

고속촬영

(High Speed Photography)

1. 서언

Daguerre에 의해 사진촬영이 성공한 후 고속촬영기술은 과학기술분야에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 짧은 시간에 일어나는 물리, 화학적 변화를 비접촉에 의한 가시적 관측이 곧 고속촬영이다.

고속촬영을 이용하여 인간의 동작, 기계구동, 병기, 동력학, 유체역학 등을 연구하는데 많은 공헌을 하였다.

현재는 촬영기술과 전자공업의 발달에 힘입어 극한이용기술, 에너지이용기술, 산업안전기술, 의용기술 등의 기반이 되는 시간분해 분광학(time resolved spectroscopy) 레이저 플라즈마, 핵융합, 압축특성, 물성 분석, photo-chemistry, photo-biology, 반도체물리 등의 첨단 연구에 이용된다.

즉, 고속촬영기술은 그 자체가 과학기술에 있어서 커다란 일부를 차지하고 있는 것이다.

본 글에서는 고속촬영이 과학기술에 어떻게 이용되는가와 그 역사적 발전과정 및 고속촬영방법과 기술에 대하여 언급하고자 한다.

2. 고속촬영의 이해

1851년 영국의 Wiliam Henry Fox Talbot는 순간섬광을 이용하여 최초로 고속영상을 기록하였다.

그후 1872년 경 미국의 Edward Muybridge는 여러대의 카메라를 동원하여 연속촬영에 성공한다.

그는 말이 질주할 때 네개의 발이 지면에서 동시에 떨어지는 순간이 있는가 없는가 하는 논쟁을 끝내는 결과를 얻었다.

노출이 부족하여 희미한 사진이지만 네개의 발이 동시에 지면에서 떨어지는 순간이 있다는 것을 확인한 것이다. 그때까지 대부분의 화가들의 발그림 역시 잘못된 것이라는 것도

확인한 것이다.

즉, 육안으로 확인할 수 없는 과정을 사진으로 기록하여 분석을 한 최초의 시도였다.

인간의 눈은 자연이 준 최고의 카메라임에는 틀림없지만 잔상때문에 시간분해능이 1/10초에 불과하다. 그래서 고속현상판별이 불가능한 것이다.

운동경기의 판정을 위해서는 1/1000초의 분해능이면 충분하지만 공업, 의학, 과학분야에서는 1/10만~1/100만 초까지 분해능이 필요하다. 더욱이 최근에는 짧은 레이저펄스조사에 의해서 물질 상호간의 작용을 관측하는데는 1/10억 초에서 1/10조 초까지의 시간분해능이 필요하다.

고속촬영은 또한 시간의 확대능력을 의미한다. 순간에 일어나는 현상을 고속촬영하여 평상속도(16fps)로 재현시키면 시간을 늘릴 수 있어 자세히 관찰할 수 있다.

이를 테면, 현재로 촬영가능

표 1 고속카메라의 종류와 특성

Camara	Frame rate Frame per sec.	Film capacity	Power	Lens mount
Intermittent pin register camera Redlake LOCAM II	2-500	400 feet	28V DC or AC	C-mount
Rotating prism camera Weinberger STALEX	50-3000	100feet	28V DC	C-mount
Redlake HYCAM	10-10000	400feet	AC	C-mount
Rotating drum camera cordin 350	200-35,000	224 pictures	115 VAC	C-mount
Rotating mirror camera cordin 114	25,000- 5,000,000	25 pictures	Compressed helium	Special mount
Image converter camera cordin 160	500- 20×10 ⁶	5 pictures	115VAC	Pentax
Multiple spark camera V-tek VT-116	100~1×10 ⁶	16 pictures	115 VAC	Special mount

한 최고속도는 초당 6억장이다. 이것을 매초 16fps로 영사한다면 1초간의 현상을 보는데 434일이 걸린다. 즉, 시간확대가 3750만 배나 된다.

고속카메라는 속도에 따라 일반적으로 다음과 같이 크게 분류된다.

- 고속카메라(High speed camera)
300fps~10,000fps
- 초고속카메라(Very high speed camera)
10,000fps~300,000fps
- 극초속카메라(Ultra high speed camera)
300,000fps~

표 1은 고속카메라의 종류와 특성을 정리하였다.

3. 고속촬영방법

3-1. 단일섬광카메라(Single spark camera)

1851년 영국의 William Henry Fox Talbot는 라이덴 병(Leiden

jar)의 아주 짧은 시간(~10⁻⁶ sec)의 불꽃방전을 조명으로 이용하여 고속으로 회전하고 있는 원통에 부착된 신문(런던 타임지)을 뚜렷하게 읽고 사진을 최초로 촬영하였다.

그 당시만 해도 이용할 수 있는 가장 강력한 조명은 태양광이었으나 감광유제가 저감도이기 때문에 긴 노출시간이 필요하였다.

따라서 셔터를 누를 때 카메라가 움직인단든지 피사체가 조금이라도 움직이면 상의 흐림이 생기곤 하였다. 이것을 방지하기 위한 촬영방법이 짧은 전기불꽃방전을 이용하여 피사체를 순간적으로 정지시켜 촬영하는 것이다. 짧은 광펄스에 의한 shuttering의 최초의 시도였다.

오늘날은 레이저이용기술의 발달과 방전전극의 재질이나 기하학적인 구조의 개선, 방전 회로의 개선 등에 힘입어 불꽃 방전시간이 10⁻¹²sec.(1조분의

1초)까지 가능하게 되었다.

3-2. 다중섬광카메라(Multiple spark camera)

단일섬광카메라의 경우 한장의 사진을 얻는데 비해 다중섬광카메라는 순차적인 여러장의 사진을 얻을 수 있다. 이 촬영 방법은 독일의 Cranz와 Shardin에 의해 처음 제작되어 Cranz-Shardin 카메라라고도 한다.

셔터방법은 짧은 광펄스적이고 프레임 분리방법은 여러대의 소형카메라를 배열한 방법이다. 광원의 배열과 카메라의 배열은 통상 1:1로 만든다.

대형 필드렌즈(field lens)에 의해 각각의 광원의 상은 각각의 카메라렌즈 앞에 맺히게 된다. 또한 카메라렌즈에 의해 찍고자 하는 대상이 정지되어 있는 필름에 상이 맺게 된다.

이때, 각각의 광원이 순차적으로 발광하게 되면 시간의 변화에 따른 대상물의 변화가 필름에 기록되는 것이다.

다중섬광카메라는 촬영프레임수가 30여장 정도 이하이고 대상물체에 대한 시각차(parallax)가 있고, 투명물체 또는 반사물체에만 가능하며 자체발광현상의 촬영에는 어려움이 있다.

반면에 제작이 용이하고 촬영 중에도 촬영속도를 자유로이 조절할 수 있으며 조작이 매우 간편하다. 그리고 대부분의 고속카메라보다 화면크기를 크게 할 수 있고 화질이 우수하다는 장점이 있다.

3-3. 고속셔터카메라(Kerr cell and faraday shutter ca-

mera)

일반적으로 기계식 셔터에서 가장 빠른 포칼플랜 셔터가 1/4000초이다. 이것으로는 짧은 노출을 위한 shutter로는 적당하지 않기 때문에 사용되는 것이 Magneto-optical 셔터와 Electro-optical 셔터이다.

○Magneto-optical shutter

페러데이 효과를 이용해서 Faraday shutter라고도 한다. 그림 1에서와 같이 자장에 의한 편광회전을 이용한 것이다.

즉 유리봉에 강한 자장을 걸면 빛이 유리를 통과할 때 회전하면서 편광을 한다. 그러므로 그림에서와 같이 편광판 2개를 겹쳐 놓고 자장을 걸지 않으면 빛은 투과할 수 없으나 유리봉에 강한 전류(1000A, 10000V)를 순간적으로 흘리면 빛의 편광이 90°가 되어 편광판을 투과할 수 있다.

노출시간은 약 1μsec(백만분의 일초)정도이다.

○Electro-optical shutter

Kerr-cell shutter라고도 한다. 페러데이 셔터는 자장(magnetic field)을 이용한 것이고 Kerr-cell shutter는 전장(electric field)을 이용한 것이다.

KDP, Nitrobenzen과 같이 전기장내에서 복굴절물질로 변화하는 물질을 이용한 것이다.

그림 2에서와 같이 Kerr cell을 만들고 입사 편광판 P를 전기장 방향에 대해 45°로 놓는다. 필름쪽에 위치한 편광판 A는 P의 방향과 90°로 놓여 있다.

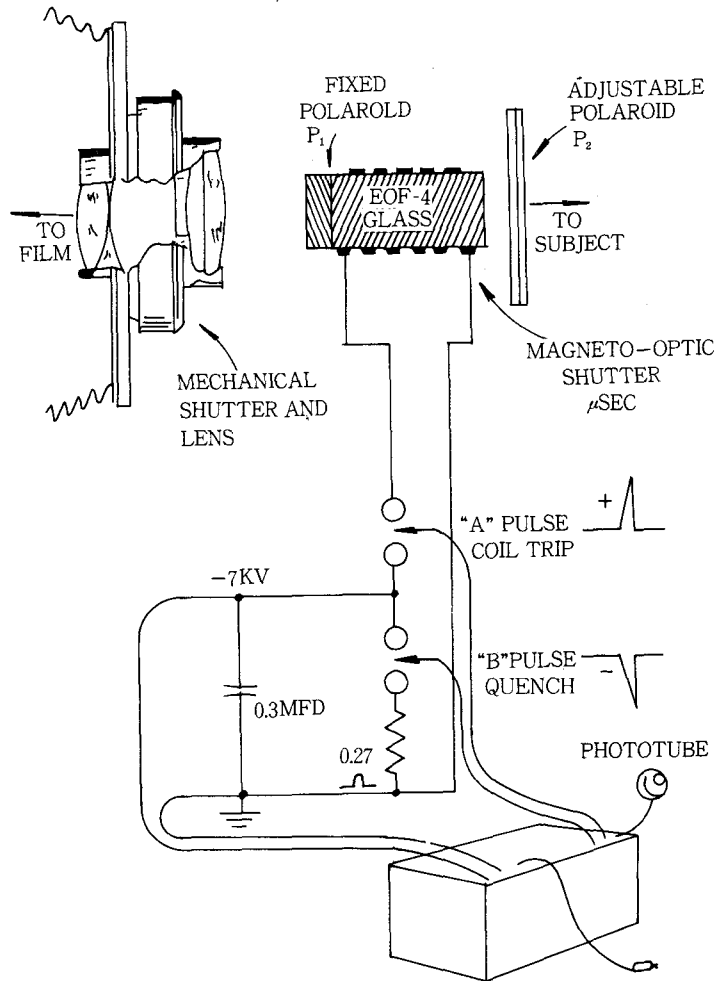


그림 1. Magneto-optical shutter의 도식과 전자회로

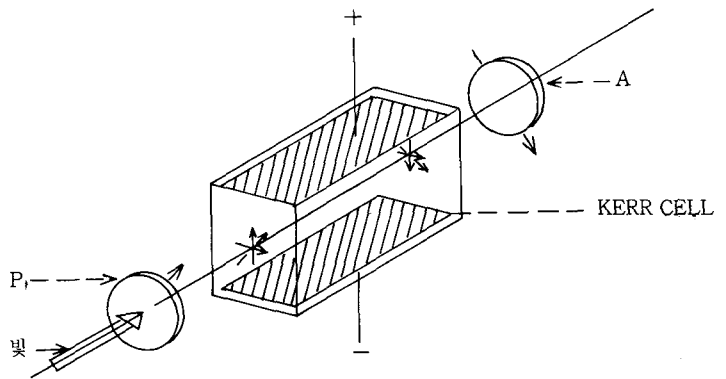


그림 2. Electro-optical shutter

빛이 편광판 P를 지나면서 선형편광되어 Kerr cell을 통과하는 동안 전기장 세기에 비례하여 편광방향이 회전하게 되며, 그 방향이 편광판 A와 일치한 경우 투과도가 가장 크게 된다.

만약 전기장이 없다면 빛은 완전히 차단된다. 가해주는 전압은 대개 20,000V 이상이며, 노출시간은 최대 1 μ sec(10억분의 1초) 정도이다. 단점은 440nm 보다 짧은 파장에서는 불투명하며 투과도도 낮다.

따라서 전기방전현상, 금속 폭발, 화학폭발 등 강력한 빛을 내는 것만 촬영이 가능하다.

3-4. 인터미턴트 핀형카메라 (Intermittent pin registered camera)

보통의 영화촬영용 카메라이다. 필름이 간헐적으로 이동되면서 필름이 정지되는 순간에만 노출이 되는 것이다.

갈퀴(claw)같은 것으로 필름을 간헐적으로 이동시키는 부분과 필름의 인장력한계때문에 16mm인 경우 최고 촬영속도는 500fps 정도이다. 그러나 한순간 필름이 정지되는 순간에 노출되기 때문에 해상력은 좋다.

3-5. 회전프리즘카메라 (Rotating prism camera)

현재까지 과학, 공학, 산업영역에서 가장 많이 사용되고 있는 고속카메라로 약 90% 정도를 차지하고 있다. 1932년 미국의 Western Electric과 Kodak이 최초로 개발하였다.

현재는 Redlake, Photec, NAC,

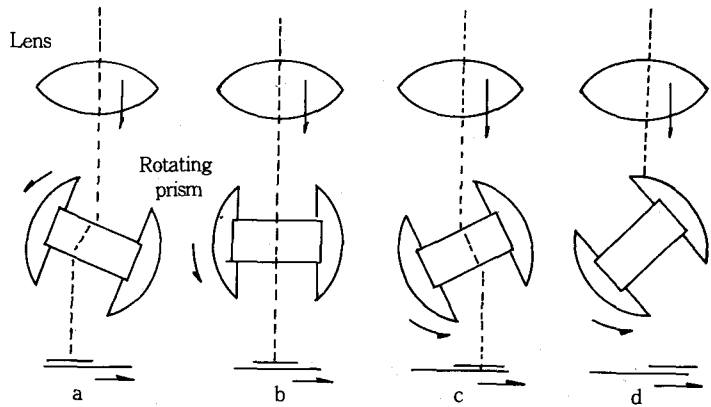


그림3. Rotating prism camera

Weinberger, Magnifax, Hadland, Photo-sonic 등에서 생산되고 있다.

촬영원리는 그림 3에서 보는 바와 같이 필름과 렌즈 사이에 4각 프리즘이 회전하고 있다. 프리즘이 회전하는 동안 물체의 상이 이동하고 있다. 이때 상의 이동속도와 방향이 일치하도록 필름이 이동된다면 물체의 상은 필름에 상대적으로 정지한다.

따라서 필름을 연속적으로 보내면서 렌즈에 의해 맺힌 상이 끌리지 않고 순간적으로 정지된 사진을 계속해서 얻을 수 있는 것이다.

단, 촬영광학계에 회전 프리즘이 사용됨으로써 색수차나 비점수차 등이 있어 전장의 카메라 형태보다는 화질이 떨어진다는 단점이 있다.

회전프리즘 카메라에서의 이러한 결점을 보완하기 위한 연구가 계속되고 있다.

최근에는 필름의 재질, 감광

재료의 개선, 조명광원의 다양한 이용과 노출시간을 줄이기 위해 원판형 셔터를 사용하여 동시에 프리즘 회전각이 클 때 생기는 상의 어긋남이나 수차를 줄일 수 있다.

그러나 아직도 광학계에서는 구조적으로 생기는 광손실문제를 해결해야 한다.

또한, 고속으로 촬영하려면 필름을 가속시키기 위해 많은 필름이 소모되며 현상처리 등의 어려움이 따르기 때문에 때에 따라서는 드럼형태의 카메라가 사용되기도 한다.

3-6. 회전드럼형카메라 (Rotating drum camera)

드럼형 고속카메라는 회전프리즘형 고속카메라의 촬영속도, 필름소모, 현상문제 등을 고려하여 개발되었다. 즉 프리즘형 고속카메라인 경우 필름자체를 고속으로 이동시켜 고속촬영하는 것인데 필름강도에 한계가 있으므로 필름이동속도가 매초 70~80m 이상은 될 수가 없다.

드럼형태의 고속카메라인 경우 드럼에 필름을 장착시킨 후 고속으로 회전시켜 원하는 속도에 도달하면 셔터가 열리면서 고속촬영하는 구조로 되어 있다.

드럼고속카메라의 형태에는 대략 3가지가 있다. 가장 단순한 구조로는 strobo 광원에 의한 광 shuttering 방법으로 자체 발광현상촬영에는 어려움이 있으나, 촬영속도는 최고 100,000fps 이다.

두번째로 회전프리즘형 고속카메라와 회전드럼형 고속카메라의 장점만을 조합해서 제작한 것으로 화면분리는 회전프리즘으로, 필름이동은 회전드럼을 사용한 것이다.

촬영속도는 최고 1000fps이다.

세번째로 가장 많이 사용되고 있는 optical shuttering 방식의 드럼형 초고속카메라이다. 최고촬영속도는 200,000fps이다.

3-7. 회전거울형 카메라(Rotating mirror camera)

기계적인 방법으로는 최고의 촬영속도를 낼 수 있는 초고속카메라이다. 드럼형태의 카메라의 경우 드럼이 회전하는 한계는 최고 초속 500m 정도이다.

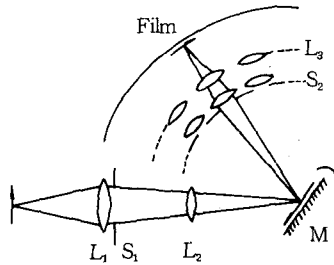
회전거울형 초고속카메라는 필름은 고정되어 있고 고속으로 회전하는 거울에 의해 상을 주사하는 형태로 되어 있다.

1940년 C.D.Miller에 의해 최초로 고안되었다.

촬영원리는 그림 4에서와 같

이 피사체가 대물렌즈와 필드(field)렌즈에 의해 회전거울표면에 상을 맺고 반사된 빛은 호(arc)의 형태로 배열된 중계렌즈에 의해 고정된 필름면에 순차적으로 상을 맺게 된다.

한편 대물렌즈 뒤에 있는 직사각형태의 aperture가 field 렌즈에 의하여 중계렌즈면에 맺히게 된다. 즉 회전거울면과 중계렌즈가 평행을 이루었을 때 클립이 없는 상이 맺게 되는 것이다. 이를 Miller 효과라 한다. 이것이 회전거울형 초고속카메라의 shuttering 방법이며 중계렌즈배열에 따라 화면이 분리된다.



대물렌즈 L_1 과 Field렌즈 L_3 는 거울에 피사체 O의 상을 맺는다. 중계렌즈 L_2 는 필름에 다시 상을 맺게한다. 중계렌즈 S_1 과 S_2 는 구경을 만들고 그 나비가 노출시간을 결정한다.

그림4. Rotating mirror camera

회전거울의 회전속도를 알면 다음과 같은 식에 의하여 촬영속도가 계산된다.

$$V=2Rn$$

$$V \Rightarrow \text{No. of frame / sec.}$$

$$R \Rightarrow \text{Rev / sec.}$$

$$N \Rightarrow \text{No. of relay lens}$$

3-8. 전자영상전환식 카메라 (Electronic image tube camera)

회전프리즘형, 회전드럼형, 회전거울형 등 기계적 방법에 의한 고속촬영의 경우 필름의 인장강도, 기계구성품들의 속도의 한계 등으로 최고 촬영속도는 초당 2500만장이다(cordin 119 camera). 또한 기계식으로 촬영되는 고속카메라의 경우 촬영대상 감광도, 분광감도 등에서 제한을 받는다.

그러나 빛을 전자로 바꾼다면 역학적인 제약들은 사라지게 될 것이다.

또한 감광감도도 증가시킬 수 있고 시간분해능도 최고 50fps (100조분의 1초)까지 가능하며, 분광감도 역시 기계식 카메라가 가시광선영역만 촬영하는 것에 비해 근적외선으로부터 X-선 영역까지 촬영이 가능하다.

1947년 Courtney-pratt와 Saxe 의 제안에 의해 1956년 1×10^8 fps의 전자영상전환식 카메라가 개발되었다.

그림 5에서와 같이 대물렌즈에 의해 X광 음극(photocathode)에 상이 맺히면 focus cone과 양극은 광학적인 상을 전자beam으로 바꾸어 준다.

이때, 양극과 스크린 사이의 shutterplate, 보정판 및 aperture plate에 의해서 beam 형태의 전자를 제어한다.

제어된 전자beam은 phosphor screen에 충돌하여 형광을 냄으로써 상이 재생되는 것이다.

재생된 상이 잔상으로 남아 있을 때 보통카메라로 촬영하

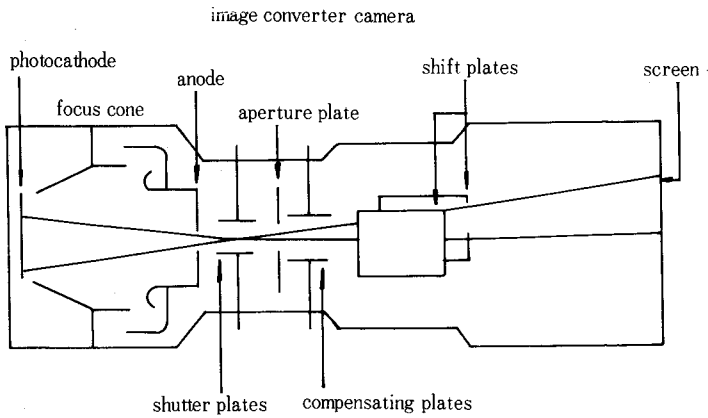


그림 5. Image converter camera

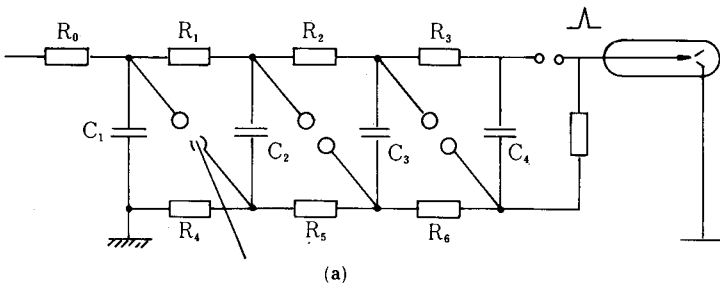


그림 6. Block diagram of flash x-ray pulser

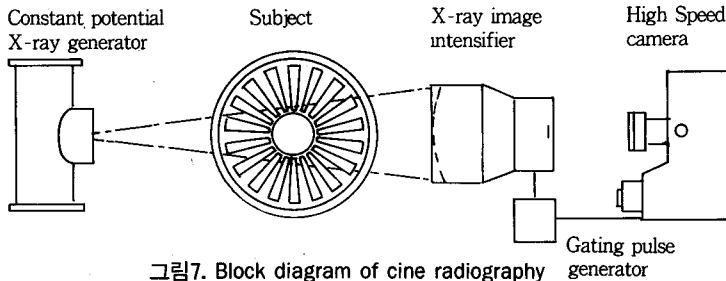


그림 7. Block diagram of cine radiography

표 2. Film camera와 camera의 비교

비교항목	Film camera	Video camera
분해능	약 100 lines / mm	약 25 lines / mm
콘트라스트 폭	약 1 : 1000 (ND 3)	약 1 : 100 (ND 2)
기록 매체	필름	Video tape
촬영결과	수시간 (현상 필요)	즉시
촬영속도	10,000 fps	200 fps (Full frame, color)
화상의 찌그러짐	0.05%	1%
주변상황	영향없음. 내구성이 우수함.	영향있음. EMI 적음. 기계적 충격 등은 치명적임.
초기투자	중간	고가
유지비	고가	저렴함
동작	용이하지 않음	용이함

거나 다른 영상출력장치로 기록한다. 약한 빛일 경우 micro channel plate라는 광증폭장치를 부착시켜 1×10^4 배까지 광량을 증폭한다. 현재 최고 촬영 속도는 초당 60억장이 가능하다.

3-9. 고속 X-선 카메라(High speed radiography)

금속이나 나무와 같이 불투명한 물체 내부에서 일어나는 고속운동현상이라든가, 피사체가 강력한 화염이나 발광을 동반하는 경우 깨끗한 사진을 얻기 위해서는 통상의 광학적 카메라로는 불가능하다. 이때 사용하는 것이 X-선 고속카메라이다.

촬영방법은 두가지인데 단일 X-선 섬광에 의해 촬영하는 방법과 X-선 영화촬영 방법이다.

그림 6은 단일 X-선 섬광 발생 장치로 30nsec(1천만의 3초)동안 X선이 방출된다.

그림 7은 x^6 X-선을 이용하여 연속적으로 촬영하는 구성도이다.

최고 촬영속도는 100,000fps 정도이다.

3-10. 고속 비디오카메라(High speed videography)

고속 비디오카메라는 일반적인 필름형식의 고속카메라보다는 화질면이라든지 내구성에 있어서 뒤지지만 즉시성, 영상처리기술의 발달 등으로 많이 사용되고 있다. 현재 상품화된 것은 초당 2000(Full frame)장까지 가능하다. 표 2은 필름카메라와 비디오 카메라의 비교이다.