

자전거 시뮬레이터 개발

이 글에서는 한국과학기술원 기계공학과와 전자전산학과의 일곱 개 연구실로 구성된 팀에서 개발 중인 자전거 시뮬레이터를 소개한다. 이두용

자전거 시뮬레이터

컴퓨터 그래픽으로 재생되는 가상현실 환경과 운동감을 재현해 주는 장치를 결합하여 현실감을 보다 향상시킨 시뮬레이터는 군용 분야에서는 항공기, 탱크, 대포, 전투함 등의 훈련용으로, 민간 분야에서는 여가 산업의 발달과 연계하여 게임용 시뮬레이터로 그 응용 분야가 확대되고 있다. 그러나 운동장치를 포함하는 양방향(interactive) 시뮬레이터의 국내 기술은 아직 개발의 여지가 많은 편이며, 지금까지 알려진 시뮬레이터의 개발 사례는 차량, 건설 차량, 항공기, 자전거 시뮬레이터 등이 있다. 특히 자전거 시뮬레이터는 자전거가 탑승자에 의해 동력을 얻는 장치이고 자전거와 탑승자의 동역학을 함께 고려해야 현실감을 충실히 재현할 수 있다는 점에서 그 연구 가치가 높다. 그러나 이제까지 국내에서 실제로 개발되거나 개발 중인 자전거 시뮬레이터는

주로 그래픽 시뮬레이션을 위주로 되어 있다. 국외에서는 싱가포르의 Nanyang Technological University에서 운동장치를 포함한 자전거 시뮬레이터가 개발되고 있다.

한국과학기술원에서 개발된 양방향 자전거 시뮬레이터는 사용자가 스텔워드 플랫폼 매니플레이터 (SPM) 위에 설치된 자전거를 타고 전방에 투사되는 그래픽 환경 내에서 실제 자전거를 주행하듯 페달과 조향장치를 조작하면서 운동감과 시각효과가 재현되는 경험을 하며, 한국과학기술원 경내를 주행하도록 되어 있다. 이 시뮬레이터는 자전거를 포함하여, 운동감을 재현하는 스텔워드 플랫폼 매니플레이터, 반력을 구현하는

조향장치와 페달장치, 그래픽 시뮬레이터와 투사장치, 음향시스템, 그리고 네트워크로 연결된 각 세부 시스템의 제어 모듈들로 구성되어 있다. 이제부터 그 구성요소들을 하나하나 살펴본다.

음향시스템

가상현실에서 사실적인 가상음장은 가상환경에 대한 몰입감을 증대시키기 위한 필수 요소이다. 1960년대 후반부터 심리음향학

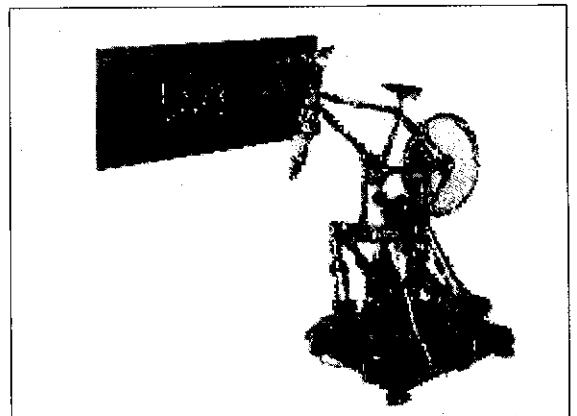


그림 1 한국과학기술원 자전거 시뮬레이터

• 이두용/ 한국과학기술원 기계공학과, 교수/ e-mail : leedy@kaist.ac.kr

과 연계하여 가상음장 재현기술에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 연구의 주류는 Binaural Technology로서 HRTF(Head Related Transfer Function)를 통과시킨 신호를 두 개의 채널로 출력하여 가상음장을 재현하는 방식이다.

이 방법은 공간감을 훌륭하게 재현하지만 HRTF의 개인편차로 인해 모든 사람에게 일반적으로 적용하기에는 호환성이 떨어지며, 가상음장 생성영역이 좁아서 사용자의 움직임에 민감하다는 문제가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 멀티 채널을 이용하여 가상 입체음장을 구현하는 방법이 제시되었다. 기존의 서라운드 시스템과는 사용자와 실시간으로 상호작용이 가능해야 한다는 점에서 차별화된다. 멀티 채널 시스템의 가장 큰 장점은 개인차에 관계없이 비교적 정확한 정위감을 구현할 수 있다는 것이다. 그 중에서 1997년에 Ville Pulkki는 VBAP(Vector Base Amplitude Panning)라는 방법을 제안하였는데 이는 단위벡터의 선형조합이 공간의 모든 벡터를 표현할 수 있다는 것과 유사한 원리를 이용한 것이며, 한국과학기술원 자전거 시뮬레이터의 음향시스템 구동 알고리즘으로 사용되었다.

VBAP를 구현하는 멀티 채널 사운드 시스템을 구축하기 위해서는 각 채널의 신호를 독립적으로 조작할 수 있어야 한다. 이를

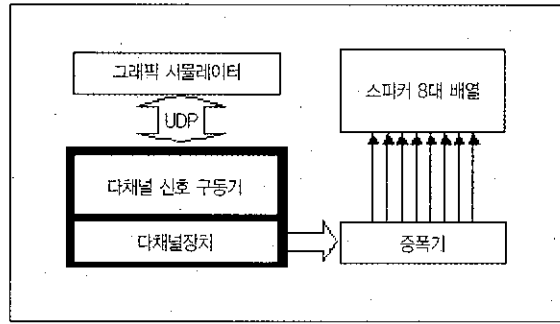


그림 2 음향시스템 구조

위해 PC에서 두 채널의 출력을 지원하는 사운드 카드를 조합하여 멀티 채널 시스템을 구성하였다. 구축된 시스템은 여덟 개의 채널에서 출력되는 신호로 입체음장을 구현하고 있다. 멀티 채널 구동 프로그램은 Windows 환경에서 실행되며, 외부 시스템과 UDP를 이용하여 통신을 한다. 영상을 담당하는 컴퓨터로부터 음원에 대한 정보를 전달 받아서 내부 신호처리 과정을 거친 후, 앰프를 통과시켜 여덟 개의 스피커로 출력한다. 생성되는 가상음원의 방향과 거리감은 사용자의 HRTF에 거의 영향을 받지 않는다. 현재 멀티 채널 시스템에서 가상 공간감을 구현하기 위한 연구가 진행중이다.

자전거 동역학 및 운동감 재현

운전자는 자전거를 탈 때 핸들과 몸의 움직임을 이용하여 방향을 바꾸며, 페달을 굴리거나 브레이크를 잡음으로써 가속하거나 감속한다. 또한 지면의 종류나 형상에 따라서 그 운동이 달라지기도 하고, 바람의 세기와 방향에 의해서 영향을 받기도 한다. 자전

거는 네 개의 바퀴를 가진 차량과는 달리 두 개의 바퀴를 가지며, 운전자가 자전거 운동의 주 에너지원이기 때문에 각 방향으로 큰 회전운동을 하며, 가속력이 크지 않다. 그러므로 이러한 특성을 갖는 자전거 운동을 재현하기 위해서는 페달

력, 핸들 조향력 또는 조향각, 운전자의 움직임에 의한 힘과 모멘트를 측정하여 동역학 모델에 고려하여야 하며, 지면과의 마찰, 미끄럼, 공기저항 등도 모델화하여야 한다. 본 시뮬레이터에서의 자전거 모델은 앞바퀴, 뒷바퀴, 프레임, 그리고 핸들로 구성되어 있으며, 운전자는 단지 질량만을 가지면서 자전거에 외력을 가하는 것으로 간주하였다. 운전자의 질량과 자전거 프레임, 핸들의 질량은 자전거의 앞·뒷바퀴에 집중되어 있다고 가정하였다. 자전거 모델의 운동방정식 유도를 위하여 뉴턴-오일러(Newton-Euler) 방법을 사용하였다. 앞바퀴, 뒷바퀴, 프레임, 핸들의 자유 물체도를 고려하여, 각각 세 개의 힘 평형 운동방정식과 세 개의 모멘트 평형 운동방정식을 도출하였다. 유도된 운동방정식을 이용하여, 자전거의 위치, 프레임에 대한 핸들의 상대각도, 핸들 포크와 프레임에 대한 앞·뒷바퀴의 상대 회전각도를 비롯한 미지수들을 구하였다. 자전거 운동에 대한 외부 환경의 영향 중에서 지면과의 구름 마찰은 상대적으로 그 크기가 매우 작기 때문에 전 속도 영역에

서 무시하였으며, 공기저항은 속도의 제곱에 비례하는 힘으로 모델화하였다. 또한 자전거 타이어를 스프링-댐퍼 시스템으로 모델화하여 지면에서 전달되는 힘을 고려하였으며, 바퀴와 지면과의 상대운동으로 나타나는 마찰력, 캠버력 등도 자전거 모델에 포함하였다. 이렇게 유도된 자전거 동역학 모델은 C 언어로 구현되었으며, 3차원 그래픽 애니메이션을 통하여 실제 자전거의 거동과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

자전거 동역학으로부터 계산되는 자전거 프레임의 운동은 6자유도 스텔트 플랫폼(Stewart Platform)에 의해서 재

현된다. 동역학 결과로부터 나오는 운동위치는 3차원 가상 공간 상에서 자유롭게 움직일 수 있지만, 운동장치인 스텔트 플랫폼은 한정된 운동 영역을 갖기 때문에 와시아웃 필터(Washout Filter)를 거쳐서 이에 전달한다. 본 시뮬레이터에 사용된 와시아웃 필터는 직선운동에 대해서는 비력(Specific Force)에 대하여 2차 고주파 통과 필터를 기본으로 하였으며, 회전운동에 대해서는 각속도에 대하여 1차 고주파 통과 필터를 기본으로 사용하였다. 지나치게 큰 비력이나 각속도가 운동장치에 전달되면 운전자에게 위험을 줄 수 있으므로 이를

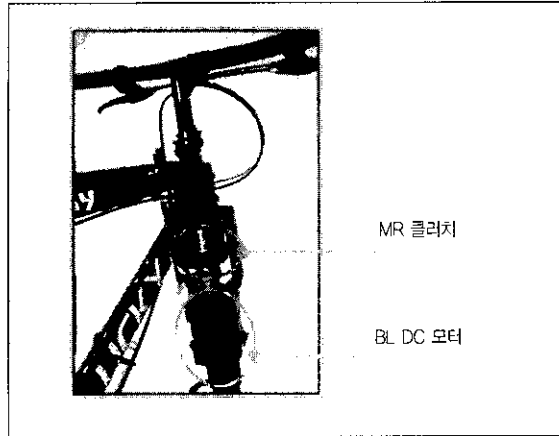


그림 3 조향 반력 시스템

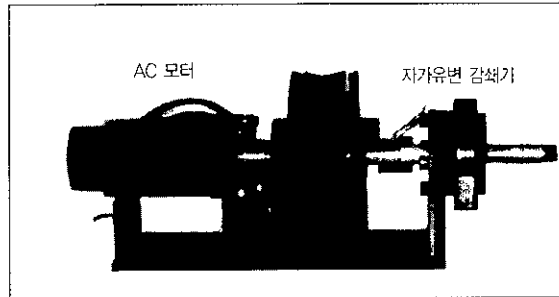


그림 4 페달 반력 시스템

방지하기 위하여 필터의 전단부에 각 운동에 대해서 제한기를 설치하였다. 또한 저주파의 직선운동은 운동장치를 운동 영역의 한계점까지 움직이게 하는 주원인이기 때문에 이러한 운동은 중력을 이용하여 운동장치의 회전운동으로 대체하여 사용하였다. 자전거 동역학으로 구현하기 힘든 약 5 Hz 이상의 고주파의 운동은 노면 정보에 따른 운동 튜닝을 통하여 동역학 계산 결과에 추가함으로써 그 현실감을 증가시켰다.

조향 및 페달 반력 시스템

자전거 시뮬레이터의 경우 조

향 반력이 제대로 구현되지 않는다면 운전자가 실제 자전거를 타는 느낌을 받을 수 없을 뿐 아니라 자전거를 안정되게 유지하면서 운전하기가 어렵다. 특히 자전거의 좌우 움직임에 대한 조향 반력은 자전거 핸들을 통하여 토크가 운전자에게 능동적으로 전달되는 능동형 조향 반력과 핸들 조작의 경중을 느끼게 하는 반능동형 조향 반력으로 구분할 수 있다. 능동 반력 구현을 위해 자전거 주행장치에 부착이 가능하고 소형, 경량인 AC 모터를 사용하였다. 자전거 운전자는 핸들을 조작할 때 노면의 반력에 대하여 핸들이 돌아가려는 방향

과 반대쪽으로 자전거의 중심을 잡아 안정성을 유지하고자 한다. 만일 모터와 핸들의 축을 직접 연결하는 경우 핸들의 조작은 모터의 움직임을 정지시키거나 또는 반대방향이 된다. 이러한 경우에는 모터에 과전류가 흘러 손상을 입을 수도 있으므로 핸들과 모터 사이에 클러치를 장착하는 구조를 채택함으로써 모터의 역회전을 방지할 수 있도록 하였다. 이 때 사용한 클러치는 전류의 세기를 조절함으로써 저항 토크를 변화시킬 수 있는 자기유변 클러치이다. 반능동형 조향 반력을 구현할 경우에는 모터를 작동시키지 않고, 클러치만을 작동시킴으로써 핸들의

무겁고 가벼운 느낌을 재현할 수 있다. 최대 1 A 인가 시 4.3 Nm의 토크를 전달할 수 있고 응답 성능이 약 60 ms인 자기유변 클러치를 설계, 제작하였다.

자전거 운전자는 페달을 밟을 때 노면의 마찰과 운전자를 포함한 자전거 전체의 관성 등의 저항력을 느끼게 된다. 또한 자전거가 내리막길을 내려갈 때 가속효과도 느낀다. 이러한 느낌을 구현하기 위해 저항력을 생성하는 자기유변 브레이크와 가감속효과를 위한 AC모터를 사용하여 페달 반력 시스템을 개발하였다. 조향 반력 장치에서 사용된 것과 동일한 모터와 Lord사의 MRB 2107-3라는 자기유변 브레이크를 사용하였는데 특히 자기유변 브레이크는 선형성이 뛰어나고 작은 소모 전력으로 큰 저항력을 발생시킬 수 있다. 페달 저항 시스템의 제어는 운전자가 페달에 가하는 토크를 추정하여 이에 상응하는 회전속도로 시뮬레이터의 뒷바퀴가 회전하도록 속도 제어를 한다. 이 때 운전자는 실제 자전거와 같은 속도 조건을 가지므로 페달에서 느끼는 저항도 실제

와 같이 느끼게 된다.

그래픽 시스템

캠퍼스 모델화는 지형과 건물로 나누어 작업하였다. 지형모델은 실제 지도로부터 도로와 지형을 만들고, 건물 모델은 dxf 포맷을 3ds 포맷으로 변환하여 MultiGen Creator™를 이용하여 세부 작업을 하였다. 실시간 렌더링(Rendering)이 중요하기 때문에 불필요한 면은 제거하고 가능한, 실제 건물과 흡사하도록 실제 이미지로 텍스처(Texture) 작업을 하였다. 즉, 영상의 질을 보장하면서 실시간 렌더링을 할 수 있도록 모델화하는 데 중점을 두었다.

모델화한 가상환경을 시뮬레이터에서 구동하기 위해 Vega™를 이용하여 응용 프로그램으로 구현하였다. 응용 프로그램에는 가상환경의 현실감을 향상시키고 사용자의 흥미를 돋우기 위해 다양한 객체와 이벤트를 추가하였다. 그래픽 시스템은 동역학 모듈로부터 영상 생성을 위한 사용자

의 위치 정보 이외에 자전거 앞·뒷바퀴의 위치 정보를 입력받고, 이를 이용하여 바퀴와 지형의 접촉점과 법선 벡터, 지형 정보 등을 구하여 동역학 모듈에 넘겨주면서 영상을 생성한다. 이와 동시에 그래픽 시뮬레이터 내부에서 발생하는 이벤트에 따라 가상환경을 동적으로 변화시켜준다. 또한, 발생하는 이벤트에 현실감을 효과적으로 증가시켜주기 위하여 필요한 음향 정보를 입체음향 모듈로 넘겨준다. 네트워크를 통하여 음향 모듈로 넘겨주는 정보는 음향 객체의 id, 상대 위치와 속도, 자전거의 현재 속도와 도로정보 등으로 입체음향을 구성하기 위하여 필요한 정보이다. 그래픽 시뮬레이터는 동역학 모듈과 입체음향 모듈 사이의 이러한 데이터 교환을 반복하면서 동작한다. 응용 프로그램에서 생성된 이미지는 빔 프로젝터 또는 HMD(Head Mounted Display)를 통하여 사용자에게 보여준다. HMD는 트래킹 신호에 따라 영상이 반응하게 됨으로써 사용자가 가상 세계에 더욱 몰입된 느낌을 갖도록 한다.

상용 시스템인 Vega™외에 Win9x/WinNT/Win2000 운영체제에 맞게 설계된, 가상현실 응용 시스템 개발 표준 API(Application Programming Interface)인 Kitten을 개발하여



그림 5 캠퍼스 모델의 한 장면

의 위치 정보 이외에 자전거 앞·뒷바퀴의 위치 정보를 입력받고, 이를 이용하여 바퀴와 지형의 접촉점과 법선 벡터, 지형 정보 등을 구하여 동역학 모듈에 넘겨주면서 영상을 생성한다. 이와 동시에

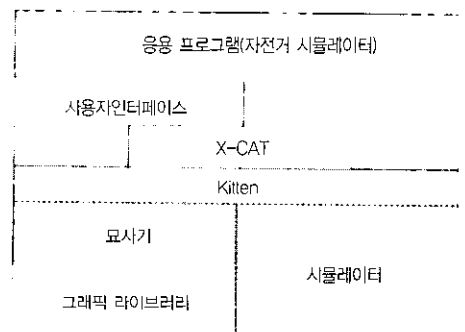


그림 6 Kitten을 포함하는 가상현실 시스템 구조

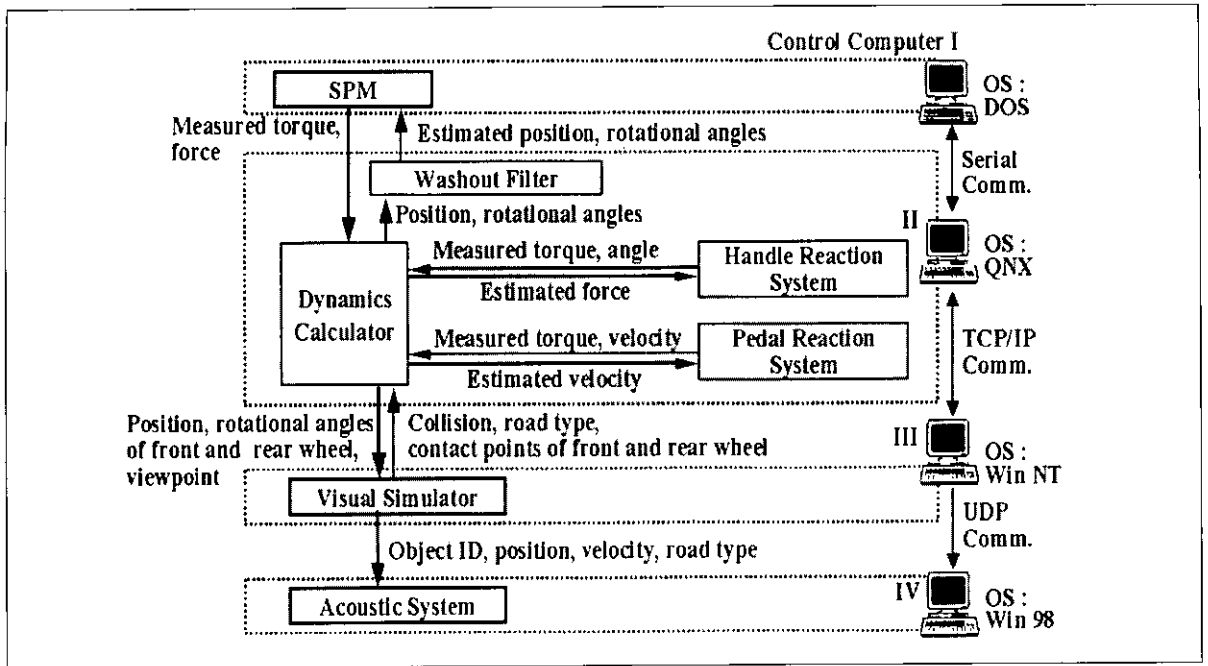


그림 7 자전거 시뮬레이터의 전체 제어 시스템 구조

사용하였다. 가상현실 시스템은 가상환경 내의 변화를 계산하는 시뮬레이션 부분과 그 변화를 표현하는 렌더링 부분으로 크게 구분할 수 있다. 렌더링 부분은 장면의 복잡도가 높아지더라도 일정한 성능을 유지할 수 있어야 한다. Kitten은 범용 가상현실 시스템을 위한 하부 라이브러리이며, 일반적인 가상현실 시스템의 구조와 개념을 바탕으로 설계되었다. Kitten은 OpenGL, GLIDE 등과 같은 3차원 Graphics Library에 기반하여 렌더링을 수행하는 렌더링 모듈과 시뮬레이터 모듈로 크게 구분되며, 다중 Thread 구조로 구성되어 전체 시스템 성능에 미치는 시뮬레이터의 영향을 감소시켰다. 또한, Axis-Aligned Bounding Box(AABB) 알고리즘과 Ray-

Triangle Intersection 알고리즘을 이용하여 사물과 자전거간의 충돌을 감지할 수 있다.

시스템 통합

자전거 시뮬레이터는 네 대의 컴퓨터로 제어된다. 제어 컴퓨터 I은 DOS환경에서 SPM의 운동을 제어하며, 제어 컴퓨터 II는 실시간 운영 체제인 QNX환경에서 자전거 동역학을 이용하여 SPM, 조향 반력 장치, 페달 반력 장치, 그래픽 시뮬레이터의 제어 관련 입력 값들을 계산하고, 자전거 조향장치와 페달 반력 장치를 제어하며, 제어 컴퓨터 III은 윈도우 NT환경에서 그래픽 시뮬레이터를 제어하고, 제어 컴퓨터 IV는 음향시스템을 제어한다. 제어 컴퓨터 I과 II는 직렬

통신으로 42 Byte, 제어 컴퓨터 II와 III은 TCP/IP 통신으로 128 Byte의 제어관련 입출력 정보를 송수신한다. 시스템 통합에 있어, 각 하위 제어 시스템에서의 블록 시간(blocking time)을 최소화하고 이들 제어 시스템들을 동기화하는 것이 매우 중요하다.

제어 컴퓨터 I은 SPM을 제어하기 때문에 블록되는 시간이 없어야 하므로 수신은 인터럽트 방법을 사용하고, 제어 컴퓨터 II는 동기화(synchronization) 방법으로 정보를 수신한다. 직렬 통신이 1 회 송수신에 평균 4.4 ms 소요되는 것과는 달리, TCP/IP통신의 경우는 1 회 송수신 소요시간이 0.76 ms로 매우 짧다. 렌더링 하는 시간이 60 ms로 비교적 길기 때문에 자전거 동역학에 의해 계산된 값들이 지연

시간에 의해 영향받는 것을 막기 위해서 동역학 계산 값과 동기화되도록 프로토콜을 설계하였다. 이 때문에 제어 컴퓨터 III에서의 평균 블록 시간은 1.18 ms이며, 프로세스의 우선 순위 변경법을 이용하여 최소 0.83 ms 까지 줄일 수 있었다. 제어 컴퓨터 III에서 제어 컴퓨터 IV와의 통신 때

문에 블록 시간이 늘어나는 것을 막기 위해서, 소켓 형성 및 데이터 송신 시 대기 시간이 없는 UCP 통신 방법을 이용하였다. 제어컴퓨터 IV는 항상 수신대기 상태에서 정보를 받아 그래픽 시스템과 음향을 동기화시킨다.

조향 반력 장치와 페달 반력 장치는 매개변수의 튜닝을 위해 100 Hz로 고정하였다. 실험을 수행한 결과, 자전거 동역학은 초당 1,120 번 계산되고, TCP/IP 통신은 182 Hz로, 직렬 통신은 147 Hz로 송수신 뒀을 알 수 있었다. 운전자의 최대 입력 주파수로 추정되는 20 Hz보다는 훨씬 빠르게 운전자의 입력에 따르는 자전거 시뮬레이터의 피드백 동작 구현에 무리가 없었다. 실제로 자전거 시뮬레이터는 운전자의 입력에 대해서 화면, SPM, 페달 반력, 조향 반력, 그리고 음향 시스템이 실시간으로 연동되어 현실감을 재현하기에 충분했다.

다수의 동시 사용자를 위한 분산처리 기술

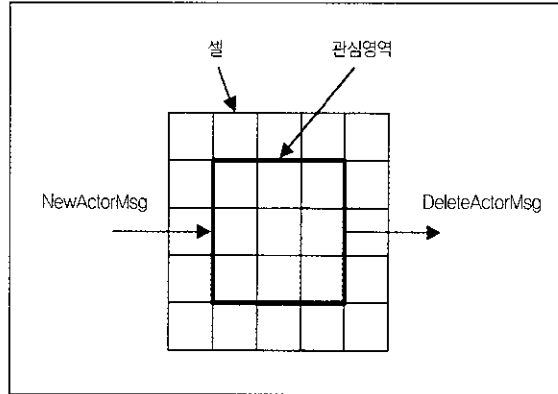


그림 8 셀 기반 AOI

다수의 자전거 시뮬레이터가 네트워크를 통해 효율적으로 상호 작용을 하게 만들기 위하여 셀 (cell) 기반의 AOI (Area-Of-Interest) 관리기법을 개발하고 있다. 이것은 TCP/IP를 사용하는 실용적인 네트워크로 연결된 각 자전거 시뮬레이터에서 처리하는 메시지의 수를 효율적으로 감소시켜 준다. 아바타(자전거)의 이동시마다 생기는 AOI의 변경으로 인한 오버헤드를 막기 위하여 운전자 아바타가 네비게이션하는 공간을 셀이라는 기본 단위로 분할하고, 운전자의 화면에 보여지는 셀과 그 주변 셀을 묶어 운전자 아바타 중심의 AOI를 형성한다. 즉, 아바타의 이동 시 셀이 변경될 때 서버에서 AOI가 다시 계산된다. 클라이언트는 자신의 AOI 내에서 발생하는 이벤트와 상태정보만을 받게 된다. 서버는 각 운전자 별로 AOI를 관리하고 각 AOI에 대한 운전자 아바타의 가입 및 탈퇴 관리와 AOI로의 메시지 지역화를 관리하는 역할을 수행한다. 다른 운전

자 아바타가 자신의 AOI영역으로 들어오면 서버는 NewActor 메시지를 보내고 클라이언트로 하여금 객체를 생성하게 한다. 자신의 AOI영역에서 사라지는 경우, 서버는 DeleteActor 메시지를 보내고 클라이언트는 객체를 소멸시킨다. 운전자 아바타의 AOI영역에서 발생하는 모든

이벤트와 정보는 서버에 의하여 운전자에게 전송된다.

향후 계획

자전거 시뮬레이터의 개발을 통하여 실용적인 양방향 시뮬레이터를 구축하기 위해 필요한 핵심기술과 개발 경험을 축적하였으며, 현재, 또 하나의 개선된 차세대 자전거 시뮬레이터를 개발하고 있다. 그리고 네트워크로 연결되고 다수의 동시 사용자를 위한 분산처리 기술이 적용되어 2인 이상이 동시에 참여하여 경주할 수 있는 자전거 시뮬레이터 시스템을 개발하고 있다. 이 시스템에서는 자전거 주행 속도에 따른 관성의 영향을 보다 사실적으로 고려하는 방법 및 8 채널 입체음장 재현기술 등 요소기술들과 시스템 통합 기술을 한층 더 개선하기 위한 연구를 수행하고 있다.