

## Pedestrian Navigation System using Inertial Sensors and Vision

박 상 경\* · 서 영 수\*  
(Sang Kyeong Park · Young Soo Suh)

**Abstract** - In this paper, a pedestrian inertial navigation system with vision is proposed. The navigation system using inertial sensors has problems that it is difficult to determine the initial position and the position error increases over time. To solve these problems, a vision system in addition to an inertial navigation system is used, where a camera is attached to a pedestrian. Landmarks are installed to known positions so that the position and orientation of a camera can be computed once a camera views the landmark. Using this position information, estimation errors in the inertial navigation system is compensated.

**Key Words** : Pedestrian navigation system, Vision system, Inertial navigation system

### 1. 서 론

보행용 관성항법 시스템은 관성센서를 이용하여 보행자의 위치를 추정하는 시스템이다. 항법 시스템에는 여러 다양한 센서를 사용하여 시스템을 구성할 수 있으며, 각 센서의 특성에 따라, 각각의 시스템에는 장단점이 존재한다.

일반적인 항법 시스템에 가장 보편적으로 사용되는 센서는 GPS를 꼽을 수 있다. 위성의 신호를 받아 삼각측량 방식으로 단말기의 위치를 추정하는 방식으로, 위성 신호를 받을 수 있는 곳에서는 쉽게 위치를 추정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 위성신호를 받기 힘든 환경(실내 혹은 빌딩 주위)에서는 정확도가 떨어지거나, 심지어는 위치를 추정할 수 없게 된다[1].

관성 센서를 이용한 관성 시스템은 GPS가 보편화되기 이전부터 개발되어 GPS와 함께 항법 시스템의 주요 시스템의 하나로 계속 사용되어지고 있는 시스템이다. 초기에는 관성력을 측정하는 관성 센서의 크기와 무게가 작지 않았으며, 센서 측을 항상 일정하게 유지시켜주기 위한 기구부도 필요했으므로 전체적인 크기와 무게가 상당했었다. 하지만 이후 MEMS 기술의 발달로 인해, 반도체 타입의 관성센서들이 개발되었고, 외부 장치의 필요성도 사라져, 오늘날 작고 가벼운 관성측정장치(Inertial Measurement Unit)들이 개발되어지고 있다[2].

다양한 작업환경이 아닌 일정한 작업환경에서 사용하기 위해, RFID나 Beacon등을 이용하기도 하며, 거리를 측정할 수 있는 장비인 초음파나 레이저 거리 측정기를 이용하거나,

비전의 이미지 처리를 통한 맵 매칭 등의 기술을 사용하여 항법 시스템들을 구성하고 있다[3-6].

보행용 항법 장치는 되도록 자유롭게 움직이는 사람의 행동반경에 제약을 주지 않아야 하므로 작고 가벼운 것이 유리 하며, 실내의 이동에 대하여도 잘 동작하여야 한다. [7]에서 사용한 보행용 항법 시스템은 관성 센서를 이용하였으며, 에러 보정을 위하여 영속도 업데이트 방법을 사용하였다. 관성 센서만을 이용한 항법시스템은 이동 거리등에 대한 측정값이 없기 때문에 필터를 이용한 위치 추정을 할 수 없다. 만약 관성 센서가 발에 부착이 되어 있고, 발이 지면에 닿아있는 시점을 확인할 수 있다면, 발이 지면에 닿는 시점의 속도가 0이라는 것을 알 수 있고, 이를 통해 오차 추정 및 보정을 하게 되는 것이다. 이러한 알고리즘을 영속도 업데이트(zero velocity update)라 한다. [7]에서는 바닥에 센서를 이용하여 발이 지면에 닿아있는 시점을 확인하고 있으며, [8]에서는 관성 센서만을 이용하여 걸을 상태를 구분 짓고, 이를 통해 영속도 업데이트를 하고 있다.

본 논문에서는 영속도 업데이트를 이용한 보행용 관성항법 시스템을 기본으로 비전을 추가한 시스템을 구성하였다. 영속도 업데이트는 변위 오차 추정이 아닌 간접적인 오차 추정 방법이기 때문에 실질적인 오차 보정을 하지 못하고 시간에 따른 오차의 누적을 피할 수가 없다. 이를 보완하기 위하여 위치에 대한 절대적인 값을 비전 시스템을 통해 구하게 되고, 이를 통해 오직 관성항법의 누적된 오차를 보상한다.

관성 시스템과 비전을 결합한 형태의 시스템은 증강현실(Argumented Reality, AR)과 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)등에서 사용되어 졌다. 비교적 넓은 범위에서 AR을 실현시키기 위해서는 각 위치에 대한 추정이 필요하고, 이를 위해 관성 센서와 곳곳에 붙어 있는 랜드마크에 대하여 비전을 통한 위치 추정으로 사용되었다. 이러한 경우 정확한 위치 및 자세 추정이 아닌 대략적인 공

\* 준 회원 : 울산대학 전기전자정보시스템공학부 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 울산대학 전기전자정보시스템공학부 교수

E-mail : suh@ieee.org

접수일자 : 2010년 1월 27일

최종완료 : 2010년 9월 27일

간 추정이 요구되어 진다[9-10]. SLAM의 경우는 지도(주변 데이터)와 위치를 모르는 상태에서 이동체 위치 추정과 지도를 구성하는 시스템으로, 관성센서를 통한 이동 경로 추정과 비전을 통한 맵핑(mapping)을 수행하게 된다. SLAM은 정확한 이동 경로 추정이 필요하므로 관성 시스템과 더불어 엔코더, GPS와 같은 위치 추정을 위한 추가적인 데이터를 이용하며, 이를 토대로 비전 데이터를 수집하게 된다. 더불어 특징점이 본 논문에서 사용하는 정해진 규격의 랜드마크와는 달리 주변과 확연히 다른 임의의 물건, 표식 등을 사용한다. 그렇기 때문에 비전을 통한 위치 추정에는 한계가 있다[11].

비전을 통한 자세 추정 결과를 통하여 관성항법 시스템의 자세오차를 보정한 연구도 있다[12]. 특별한 랜드마크를 사용하지는 않았고, 일상생활이 이루어지는 환경 안에 벽, 문, 창문 등과 같은 수직과 수평의 직선이 많이 존재한다는 것을 착안하였다. 각 직선에 대한 가상의 연장선 들이 만나는 점을 구하고, 이를 통해 카메라와 관성센서의 자세를 추정하여 관성센서의 오차를 보상한다. 자세 오차만을 보정하는 방법이라 시간에 따른 관성항법 시스템의 위치 오차까지 보상하지는 못하였다.

기존의 보행용 관성항법 시스템에는 외부 조력자가 없는 만큼 오차는 많지만 그만큼 환경에 자유롭다는 장점이 존재하였다. 본 논문에서 추가적인 시스템으로 비전을 사용하는 이유는 이러한 이점을 크게 해치지 않는 상태에서 시스템을 구성하는데 있다. 외부 시스템이 복잡할수록 더욱 능동적으로 데이터를 획득할 수 있지만, 반면 시스템 구성에 추가적인 외부 조력 시스템이 필요하게 되므로 전체적인 시스템 구성이 쉽지 않으며 환경에 제약을 받게 된다. 반면, 본 논문에서 제안하는 비전 시스템은 별다른 외부 조력 시스템이 필요하지 않고, 단지 미리 알고 있는 절대위치의 랜드마크만을 필요로 한다. 기존의 랜드마크를 이용한 비전에 대한 연구에서는 랜드마크와 카메라 사이의 거리를 자세를 추정하여 AGV의 조종을 목적으로 하여, 지속적인 비전을 통한 AGV의 위치 및 자세를 확인하는 것이 목적이었다면[13], 본 연구는 비전을 통해 랜드마크를 확인하는 경우에 이미 가지고 있는 해당 랜드마크의 정보를 통해 보행자의 절대적인 위치를 파악하는 것이 주요 목적이다. 관성항법시스템을 통해 지속적인 위치 추정을 하는 중에 비전시스템을 통한 데이터가 들어오는 경우, 위치에 대한 정보를 업데이트 하는 방식으로 비전시스템은 항법시스템의 보조수단으로 사용된다.

## 2. 비전 시스템

본 논문에서는 관성항법시스템과 결합하여 절대적인 좌표를 추정하기 위하여 랜드마크를 이용한 비전 시스템을 제안한다. 이를 위하여 본 장에서는 랜드마크의 생성과 구분에 대하여 설명하고, 랜드마크를 통한 회전행렬과 변위벡터를 구하는 방법을 설명한다.

### 2.1 좌표계 정의

비전 및 관성 센서를 이용한 보행용 항법 시스템을 구성

하기 위하여 우선 전체적인 좌표계에 대한 정의가 필요하다. 좌표계를 정리함을 통해, 각 센서간의 관계를 정의할 수 있다. 본 논문에서 항법 시스템을 구성하기 위하여 사용되어 지는 좌표계는 총 4개이며, 그림 1은 사용되어지는 각 좌표계를 나타낸 그림이다.

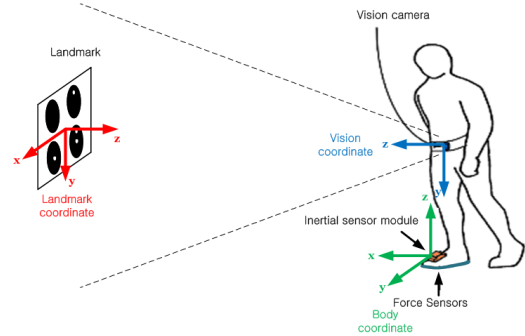


그림 1 센서 위치 및 좌표계 구성.

Fig. 1 Position of sensors and coordinate systems.

우선 전체 좌표계중 기준이 되는 항법 좌표계(Navigation coordinate)가 있으며, 비전을 통한 거리 및 자세 측정에 대한 기준이 되는 랜드마크에 대한 좌표계(Landmark coordinate)가 있다. 랜드마크를 통해 상대적인 비전 좌표계(Vision coordinate)를 구할 수 있으며, 비전 좌표계와 관성센서의 좌표계인 동체 좌표계(Body coordinate)사이에는 일정한 관계(거리 및 방향)가 있다고 가정한다. 결론적으로 임의의 항법 좌표계상의 랜드마크를 통해 항법 좌표계와 동체 좌표계 사이의 관계를 구할 수 있다.

### 2.2 랜드마크 구분

본 논문에서는 여러 개의 랜드마크를 사용하며, 각 랜드마크마다 특정한 지점에 대한 정보와 연결된다. 그렇기 때문에 비전 시스템에서 각 랜드마크의 구분이 중요하게 된다. 랜드마크는 기본적으로 4개의 하위 랜드마크로 구성되며, 이 4개의 하위 랜드마크는 큰 하나의 원의 형태를 가지고 있으며, A4 사이즈의 종이 안에 구성되어 진다. 각각 하위 랜드마크 사이의 거리는 정해져 있으며, 원의 지름 및 중심의 좌표도 일정하다. 하위 랜드마크를 구분 짓기 위해 큰 원 안에 여러 개의 구획을 나누고, 각 구획을 검은색과 흰색으로 구분하여 하위 랜드마크의 번호를 확인할 수 있다. 기본적인 랜드마크의 예는 그림 2와 같다.

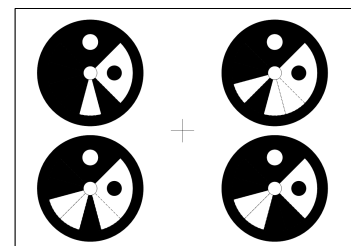


그림 2 랜드마크의 예.

Fig. 2 Example of landmarks.

그림 2를 보면 하위 랜드마크가 큰 하나의 원의 모양을 가지고 있으며, 그 안에 원과 부채꼴 모양의 마크들로 구성되어있는 것을 확인할 수 있다. 하위 랜드마크에서 흰색 원과 검은색 원은 중심에 대해 90도의 각을 가지며 위치하고 있다. 이 두 개의 원을 통해 랜드마크가 비스듬히 찍혔을 경우, 타원의 방정식을 유도하여 이용함으로써 랜드마크 확인에 대한 정확성을 높인다. 본 논문에서 사용하는 부채꼴의 구역은 6개로 각 구역은 2가지 색으로 구분 지을 수 있어서 총 64가지 하위 랜드마크를 만들 수 있다. 하나의 랜드마크에 들어가는 하위 랜드마크는 4개이며, 이 중에서 왼쪽 상단의 랜드마크는 코드 랜드마크라 부르며, 실질적인 해당 랜드마크의 번호를 나타내게 된다. 나머지 3개의 랜드마크는 공통 랜드마크로 각 랜드마크에 공통으로 사용되며, 단지 하위 랜드마크를 구분 짓기 위하여 사용된다. 본 논문에 사용한 랜드마크와 유사한 랜드마크가 [14]에서 사용되었다.

2.3 비전을 통한 거리 및 위치정보 추정

2.3.1 랜드마크 인식 알고리즘

비전을 통한 랜드마크의 거리 및 위치를 추정하기 위해서는 우선 랜드마크를 찾아야 한다. 이를 위하여 다음과 같은 순차적인 방법으로 랜드마크를 구분하게 된다[15].

- 카메라로부터 찍힌 이미지에서 캐니(Canny) 알고리즘을 통하여 모든 윤곽선의 경계를 찾는다.
- 윤곽선 중에 원의 형태가 아닌 부분을 제거하고, 오직 원과 타원의 윤곽선만을 남겨둔다.
- 남겨진 원의 중심에 대한 픽셀(pixel)정보를 구한다.
- 원의 구역 안에서 작은 원을 찾게 되며, 각각 흰색 원과 검은색 원으로 구분 짓는다.
- 두 원을 통하여 타원 방정식의 계수를 구한다.
- 흰색 원에서 일정 각도(타원의 방정식을 이용하여 보정된)만큼 시계방향으로 돌아가며 해당 지점이 흰색인지 검은 색인지 확인한다.
- 해당 지점의 색깔을 통해 0과 1로 구분하고, 이를 통해서 조합한다.

2.3.2 랜드마크와 카메라 사이의 관계

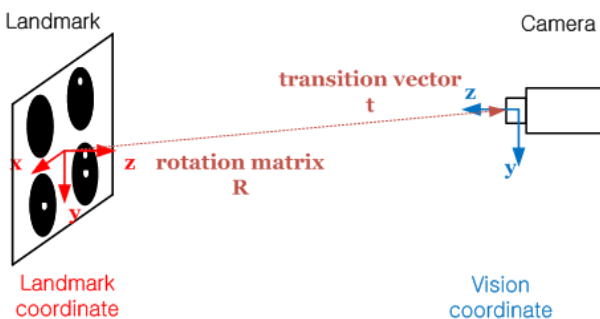


그림 3 랜드마크와 카메라 사이의 관계.

Fig. 3 Relationship between landmarks and a camera.

비전 카메라를 통해 들어온 영상 중에 랜드마크 2.3.1절의 과정을 통해 랜드마크가 존재한다고 판단이 되면 그 랜드마크

를 통해 랜드마크와 비전 카메라 사이의 정보를 구하게 된다. 각 랜드마크는 원의 크기 및 각 원의 거리 등이 고정되어 있다(2.2절 참조). 카메라 영상 중에서 랜드마크를 분리하고, 이 랜드마크에서 4개의 하위 랜드마크를 확인하여 회전행렬(rotation matrix)  $R$  과 변위벡터(transition vector)  $t$ 를 구할 수 있다[13][16]. 회전행렬은 랜드마크를 기준으로 카메라의 회전행렬을 구함으로써, 랜드마크에 대한 카메라의 자세를 추정할 수 있으며, 랜드마크에 대한 변위벡터를 구함으로써, 랜드마크를 기준으로 랜드마크 좌표계 상의  $x, y, z$ 의 좌표값을 구할 수 있다. 본 논문에서는 카메라의 자세에 대한 정보는 카메라의 움직임이 심하고, 관성센서와 카메라 사이의 움직임에 대한 연관성이 적다고 판단되어 사용하지 않았으며, 단지 변위벡터  $t$ 를 사용하여, 카메라의 위치를 항법좌표계 상에 계산하였다.

3. 관성 항법 시스템

본 논문에서는 보행을 위한 주된 항법시스템으로 관성 항법 시스템을 이용한다. 관성항법시스템은 외부의 조력자가 없이도 센서의 출력만을 이용하여 자세와 위치를 추정할 수 있기 때문에 다른 센서에 비해 활용범위가 넓다. 특히 실내외에서 모두 사용가능하기 때문에 보행용 항법 시스템에 사용하기에 적절하다.

본 논문에서는 자세를 계산하기 위하여 두 개의 좌표계를 사용한다. 동체 좌표계( $x_b, y_b, z_b$ )는 3축의 자이로스코프의 축과 동일하게 지정한다. 항법 좌표계( $x_n, y_n, z_n$ )는 각 축이 북, 서, 위를 가리키는 좌표계 중에 한 점을 기준으로 한다.

자세를 계산하기 위하여 쿼터니언(quaternion)을 사용하였으며, 쿼터니언  $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T \in R^4$  로 정의된다. 항법 좌표계와 동체 좌표계의 각 점  $p_n, p_b$ 사이의 관계는 다음과 같다.

$$p_b = C(q)p_n,$$

$$C(q) = \begin{bmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

본 논문에서는 자세 추정 문제는  $\dot{q}$ 를 추정하는 것이다.  $q$ 의 미분을 구하면 다음과 같다[17].

$$\dot{q} = 0.5q \otimes \omega \quad (2)$$

여기에서  $\omega \in R^3$ 은 각속도이며,  $\otimes$ 는 쿼터니언 곱을 의미한다.

위치를 계산하기 위한 요소로 다음을 정의 한다.

- $r_n \in R^{3 \times 1}$  : 항법 좌표계 상의 위치
- $v_n \in R^{3 \times 1}$  : 항법 좌표계 상의 속도
- $a_b \in R^{3 \times 1}$  : 중력가속도를 제외한 동체 좌표계 상의 가속도

위치를 계산하기 위한 기본적인 식은 다음과 같다.

$$\dot{v}_n = a_n = \dot{C}(q)a_b$$

$$\dot{r}_n = v_n \quad (3)$$

$\hat{q}, \hat{v}_n, \hat{r}_n$ 은 각각  $q, v_n, r_n$ 의 추정된 값을 의미한다. 본 논문에서는 보행용 관성 항법 시스템 추정을 위하여 보상 칼만필터(Complementary kalman filter)를 사용하였으며, 필터를 통해 실제 값인  $q, v_n, r_n$ 과 추정 값인  $\hat{q}, \hat{v}_n, \hat{r}_n$  사이

의 오차를 추정하여 보상한다. 이 값들을 각각  $q_e$ ,  $v_e$ ,  $r_e$ 로 정의한다. 본 논문에서 사용한 보행용 관성 항법시스템을 위한 보상칼만필터에 대한 자세한 내용은 [8]에서 소개하고 있으며, 필터에서 추정하는 상태와 상태 방정식은 다음과 같다.

$$x = \begin{bmatrix} \hat{q}_e \\ b_g \\ r_e \\ v_e \\ b_a \end{bmatrix}, \quad x \in R^{15 \times 1}$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}v_g \\ w_{b_g} \\ 0 \\ -C'(\hat{q}) \\ w_{b_a} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} [-y_g \times] & -\frac{1}{2}I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ -2C'(\hat{q})[y_a \times] & 0 & 0 & 0 & -C'(\hat{q}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 때, 행렬 내부의 [ ]는 외적 계산을 위해 변환된 형태의 행렬을 의미하며, 다음과 같다.

$$A \times B = [A \times] B = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

그 밖에  $b_a$ 와  $b_g$ 는 각각 가속도 센서의 바이어스와 자이로스코프의 바이어스( $\in R^{3 \times 1}$ )이다.

그림 4는 영속도 업데이트를 이용한 보상 칼만 필터에 의한 보행용 항법 시스템에 대한 블록 다이어그램이다.

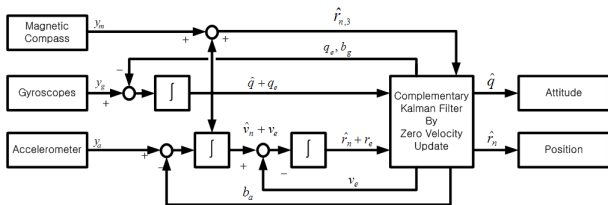


그림 4 영속도 업데이트를 이용한 보상 칼만 필터 블록 다이어그램.

Fig. 4 Block diagram of a complementary kalman filter using zero velocity update.

그림 4에서 만약 영속도 구간이 존재하지 못하여 영속도 보정을 하지 못한다면 보상 칼만 필터에서 각 오차 성분 ( $q_e, r_e, v_e, b_g, b_a$ )을 추정하지 못하여 이를 보상하지 못하게 된다. 이 시스템의 특성상 계속된 적분을 사용함으로써 이러한 에러성분은 계속 누적된다. 만약 발이 지면에 닿게 되면, 속도가 0 이라는 것을 알기 때문에 이를 토대로  $v_e$ 를 구하게 되고, 이를 통해 나머지 오차 성분도 확인하여 보상하게 된다. 영속도 보정이 이루어지는 순간의 필터의 측정 방정식 (measurement equation)은 다음과 같다.

$$z_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - v_{k,n}, \quad v_{k,n} \in R^{3 \times 1} \quad (5)$$

#### 4. 비전과 관성 항법 시스템의 결합

본 논문에서 제안하는 항법 시스템은 비전과 관성 항법 시스템을 결합을 통하여 구현한다. 두 개의 시스템은 각각 장점과 단점을 지니고 있으며, 이러한 사실을 결합을 통하여 서로 보완이 가능하다. 비전 시스템의 가장 큰 단점은 랜드마크에 있다. 비전을 통한 항법 시스템은 랜드마크를 통해 카메라의 자세 및 위치를 추정한다. 하지만 이를 위해 랜드마크에 대한 정확한 정보를 가지고 있어야 한다. 비전을 통한 항법에는 단지 카메라에 잡힌 영상에 대한 오차가 존재할 뿐, 시간에 따른 오차의 누적이 없다. 하지만 관성 항법 시스템의 단점은 시간에 따른 오차의 누적이다. 이 두 시스템의 결합을 통하여 좀 더 장시간 안정적이고 정확한 항법 시스템을 구성할 수 있다.

두 항법 시스템 중에 주된 역할은 관성 항법 시스템이 맡는다. 관성 항법 시스템은 시스템이 켜진 시점부터 계속 센서정보를 받아들이고, 이를 통해 위치 및 자세정보를 구하게 된다. 반면 비전 시스템은 단지 카메라가 랜드마크를 비추었을 때만 항법에 대한 결과를 계산할 수 있다. 때문에 랜드마크가 비춰지지 않는 곳에서의 항법은 관성 항법 시스템을 통해 구하게 되고, 랜드마크가 비춰지는 곳에서는 비전을 통한 결과를 같이 이용하게 된다.

랜드마크를 확인할 비전 카메라는 허리 전방에 위치시킨다. 카메라가 높은 곳에 위치할수록 카메라의 촬영 화각이 확보되며, 아래쪽에 설치한 경우보다 더욱 밝은 조건이 형성되기 때문에 여러 이점이 있다. 하지만 본 시스템에서 카메라와 관성 센서 사이의 관계는 실험인이 ‘차려’자세로 서 있을 때의 조건으로 구한 것이라 이동시에는 하나의 오차요인이 된다. 이 때, 발에서 부터 카메라 사이에 존재하는 각 관절 부분의 각도에 따라 카메라와 관성 센서간의 거리가 변하게 되는데, 신체의 상단부에 설치한 경우 두 센서 사이에 신체의 관절 부분 수가 증가하게 되어, 결국 더욱 많은 오차요인을 가지게 된다. 또한 무릎이나 다리 부분에 부착할 경우, 관성 센서와 비전 카메라 사이의 거리는 거의 일정하게 되지만, 비전 카메라를 통해 들어오는 영상이 걸음에 따라 수시로 바뀌게 되며, 랜드마크의 포착이 어려울 수 있다. 이러한 이유들로 본 논문에서는 비전 카메라를 허리에 설치하였다. 허리의 경우, 사람이 걸음을 걷는 동안에도 일정하게 전방을 주시할 수 있으며, 관성 센서와 카메라 사이의 오차요인으로는 무릎 부위의 관절만 작용하게 된다. 대신에 랜드마크를 통한 자세 및 위치 업데이트 과정에서 발과 지면 사이의 높이에 대한 고려가 필요하게 된다.

##### 4.1 비전 시스템을 이용한 필터 구성

본 논문의 비전 시스템은 랜드마크를 획득하였을 때, 독립적으로 회전행렬과 변위벡터를 구하게 된다. 항법 시스템의 필터에서는 이 정보를 거의 정확한 정보라고 인식하고 업데이트를 하게 된다. 영속도 업데이트 시에는 측정 데이터가 속도에 국한되었다면, 비전 시스템에 의한 데이터 획득 시에는 랜드마크에 대한 변위로 표현되면 이는 다시 항법 좌표계로 변환된다. 이를 통해,  $r_n$ 을 업데이트 하게 된다. 또, 관성센서와 카메라 사이의 관계 때문에 실제적으로 카메라

라 정보를 확인하는 순간은 발이 지면에 닿아 있는 영속도 순간이 된다. 이 때문에 실질적인 필터의 측정 데이터는  $r_n$  과  $v_n$  이 된다. 이 때, 관성 센서를 통해 들어오는 입력 ( $\hat{r}_n + r_e$ )과 비전에 의한 데이터  $r_n$ 의 차가 실제 오차가 되며, 이를 보상해 주게 된다. 이러한 내용을 필터의 측정 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$z_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ r_{vx} \\ r_{vy} \\ r_{vz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{k,n} \\ r_{k,n} \end{bmatrix}, \quad v_{k,n}, r_{k,n} \in R^{3 \times 1} \quad (6)$$

이 때,  $r_{vx}$ ,  $r_{vy}$ ,  $r_{vz}$ 는 비전을 통해 구한 위치 데이터이다.

그림 5는 비전시스템을 이용한 보상 칼만 필터의 블록 다이어그램이다.

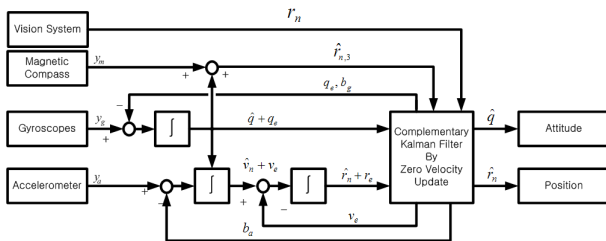


그림 5 비전을 추가한 보상 칼만 필터 블록 다이어그램.

Fig. 5 Block diagram of a complementary kalman filter with vision.

### 5. 실험

본 논문을 위한 실험에는 Xsens사의 MTi 관성센서모듈과 Pointgrey사의 Firefly 카메라모듈을 사용하였다. MTi모듈은 50%범위의 가속도계 3축과 300°/s의 자이로스코프 3축, 5a.u.의 자기를 측정할 수 있는 지자기 센서 3축이 있으며, 100Hz의 속도로 출력을 얻을수 있다. Firefly 카메라 모듈은 IEEE1394에 의한 PC인터페이스로 이미지를 보다 안정적으로 PC에 전송할 수 있다. 렌즈는 직경 14mm이며 6mm의 초점거리를 가지고 있다.

본 논문을 위한 실험은 오프라인으로 진행되었으며, 비전 시스템과 관성시스템 사이의 정확한 동기화를 위해서 관성 센서모듈에서 나오는 정보 중에서 타임스탬프(Time stamp) 정보를 직렬통신을 통해 받게 되며, 비전시스템을 통한 데이터를 저장할 때 관성센서의 타임스탬프 정보도 같이 저장하게 된다. 타임스탬프는 관성센서에서 데이터가 업데이트(100 Hz) 될 때마다 1씩 증가하는 값으로, 이 데이터를 확인함으로써 관성센서 데이터가 빠짐없이 저장되었는지 확인 가능하게 해 주는 정보이다.

#### 5.1 비전시스템의 거리측정 실험

비전 시스템을 통한 거리 벡터와 회전 행렬을 구할 수 있지만, 관성센서를 통한 위치 추정 시스템에는 거리 벡터만을 사용하였다. 관성센서를 통한 위치 추정 시스템에서 가장 큰 오차 요인은 위치에 대한 부분이며, 자세의 경우에는 영

속도 보정이 수행될 때마다 보정이 되며, 추가로 지자기 센서에 의한 방위 보정이 이루어지므로, 비전시스템에서 구한 회전행렬은 사용하지 않는다. 또한 허리에 위치한 카메라의 자세와 발 끝에 위치한 관성센서 자세 사이에 허리, 무릎, 발목 등과 같은 회전 가능한 관절이 여러 부분 존재하여 오차가 더욱 커질 수 있다.

비전 카메라와 랜드마크 사이의 거리를 측정하기 위한 실험 방법으로 고정된 벽에 랜드마크를 부착하고, 카메라의 위치를 차츰 이동시키면서 실제 측정값과 비전 시스템의 계산에 의한 결과를 비교하였으며, 실험 결과는 표 1과 같다. 표 1의 x, y, z축은 그림 1에서 정의한 랜드마크에 대한 좌표계와 동일하다. 결과를 확인해 보면, 전체적으로 x축이 0인(랜드마크 정면)인 경우에 z축 거리에 대한 값이 전반적으로 정확하고, 옆으로 수평이동 될 수록 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 실험은 정확한 좌표축 정렬 등을 하지 못한 상태에서 z축 1m 거리를 기준으로 실험한 결과이므로, 거리가 멀어질수록 오차가 더욱 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만, 관성센서만을 이용할 경우, 시간에 따른 오차가 계속 증가하기 때문에 이를 보정해 주기 충분한 정확성(최대 오차 90.629mm)을 가진다고 볼 수 있다.

표 1 카메라와 랜드마크 사이의 거리 측정 실험 결과.

Table 1 Experiment result of distance measurement between camera and landmark.

X \ Z	axis	300	200	100	0	-100
1000	x			100.016	-0.738	-103.110
	y			2.397	6.359	8.551
	z			1012.938	1000.081	1023.178
1100	x			99.737	1.372	-112.169
	y			0.394	4.991	7.283
	z			1110.815	1099.545	1121.851
1200	x		214.006	97.957	2.721	-106.533
	y		-1.469	0.777	7.108	4.001
	z		1250.406	1208.890	1198.782	1218.579
1300	x		208.258	102.899	8.068	-129.266
	y		-5.574	-2.985	4.266	6.032
	z		1346.255	1308.770	1299.300	1322.017
1400	x	318.191	203.932	89.562	3.391	-134.340
	y	-12.774	-8.237	-4.250	3.599	4.235
	z	1483.916	1441.316	1405.680	1399.044	1421.515
1500	x	303.559	191.620	84.403	-5.282	-146.413
	y	-18.728	-12.930	-8.494	-0.909	1.225
	z	1580.768	1535.083	1503.491	1498.115	1522.387
1600	x	323.827	208.800	99.384	-12.435	-151.855
	y	-25.427	-18.834	-12.868	-7.839	-0.549
	z	1683.088	1637.020	1605.072	1597.968	1620.778
1700	x	298.710	192.843	83.610	-50.135	-162.975
	y	-29.904	-22.365	-15.849	-13.635	-2.753
	z	1773.257	1729.852	1702.417	1698.295	1720.977
1800	x	299.808	192.489	78.520	-34.083	-177.867
	y	-28.841	-20.991	-14.667	-16.469	-4.952
	z	1872.120	1827.313	1801.100	1797.350	1823.037
1900	x			70.247	-58.149	-182.021
	y			-19.044	-23.069	-6.377
	z			1899.276	1897.846	1921.987
2000	x				-74.447	-190.629
	y				-28.813	-9.627
	z				1998.567	2022.716

### 5.2 관성 시스템을 이용한 이동거리 추정 실험

관성센서를 이용한 거리추정에는 시간에 따른 오차의 증가라는 단점이 존재한다. 비전과 관성항법시스템과의 결합 이전에 관성항법시스템만을 이용한 이동거리 추정 실험을 시행하였다. 거리 추정에 사용된 알고리즘은 비전과의 통합 시스템에서 사용하는 것과 동일하며, 단지 비전에 의한 보정이 빠져 있다. 보행용 관성항법에 대한 실험이기 때문에 아주 정확한 발의 위치라든지, 이동거리를 제어하는 것은 쉽지 않다. 실험은 출발점과 도착점 사이의 거리만을 측정하였으며, 여기에서 생기는 오차에 대해서는 보상하지 못하였다.

우선 실험 환경에 대하여 간단히 설명한다. 그림 6은 보행용 관성항법 시스템의 실험 대상인 된 공간에 대한 간략한 평면도이다. 약 90여 미터의 긴 복도가 있고, 양 끝과 중앙에 계단이 있다. 그림 6은 실측된 복도의 각 점들을 이용하여 평면도를 구성하였고, 이를 항법좌표계상의 점들로 변환한 이후에 도식화 하였다. 그림 6의 두 번째 그림에서 그래프 상의 숫자는 그 지점에 부착된 랜드마크의 코드번호이며, '\*'모양은 카메라가 랜드마크를 찍은 후에 이를 통해 계산된 위치이다. 실험을 위한 기본적인 도식화는 그림 6을 기본으로 한다.

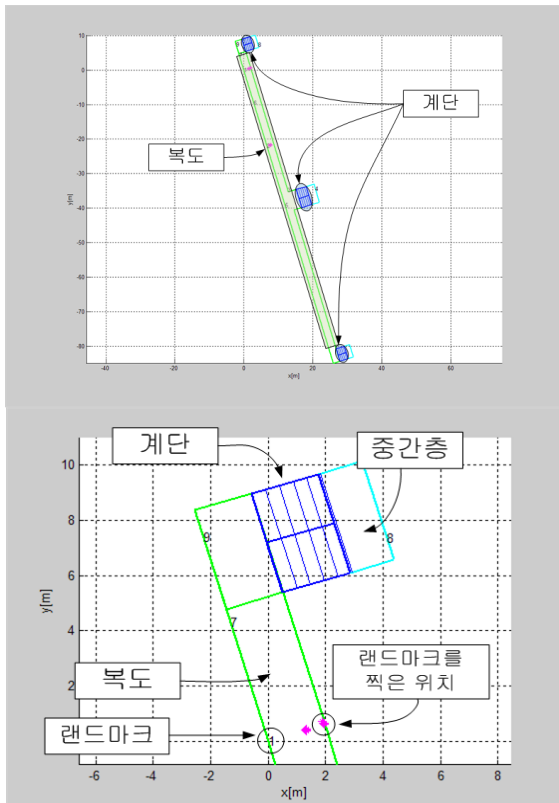


그림 6 실험 환경.  
Fig. 6 Experiment environment.

관성항법시스템을 위한 실험은 단거리, 중거리, 장거리의 3가지로 이루어졌다. 실험 결과 그림 중 위쪽 그림에서 화살표는 이동 방향 및 거리이며, 숫자는 각 상황을 순서에 맞게 표현 하였다. 아래쪽 그림에서 화살표는 각 상황에 대한 시간이며, 번호는 왼쪽 그림에서의 각 상황을 나타낸다. 단거리 실험(그림 7)은 약 5m의 거리를 'L'자 모양으로 걷는데, 한쪽 변은 계단으로 이루어져 있다. 중거리 실험(그림 8)은 평평한 복도 48m를 왕복하는 실험이고, 장거리 실험(그림 9)은 90m의 평평한 복도를 왕복하는 실험이다.

실험 결과를 보면, x-y축 실험 결과에서 전반적인 경향성은 잘 유지하는 반면, z축 실험 결과는 실제로는 평평한 바닥을 걷고 있는 중·장거리 실험에서도 결과상으로는 경사면을 걷는 것과 같은 효과를 보이고 있다. 이것은 현재 필터를 통해 오차 보상을 할 때, x-y축의 경우에는 지자기 센서를 이용하여 일정 순간마다 보정을 해 주고 있지만, z축은 보상에 사용할 정보가 존재하지 못하기 때문에 적절한 보상이 이루어지지 못하고, 결국은 시간에 따른 오차의 증가로 표현되고 있다.

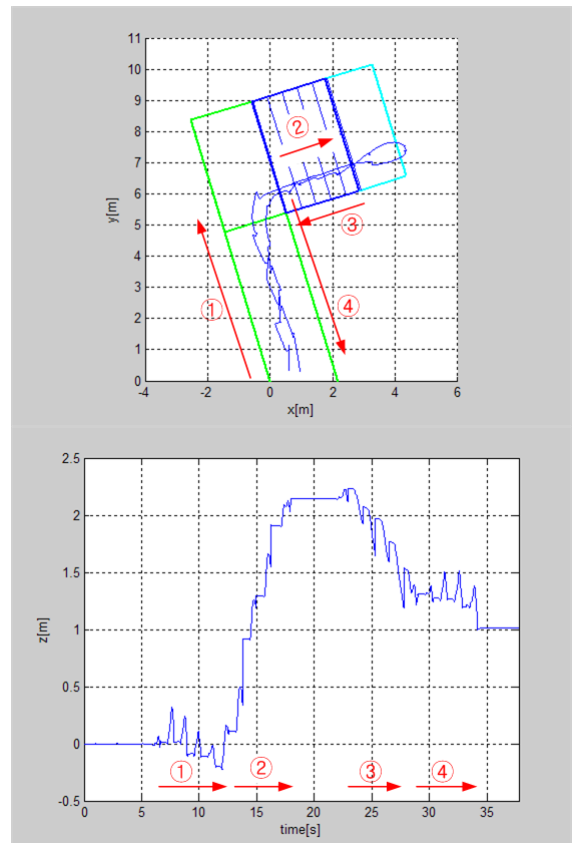


그림 7 관성항법시스템에 의한 단거리 실험결과.  
Fig. 7 Short distance experiment result using the inertial navigation system.

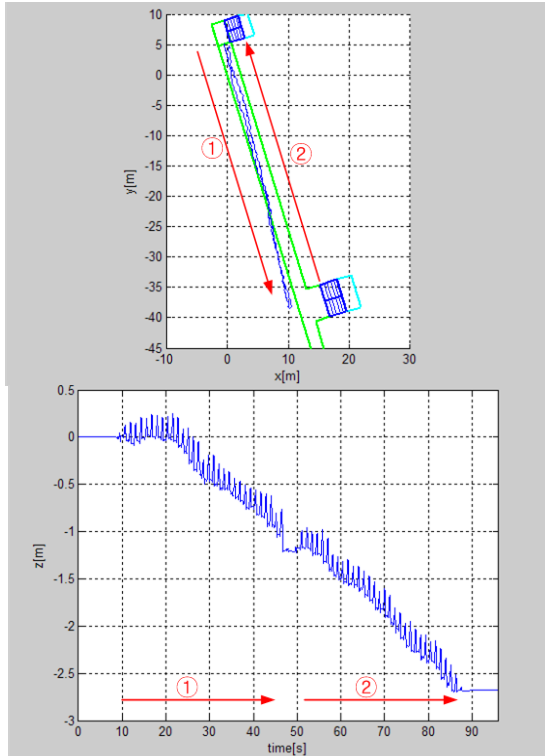


그림 8 관성항법시스템에 의한 중거리 실험결과.  
 Fig. 8 Medium distance experiment result using the inertial navigation system.

### 5.3 비전과 관성시스템의 결합을 통한 이동거리 추정 실험

실험 방법은 5.2절의 관성 시스템을 이용한 실험과 동일한 방법으로 수행하였으며, 내부 필터의 수정을 통해 동일한 실험에 대한 결합시스템과 관성항법 시스템사이의 결과에 대한 비교를 하였다. 중거리 실험(그림 10, 11)은 약 30여 미터 떨어진 두 개의 랜드마크 사이를 왕복하는 것으로 출발점과 도착점이 동일하다.

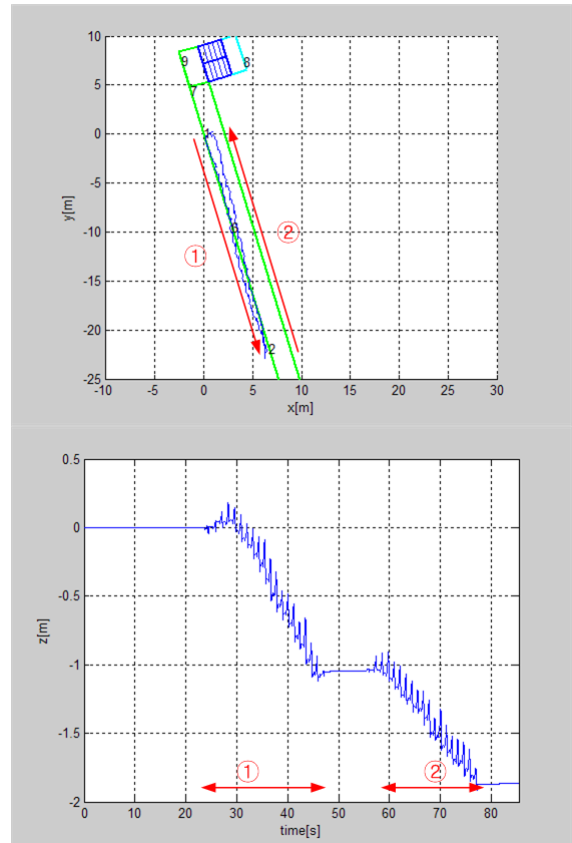


그림 10 비전시스템을 이용한 중거리 실험(비전 보상 전).  
 Fig. 10 Medium distance experiment result with a vision system (before using vision results)

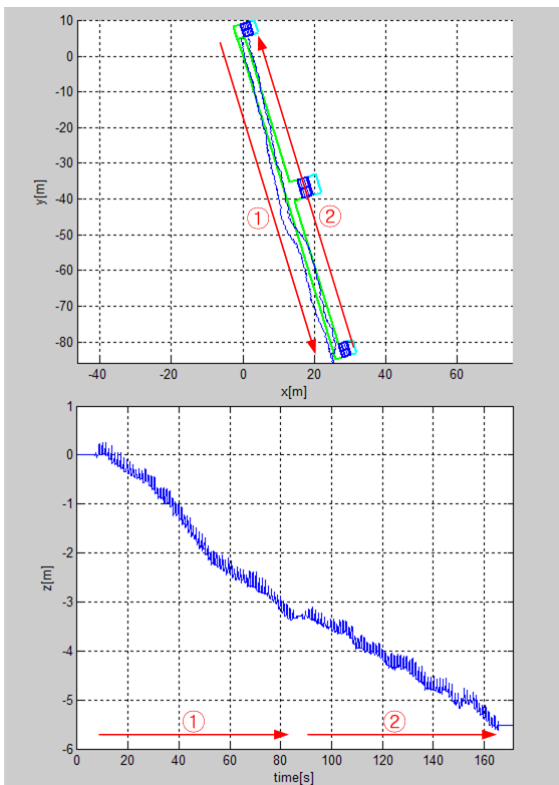


그림 9 관성항법시스템에 의한 장거리 실험결과.  
 Fig. 9 Long distance experiment result using the inertial navigation system.

실험 결과를 확인해 보면, 관성센서만을 이용한 실험에서 중거리 실험과 유사한 것을 확인할 수 있으나, z축의 결과를 보면 랜드마크를 확인하는 순간 z축의 보상이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 비전시스템을 이용한 장거리 실험 방법에 대한 설명 그림이다. 약 50여 미터의 복도를 이동(①②)후 계단을 통해 하나의 층을 내려가고(③④), 여기서 다시 복도를 지나(⑤⑥) 외부 계단을 통해 원래의 층으로 돌아온 이후(⑦⑧), 출발점으로 되돌아가는(⑨) 실험이다. 랜드마크의 순서는 1 부터 시작해서 차례대로 9까지 진행한 다음에 다시 1번(출발점)으로 돌아간다. 1부터 9까지의 랜드마크 중에 5, 6, 7은 3층, 4, 8은 3층과 4층 사이 계단의 중간층에 위치하고 있으며, 나머지는 4층에 위치하고 있다. 각 랜드마크의 위치는 그림 12에서 숫자의 위치이다.

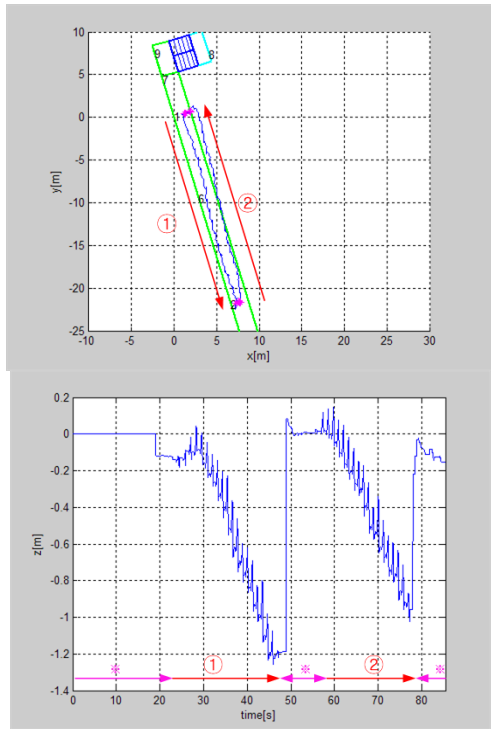


그림 11 비전시스템을 이용한 중거리 실험(비전 보상 후).  
 Fig. 11 Medium distance experiment result with a vision system (after using vision results)

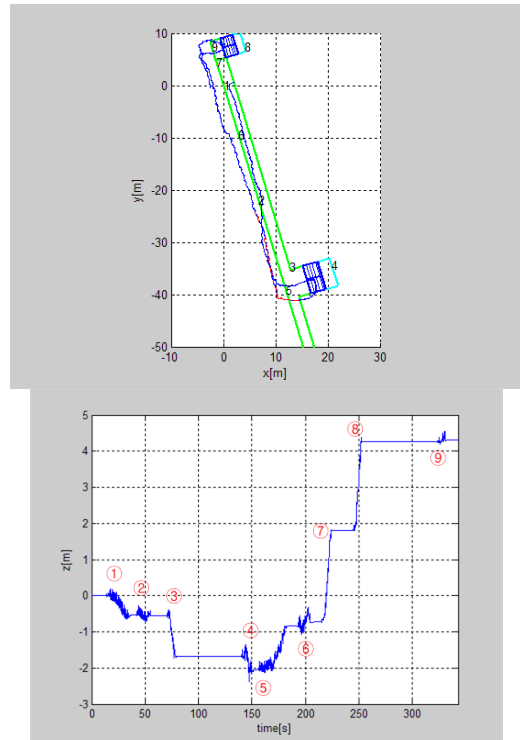


그림 13 비전시스템을 이용한 장거리 실험(비전 보상 전)  
 Fig. 13 Long distance experiment result with a vision system (before using vision results)

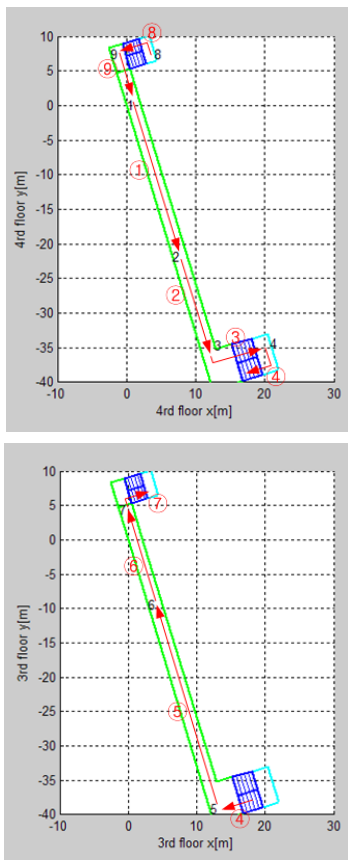


그림 12 장거리 실험 방법.  
 Fig. 12 Method of a long distance experiment.

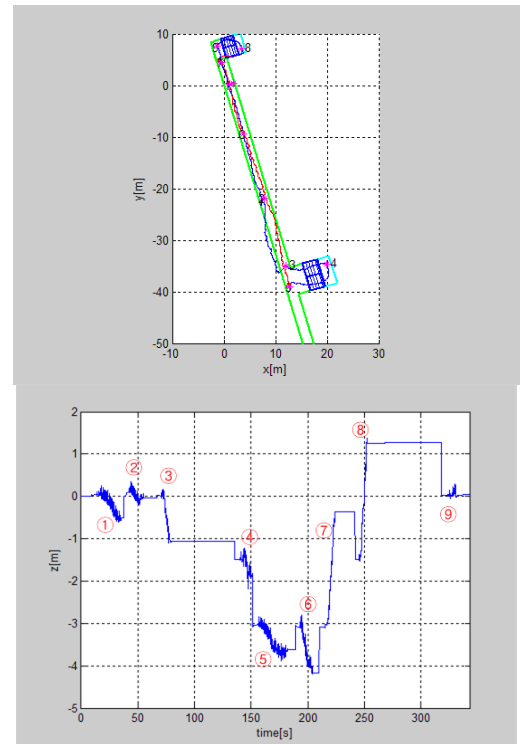


그림 14 비전시스템을 이용한 장거리 실험(비전 보상 후).  
 Fig. 14 Long distance experiment result with a vision system (after using vision results)



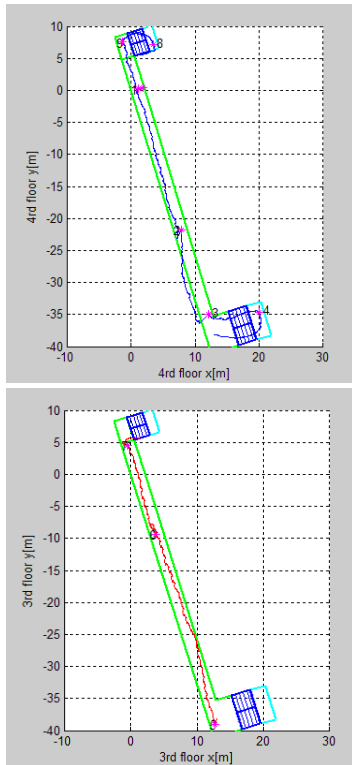


그림 15 장거리 실험에 대한 각 층별로 결과.  
 Fig. 15 Experiment result on each floor with a vision system.

장거리 실험의 결과(그림 13, 14, 15)를 확인해 보면, 비전 시스템과의 결합 이전에는 자자기 센서를 통해 방위각은 제대로 추정하지만, 시간에 따른 편중(shift)을 보상하지는 못하고 있어서 시간에 따라 오차가 증가하여, 실제로는 출발점과 도착점이 비슷함에도 불구하고 위치가 일치하지 못하고 있다. 반면, 비전시스템과의 결합 이후의 결과(그림 14, 15)의 경우 한쪽으로 편중되는 부분을 보상해 주고 있어서 제대로 된 이동 궤적을 구할 수 있다. 결과에서 랜드마크 2와 3 사이의 한 방향으로의 쏠림은 건물 내부의 기계들에 의한 자기력 발생으로 자기센서에 의한 오차로 판단된다. 이러한 근거로, 관성센서만을 이용한 중거리, 장거리 실험에서도 동일한 위치에서 벽 쪽을 향하여 들어가는 경향을 보이고 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 보행용 관성항법시스템의 시간에 대해 증가하는 오차를 보상하고 절대적인 위치를 추정하기 위하여 비전시스템을 결합 하였다. 본 논문에서 사용한 비전 시스템은 이동체에 카메라를 부착하고, 절대좌표를 알고 있는 지점에 각각 구분되는 랜드마크를 부착하였다. 카메라를 통해 랜드마크에서 카메라의 자세와 위치를 추정할 수 있고, 카메라와 관성센서사이의 관계를 통해 최종적으로 관성센서의 절대위치를 추정할 수 있다.

여러 실험을 통해 관성센서만으로는 보행용 항법시스템의 구성에 무리가 있다는 것을 확인할 수 있었고, 비전시스템과

의 결합을 통해 어느 정도 보상할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 관성항법시스템이 정확한 경우 랜드마크의 수를 줄일 수 있으며, 반대의 경우에는 많은 랜드마크를 사용하여 자주 보정을 해줌으로서 전체적으로 안정적인 항법 시스템을 구성할 수 있다.

본 논문에서 사용한 카메라는 일반적인 렌즈를 사용 하였는데, 실내의 경우 야외에 비하여 비교적 어두운 편이기 때문에 카메라를 통한 영상이 흐리거나 번지는 경우가 자주 발생하고 빠른 결과 출력에도 문제가 있었다. 그러므로 라이트 같은 보조적인 장비를 준비하거나 적외선 카메라와 같이 어두운 곳에서도 촬영이 용이한 장비를 사용하는 것도 좋은 방법일 것이다.

비록 비전시스템을 통해 보정을 하기는 하였지만, 정작 중요한 부분은 관성항법시스템에 있다. 현재 사용되는 보상 필터는 오차가 전반적으로 크고, 특히 z축에 관련된 부분은 보상이 제대로 이루어지지 못하는 것을 확인하였다. z축에 대한 부분이 보상되지 않으면 전체적인 결과에도 악영향을 끼치게 되므로, 이를 보상할 수 있는 방법을 고안하거나, 다른 형태의 필터를 염두에 두어야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년도 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] P. Moore and P. Crossley, "GPS applications in power systems. 1. Introduction to GPS," Power Engineering Journal, Vol. 13, No. 1, pp. 33-39, 1999.
- [2] D. Titterton and J. Weston. Strapdown Inertial Navigation Technology. The American Institute of Aeronautics and Astronautics, second edition, AIAA, 2004.
- [3] S. Park and S. Hashimoto, "Autonomous Mobile Robot Navigation Using Passive RFID in Indoor Environment," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 56, No. 7, pp. 2366-2373, 2009.
- [4] T. H. Riehle, P. Lichter, and N. A. Giudice, "An indoor navigation system to support the visually impaired," in Proc. IEEE Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 4435-4438, 2008.
- [5] J. Saarinen and S. Heikkila, "Laser Based Personal Navigation System," in Proc. IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp. 315-320, 2005.
- [6] M. R. Strakowski, B. B. Kosmowski, R. Kowalik, and P. Wierzba, "An ultrasonic obstacle detector based on phase beamforming principles," Sensors, Vol. 6, No. 1, pp. 179-186, 2006.
- [7] E. Foxlin, "Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors," IEEE Computer Graphics and

Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 38-46, 2005.

- [8] 박상경, 서영수, "보행용 관성 항법 시스템을 위한 HMMS를 통한 걸음 단계 구분," 전기학회논문지, Vol. 58, No. 5, pp. 1010-1018, 2009
- [9] L. Chai, W. Hoff, and T. Vincent, "Three dimensional motion and structure estimation using inertial sensors and computer vision for augmented reality", Presence: Teleoperators & Virtual Environments, pp. 474-492, 2002.
- [10] E. Foxlin and L. Naimark, "VIS-TRACKER: A wearable vision-inertial self-tracker," in Proc. IEEE Virtual Reality, pp. 199-206, 2003.
- [11] N. Hatao, R. Hanai, K. Yamazaki and M. Inaba, "Real-time navigation for a personal mobility in an environment with pedestrians," in Proc IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication, pp. 619-626, 2009.
- [12] C. Kessler, C. Ascher, N. Frietsch, M. Whinmann, and G. F. Trommer, "Vision-based attitude estimation for indoor navigation using vanishing points and lines," in Proc. IEEE Position Location and Navigation symposium, pp. 310-318, 2010.
- [13] Y. S. Suh, S. K. Park, D. Kim and K. Jo, "Remote control of a moving robot using the virtual link," in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2343-2348, 2007.
- [14] L. Naimark and E. Foxlin, "Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker," in Proc. IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented, pp. 27-36, 2002.
- [15] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing. second edition, New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [16] Chien-Ping Lu, "Fast and Globally Convergent Pose Estimation from Video Images," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 6, pp 610-622, 2000.
- [17] J. B. Kuipers, Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality. New Jersey: Princeton University Press, 1999.

## 저 자 소 개



### 박 상 경 (朴 賞 卿)

1976년 9월 28일생. 2002년 울산대 공대 제어계측공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기전자정보시스템공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기전자정보시스템공학과 박사과정

E-mail : damiro76@hotmail.com



### 서 영 수 (徐 榮 秀)

1967년 10월 6일생. 1990년 서울대 공대 제어계측과 졸업. 1992년 동 대학원 제어계측과 졸업(석사). 1997년 동경대학교 계측공학과 졸업(공학박사). 2000~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수

E-mail : suh@ieee.org