

# 빔 추적기법을 이용한 2차원 환경에서의 전파전파 시뮬레이션

박성우<sup>0</sup> 최준수 한광수  
국민대학교 컴퓨터학부  
{skiw9841<sup>0</sup>, jschoi, kshahn}@kookmin.ac.kr

## Simulation of Wave Propagation in Two-Dimensional Environments using Beam Tracing

Sungwoo Park<sup>0</sup> Joonsoo Choi, Kwangsoo Hahn  
Kookmin University, Department of Computer Science

### 요 약

무선 통신 기술의 발달로 인하여 무선 환경의 상황을 예측하기 위한 시뮬레이션이 필요하게 되었다. 본 논문에서는 무선 환경에서 전파의 수신 범위 및 전파 세기 등의 상황을 예측하기 위한 효율적인 전파 추적 기법에 대해 고찰하고, 전파추적 및 경로 계산을 할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 또한 제안된 알고리즘을 통하여 빔 트레이서를 구현하고, 실제와 유사한 전파 환경에서 트레이서를 이용한 시뮬레이션으로 알고리즘의 안정성과 효율성을 검증한다.

### 1. 서 론

무선 통신 기술의 발달로 인하여 무선 서비스를 일상에 쉽게 접할 수 있게 되었다. 이러한 서비스를 좋은 품질로 다수의 사용자에게 제공하는 것은 매우 중요하며, 이를 위하여 서비스가 제공되는 무선 통신 환경의 상황을 예측하는 것이 필요하게 되었다. 전파 환경의 상황을 예측하기 위해서 실제로 측정하는 방법은 많은 시간과 자원이 요구되고 다양하고 복잡한 공간에서는 정확한 측정이 어렵다. 이를 해결하기 위해 가상의 전파 환경에서 전파를 예측할 수 있는 트레이서(tracer)의 사용은 시간과 비용을 줄이고 다양한 실험을 통해 정확한 예측을 할 수 있다.

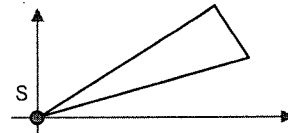
본 논문에서는 전파를 빔으로 모형화하여 추적하는 방법인 빔 추적 기법(Beam Tracing)[1]을 사용하고 이를 효과적으로 사용하는 시뮬레이션 도구 개발을 목표로 한다. 빔 추적 기법은 광선 추적 기법(Ray Tracing)[2] 보다 정확한 전파의 경로가 추적 가능하지만, 복잡한 연산을 필요로 한다. 빔 추적 기법에서 계산되는 복잡한 연산은 이진 공간 분할 트리(Binary Space Partitioning Tree)[3]를 사용하여 효율을 높였다.

### 2. 관련 연구

전파 경로를 추적하기 위한 시뮬레이션 도구인 빔 트레이서에서 사용하는 빔 추적 기법과 여기에서 발생하는 연산의 효율을 높이기 위한 이진 공간 분할에 대해 알아본다.

#### 2.1 빔 추적 기법

광선 추적 기법은 전파를 한 줄기 광선의 형태로 모형화하여 전파 경로를 예측하는 방법인데 반해, 빔 추적 기법은 광선 추적 기법에서 사용한 전파 광선의 다발을 광원에서 방사되는 빔의 형태로 대체하여 전파를 추적하는 기법이다[1]. 예를 들어 [그림 II-1]과 같이, 빔은 삼각형의 형태를 가지며 광원 S는 꼭지점에 위치하고 광원으로 방사되는 공간의 일정 범위를 가리키는 방향으로 해당 영역이 삼각형의 밑면이 되는 빔을 생성한다.



[그림 II-1] 빔 모델

빔 추적기법의 주요 과정은 최초 광원에서 방사된 전파를 빔으로 생성한다. 생성된 빔은 전파 환경을 통해 벽에서 반사와 투과가 발생하면 새로운 빔을 생성하면서 진행을 거듭한다. 빔 추적 기법은 광선 추적 기법에서 전파 광선이 충분히 생성되지 않음으로 인해 누락되는 모든 경로를 추적할 수 있기 때문에 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 빔의 이루는 삼각형의 형태는 전파 진행을 계산하는데 많은 연산이 필요하다. 그러므로 빔이 직접 닿는 구조물에 대해서만 빔 추적 연산을 수행하여 불필요한 연산을 줄임으로써 빔 추적 기법을 효율적으로 적용하는 방법이 필요하다.

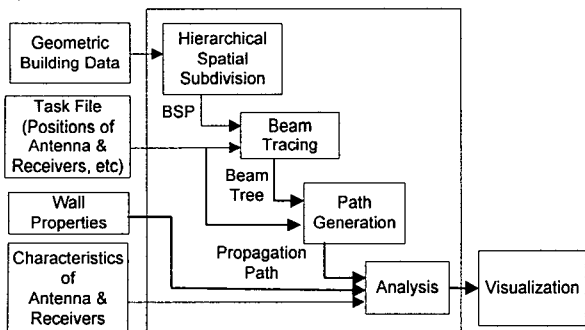
#### 2.2 이진 공간 분할

이진 공간 분할(Binary Space Partitioning)은 1980년

Fuchs, Kedem, Naylor에 의해 소개되었다[3]. 이진 공간 분할은  $n$ 차원 공간을  $n-1$ 차 분할 면 혹은 선으로 나누고, 분할된 공간이 최소 단위의 공간이 될 때까지 재귀적으로 반복한다. 그 결과, 본래의 공간과 분할된 두 개의 공간들의 관계를 계층적 구조로 표현한다.

### 3. 전파 전파 시뮬레이션

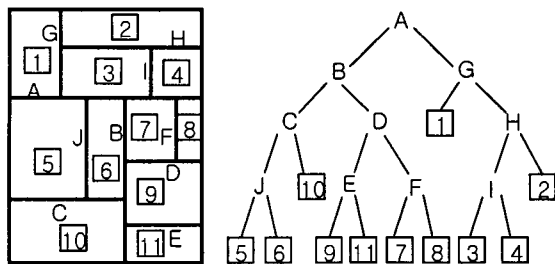
전파 전파 시뮬레이션 시스템은 그림 III-2와 같이 크게 공간 분할 모듈, 빔 추적 모듈, 경로 계산 모듈, 그리고 이를 기반으로 수신기에 도달하는 전파의 세기를 분석하는 분석 모듈로 구성되어 있다. 공간 분할 모듈은 건물을 구성하는 건물 벽의 기하학적인 형태를 기반으로 공간을 분할하여, 다음 단계인 빔 추적 모듈에서 빔을 건물 공간에서 효율적으로 추적할 수 있도록 한다. 빔 추적 모듈에서는 송신기로부터 출사되는 빔을 건물의 벽 표면에서 반사 혹은 투과하는 빔을 재귀적으로 추적한다. 그 다음 모듈인 경로 계산 모듈에서는 수신기가 빔 추적 모듈에서 현재 추적하고 있는 빔의 내부에 포함되는 경우에 빔을 이용하여 송신기로부터 수신기까지 건물벽에서 반사 혹은 투과하여 도달하는 경로를 계산한다. 전파 전파 시뮬레이션을 위하여 이러한 모든 과정을 거치면, 도달 가능한 수신기에 도착하는 전파의 세기를 쉽게 계산할 수 있다.



[그림 III-2] 전파 전파 시뮬레이션 시스템

#### 3.1 이진 공간 분할 트리

이진 공간 분할 트리는 본래의 공간과 분할된 두 개의 공간들의 계층적 구조를 표현하는 방식이다. 예를 들어, [그림 II-3]의 왼쪽과 같이 여러 개의 평면을 포함하는 이차원 공간이 존재 할 때, 오른쪽은 이진 공간 분할을 통해 트리로 나타낸 것이다.



[그림 III-3] 이진 공간 분할 트리

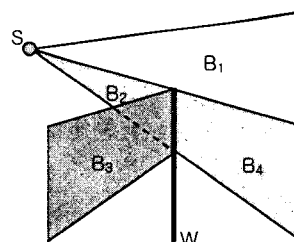
그림과 같이 이차원 공간에 선분들이 임의로 배치되어 있을 때, 이진 공간 분할 트리는 다음의 순서로 생성된다.

- 최초 이진 공간 분할 트리의 최상위 노드의 선분 목록에는 모든 선분이 기록되어 있다.
- 주어진 노드의 선분 목록에서 하나의 선분을 분할 선으로 선택한다.
- 현재 노드의 선분 목록에 속하는 선분을 분할 선 기준으로 분류하고, 해당 하위 노드의 선분 목록에 기록한다. 이 때 분할 평면과 교차하는 선분은 분할 선에 의해 분할되는 두 개의 선분으로 나누어서 각각 기록된다. 그리고 분할 선에 완전히 속하는 선분은 현재 노드에 따로 기록된다.
- 하위 노드에 대해서, 해당 노드의 선분 목록에 선분 기록이 존재하지 않는 단위 공간이 될 때까지, 위의 순서를 재귀적으로 반복한다.

#### 3.2 전파 추적

공간 분할 작업 후에는, 이를 기반으로 건물 내외의 공간에서 효율적으로 빔을 추적할 수 있다. 송신기에서 모든 방향으로 출사되는 전파는 송신기를 꼭지점으로 송신기 주위의 공간을 분할하는 여러 개의 빔으로 모형화된다. 초기에 송신기 주위로 출사되는 빔은 송신기를 꼭지점으로 한 삼각형의 빔 형태를 이룬다.

[그림 III-4]와 같이 출사된 빔의 일부만이 벽 W에 맞게 되면 벽에 맞지 않은 빔  $B_1$ 과 맞은 빔  $B_2$ 로 나누어져 각각 계산된다. 한편 벽에 맞은 빔  $B_2$ 는 벽의 특성에 따라 반사 혹은 투과하여 두 개의 빔  $B_3$ 과  $B_4$ 로 나누어 지게 된다.



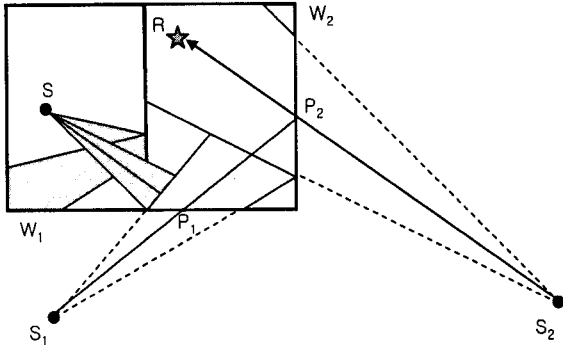
[그림 III-4] 빔의 나뉘고 분리

#### 3.3 경로 계산

이진 공간 분할 트리를 이용한 빔 추적 과정에서 빔에 속하는 수신기를 효과적으로 검색하기 위한 방법이 필요하다. 따라서 수신기의 위치를 이진 공간 분할 트리의 셀에 저장한다. 이것은 전처리 과정에서 건물 벽에 대한 이진 공간 분할 트리를 구성한 후에 바로 계산한다. 이로써 현재 추적이 이루어지는 빔에 수신기가 속하는지를 검색할 때, 해당 빔이 속하는 셀에 대해 저장된 수신기만을 빔에 포함되는지 여부를 검사한다. 따라서 각 수신기는 상수 시간에 검사될 수 있다.

송신기에서 수신기까지 도달하는 전파의 경로는 이미지 송신기(Image Source) 기법으로 계산할 수 있다. 예를 들어 [그림 III-5]와 같이, 송신기 S에서 출사된 빔이 건물벽  $W_1$ 에서 반사되는 경우, 반사 빔이 꼭지점은 건물벽  $W_2$ 에서 반사되는 경우, 새로운 반사 빔의 꼭지점은 건물벽  $W_2$ 에 대칭되는  $S_2$ 에 위치한다. 최종적으로  $S_2$ 와 수

신기 R을 연결하는 직선이 수신기에 도달하는 마지막 경로가 된다. 이 과정에서 각 건물벽과 반사 빔이 교차하는 교차점(P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>)는 수신기에서 가까운 순서로 역추적하여 계산된다.

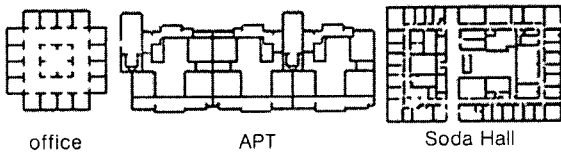


[그림 III-5] 송신기에서 수신기까지의 전파 경로

이와 같이 경로를 계산하면, 송신기부터 수신기에 이르는 전파 경로의 거리, 수신기에 도달한 전파의 방향 벡터를 쉽게 계산할 수 있다. 또한 각 건물 벽이 가지는 전파사 및 투과 비율, 전파 강도 손실 등의 전파의 특성에 관한 값을 가지고서 수신기에서의 전파 세기도 쉽게 계산할 수 있다[4].

4. 실험결과

실험은 가상 구조물의 전파 환경 복잡도 정도와 건물 벽에서 전파의 반사, 투과 횟수에 따라, 알고리즘이 어느 정도 잘 수행이 되는지를 검사하였다. 실험 대상 구조물은 [그림 IV-6]과 같이 사무실, 아파트, Berkeley 대학의 Soda Hall 등을 사용하였다. 그리고 수신기는 구조물에서 건물외부에도 전파가 얼마나 영향을 미치는지도 고려해야 하기 때문에 구조물의 약 10%정도 바깥부근까지 최대 100\*100의 격자모양으로 배치하였다.



[그림 IV-6] 실험 대상 구조물

4.1 공간 분할 결과

먼저 각 실험 구조물을 전파 환경 모형으로 하여 이진 공간 분할 트리를 사용한 공간 분할 계산을 수행하였다. 이 계산에 의하여 만들어진 이진 공간 분할 트리의 복잡도에 대한 결과는 [표IV-1]과 같다.

실험 구조물	선분(벽) 수	총 노드 수	깊이
Office	76	127	8
APT	184	401	11
Soda Hall	195	663	11

[표 IV-1] 각 실험 구조물에 대해 생성된 이진 공간 분할 트리

4.2 빔 추적 결과

각 실험 구조물에 대해 구축된 이진 공간 분할 트리를 이용하여 빔 추적 실험을 수행하였다. 각 실험 구조물에 대해 송신기는 한 개를 위치시키고, 송신기의 위치에서 빔을 출사시켜서 빔이 건물외부로 빠져나가거나, 혹은 주어진 최대 반사, 투과 횟수를 초과하는 경우에 빔 추적을 종료하였다.

실험 구조물	최대 반사, 투과 수	시간(s)	추적 빔 수
Office	1	6	236
	5	70	21798
	10	1693	626628
APT	1	22	46
	5	90	22941
	10	2716	1130615
Soda Hall	1	10	243
	5	108	60924
	10	4189	4950710

[표 IV-2] 반사, 투과에 수에 따른 빔 추적 결과

4.3 경로 계산 결과

빔 추적을 통한 송신기에서 수신기까지의 전파 경로 계산을 검증하였다. 이를 위하여 임의의 위치의 송신기에서 임의의 위치의 수신기까지의 전파 경로를 구하였다.



[그림 IV-7] APT에서의 전파 경로

5. 향후 과제

본 연구에서 사용된 알고리즘을 기반으로 구현된 시스템은 안정적으로 모든 경로를 계산할 수 있었으나, 그 수행 속도 면에서는 개선하여야 할 점이 있다. 전파는 모든 건물 벽을 대부분 투과하게 되므로 추적하는 빔의 수는 기하급수적으로 늘게 된다. 따라서 건물 벽에서 빔이 투과될 경우를 고려하여 빠르고 효율적으로 빔을 추적할 수 있는 방법이 필요하다.

6. 참고문헌

[1] B. Heckbert and P. Hanrahan. Beam tracing polygonal objects, *ACM Computer Graphics, SIGGRAPH' 84 Proceedings*, 18(3):119-127, July 1984.

[2] A. Glassner, Ed. *An Introduction to Ray Tracing*, Academic Press, London, 1989.

[3] H. Fuchs, Z. Kedem, and B. Naylor, On visible surface generation by a priori tree structures, *ACM Computer Graphics, SIGGRAPH ' 80 Proceedings*, 14(3):124-133, July 1980.

[4] H. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, Prentice Hall, 2000.