

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

人工全膝關節設計與評估用之膝關節三維電腦圖像生物力
學模型(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2320-B-002-091-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學醫學工程學研究所

計畫主持人：呂東武

計畫參與人員：洪啟峰

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 6 月 3 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫進度報告

人工全膝關節設計與評估用之膝關節 三維電腦圖像生物力學模型(2/3)

A 3D computer graphics-based biomechanical model of the knee joint for the design and evaluation of total knee replacements (2/3)

計畫編號：NSC 91-2320-B-002-091

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

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：劉華昌 國立臺灣大學醫學工程學研
究所

計畫參與人員：洪啟峰 國立臺灣大學醫學工程學
研究所

一、中文摘要

人工全膝關節置換手術(total knee replacement; TKR)一直是治療退化性膝關節炎的主要選擇。除了持續加強人工全膝關節本身耐磨耗性與固定外，如何恢復病人術後日常動作的功能，以提高其生活品質，是現階段新型人工全膝關節設計一個相當重要的課題。

本(第二)年度計畫旨在利用第一年建立之電腦模型進行手術模擬，探討不同人工關節設計(後十字韌帶保留型、替代型)對膝關節力學與動作功能之影響。

本研究結果顯示，人工全膝關節置換後，膝關節的穩定度明顯下降，因為韌帶及關節面等被動受力結構被去除或改變，而目前人工全膝關節之設計無法重建之。因此，肌肉控制對人工全膝關節穩定度非常重要。人工關節之被動運動因前十字韌帶之切除，在其功能未被代償的情形下，不可能重建正常關節運動。兩種人工關節對恢復正常運動各有優缺點，但均不足。當正常膝關節之前十字韌帶去除之後，其穩定性可藉由後腿肌30-50%最大收縮力量補償之。其中人工全膝關節(保留型、替代型)及前十字韌帶缺損

膝關節表現出的型態相似，但是前十字韌帶缺損膝關節比人工全膝關節較接近正常膝關節。因此，未來人工全膝關節或許應考慮如何重建前十字韌帶之功能。

本研究除有助對現有人工全膝關節功能表現之了解外，更可確保第三年度整合膝關節電腦模型與已建立之下肢模型以分析功能性動作之成功執行。

關鍵詞：膝關節生物力學，人工全膝關節，電腦模型

Abstract

Total knee replacement (TKR) has been the main choice of treatment for advanced degenerative knee osteoarthritis over the last few decades. In developing a new prosthesis, it is essential to ensure the functional performance that the prosthesis may bring to the patient.

In the present study, the 3D computer graphics-based biomechanical model of the knee joint that was developed in the first year has been used to simulate total knee replacement surgeries for the study of the effects of TKR designs (PCL retaining/

substitution) on the biomechanical performance of the knee during functional activities. The results of the study showed that the stability of the knee was significantly reduced after surgery as the stabilizing structures such as ligaments and articular surfaces were removed or changed. Existing total knees were unable to reconstruct the normal stability of the joint. Therefore, muscles are important for knee stability during movement. Since the ACL was removed, normal knee kinematics cannot be recovered simply by TKR without any substituting mechanism for the ACL. Both types of TKR produced passive knee kinematics that was very different from normal. The removal of the ACL reduced significantly the stability of the knee but could be recovered by hamstrings actions with 30-50% level of its maximum force. Responses of the joint with hamstrings action were similar for the two types of TKR and the ACL-deficient knee. It seems that reconstruction of the ACL function may be considered in future TKR designs.

The results of the present study will form a strong basis for the execution of the second year project in which the knee model will be incorporated into an existing lower limb model to study the mechanics of normal and prosthetic knees during functional activities.

Keywords: knee biomechanics, total knee replacement, computer model, gait analysis

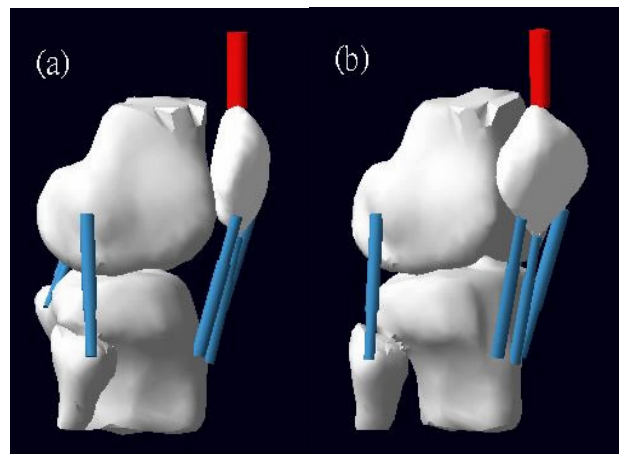
二、緣由與目的

人工全膝關節置換手術(total knee replacement, TKR)是治療退化性膝關節炎的主要選擇。目標在於有效消除疼痛、恢復功能性活動度以及提供足夠的關節穩定度。雖然現有設計長期存續率已經相當高(Wanawat et al., 1993; Ermnerson et al., 1996), 可是仍有許多改善空間, 諸如鬆脫、功能、磨耗、手術技術、修正手術之成功率以及未來可能發生的潛在問題等(Walker, 1989), 在進行新設計時均需一併考慮。特別值得注意的是, 高存續率並不代表病人膝功能恢復程度的高低。因此, 除了持續加強人工全膝關節本身耐磨耗性與固定外, 如何恢復病人術後日常動作的功能, 以提高其生活品質, 是現階段新型人工全膝關節設計一個相當重要的課

題。

本計畫第一年建立完成了輔助人工全膝關節設計與評估之三維膝關節電腦模型(圖一)。模型股骨、脛骨、髌骨、各主要肌群及韌帶之幾何係利用MRI及CT影像重建。骨骼與關節面(包括脛股與髌股關節)為剛性。膝關節韌帶, 包括十字韌帶及內外側韌帶則模擬為數條彈性的纖維束(Lu and O'Connor, 1996; Zavatsky and O'Connor, 1992), 每一根纖維各自連接其於股骨與脛骨上之起點與終點。影響膝關節的肌肉則根據Hill's equation模擬為具主動收縮能力之單元, 考慮肌肉長度、速度、激化程度與所產生肌力之關係。相關肌肉參數如最佳肌纖維長度、生理截面積等則取自文獻(Friederich and Brand, 1990; Hoy et al., 1990; Pandy et al., 1992), 並依受試者肌力實驗資料調整之。

第一年利用該膝關節模型模擬分析正常膝關節於單關節動作(活動度、穩定度與肌力測試)時之生物力學行為。所得結果與文獻(Wilson et al., 1998)及關節鬆弛度量測和動作分析實驗數據均相當一致, 部分成果已發表於九十一年台灣生物力學學會學術研討會, 並榮獲論文優良獎(Hung et al., 2002), 目前正準備撰文投稿學術期刊。



圖一、屈曲角度 0° 時三維膝關節模型之(a)外側與(b)外前側視圖。

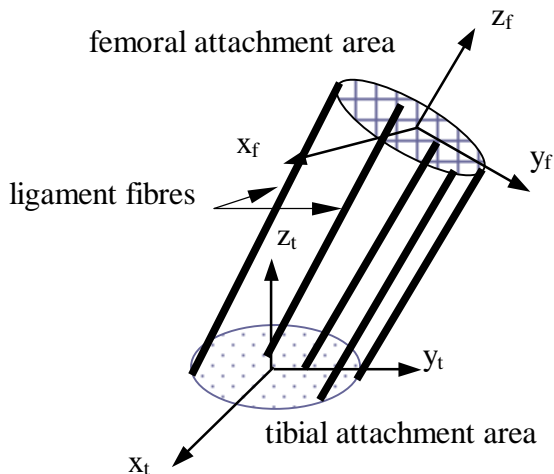
根據過去之研究經驗可知, 利用三維膝關節電腦圖像模型進行人工全膝關節手術模擬至少有下列幾個好處:(1)可輔助引導人工全膝關節之設計;(2)可評估不同的設計做為手術規劃決策之參考;(3)可減少新設計人工膝關節死體實驗的次數;(4)手術後膝關節功

能之預估，可為復健之參考。因此本（第二）年度計畫的目的在於利用已建立之電腦模型進行手術模擬，根據第一年所建立正常關節之資料，探討不同人工關節設計（後十字韌帶保留與否）對膝關節力學與動作功能之影響。此技術之建立不僅可用來協助骨科醫師做術前規劃也有助人工全膝關節之設計。此外，也可減少或替代人工全膝關節臨床測試前的死體試驗。此點對屍體取得相當不易的我國而言相當重要。

三、結果與討論

人工全膝關節置換手術電腦模擬

為了將已建立的三維膝關節模型應用於人工全膝關節置換手術模擬，並獲致更精確結果，本年度工作首先將原有之膝關節韌帶模型由單位彈性束，改進為連續性的彈性束（圖二），如此可表現出韌帶內部之受力情形，並可藉以判斷韌帶受力是否超出可承受的範圍。



圖二、韌帶模型示意圖

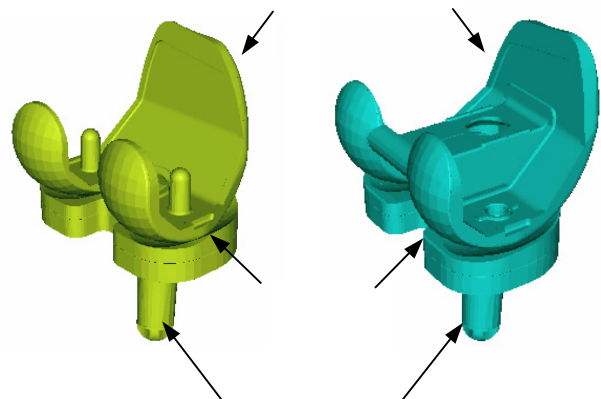
為了探討不同人工全膝關節設計及其活動度與穩定度兩個互為抵觸的特性彼此間的協調與妥協，特別選定兩膝分別植入後十字韌帶替代式與後十字韌帶保留式人工膝關節之受試者參與本研究，提供手術模擬所需之

數據。此類受試者可避免受試者間各項變數干擾研究結果，提供了一個探討解釋這兩種不同類型之膝關節設計的絕佳機會，對於瞭解後十字韌帶對於人工膝關節之功能而有所幫助。本研究特別著重不同人工關節設計（後十字韌帶保留與否）在活動度、穩定度與肌力測試時生物力學行為的差異，並與第一年所建立正常關節之資料比較。基本上，前後十字韌帶切除後，關節穩定度降低而活動度增加。後十字韌帶保留式關節因後十字韌帶之故，有較高後向穩定度，然而後十字韌帶之限制對其活動度及運動之影響尚不明確。後十字韌帶替代式關節依其替代設計不同而有不同的活動度與鬆弛度。

手術模擬技術上，主要是將膝關節模型的關節面由人工關節各元件曲面所取代，而其前後與上下之位置則以維持膝關節各元件原來位置為原則，再做前後與上下少量移動以為局部敏感度分析。除前十字韌帶切除外，後十字韌帶則依需要切除或保留。植入膝關節部分將利用 CAD/CAM 軟體進行，再將曲面資料外傳給三維圖像力學模型軟體進行活動度、鬆弛度以及肌力測試力學分析，並將結果與第一年度分析正常膝關節所得比較。

全人工膝關節組件之幾何模型

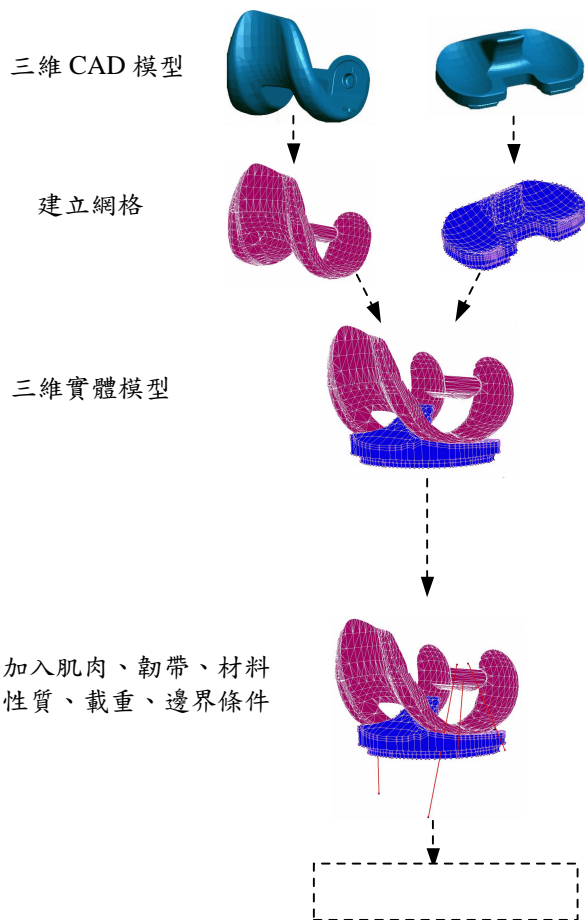
本研究採用 Johnson & Johnson 公司所設計的全人工膝關節為研究基礎，並依受試者所置換的型號找出同型號的電腦輔助設計模型作為實體模型。本研究在儘量不影響全人工膝關節的模型的幾何圖形條件下，自行規劃進行網格切割。期望產生較少節點與元素個數但仍精確的三維全人工膝關節幾何模型（圖二）。



圖三、後十字韌帶保留式(圖左)、後十字韌帶替代式(圖右)人工全膝關節電腦輔助設計圖

全人工膝關節組件之結合

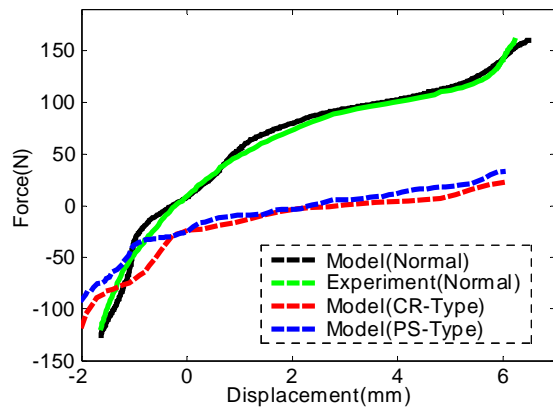
本研究先將全人工膝關節組件個別進行網格分割以建立實體模型。股骨及脛骨組件實體模型之初始相對組合位置及在人體動作中實際的相對關係則根據受試者之動態 X 光 (fluoroscopy) 影像決定之。利用影像擷取卡直接擷取所需數量之影像，再分別進行影像切割(segmentation)取得全人工膝關節各組件之影像輪廓，再利用原始 CAD 模型以及本實驗室所發展之軟體決定 CAD 模型之空間位置(旋轉角度及位移向量)。該位置係該 CAD 模型各組件在影像平面之投影最符合其影像輪廓者。如此，即可得到模型之初始相對組合位置及功能性活動中全人工膝關節組合模型之位置。



圖四、三維全人工膝關節模型建立流程

穩定度分析

以上述方法建立之三維全人工膝關節模型模擬膝關節穩定度，其分析方法與第一年度之研究方法類似。首先根據膝關節穩定度測試實驗所得，給定全人工膝關節模型相同屈曲角度(20度)，再施加前後方向最大約150牛頓的力量於脛骨結節處，經力學分析可得前後方向的力量對位移的關係圖，並與上一年度之結果比較(圖五)。



圖五、正常膝關節、後十字韌帶保留式(CR)和替代式(PS)人工全膝關節模型於鬆弛度測試模擬結果之比較

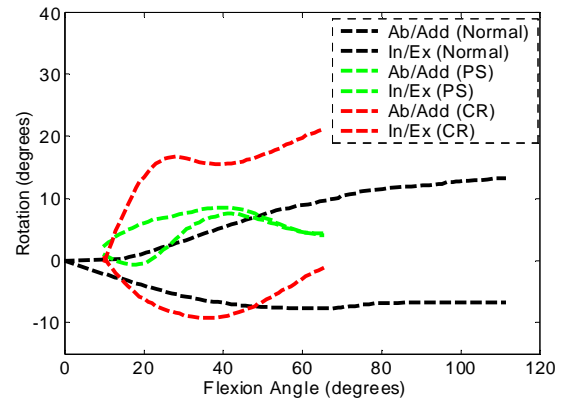
以三維膝關節模型模擬正常膝關節穩定度測試已獲致良好結果，模擬與實驗結果相符(圖五)。人工全膝關節置換後，膝關節穩定度測試模擬發現，在脛骨受到向前拉力時，由於兩種形態的人工全膝關節的前十字韌帶都已切除，因此在抵抗向前拉力的受力結構，只剩外側韌帶和人工關節的關節面，在向前6公釐的位移時，兩人工全膝關節的受力分別為21.5牛頓(保留型)和33.6牛頓(替代型)。兩種型式的受力結果差別不大，但和正常膝關節的159牛頓相差甚大。故知人工全膝關節置換後，膝關節向前被動穩定度不足，功能性動作中須有適切的肌力(如後腿肌，Hamstrings)代償方能維持應有之功能。在受到向後推力時，在相同的位移下，兩種型式的人工關節受力均小於正常膝關節。此結果顯示人工關節之關節面與正常關節有顯著差異。此外，後十字韌帶保留型的人工關節比替代型人工膝關節有較好的穩定度，顯示後十字韌帶替代機構之設計尚有改

進空間。

在接受人工全膝關節置換後，膝關節的穩定度有明顯的下降，這是由於韌帶及關節面等被動受力結構被去除或改變，而目前人工全膝關節之設計無法提供相同的穩定度。因此，肌肉主動收縮所產生的穩定度便非常重要。人工關節的運動幾何和正常膝關節不同，造成肌肉收縮的力臂和作用力方向改變，進而造成人工膝關節於功能性活動時的異常與功能不足，這是吾人未來設計人工關節所應考慮的重點。

活動度分析

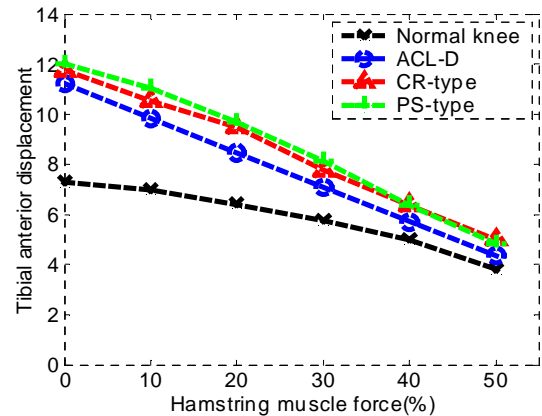
根據 Wilson et al. (1998) 之屍體研究，膝關節在不受外力情形下，其每一韌帶皆有一等長纖維，與關節面共同決定出被動運動之型態。Wilson et al. 指出膝關節結構為單一自由度的機構。換言之，給定一屈曲角度則關節內/外轉和內/外展角度即可唯一決定。膝關節之被動屈曲伴隨內轉和內展，反之亦然，此即所謂的旋回機制(screw home mechanism)。為了了解人工全膝關節之活動度，利用置換人工全膝關節受試者的膝關節模型，經由模型模擬被動活動，得到脛股關節內/外轉和內/外展角度對屈曲角度關係，並與上年度之正常膝關節模型活動度結果做一比較（圖六）。後十字韌帶保留型人工全膝關節在屈曲初期即伴隨過大的內轉，但是其內展角度則接近正常膝關節。後十字韌帶替代型人工全膝關節在屈曲時，其內轉角度較保留型接近正常膝關節，然其外展角度與正常膝關節迥異。由此可知，兩型人工膝關節的被動運動型態和正常膝關節有很大的差別。其中，前十字韌帶切除及曲面的設計等因素均伴演極重要角色。前十字韌帶切除後，膝關節結構不再是單一自由度的機構，其運動範圍受人工關節面及其他如後十字韌帶所決定。人工關節之被動運動因前十字韌帶之切除，在其功能未被代償的情形下，不可能與正常關節一樣。後十字韌帶保留及替代兩者對恢復正常運動似乎各有優缺點，也都不足。



圖六、人工全膝關節（保留型、替代型）與正常膝關節活動度之比較

股四頭肌與後腿肌肌力測試模擬

為探討人工全膝關節在功能性活動時之生物力學表現以及相關肌肉控制方式對其功能表現之影響，特別針對股四頭肌與後腿肌對膝關節的影響進行模擬研究。從第一年實驗得知股四頭肌及後腿肌在膝屈曲 90 度時最大收縮力量分別為 5000N 及 2477N。進行模擬時，首先使股四頭肌產生最大收縮力量（5000N），而後腿肌則從不施力遞增至施予一半的最大收縮力量。比較上年度正常膝關節的模擬結果，當正常膝關節之前十字韌帶去除之後，其穩定性可藉由後腿肌 30-50% 最大收縮力量補償之。其中人工全膝關節（保留型、替代型）及前十字韌帶缺損膝關節表現出的型態相似，但是前十字韌帶缺損膝關節比人工全膝關節較接近正常膝關節，主要是因為人工全膝關節關節面與正常膝關節面不同，所能提供之穩定性有限（圖七）。



圖七、人工全膝關節（保留型、替代型）、前十字韌帶缺損與正常膝關節股四頭肌與後腿肌肌力測試模

擬。股四頭肌力量不變下，後腿肌收縮強度對膝關節前後向穩定性之影響

1127-1136.

10. Zavatsky, A.B. and O'Connor, J.J. (1992) *Proc. Instn Mech. Engrs, Part H, J. Engrg Med.*, 206: 135-145.

四、計畫成果自評

本計畫第二年依據既定時程，完成利用第一年建立之三維膝關節電腦生物力學模型進行人工全膝關節手術模擬。此外，亦完成利用三維人工膝關節模型模擬分析比較人工全膝關節（保留型、替代型）與正常膝關節於單關節動作（活動度、穩定度與肌力測試）時之生物力學行為。藉此，得知何種設計較接近自然膝關節。所得結論不僅可提供作為國人選擇既有產品之參考，也是改善新設計之依據。本年度計畫成果已有會議論文發表並準備期刊發表中。本研究除有助對現有人工全膝關節功能表現之了解外，更可確保第三年度整合膝關節電腦模型與已建立之下肢模型以分析功能性動作之成功執行。

五、參考文獻

1. Ermnerson, K.P., Moran, C.G. and Finder, I.M. (1996) *Journal of Bone and Joint Surgery*, 78B: 441-445.
2. Friederich, J.A. and Brand, R.A. (1990) *Journal of Biomechanics*, 23: 91-95.
3. Hoy, M.G., Zajac, F.E. and Gordon, M.E. (1990) *Journal of Biomechanics*, 23: 157-169.
4. Hung, C.-F., Lu, T.-W., Liu, H.-C. and Hsu, H.-C. (2002) *Annual Meeting of Taiwanese Society of Biomechanics*.
5. Lu, T.-W. and O'Connor, J.J. (1996) *Proc. Instn Mech. Engrs, Part H, J. Engrg Med.* 210: 71-79.
6. Pandy, M.G., Anderson, F.C. and Hull, D.G. (1992) *Transactions of ASME – Journal of Biomechanical Engineering*, 114: 450-460.
7. Walker, P.S. (1989). *Orthopedic Clinics of North America*, 20: 15-29.
8. Wanawat, C.S., Flynn, W.F., Saddler, S., Hansraj, K.K. and Maynard, M.J. (1993) *Clinical Orthopaedics*, 286:94-102.
9. Wilson, D.R., Feikes, J.D. and O'Connor, J.J. (1998) *Journal of Biomechanics*, 31:

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫進度 報告

※※※

※※※※※

※

※

人工全膝關節設計與評估用之膝關節

※

※

三維電腦圖像生物力學模型(2/3)

※

※

※

※※※

※※※※

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2320-B-002-091

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：呂東武

共同主持人：劉華昌

計畫參與人員：洪啟峰

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：國立臺灣大學醫學工程學研究所

中華民國 92 年 5 月 24 日

