

스테레오 시각정보를 이용한 4각보행 로봇의 3차원 위치 및 자세 검출

(3-D Positioning Using Stereo Vision and Guide-Mark Pattern For A Quadruped Walking Robot)

尹 政 男*, 權 鎬 烈**, 徐 一 弘***, 卞 增 男**

(Jeong Nam Youn, Ho Yeol Kwon, Il Hong Suh, and Zeungnam Bien)

要 約

이동 로봇이 스스로 작업 공간상의 절대위치와 자세를 추정하지 못하면 주어진 경로를 따라 이동한다거나, 주어진 작업을 효율적으로 수행할 수 없다. 그러나, 바퀴로 구동되는 이동 로봇과는 달리 4각 보행로봇은 3차원 공간상의 위치와 자세정보가 요구된다. 본 논문에서는 스테레오 카메라 시스템과 특수한 조명상태가 되어 있지 않은 임의의 실제환경하에서 직접 적용할 수 있도록 고안된 표지패턴을 이용한 4각보행 로봇의 3차원 위치 및 자세검출 알고리즘을 제안하고, 실험실 환경하에서 구현하였다. 또한 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 신뢰성을 보였고, 오차 분석을 통하여 시각 처리과정에서 발생하는 오차의 영향을 줄일 수 있는 몇가지 방안들을 제시하였다.

Abstract

In this paper, the 3-D positioning problem for a quadruped walking robot is investigated. In order to determine the robot's exterior position and orientation in a world coordinate system, a stereo 3-D positioning algorithm is proposed. The proposed algorithm uses a Guide-Mark Pattern (GMP) specially designed for fast and reliable extraction of 3-D robot position information from the uncontrolled working environment. Some experimental results along with error analysis and several means of reducing the effects of vision processing error in the proposed algorithm are discussed.

*正會員, 韓國電氣通信公社 研究開發團
(Research Center, Korea Telecommunication Authority)

**正會員, 韓國科學技術院 電氣및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

***正會員, 漢陽大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ.)

接受日字: 1990年 3月 22日

I. 서 론

걸어다닐 수 있는 보행 로봇¹⁾은 계단이나 가파른 경사지를 오르내리고, 장애물을 넘고, 불연속 지형을 건널 수 있는 등, 바퀴 구동형 로봇에 비하여 활동범위의 제약이 적기때문에 산업 현장은 물론 1차 산업인 농경지에서의 작업, 3차 산업인 서비스산업 등에서 그 역할과 응용이 크게 기대되고 있다.

그러나 이동로봇에 지능적이고, 주위환경에 대

응할 수 있는 자율적인 이동기능을 부여하기 위하여는 주위 환경에 대한 정보를 수집할 수 있는 감지능력이 필수적이다. 감지능력을 구현하는 센서중에서 시각 센서는 목적지까지의 이동경로의 계획, 경로상에 존재하는 장애물의 탐지 및 회피, 그리고 목적지까지의 이동등의 로봇 항법에 있어서 가장 강력한 감지능력을 부여해 준다. 시각 기능이 부여된 이동 로봇은 바닥에 붙여 놓여 항법선(navigation line)을 감지하여, 항법선을 따라 이동할 수 있고,^[2] 길을 따라 이동한다거나,^[3] 빌딩내의 복도등을 따라 이동^[4]할 수 있다. 또한 특정한 패턴(pattern)에 대하여 고정된 동작을 발생시킴으로써^[5] 낮은 기능을 갖는 동물의 행동과 같은 기능을 발휘하기도 한다. 그리고 주위환경에 대한 3차원 공간상의 채워진 공간(occupied space)을 추정하여^[6] 주변환경에 대한 3차원 지도(map)을 만들기도 한다.

그러나 로봇의 이동경로가 월드(world)좌표계상의 공간에 주어져 있을 때, 로봇의 이동오차를 보상하면서 주어진 경로를 따라 목표점까지 이동해야 한다거나 월드 좌표계상에 정의된 작업을 효율적으로 수행하기 위하여는 월드 좌표계상의 로봇의 위치(position)와 자세(orientation)를 추정할 수 있어야 한다. 특히 보행 로봇의 경우, 바퀴 구동형 로봇이 주로 2차원 공간의 이동경로를 갖는데 비해 3차원 공간상의 위치와 자세를 추정해야 한다.

월드 좌표계상에서 보행 로봇의 작업이나 이동경로를 표현하기 위하여 그림 1과 같이 로봇 몸체를 로봇 좌표계 {R}, 로봇에 장착된 두 대의 스테레오 카메라에 의해 구성되는 좌표계를 카메라 좌표계 {C}로 설정하면 로봇 이동공간은 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 여기서 표지패턴은 카메라를 통하여 얻을 수 있는 기준정보로서 월드 좌표계상에 이미 주어진 정보들이다. 즉 로봇은 카메라를 통하여 표지패턴의 정보를 얻게되며 이 정보를 이용하여 월드좌표계상의 로봇의 위치와 자세를 검출하게 되는 것이다.

그림에서 알 수 있듯이, 월드 좌표계 {W}에 대한 3차원 공간상의 로봇의 위치와 자세는 월드 좌표계 {W}에서 바라 본 로봇 좌표계 {R}의 제차변환 행렬 ${}^W_R T$ 로 표현할 수 있음^[1]을 알 수 있다. 즉, 월드 좌표계상의 로봇의 3차원 위치와 자세를 찾는 문제는 주어진 월드 좌표계 {W}에 대한 표지패턴의 관계와 카메라를 통하여 얻은 영상정보로부터 얻을 수 있는 로봇과 표지패턴의 관계를 이용하여 ${}^W_R T$ 를 구하는 문제로 귀착시킬 수 있다.

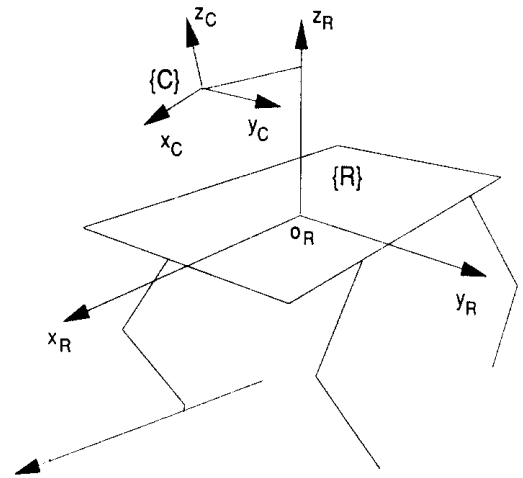


그림 1. 4각보행 로봇 좌표계 {R}과 카메라 좌표계 {C}
Fig. 1. Quadruped walking robot coordinate system {R} and camera coordinate system {C}.

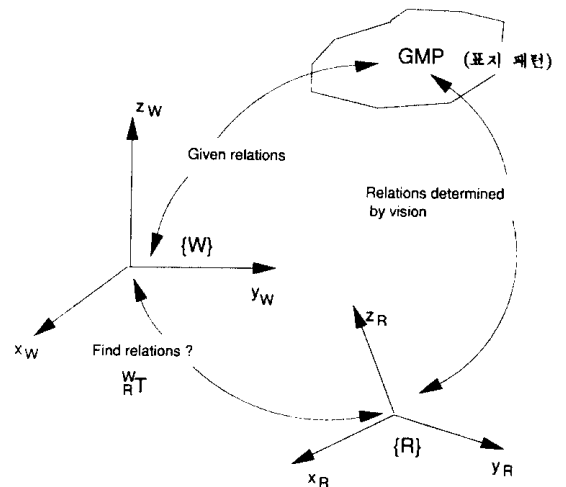


그림 2. 3차원 위치 및 자세 검출 문제
Fig. 2. Three dimensional positioning problem.

$${}^W_R T = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{자세} & \text{위치} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 $\mathbf{R} = {}^W_R \mathbf{R} = \text{Rot}(z_R, \phi_z) \text{Rot}(x_R, \phi_x) \text{Rot}(y_R, \phi_y)$
 $\mathbf{P} = {}^W \mathbf{P}_R$

그러나 다음의 수식에서 알 수 있듯이 ${}^W_R T$ 는 로봇과 카메라의 관계 ${}^R_C T$ 를 이용하면 월드 좌표계상의 카메라 좌표계의 3차원 위치와 자세를 표현하는 제차변환 행렬 ${}^W_C T$ 에서 구해질 수 있다.

$${}^wT = {}^cT \cdot {}^rT$$

이와 같이 로봇의 월드 좌표계상의 위치와 자세를 시각센서와 월드 좌표계에 주어진 기준정보로부터 검출되는 문제에 대하여 Magee와 Aggarwal^[8] 등은 한 대의 카메라와 구 형태의 물체에 두개의 원을 그린 캘리브레이션 물체(calibration object)를 사용하여, 그리고 Kabuka와 Arenas^[9] 등은 한대의 카메라와 표준패턴(standard pattern)을 사용하여 카메라의 3차원 위치를 구하는 문제를 해결하였다. 그러나 로봇의 자세를 구하는 방법은 제시되지 않았다. 바퀴 구동형 이동 로봇의 항법에 적용하기 위하여, Teray^[10] 등은 마크패턴(mark pattern)을 사용하여 로봇의 2차원 공간상의 위치와 방향을 추정하는 알고리즘을 제시하였고, 한편 로봇의 방향을 안다고 가정하여 로봇의 2차원 위치를 구하는 특징점 인식 알고리즘^[11]도 제안되었지만, 이 또한 3차원 위치와 자세를 필요로 하는 보행 로봇에는 적용할 수 없다. 위에서 언급한 패턴들은 2차원 혹은 그에 상응하는 한정된 정보들만을 추출하기 위한 제안된 것들이며, 또한 카메라로부터 얻은 영상에는 오로지 주어진 패턴만이 존재한다고 가정하고 있다는 사실에 주목할 필요가 있다. 이것은 실제에 있어 로봇의 작업환경이 잘 정의되어(well-defined)있지 않기 때문에 카메라로부터 얻은 영상에는 다른 잡음들과 패턴들이 혼합되어 있음을 의미한다. 즉 임의 환경하에서 얻은 영상정보로부터 3차원 정보를 포함하고 있는 주어진 패턴을 추출할 수 있는 다른 개선된 방법이 필요하게 된다.

로봇의 3차원 위치와 자세를 구하는 문제는 제차변환 행렬(homogeneous transformation matrix)에 기인하는^[12] 비선형 방정식을 풀어야 하기 때문에 단순하지 않다. Albero^[3] 등은 월드 좌표계에 주어진 점을 이동하는 카메라로 받아들여 반복(iteration) 기법으로 위의 제차변환 행렬을 구하는 알고리즘을 제시하였지만, 적당한 초기값이 요구되고, 수렴 시간 또한 로봇의 항법에 적합한지 보장할 수 없기 때문에 로봇의 항법에 적용하는데 문제점이 있다. 카메라의 외부 캘리브레이션 문제(exterior calibration problem)로서 한 대의 카메라를 이용하여 월드 좌표계상의 카메라의 3차원 위치와 자세를 찾는 방법이 Hung^[14]에 의해 제안되었다. 이는 공간상에 특수하게 주어진 4개의 점으로 구성된 사가형을 이용하는 방법이었지만 시뮬레이션(simulation)결과만이 제시되었고 구현되지는 않았다. 또한 이 알고리즘은 제차변환 행렬을 구하는 대신 행렬의 몇 개의 단순한 요

소들과 제한을 둔 4개의 점이 이루는 관계에서 생긴 부적절한(ill-conditioned)방정식에서 방향각을 구하였기 때문에, 유일한 해가 아니라 정의되지 않은(undefined)해를 얻게되는 경우가 발생한다. 한편, 한 대의 카메라를 사용하여 월드 좌표계상의 임의의 공간에 주어진 점들로부터 카메라의 3차원상의 위치와 방향을 구하는 좀 더 일반적인 방법이 Yuan^[15]에 의해 제안되었다. 그러나, 여전히 반복기법을 적용하고 있기 때문에 닫혀진 형태(closed form)가 되지 못하고 있으며 한대의 카메라를 사용하는 일반적인 경우에 대하여 대수학적인 해를 구하였기 때문에 스테레오 알고리즘에 적용하는 경우 불필요한(redundant)계산을 필요로 한다.

일반적으로 로봇의 항법에는 빠른 처리 시간이 요구되기 때문에 반복기법은 비합리적이 알려져 있다. Yuan의 방법을 포함한 위에서 언급한 3차원의 경우에도 카메라로 얻을 수 있는 기준정보로서 이상적인 점들만을 제안하고 있는데 주의할 필요가 있다. 이것은 앞의 2차원의 경우와 마찬가지로 실제 구현하는데 있어 잡음이 포함되어 있는 영상에서 추출이 가능하면서 로봇의 위치와 자세를 검출하는데 필요한 정보를 가지고 있는 패턴이 요구됨을 뜻한다.

본 논문에서는 4각보행 로봇에 부착된 스테레오 시각센서와 월드 좌표계에 주어진 표지 패턴을 사용하여 작업공간인 3차원 월드 좌표계상의 절대 위치와 자세를 검출하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 기존의 반복기법을 사용하지 않은 닫혀진 형태(closed form)의 선형방정식을 유도하였다. 그리고 3개의 특징점을 포함하고 있는 삼각형 형태의 표지 패턴을 제안하여 잘 정의되지 않은 임의의 환경하에서 얻은 잡음등이 포함된 영상에서 쉽게 추출가능하도록 하였다. 그리고 제안한 표지패턴은 영상처리시에 발생하는 측정오차 등에 강한 특성을 가짐을 보였다. 기존의 제안된 알고리즘들이 반복기법을 사용하고 있을 뿐 아니라 월드 좌표계에 줄어든 기준 정보들 또한 구현시의 문제점을 해결하고 있지 못하고 있는 점에 비추어 본 논문에서 제안하는 알고리즘과 표지패턴은 스테레오 시각장치를 이용한 위치와 자세 검출에 있어 실제 환경하에서의 구체적인 구현가능성을 제시하고 있다. 또한 실험을 통하여 스테레오 시각장치가 부착된 4각 보행로봇의 3차원 위치 및 자세검출에 실험실 환경하에서 신뢰성있게 적용할 수 있음을 보였다. 그리고 오차분석을 통하여 좀 더 정밀한 측정치를 얻을 수 있는 몇가지 방안을 언급하였다.

II. 표지 패턴을 이용한 3차원 위치 및 자세 검출 알고리즘

1. 3차원 위치 및 자세 방정식의 유도

(1) 위치 방정식의 유도

먼저 그림 3에서와 같이 특징점 F_i (여기서 $i=1, 2, \dots, n$)가 월드 좌표계상의 알고있는 지점에 주어졌다고 하자.

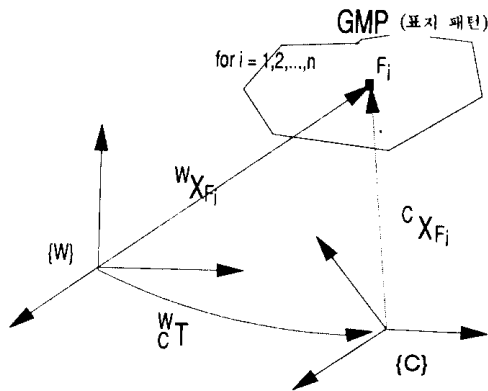


그림 3. 이상적인 특징점으로 구성된 표지패턴
Fig. 3. GMP consisted of ideal feature points.

이때 월드 좌표계 $\{W\}$ 에서 바라 본 점 F_i 의 좌표는 ${}^W X_{F_i}$ 가 된다. 또한 카메라 좌표계 $\{C\}$ 에서 바라 본 점 F_i 의 좌표 ${}^C X_{F_i}$ 가 영상 정보로부터 얻어진다고 가정하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$${}^W X_{F_i} = {}^W T \cdot {}^C X_{F_i} \quad (1)$$

여기서

$${}^W T = \begin{bmatrix} C\phi_z C\phi_y - S\phi_z S\phi_x S\phi_y & -S\phi_z C\phi_x & C\phi_z S\phi_y + S\phi_z S\phi_x C\phi_y & P_x \\ S\phi_z C\phi_y + C\phi_z S\phi_x S\phi_y & C\phi_z C\phi_x & S\phi_z S\phi_y - C\phi_z S\phi_x C\phi_y & P_y \\ -C\phi_x S\phi_y & S\phi_x & C\phi_x C\phi_y & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^W X_{F_i} = [{}^W P_{F_i} \ 1]^T = [x_{F_i}^W \ y_{F_i}^W \ z_{F_i}^W \ 1]^T,$$

$${}^C X_{F_i} = [{}^C P_{F_i} \ 1]^T = [x_{F_i}^C \ y_{F_i}^C \ z_{F_i}^C \ 1]^T,$$

$$C\phi_x = \cos\phi_x, \quad S\phi_x = \sin\phi_x.$$

식①은 로봇에 장착된 카메라의 위치 (P_x, P_y, P_z)와 자세 (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z), 즉 6개의 미지수를 포함하는 비선형 방정식이다. 이상적인 경우, 6개의 미지수에 대하여 식(1)을 풀기 위하여는 한 개의 특징점으로부터 3개의 방정식이 유도되므로 2개의 특징점만 주어지면 된다. 그러나 그러한 6개의 방정식은 비선형 방

정식이므로 수식을 풀기 위하여는 반복 기법이나 혹은 비선형 수치 해석기법을 적용해야 하기 때문에 응용하기가 어렵게 된다.

따라서 그림 4에서와 같이 표지패턴에 의해 구성된 표지패턴 좌표계 $\{G\}$ 를 도입하자.

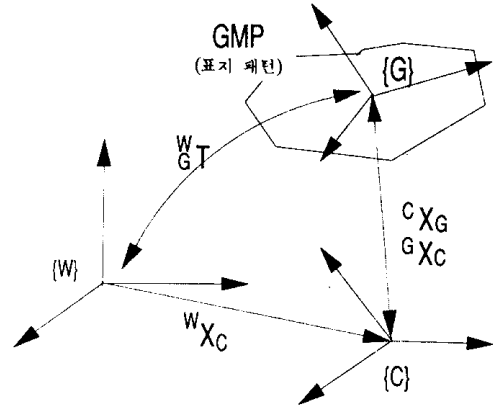


그림 4. 표지패턴 좌표계 시스템

Fig. 4. GMP coordinate system representation.

월드 좌표계 $\{W\}$ 에서 바라본 표지패턴 좌표계 $\{G\}$ 의 세차변환 행렬 ${}^W T$ 가 주어졌다고 하면 카메라 좌표계 $\{C\}$ 에서 바라본 표지패턴 좌표계 $\{G\}$ 의 원점의 좌표를 ${}^C X_G$, 그리고 $\{G\}$ 에서 바라본 $\{C\}$ 의 원점의 좌표를 ${}^G X_C$ 이라고 할 때 다음과 같은 위치 방정식을 얻을 수 있다.

$${}^W X_C = {}^W T \cdot {}^G X_C \quad (2)$$

여기서

$${}^W X_C = [{}^W P_C \ 1]^T = [x_C^W \ y_C^W \ z_C^W \ 1]^T,$$

$${}^G X_C = [{}^G P_C \ 1]^T = [x_C^G \ y_C^G \ z_C^G \ 1]^T.$$

식(2)는 첫째 ${}^W T$ 가 주어졌고 둘째 ${}^G X_C$ 를 영상 정보에 의해 구할 때 로봇의 자세와 무관하게 ${}^W X_C$ 즉 카메라의 월드 좌표계상의 3차원 위치를 구할 수 있음을 나타낸다.

(2) 자세 방정식의 유도

앞의 두 경우가 종합된 형태의 표지패턴을 생각하면 식(1)은 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} {}^W P_{F_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^W R & {}^W P_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C P_{F_i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{for } i=1, 2, \dots, n$$

$${}^W P_{F_i} = {}^W R \cdot {}^C P_{F_i} + {}^W P_C$$

여기서 ${}^W P_{F_i} - {}^W P_C$ 를 P_i 라고 표기하면

$$P_i = {}^wR \cdot {}^cP_{F_i} \text{ for } i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

i가 1, 2, 3에 대하여 식(3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$${}^wR = [P_1 \ P_2 \ P_3] \cdot [{}^cP_{F_1} \ {}^cP_{F_2} \ {}^cP_{F_3}]^{-1} \quad (4)$$

식(4)는 ${}^cP_{F_1}$, ${}^cP_{F_2}$ 및 ${}^cP_{F_3}$ 가 서로 선형 독립일 때 표지패턴과 카메라 위치의 관계에서 직접 카메라 자세를 구하는 자세 방정식이다. 결국 표지패턴의 월드 좌표계 $\{W\}$ 와의 관계 wT 와 ${}^wP_{F_i}$ 가 주어져 있고, 시각정보에 의해 cX_c 과 ${}^cP_{F_i}$ 가 구해진다면, 식(2)와 (4)에 의해 비선형 방정식을 풀지 않고 카메라의 3차원 위치 및 자세를 구할 수 있다. cX_c 과 ${}^cP_{F_i}$ 는 스테레오 시각 장치를 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 이것은 3장에서 다루도록 하겠다.

2. 제안된 표지패턴

로봇의 3차원 위치와 자세를 비선형 방정식을 풀지 않고 구하기 위하여는 2절에서 살펴본 바와 같이 표지패턴은 특징점이 3개 이상으로 구성된 좌표계라야 한다. 사실 임의의 서로 다른 위치에 존재하는 3개의 점들은 이미 그 자체로서 좌표계를 구성한다. 또한 로봇의 작업환경을 이상적인(ideal) 특수 조명 상태하에서로 가정한 지금까지의 패턴들은 임의의 환경하에서 적용할 수 없는 치명적인 문제를 안고 있다. 따라서 표지패턴은 잡음등이 포함된 영상에서 추출가능해야 한다. 효율적인 표지패턴을 구성하는데 고려해야 할 또다른 사항으로서 시각감지과정(visual sensing process)에서 측정잡음에 강해야(robust)해야 한다는 점이 있다. 특징점에서의 이러한 랜덤 잡음은 특정추출시에 평균 개념을 적용하면 감소시킬 수 있다. 또한 빠른 영상처리를 위하여 단순한 형태라야 한다는 것도 중요한 요소가 된다. 기존의 패턴들[8, 9, 10, 11]의 경우 2차원 정보검출만을 위해 고안되었기 때문에 3차원에 확장될 수 없을 뿐 아니라 임의의 작업환경하에서 패턴을 추출할 수 있는 특성을 가지고 있지 않다. 3차원에 관한 경우 [12, 13, 14, 15]에도 패턴이라기보다 이상적인 점들만으로 알고리즘을 전개하고 있기 때문에 그 구현에 있어서의 문제를 해결하고 있지 못하고 있다. 본 논문에서 제안한 이상의 조건을 만족하도록 하는 표지패턴을 그림 5에 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 제안된 표지패턴은 작은 내부와 큰 외부의 두 개의 삼각형으로 구성되어 각 삼각형의 꼭지점들의 중간점을 특징점으로 하였다. 이제 그림 10과 같은 실험실 환경하에서 제안된 표지패턴을 추출할 수 있는 판별조건을 제시하기로 하겠

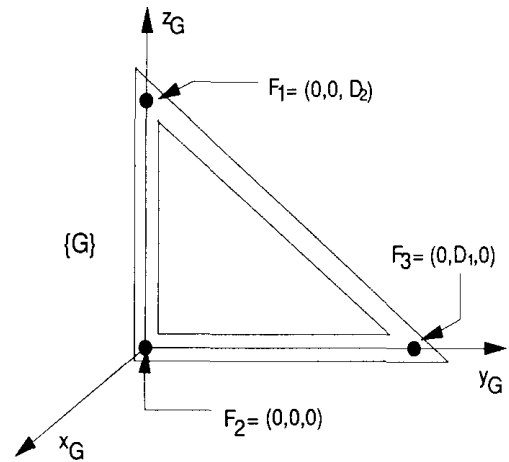


그림 5. 제안된 표지패턴
Fig. 5. Configuration of proposed GMP.

다. 카메라로부터 얻은 영상은 적당한 임대값을 적용하여 이진영상(binary)으로 변환한다. 이진(binary) 영상으로 변환된 영상에서 체인코딩¹¹⁾기법을 적용하면 쉽게 표지패턴을 추출해낼 수 있다. 체인코딩 기법은 이진 영상으로 이루어진 임의의 패턴에 대한 기하학적인 특징들(features), 예를 들면 패턴의 면적, 둘레의 길이, 그리고 무게 중심등을 빠른 시간내에 구할 수 있는 장점이 있다. 표지패턴은 내부와 외부의 두개의 삼각형으로 구성되어 있으므로 두개의 코드(code)가 생성된다.

이제 표지패턴이 카메라에 의해 완전하게 보일 수 있는 최소 거리에서, 영상 평면상의 표지패턴의 외부 삼각형의 최대 면적을 S_{max} 라고 하고, 그때의 둘레의 길이를 P_{max} 라고 하자. 그리고 로봇이 관측하고자 하는 합리적인 최대 거리에서 영상평면상의 표지패턴의 내부 삼각형의 최소면적과 둘레의 길이를 각각 S_{min} , P_{min} 라고 하면 로봇 작업공간상의 임의의 위치와 자세에서 영상평면상의 표지패턴의 두 개의 삼각형의 면적과 둘레의 길이는 위의 두 값들 사이에 한정된다. 이제 한 영상에 n개의 패턴이 존재하고 있고, i번째(여기서 $i=1, \dots, n$) 패턴의 면적을 $S(i)$, 둘레의 길이를 $P(i)$ 라고 하고 무게 중심을 $C(i) = (u_{ci}, v_{ci})$ 라고 하자. 두 개의 삼각형의 무게 중심은 이상적으로 같은 점에 존재하지만, 잡음에 의해 달라진다. 따라서 임의의 패턴들이 표지패턴일 판별조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

[표지패턴 판별조건]

표지패턴은 조건(1)과 (2)를 만족하는 코드중에서 조건(3)을 만족하는 코드 j와 k이다.

- (1) $S_{\min} \leq S(i) \leq S_{\max}$
- (2) $P_{\min} \leq P_{xi} \leq P_{\max}$
- (3) $\|C(j) - C(k)\| \leq \text{오차 한계}$

여기서 $i, j, k =$ 체인 코딩된 패턴들

오차 한계 = 실험에 의하여 결정하는 오차 마진 (margin)

특징점의 추출을 위하여 영상 평면상에서 내부 삼각형의 꼭지점들을 ($u_{\text{inner}}, v_{\text{inner}}$)라고 하고, 외부 삼각형에 대하여는 ($u_{\text{outer}}, v_{\text{outer}}$)라고 한다면 다음과 같이 특징점 F_i 에 대응하는 영상평면상의 특징점 (\bar{u}, \bar{v})를 평균적으로 얻을 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{1}{2} (u_{\text{inner}} + u_{\text{outer}}),$$

$$\bar{v} = \frac{1}{2} (v_{\text{inner}} + v_{\text{outer}}),$$

이러한 특징점 추출은 측정잡음에 강함을 알 수 있는데, 만약 두 삼각형의 꼭지점들이 평균이 제로 (zero)이며, 분산 (variance)이 σ_n^2 인 가우시안 잡음 (Gaussian noise)에 의해 오염되었다면 (corrupted), 영상평면상의 평균화된 특징점의 분산은 다음과 같이 감소함을 알 수 있다.

$$\sigma_{\bar{u}}^2 = \frac{1}{2} \sigma_n^2,$$

$$\sigma_{\bar{v}}^2 = \frac{1}{2} \sigma_n^2,$$

따라서 제안한 표지패턴은 지금까지 논의한 바와 같이 잡음이 포함된 영상정보에서의 표지패턴의 추출을 용이하게 할 아니라, 잡음이나 이진 영상으로 변환하는데 있어 임계 (threshold) 값의 변화에 민감하지 않은 알고리즘을 쉽게 구현할 수 있는 장점을 가지고 있으며 분해능을 픽셀이하 (sub-pixel) 단위로 줄이는 것을 가능하게 한다.

III. 스테레오 시각장치를 이용한 알고리즘의 구현

1. ${}^c X_{F_1}$ 의 추출

로봇에 정착된 카메라 좌표계 $\{C\}$ 에서 바라본 표지패턴의 특징점 F_1 의 좌표값 ${}^c X_{F_1}$ 는 그림6의 스테레오 평행 카메라 좌표계 시스템⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽²⁰⁾에 의하여 쉽게 얻어질 수 있다.

그림에서 처럼 두 카메라의 중심에 설정한 평행 카메라 좌표계 $\{C\}$ 공간상의 한 점 F_1 가 왼쪽과 오른쪽 영상 공간에서의 맺히는 영봉점을 각각 (u_{1l}, v_{1l})과 (u_{1r}, v_{1r})이라고 하면, $\{C\}$ 에서 바라본 특징점 F_1 의 좌표값은 다음과 같다.

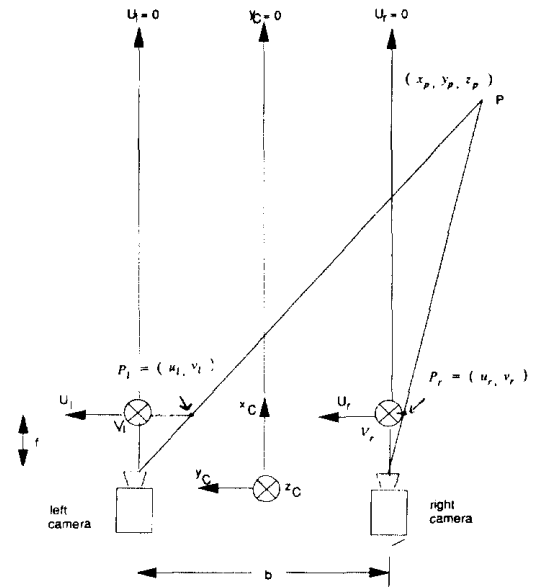


그림 6. 스테레오 평행 카메라 좌표계 시스템
Fig. 6. Stereo camera coordinate system representation.

$${}^c X_{F_1} = [{}^c P_{F_1} \ 1]^T = [x_{F_1}^c \ y_{F_1}^c \ z_{F_1}^c \ 1]^T$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{bf}{u_{1l} - u_{1r}} \\ \frac{b}{2} - \frac{x_{F_1}^c}{f} u_{1l} \\ \frac{x_{F_1}^c}{f} v_{1l} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2. ${}^c X_C$ 의 추출

표지패턴 좌표계에서 바라본 카메라 좌표계의 원점 좌표값 ${}^c X_C$ 을 구하기 위하여 그림 5에 도시한 표지패턴을 참조하여, 그림 7에 카메라 좌표계와의 관계를 세분하여 나타내었다.

여기서 $\{G\}$ 의 원점에서 $\{C\}$ 의 원점까지의 거리를 l_1 , 표지패턴의 특징점 F_1 에서 $\{C\}$ 의 원점까지의 거리를 l_2 , 그리고 F_3 에서 $\{C\}$ 의 원점까지의 거리를 l_3 이라고 하면 식(5)에서 다음을 얻을 수 있다.

$$l_1 = \sqrt{(x_{F_2}^c)^2 + (y_{F_2}^c)^2 + (z_{F_2}^c)^2}$$

$$l_3 = \sqrt{(x_{F_3}^c)^2 + (y_{F_3}^c)^2 + (z_{F_3}^c)^2}$$

$$l_2 = \sqrt{(x_{F_1}^c)^2 + (y_{F_1}^c)^2 + (z_{F_1}^c)^2}$$

그리고 l_1 과 z_c 축이 이루고 있는 경사각을 $\theta_{z,1}$ 과 y_c 축이 이루고 있는 경사각을 θ_y 라고 한다면, 삼각함수의 코사인 정리를 사용하면

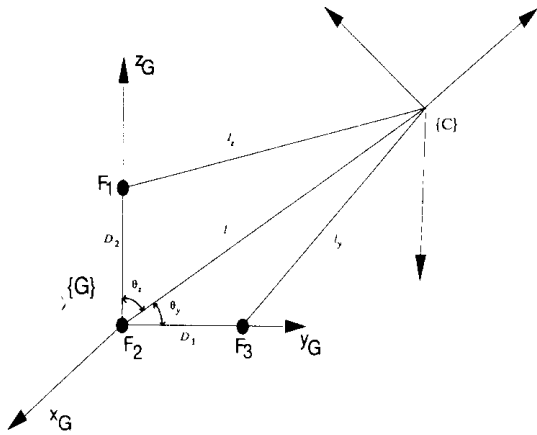


그림 7. 표지패턴 좌표계와 카메라 좌표계와의 관계
Fig. 7. Relation between GMP and camera coordinate system.

$$\cos\theta_y = \frac{l^2 + D_1^2 - l_1^2}{2 \cdot D_1 \cdot l}, \quad \cos\theta_z = \frac{l^2 + D_2^2 - l_2^2}{2 \cdot D_2 \cdot l}$$

따라서 표지패턴에서 바라본 {C}의 원점의 y와 z 값은 다음과 같다.

$$y_c^c = l \cdot \cos\theta_y \tag{6}$$

$$z_c^c = l \cdot \cos\theta_z \tag{7}$$

x_c^c 을 구하기 위하여 {G}의 원점에 중심이 있고 반경이 l인 구의 방정식을 이용하면 $x_c^c > 0$ 일 때

$$x_c^c = l \cdot \sqrt{1 - (\cos\theta_y)^2 - (\cos\theta_z)^2} \tag{8}$$

식(6)에서 식(8)를 정리하면

$${}^cX_c = [x_c^c \quad y_c^c \quad z_c^c \quad 1]^T$$

$$= \begin{bmatrix} l \cdot \sqrt{1 - (\cos\theta_y)^2 - (\cos\theta_z)^2} \\ l \cdot \cos\theta_y \\ l \cdot \cos\theta_z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

IV. 실험 결과 및 오차 분석

1. 실험 결과

시각장치가 장착된 4각 보행로봇의 외관을 그림 8에, 카메라 시스템 외관을 그림 9에 나타내었다.

시각처리 과정은 다음과 같다. 두 대의 카메라로부터 얻은 두 장의 영상을 적당한 임계값을 이용하여 이진영상으로 변환한다. 변환하기전 카메라가 보고있는 오른쪽 영상이 그림10에 보여진다. 이렇게하여 얻은 이진영상은 표지패턴과 잡음으로 이루어져

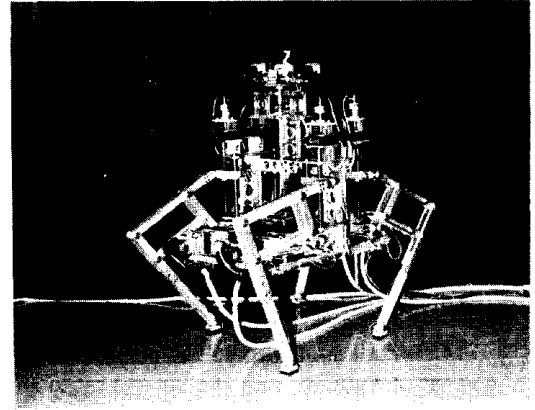


그림 8. 4각보행 로봇의 외관
Fig. 8. Photography of quadruped walking robot.

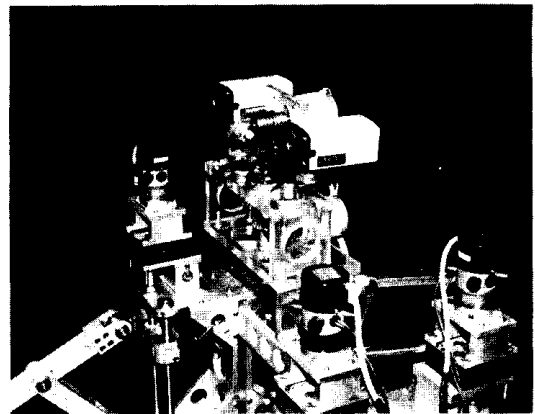


그림 9. 4각보행 로봇에 장착된 카메라 시스템 외관
Fig. 9. Photography of vision system attached to quadruped walking robot.

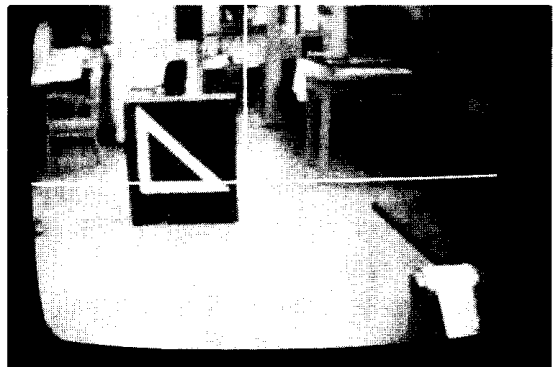


그림 10. 로봇이 보고있는 이능환경
Fig. 10. Image frame of work space seen by robot.

있게 되는데, 그림11에 보여지고 있다. 이진영상을 체인 코딩화기법^[17]을 사용하여 코딩한 후, 표지패턴을 추출한 결과가 그림12에 보여진다. 특징점을 추출하기 위하여 각각의 삼각형의 꼭지점을 꼭지점 추출기법^[18] 적용하여 찾고, 찾은 두 쌍의 꼭지점들의 평균값을 특징점으로 한다. 그림13에 그 결과가 보여지고 있는데 두 삼각형 사이에 존재하는 점들이 바로 특징점들이다.

표지패턴의 D_1 과 D_2 를 40.5cm로 하고, 월드 좌표계와 표지패턴 좌표계의 관계가 다음과 같을 때 측정된 값과 측정 오차의 평균을 표 1에 나타내었다.

$${}^W T = I \text{ or } {}^R T = {}^G T$$

여기서 I 는 단위행렬 (Identity matrix)이다.

만약 표지패턴 좌표계와 월드 좌표계의 관계가 ${}^W T$ 로 주어져 있을 경우 ${}^R T$ 는 다음과 같이 구해질수 있다.

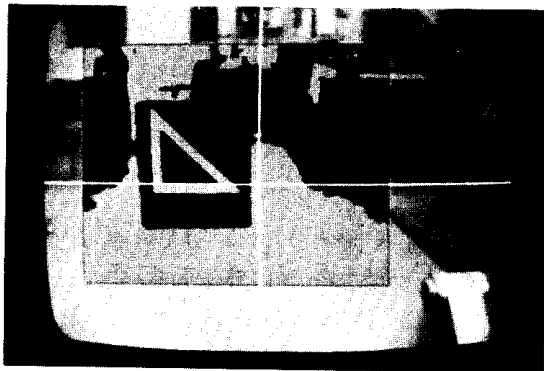


그림11. 이진 영상으로 변환된 오른쪽 영상
Fig. 11. Binary image frame of right camera.

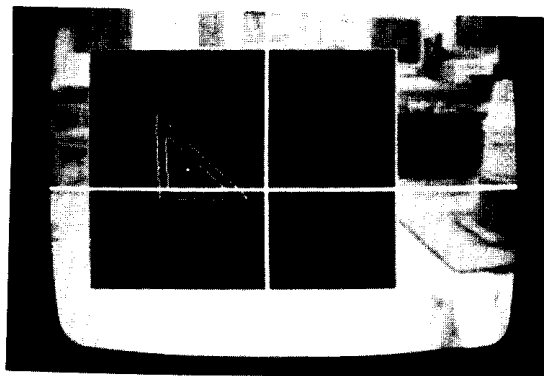


그림12. 이진 영상에서 표지패턴의 추출
Fig. 12. Extracting GMP from binary image frame.

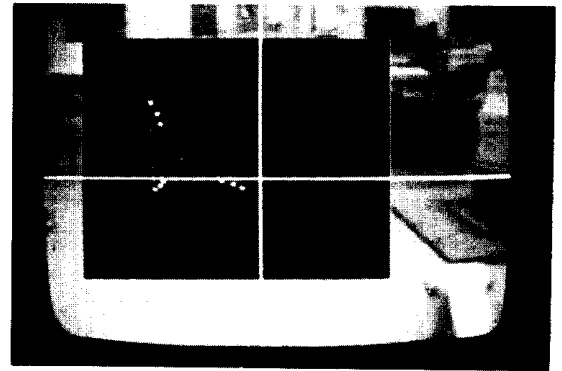


그림13. 표지패턴에서 특징점의 추출
Fig. 13. Extracting feature points frame grabbed GMP.

$${}^W T = {}^R T \cdot {}^G T$$

측정값과 실험값과의 오차는 여러가지 원인에 의해 발생한다. 그 중의 한가지 원인으로서 정확한 실제의 값을 측정하기가 곤란하기 때문에 측정값 자체가 오차를 포함하고 있는 경우이다. 그런 측면에서 표의 데이터는 충분히 신뢰성이 있다고 보여진다.

2. 오차 분석

시각 처리과정에서 발생할 수 있는 오차의 원인은 크게 다음과 같이 나누어 볼 수 있다.^[9]

1. 분해능과 잡음 (Resolution error & Noise error)
2. 영상 분할 (Image segmentation error)
3. 초점 흐림 (Focusing error-blurring error)
4. 패턴이 부착된 표면의 성질 (Material from which the pattern is constructed)
5. 내부 및 외부 캘리브레이션 (Internal and External calibration)

본 논문에서 제안된 시각 처리과정과 표지패턴은 2장에 언급하였듯이, 위의 오차를 감소시킬 수 있는 특성을 가지고 있다. 그러나 완전하게 오차를 제거한다는 것은 불가능하다. 따라서 이 절에는 카메라와 렌즈의 물리적인 특성등에서 발생하는 위와 같은 오차들이 로봇의 위치와 자세의 측정에 어떻게 영향을 미치고 있는지 분석해 보고 더욱 정확한 측정값을 얻기위한 방안을 모색해 보기로 하겠다.

(1) 로봇 3차원 위치 (P_x, P_y, P_z)

측정한 거리가 오차를 포함하고 있을 때 로봇의 3차원 위치 측정값의 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같이 l_1 와 l_2 를 정의하자. 이 때 t_1 와 t_2 는 현재 로봇의 위치가 표지패턴의 정면에서 어느 정도 벗

표 1. 검출된 3차원 위치 및 자세 정보

Table 1. Measured and estimated 3-D position and orientation data.

Experiment Results												
unit (cm, degree)												
	Real Value						Experiment Value					
	P _x	P _y	P _z	φ _x	φ _y	φ _z	P _x	P _y	P _z	φ _x	φ _y	φ _z
1	180	0	17	0	0	180	190.3	2.3	26.53	-0.7	6.96	173.7
2	180	90	17	0	0	-165	186.3	78.6	14.29	-1.4	4.76	-163.6
3	160	-60	17	0	0	160	159.3	-64.6	6.9	2.12	-2.2	151.7
4	210	20	47	-15	0	180	214.0	13.13	49.03	-14.5	2.9	173.15
5	210	90	47	-15	0	-160	163.6	91.4	60.9	-13.8	4.6	-161.6
6	180	0	75	0	15	180	185.83	0.4	73.2	1.7	17.47	176.4
7	180	-35	75	0	12	160	186.5	-37.4	72.7	-0.3	11.1	163.6
8	200	-90	75	0	7	150	201.0	-85.2	54.3	-5.79	4.95	153.1
9	160	65	75	0	15	-160	176.4	61.3	55.4	5.6	12.5	-164.0
10	140	100	75	0	10	-140	145.3	95.0	50.0	3.1	10.3	-151.4

Absolute Error unit (cm, degree)

	ΔP _x	ΔP _y	ΔP _z	Δφ _x	Δφ _y	Δφ _z
Average	6.2	4.46	12.0	2.27	2.27	5.4
standard dev.	4.12	2.91	9.3	1.8	1.9	3.1

(D₁ = D₂ = 40.5cm, b = 21.5cm, f = 8mm)

어나 있는지를 말해주는 척도가 된다.

$$l_y = l + t_y, \quad l_z = l + t_z$$

여기서 $-D_1 \leq t_y \leq D_1, \quad -D_2 \leq t_z \leq D_2$

여기서 $\mathbf{T} = \mathbf{I}$ 일 때 위의 정의를 이용하여 식(2)를 다시 정리하면

$$P_y = \frac{D_1^2 - 2 \cdot l \cdot t_y - t_y^2}{2 \cdot D_1}, \quad P_z = \frac{D_2^2 - 2 \cdot l \cdot t_z - t_z^2}{2 \cdot D_2}$$

P_y와 P_z는 같은 형태의 수식이므로 P(l, t)를 다음과 같이 정의하자.

$$P(l, t) \equiv \frac{D^2 - 2 \cdot l \cdot t - t^2}{2 \cdot D} \tag{10}$$

이제 l과 t의 측정에 오차 Δl와 오차 Δt가 발생하였다고 한다면 측정 오차 E는 다음과 같을 것이다.

$$E \equiv P(l, t) - P(l + \Delta l, t + \Delta t)$$

$$= \frac{2 \cdot (\Delta t) \cdot l + 2 \cdot (\Delta l) \cdot t + 2 \cdot (\Delta l) \cdot (\Delta t) + 2 \cdot (\Delta t) \cdot t + (\Delta t)^2}{2 \cdot D}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} E = \frac{\Delta l \cdot t}{D} \tag{11}$$

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} E = \frac{2 \cdot (\Delta t) \cdot l + 2 \cdot (\Delta t) \cdot t + (\Delta t)^2}{2 \cdot D} \tag{12}$$

따라서 식 (11)과 (12)에서 알 수 있듯이 로봇의 위치의 P_y와 P_z는 첫째, t와 l이 작을수록 절대 오차가 적어진다. 이것은 포지패턴의 정면으로 갈수록, 그리고 포지패턴에 가까이 다가갈수록 오차가 감소하게 됨을 말한다. 또한 둘째로, 오차 발생이 Δl보다 Δt에 더욱 심하게 영향받고 있음을 알 수 있다. 이것은 3개의 특징점중에 한 값의 거리가 정확하게 측정 되더라도, 다른 특징점에 대한 거리 측정값이 오차를 포함하고 있으면 전체적인 위치오차가 증가함을 말한다. 따라서 전 영상 평면에 대하여 비선형성이 심하지 않도록 하는 카메라의 내부 캘리브레이션(internal calibration)이 중요하다. 그리고 포지패턴의 크기가 증가할수록 오차가 감소하는 것은 당연하다.

로봇 위치 P_x를 분석하기 위하여 카메라에서 얻은 영상정보에 임의의 픽셀(pixel)단위의 오차가 포함되었다고 할 때 초점거리 f와 위치등의 변수에 의해 측정값이 어떻게 영향받게 되는지 살펴보기로 하자. 먼저 오차가 포함되어 있지 않을 경우 포지패턴의 특징점 F_i에 대하여 시각치리에서 얻은 (u, v, d)의 픽셀단위의 값을 (u_{ei}, v_i, d_i)이라고 하고, 여기에 (u_{ei}, v_{ei}, d_{ei})만큼의 오차가 포함되어 있는 경우 발생하는

오차의 값 E는 실험을 통하여, 근사적으로 짐작할 수 있다. E=E₁일 때 초점거리 f와 로봇 위치에 따른 P_x 영향을 그림14에 보였다.

$$E_1 = \begin{bmatrix} u_{e1} & u_{e2} & u_{e3} \\ v_{e1} & v_{e2} & v_{e3} \\ d_{e1} & d_{e2} & d_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

P_x의 경우도 P_y와 P_z처럼 초점거리 f가 클수록, 그리고 표지패턴의 중심쪽으로 접근할수록 오차가 감소함을 알 수 있다. 따라서 P_x의 경우도 앞의 분석에서 얻었던 것과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(2) 로봇 3차원 자세 (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z)

E=E₂일 때 초점거리 f와 f=8mm 일때의 로봇

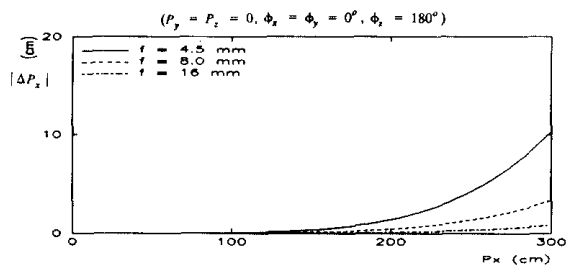
위치에 따른 자세 오차 ϕ_x 의 영향을 그림15에, ϕ_y 의 영향을 그림16에, 그리고 ϕ_z 의 영향을 그림17에 나타내었다.

$$E_2 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

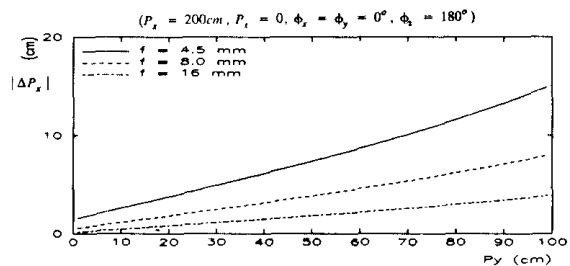
자세 측정에 있어서도 역시 초점거리 f가 클수록 오차량이 감소함을 알 수 있다. 그리고 f=8 mm의 렌즈에 대하여 로봇 위치에 따른 자세 오차의 영향을 보면 표지패턴에서 멀어질수록 오차가 증가하고 있다. 또한 그림에서 특징점 F₁의 측정치 (u₁, v₁, d₁)가 서로 같은 방향의 오차를 갖는 경우에 오차가 상쇄되는 모양을 보여주고 있듯이 오차의 방향에 따라 그 영향이 달라지고 있는 것도 주목할 만하다.

(3) 오차 분석의 결론

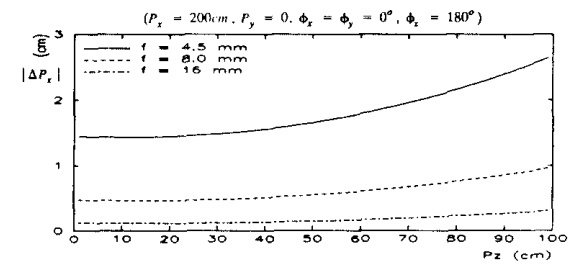
시각처리 과정에서 발생하는 측정 오차에 대한 위치와 자세값의 영향을 최소화 하기위하여, 지금까지의 오차 분석을 정리하면



(a)



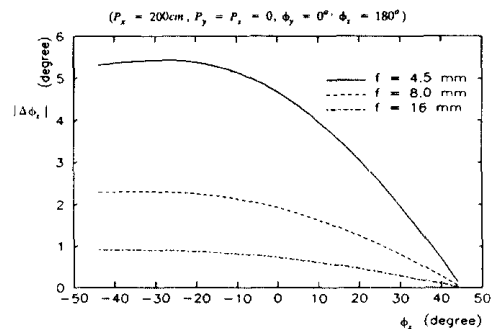
(b)



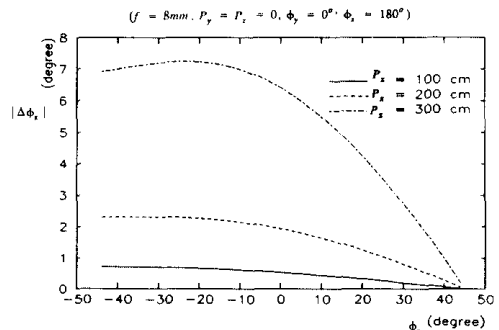
(c)

그림14. 초점거리 f와 로봇 위치에 따른 P_x의 오차 영향

Fig. 14. Variation of R_x's error with change of focal length and robot position.



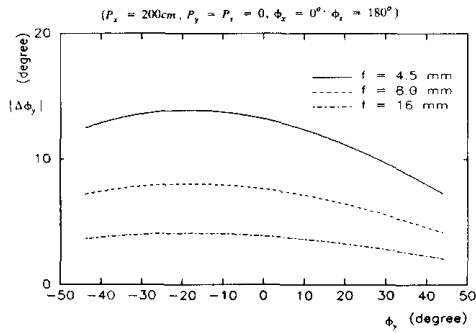
(a)



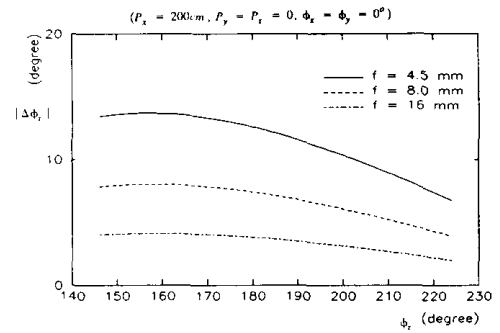
(b)

그림15. 초점거리 f와 로봇 위치에 따른 ϕ_x 의 오차 영향

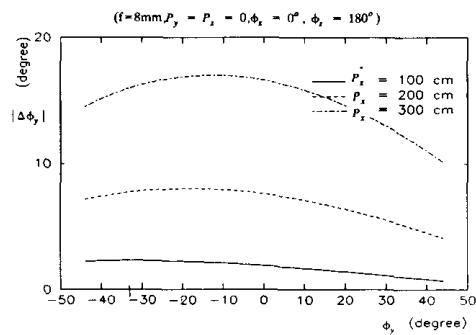
Fig. 15. Variation of ϕ_x 's error with change of focal length f and robot position.



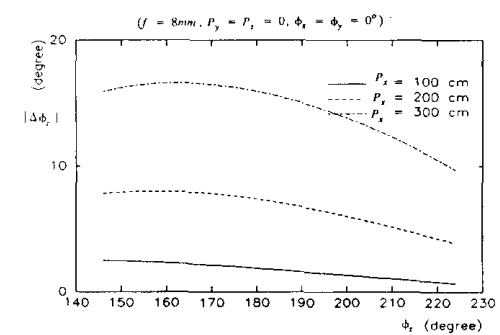
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 16. 초점거리 f와 로봇 위치에 따른 ϕ_y 의 오차 영향
 Fig. 16. Variation of ϕ_y 's error with change of focal length f and robot position.

그림 17. 초점거리 f와 로봇 위치에 따른 ϕ_z 의 오차 영향
 Fig. 17. Variation of ϕ_z 's error with change of focal length f and robot position.

- a. 초점거리가 가변 가능한 자동초점조절 (autofocusing) 렌즈를 사용한다.
- b. 표지패턴의 정면에서 측정할수록 절대 오차가 감소한다.
- c. 영상 평면의 중심근처에서 측정하면 발생하는 오차에 덜 민감하다. 즉 카메라를 회전시켜 표지패턴을 영상의 중심에 오도록 하면 오차의 영향을 줄일 수 있음을 말한다.
- d. 표지패턴의 크기, 즉 D_1 과 D_2 가 클수록 오차의 영향을 줄일 수 있다.
- e. 3개의 특징점의 오차가 서로 다른 방향으로 발생하지 않도록 카메라의 캘리브레이션 (calibration)이 중요하다.

V. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 4각보행 로봇이 월드 좌표계에 주어진 경로를 따라 이동오차를 보상하면서 목적지까지 이동하기 위해서, 혹은 월드 좌표계에 정의된 작업들의 효율적인 수행을 위하여 월드 좌표계상

의 로봇의 3차원 위치와 자세를 검출하는 알고리즘을 제안함으로써 보행 로봇에 시각기능을 부여하였다. 특히 기존의 비선형 수치해석 기법의 문제점을 해결하기 위하여 스테레오 카메라와 시각장치에 의해 인식되어질 수 있는 기준 정보로서의 월드 좌표계에 주어진 표지패턴을 사용하여, 닫혀진 형태 (closed form)의 3차원 위치와 자세방정식을 유도하였다. 또한 세 개의 특징점이 직교좌표계를 구성하고 있는 본 연구에서 제안한 표지 패턴은 특수한 조명장치등이 있지 않은 실제 로봇의 작업환경에 직접 적용할 수 있고, 시각 처리과정에서 발생할 수 있는 잡음등의 영향에 강하도록 (robust) 설계되었다. 실험 결과에서 검출된 위치와 자세 측정값은 로봇 형법에 충분히 적용할 수 있을만큼 신뢰성이 있음을 보였고, 오차 분석을 통하여 좀 더 정밀한 측정값을 얻을 수 있는 몇가지 방안을 또한 언급하였다.

본 연구를 보다 발전시키기 위해서는 좀 더 정확한 측정값을 얻기위한 방안으로서 자동초점 조절렌즈를 사용한 알고리즘의 구현, 그리고 공간상에 임

의 위치 존재하는 3개의 특징점으로부터 로봇의 3차원 위치와 자세를 검출해낼 수 있는 일반적인 알고리즘들에 관한 연구들이 수행되어야 할 것이다. 그리고 3차원 항법시에 여러개의 표지 패턴들이 필요하게 될 것이고 그 때 각각의 표지패턴을 어떻게 구별할 것인가하는 문제도 해결해야할 과제가 될 것이다.

參 考 文 獻

[1] 이승하, "힘 감지기를 이용한 4각보행 로봇의 미지 지형 보행제어," KAIST 석사학위 논문, 1990.

[2] E.S. Mckey, K.C. Drake and R.M. Inigo, "Range measurements by a mobile robot using navigation lines," *Proc. of IEEE Int. Conf. on R&A*, p. 140-149, 1984.

[3] A.M. Waxman, J.L. Moigine and B. Srinivasan, "Visual Navigation of Roadways," *Proc. of IEEE Int. Conf. on R&A*, pp. 862-867, 1985.

[4] E. Tsuji, Y. Yagi and M. Asada. "Stereo vision and navigation within building," *Proc. of IEEE Int. Conf. on R&A*, North, Carolina, U.S.A., pp. 1725-1730, 1987.

[5] Hideo Mori and Yukio Chino, "Mobile robot HARUNOBU-4 for Outdoor Environment-Stereotyped motion by sign pattern," *Proc. of IEEE Int. Conf. on R&A*, 1988.

[6] Arnaud R. de Saint Vincent, "Visual Navigation for a Mobile Robot: Building a Map of the Occupied Space from Sparse 3-D Stereo Data," *Proc. of IEEE Int. Conf. on R&A*, pp. 1429-1435, 1985.

[7] 이정수, "로봇의 작업에 응용 가능한 물체 인식을 위한 스테레오 알고리즘," KAIST 박사학위 논문, 1989.

[8] M.J. Magee and J.K. Aggarwal, "Determining the Position of a Robot Using a single Calibration object," *Proc. of First IEEE Conf. on R&A*, pp. 140-149, 1984.

[9] M.R. Kabuka and A.E. Arenas, "Position Verification of a Mobile Robot Using Standard Pattern," *IEEE Journal of R&A*, vol. RA-3, no. 6, 1987.

[10] Kouichi Teraya, Chie Kasuya "Determination of the position of a Freely Moving robot Vehicle by means of sensing a Mark Pattern," *IROS*, '89.

[11] 조동권, "시각정보를 이용한 이동로봇의 항법," KAIST 석사학위 논문, 1989.

[12] K.S. Fu, R.C. Gonzalez and C.S. G. Lee, "Robotics," McGraw-Hill Book Company, 1988.

[13] Alberto Izaguirre, Pearl Pu & John Summers, "A New Development in camera calibration Calibrating a Pair of Mobile Cameras," *Proc. IEEE Conf. on R&A*, pp. 74-79, 1985.

[14] Y. Hung, P-S. Yuh and D. Hurwood, "Passive ranging to known planner point sets," *Proc. IEEE Conf. on R&A*, pp. 80-85, 1985.

[15] JOSEPH S-C and YUAN, "A General Photogrammetric Method for Determinig Object Position and Orientation," *IEEE Trans. on R&A*, vol. 5, pp. 129-142, 1989.

[16] John J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics & Control," Addison-Wesley Publishing Company.

[17] Herbert Freeman, "Computer Processing of Line-Drawing Images," *Computer Surveys*, vol. 6, no. 1, March 1974.

[18] A. Rosenfeld and E. Johnston, "Angle detection on digital curves," *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-22, Sept. 1973.

[19] Li Jin-Cheng and Yuan Bao-Zong, "Feature-Based Motion Stereo Matching," *Int. IEEE Conf. on R&A*, 1987.

[20] Y.C. Kim and J.K. Aggarawl, "Positioning Three-Dementional Objects using Stereo Images," *IEEE Journal of R&A*, vol. RA-3, no. 4, Aug. 1987.