

3차원 이미징 미래기술 전망 및 응용 분야

□ 백준기, 최중수, 고성제, 호요성, 장우석, 이춘식, 이주한, 이승구, 하재석
/ 중앙대학교 영상학과, 고려대학교 전기전자전파공학부, 광주과학기술원 정보통신공학과, 중앙대학교 물리학과, 한국생명공학연구원

요약

본 논문은 거리 및 밝기 정보의 동시 획득과 처리, 다시점 기하학적 해석 (multi-view geometry analysis), 다시점 영상 모델 및 압축과 같은 3차원 (three-dimensional: 3D) 이미징 핵심 기술을 기반으로: (i) 3D 영상 콘텐츠 (photographic image)를 제작하는데 필요한 3D 카메라 입력장치와 교정(calibration)/합성/렌더링, (ii) 나노 스케일 및 고감도 핵영상 분석에 필요한 영상분할, 객체 모델링 및 해석, 그리고 (iii) 3D 시뮬레이션 및 가시화 기술의 전망 및 응용 분야를 소개한다.

1. 서론

영상 기술의 발달로 인하여 기존의 2D 영상을 뛰어넘어 지금은 3D 영상까지 볼 수 있는 기술의 상업화가 활발히 진행되고 있다. 기존의 브라운관, PDP,

LCD, LED TV 등을 이용한 영상 및 콘텐츠 산업은 이제 포화 상태가 되어가고 있으며 이에 대한 돌파구로 3D 콘텐츠를 표현할 수 있는 3DTV 개발에 많은 기술력이 집중되고 있다. 경제적인 면을 보면 3DTV가 2010년 680만대에서 2015년까지 연평균 90% 이상의 성장이 예측되는 시점에서 국내 3DTV 제조, 방송, 통신, 영화 산업의 기술 경쟁력 우위를 확보할 수 있는 요소기술과 응용기술 개발에 많은 인력과 시간이 투자되고 있다. 이러한 3DTV에서 사용되는 콘텐츠는 기존의 방식으로 촬영되고 편집해서 사용하는데 한계가 있는데, 이를 개선하기 위해 3D 기술 및 콘텐츠 개발에 많은 노력이 이루어지고 있다.

3D 영상이라고 하면 일반적으로 생각하는 것이 입체감이라 할 수 있는데 이 입체감을 살리기 위해

※ 본 연구는 서울시산학협력사업 (서울미래형콘텐츠컨버전스클러스터, 과제번호 10550), 한국연구재단 대학중점연구소지원사업 (2009-0093817), 교육과학기술부 원자력기초공동연구소 지원사업 및 한국생명공학연구원의 KRIBB Initiative Program 지원으로 수행되었습니다.

서는 영상의 깊이 정보를 취득하고 활용하는 것이 가장 중요하다. 영상을 여러 시점에서 보는 경우, 시점의 방향에 대한 서로 다른 영상의 입체감이 표현되어야 한다. 하드웨어 적으로 나누어 보면 3D로 구성된 영상들이 제작, 전송되어 이를 보여줄 수 있는 디스플레이 장치 개발이 필요하다.

영상에서 3D 정보는 영상의 깊이 정보를 추정하고 이에 맞게 3D 객체를 재구성해서 만들어내는 것이 중요한 기술이다. 컴퓨터시각 분야에서는 오래전부터 관련 연구가 수행되었는데, 이들 중에서 2D 영상을 이용하여 3D 정보를 취득하기 위한 카메라 정보 취득 기술, 영상의 2D-3D 사영 관계 도출 방법, 영상의 깊이 정보 도출 방법, 카메라 추적 기술 개발 및 개선 방법, 영상의 3D 합성 등이 성공적으로 수행되었다[1]. 이외에도 카메라에서 연속적으로 촬영된 카메라 영상으로부터 3차원 장면 정보를 추정하는 다음 3D 영상의 합성 및 재구성이 가능하게 되었고, 이를 영상 콘텐츠 생성/합성에 이용하기 위한 기술, 회전 영상을 이용하여 전방향 3D 재구성을 통

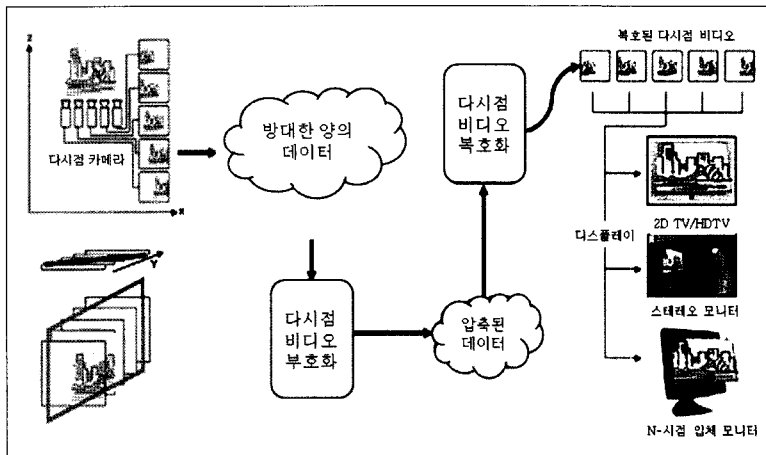
한 콘텐츠 제작 기술 등 2D 영상 기반의 3D 추정에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

동시에 의료기기 분야에서 가장 큰 시장으로 알려져 있는 핵의학용 영상기기 산업의 경쟁력을 담보할 수 있는 컴프턴 카메라 분석용 원천기술과 생명공학 및 신약개발 사업에 필수적으로 사용되는 미래기술인 라이브 셀 이미징 분야도 3D 이미징의 중요한 응용 분야이다.

본 논문에서는 3차원 영상 데이터의 입력, 전송, 저장 및 디스플레이 등 일련의 배급과정에 필수적인 다시점 부호화 기술을 소개한 후, 3차원 공간 분석 기술 및 이를 모바일 증강현실에 응용 전망을 제시하고, 감마선 핵영상 및 라이브 세포 이미징 분야에서 3D 이미징을 사용한 새로운 패러다임을 제시한다.

II. 다시점 비디오 부호화

다시점 비디오 시스템은 인접한 여러 대의 카메라

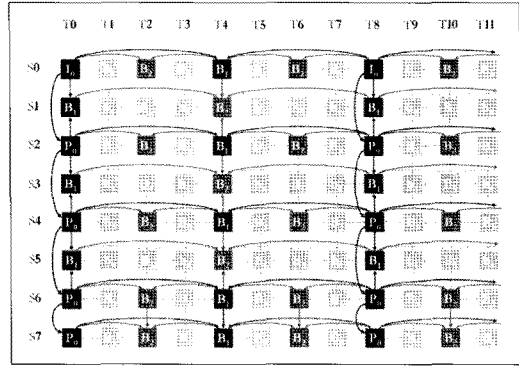


<그림 1> 다시점 비디오 시스템

를 이용하여 촬영된 다시점 영상을 획득하고 부호화하여 전송한 뒤에, 수신 단에서 재생 환경에 따라 2차원 혹은 3차원 영상으로 재생하는 시스템이다. 다시점 비디오는 사용자에게 자유로운 시청 시점과 넓은 화면을 통한 사실감 나는 입체정보를 제공할 수 있지만, 시점의 수에 비례하여 데이터 량이 증가한다는 단점이 있다. 따라서 방대한 양의 다시점 비디오 데이터를 효율적으로 압축하는 다시점 비디오 부호화 기술이 필요하다[2]. 그림 1은 일반적인 다시점 비디오 시스템의 개념도를 보여준다.

다시점 비디오 부호화는 H.264/AVC 표준을 기반으로 인접한 영상 사이의 중복성을 제거하여 압축 효율을 높인다. 이를 위한 계층적 B 화면과 시점간 예측을 이용하는 예측 구조를 그림 2에 보인다.

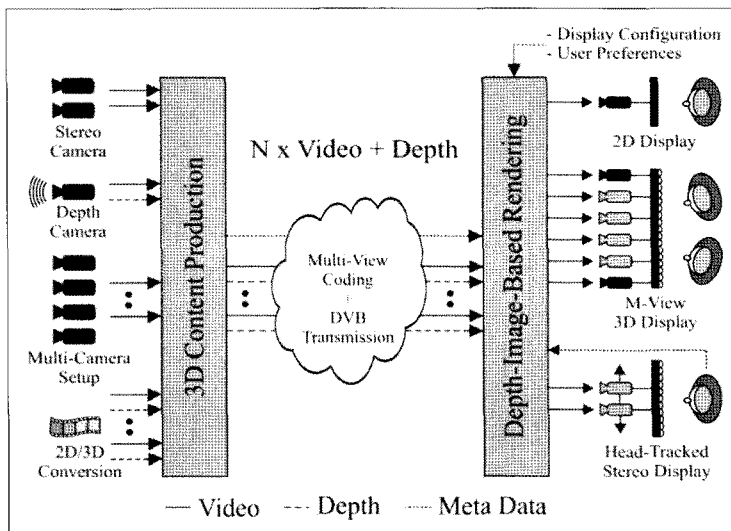
다시점 비디오 부호화 기술을 기반으로 3차원 비디오 시스템은 다시점 비디오의 색상 정보와 깊이 맵을 입력 데이터로 받는다[3]. 그림 3은 3차원 비디오 시스템의 개념도를 보이는데, 여기서 데이터 전송을 위해 다시점 비디오 부호화 방법을 일부 이



〈그림 2〉 다시점 비디오 부호화의 시공간 예측 구조

용한다. 3차원 비디오 시스템에서는 전송된 데이터를 가지고 사용자가 원하는 임의의 시점의 영상을 생성할 수도 있어야 하며, 이를 위해 가상 시점의 중간 영상을 보간하는 시점 합성 (view synthesis) 기능을 포함한다.

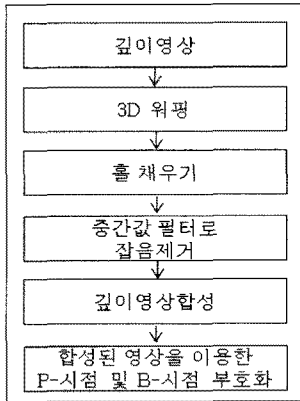
다시점 비디오 부호화의 표준화 기술로 움직임 예측/보상 과정에서 매크로블록 단위로 조명을 보상해주고, 이로 인해 발생하는 블록킹 현상을 줄이기 위



〈그림 3〉 3D 비디오 시스템

해 경계 부분에 대한 필터의 강도를 조정하는 필터링 기술이 필요하다. 또한, 움직임 정보 생략 모드가 선택되었을 때 매크로블록 모드, 참조 인덱스, 움직임 벡터와 같은 움직임 관련 정보를 직접 부호화하지 않고 인접하는 시점의 상응 매크로블록의 움직임 정보로 대체하는 움직임 정보 생략 방법이 있다. 이러한 기술은 다시점 비디오 부호화의 참조 소프트웨어인 JMVM에 구현되어 있다.

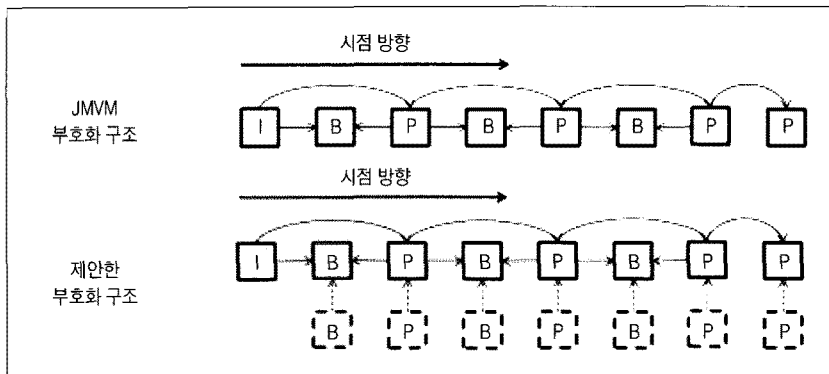
최근 3차원 위평 방법을 이용하여 부호화하고자 하는 시점의 가상영상을 만들어 이를 부호화시에 부



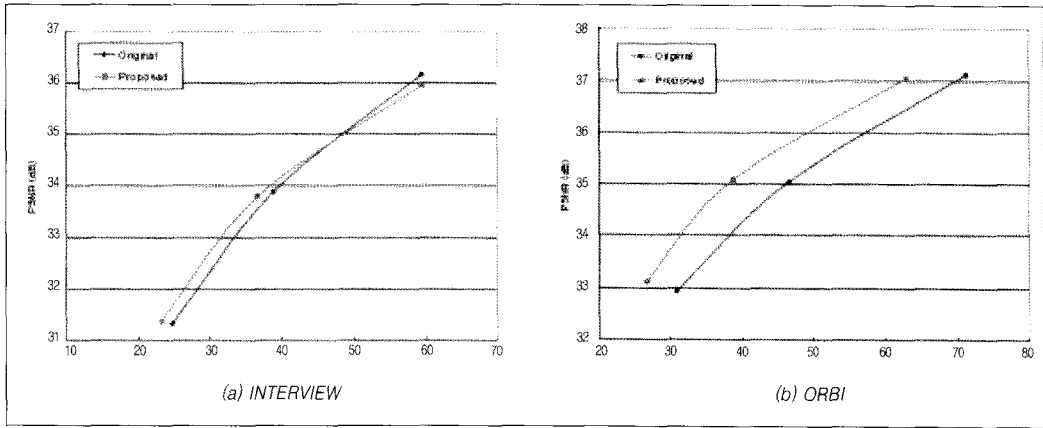
<그림 4> 참고문헌 [4]에서 제안한 깊이 영상 부호화 방법의 순서도

가적인 정보로 이용함으로써 다시점 영상의 부호화 효율을 높이는 방법이 [4]에서 제안되었다. 3D 위평을 통해 합성된 깊이 영상의 빈 곳을 배경영상을 이용하여 적절이 채우고, 중간값 필터를 이용하여 잡음을 제거한 후, 이를 원본 깊이 영상의 부호화시에 부가적인 정보로 사용하여 부호화 효율을 높였다.

또한 [5]에서는 텍스처 비디오의 움직임 정보를 이용한 H264 기반 깊이영상 시퀀스 부호화 방법을 제안하였다. 이 방법은 3D 비디오의 입력인 색상 영상과 깊이 영상 사이의 유사한 상호관계를 이용하여 깊이 영상을 부호화할 때 움직임 벡터를 별도로 찾지 않고, 텍스처 영상의 움직임 벡터를 이용하여 깊이 영상의 움직임 보상에 사용하는 방법이다. 이 방법은 부호화 시간의 대부분을 차지하는 움직임 벡터 탐색 과정이 생략되어 부호화 시간을 크게 단축시키는 장점을 가지며, 움직임 벡터를 별도로 저장하거나 보내지 않기 때문에 낮은 비트율에서 깊이 영상의 부호화 효율을 높일 수 있다. 하지만, 높은 비트율에서 이 방법을 사용했을 때에는 증가된 잔여 데이터의 세밀한 양자화로 인해 오히려 부호화 효율은 떨어지는 결과를 보였다. 일반적으로 깊이는 색상 영상보다 높은 양



<그림 5> GIST에서 제안한 방법과 JMVM 방법의 부호화 구조 비교



〈그림 6〉 Interview와 ORBI 테스트 영상에 대한 비트율-왜곡 곡선

자화 변수를 사용하여 부호화를 수행하므로 색상 영상을 먼저 부호화한 뒤에 깊이 영상을 부호화하는 3D 비디오 시스템에 효과적인 방법으로 생각된다.

III. 3차원 공간 분석 기술 및 모바일 증강 현실 응용 전망

3D 이미징 기술에 대한 논의는 이미 오래 전부터 시작되었지만, 많은 연산량과 대용량 메모리 요구 등의 문제로 본격적인 실용화가 지연되었다. 이러한 기술들이 최근 3D 관련 영화의 발전과 관련 장비들의 발달로 새롭게 조명되고 연구되고 있다. 특히 촬영된 다수의 이미지를 이용해서 대상을 3D로 분석하고 이 영상 위에 가상의 객체를 합성시키는 증강 현실 기술은 2008년 미국의 시장조사 기관인 가트너 그룹에서 발표한 '미래를 움직일 10대 혁신 기술' 중 대표로 뽑힐 만큼 그 관심이 뜨겁다.

증강 현실의 가장 기본적인 기술 형태는 마커 인식이다. 이 기술은 마커를 이용하여 합성시킬 가상

객체의 영상 내 위치를 판단하는 방법으로 미리 정의된 특정 그림 (Fiducial marker)을 이용하는 기초적인 방법 외에도 사진이나 손바닥같이 미리 정의되지 않은 물체 (Natural marker)를 이용하기도 한다. 이들 기술은 간단하게 구현할 수 있는 반면 마커 역할을 하는 사물을 필요로 하는 거추장스런 인터페이스를 가지고 있으며 여러 강인성 및 인식률 향상을 위한 기술적인 보완이 필요하다. 보다 진보된 형태로는 입력되는 영상을 3차원으로 분석하여 가상 객체를 합성시키는 방법이 있는데 영상을 받아들이는 카메라 외에는 별도의 장비가 필요 없고 더욱 직관적인 형태의 인터페이스이기에 주목받고 있다.

이러한 3D 분석 기술은 입력요소에 따라 다양한 방법이 존재한다. 이 중 한 대의 카메라가 다양한 시점으로 이동하면서 찍은 영상으로부터 대상을 복원하는 Structure from Motion (SfM) 방법은 다른 기술들 (Shape from Texture, Shape from focus/defocus 등)에 비해 공간적, 장비적 제한 요건이 적어 이용 가치가 높다. 이 기술은 3차원으로 복원시킬 물체나 공간 (빌딩이나 공원 등)을 찍은 여러 장의 사진으로부터

터 얻어낸 특징점 정합 정보를 통하여; (i) 대상의 깊이 정보(depth information)와 (ii) 카메라의 위치 정보(camera pose)를 예측하여 3D 공간상의 특징점군(point cloud)을 얻어낸다. 이 때 각각의 특징점을 다양한 시점으로 투영시킨 결과가 그 시점에서 촬영된 영상과 일치할 수 있도록 최적화하는 번들 조정(bundle adjustment)과 같은 과정이 뒤따른다. 이 외에도 최근 이용률이 급성장하고 있는 스마트폰에서도 적용될 수 있도록 복잡도와 메모리 요구량을 획기적으로 줄이는 기술도 활발하게 논의되고 있다.

이 3D 분석 기술은 단순히 가상 객체의 합성될 위치를 찾는 증강 현실뿐만 아니라 현실 속의 사물을 3차원의 가상 객체로 복원하거나(3D 복원), 영상 분석을 통해 지도를 만드는 데 이용할 수 있다. 뿐만 아니라 동영상 촬영의 핵심 기술 중 하나인 영상 안정화(Digital Image Stabilizer, DIS)기능을 더욱 확장하여 기존의 상하좌우 방향뿐 아니라 깊이 방향의 떨림 현상까지 보정하는 데 이용할 수 있는 등 다양한 응용분야를 가지고 있어 향후 연구 결과가 주목된다. 미래 기술인 모바일 증강 현실 및 3D 분석 기술이 향후 우리의 삶에 어떠한 영향을 주고 변화를 가져올 지 기대해본다.

IV. 3D 컴프턴 이미징: 감마선 핵영상의 새로운 패러다임

컴프턴 이미징(Compton Imaging)은 1920년대 양자물리학의 기원을 연 컴프턴 산란효과를 기하학적으로 재해석하여 파생된 『전기적 집속(Electric Collimation)』이라는 혁신적인 감마선 위치인식 메커니즘에 기반한다. 1974년 Nature지에 미래 감마선 이미징으로 활용될 수 있는 가능성이 보고된 이

래, 컴프턴 이미징의 잠재적인 장점을 보유한 미래 감마선 핵영상 장치를 실증하려는 연구개발 노력이 이루어지고 있다.

물리학 및 방사화학적 관점에서 컴프턴 이미징은 기존의 핵영상 장치와 현저하게 비교되는 특징을 갖고 있다. SPECT(단일광자방출단층영상)의 경우, 감마선의 위치를 식별하기 위하여 중원소 물질의 집속기를 사용하여야 하므로 저에너지 감마선을 사용하여야 하는 방사성 핵종의 선택적 제한이 수반됨과 동시에 핵영상의 민감도와 영상해상도 사이에 상호역기능적인 상관관계가 존재한다. 이에 반해, 컴프턴 이미징은 감마선 에너지에 제한이 없어 감마선을 방출하는 어떠한 방사성 핵종도 이용할 수 있으며, 민감도와 영상해상도는 상호 독립적으로 향상시킬 수 있다. 국내에서도 암진단과 뇌연구에 많이 활용되고 있는 PET(양전자방출단층영상)의 경우, 양전자를 방출하는 핵종의 수명이 대부분 수 시간 이내로 짧기 때문에 핵종을 생산하는 전용 가속기를 보유하고 있거나 지역 내 빠른 시간에 보급할 수 있는 체제를 갖추어야 하는 반면, 컴프턴 이미징에 활용할 수 있는 방사성 핵종은 수명에 제한이 없으므로 영상획득 장소가 핵종 생산 장소와 근접한 지역에 있을 필요가 없으며 국가 간 보급도 가능하다. 더욱이 양전자방출 핵종에 비해 감마선 방출 핵종은 생체의 특정 부위가 선호하는 원소를 가진 핵종이 다양하기 때문에 신진대사의 민감도를 향상시킬 수 있는 선택적 흡수를 가능하게 만들 수 있는 여지가 많다[6].

컴프턴 이미징이 미래 감마선 핵영상에 패러다임의 변화를 가져올 수 있는 우수한 장점을 보유하고 있지만 아직까지 연구개발 수준 단계를 벗어나지 못하고 있는 주된 두 가지 이유는 다음과 같다. 첫째, 감마선 검출기 내부로 들어온 감마선이 컴프턴 산란 또는 광전효과에 의하여 전자로 변환되는 위치에 대

한 3D 데이터의 우수한 검출효율과 공간 분해능을 확보할 수 있는 검출기 시스템과 디지털 펄스파형분석이라는 신개념의 신호처리방법을 구현할 수 있는 영상처리소자의 개발에 필요한 원천기술이 아직 확립되어 있지 않다. 둘째, 컴프턴 이미징의 영상재구성 과 가시화 부분에서 영상재구성 알고리즘과 연산 처리속도의 획기적인 향상을 위한 원천기술이 미확립된 상태이다. 그 주된 이유로서 SPECT나 PET의 경우 감마선의 방출 시점으로부터 검출기까지 감마선의 궤적이 직선인 반면, 컴프턴 이미징은 컴프턴 산란으로 인한 감마선 궤적의 비선형성으로 유발되는 영상해상도의 악화를 어떻게 최소화할 것이며, 또한 컴프턴 산란 시 물리적으로 내재되어 있는 도플러 퍼짐을 어떻게 보정할 것인가? 등 새로운 영상재구성 알고리즘이 절대적으로 필요한 흥미로운 문제들이 많다. 특히 기존의 핵영상 장비가 Tomography에 기반한 이미징으로 영상을 가시화한다면, 컴프턴 이미징은 원시 영상데이터 자체가 3D이며 영상의 왜곡을 최소화하여 직접적으로 3D로 가시화하는 기술은 어느 부분보다 연구개발이 미진한 상태이다.

우수한 민감도와 PET에 견줄 만한 영상해상도를 보유한 고분석력 3D 컴프턴 이미징이 실증되면 핵의학, 나노바이오영상 및 분자영상에 활용될 수 있을 뿐만 아니라 감마선 우주망원경의 개발과 방사선 위치추적, 핵물질 탐지 등 원자력산업에 곧바로 적용할 수 있는 국가적인 기술력을 확보하는 효과를 얻을 것이다. 이러한 연구개발 노력은 특정분야의 전공에 편중된 체제로서는 불가능하며 물리학, 의공학, 전자공학, 핵의학, 영상공학 분야에서 부문별 원천기술을 개발하고 이 기술들을 융합하고 시스템화하는 융·복합적인 연구체제를 갖추어야 한다. 미래 감마선 핵영상의 새로운 패러다임으로 등장할 컴프턴 이미징의 장점과 광범위한 응용력을 감안할 때

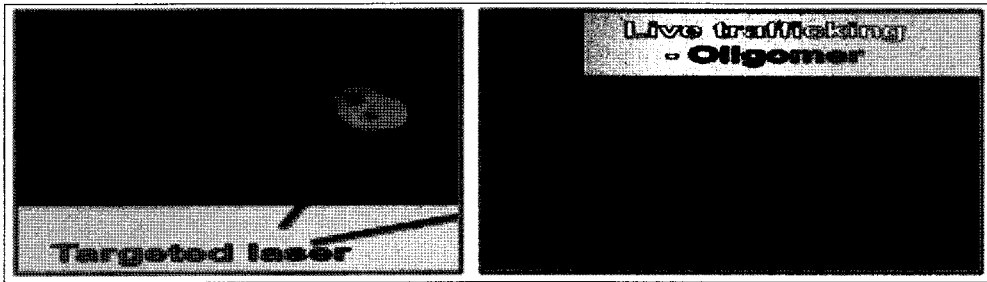
이 분야에서 우리가 국제적으로 선점하여야 할 원천 기술을 확보하기 위하여 국가적인 차원에서의 연구 개발 지원이 매우 필요한 시점이기도 하다.

V. 3D 라이브 세포 이미징

탄자니아 콰베 국립공원을 중심으로 40여년을 야생 침팬지 연구에 헌신해 온 제인 구달 (Jane Goodall) 박사는 수 차례에 걸쳐 우리나라를 방문한 바 있다. 그녀는 침팬지에 관한 수십년간의 관찰(거시적 영상화)을 통하여 인간과 유인원의 행동양식에 대한 많은 새로운 사실을 밝혀냈으며, 과학계 뿐만 아니라 사회일반에도 많은 감동을 선사했다.

이와 같이 생명과학은 대상에 대한 상세한 관찰을 기반으로 발전하는 학문분야이다. 그러나 미세한 크기의 생명체, 즉 세포/분자수준의 동적인 생명현상을 주로 다루는 오늘날의 생명과학에서는 대상의 디테일을 관찰하는 것이 매우 어려운 것이 현실이다. 최근 2008년 캘리포니아 대학의 로저 첸 (Roger Tsien) 등 3인에게 노벨화학상이 공동 수여되었다. 이것은 해파리 유래 녹색형광단백질 (GFP)의 발견/개발에 대한 공로를 높이 인정한 것이다. 이 단백질은 살아있는 세포 내에서 일어나는 동적인 생명현상을 관찰하는 데 새로운 전기를 만들었는데, 이것은 세대가 빠르고 유전공학적 설계가 가능한 세포차원의 생물학을 관찰(미시적 영상화)하는 것을 가능하게 하였기 때문이다.

한편 첨단 이미징기술은 단일세포 및 분자를 삼차원 입체구조에서 실시간 관찰하는 수준으로 발전해 가고 있다. 즉 기존에는 세포와 조직을 파괴하여 얻은 추출시료의 분석에 의존하여 생체분자들에 대한 단편적인 정보를 얻어 왔지만, 라이브 3D 공초점 현미경기술은 세포를 파괴시키지 않고도 살아있는 세



〈그림 7〉 단일 세포에서 생체 단백질이 이동하는 모습을 형광이미지로 분석한 결과

포의 동적인 변화 및 세포 내부 분자들의 상호작용을 규명하는 데 성공하고 있다[7].

따라서 다양한 형광단백질과 3D현미경을 이용하여 살아있는 세포를 영상화하는 기술과, 시간의 흐름에 따라 실시간 분석하는 초고속 데이터 처리기술이 더욱 발전하게 되면, 기존 생명과학의 한계를 뛰어넘는 새로운 차원의 “3D” 생명과학이 실현될 것이며, 각종 질병 메커니즘의 정확한 이해, 새로운 방제기술의 개발로 바이오신약, 바이오융합산업 등에서 광범위한 파급효과가 나타날 것으로 기대되는 바이다.

VI. 결론

본 논문에서는 3D 영상의 획득, 처리, 편집, 전송

및 표현에 이르는 일련의 과정을 3D 이미징 기술로 정의하고, 이것을 다시 (i) 3D 영상처리 및 전송 기반 기술, (ii) 3D 영상 콘텐츠 제작 기술, 그리고 (iii) 3D 고감도 실시간 생체 이미징으로 분류하여 각 기술의 미래 전망과 응용 분야를 정리했다. 이러한 3D 이미징 기술의 발전은 디지털 미디어의 실감 입체화를 기반으로 한 급격한 확산의 출발점이 되었고, IT 기술 전 분야의 발전과 변화에 미칠 파급효과가 매우 큰 유발 기술로 인식되고 있다. 국내에서도 3D 산업 발전을 위한 장단기 전략 추진을 위해서 2015년까지 8000억원의 투자가 계획되었다. 결론적으로 3D 이미징 기술은 자체 기반 기술 발전과 동시에, 방송/통신에 사용되는 입체 콘텐츠 제작과 기초과학 분야의 시뮬레이션 및 가시화를 가능하게 하는 미래형 융합기술이다.

● 참고문헌 ●

- [1] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed., Cambridge University Press, March 2004
- [2] R. Wand and Y. Wang, “Multiview Video Sequence Analysis, Compression, and Virtual Viewpoint Synthesis,” *IEEE Transactions on Circuit and System for Video Technology*, Vol. 10, pp. 397–410, 2000
- [3] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, “Applications and Requirements on FTV,” Doc. N9595, Antalya, Turkey, Jan. 2008

[4] 나상태, 오관정, 이천, 호요성, "3차원 위평 방법을 이용한 효율적인 다시점 깊이영상 부호화 방법," 신호처리합동학술대회, pp. 25(1-4), 2007년 10월

[5] 오한, 호요성, "텍스처 비다오의 움직임 정보를 이용한 H.264 기반 깊이영상 시퀀스 부호화 방법," 한국통신학회 춘계 학술대회, pp. 75-79, 2006년 6월

[6] T. Teranishi, et al., "Single-particle resonance levels in ^{14}O examined by $^{13}\text{N}+p$ elastic resonance scattering," Physics Letters B, June 2007

[7] J. Ha, J. Song, Y. Lee, S. Kim, J. Sohn, C. Shin, S. Lee, S. Lee, "Design and application of highly responsive fluorescence resonance energy transfer biosensors for detection of sugar in living *Saccharomyces cerevisiae* cells," Applied Environmental Microbiology, vol. 73, no. 22, pp. 7408-7414, November 2007

필자소개



백준기

- 1984년 : 서울대학교 제어계측공학과 (학사)
- 1987년 : Northwestern University 전기및컴퓨터공학과 (석사)
- 1990년 : Northwestern University 전기및컴퓨터공학과 (박사)
- 1993년 ~ 현재 : 중앙대학교 영상학과 교수



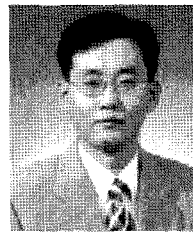
최종수

- 1975년 : 인하공대 전기공학과(학사)
- 1977년 : 서울대학교 전자공학과(석사)
- 1981년 : Keio University 전기공학과(박사)
- 1981년 ~ 현재 : 중앙대학교 영상학과 교수



고성제

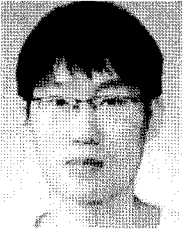
- 1980년 : 고려대학교 전자공학과 (학사)
- 1986년 : State Univ. of New York at Buffalo 전기 및 컴퓨터공학과(석사)
- 1988년 : State Univ. of New York at Buffalo 전기 및 컴퓨터공학과(박사)
- 1988년 ~ 1992년 : University of Michigan - Dearborn, 전기 및 컴퓨터공학과 조교수
- 1992년 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자전파공학부 정교수



호요성

- 1981년 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1983년 : 서울대학교 전자공학과 석사
- 1983년 ~ 1995년 : 한국전자통신연구소 선임연구원
- 1989년 : University of California, Santa Barbara Department of Electrical and Computer Engineering 박사
- 1990년 ~ 1993년 : 미국 Philips 연구소 Senior Research Member
- 1995년 ~ 현재 : 광주과학기술원 정보기전공학부 정보통신공학과 교수
- 2003년 ~ 현재 : 광주과학기술원 실감방송연구센터 센터장

필자소개



장우석

- 2001년 ~ 2007년 : 전남대학교 전자정보통신공학부 학사
- 2007년 ~ 2009년 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
- 2009년 ~ 현재 : 광주과학기술원 정보기전공학부 정보통신공학과 박사과정



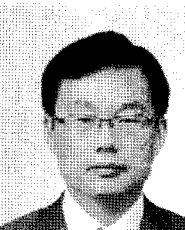
이춘식

- 1980년 : 서울대학교 물리학과 (학사)
- 1988년 : Rutgers University 물리학과 (박사)
- 1993년 ~ 현재 : 중앙대학교 물리학과 교수



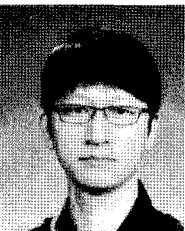
이주한

- 1995년 : 중앙대학교 물리학과 (학사)
- 1997년 : 중앙대학교 물리학과 (석사)
- 2005년 : 중앙대학교 물리학과 (박사)
- 2006년 ~ 현재 : 중앙대학교 신기능이미징연구소 연구교수



이승구

- 1989년 : 서울대학교 식품공학과 (학사)
- 1991년 : KAIST 생물공학과 (석사)
- 1995년 : KAIST 생물공학과 (박사)
- 1996년 ~ 현재 : 한국생명공학연구원 책임연구원



하재석

- 1998년 : 건양대학교 식품공학과 (학사)
- 2001년 : 서울산업대학교 식품공학과 (석사)
- 2008년 : 연세대학교 생명공학과 (박사)
- 2008년 ~ 현재 : 한국생명공학연구원 연수연구원 (Post-doc.)