

三、研究計畫內容

(一) 研究計畫之背景

1. 本研究計畫所要探討或解決的問題

我國自行車產業歷經數十年發展，目前不但成功由傳統產業躍升為高科技技術之產業，並在外銷拓展方面獲有豐碩的成果，且成為全球第二大自行車供應基地，年產值突破六百億元，尤其以進口高階零組件的歐洲市場更是排名世界第一[1]。自行車逐漸成為熱門的商品，且早已跳脫廉價與粗糙的形象，轉而躍升成為精密工業與精緻工藝產品的代名詞。在朝向精緻化發展的同時，加上休閒風氣興盛與追求環境保護的發展，使得自行車不再只是單純的交通工具，進而演變成新時代的健身、休閒的重要角色。越來越多的高單價自行車商品在市場上大受歡迎，動輒數萬元的自行車商品已成為主流。關鍵零組件更是各家廠商推陳出新吸引顧客的重要商品，消費者除了因為其功能性與安全性而購買，此類具科技感的自行車商品更是流行時尚的指標。近年來電子化是自行車發展趨勢，除常見的照明、導航、轉速計等裝置，國際大廠紛紛投入目前研發的自行車電子裝置，市場逐年遽增，由全球自行車大展所陳列數量龐大的電動自行車以及各類電子創新商品[2]，可預估自行車相關電子周邊零件可被市場接受，也將朝向電子化與智慧化發展。

自行車車體可分類為車架系統、傳動系統、車輪系統、轉向系統、煞車系統、避震系統與附件等；自行車種類繁多依其車種大致可區分為普通車、公路車、城市車、旅行車、登山車、及競賽車等六大類[3]。本計畫研究標的之登山車(Mountain Bike, MTB)，使用於(Off Road)場合也就是柏油路水泥路以外區域，在休閒競技活動盛行的歐美國家帶領之下更延伸出：

1. 越野車(Cross Country, XC)：主要騎乘於較崎嶇之山路與碎石路。
2. 自由騎車(Freeride, FR)：登高爬山區並可穿越極限地型之登山車。
3. 下坡車(Downhill, DH)：具有最堅固車體，最厚實輪胎，配備高性能避震器，可行駛山坡地高速往下衝刺及進行極限運動。

一般的自行車(Road Bike)由於設定在平緩的道路行駛，使用充氣輪胎或配備彈簧的坐墊提供避震效果增加舒適性。登山車騎乘的環境較為惡劣，行駛於崎嶇道路時吸收不平整路面所帶來車輪震動之能量，將傳遞至車身以及駕駛人。此震動能量不僅令騎乘者感到不舒適，彈跳與晃動更直接影響到行駛的安全性。為了讓騎乘更加舒適安全，避震功能在此類自行車扮演的重要性相當關鍵。

懸吊(Suspension)是當前大部分交通工具用以避(減)震的裝置，一般設計都以彈簧(Spring)、避震器(Shock Absorber)和機械結構所組合而成，以氣體或液體達成避震效果。在自行車領域中常見的懸吊又可細分為前叉式(Suspension Fork)、後置式(Rear Shock)、座管式(Seat Post Shock)等，如圖 1 所示，其目的是為了達成下列的目標：

1. 承載車輛的靜態重量，控制調整車體與路面的距離。
2. 降低輪胎跳離地面的情形，保持輪胎和路面之間的摩擦最大化，增加安全性。
3. 提供良好的轉向穩定性處理，減少震動與失控，提供騎乘者操控性。
4. 提升騎乘者的舒適度，能夠消除顛簸的道路對車體與騎乘者的影響。

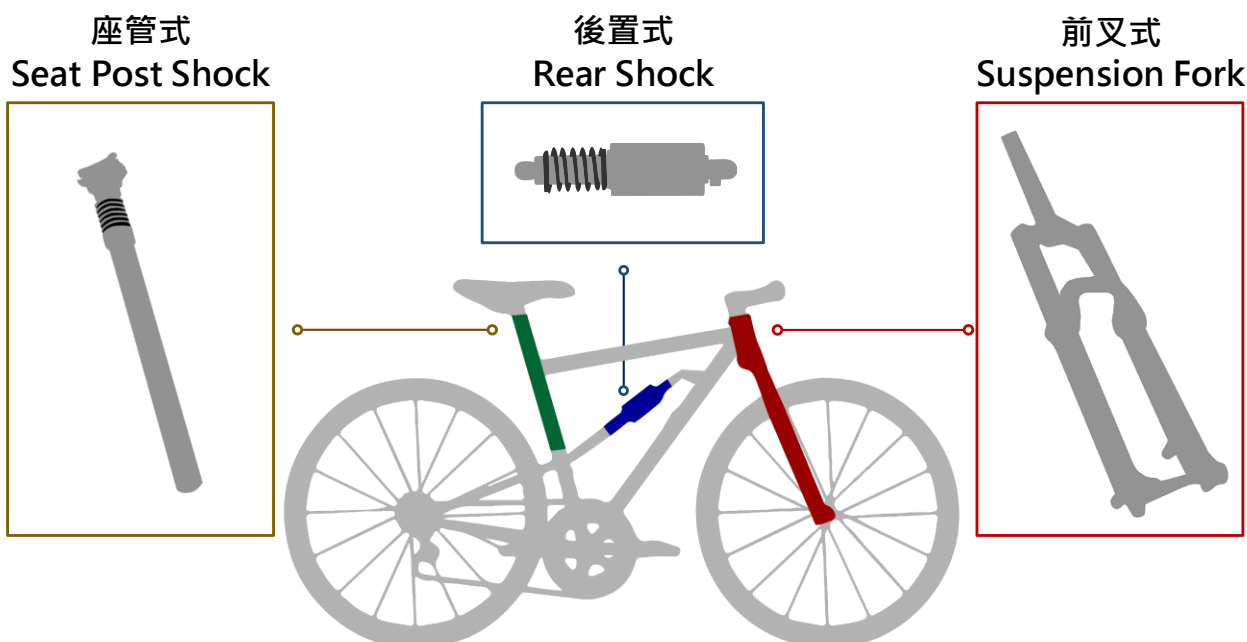


圖 1. 自行車懸吊系統與其安裝位置對應之名稱

對於以登山車做為休閒、運動、旅行的大眾，一般登山車的被動式 (Passive) 懸吊裝置能夠提供基礎舒適騎乘的功能。然而固定的減震阻尼 (Damping) 在從事越野等高強度登山、競技活動，這類型的懸吊裝置已無法滿足騎乘崎嶇道路的進階需求，更無法達到極限運動自行車運動選手在競賽中激烈的騎乘操控、安全與競速所必需的性能。為了讓自行車能適應更多不同的路況與操作條件，近年來廠商開發許多半主動式 (Semi-Active) 懸吊的設計方式，騎乘者可手動依照舒適性與操控性的需求進行調整。另一方面，懸吊之於自行車並非完全都是優點，避震器能夠抵銷來自路面的震動，相對的也會抵消騎乘者踩踏的力道。沒有配備懸吊裝置的競技公路車，車架堅固，輪胎高壓飽滿，此不具阻尼的設計是最大程度地將車手踩踏力道透過傳動裝置產生前進動力。柔軟的阻尼設定將會分散越多的踩踏力道，產生之踩踏損耗 (Bobbing) 將會與阻尼柔軟的係數成正比。介於舒適與性能間難以量化之操控性 (Controllability) 最佳調整，更是自行車廠商與愛好者一直追求的目標。

由上述說明可知，懸吊阻尼係數的調整需考慮的因素，目標並非唯一。不同於變速系統一樣直覺，駕駛無法於短時間內調整至最適合的避震阻尼。因此本計畫預計開發一種新的智慧型電子式懸吊裝置控制系統，以及其相關實驗量測環境建置。預期能完成一套可進行商品化之研究作品雛型，開發之技術與國際上相關專利有所區隔，具有完整功能測試報告，能直接與自行車廠商接軌，內容包含：

1. 智慧型路面估測：裝設於懸吊之應變規 (Strain Gage) 與加速度計 (Accelerometer) 兩種感測訊號，再輔以離散小波轉換 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 濾波後，在與自我組織映射圖 (Self-organizing Map, SOM) 進行路況分類，例如：平路、碎石路或崎嶇，精確判定路面情況提供後續自動化阻尼調整控制。
2. 被動式懸吊阻尼控制裝置：以嵌入式先進微控制器完成電子懸吊控制器與致動機械結構。
3. 騎乘狀態判定與控制：判定車體是否處於起步、飛躍、緊急煞車等狀態並調適避震器阻尼。
4. 實驗量測平台設計：設計實驗平台可產生不同路面的起伏與震動效果，量測震動量、懸吊壓縮行程、輪胎彈跳情形等相關數據及頻譜，以量化呈現舒適度、操控性以及踩踏損耗。

2. 研究原創性、重要性、預期影響性

國際低單價之通勤自行車市場近年來都由中國大陸取得領先地位。而歐美自行車競技運動風氣鼎盛，對我國生產之高品質、輕量化及高單價車種及零件需求多，尤其在歐洲多國進口市占率均具領先優勢[1]。避震裝置是煞車裝置之外，另一個可以增進行車安全的重要裝置，也是車身之外高單價的商品之一，是一項具競爭力、不易被取代、獲利高且富含技術深度之自行車零件。電子懸吊系統在汽車上已經行之有年，受限於體積、售價、電子與電池系統技術在自行車領域卻尚未普及。此問題並未因場景轉移至體積較小、速度較慢和結構較簡單的自行車上而變得更容易解決，取而代之的是要在最小動力與電力的需求下，完成各項結構與人體都緊密相連的減震動作，這些條件限制更增加了此研究的困難度。計畫提案人於 2015 年台北國際自行車展參展時，首次聆聽國際自行車零組件大廠 Fox、Shimano[4]與 Magura[5]發表自行車電子懸吊裝置周邊產品，並且參考成車製造商 Lapierre Bikes[6]及 Pinarello[7]推出的電子避震自行車商品後，評估該類產品重要性高，立即開始構思技術困難點的突破與衍伸問題的解決方案。除了一般自行車龐大的全球市場外，觀察美國市場研究機構 Navigant Research 調查報告指出，全球電動自行車自 2016 年起的年銷售額 157 億美元，可望在 2025 年達到 243 億美元[8]。電動自行車因為體積輕巧且發生意外時無保護措施，在安全性及避震需求幾乎可列為標準配備的電動自行車市場，電子懸吊裝置的研究更是值得被期待。電子懸吊不僅可望進入自行車高階市場，甚至可以進入銜接至避震需求更大、更受期待的電動自行車市場。

有別於前述商品與所屬之專利都使用加速度、踩踏頻率(Cadence)、輪速(Wheel Speed)等多項感測器才可達成自動化懸吊控制。本計畫提出一種僅使用兩種感測裝置，加速度計以及安裝於懸吊裝置上的應變規，量測應變規受力情形以及加速度計變化情況，判定騎乘狀態並制定調變懸吊阻尼決策。由於自行車的電力有限，頻繁的適應性控制不僅耗電，阻尼頻繁改變或過軟的阻尼設定更會讓騎乘者感到突兀的不適感或踩踏費力。基於這些控制目標，本計畫預計實現之原創功能：

1. 起步時將避震器調整至最硬或鎖定避震器(無減震效果)以減少踩踏損耗。另外在車體飛躍地面或受到劇烈衝擊時，將避震器調至最軟減少著陸衝擊力。
2. 緊急煞車時預先計算反作用力適當將避震器阻尼調硬，避免懸吊下沉翻車，或懸吊行程用盡觸底造成強力反彈。
3. 在連續行使時，建立一個路面估測模型，利用離散小波轉換與自我組織映射圖方法，將取得之連續感測訊號執行更細密的分析，準確估測目前所處之路面情形。除遇到前兩項情形外，懸吊系統將以路面情況，維持較長時間調整避震器的阻尼係數，避免耗電與不適感。

相較於相關文獻與專利，本研究提出原創方法感測器需求最少，相對成本也較少，演算時間複雜度低，概念創新且立即可實現，也預期能有一定的準確率。以商品的角度而言可以有效降低產品的製造成本，也可增加產品的可靠度。在學術上本計畫所使用的精簡架構之演算方式，更是在相關文獻或專利鮮少發現，具有研究新穎性與專利性，研究成果預期可以直接讓自行車廠商製造生產。

3. 國內外有關本計畫之研究情況、重要參考文獻之評述

懸吊系統電子化在汽機車領域已經行之有年，國內外相關的文獻、專利與商品相當繁多，在自行車議題上大部分卻無法沿用。自行車自動化懸吊因電力問題都已半主動式電子懸吊實現，相關領域文獻與專利技術整理與說明如下：

(1) 自行車懸吊裝置

本計畫為實務型研究，參考文獻與比較對象以發表之國內外專利技術主。由專利技術中可發現，因自行車懸吊系統的自動調教方式隨著微電子機械系統 (Micro Electro Mechanical System, MEMS) 技術進步，感測資訊變得相當多元，懸吊控制方式也有所不同。依照其技術實施細節選擇代表性之專利，對應感測控制方法以表格方式整理於表 1，另外代表性技術詳細說明如下。

表 1. 自行車懸吊系統專利分類表

感測與控制 技術 專利	震動	踏頻	扭力及角度	懸吊參數	車速	騎士位置	姿勢感測	坐墊壓力	車體狀態	重量感測	單軸加速度	地面距離	坡度感測	車輪轉速	手動	檔位偵測	地理資訊
美國專利 [9]				*													
美國專利 [10]		*		*	*												
歐洲專利 [11]									*								
美國專利 [12]		*				*				*							
美國專利 [13]		*	*	*	*			*	*								
美國專利 [14]				*													
美國專利 [15]	*	*					*						*				
美國專利 [16]									*								
美國專利 [17]					*				*								
美國專利 [18]			*														
美國專利 [19]			*		*												
美國專利 [20]			*						*								
美國專利 [21]						*										*	
中華民國專利 [22]											*			*			
中華民國專利 [23]		*	*				*						*				
中華民國專利 [24]	*													*			
中華民國專利 [25]												*					
中華民國專利 [26]	*		*			*						*					
中華民國專利 [27]	*				*							*					
中華民國專利 [28]					*				*		*						
中華民國專利 [29]															*		*

美國通用汽車 [9] 設計一種電子可變阻尼懸吊系統，其中具有一個微型三相電動交流發電機，可連接避震器機構之上，彈簧結構運作時可產生感應電流。再將三相交流發電機輸出經由單個直流整流器轉換為直流訊號，連接放大器及微控制器，經由阻尼換算避震器動作之即可獲得加速度以及懸吊受力情況，提供後續控制使用。該專利為懸吊系統受力量測相當優秀的設計，因多項國際專利 [10] 都是

以此方式為基礎，採用此方式須注意侵權問題，且自行車結構相對簡單。應用時需考量重量、成本及機構複雜度等實務問題。

歐洲專利[11]的設計在於使用汽門感測與煞車訊號用於車輛，在起步、跳躍及下坡時自動調節阻尼。該專利闡述車體加速及減速時懸吊調控的重要性，是一個值得研發參考的設計概念。

美國專利[12]可透過感測四種騎士位置(正常坐姿、前傾、站立衝刺、重心偏後)、踩踏頻率、自行車斜度及震動訊號，調控節懸吊系統。該設計凸顯輕量的自行車與一般重量汽機車，騎士動作重量對於懸吊控制的重大影響。美國專利[13]與[15]感測騎士於自行車上踩踏頻率、座椅壓力、自行車傾斜度、懸吊壓力及車速等數據，調整裝置調整自行車懸掛系統的參數，其中[15]前後避震系統為單獨調整控制能有較佳效果。然而此類作品使用大量電子感測裝置，目前在實務與成本考量下，預期普遍應用於自行車議題尚有一段距離。

美國專利[17]使用雙軸加速度計感測自行車車速、車體傾斜角度及垂直加速度，將感測數據傳輸至控制器，調整阻尼液體流動之孔口大小，藉此調整懸吊系統。此概念是自行車懸吊研究重大突破，該專利受到多項後續同質性專利引用，改善雙軸加速度感測判斷的方法是此類研究的重點研發方向。

美國專利[20]利用踩踏、功率、震動、傾斜角度及影像感測數據，對阻尼進行壓縮的三種狀態控制。該專利詳列各項感測數據所對應控制阻尼係數調教的方法，具參考價值。

中華民國專利[21]提出自行車座椅位置設定低時須將懸吊組尼設定最軟。當座椅高時即代表其是需要較大前進的傳動力，此時再依照檔位所對應的齒輪比估測可能的車速，以控制懸吊系統。

中華民國專利[22]為電子式油壓阻尼控制之專利。依據車輪轉速及單軸加速度計偵測路面狀況。使用晶片模組內建參數控制驅動裝置，該驅動裝置利用馬達調整控制油孔間隙大小達成阻尼調變，使其具有因應路面狀況自動調整阻尼係數之功能。油孔間隙大小調變阻尼方式所需之電力較低，適用於低電力的自行車應用場景，與本計畫採用之半主動避震阻尼調變方式相同。

中華民國專利[23]藉由感測踩踏迴轉速、旋轉角速度、踩踏功率、踩踏力量、扭力、騎乘者姿勢、坡度。控制裝置依據感測訊號之阻尼曲線關係，輸出不同級別控制訊號至阻尼調整裝置調整阻尼力量。

中華民國專利[24]於車輪之裝設霍爾轉速感測器，並於車輪輪軸及避震器上分別裝設壓電晶體加速度感測器，感測各輪軸及避震器之振動及衝擊量，並計算其振動頻率。當車輛本身之振動頻率與避震器之振動頻率相等時，即會產生共振現象，造成大幅度的震動，此時調整阻尼達到自動減震之功效。該專利將懸吊感測訊號導引至頻域空間進行分析，相當具有創新性，同時避免共振現象之概念也能延伸至兩輪以上懸吊系統整體最佳控制的研究。

中華民國專利[25]設計位於車體前方面對地面之距離感測器可以預先偵測地面狀況回傳給控制器，再調控阻尼係數達到避震之功效。此預先偵測路面的方式不同於碰撞後再調整阻尼的避震方式，可確實解決突發的碰撞彈跳問題，相當值得深入探討，各國汽車大廠也開始研究此議題。然而距離感測器的精度、反應速度與價格的尚未達到實際應用標準，在自行車應用領域還需要更長的時間。

中華民國專利[29]使用無線電導航系統中位置感測器如：GPS 等技術識別自行車所處之地理資訊，依照其所在位置的路面狀況調整自行車的阻尼係數。具備通訊裝置的主機更能將騎士手動更新的懸吊控制參數傳給其他使用該系統的使用者分享，是一項跳脫控制原理的物聯網創新控制概念。

(2) 電子懸吊裝置及產品說明

自行車電子懸吊是目前世界各大廠家所著重的重點商品之一，屬於高階自行車配備，目前市面上販售之代表性商品其產品功能及未實現之技術都具有多項專利保護，說明如下：

FOX Float iCD[4]

Float iCD 是 Fox 與 Shimano 公司的所共同研發之自行車電子技術。Float iCD 採用以電力線通信 (Power Line Communication, PLC) 方式，允許數據和電力共用相同導線傳輸。提供騎乘者在騎車時快速切換懸吊運作方式，增加競賽速度並增加操控性與安全性。基本上該產品為電子手控功能，並沒有提供對應之自動控制能力。其優點在於快速的阻尼變換，是目前避震阻尼反應速度最受到市場最加的作品，也是各項登山車越野競賽車手主要選擇的元件。

Magura eLECT[5]

Magura TS8 eLECT 電子智慧懸吊是目前自動化程度最高的一項作品。該系統內包含一個智慧微控制器，可以自動控制懸吊系統的運作情形。該懸吊具有 100mm 行程，內置三軸加速感測器，經由運算過後，當車體凌空飛躍時會自動將懸吊解除鎖死，通過小型壓電馬達能將懸吊在 0.5 秒內鎖死，增加騎乘傳動力。手動模式則能透過無線遙控器，快速切換懸吊是否鎖死。該產品有良好的感測運算功能，判定一般、凌空飛越與上坡三種狀態，在不同路面調整不同阻尼的功能則是在該產品出現，可能原因為該產品多為激烈駕駛與競速使用，車手大多時間都是以前輪鎖定的方式行進，一般路面顛頗直接就以相同的阻尼係數統一減震處理，過多避震功能只會降低車速。

Lapierre Bikes EI-shock[6]

EI-shock 是感測元件使用較多，相對複雜的一項作品。前叉懸吊配備專速量測元件，可以量測自行車前進的速度。該產品在避震其車架端與輪軸端裝設兩顆加速度計，根據兩顆加速度計感測之重力值，推算懸吊壓縮的速度。該作品的特色在於，根據兩顆加速度計重力強度和自行車的速度，避震器可以自動設定為開啟、半開啟和鎖死三種狀態。如果車架端的加速度計數值較高，則微控制器內的演算系統會感測到車手想要加速，並增加避震器的阻尼係數。如果輪軸端得重力值較大，代表目前的路面較為顛頗，系統則會將阻尼設定為小，增加舒適性。

Pinarello Dogma K10s with Electronic Suspension[7]

不同於元件廠商僅提供單一懸吊元件，Pinarello 在電子懸吊的產品是成車作品，並無單獨販售，同時也是將電子懸吊應用於公路車的少數作品。Domga K10 為具備後電子懸吊的公路車，其使用的技術稱為 eDSS (Electronic Dogma Suspension System)。eDSS 主要用於感測路面震動，可以讓避震器在軟硬兩檔狀態下自動切換，連結 Garmin 儀表控制器則可以進行手動檔位切換。

由上述多樣商品化作品可以得知在競速以及極限運動的市場，電子懸吊已經是高階自行車的重要配備，其電池供應電力的時間也都具有 20-40 小時的續航能力。目前看來由各家廠商已申請的專利看來，下一代的作品應該都是朝向自動化控制發展，同時路況感測與行駛狀態感測已是該項作品重點研發的技術。更加細密的懸吊參數控制以及更精確的感測技術將是該類研究的重點研發標的。

(3) 路面感測分析技術

量測路面狀態提供自行車騎士警示參考以增加騎乘安全是目前研究發展趨勢[30]。本計畫預期發展路面分析技術，經參考文獻後將各項現行技術整理如下表 2，說明如下：

表 2. 路面感測分析技術分類表

路面分析技術 參考文獻	智慧型手機	加速度計	GPS	速度感測	雷射雷達感測	小波轉換	影像處理	支撐向量機	傅立葉轉換	機率統計方法
美國專利[31]					*					
美國專利[32]					*	*			*	*
論文[33]							*			*
論文[34]							*			
論文[35]						*	*	*		
論文[36]							*	*		*
論文[37]	*	*		*					*	*
論文[38]	*	*	*							*

專利[31]於車體前方裝設都普勒微波雷達(Doppler Microwave Radar)，量測反射強度並進行低通濾波，以判定前方路面有突起物或是平緩路面。專利[32]則是使用雷射元件以雷達光束偵測道路表面狀態。取的相關數據後，在以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)以及小波轉換方式取得訊號頻譜，在以統計方式分析該頻譜所可能代表的路面型態。

論文[33]使用視覺的方式，擷取路面影像資訊經由影像處理，抽取路面特徵特徵在以貝氏分類器(Bayesian Classifier)預測路面之摩擦係數。論文[34]則是使用攝影機量測影像，以路面反射的光變化，在套用機率模型辨識像是冰、水，雪和乾瀝青等路面，適合於路面容易結冰的地區使用。論文[36]將影像進行影像前處理、色彩轉換、小波轉換、特徵擷取以及支撐向量機(Support Vector Machine, SVM)分類器進行乾地、濕地、雪地與結冰地路面。論文[36]相同使用 SVM 分類器針對影像之對比與色差進行路面判斷。機器視覺相關研究以成為路面分析主流，然而鏡頭容易受到光線影響、運算複雜度過高、成本昂貴、耗電量大等因素較不適合應用於自行車議題之上。

論文[37]利用智慧型手機的三軸加速度感測器感測車體震動及車速。藉由三項資料的頻譜圖以傅立葉轉換方式擷取特徵，最後在以機率方氏判定路面情形。論文[38]使用手機加速度計感測路面訊號，使用改良式機率方法估測路面情況。最後再將合併 GPS 地理訊號傳遞至遠端伺服器建立路面資料庫供駕駛人使用。論文[39]調查分析現有已發表之路面感測技術並說明其技術細節，內容提及路面偵測方法尚未完善，偵測方法也有需要解決的問題，如：感測震動為基底的研究必須注意輪胎大小、輪軸距、行徑方向等因素對判定結果的影響。並提及機器學習功能將會大量應用於此類議題上，依照騎乘實際情況逐步修正內部演算法參數將會成為未來研究主軸。

綜觀上述各項研究成果，本計畫獲取相關經驗，預期融合應變規以感測懸吊受力的情形，輔助單純使用加速度感測器的不足，增加判斷的準確性。同時不同於複雜的 FFT，本計畫將規畫精簡之 DWT 與 SOM 分類器也預期有較快的反應速度，能在先進微控制器平台上達成即時運算的效果。

4. 先期研究進度

(1) 自動調節避震器之電子裝置

提案人於 2017 年指導大學部三年級專題生參加第 12 屆盛群盃微控制器創意大賽，該作品使用八位元微控制器為核心，設計一款能夠自動調節避震器之電子裝置。該作品不僅榮獲該競賽金牌，並獲得財團法人自行車暨健康科技工業研究發展中心合作之智慧自行車應用獎第一名。如下圖 2 所示，該作品可以透過伺服馬達控制市售阻尼可調式前叉懸吊之旋鈕，達成電子化控制懸吊的功能。

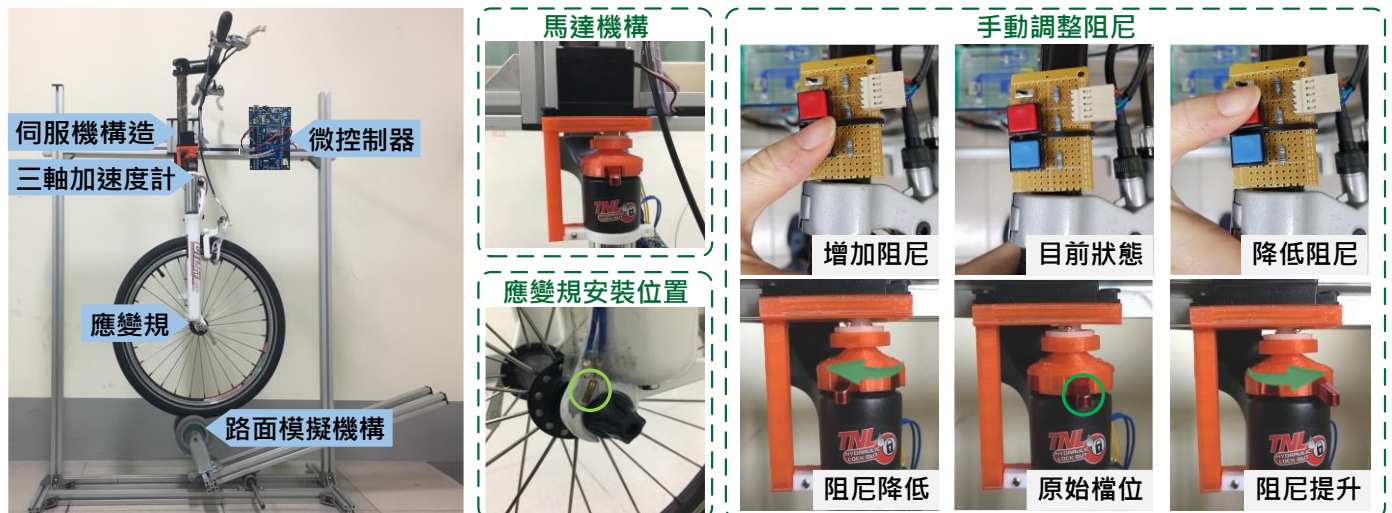


圖 2. 自動調節避震器之電子裝置與自製簡易實驗平台

如下圖 3 所示，該作品過應變規感測路面透過輪胎，給予懸吊前叉的壓力值。當懸吊受到壓力越大時，在該作品上的應變規反應之數值就會越小，系統會對應數值將懸吊阻尼調整至較軟的檔位 (例如：懸吊受到極大應力，數值為 8450)。反之當受到壓力越小時，應變規數值就會越大，系統會對應數值將懸吊阻尼調整至較硬的檔位 (例如：懸吊未受到應力，數值為 8775)。

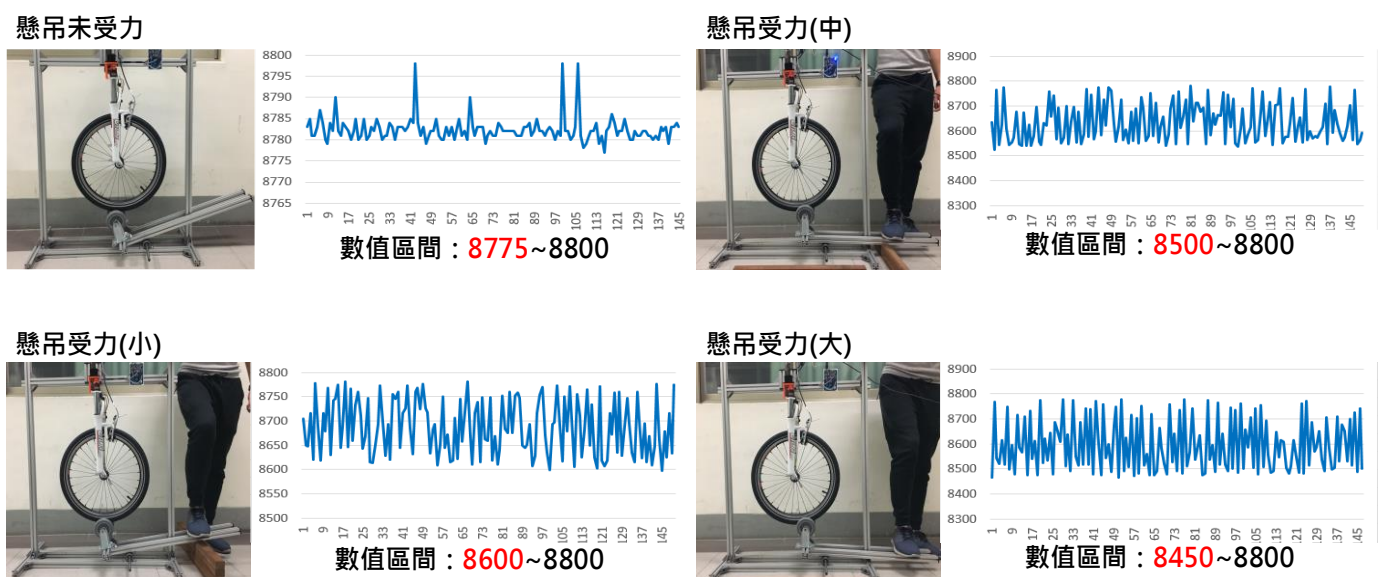


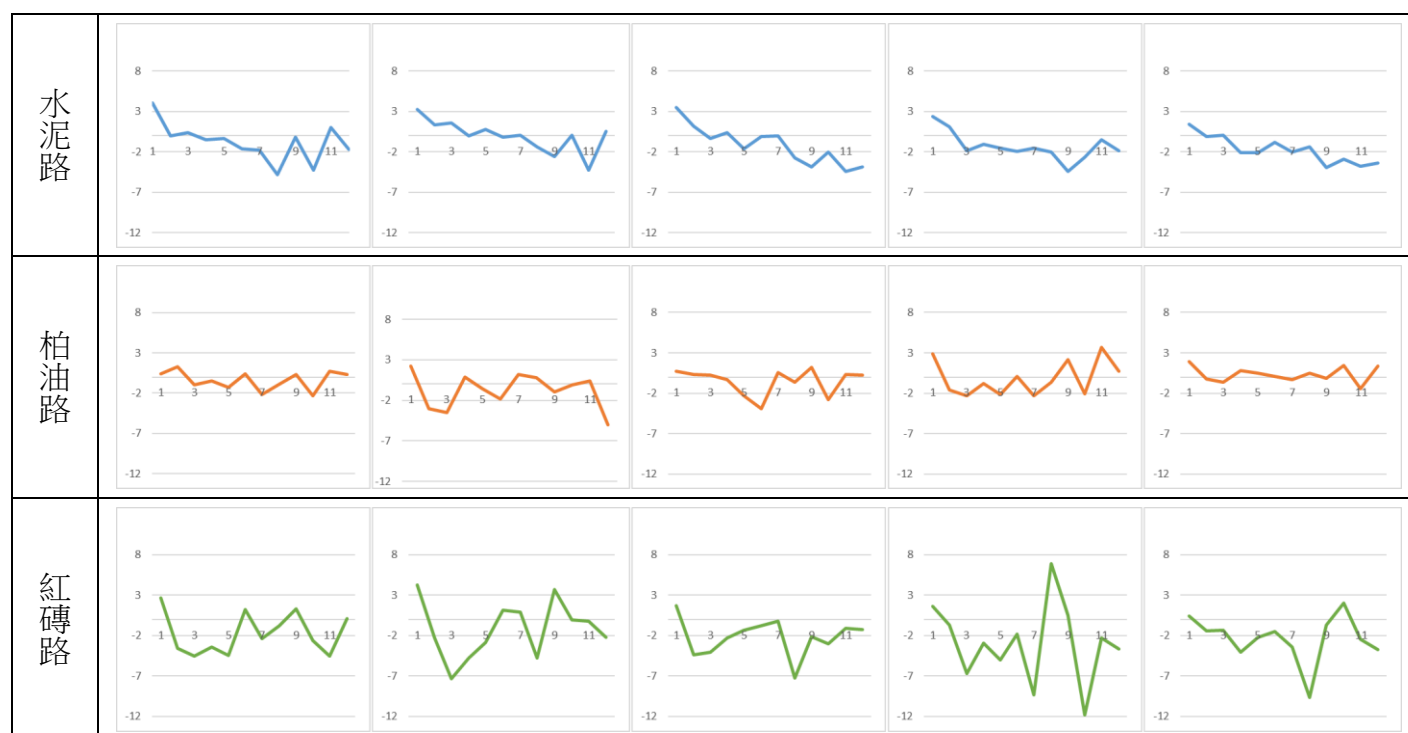
圖 3. 對於懸吊施予不同力道應變規反應之數據

配合加速度計數值，可基礎展示車輛懸空(加速度計 Z 軸數值劇烈增加)與緊急煞車(加速度計 Y 軸數值劇烈增加)時的懸吊控制。該作品受限於學生理論能力，僅以應變規應力之平均值做為控制依據，此方式容易造成誤判，僅能在實驗平台操作，無法完全反映車體震動的情形。開迴路的簡單對應關係控制並非自動化控制，無法控制連續變動的路面訊號。同時轉動的輪胎量測數據變異量極大，許多訊號都受到雜訊的干擾。因此更有效的濾波方式、更精確的路面判定方法以及控制方式，將是解決此問題的重要演算技術。此外該學生自製平台受限於經費，以踩踏方式取代懸吊測試機模擬路面的馬達與機構，無法模擬精確的路面情況與量測穩定的數據，這也是該研究需要改善的議題。

(2) 智慧型自行車安全系統之研究

提案人於 2016 年的科技部專題研究計畫中，以加速度感測器量測路面震動訊號，藉以控制自行車防鎖死煞車系統。在該研究路面分析的實驗中，選擇水泥路、柏油路以及紅磚路，以實驗平台上之加速度計感測器 (ADXL335) 數值於煞車時取樣 (10Hz) X 軸之 G 值。該研究於 1.2 秒內取得 12 筆資料，以三種路面進行五次試驗，取五筆資料作為訓練資料，如表 3 所示。為加快實際操作時的運算速度，先將此資料使用 DWT 縮減資料量，再輸入至 SOM 訓練，該實驗另外再實驗 30 組數據，各種路面各 10 組做為測試使用。該計畫實驗 SOM 之參數：學習速率 0.6，學習率以 0.96 遞減至 0.01 為止，最大疊代次數 500 次。30 組數據的實驗結果，28 組可以正確分類，正確率為 93%。其中柏油路以及紅磚路較容易分類失敗，對於水泥或是平滑之路面大都能分類成功，分類後之結果可用於煞車夾具鬆開與夾緊的參數設定。基於此研究的經驗，提案人將單一加速度計量測震動的概念，延伸至避震控制議題並申請專利[40]。不同於加速度計僅在煞車時量測劇烈變動的精確度，只使用單一加速度計量測騎乘時路面狀態，經提案人實作發現容易因人體踩踏、車體晃動、安裝位置或角度等因素干擾，變得不穩定。因此本計畫預計結合自行車懸吊上之應變規量測懸吊應力與加速度計訊號，以兩種方法的優點進行更縝密的多維度訊號分析與處理，預期能擁有更精確控制的效果。

表 3. 不同路面煞車時 X 軸加速度重力值變化圖



(二) 研究方法、進行步驟及執行進度

1. 本計畫採用之研究方法與原因及其創新性

本研究預計以發展成熟之登山車可調式之自行車懸吊為基底，開發可偵測路面狀態之自動化調整電子懸吊控制裝置，如圖 4 所示。本計畫創新之整合應變規與加速度計感測應用於路面訊息量測的方式，可解決現行僅使用加速度計會因為騎乘時踩踏、晃動、轉彎而產生誤判的情形。低複雜度的 DWT 濾波與 SOM 分類路面分析演算機制，可以實現於低功耗之進階精簡指令集機器 (Advanced RISC Machine, ARM) Cortex M0，並以即時 (Real Time) 系統方式實現，本計畫提出之架構精簡且成本較低，也具新穎性與進步性，相當適合應用於我國廠商鎖定之高階自行車市場的產業特性。本計畫累積多項提案人近年於自行車控制技術與人工智慧等實務研發成果發想而成，基於過去實作研究經驗，研發成果預期能快速產出，並能完成實際作品展示與提供專業測試報告，以利技術推廣。

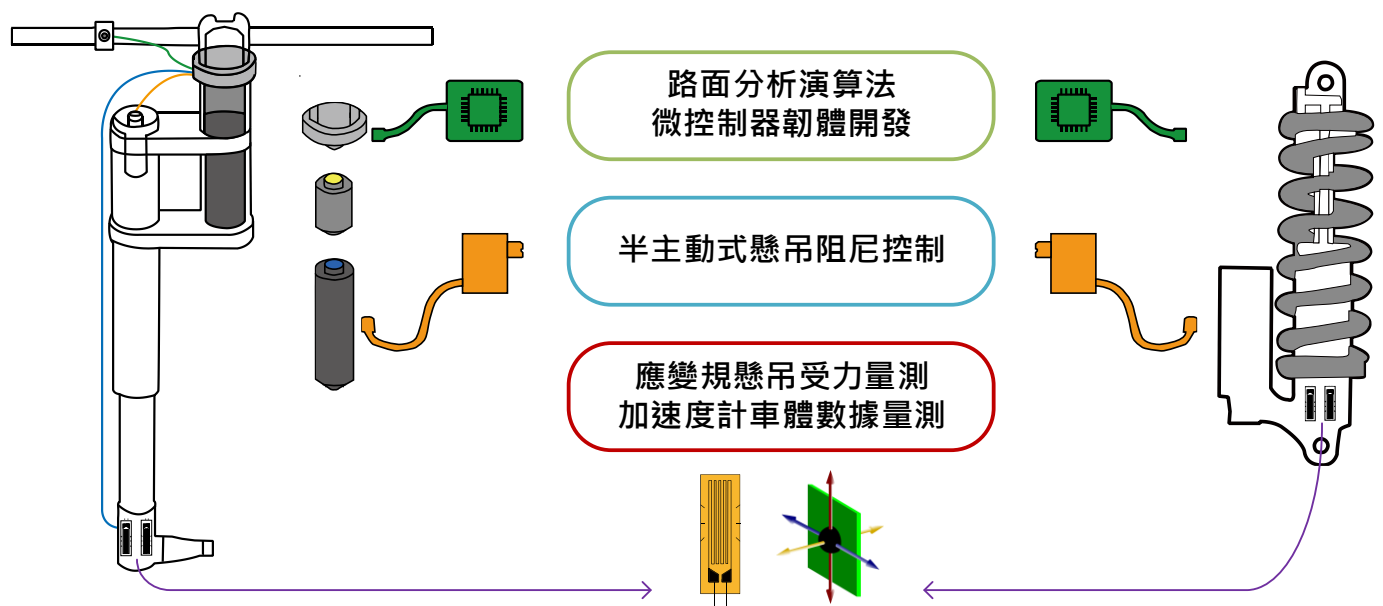


圖 4. 具智慧路面感測功能之電子式懸吊自動控制系統

(1) 自行車懸吊裝置原理介紹

騎乘自行車時，無論是行車速度、路況和車輛慣性，都會造成車身震動，而懸吊系統中的避震器能吸收外來的震動，使車身平穩，亦是車輛騎乘安全性與舒適度的主要因素。目前懸吊控制系統依照主動程度區分為被動式 (Passive)、主動式 (Active) 和半主動式 (Semi-Active)，其目的都是為了提高懸吊系統之穩定，其構造如圖 5。參考文獻[41]以數學模式說明如下：

被動式懸吊控制系統

被動式懸吊控制系統如圖 5 (a) 所示，是由彈簧和避震器所構成的傳統車用系統，沒有額外的控制力抑制擾動，主要是使用避震器來緩和路面不平導致車輛震動。由於構造固定，出廠後即無法調整，因此無法隨著路面狀況、駕駛行為及負重等參數隨意變更阻尼係數，會造成車體俯仰與側傾，甚至車輛翻覆之危險。因為無須消耗額外動力來源、成本低廉且構造簡單，所以被廣泛使用在的市售車輛。

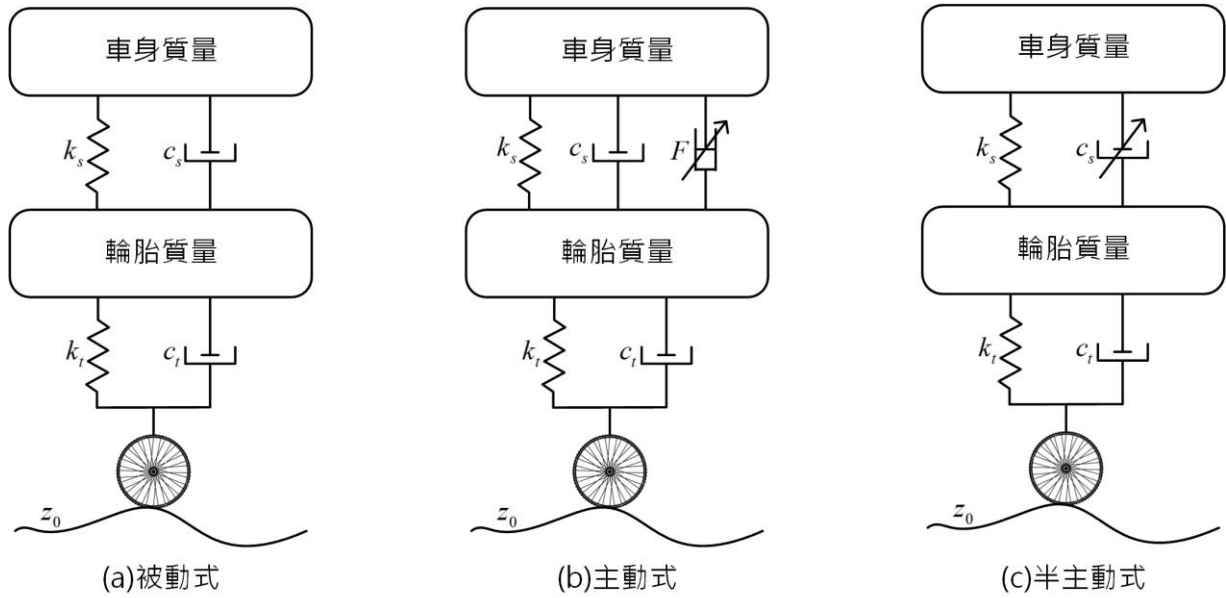


圖 5. 單輪懸吊控制系統模型

由牛頓第二定律可得單一輪懸吊控制系統數學方程式如 (1) 式。

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_1 + k_s(z_1 - z_2) + c_s(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) = 0 \\ m_{us} \ddot{z}_2 + k_s(z_2 - z_1) + c_s(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_t(\dot{z}_2 - \dot{z}_0) + k_t(z_2 - z_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 m_s 、 m_{us} 分別代表單輪車身質量 (sprung mass) 以及輪胎質量 (unsprung mass)， z_1 、 z_2 分別代表彈簧上質量以及彈簧下質量之垂直變化量， k_s 代表懸吊彈簧之係數， k_t 代表輪胎彈簧之係數， c_s 代表懸吊阻尼常數， c_t 代表輪胎阻尼常數， z_0 代表路面起伏。

主動式懸吊控制系統

主動式懸吊系統如圖 5 (b) 所示，是將原有的彈簧和避震器加入致動器 (actuator)，如線性馬達、液壓缸或壓電致動器等，利用致動器產生適當的控制力控制車身震動，使懸吊系統回到穩定狀態，不僅能增加暫態操控性，還可解決穩態轉向造成車身傾斜，可滿足自行車操作穩定性和乘坐舒適性等。雖然反應速度快，但需外加致動器控制，其造價成本高，又需額外的控制功率。

其數學方程式如 (2) 式，其中 F 為致動器產生之致動力。

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_1 + k_s(z_1 - z_2) - F = 0 \\ m_{us} \ddot{z}_2 + k_s(z_2 - z_1) + c_t \dot{z}_2 + k_t z_2 + F = c_t \dot{z}_0 + k_t z_0 \end{cases} \quad (2)$$

由 (2) 式可推導出系統之狀態與輸出方程式 (3) 式。

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (3)$$

其中

$$x = \begin{bmatrix} z_1 - z_2 \\ \dot{z}_1 \\ z_2 - z_0 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_{us}} & 0 & -\frac{k_t}{m_{us}} & -\frac{c_t}{m_{us}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ \frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ \frac{c_t}{m_{us}} \end{bmatrix}, u = F, w = \dot{z}_0.$$

阻尼控制致動器所產生之控制力寫成 (4) 式

$$F = u = -(K_4)x_4 - (K_2)x_2 - (K_3)x_3 - (K_1)x_1 = -Kx \quad (4)$$

再將 (4) 式代入 (3) 式可得 (5) 式

$$\dot{x} = (A - BK)x + Gw \quad (5)$$

在 (4) 式控制法則中的控制器增益 K ，可針對包含車身速度參數、踩踏頻率及力道、懸吊變化參數和行駛路面參數等性能指標函數 (Performance Index) 使其最小化，以求得系統控制的最佳化。主動式懸吊控制系統大都使用控制理論以上述公式設計最佳化控制器設計，求取控制器參數，使原本不穩定的系統達到穩定狀態。

主動式懸吊效能優良，控制方式因避震所需之控制力可由控制器決定，故其阻尼可快速隨車速及路面狀況做調整，但裝置複雜為其缺點，尤其致動器須有動力源而增加能量消耗，不適用於無法提供額外氣壓、液壓的自行車懸吊系統。

半主動式懸吊控制系統

半主動懸吊系統如圖 5 (c) 所示，是由彈簧、可調式阻尼 (避震器) 與微控制器等構成，半主動懸吊系統和被動式系統一樣都沒有額外的控制力抑制外界的擾動，但半主動懸吊系統可藉由感測車體震動及路面狀況之數據，由微控制器演算出適當之控制訊號，即時控制避震器的阻尼參數，使懸吊系統變硬或變軟，以衰減車身的震動，進而改善乘坐舒適度。

半主動式懸吊控制系統的性能雖然不及主動式懸吊系統，且阻尼調整範圍有限，不過僅需要少量的能量輸入就能依照參數指令調節阻尼大小，達成接近主動式懸吊系統的效果，目前普遍應用在高級轎車上。可調阻尼由 (6) 求得控制力 u 。因控制力 u 可能超過可調式阻尼件的調整範圍限定阻尼可在 $[c_{\min}, c_{\max}]$ 間調整，如 (6) 式所示。

$$c_{\text{adjust}} = \begin{cases} c_{\min}, & \text{if } \frac{u}{\dot{z}_2 - \dot{z}_1} \leq c_{\min} \\ \frac{u}{\dot{z}_2 - \dot{z}_1}, & \text{if } c_{\min} \leq \frac{u}{\dot{z}_2 - \dot{z}_1} \leq c_{\max} \\ c_{\max}, & \text{if } \frac{u}{\dot{z}_2 - \dot{z}_1} \geq c_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

為調整半主動式避震器阻尼，整理多項已發表機構與控制之代表性專利整理如下表 4。

表 4：避震器阻尼調控技術專利分類表

專利 \ 阻尼調控技術	按鈕	調整器	活塞高度	簧片	線圈	馬達	電磁閥	旋轉鈕	彈簧	流動路徑	流速	流量	磁流	壓力
美國專利[42]					*								*	
中華民國專利[43]	*					*						*		*
中華民國專利[44]		*	*											*
中華民國專利[45]												*		
中華民國專利[46]		*							*					
中華民國專利[47]		*		*								*		
中華民國專利[48]								*				*		
中華民國專利[49]								*				*		
中華民國專利[50]						*						*		
中華民國專利[51]										*	*	*		

被動式阻尼調整避震器可以分為兩大類，代表性專利技術節錄說明如下：

磁流變液 (Magneto-Rheological Fluid, MR) 為基底之避震器

磁流變液是一種具有高磁導率液態磁性材料，該液體內由低磁滯性的微小軟磁性顆粒和非導磁性液體混合而成。磁流變液在沒有磁場影響的情況下會呈現低粘度的流體特性。在磁場作用下，則會呈現出高粘度、低流動性的特性。外加電力建立磁場控制液體的流速，可以有效地調整避震器之阻尼係數，是目前最能精確控制被動式避震阻尼的一種方式，可以達到更精密的無段阻尼控制。MR 型式之被動式懸吊常應用於高單價的汽機車懸吊系統設計。美國專利[42]內展示了一套以磁流變液為基底之避震控制系統。其使用閉迴路控制器利用避震器之溫度、速度及力量之感測訊號，控制阻尼器活塞外之兩個線圈，使其活塞與阻尼汽缸壁之間的磁場產生變化，進而控制阻尼器內之電磁液體，達到控制避震器之效果。然而持續通電控制阻尼對於無法附掛過多電力系統的自行車而言是一項相當大的負擔，以目前的電池效能而言，本研究暫時不採用此方式做為控制方法。

流孔 (Orifice) 控制為基底之避震器

控制流孔的大小與液體流動路徑都被稱為流孔控制避震器，以機械結構設計的方式將避震器內的開孔大小改變能影響液體的流速，不同的開孔引流讓液體在不同路徑流動也能有效控制阻尼係數。

中華民國專利[47]以簧片或針閥調節阻尼器內之液壓流量，利用改變機構精準控制液體流量，令避震器形成多種阻尼效果。中華民國專利[48]以馬達控制其調整機構，令其旋轉閥及活塞透過機構旋轉可連續變化出無限多種的流孔組合，使阻尼內液體有多種流量控制，並使避震器產生多種軟硬不同之阻尼力，達成無段控制的能力。中華民國專利[50]使用馬達控制其機構使活塞閥旋轉，產生六種大小不同的孔口，使避震器有六段不同大小的阻尼力。中華民國專利[51]使用者可根據路面使用其控制單元調整避震器於拉伸及壓縮時枝液壓油流量、流速及流動速度，使液壓油於流動間產生適當之阻尼作用，進而達到符合個人舒適感受度的最佳避震效果。

本研究預計採用市售流孔式可多段調變懸吊做為受控之避震器。該避震器內之器阻尼可依照導通閥口大小讓液體通過，調整不同的壓縮及回彈阻尼係數。如下圖 6 (右) 所示，液體經由兩個不同 A-A 及 B-B 通道流動，當活塞動作時，液體將會在這四個孔徑中流動。本研究將改裝其旋鈕連結至一個直流伺服機，只需以微控制器以脈波寬度調變 (Pulse Width Modulation, PWM) 方式控制伺服機圖 6 (左)，將可以電力方式控制避震器阻尼。

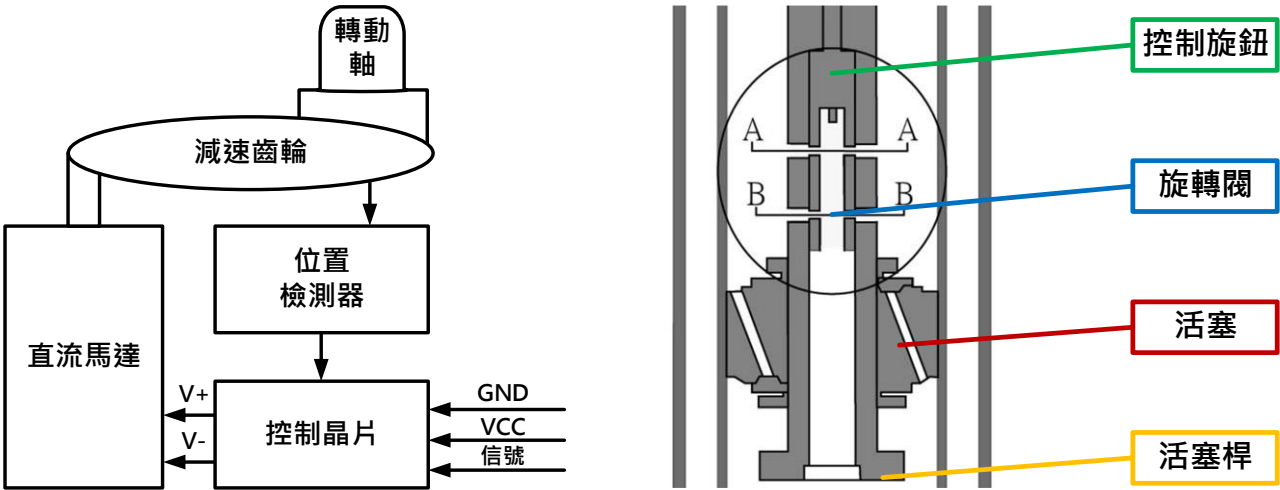
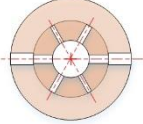
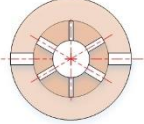
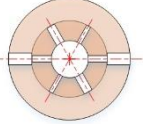
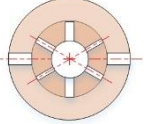
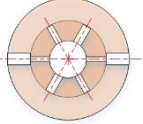
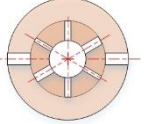
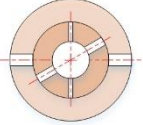
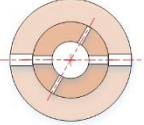
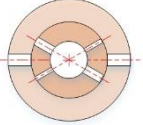
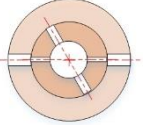
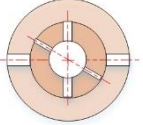
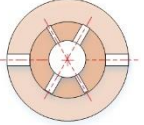


圖 6．直流伺服機與阻尼可調式避震器模組

以最受歡迎的六段式前叉懸吊而言，如表 5 所示，旋鈕轉至 a 段 c 段 e 段位時液體會在 A-A 截面的孔徑流動，旋鈕轉至 b 段 d 段位時液體會在 B-B 截面孔徑流動，f 段則為液體原本阻尼。加上機械鎖死避震器的機構，懸吊共可提供七種不同的騎乘模式，對於自行車避震控制已相當足夠。

表 5．六段式半主動式液壓閥口控制阻尼係數對照表

段數	a 段	b 段	c 段	d 段	e 段	f 段
A-A 截面						
B-B 截面						
閥口直徑	$\varphi 1.29\text{mm}$	$\varphi 0.99\text{mm}$	$\varphi 0.88\text{mm}$	$\varphi 0.63\text{mm}$	$\varphi 0.42\text{mm}$	$\varphi 0\text{mm}$
阻尼係數	345.81	2045.8	2401.3	2775.2	3120.1	3461

(2) 半主動式懸吊調整參數

下沉量 (Sag)

目前自行車前叉以氣壓彈簧為主，調整氣室壓力便可改變下沉量；若是線圈彈簧前叉則是調整預壓按鈕，以改變下沉量。下沉量是指騎士在車上且未施力的情況下，前叉因騎士自身重量所預先壓縮一段行程，一般下沉量設定在總行程的 20%~30%。下沉量愈多愈舒適，但踩踏能量損耗愈多，還會有

前叉觸底的可能；下沉量不足，在騎乘顛簸的路面時可能導致車體騰空，容易發生危險，雖然抓地力及穩定性不佳但能增加踩踏效率。調整正確的下沉量，首先確認彈簧的彈力係數(Spring Rate)能支撐騎士體重同時符合騎士的騎乘型態，並且前叉要有足夠的避震行程，確保騎乘在顛簸的路面時有良好的尋跡性。

行程 (travel-stroke length)

懸吊的行程調整能改變車身角度。爬坡時，騎士重心會向後移，此時縮短行程，使重心往車頭移動，增加車頭的穩定性；反之伸長行程，使重心往後移動，減少車子向前翻覆的力臂，也能有更的長行程依照地形產生適當的變化。

回彈阻尼 (Damping-rebound)

大部分的前叉懸吊都會有回彈阻尼的調整鈕，回彈阻尼用功能為前叉下壓後，彈簧恢復到初始狀態之時間，亦稱為避震器之回彈速度，也會影響輪胎與地面循跡穩定性。回彈阻尼若無適當調整，前叉下壓力量幾乎完全回彈到騎士手上，會導致車身難以操控；反之如果回彈速度太慢，導致上一次下壓尚未回彈，又反覆進行下壓無法回到原本的長度，因此無法接著處理下一個地形起伏，導致輪胎彈跳和抓地力不佳。當行經地勢起伏較大的路線，前叉需快速反應，須降低回彈阻尼量，使前叉能快速伸長承受下一個衝擊。若騎乘在平坦的路面時，可增加阻尼，減緩前叉動作，能減少騎士的踩踏能量損耗在前叉之上。

壓縮阻尼 (Damping-compression)

壓縮阻尼與回彈阻尼功能相同，但方向相反，亦稱為避震器之收縮速度，該調整為次要功能，並不是每支前叉都有。調整方式與回彈阻尼相同，較大的壓縮阻尼可以避免前叉觸底，增加車子的貼地性。較小的壓縮阻尼能使避震對小衝擊更靈敏。過多的阻尼會造成避震無法壓縮，導致輪胎會彈跳，進而造成車身震動。以舒適考量，通常壓縮方向之阻尼設定會小於回彈阻尼，當通過低漥路面時，能減少震動力直接衝擊車身。阻尼所控制的是懸吊的動態特性，並不能取代適當的下沉量。

在控制系統完成後，回彈阻尼與壓縮阻尼是前述之伺服馬達可以控制之參數。有關下沉量與行程兩項參數也將依照車架與騎乘者的體重進行調整，此參數同一騎乘者只需調整一次，因此本計畫將以應變規量測懸吊負重，提供介面供騎乘者調整。

(3) 應變規與加速度感測器

應變量測

自行車騎乘在路面時，路面會透過輪胎給予車身壓力，此時車體上的懸吊機構將會發生細微的形變，此承受應力所產生的變形強度稱為應變。應變可為拉伸(正應變)及收縮(負應變)，在不同的材質上也會有不同的反應。應變量測有很多方法，最使用的是應變規(Strain Gauge)，常見的片狀外觀也被稱作為應變片。應變規是一個非常精密的電阻，其電阻值會隨著不同的應變而產生不同比例的變化。由於應變規上產生的應變所感應的電子阻抗很小，一般為 $10^{-3} \sim 10^{-6} \Omega$ 到，大都是需要使用惠斯登電橋進行量測。應變規量測應力的精度相當高，在提案人先期的實驗中，將其黏貼於懸吊輪軸端可以感測外部應力精度達到 500g 以內，足以用於判斷不同路面對於車身所施加之應力。

惠斯登電橋

惠斯登電橋 (Wheatstone Bridge) 如圖 7 右所示電橋包含兩組分壓電路及一組電壓 V_{EX} ，量測兩組分壓電路中間節點可得輸出 V_O 。應變規在電橋上有多種組合搭配，因為應變規容易受到室外溫度影響，圖 7 裝設於懸吊上的雙片式組合是常見溫度補償的連接方式。在電橋 R_3 及 R_4 放置應變規另一端放兩個電阻， R_4 為動作應變規， R_3 為補償應變規，由於兩片應變規的溫度變化皆相同，因此電阻比及輸出電壓並不會發生太大變化，可將溫度造成的影響降至最低。

$$V_O = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] * V_{EX} \quad (7)$$

從方程式來看，當 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 或 $R_1 * R_3 = R_2 * R_4$ 則 V_O 輸出為 0，電橋為平衡狀態，當應變規電阻發生任何變化時，電橋則為非平衡狀態，並輸出不為 0 的電壓，可藉由透過量測此輸出電壓判斷應變大小。由於應變規電阻變化量相當小，因此輸出之電壓差相當微小，輸出時須使用放大器將其電壓放大，才可使微控制器內的類比數位感測模組量測，一般放大倍率都設定在 100~500 倍。

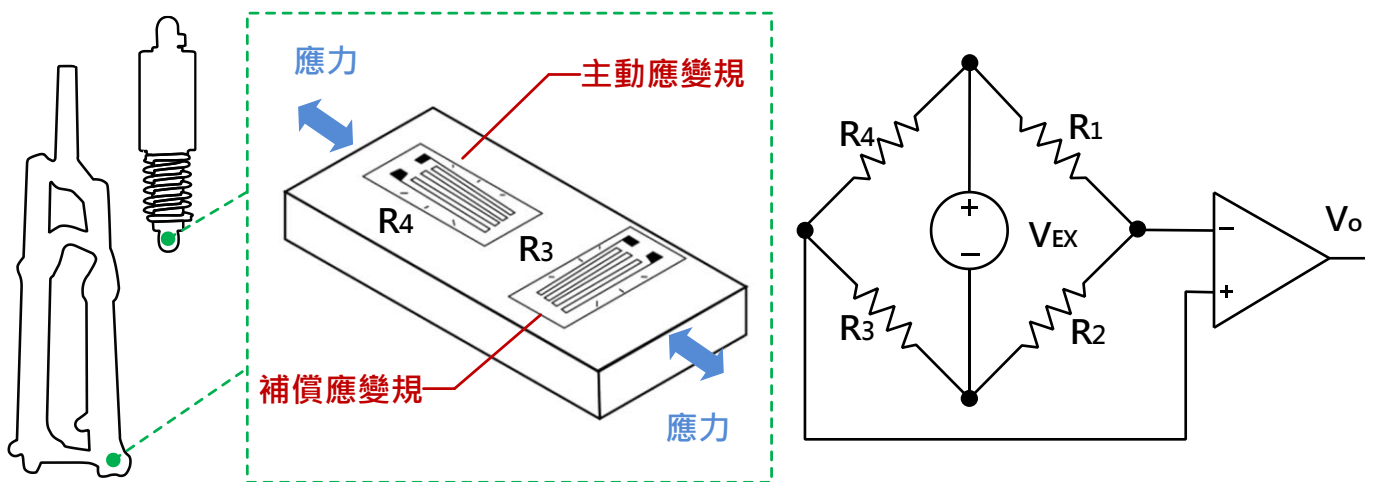


圖 7 應變規安裝位置與惠斯登電橋放大電路

加速度感測器

加速度感測器 (Accelerometer) 又稱為重力感測器 (G-sensor)，近年來因 MEMS 技術成熟，成本降低，已廣泛應用於各種領域。在車輛控制的議題中，其可應用於感測車輛負載、道路顛簸、車輛傾斜、撞擊等車路況，達成如安全氣囊、車輛控制、防鎖死煞車、循跡防滑等系統。可分為壓阻式與壓電式兩類，這兩類加速度感測器的內部都以懸臂樑結構來感測加速度。加速度計在本計畫中使用的地點有兩種：

首先為裝設於懸吊車架端上作品本體之加速度計，體積微小可量測為 $\pm 2g$ 重力值，解析度 10 位元，精度 $\pm 1\%$ ，負責感測車架上的加速度感測值，以串列通訊的方式傳至微控制器進行運算，目前規劃前後避震各使用一個加速度計。

另外兩組高階加速度感測計則是負責實驗量測，安裝於龍頭把手以及坐墊之上。因實驗進行所需量測的精度較高，預計採用可量測 $\pm 16g$ 重力值，解析度 24 位元，經度 $\pm 0.1\%$ ，取樣頻率 20kHz，進行後續的控制效能評估，以及舒適性分析。

(4) 離散小波轉換

當自行車行駛時，加速度感測器與應變規可量測一組重力訊號以及懸吊系統受力的訊號，藉由此訊號來達成路面情況、煞車速度、車體飛越的情形。然而，感測器會受到路面產生的震動造成誤判。為了分離碰撞訊號及行駛雜訊，本研究預期使用的離散小波轉換 (Discrete Wavelet Transform) 設計適當的濾波器過濾雜訊，小波轉換提供富有彈性的時域與頻域的解析度，經由其運算後訊號可被分為低頻部分 (近似值) 與高頻部分 (細部值)。DWT 具有運算簡單的效能特性，面對低運算效能運算平台，仍然可以在合理的時間內完成動作。有鑑於此本計畫採用離散型小波轉換中的上提式 Lifting 5/3 [52] 的方法做為縮減資料及路面顛簸雜訊濾除的工具。Lifting 5/3 運算效能是 DWT 中最好的一種，運算複雜度極低，其運算步驟如圖 8 所示，可大致分為兩個步驟：

分離步驟 (Splitting Step)

在此步驟中，假設具有 m 筆資料之向量變數 \mathbf{d} (例如：輸入之加速度或懸吊應力變化量)，可被切分為兩個部分：奇數點 d_{2i+1} 以及偶數點 d_{2i} ，並分別以 S_i^0 以及 D_i^0 表示，運算方式說明如下：

$$S_i^0 = d_{2i+1}, \quad D_i^0 = d_{2i}, \quad \forall (d_{2i+1}, d_{2i}) \in \mathbf{d}, \text{ and } i = 0, 1, 2, \dots, \frac{m}{2} \quad (8)$$

上提步驟 (Lifting Step)

此步驟可分離出高頻成分 D_i^1 以及低頻成分 S_i^1 ，表示如下：

$$D_i^1 = D_i^0 - \frac{(S_i^0 + S_{i+1}^0)}{2} \quad \text{and} \quad S_i^1 = S_i^0 + \frac{(D_{i-1}^0 + D_i^0)}{4}. \quad (9)$$

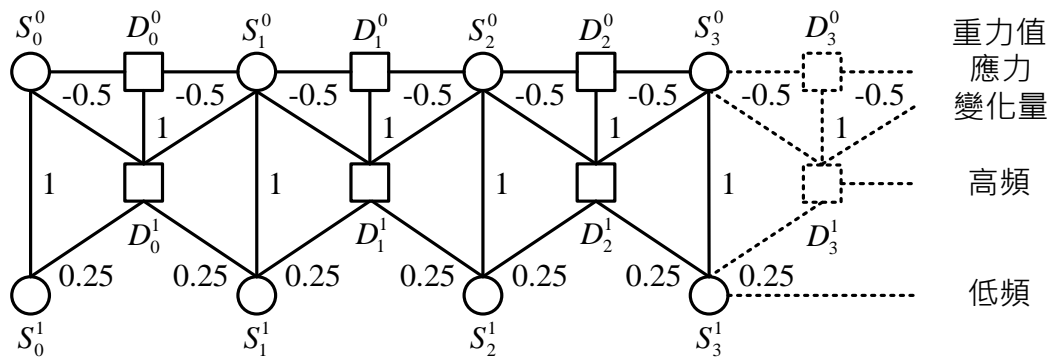


圖 8. 上提式 Lifting 5/3 離散小波轉換運算流程圖

利用上述簡單的兩個步驟，經過二次的小波轉換後稱為二階小波轉換。低頻的部分會僅剩下原來資料量的四分之一大小，更重要的是特徵並無明顯的減少，能夠有效的減少往後的複雜演算法運算時間，同時高頻的部分也被分離保留下來，可作為後續訊號分析之用。

(5) 自我組織映射圖 (Self-organizing map, SOM) 路面分析方法

SOM 是無監督式學習網路的一種，其基本原理是模仿人腦中具有相似功能的腦細胞會聚集在一起的特性，所發展出來的類神經網路，因此學習資料中有群聚分類規則，則適用於自組織映射圖網路 [53]。SOM 的架構相當精簡，如圖 9 僅有一層輸入層 (Input Layer) 與一層輸出層 (Output Layer) 也

稱作 Kohonen 層。在 SOM 中，輸出層的神經元是以矩陣方式排列於一維或二維的空間中，每一個神經元皆與其它的神經元相連結形成有意義的拓樸（Topology）結構，此一便是所謂的特徵映射圖（Feature Map），並且根據目前的輸入向量彼此競爭以爭取得到調整鏈結值向量的機會。

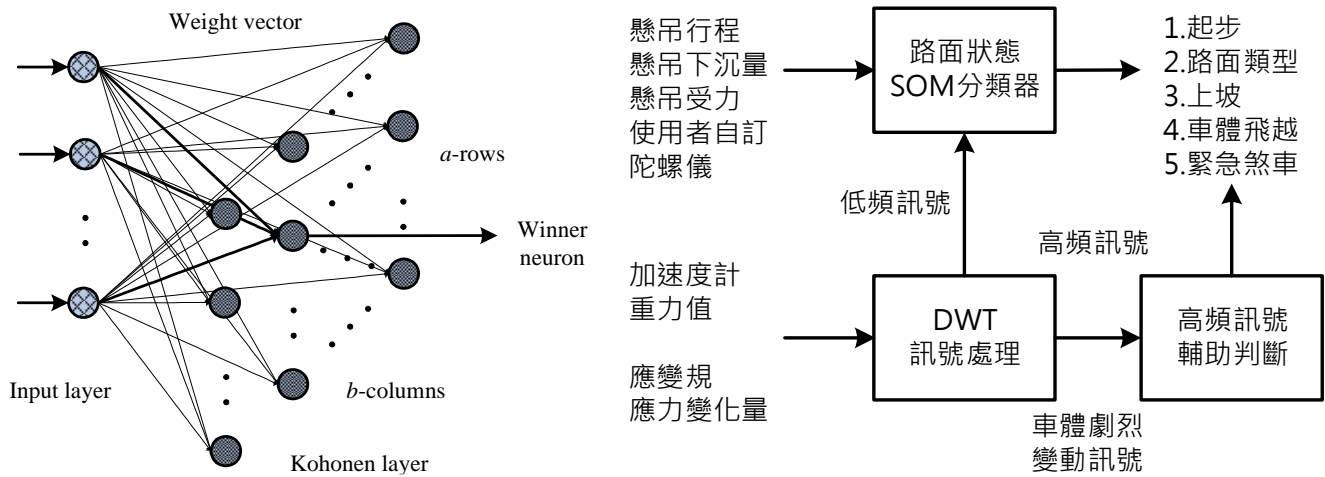


圖 9．自我組織映射圖像網路

假設一輸入向量 \mathbf{x} (加速度計與應變規感測值)與輸出層向量 \mathbf{k} (滑動量)如下所示：

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad \text{and} \quad \mathbf{k} = \begin{Bmatrix} k_{11} & \dots & k_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{N1} & \dots & k_{NN} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

其中 n 是輸入資料的數量， N 輸出層欄與列的數量。本研究規劃輸入資料為加速度感測與應變規數值。因此，與輸出層中 k_{ij} 神經元連結之權重向量 \mathbf{w}_{ij}^k 可被表示為

$$\mathbf{w}_{ij}^k = [w_{ij1}^k, w_{ij2}^k, \dots, w_{ijn}^k]^T \quad (11)$$

其中 i 與 j 分別為輸出神經元 k 欄與列之索引值。

當本架構開始學習時，完全連結至輸出層 \mathbf{k} 的輸入向量 \mathbf{x} 其連結權重向量 \mathbf{w}_{ij}^k 以隨機亂數指定。假定對於一個 \mathbf{x} 最合適 (Best-matching) 的輸出神經元可表示 $\mathbf{b}(\mathbf{x})$ ，其可用最最短的歐基里得距離 (Euclidean Distance) 計算方式得知， $\mathbf{b}(\mathbf{x})$ 可表示如下：

$$\mathbf{b}(\mathbf{x}) = \{(i, j), \arg \min_{i, j} \|\mathbf{x} - \mathbf{w}_{ij}^k\|\} \quad (12)$$

一旦最合適的神經元找到後，勝利 (Winner) 神經元及其拓樸結構鄰邊神經元對應的權重值也會被一併調整，其調整的公式可表示如下：

$$\mathbf{w}_{ij}^k(t_k + 1) = \mathbf{w}_{ij}^k(t_k) + \eta_k(t_k) h_{\mathbf{b}(\mathbf{x})}(t_k) (\mathbf{x} - \mathbf{w}_{ij}^k(t_k)) \quad (13)$$

$$h_{\mathbf{b}(\mathbf{x})}(t_k) = \exp\left(-\frac{\sqrt{([i, j] - \mathbf{b}(\mathbf{x}))^2}}{2\sigma^2(t_k)}\right) \quad (14)$$

其中 t_k 表示目前疊代索引值， $0 < \eta_k(t_k) \leq 1$ 為學習速率，此數值會隨著學習時間逐漸遞減。 $h_{b(x)}(t_k)$ 為以 $b(x)$ 為中心之鄰近神經元計算公式， $\sigma(t_k)$ 是使用設定之鄰邊範圍寬度參數，隨學習時間遞減。

重複步驟(12)、(13)與(14)直到學習流程結束，結束條件可以設定固定訓練次數或是當學習結果收斂時結束。以各種不同路面、時速、坡度等訓練資料輸入至 SOM，例如：水泥、柏油、硬碎石路、鬆動沙地等，附加凌空飛越、平地、上下坡等參數類別。完成訓練後，SOM 之輸出層權重值可用於特徵分群使用。訓練步驟雖然繁複，學習完成後實際使用並不需要再次學習，而且系統判定時間非常快。

如圖 9 (右) 所示，將加速度感測器及應變規回傳之資料經由 DWT 濾波後輸入至 SOM 分類器，立即會分出類路面類型。依照使用查表得知之所使用之懸吊裝置對應之避震係數，配合應變規受力值推估車體負重，控制半主動式懸吊之七種檔位，同時使用者自訂參數也可設定平均避震阻尼反應更軟或更硬。當車體輪胎離開地面失去應力(飛越)或劇烈衝擊情形發生時，高頻訊號可以做為輔助使用，增加系統判斷的正確性。另外上坡狀況則可使用欲採用之多功能加速度計內之陀螺儀(Gyroscope)功能，分析其縱軸中值濾波(Median Filter)後之傾角訊號得知。因自行車動力來自腳踏，阻尼短時間頻繁變化讓騎士有踩空與施力不易的突兀感。因此本計畫不同於傳統控制即時以回饋之震動量調整阻尼方式，使用 SOM 路面分析在單位時間內判定路面後在相同路段以固定阻尼避震，其他狀態再以不同的方法獨立處理，更貼近目前登山車騎士的騎乘習性，也避免伺服機過度動作耗電等情形。

(6) 系統控制流程與懸吊控制場景說明

1. 起步時或平路時鎖定避震器(無減震效果)以減少踩踏損耗，但遇重大衝擊立即解鎖。
2. 在連續行駛時，估測所處之路面情形調整避震器的最佳阻尼係數，避免耗電與不適感。
3. 上坡時將阻尼係數調至硬或鎖定避震器，增加傳動效率，但遇重大衝擊立即調至軟。
4. 車體凌空飛躍地面或劇烈衝擊時，將避震器調至最軟減少著陸衝擊力。
5. 緊急煞車時預先計算反作用力適當將避震器阻尼調硬，避免懸吊下沉翻車，或懸吊行程用盡觸底造成強力反彈。

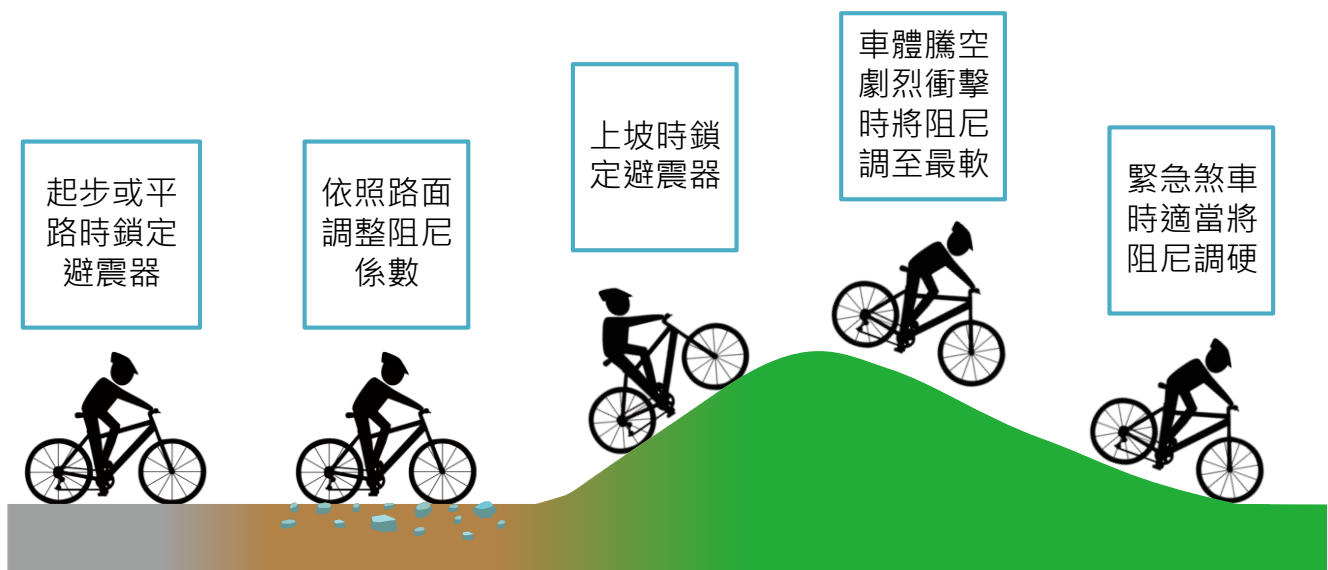


圖 10. 登山車騎乘場景與避震器阻尼設定示意圖

(7) 自行車震動實驗平台與避震效能評估方法

綜合上述演算架構，微控制器架構可能無法負擔此運算，因此本研究預計使用進階精簡指令集機器 (Advanced RISC Machine, ARM) Cortex M0 又稱先進微控制器作為本懸吊系統的中央控制器，將所有韌體以即時作業系統 (Real-Time Operating System, RTOS) 方式功能實作完成。

完成作品實作後，為量測本作品在騎乘時避震的效能評估，本計畫預期開發一套專門針對自行車震動量測之實驗平台。此實驗平台假設：輪胎氣壓維持固定。車體僅受路面垂直方向的影響，不考慮車手踩踏左右搖晃、轉彎等來自側向之應力。忽略車手衝刺時重心移動問題。如下圖 11 所示，各項裝置功能說明如下：

1. 上方直線軸承以萬象頭機構連結一個模擬人體的負載，萬象頭可以騎乘方向前後 180 度轉動，無法左右移動。再將自行車鎖固於模擬負載 (預設為 60 公斤)，當車體震動升降時，無論車體是否前後傾斜，機構都能平滑地低阻力上下移動。
2. 安裝兩組高解析度加速度計於龍頭以及座墊上方，分別量測實驗實之震動值。並安裝兩組線性位移電阻尺於前後懸吊之上，量測避震器壓縮行程之變化，判定懸吊組尼設定是否不足或超過工作範圍觸底。所有數據將使用高速動態擷取器以 10kHz 之取樣頻率，將高精度三軸加速度計感測儀與電阻尺行程量測數據傳遞至電腦儲存。
3. 底部輪胎接觸面設計不同的凸輪，以三相馬達帶動鍊條方式驅動，模擬如同圖 12 路面顛頗的行駛效果。以馬達控制器控制轉速，產生不同的震動頻率。再以單一凸輪產生巨大彈跳模擬凌空飛越或劇烈撞擊狀況，以及平滑輪高速轉動配合自行車煞車模擬緊急煞車情形。

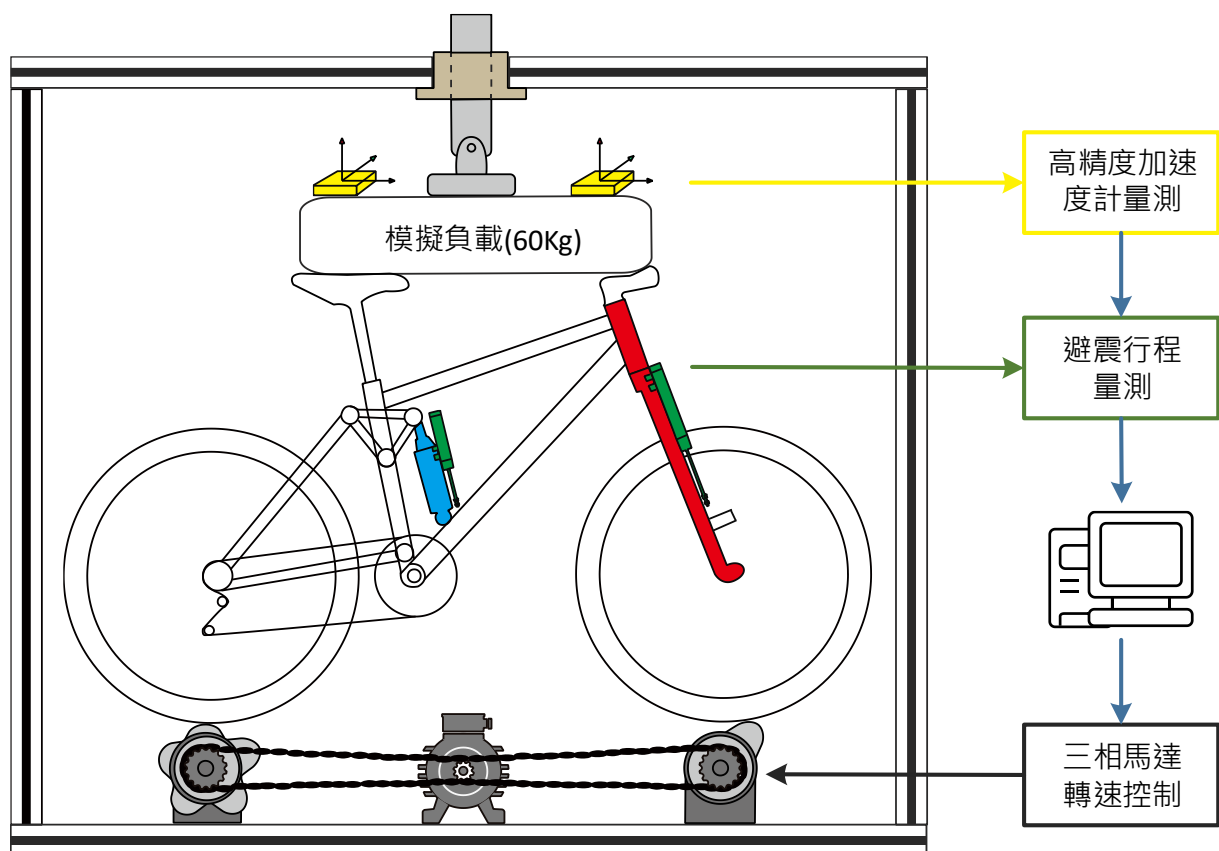


圖 11. 避震效能與舒適度量測平台

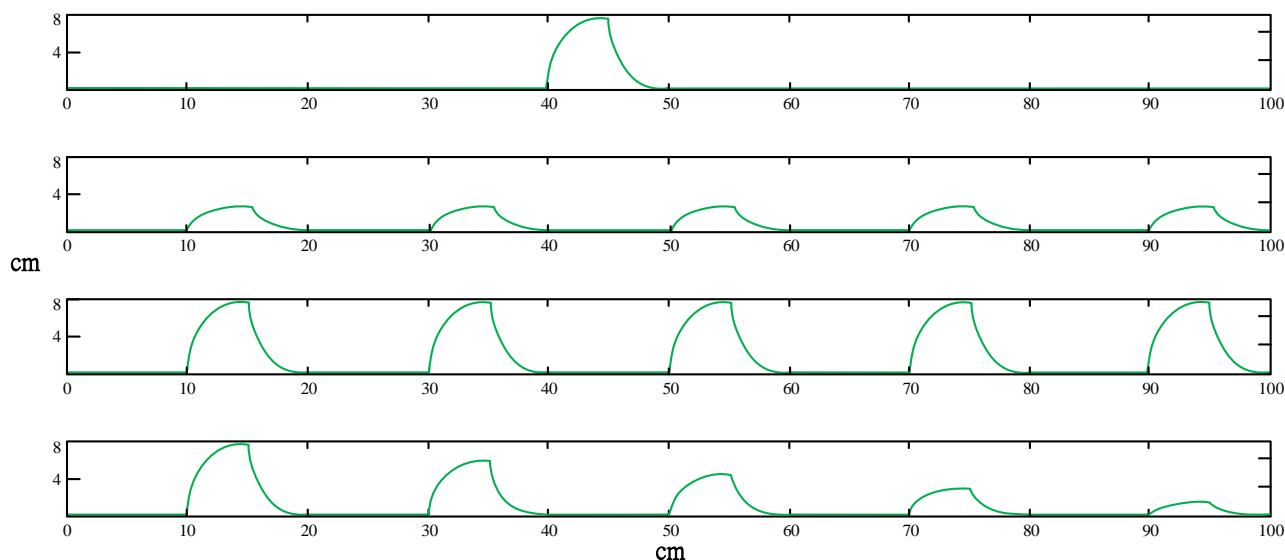


圖 12. 騎乘路面波形模擬圖

國際標準「ISO 2631-1 全身振動暴露評估指引」對於人體全身振動的評估提出量化震動對舒適度的評估方式，其方式為使用頻率加權後加速度均方根值 (Weighted R.M.S Acceleration) 為基準[54]。若對於多軸向之震動時，整合之震動值為 a^v ，而本計畫之控制目標設定為，在不同實驗的參數條件下最小化車體的震動，如(15)所示：

$$\min_{i \in \mathbf{R}} \sum f(a_i^v) = \sqrt{(k^x a_i^{wx})^2 + (k^y a_i^{wy})^2 + (k^z a_i^{wz})^2} \quad (15)$$

其中 i 為每一次加速度採樣之索引值， \mathbf{R} 為每一次實驗所採集之總數量。 a^{wx} 、 a^{wy} 及 a^{wz} 分別為 x 、 y 、 z 軸之加權加速度均方根值。 k^x 、 k^y 、 k^z 為其權重，主要是對人體較敏感特定之頻率給予較大的加權，這三個參數將參考 ISO 2631-1 評估指引設定。

本計畫預期控制三相馬達轉速，帶動不同振幅凸輪，模擬產生不同的轉動頻率與路面狀況。第一年進行前輪作品實作與實驗，第二年完成整體兩輪自行車所有不同頻率與路面震動之實驗數據。

2. 預計可能遭遇之困難及解決途徑

- SOM 判斷分類的正確率將會直接影響到懸吊控制的性能。本計畫加入更多的感測資訊，考慮使用的競爭式學習法可能掉入區域最佳解，導致效能不彰。預計發生此問題時，利用提案人以曾經使用之粒子群最佳化演算法，求解最佳權重，以增加 SOM 分類效能。
- 本研究預計採用市售懸吊裝置，大部分的機械結構原理以及避震內部結構參數都難以取得，此問題將會限制演算法參數設定，懸吊裝置感測器裝設影響量測精度的問題，也需機械結構專家給予更專業的建議。因此提案人預計與曾經合作參展之財團法人自行車暨健康科技工業研究發展中心創新設計部，以獲取更多自行車懸吊設計改裝相關知識。
- 截至提案為止，提案人因帶領學生參加競賽，使用鋁支架配合滑輪，以人力方式進行基礎實驗。本計畫依據此實驗的經驗及參考許多國內外文獻構思規劃此新式實驗平台，預計可量測全車避震效果。目前此概念詢問廠商 PGO 摩特動力機車研發部確認此平台之可行性，獲得正面評價。對於未來以三相馬達控制方式是否能達成預期效能，還是需要更深入了解。預計再聯繫 PGO 工程師討論，觀察該公司機車避震器效能實驗機設計，確保實驗能順利完成。

(三) 預期完成之工作項目及成果

1. 預期完成之工作項目

第一年預期完成之目標如下甘特圖，主要完成可獨立運作之前叉式懸吊自動感測與控制系統。

	工作項目	2018年					2019年						
		08月	09月	10月	11月	12月	01月	02月	03月	04月	05月	06月	07月
1	前叉式電子懸吊裝置規劃與設計	■	■										
2	應變規電路規劃與程式開發			■	■								
3	加速度感測器電路規劃與程式開發				■	■							
4	離散小波轉換程式設計					■	■						
5	SOM路面感測分類程式設計						■	■	■				
6	先進微控制器運算程式移植撰寫									■	■	■	■
7	前叉懸吊控制軟硬體整合測試						■	■	■	■	■	■	■
8	論文與技術文件撰寫、科技部成果展示											■	■

第二年預期完成之目標如下甘特圖，完成全車懸吊控制系統與其效能評估與舒適度檢測實驗。

	工作項目	2019年					2020年						
		08月	09月	10月	11月	12月	01月	02月	03月	04月	05月	06月	07月
1	後懸吊電子阻尼控制裝置設計	■											
2	兩輪懸吊系統協同控制		■	■									
3	全車騎乘狀態判定、控制與調整				■	■							
4	實驗量測平台設計與建置					■	■	■					
5	震動訊號量測電路與路面控制電路製作								■	■	■		
6	效能評估與舒適度檢測分析											■	■
7	整體功能測試數據報告製作											■	■
8	論文專利撰寫發表、科技部成果展示											■	■

2. 對於參與之工作人員預期可獲之訓練

本計畫可以讓參與研發之學生了解自行車業界使用懸吊避震器的相關知識，小波轉換演算法程式撰寫及應用等軟硬體開發概念，更可延伸學習馬達傳動機構與電力系統配置等產品設計技術。主持人也會培訓學生學習底層硬體溝通機制、軟硬體介面開發設計等實務技能，藉此引導計畫參與學生獲得自行車自動化控制設備實務經驗，強化學生關鍵技術能力。

本計畫為實務研究計畫，設定之目標為能夠將研發之技術與產品能夠提供國內自行車廠商所用。因此過程中將會安排與業界人員共同討論的機會。對於參與計畫的學生除了能更加瞭解廠商產品研發的機會之外，額外的見習與實習機會相信也能提升學生與業界的連結，落實學用合一的目標。

3. 預期完成之研究成果 (實務應用績效、論文、專利)

第一年預期完成之研究成果

- 完成創新融合加速度計與應變規技術路面感測之前叉式懸吊電子避震軟硬體系統 1 套。
- 發表期刊論文 1 篇，研討會論文（國際 1 篇、國內 2 篇），專利申請 1 件。
- 指導學生製作相關自行車作品，參與國際或全國性競賽，獲獎至少 1 件。
- 前叉式避震成果實體展示，並配合科技部成果展、技術交易展等公開展示。

第二年預期完成之研究成果

- 完成前後雙懸吊同步控制之電子避震系統軟硬體系統 1 套。
- 量化電子避震器於人體震動數據與舒適度之詳細效能評估分析報告 1 份。
- 發表期刊論文 1 篇，研討會論文（國際 1 篇、國內 2 篇），專利申請 1 件。
- 指導學生製作相關自行車作品，參與國際或全國性競賽，獲獎至少 1 件。
- 全車避震成果實體展示，並配合科技部成果展、技術交易展等公開展示。
- 與自行車相關產業簽訂學生實習、技術轉移或產學合作案 1 件。

4. 預期之貢獻：

對於學術價值而言：本計畫預期以 DWT 與 SOM 為基礎，結合應變歸感測車體應力與加速計感測車體震動量，開發出路面狀態分析方法，解決自行車懸吊最佳化控制，研發新式自行車之自動電子懸吊系統。本計畫不僅為 SOM 與 DWT 演算法尋求新的應用方向，在學理上突破該演算法應用的限制，設計之適用於量測全車震動對人體影響與舒適性實驗平台，也能有效量化評估自行車避震系統。

在產業貢獻的層面：在接近傳產的自行車產業中，本計畫所提出之概念將為避震議題注入智慧化的元素，將可有助於自行車產業創新力升級，並邁向逐漸受到重視的電子化領域，增加自行車廠商在高階零組件之競爭力。本計畫研發之高階電子避震技術，非常適用於量少質精的台灣產業研發生產。現有之電子自動懸吊都屬國外設計生產居多，價位偏高且市場掌握於國外廠商。我國廠商受限於專利與研發技術大都是以接單代工模式進行。因此國產、自有化與高效能電子懸吊的自主研發成果，將有助於我國在高單價自行車電子懸吊市場的國際競爭力。

參考文獻

- [1] 經濟部統計處，“產業經濟統計簡訊”，第 270 期，發布日期：106 年 1 月 16 日。
- [2] 2017 台北國際自行車展覽會，http://www.taipeicycle.com.tw/zh_TW/index.html，2017。
- [3] 經濟部標準檢驗局，“自行車相關國家標準一覽表”，發布日期：105 年 6 月 15 日。
- [4] FOX Float iCD, <http://www.ridefox.com/icd/>, last visited 2017/11.
- [5] Magura eLECT, <http://www.magura.com/en/components/bike/elect-connectivity/>, last visited: 2017/11.
- [6] Lapierre Bikes EI-shock, <http://www.lapierrebikes.com.au/ei-shock>, last visited 2017/11.
- [7] Pinarello Dogma K10s Electronic suspension, <http://www.pinarello.com/en/bike-2018/road/dogma-k10s-disk>, last visited 2017/11.

- [8] NavigantRSRCH, <https://www.navigantresearch.com/newsroom/global-sales-of-electrical-bicycles-are-expected-to-reach-to-24-3-billion-in-annual-revenue-by-2025>, 2016, last visited 2017/11.
- [9] US4815575, Balarama V. Murty, Electric, variable damping vehicle suspension, 美國專利, 1989/03/28.
- [10] US8770357, Neil David SIMS, David Craig BATTERBEE, Dampers for mountain bikes, 美國專利, 2014/07/08.
- [11] EP1564040, Hiromi Fukuda, Kazumi Inaba, Toshiyasu Terui, Shock absorber with adjustable damping force, 歐洲專利, 2005/08/17
- [12] US9540067, Min-Chang Chen, Chung-Wei Lin, Automatic shock absorber system for a bicycle, 美國專利, 2017/01/10.
- [13] US20110109060, David M. Earle, Luther M. Beale, Active shock-damping system, 美國專利, 2011/05/12.
- [14] US5971116, Joseph A. Franklin, Electronic suspension system for a wheeled vehicle, 美國專利, 1999/10/26.
- [15] US9676441, Chien-Hung Chen, Min-Chang Chen, Chung-Wei Lin, Automatic shock absorber system for bicycle, 美國專利, 2017/06/13.
- [16] US8843273, Kevin J. Wesling, Russell Rose, James Meyer, Jeremiah Boobar, Bicycle suspension, 美國專利, 2014/09/23.
- [17] US6149174, D. B. David, Electronically controlled bicycle suspension apparatus, 美國專利, 2000/11/21.
- [18] US6964203, Dominique Crasset, Pedalling force or chain tension detector and devices using said detector, 美國專利, 2005/11/15.
- [19] US6543799, Hiroyuki Miyoshi, Bicycle suspension, 美國專利, 2003/04/08.
- [20] US8286982, Pierre-Geoffroy Plantet, Emmanuel Antonot, Remy Gribaudo, Bicycle suspension system, 美國專利, 2012/10/16.
- [21] US8091910, Nobukatsu Hara, Toshikuni Suzuki, Apparatus for controlling a bicycle suspension element, 美國專利, 2012/01/10.
- [22] M360841, 蔡金松, 單車用緩衝避震器電子式油壓阻尼控制, 中華民國專利, 2009/01/19.
- [23] I537175, 陳建宏, 陳民昌, 自行車自動控制避震器系統, 中華民國專利, 2016/06/11.
- [24] I404871, 徐佳銘, 董佳璋, 劉曜綸, 電動車適應路況之自動減震方法與裝置, 中華民國專利, 2013/08/11.
- [25] M411390, 李東展, 黃立仁, 呂俊峰, 黃仁昌, 主動式前叉, 中華民國專利, 2011/09/11.
- [26] M483232, 井豐土, 自行車用懸吊控制裝置, 中華民國專利, 2014/08/01.
- [27] I330699, 田慶金, 曾柏蒼, 周欣鋒, 避震器阻尼調整機構及其控制裝置, 中華民國專利, 2010/09/21.
- [28] I343331, 陳玉坤, 機車之懸吊控制方法及其裝置, 中華民國專利, 2011/06/11.
- [29] I600572, 布特拉 彼得·拜爾 于爾根·昆斯奧 瑞能, 寇雷爾 弗羅里安, 柯恩 克里思多夫, 電子控制懸吊系統, 懸吊系統的控制方法及電腦程式, 中華民國專利, 2017/10/01.
- [30] G. Phanomchoeng and S. Chantranuwathana, "Road Surface Condition Detection in Bicycle for Active Safety Applications," *SAE Technical Paper*, 2017-01-1730, 2017.
- [31] US5061932, Raglan H. A. H. Tribe, Neil G. Thomson, Road surface sensing system for a vehicle, 美國

專利, 1991/10/29.

- [32] US9453941, Inna Stainvas Olshansky, Yosi Buda, Road surface reflectivity detection by lidar sensor, 美國專利, 2016/09/27.
- [33] D.G. Kim, J.Y. Kim, J.H. Lee, D. G. Choi, and I.S. Kweon, "Utilizing Visual Information for Non-contact Predicting Method of Friction Coefficient," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea SP*, Vol. 47 No.4. pp. 399-405, 2010.
- [34] Y.M. Kim, N. Baik, J. H Kim, "A Study on Development of Mobile Road Surface Condition Detection System Utilizing Probe Car," *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, Vol. 4, No. 10, 2013.
- [35] Hun-Jun Yang, Hyeok Jang, Jong-Wook Kang, Dong-Seok Jeong, "Classification Algorithm for Road Surface Condition," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol.14 No.1, January 2014.
- [36] J.D. Zhao, H.Q. Wu, L.L. Chen, "Road Surface State Recognition Based on SVM Optimization and Image Segmentation Processing," *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2017, Article ID 6458495.
- [37] M. Perttunen, O. Mazhelis, F.Y. Cong, M. Kauppila, T. Leppänen, J. Kantola, J. Collin, S. Pirttikangas, J. Haverinen, T. Ristaniemi, J. Riekk, "Distributed Road Surface Condition Monitoring Using Mobile Phones," *Ubiquitous Intelligence and Computing*, pp 64-78, 2011.
- [38] G. Alessandrini, L. C. Klopstein, S. Delpriori, M. Dromedari, G. Luchetti, B. D. Paolini, A. Seraghi, E. Lattanzi, V. Freschi, A. Carini, A. Bogliolo, "SmartRoadSense: Collaborative Road Surface Condition Monitoring," *UBICOMM*, 2014.
- [39] G. Chugh, D. Bansal, S. Sofat, "Road Condition Detection Using Smartphone Sensors: A Survey," *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, Vol.7, No.6, pp. 595-602, 2014.
- [40] 陳智勇、林閔雯、吳星緯、黃詩婷, 中華民國新型專利, 證書號: M550236, 可自動調整之避震裝置, 2017/10/11。
- [41] 林易助, 運用線型電動機於可調阻尼式懸吊系統, 國立台北科技大學車輛工程系, 碩士論文, 2007.
- [42] US8413773, Eric N. Anderfaas, Dean Banks, Magnetorheological damper system, 美國專利, 2013.
- [43] 166619, 易振興, 自行車智慧型按鍵式電子操控結構, 中華民國專利, 2000/12/11.
- [44] I243780, 喬丹 布萊恩, 席普曼 克里斯多佛, 奇佛 約翰, 歐德斯 史蒂芬, 可調整式氣體彈簧懸吊系統, 中華民國專利, 2005/11/21.
- [45] M399228, 顏進財, 避震器之流體輸入裝置, 中華民國專利, 2011/03/01.
- [46] M477517, 方秀東, 可調式避震器, 中華民國專利, 2014/05/01.
- [47] M373423, 劉清良, 可調式避震器之結構, 中華民國專利, 2010/02/01.
- [48] M421917, 施明璋, 王榆銜, 連續可調式之雙筒避震器, 中華民國專利, 2012/02/01.
- [49] 145814, 盧福鐘, 可調式避震器, 中華民國專利, 1999/04/01.
- [50] 192675, 施明璋, 王登彥, 六段可調式避震器, 中華民國專利, 2002/07/11.
- [51] 220197, 陳順卿, 林其祥, 吳登棋, 調整式避震器, 中華民國專利, 2004/03/01.
- [52] I. Daubechies, W. Sweldens, "Factoring wavelet transforms into lifting schemes," *J. Fourier Anal. Appl.*, Vol. 4, no. 1333, pp. 247-269, 1988.
- [53] T. Kohonen, "Self-organization and associative memory," 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [54] 騎乘自行車人體全身性振動暴露評估, 張偉倫, 張誌煌, 徐啟舜, 財團法人車輛研究測試中心.