中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組　工程學科(一)科

第一名

052313

挖掘運動研究與操作改良

學校名稱：臺北市立南港高級工業職業學校

作者：	指導老師：
職二 林良昊 職二 陳大展 職二 邱思齊	陳年佑

關鍵詞：挖掘機、運動研究、操作改良

得獎感言

一步一腳印，我們的手創人生

這一路上過關斬將到參加全國科展，我們很高興能在全國科展競賽中一舉拿下工程學科（一）第一名，當宣布得獎名單的時候，小組都激動不已。回想起過去研究過程的點點滴滴，從一開始集思廣益想題目，一步一步做出成品，再經過無數次的改良，才能造就如今的成果。我們在做科展的過程中領悟到一些重要的道理：首先，在實務方面我們是親手打造模型系統，在過程中雖然真的做的很累，但我們可是樂在其中，因為在心裡有個目標，就是想要打造出最棒的成品出來，直到模型日漸成形後，心裡自然充滿著成就感；其次，在理論方面，我們要充分的理解，才能推演、並衍生出有參考性的想法，並套用在作品上。在研究的過程中，我們所完成的不僅僅是組員之間的合作，更重要的是我們理解到，對一件事情，我們可以有不同看法，但必需從不同的看法中，醞釀出對事物多方面的思維與創新，越是遭遇到挫折就越要想辦法去突破，組員相互扶持合作，讓我們小組向前邁進、也讓每一個人蛻變後更加的卓越。

在最後的最後，真心的感謝在幕後用心的指導老師，以及一路上幫助我們研究的每一個人，因為有你們的支持與協助，才能造就今日的成果。

於會場和作品合影

摘要

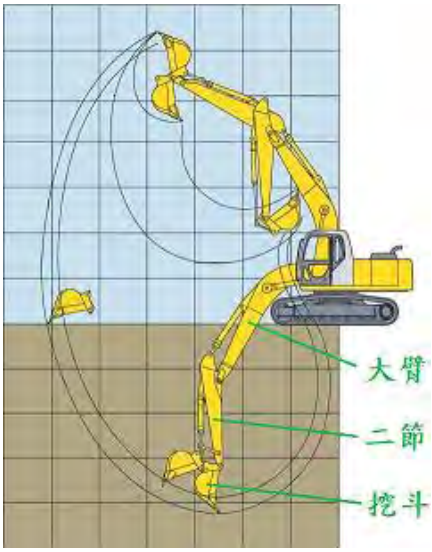
時機歹歹，工作愈來愈難找，社會新鮮人的平均薪資每每下降。但您知道嗎？有許多傳統產業相當缺人，且薪資誘人，這些工作的資深人員通常稱為「師傅」。但這些工作的特性是「辛苦且需技術性」，年輕人要學習「師傅」的技術，通常需日積月累的經驗才能出師，這段學習時間長且辛苦，無法撐過煎熬的新人退出，自然形成產業人力斷層。

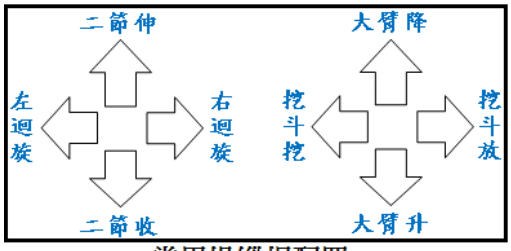
重機械挖掘機是一個典型的例子，操作挖掘機需要靈活的反應與操作經驗，入門新人操作動作較慢、施工結果有落差，會造成整體施工進度壓力。本研究希望能擷取前述「師傅」的技術經驗，融合到智慧型輔助系統上，以縮短入門技師學習時間、降低入門門檻，以期減小產業人力斷層，增加就業機率，也增加整體工程效率。

壹、研究動機

目前工程業界，重型機具施工成本很高。以挖掘機來說，一部中型機具的單日租金上萬元。若再加上操作人員工資等費用，成本高昂，因此，在聘雇操作駕駛時，通常會希望採用技巧較純熟的技師，因為其施工的效率，根本性的決定營收多寡。

另外，一部挖掘機的運動範圍，乃是由「大臂、二節、挖斗」三部份所構成 (如下圖左)。再加上機體的「迴旋」動作，共有四個自由度。這四個動作，分別由駕駛室的二支操縱桿所控制，操作時，另需參考各廠商的操縱桿配置 (下圖右為常用的操縱桿配置圖)。因此，要靈活操作挖掘臂，通常需要時間經驗的累積。





常用操縱桿配置

另一方面，隨著電子與機械技術的演進，本小組認為可以改良現有的挖掘機，朝向智慧型輔助控制，除了降低技師的入門門檻，也提高施工的精度及效率，使得較不熟練的技術工人，也能達到施工要求。

貳、研究目的

本研究的目的，是擷取師傅的技術經驗，將其融合到智慧型輔助系統，提高施工精度、降低技師入門門檻。為了達到此目的，我們採用三階段的研究驗證法：

- 第一階段為專家咨詢，此階段有 2 個重點：
  1. 首要重點是「建立評估準則」，因為一個研究或實驗通常需要進行評估，我們可以藉由專家經驗與資料蒐集得到此評估標準；
  2. 其次是瞭解「操作技巧」，確認挖掘動作如何才能兼具效率與精確度，以作為後面二個階段 (改良開發、實驗) 的方向。

- 第二階段為數學模型建立，此階段將挖掘運動數學化，並同時開發挖掘機的實驗模型、將控制邏輯建入實驗模型中。此階段的目的是利用實驗模型的操作結果，進行挖掘模式的修正與改良；

- 第三階段為實體大型實驗，此階段將先前二階段的研究結果整合至實體機具進行實驗，整合理論與實務，並對實驗結果進行分析。

參、研究設備及器材

研究設備及耗材如下表：

設備列表	耗材列表
焊槍	木板、白鐵板、鋁板
鑽床	鑽頭
砂輪機、手提電鋸	鐵釘、螺絲、螺帽
三用電表	軸承
游標卡尺、組合角尺、水平儀	砂輪片
繪圖用具	搖桿
電源供應器、示波器	按鈕開關、搖頭開關
各規格板手、虎鉗、銼刀	電路板、麵包板
筆記型電腦	導線、焊錫
MPLAB 軟體	LCD 液晶顯示器
SolidWorks 繪圖軟體	白鐵膏、羊毛輪
Tracker Video Analysis 軟體	單晶片(dsPIC30F4011)
旋轉氣壓缸、引導式止回閥、5/3 閥	電容、電阻、可變電阻、繼電器
空壓機、氣瓶	細沙、沙盆
直線型步進馬達、驅動器	

肆、研究過程與方法

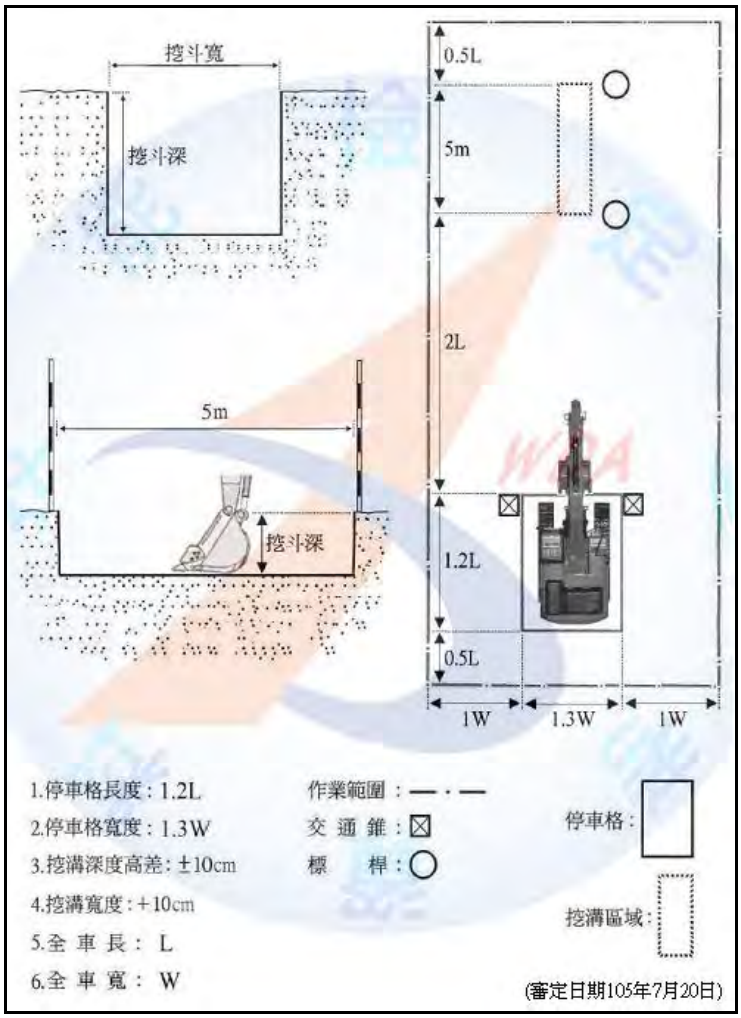
一、　資料蒐集 & 專家咨詢

(一)、資料蒐集：

此為三個研究階段的第 1 階段，其首要目的是建立本研究實驗分析的評估準則。為了達到此目的，我們希望能參考現行法規，以便依循較具權威性的標準，故我們找到勞動部勞動力發展署技能檢定中心頒佈的「挖掘機操作技術士技能檢定」資料。

依資料顯示，挖掘機操作檢定共分四站，而其中與挖掘動作相關、且具指標性的乃是第四站：「挖掘機挖溝回填整平作業」。

該站的場地佈置如下圖，其操作目的是挖出一個長、寬符合要求，且底部平整的溝渠。本小組將以此，作為研究實驗的基本評估準則。



(二)、專家咨詢：

咨詢專家的目的是確認上述準則的可行性與公信力。因為小組成員沒有人堪稱專

家，所以我們必需進行訪談。

在專家的選擇部份，應該是要業界具有公信力的成員。因此，本小組商請技能檢定中心推薦一位年資二十餘年的挖掘機操作監評，作為第一位專家。

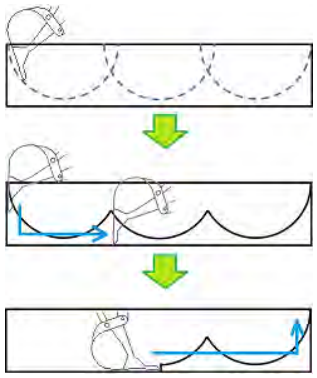
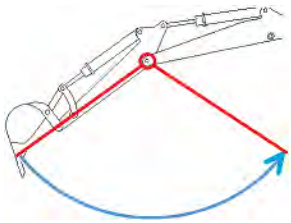
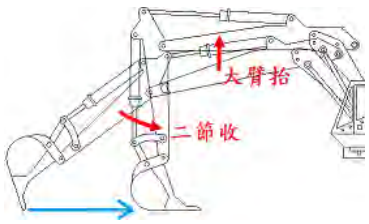
然而，一般傳統機具的專家較少進行科學研究，因此我們必需事先想好問題，並安排多次訪談，從專家的言語中，找出對本次研究有用的資訊。以下用 Q&A 的方式節錄與研究相關的內容。另外，小組並在訪談後會針對 Q&A 進行討論，將對話內容做出合理解讀。

【訪談專家一 (監評)】監評即評分員，他可以告訴我們「技術如何評估」:

專家一 (監評) Q & A	Q1：挖掘機技能檢定是否適合評定挖掘機操作能力？ A1：挖掘機技能檢定是官方為了評估技術能力所設計的試題，其題目會參考各方意見增修，確實適合評估操作人員的基本能力，近年挖掘機考試人員大量增加，可見其確實受到重視。
	Q2：挖掘機檢定四站中，哪一站最能評定駕駛的技術？ A2：第四站，因為挖溝最難，也是通過率最低的一站。
	Q3：第三站 (裝車) 也有挖掘動作，為何第四站比第三站更能評定駕駛技術？ A3：第四站挖溝要求溝底必需平整，第三站只是單純挖掘，對形狀沒有要求。
	Q4：挖溝之後，如何評定溝底是否平整？ A4：監評會用一支長尺，量測溝渠「前、中、後」深度，確認是否合於標準
	Q5：合格的標準為何？ A5：挖溝深度為挖斗深，±10cm 合格；寬度為挖斗寬，+10cm 合格。
小組解讀	●由 Q1、Q2、Q3 可知：在整個挖掘機檢定中，第四站挖溝最具參考性。由此可知本小組以該站為評估準則的做法，基本上是正確的。 ●由 Q3 可知：技術評估的重點是「底部平整」。 ●由 Q4、Q5 可知：挖掘結果必需「可量化」，研究小組必需思考研究的**量化方式是否客觀合理**。

至此，本小組得到了一個具公信力、可行的評估方法。接下來，我們希望進一步瞭解「操作技巧」，確認挖掘動作如何才能兼具效率與精確度，以作為後續研究改良的方向。因此，我們調查業界現有的挖掘機訓練單位，並找到一位年資近二十年的資深教練作為第二位專家。

【訪談專家二 (教練)】教練即專業操作人員，他可以告訴我們「操作技巧」：

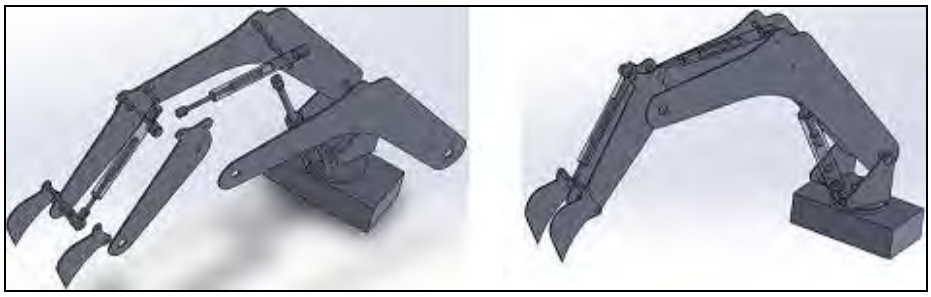
<table>
<tr><td rowspan="3">專家二 (教練) Q&A</td><td>Q1：挖溝是否有建議的操作流程
A1：如右圖。先挖 3 斗滿斗；第 4 斗斗尖向下插到底，收二節；第 5 斗斗底呈水平，進行整平。</td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">Q2：挖溝時，新手常出現的問題是什麼？
A2：挖溝時只收二節，導致溝底呈 U 字型 (如下圖左)。正確方法是「大臂抬、二節收、挖斗貼齊地面」，需同時控制三個關節 (如下圖右)。
  
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Q3：如何縮短挖掘時間？
A3：挖滿斗，一般 5 斗可完成挖溝要求，若不滿斗可能需要 8~10 斗。</td></tr>
<tr><td>小組解讀</td><td colspan="2">●由 Q1、Q3 可知：定位控制在本研究相當重要，所以要訂定座標系統。
●由 Q1 可知：若要開發的智慧型控制系統，就必需偵測機具的旋轉角度&位置。
●由 Q2 可知：溝底整平時，大臂主要控制「上下 (Y 軸方向) 移動」；二節主要控制「前後 (X 軸方向) 移動」；挖斗負責鏟土。
●由 Q2 可知：智慧型控制系統必需能同時控制大臂、二節、挖斗。</td></tr>
</table>

二、 製作挖掘臂系統模型

瞭解評估準則與操作技巧後，就可以開始製作實驗用模型。

【製作機構本體&組裝】：

先將挖掘臂依實體挖掘機比例 21 : 1 縮小，繪製 CAD 圖，如下：

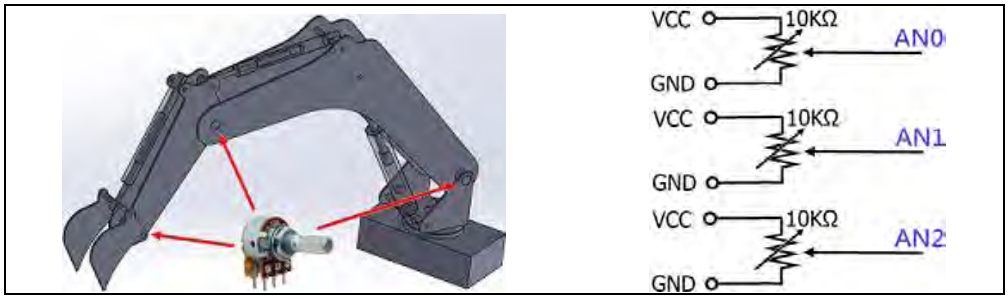


挖掘臂動力部份，採用直線型步進馬達，機體迴旋則用旋轉氣壓缸。加工&組裝過程如下：

繪製本體草圖	切削、修整	鑽孔
組件照片	安裝操縱桿、按鈕	組裝，機構完成

【製作角度感測器】：

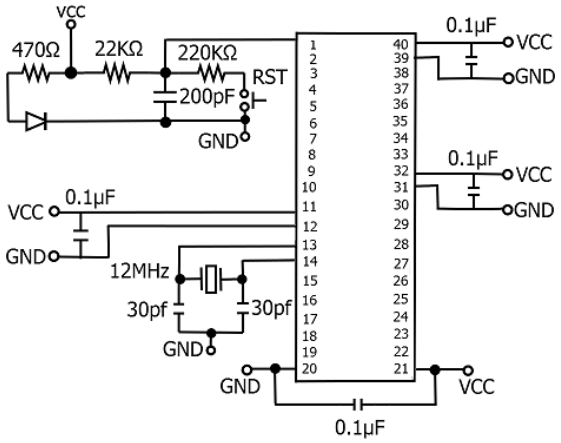
感測器部份，使用 3 個可變電阻，裝在大臂 / 二節 / 挖斗三個關節上，可測量旋轉角度：



可變電阻的轉角為 300˚，加上 5V 電壓，並利用 10-bit ADC 測量電壓降。

【製作控制器】：

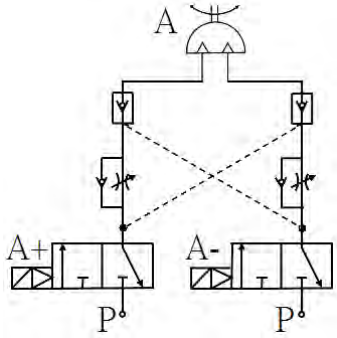
控制器部份使用 dsPIC30F4011 搭配 C 語言撰寫。其中 dsPIC30F4011 的基本電路如下：

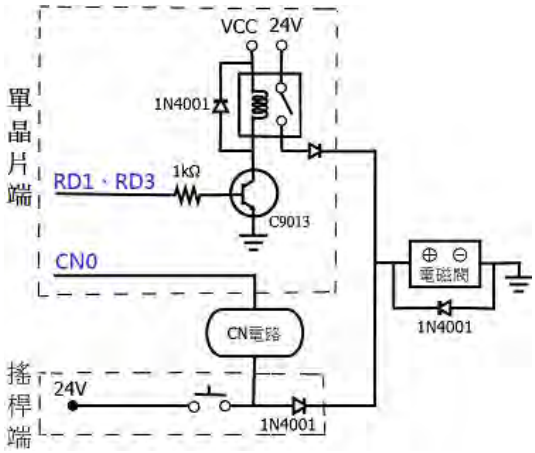


各 Pin 腳功能：

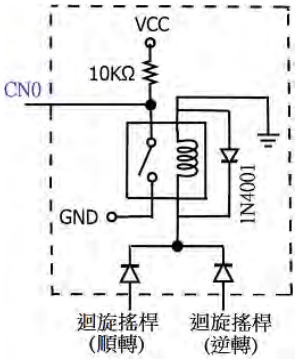
腳位編號	腳位名稱	功能
2、3、4	AN0、AN1、AN2	角度感測器，取得 ADC 值
5 ~ 10	RB3~8	大臂、二節、挖斗搖桿
33 ~ 38	RE0~5	大臂、二節、挖斗馬達 Dir、Pul
15、29、30	RC13、RF0、RF1	大臂、二節、挖斗極限開關
18、19	RD1、RD3	機體迴旋 (順、逆轉) Relay
16	CN0	迴旋搖桿觸發訊號
17	RE8	初始化兼自動操作按鈕
22 ~ 28	RF2~6、RD0、RD7	LCD

機體迴旋部份的氣壓缸迴路如下圖左。因挖掘臂除了要用傳統搖桿操作外，還需用單晶片自動控制，所以下圖右邊的電路部份分為單晶片端與搖桿端，可分別控制電磁閥：

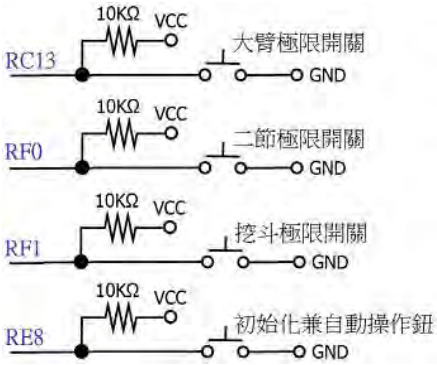




因為單晶片端與搖桿二端不可互相干擾操作，因此設計 CN 電路 (如下圖)，當搖桿動作時，可通知單晶片停止動作：



大臂、二節、挖斗部份採用直線型步進馬達，所以要加上極限開關。另外再設置一個按鈕作為啟動按鈕。極限開關、按鈕的電路如下：

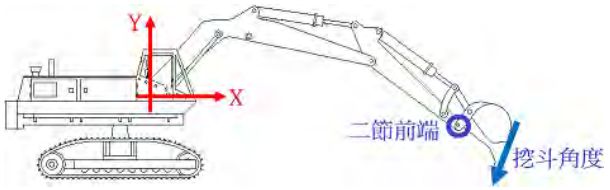


三、 挖掘運動的數學 & 邏輯

回顧第一階段專家咨詢，小組發現定位控制是本研究的關鍵，故需先訂定座標系統。本小組以大臂轉軸中心為座標原點，如下圖。

另外從機構來看，定位控制的重點是「二節前端 (挖斗轉軸) 位置」與「挖斗角度」，

只要得到這二個資訊，即可確定挖掘位置。



因此，假設：

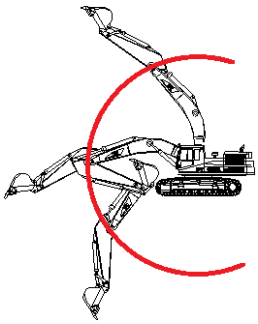
- 大臂、二節、挖斗當前的轉角 (與水平線之夾角) 分別為 θ_1、θ_2、θ_3。
- 大臂、二節的桿長分別為 r_1、r_2。

【計算二節前端座標】

二節前端當前的座標 (p, q) 計算相當簡單，只要運用三角函數：

$$\begin{cases} p = r_1 \cos\theta_1 + r_2 \cos\theta_2 \\ q = r_1 \sin\theta_1 + r_2 \sin\theta_2 \end{cases}$$

【移動至目標位置】(點到點移動)

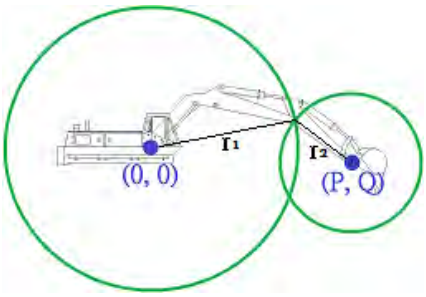


假設：操作者想將二節前端移動到目標位置 (P, Q)。

欲求：大臂、二節應到達角度 θ_{1E}、θ_{2E}。

解：從機構的運動可發現，三支挖掘臂都是畫圓運動 (如右圖)，因此本小組希望以圓方程求解。

從數學的觀點，原點 (0, 0) 和目標位置 (P, Q) 是已知條件，所以我們以反過來以這二點為圓心，r_1、r_2 為半徑畫圓，其交點就是大臂與二節之間轉軸的位置，如下圖：



一旦求得交點，再用反三角函數，即可求得 θ_{1E}、θ_{2E}。

因此，前述 (求 θ_{1E}、θ_{2E}) 問題變成求「二圓交點」問題。故，假設兩圓為

$$\begin{cases} X^2+Y^2=r_1^2 & (1) \\ (X-P)^2+(Y-Q)^2=r_2^2 & (2) \end{cases}$$

將圓方程式(1)寫成

$$Y^2=r_1^2-X^2 \tag{3}$$

代入圓方程式(2)並展開，得

$$(\mathrm{X}^2+P^2-2\mathrm{XP})+[(\mathrm{r}_1^2-\mathrm{X}^2)+\mathrm{Q}^2-2\mathrm{YQ}]=r_2^2 \tag{4}$$

整理得到 (假設 Q≠0)

$$Y=\frac{-P}{Q}X+\frac{P^2+Q^2+r_1^2-r_2^2}{2Q} \tag{5}$$

再代回(3)

$$(\frac{P}{Q})^2X^2+(\frac{P^2+\mathrm{Q}^2+r_1^2-r_2^2}{2Q})^2+(\frac{-P}{Q})(\frac{P^2+\mathrm{Q}^2+r_1^2-r_2^2}{Q})X=r_1^2-X^2 \tag{6}$$

整理得到

$$[(\frac{P}{Q})^2+1]X^2+[\frac{-P(P^2+\mathrm{Q}^2+r_1^2-r_2^2)}{Q^2}]X+[\frac{P^2+\mathrm{Q}^2+r_1^2-r_2^2}{2Q}]^2-r_1^2=0 \tag{7}$$

同乘 Q^2 得

$$(P^2+\mathrm{Q}^2)X^2-P(P^2+\mathrm{Q}^2+r_1^2-r_2^2)X+(\frac{P^2+\mathrm{Q}^2+r_1^2-r_2^2}{2})^2-r_1^2\mathrm{Q}^2=0 \tag{8}$$

至此，我們發現(8)式為一元二次方程式，求根即得到交點的 X 座標。再把 X 值代回(5)式即可得交點的 Y 座標。

然而，回顧(5)式，發現我們假設了 Q≠0，因此當 Q=0 時需改用另一個解法：只要把 Q=0 代入最初的圓方程式即可：

$$\begin{cases} X^2+Y^2=r_1^2 & (9) \\ (X-P)^2+Y^2=r_2^2 & (10) \end{cases}$$

(9) - (10)解聯立，得到交點 X 座標 (假設 P≠0)

$$\mathrm{X}=\frac{P^2+r_1^2-r_2^2}{2\mathrm{P}} \tag{11}$$

再把 X 代回(9)，可得到交點 Y 座標

$$Y^2 = r_1^2 - \left(\frac{P^2 + r_1^2 - r_2^2}{2P}\right)^2 \tag{12}$$

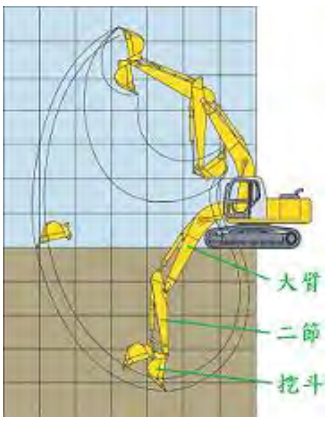
至此，我們求出了 Q=0 情況時的交點座標。

但再看 (11) 式又發現我們假設了 P≠0，因此若 P 也等於零時，需再另求解法。然而，若 P、Q 皆為 0，表示挖掘機二節前端與大臂轉軸重疊，意即機體發生碰撞，故可排除此狀況發生的可能。

另外，二圓求解可能具有「2 交點」、「1 交點」…等情況，說明如下：

交點數	二圓關係	機體情況	註
0	不相交	大臂、二節分離	發生異常
1	外切	大臂、二節於一直線上	接近機構死點，一般不會呈現此姿態
	內切		
2	交於 2 點	正常情況	需判定正確交點
∞	重疊	機體碰撞	發生異常

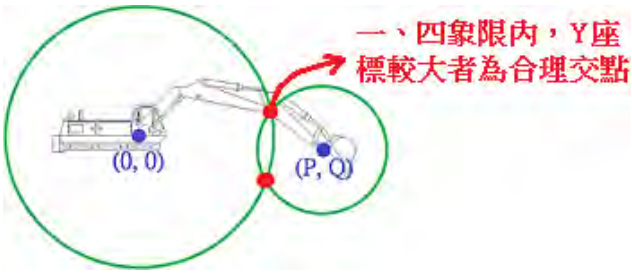
請注意當交點數有 2 個時，必需判定哪一個才是合理的交點。首先，仔細觀察原廠的挖掘臂運動範圍圖 (下圖左)，不難發現：



1. 大臂的最高位置不會超過座標軸 90 度以上 (駕駛座正上方，其原因為安全問題，避免挖掘土方落到駕駛座)。最低位置不會小於負 90 度 (因為機體會發生碰撞)。意即，其座標限於一、四象限內。

2. 二節伸至最開時，最多與大臂接近一直線，不會呈現「反折狀態」。如上圖右，黑色線表示大臂/二節的正常狀態，紅色線為反折狀態。

由以上兩點，我們可以推斷，當交點數為 2 個時，先排除一、四象限以外的交點，並取 Y 座標較大者，即為合理交點，如下圖：



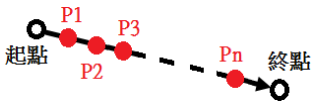
得到交點 (X、Y) 後，就可以用反三角函數求得大臂、二節的應到達角度 θ_{1E}、θ_{2E}：

$$\begin{cases} \theta_{1E} = \tan^{-1}(\dfrac{Y}{X}) & (13) \\ \theta_{2E} = \tan^{-1}(\dfrac{Q-Y}{P-X}) & (14) \end{cases}$$

本研究至此，已可實現「點到點」間的移動，但卻不能保證移動軌跡為一直線。然而，回顧專家咨詢單元，挖掘機操作技術裡頭，需要能實現平整的挖掘軌跡，因此我們還需要一個直線移動邏輯。

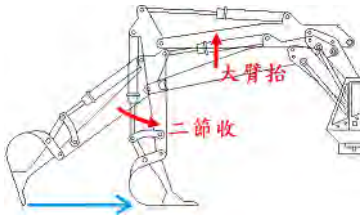
【直線移動邏輯】

直線移動的邏輯有許多種實現方法，例如，可以把直線拆成無數個點。如下圖，欲移動到終點位置，可依序移動 P1→P2→P3⋯Pn，只要點與點間的距離夠密集，即可近似為一直線。



本小組一開始即採用此方法，結果發現有許多實現上的問題。例如，機具在移動時，一定會有移動誤差，當機具依序移動時，有可能因為誤差而錯過其中某一點，導致無法穩定的直線移動。其次，機具具有質量，若每個移動步驟都有斷點，機具就容易因慣性產生震動。

為了解決此問題，本小組想到先前的專家經驗。教練告訴我們，挖溝時應「大臂抬、二節收」，意即先令二節收縮，再以大臂修正高低落差即可得到直線軌跡，如下圖：



運用此邏輯，我們就可以控制挖掘臂進行直線挖掘，不需繁複的數學推導。由此本小組也發現到解決問題的方法可能不只一種，機具運動的控制若能考慮該機具本身的特性，或可讓複雜問題簡化。然而，此類解決方案有其應注意的限制，容我們於討論單元再作說明。

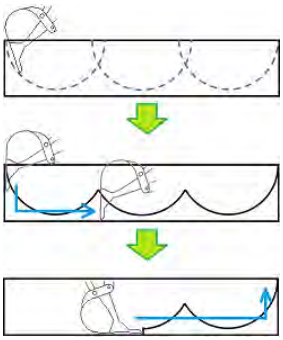
四、 實驗、驗證與分析

實驗部份，我們分成二個項目，第一個是使用小組製作的實驗模型，進行一連串的組合動作測試，其目的是以模型的操作結果，進行挖掘模式的修正與改良；第二個項目再進一步將前述結果整合到實體機具，進行大型實驗，整合理論與實務，並進行結果分析。

【實驗項目一】

實驗模型的組合動作，採用專家咨詢所建議的挖掘流程，如下圖。挖溝尺寸如下：

- 挖掘起點位置：原點前方 642 mm
- 長度 = 機具最大可挖掘長度 (333 mm)
- 深度 = 46 mm (挖斗深)



以上長度是設定為機具最大伸展長度，目的是讓實驗誤差更明顯。

實驗時，我們用沙盆裝入固定砂土，整平至標準高度，再用水平儀確認水平，如下圖：

挖掘後測量以下數據：

1. 挖掘起點實際位置　　(可評估【移動至目標位置】是否精確)
2. 實際溝長　　(可評估【移動至目標位置】是否精確)
3. 溝渠前後 5 個點的深度　　(可評估【直線移動邏輯】是否精確)

小組進行 30 次實驗，其結果如下：(單位 mm)

編號	起點位置	溝長	深度 1 (前端)	深度 2	深度 3	深度 4	深度 5 (後端)
1	642	335	48	48	46	45	43
2	642	334	46	45	45	42	42
3	642	333	48	47	46	45	42
4	642	334	46	47	45	43	42
5	642	333	46	47	46	44	43
6	642	333	48	48	49	46	44
7	642	334	48	48	48	46	44
8	642	334	48	48	48	46	45
9	642	333	48	48	47	46	43
10	642	333	48	48	48	46	42
11	642	334	48	48	48	45	42
12	642	333	48	48	47	46	42
13	642	334	48	47	47	46	43
14	642	333	48	48	47	45	43
15	642	334	48	49	48	46	42
16	642	334	48	47	47	46	42
17	642	334	48	48	47	46	43
18	642	334	48	48	47	45	42
19	642	334	48	48	47	46	43
20	642	333	48	47	46	46	42
21	642	334	48	48	46	46	43
22	642	334	48	47	47	46	44
23	642	334	48	48	47	46	43
24	642	333	48	48	47	46	44
25	642	333	48	48	47	46	44
26	642	334	48	48	48	47	44
27	642	334	48	48	47	46	44
28	642	334	48	48	47	46	43
29	642	334	48	48	47	46	44
30	642	334	48	48	47	46	43
Average	642.0	333.7	47.8	47.7	47.0	45.6	43.0

本小組觀察發現，上列數據幾乎都受到最後的整平動作影響，可見整平動作影響施工成效最鉅。而實驗結果發現，起點位置誤差 0mm，溝長誤差±2mm 以下，深度高低差平均±3mm 以內。其中起點位置非常準確，小組認為是因為機具尚處於未受力情況，其他位置則多少有誤差。以下列出本小組所發現的誤差來源：

編號	誤差來源	說明
1.	機構組裝間隙	加工、零件本身的誤差
2	機具震動誤差	機具運動時的震動
3	電磁波干擾 ADC 值	在實驗的剛開始，小組即發現三個角度感測器的 ADC 值相當不穩定，在機器尚未運動時，ADC 值就有 4~10 左右的不穩定跳動。使用示波器發現有高頻率的不穩定跳動，可能是電磁波干擾。 解決方法：本小組改用有編織網隔絕的電線，其 ADC 值的不穩定跳動降為 1~2 左右。
4	電源穩定度誤差	小組發現，使用不同的電源，也會影響角度感測器穩定度，我們測試三種不同電壓來源： (1). 手機充電器：型號 TC U250 (下圖左) (2). 筆電充電器：型號 CHD-GJ1110 (下圖中) (3). 自製 5V 穩壓器：使用 7805 IC (下圖右) 結果 (1) 和 (3) 影響 ADC 穩定度最小，因此採用手機充電器為電源，影響穩定度小於 1 個 ADC 值。

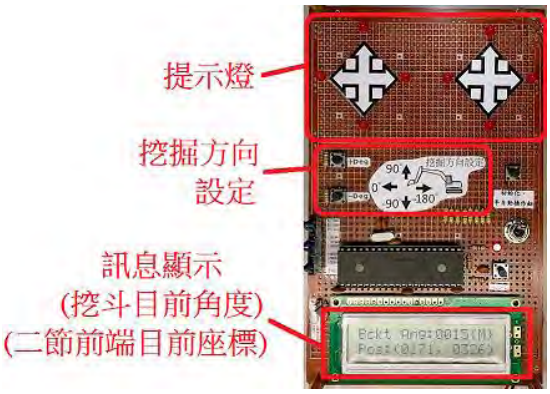
5	砂土整平誤差	實驗前砂土平整度，人為誤差
6	測量誤差	人為誤差

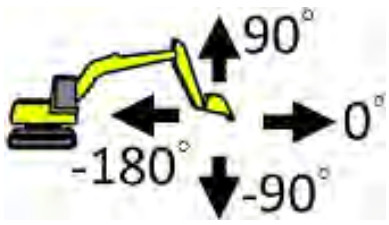
【實驗項目二】

接下來是把實驗延伸到實體機具，我們在實體挖掘機 (型號 SK032) 的三個轉軸裝上角度感測器：

裝置方式如下圖：

另外，在駕駛座前方裝置控制器面板，如下圖左。面板上端左、右各有 4 個 LED，用來提示駕駛員正確的操作動作；中間的按鈕可設定欲挖掘的方向，這是因應實際施工需求，可讓駕駛挖掘傾斜的平面。挖掘方向的設定依照本研究先前設定的座標 (向前為 0°、向後為-180°，如下圖右)。面板下方的 LCD 用來顯示即時訊息，例如「挖斗目前角度、二節前端目前座標」等。





大型實驗的重點，是希望實際評估「是否降低技師的入門門檻」，因此我們必需找到一位入門技師，故再商請前述挖掘機訓練單位推薦一位剛接受完入門訓練的新人。

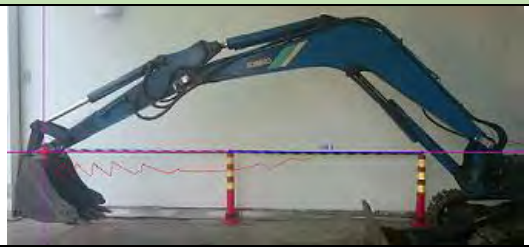
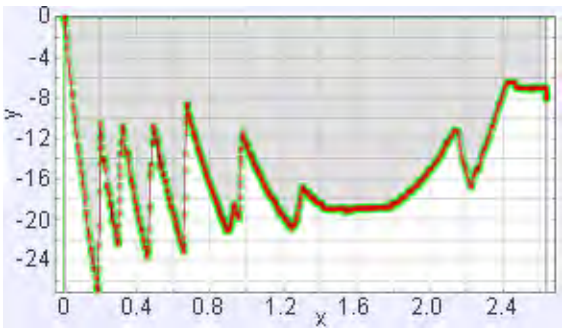
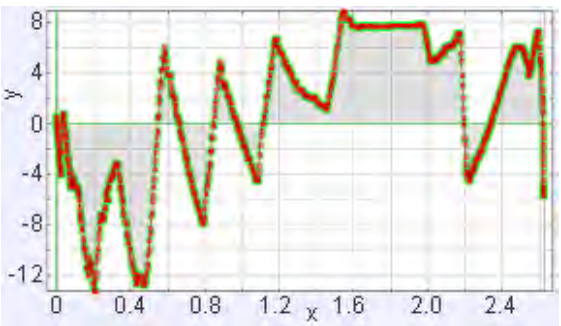
實驗執行方法如下：

- 選擇三個方向 (-180°、-165°、-150°)，進行直線移動(整平)操作。
- 測試人員依自身能力，對上述角度各操作 20 次。
- 測試人員參考控制器面板，對各角度再操作 20 次
- 每次操作限定時間 1 分鐘，測試過程錄影
- 使用 Tracker Video Analysis and Modeling Tool 擷取上述操作的運動軌跡。
- 針對運動軌跡進行數據分析與評估

大型實驗只針對整平動作，這是因為先前實驗發現影響施工成效最大的即是整平動作。而為了因應實際施工需求，我們除了水平移動 (-180°) 外，再增加 -165°(小角度)、-150°(大角度) 進行測試。以下我們將三個角度，各取一組較具差異性與代表性的測試作說明。

圖中紫色十字為移動起始點，紅色線為移動軌跡，下方則是具有刻度的軌跡圖 (刻度單位 cm)：

【-180° 實驗】：(水平移動)

測試人員自由操作	參考控制器面板操作
	
	

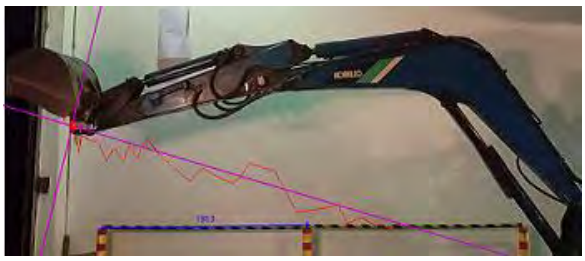
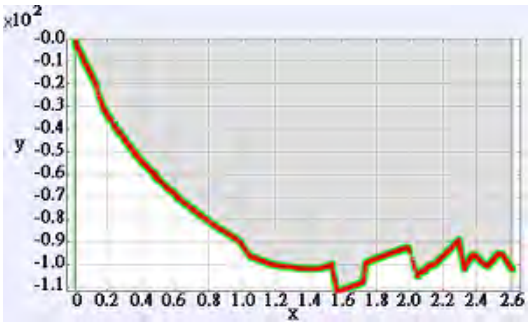
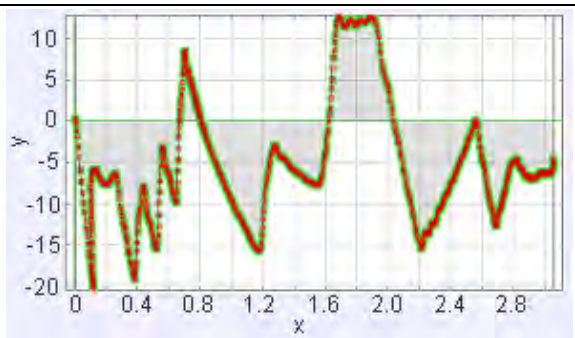
說明與分析： 此為水平操作，從「平直度」來看，二邊結果差異不大，振動範圍皆在 20 cm 左右。但自由操作時，整體偏離在基準線以下。 小組分析，在水平操作時，操作者可參考周遭景物，因此當挖掘高度偏離太多時操作者知道要修正，但整體偏移則難以查覺。然而，一旦使用者參考控制器，即可立即查覺是否偏離基準線。

另外，本小組發現大型實驗具有與先前的模型實驗不同的誤差：

編號	誤差來源	說明
1.	機構磨損間隙	機具會因為使用時間的增加，產生磨損間隙，這一點在大型實驗特別明顯。本實驗使用的機具累計啟動時間為 2112 小時(下圖左)，機具的各關節都已產生可見的間隙，如下圖右為測試人員扳動挖斗，發現約有 1~2 度的間隙。 各關節的間隙各約 1~2 度。
2	操作者反應速度	因為傳統機具沒有電控模組，所以我們用燈具來提示駕駛員正確的操作動作。因此操作結果依賴使用者的反應速度。這也是本實驗最大的誤差來源。以上面的 -180 度操作來說，即使參考控制器，仍有 20cm 左右的振動幅度。若改用全自動(無人)操作，應可達到更精確的挖掘效果，此部份容小組於後面的討論單元再述。

3	軟體截取軌跡誤差	小組發現，Tracker 軟體所截取的軌跡與實際有些許誤差。如下圖，左邊是實驗剛開始、右邊是實驗最後，比對可發現軌跡位置 (紅色點) 有些許飄移。此狀況可經由適當的軟體設定降低，誤差約在 3cm 以內。

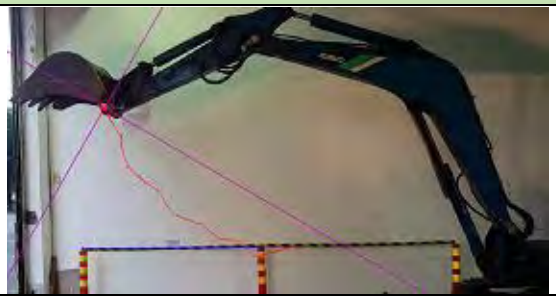
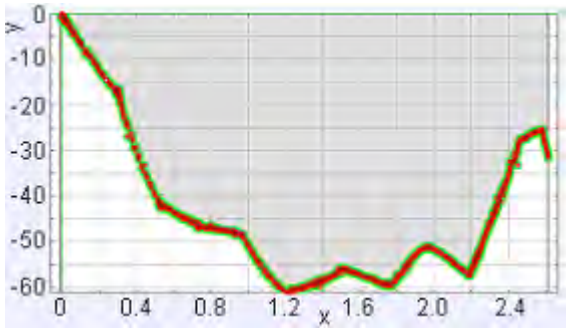
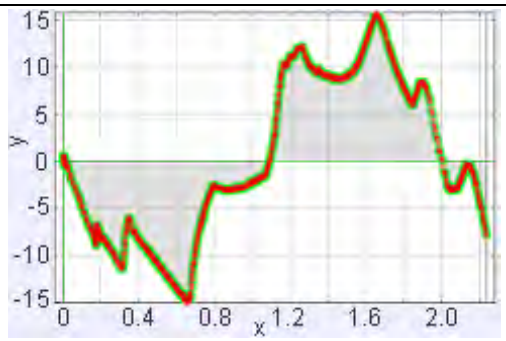
【-165° 實驗】：(小角度)

自由操作	參考控制器面板
	
	

說明與分析：

這是具有角度的挖掘測試，很明顯使用者在自由操作時，因為沒有控制器的參考指示，偏移基準線的幅度相當大。在使用控制器面板時，雖然振幅有 30cm，但整體接近基準線。

【-150° 實驗】：(大角度)

自由操作	參考控制器面板
	
	

說明與分析：

這是大角度的挖掘測試。自由操作時，軌跡仍大幅偏移基準線，且與前面 -165 度自由操作的軌跡比對發現，偏移的方向皆落在基準線以下。本小組討論認為，這是因為操作者習慣的問題，呼應了先前專家所提到的新手問題：「挖溝時只收二節，導致溝底呈 U 字型」。再檢視挖掘軌跡，確實符合「以二節轉軸為圓心」的畫圓動作，如下圖。

由以上三組分析可大致看出「使用者自由操作」與「參考控制器操作」之間的差異，但為了讓實驗分析更具有普遍適用性，我們必需分析更多資料。然而，想分析大量資料，我們還需要有客觀的分析統計法。本研究在此有一個有趣的想法：既然挖掘的軌跡會造成施工表面不平整，那就採用機件「表面粗糙度算法」來進行資料分析&統計。

表面粗糙度算法有很多種，使用時必需瞭解其意義。本小組考量後決定採用 Ra (中心線平均粗糙度)，這是因為 Ra 的計算公式為：

$$Ra = \frac{\text{曲線與基準線之間的面積(單位}cm^2\text{)}}{\text{參考長度(單位}cm\text{)}}$$

計算式裡的面積，從施工的角度來看就是挖掘的土方量，基準線以上的面積是「應挖掘而未挖掘的土方」、基準線以下的面積是「不應挖掘而挖掘的土方」。當 Ra 值愈大，表示其「挖掘結果」與「期望結果」所相差的土方量愈多。下表是全部 (120 次實驗) 的 Ra 值計算結果，表格下方為平均值：

【Ra 值計算結果】：(單位 cm)

	【-180°】		【-165°】		【-150°】	
實驗編號	自由操作	參考面板	自由操作	參考面板	自由操作	參考面板
1	17.4	4.0	73.2	8.1	24.3	7.4
2	14.4	9.9	68.3	30.7	20.4	24.4
3	12.0	7.0	81.9	12.6	23.2	5.3
4	15.0	6.1	74.4	12.3	32.0	9.6
5	13.6	7.2	42.8	45.5	44.2	14.5
6	9.8	6.4	40.9	40.3	25.7	11.4
7	4.1	6.2	46.4	20.3	19.6	8.4
8	15.8	6.3	36.5	30.9	36.9	8.6
9	15.6	5.1	24.7	8.9	22.1	17.8
10	12.5	6.6	43.1	14.8	40.0	14.3
11	11.3	5.4	49.0	12.5	30.9	17.6
12	7.4	3.7	28.6	8.3	42.3	9.3
13	3.8	6.3	28.5	14.0	26.3	9.1
14	6.1	4.1	47.7	10.2	23.0	1.6
15	4.0	8.7	37.8	26.4	27.9	15.8
16	9.5	8.6	47.5	12.9	25.5	15.1
17	6.6	5.0	41.7	4.0	85.0	12.0
18	7.3	5.8	31.9	14.1	18.6	17.9
19	6.7	3.7	38.3	12.9	25.9	14.4
20	6.1	5.4	47.0	10.5	17.7	1.1
Average	9.9	6.1	46.5	17.5	30.6	11.8

由實驗結果可以看出，水平操作 (-180°) 的 Ra 平均從 9.9 改善至 6.1；小角度 (-165°) 與大角度 (-150°) 的改善幅度更大，由原本的 46.5 及 30.6 降至 17.5 與 11.8。由此可見，操作人員在參考控制面板時挖掘結果確實有改善。

伍、研究結果

本小組將研究分成三階段進行，各階段各有其成果，如下：

【第一階段】(專家咨詢) 成果：

1. 找出一個可行的挖掘機研究實驗的評估標準，此標準乃參考專家意見與檢定法規資料而得，應符合公信力原則。其他同質性之研究可依此方法找到適合的評估標準。
2. 藉由訓練專家的訪談，整理挖掘機操作的技術技巧，作為後續機具改良的方向。

此階段是一般研究人員最容易忽略的一個階段，專家咨詢看似與技術研發無關，但卻是整個研究的基本準則。在業界，進行開發製造或檢驗產品時，也有需遵循的準則，例如 ISO、IEEE、SAE 等。當一個團體本身具有公信力時，亦能自己訂定標準，而這些標準，也是各方專家提供意見而得。

【第二階段】(數學模型建立) 成果：

此階段主要是推演挖掘臂控制所需的數學和邏輯：

1. 挖掘臂的「當前位置」座標可用三角函數計算得到。
2. 點到點移動問題可以用「二圓求交點」求解，詳見報告內文。
3. 建立挖掘臂直線移動邏輯，詳見報告內文。

此部份的數學&邏輯亦可作為機械手臂控制等研究之參考。

另外，本小組再製作模擬實驗機台、建入上述數學邏輯，以組合動作進行測試，證明前述理論推演之正確性。過程中，我們又整理出了各種實驗誤差來源，這些誤差來源也可供其他同質性研究參考。

【第三階段】(大型實驗&分析) 成果：

1. 進行實體大型實驗，進一步開發可設定施工角度的控制器，更適合實際施工場合。
2. 利用影像分析軟體，取得機具運動的軌跡。
3. 將機件表面粗糙度算法，應用於挖掘機的施工評估，當 Ra 值愈大，表示其「挖掘結果」與「期望結果」所相差的土方量愈多。實驗數據顯示挖掘結果確實改善。

另外，經過本次研究，本小組認為除了上述各階段成果，我們更展示了一個完整的科學研究方法，從建立標準、理論推演、實驗模型、到大型實驗與最後的分析，依照此研究的方法與精神，有助於未來相關科學研究之進行。

陸、討論

本小組在研究過程中發現：

一、在研究的第二階段推演控制邏輯時，我們深刻感受到解決問題的方法經常不只一種，尤其機具控制時，若能考慮機具本身的特性，或許能讓複雜問題簡化。例如，本小組直線移動的邏輯，即參考專家意見，將問題簡化成二節的收縮與大臂的修正動作。然而，利用專家意見解決問題時，必需瞭解解決方法本身的限制。上述「以大臂修正」的解法較適合「挖掘路徑接近水平」的情況，若挖掘路線偏離水平線太多，則大臂動作已經稱不上是「修正」，此時邏輯應再修改。然而，再考量實際施工土石崩落的可能性，一般整平仍然以接近水平為主，較少有大角度的整平施工情況。

二、在整個研究過程中，小組花費相當多的時間處理「實驗誤差」。報告中，本小組也整理出了影響本研究較多的誤差來源，但事實上誤差控制乃是一個相當深入的研究主題，值得再開一個項目執行研究。

三、本研究在大型實驗時為了改良傳統挖掘機，採用燈具來提示操作動作，此做法可用於沒有控制系統的傳統機具。但本小組在思考改良方式時，還考慮了其他不同的方法，以下列出優缺點及說明：

	優缺點	實現方式
全自動操作	機具完全自動控制，理論上可達無人操作，但實際應用時，需考量施工環境多變與重型機械的安全性問題	操作系統、控制系統、感測器都需修改，通常需由原廠開發
半自動操作	控制系統只「修正」動作。例如整平時，讓操作者設定挖掘角度，並拉動二節控制桿，控制系統只自動修正大臂位置	操作系統、控制系統、感測器都需修改，通常需由原廠開發
輔助操作	即本研究採用的方法，可用於沒有控制系統的傳統機具，但操作結果依賴使用者的反應速度	可外加感測器&控制器，並採用燈具或聲音提示

柒、結論

本研究試著結合業界專家經驗，並產出改良成果。研究結果可看出該系統對於「改善挖掘機的施工精確度，降低操作人員的入門門檻」確有助益。一個研究是否持續推廣，通常需再經過商業價值的評估，而本研究不論在模擬系統驗證的過程、數學邏輯推演、還是實驗過程與分析，皆有可供參考的成果。

捌、參考資料及其他

【參考資料】

[1] 勞動力發展署，挖掘機操作技能檢定規範 (http://www.labor.gov.tw/home.jsp?pageno=201109290022)

[2] Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education (http://physlets.org/tracker/)

[3] 顏鴻森、吳隆庸 (2011)，機構學，東華書局

[4] 葉倫祝 (2010)，機件原理，全華

[5] 曾百由 (2009)，dsPIC 數位訊號控制器原理與應用，宏友

[6] 林英明、徐文法、林彥伶 (2015)，機械製造，全華

【評語】052313

主要鑽研挖掘機之運動，並作專家諮詢，也融入「師傅」 的技術經驗，藉由此系統可縮短入師學習時間，整體作品的特點除了專家諮詢外，還包括挖掘機動作分析、模擬系統製作與實際控制及系統驗證，是相當嚴謹的研究。

作品海報

研究目的

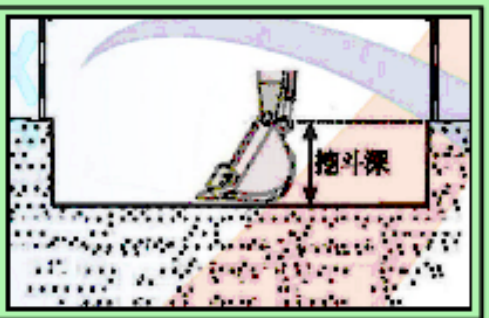
提高挖掘機施工精確度，以智慧型系統輔助技師，降低操作人員入門門檻

過程 & 成果

【第一階段：專家咨詢】

1.參考標定法規與專家意見，找出具公信力、且可行的評估標準

2.整理專家操作技術，作為機具改良方向



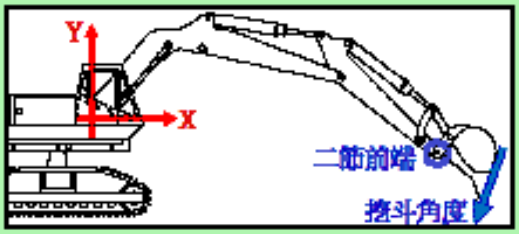
【第二階段：數學模型建立】

1.以三角函數計算挖掘臂目前座標

2.以二圓求交點，解決點到點移動問題

3.挖掘臂直線移動邏輯

4.製作模擬機台，以組合動作驗證理論正確性

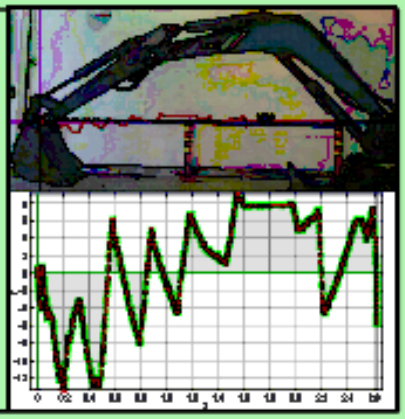


【第三階段：大型實驗&分析】

1.進行實際大型實驗，讓實驗結果符合實際施工場合

2.利用影像分析軟體，取得機具運動軌跡

3.將 Ra 粗糙度應用於挖掘機施工評估



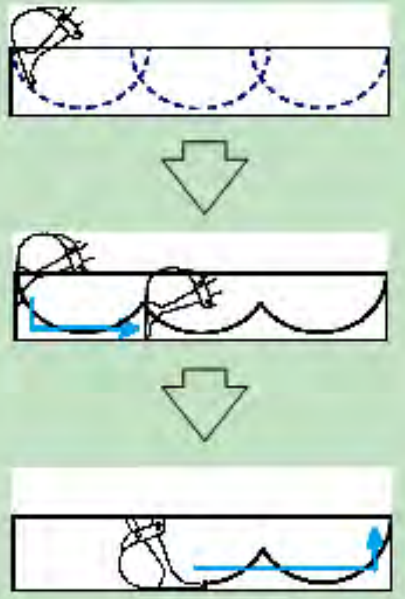
改善幅度可觀

【水平】		【小角度】		【大角度】	
自由操作	參考面板	自由操作	參考面板	自由操作	參考面板
9.9	6.1	46.5	17.5	30.6	11.8

(單位 cm)

實驗&分析

【模擬機台】



組合動作測試（邏輯驗證）：

1. 挖掘起點實際位置
2. 實際溝長
3. 溝渠前後 5 個點的深度

誤差整理：

- 組裝間隙
- 機具震動誤差
- 電磁波干擾
- 電源穩定度
- 砂土整平誤差
- 測量誤差

【實體大型實驗】

個案分析
- 水平實驗
- 小角度
- 大角度

誤差整理：

- 機構磨損間隙
- 操作者反應速度
- 軟體擷取軌跡誤差

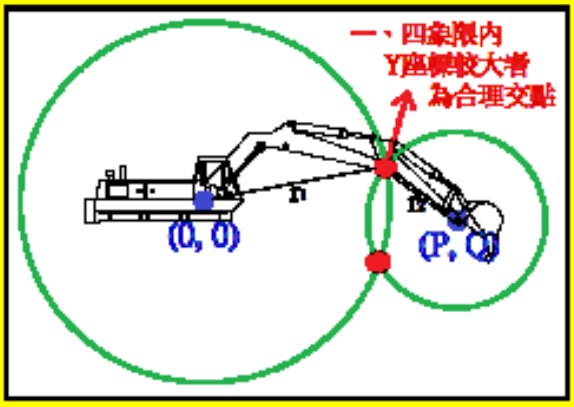
客觀的量化&統計： $Ra=\frac{\text{曲線與基準線之間面積}}{L}$

（大量資料）

數學模型建立

【目前座標】

$$\begin{cases} p = r_1 \cos\theta_1 + r_2 \cos\theta_2 \\ q = r_1 \sin\theta_1 + r_2 \sin\theta_2 \end{cases}$$



【點到點移動】

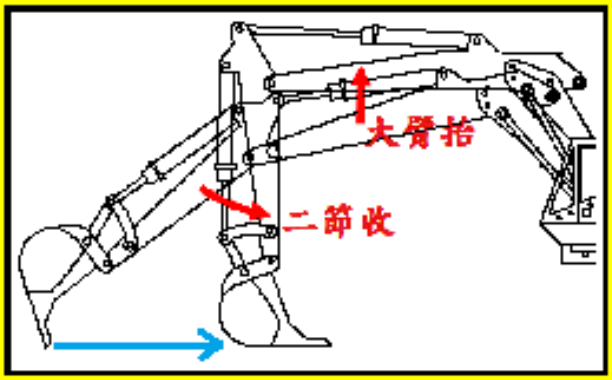
$$\begin{cases} X^2 + Y^2 = r_1^2 & (1) \\ (X-P)^2 + (Y-Q)^2 = r_2^2 & (2) \end{cases}$$

求解得 (假設 Q≠0)

$$(P^2+Q^2)X^2 - P(P^2+Q^2+r_1^2-r_2^2)X + \left(\frac{P^2+Q^2+r_1^2-r_2^2}{2}\right)^2 - r_1^2Q^2 = 0$$

解一元二次方程式可得 X 座標，再代回(1)可得 Y 座標。(詳見報告內文)

〔二圓交點 vs 機體情況分析〕：

交點數	二圓關係	機體情況	註
0	不相交	挖掘臂分離	發生異常
1	外切	大臂、二節呈一直線	接近機構死點，一般不會呈現此姿態
	內切		
2	交於 2 點	正常情況	需判定正確交點
∞	重疊	機體碰撞	發生異常

【直線移動邏輯】