

論文99-36T-12-3

화자인식 알고리즘을 이용한 보안 시스템 구축

An Implementation of Security System Using Speaker Recognition Algorithm

申 裕 淩 * , 朴 基 榮 ** , 金 鍾 玖 *

(You-Shik Shin, Kee-Young Park, and Chong-Kyo Kim)

要 約

본 연구는 문맥 독립형 화자 인식 알고리즘을 이용하여 보안시스템을 소프트웨어와 하드웨어로 구성한 논문이다. 화자인식을 이용한 보안시스템은 윈도우상에서 사운드카드를 이용하여 음성을 입력받고, 성도 모델링을 이용한 음성 파라미터를 추출하였으며, k-means 클러스터링 알고리즘을 기반으로 하여 화자를 모델링하였다. 등록된 화자에 대한 인식된 결과는 PIC16F84 마이크로 프로세서를 이용하여 자물쇠의 문을 개·폐하도록 구성하였다. OFF-LINE의 실험은 TIMIT데이터를 이용하였으며, 5명의 화자에 대하여 ON-LINE으로 인식한 결과 학습시킨 데이터에 대해서는 100%의 인식률을 얻었으며 학습을 시키지 않은 데이터에 대해서는 99%의 인식률을 얻었다. 그리고 사용자 거부율 1%, 사칭자 허용률 0%, 검증평균오류는 0.5%를 보였다.

Abstract

This paper described a security system using text-independent speaker recognition algorithm. Security system is based on PIC16F84 and sound card. Speaker recognition algorithm applied a k-means based model and weighted cepstrum for speech features. As the experimental results, recognition rate of the training data is 100%, non-training data is 99%. Also false rejection rate is 1%, false acceptance rate is 0% and verification mean error rate is 0.5% for registered 5 persons.

I. 서 론

현대 정보화 사회로의 발달로 인하여 소비자의 욕구는 다양해지고 이에 맞추어 다양한 서비스가 개발되고 있다. 이러한 서비스로서 은행의 자동 현금지급서비스, 전화 쇼핑서비스, 정보검색서비스 등이 널리 이용되고 있으며, 본인 또는 허가를 얻은 사람만이 접근해서 서비스를 이용하도록 되어 있다. 그러나 만약에 허가를

얻지 않은 사람이 접근해서 사용을 한다면 심각한 사회문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 개인의 신분확인은 보안을 필요로 하는 곳에 필수적이다. 과거에는 사람의 신원을 확인하는데 신분증, ID카드, 도장, 서명 등으로 신원을 확인하였으나 이러한 경우 분실이나 복사 또는 사본을 만들어서 사용하는 문제점이 발생하였다.

따라서 인간의 특성을 이용하여 신원을 확인하고자 하는 연구가 디지털 신호처리의 발달과 더불어 biometrics 분야로 확산되 가고 있다. 지문인식, 홍채인식, 얼굴인식, 화자인식 등 다양한 연구 분야 중에서 인간의 음성을 이용하여 신원을 확인하는 연구가 바로 화자인식분야이다. 이는 화자의 음성신호에서 발생되는 개인의 특성을 추출하여 화자를 인식한다. 음성 신호로부터 말하는 사람이 누구인지를 판단하는 화자인식(speaker recognition)기술은 task의 성격에 따라 화자식별(speaker

* 正會員, 全北大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng. Chonbuk National Univ.)

** 正會員, 全州工業大學 情報通信科

(Dept. of Information & Communication Engineering
Jeonju Technical College)

接受日字: 1999年9月15日, 수정완료일: 1999年10月25日

identification)과 화자확인(speaker verification)으로 나눌 수 있다. 여기서 화자 식별이란 등록된 화자들 중 발화자가 누구인가를 알아내는 것이고, 화자확인은 특정인이라고 자칭하는 인식 대상이 본인인지 여부를 알아내는 과정을 의미한다.^{[1][2][3]}

문맥 종속형 화자 인식은 제한된 문장이나 단어를 발생하여 화자를 인식하는 방법이며, 문맥 독립형 화자 인식은 임의의 대화 문장이나 대화를 화자가 발생하여 발생한 화자를 인식하는 방법이다. 이러한 화자인식기술은 Edinburgh 대학, 홍콩시티대학, 미국 Rutgers대학 등 활발한 움직임을 보이며 기업으로는 AT&T의 service and speech technology department, ITT, 벨코어, TI, 프랑스텔레콤 등에서 연구가 진행되고 있다. 현재 나와 있는 제품으로는 Intelitrack Technologies의 Citadel Gatekeeper, ITT 의 SpeakerKey 등이 있다. 또한 국내에서도 숭실대, 전북대, 한국과학기술원, 서울대 등에서 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 소프트웨어적으로 문맥독립 화자인식 알고리즘을 구현하고, 하드웨어적으로 PC상의 사운드 카드와 직렬통신과 PIC16F84를 이용하여 직류모터를 제어함으로써 문의 개·폐를 하는 보안시스템을 구축하였다.^[4]

II. 시스템 구성 및 설계

현재 보안시스템은 여러 가지 방법으로 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 시스템을 원도우 환경에서 구현하였다. 시스템은 사운드카드를 이용하여 low level

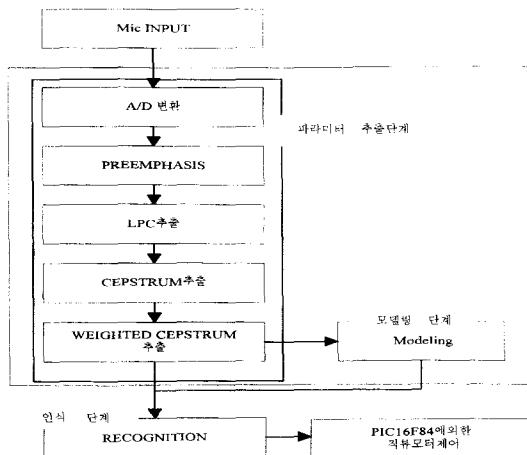


그림 1 시스템 구조도

Fig. 1 The structure of system.

음성입력 방식으로 데이터를 입력하였으며 학습부분과 인식부분은 시스템 운영자에 의해 결정하도록 하였다. 학습을 위하여 KMBM(k-means based model)알고리즘을 이용하여 화자모델링을 수행하였으며 인식을 위하여 Top-5방식을 도입하였다.^{[5][6][7]} 인식된 결과는 직렬통신을 통하여 PIC16F84의 입력으로 들어가고 PIC16F84에서는 PWM신호를 이용하여 직류모터를 제어하도록 구성하였다. 전체 화자인식 시스템의 구성을 그림 1에서 나타내었다.

1. 소프트웨어

이러한 화자인식을 이용한 보안시스템의 전체적인 흐름도를 그림 2에 나타내었으며 각각의 음성처리부분과 인식부분, 모델링부분 등을 나누어서 설명하였다.

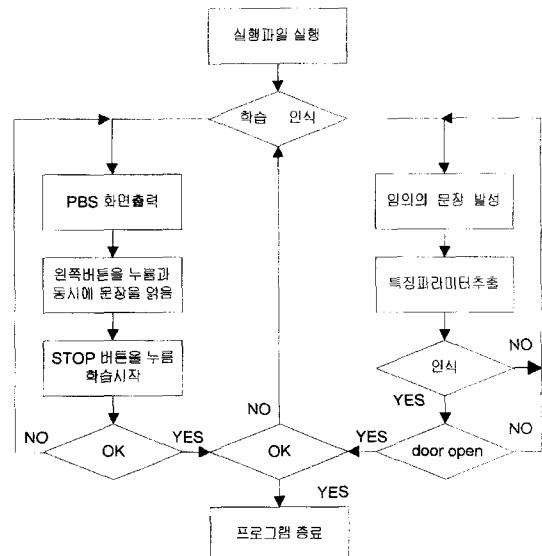


그림 2 보안 시스템의 흐름도

Fig. 2 Flowchart of security system.

1) 음성 특징 파라미터

음성이 구강으로부터 발생한다는 사실에 근거하여, 구강 형태를 필터로 가정하고 그 필터계수를 음성의 특징으로 삼는 것이다. 일반적으로 필터는 AR(auto regressive)모델, 혹은 ARMA(auto regressive moving average)모델에 의해 구성된다. AR모델의 대표적인 것이 선형 예측(linear predictive)방법을 사용하는 것인데, 이 방식은 모든 음성이 구강의 형태에 따라 구분될 수 있으며 구강의 형태는 혀의 위치에 따라서 변화한다는 가정을 이용하여 구강의 형태를 전극(all-pole)필터로 모델링하는 것이다. 그러나 음성의 자음과 비음 등은

전극필터로 모델링이 잘 되지 않는다. 특히 비음은 주파수영역에서 zero특성을 가지고 있어서 전극필터로 모델링할 때 제외되는 경우가 발생한다. 주파수영역에서 zero특성을 반영한 ARMA모델은 계산량이 많아서 음성인식을 위해서는 주로 계산량이 적은 AR모델을 이용하였다. 음성 특징파라메터로 가중 챕스트럼(weighted cepstrum)을 구하였다.^{[9][10][11]}

캡스트럼 분석 방법은 호모모피(homomorphic) 신호 처리 방법 중의 한 가지로 컨볼루션 또는 곱 등으로 처리된 신호를 해석하는데 유용한 방법이다.^[12]

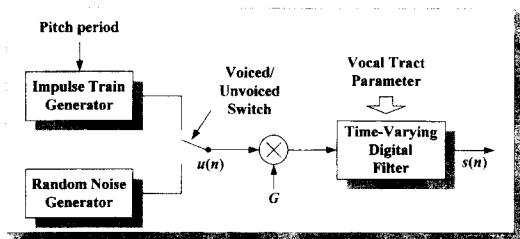


그림 3 음성생성 모델

Fig. 3 Speech production model.

그림 3에서 음성 신호 $s(n)$ 은 음원 신호 $u(n)$ 과 선형 시스템의 임펄스 응답 $h(n)$ 의 컨볼루션 형태로 결합되었기 때문에 음성 분석 문제를 각 성분을 분해하는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 음성 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(n) = h(n) * u(n) \quad (1)$$

식 (1)은 주파수 영역에서

$$S(z) = H(z) \cdot U(z) \quad (2)$$

로 표현되고 식 (2)에 대수를 취하면

$$\begin{aligned} \bar{S}(z) &= \log[S(z)] = \log[H(z)U(z)] \\ &= \log[H(z)] + \log[U(z)] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 $z = e^{j\omega}$ 를 대입하면

$$\bar{S}(\omega) = \log[S(\omega)] + j\arg[S(\omega)] \quad (4)$$

이고 여기서 $\arg[\cdot]$ 는 위상을 나타낸다.

캡스트럼 계수 $\{c_k\}$ 는 식 (4)의 실수부를 푸리에 역변환 것으로 정의되고 다음과 같다.

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log|S(\omega)|e^{j\omega k} d\omega \quad (5)$$

또한 캡스트럼 계수는 LPC 계수로부터 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$c_0 = \ln \sigma^2$$

$$c_m = a_m + \sum_{k=1}^{m-1} \left(\frac{k}{m} \right) c_k a_{m-k}, \quad 1 \leq m \leq p \quad (6)$$

$$c_m = \sum_{k=1}^{m-1} \left(\frac{k}{m} \right) c_k a_{m-k}, \quad m > p$$

여기서, σ^2 은 LPC 모델의 이득량이고 이렇게 구한 계수는 LPC계수를 이용하여 캡스트럼 계수로서 LPC 캡스트럼 계수라 한다.

음성 신호의 변화를 추정하는 방법은 주로 음성 신호를 모델링하여 구하여진 평탄화된 스펙트럼간의 차이에 기초한 방법을 사용하여 음성 인식, 화자인식 등에 적용되어 왔다. 상이성 또는 거리 측정은 최종 인식 결정이 이러한 거리를 기준으로 결정되기 때문에 매우 중요하다. 그러므로 좋은 측정 방법도 음성 신호 분석 방법처럼 두 패턴의 중요한 특성의 차에 민감하고 주변 환경 변화와 같은 부적당한 변화에는 민감하지 않아야 한다.

현재까지 음성 처리에서 여러 가지 거리 측정 방법들이 제안되어 사용되어 왔다. 특히 캡스트럼 계수를 사용하는 거리 측정 방법은 두 패턴의 대수 스펙트럼의 차이를 구하는 방법으로서, 계산이 간단하고 변별력이 우수하여 많이 사용되고 있다. 또한 최근에는 음성 처리에 중요한 스펙트럼 성분들은 불필요한 성분들은 억압하는 가중함수를 캡스트럼 계수에 사용하여 변별력을 높이는 연구가 많이 진행되었다.

Juang, Rabiner와 Wilpon 등은 고정된 필터를 사용하여 만들어진 신호에서 구한 캡스트럼 계수의 가변성과 실제 음성에서 구한 계수들의 가변성을 비교한 실험에서 캡스트럼 계수의 차수가 증가함에 따라서 캡스트럼 계수의 가변성이 크다는 것을 알 수 있었다. 낮은 차수는 스펙트럼 경사에 민감하고 높은 차수는 잡음에 민감하기 때문에 이러한 민감한 부분을 감소시키는 방법으로 경사창(tapered window)에 의한 가중치를 캡스트럼에 인가하는 것이 일반화되고 있다. 이러한 성질은 스펙트럼을 비교할 때 높은 차수의 스펙트럼 계수가 낮은 차수의 것보다 바람직하지 못하다는 것을 나타낸다.^[13]

신형 예측방법에 의하여 얻어진 스펙트럼은 전국 모델이라는 가정과 고정된 차수에 따른 비정상적인 주파수 성분을 포함할 수도 있다. 이러한 성분들은 주로 캡스터럼 계수의 낮은 차수에 영향을 미친다. 이러한 원인들에 따라서 캡스터럼 계수의 높은 차수와 낮은 차수의 바람직하지 못한 변화를 제거하기 위하여 밴드 패스 리프터(band pass lifter : BPL)형태의 가중 함수 세안되었다.^[14]

$$w(k) = 1 + 0.5L \sin\left(\frac{\pi k}{L}\right), \quad k=1, 2, 3, \dots, p \quad (7)$$

캡스터럼 계수에 이와같은 가중치를 첨가한 방법이 가중캡스터럼이다.

2) 화자 모델링 알고리즘

KMBM 알고리즘은 초기의 분류작업은 기존의 k-means 알고리즘과 동일하게 구성되어 있으며 일단 분류작업이 끝나면 같은 부류의 가중치와 분산을 구하여 화자모델로 사용하는 방법으로 다음과 같다.^[6]

- 1) 분류될 클러스터의 수를 선택한다.
- 2) 분류의 중심값에 해당하는 평균벡터로 초기값 M개를 선택한다.
- 3) 주어진 벡터를 분류의 중심값과 거리차를 구하여 가장 차가 작은 부류로 벡터의 인덱스를 할당한다.
- 4) 새로운 분류의 중심값을 계산하고 중심값을 다시 초기값으로 결정한다.
- 5) 2)~4)를 문턱값 이하가 될 때까지 계속하여 반복한다.
- 6) 문턱값 이하의 값으로 수렴하였을 때 수렴된 분류의 중심벡터를 화자의 평균벡터로 설정한다.
- 7) 각벡터의 인덱스를 참조하여 각 분류의 개수를 전체 개수로 나누어 화자의 혼합가중치로 설정한다.
- 8) 같은 인덱스에서 평균벡터와 주어진 벡터를 이용하여 분산을 구하고 이를 모델의 분산값으로 추정한다.

화자모델은 클러스터링 알고리즘 중에서 수렴속도가 가장 빠른 k-means 알고리즘을 이용하였으며 LBG 알고리즘으로 모델링했을 경우 인식률의 차이가 나타나지 않았다. 즉 k-means 알고리즘으로 클러스터링을 한 후 클러스터링된 집합의 총 갯수를 가중치로 결정하고 각 클러스터링의 중심값을 기준으로 클러스터링 내부의 분산값을 계산하여 KMBM모델의 분산으로 결정하

는 방법을 사용하였다.

3) 인식알고리즘

기존의 인식방법은 최대값만이 인식된 결과였다. 본 논문에서는 TOP-5방식을 도입하였다. TOP-5방식은 구해진 화률값을 전체로 나열한 후에 최대 화률값부터 일정한 개수를 차례로 정렬한 후 정렬된 5개의 인식결과를 가지고 최종적으로 인식을 수행하는 방법이다.

2. 하드웨어

본 논문에서 설계한 하드웨어는 직렬통신과 문의 개·폐를 위해 다음과 같이 두 개의 부분으로 구성하였다. 즉, 데이터 입력 및 처리부분과 통신 및 출입문 개·폐부분으로 구성하였다.

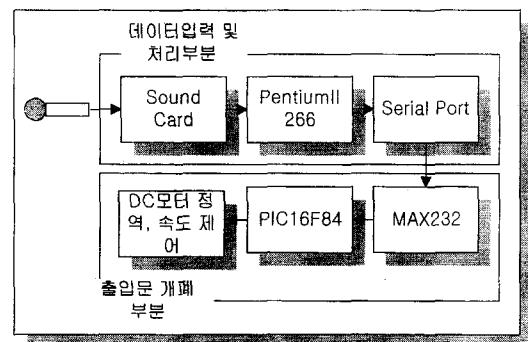


그림 4 시스템 하드웨어의 구성

Fig. 4 Structure of system hardware.

1) 데이터 입력처리부

マイ크로부터 low-level 오디오 서비스 함수를 호출하여 프로그램을 수행하며 8kHz, 16비트 웨이브형태로 입력되고 동시에 프레임별로 분할하여 음성 특징파라메터를 추출하고 화자에 대한 학습을 수행하여 컴퓨터에 화자모델을 저장한다. 인식프로그램이 실행된 상태에서 화자의 인식여부가 결정된다.

2) 통신 및 출입문 개·폐부

인식 여부가 결정되면 컴퓨터의 직렬통신인 com1라인을 통하여 9600bps, 데이터 비트 8비트, 정지 비트 1비트로 전송을 하게 된다. 이때 PIC16F84에서는 입력되는 데이터의 값에 따라서 PWM(pulse width modulation) 방식을 통하여 문의 개폐를 결정하여 기본적인 달링턴 회로 드라이브단이 구성된 모터를 제어하게 된다.

이러한 시스템의 전체적인 시나리오를 학습부와 인식부로 나누어서 그림 5와 그림 6에 각각 구성하였다.

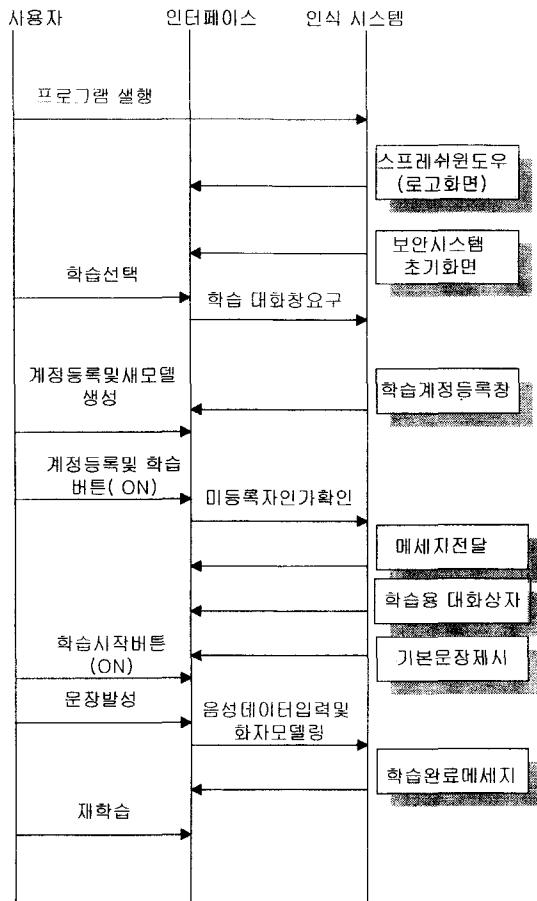


그림 5 인식시스템의 학습부

Fig. 5 Training part of recognition system.

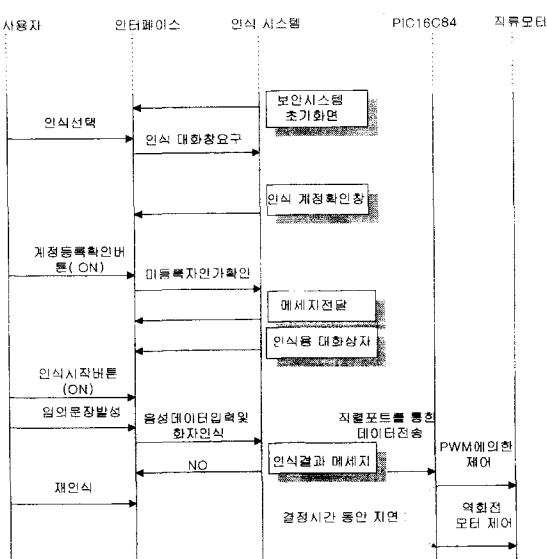


그림 6 인식시스템의 인식부

Fig. 6 Recognition part of system.

III 실험 및 결과

1. 실험 방법

1) OFF-LINE

화자인식의 정확한 인식률을 측정하기 위해 음성 데이터베이스로 TIMIT 데이터베이스를 이용하였다. 실험에 사용된 음성 데이터베이스로는 LDT(Linguistic Data Consortium)에서 만들어진 TIMIT 데이터베이스이다. TIMIT 데이터베이스는 총 630명의 화자가 발성한 문장으로 학습을 위해서 420명의 화자의 음성을 녹음하였으며, 인식을 위해서 210명의 화자가 발성한 음성을 데이터베이스화한 대규모 음성코퍼스이다. 이 TIMIT 데이터베이스는 조용한 환경에서 마이크를 통하여 녹음되었으며 양자화는 16비트로 구성되었고 샘플링 주파수는 16kHz인 양질의 음성데이터베이스이다. 이렇게 구성된 음성을 CD-ROM에 저장했으며 각 화자마다 10개의 문장이 녹음되어 있는 상용 데이터 베이스이다.

2) ON-LINE

화자인식 실험을 위해 등록자 5명에 대하여 임의의 문장을 10회 발성하여 화자모델로 등록을 했으며, 새로운 20회의 임의의 문장을 발성하여 사용자 거부율을 측정했다.

등록된 다른 사람으로 20회 임의의 문장을 발성하여 사칭자 거부율을 측정하였다. 시스템 환경은 주변잡음이 존재하는 일반적인 실험실이며, 10개의 단어는 8kHz, 16bit로 녹음한 후 음성 특징파라미터를 추출하였으며 특징파라미터의 차수는 고정적으로 15차로 결정하였다.

2. 실험 결과

오프라인 상에서 TIMIT데이터를 가지고 남자의 인식률과 여자의 인식률을 최대값을 가지고 비교하였으며, TOP-5방식으로 비교하여 실험을 수행하였다.

표 1. 최대확률의 경우 남자와 여자의 인식률 비교

Table 1. Recognition rate(Maximum value).

	LEVEL 5	LEVEL 6	LEVEL 7	LEVEL 8	LEVEL 9	LEVEL 10
MEN	87.57	91.08	91.08	91.89	92.43	92.16
WOMEN	77.27	87.58	89.09	89.69	89.69	90.91

여기에서 LEVEL은 화자모델을 만들기 위하여 크기가 큰 데이터를 한 개 사용하지 않고 한 화자에 대하여 모델을 시간적으로 여러개 만들어서 사용하는 방법으로 LEVEL수에 따라 화자의 시간적 모델이 결정되는 것이다.

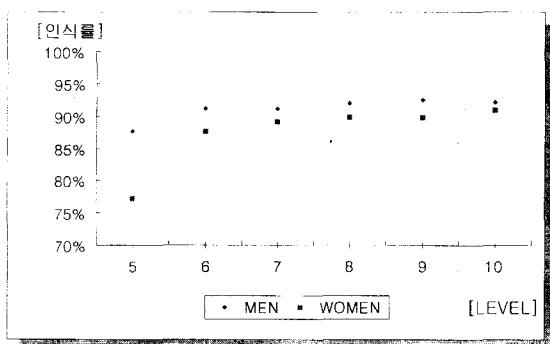


그림 7 최대확률의 경우 남자와 여자의 인식률 비교
Fig. 7 Recognition rate(Maximum value).

결과적으로 남성이 여성보다 인식률이 1.25% 높게 나타났으며, LEVEL을 점점 올려서 실험을 하였을 경우에 전체적으로 인식률이 증가됨을 그림 6에서 알 수 있었다.

또한 TOP-5 방식을 이용하여 실험을 했을 때의 결과는 다음과 같다.

표 2. Top-5 선택일 경우 남자와 여자의 인식률

Table 2. Recognition rate(Top-5).

	LEVEL 5	LEVEL 6	LEVEL 7	LEVEL 8	LEVEL 9	LEVEL 10
MEN	85.14	89.46	94.05	95.67	95.14	95.14
WOMEN	73.94	80.91	88.79	91.82	91.52	91.82

남성이 여성보다 인식률이 그림 8에서 보는 바와 같이 3.32% 높게 나타났다. 또한 표 1과 표 2를 비교하였을 경우 최대값을 이용한 것보다 TOP-5방식을 이용한 인식률이 남성인 경우 2.98% 여성의 경우 약 0.91% 향상된 것을 알 수 있다.

이러한 실험을 바탕으로 온라인 상에서 보안시스템을 구축하였으며 윈도우 환경, PIC16F84와의 직렬통신을 이용하여 구현된 시스템으로 남성화자 5명에 대하여 인식실험을 수행하였으며 그 결과 잘못된 거절(false

reject)과 잘못된 승인(false accept)의 비율은 각각 1%와 0%의 결과를 얻었다. 표 3에 화자 5명의 실험을 통한 오인식률에 대하여 나타냈다.

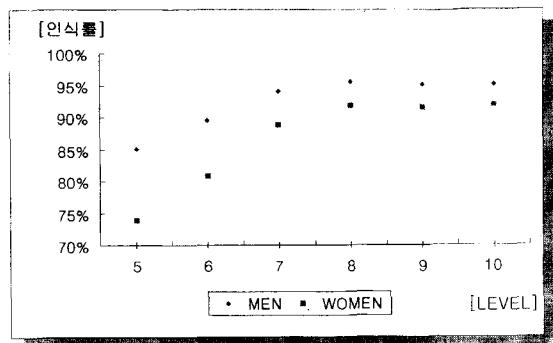


그림 8. Top-5 선택일 경우 남자와 여자의 인식률
Fig. 8 Recognition rate(Top-5).

표 3. 화자인식 시스템의 오인식률

Table 3. FA and FR by speaker recognition system.

	FR	FA
화자1	0/20	0/20
화자2	0/20	0/20
화자3	0/20	0/20
화자4	0/20	0/20
화자5	1/20	0/20
결과	1%	0%

IV. 결 론

본 논문에서는 문맥 독립형 화자인식알고리즘을 윈도우 환경에서 처리하고 인식결과를 직렬통신을 이용하여 PIC16F84에 결과 값을 전달하고 이로 인해 직류모터를 제어하는 시스템을 구성하였다. OFF-LINE실험에서는 최대값만으로 인식일 경우에 남성이 여성보다 1.25% 인식률이 높게 나타났으며 Top-5 경우도 3.32% 높게 나타났다. 또한 Top-5방식이 최대값보다 남성과 여성이 각각 2.98%와 0.91% 높게 나타났다. ON-LINE으로 실제적으로 사용될 수 있는 윈도우 환경에서 문맥독립형 화자인식시스템에 적용하여 남성 5명을 실험한 결과 FR는 1% FA는 0%의 인식률을 보였으며, 전체적인 VM은 0.5%로 나타남을 알 수 있었다.

앞으로의 연구과제로는 여러 잡음환경에서 잡음의 영향을 최소로 하는 방법에 대한 연구와 화자의 특성

을 잘 반영할 수 있는 파라미터에 관한 연구와 영상과의 접목을 통한 응용을 추구할 것이다. 또한 추후 본 시스템을 ASIC설계로 집적화 함으로써 S/W, H/W가 유기적으로 결합된 시스템산업으로 시너지효과를 극대화할 것이다. 또한 다양한 알고리즘 및 시스템의 개발을 통해 보안시스템 분야를 조기에 정착시키는 시스템 통합(SI)산업에 있어서 선두적인 역할을 할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] D. A. Reynolds, R. C. Rose, "Robust Text-Independent Speaker Identification Using Gaussian Mixture Speaker Models," *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*, vol. 3, no. 1, pp. 72-83, 1995.
- [2] 서광석, 신유식, 김종교, "출입자 판별을 위한 문맥 제시형 화자인식", 한국음향학회 학술발표대회 논문집, vol. 17 1(s)호, 1998
- [3] 신유식, 서광석, 김종교, "DTW를 이용한 향상된 문맥제시형 화자인식", 한국음향학회지, Vol. 18, No. 1, 1999
- [4] 박기영, 한국어 모음 인식을 위한 하드웨어 구성. 전주 공업대학 논문집, 제 16집, pp. 28-37, 2월, 1992
- [5] Chi Wei Chi, "An HMM Approach to Text-Prompted Speaker Verification," *Proc. of the IEEE*, vol. 2, pp. 673-676, 1996.
- [6] Furui & Sondhi, *Advances in Speech Signal Processing*, Dekker, 1991.
- [7] L. R. Rabiner & R. W. Schafer, *Digital Processing of Speech Signal*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., U.S.A., 1978.
- [8] L. R. Rabiner & Biing-Hwang Juang, *Fundamentals of Speech Recognition*, Prentice-Hall, AT&T, U.S.A, 1993.
- [9] 오영환, "음성합성시스템의 평가 및 화자확인시스템을 위한 표준어회색의 설계", 한국과학기술원, 1994.
- [10] 이용주, 이정철, 김경태, "음성 데이터베이스 구축에 관하여", 음향학회지, 제7권 제5호, 1988.
- [11] 신유식, "실시간 소규모 음성인식 시스템 구현에 관한연구", 석사학위논문, 전북대학교, 1996.
- [12] L. R. Rabiner and R. W. Schafer, *Digital Processing of Speech Signal*. Prentice-Hall, 1978
- [13] B. H. Juang, L. R. Rabiner and J. G. Wilpon, "On the Use of Bandpass Lifting in Speech Recognition," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-35, no. 7, pp. 947-954, 1987.
- [14] 정종순, "대표 평균패턴과 가중 캡스트럼을 이용한 화자인식의 성능향상에 관한 연구", 속석사학위논문, 한국과학기술원, 1996.

저 자 소 개

申 裕 淳(正會員) 第36卷 T編 第2號 參照
전북대학교 전자공학과 박사과정

朴 基 榮(正會員) 第36卷 T編 第2號 參照
전주공업대학 정보통신과 교수

金 鍾 玄(正會員) 第36卷 T編 第2號 參照
전북대학교 전기·전자·제어공학부
교수