

숙련자 기술을 이용한 디버링 공정의 자동화에 관한 연구

신상운* 김축석** 안두성***

A Study on the Automation of Deburring Process Using Expert's Skills

Sang-Woon Shin*, Choog-Seug Gal**, Doo-Sung Ahn***

* 부산공업대학교 기계공학과 ** 부산수산대학교 기계공학과

Abstract

In deburring process, Human experts who have long experienc in performing deburring tasks can manipulate tools efficiently and adapt the tool motions according to the state of the process based on their skills. However, human experts have difficulties in describing linguistically their control schemes and strategies because they don't aware the detailed process in interpreting sensory information and adapting tool motion. Therefore, it is important to develop a mean of understanding the skills and acquiring the control schemes so that the robot can perform the same skillful motion as the human experts. In this paper, an expert's skill model is developed so that it can be transferred effectively from the expert to the robot. Skills are represented by a mapping which is generated by using a neural network. Expert's skill shows that the robot is able to associate a correct control strategy with process characteristics which is acquired from a vision image in a similar manner to a human expert's.

Keywords : Deburring(디버링), Human expert's skills(인간숙련자기술), Neural Network(신경망)

1. 서론

생산현장에서는 디버링과 그라인딩 같은 작업들은 수 작업을 행하고 있다. 현장 숙련자들은 오랜 기간 동안 작업을 수행하여 경험하고 숙련 되어져 공구를 교묘하게 조종하며 능률적으로 작업을 실행할 수 있다. 숙련자들은 다양한 감각적인 정보를 통하여 작업의 공정정보를 인지하고, 공정상태에 따라 무의식적으로 공구를 다룬다. 이 때문에 공정상태에 따른 그들의 공정계획과 제어전략을 정량적으로 나타낼 수 없다. 그러므로 인간숙련자의 기술들을 찾는 방법과 제어 계획을 세우는 방법을 우선 개발하는 것이 중요하다. 그 결과를 가지고 숙련자와 똑같은 행위로 로봇은 디버링 작업을 수행할 수 있다. 디버링 작업은 절삭공구와 공작물에 상호작용력이 주어지는 가혹한 환경에서 작업이 실행되는 경우이며, 과도한 상호작용력은 공작물 또는 로봇에 손상을 줄 수 있다.

지금까지 로봇에 설치된 공구와 공작물 간에 상호작용력을 직접 제어하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. Plank와 Hirzinger⁽¹⁾는 Force/Torque 센스를 사용하여 디버링 로봇 동작의 속도제어를 연구였고, Her와 Kazernooni⁽²⁾는 공작물의 윤곽을 추적하면서 안정된 재료제거 공정을 만드는 컴플라이언스(Compliance) 제어방법을 응용하였다. Whitney⁽³⁾는 용접 비이더의 크기를 비견장치에서 측정하여, 이들 용접 비이더를 제거하는 준정적 모델(Quasi-static model)로 소요동력을 제어하는 연마장치를 개발하였다. Asada와

Asari⁽⁴⁾는 로봇에 인간의 컴플라이언스를 전달하기 위한 방법을 고안하여, 로봇이 인간의 행동을 흉내 내는 것을 가능케 하였다. 그러나 컴플라이언스는 단 하나의 작업의 티칭 데이터로 부터 확인 되어졌고, 이 컴플라이언스는 동일 조건하에서 특정한 작업이 실행될 때만 타당한 것이다. Liu와 Asada⁽⁵⁾는 인간의 숙련을 작업특성에서 작업전략으로 연관시켜 숙련을 밝히는 티칭법을 개발하였다. 그들은 작업특성을 효과적으로 나타내기 위하여 작업공정 모델에 파라미터화 된 공정특징을 사용했다. 그러나 파라미터 추정에 과도한 계산의 부하로 인하여, 실제 적용에 제한될 수 있다. 본 연구에서는 디버링 작업의 일반적인 특성들은 이미 알고있는 바와 같이 버의 높이와 관련된 사실을 가지고, 비견 장치를 사용하여 버의 높이 특징 값들을 얻어 낼 것이다. 또한 우리는 숙련자의 기술이 로봇으로 효과적으로 전달될 수 있는 숙련자의 기술모델을 제안할 것이다.

2. 디버링 공정

Fig.1의 실험장치는 디버링 공정 모델을 설명하기 위한 구조를 보여 주고 있다. 재료제거비(MRR) Q는

$$Q = A * V_n \dots (1)$$

여기서 A는 칩축면적, V_n는 법선속도로 아래와 같이 나타

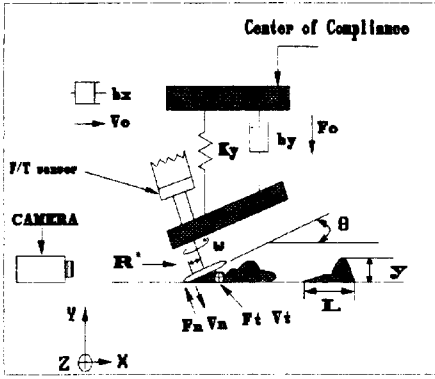


Fig. 1 Deburning model description

낼 수 있다.

$$V_n = x \sin \theta + y \cos \theta + \dot{\theta} R^* \quad \dots \dots \dots (2)$$

R^* 경우는 디스크의 실제 접촉반점의 반경으로, 디스크의 반경과 접촉반점의 길이에 절반의 차이이다. 기하학적인 해석으로부터 다음의 식을 유도할 수 있다⁽⁷⁾.

$$Q = Wx / \sin \theta \cdot [x \sin \theta + y \cos \theta + \dot{\theta} (R - y / 2 \sin \theta)] \quad \dots \dots \dots (3)$$

다음으로 디스크가 버에 접촉되어 절삭될 시 재료제거량은 공구의 동력 소비율에 비례한다⁽⁶⁾. 즉

$$Q \propto (P - P_{th}) \quad \dots \dots \dots (4)$$

P_{th} 경우는 시초동력(Threshold power)이며, 디버링 중 공구의 동력 소비율 P 를 계산할 수 있다.

$$P = \mu \omega [K_v (\theta_0 - \theta) - b_v \dot{\theta}] \quad \dots \dots \dots (5)$$

최종적으로 아래의 디버링 모델을 제안할 수 있다.

$$\begin{aligned} & K1 * \mu \omega [K_v (\theta_0 - \theta) - b_v \dot{\theta}] + K2 \\ = & G(y, w) * x + H(y, w, \theta) * y + C(y, w, \theta) * \dot{\theta} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$G(y, w)$ 경우는 버높이 Y 와 버폭 w 의 함수파라미터이며, $H(y, w, \theta)$ 는 버높이, 폭과 디스크 각의 함수파라미터이다. θ_0 는 디스크의 초기각이며 θ 는 디버링 중에 일어난 (raised) 각이다. 이와 같이 우리는 작업 중에 발생된 동력 소비율을 공구의 운동식과 연관시킨 결과로 공정모델 내에 포함된 함수파라미터 $G(y, w)$ 는 $K1$ 항에, $H(y, w, \theta)$ 는 $K2$ 항으로 그리고 $C(y, w, \theta)$ 는 $\dot{\theta}$ 항에 관련됨을 알 수 있다. 이것은 하나의 버에 대하여 디버링 작업 중에 숙련기술은 공구의 동력소비율의 관계식에서 함수파라미터와 연관 되었음을 알 수 있다. 그러므로 이 식으로부터 버의 기하학적인 특성인 버의 높이, 폭, 길이 등은 디버링공정에서 숙련자의 기술과 밀접한 관계를 나타내고 있다.

3. 숙련자의 기술 모델

3-1. 숙련자의 기술

Fig.2는 본 연구에서 논의하는 숙련자 기술의 도식표이다. 숙련자는 디버링 작업에 대해 경험한 정보를 가지고 작업목

표를 설정하고, 작업 실행에 알맞은 전략을 세운다. 또한 숙련작업자는 시각, 청각, 촉각과 같은 예민한 센서를 사용하므로 작업공정의 상태를 정확히 인식할 수 있기 때문에, 디버링의 공정상태에서 발생하는 모든 상황에 따라 작업수행 전략들을 계속 수정할 수 있다. 이처럼 숙련기술은 공정인식과 경험한 작업정보에서부터 작업전략에 까지 연상상으로 나타낸다. 그러나 숙련자는 공정상태에 따라서 그들의 기술을 무의식적으로 수행함으로써, 적용한 기술을 명확하게 설명할 수 없다. 더구나 손기술을 말로써 나타내는 것 또한 충분치 못하다. 따라서 우리는 숙련자의 작업 전략을 공구에 작용되는 동역학 식에서 특성화 된 파라미터와 공구의 운동을 표시한 변수의 향으로 나타낼 수 있다. 결론적으로 손으로 공구를 다루는 기술모델은 공정특성과 작업정보로부터 공구의 운동을 제어하기 위한 파라미터와 변수의 집합으로 연상 사상으로 나타낸다. 이러한 기술을 나타낼 수 있는 틀을 가지고, 숙련기술을 로봇에 전달하는 방법을 제안할 것이다. 즉 피이드포워드(Feedforward) 제적 (V_0, F_0)과 공구를 잡는 컴플라이언스 항 (b_x, k_y)의 파라미터 수정은 상위레벨 제어기에서 공정인식 정보로부터 만들어 진다.

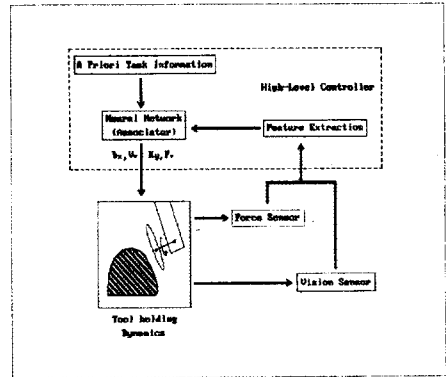


Fig. 2 Schematic model of Human skills

3-2. 공구를 다루는 Dynamic Model

이 장에서는 공구를 다루는 숙련자의 기술을 로봇에 전달하기 위하여 우선 숙련자의 손에 든 디버링 공구가 공작물에 대하여 상호작용력이 조절되는 모델을 확인할 필요가 있다. 이렇게 유도된 모델의 필요 조건들은 티칭 데이터에 아주 정확하게 잘 들어맞아야 하고, 기준 모델과 같은 결과로 로봇이 실행될 수 있도록 매우 간단해야만 한다. 본 연구에서는 아래와 같이 공구를 다루는 간단한 모델식을 사용한다⁽⁵⁾.

$$b_x (\dot{X} - V_0) = F_t \quad \dots \dots (7)$$

$$k_y y + F_0 = F_n \quad \dots \dots (8)$$

F_t 와 F_n 는 공구에 작용되는 회전접선방향과 법선방향에 각각의 힘이다. V_0 는 이송방향에 피드포워드를 표시하는 기준 속도이며, 반면에 F_0 는 법선방향에 피드포워드를 표시하는 기준 힘이다. k_y 의 경우는 강성계수이며, y 는 법선

방향에 공구의 변위이다. 위 식에 포함된 파라미터 b_x, V_0, k_y, F_0 들은 표준 커버팅 기법으로 확인 되어 진다.

$$a = (b_x, V_0, k_y, F_0) \dots\dots(9)$$

결론적으로 숙련자의 작업 행위 매개변수를 위의 식으로 나타낼 수 있다.

3-3. 숙련자 기술모델의 타당성

숙련자의 기술을 로봇에 전달하기 위하여 우리는 유용한 센서를 사용하여 디버링 공정을 감시하고 인간의 운동을 측정해야 한다. 실험에서 측정하는 물리적인 센서들은 인간이 감지할 수 있는 모든 현상들을 검출할 수 없다. 현재로서는 기계센서의 감지공간은 한계가 있다. 센서가 측정할 수 있는 모든 부분의 공간을 B로 나타낸다. 본 연구에서는 디버링 공정 특성화를 위해 비전센서를 사용하여 버의 특성들을 얻었다. 이 특성들을 b로 표시하고, 이는 비전 장치로부터 바로 확인 되며 이것을 디버링공정의 간단한 특성으로 나타낸다. 만약 숙련자의 기본적인 작업 특징들이 공정특성 b로 부터 빠져 있다면, 공정 파라메타 b의 공간에서부터 공구 조작 파라메타 a의 공간으로 정확한 관계가 나타나지 않을 것이다. 티칭데이터 집합과의 일치성을 검사하기 위해 립십츠조건(Lipschitz's Condition)을 사용한다. 일치되는 조건은 두 거리의 몫이 상한계범위 내에 있어야 한다.

$$q_{ij} = \frac{d(a^i, a^j)}{d(b^i, b^j)} \leq L, \quad \forall b^i, \forall b^j \in B \dots\dots(10)$$

$d(b^i, b^j)$ 의 경우는 b 공간내 b^i 와 b^j 간의 거리이며 $d(a^i, a^j)$ 는 a공간내 a^i 와 a^j 에 대응하는 a^i 와 a^j 사이의 거리이다. 그리고 L은 상한 경계값이다.

3-4. 버의 특성 측정

본 연구에서는 디버링 작업에서 버의 특성들을 판단하기 위하여 비전장치를 활용하였다. 비전장치는 역 광원과 CCD 카메라 그리고 영상처리 보드(MVB-02)로 구성되어져 있으며, 카메라와 시편은 고정위치에 셋팅되어 있다. Fig.3은 영상처리 과정을 보여 준다. 첫째 LUT (Look Up Table)을 사용하여 실시간에 이진화처리를 행한다. 둘째 이진화 처리된 화상에서 일정한 관심영역 이하는 모두 무시하여 라벨링을 행한다. 마지막으로 가장 면적이 큰 버 순으로 정렬하여 순번을 매기고 각 버의 특성 값인 버의 수직높이, 버의 수평폭, 버의 높이면적, 버의 도심 값들을 나타내준다.

$$b = (B_h, B_l, A_h, A_c) \dots\dots(11)$$

결론적으로 디버링에서 공정특성의 매개변수를 위 식으로 나타낸다.

4. 실험 실행 및 결과

Fig.4는 디버링 실험 장치를 보여 주고 있다. x-y축 구동 테이블 위에 디버링 장치와 CCD카메라 그리고 공작물이 설치 되어져 있다. 그라인더 헤더 부분에는 6축 Force/Torque (10/100)센서가 부착되어 절삭력을 측정한다. 실험에서 x-y 테이블에서 공작물의 이송속도와 위치를 측정하며, 그 위의 CCD카메라는 버의 형상을 얻어서 화상보드에 보내져 버의 특성들을 조사하였다. 또한 작업공구는 전기 그라인더에 강성 디스크를 사용하였고, 시편으로는 6-10mm 연강판을 가스 절단한 후에 생성된 버들을 이용하였다. 주로 산화된 버들

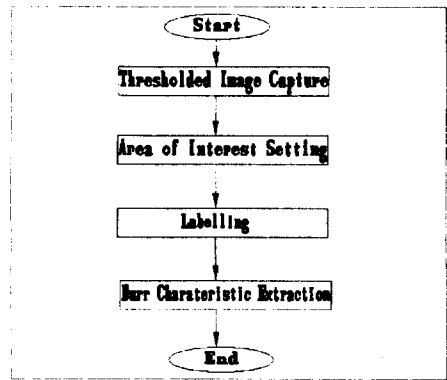


Fig. 3 Procedure of Image Processing

을 제거하고 간단히 제거되지 않는 버들을 사용하였다. 이들 버들은 변화가 크고, 예측할 수 없는 형상을 가지고 있다. 실험 방법은 공작물 위에 버의 특성들을 비전장치로 입력 데이터를 얻어서 처리한 후, 그라인더 디스크를 공작물 위에 놓고 숙련자는 버의 크기와 형상에 따라 공작물의 이송속도를 조절하면서 작업을 실행한다. 이때 숙련자는 버 가공 중의 그라인딩 불꽃과 소리들을 들으면서 최적의 이송속도를 유지시키면서 한번에 버를 제거한다. 디버링 시범 동안에 이송속도와 포스신호들은 약 6msec로 샘플링 하였다. 습득된 데이터를 기본으로 하여 식(7), (8)내에 있는 공구를 잡는 컴플라이언스와 파라메타가 확인 되었다. Fig.5는 접선 방향의 절삭력 F_t 와 식(7)에서 확인된 추정된 값과 비교된 그래프를 보여 주고 있고, Fig.6은 법선방향에 절삭력 F_n 와 식(8)에서 확인된 예측한 값들과의 비교 그래프 보여 주고 있다. 우리는 크기와 형태가 다른 다양한 버에 실험을 반복하여 22개의 버 특성과 작업 행위 파라메타 짝들을 얻었다. Table 1은 버특성과 숙련자의 시범으로 부터 얻은 파라메타 데이터를 정규화 시킨 값들 이다. Table 2는 각각의 샘플 데이터를 식(10)으로 계산된 몫들을 보여주고 있다. 따라서 비전 장치로 부터 얻어진 버 특성과 작업기술 파라메타들 간에 립십츠 조건으로 검사 된 결과를 보면 매우 작은 평균 몫을 확인할 수 있다. 결과적으로 모든 데이터 짝들은 일치성을 가지고 있음을 함축하고 있으며, 이 값들은 매핑 함수 확인으로 이용될 수 있다.

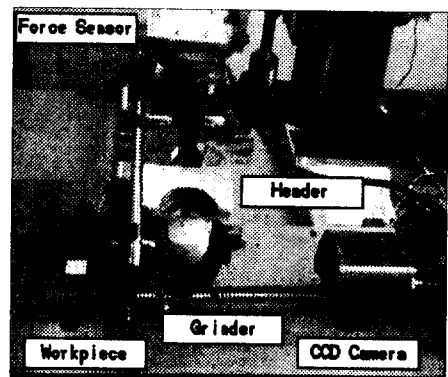


Fig. 4 The experimental setup

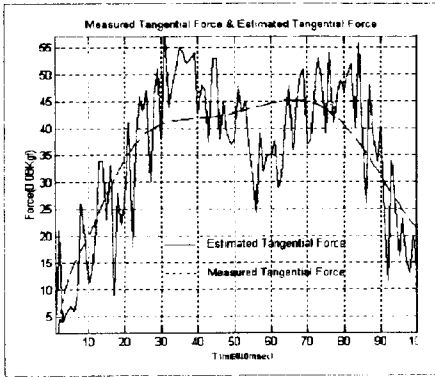


Fig. 5 Measured F_t values versus computed values based on the process model

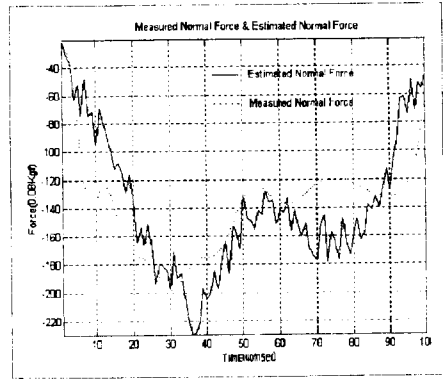


Fig.6 Measured F_n values versus computed values based on the process model

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
2	0.11	0.17	0.15	0.18	0.28	0.34	0.17	0.17	0.25	0.32	0.17	0.73	0.34	0.43	0.73	0.30	0.31	0.27	0.42	0.23	0.28		
3		0.19	0.17	0.20	0.33	0.39	0.17	0.15	0.10	0.29	0.40	0.18	0.83	0.43	0.97	0.40	0.35	0.32	0.40	0.31	0.27	0.33	
4			0.23	0.28	0.38	0.34	0.24	0.18	0.18	0.24	0.44	0.25	0.83	0.47	0.59	0.40	0.42	0.35	0.43	0.32	0.27	0.38	
5				0.51	0.68	0.47	0.44	0.24	0.21	0.59	0.84	0.50	1.15	0.98	1.24	0.54	0.88	0.48	0.44	0.88	0.43	0.68	
6					0.82	0.80	0.57	0.27	0.23	0.87	1.00	0.65	1.20	1.28	1.62	1.25	1.18	0.52	0.70	0.83	0.50	0.84	
7						0.95	0.79	0.39	0.34	0.79	1.04	0.82	1.26	1.25	1.39	1.34	1.11	0.56	0.77	0.83	0.62	0.89	
8							0.76	0.35	0.30	0.80	1.13	0.86	1.24	1.46	1.75	1.43	1.26	0.58	0.77	1.02	0.61	0.90	
9								0.75	0.22	0.84	0.94	0.57	1.17	1.11	1.42	1.09	1.00	0.50	0.57	0.94	0.45	0.78	
10									0.17	0.34	0.46	0.26	0.92	0.49	0.62	0.47	0.44	0.33	0.45	0.35	0.29	0.45	
11										0.29	0.39	0.22	0.80	0.47	0.32	0.41	0.35	0.33	0.41	0.46	0.26	0.42	
12											0.88	0.66	1.23	1.07	1.24	1.00	0.85	0.54	0.72	0.89	0.55	0.89	
13												1.00	1.29	1.46	1.59	1.35	1.34	0.43	0.85	0.96	0.74	1.14	
14													1.21	1.32	1.71	1.29	1.23	0.51	1.00	1.00	1.06		
15														1.31	1.77	1.25	1.23	1.09	1.12	1.11	1.11	1.19	
16															2.11	1.90	0.71	0.91	1.12	0.91	0.91	1.27	
17																2.17	2.18	0.73	0.88	1.42	0.98	1.4	
18																	2.14	0.68	0.88	1.30	0.74	1.15	
19																		0.60	0.85	1.28	0.70	0.87	
20																			0.60	0.80	0.48	0.6	
21																				0.76	0.51	0.69	
22																					0.78	0.15	

Table. 2 Quotient values for 22 sets of training data

Sample	Process Parameter (Inputs)				Action Parameter (Outputs)			
	Height	Width	Area	Centroid	Xy	Po	bx	Vo
1	4.713	1.880	3.356	3.024	-0.021	-0.128	0.003	-0.769
2	2.808	2.281	2.960	2.308	0.012	0.070	-0.002	-0.283
3	2.510	2.233	2.207	1.850	1.125	0.854	-0.005	-0.490
4	1.404	1.085	0.903	0.948	-0.803	-1.367	0.002	-0.429
5	0.702	1.116	0.726	0.567	0.300	0.090	0.059	-1.054
6	1.404	1.359	0.667	0.231	0.026	-0.384	0.016	-1.855
7	0.702	1.066	0.608	0.419	-2.807	0.692	-0.001	-1.350
8	1.404	0.776	0.588	0.831	0.028	0.128	0.018	-0.926
9	2.106	2.804	2.944	1.483	0.026	0.173	0.018	-0.926
10	1.404	4.833	2.688	0.444	0.004	0.015	-0.308	-0.921
11	0.702	2.039	1.000	0.751	-0.004	-0.028	0.004	-1.600
12	0.702	1.553	0.726	0.174	0.003	0.495	0.008	-2.174
13	0.702	1.165	0.586	0.270	0.379	-1.410	0.182	-0.960
14	0.702	0.971	0.470	0.409	0.619	0.332	-0.003	-5.194
15	0.702	0.678	0.393	0.406	0.493	0.172	-0.036	-1.273
16	0.702	0.631	0.353	0.361	-0.023	-0.118	2.427	-1.572
17	0.702	0.445	0.294	0.432	-0.745	-2.281	1.407	-1.513
18	0.702	0.348	0.274	0.573	0.006	-0.220	1.441	-1.308
19	2.106	2.621	2.335	1.122	-0.738	-1.315	-0.042	-2.009
20	2.106	1.650	1.588	1.812	0.013	-0.066	-0.619	-2.492
21	1.404	1.310	1.135	1.257	-0.090	-0.488	-2.950	-0.520
22	2.106	1.456	1.138	1.193	-0.001	0.007	0.183	-1.349

Table. 1 Teaching data acquired from human deburring operations

5. 결론

비전장치에서 판단한 버의 특성을 가지고 디버링 작업에 알맞은 제어 전략을 연상시킬 수 있는 새로운 숙련자의 기술 모델이 소개되었다. 비전 장치로부터 얻어진 디버링 공정 특성들은 버의 수직높이, 버의 수평폭, 버의 면적, 버의 중심으로 이루어져 있다. 숙련자의 디버링 시범에서 주어진 데이터로부터 숙련자의 운동파라미터 확인을 하였다. 버의 특성과 숙련자의 작업운동 간의 관계를 연상 매핑으로 나타내어서, 림칩즈 조건으로 확인한 결과는 매핑의 일치성을 잘 보여 주고있다. 이는 신경망으로 매핑을 성공적으로 실행시킬 수 있음을 증명하며, 그 결과 숙련자 기술을 로봇에 전달할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. G. Plank and G. Hirzinger(1982) "Controlling a Robot's Motion speed by a Force-Torque Sensor for Deburring Problems", Proc. IFAC/IFIP Symposium on Information Control Problem in Manufacturing Technology, pp.97-102
2. M.G. Her and H. Kazerooni(1991) "Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control, Vol.113, pp.60-66
3. D.E Whitney, A.C. Edsall, A.B. Todtenkopf, T.R. Kurfess and A.R. Tate(1990) "Development and Control of Automated Robotic Weld Bead Grinding System" Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.112, pp.166-176
4. Haruhiko Asada and Yukio Asari(1988) "The Direct Teaching of Tool Manipulator Skills Via the Impedance Identification of Human Motions" Proceedings of the 1988 IEEE International Conference Robotics and Automation, pp.1269-1274
5. S.Liu and H. Asada(1992) "Transferring Manipulative Skills to Robots: Representation and Aquisition of Tool Manipulative Skills Using a Process Dynamics Model", ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.114, No 2, pp.220-228
6. R. King and R. Hahn(1986) Handbook of Modern Grinding Technology, pp.34-38
7. T.R.Kurfess, D.E.Whitney and M.L.Brown(1988) "Verification of a Dynamic Grinding Model", ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol 110, pp.403-409