

## 스카라 로봇의 자세 보정을 위한 카메라 모델링 및 캘리브레이션

### Camera Modeling and Calibration for Kinematic Calibration of a SCARA Robot

°왕 한 흥\*, 장 영 희\*, 김 경 년\*\*, 한 성 현#

\* 경남대학교 기계설계학과 대학원

\*\* 거제전문대학 기계과

# 경남대학교 기계설계학과

#### Abstract

This paper presents a new approach to the calibration of a SCARA robot orientation with a camera modeling that accounts for major sources of camera distortion, namely, radial, decentering, and thin prism distortion. Radial distortion causes an inward or outward displacement of a given image point from its ideal location. Actual optical systems are subject to various degrees of decentering, that is, the optical centers of lens elements are not strictly collinear. Thin prism distortion arises from imperfection in lens design and manufacturing as well as camera assembly. It is our purpose to develop the vision system for the pattern recognition and the automatic test of parts and to apply the line of manufacturing.

**Keywords** : Camera calibration, Pattern recognition, robot vision, Geometric distortion

#### 1. 서론

비전을 이용한 부품 형상인식 및 자동검사 시스템은 vision system본체, 조명광학부, 시각센서부, display monitor, 데이터 입력장치 등으로 크게 나눌 수 있다. 조명광학부는 안정된 영상

취득을 제공하기 위해 적용분야에 적합한 조명방식 및 장치를 사용하며, 시각센서부는 일반적으로는 흑백 CCD camera를 사용하지만 필요성에 따라 color, 적외선, X-ray, 초음파 등의 센서를 쓰기도 한다. 데이터 입력장치는 keyboard, mouse, tack ball 등으로 vision system의 기능을 제어하며, display monitor는 영상(처리전/후), 입력된 데이터, 처리결과 등이 표시된다. vision system 본체는 기능상, 시각센서로부터 디지털 영상을 얻고, 저장, 표시하는 영상취득부, 영상메모리부, 영상표시부, 시각검사 알고리즘을 수행하는 고속 영상처리부, 주변제어기기 및 데이터 I/O등을 제어하는 I/O interface부, 그리고 시스템 제어부 등으로 구성된다. 이러한 구성요소들로 이루어진 비전 시스템이 산업현장에서 성공적으로 적용되기 위해서는 다음과 같은 요건들을 만족해야 한다. 1) 고속성 : 동작속도가 생산 라인의 속도에 맞출 수 있어야 한다. 2) 고신뢰성 : 사용자가 원하는 정확도를 일관되게 유지해야 한다. 3) 유연성(flexibility) : 제품 모델의 변경에 대한 적응성과 생산 방식의 구조차이에 대한 원활한 적용이 뛰어나야 한다. 4) 저렴성 : 생산비용면에서 타당성이 인정될 수 있어야 한다.

본 연구에서는 이러한 기초 연구를 바탕으로 먼저 부품 검사 및 장착 시스템으로 INTEL 80586 CPU의 SPC8200P 컴퓨터에 영상 취득부, 텍사스 인스트루먼트사의 DSP인 TMS320C30을 이용한 병렬처리부와 실시간으로 중심값과 히스토그램을 추출하는 전용하드웨어를 통한 비전 시스템을 개발하여 SM5 SCARA 로봇 시스템과의

인터페이스를 통한 부품의 자동검사 및 형상인식 시스템 개발을 위한 연구를 수행하고자 한다.

본 연구에서는 16.7 MIPS의 초고속 명령 수행 능력을 가진 텍사스 인스트루먼트사의 DSP인 TMS320C30칩을 CPU로 사용하는 영상처리 하드웨어를 설계 제작하고, 이를 활용하여 여러 제품들중 특정 제품을 자동인식하고 인식된 제품의 품질을 자동으로 검사하여 품질기준 통과여부를 자동 판단할 수 있는, 이른바 부품의 형상인식 및 자동검사용 비전시스템을 개발하여 실제 생산공정에 적용함으로써 제품의 품질향상, 생산품의 균일화 및 제품 생산성을 향상시킴으로써 생산원가를 절감하고 기업의 기술 경쟁력을 향상시키고자 하는데 연구의 목적이 있다.

## 2. 카메라 모델링

왜곡(distortion)이란 공간상의 물체를 영상화할 때 영상 평면상에 투영되는 물체의 영상 좌표가 렌즈 광학계에서 예상한 이상적 위치를 벗어남으로서 영상이 일그러져 나타나는 현상을 왜곡이라 한다. 기하학적인 왜곡은 영상 평면내에서 영상점들의 위치를 고려한다. 설계 그리고 카메라 광학계를 구성하는 렌즈 조립의 여러 가지 종류의 불완전성의 결과로서, 그 진실성을 유지할 수 없고, 위치 오차를 정확하게 고려한 다음과 같은 표현으로 바뀌어져야 한다.

$$\begin{aligned} u' &= u + f_u(u, v) \\ v' &= v + f_v(u, v) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $u$ 와  $v$ 는 관찰될 수 없는 왜곡이 없는 상태에서의 영상좌표이고  $u'$ 와  $v'$ 가 왜곡이 있는 상태에 대응되는 좌표이다.

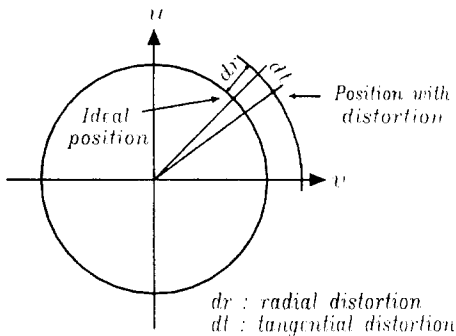


Fig. 1 Radial and tangential distortion

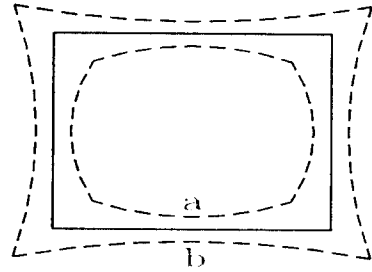


Fig. 2 Effect of radial distortion

### 2.1 Radial distortion

Radial distortion은 주어진 영상점이 이상적인 위치로부터 안쪽이나 바깥쪽으로의 변위를 생성시킨다. 이런 종류의 왜곡은 주로 렌즈 요소의 반지름 방향 굴곡 곡선의 결함에 의해 생긴다. Fig. 2는 radial distortion의 효과를 설명한다.

카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 radial 왜곡의 양은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta_{ur} &= k_1 u(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \\ \delta_{vr} &= k_1 v(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $u = \rho \cos \varphi$ ,  $v = \rho \sin \varphi$   $k_1$ 는 radial distortion의 계수,  $\rho$ 는 영상평면의 주점으로부터 반지름 방향 거리이다.

### 2.2 Decentering Distortion

실제 광학 시스템은 렌즈 요소들의 광학적 중심이 정확히 일치하지 않는 여러 가지 종류의 decentering에 영향받는다. 이런 결함은 무엇이 decentering distortion으로 불리는지를 소개한다. 카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 decentering 왜곡의 양은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta_{ud} &= p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vd} &= 2p_1uv + p_2(u^2 + 3v^2) + O[(u, v)^4] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $p_1 = -j_1 \sin \varphi_0$ ,  $p_2 = j_1 \cos \varphi_0$

### 2.3 Thin Prism Distortion

Thin prism distortion은 카메라 조립뿐만 아니라 렌즈 설계와 제조에서의 불완전함(예를 들어 렌즈 요소의 약간의 tilt 혹은 영상 센싱 배열)

으로부터 생긴다. 카티션 영상 좌표의 각각의 축에 따른 Thin prism 왜곡의 량은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\delta_{uv} &= s_1(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vp} &= s_2(u^2 + v^2) + O[(u, v)^4] \\ s_1 &= -i_1 \sin \varphi_1, \quad s_2 = -i_1 \cos \varphi_1\end{aligned}\quad (4)$$

## 2.4 Total Distortion

위의 distortion이 모두 존재할 때, 유효한 distortion은 그기에 해당하는 수식들을 합치므로써 모델링될 수 있다. 식 (2), (3) 그리고 (4)를 결합하는 것은  $u$ 와  $v$ 축을 따르는 distortion의 전체량을 제공한다. 3차 이상의 고차항들을 무시함으로써 우리는 다음과 같은 두 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\delta_u(u, v) &= s_1(u^2 + v^2) + 3p_1u^2 + p_1v^2 \\ &\quad + 2p_2uv + k_1u(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) &= s_2(u^2 + v^2) + 2p_1uv \\ &\quad + p_2u^2 + 3p_2v^2 + k_1v(u^2 + v^2)\end{aligned}\quad (5)$$

$g_1 = s_1 + p_1$ ,  $g_2 = s_2 + p_2$ ,  $g_3 = 2p_1$ ,  $g_4 = 2p_2$ 라 놓으므로써, 식 (9)의 표현은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}\delta_u(u, v) &= (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv \\ &\quad + g_1v^2 + k_1u(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) &= g_2u^2 + g_3uv + \\ &\quad (g_2 + g_4)v^2 + k_1v(u^2 + v^2)\end{aligned}\quad (6)$$

## 2.5 카메라 모델

식 (1)에 따라  $u$ 와  $v$ 축을 따르는 distortion을 고려함으로써, distortion-free 영상점  $(u, v)$ 와 이 영상점에 해당하는 pixel location 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}u + \delta_u(u, v) &= (r - r_0)/s_u \\ v + \delta_v(u, v) &= (c - c_0)/s_v\end{aligned}\quad (7)$$

여기서 새로운 변수를 도입하므로써

$$\begin{aligned}\hat{u} &= (r - r_0)/f_u \\ \hat{v} &= (c - c_0)/f_v\end{aligned}\quad (8)$$

식 (7)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\frac{u}{f} &= \hat{u} - \frac{\delta_u(u, v)}{f} \\ \frac{v}{f} &= \hat{v} - \frac{\delta_v(u, v)}{f}\end{aligned}\quad (9)$$

정확한  $u, v$ 는 실제 노이즈가 내포된 관찰로부터 얻어질 수 없기 때문에 모델링된 왜곡항들은  $\hat{u}, \hat{v}$ 에 의해 대체시킴으로써 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}\frac{u}{f} &= \hat{u} + \delta'_u(\hat{u}, \hat{v}) \\ \frac{v}{f} &= \hat{v} + \delta'_v(\hat{u}, \hat{v})\end{aligned}\quad (10)$$

계수  $k_1, g_1 \sim g_4$ 를 재정의하므로써, 식 (5), (6) 그리고 (10)의 표현은 완전한 카메라 모델은 식 (11)으로 유도된다.

$$\begin{aligned}\frac{r_{1,1}x + r_{1,2}y + r_{1,3}z + t_1}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} &= \hat{u} + (g_1 + g_3)\hat{u}^2 + g_4\hat{u}\hat{v} \\ &\quad + g_1\hat{v}^2 + k_1\hat{u}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2) \\ \frac{r_{2,1}x + r_{2,2}y + r_{2,3}z + t_2}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} &= \hat{v} + g_2\hat{u}^2 + g_3\hat{u}\hat{v} + \hat{v} \\ &\quad + (g_2 + g_4)\hat{v}^2 + k_1\hat{v}(\hat{u}^2 + \hat{v}^2)\end{aligned}\quad (11)$$

식 (11)은 왜곡 계수들  $k_1, g_1, g_2, g_3, g_4$ 에 관해서 선형이라는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험

본 연구에서 실험에 사용한 영상 처리용 하드웨어는 직접 설계 제작된 비전 보드를 사용하였다. 이 영상 처리용 보드에서 사용한 CPU는 디지털 영상을 고속으로 처리하기 위해서 TI사의 DSP TMS320C30을 채용하였다.

Fig. 3은 비전 시스템의 전체 구조를 나타내는 것으로, 전체 비전 시스템의 구성은 카메라로부터 취득된 아날로그 영상은 Video 멀티플렉서로 4:1 멀티플렉싱을 하여 A/D 변환기에 의해 디지털 영상 데이터로 변환되어 입력 LUT(Look Up Table)로 입력된다. LUT를 통과한 영상 데이터는 비전 버스에 연결되며, <BANK1> 또는 <BANK2>의 프레임 메모리(Frame Memory, FM)에 입력되기 위해 MUX를 통과하게 된다. 이 멀티플렉서는 FM에 연결되는 어드레스 및 데이터 버스의 신호원 2개, 즉 vision bus와 DSP bus를 선택하는 역할을 한다. 출력 LUT를 통과한 영상 데이터는 D/A변환기를 통과함으로써 아날로그 비디오 신호로 변환되어 모니터에 출력된다. LUT는 A/D변환기를 거쳐서 디지털로 변환된 데이터를 프레임 메모리에 저장하기 전에 하드웨어적으로 일차원적인 변환을 하기 위해서 메모리로 구성된 변환 테이블로서 이 LUT를 적절히 사용함으로써 영상 처리 시간을 단축시켜 영상속 물체의 실시간 윤곽 추출이 가능하게 한다.

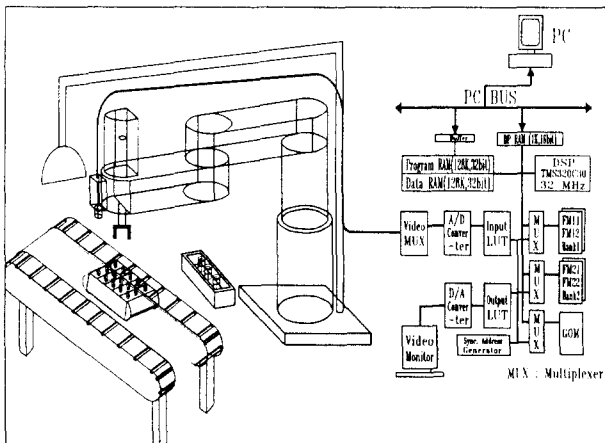


Fig. 3 Configuration of vision system

586 PC에 비전 보드가 연결되어 서로 통신을 하면서 데이터나 파라메타들을 주고받는데,

비전 보드의 CPU인 DSP와 PC와의 데이터 교신은 듀얼 포트 램(Dual-Port RAM, 1K x 16bit)을 통해서 이루어진다. 두 CPU간에 전달되는 데이터의 내용은 각 비전 함수들마다 정해져 있으며, 인터럽트 핸드셰이크에 의해 데이터 교신이 이루어진다.

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실영상에 의한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 부품은 일정한 길이를 갖는 환봉을 사용하였다. 부품들은 제작된 컨베이어를 통해 일정한 배열로 일정 시간 간격으로 카메라가 장착된 FARA SM5 SCARA 로봇 아래를 통과하게 구성하였다. 카메라의 장착위치는 FARA SM5 SCARA 로봇의 2축 앞단에 수직 및 경사각도 조절이 가능하도록 장착하며, 장착된 카메라로부터 물체까지의 거리는 30~40cm정도이며 사용된 카메라의 종류는 SFA410-ED계열의 카메라이다. HLS-100 조명 장치 조절부에서 나오는 빛을 Optical Fiber Cable을 이용해 카메라와 같은 방향에서 비추며, 렌즈는 16mm렌즈를 사용하였다.

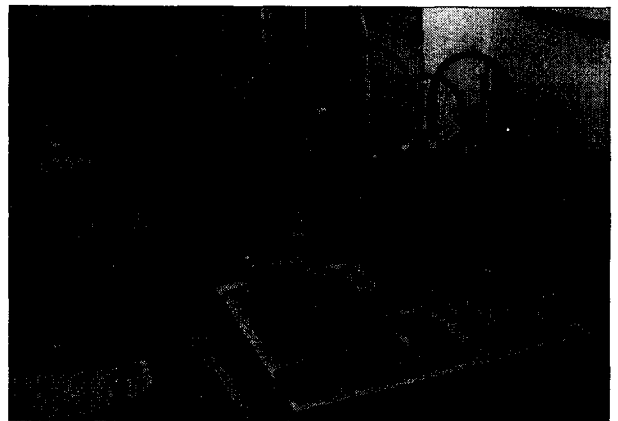


Fig. 4 Examine set-up

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실영상에 의한 실험을 수행하였다. 부품이 컨베이어를 통해 일정한 시간 간격으로 지나간다. FARA SM5 SCARA 로봇의 2축 끝단에 장착된 카메라는 부품이 카메라의 수직 하방향을 지나갈 때, 영상을 취득하고, 취득한 실 영상을 실시간으로 처리하여 부품형상을 인식하고, 인식된 부품에 대하여 Database에 저장된 기준 데이터와의 비교 매칭을 통하여 부품이 불량인지 아닌지의 여부를 자동으로 검사한다.

Fig. 5는 위에서 제시된 방법으로 취득된 부품의 실 영상을 나타내고 있다. 원영상에 포함되어 있는 각종 노이즈들을 앞에서 제시된 전처리 알고리즘을 통해 제거하고, 화상 분할을 통해 화상을 물체별로 나누는 작업을 수행한다. 화상 분할 단계를 거친 영상은 분할된 물체를 보다 명료하고 효율적으로 인식이 이루어 질 수 있도록 필요한 특징 및 정보를 다시 묘사한다. 이와 같은 과정을 거쳐 추출된 정보는 기준데이터와 비교 매칭을 통하여 검사가 수행된다.

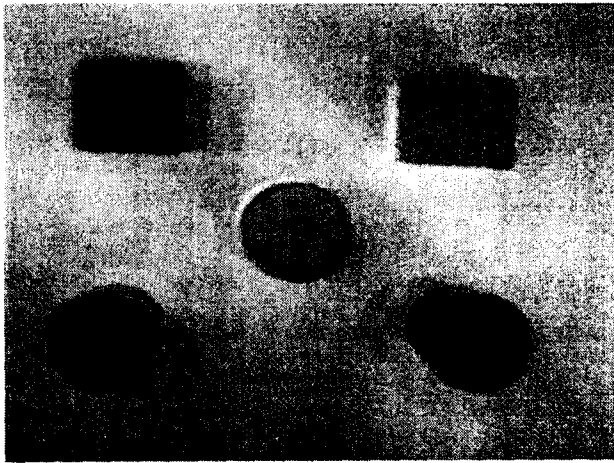


Fig. 5 The acquired image from camera

제작된 컨베이어를 이용해 부품을 이송시킬 때, 하나의 부품이 지나가는 시간 간격은 3초였으며, 총 28개의 부품에 대해 검사가 이루어졌다. 총 28개의 부품들 중 약 11%에 해당하는 숫자의 부품들에 대해서 실험자가 제시된 시스템의 성과와 정확성을 검증하기 위하여 불량조건을 부과하여 실험을 수행하였다. 그 결과로 총 3개의 불량 부품들중 1개의 부품을 잔상 판정하였고 총 25개의 정상 부품들 중 하나를 불량 판정하였다. 28개의 부품을 검사하는데 소요된 총 시간은 약 1분 30초 정도였다. 이에 대한 신뢰성의 확인 문제는 최종결과 보고서에서 제출하기로 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서 카메라 렌즈의 기하학적 왜곡을 고려한 머신 비전 시스템의 연구 수행을 통하여 위에서 언급된 많은 문제점들을 해결할 수 있었다.

본 연구에서 수행된 카메라 렌즈의 기하학적

왜곡을 고려한 머신 비전 시스템을 활용한 부품의 자동 검사, 즉 구형 및 평면 형상의 베어링 가공 정밀도 검사, 사각 형상의 부품 정밀도 검사, 사각 및 유각 볼트 및 너트류 불량품 검사, 자동 경비 시스템 등에 활용함으로써 제품의 품질향상, 생산품의 균일화 및 제품 생산성을 향상시킴으로써 생산 원가를 절감하고 기업의 기술 경쟁력 향상에 그 기대 효과가 크리라고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. I. Corke, "Visual Control of Robot Manipulators - A Review", K. Hasimoto, Visual Servoing, pp. 1-31, World Scientific, 1993.
- [2] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, Robotics : Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill, 1987.
- [3] S. W. Wijesoma, D. F. H. Wolfe, and R. J. Richards, "Eye-to-Hand Coordination for Vision-Guided Robot Control Application", Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 12, No. 1, pp. 65-77, 1993.
- [4] Parrick Gros, "Matching and Clustering: Two Steps Toward Automatic Object Modeling in Computer Vision", Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 14, No. 6, pp. 633-642, 1993.
- [5] "TMS320 Floating-Point DSP Optimizing C Compiler User'S Guide", 1993.
- [6] D. C. Brown, "Decentering distortion of lenses," Photogrammetric Eng. Remote Sensing, May 1966, pp 444-462.
- [7] W. Faig, "Calibration of close-range photogrammetric systems: Mathematical formulation," Photogrammetric Eng. Remote Sensing, vol. 41, no. 12, pp. 1479-1486, Dec. 1975
- [8] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," IEEE J. Robotics Automat., vol. RA-3, no. 4, pp. 323-34, Aug. 1987.