

원형 링 패턴 인식에 기반한 실내용 자세추정 시스템

김헌희¹ · 하윤수[†]

(원고접수일 : 2012년 5월 23일, 원고수정일 : 2012년 5월 29일, 심사완료일 : 2012년 5월 31일)

An Indoor Pose Estimation System Based on Recognition of Circular Ring Patterns

Heon-Hui Kim¹ · Yun-Su Ha[†]

요약: 본 논문은 원형 링 패턴의 인식에 기반한 물체의 3차원 위치/자세 추정 시스템을 제안한다. 단일 비전 기반의 자세추정 문제를 다루기 위하여, 본 논문은 물체인식 과정의 단순화를 위한 원형 링 패턴의 설계방법을 기술한다. 또한, 본 논문은 2차원 투영공간에서 원형 링 패턴이 가지는 기하학적 변환관계를 적극 활용한 실내용 위치/자세 추정 절차를 상세히 설명한다. 제안된 방법은 쿼드로터형 비행체의 3차원 위치/자세 추정에 적용되며 정확도 및 정밀도 분석을 통해 평가된다.

주제어: 원형 링 패턴, 3차원 자세 및 위치 추정, 타원 불변특성

Abstract: This paper proposes a 3-D pose (positions and orientations) estimation system based on the recognition of circular ring patterns. To deal with monocular vision-based pose estimation problem, we specially design a circular ring pattern that has a simplicity merit in view of object recognition. A pose estimation procedure is described in detail, which utilizes the geometric transformation of a circular ring pattern in 2-D perspective projection space. The proposed method is evaluated through the analysis of accuracy and precision with respect to 3-D pose estimation of a quadrotor-type vehicle in 3-D space.

Key words: Circular ring pattern, 3-D pose estimation, Conic invariants

1. 서 론

로봇 비전 분야에서 원형 특징은 점/직선에 비해 특징추출이 용이할 뿐 아니라 노이즈에 강인한 장점이 있어 물체의 위치인식 용도로 다양하게 활용되고 있다. 이는 원형특징이 카메라를 통해 이미지 공간에 투영되더라도 이차곡선(Conics)이 가지는 속성이 불변(Invariant)하다는 것으로부터 기인한다 [1]. 일단 특징추출 단계에서 타원의 외곽선이 추출되면, 이차곡선 방정식의 계수들은 선형대수적 기법을 통해 근사될 수 있다[2,3]. 이러한 계수들은 영상에 투영된 물체의 2차원 위치정보를 직접적으로 제공한다.

원형특징은 물체의 3차원 정보의 추출을 위해 이용될 수 있다. Kanatani[1]와 Safaei-Rad[4]는 원형특징을 기반으로 3차원 자세 추정문제를 다룬 대표적인 연구이다. 이들은 알려진 원형특징과 (원형특징이 카메라를 통해) 투영된 타원특징 사이의 변환관계를 기하학적인 해석을 통해 규명하였다. 이들은 또한 원형특징의 반지름을 아는 경우, 3개의 위치 파라미터와 1개의 방향 파라미터(법선 벡터)를 해석적으로 구할 수 있음을 보였다. 이러한 이론적 배경을 토대로, 원형특징은 카메라 보정[5], 로봇항법 등에 다양하게 응용될 수 있었다. 그러나 기존 연구에서 제시한 해법은 다중해가 존재하며

[†] 교신저자(한국해양대학교 IT공학부, E-mail:hys@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4347)

¹ 광운대학교 예술로봇 연구소

2개의 방향 파라미터를 결정할 수 없는 한계가 있어 실제 응용에 있어서 제약이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위하여, 본 연구팀의 선행연구에서는 하나의 공면점(共面點)을 도입하여 6개의 위치 및 방향 파라미터들에 대한 해석적인 해법을 제시하였고, 정확도 및 민감도 측면에서 다각적인 분석을 수행한 바 있다[6].

일반적으로 실외 환경에서 물체의 3차원 위치 및 자세 추정을 위하여 GPS/INS의 통합구조가 이용된다. 그러나 실내 환경에서 GPS시스템은 위치정보를 제공하지 못하므로 실내 환경에서의 위치/자세 추정을 위한 별도의 외계센서가 요구된다[7]. 실내 환경의 경우, 적외선을 이용한 위치추정 기법은 영상 내의 노이즈를 제거하기 위한 전처리 과정을 (가시광선 차단 및 적외선 대역통과 필터 등을 이용하여) 물리적으로 대체할 수 있으므로 고정도의 자세 추정을 위한 효과적인 대안이라 할 수 있다.

본 논문은 단일비전을 기반으로 하는 3차원 자세추정 시스템을 효과적으로 구성하기 위하여, 원형 링 패턴의 설계방법과 이를 활용한 자세추정 절차를 제안한다. 본 논문은 우선 자세추정 대상의 물체에 쉽게 탑재될 수 있으며 특히 특징점의 추출이 용이한 원형 링 패턴의 설계방법을 제시한다. 다음으로, 원형 링 패턴의 기하학적 특징을 적극 활용한 3차원 자세 추정시스템의 구성법을 제안하고 세부 과정들을 상세히 기술한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 제안된 자세 추정 시스템에 관하여 상세히 설명한다. 제3장에서는 실험을 통해 제안된 방법의 효용성을 평가하고, 마지막으로 제4장에서 결론을 맺는다.

2. 3차원 자세 추정 시스템

2.1 전체 시스템의 구성

Figure 1은 3차원 자세 추정을 위한 좌표계의 구성을 나타낸다. 본 논문에서 다루는 좌표계는 크게 3개로 구분되며, 이를 월드 좌표계, 카메라 좌표계, 물체 좌표계로 각각 명명한다. 각각의 좌표계에 대한 축의 방향은 Figure 1에 도시되어 있다. 본 논문에서 제안하는 자세 추정 시스템은 적외선 대역통과 필터가 장착된 카메라, 적외선 조명, 적외선 반사가 가능한 원형 링 패턴으로 구성된다. Figure

1과 같은 시스템에서 카메라로부터 획득된 영상은 가시광선 영역의 주요 노이즈 원이 일차적으로 제거되었으므로 특징추출이 상대적으로 용이하다.

Figure 2는 입력된 영상에 대한 자세 추정 절차를 나타낸다. 특징 추출부는 입력된 영상으로부터 우선 물체의 윤곽선(Contour)를 추출한 후 분할한다. 다음으로 각각의 윤곽선은 카메라의 렌즈왜곡 등의 보정을 위해 데이터교정 단계에서 카메라 모델을 통해 일괄적으로 변환된다. 물체인식 단계에서는 이전단계에서 보정된 윤곽선을 타원으로 근사하고, 타원 내부에 존재하는 다수의 특징점들을 이용하여 하나의 공면점을 결정하는 역할을 수행한다. 이렇게 추출된 타원 및 공면점은 자세 추정 알고리즘에 입력되며, 최종적으로 카메라 좌표계에 대한 물체좌표계의 위치와 방향을 동차변환행렬 $T_{o:c}$ ($\in R^{4 \times 4}$)의 형태로 출력한다.

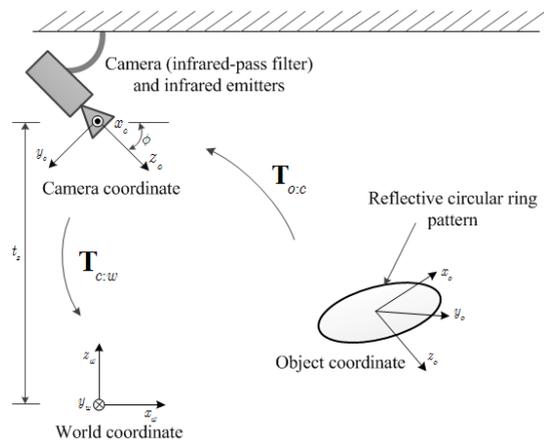


Figure 1: Coordinate systems for 3-D pose estimation.

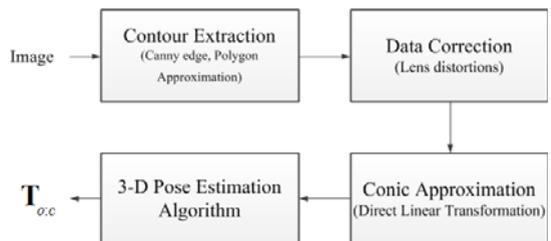


Figure 2: Procedure of 3-D pose estimation of a circular object for a given image.

2.2 자세추정 절차

2.2.1 윤곽선 추출(Contour extraction)

윤곽선 추출 단계는 관측된 영상에 존재하는 모든 객체에 대한 윤곽선을 좌표시퀀스 형태로 분할·생성하는 단계이다. 본 시스템에서 채택한 적외선 반사방식의 영상획득 기법은 영상 내에 존재하는 불필요한 노이즈를 간단한 전처리 작업을 통한 제거가 가능한 장점이 있다. 이를 위하여, 본 논문은 우선 Canny Edge 연산자를 이용하여 영상 내의 모든 모서리를 검출한 후, 서로 연결된 모서리들로 구성된 좌표시퀀스를 생성한다. 이때 윤곽선의 길이가 긴 순서로 정렬하여 데이터를 구조화함으로써, 상대적으로 짧은 길이의 데이터는 노이즈로 간주된다.

일단 윤곽선이 생성되면, 각각의 윤곽선을 다시 Douglas-Peucker 폴리곤 근사기법[8]을 통해 낮은 차수의 폴리곤으로 근사한다. 이는 곡률반경이 큰 특징들을 제거하기 위한 것으로, 예를 들어 다각형의 경우 폴리곤 근사를 수행하면 코너점들만으로 구성된 좌표시퀀스를 얻을 수 있다. 또한 이후에 수행될 물체인식 단계에서 타원근사 시 수행시간을 단축시킬 수 있는 효과를 가진다.

2.2.2 데이터 교정(Data correction)

일반적으로 카메라 영상은 카메라 자체의 내부 파라미터의 오차 및 렌즈 굴곡으로 인하여 왜곡되어 캡처된다. 따라서 카메라 보정작업 없이 자세 추정 알고리즘을 적용할 경우, 영상의 가장자리로 갈수록 큰 오차를 수반한다. 데이터 교정은 앞서 추출된 윤곽선들에 대하여 카메라 내부 파라미터 (Intrinsic parameters) 및 렌즈왜곡(Lens distortions) 보상 파라미터를 이용하여 이미지 좌표들을 변환하는 단계이다. 여기서 보상 파라미터들은 사전에 카메라 보정(Camera calibration)을 통해 추정된다.

2.2.3 물체인식(Object recognition)

3차원 공간상의 벡터 $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ 에 대하여 이차곡선(Conics)의 일반화식을 행렬 형태로 나타내면

$$\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} = 0 \tag{1}$$

과 같다. 만일 $z = f$ 인 평면에서 타원이 결정되었다면 이차곡선 행렬(이후 타원행렬이라 함) \mathbf{Q} 는

식 (2)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} A & B & F/f \\ B & C & G/f \\ F/f & G/f & H/f^2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

여기서 A, B, C, F, G, H는 이차곡선 방정식의 계수들을 나타낸다. 본 논문에서는 식 (2)와 같은 형태의 타원행렬을 모두 \mathbf{Q} 로 표기한다. 타원행렬의 6개 계수들은 좌표시퀀스에 대한 타원 근사과정을 통해 구해지며, 본 논문은 DLT 기법[2]을 통해 계수들의 근사치를 추정한다.

Figure 3(a)는 본 논문에서 제안하는 원형 링 패턴을 나타낸다. 제안된 패턴은 타원 및 특징점의 추출이 용이하도록 설계되었으며, 하나의 타원특징과 하나의 공면점을 간단히 결정할 수 있는 장점을 가진다. 제안된 원형 링 패턴의 내부에는 Figure 3(b)와 같이 특징점으로 간주될 수 있는 코너들이 포함되어 있다. 코너 검출을 위해 Harris, FAST 등의 기법들이 이용될 수 있으나, 본 논문에서는 이차곡선에 대한 기하학적 특성 및 저차수 폴리곤의 특성을 적극 활용한다. 코너 검출이 완료되면, 코너의 기하정보를 토대로 하나의 공면점이 결정된다.

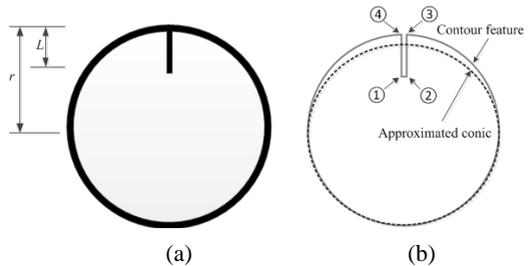


Figure 3: (a) Circular ring pattern, (b) Decision of a coplanar point among corners extracted on the contour inside a conic.

공면점의 결정방법은 다음과 같다. 영상 내의 임의의 점을 $\mathbf{x} = (x, y, f)^T$ 라 하자. 여기서 f 는 카메라의 초점거리를 나타낸다. 또한 \mathbf{Q} 를 윤곽선으로부터 근사된 타원행렬이라 하고 함수 $g(\mathbf{x})$ 를 식 (3)과 같이 정의하자.

$$g(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{x}, \mathbf{Q} \mathbf{x} \rangle \tag{3}$$

여기서 $\langle a, b \rangle$ 는 a 와 b 의 내적을 나타낸다. 즉, 3차원 공간 상에서 벡터 \mathbf{x} 의 타원 Q 대한 극좌표 평면(Polar plane)을 우선 구하고 이 평면의 법선벡터와 벡터 \mathbf{x} 의 내적을 구한 것이다. 이때, $g(\mathbf{x})=0$ 인 경우에 벡터 \mathbf{x} 의 방향은 타원 Q 위를, $g(\mathbf{x}) > 0$ 인 경우는 타원 외부로 향한다. 다시 말해, 타원의 내부에 있는 특징점들은 $g(\mathbf{x}) < 0$ 을 만족한다. 예를 들어, Figure 3(b)에서 ①, ②를 나타내는 벡터에 대한 식 (3)의 결과는 양의 실수값을, ③, ④에 대한 결과는 음의 실수값을 얻을 수 있다.

집합 S 를 $S = \{\{\mathbf{x}, g(\mathbf{x})\} \mid g(\mathbf{x}) < 0\}$ 로 정의하자. 일반적으로 \mathbf{x} 의 방향이 타원의 중심으로 향할수록 $g(\mathbf{x})$ 는 지수적으로 감소한다. 따라서 본 논문은 이러한 특성을 이용하여 각각의 \mathbf{x}_k 에 대하여 가중치 w_k 를 식 (4)와 같이 산출한다.

$$w_k = \frac{|g(\mathbf{x}_k)|}{\sum_{g(\mathbf{x}_k) \in S} |g(\mathbf{x}_k)|} \quad (4)$$

3차원 공간에서 공면점 벡터 $\hat{\mathbf{x}}$ 은 식 (5)와 같이 집합 S 에 포함된 모든 벡터 \mathbf{x}_k 의 가중합으로서 정의된다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \sum_{\mathbf{x}_k \in S} w_k \mathbf{x}_k \quad (5)$$

본 논문에서 공면점의 결정에 이용되는 마커 패턴의 끝부분이 사각 형태로 채택된 이유는 다음과 같다. 삼각형 형태로 마커를 구성하는 경우, 카메라로부터 멀어질수록 추출된 코너의 위치오차가 발생할 우려가 있다. 이는 밀변 대비 높이(L) 비가 큰 삼각형 패턴의 경우 코너 부위에서 반사광량이 적기 때문이다.

2.2.4 자세추정 알고리즘

원형 특징의 3차원 자세 추정에 앞서, 이미 알려진 모델파라미터(반지름 및 공면점 좌표)로부터 타원행렬 (Q_0) 및 공면점 벡터 $\mathbf{p}_0 = (P_x, P_y, 1)^T$ 을 결정할 수 있다. 또한, 모델 좌표(x_o, y_o, z_o) 상의 \mathbf{p}_0 벡터의 방향은 식 (6)의 회전행렬로서 결정될 수 있다.

$$\mathbf{R}_0 := \mathbf{R}_{z, \theta}^T \quad (6)$$

3차원 자세추정을 위한 전략은 다음과 같다. 우선, 모델좌표 상에서 벡터 \mathbf{p}_0 를 x_m 축으로 하고 모델평면의 법선벡터를 z_m 축으로 하는 새로운 좌표 $x_m y_m z_m$ 를 설정한다. 다음으로, $x_m y_m z_m$ 좌표계와 카메라 좌표계($x_c y_c z_c$)간의 변환행렬을 구한다. 최종적으로, 카메라 좌표계에 대한 물체 좌표계의 위치와 방향은 식 (6)의 회전변환을 적용하여 구한다.

관측된 영상에 투영된 타원행렬 및 공면점 벡터를 각각 Q_c, \mathbf{p}_c 라 하자. 여기서 $\mathbf{p}_c = (P'_x, P'_y, f)^T$ 로 주어진다. 카메라좌표계에 대한 물체좌표계의 3차원 위치 및 방향은 다음과 같이 6단계의 절차를 통해 추정된다.

단계 1: 타원행렬의 대각화를 통해 고유값 및 고유벡터를 계산한다.

$$Q_e = U^T Q_c U \quad (7)$$

여기서 $Q_e = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, $U = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3)$ 로 정의되며 λ_i, \mathbf{u}_i 는 각각 i 번째 고유치, 고유벡터를 나타낸다.

단계 2: 물체평면의 법선벡터를 산출한다.

$$\mathbf{n} = \left(0, \pm \frac{\sqrt{\lambda_1 - \lambda_3}}{\sqrt{\lambda_2 - \lambda_3}}, \frac{\sqrt{\lambda_2 - \lambda_1}}{\sqrt{\lambda_2 - \lambda_3}} \right)^T \quad (8)$$

단계 3: 공면점 \mathbf{p}_c 로부터 타원에 대한 극좌표평면을 결정한다.

$$\mathbf{l} = N \left[(\lambda_1 \mathbf{u}_1^T \mathbf{p}_c, \lambda_2 \mathbf{u}_2^T \mathbf{p}_c, \lambda_3 \mathbf{u}_3^T \mathbf{p}_c)^T \right] \quad (9)$$

여기서 $N[\cdot]$ 은 단위벡터로 정규화하기 위한 정규화 연산자이다.

단계 4: 회전행렬 \mathbf{R} 을 결정한다.

$$\mathbf{R} = (N[n \times l] \times \mathbf{n}, N[n \times l], \mathbf{n}) \quad (10)$$

단계 5: 병진벡터 \mathbf{t} 를 결정한다.

$$\mathbf{t} = \frac{r}{K} (-q_{13}, -q_{23}, q_{11})^T \quad (11)$$

여기서 $K = \sqrt{q_{13}^2 + q_{23}^2 - q_{33}q_{11}}$ 로 계산되며, q_{ij} 는 행렬 $R^T Q_e R$ 로 계산되는 행렬 Q' 의 요소를 나타낸다.

단계 6: 동차변환행렬 $T_{o:c}$ 를 구한다.

식 (7)~(11)에서 구한 U, R, t, R_o 로 각각 동차 변환행렬 ($T_i \in R^{4 \times 4}, i=1, \dots, 4$) 을 구성한다. 이들의 행렬곱은 카메라좌표 $x_y z_c$ 에 대한 물체좌표 $x_o y_o z_o$ 의 변환행렬 $T_{o:c}$ 를 나타낸다.

식 (8)에서 나타나 있듯이, 물체 평면의 법선 벡터는 y 요소의 부호에 따라 두 개의 해가 존재한다. 따라서 최종적으로 얻어지는 동차변환행렬 $T_{o:c}$ 역시 두 개이므로 하나의 해를 결정하는 과정이 필요하다. 본 논문은 모델평면상의 공면점을 영상에 역투영하여 추출된 공면점과의 유클리디안 거리를 활용하는 [6]의 절차를 따른다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험방법

본 논문은 제안된 방법을 쿼드콥터형 비행체의 3차원 자세 추정문제에 적용하였으며, 거리에 따른 위치 및 자세 추정 정확도/정밀도를 분석을 통해 제안된 방법의 효용성 평가를 수행하였다. 원형 패턴은 쿼드콥터비행체의 공기저항을 크게 가중시키지 않도록 그림 4과 같은 형태로 두께 $5mm$ 의 링 형태로 $r = 28.5cm$, $L = 11cm$ 가 되도록 제작되었다(Figure 3(a) 참조).



Figure 4: Quadrotor-type vehicle equipped with the proposed circular ring pattern.

Figure 1에서와 같이, 카메라 좌표계는 월드좌표계에 대하여 식 (12)과 같은 형태의 동차변환 행렬 $T_{c:w}$ 로 나타낼 수 있다.

$$T_{c:w} = \begin{pmatrix} 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos\phi & \sin\phi & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

본 논문에서는 $\phi = 0.8567$, $t_z = 244.0$ 으로 설정되었다. 실험을 위한 카메라는 하이비전시스템사의 HVR-2300CA 모델을 이용하였으며, 여기에는 적외선 광원만을 투과하도록 광학필터가 장착되어 있다. 본 실험을 위하여, 카메라 모델은 카메라 보정절차[9]를 통해 사전에 구해졌고, 카메라 내부 및 렌즈왜곡 파라미터는 각각 식 (13), (14)와 같다.

$$M = \begin{pmatrix} 498.209 & 0.000 & 333.894 \\ 0.000 & 488.515 & 245.895 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$k = (-0.138, -0.147, -0.003, 0.003, 0.000)^T \quad (14)$$

전체 위치추정 시스템은 OpenCV 라이브러리를 기반으로 C++언어를 이용하여 Window XP 환경 (Intel Core2 Quad CPU 2.33GHz, RAM 4GB)에서 구현되었다. 본 논문은 자세 추정 성능 분석을 위하여 월드 좌표계 상에서 비행체(원형 링 패턴을 기준)의 초기위치를 $(150cm, 0cm, 10cm)^T$ 으로 하여 x 축 방향으로 $350cm$ 까지 매 $50cm$ 마다 위치시킨 후 영상을 수집하였다. y 축의 변위는 $-50cm, 50cm$ 로 하였으며 같은 방법으로 매 측정위치에서 영상을 수집하였다. 원형 링 패턴의 방향 파라미터는 월드 좌표계를 기준으로 $(\pi, 0, 0)^T$ 으로 설정하였다. 즉, 비행체의 자세가 $x_o^{ref} = (-1, 0, 0)^T$, $y_o^{ref} = (0, 1, 0)^T$, $z_o^{ref} = (0, 0, -1)^T$ 이 되도록 위치시켰다. 각각의 측정위치에서 수집된 샘플데이터의 개수는 200이며, 영상의 크기는 640×480 픽셀이다. 원형 링 패턴의 모델 파라미터는 반지름 $r = 28.5$ 및 공면점의 좌표 $P_o = (17.5, 0)$ 이 되도록 설정되었다.

3.2 실험결과

Figure 5는 입력된 하나의 영상에 대하여 매 단

계에서의 처리결과를 나타낸 것이다. Figure 5(a)는 카메라로부터 얻어지는 영상이다. 제안된 시스템은 Figure 5(b)와 같이 입력된 영상으로부터 에지를 추출한 후 윤곽선 단위로 분할한다. Figure 5(c)는 이들 윤곽선들을 이용하여 추출된 타원과 공면점을 윤곽선 정보와 함께 도시한 것이다. Figure 5(c)는 관심영역을 확대한 것으로, 최종적으로 추출된 타원 및 공면점이 원래의 윤곽선들과는 다소 오차가 존재함을 알 수 있는데, 이는 데이터 교정과정에서 렌즈왜곡 오차가 보상된 결과를 나타낸다. 제안된 시스템은 사전에 입력된 물체모델을 기반으로 최종적으로 영상에 투영된 물체의 3차원 위치 및 방향을 추정한다. Figure 5(d)는 계산된 동차변환행렬을 통해 물체 좌표계를 영상에 역투영한 결과를 나타낸다. 여기서, x_o 축의 방향이 물체중심에서 공면점을 향하고 있음을 알 수 있다.

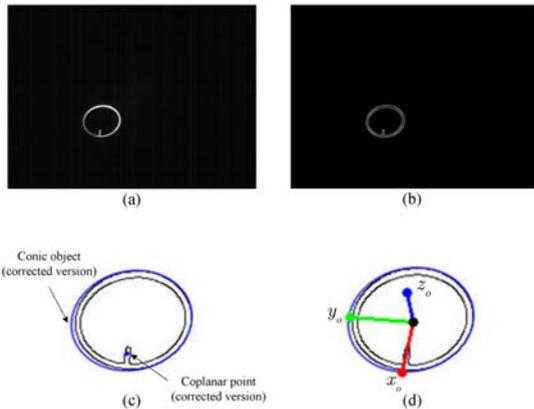


Figure 5: (a) Input image, (b) Edge detection and contour extraction, (c) Data correction and object (ellipse with a coplanar point) recognition, and (d) 3-D pose estimation of the object.

3.2.1 위치추정 성능 분석

제안된 방법을 통해 각각의 측정위치에서 추정된 비행체의 위치오차는 Figure 6에 나타나 있다. 3개의 y 축 측정위치에 대하여, Figure 6은 각각의 x 축 상의 측정위치에서 추정된 위치의 평균절대오차(MAE: Mean Absolute Error)를 나타낸다. Figure 6(a)는 비행체의 x 위치에 대한 추정오차를, (b)는 y

위치의 추정오차를, (c)는 z 위치의 추정오차를 각각 나타낸다. 비교적 측정 범위가 큰 x 위치는 카메라로부터 멀어질수록 오차도 증가하는 경향이 있었다. 반면, y 위치는 상대적으로 오차가 작았다. 비행체의 z 위치는 U자형 오차경향을 보이는데, 이는 카메라의 렌즈왜곡이 보정작업을 통해 일반적으로 완벽하게 보상될 수 없기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 즉, 카메라 영상의 중심에서는 작은 오차를 보이며 가장자리로 갈수록 증가하는 경향

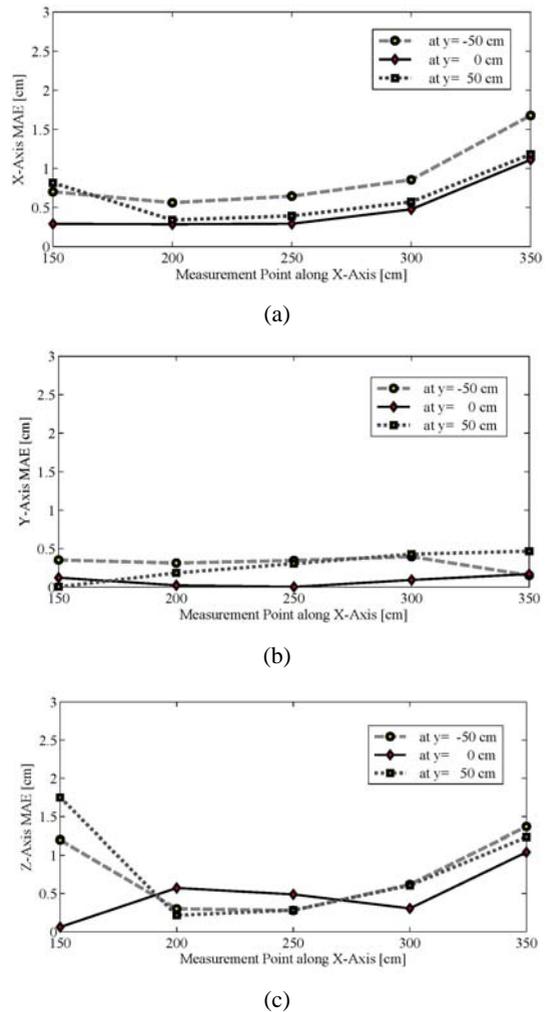


Figure 6: MAEs of 3-D position estimation at measurement points. (a) X-axis MAEs, (b) Y-axis MAEs, and (c) Z-axis MAEs.

이 있었다. 본 실험을 통해 측정거리가 멀어질수록 혹은 영상의 가장자리에서 물체가 투영되는 경우 오차가 증가하는 경향이 있었다. 그러나 단일 비전만으로도 오차범위 2cm미만의 위치 추정 결과를 얻을 수 있었다.

Table 1은 y축 변위에 따른 측정오차들의 통계적인 수치들을 나타내고 있다. 여기서 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 비행체의 위치오차에 대한 표준편차를 나타낸다. Table 1에 나타나 있듯이 제안된 방법은 0.241cm의 미만의 표준편차로 안정적인 위치추정이 가능함을 알 수 있다.

Table 1: Standard deviations of 3-D position estimation errors for each measurement point along y-axis. [unit: cm]

	$y = -50$	$y = 0$	$y = 50$
σ_x	0.241	0.120	0.165
σ_y	0.048	0.097	0.030
σ_z	0.216	0.104	0.154

3.2.2 자세추정 성능 분석

자세추정 성능은 모든 측정위치에서 추정된 물체좌표계의 기저벡터들에 대한 평균을 이용하여 분석되고 평가된다. 이는 매 측정위치마다 비행체의 자세를 고정시킨 후 샘플영상들이 수집되었기 때문에, 월드좌표계를 기준으로 추정된 비행체의 자세는 동일한 결과로 출력되어야 한다. 이때 비행체 자세의 참조값으로는 $\mathbf{x}_o^{ref} = (-1, 0, 0)^T$, $\mathbf{y}_o^{ref} = (0, 1, 0)^T$, $\mathbf{z}_o^{ref} = (0, 0, -1)^T$ 을 이용한다. 다시 말해, 추정치들은 이들 참조값에 근접한 벡터로 계산되어야 한다. Table 2는 추정된 방향벡터들의 평균을 나타낸다. 두 번째 열의 각각의 항목에서 첫 번째 벡터는 추정된 방향벡터의 평균을 나타내고, 두 번째 벡터는 표준편차를 나타낸다. Table 2에 나타나 있듯이, 본 실험을 통해 추정된 비행체 좌표계의 방향벡터들이 참조 벡터들과 근접한 수치를 얻을 수 있었다. 추정성능에 대한 보다 구체적인 수치를 얻기 위하여, 본 논문은 참조벡터와 대응되는 방향 벡터의 추정치들을 내적하여 Table 2의 제 3열에 열거하였다. 두 벡터의 방향이 완

히 같은 경우 내적 값이 1이 되며, 실험결과에서 알 수 있듯이 추정된 방향벡터가 그 대응되는 참조벡터와 근접하고 있음을 알 수 있다. 이는 제안된 방법을 이용할 경우, 단일비전시스템만으로도 충분히 안정된 자세추정 성능을 얻을 수 있음을 시사한다.

Table 2: Estimation of 3-orientation vectors of the object frame with respect to the world frame.

축	방향 벡터 추정치들의 평균	평균 내적 (표준편차)
$\hat{\mathbf{x}}_o$	$(-0.990, -0.007, -0.062)^T$ $\pm (0.078, 0.049, 0.089)^T$	0.9898 (0.0783)
$\hat{\mathbf{y}}_o$	$(-0.012, 0.998, 0.031)^T$ $\pm (0.044, 0.006, 0.028)^T$	0.9981 (0.0059)
$\hat{\mathbf{z}}_o$	$(0.062, 0.030, -0.990)^T$ $\pm (0.091, 0.020, 0.084)^T$	0.9897 (0.0839)

4. 결 론

본 논문에서는 원형 링 패턴을 이용한 실내용 3차원 자세 추정 시스템을 다루었다. 본 논문은 3차원 공간의 원형 특징에 대하여 2차원 투영공간에서의 변환원리에 관한 이론적 배경을 토대로 구체적인 응용방법에 관해 논의하였다. 실내 환경에서 노이즈의 영향을 줄이기 위하여 패시브 형태의 적외선 마커검출 방식이 적용되었고, 물체인식의 관점에서 효과적/효율적인 원형 링 패턴의 설계방법을 구체적으로 제시하였다. 또한, 본 논문은 원형 링 패턴의 인식에 기반한 물체의 3차원 자세 추정 절차를 상세히 논의하였다. 제안된 방법의 효용성을 입증하기 위하여, 본 논문에서는 쿼드로터형 비행체의 자세추정 용도로 원형 링 패턴을 설계하여 거리에 따른 위치 및 자세 정확도/정밀도를 평가하였다. 그 결과, 제안된 방법은 실내 환경에서 2cm 이하의 위치오차, 내적기준 0.9897이상의 방향벡터 부합을 보이는 위치 및 자세 추정 성능을 보였다.

본 논문에서는 단일비전 기반의 자세추정 시스템을 다루었으나 이는 다수비전 시스템에도 적용 가능하다. 특히, 다수비전 시스템의 경우 보다 정확한 위치/자세 정보를 얻을 수 있으므로 제안된 방법을 토대로 하는 다양한 활용이 기대된다.

참고문헌

- [1] K. Kanatani and L. Wu, "3D interpretation of conics and orthogonality," *CVGIP Image Understanding*, vol. 58, no. 3, pp. 286-301, 1993.
- [2] A. Fitzgibbon, M. Pilu, and R. B. Fisher, "Direct least square fitting of ellipses," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 21, no. 5, pp. 476-480, 1999.
- [3] Y. Abdel-Aziz and H. Karara, "Direct linear transformation from comparator coordinates in close-range photogrammetry," *Proceedings of ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1-19, 1971.
- [4] R. Safae-Rad and I. Tchoukanov, K. C. Smith, and B. Benhabib, "Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 5, pp. 624-640, 1992.
- [5] J. S. Kim, P. Gurdjos, and I. S. Kweon, "Geometric and algebraic constraints of projected concentric circles and their applications to camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, no. 4, pp. 637-642, 2005.
- [6] H.-H. Kim, K.-H. Park, and Y.-S. Ha, "3D pose estimation of a circular feature with a coplanar point," *Journal of IEEK-System and Control*, vol. 48, no. 5, pp. 13-24, 2011(in Korean).
- [7] J.-K. Choi and Y.-S. Ha, "A study on the improvement of the accuracy of a wheeled vehicle positioning system by multisensor data fusion," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 24, no.1, pp. 119-126, 2000.
- [8] D. H. Douglas and T. K. Peucker, "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature," *The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, vol. 10, no. 2, pp. 112-122, 1973.
- [9] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.

저 자 소 개



김헌희(金憲熙)

1997년 한국해양대학교 기관공학과 (공학사), 2002년 한국해양대학교 제어계측공학과 (공학석사), 2012년 한국해양대학교 제어계측공학과 (공학박사), 2006-2009년 한국과학기술원 인간친화 복지 로봇시스템 연구센터 연구원, 2009-현재 광운대학교 예술로봇연구소 연구원, 관심분야: 로봇비전, 패턴인식, 기계학습.



하윤수(河潤秀)

1986년 한국해양대학교 기관학과 (공학사), 1990년 한국해양대학교 기관학과 (공학석사), 1996년 일본 쓰쿠바대학 전자정보공학과 (공학박사), 1996년-현재 한국해양대학교 IT공학부 교수, 관심분야: 지능형 자율이동로봇, 무인보트, 센서응용.