

연마작업을 위한 로봇형 연마기의 힘제어 적용

진태석*

Appling of Force Control of the Robotic Sweeping Machine for Grinding

Taeseok Jin*

Department of Mechatronics Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

요 약

본 논문은 산업용 로봇을 위한 힘 피드백 제어는 사람의 감각을 기반으로 한 작업을 대체하여 구현하기에 적합한 연마 시스템을 제안하였다. 기존 연마작업의 표면 연마, 비드처리, 기계 가공 디버링 등의 공정은 그 복잡성에서 자동화가 가장 곤란하다고 인식되어 주로 인력에 의존 해왔다.

본 연구에서는 연마 공구를 파지시킨 힘 제어 로봇에 의한 자동 연마 시스템의 구축과 힘 센서로부터 신호 피드백 제어 방식의 특성 파악과 연마 공정에 적응성을 검증했다. 또한 실용화를 목적을 위한 선박의 바닥 및 측면 연마에의 응용을 진행했다. 따라서 자체 제작한 연마로봇을 활용 한 표면 연마작업을 통하여 실험결과를 검증하였다

ABSTRACT

In this research, we describe a force feedback control for industrial robots has been proposed as a system which is suitable to work utilizing pressure sensitive alternative to human. Conventionally, polished surface of the workpiece are recognized, chamfer ridge, machining processes such as deburring, and it is most difficult to automate because of its complexity, has been largely dependent on the human.

To aim to build automatic vacuum system robotic force control was gripping the grinding tool, the present study we examined the adaptability to the polishing process to understand the characteristics of the control system feedback signal obtained from the force sensor mainly. Furthermore, as a field, which holds the key to the commercialization, I went ahead with the application to robotic sweeping machine. As a result, the final sweeping utilizing a robot machine to obtain a very good grinded surface was revealed.

키워드 : 연마, 피드백, 진공장치, 로봇주행, 힘제어

Key word : grinding, feedback, vacuum, navigation, force-control

접수일자 : 2013. 10. 16 심사완료일자 : 2013. 12. 24 게재확정일자 : 2014. 01. 10

* **Corresponding Author** Taeseok Jin(E-mail:jints@dongseo.ac.kr, Tel:+82-51-320-1541)

Department of Mechatronics Engineering, Dongseo University, Pusan 617-716, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2014.18.2.276>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

선박표면의 연마공정은 연마나 절삭 공정에 생긴 표층부의 압축 섬유 도료 용제 등을 흡수함으로써 일어나는 보풀발생을 억제하고 촉감이 좋은 마무리 면을 창출하기 위해 필수적인 작업이다[1]. 그러나 의장 곡면이나 비드가 있는 철판의 연마는 독점적으로 인력에 의존하고 있는 실정이며, 이것이 제조비용 절감 및 생산성 향상의 걸림돌로 작용하고 있다. 또한, 작업 수행시 발생하는 분진과 진동 공구의 장시간 사용이 인체에 미치는 영향 등 작업 환경도 바람직하지 않은 것이다. 특히 부산, 경남에는 선박수리 및 제조 기업이 많은 국내, 해외 제품과의 경쟁에 이기기 위해서는 비용 절감 대책이 중요한 열쇠를 쥐고 있다고 생각된다. 따라서 산업용 연마로봇의 활용을 목표로 개발된 힘 제어에 의한 연마 로봇의 적용을 도모했다. 기계화를 추진할 때 사람의 손의 데이터화 등 기본적인 가공 조건이 부족했기 때문에 새로운 대응 방법 등 미지의 영역도 많았다[1][2]. 따라서 본 기술의 완성도를 높이기 위해 도구와 작업의 적절한 위치 관계를 자동으로 검색하는 기술을 고안하여 선박연마 작업현장을 통해 실험적으로 검토했다. 그 결과 연마로봇을 활용한 표면 연마는 사람이 작업한 경우와 비교하여 손색이 없을 정도의 연마 면을 얻을 수 있었다[3][4].

II. 시스템구성

본 연구에서 개발된 연마로봇은 작업 수행을 위해서는 작업환경 및 장애물 인식을 위한 각종 센서와, 이 센서의 신호를 받아서 동작계획에 따라 지능적으로 연마로봇의 위치 및 자세를 제어하기 위한 로봇 제어장치와 이 로봇 제어장치의 제어에 따라 연마로봇의 위치 및 자세를 실제로 조작하는 센서 및 액츄에이터가 장착된 시스템은 그림 1에 제시된 것과 같다.

제어기 보드 관련 구성품은 그림 2와 같이 구성하였다. 수행을 위한 2개의 서보모터와 페이퍼 휠의 업-다운 제어를 위한 1개의 AC서보모터를 연결하기 위한 단자로 구성하였다. 연마를 담당하는 주축모터와 장애물 감지를 위한 레이저센서(URG04-LX), 바닥면 케이블 등을 감지할 수 있도록 변위센서(Keyence)를 각각 RS232 통신을 이용하여 제어할 수 있도록 연결하였다[5].



그림 1. 연마로봇 시스템
Fig. 1 Grinding robot system

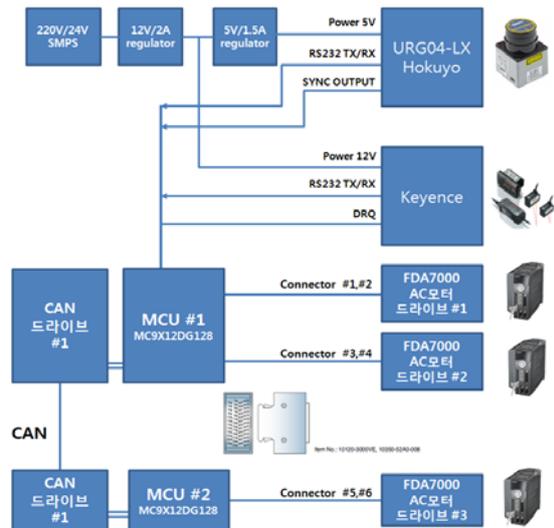


그림 2. 제어부 시스템 구성
Fig. 2 Structure of control system

III. 연마작업 모델링

3.1. 페이퍼 휠 업-다운 장치

본 실험에 사용된 연마로봇의 연마 로봇의 톨은 그림 3에서 제시한 것과 같다. 연마로봇으로 금속표면을 연마할 경우 표면을 고르게 연마하기 위해서는 연마 휠의 회전속도도 항상 일정하게 유지하는 것도 중요하

지만, 페이퍼 휠과 연마표면과의 마찰력도 항상 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 마찰력을 항상 일정하게 유지하게 위해서는 연마로봇의 진행속도와 페이퍼 휠의 마모 정도에 따라 페이퍼 휠을 적정하게 상, 하로 이동하여 대처 할 필요가 있을 것이다. 그 뿐만 아니라 연마작업 도중에 전방 용접비드 등으로 금속표면이 약간 돌출되어 있거나, 전원 케이블 등의 장애물이 있을 경우 등, 작업환경이나 장애물의 상태에 따라 연마용 페이퍼 휠을 상, 하로 이동할 수 있는 구조로 설계 및 제작 하였다.

3.2. 힘제어

구동축으로는 6축 직교 형으로 구성되었으며 기계적 인터페이스방식에 힘센서를 장착하였고 힘제어에 의해 목표 궤도를 보정하면서 이동하는 기능을 가진다. 실험에서 제시한 힘 제어는 이른바 임피던스 제어 방법을 적용하였다. 이 방식은 말단 장치가 물체에 접촉했을 때 그 이상 무리하게 강압하지 않고 팔 전체의 강성을 작게 유지하면서 힘을 간접적으로 제어하는 것이다. 그 결과 일정한 힘을 유지하면서 목표 궤도를 수정하는 것이기 때문에 미지의 표면 형상에 대해서도 매끄럽게 마무리 작업이 가능하게 된다. 예를 들어 작업의 표면 연마, 연삭 작업, 녹 및 비드 제거 및 가공 디버링 작업 등에 유용할 것으로 판단한다. 다음절에서 연마작업을 제어할 위한 제어 방법에 대해서 기술하도록 한다[5][6].



그림 3. 상하 동작이 가능한 연마로봇 툴
Fig. 3 Grinding tool with up-down

그림 4는 작업공구 끝이 작업을 수행하고자 하는 목표 궤도 수정 방법을 보여준다. 이 그림에서는 작업공구 끝을 일정한 속도로 움직일 때, 진행 방향에 대해 수직 방향으로 미는 힘이 일정하게 되도록 유지하고 있다. 이 때, 목표 궤도는 다음과 같이 표현할 수 있다 [8].

$$r = r_p + \int K_f (F_d - F) F_a dt \quad (1)$$

- r_p : 프로그램에 의해 지정되는 위치제어 목표위치
- K_f : 힘 제어 게인
- F_d : 지정된 방향으로 미는 목표 힘의 크기
- F : 지정된 방향으로 검출된 힘의 크기
- F_a : 힘 수정 방향 단위 벡터

제안한 방법으로 검출된 힘의 방향 F 와 수정 방향 벡터 F_a 을 독립적으로 다루고 있다. 예를 들어, 곡면 힘 제어 상태에서 절삭 공구의 주분력, 배분력이 발생하지만, 반력 상태는 공구 회전 면내 방향으로 업 컷과 다운 컷, 능선의 요철 상태에 따라 변화하게 된다. 따라서 반력의 방향은 기계 가공면에 따라 방향이 지배적이라고 할 수 없다. 따라서 힘의 검출 방향(반력방향)과 힘 제어 방향(수정방향)을 독립적으로 다룬 것이 적용성이 높은 것으로 판단된다. 보다 고품질의 마무리 작업을 위해 힘 제어 관련 파라미터를 설정했기 때문에 주요 내용에 대해 설명한다. 이러한 항목은 연마 도구와 그것을 파지하는 말단 장치의 기능에 의존하는 경우가 많다 [7].

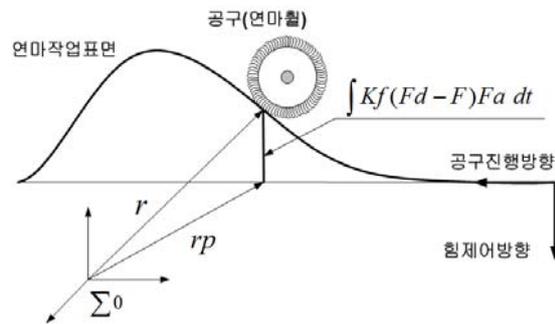


그림 4. 힘제어에 의한 작업경로 보정
Fig. 4 Working trajectory calibration by force control

3.2.1. 강압 방향 매개 변수

제어 매개변수로는 기준 방향 및 기준 방향에 대한 정의 좌표계, 강압방법으로 구성되며, 정의 좌표계를 근거로 한 기준 방향 D , 공구 진행 방향 벡터 V 로 했을 때, 강압 방향 Fa 는 다음과 같이 표현 할 수 있다 [8][9].

a. 기준 방향에 직접 강압 방법

그라인더 작업, 손질 작업 등 평면적 또는 곡면가공에 적용하는 경우

$$Fa = D \tag{2}$$

b. 공구의 진행 방향과 기준 방향의 외적 방향으로 강압하는 방법으로는 곡면처리, 디버링 작업 등의 직선, 곡선으로 가공에 적용 할 수 있다.

$$Fa = V \times D \tag{3}$$

3.2.2. 검출력 방향 매개 변수

검출방향, 감지방향에 대한 정의좌표계로 구성되어 있으며, 검출 방향은 일반 병진 힘 Fx, Fy, Fz , 공구 중심 방향의 모멘트 Mx, My, Mz , 평면 합성 힘 Fxy, Fyz, Fzx , 전 합성 힘 $Fxyz$ 중 하나를 설정할 수 있다.

3.2.3. 힘 패턴 파라미터

강압 힘 패턴을 설정하는 파라미터로써 장비 이송의 가속속에 발생하는 마찰열에 의한 뒤튕림현상을 방지하기 위해 연마작업의 시작 및 종료시에 강압을 넣거나 빼기 위한 매개 변수이다.

3.2.4. 힘 제어 계인 파라미터

식(1)에서 표시한 것과 같이 힘 제어 계인을 설정하는 매개 변수이다.

IV. 연마실험

실험에 사용 된 장비는 벨트 켄더 방식으로서 그 모양을 그림 5에 표시한 것과 같다. 연마 조건을 표 1에 나타낸다. 또한 표 2는 로봇암 끝단부분의 기계 인터페이스 부 부근에 장착 된 6축 힘센서의 특성을 나타낸다.

이 힘 센서의 출력에서 강압 변화를 관찰 할 수 있다.

표 1. 연마조건
Table. 1 Grinding condition

연마 톨	모터구동식 핸드벨트센터 중량(치구 포함): 5.8kg 플랩회전속도: 20rpm 접지폭: 250mm
공구 옵션	(x, y, z, a, b, c) =(~36.0, -5.0, 250.0, 180, 0, 90)
연마지 공작물 누르는 힘 툴이송속도	레진벨트 형식: W14A180 #350 철판 1kgf 12m/min

표 2. 6축 힘센서의 성능
Table. 2 Performance of 6-axis force sensor

	정격	비직선성	히스테리시스
Fx	16kgf	0.05%	0.06%
Fy	16kgf	0.07%	0.08%
Fz	35kgf	0.07%	0.04%
Mx	150kgf-cm	0.08%	0.09%
My	150kgf-cm	0.07%	0.06%
Mz	150kgf-cm	0.09%	0.08%

먼저 그림 6과 같은 형태의 가공물 윗면에 따라 도구를 이동시키는 궤도 프로그램을 생성했다. 그 때의 설정 조건을 아래에서 설명하도록 한다. 먼저 작업 좌표계는 로봇을 등지고 작업면을 향해 직진방향인 Y축+, 오른손 측이 X축+ 위쪽 방향이 Z축+이 되도록 설정했다. 이것은 축에 평행하게 공구가 이동할 때, NC 가공기와 동일한 좌표계가 현장에서 적용되기 때문이다. 또한, 사람이 장비를 사용할 때 약 15도 경사되어 강압하는 것이 관찰되었기 때문에 이 좌표계에서 축에 -15도 회전 방향을 목표로 하여 강압 방향으로 설정하였다. 또한, 연마 벨트 구동 폴리 콘택트 휠로서의 기능도 겸하고 있어 일정한 미는 힘으로 표면을 이동한다. 작업은 미리 선박의 곡면부가 있는 것으로 하여 공용 세로축 NC 밀링(NC 라우터)에서 절단되어있다. 사람의 연마 작업을 대행하기 위해 도구를 적당한 힘으로 누르는 힘의 변화에 유연하게 추종 하느냐가 중요하다. 그래서 실제로 연마로봇 팔에서 연마 작업의 강압 힘의 변화를 측정하여 그 안정성을 평가하였다[10].

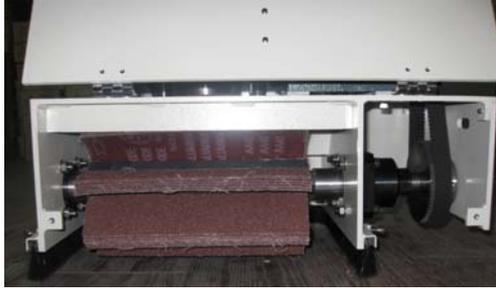


그림 5. 적용한 연마장비 툴(페이퍼 휠)
Fig. 5 Grinding robot tool(paper wheel)

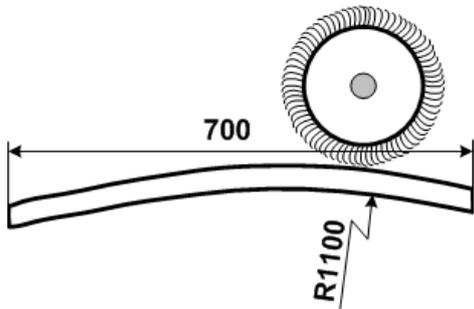
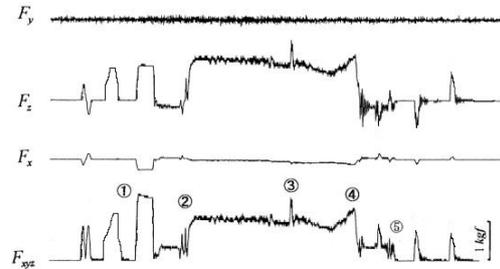


그림 6. 실험용 작업대상 철판
Fig. 6 Target plate for experiment

V. 실험결과

그림 7은 앞에서 기술한 작업대상의 상면을 X축+ 방향으로 연마작업 중에 힘 센서(force sensor)에서 출력된 신호의 모습이다. ①은 누르는 힘 14.7N로 접촉판정을 하고, 재료의 위치를 확인하고 있는 상태다. 그 후 일단 작업대상에서 떨어져 에어밸브를 열고 공구를 동작, ②에서 다시 작업대상에 접촉하여 연마를 시작하고 있다. ③은 작업대상의 궤도가 비선형(非線型)에 접촉하고 있는 개소이며, 예상 이상으로 압력이 증가하고 있다. ④의 위치에서 연마작업은 종료하고 공구를 작업대상에서 원위치시키고 있다. ⑤에서 공구의 벨트회전을 정지하고 진동현상은 사라지고 있다. ②에서 ④까지 이동 중에는 거의 일정한 누르는 힘으로 연마하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 ④의 위치에서 힘이 증가하고 있는데, 원인은 명확하지 않다. 하지만 이 위치에서 공구자세는 Y축의 +방향으로 회전하면서 이동하고 있기 때문에 공구자세와 작업대상에서 받는 반력(反力)의

방향으로 로봇의 기구상의 특성이 작용한 결과라고 생각된다.



작업조건	누르는 힘: 1.0kgf 적분계인: 3.3mm/sample/kgf 로봇이송속도: 12m/min
------	--

그림 7. 연마중의 힘 검출신호
Fig. 7 Output signal by grinding

위와 같은 실험결과에 따른 철판의 연마 전후 결과를 아래 그림과 같이 제시하였다. 그림 8(a)는 연마 테스트에서 힘제어를 실시하지 않고 사람이 직접 밀면서 제어하는 기존의 방법에 대한 결과이며, 그림 8(b)는 제안한 힘제어를 적용한 연마표면의 결과이다. 본 결과에서 그림 8(b)의 결과가 그림 8(a)의 결과보다 우수하게 연마되었음을 알 수 있었다.

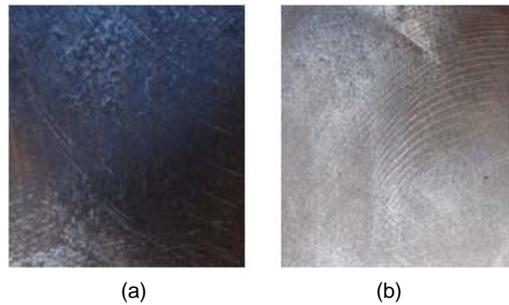


그림 8. 연마에 따른 연마표면 결과
Fig. 8 Results for plate grinding

VI. 결 론

힘 제어 로봇에 의한 선박부재 연마시스템에 대해서 이하의 과제에 대해 검토하였다.

- ①기계계의 강성이 높고 힘 피드백 제어가 가능한 선박부재의 연마작업이 가능한 시스템을 개발하였다.
- ②일정한 압부력이 되도록 궤도를 수정하는 방법인 힘 제어를 제안하였다. 이 방법으로 선박외벽을 마무리한 결과 목표압 부력에 따른 누르는 반력을 유지한 작업을 할 수 있었다.
- ③개발한 연마시스템은 공구의 왕복진동과 벨트회전 진동에 의한 영향을 받지 않으며, 일정한 연마조건에서 그 연마표면은 양호하였다.
- ④연마궤도 교시법의 간편화를 목적으로 촉각센서를 작업대상 모델의 곡면에 접촉시켜, 엔드 이펙터(end effector)의 위치와 자세를 자동으로 작업대상의 곡면을 모방하는 수법을 고안하여, 마무리 연마공정에 적용한 결과, 아주 양호한 마무리를 할 수 있었다.
- ⑤연마동작 시작시 접촉 개시점에서 오버 슈트(over shoot) 발생률이 높기 때문에 향후 효율적인 대책을 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 2013년도 산학연공동기술개발사업(No.C0096067)의 지원을 받아 수행된 연구결과임, 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 일부 수행된 기초연구결과임(N. 2010-0021054)

REFERENCES

- [1] X. Ren, B. Kuhlenkotter, H. Muller. "Simulation and verification of belt grinding with industrial robots," *Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, pp. 708-715, 2006.
- [2] Yunquan Sun, David J. Giblin, Kazem Kazerounian, "Accurate robotic belt grinding of workpieces with complex geometries using relative calibration techniques," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 25, pp. 204-210, 2009.
- [3] Zhao Yang, Zhao Ji, Zhang Lei, "Robotic blade grinding based on reverse engineering," *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, vol. 39, no 5, pp.1176-1180, 2009.
- [4] Antal K.Bejczy and Won S.Kim, "Predictive Displays and Shared Compliance control for Time-Delayed Telemanipulation" *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '90*, pp. 407-412, Vol.1, 1990.
- [5] Edited by David Clarke, "Advances In Model-Based Predictive Control," Control Engineering University of Oxford, pp.478-482. 1994.
- [6] Laurene V. Fausett, "Applied Numerical Analysis Using Matlab", Prentice, 2007.
- [7] JINNO Makoto, YOSHIMI Takashi, ABE Akira, "A Study on a Remote-Controlled Grinding Robot System[in Japanese]" *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 10, no. 2, pp. 244-253, 1992.
- [8] NAGATA Fusaomi, WATANABE Keigo, "A Teaching System of Force Control Using a Game Joystick for a Polishing Robot [in Japanese]" *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, vol. 67, issue 655, pp. 767-774, Mar. 2001.
- [9] Narikiyo, T. Kawanishi, M. & Nakagawa, M, "Robust Adaptive Position/Force Control of Mobile Manipulators with Dynamic Uncertainties," in *Proceedings of IASTED CA2009*, pp.264-269, 2009.
- [10] Narikiyo, T. Kawanishi, M. & Mizuno, T, "Robust Adaptive Position/Force Control of Mobile Manipulators with Kinematic and Dynamic Uncertainties,"in *Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference*, pp. 4704 - 4709, 2009.



진태석(Taeseok Jin)

2003년 부산대학교 전자공학과 공학박사
 2006년~현재: 동서대학교 메카트로닉스공학과 교수
 현재: 한국지능시스템학회 회원이사
 현재: 한국정보통신학회 기획이사
 ※관심분야: 센서융합, 이동로봇, 컴퓨터비전, 지능제어