

비전 센서를 이용한 디버링 로봇의 구현

배준영(경북대 대학원 기계공학과), 주윤명(경북대 대학원 기계공학과), 김준업(경북대 대학원 기계공학과), 이상룡(경북대 기계공학부)

A Realization of Deburring Robot using Vision Sensor

J. Y. Bae(Mechanical Eng. Dept. KNU), Y. M. Joo(Mecha. Eng. Dept., KNU), J. U. Kim(Mecha. Eng. Dept., KNU), S. R. Lee(Mecha. Eng. Dept., KNU)

ABSTRACT

Burr is a projected part of finished workpiece. It is unavoidable and undesirable by-product of most metal cutting or shearing process. Also, it must be removed to improve the fit of machined parts, safety of workers, and the effectiveness of finishing operation. But deburring process is one of manufacturing processes that have not been successfully automated, so deburring automation is strongly needed.

This paper focused on developing a basic algorithm to find edge of workpiece and match two different image data for deburring automation which includes automatic recognition of parts, generation of deburring tool paths and edge/corner finding ability by analyzing the DXF drawing file which contains information of part geometry. As an algorithm for corner finding, SUSAN method was chosen. It makes good performance in finding edge and corner in suitable time. And this paper suggested a simple algorithm to find matching point between CCD image and drawing file.

Key Words : deburring(디버링), Image processing(영상 처리), vision sensor(비전 센서), SUSAN, point matching(점 정합), edge finding(모서리 찾기), corner finding(코너 찾기), DXF, integration software(혼합 소프트웨어), burr(버)

1. 서론

일반적인 버(burr)의 정의는 가공 후 공작물의 모서리에 발생하는 원치 않는 돌출 부이다. 이는 소성 변형의 결과로서 나타나기도 하고 주조 가공의 경우에도 발생한다. 절삭에 의해 생기는 버는 여러 가지 문제의 원인이 되고, 생산성을 저해시킨다. 디버링 작업은 매우 복잡할 뿐 아니라 비용 또한 큰 비중을 차지하는데 기계가공 부품의 경우 디버링 비용이 총 가공비의 50%를 차지하기도 한다. 그러므로 발생한 버는 반드시 제거되어야 하며, 가능하면 버의 발생을 방지하거나 허용 가능한 최소한의 크기로 생성되도록 유도 하여야 한다.

이에 본 연구에서는 개발하고자 하는 요소 기술은 다음과 같다. 첫 번째는 로봇 교시에 필요한 DXF 기반의 CAD/CAM 모듈로서 복잡한 공구경로를 생성하고, 공작물의 정확한 형상을

인식하기 위해 필요하다. 두 번째는 CCD 영상중 공작물의 형상을 인식하는 기술이다. 이를 구현하기 위해 영상의 Edge와 Corner의 정보를 찾아낼 수 있는 SUSAN 영상처리방법을 사용하였다. 세 번째는 로봇의 경로 제어 기술이다.

2. 이론해석

2.1 DXF 기반의 CAD/CAM 모듈

CAD 도면으로부터 공구경로를 자동 생성할 수 있다. 이 방법을 이용하면 교시 도중 발생하는 실수를 미리 예방할 수 있고, 설계 도면과 실제 가공물 사이의 오차와 시간을 줄일 수 있다.

LINE 객체의 끝점들을 형상을 나타내는 특징 점으로 선정하게 되는데 이렇게 선정된 특징 점들은 대부분 공작물의 모서리 부분을 나타내게 된다.

2.2 SUSAN method 를 이용한 특징점 추출

SUSAN 영상 처리기법은 원형의 마스크를 사용한다. 원형의 마스크를 사용함으로써 프로그래밍이나 기타 계산 과정이 복잡해지지만 처리과정의 방향성 문제를 해결할 수 있다. SUSAN 기본 원리를 이용하여 Edge 검출기와 Corner 검출기를 설계할 수 있다. 찾아지는 특징 점의 품질과 연산 속도를 고려하여 마스크의 크기는 $\Phi = 6.8$ 픽셀인 원형 마스크를 사용한다. 이를 구현하면 영역내 픽셀의 개수는 37 개가 된다. 실제 구현을 위한 첫 번째 과정은 중심점과 임의의 픽셀의 밝기 차를 구하는 것이다. 임의의 포인트 \vec{r} 에서의 밝기를 $I(\vec{r})$ 이라고 정의하고 Nucleus 와 임의의 점의 밝기가 비슷하다면 1 을 다르면 0 을 돌려주는 함수를 정의한다.

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = \begin{cases} 1 & \text{if } |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| \leq t \\ 0 & \text{if } |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| > t \end{cases} \quad (1)$$

이제 마스크 내의 모든 점의 c 를 구했다면 그 합으로 USAN 의 크기 n 을 구할 수 있다.

$$n(\vec{r}_0) = \sum_{\vec{r}} c(\vec{r}, \vec{r}_0) \quad (2)$$

실제 영상에서는 노이즈가 존재하기 마련이며 이를 제거하기 위해서 형상 임계 게인(Geometric thresholding value) g가 도입되었다. 만약 n값이 g보다 크다면 노이즈에 의한 영향으로 보고 무시하면 된다. 최적 노이즈 제거를 위해 일반적으로 $(3/4)n_{max}$ 의 값이 사용된다. g를 적용한 초기 응답 Initial edge response R은 다음과 같이 정의된다.

$$R(\vec{r}, \vec{r}_0) = \begin{cases} g - n(\vec{r}_0) & \text{if } n(\vec{r}_0) < g \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

이제 식(3)의 응답 R에서 최대 값 들을 살펴보면 Edge의 형상을 알 수 있다. 만약 식(1)의 c 대신에

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = e^{-\left(\frac{|I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)|}{t}\right)} \quad (4)$$

를 사용하면 훨씬 안정적이고 민감한 응답을 구할 수 있다. SUSAN corner 검출기는 Edge 검출기와 매우 유사하다. 하지만 Edge 검출기에서 g의 값이 노이즈 제거를 위해서만 사용되는 것에 비해 Corner 검출기에서는 Corner를 찾아내는 중요한 파라미터로 사용된다. 영상에서 Corner를 찾기 위해서는 USAN 영역의 값 n이 n_{max} 의 1/2이하가 되는 곳을 찾아야 한다. 이렇게 구한 초기 응답의 Local minimum을 구하면 Corner의 위치를 구할 수 있다.

Corner를 잘못 인식하는 경우를 False

positives라고 하는데 크게 두 가지 이유로 발생한다 하나는 카메라의 포커스가 맞지 않아 영상의 경계가 명확하지 않고 간섭되는 현상이며, 또 다른 이유는 노이즈이다. 이를 해결하기 위해 도입된 개념이 CG(Center of Gravity), 즉, 무게 중심점이다. CG는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\vec{r}(\vec{r}_0) = \frac{\sum_{\vec{r}} \vec{r} c(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\sum_{\vec{r}} c(\vec{r}, \vec{r}_0)} \quad (5)$$

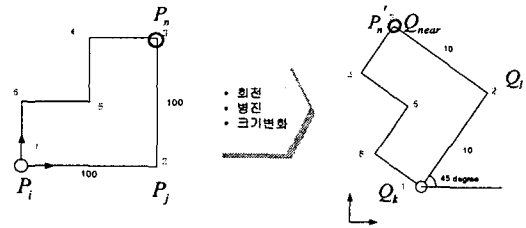
이런 False positive을 제거하고 정확한 Corner 판정을 위해 두 가지 검사를 추가한다.

- CG를 계산하여 Nucleus와의 거리가 너무 가까우면 False positive 이다.
- Nucleus와 CG를 직선으로 연결한 픽셀들의 밝기가 Nucleus와 차이가 있다면 False positive 이다.

실제 이미지에서 나타나는 여러 False positives를 위의 2가지 Rule을 이용하여 대부분 제거 할 수 있다.

2.3 형상 매칭 알고리즘

본 연구에서는 형상을 표현하는 최소단위로 Corner를 정의하였다.



(a) DXF data (b) image data
Fig. 1 Characteristic point and matching

Fig. 1에서 DXF 도면 파일에서 얻은 특징 점을 Fig. 1 (a)에 P로 표시하고, CCD 영상의 데이터에 SUSAN 영상처리 기법을 사용하면 얻을 수 있는 특징 점을 Fig. 1 (b)에 Q로 표시하였다. 이 P점들과 Q점들을 비교하면 각 모서리들이 어떤 특징 점을 중심으로 회전, 병진, 크기변화가 일어난다는 것을 알 수 있다. 기준 점과 회전, 병진, 크기변화의 값을 알아낸다면 도면상의 물체가 이미지 영역 중 어디에 위치해 있는지를 알 수 있다. 이를 알아내기 위해 먼저 도면영역에서 임의의 두 점 P_i, P_j 를 선택하고, 영상영역에서도 두 점 Q_k, Q_l 을 선택한다. 각 두점이 서로 같다고

가정하면 식 (6),(7),(8)에서 변화량을 계산할 수 있다.

$$\text{기준점 } Q_k \quad (6)$$

$$\text{각도변화} \quad (7)$$

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q_{ly} - Q_{ky}}{Q_{lx} - Q_{kx}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{P_{jy} - P_{iy}}{P_{jx} - P_{ix}}\right)$$

$$\text{크기변화 } s = \frac{Q_k Q_l}{P_i P_j} \quad (8)$$

이 변화량을 이용하여 P영역의 나머지 점들을 Q영역으로 사상 시킨다. 사상된 각 점 P'_n 과 가장 가까운 점을 Q_{near} 라고 한다. 이 사이의 거리를 거리 오차라고 정의한다. s로 나누어준 이유는 잘못 찾아진 아주 가까운 두 특징점의 경우라면 오차도 작게 나타난다. 따라서 스케일 변화로 나누어 주어 선택된 기준점에 대한 상대적인 거리 오차를 구한다.

$$d_n = \overline{P'_n Q_{near}} / s \quad (9)$$

이 거리오차를 모두 합한 것을 최종오차라 정의한다. 최종오차는 식(10)에 나타내었다.

$$d_e = \sum d_n \quad (10)$$

이 최종오차가 최소가 되는 점이 바로 일치점이며 이때의 각도변화, 기준점, 크기변화가 두 특징점 사이의 변환이 된다.(식 11)

$$\min(d_e) \rightarrow \Delta\theta, Q_k, s \quad (11)$$

이 방법을 이용하면 영상 데이터를 이용하여 찾은 특징점의 개수가 도면 영역의 개수보다 더 많거나 소실되더라도 가장 근사한 일치점의 추정이 가능하다. 다음으로 Fig. 2를 보면 CCD영상은 로봇 작업영역중의 일부분을 나타낸다. 만약 이미지중의 어떤 특징점이 실제 로봇 좌표계의 위치를 나타내는지를 안다면 이를 통해 로봇작업영역의 공구 경로를 만들 수 있다.

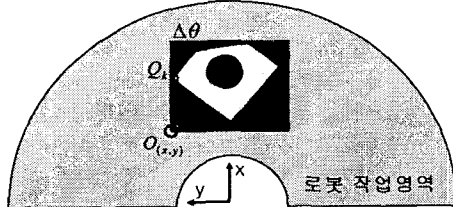


Fig. 2 Robot work space

식 (12)와 같이 로봇작업영역으로 변환 가능해진다.

$$R_{(x,y)} = O_{(x,y)} + Q_k / s \quad (12)$$

여기서 R은 로봇 작업영역을, O는 이미지 원점의 로봇좌표계, Q는 이미지 좌표상의 특징점

위치이다.

3. 실험

3.1 시스템 구성

본 연구에 사용된 디버링 로봇시스템은 삼성전자의 SM2 PARA 로봇으로 AC 서보모터를 채용한 산업용 로봇이다.(Fig.3 (a))



(a) SM2 Robot (b) Camera and tool

Fig.3 Deburring robot and tool

본 연구에서는 로봇의 운동 제어를 위해 PC 와의 시리얼 인터페이스를 이용하여 제어하도록 한다. 영상처리를 위해서는 일반 PC CAM 카메라를 사용하였으며, 로봇의 끝 단에 전동 디버링 툴과 브러쉬를 이용하여 디버링 작업을 수행하도록 한다. 끝 단에 (b)와 같이 전동 디버링 툴과 CCD 카메라를 설치 하였다. 표면처리에는 주로 와이어 브러쉬가 사용된다. 이상의 시스템으로 Fig. 4의 두 가지 공작물에 대하여 모서리 추적 및 디버링 실험을 실시 하였다. 이 시편의 재질은 알루미늄합금 6061 을 사용하였으며 원소재를 정면밀링(Face milling)한 후 내부를 엔드밀 공구로 포켓가공 한 것이다. 가공 후에 버가 생성된 시편을 실험에 사용하였다.



Fig. 4 Workpieces

3.2 형상 매칭 실험

형상 매칭 실험을 위해 제작한 소프트웨어를 이용하여 공작물의 위치를 찾고 그 오차를 계산해 보았다. Fig 5 은 실행화면이다.

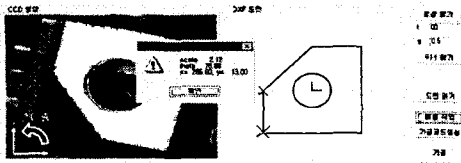


Fig. 5 Matching Process

오차 실험을 위해 실제로 작성한 프로그램을 이용하여 t 를 50, 60, 70, 80으로 변화시키면서 위치를 찾아보았다. 각 경우의 실험결과는 Table 1과 같다.

	$t=50$	$t=60$	$t=70$	$t=80$
No. of Corner	174	146	125	108
s	2.20	2.20	2.14	2.12
theta	76.34	76.34	76.69	76.88
x	266	266	267	266
y	13	13	15	13

Table 1. Matching value

찾은 기준점의 위치오차와 회전오차를 합한 최대 오차 값을 계산해 보면 약 1.17mm 정도의 오차가 발생하게 된다.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 공작물의 모서리 위치 추적에 중점을 두었으며 이를 확인할 수 있도록 공작물을 특정위치에서 0°에서 180°까지 45°씩 회전시키면서 위치를 찾는 실험을 하였다.

실험각도(deg)	0	45	90	135	180
x축 오차(pixel)	2	4	1	4	1
y축 오차(pixel)	1	1	0	3	0
각도오차(deg)	0.31	0.36	0.14	0.35	0.16
처리시간(sec)	4.5	5.6	3.8	4.8	3.2
pixel 오차	2.23	4.12	1	5	1
최대오차(mm)	0.78	1.36	0.32	1.51	0.36

Table 2. Experiment result

실험 결과를 보면 각도에 따라 최대 1.5mm 정도의 오차 안에서 추적이 가능하며 처리시간 역시 5초 이내라는 것을 알 수 있다. 디버링 작업 후 버의 제거 정도는 수동으로 브러싱 작업을 한 것과 유사한 품질을 보였다. 1mm 정도의 미세한 버들은 거의 제거되었으나 표면의 거칠기가 조금 더 나빠졌다. 만약 위치 추정의 정밀도를 향상시킬 수 있다면 표면정밀도 역시 향상시킬 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 디버링 공정의 자동화를 위한 요소 기술을 개발하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 디버링 시스템에 SUSAN 영상처리 기법을 도입하여 공작물의 형상정보를 추출하는 시간을 5초 이내로 줄였다.
- (2) DXF 도면과 CCD영상의 특징점을 비교하여 공작물의 모서리 위치를 오차 범위 1.5mm 이내에 찾을 수 있었다.
- (3) 도면 데이터로부터 가공물의 형상을 인식하고 공구 경로를 자동 생성하였다.

계산한 모서리의 오차가 최대 1.5mm 정도 되었지만 브러싱 작업에는 크게 문제가 되지 않았다. 오차가 크게 나온 이유는 실험에 사용된 카메라가 오토 포커싱이 안 되는 수동 웹 카메라를 사용하였기 때문에 잘못 판정된 특징점의 갯수가 많았기 때문이며, 이를 실제 산업 현장에 사용되는 산업용 CCD 카메라로 바꾸어 작업을 한다면 보다 정밀하고 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 추후작업으로 디버링 후, 공작물의 상태를 확인 할 수 있는 처리방법과 아울러, 가공물의 재질이나 톨의 종류나, 도면 데이터를 분석하여 버의 생성위치를 예측하여 공구경로를 최적화하는 연구를 병행할 예정이며, 실제 전문가의 작업을 모사 하는 전문가 시스템의 개발이 가능할 것으로 전망된다.

참고문헌

1. L. K. Gillespie, "Design to Reduce Deburring" *American Machinist*, Nov, pp. 125-129, 1985.
2. S. M. Smith & J. M. Brady, "SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing," *Technical Report TR95SMS1c*, 1995.
3. 윤성원, "6 축 로봇을 이용한 디버링 시스템 개발", *추계 정밀공학회 학술대회 논문집*, 1998.
4. 박동삼, "IGES 파일을 이용한 디버링의 자동화", *Proceedings of 4th Korea-Japan Joint Technical Conference on Surface Finishing & Burr Technology* pp.83-89, 1997.
5. 신상운, "비전 센서를 이용한 디버링 공정의 자동화에 관한 연구", *한국정밀공학회, 추계학술대회 논문집* pp.553-558, 1995.