

자전거 프레임 형상 검사를 위한 비전을 이용한 3차원 측정시스템의 개발 (Development of 3Dimensional Inspection system for Bicycle frame using CCD Camera)

여 인재(서울대원), 박희재(서울대 기계설계학과), 박춘열(코렉스 스포츠)
I.J.Yeo, H.J.Phak(Seoul National University), C.Y.Pahk(Corex Sports)

Abstract

The bicycle production process mainly consists of welding process of pipes and its quality is determined by geometrical symmetry of arrangement of welded pipes. Hence, manual quality control of bicycle frames was very inefficient and required much time in dimensional inspection and does not reserve high precision. In this paper we introduce a method of fast and accurate dimensional inspection of bicycle frame using the Stereo Vision system and related some image processing techniques.

1. 서론

두개이상의 파이프로 결합되어있는 자전거프레임의 중요한 기하학적 형상은 부품상호간의 결합각과 결합거리(결합위치)로 나뉘어진다. 이에대한 기준의 검사방법으로는 3차원형상을 2차원적 측정에 의존하고 있기 때문에 각각의 요소를 모두 검사하는 것이 불가능하며 정확성에 있어서도 신뢰도가 떨어진다.

스테레오비전 시스템은 비슷하게 설치된 두 대의 카메라로 동일한 물체를 촬영하여 그 영상의 차이로부터 물체의 3차원 정보를 인식하는 시스템으로써, 스테레오 비전에 의한 자전거프레임의 품질검사는 다음의 과정을 거쳐 구현된다. 첫째 각 카메라의 위치와 자세결정, 둘째 스케일인자(Scale factor), 일그러짐인자(Distortion factor)등의 카메라계수 결정, 셋째 촬영된 화상에서 주요 요소 추출, 네째 검사에 의한 기계요소의 특성치 기술이다.

카메라의 위치및 자세는 3차원 선 및 점맞춤법(3D Line & Point correspondence)을 기초로하여 직육면체형상의 3차원 교정물체(Calibration Object)를 이용하여 회전행렬(Rotation Matrix)R과 병진벡터(Translation Vector)T를 구한다. 이때, 각각의 카메라계수들은 핀홀모델(Pinhole model)을 기초로 하므로 일그러짐계수를 무시하고 수평방향(Horizontal Direction)과 수직방향(Vertical Direction)의 스케일인자를 각각 구하여 고정밀도의 검사를 가능케 한다.

이렇게 구성되는 스테레오 비전 시스템은 두대의 카메라를 한쌍으로하여 이루어진다. 각 카메라쌍에서 얻어진 하나의 목적물체에 대한 이미지를 통합및 분석하여 프레임을 구성하는 파이프의

중심선 및 프레임주요요소에 대한 3차원 정보를 얻어내어 각 중심선 상호간의 기하학적 관계로부터 프레임의 3차원 정보를 얻어낸다.

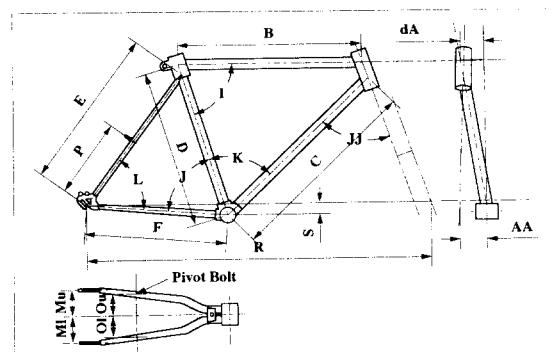


Fig.1 프레임 검사형목

Fig.1은 자전거프레임의 도면 중 하나로서 형상검사대상이 되는 주요항목을 나타낸다. 각각의 검사항목을 측정하는데 있어서 상용 CCD 카메라의 촬영영역 범위와 정밀도가 반비례하므로, 카메라쌍을 이축 선형 이송장치를 이용하여 프레임의 원하는 위치위로 연속적으로 카메라를 이동시켜 각각의 위치에서 프레임의 국부적 영역을 촬영하고 좌표계보정을 통하여 전체 형상검사를 가능케 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 카메라보정

2.1.1 카메라 자세 결정

실공간에서의 좌표계를 WCS(World coordinate System), 화면상의 좌표계를 MCS(Monitor coordinate System), 편홀모델에서의 카메라좌표계로써 Z축은 광축(Optical axis)과 일치하며 X, Y축은 MCS의 X, Y축에 대응하는 이미지좌표계를 ICS(Image coordinate System), computer memory에 대한 좌표계(Fig.4)를 BCS(Buffer coordinate System), ICS의 원점으로부터 광축을 따라 거리 1에 위치하여 광축에 수직인 가상평면을 IIP(Ideal Image Plane)라 규정할때 다음과 같이 주요 기호들을 정의한다.

P	-	WCS에 대한 3차원상의 점의 위치벡터
P'	-	P의 이상적 ICS에 대한 위치벡터
IP	-	IIP에 투사된 점 P의 상 P'에 대한 위치벡터
MP	-	MCS에 대한 모니터위의 점 P'의 위치벡터
BP	-	BCS에 대한 모니터위의 점 P'의 위치벡터
R	-	WCS에서 ICS로의 회전변환행렬
T	-	WCS에서 ICS로의 병진벡터

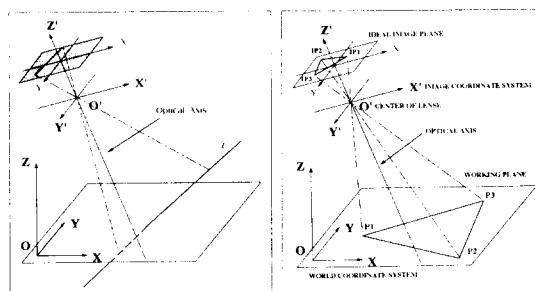


Fig.2 삼차원직선과 그 영상
WCS상의 임의의 점 P를 ICS에 대한 위치벡터로 변환하면

$$P = RP' + T \quad (1)$$

$$P = [x \ y]^\top$$

$$T = [t_x \ t_y \ t_z]^\top$$

$$P' = [x' \ y' \ z']^\top$$

이 된다. 각각의 좌표계에 대한 점 P의 위치벡터의 표시와 상호 관계는 다음과 같이 나타내어진다. (Fig. 2-3)

$$IP = [IX \ IY] \quad : MP = [MX \ MY]$$

$$BP = [BX \ BY]$$

$$IX = x'/z' \quad : Y = y'/z' \quad (2)$$

$$MX = k_H IX \quad : MY = k_V IY \quad (3)$$

$$MX = BX - c_x \quad : MY = c_y - BY \quad (4)$$

$$c_x = \text{aspX}/2 - 0.5, \ c_y = \text{aspY}/2 - 0.5$$

$$640*480 \text{ mode: } c_x = 640/2 - 0.5, \ c_y = 480/2 - 0.5$$

이때 c_x, c_y 는 화면중심(MCS의 원점)에 해당하는 점의 BCS에 대한 좌표이다. IP와 MP를 식 (1)에 대입하면 모니터상에 나타난 점 P의 WCS에 대한 위치벡터는 다음과 같이 나타내어진다.

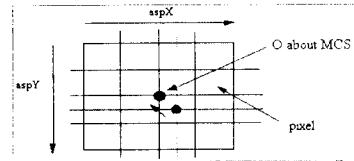


Fig.4 BCS 와 MCS

$$P = z'R[IX \ IY \ 1]^\top + T$$

$$P = z'R[MX/k_x \ MY/k_y \ 1]^\top + T \quad (5)$$

z' 는 실제 카메라의 감광센서가 위치하는 평면과 편홀모델의 원점사이의 거리이고 k_x, k_y 는 MCS와 WCS간의 스케일인자로써 감광센서의 특성치에 따라 결정되는 값이다.

실공간상의 3차원직선 /에 대하여 화상거리로 얻어진 해당 3차원직선의 방정식은 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$ak_H IX + k_V IY + (b + a c_x - c_y) = 0 \quad (6)$$

$$A IX + B IY + C = 0 \quad (A^2 + B^2 + C^2 = 1) \quad (7)$$

식(7)은 식(6)을 정규화한 것이다.

이론적으로 k_H, k_V 는 서로 같은 특정한 값을 갖는다. 이는 카메라시야영역(Camera View Region)과 디스플레이어퍼(Display Buffer)의 크기에 의해 결정된다. 즉, 수평시야영역(Horizontal View Region)을 θ_H , 수직시야영역(Vertical View Region)을 θ_V 라 하면, k_H, k_V 는 이론적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$k_H = \frac{\text{asp}X_{\max}}{\tan(\theta_H/2)} \quad ; \quad k_V = \frac{\text{asp}Y_{\max}}{\tan(\theta_V/2)} \quad (8)$$

그러나 이 값은 상용CCD 카메라에 있어서 이론적 값과 다소 틀린다. 정밀한 측정에 이론적 값을 사용하면 그 차이가 측정오차에 미치는 효과는 매우 커지므로 이 값을 정확히 알아내어야 한다. 이것에 대해서는 밑에서 자세히 다룰 것이다.

식 (7)은 ICS상에서 표현되는 3차원직선의 투영평면(Pojecting Plane - ICS 원점과 삼차원직선 /로 이루어지는 평면)의 방정식이 된다. 이때 $N = (A, B, C)^\top$ 라 하면, N 은 이 평면의 방향벡터가 된다. 따라서 $n = (a, b, c)^\top$ 과 $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 로 나타내어지는 3차원직선 /은 ICS에서 다음을 만족한다.

$$n' = R^{-1}n$$

이 직선은 평면 N에 항상 수직이므로,

$$Nn' = 0, \text{ or } n^\top RN = 0 \quad (9)$$

오일러각(θ, ϕ, ψ)으로 나타내어지는 회전변환행렬 R은 다음과 같이 구해진다.

$$R = \begin{bmatrix} C_2C_3 - C_1S_2S_3 & -C_2S_3 - C_1S_2C_3 & S_1S_2 \\ S_2C_3 + C_1C_2S_3 & -S_2S_3 + C_1C_2C_3 & -S_1C_2 \\ S_1S_2 & S_1C_3 & C_1 \end{bmatrix}$$

이때 $C_1 = \cos\theta, C_2 = \cos\phi, C_3 = \cos\psi, S_1 = \sin\theta, S_2 = \sin\phi, S_3 = \sin\psi$ 이다. 따라서 식 (9)은, 3차원직선 /에 대하여 다음

과 같이 나타내어진다.

$$F_k(\theta, \varphi, \psi) = n^T R N = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ki} r_{ij} A_{kj} = 0$$

$F_k(\theta, \varphi, \psi)$ 의 1차 테일러 전개식을 이용하여 $A_0 = (\theta_0, \varphi_0, \psi_0)$ 에 대해 전개하면,

$$\partial F_{k\theta}(A_0) + \varphi F_{k\varphi}(A_0) + \psi F_{k\psi}(A_0) = -F_k(A_0)$$

이다. 이를 $k = 1, 2, \dots, n$ 에 대하여 행렬식으로 나타내면,

$$G = \begin{bmatrix} F_{1\theta}(A_0) & F_{1\varphi}(A_0) & F_{1\psi}(A_0) \\ F_{2\theta}(A_0) & F_{2\varphi}(A_0) & F_{2\psi}(A_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{n\theta}(A_0) & F_{n\varphi}(A_0) & F_{n\psi}(A_0) \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} F_1(A_0) \\ F_2(A_0) \\ \vdots \\ F_n(A_0) \end{bmatrix}$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ \psi \end{bmatrix}$$

이고, 증분각도벡터 ΔA 는 최소자승법에 기초한 의사역행렬(Pseudo Inverse)에의하여 다음과 같이 구한다.

$$\Delta A = (G^T G)^{-1} G^T H \quad (11)$$

따라서 $k = 1$ 에대하여 $A_1 = A_0 + \Delta A_1$ 가 되고 새로 얻어진 A_1 를 다시 식 (11)에 대입하여 순차적으로 $A_k = A_{k-1} + \Delta A_k$ ($k = 1, 2, \dots$)를 구해나간다. 이때 $|\Delta A_k| < \epsilon$ 일때까지 식 (11)을 반복한다. 특정반복횟수까지 조건을 만족시키지 못하면 새로운 초기값 A_0 을 주어 계산한다.

다음으로, 병진벡터 T 는 절대좌표계에 대한 랜즈중심의 좌표에 해당하므로, 관측된 3차원직선과 렌즈의 중심점으로 이루어지는 3차원평면의 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(X - P_i)^T (RN_i) = 0$$

여기서 N_i 는 i 번째직선의 방향벡터이고, P_i 는 해당직선위의 임의의 한 점이다. 이때 관측된 모든 3차원 직선에 대하여 얻어지는 3차원 평면은 렌즈의 중심점(좌표벡터 T)을 지나므로 다음식이 성립한다.

$$T^T RN_i = P_i^T RN_i \quad (12)$$

식 (12)에 3개이상의 점에 대하여 최소오차자승법을 이용하여 병진벡터 T 를 구한다.

2.1.2. 카메라계수결정

회전변환행렬 R 를 구함에 있어서 k_H, k_V 를 미지수로 놓고 계산하면 비선형성이 커져서 기준방법으로는 풀수가 없게 된다. 따라서 특정한 k_{H0}, k_{V0} 로부터 실제값을 찾아가야 한다. 이를 위해 먼저 이론치 k_{H0}, k_{V0} 를 모든식에 대입하여 최초의 R 과 T 를 구한뒤, 이곳으로 이미 WCS에 대한 위치벡터를 알고있는 3개이상의 점 P_{Ni} 취해 좌표변환을 수행하면,

$$P_{Nk} = RP_{Nk} + T$$

이 되고, 이때 참값에 대한 오차를 다음과 같이 규정한다.

$$E(k_{H0}, k_{V0}) = \|P_{Nk} - P_{Nk}\|^2 \quad (13)$$

식(8)로부터의 이론치 (k_{H0}, k_{V0}) 주위에서 $\{(k_H, k_V)\}$ 을 설정하여 각각의 (k_H, k_V) 에 대하여 R 과 T 를 구하여 $\{E(k_H, k_V)\}$ 을 만들어낸다.

$$\begin{aligned} [(k_H, k_V)] &= \\ &\left[(k_{H0}-dk, k_{V0}-dk) \quad (k_{H0}, k_{V0}-dk) \quad (k_{H0}+dk, k_{V0}-dk) \right. \\ &\quad \left. (k_{H0}-dk, k_{V0}) \quad (k_{H0}, k_{V0}) \quad (k_{H0}+dk, k_{V0}) \right. \\ &\quad \left. (k_{H0}-dk, k_{V0}+dk) \quad (k_{H0}, k_{V0}+dk) \quad (k_{H0}+dk, k_{V0}+dk) \right] \\ U_i &= \sum_{i=0}^n (ak_{H0}^2 + bk_{V0}^2 + ck_{H0}k_{V0} + dk_{H0} + ek_{V0} + f - E)_i \end{aligned}$$

이때 K, C, U 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} K_i &= [k_{H_i}^2 \quad k_{V_i}^2 \quad k_{H_i}k_{V_i} \quad k_{H_i} \quad k_{V_i} \quad 1] \\ K &= [K_1^T \quad K_2^T \quad \dots \quad K_n^T] \\ C &= [a \quad b \quad c \quad d \quad e \quad f] \\ U &= [U_1 \quad U_2 \quad \dots \quad U_n]^T \\ C &= (K^T K)^{-1} K^T U \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)을 풀어 $E(k_H, k_V)$ 의 최소점을 찾을 수 있다. 얻어진 오차최소점주위로 새로운 $\{(k_H, k_V)\}$ 을 설정하고 각각의 (k_H, k_V) 에 대하여 다시 R 과 T 를 구하여 위의 과정을 반복한다. 이과정을 반복하여 (k_H, k_V) 를 최적화한다. 최종적으로 얻어지는 (k_H, k_V) 를 전체식에 대입하여 다시 R 과 T 를 구한다.

2.2. 형상 추출

2.2.1. 직선성분 추출

두 영상으로부터의 물체의 3차원정보를 인식하려면 각각의 영상 위의 임의의 점이 같은 점임을 인식해야 한다. 그러나 이것은 기술적으로 불가능하므로 각각의 영상에서의 임의의 직선이 같은 직선임을 인식하여 3차원정보를 얻어내는 것으로 문제를 단순화한다. 이를 위하여, 얻어진 영상위의 직선성분에 대하여 정확한 직선벡터를 추출해야 한다.

이미지상의 직선성분 추출은 보통 허프변환(Hough Transform)을 통하여 이루어진다. 그러나 이 방법은 해당직선의 벡터(방향 및 위치)를 얻고자 할때 매우 부정확하고 연산시간이 늦다는 단점이 있다. 정확성을 두배로 높이고자 하면 연산시간이 4배가 더 걸리므로 다른 방법을 이용한다.

입력된 이미지에 대하여 경계추출(diamond filtering)과 이진화를 수행한 후 이미지 버퍼를 정사각형의 검색창(search window)로써 검색한다. 검색창의 중심에 유효한 점이 인식됬을 때 점검색창전체에 대하여 유효점을 찾아 직선피팅(fitting)을 수행하고 이때 오차를 계산하여 일정한 값보다 작게 되면 검색된 점을 직선의 일부분으로 간주하여 피팅된 직선벡터값을 저장한다. 다음, 현재점에서 연속적으로 이어진 경계위의 유효점을 따라서 검색해가며 같은 연산을 반복수행하여 해당 점이 직선의 일부분으로 결정되었을 때 현재까지 저장되어있는 직선벡터들과 비교하여 그 차이가 일정한 값 이하가 되는 직선에 기준치를 부여하고 해당하는 직선의 벡터값을 직선피팅을 이용하여 갱신한다.

어떠한 관측된 직선과도 다른 벡터값을 가질 경우 새로운 직선으로 간주하여 직선버퍼를 추가한다. 이때 임의의 기울기에 대하여 추출이 가능해야 하므로 직선방정식과 직선피팅에 대한 오차는 다음과 같이 정의 한다.

$$AX + BY - 1 = 0$$

$$\text{Error} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{|AX_i + BY_i - 1|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

최종적으로 얻어지는 직선의 벡터 및 상수값은 검색된 해당직선 위의 모든 점을 직선피팅하여 결정하고 얻어진 직선벡터를식 (6), (7)로써 변환한다.

2.2.2. 주요요소 추출

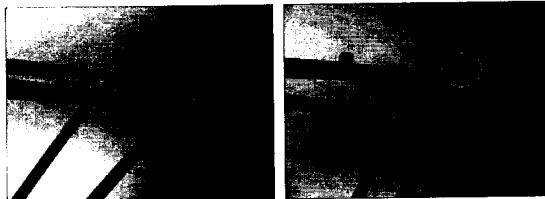


Fig.5 Solid 회성(좌-우)

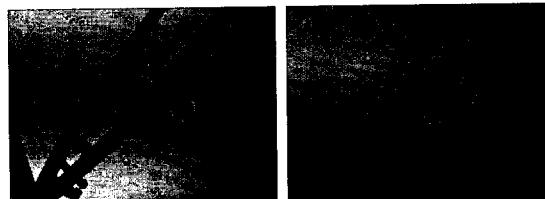


Fig.6 Pivot Bolt 와상(좌-우)

프레임검사에서 삼차원 인식을 요구하는 프레임상의 주요요소는 Fig.8(Solid), Fig.9(Pivot Bolt)의 원형부분이다. 화상전처리는 직선추출에서와 같이 다이어몬드 필터링후 이진화를 수행한다. 전처리를 거친 후의 화상은 Fig.10, Fig.11이며, Solid에서는 반원형 흄의 중심위치벡터, 그리고 Pivot Bolt에서는 원기둥 형 피봇의 바깥쪽 원모양의 중심위치벡터를 구해야 한다.

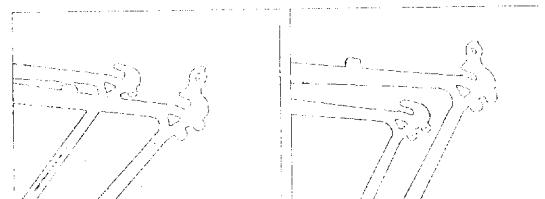


Fig.7 진처리후 Solid 화상

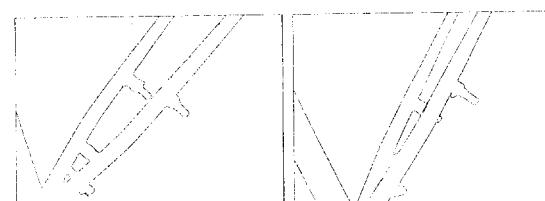


Fig.8 진처리후 Pivot Bolt 화상

이러한 형상은 일반적 패턴인식(Pattern Recognition)의 문제가 폐곡선을 다룬는데 반해 개곡선의 일부분으로서 존재하기 때문에, 패턴인식방법중 가장 일반적인 방법인 물체 중심점으로부터의 (r, θ) 에 의한 이산푸리에변환(Discrete Fourier Transform) 방법이나, AR(Autoregressive)시리즈 분석, 또는 CAR(Complex Autoregressive)시리즈 분석 등의 Time Series Analysis방법 적용이 매우 어렵다.

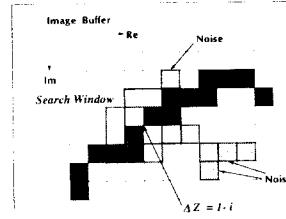


Fig.9 전신하는 검색창

본 연구에서는 이러한 형상의 추출을 위해 주어진 개곡선형상에 대하여 복소수 형태의 순간 미분치를 시간평균하여 생성되는 데이터 시리즈에 이산푸리에변환방법을 적용하여 각 주파수에서의 계수로써 형상특성치를 기술하였다.

먼저, 추출해야 할 형상의 패턴벡터(Pattern Vector)의 결정은 다음과 같다. 전처리된 후의 화상버퍼(Image Buffer)를 B라 정한다. 이때 B는 몇 개의 개곡선과 폐곡선들로 이루어진다. 전체 버퍼에 대하여 3×3 의 검색창(Fig.9)을 통해 곡선을 검색해가면서 연속된 t 개의 화소에 대하여 순간미분치(이전점에 대한 다음점의 상대적 변화를 복소수로 나타낸 것)의 시간평균(Time Average)을 취한다. 계속적인 검색에 의해 샘플링(Sampling) 개수가 채워지면 이산푸리에변환을 통해 각 주파수에서의 계수를 얻는다.

$$ta_i = \frac{\sum_{k=1}^t \Delta z_k}{|\sum_{k=1}^t \Delta z_k|} : t\text{번째 시간평균치}$$

$$x_r = \sum_{k=0}^{N-1} ta_k e^{j(2\pi kr/N)} : r = r_0, r_1, \dots, r_n$$

이때 Δz_k 는 $\{1, -1, i, -i, 1+i, 1-i, -1+i, -1-i\}$ 의 8개의 값 중 한 값을 갖을 수 있으며, N 은 샘플링 개수, r 은 해당 주파수를 나타낸다. 시간평균용 샘플링의 샘플링주파수에 의한 계수에 영향이 없는 주파수영역을 선택해야 하므로, 패턴분석에 쓰이는 주파수영역은 $r > N/\tau$ 로 제한된다. 얻어지는 계수 x_r 은 복소수이므로 위상성분 $\tan^{-1}(Im(x_r)/Re(x_r))$ 을 무시하고 크기(magnitude) $m_r = |x_r|$ 만을 취한다.

곡선 전체에 대하여 연속적으로 얻어진 특성치 시리즈 $\{m_r\}$ 에 서, 추출해야 할 형상의 중심에 대한 샘플링이 이루어졌을 때의 특성치와 그 이외에서의 특성치를 비교하여 차이가 두드러진 주파수를 패턴벡터인자로 선택하고 이값을 일차적 표준값으로 정한다. 이때 주어진 패턴의 인식을 위해서는 모든 r 를 취할 수 없으므로, 각각의 주요요소에 대해 약간씩의 변화를 주어 입력시킨 서로 다른 화상을 분석하여 통계적 평균치 $\{m_r\}$ 를 얻어내고, 이때의 해당 인자에 대한 표준편차를 $\{\sigma_r\}$ 라 정한다. 패턴벡터를 선택함에 있어서 정확성 및 견실성을 확보하기 위하여 각각의 r 에서의 m_r, σ_r 중, 다른 주파수 r' 에서보다 상대적으로 σ_r/m_r 값이 작은 r 을 선택하여 패턴벡터 $\{m_r, \sigma_r\}$ 를 규정한다.

각각의 주요요소 인식을 위한 결정함수(Decision Function)는 다음과 같이 정의한다.

$$F_p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i - x_i}{\sigma_i} \right)^2 \right)^{1/2} \quad \text{--- (15)}$$

이때 x_i 는 찾고자하는 패턴의, 주파수 r_i 에 해당하는 이산푸리에변환 계수의 절대값이다. 결정함수의 함수값이 5이하일 때에 대하여 제 1주기에 해당하는 값이 최대일 때를 목적패턴을 찾은 것으로 한다. 추출된 패턴에 대한 요구되는 2차원 좌표값은 샘플링된 점들의 좌표로부터 구한다. 표본에 대한 분석을 토대로 해당 2차원좌표(about BCS)는 다음과 같이 구해짐을 알 수 있다.

$$(x_p, y_p) = \frac{1}{s-2 \times t} \sum_{i=2-t}^{s-t} (x_i, y_i)$$

s : Number of Samples

t : Number of Samples about Time Average

2.4. 스테레오 비전에 의한 특성치 기술

2.4.1 3차원 직선

두대의 카메라는 하나의 교정물체(Calibration Object)에 의해 동일한 WCS로의 변환행렬(transfer matrices)를 갖게 된다.

	카메라 A	카메라 B
법진 벡터	T_A	T_B
회전변환행렬	R_A	R_B

이때 두대의 카메라로 하나의 3차원 직선 1을 촬영하여 각각의 카메리에 대하여 식(7)에서의 벡터를 구하면 이는 WCS에서의 평면의 법선벡터가 된다. WCS에 대한 직선 1의 방향벡터가 N_1 일때, 각각의 카메라에서 ICS_A 및 ICS_B에 대한 직선1의 방향벡터는 각각 N_{A1} , N_{B1} 이 된다.

해당직선의 3차원 방정식은 $X_1 = tN_1 + X_0$ 로 나타내어지므로, 직선 1과 각각의 카메라렌즈의 중심과 이루어지는 평면의 법선벡터 N_{A1} : N_{B1} 를 WCS에 관해 나타내면,

$$N_{AA1} = R_A N_{A1} ; \quad N_{BB1} = R_B N_{B1} \quad \text{--- (16)}$$

이며, 직선 1은 이를 평면위에 있으므로 다음식이 성립된다.

$$N_{AA1}^T (X_1 - T_A) = 0 ; \quad N_{BB1}^T (X_1 - T_B) = 0 \quad \text{--- (17)}$$

$$N_1 = N_{AA1} \times N_{BB1}$$

$t = 0$ 일 때에 대하여 (16)를 (17)에 대입하여,

$$N_{AA1}^T X_0 = N_{AA1}^T T_A ; \quad N_{BB1}^T X_0 = N_{BB1}^T T_B \quad \text{--- (18)}$$

이때 X_0 를 직선위의 점중 원점에 가장 가까운 점이라 놓아 다음 식으로 X_0 를 정한다.

$$X_0 = [N_{AA1} \ N_{BB1} \ N_1]^{-T} [N_{AA1}^T T_A \ N_{BB1}^T T_B \ 0]^T \quad \text{--- (19)}$$

이로써 여러개의 3차원 직선을 얻어내고, 각각의 벡터(N_1 , X_0)를 이용하여 상호관계를 얻어낸다. 이때 축대칭 기계요소의 경우 경계선에 대한 두개의 벡터가 추출되므로 중심축에 대한 벡터는 ICS에 대한 두 경계선벡터의 평균의 정규화로써 얻어진 N_{A1} : N_{B1} 로부터 계산한다.

2.4.2 주요요소의 3차원 좌표

두 대의 카메라로부터 얻어진 주요요소에 대한 2차원 좌표(about MCS)를 각각 $P(X_{pa}, Y_{pa})_A$, $P(X_{pb}, Y_{pb})_B$ 라 하면 이 점은 3차원공간에서 같은 점 P를 나타내므로 다음을 만족한다.

$$P = z_A R_A P_A + T_A = z_B R_B P_B + T_B \quad \text{--- (20)}$$

$$P_A = \begin{bmatrix} x_{pa}/k_H \\ y_{pa}/k_V \\ 1 \end{bmatrix}, \quad P_B = \begin{bmatrix} x_{pb}/k_H \\ y_{pb}/k_V \\ 1 \end{bmatrix}.$$

식 (22)를 의사역행렬을 이용하여 풀어 z_{sol} 을 구하고 이로부터 3차원좌표 P와, A 및 B로부터 얻어지는 P벡터의 차이로부터 측정오차 P_{error} 를 규정한다.

$$P = \frac{(z_{sol}' R_A' P_A + T_A) + (z_{sol}' R_B' P_B + T_B)}{2}$$

$$P_{error} = \frac{|(z_{sol}' R_A' P_A + T_A) - (z_{sol}' R_B' P_B + T_B)|}{2}$$

3. 시스템구현

3.1. 측정장비

3.1.1 2축이송장치

프레임의 다양한 규격에 맞추어 프레임 전체영역을 활용하기위해서 XY-table은, Lead 20mm볼스크류를 내장한 1200mm, 800mm길이의 선형가이드를 이용하였으며 각 가이드의 이송용모터는 토크 11.5kgf×cm의 스텝모터 두개로 하였다. 이 모터는 1회전당 1000펄스(Pulse)이며 최소 위치이송양은 $20\mu\text{m}$ 가 된다.

카메라의 측정정밀도가 0.2mm인 것을 감안하면, 한 번 측정함에 있어서 약 0.06mm의 오차를 일으킬수 있는 펄스수가 30이므로 기계적인 결함에 의한 펄스손실률은 측정정밀도에 매우 미미한 영향을 미친다고 할 수 있다.

이와 같은 이축이송장치를 통하여 충분한 정밀도 및 반복성능으로써 카메라를 원하는 위치에 이송시킬수 있다.

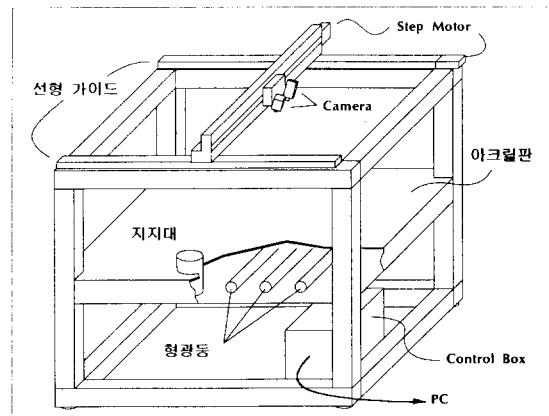


Fig.10 측정장비 개략도

3.1.2 이송장치 드라이버

스텝모터 드라이버는 최대 초당 10000펄스를 출력할 수 있으나 펄스순실에 의한 오차가 생기는 것을 줄이기 위해서는 저속운전이 바람직하며 임계값이상의 저속운전은 기계의 진동을 유발하고 소음도 많이 발생한다.

사용된 스텝모터의 부드러운 구동을 위해서는 약 300Hz이상의 출력주파수가 필요하며 신속한 검사수행을 위해서는 2000Hz이상의 출력주파수가 바람직하며 이때의 이송속도는 40mm/sec가 된다. 이를 바탕으로 모터구동의 최저속도로는 300Hz, 최대속도로는 3000Hz를 설정하였다.

3.1.3 조명장치

프레임의 경계에 대한 정확한 화상을 얻기 위하여는 프레임을 지지대를 이용하여 공중에 띄워놓고 밑에서 가능한 한 일정한 밝기의 면광원을 이용해야 한다.

바닥에 8개의 20w 형광등을 분산배치하고 그 위에 백색의 선팅용 비닐을 밑에 불인 투명한 아크릴판을 올려놓았다. 아크릴판위에 프레임을 띄워놓고 촬영을 수행하는데, 프레임이 도장되어있지 않은 상태에서는 정확한 프레임의 경계를 촬영할 수 있다. 광원의 밝기는 이미지그래버의 특성상 특별히 밝을 필요는 없고 대신 소프트웨어적으로 이미지그래버의 게인(gain)값을 조절함으로써 광원의 밝기를 밝게 한 것과 같은 결과를 얻을 수 있다.

선팅처리한 아크릴판은 깨끗한 화상을 얻기 위하여 표면을 깨끗이 해야 하며 표면의 편평도나 수평맞춤등은 중요하지 않다.

3.2. 카메라교정

3.2.1 카메라 자세교정

교정을 위한 표준물체는 정확히 치수를 알고있는 직육면체를 사용하여 3차원 선 및 점맞춤법을 쉽게 적용할 수 있게 했다.

하나의 카메라위치에 대한 카메라자세교정은, 조명장치가 밑에 설치된 평판위에 교정을 위한 표준물체를 정해진 위치에 정확히 설치한 후 카메라 A,B를 각각 고정시키고 입력채널 A, B로부터 각각의 카메라에서 얻어지는 영상을 차례로 입력받아 경계추출, 이진화, 직선추출, 표준물체와 추출직선과의 짹짓기, 회전벡터계산, 병진벡터계산의 순서로 이루어진다.

카메라를 이동하게되면 절대좌표계에 대한 병진벡터가 달라지는데, 이때 2층이송장치의 XY축이 서로 직각이 아니거나 보정물체로 규정되는 절대좌표계와 그 방향이 일치하지 않아도 회전변환행렬은 이론적으로 달라지지 않는다. 따라서 이송에 따르는 병진벡터의 변화만을 추적하면 임의의 위치에서의 절대좌표계에 대한 좌표계변환이 가능케 된다.

이를 위하여 이송장치의 각각의 축방향 이동에 대한 병진벡터의 변환식이 요구된다. 이송장치에 의한 카메라 변위가 (x, y) 이고 변위 $(0, 0)$ 에서의 보정된 병진벡터 및 회전변환행렬을 각각 T_0, R 이라 놓으면 변위 (X, Y) 에서의 병진벡터 $T(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$T(x, y) = T_0 + \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \\ C_{zx} & C_{zy} \end{vmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} : \quad C = \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \\ C_{zx} & C_{zy} \end{vmatrix}$$

행렬 C 를 구하기 위하여 이송장치로 카메라를 각각 독립적인 방향으로 두 번이상 이송하여 보정을 수행해야 한다. 보정하여 얻어진 각각의 위치 P_i 에서의 병진벡터를 T_i ($i = 1, 2, \dots, n$)라 하

면,

$$[T_1 - T_0 \ T_2 - T_0 \ \dots \ T_n - T_0] = C [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]$$

이 되어 의사역행렬을 이용하여 C 를 얻는다.

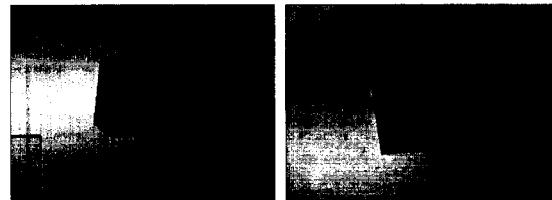


Fig.11 교정물체(좌)

Fig.12 교정물체(우)

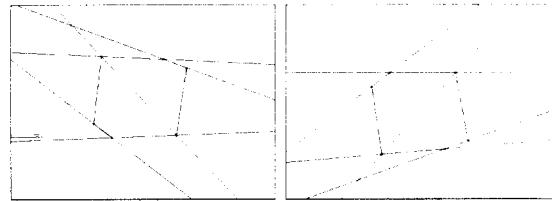


Fig.13 교정물체 직선추출(좌) Fig.14 교정물체 직선추출(우)

3.2.2 카메라 특성치보정

k_H, k_f 는 카메라제원으로부터 식 (9)에 의해 초기값 (k_{H0}, k_{f0})을 얻어 이것으로 계산을 수행하였다. (k_H, k_f)의 집합설정을 3회 반복하여 최적의 값을 얻어냈으며, 신뢰성을 좀 더 높이기 위해 WCS위에 교정물체를 고정시킨 후 카메라의 위치 및 방향을 변화시켜 오차계산을 수행할 이미지를 두 개 이상 취한다. 이때 모든 이미지는 초점거리를 고정시킨후 획득한다. 이렇게 하여 오차를 최소화하는 (k_{H0}, k_{f0})를 얻을수 있다. 이를 위해 27개의 서로다른 k_H, k_f 값에대하여 각각 회전변환행렬 및 병진벡터를 구했으며, 결과는 다음과 같다.

$$\theta_H = 30^\circ 26' : \theta_f = 22^\circ 49'$$

$$k_{H0} = 1176.44 : k_{f0} = 1189.37$$

Fig.13-14에서와 같이 하나의 이미지에서 6개의 꼭지점이 추출된다. 각각의 카메라에 대해서 4개의 교정물체 이미지를 얻어총 24개씩의 꼭지점에 대해서 오차를 계산하였다. 회전변환행렬 및 병진벡터를 구할때는 추출되는 6개의 경계선벡터중 1차독립인 벡터를 3개 포함시키고 나머지 하나를 더 선택해서 계산을 수행하였다. 이때 추가로 선택하는 직선은, 추출되는 6개의 경계선벡터들의 교점으로 얻어지는, 육면체의 대각선중 가능한 한 높은 정밀도를 얻을 수 있도록 화면상의 길이가 긴 직선을 선택하였다.

< 교정결과 >

a. 교정물체 제원

$$80 \times 80 \times 50 \text{ mm} \quad (\text{각변 허용오차} : 0.05\text{mm})$$

b. 카메라계수

$$k_H = 1240.6 : k_f = 1228.0$$

c. 꼭지점에서의 오차 (95% 신뢰도)

$$\text{하나의 카메라에서 얻어진 이미지에 대한 오차} : \pm 0.26\text{mm}$$

$$\text{두 카메라에서 얻어진 이미지상호간의 편차} : \pm 0.07\text{mm}$$

3.3 주요요소 인식

이산푸리에변환은 주파수 1Hz에서 3Hz까지 0.2Hz단위로 계수를 얻었으며, 각 주요요소형상위의 Pixel이 샘플링 개수내에 충분히 포함될 수 있도록 $N = 50$ 으로 하였으며, 시간평균치를 얻기위한 샘플링 개수는 고주파에 에너지가 집중되는 것을 피하면 서도 충분한 주파수 영역에대해 검사가 가능하도록 $\tau = 5$ 로 하였다.

형상인식에 있어서 주요요소와 국부적으로 완전히 동일한 화상(Fig.13)이 있는데, 이는 테스트 결과 결정함수로는 구분이 불가능하여, 이 형상이 물체의 내측을 향하는가 또는 외측을 향하는가를 검사함으로써 참,거짓을 판단하도록 하였다.

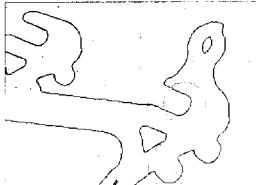


Fig.15 유사화상

Fig.8 및 Fig.9에서 보이는 총 8개의 패턴에 대하여 각각 6개의 유사화상을 처리하여 얻어진 패턴벡터값은 다음 표와 같다.

	Solid Right	Solid Left	Pivot Right	Pivot Right 2	Pivot Left
freq1	1.0	1.0	1.0	1.8	1.0
mean	.298134	.333082	.350458	.099465	.345194
stdev	.015144	.010518	.010518	.003472	.017567
freq2	1.8	2.2	1.2	2.0	1.2
mean	.209457	.069377	.263839	.128724	.258092
stdev	.012535	.019530	.004701	.003314	.010387
freq3	2.4	2.8	1.4	2.2	1.4
mean	.026453	.011044	.165985	.143900	.160201
stdev	.004244	.008235	.002979	.008438	.008586
freq4	2.8	3.0	2.4	2.4	2.4
mean	.064221	.019999	.010915	.136517	.017110
stdev	.010206	.005169	.007852	.013229	.013530

위는 각각 전술한 m_r, σ_r 값으로서 $r = freq_r, m_r = Mean, \sigma_r = stdev$ 에 해당한다. 정의된 결정함수에 따라 Fig.8 및 Fig.9에 대하여 패턴인식을 실시하여 얻어진 결과, 각 주요 좌표는 다음표와 같다.

	Solid		Pivot Bolt		
	1	2	1	2	
Left Camera	X	262.36	418.94	408.28	318.22
Right Camera	Y	158.67	233.08	242.86	197.08
Left Camera	X	443.44	291.25	352.33	441.25
Right Camera	Y	173.03	256.83	263.39	221.06

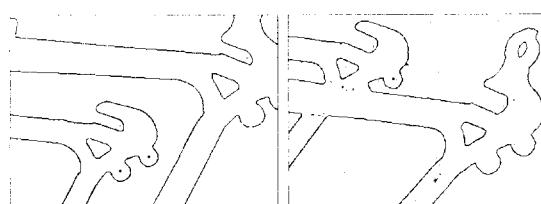


Fig.16 Solid ~ Right

Fig.17 Solid ~ Left

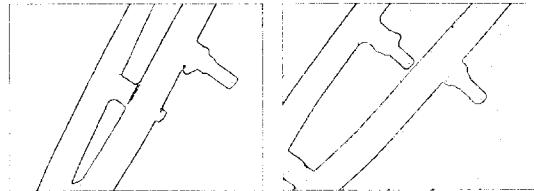


Fig.18 Pivot Bolt - Right

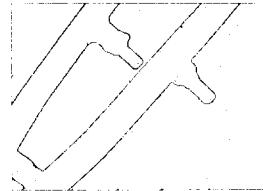


Fig.19 Pivot Bolt - Left

4. 결론

주요요소의 3차원좌표추출에서 화소단위로 약 0.2픽셀(Pixel)정도의 오차가 발생했으며 이것은 실제 거리로 약 0.25mm에 해당하며 프레임의 대칭평면에 대하여 두 개의 주요요소가 대칭을 이루므로 전체 측정오차는 최대 0.5mm가 된다. 이것은 제품의 불량판정기준 2mm에 비하면 측정오차로서 양호한 값이나 측정오차를 0.2mm안팎으로 내리는 것이 바람직하다.

전체 작업수행시간으로 보면, 카메라 교정에서 하나의 영역에 대해 약 5분, 그리고 프레임테스트에서 연산시간이 약 20초 정도 걸렸다. XY테이블로 카메라를 이동하는데는 평균적으로 5초 이내의 시간이 걸렸다.

상용제품의 품질검사에 적용시 단수검사일 경우 카메라 교정은 한번 수행한후 검사제품이 완전히 바뀔때까지는 다시 수행할 필요가 없으므로 실제 프레임검사에 필요한 시간은 매우 짧다. 따라서 본 시스템은 시간경제적 관점에서 볼때 실제 제조생산라인에 적용하는데 타당성이 충분히 있다고 하겠다.

기본적 영상처리 및 영상인식기술이 확보되었으므로 실제 생산라인에 적용하기 위하여 사용자위주의 소프트웨어 단순화 및 효율화를 이루었다.

실제로 자전거프레임은 소비자들의 취향변화가 매우 빨라서 일개 디자인의 수명이 매우 짧다. 따라서 검사되어야 할 제품의 형상이 각 모델마다 달라져도 검사 수행이 가능하도록 시스템의 유연성을 확보하여야 한다. 그런데 이때 제품설계 자체도 검사의 효율화를 위하여 모델이 달라져도 일정한 검사항목을 갖도록 되어야 한다. 검사시스템의 유연성과 제품형상의 규격화가 적절히 이루어짐으로써 시스템효율을 최대한 높일 수 있을 것이기 때문이다.

< 참고문헌 >

1. "Digital Image Processing Algorithm", Ioannis Pitas, Prentice Hall 1993.
2. "Signal Processing Image Processing and Pattern Recognition", Stephen Banks, Prentice Hall 1990.
3. Reimark K, and Rogery Y, "Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology", IEEE Trans. on Pattern Analysis & Machine Intelligence vol.10, no 5, September 1988, pp 713-720
4. Yuncai Liu, Tomas S. Huang, Olivier D. Faugeras, "Determination of Camera Location from 2-D to 3-D Line & Point Correspondences", IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence vol. 12, no. 1 January 1990, pp 28p-37
5. "Discrete-Time Signal Processing", Alan V.Oppenheim, Ronald W. Schafer Prentice Hall 1989.
6. "Time Series Analysis", George E.P. Box, Gwilym M. Jenkins, Prentice Hall, 1976