

논문 2009-46SC-3-1

컬러 모노 카메라를 이용한 전착 로봇의 자동 제어

(Automatic Control of an Electrophoretic Deposition Robot using a Color Mono Camera)

박재병*

(Jae Byung Park)

요약

본 논문에서는 컬러 모노 카메라를 이용한 자동 전착 로봇 시스템 (Automatic Electrophoretic Deposition Robot System)을 제안한다. 전착 로봇 시스템은 실제 전착 작업 수행을 위한 2자유도 직교 로봇과 로봇 자동 제어를 위한 컬러 모노 카메라로 구성되어 있다. 직교 로봇은 전착 작업 특성상 10mm/s까지 저속 구동이 가능하도록 스크류 (Screw)를 사용하여 감속 구동하였다. 컬러 모노 카메라는 로봇과 비커에 부착된 컬러 마커를 인식하여 각각의 위치를 측정하고 측정된 위치를 기반으로 로봇을 제어한다. 또한, 카메라에 의해 비커에 부착된 컬러 마커의 조합을 인식하여 다양한 작업 변수를 갖는 전착 작업을 판단한다. 제안된 자동 전착 로봇 시스템의 효율성을 입증하기 위해 전착 작업 실험을 수행하였고 그 결과를 제시하였다.

Abstract

This paper suggests an automatic electrophoretic deposition (EPD) robot system using a color mono camera. The EPD robot system consists of a 2 DOF rectangular robot to practically carry out EPD tasks, and a color mono camera to automatically control the robot. The screws are used to actuate the robot with low speed of 10 mm/s for EPD tasks. The color mono camera detects the color marks attached to the robot and beakers, and obtains their positions. The obtained positions are used for automatic robot control. Also, the camera recognizes the combinations of the markers attached to the beakers, and determines the selected EPD task among various predetermined EPD tasks with different working parameters. Finally, experimental results are shown for verifying the effectiveness of the suggested EPD robot system.

Keywords: 컬러 모노 카메라, 전착 작업, 자동 제어

I. 서 론

근래 전착 (Electrophoretic Deposition) 기법^[1]은 독특한 미세구조 (Unique Microstructures)나 복잡한 재료 결합의 현실화 가능성으로 재료 과학자들에게 매우 큰 관심을 불러일으키고 있다^[2]. 전착 기법의 새로운 응용 분야로는 Advanced Coating, Nanocomposite, Laminate Structures, Functional Graded Materials, Fibre-reinforced ceramic 등과 같은 합성 물질의 저가 제조 분야가 있다. 더 나아가 Piezoelectric Device,

Biomedical Ultrasound Probe, Chemical Sensor, Solid Oxide Fuel Cell 등과 같은 다양한 첨단 응용 분야에도 활용 가능 할 것으로 기대되고 있다.

전착 작업은 다음과 같이 수행된다. 먼저 전착 대상 재료를 전착 물질이 담겨 있는 첫 번째 비커에 넣은 후 전류를 인가한다. 일정 시간 경과 후 전류를 차단하고 등속으로 전착 대상 재료를 꺼낸다. 다음 일정 시간 건조 후 다음 전착 물질이 들어있는 두 번째 비커에 대상 재료를 넣고 첫 번째 비커에서와 같은 작업을 수행한다. 세 번째 비커에 대해서도 같은 작업을 수행한다. 이 때 인가 전류의 세기, 전류 인가 시간, 재료를 꺼내는 드로잉 속도, 건조 시간 등이 전착 작업 변수가 되며 각 비커마다 다르게 설정될 수 있다. 앞에서 말한 것처럼

* 정회원, 전북대학교 전기전자컴퓨터공학부
(Division of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Chonbuk National University)
접수일자: 2009년2월10일, 수정완료일: 2009년5월8일

전착 작업은 그 활용도 면에서 매우 유용하지만 전착 작업을 사람이 직접 수행 할 경우 전착 작업의 성공률이 매우 떨어질 뿐만 아니라 각각의 세부 작업을 일일이 관찰하고 제어하여야 하기 때문에 매우 불편한 문제를 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 자동으로 전착 작업을 판단하고 전착 작업을 수행 할 수 있는 자동 전착 로봇 시스템을 제안하려 한다.

자동 전착 로봇 시스템은 2자유도를 갖는 직교 로봇, 컬러 모노 카메라, 전류제어기, 제어용 PC로 구성된다. 직교 로봇은 저속의 드로잉 속도를 만족할 수 있도록 10mm/s까지 감속 가능한 스크류 (Screw)를 사용한다. 다음으로 로봇과 비커에 부착된 컬러 마커를 컬러 모노 카메라로 인식하여 각각의 위치를 측정하고 이를 기반으로 자동 전착 로봇 제어를 수행 한다. 이 때 비커에 부착된 컬러 마커의 조합을 인식하여 미리 정의된 작업 변수를 갖는 전착 작업을 자동으로 결정하게 된다. 제안된 자동 전착 로봇 시스템을 통해 작업 변수가 정해진 일련의 전착 작업을 자동으로 수행할 수 있게 된다.

II. 전체 시스템 구성

1. 하드웨어 시스템

본 논문에서 제안한 자동 전착 로봇 시스템은 그림 1과 같이 2 자유도를 갖는 직교 전착 로봇, 컬러 모노 카메라, 전류제어기, 제어용 PC로 구성되어 있다. 전착 로봇의 수평 축과 수직 축의 선형 구동을 위해 2개의 스텝모터가 각각 스크류 (Screw)에 연결되어 있으며, 각 모터의 속도 및 위치 제어를 위해 자동 전착 로봇 시스템 ATMEGA128 마이크로컨트롤러와 SLA7024M 모터 드라이버를 이용하였다. 이 때 무리 없고 부드러운 모터의 구동을 위해 시다리풀 속도 프로파일을 적용하였다. 전착 작업의 전류 인가를 위해 EDP1502 전류제어기를 사용하였다.

제어용 PC는 자동 전착 작업을 위해 USB 통신을 통해 카메라 영상을 획득하고, ATMEGA128와 RS232シリ얼 통신을 통해 로봇을 제어한다. 또한, 제어용 PC는 EDP1502 전류제어기와 RS232 통신으로 연결되어 있어 전착 작업에 필요한 전류의 인가 시기 및 크기를 온라인으로 제어할 수 있다. 이 때 전류제어기의 +전극은 전착 대상 물체에 연결하고 -전극을 3개의 비커에 공통으로 연결하여 전류 인가 시 전착 대상 물체가 담긴 비커에서만 전착 작업이 이루어질 수 있도록 하였다.

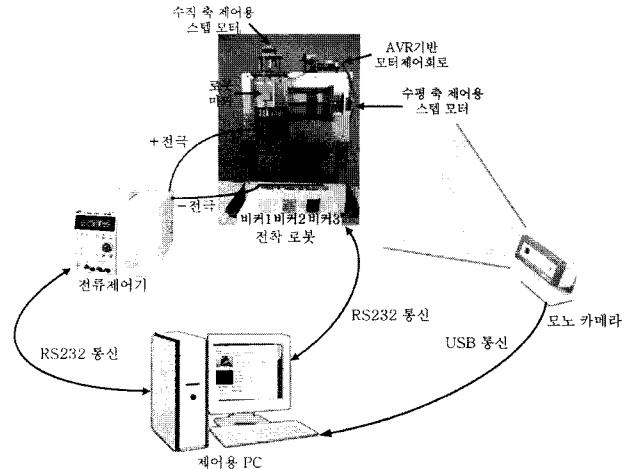


그림 1. 자동 전착 로봇 시스템 구성

Fig. 1. Automatic electrochemical deposition (EPD) robot configuration.

표 1. 제어용 PC와 로봇 사이의 통신 규약

Table 1. Protocol between the control PC and the robot.

STX	Cmd	Arg	ETX
8 bits	8 bits	16 bits	8 bits

표 2. 전착 로봇 제어 명령

Table 2. Electrophoretic deposition robot commands.

제어 명령	설명
ZeroSet	로봇 동작 명령 리셋
SetHVel	수평 이동 속도를 Arg(mm/s)로 설정
SetVVel	수직 이동 속도를 Arg(mm/s)로 설정
MoveRight	오른쪽으로 Arg(mm)만큼 수평 이동
MoveLeft	왼쪽으로 Arg(mm)만큼 수평 이동
MoveUp	위쪽으로 Arg(mm)만큼 수직 이동
MoveDown	아래쪽으로 Arg(mm)만큼 수직 이동
ContMoveRight	오른쪽으로 연속 수평 이동
ContMoveLeft	왼쪽으로 연속 수평 이동
ContMoveUp	위쪽으로 연속 수직 이동
ContMoveDown	아래쪽으로 연속 수직 이동
Working	로봇 동작 상태
WorkDone	로봇 동작 완료 상태

제어용 PC와 로봇 사이의 통신 규약은 표 1과 같다. STX (Start of text)와 ETX (End of text)는 각각 0x02와 0x03으로 명령의 시작과 끝을 나타낸다. Cmd와 Arg는 각각 제어 명령과 제어 값의 의미한다. 각 제어 명령에 대한 설명은 표 2와 같다. 이 때 Working과 WorkDone만이 로봇의 상태를 나타내는 명령으로 ATMEGA128에서 제어용 PC로 송신되며, 나머지 명령은 모두 제어용 로봇 제어를 위해 제어용 PC에서 로봇

으로 송신된다.

전착 로봇의 자동화를 위해 로봇과 비커의 위치를 카메라를 통해 빠르고 쉽게 인식하기 위해 그림 1과 같이 컬러 마커를 로봇과 각 비커에 부착하였다.

2. 소프트웨어 시스템

로봇의 자동 전착 작업은 제어용 PC의 제어 알고리즘에 의해 수행되며, 제어 알고리즘은 윈도우 XP 환경에서 Visual C++ 6.0을 이용하여 개발되었기 때문에 이벤트 기반 프로그램으로 구현되었다. 제어 알고리즘은 그림 2와 같이 크게 초기화 부분과 자동 전착 작업 부분으로 구성된다. 초기화 작업 및 자동 전착 작업은 사용자의 버튼 입력을 이벤트로 받을 때마다 수행하게 된다.

초기화 부분에서는 전착 로봇과 명령을 주고받기 위해 RS232 시리얼 통신을 초기화한다. 이와 동시에 USB 통신을 통해 카메라와 연결하고 카메라에 의해 획득된 이미지로부터 로봇과 비커의 실제 거리를 계산할

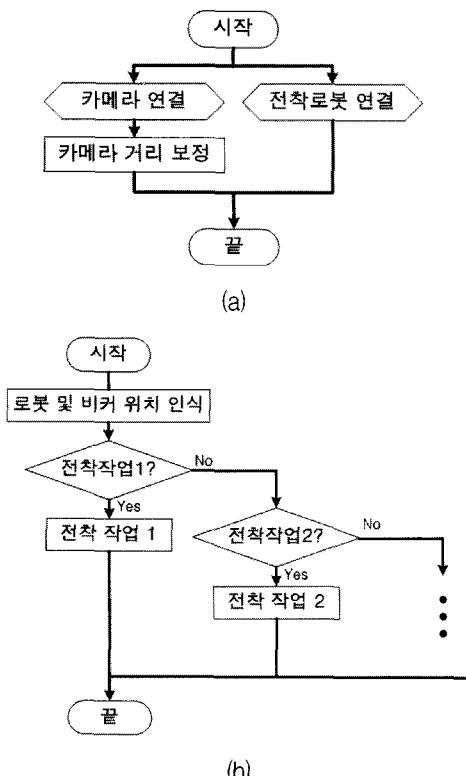


그림 2. 전착 로봇 자동 제어 알고리즘 흐름도 (a) 초기화 작업 (b) 자동 전착 작업

Fig. 2. Flow chart of an automatic control algorithm for a electrophoretic deposition (EPD) robot (a) Initialization (b) Automatic electrophoretic deposition.

수 있도록 보정을 수행한다. 다음으로 자동 전착 작업 수행 시 먼저 로봇 및 비커의 위치를 계산하고 비커의 배열 순서를 인식하여 수행해야 할 전착 작업을 판단한 후 자동으로 전착 작업을 수행한다.

III. 모노 비전 시스템

1. 컬러 마커 인식

로봇과 비커에는 사각형의 컬러 마커가 부착된다. 본 논문에서 이용된 컬러마커는 분홍 (Pink), 빨강 (Red), 노랑 (Yellow), 파랑 (Blue)의 4가지 색을 갖는다. 조명에 강인한 컬러 마커 인식을 위해 아래와 같이 정의된 정규색 (Normalized Color)^[3]을 이용한다.

$$(r,g,b) = \left(\frac{R}{S}, \frac{G}{S}, \frac{B}{S} \right) \quad (1)$$

여기서 (R,G,B) 는 각각 빨강, 초록, 파랑을 나타내며 [0,255] 범위를 갖는다. S 는 $(R+G+B)$ 이다. 본 논문에서 이용한 각 컬러 마커 인식을 위한 정규색 조건은 표 3과 같다.

표 3의 조건을 그림 3 (a)에 보이는 카메라 이미지에 적용하면 그림 3 (b)와 같이 컬러 마커와 각 마커의 중심점을 획득할 수 있다. 이 때 이미지 상의 각 마커의 중심점 (x_c, y_c) 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}, \frac{\sum_{n=1}^N y_n}{N} \right) \quad (2)$$

여기서 N 은 각 컬러 마커로 인식된 픽셀의 총수이며, (x_n, y_n) 은 각 픽셀의 좌표를 의미한다. 하지만 그림 3 (b)에서 마커 이외의 부분이 마커의 일부분인 것처럼 잘 못 인식된 것을 확인 할 수 있다. 비록 마커에 비해 상대적으로 픽셀 수가 작아 마커의 중심점이 마커 내부

표 3. 컬러 마커 인식을 위한 정규색 조건
Table 3. Condition of the normalized colors for recognizing color markers.

컬러 마커 색	조건
분홍	$r > 0.34$ and $g < 0.23$ and $b > 0.30$
노랑	$r > 0.34$ and $g > 0.34$ and $b < 0.21$
빨강	$r > 0.6$
파랑	$r < 0.2$ and $g < 0.28$ and $b > 0.5$

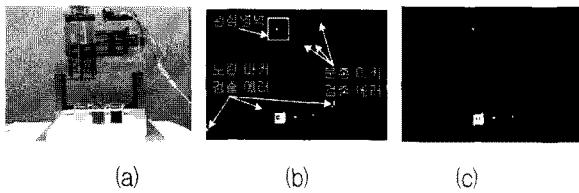


그림 3. 컬러 마커 인식 (a) 원래 이미지 (b) 이진화에 의한 마커 인식 이미지 (c) 관심 영역 기반 검출 에러 제거 이미지

Fig. 3. Color mark recognition (a) Original image
(b) Binary thresholding image
(c) ROI based error rejection image.

에 위치하고 있지만 위치 오차가 발생한 것은 분명한 사실이다. 이러한 위치 오차는 이 후 전착 로봇의 자동 제어 시 정확도를 감소시키는 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 마커의 검출 에러를 줄이기 위해 그림 3 (b)와 같이 초기 인식된 마커의 중심점을 중심으로 40x40 크기의 관심영역 (ROI: Region of Interest)을 설정하여 관심영역 내의 값에 대해서만 마커의 픽셀로 인식하도록 하였다. 모든 마커에 대해 같은 방법을 적용한 결과 그림 3 (c)와 같이 마커의 검출 에러가 현저히 줄어 마커의 중심을 매우 정확히 구할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

2. 로봇 및 비커 위치 인식

모노 비전에 의해 획득된 마커의 중심점들은 이미지 평면상에서 픽셀 (Pixel) 단위로 정의된다. 그러나 자동 전착 작업을 위해 로봇을 제어하기 위해서는 실제 공간 상에서 정의된 거리 값을 이용해야 한다^[5]. 여기서는 이미지 평면에서 정의된 위치 값을 이용해 실제 거리 값을 계산하는 방법을 제안한다.

먼저 로봇이 초기 위치에 있을 때 그림 4와 같이 모노 비전에 대한 거리 보정을 수행한다. 로봇이 초기 위치에 있을 때 로봇 마커 P_1 과 비커 마커 P_2 사이의 높이 차 d_{ref} 는 주어졌다고 가정한다. 이 때 모든 비커의 높이는 같으므로 어떤 비커에 대해서도 d_{ref} 는 일정하게 결정된다. $\Delta I_1 C_C I_C$ 와 $\Delta P_1 C_C P_C$ 의 닮음을 이용하여 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{y'_1}{f} = \frac{y_1}{d} \quad (3)$$

이 때 (x'_1, y'_1) 은 P_1 이 이미지 평면상에 맺힌 점을 의미하고 d 는 카메라 중심축인 z 축을 기준으로 한 카메라와 마커 사이의 거리를 의미한다. f 는 카메라의 초점거리를

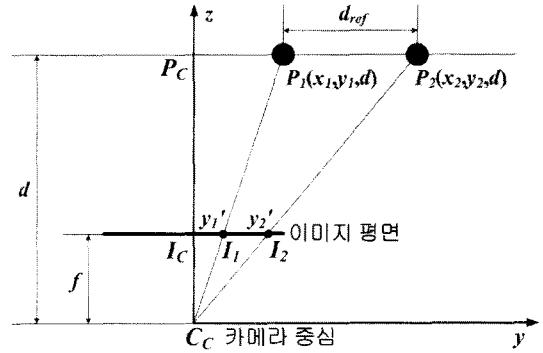


그림 4. 카메라 보정을 위한 기하학

Fig. 4. Geometry of camera calibration.

의미하며 Matlab 기반의 카메라 보정 툴박스^[4]를 이용하여 획득하였다. 같은 방법으로 $\Delta I_2 C_C I_C$ 와 $\Delta P_2 C_C P_C$ 의 닮음을 이용하여 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{y'_2}{f} = \frac{y_2}{d} \quad (4)$$

이 때 (x'_2, y'_2) 은 P_2 가 이미지 평면상에 맺힌 점을 의미한다. 같은 방법을 이미지 평면상의 임의의 점 (x', y') 에 적용하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{y'}{f} = \frac{y}{d} \quad (5)$$

식 (5)를 실제 값 y 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$y = \frac{y'}{f} d \quad (6)$$

식 (4)는 가정 $d_{ref}=y_2-y_1$ 과 식 (3)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{y'_2}{f} = \frac{y_1 + d_{ref}}{d} = \frac{y'_1}{f} + \frac{d_{ref}}{d} \quad (7)$$

식 (7)을 d 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$d = \frac{fd_{ref}}{(y'_2 - y'_1)} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (6)에 대입하면 임의의 점에 대한 y' 값으로부터 실제 값 y 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y = \frac{y'}{f} \frac{fd_{ref}}{(y'_2 - y'_1)} = \frac{y'd_{ref}}{(y'_2 - y'_1)} \quad (9)$$

여기서 d_{ref} , y'_1 , y'_2 은 로봇이 초기 위치에 있을 때 획득된 값으로 상수 값이다. 비슷한 방법으로 임의의 점

에 대한 x' 으로부터 실제 값 x 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = \frac{d_{ref}}{(y_2' - y_1')} x' \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)으로부터 이미지 평면상의 임의의 점 (x', y') 의 실제 좌표 값 (x, y) 를 획득할 수 있다.

IV. 전착 작업 알고리즘

1. 전착 작업 판단

전착 작업은 전착 물질의 종류, 인가 전류의 세기, 전류 인가 시간, 드로잉 속도 등을 변수로 하여 다양하게 수행될 수 있다. 본 논문에서는 전착 작업을 위해 사용되는 3개의 비커에 부착된 마커의 색 및 배열 순서를 인식하여 다양한 전착 작업을 판단한다. 전착 작업 판단을 위해 사용되는 마커의 종류는 분홍, 빨강, 노랑, 파랑 4개이며, 이 중 3개가 표 4와 같이 비커에 부착된다. 따라서 4개의 마커 중 3개를 선택해 판단할 수 있는 작업의 종류는 $4!$, 즉 24개가 된다. 미리 정의된 24가지 전착 작업 변수를 LUT (Look Up Table) 형태로 저장한 후 카메라에 의해 인식된 마커 조합에 해당하는 전착 변수를 LUT에서 읽어 그에 따라 전착 작업을 수행한다. 이 때 컬러 마커의 종류를 늘리면 더 많은 종류의 전착 작업을 판단할 수 있다.

표 4. 전착 작업 판단 예

Table 4. Decision Examples of Electrophoretic Deposition Tasks.

실제 이미지	마커 인식 이미지	마커 조합 인식 결과	전착 작업
		노랑, 분홍, 빨강	전착작업1
		노랑, 빨강, 분홍	전착작업2
		빨강, 노랑, 분홍	전착작업3
		빨강, 분홍, 노랑	전착작업4
...

2. 자동 전착 작업

비커의 마커 조합에 의해 결정된 작업 변수에 따라

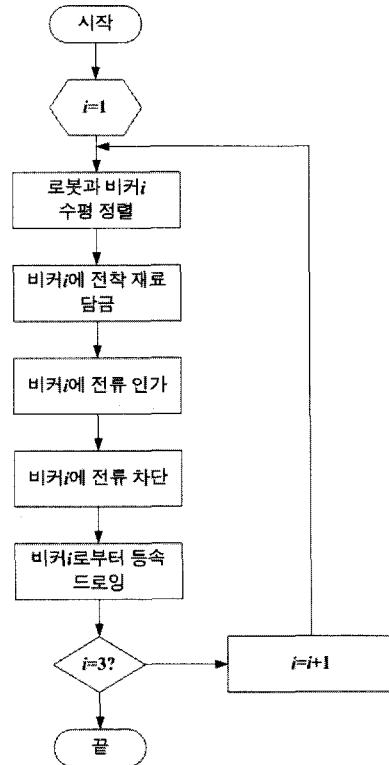


그림 5. 동 전착 작업 알고리즘 흐름도

Fig. 5. Flow chart of an algorithm for an automatic electrophoretic deposition task.

그림 5와 같이 전착 작업을 수행한다. 3개의 비커에 대해 같은 작업을 반복적으로 수행하지만 인가 전류의 세기, 전류 인가 시간, 등속 드로잉 속도와 같은 작업 변수는 각각 독립적으로 설정된다. 이 때 로봇과 비커의 수평 정렬, 전착 재료 담금, 등속 드로잉 등의 작업을 위해 RS232 통신을 이용해 직교 로봇에 이동 명령을 전달하고 각 명령이 성공적으로 수행되었음을 알리는 WorkDone 명령이 리턴 될 때까지 기다리게 된다. 이 경우 WorkDone 명령이 리턴 될 때까지 기다리는 동작은 CPU를 독점하게 되어 윈도우 XP의 멀티 테스킹 기능을 저해하게 된다. 따라서 본 시스템에서는 전착 작업 알고리즘을 쓰레드 (Thread)를 이용해 구현하여 이 문제를 해결하였다. 또한, 비커에 전류를 일정시간 가하는 작업도 작업이 끝날 때까지 CPU를 독점하지 않고 수행 가능하다. 이 때 자동 전착 작업 제어를 위한 카메라의 컬러 마커 위치 인식은 로봇 이동 명령 전에 매번 수행함으로 측정 위치의 누적 오차를 제거하게 된다. 카메라에 의한 위치 인식 시간은 100ms 이하이기 때문에 이미지 처리 시간이 저속 동작 위주의 전착 작업의 성능에는 큰 영향을 주지 않는다.

V. 실험 결과

제안된 자동 전착 시스템에 의한 실험을 그림 6에 보이는 것처럼 (a)에서 (g) 단계에 걸쳐 수행하였으며, 실제 영상 이미지, 컬러 마커와 마커의 중심점 인식

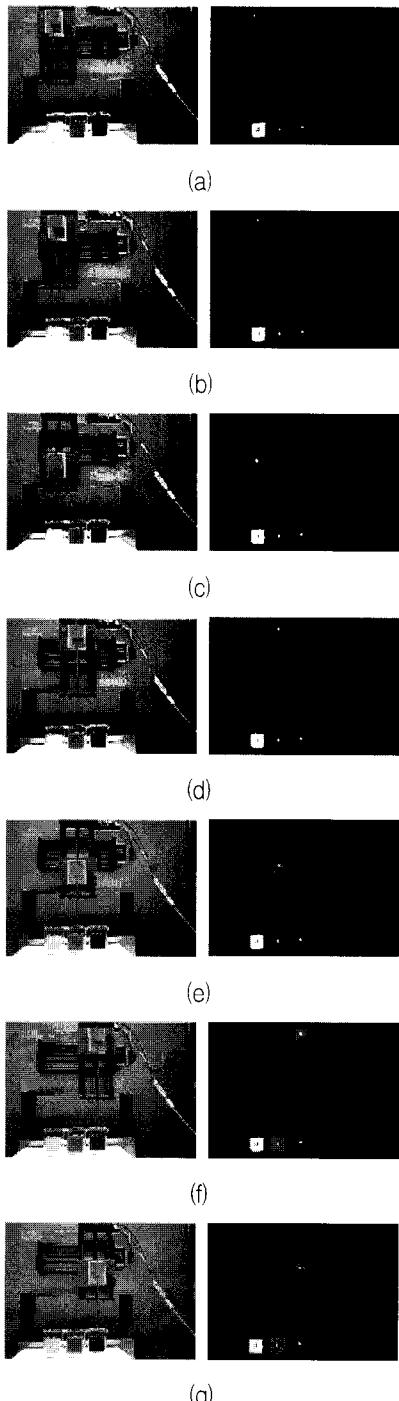


그림 6. 자동 전착 실험 (실제 카메라 이미지와 컬러 마커 인식 이미지)

Fig. 6. Experiments for automatic electrophoretic deposition (Camera Original Images and Color Marker Recognition Images).

이미지가 함께 표시되어 있다. 컬러 모노 카메라에 의한 3개의 비커에 부착된 마커를 노랑, 분홍, 빨강 순서로 인식하여 이 조합에 해당하는 작업 변수를 LUT에서 찾아 그에 따른 전착 작업을 수행하게 된다.

그림 6의 각 단계별 동작은 표 5와 같다. (a) 단계에서는 컬러 모노 카메라의 초기보정 작업을 수행한 후 로봇의 초기위치를 기준점 (0,0)으로 설정하고 이를 기준으로 인식된 비커 마커의 위치를 획득한다. (b) 단계에서는 로봇과 비커1의 수평 위치 정렬을 위해 로봇을 우측으로 1.0cm 이동 시킨다. 이 때 로봇과 비커의 측정 위치 오차가 0.1cm에서 0.2cm 정도 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 위치 오차가 허용 가능할 정도로 작고 로봇과 비커 위치가 매 순간 카메라에 의해 측정

표 5. 전착 작업 실험 결과

Table 5. Experimental Results for Electrophoretic Deposition.

단계	설명	결과 값 (cm)
(a)	카메라 초기 보정	로봇 위치: (0.0, 0.0) 비커1 위치: (1.0, 32.0) 비커2 위치: (7.0, 32.0) 비커3 위치: (13.0, 31.5)
(b)	비커1과 수평 정렬	로봇 위치: (1.0, 0.2) 비커1 위치: (1.0, 32.1) 비커2 위치: (7.0, 32.1) 비커3 위치: (13.0, 31.6)
(c)	비커1에 전착 재료 담그기	로봇 위치: (1.0, 10.7) 비커1 위치: (1.0, 32.1) 비커2 위치: (7.0, 32.1) 비커3 위치: (13.0, 31.6)
(d)	비커1에서 꺼내기, 비커2와 수평 정렬	로봇 위치: (7.0, 0.5) 비커1 위치: (1.0, 32.1) 비커2 위치: (7.0, 32.1) 비커3 위치: (13.0, 31.7)
(e)	비커2에 전착 재료 담그기	로봇 위치: (7.1, 10.6) 비커1 위치: (1.0, 32.1) 비커2 위치: (7.0, 32.1) 비커3 위치: (13.0, 31.7)
(f)	비커2에서 꺼내기, 비커3과 수평 정렬	로봇 위치: (12.9, 0.5) 비커1 위치: (1.0, 32.1) 비커2 위치: (7.0, 32.1) 비커3 위치: (13.0, 31.6)
(g)	비커3에 전착 재료 담그기	로봇 위치: (13.1, 10.1) 비커1 위치: (1.0, 32.1) 비커2 위치: (7.0, 32.1) 비커3 위치: (13.0, 31.7)

되므로 누적되지 않기 때문에 전착 작업 수행에는 전혀 문제가 되지 않는다. 다음으로 (c)단계에서는 로봇 End-effector에 부착된 전착 대상 재료를 비커1의 전착 물질에 담그기 위해 로봇을 수직 아래로 이동시킨다. 이 때 로봇의 수직 위치 10.7cm에서 대상 재료가 전착 물질에 완전히 잡기게 된다. 그 후 일정시간 동안 전류를 인가한 후 단계 (d)에서 전착 재료를 꺼내기 위해 로봇을 수직 위로 이동 시킨다. 이 때 로봇의 수직 이동 속도는 10mm/s로 등속 이동하게 된다. 그 후 (e)단계부터 (g)단계까지 비커2와 비커3에 대해 같은 방법으로 전착 작업을 수행하게 된다. 이와 같이 제안된 자동 전착 로봇 시스템을 이용하여 여러 종류의 작업 변수를 갖는 전착 작업 실험을 수행할 수 있어 다양한 응용분야에 필요한 최적 작업 변수를 찾는데 활용 가능할 것으로 기대된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 2자유도를 갖는 직교 로봇과 컬러 모노 카메라를 이용한 자동 전착 로봇 시스템을 제안하였다. 직교 로봇은 저속 구동 가능한 2개의 선형 구동기로 구성되어 전착 작업의 완성도를 높일 수 있었다. 또한 컬러 모노 카메라 기반 제어를 통해 위치 오차의 누적 없이 전착 작업을 완료 할 수 있었다. 그 뿐만 아니라 비커에 부착된 컬러 마커의 조합을 인식함으로써 다양한 작업 변수를 갖는 전착 작업을 자동으로 수행 할 수 있었다. 제안된 자동 전착 로봇 시스템은 최첨단 응용분야에서 사용되는 합성 물질 제조를 위한 작업 변수 최적화 작업에 활용되어 재료 공정 분야에 큰 진보를 가져올 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Omer O. Van der Biest and Luc J. Vandeperre, "Electrophoretic Deposition of Materials," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, Vol.29, pp.327-352, 1999.
- [2] A. Boccaccini, "Editorial: Electrophoretic deposition: fundamentals and applications in materials science," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp.769-770, 2004.
- [3] G. Healey, "Segmenting Images Using Normalized Color," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.22, No.1, Jan./Feb. 1992.

- [4] http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc
- [5] B. Jain, R. Kasturi, and B. Schunck, *Machine Vision*, McGraw-Hill, New York, 1995.

저 자 소 개



박재병(정회원)-교신저자
2000년 성균관대학교 전기·전자 및 컴퓨터공학부 학사 졸업.
2002년 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 석사 졸업.
2006년 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 박사 졸업.
2006년~2007년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 BK21 박사후연구원
2007년~현재 전북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전임강사.
<주관심분야 : 원격 로봇 제어, 이동 로봇 제어, 다중 로봇 제어, 로봇 비전>