

應用圖像處理於應變應力曲線之自動化辨識及兩刷膠條分析

王栢村¹、蔡俊郎²、王簡俊維¹、蔡曜光¹、吳盈輝³

¹ 國立屏東科技大學機械工程系

² 台灣云意科技有限公司

³ 國立內埔高級農工職業學校

摘要

有鑑於進行橡膠材料的拉伸試驗設備之限制，只能取得應變應力曲線圖像，以及數個應變與應力對應值，對於橡膠材料的非線性特徵，又極需要明確的數值化之應變與應力對應數據，以能進行後續的分析。本文應用圖像處理技術，發展應變應力曲線之自動化辨識程式模組，由拉伸試驗取得的二維曲線圖，透過圖像二值化、膨脹及侵蝕等圖像處理方式，可以成功轉換得到全區域的應變與應力對應數據。進而，可應用於有限元素分析軟體進行超彈性材料模型的模擬分析，包括 Neo-Hookean 以及 Mooney-Rivlin 兩種材料模型。由圖像辨識得到的應變與應力對應數據，可以成功的進行曲線嵌合，以取得對應的材料模型參數。本研究也應用超彈性材料模型，進行兩刷膠條靜力分析，可求得兩刷膠條受不同下壓力負荷之變形特徵與性能參數，可更符合橡膠材料的實際特性。本研究對橡膠的應變應力曲線圖像，進行自動化辨識，可取得數據資料，並應用於 FEA 軟體之超彈性材料模型設定，可以成功進行兩刷膠條的靜力分析。開發的圖像處理程序還可以應用於其他 2D 曲線圖像識別，並減少數據處理的時間和精力。

關鍵字：圖像處理、應變應力曲線、有限元素分析、超彈性材料模型

1. 前言

橡膠所製作的產品於生活中隨處可見，隨著橡膠製品在各個地方的廣泛應用，橡膠相關產業對其材料特徵的研究愈發重要。

為獲得橡膠材料的等效楊氏係數，需要多筆應變與應力對應值，但由於拉伸試驗設備之輸出限制，僅能獲得應變應力曲線圖像與特定應變率對應的應力值，為進行兩刷膠條靜力分析，依現況條件需建立應變應力曲線圖像數值化的處理模組。

為理解圖像處理模組的製作方式，參考圖像處理之相關論文，Puri[1]探討 Python 之 Open cv 圖像處理擴展功能，透過該擴展功能可以尋找輸入圖片中特定幾何形狀的位置，擷取幾何形狀之輪廓。王等人[2]探討利用影像處理即時偵測機械手臂製造工件的製

程，透過將圖像處理中圖片灰階值差距較大部分定為邊界，自動化尋找工件邊界，確認工件的製作進度，建立彈性製造系統，透過此系統，可以即時偵測工件製作情形與機械手臂有無發生故障。蔡等人[3]探討利用圖像處理辨識模具特徵，對模具圖片進行二值化後細化與平滑化邊線，透過圖像處理辨認出邊界位置後平均化近似位置的數值，達到減少冗餘數據與辨認模具之二維邊界特徵的偵測模具磨損情形，即時更換損毀模具。Huang 等人[4]探討曲線圖中曲線的辨識方式，透過標記最大數值點與零點的位置成為數值中的特徵向量，並比較特徵向量判斷是否吻合於實際線段之趨勢，透過整理特徵可以辨認數字等簡易線條。趙等人[5]使用二值化、線段提取與邊緣檢測等圖像處理技術檢測零件的輪廓，可以測量難以接觸到或量測零件的幾何尺寸，而在精準度方面已經可以滿足大多數零件的需求。蔡等人[6]探討視覺辨識應用於銑床刀具的磨損檢測，在固定視角，使用圖像處理去除刀具本身的反光，收集大量磨損刀具之特徵，若被檢測刀具有磨損刀具之特徵，則會更換刀具，驗證視覺辨識與圖像處理能夠應用於工具機刀具之預知保養。狄等人[7]探討圖像處理在指紋判別的應用，透過二值化與輪廓擷取，可以進行指紋的判別，驗證圖像處理可用於擷取線段並具有可靠性。王等人[8]探討 Python 之 Open cv 圖像處理擴展功能之指令原理與應用，透過圖像辨識對圖片進行處理，擷取圖像之邊線與繪製輪廓，驗證 Python 之 Open cv 圖像處理擴展功能的可用性。Ahmed[9]探討在模擬分析中超彈性材料之建立方法，透過拉伸試驗得到應變應力數值，並在 ANSYS 建構超彈性材料模型。Jakel[10]探討超彈性材料的模擬分析方法，建立超彈性材料之等效 E 值推算方法，並實務應用於超彈性材料拉伸試驗之檢測數值，計算該材料之等效 E 值。

在拉伸試驗中，可能因為設備限制或數值佚失，僅能獲得應變應力曲線圖像與特定應變率對應的應力值；本文針對應變應力曲線圖像使用圖像處理技術擷取應變應力數值。利用膨脹、侵蝕與二值化等圖片處理方法排除非應變應力曲線之背景部分，再對應變應力曲線進行平滑化，消除背景雜訊並擷取應變應力曲線數值，應用得到的應變應力數值進行超彈性材料模型分析，獲得等效楊氏係數，實務應用於兩刷膠條靜力分析，獲得下壓力與刷拭角度之關係曲線圖，並

探討下壓力、刷拭角度於不同材料模型設定的關聯性。

2. 應變應力曲線之圖像處理與驗證

橡膠為一種能伸長至原長度兩倍以上且能高速恢復原狀的高分子聚合物材料，經拉伸試驗所獲得的應變應力曲線為非線性特徵。由於拉伸試驗機的設備限制，只能於實驗獲得應變應力曲線圖像、四個不同應變率對應的應力值、最大伸長率與抗拉強度，其數值筆數過少，無法呈現橡膠材料的非線性特徵，為解決此問題，將建立應變應力曲線圖像處理與擷取系統，用於將曲線特性數據化，以利後續分析使用。圖 1 為圖像處理的系統方塊圖，需輸入圖像與相關參數，如應變應力曲線圖、最大伸長率與抗拉強度，並微調基準點位置，接著經由系統進行圖像處理與擷取後，即可將全區域的應變應力曲線圖數據化。本節將於 2.1 小節深入說明應變應力曲線圖像處理方法與流程，並於 2.2 小節驗證應變應力曲線數據的擷取準確度。

2.1 圖像處理方法介紹

本節以圖 2 之橡膠拉伸試驗應變應力曲線圖進行圖像處理，擷取出全區域的應變應力值。

圖像處理流程如圖 3 所示，首先需將應變應力曲線圖進行切割，只保留曲線所涵蓋的區域，接續將圖像進行灰階化(Gray scale)處理，由彩色圖像轉變為灰階圖像。然而圖像的背景常有雜訊，需先進行背景的膨脹處理(Dilation)，使圖像雜訊消除，而應變應力曲線於此步驟因背景的膨脹，以致曲線變細，故需再進行侵蝕處理(Erosion)，將曲線回復至原始寬度。

接著將圖像逆二值化，由灰階圖像轉變為非黑即白的圖像，此步驟有助於明確擷取曲線所涵蓋之所有像素點位置。由於圖像處理只能抓取到像素點位置與像素點數量，若要取得圖像的應變應力值，需進行像素點比例轉換，圖 4 為應變應力曲線圖與圖像處理像素點對照示意圖，像素點位與應變應力圖之轉換如下關係式所示：

$$\Delta p_\epsilon = \frac{\epsilon_{\max}}{n\epsilon_{px}} \quad (1)$$

$$\Delta p_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{n\sigma_{py}} \quad (2)$$

其中， ϵ_{\max} 為最大拉伸率(%)、 $n\epsilon_{px}$ 為最大拉伸率所對應的像素數、 σ_{\max} 為抗拉強度(MPa)、 $n\sigma_{py}$ 為抗拉強度所對應的像素數，由式(1)、(2)分別可獲得應變率解析度 Δp_ϵ (%)與應力解析度 Δp_σ (MPa)。接續帶入

式(3)、(4)求得 $n\epsilon_n$ 點的應變率值 ϵ_n 及與 $n\sigma_n$ 點的應力值 σ_n 。

$$\epsilon_n = \Delta p_\epsilon \times n\epsilon_n, n=1 \sim p_x \quad (3)$$

$$\sigma_n = \Delta p_\sigma \times n\sigma_n, n=1 \sim p_y \quad (4)$$

由於實驗時可能會因為設備、材料不平度等原因導致應變應力曲線不平順，故最後將曲線進行平滑化處理，消除背景雜訊，並輸出應變應力曲線數值成文字檔，即完成圖像處理的流程。

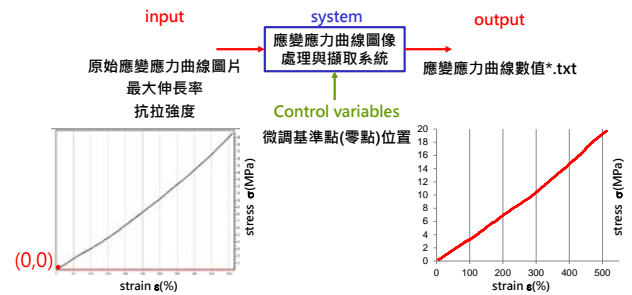


圖 1 圖像處理的系統方塊圖

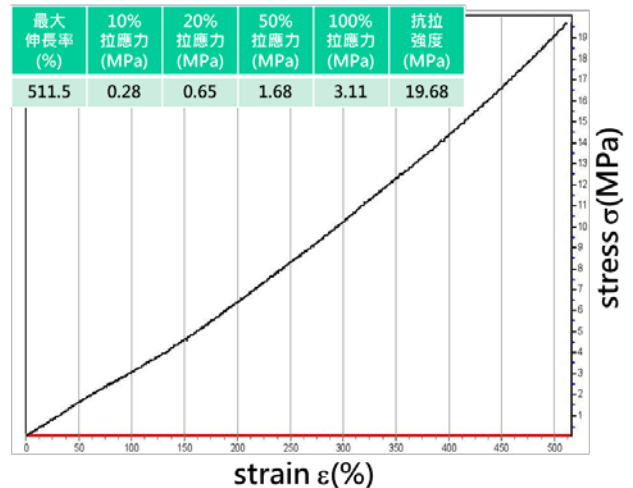


圖 2 橡膠拉伸試驗應變應力曲線圖

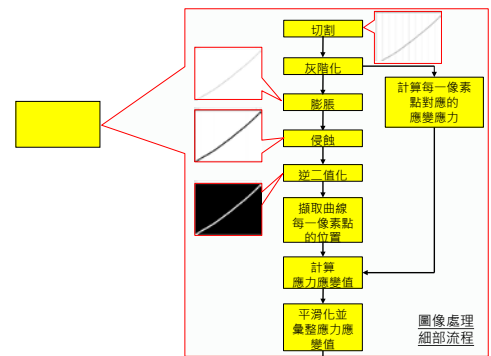
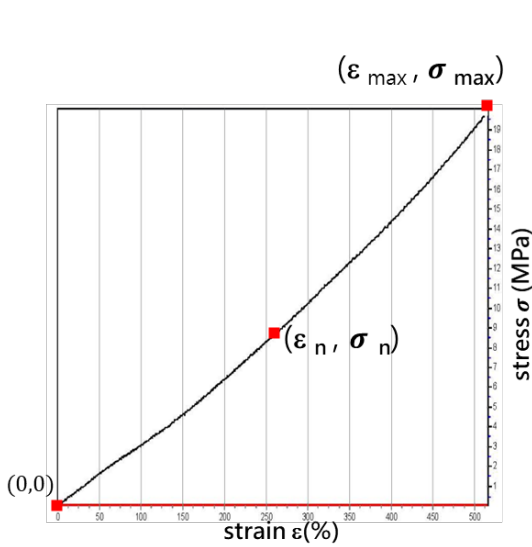
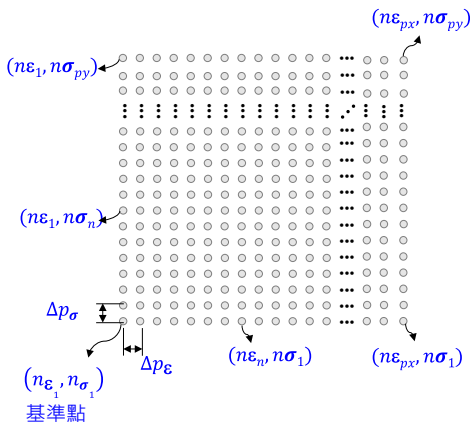


圖 3 圖像處理流程圖



(a) 應變應力曲線圖點示意圖

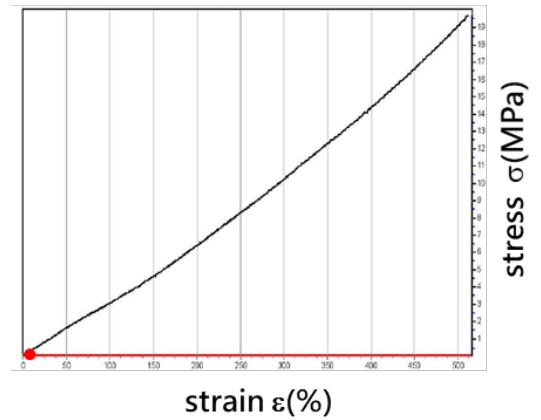


(b) 圖像處理像素點對照示意圖

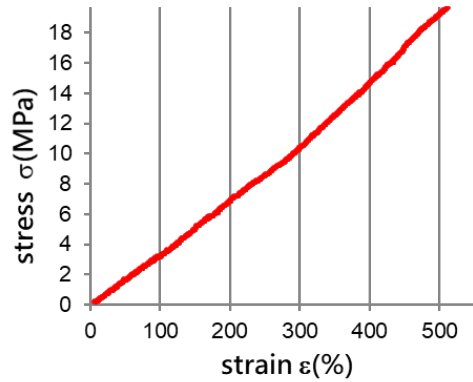
圖 4 應變應力曲線圖與圖像處理像素點對照示意圖

2.2 應變應力曲線圖像處理準確性驗證

本小節將探討圖像處理擷取應變應力曲線數值的準確性，使用圖 2 的應變應力圖做為驗證案例進行曲線擷取，圖 5 為處理前後的應變應力曲線比較圖，由圖 5(a)與 5(b)兩者比較，其曲線趨勢吻合。接續分別比較實驗與經圖像處理的應變為 10%、20%、50% 與 100% 所對應的拉應力值差異，結果如表 1 所示，透過兩者數值比較確定圖像處理擷取之數值與實驗值差異微小，約於 3% 內，楊氏係數的影響差異於 4% 內，其對於實際模擬分析僅有微小差異，並不影響後續分析的結果，經評估本圖像處理方法的準確性，符合處理應變應力曲線之需求。



(a) 應變應力案例圖像



(b) 處理的應變應力曲線

圖 5 處理前後的應變應力曲線比較圖

表 1 實驗與圖像處理之應力數值差異比較表

應變率 (%)	實驗應力值 (MPa)	實驗楊氏係數 (MPa)	圖像處理應力值 (MPa)		應力值		楊氏係數	
			應力值	楊氏係數	差值 (MPa)	誤差 (%)	差值 (MPa)	誤差 (%)
10	0.28	2.80	0.29	2.90	0.01	2.96	0.10	3.45
20	0.65	3.25	0.64	3.20	-0.01	-1.31	0.05	-1.56
50	1.68	3.36	1.64	3.28	-0.04	-2.21	0.80	-2.44
100	3.11	3.11	3.21	3.21	0.10	2.97	0.10	3.12

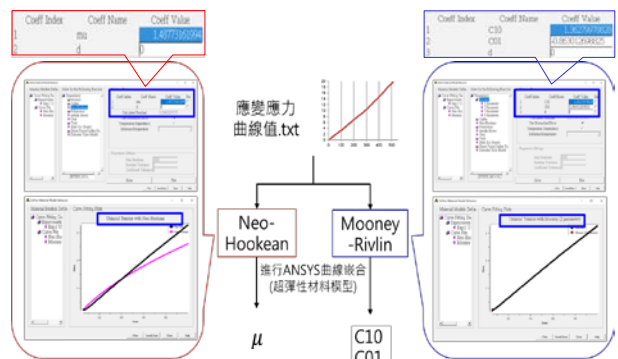


圖 6 超彈性材料曲線嵌合作業流程圖

3. 材料參數擷取與應用

橡膠材料常使用超彈性材料模型進行分析，本節將延續第 2 節的所擷取的應變應力曲線數據，應用超彈性材料模型進行曲線嵌合，獲得其材料分析模型的參數設定。

圖 6 為超彈性材料曲線嵌合作業流程圖，本節針對 0~10%、0~20%、0~50%與 0~100%之應變率的曲線進行曲線嵌合，使用 Neo-Hookean 與 Mooney-Rivlin 兩種超彈性材料模型進行曲線嵌合，可分別獲得初始剪切彈力模數(Initial shear modulus) μ 與 C10、C01 值。

根據 Jakes[10]文中分別提到超彈性材料模型 Neo-Hookean、Mooney-Rivlin 的材料參數與等效楊氏係數 E_{NH} 與 E_{MR} 的關係式：

$$E_{NH} = 3\mu \quad (5)$$

$$\text{if } \nu = 0.5, k_0 = \infty, d=0$$

$$\nu = \frac{3k_0 - 2\mu}{6k_0 + 2\mu}$$

$$k_0 = \frac{2}{d}$$

$$E_{MR} = 6(C10 + C01) \quad (6)$$

$$\text{if } \nu = 0.5, k_0 = \infty, d=0$$

$$\nu = \frac{3k_0 - 2\mu}{6k_0 + 2\mu}$$

$$k_0 = \frac{2}{d}$$

其中， ν 為蒲松比、 k_0 為初始體積模數(Initial bulk modulus)、 d 為不可壓縮參數(Incompressibility parameter)。

經由曲線嵌合所獲得的超彈性材料參數與推算之等效楊氏係數彙整於表 2，將於第 4 節使用應變率 0~50%與 0~100%進行兩刷膠條靜力分析之材料設定，觀察使用不同材料模型設定方法的差異。

4. 實務應用：兩刷膠條靜力分析

橡膠材料廣泛使用於兩刷的膠條，其透過兩刷臂施加下壓力於兩刷支架，傳遞力量將膠條壓在擋風玻璃上進行刷拭，然而膠條受壓的變形特徵、兩刷角度與刷拭品質有關，本節將使用一種典型的膠條截面進行靜力分析，探討分別使用不同材料模型對於刷拭角度模擬的差異。

圖 8 為兩刷膠條之靜力分析流程圖，首先將橡膠拉伸試驗獲得的結果進行圖像處理，可獲得應變應力數據，並透過 ANSYS 軟體進行超彈性材料模型的曲線嵌合，獲得材料參數，其包含 μ 或 C10、C01 值，

接續建構兩刷膠條分析模型，進行靜力分析設定，可得膠條截面受壓的變形特徵圖與下壓力-刷拭角度關係曲線。圖 9 為膠條受壓之位移變形與刷拭角度示意圖，由圖左至右依序增大下壓力，由變形圖可知，膠條截面隨著下壓力的改變，會呈現不同的變形型態，而刷拭角度為膠條刀口與玻璃呈現的夾角，此角度變化將接續探討。

圖 10 為不同材料模型之膠條刷拭角度曲線圖，由刷拭角度曲線可知，兩刷膠條使用超彈性材料模型與等效 E 值兩者的刷拭角度相近。然而分別使用實驗的 50%應變率對應之拉應力值與兩種超彈性模型於 0~50%的應變率之材料參數進行刷拭角度靜力分析可知，使用實驗的 50%應變率對應之拉應力值之刷拭角度分析結果分佈於兩種超彈性材料之間；若分別使用實驗的 100%應變率對應之拉應力值與兩種超彈性模型於 0~100%的應變率之材料參數進行分析，則使用實驗的 100%應變率對應之拉應力值之刷拭角度分析結果幾乎與 Mooney-Rivlin 材料模型重疊。經由不同材料模型的刷拭角度分析結果比對發現，相同應變應力曲線數據，採用不同的應變範圍與材料模型，會影響分析的結果，實務上選用何種材料模型與應變率範圍較為恰當，還需要透過實驗進行驗證。

表 2 不同材料模型的材料參數表

實驗應力值(MPa)		超彈性材料模型曲線嵌合之材料參數與等效楊氏係數(MPa)					
應變率 (%)	$E_{n\%}$	應變範圍 n(%)	Neo-Hookean		Mooney-Rivlin		
			$\mu_{n\%}$	$E_{NHn\%}$	C10 _{n%}	C01 _{n%}	$E_{MRn\%}$
10	2.80	0-10	1.17	3.51	-2.06	2.86	4.80
20	3.25	0-20	1.19	3.57	0.84	-0.28	3.38
50	3.36	0-50	1.32	3.98	1.31	-0.81	3.05
100	3.11	0-100	1.48	4.46	1.36	-0.86	2.99

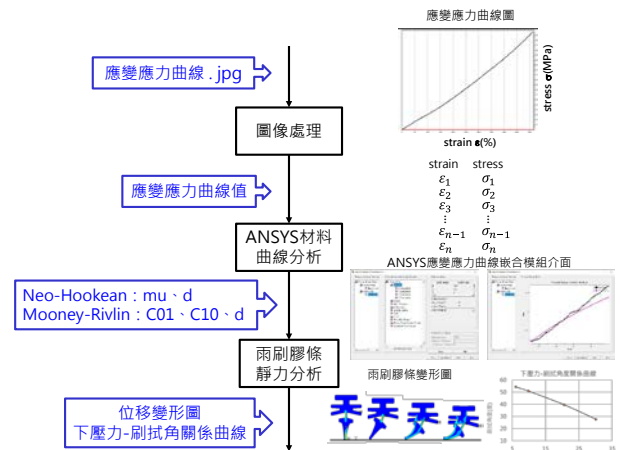


圖 8 兩刷膠條靜力分析流程圖

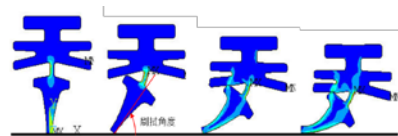
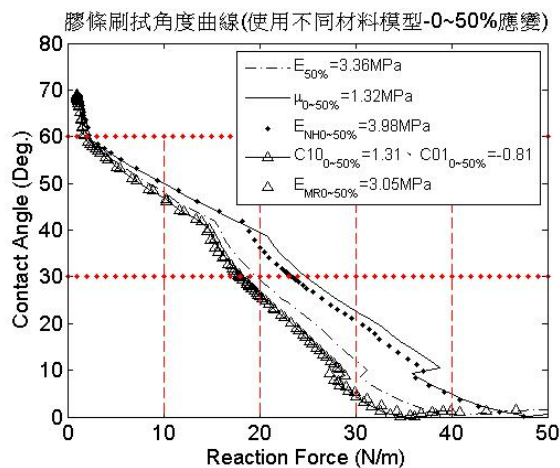
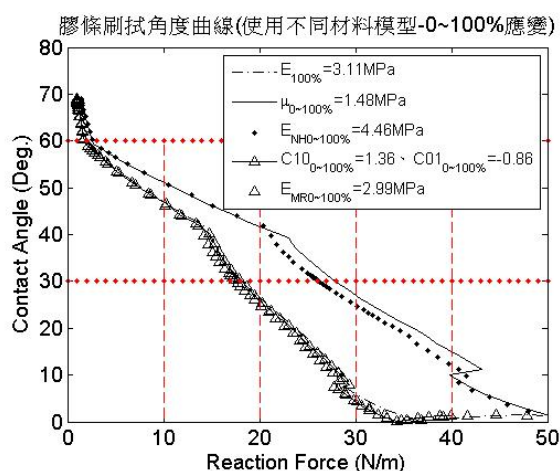


圖 9 膠條受壓之位移變形與刷拭角度示意圖



(a) 分析使用 0~50% 應變率範圍



(b) 分析使用 0~100% 應變率範圍

圖 10 不同材料模型之膠條刷拭角度曲線圖

5. 結論

本文應用圖像處理技術，發展應變應力曲線之自動化辨識程式模組，由拉伸試驗取得的二維曲線圖，透過一系列圖像處理方式，可以成功轉換得到全區域的應變與應力對應數據。進而，可應用於有限元素分析軟體進行超彈性材料模型的模擬分析，結論如下：

1. 圖像處理擷取之應變應力數值與設備實驗值之差異值微小，能符合處理應變應力曲線的需求。
2. 使用超彈性材料模型與等效E值進行刷拭角度分析，兩者相近，同步驗證等效E值關係式套用於兩刷膠條分析的合理性。
3. 開發的圖像處理程序，未來可以應用於其他 2D 曲線圖像識別，本文所進行之材料分析模式，也能應用於其他非線性材料的分析設定參考。

6. 參考文獻

1. R. Puri, A. Gupta, M. Sikri, Contour shape and color detection using open cv–python, International Journal of Advances in Electronics and Computer Science, Vol. 5, No. 3, pp. 21-22, 2001
2. 王中行, 蕭偉宗, 影像辨識在彈性製造系統上應用之研究, 大葉學報, 第九卷, 第一期, 第 41-49 頁, 2000
3. 蔡明俊, 韋志昇, 魏緒強, 應用影像處理技術於模具邊界幾何特徵辨識, 碩士論文, 國立成功大學機械工程學系, 台南、台灣, 1997
4. W. H. Huang, C. L. Tan, S.Y. Sung, Y. Xu, Vertical bar detection for gauging text similarity of document images, Document Analysis and Recognition, No. 4, pp. 640-643, 2001
5. 趙秀錦, 侯學輝, 圖像處理在零件檢測中的應用, 微計算機信息, 第 24 卷, 第 8 期, 第 306-307 頁, 2008
6. 蔡孟勳, 林俊佑, 連震杰, 麥朝創, 應用影像疊圖技術之刀具磨耗檢測, 機械工業雜誌, 432 期, 第 45-48 頁, 2019
7. 狄德英, 陳志敏, 陳梅琴, 圖像處理在指紋識別中的實踐, 西昌學院學報, 第 23 卷, 第 4 期, 第 72-74 頁, 2009
8. 王福彬, 李迎燕, 劉杰, 陳至坤, 基於 Open cv 的機器視覺圖像處理技術實現, 機械與電子, 第 6 期, 第 54-57 頁, 2010
9. A, Ahmed, Novel experimental characterisation of hyperelastic materials, Ph.D. Dissertation, Materials and Engineering Research Institute, Sheffield Hallam University, England, 2018
10. R. Jakel, Analysis of hyperelastic materials with MECHANICA – Theory and application examples, Parametric Technology Corporation, PTC, Saxony, Germany, 2010

Application of Image Processing to Automatic Recognition of Strain-Stress Curve and Wiper Blade Analysis

Bor-Tsuen Wang¹, Chun-Lang Tsai²,
Jun-Wei Wang Jian¹, Yao-Kuang Tsai¹,
Ying-Hui Wu³

¹Department of Mechanical Engineering,
National Pingtung University of Science and
Technology

²Taiwan Yunyi Techonlogy Ltd.

³Machinery Division, National Nei-Pu
Senior Agricultural-Industrial Vocational
School

Abstract

Due to the limitation of tensile test equipment for rubber materials, only the image file is available as well as a few points of strain and stress data. For the nonlinear characteristics of rubber, there requires the numerical data for the strain-stress curve so as to perform finite element analysis (FEA). This work aims to apply the image processing techniques to develop the automatic recognition program in order to obtain the strain-stress data from the image file. The measured two dimensional curve image file is input to the program to do image binarization, dilation, erosion and etc. The numerical data of strain-stress curve can be successfully obtained and validated. Those data can then be applied to FEA software for the simulation of hyper-elastic material models, including Neo-Hookean and Mooney-Rivlin models. From the strain-stress curve data, the corresponding material parameters can be extracted and used to proceed the static analysis of wiper rubber blade. The rubber blade in different loadings can be more realistically simulated to obtain the deformation and performance index with the proper rubber material model. This work shows the automatic recognition process in obtaining the strain-stress data that is then applied to FEA software to set up the hyper-elastic material models. Therefore, the wiper rubber blade analysis can be performed accordingly. The developed image processing program can also be applied to other 2D curve image recognition and reduce the time and effort in data manipulation.

Keywords : Image processing, strain-stress curve, finite element analysis (FEA), hyper-elastic material model