

자동 화물처리를 위한 실시간 팔레트 측정 방법

변성민[†], 김민환^{**}

요 약

본 논문에서는 자율주행 지게차에서 팔레트 화물을 자동 인식하여 운송할 수 있도록 하는 비전 기반의 팔레트 자세 및 위치 측정 방법을 제안한다. 일반적으로 3차원 측정에서는 스테레오 비전 기술이 사용되나, 제안한 방법에서는 지게차의 포크 캐리지에 설치한 한 대의 카메라만을 사용한다. 먼저 어떤 별도의 표식이 없는 팔레트의 자세를 측정하기 위해 영상 역투영 기법을 제시하였는데, 이 기법에서는 팔레트 앞면 영상에서의 두 특징 직선을 3차원 공간에서 주어진 축 중심으로 회전시킬 수 있는 가상평면에 역투영시킨다. 가상평면에 역투영된 두 특징 직선이 평행하게 되면 그 때의 가상평면의 회전각이 팔레트의 자세를 나타낸다는 사실을 이용한다. 팔레트 위치 측정 방법에서는 역투영된 특징 직선 간의 거리와 팔레트 앞면에서의 실제 직선 간 거리의 비율을 이용한다. 실제 팔레트 영상에 대한 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성 및 실시간 실행 가능성을 보였다.

Pallet Measurement Method for Automatic Pallet Engaging in Real-Time

Sungmin Byun[†], Minhwan Kim^{**}

ABSTRACT

A vision-based method for positioning and orienting of pallets is presented in this paper, which guides autonomous forklifts to engage pallets automatically. The method uses a single camera mounted on the fork carriage instead of two cameras for stereo vision that is conventionally used for positioning objects in 3D space. An image back-projection technique for determining the orient of a pallet without any fiducial marks is suggested in this paper, which projects two feature lines on the front plane of the pallet backward onto a virtual plane that can be rotated around a given axis in 3D space. We show the fact that the rotation angle of the virtual plane on which the back-projected feature lines are parallel can be used to describe the orient of the pallet front plane. The position of the pallet is determined by using ratio of the distance between the back-projected feature lines and their real distance on the pallet front plane. Through a test on real pallet images, we found that the proposed method was applicable to real environment practically in real-time.

Key words: Autonomous Forklift(자율주행 지게차), Pallet Engagement(팔레트 적재), Pallet Recognition(팔레트 인식), Pallet Measurement(팔레트 측정), Image Back-Projection(영상 역투영)

* 교신저자(Corresponding Author): 김민환, 주소: 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지 부산대학교 정보컴퓨터공학부(609-735), 전화: 051)510-2423, FAX: 051)518-5033, E-mail: mhkim@pusan.ac.kr
접수일: 2010년 8월 27일, 수정일: 2010년 11월 17일
완료일: 2010년 12월 6일

[†] 준회원, 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정
(E-mail: cyberide@pusan.ac.kr)

^{**} 종신회원, 부산대학교 정보컴퓨터공학부 교수
(E-mail: mhkim@pusan.ac.kr)

* 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

1. 서 론

근래의 물류창고에서는 물류작업 효율화를 위해 화물의 유형에 따라 다양한 형태의 Automated Guided Vehicles (AGV)를 활용하고 있다. 팔레트 화물을 다루는 창고에서는 주로 포크(fork)가 달려 있는 지게차(forklift)를 많이 사용하고 있으며, 10m 이상 높이의 선반(rack)에 있는 팔레트 화물도 처리할 수 있다.

한편, 특수(무균 항온 항습, 초저온/초고온, 인체 위험 등) 환경에서는 무인 지게차를 이용하여 팔레트 화물작업을 자동으로 처리할 필요가 있다. 이를 위해, 팔레트를 자동 인식하여 지게차로부터 상대적인 거리와 자세를 정밀하게 측정하는 기술이 필요하다. 이러한 기술은 작업자에 의한 수작업 처리하는 부분과 무인 자동 처리하는 부분이 만나는 인터페이스에서도 필요하다. 예를 들어, 트럭에 실려 있는 팔레트 화물이나 물류창고 선반 위의 팔레트 화물을 자동 하역하고자 할 때도 팔레트 측정 기술이 필요하다.

팔레트의 위치와 자세를 측정하기 위한 기술[1-7]이 많이 제시되었다. 이들은 사용하는 센서로는 초음파[1], 레이저[2], 카메라 비전[3-7] 센서 등을 사용하는데, 초음파 센서는 낮은 정밀도로 인해 적용 환경이 제한되는 문제점이 있으며 레이저 센서는 정밀한 측정값을 얻을 수 있으나 매우 고가이므로 적용하기에 부담스럽다. 반면에, 카메라를 이용한 비전 기술은 저가로 구현이 가능하며 팔레트 인식 및 측정이 용이하여 주로 많이 사용되고 있다.

비전 기반 기술은 스테레오 비전 이용 기술과 단일 카메라 사용 기술로 구분된다. 스테레오 기술[3]은 3차원 공간상에 존재하는 대상물의 위치 및 자세를 측정할 때 많이 사용되나 까다로운 설치/보정 문제와 정합에 따른 연산속도 저하 문제가 있다. 반면에 단일 카메라를 사용하는 경우[4-6]에는 부족한 정보를 보충하기 위해 사용 환경 및 여건에 대한 제약 조건을 활용한다.

포크 장착(forked) AGV 상부에 설치된 한 대의 카메라를 이용한 팔레트 측정 방법[4]은 작업장 바닥에 놓인 팔레트만을 측정하는 것으로서, 팔레트 색상 정보를 이용하여 팔레트를 추출한 후 바닥 평면의 수식과 캘리브레이션(calibration) 기법을 이용하여 팔레트의 위치 및 자세를 측정한다.

지게차의 양 포크 중간 위치에 설치한 한 대의 카메라를 이용하여 팔레트를 측정하는 방법[5,6]도 제시되었다. 이들은 사용할 팔레트 모델을 정한 후 반복적인 예측-검증 과정에 의해 팔레트를 측정하는 기법을 사용하였는데, [5]에서는 팔레트 슬롯구멍(slot hole)을 영상에서 잘 추출하여 모델과 정합하는 방법을 사용하였다. 이에 비해, [6]에서는 영상에서 에지(edge)를 추출하여 팔레트 CAD 모델과 정합하는 방법을 사용하였다.

이러한 비전 기반의 팔레트 측정 방법들을 종합적으로 살펴보면, 먼저 각각 다른 팔레트를 인식 대상으로 하고 있으며, 인식 및 측정 방법도 팔레트 유형에 따라 달리 제시되고 있음을 알 수 있다. 또한 팔레트는 작업장 바닥에 놓여 있어 검출이 용이하거나 또는 팔레트의 개략적인 위치를 알고 있어 영상으로부터 팔레트 검출이 용이함을 가정하고 있다. 한편, 각 방법별로 다루려는 대상 팔레트에 대한 자세한 사양 정보를 활용하고 있다.

본 논문에서는 한국 표준 팔레트의 앞면 부분의 평행선에 해당하는 에지 선분들을 영상에서 추출하여 이것으로부터 팔레트의 위치와 자세를 측정하는 방법을 제시한다. 이러한 팔레트 앞면의 평행선은 다른 팔레트에서도 공통적으로 나타나는 특성이므로 각 팔레트에 맞는 직선 추출방법만 개발하면 본 논문에서 제시하는 자세 및 위치 측정 방법을 적용할 수 있다. 지게차의 포크 캐리지(fork carriage) 중간에 장착한 한 대의 카메라를 사용함으로써 팔레트가 놓인 높이에 무관하게 인식 및 측정이 가능하며, 팔레트에는 별도의 인식 마커나 표식을 사용하지 않는다. 또한, 팔레트 슬롯구멍 부분이 주변 환경보다 상대적으로 어둡다는 사실과 팔레트의 규격 정보만을 사용함에 따라 조명이나 팔레트 색상의 변화에도 강인하게 적용할 수 있다. 한편, 팔레트는 항상 작업장 바닥면과 평행하게 놓여 있다고 가정한다.

2장에서는 팔레트 적재 시스템 구성 및 가정에 대하여 설명하고, 3장에서는 입력 영상에서의 팔레트 검출 및 인식 방법과 팔레트 측정에 유용한 특징을 추출하는 방법을 다룬다. 4장에서는 추출 특징을 이용하여 팔레트의 자세와 위치를 측정하는 방법을 기술한다. 마지막으로, 5장에서는 실험을 통하여 제안한 방법의 유용성 여부를 분석하며, 6장에서 결론을 맺는다.

2. 팔레트 적재 시스템 구성 및 가정

팔레트 적재 시스템은 지게차에서 카메라의 개수 및 설치 위치에 따라 동작 방식이 매우 달라지며, 또한 지게차와 팔레트 간의 상대적인 위치 관계를 나타내려면 관련 좌표계들을 명확하게 정의해야 한다. 한편, 단일 카메라를 이용하여 팔레트의 위치 및 자세를 측정해야 하므로, 응용 환경에 대한 타당한 제약 조건을 가정함으로써 부족한 정보를 보완해야 한다.

2.1 시스템 구성 및 문제 정의

지게차에서 팔레트의 적재와 관련된 주요 구성 요소는 그림 1에서와 같은 마스트(mast), 포크 캐리지(fork carriage), 포크(fork)이다. 팔레트 적재 시스템의 카메라 한 대는 포크 캐리지 상단 중앙에 설치하여 사용한다. 포크 캐리지는 마스트를 따라 10m 이상 높이까지 상하로 움직이므로, 높은 선반 위의 팔레트도 인식하여 적재할 수 있게 된다.

- 기준 좌표계 (XYZ_{world})
 - 작업장 내 모든 객체의 위치를 표현
- 지게차 좌표계 (XYZ_{body})
 - 지게차의 모든 장비 위치를 표현
- 포크 좌표계 (XYZ_{fork})
 - 포크로 처리하는 물체의 위치 표현
- 카메라 좌표계 (XYZ_{camera})
 - 카메라 시야 내 물체의 위치 정보 표현

3차원 공간에서 지게차를 운행하고 팔레트를 적재하기 위해서는 그림 2에서와 같은 좌표계를 정의하고, 이들 간의 변환 관계도 사전에 계산해 두어야 한다. 포크 좌표계와 카메라 좌표계의 관계는 카메라 검정(calibration) 기법으로 구해야 한다. 이 작업에는 2차원 패턴영상을 이용하여 편리하고 안정적인

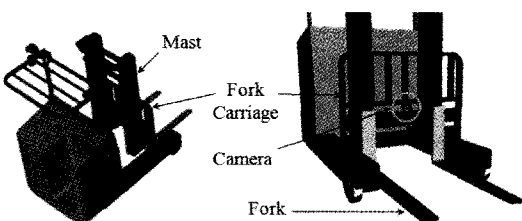


그림 1. 지게차 구성 및 카메라 위치

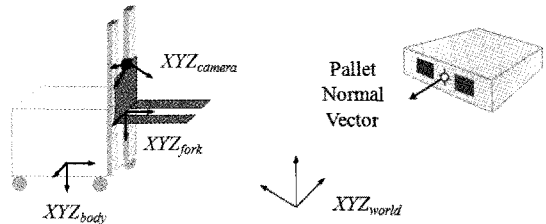


그림 2. 관련 좌표계의 정의

Zhang[7]의 기법을 사용하였다.

팔레트 적재 시스템에서는 카메라 입력 영상으로부터 팔레트의 검출 및 인식을 통해 기준 좌표계에서의 팔레트 앞면의 법선벡터(pallet normal vector)와 중심점 좌표를 구하는 것이 목표이다. 이것은 포크 좌표계에서의 팔레트 앞면의 중심점 좌표와 팔레트 법선벡터를 구하는 것과 같다.

2.2 가정 및 제약조건

팔레트는 작업장 바닥면과 평행하게 놓여 있다는 합리적인 가정을 할 수 있다. 그림 3에서 포크 평면(XZ_{fork})이 작업장 바닥면과 평행하도록 정의되면, 포크 좌표계에서의 팔레트 법선벡터는 $(a, 0, b)$ 형태의 단위벡터로 표현할 수 있으며, 포크 평면에서의 팔레트 회전각 θ 만으로도 표현할 수 있다. 팔레트 자세의 자유도가 1 밖에 되지 않으므로 하나의 영상에서 얻어지는 정보로도 자세를 결정할 수 있는 여지가 있다.

물류 현장에서 사용하고 있는 팔레트의 종류는 매우 다양하다. 여기에서는 한국 표준 팔레트(KS T 2031 D4)[8]를 인식 대상으로 하여 제안 알고리즘을 설명하고 실험결과를 제시한다.

한편, 팔레트 적재 시스템은 자율주행 지게차가

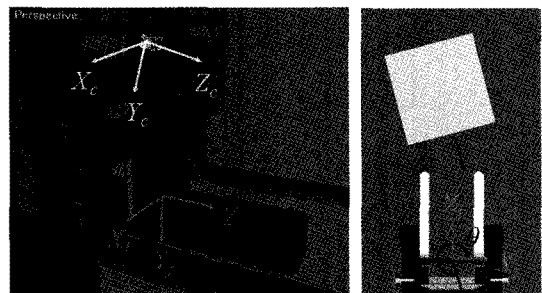


그림 3. 카메라 및 포크 좌표계 정의와 팔레트 자세 가정에 의해 정의된 회전각

적재 대상 팔레트 근처에 도달하였을 때 동작을 시작한다. 따라서 적재 대상 팔레트는 시스템이 동작할 때 카메라 입력영상에 포함되어 있어야 한다.

3. 팔레트 인식 및 특징 추출

여기에서는 입력 영상에서 팔레트 영역을 추출한 후, 해당 팔레트의 자세 측정에 사용할 특징을 추출하는 과정에 대하여 알아본다.

3.1 팔레트 검출 및 인식

한국 표준 팔레트는 단색의 플라스틱 재질로 만들어져 있으며, 네 측면에는 슬롯구멍(slot hole)이 두 개씩 있어 어느 방향에서든지 포크로 팔레트를 집을 수 있도록 되어 있다.

입력 영상에서 팔레트 영역을 검출하여 인식하는 방법은 실제 작업현장의 여건을 고려하여 팔레트의 색상, 팔레트가 놓인 위치(바닥면 또는 다층 선반 위), 주변 조명, 배경의 복잡도 등의 변화에도 무관하게 적용할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 팔레트 앞면의 두 슬롯구멍이 주변에 비해 어둡게 나타난다는 사실과 팔레트 규격 정보만을 이용하여 팔레트 영역을 추출함으로써 팔레트 색상, 주변 조명, 배경 등의 변화에도 강인하게 동작하도록 하였다.

먼저 입력 영상에 대하여 카메라 렌즈에 의한 방사 왜곡(radial distortion[9,10])을 보정하여 측정에 적합한 보정 영상을 만든다(그림 4(a)). 다음에는 어

둡게 나타나는 슬롯구멍을 결정하는데 용이하도록 이진화 과정을 거친 후 잡영 제거를 하여 그림 4(b)와 같이 간단한 영역들로 구성되는 영상을 얻는다. 이러한 이진 영상에 대하여 콤포넨트 레이블링(component labelling[11]) 기법을 적용하고, 각 콤포넨트에 대한 바운딩박스를 구한다(그림 4(c)의 박스). 다음에는 이러한 바운딩박스 중에서 실제 팔레트의 두 슬롯구멍과 유사한 크기 비율 및 상대위치를 갖는 슬롯구멍 쌍(pair) 후보를 결정한다. 즉, 가로/세로 비율이 약 2.7 - 3.0 인 바운딩박스 중에서 크기, 상대적인 중심점 거리, 중심점 연결 직선의 기울기(그림 4(c) 가로선) 등이 실제 팔레트와 유사한 쌍을 찾아 후보로 결정한다. 마지막으로, 실제 팔레트는 단색으로 되어 있다는 정보를 활용하기 위해, 두 슬롯구멍 후보 사이의 색상과 각 슬롯구멍 측면 부분의 색상 분포를 비교한다. 만약 이러한 색상 분포가 매우 유사한 경우에는, 슬롯구멍 쌍 후보를 팔레트 슬롯구멍으로 최종 판정한다. 입력 영상에서의 팔레트 영역은 이미 구한 색상 분포 정보를 이용하여 그림 4(d)에서와 같이 추출한다.

제시된 팔레트 인식 방법에서는 팔레트가 단일 색상으로 되어 있다는 정보만을 사용하고 있으므로, 팔레트 색상의 변화(노란 색, 파란 색 등)에 무관하게 적용할 수 있다. 한편, 제시된 방법을 주변 조명의 변화(조명 종류, 색상, 밝기 등)에 무관하게 적용하기 위해서는 이진화 임계값의 자동 결정 방법을 통해 팔레트 슬롯구멍이 주변 환경으로부터 용이하게 식별되도록 하였다. 즉, 지게차가 적재 대상 팔레트 앞 부근에 도착하였으나 위에서 제시된 방법으로 팔레트가 인식되지 않았을 경우에는, 이진화 임계값을 일정 범위 내에서 변경시켜 가면서 팔레트가 실제로 추출되도록 하는 임계값을 자동 결정하도록 하였다.

3.2 팔레트 특징 추출

영상에서 추출된 팔레트 영역으로부터 팔레트의 3차원 측정에 유용한 특징을 신뢰성 있으면서 안정적으로 추출할 수 있는 방법이 필요하다. 그림 5(a)의 한국 표준 팔레트는 팔레트의 네 모서리뿐만 아니라 슬롯 구멍 모서리도 둥글게 처리되어 있어 별다른 특징을 얻기가 어렵다. 그러나 팔레트 입력 영상은 카메라가 팔레트보다 약간 높은 위치에서 항상 내려다보는 방향으로 획득되므로, 슬롯 구멍 상단 부분과

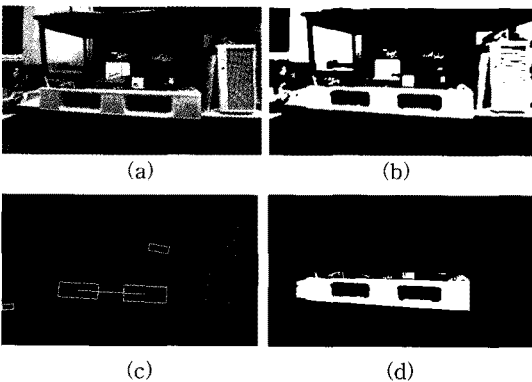


그림 4. 팔레트 영역 추출 예. (a) 방사 왜곡 보정 영상, (b) 이진화 및 잡영 제거 영상, (c) 영역별 윤곽선 추출 및 슬롯구멍 후보 결정, (d) 슬롯구멍 주변의 색상 분포 유사도 계산에 의한 팔레트 최종 인식 및 팔레트 영역 추출

팔레트 앞면의 하단 부분은 직선 형태의 에지 성분을 안정적으로 제공함을 알 수 있다. 이러한 특성은 그림 5(b)에서와 같이 다른 형태의 팔레트에서도 공통적으로 나타나는 경향이 있다.

이러한 두 직선은 표준 팔레트 인식 과정에서 추출된 팔레트의 영역에서 슬롯구멍 상단 중앙과 팔레트 하단 중앙의 경계점들을 활용하여 결정하였다. 경계점들에 대하여 least square line fitting 알고리즘을 특정 임계치 이하의 에러를 가질 때까지 반복적으로 수행하는 방식으로 직선을 결정하였다. 그림 5(c)는 그림 4에서 결정한 팔레트 영역에서 이러한 두 특징 직선을 추출한 예제이다.

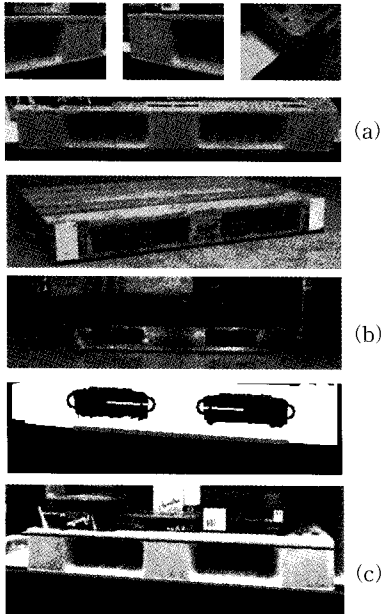


그림 5. (a) 한국 표준 팔레트에서의 등근 모서리와 안정적인 직선 성분, (b) 안정적 직선 성분을 가지는 다른 팔레트 예, (c) 그림 4의 예제 팔레트에 대한 직선 결정 예

4. 팔레트 측정 방법

팔레트 측정 방법은 2.1절에서 언급한 바와 같이 포크 좌표계에서 팔레트 앞면의 법선벡터와 중심점 좌표를 결정하기 위한 것이다. 즉, 포크 기준으로 팔레트의 상대적인 자세와 위치를 측정하는 것이다.

4.1 팔레트의 자세 결정

팔레트의 자세 측정은 팔레트의 두 평행선이 이루

는 평면과 동일한 자세를 갖는 가상평면(virtual plane)을 찾는 방법을 통해 이루어질 수 있다.

먼저 그림 6(a)에서와 같이 3차원 공간에서 한 평면 위의 두 평행선을 가상평면에 역투영(back-projection) 했을 때, 두 평면의 자세 차이는 그림 6(b)에서와 같이 평면 법선벡터 간의 전후회전(tilt) 각 차이 θ_t 와 좌우회전(pan) 각 차이 θ_p 로 나타낼 수 있다. 그림 6(a)에서 평행선 평면과 가상평면의 자세가 같으면($\theta_p = \theta_t = 0$), 역투영 된 두 직선도 평행함을 알 수 있다.

반면에, 역투영 된 두 직선이 평행하더라도 두 평면의 자세가 동일하다고 말할 수가 없다. 그림 6(c)와 같은 경우가 발생하기 때문이다. 만약 제한요건으로서 $\theta_t = 0$ 이라면, 역투영 된 두 직선이 평행한 경우에 두 평면이 동일한 자세를 갖는다고 할 수 있다. 그림 6(d)는 $\theta_t = 0$ 이더라도 θ_p 가 0이 아니면, 평행한 역투영 직선을 얻을 수 없음을 보이고 있다.

그림 7에서는 작업장 바닥면과 밑면이 평행하게 놓인 팔레트의 앞면을 카메라 원점(x^0c)으로 투영했을 때의 팔레트 이미지와 이것을 가상평면으로 역투영한 이미지를 보이고 있다. 팔레트의 앞면 법선벡터는, 2.2절에서 언급한 바와 같이, 포크 좌표계에서 ($a, 0, b$) 형태의 단위벡터로 표현할 수 있다. 역투영 이미지를 얻기 위한 가상평면의 자세는 필요에 의해

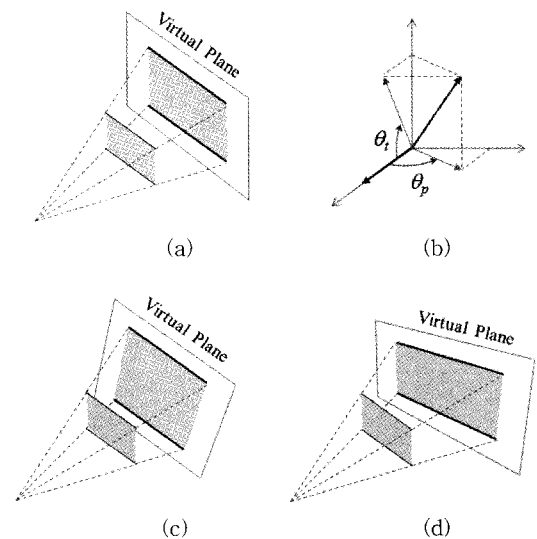


그림 6. 두 평행선 평면과 역투영을 위한 가상평면 간의 관계: (a) 자세가 동일한 경우, (b) 두 평면 법선벡터 간의 전후회전각(θ_t) 및 좌우회전각(θ_p) 차이, (c) $\theta_p = 0, \theta_t \neq 0$ 인 경우, (d) $\theta_p \neq 0, \theta_t = 0$ 인 경우

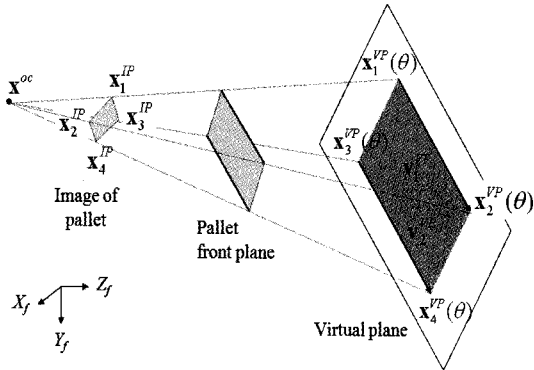


그림 7. 팔레트 앞면을 카메라 영상평면으로 투영한 이미지와 이것을 가상평면에 역투영한 이미지 간의 관계

인위적으로 설정할 수 있는데, 본 논문에서는 팔레트 앞면의 법선벡터와 유사하게 포크 좌표계에서 $(c, 0, d)$ 형태의 단위벡터가 되도록 설정한다. 즉, 팔레트 앞면과의 전후회전각 차이 θ 가 0이 되도록 설정한다. 이에 따라, 가상평면을 좌우회전(panning)하면서 역투영된 두 직선이 평행해지는 경우를 찾아내면 팔레트 앞면의 자세를 결정할 수 있다.

이러한 팔레트 자세 결정 과정을 그림 7에서와 같은 포크 좌표계 기준의 수식으로 알아보기 위해 역투영될 영상평면의 4점을 x_i^{IP} ($i = 1, \dots, 4$)로, 이것들이 각각 가상평면에 역투영된 점을 x_i^{VP} 로 정의한다. 실제 연산 및 실험에서는 x_i^{IP} 를 영상에서의 두 특징 직선이 영상의 좌우 모서리와 교차하는 점으로 설정하여 사용한다.

가상평면의 식은 수식(1)과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 $n_{VP}(\theta)$ 는 가상평면의 단위 법선벡터를 나타내며, 양수 k_{VP} 는 포크 좌표계 원점으로부터 가상평면까지의 거리를 나타낸다. 수식(1)에서 $a \cdot b$ 는 두 벡터의 내적(dot product) 연산을 의미한다. 한편, 가상평면의 단위 법선벡터 $n_{VP}(\theta)$ 는 팔레트 앞면과 마찬가지로 $(c, 0, d)$ 형태의 단위벡터가 되도록 하는데, 수식(2)에서와 같이 포크 좌표계의 xy -평면의 단위 법선벡터 $n_{xy-plane} = (0, 0, -1)$ 를 Y_f 를 축으로 하여 θ 만큼 회전시킨 형태로도 표현할 수 있다.

$$n_{VP}(\theta) \cdot x + k_{VP} = 0 \tag{1}$$

$$n_{VP}(\theta) = R_y(\theta) n_{xy-plane} \tag{2}$$

이제 가상평면의 위치를 결정하는 파라미터 k_{VP} 를 임의의 양수 값으로 고정하고, 가상평면의 자세를 결정하는 θ 값을 일정 간격으로 변경시켜 가면서 가

상평면에 역투영된 4개의 점을 구하여 역투영된 두 직선이 평행한가 여부를 조사하면 된다.

$$v_i^{IP} = x_i^{IP} - x^{OC} \tag{3}$$

$$x_i^{VP}(\theta) = x^{OC} + t_i(\theta)v_i^{IP} \tag{4}$$

$$n_{VP}(\theta) \cdot (x^{OC} + t_i(\theta)v_i^{IP}) + k_{VP} = 0 \tag{5}$$

$$t_i(\theta) = \frac{-n_{VP}(\theta) \cdot x^{OC} - k_{VP}}{n_{VP}(\theta) \cdot v_i^{IP}} \tag{6}$$

먼저 영상에서의 각 점에 대한 역투영 방향은 수식(3)과 같고, 이 방향의 역투영 선은 수식(4)와 같이 표현할 수 있다. 수식(5)는 역투영 선과 가상평면이 교차하는 점을 구하기 위한 것으로서 수식(6)과 같이 미지수 $t_i(\theta)$ 를 결정할 수 있다. 이 값을 수식(4)에 대입하여 역투영 점을 결정한다.

이렇게 구해진 4개의 역투영 점으로부터 역투영된 두 직선이 평행한가 여부를 결정하는 방법으로는 먼저 수식(7)과 수식(8)에서와 같은 역투영 직선의 방향벡터 v_1^{VP}, v_2^{VP} 를 구한 후, 수식(9)에서와 같이 이들의 내적을 통해 사이각의 코사인 값이 1이 되는가 여부를 조사하면 된다. 최종적인 팔레트 평면의 자세 n_{PP} 는 $m(\theta_{PP}) = 1$ 이 되는 θ_{PP} 값을 구해 수식(2)에 대입함으로써 결정할 수 있다.

$$v_1^{VP}(\theta) = x_2^{VP}(\theta) - x_1^{VP}(\theta) \tag{7}$$

$$v_2^{VP}(\theta) = x_4^{VP}(\theta) - x_3^{VP}(\theta) \tag{8}$$

$$m(\theta) = \frac{v_1^{VP}(\theta) \cdot v_2^{VP}(\theta)}{\|v_1^{VP}(\theta)\| \|v_2^{VP}(\theta)\|} \tag{9}$$

반복 계산 시 θ 값의 대입 범위는 $-30^\circ \sim 30^\circ$, 대입 간격은 최초 5° 간격으로 시작하여 대입 범위와 간격을 동시에 좁혀 가면서 최종적으로 0.01° 간격으로 마무리한다.

4.2 팔레트의 위치 결정

팔레트의 위치는 팔레트 앞면의 중심점 위치로 정의되는데, 먼저 팔레트 평면식을 결정한 후 팔레트 슬롯 구멍의 구조 특성을 이용하여 중심점을 결정한다.

4.2.1 팔레트 평면식 결정

팔레트 평면의 자세 n_{PP} 는 이미 결정되었으므로, 팔레트 평면식을 나타내는 수식(10)에서 k_{PP} 값만 구

하면 팔레트 평면은 유일하게 결정된다. 그림 8에서 카메라 좌표계 원점(x^{OC})으로부터 팔레트 앞면 및 가상평면까지의 거리 비율은 팔레트 높이(h)와 가상평면에 투영된 팔레트 이미지의 높이(d)의 비율과 같음을 알 수 있으며, 수식(11)에서와 같이 나타낼 수 있다. x_p 와 x_v 는 각각 x^{OC} 에서 팔레트 평면과 가상평면에 내린 수선의 발을 나타내며, 카메라 좌표계 원점으로부터 가상평면까지의 거리를 나타내는 $\|x^{OC} - x_v\|$ 는 가상평면의 수식을 이용하여 쉽게 결정할 수 있다. 한편, 카메라 원점으로부터 팔레트 앞면까지의 거리를 나타내는 수식(12)를 수식(11)에 대입하면 수식(13)을 얻을 수 있으며 이를 이용하여 k_{PP} 를 구할 수 있다.

$$n_{PP} \cdot x + k_{PP} = 0 \tag{10}$$

$$h : d = \|x^{OC} - x_p\| : \|x^{OC} - x_v\| \tag{11}$$

$$\|x^{OC} - x_p\| = |n_{PP} \cdot x^{OC} + k_{PP}| \tag{12}$$

$$k_{PP} = (h/d) \|x^{OC} - x_v\| - n_{PP} \cdot x^{OC} \tag{13}$$

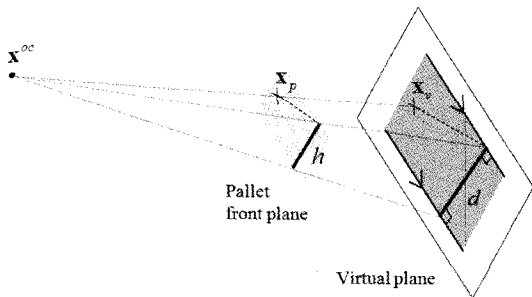


그림 8. 팔레트 앞면의 높이(h)와 가상평면에 역투영된 팔레트 이미지 높이(d)와의 비례 관계

4.2.2 팔레트 앞면의 중심점 결정

먼저 영상에서 구한 두 특징 직선을 팔레트 평면에 역투영하여 평행한 두 직선을 구한다. 다음에는, 이러한 두 역투영 직선에 평행하면서 팔레트 앞면의 1/2 높이를 지나는 직선 CL (center line)을 그림 9에서와 같이 구한 후, 이것을 다시 영상평면에 투영하여 CL^* 를 구한다. 이러한 CL^* 를 영상평면에서의 두 특징 직선으로부터 직접 구하지 못하고 역투영 과정을 통해 구하는 이유는 카메라에서의 원근 투영 과정이 비선형 변환이기 때문이다.

다음에는, 영상평면에서 CL^* 와 팔레트 슬롯 구멍의 좌우 모서리와의 교점 $P1^* \sim P4^*$ 를 구하고, 이들을

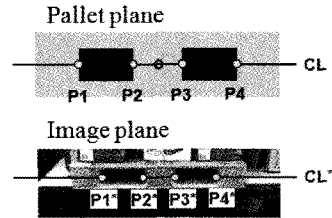


그림 9. 팔레트 앞면의 중심점을 결정하는 과정

다시 팔레트 평면에 역투영하여 $P1 \sim P4$ 를 구한다. 최종적으로, $P1 \sim P4$ 의 좌표를 평균하여 팔레트 중심점을 결정한다.

그림 10은 이러한 과정을 통해 구한 결과의 한 예를 보이고 있다. 교점 $P1^* \sim P4^*$ 를 구하기 위해서는 슬롯 구멍의 좌우 모서리를 먼저 결정하여야 한다. 그런데 한국 표준 팔레트에서는 모서리가 둥글게 되어 있어 경계선을 결정하기가 어렵다. 이에, 상대적으로 모서리 결정이 수월하도록 CL의 위치를 팔레트 앞면의 2/3 높이로 설정하여 보조 중심점을 먼저 구하였다. 이러한 보조 중심점으로부터 팔레트 앞면의 중심점은 간단한 계산에 의하여 쉽게 결정할 수 있다. 그림 10(a)에는 이진화 영상에서 교점을 구한 결과를 나타내고 있으며, 그림 10(b)에서는 본 논문에서 제시된 방법으로 측정된 팔레트의 윤곽선과 보조 중심점을 영상에 재투영하여 나타내고 있다.

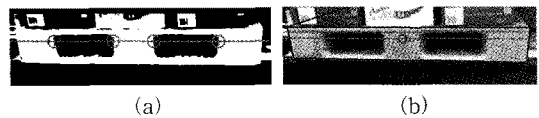


그림 10. (a) 팔레트 슬롯 구멍 모서리와 중앙선 CL^* 간의 교점, (b) 팔레트 앞면의 보조 중심점 및 측정 팔레트의 윤곽선

5. 실험 및 토의

본 논문에서 제안한 팔레트 측정 방법의 동작 타당성 여부를 간단히 테스트하기 위하여 먼저 카메라 삼각대에 설치한 카메라를 팔레트 전방에서 아래 방향(step 1-3) 및 전진 방향(step 3-5)으로 움직이며 팔레트 측정을 해 보았다. 이것은 지게차의 포크 캐리지를 아래 그리고 전방으로 이동시킨 것에 해당하는 것으로서, 팔레트 표 1에 측정결과를 보이고 있다. 좌표값 (x, y, z)는 포크 좌표계에서의 팔레트 앞면 중심점의 위치를 나타낸 것이고, θ 는 그림 3에서

표 1. 삼각대에 설치한 카메라의 하강 및 전진 이동에 따른 팔레트 측정 결과

Step	1	2	3	4	5
Result Image					
θ (degree)	265.88	265.94	263.46	260.93	265.58
x (mm)	-106	-109	-90	-187	-86
y (mm)	328	128	21	15	21
z (mm)	2106	2150	2162	1933	1170

정의된 각도로서 팔레트 자세를 나타낸다. 수작업으로 카메라를 움직여서 팔레트 자세나 위치는 다소 오차를 보이고 있으나, 예상한 바와 같이, Step 1-3에서는 팔레트 앞면 중심점의 y 값이 감소하고 있으며, Step 3-5에서는 z 값이 감소하는 것을 볼 수 있다.

팔레트의 자세와 위치 측정에 관한 정밀도를 구하는데 있어서, 오차를 계산하기 위한 정확한 기준 값을 정하기 어렵기 때문에 간접적인 정밀도 테스트를 하였다. 테스트를 위해 알루미늄 지지대를 이용하여 카메라를 각각 상하, 전후, 좌우로 직선 이동시키며 팔레트의 위치와 자세를 측정해 보았다. 이와 같은 카메라의 선형 이동에서는 팔레트 자세를 나타내는 θ 는 일정한 값을 유지해야 하며, 중심점은 완전한 선형 변화를 보이는 것이 이상적이다.

팔레트 자세는 측정값 θ 의 표준편차를 구해 정밀도 조사를 하였다. 팔레트 위치는 세 가지 이동 각각에 대하여 중심점 측정값들에 대한 직선 맞춤(line fitting)을 수행한 후, 측정값들과 이 맞춤 직선 간의 거리(즉, 맞춤 오차, fitting error)에 대한 표준편차를 구해 간접적인 정밀도 조사를 해 보았다. 이러한 간접적인 정밀도 평가결과를 표 2에 나타내었다. 각 실험에 대한 샘플 영상은 30장 내외를 사용하였다.

팔레트 자세를 나타내는 θ 각의 표준편차는 최대 0.704°로서 상대적으로 매우 정밀하다는 것을 알 수 있다. 상하, 전후, 좌우 직선 이동에 대하여 측정된

중심점에 대한 맞춤 오차의 표준편차는 최대 6.32 mm이며, 최대 맞춤 오차는 13.25mm로 나타났다. 이것은 약 1cm 내외의 오차에 불과한 것으로서, 실제 현장에 적용하는 데 문제가 없는 수준이라고 판단된다.

또한 제안 방법의 안정성을 평가하기 위해 거리별로 정지 상태에서 팔레트의 위치 및 자세를 각각 100 회씩 측정하여 그 표준편차를 그림 11에 나타내었다. 중심점 측정값은 3m 전방에서도 안정적으로 구해짐을 알 수 있다. 반면에, 팔레트 회전각 θ 는 거리가 2.5m 보다 멀어지면 상대적으로 표준편차가 많이 증가하면서 불안정해짐을 알 수 있다.

다음에는 실시간 실행에 중요한 요소인 처리속도를 알아보기 위해 성능이 다른 여러 컴퓨터에서 수행한 실험 결과를 표 3에 나타내었다. 초당 처리 프레임 수(frame per second, fps)는 근래에 쉽게 접할 수 있는 컴퓨터 성능 수준에서 약 6 정도이므로, 팔레트 측정을 실시간 처리하는데 전혀 무리가 없다고 볼 수 있다. 한편, 연산 부하의 대부분은 표 4에서와 같이 영상에서 팔레트를 인식하고 해당 영역의 픽셀을 추출하는 부분에 집중되어 있는데, 차후 이 부분을

표 2. 선형 이동에 대한 제안 방법의 정밀도 평가결과

평가 항목	동작의 종류	동작의 종류		
		상하 이동	전후 이동	좌우 이동
θ 각의 표준편차 (degree)		0.37	0.70	0.27
맞춤 오차의 표준편차 (mm)		4.92	0.84	6.32
최대 맞춤 오차 (mm)		10.61	3.11	13.25

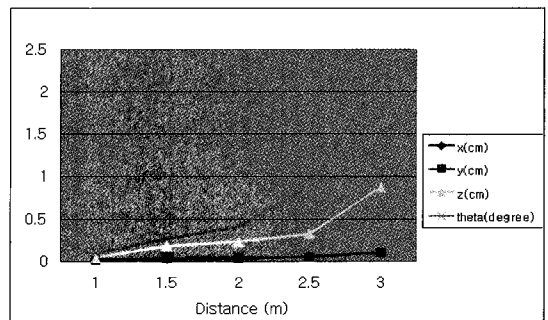


그림 11. 거리변화에 따른 측정값의 표준편차

표 3. 제안된 팔레트 측정방법의 성능평가

사용 컴퓨터 종류	성능평가항목	수행시간 (msec)	fps
Intel Pentium 3 1.0GHz (lap-top)		450	2.2
Intel Pentium 4 2.4GHz		170	5.8
Intel Core2 CPU 6300 1.86GHz		150	6.6

표 4. 제안된 팔레트 측정방법의 루틴별 수행 시간

항목	세부항목	msec	%	
검출 및 인식	방사왜곡보정	42	9.4	94.4
	이진화/잡영제거	100	22.3	
	컴포넌트 추출	13	2.9	
	슬롯구멍 후보 결정	19	4.2	
	색상분포 비교 및 팔레트 영역 추출	249	55.6	
특징 추출	직선 픽셀 샘플링	10	2.2	3.3
	특징 직선 계산	5	1.1	
측정	자세 결정	8	1.8	2.3
	평면식 결정	1	0.2	
	중심점 결정	1	0.2	
전 체		448	100	100

개선하여 수행속도를 보다 더 개선할 수 있을 것으로 기대한다. 표 4는 표 3에서 가장 느린 시스템에서의 각 루틴별 수행 시간을 나타낸 것이다.

본 논문에서 제시된 팔레트 측정 방법을 이용하여 실제로 팔레트 적재가 가능한 지를 테스트 해 보았다. 먼저 그림 12(a)에서와 같은 모형 지게차를 제작하여 노트북을 이용하여 팔레트 측정을 한 후, 그림 12(b)의 노트북 화면에서처럼 포크 캐리지의 상하 및 지게차의 전후좌우 이동 지시 화살표에 따라 수동으로 움직였을 때 목표 팔레트를 적재할 수 있었다. 한편, 제시된 알고리즘을 그림 12(c)에서와 같은 실제 지게차에 적용하여 팔레트 적재 테스트도 수행하여 제대로 적재할 수 있음을 확인하였다.

한편, 한국 표준 팔레트의 규격 정보, 단일 색상 구성 정보, 자동 이진화 임계값 결정 방법 등을 통해 주변 조명이나 팔레트 색상 변화에 무관하게 제시된 방법이 잘 동작하였으나, 작업장 바닥에 놓인 팔레트가 바닥면에 반사되어 생긴 반사 이미지를 실제의 팔레트로 잘못 인식하는 경우가 발생하였다. 한편,

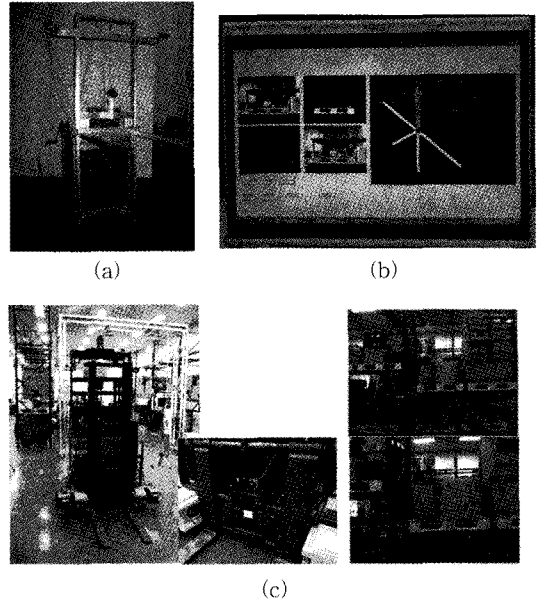


그림 12. (a) 모형 지게차, (b) 팔레트 적재 과정의 화면, (c) 팔레트 측정을 위한 실제 지게차 구성 및 검출 팔레트의 예

지게차 회전 시의 빠른 움직임에 의해 발생하는 팔레트 영상의 선명도 저하로 인하여 상대적으로 큰 측정 오차를 보이기도 하였다. 팔레트 영상의 선명도 저하는 추출된 팔레트 영역의 정확도를 감소시켰으며, 이 영역을 기반으로 추출된 두 특징 직선의 정확도 역시 감소되는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

자율주행 하는 지게차에 팔레트 화물을 자동 적재할 수 있는 기능을 구현하기 위한 비전 기반의 팔레트 측정 방법을 제안하였다.

먼저 팔레트의 근거리 입력 영상에서 팔레트를 검출하여 인식하는 기법에서는 팔레트 규격 정보와 팔레트가 단일 색상으로 구성되어 있다는 사실만을 활용하였다. 이에 따라 색상에 무관하게 팔레트를 인식할 수 있었으며, 이진화 임계값의 자동 결정 방법에 의해 주변 조명의 변화에도 무관하게 동작한다는 것을 확인하였다.

팔레트 앞면에서 슬롯구멍 상단을 연결하는 직선과 팔레트 하단을 나타내는 직선이 안정적으로 추출되는 특성과 팔레트 영상의 가상평면으로의 역투영 기법을 이용하여 팔레트 자세 측정 방법을 제시하였

고, 또한 팔레트 앞면의 높이와 가상평면에 투영된 이미지의 높이 간의 비례를 이용하여 팔레트의 위치 즉 팔레트까지의 거리를 측정하는 방법도 제시하였다.

카메라 삼각대를 이용한 지게차 이동 시뮬레이션 기반의 팔레트 측정 실험을 통해 제시한 방법이 타당함을 알 수 있었다. 아울러, 카메라의 선형 이동에 의해 측정된 값의 평균값 및 맞춤 오차의 표준편차 분석을 통해 제시한 방법에 대한 정밀도 검증 실험을 수행한 결과, 현장에서 활용할 수 있는 수준의 정밀도를 보인다는 것도 확인하였다.

비전 기반의 제안 방법은 포크 캐리지에 장착한 대의 카메라를 이용함으로써 높은 선반 위의 팔레트도 용이하게 자동 하역할 수 있다. 한편, 팔레트 자세 측정에서 두 특징 직선을 추출하여 사용하고 있는데, 이러한 특징은 다른 팔레트에서도 대부분 나타나므로 제시된 방법은 다른 여러 팔레트 하역에도 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

반면에, 팔레트 검출에 있어서의 바닥면 반사 팔레트의 오인식, 빠른 지게차 회전으로 인한 팔레트 인식 정밀도 저하 등의 문제점은 향후에 보다 개선시킬 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.W. Jang, W.S. Yang, and J.G. Jeong, "An Automatic Engagement Robot System using Combined Acoustic and Visual Sensors," 한국통신학회논문지, Vol.18, No.10, 1993.
- [2] D. Lecking, O. Wulf, and B. Wagner, "Variable Pallet Pick-Up for Automatic Guided Vehicles in Industrial Environments," IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 1169-1174, 2006.
- [3] M. Seelinger and J.D. Yoder, "Automatic Visual Guidance of a Forklift Engaging a Pallet," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.54, pp. 1026-1038, 2006.
- [4] J. Pages, X. Armangué, J. Salvi, J. Freixenet, and J. Martí, "A Computer Vision System for Autonomous Forklift Vehicles in Industrial Environments," Proceedings of 9th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2001.
- [5] G. Garibotto, S. Masciangelo, M. Ilic, and P. Bassino, "ROBOLIFT: A Vision Guided Autonomous Fork-lift for Pallet Handling," Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 656-663, 1996.
- [6] A. Kelly, B. Nacy, D. Stager, and R. Unnikrishnan, "An Infrastructure-free Automated Guided Vehicle based on Computer Vision," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 24-34, September 2007.
- [7] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," Technical Report MSR-TR-98-71, 1998.
- [8] 국가표준인증종합정보센터, <http://www.standard.go.kr/>
- [9] G.P. Stein, "Lens Distortion Calibration using Point Correspondences," Proceedings of the 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 602-608, 1997.
- [10] 김병익, 김대현, 배태욱, 김영춘, 심태은, 김덕규, "광각 카메라 영상의 보정을 위한 자동 정합 좌표 추출 방법," 한국멀티미디어학회논문지, Vol.13, No.3, pp. 410-416, 2010.
- [11] S. Suzuki and K. Be, "Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following," *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 30, Issue 1, pp. 32-46, 1985.



변 성 민

2003년 부산대학교 정보컴퓨터공학부 공학사
2008년 부산대학교 컴퓨터공학과 공학석사
2008년~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야 : 카메라 검정, 3차원 복원 및 측정



김 민 환

1988년 서울대학교 컴퓨터공학과 공학박사
1986년 4월 현재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 교수
1998. 4~2003. 2 한국멀티미디어학회 논문지 편집위원장

2004. 2~2006. 12 2008. 1~2008.12 한국멀티미디어학회 부회장

2006. 9~2008.12 부산대학교 정보전산원장

관심분야 : 컴퓨터 시각, 칼라 공학