VFH(Vector Field Histogram)+

VFH+를 이용한 장애물 회피

생기원 양광웅 작성

(J. Borenstein의 논문 VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots;
Thomas Hellstrom의 논문 Path Tracking and Obstacle Avoidance Algorithms for Autonomous Forest Machines 참조)

VFH+는 VFH 방법을 개선하여 만들어졌다.

Creation of the Local Map

Local Map은 로봇을 중심으로 로봇 주변의 장애물을 기록하는 격자지도다. 격자지도의 크기는 33 x 33 셀이며 하나의 셀은 10cm x 10cm 크기를 가진다.

Obstacle vector

그리드 맵의 활성 영역 내의 각 셀 $C_{i,j}$의 장애물이 존재할 확률 값 $c_{i,j}$로부터 obstacle vector를 만든다. 이 벡터의 방향($\beta_{i,j}$)과 크기($m_{i,j}$)는 다음과 같이 계산한다.

$$\beta_{i,j} = \tan^{-1}\frac{y_j - y_0}{x_i - x_0}$$
$$m_{i,j} = c_{i,j}^2 (a - b d_{i,j}^2)$$
$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}$$

a, b - positive constants

$c_{i,j}$ - Certainty value of active cell (i,j)

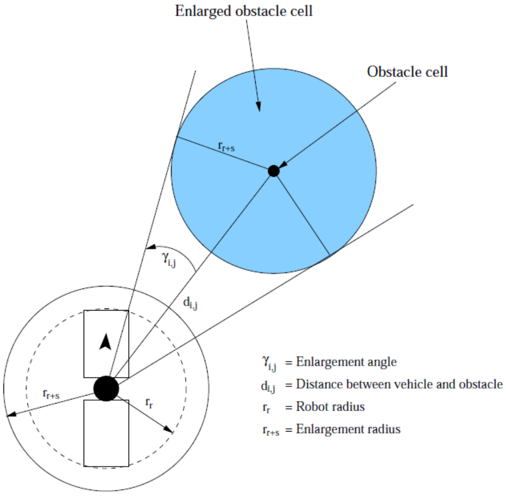
x_0, y_0 - current coordinates of the VCP(Vehicle Center Point)

x_i, y_j - Coordinates of active cell (i,j)

a, b는 $a - b\left(\frac{w_s - 1}{2}\right)^2 = 1$를 만족하도록 설정한다. w_s는 Local Map의 크기다.

Primary Polar histogram

로봇이 주행하는 영역에는 로봇 크기만큼의 공간이 필요하다. Local Map의 장애물 크기를 로봇의 크기로 늘이고 로봇은 하나의 점으로 생각한다.



장애물의 경계를 늘렸을 때 장애물이 차지하는 각도 $\gamma_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$\gamma_{i,j} = \arcsin\left(\frac{r_{r+s}}{d_{i,j}}\right)$$

Primary Polar histogram H^p 에서 장애물이 영향을 미치는 범위를 계산하고, 장애물 확률을 업데이트 한다.

$$H_k^p = \sum_{i,j \in C_a} m_{i,j} h'_{i,j}$$

여기서

$$h'_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } k\alpha \in \left[\beta_{i,j} - \gamma_{i,j}, \beta_{i,j} + \gamma_{i,j}\right] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

이고, α 는 한 섹터의 해상도다. 프로그램에서는 $\alpha = 1$ 로 적용되었다.

실제 구현에서는 코사인 법칙을 이용하여 로봇 중심에서 장애물 경계까지의 거리를 계산하였다. 범위 $\left[\beta_{i,j} - \gamma_{i,j}, \beta_{i,j} + \gamma_{i,j}\right]$에 속하는 k 에 대하여 거리 d_k 는 다음과 같다.

$$d_k = d_{i,j} \cos\gamma_k - \sqrt{r_{r+s}^2 - d_{i,j}^2 \sin^2\gamma_k}$$

여기서 γ_k 는 $\beta_{i,j}$ 와 섹터 k 가 이루는 각이다.

obstacle vector의 크기(m_k)는 다음과 같이 계산한다.

$$m_k = c_{i,j}^2 (a - b d_k^2)$$

$$H_k^p \leftarrow \max(m_k, H_k^p)$$

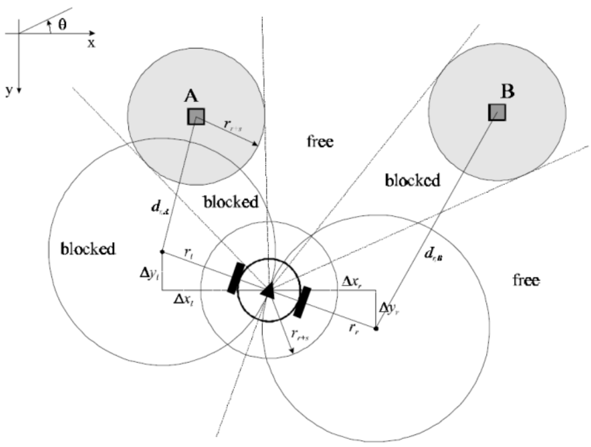
Binary Polar Histogram

이력현상(hysteresis)에 기반한 두 개의 쓰레시홀드 값 τ_{low}, τ_{high} 을 사용하여 다음과 같은 조건으로 Binary polar histogram H^b 을 만든다.

$$H_{k,i}^b = \begin{cases} 1 & \text{if } H_{k,i}^p > \tau_{high} \\ 0 & \text{if } H_{k,i}^p < \tau_{low} \\ H_{k,i-1}^b & \text{otherwise} \end{cases}$$

Masked Polar Histogram

로봇이 빠른 속도로 전진하는 경우 좌우로 안전하게 회전하기 위한 최소 곡률반경이 존재하는데, 이 최소 곡률반경 과 장애물이 겹치게 되면, 장애물이 있는 위치부터 로봇의 뒤쪽까지 로봇이 진행하지 못하도록 한다.



좌우 곡률반경 r_l, r_r 에 대한 중점 위치는

$$\Delta x_l = r_l \cos(\theta + \pi / 2)$$
$$\Delta y_l = r_l \sin(\theta + \pi / 2)$$

$$\Delta x_r = r_r \cos(\theta - \pi/2)$$
$$\Delta y_r = r_r \sin(\theta - \pi/2)$$

이고, 로봇 중심에서 $C_{i,j}$ 까지의 거리는

$$d_l = \sqrt{\left(\Delta x_l - \Delta x(j)\right)^2 + \left(\Delta y_l - \Delta y(i)\right)^2}$$
$$d_r = \sqrt{\left(\Delta x_r - \Delta x(j)\right)^2 + \left(\Delta y_r - \Delta y(i)\right)^2}$$

이다. 로봇의 진행을 막는 범위의 좌우 경계값 φ_l, φ_r 는 다음과 같이 계산한다.
만일, $C_{i,j}$ 가 로봇의 왼쪽에 있고 $d_l < r_r + r_{r+s}$ 이면, $\varphi_l \leftarrow \min(\varphi_l, \beta_{i,j})$ 로 업데이트 하고,
$C_{i,j}$ 가 로봇의 오른쪽에 있고 $d_r < r_r + r_{r+s}$ 이면, $\varphi_r \leftarrow \max(\varphi_r, \beta_{i,j})$ 로 업데이트 한다.

이제 φ_l, φ_r 과 Binary Polar Histogram으로부터 Masked Polar Histogram H^m 을 만든다.

$$H_k^m = \begin{cases} 1 & \text{if } H_k^b = 0 \text{ and } (\mathrm{k}\alpha) \in \left\{[\varphi_r, \theta], [\theta, \varphi_l]\right\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Selection of the Steering Direction

Masked polar histogram에서 로봇이 지나갈 수 있는 모든 열린 부분을 찾는다. 열린 부분의 시작과 끝 섹터를 k_l, k_r 라고 할때, 넓이가 s_{max} 보다 크면 다음 식으로 후보 섹터의 범위 $[c_l, c_r]$ 을 정한다.

$$c_l = k_r + \frac{s_{max}}{2},$$
$$c_r = k_l - \frac{s_{max}}{2}$$

넓이가 특정 값보다 작으면 다음 식으로 후보 방향 c_l, c_r 을 정한다.

$$c_l = c_r = \frac{k_r + k_l}{2}$$

후보 섹터에 속하는 $c \in [c_l, c_r]$ 에 대하여 평가함수를 적용하여 최소 값이 되는 방향을 로봇의 방향으로 정한다.

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c\alpha, \theta_t) + \mu_2 \Delta(c\alpha, \theta_i) + \mu_2 \Delta(c\alpha, \theta_{n,i-1})$$

θ_t - 목적지 방향

θ_i - 로봇의 현재 방향

$\theta_{n,i-1}$ - 이전 상태에서 선택된 방향

여기서 $\Delta(c_1, c_2)$ 는 두 각도 c_1, c_2 사이의 최단거리 절대값을 계산하는 함수이다.

μ_1, μ_2, μ_3 는 $\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$ 조건이 만족하도록 설정하는데, 다음과 같이 설정되었다: $\mu_1 = 5, \mu_2 = 2, \mu_3 = 2$.