

얼굴 인식 기술의 연구 현황 및 구현 사례

유 명 현*, 박 정 선*, 양 희 덕*, 이 상 웅*

요 약

얼굴인식 기술은 접촉에 대한 거부감이나 불편함이 없이 친숙하고 편리하게 사용자를 식별하고 인식할 수 있으며, 부가적인 센서 장비가 필요없다는 측면에서 개인 인증 및 보안 시스템으로서의 활용성이 매우 높다. 본 논문에서는 여러 가지 장점들을 지닌 얼굴 인식 시스템의 구현 사례를 실시간 얼굴 검출 기술과 특징 추출 기술, 인식 기술로 구분하여 소개한다. 개발된 시스템은 얼굴 검출을 위해서 색상과 에지 성분을 이용하는 복합 알고리즘을 적용하여 실시간 얼굴 탐지를 가능하게 하였고, 추출된 사용자의 고유 얼굴 정보는 최신 인식 기법의 하나인 Support Vector Machine으로 분류, 인식된다. 또한 시스템의 성능을 테스트하고, 실용화 가능성을 모색하기 위하여 하드웨어 임베디드 시스템의 설계 및 구현 과정과 조명 및 환경 변화에 따른 시스템의 성능 변화를 객관적으로 검증하기 위하여 다양한 변화 조건을 고려한 한국인 표준 얼굴 데이터베이스를 구축 과정을 소개한다.

주요용어 : 얼굴인식, 개인 인증, 얼굴 검출, SVM, 임베디드 시스템

1. 서 론

생체인식은 지문이나 손 모양, 음성, 홍채, 망막, 혈관, 서명에 이르기까지 개인에 따라 그 특징이 명확하게 다른 신체 부위나 행동 특성으로 사람을 식별하고 인증하는 것을 말하며, 이러한 생체 특징들은 분실, 망각의 우려가 없고 나아가서는 복제나 위조가 불가능하다는 점에서 최근 열쇠나 카드식 출입통제 시스템 등 전통적인 보안시스템을 대신할 차세대 보안 기술로 각광받고 있다. 여러 가지 생체 특징들 가운데에서도 특히 얼굴을 이용한 사용자 식별은 친숙성 및 변별성이 탁월하고 활용이 매우 편리하다는 장점으로 인해 새로운 생체인식 기술 분야로서 전 세계적으로 부각되고 있다. 얼굴인식 기술은 사용자가 신체의 일부를 직접 기계에 접촉해야 하는 불편함이 없어 특별한 거부감 없이 다양한 분야에 응용될 수 있다[1].

얼굴인식 기술은 광범위한 응용 가능성을 지닌 반면에 일상생활의 각 분야에 실제로 적용되기 위해서는 반드시 해결되어야 할 몇 가지 제약도 지니고 있다. 그 중 대표적인 것이 인식 환경이나 인식 대상의 변화에 민감하다는 것이다. 즉 얼굴인식 시스템은 안경, 머리모양, 표정 등에 의해 수시로 바뀌는 얼굴 모양과 주변 조명 및 배경의 다양한 변화를 고려하여 설계되어야 한다. 현재 많은 응용 시스템들이 얼굴 영상을 등록하고 인증하는 과정에서 가능한 배경 및 조명을 일정하게 고정시키거나 사용자로 하여금 무표정한 상태를 유지하도록 지시함으로써 얼굴 모양의 변화를 통제하고 있다. 그러나 안정적인 얼굴인식 성능을 위해서는 이와 같은 문제점들을 시스템의 인식 단계에서 자체적으로 해결할 수 있어야 하고, 그와 동시에 인식 속도도 응용분야에 적합한 수준이 보장되어야 한다[2].

본 논문에서는 생체인식 수단의 하나로서 편리함, 친숙함으로 대별되는 얼굴 인식 기술의 구현 사례를 (주)워치비전의 제품을 중심으로 얼굴 영역 추출, 얼굴 인식 및 검증 기술로 나누어 분석해 볼 것이다. 또한, 얼굴인식 기술의 상용화에 필수적인 하드웨어 구현 과정의 일례를 제시한다. 얼굴인식 기술의 적용분야 확장 안정적이며 상품성을 갖춘 응용 제품을 개발하기 위해서는 각각의 얼굴 인식 기술에 대한 객관적

* (주)워치비전 부설 기술연구소, 서울시 성북구 동선동 3가 243번지 동진빌딩 3층

인 평가와 표준화 과정이 매우 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 개발된 제품이 적용될 한국인 얼굴을 대상으로 한 객관성과 범용성을 갖춘 대용량 데이터베이스의 구축 과정을 제시할 것이다.

2. 실시간 얼굴 검출 기술

얼굴 영역 추출 기술은 얼굴 및 표정 인식을 위한 필수적인 전처리 기술일 뿐만 아니라, 사진 검색, 추적, 감시 등 다양한 분야에 독립적으로 적용 가능한 기술로써 수많은 연구가 진행 중이다. 얼굴 영상은 일반적으로 표정, 조명, 시점 변화 등에 의해 심하게 왜곡되고, 머리 모양, 화장, 안경 등에 의한 변화가 심하여 배경으로부터 얼굴 영역을 완벽하게 분리해 내기가 매우 어렵다. 또한 카메라를 통해 입력된 사진 영상은 배경, 촬영시의 밝기 정도, 촬영시의 얼굴과의 거리가 각각 다르며, 대상 인물 얼굴의 기울어짐 등으로 인하여 색인 및 검색에 바로 이용하기가 사실상 불가능하다[3].

이러한 제한을 고려하여, 얼굴 영역 추출에 주로 사용되는 기술은 피부색-기반 방법, Eigen 함수 방법, 신경망을 이용한 방법, 특징-기반 방법, 특징과 피부색을 결합한 방법 등이 있다. 이중 피부색-기반 방법은 단독으로 사용되지 않고 주로 다른 방법들과 결합된 형태로 이용된다. Eigen 함수 방법은 특정 패턴에 대하여는 비교적 높은 성능을 보이지만 시점의 변화와 같은 영상 전체의 변화에 대해 다소 민감하다는 단점이 있다. 신경망을 이용한 방법은 정지 영상내의 얼굴 탐지에서 뛰어난 성능을 보이지만 자연 배경과 같은 무수히 많은 비-얼굴 데이터를 학습시키는데 한계를 지니고 있다. 특징-기반 방법은 크기, 방향, 시점 변화 등에 독립적인 유용한 방법이지만, 눈, 코, 입과 같은 얼굴의 중요 특징을 찾는 과정이 쉽지 않다. 최근에 특징-기반 방법과 피부색을 결합한 방법들이 제안되고 있는데 비교적 안정적인 추출 성능을 보이고 있다[4].

다양한 얼굴 영역 추출 방법 가운데, 에지 정보를 이용하여 눈 위치를 탐지하고 얼굴을 검출하는 대표적인 과정이 그림 1에 제시되어 있다. 현재 얼굴탐지 기술은 주로 정면 얼굴로 제약을 가한 상황에 유용한 방법들이 개발되고 있으며, 다양한 방법들의 장단점을 고려하여 서로 보완적으로 성능을 개선하고 있다.

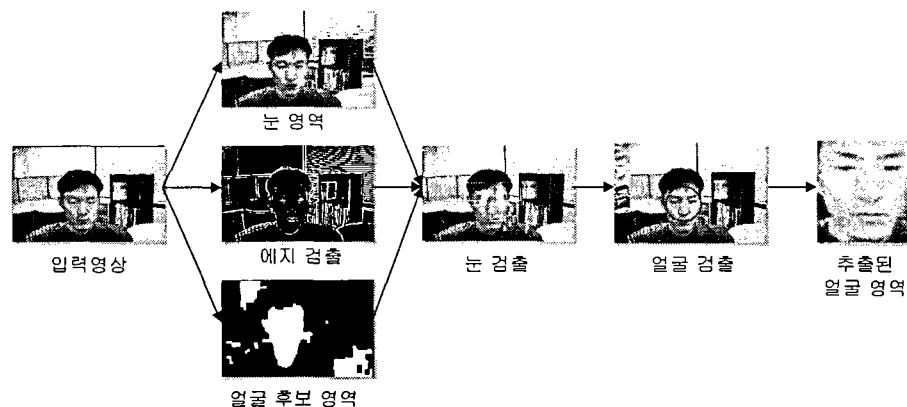


그림 1. 얼굴 영역 추출 과정의 예

3. 얼굴 인식 및 검증 기술

얼굴 인식 및 검증 기술은 주로 2차원 영상으로 획득되는 얼굴 데이터에서 서로 다른 사람의 미세한

차이를 구별하고, 동시에 같은 사람의 얼굴 영상으로부터는 작은 변형에도 불구하고 동일한 특징들을 찾아 내는 기술에 집중되고 있다[3,4,5].

얼굴 인식 기법은 크게 기하학적인 특징 정합 방법과 템플릿 패턴 정합으로 나눌 수 있다[6]. 기하학적인 특징 정합 방법은 눈, 코, 입 과 같은 얼굴 구성 요소들 사이의 위치, 모양, 코의 폭과 길이의 비 등의 거리를 측정함으로써 두 얼굴 영상의 유사도를 비교한다. 이 방법이 우수한 성능을 보이기 위해서는 각각의 얼굴에 대한 정규화 과정이 선행되어야 한다. 템플릿 패턴 정합 방법은 얼굴을 빛(light)과 형태(shape)로 구성된 2차원 영상으로 보고 인식을 시도한다. 이 방법에서도 크기 또는 대비(contrast) 등의 정규화 과정이 전처리로써 수행된다. 현재 얼굴 인식 및 검증 시스템에 사용되고 있는 대표적인 템플릿 정합 방법으로는 주성분 분석(PCA: Principal Component Analysis)[7], 국부적 특징 분석(LFA: Local Feature Analysis)[8], 변형 가능한 명도 표면(Deformable Intensity Surface)을 이용한 Bayesian 방법[9], Gabor 웨이블릿(wavelet)과 elastic bunch 그래프 매칭 알고리즘[10], 선형 판별 분석(LDA: Linear Discriminant Analysis)[11] 등이 있다.

주성분 분석(PCA)은 다변량 분석 방법으로서, 전체 영상의 데이터를 데이터의 분산이 큰 몇 개의 고유방향(EigenFaces)에 대한 축으로 선형 투사시켜 데이터의 차원을 줄이는 방법으로, 서로 다른 클래스를 차원을 줄여서 간단하게 표현할 수 있는 체계적이고 실용적인 방법으로 알려져 왔다(그림 2). 그러나, 이 방법은 클래스와의 관계를 고려하지 못하고 전체 데이터의 분산을 최대로 하는 방향으로만 선형투사 하기 때문에 클래스간의 겹침이 발생할 수 있다. 즉, 결과 주성분이 얼굴 전체 영상에 대한 표현으로서, 눈, 코, 입 등과 같은 세부적인(topographic) 표현이 아니므로, 다양한 변형을 표현할 수 있는 국부적 특징을 추출하지 못한다는 문제점을 가지고 있다. 그러나, 주성분 분석 방법은 수학적으로 잘 정의되어 있는 특성 때문에 기본 PCA의 개념을 조금씩 변형시킨 여러 가지 방법들에 널리 응용되고 있다. 응용 예로써 Eigenface, Modular Eigenfaces, Multi-dimensional discriminant analysis, Eigen space, Extracting high-order local autocorrelation features 등이 있다.



그림 2. 주성분 분석에 의해 생성된 Eigenfaces

주성분 분석 방법과 유사한 방법으로서 선형판별 분석(LDA: linear discriminant analysis)법을 제안할 수 있는데 이 방법은 공분산(covariance) 행렬이 아닌 개별(separation) 행렬 상에서 고유값 분석이 이루어진다는 차이점을 가지고 있다.

L. Wiskott 등에 의하여 제안된 Gabor 웨이블릿과 탄력적 구성 요소 그래프 매칭 방법[10]은 생물학적 동적 연결 구조(Dynamic link architecture)에 기반하여 얼굴을 인식한다. Gabor 웨이블릿을 뇌의 시각 경로를 본따 모형화한 개념(keyhole view)으로 사용하고, 얼굴의 구성 요소들의 그래프(face bunch graph)에 의하여 얼굴을 표현한다(그림 3). 얼굴 구성 요소 그래프는 눈, 코, 입, 그 밖의 윤곽 점들로써 구성되는 식별가능한 점들에 위치한 노드로 구성된다. 각각의 노드에서는 Gabor 웨이블릿의 크기로써 표현되는 특징들의 집합을 추출한다. 다음, 탄력 그래프 정합의 과정을 통하여 두 개의 패턴을 비교한다. 이 방법은 사람이 머리 모양을 바꾸거나 수염을 기르거나, 안경 또는 모자를 착용하더라도 인식이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

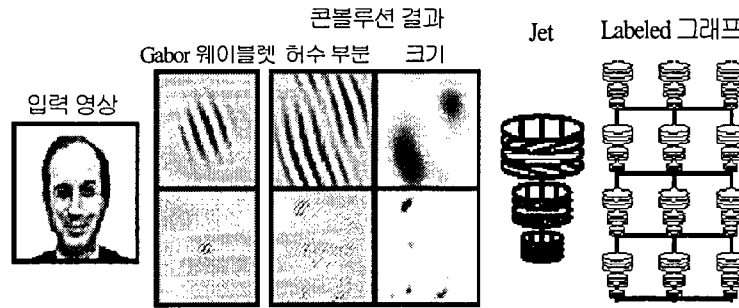
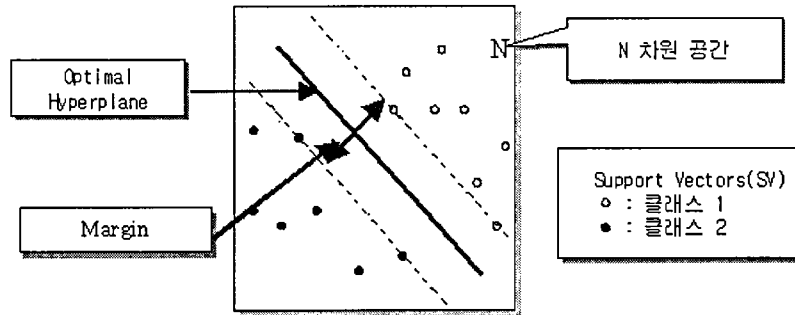
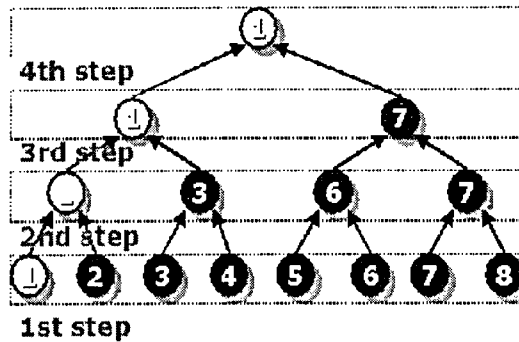


그림 3. Gabor 웨이블릿과 레이블 그래프

본 논문에서 제안하는 얼굴인식 시스템은 SVM(Support Vector Machine) 기반 방법으로 분류 및 인식 성능이 매우 뛰어나 최근 새로운 인식 엔진으로서 매우 각광받는 방법이다. 그림 4(a)에서 보듯이 이 방법은, 둘 또는 그 이상의 클래스를 분류함에 있어서 가장 대표적인 특성을 갖는 소수의 벡터들을 이용하여 최적 hyperplane을 구성하고 이를 기준으로 클래스를 분류하는 수학적 접근법으로서 인식 오류가 거의 없는 매우 정확한 인식 기술이다. 특히 인식 엔진의 최적 분류 성능외에도 시스템의 실시간 학습이 가능하여 실용적인 목적에 매우 적합하다. 나아가 그림 4의 (b)에 제시하였듯이 두 클래스씩 쌍으로 비교한 후, 보다 비슷한 하나의 클래스만으로 다시 쌍을 이뤄 단계적으로 분류해 나가는 상황식 분류 방법을 취함으로써 추가 데이터의 학습시 기존에 학습된 모델들의 수정 없이 새로 추가된 클래스의 모델만 학습하도록 하는 효율적인 구조를 지니고 있다.



(a) Support Vectors를 이용한 클래스 분류



(b) 효율적인 쌍별 비교가 가능한 상황식 분류기법

그림 4. 인식시스템에 사용된 SVM 엔진

4. 얼굴 인식 기술의 하드웨어 구현

소프트웨어 알고리즘에 기반한 얼굴 인식 시스템의 정보처리 과정에서 보통 계산량이 많이 요구되는 인식, 매칭 과정 부분을 하드웨어로 구현함으로써 출입통제 시스템, 감시 장비 및 지능형 장난감 등 독립형 응용 시스템에 적용할 수 있는 임베디드 모듈을 개발할 수 있다.

벡터 연산을 위하여 RBF 신경망과 KNN을 하드웨어로 구현한 IBM의 ZISC 칩과, 가중치를 고려한 벡터 곱을 병렬적으로 처리하는 존스홉킨스 대학교의 Kerneltron 등이 이러한 독립형 얼굴인식 하드웨어의 대표적인 응용 사례이다. 그러나 이 제품들은 컴퓨터 연산 기능의 일부를 대체함으로써 속도 증진의 효과를 얻고 있으나 통합적인 얼굴인식 과정을 모두 포함하는 독립형 얼굴 인식 시스템으로는 적합하지 않은 상태이다. (주)위치비전에서 개발 중인 얼굴인식 하드웨어 시스템은 영상의 전처리에서부터 인식에 이르는 전 과정을 포함하여 완전한 얼굴인식 기능을 구현한 독립형 하드웨어의 설계를 그 목적으로 하고 있다. 최종적으로 구현될 얼굴 인식 시스템의 기능 및 구성은 그림 5에 예시되어 있다. 그림 5에서 보듯이 본 제품은 얼굴 인식에 필요한 과정들을 하나의 하드웨어 제품 안에 통합하여 구현하고 있으며 이 시스템을 위하여 영상 입력, 제어, 메모리 등은 사용자가 자유로이 결정할 수 있도록 되어 있다.

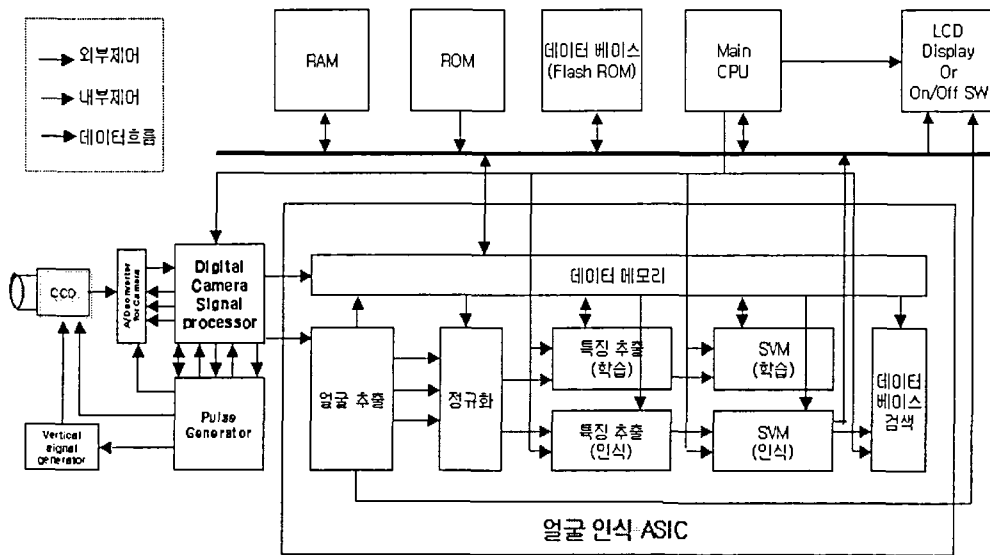


그림 5 얼굴 인식 하드웨어 시스템의 기능도

이 시스템에서 공통적으로 적용되는 벡터 곱 연산은 어레이(array) 형태로 설계되어 각 모듈에서 이를 이용할 수 있으므로 이 벡터 곱(Vector-Matrix Multiplication) 모듈을 이용하여 필터 연산, 운곽선 추출, 특징 추출 등의 벡터 연산을 빠른 속도로 수행할 수 있다. 또한 인식 모듈(classifier)의 경우, 앞에서 여러 가지 알고리즘 중에서 최적의 해를 구하는 것으로 알려진 SVM을 채택하였다. SVM 모듈의 경우에도 기본적으로 VMM 모듈을 이용하여 SV 추출을 위한 QP(quadratic problem) 문제의 해를 구하는 모듈을 포함하여 빠른 속도로 SV와 그 계수들을 추출할 수 있다. 일반적으로 QP 문제를 하드웨어로 구현하기 어려우므로 기존 인식 칩의 경우 이 부분을 소프트웨어로 처리하는 경우가 많았으나 현재 개발 중인 시스템은 하드웨어적 구현을 목표로 하고 있다.

5. 한국인 얼굴 표준 데이터베이스 구축

환경 및 얼굴표정, 조명의 변화를 고려한 얼굴인식 시스템의 개발을 위해서는 다양한 환경하의 여러 가지 얼굴 형태와 포즈 하에서의 복합적인 테스트가 필요하며 표준화된 얼굴 데이터베이스는 그러한 필요성의 가장 기초가 되는 문제이다. 선진 각국에서는 이미 다양한 얼굴 DB들이 구축되어 시스템의 성능 테스트를 수행하고 있으나 대부분이 서양인 모델을 사용한 것이어서 동양인 특히 한국인을 대상으로 한 얼굴인식 시스템의 객관적인 테스트가 매우 어려운 실정이다. 특히 얼굴 DB의 경우, 조명, 배경, 각도, 표정, 액세서리 착용, 연령, 성별, 실내외, 시간에 따른 피부색이나 헤어스타일의 변화 등 얼굴 영상에 변화를 일으킬 수 있는 다양한 요인이 고려되어 설계되어야 한다. 본 절에서는 얼굴 영상에서 발생할 수 있는 가능한 대부분의 변화를 고려하여 현재 (주)위치비전에서 구축중인 한국인 얼굴 DB의 특성과 활용 가능성을 제시한다. 얼굴 DB에서 고려되는 설계 기준은 그림 6에 예시되어 있다. 전체 DB 구축 과정은 크게 두 단계로 구성되며 일차적으로 얼굴의 표정과 포즈 및 조명과 각도 변화를 고려한 데이터베이스를 구축하고 있으며 추후 2단계에서는 그 밖의 변화들도 포함된 확장형 표준 DB가 구축될 예정이다.

얼굴 영상 획득시의 조명은 색상과 방향 두 가지를 모두 변화시켰으며 색상의 경우, 가장 일반적인 형광등과 백열등의 색상을 대신하여 삼파장 형광등의 주광색(color of daylight)과 전구색을 사용하였다. 조명의 방향은 모델을 중심으로 조명의 방향 변화가 확연히 드러나는 범위인, 좌우 다섯 가지 방향(0도, 45도, 90도, 135도, 180도) 변화를 포함하였다. 조명의 배치에 예는 그림 7에 제시하였다.

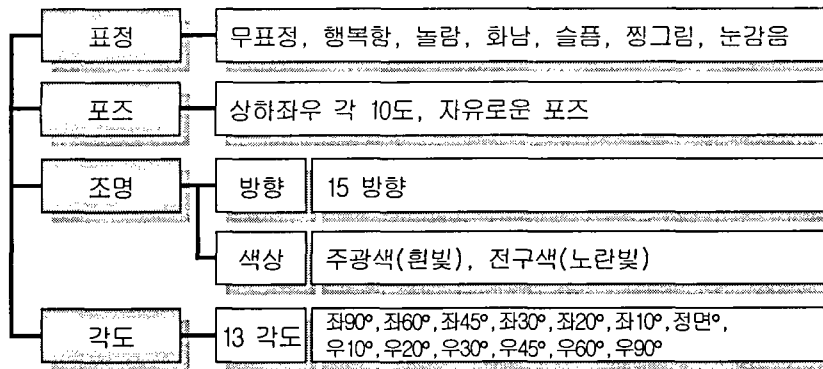


그림 6. 한국인 얼굴 데이터베이스 설계 기준

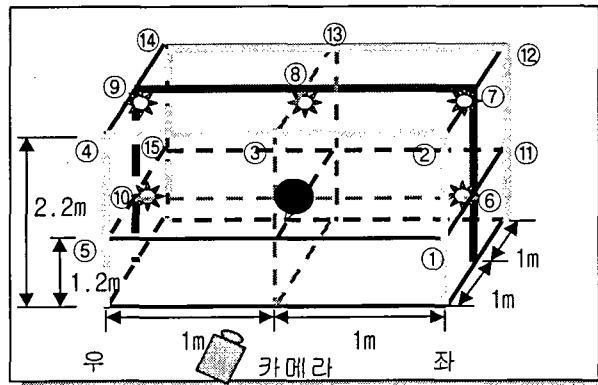


그림 7. 얼굴 DB 구축을 위한 조명 배치 예시

얼굴 영상의 각도 변화를 위해서 카메라를 정면 0도를 기준으로 좌우 30도까지는 10도 간격으로 이동하며 촬영하였고, 그 이상은 각각 45도, 60도, 90도 등 총 13각도에서 촬영하였다. 얼굴 영상은 각각의 각도 변화에 대해 자연스러운 헤어 상태뿐 아니라 눈썹, 눈, 코, 입 등의 특징들을 명확히 파악할 수 있도록 헤어밴드를 착용한 상태에서도 촬영되었다. 표정 변화는 기존의 통상적으로 사용되고 있는 외국 데이터베이스의 설계 조건을 참조하여 무표정, 행복함, 놀람, 화남, 슬픔, 찡그림, 눈감음(Blink) 등을 두 가지 조명색상 하에서 각각 촬영하였다. 각도 변화에 대응하여 카메라의 위치를 고정하고 모델의 얼굴 회전을 상하 좌우 각각 10도 지점을 응시할 때를 촬영하였고 그 외 자유로운 포즈를 주광색과 전구색 조명색상 하에서 각각 촬영하였다. 모든 조건에서 얻어진 영상의 수는 따라서 1인당 1회 총 98장이며 디지털 카메라를 사용하여 640*480 해상도에 비압축 파일포맷인 Tiff 포맷으로 저장되었다. 이 경우 저해상도로 변환은 물론 각종 이미지 변환(잡음추가, 블러링, 회색조 변환 등)이 용이하다. 구축된 데이터베이스의 조명별, 표정별 변화 예는 그림 8에 제시되어 있다.



그림 8. 한국인 표준 얼굴 DB 예, (주)위치비전

6. 결 론

얼굴 기반 생체 인식 기술에 대한 국내의 연구 현황 및 제반 고려 사항, 그리고 (주)위치비전에서 개발한 얼굴인식 시스템의 개괄적 특성들을 살펴보았다. 현재까지 생체인식 기술의 대중화에는 지문 인식이 가장 앞서 왔고 최근 홍채, 정맥 인식 분야도 새로이 각광을 받고 있다. 그러나 이들 분야에서 제기되는 자신의 신체 일부를 인식 장치에 직접 접촉시켜야 한다는 강제성에 대한 적지 않은 거부감과 불편함을 생각할 때, 신분확인 대상자가 모르는 사이에 자연스럽게 정보를 획득해야 하는 감시 분야나 사용자에 의한 기기의 조작이 필요없는 출입 제어 분야 등에는 얼굴 인식 기술을 적용하는 것이 상대적으로 유용하다. 얼굴인식에 의한 사용자 인증 방법은 여타의 생체 특징을 이용한 인식 시스템들이 데이터베이스화된 생체인식 정보, 즉 남은 기록으로부터 그것이 누구의 것인지 확인하기 어렵고 이를 위해서 부수적인 확인 과정을 거쳐야 하는 번거로움을 지닌 반면, 출입자의 얼굴이 매번 출입상황에서 작은 크기의 영상으로 기록되므로 관리자가 당장 혹은 추후에 바로 육안으로 출입 상황을 확인, 검토할 수 있다는 장점을 갖는다.

얼굴 정보가 갖는 이러한 장점을 효과적으로 이용하기 위해서는 영상으로부터 유용한 얼굴 정보를 실

시간으로 탐지 인식하는 알고리즘의 개발이 선행되어야 하며 개발된 알고리즘의 성능을 최대한 구현한 독립형 임베디드 시스템의 개발이 병행되어야 한다. 이러한 과정에서 인식 시스템의 성능을 객관적이고 과학적으로 평가하기 위한 기준이 필요하며 그 기준의 토대로서 사용자와 환경의 변화를 고려한 표준화된 얼굴 데이터베이스의 구축이 절대적으로 요구되고 있다. 본 논문에서는, 얼굴 인식 기술의 각 처리 단계별 중요 연구 현황을 살펴보고, 하드웨어 구현을 위해 고려해야 할 사항, 그리고 공정한 성능 평가를 위한 얼굴 데이터베이스를 설계, 구축하는 문제 등에 대해 실제적으로 수행되고 있는 각 분야의 연구 성과를 (주)워치비전의 활동 상황을 중심으로 살펴보았다.

참 고 문 헌

- [1] 이성환, 이미숙, "얼굴 영상 인식 기술의 연구 현황," 대한전자공학회지, 제 23권 제 6호, 1996년 6월, pp. 688-702.
- [2] 이성환, "Face Recognition: Theory and Practice," 한국정보과학회 컴퓨터비전 및 패턴인식 연구회 주관 생체인식 기술 워크샵 자료집, 2001년 2월, pp. 59-86.
- [3] R. Chellappa, C. L. Wilson, and S. Sirohey, "Human and Machine Recognition of Faces: A Survey," Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 5, 1995, pp. 705-740.
- [4] V. Ronda, M.H. Er. and W. Ser, "Face detection, tracking and recognition - A Study," Proc. of 5th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, Dec. 1998, pp. 50-55.
- [5] B.-W. Hwang, V. Blanz, T. Vetter, H.-H. Song, S.-W. Lee, "Face Reconstruction Using a Small Set of Feature Points," Proc. of 1st IEEE International Workshop on Biologically Motivated Computer Vision, Seoul, Korea, May 2000, pp. 308-315.
- [6] 박 정선, 유 명현, 이 성환, "얼굴 인식 기술의 현황과 전망," 기계저널, 제 41권, 제 9호, 2001년 9월, pp. 32-37.
- [7] S. Romdhani, "Face Recognition using Principal Component Analysis," The MS Thesis, University of Glasgow(UK), pp. 1-56, April 27, 1997.
- [8] P.S. Penev and J.J. Atick, "Local Feature Analysis: A General Statistical Theory for Object Representation," by Network: Computation in Neural Systems Vol.7, No.3, 1996, pp. 477-500.
- [9] B. Moghaddam, C. Naster and A. Pentland, "Bayesian Face Recognition Using Deformable Intensify Surfaces," Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision & Pattern Recognition, San Francisco, USA, June 1996.
- [10] L. Wiskott, J.-M. Fellous, N. Kruger, and C. von der Malsburg, "Face Recognition by Elastic Bunch Graph Matching," IEEE Trans. on PAMI, Vol.19, No. 17, July 1997, pp. 775-779.
- [11] K. Etmad and R. Chellappa, "Face Recognition Using Discriminant Eigenvectors," Proc. of IEEE International Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Atlanta, USA, 1996, pp. 2148-2151.