

論文94-31B-2-8

POLAR EXPONENTIAL GRID와 장방형격자 영상시스템의 영상분해도 및 영상처리능력 비교

(A Comparison of System Performances Between Rectangular and Polar Exponential Grid Imaging System)

林 在 權 *

(Jae Kwon Eem)

要 約

지금까지 대부분 사용되고 있는 일정한 장방형격자를 가진 영상시스템은 영상을 이용한 로봇재어분야 등에서 필수적인 영상의 처리 및 분석에 필요한 영상 확대, 영상회전, 3-D 복귀문제 등을 다룰 때 상당히 많은 계산량이 요구된다. 본 논문에서는 영상센서의 형태를 인간의 망막에 분포되어 있는 시신경의 밀도에 따라 불균일하게 분포시킨 Polar Exponential Grid(PEG) 영상시스템의 영상해상도 및 영상처리능력을 기존의 장방형격자 영상시스템과 비교 분석하였다. 먼저 PEG센서 셀의 기하학적 구조를 분석하여, 컴퓨터로 PEG센서 셀 형태의 영상을 모의시행하였다. 이를 바탕으로 PEG와 장방형격자 영상시스템의 영상해상도를 비교하고, PEG 시스템에서 영상확대 및 영상회전 등의 영상처리를 수행하여 각 시스템에서 필요한 계산량을 비교하였다. 아울러 영상해석면으로 PEG 영상에서의 푸리에변환에 대해서도 기술 및 실험하였다. 또, 영상분해도면에서는 스테레오 영상시스템에서 3차원 복귀시 나타나는 영상좌표의 양자화 오차로 인한 거리 및 각 측정오차를 PEG센서 시스템에서 계산하여, 이를 장방형격자 시스템의 오차와 비교 검토하였다. 결과적으로, PEG 영상시스템이 영상확대, 영상회전에서 필요한 계산량이 장방형격자 시스템보다 현저히 적을 뿐만 아니라, 영상인식 등에서 요구되는 푸리에영역에서의 크기 및 회전 불변특성을 갖고 있어, PEG 영상시스템이 이 문제들에서는 보다 적합한 영상표시 방법임을 알 수 있었다. 또한 거리 및 각 측정오차도 장방형격자 시스템 보다 실제 사용범위에서 우월함을 보였다.

Abstract

The conventional machine vision system which has uniform rectangular grid requires tremendous amount of computation for processing and analysing an image especially in 2-D image transformations such as scaling, rotation and 3-D recovery problem typical in robot application environment. In this study, the imaging system with nonuniformly distributed image sensors simulating human visual system, referred to as Polar Exponential Grid(PEG), is compared with the existing conventional uniform rectangular grid system in terms of image resolution and computational complexity. By mimicking the geometric structure of the PEG sensor cell, we obtained PEG-like images using computer simulation. With the images obtained from the simulation, image resolution of the two systems are compared and some basic image processing tasks such as image scaling and rotation are implemented based on the PEG sensor system to examine its performance. Furthermore Fourier transform of PEG image is described and implemented in image analysis point of view. Also, the range and heading-angle measurement errors usually encountered in 3-D coordinates recovery with stereo camera system are calculated based on the PEG sensor system and compared with those obtained from the uniform rectangular grid system. In fact, the PEG imaging system not only reduces the computational requirements but also has scale and rotational invariance property in Fourier spectrum. Hence the PEG system has more suitable image coordinate system for image scaling, rotation, and image recognition problem. The range and heading-angle measurement errors with PEG system are less than those of uniform rectangular grid system in practical measurement range.

*正會員, 金鳥工科大学校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kumoh Nat'l Univ. Tech.)

※ 이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비지원에

의해 수행되었음. (과제번호: 923-0800-005-1)

接受日字: 1993年 2月 26日

I. 서론

영상신호는 음성신호 및 다른 전기적 신호에 비하여 그 양이 많기 때문에 영상을 이용한 로봇제어분야 등에서 기본적인 영상 확대, 영상회전, 3-D 복귀문제에서 상당히 많은 계산량이 요구되어 실시간으로 영상데이터를 처리 및 분석하는데 어려움이 많다. 이 영상데이터를 얻는데 필요한 영상센서의 구조는 지금까지 대부분 일정한 장방형의 격자를 사용하여 왔다. 그러나 Carl F.R. Weiman과 G. Chaikin¹이 처음 제안한 Polar Exponential Grid(PEG) 영상시스템의 센서 구조는 M. Schultze²에 의해 조사된 인간의 망막에 분포되어 있는 시신경(photo-receptor)의 배열과 그 구조가 흡사하다. 영상센서들이 photo-receptor의 밀도에 따라 불균일하게 분포시킨 형태로 하면 영상데이터를 처리 및 분석하는데 그 속도 및 능률면에서 일정한 장방형격자 시스템에 비해 어떤 특정한 일에 대해서는 빠를것으로 판단된다. 이에 대해서는 아직 연구가 진행중에 있는 상태이며, 그 연구결과가 발표된 문헌^{3, 4}이 많지 않다.

지금, PEG 영상시스템은 우주산업분야에서 우주왕복선이 우주정거장에 도킹하기 위한 목표추적⁵ 등의 아주 특정한 일에 대해서만 실험적으로 사용되고 있으나, 만일 다른 특정한 일에 대해서도 영상처리 및 해석에 필요한 시간을 단축할 수 있다면, 이는 지금 많이 쓰고 있는 일정한 장방형 센서는 PEG 센서로 대체 사용될 것이며, 이의 파급효과는 영상처리, 영상해석등이 필수적인 컴퓨터비전을 이용한 로봇틱스 전자산업분야 등에서 두드러지게 나타날 것이다.

본 논문에서는 이 PEG 영상시스템에 대한 영상해상도, 영상처리능력 및 영상분해도를 기존의 일정한 장방형격자 영상시스템과 비교 분석하고자 한다. 이 논문의 진행순서는, 먼저 II장에서 PEG 센서 셀의 기하학적 구조를 분석 이해하고, 이를 바탕으로 컴퓨터를 이용한 PEG 센서 셀 형태의 영상생성에 대하여 기술하였고, III장에서는 장방형격자 시스템에 대한 PEG 영상시스템의 영상해상도를 각 시스템의 한 픽셀 면적을 기준으로 하여 비교하였다. IV장에서는 PEG 시스템에서 영상확대 및 영상회전에 대한 영상처리를 수행하여 이에 필요한 연산과 연산의 수를 기존의 장방형격자 시스템과 각각 비교하였다. V장에서 영상해석면에서 PEG 시스템에서의 푸리에변환에 대해 기술하고 이를 수행하였으며, VI장에서는 각 시스템에서의 영상분해능 비교로서, 스테레오 비전에서 3-D복귀 과정에서 나타나는 영상좌표의 양자화 오차로 인한 disparity 오차에 의한 거리 및 각 측정오차

에 대해 계산 분석하고, VII장에서 결론을 맺었다.

이 연구에서 기대되는 효과는, 먼저 영상해상도면에서의 비교는 PEG시스템 설계시 요구되는 영상해상도에 따른 링의 갯수와 하나의 링에 포함되어야 할 센서 셀의 갯수 및 셀배열의 최대반경 등 설계시 고려되어야 할 설계 파라미터를 기존 장방형격자 시스템의 단위 셀면적을 기준으로 하여 정할 수 있고, 영상처리능력 비교에서는 기본적으로 필요한 연산의 종류와 연산의 수를 정량적으로 분석하여 실시간 처리가 요구되는 시스템의 계산량을 비교 추정할 수 있다. 영상해석면에서는 PEG에서의 푸리에변환을 실제 구현함으로써, 크기 및 회전 불변의 특성을 나타내나 구현이 어려운 Mellin변환을 행하지 않고도 이를 이용한 영상인지 시스템에서의 응용이 기대된다. 또, 실제계 측정에 PEG 시스템이 응용될 경우, 거리 및 각 측정오차를 계산함으로써 인하여 실제 사용가능한 측정범위를 장방형격자 시스템과 비교하여 정할 수 있게 된다.

II. PEG센서의 기하학적 구조 및 PEG형태의 영상생성

영상신호를 컴퓨터로 처리하기 위해서는 영상좌표와 이에 해당하는 밝기신호를 디지털 형태로 변환하여야 한다. 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 영상좌표를 디지털화하는 방법은 그림 1(a)에 보인 것과 같은 $N(\text{열}) \times M(\text{행})$ 개의 일정한 장방형 픽셀로 구성된 격자를 사용하여 샘플링하는 것이다. 그림 1(b)에 이 장방형 격자를 사용하여 생성된 128×128 크기의 영상 "Lena"를 나타내었다.

그림 2(a)에 64×32 크기의 Carl Weiman 등이 제안한 PEG를 나타내었다. PEG는 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 픽셀들이 원점을 중심으로 동심원적으로 배열되어 있으며, 이들의 방사성 방향의 간격이 원점에 대해 멀어질수록 지수적으로 커지게 되어 있다. 이 PEG 구조에서 원점을 중심으로하는 각 링안에 들어 있는 픽셀의 갯수는 모두 같으므로, PEG의 영상해상도는 링의 갯수($M=32$)와 하나의 링안에 포함되어 있는 센서의 갯수($N=64$)에 의해 결정되어진다. 한 링안에 포함된 센서 또는 픽셀의 갯수 N 을 grain이라 하고, granularity g 를 다음과 같이 정의한다.

$$g = \frac{2\pi}{N} \quad (1)$$

따라서, g 가 작으면 주어진 하나의 링안에 포함된 픽셀의 수가 많아 즉, 왜기모양의 픽셀의 크기가 작아서 영상해상도가 좋음을 의미한다. PEG에서 특이한 점은 바로 인접한 링들에 들어 있는 픽셀의 방사성 방향 길이의 비가 e 로서 모두 같다. 그림 2(b)는 이 PEG에 생성된 영상을 저장 및 처리할 때 사용되는 PEG 표시영역을 나타낸 것이다. 실제 모든 영상 처리 및 분석은 이 PEG 표시영역에서 이루어진다.

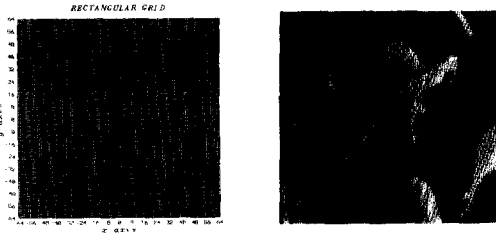


그림 1. (a) 128-by-128 크기의 장방형격자 (b) 128-by-128 크기의 장방형 "Lena" 영상
 Fig. 1. (a) A rectangular grid size of 128-by-128. (b) "Lena" image on the rectangular grid size of 128-by-128.

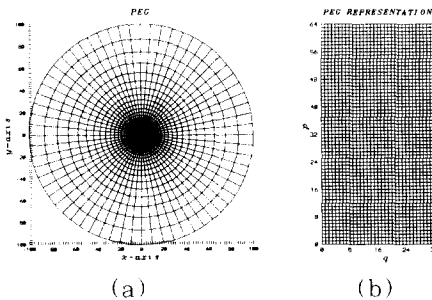


그림 2. (a) 크기 64-by-32의 polar exponential grid(PEG) (b) 크기 64-by-32의 PEG 표시영역(q 는 링번호이며, p 는 각번호이다.)
 Fig. 2. (a) A polar exponential grid(PEG) size of 64-by-32. (b) The size of 64-by-32 PEG representation(The q and p are ring and angle indices, respectively).

PEG에서 영상의 중심을 원점으로 한 (x, y) 연속좌표로부터 PEG 표시영역의 (η, θ) 연속좌표로의 변환식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \eta = \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2), & x^2 + y^2 \neq 0 \quad -\infty < \eta < \infty \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) & 0 \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

즉, η 는 원점을 중심으로 한 반경에 자연 로그를 취한 것이고, θ 는 $+x$ 축으로 부터 반시계 $+x$ 방향의 각도를 나타낸다. 실제로 영상신호를 디지털로 분석 및 처리할 경우, 연속인 영상의 좌표를 디지털화(샘플링)하게 되는데, 이 때 장방형격자 및 PEG 영상은 모두 유한 갯수의 픽셀을 가지게 되고, 이 샘플링된 영상좌표 즉, 이산좌표는 취급하기 편하도록 다시 순서를 정하여 사용하게 된다. 이 논문에서 사용된 이산좌표로의 변환, 즉 장방형격자 시스템에서는 (x, y) 연속좌표계가 (i, j) 이산좌표계로, PEG에서는 (η, θ) 연속좌표계가 (p, q) 이산좌표계로 변환될 때 사용되는 변환식은 다음과 같다. 먼저 장방형 격자에서의 이산좌표 i, j 는

$$\begin{cases} i = \frac{N}{2} - \left\lfloor \frac{y}{pxl} \right\rfloor \\ j = \frac{N}{2} + \left\lfloor \frac{x}{pxl} \right\rfloor, \quad i, j = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (3)$$

으로 정하였다. 여기서 사용된 기호 $\lfloor \cdot \rfloor$ 은 가장 가까운 정수를 나타내는 연산자이다. 위 수식에서 영상의 크기는 계산의 간편성을 위하여 $N(\text{열}) \times N(\text{행})$ 개의 픽셀로 구성된 정사각형 모양의 영상을 사용하였다. 또, pxl 은 장방형 격자에서의 한 픽셀의 가로 또는 세로의 길이를 나타내며, 이는 사용된 카메라의 초점거리 f 및 최대시각(field of view) FOV 에 의해 다음의 수식으로 정해진다.

$$pxl = \left(\frac{2f}{N}\right) \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad (4)$$

한편 PEG 영상시스템에서, PEG가 M 개의 링을 가지며 각 링은 N 개의 픽셀로 구성되어 있을 때, PEG에서의 이산좌표 p, q 는

$$\begin{cases} p = \left\lfloor \frac{1}{g} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \right\rfloor, & p = 0, 1, \dots, N-1 \\ q = \left\lfloor \frac{1}{g} \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r_{\min}}\right) \right\rfloor, & q = 0, 1, \dots, M-1 \end{cases} \quad (5)$$

로 하였다. 여기서 r_{\min} 은 PEG 설계시 특징지어지는 파라미터인 PEG 센서의 최대반경 r_{\max} 와 PEG영상에서의 영상해상도를 나타내는 N 과 M 에 의해 정해진다. 최대반경 r_{\max} 은 영상획득시 사용된 카메라의 f 와 FOV 에 의해

$$r_{\max} = f \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad (6)$$

로 주어지고, PEG 시스템에서 사용된 카메라가 장방형격자 시스템에서 사용한 것과 같은 초점거리 f 와 FOV를 갖는 경우, 이 최대반경 r_{\max} 는 식 (4)에 의하여 장방형 격자에서의 하나의 열 또는 행이 가지는 픽셀 갯수 N 과 한 픽셀의 길이 pxl 로 나타내면 다음과 같다.

$$r_{\max} = \left(\frac{N}{2}\right)pxl \quad (7)$$

이제, r_{\min} 은 PEG가 M 개의 링을 가지며 각 인접한 링들의 방사성 방향의 길이의 비가 e^{θ} 로 되기 위해서는

$$r_{\min} = \frac{r_{\max}}{e^{\theta(M-1)}} \\ = \frac{f \tan\left(\frac{FOV}{2}\right)}{e^{\frac{2\pi}{N}(M-1)}} \quad (8)$$

이 되어야 한다. 따라서, PEG에서 표현될 수 있는 가장 작은 반경은 이 r_{\min} 이 되고, PEG 설계시 고려되어야 할 중요한 파라미터이다. 이 r_{\min} 보다 작은 영역은 인간의 시각구조에서 fovea에 해당하고, 이 영역에서의 PEG구조에 대해서는 PEG의 가장 안쪽 링안의 픽셀 크기로 일정하게 채우는 방법³이 제시된 바 있다. 그러나 실제로 N 과 M 이 같으면서 512이하인 경우로 PEG를 구현할 때, 이 r_{\min} 은 식 (8)에 의하여 r_{\max} 의 약 $1/e^{\theta}$ ($=1/535.5$)이므로, 이는 장방형 격자에서의 반 픽셀이하의 크기에 해당하여 장방형격자 영상에서 PEG로 변환 생성된 영상에서는 fovea에 해당하는 이 영역이 그림 3에서와 같이 나타나지 않게 된다.

식 (2)와 (5)를 이용하여 p , q 를 η , θ 로 나타내면,

$$\begin{cases} p = \left\lfloor \frac{1}{g} \theta \right\rfloor, & p = 0, 1, \dots, N-1 \\ q = \left\lfloor \frac{1}{g} (\eta - \ln r_{\min}) \right\rfloor, & q = 0, 1, \dots, M-1 \end{cases} \quad (9)$$

이 된다. 즉, PEG에서 이산좌표 (p , q)는 $+x$ 축 방향에서 시작하여 반시계 방향으로 p 번째 켈기에서 원점을 중심으로 바깥쪽으로 q 번째 링에 위치한 픽셀의 좌표를 나타낸다. 결국, 그림 2(b)에 나타난 PEG 표시영역은 식 (5) 또는 (9)에서 얻어진 이 p 와 q 를 각각 열-index, 행-index로 나타낸 영상의 새로운 표시방법이라 생각할 수 있다.

PEG 센서를 이용한 비디오 카메라가 현재 존재하지 않으므로, PEG 영상을 얻기 위하여 그림 1(b)의 장방형격자 영상으로부터 위에서 언급한 수식들을 사

용하여 PEG영상을 생성할 수 있는 컴퓨터 모의실험을 행하여 그림 3(a)와 같은 영상을 얻었다. 그림 3(b)는 식 (9)를 이용하여 그림 3(a)를 다시 PEG 표시영역으로 변환한 결과이다.

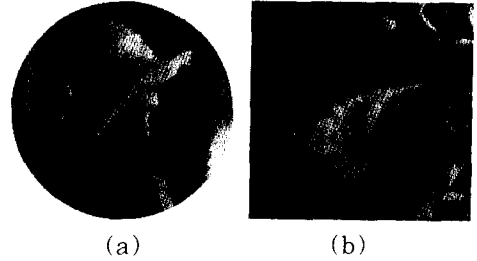


그림 3. (a) 128-by-128 크기의 PEG 영상 (b) 영상 (a)의 PEG 표시영역으로의 변환
Fig. 3. (a) A PEG image size of 128-by-128. (b) PEG representation of the image (a).

III. 장방형격자 시스템에 대한 PEG 영상시스템의 영상해상도 비교

PEG와 장방형 영상시스템의 영상해상도를 비교하기 위하여, 두 시스템이 같은 전체 영상면적을 가진다고 가정하자. 장방형격자 시스템에서 각 픽셀의 면적은 영상 전체영역에 걸쳐 일정한 반면, PEG에서는 각 링의 index에 따라 그 면적이 달라지게 된다. PEG에서 q 번째 링의 반경을 r_q 라 하면, $r_0=r_{\min}$, $r_{M-1}=r_{\max}$ 이 되고, r_q 는 식 (5)와 (8)로부터

$$r_q = r_{\min} e^{q\theta} \\ = r_{\max} e^{\theta(q-M+1)}, \quad q = 0, 1, \dots, M-1 \quad (10)$$

이 된다. 실제로 r_{\min} 은 r_{\max} 가 미리 정해진 경우, 링의 갯수 M 에 따라 달라지게 된다. 따라서, 식 (10)에 의해 q 번째 링에 포함되어 있는 켈기모양의 한 픽셀 면적 A_q 를 구하면

$$A_q = \frac{\pi}{N} e^{-\theta} (r_{q+1}^2 - r_q^2) \\ = \frac{g}{2} r_q^2 e^{-\theta} (e^{2\theta} - 1) \quad (11)$$

이 된다. 두 시스템이 같은 전체영상면적을 가진다고 가정하였으므로 즉, PEG에서 나타나는 원형의 영상에 대해서 N^2 개의 픽셀을 가지는 장방형격자 시스템의 한 픽셀면적 A_{row} 는

$$A_{rect} = \frac{\pi r_{max}^2}{N^2} \quad (12)$$

이다. 수식 (10), (11) 및 (12)를 이용하여, 이 A_{rect} 에 대한 A_q 의 비를 계산하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{A_q}{A_{rect}} = N e^{q(2(q-M)+1)} (e^{2q} - 1) \quad (13)$$

여기서 $M=N$ 일 때, q 가 0, $M/2$, $M-1$ 각각에 대해 장방형 시스템에 대한 PEG의 영상해상도 (A_q/A_{rect})를 식 (13)을 이용하여 구하면,

$$\begin{aligned} \frac{A_0}{A_{rect}} &= N e^{q(1-2M)} (e^{2q} - 1) \\ &= 4\pi e^{-4\pi} \\ \frac{A_{M/2}}{A_{rect}} &= N e^{q(1-2M)} (e^{2q} - 1) \\ &= 4\pi e^{-2\pi} \quad \text{for } M=N \\ \frac{A_{M-1}}{A_{rect}} &= N e^q (e^{2q} - 1) \\ &= 4\pi \end{aligned} \quad (14)$$

이 된다. 위 근사식 계산은 다음의 지수함수 성질을 이용하였다.

$$e^x = 1+x \quad \text{for } |x| \ll 1$$

여기서 특이한 점은 식 (14)의 각 비율들이 모두 N 에 관계없이 항상 일정하다는 것이다.

예를 들면, PEG의 가장 안쪽과 가장 바깥쪽 링의 한 픽셀 면적은 각각 N 에 관계없이 항상 장방형격자 시스템에서의 한 픽셀 면적의 약 $4\pi e^{4\pi} (=4.38 \times 10^5)$ 과 약 $4\pi (=12.566)$ 배가 된다.

또, PEG내에서 A_0 에 대한 A_{M-1} 의 비를 식 (11)를 이용하여 구해 보면,

$$\begin{aligned} \frac{A_{M-1}}{A_0} &= e^{2x(M-1)} \\ &= e^{4\pi} \quad \text{for } M=N \end{aligned} \quad (15)$$

이 되어, 이 또한 N 에 관계없이 일정하다는 것을 알 수 있다. 이제 A_{rect} 와 A_q 의 면적이 같아지는 즉, 식 (13)의 값이 1이 되는 q^* 를 구하면,

$$\begin{aligned} q^* &= \left[M - \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2\pi} \right) [\ln N + \ln(e^{2q} - 1)] \right] \\ &= \left[N \left(1 - \frac{1}{4\pi} \ln 4\pi \right) \right] \quad \text{for } M=N \\ &= [0.8N] \end{aligned} \quad (16)$$

이 된다. 즉, $M=N$ 일 때, 항상 $[0.8N]$ 번째 링에서 PEG에서의 한 픽셀 면적은 장방형격자 시스템에서

의 한 픽셀의 면적과 같다. 이 $[0.8N]$ 번째 링이 가지는 반경 r_q 는

$$\begin{aligned} r_q &= r_{max} e^{q \left(\frac{1-N}{5} \right)} \\ &= 0.285 r_{max} \end{aligned} \quad (17)$$

이 된다. 다시 말하면, PEG센서의 최대반경 r_{max} 의 0.285배 보다 작은 반경안에 전체 링 개수의 80%가 포함되어 있고, 이 안에 들어 있는 각 픽셀의 면적은 모두 장방형격자 시스템의 픽셀 면적 보다 적어서, 이 부분에서는 PEG의 영상해상도가 장방형 시스템 보다 좋다는 것을 의미한다. 그러나 링 번호가 q^* 보다 크게 되면 센서 셀 해상도는 반대로 장방형 시스템 보다 나빠지게 된다. 표 1은 영상크기에 따른 A_q 를 장방형 시스템에서의 한 픽셀 면적 A_{rect} 를 기준으로 하여 그 비를 계산하여 나타낸 것이다.

표 1. 장방형 시스템을 기준으로 한 영상크기에 따른 PEG의 영상해상도 (A_q/A_{rect})

Table 1. Image resolution of PEG system (A_q/A_{rect}) compared to rectangular grid system for various image sizes.

영상크기 (N x N)	16x16	32x32	64x64	128x128	256x256	512x512	1024x1024
1	0.000099	0.000065	0.000053	0.000048	0.000046	0.000045	0.000044
16	12.892	0.023618	0.001016	0.000211	0.000096	0.000065	0.000053
32	-	12.647	0.023505	0.001015	0.000211	0.000096	0.000065
64	-	-	12.586	0.023476	0.001014	0.000211	0.000096
128	-	-	-	12.571	0.023469	0.001014	0.000211
256	-	-	-	-	12.567	0.023468	0.001014
512	-	-	-	-	-	12.567	0.023467
1024	-	-	-	-	-	-	12.566
q^*	12	25	50	101	203	408	817

IV. PEG 표시영역에서의 영상확대 및 회전

장방형격자 및 PEG 영상시스템에서 기하학적 영상변환인 영상확대 및 영상회전에 대한 영상처리에 대해 고려해 보고, 이 때 필요한 연산과 이의 수를 각각 구하여 비교하고자 한다. 이 절에서 영상의 크기는 모두 $N \times N$ 일 때를 기준으로 하였고, 곱연산의 수를 $O_M(N)$, 합연산의 수를 $O_A(N)$ 이라 표기하였다.

1. 영상확대

기존의 장방형격자를 사용한 x-y 좌표계에서 임의의

영상을 원점을 중심으로 S_0 배 만큼 확대할 경우, 영상 좌표의 변환식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 & 0 \\ 0 & S_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (18)$$

따라서, 영상의 크기가 $N \times N$ 일 때, 영상확대에 필요한 연산은 곱연산 뿐이고, 이 때 곱연산의 수는 각 x 와 y 좌표에서 N^2 개가 되므로 총 $2N^2$ 이 된다. 즉,

$$O_M(N) = 2N^2, \quad O_A(N) = 0 \quad (19)$$

이다.

반면에 PEG에서 임의의 영상을 원점을 중심으로 S_0 배 만큼 확대할 경우에 PEG 표시영역에서 즉, $\eta\theta$ 좌표계에서 어떻게 표현되는지를 살펴 보자. PEG 표시영역에서의 $\eta\theta$ 좌표계와 $x-y$ 좌표계의 관계식은 식 (2)로 표시되는 log-polar 좌표계에서 $x-y$ 좌표계의 좌표 변환이므로 아래 식과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^\eta \cos \theta \\ e^\eta \sin \theta \end{bmatrix} \quad (20)$$

식 (20)을 식 (18)에 대입하면,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 e^\eta \cos \theta \\ S_0 e^\eta \sin \theta \end{bmatrix} \quad (21)$$

이 된다. 여기서,

$$\eta_0 = \ln S_0$$

이라 치환하면, 식 (21)은

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\eta-\eta_0} \cos \theta \\ e^{\eta+\eta_0} \sin \theta \end{bmatrix} \quad (22)$$

이 되고, 이를 다시 PEG의 $\eta\theta$ 좌표계로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} \eta' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

이 되어, 이는 결국 η 축 방향으로 η_0 만큼 (shift)된 것을 의미한다. 다시 말하면, PEG 표시영역의 η 축으로 η_0 (또는 q 축으로 $\begin{bmatrix} 1 \\ x \end{bmatrix} \eta_0$)만큼의 (shift)는 $x-y$ 좌표계에서의 영상을 $S_0 (=e^{\eta_0})$ 배 확대시킨 결과가 된다. 이 때, 필요한 연산은 곱하기가 필요없이 단지 한쪽 좌표의 더하기 연산만 필요하게 된다. 즉,

$$O_M(N) = 0, \quad O_A(N) = N^2 \quad (24)$$

이다.

2. 영상회전

기존의 장방형격자를 사용한 $x-y$ 좌표계에서 임의의 영상을 각도 θ 만큼 회전을 시킬 경우, 영상좌표의 변환식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (25)$$

따라서, 영상회전에 필요한 연산은 곱연산과 합연산이 모두 필요하며, 이의 각 연산수는,

$$O_M(N) = 4N^2, \quad O_A(N) = 2N^2 \quad (26)$$

이므로 총 $6N^2$ 이 된다.

반면에 PEG에서 임의의 영상을 각도 θ 만큼 회전을 시킬 경우, PEG 표시영역에서 즉, $\eta-\theta$ 좌표계에서 어떻게 표현되는지를 살펴 보자. 영상확대의 경우와 마찬가지로, 식 (20)을 식 (25)에 대입하여 삼각함수 합공식을 사용하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^\eta \cos(\theta_0 + \theta) \\ e^\eta \sin(\theta_0 + \theta) \end{bmatrix} \quad (27)$$

이를 다시 PEG의 $\eta-\theta$ 좌표계로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} \eta' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta \\ \theta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} \quad (28)$$

이 되어, 이는 결국 θ 축방향으로 θ 만큼 (shift)된 것과 같다. 다시 말하면, PEG 표시영역의 θ 축으로 θ 또는 p 축으로 $\begin{bmatrix} 1 \\ x \end{bmatrix} \theta$ 만큼 (shift)는 $x-y$ 좌표계에서의 영상을 각도 θ 만큼 회전을 시킨 결과가 된다. 이때, 필요한 연산은 역시 곱하기가 필요없이 단지 한쪽 좌표의 합연산만 필요하게 된다. 즉,

$$O_M(N) = 0, \quad O_A(N) = N^2 \quad (29)$$

이 된다.

3. 영상확대 및 회전

기존의 장방형격자를 사용한 $x-y$ 좌표계에서 임의의 영상을 S_0 배 만큼 확대하고 각도 θ 만큼 회전을 동시에 시킬 경우, 영상좌표의 변환식은 식 (18)과 (25)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 & 0 \\ 0 & S_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (30)$$

따라서, 영상확대 및 영상회전에 필요한 연산의 수는 아래와 같다.

$$O_M(N) = 6N^2, \quad O_A(N) = 2N^2 \quad (31)$$

한편 PEG인 경우, PEG 표시영역에서 임의의 영상을 \$S_0\$배 만큼 확대하고 각도 \$\theta\$만큼 회전을 동시에 시킬 경우, 이를 \$x\$-\$y\$ 좌표계에 나타내면,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\eta+\theta_0} \cos(\theta + \theta_0) \\ e^{\eta+\theta_0} \sin(\theta + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (32)$$

가 되고, 이를 다시 앞에서와 마찬가지로 식 (23)과 (28)에 의해 \$\eta\theta\$ 좌표계에서의 영상좌표 변환식을 나타내면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \eta' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta \\ \theta \end{bmatrix} \quad (33)$$

따라서, 영상확대 및 영상회전을 동시에 수행하기 위해 필요한 연산은

$$O_M(N) = 0, \quad O_A(N) = 2N^2 \quad (34)$$

으로, 곱하기가 필요없이 단지 합연산만 필요함을 알 수 있다. 장방형격자 및 PEG에서 영상확대 및 영상회전에 필요한 각 연산의 수를 정리하여 표 2에 나타내었다.

실제적인 예로서, 영상의 크기가 \$512 \times 512\$인 경우, 영상확대 및 회전에서 필요한 연산의 수는 장방형 시스템에서는 \$O_M(512) = 1,572,864\$이고, \$O_A(512) = 524,288\$이 되나, PEG인 경우에는 곱연산은 필요없이 단지 \$O_A(512) = 524,288\$만 필요하게 된다. 실제로 연속영상을 처리해야 할 경우 즉, 1초당 30 프레임의 영상을 처리할 때, 장방형 시스템에서는 약 60 MIPS(Million Instructions per Second)가 필요하게 되나, PEG인 경우에는 약 15 MIPS가 요구된다.

컴퓨터로 모의생성한 PEG센서의 영상에서 영상확대 및 영상회전을 실험하였다. 그림 4(a)는 \$128 \times 128\$ 크기의 장방형격자 영상 "Lena"를 4배 확대한 영상이고, 그림 4(b)는 같은 크기의 PEG 표시영역에서 단지 <shift> 동작만으로 4배 확대된 영상을 PEG에 나타낸 것이다. PEG에서의 영상확대는 앞에서 언급한 바와 같이 단지 <shift>동작만 필요하다. 다시 말해서 그림 2(b)의 PEG 표시영역에서 +q방향의 <shift>는 영상확대, -q방향의 <shift>는 영상축소가 된다. 장방형격자 영상에서의 영상확대는 \$x, y\$ 각 좌표에 대해 복잡한 연산 및 화소이전을 필요로 하는데 비해 아주 단순하다. 여기서, 화질면에서도 영상

의 중앙부분에서는 PEG 영상이 훨씬 정교함을 알 수 있다. 이는 PEG 영상의 중심부분에 화소센서가 밀집되어 있기 때문이다.

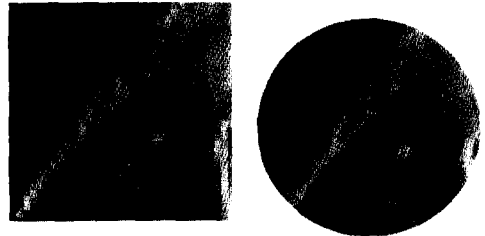


그림 4. 영상확대 (a) 장방형격자 (b) PEG
Fig. 4. Image enlargement (a) rectangular grid, (b) PEG.

표 2. 영상확대 및 영상회전에 필요한 각 연산의 수
Table 2. The required number of operations for image scaling and rotation.

	장방형 격자		P E G	
	\$O_M(N)\$	\$O_A(N)\$	\$O_M(N)\$	\$O_A(N)\$
영상 확대	\$2N^2\$	0	0	\$N^2\$
영상 회전	\$4N^2\$	\$2N^2\$	0	\$N^2\$
영상확대 및 회전	\$6N^2\$	\$2N^2\$	0	\$2N^2\$



그림 5. PEG에서의 영상 확대 및 회전
Fig. 5. Image enlargement and rotation on PEG.

영상의 중심을 축으로 하는 영상회전의 경우도 PEG 표시영역에서는 영상확대와 마찬가지로 단지 <shift>동작만 필요하다. 이 경우는 PEG 표시영역에서 p 축으로 상하 <shift>이다. 이 때, 회전은 PEG영상의 중심을 축으로 해서 이루어진다. 그림 5는 PEG 표시영역에서 단지 상하좌우 <shift>동작만으로 약 2.5배 영상확대 및 135도 영상회전을 동시에 행하여 PEG에 투사한 결과 얻은 영상이다. 결론적으로, PEG 영상에서 영상확대 및 영상회전은 장방형 영상에서보다 아주 단순한 <shift> 동작만으로 수행될 수 있으며, 그 처리속도 또한 빠르다.

V. PEG 표시영역에서의 푸리에변환

PEG 영상시스템의 영상해석능력을 장방형 시스템과 비교하기 위해 가장 기본적인 푸리에변환에 대해 고려해 보자. x - y 직교좌표계에서, 임의의 영상신호 $f(x, y)$ 의 2차원 푸리에 변환 $F(u, v)$ 는 다음식으로 정의된다.

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (35)$$

PEG 영역에서의 좌표 η , θ 는 II절 식 (2)에서,

$$\begin{cases} \eta = \ln r = \ln \sqrt{x^2 + y^2}, & x^2 + y^2 \neq 0 \\ \theta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \end{cases} \quad (36)$$

로 정의하였으므로, 이에 해당하는 직교좌표계의 x, y 는

$$\begin{cases} x = e^\eta \cos \theta \\ y = e^\eta \sin \theta \end{cases} \quad (37)$$

가 된다. PEG 표시영역에서의 영상신호를 $f_{PEG}(\eta, \theta)$ 로 표기하면, $f(x, y)$ 와 $f_{PEG}(\eta, \theta)$ 식은 아래와 같다.

$$f_{PEG}(\eta, \theta) = f(e^\eta \cos \theta, e^\eta \sin \theta) \quad (38)$$

PEG 표시영역에서의 영상신호 $f_{PEG}(\eta, \theta)$ 푸리에 변환 $F_{PEG}(\rho, \phi)$ 는,

$$\begin{aligned} F_{PEG}(\rho, \phi) &\equiv \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_{PEG}(\eta, \theta) e^{-j2\pi(\rho\eta + \phi\theta)} d\eta d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(e^\eta \cos \theta, e^\eta \sin \theta) e^{-j2\pi(\rho\eta + \phi\theta)} d\eta d\theta \end{aligned} \quad (39)$$

이 된다. 식 (39)의 $F_{PEG}(\rho, \phi)$ 를 x 와 y 의 항으로 나타내 보면,

$$\begin{aligned} F_{PEG}(\rho, \phi) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) (x^2 + y^2)^{-1} e^{-j2\pi \left[\rho \ln \sqrt{x^2 + y^2} + \phi \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \right]} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) (x^2 + y^2)^{-(1+j\rho)} e^{-j2\pi \phi \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)} dx dy \end{aligned} \quad (40)$$

위 식 (40)의 변환식은 반경 r 에 자연 \log 를 취한 극좌표 표현식에서의 푸리에변환과 다름에 유의하여야 한다.

푸리에 변환의 천이불변(translation invariant) 성질에 의하여, $F_{PEG}(\rho, \phi)$ 의 크기 $|F_{PEG}(\rho, \phi)|$ 는 η 와 θ 의 <shift>에 불변이므로, 이는 곧 영상의 확대 및 회전에서 $|F_{PEG}(\rho, \phi)|$ 가 변하지 않음을 의미한다. 그림 6(a)는 그림 6(b)의 직사각형 모양이 들어 있는 영상을 2차원 이산 푸리에 변환한 것을 나타낸 것이고, 그림 7(a)는 그림 6(a)의 영상을 2배 확대함과 동시에 원점을 중심으로 +30(deg) 회전을 시킨 영상이다. 그림 7(a)의 영상을 이산 푸리에 변환한 결과를 그림 7(b)에 보였다. 앞에서 언급한 바와 같이, 이 두 푸리에 변환이 같은 결과를 가짐을 알 수 있다. 실제, 위 식 (40)의 $F_{PEG}(\rho, \phi)$ 를 수행하기 위해서 먼저 영상을 PEG 표시영역으로 변환하고, 이를 기존의 2차원 푸리에 변환을 하였다.

따라서, PEG 영상시스템에서 푸리에 변환의 크기 $|F_{PEG}(\rho, \phi)|$ 는 장방형격자 영상시스템과는 달리 영상의 확대 및 회전에 무관하므로, 물체나 글자 인식(Object or Character Recognition)등 영상해석 분야에서도 아주 유용하게 쓰일 수 있다.

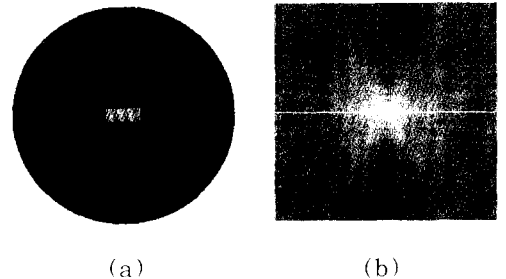


그림 6. (a) 시험영상 "직사각형"

(b) 시험영상 "직사각형"의 푸리에 변환

Fig. 6. (a) Test image, "rectangular"

(b) Fourier spectrum of the image (a).

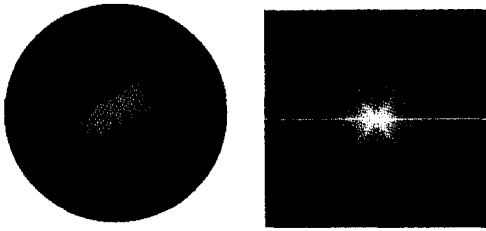


그림 7. (a) 시험영상 “직사각형”의 2배 확대 및 30(deg)회전 (b) 영상 (a)의 푸리에 변환
 Fig. 7. (a) The scaled (×2)and rotated (30 deg.) image of the test image. “rectangular”. (b) Fourier spectrum of the image (a).

Ⅶ. 거리 및 각 측정오차 분석

그림 8에 나타낸 표준 스테레오 영상시스템을 사용하여 장방형격자와 PEG영상시스템에서 각 시스템의 영상분해도에 따른 양자화오차에 의해 3차원 복귀시 나타나는 거리 및 각 측정오차에 대해 고려해 보자. 여기서 사용된 두 카메라의 광축은 서로 평행하고, baseline길이 b 만큼 떨어져 위치해 있다. 또, baseline이 은 두 광축과는 수직이고, X 축과는 평행이다. 각 영상평면은 두 렌즈의 중심으로부터 각각 초점거리 f 만큼 떨어져 있고, 스테레오 영상시스템의 중심 O 는 두 카메라 렌즈 중심 O_L 과 O_R 의 한 복판에 고정되어 있다.

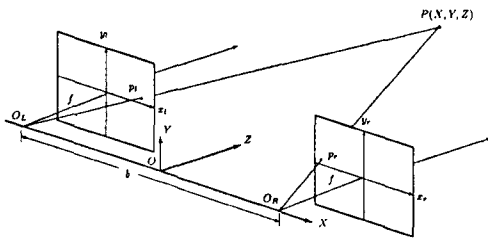


그림 8. 스테레오 영상시스템
 Fig. 8. Stereo imaging system.

좌우 영상평면의 연속좌표를 (x_i, y_i) 과 (x_r, y_r) 로 각각 표기하면 3차원 공간의 임의의 한 점 $P(X, Y, Z)$ 에 의해 좌우 영상평면에 투영되는 점 p_i 과 p_r 의 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{cases} x_i = \frac{f}{Z} \left(X + \frac{b}{2} \right) \\ y_i = \frac{f}{Z} Y \end{cases}, \quad \begin{cases} x_r = \frac{f}{Z} \left(X - \frac{b}{2} \right) \\ y_r = \frac{f}{Z} Y \end{cases} \quad (41)$$

여기서 f 는 초점거리를 나타낸다. 좌우 영상평면에서의 x 좌표의 차, $x_i - x_r$ 를 d_i 일컫는다. 이 때, 식 (41)로부터, 3차원 좌표 (X, Y, Z) 는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\begin{cases} X = \frac{b(x_i + x_r)}{2(x_i - x_r)} \\ Y = \frac{b(y_i + y_r)}{2(x_i - x_r)} \\ Z = \frac{bf}{(x_i - x_r)} \end{cases} \quad (42)$$

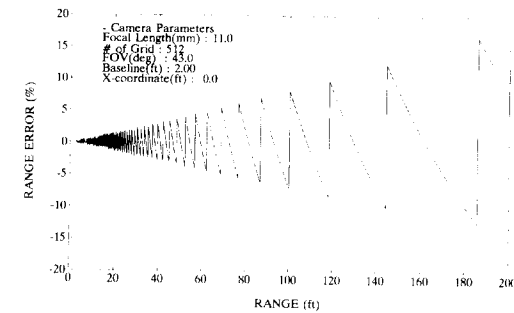
윗 식에서, X, Y, Z 는 모두 disparity에 반비례하고, 또 disparity는 baseline길이 b 에 직접 비례함을 알 수 있다. 그리고 식 (41)로부터 임의의 한점은 같은 y 좌표 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이 두점을 대응점(conjugate pair)이라 부르고, 이에 해당하는 y 값을 갖는 선을 epipolar line이라 한다. 즉, 임의의 한점이 좌우 두 영상평면에 나타날 경우 반드시 이 epipolar line위에 놓이게 된다. 물론, 스테레오 영상시스템의 정렬이 잘 안 되어 있을 경우는 이 epipolar line에서 벗어나게 된다. 또, 영상시스템의 픽셀의 크기가 주어졌을 때, 스테레오 영상시스템의 X, Y, Z 의 측정은 baseline길이가 길어질수록 정확해짐을 알 수 있다. 그러나 baseline의 길이가 길어질수록 두 영상은 많이 달라지게 되어 대응점을 찾기가 어렵게 된다.

그림 8에 나타낸 표준 스테레오 영상시스템과 각 시스템의 이산좌표 즉, 장방형 시스템에서는 (i, j) 좌표 (식 (3)), PEG에서는 (p, q) 좌표(식 (5) 또는 (9))를 사용하여 장방형격자와 PEG 영상시스템에서 3차원 복귀과정에서 나타나는 거리측정오차를 그림 9(a), (b)에 장방형 및 PEG 영상시스템 각각에 대해 보인다. 여기서 사용된 카메라 파라미터들은 $f=11$ (mm), $N=512$, $FOV=43$ (deg), $b=2(f)$ 이고, $X=0(f)$ 에 대해 계산된 것이다.

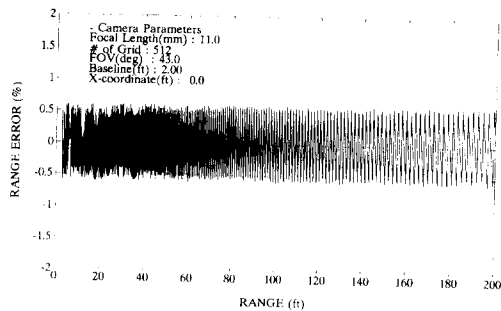
그림 9에서 주시해야 할 점은 장방형 영상시스템의 경우는 측정하고자 하는 거리가 증가함에 따라 그 퍼센트오차가 기하급수적으로 증가하는 반면, PEG센서의 경우는 그 퍼센트오차가 측정거리에 관계없이 일정한 것을 알 수 있다. 측정거리가 100(f)일 경우, 장방형격자 영상시스템의 거리측정오차는 약 7-8(%)이나, PEG영상시스템은 약 0.6(%)로서 10배 이상으로 거리측정오차가 줄어들음을 알 수 있다. 또 다른

점은 장방형의 경우는 baseline(그림 8에서 b)이 짧아질수록 그에 비례하여 거리측정오차가 증가하나, PEG 센서의 경우는 baseline의 길이에 관계없이 일정하다. 따라서, 특히 항공사진 등과 같이 측정하고자 하는 거리가 비교적 멀 경우에는 PEG 센서가 장방형 센서에 비하여 월등하게 그 측정오차가 적음을 알 수 있다.

그림 10(a), (b)에 또하나의 센서분해능으로 표현되는 각 측정오차를 $Z=50(f)$ 에서 장방형격자 및 PEG에 대하여 각각 나타내었다. 여기서, 장방형격자의 경우는 각 절대측정오차가 측정하고자 하는 각도에 대해 변화가 없이 약 0.04(deg)로서 일정한 반면, PEG 영역에서의 각 측정오차는 장방형에서와 같은 영상시스템 구조를 사용하였을 경우, 측정각이 작을 경우는 장방형 시스템 보다 그 오차가 작고, 또 측정하고자 하는 각이 커질수록 그 오차가 커짐을 알 수 있다. 그러나, 그 퍼센트 오차는 각이 아주 작을 경우를 제외하고는 거리측정오차의 경우와 같이 일정하다. 또 측정하고자 하는 각이 클 경우, 그 절대오차는 장방형의 경우보다는 크나, 오차의 값이 0.1(deg) 미만으로 아주 작다.

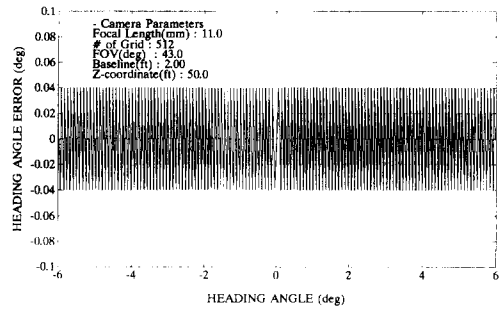


(a)

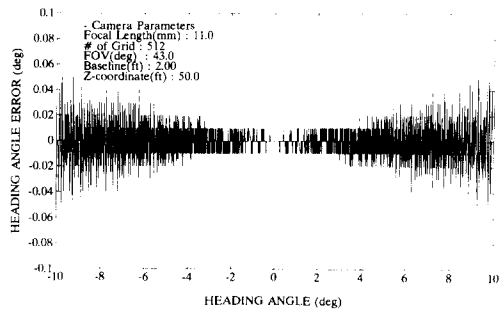


(b)

그림 9. 거리측정오차 (a) 장방형격자 (b) PEG
Fig. 9. The range measurement error. (a) rectangular grid, (b) PEG.



(a)



(b)

그림 10. 각 측정오차. (a) 장방형격자, (b) PEG
Fig. 10. The heading-angle measurement error. (a) rectangular grid, (b) PEG.

Ⅶ. 결론

PEG 영상시스템의 센서구조가 갖는 기하학적 특성과 이를 규정하는 설계 파라미터에 대해 알아 보았고, 영상해상도, 영상처리속도 및 영상분해능 측면에서 이 시스템과 기존의 장방형격자 영상시스템을 비교하였다. 영상해상도면에서는, PEG 시스템이 영상의 중앙부분에 센서가 밀집해 있는 구조적 특성 때문에, 센서의 최대반경의 약 28.5% 이내에 전체 픽셀의 약 80%가 모여 있는 영상 중앙부분에서는 장방형격자 시스템 보다 최대 20,000배 이상으로 정교하고, 바깥쪽으로 벗어날수록 이 보다 해상도가 낮아져 픽셀 한개의 면적의 비로 약 12.5배까지 낮아진다.

영상확대나 영상회전 같은 영상처리면에서는 PEG가 장방형격자 영상에서보다 훨씬 간단한 연산과 아주 적은 연산의 수로 이들이 수행될 수 있음을 보였

고, 영상확대와 영상회전을 동시에 수행할 경우, 더하기 연산만으로 장방형 시스템의 약 1/4에 해당하는 연산의 수로 수행될 수 있다.

또 PEG영상시스템은 이의 푸리에 변환의 크기가 장방형격자 영상시스템과는 달리 영상의 확대 및 회전에 무관한 성질을 가지므로, 물체나 글자인식 등 컴퓨터비전 분야의 주파수영역에서의 영상처리 및 해석에서도 영상의 회전 및 확대에 변하지 않는 물체의 특징(feature)을 추출하는 데 유용하게 이용될 수 있다.

영상분해능 관점에서, 스테레오 영상시스템을 이용한 3-D복귀의 경우에 측정거리 100(f)에서의 거리 측정오차가 장방형 시스템에서 보다 약 10배 이상으로 적음을 알 수 있다. 특이한 점은 PEG에서의 거리 측정오차의 비율이 측정거리에 관계없이 항상 일정하여 측정거리가 먼 경우에도 가까운 거리와 같은 오차의 비율로 측정 가능함을 알 수 있다. 각 측정오차도 아주 적은 측정각을 제외하고는 그 비율이 일정하고, 그 절대오차도 약 10(deg)내에서는 0.05(deg)미만으로 장방형격자 영상시스템 보다 우월하다.

參 考 文 獻

[1] Weiman, Carl F. R., and Chaikin, George, "Logarithmic Spiral Grids for Image Processing and Display." *Computer Graphics and Image Processing*, vol.11,

pp. 197-226, Nov. 1979.
 [2] M. Schultz, "Zur Anatomie und Physiologie der Retina." *Arch. Mikrosko. Anat.*, vol. 2, pp. 175-286, 1886.
 [3] Weiman, Carl F. R., "Exponential Sensor Array Geometry and Simulation." *SPIE Conference on: Digital and Optical Shape Representation and Pattern Recognition*, Orlando, April 4-8, 1988.
 [4] Weiman, Carl F.R., "Tracking System Applications of Exponential Sensor Array System." *Transition Research Corporation. Final Rep. NASA Phase I SBIR NAS 9-17728*, July 1987.
 [5] Weiman, Carl F. R., "3-D Sensing with Polar Exponential Sensor Array." *SPIE Conference on: Digital and Optical Shape Representation and Pattern Recognition*, Orlando, April 4-8, 1988.
 [6] N. C. Griswold, J. Eem and J. S. Lee, "Binocular Fusion Model Modification to Log Polar Coordinates." *Transition Research Corporation, Tech. Rep. NASA Phase II SBIR NAS 9-17990*, Jan. 1989.

著 者 紹 介



林 在 權(正會員)

1955年 7月 7日生. 1977年 2月 경북대학교 전자공학과(학사). 1979年 2月 경북대학교 대학원 전자공학과(석사). 1991年 5月 Texas A&M University 전기 및 전자공학과(Ph. D.) 1979年 3月 ~ 1986年 6月 국방과학연구소(선임연구원). 1991年 7月 ~ 현재 금오공과대학교 전자공학과(조교수). 주관심 분야는 영상압축 및 해석, 칼라영상처리 등임.