

고속 광 표면 형상 계측

종래 표면 형상 계측은 제조 공정에서 채택되어 계측에 적합하도록 가공된 소수의 샘플을 계측실이라는 조건이 갖추어진 환경에서 계측 시간에 대한 엄격한 제약 없이 이루어지는 소위 오프라인 계측이 일반적으로 행해졌다. 그러나 최근에는 더욱 향상된 견고성을 갖으면서 더욱 빠른 표면 형상 계측이 요구되고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 계속될 것으로 예상된다. 이러한 배경 하에 본 고에서는 계측의 견고성과 고속성의 관점에서 본 광 표면 형상 계측을 다루었다. 먼저 광 표면 형상 계측 기술의 현 상황을 개략적으로 설명한 후, 견고성을 가지면서 고속의 표면 형상 계측 기법으로서, 현재 그리고 앞으로도 중요한 몇 가지 기법에 대하여 최근의 동향을 간단하게 소개한다. 그런 다음에 로드맵을 상세하게 설명하기로 한다.

편집자 주

1. 현재의 광 표면 형상 계측 기술

1) 각종 광 표면 형상 계측 기법

그림 1은 각종 광표면 형상 계측 방법을 정리한 것이다. 지금까지 수많은 기법이 제안되었으며, 또 지금도 계속 제안되고 있으나, 계측 원리적으로 보면 그림 1에서 왼쪽에 있는 5가지로 정리된다. 향후 10년~20년 정도의 기간에서 볼 때, 앞으로 수많은 기법 이

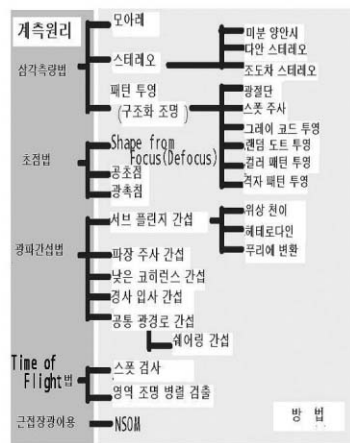


그림 1. 각종 광 표면 형상 계측 방법



그림 2. 계측 범위와 계측 분해능

제안된다고 하더라도, 원리적으로는 변함이 없을 것이라 생각된다. 그림 2는 각각의 원리를 대상으로 하는 계측 범위와 계측 정밀도의 관계를 정리한 것이다. 결정적인 하나의 기법이 존재하는 것이 아니라, 각각의 기법이 분담하여 계측 영역 전체를 커버하고 있다. 즉, 계측 대상에 따라 원리를 구분하여 사용해야 된다는 것을 알 수 있다.

근접장 광의 이용은 최근들어 제안된 새로운 계측 원리로서, 나노 테크놀로지의 급속한 발전과 더불어 향후 현저한 발전이 기대되는 기법이다. 그러나, 고속 계측은 원리적으로 어렵다는 인식이 있으므로, 본고에서는 검토 대상으로 하지 않는다(표면 형상 계측이 아니라 2차원적인 영상 계측 관점에서는 면 발광 레이저를 사용한 어레이화의 연구 등이 보고되고 있어, 앞으로는 고속 계측을 충분히 기대할 수 있다). 또한 광과 간섭 계측 방법에 대해서는 제3장 제1절 및 제5절에 상세하게 보고되어 있으며, 중복을 피하기 위하여 그리고 계측의 로버스트성의 관점에서도 여기서는 논외로 하기로 한다. 나머지 3개의 계측 원리에 대하여 그 원리적인 기초와 최근의 동향을 아래에 간단하게 소개한다.

2) 최근의 동향

① 삼각 측량법

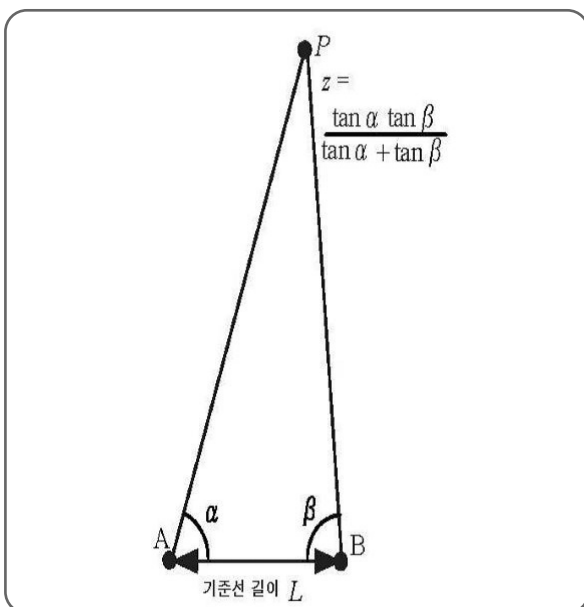


그림 3. 삼각 측량법의 원리

삼각 측량법은 그림 3에 나타난 바와 같이 위치 관계 L(기선장:baseline length)이 이미 알고 있는 두 점(2개의 삼각점 A, B)으로부터 주목점 P를 예측하는 각도 α, β 를 계측하면, 주목점 P의 공간적인 위치를 지정할 수 있는 것으로, 거리 계측 기법으로 널리 이용되고 있다. 이미 알고 있는 2점 중에서 하나를 스폿 또는 슬릿 등의 패턴을 물체에 투영하는 조명계로 하고, 다른 하나에 카메라, PSD 등의 검출기를 두어 검출기에 의해 얻어진다. 패턴 광의 물체 표면에서의 반사상을 해석하면, 상기 삼각 측량 원리에 의해 물체 표면 위치를 구할 수 있다. 투영하는 패턴의 차이에 따라 다른 명칭을 가진 수많은 기법이 제안되어 있는데, 이러한 기법을 총칭하여 여기서는 액티브 삼각 측량법이라고 부른다. 패턴 조명계를 사용하지 않고 이미 알고 있는 두 점에 모두 카메라를 두는 계측 기법이 스테레오법이다. 스테레오법과 같이 특별한 조명계를 갖지 않는 기법을 총칭하여 패시브 삼각 측량법이라 한다.

삼각 측량법의 원리를 기초로 하는 기법은 현재 가장 실용적으로 사용되고 있다. 미세 물체의 고정밀도 계측에서 거대 구조물의 계측에 이르기까지 적용 범위가 넓으며, 많은 고속 계측 기법도 제안되어 있다. 그러나, 조명계의 광축과 검출계의 광축 사이(액티브 삼각 측량법) 또는 두 검출계의 광축사이(패시브 삼각 측량)가 각도를 이루기(폭주각) 때문에, 어느 한 쪽 방향에서는 광이 도달하지 않는 그림자 영역(occlusion:교합)이 발생한다는 문제점이 있다. 삼각 측량법에서의 계측 정밀도는 폭주각의 크기에 지배

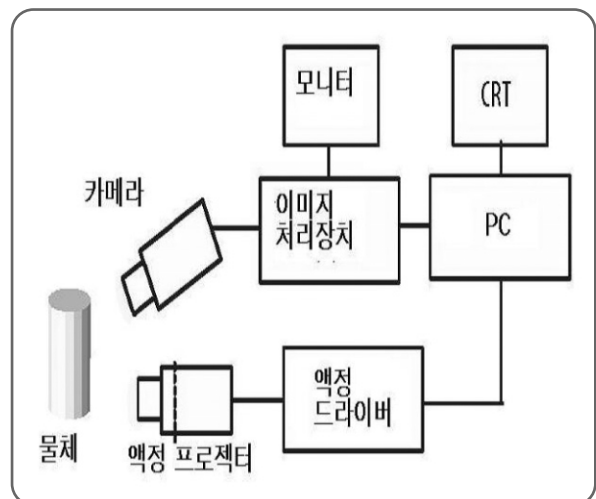


그림 4. 격자 패턴 촬영법의 시스템 예

옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵 II

되므로, 계측이 정밀해질수록 이러한 문제는 더 심각해진다. 또한 조명광이 고반사면에서 반사하고 나서 다시 다른 면에서 반사하는 다중 반사가 일어나면 조명 방향의 지정이 불가능해져 오계측이 이루어질 우려도 있다. 이러한 문제점들은 원리적인 문제점이기 때문에 완전히 해결할 수는 없다. 따라서 문제가 일어나지 않는 범위 내에서 사용할 수 밖에 없다.

액티브 삼각 측량법에서 현재 가장 실용적으로 사용되고 있는 고속 계측 기법은 격자 패턴 투영법일 것이다(그림 4). 무늬 해석 기법인 프린지 스캔법(위상 시프트법)을 도입함으로써 종래의 삼각 측량법으로는 얻을 수 없었던 μm 오더의 높은 정밀도뿐만 아니라 몇 백만점/s의 고속 계측을 실현할 수 있게 되었다. 프린지 스캔법은 무늬 패턴을 기계적으로 위상 시프트하여 적어도 3장의 위상 시프트 영상을 필요로 하는데, 최근에는 고속화를 위하여 각각 다른 조명 파장을 사용하여 3종의 위상 시프트 패턴을 동시에 투영하는 기법³⁾이나 3개의 라인 센서를 나란히 일차원 스캔하여 3장의 위상 시프트 영상을 동시에 얻는 기법²⁾을 이용한 장치가 시판되고 있다. 또한 액정 장치를 사용하여 기계 이동에 상관없이 위상 시

프트하는 기법³⁾도 제안되었다. 격자 패턴 투영법은 경사가 급한 단차나 고립점의 계측은 불가능하다는 문제가 있지만, 앞으로도 매우 유력한 기법으로써 널리 보급되어 갈 것임에는 틀림 없다.

패시브 삼각 측량법은 특별한 조명을 필요로 하지 않는다는 점에서 다른 기법에는 없는 확고한 우위성을 가지고 있으며, 자동차의 자동 운전에서 장애물을 피하거나 침입자를 감시하는 등 계측이라기보다 환경 인식에 주로 이용될 것이다. 종래의 스테레오법은 두 장의 스테레오 영상의 대응점을 탐색한다는 문제점이 있어 고속 계측이 어려웠으나, 최근에는 3대 이상의 카메라로 대응점 탐색 문제를 간략화한 직교다안(복수 기선) 스테레오법이 개발되어 비디오훈속도로 계측할 수 있는 장치도 시판되고 있다⁴⁾.

② Time of Flight 법

Time of Flight법은 비행 시간 계측 방법, 광 레이더법이라고도 불리며, 사출광이 물체 표면에서 반사한 후 되돌아갈 때까지의 시간을 계측함으로써 물체까지의 거리를 구한다. Time of Flight법에는 광펄스를 사출하여 그 왕복 시간을 직접 카운트하는 펄스 비행 시간 계측형과 정현파 모양으로 진폭 변조된 광을 사출하여 물체에서 반사될 때 물체의 기복에 따라 발생하는 위상 어긋남을 검출하는

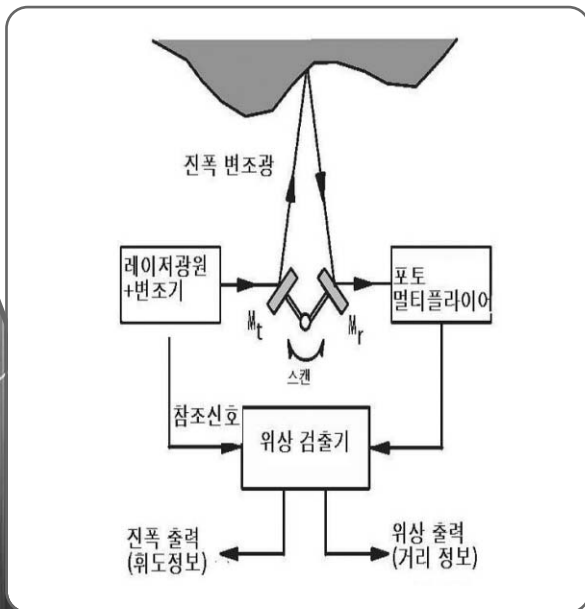


그림 5. 삼각 측량법의 원리

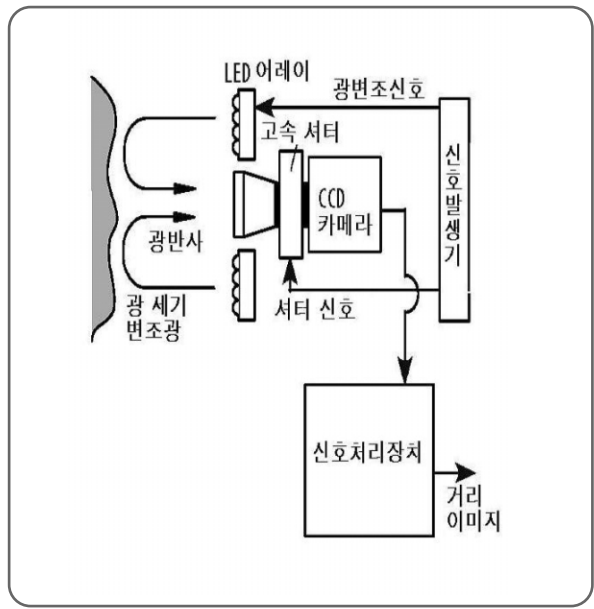


그림 6. 격자 패턴 촬영법의 시스템 예⁵⁾

위상 검출형이 있다. 그림 5에 위상 검출형 시스템의 예를 나타내었다. 30만km/s의 속도로 전파되는 광을 이용하여 물체 표면의 약간의 요철에 의한 전파 시간 차이를 평가하기란 쉽지 않다. 따라서, 정밀도 면에서 보면 현재 겨우 10mm 정도이다.

종래의 Time of Flight법은 3차원적인 계측을 위해서는 스캐너로 물체 위를 2차원 주사해야만 했기 때문에 고속 계측이 어려웠다. 그러나, 최근들어 CMOS 공정에 의한 위상 검출 회로의 어레이화가 제안되었으며, 주사하지 않고도 고속의 3차원 계측이 가능해졌다. 이미 시판되고 있으며, 가상 키보드나 게임기에 조립되는 등 다방면에서의 응용이 기대되고 있다⁶⁾. 또한 새로운 기법으로 감소 변조 광과 증가 변조광을 번갈아 사출하고, 일반적인 CCD 카메라와 고속 셔터를 조합시킨 검출 기구에 의해 검출 광량의 차이로 대상 물체의 기복 정보를 얻어내는 기법이 제안되었다⁷⁾(그림 6). 이 장치에서는 15 frames/s의 속도로 분해능 18mm의 계측이 가능하다고 하여 방송 분야에서의 이용이 시도되고 있다. 또한 비용적인 문제 때문에 아직 실용화되고 있지는 않으나, 초단(超短) 펄스 레이저를 이용한 계측 기법도 제안되어⁸⁾, 정밀 계측까지 가능한 기법으로 향후 실용화가 기대된다.

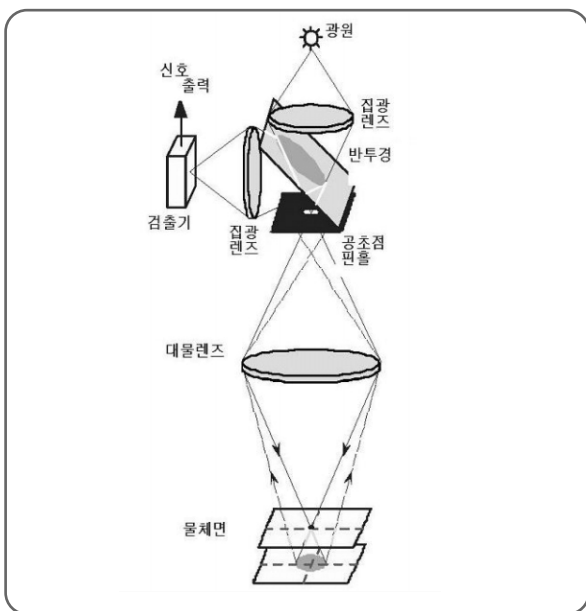


그림 7. 공초점 광학계(반사형)

③ 초점법

초점법은 초점 조정법 또는 포커스법이라 불리우며, 렌즈의 초점을 맞추으로써 물체 표면 위치를 계측하는 기법이다. 광 탐침(觸針)이라고는 점 계측형 측정 프로브의 대부분은 초점법을 계측 원리로 한다. 그러나, 점 계측으로는 고속 계측이 불가능하므로 여기서는 채택하지 않는다. 비교적 고속 계측이 가능한 면적 계측 기법으로는 Shape(Depth) from focus(Defocus)법과 공초점(confocal)법이 알려져 있다. 전자는 일반적인 결상 렌즈로 얻어진 영상으로부터 영상 안에 있는 모양(엣지)의 콘트라스트를 구함으로써 포커스의 핀트 일치 정도를 평가하는 기법이고, 후자는 공초점 광학계라는 특수한 광학계에 의해 초점의 일치 정도를 평가하는 기법이다. 그림 7은 공초점 광학계의 계측 원리이다. 점 광원의 상을 물체에 투영하여 점 광원과 광학적으로 동등한 위치에 놓인 핀 홀에 의해 물체에서 반사된 광을 수광하고, 핀 홀을 통과한 광 강도를 검출기로 검출한다. 포커스 위치(점 광원의 상이 가능한 위치에 물체 표면이 있을 때에는, 핀 홀 위치에 점 광원의 상이 형성되어 많은 광이 핀 홀을 통과할 수 있으나, 물체 표면 위치가 포커스 위치로부터 벗어나면 핀 홀을 통과할 수 있는 광은 적어지게 된다. 물체나 광학계를 광 축 방향으로 이동시켜 검출기 출력이 가장 커지는 위치를 탐색하면 물체의 표면 위치를 지정할 수 있게 된다. 보통은, 면 데이터를 얻기 위하여 기계적인 레이저 빔 편향 등으로 XY의 주사를 행한다.

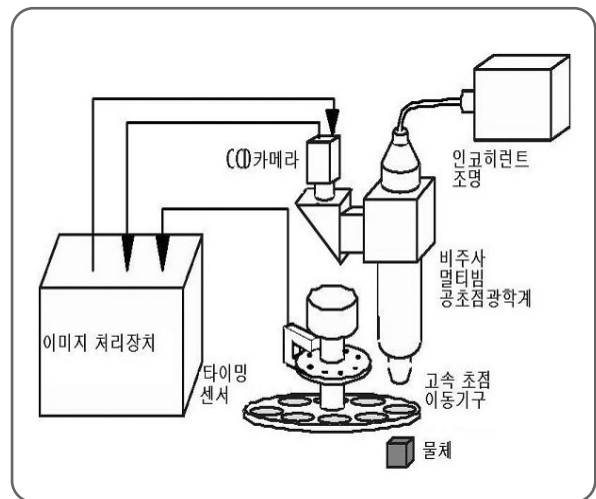


그림 8. 공초점법의 고속화에

초점법은 대물 렌즈의 개구수 (N.A.)를 크게 함으로써 서브 μm 수준의 계측 정밀도를 얻을 수 있으며, 삼각 측량법과 같은 교합(occlusion) 발생이나 다중 반사 문제가 발생하지 않기 때문에, 보다 신뢰성이 높은 계측을 기대할 수 있다. 그러나, 삼각 측량법을 원리로 하는 기법에 비해 속도면에서 훨씬 떨어지는 점이 문제로 지적되어 왔다.

최근들어 공초점법을 고속화하는 기법이 연달아 발표되었다. XYZ의 3축 주사를 필요로 하는 것이 공초점법의 고속화를 어렵게 하는 원인인데, 마이크로 렌즈 어레이와 핀 홀 어레이를 사용하여 XY 주사가 불필요하게 되고, 두께가 다른 평행한 평면 유리를 배열한 원반을 대물 렌즈의 광 경로 내에서 회전시킴으로써 광학적으로 고속의 Z 주사를 실현하였다⁹⁾(그림 8). 또, 검출기를 초점이 다른 위치에 여러 단으로 배열함으로써 Z 주사를 없애는 기법도 제안되었다¹⁰⁾.

2. 로드맵 설명

앞서 설명한 바와 같이, 향후 10년~20년 정도의 기간에서 볼 때, 앞으로도 수많은 기법이 제안된다고 하더라도 원리적으로는 변함이 없을 것이다. 따라서 상술한 3가지 원리에 의해 향후 달성될 계측 정밀도, 응용 분야, 계측 속도에 대하여 연구 수준이 아닌 실용화 수준 관점에서 예측하여 로드맵을 작성하였다. 향후의 기술적인 추세나 실용화를 위한 핵심 요소 기술에 대해서도 간단하게나마 병기하였다.

1) 계측 정밀도

그림 3.2에 나타난 바와 같이, 각 계측 원리는 어느 정도 자신있는 계측 정밀도 영역으로 나뉘어져 있다. 따라서, 현재 계측 대상물에 따라 구분되어 사용되고 있으며, 이는 앞으로도

크게 바뀌지는 않을 것이다.

향후 널리 보급될 것으로 예상되는 것이 Time of Flight 법이다. Time of Flight법과 액티브 삼각 측량법은 상당 부분 계측 정밀도 영역이 서로 중복되며, 그 중복되는 영역은 향후 점점 더 확대되어 갈 것이다. Time of Flight법은 아직 해결해야 할 과제도 많으나, 삼각 측량법에서의 교합 발생과 같이 현저한 문제점이 없다는 점에서 중복되는 영역에서는 Time of Flight법이 아무래도 주류를 이룰 것이다.

또한 고정밀도 계측을 수행하는 초점법, 특히 공초점법은 초점 이동 기구의 고정밀도화, 검출기의 GS/N화, 광원의 안정성 향상 등에 의해 현재 간섭 계측이 행하는 계측 영역까지 향후 커버하게 될 것임에는 틀림 없다. 백색 간섭법, 파장 주사 간섭법과 결합할 것으로 예상되나, 로버스트성 면에서 훨씬 우수하므로 인라인 외관 검사 등에 대한 적용에서는 주요한 기법으로 발전해 갈 것이다.

이상과 같은 고찰을 바탕으로 로드맵에서는 2020년 쪽으로 연장되는 회색 화살표를 기법마다 도시하였으며, 화살표 폭에 따라 각 기법이 커버하는 계측 정밀도 영역의 변화와 각 기법간의 추세를 나타내었다. 세로축은 정밀도이다.

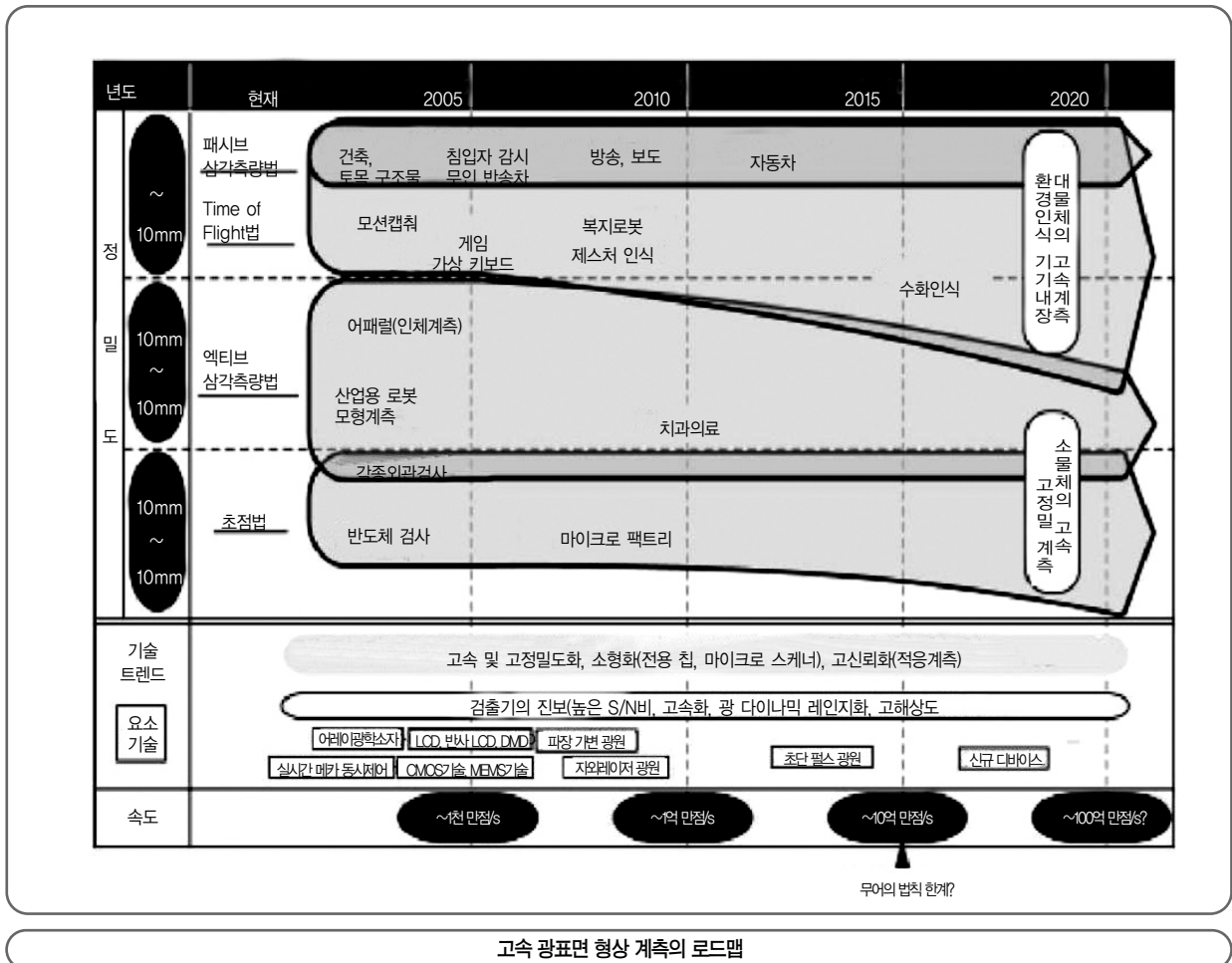
2) 응용 분야

향후 광 표면 형상 계측의 응용에 대하여 실용화가 시작되는 연대를 기술적인 난이도로 예상하여, 상술한 계측 정밀도를 나타내는 도면 상에 배치하였다. 인체의 계측, 반도체의 인라인 검사, 대형 구조물의 계측 등은 이미 많은 실용예가 있다. 또한 일반적인 계측 범주에는 들어가지 않는 새로운 응용이 향후 몇 년 안에 계속하여 실용화되어 갈 것이다. 가상 키보드의 실현, 침입자의 감시, 방송에서의 배경 합성에 이용하는 등 현재로서도 거의 실용화 수준에 이르렀다 할 수 있다. 미래에는 현재 연구가 진행되고 있는 자동차, 운송차, 휠체어 등의 장애물 회피, 치과 의료에서의 치형의 계측, 간단한 동작 인식 등이 실용화될 것이다. 그리고 계측 장치가 진화(소형화, 범용화, 고신뢰성화)됨에 따라, 현재로서는 상상할 수 없는 용도가 발생하며, 2차 함수적으로 응용이 증가되어 갈 것으로 예상된다. 예를 들면 계측 이외의 기술적인 과제 부분이 문제점이 될 것으로 생각되는데, 수화의 자동 인식 등을 생각할 수 있다. 한편으로 정밀 계측 부분은 간섭 계측과 결합하면서 초점법이 발전되어 갈 것으로 예상된다.

3) 계측 속도

계측 속도는 계측되는 대상물에 따라 각각 도달 수준이 다를 것이다. 이들 전부를 예상하여 로드맵으로 작성하는 것은 필자의 역량에 미치지 못한다. 따라서, 여기서는 각 연대에서 실용화 수준의 최고 속도를 예상하였다. 고속화에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 검출기 능력이다. 향후 어떠한 기법에서도 중점적으로 이용되는 검출기는 어레이 검출기, 예를 들면 CCD나 CMOS 센서 장치가 될 것이다. 이들 장치들은 반도체 제조 기술을 구사하여 제조된다. 또한 연산 처리 장치도 속도를 좌우하는 큰 요소인데, 보통 DSP이나 CPU 등의 디지털 연산 장치가 사용되며, 반도체 기술 진보에 따라 고속화될 것으로 생각된다. 이러한 의미에서 반도체 기술의 진보가 계측 기법과 관계 없이 계측 속도에 많은 영향을 미칠 것임에는 틀림 없다.

한편 응용면에서 볼 때, 현 시점에서 계측 속도가 가장 많이 요구되는 분야는 반도체 제조 공정의 인라인 검사이다. 예를 들면, LSI 칩 상에 2차원적으로 배열된 하나의 칩 당 몇 천 개에 달하는 전극(범프) 전체의 형상 계측을 초 차수의 속도로 계측하는 것이 요구된다. 그리고 이 계측은 앞으로 반도체의 집적도에 따라 고속화가 요구될 것이다. 결국, 시즈(seeds) 측면이나 요구(needs) 측면에서도 계측 속도는 반도체 기술의 진보에 비례해 갈 것이다. 이상과 같은 고찰에 기초하여, 로드맵에서는 반도체의 집적도에 맞추어 고속화될 것이라고 예상하였다. 반도체의 집적도는 유명한 무어의 법칙 "18개월마다 반도체의 집적도는 2배가 된다"에 따라 변화되고 있으며, 앞으로도 10년~15년 정도는 그 페이스를 유지할 것으로 예측된다. 이러한 예측에 따라 현 시점의 수준을 평가한 결과, 5년마다 거의 10배(2(5*12/18))의 속도가 될 것이라고 예상했다.



이러한 예상은 원칙적으로 각 연대에서의 도달 계측의 최고 속도를 예측한 것이지만, 결과적으로 반도체의 인라인 계측 및 검사에 대한 예측이 되어버렸음을 미리 말해둔다.

4) 기술 동향

계측의 기본 능력인 정밀도 및 속도 향상이 앞으로 계속 이어질 것은 말할 필요도 없다. 게다가, 집적화 기술을 사용한 장치의 소형화 및 계측 대상물에 따라 적응적으로 계측 조건을 변화시킴으로써 신뢰성 및 범용성을 향상시키는 기술이 향후 더욱 발전해 나갈 것이다.

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술의 진보, 면 발광 반도체 광원이나 도파로 기술이 발전됨에 따라, 향후에는 종래의 벌크(bulk)적인 계측 장치가 초소형 집적 장치로서 실현될 것이다. 소형 집적 장치가 실현되면 그 다음에는 장치 어레이화도 생각할 수 있으며, 소형화뿐만 아니라 계측 속도의 비약적인 향상도 기대할 수 있다. 또한 대상물의 반사율 분포, 형상, 크기 또는 외부 진동

등의 계측 조건을 적응적으로 보정하여 계측하는 적응적 계측에 대한 관점이 향후 신뢰성 향상의 방안으로 받아들여질 것이다. 예를 들면, LCD(Liquid Crystal Display)나 DMD(Digital Micromirror Device) 등의 디스플레이 장치를 사용한 조명기에 의해 대상물의 반사율 분포에 따라 최적의 조명 광량을 검출기의 화소 단위로 제어하거나, 또는 대상물의 형상에 따라 투영하는 패턴광의 형상을 상기 장치로 최적화하여 투영하는 것이 그 예이다. 피드백 루프를 가지며, 항상 최적의 계측 조건이 되도록 계측기 스스로가 계측 조건을 액티브하게 변경하는 지적 기구이다.

3. 맺음말

고속광 표면 형상 계측의 각종 기법 소개 및 최근의 동향을 설명하였고, 작성한 로드맵에 대하여 상세하게 설명하였다. 계측 장치가 진화되어 더욱 보편화되면, 현 시점에서 상상할 수 없는 용도가 생겨나서, 계측 장치 자체가 커다란 시장을 형성하리라는 것을 충분히 기대할 수 있다. 앞으로도 틀림없이 연구 개발이 활발하게 진행될 것이다.

〈참고 문헌〉

- 1) C. Alain, et al. , U. S. Patent Application No. 20020018118, (2002).
- 2) B. Leonard H, U. S. Patent No. 5, 646, 733, (1997).
- 3) 요시자와 외, 정밀 공학 회지, 67, 5(2001) p786.
- 4) 구와지마, 광기술 콘택트, 39, 2(2001) p10.
- 5) 요시자와 외, O plus E, 87, (1987) p56.
- 6) B. Cyrus, U. S. Patent No. 6, 323, 942, (2001).
- 7) M. Kawakita et al, Appl. Opt. , 39 (2000) p3931.
- 8) K. Minoshima et al, Jan. J. Appl. Phys, 33, 9B (1994) p1348.
- 9) 이시하라 외, 정밀 공학 회지, 64, 7(1998) p1022.
- 10) R. Schneider et al, Opt. Eng. , 36, 10 (1997) p2878.
- 11) H. J. Tiziani, et al, Proc. of SPIE, 3098, (1997) p35.