

다공질 압전소자로 제작한 초음파 센서의 물체변위에 무관한 3차원 수중 물체인식 특성

10-9-8

Characteristics of 3-D Underwater Object Recognition Independent of Translation Using Ultrasonic Sensor Fabricated with Porous Piezoelectric Resonator

조현철*, 이기성**, 박정학***, 이수호****, 사공건*****

(Hyun-Chul Cho, Keeseong Lee, Jung-Hak Park, Su-Ho Lee, Geon Sa-Gong)

Abstract

In this study, Characteristics of 3-D underwater object recognition independent of translation using the self-made ultrasonic sensor fabricated with porous piezoelectric resonator are presented. The sensor was satisfied with requirement of ultrasonic sensor. The recognition rates for the training data and the testing data are 97.45 and 91.25[%], respectively using the self-made ultrasonic sensor and SCL(Simple Competitive Learning)neural network. According to the experimental results, It is believed that the self-made ultrasonic sensor can be applied as sensor of SONAR system.

Key Words(중요용어) : Porous piezoelectric resonator(다공질 압전진동자), SCL neural network(단순경쟁학습 신경회로망).

1. 서 론

학습에 의한 정보획득과 정보의 분산표현을 특징으로 하는 신경회로망 기법을 이용한 3차원 물체인식은 수중탐사 분야에서 매우 중요하다. 3차원 물체인식에는 센서에서 물체까지의 거리정보를 이용하는 데, 거리정보 추출에는 CCD카메라, 레이더 및 초음파 센서를 이용하는 방법이 제안되고 있으나 사용환경에 따라 능률은 달라진다. 특히 수중은 혼탁하고 심해에서는 햇빛도 투과되지 않는 암흑상태이기 때문에 CCD카메라의 시야는 1~6m로 제한되며, 또한 레이더 장치로는 수중의 물체를 탐지하지 못한다.¹⁾ 이에 반해 음파는 물속에서도 통과되므로 수중의 물체인식 등 수중 음파시스템에 널리 사용되고 있으며

수중의 인식시스템은 수중의 물체변위에 관계없이 동일 물체로 인식할 수 있어야 한다.

수중의 인식시스템에 사용되는 초음파 센서는 압전진동자의 압전특성을 이용하여 기체, 및 고체 매질에 음파를 송신하여 측정물에서 반사된 음파를 수신할 때 까지의 음파 비행시간을 이용하여 물체에 대한 정보를 검출하는 소자이다.

일반적으로 음파의 송·수신이 가능한 초음파 센서의 재료로는 PZT 세라믹스가 널리 사용되고 있으나 PZT 단일상만으로 제작된 초음파 센서는 단일상이 갖는 한계성 때문에 수중에서는 성능지수가 낮아진다. 또한 밀도가 높아 수중 음향 임피던스 정합(matching)이 어렵기 때문에 수중에 적합한 저밀도 이면서도 압전성이 우수한 새로운 소재의 초음파 센서 개발이 연구되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 주로 소자 특성개선에 관한 것이며²⁾, 수중 물체인식 등 실질적인 응용분야에 적용하여 소자의 특성을 검토하는 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 다공질 압전소자로 자체 제작한 초음파 센서(이하 다공질 초음파 센서라 칭한다)³⁾를 자율학습(unsupervised learning)계열의 SCL신경회로망⁴⁾ 및 컴퓨터비전 기법인 불변모멘트 벡터와 연

*: 경북전문대학 전자과
**: 홍익대학교 전자전기공학부
***: 특허청 심사관
****: 영월공업전문대학 전기과
*****: 동아대학교 전기공학부
접수일자 : 1997년 8월 6일
심사완료 : 1997년 9월 25일

계된 실질적인 3차원 수중 물체인식 실험에 적용하여 다공질 초음파 센서의 물체변위에 무관한 수중 물체인식 특성을 실험함으로써 다양한 3차원 수중 물체인식 시스템의 센서로서 응용 가능성을 검토하였다.

2. 수중 물체인식 기법

수중 물체에 대한 3차원 정보를 초음파 센서에 의해 획득하고 이를 이용하여 물체변위에 불변하는 물체의 특징점이 되는 불변모멘트 벡터를 추출한다. 그리고 추출된 이 불변모멘트 벡터를 SCL 신경회로망에 입력·학습시켜 수중의 물체를 인식한다.

2.1 불변모멘트 벡터

수중의 물체변위에 관계없이 동일물체로 인식하기 위해서는 물체변위에 불변하는 물체의 특징점을 추출해야 하는데, 이를 위해 컴퓨터 비전기법의 불변모멘트 벡터를 이용한다. 일반적으로 입력패턴을 2진수로 고려하면 모멘트는 식 (1)과 같다.

$$m_{jk}(s) = \sum_{(x,y) \in S} x^j y^k \quad (1)$$

여기서 j, k = 0, 1, 2, ... 이며, S = {(x, y) | f(x, y) = 1}이다.

식 (1)에서 영차 모멘트(zero order moment) m₀₀는 이진(binary)입력의 경우 입력패턴 픽셀의 전체 수를 나타내고, 1차 모멘트 m₁₀, m₀₁은 중심 위치를 표현하며 2차 모멘트 m₂₀, m₁₁, m₀₂는 패턴의 크기 및 회전에 관한 정보를 포함하고 있다. 1차 모멘트를 이용하면 물체 입력패턴의 무게중심 좌표 (\bar{x} , \bar{y})는 다음과 같다.

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (2)$$

식 (2)의 무게 중심을 사용하여 위치이동에 불변하는 모멘트를 구하면 다음과 같다.

$$\mu_{jk} = \sum_{(x,y) \in S} (x - \bar{x})^j (y - \bar{y})^k \quad (3)$$

또한 회전에 불변인 모멘트는 식(4)와 같다.

$$\eta_{jk} = \frac{\mu_{jk}}{\mu_{00}^\gamma} \quad \text{여기서 } \gamma = \frac{j+k}{2} + 1 \quad (4)$$

이것으로 부터 M.K. Hu⁵⁾는 다음의 7가지 물체변위에 불변하는 함수를 정의한다.

$$\psi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad (5)$$

$$\psi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \quad (6)$$

$$\psi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad (7)$$

$$\psi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \psi_5 = & (\eta_{30} - 3\eta_{12}) \cdot (\eta_{30} + \eta_{12}) \\ & \cdot [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ & + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \\ & \cdot [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \psi_6 = & (\eta_{20} - \eta_{02}) \cdot [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - \\ & (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12}) \\ & \cdot (\eta_{21} + \eta_{03}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \psi_7 = & 3(\eta_{21} - \eta_{30}) \cdot (\eta_{30} + \eta_{12}) \cdot \\ & [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + \\ & (3\eta_{21} - \eta_{30}) \cdot (\eta_{21} + \eta_{03}) \\ & \cdot [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 SCL 신경회로망

SCL 신경회로망은 자율학습을 이용하는 기본적인 신경회로망으로서, 각 뉴런에 대응하는 연결강도 벡터들이 해당 데이터의 클러스터 중심으로 찾아 들어가게 하는 특징을 가지고 있다. 또한 경쟁에서 승리한 승자뉴런만을 학습시키는 단순경쟁학습 즉, 승자독점(winner take all) 학습을 수행하는데 그 규칙은 식 (12), (13)과 같다.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot [x_i - w_{ij}(t)] \quad (12)$$

$$\alpha(t) = 0.9 \left(1 - \frac{t}{\text{Number of Iterations}} \right) \quad (13)$$

여기서 w_{ij}는 시간 t에서 입력뉴런 i와 출력뉴런 j

사이의 연결강도 벡터, $\alpha(t)$ 는 학습률(learning rate)로서 시간이 지남에 따라 천천히 감소하는 상수값($0 \leq \alpha \leq 1$)이며, x_i 는 시간 t 에서의 입력벡터를 나타낸다.

이 신경회로망의 학습알고리즘은 매번 승자누런만을 학습시키므로 초기 연결강도 벡터들의 분포에 따라 전혀 학습이 이루어지지 않는 출력뉴런들이 생기는 문제 (non-learning problem)가 있다. 이를 방지하기 위해 본 연구에서는 연결강도 벡터들의 초기값을 임의의 값(random value) 대신에 입력패턴들 자체에서 표본추출(sampling)하여 사용하였다.

SCL 신경회로망은 그림 1에서 보듯이 입력층과 경쟁층인 2층 구조로서 모든 연결은 입력층에서 출력층 방향으로 이루어지며 출력층은 완전 연결(fully connected)되어 있다.

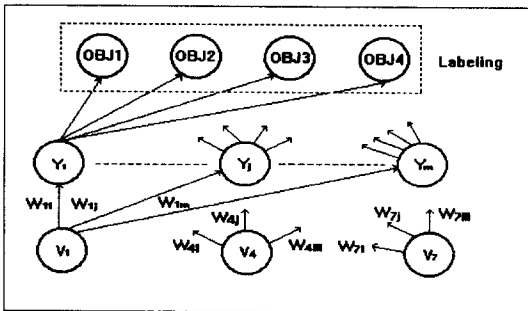


그림 1. SCL 신경회로망
Fig. 1. SCL neural network

3. 실험방법 및 측정

3.1 다공질 초음파 센서 제작

PbO, ZrO₂, TiO₂를 출발원료로 사용하여 상조성 경계(MPB)를 갖는 PZT[Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃]분말을 용융염합성법으로 합성하였다. 다공질 PZT 세라믹스의 기공 형성을 위해 플라스틱 구체로서 74~88(μ m)의 크기를 갖는 PVA를 사용하였다. PZT와 PVA 중량비를 92.5 : 7.5(wt.%)로 건식 혼합하여 20,000 (psi)로 등압 성형하고, 1,150($^{\circ}$ C)에서 1시간 소결하여 다공질 압전 PZT시편을 제조하였다.³⁾

제조된 다공질 PZT 세라믹스를 진동자로 사용하여 수중 초음파 센서용 탐촉자를 제작하였다. 이 탐촉자는 음향임피던스가 비교적 큰 동파이프를 사용하며, 내경은 15[mm]이다. 그리고 탐촉자의 한쪽은 진동자를 고정하고, 다른 한쪽은 BNC 컨넥터를 부

착하였다. 진동자 주위는 각종 초음파 특성을 조사할 수 있도록 실리콘 고무로 밀폐시켰다. 이때 진동자의 시효(aging)발생을 감소시키기 위하여 (+)전극을 안쪽으로 향하게 하고, 신호선(signal line)은 은선(silver wire)을 사용하였다.

3.2 물체변위에 무관한 3차원 수중 물체인식 실험

물체변위에 무관한 3차원 수중 물체인식 실험을 위해 표 1의 실험장치와 자체 제작한 다공질 초음파 센서를 사용하여 센서 중심을 기준으로 먼저 y축으로 1[cm]간격으로 16 step이동 시킨 후 x축으로 1[cm]이동 시키는 동작을 반복하여 한 픽셀의 크기가 x축으로 1[cm], y축으로 1[cm]인 16 \times 16픽셀의 실험물체 거리정보를 획득하였다. 여기서 작업영역의 가로, 세로, 높이는 16[cm] \times 16[cm] \times 7.5[cm]이다.

표 1. 실험장치

Table 1. Experimental system

실험장치명	모델명	회사명
구조	upk-T	Physical Acoustic
Pulse Receiver	1010PR	ACCU-TRONInc
Software	Testpro System	Infomatics Inc.

본 실험에서 x, y좌표 값은 다공질 초음파 센서 중심의 고정된 값이므로 다공질 초음파 센서는 직진성만 가진다고 가정하여 측정범위에서 벗어난 수중의 물체정보들은 제거하였다. 수중 물체의 거리정보는 다공질 초음파 센서에 가해진 임펄스 전기신호에 의한 음파의 비행시간을 이용하여 계산하였으며, 거리정보 검출방법으로는 one-pulse echo mode를 이용하였다. 실험에 사용된 물체는 정사각기둥[cm](W5 \times L5 \times H2), 직사각기둥[cm](W4 \times L5 \times H2), 원통[cm](D5 \times H2), 정삼각기둥 [cm](L5 \times H2) 4종류이다.

수중의 물체변위에 관계없이 동일물체로 인식하기 위하여 전처리된 물체정보와 불변모멘트 기법을 이용하여 물체의 변위에 불변하는 물체의 특징점이 되는 불변모멘트 벡터를 추출하였다. 이때 수중 물체변위 패턴을 위하여 각 실험물체를 중심점을 기준으로 하여 상, 하, 좌, 우 4[cm] 이동시켰다. 물체당 5개의 이동패턴과 패턴당 10개의 데이터로 총 20개의 패턴에 대한 200개의 3차원 수중 물체정보를 다공질 초음파 센서로써 획득하였다. 그리고 이를 각각 식 (5)~(11)에 적용시켜 각각 7개 성분을 갖는 불변모멘트 벡터를 계산하였다. 200개의 불변모멘트 벡터 중에서 120개는 분류 신경회로망인 SCL신경회로망

의 학습(training)데이터로 이용하고, 나머지 80개는 시험(testing)을 위해 사용하였다.

SCL 신경회로망은 그림 1에서 보듯이 정사각기둥, 직사각기둥, 원통, 정삼각기둥인 4개의 수중 물체입력을 분류하기 위해 출력 Neuron space를 4×10, 입력벡터 V를 7차원으로 구성하고 50회 반복학습시켰다.

4. 실험결과 및 고찰

표 2는 PZT와 PVA의 중량비 92.5 : 7.5(wt.%)로 제작한 다공질 초음파 센서의 제특성을 나타낸다. 본 연구에서 제작한 다공질 초음파 센서는 수중 초음파 센서의 요구조건⁶⁾을 비교적 잘 만족하고 있다.

표 2. 다공질 압전소자와 초음파 센서의 제특성
Table 2. Properties of porous piezoelectric resonator and ultrasonic sensor

특 성	다공질 PZT
밀 도 [g/cm^3]	6.6
압전정수 d_{33} [$\times 10^{-12}$ C/N]	350
기계적 품질계수 Q_m	5.8
두께방향 결합계수 K_t	0.57
탄성컴플라이언스 S_{33}^D [$\times 10^{-12}$ m ² /N]	22.3
수중 음향임피던스 [Mray]	17.8
성능지수 $d_h \cdot g_h$ [$\times 10^{-15}$ m ² /N]	2,242

그림 2는 자체 제작한 다공질 초음파 센서의 펄스-에코 응답특성을 나타낸 것인데, 그림 (a)는 인가된 임펄스에 의해 진동자 자체의 진동으로 나타난 파형이며, 그림 (b)는 수중에서의 펄스-에코 응답특성이다.

다공질 초음파 센서는 그림 2에서 보듯이 계속적인 진동울림은 나타나지 않고 시간에 따라 급격한 울림감쇠(ringdown)현상이 일어나 송·수신특성이 양호하게 나타났다.

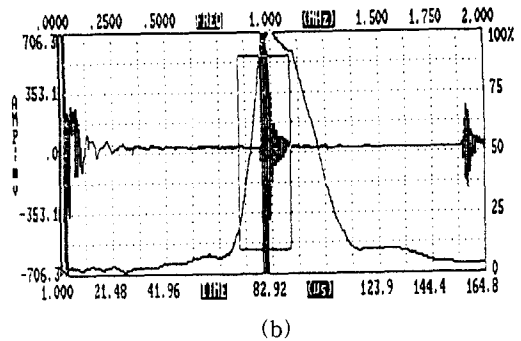


그림 2. 다공질 초음파 센서의 펄스 에코 응답 (PVA중량비 7.5)

- (a) 시편 자체의 진동파형
- (b) 에코신호의 파형

Fig. 2. Pulse-echo response of porous PZT sensor (7.5wt.% of PVA)

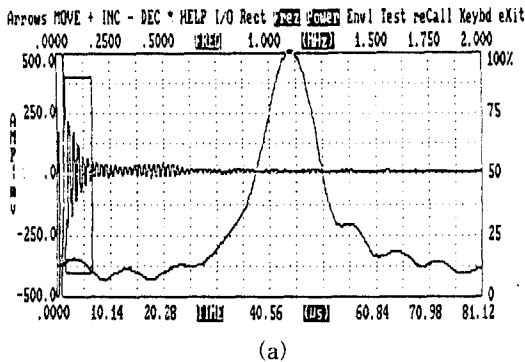
- (a) Vibrating waveform between electrodes
- (b) Waveform of echo signal

표 3. 수중의 정사각기둥에 대한 불변 모멘트벡터
Table 3. Invariant moment vectors for square block in water

invariant vector	original	4cm left	4cm right	4cm up	4cm down
ψ_1	0.164554	0.166305	0.164358	0.163771	0.163771
ψ_2	0.000012	0.000003	0.000042	0.0	0.0
ψ_3	0.000005	0.000001	0.000017	0.000010	0.000010
ψ_4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

표 4. 수중의 직사각기둥에 대한 불변모멘트벡터
Table 4. Invariant moment vectors for rectangular block in water

invariant vector	original	4cm left	4cm right	4cm up	4cm down
ψ_1	0.179012	0.175183	0.174528	0.172968	0.179012
ψ_2	0.003086	0.000798	0.000590	0.000391	0.003086
ψ_3	0.000024	0.000023	0.000068	0.000105	0.000024
ψ_4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



(a)

표 3~6은 각 수중 물체들의 위치변화에 따른 불변모멘트 벡터 $\psi_1 \sim \psi_7$ 의 값인데, 이들은 실험물체 당 일정한 범위내의 값을 가지기 때문에 수중의 물체를 구별할 수 있는 특징이 되었다.

표 5. 수중의 원통에 대한 불변모멘트 벡터

Table 5. Invariant moment vectors for cylindrical block in water

invariant vector	original	4cm left	4cm right	4cm up	4cm down
ψ_1	0.159144	0.158790	0.154195	0.156273	0.156875
ψ_2	0.000209	0.000915	0.0	0.000249	0.000172
ψ_3	0.000082	0.0	0.0	0.000075	0.000052
ψ_4	0.0	0.0	0.0	0.000001	0.000002
ψ_5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ψ_7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

표 6. 수중의 정삼각기둥에 대한 불변모멘트벡터

Table 6. Invariant moment vectors for regular triangle block in water

invariant vector	original	4cm left	4cm right	4cm up	4cm down
ψ_1	0.211248	0.252401	0.210368	0.230469	0.211248
ψ_2	0.001340	0.000301	0.005882	0.004776	0.001340
ψ_3	0.007507	0.018764	0.003308	0.013915	0.007507
ψ_4	0.000432	0.000365	0.000379	0.000602	0.000432
ψ_5	0.000001	0.000001	0.0	0.000002	0.000001
ψ_6	0.000012	0.000001	0.000028	0.000026	0.000012
ψ_7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

표 7. SCL 신경회로망의 50회 반복학습 후 각 수중물체의 인식률

Table 7. Underwater object recognition rate after 50 iterations of SCL neural network

물체 \ 인식률	학습데이터		시험데이터	
	데이터 수	인식률	데이터 수	인식률
정사각기둥	30	96.6%	20	90%
직사각기둥	30	100%	20	95%
원통	30	96.6%	20	90%
정삼각기둥	30	96.6%	20	90%

표 7은 표 3~6의 불변모멘트 벡터를 SCL 신경회로망에 입력하고 50회 반복학습시킨 후 수중의 각 실험물체에 대한 인식률을 나타낸 것이다.

전체적인 수중 물체인식률은 학습데이터인 경우에는 97.45[%], 시험데이터는 91.25[%]로서 수중 물체의 변위에 관계없이 동일물체로 인식하는 높은 인식률을 보였다. 이는 자체 제작한 다공질 PZT는 표 2에서 보듯이 단일상 PZT에 비해 밀도가 낮아졌고, 기계적 품질계수 Q_m 이 작아져 그림 2에서 보듯이 음파의 송·수신허성이 향상되었으며 초음파 센서의 성능을 가늠하는 성능지수 $dh \cdot gh$ 가 높아 수중 거리 검출 능력이 향상되었기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

자체 제작한 다공질 초음파 센서는 낮은 밀도를 가짐으로써 음향 임피던스 정합이 개선되고, 높은 성능지수에 의한 수중 거리검출 능력이 향상됨으로써 SCL신경회로망 및 불변모멘트 벡터와 연계된 물체변위에 무관한 3차원 수중 물체인식 실험에서 학습데이터인 경우에는 97.45[%], 시험데이터는 91.25 [%]의 높은 인식률을 가지는 특성을 보였다.

따라서 자체 제작한 다공질 초음파 센서는 수중의 물체변위에 무관한 3차원 수중 물체인식용 초음파 센서로서의 적용 가능성이 클 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서의 다공질 초음파 센서는 수중 거리검출이 제한되어 있어 3차원 수중 물체 인식용 센서로서 활용되기 위해서는 수중의 먼 거리에 있는 물체도 인식이 가능한 초음파 센서의 재료개발에 대한 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. J.L. Sutton, "Underwater Acoustic Imaging", Proceedings of the IEEE. Vol. 67, No. 4, pp. 229~241, April 1979.
2. 조현철, 박정학, 사공건, "다공질 압전소자로 제작한 초음파 트랜스듀서와 신경회로망을 이용한 3차원 수중 물체복원", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 9, No. 8, pp. 825~830, 1996.
3. 박정학, 이수호, 사공건, 배진호, "수중청음기 응용을 위한 다공질 PZT 세라믹스의 압전특성", 대한전기학회논문지, Vol. 45, No. 4, pp. 558~561, 1996.
4. J. Dayhoff, "Neural Network Architecture", Van

- Nostrand Reinhold, pp. 10-13, 1990.
5. M.K. Hu, "Visual Pattern Recognition by Moment Invariants", IRE Trans. Information Theory, Vol.8, pp. 179-187, Feb. 1962.
 6. S.Y. Lynn and R.E. Newnham and K.A. Killer and K. Rittenmyer and A. Safari and W.A. Schulze, " Ferroelectric Composites for Hydrophone", Ferroel., Vol. 38, pp. 955~958. 1982.

시사 소개

조현철



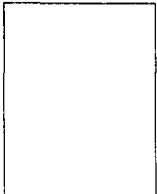
1961년 11월 19일생. 1985년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 일본 SAKURA 공업(주) 산업용로봇트 객원연구원. 1990년 동 대학원 졸업(석사). 1997년 동 대학원 졸업(공학). 현재 경북전문대학 전자과 조교수

이수호



1964년 1월 8일생. 1989년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학). 현재 영월공업전문대학 전기과 전임강사.

이기성



1958년 7월 12일생. 1980년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1983년 오하이오 주립대학 전기공학과 졸업(석사). 1989년 Purdue 대학 전기공학과 졸업(공학). 현재 홍익대 공대 전자전기공학부 조교수.

사공건



1968년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 미국 Golden State Univ.(Ph.D). 1983~1985년 The Penn. State Univ.(MRL)Visting Scientist. 1993년 일본동경공업대학 객원연구원. 1994년 The State Univ. of New

Jersey 객원연구원. 현재 동아대학교 전기공학과 교수.

박정학



1966년 8월 15일생. 1988년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학). 현재 특허청 심사관.