

互動式自行車模擬器應用於虛擬實境之研究

黃榮堂
國立台北科技大學機
電整合研究所教授
e-mail :
jthuang@ntut.edu.tw

陳峰傑
國立台北科技大學機
電整合研究所研究生
e-mail :
s4408031@ntut.edu.tw

摘要

運動休閒已是日常生活中不可或缺的重要項目，而一般的遊樂器材與遊戲軟體卻很少著重在運動休閒上，多數著重聲光效果、尋求刺激等。本研究針對目前虛擬實境與運動休閒整合為方向，旨在建立具有互動功能的模擬器。透過自行開發的動態平台作為模擬器，以解決虛擬場景與模擬器之間信號回饋等問題。本研究是以自行車作為平台搭載的載具，為了實現自行車行駛在路面之真實狀態，因此還包括了自行車動態系統的模擬與分析，最後再測試自行車模擬器與虛擬實境之間的互動狀況。透過上述設計、模擬與分析，以求作為日後設計更為精確與逼真的模擬器所需之參考。

關鍵詞：虛擬實境、自行車、動態平台。

1. 前言

目前運動器材已經發展得相當成熟，但是幾乎都侷限在訓練用途上，鮮少著重娛樂效果，因此要吸引人們去運動還欠缺了一些誘因，而市面的遊樂器材幾乎都是著重在聲光效果上，雖然也有一些運動方面的遊戲例如：賽車、賽馬、射擊等，但是這些機台的娛樂性質已經凌駕在運動效果之上了，因此要如何設計兼顧娛樂與運動的互動式休閒器材，還有很多創意可以研究與發展。

虛擬實境的技術廣泛的應用在各項領域之上，例如：飛行訓練、遊戲、場地導覽、電影等，而最近虛擬實境的技術亦有應用在休閒器材上，而互動式休閒器材與傳統的運動器材最大的區別在於，如何將虛擬實境的技術融入模擬器中，可望讓使用者與電腦動畫和模擬器之間作有效的互動。平台的設計一直是模擬器最重要的一環，因此，具有六個自由度的史都華平台被廣泛的應用在各種模擬器上[3][4][5][7]。

而模擬器的設計更關係到載具的動態系

統，由 He 與 Ma [3]提出一套完整的自行車動態模型，其中包括風阻係數對自行車行駛時的影響等，以及使用數值方法模擬等。

Kwon 等人[4][5]提出使用電磁離合器作為自行車前叉扭力回饋，以及路面狀態回饋等理論，可以針對路面的狀況回饋給使用者，以求更加逼真的效果。

Shin 等人[7]提出使用狀態觀察器，估測自行車上無法量測的物理量，即使用者作用在自行車踏板上的扭矩，以求得虛擬實境中自行車動態系統所需的相關參數。

本研究的目的是在不使用造價昂貴的六軸平台，而在於建構一低成本且為維護容易的動態平台與自行開發的虛擬場景，而要如何將動態平台與虛擬場景結合，是本研究的重心。為求得自行車在虛擬實境中移動的真實狀況，需要數值模擬與分析，而動態平台的控制則需要相關的運動學、控制理論實現，藉由相關的模擬與分析，可望設計出真正具有互動能力的模擬器。

2. 研究方法

2.1.1 動態平台設計原理

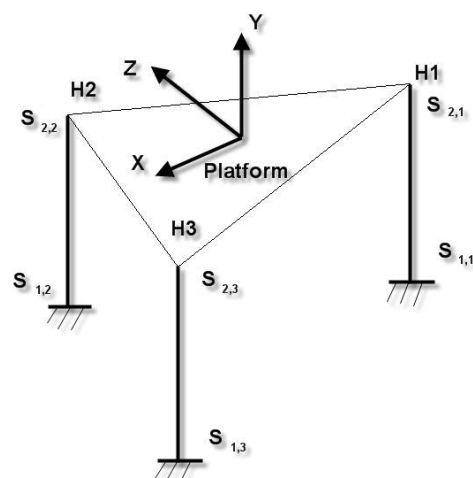


圖 1 動態平台設計構想

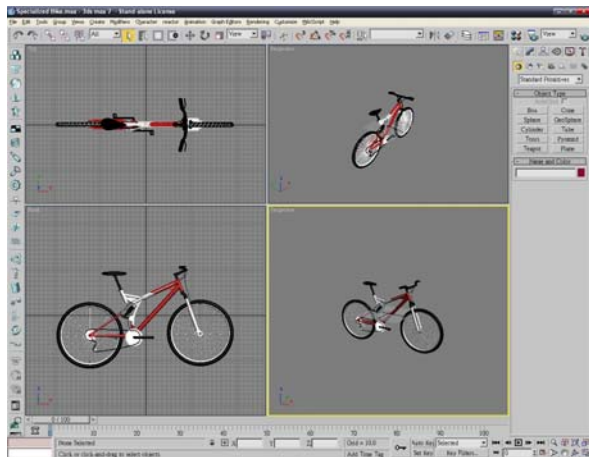


圖 2 3D Studio Max 開發工具

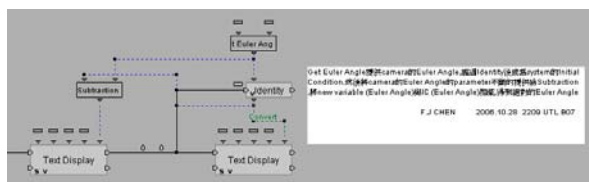


圖 3 Virtools Dev Building Blocks

本研究所使用之動態平台設計構想是由三點共面所組成的一個平面，如圖 1 所示。目的是為了使重心落在由 H1 H2 H3 所構成的三角形平面，藉由重力與改變點 H2 H3 的長度可以使得平台做相對運動，根據 Grumbler's formula [9]，可得(1)式可計算出平台在空間中的自由度，其中 d (空間的維度)、 n (連桿數)、 g (接點數)、 f_i (相對於接點數之自由度)、 M (自由度)。透過(1)式，可以計算出本研究之平台之自由度，結果如(2)所示可得三個自由度，分別為 Pitch, Roll, Yaw 三個角度。

$$M_{DOF} = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (1)$$

$$M_{3DOF} = 6(4 - 5 - 1) + 3 \times 5 = 3DOF \quad (2)$$

2.1.2 運動學模擬與分析

要控制平台的自由度是藉由鋼索的繩長改變，要如何決定馬達迴轉數對平台的相對運動會造成什麼影響。

2.2.1 虛擬模型之開發

要製作虛擬實境，其中 3D 模型是不可或缺的，而製作 3D 模型市面上有很多套軟體可選擇例如 Shade、MAYA、LightWave、3D Studio Max 等，而本研究使用 3D Studio Max，如圖 2 所示。建構虛擬實境中所需之場景。

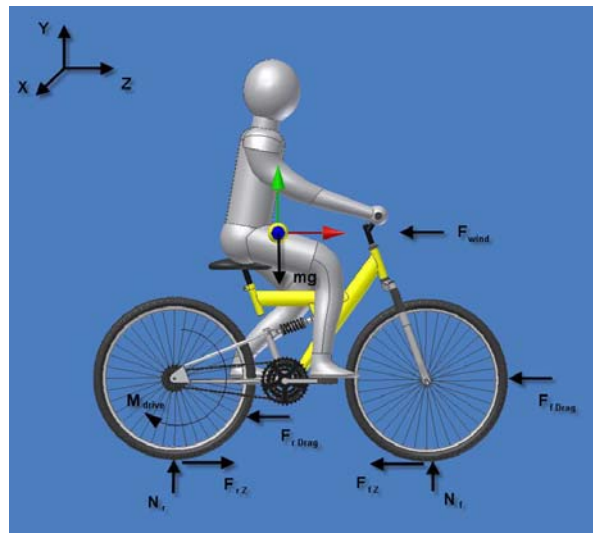


圖 4 自行車與騎士之自由體圖

2.2.2 虛擬實境之開發

本研究所採用之虛擬場景開發軟體是由法國開發之 Virtools Dev，這是一套整合軟體可以將不同的檔案格式結合在一起，創造所需之虛擬環境，撰寫程式則是採用圖形化之行為模組(Building Blocks)如圖 3 所示，使開發者可以不必浪費在複雜的程式學習上，可降低開發專案時程，而 Virtools 更提供 SDK 功能，使程式設計者可以透過 Virtools 提供的 Visual C++ 專案，撰寫自己的 Building Blocks。

2.3.1 自行車動態系統

為了探討自行車行駛在路面時所接受的外力對系統造成何種效應[3]，必須建構系統的動態模型，由於自行車各種物理性質不易獲得，因此使用 AutoDesk 的 Inventor 繪製自行車與騎士之模型，藉由 Inventor 提供的物理性質如圖 5 可獲得質量慣性矩、重心、面積等物理性質。自行車與騎士行駛在路面時受力的情況如圖 4，根據牛頓第二運動定律可獲得(3)(4)(5)式。



圖 5 自行車之物理性質

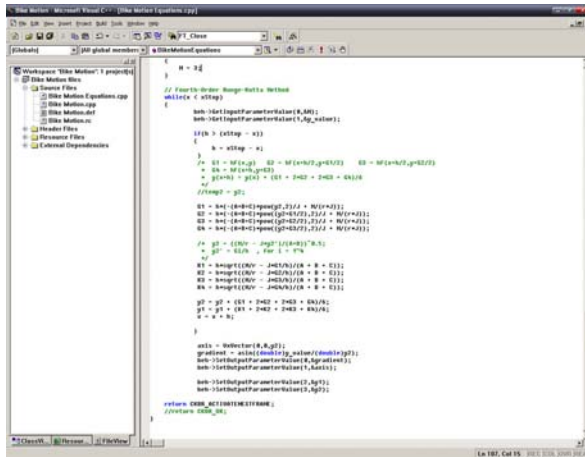


圖 6 Virtools SDK 於 VC++ 之開發環境

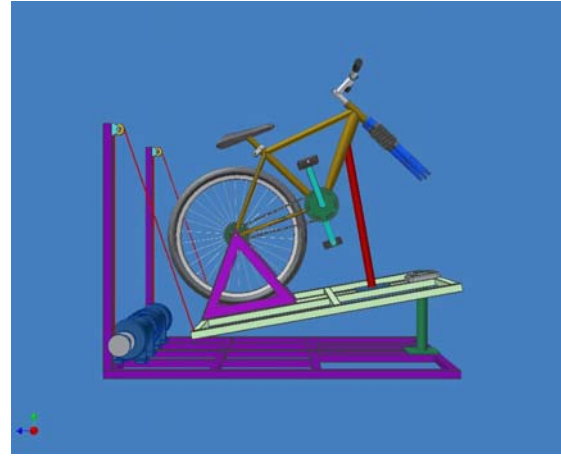


圖 7 動態平台設計

$$F_{rz} - F_{fz} - F_{rDrag} - F_{fDrag} - F_{wind} = m\ddot{z}_r + mg \sin \alpha \quad (3)$$

$$M_{drive} - F_{rz}r = J_r \ddot{\phi}_r \quad (4)$$

$$F_{fz} = J_f \ddot{\phi}_r \quad (5)$$

將(3)(4)(5)式經過整理後可獲得二階微分方程式(6)。

$$\frac{M_{drive}}{r} - F_{rDrag} - F_{fDrag} - F_{wind} - mg \sin \alpha = \left(m + \frac{J_f}{r^2} + \frac{J_r}{r^2} \right) \ddot{z}_r \quad (6)$$

一般自行車行駛時最主要的阻力是來自風阻與路面起伏，如(6)式。為了作更精確的自行車動態系統模擬則必須考慮風阻係數對自行車動態系統的影響[1]，風阻係數所產生的阻力如(7)式所示，其中 ρ (空氣密度)、 C_{xo} C_d (風阻係數)、 A (面積)、 V (自行車速度)、 RS (Rear Shelter)後輪遮蔽效應，(7) (8)式分別是作用在前後輪，(9)式則是作用在自行車騎士。

$$F_{fDrag} = \rho A_{wheel} C_d \frac{V^2}{2} \quad (7)$$

$$F_{rDrag} = \rho A_{wheel} C_d \frac{V^2}{2} (1 - RS) \quad (8)$$

$$F_{wind} = \rho A_{Rider} C_{xo} \frac{V^2}{2} \quad (9)$$

2.3.2 動態系統之數值方法

由於系統之運動方程式為非線性二階微分方程式，且具初始值之問題，為了求解該微分方程式，在此使用 Fourth-Order Runge-Kutta Method [6]求解，如(10)式。

$$\begin{aligned} K_1 &= hF(x, y) \\ K_2 &= hF\left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{K_1}{2}\right) \\ K_3 &= hF\left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{K_2}{2}\right) \\ K_4 &= hF(x + h, y + K_3) \\ y(x + h) &= y(x) + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 3K_3 + K_4) \end{aligned} \quad (10)$$

2.4.1 Virtools SDK 之開發

動態平台所設計的自由度是為了實現自行車型行駛於路面上時，適時反應路面的狀況，期望帶給騎士最接近真實路況之狀態。另一個問題則是，一般設計遊戲時速度的決定可能沒有經過系統動態模擬，可能只有一些加權等參數，因此要取得虛擬場景中的路面狀態問題，以及如何將之前數值模擬 Runge-Kutta，要如何實現在虛擬場景中等都是非常重要的問題。由於 Virtools 中並沒提供路況回饋的功能，因此必須要自行透過 SDK 設計，如圖 6 所示。

3.1 結果與討論

3.1.1 動態平台設計與分析

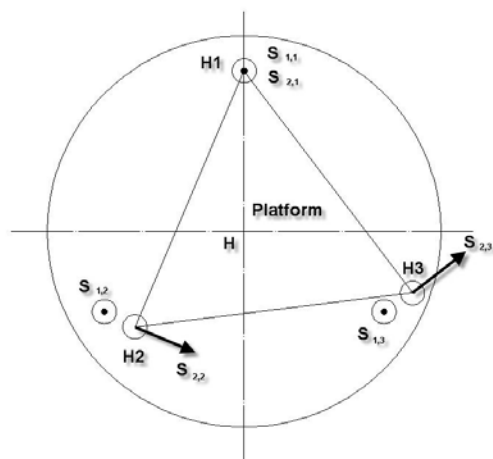


圖 8 動態平台 Yaw Angle 效應

由於最初設計動態平台的構想是以低成本、容易維護為設計理念，因此 H2 H3 這兩個接點使用鋼索作為連桿，以交流馬達作為驅動源，藉由改變繩長控制平台之相對運動如圖 7 所示。

由於鋼索只能承受張力無法承受壓力，因此無法有效的拘束平台三個自由度的運動，造成 Yaw 角如圖 8 所示的不可控制，因此 Yaw 便成為平台震盪的不確定因素。

為改善此一缺失，可以考慮加入肘節機構，肘節由兩個連桿與三個接點所組成，帶入(1)式後可得(11)式之結果，將平台的自由度簡化為 2 個自由度 (Pitch & Roll Angle)，如圖 9 所示。

$$\begin{aligned} M_{2DOF} &= 6(6-8-1)+1\times 1+2\times 1+3\times 6 \\ &= 2DOF \end{aligned} \quad (11)$$



圖 9 平台與肘節機構

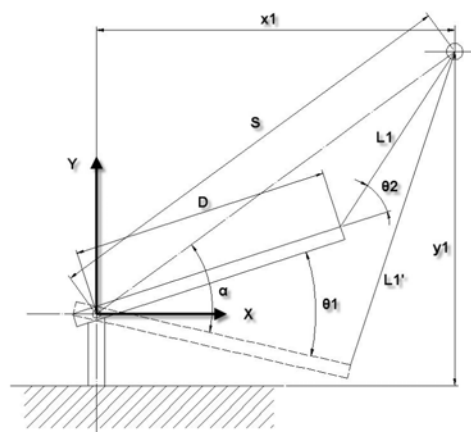


圖 10 動態平台 Pitch Angle

3.1.2 動態平台運動學模擬與分析

根據圖 9 至 10 所示，平台與繩索之間的相對位置，經過運動學分析後可得(12)(13)(14)式，並將式子帶入 MATLAB 程式化後求解。由圖 12 至 13 結果顯示 Pitch Angle 與馬達的迴轉數是呈現線性的關係。又根據分析結果顯示平台到達水平位置時 Pitch Angle 約為 12° ，而操作範圍的極限約為 24° 。而 Roll Angle 根據圖 10 所示，可得知該角度的操作範圍與馬達的迴轉數亦是呈現線性分佈。根據圖 10 至 12 所示，可得知 Roll Angle 在水平位置時馬達所需之相關迴轉數，以及 Roll Angle 隨著 Pitch Angle 變化時兩個馬達相對的迴轉數，根據所求得之相關參數，可最做為平台回饋控制之重要指標。

$$\begin{aligned} L_1^2 &= S^2 + D^2 - 2SD \cos(\alpha - \theta_1) \\ \Rightarrow \theta_1 &= \alpha - \cos^{-1} \left(\frac{S^2 + D^2 - L_1^2}{2DS} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

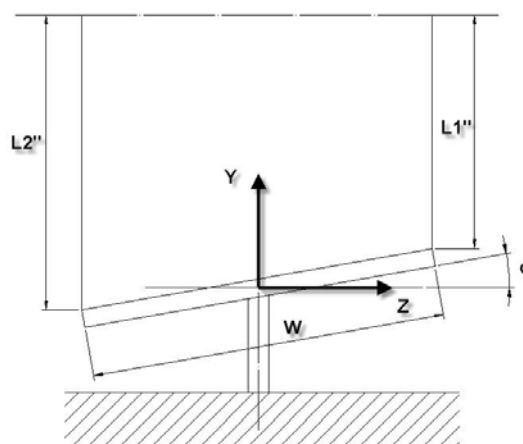


圖 11 動態平台 Roll Angle

$$\begin{aligned}
L_1'' &= (L_1' - 2n_1\pi r_1) \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
L_2'' &= (L_2' - 2n_2\pi r_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
\Rightarrow \phi &= \sin^{-1} \left(\frac{L_2'' - L_1''}{W} \right)
\end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
x_1 &= D \cos \theta_1 + L_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\
y_1 &= D \sin \theta_1 + L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
\Rightarrow x_1^2 + y_1^2 &= D^2 + L_1^2 + 2DL_1 \cos \theta_2 \\
\Rightarrow \theta_2 &= \cos^{-1} \left(\frac{x_1^2 + y_1^2 - D^2 - L_1^2}{2DL_1} \right)
\end{aligned} \quad (14)$$

3.1.3 動態平台製作與測試

為實現模組化之目的，自行車模擬器採用焊接方式完成各個單元、再使用組裝方式接和，致動器使用四個定滑輪搭配兩組三相交流減速馬達，如圖 16 所示。而馬達控制單元如圖 17 所示，由變頻器與 LabJack U12(AD/DA 控制器)、OPA 電路、Darlington 電路組成。

根據(15)式可得頻率與馬達轉速之間的關係，其中 ω (RPM)、 f (頻率 0~60Hz)、 P (極數 4)、 e (轉差速率 0.044)、 N (減速機減速比 1/75)。

$$\omega = \frac{120 f (1 - e)}{p} \times N \quad (15)$$

由於 U12 控制器本身限制類比電壓最大輸出只有 5V，而變頻器的輸入參考電壓為 0~10V，因此需要藉由 OPA 放大電路設計一增益，使用非反向接法可設計出如(16)式中之增益 K ，其中 R_1 、 R_f 為 100 Ω 。

$$\begin{aligned}
V_i &= \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_o \\
\Rightarrow K &= 1 + \frac{R_f}{R_1} = 2
\end{aligned} \quad (16)$$

交流馬達欲達到無段變速之目的，必須藉由變頻器將固定頻率、固定振幅交流電轉換成可變頻率，原理是使用 SPWM 正弦波脈寬調變

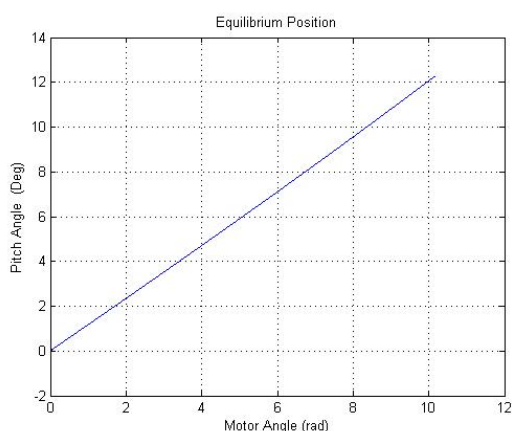


圖 12 Pitch Angle 操作在水平位置

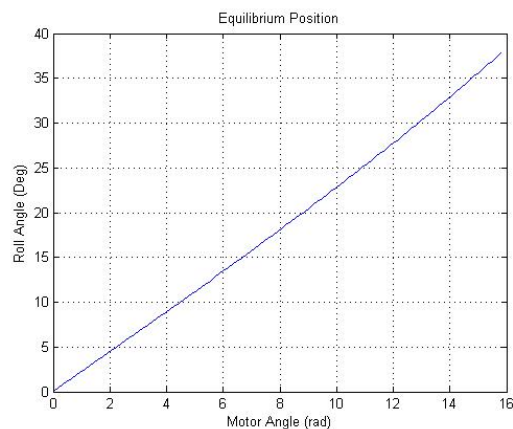


圖 14 Roll Angle 操作在水平位置

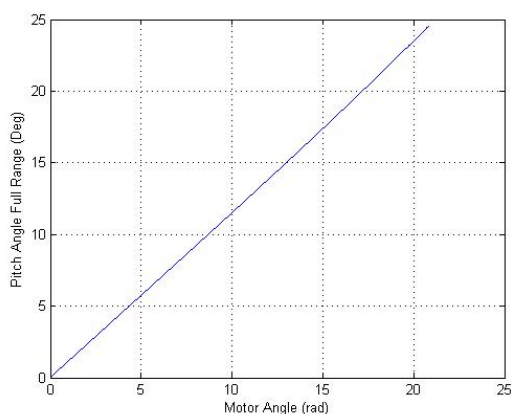


圖 13 Pitch Angle 有效範圍

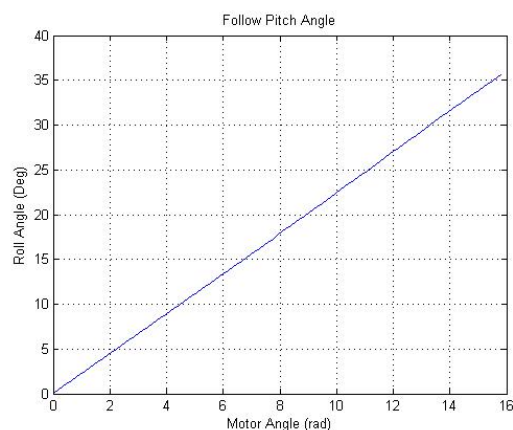


圖 15 Roll Angle 相對於 Pitch Angle



圖 16 自行車模擬器完成圖

，本研究採用台達電 VFD-S 變頻器，不需自行設計 SPWM，僅需對變頻器 AVI 輸入 0~10V 的類比參考電壓即可改變輸出頻率。觀察輸入電壓與輸出頻率之間的關係，如圖 18 所示。可以發現經過 LM324 放大後的類比電壓與變頻器輸出頻率呈現線性分佈。

建構完整的硬體控制界面後，為了實現 PC Base 控制之目的，需要撰寫軟體的控制界面，在本研究中軟體控制界面採用 Borland C++ Builder 實現圖形化控制界面，如圖 19 所示。從圖 29 至 32 可以觀察模擬器作動 Pitch Angle 與 Roll Angle 幾乎沒有干涉現象，使模擬器可以順利的操作在模擬的角度內，Yaw Angle 振動的效應也可減少至最低。

3.2.1 虛擬模型之建構

主要的模型單元為路面、路障、山洞、山坡、自行車、騎士等，採用 3D Studio Max 是因為本研究所使用的虛擬場景建構軟體是使用 Virtools Dev，因為 Virtools Dev 針對 3D Max 所轉出模型相較於其他 3D 動畫軟體轉出之圖檔，匯入結果是最佳的。

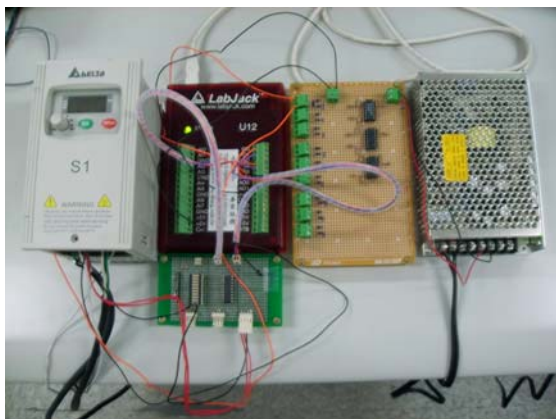


圖 17 動態平台控制單元

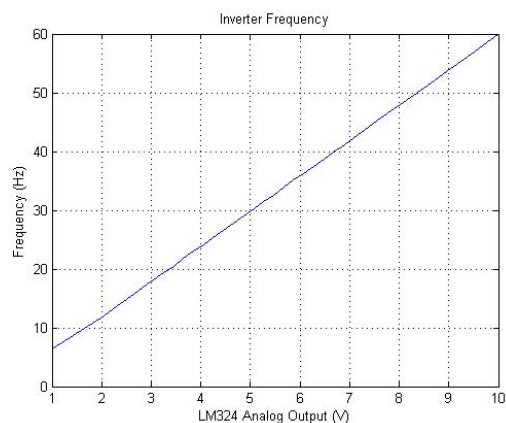


圖 18 變頻器輸出頻率與輸入電壓

3.2.2 虛擬場景建構與測試

要產生連續的畫面，一秒鐘至少需要 30 張以上圖片，為了不使電腦的運算造成負擔，除一些必要的模型，其他的場景均採用貼圖完成，如圖 20 所示。以求電腦執行時之最佳效能。如圖 21 所示，執行效率可高於每秒 60 張 (FPS) 以上。

3.3.1 動態系統之數值模擬與分析

為了決定自行車在虛擬場景中行駛時之速度依據，因此必須要有完整的物理狀態來決定，才能實現虛擬場景中加減速時之狀態。根據自然界系統容易受到各種外力的影響所產生的效應，因此本研究之自行車動態系統可預見會產生收斂的特性。在此例中模擬 5 N-m 與 9 N-m 兩種扭矩對動態系統所造成的速度及加速度響應為何。在表 1 中分別有系統所需各各種數據，並將數據帶入二階微分方程式中，再將二階微分方程式帶入 Runge-Kutta Method 中，再透過 C 語言實現數值模擬之流程，並將結果輸出至 MATLAB 觀察自行車動態系統中速度與加速度對時間的響應。

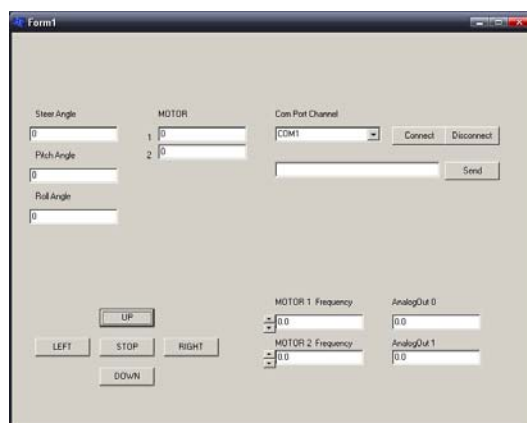


圖 19 圖形化控制界面



圖 20 濱海公路場景

本例模擬時採用求解至穩態，觀察固定輸入扭矩 5 N-m 的速度響應，如圖 25 所示。可以發現系統在 250 秒時開始收斂，而加速度響應如圖 26 則呈現指數型態收斂。

經由速度與加速度響應圖可以證明運動方程式最終是會呈現收斂的狀態。再觀察另一組數據 9 N-m 可發現速度對時間之響應如圖 27，系統收斂約在 150 秒時，加速度響應衰減時，如圖 28 所示。同樣約莫在 150 秒左右，比較 5 N-m 與 9 N-m 之差異，即輸入扭矩較高的系統之收斂時間與上升時間的比低扭矩要更快。

3.4.1 Virtools SDK 之設計與實驗

動態平台所設計的兩個自由度是為了實現自行車型行駛於路面上時，適時反應路面的狀況，期望帶給騎士最接近真實路況之狀態。另一個問題則是，要如何決定騎士在真實狀態中的扭矩回饋給虛擬實境。因此要取得虛擬場景中的路面狀態問題以及如何將之前數值模擬 Runge-Kutta，要如何實現在虛擬場景中是非常重要的問題。由於 Virtools 中並沒提供路況回饋的功能因此必須要自行透過 SDK 設計。路況資訊取得設計概念是藉由一差分方程式所構成如圖 21 所示，經過固定之 Sample Time 取樣後透過 Get Position 得到 X Y Z 的向量，

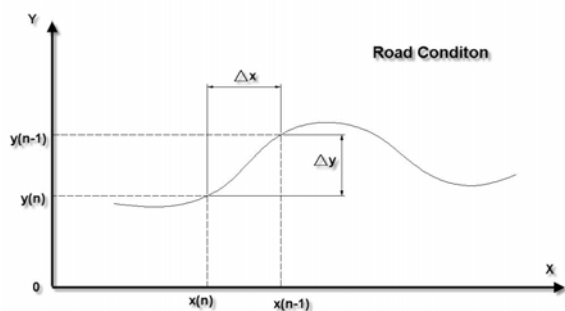


圖 21 擷取地形資訊

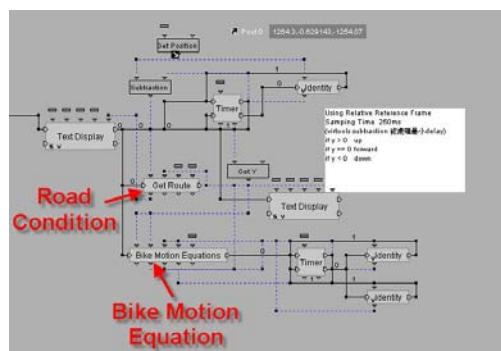


圖 22 SDK 設計之 Building Blocks



圖 23 地形回饋和自行車動態方程式測試與 Vitools FPS 執行效率

路況資訊取得設計概念是藉由一差分方程式所構成如圖 21 所示，經過固定之 Sample Time 取樣後透過 Get Position 得到 X Y Z 的向量，在經過差分運算可得三個增量值，經過正負判斷即可知道目前是上升或下降，如圖 22 所示。亦可利用此方式計算出角度。而自行車動態方程式之設計概念則採用在 2.3 所使用的方法，唯一需要注意的是在虛擬場景中所有參數都不停的在變化，因此要得到像 2.3 接近穩態解的結果是不容易的，所以在設計時要讓得到的值不斷的反覆疊代，速度才可以隨著輸入之扭矩改變，如圖 23 所示。

3.5 系統架構

為了實現具互動功能之自行車模擬器，必須建構完整之控制流程如圖 24，系統經由估測器估測自行車踏板扭矩與把手角度回饋，輸入至自行車動態方程式中，經過數值方法求解後將結果輸出至 Virtools，如此決定虛擬場景中前進之速度，而前進的過程中再由路況回饋功能將信號送給阻力裝置以及動態平台控制器。

本研究目前已完成系統中之動態平台、路況回饋、自行車數值分析、Virtools 虛擬場景。

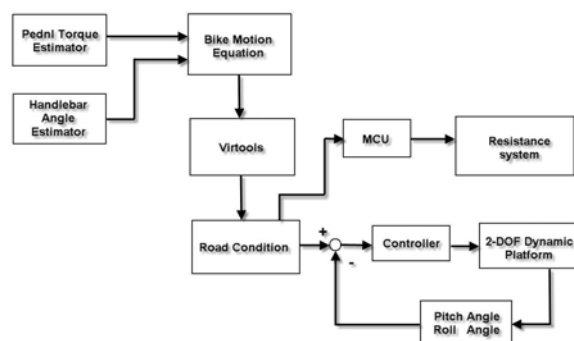
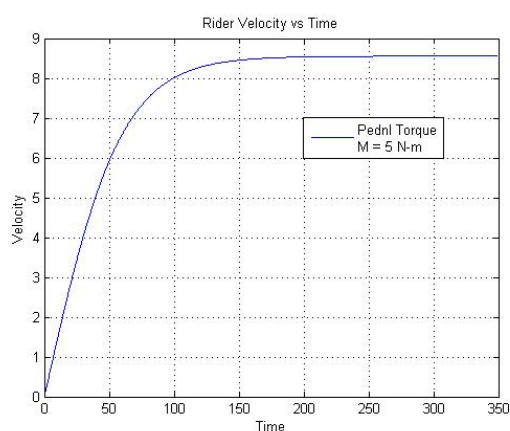
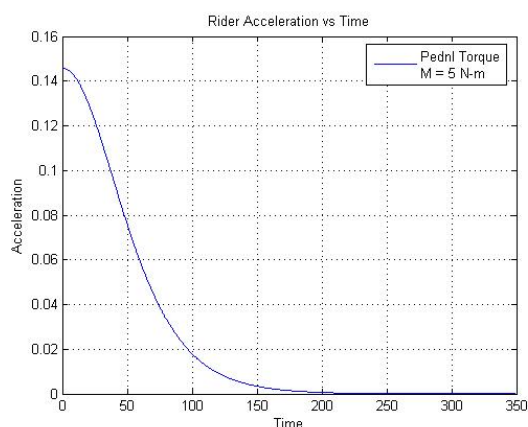
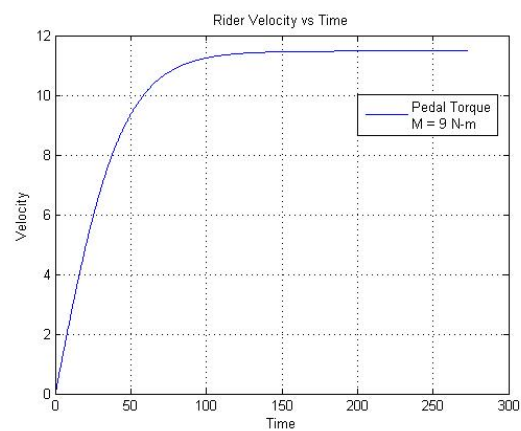
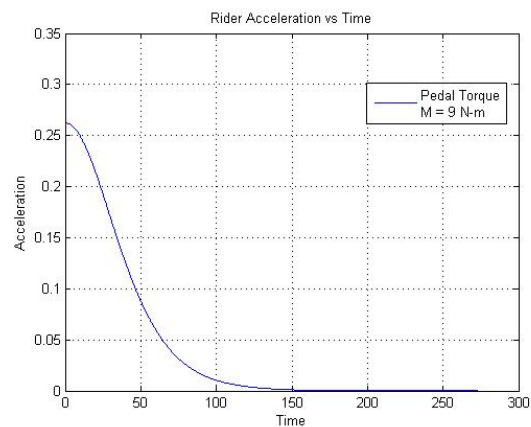


圖 24 系統之控制流程圖

4. 結論

本研究採用自行開發之二自由度動態平台除了配合本研究之載具外尚可搭配其他載具，原設計之目的是為了多用途功能之動態平台設計而開發，而不是單一功能之動態平台。為了配合虛擬自行車之主題，因此自行開發自行車行駛時所需之虛擬場景作，雖然自行開發虛擬場景較為耗時，但是一般市售之遊戲軟體並不會開放相關介面，因此要取得相關變數非常困難，以及無法自行設計改造，因此自行開

圖 25 $M = 5 \text{ N-m}$ 速度響應圖 26 $M = 5 \text{ N-m}$ 加速度響應圖 27 $M = 9 \text{ N-m}$ 速度響應圖 28 $M = 9 \text{ N-m}$ 加速度響應

發適合的虛擬場景對於應用在互動式休閒器材上是非常重要的。最後再導入數值模擬與分析，以及 Virtools SDK 之設計等流程，透過 Virtools SDK 之設計可以使許多設計問題在此基礎上作完善之處理。

M_{drive} (N-m)	5	9
C_d	0.0491	0.0491
C_{xo}	0.6	0.6
RS	0.25	0.25
r (m)	0.337	0.337
J_f ($kg - m^2$)	0.0885	0.0885
J_r ($kg - m^2$)	0.1085	0.1085
α (rad)	0	0
$m_{Bike+Rider}$ (kg)	100	100
ρ_{Air} (kg / m^3)	1.226	1.226
A_{wheel} (m^2)	πr^2	πr^2
A_{Rider} (m^2)	0.6	0.6

表 1 數值模擬參考數據



圖 30 Pitch Angle 測試
(b)



圖 29 Pitch Angle 測試
(a)



圖 31 Roll Angle 測試
(a)



圖 32 Roll Angle 測試
(b)

參考文獻

- [1] *Analytic Cycling*, www.analyticcycling.com
- [2] Åström, K.j., Klein, R.E., Lennartsson, A., "Bicycle Dynamics and Control," *IEEE Control Systems Magazine* 25 (4), pp. 26–47, 2005.
- [3] He, Q., Fan, X., Ma, D., 2005, "Full bicycle dynamic model for interactive bicycle simulator," *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 5 (4), pp. 373–380, 2005.
- [4] Kwon, D.-S., Yang, G.-H., Lee, C.-W., Shin, J.-C., Park, Y., Jung, B., Lee, D.-Y., Lee, K., Han, S.-H., Yoo, B.-H., Wahn, K.-Y., Ahn, J.-H., "KAIST interactive bicycle simulator," *Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference*, Vol. 3, 2001, pp.2313–2318, 2001.
- [5] Kwon, D.-S., Yang, G.-H., Park, Y., Kim, S., Lee, C.-W., Shin, J.-C., Han, S., Lee, J., Wahn, K.-Y., Kim, S., Lee, D. Y., Lee, K., Yang, J.-H., Choi, Y.-M., "KAIST interactive bicycle racing simulator: the 2nd version with advanced features," *Intelligent Robots and System, IEEE/RSJ International Conference*, Vol. 3, 30 Sept.-5 Oct. 2002, pp.2961–2966, 2002.
- [6] Kiusalaas, J., *Numerical Methods in Engineering with MATLAB*, Cambridge University Press, 2005.
- [7] Shin, J.-C., Lee, C.-W., "Rider's net moment estimation using control force of motion system for bicycle simulator," *Journal of Robotic Systems* 21 (11), pp. 597–607, 2004.
- [8] Wolf, A., Ottaviano, E., Shoham, M., Ceccarelli, M., "Application of line geometry and linear complex approximation to singularity analysis of the 3-DOF CaPa-Man parallel manipulator," *Mechanism and Machine Theory* 39 (1), pp. 75–95, 2004.
- [9] Yoon, J., Ryu, J., "A new family of hybrid 4-DOF parallel mechanisms with two platforms and its application to a footpad device," *Journal of Robotic Systems* 22 (5), pp. 287–298, 2005.
- [10] Ying, S.J., *Advanced Dynamics*, AIAA Education Series, 1997.