

3D 비접촉 인식을 이용한 냉연코일 테이프부착 로봇 개발

Development of Smart Tape Attachment Robot in the Cold Rolled Coil with 3D Non-Contact Recognition

신 찬 배*, 김 진 대
(Chan-Bai Shin and Jin-Dae Kim)

Abstract: Recently taping robot with smart recognition function have been studied in the coil manufacturing field. Due to the difficulty of 3D surface processing from the complicated working environment, it is not easy to accomplish smart tape attachment motion with non-contact sensor. To solve these problems the applicable surface recognition algorithm and a flexible sensing device has been recommended. In this research, the fusion method between 1D displacement and 3D laser scanner is applied for robust tape attachment about cold rolled coil. With these sensors we develop a two-step exploration and the smart algorithm for the awareness of non-aligned coil's information. In the proposed robot system for tape attachment, the problem is reduced to coil's radius searching with laser displacement sensor at first, and then position and orientation detection with 3D laser scanner. To get the movement at the robot's base frame, the hand-eye compensation between robot's end effector and sensing device should be also carried out respectively. In this paper, we examine the auto-coordinate transformation method in the calibration step for the real environment usage. From the experimental results, it was shown that the taping motion of robot had a robust under the non-aligned cold rolled coil.

Keywords: taping robot, non-aligned coil, fusion between 1D displacement and 3D laser scanner, auto-coordinate transformation, smart recognition

I. 서론

제철소 냉연코일 제품으로 생산되고 있는 아연도금강판, 전기도금강판 최종 제품의 포장전 공정에서 코일강판의 선단부를 일차적으로 고정하기 위한 테이프 부착 작업은 각 냉연강판코일생산 공정간의 이송을 위한 간이 매듭장치로서 작업자의 안전에 있어 매우 중요한 요소이다. 테이프 부착 작업 환경 자체가 열악하고 위험하며 성력화의 필요성이 증대되어 그 동안 전용기 방식의 자동화 설비를 도입 사용하고 있다[1-3].

하지만, 전용기 방식의 냉연 강판코일 테이프 부착머신은 스트립 끝단부의 위치 변화시 대응이 어렵고 테이프 부착을 위한 곡면 반경도 코일의 종류에 따라 변화하기 때문에 부착불량 등의 문제가 많이 발생하였다. 이에 대한 개선 방안으로 국내철강업체에서는 로봇을 이용한 적응형 테이프부착시스템에 대하여 관심이 집중되고 있다.

비 접촉식 변위측정은 각종 작업물의 위치파악, 로봇과 물체의 상대위치 파악 및 추적등 그 수요가 급증하고 있으며 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다[4-6].

본 연구에서는 비접촉식 변위센서와 3D레이저 스캔센서를 이용하여 냉연코일 제품의 지름 사이즈(size)에 관계없이, 코일강판 부착위치의 변화에 자동으로 인식하고 코일스트립 끝단부에서 부착코저하는 테이프의 접착력을 최대한 유지하는 자세로 코일 표면에 안정되게 동작할 수 있는 코

일강판 테이프 자동부착 로봇을 개발하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 비접촉센서기반 테이프부착로봇구성

그림 1은 비접촉식 시각 변위센서와 레이저스캔 센서를 끝단에 부착한 냉연코일 테이프부착시스템의 구성도이다. 그림에서와 같이 각각의 센서는 핸드-아이(hand-eye)구조로 장착되어있다. 로봇테이프부착시스템에서 작업 대상물인 냉연코일의 표면 인식과 부착동작에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 로봇 베이스 좌표계상에서 재구성된 물체의 위치 및 방향 데이터의 정밀도이다. 로봇이 비 정렬된 냉연코일 선단부에 테이프를 정확히 부착하기 위한 모션은 로

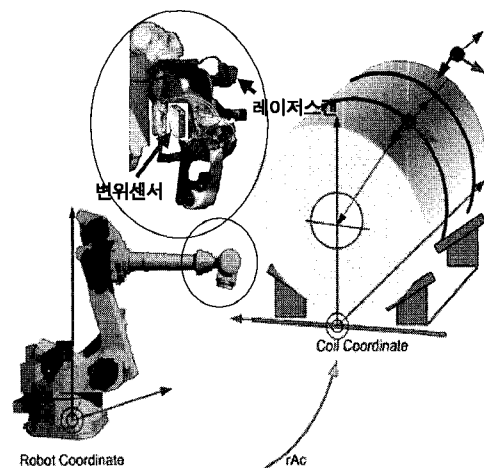


그림 1. 스마트-테이프 부착 로봇 구성.

Fig. 1. Robot smart-tape attachment configuration.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 6. 30., 수정: 2009. 8. 19., 채택확정: 2009. 10. 16.

신찬배: 울산과학기술대학교 디지털기계학부(cbshin@uc.ac.kr)

김진대: 대구기계부품연구원 지능로봇연구팀(p9950086@hanmail.net)

※ 본 논문은 울산과학기술대학교 2008 교내연구비지원으로 연구하였음.

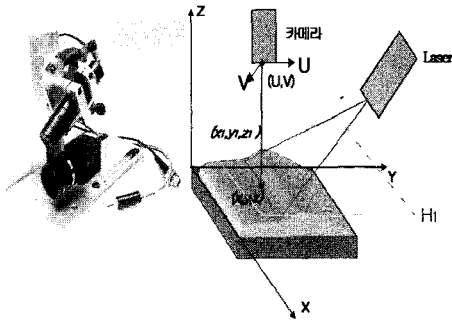


그림 2. 레이저 광학 센서의 구성.
Fig. 2. Configuration of laser optical sensor.

봇기준좌표계를 중심으로 이루어지므로 이를 중심으로 할 수 있는 모든 처리 과정과 로봇동작이 결정되어야 한다. 이를 위한 센서보정과 자동좌표변환법을 해결하여야 한다.

2. 레이저 변위와 스캔 데이터 획득

본 연구의 냉연코일 자동 테이프 부착을 위해 우선적으로 코일의 지름을 인식하는 레이저 변위센서와 스캔을 이용한 테이프 부착위치의 정확한 인식과정이 필수적이다. 레이저 비접촉식 변위측정과 스캔 측정의 이론적 모델은 동일한 것으로 스폿(spot)과 빔(beam)을 사용하는 차이만 가질 뿐 같은 광학원리 적용이 가능하다.

그림 2와 같이 레이저 빔(beam)과 CCD 카메라 조합하여 공간상에 형성되는 레이저 면과 카메라 광축사이의 기하관계로부터 냉연코일의 지름 및 3차원 위치 정보를 얻을 수 있게 된다.

그림 2에서 카르테시안 좌표계(x,y,z)와 영상 좌표계(u,v) 사이의 변환을 나타내기 위해서 동차좌표계 스케일 인자 h와 변환 행렬요소(c₁₁~c₄₃, a₁~a₄)로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$[x \ y \ z \ h] \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & a_1 & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & a_2 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & a_3 & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & a_4 & c_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 (U,V)는 영상면에 맺히는 픽셀 값이고, (u,v)는 U=u/h, V=v/h로 표현되는 동차좌표를 나타낸다. 식 (1)을 정리하여 변환행렬요소의 역행렬요소(m₁₁~m₄₃, b₁~b₄)로 나타내면 보정식은 (2)로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 (x,y,z)는 카르테시안 좌표값이고, 영상면에 맺히는 픽셀 값이고, (x',y',z')는 x=x'/h, y=y'/h, z=z'/h로 표현되는 동차좌표를 나타낸다. 이를 전개하여 정리하면,

$$\begin{aligned} m_{11}U + m_{21}V + m_{31} - x(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) &= 0 \\ m_{12}U + m_{22}V + m_{32} - y(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) &= 0 \\ m_{13}U + m_{23}V + m_{33} - z(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

(3)에서 m은 미지수로 12개 되고 식은 3개이므로 적어도 4점 이상의 정확한 공간상의 3차원 좌표 값과 그에 상응하는 영상 좌표 값을 알아야 3차원 보정행렬을 구할 수 있다. 편의상 m₃₄=1로 두고 n개의 데이터에 대하여 행렬로 표현하면 아래 (4)로 유도된다.

$$LM = X \quad (4)$$

여기서,

$$L = \begin{bmatrix} U_1 & V_1 & 1 & 0,0,0,0,0,0 & -U_1x_1 - V_1y_1 \\ 0,0,0 & U_1 & V_1 & 1 & 0,0,0 & -U_1y_1 - V_1y_1 \\ 0,0,0,0,0,0 & U_1 & V_1 & 1 & -U_1z_1 - V_1z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_n & V_n & 1 & 0,0,0,0,0,0 & -U_nx_n - V_ny_n \\ 0,0,0 & U_n & V_n & 1 & 0,0,0 & -U_ny_n - V_ny_n \\ 0,0,0,0,0,0 & U_n & V_n & 1 & -U_nz_n - V_nz_n \end{bmatrix}$$

$$M = [m_{11} \ m_{21} \ m_{31} \ m_{12} \ m_{22} \ \dots \ m_{14} \ m_{24}]$$

$$X = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ y_2 \ z_2 \ \dots \ x_n \ y_n \ z_n]$$

따라서 3차원 보정 행렬 M은 (5)으로 표현 할 수 있다.

$$M = L^T [LL^T]^{-1} X \quad (5)$$

변환 행렬이 결정되면 영상 좌표계에 나타나는 임의의 한점 좌표 (U,V)를 알 때 그에 대응하는 3차원 공간상의 한점에 대한 (x,y,z)를 다음 (6)으로 결정할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{(m_{11}U + m_{21}V + m_{31})}{(m_{14}U + m_{24}V + 1)} \\ y &= \frac{(m_{12}U + m_{22}V + m_{32})}{(m_{14}U + m_{24}V + 1)} \\ z &= \frac{(m_{13}U + m_{23}V + m_{33})}{(m_{14}U + m_{24}V + 1)} \end{aligned} \quad (6)$$

3. 자동 좌표 변환법

크기와 위치가 계속적으로 변화하는 다품종 냉연코일 테이프 부착작업의 경우 대상물의 3차원 측정위치는 계속적

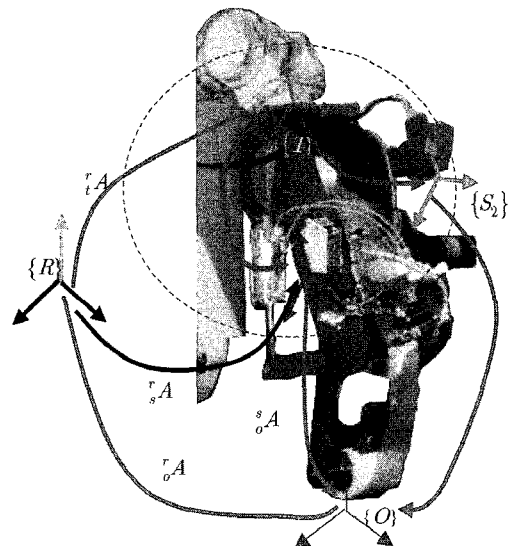


그림 3. 좌표계 변환 도표.
Fig. 3. Coordinate transform graph.

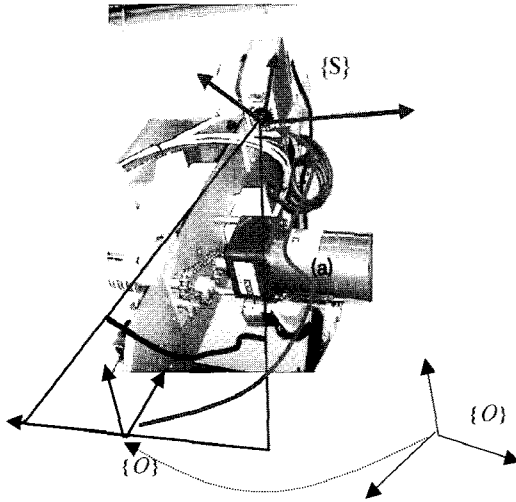


그림 4. 물체 좌표계의 레이저 면으로 이동.
Fig. 4. Object coordinate movement to the laser plane.

으로 바뀌는 환경이다. 이와 같은 측정 위치 및 방향이 계속적으로 변하는 시각시스템에서 정확한 3차원 물체의 위치와 방향을 로봇 베이스 좌표계를 기준으로 쉽게 재구성하기 위해서는 로봇 자세 변화에 대한 자동 좌표 변환이 해결되어야 한다.

그림 3은 실제 로봇에 장착된 레이저 변위 센서를 나타내는데, {R}은 로봇 베이스 좌표계, {T} 로봇 끝단 좌표계, {S}는 레이저센서 좌표계, {O}는 검사 대상물이 놓이는 물체 좌표계를 각각 표시한다. 이에 대한 3차원 측정 로봇 시스템의 폐로 방정식은 (7)과 같다.

$${}^r_0A = {}^r_sA \cdot {}^s_0A = {}^r_lA \cdot {}^l_sA \cdot {}^s_0A \quad (7)$$

여기서 r_lA 는 로봇 순기구학, r_0A 는 로봇베이스에서 물체 좌표계간의 변환을 l_sA 는 핸드-아이 파라미터를 나타내는데 특히, s_0A 는 레이저센서좌표계에서 물체의 좌표계로의 변환을 표시하며 3차원 시각 시스템의 내부 및 외부 파라미터로 구성되어 있다. 이는 측정 로봇의 자세 변화에 대하여 계속적으로 변화하는 변수가 되므로 로봇 베이스좌표계의 재구성을 복잡하게 하는 인자로 작용한다. 비접촉식 레이저 시각센서의 기본측정원리를 고려해 보면 측정되는 대상이 되는 물체의 윤곽은 항상 레이저 스폿 라인선상이나 레이저 빔 면상에만 존재함을 알 수 있는데, 그림 4와 같이 물체 좌표계의 중심점을 레이저면상에 설정할 수 있다.

하지만 레이저 센서의 경우 레이저빔이 경사(slope)를 가지고 투사되므로 실제적 물체 좌표계를 레이저 경사면상에 구속하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 그림 4의 {a}와 같이 미리 센서 보정단계에서 물체 좌표계{O}를 센서 좌표계{S}와 일치되게 설정함으로써 자동 좌표 변환을 해결하였다. 이렇게 하면 3차원 측정 자세나 위치에 관계없이 항상 정밀한 측정을 수행할 수 있게 된다.

III. 지능 테이프부착 알고리즘

1. 냉연코일 위치 및 크기인식

코일 사이즈 종류가 다양한 냉연코일의 라벨부착 작업을

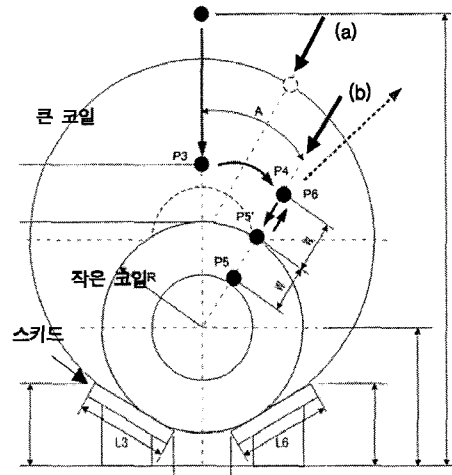


그림 5. 코일 크기 변화에 따른 로봇 작업통로 변경.
Fig. 5. Robot working pass change in Coil Size.

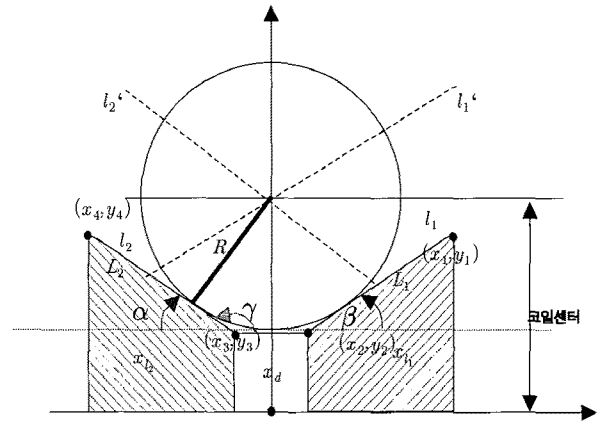


그림 6. 주어진 R에 따른 코일중심 추정.
Fig. 6. Estimation of coil center under given R.

원활히 수행하기 위해서는 3차원 공간상의 냉연코일의 크기와 위치를 우선적으로 추정하는 작업이 필요하다.

그림 5는 본 연구의 작업 대상물인 냉연코일의 크기 따른 작업 위치의 변화량을 표현한 것으로 큰 사이즈의 (a)의 경우 부착 작업 시작점의 위치와 작은 반경의 코일에 대한 부착 시작점 (b)의 위치가 많이 차이가 나고 또한 로봇 작업경로(P3,P4,P5,P6)에도 상당한 변화가 발생하고 있으며 부착 툴의 방향벡터도 많은 변화가 일어남을 확인 할 수 있다.

본 연구에서는 그림 6과 같이 코일 반경R과 코일이 놓여지는 스키드의 형상 데이터에 대한 입력이 가능할 때를 고려하여 코일 센터값 추정과 로봇 부착동작에 대한 연구를 우선적으로 수행하였다.

그림 6과 같은 스키드 형상데이터 x_d 가 주어지면 각 모서리 점의 좌표는 (8)로 결정된다.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 + x_l = x_2 + \sqrt{L_1^2 - (y_1 - y_2)^2} \\ x_2 &= x_d/2, \quad x_3 = -x_d/2 \\ x_4 &= x_3 - x_l = x_3 - \sqrt{L_2^2 - (y_4 - y_3)^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 직선 l_1 과 l_2 는

$$\begin{aligned} l_1, \quad y &= \tan\beta x - \tan\beta x_2 + y_2 \\ l_2, \quad y &= \tan\gamma x - \tan\gamma x_3 + y_3 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\beta = \text{atan2}(y_1 - y_2, x_1 - x_2)$
 $\gamma = \text{atan2}(y_4 - y_3, x_4 - x_3)$,
 $\alpha = 180 - \gamma$

그림 6에서 코일 중심은 직선 l_1' 과 l_2' 의 교점으로부터 구할 수 있는데 직선 l_1' 은 l_1 을 X축 방향으로 $-R\sin(\beta)$ 만큼, Y축 방향으로 $R\cos(\beta)$ 만큼 평행이동 시킨 것이고 직선 l_2' 은 l_2 을 X축 방향으로 $R\sin(\alpha)$ 만큼, Y축 방향으로 $R\cos(\alpha)$ 만큼 평행이동 시킨 것으로 정리하면 코일 중심값은 (10)으로 추정할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan\beta - 1 \\ \tan\gamma - 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -(\tan\beta R\sin\beta - \tan\beta x_2 + y_2 + R\cos\beta) \\ -(-\tan\gamma R\sin\alpha - \tan\gamma x_3 + y_3 + R\cos\alpha) \end{pmatrix} \quad (10)$$

2. 코일반경과 코일중심 인식

여러 종류의 코일 지름이 계속적으로 가변되는 스키드형상을 가지는 테이프 부착작업에서 상위제어시스템으로부터 코일반경 정보를 얻지 못하는 경우에는 코일 중심과 반경을 측정에 의존하여 구해야만 한다[7].

본 연구의 비접촉식 레이저 변위센서를 사용하여 중심과 반경을 알아내야 하고 이를 바탕으로 로봇의 3차원 레이저 스캔센서가 어떠한 자세로 코일 표면에 접근하느냐가 연속적으로 결정되어야 한다.

그림 7과 같이 레이저 변위 센서로 코일 표면부의 윤곽을 나타내는 2차원 상의 좌표 $(x_1, z_1), \dots, (x_i, z_i), \dots, (x_N, z_N)$ 이 주어지고 중심의 좌표 (x_c, z_c) 와 반경 R 을 가진 공간 상의 원을 정의하면 일정한 면적 πR^2 과 (x_c, z_c) 에 중심을 둔 원의 면적 사이의 차이를 추정 오차로 하여 좌표 (x_c, y_c) 에 중심을 둔 원의 반경 R 은 (11)로 표현된다.

$$R_i = (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 \quad (11)$$

오차의 제곱을 합하고 최소화 목적함수로 정리하면,

$$\begin{aligned} J &= E(R, x_c, y_c) / \pi^2 \\ &= \sum_{i=1}^N [R^2 - \{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2\}]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

함수 $E(R, x_c, y_c)$ 는 R, x_c, y_c 에 대하여 최소화 되어야 함

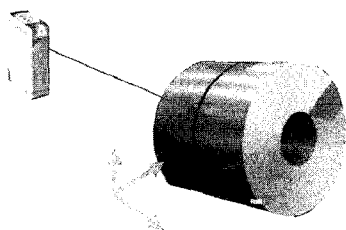


그림 7. 코일 크기의 레이저 측정.
 Fig. 7. Laser sensing for coil size.

으로 (12)식을 R, x_c, y_c 에 대하여 각각 미분하고 최종적으로 정리하면,

$$\begin{aligned} NR^2 &= \sum x^2 - 2\sum xx_c + Nx_c^2 + \sum y^2 - 2\sum yy_c + Ny_c^2 \\ R^2 \sum x &= \sum x^3 - 2\sum x^2 x_c + \sum x x_c^2 + \sum xy^2 - 2\sum xy y_c + \sum xy_c^2 \\ R^2 \sum y &= \sum x^2 y - 2\sum xy x_c + \sum y x_c^2 + \sum y^3 - 2\sum y^2 y_c + \sum yy_c^2 \end{aligned} \quad (13)$$

(13)로부터 코일의 센터와 반경을 구하면, 중심좌표는 (14)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_c &= (c_1 b_2 - c_2 b_1) / (a_1 b_2 - a_2 b_1) \\ R^2 &= (\sum x^2 - 2\sum xx_c + Nx_c^2 + \sum y^2 - 2\sum yy_c + Ny_c^2) / N \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $a_1 = 2((\sum x)^2 - N\sum x^2)$,
 $b_1 = 2(\sum x \sum y - N\sum xy) = a_2$,
 $b_2 = 2((\sum y)^2 - N\sum y^2)$,
 $c_1 = \sum x^2 \sum x - N\sum x^3 + \sum x \sum y^2 - N\sum xy^2$,
 $c_2 = \sum x^2 \sum y - N\sum x^2 y + \sum y \sum y^2 - N\sum y^3$.

3. 코일곡면에서의 부착위치 인식

그림 8은 본 연구에서 테이프가 부착되어야 하는 기준 위치를 나타내는 것으로 그림에서 코일 스트립의 끝단부를 중심으로 아래위로 200mm떨어진 점을 시작과 끝점으로 하였다.

따라서, 모션결정을 위해서는 스캔센서로 코일스트립의 끝단부 인식과정이 필수적이다.

본 연구의 레이저 스캔 센서의 경우도 앞의 레이저변위 센서와 마찬가지로 자동좌표변환을 적용하여 설계하였고 핸드-아이구조로 장착하였다. 그림 8에서 보듯이 코일스트립 끝단부는 레이저 스캔라인으로 측정하였을 경우 측정 데이터에서 약간의 들림 현상으로 인하여 데이터 연속성이 끊어지는 부분이 존재한다. 본 연구에서는 이를 이용하여 부착의 기준 위치를 정하는 방법을 고려하였다. 3차원시각 데이터 연속성이 끊어지는 알고리즘으로는 (19)와 같이 xy 면상의 데이터 순서쌍에서 거리의 임계치를 이용하는 방법을 사용하였다.

$$Dist = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (15)$$

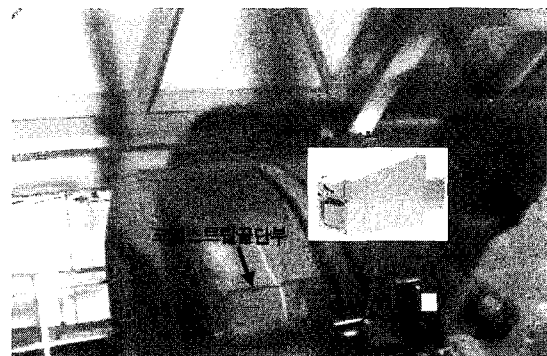


그림 8. 코일 스트립 끝단 탐지를 위한 레이저 측정.
 Fig. 8. Laser sensing for coil strip end detection.

4. 테이프부착 툴의 로봇경로 생성

그림 9는 본 연구의 필라멘트 테이프를 코일에 부착하기 위한 툴의 구조를 나타낸 것으로 흡착식 테이프 가이드에 공압으로 공급된 테이프를 흡착하여 원하는 작업경로에서 붙이는 구조로 제작하였다.

앞의 스트립 끝단부 인식 과정 후 로봇이 끝단부에 수직(normal)하게 접근하는 방법이 우선적으로 필요하다. 즉, 그림 10과 같이 코일 크기에 따라 로봇의 테이프 부착 툴을 일정방향으로 접근시켜야 한다.

로봇 테이핑 툴의 접근경로는 회전행렬을 이용한 RPY 각에 의하여 (16)으로 결정할 수 있다.

$$R = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix} \quad (16)$$

첫 번째 열은 \vec{n} 성분을, 두 번째 \vec{o} , 세 번째 성분은 \vec{a} 를 각각 나타낸다. 로봇이 라벨 부착 동작을 수행하기 위해서는 현재의 라벨부착 툴의 끝단 위치를 레이저 스폿 및 빔 정보로 구한 코일 중심값, 반경, 스트립 끝단부의 공간상의 위치와 자세로 움직이는 작업이 필요하다. 본 과제에서 경로 계획은 직각 좌표계상에서 시작점과 끝점이 주어졌을

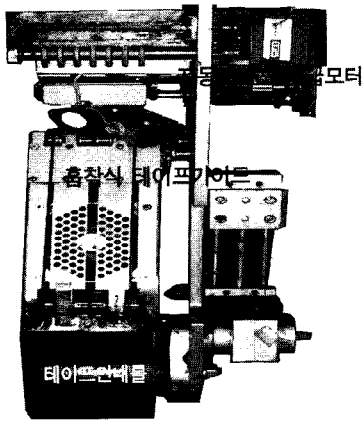


그림 9. 자동 라벨 부착 도구.
Fig. 9. Auto label attachment tool.

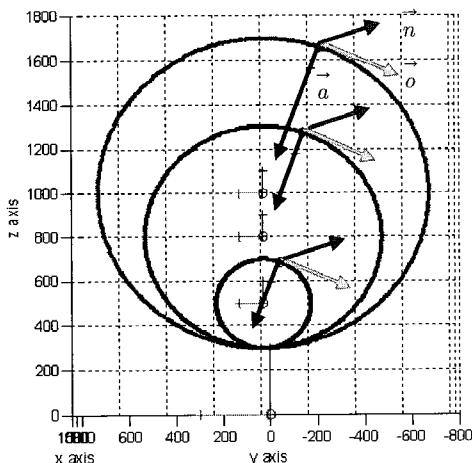


그림 10. 테이프 부착을 위한 도구 좌표계.
Fig. 10. Tool orientation for tape attachment.

때 두 점을 잇는 직선을 따라서 로봇이 자유로이 테이핑 위치로 이동할 수 있도록 공간상의 최단거리인 직선보간 방법을 활용하였다.

앞에서 구한 코일 센터를 P1, 테이프 부착 끝단부 위치를 P2, 원주 상의 P2로부터 접선 벡터 점 P3를 구한다. 이로서 P1과 P2로부터 로봇 툴의 \vec{a} 를 결정할 수 있다. 그리고, P3-P2 벡터는 로봇 툴의 \vec{o} 가 되며, 마지막 남은 로봇 툴의 \vec{n} 는 위에서 구한 벡터 외적으로부터 구할 수 있다.

위에서 구한 각각의 벡터는 회전행렬의 특성에 맞추어 정규화(normalization)가 필수적이다. 본 연구에서는 다음의 과정을 수행하였다.

단계 1: $y_1 = x_1 / \|x_1\|$ 이라 하면 y_1 의 크기는 1이다.

단계 2: y_1 에 의하여 생성되는 부분 공간 W_1 에 관한 x_2 의 직교성분을 z_2 라 하면 $z_2 = x_2 - proj_{W_1} x_2 = (x_2 \cdot y_1)y_1$ 로 정의할 수 있다. 다음으로 $y_2 = z_2 / \|z_2\|$ 라 하면 y_2 는 y_1 과 직교하고 크기가 1이다.

단계 3: 먼저 y_1, y_2 에 직교하는 벡터를 만들기 위하여 $\{y_1, y_2\}$ 에 의하여 되는 부분공간 W_2 에 관한 x_3 의 직교성분을 z_3 이라하면 $z_3 = x_3 - proj_{W_2} x_3$ 이고, $y_3 = z_3 / \|z_3\|$ 이다.

다음으로 $y_3 = z_3 / \|z_3\|$ 이라 하면 y_3 는 y_1, y_2 와 각각 직교하고 크기는 1이 된다.

단계 4: 이와 같은 방법으로 y_4, \dots, y_n 을 모두 만들 수 있다. 즉, $z_i = x_i - proj_{W_{i-1}} x_i$,

$$y_i = z_i / \|z_i\|, \quad (i=4, \dots, n)$$

R^n 의 기저 S로부터 정규직교집합 $T = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 을 만들면 로봇의 회전벡터로 사용가능하게 된다.

그림 11에서와 같이 로봇 운동의 시작점 위치: $P_c(3 \times 1)$, 방향: $R_c(3 \times 3)$, 끝점 위치: $P_d(3 \times 1)$, 방향: $R_d(3 \times 3)$ 라 하면, 직선 경로 상의 임의의 점 u 에서의 위치 P_u 는 (17)과 같다.

$$P_u = P_c + u(P_d - P_c), \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (17)$$

시작점과 끝점 사이의 방향은 두 위치에서의 방향을 보간 하여 연속적인 방향 변화가 되도록 경로를 계획한다. 공간상의 주어진 두 방향은 고정된 한축(S)에 대한 회전(Φ)으로 나타낼 수 있으므로 임의의 점 u 에서의 방향 R_u 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

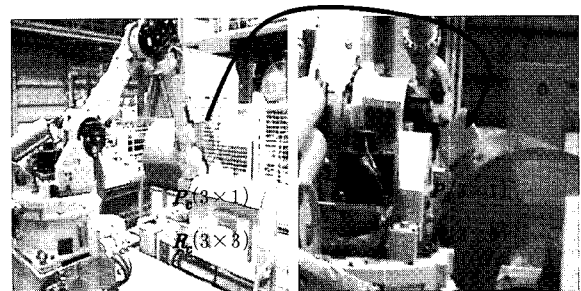


그림 11. 부착동작을 위한 경로 변환.
Fig. 11. Path transform for attachment motion.

$$R_u = D(u)R_c, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (18)$$

여기서 $D(u)$ 는 R_c 를 R_u 로 변환시키는 행렬로써 임의의 축 $S = [s_x, s_y, s_z]$ 에 대해 $u\Phi$ 만큼 회전한 $Rot(S, u\Phi)$ 로 결정할 수 있다. 그러므로 방향에 대한 경로 계획에서는 회전축 $S = [s_x, s_y, s_z]$ 및 회전각 Φ 를 구하여야 한다. 끝점 즉, $u=1$ 일 때 (18)을 다시 쓰면

$$D(1) = R_d R_c^{-1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

주어진 회전 행렬로부터 회전축 S 및 회전각 Φ 를 찾는 과정을 생각해 보면 $(R_d R_c^{-1} - \lambda I)^4 p = 0$ 의 문제가 도출된다. $^4 p \neq 0$ 이므로 이 문제의 해는 $\det(R_d R_c^{-1} - \lambda I) = 0$ 이 되는 λ 를 찾는 특별한 형태의 고유치 문제가 되고 구하는 결과는 (20)과 같다.

$$R_d R_c^{-1}(S, \Phi) = U \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\Phi} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\Phi} \end{bmatrix} V^T \quad (20)$$

이식에서 $\cos \Phi = ((\text{trace}(R_d R_c^{-1}) - 1)/2)$ 이고, 나선 축 S 는 $\lambda=1$ 일 때의 고유 벡터로 아래 (21)로 결정할 수 있고 이로서 로봇연속 궤적상의 회전 요소성분을 구할 수 있게 된다.

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sin \Phi} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} \quad (21)$$

IV. 테이프부착 실험 및 검토

본 연구의 지능형 테이프 부착 테스트에 사용된 로봇 모델은 그림 12의 NACHI-SA 160F 6R이며 레이저 변위센서는 분해능 0.3mm, 측정거리 300mm에서 4000mm의 성능을 가지는 S80-MH-5-YL09를 사용하였다. 비접촉식 레이저 스캔 센서의 카메라는 Sony의 HR50을 사용하였고 프레임 그라버(frame grabber)는 메트로릭사의 Meteor2-MC/4, 레이저 광은 Class IIIb, Wave length: 660nm, Power: 35mW 고출력 레이저를 이용하여 제작하였다.

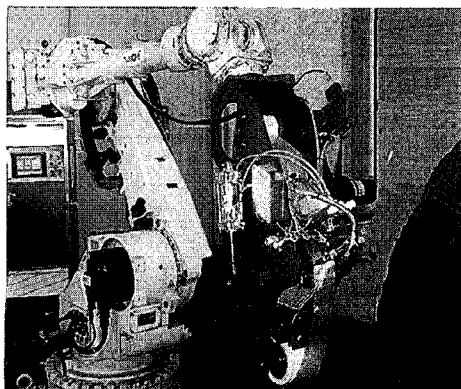


그림 12. 실험장치.
Fig. 12. Experimental setup.

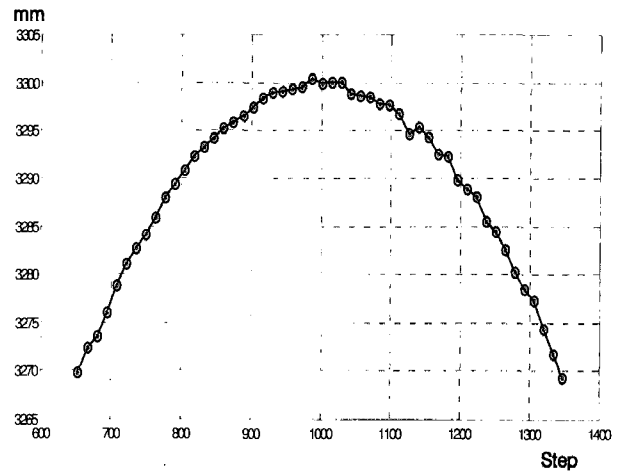


그림 13. LDS로부터의 데이터 획득.
Fig. 13. Data acquisition from the LDS.

실험에 적용한 코일 사이즈는 직경 650mm~2660mm까지의 다양한 종류를 목표로 하였다. 작업의 진행 중 어떠한 종류의 코일이 들어왔는지에 대한 정보가 우선적으로 파악이 되어야지만 이를 중심으로 스트립 끝단부 인식 및 테이프 로봇 툴 장치의 제어가 진행될 수 있다. 식 (5)와 (6)으로부터 측정피셀값을 3차원 레이저센서 좌표값으로 얻을 수 있고 식 (7)을 이용하여 로봇기준좌표계의 데이터로 변환하여 로봇중심의 경로작업이 가능하다.

그림 13은 코일 반경 2000mm에 대하여 레이저변위 센서를 1347mm에서 3.5mm간격으로 총 50번의 측정을 통하여 얻어낸 코일 표면까지의 거리를 추출한 데이터를 나타낸다.

위의 데이터에 본 과제에서 개발한 식 (14)를 적용하여 구한 코일의 중심은 x_c 는 999.64mm, z_c 는 1300.6mm이며, 코일 반경 R 은 1999.30mm로 원래 모델 2000mm에 대하여 0.7mm오차를 나타내었다. 0.7mm 오차는 레이저변위센서의 측정범위가 4m까지로 코일 표면의 반사도 차이로부터 기인된 것으로 판단되지만 다음 과정의 코일스트립 엔드부 검출을 위한 로봇 경로 접근용으로는 충분한 정밀도이므로 본 알고리즘이 적합하였음을 확인하였다.

그림 14는 코일스트립 끝단부의 레이저 3차원 시각 측정

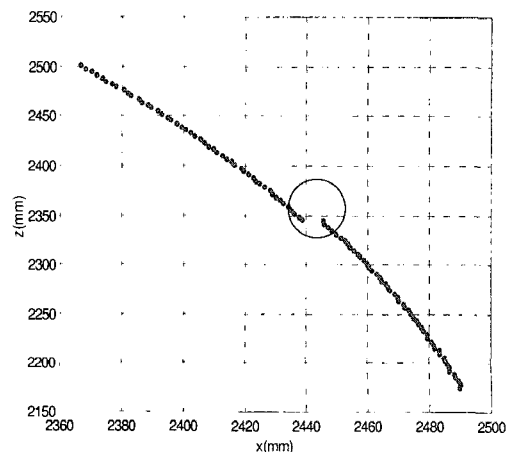


그림 14. 레이저센서로부터 데이터 획득.
Fig. 14. Data acquisition from the Laser Sensor.

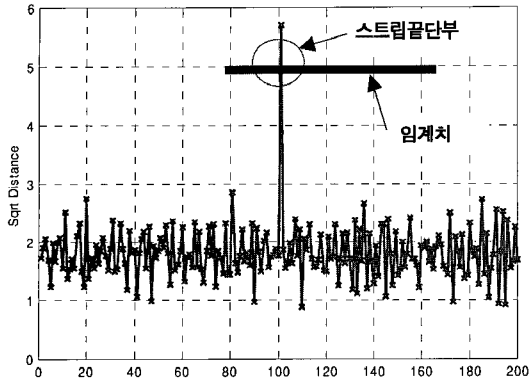


그림 15. 스트립 끝단 거리 자료.
Fig. 15. Distance data for the strip end.

데이터를 나타내고 있는데 끝단부의 경우 약간의 들림 현상으로 인하여 데이터 연속성이 끊어지는 부분이 존재하였다. 그림 15는 본 연구에서 제안한 식 (15)를 이용하여 임계치를 5로 설정하여 수행한 결과를 나타낸 그래프이다. 코일 끝단부 스트립의 들림 현상으로 데이터 연속성이 단락됨을 확인할 수 있고, 이를 이용하여 위치를 인식을 결과를 보이고 있다.

그림 16은 위의 과정에서 얻어진 데이터를 바탕으로 테이핑 틀의 접근 위치 및 경로를 생성하는 식 (21) ~ 식 (25)를 이용한 로봇테이핑경로결과이다. 초기 로봇의 레이저 스캔 센서로 끝단부 인식을 수행하는 측정 위치는,

$$Current = \begin{bmatrix} 0.931 & -0.210 & 0.296 & 1000.0 \\ 0.254 & 0.959 & -0.120 & 20.0 \\ -0.258 & 0.187 & 0.947 & 1000.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

와 같았고, 레이저 스캔 센서 피드백으로부터 계산된 테이핑을 하기 위한 틀의 기본 위치와 자세는 다음과 같았다.

$$Desired = \begin{bmatrix} 0.89 & -0.44 & -0.027 & 1234.0 \\ 0.418 & 0.869 & -0.261 & 277.0 \\ 0.139 & 0.222 & 0.964 & 1300.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위의 두 가지 경로점을 바탕으로 본 과제에서 개발한 경로 계획알고리즘으로 생성된 경로 결과를 총 11스텝으로 작업 수행하는 결과 값들을 나타내고 있다. 직접적 측정에 의한 목표값으로 정한 (1234.0mm, 277.0mm, 1300.0mm, 13.0°, -8.0°, 25.0°)로 정확히 수렴함을 확인하였다. 1스텝당 작업시간은 5초로 전체 작업시간이 55초 소요되었다.

그림 17은 위의 순서에 의해 수행된 실제 필라멘트 자동 부착작업 실험사진을 보이며, 표 1은 여러 가지 경우의 3차원 공간상의 코일라벨 부착 공정에 대하여 냉연코일 크기 인식 오차와 스트립 끝단부 인식 오차에 의한 테이프 부착 위치를 결정한 결과들을 나타낸다. 오차 범위가 약 0.2~0.7mm정도로 로봇을 이용한 자동 필라멘트 테이프 부착정밀도등에는 문제가 없음을 확인하였다.

이상의 실험결과들로부터 본 논문에서 제안한 레이저변위센서와 레이저 스캔 센서를 동시에 이용한 코일 사이즈 인식 및 테이프 부착 위치와 방향 인식에 기반한 자동 필

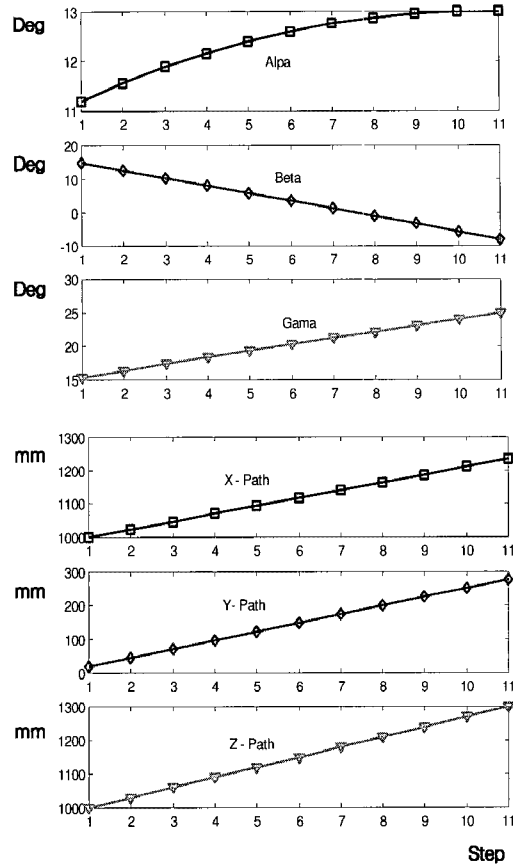


그림 16. 라벨 부착을 위한 로봇경로 결과.
Fig. 16. Robot path result for label attach.

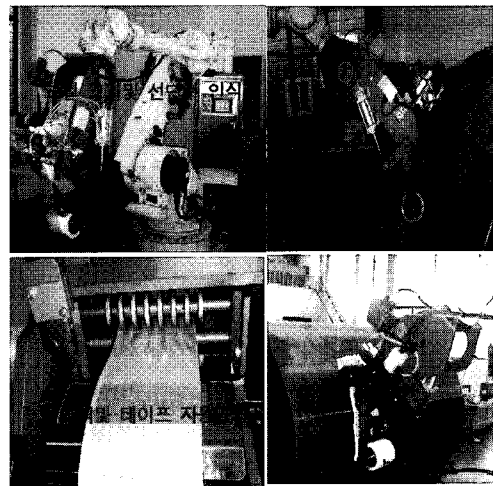


그림 17. 실제 실험 영상.
Fig. 17. The images of real test.

표 1. 로봇 라벨 부착 오차 결과.

Table 1. Result of robot label attachment error.

순번	코일 지름 (mm)		테이핑 위치 (mm)			
	크기	오차	x	y	z	rms 오차
1	1999.3	0.7	1233.7	277.3	2399.4	0.7
3	1299.5	0.5	1233.8	277.2	1699.8	0.3
4	1000.2	0.2	1234.2	278.3	1400.5	0.6
5	699.7	0.3	1234.3	277.9	1100.7	0.4

라멘트 테이프 부착 경로생성 지능로봇 작업이 성공적으로 완료되었다.

V. 결론

본 논문에서는 공간상에 불규칙적인 비-정렬되어 라인에 들어오는 3차원 냉연코일 워크에 대하여 자동으로 인식, 필라멘트 테이프를 부착 수행할 수 있는 센서 융합에 의한 지능형 로봇 테이프 부착 시스템을 개발하였다. 비 정렬 코일 곡면의 반경 사이즈 크기 인식을 위하여 비접촉식 레이저면위 센서를 이용하였고, 또한 테이프 부착 위치와 방향을 인식을 위하여 비접촉식 3차원 레이저 스캔 센서를 융합하여 단계적으로 적용하는 방법을 제시하였다. 핸드아이 로봇의 측정 자세 변화에 대한 3차원 보정 문제에 있어서 자동 좌표변환법을 제시함으로써 복잡한 기구학적 문제를 단순화하여 강인한 라벨-부착 로봇 테스트를 성공적으로 수행 완료 하였다.

향후에는 다양한 크기의 냉연코일 마무리 작업 공정에서 스트립 끝단부를 고정시키는 테이핑 작업 외에도 냉연코일의 생산정보 및 다양한 정보를 위한 바코드 라벨지 로봇 자동부착 과제가 남았으며 또한 전체 테이핑 작업시간을 단축하기 위한 로봇 접근 작업속도를 올리기 위한 연구가 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

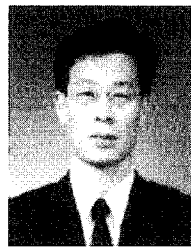
[1] 박기황, 공순석, "코일 외경 가변 끝단부 자동 필라멘트 테이핑 장치," 공개특허 10-2004-0048258, 2004.



신 찬 배

1992년 영남대학교 기계공학과 졸업. 1994년 동 대학원 정밀기계공학과 석사. 1996년 동 대학원 기계공학과 박사수료. 1996년~현재 울산과학기술대학 디지털기계학부 부교수. 관심분야는 Tele Robot, 시스템자동화.

- [2] 노성철, 김양규, 정인교, "열연코일의 라벨지 부착방법," 공개특허 10-0760578, 2007.
- [3] W. K. Kim, J. D. Chung, and Y. K. Hong, "A safety evaluation on the loading and vibration test for transport freight car of cold rolled coil sheet," 정밀공학회, 춘계 학술대회 논문집, pp. 1499-1502, 2003.
- [4] C. B. Shin, J. D. Kim, and J. W. Lee, "A study on development of PC based in-line inspection system with structure light laser," *Journal of KSPE*, vol. 22, no. 11, pp. 82-90, 2005.
- [5] J. K. Chou and M. Kamel, "Finding the position and orientation of a sensor on a robot manipulator using quaternions," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 10, no. 3, pp. 240-254, 1991.
- [6] K. Ikeuchi, "Generating an interpretation tree from a CAD model for 3d-object recognition in bin-picking tasks," *International Journal of Computer Vision*, vol. 1, pp. 145-165, 1987.
- [7] Y. Zhang and J. Paik, "3-D object representation from multi-view range data applying deformable superquadrics," *Int'l Conf. Pattern Recognition*, vol. 3, pp. 273-276, 2002.
- [8] A. Hujazi and A. Sood, "Range image segmentation with applications to robust bin-picking using vacuum gripper," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol. 20, pp. 1313-1324, 1990.



김 진 대

1994년 영남대학교 기계공학과 졸업. 1996년 동 대학원 기계공학과 석사. 2003년 동 대학원 기계공학과 박사. 2004년~2008년 유진엠에스(주) 책임연구원. 2008년~현재 대구기계부품연구원 지능로봇연구팀 책임연구원. 관심분야는 Tele-Robot, Force Control.