

이동로봇의 궤도관제기법
(NAVIGATION CONTROL OF A MOBILE ROBOT)

° 홍 문성 이 상용 한 민홍
(Mun-Seoung Hong, Sangyong Rhee, Min-Hong Han)

포항공과대학 산업공학과
(POSTECH, Dept. of Industrial Engineering)

This paper presents a navigation control method for a vision guided robot. The robot is equipped with one camera, an IBM/AT compatible PC, and a sonar system. The robot can either follow track specified on a monitor screen or navigate to a destination avoiding any obstacles on its way. The robot finds its current position as well as its moving direction by taking an image of a circular pattern placed on the ceiling.

1. 서론

유연생산 시스템의 자체운반도구로서 무인반송차는 중요한 요소이다. 이는 운전자의 도움없이 자재를 작업공간에 운반하는 시스템이다. 이의 운용방법으로는 바닥에 선을 깔거나 바닥에 화학선을 부착시키는 것들이 있다. 그러나 이런경우, 그 경로를 변경하기위하여는 바닥을 파내어 선을 다시 설치해야만 하는 비용과 시간적 번거로움을 수반한다.

이렇게 비용이드는 유도선의설치나 화학선의 부착을 제거하기위하여는 다른 유도방법의 연구를 필요로하게 된다. 새로운 방법들중에는 적외선이나 초음파를 사용하거나 복잡한 삼각법을 사용하는것들이 연구되어왔다. 최근에는 컴퓨터 비전이 이동로봇의 궤도관제를위한 기법으로 널리관심을 모으고있다. 자율적으로 항해하거나 지정되지않은 경로를 운전하기위하여는 world 좌표계에 기준한 현재의 위치를 판단하고 주행의 방향을 판단하는것이 중요하다.

많은 연구가 표준지표(standard mark)를 이용하여 위치를 판단하는 문제를 접근하였다. 표준지표는 로봇트가 움직이는 world좌표시스템의 원점과 로봇트의 위치에 대한 정보를제공하는 역할을한다. 이동로봇트의 위치를 판단하는연구는 상당히 있어왔는데 많은 연구자들중, Fukui(1981); Courtney, Magee와 Aggarwal(1984); Magee and Aggarwal(1984); 그리고 Kabuka와 Arena(1987)등이 위의 주제를다룬 연구를하였다. 한과 홍(1989)은 원형의 지표이미지로부터 얻어진 정보에 Eye Transformation을 사용하여 위치를 판단하는 손쉬운 위치판단방법을 연구하였다.

또한 로봇트의 운행관제를위한 많은연구가 있어왔다. Iyengar et al.(1986)는 Learned spatial graphs를 사용한 로봇트의 주행관계 알고리즘을 개발하였다. Kambhampati와 Davis(1986)는 이동로봇트의 경로계획의 방법을 개발하였다. Rao, Iyengar, 그리고 Weisbin(1986)는 조사되지않은 장소의 운행에대해 연구하였다.

본 연구에서는 로봇트의 경로가 결정되었을때 로봇트의 실시간 운행관제를 다룬다. 로봇트는 규정된경로에 근거한 현재의 위치를 판단하는데 카메라와 표준지표를 사용한다. 로봇트는 또한 지역적인 방해물을 피하기 위하여 초음파센서를 장치하였다.

2. 시스템의 구성.

비전에의해 운용되는 로봇트는 4개의 바퀴를가진다. 그중 둘은 스텝모터에의해 구동되고 나머지는 종동바퀴이다. 로봇트의 진행방향은 두 스텝모터의 회전속도의 차이에의하여 결정된다. 그림 1과같이 CCD 카메라를 로봇트의 중앙에 설치하였다. 카메라의 방향은 두 스텝모터에의하여 조정되고 두 스텝모터는 카메라의 초점방향이 원형의 표준지표로 향하게 하기위하여 카메라의 팬각과 틸트각을 조정한다.



그림 1. 이동로봇

바닥에있는 로봇트의 위치를 알아내기 위하여 카메라 시스템은 벽이나 천장의 정해진 위치에 부착된 표준지표의 영상을 포착한다. 본 연구에서는 그림2에서와 같이 패턴을 작성하여 천장에 부착시켰다.

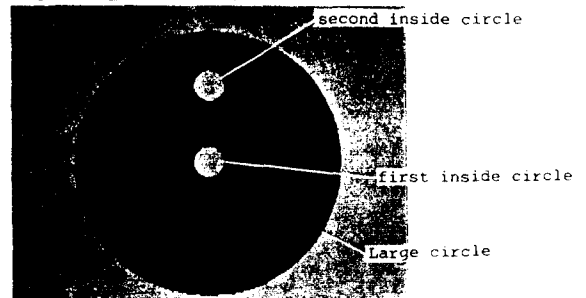


그림 2. 원형패턴

본 연구에서는 4개의 좌표시스템을 사용하였다. 첫번째 좌표시스템은 world좌표계(X_w, Y_w, Z_w)이고 원점은 원형패턴의 중심에 위치한다. 두번째 좌표계는 카메라좌표계 혹은 눈 좌표계 (X_c, Y_c, Z_c)이다. 세번째 좌표계는 화면좌표계 (X_m, Y_m)로 이미지면에서 정의되는 좌표계이다. 이 세개의 좌표계는 그림 3과 같다.

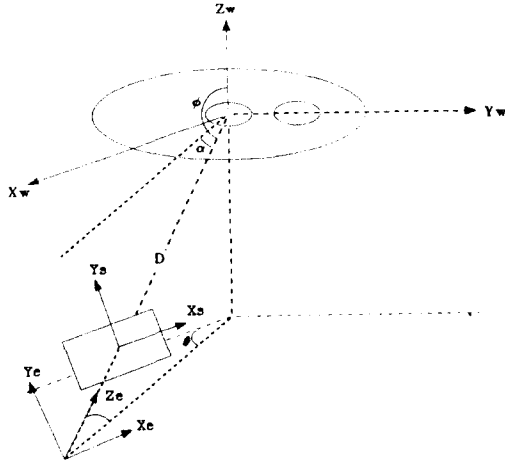


그림 3. 3 좌표계

네번째 좌표계는 로봇 좌표계로 그림 4와같이 (X_v, Y_v, Z_v)로 나타내고 Y_v 축의 양의 방향이 로봇의 진행방향을 향한다. 카메라는 Z_v 축상에 설치된다.

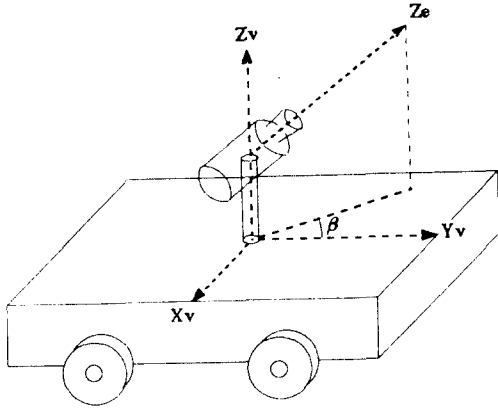


그림 4. 로봇 좌표계

패턴 이미지를 처리하고 로봇의 진행방향과 이의 위치를 계산하기 위하여 IBM/PC와 호환성이 있는 컴퓨터를 설치하였다. 컴퓨터는 로봇의 운행관계를 위하여 로봇의 속도와 진행방향을 조정하고 카메라의 팬각과 틸트각을 조정한다.

3. 위치와 진행방향의 판단.

로봇의 위치를 알기 위하여 패턴의 큰원이 화면 좌표계의 원점에 나타나야한다. 화면좌표계의 원점은 물체의 이미지를 확대하였을때 움직임이 없는 화소를 발견함으로써 결정한다. 화면좌표계의 원점에 큰원의 중심을 위치시키기 위해 그림 3에서 정의된 바와 같이 틸트각을 조정하고 그림 4에서 정의된 팬각을 조정하여 패턴의 큰원의 중심이 카메라의 시축 Z_c 를 향하게한다.

(1) 패턴 이미지의 위치.

로봇이 입이의 위치에서 패턴의 영상을 잡았을때 카메라의 시축은 world좌표계의 원점에 일치되지 않을수 있다. 그러므로 위치에 대한 정보를 패턴이미지로부터

얻어내기전에 큰원의 중심이 화면좌표계의 중심에 오도록 카메라의 팬각과 틸트각을 조정할 필요가 있다.

카메라의 각각의 각의 조정은 그림 5에서 보는바와같이 각각의 스텝모타에 적당한 펄스를 보냄으로써 할 수 있다. 그러나 문제는 조정할 각의 양을 어떻게 얻어내느냐 하는 것이다.

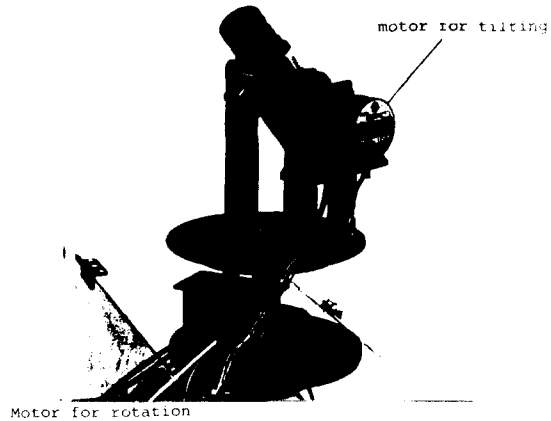


그림 5. 카메라 조정장치

화면의 바닥에 보이는 한 이미지점(그림 6에서의 점으로 보이는)을 화면의 맨위로 위치시키기 위해 필요한 카메라의 틸트각을 δ_v 라고 하자. δ_v 의 값은 그림 6에서와같이

$$\delta_v = V/f. \quad (1)$$

의해 계산될 수 있다. 여기서 f 는 화소단위로 계산된 카메라의 초점거리 (카메라렌즈로부터 이미지화면 까지의거리)이고, V 는 화면의 수직의 화소수 즉 수직해상도를 가리킨다. δ_v 의 값은 카메라의 틸트각을 측정할 수 있는 간단한 장비를 사용함으로써 기계적으로 측정될 수 있다.

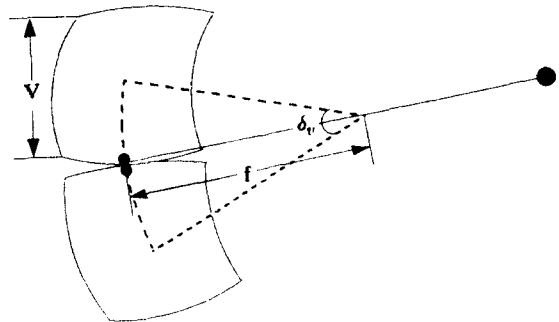


그림 6. 카메라조정의 틸트각범위

식 (1)에서보인 관계는 world좌표상의 로봇의 위치와 무관하다. 그러므로 큰 원의 중앙이 화면의 중앙에 위치하는대신 (X_m, Y_m), $y_m > 0$ 에 나타난다면 카메라는 조정각 δ_m 만큼 아래로 숙여져야한다.

$$\delta_m = \delta_v * y_m / V. \quad (2)$$

만약 $y_m < 0$ 라면 이미지를 화면의 위로 위치시키기 위하여 카메라는 $abs(\delta_m)$ 만큼 머리를 올려야한다.

비슷한 방법으로 팬조정각 δ_p 은

$$\delta_p = \delta_n * X_m / H. \quad (3)$$

δ_{α} 는 화면의 가장왼쪽에 나타난 이미지점을 오른쪽 끝으로 옮기는데 필요한 카메라의 회전각이고 h 는 수평정밀도의 수를 말한다.

δ_{α} 와 δ_{β} 는 적당한 펄스수로 변환될 수 있고 이에 대응하는 스텝모타로 보내질수 있다. 그림 5와같이 두 스텝모타는 서로 독립적으로 작동되므로 두모터는 동시에 작동될 수 있다.

(2) 위치의 계산.

World좌표계에 근거한 카메라의 위치를 결정하기 위하여, 그림 2에서와 같이 카메라의 틸트각, 팬각과 world좌표계의 원점으로부터 카메라까지의 거리 D 가 결정되어야만한다. 이 부분의 대부분은 한과 홍(1989)의 연구에 근거한다.

(2.1) 틸트각의 결정.

카메라의 틸트각은 큰 원형패턴의 이미지를 사용하여 계산될수있다. 그러나 본연구에서는 스텝모타에 보내지는 펄스수를 카운트함으로써 틸트각을 측정하는 전자적장치를 사용한다. 카운터는 카메라의 시속 Z_w 가 평행할때 0으로 된다. 카메라의 머리가 올라가면 스텝모타에 전달되는 펄스수가 카운터에 더해지고 내려가면 빼게된다. 카운터에있는 펄스수는 현재의 시각 α 가된다. 이 시각 α 로부터 틸트각이 구해진다.

$$\phi = \pi/2 + \alpha. \quad (4)$$

카메라의 팬각은 그림 3에서와같이 두개의 카운터를 사용하여 비슷한 방법으로 측정된다. 처음에 카메라는 카메라의 시속이 로봇의 진행방향과 같게, 즉 팬각을 0으로 만든다. 카메라가 반시계방향으로 돌면 그 펄스수가 더해지고 시계방향으로 돌면 펄스수만큼 뺀다.

(2.2) 팬각의 결정

패턴이미지가 얻어졌을때 화면에서의 두번째 내부원의 위치는 카메라의 위치에 따라 달라질것이다. 그림 7-a는 1사분면에서본 패턴의 이미지이다. 그림 7-b는 2사분면, 그림 7-c는 3사분면 그리고 그림 7-d는 4사분면에서본 패턴의 이미지이다.

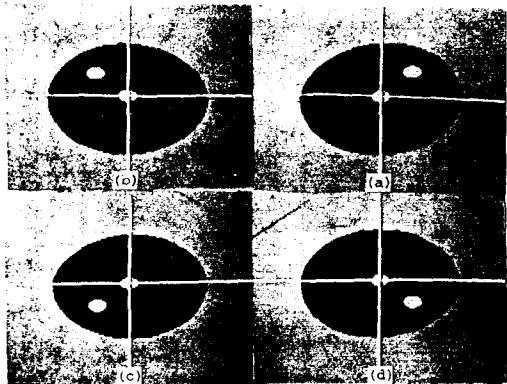


그림 7. 각 상한에서 포착한 이미지

각각의 그림들을 보면 두번째 내부원의 중심의 위치가 카메라가 영상을 포착한 world좌표계의 사분면과 일치함을 알 수 있다. 이러한 정성적인 결과가 카메라의 팬각을 결정할 수 있게한다.

팬각의 결정에 Eye Transformation을 사용하였다.

$$\begin{aligned} X_w &= X_w \sin(\theta) + Y_w \cos(\theta). & (5) \\ Y_w &= -X_w \cos(\theta) \cos(\phi) - Y_w \sin(\theta) \cos(\phi) + Z_w \sin(\phi). & (6) \\ Z_w &= -X_w \cos(\theta) \sin(\phi) - Y_w \sin(\theta) \sin(\phi) - Z_w \cos(\phi) + D. & (7) \end{aligned}$$

Eye좌표계와 화면좌표계와의 관계는 아래와같다.

$$\begin{aligned} X_w &= X_w * (f/Z_w). & (8) \\ Y_w &= Y_w * (f/Z_w). & (9) \end{aligned}$$

펄스 카운터로부터 계산된 틸트각을 계산하기위하여 world좌표계에 근거한 카메라의 팬각은 단순히 위의 식들을 조합함으로써 계산될수있다. 패턴의 두번째 내부원의 중심이 world좌표계의 알고있는 점(0, y_w , 0)에 있고, 이 점에 대응하는 화면상의 점이 (x_w, y_w)에 있다면, 그들은 다음과 같은 관계를가진다.

$$\begin{aligned} x_w &= y_w * \cos(\theta). & (5') \\ y_w &= -y_w * \sin(\theta) * \cos(\phi). & (6') \\ z_w &= -y_w * \sin(\theta) * \sin(\phi) + D. & (7') \\ x_w &= x_w * (f/z_w). & (8') \\ y_w &= y_w * (f/z_w). & (9') \end{aligned}$$

식(6')을 식(5')으로 나누고 이를 식(8')과 (9')에 대입하여 정리하면 아래와같다.

$$\begin{aligned} y_w/x_w &= -\tan(\theta) * \cos(\phi) \\ &= y_w/x_w. & (10) \end{aligned}$$

(x_w, y_w)가 알고있는 화면에 나타난 두번째 내부원의 중심이므로 카메라의 팬각 θ 의 식(10)으로부터 계산될수있다.

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan(-\text{abs}(y_w/x_w)/\cos(\phi)), & \text{if } q=1 \\ &= -\arctan(-\text{abs}(y_w/x_w)/\cos(\phi)) + \pi, & \text{if } q=2 \\ &= \arctan(-\text{abs}(y_w/x_w)/\cos(\phi)) + \pi, & \text{if } q=3 \\ &= -\arctan(-\text{abs}(y_w/x_w)/\cos(\phi)) + 2\pi, & \text{if } q=4 \end{aligned} \quad (11)$$

(q 는 두번째원의 중앙이 나타난 화면의 사분면임)

(2.3) D의 결정

이미지D는 카메라로부터 패턴까지의 높이가결정되면 알수있다. 틸트각 ϕ 를 알고있음으로 D는 삼각법의해와 다음과같이 계산된다.

$$D = h/\sin(\phi). \quad (12)$$

이러한 sphere좌표(ϕ, θ, D)로부터 로봇의 world좌표(x_w, y_w, z_w)는 다음과같이 계산된다.

$$\begin{aligned} x_w &= D * \sin(\phi) * \cos(\theta). & (13) \\ y_w &= D * \sin(\phi) * \sin(\theta). & (14) \\ z_w &= D * \cos(\phi). & (15) \end{aligned}$$

(3) 진행방향의 결정

로봇의 위치를 알고 있으므로 그 지점에서의 로봇의 진행방향은, 그림 4에서와같이 Z_w 축을 X_w, Y_w 평면에 투사시켜서 생긴선분으로부터 시계방향으로 회전각 β 로서 결정된다.

4. 로봇의 위치의 모니터

로봇가 운행하기위하여는 로봇의 위치가 주기적으로 체크되어야한다. 표준목표의 영상올잡는 간격은 주어진 경로를 따라가는 정확도를 결정한다. 만약 보다 정확함을 요구한다면 그 주기는 상당히 짧아져야 할 것이다.

바닥이 주어진 규격을가진 직육면체이고, 패턴이 알고있는위치, 천정의 중앙부에 위치한다고 가정하자. 바닥의 지도는 화면에 축소된크기로 보여질수있고, 그림 8에서와같이 로봇의 진행행로가, 그려진 바닥의 명시된다.

로봇의 현재의 위치와 이의 진행방향이 화살표로 화면에 보여진다. 화면으로부터 우리는 로봇가 주어진 경로로부터 얼마나 떨어져있고 그 방향이 요구되는 방향과 얼마나 차이가 나는지를 알수있다. 만약 현재의 진행방향이 잘못되어져있다면 그 방향은 수정되어야한다. 그림 8에서보듯이 로봇의 현 위치로부터 경로상의 가장 가까운지점(경로상에 십자표시된 점) 보여지고 그 지점으로 가기위해 요구되는 변화각이 보여진다.

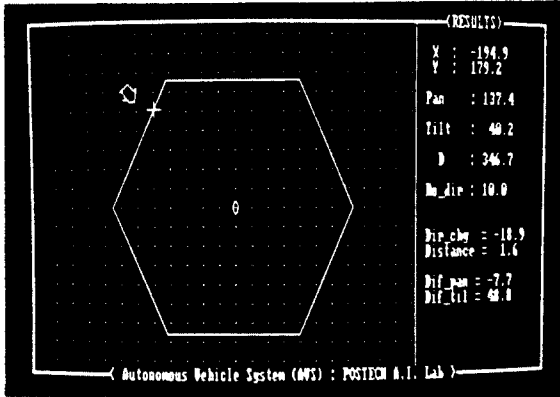


그림 8. 화면의 모니터

5. 카메라 조정

로봇이 진행해 나감에 따라, 카메라의 시각을 조정하지 않으면 화면에 나타나는 패턴의 이미지는 화면의 중심으로부터 멀어지기 시작하여 결국 화면에서 완전히 사라질 수 있다.

그림 9에서처럼 로봇이 지점1에서 위치를 결정할 때 이미지를 얻기 전에 지점2로 L만큼 이동할 경우를 고려하자. 패턴의 큰원의 중심을 가능한 화면의 중심에 가깝게 하기 위하여 카메라는 로봇이 진행함에 따라 시각을 조정해야 한다. 로봇의 진행과 동시에 카메라의 시각을 조정함으로써 운행 시간을 줄일 수 있다.

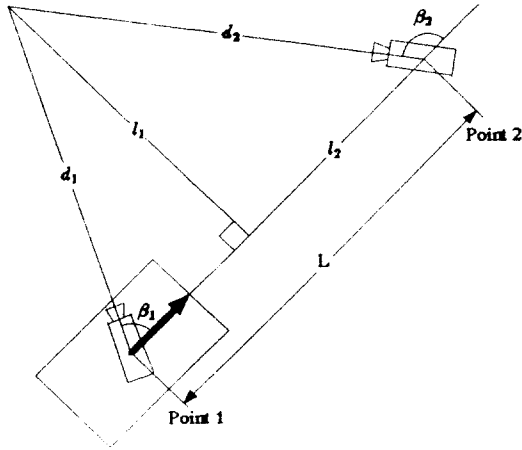


그림 9. 회전각의 계산

6. 실험결과

그림 1에서와 같이 로봇은 두개의 자동차 배터리에 의해 가동되는 컴퓨터와 하나의 비전시스템을 장치하였다. 카메라의 각조정은 두개의 스텝모터에 의해 카메라의 시점 (focal point)을 중심으로 이루어진다. 로봇의 외관 크기는 2ft X 3ft X 2ft 이다.

실험은 20ft X 30ft X 10ft 인 본 연구실에서 이루어졌다. 원형의 패턴은 실험실 천장의 거의 중심에 부착시켰다. 실험실의 경계와 로봇의 경로(그림 8에서의 정육각형)는 그래픽기법으로 화면에 그려졌다. 이러한 것들이 시스템의 입력이다.

로봇이 움직이기 시작하면 비전시스템은 패턴의 영상을 잡아 실험실상의 로봇의 위치와 이의 진행방향을 판단하고 그것을 화면에 보임과 동시에 로봇을 화면에 화살표로써 감박거리게 한다. 그러나 이러한 화면의 출력은 인간감독자에게만 필요할 것이지 경로관제에는 필요치 않다.

컴퓨터는 요구되는 경로로부터 로봇의 변이를 판단하고 이의 새로운 진행방향을 결정한다.

로봇의 새 진행방향으로 특정거리(본 실험에서는 3feet), 혹은 경로상에 십자로 표시된 지점까지를 주행한다. 그런다음 로봇은 이의 새로운 위치와 진행방향을 결정하기 위하여 새로운 패턴의 이미지를 잡는다. 본 실험에 사용된 IBM/AT호환 컴퓨터와 PC1000 이미지 보드로 이미지를 잡아 이를 분석하여 주행조정과 카메라조정의 지침을 받는데 약 2초가 걸린다. 로봇은 이미지 프로세싱을 하는 동안에는 멈추어 있는다. 그러므로 로봇이 유연하게 주행하기 위하여는 계산시간이 상당히 짧아야 한다.

본 실험에서 로봇의 속도는 약 초당 2.5feet이고 명시된 경로상에서 로봇위치의 변이는 5인치보다 작았다. 단순한 원형의 패턴을 사용한 바이너리 이미지로부터의 정보들 사용이 효과적인 계산을 위한 주된 원인이었다. 만약 더 빠른 계산이 요구된다면 보다 빠른 이미지 보드의 사용이 필요하다.

7. 결론

본 연구에서 비전을 이용한 이동로봇의 관제방법이 연구되었다. 이동로봇은 외부의 도움없이 비전시스템과 계산능력만을 가진다는 점에서 독립적이라 할 수 있다. 평면의 지도가 요구되는 로봇의 경로와 함께 시스템의 입력이고 화면에 표시된다.

본 실험실에서의 실험에서 주행속도는 대략 초당 2.5feet였고, 로봇은 요구되는 궤도로부터 5인치 이상 벗어나지 않았다. 로봇은 혼자 시작점에서 목적지까지 도달할 수 있었다. 또한 로봇은 이의 궤도상에 있는 지엽적인 방해물을 피할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 로봇의 위치를 판단하고 이의 진행방향을 판단하는 방법은 이동로봇의 실시간 관제에 효과적이고 정확함이 입증되었다.

참고 문헌

1. Brooks, R.A. A Robust Layered Control System for Mobile Robot. IEEE J. Robotics and Automation. RA-2(1): 14-23. 1986
2. Courtney, J.W., Magee, M.J., and Aggarwal, J.K. 1984. Robot Guidance Using Computer Vision. Pattern Recognition. 17(6): 585-592. 1985.
3. Crowley, J.L. Navigation for an Intelligent Mobile Robot. IEEE J. Robotics and Automation. RA-1(1): 1-41. 1985.
4. Duda, R.O., and Hart, P.E. Pattern Classification and Scene Analysis. New York: John Wiley. 1973.
5. Fukui, I. TV image processing to determine the position of robot vehicle. Pattern Recognition. 14: 101-109. 1981.
6. Han, Min-Hong. and Hong, Mun-Seung. Position Finding of a Mobile Robot in 3-D Space. IE-TR-89-01. Pohang, Pohang Institute of Science and Technology, Department of Industrial Engineering. 1989.
7. Iyengar, S.S., Jorgensen, C.C., Rao, S.V.N., and Weisbin, C.R. Robot Navigation Algorithms Using Learned Spatial Graphs. Robotica. 4(2): 93-100. 1986.
8. Kabuka, M.R., and Arenas, A.E. Position Verification of Mobile Robot Using Standard Pattern. IEEE J. Robotics and Automation. RA-3(6): 505-516. 1987.
9. Kambhampati, S., and Davis, L.S. Multiresolution Path Planning for Mobile Robots. IEEE J. Robotics and Automation. RA-2(3): 135-145. 1986.
10. Magee, M.J., and Aggarwal, J.K. Determining the Position of Robot Using Single Calibration Object. Proc. Int. Conf. Robotics. pp. 140-150. 1984.
11. Moravec, H.P. Visual Mapping by a Robot Rover. Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intell. 1(2): 598-600. 1979.
12. Park, C.S. Interactive Microcomputer Graphics, Addison Wesley Publishing Co. 1985.
13. Rao, N.S.V., Iyengar, S.S., Jorgensen, C.C., and Weisbin, C.R. Robot Navigation in an Unexplored Terrain. J. of Robotic Systems, 3(4): 389-407. 1986.