

非侵入式之膝關節韌帶聲音訊號檢測系統

Analysis of Sound Signals for Ligament Diagnosis for Non-invasive

呂基亨

國立臺北科技大學
電腦與通訊研究所
chiheng@cgmh.org.tw

蔣亞恬

國立臺北科技大學
電腦與通訊研究所
t101418015@ntut.org.tw

段裘慶

國立臺北科技大學
電腦與通訊研究所
cctuan@ntut.edu.tw

摘要

在膝部傷害研究報告中發現韌帶是常受傷的部位，當肌腱剛斷裂時，若又併發膝部嚴重腫脹，此時單靠觸診有其困難，而超音波有其侷限性，核磁共振造影則因需長時間等候，而造成患肢產生肌肉萎縮現象。本研究以非侵入性檢測方式，利用自製電子聽診器搭配加速規進行量測，以膝關節中的聲音訊號為判斷，聲音訊號包含關節粗糙度、軟骨破損及其潤滑狀態等可以診斷的訊息。本研究藉由對受測者做伸展與屈曲的動作來記錄膝關節聲音訊號，利用快速傅立葉轉換濾除不必要的頻段，再以均方值使正常聲音訊號與韌帶受損聲音訊號兩者差異更大，並做為特徵參數，使用邏輯斯迴歸分析進行統計分析並將訊號分類，以判斷受測者的韌帶是否有損傷及其損傷程度。

關鍵詞：韌帶、膝關節、非侵入式、聲音訊號。

Abstract

Knee is one of the most important joint of human body, researches about knee injuries, ligaments injuries are always mentioned. Sonography has a limitation for these situations. The MRI examinations are expensive, not always available and time-consuming. In this research, we use a non-invasive method to detect ligament that if it is fracture or laceration. The detection tool is electronic stethoscope which was made by myself. We record the knee-joint sound to determine. The knee-joint sound include many diagnostic messages related to the roughness, breakdown and lubrication status. The subjects' knee-joint sound was record during extension and flexion. Then

using fast fourier transform filtering out unnecessary frequency range. And use the mean square that can make the sound signals of the stricken ligament more different than normal sound signals, then make the value be the characteristic value. Using logistic regression to analysis and classify sound signals to determine whether the subject's ligament get hurt and the extent of damage.

Keywords: Ligament, Non-invasive, Knee-joint sound.

1. 前言

膝關節是身體最重要的關節之一，對人體行動而言是不可缺少的，而韌帶的功能是讓膝關節穩定，主要由前、後十字韌帶和內、外旁系韌帶共同固定。在膝關節傷害研究報告中發現，韌帶是最常受到傷害[1]。膝關節韌帶常因疾病、運動或外傷撞擊而造成的傷害[2]，當膝關節瞬間受外力影響而造成關節發生上下、左右位移時，膝關節出現屈曲角度減少，與內側位移增加，其位移的幅度若大於韌帶所能承受的力道，則會造成韌帶和肌腱損傷。

韌帶受損，會造成膝關節不同程度的鬆脫，伴隨膝部疼痛、腫脹、膝關節不穩定，及24小時內會有血腫形成，並在每次運動後即伴隨關節腫脹疼痛，造成活動受限之生理影響，易導致膝關節之磨損速度加快，嚴重者會形成退化性關節炎[3][4]。研究調查發現，在美國15-25歲年輕運動員中，平均一年約有80,000到250,000人發生韌帶傷害[5]，且每年約有175,000人接受韌帶重建手術，其花費的金額高達2億美元[6]。

通常韌帶損傷者進入醫院求診，醫師會先對病患的患肢做理學檢查(Physical examination, PE)，判斷結果若疑似骨頭損傷會先照X光或

超音波檢查，如疑似韌帶損傷的患者，則安排進行磁共振攝影(Magnetic Resonance Imaging, MRI)，更進一步的檢查會使用關節鏡(Arthroscopy)。本研究目的在於避免病患患肢因腫脹疼痛而無法進行檢查的困擾，或是理學檢查對於初期膝韌帶疾病較難診斷，或必須利用關節鏡等侵入性的檢測方式才能檢查出正確位置。多數文獻在探討膝關節損傷卻少見提出韌帶檢測的方法，本研究在以非侵入性的檢查方式檢測病患膝關節韌帶，其機動性較高，能在每一間骨科門診安裝，操作簡易且即時讓病患了解患肢狀況。雖然沒有 MRI 精準，但能免除 MRI 等待時間，且不具侵襲性，沒有輻射線，且不需花費龐大人力操作及費用。

2. 文獻探討

韌帶檢測的方法很多種，目前各大醫院最常用的非侵入性檢測方法為理學檢查核磁共振造影檢測。近年已有許多學者對膝關節與韌帶檢測提出不同的方法，像是電腦斷層掃描(Computed Tomography, CT)以及膝關節訊號檢測。

2.1 電腦斷層掃描檢測

核磁共振造影為目前主要膝關節內部成像技術，並且在韌帶檢測臨床上是已被證明能有效了解韌帶損傷狀態[7][8]。近年來有許多學者立用電腦斷層掃描檢測韌帶撕裂傷，電腦斷層掃描是利用 X 光掃描搭配顯影劑做檢測，由於韌帶屬於軟組織不容易呈現在 X 光片上，所以是利用骨頭間的或是半月板的距離來觀察韌帶損傷程度。Vande Berg 等人[9]利用雙螺旋電腦斷層掃描造影針對前十字韌帶以及半月板病變檢測效果研究，研究發現在掃描前，讓病患膝關節做全範圍的屈曲動作，能有效增加檢測效果，可以清楚分辨出韌帶斷裂與否，但是撕裂傷的判斷能力較差。

電腦斷層掃描因為要注射顯影劑所以有輻射線的疑慮，較適用於半月板的檢測，不適用於韌帶損傷檢測。

2.2 膝關節訊號檢測

許多文獻證明膝關節所發出的訊號是可以使用非侵入性的方式判斷膝關節內部的狀態，像是關節的粗糙度、骨頭軟化、軟骨破損、韌帶損傷及關節軟骨表面潤滑狀態[10][11]。目

前膝關節檢查相關研究文獻所使用的分析方法分為兩種，一種是利用關節振動訊號(Vibroarthrographic signals, VAG)，另一種則是使用膝關節聲音訊號量測。Rangaraj 等人[12]針對膝關節動振動訊號做骨骼的粗糙度分析，判斷關節軟骨表面是否有破裂以及其潤滑狀態，此系統主要是運用在退化性關節炎的患者。VAG 的擷取是利用加速規(Accelerometer)並搭配示波器觀察其振動訊號，再將訊號傳送至電腦做分析。訊號分析與分類方法為使用幅狀基底函數類神經網路(Radial Basis Function Network, RBFN)，受測人數總共 85 人。

類神經網路特色是不需要演算法就能直接套用模型計算輸入與輸出值的關係，能快速的將病患膝關節訊號套入並得知是否有退化性關節炎，但模型必需先經過訓練，且訓練的資料庫數量要多，每個樣本有差異性，模型才夠完整能準確判斷。Wu 等人[13]利用小波轉換(Wavelet analysis)將 VAG 的時域與頻域分出個別分析，並使用 Turn-count 濾除大部份雜訊，閾值的設定很重要，如果閾值沒有設定好，會把重要特徵值也濾除掉。

根據 Rangayyan 的研究指出[14]，膝蓋在彎曲時會發出聲音，其聲音的大小與頻率和膝蓋的疼痛相關，此聲音表示膝關節中的軟骨磨損或是關節液的流失，骨頭表面變得更粗糙，使得膝關節在彎曲時所產生的摩擦變大而發出的聲音，膝關節磨損越嚴重的患肢所發出的聲音越大聲、頻率越高，且病患的疼痛感受更劇烈。因此膝關節所發出的聲音與其內部構造有相對應關係，所以聲音訊號做分析是可行的。

Lee 等人針對半月板損傷做研究[15]，使用 Hanbyul Meditec 電子聽診器並搭配電子測角儀檢測，使用類神經網路做分析。大部分文獻測量腳彎曲角度為 90° 至 0° 及彎曲週期為 2 秒或 4 秒內[16]，Lee 等人測量時間長度為 20 秒，時間越長所測量到的訊號細節越多，但操作不易，因為手動測量使得腿部擺動速度不一，時間越長越容易造成人為誤差的產生。由於本研究以韌帶為探討對象，其振動訊號沒有骨頭來的強烈，較不易收取，所以將使用聲音訊號做為檢測標的。

3. 方法與材料

本研究應用設定空間為醫師與護士於醫院門診間直接使用，所以硬體小巧且方便穿戴與

使用。

3.1 韌帶檢測硬體架構

本研究中採用自製電子聽診器，由傳統式聽診器與麥克風所組成，傳統式聽診器使用幼兒型聽診器 LongYue 01SOAL，麥克風為 Audio-Technica AT9903。研究中考量膝蓋表面非完全平整，較為平整的部分為上方髌骨與側邊靠近韌帶的位置，感測器在記錄訊號時，如果聽診頭太大，在膝蓋彎曲時會導致聽診頭無法完全服貼於皮膚上，訊號較容易受到外在環境影響且所紀錄之訊號將不完整，所以採用嬰兒型聽診器，聽頭直徑約 3.5 公分可改善上述

之問題。選用體積較小的麥克風，除了方便攜帶亦較容易與聽診器結合，AT9903 其頻率響應為 30 至 18KHz。為了使操作動作更準確加上角度測量的裝置，減少人為操作誤差，角度測量裝置使用加速規 ADXL330，並經由藍芽將訊號傳至個人電腦。

3.2 系統架構

本系統由兩個區塊所組成，一是膝關節聲音感測與角度測量之硬體架構區塊，另一部分則是聲音訊號分析之軟體演算區塊，如圖 1 所示。

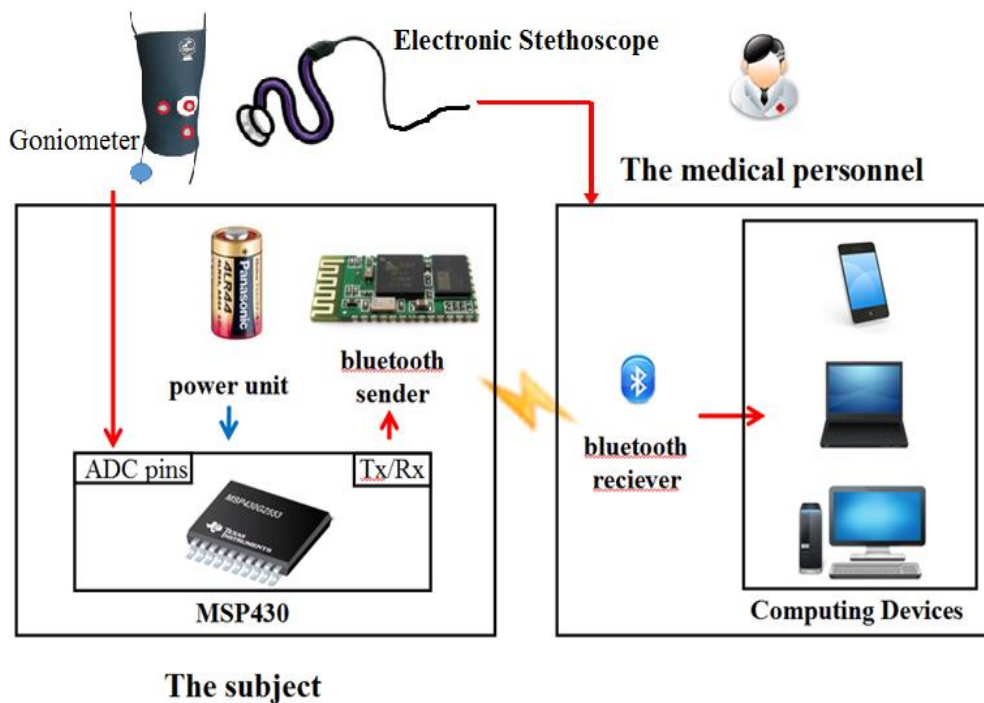


圖 1. 膝關節韌帶聲音檢測系統架構

聲音感測部分包含電子聽診器與加速規等。電子聽診器放置感測點有四點，分別是髌骨、小腿前側與旁系韌帶的位置。根據 Ji 等人研究[17]退化性關節炎檢測所置放感測器位置於患肢的髌骨上方，因為退化性關節炎主要受損部位是半月板等軟骨區域，皆位於髌骨內測，髌骨面積大且平整易放置感測，所以選擇放置於髌骨上。本研究所檢測部位為膝韌帶，膝韌帶分成四條，分別是前十字韌帶、後十字韌帶與兩條旁系韌帶，針對不同韌帶調整感測點放置位置，所以除了髌骨上方的感測點，也新增了小腿兩側的感測器放置位置，如圖 2。

經由電子聽診器收集到的訊號直接傳輸至電腦做運算分析。加速規將放置在小腿前側，使用 MSP430 控制晶片驅動並經由藍芽裝置傳輸至電腦，計算小腿擺動的角度，並與聲音訊號時間同步，經由個人電腦做訊號處理並呈現結果。

3.3 測量方式

受測者需坐在硬底的椅子，以防受測者因為軟椅子而身體歪斜造成測量困難。測量時，利用專用護膝將電子聽診器與加速規固定在測量點，如圖 2。測量角度為 0° 至 135° ，也

就是受測者下肢最大屈曲與伸展角度，有些膝關節受損的病患，因為其韌帶失去彈性，所以彎曲角度有限，檢測前將會先對受測者做屈曲角度檢測，防止患肢因為過度彎曲而造成二次傷害，如患肢無法完全伸展與屈曲的患者，受測時將加裝角度限制器限制最大彎曲角度，使檢測人員在操作時不會因為擺動幅度過大而傷害到患肢，為一安全裝置。測量週期 4 秒為一個運動範圍(Range of motion, ROM)，運動範圍為下肢屈曲到完全伸展再至屈曲的動作過程[18]，測量方式為被動式，受測者不需自行做 ROM 的動作，由測試員幫助受測者抬腿使其下肢伸展與屈曲。



圖 2. 韌帶檢測圖

3.4 訊號分析

初始擷取聲音訊號頻率範圍為 30 ~ 18K Hz，每一個 ROM 週期為 4 秒，所以前兩秒為屈曲至伸展的動作，後兩秒則是伸展回復至屈曲的動作。聲音訊號將會先利用快速傅立葉轉換進行濾波，濾波範圍為 30 ~ 1K Hz，再進行振幅正規化處理，正規化成[0,1]，圖 3 為正常聲音初始訊號，圖 4 則是韌帶受損的聲音訊號。可以發現韌帶受損的膝關節聲音訊號振幅起伏明顯大於正常膝關節所量測的訊號。

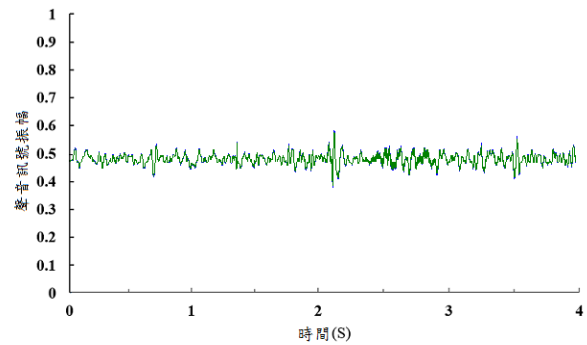


圖 3. 正常膝關節聲音訊號圖

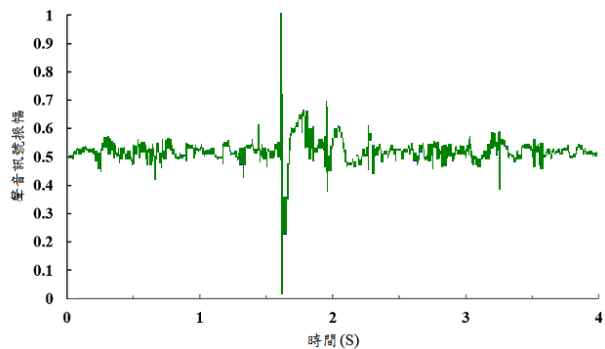


圖 4. 韌帶受損膝關節聲音訊號圖

訊號計算前會先將訊號做分割，依每週期 4 秒做為一個分割點，每次檢測共計做 10 個 ROM 的動作，最後計算將會去掉前三個週及最後三個週期訊號，因為一開始還不熟悉操作，訊號較不穩定，最後三個結尾訊號可能會因為操作者長期施力而造成手部痠痛或是結束動作所造成的雜訊影響。為使訊號特徵更明顯，更容易比較正常訊號與韌帶受損訊號的差異，本研究所使用的方法為均方值 (Mean-squared, MS) 計算聲音訊號，均方值計算快速、複雜度低，適合用在即時計算，並且此方法不必擔心其他文獻所使用方法的閾值設定的問題，本研究以每 5 ms 做為一區段。

$$MS = \frac{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_n^2}{n} \quad (1)$$

其中 s 為每個訊號點數值， n 為數值個數總合，本研究取樣頻率設定為 2 KHz，週期為 0.5ms，所以每 5ms 做為一次計算區段，每一區段計算值 n 為 10。經過均方值計算的聲音訊號能使得正常訊號與不正常訊號有更明顯變化與差異。均方值所計算的數值做為特徵參數，並使用邏輯斯迴歸分析 (Logistic Regression)。

$$P_{\text{ligament}} = \log \frac{e^{S_{\beta}}}{1 + e^{S_{\beta}}} \quad (2)$$

其中 P_{ligament} 為韌帶損傷發生機率，亦指受測者是否有韌帶損傷，其利用計算出的 p 值範圍即可得知受測者韌帶是否受損， S_{β} 為先前所計算出的特徵值。

4. 預計執行計劃

本計畫已通過本部某醫學中心之「102-3592B」人體試驗審核，預計先行招收十位受試者經由骨科主治醫師依理學檢查標準進行初步評估分類並收集膝部聲音訊號，透過訊號處理與迴歸分析以建立本系統之雛型。

再由門診招收二十位已經科學診斷方式確診為韌帶損傷之病患收集其膝部聲音訊號對本系統進行訓練，以提升可靠度；最後招收門診二十位未經確診之病患，於科學診斷之前先由系統進行膝部聲音訊號評估，再與確診結果進行比對，以驗證本系統之準確率。日後將收錄更多韌帶訊號樣本，不斷改進迴歸分析與分類模型，使系統更為完善。

5. 結論

膝關節聲音訊號相關研究眾多，大部分在討論退化性關節炎，少有討論韌帶檢測，但韌帶損傷較退化性關節炎更難檢測，韌帶撕裂傷利用理學檢查較難判定其狀態，韌帶為軟組織若使用超音波也難以分辨其組織是否受損。本研究之韌帶檢測系統，方便攜帶並且能放置於門診間，操作容易也不需大量的檢測時間。利用均方值的方法能使得正常聲音訊號與韌帶受損訊號差異更大，邏輯斯分析讓系統能判斷出受測者的韌帶是否損傷。未來會針對 ROM 週期以及特徵值的選取做調整，使系統檢測率更高。

參考文獻

- [1] 曾薇、王桂芸，”前十字韌帶重建手術對病人之身心影響及其照護”，*榮總護理*，Vol. 24(3)，pp. 244 -250，2007。
- [2] Waldén, M., Hägglund, M., Magnusson, H., and Ekstrand, J., “Anterior Cruciate Ligament

Injury in Elite Football: a Prospective three-cohort Study.” *Proceedings of the Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, Vol. 19, No. 1, pp. 11 -19, 2011.

- [3] 張世緯、張怡雯，”前十字韌帶損傷對下肢運動生物力學的影響”，*大專體育*，pp. 69 -75，2011。
- [4] Ahovuo, J., Paavolainen, P., and Slati, P., “Diagnostic Value of Sonography in Lesions of the Biceps Tendon,” *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Vol. 202, pp. 184-188, 1986.
- [5] Fang, C. L., Chen, I. C., Lin, Y. C., Yen, J. H., Ou, L. F., and Tang, Y. W., “Flexor Tendon Rupture Secondary to Golf-induced Hamate Hook Fracture-Case Report,” *中華民國整形外科醫學會雜誌*, Vol. 12, No. 4, pp. 283 -290, 2003.
- [6] Rangayyan, R. M. and Yunfeng, W., “Analysis of Knee-Joint Vibroarthrographic Signals Using Statistical Measures.” *Twentieth IEEE International Symposium on Computer Based Medical Systems*, pp. 377-382, 2007.
- [7] Dyck, P. V., Smet, E. D., Valérie Lambrecht, J. V., Gielen, J. L., Vanhoenacker, F. M., Lieven Dossche and Parizel, P. M., “Partial Tear of the Anterior Cruciate Ligament of the Knee: Injury Patterns on MR Imaging” *Proceedings of the Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, Vol. 20, No. 2, pp. 256 -261, 2012.
- [8] Kijowski, R., Sanogo, M. L., Lee, K. S., Muñoz del Río, A., McGuine, T. A., Baer, G. S. and De Smet, A. A., “Short-term Clinical Importance of Osseous Injuries Diagnosed at MR Imaging in Patients with Anterior Cruciate Ligament Tear,” *Proceedings of the Radiology*, Vol. 264, No. 2, pp. 531 -541, 2012.
- [9] Vande Berg, B. C., Lecouvet, F. E., Poilvache, P., Dubuc, J. E., Maldague, B., and Malghem, J. “Anterior Cruciate Ligament Tears and Associated Meniscal Lesions: Assessment at Dual-Detector Spiral CT Arthrography,” *Proceedings of the Radiology*, Vol. 223, No. 2, pp. 403 -409, 2002.
- [10] Mu, T., Nandi, A. K. and Rangayyan, R. M., “Strict 2-surface Proximal Classification of Knee-joint Vibroarthrographic Signals,” *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 4911-4914, August, 2007.

- [11] Umopathy, K. and Krishnan., S., "Modified Local Discriminantbases Algorithm and Its Application in Analysis Ofhuman Knee Joint Vibration Signals," *IEEE Trans Biomed*, Vol. 53, No. 3, pp. 517–523, 2006.
- [12] Rangaraj, M. R. and Yunfeng, W., "Analysis of Vibroarthrographic Signals with Features Related to Signal Variability and Radial-Basis Functions," *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 156–163, 2009.
- [13] Yunfeng, W., Krishnan, S., "Classification of Knee-joint Vibroarthrographic Signals Using Time-domain and Time Frequency Domain Features and Least-squares Support Vector Machine," *16th International Conference on Digital Signal Processing*, pp. 1-6, 5-7 July, 2009.
- [14] Rangayyan, R. M., Frank, C.-B., Bell, G.-D. and Smith, R., "Analysis of Knee Joint Sound Signals," *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE, Engineering in Medicine and Biology Society*, Vol. 2, pp. 712-713, 4-7 Nov., 1988.
- [15] Lee, S. O., Kim, K. S., Seo, J. H., Kim, K. S., Song, C. G., "The Acoustical Analysis of Knee Joint Sounds for Non-Invasive Diagnosis of Articular Pathology," *IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation*, pp.390-392, 2-4 Nov., 2005.
- [16] Dempsey, E. J., Bell, G. D. and Westwick, D. T., "Using System Identification to Model the Transmission of Vibroarthrographic Signals," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 718-721, 2004.
- [17] Ji, L. F. and Li, Y. R., "Diagnosis of Knee Osteoarthritis Based on Kalman Filter," *2012 Spring Congress on Engineering and Technology (S-CET)*, pp. 1-5, 27-30 May, 2012.
- [18] Shelbourne, K. D. and Gray, T., "Minimum 10-Year Results After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction How the Loss of Normal Knee Motion Compounds Other Factors Related to the Development of Osteoarthritis After Surgery," *The American journal of sports medicine*, Vol. 37, No. 3, pp. 471-480, 2009.