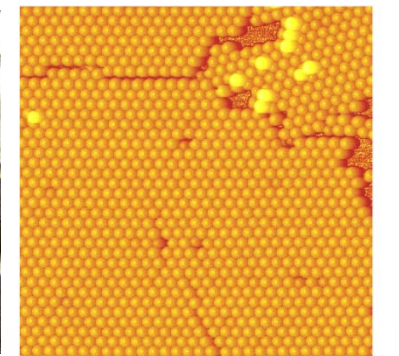
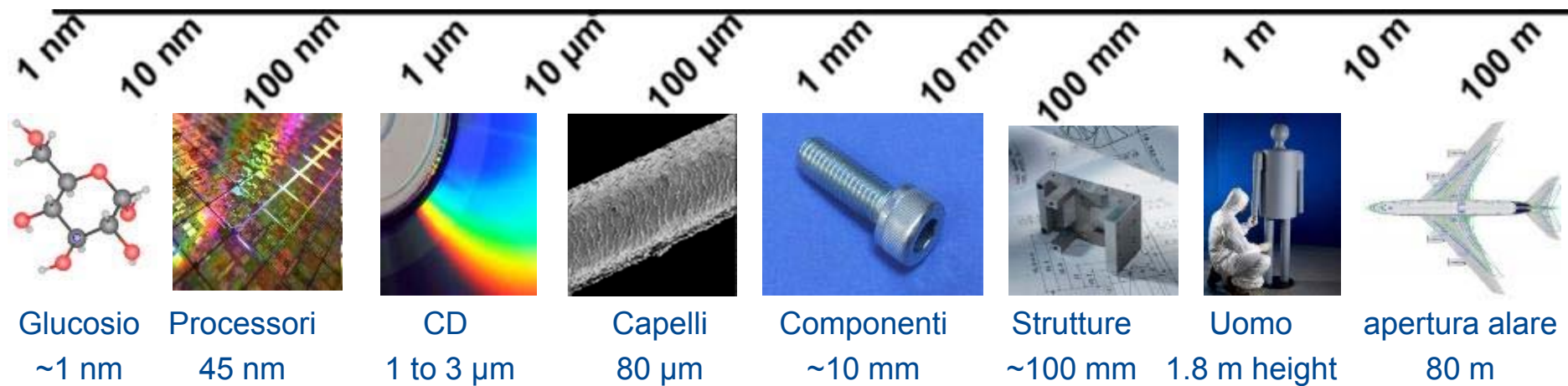


Tecnologie per le misure dimensionali di componenti meccanici

Le tecnologie disponibili: scenario, analisi, punti di forza e di debolezza



La metrologia dimensionale copre un ampio intervallo



Misure dimensionali e Temperatura

- I materiali si dilatano e si contraggono con la temperatura
- Se una misura di lunghezza serve a misurare la dimensione di un oggetto, allora occorre

- Accordarsi su una temperatura di riferimento

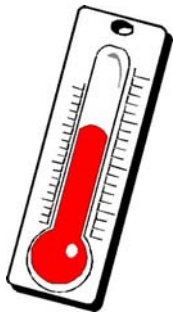
$$t_{\text{rif}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (UNI EN ISO 1)}$$

- Misurare la temperatura e correggere

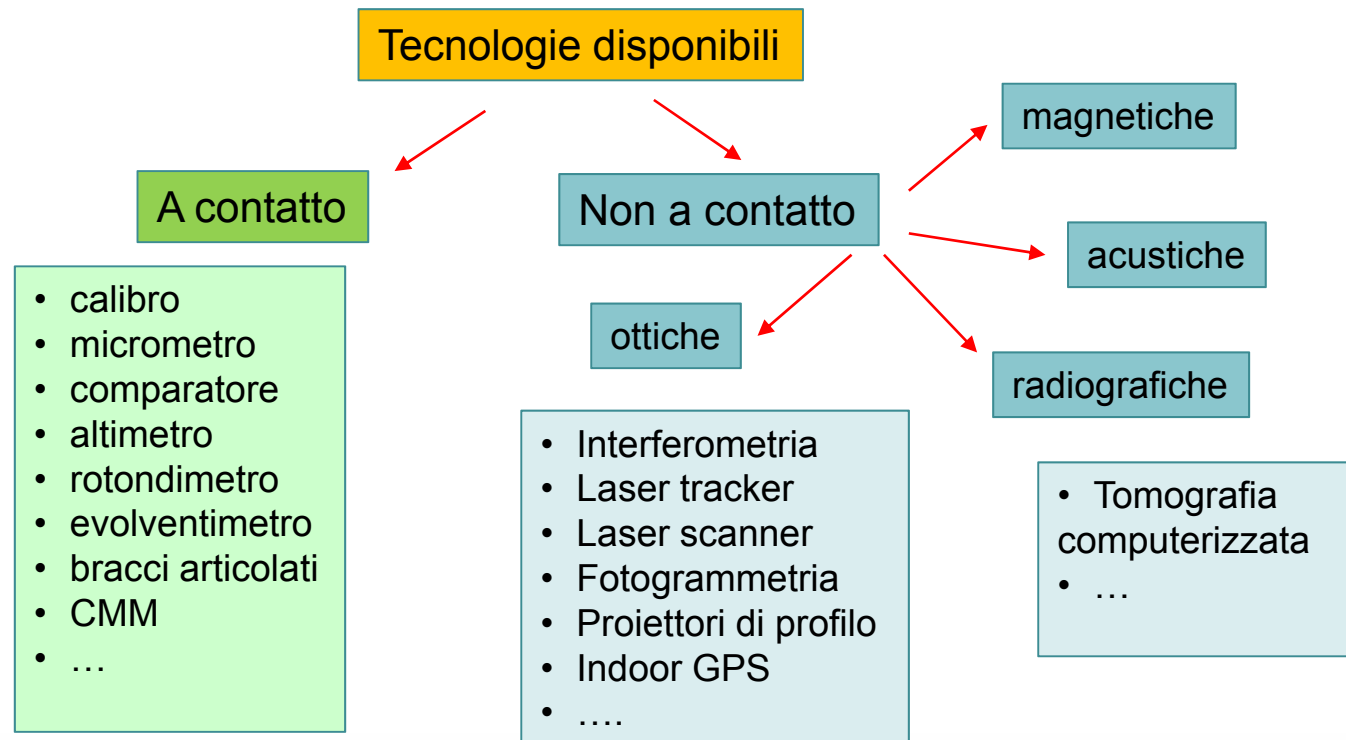
$$L_{20} = L_T [1 + \alpha(20 - T)]$$

- Disporre di un ambiente condizionato, per evitare variazioni di t (gradienti) nello spazio e nel tempo
 - Difficile e costoso in ambiente industriale

	α (ppm/°C)
Al	24
Acciaio	11
Invar	1
WC	4
Cu	16
Ti	8



Tecnologie per le misure dimensionali di componenti meccanici: scenario



Equipment Selection		Length			Step Height			Wall Thickness			Outside Diameter			Inside Diameter			Hole Depth			Hole Diameter			Radius			Thread Pitch			Runout			Finish			Profile			Roundness		
		S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L
Micrometers	External	■						■	■		■	■																												
	Internal												■																											
Callipers		■			■			■	■		■	■					■	■																						
Depth Gauges					■	■											■	■	■																					
Height Gauges		■	■		■	■																																		
Bore Gauges	Micrometers												■	■	■					■	■																			
	Indicator												■	■	■																									
	Spider Gauge												■									■																		
	Air Gauge												■	■	■					■	■																			
	Countersink Gauge												■							■																				
Thickness Gauges	Snap Gauges	■	■					■	■		■	■																												
	Ultrasonic				■			■																																
Beam Comparators	Bowers		■										■																											
	OmniGage		■										■																											
Indicators (Dial & Digital)	Lever				■																					■	■													
	Plunger				■																					■	■													
GO / NO GO Gauges	Plug Gauges												■	■						■	■																			
	Slip Gauges				■	■																																		
	Snap Gauges												■	■																										
Visual Comparators	Radius																		■	■					■	■	■													
	Thread																						■	■	■															
Surface Texture	Portable Probe																										■	■												
	Desktop Machine																										■	■												
Roundness & Form Machines													■	■												■	■													
Profile Projectors																										■	■													
Hand-held Laser Scanners		■	■																	■																				
3D Structured Light Scanning		■	■	■							■	■	■	■	■							■				■	■													
Coordinate Measurement Machine		■	■	■	■	■	■				■	■	■	■	■		■	■								■	■													
Laser Trackers			■																																					

Selezione della tecnologia:
un esempio da Rolls-Royce



Tecniche per contatto su componenti di piccole dimensioni



Calibro

Micrometro per esterni



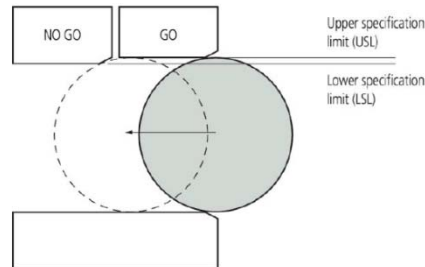
Micrometro per interni



Misuratore per altezze



Passa - non passa



indicatori



Il calibro: "capability chart"

Vernier Calliper

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)							
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 1.000
<1	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green
5	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green
10	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green
25	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green
50	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green
75	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green
100	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green
150	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Green
200	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Green
300	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
400	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
500	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
1000	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
>1000	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow

Digital Calliper

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)							
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 1.000
<1	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green
5	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green
10	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green
25	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green
50	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green
75	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green
100	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green
150	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Green	Green
200	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Green	Green
300	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Green
400	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Green
500	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
1000	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
>1000	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow

-  Likely to achieve acceptable capability
-  Unlikely to achieve acceptable capability
-  Potential to achieve acceptable capability
-  Not applicable / No data



Capability Chart

Digital Micrometer

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)							
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 1.000
<1	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
5	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
10	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
25	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
50	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
75	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
100	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
150	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
200	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
300	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
400	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
500	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
>1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green

Depth Micrometer

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)							
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 1.000
<1	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
5	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
10	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
25	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
50	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
75	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
100	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
150	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
200	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
300	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
400	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
500	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
>1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green

Digital Height Gauge

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)							
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 1.000
<1	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
5	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
10	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
25	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
50	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
75	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
100	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
150	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
200	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
300	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
400	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
500	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
>1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green

Bore Micrometer (3 point)

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)							
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 1.000
<1	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
5	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
10	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
25	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
50	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
75	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
100	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
150	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
200	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
300	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
400	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
500	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
>1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green

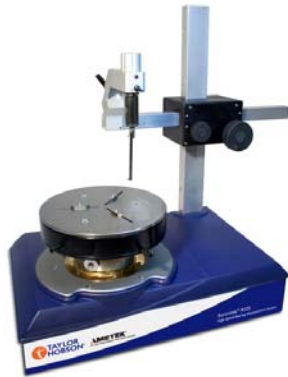
- Likely to achieve acceptable capability
- Unlikely to achieve acceptable capability
- Potential to achieve acceptable capability
- Not applicable / No data

Misure manuali
 tempi di misura ≈ minuti
 costi ≈ 10-100 €



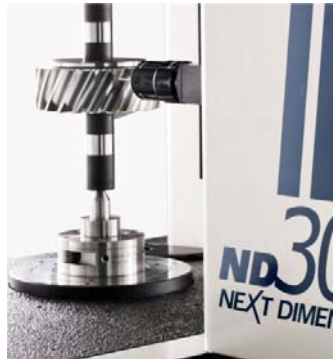
Misure di forma e finitura superficiale

Rotondimetro



Misura dell'errore di rotondità
Accuratezza $\approx 0.1 \mu\text{m}$

Evolventimetro / GMM



Misura degli errori di profilo, di elica e di passo
Accuratezza $\approx 1 - 10 \mu\text{m}$

Rugosimetro / Profilometro

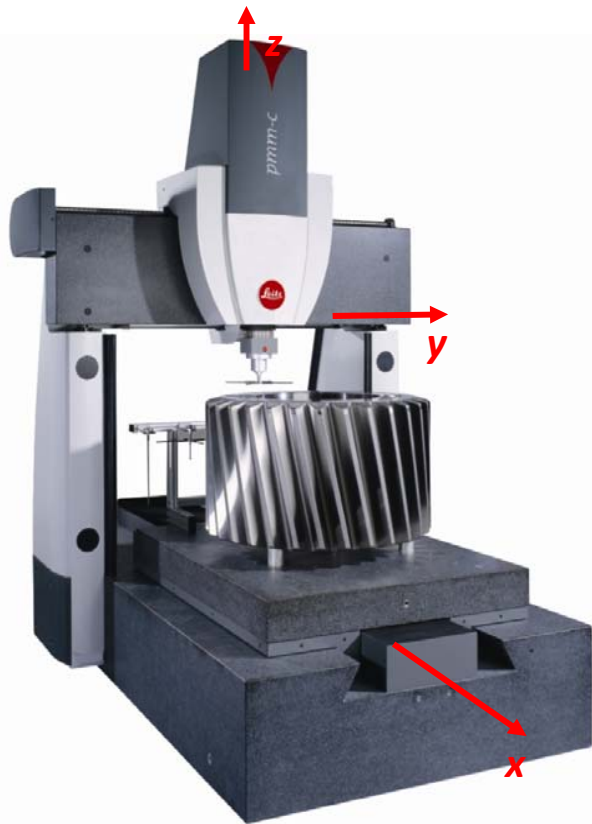


Misura di finitura superficiale
Accuratezza $\approx 10 \text{ nm} - 1 \mu\text{m}$

Misure automatiche / tempi di misura \approx ore / costi $\geq 100 \text{ k€}$



Macchine di misura a coordinate (CMM)



- ✓ misure di oggetti di forma complessa
→ Stato dell'arte per flessibilità
- ✓ misure di oggetti di medio/grandi dimensioni
- ✓ accuratezza tipica: da $1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$
- ✓ permette «reverse engineering»
- ✓ Costi: da 20k€ a 400k€
- ✓ addestramento



Capability Chart: CMM

Standard Production CMM

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)								
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 0.750	+/- 1.000
1	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
5	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
10	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
25	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
50	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
75	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
100	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
150	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
200	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
300	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
400	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
500	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
1000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
2000	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green

General guidance only - full GR&R or Automated Measurement System study required.

MPE of $2.3 + 0.3L/100 \mu\text{m}$

High Performance Laboratory CMM

Feature Size (mm)	Specification Tolerance (mm)								
	+/- 0.005	+/- 0.010	+/- 0.025	+/- 0.050	+/- 0.100	+/- 0.250	+/- 0.500	+/- 0.750	+/- 1.000
1	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
5	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
10	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
25	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
50	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
75	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
100	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
150	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
200	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
300	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
400	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
500	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
1000	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
2000	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

General guidance only - full GR&R or Automated Measurement System study required.

MPE of $0.6 + 0.16L/100 \mu\text{m}$

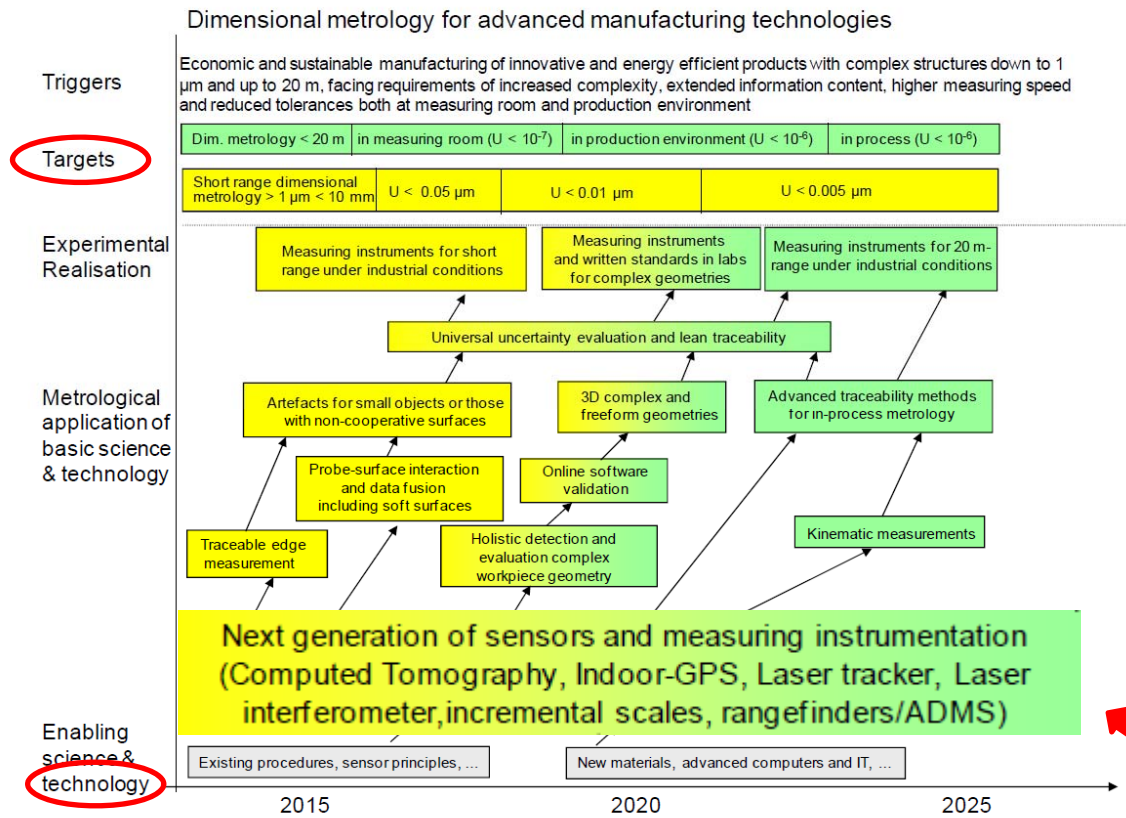


Bracci di misura articolati

- ✓ Portatile
- ✓ Peso ≈ 1-10 Kg
- ✓ Facile da usare
- ✓ Range di misura ≈ alcuni metri
- ✓ Scansione 3D veloce
- ✓ «Reverse engineering»
- ✓ Accuratezza ≈ 50 -100 μm
- ✓ Costo ≈ 20 k€



Roadmap for dimensional metrology for advanced manufacturing technologies



Triggers/needs

Range: da 1 μm a 20 m

Measurements in **production environment**

Measurement of **complex objects** (freeform geometries)

High measuring **speed**

Target

Traceable inline metrology tools

New technologies

Tecniche senza contatto

Laser Trackers



Interferometria

Indoor GPS (iGPS)



Fotogrammetria



Radar laser

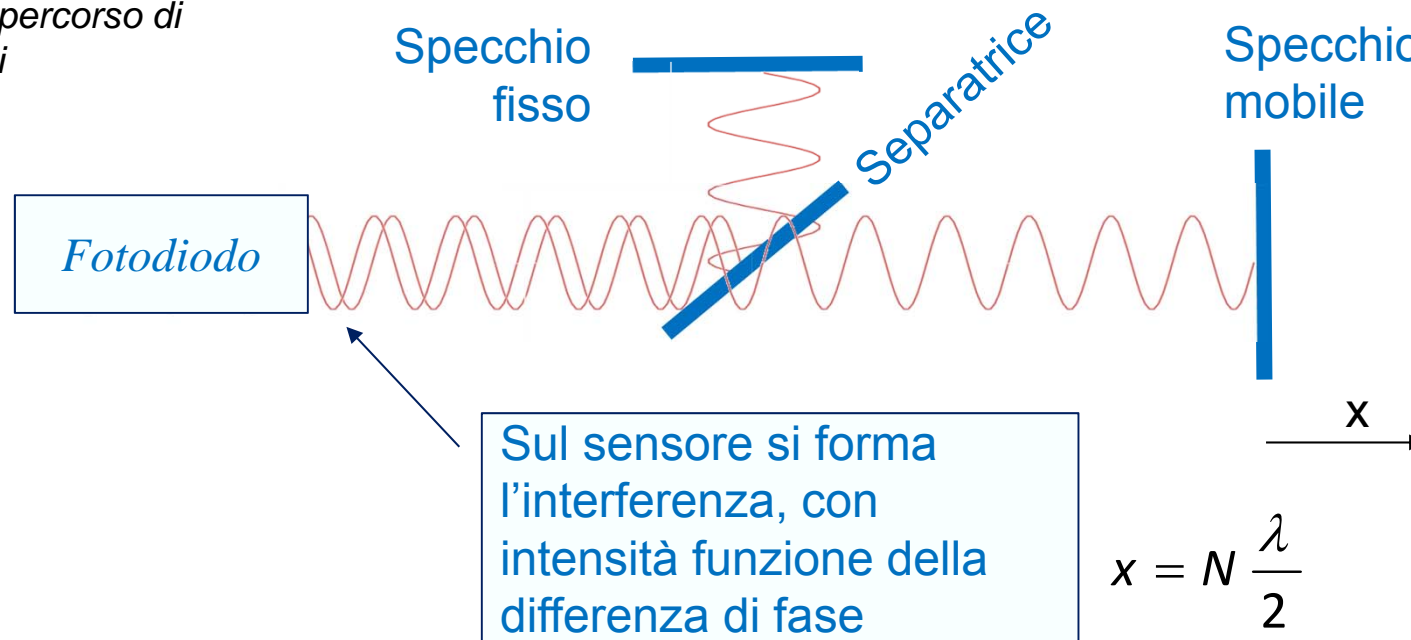


Laser scanner



Interferometria

Per semplicità grafica, è indicato solo il percorso di ritorno dei fasci



Interferometria: pro e contro

Vantaggi

- Righello naturale, le cui “tacche” sono le mezze lunghezze d’onda della luce (tipico $\lambda/2 = 633 \text{ nm}/2 = 317 \text{ nm}$, meno di un terzo di millesimo di millimetro)
- Con opportune misure di fase, si può avere risoluzione alla scala (quasi) atomica, ad esempio 1 nm
- Campo di misura molto esteso, da zero fino a (30 – 50) m (di più in applicazioni speciali)
- Rapporto campo/risoluzione $\sim 5 \cdot 10^{10}$
- Semplice e diretta riferibilità metrologica al metro (discende dalla definizione stessa)
- Strumenti disponibili in commercio, ad un prezzo elevato ma non proibitivo $\approx 10 - 30 \text{ k€}$

Svantaggi

- Il “righello” è ideale solo in vuoto; in aria
 - Alterazione di scala: $\lambda = \lambda_0/n$
 - Perturbazioni locali (disuniformità, turbolenze)
- La misura di fase tipicamente non è lineare \Rightarrow errore periodico di pochi nanometri (d’interesse solo per la nanoscala)
- L’utilizzo richiede un operatore preparato
- Misura solo 1D (scalare) \Rightarrow richiede allineamento
- Il bersaglio misurato dev’essere retroriflettente (spigolo di cubo o occhio di gatto)
- La velocità di movimento del bersaglio è limitata: (0,5 – 4) m/s
- È incrementale: se s’interrompe il fascio si perde la misura



L'indice di rifrazione dell'aria

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

← in vuoto
← in aria

↑
velocità

↑
lunghezza d'onda

$$n = 1,000\,3\,34 \times 10^{-6}$$

← 40 °C, 95 hPa, 100% UR

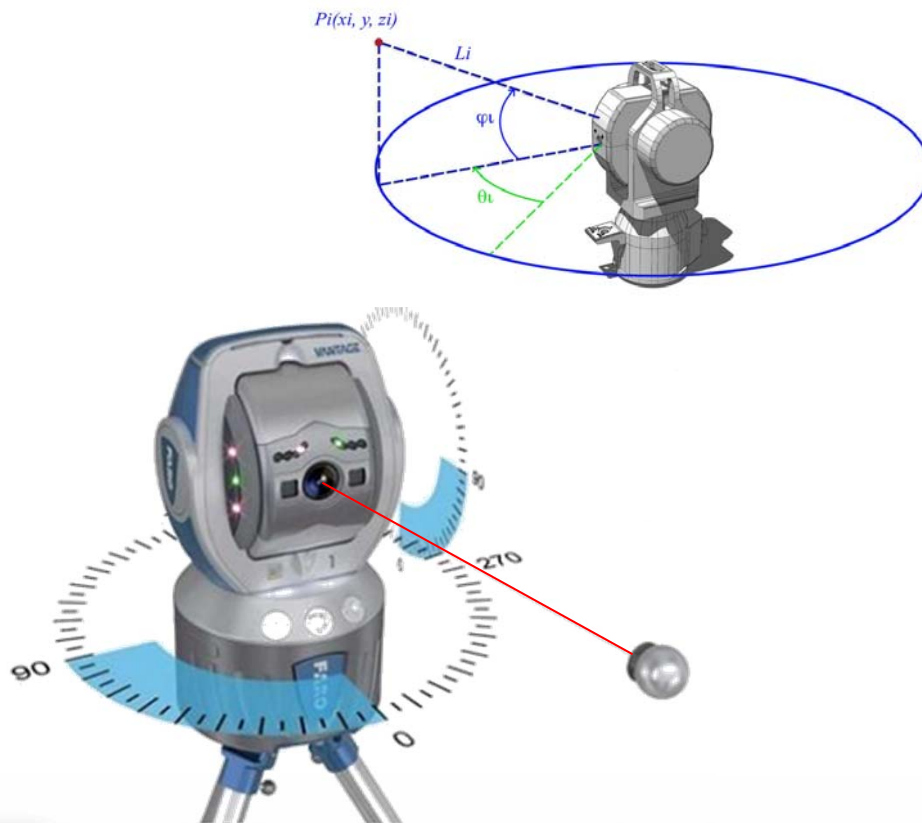
← 0 °C, 120 hPa, 0% UR

Per raggiungere $1 \cdot 10^{-7}$ occorre misurare l'aria a

- 0,06 °C
- 7% UR
- 0,2 hPa



Laser tracker (o inseguitore laser)

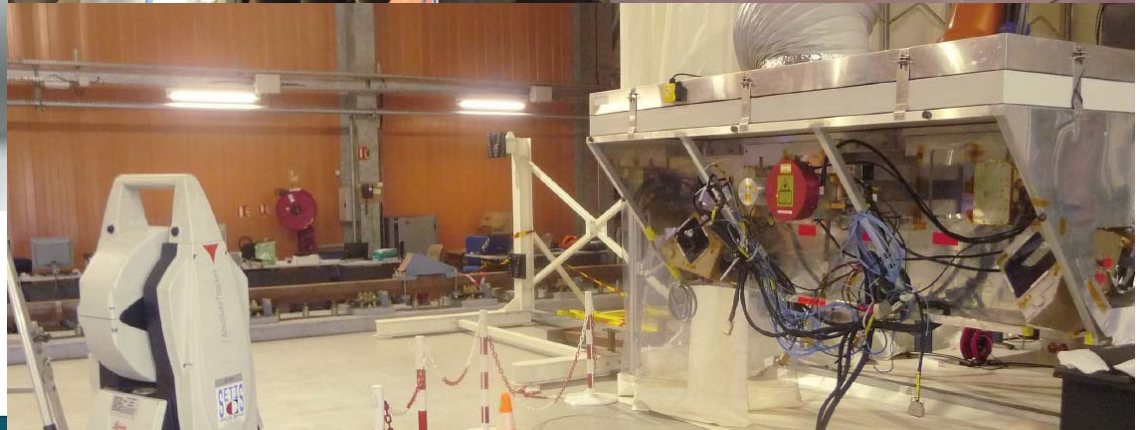


- Metrologia:
 - interferometro laser o ADM (*Absolute Distance Meter*)
 - encoder angolari
- Sistema di coordinate polari
- Retro-riflettore
- Campo di misura fino a 160 m
- Accuratezza limitata dalle misurazioni d'angolo
- $U = 5 \mu\text{m} / \text{metro}$

Stato dell'arte dell'accuratezza nella metrologia di grandi volumi

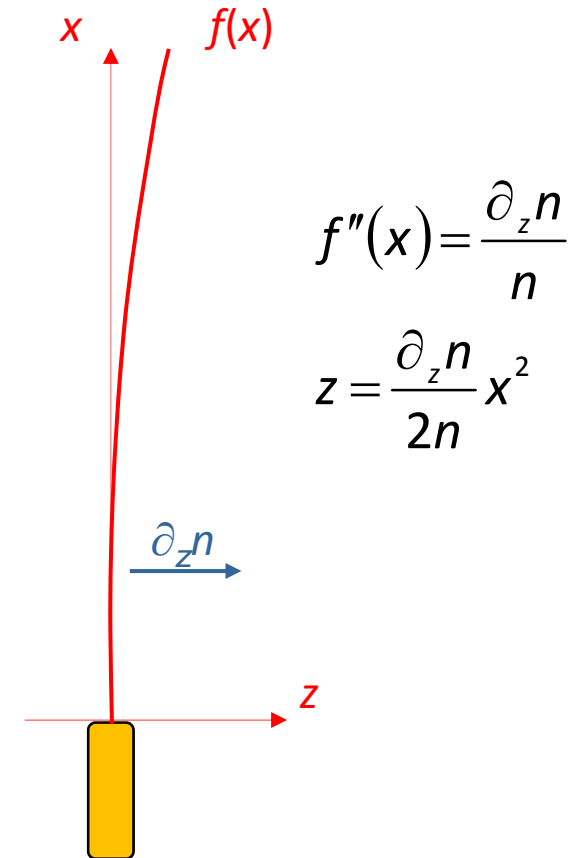


Applicazioni per grandi dimensioni

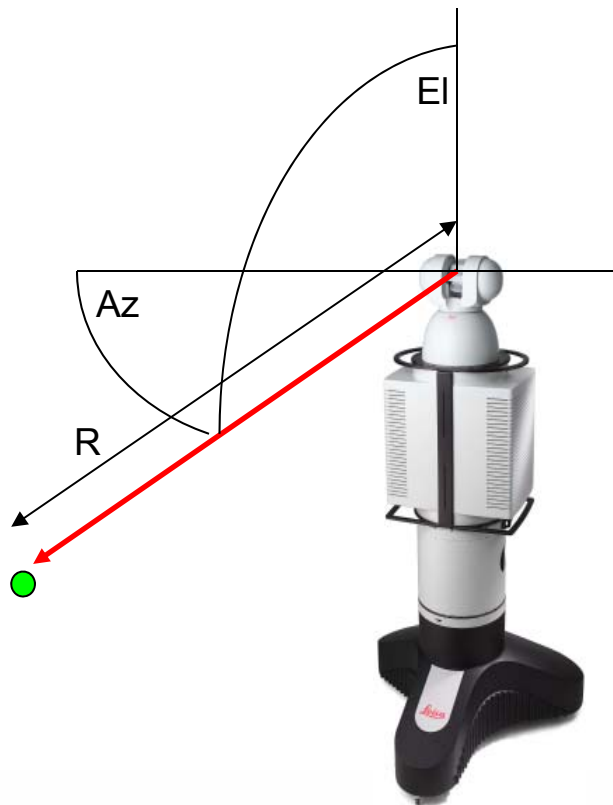


puntamento

- Gli inseguitori laser assumono che la luce si propaghi in linea retta (puntamento)
- In presenza di variazioni spaziali (gradienti) dell'indice di rifrazione, i raggi di luce s'incurvano
- Gradienti verticali esistono sicuramente, per la stratificazione termica dell'aria
- L'errore laterale sul bersaglio cresce con il **quadrato** della distanza
 - a **10 m**, **~ 50 μm** d'errore laterale



Laser radar



- Misura del tempo di volo fino alla superficie di test
- Sistema di coordinate polari
- Non c'è bisogno di retro-riflettore
- Campo di misura fino a 50 m
- $U =$ da $24 \mu\text{m}$ a $500 \mu\text{m}$



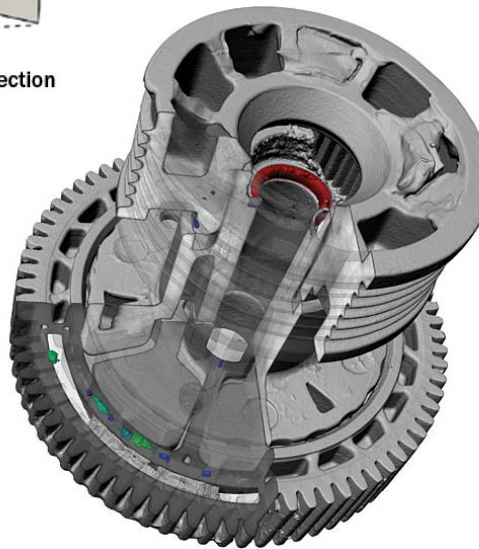
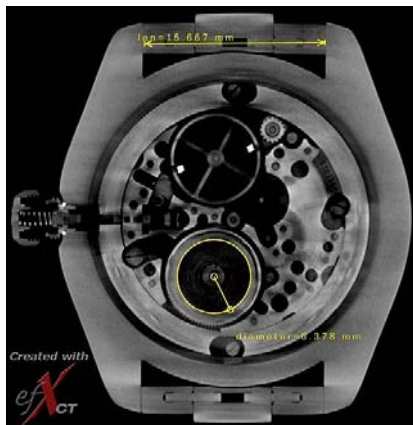
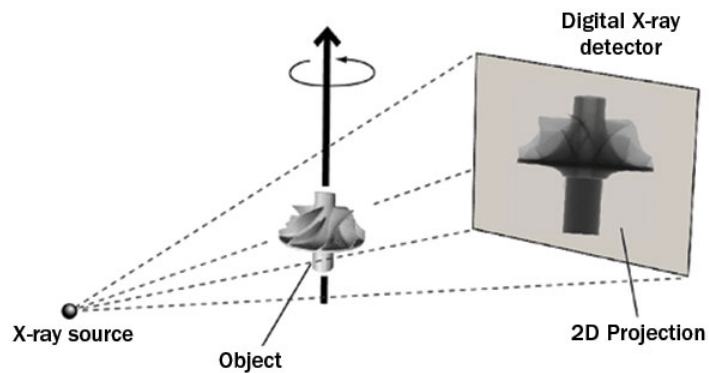
Laser scanner



- Misura del tempo di volo fino alla superficie di test
- Sistema di coordinate polari
- Non c'è bisogno di retro-riflettore
- Campo di misura fino a 70 m
- $U =$ da $300 \mu\text{m}$ a $1000 \mu\text{m}$
- $1.2 \cdot 10^6$ punti/s
→ Stato dell'arte per velocità



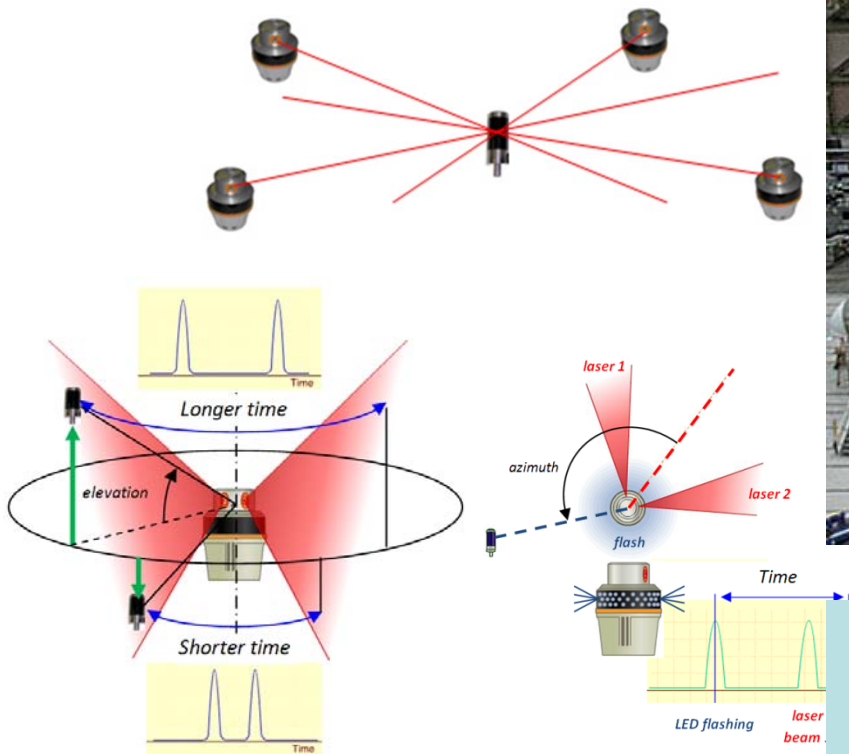
Tomografia computerizzata per metrologia dimensionale



- Prima macchina per CT dimensionale nel 2005
- Misura di parti non accessibili con altre tecniche
- Controllo simultaneo di dimensioni e materiali
- accuratezza ancora limitata
- Costi \approx 100 – 500 k€



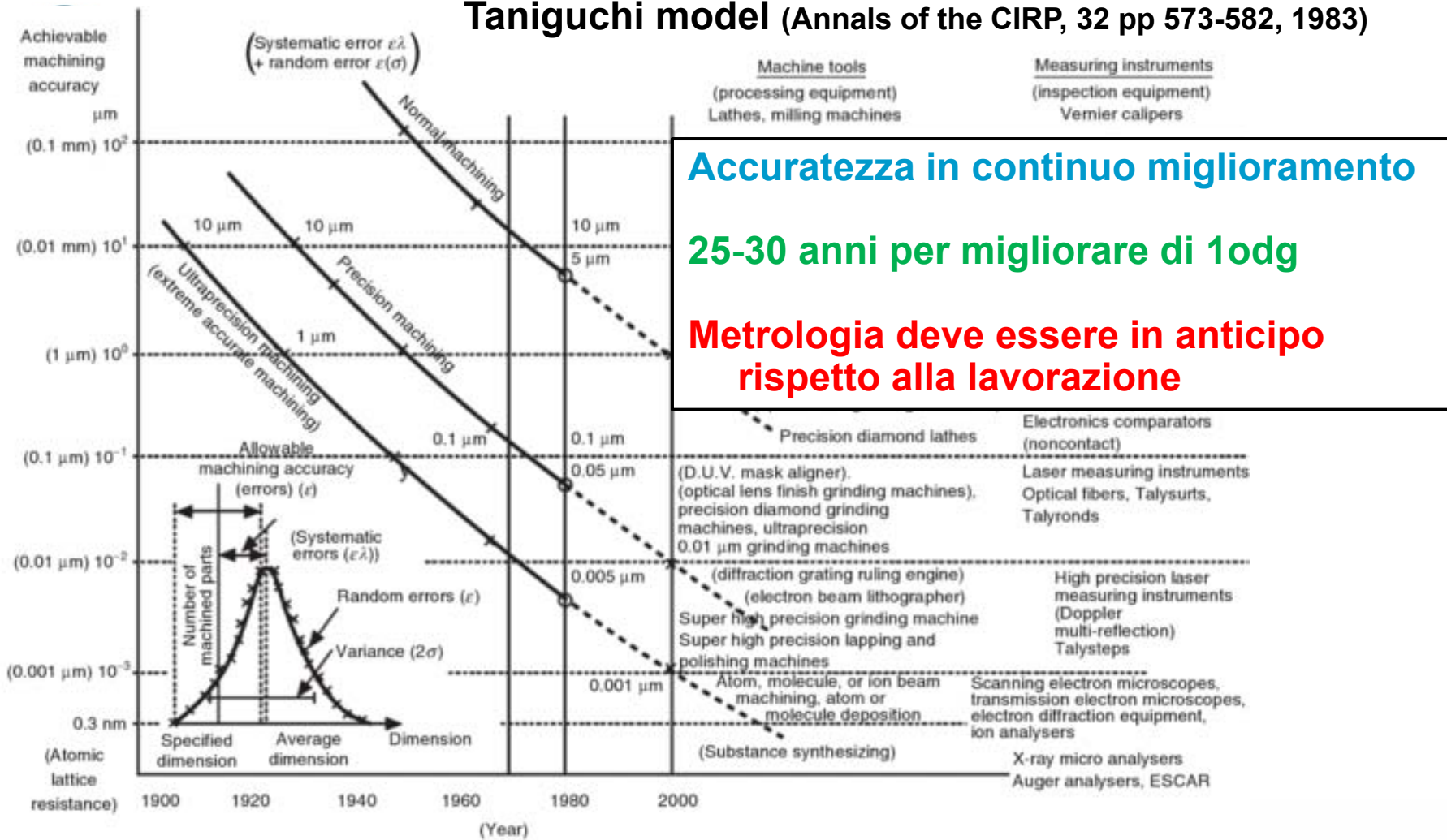
indoor GPS



«Non c'è programma per nuovi aerei che non stia usando o non stia pianificando di utilizzare l'indoor GPS»
ArcSecond President



Taniguchi model (Annals of the CIRP, 32 pp 573-582, 1983)



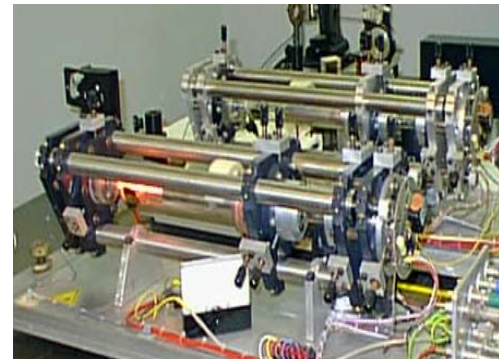
Ricerche per la realizzazione e il miglioramento dei campioni primari di lunghezza e angolo

Realizzazione della definizione del metro
(Mise en Pratique)

Mantenimento e disseminazione dei campioni primari di lunghezza e angolo

- blocchetti piano paralleli
- campioni di angolo
- campioni di diametro e rotondità
- calibri a passi, piatti a sfere
- metrologia a coordinate
- nanometrologia
- Interferometria

Il metro è la lunghezza del cammino percorso dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/299 792 458 di secondo



*He-Ne ($^{127}\text{I}_2$)
at 633 nm*

MRA - Accordo di Mutuo Riconoscimento

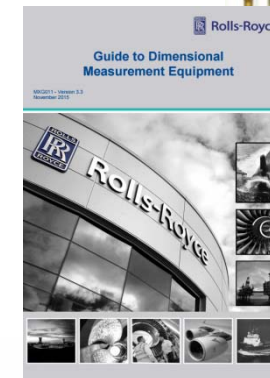
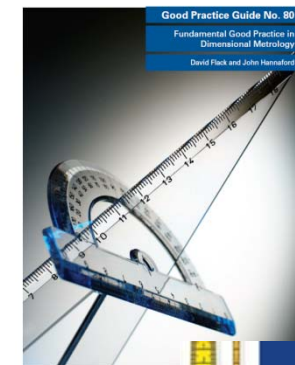
- 42 **CMC** Lunghezza (<http://kcdb.bipm.org>)
- Confronti internazionali

Progetti e Contratti di ricerca europei e regionali



Referenze e documenti utili

- **Guide to Dimensional Measurement Equipment, Rolls-Royce**
MXG011 - Version 3.3 November 2015
- **Fundamental Good Practice in Dimensional Metrology**, Flack Hannaford
Measurement Good Practice Guide No. 80, NPL, 2012
- **La Metrologia dimensionale. Teoria e Procedure di Taratura**, Malagola Ponterio, 2013
- **Dimensional Metrology Challenges - an NMI perspective**, Andrew Lewis
Proc. Royal Society Satellite meeting on Precision Measurement, 2011
- **Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing**, Norio Taniguchi, Annals of the CIRP, 32 pp 573-582, 1983
- **Norme ISO**
 - ✓ **ISO 1** – Reference temperature = 20 °C
 - ✓ **ISO 14253-1** – Tolerance decision rules
 - ✓ **ISO 10360** – CMMs
 - ✓ **ISO 17025** – Laboratory operation guidance
 - ✓ **ISO GUM** – Uncertainty evaluation





Grazie per
l'attenzione!

