

中華民國第 58 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

第二名

052320

運用氣動肌肉缸模擬上臂肌肉控制之研究

學校名稱：臺北市立內湖高級工業職業學校

作者：  高二 楊紹民  高二 張鈞淳  高二 洪子涵	指導老師：  陳昭安  陳永華
---	-----------------------------

關鍵詞：人工肌肉、影像辨識、仿生手臂

## 摘要

本研究運用氣動肌肉缸模擬手臂之控制，藉由仿照人體肌肉與骨骼建構人形機器人的手臂運作。製作氣動肌肉缸，探討不同長度及材質，充氣量及伸縮量的關係，測試氣動肌肉缸最佳的運作效果。3D 列印肱、肘部的骨骼模型，參考韌帶、肌腱及肌肉的實際組成，運用彈力繩仿製韌帶，利用柔性材質 TPC 列印肌腱配合束帶固定氣動肌肉缸固定肱二頭肌、肱三頭肌及其他肌肉，動力採用單一幫浦模仿人類單一心臟的運作模式，透過程式控制電磁閥的充氣、放氣及堵氣，確實建立一個可以執行數種上臂動作的仿生人體手臂。未來，追加更多手臂上的肌肉，讓我們的手臂能有更多的控制方向，並且結合機械學習與影像辨識，以因應更複雜的仿生控制。

## 壹、研究動機

在科幻片裡，常出現有關人形機器人的情節，在現實生活中要完全模仿人型機器人卻是一項艱難的工程。而在某次在逛外國有關生物醫學的網站，看到了氣動肌肉缸，構想如果將氣動肌肉缸像人體肌肉一樣裝載在機械手臂上，是否就能像科幻電影般，擁有一台人形機器人。於是開始研究有關人體肌肉和氣動肌肉缸的構造，發現人體是一個很精巧的結構，目前使用馬達控制，使用旋轉運動的機器人，並沒有辦法完全模擬人體。在現實的考量下，經研究氣動肌肉缸及控制肱、肘部的控制，是實際可行的做法。本研究在使用「電子學實習」實作電子開關電路，運用「專題實作」課程學會的 sketch up 建模、3D 列印及 Arduino 程式設計。



圖 1 人形機器人



圖 2 Festo 人工肌肉氣壓缸(註 10)

## 貳、研究目的

- 一、探討氣動肌肉缸的基本物理性質
- 二、探討材質與氣動肌肉缸縮放量變化關係
- 三、探討人體骨骼構造研究並分析
- 四、探討空氣幫浦進氣量與時間關係
- 五、藉由骨骼模型控制手臂彎曲角度變化量
- 六、完成模擬上臂之人造骨骼
- 七、結合機械學習及影像辨識，完成更複雜的控制

## 參、研究設備及器材

### 一、製作氣動肌肉缸材料&器材

			
氣球	電腦約束網	橡皮筋	打氣筒

### 二、製作指針式實驗平台材料

			
空壓管	空氣幫浦	三通電磁閥	IP 攝像頭
			
Make Block	3D 列印機	變壓器、Arduino 板	C-Sharp

## 肆、研究過程或方法

### 一、人體骨骼肱二頭肌構造探討

- (一) 肘部概論：肘部重要的結構包含骨和關節、韌帶和肌腱、肌肉、神經、血管，肘部骨頭分為 肱骨、尺骨、橈骨，外(內)側有個骨性突起物，稱為外(內)上髁，大多數負責伸(屈)腕和伸(屈)指的肌肉都匯聚於此。
- (二) 軟骨：橈骨與尺骨交界處為平滑，橈骨頭邊緣附蓋關節軟骨，關節軟骨是任何關節中附著在骨骼末端最重要的物質，呈白色、有光澤、如橡膠般有彈性並且很光滑，使骨頭磨擦時不會受到傷害並吸收震盪。
- (三) 肌肉：肱二頭肌是使到手臂彎曲的肌肉，它們的肌腱止於橈骨粗隆和前臂筋處，基本功能是「彎舉」。它是由肘關節為轉動點組成「單關節」活動。從實踐證明，使肱二頭肌處於「頂峰收縮」狀態，它的最佳夾角為  $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$  左右；肱三頭肌肌腱從上臂後側穿過，連接到尺骨上，使肘關節「伸直」運動。

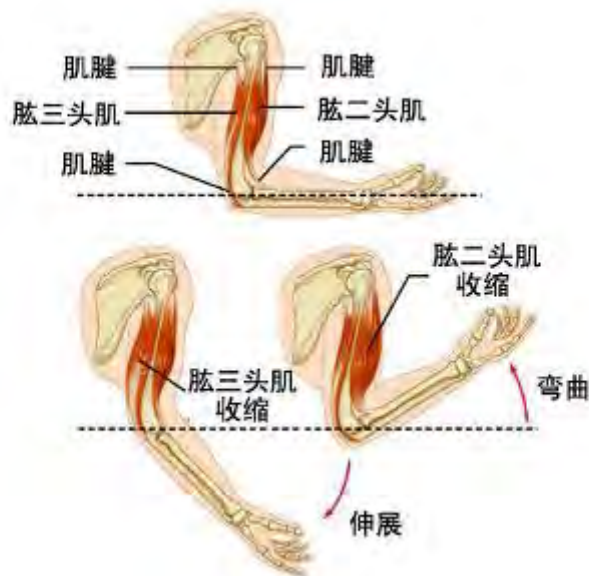


圖 3 肘部肌肉的運作說明圖

### (四) 韌帶與肌腱：

1. **韌帶**是可彎曲，纖維樣的彈性結締組織，連接骨與骨，附於骨的表面或與關節囊的外層融合，以加強關節的穩固性，以免損傷。內側副韌帶位於肘關節內側邊緣，外側副韌帶位於肘關節外側邊緣，兩條韌帶共同連接肱骨與尺骨，保持尺骨穩定於肱骨末端滑動。

2. **肌腱**是一堅韌的結締組織帶，通常將肌肉連接到骨骼，並可承受張力。腱類似韌帶和筋膜，都是由膠原蛋白組成。不過，韌帶連接骨骼，而筋膜則連接肌肉，當肌腱與肌肉一起作用則可產生動作。

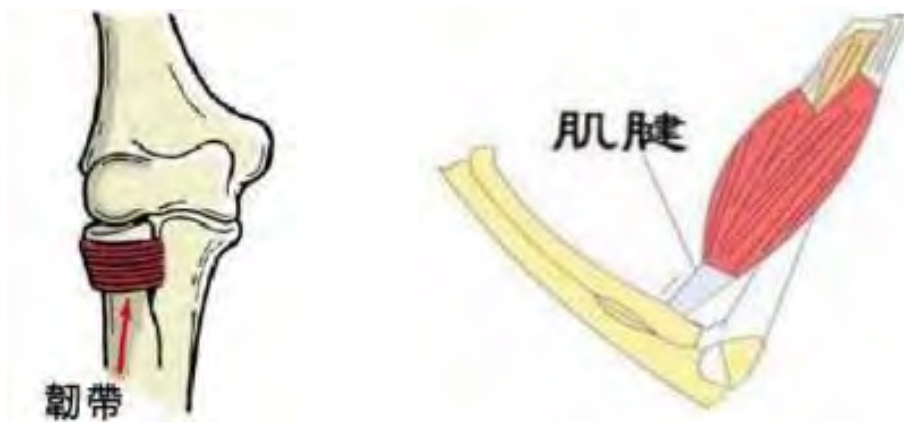








圖 4 韌帶與肌腱說明圖

(五) 肌肉收縮的類型：根據研究與文件探討有關肌肉的收縮情形，大致上得到了如下圖表格的結論：

表一 肱二頭肌的收縮運動(註 8)

肌肉收縮	等張收縮		等長收縮
	向心收縮	離心收縮	
長度	縮短 	伸長 	不變 
張力	轉變	轉變	轉變
速度	轉變	轉變	沒有動作
例子	肱二頭肌 收縮並縮短 (用力>重量) 	肱二頭肌 收縮但伸長 (用力<重量) 	肱二頭肌 收縮但長度不變 (用力=重量) 

## 二、氣動肌肉缸研究

### (一)氣動肌肉缸設計：

利用可收縮之約束網為理想材質，以達到生膠管膨脹時，約束網隨之收縮，保護氣動肌肉缸降低生膠管過度膨脹而爆裂的情形，並在所製成之氣動肌肉缸後部保留氣口，方便氣體的進入改變氣壓，藉由生膠管膨脹，使氣動肌肉缸收縮，產生抬舉的力。

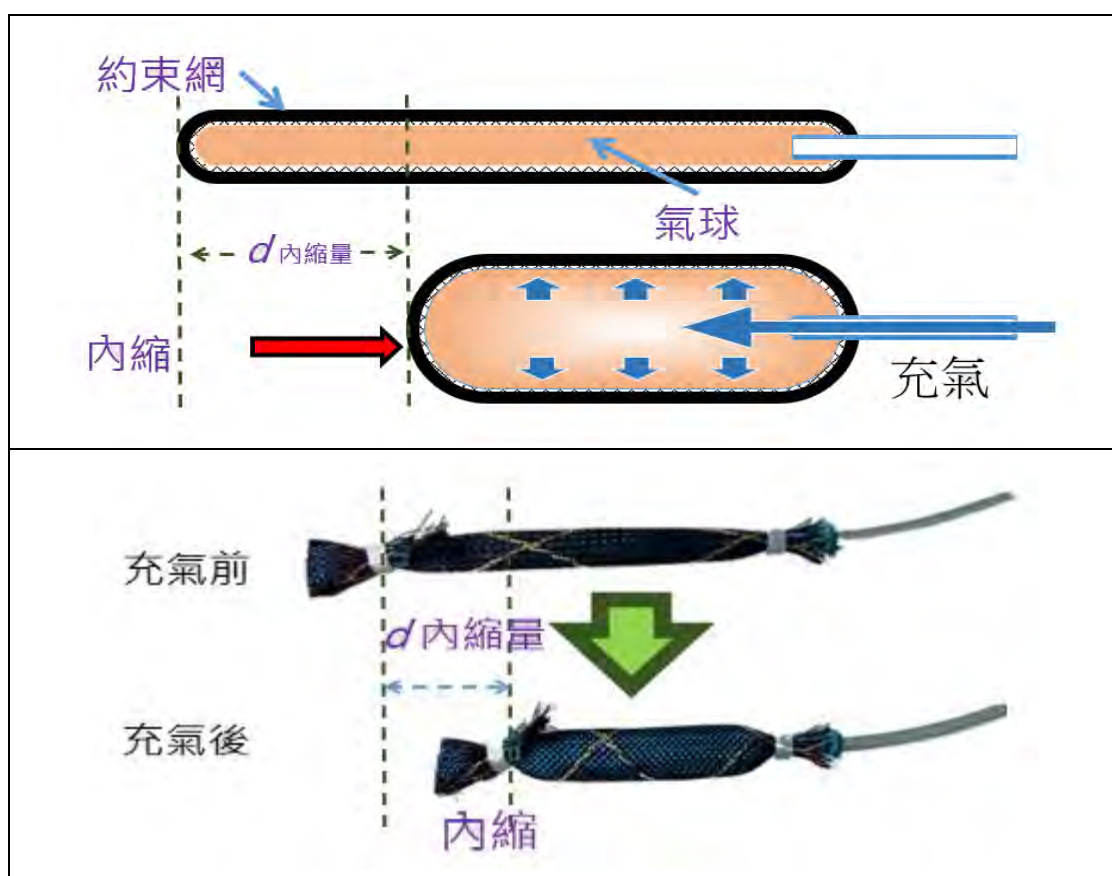





圖 5 氣動肌肉缸的運作原理

### (二)氣動肌肉缸製作方法及流程：

藉由上述的設計構思，我們開始著手製作氣動肌肉缸，經由幾次的製作與改良，大致上得到了如下述的製作方法及步驟。

	
<p>1. 量取欲做長度+5(預留範圍為網綁用)的氣球並剪取。</p>	<p>2. 將約束網套套至氣球。</p>
	
<p>3. 尾端及開端網上束帶防止氣體流失。</p>	<p>4. 完成人工肌肉製作。</p>

(三) 改變內部結構材質：

生膠管在於製作氣動肌肉缸時，是一款較優質的材料，其優點也更為接近肌肉構造。但同時也需要較大的氣量驅動，經實驗發現，空氣幫浦的氣量略為不足。因此，往後的實驗平台與骨骼模擬中，使用的是較方便操控的氣球。

	氣球	生膠管
圖片		
優點	容易取得、穩定優、方便操控	抗壓好、拉力強、耐用
缺點	容易爆裂、抗壓性不佳 拉力微弱	所需壓力大、不易取得、長度不易 掌控、穩定性不佳

(四)輸氣系統：

在模擬氣動肌肉缸的運作過程中，以打氣筒灌氣的方式氣體量有限，無法持續輸氣。所以將打氣筒改為空氣幫浦、水幫浦等不同送氣方式，再去探討不同送氣方式的差異。經實驗發現，空氣幫浦為最佳送氣來源，且能運用 Arduino 進行控制，以利於往後的實驗操作，在實驗中所使用的空氣幫浦為 DC-12V。

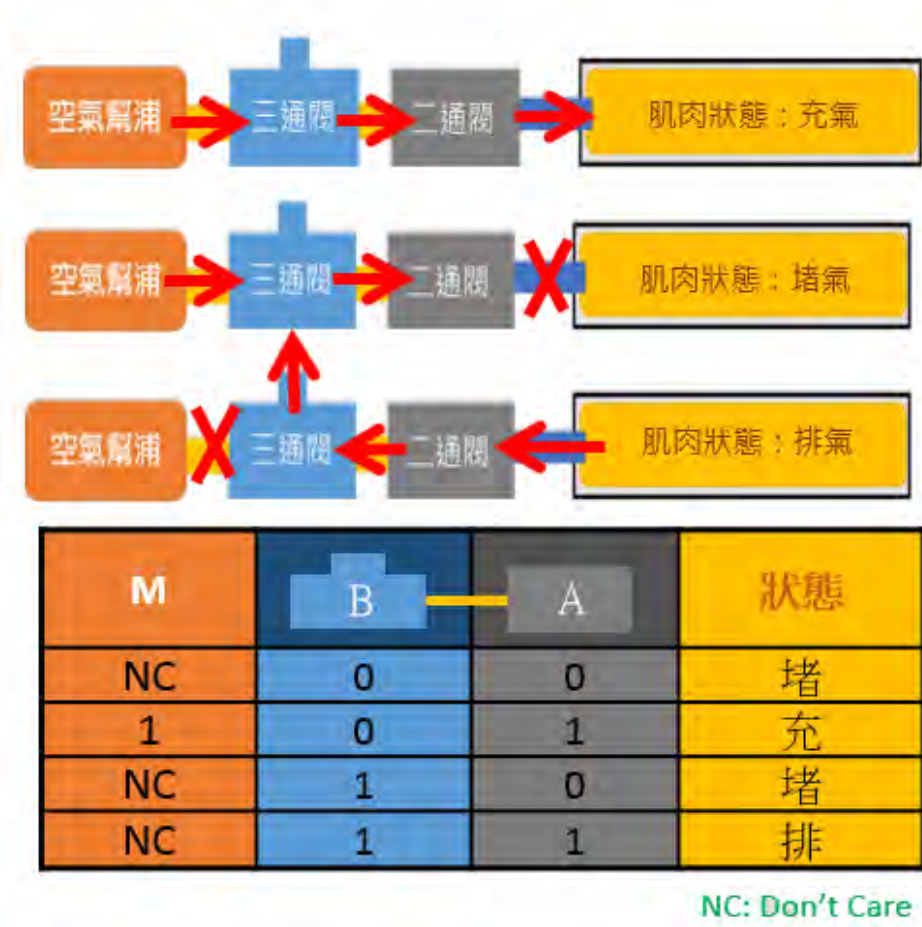


圖 6 肌肉控制流程圖



### 三、人體骨骼構造製作：

模擬肱二頭肌的實驗當中，若使用真實人體骨骼進行實驗，需要注入龐大的氣體量，為了利於觀察並設計，故採用小型的人體骨骼構造進行模擬。

(一) 3D 列印出肱部及肘部的骨骼模型。



圖 7 骨骼 3D 模組

(二) 運用氣球製作的人工肌肉，並兩端分別固定於骨頭兩側。



圖 8 氣動肌肉缸固定肌肉於骨骼的情況

(三) 將幫浦的出氣口與氣動肌肉缸緊密相接。



圖 9 氣動肌肉缸固定肌肉於幫浦的情況

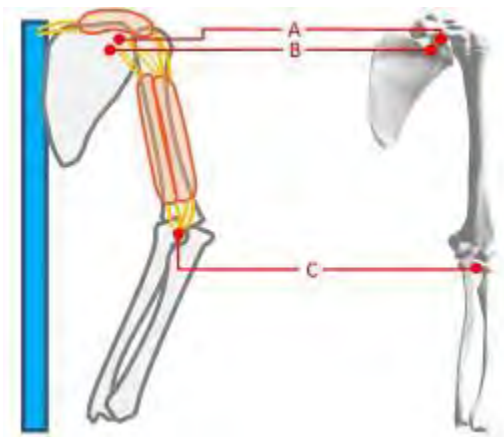


圖 10 骨骼正視圖

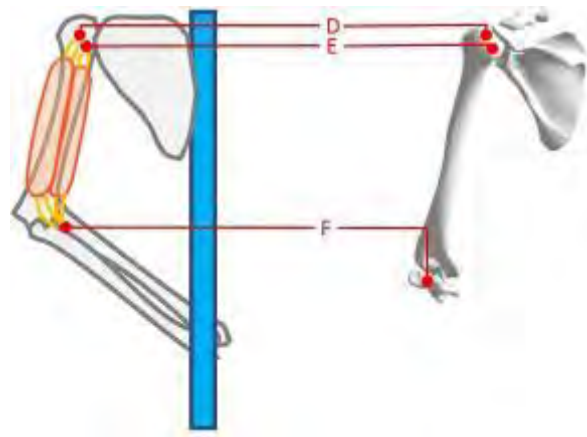


圖 11 骨骼背視圖

採用氣球製作的人工肌肉需要的氣壓比生膠管小，簡易的幫浦和電磁閥便可以控制內部壓力模擬肌肉的舒張、收縮，本模型藉由此方式，可輕鬆的模擬人體手臂構造，同時也較為輕便。

#### 四、影像辨識

為了更實際的模擬人體手臂運作，加入影像辨識技術，結合機器學習達成模擬人體實際手臂動作。

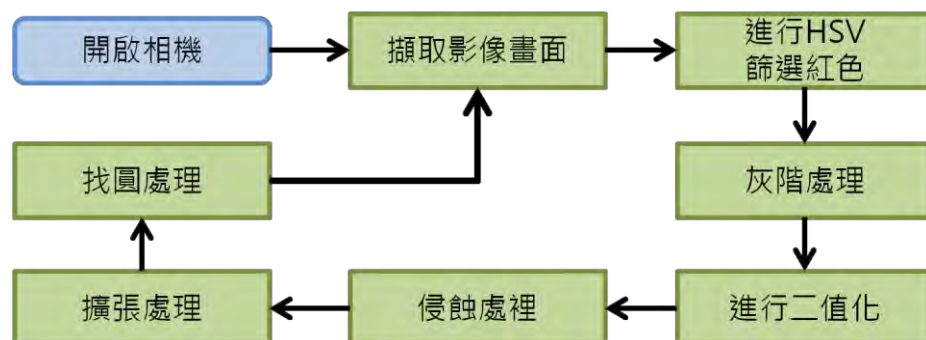


圖 12 影像辨識流程圖

##### (一)、HSV 篩選紅色

是一種將 RGB 色彩模型中的點在圓柱坐標系中的表示法。

**色相 (H)**：色彩的基本屬性，就是平常所說的顏色名稱，如紅色。

**飽和度 (S)**：是指色彩的純度，越高色彩越純，低則逐漸變灰，取 0-100%的數值。

**明度 (V)**：亮度，取 0-100%。

把顏色描述在圓柱坐標系內的點，這個圓柱的中心軸取值為自底部的黑色到頂部的白色而在它們中間的是灰色，繞這個軸的角度對應於「色相」，到這個軸的距離對應於「飽和度」，而沿著這個軸的高度對應於「亮度」，「色調」或「明度」。



圖 13 HSV 色輪

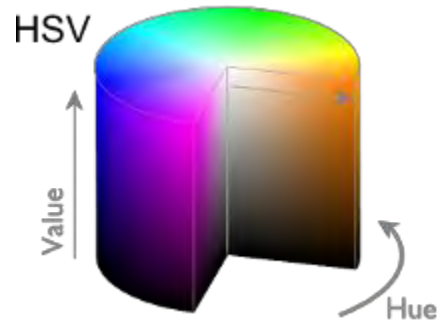


圖 14 HSV 3D 模型截面圖

## (二)、灰階

灰階影像除了純黑和純白之外，還可以包含深淺不同的灰色，即在黑色與白色之間加上不同的明暗度，每個像素佔有 8 bits 的空間，所以明暗度也就有 256 種變化，但也僅止於由黑到白的亮度變化而已，無法出現紅色、綠色等其他色彩。

## (三)、二值化

是圖像分割的一種最簡單的方法，二值化可以把灰度圖像轉換成二值圖像。把大於某個臨界灰度值（閾值）的像素灰度設為灰度極大值（即白色），把小於這個值的像素灰度設為灰度極小值（即黑色），從而實現二值化。

## (四)、侵蝕與擴張

為形態學處理，運作後結果圖像形似收縮與擴大，故得其名，可經由運算去除影像雜訊以及達到連接破碎前景物的功能，其主要是用二值化影像的膨脹(Dilation)與收縮(Erosion)的組合達到消除雜訊的目的。

## 五、 機械學習

為達成擬真目的，本作品欲加入更多肌肉進行仿生控制，而當肌肉過多時，控制的繁瑣將成為一大問題，故須找到取代的方式，而本作品為強調仿生，而學習為人類達成目的必經的過程，無論完成任何目標，都需要無數的學習與嘗試。當完成影像辨識後，機械學習為一重點目標。機械學習分為許多種類，在本作品中預計使用的為強化學習(Reinforcement Learning)以達成學習的重點目標。

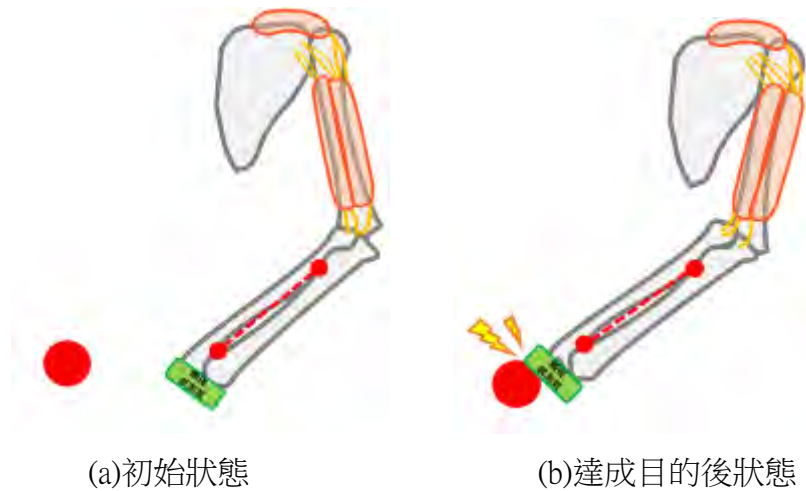


圖 15 機械學習示意圖

在強化學習中，本作品預計使用 Q-Learning 學習演算法，其方式為給定獎勵與處罰（Reward），利用亂數嘗試後，判斷產生的結果是否符合預期，若符合，則給予獎勵，並驅使結果朝著獎勵走，如不符合預期則反之，達到完成目的的學習效用。

如圖 16 之示意圖所示，觸碰到圖中大紅點為其中一學習目的，故於手臂前端加入觸碰感測器，經由給定亂數進行嘗試，直至達到目的為止，即為完成一次的學習，隨著學習成功次數逐漸增高，同時意味著學習的完整性，當學習到達一定的完整，即可執行原先給定欲達成的目的。

利用這個方式，雖然能夠解決控制繁瑣的問題，但因 Q-Learning 所產生的結果只為了達成目的，並不在意過程，手臂姿勢皆不相同，因此無法以同樣的方式進行量產，在每支肌肉進行不同動作時都須進行重新的學習，而 Q-Learning 的學習上需要時間，雖然這樣的方式較耗時也較麻煩，但同時也造就了仿生中的學習機制。

## 伍、研究結果

### 一、空氣幫浦送氣量測試

在取得空氣幫浦作為動力來源時，首先最重視的不外乎就是幫浦的送氣效能，為了有利於往後的實驗數據測量，故撰寫了一控制幫浦送氣時間的程式進行細微的控制，並將幫浦的送氣量與時間關係進行對照並記錄如下列圖表。

表二 幫浦送氣量(ml)與時間對照表

次數 秒數(Sec)	第一次測量	第二次測量	第三次測量	平均值(Avg)
0.1	8.1	8.1	8.1	8.10
0.2	16.1	16.1	16.1	16.10
0.3	24.0	24.0	23.9	23.96
0.4	31.8	31.9	31.9	31.83
0.5	39.9	39.9	40.0	39.93
0.6	48.1	48.0	48.0	48.03
0.7	56.0	55.9	56.0	55.96
0.8 (推算)				63.89
0.9 (推算)				71.82
1.0 (推算)				79.75

由於在本測試實驗中所使用的為打氣筒，故只能測量至 60ml 的測量刻度，但經由分析後發現，所繪製成的圖形近似於線性關係，經由這個關係我們可以推估往後進氣量的值，將其結果擷取部分繪製成圖表，如下圖所示。

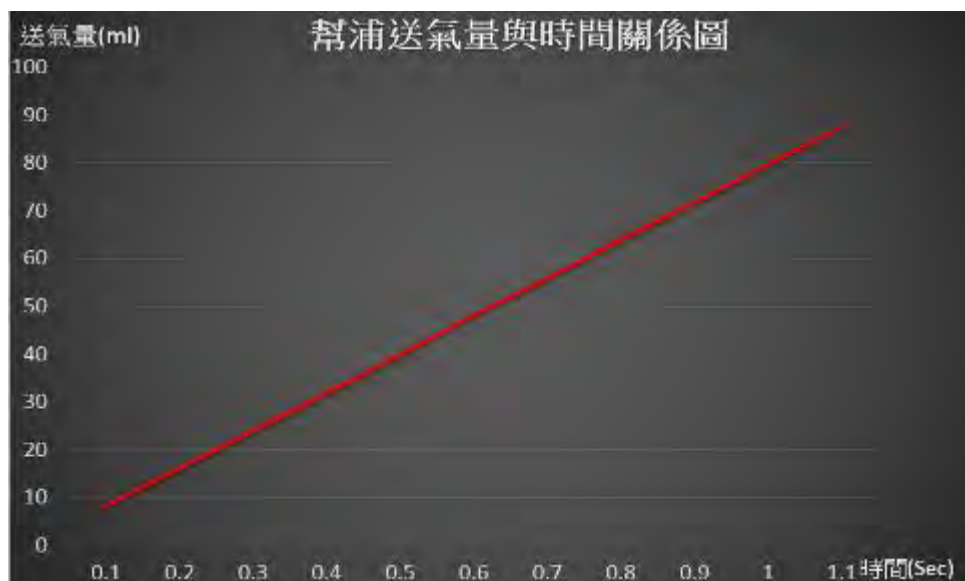


圖 16 幫浦送氣量與時間關係圖

## 二、 探討氣動肌肉缸充飽後的長度變化量與進氣關係

當測試完幫浦的進氣量與完成氣動肌肉缸(以下簡稱肌肉)的製作後，可加以測量各不同長度肌肉的收縮效能，並依照所需的進氣時間，對照幫浦的送氣量，取得估算的肌肉進氣量，有利於往後對於肌肉的進氣量與角度計算等更多作用。

表三 氣動肌肉缸充飽後長度變化與進氣關係表

肌肉長度 ( <i>cm</i> )		變化量 <i>d</i> ( <i>cm</i> )	充氣時間 ( <i>Sec</i> )	效能 ( <i>d/l</i> )	進氣量 ( <i>ml</i> )
原始長度 ( <i>l</i> )	充飽長度				
8.0	5.9	2.1	0.5	26.25%	39.93
10.5	7.8	2.7	0.6	25.71%	48.03
12.0	8.6	3.4	0.8	28.33%	63.89
15.5	11.8	3.7	1.0	23.87%	79.75
19.0	14.6	4.4	1.0	23.15%	79.75

## 三、 指針式實驗平台測試實驗

在真實的人體肌肉構造中，肌肉與肌肉間的拉扯會互相協調、干擾，導致無法達到仿生效果，故設計本實驗，用以模擬以兩支氣動肌肉缸調節角度的變化量，如下圖所示。

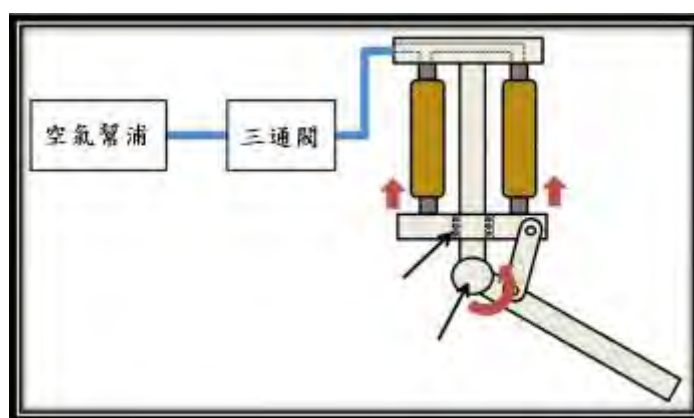


圖 17 平台示意圖

下圖為模擬上圖之指針式實驗平台構造，此平台運用 Makeblock 結合 3D 列印，其中包含了 Arduino Uno 板、變壓器、空氣幫浦、電磁閥、空壓管與氣動肌肉缸等元件，並可藉由此平台搭配 Arduino 與 C# 程式控制幫浦、三通電磁閥進行角度的變化量測試。

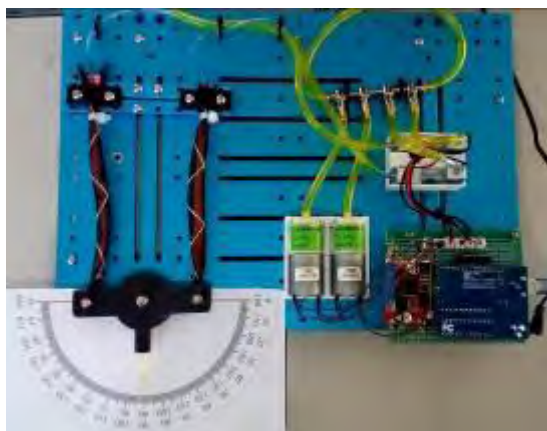


圖 18 指針式實驗平台

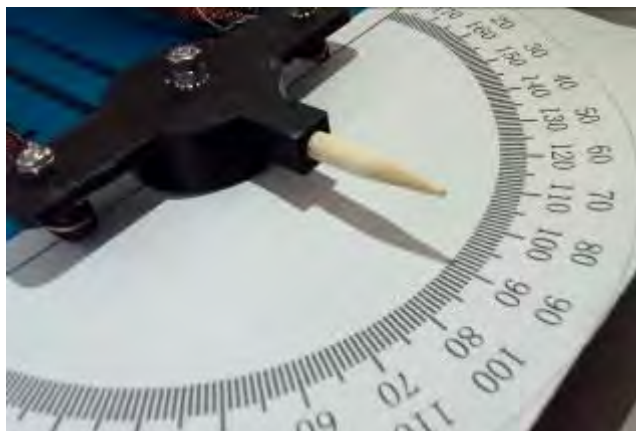


圖 19 利用光影觀察角度變化量

為了方便操控幫浦與三通電磁閥，使角度實驗測試的流程更為順暢，故利用肌肉控制流程所得到的結果，加以分析並設計了一套控制指令碼，灌入 Arduino 開發板並利用其進行控制，其指令碼大致如下表所示。

指令	操作	指令	操作
左側肌肉充氣	68	左側肌肉堵氣	13
左側肌肉放氣	24	右側肌肉堵氣	57
右側肌肉充氣	67	充氣（秒數 0.05s）	d
右側肌肉放氣	23	充氣（秒數 0.1s）	D
回歸原始狀態	Q	放氣	P



此外，並設計 C# 進行使用者介面操作與 Arduino 的結合，如左圖所示，可利用此面板直接轉成 Arduino 指令碼並進行指針式實驗平台的操控，利用不同的指令碼組合，可改變運作方式，進而調節角度。經由逐次實驗，

可得到各角度變化量所需的充放氣時間。

圖 20 程式控制面板

以下為充放的轉換與時間不同之角度變化之測試表

表四 左肌肉充氣右肌肉放氣對應時間與角度變化量表

左充(Sec) \ 右放(Sec)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.05	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°
0.10	4°	4°	4°	5°	5°	5°	5°	5°	5°	5°
0.15	7°	7°	7°	7°	7°	7°	7°	7°	7°	7°
0.20	7°	8.5°	8.5°	8.5°	8.5°	8.5°	8.5°	8.5°	8.5°	8.5°
0.25	8°	8°	8°	10°	10°	10°	10°	10°	10.5°	10.5°

表五 右肌肉充氣左肌肉放氣對應時間與角度變化量表

右充(Sec) \ 左放(Sec)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.05	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°
0.10	5°	5°	5°	5°	5°	5°	5°	6°	6°	6.5°
0.15	8°	8°	8°	9°	10°	10°	10°	10°	10°	10°
0.20	11°	11°	11°	11°	11°	11°	11°	11°	11°	11°
0.25	11°	12°	12°	14°	14°	14°	14°	14°	15°	15°
0.30	11°	12°	13°	14°	14°	14°	14°	15°	15°	15°
0.35	11°	12°	14°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°
0.40	11°	13°	14°	15°	15°	15°	16°	16°	16°	16°

由上述資料可得出以下結論：

1. 開始對兩個氣缸充氣至 90 度的角度且不能飽和。
2. 兩肌肉充放搭配大約有 1° 的解析度。
3. 排氣時間越小，搭配充氣肌肉的充氣，可解析到更細的刻度。
4. 排氣時間越久，搭配充氣肌肉的充氣，可更快趨近於飽和。



5. 雖然製作的規格及方法一致，但左右的肌肉規格很難相同。
6. 若要調節出更大的角度，兩端施力點要往中心靠近。

以下為假設其中一支肌肉之長度並推算角度，求  $\theta^t$ ：

設 S 為點到點之最小長度  $\doteq 14.253 \text{ cm}$  (經測量)

設 O 為點到點之原始長度  $\doteq 14.7 \text{ cm}$  (經測量)

設 2B 為 8 cm (經測量) 則 B 為 4 cm

設 a 長度為  $O - S = 0.447 \text{ cm}$  設  $c = 4 \text{ cm}$

設 b 長度 (非定值)  $= c^2 - a^2 \doteq 3.976 \text{ cm}$

利用餘弦定理求得  $\theta$ ：

$$\cos \theta = \frac{b}{c} = 0.994$$

$$\text{Arc cos } 0.994 \doteq 6.279^\circ$$

$$\theta + \theta' = 90^\circ, \text{ 因為 } \theta' + \theta'' = 90^\circ$$

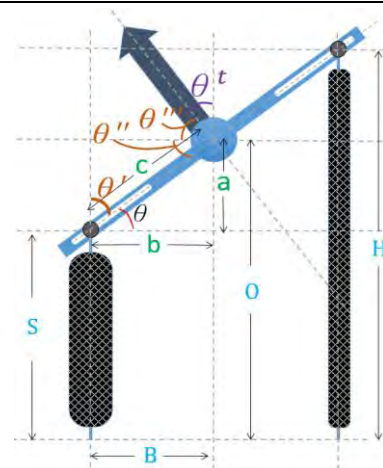


圖 21 推算示意圖

所以  $\theta = \theta''$ 。  $\theta'' + \theta''' = 90^\circ$ ，又因  $\theta''' + \theta^t = 90^\circ$ ，故  $\theta'' = \theta = \theta^t \doteq 6.279^\circ$ 。

設 S 為點到點之最小長度  $\doteq 14.217 \text{ cm}$  (經測量)

設 O 為點到點之原始長度  $\doteq 14.7 \text{ cm}$  (經測量)

設 2B 為 8 cm (經測量) 則 B 為 4 cm

設 a 長度為  $O - S = 0.483 \text{ cm}$ ，設  $c = 4 \text{ cm}$ ，設 b 長度 (非定值)  $= c^2 - a^2 \doteq 3.939 \text{ cm}$ 。

利用餘弦定理求得  $\theta$ ：

$$\cos \theta = \frac{b}{c} = 0.984$$

$$\text{Arc cos } 0.984 \doteq 10.26^\circ$$

$$\theta + \theta' = 90^\circ, \text{ 因為 } \theta' + \theta'' = 90^\circ, \text{ 所以 } \theta = \theta''$$

$$\theta'' + \theta''' = 90^\circ, \text{ 又因 } \theta''' + \theta^t = 90^\circ, \text{ 所以 } \theta'' = \theta = \theta^t \doteq 10.266^\circ$$

設 S 為點到點之最小長度  $\doteq 13.628 \text{ cm}$  (經測量)

設 O 為點到點之原始長度  $\doteq 14.7 \text{ cm}$  (經測量)

設 2B 為 8 cm (經測量) 則 B 為 4 cm

設 a 長度為  $O - S = 1.072 \text{ cm}$

設  $c = 4 \text{ cm}$

設 b 長度 (非定值)  $= c^2 - a^2 \doteq 3.863 \text{ cm}$ 。

利用餘弦定理求得  $\theta$ ：

$$\cos \theta = \frac{b}{c} = 0.9657$$

$$\text{Arc cos } 0.9657 \doteq 15.0499^\circ$$

$\theta + \theta' = 90^\circ$ ，因為  $\theta' + \theta'' = 90^\circ$ ，所以  $\theta = \theta''$ 。

$\theta'' + \theta''' = 90^\circ$ ，又因  $\theta''' + \theta^t = 90^\circ$ ，所以  $\theta'' = \theta = \theta^t \doteq 15.0499^\circ$ 。

設 S 為點到點之最小長度  $\doteq 13.5 \text{ cm}$  (經測量)

設 O 為點到點之原始長度  $\doteq 14.7 \text{ cm}$  (經測量)

設 2B 為  $8 \text{ cm}$  (經測量) 則 B 為  $4 \text{ cm}$

右圖為 肌肉最長與肌肉最短之狀態

設 a 長度為  $O - S = 1.2 \text{ cm}$

設  $c = 4 \text{ cm}$

設 b 長度 (非定值)  $= c^2 - a^2 \doteq 3.81 \text{ cm}$ 。

利用餘弦定理求得  $\theta$ ：

$$\cos \theta = \frac{b}{c} = 0.9525$$

$$\text{Arc cos } 0.9525 \doteq 17.73^\circ$$

$\theta + \theta' = 90^\circ$ ，因為  $\theta' + \theta'' = 90^\circ$ ，所以  $\theta = \theta''$ 。

$\theta'' + \theta''' = 90^\circ$ ，又因  $\theta''' + \theta^t = 90^\circ$ ，所以  $\theta'' = \theta = \theta^t \doteq 17.73^\circ$ 。

由上述資料可得出以下結論：

1. 推算中我們的肌肉最大可至  $17.73^\circ$ ，但因誤差值等因素，導致角度變化量在實際的實驗數據中最高只能至  $16^\circ$ 。
2. 由推算的方式可將角度求得更精密但較難顧慮誤差值。

#### 四、 探討骨頭模型手臂的角度變化量

在完成平台的肌肉模擬後，我們將氣動肌肉缸架在 3D 列印出的仿生骨頭上，藉由內外肌肉進氣量的控制，改變骨頭模型手臂的角度變化量並將其記錄，之後藉由角度變化量以利於控制手臂的抬舉，進行觀察並記錄。

表六 內肌肉間格秒數(次數)與角度變化量關係圖(初始角度 140°)

次數 \ 間隔秒數(s)	0.25	0.5	1
1	140°	140°	140°
2	138°	130°	125°
3	135°	105°	80°
4	127°	85°	60°
5	116°	70°	60°(飽和)
6	105°	60°	60°(飽和)
7	96°	60°(飽和)	60°(飽和)
8	86°	60°(飽和)	60°(飽和)
9	80°	60°(飽和)	60°(飽和)
10	70°	60°(飽和)	60°(飽和)
11	65°	60°(飽和)	60°(飽和)
12	60°	60°(飽和)	60°(飽和)

表七 外肌肉間格秒數(次數)與角度變化量關係圖(初始角度 140°)

次數 \ 間隔秒數(s)	0.5	1.0
1	140°	140°
2	140°	140°
3	140°	157°
4	145°	170°
5	155°	173°
6	168°	173°(飽和)
7	173°	173°(飽和)
8	173°(飽和)	173°(飽和)

表八 內肌肉充滿時外肌肉逐漸充氣角度變化量關係圖(初始角度 60°)

次數 \ 間隔秒數(s)	1
1	60°
2	70°
3	85°
4	95°
5	105°
6	110°
7	115°
8	120°
9	120°(飽和)

由上述資料可得出以下結論：

1. 第一次進氣時，不論秒數，會因為氣動肌肉缸內部壓力不夠大，使角度變化量不明顯。
2. 在多次進氣後，角度變化量會隨著內部壓力逐漸提高，而愈趨明顯。
3. 當內肌肉充滿而外肌肉逐漸充氣時，間隔秒數過短，變化量太過不明顯，故使用 1 秒為間隔開始測試。
4. 內肌肉骨頭模型將於 60° 時氣動肌肉缸達到飽和狀態。
5. 外肌肉骨頭模型將於 173° 時氣動肌肉缸達到飽和狀態。
6. 因兩支氣動肌肉缸力量拉扯，內外肌肉骨頭模型將於 120°時氣動肌肉缸達到飽和狀態。

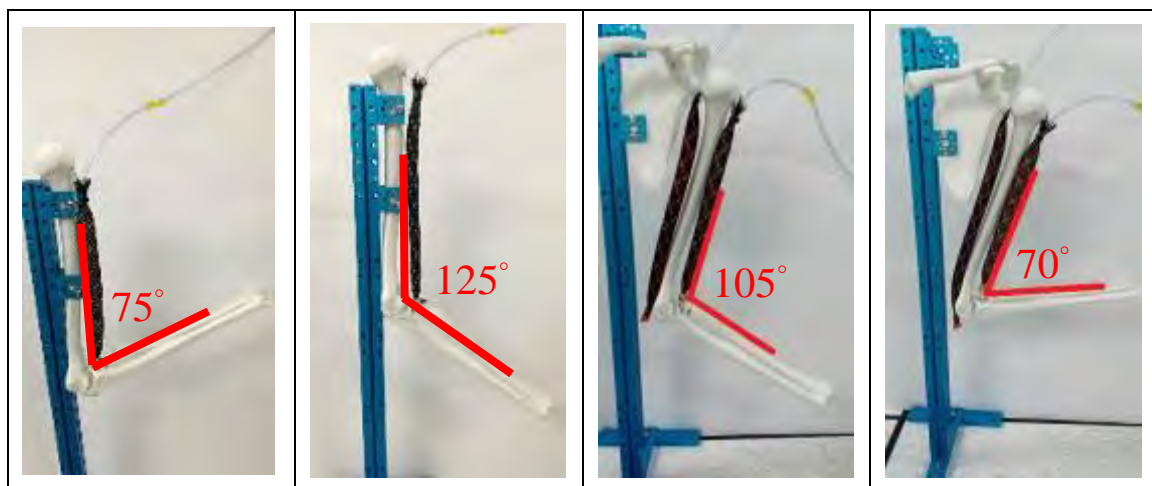


圖 22 骨骼不同角度情形

## 五、以骨頭模型為基礎追加三角肌模型

在前述實驗中，已可進行抬舉與伸直的作用。但在真實的人體手臂中，並不單只有抬舉與伸直的動作，應還有上舉的動作，為模仿真實人體手臂，手臂中追加了三角肌，以完成上舉的動作，藉由三角肌的控制，已可達到側舉功能。

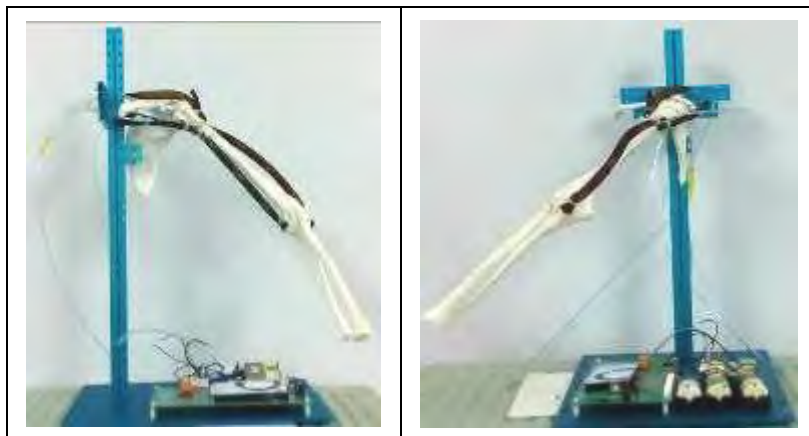


圖 23 控制手臂的側舉的示意圖

## 六、骨頭模型加入影像辨識

為了以最真實的方式模仿人體手臂構造，需要加入更多的氣動肌肉缸，而肌肉與肌肉間的協調作用，會互相影響其進氣量與伸縮量，在操作的指令上會顯得非常繁瑣。取而代之的方式是使手臂如同人體手臂一般，為達到此目標，加入影像辨識技術。由於本作品欲降低因效能而使畫面產生延遲的情形，故使用 AForge 作為影像辨識元件。為了判斷出手臂的位置，所採用的方式是將手臂貼上兩紅圓點作為判斷的基準，藉由這樣的方式，能夠找到手臂所在的位置，也能夠辨別需要查找的目標物。

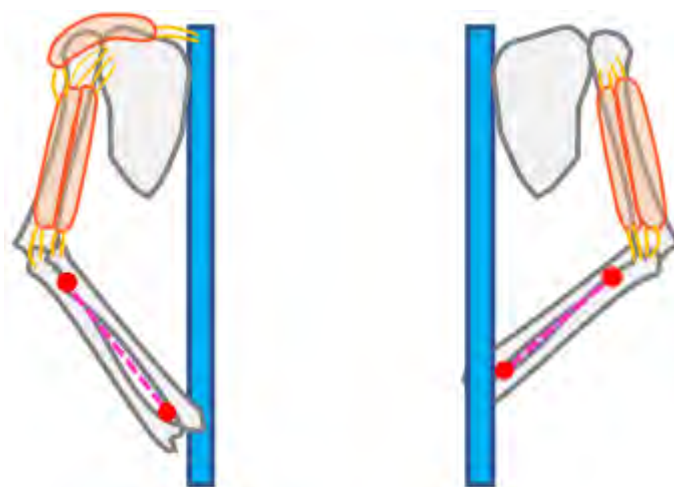
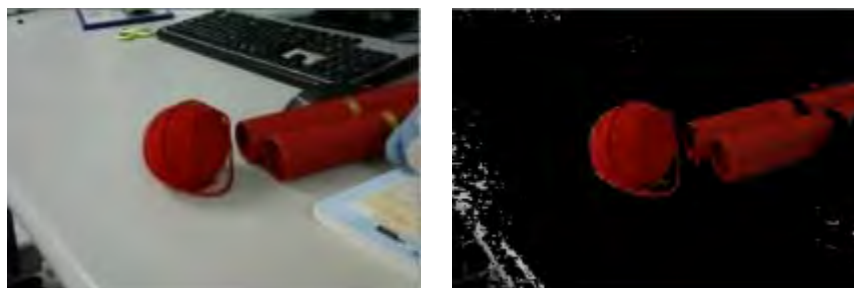


圖 24 判斷手臂位置示意圖

### (一) 利用 HSV 篩選紅色物體

由於在學習的過程中，需要一個明確的目標物，計畫以驅近飽和的紅色球體作為基準，利用 HSV 篩選畫面中紅色的物體。HSV 分別代表色相、飽和度與明度，將 H 值調到 360 度左右，可篩選出紅色。



(a)原圖

(b)HSV 擷取紅色處理

圖 25 HSV 處理

### (二) 將影像灰階與二值化處理以利後續分析處理

在完成 HSV 進行截取紅色後，由於色彩的比對不夠鮮明，而二值化為影像切割最簡易也最常用的方式，而將影像轉為二值圖像前，需要將影像轉成灰度圖像。



圖 26 灰階處理



圖 27 二值化處理

### (三) 運用侵蝕與擴張進行減少雜點

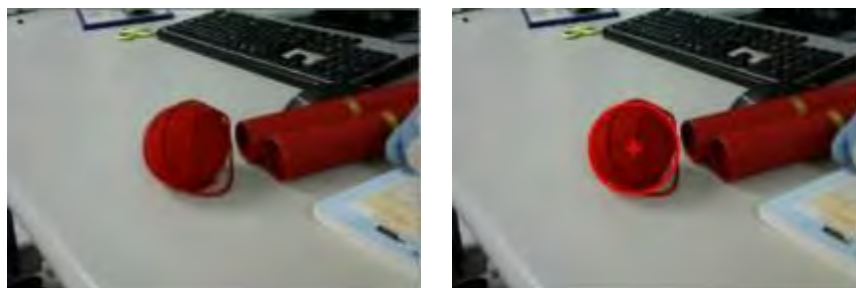
經由二值化後圖像仍有些許非紅色物體存在，而先侵蝕後擴張是一種能夠消除雜點的影像處理技巧，為求得影像辨識的準確性，於是將二值圖像進行在處理。



圖 28 侵蝕與擴張處理

#### (四) 利用找圓處理篩選出畫面中圓形的物體

由於我們欲查找的目標為手臂上的紅原點，故需要達到取圓的功用。通常使用的霍夫找圓過於耗費效能，於是利用侵蝕與擴張處理過後之圖像，判別邊界、半徑、圓心是否足以形成一個圓，再將所取得的圓形資料回傳至原圖作畫。



(a)原圖

(b)找圓後圖片

圖 29 找圓處理

藉由以上方式，我們已可辨識手臂所要學習的目標物及手臂的位置，利用影像辨識的方式，可以為機械學習做前置的準備動作，在未來能夠順利的找到目標物並且進行學習。

## 陸、討論

### 一、肌肉個體差異

為確實模仿真實人體肌肉的特性，並不會每條肌肉的長度、韌性等都是一樣，故所製作之氣動肌肉缸並不會每支都特性相同。然而，這樣的結果所導致的會是肌肉與肌肉間產生個體的差異，在實驗與紀錄上同時略顯複雜。

### 二、充放氣誤差值

當我們需要操控精密的角度（例如 1 度）時，勢必需要極短（或趨近於 0）的充氣時間或放氣時間，然而當時間過短時，容易使元件反應不及，產生無法確切進氣的情況，使變化量不明顯等問題。

### 三、動力來源的比較

在台北市科展第一天評分時，教授曾經問過我們一個問題：一般市面上通常使用伺服馬達作為動力來源，而本作品所使用的是幫浦，差異為何？這是許多人的疑問，因此我們整理了表格做說明，如下表所示。

	伺服馬達	幫浦結合氣動肌肉缸
成本	1.幾個旋轉角就需要幾顆伺服馬達 2.需要數個馬達控制版 3.價格昂貴	1.一組空氣幫浦 2.價格便宜
重量與體積	1.伺服馬達重 2.馬達本身重量會成為另一個關節的負擔 3.需要有容納伺服馬達的空間，若為多個伺服馬達，則體積龐大	1.幫浦重，但不會放在肢體上，造成關節的負擔 2.肌肉缸可以繞折彎曲，比較沒有空間限制。
效能與耗能	1.可作 0-360 的旋轉角度 2.可以精確控制角度 3.反應速度快 4.扭力 20kg 以上，擴充不容易，需購置更大扭力的馬達來解決 5.電力消耗大	1.旋轉角度與收縮的長度有關，旋轉角度不大 2.角度控制不易 3.反應速度跟充氣量有關 4.拉力大約 3kg 需搭配多條提高負重能力 5.效能相較伺服馬達耗能低
控制	PWM	充氣、放氣、堵氣
仿生	無法完全模擬生物行為	可以接近生物的動作行為

## 柒、結論

### 一、結論

(一) 藉由採用單組幫浦模擬心臟系統與二、三通電磁閥控制肱二頭肌與肱三頭肌的進氣或排氣量，以改變收縮程度，可模擬真實的人體上臂肌肉運動，手臂收縮



角度可從 60°-173°。

(二)由於所使用的材質上無法達到人體組織的精細程度，肌腱、韌帶的位置及肌肉的大小，有部分的位置權宜的變動，以符合順利運作的目標。

(三)使用氣球所製作的氣動肌肉缸並沒有足夠的耐力去拉動重物，而幫浦亦需要提升輸出氣壓。須尋求或研發更有效率的元件。

(四)透過仿照人體肌肉組織，建構肌肉系統對於了解人體架構有很大的助益。

(五)本研究建構的上臂模型採用實際的骨頭 3D 模型，確實可以運作出人類部分的肢體動作。然控制方式非常複雜，後續研究會透過建構數學模型簡化，另外機械學習也是未來的重要方向。

(六)目前影像辨識已可順利擷取目標物影像，為未來機械學習奠定基礎。

## 二、未來展望

預計建構局部甚至全身的機器人，控制系統勢必十分的複雜，採用機械學習讓系統模仿人類學習的行為，產生各種動作的微指令，建構一個具學習能力的仿生系統。在這部分，我們已首先完成影像辨識，作為機械學習的前置準備，期許在不久後的將來，能夠讓系統自主進行模仿人類的行為。

## 捌、參考資料及其他

### 論文部分

- 1.吳孟哲(2009)，穿戴式下肢輔具之氣壓式人工肌肉鑑別與控制，國立清華大學機械工程學系，碩士論文。
- 2.金冠霖(2013)，別以嵌入式系統實現人工肌肉氣壓缸之系統識別，國立臺灣師範大學機電科技學系，碩士論文。
- 3.許兆維(2015)，氣壓人工肌肉致動之下肢復健機構的設計與肌電訊號整合控制，國立臺北科技大學機電整合研究所，碩士論文。
- 4.吳政學，肌肉系統，崇仁護專自編教材。

### 網頁部分

- 5.中學生網站，人造肌肉。<http://www.shs.edu.tw/works/essay/2015/04/2015040208374726.pdf>

6.維基百科，韌帶。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%A7%E5%B8%A6>

7.每日頭條，你能分清肌腱、韌帶和肌筋膜嗎？。

<https://kknews.cc/health/oynnpq.html>

8.新高中體育課程，肌肉收縮的類型。

[http://www.hkpe.net/hkdsepe/human\\_body/muscular\\_contraction\\_types.htm](http://www.hkpe.net/hkdsepe/human_body/muscular_contraction_types.htm)

9.騰訊視屏，3D 肘關節動態解剖視屏

<https://v.qq.com/x/page/d0342io0381.html>

10.FESTO，Fluidic Muscle DMSP/MAS FESTO

[https://www.festo.com/cat/zh-tw\\_tw/data/doc\\_engb/PDF/EN/DMSP-MAS\\_EN.PDF](https://www.festo.com/cat/zh-tw_tw/data/doc_engb/PDF/EN/DMSP-MAS_EN.PDF)

11.slideshare.net，Cheetah Robot

<https://www.slideshare.net/nabeel5667/cheetah-robot-52344219>

12.drlox.com，Lateral & Medial Epicondylitis

<http://www.drlox.com/elbow/lateral-a-medial-epicondylitis/>

13.YouTube，MUSCLE SENSOR "Real Iron Man Arm Exoskeleton"#2 Update.

<https://www.youtube.com/watch?v=xWADYjee6-w>

14.YouTube，Hand made pneumatic muscle.

<https://www.youtube.com/watch?v=Xcoel6unkAM>

15.YouTube，Tutorial: Air Muscle Build.

<https://www.youtube.com/watch?v=eDq9hIroTf4>

16. keywordlister，Hsla Color Wheel.

<http://www.keywordlister.com/aHNsYsBjb2xvciB3aGVlbA/>

17. YAHOO!知識家，何謂灰階、256 色的定義？

<https://tw.answers.yahoo.com/question/index?qid=20090218000015KK05869>

18.Dancing Robot(2012)，OpenCV 設計。

<https://sites.google.com/a/ms.ttu.edu.tw/cse2012dance-robot/yan-jiu-cheng-guo/opencv-ruan-ti-shi-e-ji/qin-shi-yu-peng-zhang>

## 【評語】 052320

1. 研究主題清楚，方法適切，論述具邏輯性。
2. 本作品利用束網及生膠管製成人工肌腱，用充放氣控制來模仿肌肉的作用。
3. 未對負重或抓握力進行影響探討。
4. 這是件非常有創意的工作，具有發展的空間，若能再考慮用力負載的值會更有實用性。

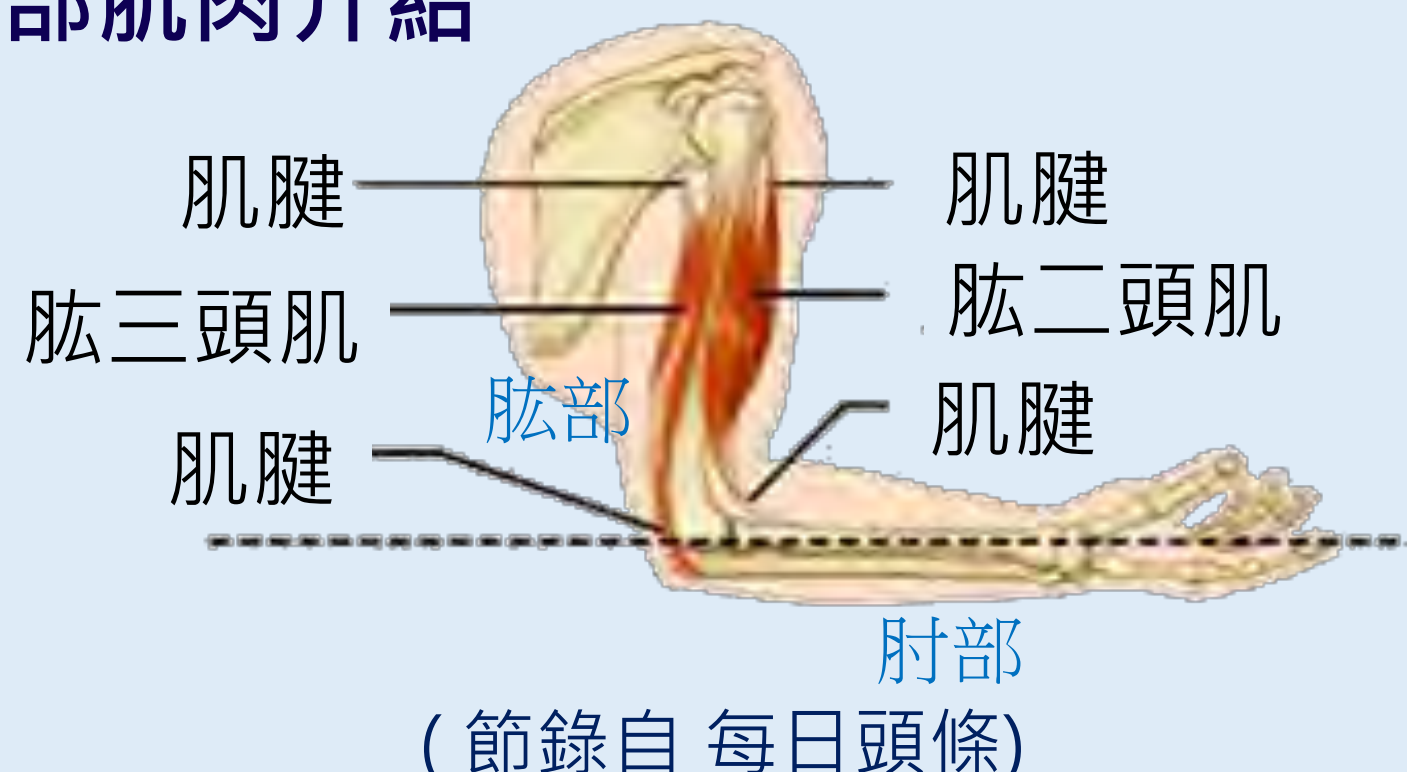
**摘要** 本研究依據人體肌肉、骨骼、韌帶及肌腱的功能及組成，建構人形機器手臂運作模型。運用氣球、約束網製作氣動肌肉缸模擬上臂肱二頭肌、肱三頭肌及三角肌，3D列印肱、肘部的骨骼模型，使用彈力繩仿製韌帶，以TPC軟性材質列印肌腱配合束帶固定氣動肌肉缸固定肱二、三頭肌及其他肌肉。動力主要以幫浦送氣，透過程式控制電磁閥氣動肌肉的充、放氣及堵氣，控制肌肉伸長及縮短。綜合以上建立具有3個自由度氣動肌肉仿生機器手臂。此系統可以將連續動作儲存產生動作組，可以做出5種以上的肢體連續動作配合，透過影像辨識指揮動作組移動手臂到目標位置。上述研究成果可在未來透過機械學習，產生更複雜的動作組。

## 研究目的

- 一、利用氣動肌肉缸建構仿生機械手
- 二、探討與氣動肌肉缸縮放量的控制參數
- 三、建構一組幫浦及多組電磁閥的控制系統
- 四、仿製人體上臂構造人形建構手臂
- 五、探討各種肢體動作肌肉的運作方式
- 六、完成仿照人體肌肉運動模式的機器手臂

## 研究流程及方法

### 肱部肌肉介紹



(節錄自 每日頭條)

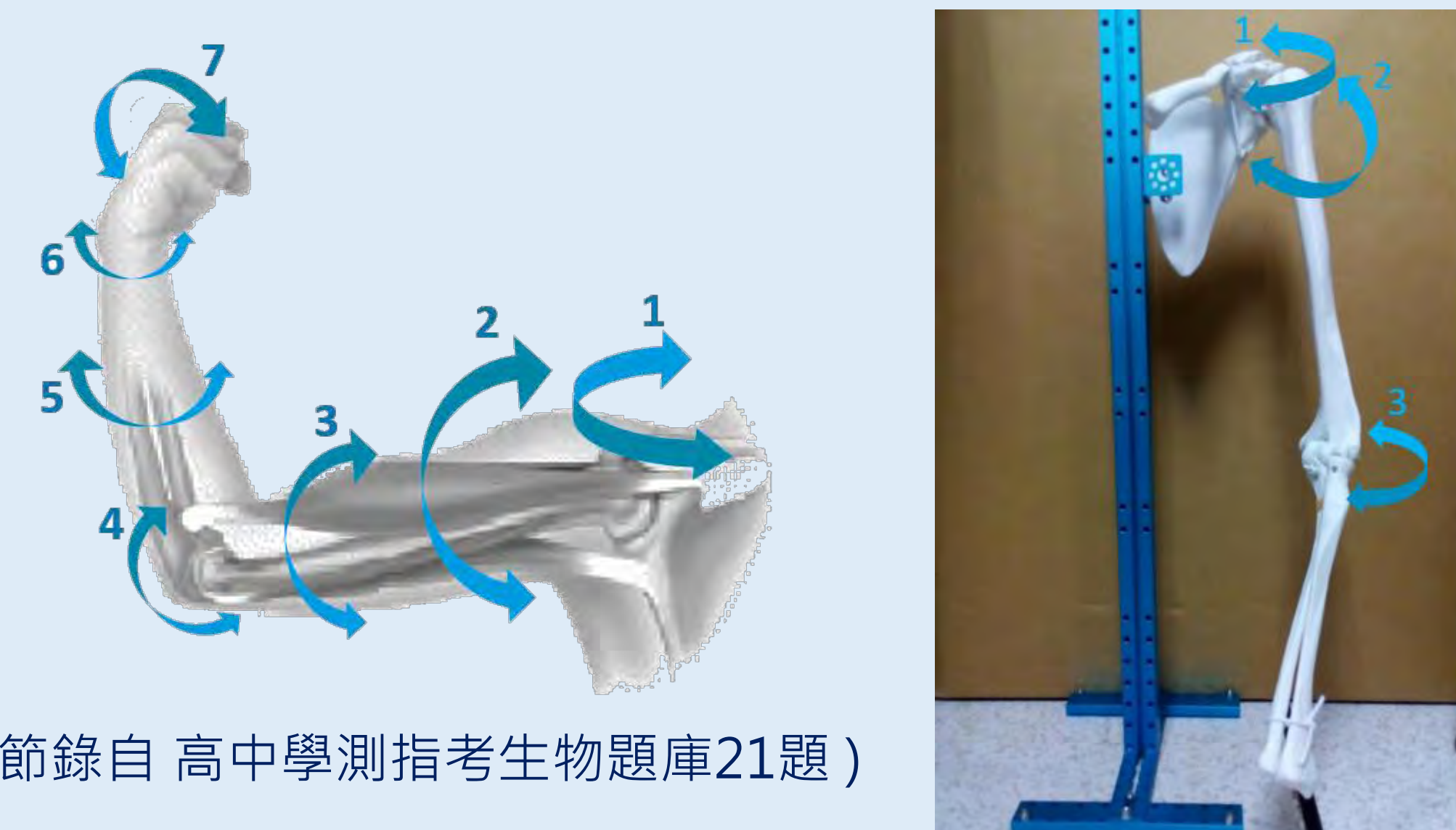
1. 肱二頭肌與**肱三頭肌**構成抬升**肘部**的主要肌肉群。
2. 藉由兩個肌肉群的**收縮**可以做各種角度的**抬升**及**支撐**。

### 人體手臂自由度探討

1. 人體手臂擁有七個不同的自由度，如右圖所示，自由度分別代表不同旋轉軸，藉由不同旋轉軸動作可對應做出人體手臂的不同動作。
2. 在本研究中目前已完成三個手臂自由度。

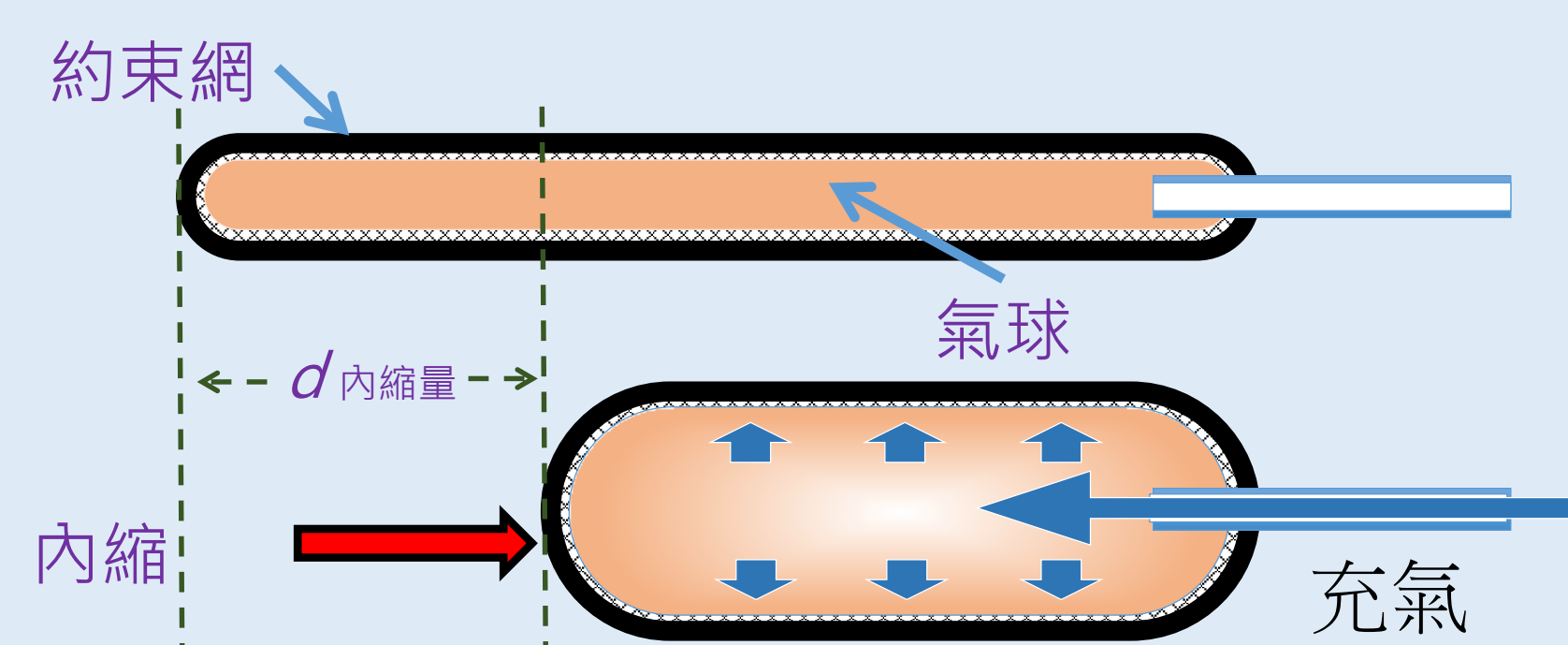
### 肱二頭肌收縮與上臂運動的關係 (節錄自 高中體育課程)

肌肉收縮	等張收縮		等長收縮
	向心收縮	離心收縮	
長度	縮短 	伸長 	不變 
張力	轉變	轉變	轉變
速度	轉變	轉變	沒有動作
例子	肱二頭肌收縮並縮短 (用力>重量) 	肱二頭肌收縮但伸長 (用力<重量) 	肱二頭肌收縮但長度不變 (用力=重量) 



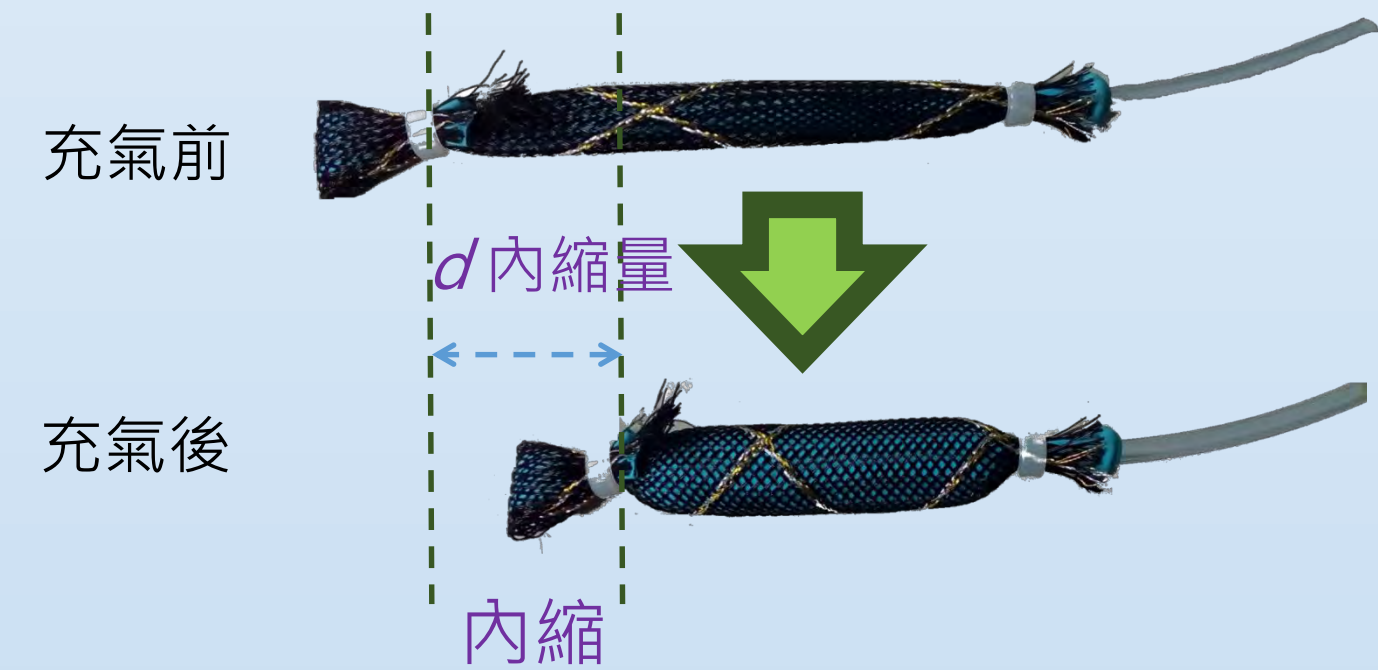
(節錄自 高中學測指考生物題庫21題)

### 氣動肌肉缸運作原理

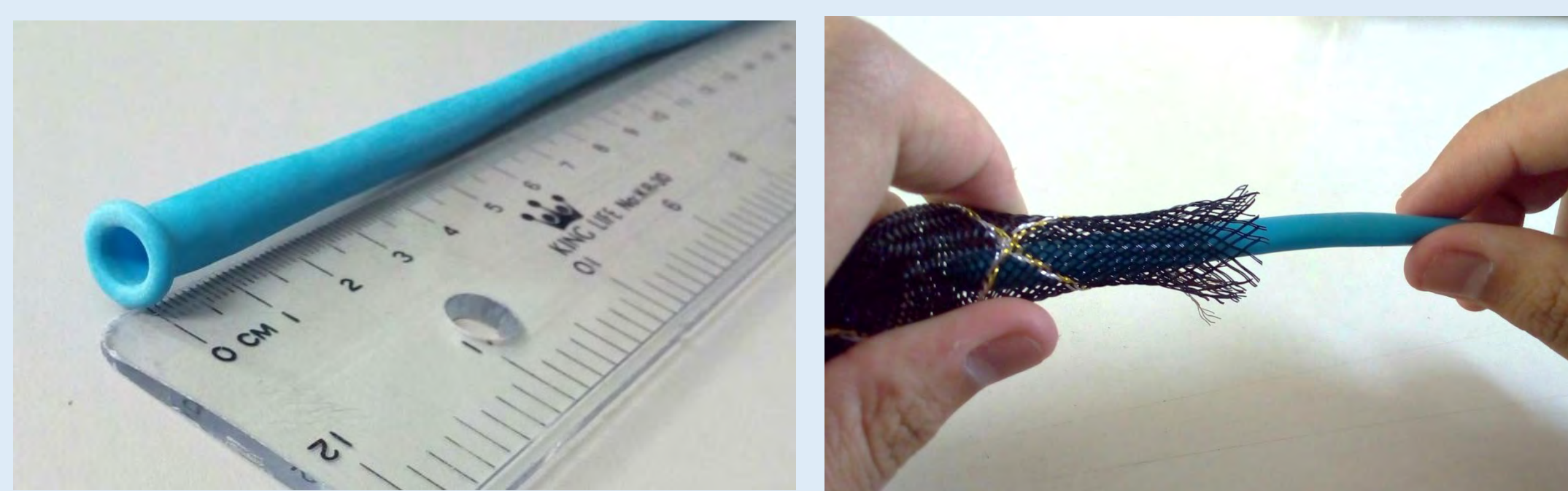


由於約束網限制容量，當氣體灌入氣球**寬度變大**，**長度減少**。當容量飽和，充氣的壓力會轉變成支撐的力量。

### 自製肌肉缸實體運作

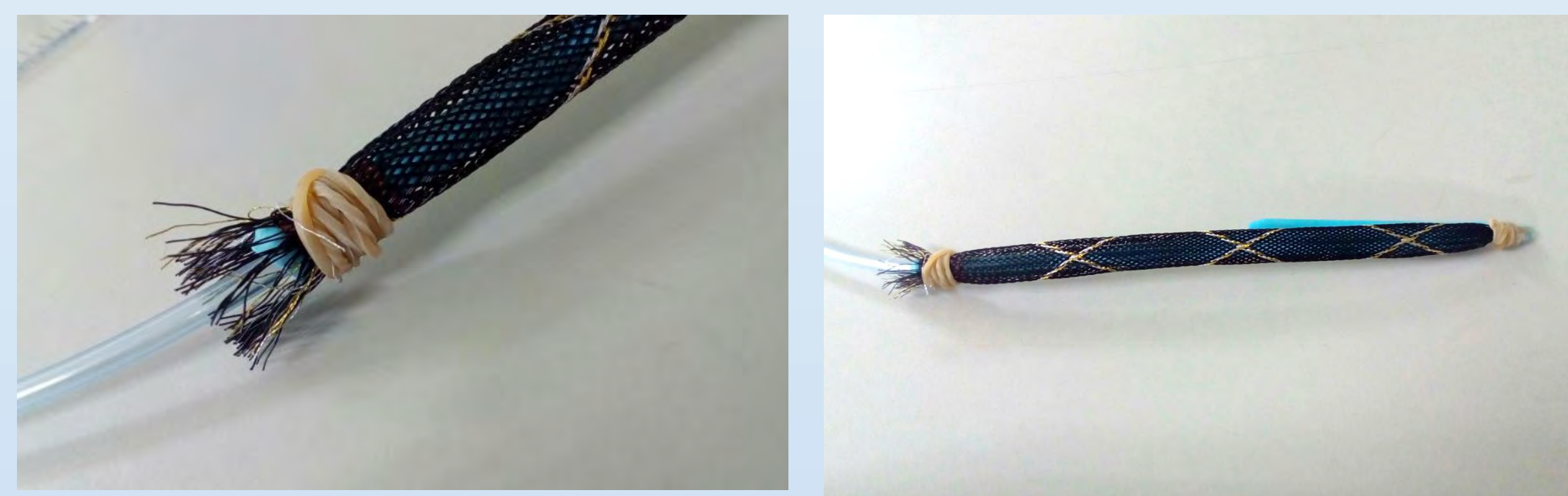


### 氣動肌肉缸實作過程



取用**氣球**量取所需長度預留5公分範圍做為網綁用

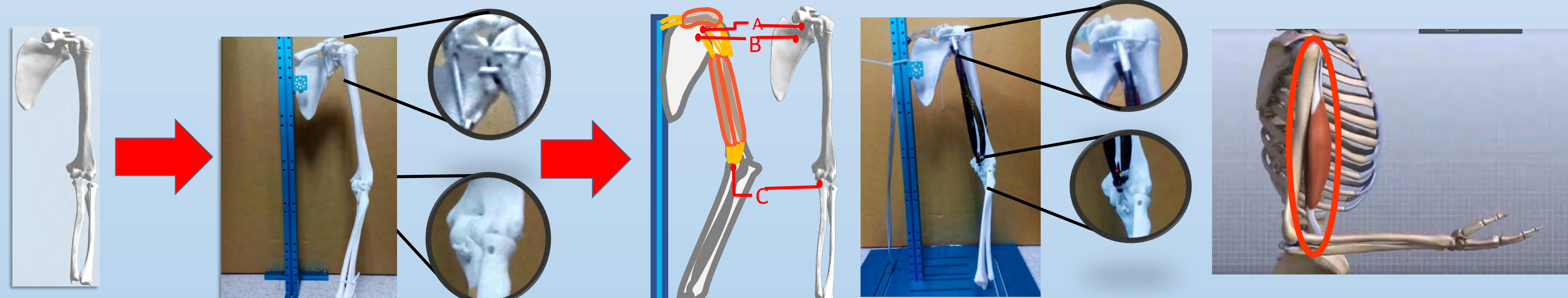
將氣球套入**約束網**內



於頭尾端網上**橡皮筋**或**束帶**以防止氣體流失並限制容量

完成**氣動肌肉缸**製作

### 骨骼、韌帶、肌腱與肌肉的连接實作

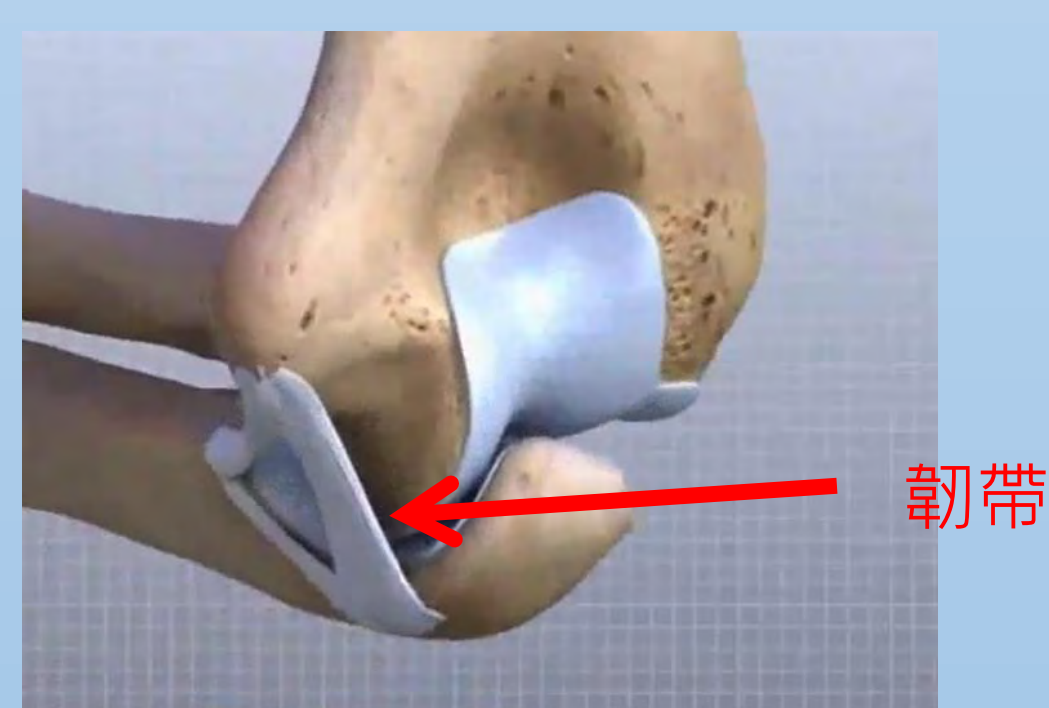


PLA質材3D列印所需骨骼

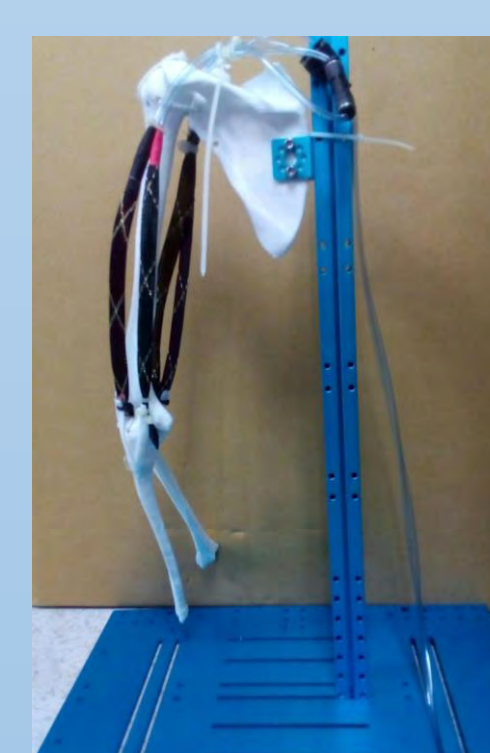
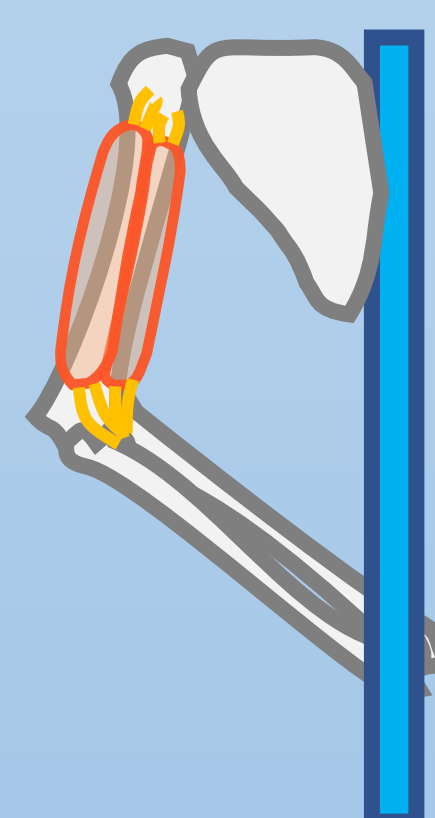
使用彈力繩當韌帶連接肩、肘關節

肱二頭肌使用TPC及束帶當作肌腱連接肌肉缸與骨頭

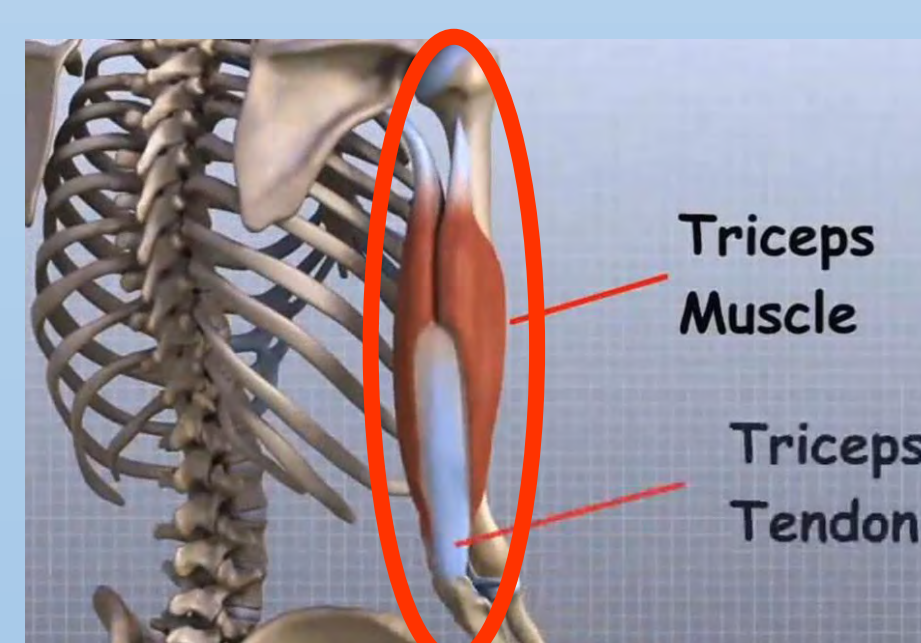
肌腱負責肌肉與骨頭的相連，圖為二頭肌的连接圖 (節錄自 eOrthopodTV)



韌帶負責股投之間的相連及關節旋轉運作 (節錄自 eOrthopodTV)



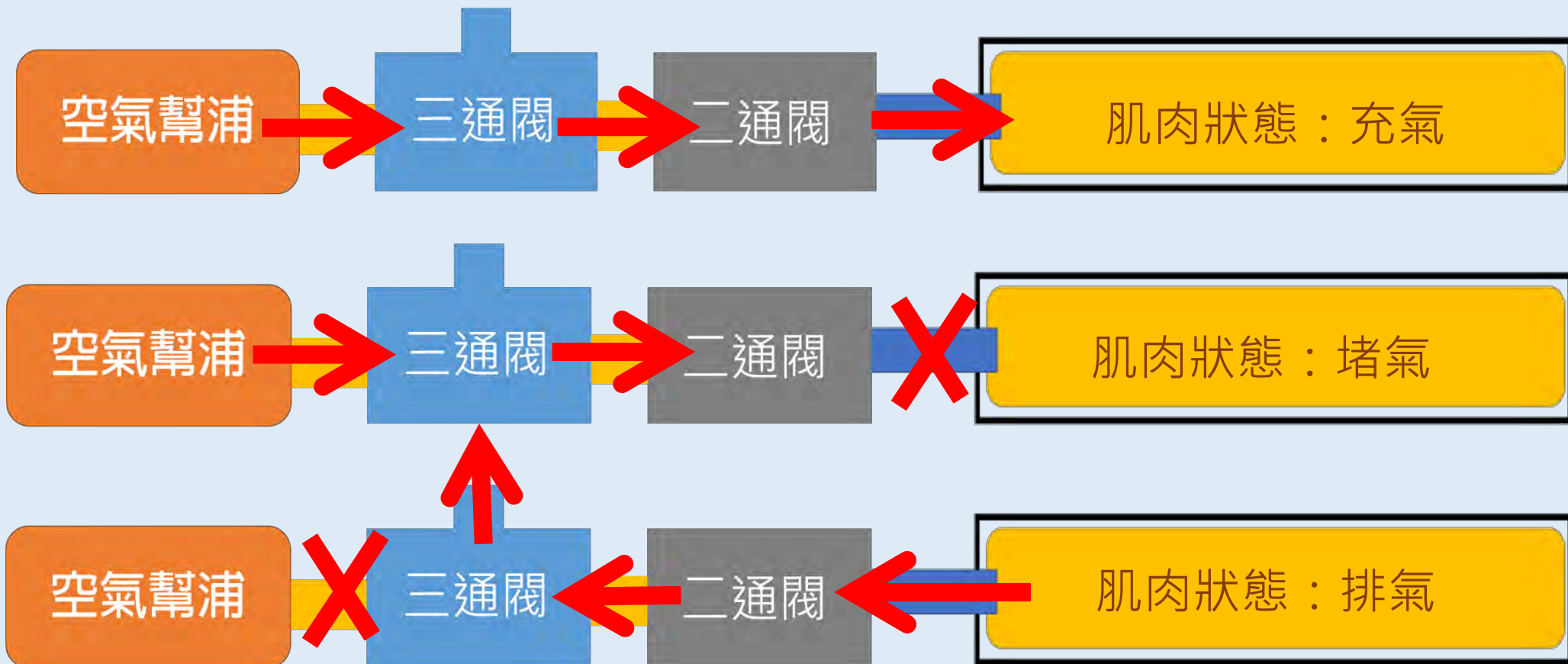
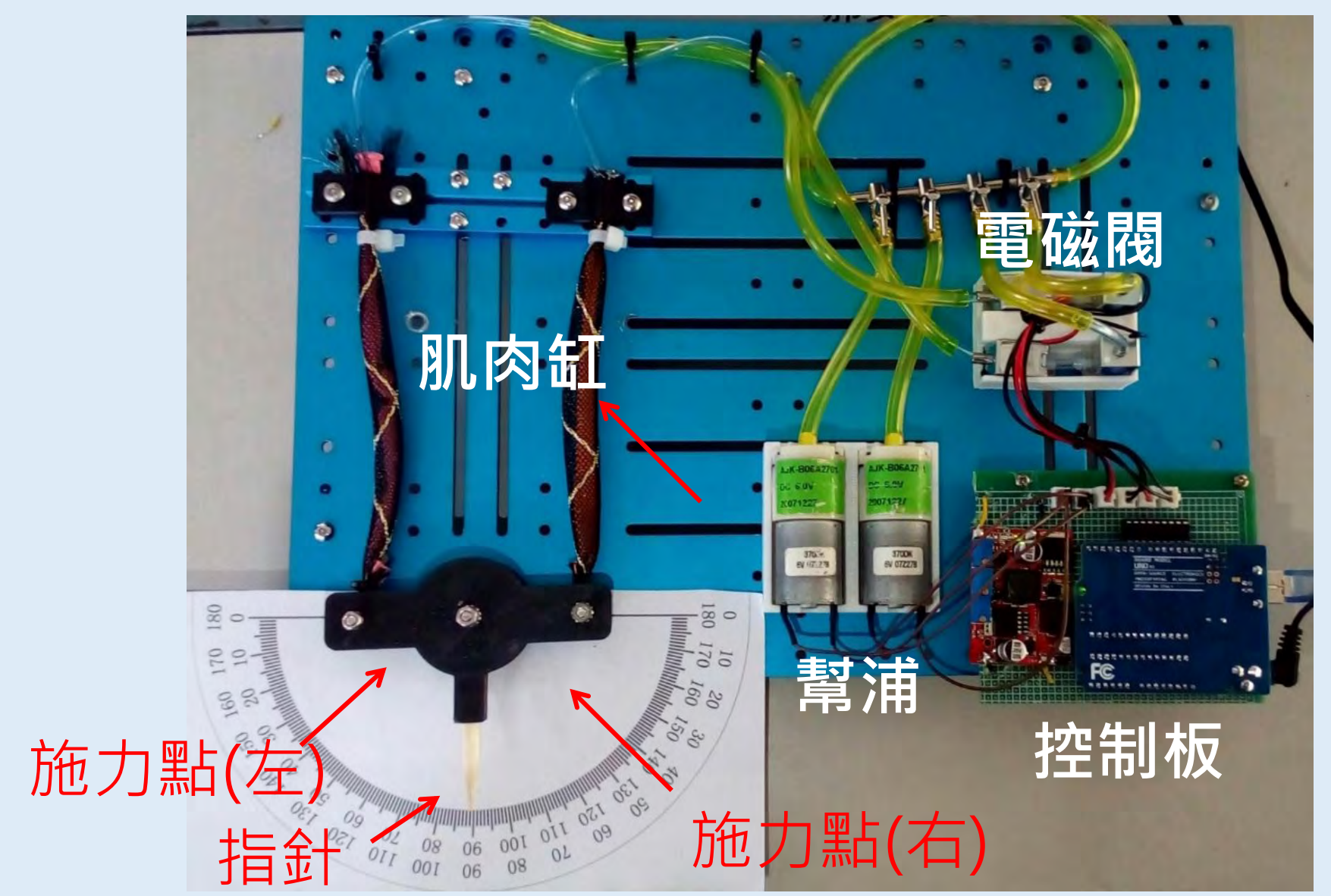
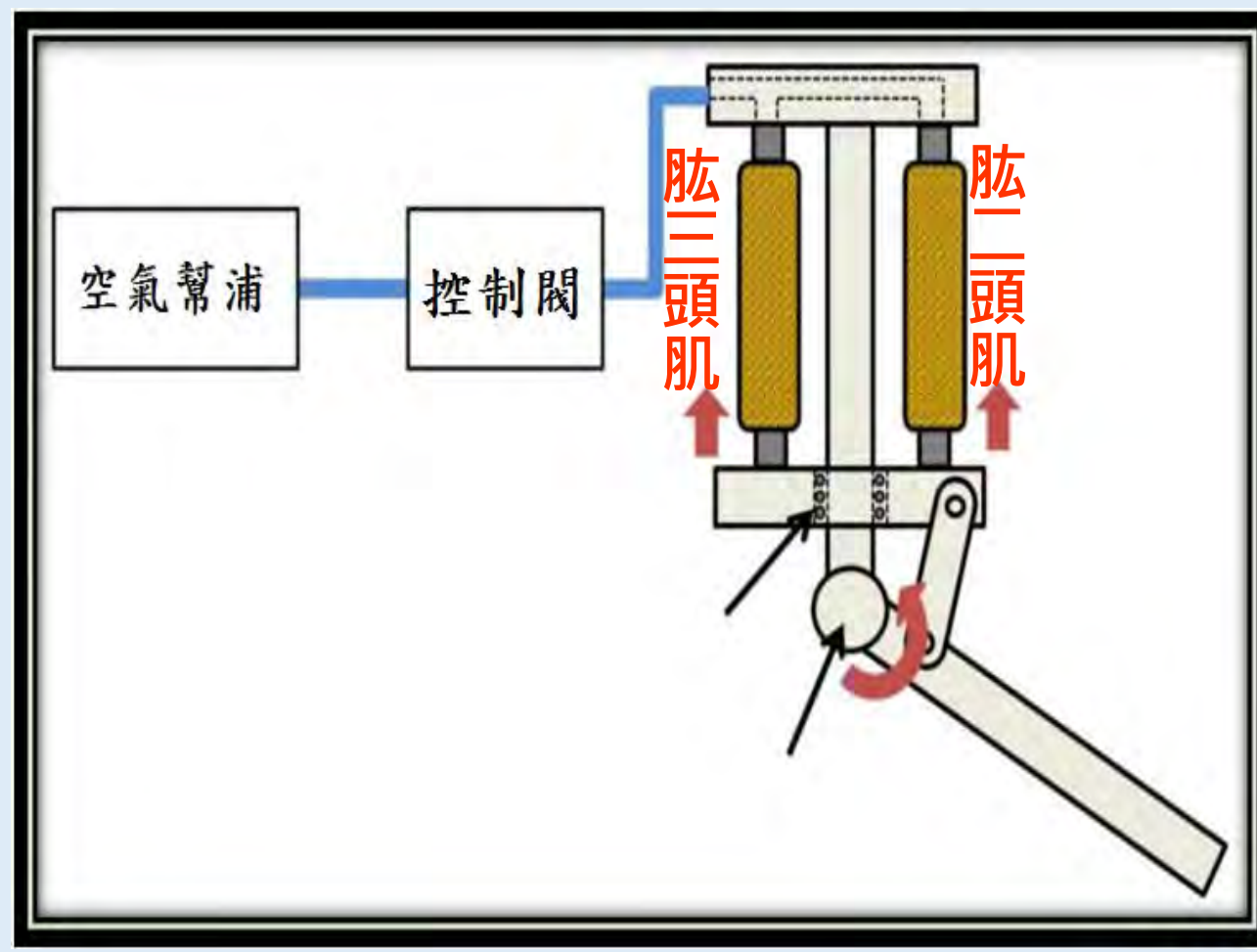
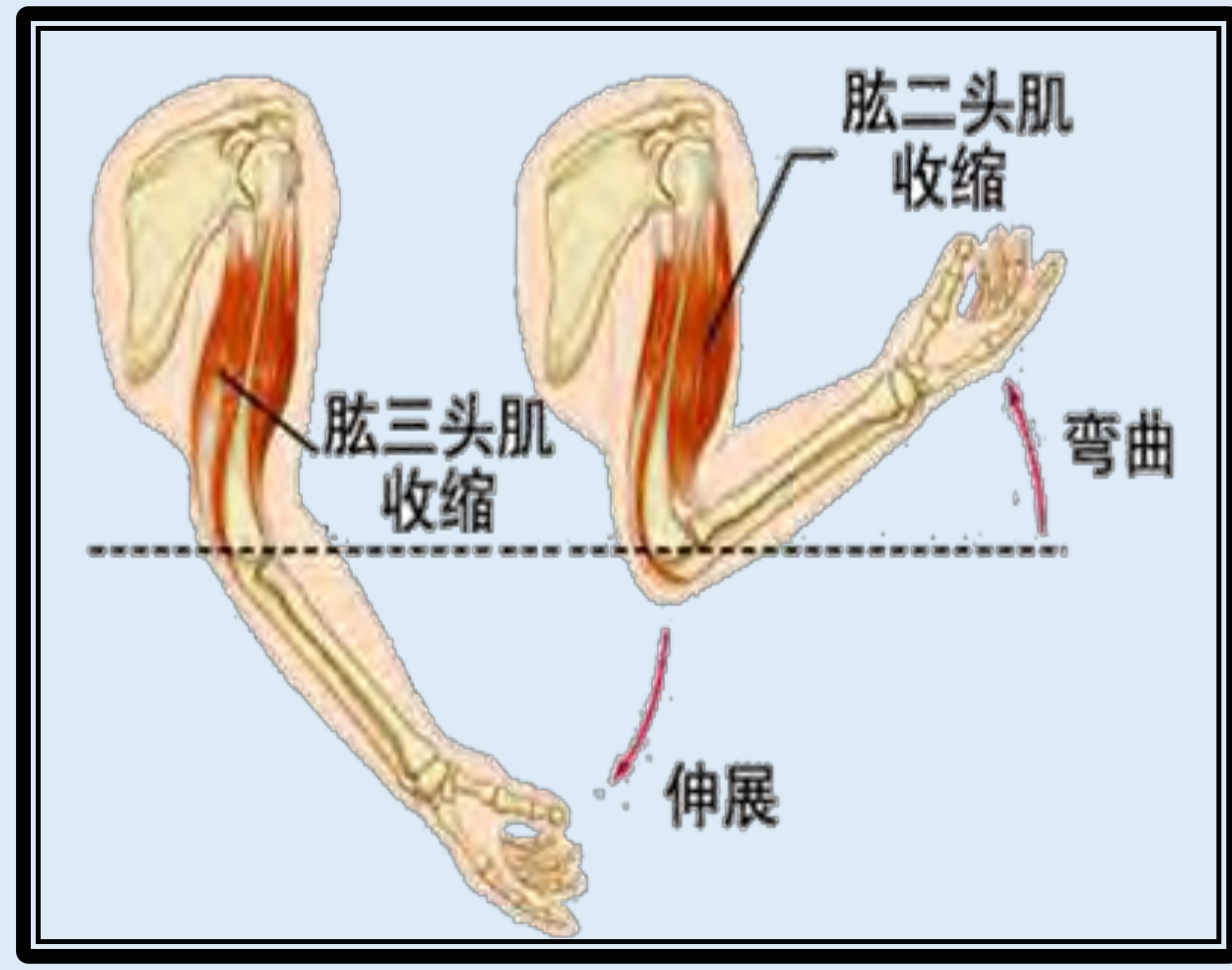
肱三頭肌



圖為三頭肌的连接圖 (節錄自 eOrthopodTV)

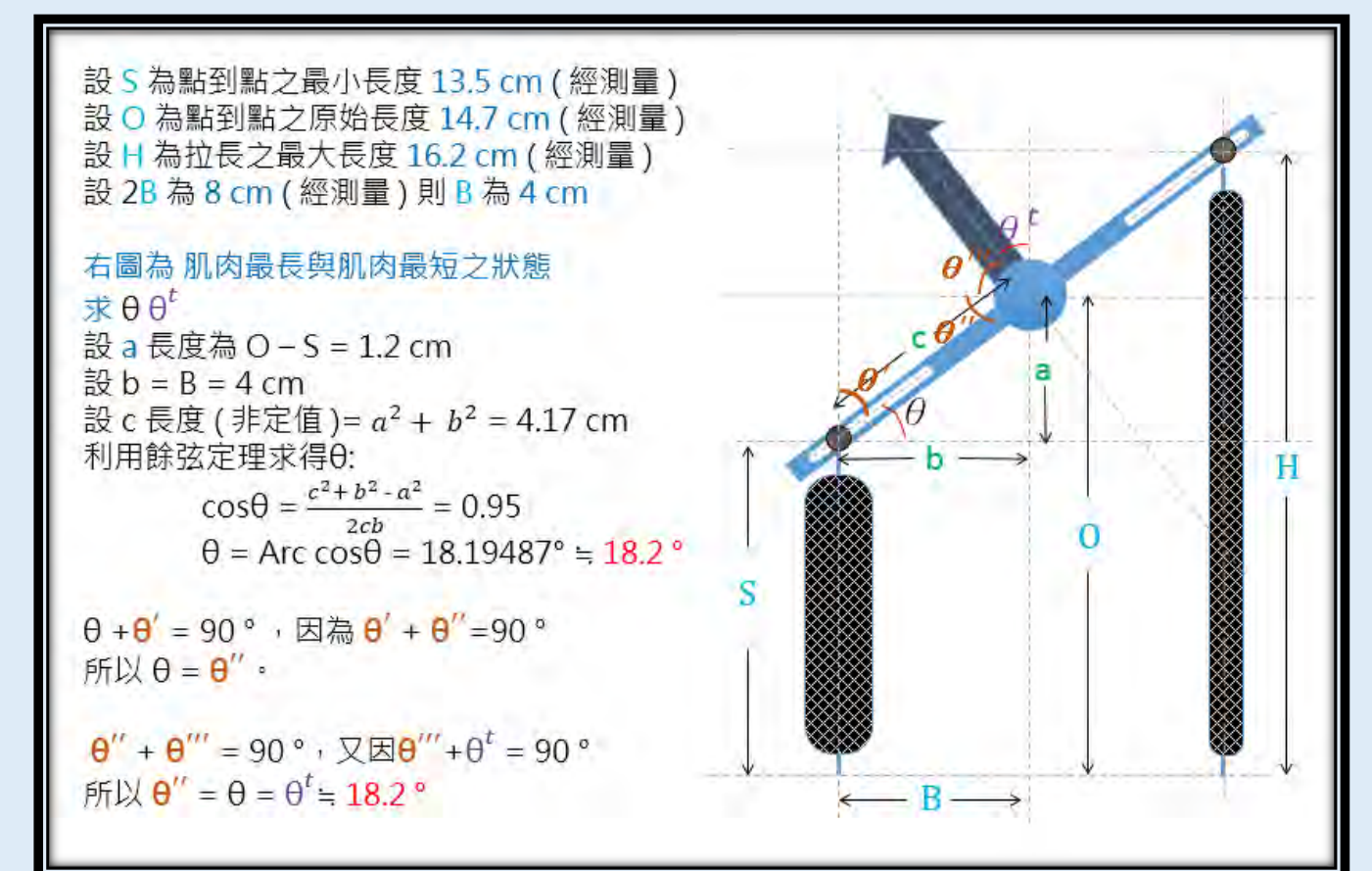
# 研究結果

## 實驗一：肱二頭肌與肱三頭肌模擬拮抗作用實驗



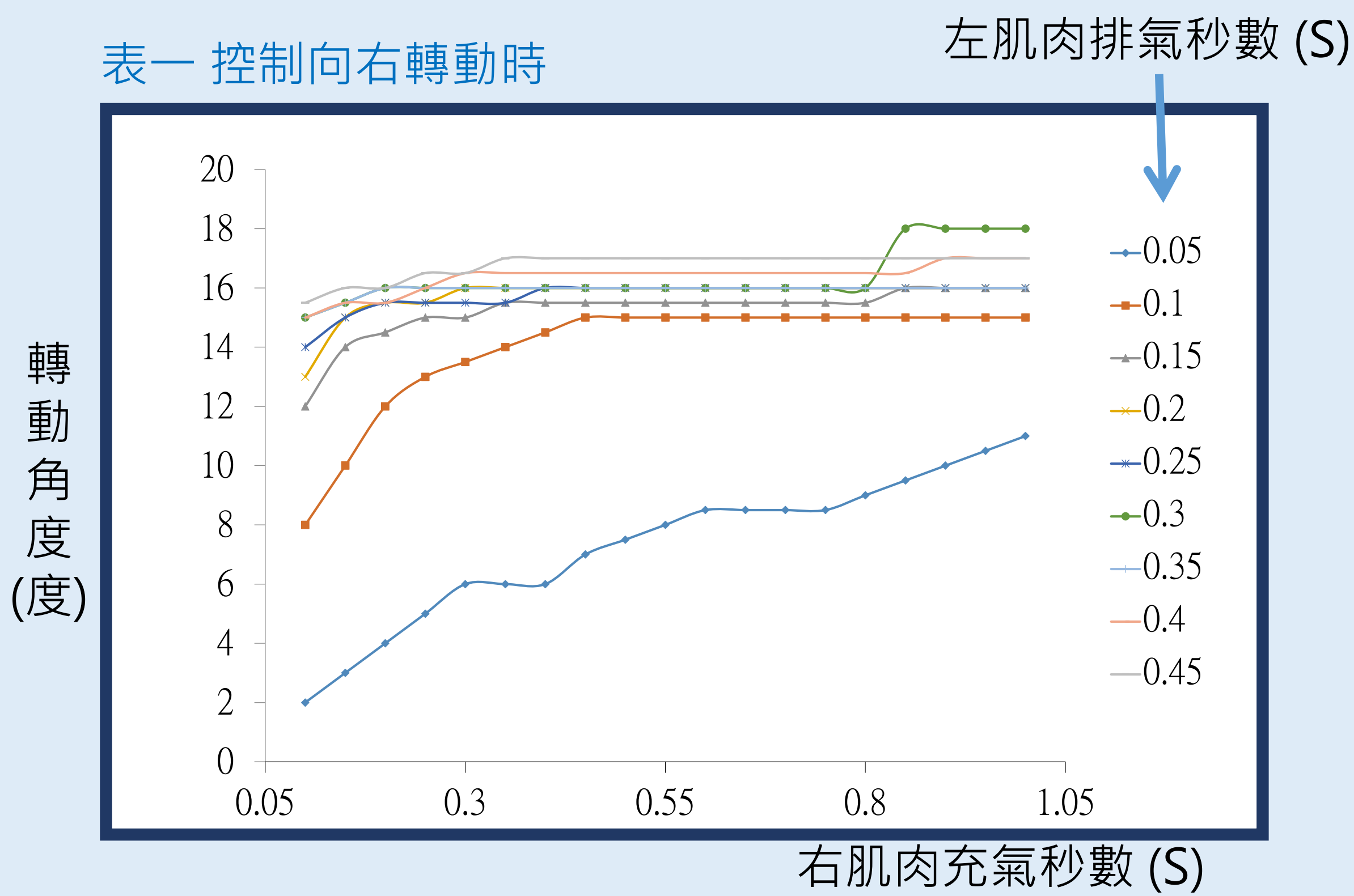
M	B	A	狀態
NC	0	0	堵
1	0	1	充
NC	1	0	堵
NC	1	1	排

NC: Don't Care

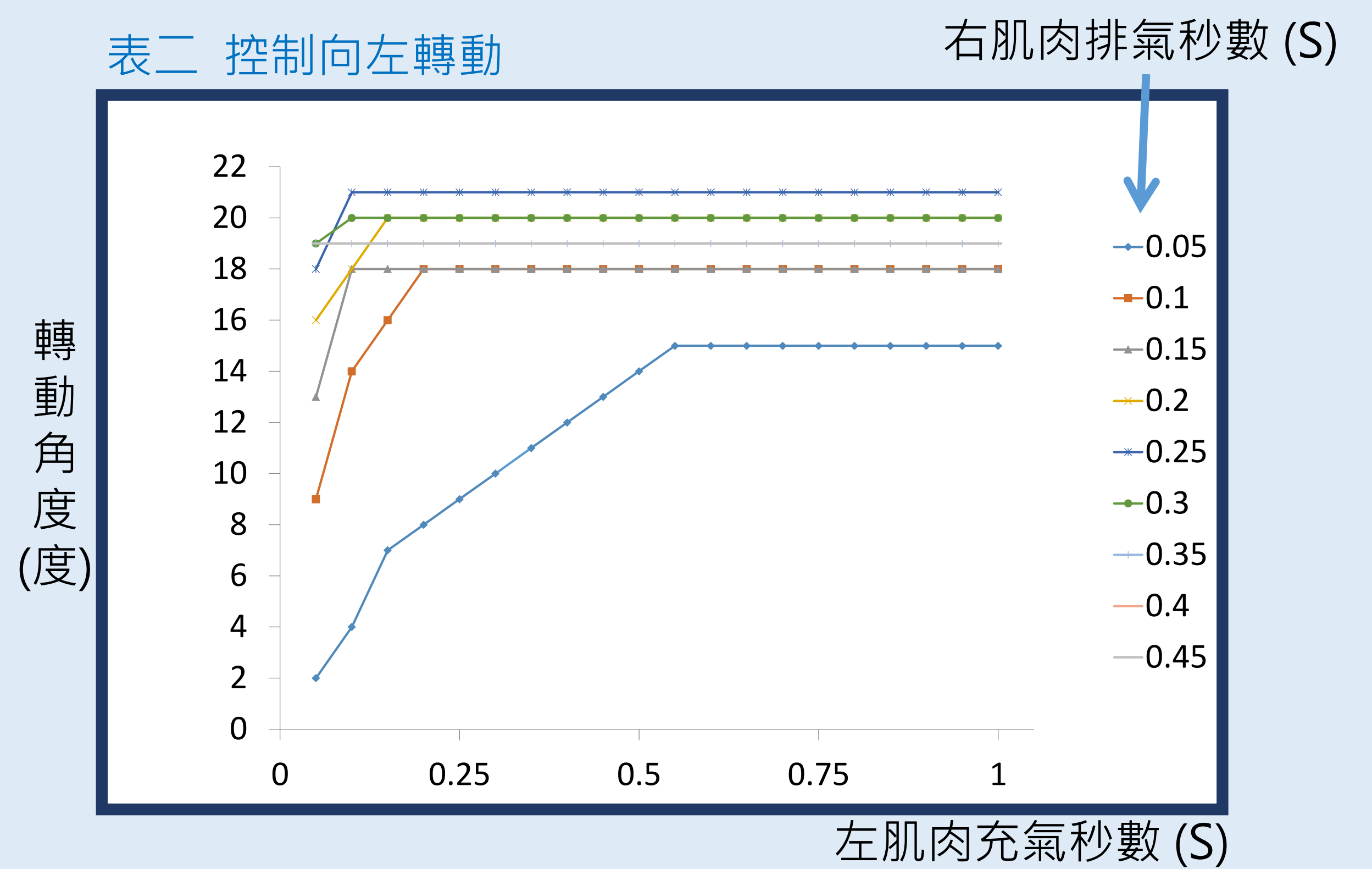


## 實驗結果

表一 控制向右轉動時



表二 控制向左轉動

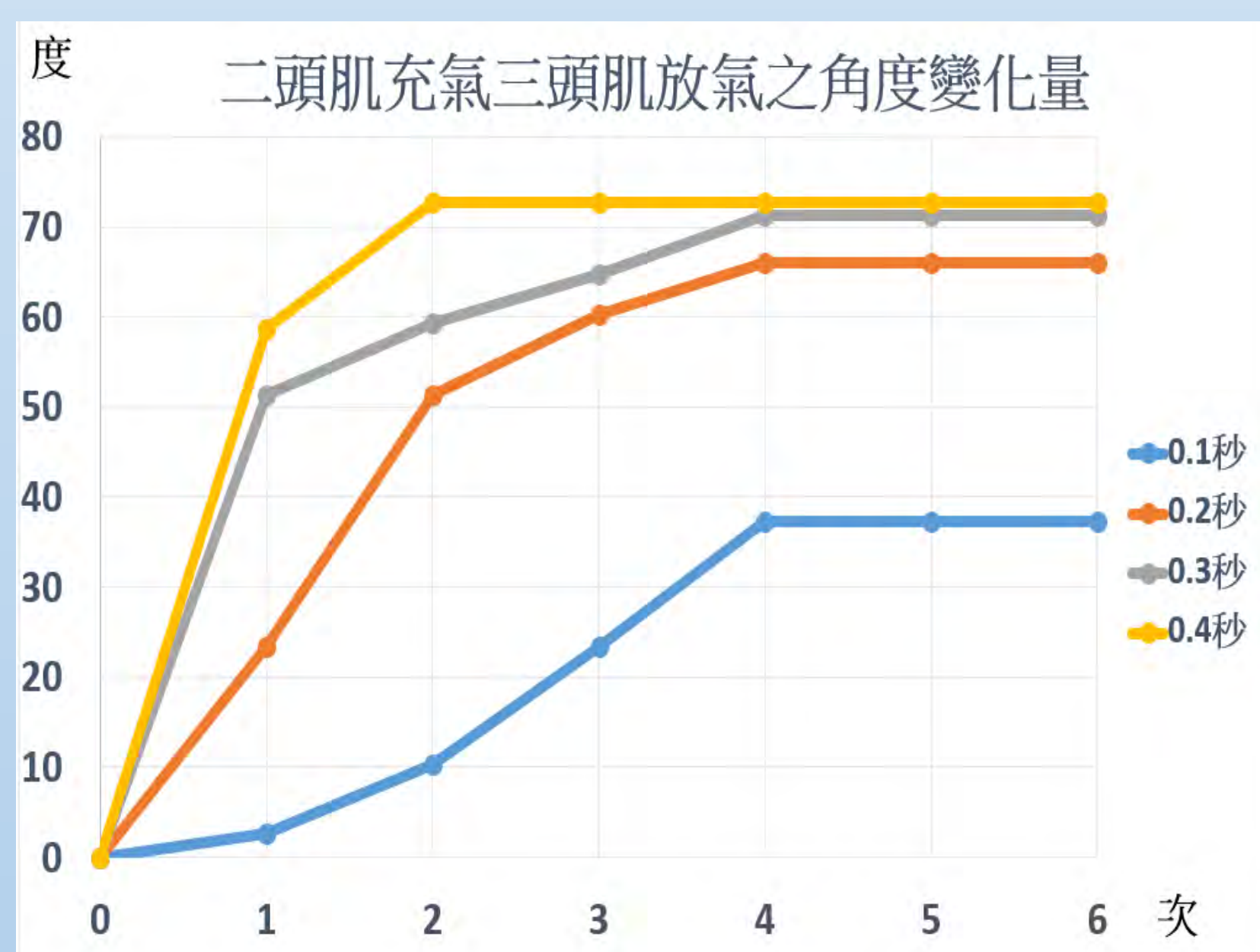
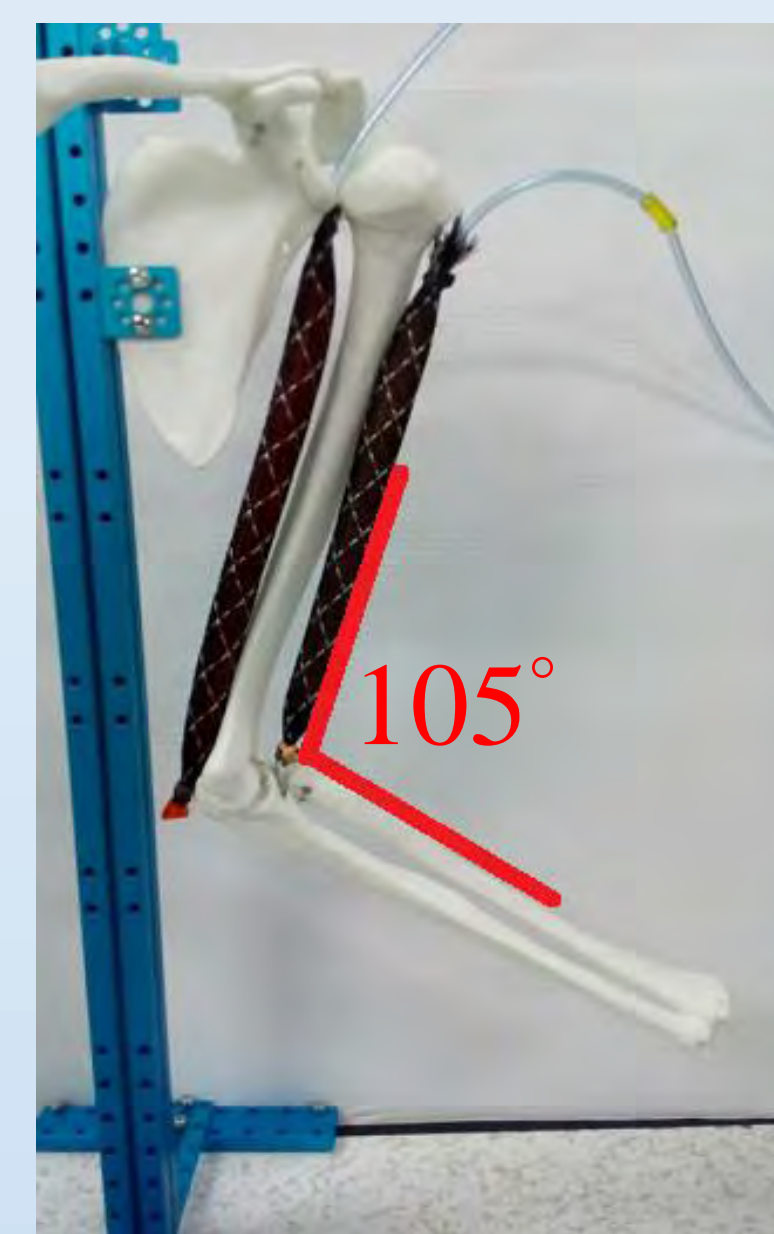


1. 兩肌肉充放搭配大約有  $1^\circ$  的解析度。
2. 排氣時間越小，搭配充氣肌肉的充氣，可解析到更細的刻度。
3. 排氣時間越久，搭配充氣肌肉的充氣，可更快趨近於飽和。
4. 雖然製作的規格及方法一致，但左右的肌肉規格很難相同。
5. 若要調節出更大的角度，兩端施力點要往中心靠近。

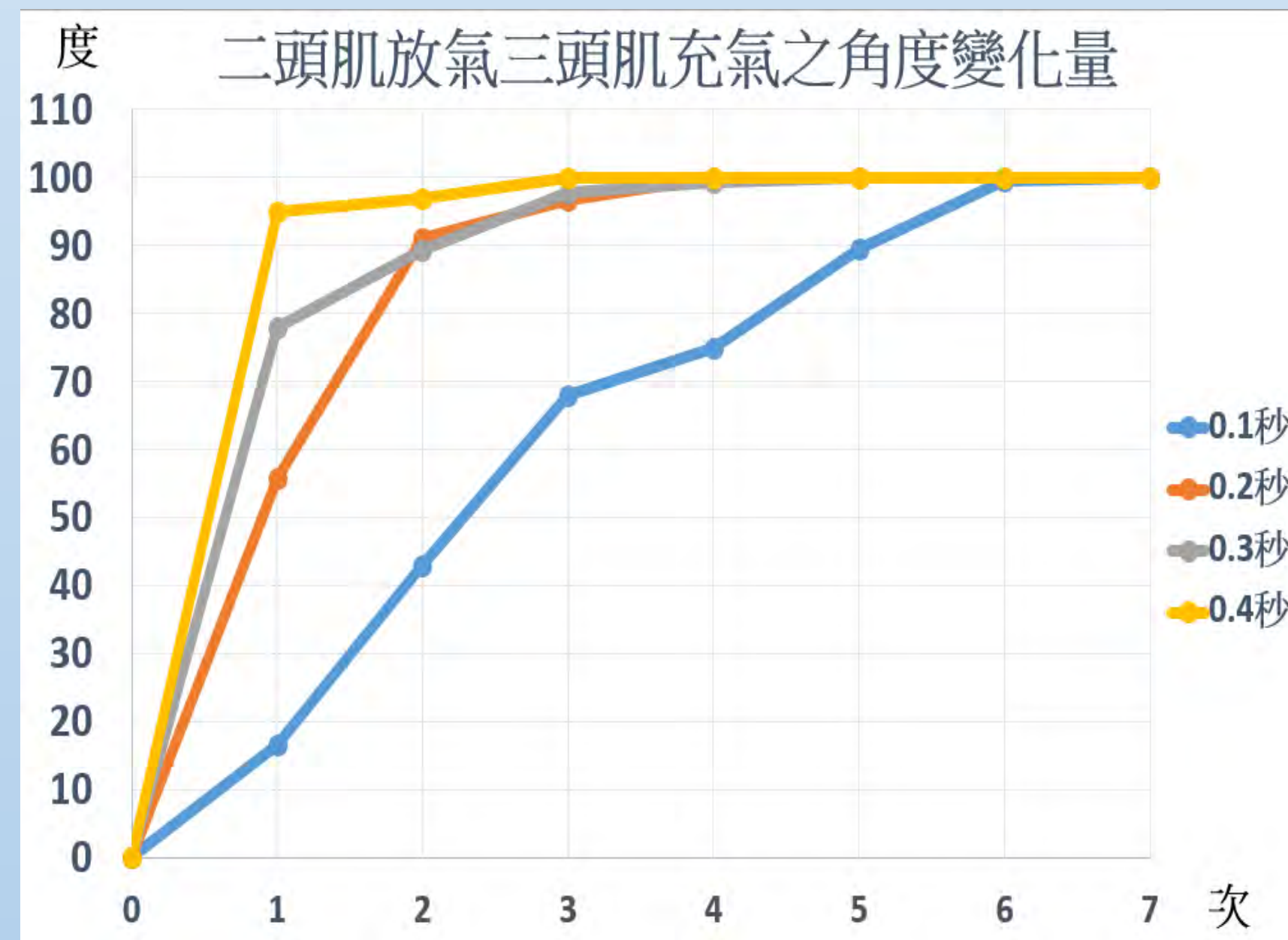
## 實驗二：骨頭模型手臂的角度變化量與時間關係實驗

### 實驗說明

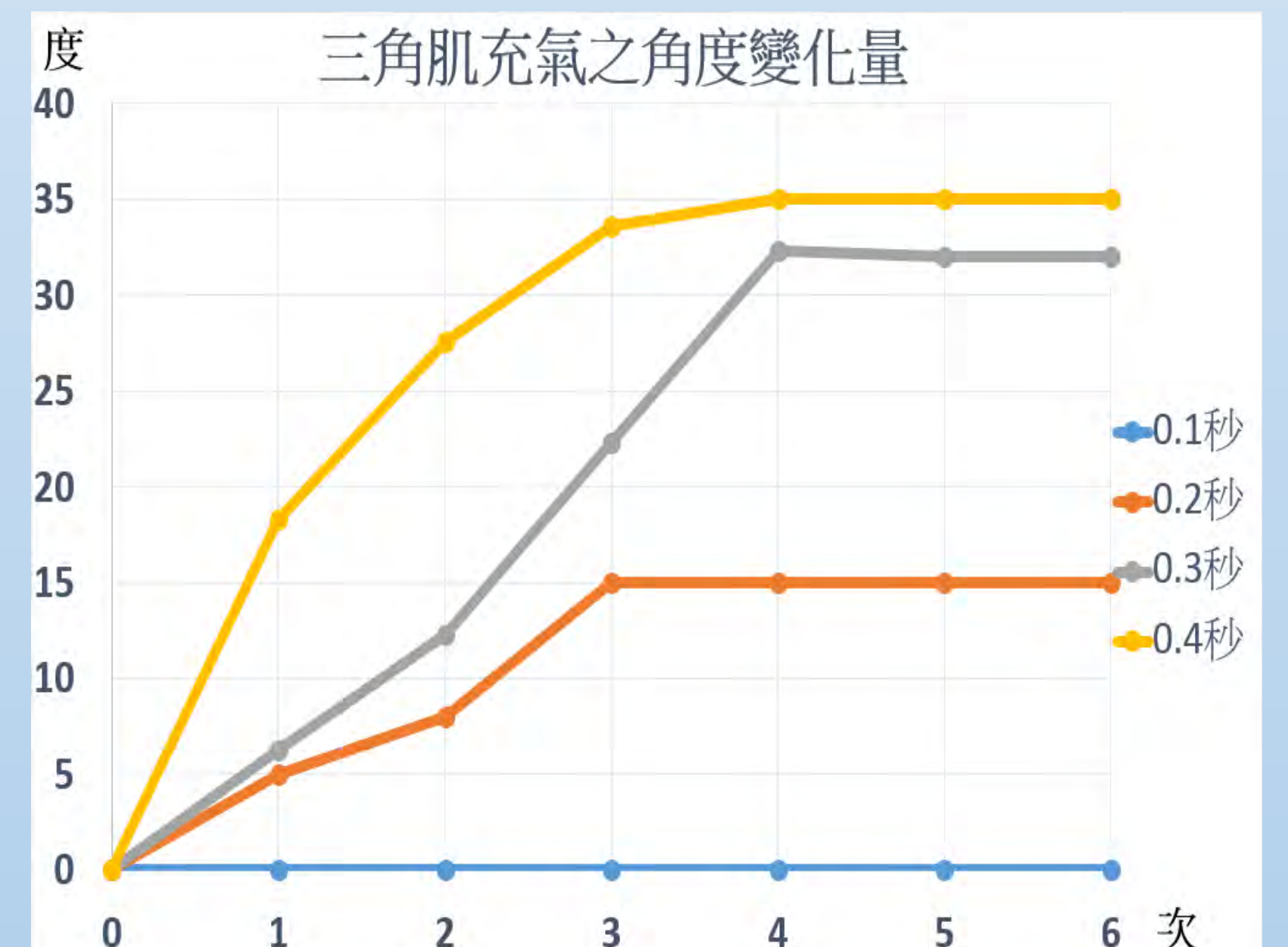
綜合以上實驗，已掌握氣動肌肉缸相關特點，故決定利用3D列印印製出輕便、容易操控的骨頭模型，再接上氣動肌肉缸，藉由模型更確切的模擬出肱二頭肌與肱三頭肌，藉由肌肉進氣量的控制，改變骨頭模型手臂的角度變化量，再藉由角度變化量，控制手臂的彎曲角度與抬舉。



圖一 (初始角度  $145^\circ$ )



圖二 (初始角度  $72^\circ$ )



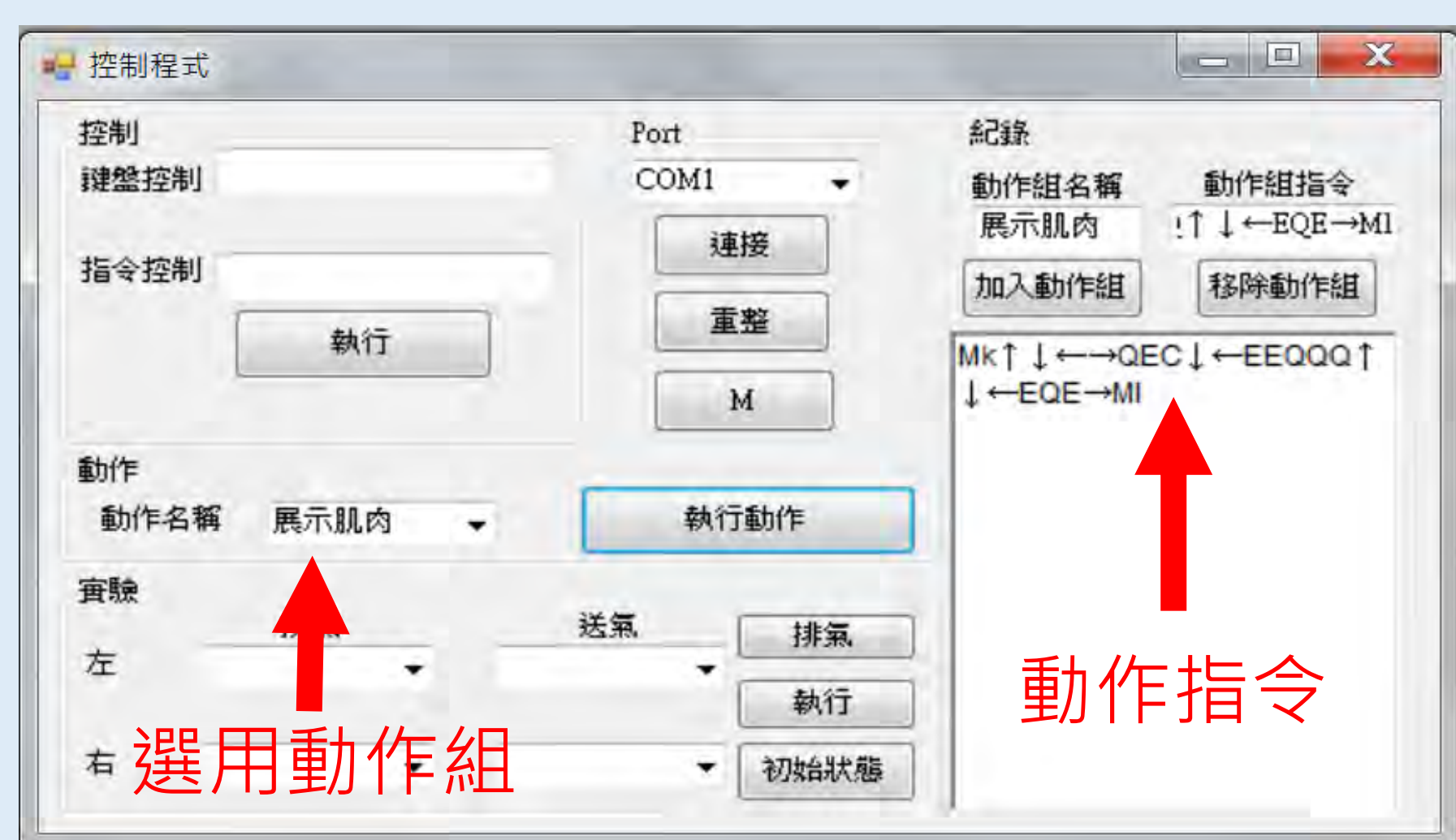
圖三 (初始角度  $65^\circ$ )

## 實驗結論

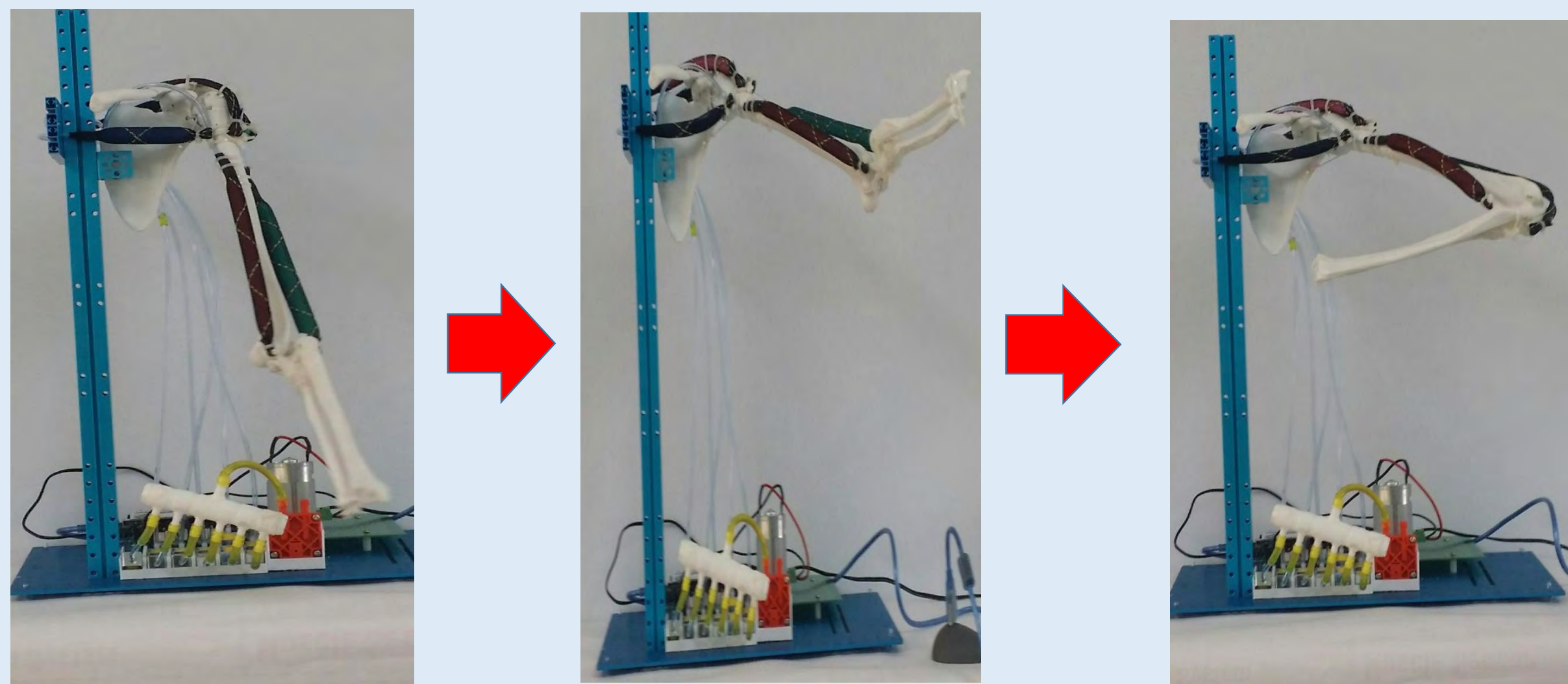
1. 如圖一及圖三，於充氣間隔時間太小時，內部壓力無法突破氣球本身的彈力系數，導致充氣情況不顯著，且無法達到一般飽和的情形，宜使用較大間距充氣做改善。
2. 如圖二，由於三角肌的飽和角度在於氣球肌肉充起來前即可達到，因此充氣至飽和情形較為顯著。

## 實驗三：利用記錄動作組以順暢執行動作

**說明** 當得知手臂的控制角度範圍後，可藉由各隻肌肉不同的間隔充放氣及配合，使手臂達到指定的位置以及做出不同的動作。在完成一個有探討價值的動作時，若要再次達到一次完整動作，需要重新經過多次的嘗試，將其結果記錄下來為一個適當的解決辦法。



運用控制程式指定動作組



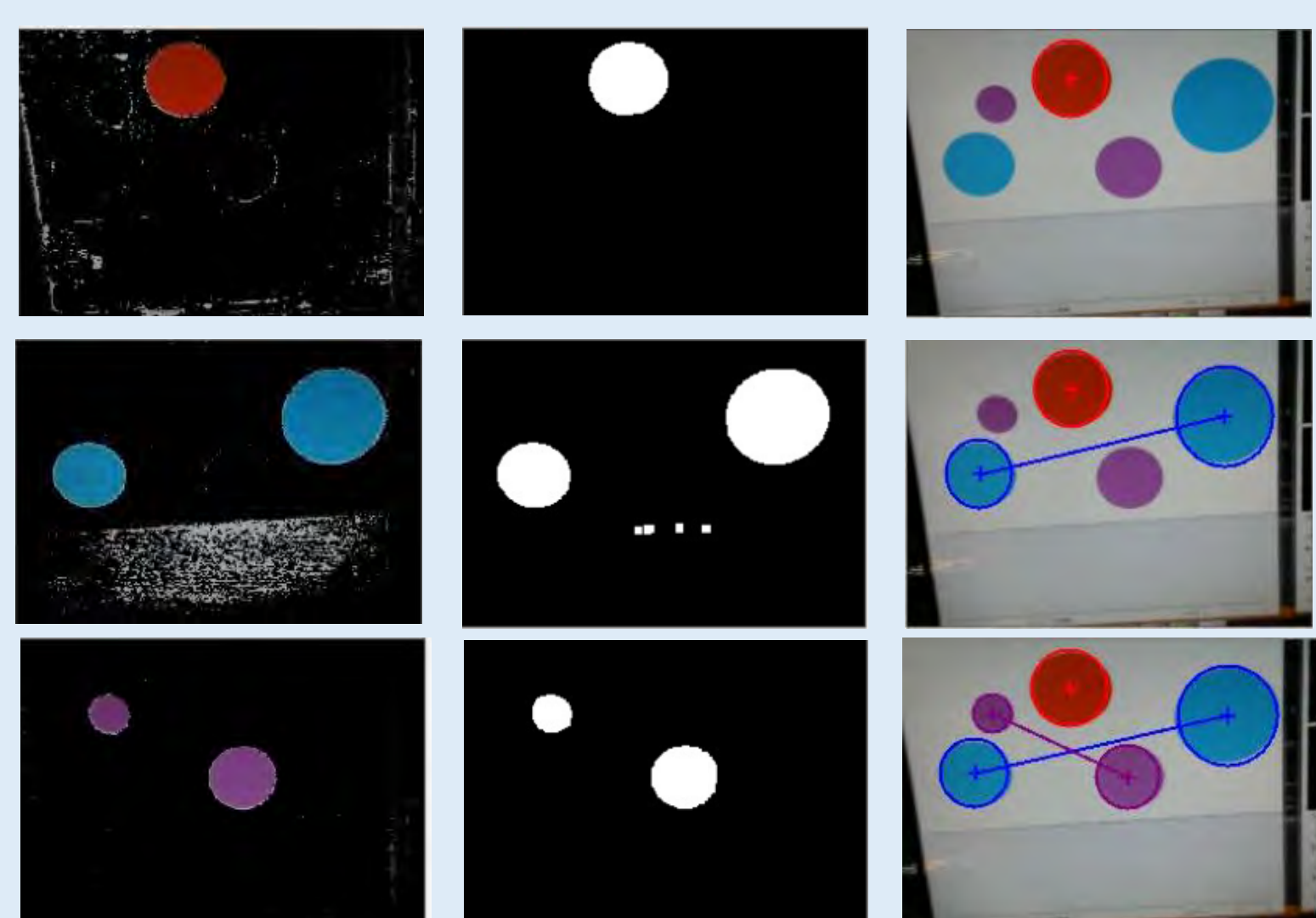
連續動作展示

## 結果

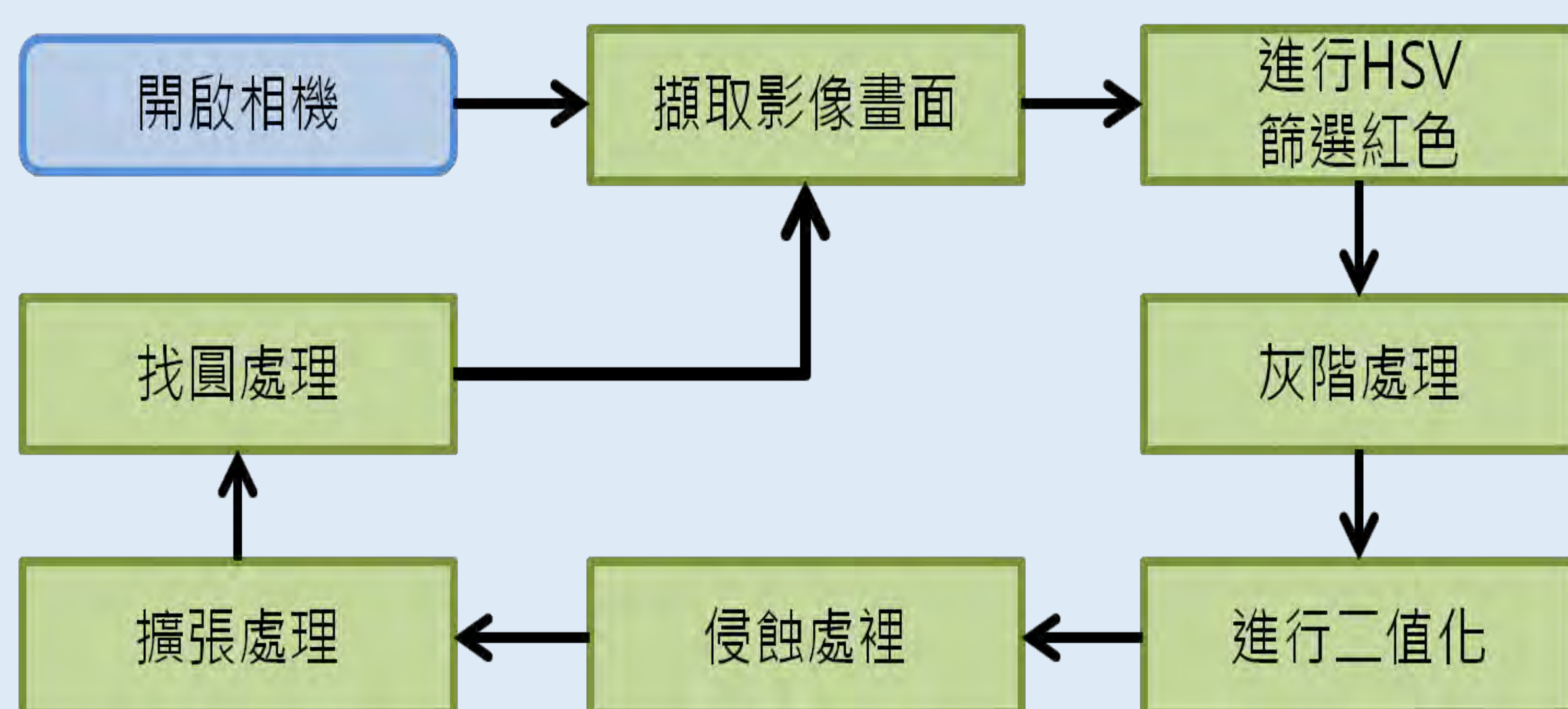
1. 在記錄行為後進行測試，可利用紀錄檔確實完成動作組。
2. 此紀錄檔可作為未來機械學習時所使用的參考學習資料。

## 實驗四：藉由影像辨識判別手臂與目標物位置

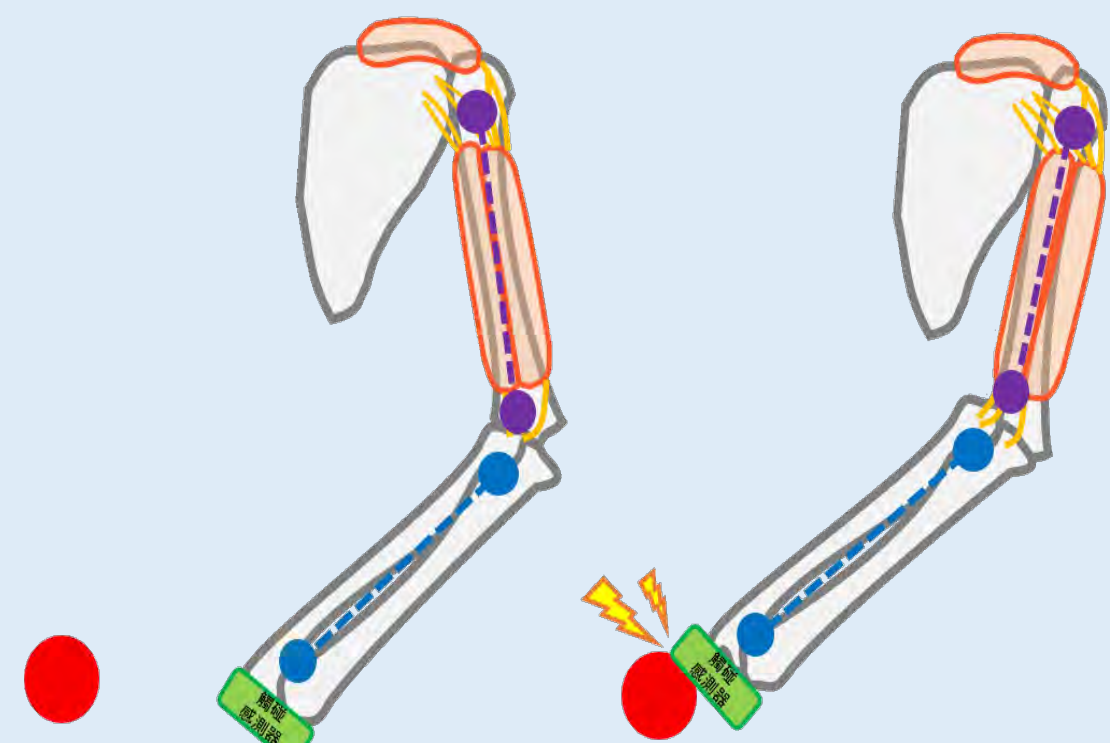
**說明** 由於以肉眼觀察手臂不同動作時，無法明確的分辨出位置間的差異性。為了得知手臂能否達到某個定點或位置，本作品加入影像辨識，藉由辨識後回傳目標物及手臂的位置，並於影像上繪製方格，使手臂可尋找目標物後可移動至對應方格，完成判別動作。



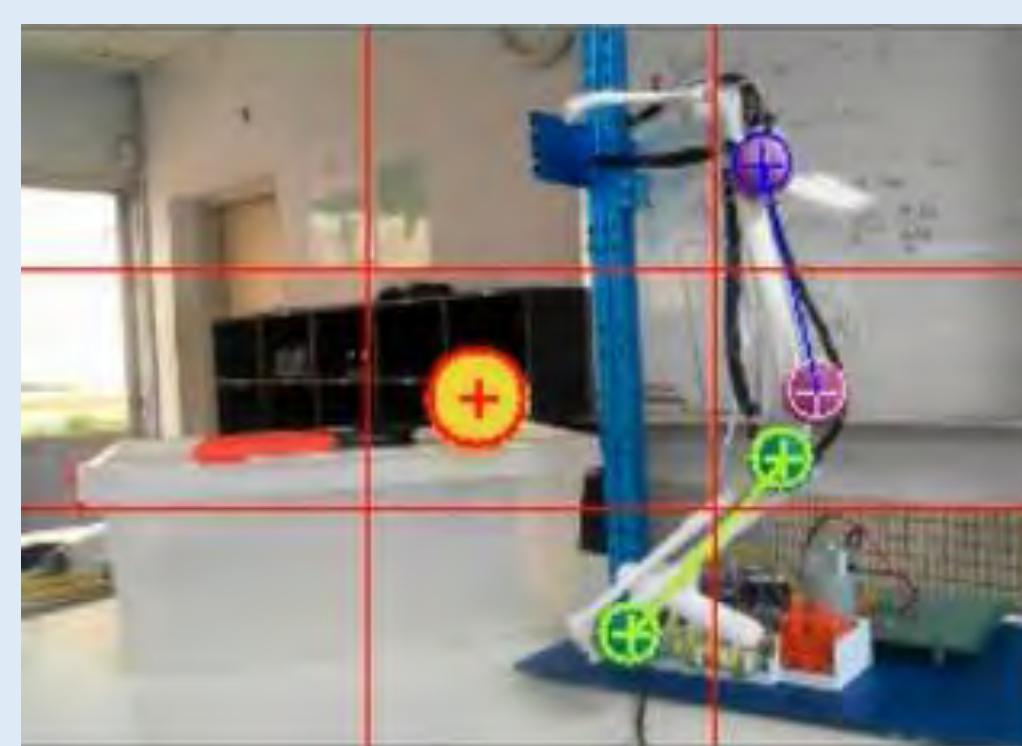
影像辨識結果圖



影像辨識流程圖

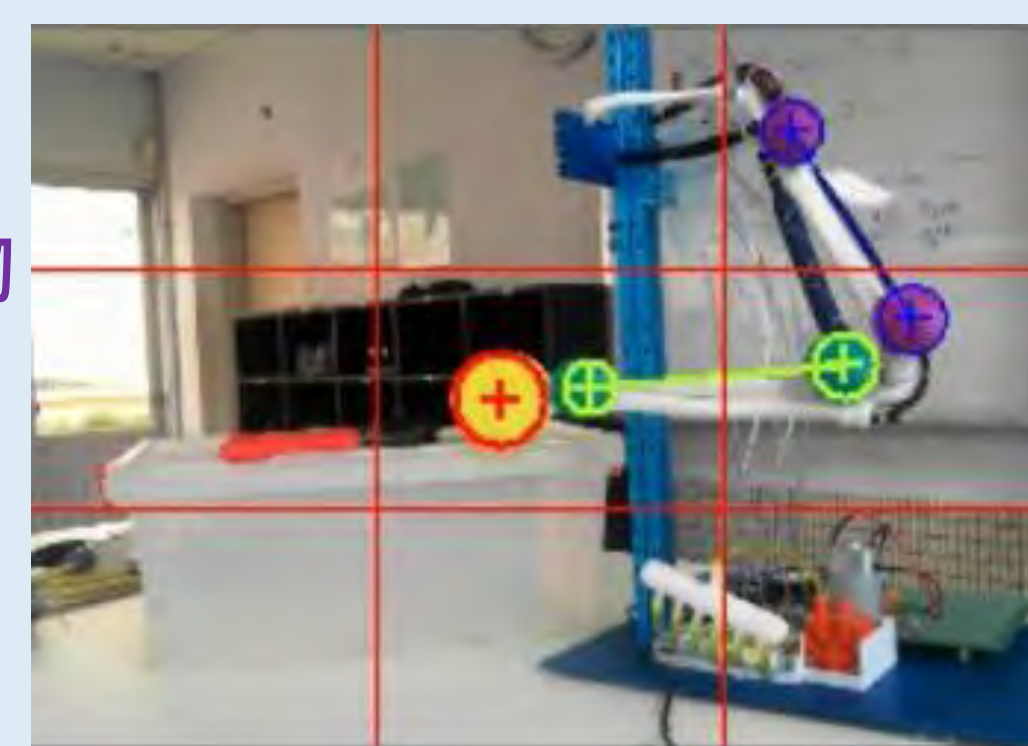


尋找目標物示意圖



手臂起始狀態

移動至目標物



手臂碰觸到目標

## 結果：

1. 在經由影像辨識的判斷過後，可確切利用畫圓找出手臂的位置以及物體的位置。
2. 經過動作組與影像辨識的相互配合，可將手臂移動到目標物位置。

## 結論

1. 藉由採用單組幫浦模擬心臟系統與二、三通電磁閥控制肱二頭肌與肱三頭肌的進氣或排氣量，以改變收縮程度，可模擬**真實的人體上臂肌肉運動**，手臂收縮角度可從**60°-173°**。
2. 由於所使用的材質上與人體組織精細程度有落差，肌腱、韌帶的位置及肌肉的大小，部分位置有權宜變動，以符合順利運作的目標。
3. 使用氣球做為材質可耐壓力不大，加上氣球與氣管及關節與關節接合的方式均有耐壓及耐重的限制，安全起見負重物能力必須限制在250g以內，研究使用不同材質及改善接合的方式，來增加耐壓可提升負重的能力。
4. 透過仿照人體肌肉組織，建構肌肉系統對於了解人體架構有很大的助益。
5. 運用**幫浦**動力配合**電磁閥**形成的動力控制系統，以**充氣、放氣及堵氣**控制多組氣動肌肉缸，模擬多種手部動作。
6. 目前發展肱二頭肌、三頭肌及三角肌3個自由度，可透過記錄動作形成動作組讓手臂反覆運行指定的動作。
7. 藉由影像辨識及動作組的配合，可使手臂自動**移到目標物**。
8. 本研究建構的上臂模型採用實際的骨頭3D模型，確實**可以運作出人類部分的肢體動作**。

## 未來展望

1. 目前手臂可達到動作僅限於上臂，未來期望可以逐步擴展到各個肢體，製作出全身的人形機器人。
2. 應用方面可記錄運動員的動作形成動作組讓仿生機器人模仿，以觀察運動員肌肉狀況，以調整到最佳的狀態。
3. 本研究影像辨識及動作組設計可以成為機械學習的主要基礎。
4. 未來製作局部或全身的人形機器人，控制系統勢必十分繁瑣，讓系統透過機械學習模仿人類學習的行為，產生各種動作的微指令，建構一個具學習能力的仿生系統。