

고속 거리 영상화 센서의 prototype 설계와 제작

○강 성호, 장성근, 홍 기상, 김 오현
포항공과대학 전자전기공학과

Fabrication and Experiments of High-speed Range Imaging Sensor prototype

○Seong-Ho Kang, Seong-Guen Jang, Ki-Sang Hong, O-Hyun Kim
Dept. of E.E. POSTECH

요 약 문

본 논문은 삼차원 거리영상화 장비중고속으로 거리영상을 잡을 수 있는 거리영상화소자를 IC로 시험 제작하여 그결과를 보였다.

제작된 IC에대한 실험은 각 부분의 성능과 센서 자체의 정밀도 측정에 중점을 두었다. 각 부분의 성능에 대해서는 빛 감지부분의 신호의 크기, 소자들의 동작성, 정보 저장부분의 입력 전압에 대한 출력 전압의 변형등을 다룬다. 센서 자체의 정밀도는 각 부분에서 발생하는 오차를 측정하였다.

제작된 센서는 아날로그방식으로 정밀도에 제한을 받는 단점이 있어 구조를 달리하여 디지털방식으로 접근한 센서를 제안한다. 아날로그 방식에 비해 셀 면적을 줄일 수 있을 뿐 아니라, 정밀도도 높고, 속도도 떨어지지 않아 아날로그 방식 IC 센서의 단점을 극복한다.

1. 서론

일반적인 비디오 카메라는 물체표면에서 반사된 빛의 세기를 잡아 영상으로 보여준다. 이러한 이차원 영상으로부터 삼차원 좌표를 구하기는 매우 어렵고 시간도 많이 든다. 이 문제를 해결하기 위해 stereo vision이나 구조화된 광원을 이용한 거리영상화기법들이 연구되었다. 그중 신뢰성 있는 방법으로 단일 빛띠를 이용한 step-and-repeat 방법이 있다. 그러나 한 화면의 거리영상을 얻는데 수 초에서 수 십초의 시간이 걸려 실시간 처리가 필요한 곳에는 쓰이지 못한다. 다중 빛띠 조사 방식은 시간을 단축시킬 수 있으나 빛띠간의 구별 문제가 단점이 된다. 이점을 보완한 방식으로 color coded stripe pattern[1]과 binary encoded light pattern[2]과 intensity ratio[3]를 이용하는 방식 그리고 rainbow pattern 방식[4]등이 있다. 이들 시스템은 해상도가 떨어질 뿐 아니라 무늬가 있는 물체에는 사용할 수 없는 단점이 있다.

빛의 세기를 받아들이지 않고 각 화소가 직접 거리에 관한 정보를 측정하여 초당 수 백 화면의 거리 영상을 얻을 수 있는 방법을 Y.Sato[5]가 제안 하였으며, T.Kanade[6]가 이를 집적회로 칩으로 만들어 초기 결과를 보였다.

본 논문에서는 이러한 거리영상화 센서를 설계하고 시험 IC를 제작하여 그 성능을 실험 하였다. 그리고 현재 고안된 센서는 아날로그 전압을 정보로 이용하는데 몇가지 단점이 있어 이를 보완한 디지털 방식의 구조를 제안한다.

2장에서 아날로그방식의 거리영상화 소자의 원리를 설명하고 3장에서는 아날로그 방식의 단위 셀을 IC로 제작하여 실험한 결과를 보인다. 4장에서는 디지털 방식의 구조와 예상되는 성능을 설명한다.

2. 아날로그 거리 영상화 시스템

2.1 아날로그 거리 영상화 소자의 원리

Y.Sato가 제안하고 T.Kanade에 의해 초기 결과가 보여진 아날로그 거리 영상화 기술은 일반 보통 비디오 카메라 대신에 그림 2-1과 같이 빛 감지와 신호처리 회로로 이루어진 셀의 2차원 배열을 사용한다. 거리 정보는 step-and-repeat 방법에 의해 얻어지지 않고 빛 평면이 일정한 각속도로 왼쪽에서 오른쪽으로 한번 물체를 지나감으로써 거리 정보가 얻어진다.

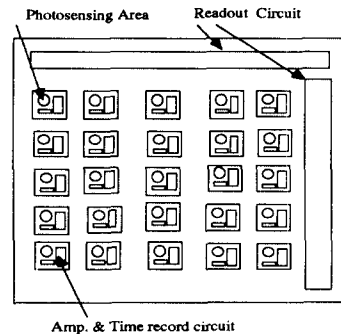


그림 2-1. 2-D Array of Photosensors

그림 2-2는 센서 배열의 한 행을 나타낸다. 빛 띠가 지나가는 동안 센서 S_m 에 걸린 빛의 세기를 I_m 이라고하고, 각 셀은 I_m 의 최고치에 해당하는 시간 t_m 을 감지하여 기록한다. 각 셀에는 하나의 시선벡터가 정해져 있고, 감지된 시간 t_m 의 정보가 저장되어 있다. 이 정보 t_m 으로 빛 평면의 회전각 $\phi(t_m)$ 을 알 수

있다.

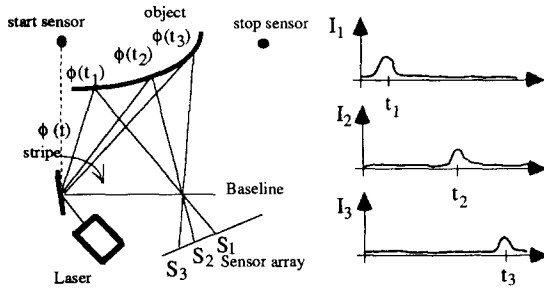


그림 2-2 Parallel Lightstripe Technique

그림 2-3의 기하 구조를 보면 빛 평면의 방정식을 구할 수 있는 회전각 ϕ 와 셀의 시선(직선의 방정식)을 알면 물체표면의 3차원 좌표를 삼각법으로 계산할 수 있음을 알 수 있다. 만일 NxM의 센서 배열들이 위의 작업을 독립적으로 한다면 한번의 빛띠가 통과 하는 동안 NxM의 거리영상정보를 알아낼 수 있게 된다. 이방법에 따르면 sweep time T는 오직 빛감지 부분의 민감도에만 제한 받고, 해상도(셀의 갯수)는 집적 기술에 제한을 받는다.

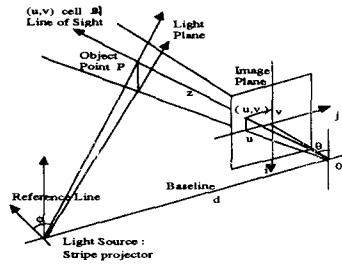


그림 2-3. Triangulation Geometry

2.2 아나로그 거리 영상화 소자의 구조

단위 셀은 빛 띠를 감지하는 센스 기능과 감지된 시간을 기록 저장하는 기억기능이 있어야한다. 이 기능을 실현하기 위해 빛 감지 센서와 아나로그 및 디지털 혼합 신호처리회로가 각 단위 셀마다 들어갔다. 각 단위셀은 면적을 최소화 하기 위해 가장 간단한 회로로 구성하였으나 필요한 기능은 모두 갖추도록 하였다. 그림 2-4에서 빛띠가 지나감에 따라 photodiode 전류가 변화하고 preamp의 출력 전압이 변하게된다. 빛띠가 그셀의 시선에 있을때 앰프의출력 전압은 미리 조절해둔 문턱값(V_{th})을 넘어서 최대가 되고 비교기 출력을 "1"로 만든다. 그림 2-2에서와 같이 시작 센서(start sensor)는 빛띠가 지나갈때 F/F를 초기화 시켜두어 축전기(C) 전압이 timestamp 함수를 잘 따라가도록 입력 gate(sw1)를 열게한다. timestamp 함수는 시간에 따라 선형적으로 증가하는 전압으로 전압을 측정하면 그때의 시간을 알 수 있다. 비교기 출력이 "1"이 되면 F/F은 상태를 바꾸어 출력으로 "0"을 내고 sw1을 잠근다. 축전기의 전압은 그때 입력된 전압을 유지하게되고 그 전압이 그 셀이 감지한 빛띠의 시작 센서로부터 돌아간 회전각의 정보가 된다. 저장된 정보는 출력 gate(sw2)를 개방하여 읽어낼 수가 있다. 읽어 내는 회

로는 칩의부에 있게하였다. 이러한 방식은 측정된 시간이 축전기(C)에 저장된 전압으로 나타나지므로 아나로그 방식이라 할 수 있다.

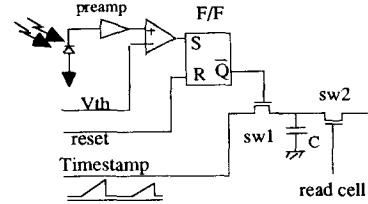


그림 2-4 단위 셀의 내부 구조

3. 아나로그 거리영상화 소자의 시험용 칩의 실험

본 연구에서는 아나로그 초 집적 거리 영상화 소자의 기초가 되는 그림 2-4와 같은 단위 셀을 설계하여 칩으로 제작 실험하였고 4x5개의 단위 셀을 가진 거리영상화 소자를 제작 중이다. (그림 3-1) 제작한 chip은 APPOLO System의 MANTOR GRAPHICS를 이용하여, 미국 ORBIT사에서 제공하는 2 μ m double poly, double metal N-well CMOS design rule로 설계하였다.

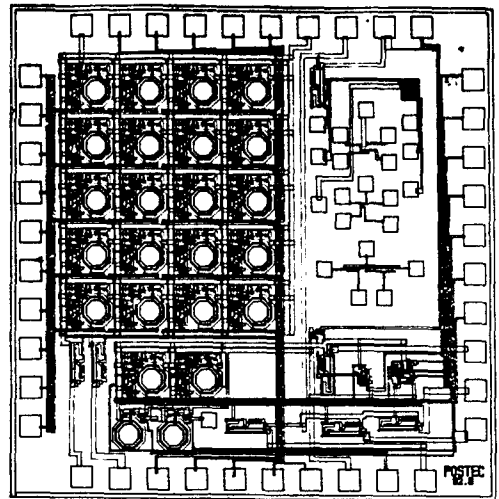


그림 3-1 제작중인 4x5개의 셀을 가진 Rangefinder

3.1 실험 칩의 기능과 구조

실험은 각 부분의 회로들이 설계한대로 잘 동작하는지에 초점을 맞추었다. 물체에서 반사되는 빛 띠가 그리 밝지않으므로 상용 35mm 카메라를 장치하고 필름이 놓이는 위치에 실험 칩을 놓았다. 빛을 조사하는 부분은 632.8nm의 파장을 갖는 30mW HeNe Laser앞에 cylindrical 렌즈를 붙이고, 모터에 의해 회전하는 거울로 빛을 반사시키는 구조로 설치하였다.

3.2 photodiode와 preamp의 실험

photodiode와 preamp는 별도로 설계하여 제작한 칩으로 만

저 실험 하였다. photodiode는 암 전류가 ~10pA, 빛이 있을때 수십 ~ 수백nA 수준으로 신호비는 1000 ~ 10000배 정도된다. 발생된 전류는 logarithm 특성을 갖는 preamp에 의해 전압으로 바뀌게 되고 이 전압의 파형으로 셀의 시선에 빛이 존재하는지를 알게된다. 처음 설계한 칩에는 세 종류의 photodiode-preamp 짝이 있는데 그들 각각의 특징은 표3-1과 같다. 실험에 사용된 칩은 5개이고 실험 물체는 흰 복사용지를 사용하였다.

물체와의 거리 70cm

photodiode pair	빛이 없을때 출력		빛에 의한 펄스 높이	
	평균	표준 편차	평균	표준 편차
8000	-997mV	45mV	66mV	7mV
20000	138mV	55mV	54mV	6mV
20000+S	-110mV	42mV	85mV	17mV

8000 : 8000 μm^2 photodiode - normal size preamp.
 20000 : 20000 μm^2 photodiode - normal size preamp.
 20000+S : 20000 μm^2 photodiode - twice scale up preamp.

표 3 - 1 photodiode and preamp의 칩별 성능 편차

빛이 없을때 preamp의 출력은 일정한 전압을 유지하며 그 전압은 칩마다 조금씩 다르다. 70cm 거리에 있는 물체에 반사된 레이저 빛때에 의한 신호의 높이는 photodiode-preamp 짝 종류에 따라 다르게 나왔는데 8000 μm^2 의 photodiode에 보통크기의 preamp가 면적도 작을 뿐 아니라 성능도 떨어지지 않는 것을 볼 수 있다. 두번째 설계하여 제작한 실험 칩에서는 8000 짝을 사용하였다.

8000 μm^2 photodiode를 이용하여 threshold에 따르는 최대치 감지와 오차를 측정하였다. 물체와 센서사이의 거리는 70cm으로 하였고 결과는 표 3-2와 같다.

pulse 주기 = 6900 μsec (145Hz), ratio = pulse 폭 / pulse 주기

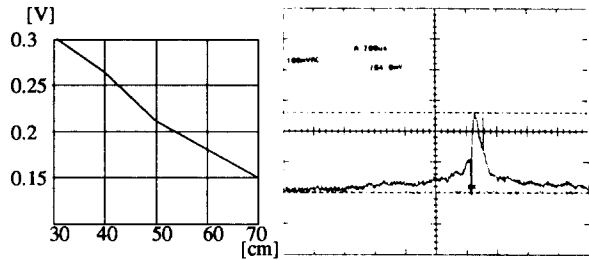
		pulse 폭	rising to peak	peak to falling
10%	μsec	40	9.6	30.3
	ratio	0.58%	0.14%	0.44%
20%	μsec	25.3	7.7	17.7
	ratio	0.36%	0.11%	0.25%
30%	μsec	20	6.9	13.0
	ratio	0.29%	0.10%	0.18%
50%	μsec	15	5.8	9.2
	ratio	0.22%	0.08%	0.13%
80%	μsec	8.8	3.8	5.0
	ratio	0.13%	0.06%	0.07%
90%	μsec	6.15	3.0	3.1
	ratio	0.09%	0.04%	0.05%

표 3 - 2 높이별 threshold방법과 최대치순간과의 오차

표에서 보는 것처럼 최대치의 50%에서 threshold하였을 때 오차는 0.08% 정도로 나타났다. 이 오차는 threshold 방법으로 최대치일때를 대신함으로써 생기는 것으로 0.5% 오차 경계를 시스템 전체 오차 목표로 했을때 충분히 수용 가능한 오차 범위이다.

두번째 설계 제작한 칩의 photodiode-preamp의 성능은 첫번째 제작된 칩보다 성능이 우수 하였다. 거리에 따른 감도를 그림 3-2 에 나타내었다. 첫 번째 제작 칩의 8000 μm^2 의 감도가 70cm거리에서 66mV였는데 반해 두번째 제작 칩의 감도는 같은 거리에서 150mV 정도를 보였다. 이는 칩 자체의 성능 차이

도 있지만 렌즈 교환과 같은 실험 환경이 달라진 이유도 있어 두배이상 좋아졌다고는 말할 수 없다. 30 ~ 70cm 사이에서 감지 전압은 거리에 거의 반비례하는 경향을 보이고있다.



(a) 거리에 따른 감지 전압 (b) 40cm 거리에서 감지된 신호

그림 3 - 2 거리에 따른 감도 측정 결과

3.3 비교기(comparator)의 성능

비교기는 preamp의 아나로그 신호를 디지털 신호 처리 회로에 맞는 신호로 바꾸어주는 기능을 한다. preamp 출력의 peak 감지 대신 일정 문턱 전압(peak의 80 ~ 90%)을 설정해 그 이상의 신호는 "1"로 그 미만은 "0"으로 출력한다. 실제에서 이 기능은 문턱전압 보다 10mV 이상이면 +5V로, 10mV 이하면 -5V로 포화되어야 한다. 문턱 전압이 +5V 혹은 -5V 근처일때를 고려하면 이득이 1000 이상되어야 한다. 이 실험에서 preamp의 DC level이 사실 0.1V 이므로 이득은 500 이상이면 된다.

비교기는 입력되는 신호의 주파수에 따라 이득이 달라 지는데 이 시스템에서 비교기에 입력되는 아나로그 신호의 최대 주파수는 100KHz 정도이다. 그러므로 100KHz에서 이득이 1000 이상인 비교기가 필요하다. 부하 효과가 없을때 실험 설계 칩의 비교기는 직류 이득이 5623 주파수 영역에서 이득이 반으로 떨어지는 곳이 50KHz로 나타났다. 100KHz 부근에서 이득이 1000 정도 되어 필요한 성능을 갖추고 있음을 확인 하였다.

이 비교기의 지연 시간은 0.85 μsec 이다. 전체 시스템이 1000frame/sec로 동작할때 한 화면을 찍는데 10⁻³초가 걸린다. 0.85 μsec 는 10⁻³초에대하여 0.085% 로서 시스템 전체 오차 목표인 0.5% 오차경계에서 작은 부분이다.

3.4 FlipFlop의 실험

FlipFlop은 비교기의 출력을 받아 transmission gate의 개폐를 조정한다. 비교기의 출력 신호폭은 140 frame/sec 정도의 속도에서 10 μsec 정도인데, 이것이 F/F의 입력으로 들어간다. 1000frame/sec에서 비교기 출력은 1 μsec 정도가 될 것이며 이는 500KHz의 사각파와 같다. 실험 칩에서 F/F은 5MHz의 사각파를 입력으로 했을때도 잘 동작하여 원하는 성능을 만족시켰다. F/F의 지연 시간은 35nsec로서 1000frame/sec 동작시 3.5x10⁻³%의 오차를 유발시킨다. 이 오차는 아주 작아 무시될 수 있다.

3.5 Transmission gate의 실험

Transmission gate는 CMOS 구조로 2개의 MOS Tr을 사용하여 만들었다. F/F의 출력 Q'가 NMOS의 gate에, Q가 PMOS의 gate에 연결되어져 있어 F/F이 reset 상태이면 transmission gate는 ON이되고, set상태면 OFF가 된다.

ON 상태에서 transmission gate는 입력 전압에 대하여 160mV 정도 감소된 출력을 보였는데 입력 전압을 1~5V로 변화시켰을때 강하 정도는 일정했다. OFF 상태에서 transmission gate의 입력 전압을 0~5V로 변화시켰을때 출력은 0V로 나왔다. OFF 상태일때 입력 전압에 전혀 영향을 받지 않으므로 OFF 특성은 양호 하지만 ON상태일때 전압 강하는 5V일때 3.2%여서 많은 오차가 발생할 가능성을 가지고 있다. 각 셀마다 보정을 해야할 뿐아니라 보정후에도 오차의 발생 가능성은 여전히 남게 된다.

3.6 축전기의 정보 저장 기능 실험.

실험에 사용된 축전기는 그림 3-3 과 같이 transmission gate 에 의해 전압의 출력이 가능케 되어 있다. 제작된 칩의 축전기는 1pF짜리 이다.

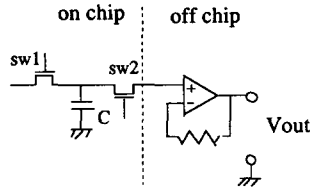


그림 3-3 capacitor 정보의 readout.

입력 전압이 0~5V로 움직일때 입력 gate(sw1)를 필요한 시점에서 닫아 축전기에 전압을 가두어 둔다. 출력 gate(sw2)는 항상 열어두어 축전기의 전압이 시간에 따라 어떻게 변하는지 측정한다. 이때 축전기내의 전하는 입력 gate쪽과 OP 앰프의 입력측 그리고 일부 다른 통로로 새어나가게 된다. 전하가 새어나감으로 전압이 강하하게 되는데 실험에서는 3.5mV/msec 정도의 강하가 있었다. 실험에 사용한 OP 앰프는 MOS입력형으로 최대한 전하의 손실을 줄였다. OP 앰프를 사용하지 않고 직접 측정하면 probe를 통하여 전하가 모두 빠져나가 측정할 수 없게 된다. OP 앰프의 입력측으로 전하가 새어나간양이 출력 gate에 의한 영향과 비슷하다고 판단할 경우 저장된 정보는 5msec 이내에 읽는다고 한다면 신호 감지때보다 17.5mV정도 감소된 전압을 읽게된다. 이는 0.35% 정도 오차 발생 요인이 된다.

3.7 아나로그 거리영상화 소자의 단점.

아나로그 거리 영상화 소자의 단점은 저장되는 정보가 아나로그 전압이기 때문에 leakage에 의한 시간에 따른 강하, transmission gate를 통과 할때의 강하와 단일 readout회로에 수많은 셀을 연결할 경우 각 셀의 축전 용량 C와 비교해 무시할 수 없는 산재 축전용량(stray capacitance)에 의한 강하 등으로 상당히 변형되어 진다는 데 있다. 그리고 그 변형이 셀마다 일정하지 않아 보정이 매우 힘들다. 이 단점은 각 셀에서 카운터를 사용하는 것과 같은 저장 정보의 디지털화로 보완할 수 있는데 일반적으로 디지털화를 하면 정보저장 부분이 무척 넓어져 각 셀의 면적이 커지게되고 데이터선이 요구하는 정밀도의 비트 수만큼 깔려야 하기 때문에 센서의 집적도가 낮아지게 된다.

또한 아나로그 시스템은 저장된 정보를 컴퓨터로 읽어들이

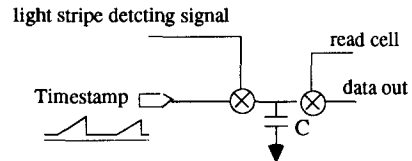
는데 시간이 걸린다. A/D 변환을 거쳐야하고 읽어 들이는 동안 화면을 찍을 수 없기 때문에 센서셀의 수가 늘어나면 찍는데 1/1000초가 걸리더라도 읽어들이는데 ~1/100 초가 걸려 실제 잡을 수 있는 화면은 초당 100화면 이하가 된다.

이 논문에서는 새로운 디지털 구조를 착안하여 셀 면적은 줄이고 대신 sweep time T_s 를 늘임으로 이 문제를 해결하였다. 새 화면을 잡고있는 동안 방금전 화면의 정보를 읽어들이 수 있어 초당 백화면 이상의 거리 영상 정보를 얻을 수 있게하였다.

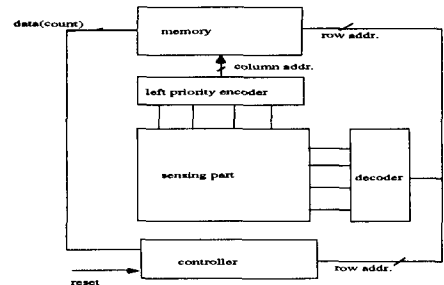
4. 디지털 거리영상화 장치

4.1 개요

디지털 방식 거리영상화 시스템은 아나로그 시스템에서와 는 달리 그림 4-1와 같이 시간 측정을 위한 램프 함수의 전압 대신 카운터의 출력인 이진숫자를 사용한다. 또한 센서 부분과 기록 부분이 분리되는 구조를 가지도록하여 센서부분의 해상도를 높일 수 있게 하였다. 거리 측정 원리는 아나로그 시스템과 같아서 빛평면이 한번 좌에서 우로 지나감으로 거리정보를 얻어낼 수 있다.



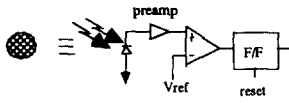
(a) Analog data storage



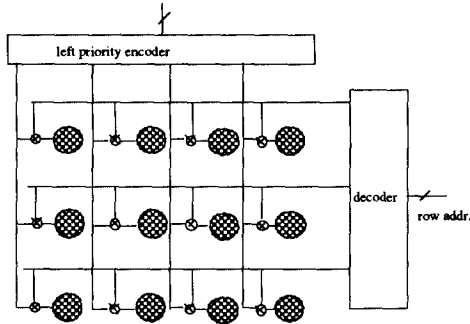
(b) Digital system structure

그림 4-1 아나로그 방식 정보 저장과 디지털 방식 시스템 구조

그림 4-2 는 센서 부분의 구조를 나타내었다. 행 주소(row addr.)가 센서 제어기에서 주어지면 센서 배열중 특정행이 선택되고 그 행의 센서 중 빛 띠를 감지한 센서만이 "1"의 출력을 낸다. 이 신호를 left priority encoder로 encode하면 기억소자(memory)의 열 주소(column addr.)가 된다. 행 주소와 열 주소가 합쳐져 완전한 주소를 이루어 기억소자의 한 장소를 지정하게 된다. 그 장소에 감지한 빛띠의 회전각의 정보(카운터의 출력)를 저장하게된다.



(a) 단위 센서의 내부 구조



(b) 센서 부분의 구조

그림 4-2 센서 부분의 구조

그림 4-3에서 작동예를 보였다. 기억장소의 2차원 배열과 센서의 2차원 배열은 각각 일대일 대응한다. 화살표로 가르킨 행이 현재 지정된 행이다. 센서 부분에서 검출 표시된 부분은 빛을 감지한 센서를 나타낸다. 감지된 센서의 열 위치를 기억 장소에 지정하여 현재 카운트값을 기억시킨다.

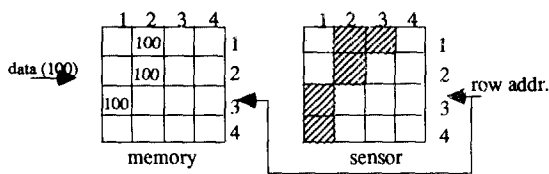


그림 4-3 디지털 거리영상화 소자의 작동 예

이 방식은 한행이 동작하는 동안 다른 행들은 기록부분을 이용할 수 없으므로 빠른 속도로 행들을 탐색해야한다. 정밀도를 n 비트로 하고 싶다면 한 행은 2^n 번 선택되어 저야하고 한 화면을 찍기위해서 열 주소의 encoding은 총 $N \times 2^n$ 번이 된다. 여기서 N 은 행의 갯수이다. 이 encoding 횟수가 한 화면의 거리 정보를 얻는데 걸리는 시간 T_s 를 결정하는 제한 요인이된다. 얻어진 정보는 일반 기억소자로 부터 정보를 읽어내듯이 주소를 지정하여 읽으면되므로 읽어내는 속도가 빠르게된다. 또한 2개의 기억소자를 사용하여 하나가 정보를 잡는 동안 다른 하나는 전 화면에서 얻어진 정보를 주 컴퓨터로 읽어내는 기능을 하도록 하면 데이터의 읽는 시간이 시스템의 동작에 전혀 영향을 주지 않게 된다.

4.2 디지털 시스템의 성능

디지털 시스템에서 정밀도는 데이터 카운터의 비트수를 늘림으로 높일 수 있다. 데이터 카운트의 비트수가 늘어나면 기억소자의 비트수도 늘어나야 하고, 한 화면을 찍는데 걸리는 시간 T_s 도 늘어난다. 데이터가 n bit, 센서 행이 N 개, 하나의 행

을 선택했을때 데이터화까지 걸리는 시간을 T_s 이라 하면 한 화면을 찍는데 소요되는 시간 T_s 는 $2^n \times N \times T_s$ 이 된다. n 이 8 bit, N 이 500 행, T_s 이 50 nsec이면 T_s 는 6.4 msec가 되어 초당 156개의 화면을 잡을 수 있게 된다. 2개의 기억소자를 이용한 기능 전환 방식을 사용하기 때문에 읽어내는 시간이 추가로 계산 되지 않는다. 정밀도면에서 이 시스템은 8 bit을 기준으로 한다면 오차 경계값이 $1/2^{n+1}$, 즉 0.195%가 된다.

5. 결론

본 논문은 아날로그 거리 영상화 센서의 시험 칩을 설계 제작하여 실험한 결과를 보였으며 아날로그 거리영상화 소자의 단점을 보완한 디지털 방식의 구조를 제안하였다.

제작한 아날로그 거리영상화 소자 시험 칩은 양호한 동작을 보였으나 transmission gate와 정보 저장부분이 3.5%정도 오차 발생 소자를 갖고 있었다. 제안한 디지털 시스템은 정밀도가 높고 단위 셀 면적이 작아 해상도를 높일 수 있으며 정보를 읽어내기가 용이하고 오차 경계가 양자화 오차 정도이다. 0.2% 오차 경계에 500행의 센서 배열을 가진 시스템에서 초당 백화면 이상의 거리 정보를 영상화 할 수 있어, 다른 응용 분야에 많은 도움이 될 것으로 생각한다.

참고 문헌

- [1] K. L. Boyer, A. C. Kak, Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging. IEEE Trans. PAMI. Vol.9, NO.1, pp. 14-28, Jan. 1987.
- [2] P. Vuytsteke, A. Oosterlinck, Range Image Acquisition with a Single Binary-Encoded Light Pattern. IEEE Trans. PAMI. Vol.12, No.2, Feb. 1990.
- [3] B. Carrhill, R. Hummel, Experiments with the Intensity Ratio Depth Sensor. CVGIP. 32. pp.337-358, 1985.
- [4] J. Tajima, Rainbow Range Finder Principle for Range Data Acquisition. IEEE Intl. Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, pp.381-386, 1987.
- [5] Y. Sato, K. Araki, S. Parthasarathy, High speed rangefinder. Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision II, SPIE, Vol.850, pp.184-188, 1987.
- [6] T. Kanade, A. Gruss, L. R. Carley, A Very Fast VLSI Rangefinder. Proc. of the IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation, pp.1322-1329, April 1991.