

Robot Posture Estimation Using Circular Image of Inner-Pipe

尹智燮* · 姜理錫**

(Ji Sup Yoon · E Sok Kang)

Abstract This paper proposes the methodology of the image processing algorithm that estimates the pose of the inner-pipe crawling robot. The inner-pipe crawling robot is usually equipped with a lighting device and a camera on its head for monitoring and inspection purpose of defects on the pipe wall and/or the maintenance operation. The proposed methodology is using these devices without introducing the extra sensors and is based on the fact that the position and the intensity of the reflected light from the inner wall of the pipe vary with the robot posture and the camera. The proposed algorithm is divided into two parts, estimating the translation and rotation angle of the camera, followed by the actual pose estimation of the robot. Based on the fact that the vanishing point of the reflected light moves into the opposite direction from the camera rotation, the camera rotation angle can be estimated. And, based on the fact that the most bright parts of the reflected light moves into the same direction with the camera translation, the camera position can be obtained. To investigate the performance of the algorithm, the algorithm is applied to a sewage maintenance robot.

Key Words : pose estimation, sewage maintenance robot, image processing, vanishing point

1. 서 론

최근 지하수와 토양의 오염 문제가 대두되면서 파손된 하수관, 상수관, 또는 가스관 등을 검사하고 보수하기 위한 지하매설 파이프의 검사 및 보수용 로봇의 개발이 진행되고 있다. 이와 같은 원격주행로봇을 관로 내에서 원하는 위치로 이동시킬 때, 지상의 작업자는 로봇의 전면에 설치되어 있는 카메라의 영상정보를 보면서 로봇을 조종한다. 즉, 작업자는 로봇의 전방만을 주시하며, 관로내 로봇의 주행 자세를 관찰할 수 없다. 일반 평지에서 주행하는 로봇과는 달리, 관로 로봇의 경우에는 제한된 관로 속으로 로봇이 투입되어야 하므로, 로봇의 윗면 또는 옆면이 관로와 충돌할 수 있고, 심지어는 로봇이 주행도중 전복할 수도 있다. 특히 하수관 로봇의 경우에는 하수관내 바닥에 퇴적되어 있는 각종 이물질, 관로 연결부(이음부)의 틈 등에 의하여 로봇의 윗면 또는 옆면이 하수관의 윗면 또는 옆면과 충돌할 수 있으며, 로봇 자체가 관로에 끼게 되어 로봇을 지상으로 회수하지 못하는 경우도 발생하게 된다. 따라서, 관로 로봇의 주행 또는 작업 도중, 로봇 몸체의 자세를 측정하여 이 정보에 따라 로봇을 조종하여야 한다. 또한, 궁극적으로 관로 로봇을 자율주행시키고자 할 경우, 관로내에서 로봇이 전복되거나, 충돌하지 않는 허용오차범위 내에서 로봇의 자세를 제어할 수

있도록 로봇의 자세를 실시간으로 측정할 수 있는 센서시스템 개발이 요구된다.

대부분의 관로용 로봇에는 자세 정보를 획득할 수 있는 센서가 별도로 장착되어 있지 않다. 예를 들어 PIRAT[1], KARO[2], KURT[3], KA-TE[4] 등과 같은 기존의 하수관 검사/보수 로봇은 자세를 측정할 수 있는 센서가 장착되어 있지 않다. 이는, 자이로 센서나 초음파 센서 등의 추가함으로써 로봇내부의 제한된 설치공간, 가격 상승, 및 입출력 및 제어회로의 복잡성 등과 같은 문제가 발생하기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 별도 센서를 추가하지 않고, 기존에 설치되어 있는 전방 감시용 카메라의 영상정보를 이용하여 로봇의 자세를 추정함으로써, 로봇의 조종 성능 및 로봇의 활용효율을 높일 수 있는 방법을 제안하였다.

이동 로봇에 설치된 카메라를 이용하여 자세를 추정하는 연구는 주로 평면을 주행하는 로봇에 관한 연구가 대부분이다. 즉, 카메라를 사용하여 표식을 인식하는 방법[5,6] 등이 있으나, 이들 방법을 평면이 아닌 원형의 하수관내에 적용하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 원형의 관로내부 영상을 이용하여 로봇의 자세를 추정하는 알고리즘을 개발하고자 하였다. 로봇의 자세 추정 알고리즘은 카메라의 회전각도와 이동량을 추정하는 과정과 카메라의 자세로부터 로봇의 자세를 추정하는 과정으로 구성된다. 첫 번째로, 카메라의 회전각도는 전방을 주시하는 카메라 모듈(조명과 카메라로 구성)이 회전함에 따라, 관로의 내벽외에 조명이 미치지 않는 부분(관로 영상에서 가장 어두운 점으로 관로의 중심축과 일치하는 점, 소멸점)의 위치가 영상면에서 변화하는 특징을 이용한다. 즉, 소멸점의 위치 변화를 이에 해당하는 카메라의 회전각도로 환산하는 방법을 제안한다. 두 번째로, 카메

* 正 會 員 : 韓國原子力(研) 遠隔裝置開發室 室長 · 工博

** 正 會 員 : 忠南大學校 工大 機械設計科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 8月 14日

最終完了 : 2002年 4月 18日

라의 이동량 추정은 카메라 모듈이 이동함에 따라, 관로의 좌측과 우측 내벽에서 반사된 빛의 명암값의 차가 변화하는 특징을 이용한다. 즉, 소멸점을 경계로 두 구간에서 명암 최대값들의 차와 이동량의 관계를 실험을 통해 수식화하고, 이로부터 이동량을 추정하는 방법을 제안한다. 마지막으로, 로봇의 자세는 카메라의 자세와 로봇의 역기구학을 통해 계산한다. 제안한 알고리즘을 검증하기 위해서 카메라 모듈을 회전시키고 위치를 변화시킬 수 있도록 실험장치를 구성하고 실제 하수관에 투입하여 영상을 획득하였다.

2. 자세추정 알고리즘

2.1 로봇 구조

로봇의 자세를 추정하기 위해 먼저 로봇과 감시카메라 모듈의 구조를 기술하고 자세추정 알고리즘에 사용된 좌표계를 정의한다. 본 연구에서 개발한 하수관 로봇의 구조[7]는 Fig. 1과 같이 크게 몸체, 주행부, 공구모듈, 및 감시카메라 모듈로 나누어지며, 감시카메라 모듈은 소형 pin hole 카메라와 할로젠 조명으로 구성된다.

Fig. 2는 로봇이 주행할 때 장애물에 의한 들림과 로봇에 설치된 각종 모터의 회전 및 실린더의 구동에 의해서 로봇의 자세가 변하는 구조를 나타낸다. 그림에서 Pan, Up/Down, Tilt Motor 및 실린더 등이 구동하게 되면 로봇 중심의 자세 변화와는 무관하게 카메라의 위치가 변하게 된다. 또한, 노면의 변화에 따라 로봇의 자세도 변하게 되고 카메라의 자세도 변하게 된다.

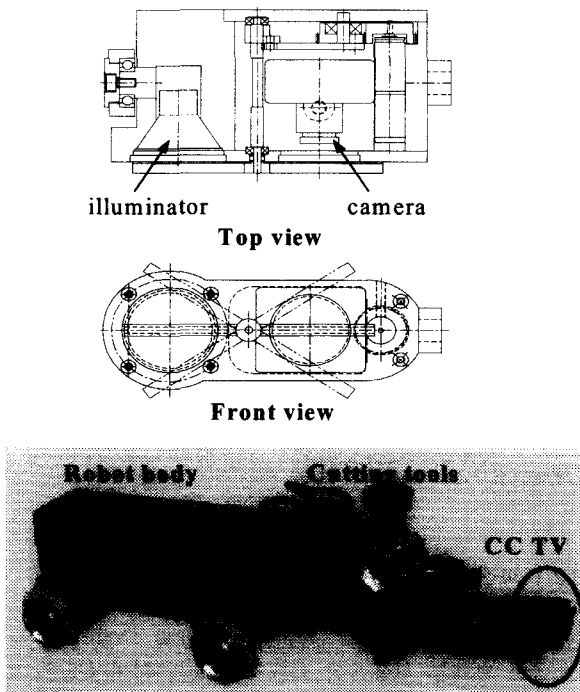


그림 1 하수관 로봇 및 감시카메라 모듈의 구조
Fig. 1 Structure of sewage robot and its CC TV

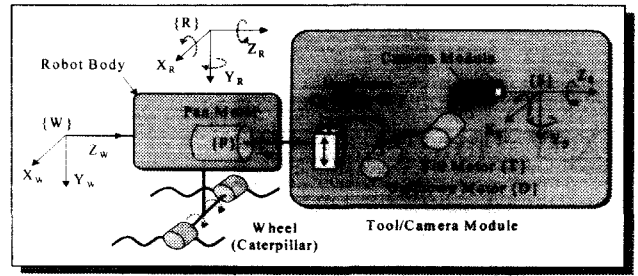


그림 2 카메라 모듈과 로봇 몸체의 좌표계
Fig. 2 Coordinate of camera module with robot body

2.2 자세 변화에 따른 영상 변화

카메라의 회전 및 좌우이동에 따른 영상의 변화는 Fig.3과 Fig. 4와 같다. Fig. 3은 로봇의 중심이 하수관의 중심에 위치하고 있을 때 하수관 중심에서 카메라를 상하방향으로 회전하거나 좌우방향으로 회전하였을 때 카메라로부터 획득된 영상을 나타낸다. Fig. 3의 각 영상에는 어둡게 나타나는 부분이 있는데 이를 소멸점이라 하며, 이 점은 조명이 반사되지 않는 하수관의 중심부를 나타낸다. 그림에서 x축 방향의 회전각도(R_x)가 증가함에 따라(카메라를 중심부에서 상방향으로 회전시킴에 따라) 소멸점은 영상면의 중심부에서 점차 아래로 이동하며, y축 방향의 회전각도(R_y)가 증가함에 따라(카메라를 우측으로 회전시킴에 따라) 소멸점은 점차 영상면의 우측에서 좌측으로 이동함을 볼 수 있다. 즉, 소멸점은 x축 및 y축 방향 모두 회전방향의 반대방향으로 이동하는데 바로 이 현상을 이용하여 회전각도를 추정한다.

Fig. 4는 카메라가 좌우로 이동하거나 상하로 이동하였을 때 획득된 영상을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 모든 영상에서 소멸점은 영상의 중심부에 위치하나 로봇이 이동함에 따라, 각 영상중 가장 밝은 부분이 로봇의 이동 방향으로 이동됨을 알 수 있으며 이와 같은 특징을 이용하여 로봇의 이동량을 추정한다. 즉, 영상중 가장 밝은 부분의 위치를 찾아내어 이 위치와 이동량과의 관계를 구한다.

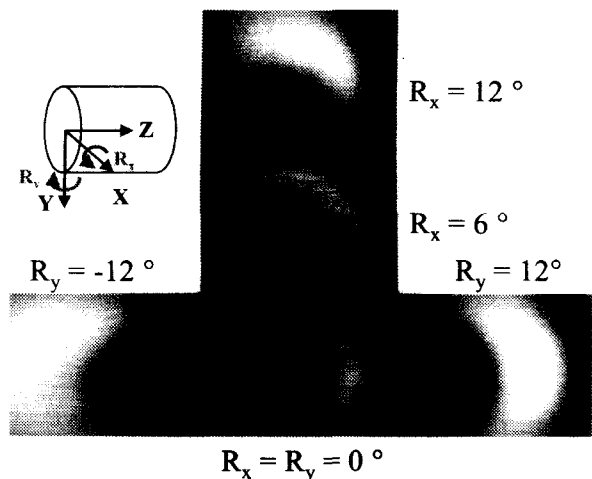


그림 3 카메라의 회전에 따른 영상 변화
Fig. 3 Variation of images with camera rotation

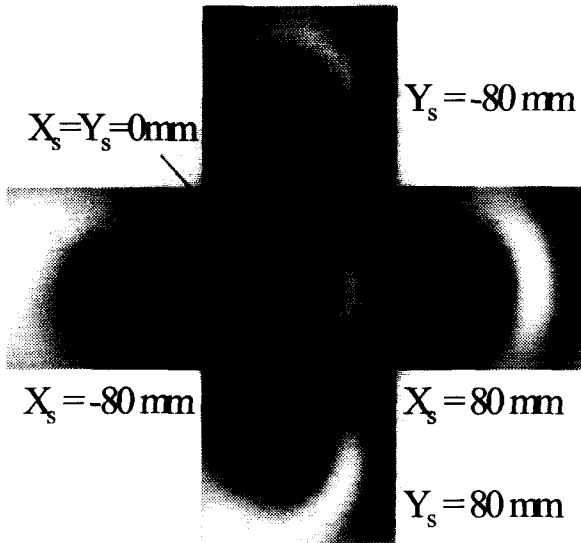


그림 4 카메라의 이동에 따른 영상 변화
Fig. 4 Variation of images with camera translation

2.3 자세 추정 알고리즘

하수관 영상 시스템의 모델링을 위하여 다음과 같이 가정한다.

- (1) 로봇 몸체 좌표계(R)에서 카메라 모듈의 로봇 중심축(Z_r)에 대한 회전각(R_z)와 이동량(Z_s)는 알 수 있다. 또한, 기준좌표계(W)에서 로봇 몸체의 관 중심축(Z_w)에 대한 회전각(R_{zr})과 이동량(Z_r)은 알 수 있다. (실제 개발한 하수관 로봇의 R_z 는 공구모듈의 축방향 회전모터에 부착한 encoder로 측정하며, R_{zr} 은 로봇 몸체내에 부착되어 있는 경사각 측정센서를 이용하여 측정함. 또한, Z_r 은 관로 로봇의 tether cable의 길이를 관로밖에서 측정하여 환산하며, Z_s 는 Z_r 로부터 카메라 모듈 좌표계와 로봇몸체 좌표계사이의 z 축 방향 거리를 뺀 값으로 결정함.)
- (2) 외부로부터의 빛의 유입은 없고, 조명은 카메라 모듈의 할로겐 램프의 조명만 존재한다. (실제 하수관 입구 맨홀부위를 제외하고 하수관 내부로의 빛의 유입은 없음)
- (3) 회전각도를 추정할 때 소멸점이 영상내에 존재하기 위해 회전각도는 18도로 제한한다. (실제 로봇의 몸체가 하수관 내벽에 부딪히지 않고 회전할 수 있는 각도는 최대 약 9°정도임. 단, 카메라 모듈은 Fig. 2의 up/down 및 tilt 모터에 의하여 360° 회전 가능함.)
- (4) 하수관은 굴곡이 없는 콘크리트 관이고 일직선이며, 길이의 영향을 무시할 만큼 길다.

이상과 같은 가정하에서 전 절에서 기술한 영상변화의 특징을 이용하여 로봇 자세를 추정하는 과정은 Fig. 5에서 보는 바와 같으며, 이를 개략적으로 설명하면 다음과 같다. 로봇의 자세추정과정은 크게 각도 추정 과정과 이동량 추정 과정으로 나누어진다.

각도 추정은 원격의 관 중심점(소멸점)을 영상으로부터 획득하고, 이를 영상좌표계로 변환한 후, 카메라 모델의 회전각도로 변환한다.

그리고 이동량 추정은 영상좌표계에서 수평과 수직선 상의 명암데이터의 차와 이동량과의 관계를 실험식으로 구한다.

이와 같이 추정한 회전각도와 이동량을 카메라 모듈의 자세로 좌표변환한다. 이때, 카메라 모듈의 로봇 중심축(Z_r)에 대한 회전각(R_z)은 공구모듈의 축방향 회전모터에 부착한 encoder로 측정된 값을 이용하며, 카메라 모듈의 z축 방향으로의 이동량(Z_s)는 cable 길이의 측정값으로부터 환산한 값을 이용한다.

카메라 모듈의 자세가 결정되면, 이로부터 로봇의 자세를 좌표변환하여 구한다. 좌표변환시에는 회전각도 추정시와 마찬가지로, 로봇 몸체내에 부착되어 있는 경사각 측정센서로부터 측정된 로봇의 회전각도 R_{zr} 과 cable의 길이로부터 환산한 로봇의 이동량 Z_r 을 이용한다.

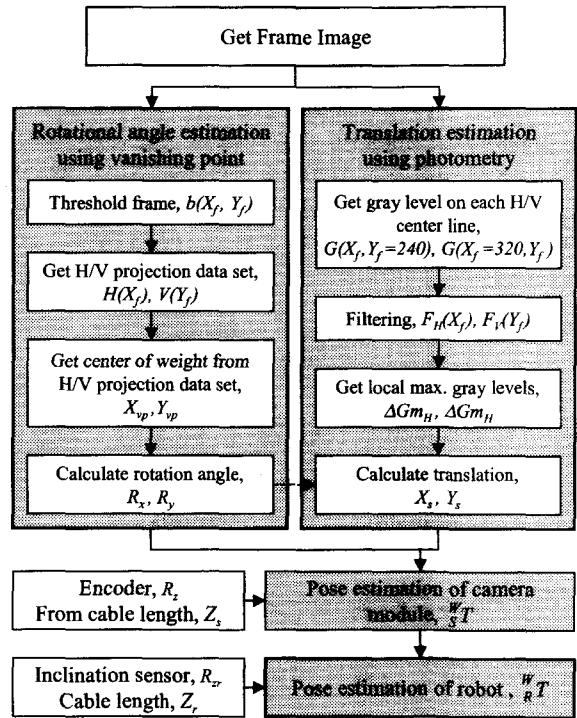


그림 5 자세추정 알고리즘의 순서도
Fig. 5 Flow chart of pose estimation algorithm

2.3.1 회전각도 추정 알고리즘

앞 절에서 기술한 대로 소멸점의 좌표를 추정하고, 카메라 모델의 관계를 이용하여 카메라 모듈의 회전각도를 계산한다. 먼저, 소멸점의 좌표를 구하기 위하여 카메라로부터 획득한 영상을 이진영상 $b(X_f, Y_f)$ 으로 변환하고, 이로부터 수평과 수직방향으로 투영(Horizontal/Vertical Projection : 이진영상에서 수평/수직 방향으로 1인 데이터의 개수) 데

이타($H(X_f), V(Y_f)$)를 다음 식과 같이 구한다.

$$H(X_f) = \sum_{Y_f=0}^{479} b(X_f, Y_f) \quad (1a)$$

$$V(Y_f) = \sum_{X_f=0}^{639} b(X_f, Y_f) \quad (1b)$$

식 (1)로 구한 수평/수직 방향 투영을 이용하여 프레임 좌표값에 대한 무게 중심값을 다음 식과 같이 구하고, 계산한 무게 중심값을 소멸점 (X_{vp}, Y_{vp})으로 취한다.

$$X_{vp} = \left(\sum_{X_f=0}^{639} X_f \times H(X_f) \right) / \left(\sum_{X_f=0}^{639} H(X_f) \right) \quad (2a)$$

$$Y_{vp} = \left(\sum_{Y_f=0}^{479} Y_f \times V(Y_f) \right) / \left(\sum_{Y_f=0}^{479} V(Y_f) \right) \quad (2b)$$

식(2)에서 구한 소멸점을 영상평면 좌표계 상의 좌표로 정밀하게 변환하기 위해서는 카메라의 정확한 변수가 필요하다. 그러나, 대부분의 상용 카메라는 이러한 변수를 제공하지 않고 있다. 특히, 본 연구에서 사용한 전방감시용 카메라는 저가의 초소형 칼라 카메라로 영상처리에 필요한 변수의 정확한 정보가 없고, 영상의 왜곡 및 오차가 심하기 때문에 정확한 영상처리를 위해서는 사용된 카메라의 변수 교정이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 Tsai가 제안한 단일영상 동일평면상의 교정점을 이용한 교정 알고리즘[8]을 적용하여 카메라의 변수를 교정하여 사용하였다.

카메라의 왜곡을 고려하여 소멸점에 해당하는 영상평면 좌표계상의 대응점 (X_d, Y_d)을 정확히 찾기 위하여 카메라

모듈 좌표계와 영상평면 좌표계의 관계를 Fig. 6과 같이 도시한다. Fig. 6에서 점 $P(x_w, y_w, z_w)$ 은 3차원 기준좌표계 {W}에서 소멸점에 대응하는 좌표이다. $P(X_{vp}, Y_{vp}, Z_{vp})$ 은 z 축을 광축에 두고 광 중심점 O 에 중심을 둔 3차원 카메라 좌표계(S)에서 소멸점 P의 좌표이다. (X, Y)는 O_i 에 중심을 두고 광축 z축과 수직인 영상 평면이다. $P_u(X_u, Y_u)$ 는 카메라에 왜곡이 없을 경우 소멸점에 대응하는 영상평면 상의 좌표이다. $P_d(X_d, Y_d)$ 는 렌즈왜곡에 의하여 소멸점에 대응하는 점이 영상평면에 실제 맺히는 점의 좌표이다.

Fig. 6에서 소멸점에 해당하는 영상평면 좌표계상의 대응점 (X_d, Y_d)은 다음 식과 같이 주어진다.

$$X_d = s_x d_x (X_{vp} - C_x) \quad (3a)$$

$$Y_d = d_y (Y_{vp} - C_y) \quad (3b)$$

여기서, s_x 는 영상의 불확실성 스케일 계수(uncertainty scale factor)이고, d_x, d_y 는 이웃한 두 개의 CCD 소자의 중심점간의 x,y 방향의 거리이며, (C_x, C_y)는 교정된 프레임 영상의 중심좌표이다. 다음, 영상평면 좌표계상의 대응점 (X_d, Y_d)을 이상적인(왜곡이 없는) 영상좌표 (X_u, Y_u)로 변환한다.

$$X_u = X_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \quad (4a)$$

$$Y_u = Y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \quad (4b)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad (4c)$$

여기서 k_i 는 왜곡계수이고, 본 연구에서는 2차 계수(k_1)까지 사용하였다.

식 (2)-(4)로부터 소멸점과 소멸점에 해당하는 교정된 영상좌표값 (X_u, Y_u)의 기하학적 관계를 이용하면 다음과 같이 카메라 모듈의 회전각도를 구할 수 있다.

$$R_x = \phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_u}{f} \right) \quad (5a)$$

$$R_y = \theta = -\tan^{-1} \left(\frac{Y_u}{f} \right) \quad (5b)$$

여기서 f 는 유효초점거리이다.

2.3.2 이동량 추정 알고리즘

Fig. 4의 영상에서 카메라의 이동량에 따라 변화하는 영상의 밝은 부분의 위치를 찾아내려면, 반사체의 미소 표면영역에 대한 입사/반사 모델을 설정하고 이로부터 광량의 최고치를 찾아내야 한다. 이와 같은 방법에 사용되는 입사/반사 모델로는 Lambertian 모델과 Torrance-Sparrow[9-10]의 모델이 사용되나, 이 모델로부터 구한 함수를 이용하여 이론

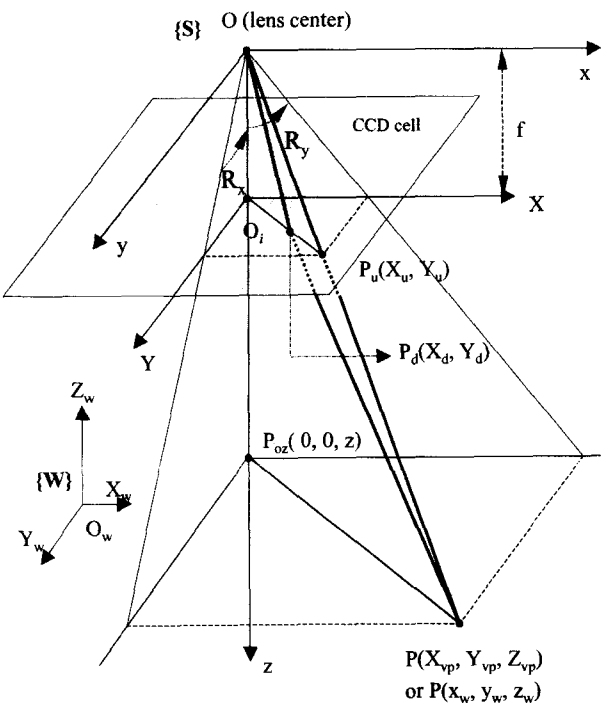


그림 6 영상의 왜곡을 고려한 카메라의 영상좌표계
Fig. 6 Coordinate system for the camera geometry with perspective projection and radial lens distortion

적으로 이동량을 추정하는 것은 고차의 비선형 방정식을 풀어야 하는 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 카메라 모듈의 이동 방향으로 영상의 밝은 부분이 이동하는 현상을 이용하고, 이의 관계를 실험적으로 유도하여 이동량을 계산한다. 또한, 영상처리의 시간을 줄이기 위해 영상의 전체 명암 데이터를 이용하지 않고, 영상중심의 수평과 수직선상에서의 명암데이터만을 이용한다. 즉, 소멸점을 기준으로 양 구간에서 최대값을 구하고, 두 개의 최대값의 차와 이동량의 관계를 실험적으로 구하여, 이동량을 추정하는 방법을 제안한다.

수평 중심의 한 행($Y_f=240$)과 수직중심의 한 열($X_f=320$)의 명암값으로부터 구간 최대값을 구하기 위해, 우선 영상중심의 수평 방향과 수직 방향의 명암값($G(x, 240)$, $G(320, y)$)의 노이즈를 이웃평균법을 사용하여 제거한다.

$$F_H(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=x-N/2}^{x+N/2} G(i, 240) \quad (6a)$$

$$F_V(y) = \frac{1}{N} \sum_{j=y-N/2}^{y+N/2} G(320, j) \quad (6b)$$

여기서, $F_H(x)$, $F_V(y)$ 는 각각 noise가 제거된 영상중심의 수평 방향과 수직 방향의 명암값을 나타내며, N 은 이웃평균의 갯수로 실험을 통해 15로 선택하였다.

다음, 영상중심의 수평 방향 데이터 행($Y_f=240$)과 수직 방향의 데이터 열($X_f=320$)로부터 각각 소멸점(X_{vp} , Y_{vp})을 중심으로 두 구간으로 나누어 각 구간에서 명암 최대값의 차(ΔGm_H , ΔGm_V)를 구한다.

$$\Delta Gm_H = \max_{X_{vp} < j \leq 639} [F_H(j)] - \max_{0 \leq j < X_{vp}} [F_H(j)] \quad (7a)$$

$$\Delta Gm_V = \max_{Y_{vp} < j \leq 479} [F_V(j)] - \max_{0 \leq j < Y_{vp}} [F_V(j)] \quad (7b)$$

j 는 정수

식 (7)에서 구한 최대 명암값의 차와 각각의 이동량과의 관계를 실험을 통하여 구한다.

2.4 로봇의 자세 추정

로봇의 자세를 추정하려면 먼저 카메라 모듈을 정해진 자세로 고정시킨 상태에서 로봇의 이동량과 회전각도를 추정한다. 로봇과 카메라 모듈의 자세가 모두 모르는 상태에서 동시에 두 가지의 자세를 추정할 수 없기 때문에 카메라 앞의 내부에 장착된 리미트스위치를 이용하여 카메라의 위치를 home position(로봇의 z 축방향의 중심축)에 고정시키고 이와 같은 상태에서는 로봇의 자세를 추정한다.

Fig. 2에서 기준좌표계{ W }와 로봇몸체 좌표계{ R } 사이의 좌표변환(${}^W_R T$)은 z축 회전과 관 입구에서 로봇 중심까지의 거리는 가정 (1)에서 구할 수 있기 때문에 x축과 y축의 이동량 및 회전각도를 변수로 사용한다. 로봇과 카메라

모듈 사이의 좌표변환 (${}^R_S T$)은 각 링크의 좌표변환으로 이루어지며 표 1의 각 링크 구조에 따른 변수를 이용하여 구할 수 있다[11]. 로봇이 이동중일 경우(에는 식 (8)의 카메라 모듈{ S }과 로봇{ R }사이의 좌표변환 정보(${}^R_S T$)를 이용하여 로봇의 자세를 구하고, 로봇이 정지한 상태에서 카메라 모듈을 회전하였을 경우에는 식 (9)의 기준좌표계에 대한 로봇의 자세정보(${}^W_R T$)를 이용하여 카메라 각 링크의 회전각도 및 이동량을 구한다.

$${}^W_R T = {}^W_S T {}^R_S T^{-1} \quad (8)$$

$${}^R_S T = {}^W_R T^{-1} {}^W_S T \quad (9)$$

표 1 로봇 각 관절의 링크 변수

Table 1 Link parameters of the robot

Link	$\alpha(^{\circ})$	a (mm)	d (mm)	$\theta(^{\circ})$	Remark
P	0	0	293	θ_p	Pan Motor
C	90	315	d_c	90	Cylinder
U	0	186	0	θ_u	Up/Down Motor
T	0	0	0	θ_t	Tilt Motor
S	90	0	0	90	Camera

3. 자세 추정 실험 및 결과

3.1 카메라 모듈의 회전각도 추정

3.1.1 x, y축으로 회전(R_x)하였을 때 회전각도 추정

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 카메라 모듈을 x축 및 y축으로 회전시켜 얻은 Fig. 3의 영상 데이터로부터 식(1)을 이용하여 수평방향과 수직방향의 투영값을 계산한 결과이다. Fig. 7에서 회전각도(R_x)가 증가함(카메라 모듈이 상방향으로 회전함)에 따라, 소멸점(Projection 값이 최고가 되는 x,y pixel 좌표)의 y좌표는 증가하며, x좌표는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는, Fig. 3의 영상에서 R_x 가 증가함에 따라 소멸점이 점차 아래로 향하고, 좌우 방향으로는 변화가 없음을 나타내는 것이다. 마찬가지로, Fig. 8에서도 회전각도(R_y)가 증가함(카메라 모듈이 우측 방향으로 회전함)에 따라, 소멸점의 x좌표는 감소하며(소멸점이 좌측으로 이동), y좌표는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

이와 같은 투영결과를 식 (5)를 이용하여 구한 각도추정 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같다. 먼저, R_x 를 변화시키며 추정한 x축 각도 추정값(그림에서 $R_y=0$ 에 해당하는 데이터군, 사각형으로 표시)은 설정값과 오차가 거의 없으며,

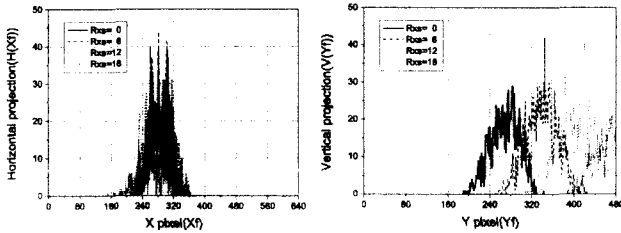


그림 7 R_{xs} 변화에 따른 투영값 ($R_{ys} = X_s = Y_s = 0$)
 Fig. 7 Projection with various R_{xs} ($R_{ys} = X_s = Y_s = 0$)

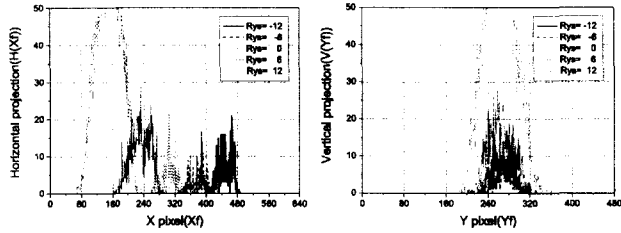


그림 8 R_{ys} 변화에 따른 투영값 ($R_{xs} = X_s = Y_s = 0$)
 Fig. 8 Projection with various R_{ys} ($R_{xs} = X_s = Y_s = 0$)

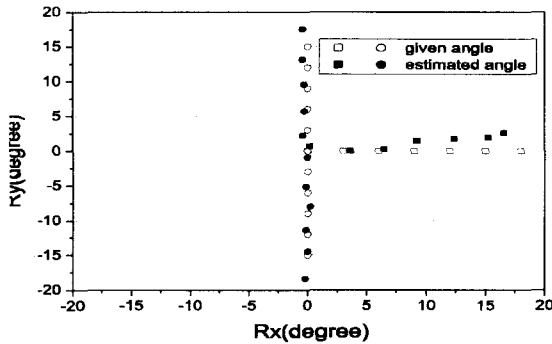


그림 9 R_{xs} 와 R_{ys} 변화에 따른 각도 추정값
 ($X_s = Y_s = 0$)
 Fig. 9 Estimated angle with various R_{xs} and R_{ys}
 ($X_s = Y_s = 0$)

투영데이터의 일부분이 영상에서 벗어난 18° 에서 -1.45° 의 최대오차를 나타내었고, y축 각도 추정 값은 R_{ys} 가 증가함에 따라 오차가 점차 커져 $R_{ys} = 18^\circ$ 에서 $+2.65^\circ$ 의 최대 오차를 나타내었다. 이는 Fig. 3의 영상에서 밝은 부분의 위치가 영상의 중심이 아닌 위(또는 아래)쪽에 위치할 경우, 이 부분의 영향으로 밝은 부분과 소멸점을 형성하는 어두운 부분의 경계위치가 실제값보다 영상의 아래(또는 위)쪽에 있는 것으로 인식되어 회전각도가 실제값보다 크게 나타난 것으로 밝혀졌다. 즉, 소멸점 주변의 어두운 부분이 원형이 아닌 타원형의 형태로 인식되어 투영데이터가 왜곡됨에 따라 나타나는 현상으로 인식되었다. 이와 같은 현상은 회전각도가 커짐에 따라 점차 심화되며, 원형의 관로에서 항상 나타나는 현상으로 관찰되었다.

다음, R_{ys} 를 변화시키며 추정된 x축 각도 추정값(그림에서 $R_x = 0$ 에 해당하는 데이터군, 원으로 표시)은 최대오차 -0.46° ($R_{ys} = 15^\circ$ 경우) 이내로 오차가 거의 없었고, y축 각도의 추정오차는 R_{ys} 가 커짐에 따라 점차 증가하여 $R_{ys} = 15^\circ$ 에서 -3.36° 의 최대오차를 나타내었다. 이는 x축 방향으로의 실험결과에서와 마찬가지로 회전각도가 커짐에 따라 y축방향 투영데이터의 왜곡이 점차 심해지기 때문이다.

이와 같은 회전각도의 추정실험 결과로부터 회전각도의 추정값은 x축방향으로는 작은 양의 일정한 오차를 나타내나, y축 방향으로는 회전각도가 증가함에 따라 투영데이터의 왜곡으로 추정오차가 점차 증가함을 알 수 있다.

3.1.2 x, y축 이동에 따른 회전각도 추정의 영향

x, y축의 회전각도를 추정함에 있어서 카메라 모듈이 상하좌우로 이동하더라도 회전각도를 정확히 추정할 수 있는지를 알아보기 위하여, 회전각도는 변화시키지 않고 이동량만을 변화시키면서 2.3.1절의 회전각도 추정 알고리즘을 이용하여 회전각도를 추정해 보았다. Fig. 10은 카메라 모듈을 하수관의 중심점에서 회전시키지 않고 ($R_{xs} = R_{ys} = 0$) 각각 x축, y축으로 카메라 모듈을 -80 mm에서 80 mm까지 이동시켰을 때의 회전각도 추정결과이다. 그림에서 y축으로 이동하였을 때(A)-(I)로 나타낸 점, R_y 의 추정 오차값은 약 0.7° 로 일정한 값을 나타내며, R_x 추정 오차값은 약 $\pm 1.5^\circ$ 내에서 이동량에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, x축으로 이동하였을 때(I)-(9)로 나타낸 점, R_x 의 추정 오차값은 약 $\pm 0.7^\circ$ 내에 존재하며, R_y 의 추정 오차값은 약 -2.8° 에서 -0.8° 사이의 값을 갖으며 이동량에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 추정오차는 관 길이와 조명의 영향뿐만 아니라, 영상중심과 스케일 계수의 교정오차로 인한 것으로 추정된다. 따라서, 이와 같은 오차의 영향을 받지 않고 로봇의 자세를 추정하기 위해서는 로봇을 주행시킬 때 로봇이 하수관 중심에서 크게 뒤틀리지 않은 상태에서 자세를 추정하는 것이 바람직하다.

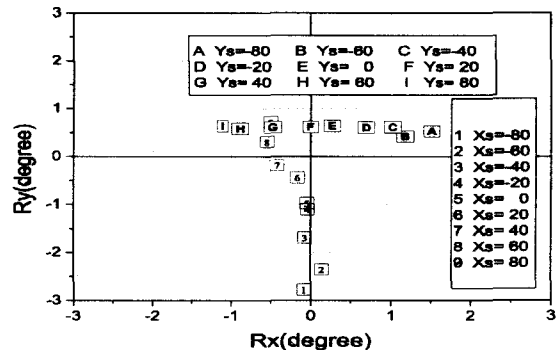


그림 10 X_s 와 Y_s 변화에 따른 각도 추정값
 ($R_{xs} = R_{ys} = 0$)
 Fig. 10 Estimated angle with various X_s and Y_s
 ($R_{xs} = R_{ys} = 0$)

3.2 카메라 모듈의 이동량 추정

Fig. 11은 카메라 모듈을 x축 방향(좌우 방향)으로 이동하였을 때 얻은 Fig. 4의 영상중 수직 중심선 ($X_f=320$)과 수평 중심선 ($Y_f=240$)의 명암데이터를 필터링한 결과이다. Fig. 4의 영상에서 밝은 부분이 X_s 가 증가함에 따라 좌에서 우로 이동함을 알 수 있듯이, Fig. 11의 수평 중심선 상 ($Y_f=240$)에서 명암값도 X_s 가 증가함에 따라 명암값이 가장 작은 소멸점 ($X_{vp} \approx 300, Y_{vp} \approx 270$ 근방)을 기준으로 좌측의 최대명암값은 감소하고 우측은 증가하여 두 값의 차는 증가함을 알 수 있다. 반면에 수직 중심선 ($X_f=320$) 상의 명암값은 소멸점을 기준으로 우측과 좌측의 최대 명암값은 동시에 감소하거나, 증가하기 때문에 두 값의 차는 거의 변화가 없다. 이와 같은 사실을 이용하여 수직 중심선상의 명암값에 대해서 소멸점 좌우 구간의 최대 명암값의 차 (ΔGm_H)와 이동량 (X_s)과의 관계를 구한다.

Fig. 12는 카메라 모듈을 x축 방향으로 이동(X_s)하면서, y축 방향으로 회전(R_y)하였을 때 얻은 ΔGm_H 와 를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 이동량 (X_s)과 수평중심선상의 최대 명암값의 차(ΔGm_H)는 거의 선형적인 관계임을 알 수 있고, 수직중심선상의 최대 명암값의 차(ΔGm_V)는 약 -30 ~ -40의 값으로 거의 일정함을 볼 수 있다. 이와 같은 현상을 이용하여, X_s 와 ΔGm_H 및 R_y 의 관계를 curve fitting하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X_s = (\Delta Gm_H - b)/a \quad (10)$$

$$a = -0.0009R_y^2 - 0.0097R_y + 1.0539$$

$$b = -11.757R_y + 16.8$$

마찬가지 방법으로 카메라 모듈을 y축 방향(상하 방향)으로 이동하였을 때 얻은 Fig. 4의 영상에서 수직과 수평 중심선상의 명암데이터를 filtering 하면 Fig. 13에서 보는 바와 같다. 그림에서 카메라 모듈을 x축 방향으로 이동하였을 때와 마찬가지로 카메라가 이동함에 따라, 수직중심선 ($X_f=320$)상의 소멸점 ($X_{vp} \approx 345, Y_{vp} \approx 265$ 근방) 좌.우측 구간의 최대명암값의 차(ΔGm_V)는 변화하고, 수평중심선 ($Y_f=240$)상의 최대명암값의 차(ΔGm_H)는 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서, x축 방향으로 이동 경우와 마찬가지로 카메라 모듈의 y축 이동량 (Y_s)과 수직중심선상에서의 최대 명암값차 (ΔGm_V), 및 x방향으로의 회전각도 (R_x)의 관계 (Fig. 14)를 구할 수 있으며, 이는 다음과 같다.

$$Y_s = (\Delta Gm_V - b)/a \quad (11)$$

$$a = -0.0023R_x^2 - 0.0035R_x + 1.0418$$

$$b = 0.2666R_x^2 - 15.179R_x + 9.3188$$

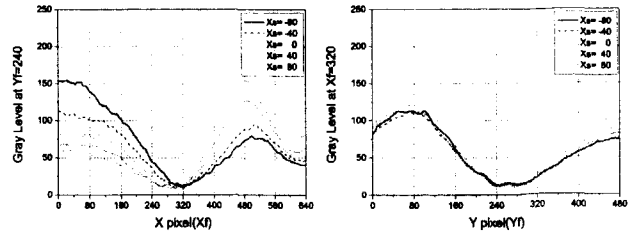


그림 11 X_s 변화에 따른 수평 및 수직 중심선 상의 명암값 분포 ($R_{xs} = R_{ys} = Y_s = 0$)

Fig. 11 Grey level at horizontal and vertical center lines with various X_s ($R_{xs} = R_{ys} = Y_s = 0$)

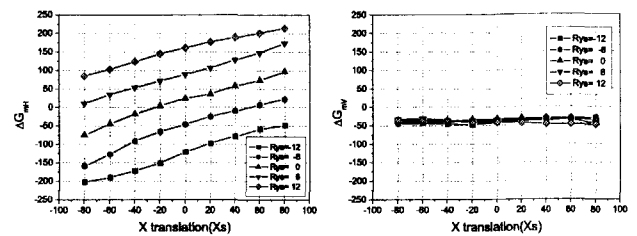


그림 12 X_s 와 R_{ys} 변화에 따른 수평 및 수직 중심선상의 최대 명암값의 차 ($R_{xs} = Y_s = 0$)

Fig. 12 Difference of two maximum grey levels at horizontal and vertical center lines with various X_s and R_{ys} ($R_{xs} = Y_s = 0$)

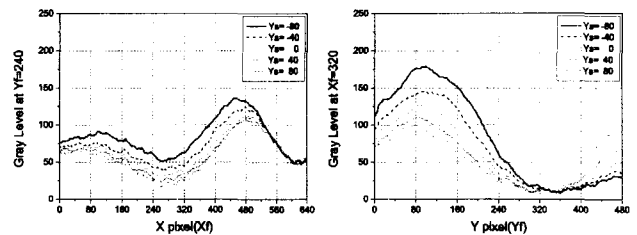


그림 13 Y_s 변화에 따른 수평 및 수직 중심선 상의 명암값 분포 ($R_{xs} = R_{ys} = X_s = 0$)

Fig. 13 Grey level at horizontal and vertical center lines with various Y_s ($R_{xs} = R_{ys} = X_s = 0$)

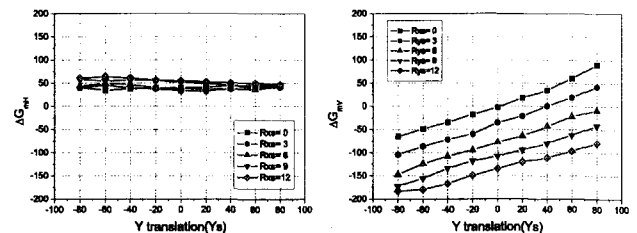


그림 14 Y_s 와 R_{xs} 변화에 따른 수평 및 수직 중심선상의 최대 명암값의 차 ($R_{ys} = X_s = 0$)

Fig. 14 Difference of two maximum grey levels at horizontal and vertical center lines with various Y_s and R_{xs} ($R_{ys} = X_s = 0$)

3.3 카메라 모듈 및 로봇의 자세 추정

Fig. 15는 제한한 회전각도 및 이동량 추정 알고리즘을 이용하여 로봇 구동중 주행이나 링크 구동을 할 때 가장 많이 나타나는 x축 회전값(R_{xs})과 y축 이동값(Y_s)을 동시에 변화시키면서 카메라 모듈의 자세를 추정한 결과이다. Fig. 15-a의 카메라모듈의 회전각도의 추정결과에서는 3.1절의 회전각도 추정결과(Fig. 9의 $R_y=0$ 인 경우)와 마찬가지로 x축 회전각도(R_{xs})가 커질수록 y축 방향의 추정오차(최대 2.01°)가 커짐을 알 수 있다. Fig. 15-b에서 x축 방향의 이동량의 추정값은 회전 각도에 관계없이 약 17 mm의 오차를 나타내며, y축 방향의 이동량의 추정값은 이동량(Y_s)이 증가함에 따라 최대 -33 mm까지 점차적으로 오차가 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 10의 이동량 변화에 따른 회전각도 추정결과(Fig. 10에서 Δ - \square 로 나타낸 점)에서 Y_s 가 증가함에 따라 R_x 의 추정오차는 증가하고, R_y 의 추정오차는 일정하게 나타남에 따라, 식(10)으로부터 R_y 값을 이용하여 추정한 X_s 값의 오차는 일정하고, 식(11)로부터 R_x 값을 이용하여 추정한 Y_s 값의 오차는 증가하기 때문이다.

Fig. 16은 로봇이 주행 중에 각 링크가 초기위치(카메라 모듈이 이동하거나 회전하지 않을 경우)를 유지하며 장애물을 통과한다고 가정하였을 때의 로봇자세 추정결과이다. 각각의 실험에서 로봇의 이동량과 회전각도는 로봇의 몸체가 하수관 내벽에 부딪히지 않고 상하로 회전(최대 9°)하거나, 상하로 이동(최대 120 mm)할 수 있는 범위내에서 변화시켰다. 로봇 자세의 추정은 먼저 카메라의 이동량과 회전각도를 추정하고, 이를 좌표변환(식(9))하여 구하였다. Fig. 16-a는 로봇이 위 또는 아래로 이동하지 않고 로봇중심점을 중심으로 상하 방향으로 회전하였을 경우의 로봇 회전각도(R_{xr})의 추정값을 나타내며, Fig. 16-b는 로봇이 회전하지 않고 장애물에 의하여 로봇 전체가 위로 들리거나 아래로 처질 경우의 이동량(Y_{sr})의 추정값을 나타낸다. 실험결과에서 보는 바와 같이, Fig. 16-a의 회전각도(R_{xr})의 추정량은 Fig. 15-a의 경우와 같은 오차 경향을 나타내며, Fig. 16-b의 이동량의 추정값(Y_{sr})은 x방향으로 -16.33 mm와 y방향으로 -11.74 mm의 최대 오차가 발생하였다.

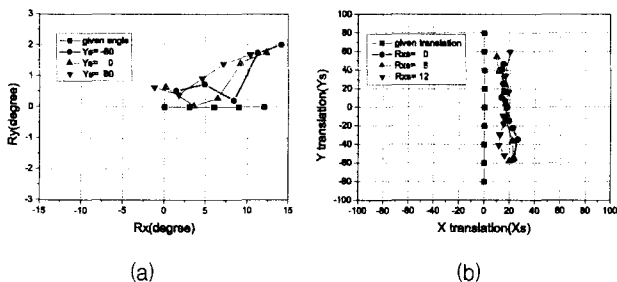


그림 15 R_{xs} 와 Y_s 변화에 따른 카메라 모듈의 각도 및 이동량 추정값 ($R_{ys} = X_s = 0$)

Fig. 15 Estimated angle and translation of camera module with various R_{xs} and Y_s ($R_{ys} = X_s = 0$)

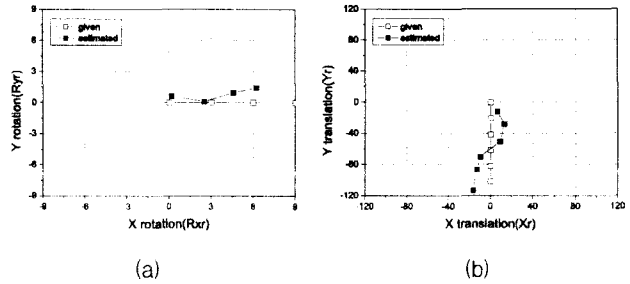


그림 16 R_{xsr} 과 Y_{sr} 변화에 따른 로봇 몸체의 각도 및 이동량 추정값 ($R_{ysr} = X_{sr} = 0$)

Fig. 16 Estimated angle and translation of robot with various R_{xsr} and Y_{sr} ($R_{ysr} = X_{sr} = 0$)

4. 결 론

본 논문에서는 하수관내에서 관 중심 축에 대한 회전 및 이동 성분을 제외한 카메라 모듈 및 로봇의 자세를 추정하기 위하여, 영상의 소멸점을 이용하여 회전각도를 추정하고, 관로내부의 조명 반사에 의한 광도와 이동량의 관계를 실험을 통해 수식화하여 이동량을 구하는 방법을 제안하였다. 실험 결과, 제안한 방법의 측정정밀도는 관 길이와 조명의 영향에 따른 투영데이터의 왜곡뿐만 아니라, 카메라의 영상 중심과 스케일 계수의 교정오차 등으로 인하여, 로봇 자세 추정의 경우, 로봇의 회전각도는 약 2° 이내, 이동량은 약 20 mm 이내의 오차를 갖음을 알 수 있었다. 이와 같이 하수관 로봇에 설치되어 있는 전방 감시카메라 모듈의 영상정보를 이용하여 로봇의 자세를 추정하는 알고리즘은 별도의 자세 측정센서를 사용하지 않고도, 로봇 조종자에게 로봇의 주행중 또는 정지중의 자세에 대한 개략적인 정보를 제공해 줌으로써, 로봇의 조종성을 향상시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] PIRAT robot, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia) Annual Report 1994-95. [http://www.csiro.au/csiro/ar94_95/resinfra.htm#pirat] [<http://www.dbce.csiro.au>]
- [2] KARO robot, LAOKOON and IPT. [<http://www.fhg.de/depts/iitb-e.html>]
- [3] KURT robot, GMD German National Research Center. [<http://www-fit-ki.gmd.de/projects/laokoon/Laokoon.html>]
- [4] KA-TE system catalog, KA-TE system ltd. [<http://www.no-dig.com/ka-te/index.htm>]
- [5] 이상룡, 권승만, "이동로봇의 실시간 자세 추정을 위한 센서

2191~2204, 1993.

- [6] 이상용, 권승만, "이동로봇의 자세측정을 위한 표식인식 시스템의 개발," 전기학회논문지, Vol.42, No.5, pp.116-131, 1993.
- [7] 윤지섭, et. al, 지하매설 파이프의 검사/보수용 다기능 이동로봇 개발, 한국원자력연구소, KAERI/CR-77/98, 1999.
- [8] Roger Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," IEEE Tr. on Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.4, pp.323-344, 1987.
- [9] K. E. Torrance, E. M. Sparrow, and R. C. Birkebak, "Polarization, Directional Distribution, and Off-Specular Peak Phenomena in Light Reflected from Roughened Surfaces," Journal of the Optical Society America, Vol. 56, No. 7, pp. 916-925, 1966.
- [10] K.E. Torrance and E.M. sparrow, "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces," Journal of the Optical Society America, Vol.57, No.9, pp.1105-1114, 1967.
- [11] John J. Craig, Introduction to Robotics : Mechanics and Control, second edition, Addison-Wesley, 1989.

저 자 소 개



윤 지 섭 (尹智燮)

1958년 2월 3일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1987년~현재 한국원자력연구소 책임연구원(실장)

Tel : 042-868-2855, Fax : 042 868-2854

E-mail : jsoon@kaeri.re.kr



강 이 석 (姜理錫)

1952년 2월 14일생. 1974년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1983년 아주대학교 기계공학과 졸업(석사). 1994년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1981년~현재 충남대학교 기계설계공학과 교수

Tel : 042-821-6647, Fax : 042-822-7366

E-mail : eskang@hanbat.chungnam.ac.kr