

CCD카메라와 레이저 센서를 조합한 지능형 로봇 빈-피킹에 관한 연구

김진대*, 신찬배#, 이재원**

A Study on Intelligent Robot Bin-Picking System with CCD Camera and Laser Sensor

Jin-Dae Kim*, Chan-Bai Shin#, Jeh-Won Lee**

ABSTRACT

Due to the variety of signal processing and complicated mathematical analysis, it is not easy to accomplish 3D bin-picking with non-contact sensor. To solve this difficulties the reliable signal processing algorithm and a good sensing device has been recommended. In this research, 3D laser scanner and CCD camera is applied as a sensing device respectively. With these sensor we develop a two-step bin-picking method and reliable algorithm for the recognition of 3D bin object. In the proposed bin-picking, the problem is reduced to 2D initial recognition with CCD camera at first, and then 3D pose detection with a laser scanner. To get a good movement in the robot base frame, the hand eye calibration between robot's end effector and sensing device should be also carried out. In this paper, we examine auto-calibration technique in the sensor calibration step. A new thinning algorithm and constrained hough transform is also studied for the robustness in the real environment usage. From the experimental results, we could see the robust bin-picking operation under the non-aligned 3D hole object.

Key Words : Bin-picking(빈-피킹), CCD camera(CCD카메라), Laser scanner(레이저 스캐너), Two-step method(2단계방법), Auto-calibration(자동보정), non-aligned 3D hole object(비정렬 3D 홀 물체)

1. 서론

최근 들어 전자 기술의 급속한 발전과 더불어 센서 기술 및 마이크로프로세서의 성능이 비약적으로 향상되어 3차원 시각 센서의 성능도 크게 개선

시킬 수 있게 되었다. 국내에서도 많은 형태의 시각 센서들이 개발되어 용접선 추적이나 3차원 로봇 검사용으로 적용되고 있다.¹

하지만 난잡하게 쌓여있는 불규칙적 대상물에 대한 핸들링이나 조립 등이 요구될 때 이를 자동으

접수일: 2006년 7월 25일; 게재승인일: 2006년 10월 14일

* (주) 유진엠에스 기술연구소

교신저자, 울산과학기술대학 디지털기계학부

Email cbshin@mail.uc.ac.kr, Tel (052) 279-3108

** 영남대학교 기계공학부

로 인식, 작업을 수행 할 수 있는 지능형 로봇 빈-피킹 작업에 적용 가능한 시각 인식 방법이나 기술에 대한 개발사례는 아직 미비한 실정이다. 비정렬된 부품에 대한 기존 로봇 작업에서는 주로 추가의 부품 정렬기구나 위치 결정 치구를 사용하였다. 이 경우 고비용의 문제점을 가진다.

Rahardja와 Kosaka는² 복잡한 비정렬 물체에 대한 스테레오 영상으로부터 다각형과 원형 부분을 추출하여 빈피킹 작업을 수행하였다. Ikeuchi³는 빈을 인식하고 파지(Grasping)하기 위하여 카메라 영상과 CAD모델을 이용하였다. Yan Zhang⁴는 레이저 측정과 비디오 영상을 함께 이용하여 2차곡면(Superquadrics)으로 모델링하여 3차원 물체의 위치와 방향을 인식하는 작업을 수행하였다. 이와 같은 연구들에서는 3차원 물체의 표현이나 분해법이 주 관점이었다.

본 연구에서는 카메라와 레이저 빔 영상을 단계적으로 이용하여 실제 빈-피킹의 기준이 되는 로봇의 관점에서 강한 성능을 발휘할 수 있는 지능형 로봇 빈피킹 모듈을 개발하고자 한다.

2. 시각 시스템의 보정

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 빈-피킹 시스템의 구성도이다. 그림에서와 같이 CCD카메라와 레이저 센서를 이용하였고 원활한 작업 공간을 확보하기 위하여 핸드-아이(Hand-eye) 구조로 하였다.

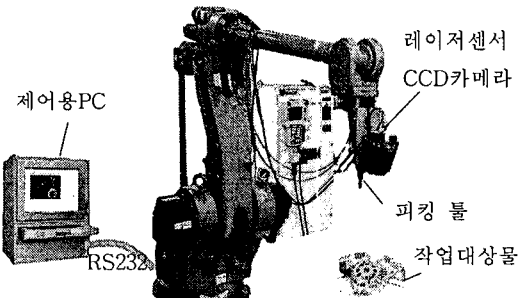


Fig. 1 Robot bin-picking configuration

핸드-아이 로봇 빈-피킹 시스템에서 작업 대상물의 인식 및 파지(Grasping) 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 로봇 베이스 좌표계상에서 재구성된 물체의 위치 및 방향 데이터의 정밀도이다. 즉, 로봇이 비정렬된 물체를 파지하는 3차원 동작은 로봇 베이스 좌표계를 중심으로 이루어지므로

이를 기준 좌표계로 하여 모든 인식 및 로봇 빈-피킹 모션이 결정되어야 한다. 이를 위해서는 각각의 시각센서 보정 및 자동 보정법이 해결되어야만 한다.

2.1 2차원 CCD 보정

비정렬 부품의 초기 위치 인식을 위해서는 2차원 공간상의 빈의 위치를 우선적으로 추정하여야만 한다. 이와 같은 위치 추정을 위한 기본 과정이 2차원 CCD보정이다. 2차원 보정은 일반적으로 카메라를 핀홀 형태로 단순화한 원근 변환 법으로 구할 수 있으나, 본 연구에서의 초기 위치인식은 대략적인 물체의 위치 추정만 필요하므로 원근변환법 보다는 보다 빨리 수행 가능한 이면보정법을 적용하였다.

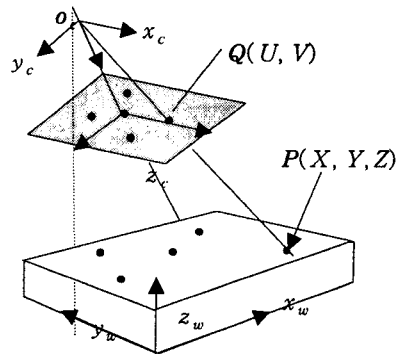


Fig. 2 Pinhole camera model and coplanar points

Fig. 2에서와 같이 동일 보정면상의 실제 좌표와 영상 점의 좌표와의 관계는 다음의 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

표기상 편의를 위하여 P 를 물체의 위치 벡터들, Q 는 그에 상응하는 영상 점들의 벡터들로 간략화 하면,

$$P = HQ \quad (2)$$

구하고자 하는 2차원 보정 행렬 H 는 식(3)의 최소자승법으로 구할 수 있다.

$$H = PQ^T[QQ^T]^{-1} \quad (3)$$

2.2 3차원 레이저 센서 보정

2차원 시각 정보만으로 공간상에 비정렬된 3차원 빈의 정확한 위치와 방향을 추정하기는 힘들다. 따라서 대략적 2차원 위치 추정 후 정밀한 3차원 레이저 센싱이 필요하다. Fig. 3과 같이 레이저 빔과 CCD카메라를 이용한 3차원 측정법은 공간상에 평면의 레이저광과 카메라 사이의 광학 기하를 이용하여 측정물체에 따른 단면의 형상에 의한 3차원 형상을 측정하는 기술이다.

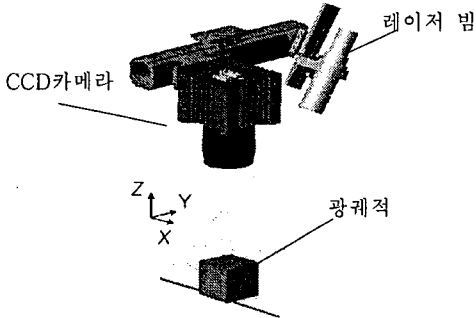


Fig. 3 Configuration of laser sensor

Fig. 3에서와 같이 CCD카메라와 레이저 빔이 결합되었을 때 두 좌표 사이의 변환 행렬은 다음 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & a_1 & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & a_2 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & a_3 & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & a_4 & c_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \\ h \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

식(4)를 전개하면 식(5)가 되고,

$$\begin{bmatrix} \frac{x}{h} \\ \frac{y}{h} \\ \frac{z}{h} \\ \frac{1}{h} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} U \\ V \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & a_1 & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & a_2 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & a_3 & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & a_4 & c_{43} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

식(4)와 (5)에서 (x, y, z) 는 공간상의 좌표이며, (U, V) 는 카메라 영상면에 맺히는 영상 좌표 값이다. (u, v) 는 $U=u/h, V=v/h$ 로 동차 좌표계(Homogeneous Coordinate)를 나타낸다. 최종 보정식은 식(6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} U \\ V \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \quad (6)$$

이를 전개하면

$$\begin{aligned} m_{11}U + m_{21}V + m_{31} - x(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) &= 0 \\ m_{12}U + m_{22}V + m_{32} - y(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) &= 0 \\ m_{13}U + m_{23}V + m_{33} - z(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서 m 은 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 $m_{34}=1$ 로 두고 n 개의 데이터에 대하여 행렬로 표현하면 아래 식(8)로 유도된다.

$$L = MX \quad (8)$$

여기서

$$L = \begin{bmatrix} U_1 & V_1 & 1 & \dots & \dots & -U_1x_1 & -V_1x_1 \\ \dots & U_1 & V_1 & 1 & \dots & -U_1y_1 & -V_1y_1 \\ \dots & \dots & U_1 & V_1 & 1 & -U_1z_1 & -V_1z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_n & V_n & 1 & \dots & \dots & -U_nx_n & -V_nx_n \\ \dots & U_n & V_n & 1 & \dots & -U_ny_n & -V_ny_n \\ \dots & \dots & U_n & V_n & 1 & -U_nz_n & -V_nz_n \end{bmatrix}$$

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

$$X = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ \dots \ y_4 \ z_4]^T$$

따라서 3차원 보정 행렬 M 는 식(9)로 구할 수 있다.

$$M = LX^T[XX^T]^{-1} \quad (9)$$

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 식(10)에 의해 구할 수 있게 된다.

$$x = \frac{(m_{11}U + m_{21}V + m_{31})}{(m_{14}U + m_{24}V + 1)} \quad (10)$$

$$y = \frac{(m_{12}U + m_{22}V + m_{32})}{(m_{14}U + m_{24}V + 1)}$$

$$z = \frac{(m_{13}U + m_{23}V + m_{33})}{(m_{14}U + m_{24}V + 1)}$$

2.3 로봇 자세 변화에 대한 자동보정

비 정렬 작업 대상에 대한 로봇 빈-피킹의 경우 작업 대상물의 3차원 측정위치는 계속적으로 바뀌는 구조다. 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 보정(Auto-Calibration)이 해결되어야만 한다.

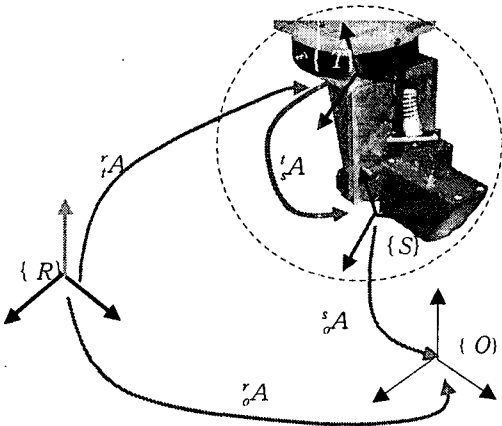


Fig. 4 Coordinate transform graph

Fig. 4는 실제 로봇에 장착된 레이저센서를 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 페로 방정식은 식(11)과 같다.

$${}^R_0A = {}^R_1A \cdot {}^1_0A = {}^R_1A \cdot {}^1_2A \cdot {}^2_0A \quad (11)$$

여기서 R_1A 는 로봇 순기구학, 1_0A 는 로봇베이스에서 물체 좌표계간의 변환을 1_2A 는 핸드-아이 파라미터를 나타내는데 특히, 2_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 베이스좌표

계의 재구성을 복잡하게 하는 요소가 된다.

레이저센서의 기본측정원리를 고려해 보면 측정되는 대상이 되는 물체의 윤곽은 항상 레이저 면상에만 존재함을 알 수 있는데 Fig. 5와 같이 물체 좌표계의 중심점을 레이저면상에 설정할 수 있다.

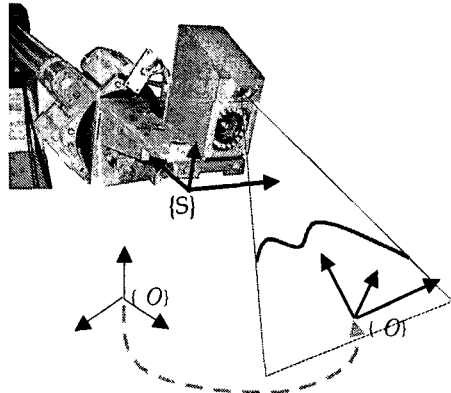


Fig. 5 Object coordinate movement to the laser plane

하지만 레이저 센서의 경우 레이저빔이 경사(Slope)를 가지고 투사되므로 실제적 물체 좌표계를 레이저 경사면상에 구속하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 미리 센서 보정단계에서 물체 좌표계{O}를 센서 좌표계{S}와 일치되게 설정함으로써 자동 보정을 해결하였다. 이렇게 하면 3차원 측정 자세나 위치에 관계없이 항상 물체 좌표계가 로봇 좌표계와 함께 이동하기 때문에 항상 정밀한 측정을 수행할 수 있게 된다.

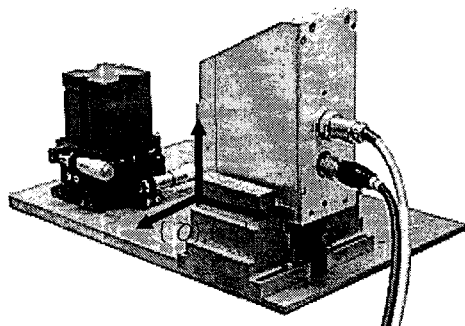


Fig. 6 Sensor and object coordinate alignment

3. 지능형 빈-피킹을 위한 알고리즘

3.1 2차원 영상처리 및 위치 인식

CCD 카메라로부터 얻어지는 영상으로부터 작

업 대상물의 2차원 위치인식을 위한 순서도는 Fig. 7과 같다. 예지의 인식은 소벨(Sobel) 마스크를 사용하였으며 8방향 체인코딩(Chain coding)으로 물체들을 분해하였고 면적과 원형도(Complexity)를 이용하여 일단 작업 대상물을 인식하였다. 인식된 결과에서 다시 체인코드 정보로부터 빈의 중심위치를 보정행렬에 적용하여 2차원 위치 인식을 하였다.

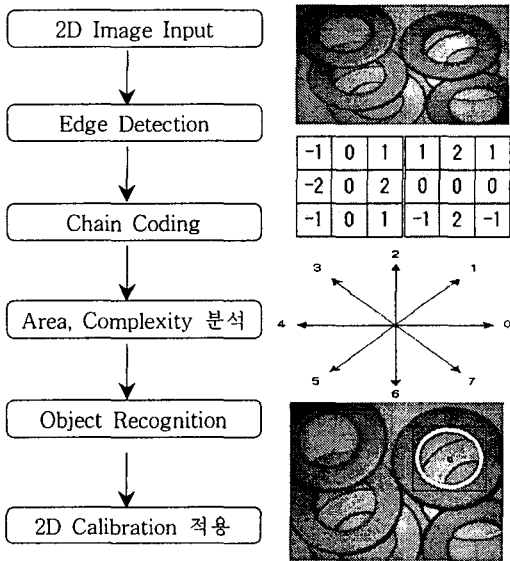


Fig. 7 2D image processing flow chart

3.2 레이저광 영상의 세선화(Thinning)

세선화는 가우시안 분포의 레이저 빔 영상에 대하여 밝기가 가장 밝은 부분을 연결하는 작업으로 본 논문에서는 레이저광 단면의 빛의 강도를 2차식 곡선 맞춤하여 최대 값을 찾는 방법을 사용하였다.

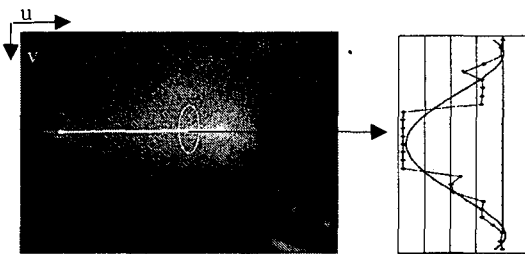


Fig. 8 Laser intensity and thinning process

먼저 Fig. 8에서 레이저 빔 영상은 v축 방향으로 빛의 강도 함수 $I(v)$ 를 식(12)와 같이 다차항 함수로 표현할 수 있다.

$$I(v) = \sum_{i=0}^n b_i v_i^i \quad (12)$$

여기서 계수 $b_i (i=0, 1, \dots, n)$ 를 구하기 위해서는 최소한 $n+1$ 화소의 밝기 값이 필요하다. 레이저 광의 영상만을 고려하기 위하여 각 열에서 가장 빛의 세기가 큰 화소 v_{max} 를 중심으로 상하로 m 화소에서의 강도를 고려하여 밝기 분포곡선의 계수를 구한다. 만일 고려되는 화소의 수가 $2m+1$ 개 일 경우 식(13)으로 적을 수 있다.

$$I = TB \quad (13)$$

여기서,

$$I = \begin{bmatrix} I_{v_{max-m}} \\ I_{v_{max-m+1}} \\ \vdots \\ I_{v_{max+m-1}} \\ I_{v_{max+m}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & (v_{max-m}) & (v_{max-m})^2 & \dots & (v_{max-m})^n \\ 1 & (v_{max-m+1}) & (v_{max-m+1})^2 & \dots & (v_{max-m+1})^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & (v_{max+m}) & (v_{max+m})^2 & \dots & (v_{max+m})^n \end{bmatrix}$$

식(13)에 최소 자승법을 적용하면 구하는 다차항 계수는 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$B = [(T^T T)^{-1} T^T I] \quad (14)$$

이 계수행렬을 구한 후 식(14)에 대입하여 뉴턴랩슨법을 이용하여 최대 값의 위치를 구함으로써 세선화를 수행하였다.

3.3 구속 허프 변환(Hough Transform)

허프 변환은 직각 좌표계 (x, y) 상의 선 데이터를 극좌표 (ρ, θ) 로 변환하여 처리, 특정 정보만을 추출하고 역 변환하여 직선을 찾아내는 방법이다.

본 연구에서 사용된 구조화 레이저 빔은 주로 직선 형태 영상을 형성하므로 직선 찾기에 대해서는 식(15)와 같은 각도 구속 허프 변환을 적용하였다.

$$y = ax + b, \quad \rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (15)$$

여기서, $\theta_{lower} < \theta < \theta_{upper}$

θ_{lower} 와 θ_{upper} 는 검사 대상물의 형상에 의해 결정되는 값으로 구속 조건으로 사용가능하며 V에 지와 같은 여러 직선 형상의 물체에 대한 두 직선, $(\rho_1, \theta_1), (\rho_2, \theta_2)$ 에 대한 교점은 식(16)으로 간단히 구할 수 있다.

$$x_i = \frac{-\rho_1 \sqrt{(1/\tan\theta_1)^2 + 1} + \rho_2 \sqrt{(1/\tan\theta_2)^2 + 1}}{-(1/\tan\theta_1) - (1/\tan\theta_2)}$$

$$y_i = \frac{-\rho_1 \sqrt{(1/\tan\theta_1)^2 + 1} (-1/\tan\theta_2)}{-\rho_2 \sqrt{(1/\tan\theta_2)^2 + 1} (1/\tan\theta_2)} \quad (16)$$

3.4 공간원의 중심 및 방향 찾기

Fig. 9의 공간원에 대한 경우 여러번의 레이저 빔 측정으로 레이저 라인이 원호의 에지점과 만나는 최소4점 이상을 이용하여 공간적으로 해결하여야 한다.

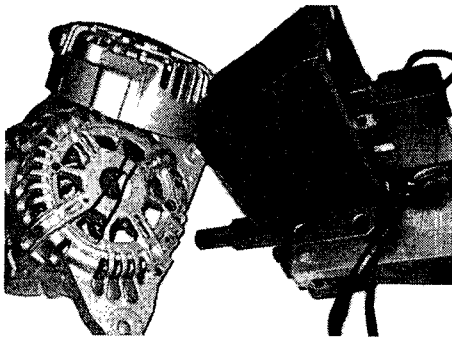


Fig. 9 3D hole center and direction

식(17)은 중심점이 $(-A/2, -B/2, -C/2)$ 이고 반경 $sr = (\sqrt{A^2 + B^2 + C^2 - 4D})/2$ 인 구의 방정식을 나타낸다.

$$x^2 + y^2 + z^2 + Ax + By + Cz + D = 0 \quad (17)$$

이를 정리하고 n개의 공간 원호 상의 에지 점들에 대하여 적용하면 식(18)이 유도 된다.

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ \vdots \\ -x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

이를 간략화 하여 표현하면,

$$K\bar{X} = L \quad (19)$$

의사 역행렬을 이용하여 식(20)과 같이 구의 중심과 반경을 알 수 있다.

$$\bar{X} = [K^T K]^{-1} K^T L \quad (20)$$

한편 구면상에 존재하는 공간원은 또한 동일 평면을 형성하므로 식(21)의 평면으로 나타낼 수 있다.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (21)$$

마찬가지 방법으로 n개의 공간 원호 상의 에지 점들에 대하여 적용하여 정리하고 $a=1$ 로 두면 식(22)가 유도된다.

$$\begin{pmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_n & z_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1 \\ \vdots \\ -x_n \end{pmatrix}, \quad k\bar{x} = l \quad (22)$$

식(23)의 의사 역행렬 방법으로 평면의 계수를 알 수 있다.

$$\bar{x} = [k^T k]^{-1} k^T l \quad (23)$$

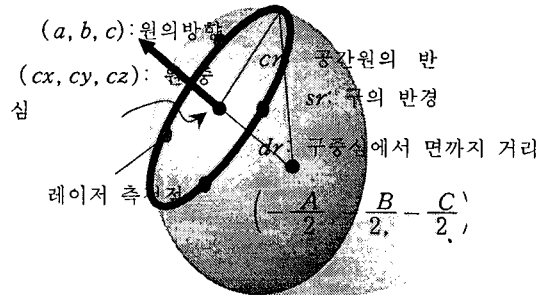


Fig. 10 Concept of space hole recognition

따라서 구하고자 하는 공간원의 반경은 Fig. 10으로부터 계산 가능하다.

$$cr = \sqrt{sr^2 - dr^2},$$

$$dr = \frac{|-Aa/2 - Bb/2 - Cc/2 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (24)$$

원의 중심점은 구 중심점을 지나고 평면의 방향 벡터와 평행한 직선과 평면의 방정식의 교점의 관계로부터 식(25)로 구할 수 있다.

$$cx = ta - A/2, \quad cy = tb - B/2, \quad cz = tc - C/2 \quad (25)$$

$$\text{여기서, } t = \frac{Aa/2 + Bb/2 + Cc/2 - d}{a^2 + b^2 + c^2}$$

구한 원의 중심과 평면의 법선은 빈피킹 로봇의 그리퍼 툴 경로 계산에 이용된다.

4. 빈피킹 툴의 경로 계획

로봇 빈-피킹을 위해서는 현재의 그리퍼 위치를 시각정보로부터 계산된 공간 빈의 위치와 방향으로 정렬시키는 작업이 필요하다. 직선 경로 계획은 카르테시안 좌표계상에서 시작점과 끝점이 주어졌을 때 두 점을 잇는 직선을 따라서 로봇이 이동할 수 있도록 제어하기 위한 것이다. 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 다음과 같다.

$$P_u = P_c + u(P_d - P_c), \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (26)$$

시작점과 끝점 사이의 방향은 두 위치에서의 방향을 보간하여 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.

$$R_u = D(u)R_c, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (27)$$

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 식(27)을 다시 쓰면

$$D(1) = R_d R_c^{-1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (28)$$

주어진 회전 행렬로부터 회전축 S 및 회전각 Φ 를 찾는 과정을 생각해 보면

$(R_d R_c^{-1} - \lambda I)^A p = 0$ 의 문제가 도출된다. $A p \neq 0$ 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 식(29)와 같다.

$$R_d R_c^{-1}(S, \Phi) = U \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\Phi} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j\Phi} \end{bmatrix} V^T \quad (29)$$

이 식에서 $\cos \Phi = ((\text{trace}(R_d R_c^{-1}) - 1)/2)$ 이고 나선 축 S 는 $\lambda=1$ 일 때의 고유 벡터로 아래 식(30)으로 결정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \sin \Phi} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} \quad (30)$$

5. 실험 및 검토

본 연구의 지능형 빈-피킹 테스트에 사용된 로봇 모델은 Fig. 11의 NACHI-SC50 6R이며 카메라는 Sony의 HR50을 사용하였고 프레임 그래버(Frame Grabber)는 메트로스사의 Meteor2-MC/4, 레이저 광은 Class IIIb, Wave length: 660nm, Power:35mW 고 출력레이저를 이용하였다.

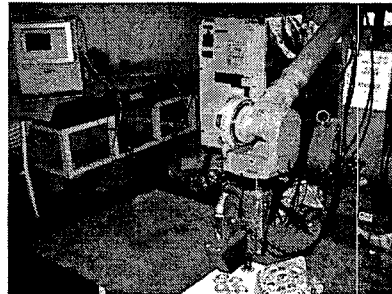


Fig. 11 Experimental setup

Fig. 12는 본 연구에서 제안하는 로봇 빈-피킹 알고리즘의 순서도를 나타낸 것으로 오른쪽 부분은 제어용 PC가 수행하는 작업을, 왼쪽 부분은 로봇작업을 표시한다. 그림에 나타낸 바와 같이 2차원 인식과 3차원 인식을 단계적으로 수행하여 복잡한 처리나 알고리즘을 단순화하여 강인한 인식성능을 얻을 수 있게 한 구조다. 순서도에서 온-라인 작업을 위하여 RS232를 통한 직렬 통신과 외부 DI/O인터페이스를 구성하였다.

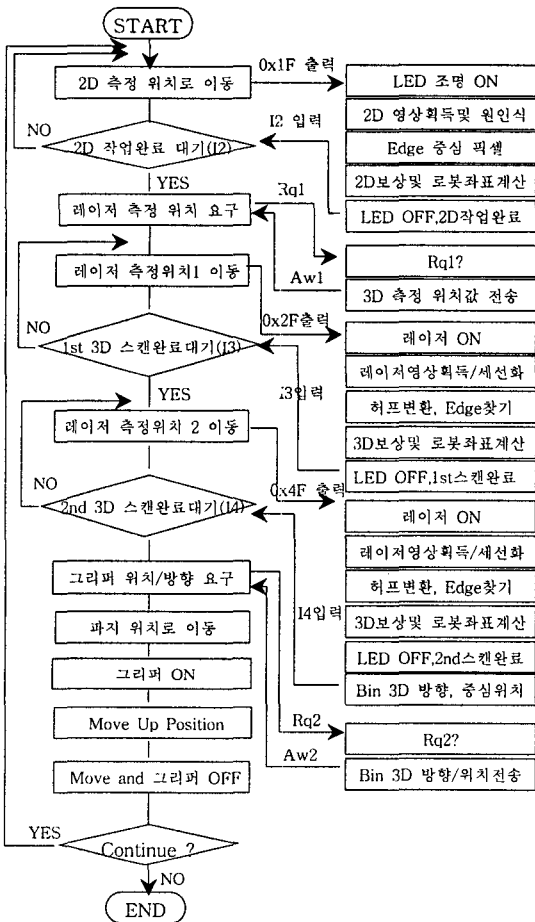


Fig. 12 Flow chart of robot bin-picking

빈피킹 대상물은 Fig. 13과 같은 외경 50mm, 내경 30mm, 두께:5mm의 원형 링들로 공간상에서 원을 형성하는 물체를 임의로 배치하였다.

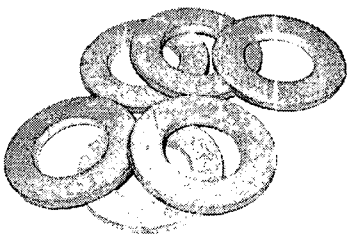


Fig. 13 Object model for bin-picking

먼저 Fig. 14는 비 정렬 물체를 카메라로 촬영한 영상으로부터 2차원 처리 과정들을 통하여 구해낸

빈-피킹 2차원 위치를 얻어내기 위한 과정으로 원의 중심점 결과를 나타낸다.

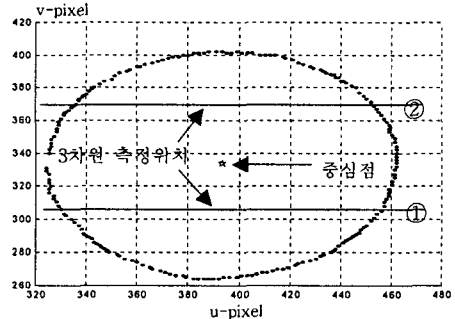


Fig. 14 Output of 2D processing

여기에서 구해진 원의 중심점은 2차원 보정행렬 적용과정을 거쳐서 Fig. 14의 3차원 측정 위치를 계산하는데 사용되며 본 실험에서는 중심점에서 ±5mm부분을 3차원 측정위치로 계산하였다.

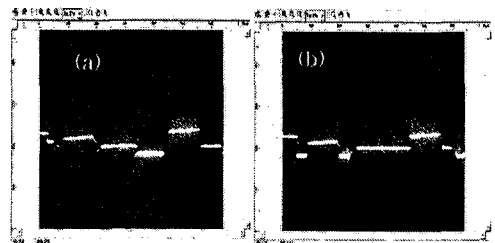


Fig. 15 Laser measurement images

Fig. 15는 Fig. 14의 ①과 ②의 위치에서 레이저 센서로 측정된 영상을 보이고 있다. Fig. 16은 Fig. 15의 각 영상에 대하여 본 논문에서 제안한 레이저 세선화 알고리즘을 적용하여 구한 레이저 프로파일 데이터를 나타낸다.

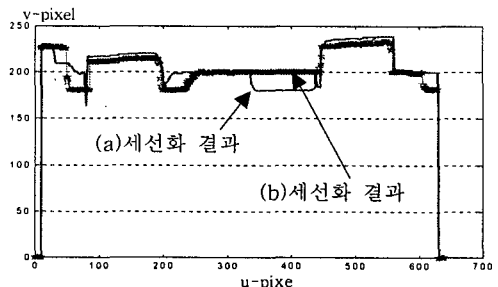


Fig. 16 The result of laser thinning

2차원 인식 부분에서 우선적으로 레이저 시각 센서 헤드를 공간 홀의 중심부분으로 이동하였기

때문에 두 직선을 u 방향 픽셀의 중간부분을 중심으로 분할 후 구속 허프 변환을 적용하였다. Fig. 16의 (a)세션화 결과와 (b)센서화 결과에 대하여 분할 및 구속 허프 변환을 적용하고 난 결과로부터 찾아낸 직선은 다음의 Fig. 17과 같다.

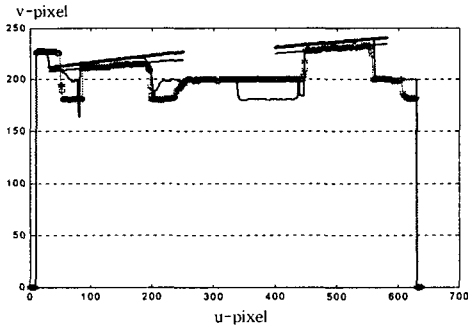


Fig. 17 The result of line detection

이로부터 공간 원주 상에 존재하는 에지 인식 결과는 Fig. 18에 나타내었다. 에지 점을 인식하기 위해 점과 직선까지의 거리를 이용하였다.

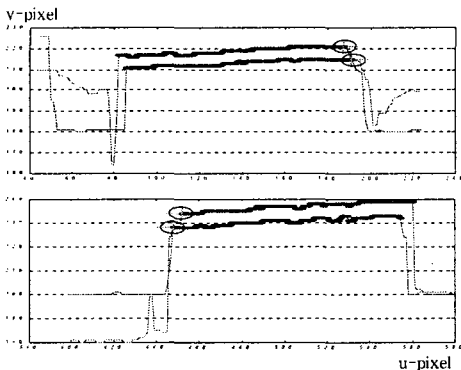


Fig. 18 The result of hole edge detection

위의 순서로 공간 원주상의 4점을 3차원 레이저 보정과 로봇 기준 좌표계의 변환 과정을 거쳐 공간원의 중심과 방향 벡터로부터 2단계 로봇 피킹 툴의 접근 경로를 구하였고 Fig. 19에 나타내었다.

초기 로봇 그리퍼 위치에서 진입전 경로에까지 직선 경로로 먼저 움직이고 속도를 낮추어 빈-피킹을 위한 진입 후 지점까지 미세하게 움직이도록 경로 계획을 수행하였다. Fig. 20은 위의 순서에 의해 수행된 실제 빈-피킹 사진을 나타낸다.

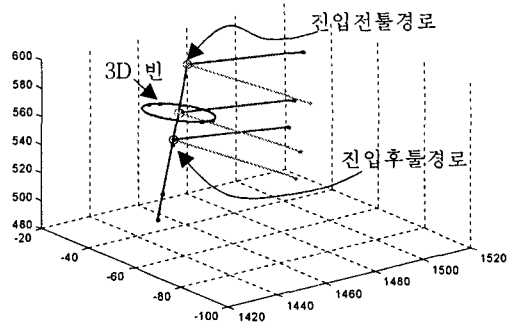


Fig. 19 Robot tool path for bin-picking

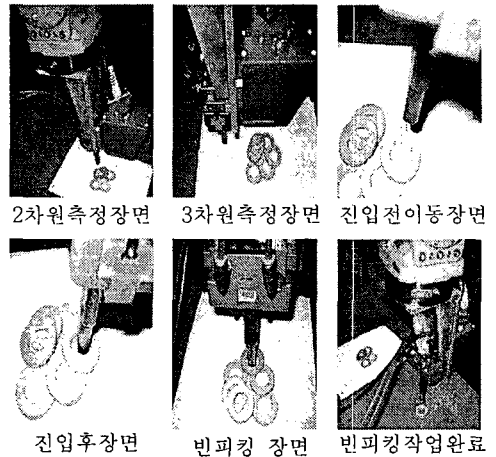


Fig. 20 The images of real test

Table 1은 Fig. 21의 여러 가지 형태의 3차원 공간상의 빈에 대하여 빈-피킹을 수행한 결과들을 나타낸다. 이상의 실험결과들로부터 본 논문에서 제안한 CCD 카메라와 레이저 3차원 센서를 이용한 2단계 지능형 로봇 빈 피킹이 성공적으로 완수되었다.

Table 1 Result of robot bin-picking's pose

2차원 인식		3차원 인식					
x	y	x	y	z	Roll	Pitch	Yaw
1398.4	-2.1	1430.8	-27.3	549.0	-4.6	7.9	-165.4
1417.2	1.6	1448.5	-20.6	550.1	-9.9	3.8	-155.7
1408.4	6.4	1440.0	-22.1	545.2	0.3	-2.2	179.5

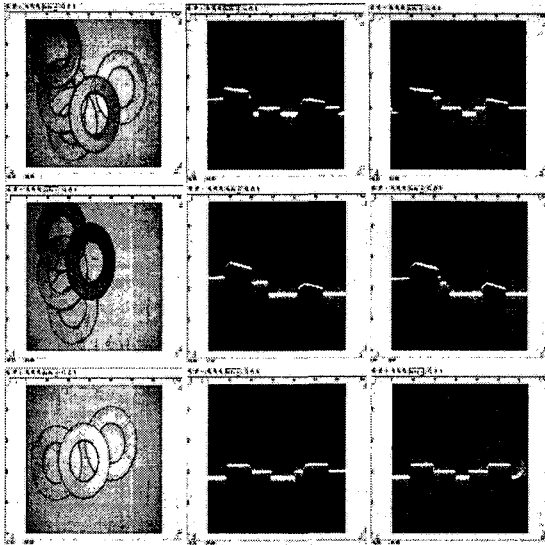


Fig. 21 Various shape in 3D hole object

6. 결론

본 논문에서는 공간상에 난잡하게 쌓여있는 비정렬 홀(Hole) 물체에 대하여 자동으로 인식, 핸들링을 수행할 수 있는 지능형 로봇 빈-피킹 모듈을 개발하였다. 비정렬 홀 부품의 초기 위치 인식을 위하여 비접촉식 2차원 CCD 카메라를 이용함과 동시에 정확한 3차원 위치와 방향 정보를 추출하기 위해 레이저 센서를 단계적으로 적용하는 방법을 제시하였다. 핸드아이 로봇의 측정 자세 변화에 대한 3차원 측정의 보정문제에 있어서 미리 센서 보정단계에서 고려할 수 있는 자동 보정기법을 제안함으로써 복잡한 기구학적 문제를 단순화하여 강인한 빈-피킹 작업이 수행되도록 하였다.

레이저 빔의 세선화시 픽셀 단위의 오차보다 낮은 성능을 얻기 위해서 강도 2차함수로 적합하여 탐색하는 알고리즘을 개발하였고 작업 대상물의 형상에 구속적으로 적용할 수 있는 허프 변환 알고리즘을 개발하였다.

향후 과제는 다양한 종류의 작업 모델이 복합적으로 비정렬되어 있을 경우에 대한 연구가 남아있으며 또한 전체 작업 속도를 올리기 위한 연구가 지속되어야 한다.

참고문헌

1. Shin, C. B., Kim, J. D. and Lee, J. W., "A study on development of PC based in-line inspection system with structure light laser," J. of KSPE, Vol. 22, No. 11, pp. 82-90, 2005.
2. Rahardja, K. and Kosaka, A., "Vision-based binpicking: recognition and localization of multiple complex objects using simple visual cues," IEEE Proc. of International Conference on Intelligent Robots and System, Vol. 3, pp. 1448-1457, 1996.
3. Ikeuchi, K., "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.
4. Zhang, Y. and Paik, J., "3-D Object Representation from Multi-view Range Data Applying Deformable Superquadrics," Int'l Conf. Pattern Recognition, Vol. 3, pp. 273-276, 2002.
5. Tsai, R. Y., "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-self TV cameras and lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 323-44, 1987.
6. Hujazi, A. and Sood, A., "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.
7. Seitz, G. and Tiziani, H. J., "Resolution limits of active triangulation systems by defocusing," Optical Engineering, Vol. 32, pp. 1374-1383, 1993.