

자기적 방법을 이용한 3차원 좌표 측정

임윤빈 · 조 욱 · 허복희 · 손대락*

한남대학교 물리학과, 대전광역시 대덕구 오정동 133

(2002년 7월 3일 받음, 2002년 11월 10일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 3개의 펄스자기장발생 장치와 3축의 탐지코일을 이용하여 3차원 좌표를 비접촉으로 측정할 수 있는 장치를 제작하였다. 펄스자기장을 만들어 주기 위하여 환 계수기와 아날로그 곱셈기를 사용하여 원하는 한 주기의 파형을 자기장발생장치의 각 축에서 만들어 질 수 있도록 하였다. 그리고 발생된 자기장 값을 거리 r 에서 측정하기 위해 탐지코일에 유도된 전압을 증폭시키고 S/H 증폭기로 최대 값을 측정하였다. 자기장발생 장치로부터 거리를 0.5 m에서 1.5 m까지 1차원과 2차원 상에서 탐지코일을 움직여 값을 측정하고 이를 거리로 환산하는 계산식에 의한 결과가 실제 거리의 값과 그 편차가 $\pm 0.5\%$ 에서 그 위치를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 모션캡처, 자기센서, 비접촉 좌표측정

I. 서 론

모션캡처(motion capture)는 애니메이션 제작, 스포츠 또는 의학용에 사용할 목적으로 사람이나 물체(object)의 다양한 움직임을 분석하는 기술로써, 데이터는 컴퓨터에서 사용할 수 있는 형태로 저장되며 캐릭터의 움직임을 조절하는데 쓰여진다. 최근 컴퓨터의 계산 속도가 빨라짐에 따라 데이터를 가지고 실시간 영상처리에 대한 많은 연구가 이루어지고 있고, 멀티미디어 시장이 증가함에 따라 동영상 및 3차원 영상매체를 제작하는데 복합적 고도의 기술이 필요시 되어지고 있다. 많은 인력과 시간을 투자하여 하나의 동작을 완성하던 과거와는 달리 모션캡처의 방법을 사용하여 사람이나 동물의 주요 운동부위에 센서를 부착하여 실시간의 움직임에 대한 좌표 값을 측정하고 컴퓨터에 입력, 계산하여 사람과 움직이는 화상을 컴퓨터 그래픽에서 동시에 실현함으로써 인건비나 시간 등을 절약하고 생동감 있는 동작을 표현할 수 있게 되었다. 이러한 사람이나 움직이는 사물의 좌표를 찾아내는 방법에는 측정원리에 따라서 전기-역학적, 광학적 그리고 자기적 방법이 있다[1-6].

그 중에서 전자기적(electromagnetic)방법은 전기적으로 형성된 자기장 안에서 송신자(transmitter)와 수신자(receiver)의 집합을 이용하는 방식으로 행위자의 몸에 부착된 센서로부터 유선으로 연결된 중앙장치로 3D의 위치와 방향에 대한 데이터를 전송받아 캡처하는 방식이다. 이 방법은 금속 성분에 민감하고 대부분의 경우 선에 의해서 제약을 받고, 캡처범위가 광학적인 방법에 비하여 적은 단점이 있으나, 실시간 데이터 출력이 즉시 피드백되어 공급될 수 있고 위치와 방향이 후처리(post-processing)없이 이용 가능하고, 시스템이 광학적인 방

법에 비하여 값이싸고, 센서가 행위자의 신체에 가리워 질 염려가 없는 장점을 가지고 있다[2].

따라서 본 연구에서는 사람의 주요 운동 부위에 센서를 부착하여 어떤 기준점의 자기장 발생 장치로부터 발생하는 펄스자기장을 측정하여 센서의 위치와 방향을 계산하는 자기적 방법을 이용하여 3차원 좌표에 대한 수학적 이론을 계산하고 측정장치를 제작하였다.

II. 측정장치의 원리

전류 I 가 단면적이 A 인 폐곡선에 전류가 흐르면 자기모멘트 $m=AI$ 이며, 이 자기모멘트 m 으로부터의 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 자기장 분포는 다음과 같이 주어진다[7].

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{\vec{m}}{r^3} + \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} \right] \quad (1)$$

여기서 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m이다.

만일 자기모멘트가 x -축, y -축, z -축으로 형성될 경우 즉,

$$\vec{m} = m_x \hat{i} + m_y \hat{j} + m_z \hat{k} \quad (2)$$

가 되며, x -축 자기모멘트에 의하여 좌표 (x, y, z) 에서의 자기장을 $\vec{B}(x)$, y -축 자기모멘트에 의한 좌표 (x, y, z) 에서의 자기장을 $\vec{B}(y)$, z -축 자기모멘트에 의한 좌표 (x, y, z) 에서의 자기장을 $\vec{B}(z)$ 라 하면, 좌표 (x, y, z) 에서 각각의 자기모멘트에 의한 벡터성분은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \vec{B}(x) \\ \vec{B}(y) \\ \vec{B}(z) \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{r^{5/2}} \begin{bmatrix} 2x^2 - y^2 - z^2 & 3yx & 3xz \\ 3xy & -x^2 - 2y^2 - z^2 & 3yz \\ 3xz & 3zy & -x^2 - y^2 - 2z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{j} \\ \hat{k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

*Tel: (042) 629-7512, E-mail: deracson@mail.hannam.ac.kr

입의 위치에서 자기장을 측정하고 이로부터 그 점의 좌표(x, y, z)를 구하는 것은 inverse 문제로서 매우 어려운 문제이다. 그러나 식 (3)에서 보면 3개의 자기모멘트에 의하여 발생하는 자기장을 3축의 자기장 성분으로 측정함으로써 9개의 방정식이 나오기 때문에 이로부터 좌표(x, y, z)를 구하는 방법을 시도하였다.

III. 측정장치의 제작 및 구성

본 실험의 펄스 자기장 발생 장치용 자기모멘트 코일은 70 mm×70 mm×70 mm 정육면체의 비자성 아크릴 블록에 x, y, z 축으로 코일을 감기 위해 깊이를 각각 3 mm, 5 mm, 7 mm 홈을 파고, 코일을 0.5 mm ϕ 로 68 turns 권선하여 제작하였다. Search coil은 자기장 발생 장치와 같은 방법으로 25 mm×25 mm×25 mm 정육면체의 비자성 아크릴 블록에 깊이 2 mm, 3 mm, 4 mm로 홈을 파고 0.1 mm ϕ 로 320 turns 권선하여 제작하였다.

측정시스템은 Fig. 1과 같이 함수 발생기로부터 2 kHz의 아날로그신호를 아날로그곱셈기(analog multiplier)의 한 입력단에 연결하고, 또한 함수 발생기로부터 2 kHz의 TTL 로직레벨 출력은 16-환 계수기를 거친 다음 그 신호를 아날로그곱셈기의 다른 입력단에 연결하고, 그 출력을 자기모멘트 발생 코일을 구동하는 전력 증폭기에 연결함으로써 한 주기의 자기모멘트를 순차적으로 발생시킬 수 있게 하였다. x -축 자기모멘트 발생장치에 의해 발생하는 자기장은 x -, y -, z -축 탐지 코일에 기전력이 유도되고, y -축 자기모멘트 발생장치 및 z -축 자기모멘트 발생장치에 의해 발생하는 자기장은 각각 x -, y -, z -축 탐지 코일에 기전력이 유도되게 만들었다. Fig. 2는 제작된 장치에 의하여 발생하는 파형의 모양으로 아래로부터 함수발생기의 아날로그출력, x -축 자기모멘트 발생코일에 흐

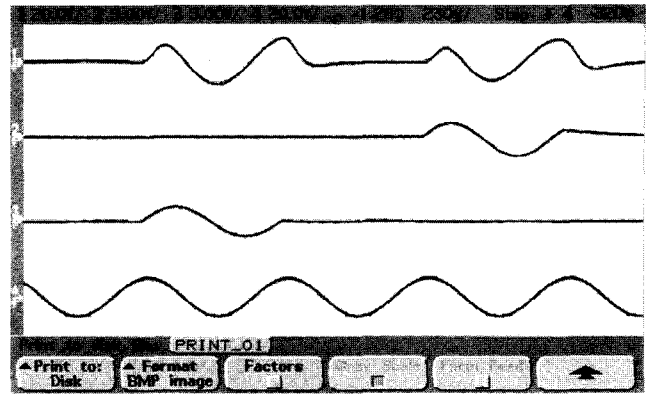


Fig. 2. Oscilloscope view of waveforms; from bottom, sine wave output from function generator, current waveform of x -dipole coil, current waveform of y -dipole coil, and induced voltage waveform from search coil.

르는 전류의 파형, y -축 자기모멘트 발생코일에 흐르는 전류의 파형 및 탐지코일에 유도되는 기전력의 파형으로 자기모멘트가 한 주기씩 순차적으로 잘 발생됨을 알 수 있다.

다음으로 자기모멘트 발생장치로부터 탐지 코일 x, y, z 에 유도되는 기전력이 너무 작기 때문에 연산 증폭기의 이득을 100배로 증폭시키고, 높은 주파수 성분의 노이즈를 없애기 위해 5 kHz의 Butterworth저주파 대역필터를 사용하였으며 증폭기에서 발생하는 dc 오프셋을 없애고 60 Hz의 전원 주파수성분의 자기장을 성분을 제거하기 위해 500 Hz의 Butterworth 고주파 대역필터를 사용하였다. 또한 탐지 코일에 유도되는 기전력의 샘플링 시점을 맞추기 위해 mono-stable multi-vibrator (74123)를 이용하여 0.5 ms 만큼 지연시키고, 펄스 폭이 500 ns 인 샘플링 펄스를 만들어주었다. 이렇게 함으로써 전압 값이 최대가 되는 시간의 위치에서 S/H 증폭기를 사용하여 샘플링 하고 DVM으로 측정하여 소프트웨어적으로 컴퓨터에서 처리

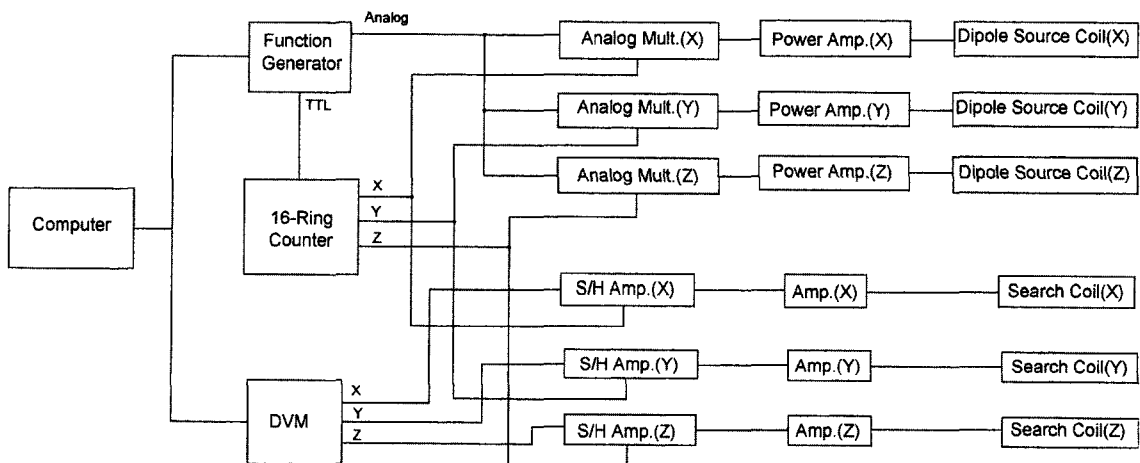


Fig. 1. Schematic diagram of the constructed non-contact motion capture sensor.

함으로써 센서의 위치와 방향을 알 수 있다.

IV. 측정장치 교정 및 비례상수 측정

x , y -축의 자기모멘트 값을 일정하게 하고, x , y - 및 z -축 탐지 코일의 감도를 일정하게 하기 위한 방법은 Fig. 3-(a)와 같이 x -축 자기모멘트와 탐지 코일의 임의의 한 축(본 연구에서는 x -축을 택하였다.)을 방향 \hat{r} , 거리 r 인 위치에 놓고, x -축 탐지 코일에 발생하는 기전력을 x -축 자기모멘트 발생장치의 연산증폭기 이득을 임의의 값으로 조절하였다. 그 다음 과정으로 x -축에 수직으로 놓여져 있던 y -축 자기모멘트 발생장치의 방향을 x 축의 방향으로 놓고 \hat{r} , 거리 r 인 위치에서 y -축 자기모멘트의 발생장치의 연산증폭기 이득을 조절하여 x -축 탐지 코일에 발생하는 기전력 크기를 x -축 자기모멘트 발생장치에 의한 것과 같게 조절함으로써 자기모멘트 발생장치의 자기모멘트 크기를 같게 조절하였다.

자기장 발생 장치로부터 각각의 탐지 코일 x , y , z 축에 유도되는 기전력을 일정하게 하기 위한 방법은 Fig. 3-(b)와 같이 자기모멘트 발생장치와 탐지 코일의 방향 \hat{r} , 거리 r 인 위치에 놓고, 자기장 발생 장치의 임의의 한 축 (x -축을 택하였다.)에 대해 방향 \hat{r} , 거리 r 인 위치에 놓여져 있는 x -축 탐지 코일에 유도되어지는 기전력이 임의의 값을 같도록 x -축 신호처리단 증폭기 이득을 조절한다. 또한 거리에 대해 수직으로 놓여져 있는 y -축 탐지 코일과 z -축 탐지 코일을 방향 \hat{r} , 거리 r 인 위치에 놓고, 각각 x -축 탐지 코일의 유도된 기전력과 같게 하기 위해 신호처리단의 증폭기 이득을 조절함

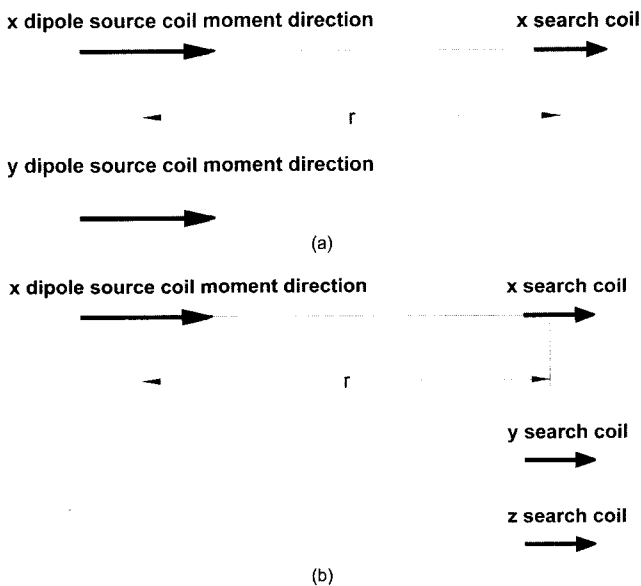


Fig. 3. Schematic diagram of the magnetic dipole and the search coil direction for the calibration of the dipole source coils and search coils

으로써 x -, y -, z -축 탐지 코일의 감도를 같게 조절하였다.

본 연구에서 제작한 측정장치에서 좌표와 측정장치 출력전압과의 비례 상수 값을 구하기 위해서 자기모멘트 발생 코일과 탐지 코일의 자기모멘트를 방향 \hat{r} , 거리 r 인 위치에 놓고, 자기모멘트 발생 코일로부터 탐지 코일의 거리 r 을 0.5 m에서 1.5 m까지 0.1 m씩 변화시켜가면서 각각 x -축 자기모멘트에 의해서 x -축 탐지 코일에 유도되는 기전력, y -축 자기모멘트에 의해서 y -축 탐지 코일에 유도되는 기전력 측정값으로부터 다음과 같은 식을 통해 비례상수를 계산하였다.

자기모멘트 발생 코일과 탐지 코일이 2차원 평면상에 놓여져 있고, 자기모멘트 발생 코일과 탐지 코일의 자기모멘트를 방향 \hat{r} , 거리 r 인 2차원 평면상에 놓여져 있다면 x -, y -축 탐지 코일에 유도된 전압 $V(x)$, $V(y)$ 와 좌표 x, y 에 대하여 식 (3)은 다음과 같이 주어진다.

$$V(x) = k \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m_x}{x^3} \tag{4}$$

$$V(y) = k \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m_y}{y^3} \tag{5}$$

여기서 k 는 측정장치의 증폭기 이득 상수이다. 측정장치를 Fig. 3-(a)와 Fig. 3-(b)와 같이 교정하였을 경우 모든 x -, y -, z -축 채널에 따라 같기 때문에 위 두 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{V}(r) = 2K \frac{1}{r^3} \tag{6}$$

여기서 K 는 측정장치의 비례상수이고 측정된 전압과 좌표값으로부터 비례상수를 측정할 수 있다.

자기모멘트 발생장치와 탐지 코일의 자기모멘트 방향이 거리 r 에 대해 수직하게 놓여져 있는 경우도 위와 마찬가지로 다음과 같이 표현된다.

$$V(x) = k \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m_x}{x^3} \tag{7}$$

$$V(y) = k \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m_y}{y^3} \tag{8}$$

$$\vec{V}(r) = K \frac{1}{r^3} \tag{9}$$

위의 두 수식 (6)과 (9)를 보면 자기모멘트 발생장치와 탐지 코일의 자기모멘트 방향이 서로 평행할 때가 서로 수직일 경우보다 2배 크다는 것을 알 수 있다. 이 이론적인 결과는 본 연구의 측정결과인 Fig. 4-(a)와 Fig. 4-(b)에서도 보면 잘 일치함을 알 수 있다. 실제 측정에 있어서 자기모멘트 코일이 점이 아니고 탐지코일 또한 점이 아니기 때문에 이를 고려하여야 한다. 본 연구에서 제작한 자기모멘트 코일과 탐지코일의

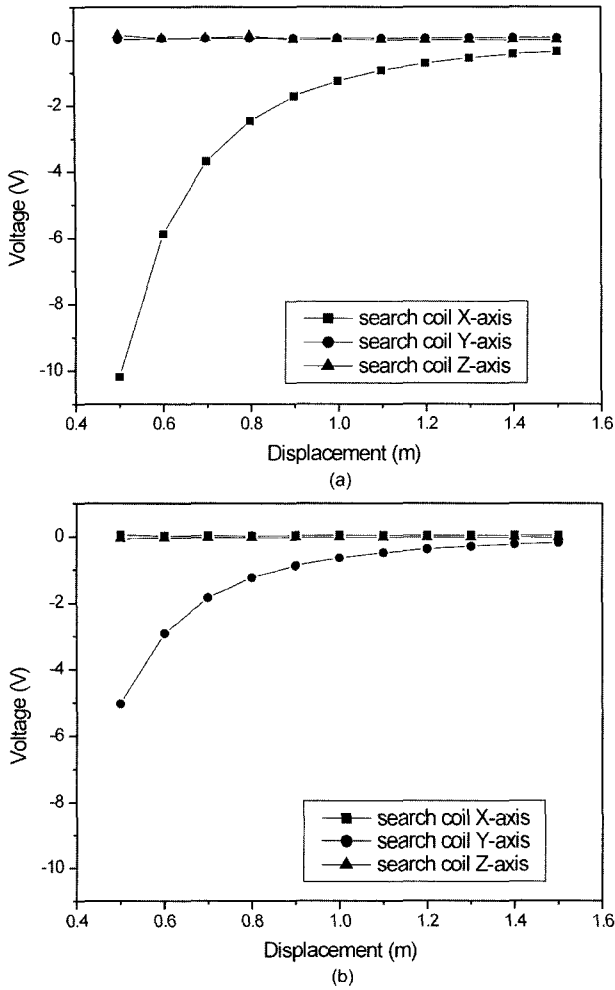


Fig. 4. Voltage vs. sensor displacement in case of the direction between dipole moment and the search coil is parallel (a), and the direction between dipole moment and the search coil is perpendicular (b).

크기에 대하여 이론적으로 계산하여 본 결과 점인 경우로부터 $\pm 0.5\%$ 의 오차범위에 들어가기 위한 자기모멘트 코일과 탐지코일사이의 거리는 최소한 50 cm 이상이 되어야 하기 때문에 측정은 50 cm 이상에서만 수행하였다[8]. Fig. 5는 식 (6) 과 식 (9)를 이용하여 거리에 따른 K 값을 측정된 결과이다. K 값이 1 m 이후에서 자기모멘트 발생장치와 탐지 코일의 자기모멘트 방향이 수직과 수평의 경우 값의 차이가 나는 이유 중의 하나는 바닥의 철근과 센서주위의 금속의 영향으로 추측되며, 비자성의 건물에서 측정하여 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

V. 3차원 좌표의 측정

측정된 데이터를 가지고 좌표로 환산하기 위해서는 펄스 자기장을 자기모멘트 발생 코일에서 발생하고 이를 탐지 코일

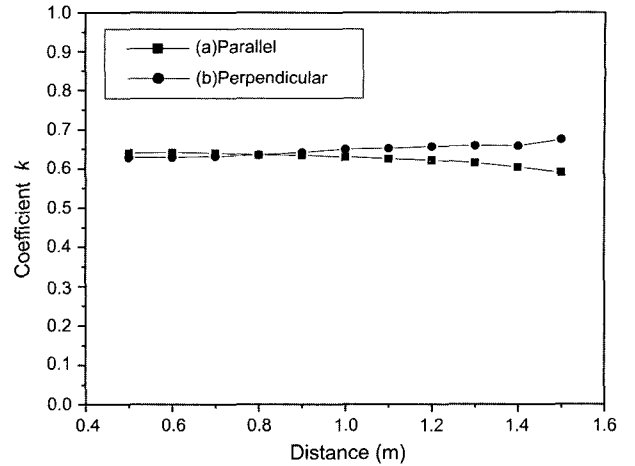


Fig. 5. Coefficient (K) vs. displacement (r) in case of the dipole moment of x-axis and displacement direction is same direction (-■-) and the dipole moment of y-axis is perpendicular to displacement direction (-●-).

에서 측정함으로써 식 (3)에서 자기모멘트 발생장치의 각 성분 자기 모멘트를 알고 탐지 코일에 유도되어지는 기전력을 알면 각각 센서의 x, y, z 위치를 알 수 있다. 식 (3)의 행렬 식에서 각각의 성분을 $B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{31}, B_{32}, B_{33}$ 로 놓으면 좌표는 다음의 수식에 의해 좌표로 환산할 수 있다.

$$x = \frac{\mu_0 \cdot m}{4\pi} \cdot \frac{\left[2 - \left(\frac{B_{23}}{B_{13}} \right)^2 - \left(\frac{B_{23}}{B_{12}} \right)^2 \right]^{1/3}}{B_{11} \cdot \left[1 + \left(\frac{B_{23}}{B_{13}} \right)^2 + \left(\frac{B_{23}}{B_{12}} \right)^2 \right]^{5/2}} \quad (6)$$

$$y = \frac{\mu_0 \cdot m}{4\pi} \cdot \frac{\left[2 \cdot \left(\frac{B_{13}}{B_{23}} \right)^2 - 1 - \left(\frac{B_{13}}{B_{12}} \right)^2 \right]^{1/3}}{B_{11} \cdot \left[\left(\frac{B_{13}}{B_{23}} \right)^2 + 1 + \left(\frac{B_{13}}{B_{12}} \right)^2 \right]^{5/2}} \quad (7)$$

$$z = \frac{\mu_0 \cdot m}{4\pi} \cdot \frac{\left[\left(2 \cdot \left(\frac{B_{12}}{B_{23}} \right)^2 \right) - \left(\frac{B_{12}}{B_{13}} \right)^2 - 1 \right]^{1/3}}{B_{11} \cdot \left[\left(\frac{B_{12}}{B_{23}} \right)^2 + \left(\frac{B_{12}}{B_{13}} \right)^2 + 1 \right]^{5/2}} \quad (8)$$

위의 세 수식으로부터 1차원 상 및 2차원 상에서 측정된 전압으로 구한 좌표와 실제 실험 시 탐지 코일의 좌표값의 편차가 Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)에서와 같이 측정오차가 $\pm 0.5\%$ 내에 있음을 알 수 있었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 3차원 상의 좌표측정을 위해 펄스 자기장을 발생시키고 x, y, z 축 탐지 코일에 유도되는 기전력을 측정

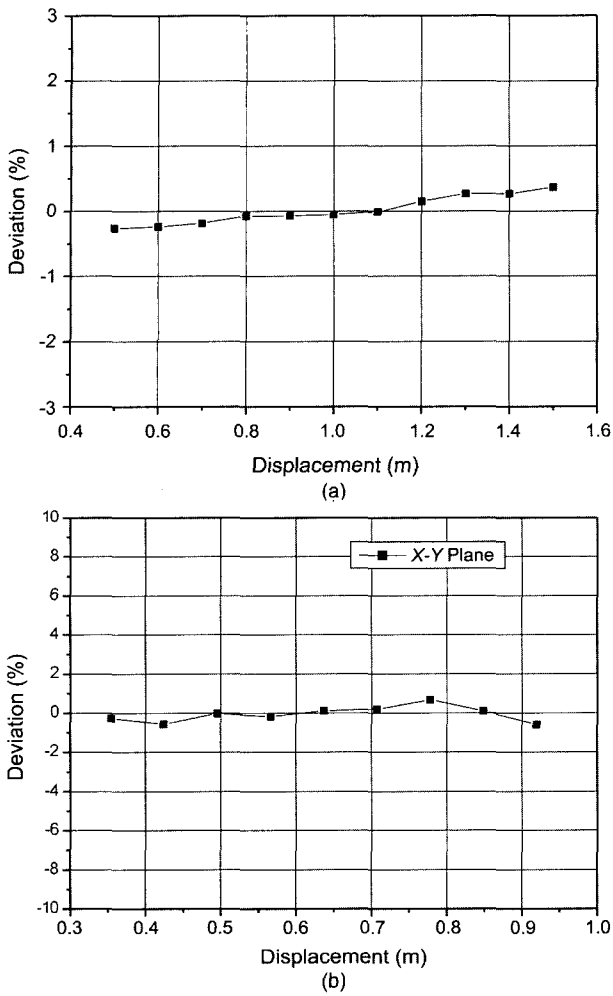


Fig. 6. Uncertainty of displacement measurement in case of x-dipole source and x-search coil are parallel (a), and x-y-dipole sources and x-y-search coils are in x-y plane (b).

함으로써 x , y , z 의 좌표값을 측정할 수 있는 펄스 자기적 방법에 의한 3차원 좌표측정에 관하여 연구를 하였다. 제작한 센서인 자기모멘트 발생 코일과 탐지 코일은 실험결과 거리 0.5 m~1.5 m까지 $\pm 0.5\%$ 내의 오차를 갖는다는 것을 알 수

있었다.

다음으로, 본 연구에서 구한 수식으로 1차원 상에서의 센서의 움직임은 좌표로 환산하여 구할 수 있었으며 실험적인 좌표값과 이론적으로 구한 값 사이의 편차가 약 $\pm 0.5\%$ 범위 내에 있음을 알 수 있었다. 거리가 멀어질수록 편차가 커지는 원인은 회로상의 노이즈와 바닥의 철근, 센서주위의 금속 등의 실험조건에 의한 것으로 생각된다.

3차원상에서 yaw, row, pitch에 관해 더 수정된다면 3차원 좌표측정을 실시간으로 읽어낼 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한남대학교 교비연구비로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] G. Pourazar, "A method to capture and animate the dynamics of human motion", *International Conference on Computational Graphics and Visualization*, **1**, 181(1991).
- [2] Alberto Menache "Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games" Morgan Kaufmann (2000), pp. 1-36.
- [3] Sakaguchi, T. Kanamori *et al.*, "Human motion capture by integrating gyroscopes and Accelerometers", *IEEE transactions on magnetics*, **MAG-32**, 470(1996).
- [4] Kaufman, Debra, "Motion capture; ready for prime time", *Animation magazine*, **12**, 10(1998).
- [5] Gillam, *et al.*, "Motion capture by a frame", *Perception&Psychophysics*, **49**, 547(1991).
- [6] Hillstrom and Annep, "Visual motion and attentional capture.", *Perception& Psychophysics*, **55**(4), 399(1994).
- [7] G. Arfken, "Mathematical methodes for physicists", Academic Press(1993), pp. 198.
- [8] 한정희, "3차원 동작측정용 자기센서에 관한연구", 한남대학교 석사학위논문(1999), pp. 15.

3-dimensional Coordinate Measurement by Pulse Magnetic Field Method

Y. B. Im, Y. Cho, H. B. Herr, and D. Son

Dept. of Physics, Hannam University Daejeon 306-791

(Received 3 July 2002, in final form 10 November 2002)

We have constructed a new kind of magnetic motion capture sensor based on the pulse magnetic field method. 3-orthogonal magnetic pulse fields were generated in turns only one period of sinusoidal waveform using 3-orthogonal magnetic dipole coils, ring counter and analog multiplier. These pulse magnetic fields were measured with 3-orthogonal search coils, of which induced voltages by the x -, y -, and z -dipole sources using S/H amplifier at the time position of maximum induced voltage. Using the developed motion capture sensor, we can measure position of sensor with uncertainty of $\pm 0.5\%$ in the measuring range from ± 0.5 m to ± 1.5 m.

Keywords : motion capture, magnetic sensor, animation.