

突破「風」鎖—— 談自由車運動科技研發與應用

苗君易、精準運動科學破風取勝團隊*

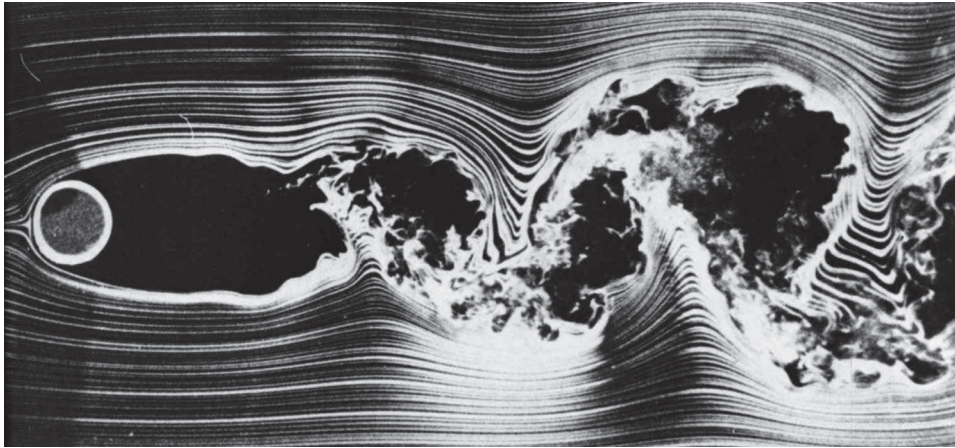
一、前言

在自由車競賽場上，毫秒之差與冠軍擦肩，因此提升選手騎乘時有效之功率輸出是自由車研究中相當重要之一課題。然而何謂有效輸出功率？當自由車手在騎乘前進時人體所輸出之功率，經地面輪組之摩擦及空氣阻力之阻擋下，真實可以帶動自由車向前之功率較小於人體所輸出之功率，而此人體所輸出之功率扣除地面摩擦力及空氣動力阻力等而得之真實可以帶動自由車向前功率稱為有效輸出功率。由有效輸出功率可看出空氣動力阻力對於自由車功率下降之影響，故本研究團隊基於航太領域之研究方法針對自由車選手騎乘時降低空氣動力阻力為目標進行研究。

二、空氣動力阻力

空氣動力阻力為物體與大氣相對運動時受到空氣之阻擋而速度變慢的現象，一般可簡稱為風阻。自由車騎乘時所產生之空氣動力阻力主要可分為壓差阻力及摩擦阻力兩類。人體主要之空氣動力阻力來源以壓差阻力主導，壓差阻力與物體（以本研究來說即人體）之形狀有關，然而人體之形狀或為體態因人而異，因此改變自由車手之阻力首先可由姿勢下手。由前述可知，壓差阻力為影響自由車手空氣動力之主要因素，壓差阻力有其特色可由實驗觀察，在流體流經物體後於某一點（後稱分離點）之後，經過物體表面之流場狀態開始出現紊亂之流動，稱之為流動分離（如圖一所示），流動分離現象為壓差阻力出現而可觀察到之現象，因此要如何改變流動分離現象而達到減阻的目的為本研究之課題。

* 苗君易，國立成功大學航空太空工程學系特聘教授、國科會「破風取勝——精進自由車選手選訓方法之研究」計畫主持人

圖一：圓柱流場分離現象¹

三、自由車衣減阻之方法

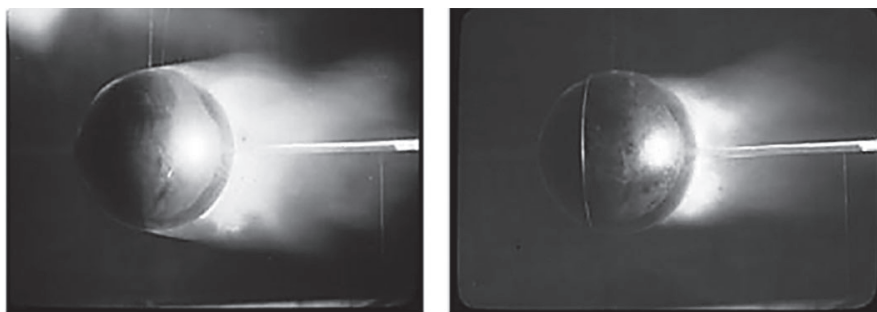
目前一般市售之自由車衣多以光滑表面為主，直覺上光滑表面能夠降低摩擦阻力，然而上述所述可知摩擦阻力並非影響自由車騎乘時產生空氣動力之主因。經前人之研究發現，在球體之分離位置上放置細線，會讓球體表面之流場發生了改變，由圖二(a)(b)可看見，球體後方產生之紊亂氣流（分離區或稱尾流區）延後了也縮小許多，因此證實了改變物體表面之粗糙度是可以影響尾流區域之大小，並同時可以降低空氣動力阻力²。由於空氣動力阻力之降低可利用延後流動分離現象之方法來實現，且90%以上之阻力來自於自由車手³；再者更有研究指出自行車在時速65 km/hr 空氣阻力高達所有阻力95%⁴，要改變自由車手身體之表面流場本研究於自由車衣上著手，因此將於自由車衣流場分離位置上放置粗糙元進而降低自由車選手之整體空氣動力阻力，設定為本研究之目的。故本研究先以自由車手模型進行實驗瞭解分離點及其連成之線（後稱分離線）之位置，以便製作減阻衣之粗糙元放置處。

¹ M. Van Dyke. (1982). *Album of Fluid Motion 4th*. Ann Arbor, U.S. State.

² E. Bodenschatz, & M. Eckert. (2011). Prandtl and the Göttingen school. In *A Voyage Through Turbulence*, K. R. Sreenivasan, K. Moffatt, P. A. Davidson, & Y. Kaneda, eds., pp.40-100. Cambridge: Cambridge University Press.

³ P. Debraux, F. Grappe, A. V. Manolova, & W. J. Bertucci. (2011). Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment. *Sports Biomechanics*, 10(3), pp.197-218.

⁴ P. E. di Prampero, G. Cortili, P. Mognoni, & F. Saibene. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 47(1), pp.201-206.



(a) Without a trip wire.

(b) With a trip wire.

圖二：改變圓球表面粗糙度對尾流區之影響⁵

四、自由車手風洞實驗

要達成降低阻力之目的首先需瞭解如何量測空氣動力阻力，由空氣動力阻力之定義可知，空氣動力阻力是與來流風相反方向之作用力，因此利用「風洞」來進行實驗，風洞是利用風扇產生穩定人造氣流的設施，利用不斷穩定的氣流達到騎乘時的風速模擬，因是人造的設施，可以去除外在環境較為不穩定的其他變量。影響空氣動力阻力大小的原因很多，如來流空氣的風速、自由車手迎風面積等，然而自由車競賽速度即是致勝關鍵，故在減阻研究上常用阻力係數和迎風面積作為降低空氣動力阻力的指標。通常在汽車及飛機的設計盡可能地降低阻力係數，但這兩種交通工具的外型已發展得相當成熟，如汽車約為 0.2-0.3、飛機約為 0.03，而自由車選手的阻力係數約為 1，相較之下較有下降之空間，本研究利用測力元件進行阻力係數的測量（圖三）。迎風面積部分，人體因人的高矮胖瘦都不相同，再加上騎乘自行車時姿勢也會不斷的改變，只要找出每位選手的最佳低風阻姿勢加以訓練配合策略也可以有效的降低阻力，本研究利用攝影機連續拍攝並結合 AI 人工智慧演算法得到自行車選手的迎風面積（圖四）。

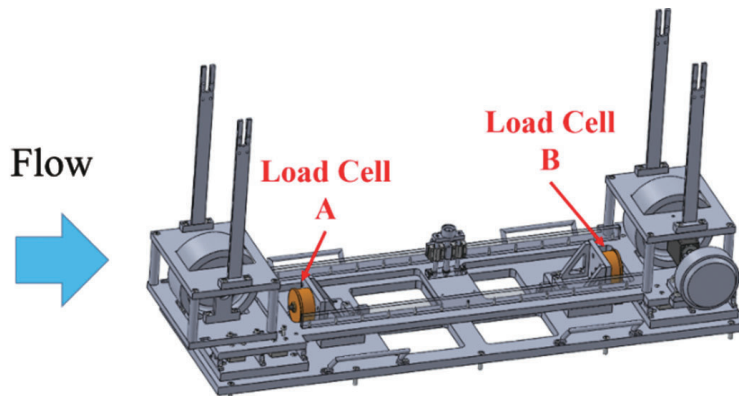
五、減阻自由車衣的設計

自由車衣為專業運動時選手之貼身衣物，除此之外也是人體與來流風接觸之表面，因此在考慮舒適性、排汗效果、散熱效果等衣物原本之功能外，也將

⁵ E. Bodenschatz, & M. Eckert. (2011). Prandtl and the Göttingen school. In *A Voyage Through Turbulence*, K. R. Sreenivasan, K. Moffatt, P. A. Davidson, & Y. Kaneda, eds., pp.40-100. Cambridge: Cambridge University Press.

降低空氣動力阻力納入考慮，利用在分離線位置前緣增加粗糙元之方式期能達到降低阻力的目的。因此本研究先利用等比例縮小的自由車手模型，於表面塗上油墨置於流動水槽之中，水槽內水流動時水流將油墨帶離原本之位置，油墨會堆積於分離線位置上，由圖五可觀察到自由車手人體的分離線位置約位於人體肩部、上手臂、腰部及大腿處^{6,7}。

在瞭解分離線位置後，本研究設計了十種不同樣式的粗糙元如圖六，利用3D 列印與矽膠製作粗糙元模型黏貼於自由車手全尺寸模型之分離線位置前緣如圖七，並將黏貼粗糙元之自由車手模型置於大型風洞之中量測其阻力。研究結果顯示，增加了粗糙元之自由車手在空氣動力阻力的確有下降，其中以粗糙元樣式3最為顯著，空氣動力阻力可下降達6-7%。



圖三：測力元件及自由車支架示意圖



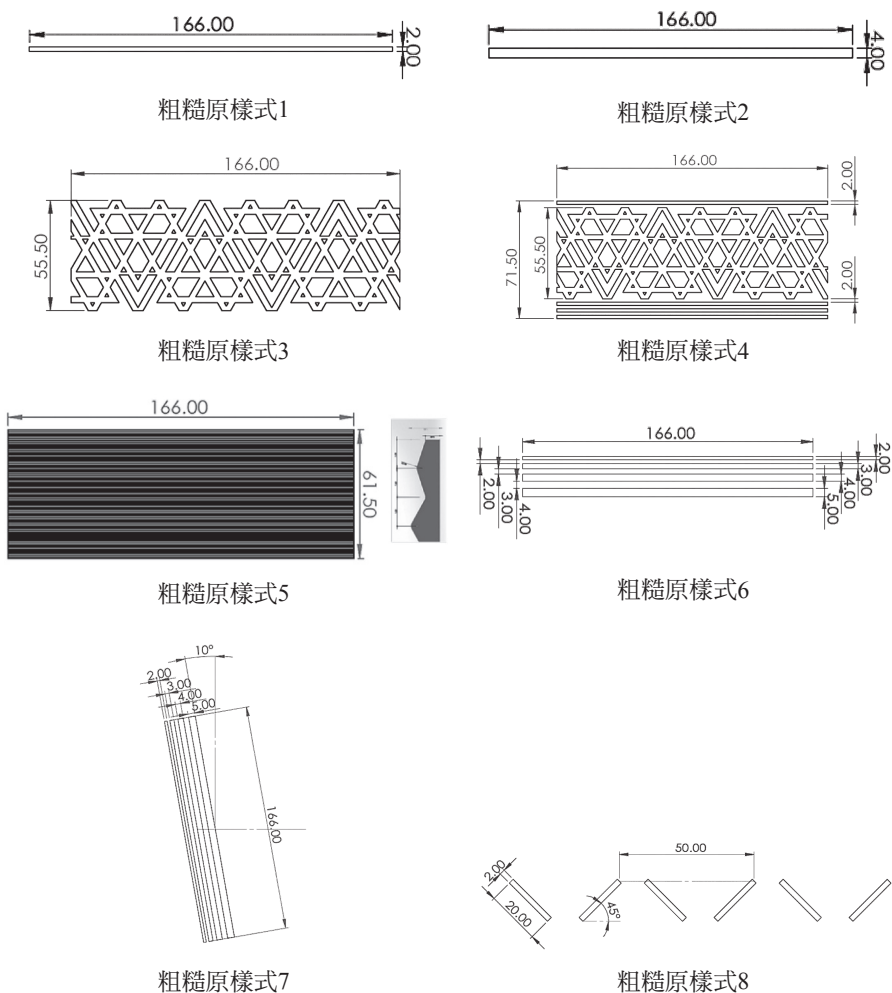
圖四：風洞自由車選手迎風面積量測示意圖

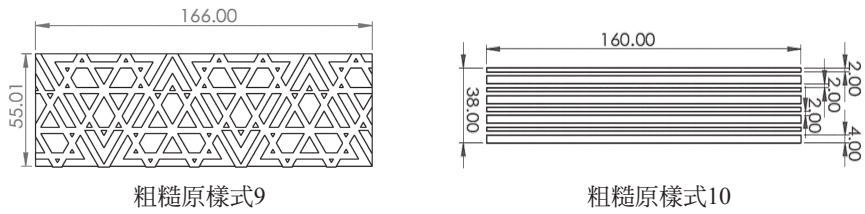
⁶ 陳昱翔 (2022)。《自由車手周遭流場結構探討與風洞實驗數據分析》，臺南市：國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。

⁷ Y. H. Chen, J. J. Miao, & Y. R. Chen. An experimental study on the phenomenon of flow field around the limbs of cyclists. *Journal of Fluid Science and Technology*, unpublished.

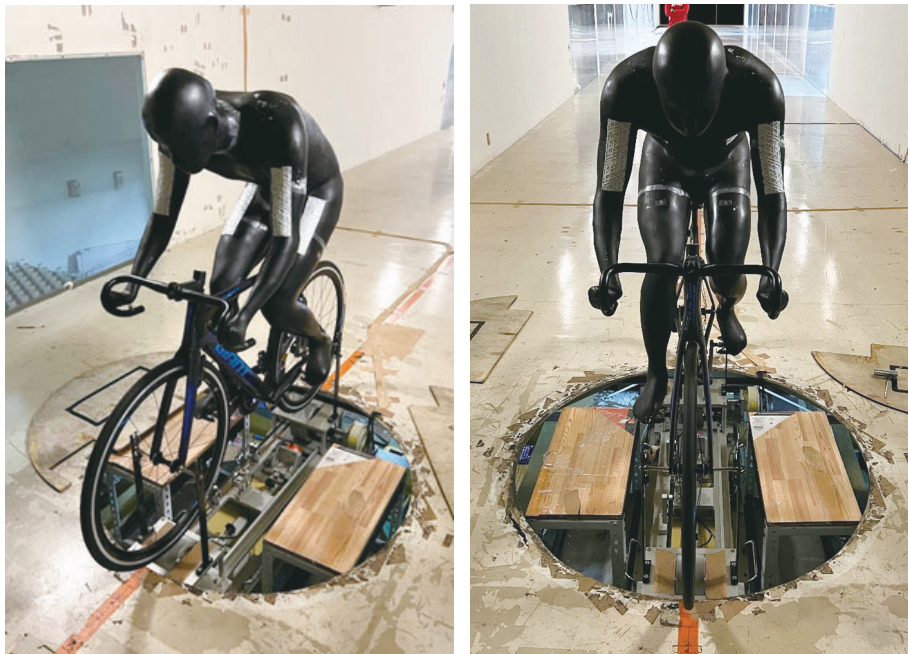


圖五：自由車手模型分離線位置示意圖





圖六：十種自製粗糙元樣式示意圖⁸



圖七：將粗糙原樣式3黏貼於自由車手模型進行風洞實驗

經風洞實驗後，本研究團隊將粗糙原 3 放置於分離線前緣位置並製成自由車衣（圖八），其特點在於迎風面採用較粗糙的布料，並以長袖車衣在上手臂及下手臂採用直條粗糙布料，經選手穿著並於大型風洞進行空氣動力阻力之量測後發現，選手在穿著圖八車衣後其在同一騎乘速度及環境狀態下可降低達 7-8% 之空氣動力阻力⁹。

⁸ 陳嘉君 (2020)。《自由車選手風洞實驗數據分析與減阻之研究》，臺南市：國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。

⁹ X. Y. Hsu, J. J. Miao, T. H. Ku, J. J. Chen, W. C. Yuan, Y. H. Lai, Y. R. Chen, Y. J. Chen, C. H. Tseng, C. H. Chen, S. S. Jan, Y. S. Ciou, Y. Chen, & C. W. Chiu. (2021). A study of drag reduction with textile roughness on a cyclist model. *Journal of The Textile Institute*, 113, pp.1206-1230.



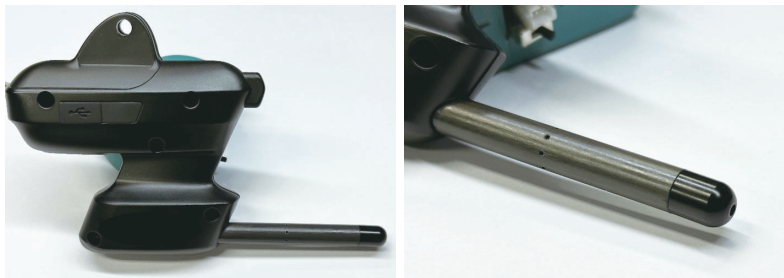
圖八：將粗糙原樣式3製作為實體車衣於風洞內進行實驗

六、數據資訊系統的整合與研發

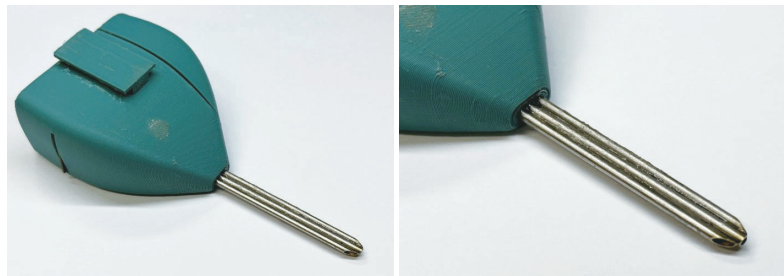
過去在自由車手訓練上大多憑感覺來瞭解環境狀態，近年來運動科學觀念興起，各家廠商逐漸開發多款智慧裝置來顯示選手之騎乘情況，為瞭解自由車手訓練及比賽時之環境狀態，市面上出現如各式功率計、心率計、運動手錶、車錶等周邊配件來監控數據以量化騎乘效益，然較少有整合性產品之出現，僅以功率當作監控指標依據。然而騎乘過程中受到影響的因素甚多，如路面顛簸、天氣、風向等都會影響騎乘表現，故近幾年有廠商推出市售風速計，透過皮托管將量測到的風阻資料傳到自行車錶，作為選手當下參考的指標。然而，目前風速計均採用單管量測（圖九），意味僅能夠量測並取得單一方向的風速數據，但在實際戶外騎乘過程中，風的影響是來自四面八方，騎乘中會因此受限資料擷取範圍，導致影響風阻數據的精確度，因此本研究自製可量測較廣角度來風的風速計（圖十），以期望提供自由車選手更為精準之空氣動力阻力參考依據。

在開發出可量測不同來流風之多孔風速計過後，本研究為使自由車選手在訓練時亦可以瞭解自身之騎乘狀態，故將資訊系統結合個人智慧型手機顯示。關於資訊系統中騎乘者之迎風面積，由於在戶外環境無法如風洞實驗時設置在騎乘者後方的攝影機系統取得，本研究基於在風洞實驗數據分析經驗，利用智慧型手機前鏡頭攝影機拍攝自由車騎乘者正面之面積，並運用人工智慧（AI）與深度學習來估算出其迎風面積（圖十一左）。再者關於資訊系統中騎乘者之阻力係數，本研究使用在風洞實驗中不同身形之自由車選手之空氣動力阻力數據建

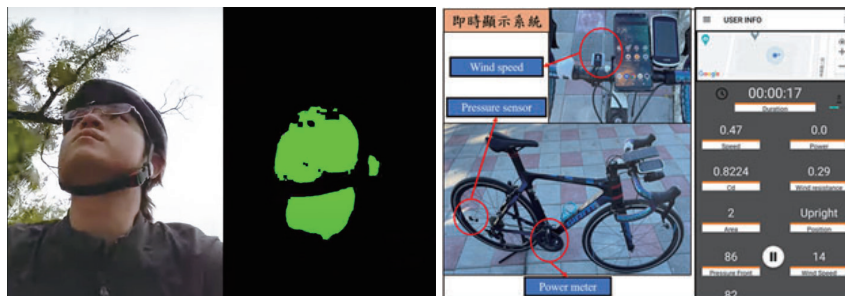
立成資料庫，即可估算資料庫之阻力係數。最後搭配利用自由車前方設置之三孔風速計量測之風速風向資訊，以及前置攝影鏡頭測得之迎風面積，運算即時之空氣動力阻力資訊，供自由車選手參考。除空氣動力阻力之外，本團隊另加入自由車功率計及輪組胎壓計，結合為一整合型之自由車資訊系統，並可顯示多種數據於智慧型手機螢幕上，選手在訓練時可藉由自身所輸出之功率及空氣動力阻力值之大小，自行配速及調配適當之功率輸出，幫助在競賽時達到更優秀之成績。



圖九：市售單孔風速計



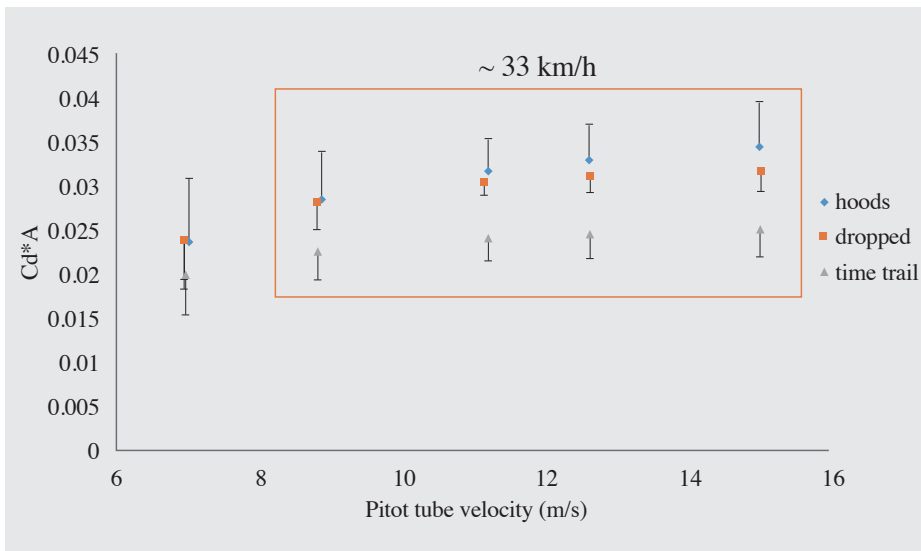
圖十：自製多風向量測風速計



圖十一：(左圖)智慧型手機前鏡頭投影面積運算概念圖；(右圖)整合型自由車智慧資訊系統及裝置於自由車之量測設備示意圖

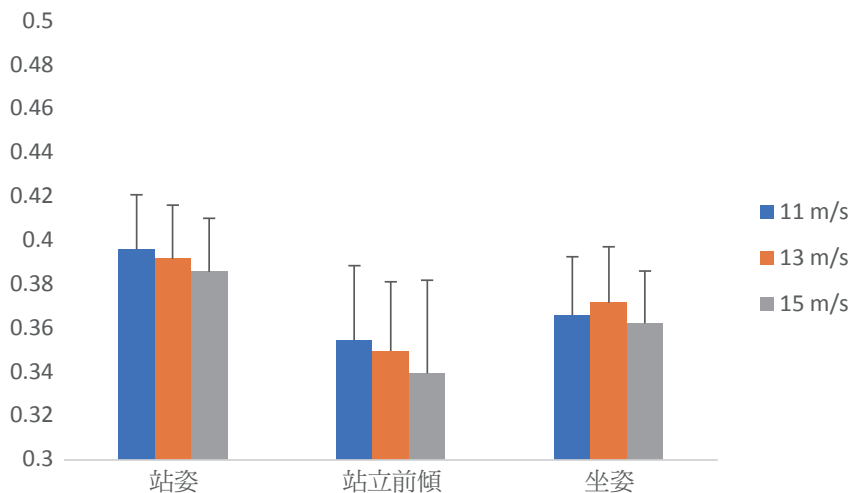
七、選手訓練時策略調整

自由車手常用姿勢以上把 (hoods position)、下把 (dropped position) 及休息把 (time trail position) 三姿勢為主，不同的騎乘姿勢在整體空氣動力阻力均有不同之表現。圖十二為在不同風速情況下三種不同姿勢整體阻力表現，在騎乘速度較低之情況下 (約時速 33km/hr)，騎乘時採用上把姿勢及下把姿勢對於整體阻力較無明顯之不同，然而當騎乘速度不斷提升後，上把姿勢之空氣動力阻力提升較下把位置明顯，除了上下把姿勢之外自由車選手在採用休息把位置時均對於降低整體阻力上有顯著之效果。然而在選手騎乘姿勢上雖然以趴臥之休息把阻力較小，但相對的舒適度不佳，經研究後發現，在自由車騎乘之相對風速達到 11m/s (約時速 40km/hr) 時，改變為趴臥之休息把姿勢更有效的降低風阻，因此選手可在較低速時保持原本之姿勢，而衝刺至較高速度時保持休息把的低風阻姿勢，以此策略可讓選手在競賽時既可降低高速時的風阻，也可以在低速時保持較舒適的姿勢維持體力。三種騎乘姿勢除了在空氣動力阻力之表現不同外，對於自由車手肌肉活化程度亦有所不同。研究結果可發現在騎乘速度小於約時速 33km/hr (約為 9.16m/s) 時，三種姿勢之間對於肌肉活性表現上無顯著差異；然而在騎乘速度大於約時速 33km/hr 時，上把與下把肌肉活化程度大於休息把。



圖十二：自由車騎乘姿勢在不同風速下空氣動力阻力之變化圖

除了在普通騎乘之情況外，無論是公路賽或場地賽在最後均以「衝刺」作為決定勝負之關鍵，故在探討衝刺階段之可讓自由車選手保持較高有效輸出功率（意味較低之空氣動力阻力輸出功率），騎乘姿勢必為影響最後決勝關鍵主要因素之一。在自由車競賽最後衝刺階段，自由車手為得較好之能量功率輸出，往往會選擇與一般騎乘狀態下不同之騎乘姿勢，如站姿、站立前傾與坐姿等，本研究探討前述三種之衝刺姿勢並量測其整體空氣動力阻力值之大小，風洞實驗結果如圖十三，結果顯示站姿比坐姿有較大的空氣動力阻力，但是站立前傾又較坐姿更能降低空氣動力阻力之表現。



圖十三：自由車選手在衝刺階段所使用之姿勢在不同風速下空氣動力阻力之變化圖

八、結語

本研究旨在於將自由車科技推廣至一般民眾之活動之中，故將風洞實驗的研究成果整合至智慧型手機之中，透過自由車資訊系統之整合，讓一般民眾亦可在運動時關注自身騎乘時之狀態，同時促進自由車運動之普及；此外藉由新整合技術構想之實現，亦可將技術轉移予國內廠商，促進產業技術之升級。在選手訓練上，可利用即時之資訊系統提升其競賽時之表現，藉由功率之估算調配競賽之節奏以達到更好之成績。