

Receding Horizon Next-Best-View 계획법 기반의 보로노이 편향 3 차원 군집 로봇 탐사 알고리즘

이재호*, 이채주*, 정우창*, 송수환**, 조성호**

*한국과학기술원 부설 한국과학영재학교

**한국과학기술원 전산학부

e-mail : tomtommy611@iCloud.com

Receding Horizon Next-Best-View Planner Based Voronoi-Biased 3D Multi-Robot Exploration Algorithm

Jaeho Lee*, Chaeju Lee*, Wochang Jung*, Soohwan Song**, Sungho Jo**

*Korea Science Academy of KAIST

** School of Computing, Korea Advanced Institute of Science and Technology

요 약

본 연구에서는 군집 로봇 체계에서 next-best-view(NBV)의 결정과 경로 계획(path planning)을 동시에 수행하는 효율적인 3 차원 탐사 알고리즘을 제안한다. NBV 결정 및 경로 계획을 동시에 수행하는 단일 로봇 탐사 알고리즘에는 최근에 제안된 RH-NBVP[1]가 있다. 우리는 각 로봇에게 효율적으로 탐사 영역을 분배하는 Voronoi-biased multi-RRTs(VB-MRRTs)를 제시하며, 이를 통해 군집 로봇 체계에 RH-NBVP 를 적용한다. 제시한 VB-MRRTs 가 공간을 얼마나 점유하는지 분석하였으며, 3 차원 시뮬레이션 상의 군집 로봇 체계에서 VB-MRRTs 가 적용된 RH-NBVP 의 탐사율 향상을 확인하였다.

1. 서론

모바일 로봇의 탐사 문제에서 일반적으로 NBV 의 결정과 경로 계획은 독립적으로 개발되었다. 그러나 이 둘을 별개로 취급하면 NBV 로의 유효한 경로 계획에 실패하는 경우가 발생한다. 이를 해결하기 위해 최근에 제안된 단일 로봇 탐사 알고리즘인 RH-NBVP[1]는 RRT[2]를 사용해 NBV 결정과 경로 계획을 동시에 진행한다. RH-NBVP 는 로봇이 RRT 를 생성한 후, 가장 많은 정보를 습득할 수 있는 가지의 첫 노드로 이동하는 것을 반복하는 탐사 알고리즘이다.

본 논문에서는 군집 로봇 체계에 RH-NBVP 적용을 가능하게 하기 위한 방법으로, 탐사 영역을 효율적으로 분할하여 RRT 를 생성하는 Voronoi-biased multi-RRTs(VB-MRRTs)를 제시한다. 제시한 VB-MRRTs 의 공간 점유율을 평가할 것이다. 또한, 시뮬레이션 상에서 세 대의 쿼드콥터로 이뤄진 군집 로봇 체계의 탐사율 측정을 통해 VB-MRRTs 가 적용되었을 때의 성능 향상을 확인할 것이다.

2. 문제 정의

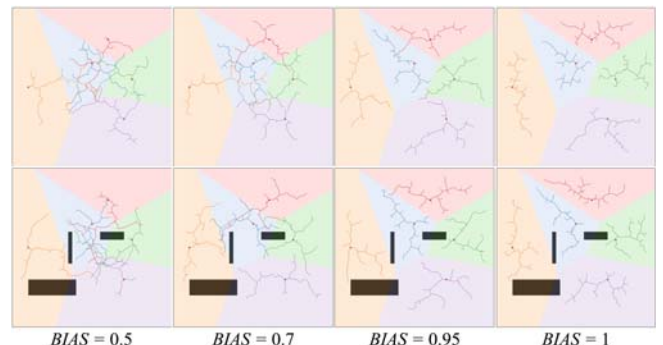
본 연구에서 다루고자 하는 문제는 군집 로봇 체계 \mathcal{A} 에 의한 팔진 트리 구조 Octomap[3]으로 표현되는 닫힌 공간 $\mathcal{S} \subset \mathbb{R}^3$ 의 탐사다. 탐사란 \mathcal{S} 로 초기화된

미지의 공간 \mathcal{S}_{unk} 을 열린 공간 \mathcal{S}_{free} , 점유된 공간 \mathcal{S}_{occ} , 탐사가 불가능한 공간 \mathcal{S}_{res} 로 분류하는 것으로 정의한다. 탐사 종료 조건은 $\mathcal{S} \setminus \mathcal{S}_{res} = \mathcal{S}_{free} \cup \mathcal{S}_{occ}$ 이다.

로봇의 배치 $\xi_1, \xi_2 \in \mathcal{E}$ 는 $\sigma_1^2(0) = \xi_1$, $\sigma_1^2(1) = \xi_2$ 인 경로 $\sigma_1^2: [0,1] \rightarrow \mathcal{E}$ 를 통해 연결된다. 로봇이 홀로노믹(holonomic)하고 두 배치가 가깝다는 가정 하에 경로는 $\sigma_{k-1}^k(r) = r\xi_k + (r-1)\xi_{k-1}$, 즉 선형적으로 정한다.

3. Voronoi-Biased Multi-RRTs

VB-MRRTs 는 특정 공간에 점들이 분포해 있을 때 각각의 보로노이(Voronoi) 영역에 편향도를 두어, 각 점을 뿌리 노드로 하는 RRT 들을 생성하는 구조다. 그림 1에서처럼 편향도를 변화시켜 RRT 들 간의 중첩



(그림 1) 편향도 BIAS 에 따른 VB-MRRTs

<표 1> 편향도 *BIAS*에 따른 VB-MRRTs의 점유율

편향도 <i>BIAS</i>	0.5	0.7	0.8	0.9	0.95	1
장애물이 없는 경우	36.7%	41.7%	44.9%	48.3%	50.0%	50.2%
장애물이 있는 경우	36.7%	41.9%	44.9%	48.7%	50.2%	50.2%

Algorithm 1 Construction of VB-MRRTs

```

 $\mathcal{A} \leftarrow$  a multi-robot system, i.e., a set of all robots
 $N \leftarrow$  a maximum number of nodes for each RRT
 $\delta \leftarrow$  a maximum distance of an edge
 $BIAS \leftarrow$  a level of bias between 0.5 and 1
 $\mathcal{T} \leftarrow \emptyset$   $\triangleright$  a set of all RRTs created by each robot
for robot  $a \in \mathcal{A}$  do
     $T_a.root(\xi(a)) \triangleright$  initialize RRT of  $a$  with current configuration of  $a$  as a root node
    for  $k = 1$  to  $N$  do
        sampling:
             $\xi_{sample} \leftarrow randomSample(S_{free})$ 
            if  $\xi_{sample} \notin \mathcal{V}_a$  then
                if  $biasedCoin(BIAS)$  then
                    go to sampling
                else
                    if  $biasedCoin(1 - BIAS)$  then
                        go to sampling
             $n_{near} \leftarrow T_a.nearestNode(\xi_{sample})$ 
             $n_{new} \leftarrow T_a.newNode(\xi_{sample}, \delta)$ 
             $T_a.addNode(n_{new})$ 
             $T_a.addEdge(n_{near}, n_{new})$ 
        add  $T_a$  to  $\mathcal{T}$ 
    return  $\mathcal{T}$ 
    
```

을 조절할 수 있다. VB-MRRTs \mathcal{T} 에 대해 각 로봇 $a \in \mathcal{A}$ 가 생성하는 RRT $T_a \in \mathcal{T}$ 의 노드 수를 N , 최대 변의 길이를 δ 으로 하자. 이제 각 로봇이 자신의 보로노이 영역에 주는 편향도를 $0.5 \leq BIAS \leq 1$ 라고 하자.

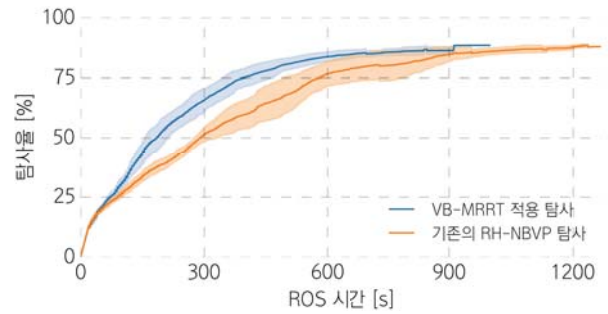
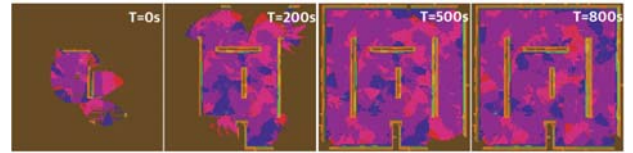
각 로봇 a 는 S_{free} 에서 추출한 표본 배치 $\xi_{sample} \in \mathcal{E}$ 가 자신의 보로노이 공간 \mathcal{V}_a 에 속하면 $1 - BIAS$ 의 확률로 새로운 배치를 추출한다. 즉, $\xi_{sample} \in \mathcal{V}_a$ 일 때 ξ_{sample} 가 받아들여질 확률은 $BIAS$ 이다. 이후 과정은 일반적인 RRT 구축과 동일하다. Algorithm 1에 VB-MRRTs의 구축 과정이 정리되어 있다.

RRT의 각 노드가 중심인 반지름 r 의 원들이 공간을 덮는 비율을 RRT의 점유율이라 정의하자. 10×10 의 공간 \mathcal{S} 에서 $|\mathcal{A}| = 5, N = 50, \delta = 0.5, r = 1$ 일 때 각각 50회에 걸쳐 평균을 취한 편향도와 점유율의 관계가 표 1 및 그림 1에 나타나 있다. 편향도가 커질수록 점유율이 상승하다가 0.95 부근에서 최대가 된다. 편향도가 1일 때 점유율이 최대가 아닌 것은 RRT가 각 보로노이 공간에 완전히 속박되기 때문이다.

4. 시뮬레이션 결과

탐사는 ROS의 Gazebo 기반의 RotorS[4] 시뮬레이션 환경에서 쿼드콥터 AscTec Firefly hexacopter MAV[5] 세대로 진행하였다. 쿼드콥터의 롤(roll)과 피치(pitch)는 오차 범위 내에서 0을 유지하고, 요(yaw)만 조정하였다. 실험에 사용된 지형은 $40m \times 40m \times 4m$ 의 장애물 벽 여러 개로 나누어진 형태를 띈다.

실험은 VB-MRRTs를 적용한 RH-NBVP와 그렇지 않은 경우를 비교하여 진행하였다. 각각 10회의 시뮬레이션을 진행하여 탐사 완료에 걸리는 시간(ROS 시



(그림 2) 상: VB-MRRTs를 사용한 탐사의 진행 과정; 하: 기존의 RH-NBVP와 VB-MRRTs를 적용한 탐사의 10회에 걸친 평균 탐사율로, 진한 선 위 아래의 영역은 각 시간에서의 표준 편차를 나타낸다.

간)과 지형 80% 탐사에 걸리는 시간을 비교하였다.

VB-MRRTs를 사용한 경우 전체 탐사 시간이 평균 806.42 초, 지형 80% 탐사 시간이 487.59 초가 걸린 반면 기존 RH-NBVP는 각각 1035.82 초와 671.01 초가 걸렸다. 이를 통해 군집 로봇 체계에서 VB-MRRTs가 영역을 효과적으로 분할한다는 것을 알 수 있다. 또한, VB-MRRTs를 사용한 경우 탐사 종료 시간의 표준편차가 114.57 초, 기존의 알고리즘의 경우에는 176.03 초로, VB-MRRTs를 사용하면 빠를 뿐만 아니라 일관적이고 안정적인 탐사 또한 가능하다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

VB-MRRTs는 RRT로 공간을 높은 점유율로 채우는 것을 가능하게 하며, RH-NBVP에 적용하면 일관적이고 빠르게 수렴하는 탐사율을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 향후에는 군집 로봇 체계에서 VB-MRRTs를 이용하여 탐사 영역을 분할하는 현재의 방법에서 나아가 로봇들이 이동하는 방향을 서로가 정할 수 있는 능동적인 탐사 알고리즘을 제시할 것이다.

참고문헌

- [1] A. Bircher, M. Kamel, K. Alexis, H. Oleynikova and R. Siegwart, "Receding Horizon "Next-Best-View" Planner for 3D Exploration," 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, 2016, pp. 1462-1468.
- [2] S. M. LaValle, "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," 1998.
- [3] A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, and W. Burgard, "OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees," Autonomous Robots, vol. 34, no. 3, pp. 189-206, 2013.
- [4] RotorS: An MAV gazebo simulator, "https://github.com/ethz-asl/rotors_simulator"
- [5] Ascending Technologies GmbH, http://www.asctec.de/