

고속촬영의 이해 및 응용

Understanding and Applications of High-Speed Photographing

김 회산*

H. S .Kim

본 장에서는 일반적으로 널리 활용되어 오고 있는 고속촬영기술을, 고속촬영장비를 예로 들어 간단히 설명 함으로써, 우리 주변에서 멀게만 느껴졌던 고속촬영에 대한 이해를 돕고자 한다.

1. 고속촬영의 개요

고속촬영기술은 우리 주변의 모든 물리, 화학적 현상들중에서 우리가 직접 확인할 수 없을 정도로 아주 짧은 시간동안 발생, 진행, 소멸과정을 거치는 현상들중 관심있는 과정을 비접촉식으로 촬영, 분석하는 기술이다. 본 기술은 그동안 반도체공학, 레이저 플라즈마, 동역학, 병기공학, 유체역학등 여러 첨단 기초 과학 분야에 응용되어 왔고, 최근에는 환경, 의학, 스포츠등 우리주변의 생활과 밀접한 분야뿐만이 아니라 컴퓨터를 이용한 영상처리기술의 발달과 더불어 에너지 및 산업 안전기술등 여러 산업분야에도 많이 응용되고 있는 첨단기술중의 한 분야이다.

2. 고속촬영의 이해

실제적인 사진 촬영기술은 1839년 프랑스의 Louis Daguerre에 의해 발명된 이후, 오늘날 과학분야뿐만 아니라 우리 생활주변에서 너무나 가까이 이용하고 있는 기술중의 하나이다.

인간의 눈이 가지고 있는 시간분해능은 약 1/10초 정도로, 그 이하의 시간동안 변화하는 현상을 이해한다는 것은 불가능하기 때문에 어

떠한 특별한 장치를 이용하여 빠른 현상을 촬영한 후 우리가 구별가능한 느린 속도로 현상을 재연(재생)하여야 하는데, 이것이 곧 고속촬영기술이라 할 수 있다. 예를 들어 1초에 백만장을 찍을 수 있는 고속촬영장비로 어떤 고속현상을 1 ms(1/1,000초) 동안 촬영했다고 하면 전체 촬영된 결과는 1,000장이 되는데, 이를 초당 30장의 속도로 재연한다면 약 33초가 소요된다. 즉 실제 1/1,000동안에 일어났던 현상을 33초동안 일어나는 것처럼 시간을 약 33,000배 정도 확대한 결과가 되는데, 이런 면에서 고속촬영기술은 시간분해기술 및 시간확대기술이라고 할 수 있겠다. 현미경이 공간에 대한 확대능력을 갖는 것과 같이 고속촬영장비는 시간에 대한 확대능력을 가지고 있어, 시간의 흐름에 따른 공간적 변화를 분석할 수 있게 해준다.

시간 간격 혹은 시간분해에 대한 연구는 일찌기 갈릴레오가 진동물체의 진동주기에 대해 관심을 가지고 많은 실험을 시도하면서 시작되었다고 할 수 있으며, 그후 오랫동안 큰 진전을 보지 못하다가 1851년 영국의 William Henry Fox Talbot(이하 Talbot)이 최초로 고속촬영을 시도하면서 이 분야의 기술이 많은 발전을 이루게 되었다.

Talbot은 약 500 μ s정도의 지속시간을 갖는 섬광을 이용하여 고속 회전하는 자전거의 바퀴에 부착된 런던 타임지 기사를 선명하게 촬영

*정회원, 브이텍 광계측기술연구소 주임연구원

하는데 성공하였는데, 이는 고속촬영의 최초 시도일 뿐만이 아니라 이 방법은 짧은 지속시간을 갖는 섬광이나 펄스레이저의 개발을 유도하였고, 또한 이러한 광원을 이용한 연속적인 고속촬영기술로 발전하여 현재에도 많이 응용되어 오고 있다.

한편 1872년 미국의 Edward Muybridge는 24대의 카메라를 일렬로 설치하여 달리는 말이 지나가는 순간에 각각의 카메라를 약 2 ms 동안 순차적으로 노출시켜 달리는 말의 네 발이 동시에 지면에서 떨어진다라는 사실을 과학적으로 입증함으로써 최초의 연속 고속촬영을 성공하였다.

고속촬영속도와 그 방법은 촬영대상물의 크기 및 현상의 진행속도와 밀접한 관계가 있는데, 예를 들어 복잡한 구조물의 운동과 변형속도를 관측하기 위해서는 약 ms ~ μ s (micro-second : 10^{-6} 초), 충격파의 진행 또는 물질의 형광 소멸과정은 μ s ~ ns (nano-second : 10^{-9} 초)의 시간분해능이 필요하며, 핵융합반응연구나 각종 초고속 화학반응을 연구하기 위해서는 ps (pico-second : 10^{-12} 초) 이하의 시간분해능이 요구되며, 이 분야는 fs(femto-second : 10^{-15} 초)펄스폭을 갖는 레이저의 개발과 함께 꾸준한 연구가 진행되어 오고 있다.

현재까지 진행된 고속현상의 관측에 있어서 시간분해능의 향상, 발전단계를 근사적으로 표시한 것이 Fig 1 이다.

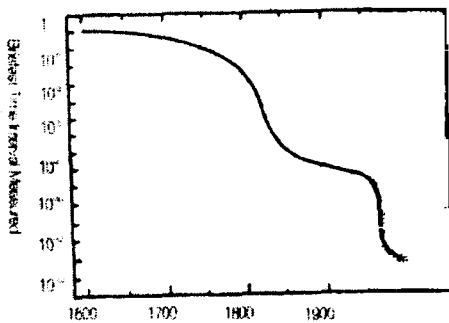


Fig. 1 시간분해능의 발전단계

그림에서 알 수 있듯이 그 발전이 연속적으로 진행된 것이 아니라 두 차례의 급진적인 향상이 있었다. 1820년 전후의 발전은 전기부품의 개발을 바탕으로 광원은 Spark-Gap, 검출기는 눈대신 광전자 증폭튜브, 기록장치로는 오실로스코프 또는 기계식 고속촬영장치를 채용함으로써 이루어진 것이다. 그러나 1960년 이전까지는 Spark-Gap과 같은 광원의 지속시간을 ns이하로 향상시키는 것이 불가능하였으므로 그 이상의 큰 진전이 이루어 지지 못하고 있다가 1962년 이후 Q-Switching, 모드동기, 광펄스 압축기법등이 개발되면서 시간분해능이 현저하게 향상되었다. 현재는 fs대의 펄스폭을 갖는 레이저펄스의 생성이 가능하므로 ps이하의 시간분해능을 얻을 수 있게 되었다.

3. 고속촬영장비의 분류

고속촬영장비(이하 고속카메라)는 구동방법 및 원리, 촬영속도등에 따라 분류할 수 있다.

3.1. 구동방법에 따른 분류

구동방법에 따라서는 기계식 카메라 (Mechanical Camera)와 전자식 카메라 (Electronic Camera)로 나눌 수 있다. 기계식 카메라는 촬영하고자 하는 영상의 경로(Optical Image Path)를 회전거울등과 같은 몇가지의 광학부품을 이용하여 필름과 같은 기록매체에 역학적으로 바꾸어 주어 고속영상을 얻는 카메라로서, 회전 거울형, 회전 드럼형, 회전 프리즘형과 단일 또는 다중 섬광카메라등이 있다. 기계식 카메라는 기록매체가 필름이기 때문에 촬영한 결과를 확인하기 위해서는 필름의 현상 혹은 인화과정등이 필요하며 경우에 따라서 많은 필름을 소모하기도 한다. 또한 정밀한 분석을 위해서는 PC 및 CCD(Charge Coupled Device ; 고체 촬상 소자)카메라, A/D보드를 이용하여 필름에 기록된 결과를 디지털화하는등 많은 번잡함과 시간이 필요하기 때문에 최근에는 활용빈도수가 점점 줄어드는 형편이다.

한편 전자식 카메라는, 기계식 카메라와는

달리 영상전환관(Image Converter Tube)을 이용하여 촬영하고자 하는 대상이 가지고 있는 밝기의 정보(광신호 = 영상)를 이에 비례하는 광전자의 흐름으로 전환(Converting)한 다음, 전자속을 전기장 혹은 자기장으로 그 방향을 편향(Deflection), 단속시켜 고속촬영이 이루어지는 카메라이다. 기록은 일반 필름이나 폴라로이드 필름을 이용할 수도 있지만, 최근 영상처리기술의 발달로 CCD를 이용하여 즉시 결과를 확인, 분석하는 추세이다.

3.2. 원리 및 속도에 따른 분류

영상을 얻는 원리에 따라 영상분리형 카메라(Framing Camera)와 줄무늬 카메라(Streak Camera)로 구분되는데, 그림 2는 중심에서부터 원형으로 진행해 가는 현상을 도식화하여 비교하는 그림이다.

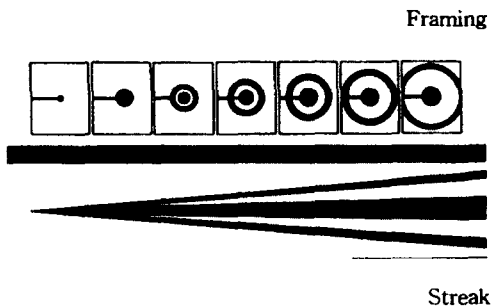


Fig. 2 영상분리형과 스트릭 카메라의 결과비교

Fig 2 에서와 같이, 영상분리형은 우리생활에 가까이 사용하는 휴대용 카메라와 같이 일정한 기간동안 진행되는 어떤 현상을 짧은 셔터타임으로 일정한 시간간격으로 노출하여 순간적인 정지상태로 기록하는 방법인데, 이러한 행위를 "영상을 분리한다"고 한다. 이때 하나의 정지된 기록결과를 한 프레임(One Frame)이라 하고 촬영속도(Framing Rate or Framing Speed)는 초당 몇장을 기록(촬영)하느냐에 따라 구분하는데, 단위는 fps(Frame Per Second)로 표시한다. 이러한 영상분리형은 촬영대상체의 형태가

시간변화에 따라 어떻게 진행되는지를 연구할 때 사용하며, 단지 한장만을 기록할 경우 단일 영상분리형(Single Frame), 그리고 여러장을 기록할 경우 다중 영상분리형 카메라(Multi-Frame Camera)라 한다. 또한 촬영속도에 따라서,

- 고속 카메라(High Speed Camera, 300 ~ 10,000 fps)
- 초고속 카메라(Very High Speed Camera, 10,000 ~ 300,000 fps)
- 극 초고속 카메라(Ultra-High Speed Camera, 300,000 fps이상)

으로 구분하기도 한다.

한편, 줄무늬 카메라는 그림에서와 같이 슬릿을 이용하여 시간 간격이 없이 연속적으로 촬영하는 방법으로, 가로축은 시간을, 세로축은 촬영대상체의 운동(이동)거리를 나타내므로, 그 기울기가 바로 속도에 해당되어 촬영대상체의 시간에 따른 순간속도를 관찰하고자 할때 사용하는 방법이다. 필요한 경우 두가지의 방법이 동시에 적용될 수도 있다.

3.3. 회전 거울형 카메라 (Rotating Mirror Camera)

회전 거울형 카메라는 회전 거울을 이용하여 촬영대상체의 상을 정지한 필름위에 전송하여 분리영상 혹은 줄무늬상을 얻는 방법이며, 기계식 카메라중 최고의 속도($\sim 10^7$ fps)의 속도를 갖는 카메라이다. Fig 3은 영상분리형 회전 거울형 카메라의 개략도로서, 그림에서 Rear Stop 및 증계렌즈(Relay Lens)를 제거하고 피사체의 상이 필름에 맺도록 하면 바로 줄무늬상을 얻을 수 있다.

그림에서와 같이 피사체의 상이 대물렌즈를 통하여 회전거울 표면에 맺히고, 호형태로 배열되어 있는 증계렌즈에 의하여 다시 필름위에 상이 형성됨으로서 초고속촬영이 이루어진다.

Fig 4은 설치된 회전 거울형 카메라이며, Fig 5는 촬영예이다.

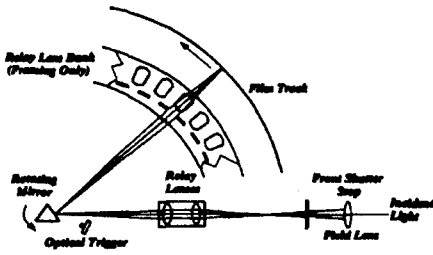


Fig 3 회전 거울형 카메라의 개략도

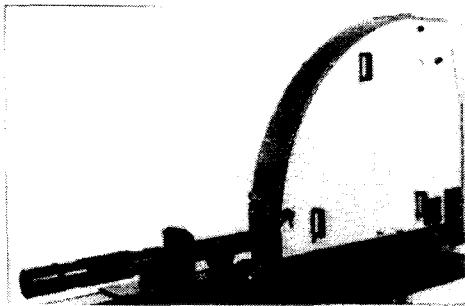


Fig 4 회전 거울형 카메라

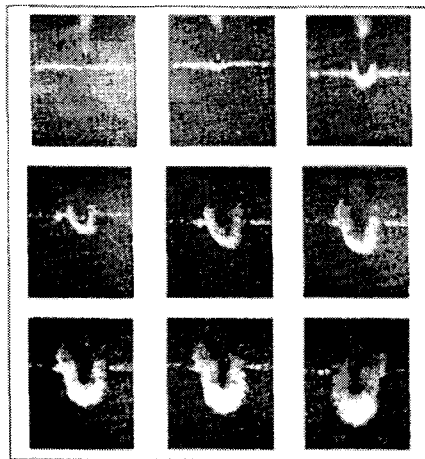


Fig 5 회전 거울형 카메라의 촬영 예

3.4. 다중 섬광 카메라(Multi-Spark Camera)

이 카메라는 독일의 Crantz 와 Schardin 에

의해 처음 제작되어 Crantz-Schardin 카메라 라고도 하며, 구조는 그림 2-4와 같다.

이 카메라는 몇 개의 점광원(Spot Light Source)으로 이루어진 다중 광원들과 대형 Field Lens, 광원수와 같은 대물렌즈군(Objective Lenses)으로 구성되어 있으며, 대물렌즈 뒤에 상을 기록하는 필름이 위치한다. 광원의 상이 Field Lens에 의해 대물렌즈의 주요면(Principal Plane)에 맺히도록 하며, Field Lens가 사이에 위치한 대상물의 실상(Real Image)은 대물렌즈에 의해서 각각의 정지필름 위에 정확히 위치한다.

일반적으로 광원은 Spark-Gap을 사용하며 각각 일정한 간격으로 μs 내의 짧은 점광원을 발생시켜 연속적인 분리영상을 얻게 된다. 이 카메라는 대상물이 투명한 경우이거나 그림영상(Shadow Image)을 얻고자 할때 사용이 가능하며, 각 영상의 촬영간격(Frame Separation)을 용이하게 조절할 수 있다. 촬영속도는 10^6 fps 정도까지 가능하다.

Fig 7은 다중 섬광 카메라를 이용하여 충격파의 전달과정을 촬영한 예이다.

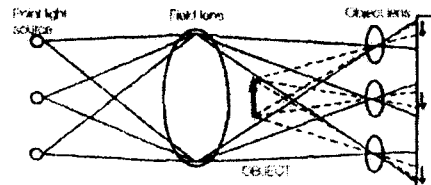


Fig 6 다중 섬광 카메라의 개략도

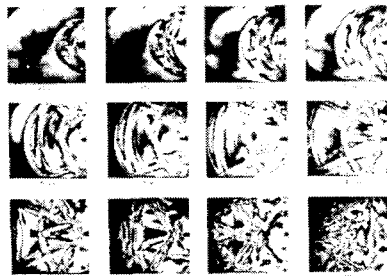


Fig 7 다중섬광 카메라를 이용한 충격파의 전달과정

3.5. (전자식)스트리크 카메라 (Electronic Streak Camera)

스트리크 카메라는 영상전환관(이하 스트리크 튜브)을 이용하여 스트리크 영상을 얻는 카메라로서, 기계식에 비해 시간분해능이 월등하기 때문에 피사체에서 발생하는 시간적인 광정보를 공간적으로 늘려 주로 분광계측기로서 시간분해 분광학에 응용된다. Fig 8은 스트리크 튜브의 원리를 나타낸다.

피사체에서 발생되어 맺어진 슬릿상은 렌즈에 의하여 스트리크 튜브의 광음극(Photocathode)에 맺히게 되고 이상의 밝기에 비례하는 광전자가 광음극에서 발생된다. 이 전자속은 슬릿이나 그리드, 메쉬등으로 이루어지는 가속전극(Accelerating Electrodes)과 광음극사이의 전위차로 인하여 인광판(Phosphor Screen)으로 직선운동을 하게 되는데, 편향판(Deflection Plate)에 인가되는 전압을 가변시켜 줌으로서 전자속을 인광판의 위에서 아래방향으로 주사(Sweeping)시켜, 피사체에서 발생한 시간적인 광정보를 공간적으로 펼쳐주게 된다. 이때 전자속은 인광판과의 상호작용으로 인하여 다시 빛으로 바뀌어 CDD 및 PC, A/D(Analog to Digital)보드로 이루어진 분석장치를 이용하여 우리가 신호를 시간 및 밝기(Intensity) 혹은 위치(Position)등 2차원이나 3차원으로의 분석이 가능한데, 인광판의 수직축이 바로 시간축이 된다.

스트리크 카메라의 시간분해능은 주로 ps에서 수백 fs정도가 많이 활용되고 있다. 예를 들어

시간분해능이 1 ps라 하면, 빛이 공기중에서 1 ns에 300 mm를 이동한다고 할때, 0.3 mm의 공간적인 간격으로 빛의 순서를 판별할 수 있는 능력이된다. 측정의 반복율은 편향판에 대한 전압의 인가 방법에 따라 수십 MHz까지 가능하며, 광음극의 종류에 따라 200 nm ~ 1500 nm까지 넓은 파장대역에 대한 감도를 갖는다.

Fig 11은 펄스폭 3ns의 질소 레이저를 Rhodamine 6D에 조사했을 때의 형광의 Decay Profile을 나타내며, Fig 12는 레이저 펄스폭 및 간격을 측정한 예이다.

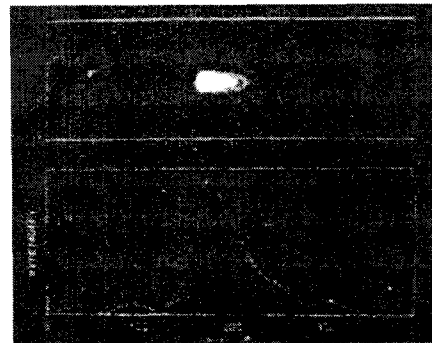


Fig 9 형광수명시간 측정 예

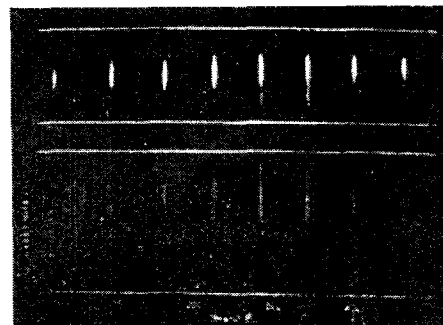


Fig. 10 레이저 펄스 측정 예

3.6. Single Frame Camera(이하 SFC)

SFC는 Proximity Focused MCP (Micro-Channel Plate) Intensifier(이하 MCP)를 이용한 한 프레임용 고속 카메라이다. Fig 11은 SFC의 구조인데 ICCD(High Speed Gated Intensified CCD Camera)의 일종으로서, 셔터타임이 10 ns이하까지 가능하며 구조상 왜곡이 거의 없는 MCP의 고유 특성을 이용한 고

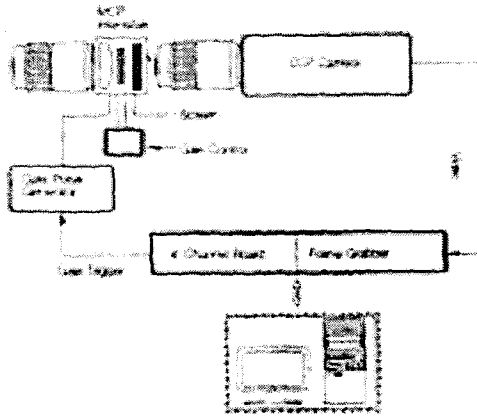


Fig. 11 SFC의 구조

속 카메라로서, 최근 많은 응용분야에 활용되고 있다.

SFC는 최근 펄스레이저와 함께 연소기구내의 온도 및 농도등을 2차원으로 측정, 분석하는 레이저 유도 형광기술(LIF : Laser Induced Fluorescence)에 유용하게 사용되고 있다.

Fig 12는 MPI 인젝터 분사를 촬영한 예이다.

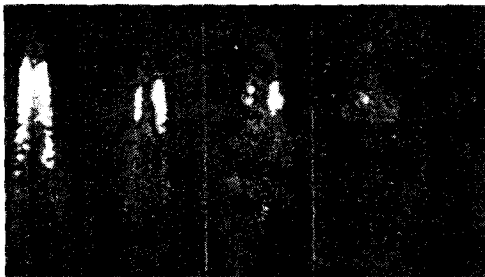


Fig. 12 SFC의 노즐 분사촬영 예

4. 고속촬영의 기술동향

필름재료를 기반으로 하여 고속현상을 기록하고 보여주고 분석하는 모든 고속촬영기술은 반도체기술의 발달과 더불어 전자재료를 기반으로 하는 고속촬영기술에 밀려 그 응용분야가 점점 좁아지고 있는 실정이다.

높은 공간 분해능과 많은 고속 영상을 얻을 수 있으며 비교적 간단하다는 장점을 지녀 그동안 많이 사용되어 오던 필름 카메라는, 필름을 다루기가 복잡하고 결과를 확인하기 위해서는

화학약품을 이용할 뿐만이 아니라 즉석에서 확인이 불가능하여 쓸데없이 반복촬영을 해야하고 때로는 많은 필름을 낭비하는 경우가 허다하여 새로운 기록매체가 필요하게 되었는데, 1970년도에 탄생한 CCD(Charge Coupled Device) 카메라(이하 CCD)가 바로 그 해답을 주고 있다.

현재 휴대용 비디오 카메라나 디지털 카메라, 감시용 CCTV (Closed Circuit TV ; 폐쇄회로 TV), 가정에서 Door Phone과 함께 방문객 감시용으로, 최근 컴퓨터 및 통신기술의 발달로 가능해진 실시간 화상회의등 우리주변에 너무나 많이 활용되고 있는 CCD는, 1970년 미국의 Bell Lab.에서 개발되어 그동안 주로 생활주변에 많이 응용되어 왔다.

CCD의 고속촬영에의 활용은 초기에 기존의 고속 카메라에 부수적으로 연결하여 사용되어 오다가 최근 Frame Rate(촬영속도) 및 공간분해능(Spatial Resolution), PC메모리, 데이터 전송속도등의 향상으로 자체가 고속 카메라인 High Speed Video camera(이하 HSV)를 탄생시켰다.

현재 HSV의 촬영속도는 4,500 fps정도까지 가능하나 이 경우 Image Foramt(데이터 량)은 겨우 (H) 256 x (V) 256 px (PiXel, 화소 ; Picture Element)밖에 안되며, 적어도 필름의 분해능을 대체하기 위해 필요한 1024 x 1024 px의 경우 촬영속도가 200 fps대에 불과하다.

Fig 13은 현재 보급되고 있는 HSV에서 촬영속도와 데이터 전송속도, 영상데이터의 크기를 나타내는데, 보는 바와 같이 촬영속도를 높이면 데이터 량이 적어진다.

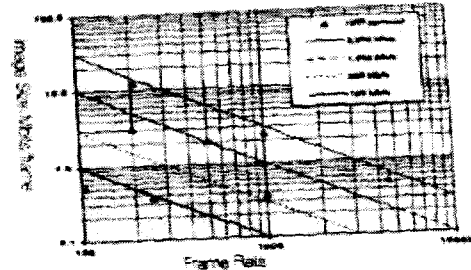


Fig. 13 HSV에서 영상의 크기 및 데이터 전송속도 촬영속도와의 관계

현재 개발되어 보급되고 있는 HSV는 기존의 고속 카메라의 역할을 다 하기에는 아주 미약하지만 데이터 압축기법이나 전송속도, 저장속도 및 저장능력 향상등 주변 기술의 급속한 발달로 머지 않아 기계식 카메라의 많은 영역을 대체하리라 생각한다.

5. 고속촬영의 활용

고속카메라는 우리가 육안으로 식별할 수 없는 우리 주변의 모든 현상들을 관측할 수 있도록 해주는 장치로서, 떨어지는 물방울이 만드는 모양에서부터 자동차 유리가 깨지는 과정, 테니스공의 압축과정, 골프공의 비행장면, 비행기 프로펠러의 회전상태, 체조선수의 몸동작 분석등 우리 가까이에서 부터, 최첨단 기초, 응용과학분야까지 다방면으로 활용되고 있는데, 주로 활용되는 분야를 정리하면 다음과 같다.

- 유체역학, 수리학, 에너지공학
- 각종 폭발연구, 탄도연구, 충격파 전파연구
- 광통신연구, 화학반응연구, 연소현상연구
- 각종 초고속 전자소자 개발, 반도체 공학
- 생화학 분야, 생의학분야
- 공장 자동화등