

컴퓨터 그래픽스 연구 현황: 1부 실세계로의 접근

윤성의¹, 이승용², 이제희³, 임인성⁴, 정규만⁵

한국과학기술원¹, 포항공과대학교², 서울대학교³, 서강대학교⁴, 대구대학교⁵

요약

컴퓨터 그래픽스 및 관련 연구 분야는 지난 30년간 눈부신 발전을 거듭해왔다. 모델링, 렌더링, 애니메이션 등 시각적 표현력을 확보하는 것을 목표로 출발한 컴퓨터 그래픽스 연구는 점차 그 범위를 확대해서 영상처리, 자연현상 시뮬레이션, 가상현실, 의료 영상, 인간-컴퓨터 상호작용, 실시간 시뮬레이션, 영화 특수 효과 등 다양한 연구 및 응용 분야를 파생 시키며 점차 복잡한 지형도를 그려가고 있다. 이 글은 전체 2편의 연속 논문 중에서 1부에 해당하며, 컴퓨터 그래픽스의 핵심 분야에 해당하는 모델링, 애니메이션, 실시간 처리, 영상 및 비디오 처리에 관련된 최근 연구 동향을 분석하고 정리한다.

키워드: 기하 모델링, 인체 애니메이션, 실시간, 영상 및 비디오

1. 서론

컴퓨터 그래픽스 및 관련 연구 분야는 지난 30년간 눈부신 발전을 거듭해왔다. 모델링, 렌더링, 애니메이션 등 시각적 표현력을 확보하는 것을 목표로 출발한 컴퓨터 그래픽스 연구는 점차 그 범위를 확대해서 영상처리, 자연현상 시뮬레이션, 가상현실, 의료 영상, 인간-컴퓨터 상호작용, 실시간 시뮬레이션, 영화 특수 효과 등 다양한 연구 및 응용 분야를 파생 시키며 점차 복잡한 지형도를 그려가고 있다. 국내의 연구도 꾸준히 저변을 넓히고 있으며, 몇몇 분야에서는 세계 최고 수준의 연구 결과를 매년 발표하고 있다. 이 글은 컴퓨터 그래픽스 및 관련 연구 분야 전반에 걸쳐 현재 진행 중인 연구 동향을 분석하고, 이에 덧붙여 한국 컴퓨터 그래픽스 연구의 지형과 동향을 정리하고자 한다.

컴퓨터 그래픽스의 연구 분야는 이미 한편의 글로 정리하기에는 그 범위가 너무 넓어졌다. 따라서, 이 글에서는 그래픽스 관련 연구 전체를 개설적으로 정리하기 보다는 세부 분야 별로 최신 동향을 조망하고자 한다. 세부 분야의 선택은 모델링, 영상 처리, 애니메이션 등 컴퓨터 그래픽스 핵심 분야 외에 국내에서 활발히 연구

하는 응용 분야들을 추가하였다. 현재 컴퓨터 그래픽스 연구는 다양한 세부 분야 간의 융합으로 인해 분야 간의 경계가 불명확해지고 있다. 한 연구 결과가 여러 세부 분야에 복합적인 영향을 미치는 경우가 많기 때문에 이 글에서의 분류 역시 편의 상의 구분일 뿐 실질적으로는 여러 세부 분야들이 복잡하게 서로 얽혀있는 것으로 파악해야 한다. 또한, 세부 분야를 나열한 순서 역시 가능한 유사성이 많은 분야들을 인접하게 배치한 것일 뿐 그 이상의 의미는 없다.

세부 분야를 초월해서 컴퓨터 그래픽스 연구에 최근 나타나는 공통적인 특징들을 몇 가지 발견할 수 있다.

실세계의 데이터: 3차원 스캔 형상, 카메라/비디오로 촬영된 영상, 다차원 BRDF 측정, 옷감의 물성, 모션 캡처, 얼굴 물성 및 반사율 측정 등 다양한 분야에 실제 세상으로부터 지극히 사실적인 데이터를 얻고자 노력하고 있다. 이러한 노력은 연구 결과물의 품질을 향상시키는데 결정적인 역할을 하고 있다.

다양한 입출력 장치의 개발 및 활용: 컴퓨터 그래픽스 연구를 통해 실세계의 데이터를 관찰/측정/취득하기 위한 다양한 입력 장치를 개발/활용하고 있다. 연구의 결과물도 단순한 컴퓨터 화면 상의 이미지에 머무르지 않

고, 3차원 프린터를 이용하여 형상, 물성, 질감을 물리적으로 재현하거나, 카메라의 내부에서 하드웨어에 임베드되거나, 실제 로봇을 제어하는 등 다양한 출력 장치를 개발/활용하는 시도가 점차 증가하고 있다.

초고속 계산: 실세계의 데이터와 다양한 입출력 장치의 활용은 필연적으로 대용량 데이터의 취득, 처리, 관리, 검색과 고속 계산(high-performance computing)을 요구한다. 병렬처리를 이용한 계산 기술은 컴퓨터 그래픽스의 고전에 해당하지만, 최근 GPU의 급격한 발달과 더불어 앞으로도 여전히 컴퓨터 그래픽스 연구의 중요한 한 축으로 작용할 것이다.

위의 세가지 관찰은 모두 컴퓨터 그래픽스 연구가 한층 더 현실의 문제와 현상에 가까이 다가가려 함을 알 수 있다. 실제 세상으로부터 입력을 얻고, 결과를 실제 세상에 물리적으로 구체화함으로써 “상상과 현실의 결합”이라는 컴퓨터 그래픽스의 모토에 충실한 방향으로 연구가 진행되고 있다.

2. 기하 모델링(Geometric Modeling)

컴퓨터 그래픽스 분야의 근간을 이루는 주요 연구 분야 중의 하나인 기하 모델링(geometric modeling)은 전통적인 매개변수 함수 또는 음대수 함수 기반의 자유 곡면 모델링(freeform surface modeling)과 이러한 곡면 또는 다면체 모델 기반의 솔리드 모델링(solid modeling)을 주요 연구 주제로 출발하였다. 1980년대에 들어서는 (결국 오픈지엘(OpenGL)과 다이렉트 엑스(DirectX)로 수렴되는) 다양한 벤더의 실시간 그래픽스 라이브러리(HP의 스타베이스(StarBase), Sun의 XGL, SGI의 GL 라이브러리 등과 같은)를 가속해주는 그래픽스 프로세서의 제조 기술이 향상됨에 따라, 이를 기반으로 하는 상업용 그래픽스 소프트웨어의 제작이 큰 관심을 갖게 되었다. 이로 인하여 대화식 그래픽스 라이브러리의 기본 기하 데이터 모델인 다면체 모델(polygonal model)의 효과적인 처리에 대한 연구가 많은 관심을 갖게 되었다. 또한 이와 더불어 볼륨 형태의 기하 데이터와 점 집합 형태의 기하 데이터의 수요가 증가함에 따라 그에 대한 모델링 연구가 동시에 진행되어 왔다. 전통적인 형태의 기하 모델링에 대한 연구 주제에는 점진적인 변화가 있어왔는데, 현재에는 전통적인 주제 외에도 다양한 관점에서의

효과적인 기하 물체의 설계, 처리 및 응용에 관한 연구가 진행되고 있다. 이 장에서는 최근 몇 년간 에이씨엠 시그래프(ACM SIGGRAPH) 학술대회와 같은 최근 연구 동향을 잘 반영하는 학술대회 및 논문지에 발표된 연구 결과를 바탕으로 기하 모델링 연구에 대한 추세를 알아 보도록 하겠다.

비록 기하 모델링 분야에만 해당하는 것은 아니지만 최근 연구 동향 중의 큰 특징 중의 하나는 GPU의 고속 병렬 처리 성능을 최대한 활용하려는 시도가 보편화되고 있다는 점이다. 특히 최근 GPU 성능의 비약적인 향상으로 인하여 실시간 그래픽스 응용은 과거보다 더 중요하게 되었는데, 그로 인하여 기하 모델링 분야에서도 연구 기법 설계 과정에서 GPU의 SIMD 기반 스트림 프로세서의 구조 및 특성을 최대한 반영하거나, 최소한 GPU 구현을 통하여 실행 속도를 향상시키려는 많은 노력이 진행되고 있다. 예를 들어, 대표적인 매개 변수 곡면인 NURBS와 같은 곡면의 도시(display)에 있어서 효과적인 트리밍(trimming) 기법의 개발은 중요한 문제이다. 이를 위하여 널리 쓰이는 베지어 클리핑(bezier clipping) 방법은 이론적으로는 안정적인 방법이나, 그 재귀적인 계산 특성으로 인하여 GPU 상에서의 구현에 적합하지 않다고 알려져 있는데, 그럼에도 불구하고 이러한 문제를 GPU의 계산 구조에 맞게 변형된 계산 기법도 제시되고 있다 [1]. 반면에 곡선/곡면 외에 전통적인 기하 물체 표현 방법인 다면체 모델/ 점 집합/ 볼륨 데이터의 경우에는 데이터 구조 자체가 본질적으로 스트리밍 SIMD 처리에 적합한 바, 이들에 대한 GPU 기반의 기하 모델링 기법의 개발은 이미 당면시 되고 있는 상황이다.

이러한 전반적인 계산 환경의 변화에도 불구하고, 전통적인 매개 변수 함수 및 음대수 함수 기반의 곡면 모델링에 대한 기술은 지속적으로 진보하고 있다. 매개 변수 곡면에 비해 사용의 용이성 떨어지는 음대수 곡면의 본질적인 성질에 대한 이해도를 높여 실용성을 높이거나 [2], 애니메이션 등의 분야에 응용하려는 시도는 지속되고 있다 [3].

컴퓨터 그래픽스 분야에서 가장 보편적인 기하 모델인 다면체 모델, 즉 메쉬 데이터에 대해서도 다양한 성격의 연구가 계속되고 있다. 과거 많은 연구 결과에도 불구하고 “좋은” 삼각화 방법을 통한 메쉬 생성과 [4] 삼

각 메쉬의 효율적인 처리 및 저장과 [5] 같은 기본 문제들이 아직도 중요한 연구 주제로 남아있다. 또한 주어진 메쉬 데이터로부터 물체의 기하 특성을 최대한 반영하는 사각형 형태의 재메쉬화 연구도 진행되고 있는데, 이러한 방법들은 유한요소 방법이나 곡면 물체 생성에 있어 유용한 도구로 사용될 수 있다 [6,7]. 한편 메쉬 데이터의 직관적이고 용이한 변형은 다면체 모델의 유용성 제고에 필수적인 기능인데, 최근 수학적 도구를 사용하여 부자연스러운 왜곡을 최소화 해주는 변형 기법에 대한 연구 결과가 발표되는 등 동적 메쉬 데이터의 모델링에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다 [8,9]. 또한 많은 기술적 진보에도 불구하고, 부드러운 물체 표현에 매우 유용한 분할 곡면(subdivision surface)에 대한 연구도 여러 연구자에 의해 진행되고 있는데, 이러한 연구 결과들이 실시간 그래픽스 응용 제작에도 큰 도움을 주고 있다. 예를 들어, 기하 물체의 효과적인 매개화 작업은 자연스러운 텍스처 매핑 등 기하 물체 활용에 있어 중요한 사항인데, 최근 비선형 함수의 최적화 과정을 통하여 왜곡을 최소화 해주는 분할 곡면 매개화 기법이 제시되는 등 분할 곡면의 활용성 제고를 위한 연구들이 진행되고 있다 [10].

다양한 스캔 장비의 발전은 “스캔 후 복원”이라는 비교적 단순한 방식의 기하 물체 모델링의 한 방향을 제시하여 왔다. 1990년대부터 주목을 받아온 이러한 방식은 그간 다양한 연구에도 불구하고 아직도 (점점 크기가 더 커지고 세밀해지는) 점 집합(point set 또는 point cloud) 데이터에 대한 강건한(robust) 처리 및 효과적인 모델 구축 방법의 개발은 주요한 문제로 남아 있다. 예를 들어, 비교적 부드러운 곡면을 가정하는 이동최소제곱(moving least square) 기반의 초기 방법들을 필두로 효과적인 점 집합에 대한 기하 물체 복원 방법들이 개발되어 왔으나 [11,12], 최근 좀 더 세밀한 물체 구축에 대한 요구가 높아짐에 따라 비교적 적은 양의 점들을 사용하여 좀 더 정밀하게 법선 벡터를 추정하고, 물체 표면의 세밀한 특징을 잡아내는 기법들이 연구되었으며 [13,14], 점 집합 정보에 대한 강건한 허마이트(hermite) 보간과 같은 기본적인 문제에 대해서도 더 연구가 진행되어야 할 상태로 남아 있다 [15]. 또한 영원한 연구 주제인 방대한 점 데이터의 고속의 효과적인 복원 처리 문제는 아직도 해결해야 할 문제로 남아 있다.

전통적인 자유 곡면(freeform surface)이나 스캐닝 방법 외에도 사용자가 손쉽게 기하 물체를 모델링 할 수 있도록 해주는 인터페이스 기술의 개발은 기하 모델링 분야의 궁극적인 목표 중의 하나이다. 물체의 2D 실루엣 그림으로부터 자동으로 3D 물체를 구축해주는 방법에 대한 연구는 그간 많이 진행되었는데, 최근에도 몇 개의 시점에서의 실루엣이나 [16], 심지어 한 장의 사진으로부터 [17] 자동으로 기하 물체를 구축해주는 흥미로운 결과들이 계속해서 산출되고 있다.

많은 시도가 있었던 영상 기반 3D 모델링의 경우에도 영상 데이터에 물리 기반 시뮬레이션 정보를 결합하여 유체와 같은 동적인 기하물체를 효과적으로 구축하려는 시도도 진행되고 있는 등, 기하 모델링의 효율을 제고하려는 재미있는 시도가 계속되고 있다 [18]. 한편 실시간 3D 스캐닝 기술의 발전에 따라 정적인 물체의 3D 스캐닝 데이터에 대한 효과적인 처리 기법 외에도 저비용으로 획득할 수 있는 스캔 데이터로부터 동적인 물체에 대한 기하 정보를 직접 복원하는 문제가 흥미로운 문제로 대두되었다. 그러한 연구 예로 연속적인 시간 프레임에 대한 점 데이터로부터 템플릿 정보 없이 기하 물체 및 변형 정보를 구축하거나 [19], 동적으로 획득한 깊이 이미지로부터 직접 애니메이션에 적합한 다관절 기하물체를 구성해주는 기법을 들 수가 있다 [20].

마지막으로, 기하 모델링 데이터의 효과적인 응용에 필수적인 기하 처리(geometry processing), 즉 기하 속성 계산도 활발히 연구되고 있는 주제 중의 하나이다. 이러한 연구는 응용 주제에 따라 다양한 문제 형태로 나타나는데, 예를 들어, 최근 활발히 연구되고 있는 물리 기반 시뮬레이션의 주요 구성 요소 중의 하나인 기하 물체의 미분 기하학적인 특성 파악은 시뮬레이션의 정확도 향상에 큰 영향을 미친다. 가장 최근의 예로 최근 일반적인 다면체 모델로부터 효과적으로 이산적인 라플라시안(laplacian)을 계산해주는 결과가 발표되었으며 [21], 지오데식(geodesic) 거리의 문제를 보완해줄 수 있는, 기하 물체의 형상을 반영하는 거리 척도의 계산에 대한 연구도 진행되었다 [22]. 이러한 기하 물체의 미분 기하학적인 성질의 응용 예는 [23,24]과 같은 논문이나 [25]과 같은 서적에서 흔히 찾아 볼 수 있다. 물론 다면체 모델에 대하여 영상 분석이나 충돌 검사 등에 유용하게 사용되는 민코우스키 합(Minkowski sum)과 같은 수학적인

성질을 효과적으로 분석해주는 문제도 중요 탐구 대상으로 남아있다 [26].

3. 인체 애니메이션

사람, 동물과 같은 가상 생명체를 컴퓨터에서 구현하고 애니메이션하는 문제는 컴퓨터 그래픽스의 핵심 분야 중 하나이다. 90년대 중반 이후 모션 캡처 기술의 실용화는 캐릭터 애니메이션 연구 전반에 큰 변화의 계기가 되었다. 사실적인 인체 운동 데이터를 대량으로 확보할 수 있게 되면서부터 데이터 기반 (data-driven) 애니메이션이라는 새로운 연구 분야가 활성화되었다. 또 하나의 주목할 만한 움직임은 2000년대 후반 이후 시작된 이족 보행 제어기의 개발을 통해 사실적인 인체 동작을 물리 기반 시뮬레이션을 통해 재현 및 제어할 수 있게 되었다는 점이다. 지난 20년 간 대표적인 미해결 난제로 여겨졌던 이 문제가 2007년 이후 붓물 터지듯 여러 연구진들에 의해 괄목할 만한 성과를 거두게 된다. 현재 캐릭터 애니메이션의 추세는 모션 캡처 데이터를 이용한 데이터 기반의 접근 방식과 물리 기반 시뮬레이션의 두 축을 중심으로 빠르게 발전하고 있으면, 경로 계획 (path planning), 강화 학습 (reinforcement learning), 게임 이론 (game theory), 최적 제어 (optimal control), 통계 모델링 (statistical modeling) 등 다양한 방법론을 적극적으로 활용하고 있다.

3.1. 데이터 기반 애니메이션

데이터 기반 애니메이션의 가장 근본적인 아이디어는 데이터의 일반화에서 출발한다. 사람의 동작을 캡처하고 동일하게 컴퓨터로 재현하는 것으로는 충분하지 않고, 미리 저장된 동작 데이터를 자르고, 붙이고, 합치고, 혼합하고, 변형하는 등 다양한 과정을 통해 캡처한 적 없는 새로운 동작 데이터를 만들어 내는 것을 목표로 한다. 근래 연구의 흐름은 데이터의 크기, 환경의 복잡성, 다수 간의 상호작용 등 다양한 측면에서 확장성을 고려하는 방향으로 전개되고 있다. 모션 캡처 데이터베이스의 크기가 점점 커짐에 따라 효율적인 동작 데이터의 저장 및 관리, 탐색이 필요해졌다. 텅 빈 평지에서 점차 복잡한 지형지물을 고려하기 시작했고, 한 명의 움직임

을 제어하는 데서 점차 다수의 사람들 간의 상호작용과 더 나아가 군중 시뮬레이션까지 데이터 기반 애니메이션의 범주에서 고려하게 되었다.

3.1.1. 대규모 데이터 저장 및 관리

데이터 기반 애니메이션에서의 가장 기본적인 문제는 대량의 모션 데이터를 효과적으로 관리할 수 있는 자료 구조의 개발과 이로부터 효율적으로 가상 캐릭터를 움직이기 위한 제어 기술이다. 모션 데이터의 저장 방법과 이를 이용한 애니메이션 및 제어 방법은 서로 밀접한 관계를 갖는다. 데이터 기반 애니메이션을 시발점을 제공한 모션 그래프는 대량의 모션 데이터를 방향성 그래프로 표현해서 데이터들 간의 연결 구조를 직접적으로 표현했다 [27]. 이러한 그래프 구조는 A*-탐색으로 대변되는 다양한 상태 공간 탐색 (state-space search) 알고리즘과 결합되어 캐릭터의 움직임을 계획하고 제어할 수 있다. 그래프 내의 개개 동작 조각들을 개별적인 객체로 보는 대신, 여러 유사한 조각들을 매개변수화하여 연속적인 공간 상에서 표현할 수도 있다 [28]. 이와 같은 매개변수화된 모션 그래프는 상태 공간을 연속적인 공간으로 확장하며, 따라서 상태 공간 탐색 시간도 급격히 증가한다 [29]. 이후 모션 그래프는 다시 통계 모델링과 결합하여 보다 엄밀한 수학적 틀을 갖추고, 비매개변수 모델링과 대량의 데이터에서 모델을 자동 추출하는 방식으로 점차 발전해가고 있다 [30]. 그래프 형태의 동작 데이터 구조를 이용한 캐릭터 애니메이션은 공통적으로 기하급수적으로 증가하는 상태 공간에서의 탐색 문제로 귀결되므로 계산 시간을 절약하는 것이 중요한 문제로 대두된다.

3.1.2. 효율적인 데이터 탐색

가상환경이나 컴퓨터 게임과 같이 대화형 캐릭터가 필요한 분야에서는 A*-탐색이나 이를 부분적으로 변용한 탐색 알고리즘은 계산 시간의 제약으로 인해서 사용하기 어렵다. 그래프 기반의 애니메이션에 있어서 강화 학습 (reinforcement learning) 개념의 도입은 계산 시간에 대한 시각의 변화를 가져왔다 [31]. 넓은 탐색 공간을 반복적으로 방문하는 대신, 탐색 공간과 행동 공간을 이산

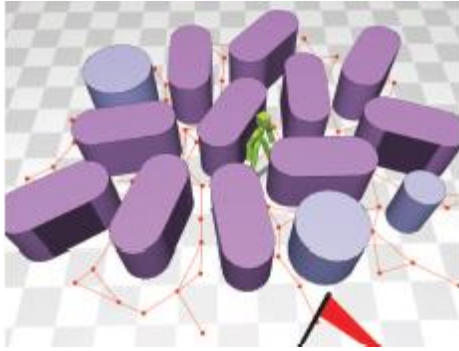


그림 1: 뾰뾰한 환경에서의 경로 탐색

화(discretize)하고 이산화된 상태 공간의 각 단위 영역에서 최적의 행동 방식을 미리 학습하여 저장하는 방식으로 실행 시간의 계산 속도를 혁신적으로 개선할 수 있다. 강화 학습은 대부분의 계산이 실행 전의 학습 과정에서 필요하고, 실행 시간에는 미리 저장된 표를 확인하는 최소한의 계산 만으로 최적의 동작을 선택할 수 있다. 이러한 아이디어는 계산 시간과 저장 용량 사이의 절충으로 생각할 수 있다. 상태 공간 탐색은 상대적으로 적은 저장 공간과 많은 계산량을 필요로 하는데 반해, 강화 학습은 대용량의 저장 공간과 많은 전처리 계산을 통해 실시간 애니메이션이 가능하도록 한다. 캐릭터 애니메이션에 있어서 강화 학습은 이후 저장 공간을 절약하기 위해 함수근사(functional approximator)를 사용하거나 [32], 모션의 종류를 줄이는 [33] 방식으로 실용적인 애니메이션 시스템을 구축하는 방향으로 발전해왔다. 강화 학습 외에도 HMM이나 차원 감소(dimensionality reduction)와 같은 다양한 기계학습 기법들이 데이터 기반 애니메이션에 활용되고 있다 [34,35].

3.1.3. 복잡한 환경

텅 빈 평지가 아닌 복잡한 환경에서의 인체 애니메이션은 많은 계산 시간을 요구하는 시공간 탐색이나 [36], 혹은 대규모 저장 공간을 이용하여 로드맵을 생성하는 [37] 등 다양한 형태의 경로계획 방법들을 널리 활용해왔다. 따라서, 기존의 경로계획 알고리즘에서 인체 동작의 특성을 고려해서 계산 시간을 줄이고 저장 공간을 보다 효율적으로 관리하는 것이 중요하다. 많은 경로계획 알고리즘은 전체 가상 환경에서의 연결성을 고려하는 전역 계획기(global planner)와 근거리에서 점과 점을 연결하는 지역 계획기를 함께 사용한다. 예를 들면, 확

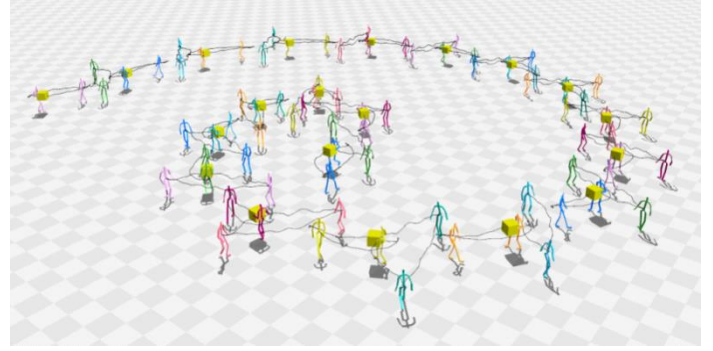


그림 2: 시간적, 공간적 상호작용을 편집

률 로드맵(probabilistic roadmap)이나 RRT(rapidly-exploring random tree) 등이 전역 계획기에 해당한다. 인체 애니메이션에 있어서 가장 단순한 형태의 지역 계획기는 모션 캡처 데이터 한 조각을 이용해서 환경 내의 한 점에서 다른 점으로 이동할 수 있는지 확인하는 과정에 해당한다. 이러한 관점에서 볼 때 최근의 주목할 만한 성과는 지역 계획기(local planner) 역할의 재발견이다. 모션 그래프를 구성하는 모션 데이터 각 조각을 마치 썰리와 같은 변형체로 모델링함으로써 장애물이 뾰뾰하게 들어찬 환경에서도 모션 데이터가 지역 계획기의 역할을 효과적으로 수행할 수 있다 (그림 1)[38]. 다른 한편으로는 강화학습에 의해 학습된 인체 동작 제어기는 강력한 지역 계획기로서 다양한 종류의 전역 계획기와 함께 사용될 수 있다. 특히, 움직이는 장애물이 있는 환경에서 확률로드맵과 결합되어 사용된 결과가 최근 발표되었다 [39]. 이와는 완전히 다른 접근 방법으로 간단한 환경에서 캡처된 모션 데이터로부터 환경을 구축하는 기본 단위와 이에 연결된 모션 데이터를 합친 모션 패치를 찾아낸다[40]. 모션 패치들을 다양한 형태로 재조합하여 새로운 환경과 그 위에서의 로드맵을 자동적으로 구축할 수 있다.

3.1.4. 다수의 캐릭터

두 명 이상의 사람들이 모이면 다양한 형태로 상호작용한다. 이러한 상호작용은 시간적으로 동기화 되고, 공간적으로 정확한 상대적 위치에서 이루어진다. 때론 물리적 접촉을 동반하기도 하고, 때론 공간적으로 멀리 떨어진 곳에서 이루어지기도 한다. 예를 들어, 두 사람이 악수를 할 때는 서로 간의 상대적 위치와 손을 내뻗는 시간이 일치해야 하며, 일정 시간 동안 손의 물리적 접촉

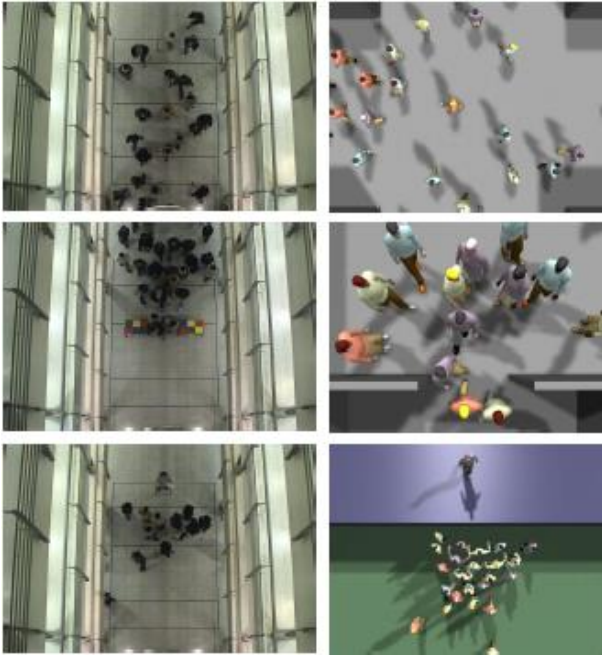


그림 3: 녹화된 작은 규모의 군중 데이터에서 대규모 군중 시뮬레이션 생성

이 지속된다. 두 명 이상이 등장하는 애니메이션 데이터를 편집/변형할 때는 이들 간의 상호작용이 유지되도록 하는 것이 중요한 문제이다. 모션 데이터의 편집에 있어서 군집 동작을 하나의 단위로 보는 접근 방식은 2008년 발표된 여러 보행자들의 보행 경로를 대화형으로 조정하는 군집 동작 편집(group motion editing)에서부터 시작되었다 [41]. 각 보행자 중심점의 (보통 엉덩이의 중점) 이동 경로를 바닥으로 투사한 2차원들을 인접한 경로들과 연결하면 시간에 따라 변화하는 3차원 메쉬로 모델링할 수 있다. 군집 동작 편집은 이렇게 얻어진 3차원 메쉬를 최소한의 변형 만으로 사용자의 지정에 따라 대화형으로 편집할 수 있게 한다. 다음 해에는 단순한 보행 동작뿐 아니라 물리적 접촉을 포함한 다양한 시간적, 공간적 상호작용을 이동 경로 편집에 적용하여 다자 간의 동기화된 동작 편집이 가능해졌다 (그림 2)[42]. 다시 다음 해인 2010년에는 복수 캐릭터의 이동 경로뿐 아니라 몸 전체의 상대적 위치관계를 4차원 메쉬로 표현하는 방법이 제시되었다 [43]. 두 명의 캐릭터 간에 경쟁적 관계는 게임 이론적으로 모델링될 수 있다. 경쟁 관계의 두 캐릭터가 각각 모션 그래프에 따라 움직인다고 가정하면 제로섬(zero-sum) 게임에 기반한 캐릭터 간의 상호작용은 강화학습을 통해 미리 학습되어 확률적으로 표현된다 [44].

3.1.5. 군중 시뮬레이션

보다 많은 수를 대상으로 한 연구는 군중 시뮬레이션(crowd simulation)으로 연결된다. 군중 시뮬레이션에 있어서 데이터 기반 접근 방식은 모션 캡처보다는 비디오 분석으로 통해 얻어진 다수 보행자의 2차원 이동 경로 데이터를 이용하는 것이 일반적이다. 녹화된 군중 데이터는 일반적으로 수십에서 수백 명의 이동 경로 데이터로 표현되며, 언제 어디서 누구를 녹화 했는지에 따라 군중의 밀도, 대형의 규칙성, 시간에 따른 대형의 변형성 등 여러 측면에서의 다양성을 보여준다. 데이터 기반 군중 시뮬레이션은 녹화된 작은 규모의 군중 데이터로부터 대규모 군중시뮬레이션을 생성하는 군중 텍스처링(그림 3), 대화형 편집, 서로 다른 스타일 간의 보간 등 군중 데이터를 기본 단위로 하는 다양한 종류의 연산과 일반화된 모델링을 추구하고 있다 [45,46].

3.2. 물리 기반 애니메이션

지난 20년 동안 대표적인 난제로 간주되던 이족 보행의 물리 기반 시뮬레이션은 최근 비약적인 기술 발전으로 인해 점차 문제 해결의 실마리를 찾아가고 있다. 현재의 기술 수준은 정상적인 보행의 경우 대단히 사실적이며 안정적인 시뮬레이션이 가능해졌고, 점차 보다 역동적이고 난이도 높은 스포츠, 체조, 댄스 동작 등으로 그 범주를 넓혀가고 있다. 보행 제어기 설계를 위해 현재는 동작 마다 제어기와 물리 시뮬레이터의 매개변수를 수동적 조정이 필요하나, 장기적으로는 완전 자동화된 제어기 자동 생성을 추구하고 있다.

보행 제어기 개발에는 크게 두 가지 접근 방식이 사용되고 있다. 첫째는 로보틱스에서 오랜 동안 발전을 거듭해온 전통적인 제어 이론과 키네마틱스/역학에 근거한 방법이다. 특히, 최적 제어(optimal control)에서 비롯된 접근방식은 자연스러운 동작의 기준을 함수 형태로 기술하고 이를 최적화하는 방식으로 사람과 같은 걸음걸이를 만들어 내고자 한다. 이에 반해서 또 다른 접근 방식은 실제 사람의 움직임을 녹화한 모션 캡처 데이터를 기준으로 삼아 물리 시뮬레이션이 기존 데이터를 최대한 근사적으로 따라가도록 하는데 주안점을 둔다.

3.2.1. 제어 이론과 경로 추적

이족 보행 시뮬레이션에 있어서 가장 핵심이 되는 부분은 원하는 동작을 만들어내는 경로 생성/추적기와 넘어지지 않도록 균형을 유지하는 균형 제어기이다. 경로 추적을 위해서는 PD (proportional derivative) 서보가 가장 단순하면서도 널리 활용되고 있다. 시뮬레이션이 원하는 경로에서 벗어날 경우 위치와 속도가 벗어난 거리에 비례하게 반대 방향으로 힘을 가하는 방식으로 경로를 추적한다. PD 서보를 사용할 경우 일반적으로 필요 이상으로 많은 힘을 내서 시뮬레이션이 경직(stiff)되는 경향을 보인다. 이러한 경직성을 피하기 위해서 중력에 의한 효과를 미리 상쇄(gravity compensation)하기도 한다 [47]. 이상적으로는 최소한의 힘 만을 이용해서 경로를 추적하고자 하며, 최적 제어 이론에 근거한 경로 추적 기법들이 보행 시뮬레이션에 사용되어왔다. 먼저, 인체의 다관절구조를 단순화하여 선형 모델로 표현할 경우 최적 경로 추적은 LQR(linear quadratic regulator)로 설명된다 [48]. LQR은 구현이 비교적 단순하고 계산량이 적으며 안정적이라는 많은 장점을 지닌다. 하지만, 사람의 전체 근골격의 움직임은 선형 모델로 표현하기에 그 자유도가 너무 높고 비선형적인 특성을 갖는다. 보다 일반화된 NQR(nonlinear quadratic regulator)도 성공적으로 보행 시뮬레이션에 활용된 바 있다 [49].

3.2.2. 균형 제어

다리를 갖는 로봇 혹은 시뮬레이션되는 캐릭터가 움직이지 않고 정적인 균형(static balance)을 유지하고 있는지는 무게 중심점을 바닥에 투영한 점이 지탱면(support polygon) 내에 포함되는 지를 확인하면 된다. 지탱면은 바닥과의 접촉점을 모두 포함하는 컨벡스헐(convexhull)로 정의된다. 하지만, 움직이고 있는 상태에서 동적 균형(dynamic balance)은 아직 명확히 정의되지 않고 있다. 흔히 ZMP(zero-moment point)가 지탱면에 포함되면 동적 균형 상태인 것으로 잘못 이해하는 경우가 많이 있으나, 실상 ZMP와 동적 균형 간에 직접적인 관계는 성립하지 않는다. ZMP는 오히려 물리적 개연성(physical



그림 4: 연속적인 스텝동작을 시뮬레이션

plausibility)이나 발이 미끄러지지 않을 조건과 관련 있다. 이족 보행의 균형 제어를 위해서는 크게 세가지 접근 방법이 사용되고 있다. 첫 번째 방법은 매 걸음마다 발을 내려놓는 위치를 교대로 조정해서 이족 보행 균형을 유지할 수 있다. 직관적으로는 설명하자면, 몸이 앞으로 기울었을 때는 보폭을 늘려서 걷는 속도를 늦추고, 반대로 몸이 뒤로 기울었을 때는 보폭을 줄여서 걷는 속도를 더 빨리 하는 식이다. 매우 간단하지만 매우 효과적이고 안정적이며, 실제 사람이 균형을 유지하는 방식과도 상당히 유사하다. SIMBICON의 피드백 규칙이나 역진자(inverted pendulum)를 사용하는 방법이 이에 해당한다 [47,50,51]. 피드백 규칙은 구현이 단순하지만 상대적으로 많은 파라미터를 손으로 미세조정 해야 하는 어려움이 따른다. 이에 비해 역진자 모델은 균형 유지 전략을 수식으로 유도할 수 있어서 파라미터가 단순하고 개수가 적다는 장점이 있다. 두 번째 방법은 일정 시간 동안 로봇/캐릭터가 원하는 경로를 따라갈 수 있다면 지속적으로 균형을 유지할 수 있다고 보는 것이다. 시뮬레이션의 매 순간마다 일정한 시간 윈도우를 설정하고 이 시간 동안 최적의 추적 경로를 수치 최적화(numerical optimization)를 통해 계산한다. 일반적으로 최적화는 비선형 이차 프로그래밍(quadratic programming)으로 수식화된다 [48,49]. 마지막으로 세 번째 부류는 기계 학습에 의거한 방법으로 실제 사람의 보행 데이터의 회귀분석으로부터 균형 전략을 계산하기도 하고, 또는 학습된 선형 균형 모델을 최적화 기법과 병행하여 사용하기도 한다 [48,50].

3.2.3. 데이터 기반 시뮬레이션

사실적인 모션 캡처 데이터는 시뮬레이션의 사실성을 높이는데도 도움을 줄 수 있다. 석광원 등에 [52] 의해 복잡한 제어 이론을 배제한 채 모션 데이터로부터 기계 학습만으로 보행 제어기의 자동 생성이 가능하다는 것이 처음 밝혀진 이래, 모션 데이터를 기준 경로로 삼는

다양한 보행 제어 및 시뮬레이션 연구가 진행되고 있다. 최근에는 충분한 계산 용량이 주어진다면 뛰고, 땅 위를 구르는 복잡한 인체 동작도 시뮬레이션을 통해 재현할 수 있게 되었다 [53]. 데이터 기반 시뮬레이션은 독립적으로도 작동할 수 있으나, 이보다는 기존의 제어 이론 및 방법론과 결합되어 보다 효과적인 결과를 만들 수 있다. 이윤상 등이 [54] 제시한 데이터 기반 제어기는 간단한 피드백과 동기화 규칙 만을 이용하여 다양한 걸음걸이와 빠른 방향 전환, 연속적인 스핀 등 어려운 동작들을 재현하는 제어기를 생성할 수 있었다 (그림 4). 복잡한 제어 이론도, 기계 학습을 위한 대량의 학습 데이터도 필요로 하지 않는 방법으로 왜 이렇게 단순한 알고리즘이 잘 동작하는가에 대한 의문이 따른다. 기존의 제어 이론이 먼저 단순화된 모델에서 (예를 들면, 역진자, LQR, 선형 균형 모델 등) 출발해서 점차 보다 복잡한 모델로 일반화하는 과정에서 모델의 복잡성, 계산의 복잡성, 사고의 복잡성 등 다양한 측면에서 복잡성이 증가하는 양상을 보인다. 따라서, 보다 사실적인 시뮬레이션은 보다 복잡하고 난해한 문제로 귀결된다. 이에 반해서 데이터 기반 접근 방법에서의 시각은 인체 보행의 복잡, 미묘한 구조는 이미 모션 데이터에 캡처되어 있다고 간주한다. 따라서, 보다 사실적인 데이터를 이용한 사실적인 시뮬레이션은 문제의 “어려움”이 아닌 “해결책”으로 작동한다. 이상적으로는 사실적인 데이터와 적절한 제어 이론의 조합을 통해 아직 해결되지 않은 많은 난제들에 도전할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 실시간 처리 기술

그래픽스 및 관련 분야에서 다루는 기하모델 데이터의 크기가 점점 증가함에 따라 이를 실시간으로 처리하기 위한 다양한 기술들이 개발되고 있다. 본 장에서는 최근 그래픽스 학계에서 연구되고 있는 실시간 관련 기술을 대용량 모델 처리 기술, GPU 기반 가속화 기술, 다중 해상도 기술 및 전처리 기반 기술 3가지 측면에서 살펴 보도록 하겠다. 또한 이러한 실시간 처리 기술을 렌더링 분야에서 주로 설명하도록 하겠다.

4.1. 대용량 모델 처리 기술

다양한 기하 모델링 기술의 발달로 더욱 더 정밀한 기하 모델을 좀 더 쉽게 제작 할 수 있게 되었다. 그림 5는 현재 그래픽스 및 가상화 분야에서 활용되는 대용량 기하 모델의 예를 보여주고 있다. 일반적으로 모델이 좀 더 정밀하게 표현 될수록 이의 데이터 크기가 현격히 커지는 단점이 있다. 이렇게 증대된 데이터 크기는 데이터 처리 시간을 증가시키고, 최종적으로는 실시간 처리에 상당한 문제를 야기하고 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 기술들이 개발되고 있고, 이러한 기술들을 아래와 같이 구분하여 설명하도록 하겠다.

4.1.1. 데이터 복잡도 감소 기술

데이터의 복잡도 감소 기술은 학계에서 상당히 오랫동안 연구되고 있다. 이 분야 하위 기술로는 다중 해상도 기술 및 가시성 기반 제거 기술 등이 최근까지 연구되고 있다. 다중 해상도 기술은 다른 절에서 좀 더 자세히 살펴보기로 하고, 본 절에서는 최신의 가시성 기반 제거 기술을 살펴보겠다.

가시성 기반 기술은 주로 렌더링 분야에서 널리 활용되는 기술로써 시점자에게 보이지 않는 부분을 신속히 파악하여 추후에 요구되는 다양한 연산을 제거 하여 성능향상을 이루는 방식이다. 또한 다양한 렌더링 효과 (예를 들면, 렌즈효과)등이 가시성의 변화에 민감하게 영향을 받기 때문에 가시성 변화를 감지하여 신속히 연산을 진행하는 기술도 개발되고 있다 [56]. 기존에는 레스터라이제이션 기반 렌더링에서 가시성 기반 기술이 주로 활용이 되었으나 최근에는 고품질 영상을 생성하는 광선추적기술로도 확장되고 있다 [57].

4.1.2. 캐쉬 적합 기술

대용량 데이터 처리 시 데이터 접근 시간이 데이터 처리시간 보다 커지는 현상이 일어나고 있다 [58]. 데이터 접근 시간을 줄이기 위해 캐쉬 미스를 줄이는 것이 상당히 중요하고 이를 위해 캐쉬 적합 기술이 활발히 연구되고 있다. 이는 크게 데이터의 배열을 캐쉬 적합형으로 바꾸는 캐쉬 적합 데이터 배열기술 및 데이터 처리 알고리즘을 캐쉬 적합형으로 개선시키는 기술로 분류된다. 이는 렌더링 분야에서 레스터라이제이션시 GPU 캐



그림 5: 대용량 모델의 예. St. Matthew 디지털 스캔 모델 (약 4억 삼각형 포함, CRS4), 자연 경치 모델 (10억 이상의 삼각형 포함, Saarland Univ.), Double Eagle급 오일 탱커(8억 이상 삼각형 포함) [55]

쉬 미스를 줄이는 기술 [59] 및 광선 추적 기반 기술에서 [60] 각각 활용되고 있다.

4.1.3. 임의 접근 데이터 압축 기술

전 장에서 소개한 캐쉬 적합 기술은 캐쉬 미스를 줄여 전체 데이터 접근 시간을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 하지만 데이터 사이즈 자체를 감소시키지는 않음으로 성능향상에 한계가 있다. 데이터 접근 시간을 더욱 더 감소시키기 위해 다양한 압축 기술이 상당히 오랫동안 연구되어 왔다. 최근에는 다양한 실시간 응용프로그램에서 압축된 데이터를 바로 사용할 수 있는 임의접근 압축기술이 활발히 연구되고 있다 [61]. 이 기술의 핵심은 해당 데이터를 여러 개의 클러스터로 분할한 후 각각을 개별적으로 압축하여 실시간 응용프로그램에서 클러스터 단위로 복원하여 임의접근을 지원하는 것이다.

4.2. GPU 기반 가속화 기술

GPU는 레스터라이제이션 가속기로 시작하여 임의의 연산을 수행 가능한 일반 연산장치로 발전을 거듭하고 있다. 단지 기능상의 확장뿐만 아니라 지속적인 성능향상을 이루어 그래픽스의 응용프로그램뿐만 아니라 다양한 분야에서 활발히 활용되고 있다. 특히 최근 몇 년간의 GPU 성능 향상은 무어의 법칙(Moore's Law) 이상의 성능향상을 보여주고 있다 [62].

GPU가 CPU보다 더 빠르게 발전이 가능한 이유는 먼저 GPU가 정형적인 연산에 최적화 되어 왔고, 또한 몇 십 또는 몇 백 개의 연산장치로 구성되어 비교적 쉽게 하드웨어의 확장성을 보일 수 있었다.

그래픽스 분야에서는 10년 전부터 GPU를 레스터라이제이션 이외의 다른 응용프로그램에서도 활용하기 시작하였고, 최근에는 GPU 범용 언어인 CUDA를 바탕으로 하여 다양한 응용프로그램으로 더욱 더 활발히 사용되고 있다. 본 장에서는 GPU를 활용하여 실시간 처리를 목표로 하는 기술들을 모두 나열하기 보다, GPU 특성을 활용하여 높은 성능을 보이는 대표적 기술을 본 장에서 설명하도록 한다.

4.2.1. 병렬화

현재의 GPU는 몇 십 또는 몇 백 개의 병렬코어로 구성되어 있고, 이를 최대한 활용하기 위하여 많은 기술들이 개발되고 있다. 고화질 렌더링 기술은 가속화를 위해 계층구조를 활용한다 [58]. 이러한 계층구조는 모델이 동적으로 변화할 때 마다 효율적으로 재구성을 해주어야 계층구조를 통한 성능향상을 이룰 수 있다. 하지만 계층구조를 매 프레임마다 재구성하는 것에는 많은 계산량이 요구되어 실시간 처리에 제약이 있었다. Zhou 및 관련 연구자들은 이러한 계층구조 재구성을 GPU를 활용하여 가속화하고 고화질 렌더링이 실시간에도 가능할 수 있다는 것을 최근에 보여주었다 [63]. 이 기술은 핵심은 GPU에 존재하는 모든 병렬 코어를 활용하기 위해 의존도가 없는 작업을 생성하는 다양한 방식에 있다.

4.2.2. GPU를 활용한 범용 응용프로그램 가속화

GPU는 레스터라이제이션 기반 렌더링 기술을 가속화하는 방식으로 발전해왔다. 하지만 CUDA의 개발과 함께 다양한 응용프로그램의 성능향상도 쉽게 가능케 하

고 있다. 특히 많은 응용프로그램에 쓰이는 다양한 수치 해석 연산 [64] 및 푸리에 변환에 [65] 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

4.3. 다중 해상도 및 전처리 기반 기술

실시간 처리를 위해 다중 해상도 및 전처리 기반 기술들이 활발히 개발되고 있다. 다중 해상도 기술은 근사기술폭써 주어진 에러바운드 안에서 간략화를 실시하여 성능향상을 이룬다. 또한 전처리 기술은 런타임시에 필요한 연산을 전처리 시간에 미리 계산해놓아 그것을 활용하여 성능을 향상시킨다.

4.3.1. 다중 해상도 기술

실사와 같은 영상을 위해서는 천 개 이상의 많은 광원을 활용해야 한다. 많은 고화질 영상 생성 기술들의 계산량이 광원의 수에 선형적으로 증가하기 때문에 실사 영상을 실시간으로 생성하기에는 많은 어려움이 존재한다. 최근에 Walter 및 관련 연구자들은 존재하는 모든 광원들을 고려하지 않고, 이의 일부분만을 고려하여 가속화하는 기술을 개발하였다 [66]. 이 기술의 핵심은 특정 광원을 고려하지 않을 때 발생하는 오류를 최소화시키는 방향으로 광원들을 선택하여 고화질을 유지하면서 성능을 향상하였다. 또한 이런 다중 해상도 기술은 렌더링 뿐만 아니라 시뮬레이션 [67], 이미지 프로세싱 등에 [68] 다양하게 활용되고 있다.

4.3.2. 전처리 기반 기술

런타임 시에 많은 양의 연산이 필요하여 실시간 처리가 불가능한 경우가 많이 있다. 이를 가속화하기 위해 많이 사용되는 기술중의 하나가 전처리 기반 기술이다. 이는 런타임 시에 필요한 연산의 결과를 전처리 시에 미리 계산하여 저장한 후, 런타임 시에 전처리된 값만을 활용하여 속도를 가속화 하는 방식이다.

고화질 렌더링에서는 다양한 전처리 기술이 많이 개발되어 왔다. 특히 렌더링 분야에서는 빛 에너지가 특정 방향으로 들어왔을 때 어떤 방향으로 얼마만큼의 에너지가 반사되는지에 대한 정보가 상당히 중요하고 많은

계산량을 요구한다. 이를 가속하기 위해 전처리 과정에서 미리 구하고 이를 구면조화함수로 저장한 후 런타임시에 활용하여 가속화를 실행한다 [69].

5. 영상 및 비디오 처리

최근 디지털 카메라가 널리 보급되면서 컴퓨터 그래픽스 분야의 연구에도 많은 변화가 생겼다. 90년대 이후 점차 비중이 줄어들던 영상과 비디오 처리를 위한 연구들이 다시 활성화되고 있는 것이다. 단순히 주어진 영상의 화질을 개선하거나 편집하는 이전의 연구와 달리 최근에는 영상처리, 컴퓨터 비전, 그래픽스 기술들을 포괄하는 다양한 영상관련 기술이 개발되고 있고 이를 계산 사진학(computational photography)이라 부른다. 이 장에서는 계산 사진학의 연구 동향을 살펴보고, 이를 바탕으로 향후 영상과 비디오 처리를 위한 연구 방향에 대해 언급하고자 한다.

5.1. 계산 사진학

계산 사진학은 빛이 디지털 카메라의 렌즈를 통과해서 최종적으로 센서에 영상을 형성하는 전 과정에 걸친 처리를 통해 새로운 영상을 생성하는 연구 분야를 말한다. 기존의 영상 처리는 영상이라는 결과물을 얻은 후에 그 영상에 처리 과정이 더해져서 수정된 최종 결과물을 얻게 된다. 그에 비해 계산 사진학은 영상이 생성되는 전 과정에 걸쳐 연산 및 조작이 가능하므로 기존의 영상 처리 기술로는 불가능한 새로운 영상을 생성할 수 있다는 차이점이 있다.

계산 사진학은 그 연구 분야에 따라 계산 조명(computational illumination), 계산 광학(computational optics), 계산 영상(computational image), 계산 콘텐츠(computational contents) 등 총 네 개의 분류로 나눌 수 있다.

5.1.1. 계산 조명

사진은 빛이 만들어내는 예술이다. 더 좋은 결과물을 얻기 위해 인공적인 조명은 사진에서 필수적인 요소라고 할 수 있다. 최근 들어 인공적인 조명을 이용해서 새로



그림 6: 왼쪽: 모션 블러가 발생한 입력 사진. 오른쪽: 모션 디블러링 결과 사진. [82]

운 정보를 얻어내는 시도가 이루어지고 있는데, 이를 계산 조명이라고 한다. 계산 조명은 새로운 영상을 얻기 위해 사진에 필요한 인공적인 조명을 구조적으로 조절하는 방식이라고 정의할 수 있다.

사진학에서 가장 널리 사용되는 조명 장치는 플래쉬이다. 플래쉬는 광량이 부족한 환경에서 적절한 노출을 확보할 수 있는 가장 확실한 방법이다. 하지만 플래쉬 자체의 강력한 광원으로 인해 기존의 광원들이 주는 고유의 느낌이나 물체의 표면 질감 등이 왜곡되어 표현된다는 단점이 있다. 또한 장면에서 존재하는 물체가 매끄러운 경우 플래쉬에 의한 빛의 반사점이 생기거나 물체 뒤쪽으로 추가적인 그림자가 생기는 등의 문제가 발생하게 된다. 플래쉬를 사용한 사진과 플래쉬를 사용하지 않은 사진의 장점을 결합하여 광량이 부족한 환경에서도 사용자가 원하는 깨끗한 사진을 얻을 수 있는 연구가 진행되었다 [70,71,72].

비사실적 렌더링에서 가장 중요한 부분 중 하나는 윤곽선인데, 윤곽선을 강조하여 표현해주고 물체의 내부는 간단하게 표현함으로써 물체를 인지하는데 도움을 주기 때문이다. 물체의 윤곽선을 효과적으로 찾아내기 위해 다수의 플래쉬를 이용한 사진들을 조합하는 새로운 알고리즘이 제시되었다 [73].

실세계의 물체들을 삼차원으로 복원하여 사실적인 렌더링을 하려는 많은 시도가 있었다. 삼차원으로 복원할 수 있다면 조명의 방향이나 위치가 달라지는 경우에도 효과적으로 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 실세계의 물체들을 복원하는 것 자체도 어렵지만 복원된 물체를 사실적으로 렌더링하는 것도 쉽지 않은 일이

다. 이런 문제점을 극복하기 위해 영상 기반의 새로운 방법들이 소개되었다 [74,75]. 이 방법들의 기본적인 아이디어는 표면 반사율 필드(surface reflectance field)를 계산한 후에 이 정보를 이용하여 주어진 조명 환경에서의 결과 영상을 생성한다는 것이다. 이러한 방법은 삼차원 복원이 필요 없다는 장점과 함께 영상 기반이므로 사실적인 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

5.1.2 계산 광학

계산 광학은 빛이 카메라 렌즈를 통과하는 시점에 부수적인 작업을 통해 추가적인 정보를 얻어내는 방법을 통칭한다. 빛이 렌즈를 통과하는 시점에 추가적인 처리가 필요하기 때문에, 특수한 장비를 사용한다는 것이 계산 광학 알고리즘들의 공통점이라고 할 수 있다.

기존의 사진학에서는 렌즈가 빛을 모아주고 조리개를 통해 통과하는 빛의 양을 조절하는 역할만을 수행한다. 따라서 기존의 사진학에서는 조리개 값의 변화에 따른 피사계 심도의 변화만 줄 수 있었다. 그러나 계산 사진학에서는 렌즈부에 추가적인 장치를 장착하여 추가 정보를 얻어내는 연구가 진행되었다 [76,77,78].

사진학에 의하면 착란원 현상에 의해 피사계 심도 내에 있는 물체는 선명하게 나오고 피사계 심도 밖에 있는 물체는 블러되는 사진을 얻게 된다. 모든 물체를 선명하게 나오게 하는 동시에 물체의 거리 정보를 얻어내는 장비를 사용하면 피사계 심도와 초점이 맞는 위치를 조절할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 이런 장비는 매우 비싸다는 문제가 있다. 기존의 카메라를 이용하여 물

체의 거리 정보를 얻어낼 수 있는 새로운 방법이 제시되었는데, 카메라 조리개 안에 패턴을 가진 마스크를 삽입하는 간단한 방법으로 기존의 장비를 재활용할 수 있도록 하였다 [79].

5.1.3 계산 영상

계산 광학이 빛이 렌즈를 통과하는 단계에서 연산이 이루어지는 반면에 계산 영상은 렌즈를 통과한 빛이 영상을 생성한 후에 추가적인 연산을 통해 새로운 영상이 생성된다는 점에서 차이가 있다. 또한 계산 광학이 광학적인 정보를 이용하는 반면, 계산 영상은 광학적인 정보를 필요로 하지 않는다.

사진을 찍는 동안 손 떨림으로 인해 모션 블러가 발생하게 된다. 이러한 모션 블러는 사진의 중요한 정보를 뭉개버린다는 문제가 있다. 그 동안 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되었다 [80,81,82]. 모션 블러는 블러 커널로 모델링될 수 있으며, 수학적으로는 영상과 블러 커널의 컨볼루션(convolution)으로 볼 수 있다. 따라서 미지의 카메라 흔들림을 제거하는 문제는 영상 역컨볼루션(image deconvolution) 문제로 변환할 수 있다. 이것이 모션 디블러링의 기본 아이디어이다.

계조(dynamic range)란 인식할 수 있는 최소값과 최대값의 비율로 정의된다. 사람의 눈은 10,000 dB의 계조를 갖는데 비해, 카메라 센서나 모니터는 100 dB의 상대적으로 낮은 계조를 갖는다. 이러한 제한된 계조로 인해 역광과 같은 특수한 상황에서 중요한 정보를 잃게 되는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 나타난 것이 고계조 영상(high dynamic range image)인데, 하나의 카메라로 노출을 변화시키면서 다수의 영상을 획득한 후에 가장 적합한 노출을 갖는 정보만을 추출하여 한 장의 영상을 만들어낸다 [83,84].

디지털 카메라나 스캐너를 통해 들어온 영상은 기기의 한계, 제조기술의 한계 등의 이유로 해상도가 제한 또는 저하된다는 문제점이 있다. 이러한 물리적인 한계를 극복하기 위한 노력이 바로 초해상도 영상 기법이다 [85,86,87]. 1970년대 시작된 초해상도 영상에 대한 연구는 1990년대 들어서면서 허블 망원경 등 우주 산업의 발전으로 비약적인 발전을 하게 된다. 영상 처리 분야에서 주로 다루어지던 초해상도 영상 기법이 90년대 후반

컴퓨터 그래픽스 분야에서도 본격적으로 연구되기 시작하였다. 주어진 입력 영상을 확대하기 위해 단순히 업샘플링할 경우에는 계단 현상이 나타나지만, 초해상도 영상 기법을 이용하면 영상을 확대해도 깨끗한 영상을 얻을 수 있다.

초해상도 영상 기법은 제한된 해상도를 갖는 입력 영상을 확대했을 때 생길 수 있는 화질 저하 문제를 해결하기 위해 입력 영상을 조작하는 방법이라면, 기가픽셀 영상은 확대해도 화질 저하가 발생하지 않을 정도의 많은 정보를 수집해놓음으로써 화질 저하를 원천적으로 막는 방법이라고 할 수 있다 [88,89]. 기가픽셀 영상은 용어 그대로 1기가 이상의 픽셀 정보를 갖는 영상을 말한다. 현재 시판되는 카메라들은 대부분 메가픽셀 해상도를 갖고 있기 때문에, 기가픽셀 영상 자체를 만드는 것 자체도 쉽지 않은 문제이다. 따라서 현재의 기가픽셀 영상 연구는 기가픽셀 영상을 생성하고 운용하는데 집중하고 있다.

5.1.4 계산 콘텐츠

계산 콘텐츠는 광학 정보가 없는 영상으로부터 새로운 영상을 얻어낸다는 점에서는 계산 영상과 흡사하다고 할 수 있다. 하지만 계산 영상은 화질 개선을 목표로 하는 반면에, 계산 콘텐츠는 새로운 결과물을 생성하여 새로운 분야에 적용할 수 있다는 점에서 그 차이를 둘 수 있다.

영상이나 비디오를 기존의 방법처럼 비율대로 리사이즈하면 왜곡이 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위해 중요한 물체를 찾아내어 그 물체는 리사이즈될 때에도 비율을 유지할 수 있도록 만들어주는 기술을 리타게팅이라고 한다 [90,91,92]. 리타게팅이란 기존의 사진이나 비디오를 다른 비율로 바꾸더라도 왜곡이 발생하지 않게 해주는 기술이다. 이때 중요한 점은 중요한 위치에 있는 물체의 비율을 유지하면서 정보를 보존함으로써 보는 사람으로 하여금 화면이 리사이즈되었다는 점을 인지하지 못하도록 해주어야 한다는 것이다. 이를 위해서는 중요한 물체나 지역의 정보를 찾아내는 작업이 선행되어야 한다.

최근 컴퓨터 그래픽스 기술의 발전에 따라 광고나 영화 등에 합성된 영상이 많이 사용되고 있다. 영상 합성을

위해서는 먼저 합성할 물체를 기존의 영상에서 따와야 하는데, 이런 작업을 영상 매칭이라고 한다. 원하는 물체를 기존의 영상에서 따내는 작업을 위해 많은 알고리즘이 나와 있고, 어도비사의 포토샵과 같은 상용 프로그램에는 대부분 구현되어 있다. 최근에 이런 작업을 쉽게 할 수 있는 여러 가지 영상 매칭 기법들이 발표되고 있다 [93,94,95].

카메라와 디스플레이 장비는 대부분 컬러를 사용하지만, 아직도 흑백을 사용하는 분야는 존재한다. 대표적으로 출판업계나 신문업계는 비용적인 측면 때문에 흑백을 많이 사용한다. 따라서 컬러 사진을 흑백 사진으로 바꾸는 것은 중요한 작업이며, 컬러 사진을 흑백 사진으로 바꾸는 방법은 다양하다. 하지만 주어진 컬러 영상을 흑백 영상으로 변환시에 기존의 방식들은 컬러 영상이 가지고 있는 중요한 특성들을 잃게 된다. 따라서 그레이스케일 영상으로 변환하면서도 이러한 특성을 유지시켜 컬러 영상 본래의 느낌을 잘 반영하도록 하는 기법에 대한 연구가 최근에 많이 진행되고 있다 [96,97,98,99]. 이런 연구의 기본적인 목표는 흑백으로 변환되면서 발생하는 정보의 손실을 최소화하는 것이다.

6. 현황과 전망

지금까지 살펴 본 바에 따르면 세부분야에 상관없이 공통적으로 나타나는 특징들을 발견할 수 있다. 먼저, 실제 세상에서 관찰할 수 있는 기하학적 형상, 영상, 반사율, 동작, 표정 등 관찰/측정 데이터를 활용하는 데이터 기반 접근 방법이 모델링, 렌더링, 애니메이션, 영상 처리 등 전 분야에서 고르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 연관되어, 다양한 입력/측정/관찰 하드웨어 장치의 개발이 지속적으로 이루어지고 있고 이러한 움직임은 컴퓨터 그래픽스 연구가 보다 현실의 물리적 세상에 관심을 기울이고 더 가까워지고자 노력하고 있음을 보여준다. 물리적 현실 세계에서의 데이터 취득, 처리, 출력 및 제어를 위해서는 필연적으로 초대용량 데이터의 관리와 초고속 계산 능력이 컴퓨터 그래픽스에서 지속적으로 필요함을 알 수 있다.



그림 7: 왼쪽: 입력 컬러 사진. 오른쪽: 결과 흑백 영상. ([97]에서 발췌)

감사의 글

자료 정리와 논문 편집에 도움을 준 박노열(서울대학교)에서 감사를 전합니다. 이 연구는 2011년도 교육과학기술부 산하 한국연구재단(No. 2011-0030822, No. 2011-0018340)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] A. Schollmeyer, and B. Fröhlich, "Direct trimming of NURBS surfaces on the GPU," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 3, 2009
- [2] Q. Li, and J. Tian, "2D piecewise algebraic splines for implicit modeling," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no.2, 2009
- [3] J. Stam, and R. Schmidt, "On the Velocity of an Implicit Surface," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30 no.3, 2011
- [4] P. Mullen, P. Memari, F. Goes, and M. Desbrun, "HOT: Hodge-optimized triangulations," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, p. 103, 2011
- [5] T. Gurung, M. Luffel, P. Lindstrom, and J. Rossignac, "LR: compact connectivity representation for triangle meshes," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30 no.4, p. 67, 2011
- [6] A. Myles, N. Pietroni, D. Kovacs, and D. Zorin "Feature-aligned T-meshes," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, 2010

- [7] M. Zhang, J. Huang, X. Liu, and H. Bao, "A wave-based anisotropic quadrangulation method," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, 2010
- [8] K. Crane, U. Pinkall, and P. Schröder, "Spin transformations of discrete surfaces," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, p. 104, 2011
- [9] W. Feng, B. Kim, Y. Yu, L. Peng, and J. Hart, "Feature-preserving triangular geometry images for level-of-detail representation of static and skinned meshes," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 2, 2010
- [10] L. He, S. Schaefer, and K. Hormann, "Parameterizing subdivision surfaces," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, 2011
- [11] D. Levin, "Mesh-independent surface interpolation," *Geometric Modeling for Scientific Visualization*, pp. 37–49, 2003
- [12] M. Alexa, J. Behr, D. Cohen-Or, S. Fleishman, D. Levin, and C. Silva, "Computing and Rendering Point Set Surfaces," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 9, no. 1, pp. 3–15, 2003
- [13] H. Avron, A. Sharf, C. Greif, and D. Cohen-Or, "11-Sparse reconstruction of sharp point set surfaces," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 5, p. 135, 2010
- [14] L. Seversky, M. Berger, and L. Yin, "Harmonic point cloud orientation", *Computers & Graphics*, vol. 35, no.3, pp. 492–499, 2011
- [15] M. Alexa, and A. Adamson, "Interpolatory point set surfaces - convexity and Hermite data," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 2, 2009
- [16] A. Rivers, F. Durand, and T. Igarashi, "3D modeling with silhouettes," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, 2010
- [17] K. Xu, H. Zheng, H. Zhang, D. Cohen-Or, L. Liu, and Y. Xiong, "Photo-inspired model-driven 3D object modeling," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, p. 80, 2011
- [18] H. Wang, M. Liao, Q. Zhang, R. Yang, and G. Turk, "Physically guided liquid surface modeling from videos," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 3, 2009
- [19] M. Wand, B. Adams, M. Ovsjanikov, A. Berner, M. Bokeloh, P. Jenke, L. Guibas, H. Seidel, and A. Schilling, "Efficient reconstruction of nonrigid shape and motion from real-time 3D scanner data," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 2, 2009
- [20] W. Chang, and M. Zwicker, "Global registration of dynamic range scans for articulated model reconstruction," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 3, p. 26, 2011
- [21] M. Alexa, and M. Wardetzky, "Discrete Laplacians on general polygonal meshes," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, p. 102, 2011
- [22] Y. Lipman, R. Rustamov, and T. Funkhouser, "Biharmonic distance," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 3, 2010
- [23] O. Schall, A. Belyaev, and H. Seidel, "Adaptive feature-preserving non-local denoising of static and time-varying range data," *Computer-Aided Design*, vol. 40, no. 6, pp. 701–707, 2008
- [24] M. Chuang, and M. Kazhdan, "Interactive and anisotropic geometry processing using the screened Poisson equation," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, p. 57, 2011
- [25] S. Osher, and R. Fedkiw, "Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces," *Springer*, 2003
- [26] H. Barki, F. Denis, and F. Dupont, "Contributing vertices-based Minkowski sum of a nonconvex-convex pair of polyhedral," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 1, p. 3, 2011
- [27] J. Lee, J. Chai, P. Reitsma, J. Hodgins, and N. Pollard., "Interactive control of avatars animated with human motion data," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, no. 3, pp. 491–500, 2002
- [28] H. Shin, and H. Oh, "Fat graphs: constructing an interactive character with continuous controls," in *Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation (SCA '06)*, pp. 291–298, 2006
- [29] A. Safonava, and J. Hodgins, "Construction and

- optimal search of interpolated motion graphs," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, p. 106, 2007
- [30] J.-X. Chai, and J. K. Hodgins, "Constraint-based motion optimization using a statistical dynamic model," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, 2007
- [31] J. Lee, and K. H. Lee, "Precomputing avatar behavior from human motion data," *Graphical Models*, vol. 68, no. 2, pp. 158–174, 2006.
- [32] A. Treuille, Y. Lee, and Z. Popović, "Near-Optimal character animation with continuous control," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, p. 7, 2007
- [33] Y. Lee, S. J. Lee, and Z. Popović, "Compact character controllers," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 5, pp. 169:1–169:8, 2009.
- [34] S. Levine, P. Krähenbühl, S. Thrun, and V. Koltun, "Gesture controllers," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, pp. 124–135, 2010.
- [35] H. J. Shin and J. Lee, "Motion Synthesis and Editing in Low-Dimensional Spaces," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 17, no. 3-4, pp. 219–227, 2006.
- [36] M. Lau and J. J. Kuffner, "Precomputed search trees: planning for interactive goal-driven animation," in *Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 299–308, 2006.
- [37] M. G. Choi, J. Lee, S. Y. Shin, "Planning Biped Locomotion Using Motion Capture Data and Probabilistic Roadmaps," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 2, pp. 182–203, 2003.
- [38] M. G. Choi, M. Kim, K. Hyun and J. Lee, "Deformable Motion: Squeezing into Cluttered Environments," *Computer Graphics Forum*, vol. 30, no. 2, pp. 445–453, 2011
- [39] S. Levine, Y. Lee, V. Koltun, and Z. Popović, "Space-time planning with parameterized locomotion controllers," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 3, pp. 23:1–23:11, 2011.
- [40] K. H. Lee, M. G. Choi, and J. Lee. "Motion patches: building blocks for virtual environments annotated with motion data," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no. 3, pp. 898–906, 2006.
- [41] T. Kwon, K. H. Lee, J. Lee, and S. Takahashi, "Group motion editing," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, pp. 80:1–80:8, 2008.
- [42] M. Kim, K. Hyun, J. Kim, and J. Lee, "Synchronized multi-character motion editing," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 3, pp. 79:1–79:9, 2009.
- [43] E. S. L. Ho, T. Komura, and C.-L. Tai. "Spatial relationship preserving character motion adaptation," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, pp. 33:1–33:8, 2010.
- [44] K. Wampler, E. Andersen, E. Herbst, Y. Lee, and Z. Popović, "Character animation in two-player adversarial games," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 3, pp. 26:1–26:13, 2010.
- [45] K. H. Lee, M. G. Choi, Q. Hong, AND J. Lee, "Group behavior from video: a data-driven approach to crowd simulation," in *SCA '07: Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 109–118, 2007.
- [46] E. Ju, M. G. Choi, M. Park, J. Lee, K. H. Lee, and S. Takahashi, "Morphable crowds," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 6, pp. 140:1–140:10, 2010.
- [47] S. Coros, P. Beaudoin, and M. van de Panne, "Generalized biped walking control," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, pp. 130:1–130:9, 2010.
- [48] M. da Silva, Y. Abe, and J. Popović, "Interactive simulation of stylized human locomotion" *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, pp. 82:1–82:10, 2008.
- [49] U. Muico, Y. Lee, J. Popović, and Z. Popović, "Contact-aware nonlinear control of dynamic characters," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 3, pp. 81:1–81:9, 2009.
- [50] K. Yin, K. Loken, and M. van de Panne, "Simbicon: Simple biped locomotion control," *ACM Transactions*

- on *Graphics*, vol. 26, no. 3, p. 105, 2007.
- [51] Y. Tsai, W. Lin, K. B. Cheng, J. Lee, and T. Lee, "Real-Time Physics-Based 3D biped character animation using an inverted pendulum model," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 99, no. 2, pp.325-337, 2009.
- [52] K. W. Sok, M. Kim, and J. Lee, "Simulating biped behaviors from human motion data," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, p. 107, 2007.
- [53] L. Liu, K. Yin, M. van de Panne, T. Shao, and W. Xu, "Sampling-based contact-rich motion control," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, pp. 128:1-128:10, 2010.
- [54] Y. Lee, S. Kim, and J. Lee, "Data-Driven biped control," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, pp. 129:1-129:8, 2010.
- [55] 윤성의, 대용량 모델 가시화 기술의 최신 연구 동향, 한국 CAD/CAM 학회지 제15권 1호
- [56] C. J. Gribel, R. Barringer, and T. Akenine-Möller, "High-Quality Spatio-Temporal Rendering using Semi-Analytical Visibility," *ACM Transactions on Graphics* vol.30, no. 4, pp. 54:1-54:12, 2011
- [57] J. Lehtinen, T. Aila, J. Chen, S. Laine, and F. Durand, "Temporal Light Field Reconstruction for Rendering Distribution Effects," *ACM Transactions on Graphics* vol.30, no. 4, pp. 55:1-55:12, 2011
- [58] S.-E. Yoon, E. Gobbetti, D. Kasik, and D. Manocha, "Real-Time Massive Model Rendering," Morgan & Claypool Publisher, 2008
- [59] S.-E. Yoon, P. Lindstrom, V. Pascucci, and D. Manocha, "Cache-Oblivious Mesh Layouts," *ACM Transaction on Graphics*, vol. 24, no. 3, 2005
- [60] B. Moon, Y. Byun, T.-J. Kim, P. Claudio, H.-S. Kim, Y.-J. Ban, S. W. Nam, and S.-E. Yoon, "Cache-Oblivious Ray Reordering," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 29, No. 3, pp. 28:1-28:10, 2010
- [61] T.-J. Kim, Y. Byun, Y. Kim, B. Moon, S. Lee, and S.-E. Yoon, "HCCMeshes: Hierarchical-Culling oriented Compact Meshes," *Computer Graphics Forum*, vol. 29, no. 2, pp. 299-308, 2010
- [62] NVIDIA CUDA Programming Guide, Nvidia, 2010
- [63] K. Zhou, Q. Hou, R. Wang, and B. Guo, "Real-Time KD-Tree Construction on Graphics Hardware," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 5, pp. 126:1-126:11, 2008
- [64] N. K. Govindaraju and D. Manocha, Cache-Efficient Numerical Algorithms using Graphics Hardware, *Parallel Computing*, vol. 33, no. 10-11, pp. 663-684, 2007
- [65] N. K. Govindaraju, B. Lloyd, Y. Dotsenko, B. Smith, and J. Manferdelli, "High Performance Discrete Fourier Transforms on Graphics Processors," in *Proceedings of the 2008 ACM/IEEE conference on Supercomputing*, pp. 2:1-2:12, 2008
- [66] B. Walter, A. Arbree, K. Bala, and D. Greenberg, "Multidimensional lightcuts," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no. 3, pp. 1081-1088, 2006
- [67] Y. Lee, S.-E. Yoon, S. Oh, D. Kim, and S. Choi, "Multi-Resolution Cloth Simulation," *Computer Graphics Forum*, vol. 29, no. 7, pp. 2225-2232, 2010
- [68] A. Agarwala, "Efficient gradient-domain compositing using quadrees," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3 p. 94, 2007
- [69] J. Lehtinen, M. Zwicker, E. Turquin, J. Kontkanen, F. Durand, F. Sillion, T. Aila, "A Meshless Hierarchical Representation for Light Transport," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, pp. 37:1-37:9, 2008
- [70] L. Yuan, J. Sun, L. Quan and H. Y. Shum, "Image deblurring with blurred/noisy image pairs," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, 2007.
- [71] E. Eisemann and F. Durand, "Flash Photography Enhancement via Intrinsic Relighting," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 673-678, 2004.
- [72] G. Petschnigg, R. Szeliski, M. Agrawala, , M. Cohen, H. Hoppe and K. Toyama, "Digital Photography with Flash and No-flash Image pairs," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 664-672, 2004.

- [73] R. Raskar, K. Tan, R. Feris, J. Yu and M. Turk, "Non-photorealistic Camera: Depth Edge Detection and Stylized Rendering using Multi-Flash Imaging," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 679-688, 2004.
- [74] V. Masselus, P. Peers, P. Dutré and Y. D. Willems, "Relighting with 4D Incident Light Fields," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 3, pp. 613-620, 2003.
- [75] W. Matusik, M. Loper and H. Pfister, "Progressively-Refined Reflectance Functions from natural Illumination," *Eurographics Symposium on Rendering*, pp. 299-308, 2004.
- [76] B. Sajadi, A. Majumder, K. Hiwada, A. Maki and R. Raskar, "Switchable primaries using shiftable layers of color filter arrays," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, 2011.
- [77] Y. Bando, B. Chen and T. Nishita, "Extracting depth and matte using a color-filtered aperture," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 5, 2008.
- [78] O. Cossairt, C. Zhou and S. Nayar, "Diffusion Coded Photography for Extended Depth of Field," *ACM Transactions on Graphics*, vol 29, no. 4, 2010.
- [79] A. Levin, R. Fergus, F. Durand and B. Freeman, "Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture," *ACM Transactions on Graphics*, vol.26, no.3, 2007.
- [80] Q. Shan, J. Jia and A. Agarwala, "High-quality motion deblurring from a single image," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, pp. 1-10, 2008.
- [81] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S. Roweis and W. Freeman, "Removing Camera Shake from a Single Image," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 787-794, 2006.
- [82] S. Cho, Y. Matsushita and S. Lee, "Removing Non-Uniform Motion Blur from Images," in *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1-8, 2007.
- [83] E. Talvala, A. Adams, M. Horowitz and M. Levoy, "Veiling Glare in High Dynamic Range Imaging," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, 2007.
- [84] P. Debevec and J. Malik, "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," in *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, pp. 369-378, 1997.
- [85] Q. Shan, Z. Li, J. Jia, and C. Tang, "Fast Image/Video Upsampling," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 5, 2008.
- [86] J. Sun, Z. Xu and H. Shum, "Image super-resolution using gradient profile prior," in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8, 2008.
- [87] G. Freeman and R. Fattal, "Image and Video Upscaling from Local Self-Examples," *ACM Transactions on Graphics*, vol 28, no. 3, pp. 1-10, 2010.
- [88] J. Kopf, M. Uyttendaele, O. Deussen and M. Cohen, "Capturing and Viewing Gigapixel Images," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, 2007.
- [89] J. Kopf, M. Cohen, D. Lischinski and M. Uyttendaele, "Joint Bilateral Upsampling," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, 2007.
- [90] Y. Wang, J. Hsiao, O. Sorkine and T. Lee, "Scalable and Coherent Video Resizing with Per-Frame Optimization," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 3, 2011.
- [91] Y. Wang, H. Lin, O. Sorkine and T. Lee, "Motion-based Video Retargeting with Optimized Crop-and-Warp," *ACM Transactions on Graphics*, vol 29, no. 3, 2010.
- [92] M. Rubinstein, A. Shamir and S. Avidan, "Improved seam carving for video retargeting," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, 2008.
- [93] Y. Zheng, C. Kambhamettu, J. Yu, T. Bauer and K. Steiner, "FuzzyMatte: A computationally efficient scheme for interactive matting," in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8, 2008.
- [94] J. Wang, M. Agrawala and M. Cohen, "Soft Scissors : An Interactive Tool for Realtime High Quality Matting," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no.

3, 2008.

- [95] M. McGuire, W. Matusik, H. Pfister, J. Hughes, F. Durand, "Defocus video matting", *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 567-576, 2005.
- [96] A. A. Gooch, S. C. Olsen, J. Tumblin and B. Gooch, "Color2Gray: Saliency-Preserving Color Removal," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 1-6, 2005.
- [97] Y. Kim, C. Jang, J. Demouth and S. Lee, "Robust Color-to-gray via Nonlinear Global Mapping," *ACM Transactions on Graphics*, vol 28, no. 5, 2009.
- [98] M. Grundland and N. A. Dodgson, "Decolorize: Fast, Contrast Enhancing, Color to Grayscale Conversion", in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 40, no. 11, pp. 2891-2896, 2007.
- [99] K. Smith, P. Landes, J. Thollot and K. Myszkowski, "Apparent Greyscale: A Simple and Fast Conversion to Perceptually Accurate Images and Video," *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 2, pp. 193-200, 2008.

159–162, 2006.

pp. 133-146, 2010.

- [109] G. Reitmayr, E. Eade, T. Drummond, "Semi-automatic Annotations in Unknown Environments," in *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 1-4, 2007.
- [110] Sprxmobile, *Augmented Reality Browser: Layar*, <http://www.layar.com/>
- [111] Mobility, *Wikitude*, <http://www.wikitude.org/>
- [112] Metaio, *Junaio*, <http://www.junaio.com/>
- [113] T. Langlotz, D. Wagner, A. Mulloni, and D. Schmalstieg, "Online Creation of Panoramic Augmented Reality Annotations on Mobile Phones," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 99, no. PrePrints, 2010.
- [114] W. Lee, Y. Park, V. Lepetit, and W. Woo, "Point-and-Shoot for Ubiquitous Tagging on Mobile Phones," 2010 9th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 57–64, 2010.
- [115] J. Lifton, "Dual Reality: An Emerging Medium," Ph.D. Dissertation, M.I.T., Dept. of Media Arts and Sciences, 2007.
- [116] W. Roush, *Second Earth*, Technology Review, 2007.
- [117] D. Anguelov, C. Dulong, D. Filip, C. Frueh, S. Lafon, R. Lyon, A. Ogale, L. Vincent, and J. Weaver, "Google Street View: Capturing the World at Street Level," *Computer*, vol. 43, no. 6, pp. 32-38, 2010.
- [118] H. Yoon, and W. Woo, "Design and Implementation of a Universal Appliance Controller Based on Selective Interaction Modes," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 54, No. 4, pp. 1722-1729, 2008
- [119] J. Lepinski, E. Akaoka, and R. Vertegaal., "Context menus for the real world: the stick-anywhere computer," in *proceedings of the 27th international conference extended abstracts on human factors in computing systems*, pp. 3499-3500, 2009
- [120] H. Lee, M. Billinghurst, and W. Woo, "Two-handed tangible interaction techniques for composing augmented blocks," *Virtual Reality*, vol. 15, No. 2-3,