

# 三次元量床量測能力之研究

陳源樹 于正道 劉順益  
逢甲大學工業工程研究所

## 摘要

本研究的目的是透過一般量測系統的五種量測特性：偏差、線性、重複性、重現性及穩定性，以建立一套有系統的 CMM 量測能力的評估方法。由文獻探討得知，可以採用 CMM 量測幾何特性中的長度量測作為評估 CMM 量測能力的指標。經由 CMM 長度量測的五種量測特性定義，選擇時間、受測工件塊規與操作人員為實驗因子，反應變數為塊規 CMM 量測值。考慮時間無法隨機化，以時間為集區。以集區內實施分裂區塊設計實驗獲得塊規 CMM 量測值數據。分析塊規 CMM 量測值數據，此次實驗的 CMM 的長度量測準度與精度極為優越。可以接受 CMM 長度量測之穩定性、重現性、線性與偏差，重複性極小，估計為  $0.1 \times 10^{-7} \text{ inch}^2$ 。

**關鍵詞：**三次元量床、偏差、線性、重複性、重現性、穩定性、分裂區塊設計。

## 1. 研究動機與目的

現代的製造產業越來越依賴三次元量床(Coordinate Measuring Machine; CMM)來做精密工件的檢驗工作。以 CMM 量測實物建立 CAD 模型，配合電腦輔助設計(CAD)與電腦輔助製造(CAM)，在研發、設計及製造上有其應用價值。除此之外，以往在檢驗如齒輪、球體、圓柱等的標準幾何特徵時，均需要準備個別的量測系統，但配備有高精度類比科技的 CMM 卻能在很小的公差範圍內全數檢驗這些標準幾何特徵。

製造高品質的產品不只靠優良的製造機器，而且需要在製造過程中使用高精度的檢驗儀器。對許多製造商而言，利用 CMM 做品質檢驗時，就必須對 CMM 量測系統的量測效能提出保證。雖然國際間對於 CMM 的精度標準有許多規範；例如三次元量床製造協會(CMMA)【6】、英國國家標準 BS 6808【5】、國際標準組織 ISO 10360【7】、美國國家標準 ANSI/ASME B89.1.12M【4】與德國國家標準 VDI/VDE 2617【9】等。但是在國內，通常使用者都以代理商所提供 CMM 製造廠商所屬國的規範，作為選購、驗收與安裝 CMM 的依據。使用期間，使用者視需要委由代理商進行校驗，本身並沒有一套有效衡量 CMM 量測效能的方法。

有鑑於此，本研究針對量測系統的五種量測特性：偏差(Bias)、線性(Linearity)、重複性(Repeatability)、重現性(Reproducibility)及穩定性(Stability)，以建立一套有系統的 CMM 量測效能的評估方法。

## 2. CMM 之介紹

范光照與張郭益【2】定義 CMM 為「一種具有可做三個方向移動的探測器，可在三個互相垂直的導軌上移動，此探測器以接觸或非接觸等方式傳送訊號，三軸之位移量測系統(如光學尺)經數據處理器或電腦等計算工件的各點座標(x,y,z)及各項功能的儀器」。CMM 之量測功能應包括尺寸精度、定位精度、幾何精度及輪廓精度等。

## 3. 文獻探討

由 CMM 量測能力研究文獻探討可以發現各國 CMM 之規範與校正項目均以量測幾何特性中的長度，作為校正與比對的項目。而量測誤差不確定性則是用來衡量 CMM 效能的重要依據。在影響 CMM 量測誤差不確定性的因素方面，環境因素被視為最重要的誤差來源，特別是實驗室的溫度。另外，操作人員的操作對 CMM 量測誤差不確定性的影響也是一個考慮因素。至於在衡量 CMM 量測能力上大都以重複性，即量測精度作為

衡量的指標。

一般量測系統量測特性之研究，大都以工件及操作人員作為影響量測系統量測能力之因子。反應變數也都是量測系統之量測值，以為分析量測系統量測能力的數據。

綜合上述文獻探討，得到評估 CMM 量測能力研究的方向，分別說明如下：

- (1) 採用量測幾何特性中的長度量測作為評估 CMM 量測能力的指標。
- (2) 探討 CMM 量測系統的重複性與重現性，並考慮影響重複性與重現性的工件與操作人員兩因子。再考慮一般量測系統之偏差、線性及穩定性，因此，本研究同時考慮偏差、線性、重複性、重現性及穩定性五種量測特性來建構 CMM 長度量測之評估模式。
- (3) CMM 量測能力研究之文獻中，甚多著墨環境因素特別是實驗室的溫度對並 CMM 量測能力的影響。本實驗之環境為全控溫與控溼，因此不視實驗室的溫度與溼度為因子。
- (4) 使用 CMM 的量測值作為實驗的反應變數，而不使用 CMM 的量測誤差作為實驗的反應變數。因為考慮工件因子中有不同尺寸，而且一般量測系統量測特性之研究也都以量測系統之量測值作為反應變數。

## 4. 實驗設計

### 4.1 實驗因子、因子水準與反應變數的選擇

根據 CMM 長度量測特性定義，進行實驗同時評估 CMM 長度量測特性，所需之實驗因子為工件、操作人員及時間，並需要反覆。

各因子水準與反應變數如下所示：

工 件：為避免受測工件之工程變異，選擇塊規(Block Gauge)為受測工件。希望工件能盡量涵蓋所有 20 個塊規的尺寸，所以選定 20 個塊規中的 7 個塊規為受測工件(參見表 1)，即工件因子的水準數為 7。

操作人員：一般 R&R 的研究操作人員都採用 2 至 3 人，本研究受限於實驗室操作人員的人數，故採用 2 個操作人員，即操作人員因子的水準數為 2。

時 間：受到實驗設備取得與安排操作人員的限制，所以分別於 3 天實驗 3 次，即時間因子的水準數為 3。

反覆次數：為了估計實驗誤差，每一種處理重複 2 次。

反應變數為塊規 CMM 量測值。

表 1 塊規尺寸

20 個塊規尺寸	選擇的 7 個塊規尺寸
0.05 inch	0.05 inch
0.10 inch	0.20 inch
0.15 inch	0.35 inch
0.20 inch	0.50 inch
.	0.65 inch
.	0.80 inch
.	0.95 inch
0.85 inch	
0.90 inch	
0.95 inch	
1.00 inch	

#### 4.2 實驗設計的選擇

依據選擇的實驗因子、因子水準與反應變數，並且考量實驗的限制以決定實驗設計。再依所選擇的實驗設計建立 CMM 長度量測的評估模式與數據分析。

評估穩定性考慮的時間因子，時間無法隨機化，將 3 天的實驗視為 3 個集區(block)。

量測塊規時，以夾具固定塊規於 CMM。為了避免頻頻更換塊規以致耗時而且不方便，工件因子的 7 個水準，即 7 個塊規無法隨機化，無法採用隨機化集區設計。

隨機化 7 個塊規的量測順序，依序將每一個塊規固定於 CMM，2 位操作人員順序隨機化各量測 2 次，此稱為分裂區塊設計(Split Plot Design)【1、3、8】3 天為 3 個集區，每天實施分裂區塊設計實驗。

依據三個因子的模式參數屬性，集區內實施分裂區塊設計之線性統計模式如下：

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} ,$$

$$i = 1 \sim a, j = 1 \sim b, k = 1 \sim c, l = 1 \sim n ,$$

$y_{ijkl}$ ：在時間  $k$  下第  $j$  個操作人員，第  $l$  次量測第  $i$  個工件的量測值，

$\mu$ ：共同平均值，

$\tau_i$ ：表示第  $i$  個工件對量測數據之效果， $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ ，

$\beta_j$  : 表示第  $j$  個操作人員對量測數據之效果,  $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ,

$(\tau\beta)_{ij}$  : 表示第  $i$  個工件與第  $j$  個操作人員對量測數據之交互作用,

$$\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = 0 = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij}$$

$\gamma_k$  : 表示時間  $k$  的效果,  $\gamma_k \text{ iid } N(0, \sigma_\gamma^2)$ ,

$(\tau\gamma)_{ik}$  : 表示第  $i$  個工件與時間  $k$  對量測數據之交互作用,  $(\tau\gamma)_{ik} \text{ iid } N(0, \sigma_{\tau\gamma}^2)$ ,

$(\beta\gamma)_{jk}$  : 表示第  $j$  個操作人員與時間  $k$  對量測數據之交互作用,  $(\beta\gamma)_{jk} \text{ iid } N(0, \sigma_{\beta\gamma}^2)$ ,

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  : 三個因子之間的交互作用,  $(\tau\beta\gamma)_{ijk} \text{ iid } N(0, \sigma_{\tau\beta\gamma}^2)$ ,

$\varepsilon_{ijkl}$  : 隨機誤差項,  $\varepsilon_{ijkl} \text{ iid } N(0, \sigma^2)$ 。

表 2 集區內實施分裂區塊設計的變異數分析表

變異來源	平方和	自由度	均方	F <sub>o</sub>
集區(C)	SS <sub>C</sub>	c-1	SS <sub>C</sub> /c-1	MS <sub>C</sub> /MS <sub>E</sub>
工件尺寸(A)	SS <sub>A</sub>	a-1	SS <sub>A</sub> /a-1	MS <sub>A</sub> /MS <sub>AC</sub>
AC(總區誤差)	SS <sub>AC</sub>	(a-1)(c-1)	SS <sub>AC</sub> /(a-1)(c-1)	MS <sub>AC</sub> /MS <sub>E</sub>
操作人員(B)	SS <sub>B</sub>	b-1	SS <sub>B</sub> /b-1	MS <sub>B</sub> /MS <sub>BC</sub>
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	SS <sub>AB</sub> /(a-1)(b-1)	MS <sub>AB</sub> /MS <sub>ABC</sub>
BC	SS <sub>BC</sub>	(b-1)(c-1)	SS <sub>BC</sub> /(b-1)(c-1)	MS <sub>BC</sub> /MS <sub>E</sub>
ABC	SS <sub>ABC</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	SS <sub>ABC</sub> /(a-1)(b-1)(c-1)	MS <sub>ABC</sub> /MS <sub>E</sub>
誤差	SS <sub>E</sub>	abc(n-1)	SS <sub>E</sub> /abc(n-1)	
總和	SS <sub>T</sub>	abcn-1		

其中  $\gamma_k$ 、 $(\tau\gamma)_{ik}$ 、 $(\beta\gamma)_{jk}$ 、 $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$  與  $\varepsilon_{ijkl}$  間互相獨立。

#### 4.3 CMM 長度量測的五種量測特性的評估方法

依據時間因子對量測結果的影響為 CMM 長度量測之穩定性估計 MM 長度量測之穩

定性：
$$\hat{\sigma}_\gamma^2 = \frac{MS_C - MS_E}{abn}$$

一般 R&R 研究均以  $\sigma$  或  $\sigma^2$  表示量測系統之重複性， $\sqrt{\sigma_\beta^2 + \sigma_{\tau\beta}^2}$   $\sigma_\beta^2 + \sigma_{\tau\beta}^2$  表示量測

系統之重現性。CMM 長度量測之重複性： $\hat{\sigma}^2 = MS_E$

CMM 長度量測之重現性：
$$\hat{\sigma}_\beta^2 + \hat{\sigma}_{\tau\beta}^2 = \frac{\sum \beta_j^2}{b-1} + \frac{\sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$$

根據 CMM 長度量測對於偏差與線性的定義，先建立工件參考值(X)與量測值(Y)之資料表。利用統計學迴歸分析建立受測工件參考值 X 與量測值 Y 之線性迴歸模式  $Y = A + BX$ ，使用最小平方法求出迴歸係數 B 與截距 A。

CMM 長度量測之線性：
$$B = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{bcn} X_i Y_{ij} - bcn \bar{X} \bar{Y}}{\sum_{i=1}^a X_i^2 - bcn \bar{X}^2}$$

CMM 長度量測之偏差：
$$A = \bar{Y} - B \bar{X}$$

## 5. 實驗與實驗數據分析

### 5.1 實驗結果

根據研究所使用的集區內實施分裂區塊設計來安排實驗的順序。實驗所得之原始數據列於表 3。

表 3 量測結果

		集區 1(Day 1)		集區 2(Day 2)		集區 3(Day 3)	
操作人員 ↙ 塊規尺寸		OP1	OP2	OP1	OP2	OP1	OP2
	0.05 inch		0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0501
		0.0498	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
0.20 inch		0.1999	0.2000	0.2000	0.2000	0.1999	0.1999
		0.1996	0.1991	0.2000	0.2001	0.2000	0.2000
0.35 inch		0.3499	0.3500	0.3500	0.3500	0.3500	0.3499
		0.3499	0.3499	0.3501	0.3500	0.3499	0.3499
0.50 inch		0.5001	0.5000	0.5001	0.5001	0.4999	0.4999
		0.4999	0.5000	0.5001	0.5000	0.4999	0.4999
0.65 inch		0.6500	0.6500	0.6498	0.6499	0.6499	0.6499
		0.6500	0.6500	0.6498	0.6499	0.6499	0.6499
0.80 inch		0.7999	0.8000	0.8001	0.8001	0.7999	0.7999
		0.8000	0.8000	0.8001	0.8001	0.7999	0.7999
0.95 inch		0.9500	0.9499	0.9500	0.9500	0.9499	0.9499
		0.9500	0.9500	0.9500	0.9500	0.9499	0.9499

由 SAS 8.0 計算得表 4 集區內實施分裂區塊設計的變異數分析表。

表 4 集區內實施分裂區塊設計的變異數分析表

Source	SS	DF	Mean Square	F <sub>o</sub>	Pr>F
集區(C)	1.3E-7	2	0.7E-7	5.12	0.0102
工件(A)	7.56	6	1.26	3.5E7	*<.0001
AC(總區誤差)	4.3E-7	12	0.4E-7	2.81	*0.0066
操作人員(B)	4.8E-10	1	4.8E-10	0.57	0.5286
AB	1.5E-8	6	2.4E-9	0.46	0.8258
BC	0	2	0	0.06	0.9373
ABC	0.6E-7	12	0.1E-7	0.41	0.9512
誤差	5.4E-7	42	0.1E-7		
總和	7.56	83			

## 5.2 CMM 長度量測的五種量測特性之評估

CMM 長度量測的五種量測特性評估結果，綜合如下：

- (1) 檢定 CMM 長度量測之穩定性，相當良好。
- (2) 估計 CMM 長度量測之重複性為  $0.1 \times 10^{-7} \text{ inch}^2$ 。
- (3) 檢定 CMM 長度量測之重現性，非常好。
- (4) CMM 長度量測之線性成立。
- (5) CMM 長度量測之偏差為 0。

## 6. 結論與未來發展

本研究的目的是透過一般量測系統的五種量測特性：偏差、線性、重複性、重現性及穩定性，以建立一套有系統的 CMM 量測效能的評估方法。由文獻探討得知，可以採用 CMM 量測幾何特性中的長度量測作為評估 CMM 量測能力的指標。

經由 CMM 長度量測的五種量測特性定義，選擇實驗因子及其水準數與反應變數。為了評估 CMM 的穩定性，選擇時間為實驗因子，時間無法隨機化，不同的 3 天實驗，3 天視為 3 個集區。避免實驗因子受測工件的工程變異，選定 20 個塊規中的 7 個塊規為受測工件。塊規為受測工件。最後一個實驗因子為操作人員，受限於實驗室操作人員的人數，採用 2 個操作人員。反應變數為塊規 CMM 量測值。

為了避免頻頻更換塊規以致耗時而且不方便，7 個塊規無法隨機化，故每天實施分裂區塊設計實驗，即在 3 天的每一天實驗，隨機化 7 個塊規的量測順序，每一個塊規由 2 位操作人員順序隨機化各量測 2 次以獲得數據。

分析集區內實施分裂區塊設計之量測資料，此次實驗的 CMM 的長度量測準度與精度極為優越。

在研究的過程中，發現數點可以為未來類似研究的參考，分述如下：

- (1) 評估 CMM 長度量測的穩定性，可以將實驗時間間隔加長與增加實驗的天數，取得 CMM 長度量測的動態穩定性，以為校正之依據。
- (2) 考慮量測製程工件或者量測較複雜的工件，以評估 CMM 的量測特性。
- (3) 未來的研究可以考慮採用綜合指標來判斷 CMM 量測能力，方便實務上的應用。

## 7. 誌謝

感謝逢甲大學工業工程所陳源樹老師對此研究之悉心指導，于正道先生與其他相關人員熱心提供實務資料與提供實驗進行之場所，使得研究得以順利進行，特此誌謝。

## 參考文獻

1. 沈明來，「試驗設計學」，九州圖書，台中市，1999。
2. 范光照、張郭益，「精密量具及機件檢驗」，高立圖書，台北市，1996，p.429。
3. 黎正中譯，「實驗設計與分析」，高立圖書，台北市，1998。
4. ANSI/ASME B89.1.12M, Method for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machine, 1990。
5. BS 6808, British Standard Coordinate Measuring Machines, by British Standards Institution, 1989。
6. "CMMA" Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machines, by Coordinate Measuring Machine Manufacturing Association, 1989。
7. ISO 10360-2, Performance Assessment of Coordinate Measuring Machines, 1994。
8. Douglas C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments", Fourth Edition, Wiley, New York。
9. VDI/VDE 2617, Accuracy of Coordinate Measuring Machines, 1986。