

자전거프레임 형상 정밀측정을 위한 비전 시스템 Vision System for Precision Dimensional Inspection of Bicycle Frames

여 인 재 (서울대원)
I. J. YEO(Seoul National Univ.)

박 회 재 (서울대)
H. J. PAHK(Seoul National Univ.)

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. 이에 대한 기존의 검사방법으로는 3차원형상을 2차원적 측정에 의존하고 있기 때문에 각각의 요소를 모두 검사하는 것이 불가능한 뿐만 아니라 정확성에 있어서도 신뢰도가 떨어진다.

스테레오 비전에 의한 자전거프레임의 품질검사다음의 과정을 거쳐 구현하였다. 첫째 각 카메라의 위치와 자세결정, 둘째 스케일인자(Scale factor), 일그러짐인자(Distortion factor)등의 카메라 계수 결정, 셋째 검사에 의한 기계요소의 특성치 기술이다.

카메라의 위치및 자세는 3차원 선및 점맞춤법(3D Line & Point correspondence)을 기초로하여 3차원 교정물체(3D Calibration Object)를 통해서 회전행렬(Rotation Matrix)R과 병진벡터(Translation Vector)T를 구한다. 그리고, 카메라계수들은 핀홀모델(Pinhole model)을 기초로하여 일그러짐계수를 무시하고 대신 수평방향(Horizontal Direction)과 수직방향(Vertical Direction)의 스케일인자를 각각 구하여 고정밀도의 검사를 가능하게 한다.



Fig. 1 Normal Frame



Fig. 2 Abnormal Frame

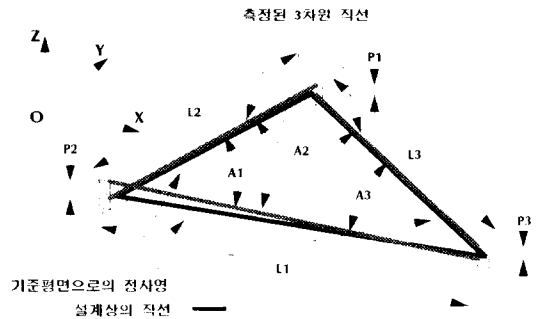


Fig. 3 검사형목

이렇게 구성되는 스테레오 비전 시스템은 두대의 카메라를 한쌍으로 하여 이루어진다. 각 카메라쌍에서 얻어진 이미지를 통합 분석하여 프레임의 구성하는 파이프의 중심선에 대한 3차원 정보를 얻어 내어 각 중심선 상호간의 기하학적 관계로부터 측정을 수행한다.

2. 이론적 배경

2.1. 카메라의 위치및 자세결정

실공간에서의 좌표계를 WCS(World coordinate System), 화면상의 좌표계를 MCS(Monitor coordinate System), 핀홀모델에서의 카메라 좌표계로서 Z 축은 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 1

에 위치하며 광축에 수직인 가상평면은 IIP(Ideal Image Plane)라 규정할 때 다음과 같이 각각의 기호들을 정의한다.

- P** - WCS에 대한 3차원상의 임의의 점에 대한 위치벡터(Position Vector)
- 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

WCS상의 임의의점 P를 ICS에 대한 위치벡터로 변환하면

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

$$P = [x, y, z]^T$$

$$T = [tx, ty, tz]^T$$

$$P' = [x', y', z']^T$$

이 된다. 각각의 좌표계에 대한 점 P의 위치벡터의 표시와 상호관계는 다음과 같이 나타내어진다. (Fig. 5-6)

$$IP = [IX, IY]$$

$$MP = [MX, MY]$$

$$BP = [BX, BY]$$

$$IX = x'/c' \quad ; \quad IY = y'/c' \quad (2)$$

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

$$MX = BX - c_x;$$

$$MY = c_y - BY; \quad (4)$$

$$c_x = aspX/2 - 0.5, c_y = aspY/2 - 0.5$$

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

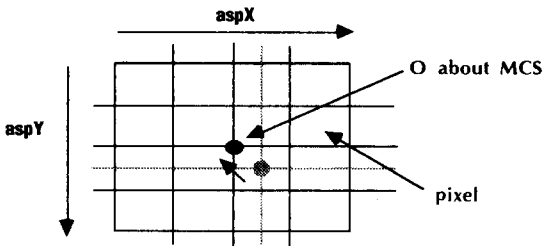


Fig. 4 BCS vs MCS

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.

$$P = c'R [IX, IY, 1]^T + T$$

$$P = c'R [MX/k_H, MY/k_V, 1]^T + T \quad (5)$$

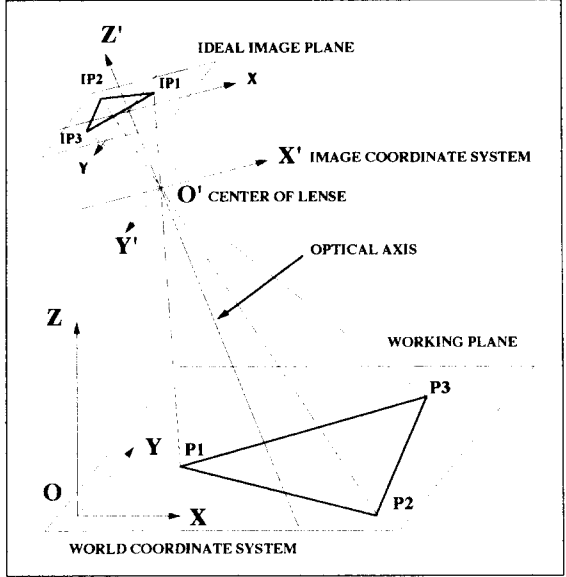


Fig. 5 World Coordinate vs Image Coordinate

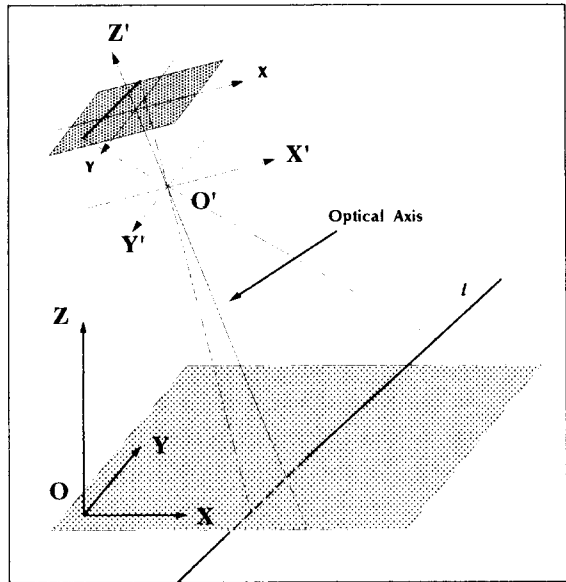


Fig. 6 3-D Line & it's Image

이때 임의의 위치벡터 P에 대한 비지수는 R, c, k_H, k_V, T 등이며, z' 는 실제카메라의 감광센서가 위치하는 평면과 핀홀모델의 원점사이의 거리이고 k_H, k_V 는 MCS와 WCS간의 스케일인자로서 감광센서의 특성치에 따라 결정되는 값이다. 실공간상의 3차원직선 l에 대하여 화상저리로 얻어진 해당 3차원직선의 방정식은 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$BY = aa BX + bb \text{ --- about BCS} \quad (6)$$

(4)와 (5)로부터,

$$IX = (BX - c_x)/k_x$$

$$IY = (c_y - BY)/k_y$$

이를 (6)에 대입하여 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} c_y - k_y IY &= aa(k_x IX + c_x) + bb \\ aak_x IX + k_y IY + (bb + aa c_x - c_y) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

각 계수를 정규화하면,

$$A^* IX + B^* IY + C^* = 0 \quad (A^{*2} + B^{*2} + C^{*2} = 1) \quad (8)$$

이것은 ICS에 대한 3차원공간상의 구면위의 한점에 대응된다. 이때 비지수는 k_x, k_y 가 되는데, 이론적으로 k_x, k_y 는 서로 같은 특정한 값을 갖는다. 이는 카메라 시야영역(Camera View Region)과 디스플레이 버퍼(Display Buffer)의 크기에 의해 결정된다. 즉, 수평시야영역(Horizontal View Region)을 θ_H , 수직시야영역(Vertical View Region)을 θ_V 라 하면, k_x, k_y 는 이론적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} k_x &= \text{asp} X_{\max} / \tan(\theta_H/2) \\ k_y &= \text{asp} Y_{\max} / \tan(\theta_V/2) \end{aligned} \quad (9)$$

그러나 이 값은 상용(CCD) 카메라에 있어서 이론적 값과 다소 틀린다. 그 차이는 1%이하이다. 정밀한 측정에 이 이론적 값을 사용하면 그 차이에 의한 오차에 미치는 효과는 매우 키진다. 따라서 이 값을 정확히 알아내어야 한다. 이것에 대해서는 밑에서 자세히 다룰 것이다.

식 (8)는 ICS상에서 표현되는 3차원직선의 투영평면(projecting plane - ICS 원점과 삼차원직선 l 로 이루어지는 평면)의 방정식이 된다. 이때 $N = (A^*, B^*, C^*)^T$ 라 하면, N 은 이 평면의 방향벡터가 된다. 따라서 $n = (a, b, c)^T$ 과 $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 로 나타내어지는 3차원직선 l 은 ICS에서 다음을 만족한다.

$$n' = R^T n$$

이 직선은 평면 N 에 항상 수직이므로,

$$N n' = 0, \text{ or } n^T R N = 0 \quad (10)$$

오일러각 (θ, ϕ, ψ) 로 나타내어지는 회전변환행렬 R 은 다음과 같이 구해진다.

$$R = \begin{bmatrix} C_2 C_3 - C_1 S_2 S_3 & -C_2 S_3 - C_1 S_2 C_3 & S_1 S_2 \\ S_2 C_3 + C_1 C_2 S_3 & -S_2 S_3 + C_1 C_2 C_3 & -S_1 C_2 \\ S_1 S_2 & S_1 C_2 & C_1 \end{bmatrix}$$

이때 $C_1 = \cos \theta$, $C_2 = \cos \phi$, $C_3 = \cos \psi$, $S_1 = \sin \theta$, $S_2 = \sin \phi$, $S_3 = \sin \psi$ 이며, 기구학적 표기에 의하여 R 은 다음과 같이 나

타낼 수 있다.

$$R R^T = R^T R = I, \det(R) = 1$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

따라서 식 (10)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} F(\theta, \phi, \psi) &= n^T R N \\ &= a(Ar_{11} + Br_{12} + Cr_{13}) + b(Ar_{21} + Br_{22} + Cr_{23}) + c(Ar_{31} + Br_{32} + Cr_{33}) = 0 \end{aligned}$$

$$F_k(\theta, \phi, \psi) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} r_{ij} A_{ik} = 0 \text{ for } k\text{'th line}$$

$F_k(\theta, \phi, \psi)$ 의 1차 테일러 전개식을 이용하여,

$$F_k(\theta, \phi, \psi) = F_k(A_0) + \theta F_{k\theta}(A_0) + \phi F_{k\phi}(A_0) + \psi F_{k\psi}(A_0) = 0$$

즉,

$$\theta F_{k\theta}(A_0) + \phi F_{k\phi}(A_0) + \psi F_{k\psi}(A_0) = -F_k(A_0) \quad (11)$$

이때 $A_0 = (\theta_0, \phi_0, \psi_0)$ 이다.

식(11)을 $k = 1, 2, 3, 4$ 에 대하여 행렬식으로 나타내면, (Pseudo Inverse or Least Square Method) $G X = H$ 가 된다. 여기서,

$$G = \begin{bmatrix} F_{1\theta}(A_0) & F_{1\phi}(A_0) & F_{1\psi}(A_0) \\ F_{2\theta}(A_0) & F_{2\phi}(A_0) & F_{2\psi}(A_0) \\ F_{3\theta}(A_0) & F_{3\phi}(A_0) & F_{3\psi}(A_0) \\ F_{4\theta}(A_0) & F_{4\phi}(A_0) & F_{4\psi}(A_0) \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} F_1(A_0) \\ F_2(A_0) \\ F_3(A_0) \\ F_4(A_0) \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix}$$

그리고 증분각도벡터 X 는 최소자승법에 기초한 의사역행렬(Pseudo Inverse)에 의하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} G^T G X &= G^T H \\ X &= (G^T G)^{-1} G^T H \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 $k = 1$ 에 대하여 $A_1 = A_0 + X^T_1$ 가 되고 새로 얻어진 A_1 를 다시 식(11) 및 식(12)에 대입하여 순차적으로 $A_k = A_{k-1} + X^T_k (k = 1, 2, \dots)$ 를 구해나간다.

이때 $\|X^T_k\| < \epsilon$ 일때까지 식 (11)-(12)을 반복한다. 특정반복횟수가

지 조건을 만족시키지 못하면 식 (11)에 새로운 초기값 A_0 을 대입한다. 이때 A_0 은 모든 각도에 대하여 계산을 수행해 볼 수 있도록 각 요소를 순서대로 π 8단위로 증가시킨다. 이것은 어떠한 해 (θ, ϕ, ψ) 에 있어서도 초기값 $(\theta_0, \phi_0, \psi_0)$ 으로부터 π 8이하의 거리에서 참값을 찾아내도록 하기 위함이며 이렇게하여 반복연산횟수를 줄일 수 있다.

다음으로, 병진벡터 T 는 다음을 만족시킨다.

$$N_i (R^T T) = N_i (R^T P) \quad (13)$$

or, $(R N_i) T = (R N_i) P_i$

여기서 N_i 는 i 번째 직선의 방향벡터이고, P_i 는 해당직선위의 임의의 한 점이다.

식 (13)에 3개이상의 점에 대하여 의사역행렬을 취하면,

$$\begin{aligned} N_1^T N_1 (R^T T) &= N_1^T N_1 (R^T P) \\ R^T T &= (N_1^T N_1)^{-1} (N_1^T N_1 (R^T P)) \\ T &= R [(N_1^T N_1)^{-1} (N_1^T N_1 (R^T P))] \end{aligned} \quad (14)$$

이 되어 식 (14)를 풀어 T 를 구한다.

2.2. 카메라계수결정

회전변환행렬 R 를 구함에 있어서 k_x, k_y 를 미지수로 놓고 계산하면 비선형성이 커져서 기존방법으로는 풀수가 없게 된다. 따라서 특정한 k_{10}, k_{10} 로부터 실재값을 찾아가야 한다. 이를 위해 먼저 이론치 k_{10}, k_{10} 를 모든식에 대입하여 최초의 R 과 T 를 구한뒤, 이곳으로 이미 WCS 에 대한 위치벡터를 알고있는 3개이상의 점 P_{ni} 을 취해 좌표변환을 수행하면,

$$P_{ni_k} = R P_{ni_k}' + T$$

이 되고, 이때 참값에 대한 오차를 다음과 같이 규정한다.

$$E(k_{10}, k_{10}) = \| P_{ni_k} - P_{ni_k}' \|^2 \quad (15)$$

이론치 (k_{10}, k_{10}) 주위에서 $\{(k_{10}, k_{10})\}$ 을 설정하여 각각의 (k_{10}, k_{10}) 에 대하여 R 과 T 를 구하여 $\{E(k_{10}, k_{10})\}$ 을 만들어낸다.

$$\begin{aligned} \{(k_{10}, k_{10})\} = & \{ (k_{10} - dk, k_{10} + dk), (k_{10}, k_{10} - dk), (k_{10} + dk, k_{10} - dk) \\ & , (k_{10} - dk, k_{10}), (k_{10}, k_{10}), (k_{10} + dk, k_{10}) \\ & , (k_{10} - dk, k_{10} + dk), (k_{10}, k_{10} + dk), (k_{10} + dk, k_{10} + dk) \} \end{aligned}$$

$$U = \sum_{i=0}^n (a k_{10}^2 + b k_{10}^2 + c k_{10} k_{10} + d k_{10} + e k_{10} + f - E)$$

이때 K, A, U 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} K_1 &= [\quad k_{10}^2 \quad k_{10}^2 \quad k_{10} k_{10} \quad k_{10} \quad k_{10} \quad 1 \quad] \\ K &= [\quad K_1 \quad K_2 \quad \dots \quad K_{np} \quad]^T \\ A &= [\quad a \quad b \quad c \quad d \quad e \quad f \quad] \\ U &= [\quad U_1 \quad U_2 \quad \dots \quad U_n \quad]^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U &= K A \\ A &= (K^T K)^{-1} K^T U \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)을 풀어 $E(k_{10}, k_{10})$ 의 최소점을 찾을 수 있다. 얻어진 오차최소점주위로 새로운 $\{(k_{10}, k_{10})\}$ 을 설정하고 각각의 (k_{10}, k_{10}) 에 대하여 다시 R 과 T 를 구하여 위의 과정을 반복한다. 이 과정을 반복하여 (k_{10}, k_{10}) 를 최적화한다. 최종적으로 얻어지는 (k_{10}, k_{10}) 를 전체식에 대입하여 R 과 T 를 구한다.

2.3. 직선추출

직선형상의 경계에 대하여 경계를 직선으로 인식시켜 각 경계의 직선방정식을 알아낸다.

목표)

- a. 굵기 2 이하의 연속직선 추출
- b. 굵기 2 이하의 불연속 직선 추출
- c. 두개이상의 직선 교차지역인식
- d. 곡선성분이나 잡음에 대한 견실성 확보

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

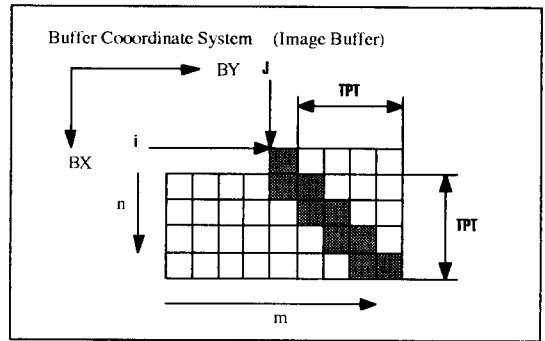


Fig. 7 Search Window

입력된 이미지에 대하여 경계추출과 이진화를 수행한 후 이미지 버퍼를 직사각형의 검색윈도우(search window - Fig. 7)로써 검색한다. image[i][j] = 1 일때에 대하여 s_window[m][n]을 검색하여 1이면 이 점이 q번째 직선위에 있는 점인가를 결정하여 q번째 직선의 [m][n]성분 Line[q][i][m][n]을 증가시키거나 새로운 라인

버퍼 Line[q](m)(n)을 생성하여 이것을 증가시킨다. 이것은 주기적으로 q번째 직선의 벡터를 얻어내어, 현재 새롭게 라인버퍼로 들어갈 점과 image(i)(j)로 이루어지는 벡터와 비교하여 새로운 직선을 생성할 것인지를 결정한다. 이때 모든 직선을 주기적으로 검사하여 곡선이나 혹은 잡음일 수 있는 직선은 해당 직선의 라인버퍼를 리셋시킨다.

최초로 얻어지는 직선의 벡터는 다음과 같다.

$$BY = aa BX + bb \quad \text{about BCS}$$

$$aa = \tan(\theta), (\theta = \sum_i \sum_j \theta_{ij} * \text{Line}[q][i][j], \theta_{ij} = \tan^{-1}(j / (TPT - i)))$$

$$bb = \sum_N (BY - a BX) / N, (N: \text{검색된 점의 갯수})$$

이러한 직선벡터는 BCS에 대한 직선의 방정식이며, 이 벡터를 정규화하여 위의 논리연산을 수행한다.

Line Vector:

$$LV[q] = (A, B, C)$$

$$A BX + B BY + C = 0, \quad A^2 + B^2 + C^2 = 1$$

최종적으로 얻어진 직선의 벡터는 식 (7)로 변환한다.

2.4. 스테레오 비전 에 의한 특성치 기술

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

| | 카메라 A | 카메라 B |
|--------|-------|-------|
| 병진벡터 | T_A | T_B |
| 회전변환행렬 | R_A | R_B |

이때 두대의 카메라로 하나의 3차원 직선 l을 촬영하여 각각의 카메라에 대하여 식 (7)에서의 벡터를 구하면 이는 WCS에서의 평면의 법선벡터가 된다. WCS에 대한 직선 l의 방향벡터가 N_l 일때, 각각의 카메라에서 ICS_A 및 ICS_B 에 대한 직선l의 방향벡터는 각각 N_{A_l} , N_{B_l} 이 된다.

해당 직선의 3차원 방정식이 다음과 같이 표현된다.

$$X_l = t N_l + X_0 \quad (17)$$

직선 l과 각각의 카메라렌즈의 중심과 이루어지는 평면의 법선벡터 N_{A_l} , N_{B_l} 를 WCS에 관해 나타내면,

$$N_{A_l} = R_A N_{A_l}, \quad N_{B_l} = R_B N_{B_l} \quad (18)$$

이며, 직선 l은 이들 평면위에 있으므로 (18)은 다음을 만족시킨다.

$$N_{A_l} (X_l - T_A) = 0$$

$$N_{B_l} (X_l - T_B) = 0 \quad (19)$$

$$N_l = N_{A_l} \times N_{B_l}$$

(18)을 (19)에 대입하여,

$$N_{A_l} (t N_l + X_0 - T_A) = 0$$

$$N_{B_l} (t N_l + X_0 - T_B) = 0$$

t = 0 일때

$$N_{A_l} X_0 = N_{A_l} T_A$$

$$N_{B_l} X_0 = N_{B_l} T_B \quad (20)$$

이때 X_0 를 직선위의 점중 원점에 가장 가까운 점이라하면, $N_{A_l} \cdot X_0 = 0$ 이 되어 다음 식으로 X_0 를 정한다.

$$\begin{bmatrix} N_{A_l} & N_{B_l} & N_l \end{bmatrix}^T X_0 = \begin{bmatrix} N_{A_l} T_A & N_{B_l} T_B & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$X_0 = \begin{bmatrix} N_{A_l} & N_{B_l} & N_l \end{bmatrix}^{-T} \begin{bmatrix} N_{A_l} T_A & N_{B_l} T_B & 0 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

이로써 여러개의 3차원 직선을 얻어내고, 각각의 벡터(N_l, X_0)를 이용하여 상호관계를 얻어낸다. 이때 축대칭 기체요소의 경우 경계선에 대한 두개의 벡터가 추출되므로 중심축에 대한 벡터는 ICS에 대한 두 경계선벡터의 평균의 정규화로서 얻어진 N_{A_l}, N_{B_l} 로부터 계산한다.

3. 시스템구현

3.1. 직선추출

전술한 알고리즘의 검증용 위해 직선성분만으로 이루어진 비트맵데이터(Bitmap Data - Fig. 8)를 생성해 이것을 이미지버퍼로 변환하여 직선추출을 수행하였다.

| No. | Slope | | Error | Constant | No. of Points |
|-----|------------|-----------|------------|------------|---------------|
| | TRUE | Estimated | | | |
| 1 | 3.7320508 | 3.723362 | 0.0005833 | -419.0660 | 577 |
| 2 | -0.2679492 | -0.267791 | -0.0001476 | 193.5441 | 481 |
| 3 | -0.2679492 | -0.267943 | -0.0000058 | 442.3408 | 396 |
| 4 | 3.7320508 | 3.725038 | 0.0004706 | -1409.9135 | 585 |
| 5 | 1.7320508 | 1.730646 | 0.0003514 | -39.1690 | 648 |
| 6 | -0.5773503 | -0.577127 | -0.0001675 | 275.3502 | 411 |
| 7 | -0.5773503 | -0.577229 | -0.0000910 | 553.2569 | 452 |
| 8 | 1.7320508 | 1.731741 | 0.0000775 | -552.4138 | 617 |
| 9 | 1.0000000 | 0.999887 | 0.0000565 | 111.5244 | 326 |
| 10 | -1.0000000 | -0.999950 | -0.0000250 | 376.4904 | 347 |
| 11 | -1.0000000 | -1.000000 | 0.0000000 | 715.5000 | 350 |
| 12 | 1.0000000 | 0.999944 | 0.0000280 | -250.4762 | 327 |

* Error = tan(True) - tan(Estimate)

위의 표에서 No.1 - 8의 데이터는 직사각형 이진이미지(Binary Image)가 회전에 의해 경계부분이 256그레이 레벨(Gray level)로 변환되면서 경계추출때 발생된 오차가 나타난 것이다. 이러한 결과로부터 실제 피검사체의 이미지를 입력받았을 때 일어날 수 있는, 이

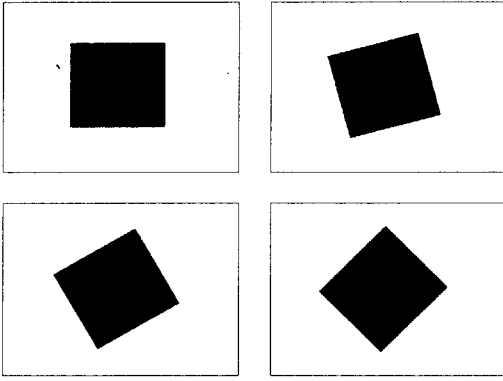


Fig. 8 Test Images for Line Extraction Algorithm

큰바 경계의 양자화에 의한 오차를 포함하는 것으로, 실제검사에서의 추출되는 직선벡터의 정밀도를 알 수 있다. 실험결과 수직방향 ($x = c, c : \text{constant}$) 직선은 추출되지 않았다. 또 교차하는 직선이 교차각 $\theta = \tan^{-1}(1/5)$ 이하일때는 두 직선 모두 부정확하게 검출될 확률이 50%정도 되었다. 상기조건에 들지 않는 직선의 경우, 신뢰도 95%에 대하여 다음과 같은 정밀도를 얻을 수 있었다.

방향벡터 오차 : 0.0275° 이하

두 직선의 교차점에서의 위치오차 : 0.01 pixel 이하

3.2. 카메라교정

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

조명장치가 밑에 설치된 평판위에 교정을 위한 표준물체를 정해진 위치에 정확히 설치한 후 카메라 A,B를 각각 교정시키고 입력채널 A, B 로부터 각각의 카메라에서 얻어지는 영상을 차례로 입력받는다.

얻어진 각각의 이미지에 대하여 다음의 작업을 수행한다.

- 경계추출
- 이진화
- 직선추출
- 추출된 직선과 표준물체의 모서리와의 짝짓기
- 회전변환행렬교정
- 병진벡터교정
- (k_H, k_V) 계산

k_H, k_V 는 카메라제원으로부터 식 (9)에 의해 초기값 (k_{H0}, k_{V0}) 을 결정하여 이것으로 모든 계산을 수행하였다. (k_H, k_V) 의 집합실정성을 3회 반복하여 최적의 값을 얻어냈으며, 신뢰성을 좀더 높이기 위해 WCS위에 교정물체를 교정시킨 후 카메라의 위치및 방향을 변화시켜 오차계산을 수행할 이미지를 두개 이상 취한다. 이때 모든 이미지는 초점거리를 고정시킨후 획득한다. 이렇게 하여 오차를 최소화하는 (k_H, k_V) 를 얻을수 있다. 이를 위해 27개의 서로다른 k_H, k_V

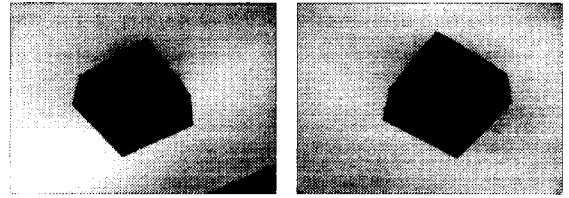


Fig. 9 교정물체(A)

Fig. 10 교정물체(B)

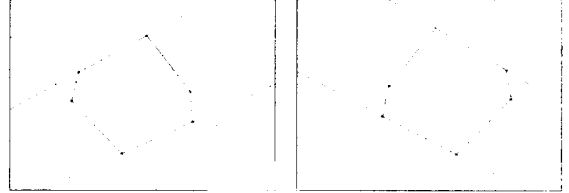


Fig. 11 교정물체 직선추출(A)

Fig. 12 교정물체 직선추출(B)

값에대하여 각각 회전변환행렬및 병진벡터를 구했으며, 결과는 다음과 같다.

$$\theta_H = 30^\circ 26'$$

$$\theta_V = 22^\circ 49'$$

$$k_{H0} = 1176.44$$

$$k_{V0} = 1189.37$$

Fig. 9-10에서와 같이 하나의 이미지에서 6개의 꼭지점이 추출된다. 각각의 카메라에 대해서 4개의 교정물체 이미지를 얻어 총 24개의 꼭지점에 대해서 오차를 계산하였다. 회전변환행렬및 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 대각선이다.

교정결과

a. 교정물체 제원

80×80×50 mm (각면 허용오차 : 0.05mm)

b. 카메라계수

$$k_H = 1240.6$$

$$k_V = 1228.0$$

c. 꼭지점에서의 오차 (95% 신뢰도)

하나의 카메라에서 얻어진 이미지에 대한 오차 :

$$\pm 0.26\text{mm}$$

두 카메라에서 얻어진 이미지상호간의 편차 :

$$\pm 0.07\text{mm}$$

3.3. 검사

카메라교정이 된 위치에서 테스트 프레임(Fig.13-14)을, 밑에 조명장치가 설치된 평판위에 올려놓고 채널 A,B 로부터 각각의 이미지를 입력받는다. 검사순서는 다음과 같다.

a. 경계추출

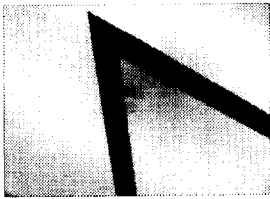


Fig. 13 테스트프레임(A)

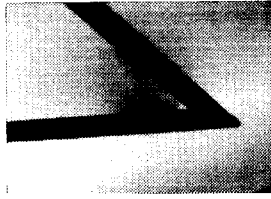


Fig. 14 테스트프레임(B)

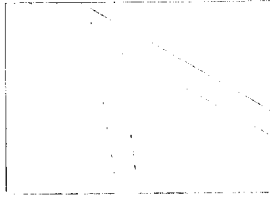


Fig. 15 테스트프레임(A)

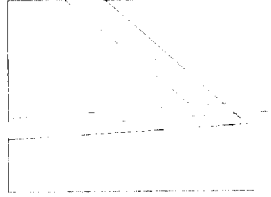


Fig. 16 테스트프레임(B)

- b. 이진화
- c. 직선추출
- d. 중심축 추출
- e. WCS로의 변환
- f. 해석

카메라 $i(i=1,2)$ 에서 얻어진 회전변환행렬 R_i 와 병진벡터 T_i 를 이용해, 역시 카메라 i 에서 얻어진 테스트프레임의 각 축의 3차원 정보를 얻는다. 3차원 정보는 각 중심축의 방향벡터, 축상호간의 교차각, 축상호간의 최근접점, 테스트프레임들의 각 교차점사이의 거리 등이다.

반복정밀도를 확인하기 위하여 두대의 카메라를 서로다른 위치및 자세로 검사한 후 각각 위치및 자세를 다시 변화시켜 검사했다.

검사결과

테스트프레임의 교차각 : 51.867° (3차원좌표측정기로 3회반복 측정)

해석 1 : 51.844°

해석 2 : 51.860°

4. 결론

테스트프레임 측정결과 약 0.03° 의 오차이내에서 정확한 교각을 구할수 있으며, 위치정밀도는 카메라 상호간의 편차에 의해 결정되므로 약 0.1mm의 오차이내로 3차원 좌표를 얻을 수 있다. 이것은 자전거프레임의 결합부위 위치오차에서의 불량품 판정기준 1mm에 비해 약 10배 더 정밀하므로 스테레오 비전을 이용한 자전거프레임의 3차원저 품질검사가 가능하며 매우 정확함을 알 수 있다.

전체 작업수행시간으로 보면, 카메라 교정에서 하나의 영역에 대해 약 5분, 그리고 프레임테스트에서 연산시간이 약 20초 정도 걸렸다.

상용제품의 품질검사에 적용시 단수검사일 경우 카메라 교정은 한 번 수행한후 검사제품이 완전히 바뀔때까지는 다시 수행할 필요가

없으므로 실제 프레임검사에 필요한 시간은 매우 짧다. 따라서 본 시스템은 시간경제적 관점에서 볼때 실제 제품생산라인에 적용하는데 타당성이 충분히 있다고 하겠다.

< 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 28-37