

活體阿基里斯腱之機械性質檢測

MECHANICAL PROPERTIES OF ACHILLES TENDON IN VIVO

李明機* 王崇禮** 邵耀華†

Ming-Chi Lee Chung-Li Wang Yio-Wha Shau

*研究生 **†教授

*† 國立台灣大學應用力學研究所

** 國立台灣大學醫學院骨科

*Graduate student **†Professor

*† Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

** Department of Orthopedics, College of Medicine, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Abstract

Non-invasive functional diagnosis of tendon and ligament in vivo is very important for clinical orthopedics. In this study, a modal testing system that combining the ultrasonic imaging and the accelerometers was used to estimate the resonant frequency of Achilles tendon. The Achilles tendon that connects with soleus, gastrocnemius muscle and calcaneus behaves like a “three stings system”. A physical model of the Achilles tendon has been constructed which reveals that the resonant frequency of the Achilles tendon in young human subjects is about 23.0Hz ~ 34.7Hz (N = 10). Fundamental resonant frequency correlates inversely with the length of the tendon and increases with its tension. A dimensionless state index (SI) was suggested to reflect the function of Achilles tendon after reconstruction. A higher SI represents a greater difference in resonant frequency between the compact Achilles tendon and the injured one.

Keywords: ultrasound, achilles tendon, mechanical properties, resonant frequency.

摘要

非侵襲性肌腱韌帶功能檢測技術對於骨科臨床醫學非常的重要。本實驗採用模態測試方法，利用超音波系統與加速度計系統結合，找出人體中最容易受傷的阿基里斯腱之共振頻率，作為臨床診斷的評估工具。基於阿基里斯腱在解剖學上同時連結了腓腸肌、比目魚肌與跟骨，可將其視為一個三弦聯結系統。本研究以三弦之力學理論應用於阿基里斯腱之生醫物理模型，以生理幾何參數評估阿基里斯腱的共振頻率。三弦之物理模型顯示成人阿基里斯腱共振頻率大約為 24Hz，而實驗研究顯示阿基里斯腱的共振頻率大約是在 23.0Hz ~ 34.7Hz 之範圍 (N = 10)，而且張力增加時，共振頻率有增加的趨勢。為反應阿基里斯腱之功能，我們提出狀態指標 SI 作為診斷與術後回復的依據：當 SI 之值愈大，代表受測者阿基里斯腱好壞邊的機械性質差異較大。

關鍵詞：超音波、阿基里斯腱、機械特性、共振頻率。

1. 研究動機與目的

對於臨床醫師來說：如何利用非侵襲性的方法診斷肌腱韌帶的「健康狀態」，例如：太緊、太鬆、鈣化、部分斷裂等等，一直是非常重要的課題。人體之阿基里斯腱 (Achilles tendon) 在組織解剖學位於小腿下緣部位，其上緣部位是由腓腸肌 (Gastrocnemius) 與比目魚肌 (Soleus) 延伸而來，另一端則附著在跟骨 (Calcaneus) 表面 (圖 1)。而阿基里斯腱所連結之腓腸肌與比目魚肌乃是小腿部位中最大且最強的兩

個肌肉群 [1]。

阿基里斯腱在外觀上呈現類似橢圓形的長束狀態，由於其外層部分有一肌腱膜包圍著，其表面是光滑而白亮的。阿基里斯腱的材質相當堅韌，是骨骼與肌肉間力量傳遞的橋樑。阿基里斯腱是由一群單方向排列整齊的膠原蛋白 (Collagen) 嵌入在凝膠狀 (gelatinous) 物質中。其組成大致上為三部分：2% 的彈性纖維 (Elastin)、30% 的膠原蛋白 (Collagen) 以及水分。而阿基里斯腱之應變量範圍大約是在 0 ~ 8% 之中，當其應變量超過 8% 時便可能造成斷裂的情形。因此，應該要避免過度的伸展 [2]。大部分 (44 %

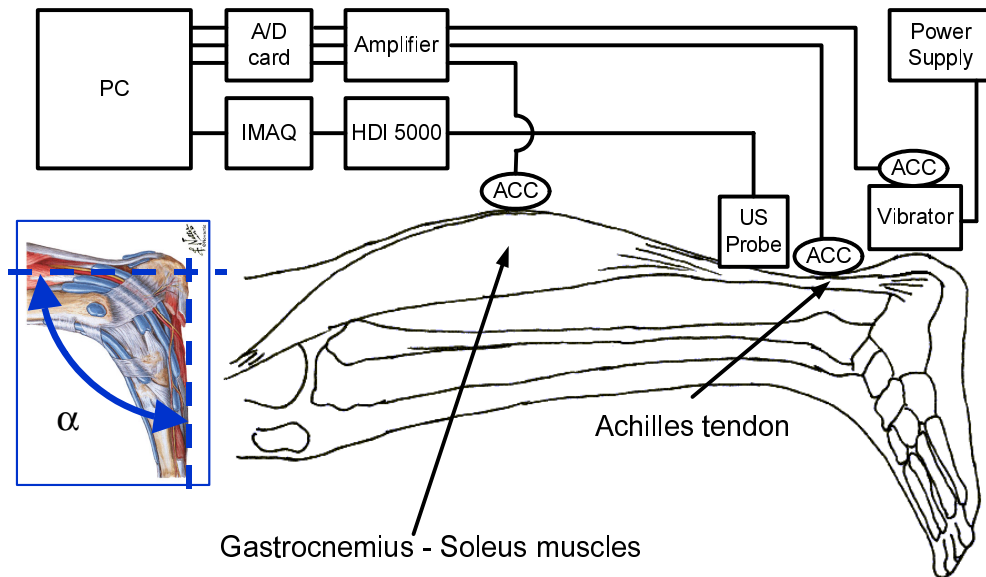


圖 1 活體阿基里斯腱共振頻率實驗之示意圖，在組織解剖學上阿基里斯 (Achilles) 腱位於小腿下緣部位，其上緣部位是由腓腸肌 (Gastrocnemius) 與比目魚肌 (Soleus) 延伸而來，另一端則附著在跟骨 (Calcaneus) 表面

Fig. 1 Schematic of apparatus for the resonant frequency of Achilles tendon in vivo. Anatomically, the Achilles tendon connects the Gastrocnemius and Soleus muscles to the Calcaneus

~ 83%) 的阿基里斯腱斷裂是發生在運動的過程之中，尤其是因為進行羽毛球運動而受傷的比例是所有運動中最高的；再者，阿基里斯腱斷裂的人大部分是男性患者。很明顯地，男性患者阿基里斯腱斷裂的比例相對於女性患者是相當高的 (1.7 : 1 ~ 12 : 1)；另外，左腳阿基里斯腱斷裂的比例比右腳高；而且大部分是發生在 30 ~ 40 歲之中的男性居多。而探究其成因，不外乎是運動方式不當或是阿基里斯腱老化的關係 [3]。

阿基里斯腱是人體中尺寸最長且強度最強之肌腱韌帶，其長度大約是 $5 \sim 6\text{cm}$ ，其橫切面之長軸長度約為 $12 \sim 15\text{mm}$ ($12.9 \pm 1.8\text{mm}$)，而其短軸長度約為 $5 \sim 7\text{mm}$ ($5.3 \pm 0.8\text{mm}$)。若將阿基里斯腱考慮為膠原蛋白的組成：其 E 值大約為 $1 \times 103\text{MPa}$ ，極限拉伸應力為 $50 \sim 100\text{MPa}$ ，堪稱軟組織中較強韌的肌腱 [4, 5]。本研究利用模態測試 (Modal Testing) 的方法結合超音波之非侵入式特色，藉著肌腱韌帶之共振頻率 f_n ，用來作為快速臨床診斷與評估工具。然而，有鑑於人體內肌腱韌帶的數目繁多，現階段以人體足部的阿基里斯腱 (Achilles tendon) 為重點。因此處是人體中最大、最容易受傷以及鈣化發生的部位。也因此人體阿基里斯腱之共振頻率 f_n 指標對臨床診斷依據有重要價值。

2. 研究方法

我們將阿基里斯腱視為一個「三弦模型」：一條分叉的弦，其三端固定，而中間相連結（圖 2）。在修正與改良 Alessandrini 等人 [6] 之三弦模型的理論方程式後，可以作為阿基里斯腱之物理模型，在此弦與弦的夾角近乎平行。

$$\begin{aligned} & (T_1 \beta_1) (\cos \beta_1 L_1) (\sin \beta_2 L_2) (\sin \beta_3 L_3) \\ & + (T_2 \beta_2) (\sin \beta_1 L_1) (\cos \beta_2 L_2) (\sin \beta_3 L_3) \\ & + (T_3 \beta_3) (\sin \beta_1 L_1) (\sin \beta_2 L_2) (\cos \beta_3 L_3) = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

$$\text{三弦系統之特徵頻率 } \omega^2 = \frac{T_1}{\mu_1} \beta_1^2 = \frac{T_2}{\mu_2} \beta_2^2 = \frac{T_3}{\mu_3} \beta_3^2 \quad (2)$$

上述方程式 (1) 與 (2) 即為阿基里斯腱之物理模型的理論方程式，其中 T 為張力， μ 為肌腱的質密度， β 為特徵值。我們引用參考文獻 [1,4] 中所提及之阿基里斯腱參數，例如：極限拉伸負載 (failure load)、應變量 (strain) 等等，並估計其數值 (如表 1 所示)。將其帶入所推導之阿基里斯腱之物理模型，所計算阿基里斯腱共振頻率之理論值約為 24Hz；而約在 38Hz 上出現阿基里斯腱的第二共振諧頻 (圖 3)。本實驗主

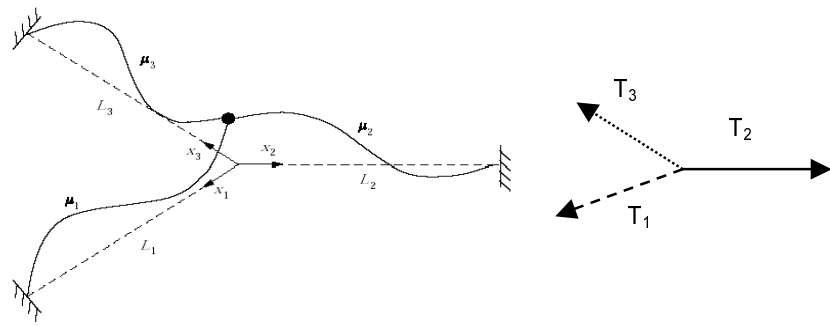


圖 2 人體阿基里斯腱之物理模型：下標「1」代表比目魚肌 (Soleus muscle)；「2」代表阿基里斯腱 (Achilles tendon)；「3」代表腓腸肌 (Gastrocnemius muscle)

Fig. 2 Physical model of Achilles tendon, subscript [1] represent the Soleus muscle; [2] Achilles tendon; [3] Gastrocnemius muscle

表 1 人體阿基里斯腱周邊組織相關參數之估計值

Table 1 Anatomical parameters of soft tissues surrounding the Achilles tendon

中文名稱	英文名稱	Tension (N)	Mass (g)	Length (cm)
比目魚肌	Soleus	480	600	30
阿基里斯腱	Achilles tendon	1200	6	8
腓腸肌	Gastrocnemius	720	1000	40

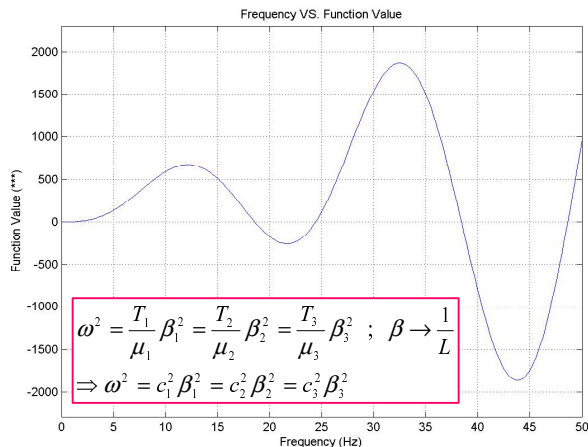


圖 3 以三弦物理模式分析人體阿基里斯腱共振頻率：17Hz 是小腿肌肉群的共振頻率；24Hz 是阿基里斯腱的共振頻率；而 38Hz 是阿基里斯腱的第二共振諧頻

Fig. 3 Resonant frequencies of Achilles tendon predicted by three-string physical model: 17Hz is the resonant frequency of the muscles at the lower legs; resonant frequency of the Achilles tendon is located at about 24Hz, whereas 38Hz is its second harmonics

要是量測一般正常年輕人之活體阿基里斯腱的共振頻率。也因此，我們選定阿基里斯腱沒有受傷的男性受測者共 10 人，記錄其姓名、年齡、身高、體重、

以及阿基里斯腱長度等相關資料。其中阿基里斯腱長度 (L) 之定義為超音波影像圖中，下跟骨至比目魚肌下緣的距離，超音波也同時紀錄阿基里斯腱之截面尺寸。並紀錄受測者之「小腿」與「腳底板」之間的角度 (α)。

我們使用不同的供應電壓，可以使振動馬達產生不同的振動頻率。先用較高頻的振動頻率 (約 30Hz)，振動阿基里斯腱約 3 分鐘以抒解肌腱內應力 (preconditioning)。將 HDI 5000 之超音波探頭固定於特定之機械手臂上，並將其置於阿基里斯腱上，但不可接觸到皮膚。我們利用超音波之杜卜勒模式 (Doppler mode) 觀察阿基里斯腱之振動速度。而且將三個加速度計分別放置在阿基里斯腱、腓腸肌與振動馬達上，以便取得相關位置之振動訊號 (圖 1)，且重複三種不同腳踝角度，分別為：100° (foot straightening, -10°)、90° (neutral, 0°)、85° (foot bending, 5°)。本實驗同步取得阿基里斯腱在外力驅動頻率下之超音波都卜勒振動平均速度、阿基里斯腱之加速度振幅、腓腸肌之加速度振幅、振動馬達之振動頻率與輸出至跟骨之力量參考值等資料。

3. 實驗結果與討論

3.1 活體阿基里斯腱的共振頻率

在利用加速度計所量到之阿基里斯腱共振頻

率，由代表性受測者 100° 、 90° 、 85° 等不同角度 (α) 下分別為 28Hz、31Hz、34Hz (如圖 4 所示)，所得到之三條頻譜曲線，都是很平滑的 (smooth)、而且重複性一致。再者，當角度由 100° 往 85° 減少時，代表著阿基里斯腱所受的張力逐步地增加，而其頻率反應部分有逐漸往高頻的趨勢，這是符合物理的現象：張力的增加，會使得系統之自然頻率的增加。將全部十位受測者用超音波系統所量測到的結果與資料整理於表 2 之中，而其所顯示之阿基里斯腱之共振頻率大約是在 29.3Hz ~ 30.7Hz，而且有角度愈小 (張力越大)，共振頻率值愈大的趨勢。

超音波系統所量測到的結果顯示，阿基里斯腱之共振頻率大約是在 29.0Hz ~ 30.2Hz，而且有角度愈小 (張力越大)，共振頻率值愈大的趨勢 (圖 5)。在其最高點所對應之頻率值與加速度計系統所得的共振頻率值，幾乎是一致的，兩者之間的相關係數值都大於 0.94 以上。

3.2 人體組織之共振頻率

Wakeling [7] 等人利用加速度計系統，配合振動平台，以脈衝 (Pulsed) 與連續 (Continuous) 的方式量測活體大、小等四個肌肉群 (Tibialis anterior、Triceps surae、Quadriceps、Hamstrings)，而其共振頻率的範圍大約落在 14.5Hz ~ 20.0Hz 之間。因為在振動阿基里斯腱的過程中，無法單純的僅激發阿基里斯腱的共振狀態，勢必也會激發旁邊小腿肌肉群的共振頻率。這部分的共振頻率範圍是值得注意，應可作為類似研究之比對。而且在實驗過程中，確實也發現到：當振動馬達的頻率在 16Hz ~ 20Hz 時，可清楚看到受測者小腿肌肉群有明顯的振動現象，故認為這個現象有可能是小腿肌肉之共振頻率。所以我們相信，在圖 3 中所出現之「第一個交點」，大約是 17Hz 附近，應為小腿肌肉群之共振頻率 (與 Wakeling 等人之實驗結果相吻合)；而其「第二個交點」，大約是 24Hz 附近，應為阿基里斯腱之共振頻率 (Resonant Frequency)。這是因為，在一個串聯的系統中，並無法真正將各個物體之間的共振頻率分離出來，而只能以一個「綜合」的系統的共振頻率表現之。

但對於一物理現象而言：質量較大而柔軟者通常是振動反應在低頻的部分，而質量較小而堅硬的材質通常是振動反應在高頻的部分。因此，基於上述之理由做一推測：對於阿基里斯腱「系統」而言，其第一共振頻率 (基頻) 應該是在 17Hz 附近 (如圖 3 所示)，但考慮小腿肌肉群與阿基里斯腱之間質量的差異，其效應主要反應在小腿肌肉群的部分。因此，我們採用其第二共振頻率 (諧頻在 24Hz 附近) 作為阿基里斯腱共振頻率，而在其後方之「第三個交點」，大約在 33Hz 附近，應可視為另一個諧頻。並與後來

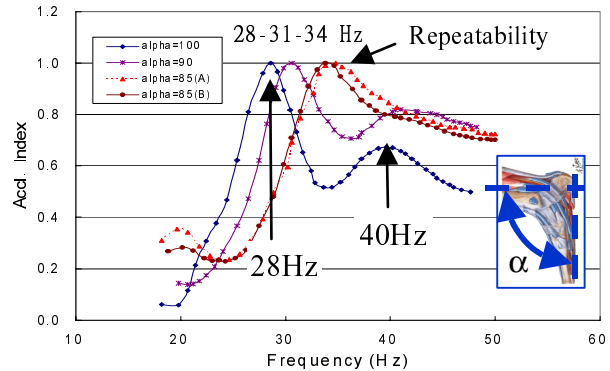


圖 4 代表性受測者之阿基里斯腱之頻譜分佈圖
Fig. 4 Typical resonant spectrum of Achilles tendon that shows good repeatability

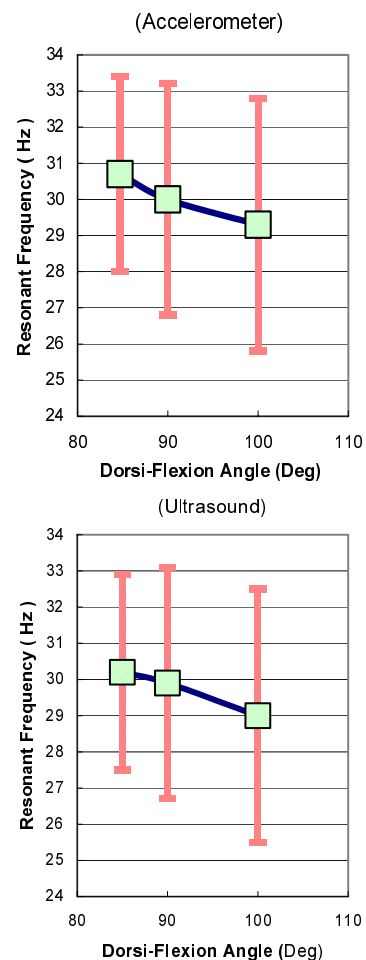


圖 5 共振頻率與腳踝角度 (張力) 之關係，加速度計 (左)；超音波 (右) 角度越小 (張力越大)，共振頻率越高

Fig. 5 Achilles tendon resonant frequency decreases with the increase in dorsi-flexion angle of the ankle (tension increases). Comparison of resonant frequency detected by using accelerometer (upper) and the resonant frequency detected by using ultrasound (bottom)

利用加速度計系統與超音波系統所量測之實驗值 (大約在 28Hz 附近), 發現其範圍是相當接近的。甚至, 我們在圖 4 看到「第三個交點」的諧頻產生, 約為 39 ~ 40Hz。也因此, 利用此一「三弦模型」作為阿基里斯腱的物理模型, 應該是可靠的。

在實驗的過程中, 我們注意到放置於跟骨之上的振動馬達在振動過程之中, 有時會有「雙擊」(double hit)現象的產生, 這有可能是因為跟骨的振動跟不上振動馬達的反應所造成的。因此, 在分析資料時, 應注意此一現象, 以免出現振動頻率誤判的情形。

再者, 比較先前許多專家學者的研究, 我們認為: 人體中各個器官或組織都應存在其特有或相關之結構共振頻率, 而此共振頻率值的大小亦可反應出各個器官或組織的材質的狀態。例如: 牙齒 (硬組織且尺寸小) 的共振頻率約為 1,000Hz 左右, 而長骨 (硬組織但尺寸長) 的共振頻率約在 300Hz ~ 600Hz 之間, 阿基里斯腱 (軟組織且質量小) 之共振頻率約為 23Hz ~ 38Hz, 而小腿肌肉群 (軟組織但質量大) 之共振頻率約在 24Hz 附近。而先前許多研究都已經指出: 在硬組織 (如骨骼、牙根) 中利用共振頻率的變化可以作為臨床上診斷的指標。因此, 在不久的將來, 可以利用共振頻率的改變亦可用於臨床中肌腱韌帶健康狀態的評估之上。

Borisovich [8] 等人將加速度計系統置於阿基里斯腱外的皮膚之上, 藉以取得阿基里斯腱的共振頻率, 以診斷阿基里斯腱的斷裂與修復後的持續控制問題。在三種不同角度下 (foot bending, 20°、neutral position, 0°、foot straightening, -40°), 亦即三種不同的張力下, 其量測阿基里斯腱之共振頻率大約落在 32Hz ~ 78Hz (N = 30) 的區間之中。他們並且利用阿基里斯腱之共振頻率的頻移, 作為阿基里斯腱受傷程度的依據。Borisovich 等人所量測到的資料中, 有位阿基里斯腱斷裂的病患經過手術修補後之共振頻率, 在某些角度會達到 53Hz; 而好邊共振頻率更高達 78Hz 左右, 與本研究所量測到的值 23.0Hz ~ 34.7Hz, 有明顯的差距。探究其原因, 可能是 Borisovich 等人所取的共振頻率值是阿基里斯腱較高頻的諧頻部分, 因為由其列舉的頻譜圖中不難發現, 在其所選取的峰值前端都會出現更低頻的峰值, 而我們認為前端的值才是阿基里斯腱的基頻部分。再者, 我們將 Borisovich 等人發表之頻譜圖修正, 假設為簡諧運動, 將加速度計振幅正規化為位移的單位, 可發現其所謂之最高點峰值皆有往低頻方向移動之現象, 而觀察其共振頻率值的範圍大約是在 20Hz ~ 41Hz 之間, 與目前活體實驗中所量測之範圍 23Hz ~ 34Hz 大致是相同的。本文之實驗結果在 39 Hz 附近有峰值; 而在理論值的部分, 也指出 38Hz 附近有第二峰值, 故可其視為阿基里斯腱之第二諧頻。探討

Borisovich 等人利用阿基里斯腱頻譜圖上峰值出現的個數作為一診斷指標, 是值得商榷的。有可能是因為其他的因素而造成峰值個數的減少, 否則就一系統的物理現象而言: 在某段頻寬之下, 其各個相關諧頻出現的個數應該相同。而將加速度計放置於皮膚之上, 用以量測阿基里斯腱的振動訊號, 有可能會造成訊號振幅的縮小, 因此在分析時應注意。

在此, 我們提出一無因次化之狀態指標 (state index) 如下: $SI = \Delta f_{n(85^\circ)} / \Delta f_{n(90^\circ)}$ 其中 $\Delta f_{n(90^\circ)}$; $\Delta f_{n(85^\circ)}$ 分別代表 90°與 85°角度下同一位受測者正常的韌帶與受傷之共振頻率差異值。當 SI 之值愈大, 則代表阿基里斯腱好邊與壞邊之共振頻率差值較大, 亦代表兩邊之阿基里斯腱狀態差異大, 所以顯示其受傷或病變的可能性愈大。

4. 結 論

本研究建立了阿基里斯腱之物理模型, 進一步估計阿基里斯腱共振頻率之理論值, 而將相關的參數帶入所推導之方程式中, 便可算出阿基里斯腱的共振頻率大約是落在 24Hz 附近, 並解釋阿基里斯腱共振頻率中各個峰值之物理意義。正常成人活體實驗求得阿基里斯腱之共振頻率範圍在 23Hz ~ 38Hz, 與理論值 (24Hz) 相近。本研究證實超音波系統是可以聚交於深層肌肉, 量測肌腱韌帶組織之共振頻率, 所以日後可能可以更進一步的量測其他深部軟組織的共振頻率。

誌 謝

本研究感謝台大醫學院骨科、復健科多位醫師的指導與協助, 國科會經費補助, 計畫編號: NSC 91-2314-B-002-252, 特此感謝。

參考文獻

- [1] C. C. Teitz, "Tendon problems in athletic individuals," *The Journal of Bone and Joint Surgery*. Vol. 79A, No. 1, 1997, pp. 138-152.
- [2] N Maffulli, "Rupture of the Achilles tendon - current concepts review," *The Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 81A, No. 7, 1999, pp. 1019-1036.
- [3] M. Paavola, "Ultrasonography in the differential diagnosis of achilles tendon injuries and related disorders," *Acta Radiologica*. 39, 1998, pp. 612-619.
- [4] T. A. Wren, "Mechanical properties of the human Achilles tendon," *Clinical Biomechanics*, Vol. 16,

2001, pp. 245–251.

- [5] Y. C. Fung, *Biomechanic: Mechanical Properties of Living Tissues*, New York: Springer-Verlag, 1993, pp. 242–320.
- [6] J. L. Alessandrini, “Vibration modes in a string of three branches,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 219, No. 5, 1999, pp. 920–924.
- [7] J. M. Wakeling, “Muscle activity damps the soft tissue resonance that occurs in response to pulsed and continuous vibrations,” *Journal of Applied Physiology*, Vol. 93, 2002, pp. 1093–1103.
- [8] M. L. Borisovich, “Testing vibration analysis of the Achilles tendon state,” 15th World conference on nondestructive testing, 2000, pp. 15–21.



李明機 (Ming-Chi Lee) 民國 1975 年生，1997 年私立逢甲大學航空工程學士，2003 年國立台灣大學應用力學研究所碩士，專長為臨床生物力學。



王崇禮 (Chung-Li Wang) 國立台灣大學醫學院骨科教授，民國 1954 年生，1994 年國立台灣大學醫學院臨床醫學研究所博士，專長為足踝外科，研究興趣在臨床生物力學、骨骼肌肉超音波檢測。



邵耀華 (Yio-Wha Shau) 國立台灣大學應用力學研究所教授，民國 1958 年生，1990 年美國德州大學奧斯汀校區航空太空工程博士，專長為極音速氣體動力學與熱流實驗，目前擔任醫工學程召集人，法務部法醫研究所法醫顧問，專攻臨床生物力學、醫學流體力學與生醫超音波檢測技術。