머신비전 시스템에서 레이저 정밀 가공을 위한 렌즈 수차 보정 방법

박양재*

The Lens Aberration Correction Method for Laser Precision Machining in Machine Vision System

Yang-Jae Park*

요 약 본 논문은 머신비전시스템에서 정확한 이미지 획득을 위한 방법을 제안한다. 각종 렌즈에서 요구되는 가장 중요한 기능으로는 실물과 동일한 고품질의 결상을 구현하는 광학적 역할이다. 그러나 머신비전시스템의 입력부에서는 렌즈의 수차로 인하여 왜곡현상이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 실세계 좌표계와 영상 좌표계 간의 변환 관계를 정의해주는 매핑 기능으로, 행렬연산을 통하여 두 좌표간의 거리를 계산하여 정확한 위치를 지정하게 된다. 레이저 정밀 가공작업에서도 Galvanometer를 사용하면 비구면 초점 렌즈에 의하여 발생되고 있는 렌즈 수차를 보정하여야 가공 오차를 개선 할 수 있다. 비구면 렌즈의 수차는 2차원 곡선의 형태를 가지고 있으나, 기존의 렌즈 보정 방법인 선형방법은 매우 많은 점들을 검사하여 보정시간이 많이 소요되는 문제점이 있었다. 가공장비에서 렌즈의 수차로 인하여 발생하는 가공오차를 감소시키기 위하여 Bilinear interpolation 기법을 적용하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 기존 선형방법과 비교하여 위치 오차의 평균값과 표준편차가 향상되었음 실험을 통하여 입증하였으며 실제 레이저 응용업무에 적용하고 있다.

주제어 : 머신비전시스템, 렌즈수차보정, 이미지 처리

Abstract We propose a method for accurate image acquisition in a machine vision system in the present study. The most important feature is required by the various lenses to implement real and of the same high quality image-forming optical role. The input of the machine vision system, however, is generated due to the aberration of the lens distortion. Transformation defines the relationship between the real-world coordinate system and the image coordinate system to solve these problems, a mapping function that matrix operations by calculating the distance between two coordinates to specify the exact location. Tolerance Focus Lens caused by the lens aberration correction processing to Galvanometer laser precision machining operations can be improved. Aberration of the aspheric lens has a two-dimensional shape of the curve, but the existing lens correction to linear time-consuming calibration methods by examining a large number of points the problem. How to apply the Bilinear interpolation is proposed in order to reduce the machining error that occurs due to the aberration of the lens processing equipment.

Key Words : Machine Vision System, Lens aberration Correction, Image Processing

1. 서론

약 10년 전부터 제조업 분야에서는 높은 품질과 비용 절감 이라는 목표 달성을 위해 Laser Application 시스템을 도입하였다. 최근의 향상된 광학 기술과 Laser 응용 기술 그리고 제어 기술은 과거의 이러한 목표를 현실화 시켜주고 있다. 일상생활에서 자주 볼 수 있는 Barcode,

※ 본 논문은 2012년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임(GCU-2012-R224)
*교신저자 : 박양재, 가천대학교 IT대학 컴퓨터공학과 교수
논문접수: 2012년 10월 18일, 1차 수정을 거쳐, 심사완료: 2012년 11월 15일

Serial Number 및 Character 등의 Laser Marking Machine에서부터 반도체 Drilling Machine, Cutting Machine, 의료 분야 , 태양광 분야, 이동통신 분야 등 이제는 Laser Application 적용되지 않은 분야는 없다고 해도 과언이 아니다. Laser 공정은 기존의 화학공정 및 물리적인 공정에서 발생 할 수 있는 유해 가스 및 환경오염을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있어 전 세계적인 정책으로 발전이 되어 가고 있다.

현재 Laser Application에서 일반적으로 적용되며, 현재 꾸준히 개발되고 있는 대표적인 가공 기술인 Scanner를 활용한 방법이 많이 사용되고 있다. Laser 가공 장비에서 Laser의 초점을 형성할 때 F-Theta Lens의 수차로 인한 오차를 Galvanometer Motor의 Calibration을 통하여 해결하는 기존의 선형 알고리즘이 많이 사용되고 있다[4].

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 관련연구로 이론적 배경 및 관련기술에 대하여 설명하고, 3장은 본론으로 기존 알고리즘과 제안 알고리즘의 비교분석 하였으며, 4장에서는 실험으로 제안 알고리즘을 실험하고 평가하며, 5장에서는 결론과 향후 연구를 기술한다.

2. 관련연구

비구면 렌즈시장은 전자제품의 기술방향이 종래 Meca-electronic에 Optics가 추가되어 광학 제품화 되는 추세에 힘입어 급격한 수요증가가 예측되는 시장으로 광통신용, 의료기기용 Micro 렌즈, 픽업용, 레이저 프린터용 Hologram 렌즈, 2초점 비구면 렌즈, Sensor렌즈, Display용 렌즈 등의 차세대 광학렌즈시장은 IT 산업의 급속한 발전과 더불어 그 용용분야는 매우 다양하여 수요는 폭발적으로 증가할 것으로 예상되고 있으며 초정밀 가공기 및 가공기술의 개발이 시급히 이루어져야할 것으로 생각된다. 따라서 비축대칭 비구면 광학계를 사용함으로서 광학계가 소형, 경량으로 되며 광학계의 취부조정이 용이할 뿐만 아니라 상의 뒤틀림이 작아진다는 잇점이 생기기 때문에 최근의 비구면화의 움직임이 새로이 전개되어지고 있고, 광학성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이중에서 F-theta 렌즈는 광학계의 핵심부품이다[2].

Machine Vision System에서는 CCD Sensor와 Lens, 획득된 이미지간의 보정을 위하여 Camera Calibration을 하게 된다. 이는 카메라에서 렌즈에 의해 화면에 왜곡되어 보여 지는 현상이 발생하여, 이를 해결하기 위해 실세계 좌표계와 영상 좌표계 간의 변환 관계를 정의해주는 매핑 기능으로, Matrix 연산을 통하여 Camera Pixel 좌표와 Real 좌표간의 거리를 계산한다. 그러므로 Laser Scanner 또한 Vision System과 같이 광원을 Objective Lens에 투과를 하여 가공을 하는 방식이므로 정확한 Real Position에 가공을 하여야 한다는 점은 동일하다[5][11].

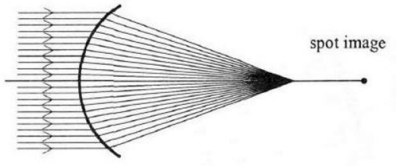
2.1 렌즈의 수차

렌즈는 설계 방법에 따라 구면 렌즈와 비구면 렌즈로 나뉠 수 있으며, 구면 렌즈는 표면이 구형태이며, 비구면 렌즈는 표면이 평면의 형태이다. 현재 대부분의 광학계는 고기능, 고품질 광학계의 필요성과 소형화의 추세로 인하여 구면 렌즈 광학계에서 비구면 렌즈 광학계로 변화되고 있으며, 비구면 렌즈 광학계는 초점 집광 성능을 향상시켜 구면 수차를 제거 하고 복잡한 렌즈 조합을 필요로 하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 등의 많은 장점을 가지고 있다. 반면 설계 및 제작 상에 어려움을 가지고 있다. 각종 렌즈에서 요구되는 가장 중요한 기능으로는 실물과 동일한 고품격의 결상을 구현하는 광학적 역할을 들 수 있다. 그러나 렌즈의 설계에서는 이러한 기능을 저해하는 요소로 각종 수차(aberration)가 존재한다. 수차는 렌즈를 통하여 얻어지는 결상을 불명확하게 하거나 원래의 상을 변형시킴으로써 렌즈의 광학적 특성을 저하시킨다. 따라서 다양한 방법으로 수차를 감소시키는 연구가 진행되고 있다.

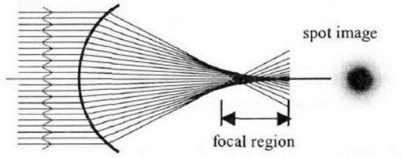
기존에 수차를 감소 시키기 위한 방법으로는 수차를 표현하는 수학적 수식에서 가능한 높은 차수의 수식을 적용함으로써 수차를 감소 시키는 방법[9]과 하나의 렌즈에서 다양한 굴절률을 갖는 재료를 사용하는 방법[13], 수차 보정용 렌즈와 수차를 가지고 있는 렌즈를 혼용하여 광학계의 수차를 보정하는 방법[7] 등이 제시되고 있다. 또한 최근에는 다양한 용도로 사용되고 있는 비구면 렌즈로도 수차문제를 해결하기 위한 수단으로 활용되고 있다.

수차는 크게 단색수차와 색수차로 구분된다. 단색수차에는 상을 불명확하게 훼손시키는 구면수차, 코마(coma), 비점수차(astigmation)가 있으며, 상을 변형시키는 페쯔발 만곡수차(petzval field curvature)와 왜곡수차(distorion)

로 분류된다[8]. 이 중에서 렌즈의 성능에 가장 크게 영향을 주는 것은 구면수차이다. 그림 1 (a)는 구면수차가 결상에 미치는 영향을 나타낸다. 구면수차가 존재하지 않을 경우에는 광축(optical axis)에 평행하게 입사하는 광선들은 렌즈의 초점에 하나의 점을 형성하게 된다. 그러나 구면수차가 존재하는 경우에는 모든 광선들에 대해 렌즈는 하나의 초점을 형성하지 않고 광축을 따라서 특정한 초점영역을 형성하게 된다. 따라서 그림 1 (b)와 같이 초점은 기하학적 단일점이 아닌 임의의 크기를 가지게 되며, 그 결과로 렌즈의 결상기능이 저하된다. 즉, 수차의 포함정도는 초점의 크기에 영향을 미치게 되며, 이로 인하여 측정기기나 광학장비의 선명도와 분해능 또는 해상도를 저해하게 된다. 따라서 렌즈의 설계에 있어서 결상기능에 큰 영향을 주는 구면수차의 보정을 필수적으로 고려되어야 한다.



(a) 구면수차가 없는 경우



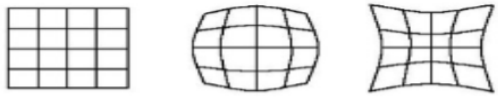
(b) 구면수차가 있는 경우

[그림 1] 구면수차가 결상에 미치는 영향

레이저 Scanner의 밑단에 장착되는 F-Theta 렌즈는 비구면 렌즈로서 왜곡 수차가 발생하게 된다. 왜곡 수차란 주광선(광학계의 조리계 중심을 지나는 광선)의 상높이(y'pr)가 그 광학계의 이상적인 상높이(y')가 일치하지 않는 정도를 나타내는 광학계의 수차로서 수직적으로 표현하면 식1과 같다[1].

$$Distortion(\%)=(y'pr - y')/y'*100 \quad (1)$$

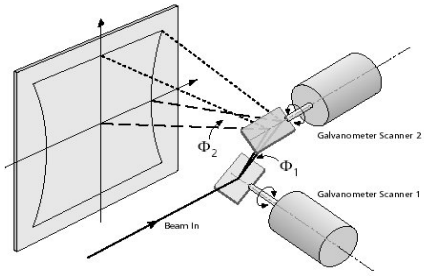
그림 2에서 보는 바와 같이 가운데가 튀어 나온 형태의 왜곡이 생기거나 아니면 가운데가 패인 형태의 왜곡이 발생한다.



[그림 2] 렌즈의 왜곡 수차 형태

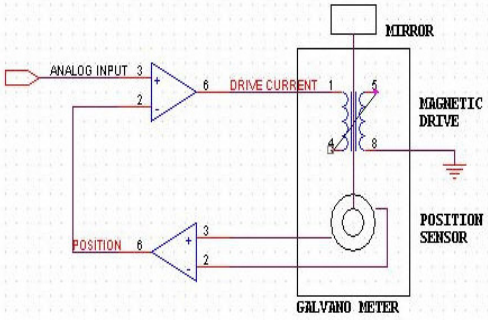
2.2 Galvanometer Motors

레이저 스캐너 가공 방식은 2개의 Mirror를 회전 시켜 반사된 Laser Beam을 가공 Material에 Energy를 집광시켜 가공을 하는 방식이다. 기구부적인 구조는 그림 3에서 보는바와 같이 매우 간단한 구조를 가지고 있으며, X-Y 축의 Linear Motor의 Analog 신호를 Digital 분해를 하여 실제 가공 좌표에 가공을 하게 된다.(ϕ_1 : 입사 빔 각도 , ϕ_2 : 출력 빔 각도)[1].



[그림 3] Scanner 구동 원리 및 구조

그림 4는 Galvanometer Scanner 스캐너 구조이다. Galvanometer는 Solid Iron Rotor Core와 그 주위를 둘러싼 4개의 Longitudinal Pole piece를 가진 Stator 및 Position Sensor등으로 구성된다. Mirror는 Mirrior Mount에 의해 Rotor에 부착되어 있으며, 구동 토르크는 Drive Coil에 흐르는 전류에 의해서 결정된다. Position은 Analog 입력신호에 의해 결정된다.



[그림 4] Galvanometer Scanner 구조

본 논문에서 테스트를 한 Control Card는 RTC4 Card로서 해당 제어카드는 65,536(16bit)의 분해능을 가지고 있다. Galvanometer Motor와 실제 가공 좌표간의 Command는 아래의 식 (2)의 공식에 의해서 결정된다. [15] FOV(Field Of View)는 물체의 모양이 렌즈를 통하여 CCD카메라에 보여지는 영역의 크기이다.

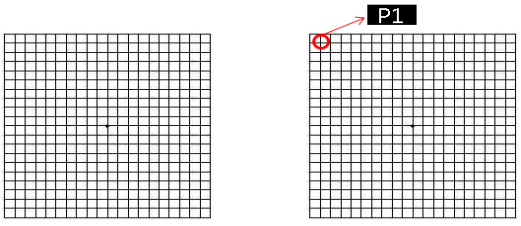
$$Commnad = Real\ Position\ /(\ FOV\ /\ 65{,}536) \quad (2)$$

3. 본론

3.1 기존의 레이저 스캐너 보정 방법

그림 5의 왼쪽의 격자는 레이저 제어 프로그램에서 실제로 레이저 스캐너에게 가공을 원하는 원본 데이터이며 오른쪽의 격자는 가공 후의 비전머신 시스템에서 Correction File을 만들기 위하여 검사가 되는 부분이다.

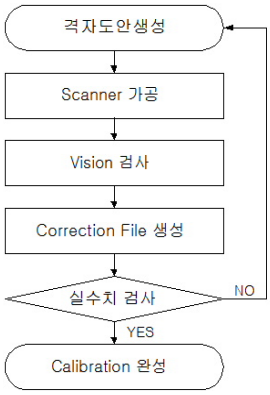
Camera에서 각 각의 격자의 만나는 위치의 십자가 위치 P1을 검사하여 십자가의 Center의 값을 반환하여 주며 그것을 취합하여 각각의 십자가의 Center Point들의 상대적인 위치 값을 계산하여 Correction File을 만들어 준다. 만들어진 Correction File은 다시 Scanner Control Program에서 새로 만들어진 Correction File을 적용 후에 재가공을 하여 원래 도안의 사이즈 및 간격이 나올 때까지 반복을 하게 된다. 해당 Program Flow Chart는 그림 6과 같다.



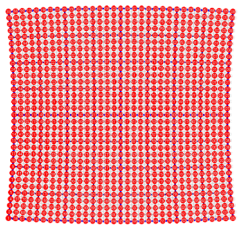
[그림 5] Scanner Calibration을 위한 가공 이미지

3.2 기존의 보정 방법의 문제점

현재의 레이저 스캐너 보정 방법은 비전 머신 시스템으로 검사된 점과 점 사이를 직선 보간법을 사용하여 보상을 하고 있다. 하지만 비구면 렌즈의 특성상 점과 점 사이는 호(Arc)의 모양으로 즉, 2차원적인 보간법[3][6]을 사용하여야만 더욱 정확한 보정이 가능하다. 만일 직선 보간법을 사용하면 매우 많은 직선으로 미분하여 보상을 하여야 하지만 이 부분은 측정 시간과 연관이 되어 있으므로 비효율적이다. 그림 7과 같이 현재 레이저 스캐너 보정방법은 총 65*65 개의 포인트를 검사하여 보정하므로 매우 많은 시간이 소요가 되는 단점을 갖고 있다 [10][12][14].



[그림 6] 프로그램 흐름도



[그림 7] 직선 보간법을 사용한 Correction File

3.3 제안 알고리즘

직선 보간법에서 수많은 점들을 나눌 수가 없는 점을 감안하여 본 논문에서는 비구면 렌즈에서 발생되는 구면수차를 제거하기 위한 방법으로 공간상의 한 점 P는 영상에서 점 p 위치에 결상된다. 그러나 실제로는 완전한 카메라 모델로 만족하지 못하기 때문에 렌즈의 왜곡에 의해 변형된 점 p'의 위치에 결상이 되게 된다. 렌즈의 왜곡 보정을 시행할 때 먼저 왜곡된 영상과 좌표간의 상관관계를 규정하여야 한다. 왜곡된 좌표를 기준으로 보정 좌표를 산출하게 되면 소수점 좌표가 산출되거나 나타낼 수 없는 좌표값이 결정될 수 있는 문제점 때문에 왜곡 보정된 좌표(u, v)의 이미지 값은 왜곡된 좌표 (u',v')로 참조되는 Bilinear interpolation 기법을 적용하여 보정하는 방법을 적용하였다. 왜곡 보정된 좌표(u, v)와 왜곡된 좌표 (u',v')가 포함되는 방정식은 식3과 같이 나타낼 수 있으며 왜곡성분이 합성된 방정식을 사용하여 산출 되었다.

$$u'=u+(u-c_x)\times(k_1r_2+k_2r_4+2p_1y+p_2(r_2/x+2x))$$
$$v'=v+(u-c_y)\times(k_1r_2+k_2r_4+2p_1x+p_2(r_2/y+2y)) \quad (3)$$

여기서, (cx, cy) : 이미지 중심, (u, v): 왜곡이미지 좌표, (u', v'):왜곡보정 이미지 좌표, $(k1, k2, p1, p2)$:왜곡보정 계수이다.

이웃하는 두 점을 식 (3)를 적용하여 두 점 간의 직선 보간법이 아닌 Bilinear interpolation 기법을 적용하여 보정하는 방법을 적용하여 구면 렌즈의 구면수차를 보정하는 알고리즘을 개발하였다. 제안한 방법은 기존방법 보다 적은 점들을 측정하면서도 레이저 스캐너 보정 시간도 단축하는 효과가 있었다.

4. 실험 및 결과

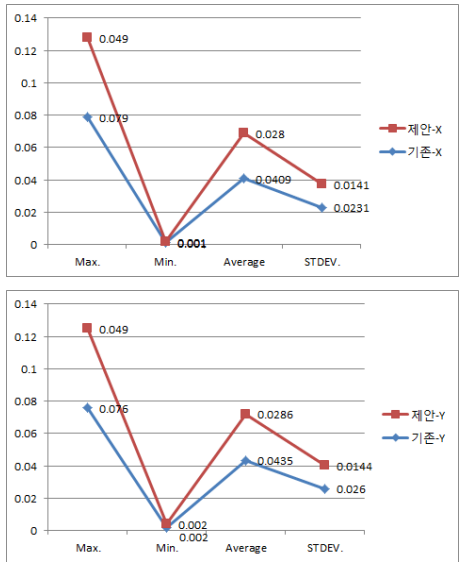
4.1 실험환경

제안 알고리즘을 검증하기 위하여 Calibration Grid는 5*5로 하였으며, 총 25개 포인트에 대하여 제안 알고리즘 전후의 결과 값이 가장 차이가 큰 각각의 이웃 하는 점들의 중간 위치를 레이저로 가공하여 가공된 위치를 측정장비를 통하여 각 10회 반복하여 객관화 하였으며, 실험환경으로는 Scanlab사 HurryScan10, Scanlab사 F-Theta Lens, Xill Optics 사의 Beam Expander, Spectra-USA Green Laser Source , Scanlab사 RTC4 Control Card , Intel i7 2.66GHz , 4GB RAM 환경에서 테스트를 하였다.

4.2 실험결과

레이저 정밀 가공작업 시 Galvanometer를 사용하면 비구면 초점 렌즈에 의하여 발생되고 있는 렌즈 수차를 보정하여야 가공 오차를 개선 할 수 있다. 비구면 렌즈의 수차는 2차원 곡선의 형태를 가지고 있으나, 기존의 렌즈 보정 방법인 선형방법은 매우 많은 점들을 검사하므로 보정 시간이 많이 소요되는 문제점이 있었다. 가공장비에서 렌즈의 수차로 인하여 발생하는 가공오차를 감소시키기 위하여 Bilinear interpolation 기법을 적용하여 보정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 기존 선형방법과 비교 실험하여 그림 8과 같이 실제 가공되어야 하는 도면상의 위치와 가공된 위치와의 오차를 계산하여 오차들의 평균값과 표준 편차를 나타내었다.

실험결과는 그림 8과 같이 기존 알고리즘과 제안된 Bilinear interpolation 기법을 적용하여 보정하는 알고리즘을 적용 한 후 지정된 위치에 레이저 가공을 하여 측정장비를 통하여 지정된 위치와 실제 가공 위치 사이의 가공 오차를 보여주고 있다. (Max. : 최대 오차 , Min. : 최소 오차 , Average : 평균 오차 , STDEV : 오차 표준편차). 그림 8과 같이 제안 알고리즘을 적용한 후 특히 최대 오차(Max)값이 현저히 감소하였으며, 평균 오차 는 67%, 표준 편차도 58.1% 이상 향상 되었음을 확인 할 수가 있다. 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘의 보정시간을 비교 측정한 결과 2.14배 빠른 우수한 결과를 나타내었다.



[그림 8] 실험결과

5. 결론

본 논문에서는 레이저 스캐너를 이용한 레이저 정밀 가공 장비에서 렌즈의 수차로 인하여 발생하는 가공 오차를 줄이기 위한 방법으로 기존의 직선 보간법으로 보정을 진행하였을 때 상당히 오랜 시간이 소요되는 것을 제안된 Bilinear interpolation 기법을 적용하여 보정하는 알고리즘을 사용하여 2.14배 보정시간을 단축하는 효과를 얻었으며, 위치의 정확성도 향상되어 가공 오차를 감소 시킬 수 있는 방법을 제안 하였다. 제안 알고리즘을 적용한 실험에서 실제 가공되어야 하는 도면상의 위치와 가공된 위치와 오차를 측정하여 오차들의 평균값과 표준 편차가 실험결과와 같이 향상 되었음을 나타내었다. 제

안 알고리즘의 적용으로 머신비전시스템 분야의 정밀가공을 위한 렌즈의 수차를 보정할 수 있었으며, 실제 반도체 분야에 적용하여 사용하고 있다. 현재 판매중인 Laser Application에도 응용 적용이 가능하다.

향후 연구 과제로는 보정을 진행하기 위하여 너무 많은 시간이 소요가 되므로 보정속도를 더욱 향상 시킬 수 있는 방법을 연구 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] 권영중·이상훈(1988). LASER를 이용한 비접촉 외경 측정기, 전기학회지, 37(7), 67-68.

[2] 김상석·정상화.(2005).F-thata Lense 금형코어 형상 정도 향상에 관한 연구. 한국정밀공학회 2005년도 추계학술대회 논문집. 1.

[3] 박철호(2000). 분할 경계 보간곡선을 이용한 자유형태 곡면 변형방법, 한국정보과학회 학술발표논문집, 508-510.

[4] 옥창석·조환규.(2011).직선 성분 분석을 통한 왜곡 이미지 보정 기법. 한국정보처리학회 2011년도 제35회 춘계학술발표대회 논문집. 463-466.

[5] 유원필·정연구.(2003).저가형 디지털 카메라 적용을 위한 기하학적 왜곡 및 광도 왜곡 보정 방법. 한국정보과학회 봄 학술발표논문집. 30(1), 205-207.

[6] 이선영·김성수(2003). 비-스프라인 보간법을 이용한 영상변환, 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 D, 2561-2563.

[7] 장경애(2001).Optics, 도서출판 성학당, 97-129.

[8] Hecht,Eugene(1987). Optics, Addison-Wesley Pub. Co.,211-239.

[9] J. I. Beamonte(2000).Stability of the spherical aberration upto the fifth order in cemented doublets. J. Opt. A: Pure Appl. 161-168.

[10] Liu Yong & Xi Ning(2011). Low-cost and automated calibration method for joint offset of industrial robot using single-point constraint. The industrial robot. 38(6), 577-584.

[11] Luo H. & Zhu L Ding H.(2006). Camera calibration with coplanar calibration board near parallel to the imaging plane, Sensors and actuators. A, Physical, 132(2), 480-486.

[12] Pedersini F. & Sarti A. & Tubro S(1999). Accurate and simple geometric calibration of multi-camera systems. Signal processing the official publication of the european association for signal processing. 77(3), 309-334.

[13] Roman linsky(2000).Gradient-index meniscus lens free of spherical aberration., J. Opt. A: Pure Appl. 449-451.

[14] WU Jianwei & MA Hongchao(2008). Error analysis on laser beam misalignment with scanner mirror of airborne LIDAR. Infrared and laser engineering, 37(2), 243-246.

[15] www.scanlab.de

박 양 재

· 1990년 8월 : 인하대학교 정보공학과 (공학석사)
· 2003년 8월 : 인하대학교 전자계산공학과 (공학박사)
· 2001년 ~ 2002년 : ㈜이메디피아 원격 의료 연구소 연구소장.
· 1993년 ~ 현재 : 가천대학교 IT 대학 컴퓨터공학과 교수.
· 관심분야 : HCI, 영상처리, 모바일네트워크, 컴퓨터비전
· E-Mail : parkyj@gachon.ac.kr