

광선 추적법에 기반한 소리 위치 추정 *

안인규⁰, 윤성의
한국과학기술원 전산학부
inkyu.an@kaist.ac.kr, sungeui@kaist.edu

Sound Source Localization Based on Ray Tracing

Inkyu An⁰, Sung-eui Yoon
School of computing, KAIST

요약

본 논문에서는 실내 상황에서 지형 정보를 이용한 3차원 소리의 위치 추적 알고리즘을 제시한다. 이를 위해 렌더링 기법 중 하나인 광선 추적법을 이용한 알고리즘을 고안하였다. 광선 추적법은 빛의 효과를 여러 개의 광선을 통해 근사(Approximation) 하는 방법으로 소리가 탐지된 방향에서 본 논문에서 제시하는 역-음향 광선 추적법(Inverse acoustic ray tracing)을 이용해 음원의 위치를 추정하려 하였다. 이를 통해 단일 프레임 안에 발생하는 간헐적인 음원을 탐지할 수 있게 되었다. 역-음향 광선 추적법을 이용해 직접 음향 전달 경로(Direct acoustic path)와 간접 음향 경로(Indirect acoustic path)를 생성한 후, 몬테-카를로 위치 추정 기법을 이용해 3차원 음원의 위치를 찾게 된다. 직접음과 간접음은 로봇에 장착된 정육면체 모양의 마이크 어레이에서 측정되며, 정적인 또는 움직이는 음원이 각각 연속적과 간헐적으로 소리를 발생할 때 모두 결과를 도출하였다. 결과적으로 가로, 세로가 7m이고 천장의 높이가 3m인 실내 공간에서 음원이 움직이는 비가시 선의 상황에서도 거리 오차가 평균 0.8m로 비교적 정확하게 3차원 위치를 추정할 수 있었다.

1. 서론

일상생활의 로봇의 사용이 증가함에 따라 로봇과 인간의 소리를 이용한 상호 작용의 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 특히 Google home과 Amazon echo와 같은 스마트 스피커 제품의 인기는 음향 관련 연구에 커다란 도전을 가져왔다. 이러한 음향 관련 제품에서 큰 이슈 중 하나는 실제 환경에서 정확한 음원의 위치를 찾는 문제이다. 이 문제는 소리 위치 추적(Sound source localization)으로 소개되었으며, 많은 연구가 있어왔다. 지난 20년간 소리 위치 추적에서는 소리가 들려오는 방향을 찾기 위한 연구가 진행되었다. 특히, 두 마이크 쌍의 도착 시간 차이(Time Difference of Arrival)를 기반

으로 하는 다양한 기법들이 고안되었다. 이러한 방법은 소리가 들려온 방향을 찾는데 효과적이지만, 정확한 음원의 3D 위치를 찾기에는 어려움이 있다[1]. 최근 연구에서는 소리 측정 장치의 여러 위치와 각도에서 데이터를 추적하여 3D 위치를 추정하고 있지만, 움직이는 음원과 간헐적으로 발생하는 소리 신호의 경우, 또 음원과 로봇 사이에 장애물이 있는 경우 위치를 추정할 수 없다는 한계가 있다[2].

그렇기 때문에 본 논문에서는 실내 상황에서 3D 음원의 위치를 추정하기 위한 방법을 제안한다. 렌더링 분야에서 잘 알려진 광선 추적(Ray tracing) 기법을 통해 문제를 해결하고자 하였다. 먼저 TDOA를 기반으로 하는 기법을 이용해 소리가 들려온 방향을 추정한 후, 역-음향 광선 추적법을 통해 소리의 방향의 역방향으로 직접 & 간접 음향 전달 경로를 생성한다. 이때 3D 실내 공간은 복셀 기반의 Octree로 재구성하여 정반사를 처리하게 하였다. 여기서 생성된 음향 전달 경로들이 하나의 음원에서 전파되었다고 가정하였을 때 역으로 추적된 경로들이 수렴하는 위치가 음원의 위치라고 추정할 수 있으며, 몬테-카를로 위치 추정 기법을 통해 수렴하는 위치를 찾아 결과를 도출하였다.

2. 반사 인지를 통한 위치 추적

마이크 어레이에서 측정된 3D 공간 상의 직접음과 간접음을 이용한 실시간 소리 위치 추적 알고리즘을 소개하고자 한다. 이때 소리의 신호는 회절과 난반사가 적은 고주파 대역의 파형이며, 실내 환경이라고 가정한다. 본 논문은 크게 두 가지 중요한 요소로 나눌 수 있다. 먼저 TDOA 기반 방법에서 측정된 직접음과 간접음의 역방향으로 역-음향 광선 추적법을 수행해 음향 전달 경로를 생성한 후, 경로들의 수렴 지점을 알아냄으로써 음원의 3D 위치를 추정하게 된다. 전체적 알고리즘의 작용 흐름은 Fig.1에 요약되어 있다.

소리 신호들이 마이크 어레이를 통해 측정된 후, TDOA 기반의 방법을 통해 소리의 방향, 크기, 주파수를 알아낸다. 해당 정보를 바탕으로 반사 인지 음향 광선 추적법(Reflection-aware acoustic ray tracing)을 통해 음향 레이(Acoustic ray)를 생성한다. 정확한 음향 레이의 계산을 위해 소리의 전파에 따른 에너지 감소, 지도 정보 오차의 보정 등이 고려되며, 모든 연산은 실시간으로

* 구두 발표논문

* 본 논문은 요약논문 (Extended Abstract) 으로서, 본 논문의 일본 논문은 International Conference on Robotics and Automation 2018 에 발표 되었음. [3]

* 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-차세대정보·컴퓨팅기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017M3C4A7066317)

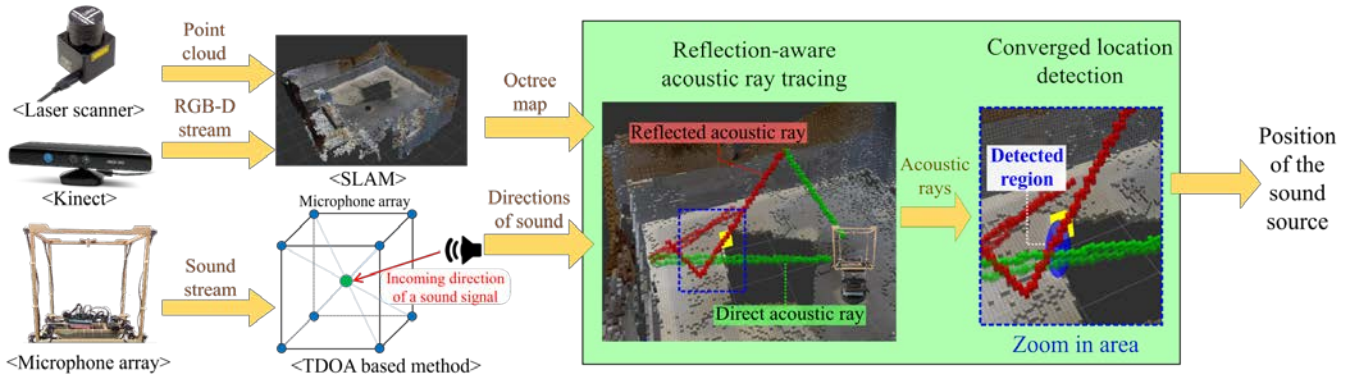


Fig. 1. 반사 인지 소리 위치 탐색 알고리즘의 개요 ([3]의 Fig.2에서 발췌)

동작한다. 또한 반사 인지 음향 광선 추적법을 수행하기 위해서는 3D 공간 정보가 필수적이며, 이를 위해 SLAM 모듈 Octree 기반의 지도를 생성한다.

반사 인지 음향 광선 추적법을 통해 생성된 음향 레이들을 통해 음원의 3D 위치를 추정하게 되며, 음향 레이들은 하나의 음원에서 발생했다고 가정하여, 역으로 추적했을 때 음향 레이들은 음원의 주위로 수렴할 것이라 예상했다. 음향 레이들의 수렴 지점은 몬테-카를로 위치 추정 기법을 적용하여 찾게 되며, 각 파티클의 가중치를 목적에 맞게 정의하였다. 가중치는 파티클과 음향 레이의 거리가 가까울수록 큰 값을 갖게 되며, 이를 위해 여러 기하학적 계산 방법을 사용하였다. 결과적으로 어떠한 파티클 주위에 음향 레이들이 많이 모였을수록 높은 가중치를 갖게 되며, 파티클들은 레이들이 많이 모여있는 지점으로 수렴하게 된다.

3. 결과

실제 실내 환경에서 음원이 움직이고, 소리가 간헐적으로 발생하게 하였을 때 소리의 위치를 추정하게 하여 결과를 측정하였다. 또한 음원과 로봇 사이에 직접음을 막는 장애물을 이동 경로 중간에 설치하여 간접음만 측정이 가능한 상황이 발생하게 제한했다. 이 실험 환경은 매우 도전적인 사례로, 어려운 상황에서도 제시된 방법이 효율적이라는 점을 보이고자 하였다.

실험은 가로와 세로가 7m이며 높이가 3m인 실내에서 진행했으며 Fig.2와 같이 음원이 시작점부터 끝점까지 제시된 이동 경로를 따라서 이동할 때, 자주색의 이동 경로에서만 박수 소리가 간헐적으로 발생한다. 결과적으로 로봇의 왼쪽의 위치에 장애물을 배치하여 직접음을 막았을 때도 파란색 타원으로 비교적 정확히 음원의 위치를 찾는 점을 확인할 수 있다.

실제 음원의 위치와 측정된 타원의 중점의 거리 오차는 Fig.3의 그래프로 볼 수 있다. 1초부터 50초까지의 거리 오차는 음원이 왼쪽 이동 경로에 있을 때이며, 230초부터 280초까지는 오른쪽 이동 경로일 때의 결과이다. 평균 거리 오차는 왼쪽의 경로는 0.7m이고 오른쪽은 0.3m으로, 장애물에 의해 발생한 회절에 의해 왼쪽의 결과가 더 안 좋은 것을 확인할 수 있다. 하지만 제시된 방법을 통해 장애물에 의해 직접음이 차단되는 상황에서도 유의미한 결과를 얻을 수 있었다. 표준편차는 왼쪽은 0.29m, 오른쪽은 0.20m로 비교적 작아 몬테-카를로

위치 추정 기법을 통해 안정적인 수렴한다고 판단할 수 있다. 즉, 음원이 움직이고 장애물의 방해가 있는 상황에서도 소리가 발생했을 경우에 효과적으로 위치를 추정했다고 판단할 수 있다. 제시된 알고리즘을 통해 한 프레임 안에 소리의 위치를 추정할 수 있으며, 움직이는 음원과 장애물이 존재와 같이 도전적인 상황에서도 음원의 위치 추적이 가능하다는 점을 확인할 수 있다.

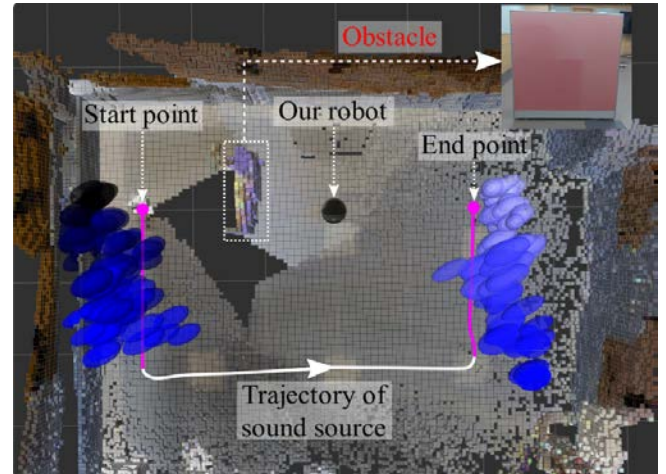


Fig. 2. 음원이 움직일 때 위치를 추정(파란 디스크) ([3]의 Fig.8a에서 발췌)

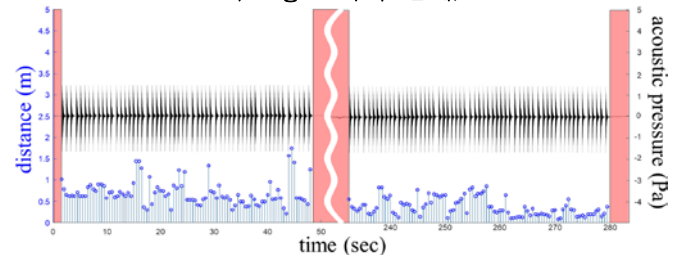


Fig. 3. 추정 위치와 실제 위치의 거리 오차 그래프 ([3]의 Fig.8b에서 발췌)

참고문헌

- [1] Knapp, C. & Carter, G. The generalized correlation method for estimation of time delay IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process. 24, no. 4, 320-327 (1976)
- [2] Su, D., Vidal-Calleja, T., and Miro, J. V. Towards real-time 3d sound sources mapping with linear microphone arrays ICRA (2017)
- [3] Inkyu An, Myungbae Son, Dinesh Manocha and Sung-eui Yoon. Reflection-Aware Sound Source Localization ICRA (2018)