

시각 장애인을 위한 착용형 컴퓨터 시각 기술

강성훈 · 이성환

고려대학교 인공시각연구센터/컴퓨터학과

Wearable Machine Vision Technologies for the Visually Impaired

Seonghoon Kang · Seong-Whan Lee

Center for Artificial Vision Research/ Department of Computer Science and Engineering,
Korea University

Abstract: In this paper, we introduce a state of the art in computer vision technologies for the visually impaired by describing OpenEyes, which has been developed in Center for Artificial Vision Research, Korea University. OpenEyes is a walking guidance system that helps the visually impaired to respond naturally to various situations that can occur in unrestricted natural outdoor environments during walking and reaching the destination. The prototype system developed can guide the visually impaired in a building, a restricted environment, due to the limitation of current computer vision technology and computing power. We will concentrate on this research for expanding the application areas of the system to an unrestricted natural environment, and developing a small and low-power wearable computer system for increasing mobility.

Key words: Mobile visual aid, wearable computer, walking guidance, artificial vision

요약: 본 논문에서는 시각 장애자를 위한 컴퓨터 시각 기술의 연구 현황을 고려대학교 인공시각연구센터에서 연구 개발한 착용형 보행 안내 시스템 시제품 OpenEyes를 중심으로 살펴보고, 현 기술의 문제점 및 향후 연구 방향에 대해서 논하고자 한다. 특히 개발된 OpenEyes는 건물 내 환경의 제약된 상황에서만 동작할 수 있도록 설계되었으며, 착용형 컴퓨터의 하드웨어적 제약 조건 때문에 시스템의 동작 시간 또한 길지 못한 단점들이 있었으나, 현재까지 개발된 시제품을 바탕으로 소형화, 경량화, 저전력화 및 고성능화된 착용형 컴퓨터인 OpenEyes-II에 관한 연구가 향후 3년간 진행될 예정이며, 보행 안내 기능의 적용 영역도 건물 내 환경에서 제약 없는 건물 밖 자연 환경으로 확대해 나갈 예정이다.

주요어: 휴대형 시각 장치, 착용형 컴퓨터, 보행안내, 인공시각

서론

인간은 살아가면서 외부 환경에 대한 많은 정보를 받아들여 지식을 축적해 나간다. 또한 정보를 수집하고 분석함으로써 외부 환경으로부터 자신을 보호하고 외적 자극에 대한 반응을 표출하게 된다. 그 중에서도 시각 정보는 가장 빠르게 받아들여지며, 차지하는

비중 또한 매우 크다. 왜냐하면, 시각 정보는 사물에 대한 형태, 색상, 질감, 움직임 등 주변 환경과의 상호작용에 필요한 거의 모든 정보들을 포함하고 있어 다른 어떤 인간의 감각 기관보다 방대한 양의 정보를 받아들이고 있기 때문이다. 이러한 측면에서 보면 시각 장애인은 일반인은 물론이며, 다른 장애인들보다도 많은 정보를 이용하지 못한다고 볼 수 있다. 이러

교신저자: 이성환

고려대학교 인공시각연구센터/컴퓨터학과, 136-701 서울특별시 성북구 안암동 5가 1번지

Tel: 02-3290-3197

Fax: 02-926-2168

E-mail: swlee@image.korea.ac.kr

한 불리한 점 때문에 많은 시각 장애인들은 사회 생활 및 경제 생활이 제한되고 있다. 따라서 시각 장애인들의 생활을 보조할 수 있는 기구가 개발된다면, 시각 장애인의 사회 활동 범위가 넓어지고, 보다 다양한 직종에 종사할 수 있게 됨으로써 시각 장애인의 경제 활동을 촉진시키고 복지생활을 영위하도록 할 수 있을 것이다.

관련 연구 현황

시각 장애인들에게 있어서 가장 절실하게 나타나는 장애 요소는 바로 보행의 어려움이다. 오래 전부터 이러한 보행의 어려움을 해결하는 방법으로 지팡이나 맹인 안내견 등이 활용되어 왔으나 이를 사용하기 위해서는 많은 훈련 시간과 비용을 투자해야 했으며, 그 효과 또한 높지 않아, 시각 장애자에게 많은 정보를 주지 못했다. 그래서, 현대 과학 문명이 발전됨에 따라, 컴퓨터 및 전자 기술을 이용한 보행 보조 기구(Electronic travel aids)들이 개발되었으며, 이미 상품화된 것들도 다수 존재한다. 가장 널리 알려진 것으로는 Laser cane으로 3개의 레이저 다이오드를 장착한 지팡이를 이용하여 장애물의 존재 여부와 위치를 탐색할 수 있다. 그리고 초음파 센서를 이용한 것으로 손전등 모양의 Mowat sensor, 목걸이 형태의 Russel pathsounder 및 벨트 형태의 Navbelt라는 것이 있다¹. 그러나 실제로 이러한 것들은 독립적으로는 큰 효과를 얻지 못하며, 지팡이나 맹인 안내견의 보조 수단으로 밖에 사용되지 못하는 단점으로 인해 많이 사용되고 있지 못하고 있다.

이러한 기구들의 단점을 해결하기 위하여 컴퓨터 시각 기술을 이용한 보조 기구들이 연구되기 시작했다². 컴퓨터 시각 기술을 바탕으로 카메라로 들어온 입력 영상을 분석하여 앞에 있는 장애물을 인식하고 그 물체와 보행자와의 거리를 계산하여 보행자가 어떤 방식으로 장애물을 피해야 하는가 하는 결정을 할 수 있게 한다. 이러한 접근 방법은 기존의 초음파나 기타 센서를 이용한 방법에서 감지해 내지 못하는 작은 물체나 위에 걸려 있는 물체, 또는 흔들리는 물체까지도 충분히 인식해 낼 수 있다. 또한 여기에 문이나 계단을 인식할 수 있는 기능과 보행 중에 마주칠 수 있는 사람의 얼굴 및 표정 인식, 방 문패의 글자

인식 기능을 추가하여 보행자에게 보다 많은 정보를 제공할 수 있다.

OpenEyes의 소개

고려대학교 인공지능연구센터에서는 현재 컴퓨터 시각 기술을 이용하여 시각 장애인을 위한 보행 안내 시스템(시스템의 명칭을 OpenEyes라 한다)을 개발 중에 있다. OpenEyes는 제약 없는 자연 환경에서 시각 장애인이 보행할 때 나타날 수 있는 여러 상황에 자연스럽게 대처하면서 원하는 목적지까지 갈 수 있게 하는 보행 안내 기능을 최종 목표로 하고 있다. 그러나 현재의 컴퓨터 시각 기술과 제한된 처리 능력으로는 자연 환경에서의 적용이 어려운 상황이다. 따라서 최근까지는 건물 내 환경이라는 제한된 환경 하에서 보행을 안내할 수 있는 그림 1과 같은 프로토타입 시스템을 개발한 바 있으며, 여기서는 최근 개발한 OpenEyes의 프로토타입 시스템(이하 OpenEyes라 한다)에 대하여 소개하고자 한다.

주요 기능

OpenEyes는 기본적으로 시각 장애인이 건물 내 한 위치에서 목적하는 다른 위치로 이동할 때 이동자의 이동 경로 안내와 이동하는 동안에 발생할 수 있는 여러 상황들에 자연스럽게 대처할 수 있게 하는 것을 기본 목적으로 한다. 이러한 기본적인 목적을 만족스럽게 수행하기 위해서는 다음과 같은 세부적인 기능들을 필요로 한다.

첫째, 보행자가 이동해 나갈 통로를 안내하는 기능이 있다. 이는 가장 기본이 되는 기능으로서 이동해나갈 복도의 정보를 얻는 것이 선행되어야 할 것이다. 예로서 현재 위치에서 진행할 수 있는 문이나 통로 및 계단을 탐지하여 그 중에서 목적하는 곳으로 가기 위한 문이나 통로를 찾아 시각 장애인에게 안내해주는 것을 들 수 있다.

둘째, 이동 중에 나타날 수 있는 장애물에 대한 회피 기능이 있다. 보행 경로 상에 나타날 수 있는 고정 또는 이동 중인 장애물의 존재 여부와 이것의 거리 정보를 추출하여 보행자가 장애물을 쉽게 회피해 갈 수 있도록 하는 것이다. 이것도 보행을 위해서는 꼭 필요한 기능 중에 하나라 할 수 있다.

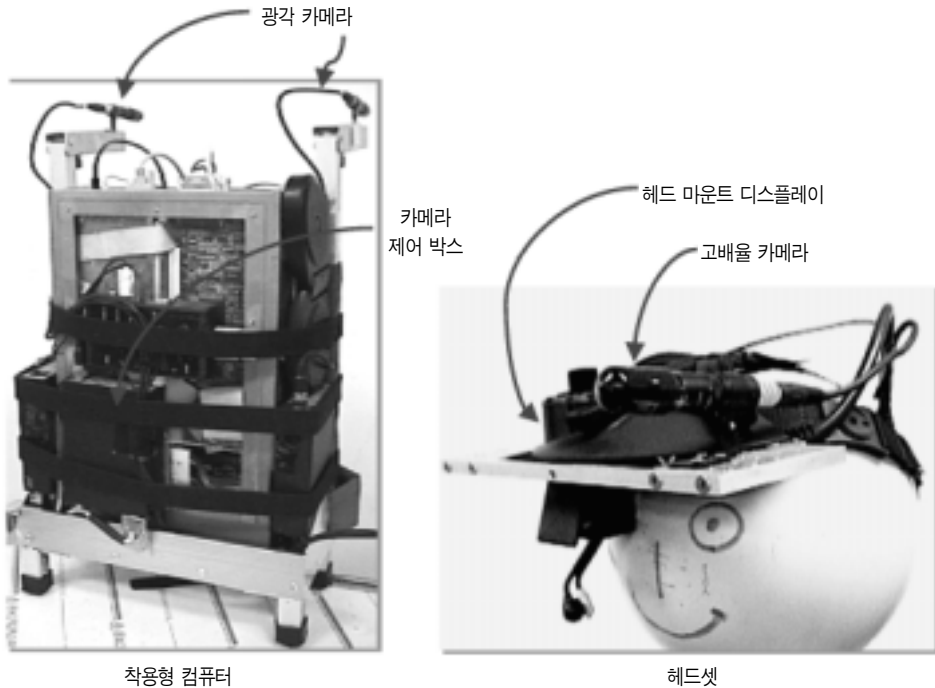


그림 1. OpenEyes 프로토타입 시스템.

셋째, 보행 중에 대면할 수 있는 사람의 얼굴과 표정을 인식하는 기능이 있다. 이것은 보행에 필수적인 기능은 아니나, 보행 중에 마주칠 수 있는 사람의 얼굴과 표정을 미리 인식하여 그 사람과의 상호 관계(인사, 대화 등)를 보다 더 자연스럽게 원활하게 하는 데에 많은 도움을 줄 수 있는 기능이라 할 수 있다. 예를 들어 전방에 다가오는 사람이 나와 친분이 있는 홍길동이란 사람이며, 밝은 표정을 짓고 있다는 것을 직접 대면하기 전에 인식함으로써 “안녕하세요? 홍길동씨, 오늘 좋은 일이 있으신가 보군요”라는 친숙한 인사를 상대방보다 먼저 전할 수 있을 것이다.

넷째, 자연 영상에 존재하는 문자를 추출, 인식하는 기능이 있다. 이러한 기능을 통하여 복도에 있는 방의 문패나 기타 유용한 문자 정보들을 인식하여 가고자 하는 목적지에 제대로 도착했는지의 여부와 기타 보행자에게 유용한 정보 등을 알 수 있을 것이다.

마지막으로 음성 메시지 입출력 기능이 있다. 이 기능을 이용하여 시각 장애인은 OpenEyes와 보다 친숙하게 정보를 교환할 수 있다. 필요한 명령을 음성으로 전달하고 그 결과를 음성으로 되돌려 받는 것은 시각

장애인에게 가장 효율적인 인터페이스가 될 것이다. 이상 OpenEyes가 가지는 기본적인 기능들에 대해서 살펴보았다. 다음은 이러한 기능들의 구현을 위한 시스템 구성에 대해 알아보겠다.

시스템 구성

본 시스템의 하드웨어는 그림 2a와 같이 시각 장애인이 몸에 장착하고 보행이 가능하도록 제작되었다.

추가 되는 컴퓨터 시스템은 Pentium III PC를 등에 멜 수 있는 형태로 소형화하여 제작하였다. 소형화를 위해 특별히 제작된 리튬-이온 배터리가 사용되며 동작 시간은 약 1시간 정도이다. 또한 부피와 소비 전력을 줄이기 위해 노트북용 초소형 하드디스크를 사용하여 시스템을 구성하였다. 그리고 실제 시각 장애자에게는 필요하지 않으나 개발의 편의성을 위하여 헤드 마운트 디스플레이를 사용한다. 영상 입력 장비로는 복도 영상의 분석을 위한 2개의 저배율(광각) 카메라와 얼굴 인식 및 문자열 인식을 위한 고배율 카메라를 사용하며, 영상 입력을 위하여 Matrox 사의 Meteor II grabber를 사용한다. 그리고 사용자와의 인터페이스는

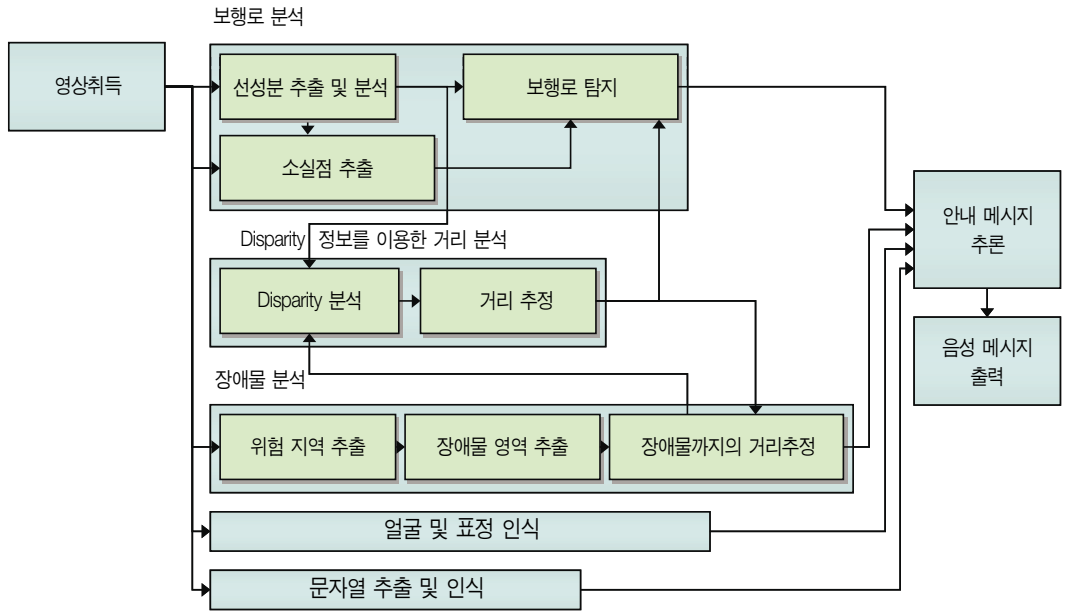
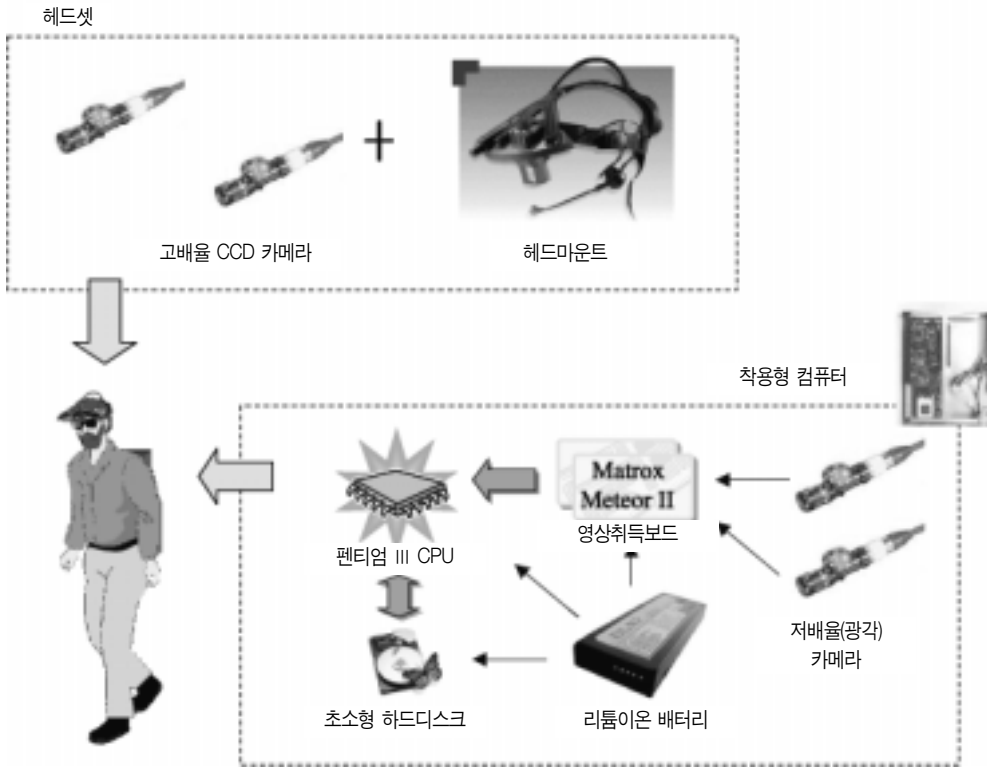
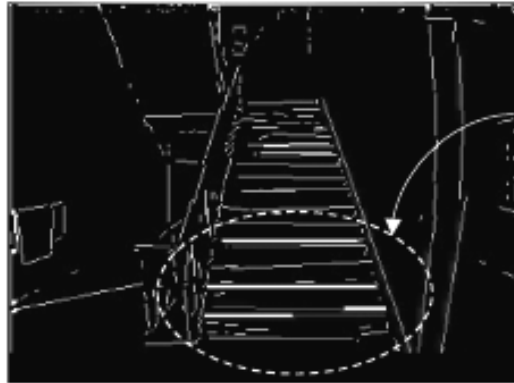


그림 2. (a) 하드웨어 구성, (b) 소프트웨어 구성.

입력 영상



검출된 선 성분



검출된 계단의 시작

그림 3. 보행로 분석에서 계단 검출의 예.

입출력 모두 음성을 사용한다.

소프트웨어는 그림 2b와 같이 크게 8부분으로 이루어진다. 스테레오 영상을 입력받는 부분과 실제 영상을 처리하는 5개의 부분(보행로 분석, disparity 분석, 장애물 분석, 얼굴 및 표정 인식, 문자열 인식)과 분석된 정보들을 바탕으로 보행자를 안내하는 메시지를 추론하는 부분, 결정된 안내 메시지를 출력하는 부분이 있다. 실제 소프트웨어의 중요한 부분을 차지하고 있는 컴퓨터 시각 부분을 중심으로 상세하게 설명하면 다음과 같다.

보행로 분석

현재 진행하고자 하는 복도의 통행로 정보를 분석하여 위치와 방향을 알려주는 부분이다. 그레이 영상을 입력받아 에지 영상을 구한 뒤 그래프 탐색 방식의 에지 추적 알고리즘으로 선 성분을 구한다. 구해진 성분들의 길이, 방향 및 위치 정보를 지식 기반 모델 정합을 통해 복도에서 보행에 중요한 요소들(문, 계단, 다른 복도)을 검출해낸다. 검출된 요소들의 위치 정보들을 이용하여 보행자 전방에서 문의 유무와 계단의 유무를 알려주며, 계단으로 보행할 경우 계단 중앙으로의 보행자 유도과 계단의 시작 및 끝을 알려준다. 보행자가 처음 진행하는 곳인 경우, 검출된 복도 정보를 고차원의 정보로 구조화하여 복도의 모델을 구성하며, 그 곳을 다시 지나갈 경우는 저장된 고차원 정보를 이용하여 통행로 분석을 보다 빠르게 수행할 수 있다. 그림 3은 보행로 분석에서 가장 어려운 부분인 계단

검출의 예이다.

Disparity를 이용한 거리 분석

스테레오 영상으로부터 얻을 수 있는 disparity를 이용하여 거리 정보를 추정할 수 있다. 실시간 처리를 위해 영상에서 추출된 에지 및 꼭지점과 같은 특징들에 대해서만 disparity 정보를 추출한다. 추출된 disparity 정보를 바탕으로 특징점까지의 거리를 계산한다. 이 기능은 스테레오 카메라로부터 검출된 장애물의 거리를 추정하는데 사용되게 된다. 그림 4는 특징 기반의 disparity를 이용한 거리 추정의 예이다.

장애물 분석

장애물 분석은 입력되는 영상에서 현재 움직이는 방향과 복도에서부터 얻어지는 소실점 및 바닥선(바닥과 벽이 만나는 선) 정보를 이용하여 보행자의 복도 상의 위치와 보행 방향을 계산한다. 또한 물체가 존재하면 충돌하게 되는 위험 지역을 결정하고 그 안에 장애물의 존재 여부와 그 거리를 추정하는 기능을 수행한다. 먼저 입력되는 복도 영상으로부터 위험 지역을 계산해내고, 결정된 위험 지역 내에서 에지 정보를 추출하여 장애물을 검출한다. 또한 스테레오 영상으로부터 추출한 두 에지 영상의 disparity를 이용하여 장애물까지의 위치를 계산하게 된다. 검출된 소실점 및 바닥선 정보를 이용하여 보행자의 위치 및 보행 방향을 구하고, 장애물의 위치와 현재 보행자의 위치 그리고 보행자가 진행하고 있는 방향 등을 종합

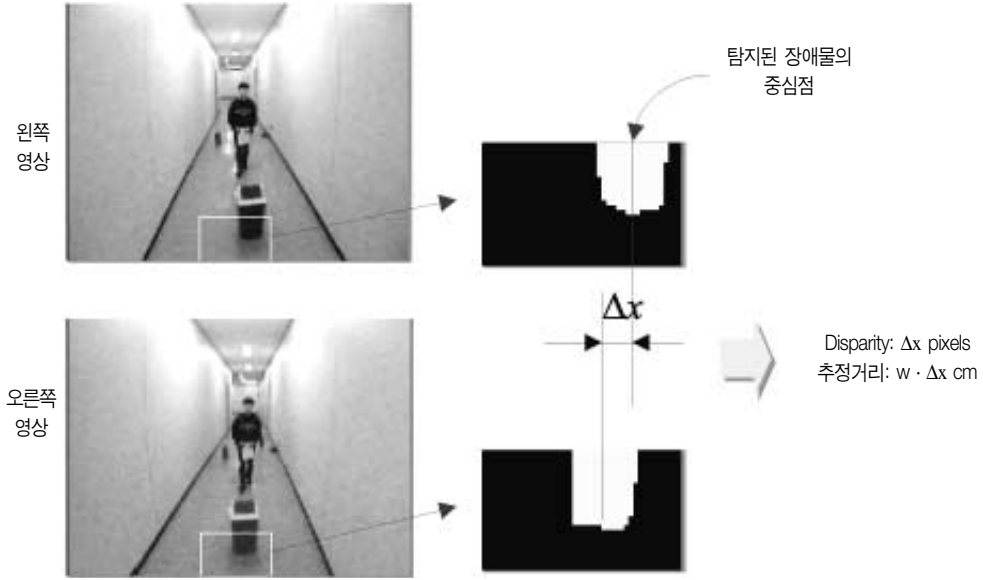


그림 4. 특징기반의 disparity를 이용한 거리 추정의 예.

적으로 고려하여 회피 방향을 결정하게 된다. 또한 보행자의 위치 및 보행 방향 정보를 바탕으로 벽과의 충돌 회피도 수행한다. 그림 5의 장애물 분석을 통한 장애물 회피의 예이다.

얼굴 및 표정 인식

보행 중에 마주 칠 수 있는 사람의 얼굴 및 표정을 인식한다. 먼저 다해상도 영상 기반의 움직임 탐지 기법³을 이용하여 보행자 전방에 걸어오는 사람을 포함하는 움직이는 객체를 실시간으로 탐지한다. 탐지된 객체 영역에 대하여 사람의 얼굴을 추출하기 위해 입력되는 컬러 영상의 RGB 정보를 조명의 변화에 덜 민감한 YIQ 컬러 모델로 변환한 후에 색차 정보인 I, Q 성분을 이용하여 얼굴 후보 영역을 검출한 뒤, 다양한 크기의 형판을 사용하여 정면 얼굴 크기와 정확한 위치를 계산한다. 추출될 얼굴영역에 대한 정확한 정보를 얻기 위해 원근을 고려한 얼굴 추적⁴을 수행하고, 추출된 얼굴 영역은 얼굴에 대한 자동적인 특징 추출과 소수의 특징 벡터로부터의 얼굴 복원 및 인식 방법^{5, 6}을 통하여 인식을 수행한다. 표정 인식은 기쁨, 슬픔, 무표정 등의 얼굴 표정에 대해 여러 사람들로 부터 얼굴 영상을 얻어 내고 이를 각 표정별로 분류한 뒤, 각 표정별 얼굴 영상에 대해 주성분 분석(Principal component analysis)

를 수행하여 고유값(Eigenvalue)과 고유 벡터(Eigenvector)를 얻어낸다. 새로 입력된 얼굴 영상에 대해 각 표정에 해당하는 고유값과 고유벡터를 사용하여 주어진 얼굴 영상이 각각의 표정을 가질 확률을 통계적으로 구하고 이를 통해 얼굴 표정을 인식한다. 그림 6은 다양한 조명하에서의 얼굴 영역 추출의 예이다.

문자열 추출 및 인식

보행 중에 나타날 수 있는 문자 정보들을 인식할 수 있는 기능이다. 이 기능을 통해 정확한 목적지에 도달했는지의 여부를 결정하게 된다. 입력되는 영상에서 에지 성분을 추출한 뒤 가장 에지 성분이 많은 부분을 문자열 후보 영역으로 추출하게 된다. 이때 보행자가 문을 바라보는 방향과 위치에 따라서 문패의 기울기 및 원근 상태가 달라지는데 이는 추출된 에지 성분들을 이용하여 원근 및 기울기 보정을 수행한 뒤 이진 문자 영상을 추출하게 된다⁷. 추출된 문자 영상은 크기 정규화를 수행한 다음, HMM(Hidden Markov Model)에 기반한 인식 방법⁸을 통하여 가장 확률이 높은 문자를 인식 결과로 출력한다. 이렇게 인식된 결과를 사용자 사전을 이용한 후처리를 통하여 오 인식을 향상시킨다. 그림 7은 문패의 문자열을 추출하여 인식하는 과정을 나타낸다.

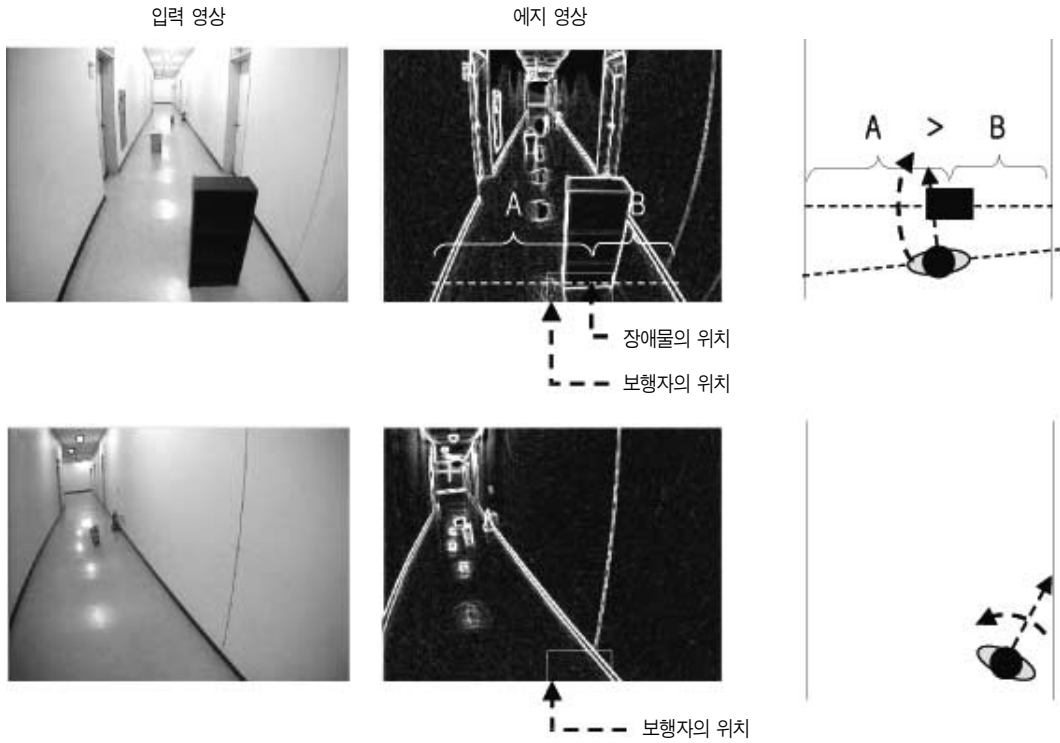


그림 5. 장애물 회피 및 벽 충돌 회피의 예.



그림 6. 다양한 조명 변화에 무관한 얼굴 영역 검출의 예.

시스템 성능

지금까지 소개한 기능들을 탑재한 OpenEyes는 제한된 건물 환경 하에서는 훌륭한 보행 안내 능력을 보인다.

다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 복도에서 마주칠 수 있는 여러 장애물을 효과적으로 회피할 수 있으며 장애물 회피 과정에서 올 수 있는 진행 방향의 변화로 인한



그림 7. 문자열 추출 및 인식.



장애물 회피

얼굴 및 표정 인식

계단 보행 유도

문자열 인식

그림 8. OpenEyes의 동작 모습.

벽과의 충돌 가능성까지 탐지하여 안내해 줄 수 있다. 또한 보행 중에 나타나는 사람을 인식하며 그 사람의 얼굴 표정까지 인식하여 보행자에게 전해줄 수 있다. 보행 중에 계속적으로 변화되게 되는 조명 조건과 얼굴 크기 및 각도의 변화에도 불구하고 90% 이상의 인식 성능을 보인다. 그리고 일반적으로 처리하기 힘든 계단의 인식 및 계단으로의 보행 유도는 OpenEyes의 능력을 잘 보여주고 있는 또 하나의 기능이라 할 수 있다. 마지막은 목적지에 도달했을 때, 방문의 문패를 인식하는 모습으로 시각 장애인이 방문을 바라봤을 때 문패의 위치가 항상 정확하게 정면의 모습을 보이기가 힘들다. 이런 경우 문자의 인식이 매우 어렵게 되지만, OpenEyes는 문패의 기울기 및 원근 보정을 통하여 문자 인식을 원활하게 할 수 있게 된다.

향후 연구 방향

지금까지 OpenEyes의 프로토타입 시스템에 대해서 살펴보았다. 현재까지는 건물 내 복도라는 제약된 상황에서 동작하도록 설계되어 있으며, 착용형 컴퓨터의 제약 조건 때문에 시스템의 동작 시간 또한 길지 못한 단점들이 있으나 컴퓨터 시각 기술을 이용하여 시각 장애인을 위한 보행 안내 기능을 구현해 보일 수 있었다는 점에서 큰 의의를 둘 수 있을 것이다. 현재 개발된 프로토타입 시스템은 앞으로 크게 두 가지의 방향으로 개선되어 나가야 할 것이다.

첫째, 하드웨어 처리 능력의 극대화와 크기의 소형화이다. 보다 편리하고 간편하게 몸에 장착할 수 있으며, 상대적으로 긴 동작 시간을 가지는 착용형 컴퓨터를 개발해 나가야 할 것이며, 또한 미적으로 타인에게 불쾌

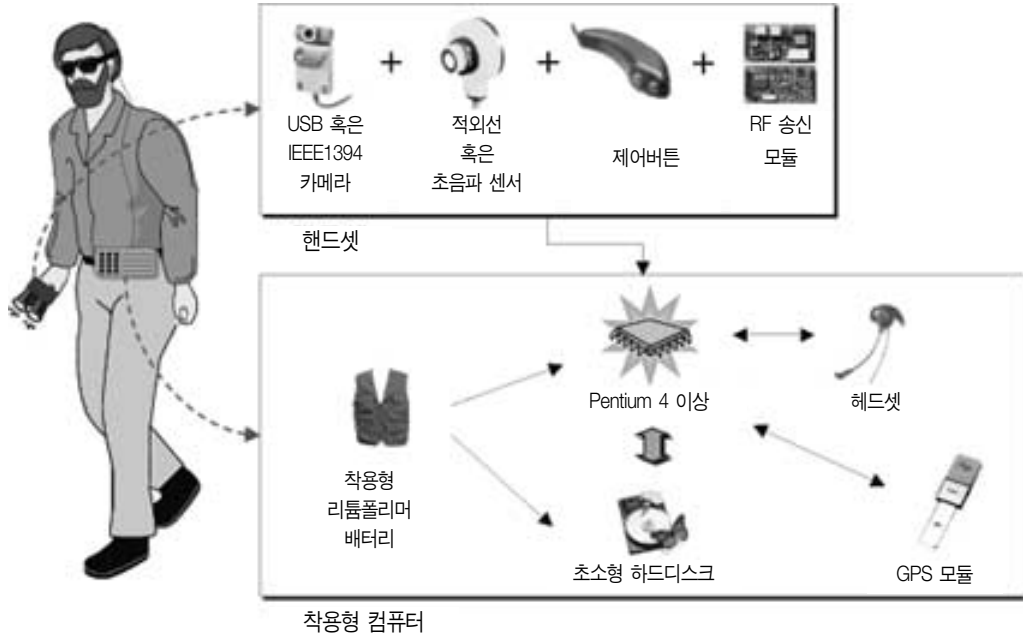


그림 9. OpenEyes-II의 하드웨어 구성.

감을 주지 않도록 일반적인 복장의 형태로 디자인해야 될 것이다.

둘째, 소프트웨어의 적용 영역을 건물 내 환경에서 제약 없는 자연 환경으로 확대해 나가야 할 것이다.

이때 많은 문제점들이 나타날 것으로 예상된다. 고정되지 않고 지속적으로 변화되는 배경과 그 안에서 빈번하게 움직여 가는 객체들, 그리고 규칙성이 없는 보행로 등 이런 모든 장애 요소들을 극복할 수 있는 알고리즘 개발에 주력해야 될 것이다.

이와 같은 개선 방향에 따른 OpenEyes-II의 하드웨어 구성은 그림 9와 같다⁹⁾.

OpenEyes-II는 크게 벨트 등에 착용할 수 있는 착용형 컴퓨터와 손에 들고 원하는 방향을 탐색할 수 있는 핸드셋으로 구성된다.

핸드셋은 영상을 입력받는 카메라와 장애물까지의 거리를 측정하기 위한 적외선 또는 초음파 센서, 그리고 간단한 조작을 위한 제어 버튼들로 이루어진다. 특히 착용형 컴퓨터의 간소화와 소형화를 위하여 USB 혹은 IEEE 1394 카메라를 사용한다. 그리고, 부가적인 기능으로 현재 경찰청에서 설치 계획하고 있는 시각 장애인용 무선 음향신호기를 작동시킬 수 있는 RF 무선 송신기를 포함할 것이다.

착용형 컴퓨터는 휴대가 가능하도록 1Kg 미만의 크기로 구성될 것이며, 배터리는 리튬-폴리머방식을 사용하여 옷과 같은 형태로 착용이 용이하게 할 것이다. 또한 소형 GPS(Global Positioning System) 모듈을 탑재하여 사용자의 전역적인 위치 측정 및 목적지까지의 보행 경로 안내를 가능하게 할 예정이다.

OpenEyes-II를 동작시키는 소프트웨어의 구성은 그림 10과 같다. 먼저 입력되는 실의 자연 동영상을 실시간으로 분석¹⁰⁾하여 시각 장애인에게 의미가 있는 사물들을 탐지하고 이것들을 몇 가지의 사물로 분류를 한다. 분류된 사물의 종류에 따라 장애물 탐지와 회피 기능, 기호 및 사물 인식, 얼굴 및 표정 인식, 문자열 인식을 각각 수행하게 된다. 장애물을 탐지할 때는 외부에 장착된 센서로부터의 거리 측정 결과를 참조하게 된다. 그리고 명령어 전달을 위해 제한된 어휘에 대한 명령어 인식 기능을 수행하며, 현재 보행자의 전역적 위치 측정을 위해 GPS를 통하여 위치 인식을 수행하게 된다. 그리고 마지막으로 앞에서 언급한 여러 기능들로부터 얻어낸 정보들을 종합 추론하여 음성 결과 메시지를 송출하는 기능을 포함한다.

이러한 OpenEyes-II의 연구는 현재 해외 유수의 연구 기관들과 공동 연구를 추진하기로 협약한 바 있다.

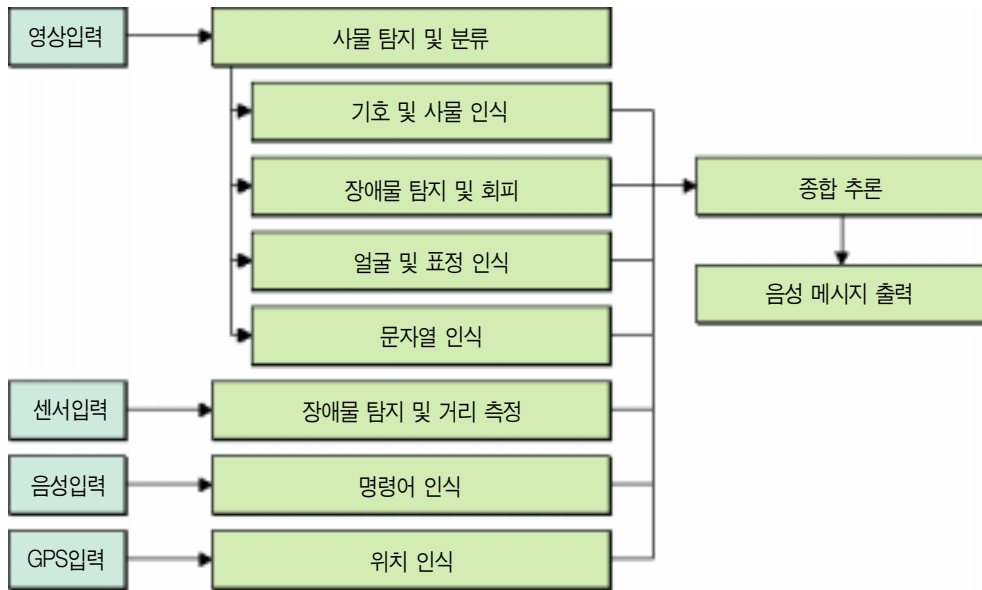


그림 10. OpenEyes-II의 소프트웨어 구성.

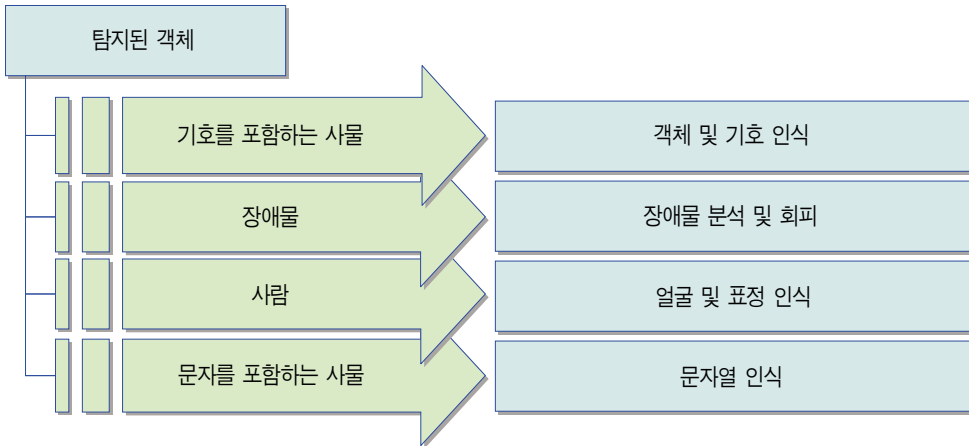


그림 11. 객체 탐지 및 분류과정에 의한 효율적인 기능 구현.

하드웨어 시스템의 소형화, 저전력화 및 최적화를 위하여 MIT의 T. Poggio와 A. Verri 교수 연구팀과 Support Vector Machine 엔진을 탑재한 저전력 VLSI 설계에 대한 공동 연구를 진행하고 있으며, Johns Hopkins 대학 Willmer Eye 연구소의 G. Cauwenberghs와 G. Dagnelie 교수팀과 임상 실험 연구도 추진하고 있다.

이러한 OpenEyes-II는 지속적인 연구를 통하여 보다

일반적인 보행 안내 시스템의 모습을 갖추나갈 것이며, 앞으로 수 년 내에 OpenEyes를 이용하여 불편 없이 거리를 확보하는 시각 장애인들의 모습을 볼 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 지원 창의적 연구진흥사업의

연구비 지원을 받았음.

참고문헌

1. S. Shoval and J. Borenstein, "The Navbelt - A Computerized Aid for the Blind Based on Mobile Robotics Technology," *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol. 45, No. 11, 1376-1386 (1998).
2. N. Molton et al., "A Stereo Vision-based Aid for the Visually Impaired," *Image and Vision Computing*, Vol. 16, 251-263 (1998).
3. S. Kang and S-W. Lee, "Multiple Object Tracking in Multiresolution Image Sequences," *Proc. of 1st IEEE International Workshop on Biologically Motivated Computer Vision*, Seoul, Korea, May 2000, 564-573 (2000).
4. S.-H. Choi and S.-W. Lee, "Region Tracking using Perspective Motion Model," *Pattern Recognition*, Vol. 33, No. 12, 2095-2098 (2000).
5. B.-W. Hwang and S.-W. Lee, "Face Reconstruction from a Small Number of Feature Points," *Proc. of 15th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Barcelona, Spain, September 2000, 842-845 (2000).
6. 황본우, 이성환, "적은 수의 특징점을 이용한 얼굴 영상 압축과 손상된 얼굴 영상의 복원 방법 및 장치", 특허출원번호 10-2000-29845, 2000년 6월.
7. S.-W. Lee and D.-S. Ryu, "Geometric Document Layout Analysis," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23 (2001).
8. H.-S. Park and S.-W. Lee, "A Truly 2-D Hidden Markov Model for Off-line Handwritten Character Recognition," *Pattern Recognition*, Vol. 31, No. 12, 1849-1864 (1998).
9. 이성환, 강성훈, "시각 장애인용 착용 가능 보행 안내 장치 및 방법", 특허출원번호 10-2000-27839, 2000년 5월.
10. S.-W. Lee et al., "Fast Scene Change Detection Using Direct Feature Extraction from MPEG Compressed Videos," *IEEE Trans. on Multimedia*, Vol. 2, No. 4, 232-244 (2000).