

편광빛의 스톡스변수들을 리용한 목표식별원리와 특징

박현철, 류명수

레이자는 편광특성을 가지는 가로파이다. 레이자빛이 물체에서 반사되면 반사빛전기벡터의 수직성분과 평행성분들이 변화되며 반사빛은 부분편광 혹은 선편광빛으로 된다. 따라서 반사빛의 편광상태는 목표물의 각종 정보를 포함하고있으며 목표식별을 위한 정보를 제공한다. 만일 매 반사빛점의 편광상태를 결정한다면 목표에 대한 정보를 얻을수 있고 영상처리과정을 거치면 목표를 식별할수 있다.[1, 2]

우리는 편광빛의 스톡스변수들을 리용한 목표식별원리와 그 특징을 연구하였다.

빛의 편광상태는 스톡스변수행렬 $S = (I, Q, U, V)^T$ 를 구성하여 표시한다. 이 방법에서 변수는 모두 실수이다. 또한 편광빛의 편광도와 편광각, 편광타원률도 스톡스변수를 리용하여 직접 계산할수 있으며 따라서 편광탐측은 점차적으로 스톡스변수를 리용한 방법으로 발전하고있다. 스톡스변수법에서는 4개의 호상독립인 변수 S_0, S_1, S_2, S_3 을 리용하여 한뿔음빛선의 편광상태를 완전히 표시한다.[3, 4]

이 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 S_0(t) &= \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 n c \right) \left[|E_x(t)|^2 + |E_y(t)|^2 \right] \\
 S_1(t) &= \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 n c \right) \left[|E_x(t)|^2 - |E_y(t)|^2 \right] \\
 S_2(t) &= \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 n c \right) \left[\frac{1}{2} \left\{ |E_x(t) + E_y(t)|^2 + |E_x(t) - E_y(t)|^2 \right\} \right] = \\
 &= \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 n c \right) \left| E_x(t) E_y^*(t) + E_x^*(t) E_y(t) \right| \\
 S_3(t) &= \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 n c \right) \left[\frac{1}{2} \left\{ |E_x(t) + i E_y(t)|^2 + |E_x(t) - i E_y(t)|^2 \right\} \right] = \\
 &= \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 n c \right) \left[-i E_x(t) E_y^*(t) + i E_x^*(t) E_y(t) \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

한편 스톡스변수 S_0, S_1, S_2, S_3 은 보통 다른 형식 I, Q, U, V 로 표시할수 있는데 한뿔음빛선의 편광상태를 완전히 확정하려면 3개의 독립자료로부터 I, Q, U 의 3개 변수를 확정해야 한다.

이를 위해서 2개의 편광자를 리용한 광학체계로 빛이 통과할 때 스톡스변수들의 변화를 관찰하자.

2개의 편광자를 리용한 광학체계로 빛이 통과할 때 전기마당성분변화는 그림 1과 같다. 빛의 편광상태가 러파기에 의해 변할 때(또는 다른 광학적인 현상에 의하여 변할 때)

이러한 변화는 다음과 같은 2×2 존스벡토르를 리용하여 입출구관계로 쓸수 있다.

$$|E_u\rangle = M|E_i\rangle \quad (2)$$

여기서 $|E_i\rangle, |E_u\rangle$ 는 각각 들어오는 빛과 나가는 빛의 상태벡토르, M 은 편광변화를 나타내는 행렬이다.

빛이 실례로 M_1, M_2, \dots, M_n 으로 표현되는 몇개의 편광러파기를 연속적으로 통과할 때 전체 편광효과는 개별적인 러파기행렬들의 적으로 표현된다는것이 존스행렬의 우점이다.

$$|E_u\rangle = M_n \cdots M_2 M_1 |E_i\rangle \quad (3)$$

x 축투과방향을 가지는 선편광자의 존스행렬은 다음과 같다.

$$M_{(H)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이제 편광자들의 축이 x 축과 임의의 각 θ 를 이룰 때 이러한 행렬의 일반적인 표현을 얻자.

먼저 자리표계를 각 θ 만큼 돌려 x' 축이 러파기축과 일치하도록 한다.

다음 러파기행렬을 적용하고 다시 자리표계를 원점위치로 돌린다. 이것은 수학적으로 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} M &= R^{-1} M_x R \\ R &= \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \\ R^{-1} &= \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 R 는 회전행렬, R^{-1} 은 R 의 거꾸행렬이다.

식 (5)로부터 다음식을 얻을수 있다.

$$M_{(\theta)} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

한편 존스행렬에 의한 표현식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E'_x &= \cos^2 \theta E_x + \cos \theta \sin \theta E_y \\ E'_y &= \cos \theta \sin \theta E_x + \sin^2 \theta E_y \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)로부터 스톡스변수들을 결정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S'_0 &= E'_x E_x^* + E'_y E_y^* = [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta] / 2 \\ S'_1 &= E'_x E_x^* - E'_y E_y^* = [S_0 \cos 2\theta + S_1 \cos^2 2\theta + S_2 \cos 2\theta \sin 2\theta] / 2 \\ S'_2 &= E'_x E_y^* + E_x^* E'_y = [S_0 \sin 2\theta + S_1 \cos 2\theta \sin 2\theta + S_2 \sin^2 2\theta] / 2 \\ S'_3 &= i[-E'_x E_y^* + E_x^* E'_y] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

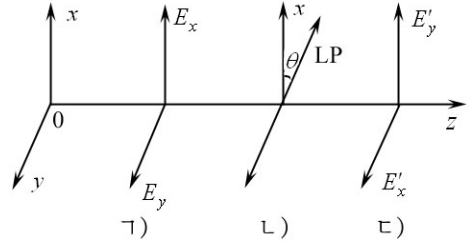


그림 1. 2개의 편광자를 빛이 통과할 때 전기마당성분

ㄱ) 첫 편광자를 통과한 입사빛, ㄴ) 자리표축과 θ 만 한 각을 지은 선편광자, ㄷ) 두번째 편광자를 통과한 빛

새로 생성된 스톡스상수들의 값을 구하는것은 그리 중요하지 않다.

본래 상태의 스톡스상수들을 결정하기 위해서는 식 (8)의 첫번째 식만을 리용할수 있다. 실례로 러파기의 각을 임의로 돌리면서 그때 측정가능한 빛세기량을 잰다면 그로부터 본래상태의 스톡스상수들을 결정할수 있다.

만일 4개 각에 해당하는 편광영상을 얻고 I, Q, U 를 결정하면 다음식을 얻을수 있다.

$$S = \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135})/2 \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{bmatrix} \quad (9)$$

따라서 CCD화면상에서 4개 편광각도에 빛세기를 기록하였을 때 1파라미터영상은 편광각 0° 와 90° 에서 얻은 빛세기의 더하기법으로, Q 파라미터영상은 편광각 0° 와 90° 에서 얻은 빛세기의 덜기법으로, U 파라미터영상은 편광각 45° 와 135° 에서 얻은 빛세기의 덜기법으로 계산할수 있다.

만일 변수 I, Q, U 가 확정되면 웅근묶음빛의 편광상태가 완전히 결정된다. 즉 4개의 각이한 각도의 선편광성분의 빛세기를 측정해내면 완전한 빛묶음의 편광상태를 정량적으로 측정한다.

또한 편광도 P 와 편광각 ϕ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (10)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right)$$

편광도 P 는 $0 \sim 1$ 사이의 무분상수이며 $P=0$ 일 때 비편광빛, $P=1$ 일 때 완전편광빛임을 표시하고 $0 < P < 1$ 일 때 부분편광빛임을 의미한다. 또한 편광각 ϕ 는 입사빛의 편광방향이 x 축과의 삽입각이다. 부분편광빛에서 보면 에네르기최대편광방향은 x 축의 삽입각에 관계된다. 스톡스변수법을 리용하여 목표를 식별하기 위한 실험장치구성도는 선행연구[1]과 같이 레이자와 CCD, 편광자와 러광판, 망원경체계와 빔확대경체계로 구성되었다.

편광정보에 기초한 영상처리계통은 3개 부분 즉 영상획득부분, 편광정보획득부분, 영상처리부분으로 가를수 있다.(그림 2)

영상획득부분에서는 1개의 CCD와 각이한 각도의 편광편을 리용하여 대상을 3차례 촬영하여 각이한 각도들에 해당하는 편광영상을 얻고 기하교정과정을 거쳐 대치되는 3장의 동일한 대상물의 비동일각도편광그림을 얻을수 있다. 편광정보획득부분에서는 이 3장의 각이한 각도에 대한 편광그림중에서 스톡스변수들과 편광도, 편광각에 해당하는 그림을 계산해낸다.

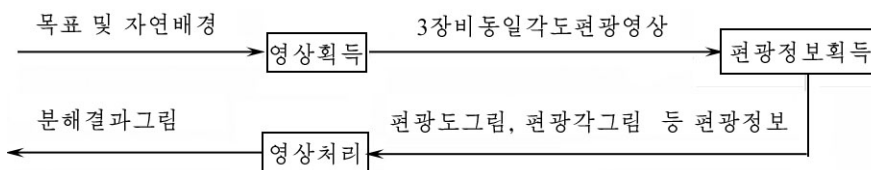


그림 2. 편광정보에 기초한 영상처리계통구조

실험과정에 우리가 얻은 목표식별기술의 특징은 다음과 같다.

첫째로, 파라미터 I 의 영상은 목표의 세기정보를 반영할뿐만아니라 목표의 반사률을 표시하며 파라미터 Q 의 영상은 목표의 재료특징을 나타내는데 각이한 재료들에서의 차이는 파라미터 Q 상에서 유효하게 큰 차이를 가진다. 파라미터 U 영상은 풍부한 가장자리와륜곽자리를 포함한다.

둘째로, 인공목표의 편광도는 일반적으로 자연배경의 편광도보다 높으므로 인공목표를 명백하게 식별할수 있게 한다. 그 원인은 자연배경이 일으키는 편광특성이 없기때문이다.

맺 는 말

1) 스톡스변수법을 리용한 목표식별원리를 해명하였으며 레이자와 CCD, 편광자와 러광관 망원경체계와 확대경체계를 리용한 기초광학실험장치체계를 구성하였다.

2) 기초실험과정에 자연배경에 비한 금속목표의 강한 반사특성, 목표의 표면구조를 반영한 스톡스변수들의 영향을 관찰하였다.

참 고 문 헌

- [1] 谭显裕; 红外与激光工程, 25, 3, 612008, 1996.
- [2] 谭佐军 等; 激光与红外, 37, 3, 200, 2007.
- [3] 刘政凯 等; 光学技术, 30, 3, 267, 2004.
- [4] 王武 等; 激光与电子学进展, 47, 6, 061402, 2010.

주체104(2015)년 8월 5일 원고접수

Principle and Feature of Target Identification using the Stokes Parameters of Polarized Light

Pak Hyon Chol, Ryu Myong Su

We propose a method of target identification based on the Stokes parameters and a basic experimental configuration consisting of a laser light source and a CCD camera. We experimentally demonstrate the influence of Stocks parameters depending on the surface structures of metallic target that has the reflectivity stronger than the background.

Key words: polarized light, target identification, Stokes parameter, laser