《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 31, No. 2, April 2020, pp. 59-70
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.2.059
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Numerical Modeling of a Short-range Three-dimensional Flash LIDAR System Operating in a Scattering Atmosphere Based on the Monte Carlo Radiative Transfer Matrix Method

Haechan An[1,2], Jeongkyun Na[1], and Yoonchan Jeong[1,3†]

[1]*SNU Laser Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea*

[2]*Hybrid Integrated Quantum Photonics Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University, 1205 W State Street, West Lafayette, IN 47906, USA*

[3]*IAP/ISRC/GSEP, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea*

(Received December 4, 2019; Revised February 20, 2020; Accepted February 21, 2020)

We discuss a modified numerical model based on the Monte Carlo radiative transfer (MCRT) method, *i.e.*, the MCRT matrix method, for the analysis of atmospheric scattering effects in three-dimensional flash LIDAR systems. Based on the MCRT method, the radiative transfer function for a LIDAR signal is constructed in a form of a matrix, which corresponds to the characteristic response. Exploiting the superposition and convolution of the characteristic response matrices under the paraxial approximation, an extended computer simulation model of an overall flash LIDAR system is developed. The MCRT matrix method substantially reduces the number of tracking signals, which may grow excessively in the case of conventional Monte Carlo methods. Consequently, it can readily yield fast acquisition of the signal response under various scattering conditions and LIDAR-system configurations. Using the computational model based on the MCRT matrix method, we carry out numerical simulations of a three-dimensional flash LIDAR system operating under different atmospheric conditions, varying the scattering coefficient in terms of visible distance. We numerically analyze various phenomena caused by scattering effects in this system, such as degradation of the signal-to-noise ratio, glitches, and spatiotemporal spread and time delay of the LIDAR signals. The MCRT matrix method is expected to be very effective in analyzing a variety of LIDAR systems, including flash LIDAR systems for autonomous driving.

Keywords: Lidar, Multiple scattering, Atmospheric scattering, Radiative transfer, Numerical approximation and analysis
OCIS codes: (280.3640) Lidar; (290.4210) Multiple scattering; (290.1310) Atmospheric scattering; (010.5620) Radiative transfer; (000.4430) Numerical approximation and analysis

몬테 카를로 복사 전달 행렬 방법을 사용한 산란 대기에서 동작하는 단거리 3차원 플래시 라이다 시스템의 수치적 모델링

안해찬[1,2] · 나정균[1] · 정윤찬[1,3†]

[1]서울대학교 전기·정보공학부, SNU 레이저 연구실
㊞ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

[2]퍼듀대학교 전기정보공학부, Hybrid Integrated Quantum Photonics 연구실
㊞ 1205 W State Street, West Lafayette, IN 47906, USA

[3]서울대학교 IAP/ISRC/GSEP
㊞ 08826 서울특별시 관악구 관악로 1

(2019년 12월 4일 받음, 2020년 2월 20일 수정본 받음, 2020년 2월 21일 게재 확정)

†E-mail: yoonchan@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-9554-4438
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

3차원 플래시 라이다 시스템(3D flash LIDAR system)에서의 대기 산란을 해석하기 위해 몬테 카를로 복사 전달(Monte Carlo radiative transfer, MCRT) 방법을 바탕으로 수정된 수치 해석 모델인 MCRT 행렬 방법을 논의한다. MCRT 방법을 바탕으로 라이다 신호의 복사 전달 함수를 행렬 형태로 구성하며, 이는 특성 응답에 해당한다. 근축 근사에 기반하여 본 특성 응답 행렬의 중첩 및 합성곱 연산을 활용함으로써 확장된 전반적인 플래시 라이다의 전산 모사 모델을 개발한다. MCRT 행렬 방법은 기존의 몬테 카를로 기반 방법들에서 과도하게 증가할 수 있는 개별 라이다 신호의 추적을 대폭 경감시킨다. 그 결과 본 방법은 다양한 산란 조건 및 라이다 시스템 구성 환경에서도 그 신호 응답을 빠르게 획득할 수 있는 특징을 지닌다. 본 논문에서는 MCRT 행렬 방법에 기반한 전산 모델을 이용하여 상이한 대기 환경 조건에서 동작하는 3차원 플래시 라이다 시스템을 그 산란 조건, 즉, 그 가시거리에 따른 산란 계수를 달리하며 모사하고, 플래시 라이다 신호의 신호대잡음비의 악화, 신호 오류, 시공간적 확산 및 시간 지연 등 시스템상에서의 산란 효과에 의해 나타나는 다양한 현상을 수치적으로 분석한다. MCRT 행렬 방법은 자율 주행을 위한 플래시 라이다 시스템을 포함해 다양한 라이다 시스템을 분석하는데 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 라이다, 다중 산란, 대기 산란, 복사 전달, 수치적 근사 및 해석
OCIS codes: (280.3640) Lidar; (290.4210) Multiple scattering; (290.1310) Atmospheric scattering; (010.5620) Radiative transfer; (000.4430) Numerical approximation and analysis

I. 서 론

라이다(LIDAR) 시스템은 광신호를 특정 시간에 방출시켜 임의의 원거리상에 존재하는 물체에 의해 반사되어 돌아오는 광신호를 탐지하고, 그 광신호의 지연 시간과 수광 방향 측정을 통해 그 물체의 상대적인 위치를 알아내는 광전자 시스템으로서, 구동 방식에 따라 크게 스캐닝 라이다(scanning LIDAR)와 플래시 라이다(flash LIDAR)로 나눌 수 있다[1-4]. 스캐닝 라이다는 광신호의 방출 방향을 지속적으로 바꿔 가며 여러 지점에 대한 정보를 순차적으로 획득하는 방식이고, 플래시 라이다는 광신호를 한 번에 광범위하게 방출하여 여러 지점에 대한 정보를 병렬적으로 획득하는 방식이다[1-4]. 3차원 플래시 라이다는 순차적으로 정보를 얻는 스캐닝 라이다 방식과는 달리 특정 시간에 유발된 섬광(flash)을 통해 3차원 공간의 여러 지점을 동시에 탐지하기 때문에 획득한 이미지 내 픽셀들 사이에 측정 시간의 차이가 없으며, 라이다 이미지의 빠른 업데이트가 가능하다. 더욱이 시스템 구현 시 광신호의 방향 조작을 위한 기계적인 부분이 필요 없어서 전체 라이다 시스템이 차지하는 공간이 스캐닝 라이다 방식에 비해 상대적으로 크지 않다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들을 바탕으로 3차원 플래시 라이다 기술은 최근 자동차 자율 주행[4,5], 비행 중 연료 공급[6], 비행기 착륙[7] 등과 같은 다양한 자율 시스템에 응용되면서 현재 많은 주목을 받고 있다.

일반적으로 3차원 플래시 라이다는 광범위한 방향으로 광신호를 동시에 방출하고 원거리상의 물체에 의해 반사되어 다시 라이다로 돌아오는 광신호를 탐지하여 그 거리를 측정한다. 통상적으로 광신호용 광원은 펄스형 레이저를 사용하고, 광신호 검출부는 각 방향에서 돌아오는 다수의 광신호를 동시에 처리하기 위해 고밀도로 밀집된 센서 어레이(sensor array) 형태로 구현된다[5,8,9]. 한 방향을 향해 방출된 광신호가 물체에 반사된 뒤, 그 방향을 향해 있는 센서가 이를 받아서 탐지하는 것을 라이다 신호의 한 채널이라고 할 때, 복잡한 산란 효과가 존재하는 경우, 서로 다른 채널의 신호들 사이에서 혼선(crosstalk)이 발생하며, 결국에는 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)가 감소하는 결과를 가져오게 된다. 이러한 채널간 혼선은 주어진 대기 및 주변 환경에서 발생하는 일련의 산란 효과뿐만 아니라 센서 어레이의 공간 및 각 해상도에 따라서도 크게 달라질 수 있다. 따라서 라이다 성능에 영향을 끼치는 매개 변수들을 개별적으로 또는 복합적으로 분석할 수 있는, 효율적이면서도 탄력성 있는 수치 모델의 확보는 실제 라이다 시스템의 구성 및 개발을 위해 매우 필수적인 요소이다.

라이다 시스템에 대한 고전적인 수치 해석 모델은 주로 라이다 방정식을 기반으로 하여 한 채널 내 라이다 신호 세기의 변화를 매우 간략하게 추정하는데[10], 이러한 고전적인 모델을 3차원 플래시 라이다 신호의 분석에도 적용하고자 다양한 방법들이 연구된 바 있다[3,4]. Sun 외 다수가 발표한 최근 논문에서는 다중 채널 구조가 가지는 센서 어레이의 기하학적 구조를 고려하여 만들어진 다중 플래시 라이다 방정식이 활용되었다[3]. 그러나 이러한 방식은 각 채널의 라이다 신호를 개별적으로 처리하기 때문에 채널 수가 증가하면 이에 따른 전체 연산 시간이 기하급수적으로 증가한다. 더욱이, 일련의 산란 과정을 통해 채널에서 벗어난 신호는 개별적으로 추적되지 않고 단순히 기존 채널 내 신호의 손실로만 고려되기 때문에, 이 방법을 통해서는 산란 효과로 인해 추가로 발생하는 잡음에 대해서는 그 정량적 분석이 불가능하다. Jang 외 다수가 발표한 또다른 논문에서는 주변환경 구조의 기하학적 모델을 기반으로 자율 주행 차량 및 고급 운전 보조 시스템에 사용되는 3차원 플래시 라이다 시스템을 분석하였는데, 여기에서는 플래시 라이다 시스템 센서의 해상도 및 크기의 최적화만 논의되었을 뿐, 여러 물체로부터의 다중 반사 및 대기에 의한 다중 산란 효과는 기본적으로 고려되지 않았다[4].

한편, 라이다 신호 분석에서 복잡한 산란에 의한 영향 또는 주변환경 구조의 영향을 반영하는 방식으로는 Plass와 Kattawar가 제안한 몬테 카를로 복사 전달(Monte Carlo radiative transfer, MCRT) 모델이 있다[11]. 이 모델에서는 광원에서 한 신호 입자(단위 신호를 구성하는 가상의 정량화된 개별 신호)가 방출되고 주어진 환경 속에서 확률적으로 산란

을 겪다가 센서로 되돌아올 때까지의 일련의 과정을 개별적으로 추적하여 그 데이터를 기록하는 방식을 취한다. 한 신호 입자의 기록은 광자가 지나갈 가능성이 있는 하나의 광경로 이상의 의미를 가지지는 않지만, 수 많은 신호 입자들의 기록을 취합하게 되면 실제 광신호의 복사 전달과 통계적으로 유사한 결과를 보여주게 되는데, 이것이 바로 MCRT 모델의 기본적인 원리가 된다. 실제로 MCRT 모델을 기반으로 한 수치 해석 모델은 신호 채널의 수 또는 주어진 주위 환경 구조의 기하학적 복잡성에 관계없이 모든 가능한 신호 경로를 처리할 수 있으므로, 다층 생물 조직 및 다양한 대기 환경에서 빛의 전파 양상을 분석하는 연구에 사용된 바가 있다[12,13]. 이와 같이 종래의 MCRT 모델에 기반한 수치 모델은 다수의 채널에 대해 다양한 사건을 처리할 수 있다는 장점을 가지지만, 반면, 라이다 신호를 수 많은 작은 신호 입자로 쪼갠 뒤 각 입자의 전파를 모두 추적하는 방식의 특성상, 고려되는 총 입자의 개수가 많아져야 그 결과의 정확도가 높아지게 되므로, 기본적으로 연산에 소요되는 시간이 길어지는 단점이 있다. 복잡한 도시 환경에서 자율 주행을 위해 사용되는 3차원 플래시 라이다의 경우, 이 문제는 더욱 심각해질 수 있으며, 연산을 어떻게 효율적으로 빠르게 처리해야 할 지가 실질적인 관건이 되므로 이에 대한 기본적인 논의가 일부 진행된 바 있다[14,15].

본 논문에서는 3차원 플래시 라이다 시스템의 신호 전파를 분석하기 위한 MCRT 행렬 모델을 보다 엄밀히 논의한다[14,15]. MCRT 행렬 모델을 이용하면 기존 MCRT 모델이 제공하는 장점을 최대한 활용하면서도 그 연산 시간을 크게 줄일 수 있다. MCRT 행렬 모델에서는 먼저 전체 신호의 일부분인 단위 신호가 광원과 물체 사이에서 단방향으로 전파하는 것을 행렬 형태의 전달 함수로 구현하고, 이를 동일한 전파가 반복될 때마다 재사용한다. 여기서 구한 행렬 형태의 전달 함수를 특성 응답(characteristic response)이라 칭하고, 이 특성 응답 행렬이 구성되면 광원과 물체 또는 센서 어레이의 표면이 가지는 기하학적 구성을 반영하여 그 특성 응답 행렬을 근사적으로 간단히 수정할 수도 있으며, 최종 응답은 각 순방향 및 역방향 응답 행렬의 결과의 중첩 및 합성곱(convolution)을 통해 얻을 수 있다. 다시 말해서, MCRT 행렬 방식을 이용하면 동일한 매체 전파 해석시 기존의 MCRT 모델에서 발생할 수 있는 중복 연산을 효과적으로 배제할 수 있다. 본 논문에서는 상기 MCRT 행렬을 기반으로 3차원 플래시 라이다 시스템에 적용할 수 있는 효과적인 수치 모델 개발을 논의하며, 이 모델을 이용해 다양한 대기 조건이 3차원 플래시 라이다 시스템에 미치는 산란 효과를 수치적으로 분석한다.

따라서 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 이어지는 제2장에서는 MCRT 모델을 기반으로 특성 응답 행렬을 찾은 뒤 중첩 및 합성곱을 통해 전체 신호의 전파를 나타내는 MCRT 행렬을 구하는 방법을 설명한다. 그리고 MCRT 행렬을 사용하여 수치 해석 모델을 구성하는 방법과 다양한 대기 조건에서 라이다 신호의 산란 효과를 처리하는 방법을 설명한다. 제3장에서 산란 매체를 통해 멀리 떨어진 물체를 3차원 플래시 라이다를 이용해 탐지하는 경우에 대해 수치 해석 모델을 적용하여 분석한 수치 결과를 제시하고, 이를 기반으로 라이다 신호가 산란 매체 안에서 어떻게 전파되는지를 논의한다. 그리고 MCRT 행렬을 활용하여 다양한 산란 조건하에서 3차원 플래시 라이다 신호가 겪게 되는 공간, 시간 및 전파 방향에 나타나는 혼선 효과와 신호대잡음비의 변화를 분석한다. 마지막으로 제4장에서는 이상의 논의에서 도출된 결론을 제시하고 MCRT 행렬 방법에 대한 향후 기대 효과에 대해 논의한다.

II. MCRT 행렬 기반 수치 해석 모델

MCRT 행렬 모델의 구성은 먼저, 신호를 발생시키는 광원 표면과 공간상에 방출된 신호를 반사시키는 물체의 표면을 설정하는 것으로 시작된다. 신호는 광원과 물체 사이를 전파하는 동안 일련의 산란 과정을 겪는다. 이후 물체에서 반사된 신호가 센서의 표면에 도달하게 되면 전체 연산 과정이 종료되며 이 과정에 대한 순서도를 그림 1에 나타내었다.

특성 응답 행렬을 얻는 과정은 그림 1 왼쪽에 위치한 둥근 모서리 네모 상자 안에서 확인할 수 있다. 먼저 MCRT 모델을 이용하여 라이다 신호가 라이다와 물체 표면 사이의 산란 매체를 지났을 때 나타나는 특성 응답을 계산한다. 그 다음, 광원, 물체, 센서 사이의 위치 관계와 표면의 기하학적 구조를 고려하여 특성 응답 행렬을 수정한다. 이때 복사 전달의 방향에 따라 순방향과 역방향의 복사 전달 행렬(radiative transfer matrix)로 설정되며, 이를 본 논문에서는 MCRT 행렬이라 칭한다. 이렇게 구한 MCRT 행렬들을 광원, 물체, 센서 표면의 정보를 나타내는 행렬과 함께 중첩 및 합성곱의 연산 과정을 거쳐 최종적으로 전체 신호의 전파 양상을 계산해낸다.

전술한 MCRT 행렬 모델의 기본적인 원리 및 구체적인 구성 절차, 이를 활용한 수치적 모델 구현과 본 모델의 장점에 대해서 다음에서 보다 자세한 논의를 진행한다.

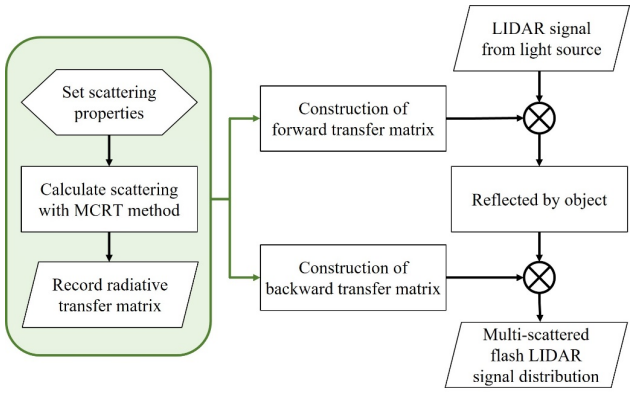

Fig. 1. Simulation procedure of the proposed MCRT matrix model. The part inside the round rectangle on the left side represents how to obtain the characteristic response.

2.1. 특성 응답 행렬의 구성

라이다 신호와 같은 실제 광신호를 시공간 축에 대하여 작은 사각 펄스의 형태로 분할하면 수 많은 가상의 광신호들의 집합으로 나타낼 수 있다. 이 가상 신호들은 서로 진행방향이나 시공간상의 위치, 신호의 세기가 다르지만, 그 초기 발산각과 펄스폭이 일정하다고 가정할 경우, 각 신호의 진행방향 기준 전파양상은 동일하다. 따라서 하나의 작은 가상 신호에 대한 전파양상을 알고 있다면 나머지 다른 가상 신호들의 전파양상을 모두 알 수 있으며, 이 가상 신호들의 전파양상을 합치는 것으로 실제 광신호의 전파양상을 도출해 낼 수 있다. 본 논문에서는 기본적 전파양상을 알기 위해 사용되는 하나의 작은 가상 신호를 단위 신호라 한다. 특성 응답 행렬은 실제 라이다 신호의 일부분에 해당하는 단위 신호가 광원에서 방출되어 산란 매체를 지나 물체 표면에 도달하였을 때 도착한 신호의 정보를 기록하는 것으로 구성된다. 광원에서 발생하는 단위 신호는 동일한 크기의 작은 신호 입자들의 집합으로 구성된다. 여기서 신호 입자는 단위 신호를 구성하는 가상의 정량화된 개별 신호를 의미한다. 즉, 몬테 카를로 기법 상에서 수치적로 정량화된 가상의 입자이다. 본 논문과 같이 기하광학을 기반으로 하는 경우, 각 신호 입자 간의 간섭은 발생하지 않고 각 신호 입자의 전파는 MCRT 모델에 따라 확률적으로 산란을 겪으면서 진행된다[11,13]. 이를 나타내는 개념도를 그림 2에 도시하였다. 이 때, 물체는 광원으로부터 일정 거리만큼 떨어져 있고, 그 표면은 단위 신호 전파 방향에 수직인 상태를 가정한다. 물체 표면에 도달하는 신호의 분포는 신호가 지나온 매체의 산란 특성에 따라 다른 분포를 가지게 되며, 물체 표면에 도달한 신호 입자의 위치, 시간, 각도 및 세기는 특성 응답 행렬의 형태로 기록된다. 예를 들어(단위를 생략하고 논의), 10.9의 세기를 가지는 신호 입자가 6.8의 시간에 3.1의 각도로 1.2의 위치에 도달한다면 특성 응답 행렬의 정량화된 성분인 위치 1, 각도 3, 시간 7에 해당하는 성분에 10.9의 세기가 더해진다. 이러한 연산이 모든 신호 입자에 대해서 적용될 경우 단위 신호에 대해 최종 합산된 결과, 즉, 단위 신호에 대한 특성 응답인 MCRT 행렬를 얻게 된다. 여기서 단위 신호는 편의상 광원 표면의 중심부에서 발생되고, 발산각은 물체 표면상의 단 하나의 단위 영역만을 덮도록 설정한다. 단위 신호는 전체 라이다 신호를 구성하기 위해 사용되는 가상의 신호이기 때문에 반드시 물리적으로 가능한 형태를 가질 필요는 없다. 따라서 계산상 편의를 위해, 단위 신호가 공간 및 시간 상에서 사각 펄스인 것으로 가정한다. 단위 신호는 물체 표면에 도달하기까지 산란 매체를 통해 전파되며 이때 발생하는 일련의 산란 과정은 MCRT 모델로 계산된다[11].

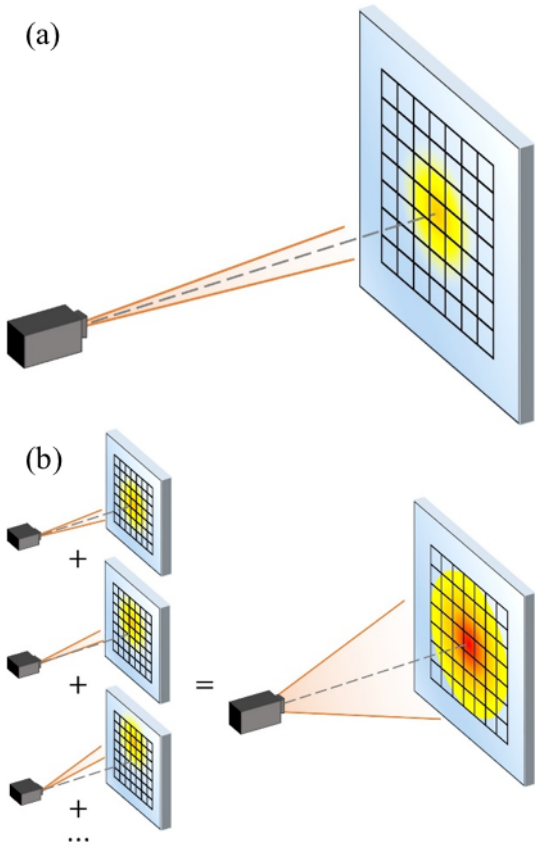

Fig. 2. Schematic diagrams for how to construct a radiative transfer matrix: (a) for the characteristic response and (b) for the real signal's response. The unit signal and the LIDAR signal generated from the light source on the left side are illuminated onto the screen on the right side. The screen is divided into imaginary grids, recording the signal power received separately by each zone. The real signal's response can be constructed by the relevant superposition of characteristic responses.

MCRT 모델에서는 매 시행마다 광원에서 신호 입자 하나를 방출하고 그 신호 입자가 어떤 가상의 평면에 도달할 때까지 일정한 확률로 신호 입자의 진행 방향과 신호의 세기가 바뀐다[11]. 신호 입자가 가상 평면에 도달했을 때 위치, 시간, 입사각, 세기 등이 기록되며 더 많은 신호 입자에 대한 기록이 쌓일수록 데이터는 특정한 분포를 가지게 된다. 일정한 확률로 나타나는 신호 입자의 변화는 라이다 신호의 산란을 의미하고, 통합된 신호 입자들의 기록을 통해 나타나게 되는 분포는 단위 신호가 산란 매체를 지나 전파되는 양상을 나타낸다. 신호 입자는 일정한 확률로 산란 현상이나 물체 표면에서의 반사를 겪으면서 예상 경로를 벗어나고, 이중 일부는 지정된 기존 채널에서 다른 채널로 이동하여 예상 범위를 벗어나 다른 센서에서 검출될 수 있다. MCRT 모델에서는 신호 입자가 지날 수 있는 모든 경로를 확률적으로 고려하여 추적하므로 일련의 산란 효과를 매우 단순하게 정량화 할 수 있다. 자세한 MCRT 모델링의 절차는 Wang 및 Jacques의 논의를 참조한다[13].

산란 현상의 빈도와 산란 현상으로 인한 경로 변화의 정도는 MCRT 모델에서 중요한 역할을 한다. 산란 현상의 빈도는 산란 계수에 직접적인 영향을 받으며, 산란 계수는 통상적으로 Kim 모델을 사용하여 계산할 수 있는데, 그 식은 다음과 같이 주어진다[16-18].

$$\mu_{scat} = \frac{3.91}{V}\left(\frac{\lambda}{550\times10^{-9}}\right)^{-q}\ [m^{-1}],$$

$$\begin{cases} (V<0.5km)\ q=0 \\ (0.5km<V<1km)\ q=V-0.5 \\ (1km<V<6km)\ q=0.16V+0.34 \\ (6km<V<50km)\ q=1.3 \\ (50km<V)\ q=1.6 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 μ_{scat}은 대기의 산란에 의한 산란 계수를 말하고, V와 λ는 각각 대기의 가시거리 및 신호의 파장을 나타낸다. 가시거리가 짧을수록 산란이 상대적으로 더 자주 발생하여 그에 따라 라이다 신호의 손실과 산란 효과가 증가한다.

산란 현상이 일어날 때마다 신호 입자의 새로운 전파 방향은 확률적인 방식으로 결정된다. 산란 방향의 확률 분포는 대기 상태에 따라 달라지며 다양한 위상함수(phase function)로 나타낼 수 있다[12]. Henyey-Greenstein 위상함수는 대기 중 작은 입자나 에어로졸에 의한 산란을 설명하는데 널리 사용되며, 이로부터 산란 방향에 대한 확률 밀도 함수는 다음과 같이 표현될 수 있다[19].

$$F_n(\theta) = \frac{1}{4\pi}\frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

$$F_{total} = \Sigma_n C_n F_n\ (\Sigma_n C_n = 1). \quad (3)$$

θ는 빛이 들어오는 방향과 산란 방향 사이의 각도이며 g는 주어진 매체의 이방성(anisotropy)을 나타낸다. 식 (2)는 타원형의 산란 분포이지만, 이 식을 중첩하여 더 복잡한 산란 분포도 모사할 수 있다[20].

라이다가 실외 동작 조건에서 작동하는 경우, 라이다 신호는 대규모 산란 입자를 포함하는 비균질 매체(inhomogeneous medium)를 통해 전파될 수 있다. 예를 들어, 자율 주행에서 라이다 시스템을 사용하는 경우, 맑거나 안개 낀 날씨는 통상적으로 균질 매체(homogeneous medium)로 간주될 수 있다. 하지만, 비나 눈 혹은 모래폭풍이 올 때, 빗방울, 눈송이 또는 모래입자가 존재하면서 추가적으로 별개의 산란을 일으키기 때문에 대기를 단순한 균질 매체로 볼 수는 없으며 이러한 조건에서는 비균질 산란 입자에 의해 일어나는 산란 또한 고려해야 한다. 산란 입자는 입사광을 산란시키는 작은 입자로 가정할 수 있으며, 이들 산란 입자의 움직이는 속도는 빛의 전파 속도에 비해 매우 작은 값을 갖기 때문에 라이다 신호 전파 중에는 산란 입자 자체는 정지된 것으로 간주할 수 있다. 그러므로 기상 조건에 따라 산란 입자의 밀도를 계산한 뒤 그만큼의 정지된 산란 입자들을 광원과 가상의 평면 사이에 무작위로 배치시키는 것으로 산란 입자의 분포를 표현할 수 있다. 수치 해석 과정에는 신호 입자가 진행할 때마다 각각의 산란 입자에 충돌하는지 확인한 뒤 충돌하면 추가적으로 산란을 일으키는 과정을 추가해야 한다. 산란 입자를 고려하여 계산할 때 충돌 여부를 확인해야 하므로 전체 영역 내에 배치된 총 산란 입자의 수가 늘어날수록 연산 시간이 늘어난다. 이 경우, 수치적 근사 기법을 활용하여 신호가 주로 전파되는 경로 주위에만 산란 입자를 배치하면 그 연산 시간을 효과적으로 절약할 수도 있다.

2.2. MCRT 행렬의 구성

그림 2와 같이 각 단위 신호에 대한 특성 응답 행렬을 중첩하여 라이다 신호 전파를 계산할 수 있다. 따라서 라이다 신호 전파를 계산할 때 각 단위 신호에 대한 특성 응답 행렬을 얻는 것은 매우 중요하다. 각 단위 신호는 출력, 방출 위치 및 전파 방향이 다 다르기 때문에 특성 응답 행렬은 모두 다 달라질 수 있다. 그러나 라이다 시스템은, 그 시스템 자체의 길이에 비해 상대적으로 더 멀리 떨어진, 즉, 원거리에 존재하는 물체를 탐지하므로, 단위 신호 간의 개별적인 차이는 공간해상도에 비해 그리 크지 않다. 따라서 방출 위치에 따른 차이는 근축 근사(paraxial approximation)를 통해 각 단위 신호의 특성 응답 행렬의 변화로 쉽게 설정할 수 있다. 특성 응답 행렬은 신호 세기의 분포를 기록하므로 그 결과는 단위 신호의 세기에 비례한다. 따라서 단위 신호 세기에 의해 발생한 차이는 단위 신호 간의 세기 비율을 단순히 행렬에 곱하여 쉽게 구현할 수 있다. 또한, 단위 신호가 다른 위치에서 생성되면 그 차이만큼 도달 위치에 해당하는 행렬 성분을 평행 이동함으로써 구현할 수 있다. 특성 응답 행렬은 산란된 빛의 분포를 구간별로 나누고 각 정보를 개별적으로 기록하기 때문에 이와 같은 적용이 가능하다. 라이다와 물체 사이의 거리가 차이가 나는 경우도 있다. 차이가 크지 않은 경우는 도달 시간을 그만큼 증가시키고 도달 위치에 해당하는 행렬 성분들을 중심에서 멀어지게 이동시키면 되고, 차이가 큰 경우는 그 차이만큼 신호 입자가 한번 더 진행한다고 생각하여 주어진 특성 응답 행렬에 늘어난 길이에 해당하는 특성 응답 행렬을 합성곱으로 연산하면 된다. 다만, 입사각의 차이를 반영하는 것은 조금 더 복잡하다. 단위 신호의 전파 방향이 변함에 따라 입사각도 변경된다. 입사각은 센서의 방향에 의존하기에 전파 방향 및 센서 방향을 고려하여 입사각의 변화를 계산하여야 한다. 그리고 전파 방향이 변경될 때, 평면상의 도달 위치도 변경되므로, 공간 영역에서의 행렬 성분의 평행 이동도 필요하다. 단위 신호가 발생된 지점은 동일하지만 그 도착 지점이 다르기 때문에 신호의 이동 거리 차이에 따른 신호의 세기 및 도착 시간 차이 또한 발생한다. 따라서 일차적으로 가장 기본적인 단위 신호가 가지는 특성 응답 행렬을 구한 후, 전술한 각각의 변형 요소들을 주어진 조건에 맞게 적용하여 해당 단위 신호가 가지는 각각의 특성 응답 행렬을 또한 구한다. 결과적으로 이렇게 구한 개별 특성 응답 행렬들을 주어진 조건에 맞게 중첩시켜서 최종적으로 라이다 신호 전파를 나타내는 MCRT 행렬을 구성하게 된다.

2.3. 플래시 라이다 시스템 모델링

앞에서 구한 MCRT 행렬은 매체를 통과한 라이다 신호의 단방향 전파 특성을 나타낸다. 그러나 최종적으로 센서 어레이에서 검출되는 라이다 신호는 신호광의 순방향 전파, 역방향 전파, 광원 세기 분포 및 반사를 나타내는 행렬을 통합적으로 고려하여 계산해야 하며, 결과는 다음과 같은 행렬 방정식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} &v_i = (\theta_{i,}\, \phi_{i,}\, x_{i,}\, y_{i,}\, z_{i,}\, t_i), \\ &\Sigma_{v_0} M(v_f - v_0) P_0(v_0) = P_f(v_f), \\ &\Sigma_{v_f} R(v_r - v_f) P_f(v_f) = P_r(v_r), \\ &\Sigma_{v_r} M(v_{d-v_r}) P_r(v_r) = P_d(v_d). \end{aligned} \tag{4}$$

v_i는 라이다 신호 특성을 결정하는 변수들의 벡터적 표현으로 변수들, 즉, θ_i, ϕ_i, x_i, y_i, z_i, t_i로 구성되며 각각 수광부 혹은 반사체에서의 입사각, 방위각, 수평 위치, 수직 위치, 거리 위치, 전파 시간을 나타낸다. 각각 변수 값의 범위를 분해능으로 나누었을 때 나오는 수만큼의 다양한 값을 가지며, v는 이런 각 수들을 다 곱해서 나오는 수만큼 다양한 값을 가진다. 광축에서 벗어나는 정도를 나타내는 입사각 θ_i뿐만 아니라 방위각 ϕ_i도 전파 과정에서는 고려되지만, 수광부 및 반사체에서 방위각에 대한 의존도가 없다고 가정할 경우, 입사각에 대한 정보만 있으면 충분하므로, 최종 연산에서는 생략될 수 있다. P는 특정 위치에서의 신호의 세기 분포, M은 신호 전파와 관련한 MCRT 행렬, 그리고 R은 물체 표면의 반사율 분포를 나타낸다. 아래 첨자 i에 대응하는 0은 광원의 위치를 나타내고, f는 반사가 발생하기 직전인 반사 물체 표면 바로 앞을 나타낸다. r은 f와 위치는 동일하지만 반사가 일어난 직후를 나타낸다. d는 플래시 라이다 센서 어레이의 위치를 나타낸다.

P, M, R은 각각 모든 v에 해당하는 신호의 세기 값을 성분으로 가지는 행렬들이며 $A(v_1)$은 행렬 A의 v_1에 해당하는 성분인 신호의 세기를 의미한다. 신호의 전파를 모사하기 위해서는 광신호가 한 상태 v_1에서 다른 상태 v_2로 변할 때 신호의 세기가 어떻게 변하는지를 알아야 하는데 이는 $\Sigma_{v_1} B(v_2 - v_1) A(v_1)$과 같이 표현되며 이 결과를 A와 B의 합성곱이라 한다. 이때 A는 전파 직전의 신호의 세기 값을 가지고 있으며 B는 광신호가 특정한 상황을 겪었을 때 나타나는 세기의 변화율을 성분으로 가지고 있다. 그러므로 식 (4)와 같이 라이다에서 방출되는 신호의 세기 분포를 의미하는 행렬과 순방향 전파에 해당하는 행렬의 합성곱을 취할 경우, 라이다 신호의 순방향 전파를 모사하는 것이 가능하고, 같은 원리로 반사와 역방향 전파도 모사가 가능하다. 이러한 일련의 합성곱 연산 과정들을 거쳐 라이다 신호 전파 전체를 모사할 수 있다. 결과적으로, 라이다 신호 전파를 설명하기 위해서는 기본적으로 순방향 전파, 반사 및 역방향 전파에 해당하는 세 가지 행렬이 필요하다.

라이다 신호의 순방향 전파는 앞에서 설명한 MCRT 행렬을 이용하여 계산할 수 있다. 그 후, 라이다 신호는 물체의 표면에 도달하고 신호의 반사가 일어난다. 신호의 일부는 물체에 흡수되어 손실되므로 물체의 반사율은 라이다 신호의 손실에 중요한 역할을 한다. 신호의 손실 외에도 반사는 신호의 전파 방향의 변화를 유발하며 반사의 종류에 따라 반사 방향이 달라진다[21]. 예를 들어, 아스팔트로 포장된 도로의 표면은 거칠기 때문에 난반사가 일어나지만, 자동차 표면은 매끄럽고 광택이 있으므로 거울 반사가 지배적으로 일어난다. 따라서 반사 종류에 따라 반사가 일어나는 방식을 고려한 후 전파 방향의 변화를 결정하여야 한다. 거울 반사는 입사각과 반사각이 동일하므로 계산이 간단한 반면, 이상적인 난반사는 입사각과 관계없이 물체 표면에 수직한 방향을 기준으로 한 람베르트(Lambertian) 반사 세기 분포를 가지고 반사된다[21]. 통상적으로 일반적인 물체 표면에 의한 반사는 거울 반사와 난반사의 중첩으로 설명될 수 있으며, 그 비율은 물체 표면의 특성에 따라 결정되므로 이에 따라 물체 표면에 의한 반사를 모델링할 수 있다.

마지막으로 역방향 전파는 전파 방향이 반대가 되는 경우이지만, 대상 물체를 광원, 라이다의 센서 어레이를 대상 물체라고 생각하면 순방향 전파와 큰 차이는 없다. 단순한 대칭적 구조의 경우 순방향 전파 결과를 역방향 전파 계산에 그대로 활용하는 것도 가능하다. 역방향 전파 후 라이다 신호가 센서 어레이에 감지되므로 역방향 전파까지 계산한 결과 행렬이 라이다 신호 전산 모사의 최종 결과물이다. 그러나 라이다 시스템의 센서 어레이는 그 특성에 따라 수광각도(acceptance angle), 각해상도, 시간 해상도 및 유효 감지 영역에 한계가 있다. 따라서 MCRT 행렬 연산을 통해 얻은 최종 결과 중 라이다 센서 어레이의 특성 및 한계의 범위 안에 드는 유효한 결과만을 취해 최종 라이다 검출 신호를 도출한다. 이는 실제로 라이다 시스템이 검출하는 신호에 대응되며, 센서 어레이의 특성과 한계를 충분히 고려한 검출 결과라 하겠다.

2.4. 연산 시간의 단축

MCRT 행렬 모델은 기존 방식인 MCRT 모델보다 훨씬 짧은 시간 안에 산란 효과를 분석해낸다. MCRT 모델의 기본적인 특성을 논의해 보는 것으로 MCRT 행렬 모델의 연산 시간 단축을 확인할 수 있다. MCRT 모델에서 라이다 신호 세기의 정밀도는 전체 신호 입자의 개수와 직접적으로 연관된다. 따라서 신호 입자의 개수를 증가시켜야만 수치 해석 결과의 정확도를 향상시킬 수 있다. 각 신호 입자의 진행은 별도로 추적되므로 신호 입자의 개수에 따라 그 계산 시간도 비례하여 증가한다. 그러나 MCRT 행렬 모델에서는 단위 신호의 특성 응답 행렬을 도출할 때만 MCRT 모델을 사용하고, 이 특성 응답 행렬을 근사적으로 재사용함으로써 신호 입자 전체에 대한 개별적인 반복된 계산 과정 없이도 전체 신호가 전파된 결과를 효과적으로 계산해 낼 수 있다. MCRT 행렬

모델의 경우를 기존의 MCRT 모델과 비교할 때, 특성 응답 행렬을 재사용하는 정도에 비례하여, 다시 말해서, 단위 신호가 더욱 세밀해질수록, 실제 계산을 진행하고 개별 추적해야 하는 신호 입자의 개수가 상대적으로 현격히 줄어들게 되므로, 그 총 연산량이 대폭 줄어든다. 이러한 효과는 신호 송신부의 단위 신호에 대한 모델링이 더 세밀해져야 하는 경우를 포함하여, 보다 정밀한 전사 모사 분석이 필요할 경우, MCRT 행렬 모델의 장점으로서 더욱 부각된다.

또한, 플래시 라이다는 기본적으로 그 기하학적 특성으로 인해 전산 모사를 할 경우 연산량이 기하급수적으로 커지는 문제를 안고 있다. 라이다 신호는 거리가 멀어질수록 세기는 약해지나 넓은 면적에서 반사되어 돌아오므로 하나의 소자에 돌아오는 신호의 총량은 $1/r^2$에 비례한다. 하지만 신호의 산란 현상을 분석할 때는 반사되는 위치에 존재하는 물체가 항상 충분히 넓은 수광 및 반사 면적을 차지하고 있는 것은 아니며, 먼 거리에 있는 물체일수록 더욱 더 큰 면적을 가져야만 신호가 $1/r^2$에 비례하는 조건을 만족하게 된다. 따라서 임의의 수광 면적을 가지는 물체에 대해서 정확한 계산을 진행하기 위해서는 반사광들의 세기가 $1/r^4$에 비례한다고 가정하고 진행하는 것이 적절하다. 단적인 예로, 지정된 거리에 위치한 반사체의 크기가 해당 거리에서 단위 라이다 센서의 수광각도에 의해 정의된 최대 크기에 비해 상대적으로 충분이 작다면, 이 반사체에서 돌아오는 신호의 세기는 근사적으로 $1/r^4$에 비례하게 되므로, 보다 정확한 해석을 위해서는 이에 해당하는 만큼 신호 입자의 개수를 늘려야 한다. 따라서 탐지 범위가 증가하면 연산량 혹은 연산 시간이 급격하게 늘어난다. 그러나 MCRT 행렬 모델에서는 MCRT 모델 연산을 기본적으로 순방향과 역방향 전파에 대해 각각 한 번만 수행하고 이를 근사적으로 수정 재사용하여 전체 결과를 얻기 때문에 개별 추적이 필요한 총 신호 입자의 개수는 기본적으로 r^2에 비례하는 장점을 지니게 된다. 결과적으로 MCRT 행렬 모델에서의 연산 시간은 MCRT 모델보다 탐지 범위에 훨씬 덜 민감하므로 MCRT 행렬 모델이 기존의 MCRT 모델보다 플래시 라이다에서의 전파 및 산란을 해석하는데 더 효율적으로 사용될 수 있다.

III. 산란 효과 수치 해석 결과 분석 및 논의

본 장에서는 제 2장에서 설명한 MCRT 행렬 모델을 사용하여 산란 매질 안에서 작동하는 플래시 라이다 시스템을 전산 모사하고 그 특성을 분석한다. 수치 해석에 사용되는 매개변수들은 기본적으로 차량 주행에 사용되는 상용 플래시 라이다 시스템의 사양들을 참조하였다[22,23]. 즉, 그 측정 거리는 수십 미터 내외로, 비행기 또는 위성에서 사용하는 통상적인 라이다 시스템에 비해 매우 짧은 거리를 가정한다. 또한, 광원에서 발생하는 라이다 신호는 1 W의 최대 전력, 1 ns의 시간 폭 및 30°의 빔 발산 각도를 갖는 구형 펄스로 동작하며, 그 파장은 905 nm로 가정한다[22]. 라이다 시스템은 안개가 자욱한 날씨의 도시 지역에서도 사용될 수 있으므로 대기의 가시거리는 1 km부터 10 km까지 다양한 값을 적용한다[24]. 그 중 실제 기상 조건인 맑은 날씨(clear), 실안개(haze), 엷은 안개(mist) 그리고 짙은 안개(fog)에 해당하는 값으로 8 km, 4 km, 2 km, 1 km를 사용한다. 또한, 라이다 센서 어레이에서 각 센서의 수광각은 10 mrad로, MCRT 행렬의 입사각, 공간 및 시간 해상도는 각각 1 mrad, 0.01 m, 0.1 ns로 가정한다. 이후에 따로 언급되지 않는 한 모든 수치 해석에 사용된 매개 변수는 표 1에 정리된 바와 같다.

Table 1. Parameters used in the simulations

Parameter	Value
Anisotropy of atmosphere	0.7
Operating wavelength	905 nm
Radiation power of source	1 W
Pulse width of radiated signal	1 ns
Divergence of radiated signal	30°
Acceptance angle	10 mrad
Object distance	10 m / 40 m
Reflectivity of object	0.1
Number of trials	10^8
Angular resolution	1 mrad
Spatial resolution	0.01 m
Temporal resolution	0.1 ns

3.1. 특성 응답 행렬과 산란

제 2장에서 기술한 바와 같이, 특성 응답 행렬은 MCRT 모델을 기반으로 산란 매질을 통과한 신호를 계산하여 얻어진다. 특성 응답 행렬을 계산하는 과정에 산란 효과가 포함되므로 특성 응답 행렬이 직접적으로 라이다 시스템에 적용되기 전 단계라 할지라도, 이로부터 광신호의 산란에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어, 거리 10 m 위치에 가상의 수광부가 존재한다고 가정하고 순방향 전파에 대한 특성 응답 행렬을 구하여 그 결과를 확인해볼 수 있는데, 이하 그림 3, 4, 5에 도시된 결과는 각각 이 순방향 전파에 대한 특성 응답 행렬을 통해 구한 가시거리에 따른 신호대잡음비, 각도에 따른 신호세기, 시간에 따른 신호세기를 나타낸다.

먼저, 특성 응답 행렬에서 신호대잡음비는 쉽게 얻을 수 있는데, 이는 특성 응답 행렬을 계산할 때 광원에서 생성되는 신호는 물체 표면 중앙을 향하고 그 크기는 단위 면적과 일치하므로, 중앙에 위치한 단위 면적에 도달하는 광 신호가 실제로 우리가 원하는 신호에 대응되고, 전파 도중 산란되어 다른 위치의 단위 영역에 도달하는 신호는 잡음에 대응되기 때문이다. 따라서 신호대잡음비는 행렬에서 중앙 단위 영역(central unit area)에 대응되는 성분과 중앙 단위 영역 주위의 인접한 단위 영역에 대응되는 성분들의 합과의 비로 구할 수 있다. 이렇게 구한 신호대잡음비는 인접한 라이다 센서 간의 혼선 효과를 보여주며 혼선 효과는 라이다의 거리 분해능을

결정하는 중요한 요소이다. 그림 3은 다양한 가시거리에 대한 신호대잡음비를 보여주며, 이러한 신호대잡음비는 시간상 중앙 단위 영역에 도달하는 빛의 세기가 최대일 때의 값들을 기준으로 계산한다. 그림 3에서 계산된 결과의 변화 추이를 표현하기 위해 삽입된 점선 곡선은 라이다 신호의 기본적인 전파 특성을 고려하여 다음의 함수 형태로 근사하였다: $SNR \approx e^{-\mu_{scat}\times r}/(1-e^{-\mu_{scat}\times r})$, $\mu_{scat}=\frac{a}{V}\times b^{V}$. 그림 3에서 가시거리가 저하됨에 따라 신호대잡음비가 감소하고 그 감소폭은 가시거리가 줄어들수록 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 가시거리가 짧아질수록 산란 효과가 커지고 신호가 공간상에 더 넓게 퍼진다는 것을 의미한다. 중앙 단위 영역에 도달하는 신호 세기는 산란 계수에 따라 기하 급수적으로 감소하는데 이는 짧은 가시거리에서 라이다의 성능 저하를 의미한다. 특기할 사항은 날씨 조건이 나빠져서 흡수와 산란 효과가 증가한다 할지라도 맑은 날씨일 때의 결과와 비교하면

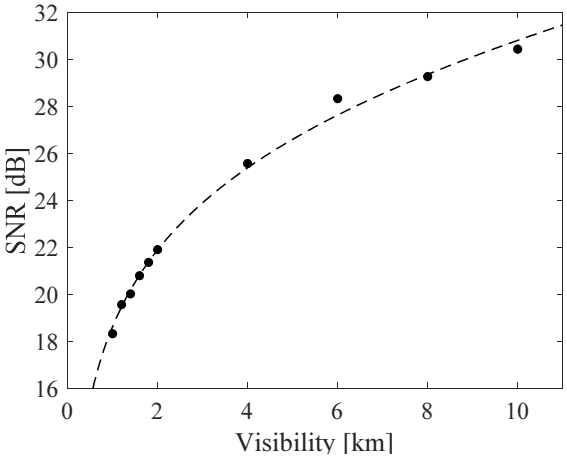

Fig. 3. Calculated SNR with respect to visibility. Note that the fitting curve in a dashed line is based on a function in a form of $SNR=\frac{e^{-\mu R}}{1-e^{-\mu R}}$, $\mu=\frac{a}{V}\times b^{V}$.

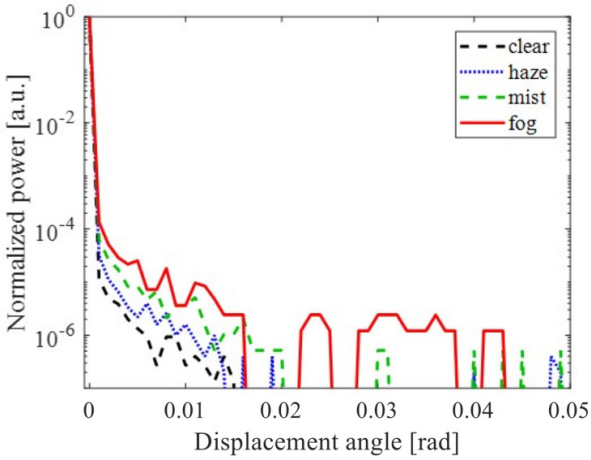

Fig. 4. Spatial scattering profiles for various visibilities. The received signal power is normalized by the power of the signal received in the central unit area.

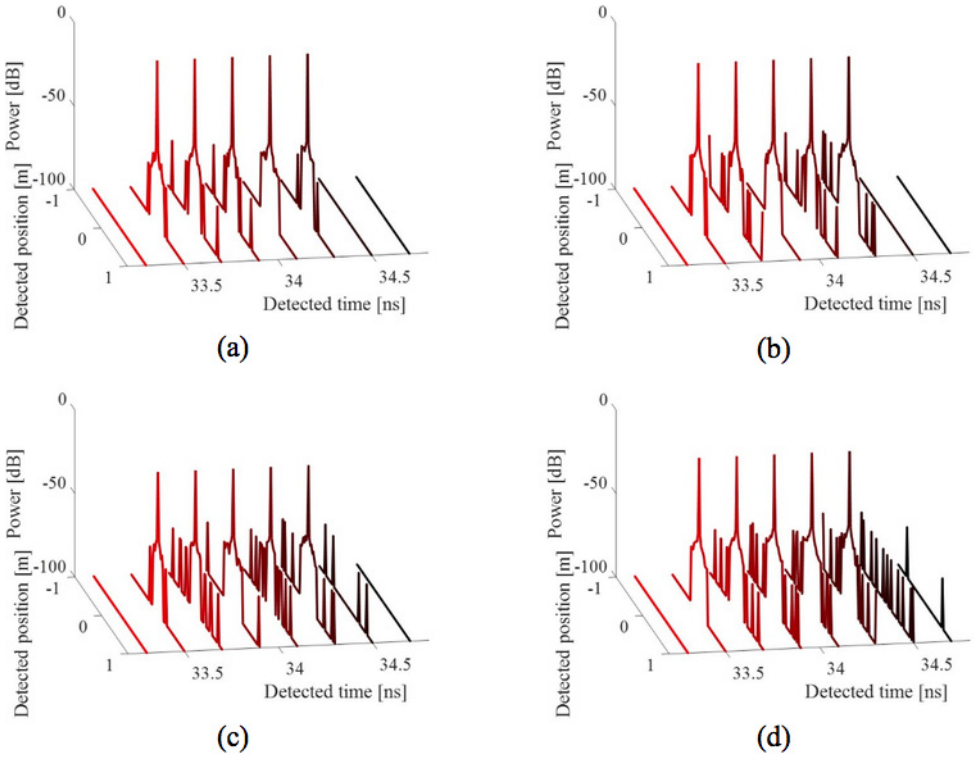

Fig. 5. Change of the spatial scattering profiles over time for different weather conditions. (a) Clear. (b) Haze. (c) Mist. (d) Fog.

중앙 단위 영역에 수광되는 신호의 세기는 크게 감소하지 않는 반면, 중앙 근처에서 발생하는 노이즈가 상대적으로 급격히 증가한다.

그림 4는 단위 신호의 공간상 산란 양상을 보여준다. 다양한 기상 조건에 따라 신호가 공간상에서 어떻게 퍼지는지를 보여주는 그래프이다. 각각의 단위 영역의 위치는 중앙 단위 영역으로부터의 상대적인 위치로 표시되고, 신호의 세기는 중앙 단위 영역에 도달하는 신호의 세기를 기준으로 정규화하였다. 그림 4의 그래프에서 특정 범위 내의 신호는 강하고 연속적인 결과를 나타내는 반면, 특정 범위 밖의 신호는 신호 오류(glitch) 형태로 나타난다. 이는 센서에 수광각이 존재하기 때문이다. 광원에서 나온 빛이 한 번 산란되는 경우 다른 채널의 센서에 도달하게 되는데 이때 센서의 수광각이 신호의 입사각을 포함할 정도로 넓다면 신호로 검출이 되고, 그렇지 않다면 검출되지 않는다. 그러므로 수광각을 조절하는 것으로 강하고 연속적인 신호가 나타나는 범위를 조절할 수 있고, 이를 통해 단일 산란된 신호를 걸러낼 수 있다. 그러나 다중 산란된 신호의 경우 입사각이 일정하지 않으므로 신호로 인식될 가능성이 여전히 존재하며 이는 신호 오류의 형태로 나타난다. 기상 조건에 따른 차이를 보면 날씨 조건이 악화될수록 산란이 더 많이 발생함을 쉽게 알 수 있다. 중앙 주위에서 수신된 신호의 세기가 상대적으로 더 강해지는 반면, 중앙에서 멀리 떨어진 센서일수록 더 많은 신호 오류가 나타난다.

신호가 산란될 때, 신호는 공간상에서 확산될 뿐만 아니라 시간상에서도 추가적인 지연을 겪게 되는데, 이는 그림 5에 나타나 있는 산란 신호 분포의 시간에 따른 변화를 통해 확인할 수 있다. 중심 근처에 도달하는 신호의 경우 적은 산란 횟수로 인해 날씨 조건에 따른 영향은 크지 않다. 그러나 중심에서 멀어진 위치에서 발생하는 신호 오류의 경우 기상 조건에 상대적으로 큰 영향을 받는다. 맑은 날씨일 때는 신호 오류가 거의 없으며 실안개 상태에서는 신호 오류가 어느 정도 나타난다. 그러나 엷은 안개일 때는 신호 오류가 실안개일 때보다 더 자주 나타날 뿐만 아니라, 중심 근처의 신호가 일정 시간이 지난 후에도 사라지지 않고 더 많이 남아 있게 된다. 이는 신호의 전파가 산란에 의해 방해되어 발생하는 신호의 지연 효과에 기인한다. 이 현상은 더 많은 산란이 발생하는 날씨에서 더욱 두드러진다. 즉, 기상 상태가 악화됨에 따라 라이다 신호가 더욱 지연되는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 플래시 라이다 수치 해석 결과

플래시 라이다 시스템의 전산 모사는 제 3.1절에서 구한 특성 응답 행렬을 기반으로 수행되었다. MCRT 모델 대신 MCRT 행렬 모델을 사용함으로써, 라이다 신호의 복잡한 산란에 의한 효과를 고려하면서도 더 짧은 시간 안에 플래시 라이다 수치 해석 결과를 얻을 수 있다. 그 예로 표면에서 반사도 0.1로 난반사를 일으키는 반경 1 m의 디스크 형태의 물체가 라이다에서부터 10 m 떨어져 있는 경우에 대해 계산하는데 통상적인 개인용 컴퓨터를 사용할 경우, 기존의 MCRT 모델을 적용하게 되면 약 17일이 소요되지만, MCRT

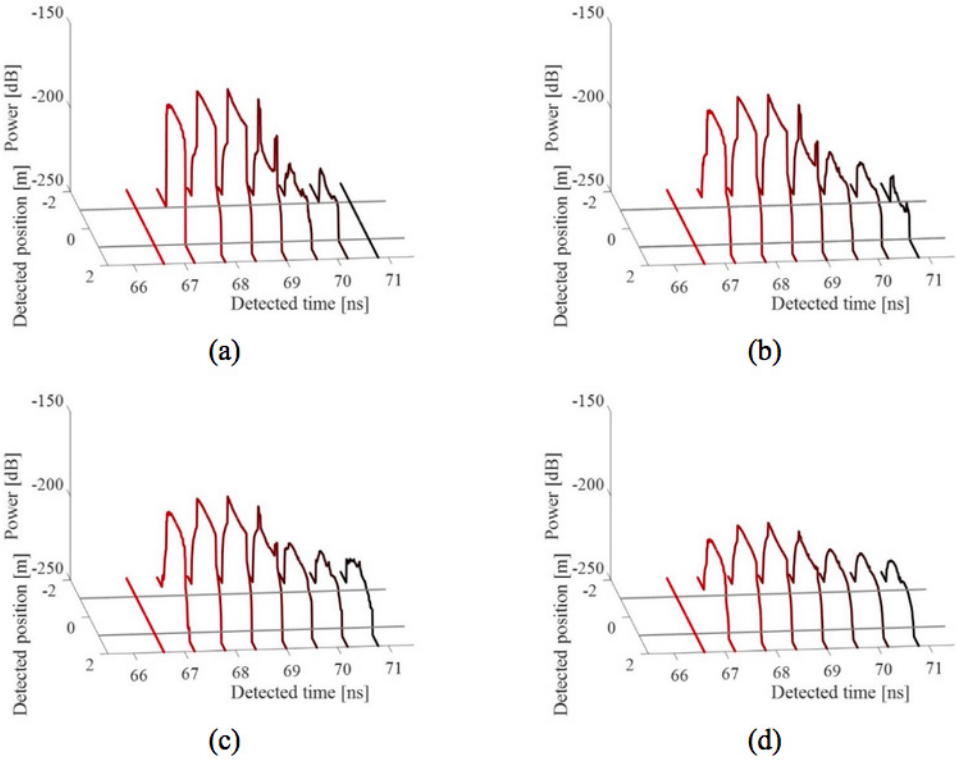

Fig. 6. Change of spatial scattering profiles over time for different weather conditions. (a) Clear. (b) Haze. (c) Mist. (d) Fog.

행렬 모델을 적용하게 되면 유사한 해상도의 결과를 얻는데 약 32시간 정도가 소요되었다. 즉, MCRT 행렬 모델을 사용할 경우 그 연산 속도가 기존의 MCRT 모델을 사용할 경우에 비해 주어진 조건에서 대략적으로 12배 이상 빨라졌다는 것을 의미한다.

MCRT 행렬 모델로 얻은 라이다 신호에서 라이다와 물체 사이의 거리를 계산할 수 있는데, 먼저, 전술한 반사도 0.1의 반경 1 m의 디스크 형태의 물체가 10 m 떨어져 있는 경우에 대하여 적용해 보고자 한다. 그림 6은 각 기상 조건에서 라이다 신호의 공간상 분포를 시간의 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 산란이 적은 맑은 날씨의 경우 처음에는 이동거리가 가장 짧은 경우인 물체의 중심에서 반사된 신호가 가장 강하고 그 뒤에는 물체의 가장자리에서 반사된 신호가 강하다. 이 경우 산란이 좀처럼 일어나지 않지만 산란의 영향으로 인해 약한 세기의 지연된 신호가 존재한다. 실안개 조건의 경우 신호는 맑은 날씨의 경우와 유사하지만 산란으로 인해 신호의 지연이 더 많이 발생하고 오래 간다. 엷은 안개 조건에서는 산란 효과로 인해 신호의 세기가 눈에 띄게 줄어드는 반면, 지연된 신호의 세기는 강해지고 더 오래 지속된다. 게다가 증가된 산란이 왜곡을 일으켜 물체의 중심과 가장자리에서 반사되어 오는 신호의 경계가 크게 무뎌졌다. 마지막으로 짙은 안개 상태의 경우 왜곡이 심해져서 물체의 중심과 가장자리에서 반사되어 오는 신호를 구별할 수 없으며 제때 도착한 신호와 지연된 신호 또한 구분하기가 어렵다. 이러한 산란에 의한 신호의 확산 및 혼선은 공간상에서 뿐만 아니라 시간상에서도 발생하므로 라이다 시스템의 정확도 및 해상도에 부정적인 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

그림 7에서 감지된 라이다 신호의 세기에 대한 점군(point cloud) 분포를 각기 날씨 조건에 따라 분할하여 한 번에 도시하였는데, 여기에서는 산란의 영향을 더 명확하게 확인하기 위해 물체와의 거리가 10 m인 경우뿐만 아니라 40 m인 경우도 추가하여 논의하고자 한다. 여기서 40 m는 상용 플래시 라이다의 통상적인 실제 동작 가능 측정 거리를 참고하였다[25]. 각각의 경우 신호의 세기는 맑은 날씨 조건에서 감지된 라이다 신호의 최대치를 기준으로 정규화하였고, x 및 y축은 반사체 표면상의 공간좌표를 의미한다. 먼저 거리가 10 m인 그림 7(a)를 보면 왼쪽 상단의 맑은 날씨를 보면 물체의 실제 크기에 해당하는 반경 1 m 내의 신호가 가장 강한 세기를 유지하고 1 m를 넘어선 영역에서는 그 세기가 급격히 감소하여 가장 이상적인 라이다 신호를 보여준다. 오른쪽 상단 섹터의 실안개의 경우와 비교하면, 반경 1 m 내의 신호 세기는 약간 낮은 대신 그 외부에 약한 신호의 대역이 있다. 이것은 산란된 라이다 신호에 의한 것이다. 산란이 더 자주 발생하는 엷은 안개 조건의 경우 결과는 실안개의 결과와 비슷하지만 1 m 이내의 신호의 세기는 더욱 약해져 있다. 마지막으로, 짙은 안개 상태의 경우, 과도한 산란이 발생하며 1 m 이내의 신호 세기가 크게 약화되었고, 1 m 반경 밖에 존재하는 산란된 신호의 세기 또한 점군으로 표시되지 않을 만큼 약화되었음을 알 수 있다. 거리가 40 m인 그림 7(b)의 경우, 거리가 멀어지면서 점군의 밀도가 현저히 줄어들었으나, 왼쪽 상단의 맑은 날씨를 보면 여전히 이상적인 라이다 신호 분포를 보여준다. 거리 10 m의 경우에 비해 총 산란 횟수가 증가하여 각 날씨별 신호의 세기 차이가 더 두드러지게 나타나며, 실안개의 경우 신호가 많이 약해져 산란 신호 대역이 충분한 수의 점군으로 표시되지 않고, 짙은 안개의 경우 신호의 세기가 더욱 약해져서 시뮬레이션 상에서 어떤 신호도 점군으로 표시되지 않음을 알 수 있다.

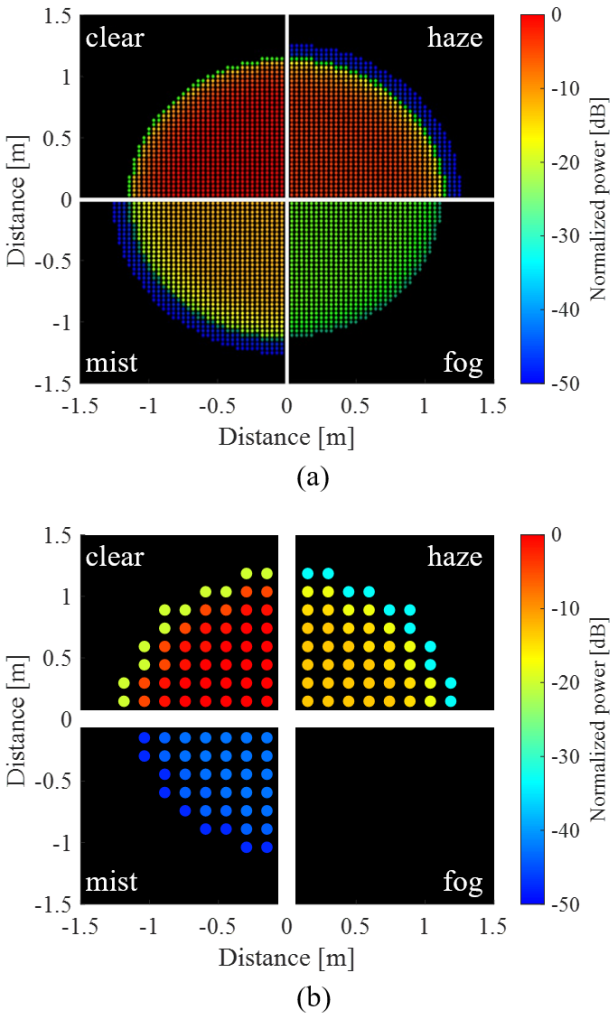

Fig. 7. Point cloud data for the detected LIDAR signals. The distance between LIDAR and reflective object is set by (a) 10 m or (b) 40 m. Each sector of the figure represents the detection result in the given weather condition. The LIDAR signal power is normalized based on the strongest signal power detected in the clear weather condition.

검출된 신호 세기를 좀더 정량적으로 확인해보면 그림 8과 같이 나타난다. 날씨 조건이 악화되고 산란이 많을수록 반경 1 m 내의 신호 세기는 그에 따라 감소한다. 한편, 산란된 신호는 반경 1 m 밖으로도 퍼져서 산란 신호 대역을 형성한다. 이 대역의 신호 세기는 거리가 10 m일 때는 실안개와 엷은 안개의 경우가 맑은 날 및 짙은 안개의 경우보다 더 강하다.

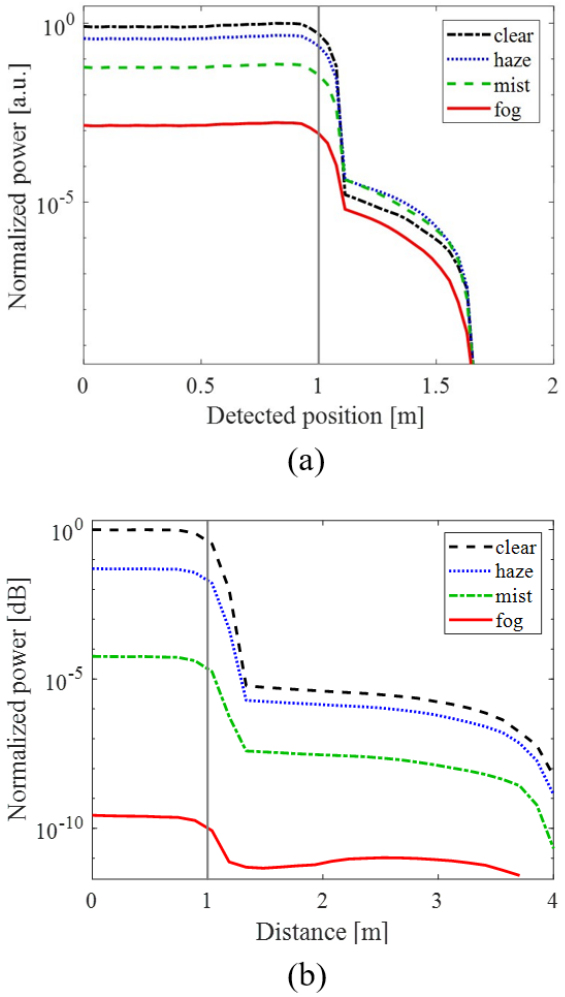

Fig. 8. Spatial scattering profiles for various visibilities. The distance between LIDAR and reflective object is set by (a) 10 m or (b) 40 m.

이는 실안개와 엷은 안개의 경우 산란 횟수가 많아지면서 신호가 산란 신호 대역에 도달할 확률이 높아지는 반면, 짙은 안개의 경우 과도한 산란에 의해 다시 돌아오는 신호의 양 자체가 전반적으로 급격하게 줄어 들었기 때문이다. 신호대잡음비를 보면 더 일반적인 결과를 확인할 수 있다. 거리가 40 m인 경우에는 전반적으로 신호가 산란되는 총 횟수가 늘어나기 때문에 수신되는 전체 신호 세기 자체가 이에 비례하여 감소한다. 이러한 추이는 짙은 안개의 경우에 더욱 현격히 나타난다. 한편, 반경 1 m 내부의 신호와 외부의 신호의 세기 비율, 즉, 신호대잡음비의 값은 기본적으로 날씨 조건이 악화될수록 더 감소함을 알 수 있는데, 이는 산란 현상이 빈번하게 발생하면 라이다 시스템이 그 만큼 정확하게 동작하기 어렵다는 것을 의미한다. 본 전산모사를 통해 얻게 되는, 매질의 산란에 기인한 플래시 라이다 신호의 시공간적 확산에 대한 정성적 및 정량적 특성은 실제 플래시 라이다 시스템 설계 및 개발 과정에서 매우 유용하게 자료로 활용될 수 있다.

IV. 결 론

3차원 플래시 라이다 시스템을 분석하기 위해 MCRT 모델에 기초한 수치 해석 모델인 MCRT 행렬 모델을 논의하고 개발하였다. 본 MCRT 행렬 모델은 두 가지 관점에서 기존 3차원 플래시 라이다 수치 해석 모델에 비해 우수하다고 할 수 있다. 첫째, MCRT 행렬 모델은 라이다 신호에 대한 대기 중 산란 효과를 용이하게 해석할 수 있다. 둘째, MCRT 행렬 모델을 사용하면 짧은 연산 시간으로도 충분히 복잡한 도시 환경에서 동작하는 플래시 라이다 시스템을 용이하게 해석할 수 있다. 따라서 MCRT 행렬 모델을 활용하여 3차원 플래시 라이다 시스템을 설계 및 분석하는 데 매우 유연하면서도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

MCRT 행렬 모델에서 가장 핵심적인 역할을 하는 MCRT 행렬은 특성 응답에서부터 유도하였으며, 이는 산란 매질을 통과한 광신호의 전파 특성을 나타낸다. 먼저, MCRT 행렬을 사용하여 공간 및 시간 상의 신호대잡음비 및 산란 신호 양상과 같은 다양한 관점에서 산란의 영향을 조사하였으며, 또한, MCRT 행렬 모델을 통해 다양한 기상 조건 하에서 플래시 라이다 신호의 전파 및 산란 양상을 확인하였다. 공간 상의 신호 전파 양상에서는 산란에 의한 라이다 신호의 손실과 산란 신호 대역이 관찰되었고, 시간 상에서는 산란에 의해 지연된 신호가 나타남을 확인하였다. 이러한 시공간상에 발생하는 산란의 영향은 플래시 라이다의 거리 측정 결과에 상당 부분 부정적인 영향을 줄 수 있다.

본 연구를 통해 MCRT 행렬 모델은 자율 주행 시스템 개발에 매우 중요하고 필수적인 기술인 3차원 플래시 라이다 시스템을 설계하고 분석하기 위한 강력한 수치 해석 도구가 될 수 있을 뿐만 아니라, 또한, 이 방법은 자율 주행을 위한 플래시 라이다 분석뿐만 아니라 다양한 복사 전달 분석에도 효율적인 수치 해석 방법이 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 The Technology Innovation Program (10065150)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 수치 해석 기본 개념 설정 및 전사 모사 시 도움을 준 동연구실 권영철, 한민곤 연구원에게 심심한 감사를 표합니다.

References

1. D. J. Natale, R. L. Tutwiler, M. S. Baran, and J. R. Durkin, “Using full motion 3D Flash LIDAR video for target detection, segmentation, and tracking,” in *Proc. Southwest Symposium on Image Analysis & Interpretation (SSIAI)* (TX, USA, May 2010), pp. 21-24.
2. A. Bulysheva, D. Pierrottetb, F. Amzajerdianc, G. Buschb, M. Vanekc, and R. Reissec, “Processing of 3-dimensional flash lidar terrain images generated from an airborne platform,” Proc. SPIE **7329**, 73290I (2009).

3. J. Sun, J. Liu, and Q. Wang, "A multiple-slit streak tube imaging lidar and its detection ability analysis by flash lidar equation," Optik **124**, 204-208 (2013).
4. C. H. Jang, C. S. Kim, K. C. Jo, and M. Sunwoo, "Design factor optimization of 3D flash lidar sensor based on geometrical model for automated vehicle and advanced driver assistance system applications," Int. J. Automot. Technol. **18**, 147-156 (2017).
5. A. S. Concepts, "Peregrine 3D Flash LIDAR Vision System," (Advanced Scientific Concepts Inc.) http://www.advancedscientificconcepts.com/products/peregrine.html (2020.03.10).
6. C.-I. Chen and R. Stettner, "Drogue tracking using 3D flash lidar for autonomous aerial refueling," Proc. SPIE **8037**, 80370Q (2011).
7. V. E. Roback, F. Amzajerdian, A. E. Bulyshev, P. F. Brewster, and B. W. Barnes, "3D flash lidar performance in flight testing on the Morpheus autonomous, rocket-propelled lander to a lunar-like hazard field," Proc. SPIE **9832**, 983209 (2016).
8. X.-B. Liu and L. Li, "Design of the optical system of flash lidar based on an APD array," Infrared. Laser Eng. **38**, 893-896 (2009).
9. G. Zhou, X. Zhou, J. Yang, Y. Tao, X. Nong, and O. Baysal, "Flash lidar sensor using fiber-coupled APDs," IEEE Sens. J. **15**, 4758-4768 (2015).
10. C. Weitkamp, *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere* (Springer Series in Optical Sciences vol. 102), C. Weitkamp, ed. (Springer-Verlag, NY, USA, 2006).
11. G. N. Plass and G. W. Kattawar, "Monte Carlo calculations of light scattering from clouds," Appl. Opt. **7**, 415-419 (1968).
12. L. R. Bissonnette, P. Bruscaglioni, A. Ismaelli, G. Zaccanti, A. Cohen, Y. Benayahu, M. Kleiman, S. Egert, C. Flesia, and P. Schwendimann, "LIDAR multiple scattering from clouds," Appl. Phys. B **60**, 355-362 (1995).
13. L. Wang and S. L. Jacques, "Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues in Standard C," (M. D. Anderson Cancer Center, University of Texas, Houston, Tex., 1992).
14. H. An, Y. Kwon, and Y. Jeong, "Monte Carlo simulation of 3D flash LIDAR scheme for high-speed autonomous driving," in *Proc. Novel Optical Materials and Applications* (NO, USA, Jul. 2017), JTu4A.17.
15. M. Han, J. Kim, H. An, and Y. Jeong, "3D flash LIDAR simulation for autonomous driving under various weather conditions," in *Proc. Optics and Photonics for Sensing the Environment* (SJ, USA, Jun. 2019), JW3A.7.
16. I. I. Kim, B. McArthur, and E. J. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," Proc. SPIE **4214**, 26-37 (2001).
17. E. J. McCartney, *Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles* (John Wiley and Sons, NY, 1976), p. 421.
18. J. M. Wallace and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (Academic Press, NY, 1977), p. 467.
19. L. G. Henyey and J. L. Greenstein, "Diffuse radiation in the galaxy," Astrophys. J. **93**, 70-83 (1941).
20. T. Binzoni, T. S. Leung, A. H. Gandjbakhche, D. Ruefenacht, and D. Delpy, "The use of the Henyey-Greenstein phase function in Monte Carlo simulations in biomedical optics," Phys. Med. Biol. **51**, N313 (2006).
21. E. Poullain, F. Garestier, P. Bretel, and F. Levoy, "Modeling of ALS intensity behavior as a function of incidence angle for coastal zone surface study," in Proc. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Munich, Germany, Jul. 2012), 2849-2852.
22. Velodyn LiDAR, "High Definition Real-Time 3D LiDAR," (Velodyne Lidar) https://velodynelidar.com/hdl-32e.html (2020.03.10.).
23. Thorlabs, "Si Avalanche Photodetectors," (THORLABS) https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6686 (2020.03.10.).
24. M. T. Cheng and Y. I. Tsai, "Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas," Sci. Total Environ. **263**, 101-114 (2000).
25. Eugene Demaitre, "Sense Photonics says new solid state 3D sensor offers longest range for industrial use," (The Robot Report, October 23, 2019) https://www.therobotreport.com/sense-photonics-solid-state-3d-lidar-longest-range-industrial-use/ (2020.03.10.).