

◆ 특집 ◆ 고층건물 외벽 유지관리 로봇 시스템

곤돌라형 외벽 유지보수 로봇의 수직위치 센서 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Height Estimation Sensor for Gondola-typed Façade Robot

윤종수^{1,✉}, 김동엽¹, 박창우¹
Jongsu Yoon^{1,✉}, Dong Yeop Kim¹, and Chang-Woo Park¹

¹ 전자부품연구원 (Korea Electronics Technology Institute)

✉ Corresponding author: charonyjs@naver.com, Tel: +82-32-327-2840

Manuscript received: 2013.1.18 / Accepted: 2013.2.15

Demand for high-rising building has arisen. However, its maintenance is usually executed by labour. It could have a severe problem. We proposed a gondola robot to solve it. In this paper, we designed a height estimation sensor for this gondola. It is consist of pan-tilt unit, ARS sensor, and laser sensor. The pan-tilt unit keeps the laser sensor to indicate the gravity direction by referencing the ARS. The laser sensor's range is vertical distance from gondola to ground. However, if there is an obstacle under the gondola, the distance includes its height. To filter it out, we apply a Kalman filter for the height estimation. If the estimated height is changed extremely, the filter decides that there is an obstacle. Then, it remembers the height of obstacle. Other extreme changes of height estimations are reflected. The experimental results using the proposed sensor system show detail flow of the height estimation.

Key Words: Gondola (곤돌라), Height Estimation Sensor (수직위치센서), Building Façade (건물유지보수)

기호설명

\hat{X}_k = estimated value

\hat{X}_k^- = predict estimated value

Z_t = measured value of the system

1. 서론

최근 기술의 발달과 수요로 인해 고층건물의 건설이 증가하는 추세이다. 현재 고층 건물의 유지보수는 인력에 의한 작업이 계속 되고 있다. 하지만 건물이 고층화 될수록 작업환경의 위험성과

인력난이 문제가 되고 있다. 이를 대신해 외벽 유지보수를 수행 할 수 있는 로봇이 개발 중에 있다.¹⁻³ 건물 외벽 유지 보수 로봇에는 크게 두 가지 타입이 있다. 건물에 미리 가이드 레일을 설치하여 로봇이 가이드를 타고 다니며 청소하는 형태인 빌트인 타입(built-in type)과 건물의 옥상에 로프를 설치하여 상하로 이동하며 청소나 도색을 하는 곤돌라 타입(gondola type)의 로봇이 있다. 두 가지 타입 모두 장단점이 있다. 빌트인타입은 초기에 건물에 가이드를 설치하여야 한다는 점이 있는 반면 레일을 따라 로봇이 이동하며 효과적인 작업을 할 수 있다. 곤돌라 형의 경우 와이어 로프에만 의지



Fig. 1 Gondola-typed Façade Robot

를 한 상태에서 작업을 수행하기 때문에 바람이나 주위 환경에 영향을 받게 된다. 하지만 옥상에 곤돌라를 지지할 수 있는 구조물만 설치가 된다면 어디에서든 작업을 할 수 있다. 본 연구에서 개발 중인 로봇은 곤돌라 타입의 외벽유지 보수 로봇이다. 일반적인 곤돌라 타입의 로봇과 다르게 환경에 따른 외란에 잘 극복하도록 설계 하였다. 곤돌라 하단에 석션팬을 2 개 설치하여 석션팬을 구동함으로써 곤돌라 로봇이 건물 외벽에 흡착하여 안정적으로 이동할 수 있고 바람의 영향을 극복할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 1 은 곤돌라 타입으로 건물 외벽에 도색을 할 용도로 개발되어 있다. 도색을 위해서는 창문의 위치나 그 밖의 외벽 상황을 정확히 인지 하는 것이 중요하다. 바람에 의해 곤돌라가 좌우로 움직이게 될 경우 도색을 하지 않기 때문에 좌우로 움직이지 않는다는 가정하에 로봇의 자유도는 롤, 피치, 그리고 수직방향이다. 외벽의 형상이나 창문을 인식 하더라도 정확한 위치를 보정해주지 않으면 창문 영역을 피해 정확히 도색을 할 수 없다. 곤돌라의 구동부는 양쪽 끝에 엔드리스 와인더 2 개 석션팬 2 개로 상하로 움직일 수 있고 석션팬을 구동하여 곤돌라의 흔들림을 최소화 하였다. 본 논문에서 제안한 수직위치 센서는 항상 지면과 수직 방향으로 향해야 한다. 이를 위해 레이저 거리센서, ARS, 팬틸트 유닛으로 구성되고 여기에 칼만필터와 장애물 가지 알고리즘 적용하여 수직 위치센서를 개발하였다.

2. 레이저 수직위치 센서

높이 측정은 많은 곳에서 사용되고 있다. 비행기의 경우 두 가지의 방식을 통해 높이를 측정한다. 비행기가 높이 있을 때 기압계를 이용하여 높

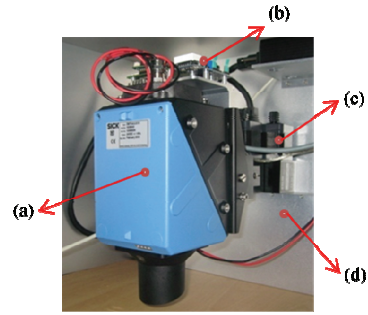


Fig. 2 Range sensor with pan-tilt module

이를 측정하게 된다. 기압계의 경우 1 m 단위의 정확도를 가지고 있다. 이 방식은 비행기에 적용하기에는 적합하다. 기압계에서 나오는 출력은 표준 기중을 정해 놓은 곳으로부터의 높이 이다. 그리고 다른 하나의 방식은 전파 고도계이다 비행 중인 항공기에서 바로 밑의 지표면을 향해서 전파를 발사하고 그 반사파가 되돌아올 때까지의 전파에 소요된 시간을 측정함으로써 항공기와 지표면의 거리 즉 고도를 측정하는 장치이다. 하지만 이장치는 항공우주 산업과 군사용으로 곤돌라에 적합하지 않다. 곤돌라의 경우 비행기처럼 높은 고도에 있는 것이 아니기 때문에 비교적 짧은 거리에서 거리 분해능이 높은 레이저 센서를 이용하기로 하였다. 곤돌라의 제어 가능한 자유도는 상하와 roll, pitch 이다. 때문에 곤돌라의 위치정보는 높이 하나뿐이다. 그만큼 높이정보에 의한 작업 의존도가 높다. 본 논문에서는 곤돌라의 도색 작업과 환경변화에 강한 수직 위치 센서를 개발하였다.

2.1 시스템 구성

곤돌라의 경우 이동 중에 바람이나 외벽의 형상에 따라 자세의 흔들림이 있다. 로봇 자체로 보면 충분히 안정적이어도 거리 측정하기 위해서는 오차가 발생할 수 있다. 이를 보정하기 위해 팬틸트 유닛과 ARS 센서를 이용하여 항상 지면을 향하도록 제어 하였다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 레이저 거리센서는 팬틸트 유닛에 연결되어 있고 팬틸트 유닛이 곤돌라에 고정되어 있다. 레이저 센서의 상단에 ARS 센서와 고정시켜 레이저 센서의 자세를 실시간으로 받아 팬틸트 유닛을 제어 하여 항상 레이저 센서가 지면을 향하도록 하였다.

레이저 수직 위치센서의 구성은 Fig. 2 와 같다. (a)는 지면과의 거리를 측정하기 위한 레이저 거리 센서이고, (b)는 레이저 센서와 지면과의 기울

Table 1 Laser range sensor

	DMT 10-2-2111
Resolution	1 mm
Repeatability	10 mm, 7 mm
Accuracy	10 mm
Light source	Laser, infrared
Output rate	1 ms/4,000 ms
Aperture delay time	1 ms
Response time	1 ms 30,000 ms
Enclosure rating	IP 65

Table 2 Pan-tilt unit

	PTU-D46-70
Rated Payload	4.08 kg
Max. Unloaded Speed	60°/second
Resolution	0.003°
Tilt Range	-47° to 31°
Pan Range	-159° to 159°
Enclosure rating	IP 65

어진 것을 보기 위한 ARS, (c)는 기울기 센서를 지면 과 수직으로 유지할 수 있도록 팬틸트 유닛으로 구성하였다. (d)는 방수 케이스로 페인트 작업 시 페인트를 뿌리는 과정에서 레이저 센서의 렌즈에 페인트가 묻으면 오작동을 하기 때문에 제작하였다. 레이저 센서의 출력부는 아크릴 재질로 제작하여 레이저가 통과하도록 설계하였다. 레이저 센서는 sick 사의 DMT 10 을 사용하였고 거리 분해능은 1 mm 이다. 반사판을 이용하여 거리를 측정하였을 때 반복 정밀도는 10 mm 이다. 레이저 거리 센서의 사양은 Table 1 과 같다.

Table 2 는 팬틸트 유닛의 사양이다. 0.003 도 단위로 제어가 가능하고 가빈하중도 4.08 kg 으로 레이저 센서를 부착하기에 충분한 용량으로 선정하였다.

2.2 팬틸트 제어

수직 위치 센서에서 팬틸트의 제어는 상당히 중요하다. 레이저 센서가 지면과 수직을 이뤄야지 정확한 데이터를 출력하며 65 m 이상의 거리를 측정하기 위해서는 반사판이 필요하게 된다. 거리가

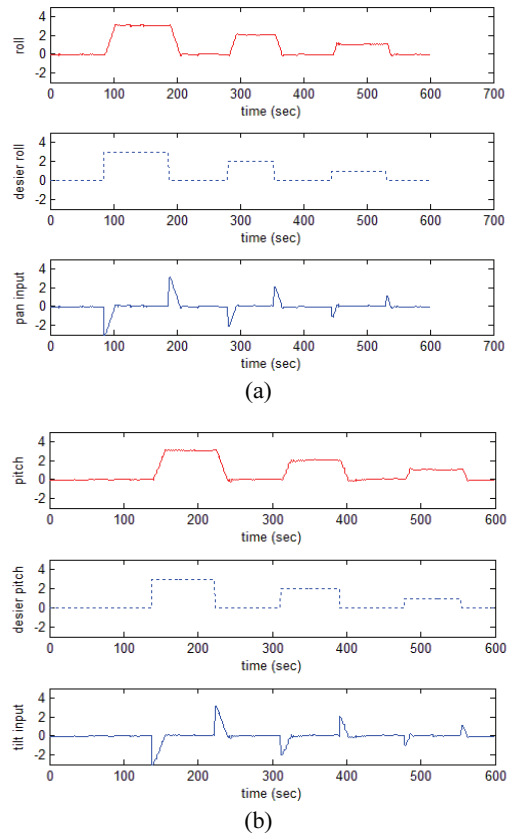


Fig. 3 Response of pan-tilt unit

65 m 일 때 1° 만 기울어져도 1 m 가 떨어진 곳을 측정하게 되는데 이것이 반사판의 거리에서 벗어나면 정확한 데이터를 얻을 수 없다. 이를 위해 정밀한 팬틸트 유닛의 제어가 필요하다.

ARS 센서가 기본적으로 어느 정도의 오차를 가지고 있기 때문에 0.1° 의 데드존을 두었다. Fig. 3 은 팬틸트 유닛에 단위 입력을 주었을 때 응답이다. Fig. 3 에서 빨간색 실선은 팬틸트 유닛의 실제 자세 값이고, 파란색 점선은 목표 자세이다. 파란색 실선은 팬틸트 유닛의 제어 입력 값이다. 레이저 거리 센서를 부착한 상태에서 3° 의 구동 명령을 하였을 때 200 ms 만에 도달하였다. 곤돌라의 경우 매우 느린 시스템이고 급격하게 기울어질 경우가 작업을 중지 해야 하기 때문에 곤돌라에 적용하기에 적합하다고 생각된다. Fig. 4(a) 는 케이스를 롤, 피치방향으로 회전을 주어 제어가 되는 모습이다. (b)는 (a)상황 때의 롤, 피치 그래프이다.

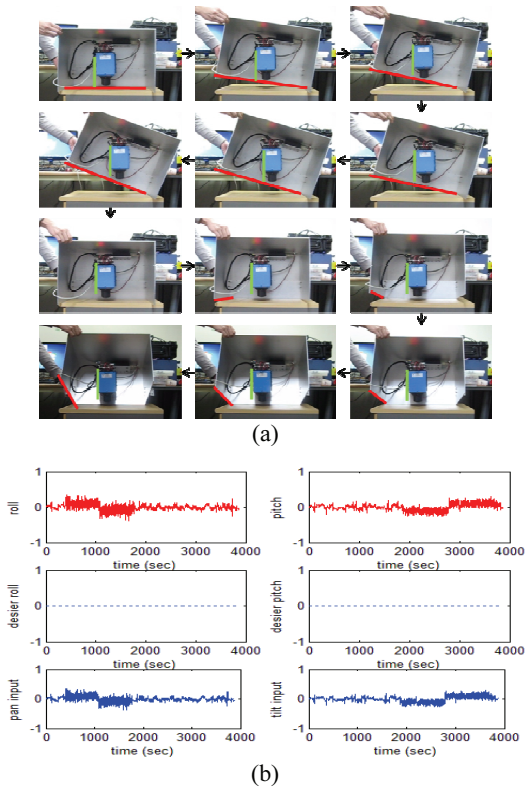


Fig. 4 Result of pan-tilt unit control

3. 곤돌라 로봇의 높이추정

곤돌라 로봇이 도색을 하거나 청소를 할 때 로봇의 높이를 알아야 정확한 작업을 할 수 있다. 곤돌라 높이를 추정하는 과정에서 여러 변수가 존재한다. 예를 들어 바람이 심하게 불어 곤돌라가 기울어져 있는 경우나 곤돌라 밑에 인부나 물체가 지나가는 경우 등이 있다. 이러한 상황에 대응할 수 있는 장애물 식별 알고리즘과 칼만필터를 적용하여 곤돌라 로봇의 높이를 추정하였다.

3.1 장애물 식별

수직위치 센서로 장애물을 구별 해내기 위해 레이저 거리센서의 변화량 곤돌라의 속도 ARS 센서의 가속도를 이용하여 장애물을 식별하였다. 곤돌라 장애물 식별 알고리즘 블록선도는 Fig. 5 와 같다.

곤돌라 로봇의 경우 작업을 위해 이동을 할 때 등속으로 운전을 해야 도색 작업 시 페인트 분사를 일정하게 유지 할 수 있다. 곤돌라의 이동 속도 명

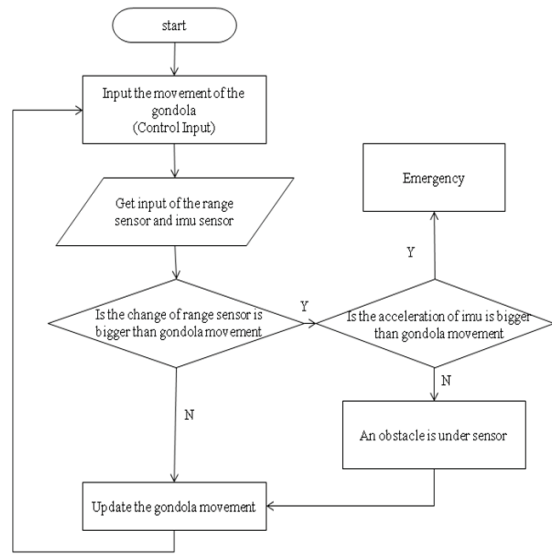


Fig. 5 Flow chart for obstacle detection

령 레이저 거리센서에서 측정된 속도를 퓨전 하여 곤돌라의 속도를 계산하고, 이를 바탕으로 장애물을 식별하였다. 곤돌라의 경우 속도가 일정하게 움직이는데 곤돌라의 속도를 초과하는 레이저 거리센서의 변화가 나오면 세 가지의 경우에 수가 있다. 하나는 곤돌라의 엔드리스 와인더에서 슬립이 일어나 곤돌라가 급격하게 이동한 경우, 두 번째 와이어가 끈 어진 경우이다. 하지만 이 두 가지 경우 충분한 검토 후 곤돌라가 설계되어 거의 일어날 일이 드물다. 마지막 경우는 곤돌라의 아래로 작업자가 지나가거나 없었던 물체가 놓여져 있는 경우이다.

장애물 구별은 곤돌라의 이동속도와 레이저 거리센서의 변화 량을 비교한다. 곤돌라의 이동 속도보다 레이저 거리센서의 변화 량이 일정 값 이상 커지면 장애물이 아래 있을 수 있다. 이런 경우 가속도 센서의 값을 확인하여 장애물 여부를 판단한다. 만약 가속도 값을 확인하여 곤돌라의 이동속도 이상으로 움직였고 레이저 거리센서의 변화 또한 크다면 곤돌라 로봇이 슬립이 일어났거나 다른 문제가 생기기 때문에 긴급상황을 알린다. 그리고 레이저 거리센서의 변위는 크지만 가속도 값의 합이 크지 않다면 로봇의 이동에 의한 거리센서 변위가 아니고 지상에 물체가 놓여있는 거라는 가정하여 물체의 높이를 계산하고 곤돌라의 높이를 계산하게 된다.

3.2 Kalman filter

기본적으로 측정된 데이터들을 칼만필터를 적용하여 높이와 속도를 측정하였다. 칼만필터 측정 갱신 전 장애물 식별 알고리즘을 통해 장애물의 높이를 기록하여 높이를 기록한다. 칼만필터 후 장애물의 높이와 센서 데이터를 더하여 높이를 계산하였다. 칼만필터의 상태 변수는 곤돌라 로봇의 높이 x_t 와 속도 v_t 이다.

$$\widehat{x}_k = \begin{bmatrix} \widehat{x}_k \\ \widehat{v}_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

상태 변수에 속도는 곤돌라 로봇의 높이 변화로부터 예상할 수 있다. 하지만 정확한 속도 값을 얻기 위하여 엔코더 값을 측정하여 예측 값으로 사용하였다.

$$\widehat{x}_k = \begin{bmatrix} \widehat{x}_k + u_k^v \cdot \Delta t \\ u_k^v \end{bmatrix} \quad (2)$$

u_k^v 는 엔드리스 와인더에 연결된 와이어 로프에 장착된 엔코더를 속도로 변환한 값이다. Δt 은 칼만필터의 샘플링 시간이다.

$$u_t^v = \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t} \quad (3)$$

e^t 는 현재 엔코더 값이고, e^{t-1} 는 이전 엔코더 값이다. 곤돌라 로봇에 장착된 엔드리스 와인더는 옥상에서 지상까지 내려져 있는 와이어를 타고 이동하게 된다. 따라서 와이어로프의 이동 량을 측정하면 곤돌라의 변위를 측정할 수 있는데 본 논문에서 구상한 와이어 로프의 변위를 측정하는 시스템은 엔코더는 Fig. 6 에서와 같이 와이어 로프를 양쪽에서 잡을 수 있는 바퀴를 제작하였고 스프링을 이용하여 최대한 슬립이 안 일어나도록 제작하여 엔코더를 바퀴에 연결하여 와이어 로프의 변위를 측정하였다. 모바일 로봇 시스템에서 보여지듯이 엔코더 값은 노이즈를 추적한다.⁴ 따라서 엔코더 값을 거리정보대신 변환하여 속도 값으로 사용하였다.

측정치 z_t 는 다음과 같다.

$$z_t = \begin{bmatrix} z_k^x \\ z_k^v \end{bmatrix} \quad (4)$$

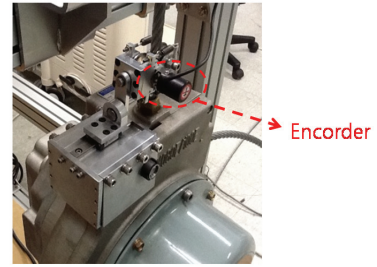


Fig. 6 Encoder mechanism

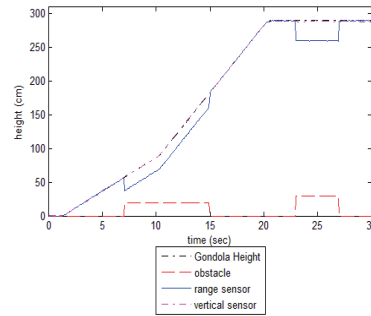


Fig. 7 Simulation Environment

z_k^x 는 레이저 거리센서 값이고, z_k^v 은 레이저 거리센서의 변위를 칼만필터의 샘플링 타임으로 나누어서 속도를 구한 값이다. 시스템 모델은 수직 방향의 운동만 있으므로 레이저 센서로부터의 위치 값과 엔코더의 속도 값을 이용하여 식(5)와 같이 구성하였다.

$$\begin{bmatrix} \widehat{x}_k \\ \widehat{v}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ v_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta t \\ 1 \end{bmatrix} [u_k^v] \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} z_k^x \\ z_k^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta t} \end{bmatrix}$$

이고 식(2)와 (4)의해 식(5) 성립된다.

3.3 시뮬레이션

매트랩으로 시뮬레이션을 하였다. 장애물인식과 칼만필터를 적용하여 높이를 추정하였다. 곤돌라는 지상에서 출발하여 10초 동안은 0.1 m/s 으로 이동한다. 10~20 s 사이에는 0.2 m/s 로 이동하였다. 20~30 s 동안은 정지 상태이다. 장애물은 7~15 s 에 20 cm 의 장애물이 있고 23~27 s 사이에는 30 cm 의 장애물이 곤돌라 밑에 위치하게 된다.

Fig. 7 는 시뮬레이션 조건이다. 레이저 거리 센

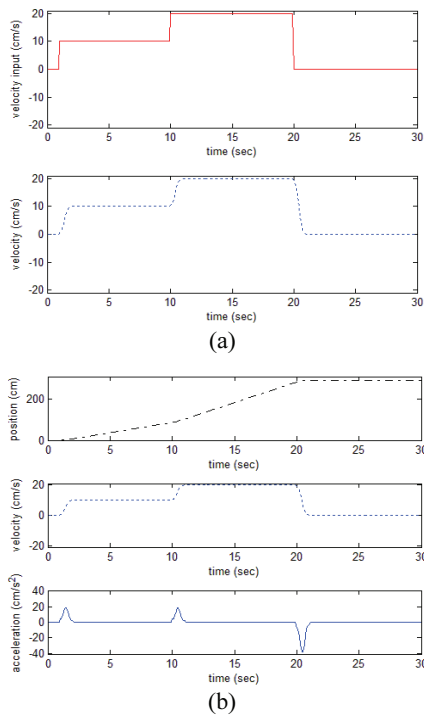


Fig. 8 (a) Velocity input from user or upper controller. (b) Corresponding position, velocity and acceleration to velocity input

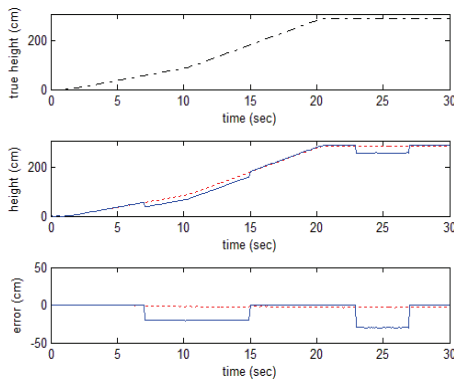


Fig. 9 True height of the gondola cage (top). Range sensor value (blue solid line) and Kalman filter estimation (red dotted line) (middle). The error of the unfiltered range sensor data (blue solid line) and Kalman filter error (red dotted line) (bottom)

서는 지면과의 거리이다. 장애물이 생겼을 때 장애물의 높이만큼 측정거리가 줄어든다.

Fig. 8(a)는 곤돌라의 속도 그래프이다. 빨간색 실

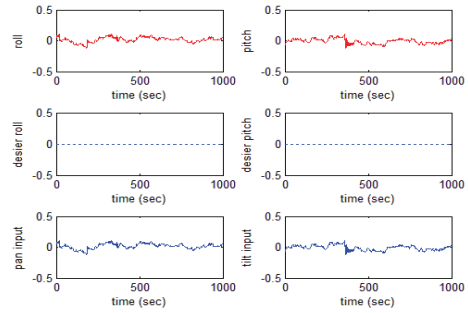


Fig. 10 Angle of Height estimation sensor

선은 곤돌라의 속도 입력 값이고, 파란색 점선은 거리센서로 측정된 실제 곤돌라의 속도이다. Fig. 8(b)는 곤돌라의 실제 위치, 속도, 가속도이다.

Fig. 7의 센서 데이터와 Fig. 8의 속도 값을 이용하여 칼만필터를 통해 곤돌라의 위치를 추정하였다.

Fig. 9는 장애물 식별 및 칼만필터를 적용한 결과이다. 7 초 때 곤돌라의 속도이상의 변화가 나타나면 장애물을 인식하였다. 10 초 때 속도를 변경하였고 15 초 때 장애물이 없어졌을 때 높이 추정을 실제 값과 같이 추정하고 있다. 곤돌라가 정지 상태일 때도 장애물을 인식하였다. 칼만 필터를 적용하기 전의 위치 인식오차는 9.2 cm 이고 칼만필터 후의 위치 오차는 1.7 cm 이다.

4. 실험

수직 거리센서로 실험을 하였다. 실험환경은 3 m 높이에 센서를 고정 시켜놓은 후 장애물을 감지하는 실험을 하였다.

Fig. 10을 보면 0.2° 의 ARS 센서의 노이즈에 있다. 0.2° 의 오차가 있을 경우 155 m에서 3 cm 이내의 오차이기 때문에 곤돌라에 사용하기에 적합하다. 팬틸트의 제어 중 수직위치 센서 값은 Fig. 11과 같다.

수직 위치 센서로 3 m 높이에서 높이 측정 중 장애물을 센서와 지면 사이에 상자를 놓았다. 상자의 높이는 87 cm 와 66 cm 이다. 파란색 실선은 레이저 센서 데이터고, 파란색 실선은 센서로부터 감지한 장애물의 높이이다. 빨간색 실선은 장애물 인식후의 보정된 곤돌라 높이이다.

Fig. 12는 칼만필터 후의 높이이다. 장애물의 높이가 높아 칼만필터 전의 위치 오차가 장애물의 높이에 비례해 크게 나왔다. 필터 전의 오차는 25 cm 이고, 칼만필터 후의 오차는 0.5 cm 로 나왔다.

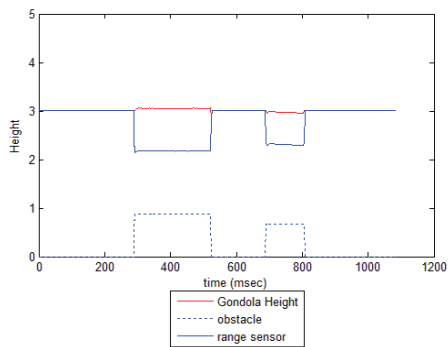


Fig. 11 Height estimation sensor data

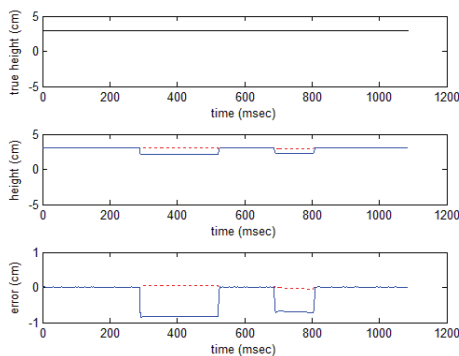


Fig. 12 True height of the gondola cage (top). Range sensor value (blue solid line) and Kalman filter estimation (red dotted line) (middle). The error of the unfiltered range sensor data (blue solid line) and Kalman filter error (red dotted line) (bottom)

5. 결론

본 논문은 곤돌라 로봇의 수직위치센서 개발에 관한 연구이다. 곤돌라 로봇이 페인팅 작업을 하기 위해서는 정확한 위치제어가 필요하게 된다. 이를 위해 레이저 센서와 팬틸트 유닛, ARS 센서를 이용한 수직위치 센서를 개발하였다. 수직위치센서의 오차 허용범위는 3 cm 이내이고 팬틸트 유닛의 제어를 통해 항상 수직을 바라보게 제작하였다.

팬틸트 유닛과 ARS, 레이저 거리센서로 구성된 수직위치센서에 장애물인식 알고리즘과 칼만 필터를 적용하여 실험 결과 곤돌라의 정적인 상태 3 m 높이에서 0.005 m의 오차 내에 효과적으로 측정할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2010년도 건설기술혁신사업(과제번호: 10 기술혁신 E03)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Gambao, E. and Hernando, M., "System for a semi-automatic façade cleaning robot," Proc. of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 407-411, 2006.
- Sun, H., Kim, D. Y., Kwon, J. H., Kim, B.-S., and Park, C.-W., "The position and orientation measurement of gondola using a visual camera," Proc. of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 693-697, 2011.
- Kim, D. Y., Kwon, J. H., Sun, H., Kim, B.-S., and Park, C.-W., "Rope attribute measurement system for gondola type facade robot," Proc. of the 2nd International Conference on Construction and Project Management, pp. 103-106, 2011.
- Thrun, S., Burgard, W., and Fox, D., "Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series), The MIT Press, 2005.