

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

運動控制精度改善與視覺檢測之雛形機開發 (2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-009-018-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程學系

計畫主持人：李安謙

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 28 日

The improvement on precision of motion stage and the development of vision inspection machine

計畫編號：NSC 92-2212-E-009-018

執行期限：92年8月 - 93年7月

主持人：李安謙 E-mail: aclee@cc.nctu.edu.tw

執行單位：交通大學機械系

一、中文摘要(關鍵詞：運動控制、摩擦力、 摩擦力觀測器、摩擦力補償)

本計劃第二年主要研究目標包含：(1)以實驗方式完成動態 LuGre 摩擦力模型六個參數鑑別。(2)以滑動模式建立動態摩擦力之觀測器設計。(3)以滑動模式觀測器架構進行摩擦力補償控制，以不同速度正弦波做為輸入命令，對啟動區、換向區及精密定位等問題方面加以討論。(4)BGA 檢測機台的安裝與調校，(5)識別各軸參數並調整伺服迴路。

英文摘要(Keyword: motion control, friction, friction compensation, a sliding mode observer)

The main objectives of this year are : 1) To identify the six parameters of LuGre friction model of the system; 2) To design a nonlinear sliding mode observer based on LuGre friction model; 3) A sinusoidal velocity is applied as input to study the tracking problems on system's start-motion region and velocity-reversal regions. Experimental results are compared and discussed; 4) A machine vision inspection system is setup for BGA IC and the hardware facility is calibrated later; 5) To identify and adjust the control gains for each servo controller.

二、計劃緣由與目的

摩擦造成精度下降的現象很常見。

摩擦力的問題上，其存在於伺服機構是無法避免，即使時常保持良好的潤滑，也僅能減少摩擦力的大小而已。摩擦力通常會造成能量消耗及控制器設計困難等問題。Craig 【1】指出機器人系統中約有 25%的動力消耗在摩擦上；Armstrong 【2】亦指出碳刷式 DC 伺服馬達存在斷離摩擦力(Break-away Friction)，其大小約為馬達全額扭力的 4%-6%之間，會造成低速運轉時的不穩定現象，所以摩擦將使能量耗損，嚴重時，因持續修正位置的運轉產生高熱，進而危害伺服系統。此外，Karnopp 【3】指出黏滑摩擦力常使得系統動態行為不穩定，因而造成控制器易發生抖動。Haessig 與 Friedland 【4】指出摩擦力造成物體移動的不連續性；當運動方向改變時會造成較大的追蹤誤差，而於目標點附近會造成極限循環。Gogoussis 與 Donath 【5, 6】指出機器人伺服系統中，摩擦力具有以下不良影響：

1. 因傳動機構的順從性效應與採用迴授控制而導致極限循環之產生。
2. 於低速運轉下，時而出現跳動現象。
3. 摩擦力對能量之消耗，導致系統產生熱與變形。
4. 於多軸機器人系統中，非線性摩擦力增加各自由度之非線性耦合而導致系統追蹤功能的不彰。

綜合上述所言，摩擦力在伺服機構控制上通常會引起穩態誤差(Steady State Error)、黏著(Stick)、極限循環及躍動(Jerk)等問題，而影響精密機械之精度。摩擦力同時為位置、速度與作用力之函數，特性極為複雜。針對黏滑摩擦力(stick-slip friction)的非線性現象，有很多學者提出了不同的模型去模擬，如古典摩擦力模型

(Classical Friction Model)、阿姆斯特壯摩擦力模型(Armstrong Friction Model)【7】、卡諾普模型(Karnopp Friction Model)【3】、戴爾模型(Dahl Model)【8】、重置積分模型(Reset Integrator Model)與刺毛模型(Bristle Model)【4】、LuGre model【9】等，分別對摩擦力中不同的靜態、動態效應都有不錯的模擬結果。

摩擦力對於產業機械，如 CNC 工具機、放電加工機、工業機器人及次微米精密定位的半導體製程設備（含視覺檢測）之精度有直接的影響。本計畫乃針對工具機及產業機械之需求，研究摩擦力之模型鑑別與補償技術應用於高性能之運動控制。

三、研究方法及成果

實驗中的驅動器使用的是 Kollmorgen 公司的 SERVOSTAR CD Amplifier，使用扭力控制模式 (Torque Mode)。線性馬達平台亦為 Kollmorgen 公司所出品的 PLATINUM DDL MOTOR，為一永磁式線性無刷馬達直線導軌。在對平台的位移量測方面，使用的是 Renishaw 公司的 RLE10 Fibre optic laser encoder，這是一個高精確度、高解析度的雷射位移計，其解析度方面，本雷射位移計提供「Coarse」和「Fine」兩種不同解析度的訊號，其中 Coarse 訊號最高解析度經校正可達 $0.0791 \mu m$ ，而 Fine 訊號的解析度最高可達 $0.02 \mu m$ ，實驗中將根據不同的實驗需求使用不同的訊號，而對於摩擦力模型參數估測而言，雷射位移計提供了一個可靠又精確的量測。利用雷射干涉儀教準雷射位移計之架構如圖 1，系統硬體設備圖如圖 2。

本研究中，因位置感測器解析度極高，其所估測之速度也相當準確，所以決定採用動態摩擦力模型 LuGre Model，假設有相當數目的無質量刺毛亂數分佈在兩物體接觸面上，在低速的微小相對運動中，摩

擦力可看成是所有刺毛的彈力總和。根據刺毛之平均變形量，刺毛行為的動態模型如下式(1)(2)：

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} \sigma_0 z \quad (1)$$

其中 z 為刺毛之平均變形量 (m)， v 為兩接觸表面間之相對速度 (m/s)， $g(v)$ 與速度相依的正函數

因此，兩物體接觸表面由變形刺毛而造成的摩擦力大小為：

$$T_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

其中 σ_0 為剛性 Stiffness (N/m)， σ_1 為阻尼係數 Damping Coefficient (Ns/m)

若同時考慮黏滯摩擦力，則可推導出摩擦力模型為：

$$f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + Bv \quad (3)$$

若將 Tustin 模型的中指數型態的快速衰減特性運用於 $g(v)$ ，即假設

$$g(v) = T_h - (T_h - T_d) \left(1 - e^{-\frac{|v|}{v_s}} \right) \quad (4)$$

其中 T_h 、 T_d 、 v_s 分別為黏著摩擦力、庫倫摩擦力及速度常數

LuGre Model 中的參數包含 T_h 、 T_d 、 B 、 v_s 、 σ_0 、 σ_1 等，可以利用上一年度計劃的鑑定方式鑑定參數。

順滑模態觀測器 (Sliding Mode Observer) 乃是以順滑模態控制理論為基礎所發展出來的一種非線性觀測器，最早是由 Utkin【10】提出。本文以 Utkin 等人的順滑觀測器設計方法為基礎，設計出以刺毛摩擦力模型為架構，並包含其他非線性干擾觀測功能的順滑模態觀測器。

首先是系統模型的狀態空間描述，在系

統模型中，我們以刺毛摩擦力模型作為摩擦力機制依據：

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = \frac{1}{J}(-Bv - T_f - d - u) \\ \dot{z} = v - \frac{|v|}{g(v)}\sigma_0 z \\ \dot{d} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{且 } T_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z}$$

其中 x 、 v 分別為位置及速度資訊， J 、 B 為系統慣量及阻尼， σ_0 為刺毛剛性， σ_1 為刺毛阻尼係數， u 為控制輸入力矩， d 為雜訊及外加干擾等非線性因素。其中使用之 T_f 並未考慮 Bv 項的摩擦力，這是因為黏滯摩擦力將併入系統阻尼中。

接著選擇一順滑函數：

$$S = e_x + \lambda_p e_v \quad (6)$$

選擇此順滑函數的原因是因為系統的位置及速度資訊是可量測的，故可設計一順滑模態觀測器，其狀態方程式如下：

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{v} \\ \dot{\hat{v}} = \frac{1}{J}(-B\hat{v} - \hat{T}_f - \hat{d} - u) - K \cdot \text{sgn}(S) \\ \dot{\hat{z}} = \hat{v} - \frac{|\hat{v}|}{g(\hat{v})}\sigma_0 \hat{z} + G_1 \cdot K \cdot \text{sgn}(S) \\ \dot{\hat{d}} = 0 + G_2 \cdot K \cdot \text{sgn}(S) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\hat{T}_f = \sigma_0 \hat{z} + \sigma_1 \dot{\hat{z}}$ ， \hat{x} 、 \hat{v} 、 \hat{d} 、 \hat{z} 皆為觀測器觀測到的資訊， K 、 G_1 、 G_2 皆為觀測器之順滑增益 (Sliding Gain)，整個系統方塊圖如圖 3 所示：

根據 (5)、(6) 式，可建立系統誤差動態 (Error Dynamics)：

$$\begin{cases} \dot{e}_x = e_v & (8) \\ \dot{e}_v = \frac{1}{J}(-Be_v - e_{Tf} - e_d) - K \cdot \text{sgn}(S) & (9) \\ \dot{e}_z = e_v - \left(\frac{|\hat{v}|}{g(\hat{v})}\sigma_0 \hat{z} - \frac{|v|}{g(v)}\sigma_0 z \right) + G_1 K \cdot \text{sgn}(S) & (10) \\ \dot{e}_d = G_2 K \cdot \text{sgn}(S) & (11) \end{cases}$$

其中 $e_x = \hat{x} - x$ 、 $e_{Tf} = \hat{T}_f - T_f = \sigma_0 e_z + \sigma_1 \dot{e}_z$ 、

$e_v = \hat{v} - v$ 、 $e_d = \hat{d} - d$ 、 $e_z = \hat{z} - z$

假設一李亞普諾候選函數 (Lyapunov

candidate) $V = \frac{1}{2}S^2 < 0$ ，則

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} = (e_x + \lambda_p e_v)(e_v + \lambda_p \dot{e}_v) \\ &= \lambda_p S \left[\left(\frac{1}{\lambda_p} - \frac{B}{J} \right) e_v - \frac{1}{J}(e_{Tf} + e_d) - K \cdot \text{sgn}(S) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

當 $S > 0$ ，則使 $\dot{V} < 0$ 的條件為：

$$K > \left[\left(\frac{1}{\lambda_p} - \frac{B}{J} \right) e_v - \frac{1}{J}(e_{Tf} + e_d) \right]$$

則 V 為一李亞普諾函數 (Lyapunov function)，滿足順滑條件。由此可知，足夠大的 K 值將能導致順滑模態的產生。

由式 (6)，令 $\dot{S} = 0$ ，可得到等效控制 $K \cdot \text{sgn}(S)_{eq}$ ：

$$K \cdot \text{sgn}(S)_{eq} = \left(\frac{1}{\lambda_p} - \frac{B}{J} \right) e_v - \frac{1}{J}(\sigma_0 e_z + \sigma_1 \dot{e}_z + e_d) \quad (13)$$

將此式分別代入 (10)、(11) 式中，整理可得下列式子：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_z \\ \dot{e}_d \end{bmatrix} + \mathbf{A}(v) \begin{bmatrix} e_z \\ e_d \end{bmatrix} = \mathbf{U} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \mathbf{A}(v) &= \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{G_1 \sigma_1}{J} \right) & 0 \\ \frac{G_2 \sigma_1}{J} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_2 + \frac{G_1 \sigma_0}{J} & \frac{G_1}{J} \\ \frac{G_2 \sigma_0}{J} & \frac{G_2}{J} \end{bmatrix}, \\ &= \frac{1}{J + G_1 \sigma_1} \begin{bmatrix} JC_2 + G_1 \sigma_0 & G_1 \\ G_2(\sigma_0 - C_2 \sigma_1) & G_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{G_1 \sigma_1}{J} \right) & 0 \\ \frac{G_2 \sigma_1}{J} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} 1 + \frac{G_1}{\lambda_p} - \frac{G_1 B}{J} \\ \frac{G_2}{\lambda} - \frac{G_2 B}{J} \end{bmatrix} e_v + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} (C_1 - C_2) \hat{z} \right\} \\ & \cdot C_1 = \frac{|\hat{v}|}{g(\hat{v})}\sigma_0 \quad \cdot C_2 = \frac{|v|}{g(v)}\sigma_0. \end{aligned}$$

利用耗散原理得穩定的觀測器 G_1 、 G_2 值。

圖 3 中，P 控制器增益為 500，I 控制器增益為 10000，下達的速度命令為 $u_v = 70 \sin(2t) \text{ mm/s}$ ，比較速度補償前後之差異。如圖 4 所示，A 為未補償之誤差，B 為補償後之誤差，兩者相差明顯。圖 5 顯示起動區與三個換向區之詳圖，更可看出摩擦力模型之適用性。

BGA 檢測機台之實體圖如圖 6 所示。表 2 為實驗設備之規格表。BGA 檢測的流程步驟如下：

步驟一：校正硬體設備，利用校正板進行鏡頭和定位平台間平行度的校正和影像中 XY 方向尺寸單位的調整。

步驟二：設定目前工作所要檢測 IC 之相關參數，如球距、球大小、球大小容許誤差、球間距容許誤差等檢測所須之條件。

步驟三：將用來建立比對樣本的 BGA IC 置於 CCD 攝影機底下，利用側照式光源照明，並調整光源強度使得(1)影像中甜甜圈現象最明顯，(2)照明前後錫球之邊緣輪廓最接近，此時光源強度即為最佳光源之強度。

步驟四：開始進行建立比對樣本(學習)的工作，以空間遮罩來加強影像，並選取最適當二值化的門檻值，使得影像中錫球的尺寸最接近實際尺寸。

步驟五：進行閉合運算將二值化影像中錫球上的黑洞補滿。再接下來便計算(1)每個錫球在 2D 影像中相對於參考座標的圓心位置。(2)此樣本 IC 於影像中偏移的角度。(3)尺寸轉換單位(mm/pixel)。並且檢查這顆作為比對樣本的 IC 球數是否正確？若是的話，則拿此顆 IC 進行學習的工作。若不是的話，則需要換另一顆的 IC，並且從步驟四重新學習。

步驟六：驅動馬達使得 CCD 攝影機能夠擷取待檢測 IC 之影像，進行區塊分析計算將每個錫球包圍住的最小方塊，再利用次像素邊緣檢測和最小平方誤差法進行橢圓逼近，便能夠計算出每個錫球的尺寸和逼近橢圓之偏心率。

步驟七：進行缺陷球的檢測，由錫球的位置判斷是否有多球、少球或球偏移，再判斷是否有球相連、尺寸異常或形狀異常的球。

步驟八：標示出有缺陷的錫球於電腦螢幕上，並將球徑尺寸、偏心率和球

座標等資料儲存起來。接下來若是需要檢測下一顆 IC，便跳到步驟六，進行六到八的步驟。

檢測流程圖如圖 7 所示

四、結論與討論

由上面的實驗可以看出，(1)順滑摩擦力觀測器可以觀測出實際的摩擦力，能精確補償、並降低追蹤誤差。

視覺檢測機器需要高度之追蹤與定位精度，利用順滑摩擦力觀測器，可以估測出系統的摩擦力，能夠有效的補償。今年已經架設好 BGA 檢測機台，相關的參數及及檢測技術，將是未來一年所必須完成研究方向。

五、參考文獻

- 1 Craig,J.,1986,Introduction to Robots, 東南.
- 2 Armstrong,B.,1988, "Friction: Experimental Determination, Modeling and Compensation," Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 1422-1427.
- 3 Karnopp,D,. 1985,"Computer Simulation of Stick-slip Friction in Mechanical Dynamic System," Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Vol. 107,pp. 100-103.
- 4 Hassig,D.A.,and Friedland, B., 1991, "On the Modeling and Simulation of Friction," Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Vol. 113,pp. 354-362.
- 5 Gogoussis, A., and Donath, M. 1988, "Coulomb Friction Effects on the Dynamics of Bearings and Transmissions in Precision Robot Mechanisms," IEEE conf. On Robotics and Automation, pp.1440-1446.
- 6 Gogoussis, A., and Donath, M. 1987,

"Coulomb Friction Joints and Drive Effects in Robot Mechanisms," IEEE conf. On Robotics and Automation, pp.828-836.

- 7 Armstrong, B., Control of Machines with Friction, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- 8 Dahl, P.R., "A Solid Friction Model," AFO 4695-67-C-0158, Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 1968.
- 9 Canudas de Wit, C., Olsson, H., Astrom, K.J., and Lischinsky, P., "A New Model for Control of Systems with Friction," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 40 (3), pp. 419-425, 1995.
- 10 Utkin, V.I., Sliding Modes in Control and Optimization, (1992), Springer-Verlag, New York, pp.207-210.

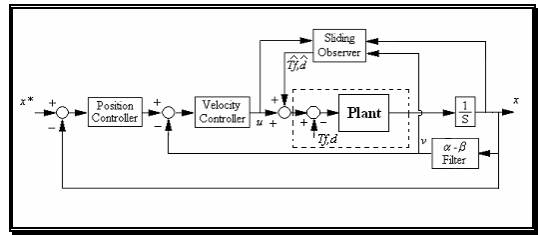


圖 3 系統方塊圖

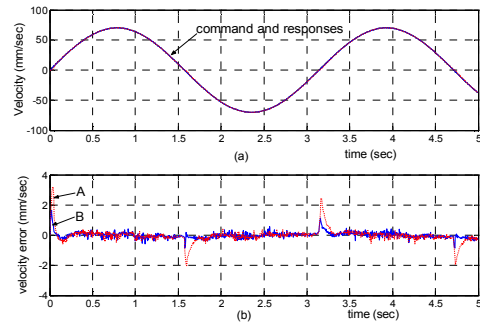


圖 4 弦波速度下未補償摩擦力與補償後之實驗比較

六、圖表

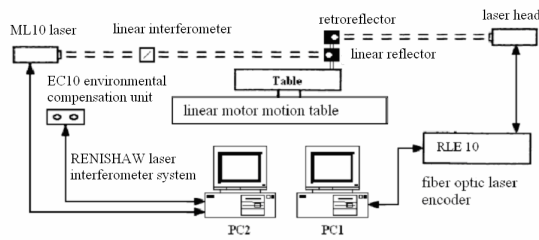


圖 1 利用雷射干涉儀教準雷射位移計之架構圖

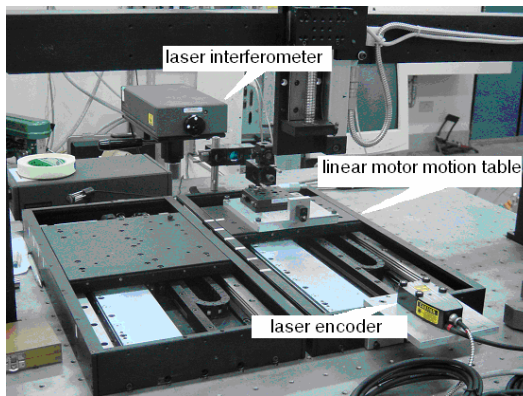


圖 2 直線馬達與雷射感測實驗設備示意圖

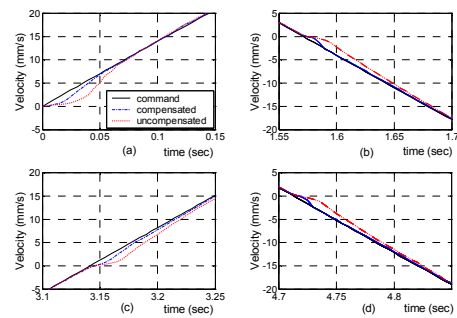


圖 5 將起動區與連續三個換向區實驗之速度響應放大圖

表 1. 系統參數表

Symbol	Value	Unit
J , inertia	5.5050	kg
B , viscous friction coefficient	110.7098	kg/sec
F_S , static friction force	21.4856	N
F_C , Coulomb friction force	7.1624	N
v_s , Stribeck velocity	5.01	mm/sec
σ_0 , bristle stiffness	2.6087×10^6	N/m
σ_1 , bristle damping	1.2835×10^4	kg/sec
K_t , force constant of motor	28.5	N/A
K_a , gain of current driver	0.349	Volt/A
T , sampling time	0.0005	sec

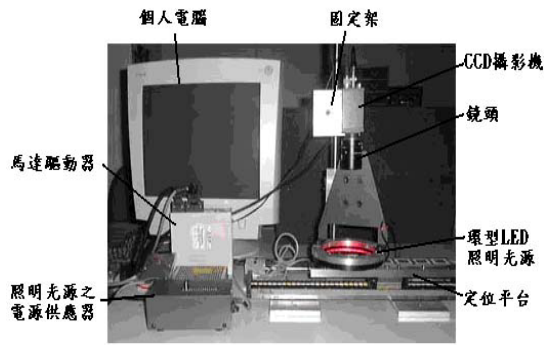


圖 6 BGA 測試機台實驗設備之實際影像

表2 實驗設備之規格表

實驗設備名稱	規格	主要功能
個人電腦	以 VC++6.0 作檢測程式的開發，將 BGA 錫球數位的影像作處理和計算，並顯示檢測結果於電腦螢幕上。	
CCD 攝影機	SONY XC-75 型 解析度：768 x 494 個 像素 單色	經環型光源照明後，調整光圈和焦距至最清晰的狀態，透過鏡頭和 CCD 攝影機將真實世界的影像擷取進來，再由擷取卡轉換為數位影像。
影像擷取卡	Matrox Meteor PCI Frame Grabber 單色	
鏡頭	工作範圍 200mm FOV：72(H) x 54(V)mm 25mm F1.4	
環型 LED 照明光源	日製 型號：LDR-146LA-1	照明置放在平台上的 BGA 用。 照明的亮度可以由其電源供應器來作調整。
數位 I/O 卡	研華 PCI-730 16 組 DI / 16 組 DO	控制伺服驅動器 SERVO ON/OFF。
運動控制卡	研華 PCI-832 三軸伺服控制卡	透過運動控制卡作閉迴路位置控制，讓驅動器送出速度命令來轉動馬達並帶動導螺桿上的平台移動，使得
單軸運動單元	精度 0.01mm 導螺桿、Panasonic 交流伺服馬達、聯軸器	BGA IC 能精準的定位在 CCD 攝影機底下，讓影像能夠擷取進來。
交流伺服驅動器	Panasonic MSDXX 系列，適用馬達出力 100W，轉速 3000 (r/min)，電源供應 100V	
固定架	自行設計	固定 CCD 攝影機和照明光源。

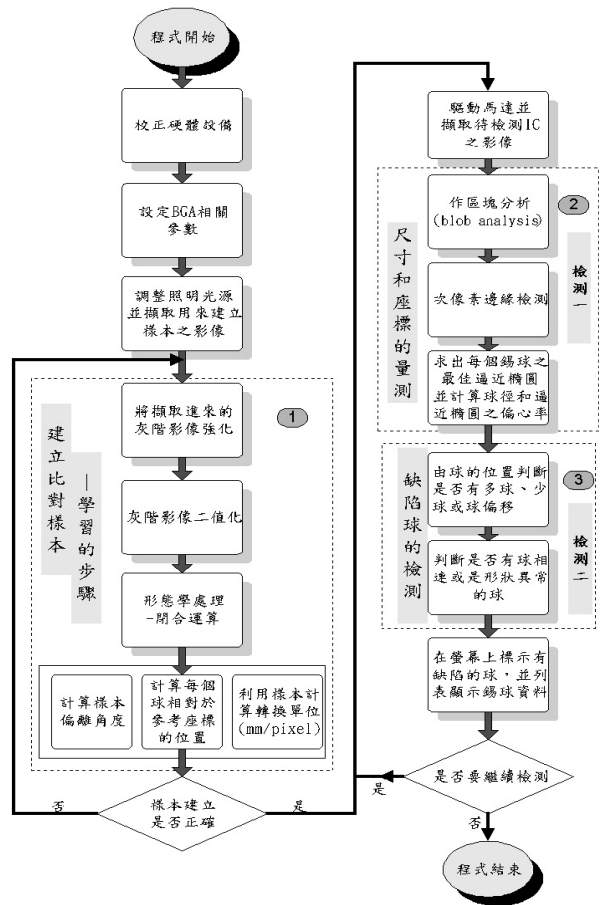


圖 7 檢測流程圖