# 비전 센서를 이용한 유연한 로봇팔의 끝점 위치 측정

## The Tip Position Measurement of a Flexible Robot Arm Using a Vision Sensor

신 효 필, 이 종 광, 강 이 석
(Hyo-Pil Shin, Jong-Kwang Lee, and E-Sok Kang)

**Abstract** : To improve the performance of a flexible robot arm, one of the important things is the vibration displacement measurement of a flexible arm. Many types of sensors have been used to measure it. The most popular has been strain gauges, which measures the deflection of the beam. Photo sensors have also been used for detecting beam displacement, and accelerometers are often used to measure the beam vibration. But the vibration displacement can be obtained indirectly from these sensors. In this article, a vision sensor is used as a displacement sensor to measure the vibration displacement of a flexible robot arm. Several schemes are proposed to reduce the image processing time and increase its accuracy. From the experimental results, it is seen that the vision sensor can be an alternative sensor for measuring the vibration displacement and has a potential for on-line tip position control of flexible robot systems.

**Keywords** · vision sensor, flexible arm, vibration displacement measurement

### I. 서론

로봇팔의 위치 정밀도는 생산성을 향상시키기 위해 팔을 고속으로 회전시키거나, 작업 영역의 확대를 위해 팔의 길이를 길게 할 때 저하되며, 구동 에너지를 줄이기 위해 팔을 경량화 할 경우 더 크게 저하될 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 로봇팔의 진동모드를 고려한 제어기의 설계가 요구된다.

또한 제어 시스템은 상태의 측정이 매우 중요하며, 전체 성능은 일반적으로 상태 측정의 수를 증가시키거나, 상태 측정의 정밀도를 향상시킴으로써 개선된다. 따라서 유연한 로봇팔의 제어 성능을 개선하는 하나의 방법은 진동하는 팔의 끝점 상태를 정확히 측정하는 것이다. 이를 위하여 이제까지의 많은 연구에서 스트레인게이지[1][2], 가속도계[3][4][5], 광학센서[6] 등이 사용되어 왔다. 최근에는 반도체 레이저와 Position Sensitive Detector(PSD)를 사용하는 광학장치가 유연한 팔의 끝점 변위의 실시간 측정을 위해 사용되고 있다[7]. 하지만 측정 범위가 ±20mm로 제한되어 있어 실제 유연한 로봇팔의 제어에 적용하기에는 한계점을 갖는다. 한편 제한된 각도의 범위(45° 이내)에서 끝점의 위치 측정에 선형 CCD 카메라를 사용한 예[5]가 보고되고 있는 점을 제외하고는 대부분의 경우 팔의 진동모드를 추정하여 제어에 이용하는 실정이다. 따라서 끝단의 처짐을 직접 측정할 수 있는 시스템이 바람직하다.

본 논문에서는 진동하는 빔의 변위를 측정하기 위하여 일반적인 산업용 카메라를 사용하였다. 카메라를 통한 영상 처리는 움직이는 물체의 위치를 효과적으로 측정할 수 있지만 방대한 양의 데이터로 인해 연산시간이 길어지는 단점을 갖는다. 본 논문에서는 이러한 시간 제약을 극복하여 유연한 로봇팔 끝점 변위를 실시간으로 측정하고자 한다. 또한 팔의 진동 형상에 기초한 교정데이터로부터 실거리를 환산하는 방법을 사용하여 단일 카메라를 통해 구한 거리 정보의 정밀도를 향상시켰다. 개발된 알고리즘의 유용성은 실제로 구성한 비전시스템을 이용한 실험과 시뮬레이션을 통해 입증되었다.

접수일자 · 1999. 10 18, 수정완료 : 2000 4. 14.
신효필 · 국방과학연구소
이종광, 강이석 · 충남대학교 기계설계공학과

### II. 수학적 모델[4]

단일링크로 구성된 유연한 로봇팔 제어계는 그림 1 과 같이 길이 $r_0$ 인 허브에 고정된 첨단질량이 부착된 Euler-Bernoulli 보로 이상화하여 해석한다. 그림에서 OXY는 허브 회전중심이 원점인 절대좌표계이며, Oxy는 보와 같이 회전하는 상대회전 좌표계이다. 회전 좌표계의 x축은 C점을 지나는 외팔보의 접선방향, y축은 이에 직교하는 방향이다. 팔 길이 방향의 위치 $x$는 계산 편의를 고려하여 C점으로부터의 값을, $y(x, t)$는 보의 횡방향 변형량을 나타낸다. 원심력, 로봇팔의 축 및 폭방향의 변위, 중력 및 회전시 발생하는 Coriolis력의 영향을 무시하고 로봇팔의 횡방향 진동에 대한 운동방정식과 경계조건을 Hamilton의 원리를 이용하여 유도한 후 Galerkin 모드합 방법을 사용하여 해를

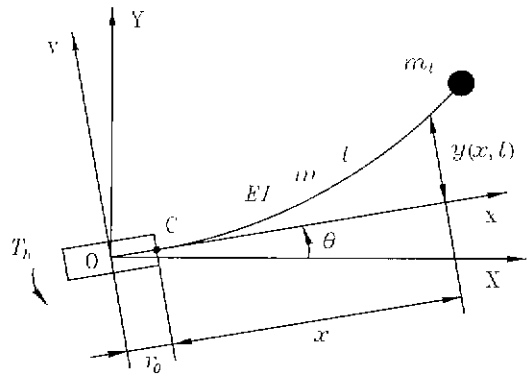



그림 1. 유연한 조작기의 모델링.
Fig. 1. Modeling of the flexible manipulator.

$$y(x,t) = \sum_{j=1}^{n} \phi_j(x)\, q_j(t) \tag{1}$$

와 같이 가정하면 모드에 관련된 다음 식을 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{Q}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{Q} = \ddot{\theta}\,\boldsymbol{F} \tag{2}$$

여기서 $n$은 가정된 모드 수이며, $q_j(t)$는 일반화된 좌표, $\phi_j(x)$는 경계조건을 만족하는 비교함수이며, $\boldsymbol{M}, \boldsymbol{K}, \boldsymbol{F}$는 각각 질량, 강성 및 힘 행렬을 나타낸다.

(2)의 행렬식에 대한 모달행렬 $\boldsymbol{P}$를 구하여

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{H} \tag{3}$$

로 상사변환을 하고 직교성 조건을 적용하면 다음과 같은 비연성(decouple) 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\boldsymbol{H}} + \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{H} = \ddot{\theta}\,\boldsymbol{E} \tag{4}$$

여기서

$$\boldsymbol{\Lambda} = \boldsymbol{P}^T\boldsymbol{K}\boldsymbol{P} = diag(\omega_1^2, \ldots, \omega_n^2)$$
$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{P}^T\boldsymbol{F} \tag{5}$$

여기서 $\omega_i$는 로봇팔의 $i$번째 모드의 고유진동수를 나타낸다.

또한, 구동부의 토오크 평형식을 정리하면 다음과 같다.

$$K_t V = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + \boldsymbol{S}^T\boldsymbol{H} + T_f \tag{6}$$

여기서,

$$\boldsymbol{S}^T = EI[\{r_0\phi_1'''(0) - \phi_1''(0)\}, \ldots, \{r_0\phi_n'''(0) - \phi_n''(0)\}]\boldsymbol{P}$$

이며, $J$는 하모닉 드라이버 및 CCD 카메라를 포함한 구동부의 관성 모멘트, $B$는 점성 마찰계수, $K_t$, $V$는 각각 모터의 회전력 상수와 구동 명령전압을, $T_f$는 쿨롱(Coulomb) 마찰을 나타낸다. 또 $\boldsymbol{S}^T\boldsymbol{H}$는 로봇팔이 모터 회전축에 미치는 굽힘 모멘트와 전단력에 관련된 항을 나타낸다.

## III. 비전 센서를 이용한 끝점 변위 측정

유연한 로봇팔의 진동을 실시간으로 측정하기 위하여 카메라를 사용하였다. 비전센서를 이용한 변위 측정 기법과 영상처리 시간을 단축시키고 측정정밀도를 향상시키기 위해 적용된 기법은 다음과 같다.

### 1. 카메라 교정

카메라로부터 얻어진 영상은 렌즈자체의 불균일성, 카메라 중심과 렌즈 중심과의 불일치와 같은 요소들에 의해 왜곡이 생긴다. 머신비전을 이용한 정밀한 측정이나 3차원 형상과 위치인식을 하거나 제품의 검사 등을 수행하고자 하는 경우 이러한 왜곡은 측정된 데이터에 내재된 오차로 작용한다. 따라서 기하학적 왜곡들을 고려한 카메라 모델링을 하는 것이 바람직하다.

카메라 내부변수들을 교정하기 위하여 그림 2와 같은 실험장치를 이용하여 Tsai가 제안한 방사상 왜곡을 고려하는 단일영상 동일평면상 2단계 교정방법을 이용하였다[8]. 영상은 알고리즘상의 행렬이 악조건이 되지 않도록 회전테이블을 y축 방향으로 30° 회전하여 획득하였다.

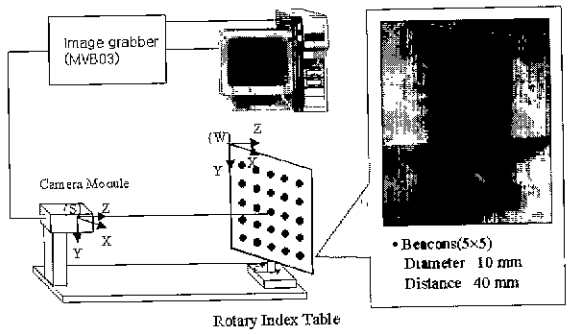



그림 2. 카메라 교정 실험장치.

Fig. 2. Experimental setup for the camera calibration.

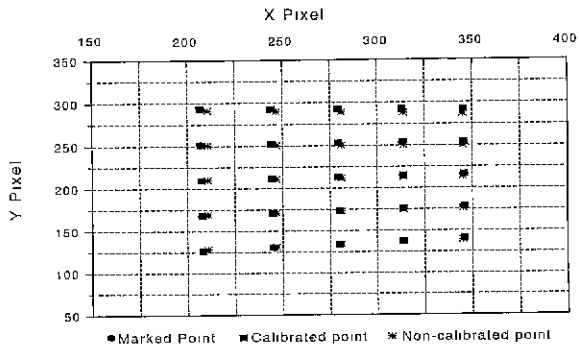



그림 3. 카메라 교정 결과.

Fig. 3. Results of camera calibration.

교정 결과는 그림 3과 같다. 표식점은 표식의 실제 위치를 나타내며, 교정점은 교정 알고리즘을 이용하여 구한 카메라 내부 변수들을 적용하여 실좌표를 추정한 점이며, 비교정점은 방사상 왜곡을 고려하지 않고 계산된 결과를 나타낸다. 교정된 카메라 내부 변수들은 초점거리 8.18mm, 왜곡계수는 0.0013으로 구해졌으며, 영상의 중심은 (322.47, 240.02)로 영상 중심과 프레임 메모리의 중심이 수 픽셀 내에서 일치하였다

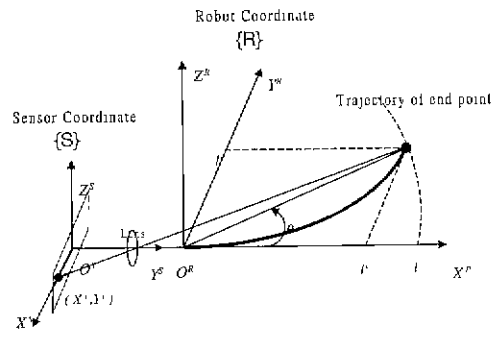



그림 4 위치 측정 시스템의 좌표계.

Fig. 4. Coordinate systems of the position measuring system.

2. 물체의 위치 측정

그림 4는 로봇 팔 위치 측정시스템의 좌표계를 나타내고 있다. 로봇 팔의 회전 좌표계, $\{R\}$은 허브의 회전축에 부착되어 있으며, $\{R\}$의 $X_R$의 연장선이 카메라의 렌즈 중심을 통과하도록 카메라를 설치하고, 그 연장선과 영상면의 교점을 센서 좌표계, $\{R\}$의 원점으로 하여 그림과 같이 좌표계를 설정한다.

이 좌표계에서 pinhole 카메라 기하학의 원근투사법으로부터 이상적인 영상좌표( $X_u$, $Y_u$ )는 다음 식과 같은 관계를 갖는다.

$$X_u = f\frac{l_y}{l_x + x_0} \tag{7}$$

여기서 $f$는 초점거리, $l_x$와 $l_y$는 각각 로봇 팔 좌표계에서의 끝점의 좌표이며, $x_0$는 렌즈의 중심과 로봇팔 좌표계 원점 사이의 거리이다.

또한, 반경방향 렌즈 왜곡을 고려하면 실제 영상 좌표 ( $X_d$, $Y_d$ )와 이상적인 영상좌표 ( $X_u$, $Y_u$ )는 다음 식과 같은 관계를 갖는다.

$$X_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \cdots) = X_u \tag{8}$$

여기서, $$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \tag{9}$$

이며, $k_i$는 왜곡계수를 나타낸다. 왜곡계수를 2차까지 사용하면 팔의 끝점 변위는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$l_y = \frac{X_d(1 + k_1 r^2) \cdot (l_x + x_0)}{f} \tag{10}$$

단일 카메라로부터 얻은 2차원 영상으로부터 물체의 3차원 위치 정보를 얻기 위해서는 그 물체까지의 깊이정보를 필요로 한다. 유연한 로봇 팔은 탄성 변형에 따라 팔 길이 방향의 위치( $l_x$ )도 같이 변화하게 되어 이에 대한 고려없이 정확한 위치정보를 얻기가 힘들다. 이를 위하여 실험에 사용된 길이 872mm의 팔의 변형량( $l_y$ )과 길이 방향의 직선거리( $l_x$ )를 측정하였으며, 2차 곡선으로 근사화한 결과는 그림 5와 (11)과 같다.

$$l_x = A l_y^2 + B l_y + C \tag{11}$$

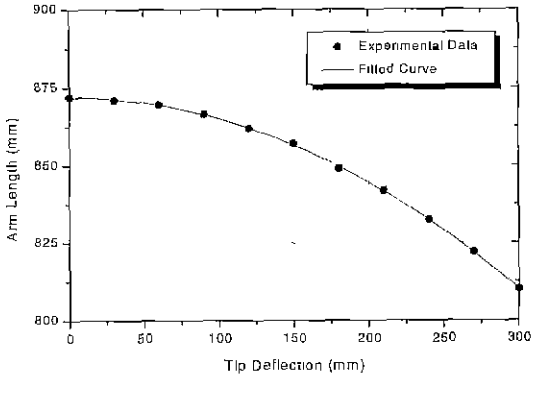



그림 5. 팔의 탄성 변형에 대한 길이 변화도.

Fig. 5. Arm length variations via tip deflection.

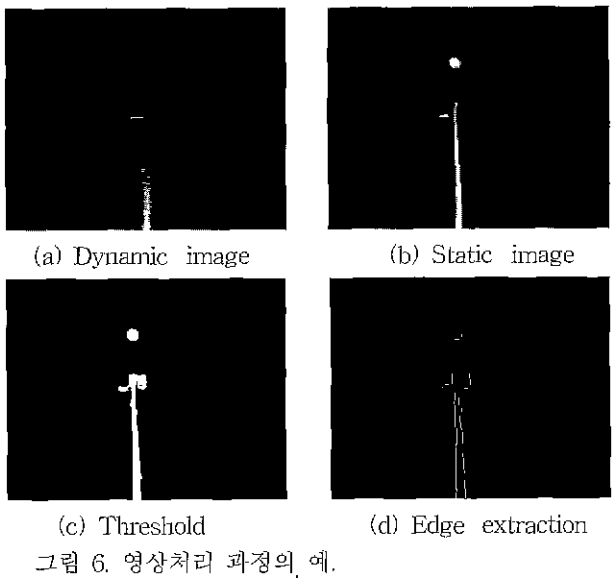
(10)과 (11)을 연립하여 풀면 팔의 탄성 변형이 고려된 실제 좌표를 추정할 수 있다.

3. 영상처리

비전 센서의 출력은 보통 초당 9Mbyte로서 영상처리를 위한 특수화된 하드웨어를 사용하여도 제어에 사용할 수 있는 정보를 얻어내는데 시간이 많이 소요되어 시스템의 샘플링 속도나 정밀도를 제한하는 요인이 된다. 더욱이 본 논문에서와 같이 물체의 이동 속도가 최대 약 1.6m/sec로 빠른 경우 실시간 측정을 더욱 어렵게 한다. 따라서 영상처리시간을 단축시키고 측정 정확도를 향상시키기 위한 알고리즘 개발이 필수적이다. 유연한 로봇팔 끝점 변위를 실시간으로 측정하는 것에 주안점을 두어 비교적 단순한 영상처리 알고리즘이 사용되었다. 영상처리는 영상의 획득, 설정된 관심영역의 이진화 처리 등의 전처리와 중심점 계산 등의 일련의 과정으로 진행되며, DSP를 사용하여 컴퓨터 CPU의 계산부하 없이 독립적으로 수행하도록 하였다.

3.1 영상의 저장

카메라 입력 화상을 프레임 메모리에 저장하는 방법에는 프레임모드와 필드모드가 있다. 한 개의 프레임은 홀수 필드와 짝수필드의 2개의 필드로 구성되어 있으며 두 필드는 인간이 편안히 볼 수 있도록 교대로 주사된다. 그림 6(a)에 보이는 바와 같이 움직이는 물체를 프레임모드로 촬상할 경우 두 개 필드간의 주사 시간 차이로 인해 동일 물체가 겹쳐진 것 같은 영상이 프레임 메모리에 저장된다. 또한 물체의 속도가 클수록 두 필드간 영상의 차이는 커지게 된다. 따라서 유연한 로봇팔의 진동과 같이 빠른 속도로 움직이며, 측정 정밀도가 주로 수평해상도에 관련되는 경우 영상처리 시간을 단축시키기 위해 수평해상도는 동일하고 수직해상도만 반으로 줄어드는 필드모드를 사용하는 것이 유리하다. 본 연구에서는 짝수 필드에 해당하는 640×240 픽셀 크기로 입력 화상을 저장하였으며, 홀수 필드에서 영상처리를 수행함으로써 영상처리 효과를 극대화



(a) Dynamic image (b) Static image

(c) Threshold (d) Edge extraction

그림 6. 영상처리 과정의 예.

Fig. 6. The example of image processing process.

하였다 또한 실시간 영상처리와 노이즈의 영향을 감소시키기 위하여 검은색 배경으로 단순화하였다.

3.2 이진화(threshold) 처리

영상처리 시간을 단축시키기 위하여 팔 끝단의 표식부분에 관심영역(ROI; Region Of Interest)을 설정하였으며, 이진화 방법으로 물체와 배경을 분리하도록 하였다. 임계치의 결정은 관심 영역 내에서의 명암도 히스토그램을 바탕으로 적절히 선정하였다.

3.3 검사 윈도우의 선정

로봇 팔 끝점 위치는 팔의 변형에 따라 수직 축 상으로 좌표 변화가 발생한다. 수직 최대 변위에 대한 실험 결과로부터 640×30의 관심영역을 설정하였으며 불필요한 계산량을 줄이기 위해 팔 끝단 표식 부분에 다음과 같은 과정으로 검사 윈도우를 설정하여 연산 시간을 더욱 줄이도록 하였다

첫째, 초기 팔 끝단의 중심과 ROI의 좌우 하단 좌표 사이의 직선 부분에 해당되는 픽셀을 읽어 들여 물체의 유무를 판단한다.

둘째, 물체가 검출된 경우 물체의 사선 부분을 통해 물체의 중심을 구한다.

셋째. 구해진 물체 중심으로부터 50×30의 검사 윈도우를 설정하고 그 영역 내에서만 영상처리를 수행한다.

3.4 로봇 팔 끝점의 계산

로봇 팔 끝점은 영상에서 팔 끝단에 부착된 원형 표식($\phi$15)의 중심에 해당된다. 중심점 계산은 검사 윈도우 영역 내에서 표식의 경계부근 이미지의 불안정 요소를 흡수할 수 있도록 면적 중심으로부터 계산하였다. 로봇 팔 끝점의 실시간 검출을 위한 알고리즘의 흐름도는 그림 7과 같다. 필드모드를 이용하여 짝수필드에서는 영상저장, 홀수필드에서는 영상처리후 PC로 데이터 전송하는 방법을 이용하여 초당 30회의 변위 정보를 획득하였다.

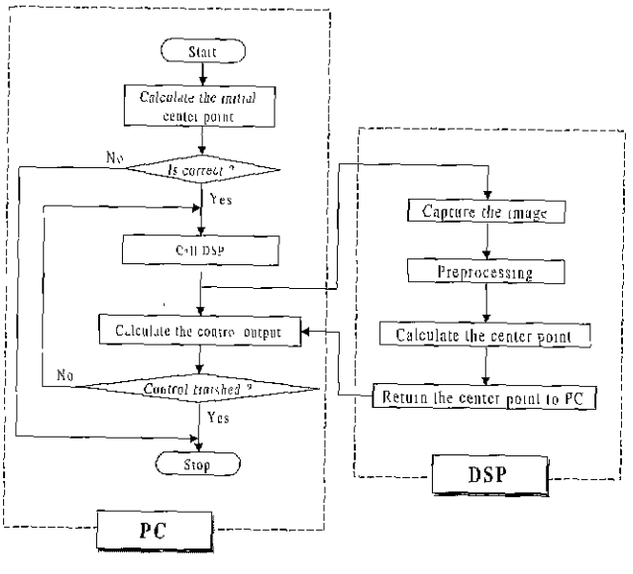



그림 7. 실시간 중심선 검출 알고리즘 흐름도.

Fig. 7. Flow chart for the real time center line detection algorithm.

## Ⅳ. 시스템 구성

1. 실험장치

그림 8은 비전 센서를 포함한 전체 실험장치를 보여준다. 유연한 로봇 팔 시스템은 크게 제어부와 구동부, 첨단질량을 포함한 유연한 로봇 팔, 카메라와 가속도계 등의 센싱부로 구성하였다.

제어부는 IBM 호환 586 컴퓨터를 사용하였고, 구동부는 토크 지령으로 구동되는 AC 서보 모터, 서보 드라이버와 감속을 위해 모터 축에 부착한 하모닉 드라이버, 커플링 및 허브로 구성하였다. 유연한 로봇 팔은 얇은 알루미늄 판재로 제작하였으며, 로봇 팔 끝단에 홀더를 부착하여 첨단질량을 변경할 수 있도록 하였다. 센싱부는 로봇 팔 끝단의 변위를 측정하기 위해 CCD 카메라를 허브 위에 단단히 고정하여 허브와 같이 회전하도록 설치하였으며, 측정 결과의 비교를 위해 팔의 끝단에 가속도계를 부착하였다. 제작된 실험장치의 개략도는 그림 9와 같으며, 사용된 실험장치의 파라미터 값은 다음 표 1과 같다.

그림 8. 유연한 로봇 조작기 실험장치

Fig. 8. The experimental setup of the flexible robot manipulator.

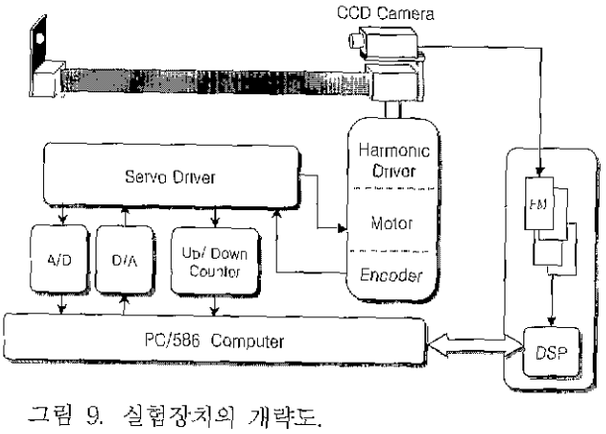



그림 9. 실험장치의 개략도.

Fig. 9 Schematic of the experimental equipment.

표 1. 유연한 로봇 조작기 시스템의 파라미터.
Table 1. Parameters of the flexible robot manipulator system.

| Parameters | Value |
|---|---|
| Length of the flexible link ( $l$ ) | 0.87 $m$ |
| Mass per unit length of the flexible link ( $m$ ) | 0.222 $kg/m$ |
| Bending stiffness of the flexible link ( $EI$ ) | 1.60 $Nm^2$ |
| Tip mass ( $m_t$ ) (Percentage to the mass of the flexible link) | 0.052 $kg$ (27%) |
| Hub length ( $r_0$ ) | 0.051 $m$ |
| Inertia of the hub ( $J_h$ ) | 0.32 $kgm^2$ |
| Total inertia of the flexible arm system ( $J$ ) | 0.746 $kgm^2$ |
| Proportional gain of the driving system ( $K_t$ ) | 16.98 $Nm/V$ |
| Velocity saturation bound in hub ( $S_b$ ) | 3.27 $rad/s$ |
| Friction torque in hub ( $T_f$ ) | 0.08 $Nm$ |
| Gear reduction ratio ( $N$ ) | 80 |
| Damping ratio of the flexible arm ( $\zeta$ ) | 0.019 |

2. 영상처리 장치

CCD 카메라는 초점거리가 8 mm인 렌즈를 부착한 초당 30 프레임을 전송할 수 있는 768(H)×494(V)의 화소를 가지는 삼성항공의 SFA-410ED를 사용하였다. 카메라로부터 얻은 영상은 MVB-03 비전 보드에 의해 프레임 메모리에 저장되고, 별도의 고속 DSP인 TMS320C31에서 영상처리를 수행하였다.

## V. 실험 결과 및 고찰

1. 정적 물체의 측정

그림 10은 로봇 팔 끝점의 이동 궤적을 갖는 실험장치의 개략도를 나타내며, 궤적은 그림 5의 측정 결과로부터 제작되었다. 카메라 모듈, 표식, 표식을 회전시키기 위한 회전테이블, 영상획득장치들로 구성되어 있다. 표식은 폭이 10mm이고 간격이 20mm이며 영상왜곡이 적은 14개의 검은색 바(bar)로 구성하였으며, 흰색 종이에 프린터로 출력하여 제작하였다. 표 2는 실측된 로봇팔 궤적의 좌표값과 (10)과 (11)로부터 계산된 중심값을 비교한 결과이다. 실제 팔 끝단의 변위를 나타내는 표식의 중심은 변위가 커짐에 따라 간격이 좁혀짐을 알 수 있다 측정 결과 약

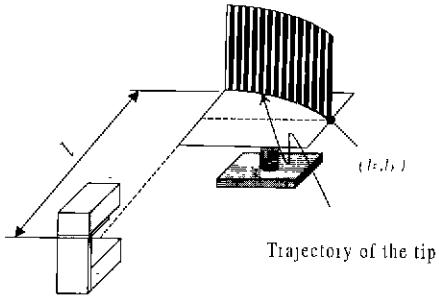



그림 10. 정적물체 측정.
Fig. 10. Measurement of static object.

표 2. 측정 결과
Table 2. Results of the measurement.

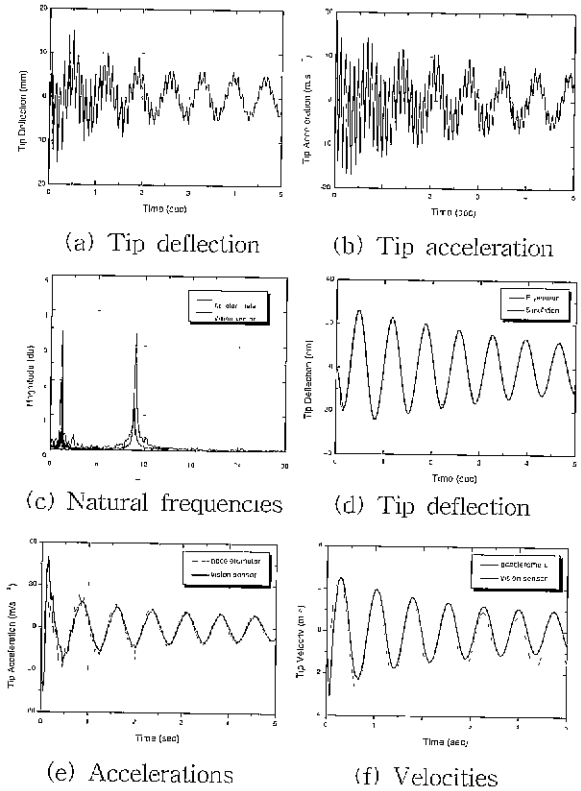
(단위:mm)

| Real distance | Measured distance | Error |
|---|---|---|
| 20 | 20.98 | -0.98 |
| 50.9 | 59.69 | 0.21 |
| 99.1 | 98.46 | 0.59 |
| 139 | 137.26 | 1.74 |
| 178 | 176.67 | 1.32 |
| 216 | 216.29 | -0.29 |
| 254 | 256.61 | -2.61 |
| max | - | 2.61 |
| $\sigma$ | - | 1.48 |

500mm의 측정 범위에 대해 표준편차 1.5 이내의 정밀한 추정을 할 수 있었다.

2. 가속도계 측정값과의 비교

비전 센서를 이용한 로봇 팔의 진동 변위 측정의 타당성을 입증하기 위하여 유연한 로봇 팔에 임펄스를 가한 후 가속도계를 이용하여 측정한 신호와 CCD 카메라를 이용하여 측정된 결과를 서로 비교하였다. 그림 10(a)와 (b)는 각각 비전센서와 가속도계를 통해 계측된 변위와 가속도이다. 그림 10(c)는 이들 측정 결과를 고속 프리에 변환하여 팔의 고유진동수를 구한 결과를 보여준다. 상대적인 모드와 노이즈의 크기를 제외하고는 고유진동수의 측정 결과가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.




(a) Tip deflection (b) Tip acceleration

(c) Natural frequencies (d) Tip deflection

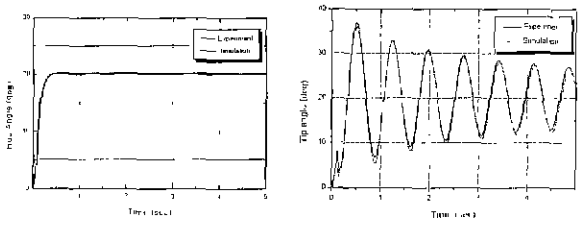
(e) Accelerations (f) Velocities

그림 11. 가속도계 측정값과의 비교
Fig. 11. Comparisons to the measuring output of the accelerometer.

또한, 그림 11(d)는 계단 입력에 대한 팔의 진동 변위를 나타내고 있다. 그림 11(e)는 가속도계를 통해 측정된 가속도와 비전 센서를 이용하여 측정한 진동 변위를 2차 수치 미분하여 구한 가속도 값을 서로 비교한 결과이다. 그림 11(f)는 가속도계와 비전 센서의 측정치로부터 추정된 끝점의 선속도를 나타내고 있다. 이를 통하여 보면 가속도계를 사용하는 경우는 출력신호의 노이즈나 바이어스 등의 오차로 인해 속도, 변위와 같은 다른 상태를 정확히 추정하는 것이 어려운 반면, 비전 센서의 경우는 영상처리에 따른 시간 지연은 있으나 속도와 가속도와 같은 다른 상태를 추정할 수 있는 장점을 가짐을 알 수 있다.

3 전산모사와의 비교

그림 12의 (a)와 (b)는 진동제어를 실시하지 않고 허브의 회전각 위치만을 PID 제어한 경우에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 모의실험과 실제 실험결과를 서로 비교한 결과이다. 거의 일치하는 것으로 보아 계의 모델링이 타당하며, 비전 센서가 로봇팔 끝점의 진동 변위 측정의 대안이 될 수 있음을 보였다.



(a) Hub angle (b) Tip angular position

그림 12 계단응답의 결과.

Fig. 12. Result of the step response.

## VI. 결론 및 향후 과제

유연한 로봇팔 끝점의 진동상태의 실시간 측정을 위한 비접촉식 위치 측정 센서로 비전 시스템을 적용하였다. 필드모드 영상 중 관심영역 부근에 국한된 영상처리를 이용하여 영상처리시간을 단축시켰으며, 로봇팔의 탄성 변형에 따른 팔 길이 방향의 거리변화를 고려하여 측정 정밀도를 개선하였다. 가속도계 측정값과의 비교와 시뮬레이션과의 비교를 통해 비전센서는 끝점의 진동 변위의 측정에서 우수한 결과를 보여, 스트레인게이지, 가속도계, 광학센서와 함께 진동하는 물체의 진동을 효과적으로 측정하는 센서의 대안이 될 수 있음을 보였다. 또한 실험을 통하여 비전 센서가 로봇팔의 진동 모드 측정에 이용되고 있는 가속도계에 비하여 속도 등의 다른 상태의 추정에 유리하여 로봇팔의 진동제어를 위한 센서로 적용 가능함을 보였다.

앞으로 비전 센서를 이용하여 측정된 변위 정보와 추정된 속도, 및 가속도를 이용한 유연한 로봇팔의 위치 및 진동제어에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해서는 비전 센서의 영상처리 시간으로 인한 시간지연 효과를 고려한 제어기법의 개발이 요구된다. 이와 아울러 움직이는 물체의 위치 측정에 비전 센서를 효과적으로 적용하기 위해서는 영상처리 시간을 더욱더 단축시킬 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어의 개발이 요구된다.

## 참고문헌


[1] R. H. Cannon and E. Schmitz, "Initial experiments on end-point control of a flexible one-link robot", *Intl. J. of Robotics Research*, vol 3, no. 3, pp. 62-75, 1984.

[2] 하영균, 김승호, 이상조, 박영필, "유연한 단일링크 로봇 조작기의 최적귀환제어", 기계학회논문집, 11권 6호, pp. 923-934, 1987.

[3] 신효필, 윤여산, 윤지섭, 강이석, "유연한 로봇팔의 진동제어", '96 자동제어 학술회의 논문집, pp. 229-232, 1996.

[4] 신효필, 정영무, 강이석, "적응 입력다듬기를 이용한 유연한 조작기의 진동제어", 제어 · 자동화 · 시스템공학회 논문지, 5권 2호, pp. 220-227.

[5] S. Yurkovich and F. E. Pacheco. "On controller tuning for a flexible-link manipulator with varying payload", *J. of Robotic Systems*, vol 6, no. 3, pp. 233-254, 1989.

[6] H Geniele, R. V. Patel, and K. Khorasani, "Control of a flexible-link manipulator", *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1217-1222, 1995.

[7] Y. F Li and X. B. Chen, "Tip deflection measurementand state observation of a flexible robot arm", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1174-1178, 1998.

[8] Roger Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, pp 323-344, 1987.

**강이석**

1974년 서울대 기계공학과 졸업. 1983년 아주대학교 기계공학과 석사. 1994년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 1991~1992년 MIT대학 방문연구원. 1981~현재 충남대학교 기계설계공학과 교수. 주관심분야는 제어이론의 응용, 로보틱스, 인공지능, 유압공학, 공장자동화.

**신효필**

1977년 울산대학교 기계공학과 졸업 1991년 충남대학교 기계설계공학과 석사. 2000년 동대학원 박사. 1977~현재 국방과학연구소 재직중. 주관심분야는 로보틱스, 제어이론의 응용, 유압제어공학.

**이종광**

1997년 충남대학교 기계설계공학과 졸업. 1999 동대학원 석사. 1999~현재 동대학원 박사과정. 주관심분야는 진동제어, 로봇비전