

RIS 위치에 따른 도착 방향 추정 기반 실내 가시광 측위 기법

이 용 업[°]

Indoor Visible Light Positioning Technique Based on RIS Position and AOA Estimation

Yong Up Lee[°]

요 약

6G 통신 서비스를 위한 RIS와 도착 방향 (AOA) 추정 기반 가시광 실내 측위에서 설정 위치에 따라 크게 다른 가시광 측위 채널이 되므로 종래 방식으로 정확한 도착 방향 추정이 어렵다. 이 논문에서는 다양한 다중 경로 클러스터가 수신되는 RIS 위치 기반 가시광 채널 환경에서 정확한 측위에 필요한 매개변수 확보를 위해 새로운 평균 주사 벡터 개념의 AOA 매개변수 추정 기법을 제안한다. 수신기 근처 RIS를 설치한 측위 모의실험에서 RIS 다중 반사된 후 넓게 퍼진 다중 경로들이 수신기에 도달하므로 종래 방식은 매개변수 추정을 실패하지만, 제안한 가중평균 주사 벡터를 도입한 다중신호 분류 AOA 추정 기법을 적용한 결과 정확한 AOA 추정치를 얻었다. 제안 방식은 다른 방식에 비해 간단한 시스템 구조, 개선된 측위 정확도, 낮은 계산량 면에서 장점도 가진다.

키워드 : 6세대 통신, 실내 가시광 측위, 재구성 지능형 표면, 신호 도착 방향

Key Words : 6G, indoor visible light positioning, RIS, angle-of-arrival (AOA)

ABSTRACT

In the RIS (reconfigurable intelligent surface) assisted visible light (VL) positioning based on angle-of-arrival (AOA) estimation for 6G communication service, VL positioning channel is largely dependent of RIS position and it is difficult to obtain the exact AOA parameter estimate by conventional technique. In this paper, the new AOA estimation technique based on weighted mean steering vector concept is proposed to estimate the angle-of-arrival (AOA) parameters of multiple clusters under different visible light positioning channel due to RIS position. It is seen that the proposed AOA estimation technique gives an optimal AOA estimate, however the previously published method meets a failure because the widely distributed multipath signals by RIS reflection arrive at the receiver under the positioning environment based on RIS around receiver. The proposed method has also the advantages of the simpler system architecture, the better positioning accuracy, and the lower computation, compared with the conventional one.

※ 이 논문은 2024년도 한림대학교 교비연구비(HRF-202409-001)에 의하여 연구되었음.

•° First and Corresponding Author: Hallym University Division of Software, yulee@hallym.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS 202410-247-B-RE, Received October 21, 2024; Revised December 13, 2024; Accepted December 16, 2024

I. 서 론

종래 측위 기법의 한계인 문제점들(예로써, 여러 개의 기준 노드가 필요한 복잡한 측위 구조, 또는 여러 번 추정 재시도로 인한 측위 데이터 신뢰도 저하)을 극복하는 방법의 하나로 재구성 지능형 표면 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 소자 기반의 가시광 측위 기법들이 최근 광범위하게 활발히 연구^{1,2)}가 진행 중이다.

대개 신호 도착 방향 변수 추정 기반 가시광 측위는 배열 광다이오드 센서의 수신기와 배열 신호처리를 통해 수집된 가시광 신호로부터 도착 방향 추정치를 얻는 매개변수 추정, 그리고 추정치와 이미 알고 있는 기준 노드들의 위치들을 융합해 목표인 수신기 위치를 결정하는 데이터 융합의 두 단계이다. 가시광 측위 정확도는 1 단계 매개변수 추정에 크게 좌우가 된다.

그림 1과 같은 가시광, 밀리미터파 무선, 또는 저궤도 위성 무선 등의 광무선 하이브리드 신호 기반의 6G 통신 서비스³⁾ 환경의 측위는 매우 심한 경로 손실이 있고, 특히 밀도가 희박한 산란 (sparse scattering) 채널에서 다중 경로들의 클러스터 특성 등의 광무선 채널 환경에 크게 좌우된다. 그런데 신호 도착 방향 (angle of arrival, AOA) 변수 추정 기반 가시광 측위는 신호 세기 왜곡이나 시간 동기 문제가 없으므로 신호 세기 변수 또는 도착시간 변수 기반 측위 방식보다 채널 특성 영향을 덜 받아 6G 통신 서비스를 위한 측위 기법으로 선호된다.

6G 통신 서비스 환경은 재구성 지능형 표면 소자 기반 가시광 측위 기법, 그리고 그림 1에 있는 가시광, 밀리미터파 무선 기반 하이브리드 광무선 측위 기법이 종래 무선측위 방식보다 더 선호된다고 생각하고 이 논문에서 최적 측위 기법을 다룬다.

가시광 연구⁴⁾에 따르면, 최근 구형파 수신기의 근거리 (Near field) 채널 환경에서 가시광 측위를 연구하는 중인데, 채널 측위 환경에서 주어진 파장 λ , 측위 수신기의 배열 광다이오드 크기 D 인 경우, 가시광 측위 거리 x 의 구형파 입사 프라운호퍼 (Fraun-hoper) 조건인 $x \leq 2D^2/\lambda$ 를 만족하는 경우 가시광 평면파 대신 구형파와 신호가 목표 노드인 수신기에 입력된다. 예로써, $D=3\text{ mm}, \lambda=0.5\text{ }\mu\text{m}$ ($f=600\text{ THz}$) 일 때 $x \leq 36\text{ m}$ 를 가진다. 이런 측위 거리는 6G 통신의 주요 서비스인 실내 가시광 측위에서 수신기 노드 또는 목표 노드에 수신된 측위 신호들은 적지 않게 근거리 측위 조건이고 구형파가 배열 광다이오드에 수신될 수 있음을 알려준다.

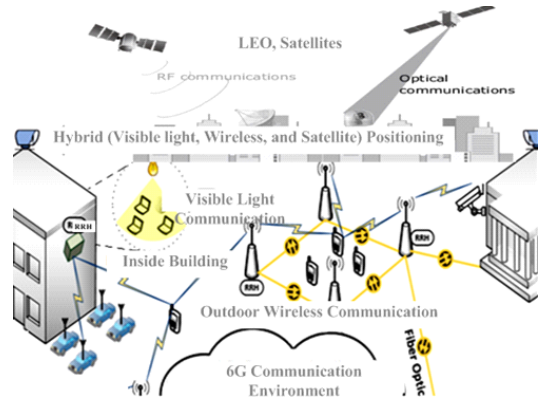


그림 1. 6G 통신 환경에서 실내외 가시광과 밀리미터 무선, 실외 저궤도 위성 무선 기반 하이브리드 광무선 측위 예
Fig.1. Illustration of the hybrid optical wireless positioning based on the millimeter wave wireless, visible light, or LED satellite wireless in the environment of 6G communication

이제까지 연구에서 가시광 측위에 가시광 채널을 잘 분석해서 RIS 소자 장점을 적용해 우수한 RIS 기반 가시광 측위 기법을 제안하려는 시도들⁵⁻¹¹⁾이 있었다. 하지만 실내 가시광 측위 환경의 RIS 소자 적용 위치에 따른 최적 측위 연구는 저자가 아는 한 고려되지 않았다.

이 논문은 6G 통신 서비스를 위한 가시광 측위 기법에서 RIS 소자 적용 위치에 따른 다양한 실내 가시광 측위 기법 연구와 측위 변수인 두 가지 신호 도착 방향 추정 기법 연구를 수행한다. 측위 채널은 RIS 소자 적용 위치에 따른 다양한 실내 가시광 측위 모형을 사용하며, 신호 도착 방향 추정은 모수 클러스터 매개변수 추정 기법을 사용한다.

지금까지 6G 통신 서비스를 위해 RIS 적용을 통한 가시광 측위 해법을 서론에서 다루었다. 2장에서 가시광 채널과 RIS 기반 가시광 측위 시스템에 대해 다루고, 3장은 가시광 측위 알고리즘을 다루고, 4장에서 실험과 토론, 결론은 5장에 할 예정이다.

II. RIS 기반 가시광 측위

2.1 가시광 채널

가시광 측위 채널에는 양 (nonnegative) 범위의 입사 성질을 가지는 가시광 다중반사 경로들의 클러스터 형태 신호들이 있는데 양, 음 범위 모두를 포함하는 입사 성질의 무선 채널과는 다르다. 또 가시광 실내 채널은 무선 실내 채널과 유사하게 직접 가시거리 (LOS) 경로와 수많은 비 가시거리 (NLOS) 다중반사 경로들로 구성되며 RIS 기반 측위 시스템 구조에 따라 그림 2와

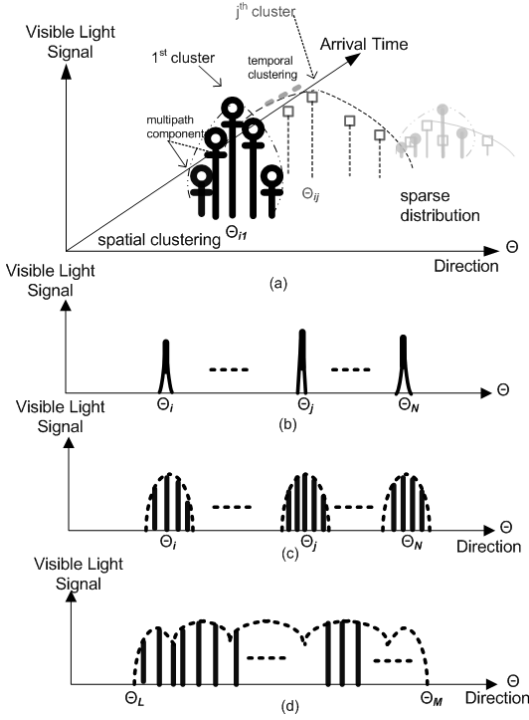


그림 2. 실내 가시광 신호들의 예 (a) 다중 경로, 클러스터 신호들의 시간 공간적 크기의 3차원 형태 (b) 평면파로 수신될 때 다중 경로들의 모수 도착 방향 (c) 평면파로 수신될 때 모수 클러스터 내의 다중 경로들 (d) 구형과 수신될 때 비모수 클러스터의 다중 경로들

Fig. 2. Illustration of VL signal under indoor channel (a) Three dimensional spatial-temporal form of multipath, cluster signals (b) a point angle form (c) a parametric distributed angle form (d) a nonparametric distributed angle form.

같은 다양한 다중 경로들의 클러스터 형태들이 된다^[12].

그림 2(a)는 가시광 측위 채널의 일반 특성인 심히 경로 손실된 직접 경로 또는 다중반사 경로 신호들이 공간적인 밀도는 드문드문 (sparse) 분포된 방향 클러스터, 도착시간 차 표현의 시간 클러스터들의 시공간 3차원 형태 표현이다. 특히 실내 가시 광 측위인 경우, 가까운 측위 거리로 다중반사 경로로 의한 다양한 시공간 클러스터들이 발생하는데, 시간 클러스터링은 거의 무시되지만 공간 클러스터링은 매우 심각하다. 또한 가시광 채널은 가시광 파장의 수백 배 크기의 배열 광다이오드로 수신되므로 공간 다이버시티 효과로 인해 다중 경로 페이딩 왜곡은 거의 없다. 이 논문은 다양한 공간 클러스터들의 채널 환경에서 측위를 위해 정확한 수신 신호 도착 방향을 추정하려고 한다.

일반적으로 원거리 (Far field) 실내 측위 환경에서 가시광 수신기인 목표 노드에서 평면파 수신 가능하고 다중 경로들이 명확히 구분이 가능한 데 그림 2(b)의

경우이다. 또한 RIS 기반 측위에서 설치된 RIS 위치에 따라 어떤 경우는 밀접 다중반사 경로들로 신호 구분은 어렵고 대신 클러스터들은 서로 명확히 구분되는 공간 클러스터 형태가 가능한 데 그림 2(c)의 경우이다. 그림 2(b)와 그림 2(c) 경우, 가시 광 수신기에 평면파 입사된 공간 클러스터를 모수 매개변수 (예, 중심각, 퍼짐 각) 형태의 도착 방향 함수로 가능하다. 그래서 채널 응답은 다음과 같다.

$$h(\theta, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^Q h_{ik}(t) \delta(\theta - \theta_i - \omega_{ik}), \quad (1)$$

여기서, h_{ik} , ω_{ik} 는 송신 가시 광의 i 번째 RIS 반향에서 가시 광 수신기에 도달한 k 번째 클러스터 내 다중 경로 신호 크기와 방향이다. θ_i 는 특정 확률밀도 분포를 가지는 클러스터의 중심 AOA 매개변수이다. N, Q 는 클러스터 수, 클러스터 안의 다중 경로의 개수이다.

실내 근거리 (Near field) 가시광 측위 환경에서 구형과 형태의 다중 경로와 클러스터들이 가시 광 수신기에 도달해 서로 구분이 안 되고 매개변수 클러스터로 표현이 어려운 비모수 클러스터 형태로 그림 2(d) 경우이다. 그래서 근거리 채널 응답은 다음과 같이 표현된다.

$$h(\theta, t) = \sum_{m=1}^D h_m(t) e^{-jm\theta}, \quad (2)$$

여기서 $h_m(t)$ 는 m 째 푸리에 급수, D 는 급수 항이다.

2.2 RIS 기반 실내 가시광 측위 시스템

6G 통신 서비스를 제공하려면 측위 정보가 반드시 미리 확보되어야 한다. 구체적으로 6G 통신 서비스를 위한 측위에서 실내는 가시광 측위를 사용하고, 실내외는 수십 GHz의 밀리미터파 무선, 실외는 저궤도 위성 무선의 하이브리드 측위 방식이 예상된다.

그림 3은 이 논문에서 구상한 RIS 소자 기반 실내 가시광 측위 시스템 구조이다. LED 배열 조명의 가시광 송신기, 배열 광다이오드로 가시광 수신을 위한 수신기, 그리고 측위 신호의 다중반사를 위한 다음과 특성을 가진 RIS로 구성된다.

$$\gamma = [\gamma_0 e^{j\theta_0}, \dots, \gamma_k e^{j\theta_k}, \dots, \gamma_{M-1} e^{j\theta_{M-1}}]^T \quad (3)$$

여기서 $\gamma_0 = \gamma_1 = \dots = \gamma_{M-1}$, $\theta_0 \neq \dots \neq \theta_{M-1}$ 여기서이다. RIS 소자는 반향기 또는 수신기로 동작이 되는데,

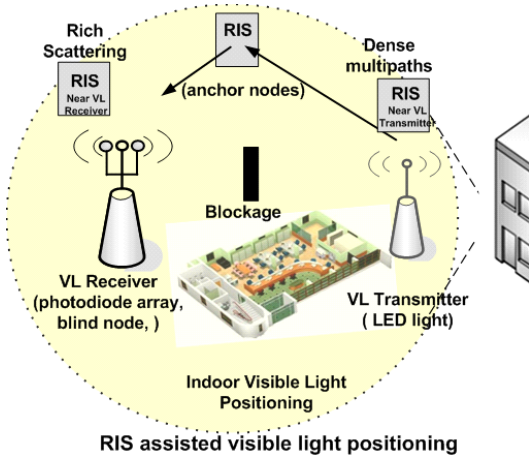


그림 3. 재구성 지능형 반향 기반 실내 가시광 측위 시스템 구조 예
Fig. 3. Illustration of the RIS assisted indoor visible light positioning system architecture

여기서는 반향기 역할이다.

일반 실내 가시광 측위에서 LED 배열에서 방출된 수 마이크로미터 (μm) 파장의 가시광 측위 신호는 실내 중거리 또는 근거리를 직접 또는 다중반사 경로 전송을 통해 가시광 수신기의 배열 광다이오드에 도달한다. 프라운호퍼 조건에 따라 원거리는 평면파 형태로 근거리는 구형파 형태로 배열 광다이오드에 입사하게 된다. 이 논문은 RIS 기반 측위 구조에서 RIS 위치로 인한 두 가지 원거리 평면파 수신 형태의 측위를 고려한다.

그림 3의 RIS 소자 기반 실내 가시광 측위 시스템에서 가시광 송신기의 LED 배열에서 방출된 가시광 측위 신호는 설계된 측위 시스템 구조에 따라 송신기 근처, 중앙, 또는 수신기 근처에 설치된 RIS 소자들의 반향을 통해 원거리 평면파 수신 형태로 가시광 수신기의 배열 광다이오드에 도착한다. 시스템 구조의 측위 채널 환경에 적합한 매개변수 추정 기법으로 수신된 다중반사 경로 또는 모수 클러스터 방향을 추정해 이미 알고 있는 RIS 반향 소자 위치 정보와 융합해서 가시광 수신기 위치를 결정하는 측위 개념이다.

그림 3의 RIS 기반 실내 가시광 측위 환경에서 송신된 가시광 측위 신호가 k 번째 RIS 반사를 거쳐 가시광 수신기에 도달한 l 번째 클러스터 내 다중 경로 신호의 측위 거리가 d_{kl} 이면 원거리 측위, 즉 수신기에 평면파로 도착하려면 다음 관계를 만족해야 한다.

$$(\|X_k - X_0\| + \|X_k - X\|) > 2D^2/\lambda \quad (4)$$

여기서 X , X_0 , X_k 는 x 축 상의 목표 노드, 기준노드,

RIS 위치이다. λ 는 가시광 파장, D 는 수신기의 배열 광다이오드 크기이다. 식 (4)에서 가시광 송신기와 RIS 사이 또는 가시광 수신기와 RIS 사이 거리에 따라, 즉 RIS 설치 위치의 시스템 구조에 따라 다양한 채널 환경이 가능하다. 여기서는 이를 고려해 시스템 구조를 다음 같이 구분해 분석한다.

1) 송신기 근처 RIS 설치 기반 실내 원거리 측위

이런 유형 구조에서 송신기에서 방출된 측위 신호는 대개 송신기 근처 높은 곳의 대형 RIS가 설치되고 RIS 반향 소자에 다중반사가 되고 반사된 다중반사 경로 원거리 전송으로 목표 노드인 가시광 수신기의 배열 광다이오드에 다중반사 경로 신호들이 주로 특정한 방향에 밀집 다중 경로 (dense multipaths)의 평면파 형태로 도달하게 된다. 그래서 그림 2(b)와 같은 다중반사 경로들이 수신되며, 실제로 $\|X_k - X_0\| \ll \|X_k - X\|$ 조건을 가지므로 $\|X_k - X\| \geq 2D^2/\lambda$ 가 가시광 수신기와 RIS 사이 거리로 반드시 원거리 평면파 수신 조건이 만족해야 한다.

2) 수신기 근처 RIS 설치 기반 실내 원거리 측위

이런 유형 구조에서 송신기에서 방출된 측위 신호는 실내 원거리 전송으로 높은 곳의 소형 RIS 소자들에 다중반사가 되고 목표 노드인 가시광 수신기의 배열 광다이오드에 수많은 방향에 걸쳐 흩어진 다중반사 경로들로 (Rich scattered multipaths) 구성된 클러스터들이 평면파 형식으로 도달한다. 목표 노드인 수신기에는 그림 2(c)와 같이 다중반사 경로들이 넓게 퍼진 방향 클러스터들로 수신되며 실제 환경에서 대개 $\|X_k - X_0\| \gg \|X_k - X\|$ 조건이 되므로 $\|X_k - X_0\| \geq 2D^2/\lambda$ 가 되어 원거리 평면파 수신 기반 측위 동작이 된다. 그래서 가시광 송신기와 RIS 사이는 원거리 평면파 수신이 되는 거리가 되어야 한다.

3) 송수신기, RIS 사이가 근거리인 실내 측위 구조

이런 구조의 시스템에서 방출된 측위 신호는 송수신기 사이 높은 곳의 RIS 소자들에 다중반사가 되고 반사 신호들은 실내 근거리 전송으로 목표 노드인 가시광 수신기의 배열 광다이오드에 구형파와 형태 다중반사 경로 신호들이 도달한다. 평면파와 다르게 많은 도착 방향이 가능하고 공간적으로 겹친 그림 2(d)의 비모수 클러스터 형태 수신이며 앞의 두 가지 채널, 밀집된 다중반사 경로들의 클러스터 채널, 수많은 방향으로 퍼진 다중반사 경로의 클러스터 채널의 복합이다.

그림 3의 RIS 기반 실내 가시광 측위 환경에서 RIS 내 k 번째 반향에서 가시 광 수신기에 도달한 l 번째 클러스터 내 다중반사 경로 신호의 도착시간을 τ_{kl} 로 할 때 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{\tau}_{kl} = \|X_k - X_0\|/c + \|X_k - X\|/c \quad (5)$$

여기서 c 는 가시광 속도이다.

RIS 내 k 번째 반사에서 평면과 형태로 수신된 l 번째 클러스터 내 다중반사 경로 신호의 도착 방향 추정치를 θ_{kl} 로 하면 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_{kl} = \tan^{-1}(y - y_k)/(x - x_k) \quad (6)$$

여기서 y, y_k 는 목표 노드와 기준노드인 RIS의 y 축 위치 x, x_k 는 목표 노드와 RIS의 x 축 위치이다.

III. 가시광 측위 알고리즘

6G 통신 서비스 질은 핵심 요소인 가시광 실내 측위 결과의 정확도에 크게 좌우된다. 그래서 가시거리 또는 비 가시거리 환경에서 RIS 소자의 측위 시스템 내 위치를 적절히 선정해 측위 신호의 근거리 구형과 수신 동작을 가능한 피하고 매개변수 추정이 수월한 원거리 평면과 수신이 되게 측위 시스템 구조를 설계해야 정확한 실내 측위 추정치를 얻을 수 있다.

가시광 측위 알고리즘은 두 가지 알고리즘의 연계 동작으로 측위 치를 얻는다. 먼저 수신기에 수집된 측위 신호에서 방향 추정 알고리즘을 사용해 도착 방향 변수들을 추정한다. 그런 후 도착 방향 추정치들과 RIS 반향 소자들의 위치들인 기준노드 위치들을 융합해 가시광 수신기 위치인 측위 목표치를 얻게 된다. 도착 방향 변수 추정치 성능은 측위 정확도에 직접 관련이 있다.

3.1 RIS 기반 가시광 채널에 적합한 신호모형

그림 3의 우측에 가시광 송신기의 LED 배열에서 방출되는 D 비트의 이진 디지털 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{D-1} A_k p(t - kT) \quad (7)$$

여기서, A_k 는 양수 (Nonnegative), 동일 확률의 0, 1 값이 되는 신호 크기, $p(\cdot)$ 는 이진 디지털 함수 형태, T 는 비트 채류시간이다. 송신기의 LED 배열 전송되는

가시광 전력은 $P_{LED} = s^2(t)$ 이며, 가시 광 채널에 방출되는 전력은 $P_T = I(\phi)P_{LED}$ 이다. $I(\phi)$ 는 ϕ 각도로 가시 광을 방출하는 LED 배열의 조도이다. 만일 LED가 람버틴 (Lambertian) 방출이면 조도는 $I(\phi) = [(1+m)/2\pi]\cos^m\phi$ 이며 m 은 람버틴 인수이다^[13].

송신기에서 방출된 측위 신호는 RIS의 N 개 반향 소자에서 동시 다중 반사되고, 시스템 구조에 따른 다양한 신호 왜곡 또는 채널 특성에 영향을 받는다. 가시광 수신기의 배열 광다이오드에 수집된 신호는 그림 2와 같이 RIS 위치에 따라 시공간적으로 다른 형태이다.

RIS의 반사된 다중반사 경로, 즉 그림 2(b) i 번째 클러스터 내 k 번째 다중 경로가 원거리 평면과 형태로 그림 3 가시광 수신기 안의 d 간격 균일 선형 간격 구조의 배열 광다이오드에 도달될 때 $T_k = d(l-1)\sin\theta_k/c$ 시간지연이 생긴다. 여기서 l 번째 광다이오드 거리는 $d(l-1)$, 도착 방향은 θ_k , 빛 속도는 c 이다.

만일 $d = \lambda/(2\pi)$ 로 하면, l 번째 광다이오드의 채널 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h_i^l(t) = \sum_{k=1}^Q h_{i,k}(t) e^{-j(l-1)\sin(\theta_i + \rho_{i,k})} \quad (8)$$

여기서 $l = 1, 2, \dots, L$, $i = 1, 2, \dots, N$ 이며, θ_i 은 i 번째 클러스터, $h_{i,k}(t)$ 와 $\rho_{i,k}$ 는 i 번째 클러스터 안 k 번째 다중 경로 크기와 각도이다.

가시광 수신기에 N 개 클러스터와 클러스터 안의 Q 개 다중 경로 신호들이 도달할 때 l 번째 광다이오드에 수신 신호는 다음과 같다.

$$y^l(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^Q h_{i,k}(t) e^{-j(l-1)\sin(\theta_i + \rho_{i,k})} \cdot x(t - \tau_{i,k}) + \eta^l(t) \quad (9)$$

여기서 $\eta^l(t)$ 는 l 번째 광다이오드의 유기 잡음이다. $y(t) = [y^1(t) \dots y^L(t)]^T$ 는 L 개 배열 광다이오드의 수신 신호이며, $\underline{y}(t) = [\eta^1(t) \dots \eta^L(t)]^T$ 잡음벡터라 하면 수신기의 배열 광다이오드 구조는 $\underline{a}(\theta) = [1 \dots e^{-j(l-1)\sin\theta} \dots e^{-j(L-1)\sin\theta}]^T$ 주사 벡터로 표현된다^[14].

그림 3의 실내 가시광 측위 환경에서 구조를 고려하면 다중 경로 시간 차이와 다중 경로 페이딩이 무시되

로 $\tau_{i,1} \approx \dots \approx \tau_{i,Q} \equiv \tau_i$, $\bar{h}_i \equiv \sum_{k=1}^Q h_{i,k}(t)$ 와 같이 다중 경로 지연과 크기를 단일로 하면 수신 신호는 다음과 같다.

$$\underline{y}(t) = \sum_{i=1}^N \tilde{x}(t - \tau_i) \sum_{k=1}^Q \underline{a}(\Theta_i + \rho_{i,k}) + \underline{n}(t) \quad (10)$$

여기서 $\tilde{x}(t - \tau_i) \equiv \bar{h}_i \cdot x(t - \tau_i)$ 이다.

가시광도 무선 신호와 같은 확률 특성의 입자성을 가지므로 가시광의 도착 방향 변수의 확률 특성도 실내 무선 채널과 유사하다. 그림 3의 RIS 기반 가시광 측위 환경에서 다양한 다중 경로들의 클러스터가 수집되는 수신기의 배열 광다이오드에 적합한 평균 주사 벡터를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \underline{v}(\Theta, \rho) &\equiv E\{\underline{a}(\theta)\} \\ &= \int \underline{a}(\theta) f(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\underline{v}(\Theta, \rho)$ 는 클러스터 수집에 적합한 평균 주사 벡터이며, $\underline{a}(\theta)$ 는 점 신호 방향을 수집하는 종래 일반 주사 벡터이다. $f(\theta)$ 는 도착 방향 θ 의 확률 밀도 함수, Θ 는 클러스터 중심 AOA인 θ 의 평균, ρ 은 θ 의 퍼짐 각도 모수이다.

두 가지 평균 주사 벡터를 구하자. 먼저 도착 방향 변수 θ 가 균일 밀도 함수 $f(\theta) = \frac{1}{2\rho}$ 이며 평균이 Θ , 분산이 ρ 인 확률변수로 $\pm \rho$ 에서 분포되는 일반적 측위 환경인 경우일 때 평균 주사 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v^l(\Theta_i, \rho_i) &= \int_{\Theta_i - \rho_i}^{\Theta_i + \rho_i} \frac{1}{2\rho} e^{-j(l-1)\sin\theta} d\theta \\ &= \text{sinc}((l-1)\rho_i) a^l(\Theta_i) \end{aligned} \quad (12)$$

그림 3의 실내 가시광 측위 환경에서 도착 방향 변수 θ 가 $f(\theta) = (1/\sqrt{2}\rho)e^{-|\sqrt{2}\theta/\rho|}$ 인 이중 지수분포를 가질 때 평균 주사 벡터는 다음과 같다.

$$v^l(\Theta_i, \rho_i) = \frac{a^l(\Theta_i)}{1 - j l(\rho_i/\sqrt{2})} \quad (13)$$

여기서 $a^l(\Theta_i) = e^{-j(l-1)\sin\Theta_i}$ 이며, 평균 주사 벡터는 $\underline{v}(\Theta_i, \rho_i) = [v^1(\Theta_i, \rho_i) \dots v^L(\Theta_i, \rho_i)]^T$ 이다.

실내 가시광 측위에서 RIS 반사된 가시광 측위 신호들이 그림 2의 세 가지 클러스터 형태들로 수신기에 도달할 때 클러스터 내 다중 경로의 도착 방향 퍼짐 정도는 측위 시스템 구조에 따라 매우 다양하므로 각 경우에 맞는 평균 주사 벡터를 다음과 같이 생각할 수 있다.

1) 클러스터 내 다중 경로들의 퍼짐 차이가 미세한 그림 2(b)인 경우 즉 $\rho_i = \rho_{i,1} \simeq \rho_{i,2} \simeq \dots \simeq \rho_{i,G}$ 일 때, 배열 안테나의 구조 특성을 나타내는 평균 주사 벡터는 다음과 같다.

$$v^l(\Theta_i, \rho_i) = \frac{G}{1 - j l(\rho_i/\sqrt{2})} a^l(\Theta_i). \quad (14)$$

이와 같은 송신기 근처 RIS가 있는 측위 시스템 구조의 가시광 채널에 적합한 평균 주사 벡터 $v^l(\Theta, \rho)$ 는 거의 동일 형태의 다중반사 경로들이 수집되므로 단순히 다중 경로 수 G 만큼 가중하는 효과이다.

2) 다중반사 경로들 퍼짐이 그림 2(c)인 경우, 즉 $\rho_{i,\min} \leq \{\rho_{i,1}, \dots, \rho_{i,G}\} \leq \rho_{i,\max}$ 이며 다중 경로 중심각들이 거의 일치일 때, 다중 경로의 최대 또는 최소 퍼짐을 고려한 산술 (또는 기하) 가중평균 주사 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v^l(\Theta_i, \rho_i) &= \frac{1}{2} a^l(\Theta_i) \cdot \\ &\left\{ \frac{1}{1 - j l(\frac{\rho_{i,\max}}{\sqrt{2}})} + \frac{1}{1 - j l(\frac{\rho_{i,\min}}{\sqrt{2}})} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

또는

$$v^l(\Theta_i, \rho_i) = a^l(\Theta_i) \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - j l(\frac{\rho_{i,\max}}{\sqrt{2}})} \cdot \frac{1}{1 - j l(\frac{\rho_{i,\min}}{\sqrt{2}})}}. \quad (16)$$

수신기 근처 RIS가 있는 측위 시스템 구조의 가시광 채널에 적합한 주사 벡터 $v^l(\Theta, \rho)$ 는 다중 경로들의 최대 또는 최소 퍼짐을 고려한 산술 또는 기하 평균이 가중되는 효과이다.

3) 클러스터들이 결합이 되어 구분이 어려운 비모수 형태인 그림 2(d)인 경우, 모수 형식으로 표현된 평균 주사 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v^l(\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \dots, \theta_{i,G}, \rho_{i,1}, \rho_{i,2}, \dots, \rho_{i,G}) \\ = \frac{d^l(\theta_{i,1})}{1 - jl(\frac{\rho_{i,1}}{\sqrt{2}})} + \dots + \frac{d^l(\theta_{i,G})}{1 - jl(\frac{\rho_{i,G}}{\sqrt{2}})}. \end{aligned} \quad (17)$$

이런 수신기 도달 측위 신호는 도착 방향들이 공간적으로 겹친 그림 2(d)의 비모수 클러스터 형태이며 구형과 도착으로 인한 것이다. 모수 방향 추정 기법 적용은 어렵고 새로운 비모수 도착 방향 추정 기법이 필요하다.

3.2 방향 추정 알고리즘

그림 3의 실내 측위에서 우측 가시광 송신기의 LED 배열로부터 방출된 측위 신호는 RIS의 여러 개 반향 소자의 다중반사를 거쳐 각기 다른 다중 경로 신호들이 된다. 이는 목표 노드 측위를 위해 필요한 기준노드들이 한 개에서 여러 개가 되는 효과이다.

일반적으로 단일 송수신기 사이의 단일입력 단일출력 (SISO) 환경에서 여러 번의 도착 방향 매개변수 추정을 위해 동일 실험 환경 유지의 어려움이 있다. RIS 기반 측위 구조는 이런 문제점이 극복되고 다중 입력 단일출력(MISO) 환경이 되며 다중 경로의 도착 방향을 추정하는 다중신호 분류에 근거한 매개변수 추정 기법 적용도 가능하다.

이 논문은 RIS 기반 측위에서 그림 2(b), 2(c)의 가시광 채널 환경에 적합한 새로운 평균 주사 벡터 $\underline{v}(\theta, \rho)$ 를 적용한 다중 분류 도착 방향 추정 기법을 제안한다. 평균 주사 벡터를 그림 3의 가시광 수신 환경에 적용하면 식(10)은 다음과 같이 된다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^N \underline{v}(\theta_i, \rho_i) \tilde{x}(t - \tau_i) + \underline{\eta}(t) \quad (18)$$

또, 수신 신호 벡터의 공분산 행렬은

$$\begin{aligned} R_y &= E\{y(t) y^H(t)\} \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N r_x(\tau_i - \tau_k) \underline{v}(\theta_i, \rho_i) \underline{v}^H(\theta_k, \rho_k) + \sigma_\eta^2 I. \end{aligned} \quad (19)$$

이다. $r_x(\tau_i - \tau_k) = E\{\tilde{x}_i(t - \tau_i) \tilde{x}_k^*(t - \tau_k)\}$ 는 클러스터들의 공분산이며, 잡음 벡터의 공분산 행렬은

$$\sigma_\eta^2 I = E\{\underline{\eta}(t) \underline{\eta}^H(t)\} \text{이다.}$$

그림 3의 가시광 측위에서 RIS 다중반사로 수신기에 수집된 클러스터의 도착 방향 매개변수는 (θ_i, ρ_i) 이다. 여기서 θ_i 는 클러스터 중심 AOA 변수, ρ_i 는 다중 경로들의 퍼짐 각도 변수이다. 추정을 위해, 식 (19) 공분산 행렬을 고유 분해해 얻은 고유치를 $\lambda_1 > \dots > \lambda_N > \lambda_{N+1} = \dots = \lambda_L$ 로 한다. 고유치 $[\lambda_1, \dots, \lambda_N]$ 와 $[\lambda_{N+1}, \dots, \lambda_L]$ 에 대응하는 고유벡터 $[\underline{e}_1, \dots, \underline{e}_N]$ 과 $[\underline{e}_{N+1}, \dots, \underline{e}_L]$ 로 신호 부공간 $S = [\underline{e}_1, \dots, \underline{e}_N]$ 과 잡음 부공간 $G = [\underline{e}_{N+1}, \dots, \underline{e}_L]$ 를 얻는다. 잡음 부공간에 공분산 행렬을 투영하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} R_y \cdot G &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N r_x(\tau_i - \tau_k) \\ &\cdot \underline{v}(\theta_i, \rho_i) \underline{v}^H(\theta_k, \rho_k) \cdot G + \sigma_\eta^2 \cdot G. \end{aligned} \quad (20)$$

그래서 식(19)에서 다음의 관계식을 얻는다.

$$\underline{v}^H(\theta, \rho) G G^H \underline{v}(\theta, \rho) = 0. \quad (21)$$

여기서 $(\theta, \rho) \in \{(\theta_1, \rho_1), \dots, (\theta_N, \rho_N)\}$ 이다. 실제로 공분산 행렬 R_y 대신 다음 표본 공분산 행렬 $\hat{R}_y$ 가 얻어진다.

$$\hat{R}_y = \frac{1}{D} \sum_{k=1}^D y(k) y^H(k). \quad (22)$$

유사하게 표본 공분산 행렬 $\hat{R}_y$ 의 고유치에 대응하는 $[\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_N, \hat{g}_1, \dots, \hat{g}_{L-N}]$ 인 고유벡터로 표본 신호 부공간인 $\hat{S} = [\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_N]$, 표본 잡음 부공간인 $\hat{G} = [\hat{g}_1, \dots, \hat{g}_{L-N}]$ 로 식(21)은 다음 식이 된다.

$$f(\theta, \rho) = \underline{v}^H(\theta, \rho) \hat{G} \hat{G}^H \underline{v}(\theta, \rho) \quad (23)$$

그래서 RIS 기반 가시광 측위에서 고도각(elevation angle)이나 방향각(azimuth angle)의 도착 방향 매개변수 추정치는 다음 식으로 얻는다.

$$(\hat{\theta}_i, \hat{\rho}_i) = \arg \min_{\theta, \rho} f(\theta, \rho) \quad (24)$$

3.3 측위 결정 알고리즘

매개변수 추정 단계에서 얻은 고도각이나 방위각 추정치 $(\hat{\theta}_i, \hat{\psi}_i)$ 들을 사용해 목표 노드인 가시 광 수신기 위치를 정하는 것이 측위 결정 알고리즘이다.

RIS에 다중 반사된 신호들이 목표 노드인 배열 광다이오드에 수집되면 식(22)의 표본 공분산 행렬을 구한다. 배열 신호처리 기법[14]에 기반한 다중신호 분류 기법에 이 논문에서 제안한 평균 주사 벡터 개념을 적용한다. 식(23)을 사용해 수신된 신호의 고도각 방향 추정치 $(\hat{\theta}_i, \hat{\rho}_i)$ 를 구하고 유사하게 방위각 방향 추정치 $(\hat{\psi}_i, \hat{\nu}_i)$ 도 구한다.

제안한 도착 방향 추정 기법으로 얻은 추정치들 $(\hat{\theta}_i, \hat{\psi}_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 과 알고 있는 RIS 반향 소자들의 위치인 기준노드 위치 (x_i, y_i, z_i) 를 가지고 최소 지승 기법을 이용하여 목표 노드 위치인 지점 (x_m, y_m, z_m) 을 추정한다. 그림 3의 측위에서 다음 기하학적 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_m \\ \hat{y}_m \\ \hat{z}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_i \cos \hat{\theta}_i \sin \hat{\psi}_i \\ r_i \sin \hat{\psi}_i \sin \hat{\theta}_i \\ r_i \cos \hat{\theta}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서, $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$, $i = 1, 2, \dots, N$ 로 RIS 반향 소자인 기준노드들과 수신기인 목표 노드 사이 관계로 주어진 조건이다. 그러면 위 관계식에서 다음 관계를 구할 수 있다.

$$P\hat{X} = \hat{K} \quad (26)$$

여기서

$$\hat{K} \equiv \begin{bmatrix} r_1 \cos \hat{\theta}_1 \sin \hat{\psi}_1 + x_1 \\ r_1 \sin \hat{\psi}_1 \sin \hat{\theta}_1 + y_1 \\ r_1 \cos \hat{\theta}_1 + z_1 \\ \vdots \\ r_N \cos \hat{\theta}_N \sin \hat{\psi}_N + x_N \\ r_N \sin \hat{\psi}_N \sin \hat{\theta}_N + y_N \\ r_N \cos \hat{\theta}_N + z_N \end{bmatrix}, \quad \hat{X} \equiv \begin{bmatrix} \hat{x}_m \\ \hat{y}_m \\ \hat{z}_m \end{bmatrix},$$

$$P \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

이다. 위 정의된 행렬과 벡터를 사용하면 역행렬이 존재할 때 가시광 측위 결과는 다음과 같이 얻어진다.

$$\hat{X} = (P^T P)^{-1} P^T \hat{K} \quad (27)$$

IV. 실험

4.1 두 가지 측위 채널

RIS 기반 가시광 측위에서 RIS 위치는 측위 성능에 큰 영향을 주는데 두 가지 설치 경우를 모의 실험하였다. 측위에서 성능에 관련된 주요 매개변수는 AOA 변수이다. 가시광 송신기 측위 신호가 RIS에 동시 다중 반사되고 가시광 수신기에서 수집될 때 RIS 설치 위치에 따라 다른 클러스터 형태를 가진 채널에서 배열 광다이오드에 평면파로 입사하는 도착 방향 매개변수이다.

이 논문에서는 그림 3의 측위 환경에서 두 가지 RIS 설치 경우를 고려하여 RIS 소자와 가시광 수신기 사이 채널을 매트랩 도구로 모형화 실험을 수행하였고 얻은 결과가 각각 그림 4와 그림 5에 있다. 그림 4와 그림 5의 RIS는 $\gamma = [e^{j11^\circ}, e^{j47^\circ}, e^{j101^\circ}]^T$ 의 X축 반사 방향이며, 식(3)에서 3개 센서 크기는 모두 크기 1인 반향 소자이다.

먼저 송신기 근처 RIS를 설치한 가시광 측위 경우로 RIS 다중 반사된 후 수신기에 수집되는 신호들이 원거

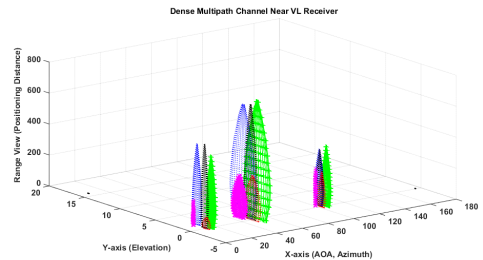


그림 4. 송신기 근처 RIS 설치 측위에서 밀집한 다중 경로 채널 예
Fig. 4. Illustration of the dense multipath channel by RIS near transmitter for visible light positioning

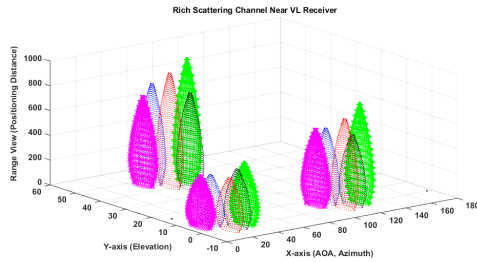


그림 5. 수신기 근처 RIS 설치 측위에서 넓게 퍼진 다중 경로 예
Fig. 5. Illustration of the rich scattering cluster channel by RIS near receiver for visible light positioning

리로 인해 특정한 방향에 몰린 밀집한 다중 경로(dense multipath)들로 구성된 클러스터 형태로 획득되는데, 이를 모의 실험한 결과가 그림 4이다. 그림 4 결과에서 클러스터 안의 다중 경로들이 거의 동일 방향값이고 클러스터는 한 점으로 볼 수 있다. 세 개의 클러스터가 11° , 47° , 101° 방위각 근처에 분포된 것을 볼 수 있다.

다른 경우로 수신기 근처 RIS를 설치한 가시광 측위에서 RIS 다중 반사된 후 수신기에 도달하는 다중 경로들은 근접된 거리로 인해 여러 방향에 걸쳐 퍼진 수많은 산란을 가진 (rich scattering) 클러스터 형태로 수신기에 도달되는데, 이를 모의 실험한 결과가 그림 5이다. 그림 5에서 클러스터 안의 다중 경로들이 많이 퍼진 방향들이고 클러스터는 중심 AOA와 퍼짐 각의 두 가지 매개변수로 표현된다. 세 개 클러스터가 11° , 47° , 101° 방위각을 중심으로 넓게 분포되어 있다.

그림 4와 그림 5의 실험 환경은 다음과 같다: 그림 3의 한 개 가시광 송신기에서 방출된 신호가 3개 반향 센서로 된 RIS에 의해 X축의 여러 방향으로 반사된다. 반사된 다중 경로들은 좌측의 수신기에 도달된다. 그림 2(b)의 밀집된 다중 경로들이 한 점의 모수 방향에 도착하는 측위 환경, 그림2(c)에서 넓은 방향에 걸친 산란으로 모수 클러스터 내의 넓게 분포된 다중 경로들로 도착하는 측위 환경이다.

4.2 측위를 위한 도착 방향 추정

표 1은 실험에서 고려한 측위 시스템 구조이다.

표 1의 시스템 구조를 가진 그림 3의 측위 환경에 제안한 기법을 사용해 AOA 변수 추정치를 구하는 두 가지 실험을 수행하였고, 표 2는 실험 환경 설명이다. 신호 대 잡음 비율은 $SNR = 20$ dB, 데이터 표본 수는 $D=1000$ 이다.

첫 번째 실험으로 표 2의 중앙 환경인 송신기 근처 RIS를 설치한 실험에서 RIS 다중 반사된 후 수신기에

표 1. 측위 시스템 구조

Table 1. Positioning system architecture

Visible light signal	Frequency Wavelength	$f = 600$ THz $\lambda = 0.5 \mu m$
VL transmitter	Function LED array radiation	Generation of VL positioning signal Lambertain form
VL receiver	Function Photo-diode array Sensor number	Blind node Diameter $D = 1$ mm $L = 10$
RIS	Function Reflection number Amplitude Reflection direction	Anchor node 3 $\gamma_{1,2,3} = 1$ $\theta_{1,2,3} = 11^\circ, 47^\circ, 101^\circ$

표 2. 두 가지 측위 실험 환경

Table 2. Two positioning experiment environments

Positioning system environment	VL receiver: target, anchor node: RIS near transmitter, VL transmitter	VL receiver: target, anchor node: RIS near receiver, VL transmitter
VL channel environment	Dense multipath channel	Rich scattering channel
Positioning condition (X, X_0, X_k : target, transmitter, RIS position)	$\ X_k - X\ \geq 2D^2/\lambda (= 4m)$	$\ X_k - X_0\ \geq 2D^2/\lambda (= 4m)$
AOA parameter (θ_i, ρ_i)	Cluster center θ_i	Cluster center, distribution extent (θ_i, ρ_i)
Deviation extent of multipath signal	Max. 0.06°	Max. 4.16°

특정한 방향에 몰린 밀집 다중 경로의 도착 방향 추정을 위해 식(14)의 평균 주사 벡터 개념을 도입한 추정 기법을 적용하였다. 매트랩 실험으로 얻은 그림 6 삼차원 표본 스펙트럼 결과가 식(23)의 다중신호 분류 AOA 추정 함수의 역 (inverse)이다.

그림 6의 실험 환경은 송신기 근처 RIS 반사로 원거리에 있는 수신기의 배열 광다이오드에는 세 개 클러스터와 클러스터 안의 밀집히 생성된 다중 경로들이 도달된다. 클러스터 중심 AOA와 퍼짐 매개 변수값은 $A(11^\circ, 0.06^\circ)$, $B(47^\circ, 0.05^\circ)$, $C(101^\circ, 0.045^\circ)$ 들이다.

도달한 클러스터를 수신기에서 평균 주사 벡터 개념의 제안 기법으로 추정해 그림 6의 삼차원 표본 스펙트럼을 얻었다. 스펙트럼 결과를 보면, 수신기에 도달하는

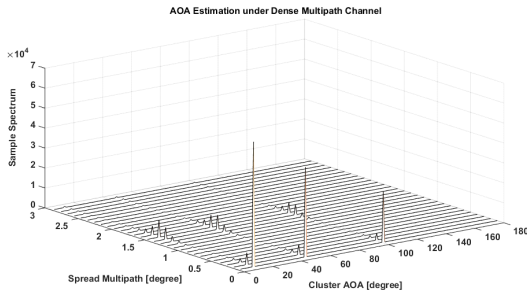


그림 6. 송신기 근처 RIS를 둔 밀집된 다중 경로 채널 측위에서 제안 기법으로 수신기에서 추정된 삼차원 표본 스펙트럼
Fig. 6. Illustration of the three dimensional sample spectrum observed at receiver for visible light positioning with dense multipath channel by RIS near transmitter

클러스터는 세 개이며 클러스터 안의 다중 경로 퍼짐은 없고, 퍼짐 각도 값도 거의 0° 이다. 그래서 송신기 근처 RIS를 설치한 측위에서 측위의 핵심 정보인 AOA 변수를 클러스터 중심각 AOA 추정치로 해도 됨을 알 수 있다. 종래 주사 벡터 기반 AOA 추정 기법을 사용해도 됨을 알 수 있다.

두 번째 실험으로 표 2의 우측 환경인 수신기 근처

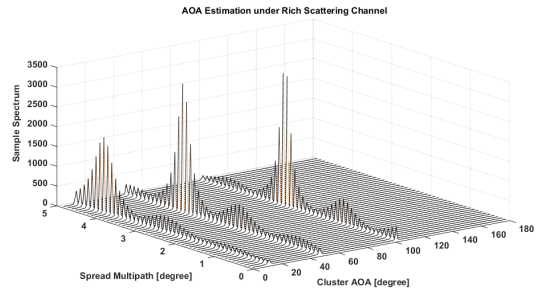


그림 7. 수신기 근처 RIS를 둔 넓게 퍼진 산란 채널 측위에서 제안 기법으로 수신기에서 추정된 삼차원 표본 스펙트럼
Fig. 7. Illustration of the three dimensional sample spectrum observed at receiver for visible light positioning with rich scattering multipath channel by RIS near receiver

RIS를 설치한 측위에서 RIS 다중 반사된 후 근접된 거리로 인해 여러 방향에 걸쳐 넓게 퍼진 다중 경로의 클러스터들이 수신기에 도달하는 것을 추정하는 것이다. 이를 위해 식(15)과 식(16)의 가중평균 주사 벡터를 도입한 다중신호 분류 AOA 추정 기법을 사용하였다. 매트랩 실험으로 식(23)의 다중신호 분류 AOA 추정 함수의 역이 그림 7의 삼차원 표본 스펙트럼이며, 다중 경로 퍼짐 각이 주어질 때 표본 스펙트럼이 그림 8이다.

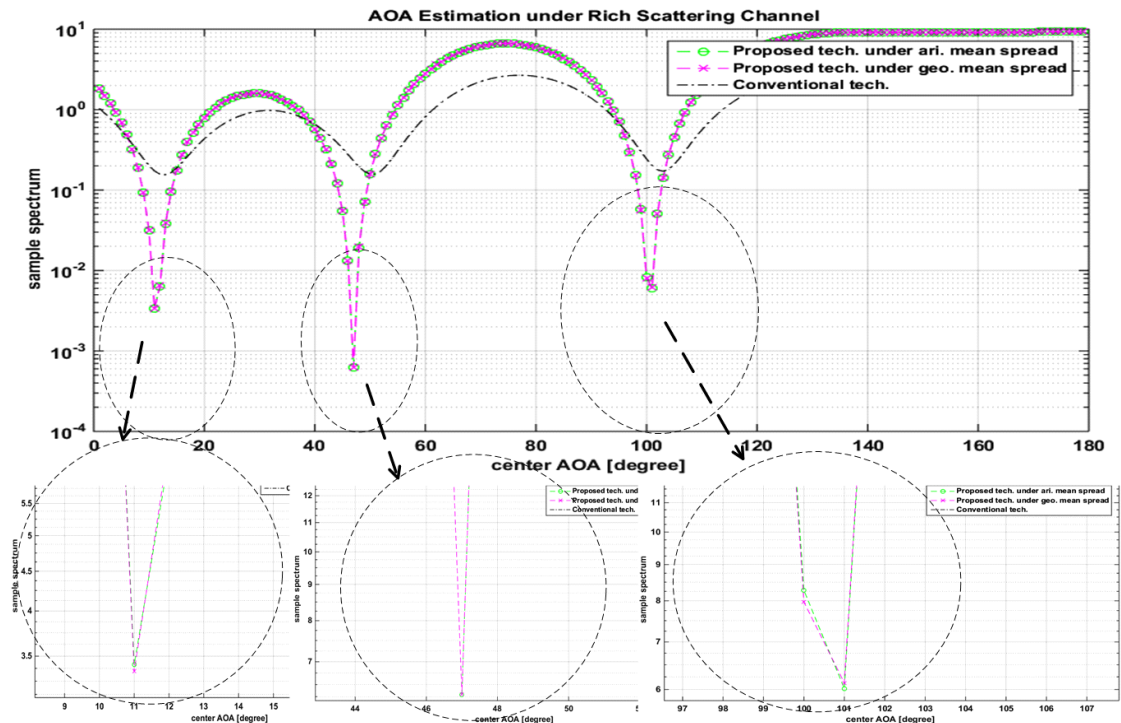


그림 8. 퍼지면 변숫값을 정해 본 이차원 표본 스펙트럼들과 확대 그림
Fig. 8. The two dimensional sample spectrum and its expanded view estimated at receiver under rich scattering multipath channel by RIS near receiver

그림 7과 그림 8의 실험 환경은 수신기 근처 RIS에 반사된 신호들은 근거리 수신기 배열 광다이오드에 세 개 클러스터와 클러스터 안의 넓게 퍼진 다중 경로들이 도달된다. 클러스터 중심과 퍼짐 변숫값은 $A(11^\circ, 4.16^\circ)$, $B(47^\circ, 3.41^\circ)$, $C(101^\circ, 2.89^\circ)$ 이다.

모의실험으로 수신기에 도달한 클러스터들, 수많은 다중반사 경로의 방향들을 산술 평균, 기하 평균 기반 가중평균 주사 벡터 개념의 제안 기법으로 추정해 그림 7의 삼차원 표본 스펙트럼을 얻었다.

그림 7 결과를 보면, 수신기에서 추정된 클러스터는 세 개이며 클러스터 안의 다중 경로들의 퍼짐 각은 큰 값을 가진다. 그래서 수신기 근처 RIS를 설치한 측위에서 측위에 필요한 핵심 정보인 AOA 변수는 클러스터 중심 AOA 추정치와 퍼짐 각도 추정치인 두 개임을 알 수 있다. 이 경우 한 개 모수 추정 기법인 종래 추정 기법은 적용하기 어려움을 알 수 있다.

그림 8은 그림 7의 삼차원 표본 스펙트럼에서 퍼짐 각을 정한 이차원 표본 스펙트럼들의 역이다. 그림의 흑색 점선과 실선(---)으로 된 표본 스펙트럼은 종래 AOA 추정 기법을 적용해 추정한 결과이다. 결과를 보면 세 개의 클러스터가 11° , 47° , 101° 방위각의 클러스터 중심 AOA로 수신기에 도달되는 실험 환경에서 이와 다른 지점에서 국부 최소가 되는 결과로 잘못된 AOA 추정치를 얻게 된다. 수신기 근처 RIS를 둔 측위 환경은 종래 AOA 추정 기법으로 원하는 AOA 추정치를 얻지 못함을 다시 알 수 있다.

그림 8의 녹색 실선과 ‘0’로 조합된 선(-○-)으로 된 표본 스펙트럼과 적색 실선과 ‘*’로 조합된 선(-*-)으로 표시된 표본 스펙트럼은 여기서 제안한 식(15)의 산술 평균, 식(16)의 기하 평균 개념의 가중평균 주사 벡터를 다중신호 분류 기법에 적용한 새로운 다중신호 분류 AOA 추정 기법들로 얻은 것이다.

그림 8의 추정된 스펙트럼에서 클러스터가 11° , 47° , 101° , 클러스터 중심 AOA와 동일 지점에서 최소가 되는 정확한 AOA 추정 결과이다. 그래서 수신기 근처 RIS를 둔 측위에서 제안한 가중평균 AOA 추정 기법이 정확한 AOA 추정이 됨을 알 수 있다.

4.3 다른 기법과 비교

제안한 RIS 기반 가시광 측위 기법과 다른 측위 기법을 실험 재시도 수, AOA 변수 추정 단위, 정확도, 계산량, 사용한 측위 채널 등의 관점으로 비교한 결과가 표 3이다.

제안 방식은 일반적인 측위보다 특정된 측위 (예, 실내 장애물의 가시광 측위) 환경에서 가시광 신호의 도착 방향 변수를 수정된 다중신호 분류 (MUSIC) 추정 기법으로 측위에 필요한 위치 추정치를 얻습니다. 시스템 구조, 측위 정확도, 계산량 면에서 장점을 가진다.

이 논문에서 제안한 AOA 추정 기법은 가시광 음영 지역 실내, 구면과 전송의 인접 거리 측위, 즉 측위 시스템의 수신기에 도달하는 신호가 구면과 형태의 비모수 클러스터 입사인 근거리 수집이나 다중 경로들의 도착 시간 차이가 큰 대형 실내 측위 경우는 적용하기 어렵다.

V. 결 론

도래할 6G 통신 서비스 환경에서 측위 방식으로 RIS 소자 기반 가시광 측위 기법, 가시광과 밀리미터파 무선 기반 실내의 하이브리드 광무선 측위 기법이 종래 무선 측위 방식보다 더 선호될 것으로 예상된다.

이런 흐름에 따라 이 논문에서는 6G 통신 서비스를 위한 가시광 측위 기법에서 RIS 소자 적용 위치에 따른 다양한 실내 가시광 측위 기법과 측위 핵심 변수인 신호

표 3. 제안 기법과 다른 방식의 비교

Table 3. Comparison between the proposed technique and the previously published techniques

Ref.	Cycle of reconfiguration	Estimation error order (variance)	Accuracy per wave length	Computation per N samples	Positioning channel
[1]	Number of anchor node (min. two)	$\sim 10^{-6}$	2	$\sim N^2$	Microwave channel
[2]	Number of anchor node (min. two)	$\sim 10^{-6}$	max.780	$\sim N^2$	Visible light channel
[5]	One	$\sim 10^{-5}$	max.780	$\sim N^2$	Visible light channel
[9]	One	$\sim 10^{-5}$	max.10.6	$\sim N^2$	UWB channel
[10]	One	$\sim 10^{-3}$	2	$\sim N$	Microwave channel
Proposed technique	One	$\sim 10^{-3}$	max.780	$\sim N$	visible light channel

도착 방향 추정 기법을 다루었다. 정확한 측위 서비스 구현을 위해 RIS 설치 위치에 따라 다양한 클러스터 특성의 가시광 채널 환경을 극복하는 새로운 평균 주사 벡터 개념의 다중신호 분류 AOA 매개변수 추정 기법이 생각되었다.

송신기 근처 RIS를 설치한 측위 실험에서 측위의 핵심 정보인 AOA 변수를 클러스터 중심각 AOA 추정치로 해도 되며 종래 주사 벡터 기반 AOA 추정 기법 적용이 가능함을 알았다.

수신기 근처 RIS를 설치한 측위 실험에서 RIS 다중 반사된 후 근접된 거리로 인해 여러 방향에 걸쳐 넓게 퍼진 다중 경로의 클러스터들이 수신기에 도달할 때 여기서 제한한 산술 평균이나 기하 평균 기반 가중평균 주사 벡터를 도입한 다중신호 분류 AOA 추정 기법을 적용한 한 결과 정확한 AOA 추정치를 얻게 됨을 알 수 있었다.

References

- [1] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based wireless location," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 22, pp. 24-40, Jul. 2005. (<https://doi.org/10.1109/MSP.2005.1458275>)
- [2] J. Luo, L. Fan, and H. Li, "Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art," *IEEE Commun. Surv. and Tuts.*, vol. 19, pp. 2871-2893, Aug. 2017. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2743228>)
- [3] E. C. Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, L. Maret, and C. Dehos, "6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, pp. 42-50, Sep. 2019. (<https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921162>)
- [4] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira, and O. Gnawali, "Visible light communication: Concepts, applications and challenges," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 21, pp. 3204-3237, 2019.
- [5] S. Aboagye, A. R. Ndjiongue, T. M. N. Ngatched, O. A. Dobre, and H. V. Poor, "RIS-assisted visible light communication systems: A tutorial," *IEEE Commun. Surv. and Tuts.*, vol. 11, pp. 251-288, First Quarter 2023. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3225859>)
- [6] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, "Beyond massive MIMO: The potential of data transmission with large intelligent surfaces," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, pp. 2746-2758, May 2018. (<https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2816577>)
- [7] O. Rinchi, A. Elzanaty, and M.-S. Alouini, "Compressive near-field localization for multipath RIS-aided environments," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, pp. 1268-1272, Jun. 2021. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3151036>)
- [8] S. Jeong and S. Kim, "Low-complexity RIS phase error estimation method for RIS-aided OFDM systems," *J. KICS*, vol. 48, no. 10, pp. 1271-1276, 2023. (<https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.10.1271>)
- [9] T. Ma, Y. Xiao, X. Lei, W. Xiong, and Y. Ding, "Indoor localization with reconfigurable intelligent surface," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, pp. 161-165, Jan. 2021. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3025320>)
- [10] X. Shao, C. You, W. Ma, X. Chen, and R. Zhang, "Target sensing with intelligent reflecting surface: Architecture and performance," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 40, pp. 2070-2084, Mar. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155546>)
- [11] A. Chen, L. Chen, Y. Chen, C. You, G. Wei, and F. R. Yu, "Cramér-Rao bounds of near-field positioning based on electromagnetic propagation model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 11, pp. 1-17, Jun. 2023. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3284658>)
- [12] X. Zhang, K. Cui, M. Yao, H. Zhang, and Z. Xu, "Experimental characterization of indoor visible light communication channels," *IEEE 8th Int. Symp. Commun. Syst., Netw. & Digital*

Sign. Process., vol. 1, pp. 1-5, Jul. 2012.
(<https://doi.org/10.1109/CSNDSP.2012.6292759>)

- [13] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*, IEEE Standard 802.15.7, Sep. 2018 (revision of 2011).
(<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8697198>)
- [14] J. Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W. Gerstacker, and P. A. Hoeher, “Multiple-antenna techniques for wireless communications - A comprehensive literature survey,” *IEEE Comm. Surv. and Tuts.*, vol. 11, pp. 87-105, Jun. 2009.
(<https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090207>)

이 용 업 (Yong Up Lee)



1985년 : 서울대학교 공학사
1987년 : KAIST 공학석사
1996년 : KAIST 공학 박사
2004년 : 호주 UNSW 방문학자
2012년 : 미국 Pen. State Univ.
방문교수
1986년~1998년 : (주) 삼성전자

1998년~현재 : 한림대학교 교수

<관심분야> 무선통신, 위치인식, 가시광 통신, 통계
신호처리