

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

機械刺激對骨延長之影響 (II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2314-B-002-079-

執行期間：93年08月01日至94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：黃世傑

共同主持人：呂東武，王廷明

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 24 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫進度結案報告

機械刺激對骨延長之影響(II)

計畫編號：NSC 93-2314-B-002-079

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

主持人：黃世傑

國立臺灣大學醫學院骨科

共同主持人：呂東武

國立臺灣大學醫學工程學研究所

共同主持人：王廷明

國立臺灣大學醫學院骨科

一、中文摘要

骨延長增生手術目前是廣泛用以治療肢段長度缺陷、肢段變形、骨性缺損及骨折後癒合不全等疾病的方法。此方法基本上是將骨肢段以一個外固定器來連接，於術後有控制的拉長，引導誘發骨性增生，同時以一適當速度來作拉長動作，使骨頭斷面處可繼續保持骨性增生。當此拉長動作停止時，骨性增生也會跟著停止，骨斷面因拉長動作而增生之骨痂將漸漸固化。摒除此手術於治療上述疾病之正向療效，需要長期將外固定器固定在肢體外依然是個問題(約一至二個月延長一公分)。許多方法可用以加速骨性增生的速度，諸如電刺激以及機械性之壓力給予。至目前為止，動物實驗的研究報告也顯示出不同的機械性因素會明顯影響骨性增生的生理過程，此因素包括有相鄰斷面之間的距離大小、應變大小、應變速度、外力施加之形式與重複之次數以及刺激時機。除此之外，增生的骨痂也會影響癒合的過程。增生的骨痂會減少近端及遠端骨肢段彼此間之相對運動，而骨痂生成量是被兩個骨肢段間運動所影響。穩定固定會使得較少的骨痂形成，而不穩定固定就會使得較多的骨痂生成。骨肢段遲緩癒合及癒合不全則是因為骨肢段間過度的運動所造成，軸向或側向的骨肢段間運動也會對癒合過程有不同之影響。故關於機械刺激對於骨性增生之影響對於評估及決定固定之穩定程度與斷面之間相對運動有相當之助益。

本計畫利用上一年度三維動作分析求出接受股骨切斷術病患於步行時，不同程度的機械性外刺激對於斷面兩端骨肢段之間相對

運動之資料，配合 X 光片建立病患之骨頭模型，以有限元素法進行分析。分析結果顯示患者於術後四週至八週時固化作用旺盛，至十六週後強度增加的同時，步態亦趨於正常。此結果對於現今技術之改良以及接受此手術的患者的治療與照顧有很大的助益。

關鍵詞：外固定器、骨肢段間運動、機械性外刺激、步態分析、有限元素分析

Abstract

Distraction osteogenesis is a well-established technique for bone lengthening that has widespread clinical applications in the treatment of limb length discrepancies, limb deformities, bone defects and fracture nonunion. Basically, an osteotomy is performed with the bone fragments fixed with an external fixator. After surgery, the osteotomy site is then subject to controlled distraction by which osteogenesis is induced. The distraction has to be kept at an adequate rate for the bone to continue to grow in length. Bone ceases to grow when the distraction is stopped. The newly formed callus in the distracted zone then gradually consolidates. Despite its success in the treatment of many orthopaedic disorders, the requirement of external fixation for a long period remains a problem (approximately 1-2 months for every centimeter lengthened). Various approaches have been tested to accelerate the process, such as electrical stimulation and mechanical compression. It is well known that bony consolidation associated

with distraction osteogenesis is a complex process that is influenced by multiple factors. Apart from the extent of bone defect, animal studies have shown that the mechanical conditions significantly affect the biological process of osteogenesis, including gap size, strain magnitude, strain rate, nature of loading, number of cycles and timing of mechanical stimuli. Apart from these factors, the developing callus also affects the healing process. The developing callus reduces the relative movement between the proximal and distal bone fragments. The amount of callus formed is affected by interfragmentary movement. Less callus formation is achieved with a generally stable fixation whereas a larger callus forms with an unstable fixation. Delayed union or nonunion can result from excessive interfragmentary movement and the influence of axial and shear interfragmentary movements on the healing process can be quite different. Knowledge of the influence of mechanical stimuli on the formation of bone is therefore helpful for the assessment and determination of the suitability of the level of fixation stability and the mechanical conditions at the gap.

The study used 3D gait analysis to obtain the different level of influences of interfragmentary motion during level walking, and a finite element model of the subject-specific external fixator was developed for subsequent analysis of the mechanical behavior of the callus and adjacent bones. Results showed that osteogenesis rapidly grown and strength of it also developed after surgery 4 to 8 weeks and gait became similar to normal after surgery 16 weeks. Results of this study improved of current techniques, contributed to the treatment and care of patients with bone lengthening.

Keywords : external fixator, interfragmentary motion, mechanical stimulation, gait analysis, finite element analysis

二、緣由與目的

骨延長增生手術目前是針對治療肢段長度缺陷、肢段變形、骨性缺損及骨折後癒合

不全等疾病最為廣泛使用的方法。而此方法是將骨肢段打斷並以外固定器連接，術後利用控制性之拉長動作誘發骨性增生，同時以一適當速度作兩肢段間拉長動作，使骨頭斷面處持續保持骨性增生。伴隨著在骨斷面因拉長動作，增生之骨痂也會漸漸固化。當此兩肢段間拉長動作停止，骨性增生也會隨之停止。屏除此手術在治療上述疾病的正向療效，需要長期將外固定器固定在肢體外(大約一至二個月會延長一公分)(Huang, 1997; Huang and Kuo, 1998)，使病患生活不便，亦降低了此一手術的接受度。

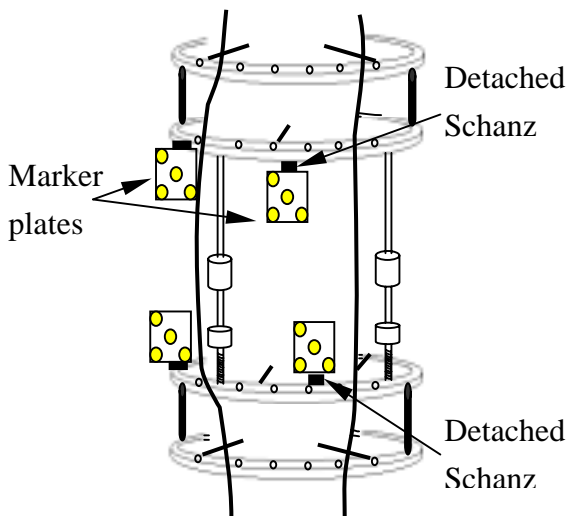
現今有許多的方法已被應用在加速骨性增生的速度上，諸如施以電刺激或是機械性的壓力(Huang, 1997; Huang and Chang, 1997; Pepper et al., 1996)。目前已廣為接受並了解到由骨性增生所伴隨之固化作用是一個非常複雜的過程，而此過程也會受到很多因素所影響。目前為止動物實驗的研究報告也顯示出不同的機械性因素會明顯的影響到骨性增生的生理過程，這些因素包括有相鄰斷面之間的距離大小、應變的大小、應變的速度、外力施加的形式、重複的次數以及刺激的時機 (Claes et al., 1998; Goodship, 1992; Goodship and Kenwright, 1985)。另一方面，增生的骨痂也會影響癒合之過程。增生的骨痂會減少近端及遠端骨肢段彼此間的相對運動，骨痂生成數量是被兩骨肢段間運動所影響。一個穩定的固定會使得較少的骨痂形成，相對的不穩定的固定就會使得較多的骨痂生成。至於遲緩癒合及癒合不全乃因過度的骨肢段間運動所造成，軸向或側向的骨肢段間運動也會對癒合過程有不同的影響。所以關於機械刺激對於骨性增生之影響的知識對於評估及決定固定穩定程度和斷面之間的相對運動非常有幫助，並且對於現今手術技術的改進有很大的助益。

本計畫目的為利用接受骨延長增生手術病人於步態動作中骨肢段間運動及地面反作用力之量測，並配合 X 光片建立骨頭模型以進行有限元素分析，目的是確定及監測初期骨肢段間之運動，並以有限元素法分析骨痂生成期間應力的大小及分佈，可判斷並決定初期固定穩定度合適與否，進而探討與骨性增生間彼此關係。

三、材料與方法

骨外固定器

本計畫由臺大醫院提供因肢段長度缺陷接受股骨切斷術的病患，骨肢段用外固定器來加以固定(圖一)。每一位病患至少植入兩根骨釘並以金屬線分別環繞在上下骨肢段外圍，兩根骨釘分別植入於上下骨肢段中，並以四片不產生形變的方形板固定其上，每一片方形板各有四顆紅外線反光球。兩片方形板固定在上下各一的金屬骨釘上，另外兩片分別組裝在外固定器的上下金屬鐵環。以用來測量骨肢段間的剛體運動。進行測試時，金屬骨釘將與外固定器分離，於是上下兩骨肢段間的運動就可以藉由兩片固定在上的方形板的反光球運動量測。兩片固定在外固定器上下金屬環的方形板，當作是參考點，在實驗過程之間，兩個金屬骨釘會在與外固定器相連接，也可以當作是一個額外的穩定機



構。

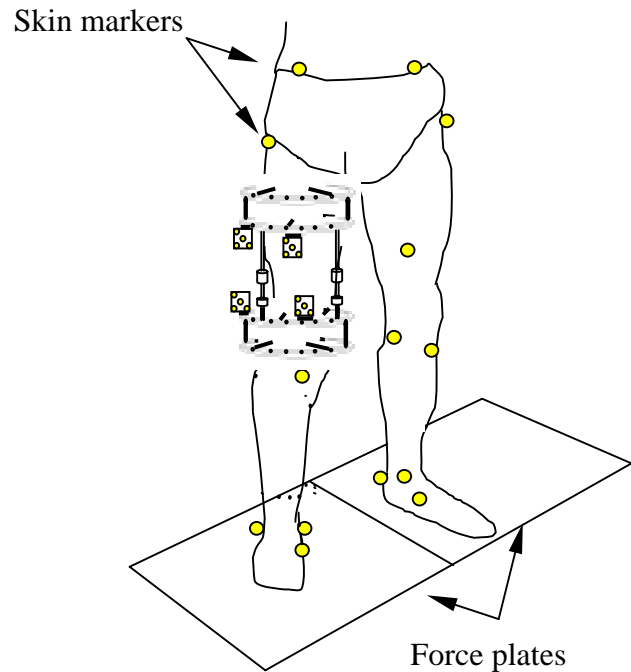
圖一、骨外固定器及連接反光球方形板金屬骨釘

動作分析

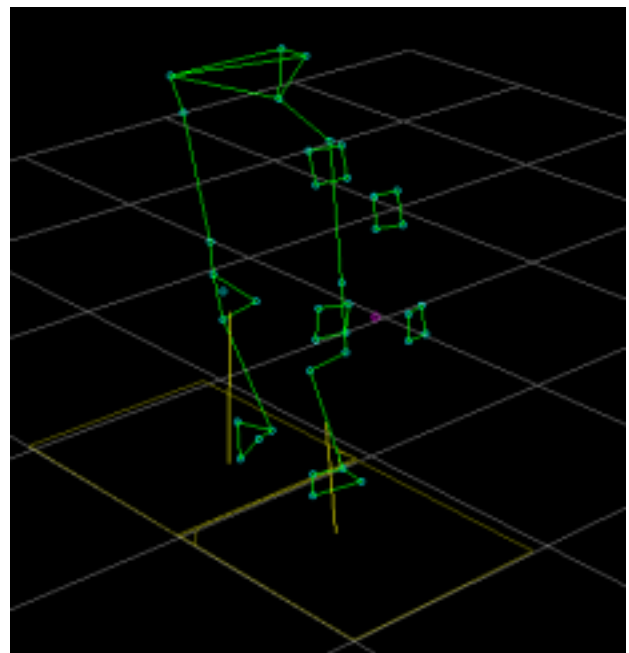
受試者均於步態實驗室中利用三維動作量測系統(Vicon, Oxford Metrics, U.K.)之紅外線攝影機攝取肢段在空間中的位置，並利用兩塊測力板(AMTI, Mass., U.S.A)來測量運動過程中的地面反作用力(圖二、三)。

受試者下肢骨標記部分貼上 10mm 的反

光球，目的是減少反光球彼此之間的干擾。測試前必須把金屬骨釘與外固定器之間的連接部分解除，使其各自獨立分離，並將连接有反光球的方形板附著在金屬骨釘及外固定器鐵環上。



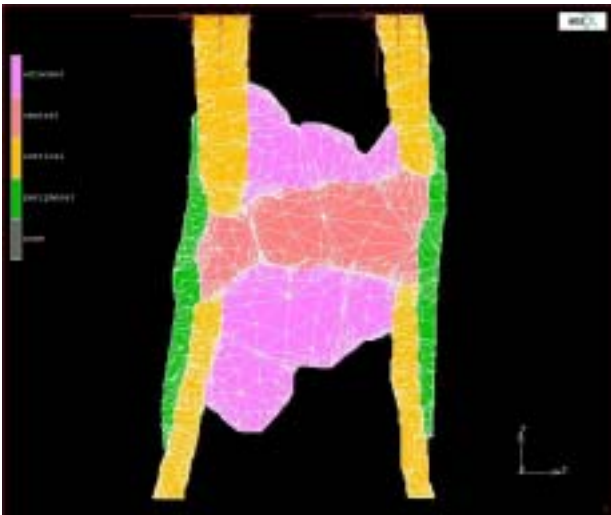
圖二、裝置骨外固定器受試者粘貼反光球標記利用三維動作量測系統及測力板量測資料



圖三、站立時動作分析系統所測得各肢段反光標記之空間位置

有限元素分析

接受股骨切斷術之病患於兩肢段間施行拉長動作使骨頭斷面處持續保持骨性增生之每一階段均照射 X 光片，利用 AMIRA 3.1.1(TGS Inc., USA)影像處理軟體重建骨肢段之模型，並以 STL 檔案格式匯入 MARC/MENTAT 2001(MSC Software Corp., Los Angeles, USA)，經由 MENTAT 網格的處理，構成骨肢段之有限元素法模型(圖四)。其位移邊界條件之設定為固定骨肢段一端，密質骨及骨斷面處軟組織之材料性質取自 Gardner et al.(2000) (表一)，載重條件方面以均布載重施於骨肢段一端。



圖四、術後四星期骨肢段之有限元素法模型

| E (MPa) | | 4 weeks | 8 weeks | 12 weeks | 16 weeks |
|---------------|------------|---------|---------|----------|----------|
| cortical bone | | 18400 | | | |
| Tissue | central | 0.05 | 20 | 30 | 30 |
| | adjacent | 1.0 | 500 | 900 | 2000 |
| | peripheral | 20 | 2000 | 3600 | 8000 |

表一、術後各階段骨頭與軟組織之材料性質 (Gardner et al., 2000)

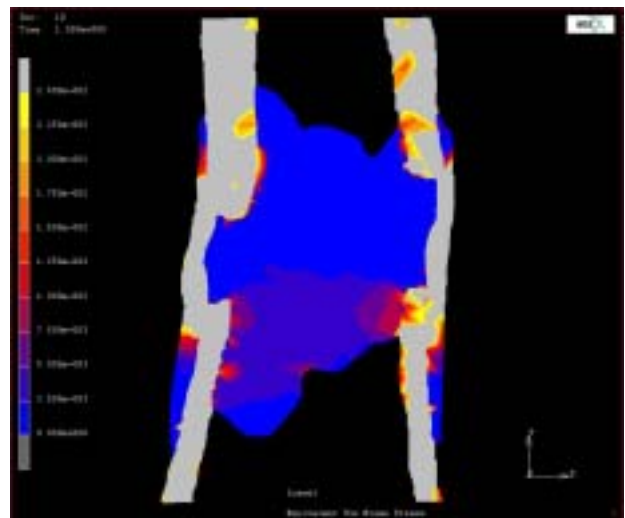
四、結果與討論

本計畫以一接受骨延長術之典型病患

(男性，車禍造成骨生長板損傷，體重約為 32 kg)之 X 光片建立於術後不同天數(四星期、八星期、十二星期及十六星期)之有限元素模型，並以第一年度三維動作分析求出接受股骨切斷術病患於步行時，不同程度的機械性外刺激造成斷面兩端骨肢段之間相對運動之資料做為邊界條件，以及地面反作用力經正規化後作為受力條件以均布載重施於骨肢段其中一端，進行有限元素分析。

術後四星期

以術後四星期 X 光片建立骨肢段模型經網格處理之有限元素模型共有 3086 個元素。由於術後骨痂尚未完全固化，彈性模數較小，且病患步行時患側腳不敢承重過大，地面反作用力較小，經有限元素分析之 Von Mises 應力最大值約為 0.8 MPa，應力分別集中在密質骨及圍繞軟組織 (peripheral tissue)，屬材料性質較堅硬處 (圖五)。

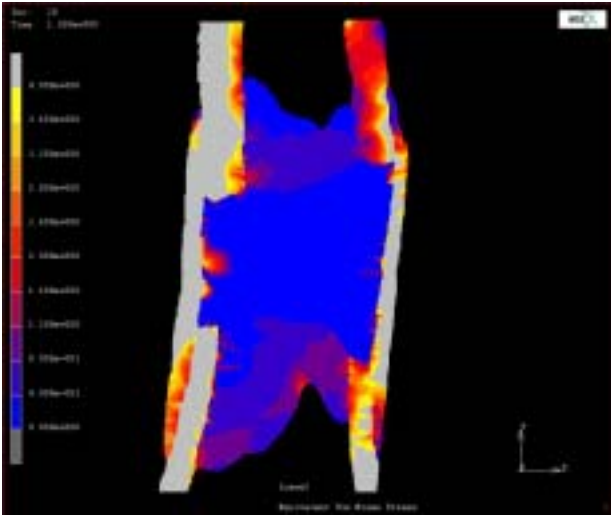


圖五、術後四星期骨肢段及軟組織 Von Mises 應力分布圖

術後八星期

經 X 光片建立骨肢段模型經網格處理之有限元素模型共有 4946 個元素。骨痂於術後四星期至術後八星期間固化作用旺盛，然病患步行時患側腳尚不敢承重過大，經有限元素分析之 Von Mises 應力最大值約為 20 MPa，應力仍集中在密質骨及圍繞軟組織 (peripheral tissue)，屬材料性質較堅硬處 (圖

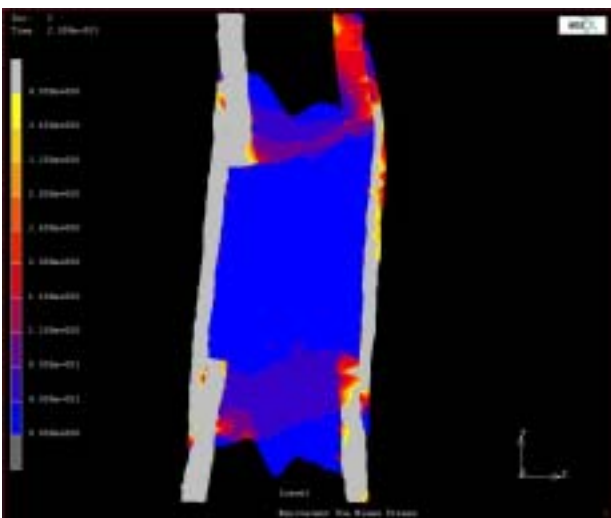
六)。



圖六、術後八星期骨肢段及軟組織 Von Mises 應力分布圖

術後十二星期

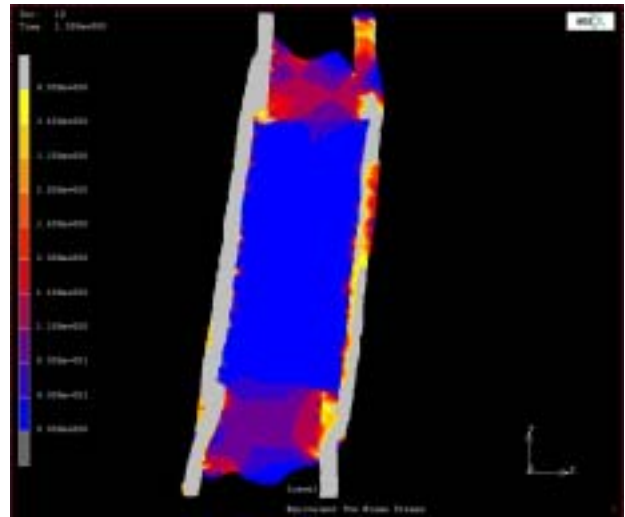
經 X 光片建立骨肢段模型經網格處理之有限元素模型共有 5277 個元素。骨痂於術後八星期至術後十二星期固化作用益趨明顯，病患步行時患側腳最大承重約為體重之 61%。以有限元素分析之 Von Mises 應力最大值約為 30 MPa，應力仍集中在密質骨及圍繞軟組織(peripheral tissue)，屬材料性質較堅硬處(圖七)。



圖七、術後十二星期骨肢段及軟組織 Von Mises 應力分布圖

術後十六星期

經 X 光片建立骨肢段模型經網格處理之有限元素模型共有 6257 個元素。骨痂於術後十六星期固化作用已達一定階段，但尚未長成密質骨，而病患步行時患側腳最大承重已達體重之 90%，以有限元素分析之 Von Mises 應力最大值約為 35 MPa，應力仍集中在密質骨及圍繞軟組織(peripheral tissue)，屬材料性質較堅硬處(圖八)。



圖八、術後十六星期骨肢段及軟組織 Von Mises 應力分布圖

比較術後不同階段，隨著骨性增生作用，骨痂固化作用使材料性質愈趨硬化，及隨著術後時間增加，病患增加患側於步行時之承重，使 Von Mises 應力最大值於術後十六星期遠大於術後四星期且達到 35 MPa。而應力多集中在材料性質較為堅硬的密質骨與圍繞軟組織(peripheral tissue)，以力學觀點來看，應力集中在彈性模數較大之材料處為合理力學現象。從臨床角度觀之，術後拉長骨肢段之速度需以骨性增生之特性為基礎，術後四星期至術後八星期為骨痂固化作用最明顯時間(Gardner *et al.*, 2000)。不穩定之固定使骨痂生成，但於術後四星期內拉長骨肢段之速度不宜過快，以免於骨痂尚未固化至一定程度前造成骨肢段第二次斷裂，於術後八星期至術後十六星期隨著骨痂持續增生，配合一定之拉長速度有效地使骨痂生成，並使骨肢段逐漸癒合。

機械刺激對於骨性增生之影響對於評估

與決定固定穩定程度和斷面之間的相對運動有決定性的助益，若病患於術後不同階段配合接受 X 光片照射以建立有限元素模型進行分析，可瞭解骨肢段拉長速度是否適宜，並且對於現今手術技術的進步有所幫助。

五、計畫成果自評

本計畫利用病患 X 光片資料建立骨肢段之有限元素模型，配合上一年度三維動作步態分析之計畫結果求出於步行時，不同程度的機械性外刺激對於斷面兩端的骨肢段之間的相對運動與地面反作用力之影響，進行有限元素分析。分析結果 Von Mises 應力最大值於術後十六星期遠大於術後四星期，顯示骨性增生作用及固化作用隨術後天數增加而增加，藉此瞭解骨肢段拉長速度是否適宜，對於現今技術之改良及接受此手術患者之治療與照顧有很大的助益。

六、參考文獻

1. Gardner, T.N., Stoll T., Marks L., Mishra S. and Knothe Tate M.: The influence of mechanical stimulus on the pattern of tissue differentiation in a long bone fracture – a FEM study. *Journal of Biomechanics*. 33: 415-425, 2000.
2. Claes, L. E.; Heigele, C. A.; and Neidlinger-Wilke, C. e. a.: Effects of mechanical factors on the fracture healing process. *Clinical Orthopaedics*, 355(Suppl): S132-S147, 1998.
3. Goodship, A. E.: Mechanical stimulus to bone. *Ann Rheum. Dis*, 51: 4-6, 1992.
4. Goodship, A. E., and Kenwright, J.: The influence of induced micromovement upon the healing of experiemntal tibial fractures. *Journal of Bone & Joint Surgery*, 67B: 650-655, 1985.
5. Huang, S. C.: Effect of electrical stimulation on callus maturation during callus distraction in rabbits. *J Formos Med Assoc*, 96: 429-34, 1997.
6. Huang, S. C., and Chang, C. W.: Electrophysiologic evaluation of neuromuscular functions during limb lengthening by callus distraction. *J Formos Med Assoc*, 96: 172-8, 1997.
7. Huang, S. C., and Kuo, K. N.: Differential lengthening of the radius and ulna using the Ilizarov method. *Journal of Pediatric Orthopedics*., 18(3): 370-3, 1998.
8. Pepper, J. R.; Herbert, M. A.; Anderson, J. R.; and Bobechko, W. P.: Effect of capacitive coupled electrical stimulation on regenerate bone. *Journal of Orthopaedic Research*, 14: 296-302, 1996.

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫結案報告

機械刺激對骨延長之影響(II)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2314-B-002-079

執行期間：93年8月1日至94年7月31日

計畫主持人：黃世傑

共同主持人：呂東武、王廷明

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立臺灣大學醫學院骨科

中 華 民 國 94 年 10 月 15 日