

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

非侵入性人體阿基里斯腱材質特性之研究(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2314-B-002-097-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學醫學院骨科

計畫主持人：王崇禮

計畫參與人員：邵耀華,王亭貴

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 28 日

非侵入性人體阿基里斯腱材質特性之研究 (2 / 3)

關鍵詞：超音波、阿基里斯腱、機械特性、共振頻率、功能指標

1、研究動機與目的

對於臨床醫師：如何利用非侵襲性的方法診斷肌腱韌帶的「健康狀態」，例如：強度、鈣化、部分斷裂等等，以決定病人可從事何種之復健及運動，一直是非常重要的課題。人體中阿基里斯腱 (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 (圖一)。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]。

而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 ~ 6 cm，其橫切面之長軸長度約為 12 ~ 15 mm (12.9±1.8 mm)，而其短軸長度約為 5 ~ 7 mm (5.3±0.8 mm)。若將阿基里斯腱考慮為膠原蛋白的組成：其 E 值大約為 1×10^3 MPa，極限拉伸應力為 50 ~ 100 MPa，堪稱軟組織中算是強韌的肌腱[2,3]。本研究利用模態測試 (Modal Testing) 的方法與超音波之非侵入式的特色，藉以找出人體肌腱韌帶之共振頻率 f_n ，用來作為臨床方面快速的診斷與評估工具。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「三弦模型」：一條分叉的弦，其三端固定，而中間相連結(圖二)。在修正與改良 Alessandrini 等人[6]之三弦模型的理論方程

式，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。

$$\begin{aligned} & (T_1\beta_1)(\cos\beta_1L_1)(\sin\beta_2L_2)(\sin\beta_3L_3)+ \\ & + (T_2\beta_2)(\sin\beta_1L_1)(\cos\beta_2L_2)(\sin\beta_3L_3) \\ & + (T_3\beta_3)(\sin\beta_1L_1)(\sin\beta_2L_2)(\cos\beta_3L_3)=0 \end{aligned} \quad (1)$$

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

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(如表一所示)。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24 Hz；而38 Hz出現阿基里斯腱的第二共振諧頻(圖三)。

3、實驗結果

活體阿基里斯腱的共振頻率

利用加速度計所量到之阿基里斯腱共振頻率，在代表性受測者100°、90°、85°等不同角度(α)下分別為28Hz、31Hz、34Hz(如圖四所示)，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是逐步地在增加，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二之中，而其所顯示之阿基里斯腱之共振頻率大約是在29.3 Hz ~ 30.7 Hz，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29.0 Hz ~ 30.2 Hz，而且有角度愈小(張力越大)，共振頻率值愈大的趨勢。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。

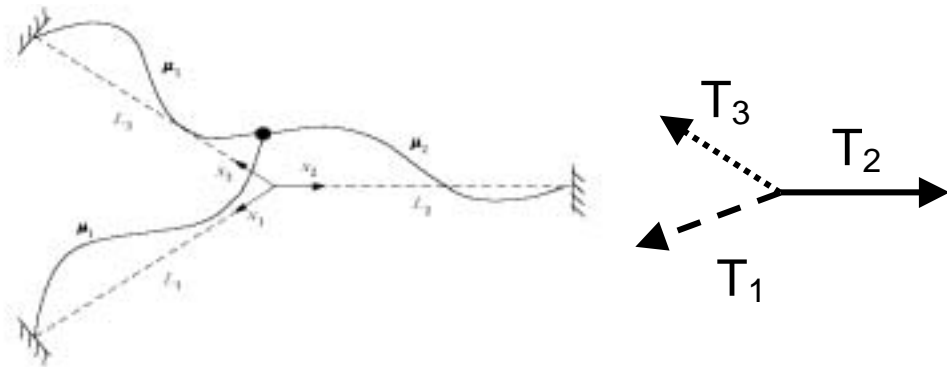
中文名稱	英文名稱	Tension (N)	Mass (g)	Length (cm)
比目魚肌	Soleus	480	600	30
阿基里斯腱	Achilles tendon	1200	6	8
腓腸肌	Gastrocnemius	720	1000	40

表一 人體阿基里斯腱周邊組織相關參數之估計值

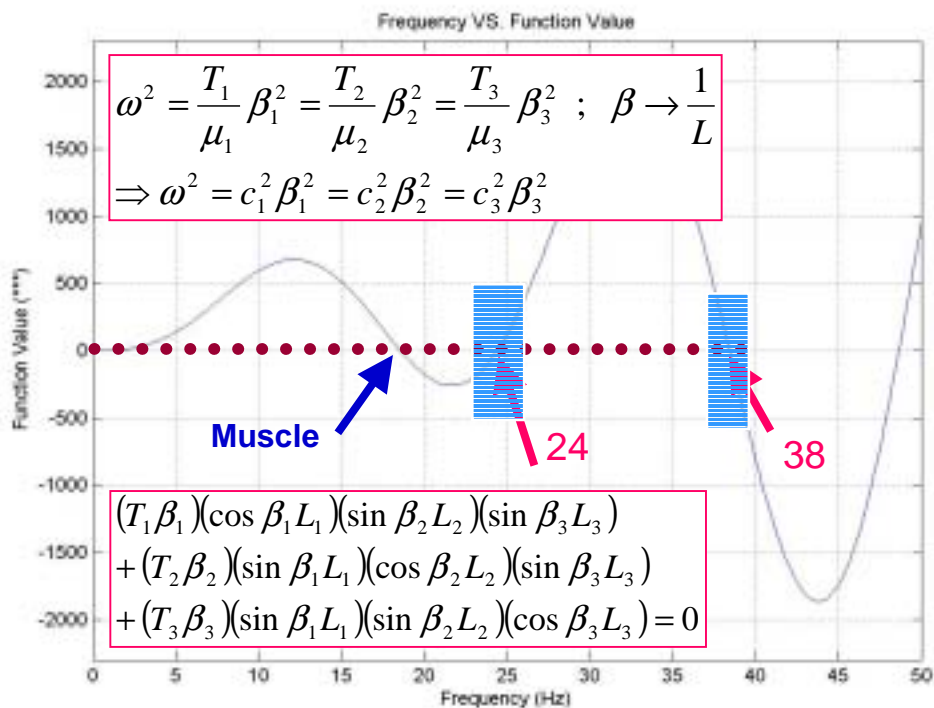
$$\alpha \downarrow \Rightarrow T \uparrow \Rightarrow f_n \uparrow$$

Patient No.	L-AT (cm)	HDI 5000 (RF)			Accelerometer (RF)		
		100	90	85	100	90	85
1	5.5±0.1	28.7±0.1	30.6±0.2	33.8±0.2	28.8±0.2	30.9±0.2	33.6±0.2
2	4.6±0.1	27.8±0.2	29.4±0.4	33.2±0.6	27.8±0.2	29.8±0.2	33.0±0.2
3	5.5±0.1	26.0±0.2	27.7±0.3	32.0±0.4	26.4±0.4	29.4±0.4	31.2±0.4
4	8.5±0.1	28.5±0.1	29.8±0.2	31.7±0.7	28.5±0.1	30.4±0.4	30.9±0.3
5	4.2±0.1	34.7±0.5	34.5±0.7	31.3±0.9	33.3±0.9	34.0±0.2	31.9±0.3
6	5.1±0.1	28.0±0.2	32.1±0.1	33.2±0.2	28.4±0.4	30.0±0.2	31.7±0.1
7	3.4±0.1	33.8±0.2	33.9±0.1	29.8±0.2	33.8±0.2	33.9±0.1	33.6±0.2
8	3.2±0.1	26.4±0.2	24.9±0.1	26.3±0.3	25.3±0.3	24.0±0.2	23.5±0.3
9	5.3±0.1	34.0±0.4	31.0±0.4	28.4±0.2	34.5±0.3	32.0±0.2	28.7±0.3
10	4.3±0.1	25.1±0.5	25.9±0.1	26.8±0.4	23.0±0.6	24.7±0.1	23.8±0.4
Mean	5.0	29.3	30.0	30.7	29.0	29.9	30.2
SD	1.5	3.5	3.2	2.7	3.8	3.3	3.7

表二 比較超音波與加速度計系統所得到之阿基里斯腱共振頻率

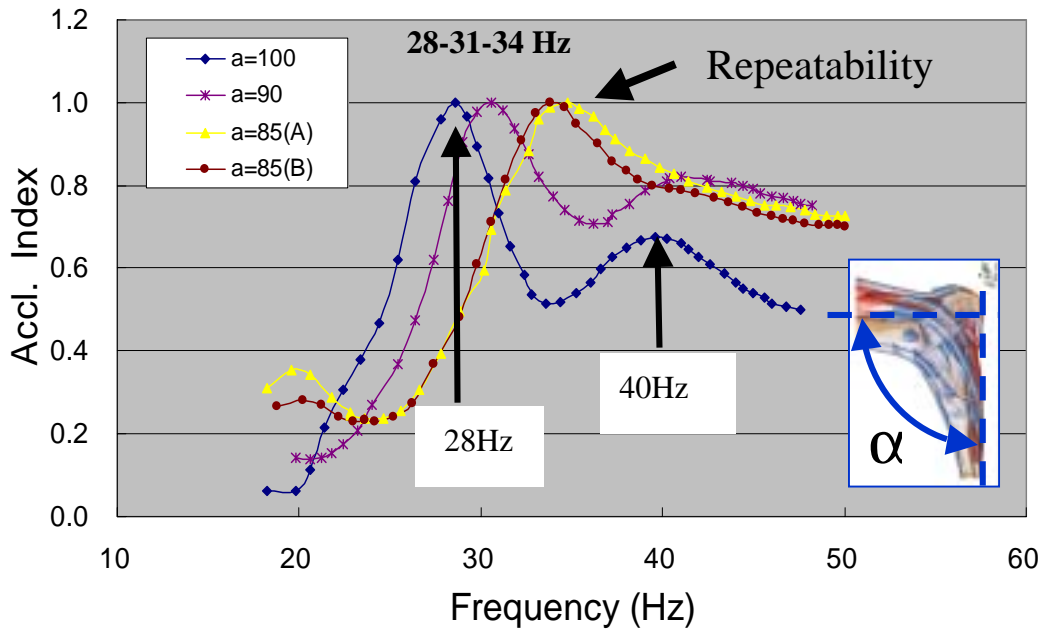


圖二 人體阿基里斯腱之物理模型：下標「1」代表比目魚肌 (Soleus muscle)；「2」代表阿基里斯腱 (Achilles tendon)；「3」代表腓腸肌 (Gastrocnemius muscle)

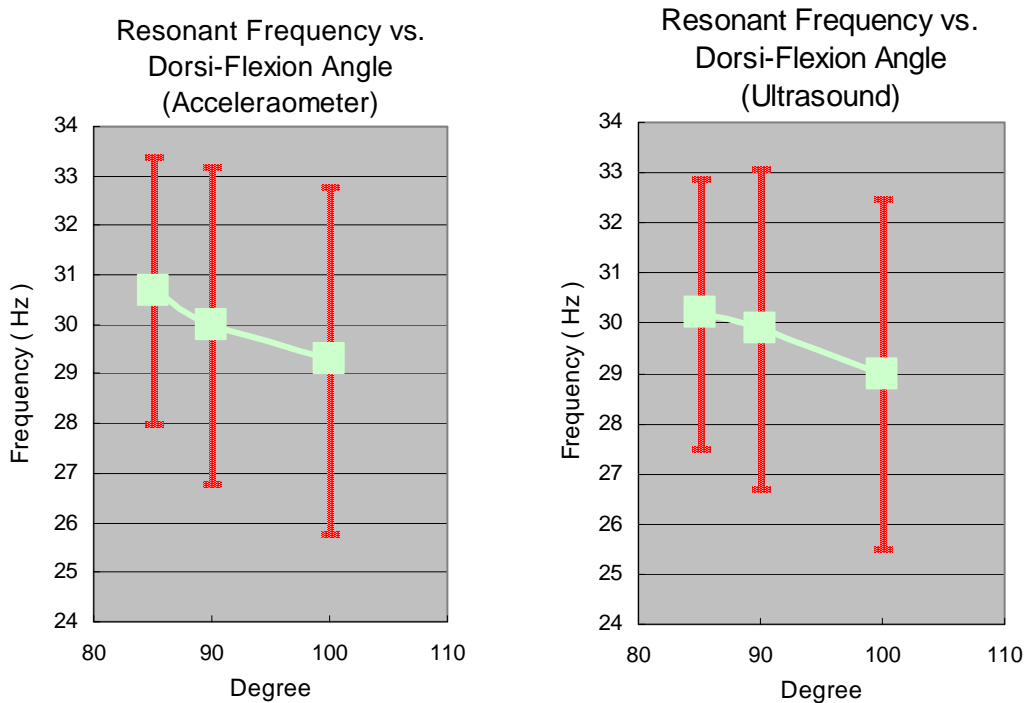


圖三 以三弦物理模式分析人體阿基里斯腱共振頻率：17 Hz 是小腿肌肉群的共振頻率；24 Hz 是阿基里斯腱的共振頻率；而 38 Hz 是阿基里斯腱的第

二共振諧頻



圖四 代表性受測者之阿基里斯腱之頻譜分佈圖



圖五 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

4、討論

Borisovich [4]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 53 Hz; 而好邊共振頻率更高達 78 Hz 左右, 與本研究所量測到的值 23.0 Hz ~ 34.7 Hz, 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 20 Hz ~ 41 Hz 之間, 與目前活體實驗中所量測之範圍 23 Hz ~ 34 Hz 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 38 Hz 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。

5、參考文獻

- [1] Teitz CC. Tendon problems in athletic individuals. The Journal of Bone and Joint surgery. 79A(1) : P138-152, 1997.
- [2] Wren TA. Mechanical properties of the human Achilles tendon.

Clinical Biomechanics. 16 : P245-251, 2001.

[3] Fung YC. Biomechanics : mechanical properties of living tissues.
New York : Springer-Verlag, P242-320, 1993.

[4] Borisovich ML. Testing vibration analysis of the Achilles tendon
state. 15th World conference on nondestructive testing. P15-21,
2000.