



[UCI]I804:24011-200000267283



2019년 2월

박사학위 논문

증강현실 환경에서 적외선 센서를 이용한 하이브리드 추적 방안

조선대학교 대학원

산업공학과

정 호 균



증강현실 환경에서 적외선 센서를 이용한 하이브리드 추적 방안

Hybrid Tracking Using Infrared Markers in Augmented Reality Environments

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

산업공학과

정 호 균





증강현실 환경에서 적외선 센서를 이용한 하이브리드 추적 방안

지도교수 박 형 준

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

산업공학과

정 호 균





정호균의 박사학위논문을 인준함

위 원 조선대학교 교 수 박 형 준	트 (인)
위 원 조선대학교 교 수 백 정 유	<u>역</u> (인)
위 원 조선대학교 교 수 김 성 준	트 (인)
위 원 전남대학교 교 수 이 재 열	! (인)

2018년 12월

조선대학교 대학원





모	τL
	~

목차i
그림 목차 iv
표 목차 vi
ABSTRACT vii
제 1 장 서론 1
1.1 연구 배경 1
1.2 연구 범위 및 목적 3
제 2 장 기존연구 고찰 5
2.1 증강현실 5
2.2 객체 추적 기술 9
2.2.1 마커 추적 기술9
2.2.2 마커리스 추적 기술 11
2.2.3 센서 기반 추적 기술 14
2.3 적외선을 이용한 객체 추적 기술 16
2.3.1 직접 적외선 추적 16
2.3.2 간접 적외선 추적 17
제 3 장 적외선 센서를 이용한 하이브리드 추적 방안 19
3.1 IR-RGB 스테레오 카메라 설치 및 영상 획득 21
3.2 영상 특징점 검출 22

3.3 영상 특징점 식별 및 마커 인식
3.4 IR 마커-RGB 카메라 간의 변환관계 25
제 4 장 다층 이진화를 이용한 영상 특징점 검출 28
4.1 다층 이진화 방법 28
4.2 영상 특징점 검출을 위한 주요 절차
4.2.1 다층 이진화를 위한 전처리 및 경계선 지도 생성 33
4.2.2 단순 영역 검출을 통한 영상 특징점 검출35
4.3 병렬화 기법을 활용한 연산 최적화
4.3.1 병렬화 기법 38
4.3.2 다층 이진화 방법의 연산 최적화
제 5 장 아핀 불변 특징을 활용한 IR 마커 추적 44
5.1 IR 마커의 적외선 영상에 대한 특징 서술자 44
5.2 평면 다각형을 활용한 IR 마커 추적
5.2.1 평면 다각형 생성 45
5.2.2 IR 마커 추적 방안 47
5.3 LLAH 서술자를 이용한 IR 마커 추적 53
5.3.1 LLAH 서술자 53
5.3.2 기존 LLAH 서술자의 단점 57
5.3.3 LLAH 서술자 개선 방법 59
제 6 장 구현, 실험, 그리고 적용65
6.1 시스템 구현 65

6.2 성능 실험 및 평가 67
6.2.1 추적의 강건성 비교 실험67
6.2.2 추적의 정확성 비교 실험
6.2.3 마커 가림에 대한 처리 능력 비교
6.2.4 제안된 IR 마커 추적 방안들에 대한 고찰81
6.3 사용성 평가 및 적용 83
6.3.1 사용성 평가83
6.3.2 적용 사례 87
제 7 장 결론 및 토의 91
참고문헌





[그림	1]MILGRAM이 제안한 혼합 현실 스펙트럼 [2]	…6
[그림	2] 증강현실의 영상 정합 및 합성 기술들 [20,21]	8
[그림	3] 인공지능 기술을 접목한 증강현실 구현 사례 [22,23]	8
[그림	4] 대표적인 마커들과 마커 추적 기술의 영상 정합 원리	9
[그림	5] 마커리스 기반의 추적 기술의 분류 [11]	11
[그림	6] 대표적인 직접 적외선 추적 방법 사례들	17
[그림	7] 대표적인 간접 적외선 추적 방법 사례들	18
[그림	8] 제안된 하이브리드 추적 방안에 대한 개념도	19
[그림	9] 제안된 하이브리드 추적 방안의 주요 절차	20
[그림	10] 평형식 카메라 구조 및 스테레오 영상 결과	21
[그림	11] 다층 이진화를 통해 분할된 경계영역 예시	23
[그림	12] 스테레오 카메라와 마커 좌표계 간의 변환 관계	26
[그림	13] 일반적인 이진화 기법을 활용한 영상 분할 결과	29
[그림	14] 다층 이진화 과정 및 다층 경계선 지도	30
[그림	15]IR LEDS에 대한 적외선 영상의 특징점 검출의 주요 절차	32
[그림	16] 적외선 영상의 히스토그램 및 다층 이진화 파라미터 설정	34
[그림	17] 다층 이진화의 각 단계별 영상처리 과정 및 다층 경계선 지도	35
[그림	18] 경계 영역에 대한 타원 근사 및 중심점 계산	36
[그림	19] 적외선 영상의 IR LEDS 광원의 중심점 검출 결과	37
[그림	20] 다층 경계선 지도 생성을 위한 순차 및 병렬 구조	40
[그림	21] 병렬화 방안의 수행시간 평가를 위한 적외선 이미지 예시	41
[그림	22] 스레드 사용량에 따른 제안된 병렬 모형의 초당 프레임 비교	43
[그림	23] 평면 다각형의 형태 및 외곽 직선 정의 예시	47
[그림	24] 기준점과 외곽 직선 상의 특징점들 간의 거리에 따른 대응점 지정	49
[그림	25] 평면 다각형 형상 정의 및 IR 마커 제작	49
[그림	26] 평면 다각형 IR 마커의 특징점 후보군 선정 과정	51



조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

[그림	27] 특징점 후보군 선정 결과	· 51
[그림	28] 아핀 불변 성질을 활용한 삼각형 면적비 예시	· 52
[그림	29]LLAH 서술자를 이용한 마커리스 기반 추적 기술 사례 [40,41]	· 53
[그림	30]LLAH의 서술자 생성 및 등록 알고리즘 [41]	· 56
[그림	31] 특징점 P에 대한 인접 특징점들의 조합 예시 (N=6, M=5)	· 56
[그림	32]LLAH의 서술자 검색 알고리즘 [41]	· 57
[그림	33]LLAH의 특징점 인식 실패 사례	· 58
[그림	34]LLAH 개선을 위한 기본적인 아이디어	· 60
[그림	35] 연산 효율 및 추적의 정확성 측정을 위해 활용된 특징 정보	· 62
[그림	36] 영상 특징점의 인접한 특징 수 K의 변화에 따른 마커 인식률 그래프	· 63
[그림	37] 스테레오 카메라 및 시스템 구현 환경	· 66
[그림	38] 제안된 IR 마커 추적 방안들에 대한 IR 마커 제작	· 66
[그림	39]PHONG의 정반사 모델	· 68
[그림	40] 추적 강건성 비교 실험을 위한 실험 환경 및 실험 방법	· 69
[그림	41] 어두운 주변 환경에서 ARTOOLKIT 및 IR 마커 추적 결과	·70
[그림	42] 정적인 환경에서 추적의 정확성 평가를 위해 선정된 마커 자세	·71
[그림	43] 추적 정확성 평가를 위해 지정된 참조점의 위치	· 72
[그림	44] 모션 블러 현상에 대한 제안된 추적 방안의 추적 결과	· 78
[그림	45] 마커 가림 현상에 대한 추적 결과	· 80
[그림	46] 사용성 평가를 위한 실험 환경 및 포인터용 마커들	· 84
[그림	47] 사용성 평가에 대한 설문 분석 그래프	· 85
[그림	48]PMP 모델에 대한 품평 시스템 구현 환경	· 88
[그림	49]ARTOOLKIT을 활용한 제품 품평 결과 [54]	· 89
[그림	50] 제안된 하이브리드 추적 방안을 활용한 제품 품평 결과	· 90



표 목차

표 1. 수행된 연구 내용	3
표 2.98'~17' 증강현실 관련 게재된 논문의 연구 분야 및 인용 빈도수 [3,4]	··7
표 3. 다층 경계선 지도의 경계 영역 분류	30
표 4. 다층 이진화 변수 지정에 따른 이진화 반복횟수	42
표 5. 스레드 사용량에 따른 제안된 병렬 모형의 초당 프레임(FPS) 측정 결과	42
표 6. 특징 잡음으로 인해 잘못 생성된 특징점 P 의 서술자 정보	59
표 7. 서술자 생성 방법에 따른 연산량 비교 (M=5)	61
표 8. 서술자 생성 방법에 따른 연산량 비교 (M=6)~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	61
표 9. 서술자 생성 파라미터 설정에 따른 마커 인식률 (%)	63
표 10. 다양한 조명 위치에서 물체 추적의 강건성 실험 결과	70
표 11. 마커 추적 방법들에 대한 정확도 평가 결과	73
표 12. ARTOOLKIT과 POLYGON_IRMK의 투영 정확도에 대한 T-검정 결과	74
표 13.SURF과 LLAH_IRMK의 투영 정확도에 대한 T-검정 결과	74
표 14. 마커 추적 방법들에 대한 떨림 정도 평가 결과	75
표 15. ARTOOLKIT과 POLYGON_IRMK의 떨림 정도에 대한 T-검정 결과	75
표 16.SURF과 LLAH_IRMK의 떨림 정도에 대한 T-검정 결과	76
표 17. 동적인 추적 환경에서 ARTOOLKIT과 POLYGON_IRMK에 대한 추적 결과·	77
표 18. 동적인 추적 환경에서 SURF과 LLAH_IRMK에 대한 추적 결과	77
표 19. 제안된 IR 마커 추적 방법과 기존 마커 추적 기술에 대한 비교·분석 결과표	
{	81
표 20. 각 추적 방법에 대한 작업 수행 시간 측정 및 분산분석 결과	84
표 21. 설문지 질문 항목	85



조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY



ABSTRACT

Hybrid Tracking Using Infrared Markers in Augmented Reality Environments

Ho-Kyun Jung Advisor: Prof. Hyungjun Park, Ph.D. Department of Industrial Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, computer vision-based augmented reality (AR) has been widely used in various academic and industrial fields such as advertisement, education, medical treatment, and product development. Object tracking, which has been studied since more than the last two decades, is a core technology of AR because it significantly affects the interaction performance and immersion level of most AR applications. In general object tracking, the method of tracking markers or image feature points in RGB images is mainly used. However, it cannot provide robust and accurate tracking performance since RGB image-based tracking reacts sensitively to image noise and lighting conditions. In order to solve this problem, many studies have been conducted on hybrid tracking using various sensors. In particular, infrared (IR) images obtained from IR sensors are widely used for hybrid tracking since they have fewer noises and are less sensitive to lighting changes than RGB images.

In this paper, we propose a novel approach to object tracking that is robust and accurate for ambient lighting changes and marker occlusion by using invisible markers utilizing IR sensor technology in AR environments. The proposed approach uses IR markers composed of IR LEDs and a stereo camera consisting of an RGB camera and an IR camera. It makes good use of two essential methods for feature point detection and for IR marker recognition from an IR image.



Collection @ chosun

We propose a method of feature point detection based on multi-layer thresholding, which finds the center points of the IR LEDs by using the image contours obtained at multiple thresholds in an IR image. This method converts an IR image into a contoured image, classifies each contour region into simple region, expanded region and complex region, finds the center points of simple regions, and uses these as the candidate feature points of the IR LEDs.

We also propose two methods of recognizing IR markers by utilizing the geometric property that feature points are invariant on projection and affine transformation. First, we propose an IR marker tracking method using the geometric property of a planar shape composed of two simple planar polygons. The IR marker consists of IR LED dots corresponding to the vertices of the planar shape. This method finds the correspondence between the candidate feature points and the vertices of the planar shape and determines the feature points corresponding to the IR marker by using the geometric property that the area ratio of two triangles is invariant on affine transformation. Second, we propose an IR marker tracking method using an enhanced locally likely arrangement hashing (LLAH) descriptor. The IR marker consists of IR LED dots corresponding to the points that are randomly placed on a plane. In case of using the original LLAH descriptor, many (more than 40) feature points are required because erroneous recognition frequently occurs due to feature noise. In this study, we investigate how to improve recognition performance by making good use of the LLAH descriptor with fewer feature points even when feature noise occurs.

We implemented the proposed approach and confirmed its usefulness by conducting a comparative performance evaluation between the proposed approach and the conventional image-based tracking approach. We highly expect that the proposed approach for hybrid tracking can be usefully utilized for various fields in which the image-based tracking approach does not work well due to image noise and lighting conditions.



제 1 장 서론

1.1 연구 배경

가상현실(Virtual Reality)은 사용자가 물리적, 시간적, 공간적인 한계로 경험할 수 없는 가상세계를 제공하는 기술이다[1-7]. 오늘날 컴퓨터의 발전으로 가상현실은 사실인 묘사를 통해 보다 나은 현실감과 몰입감(immersion)을 제공하며, 일상생활의 다양한 분야(교육, 비즈니스, 게임, 의료, 시뮬레이션, 방송 등)에 활용되고 있다. 최근 정보통신기술(ICT)의 급속한 발전과 더불어 카메라, 디스플레이(display) 장치, 측정 센서(GPS, 자이로 센서, 가속 센서 등)를 탑재한 고성능 스마트폰이 상용화되면서 가상현실 분야의 증강현실(augmented reality, AR) 기술이 각광 받고 있다[3,4,6-8]. 가트너사에서 발간한 2018년 전략 기술 동향 보고서에 따르면 대화형 플랫폼(conversational platforms)과의 결합으로 증강현실 기술의 활용성을 극대화할 수 있으며, 이러한 증강현실 기술시장을 선도하기 위해 2017년에 애플과 구글은 자사의 모바일 컴퓨팅 장치를 위한 몰입형 기술 플랫폼(immersive technology platform)인 ARkit과 ARCore를 도입하였다[14-16].

증강현실은 가상세계와 현실세계를 적절히 혼합한 혼합현실(mixed reality, MR)의 한 범주로서 물리적 공간에서 제공할 수 없는 형태(이미지, 텍스트, 음성 등)의 가상정보를 실세계 배경 영상 위에 중첩하고, 실시간으로 가상 객체들과 상호작용하여 다양한 사용자 경험(user experience)을 제공하는 기술이다[1,2]. 효과적인 사용자 경험을 제공하기 위해서는 사실적인 시각화와 사용자-컴퓨터 상호작용이 요구되며, 이를 위해 물리적 객체의 위치/자세를 추적하는 추적(tracking) 기술이 중요하다.

추적 기술은 가상공간에 존재하는 가상 객체를 현실공간의 물리적 객체(이하 객체)에 오버레이(overlay)하기 위해 카메라-객체 간의 변환관계를 추정하는 기술로

- 1 -



추적하는 방법에 따라 영상 기반 추적(vision based tracking)과 센서 기반 추적(sensor based tracking)으로 분류된다.

영상 기반 추적은 촬영된 영상에서 객체의 위치/자세를 대표하는 마커(marker)를 영상처리 기법을 활용하여 식별(recognize)하고, 투영된 마커 이미지를 이용하여 카메라-객체 간의 변환관계를 추정하는 기술이다[6,7,25,27]. 이 기술은 추가적인 하드웨어 없이 쉽고 간편하게 구현되며, 정확한 추적이 가능한 장점이 있다. 초기에는 카메라로 획득된 영상에서 사각 마커를 검출 및 추적하는 연구가 주로 개발되었지만, 인위적인 마커로 인한 사용자의 몰입감 저하와 수행과정에서 작업자가 마커를 가려 추적이 실패하는 현상이 빈번히 발생하는 문제점들을 갖고 있으며, 이를 해결하기 위해 인위적인 마커 대신에 객체의 점, 선, 텍스처(texture) 등과 같은 특징들을 마커로 활용하는 마커리스(markerless) 추적에 대한 연구가 이루어지고 있다[6-8,11]. 마커리스 기술은 객체가 가지고 있는 특징들을 활용하여 인위적인 마커 및 일부 마커 영역 가림 현상의 문제점을 해결하였지만, 객체의 고유 특징을 추출하는 과정에서 상당한 계산이 요구됨에 따라 이를 해결하는 방법에 대한 연구가 요구된다.

또한, 영상 기반 추적 방법은 증강현실 구현 환경이 매우 제한적이다. 이는 영상 정보에 많이 의존하기 때문에 구현 환경의 조도(illuminance)가 높거나 낮은 경우, 영상 내에 마커가 소실되어 추적이 불가능하기 때문이다. 따라서 주변 조명과 상관없이 안정된 추적 결과를 제공하는 추적 방법에 대한 연구가 요구된다.

센서 기반 추적에는 GPS, 관성 센서, 초음파센서(ultrasonic sensor), 적외선 센서 등이 이용된다[7-9,17-19]. 이 센서 들은 측정 방법 및 특성에 따라 객체의 움직임 추적, 객체와의 거리 측정, 객체의 자세 등의 일부 정보들을 측정할 수 있으며, 이러한 센서들을 조합하여 객체의 위치와 자세를 추정하는 것이 일반적이다. 이 기술에 사용되는 센서들은 객체의 상태 정보를 실시간으로 측정 가능하며, 단순한 연산으로 카메라-객체 간의 변환관계를 추정할 수 있다. 하지만 각 센서에 내재되어 있는 고유한 측정 오차(error)로 인해 추적이 진행되는 과정에서 오차가 누적되는

- 2 -





Collection @ chosun

드리프트(drift) 현상으로 정확한 추적이 어렵기 때문에 주기적으로 객체의 자세를 초기화해야 하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 안정적인 추적이 가능한 영상 기반 추적 기술과 센서 기반 추적 기술을 병행하는 하이브리드 추적(hybrid tracking) 방안에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[3,4,7-9].

1.2 연구 범위 및 목적

본 연구의 목적은 증강현실 환경에서 적외선 센서 기술을 활용한 비시각(invisible) 마커를 사용하여 주변 조명 변화 및 마커 가림 현상에 대해 강건하고, 정확한 객체 추적 방안을 연구·개발하는 것이다.

연구목적 달성을 위해 증강현실 환경에서 적외선 센서를 이용한 하이브리드 추적 방안을 제안한다. 적외선 센서로부터 획득되는 적외선 영상은 RGB 영상보다 잡음이 적고, 조명 변화에 둔감함에 따라 안정된 영상정보로 널리 활용되고 있다. 본 논문에서는 증강현실 환경에서 적외선 센서 기술을 활용하여 주변 조명 변화 및 마커 가림 현상에 대해 강건하고, 정확한 객체 추적 방법을 제안한다. 제안된 방안은 IR LEDs로 구성된 IR 마커와 적외선 카메라가 포함된 스테레오 카메라를 활용하며, 기술 개발에 필요한 두 가지 요소기술로 적외선 영상의 특징점 검출과 IR 마커 인식 방법을 제안한다. 표 1은 본 연구에서 수행한 연구내용을 요약한 것이다.

표 1. 수행된 연구 내용

1	적외선 영상에 대한 영상 특징점 검출 방안
2	특징점 간의 기하적 관계를 이용한 IR 마커 추적 방안 - 평면 다각형을 활용한 IR 마커 추적 방안 - LLAH 서술자를 이용한 IR 마커 추적 방안



본 연구에 의해 개발된 하이브리드 추적 방안은 주변 조명 변화에 둔감한 적외선 영상을 활용하여 정확하고, 안정된 추적 성능을 제공하며, 부수적으로 비시각 마커를 활용함에 따라 사용자의 몰임감을 향상시켰다. 또한, 마커리스 추적기술을 접목하여 마커 가림 현상을 해결하였다. 이러한 하이브리드 추적 방안은 기존 영상 기반 추적 방안의 단점을 보완함에 따라 주변 조명 환경 제약으로 인해 적용하기 힘든 다양한 분야에 유용하게 활용될 수 있으리라 사료된다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 증강현실의 개념 및 연구 동향, 객체 추적을 위한 추적 기술들에 대해 살펴보고, 적외선 센서를 활용한 기존의 추적 연구들을 고찰한다. 3장에서는 제안된 하이브리드 추적 방안의 주요 절차에 대해 설명한다. 4장에서는 적외선 센서로부터 획득되는 적외선 영상에서 IR LEDs 광원으로 구성된 영상 특징점 검출 방안을 설명하며, 5장에서는 검출된 영상 특징점들을 이용하여 IR 마커를 인식하는 방안 두 가지를 설명한다. 6장에서는 제안된 IR 마커 인식 방안들을 구현하고, 기존 마커 추적 방안과의 성능 평가를 수행하여 제안된 방안들에 대한 유용성을 평가한다. 마지막으로 7장에서는 결론 및 추후 연구 방안에 대해 언급한다.



- 4 -



제 2 장 기존연구 고찰

본 장에서는 증강현실의 기본 개념 및 주요 연구 분야를 개괄적으로 설명하고, 증강 현실 분야에서 주로 활용되는 객체 추적 기술을 설명한다. 또한, 본 연구에서 활용되 는 적외선 센서를 이용한 객체 추적 방법과 기존 연구에 대해 설명하고, 각 연구들에 대한 특성과 한계점을 고찰한다.

2.1 증강현실

가상현실은 사용자가 물리적, 시간적, 공간적인 한계로 경험할 수 없는 가상세계를 제공하는 기술로 사용자가 컴퓨터로 구현된 가상공간에서 자유롭게 가상의 객체와 상호작용(interaction)함으로서 마치 가상공간이 실존하는 것과 같은 몰입감을 제공하는 것을 목표로 수많은 연구가 이루어지고 있다. 몰입감이란 가상공간을 사실적으로 묘사하여 사용자로 하여금 가상세계와 현실세계의 경계를 모호하게 만들고, 가상의 현실에 몰입하는 것을 의미한다. 즉 사용자의 감각기관과 적절히 상호작용 함으로서 실존하지 않는 가상환경이 실존하는 것과 같은 느낌을 사용자에게 제공하는 것을 의미한다.

가상현실은 3D 그래픽스, 시뮬레이션, 인터페이스 등의 기술이 복합적으로 결합한 기술로 제한적인 시스템 구현 환경, 제한적인 시나리오, 사실적인 묘사를 위해 요구되는 많은 시간과 노력 등의 문제로 인해 높은 수준의 몰입감을 제공하기 어렵다. 이러한 기술적 한계를 해결하기 위해 가상환경과 실제환경을 적절히 혼합한 현실에 대한 연구가 이뤄졌으며, 1994년 토론토 대학의 폴 밀그램(Paul Milgram) [2]은 두 환경의 연속성(reality-virtuality continuum)에 대하여 그림 1과 같이 스펙트럼에 적용하여 혼합현실을 설명하였다.





Collection @ chosun



증강현실은 1960년대 말 하버드 대학의 이반 서덜랜드(Ivan Edward Sutherland) [12]가 가상현실과 see-through 형식의 HMD를 고안한 것을 시초로 1990년 보잉사의 톰 코델(Tom Caudell) [13]이 항공기 전선 조립과정 교육을 위해 실제 영상에 가상의 이미지를 중첩하는 증강현실 기술을 제안하면서 본격적으로 연구되어 왔다. 이 기술은 실세계를 배경으로 가상의 정보를 중첩하고, 실시간으로 상호작용하여 다양한 사용자 경험을 제공하는 기술로 다음의 세 가지 특징을 갖는 시스템으로 정의된다[1].

- ① 실세계 환경에서 현실과 가상 객체의 결합(combination)
- ② 실시간 3차원 공간에서 현실과 가상 객체 간의 상호작용
- ③ 현실과 가상 객체의 정합(registration)

증강현실 시스템을 구현하기 위해서는 객체 추적, 상호작용, 영상 정합 및 합성, 디스플레이 기술 등 다양한 요소 기술들이 요구되며, 개발 상황에 맞는 적절한 방법을 선택함으로써 사용자에게 향상된 몰입감과 현실감을 제공할 수 있다. 증강현실 기술 관련 주요 연구 분야는 표 2와 같이 1998 ~ 2017년 기간 동안에 혼합·증강현실 관련 국제 심포지엄 등에서 게재된 연구 논문에 대한 연구 분야 및 인용 빈도수 조사 결과로 확인할 수 있다. 이 표는 Zhou 등 [3]이 1998 ~ 2007년 기간 동안에 총 276편의 혼합·증강현실 관련 게재 논문을 조사한 결과를 바탕으로 Kim 등[4]이 2008 ~ 2017년 기간 동안에 총 264편의 혼합·증강현실 관련 게재 논문을 조사한 결과를 나타낸다.



	98' ~ 07' (Zhou [3])		08' ~ 17'	(Kim [4])
Topics	% Papers	% Citations	% Papers	% Citations
Tracking	20.1	32.1	19.4(16.2)	25.2(20.9)
Interaction	14.7	12.5	11.4(9.5)	10.6(8.8)
Calibration	14.1	12.5	6.4(5.3)	0.8(0.7)
AR Application	14.4	12.5	12.5(10.5)	10.6(8.8)
Display	11.8	5.4	3.2(2.7)	3.3(2.7)
Evaluations	5.8	1.8	16.4(13.7)	15.4(12.8)
Mobile AR	6.1	7.1	9.1(7.6)	14.6(12.2)
Authoring	3.8	8.9	2.3(1.9)	2.4(2.0)
Visualization	4.8	5.4	4.8(4.0)	5.7(4.7)
Multimodal	2.6	0.0	2.1(1.7)	0.8(0.7)
Rendering	1.9	1.8	12.5(10.5)	10.6(8.8)
Total	100.0	100.0	100.0	100.0
New Category		•		
Perception			(7.2)	(3.4)
Collaboration			(1.7)	(1.4)
Reconstruction			(5.5)	(9.5)
Modeling			(2.1)	(2.7)
Total			(100.0)	(100.0)

표 2.98'~17' 증강현실 관련 게재된 논문의 연구 분야 및 인용 빈도수 [3,4]

2008년에 혼합·증강현실 분야의 주요 연구 분야는 추적 (20.1%), 상호 작용 (14.7%), AR 응용 (14.4%), 보정 (14.1%), 디스플레이 (11.8%) 였으나, 최근 10년 사이에 추적 (19.4%), 평가 (16.4%), AR 응용(12.5%), 렌더링 (12.5%), 상호작용 (11.4%)으로 주요 연구 분야가 변화한 것을 확인 할 수 있다. 추적, 상호작용 및 AR 응용 분야의 경우 여전히 활발히 연구되는 분야인 반면에, 보정 및 디스플레이 분야의 경우 과거 연구들로 인해 많은 문제가 해결됨에 따라 연구 빈도가 낮아진 것으로 사료된다. 또한, 렌더링 기술은 관련 장치의 발전으로 최근 10년 동안에 연구 빈도가 높아진 연구



분야이다. 이 기술은 추적으로 얻어진 객체의 위치/자세를 토대로 영상에서 가상 객체를 표현하며, 주변 환경(장애물, 조명 등)을 고려하여 가상의 객체를 사실적으로 묘사하기 위해 연구되고 있다.





[그림 2] 증강현실의 영상 정합 및 합성 기술들 [20,21]

최근 증강현실 기술에 대한 사회적 관심과 더불어 하드웨어 장치들의 성능 향상으로 인해 추적, 상호작용, AR 응용, 모바일 증강현실에 대한 연구 비중이 증가할 것으로 예상된다. 특히, 모바일 증강현실(mobile AR) 분야의 경우 고성능의 스마트폰의 대중화, 가정용 HMD 및 다양한 상호작용 도구의 보급, 사물인터넷(internet of things, IoT) 기술의 발전 등의 요인으로 증강현실 관련 응용 연구가 활발히 진행될 것으로 예상된다[7,14,15]. 또한, 최근 인공지능(artificial intelligence, AI) 기술이 급격히 발전함에 따라 인공지능 기술을 접목한 증강현실 기술에 대한 연구가 진행 중이다[22,23].







2.2 객체 추적 기술

객체 추적 기술은 가상 객체를 현실공간의 객체에 오버레이하기 위해 카메라-객체 간의 변환관계를 추정하는 기술로 추적하는 방법에 따라 영상 기반 추적과 센서 기반 추적으로 분류되며, 영상 기반 추적 기술은 마커 사용 여부에 따라 마커 기반 추적, 마커리스 기반 추적으로 분류된다. 본 절에서는 마커 기반 추적, 마커리스 기반 추적, 센서 기반 추적 기술들의 특성과 한계점에 대해 조사·분석한다.

2.2.1 마커 추적 기술

마커 기반 추적 기술은 가상 객체의 위치/자세를 추정하기 위해 영상에서 검출이 쉽고, 상대적 좌표 추출이 가능한 마커를 사용한다. 마커는 1996년 Rekimoto[24]가 제안한 이후로 객체의 위치/자세를 추정하기 위해 현재까지 널리 활용되고 있는 방법으로 그림 4(a)와 같이 영상에서 검출하기 쉬운 단순한 평면 도형(원형, 사각형 등)의 형태를 가지며, 마커 식별(recognition)을 위해 내부에 이미지 또는 격자 정보를 포함한다. 영상에서 마커를 추적하기 위해서는 그림 4(b)와 같이 영상 이진화 (thresholding), 마커 검출 및 식별(detection), 자세 추정 과정을 순차적으로 수행한다.





마커 추적 기술은 추적이 쉽고, 빠르며, 안정성이 높은 장점이 있지만, 시각적으로 주변환경과 확연히 구별되는 인위적인 형태의 마커를 사용하기 때문에 사용자의 몰입감이 저하되는 단점과 함께 다음과 같이 주변 조명 변화에 마커 영상이 소실되어 마커를 추적할 수 없는 경우가 빈번히 발생하는 문제점이 있다.

- 실외 또는 실내의 강한 조명 환경 및 어두운 조명 환경으로 영상이 소실되는 현상
- ② 카메라-마커-조명의 반사각으로 인해 마커의 영역이 빛에 강조 (highlight) 되어 소실되는 현상

대표적인 마커 기반 추적 기술로 ARToolKit, ARTag, ARToolKitPlus 등이 있으며, 현재까지도 이를 활용한 다양한 연구들이 이루어지고 있다.

ARToolKit[25-27]은 추적을 위해 정사각형 마커를 사용하며, 내부 패턴 영역의 이미지를 16×16 이미지 정보로 코드화하여 마커 인식에 사용한다. 이 추적 기술은 실시간 마커 인식 및 자세 추정이 가능하며, 실시간 가상 객체와의 상호작용을 지원한다. 또한, 사용자가 설계한 내부 패턴 이미지를 마커로 등록할 수 있으며, 사용되는 카메라에 대한 카메라 보정 기능을 제공하여 안정적인 증강현실 시스템 구축을 지원한다.

ARTag[28]는 추적을 위해 정사각형 마커를 사용하며, 내부 패턴 영역을 검은색 또는 흰색으로 구성된 6×6 격자(grid)로 코드화하여 마커 인식에 사용한다. 내부 패턴은 방향성이 있는 패턴 구조로 1,001개의 조합이 가능하며, 마커 경계 색상을 검은색 또는 흰색으로 표현하여 총 2,002개의 마커를 생성할 수 있다. 또한, ARTag는 마커 경계를 연결된 선분의 쿼드(quads)로 그룹화하여 마커를 추적하기 때문에 마커가 일부 가려지는 상황에서 추적이 가능하며, 내부 패턴을 흰색과 검은색으로 설정하여 비교적 어두운 환경에서도 영상의 경계를 안정적으로 추출할 수 있는 장점이 있다.

ARToolKitPlus[29]는 일반 PC보다 낮은 사양의 모바일 장치를 지원하기 위해 개발된

- 10 -





라이브러리로 기존 ARToolKit을 계승하여 모바일 환경에서도 구동 가능하게 최적화하였다. 2006년 이후 개발팀은 공식적인 업데이트가 중단되었지만, 그 동안의 최적화 노하우를 바탕으로 퀄컴사의 모바일 증강현실 SDK(CQAR)인 Vuforia[30] 개발에 참여한 것으로 알려져 있다. 현재, Vuforia 플랫폼은 모바일 증강현실 분야에서 가장 널리 사용되는 플랫폼으로 성장하였으며, 최근 PTC사는 Vuforia를 인수하면서 사물인터넷과 증강현실을 융합하는 사업을 준비하고 있다.

2.2.2 마커리스 추적 기술

마커리스 추적 기술은 사실적인 증강현실 구현을 위해 기존의 인위적인 마커 대신에 영상의 점, 선, 텍스처 등과 같은 객체 특징 정보를 이용하여 카메라의 위치/자세를 추적하는 기술들을 총칭한다. 이 기술은 가상 객체 정보의 제공 여부, 영상 특징 정보의 획득 방법 등의 방식에 따라 그림 5과 같이 분류된다.



모델 기반 방식은 사전에 추적할 객체 정보를 저장하고, 영상에서 추적할 객체의 정보를 검출하여 추적하는 기술이다. 비모델 기반 방식은 사전에 객체 정보 없이 영상에서 주변 환경의 특징 정보를 획득하여 카메라의 위치/자세를 추정한다[31]. 일반적으로 모델 기반 방식은 비모델 기반 방식에 비해 추적 범위가 단순하고, 가상 객체와 실제 객체 간의 상호작용이 가능하다. 따라서 모델 기반 방식의 마커리스 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[6-8,11].

모델 기반 방식은 영상에서 특징 정보의 획득 방법에 따라 에지 기반, 광류 기반, 텍스처 기반 추적 기술로 분류된다. 에지(edge) 기반 추적 기술은 초기 영상에서 객체의 에지 정보를 수작업으로 지정하며, 카메라 또는 객체의 움직임으로 에지 정보가 변화하는 것을 추적한다[32]. 이 방법은 영상처리의 복잡도가 낮고 구현이 비교적 쉬워 초기 연구에서 활발히 연구되었지만, 영상 잡음(image noise), 그림자, 객체 또는 카메라의 빠른 움직임에 추적 성능이 떨어지는 문제점이 있다. 광류(optical flow) 기반 추적 기술은 연속적인 두 프레임 영상에 존재하는 특정 점의 2차원 광류를 파악하여, 객체 또는 카메라의 움직임을 추적한다. 이 방법은 연속적인 프레임에서의 객체 또는 카메라의 부드러운 움직임을 표현할 수 있지만, 순차적인 방향 추적으로 인한 오차의 누적 및 조도의 변화로 추적 성능이 떨어지는 문제점이 있다. 마지막으로 텍스처 기반 추적 기술은 사전에 정의된 텍스처를 이용하여 프레임 단위로 객체 또는 카메라의 위치/자세를 추적한다. 이 방법은 영상에서 정의된 이미지의 위치/자세를 찾는 템플릿 정합(template matching)과 사전에 정의된 이미지의 특징점을 영상에서 검출하여 이미지의 위치/자세를 찾는 관심점 기반(interest point based) 추적 기술이 있다. 특히, 관심점 기반 추적 기술의 경우 템플릿 정합보다 계산이 빠르며, 미세한 조도 변화 및 부분 겹침 문제에도 추적이 가능하다.

관심점 기반 추적 기술은 특징점 매칭(keypoint matching)으로도 불리며, 특징점을 검출하는 관심 연산자(interest operator), 특징점 주변의 지역적 특징을 기술하는 지역 서술자(local descriptor)에 대한 연구가 주로 이루어 지고 있다. 관심 연산자는 이미지의

- 12 -



형태, 크기, 위치, 카메라의 시점, 조명 등의 변화에도 쉽게 식별이 가능한 특징점을 찾는 방법으로 Harris corner[33], Shi & Tomasi[34], DoG[35], FAST[36], AGAST[37] 등이 대표적이다. 지역 서술자는 서로 다른 특징점 간의 식별이 가능하기 위해 회전, 축소, 변형 등이 발생하여도 불변(invariant)한 특성을 가지는 정보를 활용하여 특징점을 서술한다. 대표적인 지역 서술자로 SIFT[35], SURF[38], BRIEF[39], ORB[40], LLAH[41] 등이 있으며, 증강현실의 구현환경 특성에 맞춰 특징점 검출 기술과 지역 서술자 기술을 선택하여 사용할 수 있다. 대표적인 관심점 기반 추적 방법들로 SIFT, SURF, ORB 등이 있으며, 이를 자세히 알아보도록 한다.

SIFT(scale invariant feature transform)는 이미지를 가우시안 평활화(gaussian smoothing) 하여 스케일 공간(scale space)을 정의하고, DoG(difference of gaussian)을 이용하여 얻어지는 높은 대비(contrast)의 극점을 특징점으로 활용한다. 또한, 개별적인 특징점 간의 식별을 위해 다음에 과정을 수행하여 특징점에 대한 지역 서술자를 생성한다. 우선, 얻어진 특징점을 중심으로 이미지 윈도우를 설정하여 그래디언트(gradient) 계산을 수행한다. 이후, 특징점 중심으로 $n \times n$ 개의 하위 윈도우로 나누어 그래디언트 방향과 크기에 대한 8-방향의 히스토그램으로 표현하고, 이 정보를 지역 서술자로 사용한다. 이 방법은 이미지 회전 및 스케일, 아핀 변환(affine transformations), 채도(intensity) 및 시점 변화에 불변한 특징으로 객체 추적에 매우 효과적인 성능을 보여주지만, 높은 수준의 연산 복잡도(computational complexity)가 요구되는 단점이 있다.

SURF(speed up robust feature)는 SIFT을 근사한 기술로 특징점 추적의 성능을 유지하며 SIFT보다 빠르게 객체 추적을 수행한다. 이 방법은 이미지를 가우시안 평활화하는 대신에 적분(integral) 이미지를 활용하여 빠른 컨볼루션(convolution) 연산과 다중 스케일 마스크로 각 스케일 공간의 병렬 수행을 가능하게 하였다. SURF의 지역 서술자 생성 방법은 Haar Wavelet을 이용하여 얻어진 높은 대비의 극점을 특징점으로 활용하고, Haar Wavelet response를 이용하여 특징점의 방향 결정한다. 그런 다음 개별적인 특징점 간의 식별을 위해 특징점을 중심으로 윈도우를 구성하고, 회전

- 13 -





불변성을 위해 특징점 방향으로 윈도우를 회전한다. 회전된 윈도우는 4×4의 서술자 윈도우로 분할되고, 각 서술자 윈도우는 5×5의 구역으로 나눠 Haar Wavelet response에 대한 $\sum dx$, $\sum |dx|$, $\sum dy$, $\sum |dy|$ 를 계산하며, 이를 지역 서술자로 사용한다.

ORB(oriented FAST and rotated BRIEF)는 FAST를 이용하여 특징점을 검출하고, 개선된 BRIEF를 사용하여 특징점의 지역 서술자를 생성한다. 우선, 이미지의 스케일 피라미드(image pyramid)를 생성하고, 각 단계마다 FAST를 적용하여 초기 코너점을 찾고, Harris 코너 검출을 이용하여 상위 *n* 개의 특징점을 찾는다. 특징점의 방향 결정을 위해 특징점 중심의 원형 패치(patch)의 강도 가중치 중심점(intensity weighted centroid)을 이용하였다. 지역 서술자로 사용된 BRIEF는 SIFT, SURF의 서술자와 달리 빠른 비교를 위해 기술자의 정보를 이진(binary)으로 표현한 이진 기술자로 in-plane 회전에 성능이 급격하게 떨어진다. 이를 해결하기 위해 특징점의 방향으로 회전시켜 BRIEF를 수행하는 방법을 사용하였다. ORB는 앞서 소개된 SIFT, SURF에서 제공하는 수준의 성능을 보이면서도 가장 빠른 연산속도를 제공한다.

LLAH(locally likely arrangement hashing)는 기존 특징점 지역 서술자 방법과 달리 특징점 간의 기하관계를 수학적으로 모델링하여 특징점의 지역 서술자를 생성한다. 이 방법은 텍스트 문서와 같이 특징점 주변 이미지 정보가 부족한 상황에서 특징점 간의 투영 및 아핀 변환에도 불변한 성질을 이용하여 특징을 서술할 수 있다. 하지만 특징점을 서술하는 과정이 복잡하고, 검출된 특징점이 주변 특징 잡음으로 인해 신뢰도가 크게 떨어질 수 있어 활용분야가 제한적이다.

2.2.3 센서 기반 추적 기술

센서 기반 추적 기술은 사용자 또는 객체의 움직임, 객체와의 거리, 객체의 자세 등을 측정하는 센서를 활용하여 추적하는 기술이다. 추적을 위해 사용되는 센서들은

- 14 -



실시간으로 객체의 상태 정보 측정이 가능하며, 단순한 계산을 통해 카메라-객체 간의 변환관계를 추정할 수 있다. 하지만 데이터를 측정하는 방법 및 측정 환경에 따라 센서에 내재되어 있는 고유한 측정 오차(error)가 존재하며, 오차가 누적됨에 따라 잘못된 추적 정보를 제공하기도 한다. 이를 해결하기 위해서는 상호보완적인 센서들의 조합을 이용하는 방법이 활용되며, 영상 기반 추적 기술과 센서 기반 추적 기술을 병행하는 하이브리드 추적 방안에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 일반적으로 객체 추적에 활용되는 센서로는 GPS, 관성 센서, 적외선 센서, 초음파센서 등이 있으며, 이를 자세히 알아보도록 한다.

GPS(global positioning system)는 지구 주변을 공전하는 인공위성 정보의 신호를 삼각측량법을 이용하여 사용자의 위치를 추적하는 시스템으로 지구 표면의 대다수의 실외 환경에서 위치 추적이 가능하다. 하지만 인공위성과의 통신을 방해하는 나무, 건물 등의 주변 장해물로 인해 GPS 신호의 손실이 발생하는 문제가 있다.

IMU(inertial measurement unit) 센서는 객체의 자세, 각도 비율, 선형 속도 및 위치 등을 측정하기 위해 가속도 센서(accelerometer), 자이로스코프(gyroscope), 지자기 센서 (magnetometer)로 구성된 전자 장치이다. 이 장치는 예전부터 유인 항공기, 미사일, 선박, 잠수함, 위성 등에 활용되고 있으며, 최근 IMU 센서를 탑재한 스마트폰의 보급으로 IMU 센서를 이용한 추적 기술이 활발히 연구되고 있다. 하지만 측정 데이터에 포함되어 있는 오차가 누적됨에 따라 드리프트 현상이 발생하며, 이를 해결하기 위해 주기적인 자세 초기화가 필요하다. 또한 주변 자성의 간섭으로 인해 잘못된 측정 결과를 출력하기도 한다.

적외선 센서(infrared sensor)는 사람의 눈으로 식별이 가능한 가시광선(visible light)과 달리 식별이 불가능하고, 대기 중 투과성이 높으며, 반사율이 가시광선과 다른 특성을 갖는 적외선을 영상의 형태로 촬영하는 센서로 적외선 영상은 가시광선의 RGB 영상보다 잡음이 적고, 조면 변환에 둔감한 특징이 있다.

- 15 -



2.3 적외선을 이용한 객체 추적 기술

카메라는 빛이 물체에 반사되면서 보이는 이미지를 측정하는 장치로 사람의 눈과 같은 기능을 수행한다. 일반적인 카메라의 경우, 사람의 홍채와 같이 빛의 양을 조절하는 장치가 내장되지 않아 강한 조명, 밝은 환경, 어두운 환경 등의 조도 변화에 민감하게 빛의 양을 조절할 수 없다. 이로 인해 영상의 특정 부분 또는 전체 영상이 빛에 강조되어 영상 정보가 소실되거나, 빛의 양이 적어 영상 자체를 얻을 수 없는 상황이 빈번히 발생한다. 영상 기반 추적 기술에서는 이러한 문제가 매우 치명적이기 때문에 이를 해결하기 위해 적외선 센서를 활용한 하이브리드 추적 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 적외선 센서로부터 획득되는 적외선 영상을 이용한 객체 추적 기술은 적외선 광원을 추적하는 직접 추적 방법과 적외선을 반사하는 반사체 (reflector)를 추적하는 간접 추적 방법으로 나뉘며, 이 절에서는 두 추적 방법의 연구사례에 대해 고찰한다.

2.3.1 직접 적외선 추적

직접 추적 방법(direct IR tracking)은 적외선 광원(적외선 비콘, IR LEDs 등)을 직접 IR 카메라로 촬영하여 적외선 영상에서 광원을 추적하는 방법으로 강한 적외선 광원으로 주변 적외선 빛과 구별이 쉽다. 하지만 적외선 광원에서 발산되는 적외선 빛으로 인해 광원과 조명 빛을 분리하기 어려워 정확한 광원의 중심점을 찾기 어려우며, 일정한 밝기의 광원을 사용해야 하기 때문에 구현에 상에 어려움이 있다.

직접 추적 방법의 대표적 사례로 3rd Tec사의 HiBall[42]은 천장에 여러 개의 적외선 비콘(beacon)을 설치하고, 6개의 렌즈와 광다이오드(photodiode)들로 구성된 HiBall 광학 센서를 이용하여 객체를 추적하는 시스템을 개발하였고, Advanced Real-time Tracking(ART) GmbH[43]는 스테레오 적외선 카메라와 적외선 비콘으로 구성된 IR

- 16 -





타깃을 이용하여 객체의 위치/자세를 추적하는 시스템 개발하였다. 언급된 직접 추적 방법은 정확한 객체 추적 결과를 도출할 수 있지만, 시스템 적용을 위한 공간과 비용의 제약으로 인해 여러 분야의 다양한 환경에서 적용하기 어려운 단점이 있다.



(b) ART [36] [그림 6] 대표적인 직접 적외선 추적 방법 사례들

2.3.2 간접 적외선 추적

간접 추적 방법(indirect IR tracking)은 적외선 조명에 의해 반사되는 반사체의 형상을 추적하는 방법으로 다양한 반사체의 형상을 다양화하여 각각의 특징을 부여할 수 있는 장점이 있는 반면에 반사체와 조명 및 카메라와의 반사각(angle of reflection)을 고려해야 한다. Kim 등[44]은 적외선 반사판에 색상을 부여하여 적외선 영상에서 얻어진 마커의 2D 위치와 RGB 영상에서 얻어진 색상 정보를 활용하여 객체를 추적하는 방법을 제안하였고, Park 등[45]은 콜드 미러(cold mirror)를 이용해 IR 카메라와 RGB 카메라의 영상을 일치시켜 스테레오 카메라 보정 과정을 생략하였고,





적외선 형광 팬으로 그려진 마커를 이용하여 육안으로 식별이 불가능한 비시각 마커 추적 시스템을 제안하였다. 간접 추적 방법은 비교적 시스템 구성이 간단해서 구축 비용이 적으며, 여러 환경에서 적용할 수 있지만, 의도하지 않은 반사체 또는 반사각에 따른 오인식과 낮은 추적 정확도 등과 함께 일부 특징정보 및 마커 영역이 가려짐에 따라 추적이 실패하는 마커 가림 현상이 여전히 존재하는 단점이 있다.



[그림 7] 대표적인 간접 적외선 추적 방법 사례들

제 3 장 적외선 센서를 이용한 하이브리드 추적 방안

제안된 하이브리드 추적 방안은 IR 마커를 IR 카메라로 촬영하여 마커의 위치/자세를 추정하고, 스테레오 카메라로 정의되는 IR 카메라와 RGB 카메라의 변환행렬을 이용하여 RGB 영상에 가상의 객체를 오버레이하는 추적 시스템이다. 이 시스템은 IR LEDs로 구성된 IR 마커와 적외선 영상 및 실세계 영상 촬영을 위한 IR-RGB 스테레오 카메라로 구성되며, 그림 8은 제안된 방안에 대한 개념도를 나타낸다.



[그림 8] 제안된 하이브리드 추적 방안에 대한 개념도

우선, IR-RGB 스테레오 카메라를 이용하여 적외선 및 실세계 영상 정보를 획득하고, 적외선 영상에서 제안된 방안을 이용하여 IR LEDs의 중심점들에 대한 영상 특징점을 검출한다. 다음으로 제안된 IR 마커 추적 방법들을 이용하여 영상 특징점과 마커 특징점에 대한 대응관계를 생성하고, 호모그래피(homography) 행렬을 계산하여 IR_마커-IR_카메라 간의 변환행렬을 얻는다. 이를 스테레오 보정을 통해 얻어진 IR_카메라-RGB_카메라 간의 변환관계를 이용하여 IR_마커-RGB_카메라 간의 변환관계를 계산하고, RGB 카메라 좌표 공간에 가상 객체를 생성하여 RGB 영상에 투영한다. 이 과정을 매 영상 프레임 마다 반복 수행하여 증강된 영상 정보를 사용자에게 제공한다. 그림 9는 제안된 하이브리드 추적 방안의 주요 절차를 나타낸다.











3.1 IR-RGB 스테레오 카메라 설치 및 영상 획득

제안된 하이브리드 추적 방안은 적외선 카메라가 포함된 스테레오 카메라를 활용한다. 영상 촬영을 위해 활용된 두 카메라는 일반 PC 환경에서 활용되는 웹캠 적외선 촬영용 웹캠의 적외선 필터를 (webcam)으로 적외선 영상 촬영을 위해 제거하고, 자외선 필터를 삽입하였다. 또한, 두 카메라를 고정하기 위해 3D 프린터를 활용하여 하우징 하였다. 스테레오 카메라는 두 영상의 기하학적 변형을 피하기 위해 그림 10(a)와 같이 두 카메라의 광축이 서로 평행한 평행 카메라(parallel camera) 모델로 배치하였고, 카메라 간격(stereo baseline)을 최소화하여 일치하는 영상의 범위를 최대로 설정하였다. 또한, 카메라 설치 과정에서 발생할 수 있는 오차 제거 및 두 카메라 간의 변환관계를 얻기 위해 스테레오 보정을 수행하였다. 그림 10(b)는 제작된 스테레오 카메라를 통해 얻어진 RGB 영상과 IR 영상을 나타낸다.



(a) Parallel camera system(b) Stereo image:(top)RGB, (bottom)IR[그림 10] 평형식 카메라 구조 및 스테레오 영상 결과



Collection @ chosun

3.2 영상 특징점 검출

일반적으로 영상에서 배경과 객체 사이에 화소(pixel)의 밝기 차가 있는 경우, 영상 처리 및 인식을 위한 계산량을 줄이고, 영상에서 특정 영역을 추출하는데 영상 이진화 기법이 유용하게 활용된다. 영상 이진화 기법은 임계치(threshold)를 기준으로 회색조 영상을 이진영상으로 변환하는 방법으로 식 3.1과 같이 임계치 *T* 을 기준으로 영상 *f*(*x*,*y*)를 이진영상 *g*(*x*,*y*)로 이진화한다.

$$g(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{if } f(x,y) \le T \\ 1, & \text{if } f(x,y) > T \end{cases}, \quad T = [0,255]$$
 (A) 3.1)

영상 이진화를 위해서는 분할 영역의 밝기가 일관되고, 분할 영역의 경계와 배경 간의 밝기 변화가 명확한 차이를 보여야 한다. 하지만 LEDs 조명 영상의 경우, LED 광원을 중심으로 강한 빛이 발산(emit)되어 분할 영역의 경계가 명확하지 않고, 각 LED 조명 간의 광원의 밝기가 서로 달라 일관된 임계치를 적용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 LEDs 조명 영상에 대한 다중 임계치를 설정하고, 각 임계치로 얻어진 분할영역의 경계정보를 이용하여 LED 광원을 검출하는 다층 이진화 (multi-layer threshold) 방법을 제안한다. 다층 이진화에 대한 수식 모델은 다음 식 3.2과 같다.

$$g(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{if } f(x,y) \le T_0 \\ 1, & \text{if } f(x,y) > T_1 \\ 2, & \text{if } f(x,y) > T_2 \\ \vdots & \vdots \\ n, & \text{if } f(x,y) > T_n \end{cases}$$
 (4 3.2)

$$T_0, T_1, T_2, \dots, T_n$$
 are integer.
 $T_k = [0, 255], \quad T_k = T_0 + \frac{k(255 - T_0)}{n+1}, \quad k = 1, 2, \dots, n$





다층 이진화 방법은 화소 값의 범위를 *n*+1 개의 구간으로 분할하여 각 영상의 이진화를 수행한다. *T*₀ 은 적외선 영상의 배경을 제거하기 위해 설정되는 최소 임계치이다. 나머지 다중 임계치 *T*₁,…,*T_n*은 구간 [*T*₀, 255]을 *n* 개의 영역으로 나누는 정수 값으로 설정한다. 그림 11는 제안된 다층 이진화 방법을 통해 적외선 영상이 분할된 다층 경계선 지도(level contour map)을 나타낸다.



 (a) Raw IR image
 (b) Level contour map

 [그림 11] 다층 이진화를 통해 분할된 경계영역 예시

다층 이진화 방법은 영상 밝기가 강할수록 높은 계층 값을 가지며, 각 계층의 외곽선 영역의 특징을 이용하여 LED 광원의 중심점들을 계산할 수 있다. 다층 이진화 방법을 통해 얻어진 다층 경계선 지도를 이용하여 영상 특징점을 검출하는 세부적인 과정은 4장에서 자세히 설명한다.
3.3 영상 특징점 식별 및 마커 인식

영상 특징점은 IR 마커의 특징점이 카메라를 통해 영상으로 투영 변환된 점을 의미하며, 두 특징점 정보는 교차비(cross ratio)와 같이 투영 변환에 불변하는 기하적 성질을 활용하여 대응관계를 식별할 수 있다. 특히, 마커 영역과 같이 작은 영역에서의 투영 변환은 자유도가 상대적으로 낮은 아핀 변환으로 근사(approximate)가 가능하며, 불변값 계산을 위한 연산의 복잡도를 낮출 수 있다. 아핀 변환은 회전, 평행이동, 스케일, 반전(reflection), 층밀림(shearing)을 포함하는 변환으로 변환과정에서 다음과 같은 특징을 갖는다[46].

- ① 변환 과정에서 평행선을 보존한다.
- ② 변환 과정에서 직선을 보존하며, 직선 위의 점들의 분비를 보존한다.
- ③ 변환 과정에서 면적을 보존하지 않지만, 면적의 변화 배수는 일정하다.
- ④ 변환 과정에서 각도, 직선의 방향, 두 점 사이의 거리를 보존하지 않는다.

아핀 불변(affine invariant)은 기하적 특징을 유지하는 성질로 대표적인 불변값으로 교차비, 삼각형 면적비(triangle area ratio) 등이 있다. 본 논문에서는 영상 특징점 식별 및 마커 인식을 위해 아핀 불변 특징을 이용한 2가지 추적 방법을 제안하며, 자세한 내용은 5장에서 다루도록 한다.





3.4 IR 마커-RGB 카메라 간의 변환관계

한 평면 위의 도형을 다른 평면으로 투영시켰을 때, 원래 도형과 투영 도형의 대응점들 사이에 일정한 변환관계가 성립되며, 이 변환행렬을 호모그래피 행렬이라 한다. 호모그래피는 한 평면의 점 $p(x_i, y_i)$ 들이 다른 평면의 점 $\hat{p}(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ 들로 투영될 때, 이들의 대응점 사이에는 식 3.3을 만족하는 3×3호모그래피 행렬이 항상 유일하게 존재한다.

$$s\begin{pmatrix} \hat{x}_{i} \\ \hat{y}_{i} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{1} & h_{2} & h_{3} \\ h_{4} & h_{5} & h_{6} \\ h_{7} & h_{8} & h_{9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{i} \\ y_{i} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \cdots$$
(4) 3.3)
s is scale factor.

호모그래피 행렬의 $[h_1, h_2; h_4, h_5]$ 는 두 평면 간의 회전, 스케일, 반전, 층밀림 관계를 표현하며, $[h_3, h_6]$ 은 평행이동, $[h_7, h_8]$ 은 원근 변환을 표현하는 인자이다. 여기서 h_5 는 스케일 인자로 이를 제외한 나머지 8개 인자에 대한 호모그래피 행렬을 계산하기 위해서는 최소 4개의 대응점 정보가 요구된다. 또한, 호모그래피 행렬 H 는 식 3.4와 같이 객체 평면이 영상 평면으로 매핑(mapping)되는 물리적 변환관계인 카메라 외부행렬 W 와 카메라의 투영 변환을 정의하는 카메라 내부행렬 M 으로 나누어 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = sH\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = sMW\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4)
s is scale factor.

카메라 내부행렬 \mathbf{M} 에서 f_x 와 f_y 는 렌즈의 초점 거리 F에 영상 센서의 개별

- 25 -





요소의 크기 s_x 와 s_y 를 각각 곱한 값을 의미하며, c_x 와 c_y 는 카메라 좌표계에서 스크린 좌표계로의 이동변위를 나타낸다. 2차원 평면 상의 점들을 카메라의 영상 센서로 옮기는 변환 과정도 호모그래피의 한 예로 2차원 마커 평면을 3차원 마커 좌표계(marker coordinate frame)로 확장할 수 있다. 얻어진 호모그래피 행렬에 카메라 내부행렬을 제거하면, 마커-카메라 간의 3차원 변환 관계를 얻을 수 있다.



또한, 두 카메라의 3차원 변환 관계 및 카메라 내부행렬을 알고 있을 때, 나머지 카메라와 IR 마커 좌표계 간의 3차원 변환 관계 및 카메라 영상에서의 투영 점의 위치를 얻을 수 있다. 그림 12는 스테레오 카메라와 IR 마커 좌표계 간의 변환 관계를 나타낸다. 임의의 공간 상의 점 P는 두 카메라의 영상 좌표 점 q₁과 q,에 투영되며, 식 3.5과 같이 카메라의 내부행렬 M₁과 M₂, 임의의 공간과 카메라 간의 변환행렬 T^P₇과 T^P₂로 표현할 수 있다.





$$s\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \alpha f_x & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}[\mathbf{R} \mid t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$
 (A) 3.5)

$$sq_{l} = \mathbf{M}_{l}\mathbf{T}_{l}^{P}P = \mathbf{M}_{l}p_{l}, \quad sq_{r} = \mathbf{M}_{r}\mathbf{T}_{r}^{P}P = \mathbf{M}_{r}p_{r} \qquad (\stackrel{\text{\ }}{\neg} 3.6)$$

식 3.6은 각 카메라에 대한 투영 변환을 나타낸다. 점 *p_l*와 *p*,은 각 카메라 좌표계에서 점 *P*의 위치를 나타내며, 두 점의 관계는 두 카메라 간의 변환행렬 T^r,로 표현할 수 있다. 이를 이용하여 식 3.7을 유도할 수 있으며, 카메라 영상에 투영된 점에 대한 다른 카메라 영상의 투영된 점 위치를 얻을 수 있다.

$$sq_{l} = \mathbf{M}_{l}p_{l} = \mathbf{M}_{l}\mathbf{T}_{l}^{r}p_{r}, \quad p_{l} = \mathbf{T}_{l}^{r}p_{r}$$

$$sq_{r} = \mathbf{M}_{r}p_{r} = M_{r}\mathbf{T}_{r}^{l}p_{l}, \quad p_{r} = \mathbf{T}_{r}^{l}p_{l}$$
($\stackrel{\text{(A)}}{=} 3.7$)

따라서 적외선 영상에서 얻어진 IR_마커-IR_카메라 간의 변환행렬과 두 카메라 간의 변환행렬을 이용하여 IR_마커-RGB_카메라 간의 변환행렬을 계산한다. 이를 통해 3D 환경의 가상 객체를 RGB 카메라의 영상에 증강할 수 있다.



제 4 장 다층 이진화를 이용한 영상 특징점 검출

영상 객체 인식은 영상 속 주변 환경과 구분할 수 있는 객체의 고유한 특징정보(feature)를 식별하고, 식별된 특징정보를 이용하여 영상에서 객체의 위치/자세를 추정하는 것을 의미한다. 대표적인 특징정보로는 객체의 고유한 코너(corner), 객체와 환경을 분리하는 에지(edge), 객체를 구성하는 면(face), 객체에 포함되어 있는 텍스처 등이 있으며, 각 특징정보는 영상에서 객체를 추적하거나 영상 매칭(matching)을 위해 활용된다.

특히, 영상 특징점은 고유한 특징 정보의 영상 좌표로 keypoint, interesting point, feature point 등의 용어로 불려지고 있으며, 이상적인 특징점은 회전, 스케일, 조명(illumination), 영상 잡음, 시점 변환 속성에 불변성을 가져야 한다. 대표적인 영상 특징점 검출 방법으로 마커를 이용한 마커 추적[25-27]과 이미지의 특징점을 검출하는 마커리스[35,38-41] 방법들이 활용되고 있다.

본 연구에서는 IR LEDs 광원의 중심점을 영상 특징점으로 활용한다. 이를 위해 적외선 영상에서 LEDs 광원을 찾고, LEDs 광원의 중심점을 검출하는 다층 이진화 방법을 제안한다. 이를 위해 다층 이진화 방법과 주요 절차에 대하여 설명하고, 다층 이진화 방법의 연산 최적화를 위한 병렬 처리 과정에 대하여 설명한다.

4.1 다층 이진화 방법

영상에 대한 관심 영역(region of interest, ROI)을 분할하기 위해서는 선행적으로 영상 이진화 과정이 수행된다. 영상 이진화 기법은 관심 영역을 분할하는 간단한 연산으로 임의의 임계치를 기준으로 영상을 0과 1로 정의하는 기법이다. 하지만 IR 카메라로 촬영된 IR LEDs 광원들의 영상은 다음과 같은 특징들로 인하여 LED 광원에 대한 관심 영역 검출이 어렵다.



- ① LED 조명 간의 광원의 밝기가 일정하지 않다.
- ② LED는 광원을 중심으로 빛이 발산한다.
- ③ 발산된 광원의 빛으로 인해 분할 영역의 경계가 명확하지 않다.
- ④ 인접한 LED들의 광원의 빛이 중첩된다.
- ⑤ LED와 카메라 간의 각도에 따라 촬영된 빛의 양이 다르다.

그림 13은 IR LEDs 광원이 포함된 적외선 영상을 일반적인 이진화 기법을 수행한 결과를 나타낸다. 그림 13(b)는 너무 높은 임계치를 사용하여 일부 IR LED들의 관심 영역이 검출되지 않은 결과이며, 그림 13(c)는 너무 낮은 임계치를 사용하여 IR LED 광원에서 발산된 빛까지도 관심 영역에 포함된 결과를 보여준다.



(a) Raw IR image



 (b) Threshold value = 253
 (c) Threshold value = 51

 [그림 13] 일반적인 이진화 기법을 활용한 영상 분할 결과





본 연구에서는 IR LEDs 조명 영상에 대한 다중 임계치를 설정하고, 각 임계치로 얻어진 계층 영상을 이용하여 주변 영역에 비해 상대적으로 밝은 IR LED 광원의 영역을 추출하는 다층 이진화 방법을 제안한다. 다층 이진화 방안은 적외선 영상의 지역 극대 임계치(local maximum threshold)를 찾는 과정으로 그림 14와 같이 높은 임계치에서 낮은 임계치로 여러 단계의 이진화를 수행하여 다층 경계선 지도를 생성한다. 다층 경계선 지도의 형상은 등고선 형태로 나타나며, 경계 영역의 화소 값은 임계치가 높을수록 높은 값을 갖는다.



[그림 14] 다층 이진화 과정 및 다층 경계선 지도

경계 영역	특징
단순 영역(A)	내부 영역에 다른 경계 영역이 없음
확장 영역(B)	내부 영역에 적어도 하나의 단순 영역 또는 확장 영역을 포함함
복합 영역(C)	내부 영역에 적어도 하나의 복합 영역 또는 둘 이상의 단순 영역 및 확장 영역을 포함함

표 3. 다층 경계선 지도의 경계 영역 분류

다층 경계선 지도의 경계 영역은 다른 경계 영역과의 관계를 통해 표 3과 같이 단순(A) 영역, 확장(B) 영역, 복합(C) 영역으로 분류할 수 있다. 단순 영역(simple region)은 그림 14의 A와 같이 하나의 LED 광원 만을 포함하는 가장 면적이 작고,

- 30 -





인접 경계 영역에 비해 밝은 지역 극대 영역(local maximum region)이다. 확장 영역(expanded region)은 그림 14의 B와 같이 하나의 LED 광원 및 발산하는 빛을 포함하는 영역으로 내부에는 단순 영역을 포함하는 영역을 말한다. 복합 영역(complex region)은 그림 14의 C와 같이 두 개 이상의 LED 광원들을 포함하는 영역으로 각각의 LED 광원의 빛이 발산하면서 혼합된 영역을 말하며, 내부에 둘 이상의 단순 영역 및 복합 영역을 포함하는 영역이다. 단순, 확장, 복합 영역의 평균 밝기 값은 단순, 확장, 복합 영역 순으로 작아지는 특징을 가지며, 각 영역의 포함 관계를 이용하여 경계 영역을 지정할 수 있다. 본 연구에서는 단순 영역을 IR LEDs의 광원으로 정의하여 광원의 중심점을 계산하며, 이를 영상 특징점 정보로 활용하였다.





4.2 영상 특징점 검출을 위한 주요 절차

본 연구에서 활용되는 다층 이진화 방법은 높은 임계치에서 낮은 임계치로 여러 단계의 임계치를 순차적으로 영상 이진화하여, 영상 밝기에 대한 등고선 형태의 다층 경계선 지도를 생성한다. 생성된 다층 경계선 지도의 지역 최대 임계치 영역을 추출하여 단순 영역으로 정의하고, 찾아진 단순 영역의 중심점을 계산하여 적외선 영상의 영상 특징점으로 활용한다. 그림 15는 IR LEDs에 대한 적외선 영상의 특징점 검출의 주요 절차를 도식화하였다.



[그림 15] IR LEDs에 대한 적외선 영상의 특징점 검출의 주요 절차

Collection @ chosun

4.2.1 다층 이진화를 위한 전처리 및 경계선 지도 생성

다층 이진화를 수행하기 위해서는 촬영된 적외선 영상에 대한 회색조(grayscale) 영상 변환을 수행하고, 다층 이진화 수행을 위한 파라미터 값을 지정하는 전처리 과정이 수행된다. 일반적으로 영상 이진화를 수행하기 위해서는 3채널(RGB)의 카메라 영상 정보를 1채널(gray)의 이미지 정보로 변환하는 회색조 변환 과정이 요구되며, 다층 이진화 과정에서도 반복적인 영상 이진화 과정 수행을 위해 회색조 영상 변환을 수행하였다.

다층 이진화 파라미터는 다층 이진화 수행을 위해 설정되는 값으로 다중 임계치의 최소·최대 구간(Min/Max), 다중 임계치의 감소량(Step)이 있으며, 입력된 영상의 배경 및 영상 잡음 제거, 다층 이진화의 반복 횟수 등을 고려하여 사용자가 지정한다. 다중 임계치의 최소·최대 구간은 적외선 영상의 배경 및 의도하지 않는 주변 광원 또는 반사광 등의 적외선 영상 잡음을 제거하기 위해 설정된다. 일반적으로 적외선 영상은 주변 환경에서 자연적으로 발생되거나, 반사되는 낮은 밝기의 적외선 빛으로 인해 배경 이미지가 영상에 포함될 수 있다. 이는 영상 특징점 검출 과정에서 특징 잡음이 발생되는 주요 원인 중 하나로 배경 이미지의 밝기보다 높은 영역의 임계치를 적용하여 배경 이미지로 인한 특징 잡음의 발생 현상을 줄이며, 다중 임계치의 최대값을 설정을 통해 강한 밝기의 LED 광원에 대한 불필요한 이진화 과정을 줄일 수 있다. 다중 임계치 감소량은 최소·최대 구간에서 임계치의 변화량을 나타낸다. 이 감소량은 다층 경계선 지도의 등고선 간격을 설정하는 것으로 감소량이 작을수록 민감한 밝기 변화를 측정할 수 있고, 단순 영역에 대한 정확한 경계 검출이 가능하지만, 조밀한 임계치 변화에 따른 이진화 반복 횟수가 증가하는 문제가 있다. 반대로 감소량이 클수록 이진화 수행 과정이 줄어 들지만, 단순 영역에 대한 정확한 경계 영역을 찾을 수 없다. 따라서 영상 정보에 대한 적절한 감소량을 설정하는 것이





중요하다. 그림 16은 적외선 영상에 대한 다중 임계치 구간 및 감소량을 설정한 예시를 보여준다.



[그림 16] 적외선 영상의 히스토그램 및 다층 이진화 파라미터 설정

전처리 과정을 통해 생성된 회색조 영상과 다층 이진화 파라미터들을 이용하여 다층 이진화를 수행한다. 다층 이진화 과정은 최대 임계치를 초기 임계치로 설정하고, 감소량에 따라 임계치를 조정하여 최소 임계치까지의 영상 이진화 및 기타 영상 처리 과정을 수행한다. 각 단계는 입력된 임계치와 회색조 영상을 이용하여 영상 이진화를 수행하며, 이진화 영상에 포함된 영상 잡음 제거 및 영상 경계를 매끄럽게 하기 위해 모폴로지(morphology) 변환을 수행한 후, 외곽선 검출을 통해 영상의 경계선을 획득한다. 그림 17는 적외선 영상에 대한 다층 이진화의 각 단계별 영상처리 과정 및 다층 경계선 지도를 나타낸다.

- 34 -





4.2.2 단순 영역 검출을 통한 영상 특징점 검출

IR LEDs 광원이 포함된 적외선 영상에 대한 다층 경계선 지도의 경계 영역은 다음과 같은 특징을 갖는다.

- ① 단순 영역은 인접한 주변 영역보다 영상 밝기가 항상 밝다.
- ② 단순 영역의 형태는 원 또는 타원을 유지한다.
- ③ 영역 간의 포함 관계는 완전 포함 관계이다.
- ④ 확장 영역 및 복합 영역은 단순 영역을 항상 포함한다.

단순 영역은 높은 임계치에서 낮은 임계치로의 순차적인 이진화 과정에서 최초로 얻어지는 경계 영역으로 특징 ①을 가지며, 광원의 빛이 발산하기 때문에 특징 ②를



항상 만족한다. 특징 ③은 두 영역에 대한 포함 관계를 정의할 때, 한 영역에 포함된 점이 다른 영역에 포함되는지를 평가하여 정의할 수 있음을 의미한다. 이를 이용하여 단순 영역이 임의의 영역에 포함되는지를 쉽게 계산할 수 있으며, 본 연구에서는 그림 18과 같이 단순 영역을 타원으로 근사하고, 타원의 중심점을 단순 영역의 대표 점으로 활용하였다.



[그림 18] 경계 영역에 대한 타원 근사 및 중심점 계산

특징 ④는 순차적 이진화 과정에서 얻어지는 임의의 경계 영역을 분류하는데 활용된다. 경계 영역을 분류하는 방법은 임의의 경계가 포함하는 단순 영역의 개수를 파악하여 단순, 확장, 복합 영역으로 분류하며, 이를 위해 이전 단계에서 정의된 단순 영역의 중심점 정보가 단순 영역의 대표점으로 활용된다. 임의의 영역이 하나의 단순 영역을 포함할 경우 확장 영역으로 분류하고, 둘 이상의 단순 영역을 포함할 경우 복합 영역으로 분류한다. 만약 임의의 영역이 확장 영역 또는 복합 영역이 아닐 경우 단순 영역으로 분류한다.

이를 바탕으로 단순 영역 검출 과정은 다음과 같이 수행된다. 최초로 얻어지는 경계 영역은 경계 영역의 최소 면적(3×3 pixels 이상), 경계 영역과 최소 사각형(minimum enclosing rectangle) 간의 면적비(60% 이상), 볼록 다각형(convex hull) 검사를 통해 단순 영역으로 지정하고, 단순 영역의 중심점을 계산하여 특징점 리스트에 저장한다. 이후 얻어지는 경계 영역에서 특징점 리스트에 포함되어 있는 중심점들을 이용하여 단순

- 36 -





영역의 포함 여부를 검사하여 경계 영역을 분류한다. 만약 단순 영역으로 분류 될 경우 앞서 수행된 최소 면적, 면적비, 볼록 다각형 검사를 수행하여 단순 영역으로 지정하고, 특징점 리스트에 단순영역의 중심을 추가하는 과정을 반복 수행한다. 이 과정은 다층 이진화 파라미터인 특징점 리스트의 최대 개수를 만족하거나, 다중 이진화 과정이 끝날 때까지 수행된다. 그림 19는 제안된 다층 이진화 방법을 이용하여 적외선 영상에서 IR LEDs 광원의 중심점을 찾는 과정을 나타낸다.



[그림 19] 적외선 영상의 IR LEDs 광원의 중심점 검출 결과



4.3 병렬화 기법을 활용한 연산 최적화

4.3.1 병렬화 기법

병렬 컴퓨팅(parallel computing) 또는 병렬 연산은 크고 복잡한 문제를 작게 나눠 동시에 병렬적으로 해결하는 과정으로 상호독립적이고, 반복적인 연산이 수행되는 과정을 동시에 수행하여 수행시간을 줄이는 연산 기법이다. 병렬 연산의 종류는 CPU를 활용한 공유 메모리 방식과 분산 메모리 방식, GPU를 활용한 GPGPU(general purpose GPU) [58]가 대표적이다.

공유 메모리 방식은 다수의 연산 장치가 특정 메모리 공간을 공유하여 독립적으로 연산을 수행하는 방식으로 프로세스에 속한 스레드(thread)들 간의 정보 교환을 위한 통신이 필요하지 않는 것이 특징이다. 대표적인 API(application programming interface)로 OpenMP가 있으며, 간단한 컴파일러(compiler) 지시어를 통한 병렬 시스템 설계가 가능하다는 장점이 있다[56].

분산 메모리 방식은 각 프로세스마다 독립된 메모리 공간을 할당하여 독립적으로 연산을 수행하는 방식으로, 단일 컴퓨터의 제한된 메모리와 연산력을 여러 대의 컴퓨터로 분산하여 프로세스의 메모리와 연산능력을 향상시키는 것이 특징이다. 이를 위해 적절한 부하 분산(load balancing)과 함께 정보 교환을 위한 통신 수단이 요구된다. 대표적인 API로 MPI(message passing interface)가 활용된다[57].

GPGPU는 수백 개의 코어가 병렬구조로 구성되어 있는 GPU의 빠른 연산능력을 활용하는 기술로 데이터 집합이 크고, 병렬도가 높으며, 데이터 요소 간의 의존성이 낮은 시스템에서 활용된다. 이 방법은 다수의 프로세스를 생성할 수 있지만, 적은 메모리 양, CPU와 GPU 간의 메모리 복사 과정 등의 문제로 인해 활용분야가 제한적인 것이 단점이다. 대표적인 API로 CUDA(compute unified device architecture) [59]가



활용된다.

Collection @ chosun

그 밖의 개방형 범용 병렬 컴퓨팅 프레임워크로 OpenCL(Open Computing Language) 이 있으며, CPU, GPU, DSP 등의 프로세서로 이루어진 이종 플랫폼에서 실행되는 병렬 프로그램을 작성할 수 있다.

다층 이진화 방안의 경우, 동일한 적외선 영상을 이용하여 영상 이진화, 외곽선 검출, 경계 영역의 분류, LED 광원의 중심점 계산 등의 다양한 연산들이 반복적으로 수행되기 때문에 CPU를 활용한 공유 메모리 병렬화 기법이 적합하다.

4.3.2 다층 이진화 방법의 연산 최적화

본 연구에서는 다층 이진화 과정에서 반복적으로 수행되는 영상 처리 및 검색 과정을 병렬화하여 연산 최적화를 수행하였다. 개발된 다층 이진화 방법은 3단계의 주요 연산 과정(파라미터 초기화, 다층 경계선 지도 생성, 영상 특징점 검출)으로 구성되며, 다층 경계선 지도 생성과 영상 특징점 검출 과정에서 반복적인 연산이 수행된다.

다층 경계선 지도 생성 과정은 동일한 적외선 영상을 다층 이진화 파라미터에서 정의된 각각의 임계치에 따라 그림 20(a)와 같이 순차적으로 영상 처리(영상 이진화와 외곽선 검출) 과정이 반복적으로 수행된다. 이 과정은 영상 정보 및 외곽선 정보를 공유하며, 서로 독립적으로 수행됨에 따라 병렬 연산이 가능하다. 또한, 영상 특징점 검출 과정은 다층 경계선 지도에서 얻어진 외곽선 리스트의 요소들에 대한 반복적인 비교 연산을 수행하여 단순 영역을 지정하기 때문에 이 과정에 대한 병렬화가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 그림 20(b)와 같이 다층 이진화와 단순 영역 검색을 위한 병렬 연산을 설계하여 공유 메모리 방식의 병렬화를 수행하였다.





[그림 20] 다층 경계선 지도 생성을 위한 순차 및 병렬 구조

다층 이진화 과정에 대한 공유 메모리 방식의 병렬 연산 과정은 다음과 같이 구성된다.

- (1) CPU 코어 수와 임계치 변화량에 따른 적절한 스레드 생성
- (2) 각 스레드에 대한 개별적인 임계치 지정
- (3) 모든 스레드들의 동시적 연산 수행
- (4) 공유 메모리에 각 스레드들의 연산 수행 결과(외곽선 정보) 저장
- (5) 단순 영역 검출을 위한 스레드 생성
- (6) 각 스레드들의 동시적 검색 및 비교 연산 수행
- (7) 단순 영역 리스트 등록/갱신

매 순간 IR 카메라로 촬영되는 적외선 영상은 다층 경계선 생성을 위해 설정된 파라미터들(최대·최소 임계치, 임계치 변화량 등)의 정보를 이용하여 스레드를 생성하고, 각 스레드에 입력될 임계치를 지정한다. 다음으로 각 스레드에서 입력된



적외선 영상과 임계치 정보를 이용하여 이진화 및 외곽선 검출을 수행하고, 공유 메모리에 외곽선 정보를 리스트 형태로 저장한다. 그런 다음 모든 병렬 연산이 끝나면 각 스레드들은 소멸되고, 공유 메모리에 저장되어 있는 외곽선 리스트를 이용하여 다층 경계선 지도를 생성한다. 마지막으로 외곽선 리스트의 요소들과 공유 메모리의 단순 영역 리스트 간의 병렬 연산으로 수행하여 새로운 영역에 대한 단순 영역의 등록 및 갱신을 수행한다.

제안된 병렬 모형의 성능 검토를 위해 스레드 사용량에 따른 연산 수행시간을 측정하는 실험을 실시하였다. 실험 환경은 총 4개의 스레드로 구성된 Intel Core(TM) 3.3GHz CPU와 메모리(RAM) 16GB가 내장된 PC 환경에서 적외선 영상 촬영용 IR 카메라를 활용하였고, OpenMP를 지원하는 컴파일러 Visual C++ 2013을 이용하여 프로그램을 작성하였다. 실험 방법은 카메라와 IR 마커가 고정된 상태에서 그림 21과 같이 연속된 100 프레임의 영상을 촬영하고, 병렬 연산에 활용되는 스레드 생성 수를 변경하여 제안된 병렬 모형에 대한 다층 이진화를 수행하였다. 마지막으로 수행 과정에서 측정된 수행시간에 대하여 초당 프레임(frames per second, FPS)을 계산하여 병렬 연산의 속도를 측정하였다. 실험에 활용된 다층 이진화 변수는 표 4와 같이 총 5가지의 변수로 지정하여 이진화 반복횟수에 대한 병렬 연산의 정량적인 평가를 수행하였다.



[그림 21] 병렬화 방안의 수행시간 평가를 위한 적외선 이미지 예시



	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
다층 이진화 변수 (Min/Max/Step)	50/250/1	50/250/2	50/250/3	50/250/4	50/250/5	50/250/10
이진화 반복횟수	641	321	161	81	41	21

표 4. 다층 이진화 변수 지정에 따른 이진화 반복횟수

표 5과 그림 22는 스레드 사용량에 따른 평균 초당 프레임의 측정 결과를 나타낸다. 실험 결과, 병렬 모형에 사용되는 스레드 생성 개수가 증가함에 따라 초당 프레임 속도가 증가함을 확인할 수 있었고, 일정 수준(초당 60 프레임)에 도달하면서 개선효과가 미비한 것으로 나타났다. 따라서 실시간 연산을 고려할 때, 다층 이진화 변수는 최소 50/250/5의 조건 이상에서 병렬 연산을 수행하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

	1 thread	2 thread	3 thread	4 thread
Test 1 (50/250/1)	6.002	11.387	15.164	19.171
Test 2 (50/250/2)	11.995	20.412	29.982	34.755
Test 3 (50/250/3)	16.430	30.049	41.739	50.184
Test 4 (50/250/4)	12.005	20.437	30.030	34.423
Test 5 (50/250/5)	22.054	47.301	60.064	59.972
Test 6 (50/250/10)	47.898	59.963	60.338	60.357

표 5. 스레드 사용량에 따른 제안된 병렬 모형의 초당 프레임(FPS) 측정 결과









제 5 장 아핀 불변 특징을 활용한 IR 마커 추적

앞서 객체 인식을 위해 적외선 영상에서 영상 특징점을 검출하는 과정을 설명하였다. 이 특징점은 영상의 고유 특징을 대표하는 영상 좌표로 마커 특징점과의 대응관계를 정의하기 위해 고유한 특징 정보를 포함해야 한다. 이번 장에서는 사전에 정의된 마커 특징점 정보를 이용하여 영상 특징점을 식별하는 특징 서술자에 대하여 논의하고, 영상 특징점 식별 및 마커 인식을 위해 아핀 불변 특징을 이용한 2가지 마커 추적 방법을 제안한다.

5.1 IR 마커의 적외선 영상에 대한 특징 서술자

특징 서술자는 특징점 주변의 지역적 특성을 데이터 형태로 서술하는 방법으로 영상 특징점과 마커 특징점 간의 대응점 식별을 위한 도구로 활용된다. 대표적인 특징 서술자로 SIFT, SURF, ORB, LLAH 등이 있으며, 두 영상 특징점 간의 비교를 통해 매칭에 필요한 대응점을 찾는데 활용된다. 이를 위해 특징 서술자는 서로 다른 특징점의 서술자와의 분별이 가능해야 하며, 영상의 회전, 축소, 변형 등이 발생하여도 불변한 성질을 가져야 한다. 또한, 특징 서술자 간의 비교를 통해 특징점을 구별하기 때문에 서술자 데이터의 크기가 작을수록 연산 효율이 좋은 것이 특징이다.

증강현실 분야에서 주로 활용되는 특징 서술 방법[35,38-40]은 밝기 및 그래디언트의 변화가 존재하는 이미지에서 특징점을 중심으로 일정 범위의 윈도우를 설정하고, 윈도우 이미지 정보를 미분하여 벡터(vector) 정보로 서술하는 것이 일반적이다. 반대로 단순 다각형 이미지나 문서 등과 같이 이미지의 밝기 및 그래디언트 변화가 없는 경우, 투영 변환에도 불변하는 특징점 간의 기하관계를 활용하는 서술자 방법도 일부 활용되고 있다[41]. 특징점 간의 기하관계를 활용하는 방법은 점들 간의 기하관계로 특징점을 검출하기 때문에 특징점 검출 방법에 따른 잡음 발생에 민감하게 반응한다.

- 44 -



IR 마커를 촬영한 적외선 영상의 경우, IR LEDs 조명의 밝기가 연속적으로 바뀜에 따라 영상 특징점 주변의 이미지를 이용하여 영상 특징점을 서술하는 것이 어렵다. 따라서 본 연구에서도 다층 이진화 방안으로 얻어진 영상 특징점 간의 기하관계를 활용하여 서술자를 생성하는 방법을 활용하며, 이를 위한 2가지 마커 추적 방법을 제안한다.

5.2 평면 다각형을 활용한 IR 마커 추적

본 절에서는 동일 평면 상의 단순한 도형들로 구성된 평면 다각형 형태의 IR 마커를 추적하는 방법에 대하여 설명한다. 제안된 평면 다각형 IR 마커 추적 방법은 적외선 영상에서 검출된 IR LEDs 점과 미리 정의된 도형의 꼭지점들 간의 대응관계를 찾아 대응점 후보군을 지정하고, 아핀 불변 특성을 이용하여 대응점 후보군에서 IR 마커를 추적하는 방법이다. 이를 위해 제안된 평면 다각형 생성 방법을 설명하고, 예시를 통해 평면 다각형 IR 마커의 특징점 후보군 선정 과정 및 불변 특성을 이용한 마커 추적에 대하여 설명한다.

5.2.1 평면 다각형 생성

평면 다각형(plane polygons)은 둘 이상의 단순한 형태(삼각형, 사각형, 오각형 등)의 다각형으로 구성된 도형으로 일반적인 RGB 영상에서 영상처리 기법을 이용하여 다각형을 쉽게 검출할 수 있고, 다른 다각형과의 기하적 관계를 이용하여 정의된 평면 다각형을 찾을 수 있다. 적외선 영상에서도 다각형 간의 기하적 관계를 이용하여 평면 다각형들의 특징점을 찾을 수 있으며, 평면 다각형 추적 방법의 일관성 및 정확성을 위해 다음의 기하적 특징을 만족하는 평면 다각형을 고려한다.



Collection @ chosun

- ① 모든 다각형은 연결된 꼭지점 정보로 정의한다.
- ② 모든 다각형은 반시계 방향으로 꼭지점을 정의한다.
- ③ 다각형들의 꼭지점은 적어도 두 개의 외곽 직선 위에 존재해야 한다.
- ④ 외곽 직선은 다른 꼭지점들에 대해 편향성을 갖는다.
- ⑤ 평면 다각형의 구성은 방향성을 갖는다.

특징 ①과 특징 ②는 기하학에서 정의되는 다각형 속성을 의미한다. 기하학에서 다각형은 한 평면 위에 유한 개의 선분의 끝점이 차례로 이어져 있는 도형으로 정의된다. 다각형은 선분과 꼭지점으로 구성되어 있으며, 꼭지점의 연결 순서에 따라 정면과 후면이 정의된다. 일반적으로 다각형의 꼭지점이 반시계 방향으로 정의될 경우 정면을 나타내며, 반대로 시계 방향으로 정의될 경우 후면을 나타낸다. 특징 ③과 특징 ④는 다각형들에 접하는 외곽 직선(outside straight line)을 정의하여 다각형 간의 기하적 관계를 정의한다. 직선은 투영 및 아핀 변환에도 직선의 형태를 유지하기 때문에 다각형 간의 대략적인 기하 관계를 추정할 수 있으며, 평면 다각형의 외곽 직선은 소속된 다각형에 대한 편향성을 갖고 있기 때문에 검출이 용의하다. 마지막으로 ⑤는 제작된 평면 다각형의 방향을 결정하기 위한 제약으로 일부 위·아래 또는 좌·우와 같은 한 방향 대칭성은 인정하지만, 그 외의 대칭성은 인정하지 않는다. 추가적으로 평면 다각형에 포함되는 다각형의 형상은 삼각형, 사각형 등의 단순한 형태의 조합을 활용하는 것이 좋다. 그림 23은 다양한 평면 다각형의 형태와 외곽 직선 정보의 예시를 나타낸다. 이렇게 정의된 평면 다각형의 형상들은 각 특징점에



5.2.2 IR 마커 추적 방안

평면 다각형 IR 마커를 추적하는 방법은 다층 이진화를 통해 검출된 영상 특징점에서 평면 다각형과 대응될 것으로 예상되는 특징점 후보군(candidate)을 찾는 것이 중요하다. 이를 위해 평면 다각형의 꼭지점 개수만큼의 영상 특징점을 조합(combination)하여 기하적 특성을 판별하며, 이를 만족하는 조합을 특징점 후보군에 포함시킨다. 마지막으로 후보군들에 대한 대응점 간의 아핀 불변 값을 계산하여 가장 일치하는 대응점 후보를 찾고, IR 마커와 대응 관계를 이용하여 IR_마커-IR_카메라 간의 변환관계를 계산하는 과정으로 수행된다.

평면 다각형의 기하적 특성을 판별하기 위해서는 정의된 평면 다각형의 형태마다 개별적인 과정을 수행하지만, 일반적으로 다음의 기하학적 특성의 조합을 통해 평면 다각형을 판별할 수 있다.

- ① 각 외곽 직선에 특징점이 포함되지 여부
- ② 외곽 직선의 편향 정보





- ③ 다각형의 특징점의 개수 및 순서
- ④ 특징점 간의 최대·최소 거리 정보
- ⑤ 아핀 불변 특징에 의거한 특징점로 구성된 삼각형들의 면적비 정보

특징점 후보는 평면 다각형으로 정의된 IR 마커 특징점들의 기하적 관계를 만족하는 영상 특징점들의 조합을 의미한다. 따라서 영상 특징점에 대한 마커 특징점 개수 만큼의 특징 조합을 생성하며, 다음의 단계를 검사하여 특징점 후보군을 선정한다.

- ① 영상 특징 조합에서 외곽 직선 L_a , L_b 정의
- ② 외곽 직선에 포함되지 않는 특징점들에서 기준점 정의
- ③ 검출된 기준점과 외곽 직선 상의 특징점 간의 거리 관계를 이용한 특징점 정의
- ④ 외곽 직선에 포함되지 않는 특징점들과 기준점과의 거리 관계를 이용한
 특징점 정의

평면 다각형 형상에서 정의된 외곽 직선은 모든 다각형들의 꼭지점(특징점)을 적어도 하나 이상 지나며, 모든 특징점에 대하여 편향성을 갖기 때문에 이 조건을 만족하는 직선을 찾을 수 있다. 우선, 외곽 직선을 지나는 특징점의 개수를 충족하는 직선 방정식을 찾고, 모든 특징점 정보를 식 5.1에 대입하여 직선에 대한 각 점들의 편향을 판별하여 외곽 직선의 편향성을 확인한다.

$$ax + by + c = d$$

 $d < 0$, below the line
 $d = 0$, on the line
 $d > 0$, above the line
($4 > 0$, 2.1)

외곽 직선의 편향성은 모든 특징점이 직선 또는 한 방향에 위치한 것을 의미하며, 이러한 과정을 통해 외곽 직선 두 개를 찾을 수 있다. 두 외곽 직선은 편향 방향 또는

- 48 -



회전 방향의 순서로 정의한다.

다음으로 평면 다각형의 기준점은 두 외곽 직선에 포함되지 않는 특징점으로 두 외곽 직선과의 거리가 가장 먼 특징점을 지정한다. 기준점은 외곽 직선을 이루는 특징점들 또는 외곽 직선에 포함되지 않는 특징점들 간의 거리 비교를 통해 그림 24와 같이 대응점의 위치를 지정할 수 있다.



[그림 24] 기준점과 외곽 직선 상의 특징점들 간의 거리에 따른 대응점 지정

본 연구에서는 그림 25와 같이 도형의 꼭지점과 대응되는 7개의 IR LEDs로 구성된 평면 다각형 IR 마커를 제작하고, 앞서 정의된 특징점 후보군 선정방법에 대한 설명과 더불어 아핀 불변 정보를 이용한 마커 추적 과정을 설명한다.





[그림 25] 평면 다각형 형상 정의 및 IR 마커 제작

IR 마커 제작에 활용된 평면 다각형은 삼각형 (P₀,P₁,P₂)과 사각형 (P₃,P₄,P₅,P₆)으로 구성되며, 평면 다각형의 기준점 P₀, 외곽 직선 L_a(P₁,P₃,P₄)와 L_b(P₂,P₆,P₅)으로 구성된다. 평면 다각형 IR 마커의 후보군 선정 과정은 다음과 같다.

- 49 -





- (1) 적외선 영상에서 얻어진 특징점들 중에 임의의 7개 점을 조합한다.
- (2) 7개 점 중에 직선을 이루는 점 3개를 검색하고, 특징점과 직선과의 편향성을 계산하여 평향된 정보에 따른 외곽 직선 L_a, L_b를 지정한다.
- (3) 외곽 직선 L_a, L_b에 포함되지 않는 나머지 한 점을 삼각형의 한 점 P₀로 설정한다. 이후, L_a를 이루는 세 점 중 P₀에서 가장 가까운 점을 P_a라고 하고, L_b을 이루는 세 점 중 P₀에서 가장 가까운 점을 P_b라고 한다.
- (4) P_a 와 P_b를 잇는 선분을 경계로 점 P₀가 나머지 네 점과 다른 쪽에 있으면,
 다음을 수행한다. 그렇지 않으면, 7개 점은 유효하지 않다고 판정한다.
- (5) 세 점 P₀, P_a, P_b가 시계 방향을 이루면, P_a와 P_b를 교환하고, 직선 L_a와 L_b를 교환한다. 아울러 직선을 이루는 세 점도 각각 교환한다.
- (6) $P_a \equiv P_1 \subseteq Z$ 설정하고, $P_b \equiv P_2 \subseteq Z$ 설정한다.
- (7) L_a 를 이루는 P_a 가 아닌 두 점 중 점 P_0 에서 거리가 먼 점을 P_4 로 지정하고, 그렇지 않은 점을 P_3 로 지정한다.
- (8) L_b 를 이루는 P_b가 아닌 두 점 중 점 P₀에서 거리가 먼 점을 P₅로 지정하고,
 그렇지 않은 점을 P₆로 지정한다.
- (9) P₁과 P₄를 잇는 선분과 P₂과 P₃를 잇는 선 분이 서로 교차하면, 7개 점은 유효하지 않다고 판정한다.

위의 과정은 앞서 소개한 특징점 후보군 선정 과정에서 보다 정확한 외곽선 L_a , L_b 를 찾기 위해, 과정(4)에서 각 외각선을 대표하는 점 P_a , P_b 과 기준점 P_0 을 이용하여 법선 벡터의 방향을 확인하는 절차를 추가적으로 삽입하였다. 그림 26과 그림 27은 영상 특징점 정보에서 특징점 후보군을 선정하는 과정 및 결과를 나타낸다.







[그림 26] 평면 다각형 IR 마커의 특징점 후보군 선정 과정



(a) Raw IR image





(b) Feature points(c) Candidate shape features[그림 27] 특징점 후보군 선정 결과

선정된 특징점 후보군은 특징점 리스트와 함께 마커 식별을 위한 아핀 불변 서술자를 작성한다. 아핀 불변 서술자는 정의된 평면 다각형의 꼭지점들에 대한 삼각형 면적비를 배열의 형태로 나타내며, 삼각형 면적비의 순서는 사용자가 지정하여 저장한다. 삼각형 면적비는 그림 28과 같이 정의된 평면 다각형 내 두 삼각형의 면적을 *a*, *b*라고 할 때, 두 삼각형의 면적비 *r*는 식 5.2과 같이 정의된다.

$$r = \frac{b}{a + 0.000001}$$
 (4 5.2)







[그림 28] 아핀 불변 성질을 활용한 삼각형 면적비 예시

대응점 후보에서 대응되는 두 삼각형의 면적 a', b'에 대하여 면적비 r'을 계산하고, 식 5.3과 같이 정의된 평면 다각형의 면적비와의 비교를 통해 가장 작은 형상 차이를 가지는 후보군을 대응점 정보로 활용한다.

$$\sum \left| \frac{\left(r_i - r_i' \right)}{r_i} \right| \tag{A1 5.3}$$

최종적으로 대응점 정보는 IR 마커의 특징점 정보를 이용하여 호모그래피 행렬을 계산하고, IR_마커-IR_카메라 간의 변환행렬을 계산하여 마커의 위치/자세를 추정한다.





5.3 LLAH 서술자를 이용한 IR 마커 추적

본 절에서는 특징점 간의 기하관계를 수학적으로 모델링하여 특징을 기술하는 LLAH (locally likely arrangement hashing) 서술자를 활용하여 IR 마커를 추적하는 방법을 설명한다. 우선, LLAH 서술자에 대하여 간단하게 설명하고, LLAH 서술자의 성능을 개선하기 위한 방안을 제안하며, 이를 IR 마커 추적에 활용한다.

5.3.1 LLAH 서술자

LLAH 서술자는 특징점 매칭 기술로 영상 특징점에 대한 고유한 식별정보를 인접한 특징점들과의 기하적 관계를 이용하여 서술하는 지역 서술자이다[41]. 이 방법은 텍스트 문서와 같이 영상 주변 픽셀의 밝기나 그래디언트 정보를 활용할 수 없는 상황에서 특징점 정보를 서술하기 위해 인접 특징점들의 불변량을 계산하고, 불변량의 조합을 인덱스로 변환하여 서술자로 활용한다. 최근 랜덤하게 분포된 점들로 구성된 마커를 제작하고,LLAH 서술자를 활용한 마커리스 추적 기술도 활용되고 있다[47,48].



LLAH 서술자는 등록된 마커와 촬영된 영상 간의 특징 서술자들을 비교하여 마커를 추적한다. 시스템 시작 단계에서 등록된 마커의 특징점들에 대한 서술자를 생성/등록하고, 이 정보를 영상에서 검출된 특징점의 서술자와 비교하는 검색과정을 통해 영상 특징점에 대응되는 마커 특징점을 찾는다. 특징 서술자를 생성하는 과정은 인접한 특징점 n개에 대하여 m개의 조합을 구성하고, 각 조합에 포함된 특징점 간의 기하적 관계를 하나의 서술자로 활용한다.

[서술자 정보 생성]

카메라 영상의 특징점은 3차원 공간에 있는 점을 2차원 이미지 평면에 원근 투영한 점으로 카메라와 물체의 거리가 가까워질수록 커지고, 멀어질수록 작아지는 원근 왜곡(perspective distortion)이 존재한다. 이로 인해 특징점 간의 거리, 각도 등의 일반적인 기하적 관계만으로 특징점을 정의하는 것이 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 LLAH 서술자는 교차비 등과 같이 원근 변환 과정에서도 불변하는 기하적 성질을 활용하며, 작은 면적 또는 가까운 거리에 한하여 원근 변환을 아핀 변환으로 근사하여 서술자를 생성하는 방법을 활용한다. 식 5.4와 식 5.5는 LLAH 서술자에서 활용되는 기하 관계로 원근 불변 특징인 교차비와 아핀 불변 특징인 삼각형 면적비를 나타내며, 식의 *P(A,B,C*)는 점 *A*, *B*, *C*로 이뤄진 삼각형의 면적을 나타낸다[41].

$$Cross Ratio = \frac{P(A, B, C)P(A, D, E)}{P(A, B, D)P(A, C, E)}$$
(A)

Triangle Area Ratio =
$$\frac{P(A, B, D)}{P(A, B, C)}$$
 (A 5.5)

이렇게 얻어진 불변 값은 해시 함수(hash function)를 이용하여 해시 테이블(hash table)에 저장된 인덱스 정보로 변환되며, 하나의 서술자는 조합된 인접 특징에 대한

- 54 -



기하 관계를 일정한 방향 순서를 갖는 배열로 지정하여 회전 불변성을 서술자 정보에 부여한다.

[서술자 등록]

특징점에 대한 서술자 등록을 위해서 LLAH 서술자는 인접 특징점들의 조합을 구성하고, 각 조합에서 세 점으로 구성된 삼각형들을 생성하여 삼각형 들간의 교차비 또는 면적비를 계산한다. 그림 30은 서술자 생성 및 등록 알고리즘을 나타내며, 각 특징점에 대한 서술자 생성을 위해 3가지 파라미터(인접 특징 수, 조합의 부분집합 개수, 불변량 개수)를 설정한다. 인접 특징 수 n은 특징점 P를 기준으로 가장 가까운 거리에 인접 특징점의 개수를 나타내며, 조합의 부분집합 개수 m 은 인접 특징점들에 대한 부분집합을 나타낸다. 두 파라미터는 인접 특징점들의 조합에 대한 "C" 개의 서술자를 생성하며, 특징점 검출 과정에서 발생되는 특징 잡음으로 인한 오인식을 방지하는 역할을 한다. 각 기술자는 소속된 특징점들에 대한 회전 볼변성을 유지하기 위해 불변량 개수 f 에 대한 특징 조합을 순환 시프트(circular shift)로 구성한 후, 볼변값(교차비 또는 삼각형 면적비)을 계산한다. 볼변량 개수 f 는 선택된 볼변 특징에 따라 교차비(5) 또는 삼각형 면적비(4)로 설정되며, 볼변값 리스트의 길이는 "C_f 이다. 볼변값은 실수의 형태로 다른 서술자와 비교하기에 적합 데이터의 형태가 아니기 때문에 식 5.6와 같이 볼변값을 양자화(quantization)하는 해시 함수를 이용하여 인덱스로 변환하여 관리한다[41].

$$H_{index} = \left(\sum_{i=0}^{m^{C_{f-1}}} r_{(i)} k^{i}\right) \mod H_{size}$$
 (A)



Collection @ chosun



- 1: for each $p \in \{All \text{ feature points in a database image}\}$ do
- 2: $P_n \leftarrow$ The nearest *n* points of *p* (clockwise)
- 3: for each $P_m \in \{ \text{ All combinations of } m \text{ points from } P_n \}$ do
- 4: for each $P_f \in \{ \text{ All combinations of } f \text{ points from } P_m \}$ do
- 5: $r_{(i)} \leftarrow$ The invariant calculated with P_f
- 6: end for
- 7: $H_{\text{index}} \leftarrow$ The hash index calculated by Eq. (5.6).
- 8: Register the item (document ID, point ID, $r_{(0)}, \dots, r_{(mC_f-1)}$) using H_{index}
- 9: end for

10: end for

[그림 30] LLAH의 서술자 생성 및 등록 알고리즘 [41]



[서술자 검색]

Collection @ chosun

서술자 검색은 영상 특징점 정보에 대한 서술자 생성과 등록된 서술자 간의 비교를 통한 특징점 인식 단계로 나뉜다. 영상 특징점 정보에 대한 서술자 생성은 앞서 소개한 서술자 생성과 동일하며, 데이터 베이스에 저장되어 있는 특징점의 서술자 정보와 비교를 수행하여 동일한 서술자가 많은 특징점으로 인식하는 과정을 수행한다. 이 과정을 통해 영상 특징점들에 대한 대응관계가 부여되며, 호모그래피 행렬을 계산하여 마커의 위치/자세를 추정한다. 그림 32는 서술자 검색 알고리즘을 나타낸다.



- 1: for each $p \in \{All \text{ feature points in a query image}\}$ do
- 2: $P_n \leftarrow$ The nearest *n* points of *p* (clockwise)
- 3: for each $P_m \in \{ \text{ All combinations of } m \text{ points from } P_n \}$ do
- 4: for each $P'_m \in \{ \text{ Cyclic permutations of } P_m \}$ do
- 5: for each $P_f \in \{ \text{ All combinations of } f \text{ points from } P'_m \}$ do
- 6: $r_{(i)} \leftarrow$ The invariant calculated with P_f
- 7: end for
- 8: $H_{\text{index}} \leftarrow$ The hash index calculated by Eq. (5.6).
- 9: Look up the hash table using H_{index} and obtain the list.
- 10: for each Item of the list do
- 11: if Conditions 1 to 3 are satisfied then
- 12: Vote for the document ID in the voting table.
- 13: end if
- 14: end for
- 15: end for
- 16: end for
- 17: end for
- Return the document image with the maximum votes.

[그림 32]LLAH의 서술자 검색 알고리즘 [41]

5.3.2 기존 LLAH 서술자의 단점

LLAH 서술자는 마커를 추적하는 과정에서 특징점 주변의 정보가 부족하여 고유한 특징 정보를 서술하지 못하는 상황에서도 특징 정보를 서술하는 방법을 제공하지만, 특징점을 서술하는 과정이 복잡하고, 검출된 특징점이 주변 특징 잡음으로 인해 신뢰도가 크게 떨어질 수 있어 활용분야가 제한적이다.

특히, 서술자 등록 및 검색에 적용되는 서술자 생성 방법이 동일함에 따라 특징 잡음에 대한 서술자 생성 방법의 유연성이 부족하며, 필요 이상의 비교 서술자를 생성하여 검색 과정의 비교 연산량이 증가하는 단점을 갖는다. 그림 33은 영상 서술자를 검색하는 과정에서 특징 잡음으로 인해 대응되는 마커 특징점을 찾지 못하는 대표적인 사례를 나타낸다.







입력된 영상 정보에 정의된 두 개의 마커가 겹쳐있고, 특징 잡음이 발생된 상황에서 영상 특징점 P를 인식한다고 가정하자. 특징점의 서술자를 생성하는 방법을 6/5 (인접 특징수, 조합의 부분집합 개수)로 지정할 경우, 마커 특징점 P에 대한 서술자는 그림 33과 같이 마커 특징점 p1, p2, p3, p4, p5, p6를 인접 특징점으로 설정하여 특징점 조합의 서술자를 생성한다. 영상 특징점 P'의 경우, 영상 특징점들에 포함된 다른 마커의 특징점 또는 특징 잡음으로 인해 그림 33과 같이 영상 특징점 n1, p3, o1, n1, p4, p6를 인접 특징점으로 설정하여 특징점 조합의 서술자를 생성하기 때문에 표 6과 같이 마커 특징점 P 와는 다른 영상 특징점 조합을 생성하게 된다. 이러한 문제는 마커 내부보다 외부 경계에서 많이 발생하며, 여러 개의 마커를 사용하거나 영상 특징 검출에 특징 잡음이 많은 경우 마커 추적의 정확성이 떨어진다. 이러한 문제로 LLAH 서술자를 활용한 마커의 경우 다수(40개 이상)의 특징 정보가 요구되며, 서술자 검색을 통해 얻어진 소수의 영상 특징 정보를 이용하여 부정확한 마커의 위치/자세를 계산하고 있는 실정이다. 따라서 마커 추적에 정확성 및 연산 효율성을 높이기 위한 연구가 필요하다.



	Descriptors of the P on Marker_1	Descriptor of the P' on Image
Combination of neighbor points	<i>p</i> 1, <i>p</i> 2, <i>p</i> 3, <i>p</i> 4, <i>p</i> 5	<i>n</i> 1, <i>p</i> 3, <i>o</i> 1, <i>n</i> 2, <i>p</i> 4
	<i>p</i> 1, <i>p</i> 2, <i>p</i> 3, <i>p</i> 4, <i>p</i> 6	<i>n</i> 1, <i>p</i> 3, <i>o</i> 1, <i>n</i> 2, <i>p</i> 6
	<i>p</i> 1, <i>p</i> 2, <i>p</i> 3, <i>p</i> 5, <i>p</i> 6	<i>n</i> 1, <i>p</i> 3, <i>o</i> 1, <i>p</i> 4, <i>p</i> 6
	<i>p</i> 1, <i>p</i> 2, <i>p</i> 4, <i>p</i> 5, <i>p</i> 6	<i>n</i> 1, <i>p</i> 3, <i>n</i> 2, <i>p</i> 4, <i>p</i> 6
	<i>p</i> 1, <i>p</i> 3, <i>p</i> 4, <i>p</i> 5, <i>p</i> 6	<i>n</i> 1, <i>o</i> 1, <i>n</i> 2, <i>p</i> 4, <i>p</i> 6
	<i>p</i> 2, <i>p</i> 3, <i>p</i> 4, <i>p</i> 5, <i>p</i> 6	<i>p</i> 3, <i>o</i> 1, <i>n</i> 2, <i>p</i> 4, <i>p</i> 6

표 6. 특징 잡음으로 인해 잘못 생성된 특징점 P의 서술자 정보

5.3.3 LLAH 서술자 개선 방법

기존의 LLAH 서술자는 서술자 등록 및 검색에 적용되는 서술자 생성 방법이 동일 함에 따라 특징 잡음에 대한 서술자 생성 방법의 유연성이 부족하며, 필요 이상의 비교 서술자를 생성함에 따라 검색 과정의 비교 연산량이 증가하는 단점을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 기존 LLAH 서술자 등록/검색 과정의 서술자 생성 방법을 다르게 지정하여 특징 잡음에 대한 추적의 정확성 및 검색 수행 시간을 향상시키고, 이를 IR 마커 추적에 활용하는 방법에 대하여 설명한다.

LLAH 서술자의 서술자 등록 과정은 특징 잡음이 포함되지 않은 마커 특징점들에서 서술자 정보를 생성하기 때문에 각 특징점에 대한 최소한의 인접 특징점을 선택하는 것이 요구되며, 반대로 서술자 검색 과정은 특징 잡음이 포함된 영상 특징점들에서 서술자 정보를 생성하기 때문에 특징 잡음을 고려하여 충분한 수의 인접 특징점을 선택하는 것이 요구된다. 하지만 기존 LLAH 서술자의 경우 동일한 서술자 생성 방법을 이용하여 각 과정에서 요구되는 적절한 서술자 생성이 어려우며, 그로 인해 추적의 정확성이 떨어지는 문제점이 있다.






본 연구에서는 그림 34와 같이 서술자 등록 과정에서 마커 특징점의 인접한 특징 수를 줄이며, 서술자 검색 과정에서 영상 특징점의 인접한 특징 수를 늘리는 방법을 제안한다. 이 방법은 영상의 특징 잡음에 대한 추적 성능의 유연성을 높이고, 정확한 추적 결과를 제공한다. 또한, 검색 과정에서 수행되는 특징 서술자 간의 비교 연산을 제어하여 기존의 LLAH 서술자보다 적은 비교 연산을 수행할 수 있다. 식 5.7은 서술자 검색을 위해 수행되는 특징 서술자 간의 비교 연산량의 총 합을 나타낸다.

comparison operation amount_i = $M(p^{marker} \cdot {}_{n}C_{m})(p^{image} \cdot {}_{k}C_{m})$ (4 5.7)

여기서 M은 추적에 활용되는 등록된 마커의 개수를 의미하며, p^{marker}는 각 마커의 특징점 개수, p^{image}는 i번째 영상에서 얻어진 영상 특징점의 개수를 의미한다. n과 k 는 특징점의 서술자 생성을 위해 지정된 마커 특징점과 영상 특징점의 인접한 특징 수를 나타내며, m 은 인접 특징들에 대한 특징 조합 수이다. 마커의 특징점들은 총 _nC_m 개의 서술자를 각각 생성하고, 영상의 특징점들은 총 _kC_m 개의 서술자를 각각 생성한다. 따라서 서술자 검색 과정에서 수행되는 비교 연산량은 마커 및 영상



특징점들의 서술자 생성량에 따라 증가함을 알 수 있다. 표 7과 표 8은 임의의 30개의 특징 정보를 갖는 마커를 기준으로 서술자 등록 및 검색 과정에서 서로 다른 서술자 개수를 생성하였을 때, 검색 과정에서 발생하는 비교 연산량을 보여준다. 서술자 생성 방법에 따른 연산량 비교결과, 마커와 영상의 특징 서술자를 동일하게 생성하는 기존 LLAH 서술자 방법에 비해 비교 연산 횟수가 개선된 것을 확인할 수 있다. 하지만 서술자 검색에 요구되는 소요시간이 극히 짧기 때문에 실제 추적 시간에 대한 성능 향상을 기대하기 어려운 것으로 사료된다.

		영상 특징점의 서술자 생성 $k/m(_kC_m)$					
		5/5 (1)	6/5 (6)	7/5 (21)	8/5 (56)	9/5 (126)	10/5 (252)
마커	5/5 (1)	900	5,400	18,900	50,400	113,400	226,800
특징점의	6/5 (6)		32,400	113,400	302,400	680,400	1,360,800
서술자	7/5 (21)			396,900	1,058,400	2,381,400	4,762,800
생성	8/5 (56)				2,822,400	6,350,400	12,700,800
n/m	9/5 (126)					14,288,400	28,576,800
$({}_{n}C_{m})$	10/5 (252)						57,153,600

표 7. 서술자 생성 방법에 따른 연산량 비교 (m = 5)

표 8. 서술자 생성 방법에 따른 연산량 비교 (m=6)

		영상 특징점의 서술자 생성 $k/m(_{_k}C_{_m})$						
		5/5 (1)	6/5 (6)	7/5 (21)	8/5 (56)	9/5 (126)	10/5 (252)	
마커	5/5 (1)	900	6.300	25,200	75,600	189,000	415,800	
특징점의	6/5 (6)		44,100	176,400	529,200	1,323,000	2,910,600	
서술자	7/5 (21)			705,600	2,116,800	5,292,000	11,642,400	
생성	8/5 (56)				6,350,400	15,876,000	34,927,200	
n/m	9/5 (126)					39,690,000	87,318,000	
$({}_{n}C_{m})$	10/5 (252)						192,099,600	



기존 LLAH 서술자에 대한 제안된 방안의 개선 효과를 검증하기 위해 마커 인식률 실험을 수행하였다. 마커 인식률은 마커를 추적하는 과정에서 인식된 대응점의 비율을 말하며, 본 실험에서는 특징 잡음의 증가로 인한 마커 인식률의 변화를 평가하였다. 이를 위해 그림 35와 같이 500×500 의 크기의 영상에 임의의 특징점 50개를 갖는 마커를 지정하고, 영상의 임의의 위치에 특징 잡음(0, 5, 10, 15, 20, 25)을 생성하여 마커 추적을 수행하며, 서술자 등록 및 검색에 활용되는 서술자 생성 파라미터를 조절하여 기존의 LLAH 방법과 제안된 방법의 마커 인식률을 비교 평가하였다. 측정 방법은 특징 잡음의 위치를 매번 랜덤하게 설정하여 각 서술자 생성 파라미터 마다 총 100번 추적을 수행하고, 추적 결과로 얻어진 마커 인식률의 평균을 측정하였다. 서술자 생성 파라미터는 마커 특징점의 인접한 특징 수 n, 영상 특징점의 인접한 특징 수 k, 인접한 특징들에 대한 특징 조합 수 m(5)이며, 기존의 LLAH 방법의 경우 n과 k가 동일한 값을 갖는다.



[그림 35] 연산 효율 및 추적의 정확성 측정을 위해 활용된 특징 정보

실험을 위해 Intel Core(TM) 3.3GHz CPU와 16GB RAM이 내장되어 있는 PC 환경에서 모든 알고리즘에 대한 최적화 및 병렬처리 없이 C/C++로 구현하였고, 영상 처리를 위해 OpenCV [60]를 활용하였다.



lr.	11		영상의	특징점 개	수(특징 잡음	음 개수)	
ĸ	п	50(0)	55(5)	60(10)	65(15)	70(20)	75(25)
6	6	100.0	85.8	67.6	51.0	38.8	28.1
7	6	100.0	96.0	87.6	75.1	62.3	50.0
/	7	98.0	95.7	88.6	76.3	63.4	51.7
	6	100.0	99.3	95.4	89.6	80.5	69.5
8	7	100.0	98.3	95.0	87.1	79.1	68.4
	8	100.0	99.3	93.6	86.4	74.2	63.2
	6	100.0	99.6	97.9	94.7	89.6	82.3
0	7	100.0	99.5	97.5	94.0	87.8	79.1
9	8	100.0	99.9	98.5	93.2	84.5	74.3
	9	100.0	99.2	97.2	92.3	83.5	72.2
	6	100.0	99.7	98.9	96.6	93.9	88.4
	7	100.0	99.9	99.5	97.5	93.5	87.7
10	8	100.0	100.0	99.6	97.4	93.1	86.2
	9	100.0	99.5	99.0	97.3	92.2	84.2
	10	96.0	98.4	98.3	96.0	91.4	83.0

표 9. 서술자 생성 파라미터 설정에 따른 마커 인식률 (%)

Ш

비의

CHOSUN UNIVERSITY



[그림 36] 영상 특징점의 인접한 특징 수 k의 변화에 따른 마커 인식률 그래프



표 9와 그림 36은 서술자 생성 파라미터 설정에 따른 마커 인식률을 나타낸다. 일반적으로 영상의 특징 잡음이 증가할수록 마커 인식률이 감소하며, 서술자 생성 과정에서 마커 특징점의 인접한 특징 수 n이 증가함에 따라 마커 인식률이 증가함을 확인하였다. 또한, 마커 특징점의 인접한 특징 수 n이 동일한 상황에서 제안된 방안의 경우 영상 특징점의 인접한 특징 수 k를 늘림에 따라 기존 LLAH 서술자 방법에 비해 마커 인식률이 향상된 것을 확인하였다. 이는 제안된 방안이 서술자 등록 및 검색 과정에서 요구되는 서술자 정보를 충족함에 따라 마커 인식률이 향상된 것으로 사료된다.



제 6 장 구현, 실험, 그리고 적용

본 장에서는 제안된 하이브리드 추적 방안에 대한 성능과 유용성을 검증하기 위한 시스템 구현,실험,그리고 사용성 평가에 대해 설명한다.

6.1 시스템 구현

본 논문에 제시한 연구내용을 바탕으로 Windows 기반 Visual C++ 2013 개발환경에서 C/C++ 언어를 이용하여 구현하였다. 영상 처리를 위한 라이브러리 OpenCV[60], 3차원 그래픽 처리용 라이브러리 OpenGL 및 GLUT[61], 시스템 병렬화를 위한 OpenMP[56], 카메라 보정 및 가상 모델 증강을 위해 ARToolKit[27]을 활용하였다. 또한, 다층 이진화 방안, I/O 인터페이스를 포함한 환경설정, 시스템 통합 등의 전반적인 시스템을 자체 개발하였다.

하드웨어 구성은 영상 촬영용 스테레오 카메라와 영상 출력용 LED 모니터, IR LEDs로 구성된 IR 마커를 이용하였다. 영상 촬영을 위해 640×480 해상도를 갖는 2대의 동일한 웹캠을 이용하여 실세계 영상과 적외선 영상을 촬영하였다. 적외선 영상 촬영을 위해 카메라에 내장되어 있는 적외선 필터를 제거하고, 가시광선 필터를 삽입하여 IR 카메라를 제작하였다. 또한, 3D 프린터를 이용하여 두 카메라의 광축이 서로 평행한 스테레오 카메라로 제작하고, 두 영상에 대한 변환 관계 및 두 카메라의 물리적 변환 관계를 얻기 위해 스테레오 보정을 수행하였다. 그림 37은 RGB 카메라와 IR 카메라로 구성된 스테레오 카메라와 구현 환경을 나타낸다. IR 마커는 직경 5mm, 빛의 파장 940mn의 IR LEDs를 활용하였고, 3D 프린터를 이용하여 IR 마커의 외관을 하우징(housing)하였다. 그림 38은 제안된 평면 다각형 기반 IR 마커 추적 방법(이하 Polygon_IrMk) 및 LLAH 기반 IR 마커 추적 방법(이하 LLAH_IrMk)의 실험을 위해 구현된 IR 마커를 나타내며, 각 추적 방법의 비교 평가를 위해 ARToolKit의 사각 마커

- 65 -





및 마커리스 추적 기술인 SURF로 등록된 이미지를 부착하였다. 또한, 제안된 방안의 LLAH 서술자를 생성하기 위해 서술자 등록(6/5/4)과 서술자 검색(9/5/4)에 대한 서술자 생성 파라미터를 설정하였다.





(a) Stereo camera (L-RGB, R-IR)(b) Environment for testbed[그림 37] 스테레오 카메라 및 시스템 구현 환경





(a) Marker of Polygon_IrMk with ARToolKit(b) Marker of LLAH_IrMk with SURF[그림 38] 제안된 IR 마커 추적 방안들에 대한 IR 마커 제작





6.2 성능 실험 및 평가

본 연구에서 제안된 추적 방법들의 유용성을 검증하기 위해 성능평가를 수행한다. 성능평가는 기존 추적 방법들과의 비교 실험으로 주변 조명 변화에 따른 추적의 강건성, 추정 자세에 대한 추적의 정확성, 마커 가림 현상에 대한 추적 성능을 평가한다. 제안된 방법들은 형상 정보를 기반으로 마커를 추적하는 평면 다각형 IR 마커 추적 방법과 특징점 정보를 기반으로 마커를 추적하는 LLAH 서술자 IR 마커 추적 방법이 있으며, 각 추적 방법은 ARToolKit의 사각 마커 추적 방법과 마커리스 추적 방법의 접근 방법을 활용하였다. 따라서 본 성능평가에서는 제안된 방법들의 비교 대상으로 마커 기반 추적 방법인 ARToolKit[27]과 마커리스 기반 추적 방법인 SURF[38]를 활용하였다.

6.2.1 추적의 강건성 비교 실험

일반적인 RGB 영상은 주변 조명이 어두울 경우 반사광이 부족하여 카메라에 상이 맺히기 어렵고, 반대로 너무 밝을 경우 강한 반사광으로 인해 영상 정보가 소실되는 현상이 발생한다. 하지만 적외선 센서로부터 획득되는 적외선 영상의 경우 주변 조명 상황에 상관없이 일정한 영상 정보를 제공하기 때문에 RGB 영상의 단점을 보완할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 제안된 방안의 유용성을 평가하기 위해 주변 조명 변화에 따른 추적의 강건성(robustness) 평가를 수행한다. 이를 위해 주변 조명이 어두운 환경에서부터 밝은 환경까지의 전반적인 상황을 고려해야 하지만, 영상 정보를 기반으로 마커를 추적하는 ARToolKit과 SURF의 경우 주변 조명이 너무 밝거나 어두운 상황에서 영상 획득이 불가능함에 따라 비교 평가가 무의미한 것으로 판단하여 일반적인 조명 환경에서 조명의 밝기 강도를 조절하는 상황만을 고려하였다.







[그림 39] Phong의 정반사 모델

조명의 밝기 강도를 조절하기 위해 그림 39와 같이 퐁(Phong) 모델[49,50]을 활용한다. 퐁 모델은 광원으로부터 직접적으로 물체에 들어오는 빛만을 고려한 지역 조명 모델로 반사광 벡터 R 와 시각 벡터 V 가 이루는 각의 크기에 따라 정반사에 의한 반사광의 강도를 식 6.1과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{s} = \frac{E_{p}}{D + D_{0}} K_{s} (\cos \phi)^{n} = \frac{E_{p}}{D + D_{0}} K_{s} (\mathbf{V} \cdot \mathbf{R})^{n}$$

$$K_{s} \quad \text{:a specular reflection constant}$$

$$n \quad \text{:a shininess constant for this material}$$

$$E_{p} \quad \text{:an intensity of light}$$

$$D \quad \text{:a distance between camera and point}$$

$$(4 \ 6.1)$$

여기서 정반사율 K_s , 광원의 강도 E_p , 반사되는 한 점과 카메라와의 거리 D등이 동일한 조건일 경우, 반사광 벡터 R 와 시각 벡터 V 가 이루는 각도 ∅를 이용하여 정반사에 의한 반사광의 강도를 조절한다. 각도 女가 작아질수록 정반사에 의한 빛의 강도가 커지며, 각도 θ가 클수록 정반사에 의한 빛의 강도가 작아짐에 따라 반사광에 대한 영향을 덜 받는다. 이를 활용하여 그림 40과 같이 실험 환경을 구축하였다.



실험 방법은 카메라와 마커가 일정한 거리에 고정되어 있고, 조명 자세를 변화하여 정반사 빛의 강도를 조절하는 상황에서 마커 추적이 원활히 수행되는지를 평가한다. 이를 위해 별도의 조명을 배치하고, 조명의 위치각을 각각 15°, 30°, 45°, 60°, 75°로 변화시켜 반사광의 강도에 따른 마커 인식 여부를 파악하였다. 표 10은 해당 실험 결과를 나타낸다.



(a) Hardware setup for testing object tracking with various light positions.



(b) Experimental setup for object tracking with various light positions. [그림 40] 추적 강건성 비교 실험을 위한 실험 환경 및 실험 방법

- 69 -



Angle of light Method	None	15°	30°	45°	60°	75°
ARToolKit	0	Х	Х	Х	Х	0
Polygon_IrMk	0	0	0	0	0	0
SURF	0		0	0	0	0
LLAH_IrMk	0	0	0	0	0	0

표 10. 다양한 조명 위치에서 물체 추적의 강건성 실험 결과

실험 결과, 적외선 영상을 이용하여 마커를 추적하는 제안된 방법들의 경우 조명의 각도 변화에 따른 조명의 정반사 현상과 상관없이 추적이 가능한 것을 확인하였다. 또한, SURF의 경우 조명의 정반사 현상에 어느 정도 강건성이 있는 것으로 나타났다. 이는 조명 변화에 대한 불변성을 가지는 특징점의 성질과 함께 일부 특징점이 소실되어도 나머지 특징점으로 마커 추적이 가능함에 따라서 추적이 가능한 것으로 사료된다. 하지만 ARToolKit의 경우 조명의 정반사 영향으로 인해 4번의 추적 실패가 관측되었으며, 특히 조명-카메라 간의 각도가 60° 이하인 경우, 강한 조명에 의해 추적이 매우 어려운 것으로 확인하였다. 이 실험을 통해 제안된 추적 방법들이 조명의 변화에 강건함을 확인할 수 있었으며, 아주 어두운 환경에서도 그림 41과 같이 추적되는 것을 확인하였다.



[그림 41] 어두운 주변 환경에서 ARToolKit 및 IR 마커 추적 결과

6.2.2 추적의 정확성 비교 실험

추적의 정확성은 연속된 영상 이미지에서 마커의 자세를 정확하고 일관되게 추적하는 것을 의미하며, 마커의 움직임에 따라 정적인 추적 환경과 동적인 추적 환경에 대한 평가를 수행한다. 마커의 움직임이 없는 정적인 추적 환경에서는 추적 자세의 투영 정확도 및 떨림(jitter)의 정도를 활용하여 평가할 수 있으며, 마커가 움직이는 동적인 추적 환경에서는 마커의 움직임으로 인해 발생되는 모션 블러(motion blur) 현상에 대한 추적 실패 횟수를 활용하여 추적의 정확도를 평가할 수 있다.

[추적 자세의 투영 정확도 및 떨림 정도 비교 실험]

정적인 추적 환경에서 추적 자세의 투영 정확도 및 떨림 정도에 대한 실험 환경은 그림 37(b)와 같이 마커-카메라 간의 위치관계를 정의하고, 마커의 자세를 변화시켜 다양한 자세에서 추적 성능을 평가한다. 이를 위해 그림 42와 같이 마커의 법선 벡터 방향으로 일정한 거리에 카메라를 배치하고, 카메라-마커 수직축 간의 상하각(-30°, 0°, 30°)과 측면각(-30°, 0°, 30°)을 변화시켜 총 9 가지의 마커 자세를 선정하였다. 또한, 비교 실험의 정량적 평가를 위해 그림 43과 같이 마커 좌표계 상의 3차원 위치와 마커 이미지 상의 2차원 위치가 동일한 참조점 p_1 , p_2 , p_3 을 각 추적 방법마다 지정하였다.



[그림 42] 정적인 환경에서 추적의 정확성 평가를 위해 선정된 마커 자세





이론적으로 마커 추적이 정확할 경우 앞서 정의된 점 p_i 에 대한 영상 특징점 p_i^{img} 과 특징 투영점(projection point) p_i^{prj} 은 동일한 영상 좌표를 가지며, 각 점들의 차이를 비교하여 추적 자세의 투영 정확도 및 떨림 정도를 확인할 수 있다. 본 실험에서는 추적 성능을 평가하기 위해 각 자세마다 n(100)개의 연속된 프레임에서 얻어진 영상 특징점들과 특징 투영점들을 이용하여 추적 자세의 정확도와 떨림 정도를 계산한다.

투영 정확도 r_{acc} 는 각 프레임마다 특징 투영점 $p_{i,j}^{prj}$ 과 영상 특징점 $p_{i,j}^{img}$ 간의 거리 오차의 평균을 의미한다. 추적을 통해 얻어진 카메라-마커 간의 변환관계로 계산되는 특징 투영점이 실제 영상 특징점과 다른지를 평가하는 척도로 식 6.2과 같이 계산된다.

$$r_{acc} = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{n} \left\| p_{i,j}^{prj} - p_{i,j}^{img} \right\|$$
 (A) 6.2)

떨림 정도 r_{jit} 는 각 특징 투영점 $p_{i,j}^{prj}$ 과 특징 투영점들의 평균점 $\overline{p}_{i,j}^{prj}$ 간의 거리 오차의 평균을 의미하며, 추적 자세의 떨림 정도를 평가하는 척도로 식 6.3과 같이 계산된다.

$$r_{jit} = \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{n} \left\| p_{i,j}^{prj} - \overline{p}_{i}^{prj} \right\|, \quad \overline{p}_{i}^{prj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} p_{i,j}^{prj} \tag{A} 6.3$$



	Yaw	3	0°	()°	-3	60°
Pitch		Avg	Std. Dev	Avg	Std. Dev	Avg	Std. Dev
	30°	1.605	0.383	1.510	0.276	1.608	0.286
ARToolKit	0°	1.499	0.520	1.083	0.259	1.294	0.610
	-30°	1.063	0.324	0.919	0.412	1.029	0.192
	30°	0.139	0.111	0.224	0.164	0.261	0.141
Polygon IrMk	0°	0.313	0.129	0.183	0.079	0.353	0.053
IIIVIK	-30°	0.219	0.090	0.258	0.127	0.214	0.079
	30°	4.054	4.165	8.175	4.370	9.011	23.090
SURF	0°	1.216	1.056	8.953	1.350	7.794	3.160
	-30°	6.243	14.612	4.032	3.375	9.018	17.479
LLAH IrMk	30°	0.000	0.000	0.094	1.635	0.000	0.000
	0°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	-30°	0.098	1.692	0.147	2.549	0.147	1.799

표 11. 마커 추적 방법들에 대한 정확도 평가 결과

표 11은 각 측정 자세에 대한 마커 추적 방법들의 평균 투영 정확도와 표준편차를 나타낸다. 투영 정확도를 평가한 결과,LLAH_IrMk > Polygon_IrMk > ARToolKit > SURF 순으로 추적 자세에 대한 투영 정확도가 우수한 것으로 나타났다. 제안된 방법들의 경우 적외선 영상의 IR LEDs의 광원의 중심점을 활용함에 따라 정확한 특징점의 위치를 계산할 수 있는 반면에 영상 기반 추적 방법(ARToolKit, SURF)의 경우 픽셀 단위의 특징 좌표로 인해 투영 정확도가 떨어지는 것으로 사료되며, 특히 SURF의 경우 매 순간 검출되는 대응점 정보가 다름에 따라 불안정한 자세를 추정하는 것으로 사료된다. 실험 결과에 대한 마커 추적 방법들의 차이가 통계적으로 유의한지를 평가하기 위해 SPSS[51]를 활용한 집단 간의 평균의 차이를 분석하였다. 본 실험에서는 추적에 활용된 특징정보(도형, 특징점)에 따라 ARToolKit & Polygon_IrMk, SURF & LLAH_IrMk에 대한 각각의 T-검정을 수행하였다. 표 12, 표 13은 각 평가 결과의 평균값에 대한 차이 유무를 검증하기 위해 유의수준 1%의 t-검정을 실시한

- 73 -





가정하였다.

Yaw	30°		0°		-30°	
Pitch	T-value	p-value	T-value	p-value	T-value	p-value
30°	63.632	0.000	69.482	0.000	73.292	0.000
0°	38.319	0.000	57.564	0.000	26.629	0.000
-30°	43.517	0.000	26.558	0.000	67.966	0.000

표 12. ARToolKit과 Polygon_IrMk의 투영 정확도에 대한 t-검정 결과

표 13. SURF과 LLAH_IrMk의 투영 정확도에 대한 t-검정 결과

Yaw	30°		0°		-30°	
Pitch	T-value	p-value	T-value	p-value	T-value	p-value
30°	16.859	0.000	29.997	0.000	6.760	0.000
0°	19.952	0.000	114.838	0.000	42.714	0.000
-30°	7.236	0.000	15.907	0.000	8.744	0.000

ARToolKit & Polygon_IrMk, SURF & LLAH_IrMk의 추적 자세의 투영 정확도에 대한 T-검정 결과, 모든 자세에 대한 p-값이 유의 수준 0.01보다 낮음을 확인하였다. 따라서 추적에 활용된 특징정보에 따른 기존 추적 방법과 제안된 추적 방법 간의 투영 정확도의 평균값이 통계적으로 차이가 있음을 확인하였다.



	Yaw	3	0°	()°	-3	60°
Pitch		Avg	Std. Dev	Avg	Std. Dev	Avg	Std. Dev
	30°	0.241	0.145	0.310	0.164	0.287	0.166
ARToolKit	0°	0.205	0.130	0.177	0.116	0.287	0.180
	-30°	0.366	0.195	0.290	0.161	0.224	0.154
	30°	0.046	0.272	0.067	0.044	0.033	0.017
Polygon IrMk	0°	0.052	0.045	0.023	0.016	0.071	0.038
IIIVIK	-30°	0.035	0.022	0.068	0.043	0.055	0.028
	30°	1.816	1.970	2.389	2.217	5.057	22.946
SURF	0°	0.572	0.480	0.620	0.663	1.050	1.133
	-30°	4.375	14.708	0.995	0.676	4.339	17.089
LLAH IrMk	30°	0.059	0.054	0.031	0.258	0.069	0.042
	0°	0.037	0.024	0.111	0.101	0.166	0.210
	-30°	0.031	0.037	0.039	0.045	0.359	0.280

표 14. 마커 추적 방법들에 대한 떨림 정도 평가 결과

표 14는 각 측정 자세에 대한 마커 추적 방법들의 평균 평균 떨림 정도와 표준편차를 나타낸다. 떨림 정도를 평가한 결과, LLAH_IrMk = Polygon_IrMk > ARToolKit > SURF 순으로 추적 자세에 대한 떨림 정도가 낮은 것으로 나타났다. 실험 결과에 대한 마커 추적 방법들의 차이가 통계적으로 유의한지를 평가하기 위해 투영 정확도와 동일한 방법으로 집단 간의 평균의 차이를 분석하였고, 표 15, 표 16은 각각의 T-검정 결과를 나타낸다.

표 15. ARToolKit과 Polygon_IrMk의 떨림 정도에 대한 t-검정 결과

Yaw	30°		()°	-30°	
Pitch	T-value	p-value	T-value	p-value	T-value	p-value
30°	22.794	0.000	24.795	0.000	26.216	0.000
0°	19.210	0.000	22.953	0.000	20.304	0.000
-30°	29.099	0.000	23.026	0.000	18.724	0.000



Yaw	3	0°	0°		-30°	
Pitch	T-value	p-value	T-value	p-value	T-value	p-value
30°	15.442	0.000	18.412	0.000	3.765	0.000
0°	19.284	0.000	13.137	0.000	13.278	0.000
-30°	5.116	0.000	24.441	0.000	4.033	0.000

표 16. SURF과 LLAH IrMk의 떨림 정도에 대한 t-검정 결과

ARToolKit & Polygon_IrMk, SURF & LLAH_IrMk의 추적 자세의 떨림 정도에 대한 T-검정 결과, 모든 자세에 대한 p-값이 유의 수준 0.01보다 낮음을 확인하였다. 따라서 추적에 활용된 특징정보에 따른 기존 추적 방법과 제안된 추적 방법 간의 떨림 정도의 평균값이 통계적으로 차이가 있음을 확인하였다.

[동적인 추적 환경에서 추적 결과에 대한 비교 실험]

동적인 추적 환경에서 마커 또는 카메라의 움직임이 빠를 경우 움직인 방향으로 모션 블러 현상이 영상에 발생하게 된다. 모션 블러 현상이란 마커 또는 카메라의 움직임에 의해 화소가 혼합되는 현상을 의미하며, 이로 인해 마커 추적에 활용되는 영상 이미지의 경계가 흐려져 추적이 실패하거나, 부정확한 추적 결과를 도출한다. 이 현상은 영상 기반 추적 방법에서 빈번히 발생됨에 따라 안정적인 추적 환경을 방해하는 요인으로 인식되고 있다. 본 실험에서는 모션 블러 현상을 재현하고, 각 추적 방법에 대한 추적 결과를 비교 평가하였다. 실험 방법은 고정된 카메라 영상에서 일정한 마커 움직임에 대한 *n*(200) 프레임 영상을 촬영하고, 각 추적 방법들에 대한 수행 시간과 인식 실패 횟수를 고려하여 추적의 결과를 평가하였다. 동일한 움직임에 대한 추적 성능을 평가하기 위해 그림 38과 같이 마커를 배치하여 실험을 수행하였다. 표 17과 표 18은 각 추적 방안들에 대한 동적인 마커 추적 환경에서의 평균 수행 시간과 총 인식 실패 횟수를 나타낸다.



	평균 수행 시간 (frame/sec)	총 인식 실패 횟수
ARToolKit	60.276	110
Polygon_IrMk	51.690	29

표 17. 동적인 추적 환경에서 ARToolKit과 Polygon IrMk에 대한 추적 결과

표 18. 동적인 추적 환경에서 SURF과 LLAH IrMk에 대한 추적 결과

	평균 수행 시간 (frame/sec)	총 인식 실패 횟수
SURF	9.660	96
LLAH_IrMk	33.389	5

평균 수행 시간의 경우 마커를 추적하는 방법에 따라 수행 시간의 차이가 있으며, ARToolKit > Polygon_IrMk > LLAH_IrMk > SURF 순으로 수행 시간이 빠른 것으로 나타났다. 형상 정보를 기반으로 추적하는 ARToolKit과 Polygon_IrMk의 경우, 단순한 도형(사각형)을 찾는 ARToolKit이 빠르게 수행되는 반면에 적외선 영상의 특징점을 검출하고, 대응점을 찾는 Polygon_IrMk의 방법이 상대적으로 느리게 수행된 것으로 사료된다. 특징점 정보를 기반으로 추적하는 SURF와 LLAH_IrMk의 경우, 특징점 검출 및 특징 서술자 생성 과정에서 상당한 계산이 요구됨에 따라 평균 수행시간이 느려짐을 확인하였다. 하지만 LLAH_IrMk의 경우 SURF의 특징점 검출보다 연산이 빠른 다층 이진화를 이용한 적외선 영상의 특징점 검출 방법을 활용함에 따라 30 FPS 이상의 안정된 추적 연산 속도를 제공하는 것을 확인할 수 있었다.

모션 블러 현상에 대한 마커 인식 실패 횟수의 경우 제안된 방법들(Polygon_IrMk, LLAH_IrMk)이 기존 방법에 비해 월등이 높은 인식률을 나타낸 것을 확인하였다. 이 결과는 복잡한 배경 영상을 포함하는 실세계 영상의 경우 그림 44(a)와 같이 모션 블러 현상이 심하게 발생하여 추적이 실패되는 반면에, 그림 44(b)와 같이 IR LEDs 광원에 대한 적외선 영상의 경우 배경 영상이 포함되지 않아 영상이 단순하며, 영상

- 77 -





특징점을 검출하는 다층 이진화 과정에서 모션 블러 현상이 제거되어 추적이 가능한 것으로 사료된다. 그림 44는 모션 블러 현상에 대한 각 영상과 추적 결과를 나타낸다.







6.2.3 마커 가림에 대한 처리 능력 비교

증강현실 환경에서 사용자 또는 마커 간의 상호작용으로 인해 일부 마커의 특징 정보가 가려지는 마커 가림 현상이 빈번히 발생한다. 마커 가림 현상은 마커를 추적하는 방법, 마커 특징 정보량에 따라 추적 성능에 많은 영향을 미친다. 그 예로 사각 마커 추적 기술은 마커 가림 현상으로 영상에서 사각형 도형을 찾을 수 없어 추적이 실패되지만, 마커리스 추적 기술은 마커 가림 현상으로 일부 마커 영상이 훼손되어도 나머지 영상에서 검출된 특징 정보를 이용하여 추적이 가능하다. 본 실험에서는 마커 가림 현상을 재현하고, 각 추적 방법에 대한 추적 결과를 비교 평가하였다. 실험 방법은 카메라와 마커가 고정된 상황에서 사용자가 인위적으로 마커 가림 현상을 재현하여 추적 결과를 평가하였다.

실험 결과, 형상 정보 기반 추적 방법인 ARToolKit과 Polygon_IrMk의 경우 마커 가림 현상이 발생되면 추적이 실패하는 것을 확인하였다. 이는 사각형 또는 평면 다각형의 기하적 특성이 사용자의 손에 의해 가려짐에 따라 추적하는 형상과 대응되는 형상을 찾지 못하기 때문으로 사료된다. 하지만 특징점 정보 기반 추적 방법인 SURF와 LLAH_IrMk의 경우 일부 영상 특징 정보가 소실되어도 나머지 대응되는 영상 특징정보를 활용하여 추적이 가능하였다. 그림 45는 마커 가림 현상에 대한 각 추적 방법의 추적 결과를 나타낸다.



- 79 -







6.2.4 제안된 IR 마커 추적 방안들에 대한 고찰

마커 추적 기술은 대응점을 검출하는 방법에 따라 형상 정보 기반과 특징점 정보 기반으로 분류할 수 있다. 형상 정보 기반 추적 방법은 단순한 도형(원형, 사각형)의 꼭지점을 특징점으로 지정하고, 영상에서 도형의 방향과 꼭지점 정보를 이용하여 대응점을 검출하는 방법으로 ARToolKit[27]이 대표적이며, 제안된 평면 다각형 IR 마커 추적 방법을 포함한다. 특징점 정보 기반 추적 방법은 마커의 특징점마다 지정된 서술자 정보를 이용하여 대응점을 검출하는 방법으로 SURF[38] 등이 대표적이며, 제안된 LLAH 서술자를 이용한 IR 마커 추적 방법을 포함한다. 표 19는 대응점 검출 방법에 따른 기존 추적 기술들과 제안된 추적 방법들을 비교·분석한 결과를 나타낸다.

	형상 정보 기반		특징점 정보 기반	
	ARToolKit (마커 추적)	평면 다각형 IR 마커 추적	SURF (마커리스 추적)	LLAH 서술자 IR 마커 추적
추적 기술	영상 기반	하이브리드	영상 기반	하이브리드
입력 정보	실세계	실세계+적외선	실세계	실세계+적외선
마커 형태	사각 마커	IR 마커	이미지	IR 마커
마커 크기	작음	작음	一一一一	一一一一
마커 다양성	바시 미이	중간	는 문 문	바 미 이
비시각화	아 나	는 문	중간	바 미 이
특징 서술자	Х	Х	О	О
추적 정확성	· 문 민	높음	중간	높음
조명 강건성	낮음	는 문	중간	바 미 이
모션 블러	낮음	는 문	낮음	바 미 이
연산 속도	배도 미이	중간	낮음	중간
마커 가림	추적 불가능	추적 불가능	추적 가능	추적 가능

표 19. 제안된 IR 마커 추적 방법과 기존 마커 추적 기술에 대한 비교·분석 결과표

Collection @ chosun

형상 정보 기반 추적 방법은 영상에서 단순한 도형의 형상을 검출하는 방법으로 추적 연산 속도가 빠르지만, 마커 가림 현상으로 도형의 형상이 훼손될 경우 추적이 불가능 한 것이 특징이며, 특징점 정보 기반 추적 방법은 마커의 각 특징점을 독립적으로 식별하기 때문에 일부 특징점 정보가 가려지는 상황에서도 마커 추적이 가능하지만, 특징점 검출 및 특징 서술자 생성에 요구되는 연산량이 증가함에 따라 연산 속도가 상대적으로 느린 단점이 있다. 동일한 범주의 추적 기술을 비교한 결과, 제안된 추적 방법들이 기존 방법들에 비해 대체적으로 비슷하거나 개선된 효과를 제공함을 확인하였다. 특히 LLAH 서술자를 이용한 IR 마커 추적 방법의 경우 기존 마커리스 추적 방법의 특징점 검출 과정 대신에 적외선 영상의 직관적인 특징 정보를 활용하여 특징점 검출을 간소화하였고, 그로 인해 추적 연산 속도를 향상시킬 수 있었다.

아울러 적외선 영상을 활용한 제안된 추적 방법들은 조명 변화에 상관없이 정확하고, 안정된 추적 성능을 제공하며, 부수적으로 적외선 조명을 활용하여 높은 수준의 비시각적 마커 제작이 가능함에 따라 주변 조명 환경 제약으로 인해 적용하기 힘든 다양한 분야에 유용하게 활용될 수 있으리라 사료된다.



- 82 -

6.3 사용성 평가 및 적용

증강현실의 추적기술은 가상 객체의 정확한 위치/자세 추적 결과를 바탕으로 사용자-가상 객체 간의 상호작용을 지원하는 역할을 수행한다. 이러한 상호작용은 사용자에게 가시화 이상의 다양한 정보를 제공할 수 있으며, 증강현실 시스템에 대한 향상된 사실감 및 몰입감을 제공한다. 본 절에서는 제안된 추적 방안들의 대한 상호작용 사례를 구현하여 사용성 평가를 수행하고, 제안된 방안들의 활용 방안에 대하여 고찰한다.

6.3.1 사용성 평가

사용성 평가는 사용자가 각 추적 방법에 대한 상호작용 기술을 체험하고, 각 추적 방법에 대한 사용자의 평가를 종합한다. 실험 방법은 피실험자에게 4개의 난수들로 구성된 숫자열을 제시하여 피실험자로 하여금 증강현실 공간에 5×5 격자로 구성된 가상 버튼을 선택하게 하였고, 이 과정을 각 추적 방법마다 조명이 일정한 환경과 그렇지 않은 환경에서 수행하였다. 평가 방법은 일정한 조명 환경에서 피실험자가 상호작용 작업을 수행하여 소요되는 평균 시간을 측정·평가하고, 조명 환경 변화에 따른 성능 평가를 설문지 작성 및 인터뷰를 병행하여 수행하였다. 시스템 구현은 Park 등[52-55]이 제안한 상호작용 실험 환경을 참고하여 그림 46과 같이 테스트베드 환경을 구현하고, 각 추적 방법의 상호작용을 지원하는 포인터 형태의 상호작용 도구들을 제작하였다. 실험에 참여한 피실험자는 대학생 20명으로 사전에 실험 방법에 대하여 설명하고, 충분한 연습 시간을 제공한 후 실험을 진행하였다.







(a) Testbed environment for user study







(b) ARToolKit(c) Polygon_IrMk(d) LLAH_IrMk[그림 46] 사용성 평가를 위한 실험 환경 및 포인터용 마커들

표 20은 일정한 조명 환경에서 각 추적 방법에 대한 작업 수행 시간과 측정 결과에 대한 분산분석 결과를 나타낸다. 실험 측정 결과 Polygon_IrMk < LLAH_IrMk < ARToolKit 순으로 작업시간이 소폭 감소한 것으로 나타났으나, 분산분석 결과 유의확률이 0.061로 유의수준 (*p*<0.05) 보다 높은 값을 가짐에 따라 일정한 조명환경에서 각 추적 방법에 따른 수행 시간의 평균이 통계적으로 차이가 없음을 확인하였다. 이 결과는 제안된 추적 방안들의 추적 성능이 상호작용 기술 적용에 적합함을 의미한다.

표 20. 각 추적 방법에 대한 작업 수행 시간 측정 및 분산분석 결과

	평균	표준편차	F 값	유의확률
ARToolKit	9.658	1.715		
Polygon_IrMk	9.148	1.465	2.827	.061
LLAH_IrMk	9.545	1.587		



조명 환경 변화에 따른 성능 평가를 위해 표 21과 같이 총 6 문항에 대하여 5점 척도('전혀 그렇지 않다' 1점, '그렇지 않다' 2점, '보통이다' 3점, '그렇다' 4점, '매우 그렇다' 5점)로 구성된 설문지 작성과 인터뷰를 병행하여 사용자의 주관적인 의견을 수집·분석하였다. 설문지의 문항 Q1 ~ Q3은 조명 환경 변화 및 마커 가림에 대한 추적 성능을 평가하며, 문항 Q4 ~ Q6는 각 추적 방법을 지원하는 상호작용 도구의 조작감을 평가한다. 그림 47은 설문을 통한 분석 결과로 각 문항에 대한 평가 결과의 평균과 표준편차를 도표로 나타낸다.

표 21. 설문지 질문 항목

No.	질문 내용
Q1	일정한 조명환경에서 마커 추적이 잘 이뤄지는가?
Q2	주변 조명환경 변화에 강건한 가?
Q3	일정한 조명환경에서 마커가 일부 가려지는 상황에서 잘 작동하는가?
Q4	일정한 조명환경에서 마커 사용에 몰입감(사실감)이 드는가?
Q5	일정한 조명환경에서 상호작용 도구 이용 시 버튼 클릭이 용이한가?
Q6	상호작용 도구의 크기가 적당한가?



Collection @ chosun

문항 Q1은 일정한 조명환경에서 추적 성능에 대한 사용자 평가로 실험에 활용된 모든 추적 방법이 높은 점수를 얻은 것을 확인할 수 있었다. 문항 Q2는 주변 조명환경이 어둡거나 밝은 상황에서 추적의 정확성을 평가하는 항목으로 ARToolKit의 경우 추적의 정확도가 떨어지거나 추적이 실패하는 현상이 빈번히 발생하는 반면에, 주변 조명환경에 영향을 받지 않는 Polygon_IrMk과 LLAH_IrMk의 경우 안정된 추적 성능을 보임에 따라 그 결과가 평가에 반영된 것으로 사료된다. 문항 Q3는 작업 수행 과정에서 마커를 일부 가려지는 현상이 발생될 때, ARToolKit과 Polygon IrMk의 경우 추적이 실패하는 반면에 LLAH_IrMk의 경우 일부 특징점이 가려지더라도 추적이 가능함에 따라 그 결과가 평가 점수에 반영됨을 확인하였다. 추가적으로 ARToolKit의 경우 마커를 직접 가리지 않더라도 그림자에 의해 쉽게 추적이 실패하는 반면에, Polygon IrMk의 경우 그림자에 영향을 받지 않음에 따라 평가에 차이가 있는 것으로 사료된다. 문항 Q4와 문항 Q5는 모든 추적 방법에서 유사한 평가 점수를 확인하였다. 이는 실험에 활용된 각 추적방법의 상호작용 도구의 형태가 유사함에 따라 가상 버튼을 클릭하는 터치감 및 버튼 선택의 정확도에 차이가 없음을 의미한다. 문항 Q6의 평가 결과 ARToolKit과 Polygon IrMk는 마커 크기가 작음에 따라 점수가 높게 평가되었고, 두 추적 방안보다 상대적으로 마커의 크기가 큰 LLAH IrMk는 점수가 낮게 평가되었다. 이는 피실험자와의 인터뷰 결과에서도 지적된 사항으로 마커의 사이즈를 줄일 수 있는 방안에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 그 밖의 인터뷰 내용으로 "프로젝트를 활용하는 강의 환경에서 활용 가능성이 높을 것 같다"는 의견과 함께 "상호작용 도구로 포인터 형태 대신에 착용 가능한 글러브 형태의 도구가 있으면 좋겠다" 등의 추가 의견들이 있었다. 사용성 평가를 종합해 보면 성능 실험 결과와 동일하게 제안된 방안들이 ARToolKit과 유사한 추적 성능을 제공하며, 주변 조명 변화에 강건함을 확인하였다. 특히, LLAH IrMk의 경우 일부 마커 가려짐 현상에서도 추적이 가능하지만, hand-held 방식의 상호작용 도구로 활용하기에 마커의 크기가 다소 큰 단점이 있음을 확인하였다.



6.3.2 적용 사례

Park 등[52-55]은 휴대용 전자제품을 대상으로 제품의 디자인 및 기능 평가를 위해 마커 추적 기술을 활용한 증강현실 기반 가상 품평 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 가상 제품의 사실적인 표현을 위해 감각형 증강현실(tangible AR, TAR) 기술을 적용하며, 자연스러운 사용자 환경 구현을 위해 다양한 연구를 진행하였다. 하지만 품평 과정에서 사용자의 조작으로 인한 마커 가림 현상, 조명의 반사광으로 인해 안정적인 추적 환경을 제공하지 못하는 문제가 빈번히 발생됨에 따라 추적 기술의 개선이 요구된다. 제안된 하이브리드 추적 방안은 기존 영상 기반 추적 방안의 단점을 보완함에 따라 주변 조명 제약으로 인해 적용하기 힘든 다양한 분야에 유용하게 활용될 수 있다. 따라서, 제안된 방안을 증강현실 기반 제품 품평 시스템에 적용하여 앞선 문제점을 해결해 보았다.

제안된 방안을 활용한 제품 품평 시스템 구현을 위해 PMP 모델을 선정하였다. 품평 과정에서 마커 가림 현상이 빈번히 발생하는 제품용 오브젝트의 추적을 위해 LLAH 서술자를 이용한 IR 마커 추적 방법을 활용하였고, 조작의 편의성 및 상호작용의 정확성을 위해 평면 다각형을 활용한 IR 마커 추적 방법을 활용하였다. 시스템 개발을 위해 Windows 기반 Visual C++ 2013 개발환경에서 C/C++ 언어를 이용하여 증강현실 기반 가상디자인 품평 테스트베드를 구현하였고, 영상 처리를 위한 라이브러리 OpenCV[60], 3차원 그래픽 처리용 라이브러리 OpenGL 및 GLUT[61], 시스템 병렬화를 위한 OpenMP[56], 카메라 보정 및 가상 모델 증강을 위해 ARToolKit[27]을 활용하였다. 제품에 기능모델 및 유한상태기계(finite state machine, FSM) 생성을 위해 XML 기반의 HMI 행동양태 모델을 활용[62]하였다. 또한, RP(rapid prototyping) 제작을 위해 MakerBot[63]사의 3D 프린트인 ReplicatorTM 2X를 활용하였다. 그림 48은 구현된 시스템 환경을 나타낸다.







(a) Environment for AR-based virtual prototyping





(b) Tangible objects with ARToolkit markers(c) Tangible objects with IR markers[그림 48] PMP 모델에 대한 품평 시스템 구현 환경

그림 49는 Park 등이 제안한 PMP 모델에 대한 품평 과정을 나타내며, 그림 50은 제안된 방안을 활용하여 마커 가림 및 어두운 조명 환경에서 PMP 모델에 대한 품평 결과를 나타낸다. 품평 환경은 일정한 밝기의 실내 조명과 함께 강한 조명을 생성하기 위한 스텐드로 구성되어 있으며, 품평 과정에 인위적으로 마커 가림 현상을 발생시켜 각 품평 결과를 비교하였다. 비교 결과, Park 등이 제안한 품평 시스템의 경우 조명의 밝기 변화, 위치에 따라 영상에서 마커가 소실되거나 마커를 인식하지 못하는 현상이 발생하였고, 마커가 가려질 경우에도 마찬가지로 추적이 실패하였다. 이와는 반대로 제안된 방안이 적용된 품평 시스템의 경우 조명의 밝기 변화, 위치에 상관없이 일정한 적외선 영상을 촬영함에 따라 동일한 추적 결과를 제공하며, 마커 가림 현상에서도 인식된 나머지 특징 정보를 이용하여 추적함을 확인하였다. 이를 통해 제안된 방안이 기존 영상 기반 추적 기술과 동일한 추적 성능을 제공하며, 마커 가림 및 주변 조명







(a) Real image



(c) Real image in a high intensity lighting situation



(b) Augmented view of the image (a)



(d) Augmented view of the image (c)



(e) Real image with partial occlusion of markers [그림 49] ARToolkit을 활용한 제품 품평 결과 [54]



(f) Augmented view of the image (e)







(a) Real image



(c) Real image in a low intensity lighting situation



(e) Real image with partial occlusion of markers [그림 50] 제안된 하이브리드 추적 방안을 활용한 제품 품평 결과



(b) Augmented view of the image (a)



(d) Augmented view of the image (c)









제 7 장 결론 및 토의

효과적인 증강현실 시스템을 구현하기 위해서는 사실적인 시각화와 상호작용이 요구된다. 이를 위해 정확한 사용자 위치 및 시점을 추적하는 추적 기술이 중요한 이슈가 되고 있다. 일반적인 객체 추적에서는 RGB 영상에서 마커 또는 이미지의 특징점을 추적하는 방법이 주로 활용되고 있지만, RGB 영상 기반 추적은 영상 잡음과 조명 변화에 민감하게 반응함에 따라 강건하고 정확한 추적 성능을 제공하지 못하는 실정이다.

본 논문에서는 증강현실 환경에서 적외선 센서 기술을 활용한 비시각 마커를 사용하여 주변 조명 변화 및 마커 가림 현상에 대해 강건하고, 정확한 하이브리드 기반 객체 추적 방안을 제안하였다. 제안된 방안은 IR LEDs로 구성된 IR 마커와 적외선 카메라가 포함된 스테레오 카메라를 활용하며, 기술 개발에 필요한 두 가지 요소기술로 적외선 영상의 특징점 검출과 IR 마커 인식 방법들을 제안하였다.

제안된 다층 이진화 방법은 적외선 영상에서 여러 임계 값에 대해 얻어진 영상 윤곽선을 활용하는 방법으로 영상 경계가 명확하지 않고, 조명 밝기가 서로 다른 IR LEDs 광원의 경계를 검출하고, 광원의 중심점을 계산하여 적외선 영상의 특징점 정보로 활용하였다. 제안된 IR 마커 인식 방안에서는 투영 변환 및 아핀 변환에 불변하는 기하적 성질을 활용하여 IR 마커를 인식하는 두 가지 방안을 제안하였다. 첫째, 두 개의 단순한 모양의 다각형으로 구성된 평면 다각형들의 정점들에 대한 기하적 관계를 이용한 IR 마커 추적 방법을 제안하였다. 이 방법은 평면 다각형에 대한 기하적 관계를 정의하여 평면 다각형의 대응점 후보군들을 찾고, 두 개의 삼각형의 면적비가 아핀 변환에 보존되는 특성을 이용하여 IR 마커와 대응되는 영상 특징점을 결정하였다. 둘째, 개선된 LLAH 서술자를 이용한 IR 마커 추적 방법을

- 91 -





제안하였다. 이 방법은 특징 잡음으로 인해 오인식이 자주 발생하는 기존 LLAH 서술자 추적 방법을 적은 수의 특징 정보만으로 강건한 추적이 가능 하도록 개선하여 IR 마커 추적에 활용하였다.

본 연구에서 제안된 추적 방안을 구현하고, 기존 마커 추적 방안과의 성능 평가를 수행하여 제안된 방안의 유용성을 확인하였고, 제안된 방안이 기존 영상 기반 추적 방안의 단점을 보완할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 방안은 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 영상 잡음이 적은 적외선 영상을 활용함으로써 추적 과정에서 발생되는
 오인식을 줄이며, 주변 조명 환경에 상관없이 안정된 추적을 제공한다.
- IR LEDs를 이용하여 완전한 비시각 마커를 제작함으로써 사용자의 몰입감을 높였으며, 마커리스 추적기술을 접목하여 상호작용 과정에서 발생하는 마커 가림 현상을 해결한다.
- 박물관, 영화관 등과 같이 저조도 환경 또는 전시회 등의 고조도 환경과 같이 기존 추적 기술을 적용하기 힘든 주변 조명 환경에서 정확하고 안정된 객체 추적할 수 있어 다양한 분야에 활용될 수 있다.

아울러, 제안된 방안은 어두운 환경에서 프로젝터를 활용하여 실제 객체에 영상을 투사하는 공간 증강현실(spatial augmented reality, SAR) 응용에서도 활용될 수 있으리라 기대한다.

최근 적외선 카메라가 내장된 스마트폰 및 기기에 부착할 수 있는 적외선 카메라가 시판됨에 따라 제안된 방안의 활용도가 높아지고 있지만, 제안된 방안을 일반 PC에 비해 상대적으로 낮은 사양의 스마트폰 환경에서 구현하기는 어려운 실정이다. 이를

- 92 -





위해 다층 이진화의 최적 파라미터 값 결정 및 CPU-GPU를 병행하는 병렬 연산 방법과 함께 추적 과정에서 수행되는 서술자 생성 및 검색 과정에 대한 GPU 활용 방법에 대한 연구를 향후 지속적으로 수행할 예정이다.





참고문헌

1. Azuma, R. T., 1997, A survey of augmented reality, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), pp. 355-385.

2. Milgram, P. and Kishino, A. F., 1994, Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, IEICE Transactions on Information Systems, 77(12).

3. Zhou, F., Duh, H. B. L., and Billinghurst, M., 2008, Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. In Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, IEEE Computer Society, pp. 193-202.

4. Kim, K., Billinghurst, M., Bruder, G., Duh, H. B. L., & Welch, G. F., 2018, Revisiting Trends in Augmented Reality Research: A Review of the 2nd Decade of ISMAR (2008–2017), IEEE transactions on visualization and computer graphics, 24(11), 2947-2962.

4. Van Krevelen, D. W. F., and Ronald Poelman, 2010, A survey of augmented reality technologies, applications and limitations, International journal of virtual reality, 9(2), pp. 1-21.

5. Lepetit, V., & Fua, P., 2005, Monocular model-based 3d tracking of rigid objects: A survey, Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision, 1(1), pp. 1-89.







6. Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G., 2015, A survey of augmented reality. Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction, 8(2-3), 73-272.

 Papagiannakis, G., Singh, G., & Magnenat-Thalmann, N., 2008, A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems, Computer Animation and Virtual Worlds, 19(1), pp. 3-22.

8. Foxlin, E., 2002, Motion tracking requirements and technologies, Handbook of virtual environment technology, chapter 8, pp. 163-210.

9. Tenmoku, R., Kanbara, M., & Yokoya, N., 2003, A wearable augmented reality system using positioning infrastructures and a pedometer.

 Teichrieb, V., do Monte Lima, J. P. S., Apolinário, E. L., de Farias, T. S. M. C., Bueno, M. A. S., Kelner, J., & Santos, I. H., 2007, A survey of online monocular markerless augmented reality, International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry, 1(1).

11. Sutherland, I. E., 1968, A head-mounted three dimensional display, In Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I, ACM, pp. 757-764.

12. Caudell, T., 1990, AR at boeing, 2002-07-10 [2014-11-02], ht-tp://www, idemployee, id. tue. nl/gwm rauterberg/presenta-tions/hci-history/sld096, htm.






13. Gartner, 2017, Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2018, https://www.gartner.com.

14. 양희태, 2017, [미국] 가트너가 발표한 10 대 전략기술 트렌드 및 미래 전망, 과학기술정책, 27(11), pp.4-9.

15. ARCore, https://developers.google.com.

16. 이주행, 2013, 프로젝터를 이용한 사용자 상호작용 기술, 한국 CDE 학회지, 19(2), pp.18-21.

17. Kinect, https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect

18. LeapMotion, https://www.leapmotion.com/

19. 박홍석, 최흥원, 2008, 제품설계를 위한 신 협력 툴로써의 AR 기술, CAD&Graphics 2008/6, pp.194-197.

20. Supan, P., & Stuppacher, I., 2006, Interactive image based lighting in augmented reality, In Central European Seminar on Computer Graphics, 17.







21. Mehta, D., et al., 2017, Vnect: Real-time 3d human pose estimation with a single rgb camera, ACM Transactions on Graphics(TOG), 36(4).

22. Ask Mercedes, https://www.vuforia.com/case-studies/daimler.html.

23. Rekimoto, J., 1998, Matrix: A realtime object identification and registration method for augmented reality, In Computer Human Interaction, 1998, Proceedings. 3rd Asia Pacific, IEEE, pp. 63-68.

24. Kato, H., & Billinghurst, M., 1999, Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, In Augmented Reality, 1999.(IWAR'99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on, IEEE. pp.85-94.

25. Kato, H., Billinghurst, M., 2000, Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment, In proceedings of the International Symposium on Augmented Reality(ISAR), pp.111-119.

26. ARToolKit, https://artoolkit.org.

27. Fiala, M., 2005, ARTag, a fiducial marker system using digital techniques, In Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, CVPR 2005, IEEE Computer Society Conference on, IEEE, 2, pp. 590-596.

28. ARToolKitPlus, https://launchpad.net/artoolkitplus.

29. Vuforia, https://www.vuforia.com.





30. Davison, A. J., Reid, I. D., Molton, N. D., & Stasse, O., 2007, MonoSLAM: Real-time single camera SLAM, IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, (6), pp. 1052-1067.

31. Kang, W., & Eiho, S., 2007, 3D tracking using 2D-3D line segment correspondence and 2d point motion, In Advances in Computer Graphics and Computer Vision, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 367-380.

32. Harris, C., & Stephens, M., 1988, A combined corner and edge detector, In Alvey vision conference, 15(50), pp. 10-5244.

33. Shi, J., & Tomasi, C., 1993, Good features to track, Cornell University.

34. Lowe, D. G., 2004, Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International journal of computer vision, 60(2), 91-110.

35. Rosten, E., & Drummond, T., 2006, Machine learning for high-speed corner detection, In European conference on computer vision, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 430-443.

36. Lowe, D. G., 1999, Object recognition from local scale-invariant features, In Computer vision, 1999, The proceedings of the seventh IEEE international conference on, IEEE, 2, pp. 1150-1157.

37. Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L., 2006, Surf: Speeded up robust features, In European conference on computer vision, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 404-417.

38. Calonder, M., Lepetit, V., Strecha, C., & Fua, P., 2010, BRIEF: Binary robust independent elementary features, In European conference on computer vision, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 778-792.





39. Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G., 2011, ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, In Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE international conference on, IEEE, pp. 2564-2571.

40. Nakai, T., Kise, K., & Iwamura, M., 2006, Use of affine invariants in locally likely arrangement hashing for camera-based document image retrieval, In International Workshop on Document Analysis Systems, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 541-552.

41. Welch, G., Bishop, G., Vicci, L., Brumback, S. and Keller, K., 1999, The HiBall Tracker: High-Performance Wide-area Tracking for Virtual and Augmented Environments. Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. ACM, pp.1-11.

42. Advanced Real-time Tracking (ART), http://www.ar-tracking.com.

43. 김병기, 고영웅, 송창근, 장재혁, 2010, 적외선 카메라와 웹 카메라를 이용한 마커 트래킹 시스템, 정보과학회논문지 : 컴퓨팅의 실제 및 레터, 16(7), pp.753-758.

44. Park, H. and Park, J., 2014, Invisible Marker-Based Augmented Reality, International Journal of Human–Computer Interaction, 26(9), pp.829-848.

45. https://en.wikipedia.org/wiki/Affine_transformation.

46. Iwamura, M., Nakai, T., & Kise, K., 2007, Improvement of Retrieval Speed and Required Amount of Memory for Geometric Hashing by Combining Local Invariants, In BMVC, pp. 1-10.

47. Uchiyama, H., & Saito, H., 2011, Random dot markers. In Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE, pp. 35-38.





48. Lee, K., 1999, Principles of CAD/CAM/CAE Systems, Addison Wesley, Berkeley.

49. https://en.wikipedia.org/wiki/Phong_reflection_model.

50. SPSS, http://www.ibm.com/analytics/us/en/technology/spss.

51. Park, H., Moon, H. C., Lee, J. Y., 2009, Tangible augmented prototyping of digital handheld products, Computers in Industry, 60(2), pp. 114-125.

52. Park, H., Son, J. S., & Lee, K. H., 2008, Design evaluation of digital consumer products using virtual reality-based functional behaviour simulation. Journal of Engineering Design, 19(4), 359-375.

53. Park, H., & Moon, H. C., 2013, Design evaluation of information appliances using augmented reality-based tangible interaction. Computers in Industry, 64(7), pp.854-868.

54. Park, H., Park, S. J., Jung, H. K., 2013, Note on tangible interaction using paper models for AR-based design evaluation. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 7(5), 827-835.

55. OpenMP, https://www.openmp.org.

56. MPI(message passing interface), https://www.mpi-forum.org.

57. GPGPU(general purpose GPU), https://en.wikipedia.org/wiki/General-purpose_computing_on _graphics_processing_units.







58. CUDA(compute unified device architecture), https://developer.nvidia.com/computeworks.

59. OpenCV, http://opencv.org.

60. Open GL and GLUT, http://www.opengl.org.

61. 정호균, 박형준, 2015, XML을 이용한 3D 가상 제품의 HMI 행동양태 모델링과 시뮬 레이션 방안, 한국 CDE 학회 논문집, 20(1), pp.75-83.

62. MakerBot, https://www.makerbot.com.

