

수정 하후변환을 이용한 전선의 중심위치의 인식

안경관
기계자동차공학부

<요 약>

최근 정보사용기기의 급증으로 전력을 안정적으로공급하는 것이 무엇보다도 중요하다. 특히 안정적인 전력공급을 위하여 활선보수공사를 자율적으로 실현하기 위해 로봇의 자율 제어 기술이 필수적으로 요구되어지고 있다. 본 연구에서는 활선보수공사의 대표작업중 전선의 삽입작업을 대상으로하여, 본 작업을 자율적으로 수행하기 위해 필요한 전선의 3차원 중심위치를 신속, 정확하게 인식하는 알고리즘을 제안한다. 본 연구에서는 기존의 하후변환을 수정하여 2차원 평면에서 전선의 중심위치를 인식하는 알고리즘을 제안하고, 나아가 이를 바탕으로 전선의 3차원 중심 위치를 인식하기 위하여 계산법을 제안한다. 이를 상기 대표작업중 전선의 중심위치의 인식에 응용하여 제안한 인식법의 유효성을 확인하였다.

Recognition of the Center Position of Electric Line Using Modified Hough Transform

Ahn, KyoungKwan
School of Mechanical and Automotive Engineering

<Abstract>

Nowadays it is strongly requested to supply electric power safely and uninterruptedly. For this purpose, a 6-link electro-hydraulic dual-armed manipulator has been developed to realize the maintenance task of active electric power distribution lines autonomously. In order to realize these tasks autonomously, the three dimensional position of target object must be recognized accurately and rapidly. In this report, the insertion task of an electric line into a sleeve is selected as the typical task of the maintenance of

active electric power distribution lines and a modified Hough transform method and optimal target position calculation method are newly proposed in order to recognize the center position of the electric line. By the proposed modified Hough transform, the center position of the electric line can be recognized without respect to the noise of image and the shape of electric lines.

1. 서론

최근, 컴퓨터 등의 정보기기의 사용이 급증함에 따라 전력을 안정적으로 공급하는 것이 무엇보다도 중요한 부분이 되었다. 특히 배전선의 보수공사를 수행할 때, 송전을 멈추지 않고 공사를 수행하는 활선공사가 더욱 요구되어지고 있다. 그런데, 상기 활선공사는 높고 불안정한 장소에서의 작업일 뿐만 아니라, 작업시 감전 등의 안전사고와 3D산업에서의 작업자의 감소 등의 원인으로 이와 같은 작업을 원격제어 혹은 기계의 완전 자율에 의해 수행할 필요가 있다. 현재는 일본, 캐나다, 미국 등지에서 상기 활선공사를 전용공구에 의한 원격조작 매니플레이터에 의하여 반자동으로 수행하고 있으며 그 대부분은 마스터 슬레이브(Master-Slave) 방식의 원격조작 매니플레이터 시스템이다⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. 그런데 마스터 슬레이브 방식의 작업은 CCD카메라 등에 전송되어 온 작업환경을 보면서 작업을 수행하므로 실제 작업자가 직접 작업하는 경우보다 작업효율이 훨씬 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 이에 대한 대안으로서 인간이 개입하지 않고 작업을 자율적으로 수행할 수 있는 자율제어 시스템을 본 연구에서는 구축하고자 한다. 이와 같은 옥외작업에 대해서 자율제어 시스템을 구축하기 위해서는 기본행동기로서 고정도의 위치 및 힘제어기와 작업 대상물의 목표 위치의 인식기 및 작업경로 판단기 등의 세부 기술에 대한 연구가 필수불가결한 요소가 된다.

저자는 활선공사중에서 볼터와 너트의 장착 및 체결작업과 전선의 슬리브에의 삽입작업을 활선공사에서의 대표작업으로 선정하여, 작업의 자율화를 목표로 현재 연구를 진행하고 있다. 전선의 중심위치를 안다고 가정할 경우, 저자에 의해 제안된 힘제어 알고리즘⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾ 및 협조 제어 알고리즘⁽⁷⁾에 의해, 부분적인 조립작업의 자율화가 실현되어 있다.

본 연구에서는 전선의 슬리브에의 삽입작업의 완전자율화를 위해 필요한 전선의 중심위치의 인식을 위하여 하후변환(Hough Transform)⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾을 수정한 전선의 중심위치의 인식수법을 새롭게 제안한다. 또한, 제안한 하후변환에 의해 구한 화상에서의 전선의 중심위치로부터 실제의 전선중심의 3차원 좌표를 구하기 위해 다수의 화상을 이용한 목표위치의 최적화를 수학적으로 유도한다. 마지막으로 제안한 다수의 화상을 이용한 수정된 하후변환에 의한 전선의 중심위치의 인식법을 실제의 배전공사중에서 전선의 슬리브에의 삽입작업에 응용하여 제안한 인식법의 유효성을 확인한다.

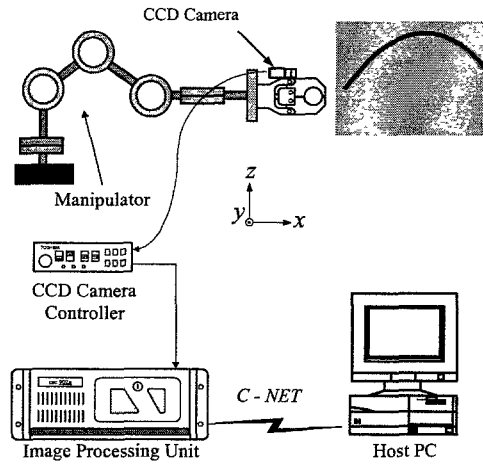


Fig.1 System Configuration of 6 link electro-hydraulic manipulator

2. 실험장치

실험장치의 개략도를 그림1에 나타낸다. CCD카메라는 PC에 의해 제어되는 전기유압식 6축 매니플레이터의 선단에 장착되어져 화상을 취득한다. 얻어진 다수의 화상은 화상처리 장치에서 전선의 3차원 중심좌표가 연산되어져 그 계산 결과는 호스터 PC에 보내진다. CCD카메라의 CCD는 1/3인치, 4.1×10^5 화소, 렌즈의 초점거리는 $f = 15$ [mm] 이다. 화상처리장치의 CPU는 Pentium 166[MHz]이고, 8 bit, 256단조의 광도정보를 처리한다. 호스터PC의 CPU는 MMX Pentium 200[MHz]이다. 실험에 사용되어지는 매니플레이터의 절대위치는 매니플레이터의 각 축의 엔코더(분해능:0.0044[Deg])에 의해 연산되어 PC에 입력된다. 실제의 활선공사시에는 그림 2에 나타낸 바와 같이 2대의 매니플레이터에 의해 작업을 수행한다.

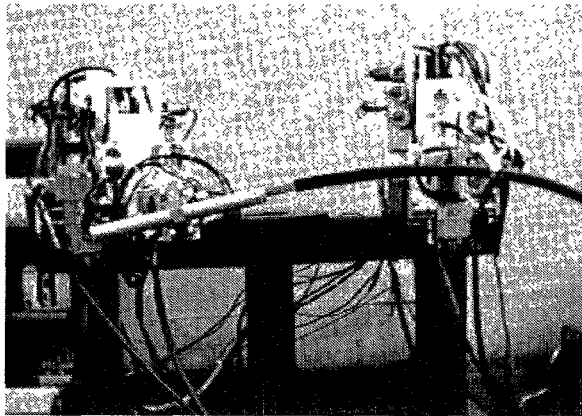


Fig.2 Insertion Task of Electric Line to Sleeve

3. 수정하후변환을 이용한 화상에서의 전선의 중심위치 인식

3.1 수정하후변환의 제안

본 논문의 대상작업인 전선의 슬리브에의 삽입작업을 자율적으로 수행하기 위해서는 전선의 중심위치를 인식할 필요가 있다. 그러나, 이 보수작업이 수행되어지는 현장에서는 목표물이 되는 전선 이외에도 배경이나 다른 물체에 의한 전선의 은폐 등에 의해 전선의 중심부의 인식이 매우 곤란하다. 이와 같은 불완전한 정보로부터 도형의 파라미터를 찾는 강건한 인식수법으로서, 하후변환을 이용한 수법이 제안되어져있다. 하후변환은 지금으로부터 30년전에 하후에 의해 제안되어졌으며, 그 원리는 그림 3과 같다, 즉 식(1)에 의해 표현되어진 2차화 화상으로부터 직선의 기울기 (a)와 절편 (b)을 구하기 위해 (a, b)파라미터 공간상에서 히스토그램을 구성, 그 피크치를 탐색함으로써 직선의 기울기와 절편을 구할 수 있다.

$$y = ax + b \quad (1)$$

여기서 파라미터 공간에 구성된 히스토그램을 나타내는 행렬을 어큐물레이터 행렬 (Accumulator Matrix)이라 한다. 하후 변환은 직선의 기울기와 절편을 구하기 위해 고안된 수법이지만, 여기서는 전선의 중심을 인식하기 위해 전선의 형태를 포물선으로 근사시켜 상기 하후변환을 수정하여 포물선식으로 표현되어진 식(2)의 (a, b, c)파라미터를 구하고자한다.

$$y = a(x-b)^2 + c \quad (2)$$

직선의 경우는 상기 어큐물레이터 행렬이 2차원 배열임에 반해, 포물선의 경우는 3차원 배열이 됨을 알 수 있다.

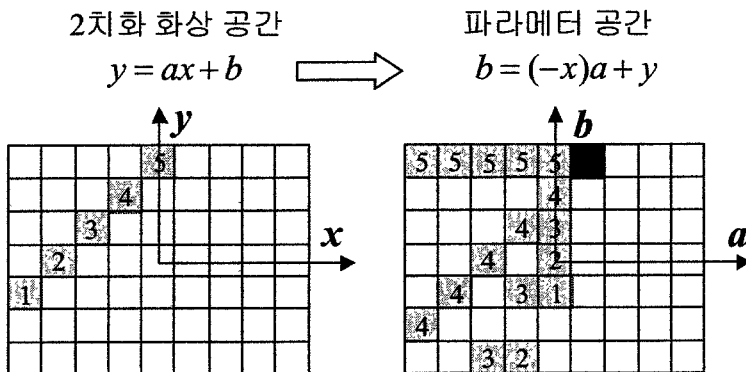


Fig.3 Principle of Hough Transform

3.2 수정하후변환을 이용한 전선중심의 인식

본 논문에서 이용되어지는 수정하후변환을 이용한 전선중심의 인식법을 그림4에 나타내고 있다. 우선 계산시간의 단축을 위해 CCD카메라로부터 취득한 원화상을 1/10사이즈로 축소시키고 축소한 화상을 이치화처리한다. 이 이치화 화상에 본 논문에서 제안한 수정하후변환을 적용시켜 3차원 파라미터 공간상에 투표한다. 이 때, 투표수가 가장 많은 파라미터 값이 전선의 중심위치 및 기울기가 된다. 그림3의 하단부에는 상기 식(2)의 포물선의 기울기를 현재의 전선의 기울기로 고정한 상태에서 포물선 중심(x,y)에 대한 어큐뮬레이터 행렬을 나타내고 있다. 하단부의 그래프에서 색이 짙을수록 겹친 횟수가 많음을 나타내며, 그 좌표가 전선의 중심좌표를 의미하게 된다. 다음으로 수정하후변환을 이용한 인식실험결과에 대하여 설명한다.

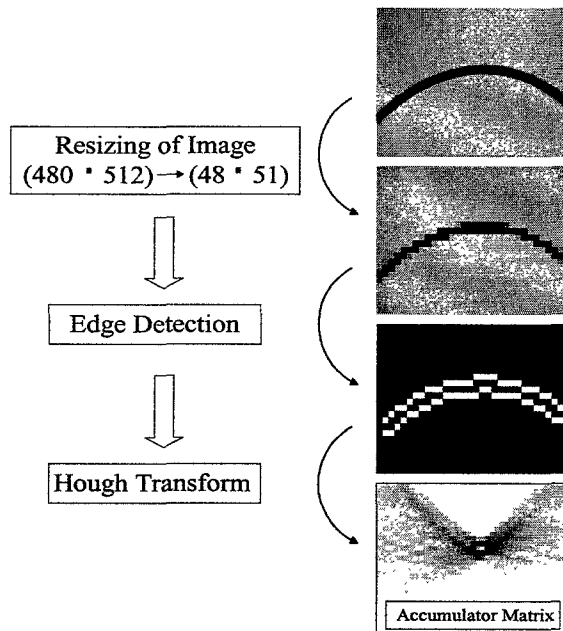


Fig. 4 Algorithm for Recognition of Electric Line

3.3 수정하후변환을 이용한 전선중심인식 실험

본절에서는 전절에서 제안한 수정하후변환의 강건성을 확인하기 위하여, 각 화상에 3종류의 노이즈를 넣은 경우, 장애물이 있는 경우 및 대상물이 은폐되어있는 경우에 대해서 전선 중심의 인식 실험을 실시했다.

3.3.1 노이즈에 관한 검토

그림5는 노이즈를 포함한 전선의 화상에 대하여 제안한 수정하후변환을 적용한 결과를 나타내고 있다. 그림5의 상단부는 그림4의 상단부에 나타내고 있는 원화상에 각각 **Gaussian Noise**, **Salt & Pepper Noise** 및 **Speckle Noise**를 임의로 넣은 화상을 나타내고 있다.

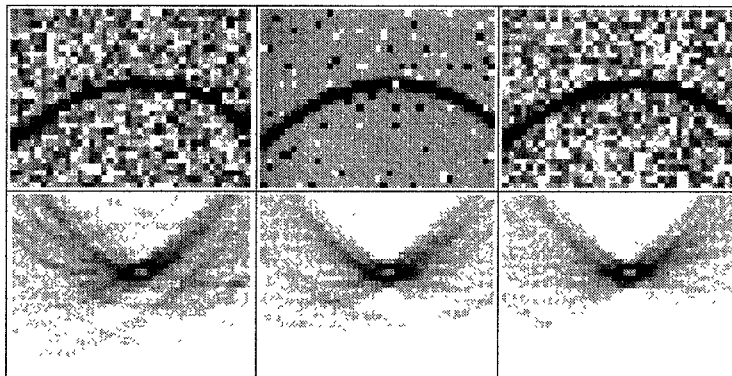
그림4의 하단부는 제안한 수정하후변환의 결과를 나타내고 있다. 하단부의 x 축은 식(2)의 b 의 값(즉, 포물선의 중심의 x 좌표)을, y 축은 포물선의 c 의 값(포물선의 중심의 y 좌표)를 각각 나타낸다. 하단부의 결과로부터 다양한 노이즈에 상관없이 전선의 중심(여기서는 $(x, y)=(1,2)$)을 인식하고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 장애물 및 목표물의 은폐에 관한 검토

본 논문에서 대상으로 하고 있는 활선공사의 작업환경을 고려한다면, 전선이 위치하는 화면에 다른 물체가 함께 혼재하던가 아니면 전선이 다른 물체에 은폐될 가능성을 배제할 수 없다. 그런 경우를 고려하여 원형 및 직각형의 장애물이 있는 경우와 전선이 부분적으로 은폐되어 있는 경우에 대해서 전선중심의 인식 실험을 수행했다. 그 결과를 그림6의 (a), (b), (c)에 각각 나타내고 있다. 그림6의 상단부는 원래의 화상을, 중단부는 전선의 중심좌표에 대한 어큐물레이터 행렬의 결과를, 하단부는 원래의 장애물이 포함되어 있는 이치화 화상과 수정하후변환의 연산결과로부터 구한 전선의 형상을 겹쳐서 나타내고 있다. 이 결과로부터 2종류의 대표적인 장애물과 부분적인 은폐가 있는 경우의 전선에 대해서도 제안한 수정하후변환에 의해 전선의 중심을 인식할 수 있음을 확인하였다.

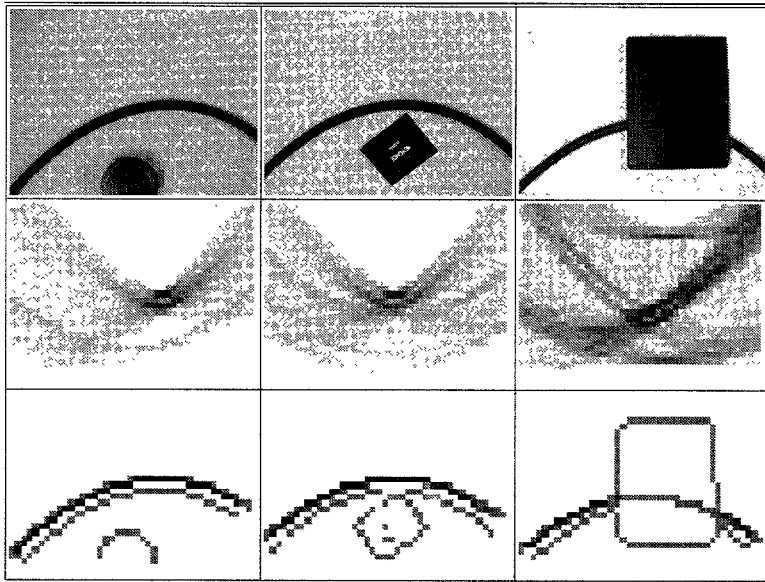
3.3.3 기울기가 다른 전선에 관한 검토

그림5에 제시된 전선과 기울기가 다른 전선에 대하여 실험을 수행하였다. 그 결과를 그림7에 나타내고 있다. 본 수정하후변환을 적용한 결과 기울기가 다른 전선에 대해서도 그 중심을 인식할 수 있다는 것을 확인하였다.



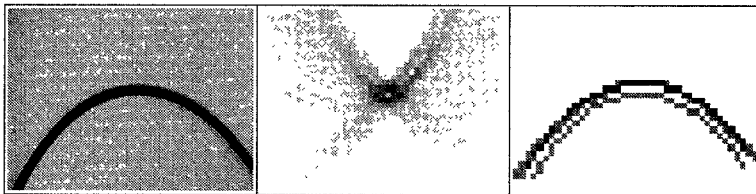
(a) Gaussian (b) Salt & Pepper (c) Speckle

Fig. 5 Hough Transform with Noise Image



(a) Round Obstacle (b) Rectangular Obstacle (c) Occlusion

Fig. 6 Hough Transform with Obstacles and Occlusion



(a) Electric Line (b) Accumulator Matrix (c) Estimated with different shape Electric Line

Fig. 7 Hough Transform with Different Shape

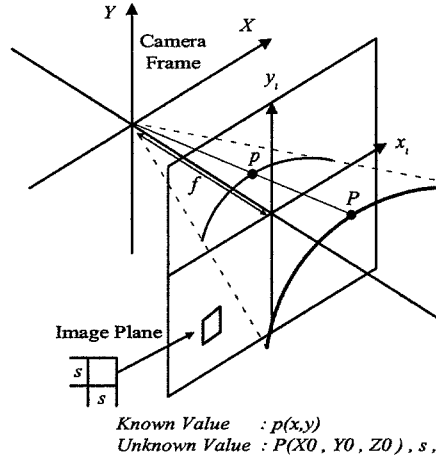


Fig.8 Pin-Hole Camera Model

4.다수의 화상을 이용한 전선중심의 인식

3장에서는 제안한 수정 하후변환을 이용하여 2차원 화상에서의 전선의 중심좌표를 구할 수 있었다. 그런데, 본 논문에서의 전선삽입작업을 실현하기 위해서는 전선중심의 3차원 좌표를 알아야한다. 본절에서는 전선중심의 3차원 좌표를 구하기 위해 매니퓰레이터의 움직임과 그 때 촬영한 화상에서의 전선위치를 기하학적인 관계를 이용하여 전선중심의 3차원좌표의 최적해를 구하는 방법을 소개한다. 또한 이 유도된 전선중심 인식법을 실제 매니퓰레이터를 이용한 전선삽입작업에 응용한다.

4.1 기본 원리

본 절에서는 카메라 모델로서 그림8에 나타낸 것과 같은 **Pin-Hole**카메라 모델을 이용한다. Z 축은 카메라의 초점과 같은 방향이고 X , Y 축은 각각 화상의 수평, 수직방향을 나타낸다. 특징점을 $P=[X_0, Y_0, Z_0]$ 로 하고, 화상에서의 특징점의 좌표를 $p=[x,y]$, 1[Pixel]당의 실제의 거리를 s , 초점거리를 f 로 정의하면 식(3)과 같은 비례관계가 성립한다.

$$x = \frac{f X_0}{s Z_0}, \quad y = \frac{f Y_0}{s Z_0} \quad (3)$$

식(3)에서 화상의 특징점은 3장의 수정 하후변환에 의하여 기지의 값이고, 그 이외의 값은 미지라고 가정한다. 물론 1[Pixel]당의 실제의 거리 s 도 기지의 값이라고 하여도 무방하나, 향후 완전 자율시스템에서는 카메라의 줌기능을 포함하여 넓은 영역에서 목표물을 인식하기 위하여 미지의 값으로 가정한다. 즉, s 가 미지라는 조건에 의해 카메라의 어떠한 줌 상태에서도 카메라의 캘리브레이션이 필요없게 된다. 여기서 식(3)은 그대로는 폴리지

않으므로 매니플레이터의 공간상에서의 움직임과 화상에서의 전선의 중심위치의 변화의 기하학적인 관계를 이용하여 식(4)가 유도되어진다.

$$x_i = \frac{f(X_0 + \Delta X_i)}{s(Z_0 + \Delta Z_i)}, \quad y_i = \frac{f(Y_0 + \Delta Y_i)}{s(Z_0 + \Delta Z_i)} \quad (4)$$

여기서 X_0, Y_0, Z_0 는 매니플레이터의 초기위치를, $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ 는 매니플레이터를 초기위치에서 X, Y, Z 축 방향으로 움직인 거리를, x_i, y_i 는 2차원 화상에서의 전선의 중심위치를 각각 나타낸다. 식(4)로부터 X_0, Y_0, Z_0 의 최적치를 구하기 위하여 식(5)와 같은 평가함수 J_n 을 정의한다.

$$J_n = \sum_{i=1}^n \left[\left\{ (Z_0 + \Delta Z_i) \cdot x_i - r(X_0 + \Delta X_i) \right\}^2 + \left\{ (Z_0 + \Delta Z_i) \cdot y_i - r(Y_0 + \Delta Y_i) \right\}^2 \right] \quad (5)$$

where $r = \frac{f}{s}$

여기서 n 은 매니플레이터의 이동횟수를 나타낸다. 식(5)에서 평가함수 J_n 을 최소화하는 X_0, Y_0, Z_0 가 목표물의 중심위치가 된다. J_n 을 최소화하는 X_0, Y_0, Z_0 를 구하기 위해 식(6) 편미분 방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial J_n}{\partial X_0} = 0, \quad \frac{\partial J_n}{\partial Y_0} = 0, \quad \frac{\partial J_n}{\partial Z_0} = 0, \quad \frac{\partial J_n}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

식(6)을 풀기 위해 편미분방정식을 전개하면 식(7)~(10)이 구해진다.

$$\frac{\partial J_n}{\partial X_0} = 2 \sum_{i=1}^n \{ (X_0 + \Delta X_i) \cdot r - (Z_0 + \Delta Z_i) \cdot x_i \} \cdot r = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial J_n}{\partial Y_0} = 2 \sum_{i=1}^n \{ (Y_0 + \Delta Y_i) \cdot r - (Z_0 + \Delta Z_i) \cdot y_i \} \cdot r = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial J_n}{\partial Z_0} = 2 \sum_{i=1}^n \left[\{ (X_0 + \Delta X_i) \cdot r - (Z_0 + \Delta Z_i) \cdot x_i \} \cdot x_i + \{ (Y_0 + \Delta Y_i) \cdot r - (Z_0 + \Delta Z_i) \cdot y_i \} \cdot y_i \right] = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial J_n}{\partial r} = 2 \sum_{i=1}^n \left[(X_0 + \Delta X_i) + \{ (Y_0 + \Delta Y_i) \cdot r - (Z_0 + \Delta Z_i) \cdot y_i \} \cdot (X_0 + \Delta X_i) \right] = 0 \quad (10)$$

식(7)과 (8)로부터 식(11), (12)가 유도되어진다.

$$r \cdot X_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [-\Delta X_i \cdot r + x_i \cdot Z_0 + x_i \cdot \Delta Z_i] = 0 \quad (11)$$

$$r \cdot Y_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [-\Delta Y_i \cdot r + y_i \cdot Z_0 + y_i \cdot \Delta Z_i] = 0 \quad (12)$$

식(11), (12)를 식(9)에 대입하면 식(13)이 유도된다.

$$r = \alpha \cdot Z_0 + \beta \quad (13)$$

$$\text{where } \alpha = \frac{\left\{ \frac{(sx)^2 + (sy)^2}{n} - sxy \right\}}{\text{den}}$$

$$\beta = \frac{\left\{ \frac{(sx \cdot sxz + sy \cdot syz) - sdzxy}{n} \right\}}{\text{den}}$$

$$sx = \sum_{i=1}^n x_i \quad sy = \sum_{i=1}^n y_i \quad sxy = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \quad sxz = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \Delta Z_i \quad syz = \sum_{i=1}^n y_i \cdot \Delta Z_i$$

$$sdzxy = \sum_{i=1}^n \left\{ \Delta Z_i \cdot (x_i^2 + y_i^2) \right\} \quad sdx = \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad sdy = \sum_{i=1}^n \Delta Y_i$$

$$sxx = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot x_i) \quad sy = \sum_{i=1}^n (y_i \cdot y_i) \quad \text{den} = \left(\frac{sx \cdot sdx + sy \cdot sdy}{n} - sxx - syy \right)$$

또, 식(11), (12) 및 (13)에서 다음 식이 유도된다.

$$r \cdot X_0 = \alpha_x \cdot Z_0 + \beta_x \quad (14)$$

$$r \cdot Y_0 = \alpha_y \cdot Z_0 + \beta_y \quad (15)$$

$$\text{where } \alpha_x = \frac{(sx - sdx \alpha)}{n}, \quad \beta_x = \frac{(sxz - sdx \beta)}{n}$$

$$\alpha_y = \frac{(sy - sdy \alpha)}{n}, \quad \beta_y = \frac{(syz - sdy \beta)}{n}$$

$$\begin{aligned} r^2 X_0 &= r \cdot (\alpha_x \cdot Z_0 + \beta_x) \\ &= c_1 \cdot Z_0^2 + c_2 \cdot Z_0 + c_3 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} r^2 Y_0 &= r \cdot (\alpha_y \cdot Z_0 + \beta_y) \\ &= d_1 \cdot Z_0^2 + d_2 \cdot Z_0 + d_3 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{where } c_1 = \alpha \cdot \alpha_x, c_2 = (\alpha \cdot \beta_x + \beta \cdot \alpha_x), c_3 = \beta \cdot \beta_x$$

$$d_1 = \alpha \cdot \alpha_y, d_2 = (\alpha \cdot \beta_y + \beta \cdot \alpha_y), d_3 = \beta \cdot \beta_y$$

식(10)의 양변에 r 을 곱하고, 상기의 식(13)~(17)을 대입하여 Z_0 에 대하여 정리하면 식(18)의 Z_0 에 관한 방정식이 유도되어진다.

$$a_1 \cdot Z_0^2 + a_2 \cdot Z_0 + a_3 = 0 \quad (18)$$

where

$$a_1 = \sum_{i=1}^n \left\{ \begin{array}{l} (\alpha_x^2 + \alpha_y^2) + 2c_1 \Delta X_i + 2d_1 \Delta Y_i - \alpha_x x_i - \alpha_y y_i \\ -(x_i \Delta X_i + y_i \Delta Y_i) \alpha + \alpha^2 ((\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2) \end{array} \right\}$$

$$a_2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot (\alpha_x \beta_x + \alpha_y \beta_y) + 2c_2 \Delta X_i + 2d_2 \Delta Y_i \\ -\beta_x x_i - \beta_y y_i - \alpha_x \Delta Z_i x_i - \alpha_y \Delta Z_i y_i \\ -(x_i \Delta X_i + y_i \Delta Y_i) \beta + 2\alpha \beta ((\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2) \\ -\alpha x_i \Delta X_i \Delta Z_i + y_i \Delta Y_i \Delta Z_i \end{array} \right\}$$

$$a_3 = \sum_{i=1}^n \left\{ \begin{array}{l} \beta_x^2 + \beta_y^2 + 2 \cdot c_3 \Delta X_i + 2d_3 \Delta Y_i - \beta_x \Delta Z_i x_i \\ -\beta_y \Delta Z_i y_i + \beta^2 ((\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2) \\ -\beta (x_i \Delta X_i \Delta Z_i + y_i \Delta Y_i \Delta Z_i) \end{array} \right\}$$

식(18)로부터 Z_0 를 구하고, 다음에 식(13)을 이용하여 r 을 구한다. 마지막으로 식(14) 및 식(15)로부터 X_0 , Y_0 가 구해진다. 여기서 구한 X_0 , Y_0 , Z_0 가 카메라의 중심으로부터 실제 목표물의 위치가 된다. 제안한 다수의 화상을 이용한 전선의 3차원 중심위치의 계산법은 목표물의 특징부의 치수만 알고 있다면 카메라의 캘리브레이션이 필요없는 신속, 간단한 계산수법이다.

4.2 다수의 화상을 이용한 전선의 중심위치의 인식 실험

상기에 제안한 계산법의 유효성을 확인하기 위하여, 실제 배전공사에 사용되어지는 매니플레이터를 이용하여 전선의 중심위치 인식 실험을 수행하였다. 이 때, 카메라의 중심으로부터 전선의 초기 중심위치는 측정에 의해, $(X_0, Y_0, Z_0) = (60, -73, 1000) \pm 1[\text{mm}]$ 라는 결과를 얻었다. 그림9(a)에서는 실제 매니플레이터가 ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i 만큼 이동하였을 때의 화상을 나타내고 있으며, 그림9(b)에서는 각 화상에 대해 제안한 수정하후변환을 적용한 결과로부터 구한 가상적인 포물선과 원화상에 이치화처리한 화상을 겹쳐서 나타내고 있다. 이 결과로부터 수정하후변환에 의해 고정도로 화상에서의 전선의 중심위치가 인식됨을 확인할 수 있다. 각각의 경우에 있어서의 매니플레이터의 이동거리는 표1의 좌측에 기입되어 있다. 여기서 전선에 대하여 수직거리(ΔZ)가 클수록 카메라와 전선간의 거리가 커져 전선이 작게 보임을 알 수 있다. 또한 수정하후변환을 적용하여 전선의 기울기와 중심점을 구한 결과는 표1의 우측에 표시되어 있다. 이 결과와 4.1절의 계산식을 이용하여 전선의 중심위치를 계산한 결과 $(X_0, Y_0, Z_0) = (60.7, -73.3, 988)[\text{mm}]$ 의 결과를 얻었다. 이 결과는 실제 전선중심좌표에 대해 x , y 축에 관해서는 약 $1[\text{mm}]$, z 축에 관해서는 $12[\text{mm}]$ 의 오차이다. 이 오차는 전선의 삽입작업을 수행하는데 충분한 정도이다. 이 결과로부터 제안한 수정하후변환을 이용한 화상에서의 전선중심의 인식 및 다수의 화상을 이용한 전선의 3차원 공간에서의 중심위치의 계산수법의 유효성을 확인할 수 있다.

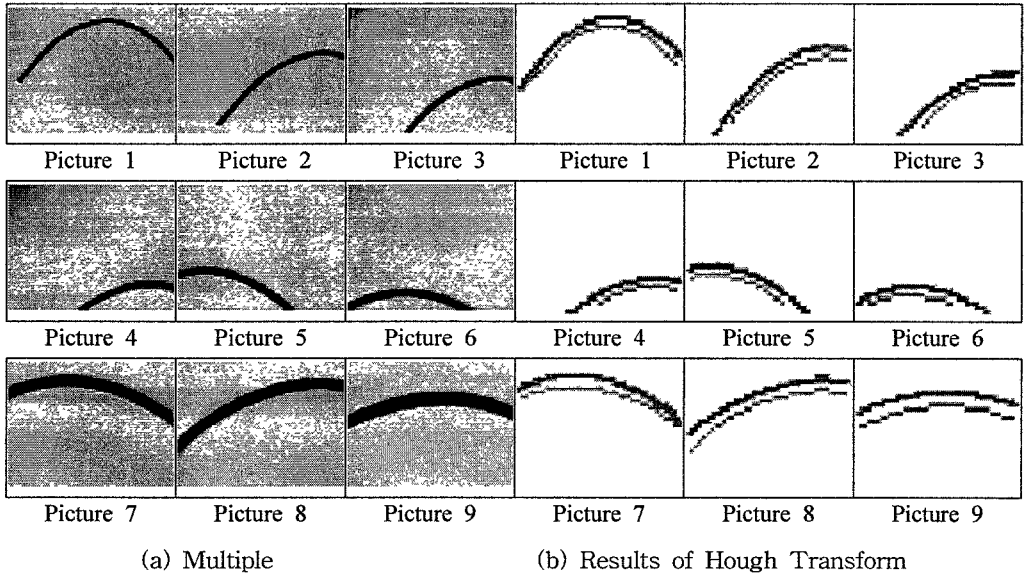


Fig. 8 Experiments by using multiple images

Table 1 Movements of Manipulator and Results of Modified Hough Transform

Picture No.	Movement of Manipulator[mm]			Modified Hough Transform ($y=a(x-b)^2+c$)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	a	b	c
1	-300	0	300	-0.033	3	12
2	-150	170	100	-0.028	14	5
3	-50	180	100	0.020	18	-1
4	50	120	0	-0.018	14	-8
5	0	-230	-100	-0.022	-14	-5
6	50	-130	-200	-0.020	-6	-10
7	-150	-100	-500	-0.018	-6	11
8	-150	45	-500	-0.012	13	10
9	-110	-45	-600	-0.010	2	7

5. 결론

본 연구에서는 활선공사의 대표적인 작업중 하나인 전선의 슬리브에의 삽입작업의 완전 자율화를 실현하기 위해 필요한 전선의 중심위치의 인식을 위하여 하후변환을 수정한 전선의 중심위치의 인식수법을 새롭게 제안하였다. 제안한 수정하후변환은 2종류의 대표적인 장애물과 부분적인 은폐가 있는 경우 및 다른 기울기를 가진 전선에 대해서도 전선의 중심을 제대로 인식할 수 있음을 확인하였다.

또한, 실제의 전선중심의 3차원 좌표를 구하기 위해 다수의 화상을 이용한 목표위치의

최적화를 수학적으로 유도하여 실제의 배전공사중에서 전선의 슬리브에의 삽입작업 중 전선의 중심위치의 인식에 응용하여 제안한 인식법의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

1. M. Nakashima, H. Yakabe, Y. Maruyama, K. Yano, K. Morita, H. Nakagaki: Application of Semi-Automatic Robot Technology on Hot-Line Maintenance Task, Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A, pp.843-850 (1995)
2. M. Boyer: System Integration in Telerobotics: Case Study: Maintenance of Electric Power Lines, Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1042-1047 (1996)
3. S. Tanaka, Y. Maruyama, K. Yano: Work Automation with the Hot-Line Work Robot System "Phase II", Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on R&A, pp.1261-1267 (1996)
4. L. Penin, R. Aracil, M. Ferre, E. Pinto, M. Hernando, A. Barrientos : Telerobotic System for Live Power Lines Maintenance (ROBET), Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on R&A, pp.2110-2115 (1998)
5. K.K. Ahn, S.Yokota, T. Yamamoto : On Robust Impedance Force Control to a 6-Link Electro-hydraulic Manipulator, 14th World Congress of IFAC, Vol. G, pp.73-78 (1998)
6. K.K. Ahn, S.Yokota, H. Furuta : Force Control of to 6-Link Electro-hydraulic Manipulator(Application to the approaching of a bolt and the wrenching of a nut task), JSME(C), Vol. 65,No. 637,pp.3672-3677(1999)
7. K.K. Ahn, S.Yokota, H. Furuta : Coordinative control of a 6-link electro-hydraulic manipulator with dual arm (Application of discrete event control to the task of insertion of electric line to the sleeve), JSME(C), Vol. 66,No. 645,pp.1567-1573(2000)
8. P.V.C.Hough: Method and means for recognizing complex patterns, U.S. Patent 3069654 (1962)
9. R. Y92)ip, P.Tam, D.Leung : Modification of Hough Transform for circles and ellipses detection using 2-dimensional array, Pattern Recognition, Vol.25, No.9, pp.1007-1022(19)
10. S.K.Kang, S.H.Jeong, J.A.Park : Estimation of Moving Information for Tracking of Moving Objects, KSME International Journal, Vol.15, No.3, pp.300-308(2001)