

비전을 이용한 볼-스터드 검사 시스템에 관한 연구

장영훈*, 권태종*, 한창수**, 문영식***

A Study on the Vision-Based Inspection System for Ball-Stud

Young Hun Jang,* Tae Jong Kweon,* Chang Soo Han,** Young Shik Moon***

ABSTRACT

In this paper, an automatic ball-stud inspection system has been developed using the computer-aided vision system. Index table has been used to get the rapid measurement and multi-camera has been used to get the high resolution in physical system. Camera calibration was suggested to perform the reliable inspection. Image processing and data analysis algorithms for ball stud inspection system have been investigated and were performed quickly with high accuracy. As a result, inspection system of a ball stud could be used with a high resolution in real time.

Key Words : ball-stud(볼-스터드), inspection(검사), vision(비전), least square method (최소제곱법), polygonal approximation(다각형 근사법), camera calibration(카메라 보정)

1. 서 론

최근에 제조 공장에서는 인력에 의존해야만 하는 제품의 체크나 최종 목시 검사 등을 자동화하고 있으며, 고속으로 이송되는 제품의 상태를 하나하나 확실하게 판정하기 위해 비접촉식 측정기술로서 카메라를 이용한 화상 처리 시스템인 머신 비전이 각광 받고 있다. 국내에서도 PCB와 같은 2차원 형상의 위상 기하학적인 상태의 검사 및 제품의 유무 검사는 좋은 결과를 얻고 있다. 본 연구에서는 3차원 형상의, 자동차 조향 장치의 타이로드 끝단부(tie rod end)에 사용되어지는 볼-스터드(ball-stud)의 치수 검사를 위한 검사 시스템을 제안하였다. 기성품의

CCD카메라로 정밀한 계측(최대0.05mm 허용공차)을 위해 제품의 부위별 영상을 획득하였으며 빠른 시간(1.5초) 내에 검사를 하기 위해 인덱스 테이블을 사용하였다.

2. 시스템 구성

2.1 검사 물체 및 검사 항목

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 구성한 검사 시스템은 3차원 형상의 볼-스터드를 검사하기 위한 것으로서, 검사 물체는 그림 1에 나타난 바와 같다. 제품에서 테이퍼가 시작하는 부분의 지름을 기준경이라 하며, 검사 항목과 각 항목에 대한 허용 공차는 표 1에 나타내었다.

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
** 한양대학교 기계공학과
*** 한양대학교 전자계산학과

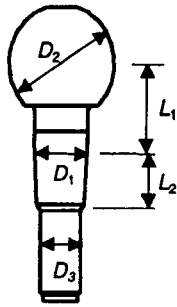


Fig. 1. Ball-stud

Table. 1 Inspection dimensions and their tolerances

검사부위	허용공차
D_1 기준경	0.05
D_2 볼 지름	0.05
D_3 전조 하경	0.05
L_1 볼 중심에서 기준경까지 길이	0.1
L_2 테이퍼 길이	0.2

2.2 시스템 구성

2차원 비전 시스템으로 3차원 물체의 정보를 얻는 방법은 여러 가지가 있다. 대표적인 방법으로 레이저, 모아레 무늬(Moire fringe), 수동적 스테레오스코프를 이용하는 방법 등이 있으며, 개별적으로 각각의 장·단점이 있다.⁽¹⁾

본 연구에서는 고정된 이차원 비전 시스템으로 축대칭인 물체의 크기를 측정하기 위해서 그림 2에 나타난 바와 같이 인덱스 테이블을 이용한 구동부를 설계하였다. 한 개의 인덱스 테이블에는 4개의 볼-스터드를 삽입할 수 있다. 기계적인 실시간 처리를 위하여 두 단계의 검사를 행

하였으며, 정밀한 측정을 위해 각 검사 단계에서는 CCD 카메라 2대씩을 사용하여 검사 항목의 허용공차를 만족시켰다. 영상 획득은 물체의 난반사를 피하기 위하여 후방 조명(back lighting) 기법을 이용하였으며, 조명 차단막을 설치함으로써 조명을 연속적으로 개폐시키는 효과를 얻을 수 있고, 결과적으로 이전 영상의 잔재를 없앨 수 있다. 인덱스 테이블의 볼-스터드 삽입부는 기준경 검사를 위한 접촉식 검사 장치로써 정교하게 설계되었으며 볼-스터드 입력시 자세를 고정하기 위해 각 검사 하단부에 클램프를 설치하였다. 시스템에 사용되어진 주요 하드웨어의 모델명 및 사양은 표 2와 같다.

2.2.1 검사부1 (stage 1)

검사부1은 볼-스터드의 검사 항목 중 구의 중심과 지름을 구하고, 전조 하경의 한 면에 대한 정보를 얻어내기 위한 검사부이다. 카메라 1에서는 구의 중심과 지름을 구한다. 또한 카메라 2에서는 전조 하경 왼쪽 면의 영상을 얻어서 검사부 2에서 구한 다른 한편의 영상(camera 4)과

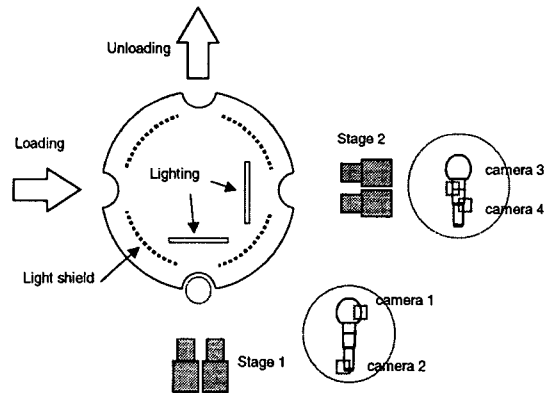


Fig. 2 Schematic diagram of system and FOV's (in circles)

Table. 2 Hardware specifications

H/W	Model	Specifications
Frame Grabber	Ultra-II (Coreco)	resolution : 640 × 480 [pixel × pixel] sampling rate: 10 [msec/frame]
CCD Camera	TM-7EX (PULNiX)	pixel 768 × 494
Lens	MS-509 (Seiwa)	F _{OV} 8.8mm × 6.6mm
CPU	Pentium (Intel)	133 [MHz]
Illuminator	A0-8920 (Fostec)	4" × 5"

조합하여 전조 하경의 지름에 대해 측정한다.

2.2.2. 검사부2 (stage 2)

검사부2는 불-스터드의 검사 항목 중 테이퍼 길이 및 전조 하경의 검사를 위한 다른 면에 대한 측정 및 정보를 얻기 위한 검사부이다. 카메라 3에서는 기준경(테이퍼 시작점)의 위치를 구하며, 카메라 4에서는 테이퍼의 끝점과 전조 하경의 다른 면을 구한다.

2.2.3. 조명부

비전 시스템은 광원에 대하여 매우 민감하므로 검사 시스템에서는 제한적인 환경 혹은 최적의 환경을 만들어 주어야 한다. 이것은 조명 설계에도 관계되는 사항으로서, 보통 형광등이나 일상 환경에서는 금속성의 물체는 난반사가 강하여 측정하기에 어려운 문제가 발생한다. 검사 시스템의 최적화된 환경을 만들고, 강인하게 측정할 수 있는 방법으로 카메라, 물체, 조명의 순서대로 배치되는 후방 조명(back lighting) 기법을 사용한다.⁽¹⁾ 카메라에서 받아 들이는 영상은, 물체에 의해 가려진 부분은 어두운 색으로 되며 그 외의 영역은 밝은 색으로 이루어진다. 이 방법은 필터링이나 모폴로지(morphology) 같은 다른 전처리 과정을 거치지 않아도 되는 잇점이 있지만 좋은 문턱값(threshold)을 결정하는 문제는 여전히 남게 된다.

또한 안정적인 조명을 얻기 위하여 할로겐 광원과 광섬유를 이용한 조명 장치를 이용하였다.

3. 측정 알고리즘

입력된 영상으로부터 불-스터드가 기준에 적합한지 않은지를 판정해서 전체 시스템에 어떤 조치를 취하도록 신호를 보내는 것이 검사 소프트웨어가 해야 할 일이다. 그림 2와 2.2절에서 언급하였듯이 검사를 위해서 본 시스템에서는 구부의 부분 영상, 테이퍼의 시작점의 영상, 테이퍼의 끝점의 영상, 그리고 스테드 아랫단의 영상을 얻어야 한다. 이 영상들로부터 다음과 같은 정보를 추출해야 한다.

- 구부의 직경(D_h) 및 구부 중심의 수직 좌표(y_1)
- 테이퍼의 시작점(기준경)의 수직 좌표(y_0)
- 테이퍼 끝점의 수평 및 수직 좌표(x_2, y_2)
- 전조하경 상단의 수평 좌표(x_3)
- 전조하경 하단의 수평 좌표(x_4)

이 값을 바탕으로 표 1에서 나타난 검사 항목을 계산하게 된다. 즉

$$\begin{aligned}
 D_2 &= D_2(D_h) \\
 D_3 &= D_3(x_3, x_4) \\
 L_1 &= L_1(y_0, y_1) \\
 L_2 &= L_2(y_0, y_2)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

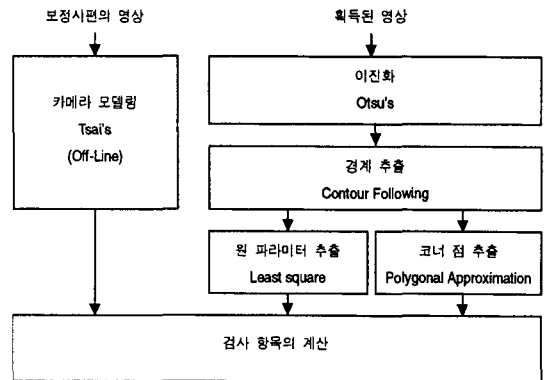


Fig. 3 Flow chart of inspection algorithms

이를 위해서 우선 입력 영상으로부터 물체와 배경을 분리해야 하며(영상의 이진화), 그를 바탕으로 경계를 이루고 있는 화소의 집합을 추출해야 한다. 구부의 경우는 점들로부터 원의 파라미터를 추정해야 하며, 나머지 다른 경우는 주요 코너점을 찾아야 한다. 원의 파라미터를 추정하기 위해서 최소제곱법(least square method)을 사용하였으며, 코너점을 찾기 위해서는 다각형 근사법(polygonal approximation)과 최소제곱법(least square method)을 병용하였다. 식 (2)에 나타난 $D_2(\cdot)$, $D_3(\cdot)$, $L_1(\cdot)$, 그리고 $L_2(\cdot)$ 를 구체적으로 구

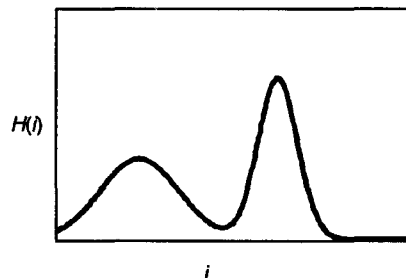


Fig. 4 Typical histogram of an image

현하기 위해서 카메라를 모델링하고 카메라의 인자들을 보정해야 한다. 이는 오프라인으로 행해지며 필요에 따라서 갱신되어야 한다. 이상의 과정은 그림 3에 요약되어 있다.

3.1 이진화

여러가지 이진화 알고리즘 중 본 검사 시스템에서는 계산 과정이 간단한 알고리즘인 Otsu의 방법을 이용하였다.⁽⁴⁾ 그림 4에서 보는 바와 같이 한 가지 밝기의 배경에 다른 밝기의 물체가 입력된 영상의 히스토그램을 살펴 보면 두개의 모드가 나타난다. 그림에서 i 는 밝기값을 $H(i)$ 는 밝기값 i 를 갖는 화소의 수를 나타낸다. 후방 조명의 경우, 밝은 쪽 모드는 배경이고, 어두운 쪽의 모드는 물체이다. 이진화는 이 두 모드를 가장 잘 분리할 수 있는 값, 즉 문턱값(threshold)을 구하는 것이다. Otsu에 의하면 다음 식을 최소화 하는 T 를 문턱값으로 구한다.

$$\sigma^2(T) = \sum_{i=0}^T [i - u_1(T)]^2 P(i) + \sum_{i=T+1}^{255} [i - u_2(T)]^2 P(i) \quad (3)$$

위 식에서 u_1 과 u_2 를 각각 모드 1, 모드 2의 평균값이라고 하고 다음과 같이 정의 된다.

$$u_1 = \frac{\sum_{i=0}^T iH(i)}{\sum_{i=0}^T H(i)} \quad u_2 = \frac{\sum_{i=T+1}^{255} iH(i)}{\sum_{i=T+1}^{255} H(i)} \quad (4)$$

그리고 $P(i)$ 는 밝기값 i 가 나타날 확률을 의미하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(i) = \frac{H(i)}{N_x N_y} \quad (5)$$

여기서 N_x 와 N_y 는 각각 가로 방향과 세로 방향의 화상의 크기를 나타낸다.

3.2 원의 파라미터 추정

추출된 경계 화소로부터 원의 중심 좌표와 반지름을 추정하는 알고리즘으로 최소제곱법(least square method)을 이용하였다.^{(6) (7)} 원의 중심을 (x_0, y_0) , 반경을 r , 경계상의 측정값을 (x_i, y_i) 라고 하면, 다음의 오차 함수 E 를 정의 할 수 있다.

$$E^2 = \sum_{i=1}^n [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2]^2 \quad (6)$$

식 (6)을 직접 이용하여 추정할 경우 비선형 문제가 되지만, 약간의 조작을 통해 선형 관계식으로 나타내어지는 추정자(estimator)를 유도할 수 있다. 즉, 식 (6)은 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$E^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z)^2 \quad (7)$$

여기서 z 는 다음과 같이 정의 된다.

$$z = x_0^2 + y_0^2 - r^2 \quad (8)$$

추정 변수를 x_0, y_0 , 그리고 z 로 다시 정하고,

$$\frac{\partial E}{\partial x_0} = 0 \quad \frac{\partial E}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial E}{\partial z} = 0$$

를 이용하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 2\sum x_i^2 & 2\sum x_i y_i & -\sum x_i \\ 2\sum x_i y_i & 2\sum y_i^2 & -\sum y_i \\ 2\sum x_i & 2\sum y_i & -N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^3 + \sum x_i y_i^2 \\ \sum x_i y_i^2 + \sum y_i^3 \\ \sum x_i^2 + \sum y_i^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)를 풀면 원의 중심 x_0, y_0 과 z 의 값을 구할 수 있으며, 반경 r 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - z}$$

3.3 코너점 추출

식 (1)에 나타난 항목 중 두번째부터 다섯번째 항목을 구하기 위해서는 코너점을 찾아야 하는데, 이를 위해 다각형 근사법(polygonal approximation)을 이용하였다. 다각형 근사법은 보통 경계 근사법(boundary approximation)을 수행하며, 곡선이나 선의 원형을 추출하거나 복원하는데 널리 쓰인다.^{(2) (3)} 다각형 근사법을 자세히 설명하기 위해, 경계 상의 N 개의 점들을 $P_i (i = 1, \dots, N)$ 라 하고 그 중 양끝점을 P_1, P_N 이라 하자. 그러면, 각 경계점 P_i 에서 P_1, P_N 을 잇는 수선의 발 d_i 는 다음을 만족한다.

$$(P_i - d_i)^T (P_N - x_1) = 0 \quad (10)$$

그리고 E_{max} 를 직선까지 거리의 최대 오차(maximal error)라 하고 다음과 같이 정의 하면,

$$E_{max} = \max_{2 \leq i \leq N-1} |P_i - d_i| \quad (11)$$

E_{max} 를 가장 크게 하는 $i = m$ 를 구할 수 있다. 이를 이용하여 새로운 두 직선 $P_i P_m$ 과 $P_m P_N$ 으로 분할한다. 각각의 분할된 경계에 대하여 앞의 과정을 최대 오차가 임계값 이하가 될 때까지 반복한다. 그림 5는 그 수행과정을 나타낸다. 강인한 알고리즘을 위해서, 앞에서 구한 코너점을 바탕으로 나누어지는 각 경계 성분들에 대해서 최소제곱법을 적용하여 직선식을 추출하였으며, 그 직선식의 교점을 구하여 코너점으로 한다.

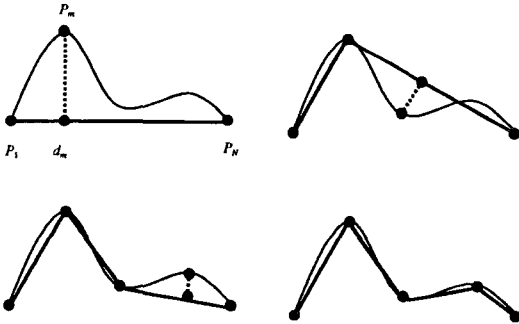


Fig. 5 Polygonal approximation

3.4 카메라 모델링 및 보정

네개의 카메라의 상대 위치 및 화소좌표계와 절대 좌표계 사이의 관계를 나타내기 위해서 카메라 모델링 및 보정이 필요하며 이를 위한 알고리즘으로 Tsai가 제안한 보정 방법을 사용하였다. ^{(1) (2) (3) (5)} 보정을 위한 기하학은 그림 6과 같이 표현되며, 수치적 계산을 위하여 다음과 같은 좌표계를 정의한다.

- (x_w, y_w, z_w) 절대 좌표
- (x, y, z) 카메라 좌표
- (X, Y) 영상 평면 좌표
- (I, J) 프레임 버퍼의 좌표 (화소 좌표)

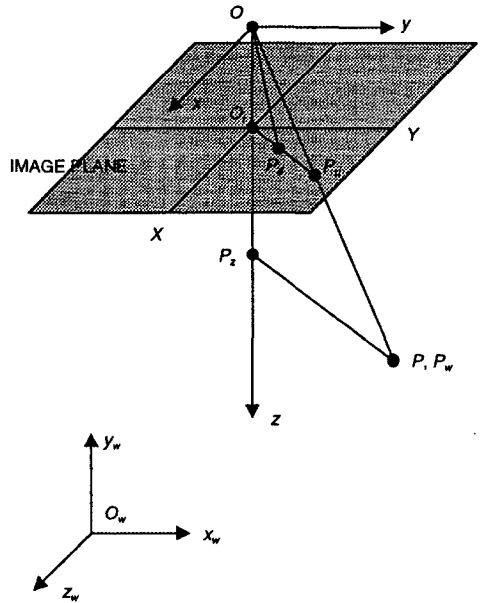


Fig. 6 Imaging geometry

카메라를 모델링하기 위한 인자를 내부인자, 외부인자, 카메라 상수로 분류하여 정의하면 다음과 같다.

내부인자(Intrinsic parameters)

- f 카메라 유효 초점 거리
- κ_1 일차 원주 방향 렌즈 왜곡 계수(radial lens distortion coefficient)
- C_x, C_y 원주 방향 렌즈 왜곡의 중심 좌표
- s_x 프레임 그래버의 스캔라인의 샘플링에서의 불확실성을 보정하기 위한 계수

외부인자(Extrinsic parameters)

- R_x, R_y, R_z 카메라 좌표계와 절대 좌표계 사이의 변환에서의 회전 각도
- T_x, T_y, T_z 카메라 좌표계와 절대 좌표계 사이의 변환에서의 병진 요소

카메라 상수(Camera constants)

- N_{cx} 카메라의 x 방향 센서 소자의 개수 (sels)
- N_{fx} 프레임 그래버의 x 방향 화소의 개수 (pixels)
- d_x 카메라 센서 소자의 x 방향 크기 (mm/sel)
- d_y 카메라 센서 소자의 y 방향 크기 (mm/sel)
- d_{px} 프레임 그래버 화소의 유효 x 방향 크기

d_{py} (mm/pixel)
 프레임 그래버 화소의 유효 y방향 크기
 (mm/pixel)

이상의 인자를 이용하여 영상평면 좌표계와 절대 좌표계 사이의 변환 관계식은 다음과 같이 나타내진다.

$$s_x^{-1}d_x^{-1}X(1+\kappa_1r^2) = f \frac{r_{xx}x_{a,i} + r_{xy}y_{a,i} + r_{xz}z_{a,i} + P_x}{r_{yx}x_{a,i} + r_{yy}y_{a,i} + r_{yz}z_{a,i} + P_y} \quad (12)$$

$$d_y^{-1}Y(1+\kappa_1r^2) = f \frac{r_{yx}x_{a,i} + r_{yy}y_{a,i} + r_{yz}z_{a,i} + P_y}{r_{xx}x_{a,i} + r_{xy}y_{a,i} + r_{xz}z_{a,i} + P_x}$$

여기서

$$r = \sqrt{(s_x^{-1}d_x^{-1}X)^2 + (d_y^{-1}Y)^2}$$

이다. 보정의 과정은 정확한 절대 좌표값을 알고 있는

보정시편의 점들에 대해서 영상에서의 좌표값을 읽어들이어 위 식 (12)를 비선형 최적화해서 얻을 수 있다.

4. 실험 결과

각각의 카메라에서 획득한 영상의 처리 결과는 그림 7에 나타난 바와 같다. (a)는 구부 영상, (b)는 테이퍼 시작 부위, (c)는 전조 하경의 오른쪽 부위 그리고 (d)는 테이퍼 끝단부 및 전조하경의 왼쪽 부위를 나타낸다. 굵은 점선은 원래 영상을 나타내고 가는 점선은 영상 처리 결과 추정한 파라미터에 의해서 생성된 영상이다.

각각의 처리 시간은 최대 0 ~ 30msec였다. 그림 8은 시스템 측정 흐름도와 검사 시간을 설명한다. 검사 대상인 볼-스터드를 장착하여 검사 시스템에 검사 판정하여 내릴 때까지 검사 시간이 1.5 sec 안에 처리되어야 한다. 구동부가 인덱스 테이블을 회전시키는 동안 검사 알고리즘에 의해 검사를 행함으로써 검사 시간을 줄일 수 있다.

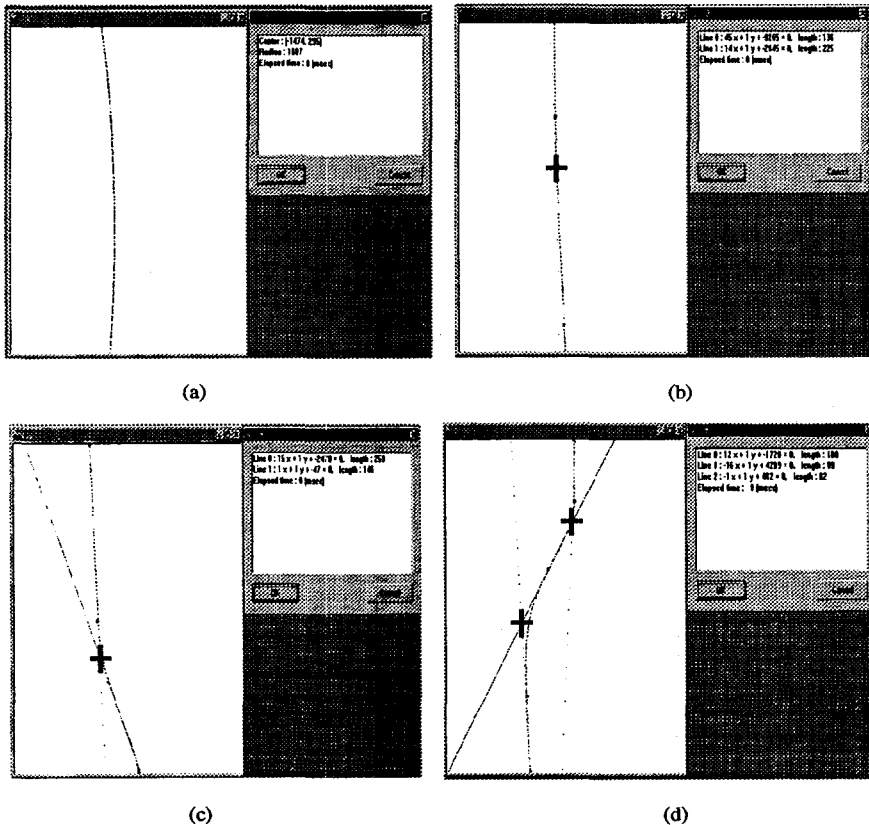


Fig. 7 Results of measurements

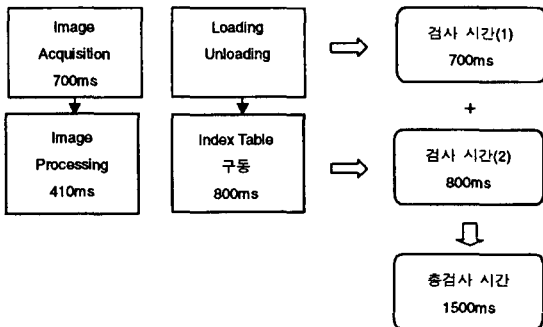


Fig. 8 Collapsed time

5. 결 론

본 연구에서는 3차원 물체인 볼-스터드에 대한 검사 시스템 설계를 제안 하였다. 측정 물체가 기계 부품인 점을 고려하여 고정밀도와 고속 처리를 가능하게 하였다. 고정밀도 즉, 검사 허용 공차가 0.05mm ~ 0.2mm을 만족하도록 하기 위해 다중 카메라 모델을 구성하였다.

또한 고속 처리 즉, 처리 시간 1.5sec 이내에 검사 할 수 있도록 하기 위하여 시스템의 구동부를 인덱스 테이블로 제안하여 검사 부위를 분리시켜서 검사에 할당된 시간을 단축하는 효과를 얻었다. 검사 물체가 바뀌어도 검사 시스템의 환경변화를 최소화 시킬 수 있도록 카메라 지지대가 3자유도를 갖도록 설계하였다. 금속성인 물체 특성에 강한 영상을 얻기 위해서 후방 조명 기법을 이용하였고, 검사 부위별로 영상을 획득하여 볼-스터드를 측정·검사할 수 있도록 하였다. 또한 원 해석과 직선 추출 알고리즘을 구현하였고, 사용자가 이용하기 쉽도록 윈도우 환경에서 처리하도록 하였다. 볼-스터드를 측정할 때 특징점을 이용하는 방법을 제안하여 길이 및 거리를 판정할 수 있도록 하였다.

앞으로 조명 위치에 대한 최적화 연구 및 후방 조명 방

법에 대한 조명원 연구가 필요하다.

또한 측정 시에 조명 밝기 값이 변하는 환경에도 강인하게 대응할 수 있는 최적 이진화법에 대한 연구가 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. A. D. Marshall and R. R. Martin, *Computer Vision, Models and Inspection*, World Scientific, pp.18~25, pp. 32~36, pp. 350~355, 1992.
2. R. Jain, R. Kasturi and B. G. Schunck, *Machine Vision*, McGraw-Hill, pp.189~191, pp. 309~362, pp. 196~198, 1995.
3. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, pp. 51~70, pp. 484~486, pp. 486~488, pp. 443~457, 1992.
4. N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms," *IEEE Trans. SMC*, vol. SMC-9, pp. 62~66, 1979.
5. R. Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses," *IEEE Robotics and Automation*, vol ra-3, NO. 4, Aug 1987.
6. 이 일환, 박 희재, "비전을 이용한 기어 형상 측정 시스템 개발," *한국정밀공학회 96년도 추계학술대회 논문집* pp. 485~489, 1996.
7. 박 재성, 박 희재, 김 구영, "3차원 측정기용 비전 프로브 운용시스템 개발," *한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집* pp. 501~505, 1996.