

Stereo Vision을 이용한 Wheeled Mobile Robot의 선행물체 추종제어

윤재상, 최경진, *문종우, 박종국
경희대학교 전자공학과, *부산정보대학교 디지털자동화정보과
전화 : 031-201-2957 / 핸드폰 : 016-779-3542

Following Control of Wheeled Mobile Robot Using Stereo Vision Sensor

Jae Sang Yoon, Kyung Jin Choi, Jong Woo Moon, Chong Kug Park
Dept. of Electronic Engineering, Kyunghee University
E-mail : ep_rom74@hotmail.com

Abstract

This paper describes the algorithm for WMR (Wheeled Mobile Robot) to follow the preceding object using stereo vision. The center point of object existing in each image is calculate. From the distance and variation of two center points, we calculates the distance from WMR to preceding object and the relative velocity of WMR. And we use the Lyapunov theory to design controller.

유지하며 로봇이 이동하기 위해 스테레오 비전을 사용해 필요한 정보를 추출하는 알고리즘을 구성하고자 한다. 먼저 본 논문에서 사용하고자 하는 이동로봇에 대한 기구학 모델링을 수행한다. 선행물체와 일정한 거리를 유지하는데 필요한 물체까지의 거리, 물체의 이동속도를 두 이미지를 이용해 추출한다. 이때 일반적으로 사용되는 정합방식이 아닌 두 영상에 존재하는 물체의 중심점의 위치 사이의 거리와 거리의 변화율로서 필요한 정보를 구하고자 한다.

I. 서론

이동로봇이 공간을 주행하기 위해서는 로봇의 위치정보, 주행공간에 대한 정보 등 많은 정보를 필요로 한다. 이러한 정보를 얻기 위해 초음파센서, 비콘, 비전센서 등 다양한 종류의 센서를 사용하며 필요에 따라서는 2개 이상의 센서를 동시에 사용하여 필요한 정보를 획득한다. 센서중 최근에 가장 많이 사용되며 많은 정보를 얻을 수 있는 것이 비전센서이다. 카메라로 입력되는 영상으로부터 주변환경에 대한 정보, 특정 대상물에 대한 로봇의 상대위치, 주행 전방의 장애물의 존재유무 확인, 주행가능한 영역판별 등 다양한 정보를 얻을 수 있다. 또한 스테레오 비전을 사용함으로써 특정 대상까지의 거리까지 측정 가능하다. 본 논문에서는 이동하는 선행물체를 일정한 거리를

II. 구륜 이동로봇의 기구학

2.1 구륜 이동로봇의 구조

본 논문에서 연구되어진 4륜 구륜 이동로봇의 좌표 할당은 그림 1과 같다. 2개의 전륜은 구동 구륜이고, 2개의 후륜은 구륜 이동로봇의 안정을 위한 보조구륜이다. 구륜 이동로봇의 방향전환은 두 개의 독립적인 구동구륜의 속도차에 의해 이루어진다.

구륜 이동로봇의 위치는 $X=(x, y, \theta)$ 로 표현된다. 여기서 (x, y) 는 제어점(controlled-point)의 직각좌표이며, θ 는 기준좌표계의 x 축에 대한 구륜이동로봇의 x 축의 방향각을 나타낸다.

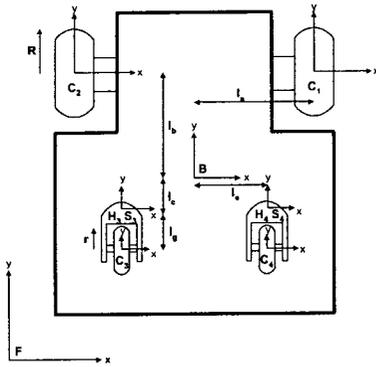


그림 1. 구륜 이동로봇의 좌표할당

2.2 기구학 모델링

기구학 모델링의 단순화를 위해 구륜이동로봇은 평지에서 이동하며, 구륜의 변형과 미끄러짐이 발생하지 않는 것으로 가정한다.

(1) 전향기구학

전향기구학에서는 엔코더에서 측정된 구륜의 속도로부터 구륜이동로봇 본체의 속도를 구한다. 구륜이동로봇의 전향기구학의해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{B_x} \\ v_{B_y} \\ w_{B_z} \end{bmatrix} = \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} -l_b & l_b \\ -l_a & -l_a \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \omega_{w_{1z}} \\ A_2 \omega_{w_{2z}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 역기구학

역기구학에서는 구륜이동로봇이 주어진 기준궤적을 추적하기 위한 구륜의 속도를 구한다. 구륜이동로봇의 역기구학은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \omega_{w_{1z}} \\ A_2 \omega_{w_{2z}} \end{bmatrix} = \frac{1}{R(l_b^2 + 1)} \begin{bmatrix} -l_a l_b & -l_b^2 - 1 & -l_a \\ l_a l_b & -l_b^2 - 1 & l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{B_x} \\ v_{B_y} \\ w_{B_z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ω 는 구륜의 속도이며, R은 구동구륜의 반지름이다. [2]

III. 제어기 구성

3.1 위치오차

본 논문에서의 제어시스템에서는 기준궤적에서의 위치오차 $P_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 에 대해 다음과 같이 정의하며 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = T_e(P_r - P_c) = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 T_e 는 기준좌표계에 대한 위치오차의 변환 행렬이다. 제어기의 목적은 위에서 정의한 오차가 0으로 수렴하게 하기 위한 것이다.

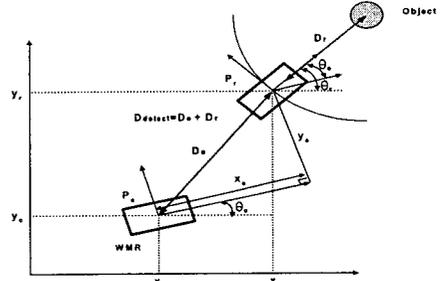


그림 2. 위치 오차

3.2 제어규칙

식 (3)에서 각각의 성분 P_e, P_r, P_c 는 모두 시간에 대한 함수이므로 시간에 대해 미분, 정리하여 시스템에 대한 기준입력 $q_r = (v_r, w_r)^T$ 과 오차를 보상하기 위해 필요한 입력 $q_e = (v(p_e, q_r), w(p_e, q_r))^T$ 으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_e = f(t, p_e) = \begin{bmatrix} w(p_e, q_r)y_e - v(p_e, q_r) + v_r \cos \theta_e \\ -w(p_e, q_r)x_e + v_r \sin \theta_e \\ w_r - w(p_e, q_r) \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)에서의 비선형 시스템에 대해 점근적으로 안정하기 위한 입력 $q = (v(p_e, q_r), w(p_e, q_r))^T$ 을 결정하기 위하여 다음의 Lyapunov 함수를 제안한다.

$$V = \frac{1}{2}(k_x x_e^2 + k_y y_e^2) + (1 - \cos \theta) \quad (5)$$

여기서 k_x, k_y 는 양의 상수이다.

시스템을 안정하게 하기 위한 입력, 즉 제어규칙은 제안된 Lyapunov 함수에 대한 다음의 조건, 즉 시스템이 안정하기 위한 조건을 만족하여야 한다.

$$V \geq 0 \text{ and } \dot{V} \leq 0 \quad (6)$$

식 (6)의 조건을 만족하는 제어법칙은 식(7)과 같이 제시될 수 있다.

제시된 제어법칙을 이용하여 제안된 Lyapunov 함수가 식(6)의 조건을 만족함을 알 수 있다. 그러나 식(6)에서의 조건은 시스템이 점근적으로 안정함을 보장하지 못

한다.

$$a = \begin{bmatrix} v(P_e, q_r) \\ w(P_e, q_r) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + y_e w_r + k_y v_r^2 - \frac{k_x}{k_x} y_e w_r - \frac{k_x^2}{k_x} y_e^2 v_r + x_e \\ w_r + k_y y_e v_r \end{bmatrix}$$

따라서 선형화된 모델과 Routh-hurwitz 안정도 판별법을 이용하여 제시된 제어법칙에 의해 시스템이 점근적으로 안정하기 위한 k_x, k_y 에 대한 조건을 구하기 위해 식(7)을 식(4)에 대입하여 평형점에 대해 선형화하면 다음과 같다.

$$P_e \triangleq AP_e = \begin{bmatrix} -1 & \frac{k_y}{k_x} w_r & 0 \\ -w_r & 0 & v_r \\ 0 & -k_y v_r & 0 \end{bmatrix} P_e \quad (8)$$

식(8)에서 행렬 A에 대해 특성방정식을 구성하고, Routh-Hurwitz 안정도 판별법을 이용하여 선형화된 시스템이 점근적으로 안정하기 위한 조건을 구하면 다음과 같다.

$$k_x \geq 0 \text{ and } \frac{k_y w_r^2}{k_x} > 0 \quad (9)$$

IV. 위치추정

이동로봇이 주행하는데 있어 중요한 것은 로봇의 본체속도다. 선행하는 물체와의 거리에 따라 현재의 이동속도를 증감시켜야 하며, 속도의 변화량은 선행물체에 대한 이동로봇의 상대속도와 같다. 따라서 선행물체까지의 거리, 선행물체의 상대이동속도를 입력된 두 이미지로부터 계산하여야 한다. 이를 위해 스테레오 비전을 사용할 경우 일반적으로 스테레오 정합을 사용한다. 스테레오 정합은 매우 많은 계산을 필요로 하기 때문에 실시간으로 정합하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 정합을 사용하지 않고 두 이미지에 존재하는 물체의 무게중심점 사이의 거리와 그 변화량을 이용해 함수식을 구성하고 이를 이용하고자 한다. 본 논문에서는 직경 10cm의 원을 테스트용으로 사용하였다. [6]

4.1 전처리과정

입력된 두 이미지에 대해서 선행물체를 분리하기 위해 thresholding을 수행한다. 분리된 물체에 대해 레이블링[3]을 수행하고 각 이미지에 존재하는 물체의 무게중심을 식 (10)에 의해 구한다.

$$CX_n = \frac{1}{m_i} \sum_{i=1}^n x_i, CY_n = \frac{1}{m_i} \sum_{i=1}^n y_i, n=1,2,\dots, k \quad (10)$$

CX_n, CY_n 는 물체의 무게 중심점이며, n 은 레이블링에 의해 할당된 번호이며, m_i 는 각각의 영상을 구성하는 픽셀의 개수, x_i, y_i 는 픽셀의 위치이다.[1][5]

4.2 거리측정

선행물체와 이동로봇 사이의 거리를 구하기 위해 전처리 과정에서 구한 각 이미지에 존재하는 물체의 무게중심점 사이의 거리와 변화량을 이용해 함수식을 구성하고 이를 이용하여 현재 입력된 이미지에 해당하는 거리값을 계산하고자 한다.

카메라로부터 특정거리(D)에 테스트 이미지를 위치시키고 각각의 카메라 이미지를 획득하고, 두 이미지에 존재하는 물체의 무게중심 사이의 거리를 구한다. 이러한 과정을 D를 변화시켜가면서 데이터를 얻은 후 무게중심 사이의 거리를 이용하여 식 (11)과 같은 함수를 구한다.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (11)$$

여기서 y 는 이동로봇과 물체사이의 거리, x 는 각 이미지에 존재하는 물체의 무게중심 사이의 거리, a, b, c 는 획득된 데이터를 이용해 구하는 계수이다.

이 함수식을 이용함으로써 현재의 이미지에 존재하는 무게중심 사이의 거리로서 물체까지의 거리를 구할 수 있다. 또한 이 자료를 토대로 오차의 범위를 구할 수 있다. [6]

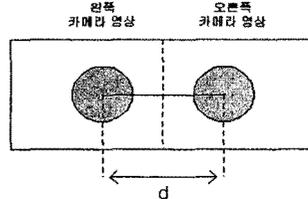


그림 3. 중심점간의 거리

4.3 속도측정

선행물체와 로봇이 일정한 거리를 유지하면서 이동하려면 선행물체와 이동로봇간의 상대속도를 알아야 한다. 시간 t_1 에서 얻어진 영상(A)의 중심점 거리를 d_1 라 하고 시간 t_2 에서 얻어진 영상(B)의 중심점간 거리를 d_2 라 하며, 각각의 두 영상이 얻어지는 시간차를 구하면 픽셀당 거리차와 시간차를 이용하여 대상물체

의 상대 이동속도를 식(12)와 같이 계산할 수 있다.

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (12)$$

V. 제어기 설계

구름이동로봇이 기준궤적을 이탈없이 경로오차를 최소화하며 신속히 추적하는 것이 제어기의 목적이다. 제어시스템의 블록선도는 다음과 같다.

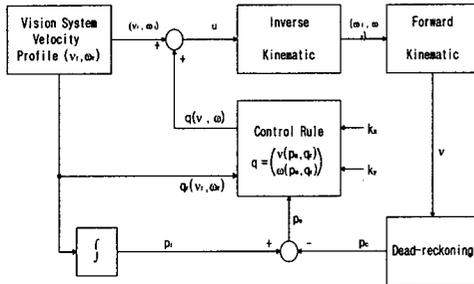


그림 4. 제어기의 블록선도

VI. 위치정보 추출 및 모의실험

6.1 시스템구성

본 논문에서 사용된 실험용 시스템은 CCD카메라는 고정된 상태에서 실험대상물을 수동으로 움직여서 영상을 얻었다. (표1)은 각각의 시스템 구성요소에 대한 사양이다.

표1. Stereo Vision System 구성요소

CCD Sensor Size	148mm×49mm×55mm	2 EA
Personal Computer	Pentium 200MMX	1 EA
Object	10Cm diameter circle	
Grabber Board	Meteor II Grabber Board	

*a reference distance : 100Cm

6.2 위치정보 추출

(1) 거리측정

표 2의 데이터에서 식 (13)의 근사화식을 유도한다. 이 방법은 앞의 이론에서도 설명했듯이 픽셀당 거리 측정값이 되므로 픽셀수에 해당하는 거리를 영상에서 거리정보를 구할 수 있다. 그림 6과 표 2는 이러한 근사화식에 의해 구해진 거리정보를 나타낸 것이다.

$$y = 0.056x^2 - 62.955x + 17790.013 \quad (12)$$

표2. 카메라 중심과 물체간의 거리측정

Pixel Numbers	Real Distance[Cm]	Image Process [Cm]	Error [Cm]
570.001	100	100.063	0.635
585.001	125	125.938	0.938
593.001	150	150.042	0.042
600.001	175	177.013	2.013
605.001	200	199.638	0.362

(2) 속도측정

본 논문은 선행물체와 구름이동로봇이 정해진 간격을 유지하기 위해 선행물체와 이동로봇간의 상대속도를 결정하게 된다. 구현하기 위한 방법은 연속적인 영상을 각각의 영상을 받아들이는 시간간격을 결정하는데 있다.

표 3. 속도

픽셀의 변화량	속도[Cm/sec]
15	4.960
8	2.645
7	2.314
5	1.653

영상이 바뀌는 시간이 1sec라 가정하고 픽셀을 거리 [Cm]로 환산하면 표 3과 같은 속도가 얻어진다. [3][4]

6.3 모의실험

모델링의 유효성과 제어 알고리즘의 효율성을 증명하기 위하여 모의실험을 수행한다.

표 4. 구름이동로봇의 재원 및 매개변수

기호	수치값	단위	내용
l _a	0.15	m	본체 폭/2
l _b	0.225	m	본체 길이/2
l _c	0.225	m	보조구름의 y변위
l _d	0.115	m	구동구름의 z변위
l _e	0.125	m	보조구름의 x변위
l _f	0.15	m	보조구름의 z변위
R	0.05	m	구동구름의 반경
r	0.025	m	보조구름의 반경

구름 이동로봇의 초기 위치는 (-0.05, 0, 0°)에 있다고 가정하고 구름이동로봇이 추적해야할 기준궤적

은 선행물체와 일직선상이며 중점은 (0.09, 1.04, 85°)이다. 모의실험에 이용된 구륜이동로봇의 제원과 사용된 매개변수는 표 4와 같다.

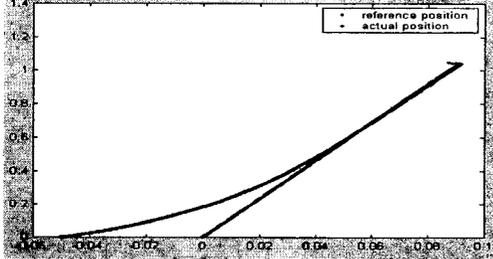


그림9. 기준이동위치와 실제위치

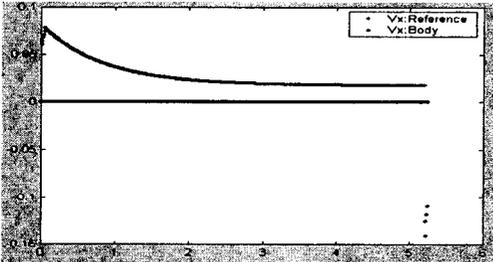


그림10. X축 기준속도와 실제본체속도

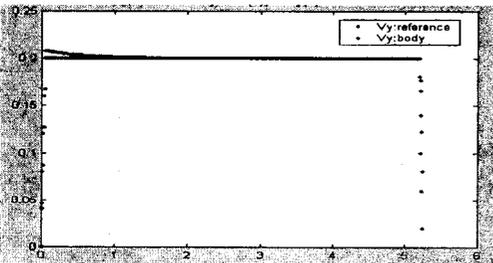


그림11. Y축 기준속도와 실제본체속도

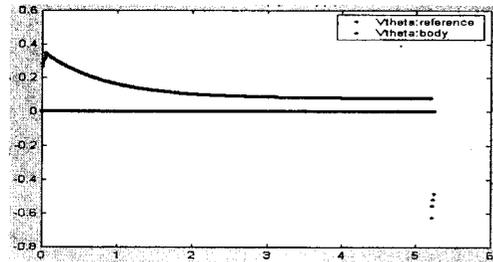


그림12. 기준각속도와 실제본체 각속도

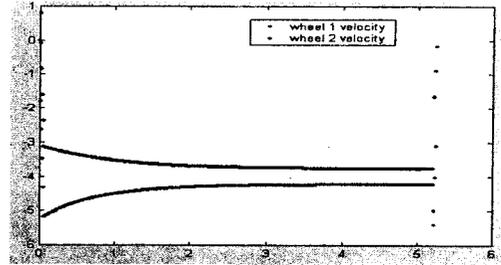


그림13. 각각의 바퀴속도

그림 9는 기준 이동위치로 실제 구륜이동로봇의 이동 위치가 수렴해가는 모습을 나타내고 있다. 또한, 그림 10~12는 각각의 좌표에서 기준속도와 구륜이동로봇의 본체속도를 나타내고 있다. 그림13은 양 구륜의 속도를 각각 나타내고 있다.

VII. 결론

본 논문에서는 이동하는 선행물체를 일정한 거리를 유지하며 로봇이 이동하기 위해 스테레오 비전을 사용해 필요한 정보를 추출하는 알고리즘을 구성했다. 이동로봇에 대한 기구학적 모델링을 수행하고, 선행물체와 일정한 거리를 유지하는데 필요한 물체까지의 거리, 물체의 이동속도를 구하였다.

안정한 경로추적을 위한 제어법칙을 구성하기 위해 Lyapunov 함수를 제시하였고, 시스템이 안정하기 위한 Lyapunov 함수에 대한 조건으로부터 제어법칙을 구성할 수 있었다. 구성된 제어법칙을 이용한 모의실험을 통해 제어기의 유용성을 입증하였다.

참고문헌(또는 Reference)

- [1] Gonzalez/Woods, "Digital Image Processing", Addison Wesley, 1993
- [2] 문종우, "2자유도 구륜이동로봇의 기구학적 보정과 궤적추적에 관한 연구", 경희대학교 박사논문, pp32~38, 2000.2
- [3] Ramesh Jain and Rangachar Kasturi and Brian G.Schunck, Machine Vision, McGRAW-HILL, 1995
- [4] 한만용, "원형 물체를 이용한 로봇/카메라 자세의 능동보정", 제어·자동화·시스템공학 논문지 제5권 제3호, 1999. 4.
- [5] 김희승, "영상인식-영상처리, 컴퓨터처리, 패턴인식, 신경망", 생능출판사, pp60~62, 1994
- [6] Ho Rim, "A Moving Tracking Algorithm for a Mobile Robot Based on 2D Image of a Line Light", 전자공학회논문집, pp12.