
스테레오 카메라의 양안 시차를 이용한 거리 측정의 고속 연산 알고리즘

김재한*

An Efficient Algorithm for 3-D Range Measurement
using Disparity of Stereoscopic Camera

Jae-han Kim*

요 약

거리 측정 시스템은 물체까지의 거리를 삼차원 좌표계에서 측정하는 장치이다. 군용 장비나 건설, 항해, 검사, 조립, 로봇 비전 등에 널리 사용되는 무접촉식 원격 거리 측정(ranging) 시스템은 자동화 응용에 매우 중요하다. 측정 방식은 active와 passive 방식으로 구분되는데, active 방식은 laser나 microwave, 초음파 등의 time of flight를 이용하거나 레이저 조사(illumination)에 대한 카메라 영상을 해석하는 등의 다양한 방식이 있으나 장치가 복잡하며, passive 방식은 stereo camera의 양안영상을 이용하거나 focus특성을 이용하는 방식 등이 있으나 대부분 연산시간이 많이 요구된다. 본 연구에서는 수동식 스테레오 카메라에서 양안시차를 산출하여 triangulation으로 목표점의 거리를 측정하는 방식에서, 연산 시간이 많이 소요되는 과정을 고속으로 처리하는 새로운 방식을 제안하였다. 즉, 목표점에서의 양안 edge 영상을 구하고, 이 영상의 projection profile을 cross correlation하여, 시차를 고속으로 산출해 거리를 구하는 알고리즘을 제안하였으며, 이 방식의 효율성을 실험 결과를 통하여 보였다.

ABSTRACT

The ranging systems measure range data in three-dimensional coordinate from target surface. These non-contact remote ranging systems is widely used in various automation applications, including military equipment, construction field, navigation, inspection, assembly, and robot vision. The active ranging systems using time of flight technique or light pattern illumination technique are complex and expensive, the passive systems based on stereo or focusing principle are time-consuming. The proposed algorithm, that is based on cross correlation of projection profile of vertical edge, provides advantages of fast and simple operation in the range acquisition. The results of experiment show the effectiveness of the proposed algorithm.

Keyword

three dimensional(3D), stereoscopic camera, ranging, disparity, edge projection

* 호남대학교 공과대학 전자공학과 교수

접수일자: 2001. 11. 15

1. 서론

직접적인 접촉(non-contact)이 없이 목표물까지의 거리를 계측(ranging)하는 원격 계측 기술은 군사용 응용이나 항해 및 지상 주행 응용, 조립이나 검사와 같은 공장 자동화 분야, 건설 분야, robot vision 등에 매우 활용성이 많다.

이러한 거리 계측 방식은 능동형(active)과 수동형(passive) 계측 방식으로 구분된다[1]. 능동형 방식은 laser나 microwave, 초음파 등을 이용하여 물체 표면을 반사하여 되돌아 오는 반사파의 시간을 측정하고 반사파의 전파 속도를 기준으로 환산하여 거리를 계산하는 time of flight 이용 방식이 있고, 또 다른 응용된 방식으로는 레이저를 목표물에 조사(illumination)하고 이 레이저와 다른 각도에서 얻은 카메라 영상을 가지고 기준선에 대한 레이저의 각도와 카메라의 주시 각도를 삼각법으로 해석하여 거리를 연산해 내는 응시각 해석 기반의 삼각법(triangulation) 방식이 있다[2][3]. 이외에도 부호화 패턴(coded pattern) 투영법, Moire 방법, 홀로그래픽 간섭을 이용하는 방법들이 있다.

수동형 방식은 스테레오 카메라(stereoscopic camera)의 양안 영상을 이용하거나 초점(focus) 특성을 이용하는 방식 등이 있다. 양안 영상을 이용하는 방식은 능동형의 삼각법과 원리는 동일하나 능동형 조사 광원 대신에 수동형의 카메라를 이용하는데 한 목표 지점을 두 카메라가 바라보는 각도인 응시각(vergence angle)과 이 두 카메라 간의 거리(base line)를 삼각법에 적용하여 거리를 구하게 된다.

초점을 이용하는 방법은, 렌즈를 이용하여 얻어지는 영상에서 초점이 잘 맞아 물체의 외각선인 edge가 선명하게 되는 거리는 렌즈의 곡률(lens curvature) 특성에 따라 결정되므로, 역으로 렌즈의 특성을 미리 파악한 후에 목표물을 초점이 맞아 선명하도록 조정하면, 이때의 렌즈의 특성과 위치에 따라 목표물까지의 거리를 구하게 되는 것이다.

본 연구에서는 거리 연산의 기본 방법으로 수동형 스테레오 카메라에서 얻어지는 양안 영상으로 부터 양안시차를 추출하여 삼각법으로 목표점(target point)의 거리를 측정하는 방식을 사용하였다.

이때, 기존의 방식은 양안 카메라로 얻어지는 두 영상에서 한 목표점에 대하여 일치 부분을 찾아 양안 시

차를 산출하는 방법으로서 산출 과정에서 많은 연산 시간이 요구된다[4][5][6].

그러므로, 본 논문에서는 이를 극복하기 위한, matching 연산 과정을 고속으로 수행하여 효율적으로 정확한 거리를 계산하는 새로운 방안을 제시한다.

II. 제안된 양안시차 추출 방법

(1) focusing과 disparity의 특성 분석

본 연구에서는 입체 카메라 구성을 가장 간단한 형태인 평행식 Stereoscopic Camera 구조로 하였다. 제안 방식을 개발하게 된 착안점은 다음과 같은 focusing과 disparity의 특성에 관한 사항 분석으로부터 시작한다.

첫 번째는 focusing에 관한 사항으로써, 거리를 측정하려는 목표점의 위치는 본 장치를 운용하는 사용자가 정해야 하므로 사용자는 기준 카메라로 설정된 좌측 카메라를 통해 관찰되는 영상내에서 목표점을 지정한다. 이 경우 사용자에게 의하여 지정된 목표점의 영상은, 정확하게 focusing이 된 영상이다.

둘째는 disparity에 관한 사항으로써, 거리를 산출하기 위해서는 두 카메라로부터 얻은 영상에서 동일한 점을 찾는 작업인 stereo matching이 핵심적인 사항이며 동시에 어려운 작업이다. 즉, 일치 불확실성 문제인 correspondence problem이 존재한다. 따라서, 동일한 점을 찾는 작업과 이를 통한 양안시차 획득에 많은 시간이 소요되고, 적지 않은 오차가 유발된다. 따라서 목표점이 위치한 영상 중심부를 pixel 단위로 세부 edge 단위로 비교하여 정확하게 일치시키며 한다. 아울러 세부 비교 과정에서 오차가 발생하는 것을 방지하기 위해서는 영상의 중심 영역에 대해서는 가중치를 부여하고 가장자리 영역은 가중치를 낮춘 가중치 적용 영상을 수평적으로 비교하므로써, 전역 비교가 이루어져서 전체적으로는 영상의 중심 영역의 목표점에 대한 동일점 일치가 정확하게 이루어져 disparity를 효율적으로 산출하며 이로써 정확한 거리 연산이 가능하게 된다.

(2) 제안 방식의 거리 산출 순서

그림 1의 기본 동작 절차와 구체적인 연산 절차를 설명하면 다음과 같다. 양안 영상에 대한 고속의 양안시차 산출을 위하여, 계측을 원하는 목표점에서의 영

상인 edge영상을 구한다. 이 edge영상으로 부터 수직 projection profile을 구하여 일치점 matching을 위한 수단으로 한다. 중심 목표점에 대하여 가중치를 부여 하기 위하여 Gaussian 분포 함수의 곱셈 operation을 한다. 여기서 edge영상은 초점이 맞는 거리의 영상이다. 이 점이 목표 지점의 거리 정보를 함축하고 있는 edge영상을 사용하는 근거가 된다.

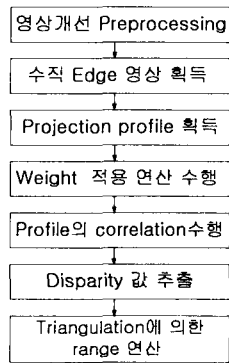


그림 1. 제안 알고리즘의 기본 동작 흐름도

그 후, 좌측 및 영상의 profile에 대하여 한 pixel 씩 위치를 이동하며 cross correlation을 한다. 이 결과 correlation의 최대값이 나오는 이동 위치의 pixel 위치 값을 구하면 이 값이 연고자 하는 양안 시차가 된다.

(3) 거리 산출식

그림 2 에서 보인 바와 같이 P는 3차원상의 목표 지점이며, 두 image plane간의 거리를 baseline distance L이라 한다. 카메라를 pinhole 모델로 하며, f는 이 모델의 effective focal length이다.

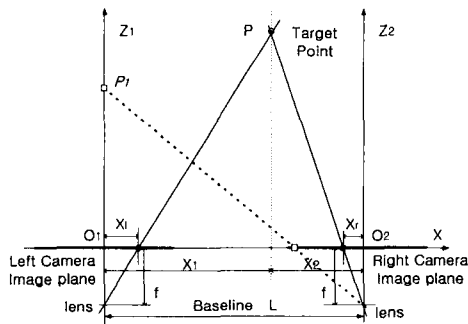


그림 2. Stereoscopic 카메라의 Geometry

Z₂와 X축과의 교점을 우측 카메라의 원점인 O₂로 하면, 우측 image plane으로 P점이 projection되는 점에서 우측 카메라의 원점까지의 거리는 X_r이 된다. 마찬가지로 Z₁과 X축과의 교점을 좌측 카메라의 원점인 O₁로 하면, 좌측 image plane으로 P점이 projection되는 점과 좌측 카메라의 원점까지의 거리는 X_l이 된다.

baseline L과 disparity d는 다음과 같다.

$$L = X_2 - X_1 \tag{1}$$

$$d = X_l - X_r \tag{2}$$

목표점 P가 두 개의 image plane의 원점과 baseline 이 같은 평면 위에 있다고 하는 경우에 거리 z는 아래 식 (7)과 같이 유도된다.

$$\frac{X_l}{f} = \frac{X_1}{(z+f)} \tag{3}$$

$$\frac{-X_r}{f} = \frac{X_2}{(z+f)} \tag{4}$$

$$X_2 = L - X_1 \tag{5}$$

여기서, X₁과 X₂를 소거하면

$$z = \frac{-f(X_l - X_r - L)}{(X_l - X_r)} \tag{6}$$

$$z = \frac{f(L-d)}{d} \tag{7}$$

(4) 제안 알고리즘의 특징

제안된 알고리즘은, 기존의 pixel 기반 또는 object 기반의 matching 방식과 달리 목표 물체의 edge를 이용한 matching이므로 상대적으로 연산 속도가 빠르며 동시에 정확성을 유지하는 효율성을 갖는다. 즉, 사용자가 개입함으로써 focusing 방식의 장점을 취하고, 양안 시차를 찾는 데는 edge projection profile을 matching하는 방식을 사용하여 상존하는 문제점이었던 연산 속도를 대폭 개선하였다.

III. 시스템 구성 및 거리 연산

(1) 시스템의 구성 및 특징

시스템의 구성은 두 대의 양안식 카메라와 영상 획득장치 및 처리 장치로 구성된다.

그림 2에서와 같이, 좌측 카메라가 시스템의 기준 카메라가 된다. 이에 따라, P1점이 목표점일 때에 좌측 카메라를 정면으로 지향하여 좌측 카메라 영상 면의

가운데에 목표점이 오도록 한다. 이와 동기되어 우측 카메라는 영상 면의 중심부에 목표점이 오도록 카메라 제어부에 의하여 자동 조정된다. 즉 목표점이 중심부와 이격된 간격이 disparity가 되며 이 값을 알면 우측 카메라가 바라보는 각도를 계산할 수 있으므로 이 각도로 거리를 쉽게 계산하여 구할 수 있다.

그러므로, 결국 제어 및 거리 계산에 필요한 정보는 disparity 값이 된다. 한편, 영상면 중앙에 목표점이 오도록 하는 것은 keystone distortion이 최소가 되도록 하는 데 목적이 있다.

또한, 이러한 geometry에서는 단지 우측 카메라 영상으로부터, 영상 면 원점에서 목표점까지의 disparity를 산출하는 것이 되므로 거리 계산 과정이 간단하게 된다.

(2) 시스템의 동작 특성

시스템의 동작은 기준이 되는 좌측 카메라의 목표점의 지향과 아울러 우측 카메라도 좌측 카메라와 동기되어 지향 방향이 평행하도록 연속 제어되는 것인데, 거리 획득 명령에 따라 영상 획득 작업이 연속적으로 수행되어야 한다.

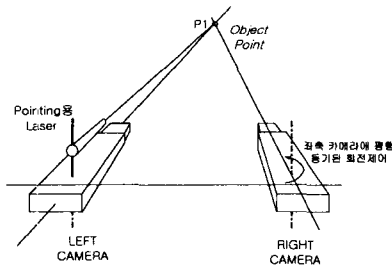


그림 3. Stereoscopic 카메라 시스템 구성도

목표 물체의 표면이 충분한 윤곽선(edge)을 갖지 않는 형태인 경우에는, 좌측 카메라의 영상중심인 원점 위치에 레이저 pointer를 이용하여 짧은 duration을 갖는 단일 pulse laser를 조사(illumination)하고, 임의의 한 점을 지정하며 이 레이저 펄스 신호와 동기하여 우측 영상을 획득하도록 시스템을 구성한다. 따라서 우측 영상에서 disparity를 구할 수 있다. pointing에 대하여 양안 영상 획득과 이를 처리하는 방법도 가능하다. 윤곽선이 충분한 영상에서는 레이저 pointing이 생략될 수 있다.

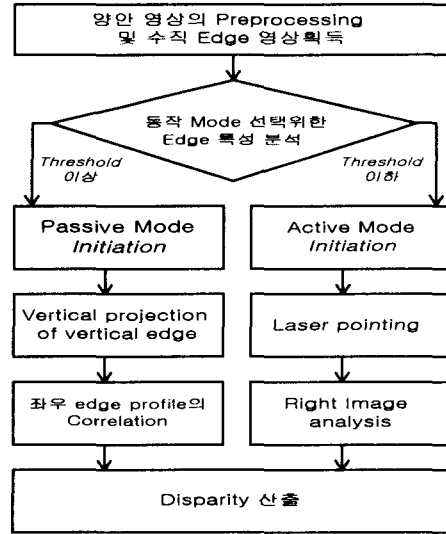


그림 4. 거리 측정 시스템의 동작 mode 선택

거리 연산 작업은 좌측 카메라 영상과 우측 카메라 영상을 비교하여 disparity를 산출하므로써 이루어진다. 이와 같은 단계적인 시스템 동작은 그림 4의 동작 mode 선택 흐름도와 같다.

(3) 거리 연산의 정확도 향상

거리 연산을 하기 위하여 우선적으로 수평 방향 밝기 변화 검출 operator를 이용하여 수직 edge 영상을 획득한다. 우리 눈이 수평 방향으로 물체의 이격 상태를 검출할 때 수직 edge를 이용하듯이, 여기에서도 수직 edge로 disparity를 찾는다.

획득된 수직 edge 영상에 대하여 수평 방향 변이를 찾기 위하여 직접 비교 대신에 수직 방향으로 edge 성분을 projection하여 축적된 profile을 구하고 이를 비교하는 방법을 도입하였다.

또한 목표점은 중심에 위치하도록 카메라를 지향하였으므로 영상 중심부에 대하여 가중치를 부여하였다.

즉, 아래 식 (8)과 같은 Gaussian density function을 좌우 영상의 profile에 대하여 곱셈 operation을 한다

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left\{ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (8)$$

여기서, m은 영상의 가로 pixel수의 1/2이며, σ^2 는 variance로서 목표 영역의 국소화 정도를 나타내고, 또한 disparity 산출의 정확도와 반비례 관계를 가지므로

최적 변수값의 산출과 선정이 요구된다. 이러한 연산은 전체 edge를 이용하며 동시에 목표점의 disparity를 정확하게 추출하는데 목적이 있다.

N. 실험 및 분석

좌우 영상으로부터 각각의 수직 edge 영상을 구하기 위한, 잡음 제거용 preprocessing으로서 Gaussian filtering mask를 이용하여 그림 5와 같이 잡음을 제거한다. 이후, Sobel mask과 같은 수직 edge 강조 mask를 이용하여 그림 6과 같은 좌우 edge 영상을 얻었다.

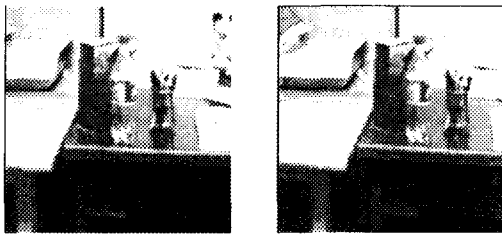


그림 5. preprocessing된 좌우 카메라 원 영상

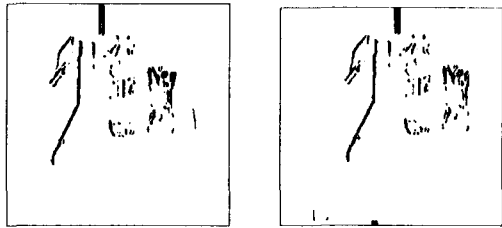


그림 6. 좌우 수직 edge 영상

좌우 카메라 영상으로부터 추출된 각 수직 edge 영상으로부터 수직 방향의 disparity를 구하기 위해서는 수직 edge를 수직 방향으로 projection을 하여 projection 된 것과 같은 형태의 좌우 각 영상의 edge projection profile을 얻었다. 그림 7과 같은 얻어진 edge projection의 profile에 대하여, 목표점 부근에 가중치를 주기 위하여 식 (8)과 같은 Gaussian density function 함수를 적용하였다.

이러한 좌우 영상의 weighted profile들에 대하여 두 영상의 이격 간격인 disparity를 구하기 위하여, 좌측 영상의 profile을 기준으로 우측 영상의 profile을 한 pixel씩 이동해 가며 correlation을 하여 그림 8과

같은 결과를 얻는다. 이때, 최대점이 산출된 지점에서 이동된 pixel 값이 disparity가 된다.

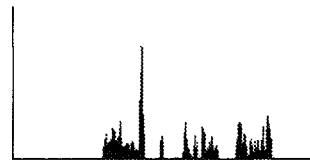
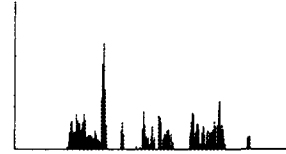


그림 7. 수직 edge projection (좌, 우 결과)

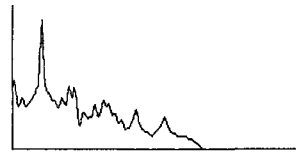


그림 8. projection profile의 correlation

그림 9는 좌우 profile을 겹쳐 비교해 놓은 것이고 그림 10은 그림 8에서 획득된 disparity 만큼 좌측 profile을 이동시킨 후, 겹쳐 그린 것으로 disparity 산출이 정확함을 보이고 있다.

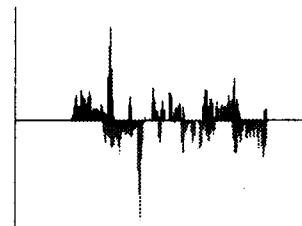


그림 9. 좌우 영상 profile의 비교 도시

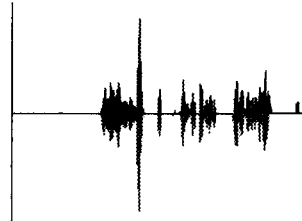


그림 10. disparity를 보상 후, 비교 도시

여기서 얻어진 disparity 값 d 와 두 카메라의 간격 L 과, 초점거리 f 를 앞에서 유도한 식 (7)에 대입하여 카메라 baseline으로부터 목표점까지의 거리 z 를 구한다.

예로서, baseline distance L 이 65[mm]이고 초점거리 f 는 16[mm]인 거리 측정 시스템에서, 산출된 disparity가 26 pixels인 경우에, 실험에 사용된 카메라 (Pulnix TMC-7N)의 1 pixel 간격이 0.0082 [mm]이므로, 실제 pixels의 간격은 0.214[mm] 이 된다. 그러므로, 거리는 유도된 거리 산출식 (7)에 의하여 다음과 같이 산출된다.

$$z = \frac{f(L-d)}{d} = \frac{16(65-0.214)}{0.214} \quad (9)$$

따라서, 구하려는 거리 $z = 4,844$ [mm]이 되며 실제 값과 근사함을 알 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 직접적인 접촉 없이 목표 지점까지의 거리를 측정(ranging)하기 위한 시스템에서, 효율적인 거리 산출 알고리즘을 제안하고, 그 시스템의 동작 방법과 거리 산출에 대한 산출 결과를 기술하고 분석하였다.

양안 카메라 구성은 가장 간단한 형태인 평행식 stereo camera 구조로 하였다. 양안 영상에 대한 고속의 양안시차 추출을 위하여, 잡음 제거 preprocessing을 행한 후, 측정을 원하는 목표점을 포함하는 좌우 영상에 대하여 수직 edge영상을 구하였다.

이 수직 edge 영상에 대하여 좌우 방향의 이격 거리의 matching 비교를 빠르게 하기 위하여, 수직 방향으로 edge 성분의 크기를 projection하여, 좌우 축 방향으로 edge 분포에 대한 profile을 구하였다.

중심 목표점에 대하여 중요도 가중치를 부여하기 위하여 Gaussian 밀도 분포함수의 곱 연산을 적용하였고, 가중치 적용 profile을 correlation하여 최종적으로 disparity를 구하였고, 이 값을 이용하여 거리를 산출하였다.

위와 같은 새로운 제안 방식에 대하여 구현된 실험 결과를 분석해 본 결과, 정확한 disparity의 산출이 이루어짐을 알 수 있으며, matching에 이용되는 데이터가 기존 방식에 비하여 절반 이하로 감소되므로, 총 계

산 속도는 기존의 stereo matching을 위한 searching 방법에 비하여 2배 이상 빠른 것으로 분석되었다.

추후, 거리 오차를 정밀 분석하여, 이를 줄이는 것이 차후 과제이다.

참고 문헌

- [1] P. J. Besl, "Range Imaging Sensor", Research publication GMR-6090, General Motors Research Laboratories, pp.1-63, March 1987
- [2] Denis Poussart and Denis Laurendeau, "3-D Sensing for industrial computer vision", Advanced in machine vision, Springer series, pp.122-155, 1988
- [3] Krotkov, "Active Computer vision by cooperative focus and stereo", Springer-Verlag, 1989
- [4] David Coombs and Christopher Brown, "Real-time binocular smooth pursuit", Int. of Jour. of Computer Vision, No.2 pp.147-164, 1993
- [5] Philip W. Smith and N. Nandhakumar, "An improved power cepstrum based stereo correspondence method for textured scenes", IEEE trans. on pattern analysis and machine intelligence, vol.18, no.3, pp.338-347, March 1996
- [6] Soon Y. Park et. al. "Linear relation for vergence control of parallel stereo camera", Electronics letters, vol. 34, no.3, pp.225-256, February 1998



김재한(Jae-Han Kim)

국방과학연구소(ADD) : 연구원
 한국전자통신연구원(ETRI): 연구원
 (DTV 시스템 연구팀장)
 전기통신기술사

호남대학교 전자공학과 교수(現在)

※관심 분야: 디지털 영상 처리, 디지털 방송 시스템, 3DTV, 3차원 영상 처리 및 응용, Human-Machine Interface (HMI)