

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.4.345>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 키넥트센서와 확장칼만필터를 이용한 이동로봇의 사람추적 및 사람과의 동반주행

박 경 재\* · 원 문 철\*\*

\* 충남대학교 메카트로닉스 공학과

### People Tracking and Accompanying Algorithm for Mobile Robot Using Kinect Sensor and Extended Kalman Filter

Kyoung Jae Park\* and Mooncheol Won\*\*

\* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received November 29, 2012 ; Revised February 12, 2014 ; Accepted March 7, 2014)

**Key Words:** Robot Vision(로봇 비전), Support Vector Machine(서포트 벡터 머신), Extended Kalman Filter (확장 칼만 필터), Kinect Sensor(키넥트 센서)

**초록:** 본 논문에서는 키넥트센서(Kinect sensor)와 확장칼만필터(Extended Kalman Filter : EKF)를 이용하여 사람과 로봇간의 상대위치 및 각도와 상대속도를 실시간으로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 또한, 다양한 이동모드에 따른 모바일로봇의 사람과의 근접동반이동 제어를 수행한다. HOG 및 SVM을 이용한 사람 두부 및 어깨 검출 알고리즘을 통해 사람을 검출하고, 키넥트센서의 정보를 이용해 EKF 알고리즘을 거쳐 사람과 로봇간의 상대위치 및 속도를 추정한다. EKF 알고리즘의 결과를 이용해 실내 환경에서 사람과 같이 근접동반주행을 하기 위한 다양한 모드의 제어 실험을 수행한다. 또한, 모션캡처장비(VICON)를 이용해 알고리즘의 정확도를 검증하였다.

**Abstract:** In this paper, we propose a real-time algorithm for estimating the relative position and velocity of a person with respect to a robot using a Kinect sensor and an extended Kalman filter (EKF). Additionally, we propose an algorithm for controlling the robot in the proximity of a person in a variety of modes. The algorithm detects the head and shoulder regions of the person using a histogram of oriented gradients (HOG) and a support vector machine (SVM). The EKF algorithm estimates the relative positions and velocities of the person with respect to the robot using data acquired by a Kinect sensor. We tested the various modes of proximity movement for a human in indoor situations. The accuracy of the algorithm was verified using a motion capture system.

- 기호설명 -

$\hat{x}_k$  : 상태변수 추정값

$\hat{x}_k^-$  : 상태변수 예측값

$K_k$  : 칼만 이득값

$z_k$  : 측정값

$Q$  : Process noise 공분산행렬

$R$  : Measurement noise 공분산행렬

$\Phi$  : 키넥스의 화각

$\beta$  : 영상의 가로축 픽셀의 크기

$w_\theta$  : Process noise의  $\theta$  값의 오차 분산값

$w_v$  : Process noise의  $v$  값의 오차 분산값

### 1. 서 론

인간 친화형 서비스로봇은 인간을 보조하거나 엔터테인먼트의 역할 및 정보제공을 수행하는 것으로 정의할 수 있다. 현재 각국에서 인간 친화형 서비스로봇을 개발하고 있으나 실제로 인간의 일

† Corresponding Author, [mewon@cnu.ac.kr](mailto:mewon@cnu.ac.kr)

상생활을 사람처럼 보조하기에는 성능이 제한적이며 가격 또한 매우 비싼 편이다. 인간 친화형 서비스로봇의 필요한 기능 중 하나로 사람과의 자연스러운 근접동반이동 기능을 들 수 있다.

이러한 기능 구현을 위하여 로봇의 사람과의 근접 동반 이동 제어기술과 HRI(Human Robot Interaction)관점에서의 학술적 연구가 매우 필요하다. 특히, 사람의 근접보행과 유사한 자연스러운 로봇주행을 위한 핵심 요구로는 정확한 로봇과 사람 간 상대위치 및 속도 추정에 있을 것이다.

사람추종 기능을 가진 이동로봇 관련 연구로는 Care-O-bot3<sup>(1)</sup>를 이용한 로봇 서비스 및 로봇과 인간의 상호작용에 관한 연구를 수행하는 EU Framework Project의 ACCOMPANY<sup>(2)</sup>와 NASA와 GM간의 Robonaut2 로봇을 이용한 인간과 같이 공동 작업하는 차세대 로봇기술 개발 등이 있으며, 국내에서도 지능로봇기술개발사업단(CIR)의 ‘실벗’, ‘씨로스’와 한국전자통신연구원(ETRI)의 ‘POMI’<sup>(5)</sup> 등이 있다. 하지만 상기 로봇 모두 사람과 일정한 거리(1m)에서 사람을 따라갈 뿐 본 논문의 제안과 같은 다양한 근접동반주행 기능은 없는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 저가 RGB-D 센서인 키넥트센서를 사용하여 사람과 로봇과의 상대위치 및 속도 추정을 얼마나 정확히 할 수 있을지에 대하여 중점적으로 연구한다. 이를 위해 모션캡처장비를 사용하여 상기 정확도를 검증하고, 복도환경에서 모바일로봇이 다양한 제어모드에 따라 사람을 추적하는 실험을 통해 알고리즘을 검증한다.

## 2. 시스템 및 알고리즘 개요

로봇과 사람간의 상대위치 및 속도를 추정하는 알고리즘을 검증하고, 다양한 이동모드에서 근접동반이동 제어를 수행하기 위해 키넥트센서를 부착한 모바일로봇과 RF통신을 통한 제어 시스템을 구현하였다.

### 2.1 키넥트센서(Kinect sensor)<sup>(3)</sup>

RGB-D 센서인 Fig. 1의 키넥트센서는 적외선 프로젝터 및 적외선 센서와 단안 카메라가 탑재되어 있다. Fig. 2와 같이 RGB색상 정보 및 비교적 정확한 거리(Depth)정보<sup>(6)</sup>와 조밀도를 동시에 제공하므로 거리정보를 이용하여 배경에서 물체를 분리하는 것이 매우 용이하고 센서와 물체 사

이의 거리를 용이하게 계산할 수 있고, 야간에도 비교적 정확한 거리정보를 제공하므로 조명이 열악한 환경에서도 사용 가능하다.

이런 장점으로 현재 세계적으로 활용이 늘고 있으며, Willow Garage 사의 개방형 로봇 개발 플랫폼을 이용한 저가 로봇인 TuttleBot<sup>(4)</sup>에도 장착하고 있다.

### 2.2 시스템 구성 및 모바일 로봇

본 논문에 사용된 시스템은 Fig. 3과 같이 컴퓨터에서 사람을 인식하고, 상대위치 및 속도를 추정한다. 키넥트센서가 장착된 모바일로봇은 알고리즘에 의한 속도와 각속도 명령에 따라 주행한다. 컴퓨터와 모바일 로봇은 RF 통신을 이용해 영상과 속도, 각속도 및 각도 명령을 통신한다.

컴퓨터에서 MFC를 이용하여 구현된 프로그램은 키넥트센서의 영상을 받아 사람의 두부 및 어깨를 검출하고, 검출된 영역의 정보로 확장칼만 필터를 거쳐 상대위치 및 속도를 얻어낸다. 이를 바탕으로 모바일로봇이 사람을 추적하기 위한 직진속도와 각속도를 모바일로봇에 전달하게 된다. 모바일로봇은 컴퓨터로부터 전송받은 주행명령에 따라 주행하면서 변화된 환경을 키넥트센서로 획득하여 영상 및 거리정보를 다시 컴퓨터로 전송하며 자율 주행을 한다.

본 연구에서는 Fig. 4에서 나타낸 가로 50cm, 세로 40cm, 높이 155cm의 모바일로봇을 제작하여 실험에 사용하였다. 모바일로봇의 가장 위에는 팬틸트 제어가 가능한 키넥트센서가 있다.



Fig. 1 Kinect sensor appearance

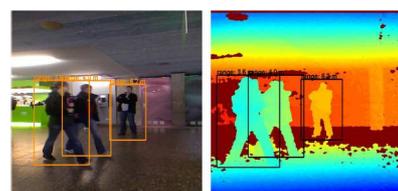


Fig. 2 RGB and Depth image of Kinect sensor

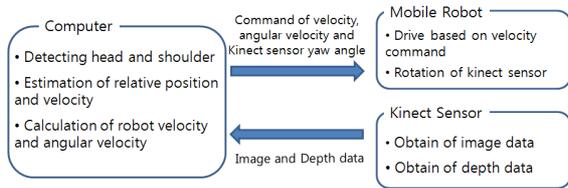


Fig. 3 Experimental system architecture of mobile robot and computer system

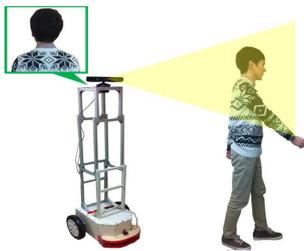


Fig. 4 Mobile robot used in the experiment

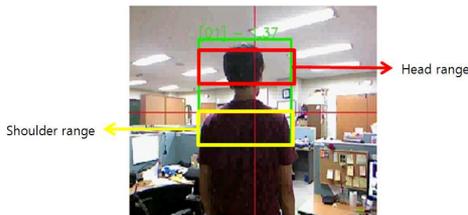


Fig. 5 Result on detection of the head and shoulder

### 2.3 두부 및 어깨 검출 알고리즘

본 논문에서는 사람의 두부/어깨 영역 검출을 위하여 사람 전신 검출에 사용된 Dalal과 Triggs의 방법<sup>(7)</sup>을 응용하여 적용하였다. 키넥트센서의 색상정보 및 깊이정보를 이용한 SVM<sup>(8)</sup> 기반 사람의 두부/어깨부위 분류기를 사용하였다. Fig. 5는 RGB 영상으로 부터 임의의 사람의 두부 및 어깨부위 검출 결과 영상이다.

## 3. 사람과 로봇간 상대위치 및 속도 추정

최근 사람 추적 연구에는 칼만필터(Kalman Filter)를 이용한 방법이 많이 사용되고 있다.

칼만필터의 가장 큰 특징은 에러의 제곱이 최소화되도록 상태변수들을 업데이트하는 반복적인 연산 과정을 수행하는 것이다. 확장칼만필터(Extended Kalman Filter) 알고리즘은 칼만필터 알고리즘을 비선형 시변 시스템에 적용하기 위해 비선형 방정식을 테일러 급수(Taylor-series)를 취해 선형화(Linearization)하여 적용한 필터이다.

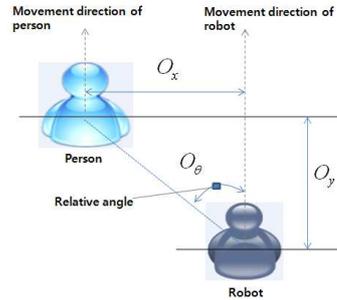


Fig. 6 Definition of relative position and angle between robot to person

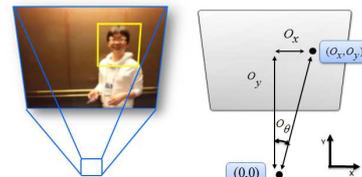
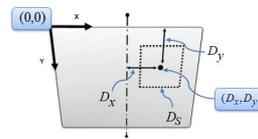


Fig. 7 Estimation method of relative position and angle

본 논문에서는 키넥트센서를 이용하여 가능한 정확히 로봇과 사람간의 상대위치를 추정하기 위해 키넥트센서의 좌우 회전(Yaw)각도를 고려한 확장칼만필터 알고리즘을 사용하였다.

### 3.1 키넥트센서를 이용한 위치 및 각도 검출 방법<sup>(11)</sup>

두부 및 어깨 검출 알고리즘을 이용해 검출된 영역의 윈도우 위치값( $D_x, D_y, D_s$ )과 윈도우 영역에서의 키넥트센서 거리값을 사용하여 Fig. 6과 같은 사람과 로봇간의 상대위치( $O_x, O_y$ ) 및 각도( $O_\theta$ )를 추정하였다.

Fig. 7에서  $O_y$ 값은 검출된 윈도우의 위치값( $D_x, D_y, D_s$ )을 이용해 키넥트센서의 거리정보를 이용하여 추정한다. 키넥트센서의 거리정보는 Fig. 5와 같이 두부영역과 어깨영역으로 나눌 수 있다. 어깨영역의 거리값은 사람의 자세에 따라서 크게 바뀌지만 두부영역의 거리값은 크게 바뀌지 않는다. 따라서  $O_y$ 값은 두부영역 거리의 최소값으로 측정하였다.

또한, 전체 영상의 픽셀크기 및  $D_x$ 와 키넥트센

서의 화각을 이용한 식 (1)으로  $O_\theta$ 를 측정한다.

$O_x$ 값은 측정된  $O_y$ 와  $O_\theta$ 를 통해 식 (2)의 과정으로 계산하여 얻는다.

$$O_\theta = \frac{\Phi \times D_x}{2 \times \beta} \quad (1)$$

$$O_x = \tan(O_\theta) \times O_y \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \\ v_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{t-1} + v_{t-1} \cos(\theta_{t-1}) \Delta t \\ y_{t-1} + v_{t-1} \sin(\theta_{t-1}) \Delta t \\ \theta_{t-1} \\ v_{t-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w_\theta \\ w_v \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$z_t = (x_t, y_t, \theta_t, v_t)^T + G_z$$

$$v_t = \frac{y_t - y_{t-1}}{\cos(\theta_t) \times \Delta t} \quad (4)$$

$$f(\hat{x}_{k-1}) \equiv \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1}}, \quad h(\hat{x}_k^-) \equiv \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^-} \quad (5)$$

$$f(\hat{x}_{k-1}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -v_{k-1} \times \sin(\theta_{k-1}) \times \Delta t & \cos(\theta_{k-1}) \times \Delta t \\ 0 & 1 & v_{k-1} \times \cos(\theta_{k-1}) \times \Delta t & \sin(\theta_{k-1}) \times \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$h(\hat{x}_k^-) = \begin{pmatrix} \hat{x}_k^- & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{y}_k^- & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\theta}_k^- & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{v}_k^- \end{pmatrix} \quad (7)$$

### 3.2 확장칼만필터 적용을 위한 로봇과 사람간 상대운동 모델<sup>(9,10)</sup>

확장칼만필터는 추적 대상의 운동 모델(Process Model) 및 관측모델(Observation Model) 불확실성에 대한 확률 모델을 사용한다. 본 논문에서는 다음과 같은 수식으로 사람과 로봇간 상대이동 및 관측 모델을 수립하였다.

식 (3)에서  $(x, y, \theta, v)^T$ 는 사람의 로봇기준 상대좌표, 상대각도 및 상대속도를 나타낸다.  $G_z$ 는 측정오차 벡터를 나타낸다. 또한,  $\Delta t$ 는 신호 취득 주기이다. 확장칼만필터의 입력값은 상기 3.1절에서 설명된 측정값을 사용한다. 추정되지 않은  $v_t$ 값은 식 (4)의 과정을 통해 측정한다.

### 3.3 비선형 운동방정식의 선형화(Linearization)

확장칼만필터 알고리즘을 유도하기 위해서는

선형화된 시스템 행렬을 유도해야 한다. 본 논문에서는 시스템 행렬을 얻기 위해 식 (5)의 편미분 과정을 거쳐 자코비안(Jacobian) 행렬을 얻어냈다.

편미분 과정으로 얻어진 자코비안 행렬은 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

### 3.4 매저먼트(Measurement), 프로세스(Process) 노이즈의 공분산 매트릭스

매저먼트(Measurement) 노이즈의 벡터는 키넥트 센서의 측정값에 대한 오차 공분산으로 구성된 행렬로 식 (8)과 같다. ( $v_x, v_y, v_\theta, v_v$ )는 측정값 각각의 오차에 대한 분산( $\sigma$ )이다. 분산값은 사람과 로봇이 모두 정지하고 있을 때의 거리 측정오차를 분석하여 구하였다.

프로세스(Process) 노이즈의 벡터는 시스템 모델링과정과 프로세서의 처리과정에서 생긴 오차의 행렬이다. 벡터의  $w_\theta$ 와  $w_v$ 는 확장칼만필터의 결과값과 실제값과의 비교를 통한 반복된 실험으로 식 (9)과 같이 구하였다.

정확한 사람과 로봇간의 상대위치를 구하기 위해 모션캡처장비(VICON)를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 모션캡처장비는 6개의 카메라로 사람과 로봇에 부착된 마커의 위치를 추적하여 3차원 좌표 데이터를 생성해주는 시스템이다.

$$R = \begin{pmatrix} v_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_v \end{pmatrix} \begin{matrix} v_x = \sigma_x = 0.3596 \\ v_y = \sigma_y = 0.6047 \\ v_\theta = \sigma_\theta = 0.0976 \\ v_v = \sigma_v = 0.2160 \end{matrix} \quad (8)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_v \end{pmatrix} \begin{matrix} w_\theta = 0.15 \\ w_v = 0.25 \end{matrix} \quad (9)$$

**Table 1** Measured error from Kinect sensor and estimated error from EKF

	$O_x(cm)$	$O_y(cm)$	$O_\theta(deg)$	$v(cm/s)$
Kinect sensor	3.0069	2.1026	1.5350	0.0807
EKF estimate	1.8643	1.3036	0.9280	0.0486

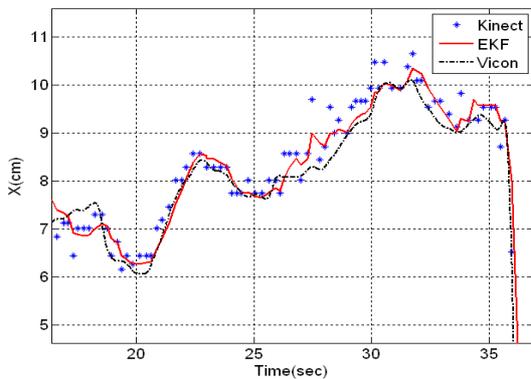


Fig. 8 Experiment result on relative position( $x$ )

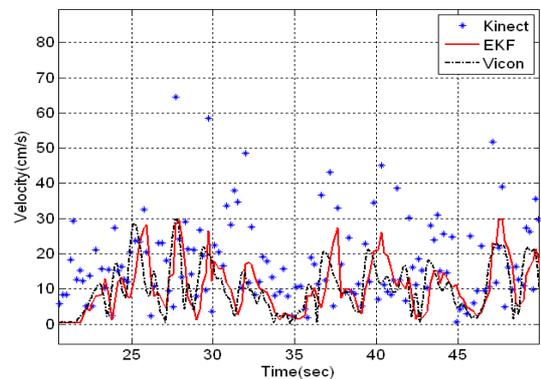


Fig. 11 Experiment result on relative velocity( $v$ )

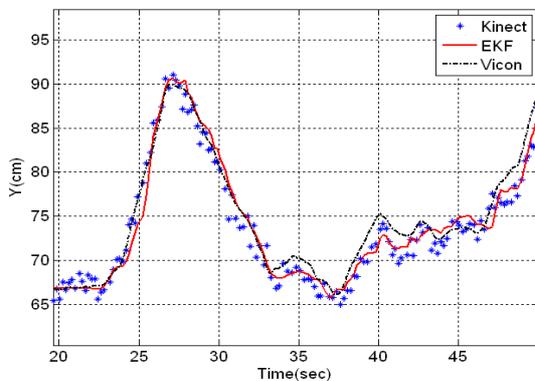


Fig. 9 Experiment result on relative position( $y$ )

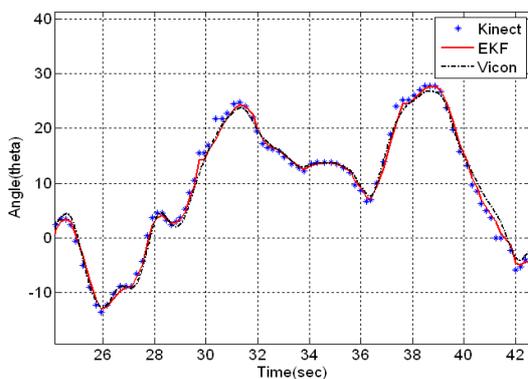


Fig. 10 Experiment result on relative angle( $\theta$ )

### 3.5 상대위치 및 속도 추정결과

정지한 로봇에서 사람의 상대위치 및 속도 추정하는 실험을 수행하였다. Marker를 사람 두부와 키넥트센서에 부착하여 알고리즘의 결과와 모션캡처장비의 결과를 비교하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 로봇과 사람 사이의 상대위치에 대한  $x$ ,  $y$ 축 거리 값이고, Fig. 10은 상대 각도를 나타낸다. Fig. 11의 Kinect와 Vicon의 속도(\*)는 각각의 relative position  $x$ ,  $y$ 를 수치미분 하

여 얻은 결과이다. Fig. 11의 Vicon의 측정값을 참 값으로 가정하면 상대속도 추정에 EKF가 매우 효과적임을 알 수 있다.

Table 1은 키넥트센서의 출력값과 알고리즘의 추정값을 모션캡처장비의 출력과 비교한 결과이다. 확장칼만필터 알고리즘의 추정결과 절대값 오차의 평균이 키넥트센서의 측정 결과보다 60% 내외로 줄어든 것을 확인할 수 있다.

## 4. 모바일로봇의 동반주행 알고리즘

본 논문에서는 로봇과 사람이 옆에서 같이 움직일 수 있는 공간에서는 옆에서 사람과 같이 동행하고, 한 사람 만이 통과할 수 있는 문 등을 통과할 때는 로봇이 사람 바로 뒤에서 따라가는 제어를 위한 동반주행 알고리즘을 제안한다.

### 4.1 동반주행 모드

본 논문에서는 그림 Fig. 12와 같이 로봇이 사람 바로 옆에서 이동하는 제어모드(Side by side) 문 등 좁은 통로를 통과하기 위해 사람 뒤를 근접하여 따라가는 제어모드(Following), 모드를 전환할 때를 위한 측후방에서 따라가는 제어모드(Diagonal following)를 구현하였다.

모든 제어모드는 50~60cm의 근거리에서 사람과 함께 이동하도록 제어하였다. 가급적 근거리에서 동반이동 제어하고자 하는 이유는 시장과 같은 복잡한 환경에서 사람과 로봇 사이에 사람이나 물체가 끼어들지 못하도록 하여 로봇의 추적을 용이하게 하고, 사람이 경로를 리드하여 로봇이 장애물을 자연스럽게 회피할 수 있도록 유도하기 위함이다.

**Table 2** Desired relative  $y$  direction distance and  $\theta$  angle between people and robot

	following	side by side	diagonal following
$y_D$	60cm	20cm	42cm
$\theta_D$	$0^\circ$	$70^\circ$	$45^\circ$

4.2 로봇의 주행 알고리즘

Fig. 13은 모바일로봇의 주행 알고리즘의 구조를 보여준다.

키넥트센서의 영상에서 사람의 두부 및 어깨를 검출하고 거리정보를 받아온다. 획득한 정보로 사람과 로봇간의 상대위치 및 속도를 확장칼만필터 알고리즘을 통해 계산한다. 계산된 상대위치 및 속도를 고려하여 제어기에서 로봇에 필요한 전진속도 및 회전속도를 계산한다.

본 논문에서는 화각이  $30^\circ$  인 키넥트센서를 다양한 제어모드에서 사용하기 위해서 Yaw축으로 회전시켜 효과적으로 사람을 인식하도록 하였다. 키넥트센서가 Yaw축으로 회전하기 때문에 로봇의 제어를 위해서는 Fig. 14와 같은 로봇에 대한 사람의 상대위치 및 각도가 필요하다.

따라서 확장칼만필터 알고리즘을 통해 얻은 키넥트센서에서의 상대위치 및 각도와 키넥트센서의 Yaw축 회전 각도를 이용하여 식 (10)을 통해 사람과 로봇간의 실제 상대위치 및 각도를 계산하였다.

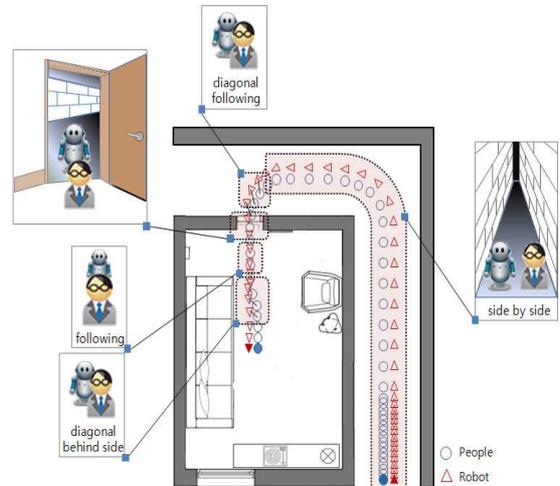
로봇에서의 사람의 상대위치 및 각도를 통해 아래 식 (11)과 같은 P제어를 수행하였다. P제어로 Table 2에 제시된 제어모드에 따른 상대거리를 유지하였다.

식 (11)의  $y_D$  는 모드에 따른  $y$ 축 상대 거리유지 값,  $\theta_D$  는 상대 각도유지 값이다. 또한,  $K$ 값은 각각의 게인 값이며  $\Delta t$ 는 제어시간 주기이다.

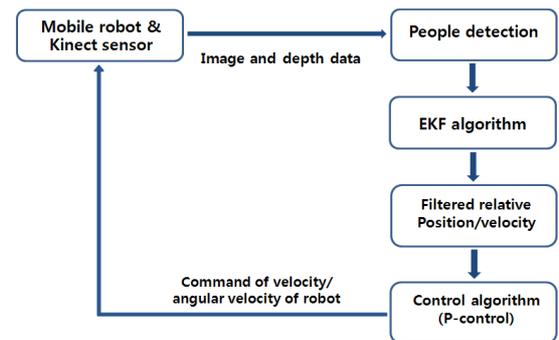
Table 2는 사람과 로봇 간에 유지해야할 상대위치 및 상대각도를 나타낸다. 현재의 로봇의 상대위치 및 상대각도와 이동모드에 따른 값을 통해 식 (11)의 과정으로 속도 및 각속도를 계산하였다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (10)$$

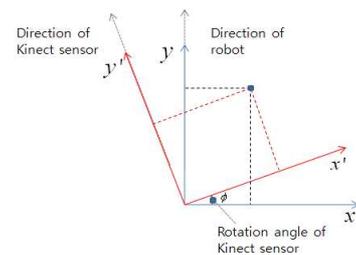
$$\begin{aligned} \text{Desired Robot velocity} &= K_v \times \frac{(O_y - y_D)}{\Delta t} \\ \text{Desired Robot angular velocity} &= K_\theta \times \frac{(O_\theta - \theta_D)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (11)$$



**Fig. 12** Robot control algorithm to move robot with people



**Fig. 13** Architecture of robot navigation control with human



**Fig. 14** Robot and kinect sensor coordinate system

4.3 동반주행 실험 결과

실내 사무실환경에서 동반주행실험을 수행하였으며 정확한 상대위치 값을 제공하는 모션캡처장비를 통해 동반주행 제어의 성능을 검증하였다.

위의 그림에서 사람의 이동 궤적이 좌우로 흔들리는 이유는 사람이 걸을 때 머리가 좌우로 조금씩 움직여서 머리의 마커도 함께 흔들리기 때문이다.

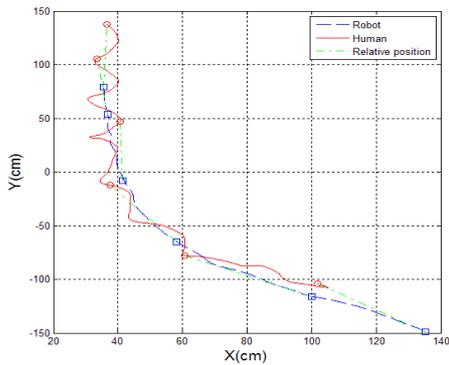


Fig. 15 Experiment result on following-mode control (Position)

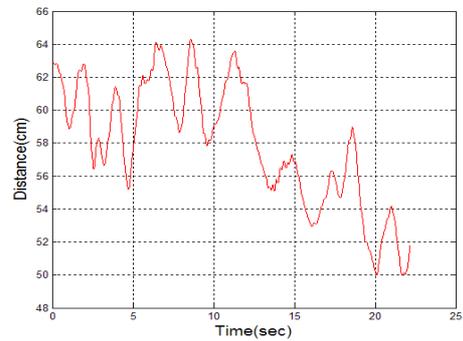


Fig. 18 Experiment result on side by side-mode control (Distance)

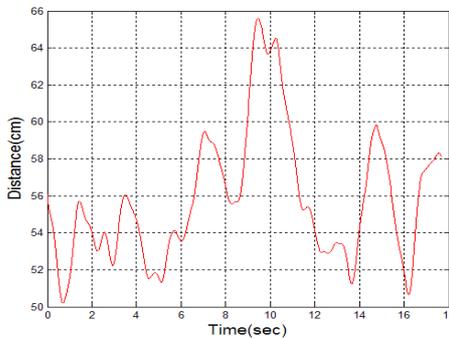


Fig. 16 Experiment result on following-mode control (Distance)

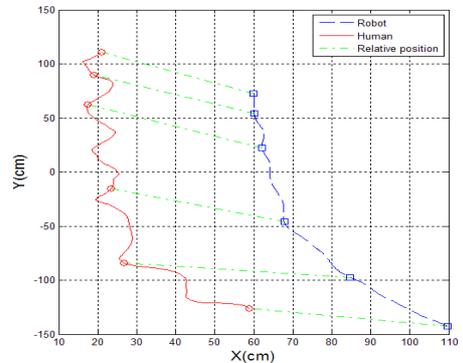


Fig. 19 Experiment result on diagonal following-mode control (Position)

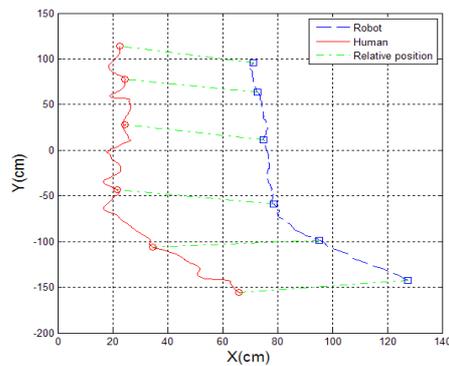


Fig. 17 Experiment result on side by side-mode control (Position)

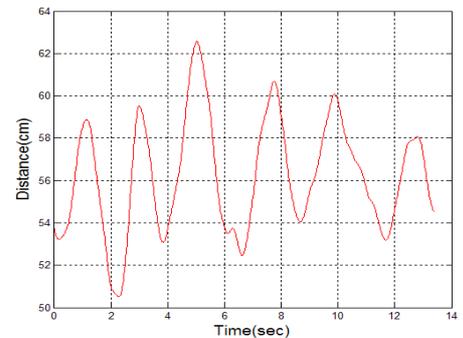


Fig. 20 Experiment result on diagonal following-mode control (Distance)

Fig. 15, Fig. 17, Fig. 19는 각각의 동반주행 모드 수행시의 로봇과 사람의 이동 궤적을 나타낸다. 그림에서 Relative position은 같은 동일한 시간에서 로봇과 사람의 위치와 연결한 선이다. Vicon을 통한 결과는 절대위치만 볼 수 있기 때문에 이 선을 통해 실제 로봇과 사람의 거리 및 위치를 확인할 수 있다.

Fig. 16, Fig. 18, Fig. 20은 동반주행시의 로봇과 사람의 직선거리를 나타낸다. following 제어

는 50~60cm, side by side 제어는 50~58.5cm, diagonal following 제어는 50~59.4cm가 제어 목표의 직선거리이다. 그림의 수치를 통해 following 제어는 최대오차 +5.7cm, side by side 제어는 최대오차 +5.6cm, diagonal following 제어는 최대오차 +3.3cm로 각각의 주행 모드에 따라 동반주행이 이루어진 것을 확인할 수 있다.

### 5. 이동모드간의 전환제어

로봇이 사람과 근접동반주행을 하기 위해서는

주변상황에 따라서 이동모드를 변화시켜가며 동 반주행을 해야 한다. 따라서 본 논문에서는 이동 모드간의 전환제어를 수행하였다.

5.1 전환제어 모드

본 논문에서는 후방 동반이동을 하다가 측면 동반이동으로 이동모드를 전환하는 전환모드1 (following → side)과 측면 동반이동을 하다가 후 방 동반이동으로 이동모드를 전환하는 전환모드2 (side → following)의 제어를 수행하였다.

5.2 전환모드 제어 알고리즘

아래 Fig. 21은 전환 모드제어 시 사람과 로봇 간의 상대거리 및 상대방향 제어목표의 시간이력 ( $f_{y_D}(t)$ ,  $f_{\theta_D}(t)$ )을 나타낸다.

전환모드의 제어는 식 (12) 같은 P-제어 방법을 사용하였으며 제어루프타임은 0.2sec 이다.

5.3 전환모드 제어 결과

실험에 사용된 모바일 로봇은 빠른 방향 전환 이 불가능하기 때문에 사람이 천천히 전진할 때 로봇이 비교적 천천히(약 10초간) 모드를 전환하 는 실험을 수행하였다.

Fig. 22, Fig. 25는 전환제어 수행 중의 로봇과 사람의 이동궤적을 나타낸 것이고, Fig. 23, Fig. 26과 Fig. 24, Fig. 27은 각각의 전환제어 수행 중 의 각도와 거리를 나타낸다.

상대방향  $\theta$ 와 상대거리  $y$ 의 그래프에 전환모 드제어의 시간에 따른 목표함수(Target function)를 함께 표시하여 비교하였다.

전환모드1의 실험 결과에서는 following mode에 서 side-by-side mode로 전환이 이루어진 것을 이 동 궤적을 통해 알 수 있으며 각도와 상대거리 그림을 통해 실제 제어 알고리즘의 시간에 따른 제어 목표에 따라 로봇이 전환제어를 수행하였음 을 확인할 수 있다.

전환모드2의 실험 결과 또한, side-by-side mode 에서 following mode로 전환이 이루어진 것을 이 동 궤적과 각도 및 상대거리 그림을 통해 확인할 수 있다.

실험결과 전환제어 시 약 10초 정도의 시간이 걸리게 된다. 좀 더 빠른 전환제어를 시도하였으 나 로봇이 빠르게 움직일 경우 키넥트센서가 많이 흔들려 사람을 추적하지 못하게 되는 문제가

생겨 실패하였다. 추후 연구에서 로봇의 구조를 변경하여 좀 더 빠른 전환제어를 연구할 예정이 다.

$$\begin{aligned} \text{Desired Robot velocity} &= K_v \times \frac{(O_y - f_{y_D}(t))}{\Delta t} \\ \text{Desired Robot angular velocity} &= K_\theta \times \frac{(O_\theta - f_{\theta_D}(t))}{\Delta t} \end{aligned} \quad (12)$$

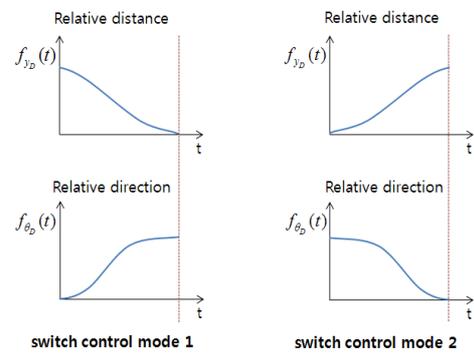


Fig. 21 Relative distance and direction target function of switch-mode control

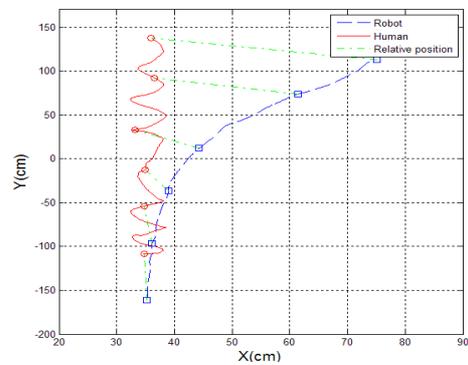


Fig. 22 Experiment result on switch-mode-1 control robot and human (Position)

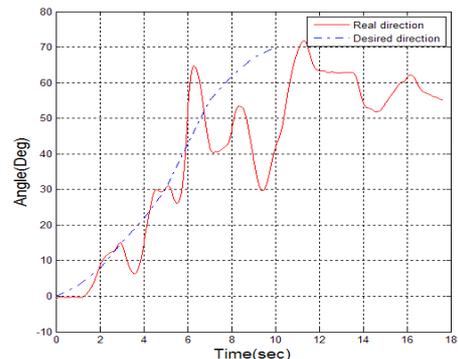


Fig. 23 Experiment result on switch-mode-1 control (relative direction  $\theta$ )

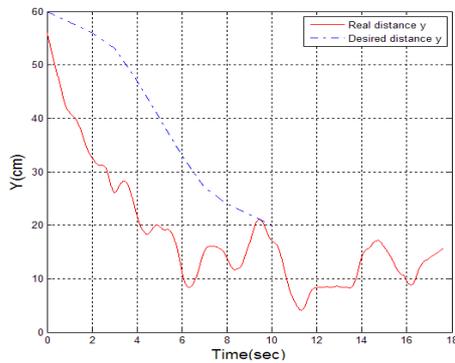


Fig. 24 Experiment result on switch-mode-1 control (relative distance  $y$ )

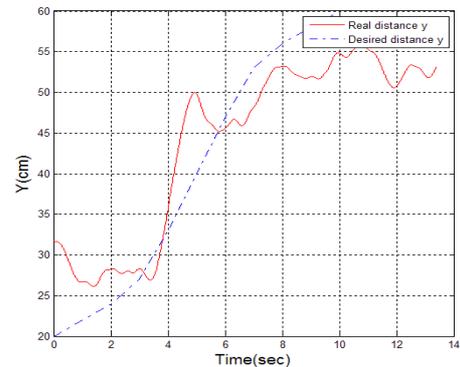


Fig. 27 Experiment result on switch-mode-2 control (relative distance  $y$ )

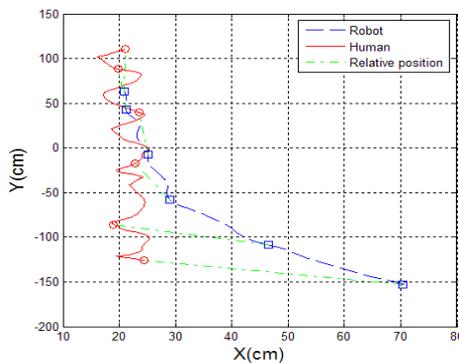


Fig. 25 Experiment result on switch-mode-2 control robot and human (Position)

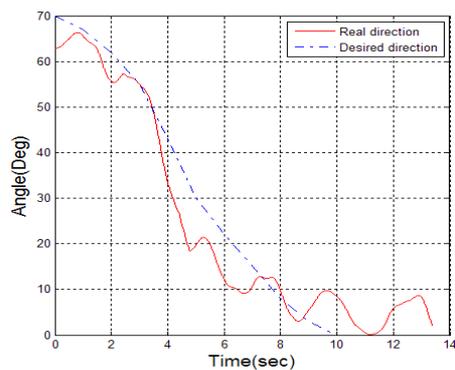


Fig. 26 Experiment result on switch-mode-2 control (relative direction  $\theta$ )

확장칼만필터를 통해 사람과 로봇간의 상대위치 및 속도를 구하는 알고리즘을 설계하였다. 알고리즘 검증을 위해 상대위치 및 속도를 추정된 결과와 모션캡처장비의 출력과 비교하였다. 또한, 확장칼만필터 알고리즘으로 추정된 상대위치 및 속도를 통해 다양한 모드의 근접동반이동 제어를 수행함으로써 사람과 로봇이 50~60cm의 근접 거리에서도 동반 주행이 가능함을 확인하였다.

또한, 로봇이 사람 후방에서 이동하다가 측면으로 이동하거나 측면에서 후방으로 이동하는 상황을 위한 이동모드간의 전환제어 실험을 수행하여 다양한 환경에서 사람과 로봇이 동반주행이 가능하도록 하였다.

하지만 모바일로봇의 속도가 빠를 때는 로봇 상단에 위치한 키넥트센서의 흔들림이 심해지는 문제로 사람을 잘 검출하지 못하는 문제로 인해서 사람이 빨리 걷는 속도(1~1.4m/s)에서는 제어하지 못하고 0.85m/s 이하의 속도에서 제어하였다.

앞으로 빠른 속도에도 상부에 부착된 키넥트센서의 흔들림이 적은 모바일로봇을 설계하여 사람이 빨리 걷는 속도에서도 제어가 가능하도록 하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 6. 결론 및 분석

본 논문에서는 저가 키넥트센서를 이용하여 사람의 두부 및 어깨를 인식하고 확장칼만필터 알고리즘을 통해 상대위치 및 속도를 추정하였다. 또한, 근접동반이동 로봇을 위한 다양한 모드의 동반이동 제어 실험과 모드간의 전환제어 실험을 수행하였다.

## 참고문헌

- (1) <http://www.care-o-bot.de/>
- (2) <http://accompanyproject.eu/>
- (3) <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>
- (4) TurtleBot, <http://www.turtlebot.com/>
- (5) Roh, H. K. and Lee, S. W., 2001. "Multiple People Tracking Using an Appearance Model Based on Temporal Color," *In Proc. Int. Conf.*

- On Pattern Recognition*, Vol. 4, pp. 643~646.
- (6) Khoshelham, K., 2011, "Accuracy Analysis of Kinect Depth Data," In ISPRS Workshop Laser Scanning, volume XXXVIII.
- (7) Dalal, N. and Triggs, B., 2005, "Histogram of Oriented Gradients for Human Detection," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR*. 177, USA, Vol. 1, pp. 886~893.
- (8) Schapire, R. E., 2002, "The Boosting Approach to Machine Learning, an Overview," In MSRI Workshop on Nonlinear Estimation and Classification. Berkeley, CA, USA.
- (9) Savtchenko, C. and Spletzer, J. R., "Sidewalk-Level People Tracking with a Low-Cost 3D LIDAR System."
- (10) Ess, A., Schindler, K., Leibe, B. and L. Gool, V., 2010, "Object Detection and Tracking for Autonomous Navigation in Dynamic Environments," *IJRR*, Vol. 29, No. 14, pp. 1707~1725.
- (11) Lee, J.-U., Sun, J.-Y. and Won, M., 2013, "Real Time Algorithm for Relative Position Estimation Between Person and Robot Using a Monocular Camera," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 12, pp. 1445~1452.