

시스템 함수 및 변복조 개념 적용 능동 방식 3차원 물체 좌표 복원

이덕우*, 김지수, 박철형
계명대학교 공과대학 컴퓨터공학전공

Concepts of System Function and Modulation-Demodulation based Reconstruction of a 3D Object Coordinates using Active Method

Deokwoo Lee*, Jisu Kim and Cheolhyeong Park
Department of Computer Engineering, Keimyung University

요약 본 논문에서는 시스템함수 및 변복조의 개념을 3차원 복원 문제에 적용하는 알고리즘을 제안한다. 시스템의 유일한 특성을 정의하는 시스템 함수 (또는 시스템 응답)를 일반적인 신호처리 또는 제어시스템에서 결정하듯이, 본 논문에서는 적절한 입력과 출력신호를 선택한 다음 3차원 물체의 특성을 결정짓는 시스템 함수를 결정한다. 본 논문에서는 3차원 복원 문제를 두 가지 방법의 시스템 함수 문제로 풀어 나간다. 첫 번째 방법은 입력과 출력 신호를 각각 3차원 물체의 면에 투영된 원형 빛 패턴과 카메라(2차원 이미지 면)가 획득한 패턴이 투영된 3차원 물체의 이미지로 정의하여 3차원 물체의 특성을 나타내는 시스템 함수를 정의 하는 것이다. 두 번째 방법은 입력과 출력 신호를 각각 복원되어야 할 3차원 물체의 좌표와 카메라가 획득한 빛 패턴이 투영된 3차원 물체의 이미지로 정의하여 입력 신호를 추정하는 문제로 해석하는 것이다. 첫 번째 방법은 일반적인 입출력 함수의 비(ratio)로부터 시스템 함수를 구하는 것이고 두 번째 방법은 신호의 변조와 복조 과정으로부터 원래의 전송된 신호 (입력) 를 추정하는 것처럼 입력 신호인 3차원 물체의 좌표를 추정하는 것이다.

Abstract In this paper we propose a novel approach to representation of the 3D reconstruction problem by employing a concept of system function that is defined as the ratio of the output to the input signal. Akin to determination of system function (or system response), this paper determines system function by choosing (or defining) appropriate input and output signals. In other words, the 3D reconstruction using structured circular light patterns is reformulated as determination of system function from input and output signals. This paper introduces two algorithms for the reconstruction. The one defines the input and output signals as projected circular light patterns and the images overlaid with the patterns and captured by camera, respectively. The other one defines input and output signals as 3D coordinates of the object surface and the image captured by camera. The first one leads to the problem as identifying the system function and the second one leads to the problem as estimation of an input signal employing concept of modulation-demodulation theory. This paper substantiate the proposed approach by providing experimental results.

Keywords : Circular Pattern, Demodulation, Light Pattern, Modulation, System Function, 3D Reconstruction

*Corresponding Author : Deokwoo Lee(Keimyung Univ.)

Tel: +82-53-580-5268 email: dwoolee@kmu.ac.kr

Received February 8, 2019

Revised March 5, 2019

Accepted May 3, 2019

Published May 31, 2019

1. 서론

구조광 패턴(structured light pattern)을 활용하는 방식으로 대표되는 능동방식 3차원 복원 알고리즘은 지난 수십 년간 활발히 연구되어 왔으며 상용화 되어 게임 등 다양한 분야에 적용되고 있다[1,2]. Geng[3]은 구조광 패턴을 활용한 3차원 복원 알고리즘에 대한 소개를 자세하게 하였다. Lee[4]는 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 복원 알고리즘과 빛 패턴의 개수와 3차원 복원 결과 사이의 관계를 정립하는 샘플링 이론 모델을 제시하였다. 구조광 패턴을 활용한 3차원 복원은 투영된 광패턴의 정보를 활용하여, 목표 물체의 좌표 정보를 계산한다. 높은 정확도의 복원 결과를 얻기 위해서는 광패턴의 개수를 증가 (또는 광패턴의 밀도 증가) 시키는 방법이 있으나 계산 복잡도의 증가를 야기하므로, 효율적인 복원을 위한 적절한 광패턴의 개수를 결정하는 것은 중요하다. 일반적인 신호처리에서 Nyquist rate [5,17] 또는 Compressed sensing[6,15,16] 알고리즘이 존재하듯이, 3차원 복원을 위한 샘플링 rate도 앞으로 반드시 연구되어야 할 내용이다. 그 이유는 컴퓨터 비전이나 영상처리의 모든 응용 분야들이 높은 정확도의 3차원 복원을 요구하는 것은 아니기 때문이다. 응용분야에 따라 필요한 정확도는 모두 다르므로, 응용분야에 따른 샘플링 밀도를 조절할 필요가 있다. 신호처리 또는 제어시스템 이론에서 활용되는 시스템 함수 (또는 시스템 응답) 는 입력에 따른 출력의 특징을 분석하기 위해 사용되는 개념이다[7] (Fig. 1 참조).

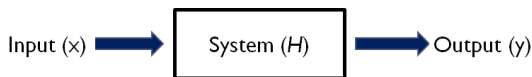


Fig. 1. System function establishes a relationship between input and output signal.

주로 디랙델타(dirac delta) 함수를 활용하여 시스템 함수를 계산하며, 계단함수(step function), 정현파 함수 (sinusoidal function)를 사용하기도 한다[7]. 이 함수들을 사용하면, 입출력 관계를 간단하면서도 정확히 분석할 수 있다. 본 논문에서는 이 개념을 3차원 복원 또는 3차원 물체의 특징 추출에 활용한다. 원형 빛 패턴을 활용하여 3차원 특징을 추출하므로, 시스템 함수는 물체의 3차원 특징과 대응이 된다고 볼 수 있다. 3차원 복원 알고리즘에서 디랙델타 함수 등을 활용할 수는 없으므로, 원형 빛 패턴이 디랙델타 함수의 역할을 한다고 볼 수 있다. 본 연구에서의 시스템 함수를 얻기 위해서는 적절한 입

력과 출력 신호를 3차원 복원 시스템 내에서 결정하여야 하며 3장에서 자세하게 논의한다. 3장에서 3차원 복원 함수를 입력과 출력 함수의 비로부터 계산됨을 보인다. 3차원 복원 알고리즘에 적용할 다른 하나의 개념은 변조와 복조(modulation-demodulation) 이다 (Fig. 2 참조).

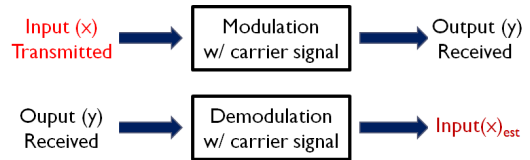


Fig. 2. Transmitted signal is estimated by demodulation of the received signal that is modulation of the transmitted one.

통신시스템에서 전송된 신호는 이산화, 필터링, 부호화 및 변조 과정 등을 거치고, 이 과정을 거친 신호(수신 신호)는 다시 복호화, 필터링 및 복조 과정 등을 거친 후 원래의 전송된 신호를 얻게 된다[8,18]. 반송파 신호(carrier signal)는 수학적으로 변조와 복조의 과정을 모델화 하는데 필요하다. 본 논문에서는 3차원 복원을 변복조 개념을 적용하여 재구성 하고자 하며, 실제 통신시스템에서 고려되어야 할 다른 과정(필터링, 부호 및 복호화, 이산화 등) 들은 다루지 않는다. 변복조 개념을 3차원 복원 문제에 적용하기 위하여 정의되어야 할 필수적인 세 가지 요소가 있다. 첫 번째는 전송된 신호(Fig. 2의 Input(x))의 역할을 하는 구성요소를 찾는 것이다. 두 번째는 반송파 신호 (Fig. 2의 carrier signal)의 역할을 하는 구성요소를 찾는 것이며 세 번째는 수신신호의 역할 (Fig. 2의 Output(y))을 하는 구성요소를 찾는 것이다. 3.2장에서 자세하게 논의되는 바와 같이 Fig. 2의 Input(x)에 해당하는 요소는 3차원 물체이고, Output(y)는 원형 빛 패턴에 투영된 3차원 물체가 카메라에 의해 획득되어 나타난 이미지이다. 반송파 신호에 해당하는 요소는 원형 빛 패턴이고, 원래의 전송신호를 복원한 결과는 복원된 물체의 3차원 좌표 값에 대응된다. 실제로 3차원 복원 과정에서 반송파 신호를 사용할 수는 없지만, 원형 빛 패턴의 정보가 반송파 신호의 역할을 하며 변조와 복조의 과정은 패턴의 투영과 연관이 있으며, 이 부분의 수학적 모델은 3.2장에서 자세하게 제시된다.

지난 수십 년간 3차원 복원에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔으며, 복원의 정확도 또한 상용화가 가능한 정도로 개선되어 왔다. 그러나 앞으로 많은 응용분야에 적용하기 위해서는 복원의 정확도 뿐 아니라 복원 알고리

즘의 적응적 효율성을 고려해야 한다. 본 논문에서 제안하는 3차원 복원 알고리즘은 복원 알고리즘의 적응적 효율성에 중점을 두고, 수학적 모델화가 기존 연구들에 비해 간단한 원형 빛 패턴을 활용하여 3차원 복원을 수행한다. Lee[9]가 제안한 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 복원 알고리즘은 계산 복잡도가 높다. 본 논문에서 제안하는 시스템 함수 또는 변복조 개념 기반 3차원 복원 알고리즘은 계산 복잡도가 기존 알고리즘 대비 낮다는 장점이 있으며, 본 논문에서 이 내용을 자세히 다루도록 한다. 2장에서는 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 복원에 관해 간단히 소개를 하고 3장에서는 시스템 함수 및 변복조 개념 기반 3차원 복원 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 3장에서 제안한 알고리즘을 구현한 결과 및 복원의 정확도를 제시하고 5장에서 논문을 끝맺는다.

2. 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 좌표 복원

본 장에서는 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 복원에 대해 간단히 소개를 한다. 자세한 내용은 기존의 3차원 복원에 관한 논문에 나타나 있으며[3]장에서 제시할 알고리즘도 같은 형태의 원형 패턴을 활용한다. 3차원 복원의 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 수동방식(passive method)으로서 두 개 이상의 카메라를 활용하여 카메라들이 획득한 물체의 이미지로부터 기하학적인 관계를 정립하여 목표 물체의 3차원 좌표를 계산하는 것이다. 두 번째 방법은 능동방식(active method)으로서 한 개의 카메라와 한 개의 광원을 활용하여 목표 물체의 3차원 좌표를 계산하는 것이다. 여기서 사용되는 광원은 특정 형태의 패턴을 생성하여 목표 물체에 투영시키며, 물체 모양에 의해 변형된 패턴의 모양을 활용하여 3차원 복원을 수행한다. 능동방식 3차원 복원은 어두운 환경이나 텍스처(texture)가 부족한 물체 등 수동방식을 이용했을 때 생기는 오류의 가능성을 줄여준다. 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 복원은 패턴의 모양을 모델화 하는 것이 간단하고, 패턴의 변형을 정량화하기 용이하다는 장점이 있다. 원형 빛 패턴을 활용할 경우 패턴의 정보는 반지름과 중심점만으로 충분하다(Fig. 4). 기존의 능동방식 3차원 복원에서 활용된 패턴들은 점 패턴[10], 수직선, 수평선 및 격자 패턴[11,12], 코드화 패턴[13] 등이었으나, 이 패턴들은 패턴의 위치, 패턴의 색상 등 필요한 정보들이 원형 패턴에 비해 많다는 단점이 있다. 원형 패턴을 활용한 3차원 복원은 Fig. 3와 Fig. 4에 나타나 있다.

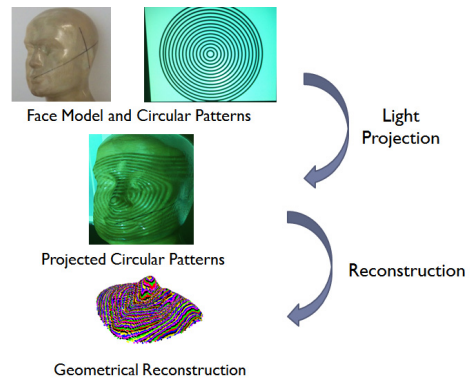


Fig. 3. Flowchart of a 3D reconstruction using structured circular light patterns

3. 3차원 복원 알고리즘의 대체 접근법

본 장에서는 3차원 좌표 복원 문제를 입력력 신호를 활용한 시스템 함수 계산 또는 변복조 시스템의 개념을 활용한 입력함수 추정의 문제로 대체하는 과정과 그에 해당하는 수학적 모델 제시를 상세하게 다룬다. 3차원 복원은 다양한 분야에 응용이 되며, 응용 분야에 따라 정확도가 높은 3차원 복원, 3차원 물체의 특징 추출만으로도 충분한 복원 등으로 나누어 질 수 있다. 3차원 물체의 특징 추출이 필요할 경우 계산량이 복잡하고 고비용의 하드웨어를 요구하는 물체의 모든 좌표의 복원보다는 특징만을 추출해 낼 수 있는 간단한 알고리즘이 효율적일 것이다. 이러한 목적에 초점을 두고, 본 장에서는 3차원 복원 그 자체보다는 3차원 물체의 특징을 추출하는 복원 알고리즘을 제안하기 위해 시스템 함수 (3.1) 또는 변복조 시스템 (3.2)의 개념을 도입하여 문제를 풀어보고자 한다. 시스템 함수 (시스템 응답) 는 입력과 출력 함수 사이의 비율로부터 정의된다. 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 복원 시스템에서 입력 및 출력 신호의 역할을 하는 부분을 정의한 후 두 신호의 비율로부터 시스템 함수, 즉 3차원 복원 결과를 계산한다. 통신 시스템에서는 변복조 (Modulation-Demodulation) 과정을 통하여 반송파 신호 (carrier signal)를 활용하여 전송된 신호를 추정할 수 있다. 3차원 복원 과정을 변복조 과정의 개념을 도입하여 수학적 모델화 할 수 있다. 3차원 복원 시스템에서 출력(수신)신호, 반송파 신호의 역할을 하는 부분을 정의한 후 입력(전송)신호, 즉 3차원 복원 결과를 추정한다. 본 논문을 이해하는 과정에서의 혼란을 줄이기 위해 입력, 출력, 시스템 함수를 각각 $A(t)$, $B(t)$, $H(t)$ (또는

A, B, H) 로 표현한다. t 는 원형 빛 패턴들에서 각 패턴의 위치를 나타내는 변수이다. 이 두 가지 접근법은 기존의 3차원 복원 결과와 비교하여 미세한 정확도를 얻기 위함보다는, 3차원 복원 알고리즘을 효율적이고 간단하게 모델화 하여 3차원 비전 시스템 또는 카메라 시스템의 실제 구현에 기여할 수 있을 것이다.

3.1 입출력 기반 시스템 함수 (시스템 응답)

본 장의 소개에서와 같이 A, B, H ($A \subset \mathbb{R}^3, B \subset \mathbb{R}^2, H \subset \mathbb{R}^3$)를 각각 입력, 출력, 그리고 시스템 함수로 정의한다. 본 연구에서 3차원 좌표 복원은 중심이 동일하고 반지름이 다른 원형의 빛 패턴들을 목표 물체에 투영한 후 물체의 표면에서 일그러지는 패턴들의 모양을 정량화 한 후 원래의 패턴과 비교하는 과정을 거친다. 능동 방식의 전통적인 3차원 복원 알고리즘은 투영된 빛의 패턴 정보를 활용하는 것을 활용 하며, 투영된 빛 패턴의 기하학적인 정보 또는 색상 정보 또는 코드화한 후의 정보를 활용하는 과정에서 높은 계산량과 고비용의 하드웨어가 요구되기도 한다. 본 논문에서는 3차원 복원 문제를 시스템 함수를 추출하는 문제로 바꾸어 접근한다. 목표가 되는 물체의 3차원 좌표 정보는 H 에 포함되어 있으며, 구체적으로 H 는 원형 빛 패턴에 투영된 3차원 물체의 좌표 정보를 포함하고 있다. 3차원 물체에 투영되는 원형 빛 패턴의 정보는 A 에 포함되어 있으며, 패턴이 투영된 3차원 물체의 이미지(B)는 카메라에 의해 획득된다 (Fig. 4 참조).

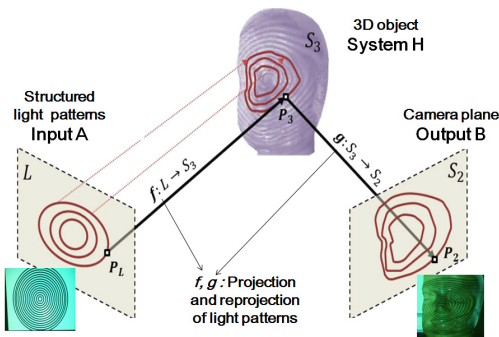


Fig. 4. Choosing input, output and system function in 3D measurement setup

신호처리에서 시스템 함수 (시스템 응답)는 디랙델타 함수가 입력신호일 때의 출력함수로 정의될 수 있다. 본 논문에서 제안하는 3차원 복원에서는 디랙델타 함수를 생성하는 것은 불가능하다. 그러므로 디랙델타 함수의 역

할을 하는 입력 신호를 적절히 선택해야 하며, 본 논문에서는 한 개의 원형 빛 패턴 (single circular light pattern) 을 활용하여 3차원 물체의 특성을 표현할 수 있는 시스템 함수를 얻는다. 본 장에서는 입력(한 개의 원형 빛 패턴)과 출력(패턴이 투영된 3차원 물체의 이미지)으로부터 시스템 함수(물체의 3차원 특성)를 얻을 수학적 모델을 제시한다. 3차원 좌표 정보를 계산하기 위한 수학적 모델은 3차원 점 $M \subset \mathbb{R}^3$ 과 카메라가 획득한 3차원 물체의 2차원 이미지 점 $m \subset \mathbb{R}^2$ 간의 기하학적인 관계로부터 만들어 진다. Thales의 이론[14]에 근거하여 M 과 m 사이의 관계식은 다음과 같이 표현된다 (Fig. 5).

$$x = z \frac{u}{f}, y = z \frac{v}{f} \tag{1}$$

$$x^2 + y^2 = R^2 \tag{2}$$

$$z = \frac{fR}{\sqrt{u^2 + v^2}} \tag{3}$$

f, R 은 카메라의 초점거리와 투영되기 전의 원형 빛 패턴의 반지름을 나타낸다. x, y, z 는 물체의 점 M 의 3차원 좌표를 나타내고, u, v 는 M 이 카메라의 이미지 평면에 투영된 상태에서의 좌표를 나타낸다. 깊이 값 z 는 투영되는 원형 빛 패턴의 모양을 변형 시키고, 이 변형에 따라 3차원 물체의 기하학적 특성이 정량화 될 수 있다.

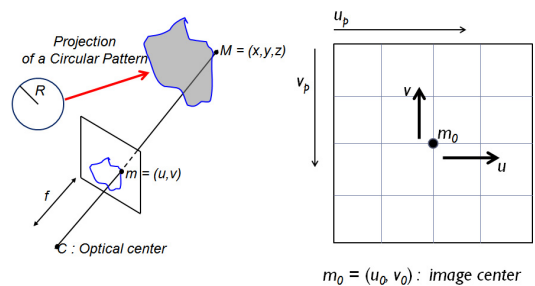


Fig. 5. Based on the Thales' Theorem, and on the properties of a circular pattern, relationship between M and m is established.

본 연구에서는 이러한 3차원 특성을 시스템 함수로 정의하고 입력과 출력 신호의 관계로부터 도출할 수 있으며 수학적 모델은 다음과 같다.

$$H(t) = \frac{B(t)}{A(t)} \tag{4}$$

$$A(t) = \frac{1}{f(t)R(t)} \quad (5)$$

$$B(t) = \frac{1}{\sqrt{u(t)^2 + v(t)^2}} \quad (6)$$

$H(t), A(t), B(t), f(t)$ 는 각각 시스템 함수, 입력, 출력 함수, 카메라의 초점함수를 나타내고, 변수 t 는 투영되는 원형 빛 패턴들의 위치를 나타낸다 (Fig. 6). 카메라의 초점함수는 패턴의 위치와 무관하고, 동일한 카메라에서는 초점거리가 변하지 않는다는 가정 하에 $f(t) = f$ 로 두고 계산해도 무방하다[14]. 일반적으로 시스템 함수를 계산할 때 주파수 영역 (푸리에 변환 활용시) 또는 z 영역 (z 변환 활용시)에서 계산이 되지만, 본 연구에서는 패턴의 위치를 나타내는 t 영역에서 시스템 함수 계산을 수행한다. 일반적으로 여러 개의 패턴을 사용하기 보다는 가장 작은 반지름을 가진 패턴부터 3차원 물체에 투영을 하면서 물체의 3차원 정보를 추출한다.

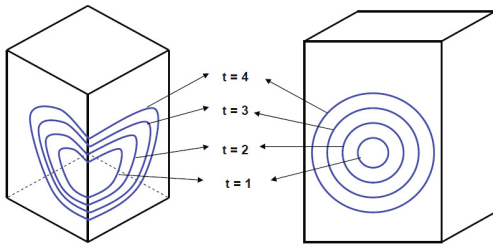


Fig. 6. A variable t represents the positions of circular patterns projected onto the 3D object.

3.2 Modulation-Demodulation 개념 적용 3차원 복원 모델화

본 장에서는 3차원 복원 시스템을 모델화 하기 위해 통신신호처리에서 활용되는 변복조 개념을 적용한다. 통신신호처리에서 전송된 신호의 변조 및 복조의 과정은 Fig. 7와 같으며, 변조 및 복조의 과정에서 반송파 신호 (carrier signal)가 중요한 역할을 하며 변조와 복조의 과정을 거쳐서 전송된 신호를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 3차원 복원 알고리즘에 변복조의 개념을 적용하는 것에 목적이 있으므로, 실제 변복조 과정에서 중요하게 고려되는 다른 과정들 (필터링, 신호의 이산화, 샘플링, 부호 및 복호)은 다루지 않는다.

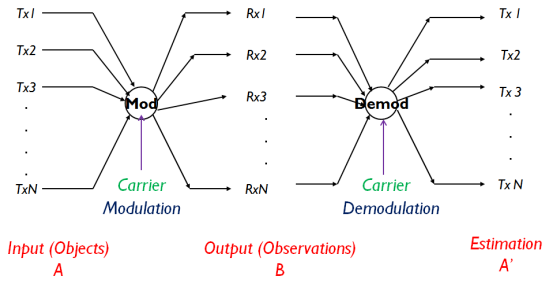


Fig. 7. Modulation and demodulation in communication systems

변조와 복조 과정의 개념을 적용한 3차원 복원 시스템에서는 전송신호, 반송파 신호, 변조 및 복조 과정 및 최종에 추정된 전송신호에 해당하는 데이터들을 적절히 선택한다. 우선, 전송신호에 해당하는 데이터는 복원의 대상이 되는 물체 (원형 빛 패턴이 투영된 3차원 물체)의 3차원 좌표 ($A \subset \mathbb{R}^3$)이고, 수신신호에 해당하는 데이터는 카메라가 획득한 물체 (원형 빛 패턴이 투영된 3차원 물체)의 이미지 ($B \subset \mathbb{R}^2$)이다. 전송신호(A)와 수신신호(B) 간의 관계, 수신신호(B)와 추정되어야 할 전송신호(A') 간의 관계는 반송파 신호로부터 정립될 수 있으며, 3차원 복원에서 반송파 신호의 역할을 하는 데이터는 투영되는 원형 빛 패턴의 기하학적 정보와 카메라의 정보로 구성되어 있다. (변복조 개념을 도입한 3차원 복원 과정을 본 논문에서 간단히 MODEM 복원이라 부른다) 구체적으로 패턴의 기하학적 정보는 원형 패턴의 반지름이며 각 위치에서의 패턴의 반지름은 벡터 $\mathbf{R} = [R_i]_{i=1}^N$ 로 표현할 수 있으며 N 은 투영된 패턴의 개수이다 (Fig. 8). 일반적으로 여러 개의 패턴을 사용하기 보다는 가장 작은 반지름을 가진 패턴부터 3차원 물체에 투영을 하면서 물체의 3차원 정보를 추출한다. MODEM 복원의 과정은 Fig. 7와 같이 표현이 되며, 추정된 전송신호 A' 는 3차원 물체의 깊이 정보를 포함한다. 수신신호 B 는 카메라가 획득한 이미지 정보, 즉 2차원 좌표 (u, v) 정보를 포함한다. 식 (1)-(3)을 활용하여 깊이 값 z 는 $\frac{fR}{\sqrt{u^2 + v^2}}$ 이며 Fig. 8에서 표현한 Depth 는 $\frac{1}{z} = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{fR}$ 이다. Fig. 8에서처럼 $1/z$ 를 활용하거나 z 를 활용해도 깊이 정보를 나타낸다는 것에는 변함이 없다. 이러한 과정을 거쳐 전송신호 (3차원 물체의 좌표 정보)를 빛 패턴의 정

보 (fR 또는 $\frac{1}{fR}$)를 활용하여 추정할 수 있다.

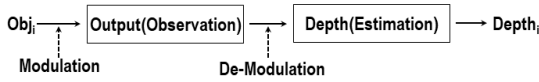


Fig. 8. Estimation of 3D coordinates of an object employing the concept of modulation and demodulation

Fig. 8에서 나타난 것처럼, $[Obj_i]_{i=1}^N$ 는 복원 되어야 할 목표 물체이며 3차원 좌표 정보를 가지고 있다. 이 물체는 원형 빛 패턴에 의해 투영이 되며 (fR) 이 과정이 변조에 해당한다. 카메라는 3차원 물체에 투영된 빛 패턴의 이미지를 포함하고($[u_i, v_i]_{i=1}^N \Rightarrow [\sqrt{u_i^2 + v_i^2}]_{i=1}^N$), 복조 과정($1/fR$)을 거쳐 물체의 3차원 정보를 추정 또는 복원 ($[Depth]_{i=1}^N$)한다. 그리하여 MODEM 복원의 수학적 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$B = AfR \tag{10}$$

$$A' = \frac{B}{fR} \tag{11}$$

식 (10)-(11)은 각각 본 논문에서 사용되는 변조(modulation)와 복조(demodulation) 연산자를 나타내며 본 논문에서는 원형 변조(circular modulation)와 원형 복조(circular demodulation)라고 부른다. 식 (10)과 식 (11)은 각각 변조(modulation)와 복조(demodulation)을 나타낸다. 식 (10)-(11)와 같이 변조와 복조 과정에서 패턴의 반지름 R 과 카메라의 초점거리 f 가 사용된다. 반지름 R 은 $R_1, R_2, \dots, R_{N-1}, R_N$ 의 다양한 값을 가질 수 있다. 카메라의 초점거리는 상수로 가정한다. 3차원 복원을 위한 패턴의 최소 개수, 즉 N_{\min} 을 구하는 것은 복원 알고리즘의 효율화와 밀접한 연관이 있고, 3차원 복원을 위한 샘플링 rate 결정 연구 [4]에서 다루고 있다. MODEM 복원 모델을 활용하였을 때, 동일 카메라를 활용할 경우 여러 개의 3차원 물체 복원에도 적용할 수 있다.

4. 실험

본 장에서는 3장에서 제안한 시스템 함수 기반 3차원 복원과 MODEM 복원을 구현한다. 물체에 투영된 원형

빛 패턴을 생성하기 위해 LCD EPSON 프로젝터 (1024×768 해상도)를 사용한다. 빛 패턴을 생성하기 위해 저가의 LED 광원도 있으나, 투영된 빛의 해상력 문제로 인해 일반 LCD 프로젝터를 사용한다. 이미지 획득을 위한 카메라는 Canon 디지털 카메라 (1280×720 해상도)를 사용한다. 카메라 캘리브레이션(calibration)은 체커보드(checkerboard)를 활용하여 초점거리(focal length)와 이미지 중심(principal point)을 픽셀(pixel) 단위로 계산하였으며 초점거리는 2480.3픽셀이고 이미지 중심은 (792, 547)이다. 3.1에서 제안한 알고리즘을 활용하여, 한 개의 원형 빛 패턴을 활용한 3차원 복원의 결과는 Fig. 9와 같이 나타난다.

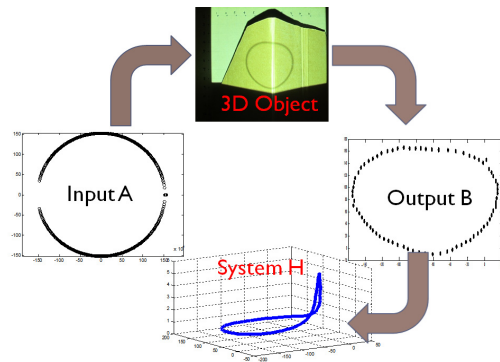


Fig. 9. Input A : Original circular pattern, Output B : Deformed pattern by the object surface, System H : Reconstructed 3D coordinates (depth) of the object.

3.2에서 제안한 MODEM 복원을 활용한 알고리즘 구현은 2개의 3차원 물체를 이용한다. 즉, 입력이 2개이며, 변복조 개념을 활용하여 2개의 입력신호를 추정한다. 3차원 복원의 실험 결과는 Fig. 10와 같이 나타난다. Fig. 10은 Fig. 7의 개념도를 이용하여 한 물체의 다른 영역에 빛 패턴을 투영한 후 최종 복원 결과는 두 개의 부분 복원 결과를 합한다.

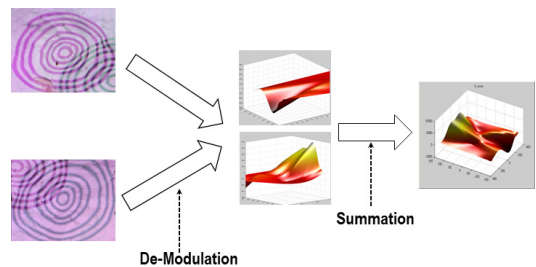


Fig. 10. 3D reconstruction of the object overlaid with the light patterns based on MODEM reconstruction.

본 연구에서의 실험은 3차원 복원 알고리즘을 시스템 함수와 번복조 개념을 활용하였다. 본 연구의 주된 목적은 새로운 개념을 활용하여 더 효율적인 3차원 복원 시스템을 구현하고자 함이다. 그러므로 3차원 복원의 절대적인 정확도를 타 연구결과와 비교하는 것보다는 계산량의 효율성을 비교하는 것이 더 의미가 있다고 할 수 있다. 식 (1)-(6), 식 (10)-(11)을 이용하여 계산량은 빛 패턴의 개수에 의존한다. 또한 빛 패턴의 개수에 따라 선형적으로 증가하므로 계산 복잡도를 빅오 (Big O) 함수로 나타내면 $O(n)$ 이다. 기존의 능동 방식용 활용한 3차원 복원 알고리즘들은 본 연구에서 활용한 패턴과 다른 형태의 것을 활용하므로 패턴의 개수 이외에도 패턴의 모양, 패턴의 색상, 패턴의 반사율 등 고려할 요소들이 더 많으며 3차원 정보 복원을 위해 필요한 파라미터의 개수가 증가한다 ($O(n^2)$ 이상의 계산 복잡도). 그러므로 계산의 복잡도는 더 높다고 할 수 있다. 3차원 복원 시스템의 응용분야는 다양하며, 매우 높은 정확도의 3차원 복원 결과를 항상 요구하는 것은 아니다. 또한 높은 정확도의 복원에 필요한 계산량과 고비용의 하드웨어는 시스템의 효율성을 저하시킨다. 그러므로 본 연구에서 수행된 실험처럼, 간단하며 수학적 모델이 쉬운 패턴을 활용할 경우 효율성과 정확도를 동시에 달성할 수 있으며, 응용분야에 따라 패턴의 개수를 조절함으로써 정확도와 효율성 사이의 트레이드 오프(trade-off)를 적절히 조절할 수 있다. 3차원 복원의 결과 정확도를 패턴의 개수의 비율 (sampling density) ($0 \leq r \leq 100$)에 따른 상관계수 (correlation coefficient) ($0 \leq c \leq 1$) 로 나타내면 Fig. 11와 같다. Fig. 11에서 활용한 3차원 물체의 복원 실험은 패턴 개수의 최대값은 110개이며, 70%에 해당하는 77개 이상의 패턴을 활용할 경우 상관계수는 1에 근접하며 65%에 해당하는 71개 이하의 패턴을 사용할 때 부터 상관계수의 감소폭이 커짐을 알 수 있다.

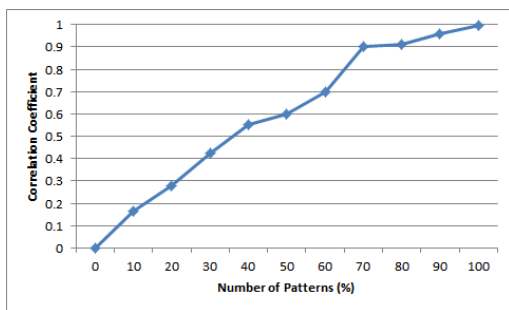


Fig. 11. Quantifying reconstruction result with the number of circular light patterns

5. 결론

본 논문에서는 효율적인 3차원 복원 시스템을 구현하기 위해 시스템 함수와 번복조 개념을 적용한 알고리즘을 제시하였다. 두 가지 개념 모두 입력과 출력신호를 선택하여 두 개의 관계를 정립한 후 3차원 복원 알고리즘을 구현하였다. 시스템 함수 기반 3차원 복원은 입력과 출력간의 관계를 수학적 모델화 하였고, 번복조 개념 기반 3차원 복원에서는 입출력 신호와 반송파 신호를 수학적 모델화 하였으며 두 방법 모두 원형 빛 패턴의 정보를 적절히 활용하였다. 투영되기 전의 패턴과 투영된 후의 패턴 간의 모양을 수학적 모델화 한 후 3차원 정보를 나타내는 깊이 값을 계산하였으며, 한 개의 카메라와 프로젝터 또는 두 개의 카메라와 프로젝터를 활용한 실험결과를 제시하였다. 본 논문에서는 통신시스템에서 주로 활용하는 개념을 컴퓨터 비전의 핵심 영역인 3차원 복원에 활용하였으며, 향후에는 좀더 현실적인 실험환경과 구체적인 실험 파라미터들을 고려하여 연구를 진행할 계획이다. 구체적으로 고려되어야 할 요소들은 카메라 캘리브레이션, 실험환경에서의 빛의 조건, 물체의 형태 및 크기 등 컴퓨터 비전 및 영상처리의 연구 및 상용화에 매우 중요한 것들이다.

References

- [1] D. Scharstein, R. Szeliski, "High-accuracy stereo depth maps using structured light", *Proceedings of IEEE Computer Society on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Madison, WI, USA, June 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2003.1211354>
- [2] J. Salvi, J. Pagès, J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems", *Pattern Recognition*, Vol. 37, No. 4, pp.827-849, April 2004. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.patcog.2003.10.002>
- [3] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial", *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 3, No. 2, pp.128-160, March 2011. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.1364/AOP.3.000128>
- [4] D. Lee, H. Krim, "A Sampling Theorem for a 2D Surface", *Proceedings of International Conference on Scale Space and Variational Methods in Computer Vision*, pp.556-567, Springer, Berlin, Heidelberg, Ein-Gedi, Israel, May, 2011. DOI: https://doi.org/doi.org/10.1007/978-3-642-24785-9_47
- [5] A. Papoulis, *Signal Analysis*, 1st Ed., McGraw-Hill College, 1977. ISBN : 978-0070484603
- [6] D.L. Donoho, "Compressed Sensing", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 52, No. 4, pp.1289-1306, April 2006.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>

- [7] A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, S. Hamid, Signals and Systems, 2nd Ed., Pearson, 1996.
- [8] S. Haykin, M. Moher, Communication Systems, 5th Ed., Wiley, 2009.
- [9] D. Lee, H. Krim, "3D Surface Reconstruction Using Structured Circular Light Patterns", *Proceedings of International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, pp. 279-289, Springer, Berlin, Heidelberg, Sydney, Australia, December 2010. DOI: https://doi.org/doi.org/10.1007/978-3-642-17688-3_27
- [10] A. Dipanda, S. Woo, "Towards a real-time 3D shape reconstruction using a structured light system", *Pattern Recognition*, Vol. 38, No. 10, pp.1632-1650, October 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.01.006>
- [11] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, Y. Yagi, "Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern", *Proceedings of IEEE Computer Society on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Anchorage, AK, USA, pp. 1-8, June. 2008. DOI : 10.1109/CVPR.2008.4587702
- [12] J. Pages, J. Salvi, R. Garcia, C. Matabosch, "Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Taipei, Taiwan, pp. 133-138, September 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241585>
- [13] J. Salvi, J. Battle, E. Mouaddib, "A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 19, No. 11, pp.1055-1065, September 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(98\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(98)00085-3)
- [14] O. Faugeras and Q. T. Luong, The Geometry of Multiple Images, The MIT Press 2001. ISBN : 0262062208
- [15] T.L.N. Nguyen, H. Jung, Y. Shin, "A Signal Detection and Estimation Method Based on Compressive Sensing", *The Journal of Korean Institute of Communication and Information Science*, Vol. 40, No. 6, pp.1024-1031, June 2015. DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2015.40.6.1024>
- [16] S. Jeong, D. Lim, "A Study on the Reconstruction of a Frame Based Speech Signal through Dictionary Learning and Adaptive Compressed Sensing", *The Journal of Korean Institute of Communication and Information Science*, Vol. 37, No. 12, pp.1122-1132, December 2012. DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2012.37A.12.1122>
- [17] D. Kang, H. Kim, K. Park, W. Oh, "Parameter Derivation for Reducing ISI in 2-Dimensional Faster-than-Nyquist Transmission", *The Journal of Korean Institute of Communication and Information Science*, Vol. 41, No. 10, pp.1147-1154, October 2016. DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2016.41.10.1147>
- [18] B. Sklar, Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2nd Ed. Prentice Hall 2001.

이 덕 우(Deokwoo Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 경북대학교 전자전 기컴퓨터학부 (공학사)
- 2008년 12월 : North Carolina State University (공학석사)
- 2012년 12월 : North Carolina State University (공학박사)

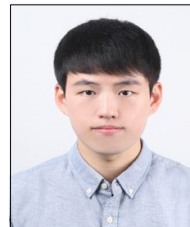
- 2013년 1월 ~ 2013년 4월 : Washington University in St. Louis, 박사후 연구원
- 2013년 9월 ~ 2016년 8월 : 삼성전자 무선사업부 책임 연구원
- 2016년 9월 ~ 2018년 2월 : 영산대학교 가상현실콘텐츠 학과 조교수
- 2018년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 컴퓨터공학전공 조교수

<관심분야>

컴퓨터비전, 영상신호처리

김 지 수(Jisu Kim)

[준회원]



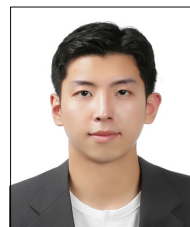
- 2019년 2월 : 계명대학교 컴퓨터 공학과 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 컴퓨터공학과 석사과정

<관심분야>

컴퓨터비전, 영상처리, 머신러닝

박 철 형(Cheolhyeong Park)

[준회원]



- 2014년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 컴퓨터공학과 학/석사 연계과정

<관심분야>

컴퓨터비전, 영상처리, 머신러닝