

스테레오 카메라 기반 2차원 이미지로부터 3차원 특징점 좌표값의 추출

2021/12/06

한국항공대 이형근

주변의 3차원 객체들에 대한 정보를 2차원 이미지 형태로 제공하여 주는 카메라는 측정 정보량이 가장 많은 센서이다. 다른 센서들에 비해서 가장 많은 정보량을 제공할 수 있는 장점으로 인하여 다수 주변 물체를 식별하고 이들의 움직임을 세세하게 추적하는 것이 가능하다. 또한, 주변 물체 뿐만 아니라 카메라 자체의 병진 운동과 회전 운동도 추정이 가능하므로 최근에 들어 이동체의 주변 상황 인지와 충돌 방지를 위해 널리 활용되고 있다.

한 개의 카메라는 3차원 정보가 2차원 이미지에 투영된 정보를 제공해 주는 센서이다. 반면, 반대의 순서로 2차원 이미지로부터 3차원 정보를 추출하는 과정은 간단하지 않다. 이에 덧붙여, 카메라가 제공하는 정보는 지역적인 상대 위치와 자세에 한정되므로, 지구 전지역에 대해서 균일하게 적용이 가능한 전역 좌표계 기반의 절대 위치와 자세 정보를 제공하기 위해서는 GPS 와 같은 보조 센서의 활용이 필요하다.

본 고에서는 스테레오 카메라의 이미지로부터 취득된 픽셀 측정치를 활용하여 이미지에 포함된 특징점의 상대 위치를 추정하는 과정을 상세히 설명하고자 한다. 이를 위하여 먼저 이상적인 핀홀(pinhole) 카메라 모델을 활용하여 초점거리에 기반한 3차원 객체와 2차원 투영 이미지 사이의 비례 관계를 살펴본다. 다음으로는 특징점의 3차원 위치를 추정하는 과정에 활용되는 좌표계, 주점(principal point), 이미지 평면,

픽셀 단위 좌표값, 그리고 거리 단위 좌표값 사이의 관계를 상세히 설명한다. 이후 스테레오 카메라 모델을 도입하여, 좌우의 두 카메라에서 취득된 동일한 특징점의 픽셀 측정치를 활용하여 3차원 위치를 추정할 수 있는 측정 모델을 소개한다. 마지막으로, 스테레오 카메라의 섭동된 오차 측정 모델을 활용하여 반복적인 방법으로 특징점의 위치를 추정하는 과정을 설명한다.

핀홀 카메라 모델

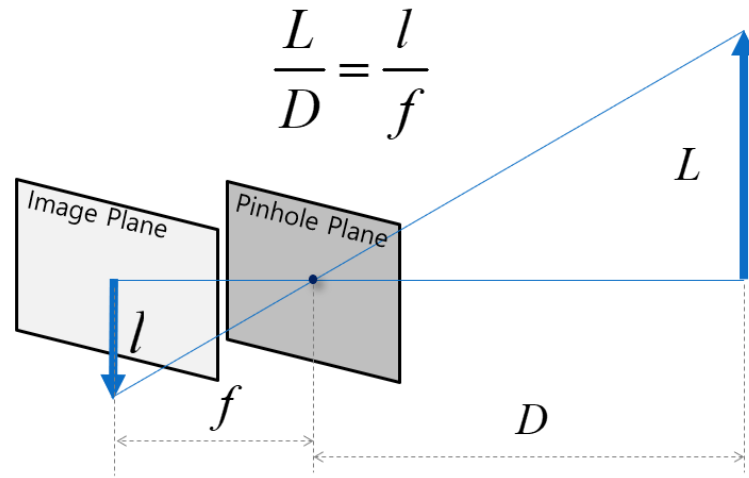


그림 1 핀홀(pinhole) 카메라 모델

핀홀(pinhole) 카메라 모델은 카메라의 원리를 가장 간단하게 설명해 주는 모델이며 그 개형은 그림 1에 도시된바와 같다. 핀홀은 중앙에 작은 구멍이 있는 가상의 평면을 의미하며, 이 작은 구멍을 통해서만 빛이 통과할 수 있다. 핀홀로부터 대상체인 화살표까지의 거리(depth)를 D , 핀홀로부터 영상 평면(image plane)까지 초점거리를 f , 실제 화살표의 길이를 L , 그리고 영상 평면에 투영된 화살표의 길이를 l 로 표기하면 그림 1에 도시된 바와 같이 핀홀 좌우 두 삼각형의 비례 관계로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$l = f \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1)$$

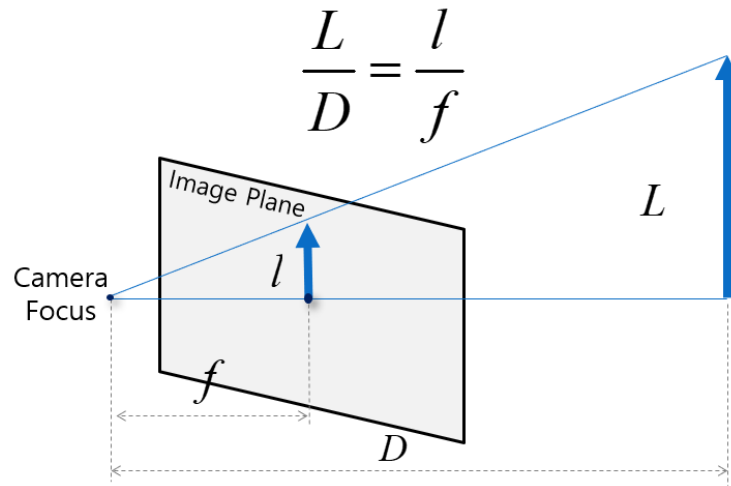


그림 2 변형된 핀홀 카메라 모델

그림 2는 핀홀과 영상 평면의 위치를 서로 바꾼 모습을 보여준다. 이렇게 구조를 변경하면 객체가 핀홀의 오른쪽에 상이 맺히게 되고 역상이 아닌 똑바로 선 형태의 영상이 생성된다. 그림 2에 도시된 변형된 핀홀 카메라 모델에 있어서도, 카메라의 초점(camera focus)과 실제 화살표가 이루는 큰 삼각형과 초점과 투영된 화살표가 이루는 작은 삼각형 사이에는 비례 관계가 성립한다. 이를 활용하면 앞선 그림 1과 동일하게 다음의 비례 관계식을 얻을 수 있다.

$$l = f \left(\frac{L}{D} \right) \tag{2}$$

단일 카메라 모델

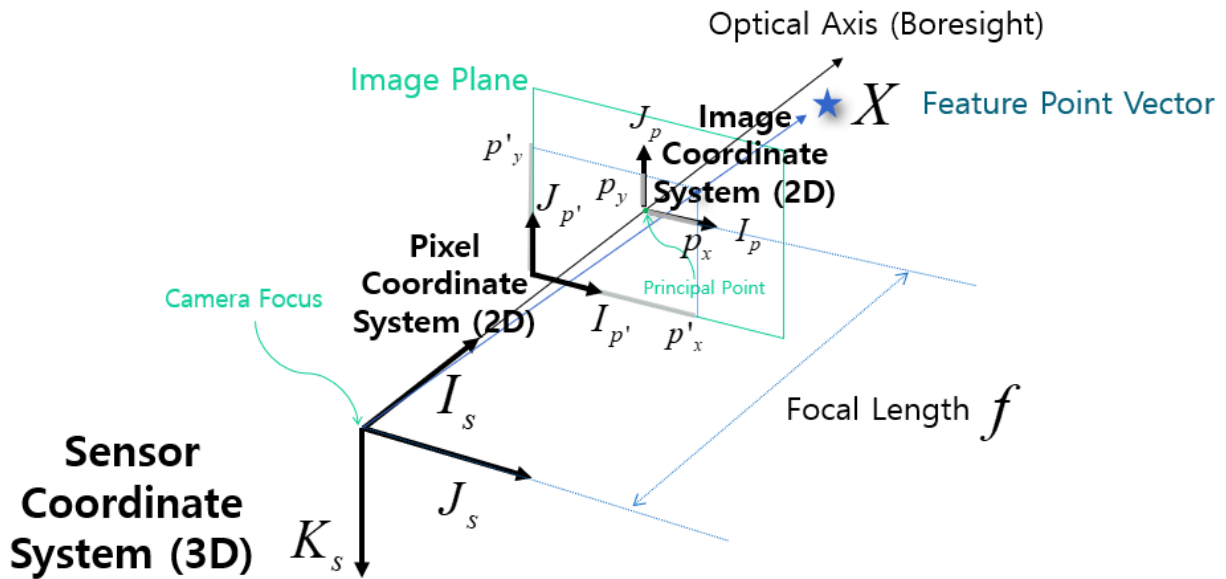


그림 3 단일 카메라와 관련된 좌표계

그림 3에 도시된 바와 같이 임의의 특징점 X 가 카메라의 이미지 평면에 투영된 2차원 픽셀 측정값 $[p'_x \ p'_y]^T$ 로부터 3차원 좌표값 X^s 를 알아내기 위해서는, 다양한 좌표계를 정의하고 활용해야 한다. 센서 좌표계 (sensor coordinate system)는 카메라의 초점을 중심으로 카메라 렌즈의 전방 방향, 우측 방향, 아래쪽 방향을 각각 x -축, y -축, z -축 방향으로 정의한다. 센서 좌표계는 간혹 카메라 좌표계로 지칭되기도 한다. 센서 좌표계를 활용하여 영상 내에 보이는 특징점의 실제 거리 단위 기반 좌표값을 표현하면 다음과 같다.

$$X^s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

픽셀 좌표계(pixel coordinate system) 혹은 픽셀이미지 좌표계는 이미지의 한쪽 귀퉁이를 원점으로 하는

2차원 좌표계이다. 픽셀 좌표계를 활용하면 화면 내에서 어떤 특징점의 위치를 좌표값 $[p'_x \ p'_y]^T$ 으로 표현할 수 있다. 그림 3에는 픽셀 좌표계의 원점이 왼쪽 아래 귀퉁이에 예시되어 있다. 2차원 픽셀 좌표계를 구성하는 2개 기저벡터는 일반적으로 화면의 수평 방향($I_{p'}$)과 수직 방향($J_{p'}$)에 해당된다. 그림 3에는 x-축 기저벡터 $I_{p'}$ 의 방향은 원점으로부터 수평 오른쪽 방향으로 하고 y-축 기저벡터 $J_{p'}$ 의 방향은 원점으로부터 수직 위쪽 방향으로 예시되어 있다.

이미지 좌표계(image coordinate system)는 일반적으로 화면 중앙의 주점(principal point)을 원점으로 하는 2차원 좌표계이다. 앞서 설명된 픽셀 좌표계와 이미지 좌표계의 기저벡터들의 방향은 일치하나 원점이 일치하지 않으므로, 픽셀 단위의 이미지 좌표계에 대한 픽셀 단위 기반 좌표값 $[p_x \ p_y]^T$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $[c_x \ c_y]^T$ 는 주점의 좌표값을 픽셀 좌표계에 대하여 픽셀 단위로 나타낸 것이다.

영상 내 임의의 점의 위치를 2차원 이미지 좌표계에 대하여 픽셀 단위의 좌표값 $[p_x \ p_y]^T$ 대신에 거리 단위의 좌표값 $[x_p \ y_p]^T$ 로 나타내고자 할 경우에는 다음의 관계식을 활용한다.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 s_x 와 s_y 는 픽셀 단위 좌표값을 거리 단위 좌표값으로 변환하기 위한 환산계수를 나타낸다. 그림 3에 도시된 단일 카메라 모델에 의하면 수평 방향에 해당하는 이미지 좌표계의 x-축 기저벡터 I_p 와 센서 좌표계의 y-축 기저벡터 J_s 는 방향이 일치한다. 이에 기반하여, 초점거리 f 와 대상체까지의 깊이 (depth) x_s 에 대한 수평 방향의 영상 내 거리 x_p 와 실제 거리 y_s 의 비례관계를 적용하면 다음의 식을

얻을 수 있다.

$$x_p = f \left(\frac{y_s}{x_s} \right) \quad (6)$$

유사하게, 그림 3에 의하면 이미지 좌표계의 y-축 기저벡터 J_p 와 센서 좌표계의 z-축 기저벡터 K_s 는 서로 반대 방향에 해당한다. 이에 기반하여, 초점거리 f 와 대상체까지의 깊이(depth) x_s 에 대한 수직 방향의 영상 내 거리 y_p 와 실제 거리 $-z_s$ 의 비례관계를 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$y_p = f \left(\frac{-z_s}{x_s} \right) \quad (7)$$

지금까지의 설명을 종합하여 식 (3)에 식 (7)까지의 내용을 조합하면 다음과 같이 한 개의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$A X^s = O_{2 \times 1} \quad (8)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} s_x \cdot p_x & -f & 0 \\ s_y \cdot p_y & 0 & f \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)는 1개의 특징점으로부터 얻을 수 있는 2개의 픽셀 측정치가 3개의 상태변수 X^s 에 대하여 만족해야 할 관계식을 나타낸다. 3개의 상태변수에 대하여 2개의 측정치만 가용하므로, 한 개의 카메라를 한 시점에서 활용하는 식 (8) 단독으로는 상태변수를 알아낼 수 없다. 상태변수 X^s 를 추정하기 위한 추가 측정치를 제공하기 위해서는 (a) 동일한 카메라를 사용하되 다른 시점에서 동일한 대상체의 이미지를 취득하거나 (b) 카메라를 하나 더 추가하여 다른 위치에서 동일한 대상체의 이미지를 취득하는 방법을 활용하여야 한다.

스테레오 카메라 모델

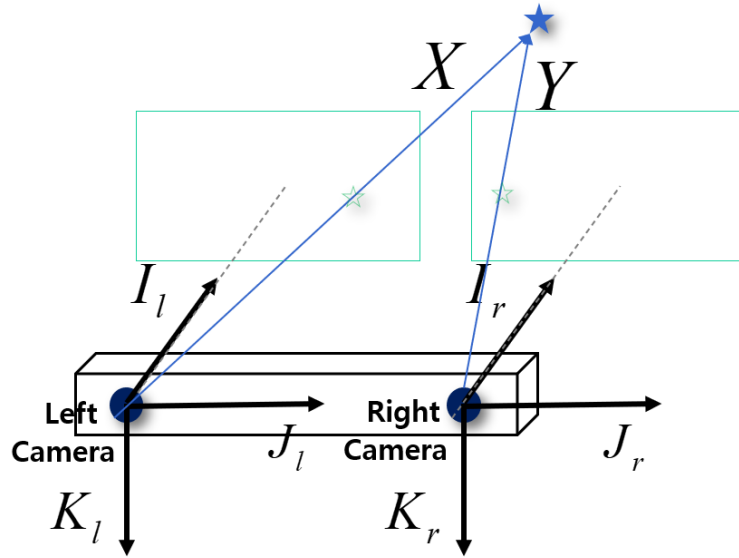


그림 4. 스테레오 카메라와 특징점 사이의 기하학적 관계

앞서 살펴본 바와 같이 한 개의 카메라를 한 시점에서만 활용할 경우에는 측정치 개수의 부족으로 인하여 특징점의 좌표값을 알아낼 수 없다. 지금부터는 스테레오 카메라를 활용하여 픽셀 측정치의 개수를 증가시켜서 특징점의 좌표값을 알아내는 방법을 설명하고자 한다. 그림 4는 스테레오 카메라와 이미지 그리고 객체 사이의 기하학적 관계를 나타낸다. 한 개의 스테레오 카메라에는 왼쪽과 오른쪽에 두 개의 단안 카메라가 포함되어 있다.

그림에 도시된 바와 같이 동일한 한 개의 특징점에 대하여 왼쪽과 오른쪽 카메라가 각각 독립적인 이미지를 취득하면 각각의 이미지에는 동일한 특징점이 각기 다른 이미지 내 각기 다른 위치에 존재하게 된다. 동일한 특징점에 대해서도 원점이 다른 좌표계를 사용하면 위치 벡터가 다르게 나타난다. 이를 구분하기 위하여 왼쪽 카메라 좌표계를 활용할 경우의 특징점 위치 벡터를 X 로 표시되어 있으며, 오른쪽 카메라 좌표계를 활용할 경우의 동일한 특징점 위치 벡터는 Y 로 구분하여 그림 4에 표시하였다.

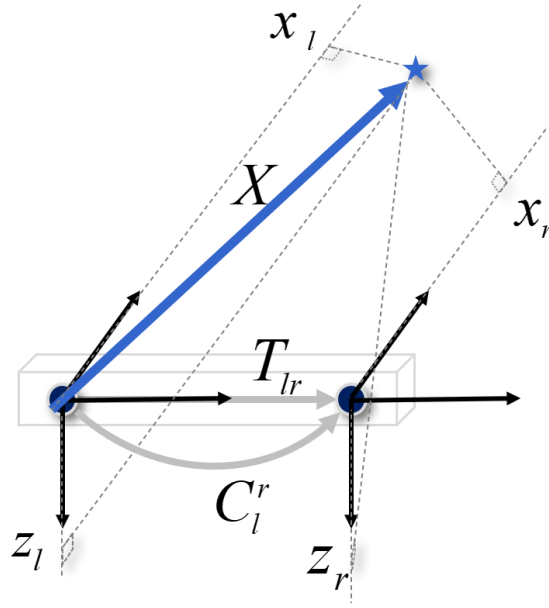


그림 5. 왼쪽 카메라 좌표계에 대한 특징점 위치 벡터의 좌표값 개형

지금부터는 그림 5에 도시된 바와 같이 왼쪽 카메라를 기준으로 특징점의 상대 위치를 추정하는 과정을 고려하기로 한다. 한 개의 카메라로 획득한 측정식에 해당되는 식 (8)과 식(9)를 활용하면 그림 5의 왼쪽 카메라로 취득한 측정식은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$A_l X^l = O_{2 \times 1} \tag{10}$$

여기서

$$A_l = \begin{bmatrix} s_x^l p_x^l & -f_x^l & 0 \\ s_y^l p_y^l & 0 & f_y^l \end{bmatrix} \tag{11}$$

$X^l = [x_l \quad y_l \quad z_l]^T$: 왼쪽 카메라 좌표계에 대한 특징점의 좌표값

p_x^l, p_y^l : 왼쪽 카메라로 취득한 특징점의 2차원 픽셀 좌표값

s_x^l, s_y^l : 왼쪽 카메라의 픽셀/거리 환산계수

f_x^l, f_y^l : 왼쪽 카메라의 초점거리

식 (9)와 식 (11)을 비교하면, 식 (9)에는 x-축과 y-축 픽셀 측정치에 대하여 동일한 초점거리를 적용한 반면에 식 (11)은 x-축과 y-축 픽셀 측정치에 각기 다른 초점거리를 적용한 것을 알 수 있다. 식 (11)은 실제 카메라의 특성을 고려한 표현식에 해당되며, 특히 $f_x^l = f_x^r = f$ 의 관계가 만족되는 경우에는 식 (9)와 동일한 의미를 담게 된다.

유사한 방식으로 오른쪽 카메라로 취득한 측정식은 다음과 같이 정리된다.

$$A_r Y^r = O_{2 \times 1} \quad (12)$$

여기서

$$A_r = \begin{bmatrix} s_x^r p_x^r & -f_x^r & 0 \\ s_y^r p_y^r & 0 & f_y^r \end{bmatrix} \quad (13)$$

Y^r : 오른쪽 카메라 좌표계에 대한 특징점의 좌표값

p_x^r, p_y^r : 오른쪽 카메라로 취득한 특징점의 2차원 픽셀 좌표값

s_x^r, s_y^r : 오른쪽 카메라의 픽셀/거리 환산계수

f_x^r, f_y^r : 오른쪽 카메라의 초점거리

X^l 과 Y^r 은 동일한 3차원 특징점을 서로 다른 좌표계에 대해서 표현한 좌표값들에 해당하므로, 왼쪽 카메라에 대한 오른쪽 카메라의 상대적인 위치 T_{lr} 과 자세 C_l^r 에 의하여 다음의 관계를 만족하게 된다.

$$Y^r = C_l^r (X^l - T_{lr}^l) \quad (14)$$

여기서 T_{lr} 은 그림 5에 도시된 바와 같이 왼쪽 카메라의 초점에서 시작하여 오른쪽 카메라의 초점에서 종료되는 기저선(baseline) 벡터로서 상대적인 위치를 나타낸다. 또한, C_l^r 은 왼쪽 카메라 좌표계에서 오른쪽 카메라 좌표계로의 좌표변환행렬을 나타내며, 상대적인 자세에 해당된다. 특히, 왼쪽 카메라와 오른쪽 카메라의 3축 방향이 정렬되어 있고 서로 길이 b 만큼 분리되어 있는 스테레오 카메라의 경우에는 T_{lr} 과 C_l^r 의 값은 다음과 같다.

$$T_{lr}^l = T_{lr}^r = \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_l^r = I_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (12)와 식 (14)를 결합하면 다음의 관계가 성립한다.

$$A_r C_l^r (X^l - T_{lr}^l) = O_{2 \times 1} \quad (16)$$

최종적으로 식 (10)과 식 (16)을 누적하면 3개의 특징점 좌표값 X^l 을 구하기 위한 4개의 픽셀 측정치 $p_{x^l}^l, p_{y^l}^l, p_{x^r}^r, p_{y^r}^r$ 사이의 관계식이 다음과 같이 얻어진다.

$$AX^l = B \quad (17)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} A_l \\ A_r C_l^r \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} O_{2 \times 1} \\ A_r C_l^r T_{lr}^l \end{bmatrix}, \quad A_l = \begin{bmatrix} s_x^l p_x^l & -f_x^l & 0 \\ s_y^l p_y^l & 0 & f_y^l \end{bmatrix}, \quad A_r = \begin{bmatrix} s_x^r p_x^r & -f_x^r & 0 \\ s_y^r p_y^r & 0 & f_y^r \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (17)과 식 (18)은 오차가 없는 이상적인 관계를 나타내며, 위해서는 $s_x^l, s_y^l, s_x^r, s_y^r$ 등의 환산계수와 $f_x^l, f_y^l, f_x^r, f_y^r$ 등의 초점거리 값들은 미리 알려져 있다고 가정한다. 또한, 좌우 카메라들 사이의

회전과 병진 관계에 해당되는 C_l^r 과 T_{lr} 도 모두 정확하게 알려져 있다고 가정한다. 식 (17)과 식 (18)에서 A 와 B 행렬을 구성하는 $p_{x'}^l, p_{y'}^l, p_{x'}^r, p_{y'}^r$ 값들은 이상적인 픽셀 좌표값에 해당되며 X' 은 특징점 좌표값의 참값 해당된다. 보다 해석을 편리하게 하기 위한 목적으로 식 (17)을 간단하게 수정하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$AX' - B = O_{4 \times 1} \tag{19}$$

픽셀 측정치에 의한 특징점 좌표의 추정

픽셀 측정 오차 $\delta p_x^l, \delta p_y^l, \delta p_x^r, \delta p_y^r$ 오차의 영향이 포함되지 않은 이상적인 A, B , 그리고 X^l 은 실제 상황에서 사용이 불가능하다. 대신에 픽셀 측정 오차의 영향이 포함된 \tilde{A} 그리고 \tilde{B} 와 추정오차 δX^l 포함된 추정값 \hat{X}^l 을 (19)와 유사한 형태로 결합하면 다음의 관계식을 얻게 된다.

$$Z \triangleq \tilde{A}\hat{X}^l - \tilde{B} \neq O_{4 \times 1} \quad (20)$$

여기서

$$\hat{X}^l \triangleq X^l + \delta X^l, \quad \tilde{A} \triangleq A + \delta A, \quad \tilde{B} \triangleq B + \delta B \quad (21)$$

참고로, 특징점 좌표값에 대하여 어떠한 선정보(prior information)도 없는 경우에는, 좌표계 원점을 좌표값의 추정치로 $\hat{X}^l = [0 \ 0 \ 0]^T$ 과 같이 간단하게 초기화 할 수도 있다.

식 (19)-(21)을 조합하면 좌표값의 추정오차 δX^l 에 대한 측정식 Z 는 다음과 같이 해석될 수 있다.

$$\begin{aligned} Z &= (A + \delta A)(X^l + \delta X^l) - (B + \delta B) \\ &= A\delta X^l + \delta A X^l - \delta B \end{aligned} \quad (22)$$

일반적인 스테레오 카메라의 경우 T_{lr} 과 C_l^r 의 대표적인 예시에 해당하는 식 (15)를 가정하면 δB 는 다음과 같이 픽셀 오차에 영향을 받지 않는다.

$$\begin{aligned} \delta A_r C_l^r T_{lr}^l &= \begin{bmatrix} s_x^r \delta p_x^r & 0 & 0 \\ s_y^r \delta p_y^r & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix} = O_{2 \times 1} \\ \delta B &= \begin{pmatrix} O_{2 \times 1} \\ \delta A_r C_l^r T_{lr}^l \end{pmatrix} = O_{4 \times 1} \end{aligned} \quad (23)$$

반면, $\delta A X^l$ 은 픽셀 측정 오차에 의하여 다음과 같이 영향을 받게 된다.

$$\delta A X^l = \begin{bmatrix} s_x^l & \delta p_x^l & 0 & 0 \\ s_y^l & \delta p_y^l & 0 & 0 \\ s_x^r & \delta p_x^r & 0 & 0 \\ s_y^r & \delta p_y^r & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = x_l \begin{bmatrix} s_x^l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y^l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_x^r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_y^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_x^l \\ \delta p_y^l \\ \delta p_x^r \\ \delta p_y^r \end{bmatrix} = x_l S \delta p \quad (24)$$

여기서

x_l : 특징점의 x-방향 좌표값 (특징점과 카메라 사이의 거리)

$$S = \begin{bmatrix} s_x^l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y^l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_x^r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_y^r \end{bmatrix} : \text{픽셀에서 거리로의 환산계수 행렬} \quad (25)$$

$$\delta p = \begin{bmatrix} \delta p_x^l \\ \delta p_y^l \\ \delta p_x^r \\ \delta p_y^r \end{bmatrix} : \text{특징점에 대한 픽셀단위 측정 오차} \quad (26)$$

식 (22) 양변에 대해서 각각 왼쪽으로 의사역행렬 $(A^T A)^{-1} A^T$ 을 가하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$(A^T A)^{-1} A^T Z = \delta X^l + x_l (A^T A)^{-1} A^T S \delta p \quad (27)$$

픽셀 측정 오차가 없어서 $\delta p = O_{4 \times 1}$ 의 관계가 성립할 경우에는, 식 (27)에 의해서 다음과 같이 δX^l 를 완벽하게 추정하고 보상할 수 있다.

$$\delta X^l = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (28)$$

$$\hat{X}^l - \delta X^l \rightarrow X^l \quad (29)$$

반면, 실제 상황에서는 항상 픽셀 측정 오차 δp 는 항상 존재하므로 정확한 δX^l 을 얻는 것은 불가능하다. 실제 상황에서는 δX^l 대신에 근사치 $\delta \hat{X}^l$ 를 다음과 같이 추정하고 \hat{X}^l 의 보상에 활용한다.

$$\delta \hat{X}^l = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (30)$$

$$\hat{X}^l (before) - \delta \hat{X}^l \rightarrow \hat{X}^l (after) \quad (31)$$

식 (31)에 의한 $\delta \hat{X}^l$ 의 보상에 의해서 일반적으로 $\hat{X}^l (after)$ 의 정확도는 $\hat{X}^l (before)$ 의 정확도보다 향상된다.

추정된 \hat{X}^l 이 X^l 의 참값에 최대한 가깝게 하기 위해서 \hat{X}^l 을 초기화 한 뒤에, 식 (20), (30), (31)을 반복하여 $\|z\|$ 크기가 영값에 가까우면서 더 이상 줄어들지 않을 때까지 반복한다. 이와 같은 반복을 통해서 수렴한 추정값 \hat{X}^l 의 추정 오차 δX^l 는 픽셀 측정 오차 δp 와 다음의 관계를 만족하게 된다.

$$\delta X^l = -x_l (A^T A)^{-1} A^T S \delta p \quad (32)$$

식 (32)에 의하면 추정 오차 δX^l 는 동일한 크기의 픽셀 측정 오차에 대해서도 카메라로부터 특징점까지의 거리 x_l 가 증가하면 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 측정 오차와 동일한 거리에 대해서도 특징점이 카메라로부터 어떤 방향에 있는지에 따라 (a) 픽셀 좌표 $p_x^l, p_y^l, p_x^r, p_y^r$ 가 변화하게 되고, (b) 이에 연동하여 계수행렬 A 가 변화하여, (c) 최종적으로 δX^l 에 영향을 미침을 알 수 있다.

참고로, 스테레오 카메라에 의하여 취득되는 특징점은 한 개가 아니라 여러 개이다. 이와 같은 여러 개의 3차원 특징점들을 포인트 클라우드(point cloud)라 지칭한다. 앞서 설명된 방법을 각각의 특징점에 적용하면 포인트 클라우드 내 다수 특징점들의 좌표값들을 동시에 획득할 수 있다.

결론

본 고에서는 스테레오 카메라를 활용하여 획득한 픽셀 측정치를 활용하여 이미지에 포함된 각각의 특징점으로부터의 거리를 추정하는 과정을 상세히 설명하였다. 이에 의하면, 한 개의 특징점에 대하여 스테레오 카메라가 2 개의 이미지가 동시에 취득하면 이로부터 4 개의 픽셀 좌표값이 측정됨을 알 수 있었다. 다음으로는, 4개의 픽셀 측정값과 3개의 특징점 좌표값 사이의 관계를 살펴보기 위하여 상세한 스테레오 카메라 측정 모델을 설명하였다. 마지막으로, 스테레오 카메라 측정 모델에 기반하여 반복적으로 특징점 좌표값 추정오차를 보상하여 점진적으로 정확도가 향상되는 방식으로 특징점의 좌표값에 수렴시키는 방법과 이에 수반되는 오차를 살펴 보았다.

참고문헌

- [1] 이형근, "벡터, 좌표계, 좌표값, 그리고 좌표변환 행렬," 제어로봇시스템학회지, vol. 15, no. 14 겨울호 (12월호), pp. 38-42, 2009
- [2] 이형근, "좌표계의 회전과 코리올리 효과," 제어로봇시스템학회지, vol. 16, no. 1 봄호 (3월호), pp. 51-55, 2010
- [3] 이형근, "비선형 TOA 측정치를 활용하여 위치해를 산출하기 위한 반복 선형화 추정 기법," 제어로봇시스템학회지, vol. 17, no. 2, pp. 56-61, 2011
- [4] 이유담, 최광호, 임준후, 유원재, 김라우, 이형근 "RTK GPS/INS/스테레오 카메라를 활용한 3차원 지도 기반 복합 항법의 공간 정보 생성 시스템", 제어로봇시스템학회 논문지, Vol 24, No. 8, pp. 757-766, 2018
- [5] Y. D. Lee, W. J. Yoo, L. W. Kim, and H. K. Lee, "A Novel Feature Coordinate Initialization Algorithm Utilizing Image-Based Hybrid Correspondences," Journal of Electrical Engineering & Technology, Published Online, Nov. 29, <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00962-8>, 2021