 렌즈의 설정들은 렌즈 설정을 조정하는 모터의 단계에 따라 굉장히 많은 단계에 대하여 보정 값들을 계산하여야 한다. 효과적으로 모든 단계의 렌즈 설정의 보정 값들을 계산하기 위하여 보간법을 사용하여 모든 렌즈 설정이 아닌 일정량의 렌즈 설정에 대해서 파라미터를 구하고 중간 값들을 보간 하는 방법을 이용하고 있다. 그러나 최소한으로 렌즈 설정 단계를 이용하여 보정하기 위해 모든 렌즈 설정 단계 중 보정 계산에 사용되는 적절한 렌즈 설정 단계를 결정하여야 한다. 이를 위하여 Chen[7] 등은 캘리브레이션 온 디맨드 방법(calibration-on-demand)

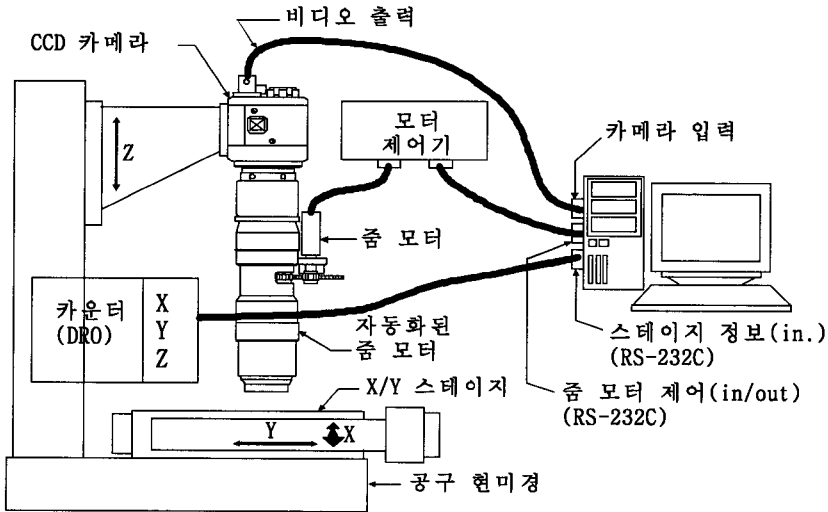
을 소개하였다. 캘리브레이션 온 디맨드 방법은 줌 렌즈의 적절한 렌즈 설정 단계를 결정하기 위한 보정 절차라고 볼 수 있다. 보정에 사용될 렌즈 설정 단계를 결정하기 위해서 보정 절차는 먼저 가장 간격이 큰 렌즈 설정 단계들에서 렌즈를 보정하여 오차를 계산하고 계속적으로 간격을 좁히면서 오차를 줄여가는 방식이다. 이런 절차에 의해서 가장 적절한 렌즈 설정 단계들을 결정할 수 있어서 적절한 오차 내에서 최소의 렌즈 설정 단계에 대한 줌 렌즈 보정으로 모든 렌즈 설정에 대한 보간을 할 수 있다.

3. 정밀측정장비

정밀 측정 장비는 물체의 X, Y, Z축 점들의 값들을 정밀하게 측정하여 하나의 물체전체를 측정하는 장비이다. 측정된 점들은 기하학적인 형상들로 정합(fitting)되고, 정합된 형상은 물체의 설계치와 비교하여 기하학적인 차이를 검사한다. 이런 장비를 통칭하여 CMM(coordinate measuring machine)이라고 하고 제조 산업체에서 생산품의 검사와 품질 제어 공정에서 널리 사용되고 있다.

현대에 와서는 제조 시스템이 자동으로 이루어지게 되어 자동으로 생산품을 검사하기 위한 시스템이 더욱 필요하게 되었고, 이에 CMM은 정확성과 빠른 속도, 유연성으로 대중화되었으며 지속적인 발전으로 다양한 감지 기법이 도입되고 있다. 감지 기법은 크게 접촉식과 비접촉식 두 가지로 나누어진다. 접촉식은 접촉 탐침(probe)을 사용하여 직접 측정하려는 물체의 면을 접촉시켜서 물체를 측정하는 방법이고 비접촉식은 컴퓨터 비전이나 레이저를 이용하여 물체에 접촉하지 않고 물체를 측정하는 방법이다.

컴퓨터 비전을 이용한 CMM은 일반적으로 CCD 카메라와 렌즈, 렌즈에 빛을 주기 위한 조명, 카메라에서 이미지를 디지털화하기 위한 프레임 그라버(frame grabber)와 스테이지 장비로 구성되어 있다.



〈그림 2〉 VMS의 구성 요소들

CMM은 카메라, 그레버 등과 같은 비디오 장비에 의해서 물체를 측정하기 때문에 VMS(video measuring system)이라고 불리기도 한다. 이 VMS는 CMM의 평면 스테이지 위에 놓인 물체를 조명에 의해서 빛을 반사시켜 렌즈를 통하여 CCD 카메라에 의하여 영상이 촬영되고, 그 영상은 프레임 그레버에 의해서 컴퓨터로 디지털 신호로 보내져서 이미지로 획득된다. 획득된 이미지는 영상 처리를 통하여 물체의 윤곽 좌표 값들을 추출하게 된다.

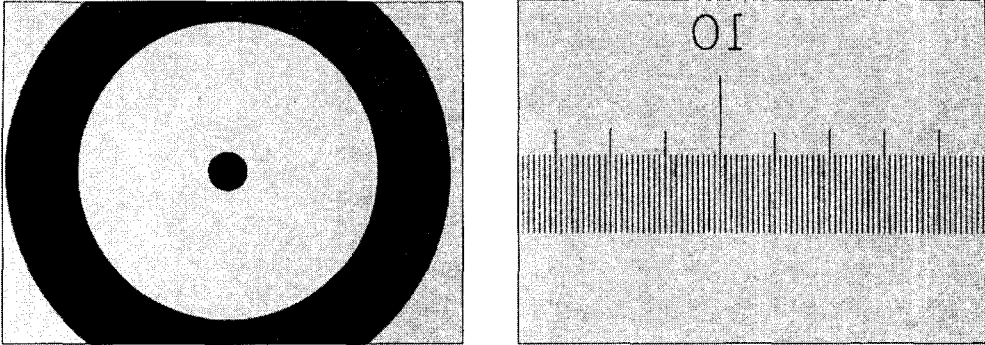
본 논문에서 사용하는 정밀측정장비는 그림 2와 같이 줌 렌즈가 장착된 영상획득장치가 부착된 장비로서, 줌 렌즈를 이용하여 물체를 확대하고, 스테이지의 X, Y, Z축의 방향 이동을 정밀한 단위로 표시하는 DRO(digital read out)를 통하여 물체의 치수를 측정하는 장비이다. 스테이지의 X축과 Y축의 평행 이동과 스테이지와 직각인 렌즈와의 높이를 조절하는 Z축의 3가지 축에 대한 이동량을 측정할 수 있고 읽은 치수는 장착된 카운트(또는 DRO)를 통하여 사용자에게 보여지거나 컴퓨터로 전달된다. 또한 컴퓨터에서 지정된 치수로 스테이지를 이동 시킬 수 있으며, 모터로 구동 되는 줌을 가진 줌 렌즈를 제어할 수 있다.

4. 정밀측정장비를 위한 줌 렌즈 캘리브레이션

일반적인 줌 렌즈에 적용하는 보정 기법을 VMS에 장착된 줌 렌즈를 보정하기 위하여 적용하기는 상대적으로 복잡한 면들이 있다. 조리개, 초점 및 줌 제어와 같은 줌 렌즈의 제어 가능한 요소들 중에서, VMS에서의 줌 렌즈는 고정된 조리개를 사용하고 빛의 양은 VMS의 조명장치를 이용하여 조절하므로, 렌즈 보정작업에서 조리개의 보정작업은 생략할 수 있다. 또한 조리개 제어가 초점 거리에 큰 영향을 미치지 않으므로, 일반 줌 렌즈 보정작업에서도 조리개 제어를 생략하는 경우도 있다[7,11].

VMS에서는 줌 렌즈의 피사계 심도의 특성을 이용하여 줌 렌즈를 보정하기 위해 줌 렌즈의 최고 줌 배율에서 카메라와 피사체간의 거리를 조정하여 가장 알맞은 초점으로 맞추고 나서 보정을 수행하기 때문에 초점 제어를 변경시키면서 보정할 필요가 없다. 그러므로 VMS에서는 초점 제어를 고정하여 사용하고, 따라서 초점 제어 보정작업을 생략할 수 있다.

이와 같이 VMS에서의 줌 렌즈는 조리개와



〈그림 3〉 최소 줌 배율에서의 원과 자 레티클

초점 제어를 고정시키고 줌 제어만을 가능하도록 만들어져 있기 때문에 보정해야 하는 렌즈 제어를 줌으로만 간주한다. 조리개와 초점 제어가 고정되면 줌 제어와 카메라 변수들 사이의 관계만 계산하면 줌 렌즈를 보정할 수 있다.

줌 제어를 이용하여 줌 렌즈를 보정하기 위해서는, 줌의 각 단계를 고정 렌즈처럼 계산하여 각 줌 단계에 대한 카메라 변수 값들을 저장한다. 모든 줌 단계에 대한 변수 값들을 계산하기에 비효율적이기 때문에 보간법으로 중간 단계의 변수 값들을 유추한다. 조리개와 초점 제어는 고정이기 때문에 줌 제어에 따른 변수 값들의 일차원 배열의 테이블을 구성하여 줌렌즈를 보정한다. 본 절에서는 이와 같이 줌 제어만을 이용하여 줌 렌즈를 캘리브레이션하기 위한 새로운 방법에 대하여 설명한다.

줌 렌즈를 보정하기 위해서는 실제의 거리 값을 알고 있는 패턴을 가지는 캘리브레이션 레티클(reticle)이 있어야 하며, 레티클의 보정 패턴을 CCD 카메라로 획득한 후 패턴의 거리 값을 측정하여 실제의 거리 값과의 차이를 이용하여 렌즈를 보정한다. 이런 작업을 수행하기 위해서는 우선 렌즈를 통하여 CCD 카메라로 획득한 영상의 실제 크기를 알아야 그 크기에 맞는 보정 패턴으로 렌즈를 보정할 수 있다. 이 영상의 실제 크기를 FOV(field of view)라고 하고 FOV안에

들어오는 보정 패턴을 추출하여 렌즈를 보정하게 된다. 그러나 줌 렌즈의 경우 이 FOV의 크기가 줌 배율에 따라서 변하므로 하나의 줌 배율에 맞는 보정 패턴만으로는 한계가 있다. 본 절에서는 이러한 문제에 대한 해결책을 기술한다.

4.1 캘리브레이션 패턴

VMS의 줌 렌즈 보정을 위하여, 보정 패턴으로는 정확한 크기를 모르는 원 레티클과 정확한 길이를 알고있는 자 레티클을 사용하였다. 그림 3은 1/2" CCD 카메라를 사용하여 줌 렌즈의 최소 배율에서의 원 레티클과 자 레티클을 보여주고 있다.

4.2 보정 변수와 보정 방법

줌 렌즈는 줌 단계의 변화에 의해 초점 거리가 변경되고, VMS에서 줌 배율에 따라 FOV 크기가 변한다. 그러므로 줌 렌즈를 보정하기 위한 하나의 변수로써 줌 배율에 따른 FOV내의 한 픽셀 크기의 변화를 계산해야 한다. 또한 줌 렌즈의 광 축이 정확하게 스테이지와 직각으로 설치하기가 쉽지 않기 때문에 줌이 변할 때 영상 중심이 이동하게 된다. 줌 렌즈를 보정하기 위한 또 다른 하나의 변수로써 줌 배율에 따른

중심 이동 좌표 값의 보정이 요구된다.

VMS의 줌 렌즈는 장비의 스테이지에 직각으로 장착되어 있기 때문에 카메라의 회전이나 이동이 없으므로 외부변수에 의한 보정이 필요하지 않다. 그러나 줌 렌즈의 줌 단계 변화에 따라 내부변수들의 값이 변하게 된다. Tsai[9]는 카메라 모델에 의해 렌즈를 보정하였지만 모델링에 의한 작은 오차도 VMS의 줌 렌즈에서는 큰 오차를 보이기 때문에 FOV내에서의 측정 시 측정값에 직접적으로 관련이 있는 가로, 세로 픽셀의 크기와 중심 이동 값을 보정한다.

렌즈 왜곡의 종류에는 방사형 왜곡과 분산형 왜곡이 있으며[9], 이러한 왜곡값들을 보정하여야만 더 정확한 측정치를 얻을 수 있다. 줌 렌즈의 특징중의 하나는 저배율일 경우가 고배율일 경우 보다 렌즈의 중심 부분에서 더 먼 곳까지 빛이 들어오게 되므로 왜곡이 더 심해지는 것이다. 렌즈는 렌즈의 중심으로부터 멀어질수록 질수록 왜곡이 더 심해지기 때문에, 동일한 CCD 상에 더 넓은 면적을 보기 위해서 렌즈의 중심 부분에서 더 넓은 곳에서 받은 빛까지 사용하고 적은 면적을 보기 위해서 중심 근처 부분에서 들어오는 빛만을 사용하게 된다. 일반적으로 VMS에서 사용하는 렌즈는 왜곡수치가 상당히 개선되어 무시할 정도이므로, 렌즈의 왜곡에 의한 보정은 무시하기로 한다.

(1) 픽셀 크기의 변화

FOV상의 한 픽셀 크기는 컴퓨터의 이미지 화면상의 한 픽셀이 실세계에는 실제 얼마의 크기인지를 나타낸다. 줌이 변화함에 따라 이 한 픽셀의 크기도 함께 변화를 하게 된다. FOV상에서 한 픽셀의 크기는 카메라 변수 값인 CCD 셀의 가로 크기인 d_x 와 세로 크기인 d_y 에 렌즈의 배율을 곱한 값과 비슷하다. Tsai[9]의 렌즈 보정 방법에서는 이 CCD 셀의 가로 크기와 세로 크기인 (d_x , d_y)값을 카메라 제조자의 명서의 값으로 입력해주고 있지만, 렌즈의 정확한 배율을 계산하기가 어려우므로 정확한 값을 알기

위해서 렌즈를 통해 이미지로 획득한 영상을 직접 측정하여 계산한다.

이를 위하여 정밀한 자 레티클을 이용하여 픽셀의 가로, 세로의 크기를 정확하게 계산하여 보정한다. 일반적으로 VMS에서 사용하는 줌 렌즈는 왜곡수치가 상당히 개선된 렌즈이기 때문에 FOV상의 모든 픽셀의 크기가 같다고 가정하며, CCD의 셀은 가로와 세로의 크기가 다르므로 자 레티클을 셀의 가로와 세로로 위치시켜서 픽셀의 가로, 세로 크기를 각각 계산한다..

VMS에서 사용하는 줌 렌즈에서는 조리개를 고정시켜 놓았기 때문에 빛은 고정된 양으로 들어온다. 그러나 줌을 변화하게 되면 FOV의 크기가 달라지게 되어 들어오는 빛의 양이 변하기 때문에 빛의 세기도 보정하여 주어야 한다. 그러나 빛의 강약에 의한 차이는 아주 심하지 않고 백 라이트를 사용하여 물체의 윤곽에 대한 에지들을 추출하기 때문에 빛의 세기에 대한 보정을 하지 않는다.

(2) 이미지 중심의 이동

줌 렌즈는 VMS의 스테이지에 직각으로 설치되고, CCD 카메라는 줌 렌즈와 마운트(mount)를 통하여 연결된다. 줌 렌즈의 광 축은 장비의 스테이지와 직각이어야 하고 카메라는 장비의 스테이지와 평행하여야 한다. 그러나 기계적으로 줌 렌즈의 광 축을 맞추거나 카메라를 정렬할 때 CCD 카메라와 줌 렌즈를 연결하는 마운트를 이용하여 보정한다. 그러므로 줌 렌즈의 광 축을 맞추고 나서 카메라와 스테이지의 평행성을 맞추면 줌 렌즈의 광 축이 틀어지게 되는 현상이 발생한다. 이 두개의 보정을 계속적으로 맞추어야만 두 보정이 정확하게 맞추어지지만 쉬운 작업이 아니다. 실제로 VMS의 장비 보정 절차에서는 고 배율에서 카메라의 회전을 보정하는데 이 회전 보정 때문에 줌 렌즈의 광 축이 변하게 된다. 그러므로 카메라 회전 보정과 줌 렌즈의 광 축을 기계적으로 동시에 보정하기 위해서는 전문가라도 여러 번의 보정 시도를 하게

되고 VMS 제조 업체들도 장비 내부 규칙으로 $\pm 5\mu\text{m}$ 의 허용오차를 두고 있기 때문에 정확한 보정이 어렵다는 것을 알 수 있다.

논문에서는 원 레티클을 이용하여 원의 중심 값을 측정하여 줌 단계 변화에 따른 이미지 중심 값의 이동을 보정한다. 이 이미지 중심 값은 카메라 변수에서 C_x 와 C_y 에 해당하는 값과 같은 의미이다.

(3) 픽셀 크기와 중심이동의 보정

위에서 설명한 바와 같이 렌즈 보정을 위해서는 픽셀 크기와 중심 이동만을 고려하기로 한다. 픽셀 크기를 나타내기 위하여 f_x 를 가로 크기, f_y 를 세로 크기로 정의하고, 중심 이동에 대한 보정을 위하여 (o_x, o_y) 를 중심점으로 정의한다. 패턴의 실제 값을 (x_w, y_w, z_w) 이라고 할 때 측정된 값을 (x_f, y_f) 로 정의한다.

다음 식 (1)은 픽셀 크기와 중심 이동의 변수를 이용하여 측정값 (x_f, y_f) 으로부터 실제값 (x_w, y_w, z_w) 를 계산하는 식이다.

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x \\ 0 & f_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 실제의 패턴 값에서 z값은 모두 같은 평면으로 사용하기 때문에, z의 값을 1로 고정한다. 가로 픽셀 크기인 f_x 에 이미지 좌표계의 한 점인 x 방향 위치인 x_f 를 곱하게 되면 실제 좌표 값에의 x 방향의 위치가 계산된다. 그러나 이 값은 모든 줌 배율에 대해서 중심 값이 맞아야 하기 때문에 줌 배율에 따른 x방향 중심 값인 o_x 를 더해준다. y 방향에 대해서도 마찬가지로 계산하여 좌표 값들을 보정한다.

f_x 의 값은 측정된 두 개 선분의 픽셀 거리에 대한 패턴상의 실제 거리값이기 때문에 첫번째 선분의 x_f 에서 두 번째 선분의 x_f 를 빼준 값에

실제 값으로 나누어 f_x 를 구하고 f_y 에 대해서도 같은 방식으로 계산한다. 따라서 f_x 와 f_y 는 다음 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$f_x = \frac{x_w(mm)}{|x_{f2} - x_{f1}|_{(pixel)}} \quad f_y = \frac{y_w(mm)}{|y_{f2} - y_{f1}|_{(pixel)}} \quad (2)$$

4.3 보간법에 의한 줌 캘리브레이션

모터로 구동 되는 줌 제어의 단계는 모터에 따라서 다르지만, 수 백에서 수 만 단계까지 제어 가능하다. VMS에서 사용될 자동화된 줌 렌즈들도 서보 모터로 구동 되는 줌을 사용한다. 많은 줌 단계에 대해서 모두 보정하기에는 너무 많은 시간과 노력이 들어가기 때문에 모든 줌 단계 중에서 일정 단계만으로 모든 줌 단계를 계산하기 위해서 보간법을 사용한다. 보간은 줌 단계에 따라 가로, 세로 픽셀 크기와 이미지 중심 가로, 세로 이동에 대한 변수에 대해 각각 보간하여 보정 단계에서 계산되지 않은 중간 값들을 계산한다.

보간 방법으로는 줌 배율과 중심 이동치가 선형이 아니므로 3차 스플라인 보간법(cubic spline interpolation)을 사용한다. n개의 줌 단계 x_1, x_2, \dots, x_n 에서 정의되는 3차 스플라인 보간식인 $S(x)$ 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- a) $S(x)$ 는 구간 $[x_i, x_{i+1}]$ 에서 3차 다항식 $P_i(x)$ 로 표현된다. ($i = 1, 2, \dots, n-1$)
- b) $S(x) = f(x_i) = y_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$)
- c) $P_i(x_{i+1}) = P_{i+1}(x_{i+1})$ ($i = 1, 2, \dots, n-2$)
- d) $P_i'(x_{i+1}) = P_{i+1}'(x_{i+1})$ ($i = 1, 2, \dots, n-2$)
- e) $P_i''(x_{i+1}) = P_{i+1}''(x_{i+1})$ ($i = 1, 2, \dots, n-2$)
- f) 보간식의 경계에 대한 조건은 다음과 같다.
 $P_1^-(x_1) = P_{n-1}^-(x_n) = 0$
 $P_1'(x_1) = f'(x_1), P_{n-1}'(x_n) = f'(x_n)$

구간 $[x_i, x_{i+1}]$ 에서 주어진 함수에 관한 3차

스플라인 보간식은 식 (3)과 같다.

$$S(x) = \begin{cases} P_1(x) & (x_1 \leq x \leq x_2) \\ P_i(x) & (x_i \leq x \leq x_{i+1}) \\ P_{n-1}(x) & (x_{n-1} \leq x \leq x_n) \end{cases} \quad (3)$$

각각의 $P_i(x)$ 의 식은 위 조건 e)의 2차 도함수가 x_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$)에서 연속성을 만족해야 한다는 조건에 의해 식 (4)를 유도한다.

$$P_i(x) = a_{i-1} \frac{(x_{i+1} - x)^3}{6h_i} + a_i \frac{(x - x_i)^3}{6h_i} + b_i(x_{i+1} - x) + c_i(x - x_i) \quad (4)$$

$(h_i = x_{i+1} - x_i)$

식 (4)는 조건 b)에 의해서 식 (5)의 b_i, c_i 식을 표시할 수 있다.

$$c_i = \frac{1}{h_i} \left[y_{i+1} - a_i \frac{h_i^2}{6} \right] \quad (h_i = x_{i+1} - x_i) \quad b_i = \frac{1}{h_i} \left[y_i - a_{i-1} \frac{h_i^2}{6} \right] \quad (5)$$

식 (5)을 식 (4)에 대입하면 식 (6)을 식을 얻는다.

$$P_i(x) = a_{i-1} \frac{(x_{i+1} - x)^3}{6h_i} + a_i \frac{(x - x_i)^3}{6h_i} + \left[y_i - a_{i-1} \frac{h_i^2}{6} \right] \frac{(x_{i+1} - x)}{h_i} + \left[y_{i+1} - a_i \frac{h_i^2}{6} \right] \frac{(x - x_i)}{h_i} \quad (6)$$

$(h_i = x_{i+1} - x_i)$

조건 d)에 의해서 x_{i+1} ($i = 1, 2, \dots, n-2$)에서 1차 도함수 값이 같아야 한다. $P_i(x_{i+1})$ 와 $P_{i+1}(x_{i+1})$ 의 식을 구하여 두 식이 같을 때의 조건식을 구하면 식 (7)의 관계가 성립된다.

n 개의 미지수인 a_i ($i = 0, 1, \dots, n-1$)에 대해 식 (7)은 $(n-2)$ 개의 방정식을 갖는다. n 개의 미지수를 해결하기 위해서는 $(n-2)$ 개의 방정식에서 2가지의 조건이 더 필요하다. 이 조건은

조건 f)에서 선택한다.

$$\begin{aligned} & \frac{h_i}{6} a_{i-1} + \frac{h_i + h_{i+1}}{3} a_i + \frac{h_{i+1}}{6} a_{i+1} \\ &= \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \\ & (h_i = x_{i+1} - x_i) \\ & (i = 1, 2, \dots, n-2) \end{aligned} \quad (7)$$

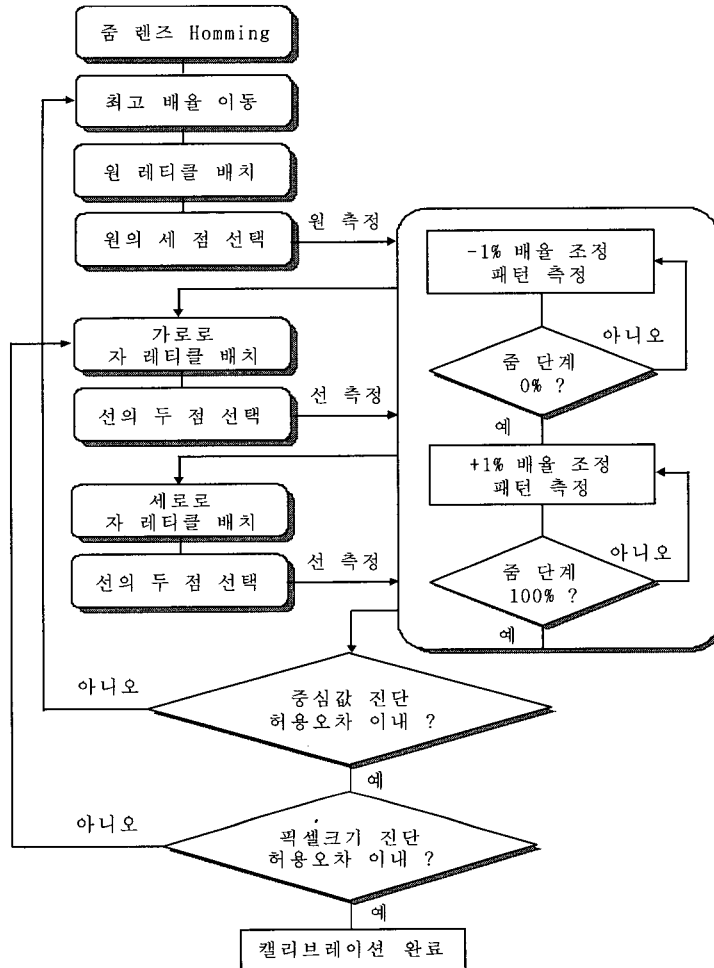
4.4 캘리브레이션 절차

줌 렌즈는 줌 단계마다 초점거리가 달라지면서 영상의 이미지 배율이 변한다. 줌 렌즈를 보정하기 위하여 줌 단계마다 변하는 이미지 특징들을 각 줌 단계마다 측정하여 줌 단계들의 렌즈 보정값들을 계산한다. 이 보정 값들은 테이블에 저장되고 이 보정 값을 이용하여 정확한 물체 측정을 할 수 있도록 렌즈를 보정한다. 그러나 줌 단계를 조정하는 모터의 단계 단계가 많기 때문에 모든 줌 단계에서 보정 값들을 계산해서 저장하는 것은 비효율적이다. 따라서, 적절한 줌 간격 사이의 줌 단계에서 보정 값들을 계산하여 저장해 두고, 세밀한 줌 배율에서는 저장된 보정 값들을 보간하여 근사한 보정 값들을 계산하여 사용한다.

그림 4는 줌 렌즈를 사용하는 VMS에서 줌 렌즈 보정을 위한 절차를 나타낸다. 줌 렌즈의 1% 배율마다 줌 단계를 설정하고, 원 레티클과 자 레티클을 이용하여 +1% 그리고 1%의 줌 단계의 방향성으로 원과 선분을 측정하여 보정 변수를 계산한다. 그러나 보간법을 사용할 경우에는 적절한 단계의 줌 단계로 보정 변수들을 측정하여 보간법을 사용하여 모든 줌 단계의 보정 변수들을 계산한다.

5. 실험 및 결과 분석

VMS에 설치된 줌 렌즈의 보정작업은 그림 4에서와 같이 원 레티클과 자 레티클을 이용하여 보정 변수인 줌 단계에 따른 원점 이동과 가로,



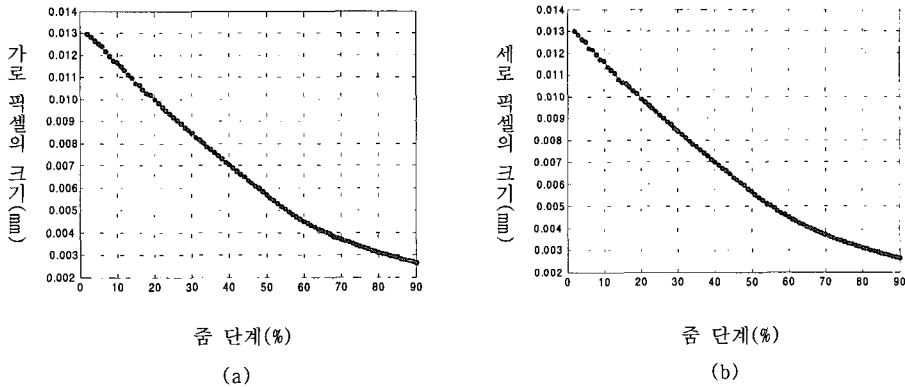
〈그림 4〉 VMS에 설치된 줌 렌즈 캘리브레이션 절차

세로 픽셀의 크기를 측정하여 보정한다. 보정 절차는 캘리브레이션 절차에 따라서 먼저 원 레티클을 이용하여 줌 단계 변화에 따른 원점 이동치를 측정하고 자 레티클을 이용하여 가로와 세로 픽셀 크기를 측정한다. 줌 단계를 100% 단계로 나누어 1% 간격의 줌 단계에 따라 보정을 하여 보정 변수들을 계산하고 넓은 간격의 보정 변수 값들로 모든 줌 단계에 대한 보정 변수들을 계산하기 위하여 3차 스플라인 보간법을 사용하여 가장 적절한 간격의 줌 단계를 선택하고 계산된 보정 변수들로 원을 측정하여 평가한다. 본 실험에

서는 1/2" CCD 를 가진 Hitachi KP-D20B 카메라와 0.7x~4.5x의 줌 배율을 가지는 Navitar Zoom 6000 줌 렌즈를 사용하였다.

5.1 보정 변수 측정

보정 변수인 줌 단계의 변화에 따른 이미지 원점 이동과 가로와 세로 픽셀 크기를 측정한다. 이론적으로 이 값들은 원이 고정되어 있는 물체이기 때문에 모든 줌 단계에서 동일한 수치를 보여야 한다.



〈그림 5〉 줌 단계에 따른 픽셀의 크기: (a) 가로 픽셀 (b) 세로 픽셀

(1) 픽셀의 가로, 세로 크기

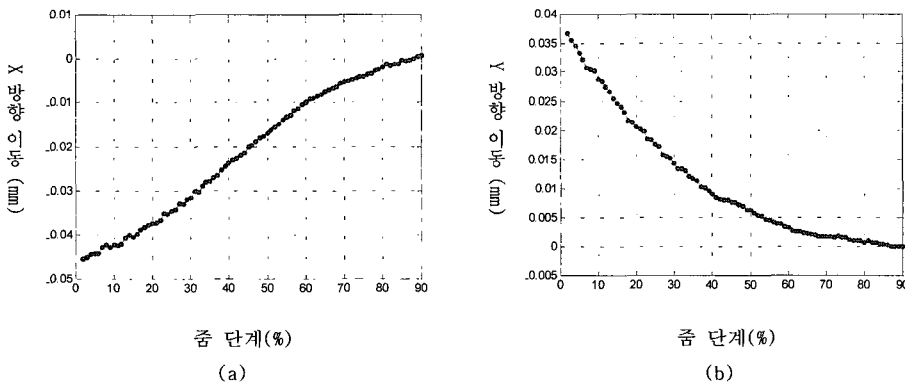
줌 단계에 따라 자 레티클의 수직선과 수평선 각각 두 개씩의 간격을 측정하여 가로와 세로 픽셀의 크기를 측정한다. 픽셀의 가로 크기를 측정하기 위해 줌 단계 90%에서 자 레티클의 눈금으로 수직으로 놓고 사용자가 측정하기 원하는 두 선을 선택하여 선택한 수직선 간격의 실제 길이를 입력한다. 줌 단계 변화에 따라 두 수직선의 간격이 측정되고 실제 길이를 간격의 픽셀 길이 수치로 나누면 가로 방향의 한 픽셀 크기를 계산할 수 있다.

그림 5는 각각 줌 단계에 따라 픽셀의 가로 크기와 세로 크기 값을 보여주고 있다. CCD 셀

의 가로와 세로 크기 비율이 프레임 그래버의 가로, 세로 버퍼 비율과 비슷하기 때문에 픽셀의 가로와 세로 크기는 작은 차이를 보인다.

(2) 이미지 중심 이동

줌 단계에 따라 원 레티클의 원을 측정하여 가로와 세로 방향으로 중심이 얼마나 이동하는지를 측정한다. 줌 단계 90%에서 원 레티클의 원을 이미지의 중심에 위치시킨 후 측정된 원의 중심으로 원점을 맞추고 줌 단계 변화에 따라서 원의 중심 변화를 픽셀 값으로 계산한 후 측정된 중심 픽셀 변화 값에 가로와 세로 픽셀 크기를 곱하여 mm 단위의 값으로 도시한다. 그림 6은 줌 단계에 따른 원의 중심이 이동치를 mm 단위로 보여주고 있다.



〈그림 6〉 줌 단계에 따른 원 중심(X,Y)의 이동(mm): (a) X (b) Y

5.2 실제 물체 측정을 통한 평가

원 레티클과 자 레티클을 이용하여 줌 단계 2%에서 90%사이를 1% 간격으로 측정된 보정 변수들을 이용하여 실제 물체를 측정한다. 여기서는 마이크로미터 단위로 정확히 알고 있는 물체를 구하기 힘들기 때문에 보정 변수에서 이용한 원 레티클을 이용하여 실제 물체를 측정한다. 물체는 고정시켜 놓고 줌 단계만을 변화하면 고정된 물체이기 때문에 줌 단계가 변화해도 물체의 치수는 변하지 않는다. 그러므로 원 레티클 측정시 줌 단계에 따라서 원의 중심과 원의 직경을 측정하여 보정 변수의 값을 평가한다.

표 1은 줌 렌즈 보정 후에 줌 단계 2%~90% 사이를 1% 간격으로 원의 중심과 직경을 측정 한 후, 그 표준편차와 오차범위를 나타낸다. 오차범위는 최대오차와 최소오차를 더한 값이다. 오차범위가 원의 중심에서는 $2\mu\text{m}$ 정도이고, 원의 직경은 $6\mu\text{m}$ 정도이다. 여기에서 저 배율에서 비교적 큰 오차범위를 갖는 것을 볼 수 있는데, 이는 줌 단계가 낮아질수록 픽셀의 크기가 커지므로 서브 픽셀 보간법(sub-pixel interpolation)의 오차에 아주 민감해지기 때문에 반복 정밀도에 영향을 주고 줌 단계가 작아질수록 영상처리의 중요성이 커지게 됨을 알 수 있다.

5.3 보간법을 이용한 실제 물체 측정을 통한 평가

5.2절에서 계산된 보정 변수들은 줌 단계 2%~90% 구간에서 1% 간격으로 계산한 것이다. 그러나 이 계산값은 89개 단계를 모두 측정하여

〈표 1〉 줌 렌즈 보정 후 줌 단계에 따른 원의 중심과 직경의 오차

	표준 편차(mm)	오차범위(mm)
원의 중심(X)	0.0003112	0.0017840
원의 중심(Y)	0.0002941	0.0016580
원의 직경	0.0011550	0.0064850

계산하였고, 이와 같이 많은 단계를 측정할 경우에는 많은 시간과 노력이 든다. 따라서 실제로는 미리 1% 이상의 구간에 대하여 보정변수를 계산하고, 필요시 보간법을 이용하여 1%간격에 대한 보정변수를 추출하여 사용하게 된다.

표 2는 실험적으로 2%~90%의 줌 단계 구간에서 4%, 10%, 20% 등간격으로 각각 23개, 11개, 6개의 줌 단계를 선택하여 보정변수(원의 중심과 직경)를 계산하고, 보간법으로 1% 간격으로 89개의 줌 단계로 보간된 보정 변수들을 계산하여 줌 렌즈를 보정한 후, 원을 측정하여 원의 중심과 직경에 대한 측정치에 대한 오차를 보여주고 있다. 보간법으로는, 그림 5, 그림 6의 1% 간격으로 계산된 보정 변수 그래프에서와 같이 보정변수 값들이 배율에 따라 곡선을 이루고 있기 때문에 4.3 절에서 기술한 3차 스플라인 보간법을 사용하였다. 여기에서 4% 간격을 이용한 경우에는 표 1의 보간법을 사용하지 않은 결과 수치보다 더 많은 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 23개의 줌 단계에서만 보정 변수들을 측정하여 89개 줌 단계의 보정 변수로 보간할 때의 중간 단계들의 보간 오차로 인하여 오차가 발생한다. 10% 간격을 이용한 경우에는 4% 줌 단계를 선택하여 보간한 수치보다 더 좋은 결과를 보이고 있다. 그러나 20% 간격을 이용한 경우에는 10% 간격을 이용한 경우보다 더 나쁜 결과를 보이고 있다.

이는 10% 줌 단계에서 보정 변수로 측정된 값들로 중간 보정 변수들을 계산하기 때문에 측정 오차가 작아지고, 그림 5, 그림 6과 같은 1% 간격으로 보정된 보정 변수의 곡선과 유사한 그래프를 만들 수 있으므로 중간 보정 변수들의 보정 오차를 상당히 줄여 주고 있다. 이런 실험 결과는 더 적은 수의 보정 변수로 곡선 그래프의 보간법을 사용한다면 더 좋은 결과를 보여 줄 수 있다고 생각되지만, 20% 줌 단계를 선택한 예에서와 같이, 더 적은 수로 보정 변수로 측정된 값으로 보간을 할 경우 너무 넓은 간격

〈표 2〉 23개, 11개, 6개의 줌 단계로 보정한 후 측정한 원의 중심과 직경의 오차

단계	측정	표준 편차(mm)	오차범위(mm)
23개 (4% 간격) 보간법	원의 중심(X)	0.0004344	0.003274
	원의 중심(Y)	0.0004921	0.003204
	원의 직경	0.0013420	0.007006
11개 (10% 간격) 보간법	원의 중심(X)	0.0003869	0.001687
	원의 중심(Y)	0.0004173	0.002915
	원의 직경	0.0013810	0.006241
6개 (20% 간격) 보간법	원의 중심(X)	0.0005981	0.002726
	원의 중심(Y)	0.0004862	0.002985
	원의 직경	0.0062420	0.024890

으로 중간 보정 변수들이 계산되기 때문에 오차가 커진다.

이와 같이 보간한 수치를 계산하는 시간을 줄이기 위하여 너무 많은 보간간격을 설정하게 되면 오차가 커질 수 있으며, 너무 좁은 보간간격을 설정하게 되면 보간계산 시간을 많이 줄일 수 없을 뿐만 아니라, 오차가 항상 줄어들지는 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 최적의 보간간격을 설정하기 위해서는 적절한 단계를 실험적으로 선택하여 하여야 한다.

6. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 정밀측정장비에 설치된 자동줌 렌즈를 보정하는 새로운 기법을 제안하였다. 일반적으로 자동줌 렌즈를 보정하기 위해서는 세 가지 렌즈 제어장치인 조리개, 초점 그리고 줌장치와 카메라 변수들 사이의 모델링을 통한 상대적으로 복잡한 과정을 통하여 보정작업이 이루어지며, 이러한 과정을 단순화하기 위한 연구가 수행되었다[6,7]. 본 연구에서는 정밀측정장비의 특성을 이용하여 일반적인 줌렌즈를 보정하는 방법보다 상대적으로 단순화하였다. 정밀측정장비는 설치된 줌 렌즈들이 렌즈 자체에서 줌에 대한 초점을 보정하고, 조리개 제어를 통하지 않고 직접 빛의 세기를 조절함으로써 측정 대상물

의 빛 반사율을 조절하기 때문에, 자동화된 줌 렌즈의 세 가지 렌즈 제어장치인 조리개, 초점 그리고 줌 제어 중에서 줌 제어만을 자동으로 조절할 수 있도록 설계되어 있다. 따라서 조리개와 초점에 대한 보정과정이 필요하지 않으므로, 일반적인 줌렌즈의 보정작업보다는 상대적으로 단순화시킬 수 있다.

줌 단계가 바뀌면 줌 렌즈를 사용하는 카메라 파라미터 값이 바뀌고 정확한 측정을 위해서는 캘리브레이션 과정을 거쳐 새로 보정된 파라미터 값을 사용하여야 한다. 따라서 줌 단계가 바뀔 때마다 캘리브레이션 패턴을 이용하여 새로 줌 렌즈를 보정하거나, 사용할 줌 단계들에 대한 보정 파라미터 값들을 미리 계산하여 저장하고 있다가 줌 단계가 변할 때마다 적절한 파라미터 값을 선택하여 사용할 수 있다. 그러나 무수히 많은 줌 단계에 대한 파라미터 값들을 모두 계산하여 저장하기는 불가능하고, 일반적으로 적당한 간격으로 계산된 소수의 파라미터 값들을 저장하고 이들 간격 사이의 줌 단계에 대한 파라미터 값들은 보간법을 이용하여 근사화하여 사용하여야 한다.

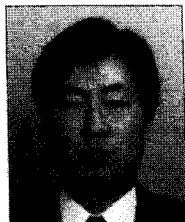
본 논문에서는 원 레티클과 정밀한 자 레티클을 이용하여 VMS에 장착된 줌 렌즈를 보정하는 방법을 제안하였다. 줌 단계에 따라 변화되는 이미지의 특징을 가로, 세로 픽셀 크기 변화와 이미지 원점 변화 등의 2가지 변수로 설정하여 보정한다. 또한, 모든 줌 단계에서의 보정 변수를 계산한 결과, 보정 변수들이 곡선을 보이고 있기 때문에 적절한 간격의 줌 단계에서의 보정 변수들을 측정 후, 모든 줌 단계에서의 변수들은 3차 스플라인 보간법을 적용하여 계산한다. 본 논문에서는 2%~90% 구역에서 1% 간격으로 나누어 보정 변수들을 측정 한 경우와 4%, 10%, 그리고 20% 간격으로 나누어 3차 스플라인 보간법을 사용하여 1% 간격의 보정 변수들을 계산하여 원 형상을 측정 한 경우를 비교한 결과, 가장 적절한 단계가 줌 단계를 10% 간격으로

11개의 줌 단계를 선택한 경우임을 보이고 있다. 그러나 적절한 단계를 선택하는 것이 실험적으로만 가능하다는 단점이 있고, 최적의 줌 단계를 구하는 방법에 대해서는 앞으로 연구가 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

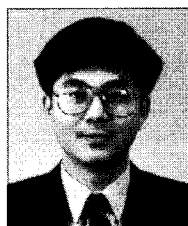
- [1] Lavest, J., Rives, G., and Dhome, M., "Three-Dimensional Reconstruction by Zooming," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.9, No.2, pp.196-207, 1993.
- [2] Lavest, J., Rives, G., and Dhome, M., "Modeling an Object of Revolution by Zooming," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.11, No.2, pp. 267-271, 1995.
- [3] Lavest, J., Delherm, C., Peuchot, B., and Daucher. N., "Implicit Reconstruction by Zooming," *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol.66, No.3, pp. 301-315, 1997.
- [4] Fayman, J., Sudarsky, O., Rivlin, E., and Rudzsky, M., "Zoom tracking and its Applications," *Machine Vision and Applications*, Vol.13, No.1, pp.25-37, 2001.
- [5] Hosoda, K., Moriyama, H., and Asada, M., "Visual Servoing Utilizing Zoom Mechanism," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 178-183, 1995.
- [6] Willson, R., *Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses*, PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1994.
- [7] Chen, Y., Shih, S., Hung, Y., and Fuh, C., "Simple and Efficient Method of Calibrating a Motorized Zoom Lens," *Image and Vision Computing*, Vol.19, No. 14, pp.1099-1110, 2001.
- [8] Kingslake, R., *Optical System Design*. Academic Press, 1983.
- [9] Tsai, R., "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.3, No.4, pp.323-344, 1987.
- [10] Tarabanis, K., Tsai, R., and Goodman, D., "Modeling of a Computer-Controlled Zoom Lens," *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1545-1551, 1992.
- [11] Li, M. and Lavest, J., "Some Aspects of Zoom-Lens Camera Calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.18, No.11, pp. 1105-1110, 1996.

◎ 저자 소개 ◎



한 광 수 (Hahn, Kwang-Soo)

1978년 서울대학교 공업교육과 졸업(학사)
1986년 Texas Tech University 대학원 전산학과 졸업(석사)
1989년 Texas Tech University 대학원 전산학과 졸업(박사)
1990년 ~ 1992년 현대전자 산업전자연구소 수석연구원
1992년 ~ 1993년 수원대학교 전임강사
1994년 ~ 현재 국민대학 컴퓨터학부 교수
관심분야 : 컴퓨터 비전, 영상처리, 패턴인식, etc.
E-mail : kshahn@kookmin.ac.kr



최 준 수 (Choi, Joon-Soo)

1984년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사)
1986년 한국과학기술원 전산학과 졸업(석사)
1989년 New York University 대학원 전산학과 졸업(박사)
1995년 ~ 1996년 한국통신 연구개발본부
1996년 ~ 현재 국민대학 컴퓨터학부 교수
관심분야 : 알고리즘 설계, 계산기하학, etc.
E-mail : jschoi@kookmin.ac.kr



최 기 원 (Choi, Ki-Won)

2000년 국민대학교 전산학과 졸업(학사)
2003년 국민대학교 대학원 전산학과 졸업(석사)
2003년 ~ 현재 (주)브이에스테크 R&D팀 선임연구원
관심분야 : 컴퓨터 비전, 자동시각검사, etc.
E-mail : kwchoi@vstech.co.kr