

모노 비전 기반 3차원 평행직선의 방향 추정 기법 및 파렛트 측정 응용

김민환[†], 변성민^{**}, 김진^{***}

A Monocular Vision Based Technique for Estimating Direction of 3D Parallel Lines and Its Application to Measurement of Pallets

Minhwan Kim[†], Sungmin Byun^{**}, Jin Kim^{***}

ABSTRACT

Many parallel lines may be shown in our real life and they are useful for analyzing structure of objects or buildings. In this paper, a vision based technique for estimating three-dimensional direction of parallel lines is suggested, which uses a calibrated camera and is applicable to an image being captured from the camera. Correctness of the technique is theoretically described and discussed in this paper. The technique is well applicable to measurement of orientation of a pallet in a warehouse, because a pair of parallel lines is well detected in the front plane of the pallet. Thereby the technique enables a forklift with a well-calibrated camera to engage the pallet automatically. Such a forklift in a warehouse can engage a pallet on a storing rack as well as one on the ground. Usefulness of the suggested technique for other applications is also discussed. We conducted an experiment of measuring a real commercial pallet with various orientation and distance and found for the technique to work correctly and accurately.

Key words: Parallel Lines, Line Direction Measurement, Camera Calibration, Pallet Orientation, Pallet Engagement

1. 서론

우리는 일상생활에서 평행한 직선들을 포함하고 있는 물건이나 구조물을 자주 보게 된다. 이러한 평행 직선들은 해당 물건이나 구조물의 자세나 구성 형태를 알아보는데 매우 유용한 정보를 제공해 준다. 예를 들어, 자전거, 화분, 건물 등이 있는 Fig. 1에서, 건물 벽의 평행한 두 개 (파란) 직선을 연장하여 만나는 (파란) 교점은 사진에 구해 놓은 (검은) 지평선 위에 나타난다. 따라서 건물 벽 평행직선들은 지면과

평행함을 알 수 있다. 아울러, 도로 지면에 깔린 블록을 연결한 (파란) 점선이 동일한 (파란) 교점에서 만나므로, 건물 벽 평행직선과 동일한 방향을 갖는다는 것을 알 수 있다. 한편, 지면에 놓인 자전거 바퀴의 아래 점을 연결한 (녹색) 직선은 지면과 평행하지만, 지평선 위에서 건물 벽 직선과의 (파란) 교점이 아니라 다른 (녹색) 교점에서 만난다. 따라서 자전거 바퀴 연결선은 건물 벽 직선들과 평행하지 않다는 것을 알 수 있다. 자전거 바퀴의 위 점들을 연결한 (녹색) 점선은 지평선 위 (녹색) 교점이 아닌 곳에서 만나므로

* Corresponding Author : Minhwan Kim, Address: (46241) 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Busan, Korea, TEL : +82-51-510-2423, FAX : +82-51-517-2431, E-mail : mhkim@pusan.ac.kr

Receipt date : Sep. 20, 2018, Approval date : Oct. 22, 2018
[†] School of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, Pusan National University

^{**} School of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, Pusan National University
(E-mail : cyberides@gmail.com)

^{***} Dept. of Computer Engineering, Jungwon University
(E-mail : martin@jwu.ac.kr)

* This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

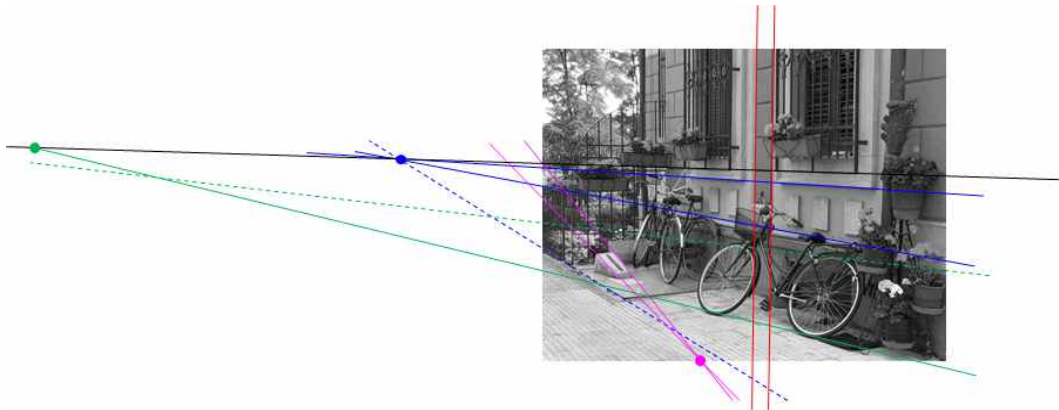


Fig. 1. An example image with a few support lines in order to discuss usefulness of parallel lines in our life.

로, 이 점선은 (녹색) 실선과 평행하지 않음을 알 수 있다. 또한, 건물 앞 지면에 놓여 있는 표지 석으로 보이는 것의 윗면 (분홍색) 직선들도 지평선에서 교차하지 않으므로, 두 직선이 자체적으로 평행하지 않거나 또는 지면과 평행하지 않음을 알 수 있다. 이와 같이, 평행한 직선은 물건이나 구조물의 방향이나 구성 형태를 알아보는 데 유용하다.

한편, 어떤 영상에서 평행한 직선들의 교점은 그 직선들의 방향 정보를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 예를 들어, Fig. 1의 지평선 위 두 교점이 서로 다른 위치에 나타나므로, 해당 (녹색 및 파란색) 직선들은 3차원 공간에서 서로 다른 방향을 향하고 있다는 것을 알 수 있다. 만약 평행직선들의 교점으로부터 이들의 3차원 방향을 추정할 수 있다면, 3차원 실세계 물건이나 구조물을 분석하는데 매우 유용할 것이다. 예를 들어, Fig. 1에서 벽면 (파란) 직선의 3차원 방향을 구할 수 있다면, 카메라 장착 차량을 건물 벽과 평행하게 자동 이동시킬 수도 있을 것이다. 한편, Fig. 1의 건물 벽 수직의 (붉은색) 평행직선은 영상에서 거의 평행하게 나타나므로, 교점은 구하는데 상대적으로 어렵다. 만약 영상에서 거의 평행하게 나타나는 평행직선에 대해서도 3차원 방향을 측정할 수 있다면, 물건이나 구조물의 구조 분석에 보다 유용하게 활용할 수 있을 것이다. 예를 들어, Fig. 1의 건물 벽 수평 (파란색) 평행직선의 3차원 방향과 수직 (붉은색) 평행직선의 3차원 방향을 구할 수 있다면, 이러한 두 종류의 직선이 서로 직각을 이루고 있음을 쉽게 판정할 수 있을 것이다. 이에, 본 연구에서는 하나의 영상에 나타나는 평행직선들의 3차원 방

향을 추정할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

다른 한편으로, 본 연구는 카메라를 한 대 장착한 지게차(forklift)로 Fig. 2에서와 같은 파렛트(pallet)의 자세 및 위치를 자동으로 측정하는데 효과적으로 적용할 수 있는 기법을 개발하기 위해 수행하였다. 파렛트를 검출하여 측정하는 방법은 오랜 동안 많이 연구되어 왔으며, 최근에도 계속 연구결과가 발표되고 있다[1-10]. 파렛트를 검출하기 위해 사용하는 방법으로는 카메라 비전을 이용하는 방법[1-6]과 거리(range) 영상을 이용하는 방법[7-9]이 주로 사용된다. 일반적으로, 카메라 비전을 이용하는 방법은 주변 환경의 조명 변화에 약하고, 거리 영상을 사용하는 방법은 정밀한 영역분할 및 구현비용 증가로 인해 애로를 겪는 것으로 알려져 있다. 이에 따라, 비전 영상의 장점과 거리 영상의 장점을 적절하게 활용하는 방법[10]도 연구되었다. 한편, 파렛트의 자세 및 위치를 측정하기 위한 수단으로는, 대부분의 방법에서 파렛트 앞면 모델을 이용한 원형 정합(template matching) 방법을 사용한다. 반면에, 하나의 카메라를 이용하는 방법[5,6]에서는 파렛트의 구조적인 특징을 활용하는 독창적인 방법을 사용한다. 이 방법에서는, 지면의 파렛트만을 측정 대상으로 하는 대부분의 방법과 달리, 파렛트가 창고선반이나 트럭 위에 있더라도 파렛트 자세 및 위치를 측정할 수 있는 방법[7,8]을 제시하고 있다. Fig. 2에서와 같이 파렛트 앞면에서 평행한 두 직선을 수월하게 구할 수 있음을 주장하며, 파렛트 영상에 나타나는 이러한 직선들을 가상평면(virtual plane)에 역투영(back projection)하는 방식을 통해 해당 직선의 3차원 방향 및 파렛트



Fig. 2. Various pallet images with two or three edge lines that are useful for estimating orientation of each pallet.

앞면의 법선벡터(normal vector)를 추정하는 방법을 제시하고 있다. 그러나 가상평면의 자세 방향을 일정 간격으로 바꾸어가며, 최적의 방향을 선택하는 반복적(iterative) 계산방법을 사용함에 따라, 계산시간 및 정확도 측면에서 약점을 보이고 있다. 본 논문에서는, 평행한 직선들의 3차원 방향을 단번에 직접 구할 수 있는 방법을 제시하고, 이론적으로 정확성에 대하여 분석적인 접근을 통해 보인다. 아울러, 실제 산업용 팔레트에 대하여 방법[6]을 대부분 그대로 적용하되 평행직선 방향 추정 부분만을 본 논문에서 제시하는 분석적 방법으로 대체하는 실험을 통해, 제시한 방법의 효용성을 알아본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 먼저 카메라 모델, 투영에 의한 좌표계 관계, 직선방향 추정 문제의 정의 등에 대하여 알아보고, 3장에서 평행 직선의 3차원 방향을 추정하는 분석적인 방법을 제시한다. 4장에서는, 실제 팔레트에 대한 실험을 통해 제시한 방법의 효용성을 보이며, 아울러 제시한 방법의 다른 응용 가능성에 대해서도 토의한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 카메라 모델 및 문제 정의

하나의 카메라 영상에 물체나 구조물에서 나타나는 두 개 이상의 평행한 직선들이 포함되어 있다면, 그 직선들의 3차원 방향 정보를 추정하는 방법을 알아본다. 3차원 정보는 일단 카메라좌표계에서 구하도록 한다. 차후에, 실세계 기준좌표계(world coordinate system)에서의 3차원 방향 정보가 필요한 경

우에는, 카메라검정(camera calibration)[11,12] 과정에서 얻어지는 정보를 이용하여 카메라 좌표값을 기준 좌표값으로 쉽게 변환할 수 있다.

2.1 카메라 모델 및 투영 관계식

XYZ-카메라좌표계는 카메라 투영중심점 **O**를 원점으로 하며, Fig. 3에서와 같이 주축(principal axis) 방향을 Z축으로 하는 오른손좌표계로 정의한다. 주축 방향으로 원점에서 초점거리 *f*만큼 떨어진 위치에 수직으로 영상평면(image plane)이 나타나는 것으로 정의하며, 주축과 영상평면이 교차하는 주점(principal point) **p**는 xy-영상좌표계에서 좌표값 (p_x, p_y)로 표기하였다.

카메라좌표계의 점 **X**(*X, Y, Z*)가 영상평면에 투영되는 점 **x**는 비례관계에 의해 영상좌표계 좌표값 ($fX/Z + p_x, fY/Z + p_y$)가 되며[13], 영상좌표계의 점을 동차좌표(homogeneous coordinate)로 표기하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 동차좌표는 어떤 2차원 좌표값 (*x, y*)를 3차원 (*kx, ky, k*) 형태로 표현하는 것이다. 세 번째 좌표값 *k*가 0이 아닌 경우에는, *k*로 다시 나누어주게 되면 표준(normal) 동차좌표 (*x, y, 1*) 형태가 되며 본래 좌표값 (*x, y*)를 얻을 수 있다. 동차좌표 (*x, y, 0*) 형태는 2차원 공간에서의 (*x, y*)-방향(direction)을 나타내거나 이 방향의 무한대 점을 표현하는데 사용한다. 일반적으로, 식 (1)에서의 행렬 **K**는 카메라검정행렬(camera calibration matrix)이라고 하며, 그것의 역행렬이 존재한다. 따라서 표준 동차좌표 ($fX/Z + p_x, fY/Z + p_y, 1$) 형태로 표기된 영상좌표계 점 **x'**와 카메라좌표계 점 **X**(*X, Y, Z*) 사이에는 식 (1)로부터 식 (2)에서와 같은 관계를 유도할 수 있다. 따라서 식 (2)로부터, 영상평면 위에 있는

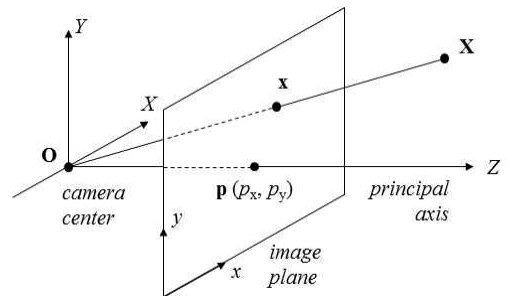


Fig. 3. Perspective projection in a XYZ-camera coordinate system onto a xy-image coordinate system.

카메라좌표계 점 (X, Y, Z) 와 영상좌표계의 표준 동차좌표 점 $(x, y, 1)$ 사이에 식 (3)과 같은 관계를 유도할 수 있다. 즉, 영상에서의 한 점 (x, y) 가 주어지면, 이것에 대한 3차원의 카메라 좌표값 (X, Y, Z) 를 구할 수 있다는 것을 의미한다. 예를 들어, Fig. 3의 영상평면 위의 주점 \mathbf{p} 에 대한 동차좌표 $(p_x, p_y, 1)$ 를 식 (3)의 오른쪽 부분에 대입한 후, 역행렬 \mathbf{K}^{-1} 를 곱하여 구해지는 카메라 좌표값은 $(0, 0, Z)$ 가 된다.

$$\begin{bmatrix} fX + Zp_x \\ fY + Zp_y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{K} \mathbf{X} \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = Z \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} fX/Z + p_x \\ fY/Z + p_y \\ 1 \end{bmatrix} = Z \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}' \quad (Z \neq 0) \quad (2)$$

$$(X, Y, Z) = f\mathbf{K}^{-1}(x, y, 1) \quad (3)$$

2.2 평행직선의 방향추정 문제 정의

본 논문에서는, 3차원 공간에서 평행한 직선 두 개 이상이 영상에 투영되어 나타나 있다면, 이들의 3차원 방향벡터를 카메라좌표계에서 구하는 것이다. 예를 들어, Fig. 1의 영상에서 건물 벽 가로방향의 (파란) 두 직선이 주어지면 이들의 3차원 방향벡터를 구하는 것이다. Fig. 1의 건물 벽 세로방향의 (붉은) 두 직선과 같이 영상평면에서 거의 평행하게 나타나더라도 이들의 3차원 방향벡터를 구할 수 있어야 한다. 그러나 Fig. 1에서 지면의 표지 석 윗면 두 (분홍색) 직선에 대해서는, 실제로 3차원 공간에서 그들이 평행한 것이 아니므로, 직선 방향을 결정할 수 없다.

3. 평행직선의 방향 추정 방법

3차원 공간에서 평행한 두 직선이 영상에서 주어질 때, 이들의 3차원 방향을 추정하는 문제의 해결방안에 대한 핵심 내용을 Fig. 4에서 간략히 설명할 수 있다. 먼저 영상평면에서 두 직선 l'_u, l'_l 이 주어지면, 카메라 원점과 각 직선을 포함하는 두 개의 직선평면 upper plane, lower plane을 카메라좌표계에서 구할 수 있다. 투영관계에 의하여, 이러한 직선평면들은 3차원 공간의 실제 해당직선 l_u, l_l 을 각각 포함하게 된다. 두 직선평면이 교차하는 직선의 방향벡터는, Fig. 4에서와 같이, 두 직선평면의 법선벡터(normal vector) $\mathbf{n}_u, \mathbf{n}_l$ 을 외적(cross product)하여 구할 수

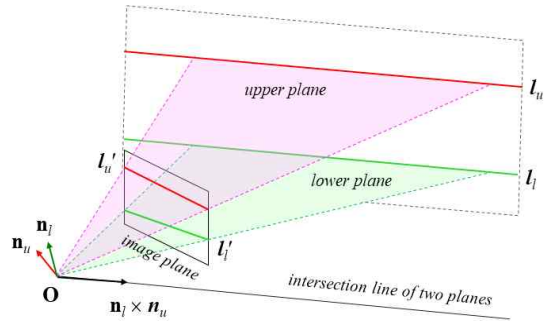


Fig. 4. Core idea of estimating three-dimensional direction of parallel lines. Cross product of two normal vectors for the upper plane and the lower plane indicates their 3D direction.

있다.

만약 두 직선 l_u, l_l 이 3차원 공간에서 서로 평행하다면, 두 직선평면이 교차하는 직선은 직선 l_u, l_l 과 평행하게 된다. 한편, 카메라 원점을 통과하지 않는 직선 l_u, l_l 이 서로 평행하므로, 이들을 모두 포함하면서 카메라 원점을 통과하지 않는 평면은 Fig. 4에서와 같이 하나로 유일하게 정해진다. 만약 교차직선이 직선 l_u, l_l 과 평행하지 않다면, 직선 l_u, l_l 은 교차직선과 각각 만나야 한다. 그런데 두 직선 l_u, l_l 에 의한 직선평면들의 교차직선은 두 직선 l_u, l_l 을 포함하는 평면과 한 점에서 만나야 한다. 즉, 교차직선이 직선 l_u, l_l 과 평행하지 않다면, 직선 l_u, l_l 은 한 점에서 만나야 한다는 결론에 도달한다. 이것은 직선 l_u, l_l 이 서로 평행하다는 가정에 모순이 된다. 따라서 평행한 직선 l_u, l_l 과 직선평면의 교차직선은 평행해야 한다. 결론적으로, 평행한 두 직선에 대한 3차원 방향벡터는 해당하는 두 직선평면의 법선벡터들을 외적(cross product)하여 구할 수 있게 된다.

직선평면의 법선벡터를 카메라좌표계에서 구하기 위해서, 먼저 Fig. 5에서와 같이 영상에서 주어지는 직선 위의 점을 두 개 선택한다. 선택 점들에 대한 표준 동차좌표 표현의 $\mathbf{x}_i (i = ul, ur, ll, lr)$ 를 식 (3)에 적용하여 식 (4)에서와 같이 카메라 좌표값 \mathbf{X}_i 를 구한다. 직선평면의 법선벡터는 식 (5), (6)에서와 같이 선택한 두 점의 카메라 좌표값을 외적하여 구할 수 있다. 교차직선의 방향 \mathbf{d} 즉, 평행한 직선 l_u, l_l 의 3차원 방향은 식 (7)에서와 같이 직선평면의 법선벡터들을 외적하여 구할 수 있다. 만약 Fig. 5에서와 같이 $\mathbf{x}_{ur}, \mathbf{x}_{lr}$ 간의 거리가 $\mathbf{x}_{ul}, \mathbf{x}_{ll}$ 간의 거리보다 짧으

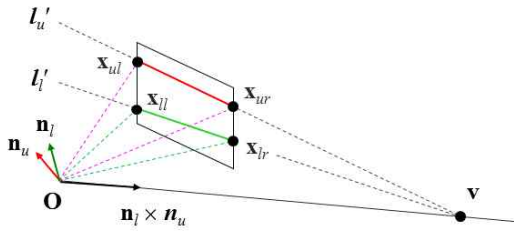


Fig. 5. Diagram to show an estimation method of three-dimensional parallel line direction based on four selected points.

면 $\mathbf{n}_l \times \mathbf{n}_u$ 을 적용하고, 그렇지 않으면 $\mathbf{n}_u \times \mathbf{n}_l$ 을 적용하면 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i &= f \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_i \quad (i = ul, ur, ll, lr) & (4) \\ \mathbf{n}_u &= \mathbf{X}_{ur} \times \mathbf{X}_{ul} & (5) \\ \mathbf{n}_l &= \mathbf{X}_{lr} \times \mathbf{X}_{ll} & (6) \\ \mathbf{d} &= \mathbf{n}_l \times \mathbf{n}_u \text{ or } \mathbf{n}_u \times \mathbf{n}_l & (7) \end{aligned}$$

한편, 투영기하학(projective geometry)에서는 2차원 투영공간(projective space) P^2 의 구성요소인 점을 나타내기 위해 2차원 동차좌표 표현법을 사용한다[13]. 이 표현법에서는 무한대에 있는 점도 표현이 가능하다. 예를 들어, 원점 (0,0)에서 점(1,2) 방향의 무한대에 있는 점을 동차좌표 (1,2,0)으로 표현할 수 있다. 한편, Fig. 5에서의 동차좌표로 표현된 두 점 $\mathbf{x}_{ur}, \mathbf{x}_{lr}$ 을 지나는 직선 I'_u 은 이들의 외적 $\mathbf{x}_{ur} \times \mathbf{x}_{lr}$ 으로 나타낼 수 있다. 또한 두 직선 I'_u, I'_l 의 교점 \mathbf{v} 는 투영공간 P^2 에서 이들의 외적 $I'_l \times I'_u$ 로 표현된다[13]. 투영공간 P^2 에서는 무한대 점도 표현이 가능하므로, 영상에서의 두 직선 I'_u, I'_l 이 평행하더라도 교점 \mathbf{v} 를 외적 표기를 통해 잘 나타낼 수 있다. 투영공간 P^2 에서의 동차좌표 표현법을 식 (4)-(7)에 적용하여 정리하면, 식 (8)-(10)에서와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_u &= f \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_{ur} \times f \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_{ul} = f^2 \det(\mathbf{K}^{-1}) \\ &\quad \mathbf{K}^T(\mathbf{x}_{ur} \times \mathbf{x}_{ul}) = \mathbf{K}^T I'_u & (8) \\ \mathbf{n}_l &= f \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_{lr} \times f \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_{ll} = f^2 \det(\mathbf{K}^{-1}) \\ &\quad \mathbf{K}^T(\mathbf{x}_{lr} \times \mathbf{x}_{ll}) = \mathbf{K}^T I'_l & (9) \\ \mathbf{d} &= \mathbf{n}_l \times \mathbf{n}_u = \mathbf{K}^T I'_l \times \mathbf{K}^T I'_u = \det(\mathbf{K}^T) \\ &\quad \mathbf{K}^{-1}(I'_l \times I'_u) = f^2 \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v} = k \mathbf{V} & (10) \end{aligned}$$

식 (10)에서 알 수 있듯이, 방향벡터 \mathbf{d} 는 영상평면에서의 두 직선 I'_u, I'_l 의 교점 \mathbf{v} 에 대한 카메라좌표

계에서의 점 \mathbf{V} 를 향하는 것이다. 두 직선 I'_u, I'_l 에 대한 3차원 해당 직선 I_u, I_l 이 평행하다면, 교점 \mathbf{v} 는 두 직선 I_u, I_l 의 무한대 교점에 대한 소멸점(vanishing point)을 나타낸다. 즉, 무한대 교점이 투영된 점을 나타낸다. 따라서 카메라좌표계에서 점 \mathbf{V} 를 향하는 방향벡터 \mathbf{d} 는 평행한 두 직선 I_u, I_l 의 방향을 나타낸다. 한편, [13]에서는, 3차원 방향벡터 \mathbf{d} 를 갖는 직선의 영상 내 소멸점이 \mathbf{v} 일 때 관계식 $\mathbf{v} = \mathbf{K} \mathbf{d}$ 가 성립함을 언급하고 있는데, 식 (10)은 이러한 관계에 잘 부합함을 보여준다. 참고로, 식 (10)의 마지막 부분에서 \mathbf{N} 대신에 $k \mathbf{V}$ 로 표현한 것은, \mathbf{v} 가 표준 동차좌표가 아니므로, 적절한 상수 배수가 된다는 것을 나타내기 위한 것이다.

본 논문에서 제시하는 평행직선의 방향을 추정하는 방법을 정리해 보면, 먼저 영상에 투영된 직선 위의 네 점을 선택한 후, 식 (4)-(7)을 단계적으로 적용하여 구하면 된다는 것이다. 이를 위해서는, 사전에 카메라점정[12]을 통해 행렬 \mathbf{K} 를 구하여 사용해야 한다.

4. 제시한 방법의 응용 및 실험

여기에서는, 먼저 본 연구를 시작하게 된 파렛트 측정에 관한 응용에 대하여 자세히 알아보고, 이어서 다른 응용 가능성에 대해서도 알아본다.

4.1 모노 비전 기반 파렛트 자세 측정에 관한 기존 연구

하나의 카메라를 장착하여 파렛트를 검출하고 자세 및 위치를 측정하는 방법[6]에서는, Fig. 2에서와 같이, 파렛트 앞면에서 상대적으로 수월하게 얻을 수 있는 두 개의 투영된 평행직선에 관한 정보를 활용하고 있다. 이러한 투영평행직선으로부터 먼저 파렛트의 자세를 추정하고, 이어서 파렛트 앞면의 중앙 위치를 측정하는 단계적인 방식을 사용한다. 이때, 파렛트는 지면과 평행하게 놓여 있다고 가정함으로써, 본래 회전 자유도(degree of freedom)가 3인 파렛트 자세에 대하여 지면과 평행해야 한다는 제약을 통해 자유도를 1로 떨어뜨려 간단하게 다룬다.

파렛트 자세를 추정하는 방법[6]으로는, 영상에서 구해지는 두 투영평행직선을, Fig. 6에서와 같이, 가상평면(virtual plane)에 역투영하는 방식을 사용하고 있다. 가상평면의 자세를 나타내는 법선벡터는 지

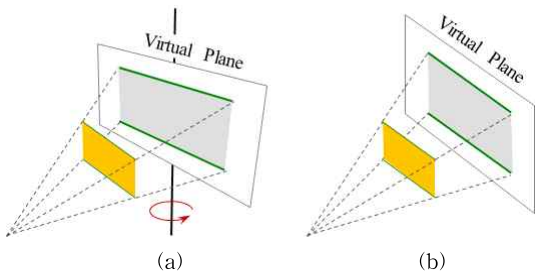


Fig. 6. An approach to determination of pallet orientation in [6]. (a) relation diagram between the (yellow) front plane of a pallet and its back-projection onto a virtual plane with various orientation, (b) a case of aligning the virtual plane parallel to the front plane of pallet.

면과 평행하되 Fig. 6(a)에서와 같이 자유롭게 회전이 가능하도록 설정한 후, 회전각도를 조금씩 바꾸어가며 역투영된 투영평행직선이 가상평면에서 평행하게 나타나는 회전각도를 결정하는 방식을 사용하고 있다. 이러한 회전각도에서는, Fig. 6(b)에서와 같이, 가상평면과 팔레트 앞면이 평행하게 된다는 사실을 이용한 것이다. 그러나 이 방법에서는 회전각도를 일정한 크기만큼 계속 바꾸어가며 역투영된 직선의 평행여부를 반복적으로 계산해야 한다. 이에 따라, 회전변화 크기에 의해 팔레트 자세의 측정 정밀도가 영향을 받으며, 전체 회전각도 범위를 회전변화 크기로 나눈 횟수만큼 반복 계산을 해야 하는 부담이 있다.

팔레트 자세가 결정된 다음에는, 팔레트 앞면 높이와 가상평면 투영직선 간 거리의 비율이 카메라 원점으로부터 팔레트 앞면과 가상평면까지 거리의 비율과 동일하다는 비례 관계를 이용하여, 팔레트 앞면의 평면식을 결정한다. 이어서 팔레트 앞면 중앙점의 좌표값을 구함으로써 팔레트의 위치 측정을 마무리 한다.

4.2 제시 방법의 팔레트 측정 적용 실험결과 및 고찰

하나의 영상에서 팔레트를 검출하여 자세 및 위치를 측정하는 방법[6]에서는, 먼저 팔레트 자세를 결정한 다음에 팔레트 위치를 측정하는 단계적인 접근 방법을 사용하고 있는데, 본 연구에서 제시한 방법은 팔레트 자세를 결정하는 부분을 대체하여 적용할 수 있다. Fig. 7은 우리나라 표준 팔레트[14]에 대하여 자세 및 거리를 변화하면서 실험한 것을 보이고 있다. 흰 타자는 수작업에 의해 팔레트의 정확한 자세 및 위치를 용이하게 계측하기 위해 사용되었으며, 타자 위에 기준 좌표계(x : 타자 오른쪽 방향, y : 타자 멀어지는 방향, z : 타자 위쪽 방향)를 설정하여 카메라 검정[12] 과정을 수행하였다. 모든 측정값은 기준 좌표계의 좌표값으로 나타내었다. Fig. 7에서 왼쪽부터 오른쪽으로 나타나는 팔레트들은 카메라로부터 대략 1.1 - 1.7 m 범위 내에서 점점 더 멀리 놓인 것이며, 팔레트들 앞면의 법선벡터는 정면 0° 를 기준으로 각각 7.58° , -14.20° , 0.49° , -7.58° 방향을 나타낸다. 법선벡터는 타자 윗면 즉, xy -평면에서 좌우로 회전만 가능하므로, 회전 각도만으로 팔레트의 자세를 표현할 수 있다.

팔레트 자세 및 위치에 대한 실험결과는 수작업으로 계측한 값을 기준으로 기존 방법[6] 및 제시한 방법으로 측정된 값과의 오차를 Table 1에 나타내었다. 두 방법에 의한 자세 측정오차는 동일한 수준으로 나오도록 기존 방법[6]에서 가상평면의 회전변화 크기를 미세하게 조정하였다. 이에 따라 팔레트 위치에 대한 측정오차도 거의 동일하게 나오게 되므로, Table 1에는 두 방법의 측정오차를 구분하지 않고 한 가지만 나타내었다. 팔레트 위치에 대한 절대값 오차 중에서 $|\Delta x|$ 오차는 최대 12.18 mm 로 나타났으며, $|\Delta z|$ 최대 오차는 10.15 mm 로 나타났다. 이 정도의 오차는 팔레트 앞면 포크용 구멍의 크기가 가로세로 260 mm \times 95 mm 인 것을 감안하면, 현상



Fig. 7. Sample images of pallet with various orientation and distance to test usefulness of the proposed method.

Table 1. Experimental results for four pallets with various distance and orientation

(unit: mm for Δx , Δy , Δz , and degree for $\Delta\theta$)

| Test images | | Methods | Location | | | Orientation |
|---------------|-----------|---------|------------|------------|------------|----------------|
| | | | Δx | Δy | Δz | $\Delta\theta$ |
| Fig.7 | 1 (left) | | -5.12 | 3.81 | 2.55 | -0.02 |
| | 2 | | 5.50 | -4.52 | 6.03 | -0.03 |
| | 3 | | -2.69 | -14.96 | 10.15 | -0.33 |
| | 4 (right) | | 12.18 | -6.23 | 9.86 | -0.04 |
| Absolute mean | | | 6.37 | 7.38 | 7.15 | 0.10 |

에서 포크로 파レット를 다룰 때 전혀 문제가 되지 않음을 알 수 있다. 참고로, $|\Delta y|$ 최대 오차는 14.96 mm로 나타났는데, y-방향은 파レット까지의 거리와 관련된 것이므로 파レット 처리에 별로 영향을 주지 않는다. 한편, 파レット 앞면의 법선방향의 절대 오차 $|\Delta\theta|$ 는 최대 0.33°로 나타났는데, 이것으로부터 파レット 자세도 매우 잘 측정되는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 7의 왼쪽에서 세 번째 파レット는 앞면의 법선방향이 0.49°이므로 거의 정면을 향하고 있다. 따라서 이 파レット의 앞면으로부터 Fig. 2에서 보인 바와 같은 두 개의 직선 즉, 파レット 하단의 선과 포크용 구멍의 윗선을 영상에서 살펴보면 거의 평행하게 나타난다. 이 파レット 영상에 대한 실험결과인 Table 1의 3번 줄에서 파レット 자세에 대한 측정오차 결과를 보면, 다른 자세에 비해 상대적으로 큰 오차를 보이지만 0.33°에 불과하므로 전혀 문제가 되지 않는다. 아울러, 영상에서 평행하게 나타나는 직선들에 대해서도 제안한 방법으로 직선의 3차원 방향을 제대로 추정할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 기존 방법[6]에서 파レット 자세 측정값이 본 논문에서 제안한 방법에 의한 측정값과 소수점 아래 두 자리까지 일치하도록 정밀하게 구하려면, 가상평면 회전크기를 0.01°로 설정하여야 한다. 이 경우에 연산시간이 급증하게 된다. 예를 들어, -40° ~ +40°로 설정한 파レット 자세 범위를 1° 간격으로 크기변화

를 주게 되면 81회 연산만으로 자세를 결정할 수 있지만, 0.01° 크기변화의 경우에는 8100회 연산을 수행하여야 한다. 이에, 정밀도를 높이면서도 연산시간을 줄이기 위해 coarse-to-fine 방식으로 구현하였다. 먼저 자세 범위에 대하여 1° 간격 크기변화를 통해 개략적인 자세방향을 결정한 후, 이 방향의 좌우 1° 범위에 대하여 0.1° 간격 크기변화를 통해 보다 정밀한 방향을 계산하도록 하였다. 이어서, 마찬가지로 0.01° 간격 크기변화를 통해 최종 자세방향을 결정하도록 하였다. 따라서 총 103 (= 81+11+11) 회 연산을 통해 0.01° 수준의 정밀한 자세를 측정할 수 있었다.

기존 방법[6]과 본 논문에서 제시한 방법을 Intel Core i3-2100 CPU 3.1GHz 시스템에서 실행한 총 연산시간은, Table 2에서 보인 바와 같이, 각각 26.02 msec 와 24.65 msec 로 나타났다. 대략 25 msec로 계산한 경우에 초당 40회 측정이 가능하므로, 현장에서 적용하는데 전혀 문제가 되지 않는다. 두 방법의 연산시간 차이는 파レット 자세 결정부분에서 주로 나타났다는데, 직접 단순 계산을 통해 자세 측정값을 얻는 본 논문의 제안 방법이 기존 방법[6]에 비해 18.5배 빠른 속도로 수행될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 총 연산시간의 97.5%에 해당하는 대부분의 연산시간이 파レット의 검출 및 인식에 사용되고 있으므로, 파レット 검출 및 인식 방법을 향후 보다 더 개선해

Table 2. Execution times for measuring orientation and location of pallets

(unit: msec)

| Modules | Pallet detection & recognition | Finding orientation | Computing location | Extra computing | Total |
|---------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|-------|
| Iterative method[6] | 23.63 | 1.71 | 0.22 | 0.46 | 26.02 |
| Proposed method | 24.04 | 0.06 | 0.07 | 0.48 | 24.65 |
| | 97.5% | 0.2% | 0.3% | 2.0% | 100% |

나갈 필요가 있음을 알 수 있다.

한편, 본 논문에서 제시한 방법은, 기존 방법[6]과 달리, 평행직선 방향이 지면에 평행하지 않은 경우에도 적용할 수 있다. 기존 방법[6]에서의 회전 자유도는 좌우 회전만 허용하므로 1에 불과하지만, 일반적인 3차원 공간에서의 회전 자유도는 3이다. 따라서 일반적인 경우에 대하여 기존 방법[6]으로 가상평면의 방향을 조정하려면 자유도가 3에 해당하는 만큼의 회전크기 변화를 주어야 하며, 이에 따른 연산시간은 지수적으로 증가하게 된다. 반면에, 본 논문에서 제시한 방법은, 회전 자유도와 상관없이 직접 바로 계산할 수 있으므로, 연산시간 측면에서 상대적으로 매우 효율적임을 알 수 있다.

4.3 제시 방법의 다른 응용에 대한 검토

이전 실험에서의 파렛트 자세 및 위치를 측정한다는 것을 거꾸로 보면 파렛트 기준으로 카메라의 위치를 결정한다는 것과 같다. 자율주행하는 장치에서 자신의 위치를 측정하기 위한 방법[15]이 많이 연구되어 왔는데, 자율주행 장치가 주행하는 주변환경에 파렛트에 해당하는 직사각형 형태의 표식을 설치할 수 있다면 제시한 방법을 적용하여 자율주행 장치의 상대적인 위치 즉 자신의 위치를 측정할 수 있다. 한편, 창고, 건물실내 등과 같이 평행한 직선들이 많이 나타나며 이들의 거리 정보를 사전에 알 수 있는 환경에서는 별도의 표식을 설치하지 않고도 카메라의 위치를 추정할 수도 있을 것이다.

다른 응용으로서, 고정된 카메라를 이용하여, 번호판과 같은 직사각형 형태의 표식을 달고 움직이는 자동차나 자율주행장치에 대한 위치 및 자세를 지속적으로 관찰하는데 응용할 수 있다[16]. 직사각형 표식으로부터 해당 장치의 3차원 위치 및 자세를 계속 추정할 수 있으므로, 장치 이동 궤적의 자동 추적 및 분석이 가능할 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 논문에서는, 영상에 나타난 두 개의 평행직선으로부터 이들의 3차원 방향을 단순한 계산을 통해 직접 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 투영된 두 평행직선이 영상에서 평행하게 나타나더라도 상관없이 적용할 수 있다. 제시한 방법을 파렛트

자세 및 위치 측정에 적용하는 실험을 통해, 제시 방법의 정확성과 현장 응용의 효율성을 확인할 수 있었다. 한편, 제시한 방법은 지면과 평행한 직선들만 나타나는 파렛트 측정 실험뿐만 아니라 임의의 방향을 갖는 평행한 직선들에 대해서도 적용할 수 있으므로, 향후에 제시한 방법을 주변의 시각적 정보로부터 자신의 위치 측정하는 응용 분야나 스마트 감시시스템 분야에 적용하는 연구를 할 것이다.

REFERENCE

- [1] G. Garibotto, S. Masciangelo, M. Ilic, and P. Bassino, "ROBOLIFT: A Vision Guided Autonomous Fork-lift for Pallet Handling," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 656-663, 1996.
- [2] 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*, pp. 1-6, 2001.
- [3] D. Lecking, O. Wulf, and B. Wagner, "Variable Pallet Pick-Up for Automatic Guided Vehicles in Industrial Environments," *Proceedings of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 1169-1174, 2006.
- [4] M. Seelinger and J.D. Yoder, "Automatic Visual Guidance of a Forklift Engaging a Pallet," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 54, Issue 12, pp. 1026-1038, 2006.
- [5] S. Byun and M. Kim, "Real-Time Positioning and Orienting of Pallets Based on Monocular Vision," *Proceedings of IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, pp. 505-508, 2008.
- [6] S. Byun and M. Kim, "Pallet Measurement Method for Automatic Pallet Engaging in Real-Time," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 14, No. 2, pp. 171-181, 2011.
- [7] M.R. Walter, S. Karaman, E. Frazzoli, and S. Teller, "Closed-Loop Pallet Engagement in an

Unstructured Environment,” *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5119-5126, 2010.

[8] D. Haanpaa, G. Beach, and C.J. Cohen, “Machine Vision Algorithms for Robust Pallet Engagement and Stacking,” *Proceedings of IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR)*, pp. 1-8, 2016.

[9] J. Xiao, H. Lu, L. Zhang, and J. Zhang, “Pallet Recognition and Localization Using an RGB-D Camera,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 14, Issue 6, 2017.

[10] L. Baglivo, N. Biasi, F. Biral, N. Bellomo, E. Bertolazzi, M.D. Lio, et al., “Autonomous Pallet Localization and Picking for Industrial Forklifts: A Robust Range and Look Method,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 22, No. 8, 2011.

[11] R. Jain, R. Kasturi, and B.G. Schunck, *Machine Vision*, McGraw-Hill, New York, 1995.

[12] Z. Zhang, *A Flexible New Technique for Camera Calibration*, Technical Report MSR-TR-98-71, 1998.

[13] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiview Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.

[14] Flat Pallets for Through Transit (KS T 1372), <http://standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do> (accessed Sep., 13, 2018).

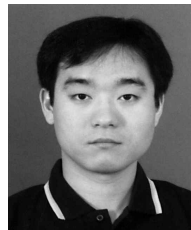
[15] A.J. Davison, I.D. Reid, N.D. Molton, and O. Stasse, “MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 29, No. 6, pp. 1052-1067, 2007.

[16] W. Hu, T. Tan, L. Wang, and S. Maybank, “A Survey on Visual Surveillance of Object Motion and Behaviors,” *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol. 34, No. 3, pp. 334-352, 2004.



김민환

1988년 서울대학교 컴퓨터공학과 공학박사
 2004년~2006년 한국멀티미디어 학회 부회장
 현재 부산대학교 전기컴퓨터공학부 교수
 관심분야: 컴퓨터시각, 칼라공학



변성민

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

관심분야: 3차원 복원 및 측정, 산업용 비전시스템



김진

2013년 2월 충북대학교 컴퓨터공학과 공학박사
 현재 중원대학교 컴퓨터공학과 교수
 관심분야: 정보보호, 인공지능, 멀티미디어