카메라 모델과 투시 변환에 의한 레일 마모도 측정 시스템 개발

Development of the Railway Abrasion Measurement System using Camera Model and Perspective Transformation

안성혁* 강동은* 문형득* 박소연* 김만철**

Sung-Hyuk Ahn*, Dong-Eun Kang*, Hyoung-Deuk Moon*, So-yeon Park*, Man-Cheol Kim**

ABSTRACT

The railway abrasion measurement system have to satisfy two conditions to increase the measurement accuracy as follows. The laser region which is 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 processed exactly. But, the conventional railway abrasion measurement system is deeply effected by the foreign substance(dust, rainwater, and so on) on the railway or the sensitive response characteristic of the laser to the external measurement circumstance, and then the measurement errors arise from above factors. When the laser region is projected on the rail extracts from the acquired image, the interference of the light with the same frequency as the laser system occurs the serious problems. In the process of the mapping between the railway profile and the extracted laser region, the measurement accuracy is very highly effected by the geometrical distortion and the abnormal variation.

In this Paper, we propose the novel method to increase the accuracy of the railway abrasion measurement dramatically. we designed and manufactured the high precision and fast image processing board with DSP Core and FPGA to measure the railway abrasion. The image processing board has the capability that the image of 1024X1280 from camera can be processed with the speed of 480 frame/sec. And, we apply the image processing algorithm base on the wavelet to extract the laser region is projected on the rail exactly. Finally, we developed high precision railway abrasion measurement system with the error range less than +/-0.5mm by which 2D image data is covered 3D data and mapped on the rail profile using the camera model and the perspective transform.

레이저와 카메라를 이용한 레일 마모도 측정 시스템은 정확한 마모도 측정을 위하여 레일에 조사된 레이저의 영역을 왜곡 없이 획득하고 이를 레일 단면과 정밀하게 일치시키는 과정이 매우 중요하다. 그러나 기존의 레일 마모도 측정 시스템은 빗물 등의 레일 위에 이물질이 있을 경우와 온도와 같은 측정 환경에 민감하게 반응하는 레이저의 특성으로 인하여 오차가 발생할 수 있으며 특히 외부에서 유입되는 태양광, 등과 같이 레일에 조사된 레이저와 같은 파장을 가지는 빛의 간섭에 의하여 레일에 조사된 레이저 영역 추출에 한계를 가진다. 또한, 2차원 상의 좌표 값으로 표현되는 추출된 레이저 영역을 레일 단면에 맵핑시키는 과정에서 발생하는 기하학적 왜곡과 변형으로 측정 정밀도에 대한 한계가 발생하는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 레일 마모도 측정을 위하여 카메라로부터 입력되는 1메가급 해상도의 영상을 초당 480 프레임의 속도로 실시간 처리할 수 있는 DSP와 FPGA가 탑재된 고성능 영상처리보드를 개발하고 이를 기반으로 각 프레임에 대한 2D 영상 데이터를 3차원 상의 데이터로 맵핑함으로써 정밀한 레일 마모도 측정 방법을 제안하고자 한다. 획득한 영상으로부터 레일에 조사된 레이저의 영역을 정확하게 추출하기 위하여 웨이브렛 기반의 영상 알고리즘을 적용하고 2차원 상의 좌표값으로 표현된 레이저 영역을 카메라 모델과 투시 변환을 이용하여 레일의 단면에 정확하게 위치시킴으로서 ±0.5㎜ 이하의 오차범위를 가지는 고정밀 레일 마모도 측정 시스템을 개발하였다.

* (주)상상돔 무선A/V시스템연구소
E-mail : requiem70@sangsangdom.com
TEL : (042)484-9747 FAX : (042)487-9747
** 한국철도기술연구원 책임연구원

1. 서 론

레일은 철도차량의 하중을 직접 지탱하고 침목(枕木)에 분산시키는 동시에 주행면을 평평하고 미끄럽게 하여 차량을 유도하는 특수단면형상의 띠 모양 강철제품으로 레일의 종류는 질량과 단면형상에 따라 구분된다. 세계 각국에서는 각각 다른 단면 형상이 사용되고 있다. 레일은 두부(頭部) 복부(腹部)·저부(底部)로 구성되어 있다. 항상 차륜이 접촉하는 두부는 접촉에 따른 마모를 최소로 줄이고, 또 마모에 의한 단면의 감소에 대해 여유 있는 단면형상으로 하여 차량의 원활한 주행을 꾀한다. 복부는 차량의 하중을 두부에서 저부로 전달하는 부분으로, 충분한 강성(剛性)을 가지면서 재료의 사용량을 최저로 하는 고려가 필요하다. 저부의 형상은 침목 위에 안정되게 정착하고, 차량 중량에 의한 횡전(橫轉)에의 저항력, 게다가 전체 단면의 균형, 제조상의 압연 조건, 오래 사용했을 경우의 부식 등에 의한 단면 감소 등을 고려하여 결정한다.

또한, 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 상대운동에 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.

일반적인 3차원 물체의 정보 측정 방법에는 접촉식과 비접촉식이 있다. 접촉식 방법에는 정밀성은 보장되지만 측정에 많은 시간이 걸리며 또한 고가의 장비가 필요하다. 그리고 비접촉식방법에는 포인트 광 방식(Point Beam Projection), 슬릿광 방식(Slit Beam Projection), 그리고 모아레 방식(Moire Method), PMP를 이용한 3차원 형상측정 방식 등이 있다. 포인트 광 방식은 한 번에 한 점의 높이만을 측정할 수 있기 때문에 곡면형상을 측정할 경우 센서를 이동시키면서 동시에 센서의 3차원 위치좌표를 읽어야 하기 때문에 고정도의 이동이 가능한 기구부가 필요하게 된다. 슬릿 광 방식은 광삼각법의 원리에 기초한 측정법으로 레이저 광을 집광시킨 후 로드렌즈나 실린더리컬 렌즈로 슬릿 광을 만들어 측정물체에 투영시켜 형상에 따라 변현된 슬릿 광을 얻는다. 이렇게 CCD 카메라로 얻어진 슬릿 광 이미지 데이터를 기하학적인 연산을 통하여 형상의 3차원 좌표를 산출하는 방법이다. 모아레 방식은 측정대상물 바로 앞에 규칙적인 줄무늬격자를 두고 한 쪽에서 빛을 비추면 물결무늬의 그림자가 측정물 위에 생기게 되는데 이 무늬를 모아레 무늬라고 한다. 이 무늬는 물체의 형상정보를 가지고 있어서 이를 분석하여 높이 값을 얻게 된다. PMP 방법(위상측정 형상측정법)에서는 영사식 모아레에서 사용하는 위상천이법을 주된 방법으로 하여 우수한 측정정도를 확보하면서 광학계를 대폭 간소화시킨 측정법이다. 하지만 우수한 측정정도에도 불구하고 산업현장에서 구현이 불가능함으로 거의 사용되지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 라인 레이저와 고속 카메라를 이용하여 레일의 효과적인 마모도 측정하기 위한 시스템 개발을 통하여 고속 주행 중에 레일 단면의 영상을 획득할 수 있는 기반 기술을 확보하고자 고속 카메라로부터 입력되는 1메가 급 해상도의 영상을 초당 480 프레임의 속도로 실시간 처리할 수 있는 DSP와 FPGA가 탑재된 고성능 영상처리보드를 개발하고 이를 기반으로 각 프레임에 대한 2D 영상 데이터를 3차원 상의 데이터로 맵핑함으로써 정밀한 레일 마모도 측정 방법을 제안하고자 한다. 또한 제안된 방법을 통하여 획득한 영상으로부터 레일에 조사된 레이저의 영역을 정확하게 추출하기 위하여 웨이브렛 기반의 영상 알고리즘을 적용하고 2차원 상의 좌표 값으로 표현된 레이저 영역을 카메라 모델과 투시 변환을 이용하여 레일의 단면에 정확하게 위치시킴으로서 300km/h의 운행 속도에서 ±0.5mm 이하의 오차범위를 가지는 고정밀 레일 마모도 측정 시스템을 개발하였다.

2. 레이저 영역에 대한 외곽선 추출

라인 레이저가 조사된 레일을 고속 카메라로 촬영하고 획득한 영상으로부터 레이저의 외곽선을 정밀하게 추출하고 이에 대한 2차원 좌표데이터를 획득하기 위하여 웨이브렛 방식을 적용하였다.

2.1 외곽선에 대한 웨이브렛 변환

물체의 외곽선은 매개변수의 표기기법을 사용하여 물체의 2차원적 표현을 1차원적 표현으로 변환할 수 있기 때문에 외곽선은 매개변수 t의 함수로 표현되고, 그것은 두 개의 함수 {X(t), Y(t)}의 쌍으로 연속함수로 표현할 수 있다. 따라서 외곽선은 1차원 웨이브렛 변환에 의해 분할(decompose)될 수 있고, 모든 스케일(scale)의 외곽선 정보를 얻을 수 있으며 본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 모든 스케일에 대한 외곽선을 표기하여 물체의 특성을 추출하였다.

스케일함수로는 3차(cubic) B-spline 함수의 이원적형태(dual form)를 사용하였다. B-spline 함수는 bi-orthonormal의 기초함수(basis)가 되며 orthonormal 웨이브렛보다 bi-orthonormal 웨이브렛은 많은 이점을 갖고 있다. 이에 따라 스케일함수로 dual B-spline 함수를 선택하여 신호를 dilated B-spline 함수로 필터링(filtering)할 수 있게 되고 B-spline 함수는 하드웨어와 소프트웨어 실현이 쉽고 해석하기가 쉬우므로 smoothing 함수로 적절하게 사용할 수 있다. 이때 스케일함수와 웨이브렛 사이의 두 스케일에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\Psi(\frac{x}{2}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d(k)\,\hat{\beta}^3(x-k) \qquad (1)$$

$$\Psi(\frac{x}{2}) = \hat{\beta}^3(\frac{x}{2}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b(k)\,\hat{\beta}^3(x-k) \qquad (2)$$

여기서 b(R)와 d(R)는 스케일에 대한 관계를 설명하는 유한계수들이다. 식(1)과 (2)에 의하여 분해된 두 개의 신호는 근사화(approximated)된 신호와 웨이브렛에 관계된 신호로서 이들 두 신호에 의하여 웨이브렛 변환을 구성한다. 스케일 표현을 위해서 근사화된 신호가 사용되고 원래의 신호로 복원하기 위해서는 웨이브렛 변환을 사용한다. B-spline 함수를 사용하는 것의 한가지 중요한 이점은 B-spline 함수와 그것의 도함수(미분함수)가 아주 잘 해석되고 단순한 연산만 필요로 한다는 점이다. 또한 B-spline 함수는 적절한 근사화된 신호를 제공한다. 그것이 의미하는 바는 근사화된 신호는 원래의 신호와 비슷한 모양을 갖는다는 것이다. 근사화된 신호는 수학적으로 다음과 같이 묘사된다. 우선 LXs(t)를 스케일 s에서 근사화된 신호라고 가정한다.

$$LX_2(t) = X(t) \cdot \beta^3 s(t) \qquad (3)$$

근사화된 신호는 원래 신호의 B-spline 함수로 interpolation된 것으로 간주할 수 있다. 결과적으로 원래의 물체 외곽선 표기 {X(t), Y(t)}로부터 각 스케일마다 한 쌍의 웨이브렛 변환 {LXs(t), LYs(t)}이 얻어질 수 있다.

2.2 곡률함수와 웨이브렛 변환과의 관계

외곽선에 대한 곡률은 일반적으로 곡선에 대한 tangent 각의 미분으로 표현된다. 곡선에 대한 매개변수 표현을 사용해서 곡률함수를 계산하는 공식은 다음과 같이 구해진다.

$$k(t) = \frac{d\theta}{ds} = \frac{\dot{X}(t)\ddot{Y}(t) - \ddot{X}(t)\dot{Y}(t)}{(X^2(t) + Y^2(t))^{3/2}} \qquad (4)$$

방정식(4)은 원래의 외곽선에 대한 곡률함수를 나타낸다. 낮은 해상도로로 외곽선을 획득한 후, 다음과 같이 웨이브렛 변환 계수에 의하여 곡률함수를 나타낼 수 있다.

$$\frac{W^1 X_5(t) W^2 Y_5(t) - W^2 X_5(t) W^1 Y_5(t)}{([W^1\{X_5(t)\}]^2 + [W^1\{Y(t)\}]^2)^{3/2}} \qquad (5)$$

이에 따라, 모든 스케일에 걸쳐 곡률함수의 zero-crossing 점들을 다음에서 찾을 수 있다.

$$k_5(t) = O \ all \ over \ scales \qquad (6)$$

곡률함수의 zero-crossing들은 모양해석(shape analysis)에서 중요한 특징이 된다. 이 곡률함수의 zero-crossing 점들은 제안된 스케일 무관한 표기 기법에 사용된다.

2.3 웨이블렛 변환 알고리즘 분석

Mallet의 2차원 웨이브렛 변환은 행방향으로서의 1차원 웨이브렛 변환과 열방향으로의 1차원 웨이브렛 변환으로 생각할 수 있으며 2차원 웨이브렛 변환은 영상의 행과 열을 1차언 필터들로 순차적으로 연이어 필터링함으로써 계산할 수 있다. 즉, 원래신호 $LX_0(n_1, n_2)$는 저역통과필터와 고역통과필터의 조합에 의해서 4개의 밴드로 분리할 수 있으며 다시 $LX_1(n_1, n_2)$는 같은 필터링 과정에 의해서 더 많은 밴드로 분할이 된다. 실제로 이 알고리즘은 2차원 product separable 필터 뱅크의 피라미드 구조로 볼 수 있다.

따라서, 식(3)의 2차원 product separable 필터 구현은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y(n_1, n_2 &= \sum_{t-0}^{N_1}\sum_{t-0}^{N_2} k(i,j)x(n_1 - i, n_2 - j) \\ &= \sum_{t-0}^{N_1} k(i) \sum_{t-0}^{N_1} k(j)x(n_1 - i, n_2 - j) \qquad (7) \end{aligned}$$

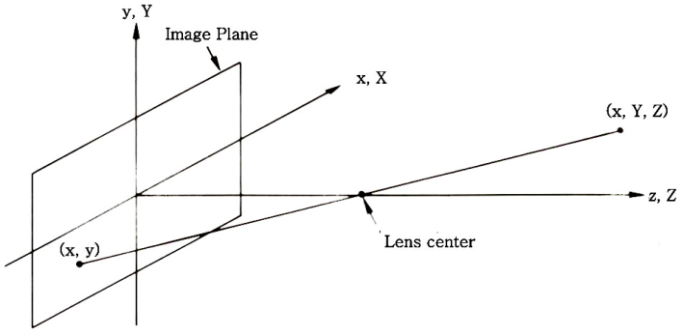
여기서 h(ij)는 필터의 임펄스 응답을 나타내고, N_1 N_2 는 수평 수직 방향의 필터의 차수를 나타낸다. 식(7)의 두 번째 식은 product separable 2차원 필터의 임펄스 응답인 h(ij)가 1차원 필터의 임펄스 응답인 h(i)와 h(j)의 곱으로 분리되는 것을 보여주며, 또한 2차원 필터링 알고리즘의 행-열 분할(row-column decomposition)을 보여주고 있다. 이와 같이 분할된 알고리즘은 상태 변수 표현(state space representation) 방법을 사용하여 효율적으로 구현할 수 있는데, 열방향의 수직 상태 변수와 행방향의 수평 상태 변수를 사용하여 출력 신호와 상태 변수를 독립적인 식으로 표현해보면 파이프라인에 적합한 병렬처리 연산구조를 찾아낼 수 있다.

3. 레이저 추출 데이터 매핑

3.1 투시변환 (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 나눠지는 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.



[그림 1] 영상 형성 과정의 기본 모델

따라서, 식 (8)을 통해 투사된 3차원 점의 영상 평면 좌표를 다음과 같이 직접 구할 수 있다.

$$\chi = \frac{\lambda X}{\lambda - Z}, \quad y = \frac{\lambda X}{\lambda - Z} \qquad (8)$$

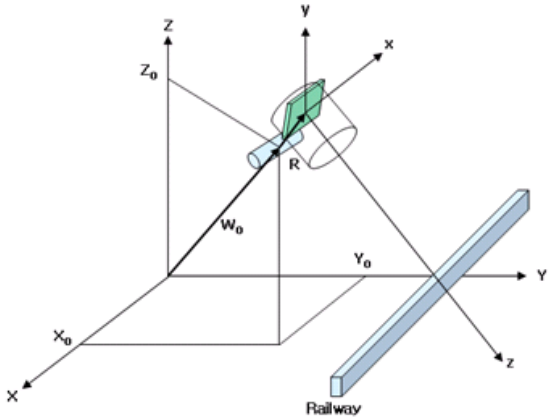
식 (8)은 변수 Z에 의해 나눠지는 비선형 구조를 가지며 회전, 이동, 배율조정처럼 선형 행렬의 형태로 표현되는 동차 좌표(homogeneous coordinates)를 이용하는 것이 바람직하며 이에 따라 직교 좌표(x,y,z)를 갖는 한 점의 동차 좌표가 (kX, kY, kZ, k)일 때 식 (9)와 같이 벡터적인 표현이 가능해진다.

$$C_h = PW_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa X \\ \kappa Y \\ \kappa Z \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa X \\ \kappa Y \\ \kappa Z \\ \kappa \\ \frac{-\kappa Z}{\lambda} + \kappa \end{bmatrix} \qquad (9)$$

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

3.2 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 ⊖만큼 좌우로, 각 α?만큼 기울어져 레일을 비스듬한 각도에거 바라보고 있으며 Pan은 x와 X축 사이의 각이고, Tilt는 z와 Z축 사이의 각이다. 실좌표계의 원점에서 카메라 축의 중심까지 오프셋을 W_0로 표기하고, 카메라 축의 중심에서 영상 평면 중심까지의 오프셋은 구성요소가 (r_1 , r_2 , r_3)인 벡터 r이다. 이후 실제 점에 대해 영상 평면 좌표를 얻기 위해서는 단지 원근 변환을 적용하면 된다.



[그림 2] 카메라 모델

카메라 축의 중심과 영상 평면의 원점이 실좌표계의 원점에 있고 모든 좌표축들이 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 적용하면 정규위치로 다시 옮길 수 있게되어 정규위치에 있는 카메라는 원근변환의 적용을 위한 조건을 만족하게 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 (10)과 식 (11)에 의하여 표현될 수 있으며 기하학적 배열을 만족하는 카메라에 의한 동차 실점은 카메라 좌표계에서 식 (12)와 같은 동차 표현을 갖는다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_1 \\ 0 & 1 & 0 & -r_2 \\ 0 & 0 & 1 & -r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (\ 10\ )$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta Scos\alpha & \cos\theta\cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ \sin\theta\sin\alpha & -\cos\theta\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (\ 11\ )$$

$$c_h = PCRGw_h \qquad (\ 12\ )$$

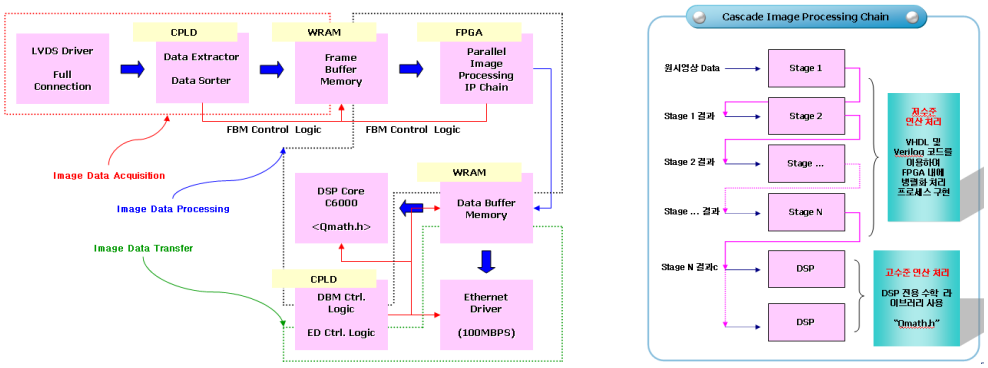
따라서, c_h의 네 번째 요소로 첫 번째와 두 번째 요소를 나누어서 영상점의 직교 좌표 (x,y)를 얻음으로서 각 점에 대한 좌표는 식 (13)과 (14)에 의하여 획득된다.

$$x = \lambda \frac{(X-X_0)\cos\theta + (Y-Y_0)\sin\theta - r_1}{-(X-X_0)\sin\theta\sin\alpha + (Y-Y_0)\cos\theta\sin\alpha - (Z-Z_0)\cos\alpha + r_3 + \lambda} \qquad (\ 13\ )$$

$$y = \lambda \frac{-(X-X_0)\sin\theta\cos\alpha + (Y-Y_0)\cos\theta\cos\alpha - (Z-Z_0)\sin\alpha - r_2}{-(X-X_0)\sin\theta\sin\alpha + (Y-Y_0)\cos\theta\sin\alpha - (Z-Z_0)\cos\alpha + r_3 + \lambda} \qquad (\ 14\ )$$

4. 시스템 구현

구현된 하드웨어 시스템은 그림 3과 같으며 처리속도 향상에 따른 성능 개선과 열차 내 탑재의 편의성을 위한 물리적 사이즈의 최소화를 위하여 고속의 데이터 처리가 가능한 VRAM(Video Memory)를 중심으로 영상 데이터 획득 파트, 처리 파트 및 전송 파트로 전체 신호처리 보드를 구분하고 각 파트가 독립적으로 운영될 수 있도록 하였다. 또한, DSP 및 FPGA 혼합 운영을 기반으로 병렬화 연산 처리 방식(그림 3)을 적용하여 영상처리 알고리즘의 처리 속도 및 시스템 효율을 극대화할 수 있도록 하였다. 특히, 알고리즘 및 하드웨어 개발은 Simulink를 이용한 알고리즘 개발 과정에서 도출된 결과를 하드웨어 설계 과정에 적용함으로서 시스템을 최적화하고 개발된 알고리즘을 VHDL 및 DSP 펌웨어 적용에 적합한 C 코드로 변환하여 사용하였다.

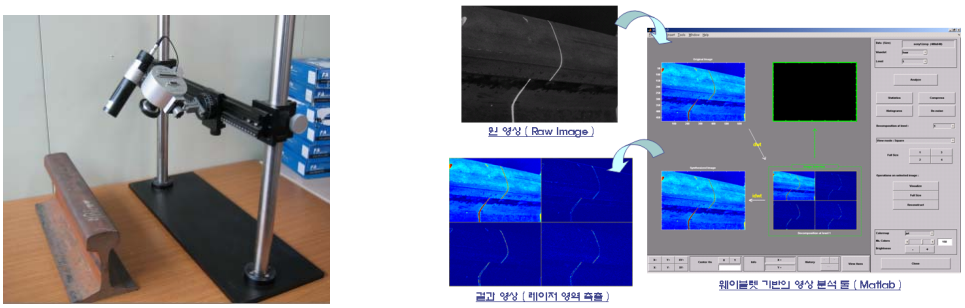


[그림 3] 전체 하드웨어 시스템 블록 다이어그램 및 병렬화 처리 프로그래밍

5. 실험 결과

5.1 영상처리 알고리즘

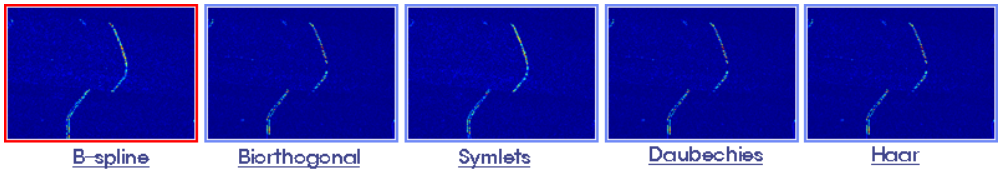
웨이블렛 기반의 영상처리 알고리즘을 개발하기 위하여 Matlab에서 제공하는 웨이블렛 분석 툴(그림 4)를 이용하여 영상분석 테스트를 진행하였으며 레일에 조사된 라인 레이저의 정확한 윤곽선 추출을 위하여 웨이블렛 베이시스와 적용될 차수에 대한 기본적인 테스트를 진행하였다.



[그림 4] 시험영상획득을 위한 Experimental Setup 및 영상처리 알고리즘 구현을 위한 영상 분석

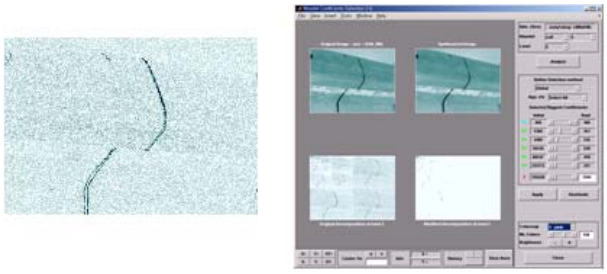
앞서 밝힌 바와 같이 B-spline 함수를 사용할 경우 B-spline 함수와 그것의 도함수(미분함수)가 아주 잘 해석되고 단순한 연산만 필요로 한다는 점을 감안할 때 하드웨어와 소프트웨어 실현이 쉽고 해석하기가 쉬워 적절한 smoothing 함수로 사용할 수 있다는 장점이 있으나 베이시스 적용에 따른 윤곽선 추출의 정량적 평가를 위하여 웨이블렛 분석 툴에 의한 영상 분석을 진행하였다.

그림 5에서 보는 바와 같이 B-spline 함수를 포함하여 Biorthogonal, Symlets, Daubechies, Haar, 등 대표적인 웨이블렛 베이시스를 적용한 결과 B-spline 함수에 의한 윤곽선 추출 결과가 가장 우수한 것으로 나타났으며 윤곽선의 끊어짐이 가장 적어 최적화된 레이저 조사 영역을 추출해낼 수 있음을 확인하였다. 특히, 영상분석과정에서 샘플로 사용된 레일에 대하여 100 포인트에 해당하는 지점으로부터 획득한 영상을 분석한 결과 획득한 레이저 영역 추출의 결과가 레일의 상태를 정확하게 표현할 수 있는 정확성을 가지는 것을 알 수 있었다.



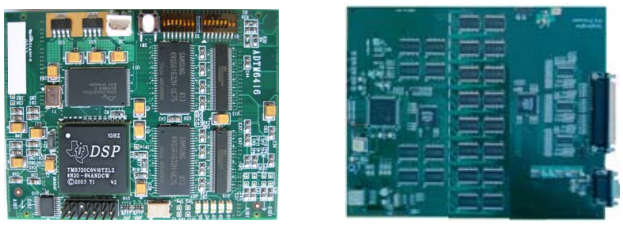
[그림 5] 영상처리 알고리즘 구현을 위한 웨이블렛 패밀리 적용 시험

이와 같은 영상 분석 결과를 이용하여 B-spline 함수 사용을 위한 웨이블렛 계수를 획득하기 위하여 Matlab에서 제공하는 Selection 프로그램(그림 6)을 이용하였고 이를 기반으로 구현된 웨이블렛 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.



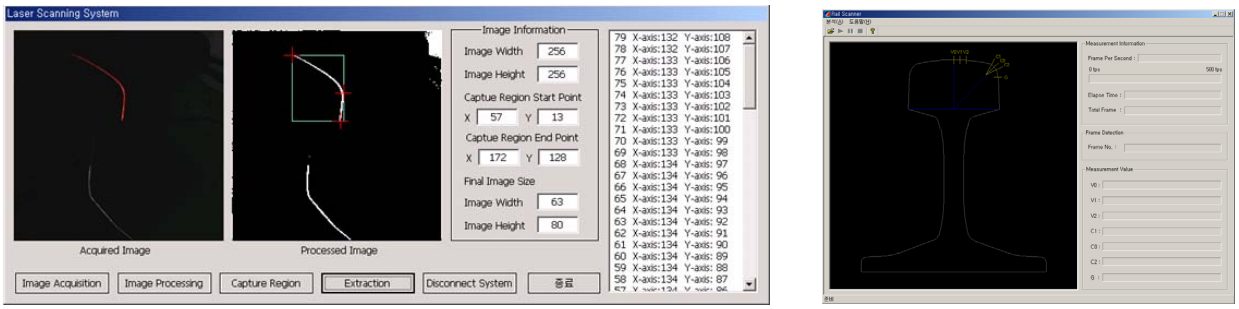
[그림 6] 영상처리 알고리즘 구현을 위한 웨이블렛 패밀리 적용 시험

특히, 카메라로부터 입력되는 디지털 영상 데이터는 Camera Link(Full Link) 방식에 초당 480FPS의 속도를 가지며 1M 급 영상이 2ms 마다 갱신되고 Camera Link의 LVDS(Low Voltage Differential Signal) 드라이버에 의하여 660MHz의 픽셀 클럭으로 10픽셀의 데이터가 1회에 출력되기 때문에 Realtime으로 입력되는 영상에 대한 영상처리를 진행하여 레이저 윤곽선에 대한 좌표값을 획득하기 n이하여 FPGA와 DSP를 이용한 병렬 프로그래밍 구현이 절대적으로 요구된다고 할 수 있다. 따라서 FPGA와 DSP에 의하여 기능적으로 분할될 영상처리 시퀀스를 작성하고 FPGA와 DSP를 이용한 병렬 프로그래밍 구현을 위한 최적의 하드웨어 설계를 설계하기 위하여 전체 영상처리 알고리즘을 FPGA와 DSP 영역으로 구분하여 분할하였다. 또한, 분할된 영상처리 기능 중 FPGA에 탑재될 영상처리 블록의 구현과 테스트를 위하여 VHDL 코드를 제작된 영상처리 모듈을 제작하고 DSPdhk 연동하여 소프트웨어적으로 시험하여 성능을 분석함으로서 최적의 성능을 가지는 하드웨어를 설계, 제작하였다.



[그림 7] 제작된 하드웨어 시스템 (CORE 및 Base Board)

제작된 하드웨어를 기반으로 영상처리 결과와 좌표 획득 결과를 확인하기 위하여 그림 8과 같은 WIndow 기반의 테스트프로그램을 개발하여 이를 검증하였으며 획득한 좌표데이터에 대하여 Perspective Transform과 Camera Model을 적용하고 최종적으로 획득한 레일의 단면을 레일 마모도 측정 프로그램 상에 표시하여 7개의 특징점에 대한 마모상황을 실시간으로 출력하도록 하였다.



[그림 8] 윈도우 기반의 하드웨어 성능시험 프로그램 및 운영 프로그램

6. 결론

개발된 레일 마모도 시스템은 300km/h의 속도에서 최적의 측정 환경을 제공할 수 있도록 제작하였으며 측정용 기구를 이용한 샘플레일에 의한 비교시험에서 ±0.5mm 이하의 오차 범위를 가짐을 확인하였다. 이에 따라 동적측정환경에서의 시스템 성능 평가를 위하여 트롤리 시스템을 이용한 성능 시험을 준비 중에 있으며 향후 KTX 열차에 탑재하여 현장 평가를 진행할 계획을 가지고 있다.

또한, 개발된 레일 마모도 시스템을 이용하여 궤도 틀림을 측정하기 위한 시스템 개발에 응용하여 레이저와 카메라를 이용하여 최대 300km/h의 검측속도에서 고속 궤도틀림 검측시스템 구현을 위한 핵심 기술 확보하고자 한다. 이에 따라 해외에 의존하고 있는 궤도검측 분야의 핵심 기술 및 검측 시스템의 국산화 및 기존 제품을 능가하는 양질의 기술을 개발, 확보함으로서 철도기술의 선진화와 고도화를 이루고자 한다.

참고문헌

1. Jihong Chen, Daoshan Yang & Huicheng Zhou(18-21 May 1998) "Avoiding Spurious Reflections Form Shiny Surfaces On a 3D Real-Time Machine Vision Inspection System", Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE, Volume: 1, pp.364-368 Vol.1,1998
2. Bieman, L.H., Michniewicz, M.A(18-22 May 1992) "CADEYES - a three dimensional gage", Aerospace and Electronics Conference, 1992. NAECON, Proceedings of the IEEE 1992 National, Pages:1200-1204 vol.3, 1999
3. Rafael C. gonzales & Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Addison Wesley, Sept 1993
4. Zhengyou Zang(15-17 Sept 1999) "Camera calibration with one-dimensional objects", Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Valume 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