

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

第三名

030104

飛輪騎跡～以 tracker 追蹤姿勢與車身調整，影響身體軌跡運動數據之探究

學校名稱：高雄市立國昌國民中學

作者： 國二 黃柏巽 國二 吳詩涵 國二 王雋鑫	指導老師： 陳惠玲
---	------------------

關鍵詞：飛輪、tracker、功率計

摘要

用 tracker 追蹤身體定點運動數據，探索研究模式！

軌跡加速度部份：取扣片坐姿，選擇 Y 軸速率加速度，確立分析基準。踩踏 Y 軸端點加速度在此只是速度參數，代表此點之前半圈施力力矩的盈餘。調整車身遠離標準坐姿，發現固定轉速加速度偏大，代表一圈內有快慢，圈內升速需更用力。此外，我們用模型推出坐墊位置的調整方案，並找出身體角度影響施力的相關性。

功率計部分：測功率算踩踏力量，發現一圈內快慢加速影響功率數據波動大，可以用回歸判別合理數據。高轉速高功率，發現力量增幅並不大；大齒比需要耗更多力去對抗齒比倍率之外的額外阻力；訓練台功率比對軸心功率，機械效率為 0.8。

圈整踩踏細節，結合功率力量，希望能完整描繪輪轉踩踏的力學輪廓。

壹、研究動機

電視上看到自行車選手們賣力騎車，覺得真的很帥。騎乘施力，網路只有泛泛提出肌肉的轉換，至於調整姿勢與車體對身體用力的影響，並沒有數據細部說明。後來查到了調整騎乘姿勢有一套系統，叫 Fitting，內鍵的程式輸入身體數據與攝影調整，漸漸可以調整出騎乘者最好的姿勢，不知是甚麼道理…。剛好有同學家去年新購買”飛輪”，為了滿足我們的好奇心，決定以各種騎乘變因，利用 tracker 追蹤關節各處的數據變化，無中生有，從軌跡與加速度轉折自行判讀施力，與變因造成的影響，呈現屬於我們對飛輪騎乘的解讀。

貳、研究目的：

(一) 確認 tracker 比對姿勢與數據研究方向~標準坐姿

1. 找出測試員最初最理想、最好施力的飛輪車況拍標準影片
2. 確立各關節點軌跡的與各種數據，確立站姿與坐姿的差異

(二) 基礎調整：身體騎乘姿勢或施力方式改變

1. 只前踩與只後拉對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響
2. 把手不同位置對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響
3. 轉速快慢對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響

(三) 進階調整：飛輪硬體調整

- 坐墊：1. 調整坐墊前後對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響
2. 調整坐墊上下對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響
- 把手：3. 調整把手前後對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響
4. 調整把手上下對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響
- 阻力：5 調整阻力對於騎乘姿勢軌跡與數據的影響騎乘姿勢軌跡與數據的影響

(四)模型分析：整合身體角度與速度加速度之間的關係

1. 確立模型規格，討論不同身高與大小腿比例調整坐墊規則性
2. 測量身體角度，同時討論速度與加速度的關係

(五)功率探討：利用功率計分析踩踏力量

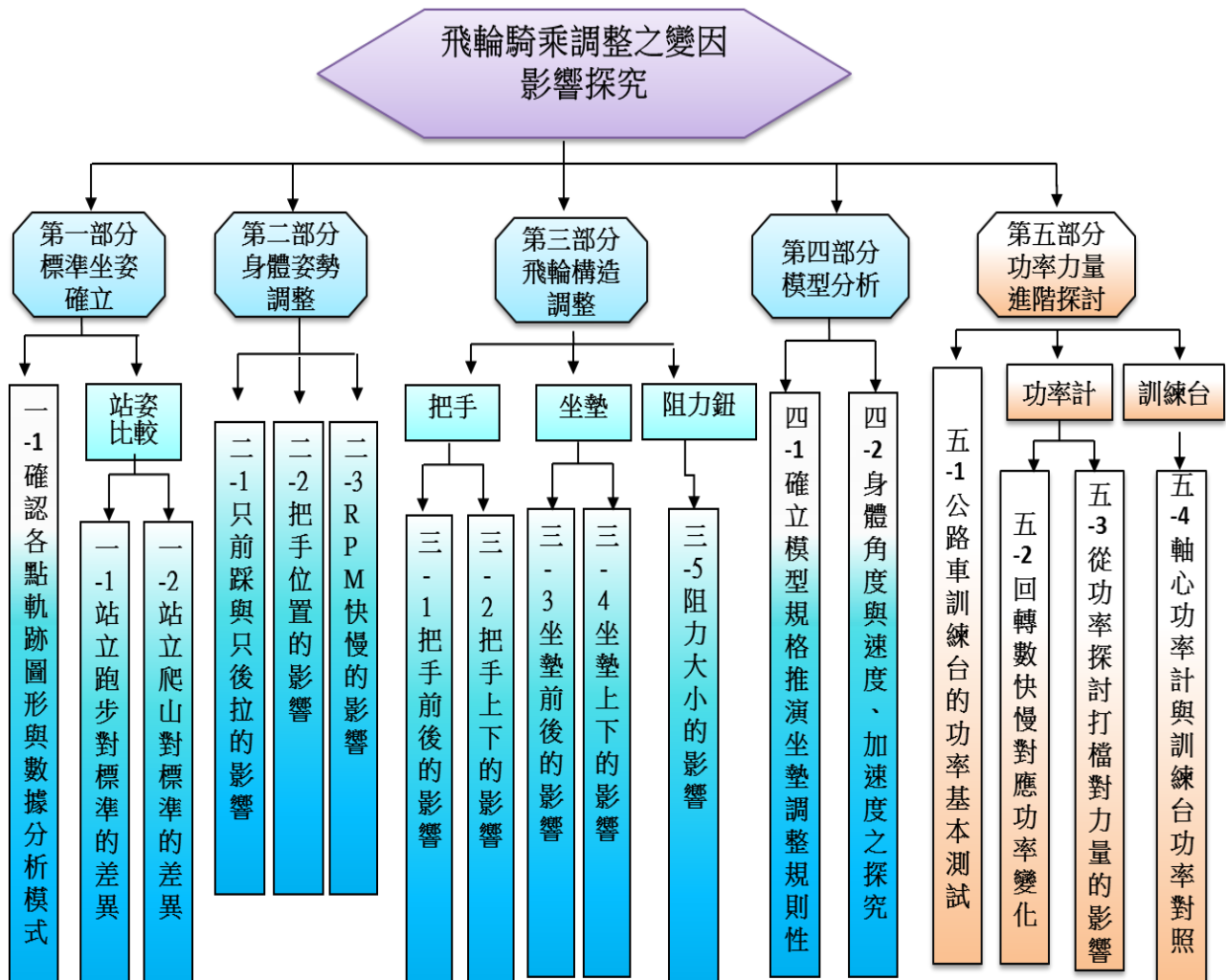
1. 同時抓取 tracker 與功率計，初探公路車訓練台的標準數據
2. 配合打檔與回轉數影響踩踏功率之探討
3. 軸心踩踏功率與訓練台功率比對差異



參、研究器材與思路架構

初階軌跡器材：測試員 1 人，飛輪一輛(BHG7 磁控飛輪車HA993)、量尺一台、直尺、釘書機、圓點標籤貼數包、標記 160 公分長 PVC 塑膠管一根、Tracker 使用軟體、Excel 計算軟體、攝影手機一台，腳架一隻

進階功率主要設備：Xpedo APX COMP 訓練台、ROTOR 2INPOWER 軸心功率計



肆、研究過程

第一部分：標準坐姿確立

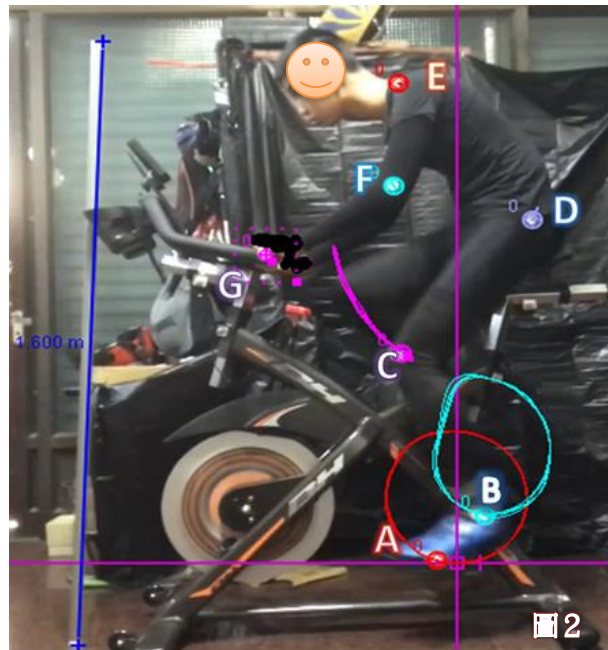
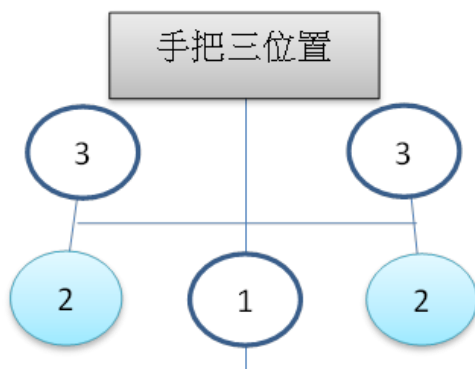
實驗(一)-1 確認各點軌跡圖形與數據分析模式

1. 定義標點：

如圖由下而上 A：扣片，B：腳踝，C：膝蓋，D：髖關節，E：肩關節，F：手肘，G：握把

2. 實驗步驟說明：

- (1) 我們請甲組員全身穿著黑色，在上述關節處貼上直徑 2 公分白圓貼紙，黑色背景下，調整平時最適騎乘的飛輪位置，騎到指定轉速，開始拍攝 10 秒鐘影片。
- (2) 標準影片基本條件：迴轉速度 60RPM，卡鞋施力：前踩後拉，握把位置：側把 2 號位置。阻力 4 為準(阻力定義~以旋轉鈕定點鬆緊 0-13 段，1/4 圈為一段)
- (3) 以 tracker 軟體，取長棍 1.6 公尺作為比例尺，取影片迴轉 1-2 個週期，分析各點軌跡與相關數據。


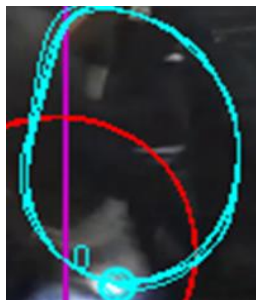
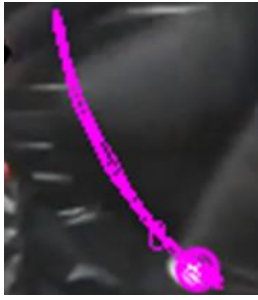


3. 結果與立即討論

標點軌跡圖形說明：

- (1) A：扣片，B：腳踝，C：膝蓋 此三點的位移量數據、軌跡形狀如下圖：

表 1

標點位置	A 扣片	B 腳踝	C 膝蓋
標點軌跡			
X 軸水平最大位移量 Δx	0.3306m	0.2725m	0.1883m
Y 軸垂直最大位移量 Δy	0.3514m	0.3780m	0.3062m
軌跡形狀描述	以五通為軸心的圓形 (上下稍長)	像正立的蛋，水平距離短，垂直距離較長，前踩弧度較陡，蛋尖朝上	是以髌關節為圓心的弧線，水平距離與垂直距離都是三標點中最短的。

(2) D：髌關節，E：肩關節，F：手肘，G：握把 這四點坐姿變化太小則不予考慮



圖 3

標點 ABC 軌跡對應時間數據說明：

1. 以左腳 A 扣片逆時針旋轉定位角度位置
 如圖定義 QRSP 角度為 0、90、180、270 度
 每段區間左右腳同步施力踩拉如右圖，從
 tracker 找出週期軌跡與扣片 A、腳踝 B、膝蓋 C
 標點的各项數據，摘出 XY 軸各三項數據

迴轉 X 水平軸對應時間 t 的關係圖

位置 X-t、速度 V_x-t 、加速度 a_x-t 。

迴轉 Y 垂直軸對應時間 t 關係圖

位置 Y-t、速度 V_y-t 、加速度 a_y-t 。

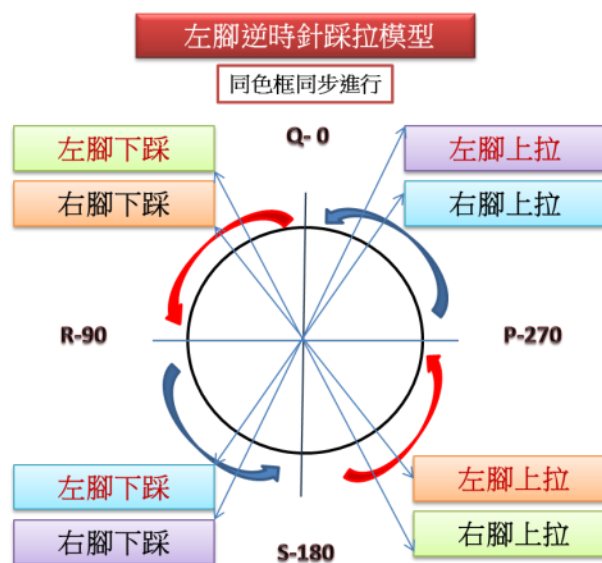


圖 4

表 2		標點 A 扣片	標點 B 腳踝	標點 C 膝蓋
X 軸 標準 坐姿 數據圖	X-t			
	V _x -t			
	a _x -t			
Y 軸 標準 坐姿 標準圖	X-t			
	V _x -t			
	a _x -t			

各點軌跡數據比較討論

1. 以上單一標點有水平 X 垂直 Y 數據六圖，三位置共 18 圖，皆是同一個影片週期，**同步截取**的數據時間相關圖。加上位置標點，可以明顯化速度或加速度出現最大值位置。
2. 以 A 扣片標點而言，X-t 與 Y-t 的軌跡數據對應時間圖相似，速度 V 對應時間圖，過最高點★後，水平速度出現明顯波折，a-t 圖看見用力踩踏的轉折。同時由於垂直軸的速度為 0，因此變化不明顯。
3. 以 B 腳踝 C 膝蓋標點而言，不論 X 或 Y 軸，明顯看出加速度轉折處接近最高點 0 度 90 度後方。

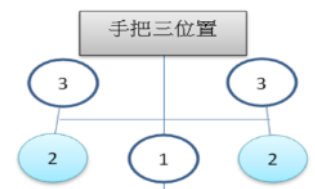
小結論 ABC 三標點，軌儘管軌跡互異，但是不論 X 軸或 Y 軸，看見力量切換的位置相同。但是測試員不會橫向施力，且膝蓋 C 與腳踝 B 的軌跡不規則，因此我們後續的實驗數據只對正圓軌跡 A 點扣片的 Y 軸進行討論。

實驗(一)-2：站姿跑步(平把)和站姿爬山(前把)與標準坐姿的比較

操縱變因：站姿、坐姿 (握把控制為平把 2 號位置)；

握把位置~平把 2、前把 3 (控制皆為站姿)

結果：各點軌跡圖 與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度



類型	站姿跑步(平把)	標準坐姿(平把)	站姿爬山(前把) 表3
軌跡總圖			
A 點數據圖			
y-t	0 度標高：0.35m 180 度標高：0m	0 度標高：0.35m 180 度標高：0m	0 度標高：0.35m 180 度標高：0m
V _y -t	0、180 度速度為 0 90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：0.9m/s	0、180 度速度為 0 90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s	0、180 度速度為 0 90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：0.9m/s
a _y -t	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：7m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²	0 度達最大值：12m/s ² 180 度達最大值：10m/s ²

觀察與討論

(一) 站姿跑步與標準坐姿的比較(手把皆為平把位置)：

腳踝 B 點軌跡比較：標準坐姿為蛋形，站姿跑步為向前傾的蛋形~我們推測為站姿身體髖關節向前，連動腳踝需拉到更前方才開始前踩。

膝蓋 C 點軌跡比較：標準坐姿為弧形，站姿跑步為 8 字形~我們推測為髖關節懸空上下振動影響膝關節畫弧的軌跡變成斜躺的 8 字形

垂直加速度數據比較：差異不大。

(二) 站姿跑步(平把 2)與站姿爬山(前把 3)的差異：

腳踝 B 點軌跡比較：站姿爬山在 270 度到 0 度的位置★，不是畫弧~我們推測站姿爬山，手把更向前的位置，身體向前，腳踝可以拉到更高，拉腳更有效。

膝蓋 C 點軌跡比較：**站姿爬山**，8 字形加大~我們推測是髌關節懸空上下振動更大造成
 站姿爬山，8 字形變得更傾斜~我們推測是髌關節變高，膝關節更能往前帶動造成

(三)垂直加速度 a_v 數據比較：

1. **站姿爬山**比**站姿平把**更大，端點加速度大代表端點瞬時速率大，在同為 60RPM 每圈維持 1 秒之下，端點速率大，代表其他位置有掉速，因此此點前需更用力踩拉大盤。
2. **站姿爬山**對應軌跡在 0 度最高點的最大加速度約延遲 0.02 秒出現佔週期 1 秒約 1/50，看見施力大約在 7.2 度加速度達到最大。
3. **站姿爬山** Y-t 軌跡由 0 度到 180 度再回到最高點 0 度，時間為 0.46 秒、0.54 秒，時間不對稱，代表腳力轉動速率在前半圈快，後半圈慢，施力不均等，。
4. 站姿爬山身體重心更往前，讓站姿跑步的加速度看起來更有波折。

小結論：

測試員在**站姿跑步**與**標準坐姿**的施力與速度圖差異不大

測試員在**站姿跑步**與**站姿爬山**的施力有明顯轉折，造成波形與時間不對稱，推測是

0-180 度的總力矩(左腳踩，右腳拉組) **大於** 180-0 度的總力矩(左腳踩，右腳拉組)

※站姿身體姿勢變動較大不穩定，決定採取坐姿當標準比對數據

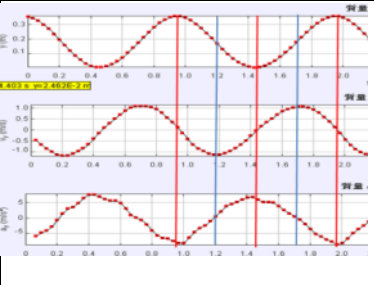
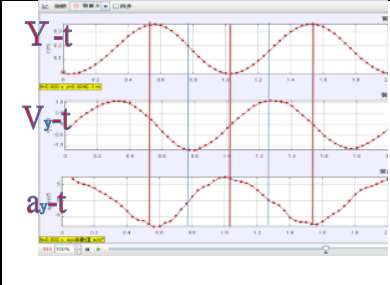
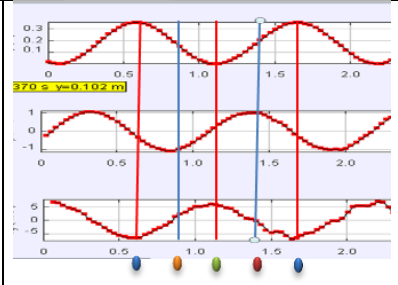
第二部分：身體調整與標準坐姿數據分析比較(非飛輪調整)

實驗(二)-1 坐姿只前踩和坐姿只後拉與標準坐姿的比較

操縱變因：前踩、後拉的差異(其他同標準坐姿)

結果：各點軌跡圖與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較

類型	坐姿 只前踩	標準坐姿 (前踩後拉)	坐姿 只後拉 表 4
軌跡總圖			

A 點數據圖			
速度 V_y-t	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：0.9m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s	90 度達最大值：約 1m/s 270 度的最大值：0.9m/s
加速度 a_y-t	0 度達最大值：10m/s ² (右腳踩) 180 度達最大值：7m/s ² (左腳踩)	0 度達最大值：7m/s ² (右腳踩+左腳拉) 180 度達最大值：8m/s ² (左腳踩+右腳拉)	0 度達最大值：6m/s ² (左腳拉) 180 度達最大值：7m/s ² (右腳拉)

※實驗設計半圈只有對應一隻腳，明顯看出測試員兩腳踩拉腳力不同，左右腳施力如何影響端點數據以下進行討論。

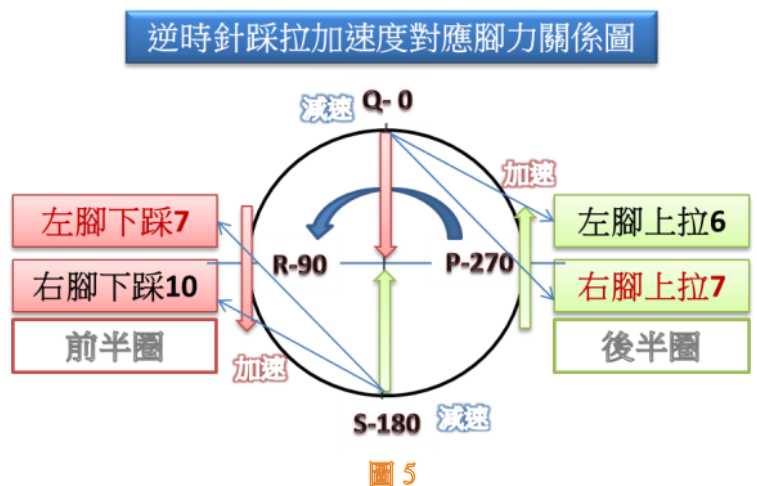
1、探討 y 軸最高低點加速度值，對左右腳踩拉施力的關係

- (1) 當測得端點加速度值，若比標準大，代表瞬時速率快，但是在 60rpm 的定速之下，瞬時速率有快必有慢。因此為了彌補慢下來的速率，腳需要施比標準更大的力量增加力矩，表現結果在端點加速度上。
- (2) QS 端點加速度指向圓心，像是有施力，但是由於施力點在軸心五通上，並不造成力矩提供驅動，因此我們改用端點前總力矩的盈餘造成加速來解讀端點加速度對應的速度值，判斷腳力。
- (3) 腳對於曲柄向下施力，在 90 與 270 度時有最大力矩，驅動轉速最為有效，在 0 度與 180 度力矩為 0，我們推論在圓的第 90 度與 270 度前後區間是加速區，0 度與 180 度無力矩加速，所以是慣性切過，全程均有阻力，若切換施力力矩有小於阻力力矩，隨時會減速。

2. 只前踩與只後拉實驗，比對前踩後拉標準實驗之分析

我們將實驗二-1 只前踩與只後拉的取得單腳踩拉加速度的對應值當腳力參數，整合如圖進行分析如下：

- (一) 只前踩，一圈有兩段施力，我們從 y 軸取得左腳前踩到 180 度、右腳前踩(左腳回 0 度)的瞬間加速度。同理取得只後拉雙腳數據，確認高低點



加速度數據對應腳力進行分析。

(二) 我們有思考過單腳只前踩或只後拉，由於持續施力只有半圈，我們預估會需用更大的力氣去帶動後半圈減少速度，導致數據大增而失真，因此左右腳力，皆由本實驗數據來參考。

(三) 當前踩後拉同時進行的標準坐姿，要保持 60RPM 定速回轉，發現兩腳力量差異大的 180-0 度(右腳踩 6+左腳拉 10)整體表現為 $7m/s^2$ 兩腳力量差異小的 0-180 度(左腳踩 7+右腳拉 7)整體表現為 $8m/s^2$ 推論前踩後拉之後雙腳加速的差異性大減。

(四) 只後拉，是三者端點加速度最小的踩法，要保持 60RPM 回轉數，端點加速度小代表踩踏最為順暢省力。

小結論

1. 同為維持 60RPM 效果，推出踩踏出力 只前踩 > 標準坐姿 > 只後拉。
2. 由數據可以說明，測試員後拉比前踩省力順暢。

※本實驗，發現測試員左右腳力單獨運作有落差，之後操作皆為前踩後拉，施力定義皆改為 0-180 度施力總力矩(左腳踩右腳拉)呈現結果在 180 度的加速度值 180-0 度施力總力矩(左腳拉右腳踩)呈現結果在 0 度的加速度值

實驗(二)-2：握把位置 1 與標準坐姿的比較

操縱變因：握把平把 1 與 2 的差異 (其他同標準坐姿)



結果：各點軌跡圖與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較

類型	握把位置 1	標準坐姿 (平把) 表 5
A 點軌跡圖		
V _y -t	90 度達最大值：1m/s 270 度的最大值：1.2m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s
加速度 a _y -t	0 度達最大值：6.4m/s ² 180 度達最大值：6m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²

討論

1. 兩圖 Y 軸軌跡圖差異不大

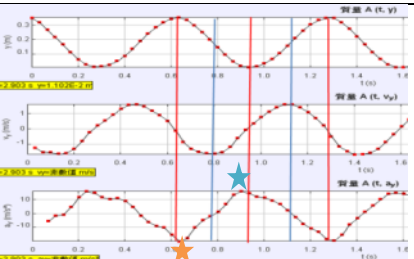
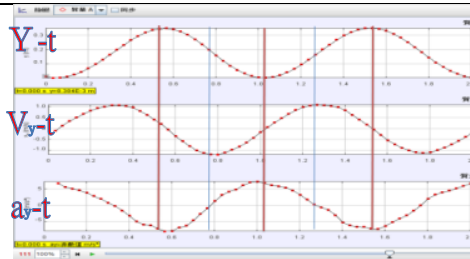
2. 累積力矩讓 270 度速度達 1.2m/s 比標準更快，代表**握把位置 1 的姿勢**有利於左腳拉右腳踩這一組力，加速容易。
3. 握把 1 姿勢 180-回到 0 度那一段，尤其 270-0 度位置，從加速度圖發現出力曲折不順暢。推測測試員在此段切換施力的順暢度大減
4. 比起**標準坐姿**，**握把位置 1** 兩端加速度較小，中間速度變快，代表手把位置影響施力踩拉加速點，左腳在 180-270 度之間。

小結論：手握在**握把位置 1**，從端點加速度與速度值間接推出踩踏加速點偏移。

實驗(二)-3：RPM90 與 60 的比較

操縱變因：RPM90、60（其他同標準坐姿）

結果：各點軌跡圖與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較

類型	RPM90	標準坐姿 (RPM60) 表 6
A 點軌跡圖		
V _y -t	90 度達最大值：1.5m/s 270 度的最大值：1.5m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s
加速度 a _y -t	0 度達最大值：20m/s ² 180 度達最大值：16m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²

討論

1. RPM90 時加速度圖形波折不斷顯現快速踩踏時，測試員雙腳並非順暢施力，在 0 度高點★後，180 度低點★前，有瞬間施力的轉折。
2. RPM90 比 RPM60 快速，時間減少 2/3 倍，若為等速率劃圓，理論速度放大為 1.5 倍，加速度放大為 2.25 倍。
3. 從實際數據看出高轉速時，速度的確變成約 1.5 倍，但是 0 度加速度為 2.85 倍，180 度加速度僅為 2 倍，代表 RPM90，左拉右踩那組的踩踏力矩相對較大，

小結論：RPM90 快踩的時候，可知 0-180 度前踩總力矩小於 180-0 度後拉總力矩

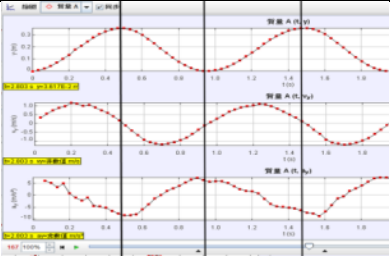
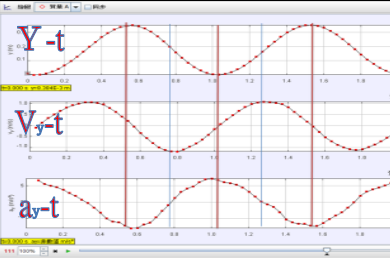
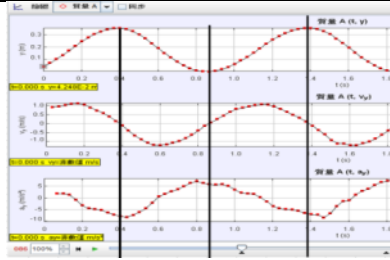
第三部分：飛輪調整四種變因與標準坐姿數據分析與比較

實驗(三)-1：握把向前 5.7cm 和握把向後 3cm 與標準的比較

操縱變因：握把前後調整 (其他同標準坐姿)



結果：各點軌跡圖與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較

類型	握把往前 5.7cm	標準坐姿 (平把)	握把往後 3cm 表 7
A 點軌跡圖			
V_{y-t}	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1.2m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1.2m/s
加速度 a_{y-t}	0 度達最大值：8m/s ² 180 度達最大值：7m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²	0 度達最大值：8m/s ² 180 度達最大值：9m/s ²

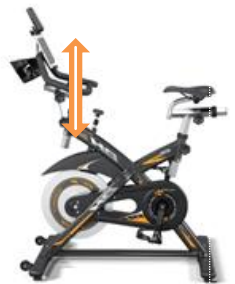
討論

1. 從加速度圖看出，不論握把向前或向後，測試員加速波折明顯，尤其是 180-0 度後半圈。
2. 握把前後距離改變，看見加速度最大值出現在 0 度之後，180 度之前，前半圈時間明顯小於後半圈，代表 0-180 前半圈需要施較大的力氣加速，來抵銷後段肌肉切換不順的變慢。

小結論：

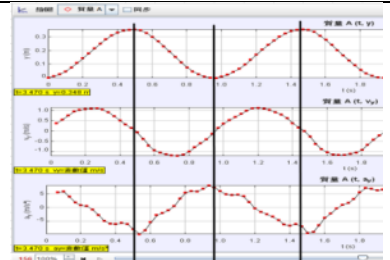
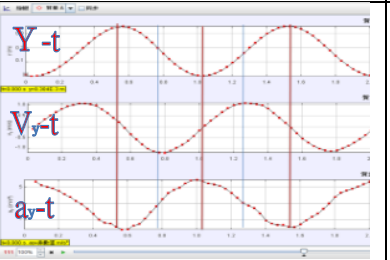
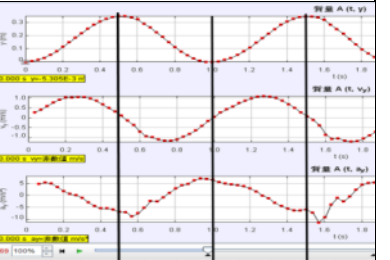
1. 手把位置改變，會導致後半圈肌肉切換不順，尤其是手把往後(向身體)內縮，前半圈須更用力才能維持定速。

實驗(三)-2 握把 向上 5.7cm 和握把向下 5.8cm 與標準的比較



操縱變因：握把高低(其他同標準坐姿)

結果：各點軌跡圖與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較

類型	握把往上 5.7cm	標準坐姿 (平把)	握把往下 5.8cm 表 8
A 點軌跡圖			
V_{y-t}	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1.2m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s	90 度達最大值：1m/s 270 度的最大值：1.2m/s
加速度 a_{y-t}	0 度達最大值：8m/s ² 180 度達最大值：7m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²

討論

1.從加速度圖看出，握把向上向下調，測試員都在 0 度之後加速明顯波折，不過整體而言與標準坐姿差異不大。

小結論：

1. 手把上下調整，都會使肌肉切換不順，但是對於施力大小較無顯著影響

實驗(三)-3：坐墊往前 9.4cm 和坐墊往後 1.3cm 與標準的比較

操縱變因：坐墊往前 9.4cm；坐墊往後 1.3cm (其他同標準坐姿)

結果：各點軌跡圖 與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較



類型	坐墊往前 9.4cm	標準坐姿 (平把)	坐墊往後 1.3cm 表 9
軌跡總圖			
A 點軌跡圖			
V_y-t	90 度達最大值：1.2m/s 270 度的最大值：1.1m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s	90 度達最大值：1.2m/s 270 度的最大值：1.1m/s
加速度 a_y-t	0 度達最大值：9m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²	0 度達最大值：10m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²

討論

1. 坐墊往前使髌骨 D 定點和扣片 A 點直線距離接近，會讓膝蓋突出扣片位置去踩踏，受力有點像膝蓋超過腳尖的深蹲
2. 從加速度圖，不論坐墊向前或向後調整，都會使肌肉切換不順。

小結論：坐墊前後移動，腿的伸展距離不正確，會造成踩踏不順減速，只好用更大的力量來加速才能維持 60RPM。

實驗(三)-4：坐墊往下 12.4cm 和坐墊往上 5cm 與標準的比較

操縱變因：坐墊往下 12.4cm；坐墊往上 5cm（其他同標準坐姿）

結果：各點軌跡圖 與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較



類型	坐墊往下 12.4cm	標準坐姿 (平把)	坐墊往上 5cm 表 10
軌跡總圖			
A 點軌跡圖			
V_y-t	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s	90 度達最大值：1.2m/s 270 度的最大值：1.1m/s
加速 度 a_y-t	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²	0 度達最大值：9m/s ² 180 度達最大值：7m/s ²

討論

- 1.坐墊往下，腳空間受限，看出肌肉切換斷斷續續，但是加速度並未看出需要更多施力。
- 2.坐墊向上，比起向下，肌肉切換順暢不少，但是加速度高低點的加速度與標準相反，代表有利於後半圈出力。

小結論

坐墊向上調，後半圈需出更大的力維持 60RPM。

而坐墊向下最大施力雖與標準值差不多，但是肌肉切換極度不順暢，代表較施力不連續

實驗(三)-5：阻力 8 與 4 的比較

操縱變因：阻力大小增為 8 與 4 比較（其他同標準坐姿）

結果：各點軌跡圖 與 A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度比較

類型	阻力 8	標準坐姿 (阻力 4) 表 11
軌跡 總圖		
A 點軌跡 圖		
V_y-t	90 度達最大值：1m/s 270 度的最大值：1.1m/s	90 度達最大值：1.1m/s 270 度的最大值：1m/s
加速度 a_y-t	0 度達最大值：7 m/s ² 180 度達最大值：8 m/s ²	0 度達最大值：7m/s ² 180 度達最大值：8m/s ²

討論

- 1 以 1/4 圈為 1 段，由 0 開始，選擇阻力 8 與標準阻力 4 做區分。
2. 加大阻力腳踝的軌跡出現胚芽米般的突起，這是腳踝帶動高阻力的扣片拖不動，形成比以往都高的位置。
3. 高阻力的時候，測試員需要加大輸出的肌力以抵抗阻力，才能騎出如同標準姿勢的速度與加速度，但是加速度的曲線斷斷續續，肌肉切換十分不流暢。

小結論

高阻力的時候，需要更高的肌肉力量輸出，抵抗磨擦力所造成的力矩，從加速度數值看不出來，但是從加速度圖，可以明顯看出肌肉分段切換施力。

第四部分：模型製作 身體角度與整體數據分析

實驗(四)-1：確立模型規格推論坐墊

1 車架與下半身 3D 模型製作

量出測試員的身體長度，並量出標準姿勢坐墊(腕關節)與大盤五通(圓心)的水平與垂直距離。用 5:1 的比例縮小設計，自行設計 3D 列印，做成腿部的關節點可活動的模型。規格如圖表所示。

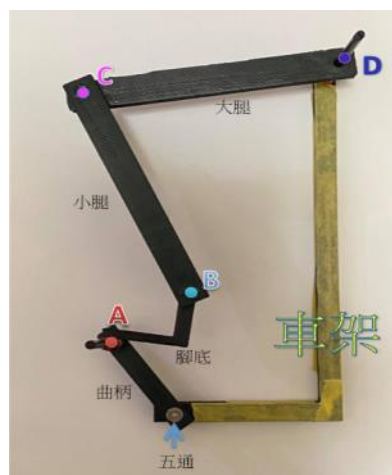
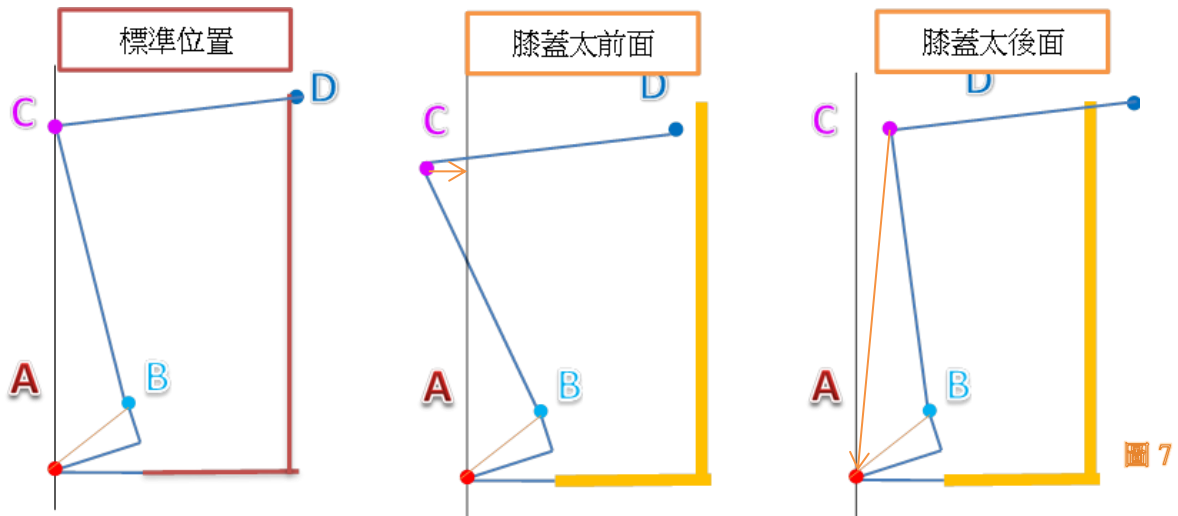


表 12	實際 (公分)	模型 (公分)
大腿	43	8.6
小腿	41	8.2
腳底高	9	1.8
腳底長	13	2.6
曲柄	17	3.4
五通坐墊 水平距離	28	5.6
五通坐墊 垂直距離	66	13.2

圖 6

2.膝蓋對齊扣片踩踏順暢有效之推論

(1)膝蓋對準扣片時定位為大盤 90 度(R 點)



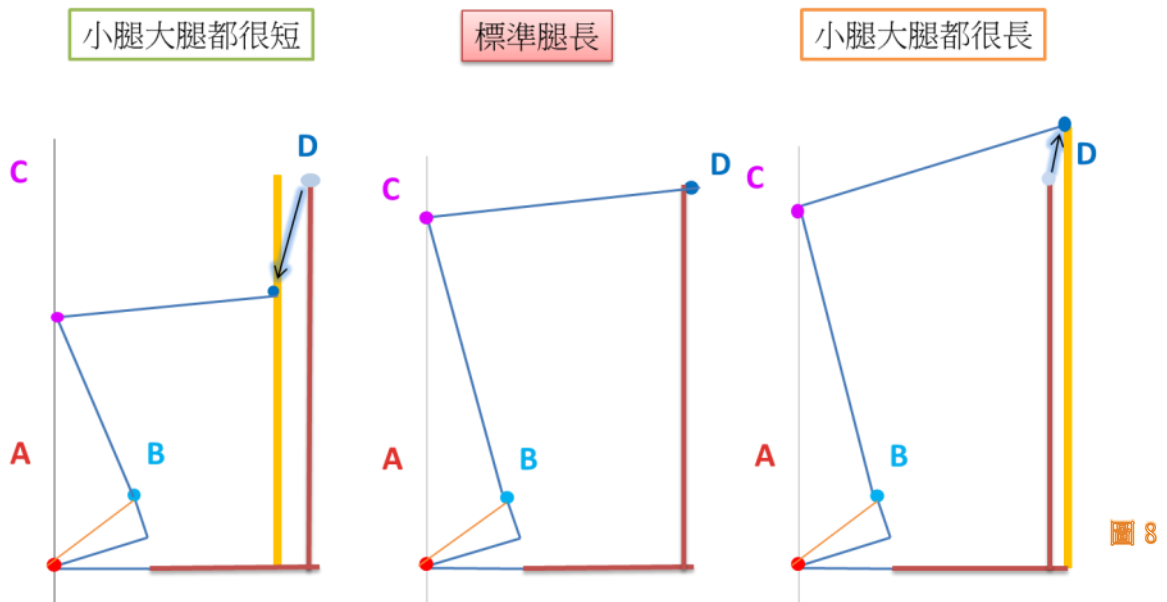
(圖 7 左)膝蓋對齊扣片向下施力，垂直踩動踏板，最有效能

(圖 7 中)膝蓋突出扣片點太前面，導致前採用力類似錯誤的深蹲，因 C 點與施力垂線的力臂從 0 到有（突出），所以造成旋轉力矩，突出越多越傷膝蓋。

(圖 7 右)膝蓋太後面，則是對 A 點施力方向傾斜，垂直施力為分力，沒有效率。

3 在坐墊調整的規則性(以 C 點對齊扣片為前提)

(1)標準腿長變長變短(等比例放大、縮小)

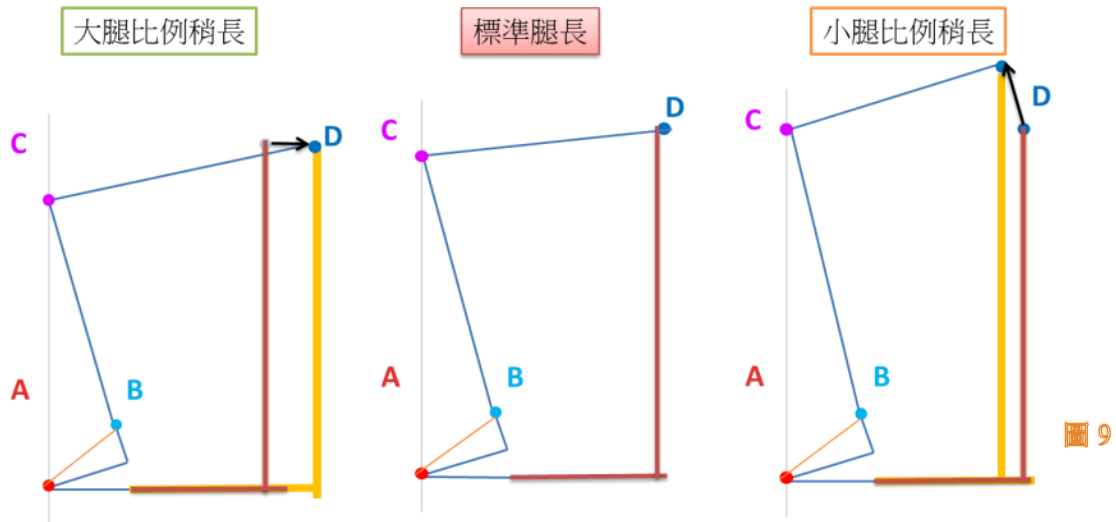


(圖 8 左)若嬌小的人，小腿大腿都很短則可降 D 點、前移 D 點

(圖 8 右)若高大的人。小腿大腿都很長則可升 D 點、後移 D 點

(2)相同腿長比例調整 (大小腿不同比例)

我們將大腿小腿加減定量長度，保持總腿長不變去作圖

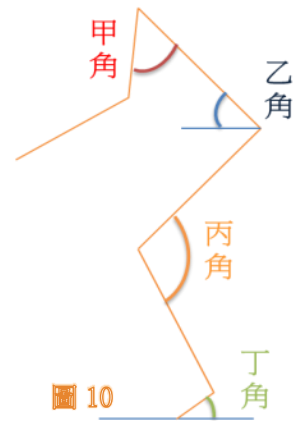


(圖 9 左)若大腿比例稍長則直接後移 D 點
 (圖 9 右)若小腿比例稍長則可調升 D 點、前移 D 點

實驗(四)-2：身體角度與速度加速度之探究

整合 1. 身體角度

- 定義：
- 甲角 肩膀 E 夾角之間的角度
 - 乙角 腕骨 D 為軸心水平與上半身之間的角度
 - 丙角 膝蓋 C 夾角之間的角度，依踩踏取最大與最小角
 - 丁角 腳踝 B 運行到最高與最低點與扣片 A 之間的角度



從影片定格，我們量出個別身體角度，與速度、加速度一同表列如下

表 13	V_y (m/s)				a_y (m/s ²)				身體角度(度)						
	0	90	180	270	0	90	180	270	甲(肩手)	乙(腰上)	丙(膝蓋)		丁(腳底)		
												最小	最大	最小	最大
標準坐姿	0.0	1.1	0.0	1.0	7.0	0.0	8.0	0.0	45.0	50.0	58.0	113.0	50	75	
站姿跑步	0.0	1.1	0.0	0.9	7.0	0.0	7.0	0.0	44.6	52.1	67.0	139.7	43.8	80.3	
站姿爬山	0.0	1.1	0.0	0.9	12.0	0.0	10.0	0.0	43.1	41.8	65.1	134.9	48.1	85.37	
只前踩	0	1.1	0	0.9	10	0	7	0	44	45	61	112	53	70	
只後拉	0	1	0	0.9	6	0	7	0	40	50	66	112	51	73	
手把位置一	0	1	0	1.2	6.4	0	6	0	46.5	68.4	59.6	112.5	56.3	64.4	
RPM90	0	1.5	0	1.5	20	0	16	0	47	50	59	112	64	70	
手把往前5.7cm	0	1.1	0	1.2	8	0	7	0	52	59.8	61.7	119.7	53.4	64.3	
手把往後3cm	0	1.1	0	1.2	8	0	9	0	52.5	60.5	61.4	117.2	51.8	66.9	
手把往上5.7cm	0	1.1	0	1.2	8	0	7	0	42.7	70.8	61.5	120.1	60	75.6	
手把往下5.8cm	0	1	0	1.2	7	0	8	0	50.5	58.2	59.4	117.6	51	74.2	
坐墊往前9.4cm	0.0	1.2	0.0	1.1	9.0	0.0	8.0	0.0	28.0	48.0	56.6	113.9	66.6	80.8	
坐墊往後1.3cm	0.0	1.2	0.0	1.1	10.0	0.0	8.0	0.0	48.9	48.4	59.4	118.1	52.6	71.3	
坐墊往下12.4cm	0.0	1.1	0.0	1.0	7.0	0.0	8.0	0.0	53.4	64.0	46.0	89.3	63.8	71.5	
坐墊往上5cm	0.0	1.2	0.0	1.1	9.0	0.0	7.0	0.0	50.4	43.5	65.2	130.3	53.9	65.8	
阻力八	0	1	0	1.1	7	0	8	0	45	60	59	117	62	60	

從表格中，我們用身體角度做雷達圖，以標準坐姿為準，對於差異較大的數據加以探討。

上半身身體角度(肩手、腰上)

1. 肩膀的角度比標準大：手把位置一、手把前後、手把往下。
2. 腰的角度比標準大：手把位置一、手把往上、坐墊往下、阻力 8 時。這些變因讓身體**挺起來**，腰上角變大
3. 腰的角度比標準小：站姿爬山、只前踩、RPM90、坐墊往上。這些變因比較傾向**用力前踩**造成

小結論:

1. 改變手把或坐墊位置，都會同步改變上半身的肩膀角與腰上角。
2. 只要身體挺起來，腰上角會變大，當需用更多力時，腰上角變小最明顯

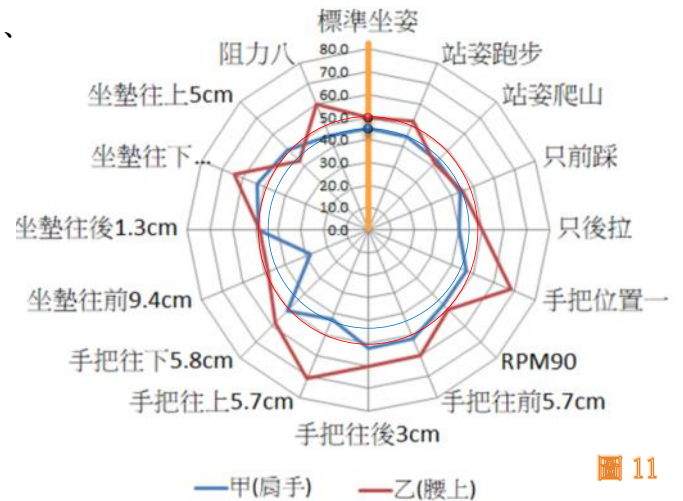


圖 11

下半身身體角度(膝蓋最小角與最大角)

1. 在站姿跑步與爬山、坐墊往上、，膝蓋角**最大角度**比標準大，推論這種姿勢讓膝蓋活動空間變大，所以膝蓋最大角度變大
2. 除了站姿之外在、只後拉、坐墊向上，膝蓋**最小角度**比標準大，推論這拉提出力可以使最高點膝蓋最小角再放大。而飛輪高度調整一定會影響。
3. 在坐墊往下時。膝蓋的最小與最大角度都比標準小。推論這種調整腿活動被壓縮到，不論上提前踩，腿都無法伸展開來。

小結論:

對於膝蓋最大角與最小角的影響因子，主要來自膝蓋活動空間(站姿、坐墊上下調整)，另一個因子是是否提拉出力。

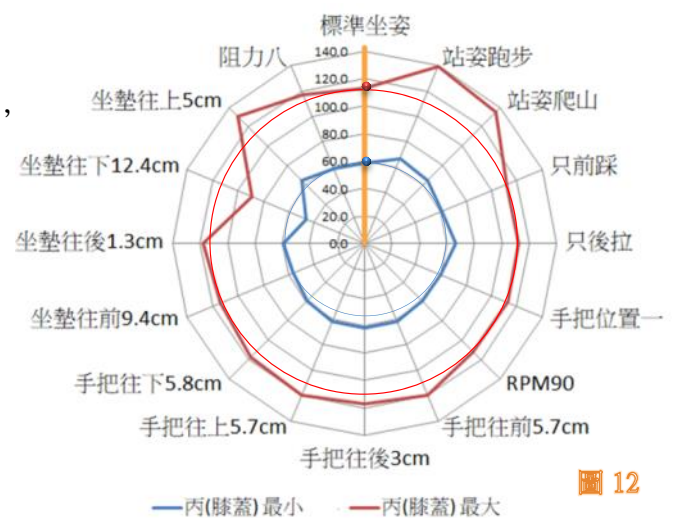


圖 12

下半身身體角度(腳踝)

1. 站姿時，因為是站著的，所以腳踝最小角度變小，因為提拉施力，所以最大角變大。這組變化最明顯。
2. 手把位置一時，腳後拉時無法完全舒展開來，所以最大角變小。
3. 阻力 8 時，因為比較偏重前踩，腳踝最大角變小很多，幾乎與最小角重疊。

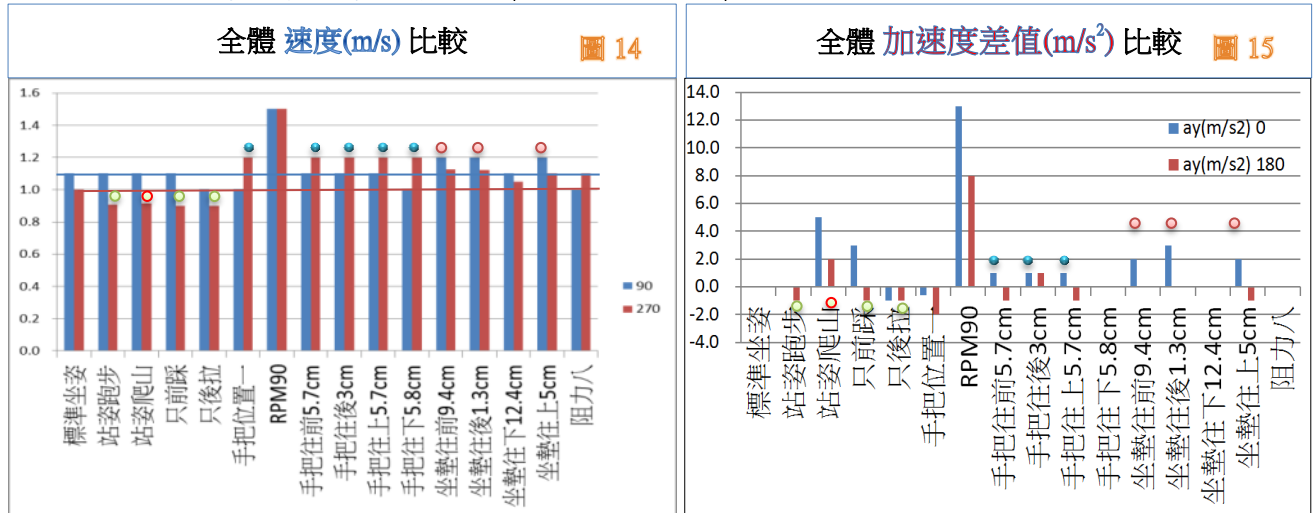
小結論:

1. 站姿腳踝角度變化最大，可以有效活動踝關節
2. 只要身體挺起來，腳踝角度最大角就會變小，重踩，腳踝角度最大角就會變小



圖 13

整合 2.全體速度與加速度差值比較(A 扣片 Y 軸數據)



- (1) RPM90 回轉數快，會造成速度與加速度暴增，在這裡不予比較。
- (2) 跟標準坐姿對比，坐墊調整除了向下之外在 90 與 270 度都相對較大，也看出回到 0 度加速度正差值較大，代表本範圍踩踏需施較多力矩維持增速。
- (3) 站姿、只前踩，只後拉，在 270 度速度相對最慢，從 180 度的加速度差值可看出早已經降速，其中站姿爬山 180 度是較快的，到 270 度降速最多，代表此區較難施力。
- (4) 跟標準坐姿對比，270 度時速度較大的有手把位置一、手把調整，對照加速度 0 度數據差值有三項比標準大，我們認為手把調整有利於後半圈出力
- (5) 只後拉和手把位置一的加速度都較小，所以騎乘時可以透過改變握法和穿卡鞋上提來省力。

小結論

從各個影片速度與加速度差值兩圖相比對，可以抓到相對速度變快或變慢，得知測試員是在哪裡施力與加速效果，進而得知調整姿勢或飛輪硬體對踩踏的影響力。

第五部分：踩踏力量與功率之探討

緣起：前方實驗是分析迴轉加速度所代表的物理意義，但是卻無法進一步推斷測試員到底出多少力量。後來在單車功率簡介，發現一條公式：

$$\text{踩踏功率 } P(W) = \text{踩踏力量 } F(N) * \text{迴轉速度 } V(m/s)$$

我們的 tracker 可以抓取整圈踩踏速度的細節，若能結合踩踏功率的數據，可以推論踩踏力量，完整描繪輪轉踩踏的力學輪廓。於是我們尋找功率計，終於借到用單車工作室的固定式裝備，由飛輪轉成公路車訓練台，模擬公路車外騎，進階探究身體力量的展現。

使用器材

訓練台: Xpedo APX COMP(提供阻力)
 功率計: ROTOR 2INPOWER 軸心功率計
 其他設備: Cervelo 公路車架 Osymetric 橢圓盤 shimano ultegra
 變速系統, 曲柄 17.1 公分

實驗方法

- (1) 先以如前方飛輪標準，拍攝公路車訓練台標準影片，並同



圖 16

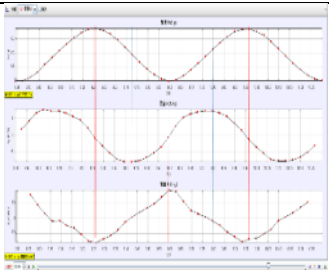
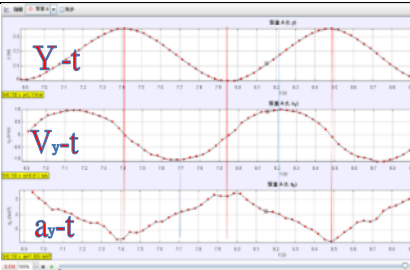
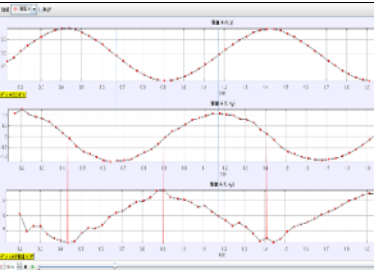
步讀取軸心功率計當踏頻達到 60 瞬間功率數值。

- (2) 迴轉速度 60RPM、卡鞋前踩後拉，手握側把 2 號位置，以 tracker 軟體，取影片迴轉 1-2 個週期，分析各點軌跡與相關數據。

實驗(五)-1 以加快踏頻與加大訓練台阻力，對公路車標準坐姿的功率影響之基本測試

結果：各點軌跡圖 ,A 點扣片點 tracker Y 軸分量 ~位置、速度、加速度與功率比較

表 14

類型	高速 RPM90 正常阻力	標準坐姿 (RPM60 正常阻力)	加大阻力 RPM60
A 點軌跡圖			
V _y -t	90 度最大值：1.56m/s 270 度最大值：1.47m/s	90 度最大值：0.99m/s 270 度最大值：1m/s	90 度最大值：1.14m/s 270 度最大值：1.11m/s
加速度 a _y -t	0 度最大值：16.06m/s ² 180 度最大值：18.30m/s ²	0 度最大值：7.73m/s ² 180 度最大值：7.08m/s ²	0 度達最大值：9.13m/s ² 180 度最大值：8.59m/s ²
最大功率(w) /有效力量	235W / 145.89N (14.89kgw)	129W / 120.13N (12.26kgw)	361W / 336.16N (34.30kgw)

討論：

1. 從飛輪換成公路車訓練台，需重新定義標準坐姿，從飛輪分析經驗。從波形可以看出測試員在標準坐姿的加速度圖不如之前飛輪曲線順暢。
2. 相同訓練台阻力，相同檔位(中盤-6 檔)，當由 60 變 90 RPM 時，轉速變 1.5 倍，加速度增加兩倍多，功率大增 1.82 倍，但是力量只有增加 1.21 倍。由此可知**轉速拉快，力量微增加乘可達的高功率踩踏。**
3. 訓練台的波形加速度顯示，一圈踩踏忽快忽慢，加上施力不均等，對應到我們現場的**功率數據的確非常波動**，因此我們本測試只取最大功率對應最大有效力量置於上表。
4. **同為 60RPM，最大功率直接正比於踩踏最大力量。**

小結論：公路車訓練台，測試軌跡圖與飛輪一致。從功率除以轉速，可以推出當下的有效力量。踩踏功率數據一直是波動的，與前方飛輪基礎探討吻合。

實驗(五)-2：回轉數快慢對應功率變化

操縱變因：回轉數 40~100rpm

步驟：訓練台調整中等阻力，檔位中盤 6，標準坐姿，請測試員由 40rpm 一路加速，同步拍攝軸功率計的數值。將所有數據讀出作圖，並將特定迴轉瞬間功率找出，計算最大力量。

結果

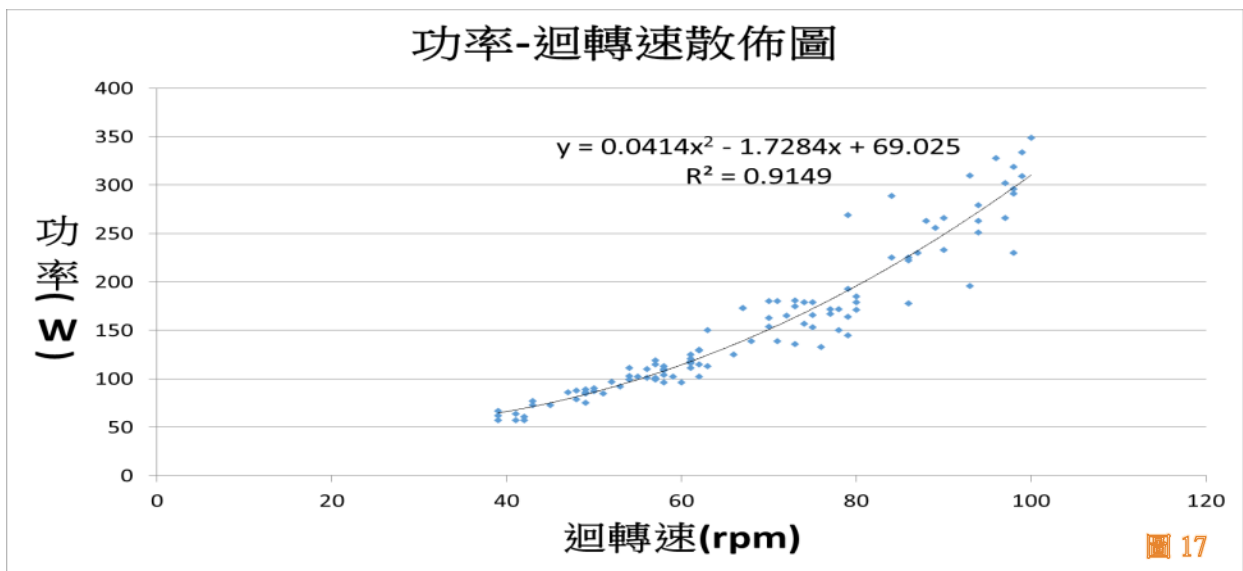


圖 17

回轉數(rpm)	功率(W)	轉速(m/s)	最大力量(N)	最大力量(kgw)	回歸功率(W)
40	64	0.72	89.40	9.12	66
50	90	0.89	100.57	10.26	86
60	119	1.07	110.81	11.31	114
70	154	1.25	122.92	12.54	151
80	185	1.43	129.20	13.18	196
90	266	1.61	165.13	16.85	249
100	349	1.79	194.99	19.90	310

表 15

討論:

1. 由於我們使用的功率計是扭力感測，瞬間是否施力，會波動功率數值。又因每 1.5 秒讀取一次的設定，使得相同轉速之下，數據顯示是一段對應範圍，而非一個對應數據。
2. 我們做出遞增的回轉數，取最大功率，計算總施力，發現回轉數高，施力越大，而功率暴增。
3. 儘管數據很波動，本次實驗可以找出功率的回歸方程式，找出最符合的功率數值，80rpm 前，與實際對應的功率很接近。以此固定阻力到了 100rpm，功率暴增，測試員心率過高，我們立即停止實驗，導致終端數據分布過少，末端回歸功率值未貼近真實狀況。

小結論：固定阻力，連續加速施力時，切過回轉數得到的瞬間功率，數據合理。

實驗(五)-3 從功率數據探討打檔對力量的影響

操縱變因：檔位齒比

(1)前盤：大盤 52 齒、中盤 34 齒

(2)訓練台飛輪：(1-11 檔分別為 32-28-25-22-20-18-16-14-13-12-11 齒)

步驟：訓練台調整中等阻力，60rpm 標準坐姿，請測



圖 18

試員由中盤 2 檔一路打檔到大盤 11 檔，同步拍攝軸功率計的數值，並將特定迴轉瞬間功率找出，計算最大力量。

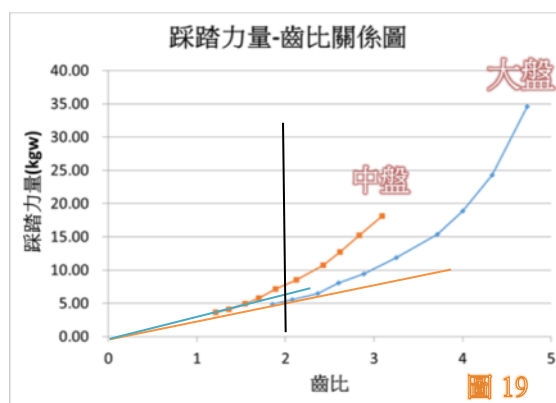
結果

表 16

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
檔位	前盤齒數	飛輪齒數	齒比	迴轉速(RPM)	最大功率(W)	轉速(m/s)	最大踩踏力(N)	最大踩踏力(kgw)	I/D
中2	34	28	1.21	60	38	1.07	35.39	3.61	2.97
中3	34	25	1.36	60	43	1.07	40.04	4.09	3.00
中4	34	22	1.55	60	52	1.07	48.42	4.94	3.20
中5	34	20	1.70	60	61	1.07	56.80	5.80	3.41
中6	34	18	1.89	60	75	1.07	69.84	7.13	3.77
中7	34	16	2.13	60	90	1.07	83.81	8.55	4.02
中8	34	14	2.43	60	113	1.07	105.23	10.74	4.42
中9	34	13	2.62	60	134	1.07	124.78	12.73	4.87
中10	34	12	2.83	60	160	1.07	148.99	15.20	5.37
中11	34	11	3.09	60	191	1.07	177.86	18.15	5.87
大2	52	28	1.86	60	51	1.07	47.49	4.85	2.61
大3	52	25	2.08	60	58	1.07	54.01	5.51	2.65
大4	52	22	2.36	60	68	1.07	63.32	6.46	2.73
大5	52	20	2.60	60	85	1.07	79.15	8.08	3.11
大6	52	18	2.89	60	99	1.07	92.19	9.41	3.26
大7	52	16	3.25	60	125	1.07	116.40	11.88	3.65
大8	52	14	3.71	60	162	1.07	150.85	15.39	4.14
大9	52	13	4.00	60	199	1.07	185.31	18.91	4.73
大10	52	12	4.33	60	256	1.07	238.39	24.33	5.61
大11	52	11	4.73	60	364	1.07	338.96	34.59	7.32

討論

1. 由簡單機械單車齒比，可以理論推算其施力倍數(低齒比輕踩，高齒比重踩)。但是從實測數據，只有低齒比 2 以下與力量較符合正比
2. 定速之下高齒比的踩踏功率大增，來自踩踏力量大增，而增幅遠大於齒比增加，大盤高齒比尤其明顯難踩。



小結論：高齒比大於 2 時，需要出更多的力量去抵抗齒比放大倍率之外的阻力。符合在外真實路騎的身體經驗。

實驗(五)-4：軸心功率計與訓練台功率對照

說明：我們的設備，可以得到軸心功率，也有訓練台阻力含意，於是進行最後一個實驗…

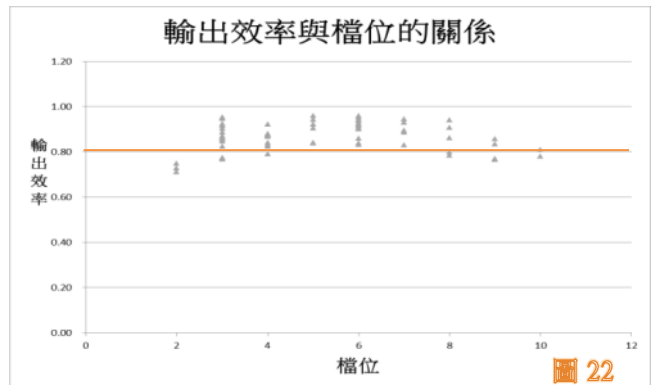
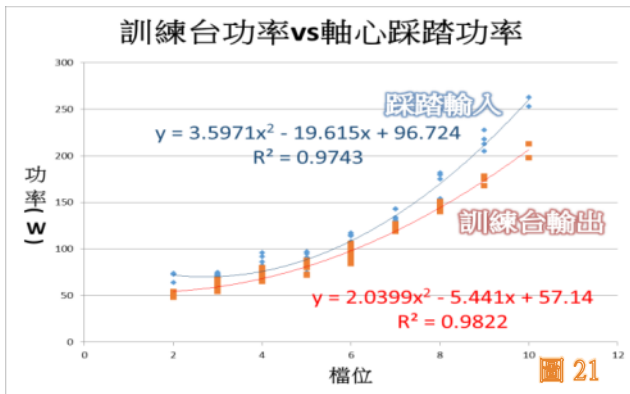
操縱變因：軸心和訓練台功率比對



圖 20

步驟：訓練台調整中高阻力，全程中盤踩踏 60 RPM，標準坐姿，請測試員由 2 檔踩到 10 檔，同步拍攝兩種功率計的數值，擷取整數踏頻的功率。同時比對作圖。

結果



討論

1. 軸心功率計感受踩踏力量輸入功率，數據大較為波動，而訓練台功率是力量傳動到終端抵抗阻力展現的輸出功率，數據小較為穩定。
2. 一開始的 2 檔踩踏功率比 3 檔大。是因為當時掉速後拼命加速更大力，剛好在大力加速過程中通過 60rpm，功率比 3 檔大
3. 我們做出各檔位 訓練台輸出功率 / 踩踏輸入功率，即為**機械效率**，大約為 0.8，在此數值之上的機械效率，推論是踩踏一圈偵測到非加速中的功率降低所導致。

小結論

同時偵測的訓練台功率小於軸心踩踏功率，中間的差值推測是傳動損耗，檔位越高越難踩，損耗越大，但是機械效率約維持 0.8 波動不大。

伍、整體討論

一、等速率圓周運動在 y 軸投影的數學意義找理論值

我們在網路影片圓周運動投影(參考資料二)截到一個圖，針對 Y 軸數據重製說明如下

圓周運動的數學意義

→ 恰為等速率圓周運動在直徑上的投影

參考圓模型：逆時針運轉

<< 投影 >>

位置 $\bar{y}(t) = R \cos\theta = R \cos\omega t$

速度 $\bar{v}(t) = -v \sin\theta = -R\omega \sin\omega t$

加速度 $\bar{a}(t) = -a_c \cos\theta = -R\omega^2 \cos\omega t$

角速度 ω 半徑 R
週期 T

圖 23

(一)理論 Y-t Vy-t ay-t 軸探討

參考圓模型，逆時針旋轉，投影到 Y 方向

位置 $y=R\cos\theta = R\cos\omega t$

速度 $V_y=-V\sin\theta = -R\omega \sin\omega t$

加速度 $a_y=-a\cos\theta = R\omega^2\cos\omega t=\omega^2 R\cos\omega t= \omega^2 * y$

(二) 由於等速率圓周運動，在 y 軸投影上

半徑 R 最大速率 V、最大加速度為定值，若踩踏劃正圓，選一個週期做的圖形都是三角函數的平滑曲線

(三)我們量出 A 扣片到五通的半徑是 17.1 公分，若

60RPM 等速率圓周運動，對於*Y 軸投影

最大速率 $V_y=2\pi R/T=1.1 \text{ m/s}$ (出現在中間，RP 點)

最大加速度 $a_y=v^2/R=6.8 \text{ m/s}^2$ (出現在兩端，QS 點)

(四)當 0 度位置加速度大，代表速率大，也就是左腳拉右腳踩效能大，當 180 度位置加速度大，則是右腳左腳踩右腳拉效能大。

(五)從理論數據來解讀標準坐姿數據，測得的速率 1

m/s、加速度 7 m/s^2 與 8 m/s^2 ，測試員在標準坐姿時，上下加速度不同，代表不是等速率劃圓。

(六) 儘管標準坐姿不是等速畫圓，但是我們的各實驗 tracker 數據分析都以標準坐姿為基準去比對，用端點加速度偏差值輔以 90、270 度的速度值，解讀各種變因對測試員運動效果的影響，並不影響討論結果。

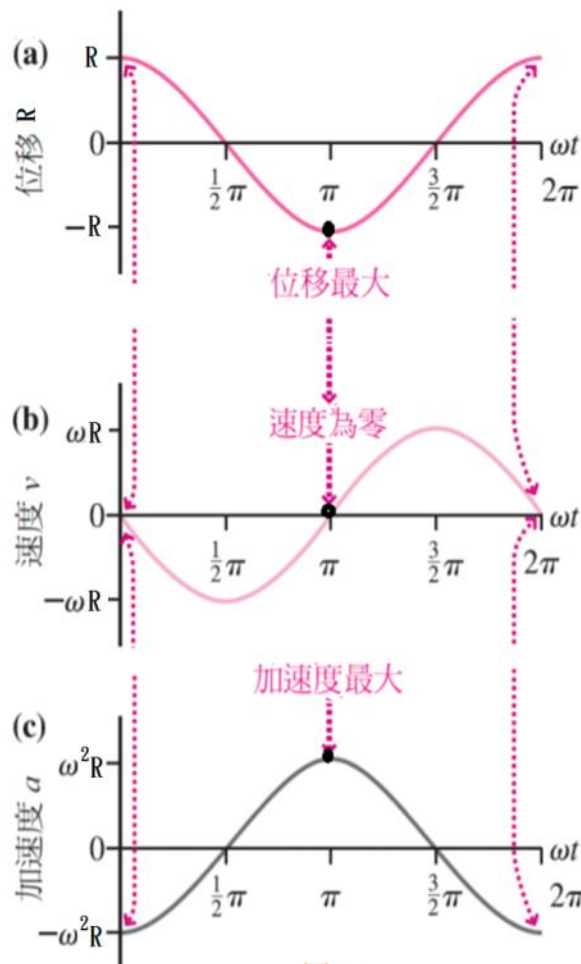


圖 24

二、身體標點軌跡解讀探究

(一)各點軌跡通則

坐姿踩踏軌跡：髖關節 D、大盤五通 O 為不動點，扣片 A 點固定於腳踏板上劃圓，踝關節 B、膝關節 C 隨踏板前踩後拉出現不同的軌跡

表 17	五通 O	扣片 AA	踝關節 B	膝關節 C	髖關節 D
坐姿	不動點	圓形軌跡	蛋形軌跡	弧形軌跡	不動點
站姿	不動點	圓形軌跡	蛋形軌跡	8 字弧形軌跡	上下彈震

A 點圓形軌跡：我們以卡鞋扣片固定於踏板定點，因此軌跡為**正圓型**。

B 點蛋型軌跡：由於扣片 A 點前踩後拉，踝關節隨之上提(下壓，導致原本正圓的軌跡變成水平縮減，垂直加長的**蛋形**

C 點弧形軌跡之解讀：

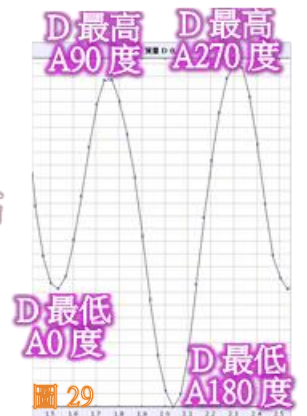
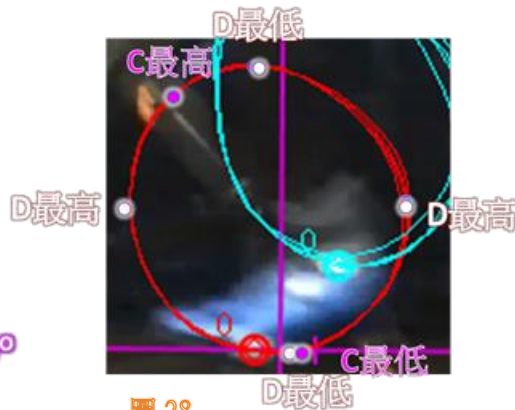
D 為不動點，則膝關節 C 點為以 D 點為圓心的弧型擺動
 為彈震點與關節 C 同步上升或下降，會出現弧線中心交叉的 8 字形，站姿換腳導致腕關節
 上下震動，一周期兩次。D 彈震較大如站姿，8 自行軌跡會特別明顯。坐姿不明顯。

(二) 以站姿爬山為例，軌跡細部探究

踩 1 圈擷取影片，間格為 1/8 圈，踝關節 B 膝關節 C 腕關節 D 相對應位置以圓點圈起來



從一格一格觀察，我們找到腕關節 A、膝關節 C 和腕關節 D 的同步軌跡對應關係，標示如下



測試員身體軌跡說明(圖 30)

- (1)膝關節 C 軌跡是從左上大角度往下到右下，再往上小角度回到到左上，中央交叉。
- (2)當左腳或右腳前踩到 90 度，會有反作用力使髌關節 D 點往上頂，達到最高。
- (3)膝關節 C 點最高並不是扣片 A 點最高，而是在約 A 點 35 度產生膝關節 C 最高。
- (4)因為腳踩到最低 180 度，髌關節 D 點就是最低，大腿往下接近垂直，造成 ACD 點都同時在最下。
- (5)因為站姿下移會碰到坐墊，所以從 8 字形坐姿的弧線應該是位於站姿八字的下緣如黃線所示，臀部的震動大小如雙箭頭長短所示

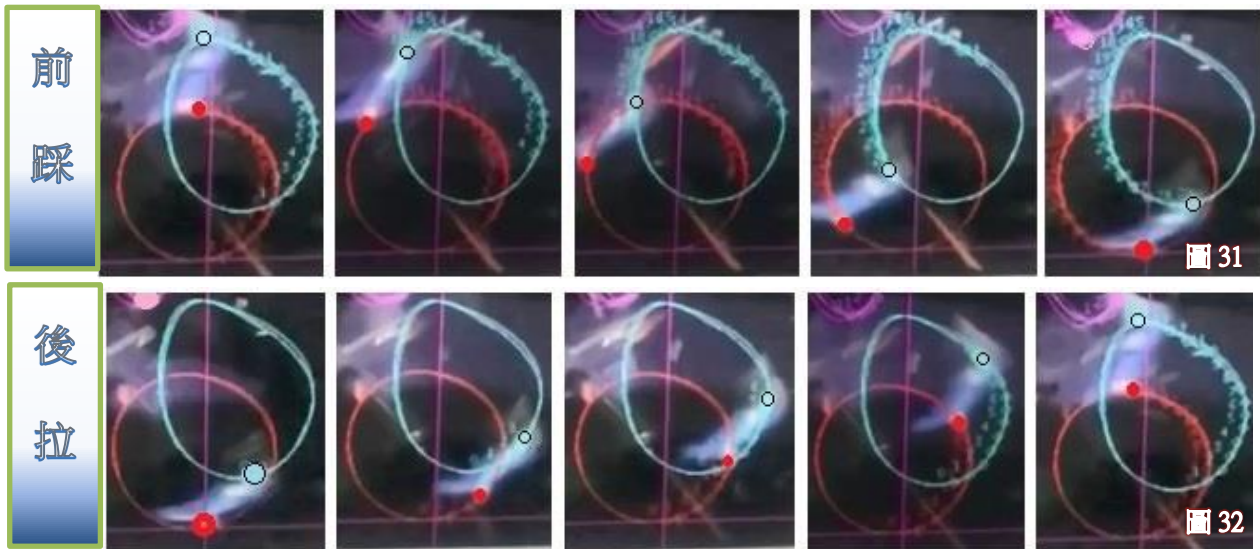


(三)踝關節軌跡 蛋形探討

取站姿爬山，將一次循環分割成 8 等份，量出扣片與踝關節的角度如下

A點角度	0度	45度	90度	135度	180度	180度	225度	270度	315度
AB點水平角度	88.7	61.8	53.2	48.1	41.4	40.5	47.6	52.1	65.7

表 18



我們取軌跡重疊影像製圖，說明測試員左腳腳踝 B 與扣片 A 點關係

1. 在後拉時，腳尖被扣片卡住，所以只有腳跟上抬。下壓時，因為力量集中在扣片上，為了方便施力，所以腳尖下壓。
2. 整體而言若踝關節都不偏移，理論上軌跡與扣片都是正圓形，但是腳後拉時，會造成踝關節向左(內)向上偏移，腳前踩時又急速向右(內)偏移更多，因此行成蛋型的軌跡如圖 33。



3. 對應 A 點扣片 4 等分圓，製出腳踝角度連續軌跡圖，白線代表 0-90-180-270 蛋型四等分軌跡。

4. AB 點水平角度討論

(1)270-0 度：後拉比前踩大很多，造成右上圓的曲線直接偏離圓形軌跡，往左上方切過去

(2)0-90 度：前踩上半段是由高角度還原，踝關節的軌跡會向內縮，形成向下陡切的角度。

(3)90-270 度：腳踝角度差異不大，因此貼近圓型。

5.蛋型軌跡可看出站姿爬山在 270-0 度的施力很吃重。與加速度值 0 度高達 12m/s^2 相符。



三、踩拉飛輪之肌肉切換與加速度探討

(一)、騎車鍛鍊的肌肉與迴轉位置的關係。

大腿 大腿正面的股四頭肌（大腿正面的四股肌肉）在騎行過程中起重要作用，它們在每一次向下蹬踏時有力的推動腿部和膝部。

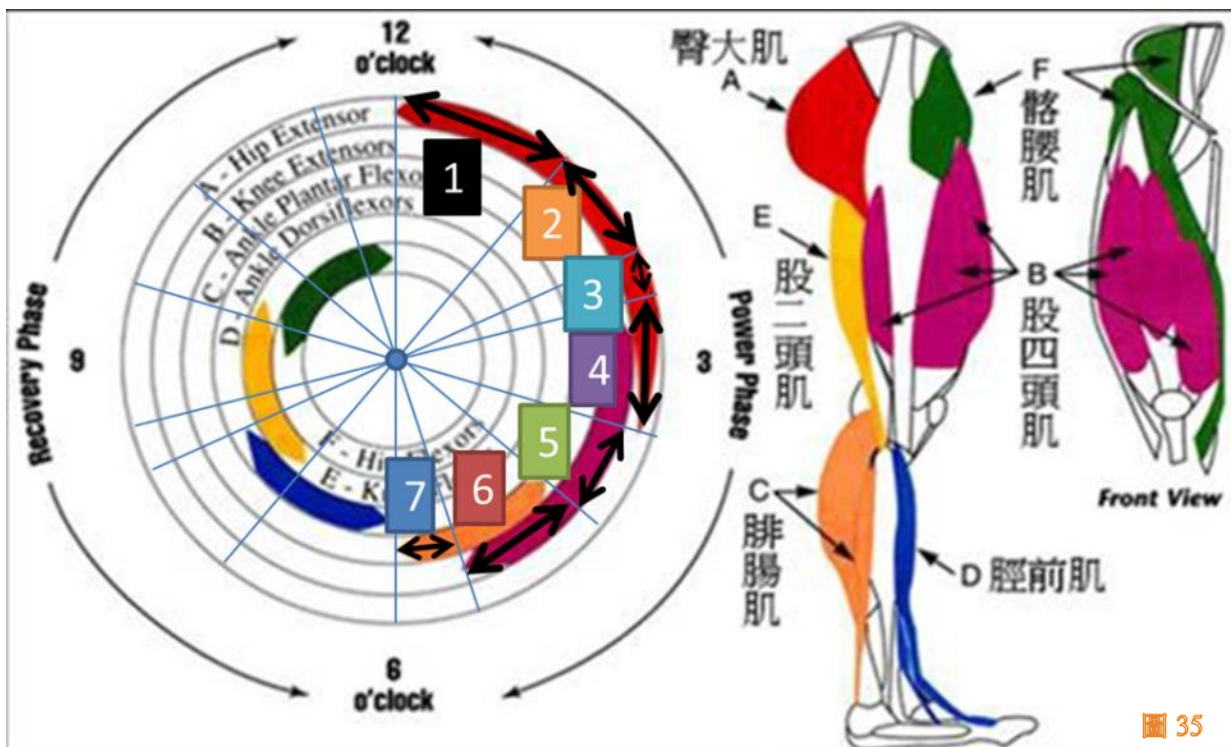
臀大肌（位於臀部）在你划動腳踏通過圓周的最低點時參與進來，得到運動。

腿後肌（位於大腿背側），當你划動腳踏過程中彎曲膝蓋時會用到它。而且，用踏板劃圓周的過程中，每一次經過最低點向後劃、向上提拉時最能練到腿後肌。

小腿 對小腿的鍛鍊效果取決於你把腳板前腳掌放在腳踏踏板上蹬踩劃圓，鍛鍊效果最大。

(二)肌肉切換之分段推想

1.從參考資料三的摘錄，而聯想到我們之前的加速度常常出現曲曲折折的加速度轉折，似乎與肌肉切換有關聯，於是將參考資料圖片在肌肉切換前後端，加工分段 7 區



2.從 tracker 找出以加速度波折最大的阻力八，取位置圖 Y-t 與加速度 a_y-t 圖，左右兩腳可製成肌肉切換對應 Y 軸軌跡圖。

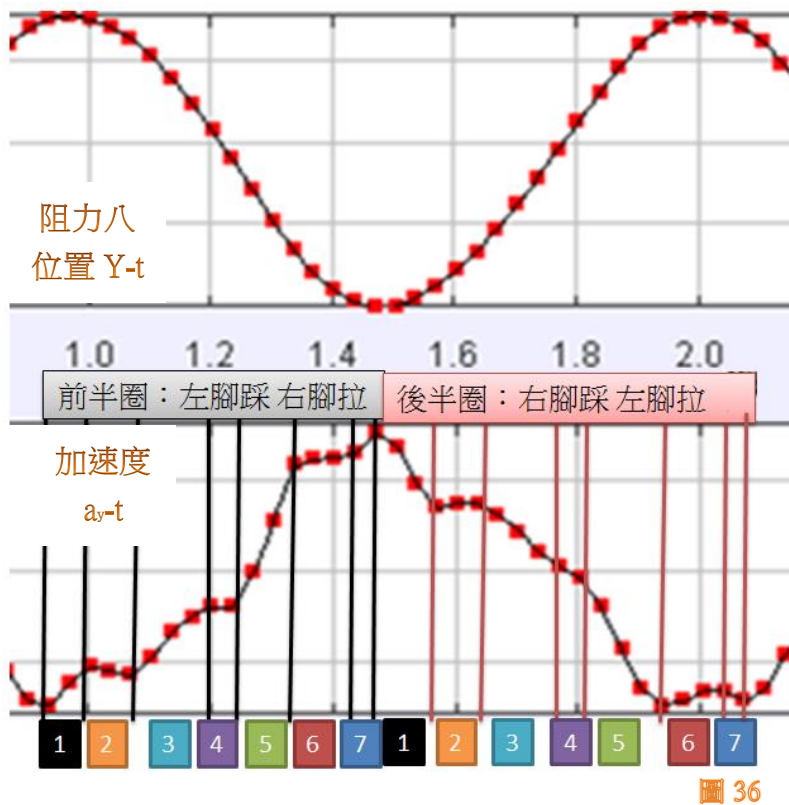


表 19

區域	運用肌肉 (左腳)	運用肌肉 (右腳)
第一區	臀大肌	脛前肌
第二區	臀大肌	脛前肌 切換 股二頭肌
第三區	臀大肌	股二頭肌
第四區	臀大肌 切換 股四頭肌	股二頭肌
第五區	股四頭肌	股二頭肌 切換 髂腰肌
第六區	股四頭肌 切換 腓腸肌	髂腰肌
第七區	腓腸肌	髂腰肌

我們發現阻力八依照波折區分加速度圖，每半圈一樣可區分成 7 段，與理論圖切換相符。到此我們確定以簡單的 tracker 工具追蹤軌跡數據，一樣可以看出各段肌肉切換的時間位置

四、騎乘功率、踩踏施力、RPM 轉速

(一)功率基本原理：踏板踩踏功率 $P(W) = \text{踩踏力量 } F(N) * \text{迴轉速度 } V(m/s)$
 $= \text{踩踏力量 } F(N) * 2\pi * \text{曲柄長 } R(m) / 60 / \text{回轉數 (RPM)}$

訓練台阻力功率 $P(W) = \text{抗力矩 } \tau(N\cdot m) * \text{迴轉角速度 } \omega(\text{rad/s})$

(二)踏板踩踏功率是總輸入，訓練台阻力功率是淨輸出，中間的差值不是誤差，而是傳動過程的損耗，**機械效率** = 訓練台阻力功率 $P(W)$ / 踏板踩踏功率 $P(W)$

(三) 從 tracker 知道踏板踩踏時並非等速率畫圓，從功率數據波動可知踩踏也非等力量輸出。固定轉速時，人體踩踏力量正比於功率，瞬時加速會放大，進而影響轉速快慢，造成功率有更大波動。

陸、總結論

第一部分：標準比較數據確立

(一)比較各標點數據，我們選擇坐姿的 A 點扣片 Y 軸軌跡數據進行整篇研究判讀。
再從身體調整，選擇 60rpm、平把、阻力 4，作為標準坐姿，Y 軸速率、加速度比較值

標準值 最大速率 $V_y=1.0-1.1 \text{ m/s}$ (90、270 度) 最大加速度 $a_y=7-8 \text{ m/s}^2$ (0 度、180 度點)

(二) 核心比較理論值

從等速圓周運動對 Y 軸的投影，若曲柄迴轉半徑為 17.1 公分

理論值 最大速率 $V_y=1.1 \text{ m/s}$ (90 與 270 度) 最大加速度 $a_y=6.8 \text{ m/s}^2$ (0 度與 180 度點)

第二部分：身體運作改變數據軌跡之物理意義確立

(一)Y 軸端點加速度，直接通過原點，在本研究中只能反推**速率**判讀是否比標準值大。

(二)加速度-時間圖的波折，代表肌肉切換不順，非穩定施力

(三)**前踩後拉**模式，施力判讀根據改為**端點加速度**(對應速率)**與標準值比較**，判別快慢

0-180 度施力總力矩(**左腳踩右腳拉**)呈現結果在 180 度的加速度值

180-0 度施力總力矩(**左腳拉右腳踩**)呈現結果在 0 度的加速度值

(四)固定轉速，若比較端點加速度過大，代表必有其他慢速區，代表施力速度都不穩

第三部分：飛輪硬體改變對於數據軌跡之影響

(一)**坐墊手把**調整移動，遠離舒適標準坐姿，大都能看見加速度變大與波折。

(二)**高阻力**需要更高的肌肉力量輸出。定轉速下，加速度數值變化不大，再次瞭解端點加速度無法推知力量。但是從加速度圖，最能明顯看出肌肉分段切換施力。

第四部分：模型製作 身體角度與整體數據分析

(一)膝蓋需要對齊扣片下踩，最能有效施力，避免運動傷害，是調整坐墊最高原則。

(二)身體角度隨車身與姿勢調整而改變，比對整體數據速率分析，可得到特定姿勢有利於明確位置的加速

第五部分：踩踏力量與功率之探討

(一)端點加速度只能判別端點速率與是否加速，使用功率計開始掌控騎乘施力的大小。

(二)踩踏功率波動代表力量波動，與前方飛輪基礎探討吻合。大量數據難以判別十，可以回歸出趨勢找出合理功率值。

(三)轉速拉快的高功率踩踏，力量增幅不大，推測適合長途騎乘。

(四)我們的打檔功率指出，高齒比大於 2 時，需要出更多的力量去抵抗齒比放大倍率之外的阻力。

(五)我們功率實驗的有兩組功率數值，最高踩踏功率與訓練台輸出，機械效率約為 0.8。

柒、參考資料

- 一、虎尾科技大學物理教學網站(2015)。震盪運動，線上檢索日期：2020年11月3日。
網址：<https://reurl.cc/nnp43l>
- 二、youtube. (2015)。簡諧運動（2）數學意義，線上檢索日期：2021年3月1日。
網址：<https://www.youtube.com/watch?v=W0TVfsZlCk>
- 三、痞客幫(2014)。漫談踩踏效率，線上檢索日期：2020年10月5日
網址：<https://asruada0.pixnet.net/blog/post/403268968>
- 四、VIGOR(2021)。你知道騎車鍛煉什麼部位的肌肉嗎？線上檢索日期：2021年2月19日
網址：<http://www.vigors.site/show/76652>
- 五、每日頭條(2017)。深蹲不能超過腳尖(膝關節力矩數據)，線上檢索日期：2020年10月25日。
網址：<https://kknews.cc/health/xr3vnrg.html>
- 六、自然與生活科技課本第五冊(2020)。南一出版社
- 七、運動解剖書(2010)。莫納夏著，木馬文化出版。

捌、實驗歷程心得

第一部 軌跡加速度篇

我家去年買了新飛輪，我們都很愛運動。

有關騎車的原理，網路資料很多，然而對於細部的理解，好像都說不清楚。

我們剛開始想做這題目時，本來想從肌肉出力著手（還好沒有）…。摸不著頭緒的開端，靠著東拼西湊試著去了解原理，但是不論怎麼瞎想，都沒有進度，只知道我們可能會用到 tracker 軟體追蹤會動的東西。

第一次拍影片，由於沒放標準尺，數據完全沒意義……

第二次拍影片，匯入 tracker 抓軌跡時，發現軌跡點會被同色背景拉走？！

第三次拍影片，背景全部用黑布蓋住，發現手臂上的反光，與白亮的手都會讓軌跡抓錯……

第四次拍影片，除掉所有可能的雷包，小心翼翼地拍完，直到每一個影片確定都能抓到正確的點位，總算才鬆了一口氣。

我從 tracker 摸索多點設定、從 X 軸到 Y 軸，從位置到加速度，按圖索驥上查資料兩三天，我才知道怎麼按，按那裡，才會跑出我要的功能…。後來發現軟體數據實在太多，要呈現哪一組來討論飛輪，真是傷透腦筋。（曾有人說 tracker 自己摸索就會做，所言不假，只是老師都不會，就要自己想好久 XD）

確立了研究截圖模式，數量龐大的影片群，第一次處理一個影片較要花大約 30 分鐘，嚇到我了，還好在組員互相教導分工之下，寒假前總算完成基本工。

第一次解讀從只有左腳的軌跡去解釋，並未加入隔壁右腳的存在…
從端點加速度以為就是單腳施的力，加速大盤，卻忘記這裡通過支點…
發現加速度只是代表端點的速度，於是數據全部倒過來解釋…

每一次發現盲點，都要重修整份作品的討論，
報告退貨重寫修正，慢慢地，發現能夠解釋相符的數據變多了。

我們發現，簡單的學理逆著說超清楚，但沒有類似作品的引導，暗中摸索研究的時間很漫長，就是找不到精準的起點…從一開始傻傻的拍片，從軟體中一堆對應圖翻出可能可以用的數據，最後找出圓周運動投影的理論數據，在最後關鍵時刻，才正確解讀數據，想來真是歷程艱辛。

第二部 功率篇

開始找軌跡數據時，我們以為找到加速度就可以測力量，但是到最後才知道我們的加速度只能當速率的參考數據。後來發現可以用自行車愛好者狂推的「功率值」來找力量。所以我們原本設想在市賽後想借功率計，裝在家裡的飛輪延續實驗。

但是功率計造價不斐，拆裝有毀損顧慮，怎麼可能有人會借我們？好不容易透過叔叔車友，找到熱心的邵大哥願意停下手邊工作，移出工作場地借我們全套裝置(聽說他還是一位前自由車國手…)。於是在飛輪探究的基礎之下，改換成公路車訓練台測試(也算飛輪吧)，這下子更貼近真正戶外騎乘的狀況。

5月13日上午請了假，來到單車工作室。當天看到我要騎的設備，霎時傻眼，內心萬分激動，Cervelo 公路車架，專業 Osymmetric 大盤、shimano ultegra 變速系統，電子變速、ROTOR 2INPOWER 軸心功率計、Xpedo APX COMP 訓練台…等等等，這些只有在單車雜誌裡夢想的高級設備，全部真實在眼前，讓我們操作實驗數據@@。

知道機會得來不易，不能重來，出發前數天都在沙盤推演流程與準備細項。當天有高人協助設備，除了不知為何功率數據波動很大之外(只好全部數據都攝影記錄)，實驗非常順利。測完有玩一段 17 分鐘的模擬山路，測出我的最大功率 668 瓦。後來完成功率實驗數據的解讀，我終於完全了解要如何推算出我的真實腳力了。

做好久的作品，從無中生有的 tracker 軌跡分析，確實可以呈現測試員（就是我）踩踏腳力判讀，就像是自己為自己 fitting 解析。後來加上功率力量的呈現，讓我秒懂騎車的身體經驗，解開迴轉打檔的迷惑，一整個功力大增！！！！

能夠與同學，共同完成這份研究，歷程從一團迷霧到豁然開朗，探入學理了然於胸，心中有無限的感動！

【評語】 030104

本研究運用軌跡分析技術將科學帶入運動中。後續還可以幫助運動員去做動作的最佳化，追根究柢的分析精神相當值得鼓勵。

作品簡報

飛輪騎跡

~以tracker

追蹤姿勢與車身調整

影響身體軌跡運動數據之探究

國中組 物理科 編號：030104

研究問題與架構

飛輪騎乘調整之變因 影響探究

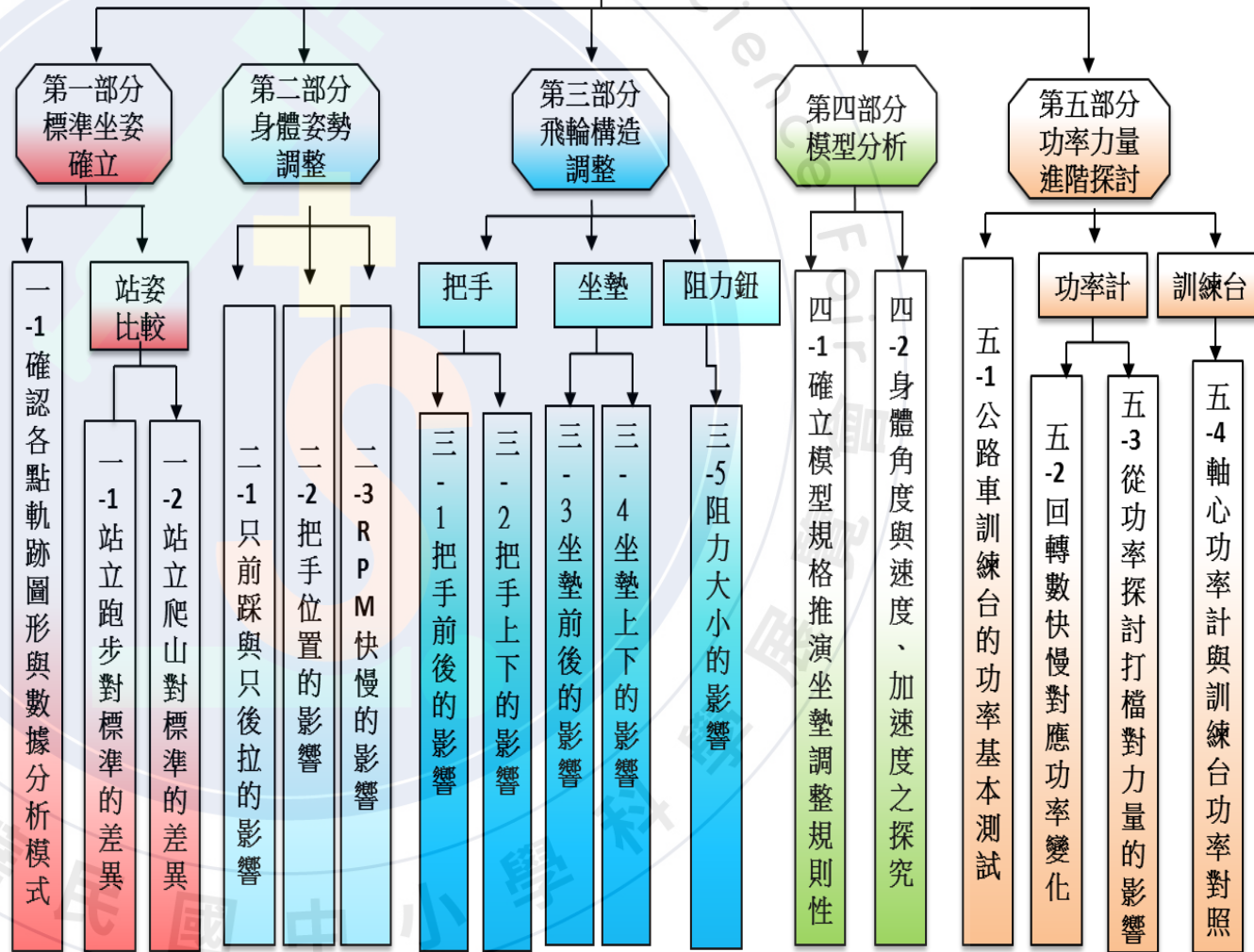
第一部分
確立分析點、分析模式、分析數據
找出站姿與坐姿差異，
決定後續研究比較標準。

第二部分
想知道身體的踩踏方式或手部的位
置改變，對踩踏有什麼影響。

第三部分
想知道調整飛輪各構造，對於腳部
的數據會產生何種影響。

第四部份
透過模型做出調整。綜合全部數據，
想要找出騎乘規則性。

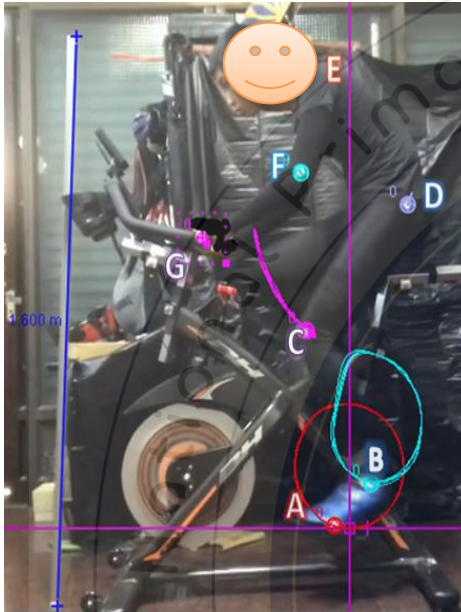
第五部分
透過功率，想要知道真正施力的數
值是多少，探索自行車打檔效率騎
乘的規則性



第一部分：研究方法確立

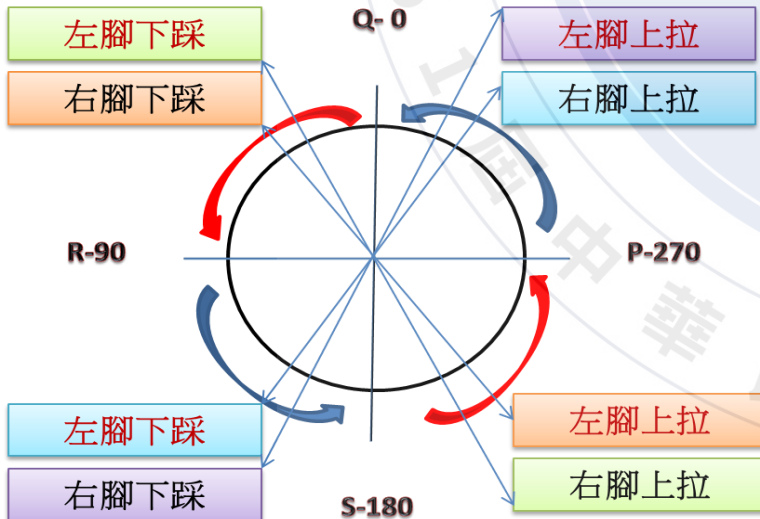
定義標點

- A：扣片
- B：腳踝
- C：膝蓋
- D：髖關節
- E：肩關節
- F：手肘
- G：握把

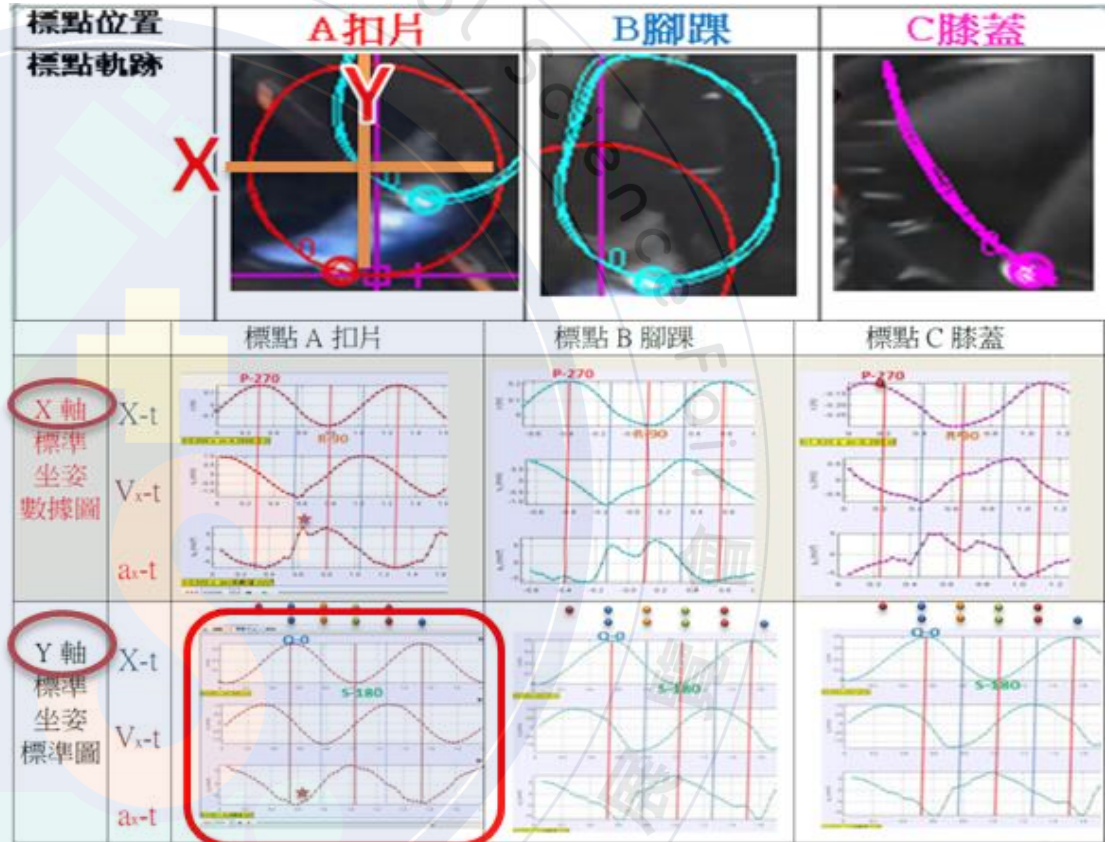


左腳逆時針採拉模型

同色框同步進行



確認各點軌跡形狀與標點ABC軌跡對應時間數據



數據分析模式

後續的實驗數據只對A點扣片的Y軸進行討論。

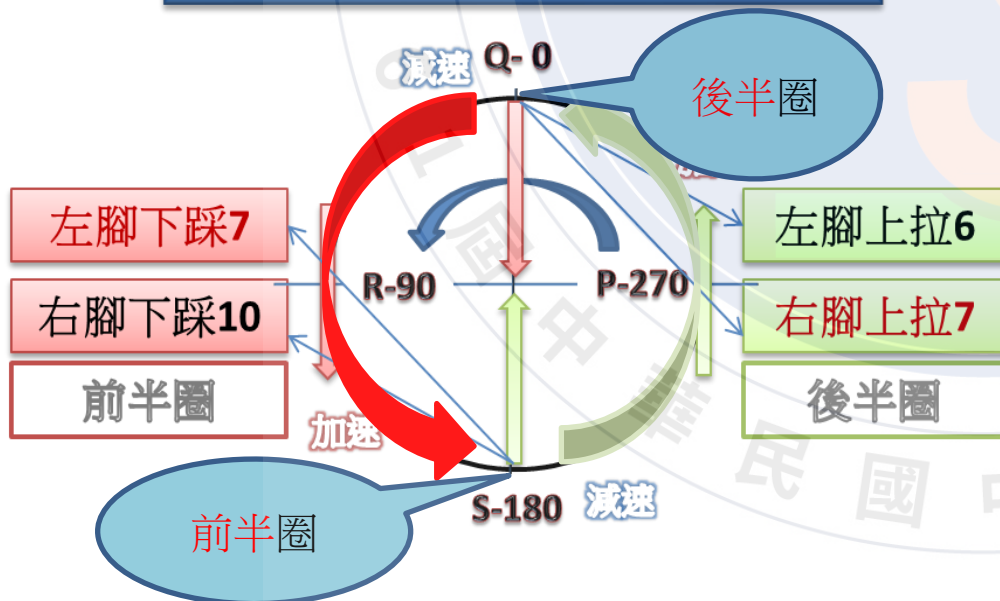
ABC三標點儘管軌跡互異，但是XY軸，力量切換位置相同
測試員不會橫向施力，且膝蓋C與腳踝B的軌跡不規則，只探討垂直施力

第二部分：身體調整與標準坐姿數據分析比較

實驗設計：探索單腳腳力~只前踩 只後拉與標準坐姿的比較

類型	坐姿只前踩	標準坐姿(前踩後拉)	坐姿只後拉
A點數據圖			
加速度 a_y -t	0度達最大值：10m/s ² (右腳踩) 180度達最大值：7m/s ² (左腳踩)	0度達最大值：7m/s ² (右腳踩+左腳拉) 180度達最大值：8m/s ² (左腳踩+右腳拉)	0度達最大值：6m/s ² (左腳拉) 180度達最大值：7m/s ² (右腳拉)

逆時針踩拉加速度對應腳力關係圖



端點加速度在本實驗的意義探討

迷思、y軸最高點加速度值，由牛頓第二運動定律，可以對應左腳在該點瞬間施力力量？

討論1：QS端點加速度指向圓心，但是施力點在圓心，不造成力矩驅動，對轉速無效

討論2：改用端點前總力矩的盈餘造成加速。端點加速度在此只能對應出瞬速，間接判斷腳力。

小結論：前踩後拉 施力效果對應點

0-180度施力總力矩(左踩右拉)呈現在180度加速值
180-0度施力總力矩(左拉右踩)呈現在0度加速度值

等速圓周運動Y軸投影的數學意義

§簡諧運動的數學意義

→ 恰為等速率圓周運動在直徑上的投影

參考圓模型：逆時針運轉

<< 投影 >>

$$\text{位置 } \vec{y}(t) = R \cos \theta = R \cos \omega t$$

$$\text{速度 } \vec{v}(t) = -v \sin \theta = -R\omega \sin \omega t$$

$$\text{加速度 } \vec{a}(t) = -a_c \cos \theta = -R\omega^2 \cos \omega t$$

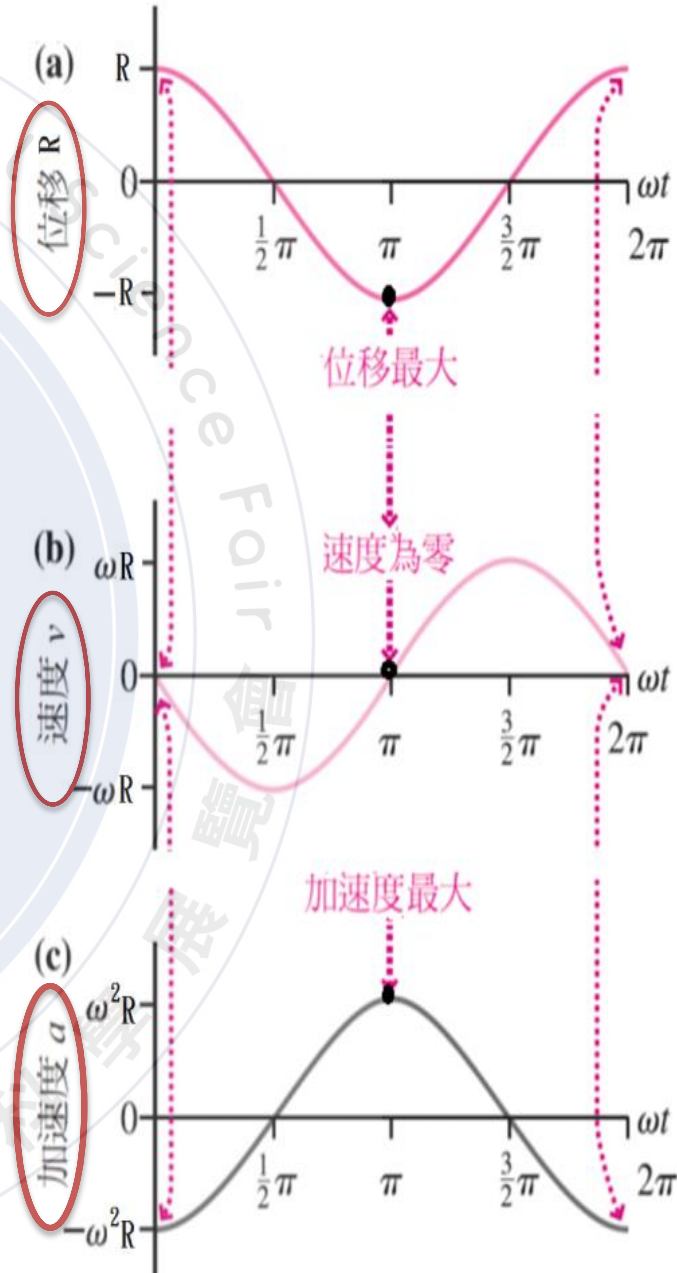


理論數據比對tracker數據之解讀

理論計算：A扣片到五通的半徑是17.1cm，60RPM等速率圓周運動
Y軸投影最大速率 $V_y = 1.1 \text{ m/s}$ (出現在中間，RP點)
Y軸投影最大加速度 $a_y = 6.8 \text{ m/s}^2$ (出現在兩端，QS點)

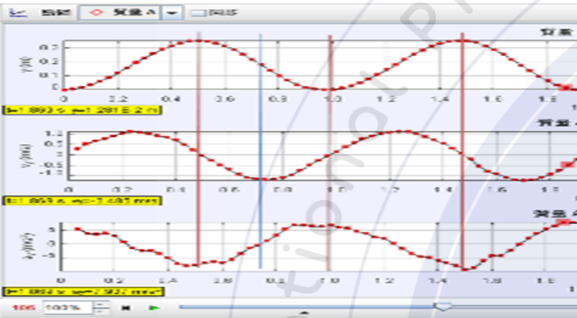
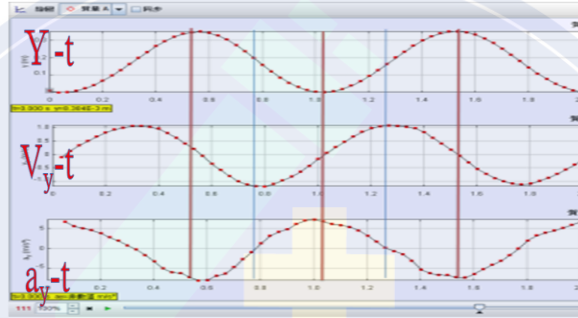
標準坐姿實驗值：端點瞬時速率1 m/s、加速度 7 m/s^2 、 8 m/s^2 ，
上下加速度不同，代表測試員在標準坐姿時，不是等速率劃圓。

分析基準：我們各實驗tracker數據分析都以標準坐姿為基準去比對，
用端點加速度反推變快或變慢，輔以90、270度的速度值，以差值解讀各種變因對測試員踩踏效果的影響，不影響討論比較。



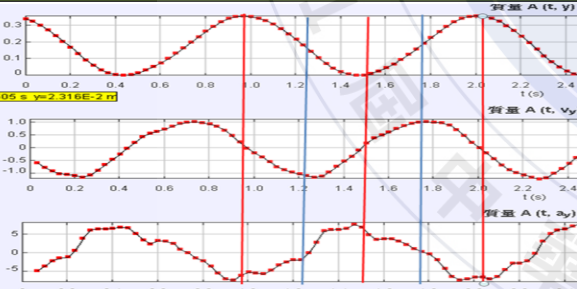
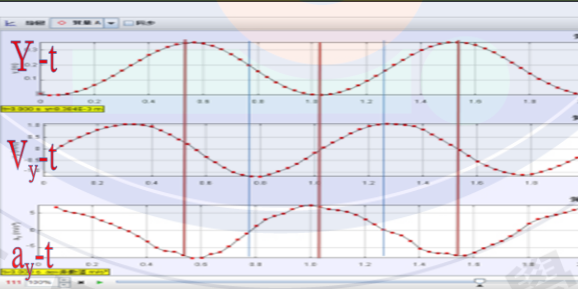
第三部分：飛輪結構調整與標準坐姿數據分析

實例判讀：(三)-3：坐墊往前9.4cm與標準的比較

類型	坐墊往前9.4cm	標準坐姿(平把)
A點軌跡圖		
加速度 a_y-t	0度達最大值：9m/s ² 180度達最大值：8m/s ²	0度達最大值：7m/s ² 180度達最大值：8m/s ²

數據：坐墊往前0度加速度比標準大，代表瞬時速率比60rpm快。
推論：固定轉速60RPM，一圈內實測數據有快必有慢。
觀察：坐墊前後移動，腿的伸展距離不正確，造成踩踏不順，只好用更大的力量來超速，才能一圈維持60RPM。
小結論：坐墊向前0度速度快，代表左拉右踩這組踩踏較吃重。

實例判讀：實驗(三)-5：阻力8與4的比較

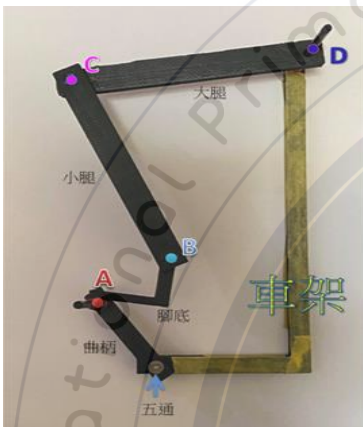
類型	阻力8	標準坐姿(平把)
A點軌跡圖		
加速度 a_y-t	0度達最大值：7m/s ² 180度達最大值：8m/s ²	0度達最大值：7m/s ² 180度達最大值：8m/s ²

數據：高低阻力60RPM所測出瞬時速率與加速度，沒有差異。
推論：從加速度時間圖的曲線波折更大，推論與肌肉分段切換施力有關。
觀察：高阻力，需要更高的肌肉力量輸出，
小結論：出力加速度波折大，但數據看不出力量大小。

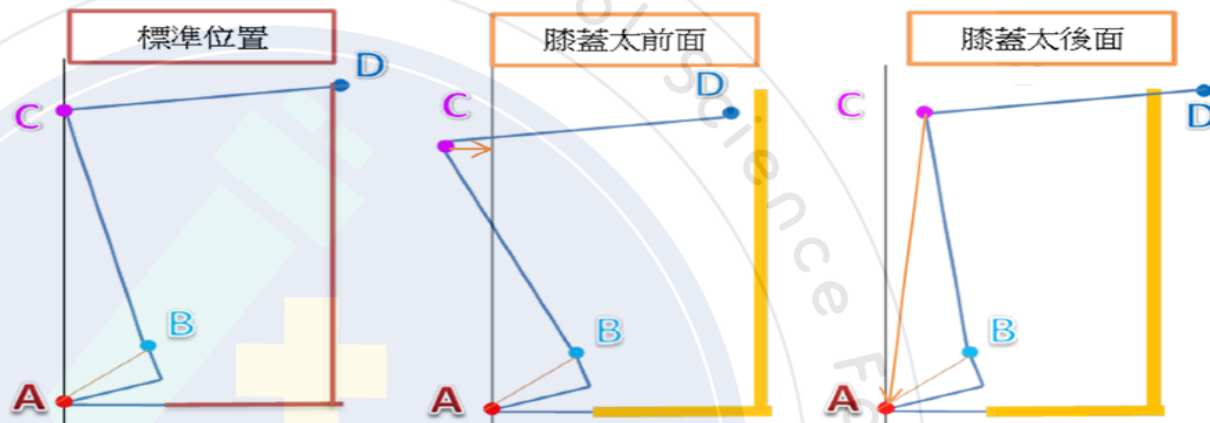
第四部分：模型製作、身體角度與整體數據分析

1. 車架與下半身.3D模型製作

	實際 (公分)	模型 (公分)
大腿	43	8.6
小腿	41	8.2
腳底高	9	1.8
腳底長	13	2.6
曲柄	17	3.4
五通坐墊水平距離	28	5.6
五通坐墊垂直距離	66	13.2

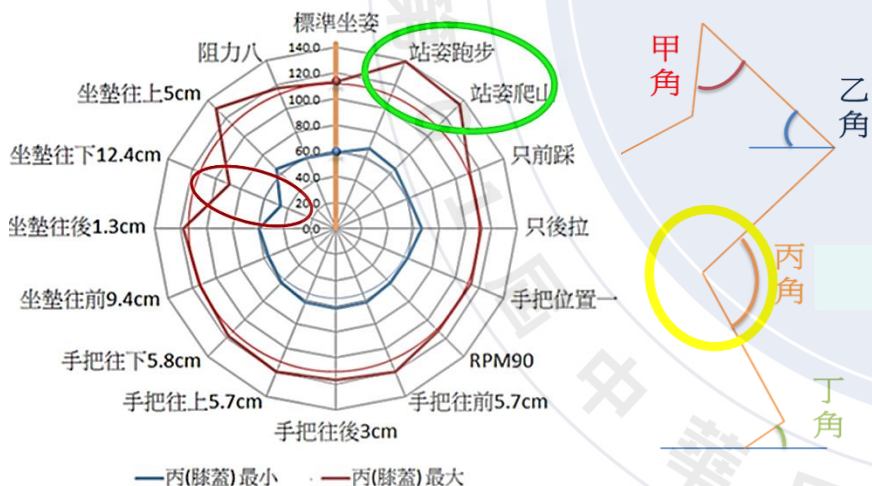


2. 膝蓋對齊扣片 踩踏順暢有效之推論



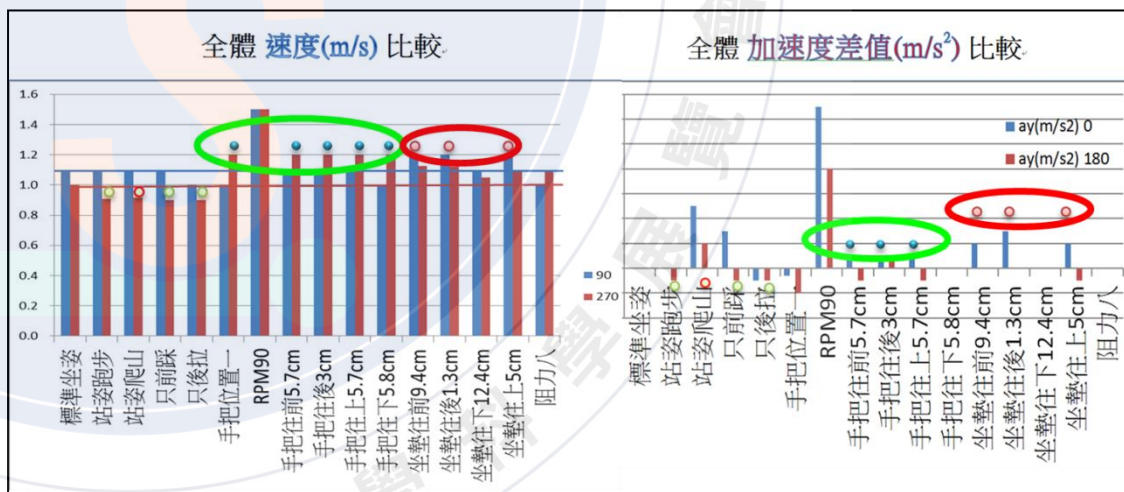
3. 身體角度與速度加速度之整體探究

下半身身體角度(膝蓋)



膝蓋最大角與最小角的影響因子
主要來自膝蓋活動空間

全體 速度(m/s) 比較



全體 加速度差值(m/s²) 比較

改變手把位置有利於下半圈的加速
改變坐墊位置會有利於上半圈的加速

第五部分：踩踏力量與功率之探討

實驗(五)-1以加快踏頻與加大訓練台阻力，對公路車標準坐姿的功率影響之基本測試

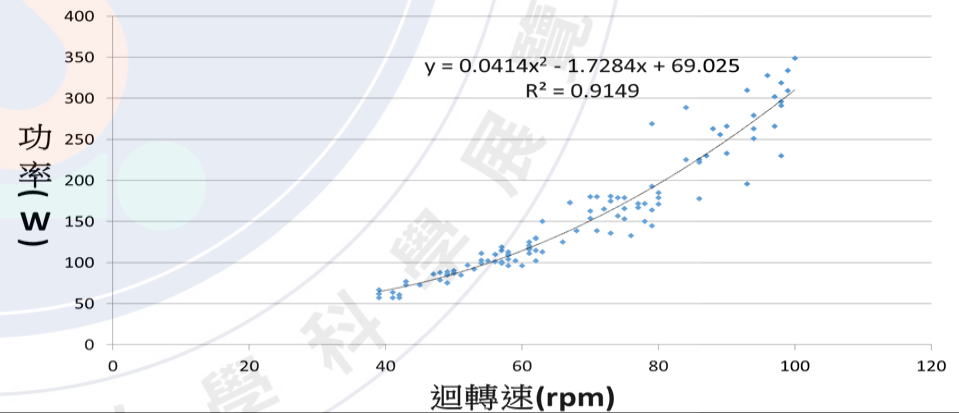
類型	高速 RPM90 正常阻力	標準坐姿 (RPM60 正常阻力)	加大阻力 RPM60
A 點軌跡圖			
V_y-t	90 度最大值：1.56m/s 270 度最大值：1.47m/s	90 度最大值：0.99m/s 270 度最大值：1m/s	90 度最大值：1.14m/s 270 度最大值：1.11m/s
加速度 a_y-t	0 度最大值：16.06m/s ² 180 度最大值：18.30m/s ²	0 度最大值：7.73m/s ² 180 度最大值：7.08m/s ²	0 度最大值：9.13m/s ² 180 度最大值：8.59m/s ²
最大功率(w) /有效力量	235W / 145.89N (14.89kgw)	129W / 120.13N (12.26kgw)	361W / 336.16N (34.30kgw)

1. 從功率除以轉速，可以推出當下的有效力量。
2. 轉速變1.5倍，功率大增1.82倍，力量只有增加1.21倍。
3. 轉速拉快，力量微增加乘可達高功率踩踏。
4. 同為60RPM，最大功率直接正比於踩踏最大力量。
5. 踩踏功率數據一直是波動的，與前方飛輪基礎探討吻合。

實驗(五)-2：回轉數快慢對應功率變化

回轉數(rpm)	功率(W)	轉速(m/s)	最大力量(N)	最大力量(kgw)	回歸功率(W)
40	64	0.72	89.40	9.12	66
50	90	0.89	100.57	10.26	86
60	119	1.07	110.81	11.31	114
70	154	1.25	122.92	12.54	151
80	185	1.43	129.20	13.18	196
90	266	1.61	165.13	16.85	249
100	349	1.79	194.99	19.90	310

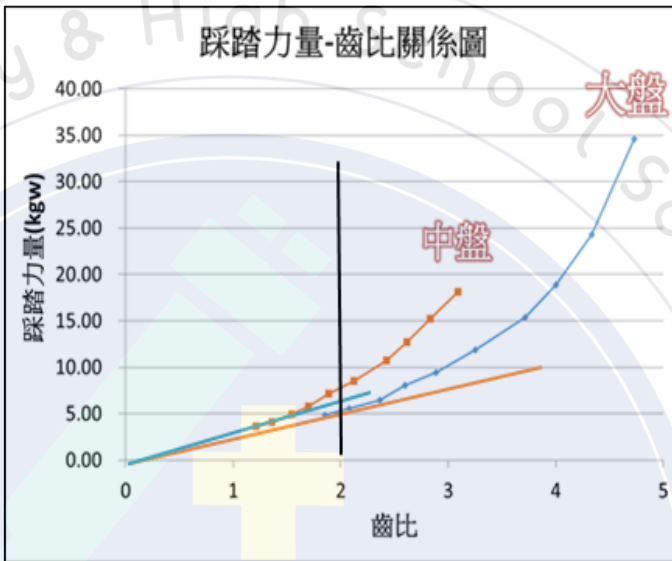
功率-迴轉速散佈圖



小結論：固定阻力，連續加速施力時，切過回轉數得到的瞬間功率，數據合理。

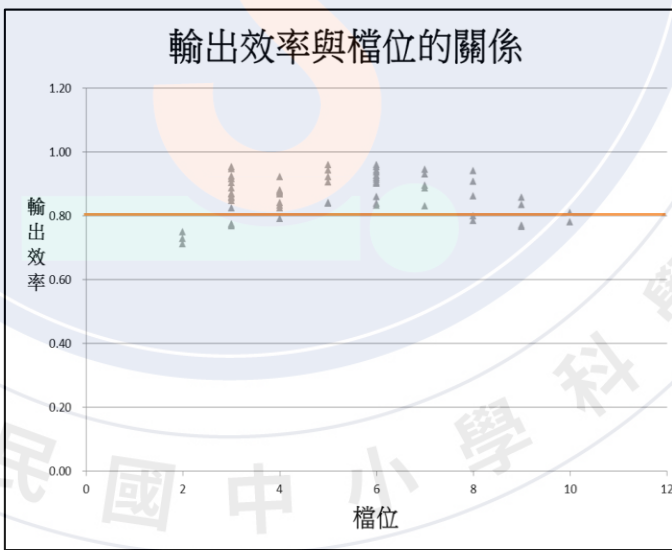
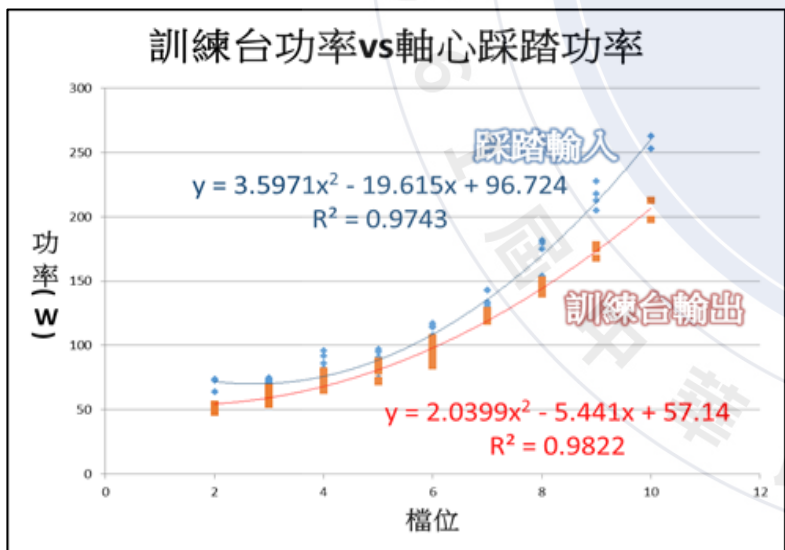
實驗(五)-3從功率數據探討打檔對力量的影響

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
檔位	前盤齒數	飛輪齒數	齒比	迴轉速(RPM)	最大功率(W)	轉速(m/s)	最大踩踏力(N)	最大踩踏力(kgw)	I/D
中2	34	28	1.21	60	38	1.07	35.39	3.61	2.97
中3	34	25	1.36	60	43	1.07	40.04	4.09	3.00
中4	34	22	1.55	60	52	1.07	48.42	4.94	3.20
中5	34	20	1.70	60	61	1.07	56.80	5.80	3.41
中6	34	18	1.89	60	75	1.07	69.84	7.13	3.77
中7	34	16	2.13	60	90	1.07	83.81	8.55	4.02
中8	34	14	2.43	60	113	1.07	105.23	10.74	4.42
中9	34	13	2.62	60	134	1.07	124.78	12.73	4.87
中10	34	12	2.83	60	160	1.07	148.99	15.20	5.37
中11	34	11	3.09	60	191	1.07	177.86	18.15	5.87
大2	52	28	1.86	60	51	1.07	47.49	4.85	2.61
大3	52	25	2.08	60	58	1.07	54.01	5.51	2.65
大4	52	22	2.36	60	68	1.07	63.32	6.46	2.73
大5	52	20	2.60	60	85	1.07	79.15	8.08	3.11
大6	52	18	2.89	60	99	1.07	92.19	9.41	3.26
大7	52	16	3.25	60	125	1.07	116.40	11.88	3.65
大8	52	14	3.71	60	162	1.07	150.85	15.39	4.14
大9	52	13	4.00	60	199	1.07	185.31	18.91	4.73
大10	52	12	4.33	60	256	1.07	238.39	24.33	5.61
大11	52	11	4.73	60	364	1.07	338.96	34.59	7.32



小結論
高齒比大於2時，需要出更多的力量去抵抗齒比放大倍率之外的阻力。
符合真實路騎的身體經驗。

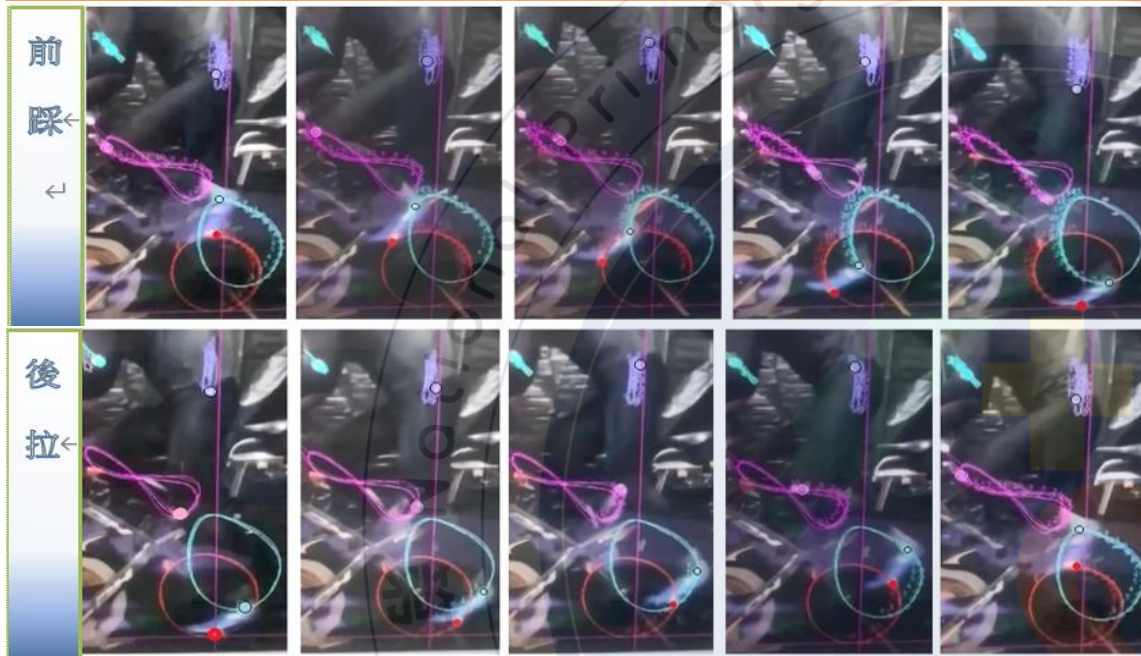
實驗(五)-4：軸心功率計與訓練台功率對照



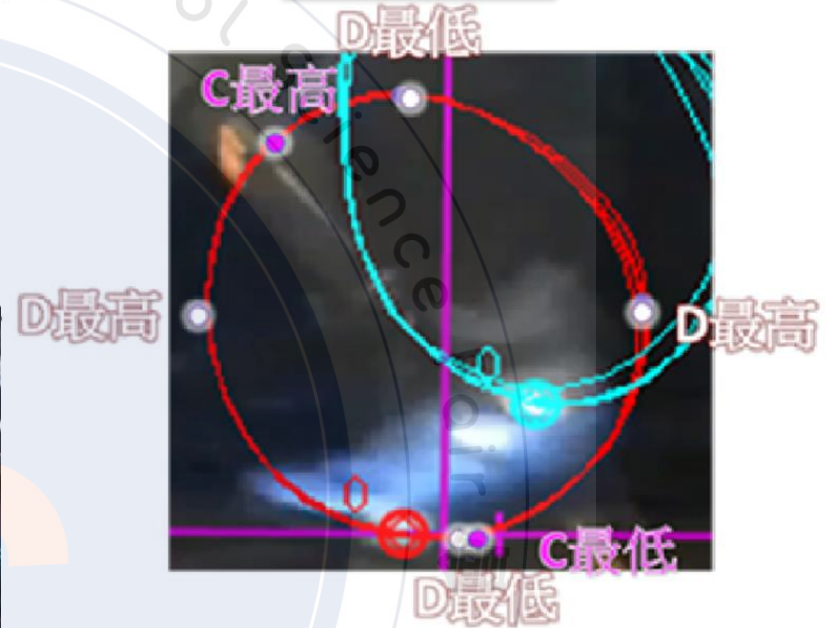
小結論
同時偵測的訓練台功率小於軸心踩踏功率，兩者差值推測是傳動損耗。
檔位越高越難踩，摩擦傳動損耗越大
整組機台機械效率約0.8

整體討論

討論一、以站姿爬山為例，同步軌跡細部探究



扣片A~圓形



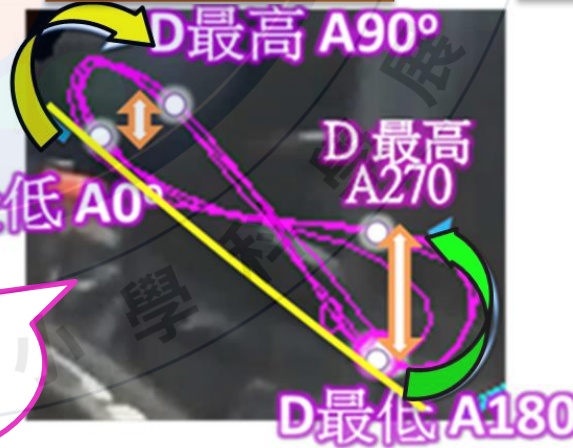
踝關節B~蛋形



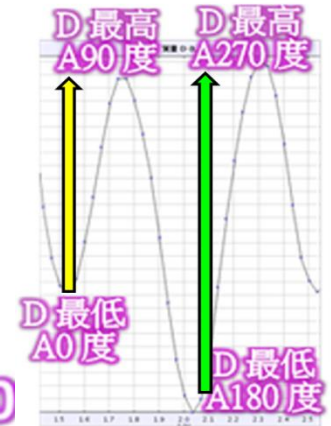
前踩軌跡
內切
後拉軌跡
上拉

前踩彈震小
後拉彈震大
形成8字形

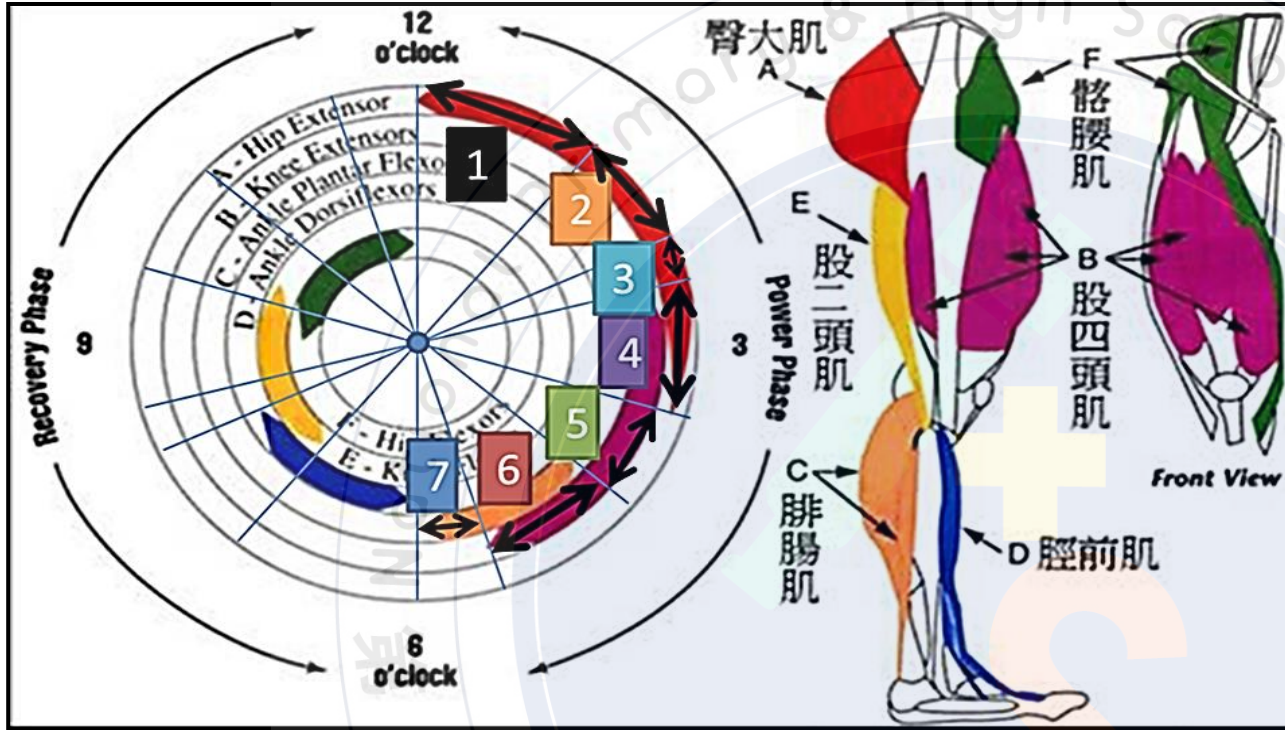
膝關節C~8字形



髖關節D~不等彈震



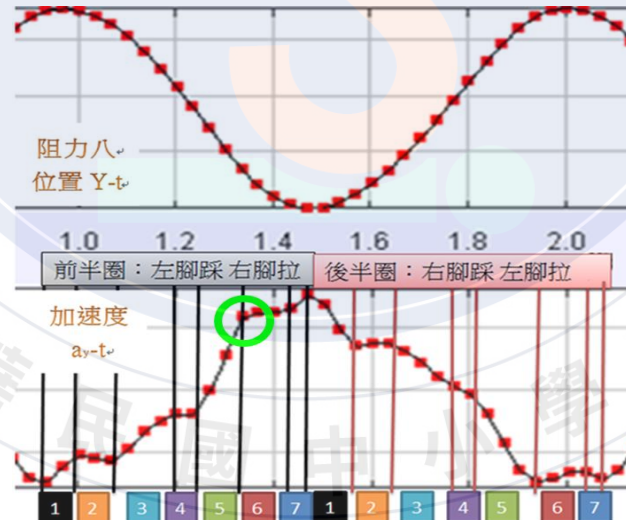
討論二、踩拉飛輪之肌肉切換與加速度探討



區域	運用肌肉 (左腳)	運用肌肉 (右腳)
第一區	臀大肌	脛前肌
第二區	臀大肌	脛前肌 切换 股二頭肌
第三區	臀大肌	股二頭肌
第四區	臀大肌 切换 股四頭肌	股二頭肌
第五區	股四頭肌	股二頭肌 切换 髂腰肌
第六區	股四頭肌 切换 腓腸肌	髂腰肌
第七區	腓腸肌	髂腰肌

肌肉切换之分段推想

1. 將參考資料圖片在肌肉切换前後端，加工分段7區
2. 取實驗三-5阻力八，依波折分段區加速度圖，每半圈也可區分成7段，與理論圖切换相符。
3. 到此我們確定以簡單的tracker工具追蹤軌跡數據做圖，可以看見各段肌肉切换的時間位置



總結論

用tracker追蹤身體定點運動數據，探索研究模式！

- 第一部分：軌跡加速度部份：取扣片坐姿，選擇Y軸速率加速度，確立分析基準。
 - 第二部分：踩踏Y軸端點加速度在此只是速度參數，代表此點之前半圈施力力矩的盈餘。
 - 第三部分：調整車身遠離標準坐姿，發現固定轉速加速度偏大，代表一圈內有快慢，圈內升速需更用力。
 - 第四部份：我們用模型推出坐墊位置的調整方案，可以找出身體角度影響施力的相關性。
 - 第五功率計部分：高轉速高功率，發現力量增幅並不大。
 - 大齒比需要耗更多力去對抗齒比倍率之外的額外阻力。
 - 訓練台功率比對軸心功率，機械效率為**0.8**。
- 圈整踩踏細節，結合功率力量，以tracker與功率計，完整描繪輪轉踩踏的力學輪廓。

參考資料

- 一、youtube. (2015)。簡諧運動（2）數學意義，線上檢索日期：2021年3月1日。
網址：<https://www.youtube.com/watch?v=W0TVfjsZlCk>
- 二、痞客幫(2014)。漫談踩踏效率，線上檢索日期：2020年10月5日
網址：<https://asruada0.pixnet.net/blog/post/403268968>
- 三、每日頭條(2017)。深蹲不能超過腳尖(膝關節力矩數據)，線上檢索日期：2020年10月25日。
網址：<https://kknews.cc/health/xr3vnrg.html>