https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.1.11

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

가공 시작점 인식을 위한 다중 스케닝 비전센서 시스템 개발

김지우°, 백대현°, 최재원°, 문형순^{b*}

Development of a Multi-Scanning Laser Vision Sensor System to extract the Machining Start Point

Ji-Woo Kim^a, Dae-Hyun Baek^a, Jae-Won Choi^a, Hyung-Soon Moon^{b*}

^a Department of Mechanical Engineering, Pusan National University ^b Precision Machinery Process Control Research Group, Korea Institute of Industrial Technology

ARTICLE INFO

Article history:							
Received	20	October	2020				
Revised	15	December	2020				
Accepted	30	December	2020				
<i>Keywords:</i> Machining start point Laser vision sensor system Multi-scanning laser N-point circle extraction method							

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a system that can accurately extract the machining start point based on the developed laser vision sensor system in the manufacturing system for carbon fiber reinforced plastic (CFRP). The developed sensor system comprised a multi-line laser scanning module, camera-based image acquisition module and specially designed image processing algorithm. The multi-line scanning module created several laser lines on a hole located on the CFRP, and the captured images were processed to extract the coordinate information of the hole on CFRP. Finally, The machining start point was extracted using the n-point circle center extraction method.

To verify the reliability of the developed sensor system, numerous experiments were tested and analyzed to increase the accuracy through the actual field system.

1. 서 론

고령화로 인한 숙련된 노동력의 감소와 산업 4.0과 같이 고객 맞춤형 산업 성장에 기반한 다품종 소량생산에 적응하기 위하여 가공 시스템 전반에 걸쳐 자동화에 대한 수요가 증가하고 있다^[1]. 하지만 다수의 자동화된 가공 시스템에서 가공물의 교체 및 재배 치와 같이 작업자의 개입이 필요한 부분이 여전히 존재하며, 작업 자의 개입에 의한 가공 공정의 생산성이 감소하는 문제가 남아있 다^[2]. 따라서 가공 시스템 자동화 생산성을 최대화하기 위해서 위 와 같은 시간 지연 요소의 개입을 최소화하는 방법을 고안할 필요 가 있다^[3]. 자동화 공정 중에 사용되는 가공 재료 중 탄소섬유복합 재(Carbon fiber Reinforced Plastics, CFRP)는 항공, 자동차, 디 스플레이 산업에서 주로 사용되고 있고, 높은 인장강도와 피로 및 부식이 없는 고강도 경량 소재로 각광을 받고 있다. 일반적으로 탄소섬유복합재는 항공기 및 자동차에 사용되는 철에 비해 밀도가 1/4 수준이고, 인장강도는 철보다 2배 높은 특성을 가지고 있기 때문에 경량화가 요구되는 항공기나 자동차 프레임 및 부품재료로 서 사용량이 증가하고 있다⁽⁴⁾. 그러나 고강도의 탄소섬유와 폴리머 (polymer)가 결합된 탄소섬유복합재는 이종재료의 조합에 의한 복 합재료이기 때문에 불균질성(heterogeneity), 이방성(anisotropy) 등 통상적인 금속재료와는 기계적 특성의 차이로 인하여 강도가 높아 가공이 어렵고 진동 및 분진 형태의 칩이 발생한다. 따라서 가공 시 박리(delamination), 미절삭 버(uncut burr) 등의 가공결 함이 발생하기 용이하며, 이로 인한 생산성 저하와 같은 문제를 안고 있다. 미국의 PAR System^[5]사는 자동차 경량화를 위한 다양 한 부품으로 사용 되는 탄소섬유복합재 패널의 버(burr) 제거하는

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-51-309-7450

E-mail address: hsmoon@kitech.re.kr (Hyung-Soon Moon).



Fig. 1 Burr generated during the 1st molding process



Fig. 2 Hole for recognition of machining start point

디버링(deburring) 공정 전반의 자동제어와 레이저 구조체 기반의 가공 시작점 수동 위치 조절 시스템을 개발하였다. PAR System 사에서 개발한 각공 시작점 인식 시스템은 작업자가 탄소섬유복합 재 패널에 형성된 원형 홀(Archetype hole)을 구조체 레이저에 수 동으로 위치시켜 가공 홀의 정보를 추출하는 방식으로 구현하였다. PAR System사의 가공시스템은 홀이 가공된 부분을 작업자가 수 동으로 고정된 레이저 선에 배치 및 고정시켜야 하기 때문에 가공 효율이 떨어지는 단점이 있다. Fig. 1에서와 같이 1차 성형된 탄소 섬유복합재 패널의 경우 매우 불균일한 버의 형상 때문에 버를 가 공하기 위한 초기 가공 시작점을 인식하는 것이 용이하지 않다. 이를 해결하기 위해 Fig. 2와 같이 패널 내부에 가공 시작점을 인 식하기 위한 홀을 가공하며, 버 제거를 위한 2차 가공 시 작업자가 수동으로 가공물의 원점을 조정하는 공정을 사용하고 있다. 레이 저 선에 가공 홀을 맞추는 작업의 경우 작업자의 개입으로 인한 자동화 공정 전체의 생산성 및 효율성의 저하를 야기 할 수 있다. 본 연구는 탄소섬유복합재 가공 시작점 자동 인식을 위한 다중레 이저 라인 기반 레이저 비전 센서시스템의 개발에 관한 것이며, 작 업자의 개입에 의한 생산성 저하 문제를 최소화하기 위하여 고안하 였다. 개발된 센서는 가공 시작점 자동 인식을 위해 다수의 레이저 라인을 가공홀에 조사하기 위한 갈바노미터 스캐너(Galvanometer scanner), 주변 조도 환경의 영향을 최소화하기 위한 대역통과필터 (Band pass filter) 및 영상 수집을 위한 카메라 모듈로 구성된다. 위특성을 이용해 가공물이 교체될 때 마다 고정된 위치에서 다양 하게 변하는 가공 시작점 위치를 자동으로 탐색하여 인식함으로써 작업자의 개입을 최소화 할 수 있는 자동 탄소섬유복합재 가공 시 스템에 적용 가능한 비전센서를 개발하였다.

2. 멀티 라인 스캐닝(Multi-line scanning)이 가능한 레이저 비전센서 개발

2.1 광학설계

본 연구에서 사용 되는 카메라 모듈의 해상도는 1280×1024이고, 초점거리 16 mm의 광학렌즈를 사용하며, 수평방향 가시영역^[6] (Field Of View, FOV)은 가로 45.47 mm, 세로 35.74 mm이다. 카메라 모듈은 가공장치 말단에 고정하여 사용하며 가공물 표면과 수직을 이룬 상태로 가공물 표면과 센서 사이의 거리는 항상 일정하 게 유지된다. 본 연구에서는 개발된 센서의 하단부와 가공물 간의 거리를 90 mm로 일정하게 유지하였으며, 해당 거리에서의 카메라 를 통해 수집된 이미지 상에서의 수평방향의 해상도(resolution)는 R_u = 0.0356 mm/pixel, 수직방향의 해상도는 R_v = 0.0349 mm/pixel 로 계산되었다.

2.2 레이저 파장 선정

연구에서 사용된 반도체 레이저의 파장은 가시광선 영역에 위치 하는 파장대에서 가시광선에 해당하는 광원의 영향을 최소화할 수 있는 레이저의 파장을 선정하였다. 가시광선의 영향을 많이 받을 수록 렌즈로 들어오는 가시광선의 영향이 증가하기 때문에 레이저 형상의 인식률을 저하시킬 수 있다. 따라서 가시광선 영역의 파장 을 선정하되 Fig. 3의 A 파장대와 같이 가시광선에 의한 영향이 최소화 되는 자외선에 근접한 파장을 가진 레이저를 사용하였다. 적외선에 근접한 660 nm 파장의 경우 가공 시편에 해당 파장의

레이저 띠를 조사하였을 때, 굴절률이 낮아 반사에 의한 빛의 산란 이 레이저 형상의 선명도를 감소시키는 작용을 하였기 때문에 본 연구에서는 적합하지 않다고 판단하였다. 자외선에 근접한 파장 영역에서는 405 nm, 450 nm 두 가지 파장의 레이저를 이용해 실험하여 파장에 따른 가시광선의 영향을 비교하였다. Fig. 4(a)에 서 450 nm 레이저는 450 nm의 대역통과필터를 적용하였으며 주 변 가시광선 광원의 영향을 받아 영상의 레이저 띠의 선명도가 감



Fig. 3 Wavelength distribution map in visible light wavelength band



Fig. 4 Laser line image

소하고 부분적으로 조도가 높은 영역이 나타나는 것이 관찰되었다. 반면에 Fig. 4(b)의 405 nm 레이저는 405 nm의 대역통과필터를 적용하여 가시광선 파장대 광원에 의한 영향을 최소화하였다. 405 nm 레이저는 450 nm 레이저에 비해 주변 광원의 간섭을 보다 더 억제하는 것이 가능함으로써 상대적으로 보다 선명한 레이저 띠 영상을 얻을 수 있었다. 본 실험 결과를 통해 405 nm 레이저를 비전센서 스캐닝에 사용하는 것이 가장 적합하다고 판단하였다.

2.3 멀티 라인 스캐닝(Multi-line scanning)

탄소섬유 복합재 패널 표면의 가공 홀의 위치가 고정되어 있지 않기 때문에 가공 시작점 자동 인식을 위해서는 영상으로 보여지 는 모든 부분의 영상정보를 획득할 필요가 있다. 이를 위해 레이저 띠가 영상 상의 모든 위치를 스캔(scan) 할 수 있는 비전 시스템이 필요하다. 위와 같은 방식을 구현하기 위하여 반도체 레이저와 광 학렌즈를 결합한 다중 레이저 빔(beam) 생성 방법이 있다^[7]. 하지 만 광학렌즈를 이용한 방식의 경우 렌즈를 통한 레이저 광원의 분 산된 출력으로 인해 레이저 라인 강도가 떨어져 선명한 영상정보 획득이 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해서는 일 반적으로 노출시간과 조리개 개방률을 증가시키거나, 고출력 레이 저를 사용하는 방법이 있다. 노출시간과 조리개 개방률을 늘리는 방법은 가시광선의 영향을 증가시켜 영상 노이즈가 증가할 수 있 기 때문에 적합하지 않으며, 고출력 레이저를 사용하는 방법은 분 산된 레이저 출력을 보완하는 것이 가능하지만 반도체 레이저의 출력 향상에 따른 안정성 저하 및 위험성 증가로 인하여 적합하지 않다고 판단하였다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 라인 레이저(Line laser)와 갈바노미터 스캐너를 이용한 스캐닝 모듈을 설계하여 멀티 라인 레이저 스캐닝 모듈을 개발하였다. 스캐닝 모듈 개발에 사용된 갈 바노미터 스캐너는 -15°~+15°의 회전반경과 1 Hz~1 kHz의 회전 진동 범위를 가진다. 갈바노미터 스캐너의 회전축에 부착된 광학 미러(Optical mirror)에 라인 레이저를 반사시킴으로써, 레이 저 세기의 큰 변화 없이 라인 스캔이 필요한 영역 전체에 반사된 라인 레이저를 조사하는 것이 가능하도록 구성하였다.

상기 장치 구성을 기반으로 가공 홀의 위치 탐색 알고리즘은 Fig. 6와 같이 구현하였다. 외부 제어장치부터 탐색 시작 신호를 수신하여 비전센서 제어장치(Vision sensor controller, VSC)에 서 비전센서로 스캐닝 모듈의 구동 신호를 송신한다. 이때 구동 신호의 송/수신은 CAN (Control Area Network) 통신 환경에서 이루어졌으며, 수신된 신호는 갈바노미터 스캐너의 구동 시 필요 한 회전각도 및 속도를 포함하는 문자열 데이터로 구성하였다.

구동 신호를 수신한 비전센서에서는 멀티라인 스캐닝 작업을 수 행하며, 스캐닝이 완료되지 않은 경우 스캐닝이 종료될 때까지 회 전각도를 달리하며 반복적으로 스캐닝을 수행한다. 회전각도의 변 경에 따라 변경된 위치에서 비전센서 제어장치에서는 영상처리 알 고리즘을 통해 가공 원홀의 위치를 탐색한다. 스캐닝이 종료되었



Fig. 5 Schematic diagram of multi-line laser scanning module using galvanometer scanner



Fig. 6 Flow chart of multi-line laser scanning algorithm



Fig. 7 Schematic diagram of multi-line laser scanning

다고 판단되면 비전센서 제어장치에서는 가공 원 홀에 대한 탐색 을 중지하고 갈바노미터 스캐너의 회전 각도를 초기값으로 설정함 으로써 레이저 띠의 위치를 초기화시킨다.

멀티라인 레이저 스캐닝 모듈을 구성하고 Fig. 6의 알고리즘을 통해 구현되는 레이저 띠 영상은 Fig. 7의 개략도와 같이 나타난다 고 할 수 있다. 각각의 위치에서 수집되는 영상데이터는 Fig. 7(a), (b) 그리고 (c)와 같이 나타나며 해당 개별 영상데이터에 대한 영상 처리를 통해 원 홀 경계선 상의 좌표를 추출할 수 있다. 최종적으로 다중 스캐닝을 통해 Fig. 7(d)과 같이 전체 영역에 대한 스캐닝과 동일한 효과를 가질 수 있다.

3. 영상처리 알고리즘

3.1 레이저 형상 추출을 위한 영상처리

가공 홀의 위치를 알기 위해서는 영상의 레이저 띠로부터 특징



Fig. 8 Flow chart of algorithm for detecting feature points on laser line

점을 추출하고, 특징점으로부터 좌표를 추출해야 한다. 본 연구에 서는 Fig. 8과 같이 가공 홀에 레이저를 조사하였을 때의 획득한 영상을 이용하여 이진화(binarization) 및 세선화(thinning) 방법 을 적용함으로써 특징점을 추출할 수 있는 영상처리 알고리즘을 개발하였다.

영상처리의 용이함을 위하여 원본 영상(Fig. 8(a))을 BGR 컬러 영상에서 256비트(Bit)의 회색조 영상(Gray-scale image)으로 변환하였다. 회색조 영상에서 레이저 형상은 주변부 픽셀과 비교하 여 상대적으로 높은 밝기를 가진 흰색에 가까운 픽셀로 나타났다. 회색조 영상에서 레이저 형상만을 추출하기 위하여 임계값 (threshold)을 적용하여 이진화 영상을 생성하였다(Fig. 8(b)). 이



Fig. 9 Thinning laser line using column-window filter

진화 영상에서는 임계값보다 높은 밝기값을 가진 레이저 형상은 255 (흰색), 임계값보다 낮은 다른 픽셀은 0 (검은색)으로 표현하였다.

이진화 영상을 이용한 세선화 방법^[8]은 두께 T를 가진 레이저 띠의 중심선을 추출하기 위하여 적용하였으며 Fig. 9와 같이 구성 하였다. 영상에서 나타나는 레이저 띠 두께에 해당하는 T 크기의 종단 필터(Column-window filter)를 구성하였다. 종단필터는 임 의의 n번째 열(column)에 대하여 1행 단위로 이동시키며 종단 필 터 상에 위치하는 픽셀의 밝기값 G(m)을 적산하며, 적산한 값 S_m 이 최대가 되는 위치에 레이저 띠의 중심이 위치한다고 가정하였 다. 동일한 열에서 m행부터 시작하는 종단필터의 적산 S_m은 식 (1)를 이용하여 계산한다. S_m이 최대가 되는 종단 필터의 중심을 레이저 띠의 중심으로 인식함으로써 연결된 하나의 에지(edge) 형 태의 세선을 추출할 수 있다.

$$S_m = G(m) + G(m+1) + \dots + G(m+T-1)$$
(1)

3.2 특징점 추출 알고리즘

본 연구에서는 레이저 띠 형상의 특징점을 추출하기 위하여 Shi-Tomasi 코너 검출(Corner detection)^[10] 알고리즘을 이용하 여 특징점 인식 알고리즘을 구현하였다. Shi-Tomasi 코너 검출 방법은 Harris 코너 검출^[11] 알고리즘을 개선한 코너 검출 방식이 다. Harris 코너 검출 알고리즘은 영상 필터(filter) 역할을 하는 윈도우(window)를 x축 및 y축 방향으로 이동할 때 영상에서 발생 하는 밝기 강도 변화에 따라 모서리를 판별하는 방법이다. 식 (2)은 영상에서 윈도우를 x축 방향으로 u만큼, y축 방향으로 v 만큼 이동 시켰을 때 이동 전후의 영상 밝기 강도에 대한 변화(E)를 나타낸 식이다. 테일러 확장에 의해 식 (2)은 행렬 형태로 표현할 수 있으 며, 행렬 M (Structure tensor)은 양의 실수 고유값를 가지는 대칭 행렬이다. 여기서 I_x 와 I_y 는 영상 I의 x방향과 y방향으로의 1차 미분을 나타내며, 고유값(Eigen value) λ_1, λ_2 는 행렬식 M을 고유 값 분해 시 얻을 수 있다.

$$E(u,v) = \sum_{(x_k,y_k \in w)} [I(x_k + u, y_k + v) - I(x_k, y_k)]^2$$

= $[u \ v] \begin{bmatrix} \sum (\frac{\partial I}{\partial x})^2 & \sum (\frac{\partial I}{\partial x})(\frac{\partial I}{\partial y}) \\ \sum (\frac{\partial I}{\partial x})(\frac{\partial I}{\partial y}) & \sum (\frac{\partial I}{\partial y})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$ (2)
$$\underbrace{\underline{M}}$$

이 때 코너를 검출하기 응답함수는 식 (3)과 같이 정의되고, 고유 값에 의해 결정되는 R의 값에 따라 평면, 모서리, 코너인지를 판단 할 수 있으며, k는 경험적 상수로써, 0.04~0.06의 값을 가진다.

$$R = \det(M) - k(trace(M))^2$$
(3)

R이 0보다 크면 두 방향으로의 밝기 변화가 크게 되어 코너 (corner)가 되고, R이 0보다 작으면 한 방향으로의 밝기 변화만 크기 때문에 에지(edge)가 되며, R의 값이 0에 매우 근접하면 플랫 (flat), 즉 모든 방향으로 변화가 없는 상태이다.

Harris 코너 검출 방법을 이용하여 검출한 레이저 띠의 특징점은 Fig. 10(a)와 같다. 검출된 특징점은 가공 홀 상의 레이저 띠의 특 징점 뿐만 아니라, 가공 홀에 위치하지 않은 레이저 띠의 미세한 강도 변화가 있는 부분까지 특징점으로 인식하여 추출한 것을 확 인할 수 있다. 따라서 불필요한 특징점을 제거하기 위해 Harris 코너 검출 방법을 개선한 Shi-Tomasi 코너 검출 방법을 이용하여 불필요한 특징점을 억제하였다. Shi-Tomasi 코너 검출 방법에서 R은 식 (4)와 같이 두 개의 고유값 중 작은 고유값을 기준으로 판별한다.

$$R = \min\left(\lambda_1, \lambda_2\right) \tag{4}$$

Harris 코너 검출과 비교하였을 때 코너로 인식되는 영역이 감소 하는 만큼 코너 검출의 민감도 역시 감소하기 때문에 코너 검출량 을 억제할 수 있다(Fig. 11). Fig. 10(b)와 같이 Shi-Tomasi 코너 검출 방법을 이용하여 특징점을 추출한 결과 시작점 추출을 위한 가공 홀 상의 특징점 2개만을 추출하였음을 확인할 수 있었다. 따 라서 Shi-Tomasi 방법이 Harris 방법보다 특징점을 추출하기에 적합한 방법임을 검증하였다.

3.3 기공 흘 중심 좌표 추출 알고리즘

3.2의 특징점 추출 알고리즘은 다중 스캐닝에 의하여 변화하는 모든 레이저 띠의 위치에 대하여 적용할 수 있으며 알고리즘을 통해 추출되는 모든 특징점은 가공 홀의 경계선 상에 있는 픽셀 좌표의 집합이다. 다중 스캐닝 시 갈바노미터 스캐너는 최대 -15°~ 15°의 범위에서 회전하며, 회전 주파수 및 회전 각도를 조절함으로써 다중 스캐닝 속도를 제어하는 것이 가능하다. 갈바노미터 스캐너의 주파



(a) Harris corner detection



(b) Shi – Tomasi corner detection

Fig. 10 Results of extracting feature point by 2 corner detection algorithms



(a) Harris corner detection



수가 일정하다고 하였을 때, 1회 회전하는데 소요되는 시간이 동일 하기 때문에 회전각에 따라 스캐닝 속도가 변화한다. Fig. 12과 같 이 1회 회전운동 시 회전하는 각도가 클수록 스캐닝 속도가 높다고 정의할 수 있으며, 스캐닝 속도가 상대적으로 높은 경우 레이저 띠 가 홀 상에 걸친 형태의 영상을 적게 수집하기 때문에 홀 중심 추출 시 부족한 특징점 좌표로 인한 오차가 클 수 있다. 반대로 스캐닝 속도가 낮은 경우 상대적으로 많은 수의 특징점이 추출되어 중심점 추출에 발생하는 오차가 감소하는 반면 소요되는 시간이 증가하여 시간 대비 효율 저하와 같은 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 스캐닝 속도를 비교적 높게 유지하면서 허용되는 오차 범위 내에서 중심점을 추출 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

중심점을 추출하기 위하여 사용된 알고리즘은 최대 거리 중심 추출법과 n점원 중심 추출법으로써, 2가지 알고리즘을 구현하고 홀 중심점 검출 결과를 비교하여 보다 정확성과 시간 대비 효율이 높은 알고리즘을 선정하였다. 최대 거리 중심 추출법은 추출된 특징점의 좌표 집합에서 영상좌표계 기준 하나의 짝을 이루는 특 징점 2개의 수평 방향 좌표 사이의 거리가 최대가 되는 특징점 쌍 을 추출하여 중심 좌표를 홀의 중심점으로 간주하는 방법이다. 하 지만 해당 방법은 Fig. 12(c)와 같이 스캐닝 속도가 높은 경우 레이 저 띠가 가공 홀의 모든 부분을 스캔 하지 못하는 상황이 발생하였 고, 오차가 증가하고 정확성이 떨어진다는 단점을 나타냈다.

n점원 중심 추출법은 Fig. 13과 같이 홀의 경계선 상에서 추출된 n > 3개의 특징점 좌표를 이용하여 중심점을 추출하는 방식이다. 식 (5)는 가공 홀 경계선 상의 임의의 세 특징점 좌표 P1 (u₁,v₁), P2 (u₂,v₂), P3 (u₃,v₃)를 이용하여 홀의 중심 좌표 (u,v)를 계산 하는 행렬식이다.

$$\begin{bmatrix} u_2 - u_1 v_2 - v_1 \\ u_3 - u_2 v_3 - v_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_2^2 - u_1^2 + v_2^2 - v_1^2 \\ u_3^2 - u_2^2 + v_3^2 - v_2^2 \end{bmatrix}$$
(5)

원홀 중심점 좌표 계산 시 오차를 줄이고 정확성을 향상시키기 위해 경계선 상의 추출되는 모든 특징점을 이용하여 식 (6), (7)과 같이 최소자승법(Least square)을 이용한 행렬변환을 통해 홀 중 심점의 좌표를 도출할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

$$\begin{bmatrix} u_{2}-u_{1} & v_{2}-v_{1} \\ u_{3}-u_{2} & v_{3}-v_{2} \\ \vdots & \vdots \\ u_{n-1}-u_{n-2}v_{n-1}-v_{n-2} \\ u_{n}-u_{n-1} & v_{n}-v_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_{2}^{2}-u_{1}^{2}+v_{2}^{2}-v_{1}^{2} \\ u_{3}^{2}-u_{2}^{2}+v_{3}^{2}-v_{2}^{2} \\ \vdots \\ u_{n-1}^{2}-u_{n-2}^{2}+v_{n-1}^{2}-v_{n-2}^{2} \\ u_{n}^{2}-u_{n-1}^{2}+v_{n}^{2}-v_{n-1}^{2} \end{bmatrix}$$

$$(6)$$

$$AX = Y$$

$$A^{T}AX = A^{T}Y$$

$$X = (A^{T}A)^{-1}A^{T}Y$$
(7)

해당 알고리즘은 식 (6)에 이용되는 특징점의 개수가 많을 때 발생하는 잔차를 최소화하기 위하여 식 (7)과 같은 최소자승법을 이용하였다. 또한 최소자승법에 사용되는 특징점 포인트의 개수는 스캔 속도에 따른 실험을 통해 1 °/step일 때 추출되는 6~8개의 특징점이 원 홀 중심점 추출에 있어서 시간대비 추출 효율이 가장 높으면서 노이즈로 인해 발생하는 잔차에 의한 오차를 최소화하였 기 때문에 최적의 개수임을 확인하였다.

4. 중심점 좌표 측정 및 비교 실험

본 연구에서는 3에서 제시한 가공 홀의 중심점 추출 알고리즘을 적용한 레이저 비전센서를 이용하여 센서를 통해 인식되는 홀 중 심점 좌표와 가공 로봇 시스템 기준 좌표계에 의해 측정된 절대 좌표의 오차 비교 및 측정 실험을 위하여 멀티라인 스캐닝 및 알고 리즘을 포함한 비전센싱 시스템(Vision sensing system)을 구성 하였다.

4.1 멀티라인 스캐닝 장치 구성

멀티라인 스캐닝 모듈은 하나의 커넥터(connecter)로 들어오는 전원과 통신 신호를 분배하는 배전반 보드(Power distribution board), 갈바노미터 스캐너의 구동을 위한 갈바노미터 드라이버 보드(Galvanometer driver board), 갈바노미터 스캐너의 회전 동 작 제어를 위한 신호발생기 보드(Signal generator board)의 3개



Fig. 12 Extracting center of the maximum distance; (a) 0.1 °/step, (b) 0.5 °/step, (c) 1.0 °/step



Fig. 13 Center of 3-point circle



Fig. 14 Laser vision sensor

의 보드(board)로 구성하였다. 갈바노미터 스캐너 회전축 광학 미 러에 반사된 레이저 띠가 카메라 모듈의 가시영역 상에 위치할 수 있도록 반도체 레이저와 갈바노미터 스캐너, 카메라 모듈을 배치 하고 설계하여 하나의 모듈로 제작하였으며, 제작한 모듈의 구성 도는 Fig. 14에 나타내었다. 카메라 모듈을 통해 수집되는 영상은 카메라와 연결된 비전센서 제어장치(Vision sensor controller)로 송신되며, 제어장치에서 수신된 레이저 띠의 영상을 이용하여 알고 리즘을 이용한 가공 홀의 중심점 좌표를 측정하도록 구성하였다.

4.2 실험 장치 구성

실험을 위한 전체 시스템은 Fig. 15(a)와 같이 구성하였다. 멀티 라인 스캐닝 모듈은 Fig. 15(c)와 같이 가공로봇 말단에 부착하여 가공 홀이 존재하는 가공 시편 표면과 적정거리 내에 위치하도록 고정하였다. Fig. 15(b)와 Fig. 16은 현재 카메라 모듈에서 수집되 는 영상의 실시간 모니터링 및 가공 홀 중심점 추출을 위한 영상처 리를 위한 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic user interface, GUI) 소프트웨어이다. 알고리즘을 이용하여 추출하는 가공 홀의 중심점 좌표는 소프트웨어 상에서 출력된다. 또한 세부 설정을 통 해 임계값과, 세선화 임계값 등의 영상처리 변수를 조절함으로써



Fig. 15 Experimental setup for detecting center point of machining hole on CFRP panel



Fig. 16 Graphical user interface software that performs real-time monitoring and image processing algorithms for laser line

가공 홀 중심점 추출 알고리즘을 제어할 수 있도록 개발하였다.

4.3 실험절차

가공 시작점 용 홀의 중심점 추출을 위한 과정은 Fig. 17에 나타 내었다. 탄소섬유복합재 시편 표면에 가공된 홀을 비전센서의 카 메라 모듈의 가시영역 상의 임의의 위치에 배치한 후 GUI 소프트 웨어를 이용하여 다중 스캐닝 및 특징점 검출 알고리즘을 수행하 였다. 스캐닝이 종료되면 중심점 추출 알고리즘에 의하여 추출된 특징점 좌표를 이용하여 가공 홀의 중심점 좌표를 계산하였다.

가공 홀 중심점 좌표 전달을 위한 가공로봇 시스템과의 통신은 비전센서 제어장치와 가공로봇 시스템 간 CAN 통신으로 연결하 여 구성되었다. 알고리즘을 통해 계산된 가공 홀의 중심점 좌표를 통신 프로토콜(protocol)에 맞게 변환하여 가공로봇 제어시스템으 로 송신하였으며, 해당 데이터 통신 기능 역시 GUI 소프트웨어 상에서 동작할 수 있도록 개발하였다. 알고리즘에 의한 추출 좌표



Fig. 17 Process of machining start point recognition and coordinate transmission from vision sensor to machining robot controller

Table 1 Experimental conditions

Scanning speed	0.1 / 0.5 / 1.0 (°/step)		
Hole position	Random position		
Measuring count	10		
z coordinate	90 mm (fixed)		
Real coordinate	(u, v) = (22.95 mm, 27.20 mm)		
Hole diameter	15 mm		

와의 비교를 위한 실제 가공 홀 중심 좌표의 측정은 Fig. 15(a)에서 나타낸 것과 같이 멀티라인 스캐닝 모듈 장치의 모서리 부분을 영 점(p_0)으로 설정하여 해당 영점을 기준으로 측정 하였다. 스캐닝 모듈 및 알고리즘을 통해 측정된 홀 중심 좌표의 정확도를 측정하 기 위하여 영점 기준으로 측정한 실제 홀 중심 좌표와의 오차 계산 을 통해 비교하였다. 멀티라인 스캐닝 모듈 및 알고리즘을 이용한 가공 홀 중심 좌표와 실제 가공 홀 중심 좌표의 비교 측정 실험은 Table 1의 실험조건 하에 진행하였다.



Fig. 18 Results of center point extraction using n-point circle method

5. 실험 결과 및 고찰

스캐닝 속도에 따른 가공 홀 중심점 좌표의 측정 실험 결과는 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 19(a)은 영상좌표계 u 좌표에 대한 최대 거리 중심 추출법과 n점원 중심 추출법에 의한 중심점 추출 결과의 오차와 표준편차를 스캐닝 속도에 따라 나타낸 그래프이며, Fig. 19(b)은 영상좌표계 v좌표축에 대한 중심점 추출 결과를 나 타낸 그래프이다. 가공 홀 중심점의 측정은 3가지 스캐닝 속도 조 건 1) 0.1 °/step, 2) 0.5 °/step, 3) 1.0 °/step에서 진행하였다. u 좌표축에 대한 최대 거리 중심 추출법은 3가지 조건 모두 실제 좌표와 동일한 22.95 mm로 나타났다. 반면에 n점원 중심 추출법 은 참값 22.95 mm과 비교해 0.1 °/step일 때의 오차는 0 mm, 0.1 °/step일 때의 오차는 0.04, 표준편차는 0.015 mm, 0.1 °/step 일 때의 오차는 0.03 mm, 표준편차는 0.01 mm로 나타났다. u 좌표에서 최대 거리 중심 추출법과 n점원 중심 추출법을 비교하였 을 때, 최대 거리 중심 추출법은 스캐닝 속도가 증가하더라도 추출 되는 특징점은 가공 홀을 중심으로 대칭을 이루기 때문에 세 가지 경우 모두 실제 가공 홀 중심점 좌표와 동일한 22.95 mm였다. 반면에 n점원 중심 추출법은 0.1 °/step과 같이 상대적으로 속도가 느린 경우에는 실제 좌표와 동일한 결과를 나타내었지만, 속도가 빠를수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 발생하는 오차와 표준 편차는 실제 좌표와 비교하였을 때 최대오차 0.04 mm정도의 오차를 나타내었고, 가공 정밀도에 영향을 미칠 수 있 는 허용오차 1 mm와 비교하여 가공 정밀도에 있어서 큰 영향을 미치지 않았다. 또한 v 좌표의 경우, Fig. 19과 같이 0.1 °/step



Fig. 19 Comparison of center point extraction results by 2 methods; Maximum distance center method and n-point circle method

일 때의 오차는 0.12 mm, 표준편차는 0.02 mm, 0.5 °/step 일 때의 오차는 0.25 mm로 측정되었으며 표준편차는 0.1 mm, 1.0 °/step일 때의 오차는 0.55 mm, 표준편차는 0.2 mm로 측정되었 다. 스캐닝 속도가 증가할수록 오차와 표준편차 역시 증가하였으 며 이로 인해 정확도가 감소하는 경향을 보였다. 반면에 n점원 중 심 추출법은 0.1 °/step, 0.5 °/step, 1.0 °/step일 때의 오차는 각각 0.04 mm, 0.06 mm, 0.09 mm, 표준 편차는 0.02 mm로 스캐닝 속도가 증가할 때 오차와 표준편차는 증가하는 경향을 보였지만, 최대거리 중심 추출법과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 0.1 mm 이내의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

중심점의 u 좌표 및 v 좌표측정 실험 결과에서 n점원 중심 추출 법을 최대 거리 중심 추출법과 비교하였을 때 u 좌표 측정에 있어 서는 최대 거리 중심 추출법이 n점원 중심 추출법에 비해 상대적으 로 더 정확한 좌표를 추출하였지만, v 좌표 측정에 있어서 스캐닝

Scanning Speed (°/step)	0.1	0.5	1.0
Scanning Time (s)	9.1	4.5	0.9
Total Process Time (s)	67.1	62.5	58.9
Processing Start Point Extraction Time Ratio (%)	13.6	7.2	1.53

 Table 2 Ratio of starting point extraction in the whole process

속도가 빨라질수록 오차가 유의미하게 나타나는 최대 중심 추출법 에 비해 n점원 중심 추출법은 스캐닝 속도가 빨라지더라도 가공에 영향을 끼치지 않는 허용오차 1 mm 이내에서 오차가 발생하였다. 따라서 가공 시작점 인식에 있어서 n점원 중심법이 최대 거리 중심 추출법에 비해 유효함을 입증하였다. 또한 가공 시작점 추출 과정 이 전체 공정에서 차지하는 비중은 Table 2에서 나타내었다.

탄소섬유복합재의 제거가공 공정 시간은 가공물 교체, 가공 시작 점 추출, 디버링 공정, 가공 종료 후 원점 재배치 등의 시간을 포함 하고 있다. Table 2는 갈바노미터의 스캐닝 속도에 따라서 달라지 는 스캐닝 시간이 따라 변하는 전체공정 시간과, 전체공정 시간에 대한 시작점 추출의 비율을 나타낸 것이다. 0.1 °/step의 스캐닝 속도에서는 9.1초의 스캐닝 시간으로 전체 공정의 13.6%를 차지 하였고, 0.5 °/step의 스캐닝 속도에서는 4.5초의 스캐닝 시간으로 전체 공정이 7.2%, 1.0 °/step의 속도에서는 0.9초의 스캐닝 시간 으로 전체 공정의 1.53%를 차지하였다. 따라서 본 연구의 가공 시작점 추출과정이 전체 가공 공정 시간을 줄임으로써, 유의미한 결과를 나타내었음을 입증하였다.

본 실험을 통해 탄소섬유복합재 제거가공 공정의 가공 시작점 인식을 위한 원 홀 중심점 계산에 있어서 n점원 중심 추출법이 최 대 거리 중심 추출법에 비해 빠른 스캐닝 속도를 유지하면서 허용 오차 범위 이내의 홀 중심점을 추출함으로써, 작업자의 개입 없이 시간 대비 효율성과 정확성을 검증하였고, 본 연구에서 개발한 알 고리즘이 실제 탄소섬유복합재 패널의 가공 시 작점 인식에 있어 서 유효함을 입증 할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유복합재 가공 시 발생하는 박리, 미절삭 등의 가공 결함을 제거하기 위한 가공 장치에서 자동으로 가공 시 작점을 추출할 수 있는 멀티라인 레이저 스캐닝 비전센서 시스템 및 알고리즘을 개발하였다. 멀티라인 레이저 스캐닝 비전센서는 광학미러가 부착된 갈바노미터와 라인 레이저 모듈을 이용하여 구 성함으로써 기존의 멀티라인 레이저와 동일한 효과를 가질 수 있 는 다중 스캐닝 장치를 개발할 수 있었다. 다중 스캐닝을 통해서 다양한 위치에 있는 레이저 띠 형상의 영상데이터를 수집하고, 영 상처리 알고리즘을 통해 수집된 영상정보에서 가공 홀 경계선 상 에 위치한 레이저 띠의 영상적 특징점 정보를 수집할 수 있다. 최종 적으로 수집된 가공 홀 경계선 상의 특징점 정보들을 이용하여 허 용오차 1 mm 이내로 가공 홀 중심점을 인식하고 정량적으로 측정 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 개발한 알고리즘의 신뢰성에 대한 검증은 실제 탄소섬유복합재 패널에 가공된 임의 위치의 가 공 홀의 좌표와 멀티 라인 레이저 스캐닝 비전센서 시스템을 이용 하여 추출한 좌표의 오차를 도출하는 실험을 통해 이루어졌다. 전 체 스캐닝에 필요한 시간을 감소시키기 위하여 높은 스캐닝 속도 를 유지하더라도 실제 가공 시작점 u = 22.95 mm, v = 27.2 mm 와 비교하였을 때 추출된 가공 시작점 u = 22.98 mm, v = 27.11 mm로 측정되었으며, 오차는 각각 u와 v축 각각 0.03 mm, 0.09 mm로써 허용 오차 1 mm 이내에서 추출된 것을 확인할 수 있었다.

상기 실험 결과를 통해 임의의 원 홀 위치에 대해 0.1, 0.5, 1.0 °/step의 스캐닝 속도에 따른 가공 시작점 인식의 정확도를 측정하 였고, 동일한 실험조건에서 최대 거리 중심 추출법으로 측정한 결 과와 비교하였다. 그 결과 스캐닝 속도가 빨라질수록 최대거리 중 심 추출법은 오차가 크게 증가하는 반면 n점원 중심 추출법은 스캐 닝 속도가 빨라져도 허용 오차 1 mm 이내의 오차를 유지하면서 가공 시작점을 추출 할 수 있었다.

가공 시스템을 위한 멀티라인 레이저 스캐닝 비전센서는 가공 홀 추출 실험을 통해서 빠른 스캐닝속도를 유지하여 전체적인 스 캐닝 시간을 감소시켰으며, 동시에 가공 시작점 인식의 정확도 역 시 유지하였기 때문에 자동 가공 시작점 인식에 요구되는 정확성 및 효율성을 확보할 수 있었다. 본 연구를 통해 탄소섬유복합재 패널의 1차 성형 가공시 발생하는 박리, 미절삭 버 등을 제거하기 위한 가공 시스템에 적용하여 작업자의 개입 없이도 높은 효율성 을 유지하면서 가공을 위한 가공 시작점을 허용 오차 범위 이내로 정확하게 측정이 가능한 자동 가공 시작점 인식 시스템을 개발 하 였으며, 일련의 측정 및 비교 실험을 통해 개발된 시스템이 실제 탄소섬유복합재 가공 공정에 적용하는 것 또한 충분히 유효하다고 판단하였다.

References

- [1] Park, P. H., Cheong, S. H., Ro, S. H., Choi, S. D., Choi, H., 2000, A Study on the Vision System Application for Welding Robot, Korean Society for Precision Engineering Fall Conference, 678-682.
- [2] Kim, D. H., Song, J. Y., Ha, T. H., Lee, J. H., Cha, S. K., 2010, Automatic Setting System and Method of Work Origin for Machine Tool, Korean Society for Precision Engineering

Spring Conference, 405-406.

- [3] Dwijayanti, K., Aoyama, H., 2014, Basic Study on Process Planning for Turning-Milling Center based on Machining Feature Recognition, J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf., 8:4 0058, https://doi.org/10.1299/jamdsm.2014jamdsm0058.
- [4] Kim, C. G., Park, M. H., Son, J. S., Yun, T. J., Kim, I. S., 2018, Study of Extraction Algorithm for Image Processing in Vertical GMA Welding, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 27:4 363-370, https://doi. org/10.7735/ksmte.2018.27.4.363.
- [5] Park, K. M., Yu, Z., Ko, T. J., 2018, Analysis of Mechanism and Effect in CFRP Deburring Using Ice-backup Layer, Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, 257.
- [6] Par System, n.d., viewed 9 February 2021, http://www.par.com/life-science/lab-automation>.
- [7] Jang, W., Shin, J., Kim, K., 2015, Virtual Reality (VR) Paradigm for Measuring Field of Regard (FOR) and Field of View (FOV), Korea Computer Graphics Society Conference, 63-64.
- [8] Woo, D., Oh, J., Lee, C., Jung, S., 2011, Development of a Multi-Line Laser Sensor Based Robotic 3D Measurement System, 11th International Conference on Control, Automation and Systems, 1777-1782.
- [9] Sung, K., Rhee, S., 2002, Development of Laser Vision Sensor with Multi-line for High Speed Lap Joint Welding, International Journal of Korean Welding Society, 2:2 57-60.
- [10] Shi, J. and Tomasi, C., 1994, Good Features to Track, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 593-600, https://doi.org/10.1109/CVPR. 1994.323794.
- [11] Harris, C., Stephens, M., 1988, A Combined Corner and Edge Detector, Proceedings of the Alvey Vision Conference, 23.1-23.6, https://doi.org/10.5244/C.2.23.



Ji-Woo Kim

Graduate student in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is Machine Vision. E-mail: wldn9303@nate.com



Dae-Hyun Baek

Graduate student in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is Machine Vision. E-mail: acbr2498@kitech.re.kr



Jae-Won Choi

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is Mechanical Engineering. E-mail: choijw@pusan.ac.kr



Hyung-Soon Moon

Senior researcher in Korea Institute of Industrial Technology Precision Machinery Process Control. His research interest is Machine Vision. E-mail: hsmoon@kitech.re.kr