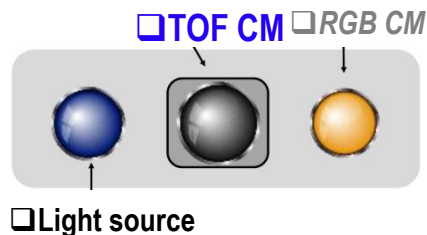


3D & TOF

TOF(Time of Flight)

□TOF Sensor 기반, 물체에 맞고
빛이 돌아오는 시간을 측정하여,
물체와의 거리 인식

□Module 구성

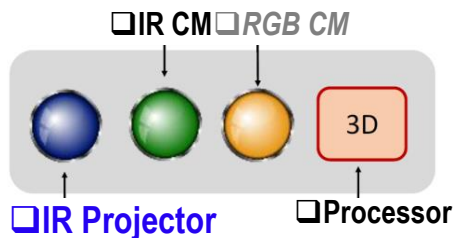


□주요 업체



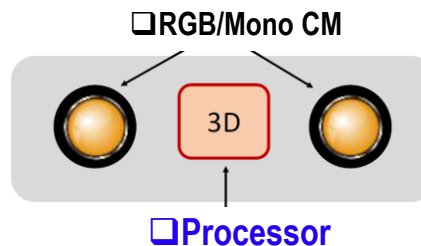
구조광(Structured Light)

□정보를 가지고 있는 패턴(구조광)을
□ 주사 후, 카메라에 찍히는 이미지의
□ 왜곡을 분석하여 Depth를 인식



Stereo(Stereoscopic)

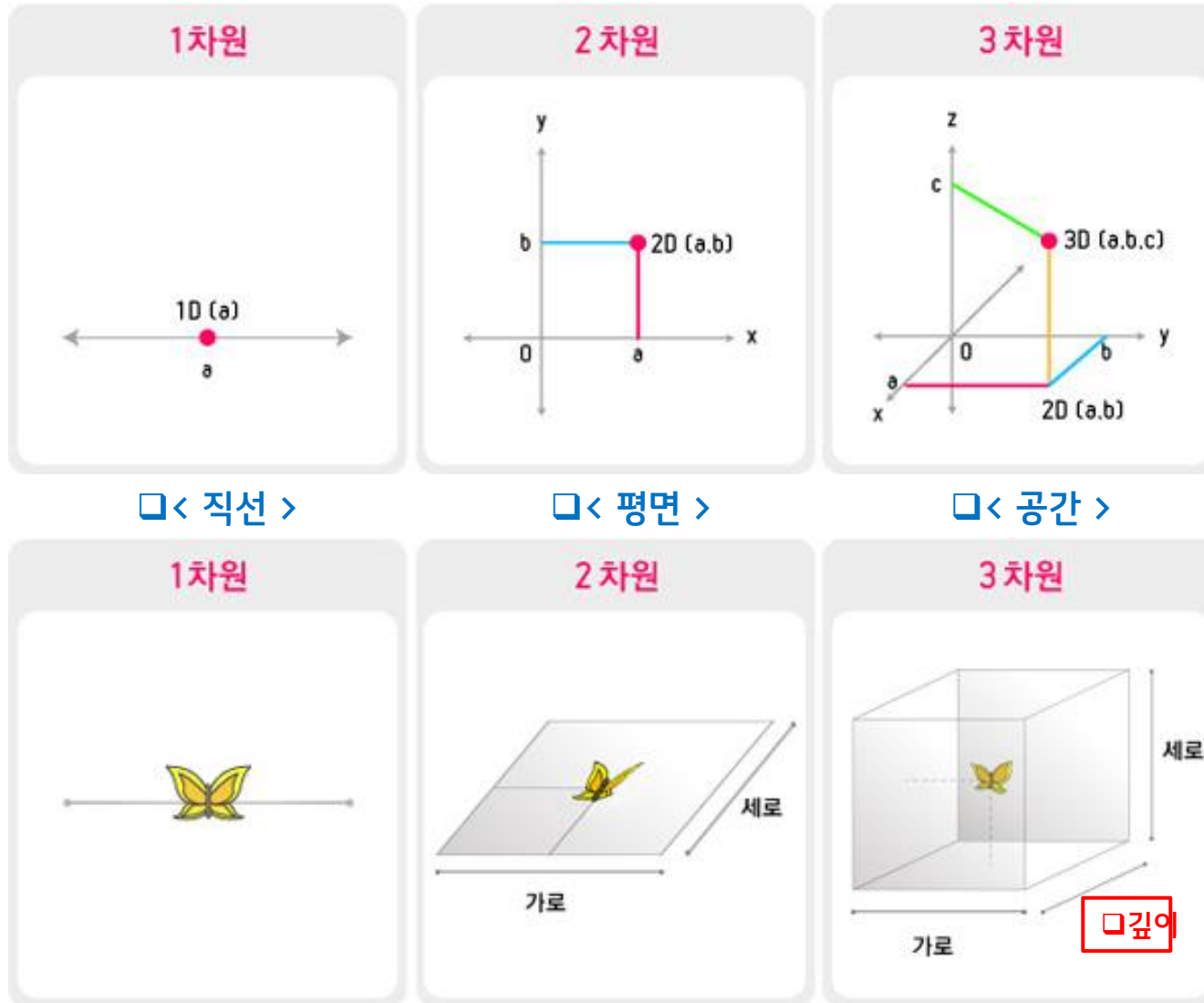
□카메라 모듈 2개를 써서, 사람의
□시각차와 같은 삼각법을 응용하여
□거리를 인식



1. 3차원 영상 처리 기술 개념

대외비 2급

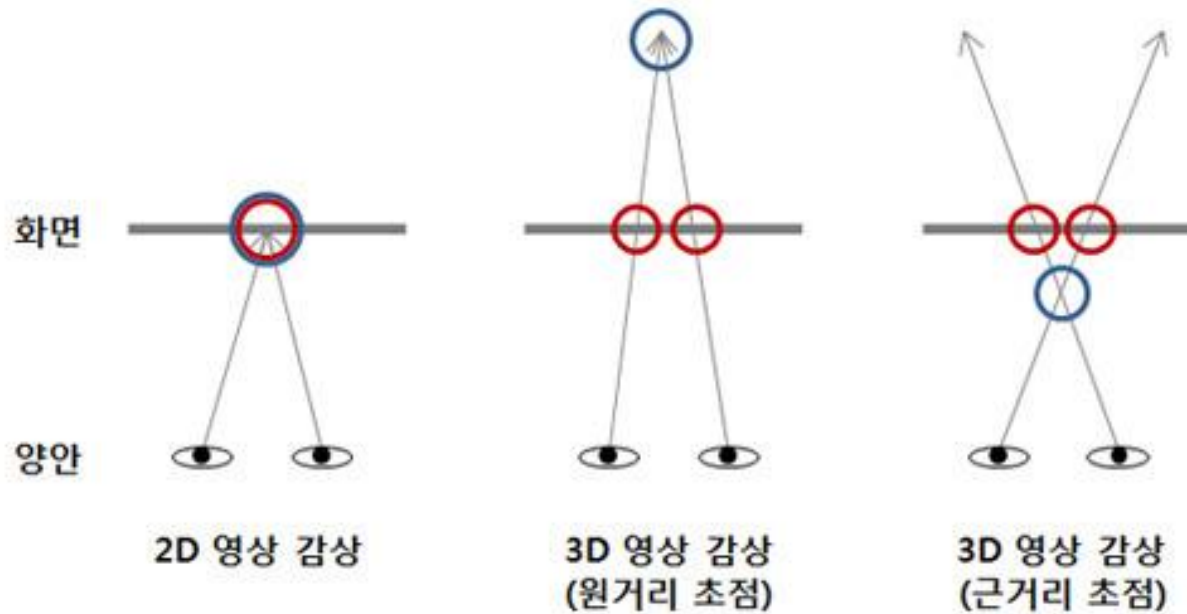
'3차원' 이란?



1. 3차원 영상 처리 기술 개념

대외비 2급

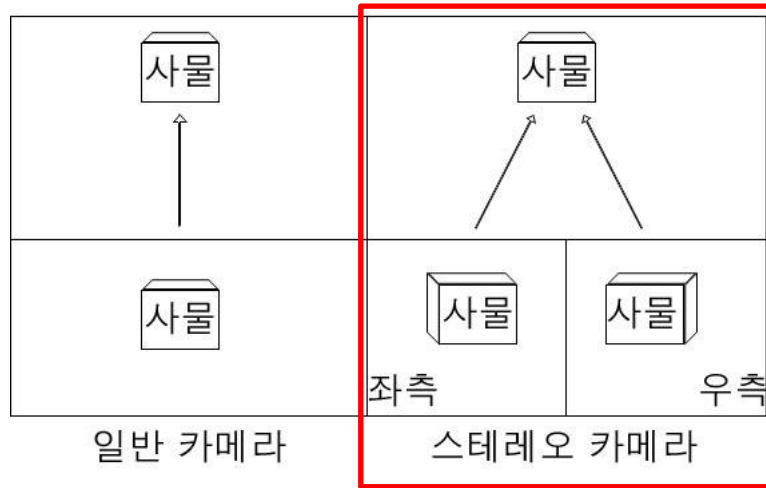
❖ 평면 화면을 이용한 3차원 영상 인식 원리 (양안 시차 기술) – 3D TV 혹은 3D 극장



1. 3차원 영상 처리 기술 개념

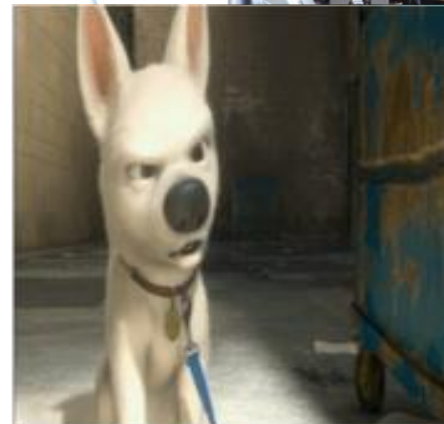
대외비 2급

❖ 양안 시차 기술을 이용한 스테레오 카메라 및 촬영된 영상의 원리

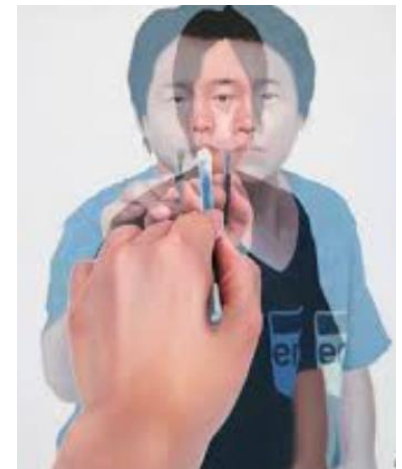


좌측 눈

우측 눈



좌.우측 눈 합성



2. Stereo Vision Camera 활용 분야 (화질개선)

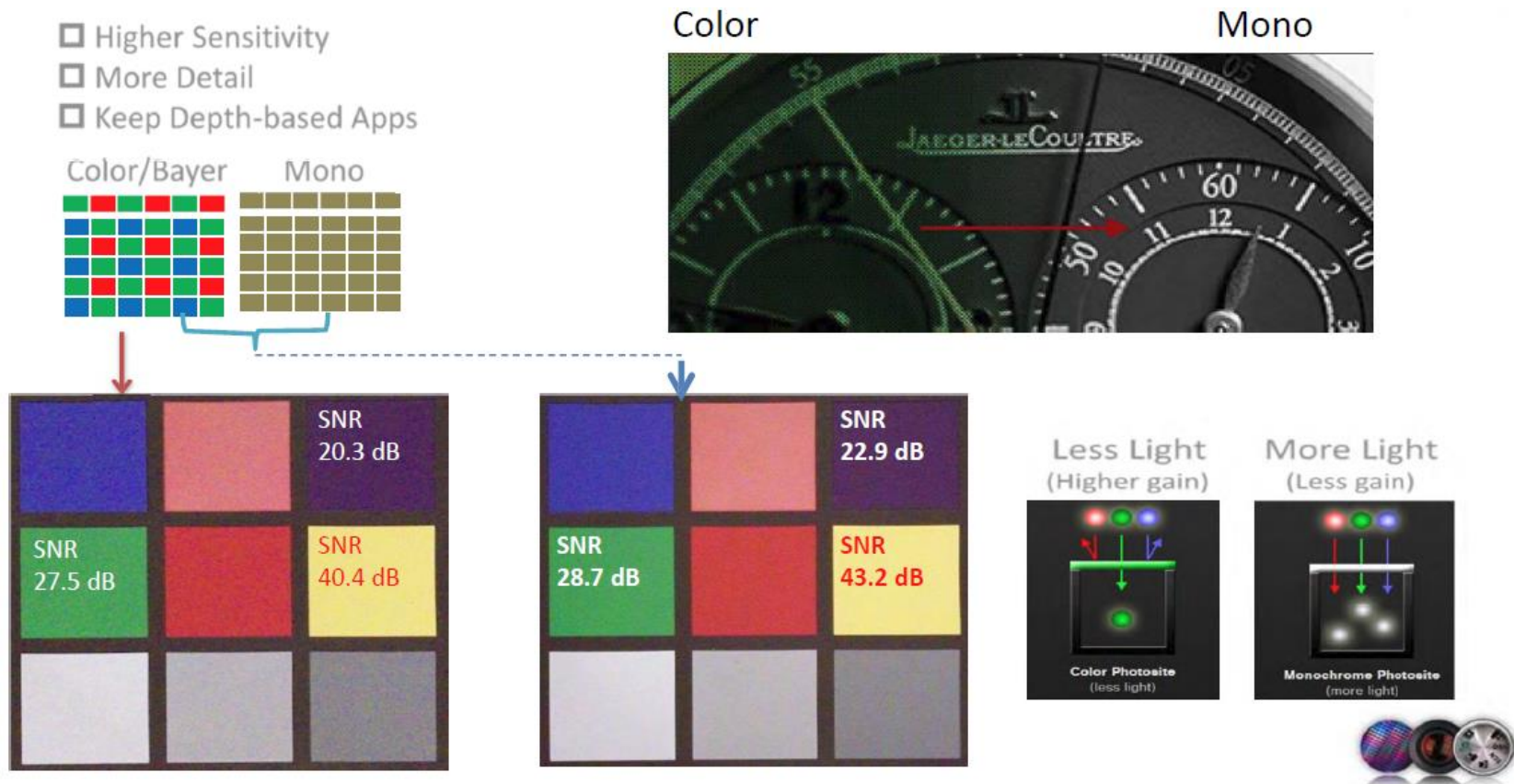
화질 개선 (Symetric Color + Mono Sensor)

Slim, High Resolution (Equivalent to 21MP Bayer Using 12M Dual)

Low Light performance (Equivalent to 1.55um pixel)

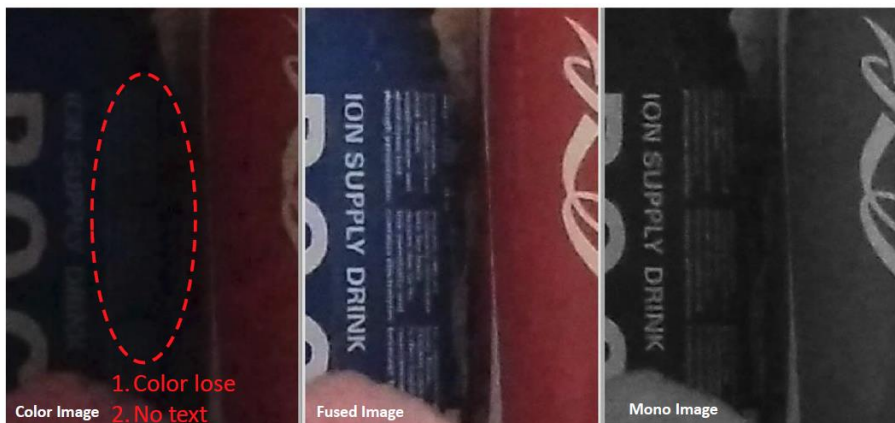
High Dynamic Range (2X wide light range)

Fast Instant AF (using Depth map)



2. Stereo Vision Camera 활용 분야 (화질개선)

화질 개선 (Symetric Color + Mono Sensor)

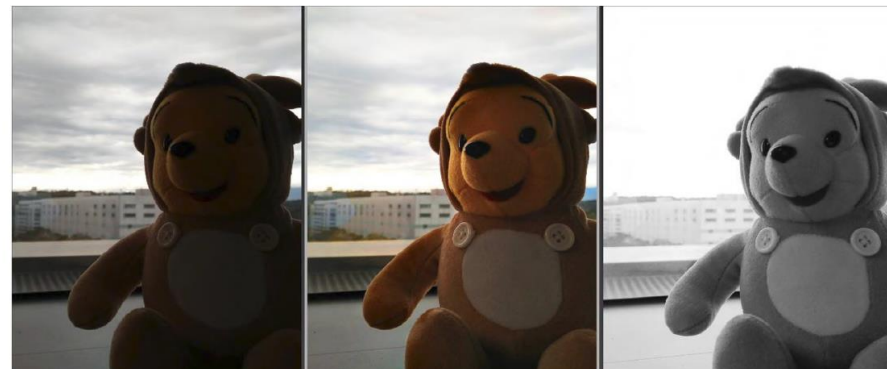


Vivid Color & Brighter

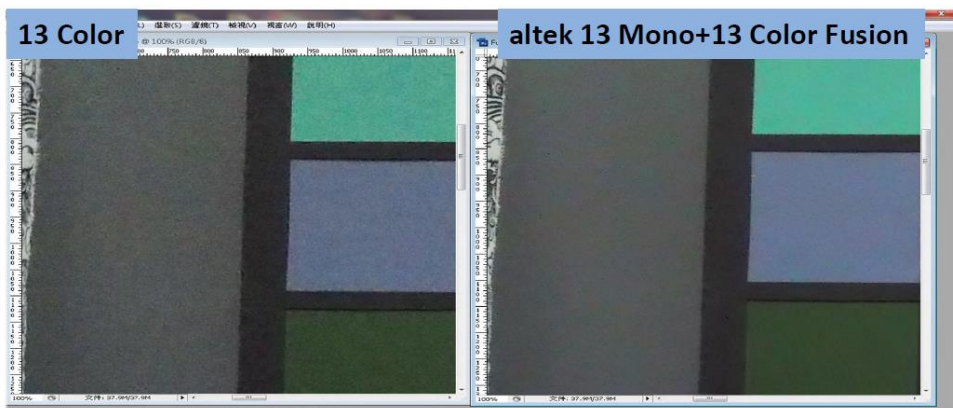
□저조도 성능

HDR

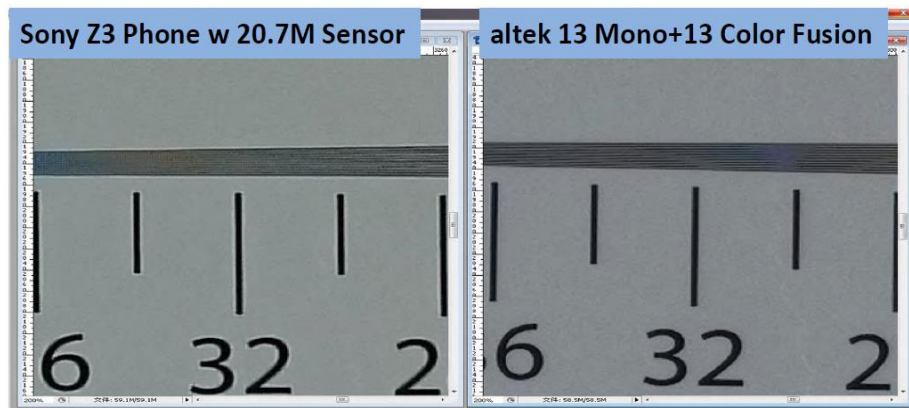
come from color & mono sensor



□HDR 성능



□노이즈 성능

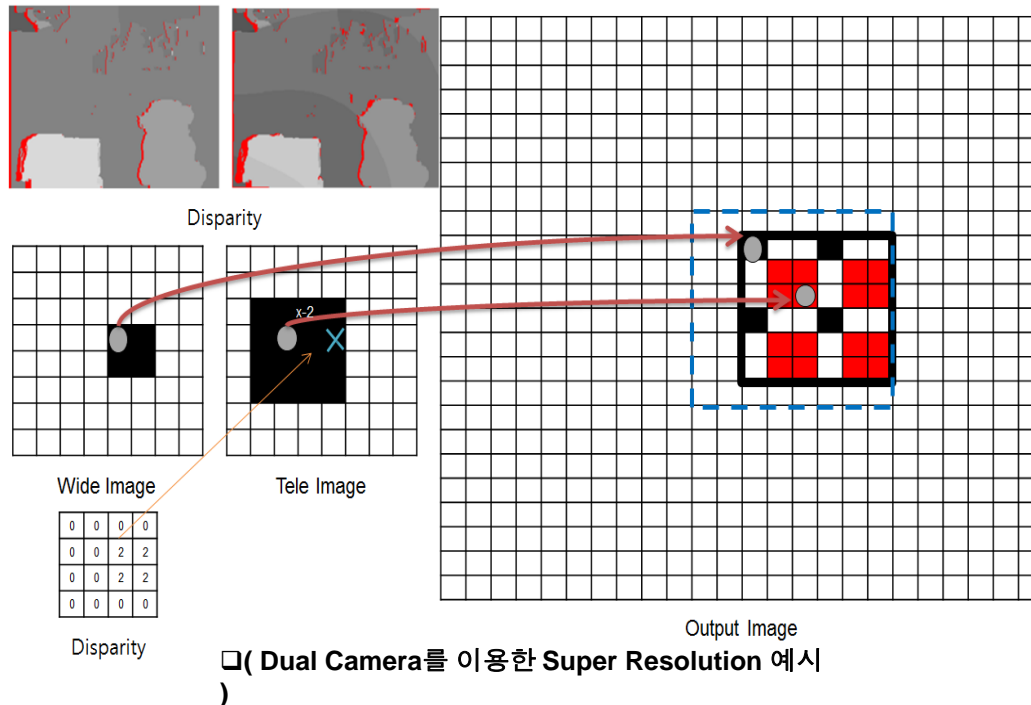


□해상력 성능

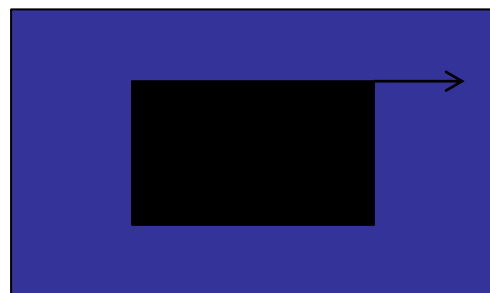
2. Stereo Vision Camera 활용 분야 (화질개선)

Zoom (Normal Angle + Tele Angle) -> Super Resolution

ex) Apple X3 줌 (using Normal & x2 Tele Camera), Oppo X5 줌 (using Normal & X3 Tele Camera)



□Edge Condition



□Tele

□Normal

□-. Normal 과 Tele의 정보가 겹치는 부분에서는 Super Resolution 의 효과로 Image Quality가 향상되지만, 경계부부터는 Image Quality가 저하되므로 중심과 주변부의 Quality를 줄이기 위해 이미지 Center에서 Edge방향으로 점진적으로 Super Resolution 적용해야 함.

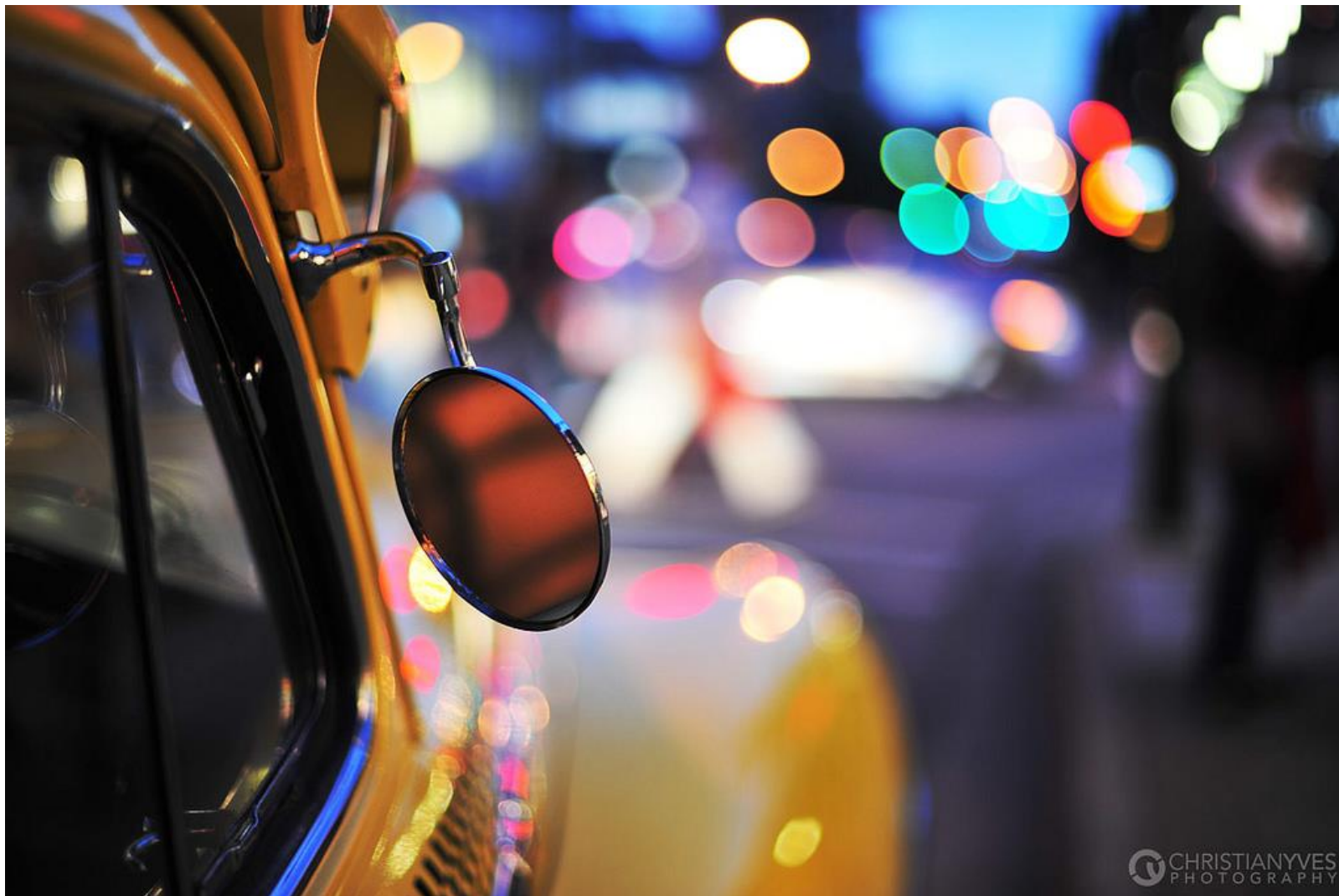


□(Digital Zoom)

□(SR using Dual Camera)

2. Stereo Vision Camera 활용 분야 (화질개선)

Bokeh 효과 적용된 이미지 예시


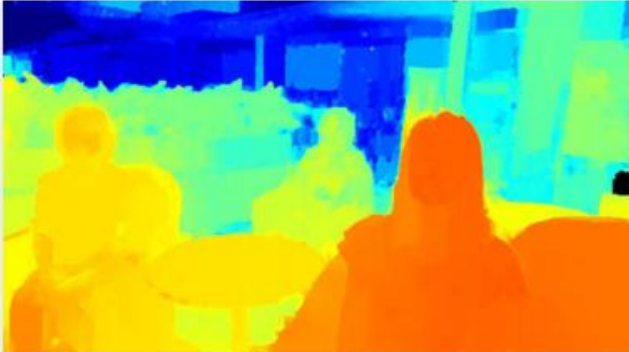


2. Stereo Vision Camera 활용 분야 (화질개선)



Depth Map

Viewpoint 으로부터 특정 객체까지의 거리에
관한 정보를 포함하는 이미지 또는 이미지 채널

Types of Depth Maps	Sparse Depth Map	Dense Depth Map
Applications	Real-time apps, such as Instant AF, object tracking, ...	High quality effects at stills, such as Bokeh, segmentation, ...
Examples		

Smart Phone vs. DSLR Image



❑ Smart Phone 28mm F2.0
❑ (original)



❑ Smart Phone 28mm F2.0
❑ (dual cam)



❑ DSLR 50mm F1.8

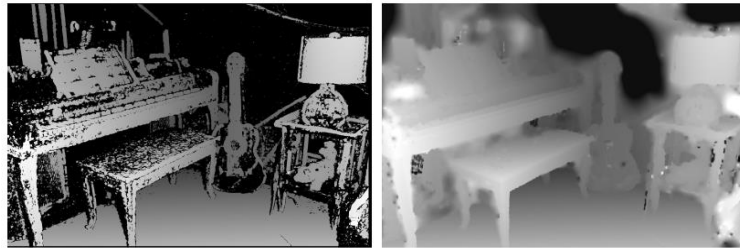
2. Stereo Vision Camera 활용 분야 (화질개선)

Bokeh 효과 Algorithm 예시



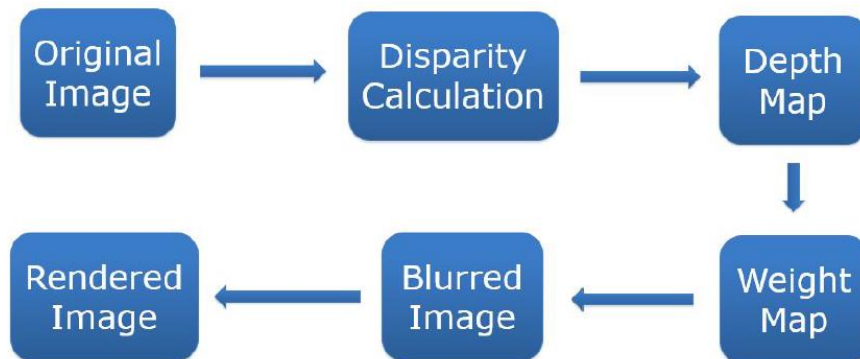
A

B



A

B



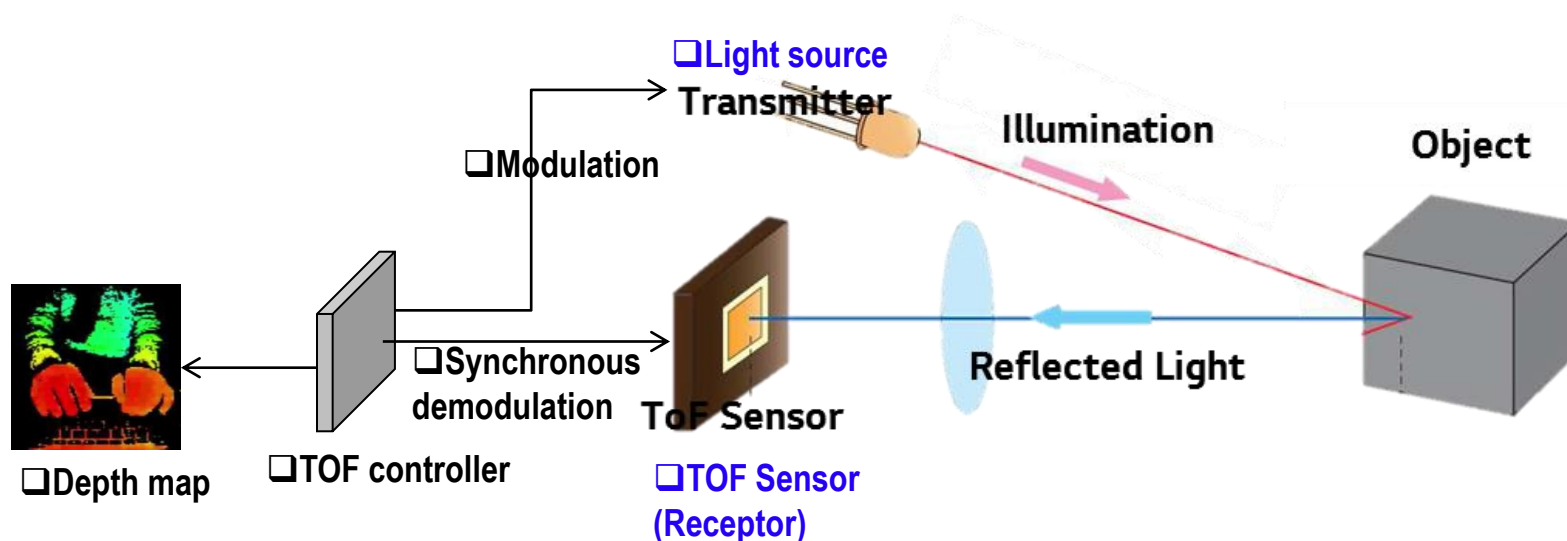
$$J(x) = I(x) \cdot [1 - W(x)] + [\alpha \cdot B(x) + (1 - \alpha) \cdot C(x)] \cdot W(x)$$

$$W(x) = 1 - \left(1 - \frac{|D(x) - D_f|}{\max\{|D(x) - D_f|\}} \right)^t$$

□* Sun, C., Kong, B., He, L., and Tian, Q. *An Algorithm of imaging simulation of fog with different visibility*. 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, 2015.

TOF(Time of Flight)

- Depth 인식을 하고자 하는 영역(3D Scene)으로 Light source (Laser) 에서 굉장히 빠른 간격으로 점멸 (Modulation)을 시키면서 빛을 쏘고,
- 수신부(TOF Sensor)에서는 Modulation 간격과 동기화 하여 Receptor들을 활성화 시키면서 되돌아오는 빛의 양을 인식하여 물체와의 거리 측정



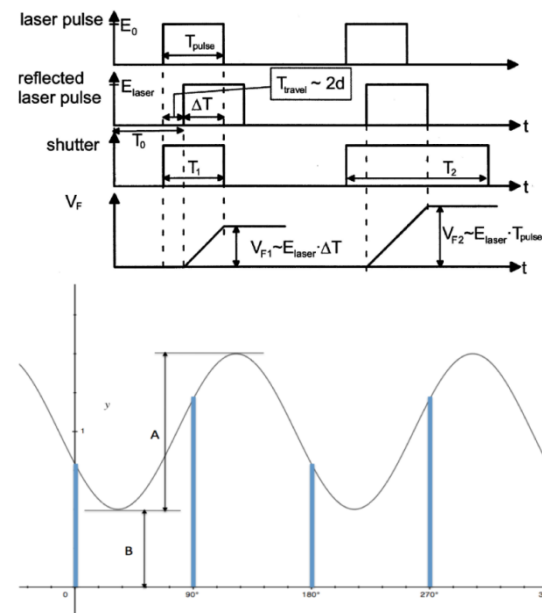
TOF(Time of Flight)

□ Direct TOF

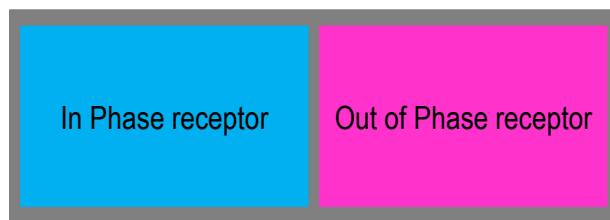
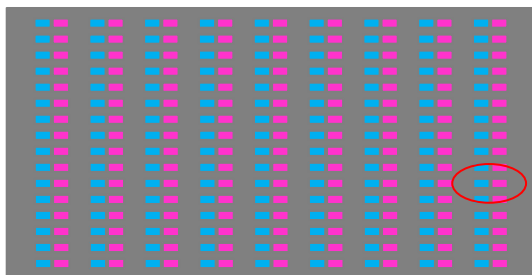
- Measures the time-of-flight directly. Allows long-distance measurements. The arrival time must be detected very precisely. Needs very short light pulses with fast rise-and fall-times and with high optical power (lasers or laser diodes)

□ Indirect TOF

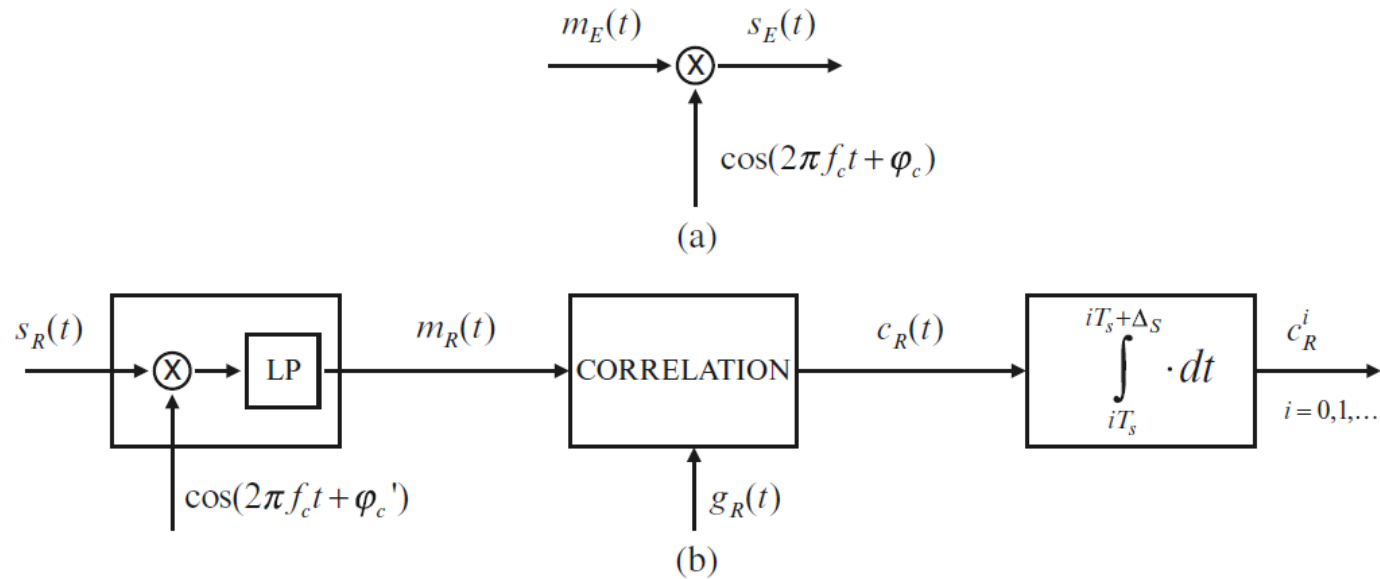
- Measures the phase difference between the sent and received signals. Different shapes of signals are possible, e.g., sinusoidal, square waves, etc. Cross-correlation between the received and sent signals allows phase estimation which is directly related to distance if the modulation frequency is known.



□ TOF Sensor



- 각 Pixel은 1쌍의 Receptor로 구성
 - In phase receptor / out phase receptor (각각 in-phase / out-phase 일 때 활성화 / 비활성화됨)
- In phase : 광원(laser or LED)이 켜졌을 때
Out phase : 광원(Laser or LED)이 꺼졌을 때

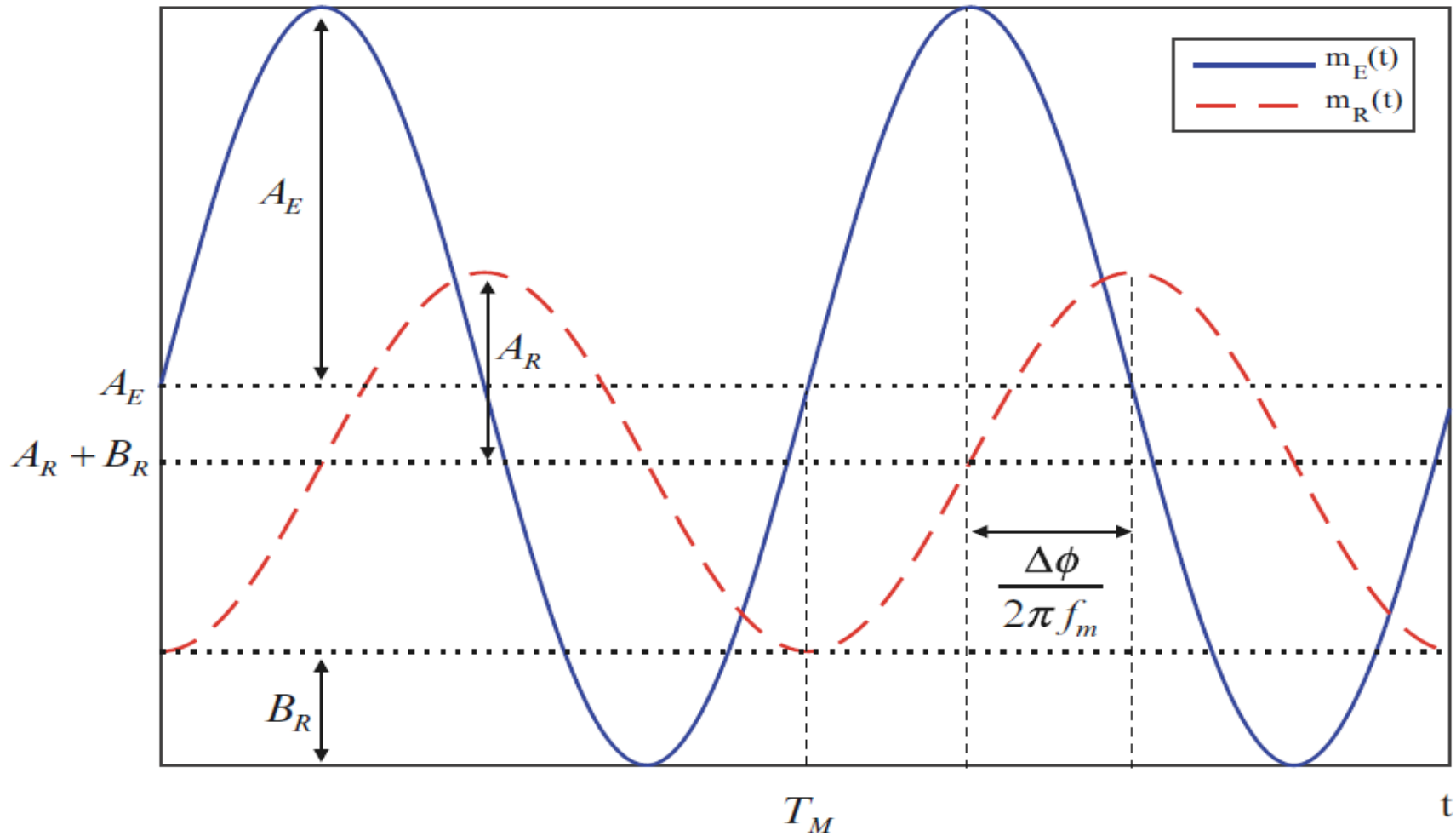


(a) Transmitter Model, (b) Model of in-pixel receiver

$$s_E(t) = m_E(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi_c)$$

$$s_R(t) = m_R(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi'_c) + n_R(t)$$

Sinusoidal Modulation



Sinusoidal Modulation

$$m_E(t) = A_E[1 + \sin(2\pi f_m t + \varphi_m)].$$

$$\begin{aligned} m_R(t) &= A_R[1 + \sin(2\pi f_m t + \varphi_m + \Delta\varphi)] + B_R \\ &= A_R \sin(2\pi f_m t + \varphi_m + \Delta\varphi) + (A_R + B_R) \end{aligned}$$

$$m_R(t) = A \sin(2\pi f_m t + \varphi_m + \Delta\varphi) + \frac{B}{2}.$$

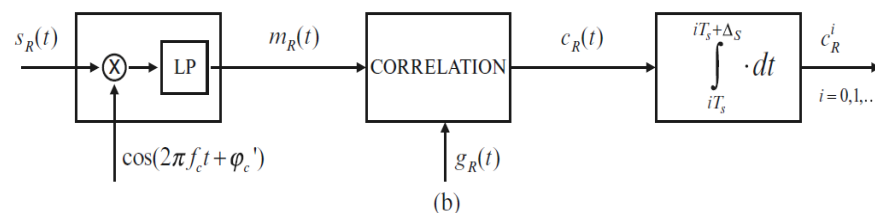
A : Amplitude , B : Intensity

만약, $g_R(t) = \frac{2}{T_m} [1 + \cos(2\pi f_m t + \varphi_m)]$ 이면

$$c_R(t) = \int_0^{T_m} m_R(t') g_R(t' + t) dt' = A \sin(\Delta\varphi - 2\pi f_m t) + B.$$

$$\Delta\varphi = 2\pi f_m \tau = 2\pi f_m \frac{2\rho}{c}$$

$$\rho = \frac{c}{4\pi f_m} \Delta\varphi.$$



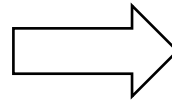
Sinusoidal Modulation

$$(\hat{A}, \hat{B}, \widehat{\Delta\varphi}) = \operatorname{argmin}_{A, B, \Delta\varphi} \sum_{n=0}^3 \left\{ c_R^n - \left[A \sin \left(\Delta\varphi - \frac{\pi}{2} n \right) + B \right] \right\}^2.$$

$$\hat{A} = \frac{\sqrt{(c_R^0 - c_R^2)^2 + (c_R^3 - c_R^1)^2}}{2}$$

$$\hat{B} = \frac{c_R^0 + c_R^1 + c_R^2 + c_R^3}{4}$$

$$\widehat{\Delta\varphi} = \operatorname{atan2}(c_R^0 - c_R^2, c_R^3 - c_R^1).$$



$$\hat{A}' = \frac{\pi}{T_S \sin \left(\frac{\pi \Delta_S}{T_S} \right)} \hat{A}$$

$$\hat{B}' = \frac{\hat{B}}{\Delta_S}$$

$$\widehat{\Delta\varphi}' = \widehat{\Delta\varphi}$$

$\widehat{\Delta\varphi}$ 는 **Sampling Width** 에 독립적임 **SNR** 을 높이기 위해 **Sampling Duration Time** $\Delta_S = T_m/4$

Square Wave Modulation (Concept 1)

$$m_E(t) = A_E \sum_{k=0}^{\infty} p(t - kT_m; \Delta_m)$$

$$m_R(t) = A \sum_{k=0}^{\infty} p(t - \tau - kT_m; \Delta_m) + B$$

$$g_R(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k p(t - 2kT_S; 2T_S).$$

$$c_R^0 = R + W = Q \left(1 - \frac{\tau}{T_S} \right) + W$$

$$c_R^1 = Q + W$$

$$c_R^2 = -[Q - R + W] = -\left[Q \frac{\tau}{T_S} + W \right]$$

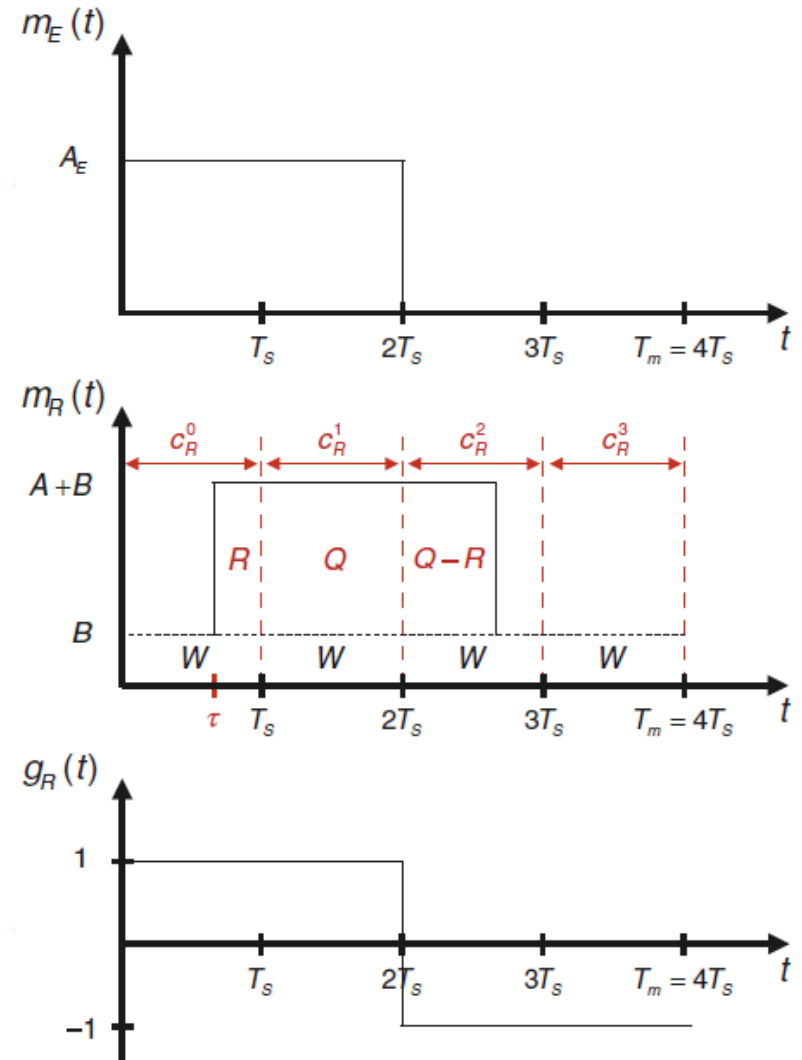
$$c_R^3 = -W.$$

$$\hat{\tau} = \frac{T_S}{2} \left(1 - \frac{c_R^2 + c_R^0}{c_R^1 + c_R^3} \right)$$

$$\hat{A} = \frac{1}{T_S} (c_R^1 + c_R^3)$$

$$\hat{B} = -\frac{c_R^3}{T_S}.$$

$$\begin{aligned} R &= (T_S - \tau)A \\ Q &= T_S A \\ Q - R &= \tau A \end{aligned}$$



Square Wave Modulation (Concept 2)

$$m_E(t) = A_E \sum_{k=0}^{\infty} p(t - kT_m; \Delta_m)$$

$$m_R(t) = A \sum_{k=0}^{\infty} p(t - \tau - kT_m; \Delta_m) + B$$

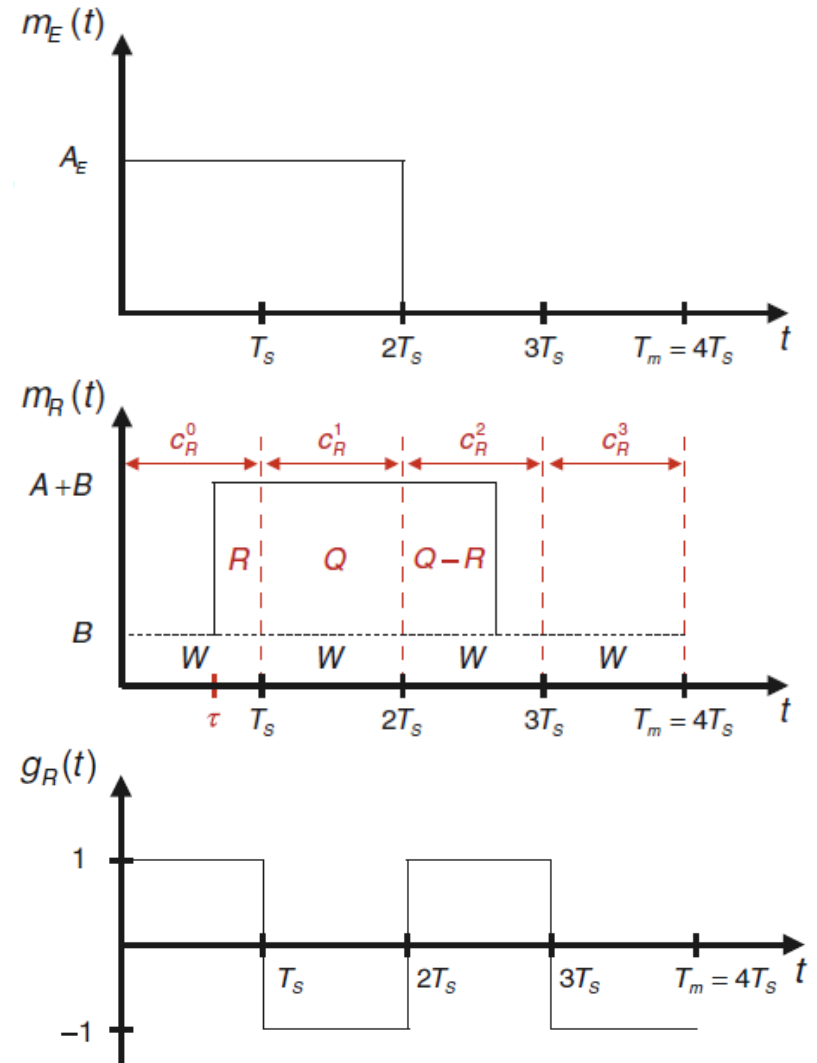
$$g_R(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k p(t - kT_s; T_s)$$

$$\hat{\tau} = \frac{T_s}{2} \left(1 - \frac{c_R^2 - c_R^0}{c_R^1 - c_R^3} \right)$$

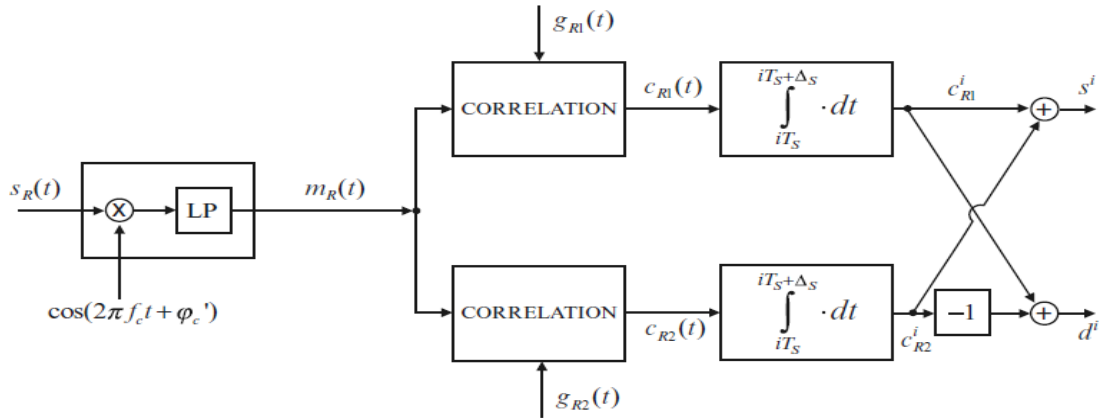
$$\hat{A} = \frac{1}{T_s} (c_R^3 - c_R^1)$$

$$\hat{B} = \frac{c_R^3}{T_s}$$

$$\begin{aligned} R &= (T_s - \tau)A \\ Q &= T_s A \\ Q - R &= \tau A \end{aligned}$$



Square Wave Modulation (Concept 3)



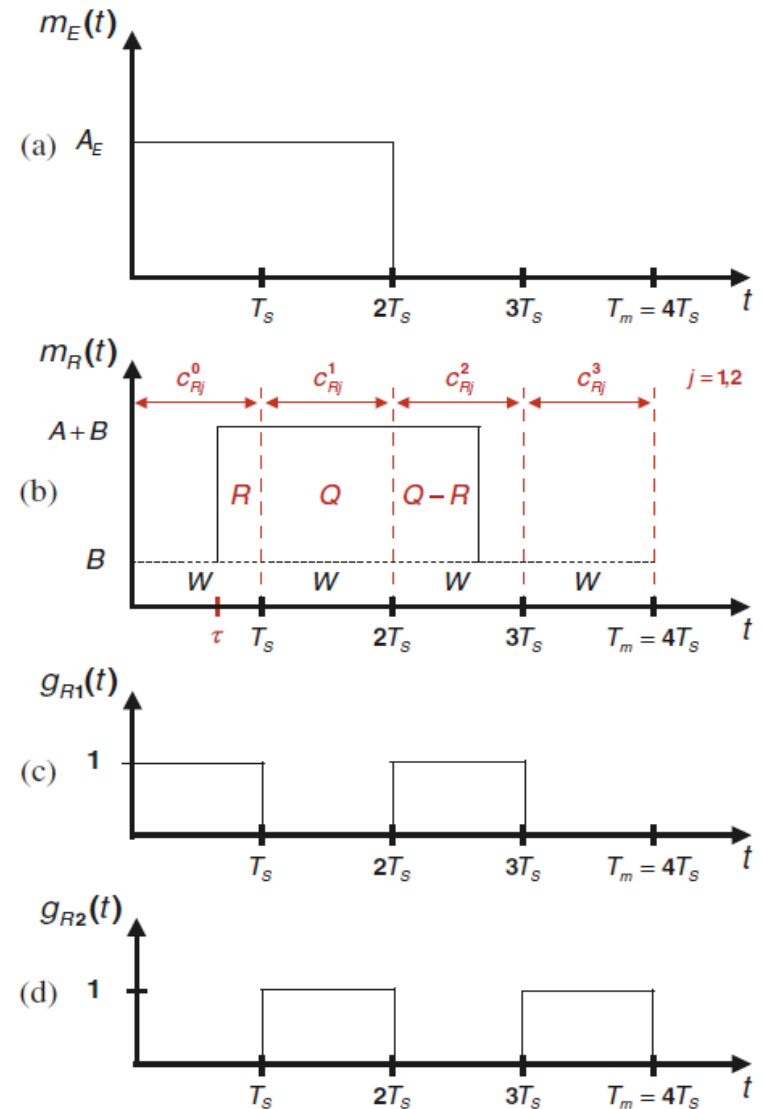
$$g_{R1}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} p(t - (2k)2T_S; T_S) \quad \begin{matrix} c_{R1}^0 = R + W & c_{R2}^0 = 0 & s^0 = R + W & d^0 = R + W \\ c_{R1}^1 = 0 & c_{R2}^1 = Q + W & s^1 = Q + W & d^1 = -[Q + W] \\ c_{R1}^2 = Q - R + W & c_{R2}^2 = 0 & s^2 = Q - R + W & d^2 = Q - R + W \\ c_{R1}^3 = 0 & c_{R2}^3 = W & s^3 = W & d^3 = -W \end{matrix}$$

$$g_{R2}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} p(t - (2k + 1)2T_S; T_S)$$

$$\hat{\tau} = T_S \frac{d^1 + d^0}{d^1 - d^3} = T_S \frac{d^3 + d^2}{d^3 - d^1}$$

$$\hat{A} = \frac{1}{T_S} (d^3 - d^1)$$

$$\hat{B} = -\frac{1}{T_S} d^3.$$



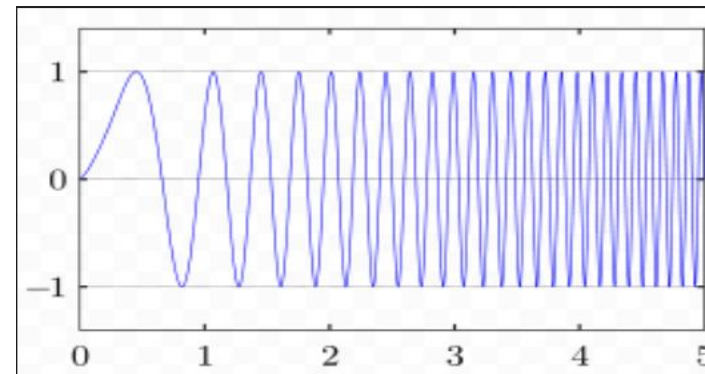
Phase Warpping

ToF는 입력 신호의 주기 내에서만 거리 측정이 가능한 모델.

만약, 반향파의 신호가 $[0, \pi]$ 밖의 신호일 경우, 기존 신호와 겹쳐져 Phase Warpping 발생함.

Solution

- 다중 주파수 변조 사용. (대부분 2~3개 주파수 사용함)
- 정현파 신호가 아닌 wave-form 사용 (ex) chirp wave)



chirp wave

4. ToF Camera Issue 및 Calibration 항목 대외비 2급

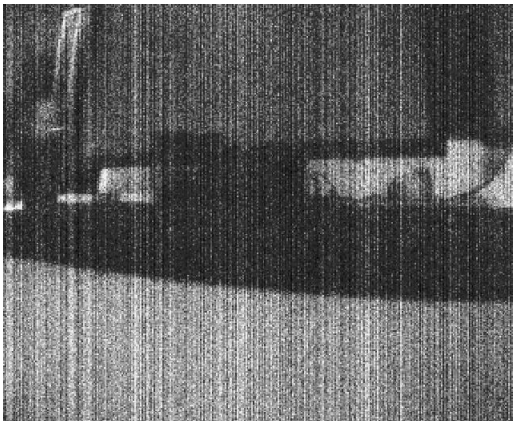
Fixed Pattern Noise

빛을 받기 전의 밝기 OFFSET값이 픽셀에 따라 Random하게 다름.

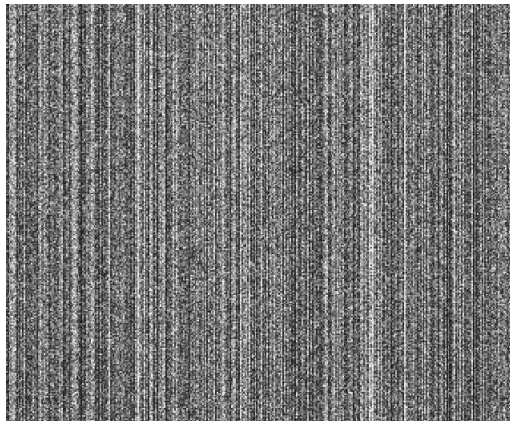
올바른 영상을 얻기 위해 Fixed Pattern Noise를 제거해야 함.

Camera Module 마다 FPN 특성이 다르므로 각각의 모듈을 모두 개별 Calibration 해야함.

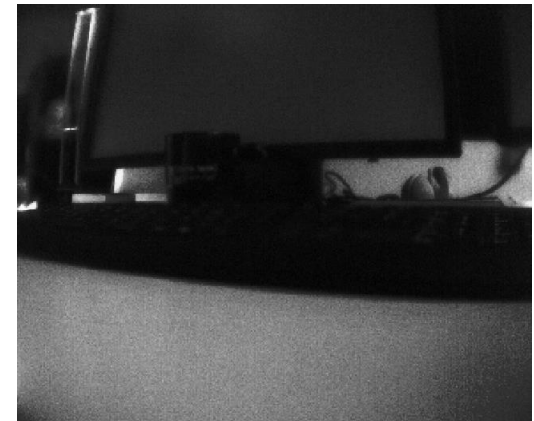
Intensity image



Pixel offset image



Offset free intensity image



-

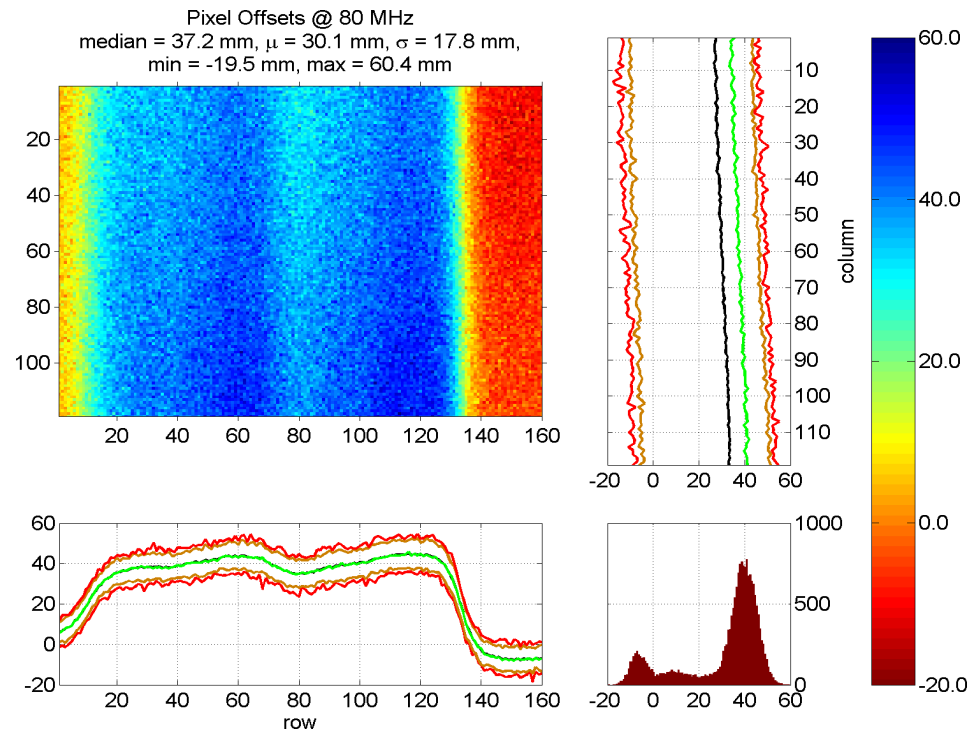
=

FPPN (pixel offsets of phase images)

각각의 PIXEL은 독립적인 Distance Offset을 가짐 (about 8 cm deviations @ 80 MHz).

모듈에 따라 서로 다르므로 FPPN Calibration도 모듈마다 각각 진행해야 함.

미리 알고 있는 고정된 위치에 Target을 놓고 각 Pixel마다의 측정된 Offset 값을 보정.



4. ToF Camera Issue 및 Calibration 항목 대외비 2급

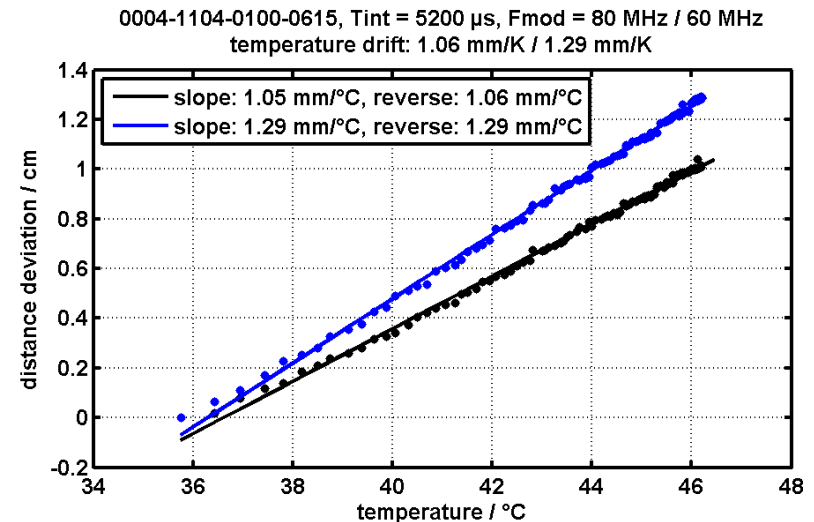
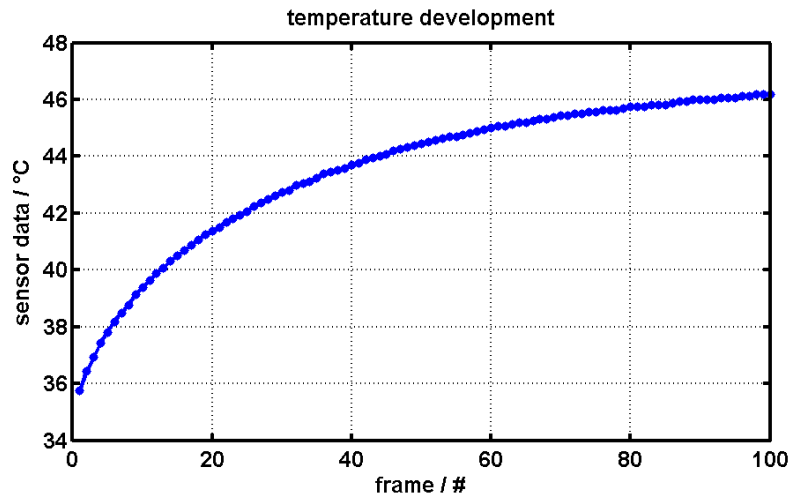
Temperature Drift

측정된 Distance 값이 온도에 따라 변함.

온도에 따른 Distance 변화량을 보정해주어야 함.

몇 개의 Typical 시료를 선택하고, 고정된 위치의 Target의 거리변화와 Module의 온도변화를 획득한 후 변화량만큼 보정함.

모듈간 변화량이 크지 않으므로 대표값을 각각의 모듈에 적용함.



4. ToF Camera Issue 및 Calibration 항목 대외비 2급

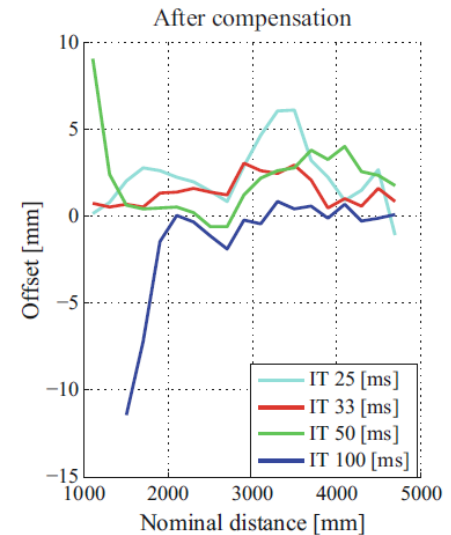
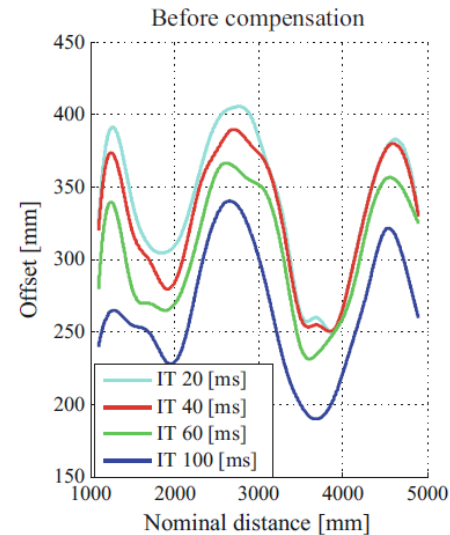
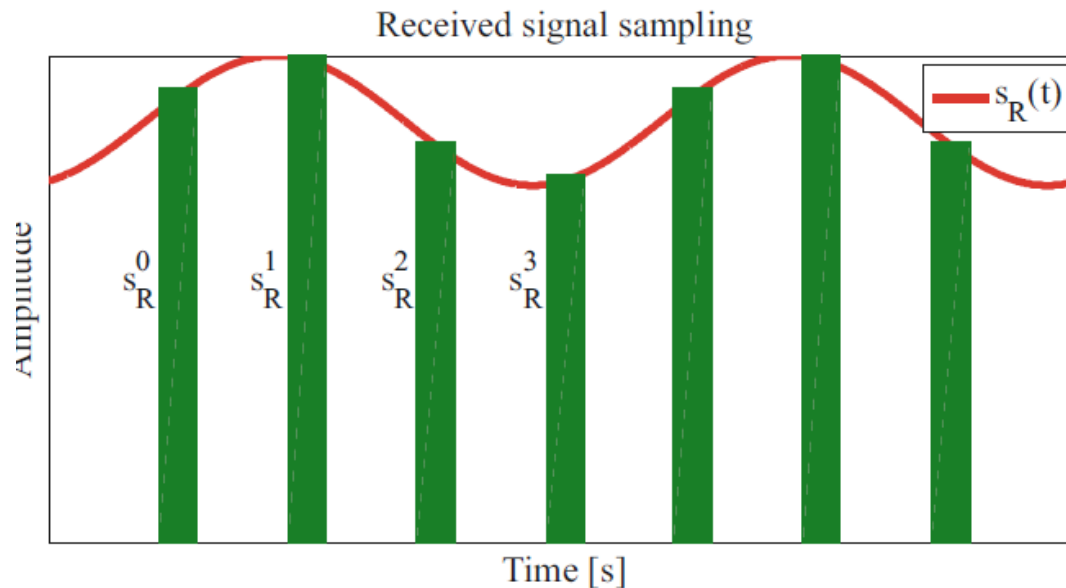
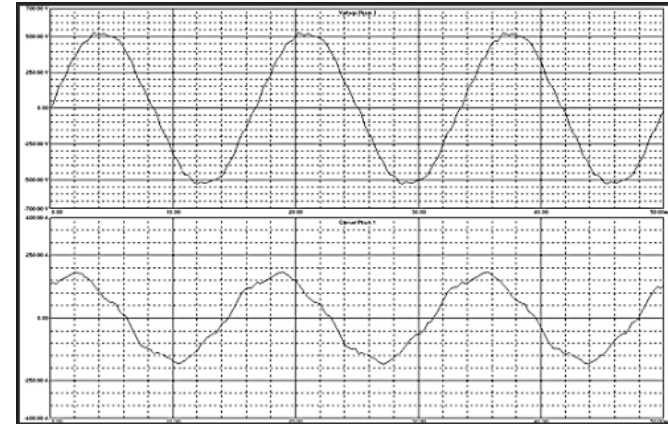
Harmonic Distortion

출력신호 (IR LED)의 정현파 파장은
Low Pass Filter로 구현되는데, 이 파장이 완벽한 구형파가 아님.

수신된 신호 또한, Sampling으로 얻어지는데, 수신된 신호도
구형파가 아님.

결과적으로, 완벽하지 않은 신호의 조합 때문에 Harmonic Distortion 발생

LUT를 이용하여 파형 신호를 Correction 함.



Photon-Shot Noise

Sampleing된 수신 신호 $c_R^0, c_R^1, c_R^2, c_R^3$ 가 Dark Electron Current (Black Level)과

Photon-generated electron 의 영향으로 Photon-shot Noise 발생 함.

- Dark Electron Current는 Sensor 의 온도를 낮게 유지하거나, 다른 방법(BLC) 등으로 제거 가능함. (FPN Cal)
- Photon-generated electron는 Poisson 분포를 가지며, 신호에 모두 포함되어 있어서 완벽한 제거 불가능함.
- STD (STD가 커질수록 Precision감소)
는 precision을 결정함. (f_m : Modulation Freq, A : 수신 신호 Amplitude, B: 수신 신호의 간섭강도)

$$\sigma_p = \frac{c}{4\pi f_m \sqrt{2}} \frac{\sqrt{B}}{A}.$$

- Precision을 높이기 위해서는 A를 키우거나, F_m 을 키우거나, B를 낮추어야 함.
- B는 주변 IR의 세기에 비례하고, A의 세기에 반비례함. (따라서 A를 높이면 B가 줄어듦)
- F_m 을 키우면 Precision은 좋아지지만, 측정 가능한 Distance는 줄어듦. (Distance VS Precision간 Tradeoff)

Multiple-Frequency Modulation

측정 가능한 Distance와 Precision는 Tradeoff관계에 있으나, Multiple Frequency 기술을 사용하여 Precision을 유지하면서 측정 Distance를 넓힐 수 있음.

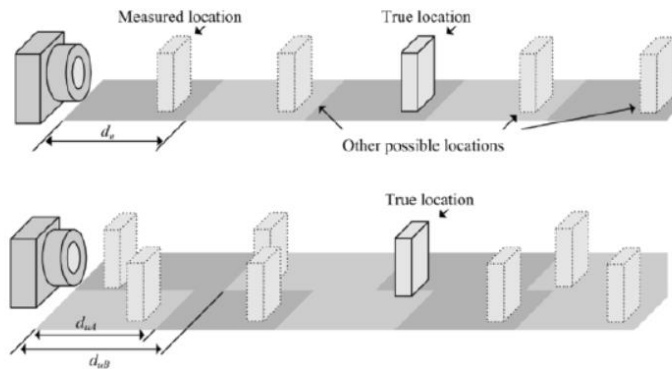
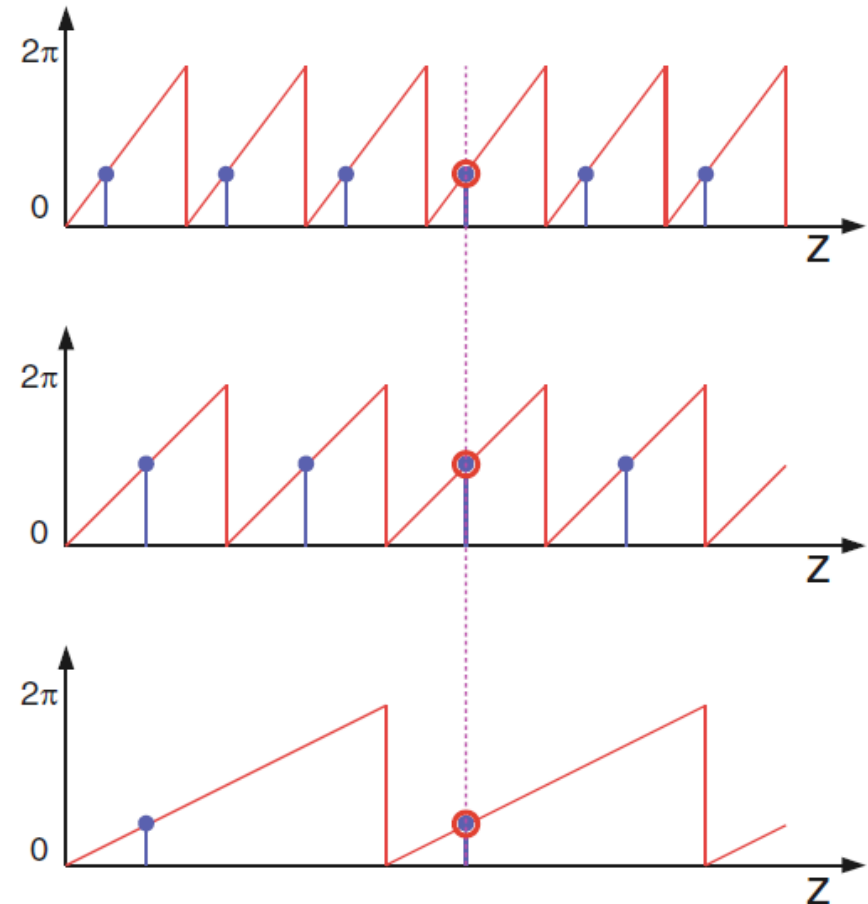


Figure 3: Extending distance using a multi-frequency technique.



Saturation and Motion Blur

노출 시간에 따른 Saturation 및 Motion Blur 발생

Saturation : 주변에 IR 광원의 양이 많은 환경에서 발생.

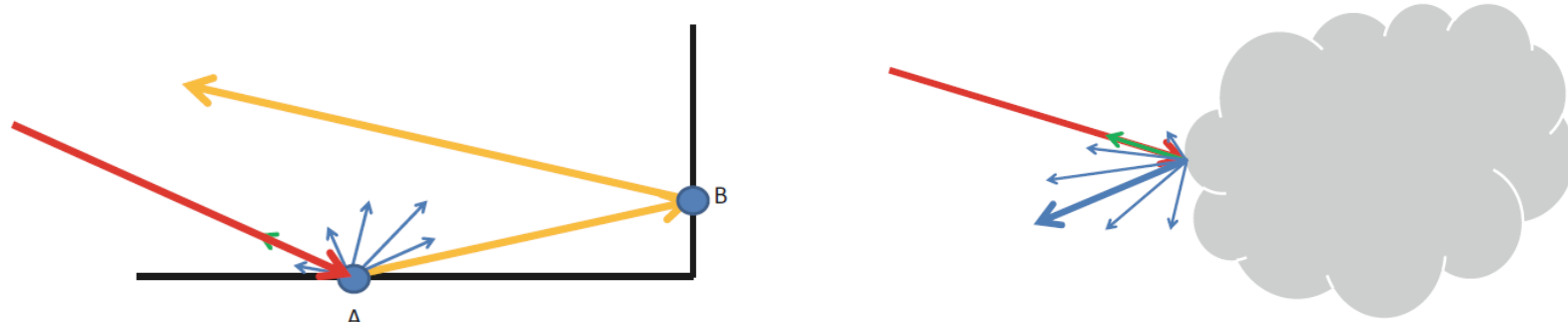
-> 해결방법 : Background 광을 억제하거나, 주변 환경에 따른 fm 및 노출시간 변경 등의 방법이 사용됨.

12. B. Buttgen, P. Seitz, Robust optical time-of-flight range imaging based on smart pixel structures. IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regul. Pap. **55**(6), 1512–1525 (2008)
13. B. Buttgen, T. Oggier, M. Lehmann, R. Kaufmann, F. Lustenberger, Ccd/cmos lock-in pixel for range imaging: challenges, limitations and state of the art, in *1st Range Imaging Research Day* (2005)

Motion Blur : Sampling 되는 주기 동안에 움직이는 물체에 대해서 거리값의 정확도가 저하됨.
노출시간이 길어질수록 Motion Blur가 심해지므로, Application의 목적에 따라 Parameter를 제한해야 함.

4. ToF Camera Issue 및 Calibration 항목 대외비 2급

Multipath Error



$$s_R(t) = [A \sin(2\pi f_m t + \Delta\varphi) + B] + [A_{MP} \sin(2\pi f_m t + \Delta\varphi_{MP}) + B_{MP}]$$

원래의 신호

Multiple 신호

Solution

정현파가 아닌 Code화된 Wave를 사용하여 Multiple 신호 제거

20. A. Kadambi, R. Whyte, A. Bhandari, L. Streeter, C. Barsi, A. Dorrington, R. Raskar, Coded time of flight cameras: sparse deconvolution to address multipath interference and recover time profiles. *ACM Trans. Graph.* **32**(6), 167:1–167:10 (2013)

2개 이상의 변조 주파수를 사용하여 원신호를 재구성

22. A. Kirmani, A. Benedetti, P.A. Chou, Spumic: simultaneous phase unwrapping and multipath interference cancellation in time-of-flight cameras using spectral methods, in *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pp. 1–6 (2013)

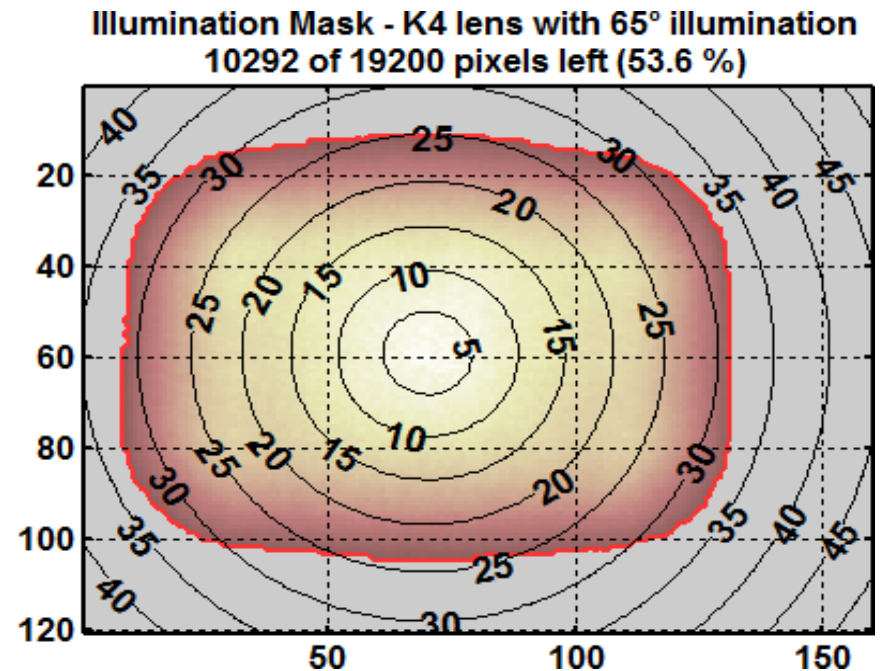
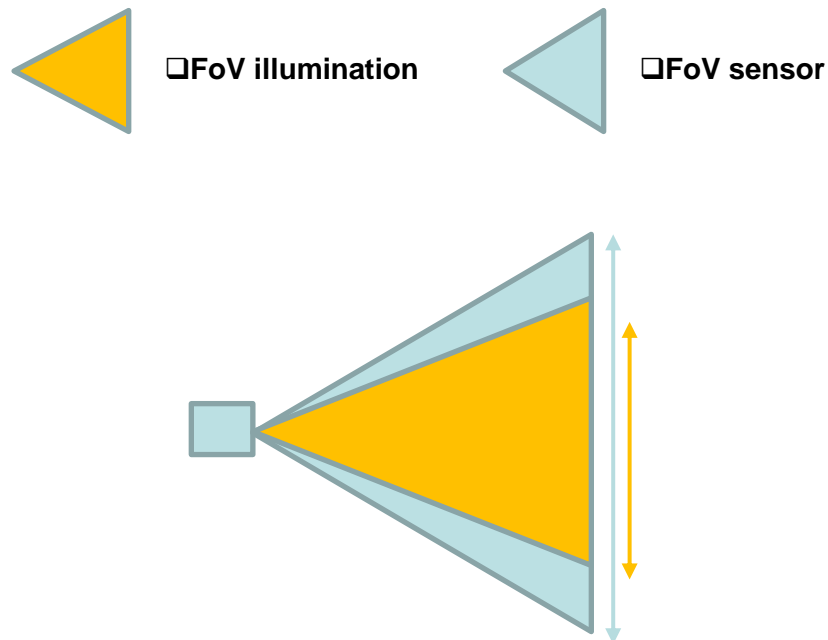
4개의 변조 주파수를 사용하여 폐쇄형 신호 구성

16. J.P. Godbaz, M.J. Cree, A.A. Dorrington, Closed-form inverses for the mixed pixel/multipath interference problem in amcw lidar, *Proceedings of SPIE* **8296**, 829618–829618-15 (2012)

4. ToF Camera Issue 및 Calibration 항목 대외비 2급

Illumination Mask

Illumination(VICSEL)의 FoV와 sensor의 FoV가 Matching되지 않거나 VICSEL의 화각이 Sensor의 화각보다 작을 경우 사용 Sensor에서 Illumination이 비추는 위치만 사용하기 위하여 mask 생성

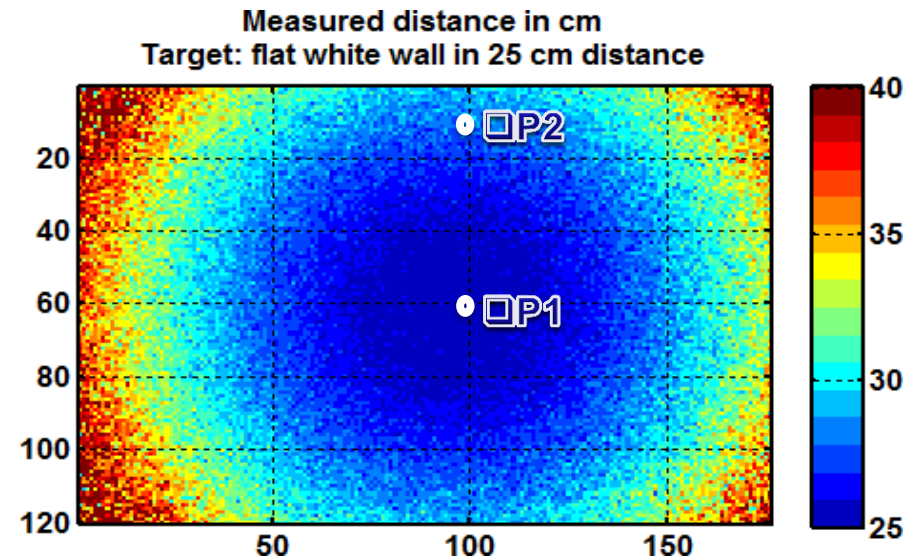
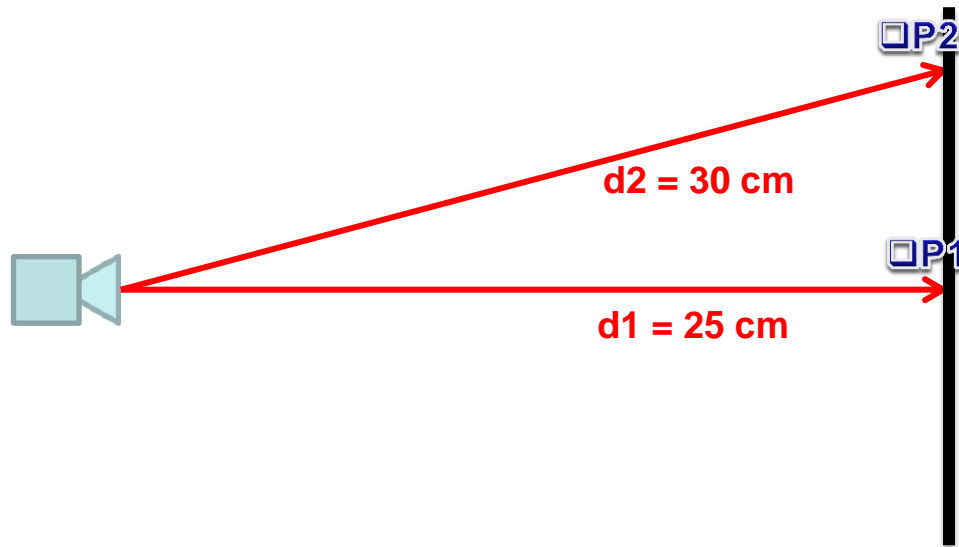


4. ToF Camera Issue 및 Calibration 항목 대외비 2급

직교좌표 변환 / Lens Calibration

화각과 왜곡에 따라 각각의 Pixel에서 획득되는 Distance값이 달라짐.
동일 면에 대해 동일한 Distance가 측정되도록 Calibration 필요함.

-> 25 CM 위치의 벽을 비췄을 때 획득되는 Distance 값



화각 좌표에 영향을 주는 요인

focal length, lens distortion parameters

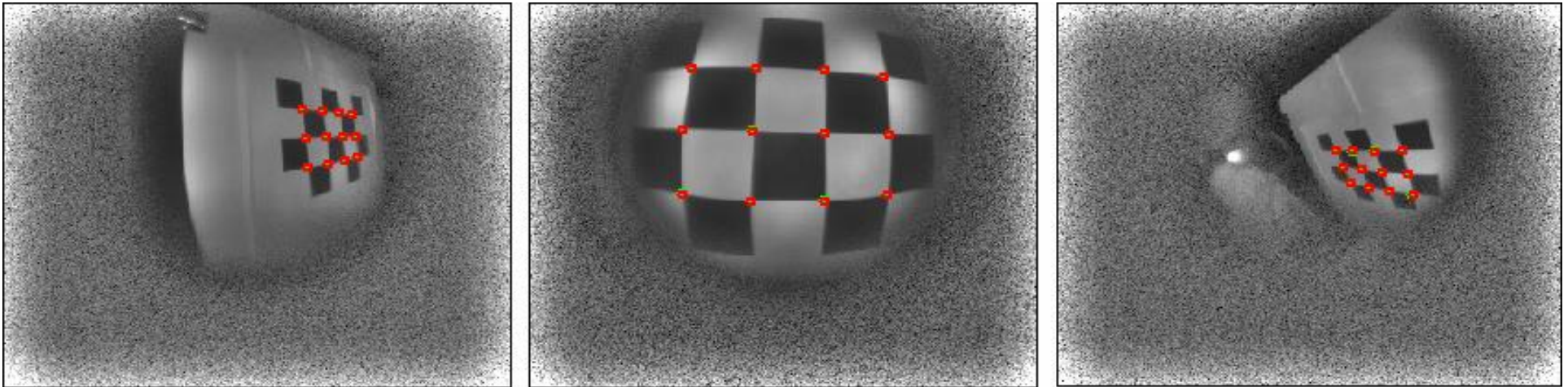
Sensor와 lens간 정렬 (Optical center)

흔히 알고 있는 Camera Calibration 과정으로 Data 획득 가능함.

4. ToF Camera Issue 및 Calibration 항목 대외비 2급

직교좌표 변환 / Lens Calibration

.Homography 및 radial Distortion Modeling을 이용한 Camera Calibration을 진행하여 화각 및 Lens 왜곡에 따른 Distance값의 불일치를 보정할 수 있음.

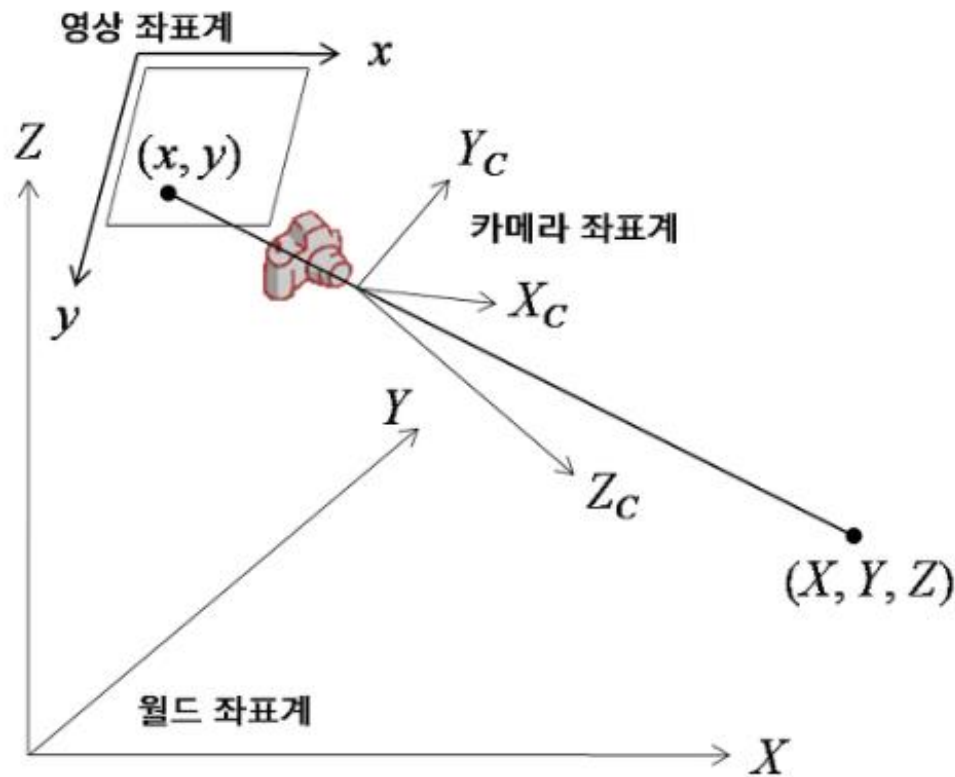


Camera Calibration이란? (Single Camera 경우)

3차원 실세계의 점을 Camera를 통해 2차원 평면으로 변환시킬 때, 카메라의 기구적인 특성 혹은 렌즈의 왜곡에 영향을 받음. Camera로 획득된 점이 실세계의 어떤 점에서 왔는지를 추정하기 위해 카메라의 기구적인 특성과 렌즈 왜곡 정보 계산하는 것

Output : Camera Intrinsic Parameters, Distortion Parameters.

-> Output Data를 찾기 위해서, 매 영상마다 Chart와 Camera의 위치 관계인 Extrinsic Parameter를 함께 구해야 한다. (중간 결과물)



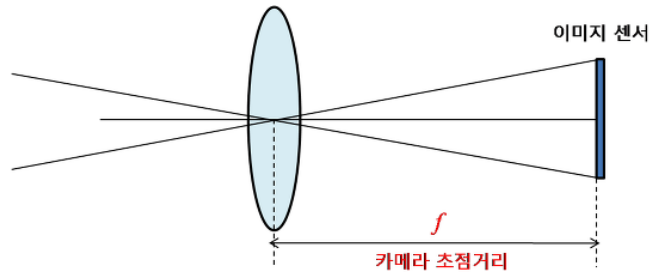
□(Image, Camera, World 좌표계 관계)

1) Intrinsic Parameters

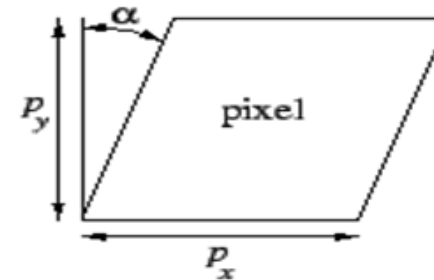
초점거리(focal length): **fx, fy**

주점(principal point): **cx, cy**

비대칭계수(skew coefficient): **skew_c = tan α**



초점거리

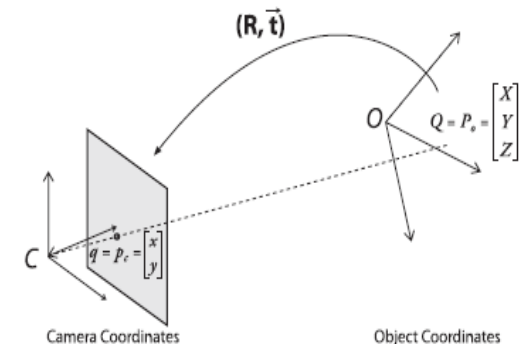


비대칭 계수

2) Extrinsic Parameters

- 카메라 좌표계와 월드 좌표계 사이의 변환 관계를 설명하는 파라미터.
- 두 좌표계 사이의 회전(rotation) 및 평행이동(translation) 변환으로 표현

$$R_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



□ 실 좌표와 카메라 좌표와의 관계

3) Parameter 구하는 법

□물리적 변환(Extrinsic)과 카메라 내부 행렬(Intrinsic)으로 분리하여 표현하면

$$\tilde{q} = sMW\tilde{Q}$$

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix}$$

□카메라 내부 행렬

□외부 행렬(R : 회전행렬, t : 이동 벡터)

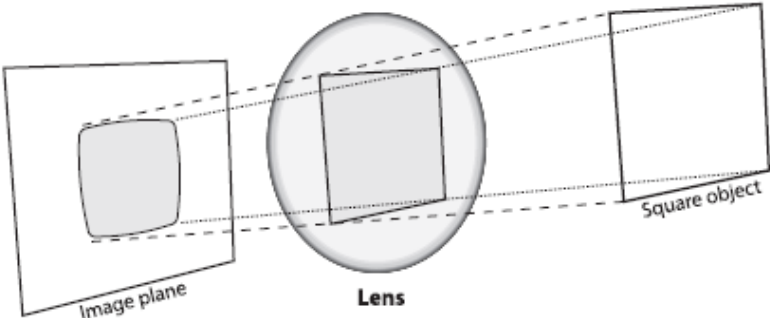
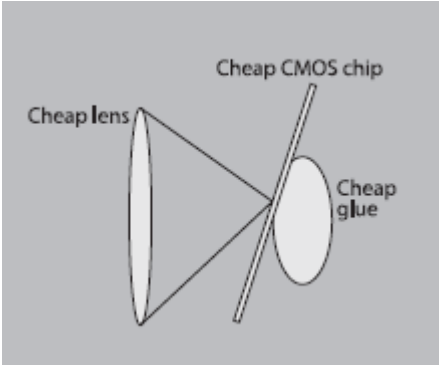
□우리가 바라보는 평면은 $\tilde{Q} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$

□에서 Z축은 모두 같은 2차원 평면이므로 Z=0으로 가정

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \square \text{즉, } H = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}$$

1. 왜곡

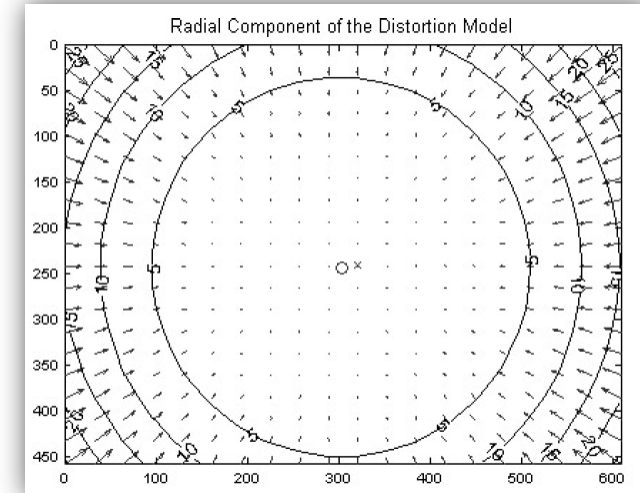
- 대표적인 렌즈 왜곡

□방사 왜곡	□접선 왜곡
<p>□Lens의 특성상 가장자리 부분에 왜곡현상이 발생</p> <ul style="list-style-type: none"> □ - barrel Distortion □ - fish-eye Distortion  <p>□Barrel Distortion의 예</p>	<p>□Lens를 조립하는과정에서 IS와 Lens가 평행하지 않아 발생</p>  <p>□접선 왜곡의 예</p>

• 방사왜곡 조정식

$$x_{corrected} = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)$$

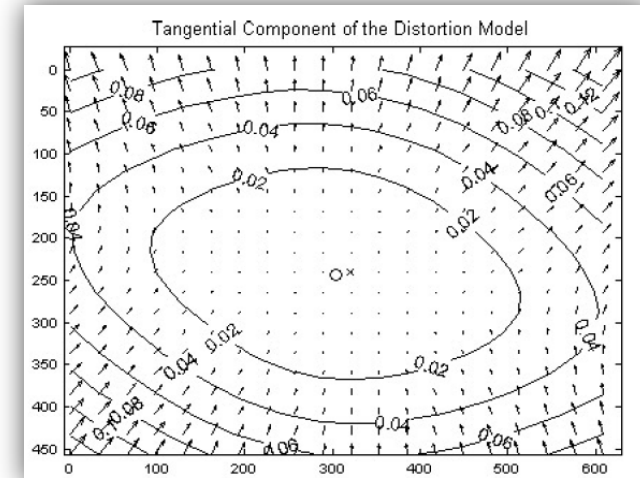
$$y_{corrected} = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)$$



• 접선왜곡 조정식

$$x_{corrected} = x + [2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2)]$$

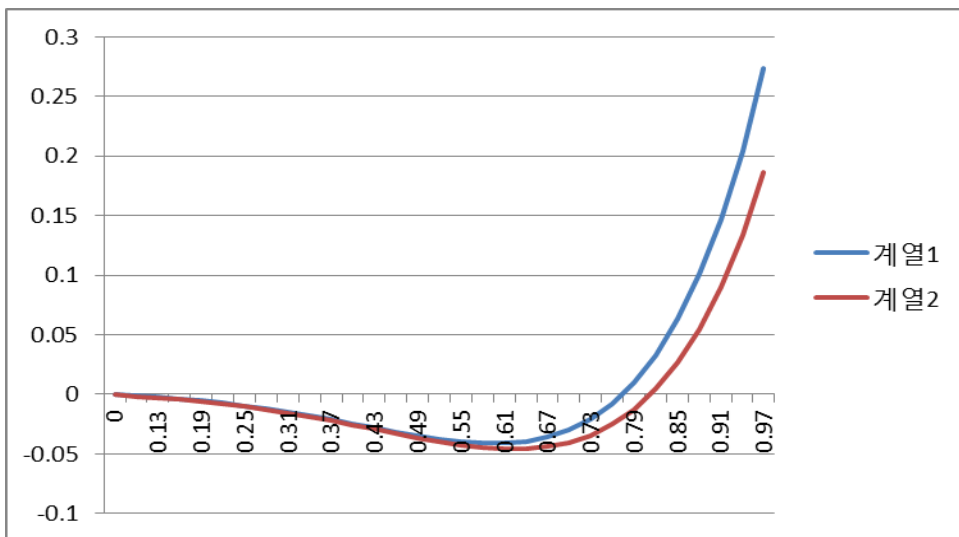
$$y_{corrected} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2x]$$



D.C. Brown, "Decentering Distortion of Lenses", *Photometric Engineering* 32(3) (1996), 444-462

Calibration시 고려사항(Distortion Calibration)

Chart의 정보가 화면의 대부분의 영역을 **Cover**하도록 **Calibration** 되어야 함.
왜곡이 $< 1\%$ 인 **Lens**에서는 오히려 설계치나 대푯값을 사용하는 것이 더욱 좋을 수 있음.



동일한 모듈을 두 번 **Calibration** 했을 때 추정된 왜곡

