

레일 마모도의 측정 정밀도 향상을 위한 3차원 레일 프로파일 재구성 기법 개발

Development of the 3D Rail Profile Reconstruction Method Improving the Measurement Accuracy of Railway Abrasion

안성혁† 김만철*
Sung-Hyuk Ahn Man-Cheol Kim

ABSTRACT

The The contactless railway abrasion measurement system have to satisfy two conditions to increase the measurement accuracy as follows. The laser region projected on the rail have to be extracted without the geometrical distortion. The mapping of the acquired laser region data on the rail profile have to be matched with the cross section of rail, exactly. But, the conventional railway abrasion measurement system is required the post image processing with a camera model and a perspective transform for the exact mapping between the cross section of rail and the coordinate data extracted from a line laser region or the raw image obtained from a camera because the image captured from the camera has an oblique viewpoint. So, the measured rail profile data had limits to the measurement accuracy because of a discontinuity point.

In this Paper, we propose the 3D rail profile reconstruction method to increase the accuracy of the railway abrasion measurement system applying the modified camera model and perspective transform to the image obtained from the bidirectional rail.

국문요약

2차원 카메라와 라인 레이저를 이용한 비접촉식 레일 마모도 측정 시스템은 레일의 정확한 마모도 측정을 위하여 레일에 조사된 레이저 영역을 왜곡 없이 획득하고 이를 레일 단면과 정확하게 일치시켜야 한다. 그러나 일반적인 비접촉식 레일 마모도 측정 시스템의 카메라는 레일의 측면에서 비스듬하게 레일을 촬영하여 사선방향(Oblique Viewpoint)의 원시영상을 획득하는 방식을 취하기 때문에 카메라 모델(Camera Model)과 투시 변환(Perspective Transform)을 이용하여 카메라로부터 획득한 원시영상이나 영상으로부터 추출된 레이저 영역의 좌표 데이터를 레일의 단면과 일치시키기 위한 영상 후처리 작업을 수행하게 된다. 이때 라인 레이저가 조사된 지점에서 획득한 레일 프로파일 데이터는 전체 측정 구간에 대하여 일정한 간격으로 측정된 불연속 데이터의 특성을 가지므로 측정된 각 레일 프로파일 데이터 사이의 영역에서는 정확한 레일의 마모도를 측정할 수 없는 한계를 가진다.

본 논문에서는 레일의 양방향에서 획득한 영상에 대하여 3차원 레일 프로파일 생성을 위한 변형된 카메라 모델과 투시 변환을 적용함으로써 레일 마모도의 측정 정밀도를 향상하기 위한 3차원 레일 프로파일 재구성 기법을 제안하고자 한다. 제안된 3차원 레일 프로파일 재구성 기법을 통하여 전체 측정 구간 내에 포함된 레일 마모도 측정 데이터의 불연속성을 효과적으로 제거하여 연속적인 측정면(Measurement Surface)을 생성함으로써 측정하고자 하는 전체 레일에 대한 향상된 측정 정밀도를 제공하고자 한다.

† 책임저자 : (주)상상돔, 정회원
E-mail : requiem70@sangsangdom.com
TEL : (042)484-9747 FAX : (042)487-9747
* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

1. 서론

철도 레일은 열차의 반복적인 운행에 따른 하중, 충격에 의하여 변형, 마모, 파손될 수 있으며, 이는 열차의 동요, 승차감 악화, 최악의 경우 열차 탈선 사고를 유발할 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여 주기적인 궤도검측(Track Measurement)과 보선작업(Track Maintenance)이 이루어지며 마모도 측정 및 궤도검측은 궤도를 구성하는 모든 요소들을 시설 기준에 따라 종합적으로 측정하여 보선작업을 위한 자료를 제공하고 철도 운행의 안정성 보장을 위해 열차의 과격한 차량 하중과 기상 작용 및 상대 운동에 의한 마모와 파손을 측정 한다. 그러나 레일의 유지 보수 측정용 장치와 초음파를 이용한 측정 시스템은 기구적, 기능적 한계 및 측정 상태, 측정 환경에 영향을 받아 정밀한 측정이 어렵고 비용 대비 측정 효율이 낮은 문제가 있다.

레일의 마모도 측정 방식은 자주식 검측차를 이용한 방식과 고속검측설비를 이용한 방식으로 구분된다. 자주식 검측차는 궤도의 보다 정밀한 기하학적 상태를 파악하고 유지보수 작업계획을 수립하기 위하여 사용되며 궤도의 선형검측, 레일의 단면 및 표면결함 측정, 파상마모 측정, 등을 수행한다. 또한, 160km/h 이상의 검측속도에서도 검측이 가능하기 때문에 가속도계와 카메라를 이용한 관성식 또는 광학식 비접촉 측정방식을 도입하여 검측 정밀도를 향상시키고 있으나 300km/h의 고속철도에서는 검측이 완전하지 못하여 레일 마모현상을 정확히 분석할 수 없으며 편마모가 심하거나 침체된 레일의 경우와 같이 탐측차가 레일 두부의 중심을 벗어나 진행하게 되는 경우에 에러가 발생하여 정밀 탐상이 불가능한 단점을 가진다. 고속검측설비의 경우 차상 및 대차의 진동가속도를 측정하는 설비가 사용되며 열차가 고속 주행하는 경우 차량의 진동으로 인해 발생하는 궤도의 틀림을 추정하고 있으나 진동에 의한 측정은 정밀도가 낮고, 측정값의 오차가 발생하는 단점을 가진다. 특히, 자주식 검측차에 적용되는 레이저-카메라 시스템은 운행중인 열차에서 실시간으로 레일의 마모도와 궤도틀림을 측정할 수 있는 능력을 가지며 측정 중 주행속도 및 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 인공지능(Neural Network)을 적용한 영상처리방식을 적용하여 성능을 개선하거나[1], 위치센서(Displacement Sensor)와 가속도센서(Accelerometer)와 결합된 형태의 시스템을 구성하여 중앙 종거법(Mid Chord Offset Method)을 적용하는 방법[2], 등을 통하여 최대 300km/h의 검측속도에서 레이저와 카메라를 이용하여 고속, 정밀 측정을 수행하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.

일반적으로 라인 레이저와 카메라를 이용한 고해상도 레일 마모도 측정 시스템은 정밀한 마모도 측정을 위하여 레일에 조사된 레이저 영역을 왜곡 없이 획득하고 이를 레일 단면 템플릿과 정밀하게 일치시키는 과정이 필수적으로 요구되며 이를 위하여 초당 480 프레임 이상의 고속으로 획득된 라이 레이저 조사 영상으로부터 레일 프로파일 데이터를 추출하고 카메라 모델(Camera Model)과 투시 변환(Perspective Transform)을 이용하여 각 프레임에 대한 2D 영상 데이터를 3차원 상의 데이터로 맵핑함으로써 레일 마모도를 측정하게 된다. 그러나 주행 중인 열차로부터 추출된 레일 프로파일 데이터는 일정한 간격을 가지며 생성되기 때문에 결과적인 레일 마모도 측정은 일정한 간격의 불연속 지점을 가지게 되며 추출된 레일 프로파일 데이터 사이의 구간에서는 레일 마모도를 측정할 수 없는 한계를 가진다.

이에 본 논문에서는 레일의 양방향에서 획득한 영상에 대하여 3차원 레일 프로파일 생성을 위한 변형된 카메라 모델과 투시 변환을 적용함으로써 레일 마모도의 측정 정밀도를 향상하기 위한 3차원 레일 프로파일 재구성 기법을 제안하고자 한다. 제안된 3차원 레일 프로파일 재구성 기법을 통하여 전체 측정 구간 내에 포함된 레일 마모도 측정 데이터의 불연속성을 효과적으로 제거하여 연속적인 측정면(Measurement Surface)을 생성함으로써 측정하고자 하는 전체 레일에 대한 향상된 측정 정밀도를 제공하고자 한다.

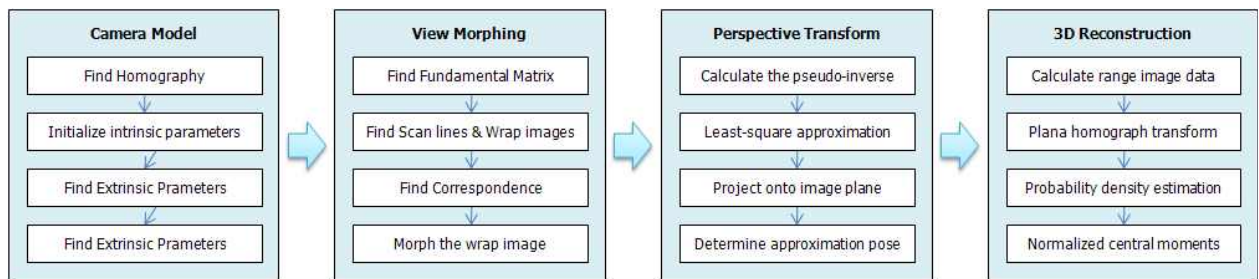
2. 실험 장치 구성 및 수행 방안

3차원 레일 프로파일 재구성을 위하여 구현된 실험 장치는 그림 1의 (a)와 같다. 그림 1의 (a)에서 보는 바와 같이 레일을 따라 등속 이동할 수 있는 테스트 지그에 라인레이저와 카메라를 장착하고 이동하며 라인 레이저 영상을 획득하였으며 좌측과 우측을 교대로 측정하였다. 또한, 좌, 우측에서 측정된 영상에 대하여 레일 상의 위치를 일치시키기 위하여 테스트 지그에 설치된 엔코더를 이용하여 카메라와 라인레이저의 이동거리를 기록하고 기록된 이동거리를 기준으로 좌, 영상에 대한 영상 데이터 세트를 구성하였다. 획득한 좌, 우영상은 그림 1의 (b) 및 (c)와 같다.



[그림 1] 실험장치 구현 및 촬영 영상

카메라와 라인 레이저를 이용하여 획득한 좌, 우 영상에 대하여 그림 2와 같이 레일 프로파일 획득으로 위하여 일반적으로 적용되는 Camera Model과 Perspective Transform 사이에 가상 카메라 방식을 이용하여 합성영상을 얻기 위한 View Morphing 과정을 추가하여 수행하였으며 레일 프로파일에 대한 3차원 재구성을 위하여 몸짓 인식 알고리즘(Gesture Recognition Algorithm)을 변형한 수정된 스테레오 알고리즘(Modified stereo imaging algorithm)을 적용하였다.



[그림 2] 3차원 레일 프로파일 재구성을 위한 알고리즘 적용 및 수행 방안

3. 3차원 레일 프로파일 재구성을 위한 알고리즘

3.1 카메라 모델 (Camera Model)

카메라 모델은 카메라의 기본적인 수학적 모델을 구성하며 카메라와 실좌표계가 일직선상에 있다는 가정 하에 이루어진다. 그림 2는 은 카메라와 3차원 점들(W로 표기)을 찾아내는데 이용되는 실좌표계

(X,Y,Z)를 보이고 있다. 이때 카메라는 각 \ominus 만큼 좌우로, 각 α 만큼 기울어져 레일을 비스듬한 각도에
 거 바라보고 있으며 Pan은 x와 X축 사이의 각이고, Tilt는 z와 Z축 사이의 각이다. 실좌표계의 원점에
 서 카메라 축의 중심까지 오프셋을 W_0 로 표기하고, 카메라 축의 중심에서 영상 평면 중심까지의 오프
 셋은 구성요소가 (r_1, r_2, r_3) 인 벡터 r이다. 이후 실제 점에 대해 영상 평면 좌표를 얻기 위해서는 단지
 원근 변환을 적용하면 된다. 카메라 축의 중심과 영상 평면의 원점이 실좌표계의 원점에 있고 모든 좌
 표축들이 일치한다는 점에서 카메라가 정규 위치에 있다고 할 때 (1) 원점에서 짐벌 중심의 변위 (2)
 x축의 팬 (3) z축의 경사 (4) 짐벌 중심에 대한 영상 평면의 변위의 순서로 조정되었다고 보면 이러한
 순서들은 실제 지점에는 영향을 미치지 못한다. 이는 정규 위치로부터 옮겨진 후에 카메라를 통해 보는
 이 일련의 점들은 매우 다르기 때문이며 실질적으로 모든 실제 점에 같은 순서의 단계로 정확하게 적용
 하면 정규위치로 다시 옮길 수 있게 되어 정규위치에 있는 카메라는 원근변환의 적용을 위한 조건을 만
 족하게 된다. 이에 따라, 벡터 r에 의한 영상 평면의 원점 변위에 대한 변환 행렬(C)와 Pan Angle(\ominus)
 및 Tilt Angle(α)에 대한 변환 행렬(R)은 식 (1)과 같으며 기하학적 배열을 만족하는 카메라에
 의한 동차 실점은 카메라 좌표계에서 식 (2)와 같은 동차 표현을 갖는다. [3]

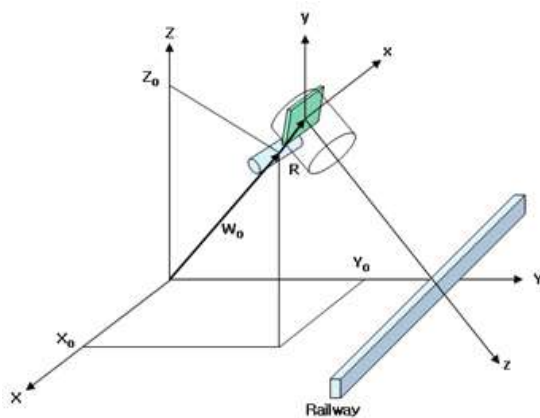
$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta \cos \alpha & \cos \theta \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \theta \sin \alpha & -\cos \theta \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_1 \\ 0 & 1 & 0 & -r_2 \\ 0 & 0 & 1 & -r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$c_h = PCR G w_h \quad (2)$$

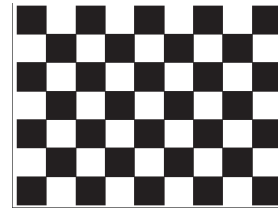
따라서, c_h 의 네 번째 요소로 첫 번째와 두 번째 요소를 나누어서 영상점의 직교 좌표 (x,y)를 얻음
 으로서 각 점에 대한 좌표는 식 (3)과 (4)에 의하여 획득된다.

$$x = \lambda \frac{(X - X_0) \cos \theta + (Y - Y_0) \sin \theta - r_1}{-(X - X_0) \sin \theta \sin \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \sin \alpha - (Z - Z_0) \cos \alpha + r_3 + \lambda} \quad (3)$$

$$y = \lambda \frac{-(X - X_0) \sin \theta \cos \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \cos \alpha - (Z - Z_0) \sin \alpha - r_2}{-(X - X_0) \sin \theta \sin \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \sin \alpha - (Z - Z_0) \cos \alpha + r_3 + \lambda} \quad (4)$$



(a) 카메라 모델



(b) 보정 패턴



(c) 보정 패턴을 이용한 촬영

[그림 3] 카메라 모델 및 카메라 파라미터 획득을 위한 보정 패턴

3.2 뷰 모핑 알고리즘 (View Morphing Algorithm)

뷰 모핑은 좌, 우측의 두 카메라 사이 중앙에 가상의 카메라(Virtual Camera)가 있다고 가정하고 가상의 카메라로부터 촬영된 영상을 획득하는 것을 의미한다. 뷰 모핑 알고리즘은 좌, 우측의 카메라에서 촬영한 실제 영상을 이용하며 두 영상에 포함된 영역 내에서 상응되는 지점(Correspondence Points)을 찾아 이에 대한 정보를 사용하게 된다. 따라서 뷰 모핑 알고리즘은 가상 카메라의 시야각으로 촬영된 것과 같은 합성영상을 결과로 얻게 된다.

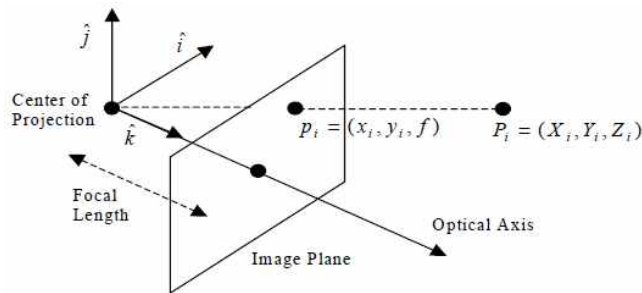


(a) 좌측 카메라 영상 (b) 우측 카메라 영상 (c) 좌측영상의 대응점 (d) 우측영상의 대응점

[그림 4] 뷰 모핑 알고리즘 적용을 위한 좌, 우 영상과 대응점 예시

3.3 투시 변환 (Perspective Transform)

원근변환은 3차원 상의 한 점을 평면에 투사한다. 원근 변환은 인간이 3차원 세계를 직접 눈으로 봄으로써 한 영상을 구성하는 방법과 매우 근사한 방식이기 때문에 영상처리에서 중심적인 역할을 하며 이 변환은 좌표값에 의해 나뉘지는 비선형성을 포함하는 다른 변환들과는 기본적으로 차별되는 역할을 제공한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 카메라 좌표계(x,y,z)에는 xy 평면과 일치하는 영상 평면이 있고 Z축을 따라서 광축(렌즈의 중심에 의해 결정됨)이 있다. 따라서 영상 평면의 중심은 원점이고, 렌즈 중심은 좌표(0,0,λ)이다. 만일 카메라가 멀리 떨어진 물체와 초점이 맞는 거리에 있다면 λ 를 렌즈의 초점거리라고 한다. 여기에서의 가정은 카메라 좌표계가 실좌표계 (x,y,z)와 일직선상에 맞춰져 있다는 것이다. [4]



[그림 5] 투시변환을 위한 공간내의 기하 모델 (Perspective Geometry Projection)

따라서, 식 (5)을 통해 투사된 3차원 점의 영상 평면 좌표를 다음과 같이 직접 구할 수 있다.

$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z}, \quad y = \frac{\lambda Y}{\lambda - Z} \quad (5)$$

식 (5)은 변수 Z에 의해 나뉘지는 비선형 구조를 가지며 회전, 이동, 배율조정처럼 선형 행렬의 형

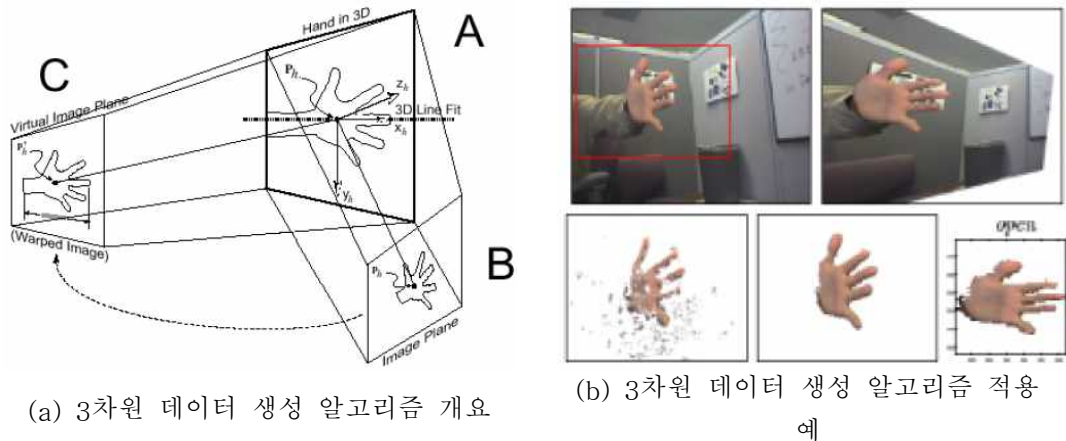
태로 표현되는 동차 좌표(homogeneous coordinates)를 이용하는 것이 바람직하며 이에 따라 직교 좌표 (x,y,z)를 갖는 한 점의 동차 좌표가 (κX, κY, κZ, κ)일 때 식 (6)와 같이 벡터적인 표현이 가능해진다.

$$C_h = PW_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa X \\ \kappa Y \\ \kappa Z \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa X \\ \kappa Y \\ \kappa Z \\ \frac{-\kappa Z}{\lambda} + \kappa \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기에서 C_h 의 원소들은 동차 형태의 카메라 좌표이며 앞에서 언급했듯이 이 좌표는 네 번째 원소로 C_h 의 앞의 세 원소를 나누면 직교 형태로 바꿀 수 있다. 따라서 카메라 좌표계의 어떤 직교 좌표도 다음 벡터의 형태가 될 수 있다.

3.4 3차원 데이터 생성 알고리즘

3차원 데이터 생성하기 위하여 일반적으로 몸짓 인식(Gesture Recognition)으로 알려져 있는 몸짓 인식 알고리즘(Gesture Recognition Algorithm)을 변형한 수정된 스테레오 알고리즘(Modified stereo imaging algorithm)을 적용하였다. 몸짓 인식 알고리즘은 대상체의 좌, 우에서 획득한 영상을 이용하여 3차원 데이터를 생성하는 기법으로서 표준 스테레오 대응 알고리즘(Standard Stereo Correspondence Algorithm)을 기반으로 하기 때문에 레일의 3차원 프로파일 재구성을 위한 과정과 유사한 절차를 따르는 특징을 가진다. 따라서 몸짓 인식 알고리즘(Gesture Recognition Algorithm)을 변형한 수정된 스테레오 알고리즘(Modified stereo imaging algorithm)을 적용하여 레일 프로파일에 대한 3차원 재구성을 수행하였다.[5]

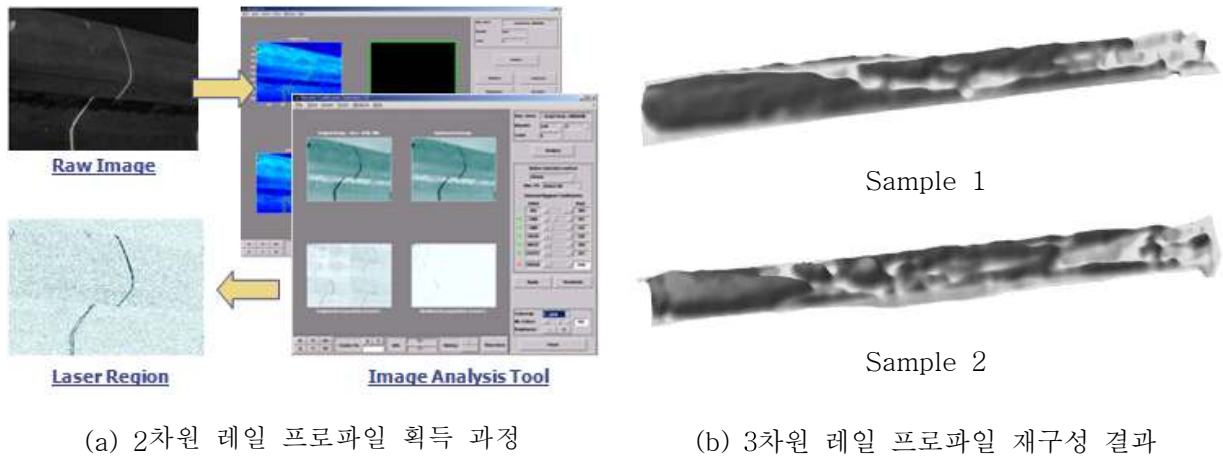


[그림 6] 투시변환을 위한 공간내의 기하 모델 (Perspective Geometry Projection)

4. 실험 결과

카메라로부터 획득한 원시영상에 대한 레일 프로파일의 추출은 웨이블릿 기반의 영상처리 알고리즘을 적용하였으며 Matlab에서 제공하는 웨이블릿 분석 툴을 이용하여 영상분석 테스트를 진행하였고 레일에 조사된 라인 레이저의 정확환 윤곽선 추출을 위하여 웨이블릿 베이스와 적용될 차수를 결정하여 적용하였다. 이를 위하여 B-spline 함수를 포함하여 Biorthogonal, Symlets, Daubechies, Haar, 등 대표적인 웨이블릿 베이스를 적용하고 윤곽선 추출 결과가 가장 우수한 B-spline 함수를 최종적으로 선

택하여 레일 프로파일 데이터를 추출하였다. 또한, 영상 분석 결과를 이용하여 B-spline 함수 사용을 위한 웨이블릿 계수를 획득하기 위하여 Matlab에서 제공하는 Selection 프로그램을 이용하였고 이를 기반으로 구현된 웨이블릿 기반의 영상처리 알고리즘을 수행능력과 480FPS의 고속으로 입력되는 1M 급 영상에 대한 처리능력을 검증하기 위하여 Matlab의 Simulink에서 제공하는 TI사의 C6000 DSP Core 및 C6000 Target Preference를 이용하였다. 그 과정과 결과는 그림 7과 같다.



(a) 2차원 레일 프로파일 획득 과정

(b) 3차원 레일 프로파일 재구성 결과

[그림 7] 3차원 레일 프로파일 재구성을 위한 레일 프로파일 획득 및 결과

5. 결론

본 논문에서는 레일의 양방향에서 획득한 영상에 대하여 3차원 레일 프로파일 생성을 위한 변형된 카메라 모델과 투시 변환을 적용함으로써 레일 마모도의 측정 정밀도를 향상하기 위한 3차원 레일 프로파일 재구성 기법을 제안하였고 정속 주행이 가능한 테스트 지그를 이용하여 결과를 확인하였다. 철도 레일의 마모도 측정을 위하여 일반적으로 적용되는 카메라 모델과 투시 변환을 기반으로 View Morphing 과 수정된 스테레오 알고리즘(Modified stereo imaging algorithm)을 추가 적용하여 3차원 레일 프로파일을 생성함으로써 주행 중에 측정되는 레일 단면 프로파일 상의 불연속 지점을 제거함으로써 레일 마모도의 측정 해상도를 향상할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 향후 실측된 레일 단면 프로파일 데이터 사이의 불연속 영역에 대하여 Bi-cubic Spline Interpolation 기법을 적용하여 3차원 재구성을 위한 원시 데이터를 보강함으로써 레일 마모도의 측정 정밀도 향상이 증대될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. C. Alippi, E. Casagrande, F. Scotti, V. Piuri, "Composite Real-time image processing for railways track profile measurement", IEEE Trans. on International and Measurement, Vol.49, pp.559-564, 2000
2. Kunio Takeshita, "Track Irregularity Method by Commercial Railway Vehicles", QT of RTRI, Vol.38, pp.6-12, 1997
3. Rafael C. gonzales & Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Addison Wesley, Sept 1993
4. Zhengyou Zang, "Camera calibration with one-dimensional objects", Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Volume 26, Issue 7, pp, 892-899, July 2004,
5. Dea-Gyu Kim & Won-seck Chang, "A Study on a 3-D Profilemeter Using Dynamic Shape Reconstruction with Adaptive Pattern Clustering of the Line-Shaped Laser Light", TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference, Volume: 2, pp.1371-1374 vol.2, 1999