

中華民國第 屆 中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：

組 別：

作品名稱：The climbing strandbeest

關 鍵 詞：仿生學、連桿系統、負載 (最多 3 個)

編 號：

製作說明：

- 1.說明書封面僅寫科別、組別、作品名稱及關鍵詞。
- 2.編號由國立臺灣科學教育館統一編列。
- 3.封面編排由參展作者自行設計。



作品名稱:The climbing Strandeest

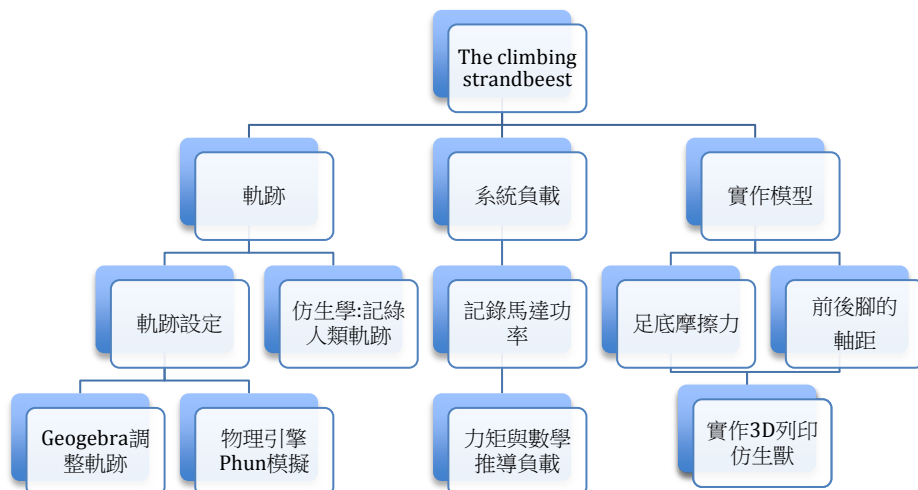
摘要:

我們的目的是於完成一架攀爬樓梯的「仿生獸」Strandbeest^註。研究則專注在連桿系統之中，尤其是發現了腳尖的軌跡與系統所承載的阻力，分別肇因於連桿長度的比例與重心位置相對於曲柄的力矩有關，又分別影響著仿生獸是否能克服地形與產生足夠強大的前進力量。最後，我們再探討了足底的摩擦力和四足間軸距的學理，並使用 3D 列印調整連桿長度設計的便利性，完成一架可以克服地形的「仿生獸」。(註：所謂「仿生獸」，是由一位荷蘭科學家泰奧·楊森所發明的機械體，利用風力與力學原理制動，可以躲避障礙物或模仿生物的一些行為。)

壹、研究動機

我們曾赴高雄科工館參觀一項名為「奇幻仿生獸」的展覽。其中看見了數隻高逾數層樓的仿生獸，並被他行走時強大的機動能力與高度富有近似生物性質的設計給震懾了。事後，我們又在書本上、網路裏參閱到幾篇仿生獸的研究或報導，才發現原來世界各地也有許多人效法著楊森所公開的「13 連桿機構黃金比例」作出各式各樣的手做機器人與研究。後來，我們漸漸發現到，各國政府單位、民間廠商所開發的人形機器人，竟罕有能攀爬樓梯、克服崎嶇地形的功能。因而我們遂興起了結合 13 連桿機構與跨障仿生獸的念頭，使結構設計更簡潔實用。這想法讓平時也愛好機器人的我們為之瘋狂，便以此為題，組隊並再延續探索仿生獸的軌跡、效率、摩擦力與軸距。

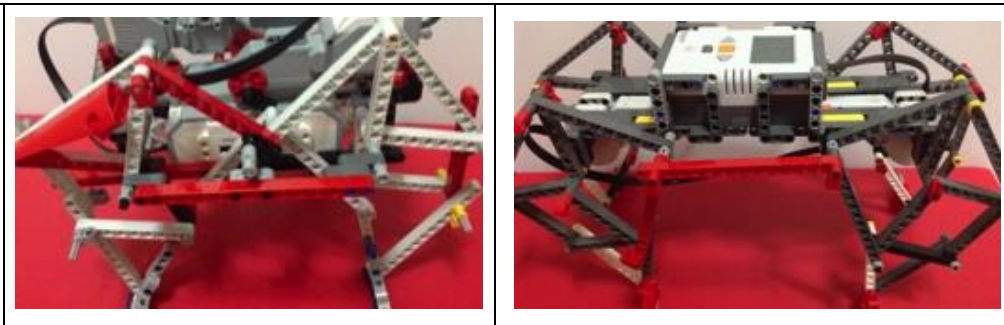
貳、研究目的



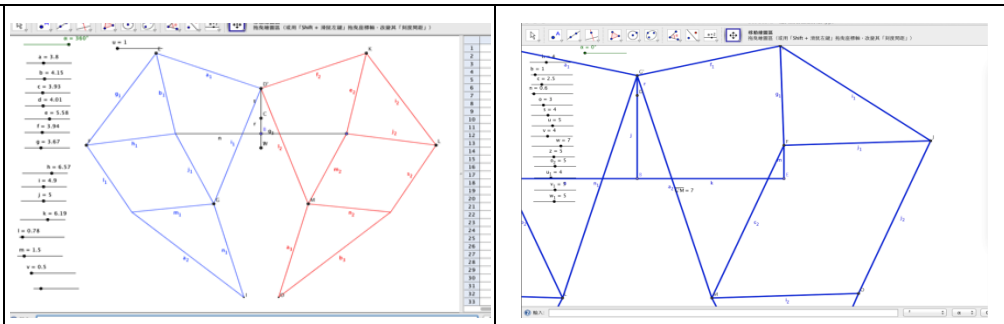
- 一、軌跡的應用：實踐能使仿生獸跨上樓梯的腳步軌跡
- 二、系統負載的應用：計算與模擬並揀選出馬達出力最低的連桿設計
- 三、影響實作模型的因素：摩擦力、軸距

參、研究設備及器材

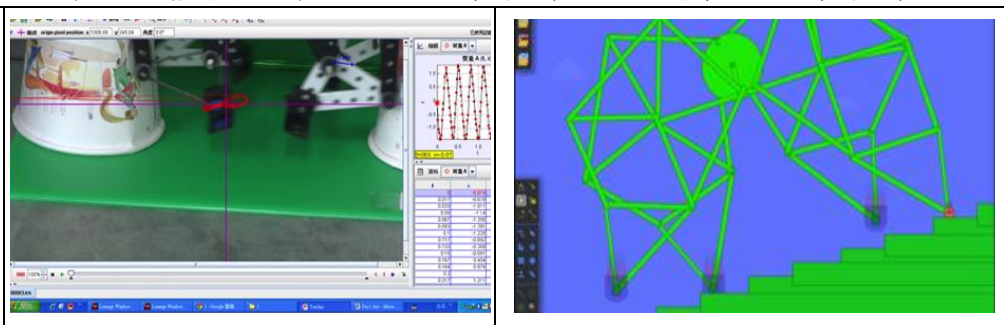
一、實體：EV3 仿生獸、NXT2.0 仿生獸（可調軸距版）

<p>圖片</p>	
<p>說明</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.藉由程式 LEGO MINDSTORMS Education EV3 讀取馬達的輸出功率 2.利用積木的精密接合可減少關節間的晃動與材質摩擦產生的誤差 3.易於調整各連桿的長度，並設計出最佳連桿比例的仿生

二、軟體：數學幾何軟體 Geogebra

<p>圖片</p>	
<p>說明</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.模擬 2D 連桿系統，利用數值滑桿來控制連桿長度 2.記錄系統留下的軌跡，並以試算表功能運算點坐標 3.使用作圖方法套入物理運算，並記錄得出的負載

三、四、軟體：影片軌跡軟體 tracker（圖左）、物理引擎 Phun（圖右）

<p>圖片</p>	
<p>圖左</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.以攝影機拍攝物體運動的狀態，取出所需的軌跡 2.畫面上開啓坐標軸後，能記錄軌跡點坐標並運算 3.除座標與點，更能運算速度、動量、加速度等物理值
<p>圖右</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.2D 的執行環境，並具備空氣阻力、地心引力、彈力等物理現象 2.使用各種機械原件如軸承、馬達等組建仿生獸模型 3.程式可顯示運動中的物理量，如 x 軸速度、力強度等

肆、研究過程或方法

實驗一：用影片軌跡軟體 tracker 記錄人類步行的狀態

【實驗 1-1】記錄人類行走於平地的軌跡

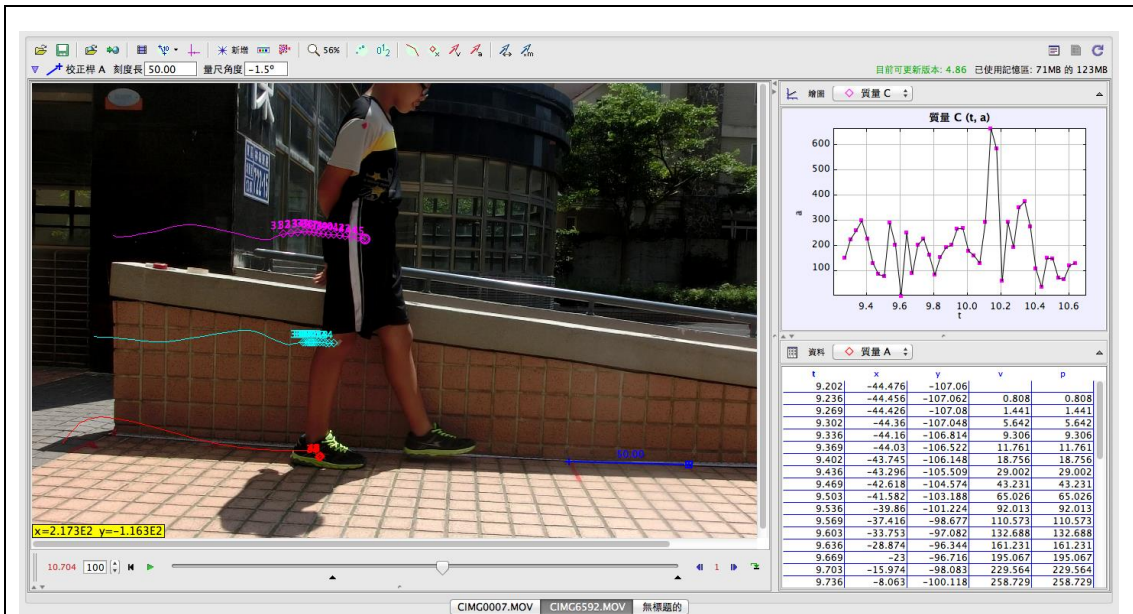
(一) 實驗說明：為了使仿生獸也能走出相仿於人類的足底軌跡，我們運用了影片軌跡軟體 tracker，在一人的足尖、髌骨各黏貼了一個亮點，於軟體中取出了兩道軌跡線，最後在以設定髌骨的軌跡線為坐標軸原點，重新計算足底形成的軌跡，便得到了連桿系統所需，機體靜止而掉在空中的足尖軌跡了。

(二) 操作變因：攝影機與該行走的人之間的位置、距離，與實驗的方法

(三) 控制變因：實驗 1-2, 3, 4 的結果（上下于斜坡、樓梯）

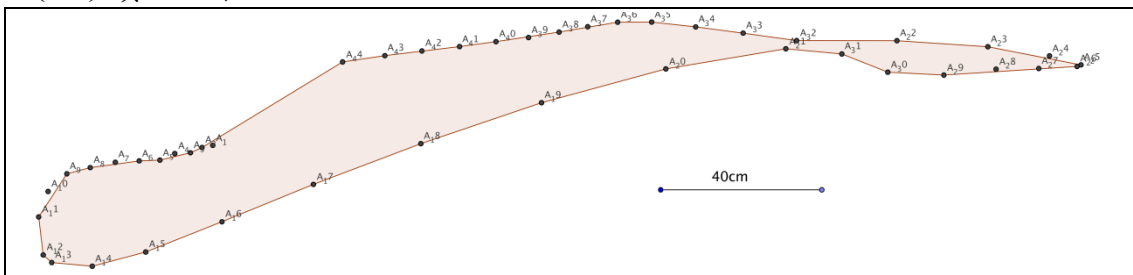
(四) 應變變因：產出的軌跡圖形

(五) 方法與圖示：



▲影片于 tracker 中分析的情況

(六) 實驗結果：



▲人類平地軌跡=腳尖軌跡-髌骨軌跡（全軌跡長=40cm）

(七) 結論：

此次研究得出：人類腳尖的運行軌跡，其實是一個封閉的不規則圖形（見上圖）

【實驗 1-2】記錄人類下斜坡時的軌跡

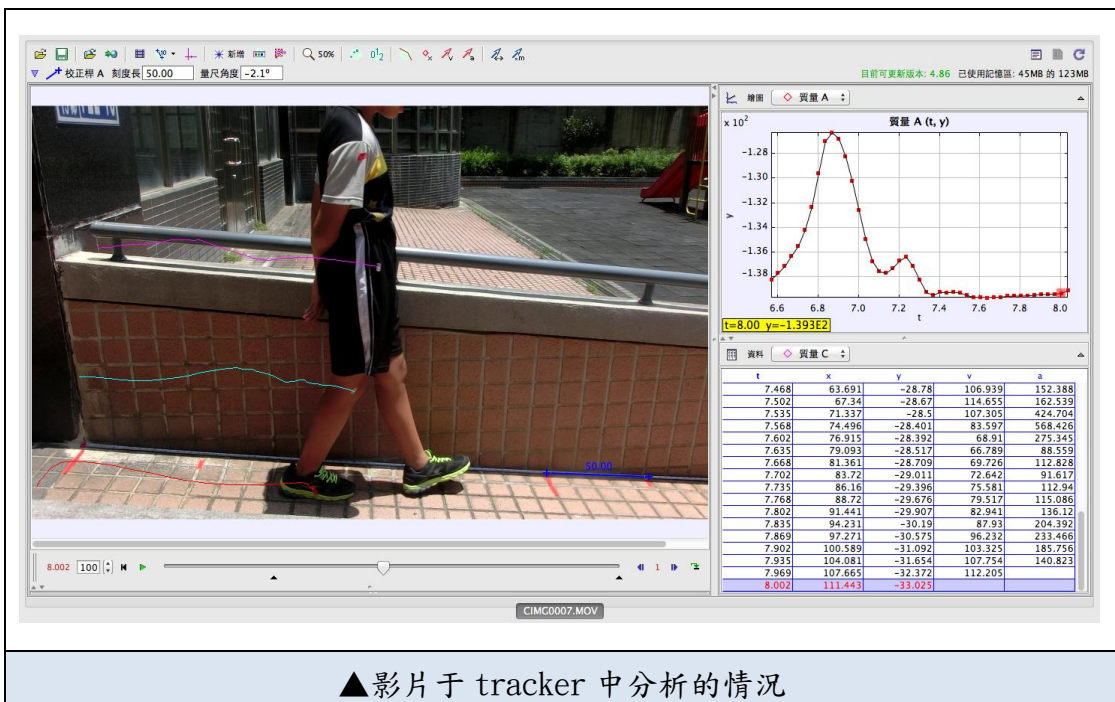
(一) 實驗說明：為了使仿生獸也能走出相仿於人類的足底軌跡，我們運用了影片軌跡軟體 tracker，在一人的足尖、髌骨各黏貼了一個亮點，於軟體中取出了兩道軌跡線，最後在以設定髌骨的軌跡線為坐標軸原點，重新計算足底形成的軌跡，便得到了連桿系統所需，機體靜止而掉在空中的足尖軌跡了。(同實驗 1-1)

(二) 操作變因：攝影機與該行走的人之間的位置、距離，與實驗的方法

(三) 控制變因：實驗 1-1, 3, 4 的結果（上下于斜坡、樓梯）

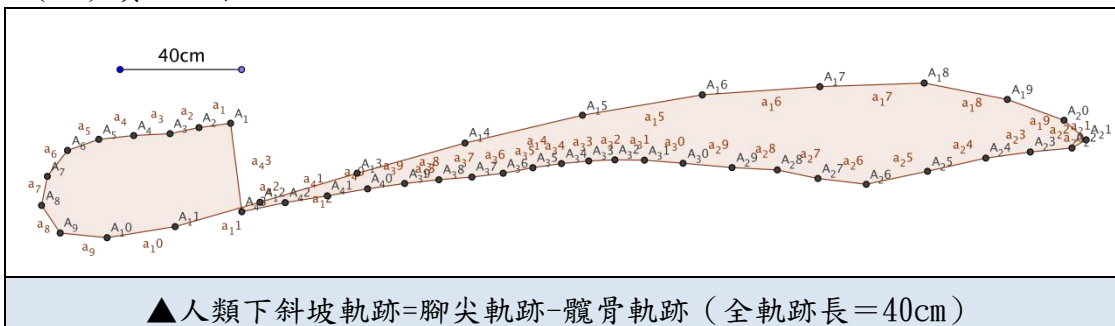
(四) 應變變因：產出的軌跡圖形

(五) 方法與圖示：



▲影片于 tracker 中分析的情況

(六) 實驗結果：



(七) 結論：在下斜坡的軌跡裡，並未和平地行走的軌跡有相異之處，我們推測是斜坡不夠陡，以至於沒有明顯的變化產生。因此，在這張圖裡，我們尚不能斷定“地形與軌跡之關聯性”。

【實驗 1-3】記錄人類下樓梯時的軌跡

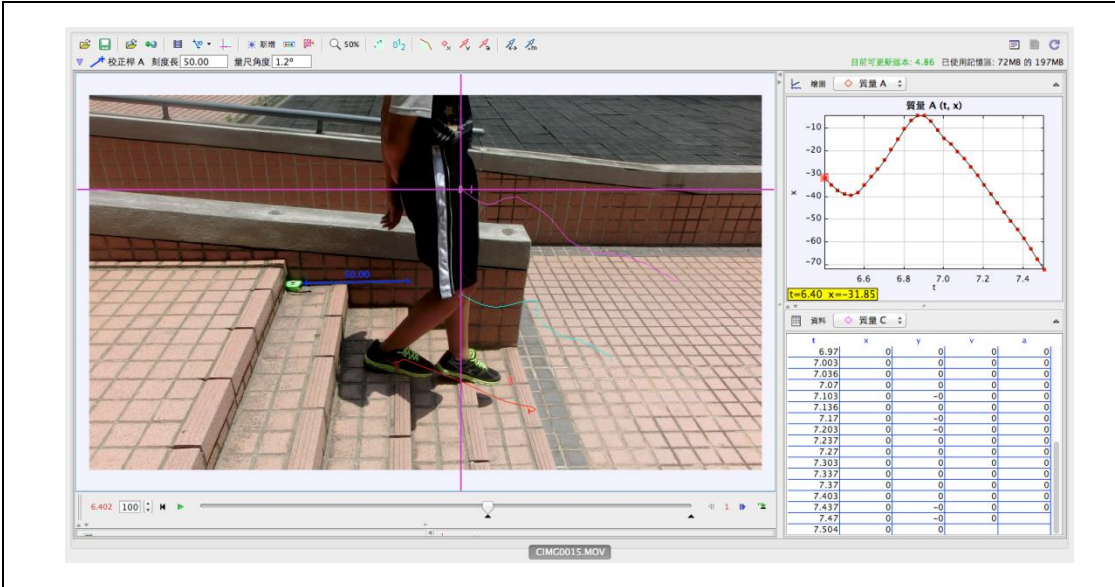
(一) 實驗說明：(同實驗 1-1)

(二) 操作變因：攝影機與該行走的人之間的位置、距離，與實驗的方法

(三) 控制變因：實驗 1-1, 2, 4 的結果(上下于斜坡、樓梯)

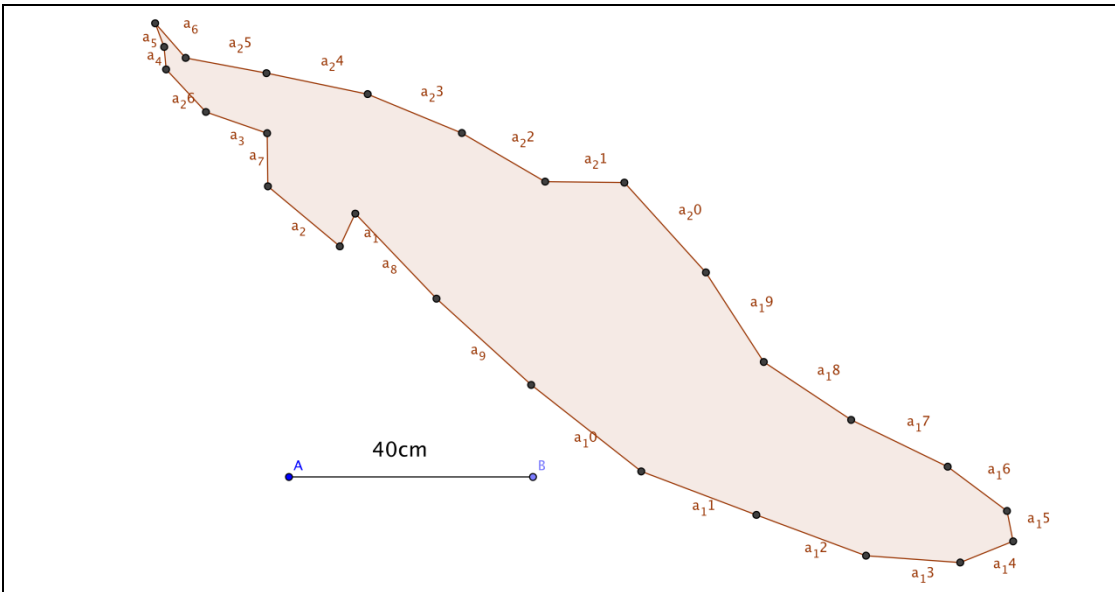
(四) 應變變因：產出的軌跡圖形

(五) 方法與圖示：



▲影片于 tracker 中分析的情況

(六) 實驗結果：



▲人類下樓梯軌跡(全軌跡長=40cm)

(七) 結論：從這張軌跡中，我們發現了兩個現象：

1. 地形起伏的角度，將與正常軌跡完整旋轉的角度相同
2. 軌跡形狀的改變無關乎地形因素如斜坡, 樓梯等，只有傾斜不同角度而已。

【實驗 1-4】記錄人類上樓梯時的軌跡

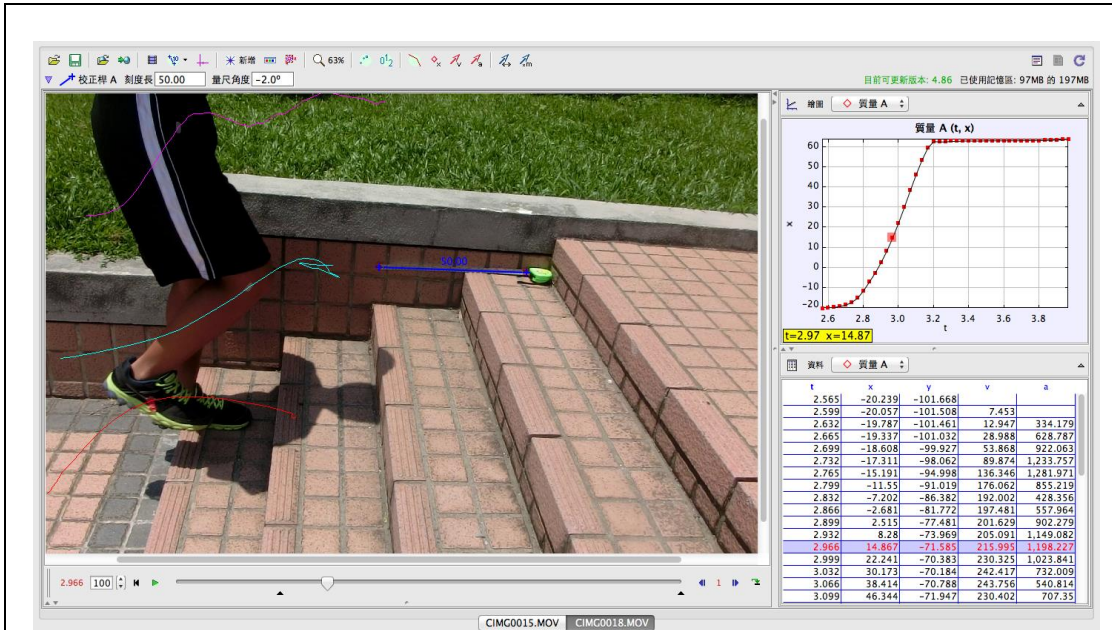
(一) 實驗說明：(同實驗 1-1)

(二) 操作變因：攝影機與該行走的人之間的位置、距離，與實驗的方法

(三) 控制變因：實驗 1-1, 2, 3 的結果(上下于斜坡、樓梯)

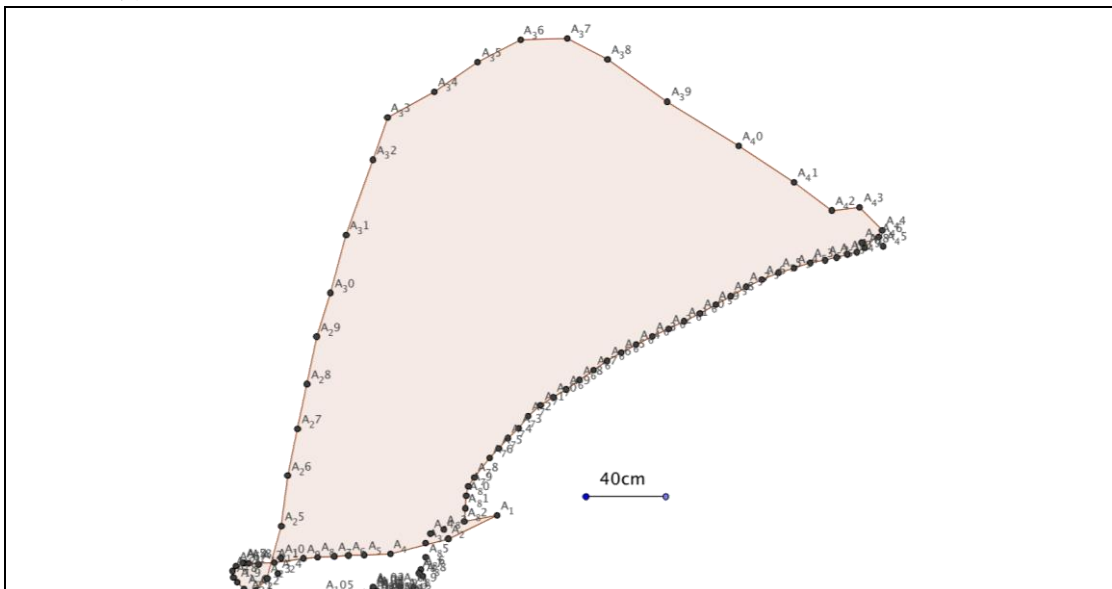
(四) 應變變因：產出的軌跡圖形

(五) 方法與圖示：



▲影片于 tracker 中分析的情況

(六) 實驗結果：



▲人類上樓梯軌跡(全軌跡長=40cm)

(二) 結論：

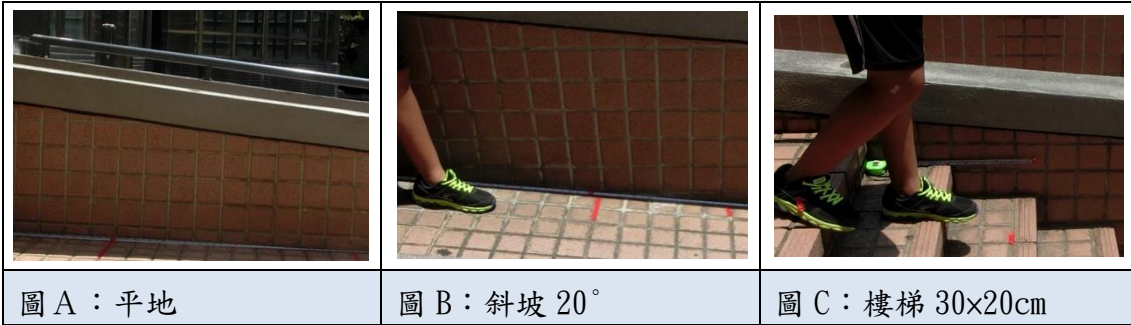
此一軌跡與與實驗 1-3 的軌跡皆提供了“軌跡地形理論”的最佳依據。

【實驗 1-5】分析人類行走四種地形時，產生的不同軌跡

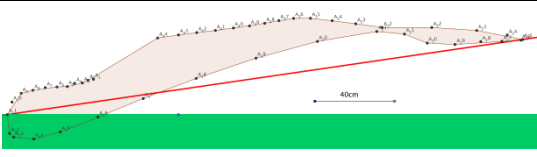
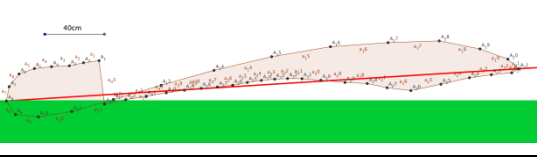
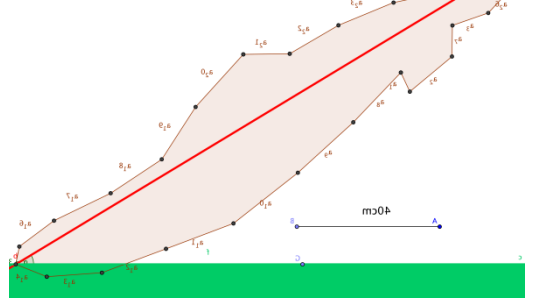
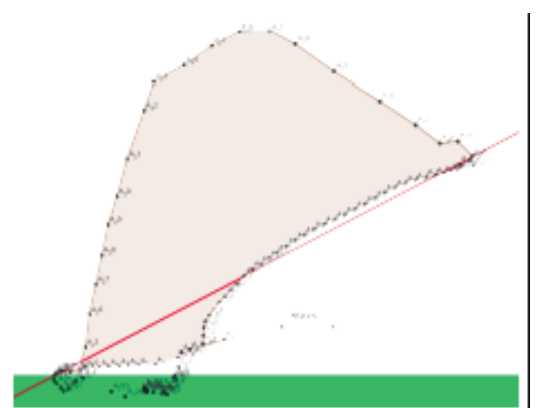
(一) 實驗目的：藉由觀察真實人類行走的狀態，來設計步行仿生獸步伐的軌跡，以達到「仿生」的目的。

(二) 實驗假設：人類遇到不同高度的地形時，行走的軌跡將會依障礙物的高低，產生特定角度，卻不會改變原有形狀。

(三) 實驗設置：設計三種地形（平地、下坡 20°、與上下樓梯）



(四) 軌跡地形理論：

	實驗結果	傾斜角	結論
平地		傾斜角	※ 傾斜角：在軌跡中取前後兩個最前最後的兩個點，連線後（圖中紅線）與地面（綠色區塊）的夾角。 1. 傾斜 20 度以內的軌跡（平地、下斜坡）無法明顯辨識出與地形間的關聯。 2. 所有的腳步軌跡皆是一種接近橢圓形的形狀。（上樓梯不明顯） 3. 各圖形間所不同者乃是軌跡順應地形所傾斜的角度大小。 4. 清楚此原理後，欲設計可以攀上斜坡、樓梯的連桿軌跡，只需改變腳步軌跡的傾斜角即可。
		8.26°	
下斜坡		傾斜角	
		3.58°	
下樓梯		傾斜角	
		31.09°	
上樓梯		傾斜角	
		27.3°	

實驗二、用連桿模擬人類步伐軌跡

【實驗 2-1】改變連桿底邊三角形長、【實驗 2-2】改變連桿底邊三角形角度

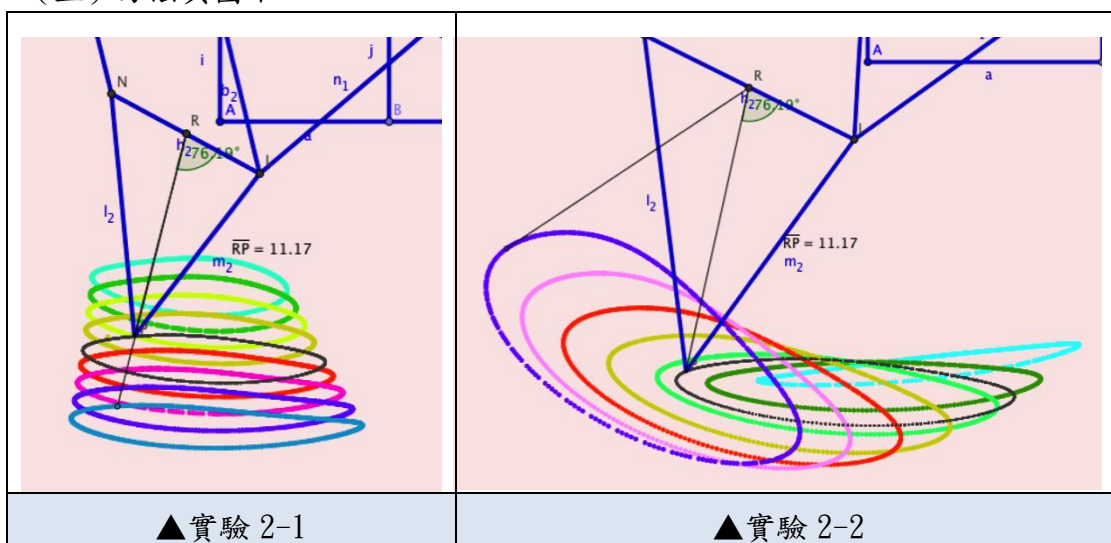
(一) 實驗說明：為使連桿系統模擬出類人的步態軌跡，我們欲從連桿最下方的三角形著手，取頂邊的中點，連線到三角形下端，實驗 2-1 固定此線角度 (79.19 度)，再逐次調整長度 (7~15cm)，實驗 2-2 則相反，最後再觀察所得到的圖形。

(二) 操作變因：三角形底邊中點與腳尖頂點的直線距離、或角度

(三) 控制變因：底邊三角形角度 79.19 度、或長度 11.17cm

(四) 應變變因：仿生獸軌跡圖形的變化

(五) 方法與圖示：



(六) 實驗結果：

三角形長	15cm	14cm	13cm	12cm	11.17cm	10cm	9cm	8cm	7cm
軌跡顏色									
高度排序	No. 9	No. 8	No. 7	No. 6	No. 5	No. 4	No. 3	No. 2	No. 1
大小排序	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9

角度	120 度	110 度	100 度	90 度	80 度	76.19 度	70 度	60 度
軌跡顏色								
軌跡大小	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
傾斜角度	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8

(七) 結論：

1. 實驗 2-1: 底邊三角形的長度與軌跡圖形的大小有關，長度越長、軌跡越大。
2. 實驗 2-2: 底邊三角形的角度與軌跡圖形的傾斜有關，角度越大、軌跡越陡。

實驗三、建置 EV3 仿生獸觀察受力變化

【實驗 3-1】比較仿生獸懸空時的運行與地面行走時，出力功率的變化

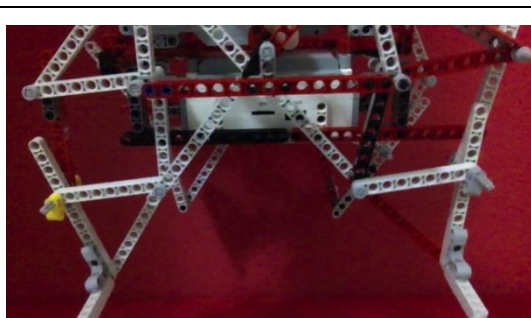
(一) 實驗假設：經觀察得知，EV3 仿生獸在懸空時的速度，遠大於置於地面行走的速度。因此我們推斷：仿生獸運作時的阻力（即負載），除腳底摩擦力與機構摩擦損耗外，最大者即支撐自身重力所需的力量。

(二) 操作變因：EV3 仿生獸懸空運行、與置於地面行走

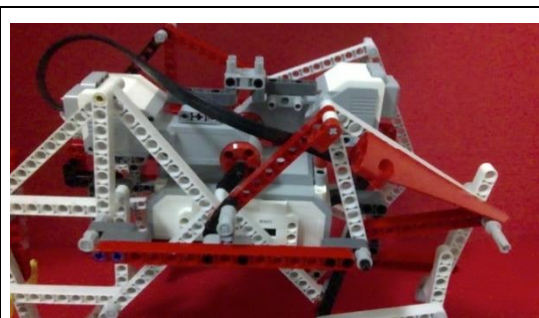
(三) 控制變因：三種各異足底的 EV3 四足仿生獸

(四) 應變變因：經電腦連結 EV3 主機可測得雙馬達出力功率

(五) 方法與圖示：

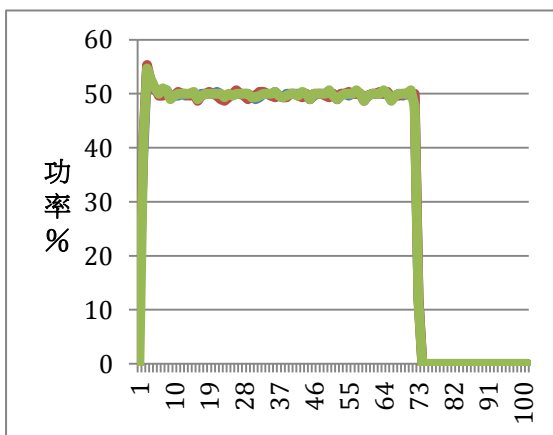


▲圖 3-1-1:懸空運行

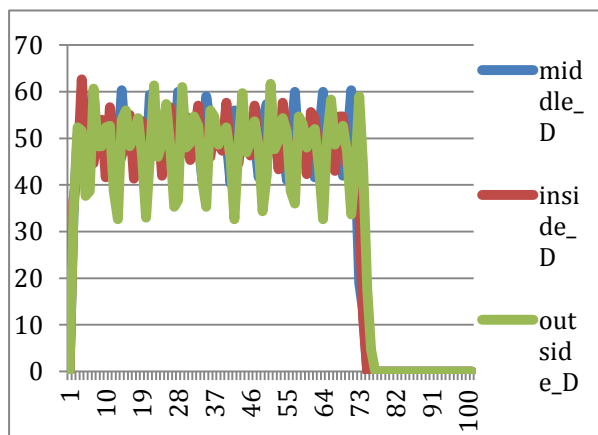


▲圖 3-1-2:地面行走

(六) 實驗結果：



▲圖 3-1-3: 懸空運行



▲圖 3-1-4:地面行走

※縱軸：馬達輸出功率%（程式本控制為 50%）。橫軸：時間

上方兩張圖表正是最終所量測的數據，我們將實驗分成三組（詳細可見實驗 3-2），是為三種連桿比例各異的仿生獸。由表格可知：馬達出力的功率，於地面走動時確實大於空中空轉的狀態

(七) 結論：

1. 仿生獸自身重力在連桿中的作用力，將成為連桿系統的負載。
2. 我們應研究並尋找出有效減低連桿負載的理論或負載。

【實驗 3-2】記錄三種不同連桿組合的仿生獸出力變化

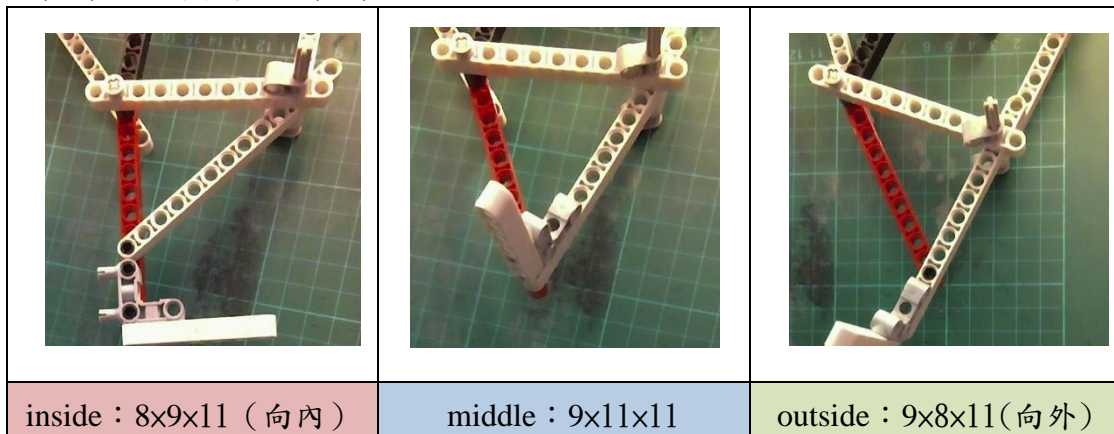
(一) 實驗假設：由實驗 3-1 可知，仿生獸自身重量的負載，將成為機器人運作時最大的阻力。另外，我們借由觀察，認為負載所傳遞的方向，是由觸地的腳尖起始，一層一層地自下傳上，所以設計了這個實驗，欲一窺其中堂奧。

(二) 操作變因：圖示的三種連桿設計。(唯改變連桿系統中，最下方的三角形)

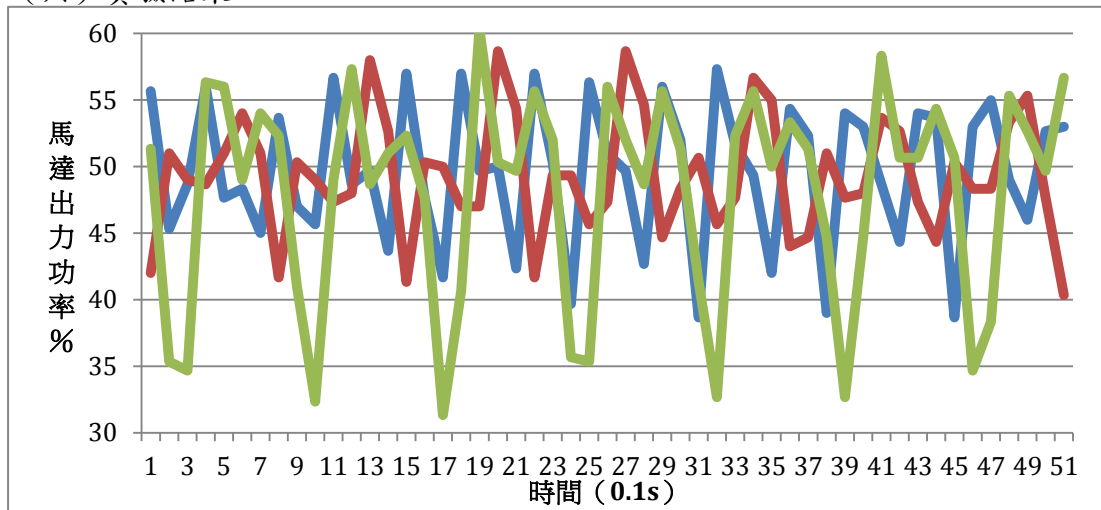
(三) 控制變因：除最下方三角形不同外，其餘亦不變長度的連桿。

(四) 應變變因：EV3 的馬達功率，即表示該時間點的出力。

(五) 方法與圖示：(cm)



(六) 實驗結果：



功率資料的全距	17.3%	24.7%	29%
行走速度 (cm/s)	34.3	32.6	24.5
平均功率 (%)	49.7%	49.4%	48.4%

(七) 結論：

- 1.不同的連桿組合與設計，將影響馬達出力功率 (%) 的大小
- 2.比較平均功率與行走速率的關聯性，出力功率起伏越大者，速度反倒較慢。
- 3.腳尖越靠近重心的連桿設計，其功率起伏較小，而行走速度表現較佳。

【實驗 3-3】了解仿生獸腳尖所產生的作用力變化，是否與連桿系統的負載有關

(一) 實驗假設：在連桿足部的軌跡中，每一個時刻運動的速率盡皆不同，換言之即代表每一時刻足尖的出力有異。因此認為腳尖的出力變化，也應與馬達出力功率變化有關。

(二) 操作變因：在 Geogebra 軟體中模擬連桿系統

(三) 控制變因：EV3 仿生獸（腳尖 middle）的連桿比例

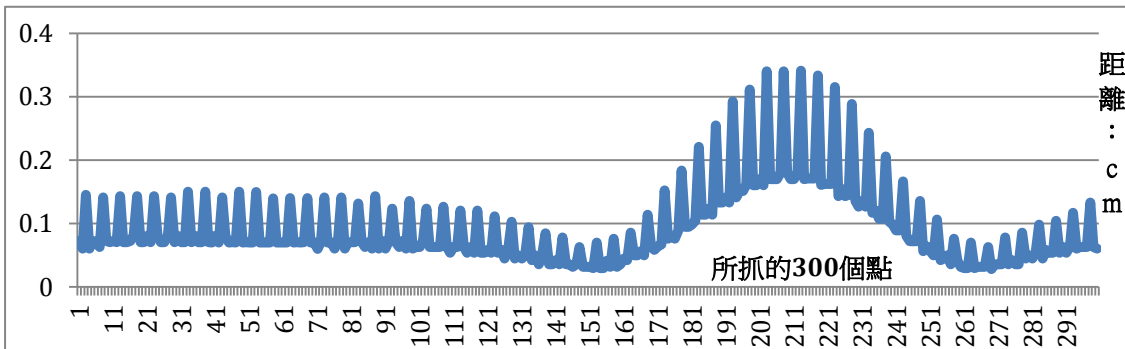
(四) 應變變因：自固定時間間隔中取出軌跡上的點，計算出的相對距離值便代表速度，最後前後相減得到加速度，則亦為所求的作用力

(五) 方法與圖示：



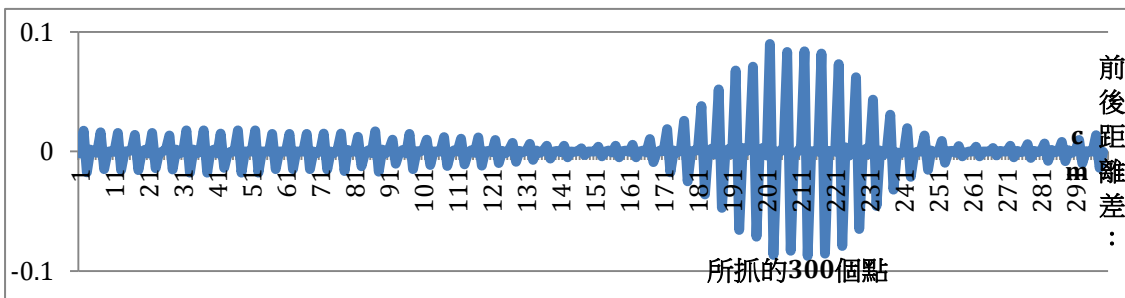
1. 截取軌跡上 300 個點的 x, y 坐標

2. Excel 自畢氏定理計算各點相對距離



▲連桿系統軌跡中，300 個點間的相對距離，= 速率。

(六) 實驗結果：



▲各個點之相對距離，前後相減的結果，= 加速率 = 作用力。

(七) 結論：

據作用力圖表顯示：將前後兩個連續的數值相加，可得到 0。即若我們放大取點的時間間隔，會使作用力趨近於 0。因此，我們認為：腳尖作用力與負載無關。

【實驗 3-4】透過實驗數據的對照，證明物理引擎 Phun 可模擬仿生獸的行為

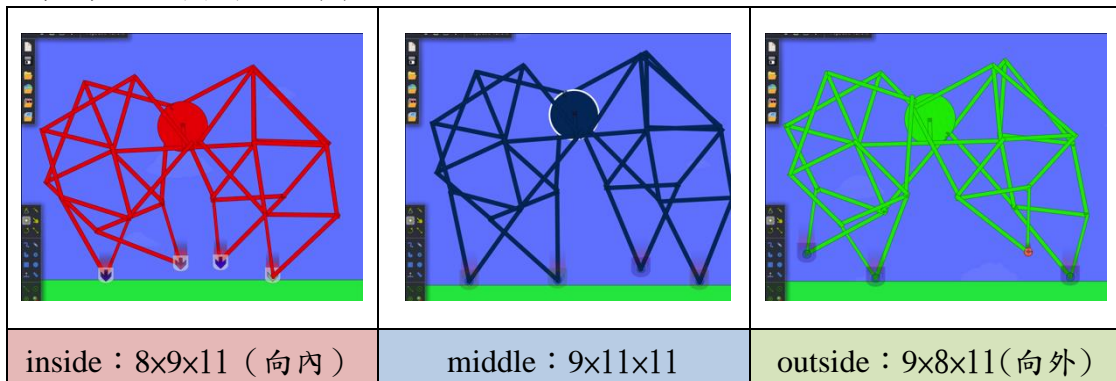
(一) 實驗說明：鑑於實體仿生獸所欲達到“行走上坡/上樓梯”的目的，我們採用了一套物理引擎”Phun”用以模擬物理上的設計與參數，以在實作 3D 列印機器人之前，進行設計或對照。

(二) 操作變因：從 Phun 中讀取出的馬達出力數據（見實驗結果所示）

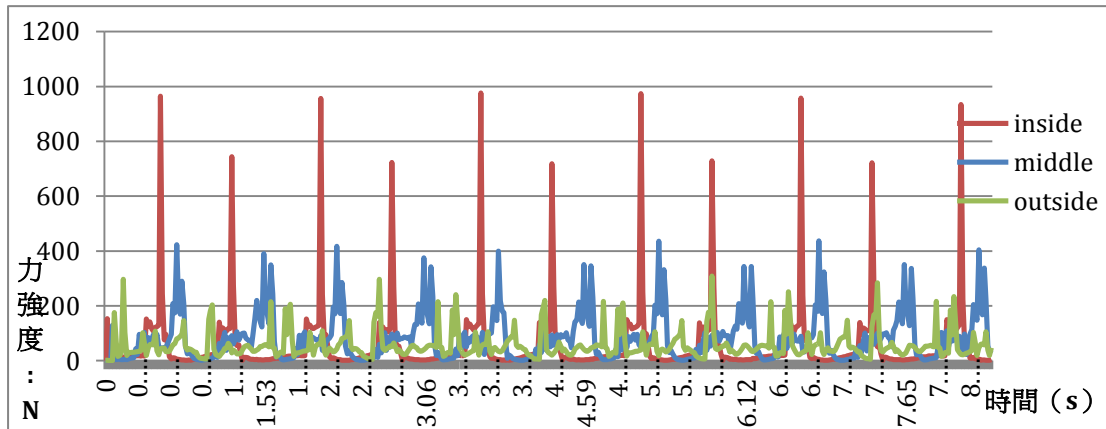
(三) 控制變因：從 EV3 實測得出得馬達出力數據（見實驗 3-2）

(四) 應變變因：比較兩者，以認同 Phun 足以測試仿生獸的行為

(五) 方法與圖示：(m)



(六) 實驗結果：用 Phun 量測三種機型的力強度變化



	inside : 8x9x11	middle : 9x11x11	outside : 9x8x11
EV3 實測功率全距	NO. 3	NO. 2	NO. 1
EV3 實測速率	NO. 1	NO. 2	NO. 3
Phun 模擬力全距	No. 1	NO. 2	NO. 3
Phun 模擬速率	NO. 3	NO. 2	NO. 1

(七) 結論：

1. EV3 實作中所得到的結果與結論，竟然完全和 Phun 模擬出的結果完全相反。原來是樂高與 Phun 的馬達設定，一為固定功率，一為固定速度，故而如此。
2. 故而，在模擬仿生獸行走之時，在 Phun 中仍固定功率才是。

【實驗 3-5】建立能可計算出連桿受力變化的數學方法

(一) 實驗說明：得到 EV3 與 Phun 的行走資料後，我們嘗試以物理中的力矩原理，與幾何代數軟體 Geogebra 的輔助，推導了這項數學過程，可以計算並得到仿生獸的負載中，所承受多少比例的自身重力。並借此實驗證明可行並應用之。

(二) 操作變因：所推導出的力矩受力變化圖（見實驗結果所示）

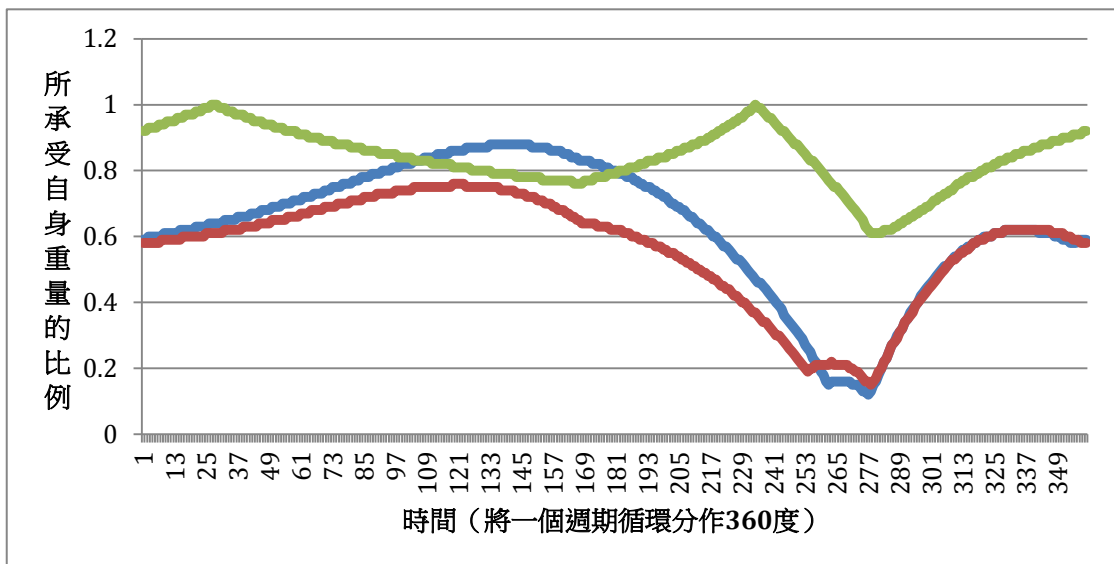
(三) 控制變因：從 EV3 實測得出得馬達出力數據（見實驗 3-2）

(四) 應變變因：比較兩者，已知此公式是否試用

(五) 方法與圖示：

<p><u>第一部分：力從 A 分到 B1、B2</u></p> $F_A = B_1 + B_2$ $F_{B1} : F_{B2} = \text{虛線 } B_2 : \text{虛線 } B_1$ <p><u>第二部分：力從 B2 分到 C1、C2</u></p> $F_{B2} = F_{C2} + F_{C1}$ $F_{C1} : F_{C2} = \text{虛線 } C_2 : \text{虛線 } C_1$ <p><u>第三部分：C1 的合力、C2 的合力</u></p> <p>合力 C1 = (見第二部分)</p> $\text{合力 } C_2 = F_{B1} + F_{C2}$	
--	--

(六) 實驗結果：利用 Geogebra 計算得到的馬達受力變化圖



(七) 結論：

1. 由實驗結果判定，雖然無法完全與 EV3 數據相似，但已能觀察出力道強弱。
2. 於物理方法的預測上，雖已頗有小成，但仍與實測數據之圖形相去甚遠。

【實驗 3-6】 建立能可計算出連桿受力變化的數學方法（進階版-2）

- (一) 實驗說明：擴充實驗 3-5 的算法，於 B1 到 C2 的力詳細推導。
- (二) 操作變因：所推導出的力矩受力變化圖（見實驗結果所示）
- (三) 控制變因：從 EV3 實測得出得馬達出力數據（見實驗 3-2）
- (四) 應變變因：比較兩者，已知此公式是否試用
- (五) 方法與圖示：

※沿用實驗 3-5 推導，此更詳細推演

第一部分：力從 B1 分到 C1、K

$$FB1=FC1+FK$$

FC1:FK=虛線 FK：虛線 FC1

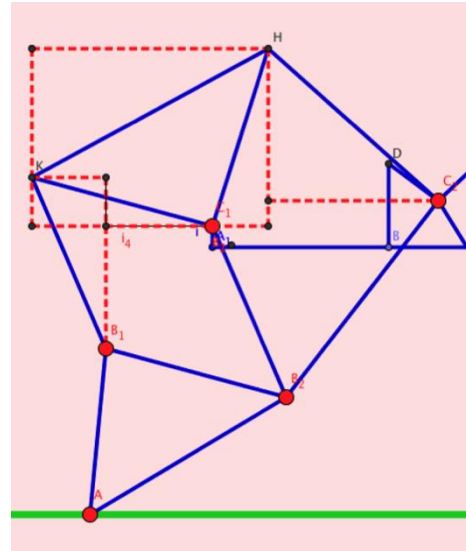
第二部分：力從 K 分到 H、C1

FH:FC1=虛線 C1：虛線 H

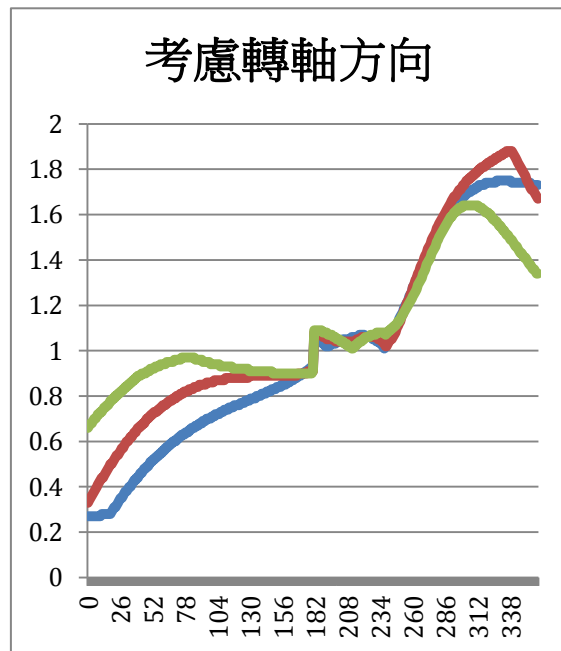
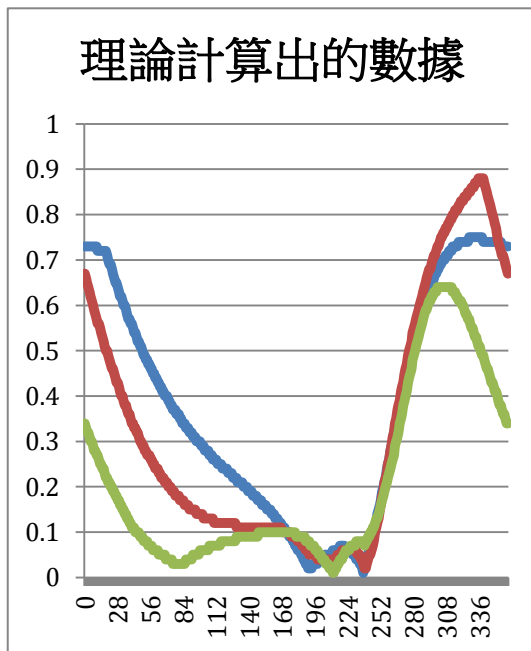
第三部分：力從 H 分到 C1、C2

FC1:FC2=虛線 C2：虛線 C1

第四部分：自身重力負載其力恆向上，故而轉軸順時針轉時，0~180 度是為阻力，180~360 度是為助力



(六) 實驗結果：利用 Geogebra 計算得到的馬達受力變化圖



(七) 結論：

1. 所得到的結果已接近 EV3 實測中起伏的波形（考慮轉軸方向）
2. 然而受力大小的變化，其大小排列卻又全然顛倒，因此算法仍需在修正。

【實驗 3-7】 建立能可計算出連桿受力變化的數學方法（進階版-3）

- (一) 實驗說明：擴充實驗 3-6 的算法，於 B1 到 K 的力以分力推導。
- (二) 操作變因：所推導出的力矩受力變化圖（見實驗結果所示）
- (三) 控制變因：從 EV3 實測得出得馬達出力數據（見實驗 3-2）
- (四) 應變變因：比較兩者，已知此公式是否試用
- (五) 方法與圖示：

※沿用實驗 3-5、3-6 推導之原理，于此運用分力之法推演自 B1 到 K 的力量傳遞。

第一步：

在 Geogebra 中建立兩條分別通過 B1、K 並分別垂直、平行于地面的線。

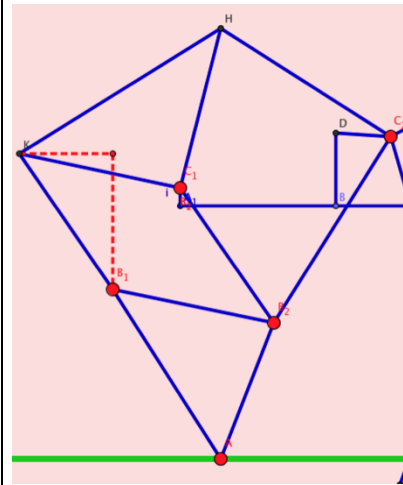
第二步：

利用此二線形成一個直角三角形。

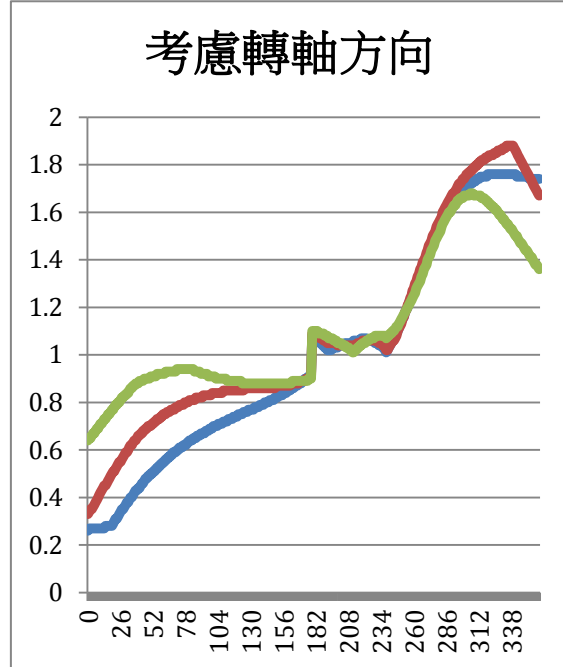
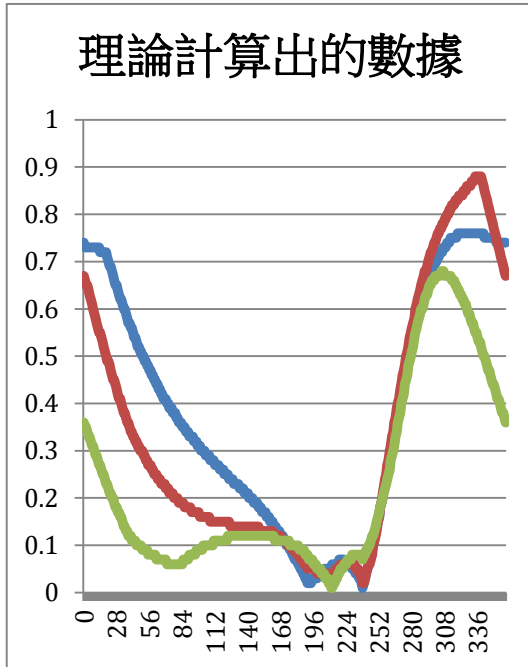
第三步：

則 FB1 與 FK 的關係如下：

$$FK = FB1 \div \text{斜邊 (藍)} \times \text{虛線 B1}$$



(六) 實驗結果：利用 Geogebra 計算得到的馬達受力變化圖



(七) 結論：

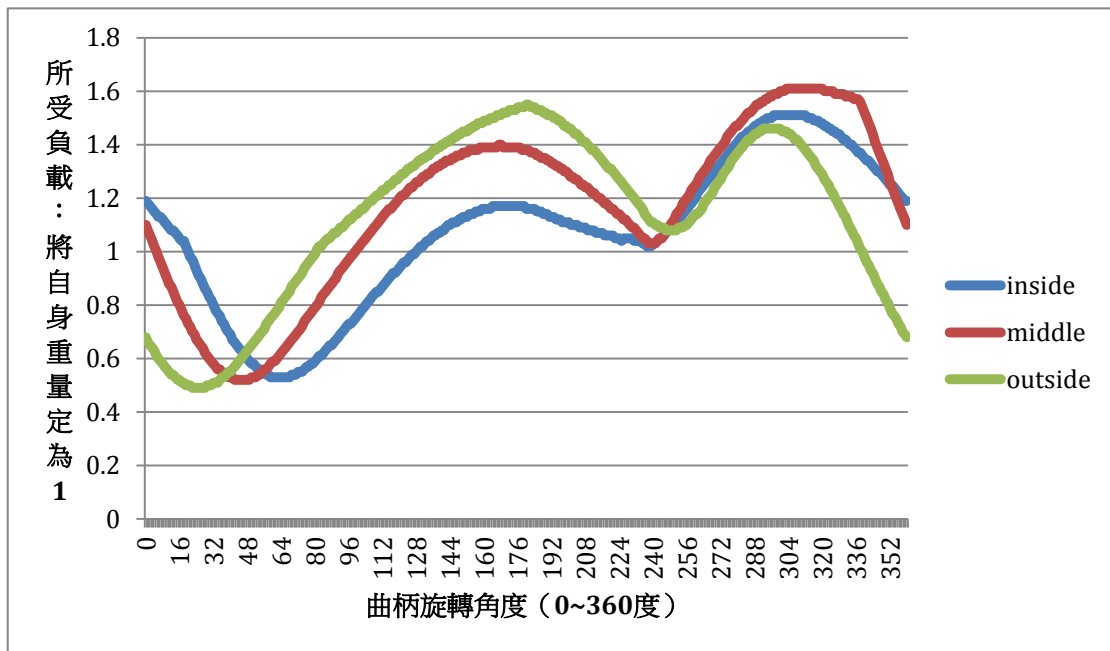
1. 此研究結果與實驗 3-6 的圖表竟然相似，所異者不過數據資料間些微差距而已
2. 雖然已經變換計算與推導方式，但結果仍然與預期不同。
3. 對於解釋負載現象的數學方法，我們仍需在探討、精進。

【實驗 3-8】建立能可計算出連桿受力變化的數學方法（進階版-4）

- (一) 實驗說明：擴充實驗 3-7 的算法，於 B1 到 C2 的力以分力推導。
- (二) 操作變因：所推導出的力矩受力變化圖（見實驗結果所示）
- (三) 控制變因：從 EV3 實測得出得馬達出力數據（見實驗 3-2）
- (四) 應變變因：比較兩者，已知此公式是否試用
- (五) 方法與圖示：

<p><u>第一步：B1 到 K</u> FB1 經紅色虛線分為 FB1（斜邊）、FB1（向左） 兩者作用在藍桿（C1~K）上之合力恰為 FB1</p> <p><u>第二步：K 到 H</u> 藍桿力矩（C1~K）=藍桿力矩（C1~H） 又兩桿于此等長，故 FK=FH</p> <p><u>第三步：H 到 C2、C1</u> 經三點位置依力矩計算可得（如先前之算法）</p> <p><u>第四步：C2 到轉軸、另部分力之合力</u> 直接在 Geogebra 中以作圖方法得到</p>	
--	--

- (六) 實驗結果：利用 Geogebra 計算得到的馬達受力變化圖



- (七) 結論：

- 1.此結果呈現，確定符合實測中 EV3 馬達所傳回的實驗數據之大小關係了。
- 2.另外，對於波形的起伏變化，較之實驗 3-5 的數據，也大幅逼近實測值了。
- 3.因此，我們應該便能就這樣的算法方式，去解釋與研究仿生獸負載的大小了。

【實驗 3-9】證實串聯多個連桿組後，能相互抵消負載並減低輸出功率的變化

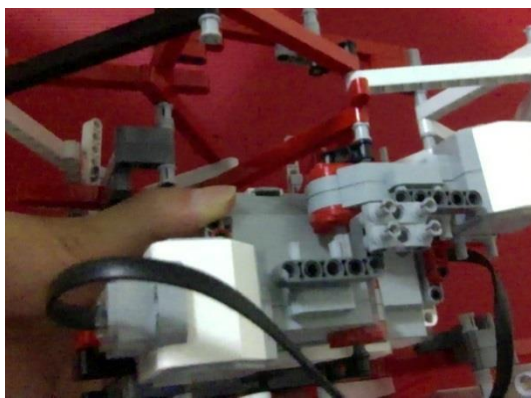
(一) 實驗假設：經由先前數個物理原理所推導出的運算方式可以得知：自身重量的負載將在馬達轉軸上，與轉軸力矩形成合力。但是實際上則是有多個連桿組接在轉軸上頭，因此我們推測其負載將兩兩相抵消，是故以此實驗證明之。

(二) 操作變因：以套筒連接起左右兩顆馬達的轉軸，所測的 EV3 數據

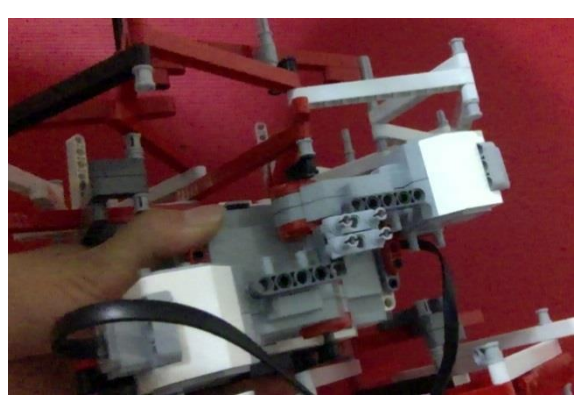
(三) 控制變因：實驗 3-1、3-2 中，未串起左右兩馬達所測的數據

(四) 應變變因：相較後觀察串聯後馬達功率大小變化是否降低

(五) 方法與圖示：

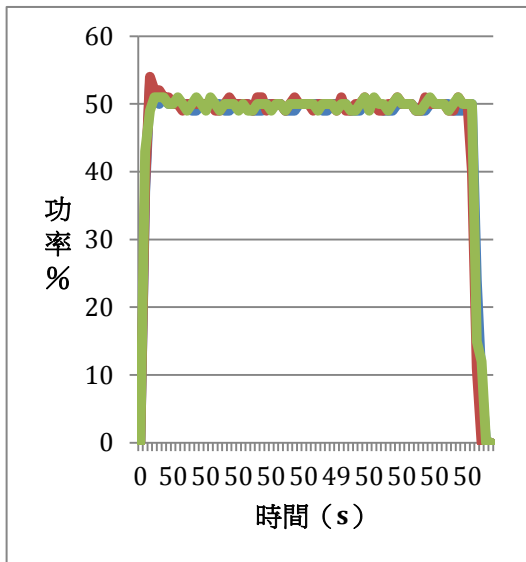


▲圖 3-9-1:連結左右的馬達

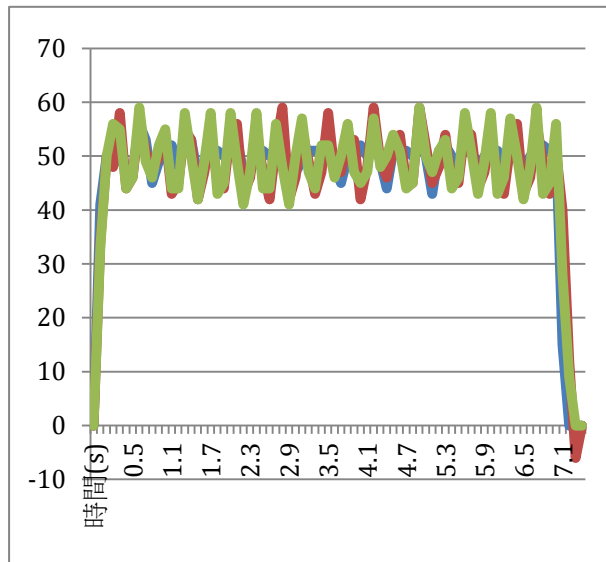


▲圖 3-9-2:分開左右的馬達

(六) 實驗結果：



▲圖 3-9-3:吊起空轉



▲圖 3-9-4:地面行走

(七) 結論：

1. 互相串聯起的這一組數據變化確實小於分開的對照組
2. 由此可證實假設中的猜測：即多個連桿組並聯之時，可以抵消負載
3. 因此，我們于設計下一組仿生獸時，應能增加幾雙腳以產生負載相抵的作用

實驗四、實作一架上樓梯的 3D 列印仿生獸

【實驗 4-1】量測各種材質的最大靜摩擦力，以應用在仿生獸的腳底上










(一) 實驗原理：將物體靜置于一個斜面之上，並緩緩抬升斜面的角度，直至物體開始滑落。令角度為 θ ，則最大靜摩擦力就為 $\cos \theta$ 。

(二) 操作變因：長度為 60cm 的斜面

(三) 控制變因：變化各種材質

(四) 應變變因：抬升後垂直地面的高度

(五) 方法與圖示：

1. 樂高積木	2. 氣球	3. 橡膠指環	4. 橡皮擦	5. 水彩袋
				
6. 橡皮印章墊	7. 砂紙	8. 止滑墊	9. 塑膠墊	
				

(六) 實驗結果：

編號	名稱	三次實驗數據記錄			最大靜摩擦力	排名
1	樂高積木	30	34	31.5	5.64	7
2	氣球	31	33.5	32.5	5.69	6
3	橡膠指環	38.5	40.5	41.5	6.34	3
4	橡皮擦	38.5	34.5	33.5	5.96	4
5	水彩袋	31.5	29	32.5	5.57	8
6	橡皮印章墊	26	28	30	5.29	9
7	砂紙	32	36	32	5.77	5
8	止滑墊	56	59	48	7.37	1
9	塑膠墊	45	40	42.5	6.52	2

(七) 結論：

1. 了解到使用各種不同的材質作為腳尖，摩擦力間的差距竟有此差距。
2. 清楚明白各材質間最大靜摩擦力間的差距，以利於接下來的實驗。

【實驗 4-2】借由改變仿生獸足底摩擦力的大小，提升行走的效能

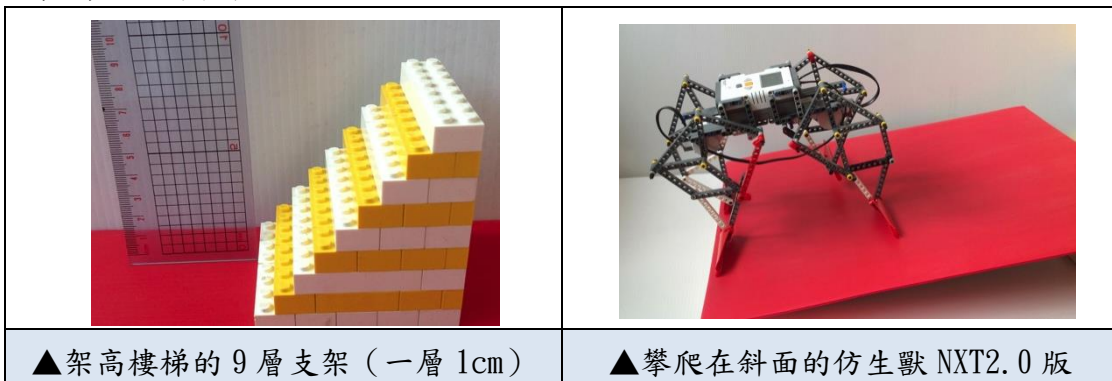
(一) 實驗設計：由實驗 4-1 中，選取出三種材質作為仿生獸的腳底面。分別為#1 純樂高、#2 橡皮印章墊腳、與#3 止滑墊，而最大靜摩擦力排名則分別是第 7、第 9 與第 1。我們便可借此來證明足底摩擦力將影響仿生獸爬坡的效能了。

(二) 操作變因：採用三種不同腳底材質的機器人

(三) 控制變因：自 0~9 層的 10 種坡度，60cm 長的斜坡

(四) 應變變因：以碼表記錄仿生獸在斜面上行走 30cm 的秒數

(五) 方法與圖示：



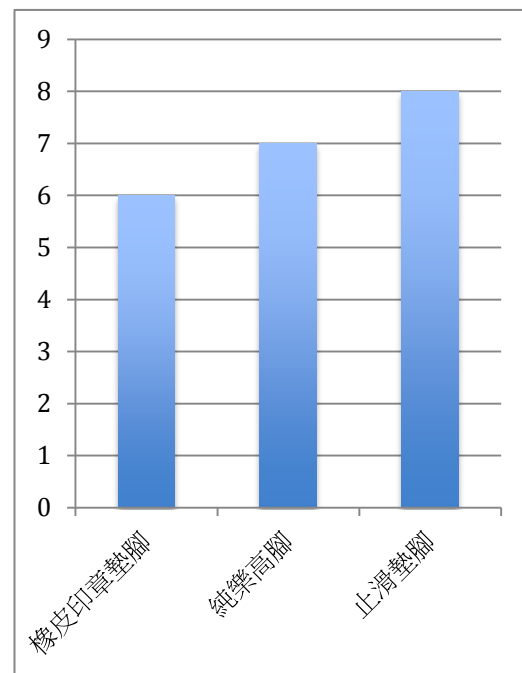
▲架高樓梯的 9 層支架（一層 1cm）

▲攀爬在斜面的仿生獸 NXT2.0 版

(六) 實驗結果：

層高 (0~9)	第一二三次秒數		
0	1.97	1.84	1.75
1	1.81	1.78	1.84
2	2.5	1.87	2
3	1.75	2.03	2.28
4	1.97	1.94	1.88

層高 (0~9)	第一二三次秒數		
5	2.35	2.13	2.31
6	2.79	2.82	2.5
7	3.78	3.94	3.06
8	2.68	2.59	2.78
9	□	□	□



(七) 結論：

1. 仿生獸腳底材質的最大靜摩擦力之大小，確將影響仿生獸攀高層級的多寡。
2. 腳底材質之最大靜摩擦力（止滑墊>純樂高>橡皮印章墊）越大，則機器人便可以攀上越高的坡度（止滑墊 9>純樂高 8>橡皮印章墊 7）
3. 在此證明此法則後，將可把最大靜摩擦力最大的材質應用於實作仿生獸上了。

【實驗 4-3】透過改變機體的軸距，以收上梯重心之問題

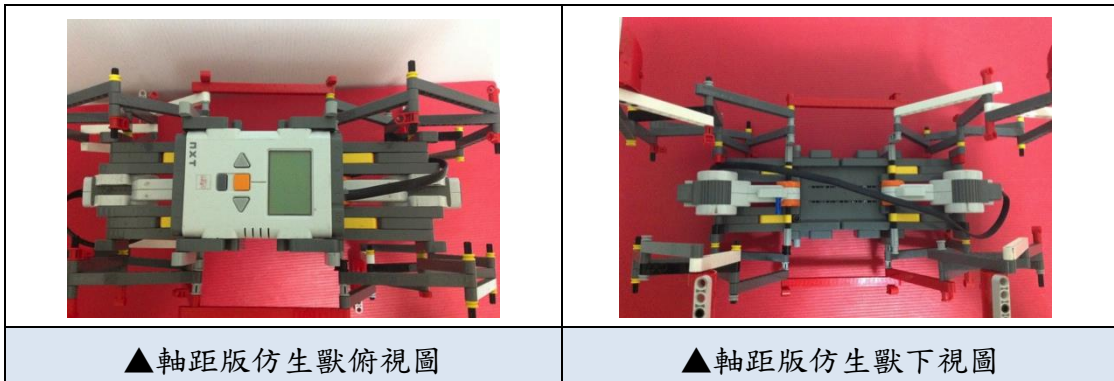
(一) 實驗設計：樂高 NXT2.0 組建四足仿生獸，在固定四腳的位置加入兩道滑渠，將兩顆貫穿兩側兩腳的馬達可至於中間，軸距則可以從 5 調整成 12。因此本實驗揀選了三組：軸距=5、軸距=9、軸距=12，分別測量速率與爬坡高低。

(二) 操作變因：軸距=5、軸距=9、軸距=12 三組

(三) 控制變因：斜面設置、NXT 馬力輸出以程式固定控制

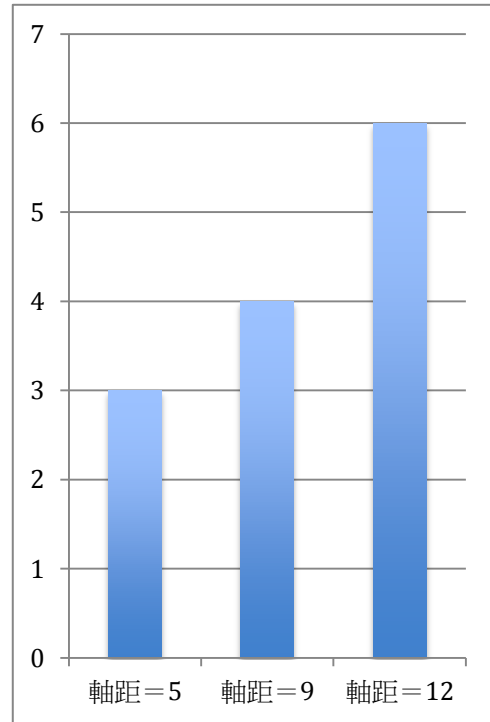
(四) 應變變因：仿生獸速率表現與爬坡高度

(五) 方法與圖示：



(六) 實驗結果：

組別	層級	第一二三次秒數		
軸距 =5	第0層	2.13	2.07	2.22
	第1層	2.22	3.16	2.47
	第2層	2.62	4.09	3.47
	第3層	3.91	5.09	4.47
軸距 =9	第4層	6.9	5.5	4.65
軸距 =12	第5層	6.56	5.72	5.59
	第6層	8.96	7.28	8.03
	第7層	□	□	□
	第8層	□	□	□
	第9層	□	□	□



(七) 結論：

1. 軸距間隔越大者，越能攀上越高層級的斜面而不致傾斜、翻車。
2. 我們得知，機器人的重心恆維持於中心點，是故四足（支撐點）離重心越遠越不易因重心不穩而翻車、傾斜偏曲。

伍、研究結果

一、軌跡的應用：實踐能令仿生獸攀上樓梯的腳步軌跡

說明：本研究是一組由四項步驟組合成的流程，細節如下：

1. 仿生學：人類行走的軌跡，發現是由一般平地軌跡稍稍旋轉一個仰起角度形成
2. 軌跡：透過軟體 Geogebra 擬定連桿系統的空中腳步軌跡（如下圖）
3. 模擬：將設定好的連桿長度比例在物理引擎 Phun 中觀察是否實用于實作上
4. 歸納：調整 13 連桿組軌跡的方法

（一）仿生學：人類行走時，形成特定軌跡的原理。

狀況	圖示	說明
狀況一		<u>平地軌跡：</u> 1. 橢圓形形狀 2. 身體與地表成 90 度 3. 軌跡平行于地表 4. 軌跡平行于地面
狀況二		<u>斜坡軌跡：</u> 1. 橢圓形形狀 2. 身體與地表成 90 度 3. 軌跡不平行于地表，軌跡平行于地面 4. 地面與地表夾角=軌跡與身體、地表之夾角
狀況三		<u>樓梯軌跡：</u> 1. 橢圓形形狀 2. 身體與地表、階面成 90 度 3. 樓梯各階面連線，亦相同于斜坡 4. 樓梯與地表夾角=軌跡與身體、樓梯之夾角

（二）軌跡：由 Geogebra 模擬的三種連桿比例

inside : 8x9x11 (向內)	middle : 9x11x11	outside : 9x8x11(向外)

結果：傾斜高低= outside > middle > inside

(三) 模擬：將 Geogebra 所得到的三種連桿比例套入 Phun 中模擬爬坡情形
 說明：由於程式 Phun 設定的關係，模擬出的結果會與實際全然相反，因此先在第二步中，調整三隻仿生獸至不同的輸入速率，最後在進行斜坡與樓梯的實驗。

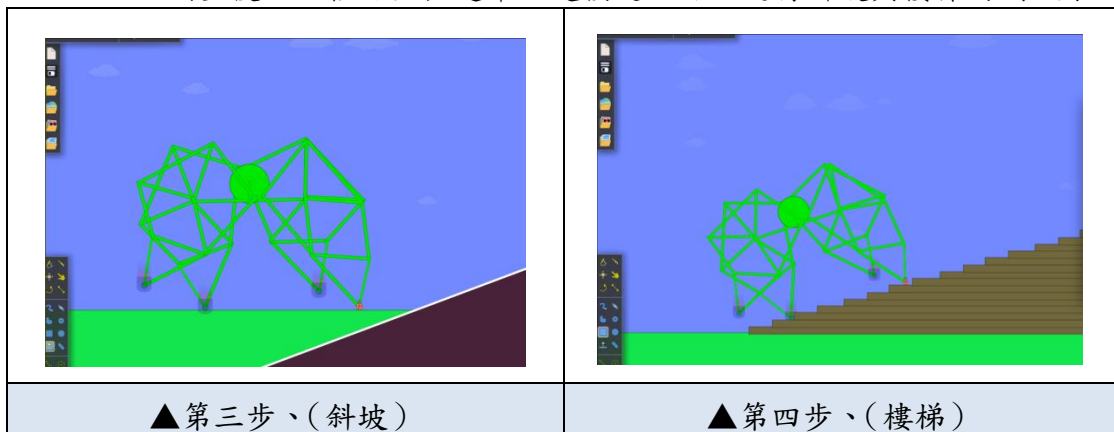
第一步、行走於平面上的三種仿生獸（為調整馬達速度設定，同實驗 3-4）

	inside：(向內)	middle：	outside：(向外)
馬達速度設定	40 rpm	40 rpm	40 rpm
仿生獸行走速率	2.04 m/s	9.33 m/s	11.17m/s
排名	3	2	1

第二步、行走於平面上的三種仿生獸（調整馬達速度設定後的結果）

	inside：(向內)	middle：	outside：(向外)
馬達速度設定	100 rpm	55 rpm	40 rpm
仿生獸行走速率	10.51 m/s	12.52 m/s	11.17m/s
排名	3	1	2

※ 至此經調整後，三種仿生獸速率已趨接近，可以進行斜坡與樓梯的測試了



第三步、行走於斜面上的三種仿生獸（斜面斜度=20度）

仿生獸行走速率	0（無法上坡）	10.58m/s	7.79 m/s
減量	10.51m/s	1.94 m/s	3.38 m/s
排名	1	3	2

※減量：相對於行走面，所減少的速率

第四步、行走於樓梯上的三種仿生獸（階面:階高=40:13）

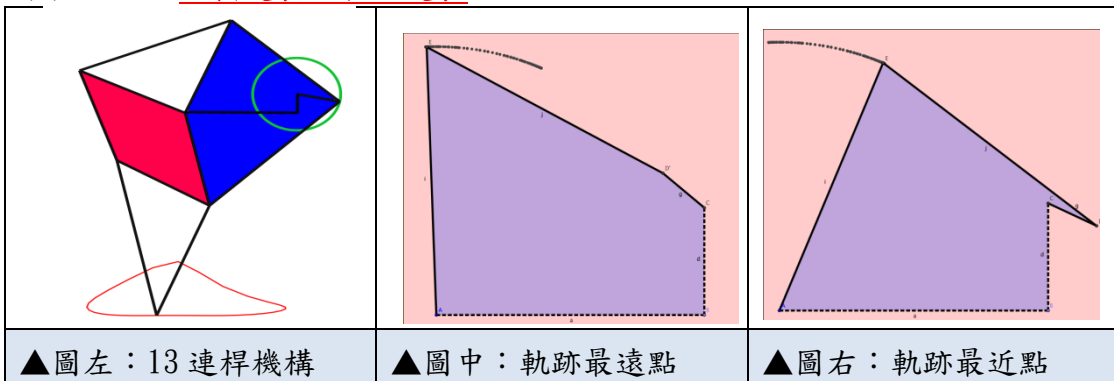
仿生獸行走速率	0（無法上階）	4.91m/s	7.37m/s
減量	10.51m/s	7.61m/s	3.79 m/s
排名	1	2	3

結果：最後，我們到結論，即經由模仿人類足跡，仿生獸的爬坡能力，將與軌跡的傾斜程度有關，傾斜越高，越容易克服地形如斜面、樓梯等。

(四) 歸納：調整 13 連桿組軌跡的方法

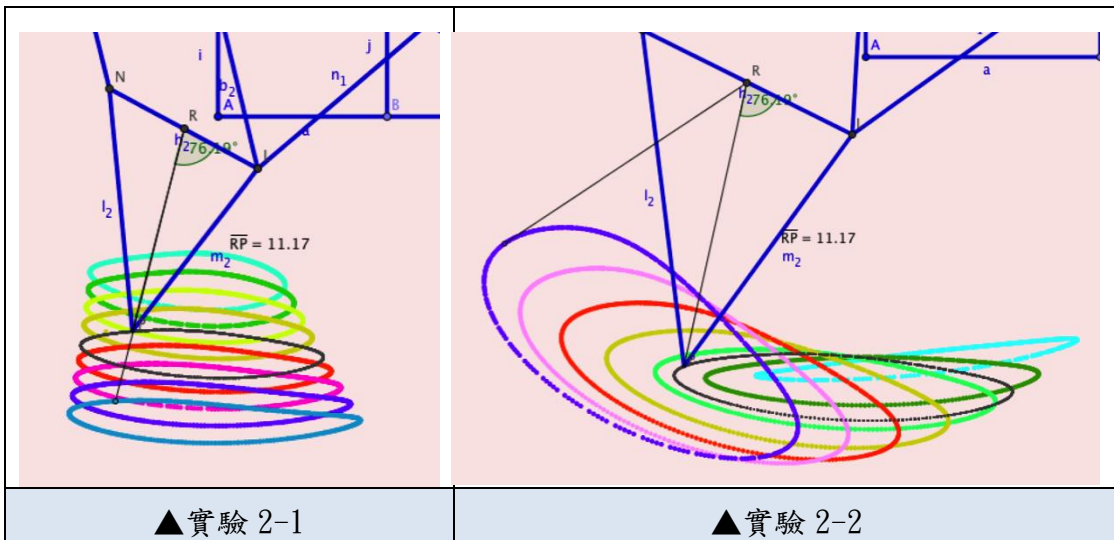
方法一、擴增或減少「四連桿組」的輸出軌跡：

- (1). 「泰奧楊森 13 連桿組」中包含有三組兩種「四連桿機構」
- (2). 第一種：下圖左兩塊藍色的機構為「曲柄式四連桿」
- (3). 第二種：下圖左一塊紅色機構為「平行四邊形連桿」
- (4). 其中「曲柄式四連桿」最易改變其軌跡大小。如下圖中、下圖右，當曲柄與聯動軸成一直線時，有最短與最長的兩種情形，分別為扇形軌跡的端點。
- (5). 因此，**曲柄越長，軌跡越長。**



方法二、改變三角形連桿的形狀

- (1). 在【實驗 2-1】【實驗 2-2】中，我們將連桿三角形的變數簡化至長度與角度
- (2). 最後我們得到兩個結論，即：底邊三角形得長度與軌跡圖形的大小有關，長度越長、軌跡越大。又角度與軌跡的傾斜有關，角度越大、軌跡越陡。如下圖：



方法三、拉長支架與聯動軸的長度，使軌跡傾斜

- (1). 為解決力矩分配問題而嘗試出的方法，詳見研究結果二
- (2). 使上下兩組「曲柄式四連桿」同時收縮、同時推出，達到拉高軌跡的效果

二、系統負載的應用：計算與模擬並揀選出馬達出力最低的連桿設計
說明：本研究亦是由四組步驟所形成的計劃。

1. 實驗：建構樂高 EV3 的仿生獸模型，設計各項實驗並讀出馬達輸出功率變化
2. 物理計算：採用力矩分佈的方法，歸納出計算負載的演算法並比較實驗結果
3. 減少負載：分析整理好的力矩演算法，尋找能減低負載的方式
4. 連桿比例：以步驟三的方法，設計一組兼具軌跡與負載的仿生獸連桿比例

(一) 實驗：

馬達功率：空中旋轉		<p>實驗設定：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.三種 EV3 仿生獸 2.程式控制功率 50% 3.吊起於空中空轉 <p>實驗結論：</p> <p>自身重力的負載是造成功率波動與運行速度降低的主因</p>
馬達功率：地上行走		<p>實驗設定：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.三種 EV3 仿生獸 2.程式控制功率 50% 3.至於地面上跑動 <p>實驗結論：</p> <p>三種仿生獸中，底邊三角形的腳尖離重心越遠，功率波動越大</p>
馬達功率：加聯動軸		<p>實驗設定：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.三種 EV3 仿生獸 2.程式控制功率 50% 3.至於地面上跑動 4.連接左右兩馬達的轉軸 <p>實驗結論：</p> <p>功率的變化波動隨連接馬達轉軸而縮小，應是左右馬達負載相互抵消了</p>

(二) 物理計算：

第一 步	力 F (自身重量) 從 A (腳尖) 傳導至 B1、B2 $FA=FB1+FB2$ (力量皆向上↑) 由力矩公式導出： $FB1:FB2=虛線 B2:虛線 B1$	
第二 步	力 B2 (接第一步) 從 B2 傳導至 C1、C2 $FB2=FC1+FC2$ (力量皆向上↑) 由力矩公式導出： $FC1:FC2=虛線 C2:虛線 C1$	
第三 步	FC1 直接由機體吸收 FB1 之傳播路徑見第四步 FC2 在曲柄形成向上力，故時為阻力，時助力	
第四 步	力 FB1 傳導到 K 由右圖中的虛線分力圖可分出兩力，又此二力同時作用在 K，整理後發現 $FB1=FK$	
第五 步	力 K 傳導到 H 由於力矩 $K=力矩 H$ (位於同一剛體三角形上) 所以 $FK:FH=藍線 H:藍線 K$	
第六 步	力 H 傳導到 C1、C2 (如先前力矩分配法) $FH=FC1+FC2$ (力方向垂直藍線 H) 由力矩公式導出： $FC1:FC2=虛線 C2:藍線 H$	
第七 步	自身重力所造成的負載 = $FC2$ (第三步，方向向上) + $FC2$ (第六步，方向垂直藍線 H) 由 Geogebra 導出最終分力後負載	

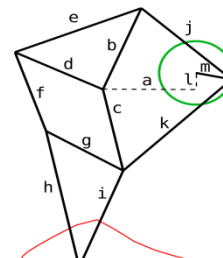
(三) 減少負載：

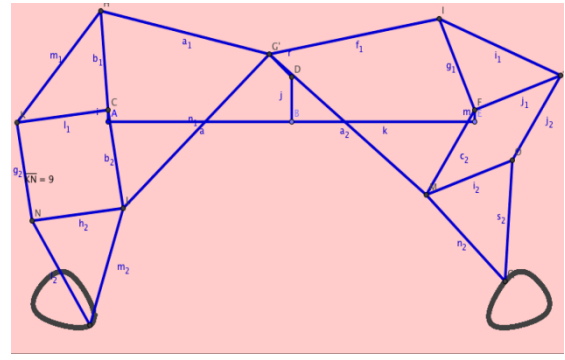
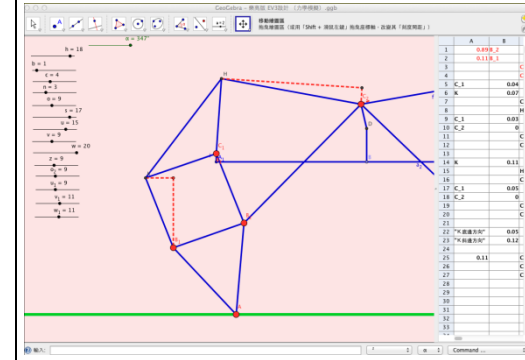
	說明	Before	After
方法一	1.原理：(見上方第一步) 2.方法：改變連桿系統的底邊三角形，使腳尖位置靠近內部(重心)，經力矩轉換後可降低負載		
方法二	1.原理：(見上方第二步) 2.方法：放大支架與機構的聯動軸長度，使力在第二層的分配中，盡數集中到支架上		

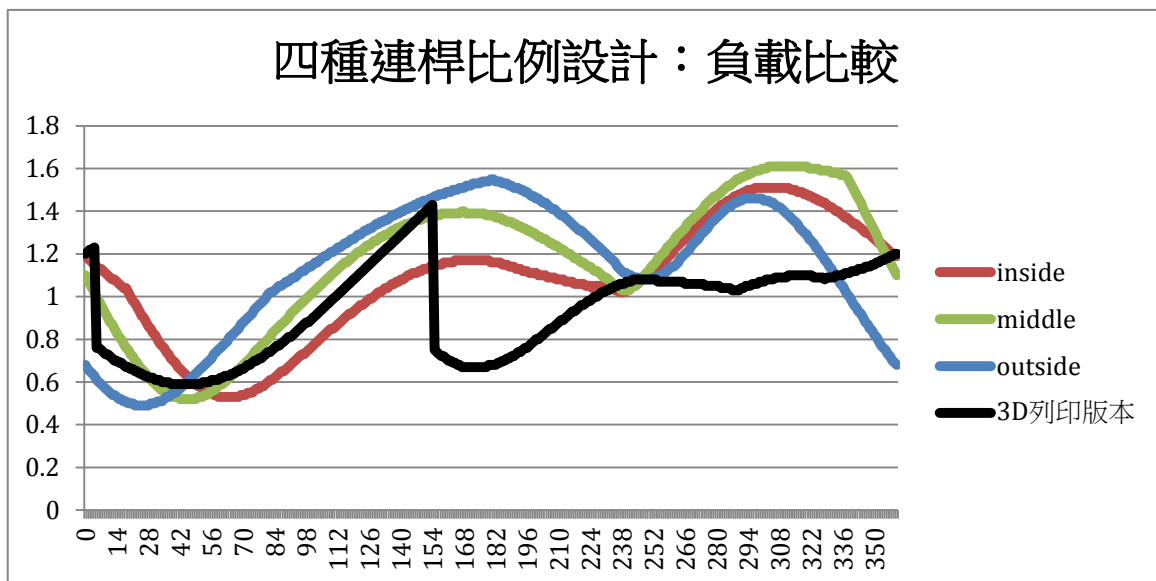
(四) 連桿比例：綜合軌跡、力矩的最佳設計（此為比例）

說明：此種連桿比例的設計，是套用了各項我們所導出的理論所設計的，如下表，是評判與解說各項研究結果對應到此模型分析表格。

研究結果項目	實踐此理論	詳細
軌跡：向上翹起	是	(見下圖左)
負載：減少之	是	(見下表)
摩擦力：越大者越佳	需透過腳底面材質(止滑墊)來改善	
軸距：越長者越佳	是	(見下圖左右)

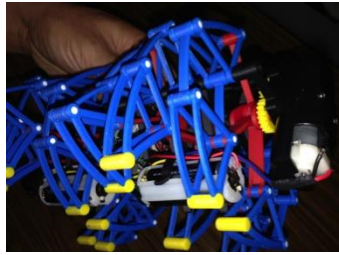

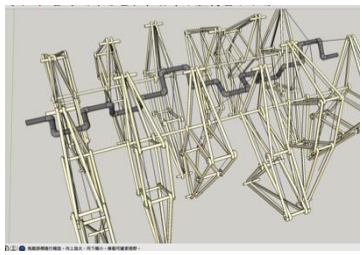
	A	18	F	9	J	17
	B	9	G	9	K	20
	C	9	H	11	L	3
	D	9	I	11	M	3
	E	13				

	
▲Geogebra: 執行此種比例的仿生獸模型	▲Geogebra: 負載公式計算

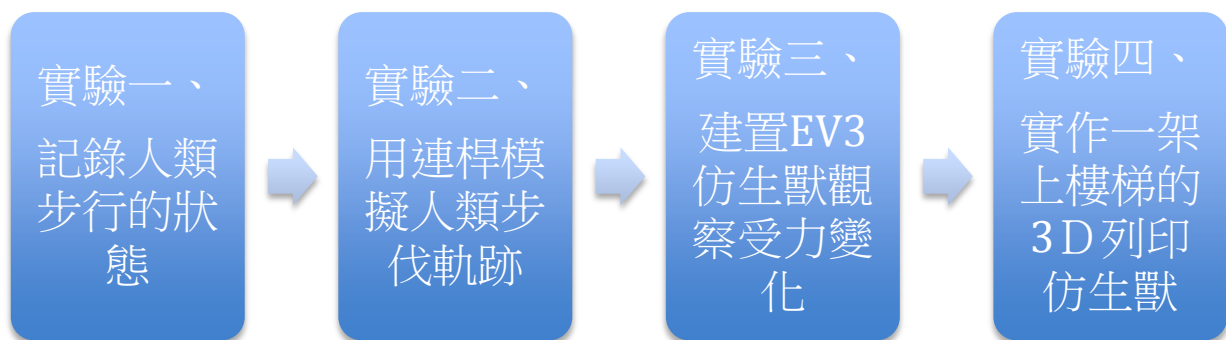


三、影響實作模型的因素：摩擦力、軸距

- (一) 摩擦力：只需以斜面測量該材質的最大靜摩擦力，越大者即越佳者
- (二) 軸距：在重心固定的前提下，軸距越大者越佳
- (三) 3D 列印的仿生獸：縱合所有研究學理，所完成的最佳化仿生獸（如上），並同時具備爬越樓梯的功能。

		
▲在 Make Fair 見到的 3D 列印仿生獸作品	▲大人的科學-仿生獸風力模型	▲3D 建模軟體 sketchup 中的仿生獸模型

※實驗流程圖（Research Process）：



陸、討論

Q1.由人類行走所得到的軌跡圖形，是不是能在捕捉更多組數據來分析，以加強實驗的可靠度？

A1.是。但現有的圖形數據，已驗證了實驗的假設為正確的了。

Q2.除了一組一組比較並嘗試出所需的連桿軌跡，能不能建立數學模型來描述之，以求更多種的變化？

A2.是。我們去年曾寫出軌跡的數學解法，但如要產生新軌跡，卻非此簡單。

Q3.能否將物理引擎 phun 中的出力、負載、重力等的實驗數據，與數學模型的計算結果相互印證？（兩者皆以理論值表現，都排除了實際因素的影響）

A3.是。但目前我們只注重在單一個區塊，考慮所有的現象需擴大研究範圍。

Q4.實際影響仿生獸運作的因素除連桿系統與本研究所探討的項目外，應有其他許多變數才是，我們當如何了解研究中所探討的因素，占了行走效果的幾%，又如何證明之？

A4.我們或能比較仿生獸實體運作的狀態，與理論模型預測的表現。

柒、結論

經過我們上述的研究及論證，我們發現欲設計一架可以攀爬樓梯、斜面的仿生獸，必須優先考慮以下兩點，才能提高其效率：

一、軌跡：連桿系統需增加支架與連動軸的長度，產生最適合的連桿比例，以使腳步軌跡產生向上傾斜的角度（須大於斜面的角度）。

【實驗 1-3】

1. 地形起伏的角度，與正常軌跡傾斜的角度相同
2. 所有的軌跡形狀皆為封閉圖形，並不會因地形因素如斜坡、樓梯而改變，

二、負載：利用力矩原理分配較少的負載到曲柄上

【實驗 3-1】

1. 仿生獸自身重力在連桿中的作用力，將成為連桿系統的負載。

【實驗 3-2】

1. 不同的連桿組合與設計，將影響馬達出力功率（%）的大小
2. 比較平均功率與行走速率的關聯性，出力功率起伏越大者，速度較慢
3. 腳尖越靠近重心的連桿設計，其功率起伏較小，而行走速度表現較佳。

【實驗 3-9】

1. 互相串聯起的這一組數據變化確實小於分開的對照組
2. 證實：多個連桿組並聯時，可以幫助抵消部分負載
3. 設計仿生獸時，應採用多組連桿並聯的方式，產生負載相抵的作用

捌、參考資料及其他

1. Geogebra: <https://www.geogebra.org>
2. tracker: <https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>
3. 樂高 <http://www.lego.com/en-us/mindstorms/products/31313-mindstorms-ev3>
4. 泰奧楊森仿生獸：<http://www.strandbeest.com>
5. 大人的科學：仿生獸：<https://www.youtube.com/watch?v=39I0yOIAUs>
6. phun: http://www.algodoo.com/?attachment_id=258
7. sketchup: <http://www.sketchup.com/zh-TW>
8. 維基百科：<http://zh.wikipedia.org/zh-tw/Wikipedia:首页>
9. 師大物理論壇：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/index.php>

