한국ITS학회논문지
제9권, 제5호 (2010년 10월)
pp.80~86

자동차 멀티미디어 시스템에서의 사진과 음악을 이용한 음악스토리 비디오 자동생성 기술

Automatic Music-Story Video Generation Using Music Files and Photos in Automobile Multimedia System

김 형 국
(Hyoung-Gook Kim)

요 약

본 논문에서는 차량 내의 멀티미디어 시스템에 장착되는 엔터테인먼트 기능 중의 하나인 음악스토리 자동생성 기술을 소개한다. 음악스토리 비디오 자동생성 기술은 개인이 소지하고 있는 휴대폰을 차량 내의 멀티미디어 시스템과 연결하여, 휴대폰 안에 저장된 음악과 사진의 결합을 통해 음악비디오를 자동으로 생성하는 멀티미디어 요소기술로서, 사용자에게 분위기에 맞게 음악을 들으면서 생성된 음악스토리 비디오를 즐기는 기능을 제공한다. 음악스토리 비디오 자동생성 기술에 대한 성능은 음악분류, 사진분류, 핵심단어 검출 등의 정확도와 생성된 음악스토리 비디오를 시청한 사용자의 MOS 결과를 통해 측정되었다.

Abstract

This paper presents automated music story video generation technique as one of entertainment features that is equipped in multimedia system of the vehicle. The automated music story video generation is a system that automatically creates stories to accompany musics with photos stored in user's mobile phone by connecting user's mobile phone with multimedia systems in vehicles. Users watch the generated music story video at the same time. while they hear the music according to mood. The performance of the automated music story video generation is measured by accuracies of music classification, photo classification, and text-keyword extraction, and results of user's MOS-test.

Key words : Music video, photo classification, music classification, text keyword extraction

Ⅰ. 서 론

최근 들어 본격화된 텔레매틱스 분야의 기술개발은 차량공간에 외부 정보 및 멀티미디어 환경제공을 목표로 진행되어 오고 있다. 즉, 초기에는 전자 지도, 경로 탐색 등의 서비스가 이루어져 왔으나, 현재에는 이를 뛰어넘어, 스스로 자동적으로

† 이 논문은 2010년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.
* 주저자 및 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 부교수
† 논문접수일 : 2010년 7월 19일
† 논문심사일 : 2010년 9월 6일
† 게재확정일 : 2010년 9월 8일

제어가능한 자동차 기술의 구현뿐만 아니라, 운전 중이나 이동 중에도 일상생활처럼 음악을 듣거나, 사진이나 동영상을 보거나, 전화를 하거나, 회의를 할 수 있는 보다 나은 멀티미디어 환경을 제공하는 텔레매틱스 기술이 구현되어 가고 있다. 특히, 자동차 인테리어에 있어서 오디오를 밀어내고 멀티미디어 장비들이 더해지고 있다. 실제적으로 차 안에 DVD 플레이어, DMB 수신기, LCD 모니터 등이 설치되어 뒷좌석에 앉은 승객들이 영화나 TV, 간단한 게임 등의 다양한 엔터테인먼트 요소를 즐길 수 있는 멀티미디어 환경이 제공되고 있다.

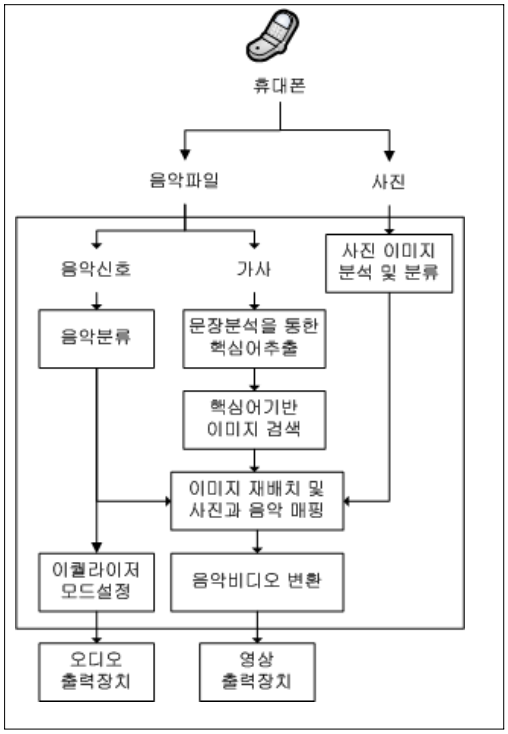
본 논문에서는 운전자 혹은 승객의 휴대폰, MP3 플레이어 및 개인 미디어 기기를 차량 내의 멀티미디어 시스템과 연결하여, 사용자의 기기 내에 저장된 음악과 사진의 결합을 통해 음악비디오를 자동으로 생성하고, 생성된 음악비디오를 보면서 음악을 즐길 수 있는 멀티미디어 기술을 소개하고자 한다.

개인사진, 음악, 웹상의 사진 이미지나 그림 등의 개인 및 인터넷 웹 콘텐츠를 이용하여 음악비디오를 생성하는 연구는 다양한 멀티미디어 신호처리 기술들의 결합으로서 개인사진과 음악의 템포를 이용한 음악비디오 자동생성[1,2], 사진이미지와 무드로 분류한 음악을 결합한 음악비디오 자동생성[3-6], 다양한 사진들을 몇 가지의 사진 클래스로 분류하는 사진자동분류 방식[7-9] 등의 연구들이 수행되어 오고 있다. 그러나 이러한 음악비디오 자동생성은 오디오, 영상, 텍스트를 기반으로 많은 연산을 수행하기 때문에 아직까지는 스마트 폰에서의 적용은 어렵고, 충분한 연산을 수행할 수 있도록 차량 내의 멀티미디어 시스템에 적용할 수가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 음악스토리 비디오 자동생성 방식의 전체 흐름과 구성된 알고리즘을 구체적으로 설명하고, 3장에서는 실험결과, 마지막으로 4장에서는 결론을 제시한다.

Ⅱ. 음악스토리 비디오 자동생성 구조

본 논문에서 구현한 음악스토리 자동생성 장치의 전체적인 구조는 <그림 1>에 나타나 있다. 사용



〈그림 1〉 음악스토리 비디오 자동생성 시스템 구조
〈Fig. 1〉 Structure of automated music story video generation

자의 휴대폰은 차량 내의 멀티미디어 시스템과 연결되고, 휴대폰 내에 저장된 사진과 음악파일이 입력된다. 입력된 음악파일은 음악신호와 음악가사를 포함하고 있다. 음악신호에서는 음악신호의 패턴을 분석하여 음악신호를 장르와 분위기에 따라 분류한다. 음악장르 분류결과는 오디오 출력장치에 연결된 이퀄라이저 모드를 자동으로 조절하여 각 음악에 맞게 음악을 재생시키고, 음악분위기 분류결과는 사진의 색 정보와 매핑된다.

음악가사에서는 문장 분석을 통해 핵심단어를 추출하고, 추출된 핵심단어는 무선인터넷 통신환경이 가능한 지역에서는 웹상의 사진 공유 커뮤니티 이미지 검색서비스에 입력되어 사진 검색을 위한 질의어로 사용되고, 그렇지 못할 경우에는 휴대폰 및 차량 내의 멀티미디어 시스템에 저장된 사진이나 이미지를 위한 질의어로 사용된다. Flicker와 같은 이미지 검색서비스 혹은 멀티미디어 시스

템에 저장된 사진들로부터 질의어에 의해 검색된 다양한 사진들은 핵심단어에 상응되게 배치 된 후에, 각 사진들로부터 추출된 이미지 특징을 이용하여 도시사진, 인물사진, 풍경사진 및 기타사진 등으로 분류한 후에 핵심단어 순서에 상응되게 사진을 배치한다.

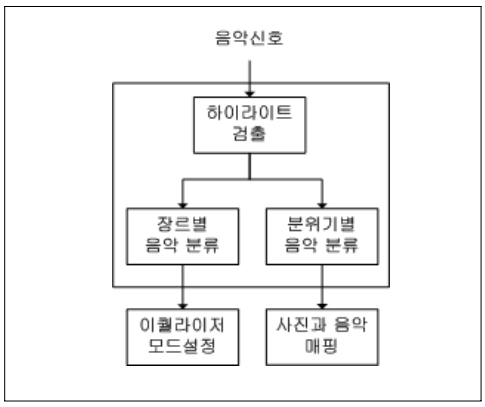
사진의 분위기를 표현하는 사진의 색과 음악파일의 Mapping Table을 통해 음악가사에 상응하는 사진이 자동으로 선정된다.

각 사진으로부터 추출된 영상 특징을 이용하여 사진의 강조 영역을 찾은 후에, 시작점에서 검출된 강조 영역을 향해 zoom in, 검출된 강조 영역으로부터 zoom out, 그리고 panning 기법을 이용하여 한 장의 사진이 몇 장의 사진으로 합성하여 동영상으로 편집된다. 즉, 음악이 흘러나오면서 음악가사와 상응하는 사진이 연결되어 음악스토리가 생성된다. 사용자는 이퀄라이저 모드설정에 따라 재생되는 음악을 들으면서 생성된 음악스토리를 보게 된다.

1. 음악분류

<그림 2>는 음악신호를 분석하여 장르와 분위기별로 자동 분류하는 음악분류를 구조를 나타낸다.

먼저, 각 음악신호의 일정구간(1초)에 대한 스펙트럼 분석을 통해 각 주파수 대역의 root-mean square(RMS) 에너지 값을 계산하여 고조 에너지 후보구간을 검출한다. 검출된 후보구간의 반복성을 점검하고, 고조 에너지가 발생하는 이전과 이후의 낮은 에너지 구간이 5초 정도 유지되는 고조 에너지 구간을 하이라이트 구간으로 선택한다.



〈그림 2〉 음악분류 구조
〈Fig. 2〉 Block diagram of music classification

검출된 음악하이라이트 구간으로부터 스펙트럼 분석을 기반으로 centroid, roll-off, flux, bandwidth, MFCC 특징 등의 음색특징을 추출하고, 템포 특징 추출을 위해서 temporal analysis, waveform의 에너지 분석, 주파수 대역폭으로부터 구해진 envelope의 변조스펙트럼 등을 사용한다. 추출된 템포 특징과 음색 특징은 AdaBoost알고리즘[4]을 통해 음악장르 및 무드 학습모델을 형성하고, 형성된 모델은 자동 음악 무드 및 장르분류의 성능을 효과적으로 향상 시키는데 사용된다. 자세한 음악분류방식은 [10]에 잘 나타나 있다. 장르 분류별 결과는 이퀄라이저 자동 모드설정에 반영되어 분류된 음악장르에 맞게 음악이 출력되도록 하고, 분위기 분류별 결과는 사진과 음악 매핑을 위해 사용된다.

2. 문장분석을 통한 핵심어 추출

음악스토리를 구성하는 이미지를 검색하기 위해서는 음악가사로부터 중요 핵심어를 추출하여 질의어로 사용하며, 음악가사 텍스트로부터 중요 핵심어를 검출하는 과정은 다음과 같다.

(단계 1) 형태소 분석사전을 이용하여 문장 텍스트로부터 단어의 형태소를 분리하고 품사를 결정한다. (단계 2) 품사가 결정된 문장의 구문적 구조를 분석하고 구단위와 구에 대한 격(case)을 결정한다. (단계 3) 결정된 격을 기반으로 각 문장을 구분하고, 구분된 문장으로부터 명사만을 추출한다. 추출된 명사를 수식하는 형용사만을 제외한 모든 다른 단어는 불용어로 가정하고 제거한다. (단계 4) 추출된 핵심 단어와 수식어를 질의어로 사용하여 해당하는 사진을 검색한다.

3. 사진이미지 분석 및 분류

휴대폰 안에 저장된 개인사진의 이미지를 분석

하여 분류하는 목적은 사용자가 보유하고 있는 많은 사진들로부터 음악스토리 비디오 생성을 위해 원하는 사진을 빠르게 브라우징할 수 있도록 자동으로 색인을 하기 위함이다.

본 논문에서 사용된 사진 분류 및 색인은 다음의 4 단계과정을 통해서 수행된다.

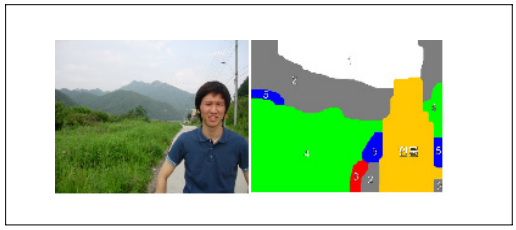
(단계 1.) 입력되는 사진으로부터 미리 형성된 얼굴모델 파라미터와 사진에서 추출한 haar-like 특징기반의 cascade 구조의 분류기를 통해 얼굴 영역을 검출한다. 검출된 얼굴정보는 입력이미지에서 인물영역을 지정하는 중요한 요소가 되며, 얼굴의 위치정보, 폭 그리고 높이로 표현된다. (단계 2.) 입력되는 사진에서 얼굴이 검출된 경우, 얼굴 검출 결과로부터 인물 클래스를 분류하고, 검출된 얼굴의 폭을 일정한 비율로 늘려 얼굴 시작점부터 이미지의 하단까지 인물영역이라 지정한다. 지정된 인물영역은 입력이미지에서 제거하여 영역분할에서 제외한다. (단계 3.) 인물영역이 포함되지 않은 사진으로부터 이미지 분류를 위한 사진의 내용 정보로서 색상과 질감특징을 추출한다. 색상특징은 입력 이미지의 RGB 색상공간을 HSV 색상공간으로 변환을 하고, 변환된 hue, saturation, value를 색상 히스토그램의 범위 기준에 따라 양자화시킨다. 양자화된 10개의 색상 히스토그램을 색상 특징으로 사용하고, 질감특징은 gabor 함수를 이용하여 scale 2개($w_0 \in 1, 2$), orientation 6개($\theta \in 1, 2, 3, 4, 5, 6$)의 gabor mask를 사용하여 식 (1)과 같이 이미지에서 추출되어지는 공간 주파수 C_{Ig}의 평균을 계산한다.

$$C_{Ig} = I(x,y) * g(x,y,w_0,\theta) \tag{1}$$

$$g(x,y,w_0,\theta) = \frac{\left[\exp(i(w_0 x\cos\theta + w_0 y\sin\theta)) - \exp(-w_0^2\sigma^2/2)\right]}{2\pi\sigma^2} \times \exp\left[\frac{(x\cos\theta + y\sin\theta)^2 + (-x\sin\theta + y\cos\theta)^2}{2\sigma^2}\right]$$

위의 식에서 σ는 gabor mask의 표준편차를 나타내며 $\sigma = \pi / w_0$이다.

대부분의 사진은 다수의 배경 클래스를 포함하고 있는 경우가 빈번하다. 만약 다수의 배경을 포함하고 있는 이미지에 대해서 전체의 이미지를 하나의 영역으로 간주하여 특징들을 추출하면 여러 가지 배경의 특징을 반영하지 못하기 때문에 분류오류를 유발한다. 이런 분류오류율을 감소시키기 위해 본 논문에서는 색상의 특징을 대표값으로 양자화 시켜 인접한 픽셀들을 하나의 영역으로 그룹화하는 과정을 통해 사진 내에서 영역을 분할한다. 즉, 영역분할은 5개의 색상 특징 대표값으로 양자화된 이미지에 5x5 최빈값 필터와 라인필터를 적용함으로써, 일정 크기 이하의 미세한 영역을 인접한 큰 영역으로 통합하여, 동일한 대표값으로 영역을 분할한다. <그림 3>은 영역분할 결과를 나타낸다.



〈그림 3〉 사진 영역 분할: 입력사진(좌), 영역 분할 사진(우)
〈Fig. 3〉 Block diagram of image segmentation

(단계 4.) 사진의 각 분할된 이미지는 식 (2)의 Support Vector Machine을 통해 구성된 다단계 별 분류구조를 이용하여 해변, 하늘, 산 또는 숲, 건축물 등으로 분류한다.

$$f(x) = sgn\left(\sum_{i=1}^{l} \bar{a}_i y_i K(x_i, x) + \bar{b}\right) \tag{2}$$

식(2)에서 $\bar{a}_i$, $\bar{b}$ 는 모델 형성 과정에서 생성된 결정 초평면의 기울기와 바이어스를 나타내고 x 는 분류하고자 하는 두 영역의 여백을 최대로 갖는 support vector를 의미한다. 커널함수($K(x_i, x)$)는 비선형적인 데이터의 차원을 증가시킴으로서 선형적인 분류가 가능하게 하는 역할을 한다. 본 논문에서는 사진 분류 실험에서 가장 우수한 결과를 보인 식(3)의 polynomial 커널함수를 사용한다.

$$K(x_i,x) = (x_i \cdot x+1)^d \quad (3)$$

식(3)의 d는 ploynomial 커널의 차수를 결정하며 제안된 장치에서 d 값은 3으로 사용하였다.

각 사진의 이미지 영역분류 결과를 통해 입력된 사진은 영역별 분류결과를 조합하여 도시사진, 인물사진, 풍경사진, 기타사진의 4 개 사진 클래스 중 하나로 분류된다.

4. 이미지 재배치 및 사진과 음악 매핑

음악가사의 텍스트로부터 추출된 핵심단어를 질의어로 사용하여, Flicker와 같은 이미지 검색서비스로부터 검색된 다양한 사진들을 텍스트에 추출된 핵심단어의 순서대로 배열한다. 이렇게 배열된 사진과 사진 분류를 통해 색인된 휴대폰 사진들의 색인주석과 색 분포도를 맞추어 전체 사진을 재배열 한 후에, 재배열된 사진으로부터 RGB컬러 공간으로 표현되어 있는 입력 사진을 인간의 시각 시스템과 유사한 HSV 컬러 공간으로 변환하여 컬러 히스토그램을 추출한다. 추출된 컬러 히스토그램에 의하여 가장 많이 표현되는 색을 입력 사진의 대표 색으로 결정하고, 결정된 사진의 대표 색은 <표 1>에 나타난 색-음악 분위기 맵핑 테이블에 적용되어 사진과 음악의 조화를 구성한다.

〈표 1〉 색과 음악분위기 맵핑 테이블
〈Table 1〉 Color-Music emotion mapping table

색	분위기	음악
검은색	슬픔, 이별	슬픈 음악
회색	슬픔, 이별	슬픈 음악
흰색	슬픔, 이별	슬픈 음악
적색	축제 분위기	강렬한 음악
오렌지색	유쾌함	신나는 음악
노란색	유쾌함	신나는 음악
녹색	편안함	잔잔한 음악
청록색	평화	잔잔한 음악
청색	평화	잔잔한 음악
보라색	감미로움	잔잔한 음악

5. 음악비디오 생성

사진들을 연결하여 동영상으로 변환하기 위해서는 사진에서 강조 영역을 검출하는 attention focus detection, 강조영역을 포함하는 핵심부분의 크기를 찾는 key-frame selection, key-frame들의 순서를 정하는 key-frame sequencing, 그리고 세부적인 움직임을 만드는 motion generation 과정으로 나뉘어져 수행된다. 각 과정의 개요은 다음과 같으며 세부적인 동작은 [1]에 나타나 있다.

• Attention Focus Detection: 각 사진으로부터 비디오로 변환 시에 보는 이로 하여금 관심을 불러일으킬 수 있는 강조 영역인 attention focus 부분을 검출한다. 사용자의 만족도를 높일 수 있는 attention focus로서 semantic 정보를 추출하기 위해서는 현재까지 개발되어 온 알고리즘과 구현에 있어서 많은 제한이 있기 때문에, 본 논문에서는 인물사진인 경우에는 사진에 포함된 각 얼굴영역을 검출하여 attention focus로 설정하고, 인물이 없는 풍경사진의 경우에는 명암을 구별하여 밝은 영역을 attention focus로 결정하는 단순한 방식을 사용한다.

• Key-frame Selection: 사진의 핵심영역을 연결하여 보여주기 위해서는 FF(full frame), MF(medium frame), CF(close-up frame)와 같은 다양한 크기의 key-frame을 선택하여 사용한다.

• Key-frame Sequencing: 설정된 key-frame을 바탕으로 4개의 basic motion unit인 Light Pan, Zoom In, Zoom out, Pan 등으로 구분하여 나누고, FFs, MFs, CFs들을 적절히 배열하여 표1에 나타난 바와 같이 4가지의 기본적인 Motion Pattern을 생성한다.

• Motion Generation: 음악의 템포에 따라 사진안의 frame의 비율을 조절하여 앞선 과정에서 추출된 4

〈표 2〉 4개의 basic motion unit
〈Table 2〉 Four basic motion units

모션종류	모션동작 형태
LP: Light Pan	FF→FF, MF→MF, or CF→CF
ZI : Zoom In	FF→MF, or MF→CF
ZO : Zoom Out	CF→MF, or MF→FF
PA : Pan	Among different BCFs

가지의 motion pattern들을 보여줌으로써 사진 스토리가 음악과 연결되어 동영상을 생성하도록 한다.

III. 실험 및 결과고찰

본 논문의 음악스토리 자동생성의 성능측정을 위해 1200곡의 음악분류, 1500장의 사진분류, 1200곡의 음악가사로부터의 핵심단어 검출 등의 정확도를 Windows XP 운영체제를 가진 Intel Pentium IV 3.0GHz CPU PC 실험 환경에서 측정하였으며, 생성된 음악스토리 비디오를 보면서 11명의 사용자를 대상으로 측정한 MOS 결과는 다음과 같다.

〈표 3〉 하이라이트 구간 기반 음악분류 결과
〈Table 3〉 Music classification results based on highlight segment

	GMM	SVM	AdaBoost
장르분류 정확률	81.7%	81.54%	86.32%
분위기분류 정확률	76.5%	78.32%	82.58%

〈표 4〉 사진분류 결과
〈Table 4〉 Photo classification results

	KNN	SVM	AdaBoost
사진분류 정확률	78.7%	85.6%	89.2%

〈표 5〉 핵심용어 검출결과와 MOS 테스트 결과
〈Table 5〉 Results of text-keyword extraction and MOS test

핵심용어 검출률	MOS 테스트
85.34%	3.4 ± 0.29

위에서 제시된 음악분류, 사진분류 및 핵심용어 검출결과는 90% 이하의 높지 않은 정확률을 갖고 있지만, 85% 정도의 정확률을 기반으로 생성된 음악비디오에 대한 사용자의 만족도를 테스트하였다. 사용자의 주관적인 MOS 테스트 실험 결과를 분석해보면, 사진과 음악가사가 어울린다는 의견이 대다수였으나, 검출 및 분류정확도의 오류로 인한 일부 입력 사진이 전체 음악스토리와 어울리지 못하는 경우가 발생하였다. 또한 사람마다 특정 사진이나 음악에 대한 개별적인 느낌의 차이가 존재하기 때문에 MOS 테스트가 낮아지는 경우가 있었다.

음악비디오 자동생성에 대한 최소한의 연산시간은 짧은 음악가사로부터 추출한 10개의 중요핵심어를 질의어로 사용하여 검색된 사진이 존재한다는 가정에서 세부적인 연산시간을 측정한 결과, 핵심어 검출 0.24초, 사진분류 및 attention focus 검출 2.31초, 음악분류 1.45초, 매핑 0.25초, 음악비디오 모션생성 2.23초가 필요하였다. 즉, 10개의 중요핵심어를 기반으로 병렬프로그래밍(음악분류, 사진분류,핵심어 검출은 병렬 신호처리됨)을 사용하여 최종적으로 음악비디오를 생성하는 연산시간은 4.79초(2.31+0.25 +2.23)가 소요되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 차량 내의 멀티미디어 시스템에 장착되는 엔터테인먼트 기능 중의 하나인 음악스토리 비디오 자동생성 기술을 제안하였다.

제안된 음악스토리 비디오 자동생성 기술은 90% 이하의 핵심용어 검출 및 사진/음악 분류정확도를 기반으로 구성되어 사용자 만족도 성능을 측정한 결과 3.4 MOS 테스트 결과를 제시하고 있다.

정확도가 높은 음악스토리 비디오 생성과 함께 사용자 만족도가 향상되기 위해서는 이미지 검색 서비스가 원활하게 이루어지는 통신환경이 구축되어야 하며, 개발된 알고리즘의 복잡도를 최소화시키고 효과적인 성능을 구현하기 위해 알고리즘이 개선되어야 하고, 이와 함께 독립형 임베이디드 시스템의 개발이 병행되어야 한다고 판단된다.

본 논문에서 제안된 음악스토리 비디오 자동생성 기술은 앞으로 자동차 내의 엔터테인먼트 요소를 즐길 수 있는 멀티미디어 시스템에 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

[1] X. S. Hua, L. Lu and H. J. Zhang, "Photo2Video-A system for automatically converting photographic series into video," *IEEE Tans,* on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 16, no. 7, pp. 803-819, July 2006.

[2] X. S. Hua, L. Lu and H. J. Zhang, "Automatic music video generation based on temporal pattern analysis," *Proc. 12th ACM Intl, Conference on Multimedia,* October 2004.

[3] D. A. Shamma, B. Pardo and K. J. Hammond, "MusicStory: a personalized music video creator," *Proc. 13th ACM Intl, Conference on Multimedia,* October 2005.

[4] L. Lu, D. Liu and H. J. Zhang, "Automatic mood detection and tracking of music audio signals," *IEEE Trans.* on Audio, Speech and Language Processing, vol. 14, no. 1, pp. 5-18, January 2006.

[5] J. C. Chen, W. T. Chu, J. H. Kuo, C. Y. Weng and J. L. Wu, "Tiling slideshow," *Proc. 14th ACM Intl, Conference on Multimedia,* October 2006.

[6] T. L. Wu and S. K. Jeng, "Probabilities estimation of a novel music emotion model," *Proc. 14th Int,. Multimedia Modeling Conference,* January 2008.

[7] S. Yang, Y. M. Ro, P. Viola and M. Jones, "Two-Layered photo classification based on semantic and syntactic features," *Proc. First Intl, Workshop on Semantic-Enhanced Multimedia Presentation Systems,* December 2006.

[8] T. S. Chua, L.-L. Tan and B. C. Ooi, "Fast signature-based color-spatial image retrieval," *Proc. Intl, Conference Multimedia Computing System,* pp. 362-369, June 1997.

[9] J. Platt, "AutoAlbum: clustering digital photographs using probabilistic model merging," *Proc. IEEE Workshop Content-Based Accesses Image Video Libraries,* pp. 96-100, June 2000.

[10] X. Zhu, Y. Y. Shi, H. G. Kim and K. W. Eom, "An integrated music recommendation system," *IEEE Transactions on Consumer Electronics,* vol. 52, Issue 3, pp. 917-925, August 2006.

저자소개

김 형 국 (Kim, Hyoung-Gook)

2007년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 전자융합공학과 부교수
2005년 4월 ~ 2007년 2월 : 삼성종합기술원 수석연구원
2002년 8월 ~ 2005년 3월 : 독일 베를린 공과대학교 조교수 (Adjunct Professor)
1999년 1월 ~ 2002년 7월 : 독일 Cortologic AG 책임연구원