

〈메소 스케일 3차원 형상측정기술〉

마이크로·메소스케일 3차원형상 측정기술의 동향

글 _ SATO Osamu

1. 서론

1983년에 谷口가 나타난 기술예측을 따라가는 형식으로 최근 20년, 생산기술의 고도화, 미세화가 진전되어 왔다. 요즘에는 MEMS에 의한 마이크로 센서, 마이크로 절삭에 의한 마이크로 금형이나 하드 디스크용 동압 베어링, 마이크로 금형에 의하여 제조되는 미소광학소자, 마이크로 방전가공에 의한 미세 구멍(예 : 자동차용 엔진의 인젝션 노즐)등 많은 기계요소 가 마이크로 가공 기술에 의하여 제조되고, 이들을 조립한 제품이 이용되고 있다. 이러한 미소 기계요소의 개발 및 제조 프로세스에 있어서는 공정의 각 단계에서 제품의 치수, 형상 측정을 할 필요가 있을 뿐만 아니라 가공에 이용하는 마이크로 툴이나 금형, 검사에 이용하는 측정자(예 : 마이크로 비커스 경도 시험기의 압자) 등도 측정할 필요가 있다. 이들 용도를 위해서는 10mm 입방 이상의 측정범위를 갖는 10nm 오더 이상의 정도로 치수, 형상을 측정할 수 있는 장치가 필요하다.

측정범위 1~10mm 정도, 분해능 및 정도(精度) 0.01~0.1 μ m 정도의 영역(Micro/Meso영역)을 대상으로 한 가공기술의 진보와 비교하여, 계측 기술, 특히 3차원 형상측정 기술의 개발은 늦어지고 있다. 이것보다도 큰 영역(Macro영역) 및 작은 영역(Nano영역)과 비교하면, Macro영역에서는 좌표측정기(Coordinate

Measuring Machine : CMM)가 이미 측정범위 1mm~1m, 측정 불확실함 1 μ m 정도의 측정능력을 갖고 있어서, CMM을 이용한 측정이 널리 이용되고 있다. 또 Nano영역에 있어서도 수직벽을 측정하기 위하여 개량을 함으로서 주사형 Probe현미경(Scanning Probe Microscope : SPM)등을 이용하여 측정범위 100nm~10 μ m, 측정 불확실함 0.1nm 정도를 만족하는 측정기술이 개발되어 있다. 그러나 양자의 적용범위는 중복되어 겹치지 않는다(그림1). 즉 양자 사이에는 측정할 수 없는 영역이 있다. 그래서 1990년대부터 Micro/Meso 영역에 있어서 3차원 형상측정을 실현하는 장치의 연구, 개발이 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 채용한 수법에 의하여 「Macro 영역용 측정기(CMM)의 Miniature화」와 「Nano 영역용 측정기(SPM)의 Long Stroke화」로 분류할 수 있다. 이 가운데 CMM의 Miniature화에 대해서는 측정불확실함이 작은 Probe의 개발이 곤란하였기 때문에 장치의 실현에서는 SPM의 Long Stroke화가 선행되었다. 그러나 2000년대에 들어와 마이크로 가공기술을 이용한 미세 Probe의 개발이 진행됨으로서, 오늘날에는 복수의 Micro/Meso 영역용 CMM이 시판되고, 이용되기에 이르렀다. 또 영국의 국립물리학 연구소(National Physical Laboratory : NPL)와 마이크로·나노 테크놀로지에 있어서 계측을 위한 센터(Centre of Excellence for Metrology in

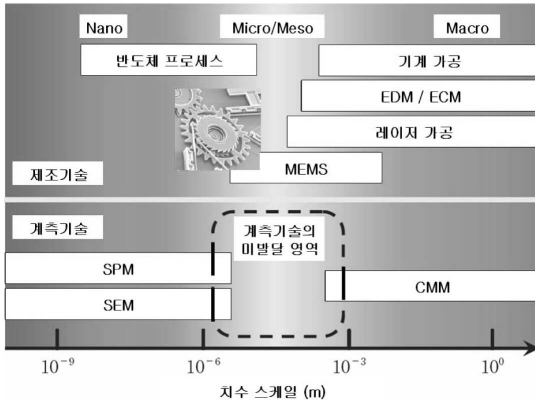


그림1 Micro/Meso 영역에 있어서 측정기술의 갭

Micro and Nano Technology : CEMMNT) 등과 같이 Micro/Meso 영역용 CMM을 이용한 교정 서비스를 제공하고 있는 기관도 나타났다.

본 원고에서는 Miniature화 한 CMM을 중심으로, Micro/Meso 영역에 있어서 3차원 형상측정 기술의 현상과 동향을 소개한다.

2. Micro/Meso 영역에서의 3차원 형상측정

측정 대상의 크기에 의하여 3차원 형상측정기에 요구되는 사양은 다르고, 개략적으로 표1과 같다. 이전에는 마이크로 가공기술로 제작된 기계요소에 High Aspect비를 갖는 것이 적고, 완전한 3차원 계측을 필요로 하는 장면이 적었다. 그래서 Micro/Meso 영역에서는 광학현미경이나 주사형전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM), 표면상태 측정기를 이용한 2~2.5차원 형상측정이 많이 이루어졌다. 그 후, 앞에 기술한 것과 같이 마이크로 가공기술의 발전과 더불어 Micro/Meso 영역에서의 3차원 형상측정 수요가 높아졌다.

Micro/Meso 영역에서의 3차원 형상계측에 관한 연

표1 각 영역에서 요구되는 3차원 형상측정

	Nano	Micro/Meso	Macro
측정대상	100nm~10 μ m	10~10mm	10mm~1m
분해능	10pm	1nm	0.1 μ m
불확실함	0.1nm	10nm	1 μ m

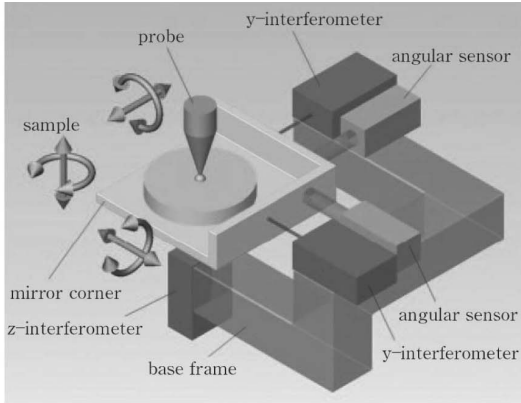
구 가운데, CMM의 Miniature화에 관한 연구로는 1990년대 후반부터 2000년대 초반에 걸쳐서 Stage와 측정(測長)시스템, Probing System의 개발이 진행되어 왔다. 이 절에서는 Micro/Meso 영역용 CMM의 Stage와 측정 시스템, Probing System에 대하여 소개한다.

2.1 Stage와 측정 시스템

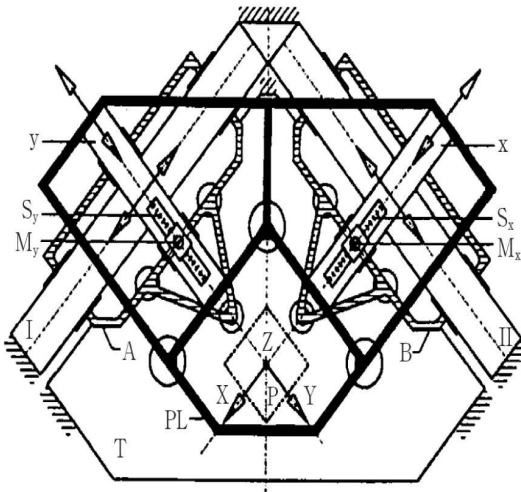
3차원 형상측정을 포함하여 길이의 측정을 수반하는 정밀측정에서는 측정 시스템이 아베의 원리를 만족하는 것이 필요하다. 그런데 통상의 CMM은 아베의 원리를 만족하고 있지 않다. 그래서 Peggs 등은 통상의 CMM에 아베의 원리를 만족하는 독립적인 측정 시스템(Metrology Frame)을 추가함으로써 길이 측정의 불확실함을 저감시켰다.

이 이외에도 아베의 원리를 만족하는 Stage, 측정 시스템의 개발은 이루어지고 있다. 최근에 제창된 기구는, 현재 시판되고 있는 Micro/Meso 영역용 CMM의 기구에 채용되어 있다. 대부분은 그림2(a)에 나타내는 것과 같이 레이저 간섭계의 측정(測長) 축을 Probe 선단구와 일치시킨 것이다. 그림2(b)는 Glass Scale을 이용하여 아베의 원리를 만족하는 Stage와 측정시스템을 구축한 예이다. 이것은 측정환경에서의 공기의 유동 등이 레이저 간섭계에 의한 측정의 불확실함 요인이 되는 것을 피하기 위함이다.

Stage의 안내에는 Air Bearing이 채용되어 있는 경우가 많고, 중심(重心)구동 함으로서 Stage의 Motion Error를 저감시키고 있다. 또한 Auto Collimator 등으로 Stage의 자세 변화를 측정하여 보정을 하고 있다.



(a) 레이저 간섭계로 구성한 경우



(b) Glass Scale로 구성한 경우

그림2 아베원리를 만족하는 Stage와 측정시스템

또 Stage 본체를 저열팽창재료로 만들어 열팽창에 의한 Frame의 굽힘을 저감시키고 있는 예도 있다. Stage의 가동범위는 10mm입방에서 200mm입방 정도로 되어 있어서 Stage 이동량에 따른 측정 불확실함은 10nm 정도를 달성하고 있다.

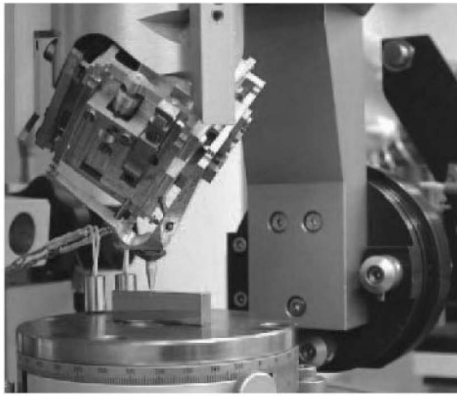
2.2 마이크로 프로브(Micro Probe)

앞에 기술한 것과 같이 CMM의 Miniature화에 있어서는 측정의 불확실함이 작은 Probe의 개발이 곤란하였다. Probe의 개발이 곤란하였던 이유는 여러 가지가 있다. Probing 시(時)의 미소한 힘을 검출하는 것이 곤란하였던 점, Probing시의 스타일러스의 굽힘과 헤르츠 응력에 의한 변형량이 상대적으로 큰 점, Probe의 평가나 교정을 작은 불확실함으로 행하는 것이 곤란하였던 점, Probe의 교정에 이용하는 구의 진구도(眞球度)가 낮은 점, 등이다.

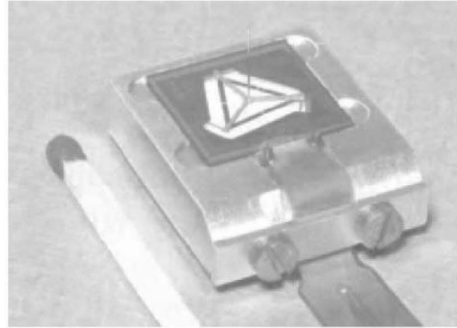
Micro/Meso 영역용 CMM의 경우에도 Probing의 Mechanism은 통상 사이즈의 CMM의 경우와 마찬가지로이다. Probe 선단구가 어느 방향으로부터 측정 대상에 접촉할 때에 Probe Unit에 가해지는 힘을 어떤 방법에 의하여 전기신호로 변환하여 이것을 검출한다. 이때에 읽는 Stage의 위치는 Probe 선단구의 중심좌표이기 때문에 사전에 구해놓은 Probe의 방향특성이나 선단구의 형상, Probing 시의 Stage 이동방향에서부터 측정 대상 표면의 좌표값을 산출한다.

Micro/Meso 영역용의 Probe(Micro Probe)는 미소한 형상을 측정하기 위하여 사용하기 때문에 Probing력이 작은 것이 요구된다. 작은 Probing력을 검출하기 위하여 광지렛대를 이용하는 방법, 레이저 트래핑을 이용하는 방법 등이 제안되었다. 오늘날 시판되고 있는 Micro Probe에는 MEMS에 의하여 제작된 변형센서 등을 이용하고 있는 예가 몇 가지 보이고 있다. 이외에도 Probe 선단구의 위치를 화상 센서로 계측하는 방식이나, 고유진동상태에 있는 Probe의 진폭이 측정 대상과의 접촉에 의하여 변화한 것을 검출하는 방식 등도 실용화 되고 있다. 마이크로 프로브의 예를 그림 3에 나타낸다. 이들의 반복성은 수 nm 정도이다.

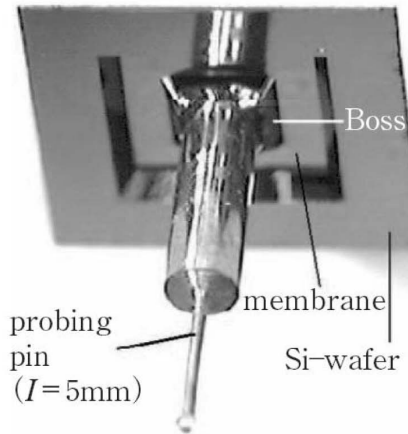
마이크로 프로브의 반복성에 유래하는 불확실함은 Stage 이동량에 대한 측정불확실함과 비교하여도 손색이 없는 수준이다. 그러나 Probing 시의 Stage 위치



(a) METAS



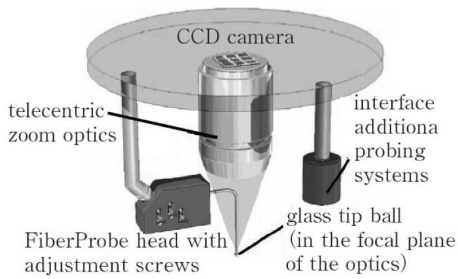
(b) TU/e



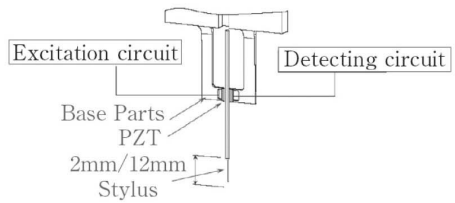
(c) Zeiss



(d) NPL



(e) Werth



(f) Mitsutoyo

그림3 Micro Probe의 예

값을 읽어서 측정대상 표면의 좌표를 구하기 때문에 보정량의 불확실함이 커져서 현재에는 Probing 유래의 불확실함은 커지게 된다. 통상 사이즈의 CMM에서는 이 보정량을 마스터 구를 측정하여 구하고 있다. 이때에 Probe 선단구의 크기는 수 mm, 마스터 구의 크기는 10~30 mm 정도이고, 어느 쪽 구에도 진구도가 좋은 구를 이용하여야 한다. 그래서 이 보정량을 작은 불확실함으로 구할 수 있다. 한편, Micro Probe에 이용하고 있는 직경 100 μ m 정도의 선단구는 진구도가 상대적으로 낮고, 마스터 구의 교정값의 불확실함도 무시할 수 없는 크기가 된다. 여기에 대해서는 마스터 구와 Probe 선단구를 동시에 자기 교정하는 방법이나 마스터 구 대신에 Knife Edge를 이용하는 방법 등, Micro Probe 교정의 불확실함을 저감하는 방법이 제안되고 있다.

현재에는 30~200 μ m 정도의 선단구를 갖고, 수 μ N~mN의 Probing력으로 측정 대상에의 접촉을 검출할 수 있는 마이크로 프로브가 실현되어 있다. 그러나 위의 이유에 의하여 Probing에 유래하는 불확실함은 50~100 nm 정도와 Stage 이동량에 관한 측정 불확실함과 비교하여 커지게 된다. 그래서 Micro/Meso 영역용 CMM에 의한 좌표측정의 불확실함도 100 nm 정도에 그치고 있다.

3. 측정기의 평가

3.1 CMM으로서의 평가

통상 사이즈의 CMM은 ISO 10360 시리즈(JIS B7440 시리즈)에 따라서 평가하고 있다. ISO 10360 시리즈에서는 Probing 오차의 평가와 치수측정의 오차를 평가하고 있다. 이것에 대하여 Nano 영역의 측정기 평가법으로서 제안되어 있는 것으로는 측정기를 21개의 기하 파라미터로 모델링하여 이것을 평가하는 것으로 하고 있다. 이것은 치수측정의 오차만이 아니

고, Stage 이동에 따르는 자세변화와 각 축의 직교 오차도 평가하는 것으로 통상 사이즈의 CMM을 교정하는 수법으로서 제안된 것에 가깝다. 단, CMM의 경우는 Ball Plate 등의 표준기를 여러 가지 위치, 자세로 측정함으로써 기하 파라미터를 평가하는 것에 대하여(그림4), Nano 영역용의 측정기로는 통상, 측정대상에 대하여 윗방향에서만 Probing을 할 수 있기 때문에 여러 가지 형식의 표준을 준비할 필요가 있다.

Micro/Meso 영역용 CMM에 대해서도 적절한 평가를 할 필요가 있다. Probing 오차의 평가에 대해서는 2.2절에서 간단히 기술하였다. Stage 평가에 대해서는 그림5에 나타내는 것과 같은 치수 표준기를 이용하여 ISO 10360 시리즈에 준거하여 평가를 하는 방법만이 아니고, 평면표준이나 Polygon 등을 이용하여 기하 파라미터를 구하는 방법을 제안하고 있다. 또 통상 사이즈의 CMM 교정에 대하여 이용하는 Ball Plate와 Hole Plate를 소형화한 표준을 이용하는 방법도 제안되어 있다. 여기에서 Ball Plate나 Hole Plate를 소형화 하는 경우에는 사용하는 구의 진구도 등이 상대적으로 저하하는 문제점이 있기 때문에 측정할 때 Probe 중심이 운동학적으로 하나로 결정되는 Corner Cube를 2차원적으로 배열한 표준도 제안되어 있다. 현상의

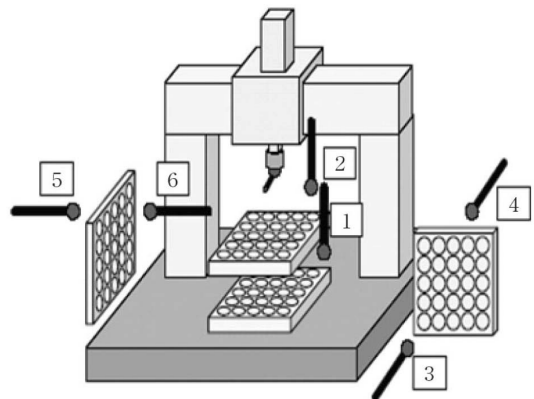


그림4 기하 파라미터를 평가하기 위한 측정

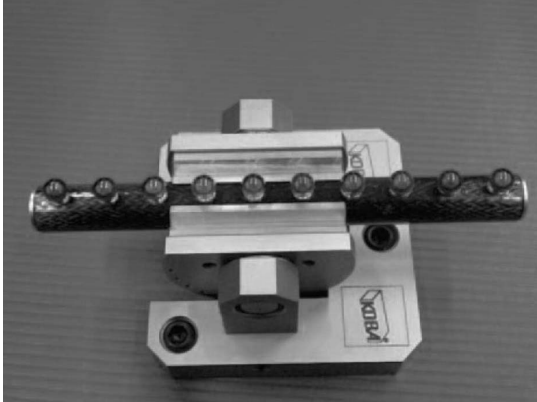


그림5 Mini Ball Bar

Micro/Meso 영역용 CMM은 Probe의 자세 변화 기구를 갖추고 있지 않은 것이 대부분이고, 측정대상의 윗 방향에서만 Probing 할 수 있다. 그래서 Nano 영역용 측정기와 마찬가지로 Micro/Meso 영역용 CMM 평가에서는 다른 종류의 표준 측정결과를 조합할 필요가 있다.

3.2 Multi-Sensor 평가

Macro 영역에서의 3차원 형상 측정은 CMM에 의한 점 측정만이 아니고, 스캔 측정이나 화상 Probe 등을 이용한 비접촉 측정을 이용하는 경우가 증가하고 있다. 스캔 측정이나 화상 Probe를 이용한 비접촉 측정의 장점은 측정대상 표면상의 좌표값을 단시간에 대량으로 얻을 수 있는 것이다. 단시간에의 다수점 측정은 Micro/Meso 영역에 있어서도 비구면형상 등의 복잡한 형상의 측정에 요구되고 있다. 그래서 대부분의 Micro/Meso 영역 CMM에서는 스캔 측정이 가능해졌다. 또한 그림3(e)에 나타내는 것과 같이 접촉식 Probe에 추가하여 비접촉식 Probe를 갖춘 Multi-Sensor식의 Micro/Meso 영역용 CMM도 시판되고 있다.

멀티센서식의 CMM을 이용하여 측정을 할 경우, 서

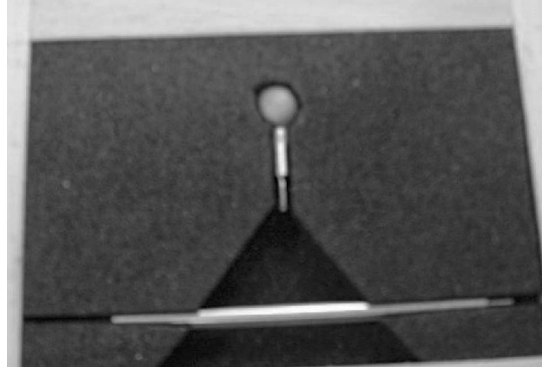


그림6 Multi-Sensor 교정용 구

로 다른 Probe 사이의 위치오차 등을 평가해 놓을 필요가 있다. 여기에 서로 다른 Probe가 둘 다 접촉식 Probe이면, 통상 사이즈의 CMM에 있어서 멀티 스타 일러스 측정검사(ISO 10360-5)와 마찬가지로 진구도가 높은 마스터 구를 각각의 Probe를 이용하여 측정하여 위치오차 등을 평가하면 된다. 그러나 한편이 비접촉식 Probe인 경우, 이용하는 마스터 구의 재질이나 표면특성에 대하여 주의를 요한다. 예를 들면, 화상 Probe를 이용하는 경우, 통상의 마스터 구로는 표면의 광택이 강하고, 구 표면의 좌표값을 불확실함이 작게 얻는 것은 어렵다. 그래서 그림6에 나타내는 것과 같이 확산반사면을 갖는 마스터 구를 준비할 필요가 있다. 그림6의 마스터 구는 표면을 약품 처리 하여 확산 반사면으로 한 것이다. 이것은 독일의 물리공학연구소(Physikalish-Technische Bundesanstalt : PTB)에서 Micro/Meso 영역의 3차원 형상측정을 개발하고 있는 그룹이 사용하고 있다.

3.3 평가용 표준

측정기를 평가하기 위한 표준기는, 보다 상위의 표준기에 의하여 교정되어 있지 않으면 안된다. 또

Micro/Meso 영역에서의 최종적인 좌표계측의 불확실함을 작게 하기 위하여 평가에 이용하는 표준기가 불확실함이 작게 교정되어 있을 필요가 있다. Micro/Meso 영역에서는 3차원 형상측정기의 정도(精度)평가법이 몇 가지 제안되어 있지만 통일적인 것은 없고, 정도(精度) 평가용 표준기의 형식이나 표준기의 교정방법 등이 아직도 개발 중에 있다. 산업종합연구소에서는 Micro/Meso 영역에서의 3차원 기하표준의 공급 개시를 향하여 연구를 진행하고 있다. 또, 정도평가법의 확립과 평가에 이용할 표준기의 개발도 포함한 연구 프로젝트가 최근 유럽에서 개시되었다. 그래서 필자는 정도평가법의 규격화 등을 포함한 정도평가법의 정비가 이후 수년 안에 진전될 것으로 예상하고 있다.

4. 결론

본 원고에서는 Micro/Meso 영역용 CMM을 중심으로 3차원 형상측정기술의 현상과 동향을 소개하였다. Micro/Meso 영역의 3차원 형상측정 기술개발에서는 Macro 영역이나 Nano 영역용의 장치개발로 축적된 고정도 Stage와 Probing 기술, 마이크로 가공기술 등이 투입되었다.

현상에서는 측정범위 10mm 입방정도, 측정분해능 1nm 정도의 Micro/Meso 영역용 CMM이 시판되고 있어서, 이들을 이용한 3차원 형상측정을 하고 있다. 그러나 Micro Probe에 유래하는 불확실함이 크고, 최종적인 좌표 측정의 불확실함이 100nm 정도에 머물러 있다. 마이크로 프로브에 의한 측정의 불확실함이 큰 요인으로는 Probe 교정의 불확실함이 큰 것을 들고 있다. 이것에 대하여 통상 사이즈의 CMM에 있어서 Probe

교정기술에 제한을 받지 않는 새로운 수법이 제안되어 있다.

Micro/Meso 영역용의 CMM의 정도 평가법은 현상에서는 통상 사이즈의 CMM용 검사규격을 유용하던가, 측정기의 개발자가 고안한 방법이 이용되고 있다. 또 검사용의 표준기에도 독자적인 것이 사용되는 경우가 많다. 이것에 대하여는 평가용 표준기의 개발도 포함한 정도 평가법의 연구 프로젝트가 최근 개시되었다. 산업종합연구소에서도 Micro/Meso 영역용 CMM의 정도 평가법의 확립과 평가용 표준기의 연구를 진행하고 있다.

이후에는 Probe 교정기술의 고도화, 측정기 검사수법의 고도화를 통하여 불확실함이 적은 3차원 형상측정이 Micro/Meso 영역에서도 실현될 것으로 예상된다.

본 원고에서 소개한 것 이외에도 Micro/Meso 영역용 3차원 형상측정기의 기구, Probe, 측정기의 검사법 등은 많이 발표되어 있다.



<<일본정밀공학회지, Vol.74, No.3, 2008>>

본 기사는 건국대학교의 이성수 편집이사가 “일본정밀공학회지” 2008년 3월호 pp.217-221을 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

- 주소 : -0073 東京都千代田區 九段 北 1-5-9(九段誠和Building 2F)
- 전화 : +81-3-5226-5191 / FAX : +81-3-5226-5192
- URL : <http://www.jspe.or.jp/>