Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 4, pp.92-98 (2010)

Copyright Ⓒ 2010 KSAE
1225-6382/2010/106-13

실시간 야지주행 시뮬레이션을 위한 3차원 가상노면의 구성 및 적용에 대한 연구

이 정 한 · 유 완 석*

부산대학교 기계공학부

Study on the 3D Virtual Ground Modeling and Application for Real-time Vehicle Driving Simulation on Off-road

Jeonghan Lee · Wansuk Yoo*

Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Received 1 October 2009 / Accepted 19 January 2010)

Abstract : Virtual ground modeling is one of key topic for real-time vehicle dynamic simulation. This paper discusses about the virtual 3D road modeling process using parametric surface concept. General road data is a type of lumped position vector so interpolation process is required to compute contact of internal surface. The parametric surface has continuity and linearity within boundaries and functions are very simple to find out contact point. In this paper, the parametric surface formula is adopted to road modeling to calculate road hight. Position indexing method is proposed to reduce memory size and resource possession, and a simple mathematical method for contact patch searching is also proposed. The developed road process program is tested in dynamic driving simulation on off-road. Conclusively, the new virtual road program shows high performance of road hight computation in vast field of off-road simulation.

Key words : Virtual road(가상노면), Parametric surface(매개변수 곡면), Real-time simulation(실시간 시뮬레이션), Vehicle dynamics(차량동역학)

1. 서 론

차량동역학 시뮬레이션에 사용하고 있는 일반적인 노면은 2차원적인 굴곡노면이나 3차원 삼각 패치노면 또는 스플라인 곡면노면을 사용한다. 이러한 노면들은 3차원적인 지면의 굴곡을 수학적으로 표현하고 타이어와 지면과의 접촉위치를 계산하기 위한 방법들이다. 가상 노면모델의 구성은 지면 자체를 표현하기 위한 수학적 모델과 함께 함께 타이어와 지면의 접촉위치를 찾고 지면과의 절입량을 계산하기 위한 수학적인 계산과정을 포함한다.

2차원적인 굴곡 노면은 가장 많이 사용되는 방법 중의 하나로서 시험로의 지면 데이터를 주행방향과 고도에 대한 2차원 선형보간 데이터[1] 또는 스플라인 보간 데이터로 입력 하는 방법이다. 이 방법은 가장 구현하기 쉬운 방법으로서 주로 험로 주행 환경에 대한 주파수 응답 특성이나 내구해석을 위한 하중 도출을 위해 2차원적인 주행로를 구성하여 직진 주행 시뮬레이션을 수행한다. 또한 차량의 주파수 응답특성을 이용하여 재구성한 노면[2]을 이용하거나 ISO 전력밀도 함수를 이용한 노면[3]구성에 용이하다. 3차원 노면모델의 경우 삼각 패치노면[4,5]이나 스플라인 곡면[6]을 사용한다. 삼각패치노면은 연속된 삼각형의 패치를 이용하여 노면의 굴곡을 표현하는 방법이며 3D 스플라인노면은 두 개 이상의 교

*Corresponding author, E-mail: wsyoo@pusan.ac.kr

차하는 스플라인 곡선을 이어서 곡면을 구성하는 방법이다. 이러한 곡면구성 방법은 주행로 상의 작은 굴곡을 표현하기에 적합하다.

시뮬레이터에서 사용하는 지형은 도로를 포함하여 야지에 대한 노면 모델을 수용 할 수 있어야 하며 지형의 범위 또한 매우 크기 때문에 효율적으로 야지의 특성을 잘 나타내 줄 수 있는 3차원 곡면 모델이 필요하다. 특히, 야지 주행에 필요한 지면은 곡면의 형태가 매우 불규칙하며 물리적 특성 또한 매우 다양하기 때문에 곡면의 물리적 특성 중 데이터 점의 연속성과 기울기의 연속성만을 고려하여도 지면 모델로서 충분하다.

본 연구에서는 이러한 3차원 지면을 표현하기 위해 퍼거슨(Ferguson) 곡면방정식을 이용하여 지면 모델을 구성하였다. 퍼거슨 곡면 방정식은 3차원 좌표로 이루어진 사각형의 패치 정보로부터 위치와 기울기만을 이용해 3차함수로 보간하여 곡면을 계산하는 방법이다.

2. 퍼거슨 곡면을 이용한 3D 지면 구성방법

곡면을 구성하는 수학적 방법은 다양하게 존재한다. 특히 CAD/CAM에서 사용하는 다양한 곡면에 대한 함수들은 매우 복잡한 형상에 대해 정확하고 효율적으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용한 퍼거슨 곡면은 매우 쉽고 간단한 곡면의 표현 방법으로서 복잡한 입체 현상의 표현에는 적합하지 않다. 그러나 지면의 형상과 같이 3차함수적인 연속성만을 나타내는 데는 적합하다. 곡면을 구성하기 위해 입력되는 지면데이터는 순수한 좌표데이터로서 입력된 지점에 대한 지면은 반드시 존재해야 하며 모든 입력 좌표점에서 연속적이어야 한다. 또한 방대한 지면데이터의 입력에 용의해야 한다.

퍼거슨 매개변수 곡면은 Fig. 1과 같이 3차원 직교좌표계에서 x, y, z모든 방향에 대한 매개변수 방정식이 존재한다. 그러나 지면의 3차원 형상은 일반적으로 법선벡터가 위쪽을 향하기 때문에 데이터 점의 배열이 x와 y방향에 대해 불규칙적이지 않다면 지면을 구성하기 위해 x와 y방향에 대한 매개변수 공간을 사용 할 필요가 없다. 따라서 z방향에 대한 매개변수 공간만을 사용하여 노면을 구성할 수

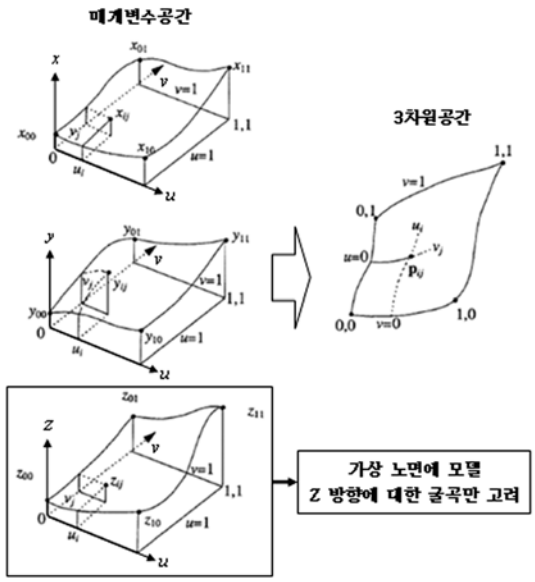

Fig. 1 퍼거슨 곡면

있다. 또한 매개 변수 u와 v에 대한 방향과 일반좌표계 x와 y방향에 대한 방향을 일치시키게 되면 z에 대한 퍼거슨 곡면수식만으로 지면의 높이에 대한 함수를 구성 할 수 있다. 즉, z(u, v)에 대한 함수로 곡면을 나타냄으로서 수식적으로 보다 단순하게 곡면을 표현할 수 있다.

퍼거슨 매개변수 곡면의 수학적 모델[7,8]의 일반식은 식 (1)과 같으며 본 연구에서는 z방향에 대한 수식만 사용한다.

$$z(u,v) = \sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3} a_{ij} u^i v^j \qquad (1)$$

a_{ij}는 좌표와 기울기를 이용하여 계산하는 퍼거슨 매개변수 곡면의 3차 함수의 계수이다.

3. 지면데이터를 이용한 지면 모델의 동역학 해석에 적용방법

지면 데이터의 입력형태는 공간상에 뿌려져 있는 좌표점의 형태가 되며 보다 체계적으로 데이터를 입력받게 되면 격자형태의 x,y좌표와 높이 값 z를 가진 좌표 정보가 된다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 2과 같이 나타낼 수 있으며 곡면패치는 격자 하나하나에 독립적으로 구성된다.

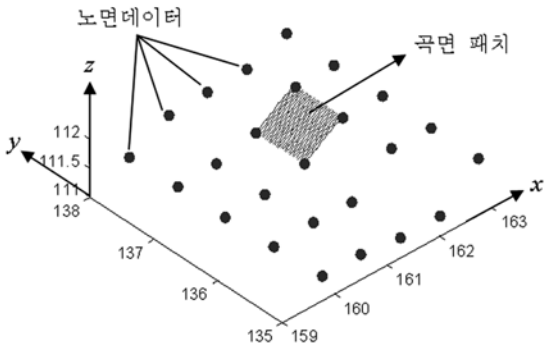

Fig. 2 퍼거슨 곡면의 패치 적용

Fig. 2와 같이 격자형 지면 데이터에 대해 각각의 곡면패치는 서로 연속적이어야 하며 데이터 위치를 통과하는 곡면이어야 한다. 이 곡면 패치를 퍼거슨 곡면을 이용하여 구성할 수 있다.

Fig. 3은 퍼거슨 곡면을 이용한 곡면 패치를 나타낸다. 이때 곡면은 4개의 좌표점을 기준으로 x와 y 방향에 대해 직사각형 또는 정사각형형태로 나타낼 수 있다. 또한 격자점의 좌표를 x와 y방향에 대해 순서대로 정리하면 m과 n에 대해 색인화 하여 행렬로 나타낼 수 있다.

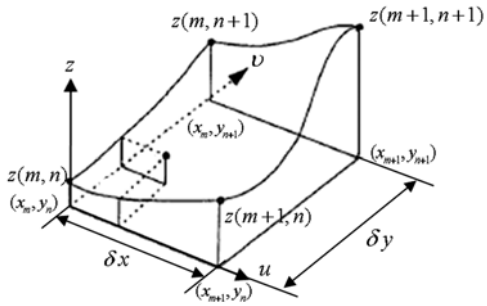

Fig. 3 퍼거슨 곡면을 이용한 곡면패치모델

퍼거슨 곡면의 3차함수를 구하기 위해서는 경계조건을 입력 하여야 한다. 본 연구에서는 지면데이터의 위치와 좌표를 격자 형태로 저장하고 있기 때문에 이웃한 지면 데이터의 좌표정보를 이용하여 기울기를 추출할 수 있다. 즉, 위치에 대한 경계조건 $\boldsymbol{R}_{ij}$와 x와 y각 방향에 대한 기울기 경계조건 $\boldsymbol{R}^{u}_{ij}$, $\boldsymbol{R}^{v}_{ij}$ 그리고 $\boldsymbol{R}^{uv}_{ij}$를 지면의 데이터행렬의 m과 n을 이용하여 식 (2)~(5)와 같이 구할 수 있다. 경계조건 식은 각각 2×2의 행렬이며 최종적으로 퍼거슨 곡면 방정식에 사용하는 대수 벡터 계수(algebraic vector coefficient)로서 식 (6)과 같이 4×4의 행렬형태로 나타낼 수 있다. 단, $i,j=0,1$.이다.

$$\boldsymbol{R}_{ij}=z(m+i,\,n+j) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R}^{u}_{ij}=\frac{1}{2}[z(m+i+1,n+j)-z(m+i-1,n+j)] \tag{3}$$

$$\boldsymbol{R}^{v}_{ij}=\frac{1}{2}[z(m+i,n+j+1)-z(m+i,n+j-1)] \tag{4}$$

$$\boldsymbol{R}^{uv}_{ij}=\frac{1}{2}(R^{u}_{ij}+R^{v}_{ij}) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{ij} & \boldsymbol{R}^{v}_{ij}\\ \boldsymbol{R}^{v}_{ij} & \boldsymbol{R}^{uv}_{ij}\end{bmatrix} \tag{6}$$

마지막으로 Hermit 블렌딩 함수를 이용하여 u와 v로 구성된 $\boldsymbol{F}(u)$와 $\boldsymbol{F}(v)$를 계산하고 행렬계산식으로 나타내면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.[8,9]

$$z(u,v)=\boldsymbol{F}(u)\boldsymbol{B}\boldsymbol{F}(v)^{T} \tag{7}$$

결과적으로 식 (7)은 매개변수 u와 v에 대한 함수식이며 입력 값 u와 v에 따라 지면의 높이(z)를 추출할 수 있는 간소화된 함수식이 구성된다.

시뮬레이션에서 타이어의 반력을 계산하기 위해 타이어의 절입량을 계산하는 과정에서 주어지는 상태변수는 휠의 좌표와 자세이다. 이 정보로부터 지면의 접촉상태를 계산하기 위해서는 지면의 x와 y 위치에 따른 지면의 높이를 빠른 속도로 추출할 수 있어야 한다. 식 (7)은 x 및 y좌표에 따른 정확한 u와 v 및 m과 n을 찾을 수 있다면 신속하게 지면의 높이를 계산할 수 있는 수식이다.

4. 지면모델에서 접촉위치의 계산

시뮬레이션을 위한 지면 모델로 식 (7)을 사용하기 위해서는 현재 타이어가 존재하는 지면패치에 대한 색인 값인 m과 n 그리고 패치 내에 휠의 위치에 해당하는 u와 v를 계산하는 과정이 필요하다. 본 연구에서 사용하는 Fig. 1의 매개변수공간 중 z방향에 대한 함수만을 사용하기 때문에 u와 v의 매개변수의 방향벡터를 x와 y방향에 대해 일치시킬 수 있다. 따라서 간단한 방법으로 m과 n 및 u와 v를 계산할 수 있다.

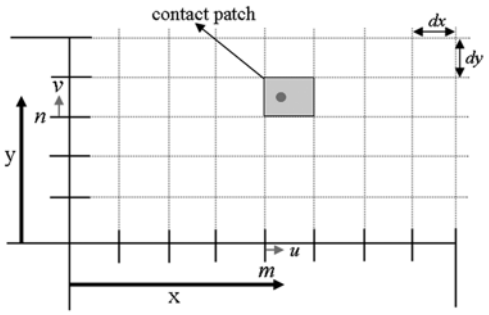

Fig. 4 가상노면 접촉 패치 검색 방법

Fig. 4는 타이어의 위치에 따른 m과 n 그리고 u와 v의 추출방법을 나타낸다. x의 위치는 데이터 점의 개수m과 dy의 곱에 u벡터를 더한 값이며 y위치 역시 같은 방법으로 계산할 수 있다. 따라서 역으로 m과 n의 계산을 위해 격자 간격의 정보(dx,dy)를 현재 위치한 x또는 y좌표로 나누게 되면 근의 값(정수)은 m과 n이 되며 나머지는 u와 v(소수)로 계산할 수 있다. 만약 dx와 dy의 간격이 불규칙적으로 사용할 경우 간격에 대한 정보를 같이 이용하게 되면 동일한 방법으로 계산할 수 있다. 간단한 계산이지만 지면 데이터의 개수나 크기에 관계없이 단순한 수식으로 필요한 변수를 계산할 수 있으므로 효과적이라 할 수 있다.

$$\begin{cases} m = floor(x/dx) \\ n = floor(y/dy) \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} u = residual(x/dx) \\ v = residual(y/dy) \end{cases} \tag{9}$$

5. 실시간 가상노면 처리 프로그램

지금까지 연구한 가상 노면의 구성방법에 대하여 MATLAB과 C++ 프로그램으로 노면 처리 모듈 및 타이어 모듈을 구성하여 실시간 동역학 해석 프로그램에 접목 시켰다.

본 연구에서 개발한 3차원 지면 모델의 특징은 전체의 지면을 하나의 곡면으로 처리하는 것이 아니라 지면데이터와 데이터 사이를 하나의 패치로 정하고 그 패치에 대한 곡면을 독립적으로 계산하여 방대한 지형데이터를 가지더라도 패치에 대한 정보만을 이용하여 빠른 속도로 노면정보를 계산할 수 있다. 이를 위해 3장에서 설명한 퍼거슨 곡면의 계

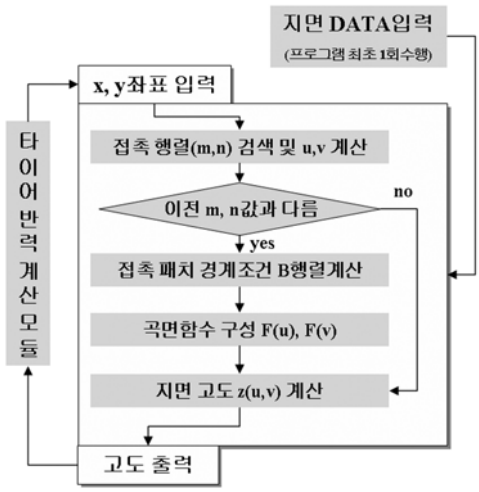

Fig. 5 시뮬레이션을 위한 가상노면 계산 프로그램

산식인 식 (7)과 4장에서 설명한 접촉 패치의 계산식 (8), (9)를 사용한다.

프로그램의 순서도는 Fig. 5와 같다. 가상노면 처리 프로그램은 최초 노면 정보를 읽어 들이며 이후 해석을 수행하는 동안 노면정보를 메모리에 입력한 상태로 구동 한다. 타이어 힘의 계산 모듈로부터 휠 중심위치(x,y)좌표를 입력받으며 지면 모듈에서는 퍼거슨 곡면을 이용한 x 및 y 위치의 높이 z값을 출력하여 타이어 모델로 전달하게 된다.

차량이 주행함에 따라 타이어의 위치는 이동하게 되지만 동일한 패치를 지나는 동안에는 같은 곡면의 함수를 사용하기 때문에 매번 다시 곡면의 함수를 구성할 필요가 없다. 따라서 곡면의 함수식 재사용할 수 있도록 하는 것이 보다 효율적이다.

개발한 가상노면 처리 프로그램은 방대한 지형데이터를 가지고 있더라도 현재 타이어가 존재하는 작은 패치에 대해서만 곡면을 계산하기 때문에 프로그램의 크기가 간소하고 빠르게 수행 할 수 있다.

6. 가상노면을 이용한 주행 시뮬레이션

실시간 해석을 위한 3차원 가상노면 처리 프로그램의 성능을 시험하기 위해 Fig. 6과 같이 실측한 국방과학연구소 창원 기동시험장의 지면데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 지면데이터는 위성관측을 이용한 좌표정보의 데이터로서 전체

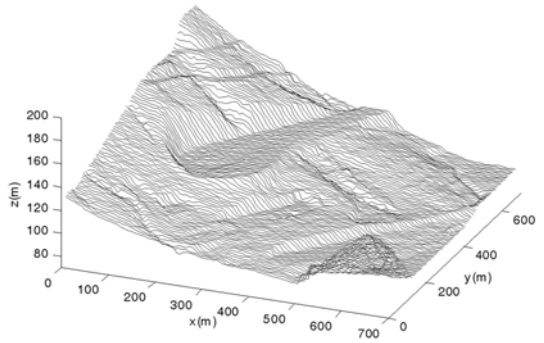

Fig. 6 700×700 야지노면 노면 데이터

길이는 가로세로 700m이며 격자 간격은 0.75m이다. 이 노면은 경사로와 야지 및 평지가 포함되어 있으며 광범위한 지면 데이터 중 일부에 해당한다. 시험장에 해당하는 평평한 부분은 완전한 평지가 아닌 야지에 해당하는 굴곡노면이다.

입력한 노면에서 형상 특성을 분석하기 위해 국부지역에 대한 노면을 Fig. 7에 좀더 구체적으로 표현하였다. Fig. 7을 그리기 위해 노면 처리 프로그램에 강제로 x와 y좌표를 순차적으로 입력한 후 계산되는 z값을 이용하여 출력한 결과이다. 도시된 영역은 시뮬레이션에서 차량이 지나치게 될 지점으로 Fig. 7에서 표시되어있는 좌표로 볼 때 x방향 230m지점과 y방향 320m지점에서 가로세로 5m에 대한 지면을 개발한 가상노면 프로그램을 이용하여 표현한 것이다. 곡면에 존재하는 점 표시는 입력한 지면데이터를 나타낸다. 데이터의 중간점에 해당하는 패치에 적용된 퍼거슨 곡면의 형상이 잘 표현되어 연속적인 지면모델을 형성하고 있는 것을 알 수 있다.

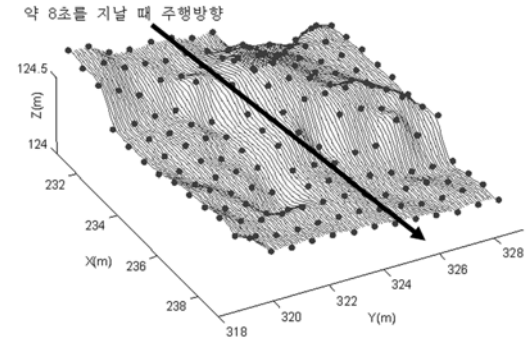

Fig. 7 주행로 상의 가상 지면의 곡면 형상

본 연구에서는 개발한 가상노면 프로그램을 이용하여 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 시험한 차량 모델은 Fig. 8과 같이 6개의 바퀴와 암을 가진 차량 모델[10]이며 본 연구에서 개발한 가상노면계산 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. Fig. 8은 시뮬레이션에 사용된 차량모델을 나타낸다. 타이어 모델은 Magic Formula[11]를 사용하였다. 6×6차량은 마찰조향시스템이기 때문에 좌우 휠에 다른 토크를 가해주어 차량을 선회 시킬 수 있다. 시뮬레이션은 좌선회하도록 PD제어기를 이용한 속도제어를 구현하여 수행하였다. 차량의 속도는 4m/s로(회전구간 속도 감소) 입력하였다.

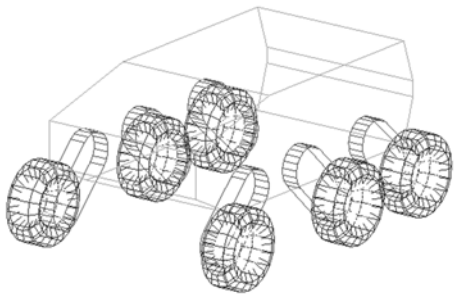

Fig. 8 6×6 차량 모델의 구조

차량 주행 시뮬레이션의 해석 결과는 차량의 현가장치에 의한 영향뿐만 아니라 타이어의 비선형적 특성이 주행에 많은 영향을 끼친다. 따라서 주행한 노면의 특성을 정확히 구현하는가에 대한 여부를 판단하는 것은 간단한 문제가 아니다. 따라서 지면의 모델에 대한 신뢰성을 판단하기 위해 주어진 곡면에 대한 위치 및 기울기에 대한 정보가 타이어 계산을 위한 지면의 높이로 적절하게 사용 되었느냐를 중심으로 결과를 관찰하였다.

노면의 계산 결과를 확인하기 주행한 차량의 질량 중심에 대한 주행 궤적(Fig. 9)과 전방 좌우 바퀴에서 측정한 지면의 높이 및 타이어 중심의 높이를 그래프로(Fig. 10) 나타내었다. Fig. 9의 주행 궤적은 해석결과에 의한 차량의 질량중심좌표를 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 따라서 주행궤적은 z방향에 대한 변위도 포함하고 있다.

차량은 Fig. 9와 같이 궤적을 주행하면서 좌우 타이어가 서로 다른 위치의 노면을 만나지만 곡면

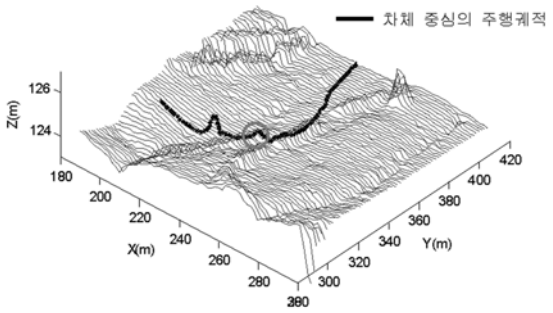

Fig. 9 차량의 주행궤적

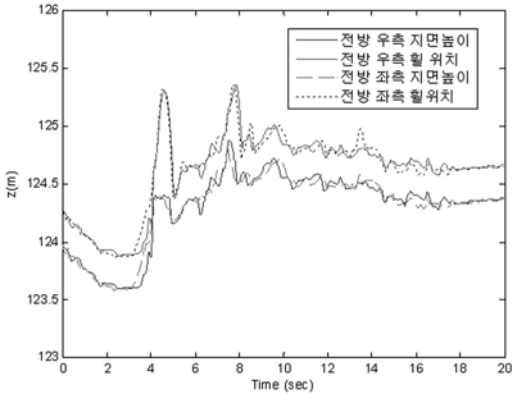

Fig. 10 실시간 노면 프로그램을 통한 휠과 지면의 계산 높이

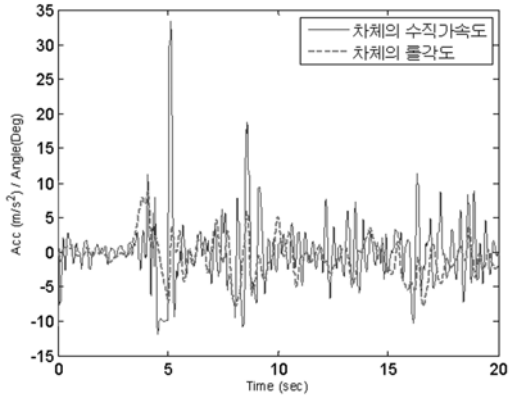

Fig. 11 차체의 수직 가속도 및 롤각속도

계산을 통한 굴곡의 형상을 지나면서 차량의 동적특성을 잘 나타내고 있다. Fig. 10은 차량이 주행하는 동안 좌우 휠이 지나게 되는 지면의 높이와 휠 중심의 높이를 그래프로 그린 것이다. 타이어 반경은 0.3m이기 때문에 약 0.28m간격을 두고 휠과 지면의 높이가 변화되는 것을 알 수 있다. 지면의 특성이 차량에 미치는 영향을 관찰하기 위해 Fig. 11에 차체가 가지는 수직 가속도와 롤 각도를 그래프로 그려 보았다. 약 4초와 8초경에 만나게 되는 높은 범프의 영향으로 큰 수직가속도를 나타내고 Fig. 10에서 좌우 노면의 높이차이가 발생하는 지점에서 롤각도가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 약 18초 이후 지면이 거의 평탄화 되지만 3축 타이어가 모두 빠져 나가는 순간을 감안하면 약 19초이며 이후 차체가 안정화 하게 된다.

본 연구에서 사용한 지면데이터는 간격이 0.75m로서 낮은 공간 주파수를 가지고 있다. 따라서 저속주행 시 차량동특성에서 노면에 의한 고주파 특성은 나타낼 수 없다. Fig. 11의 수직가속도가 가지는 진동 특성은 차량의 현가장치와 타이어에 의해 나타나는 특성이다. 일반적으로 노면의 특성은 높은 공간주파수에 대해 좌우 상관도가 낮으나 낮은 공간주파수에 대해서는 유사성을 가진다.[2] 개발한 가상노면은 낮은 공간주파수 특성을 잘 표현할 수 있다. 개발한 가상노면 모델의 가장 큰 단점은 데이터의 형태가 반드시 격자형이어야 한다는 것이다. 만약 도로를 모델링하듯이 곡면을 만들고자 한다면 x와 y방향에 대한 곡선을 정의해야 하기 때문에 퍼거슨 곡면보다는 스플라인 곡면을 사용하는 것이 더 유용할 것이다.

7. 결 론

본 연구에서는 실시간 동역학 시뮬레이션을 위한 3차원 가상노면구성 방법을 개발하였다. 일반적인 차량동역학 시뮬레이션과 달리 실시간 동역학 해석을 위해서는 빠르고 정확한 노면처리를 필요로 한다. 개발한 노면 처리 방법은 방대한 량의 지면 입력 데이터를 가지고 있더라도 현재 타이어가 위치한 지면에 대한 패치정보만을 이용하여 함수적으로 지면의 형상이 처리되기 때문에 빠른 계산이 가능하다. 또한 개발한 지면은 모든 구간에서 연속적인 지면이기 때문에 지면데이터의 간격을 크게 하더라도 비선형적인 지면형상이 계산되지 않는다. 따라서 제어시스템에 입력되는 가상 주행에 사용하더라도 해석이 노면의 비선형성 때문에 해석이 발산하는 것을 방지할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원과 두뇌한국(BK)21 사업의 협력으로 수행되었습니다.

References

1) K. S. Yi and S.-J. Yi, “Real-time Simulation of a High Speed Multibody Tracked Vehicle,” Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.4, pp.351-357, 2005.
2) M. Kim, K. Kim and W. Yoo, “Regeneration of Road Profile to Compensate Nonlinearties of Tires,” SAE 99370267, 1999.
3) K. Kim and W. Yoo, “Generation of Road Surface Profiles with a Power Spectral Density Function,” SAE 97370015, 1997.
4) S. Yoon, H. Kang and J. Kong, “A Study on 3D Terrain Surface Modeling and Search Algorithms for Real-time Simulation of Off-road Vehicles,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.809-814, 2000.
5) ADAMS Online Document, Using the 3D Contact Model, MSC Software, 2005.
6) ADAMS Online Document, Adams/3D Road Model, MSC Software, 2005.
7) D. Salomon, Curves and Surfaces for Computer Graphics, Springer Science+Business Media Inc., USA, 2006.
8) K. Lee, Principles of CAD/CAM/CAE Systems, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1999.
9) A. Watt, 3D Computer Graphics, 3rd Edn, Addison Wesley, 2000.
10) K. Yi, J. Lee, D. Cho and W.-S. Yoo, “Equation of Motion of a 6*6 Autonomous Vehicle in Terms of Chassis Local Coordinates for Real-Time Dynamic Simulation,” Asian Conference on Multibody Dynamics Jeju Korea, pp.145-148. 2008.
11) E. Bakker, L. Nyborg and H. B. Pacejka, “Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies,” SAE 870421, 1987.