

出國報告（出國類別：國際會議及參訪）

2018 年 LS DYNA 國際研討會及參訪

服務機關：國防大學理工學院動力及系統工程學系

姓名職稱：文職教授鄧世剛

派赴國家：美國

出國時間：2018/06/07-2018/06/30

報告日期：2018/07/24

摘要：

本次出國為由國防工業發展基金會所提供之研究計畫『碳基複合材料輕量化槍管之研發－以國造 T75 手槍為例』，參與於美國底特律舉行之『**2018 LS-DYNA** 使用者國際會議』，在會中除聽取各種學術性論文發表，了解 **LS-DYNA** 最新應用及發展。在研討會結束後，本人即前往位於康乃狄克州之康乃狄克大學機械工程學系，參訪由 Tai-Hsi Fan 教授主持的流體及傳播現象實驗室(Fluids & Transport Phenomena Lab)。結束後再前往位於加州聖地牙哥的 **TREX** 企業公司，拜訪執行長 **Kenneth Tang** 博士並參觀該公司各項研發成果及應用。接著在赴位於舊金山附近的 **Livermore** 軟體科技公司，與該公司軟體研發人員 **Jason Wang** 博士，討論在 **LS DYNA** 下之離散元素法(**Discrete Element Method, DEM**)的應用與問題改善。本次赴美行程共 **23** 日，總計赴四個場合，雖然行程緊湊，但收穫良多。

目 次

壹、	目的.....	3
貳、	過程.....	4
參、	心得報告.....	18
肆、	建議事項.....	19

壹、目的

2016年「第15屆LS DYNA國際研討會(15th LS-DYNA International Conference)」為由美國LSTC公司，於107年6月10日至12日，在美國密西根州底特律附近之愛德華鄉村酒店(Edward Village Michigan Hotel)舉行。本研討會主要目的為以LS DYNA非線性有限元素軟體，應用於多重物理現象耦合分析之研究成果與實務經驗，提供全世界各領域之科學家、工程師、及研究人員參考及分享。另外研討會中還提供付費之教育訓練課程，如爆炸模型、氣囊分析、爆炸及穿透分析等。本次參與研討會之專家學者來自全世界各國約350人左右（目視），總計發表各領域論文計120篇。本人因槍砲結構與機構之學術研究，亦使用LS DYNA軟體。藉由此次參與研討會，瞭解國際研究的現況與趨勢。另利用本次機會，特別前往康乃狄克大學機械工程系Tai-Hsi Fan教授聯繫，參訪其主持的流體及傳播現象實驗室、加州聖地牙哥的TREX企業公司執行長Kenneth Tang博士聯繫，拜訪並參觀該公司各項研發成果及應用、以及位於加州舊金山附近LSTC軟體科技公司研發部門經理Chen-Shyh Tsai博士，參訪該公司研發部門，以及了解非線性有限元素分析軟體LS-DYNA的發展現況與現有問題改善。總而言之，23天的行程雖然緊湊，卻也收穫良多。返國後，亦需要長時間的消化，才能得以順利在本人未來研究中實現。

貳、過程

一. 第 15 屆 LS DYNA 國際研討會(107 年 6 月 10 日~107 年 6 月 12 日)

會議過程

107年6月10日（星期日）

18:00 ~ 20:00 註冊及報到



107年6月11日（星期一）

08:35 ~ 11:45 大會演講

第一場

講 題：等幾何方式應用於分析(Isogeometric Approach to Analysis)

演講人：德州大學奧斯汀分校航太工程與工程力學系教授Thomas J.R. Hughes

內 容：等幾何分析的概念為將非均勻有理B雲形線(Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS)入有限元素分析，以建立正合的幾何模型。現今的有限元素模型均為平面切割近似模型，不但模型定義複雜，且幾何僅能近似。若要達成可接受的形狀，則模型將產生極大的模型檔，使計算愈趨緩慢。在演講中，Hughes教授展示在有限元素分析中，自建更有效率、更高階的k-refinement NURBS法則，以取代h-及p-refinement法則，達成各層面的正合幾何模型，而無須在CAD軟體建立模型後，再轉入有限元素分析軟體中。在數值分析的測試中，k-refinement在具尖銳內裡及邊界層的平流擴散流程案例中，展現驚人的單調(Monotone)收斂性，且結果更佳。



Thomas J.R. Hughes教授演講



與Thomas J.R. Hughes教授合照

第二場

講題：應用簡化模型於豐田汽車之乘客保護及防撞度模擬(Application of Reduced Model to Simulations of Occupant Protection and Crashworthiness at Toyota)

演講人：豐田汽車公司先進CAE部專案總經理Tsuyoshi Yasuki博士

內容：使用降低汽車質量後的簡化模型，為汽車工業界的設計目的第一優先。為達成設計目的，豐田汽車公司在執行乘客保護及防撞度模擬時，提出數個品質控制方法。其中之一為使用LS-TASC軟體進行模擬。Yasuki博士在這個演講中，對於豐田汽車公司執行乘客保護及防撞度模擬時，簡化模型的效果及其成效做了詳細的說明。

13:00 ~ 17:30 論文發表

由於以數各主題場次同時發表，因此僅能以個人有興趣的主題選擇性的參與。

第一場

講題：爆炸實驗與模擬：震波在凸型結構附近之傳遞(Experiments and Simulations of Explosives: Shock Wave Propagation around a Convex Structure)

主講人：N. Van Dorsselaer

內容：法國國家研究院IRSN支援法國各部門參與核能材料、設備安全，與核能材料透明化的活動。為了要改善爆炸波傳遞的知識，IRSN設立一個實驗室，其級數到達可在剛性結構(無損壞或變形)旁執行引爆實體炸藥。2017年7月，第七次實驗活動，即在這種結構下研究震波在凸型結構附近之傳遞。這次活動進行了多次各種不同型態的爆炸測試，在一個平面(1.6x2.4公尺)上半圓柱型(直徑0.4公尺)結構旁，引爆50克TNT當量的炸藥。在爆炸時所測得的相關數據(使用11個感測器)，用來與LS-DYNA及法國CEA開發的OURANOS軟體模擬相比較。在模擬時，兩種軟體均進行了確認流程，以便訂定網格尺寸、結構或非結構的網格等，以及邊界條件如網格邊界、耦合等。在調整階段時，測試所獲得的壓力數據，用以比較兩個軟體的模擬數據後顯示，兩種軟體計算結果均可達到測試誤差的20%。但從圓柱結構的反射壓力來看，OURANOS軟體的計算結果顯示與其他文獻所預測結果，有更低的誤差。至於實際爆炸與模擬結果比較，則有待後續的研究才能得知。

第二場

講題：LS-DYNA ALE於都市環境之爆炸建模(LS-DYNA ALE Modeling of Blast in an Urban Environment)

主講人：Sergey Medyanik

內容：在LS-DYNA軟體中，ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)方法可以應用於爆炸產生的動態負載建模。這個方法的主要優勢為因具有爆炸外顯模型，以及爆炸波延著介質傳遞等條件，所以產生較佳的精確度。但這種方式須使用非常小的網格，如當爆炸附近尖峰壓力值為重要影響結果因素時，需使用更細小的網格來描述，以便獲得精確的計算結果。在本次報告中，以都市環境中空氣爆炸為案例，計算其的影響。報告人使用在都市中具代表性的街道十字路口簡單幾何模型，其結果的精確性與網格敏感性，則以特定點之尖峰壓力來探討。這種建模方式的正確性，亦經由有限元素分析的數值結果，比對文獻中的實驗數據後得到驗證。

第三場

講題：LS-DYNA於客用軌道車輛爆炸狀況下的特性模擬(Simulation of the Performance of Passenger Rail Vehicles under Blast Conditions in LS-DYNA)

主講人：Francois Lancelot

內 容：面對漸增的恐攻威脅，如何保護國家運輸系統，已成為嚴重問題。Arup以及運輸科技中心(TTCI)，進行了有關爆裂物於軌道車輛的脆弱性，以及對於基礎設施的破壞。這個進行中的研究，其主要的目標為，發展對於現行軌道車輛結構性能評估工具，以及發展可能減輕測量現行的軌道車輛。以及探索先進安全系統，以因應未來在爆炸狀況下的設計。本研究一部分，Arup已經發展出一系列客用軌道車輛的細部有限元素模型。目的為探討在LS-DYNA中，運用爆炸負載的各種不同方法。這些方法探討包括：壓力映射於有限元素模型、ConWep方程式的應用、以及將流體結構交互作用方法與LS-DYNA中的ALE法則進行全耦合分析。這些技術均已經TTCI的全尺寸爆炸測試確認結果，多數軌道車輛爆炸特性的可用方式均已經確認。報告人在本次的報告中，詳細的說明建模方式、分析結果，以及未來將進行的研究。

第四場

講 題：炸藥形狀效應於站立距離相關的邊界表面尖峰壓力值 (Effect of Explosive Charge Geometry on Boundary Surface Peak Pressure with Regard to Standoff Distance)

主講人：John Hamilton

內 容：為了更了解炸藥形狀在爆炸時所產生的效應，特別是與站立距離相關的邊界表面尖峰壓力值，本研究提出三種不同炸藥形狀，探討在不同站立距離(從0.5公尺至6公尺)的爆炸，其在目標牆的反射壓力尖峰值。這三種炸藥形狀分別為圓柱形、球形、與正方形，炸藥的質量則均相同。分析模型則建置於LS-DYNA下的ALE模組。每一個站立位置的反應邊界表面尖峰壓力值均經量測並記錄，以作為爆炸效應的量化分類。分析顯示，當在最近距離時(0.5公尺)，炸藥形狀在目標物所造成的壓力形狀效應最大。當站立距離至2公尺時，目標物所造成的壓力形狀則均相同。而當在最近距離時(0.5公尺)，方形炸藥所產生的壓力形狀，不如圓球形爆炸藥來的對稱，但尖峰壓力值則顯著高過許多，其值約為元球形的兩倍。這一點說明不同幾何形狀的炸藥，對於不同站立距離的爆炸尖峰壓力，有顯著的影響效應。

107年6月12日 (星期二)

08:25 ~ 12:25 論文發表

第一場

講 題：*MAT_224高應變率敏感度之鎳基超合金-718於彈道衝擊下之效應 (The Effect of Inconel-718 High Strain Rate Sensitivity on Ballistic Impact Response using *MAT_224)

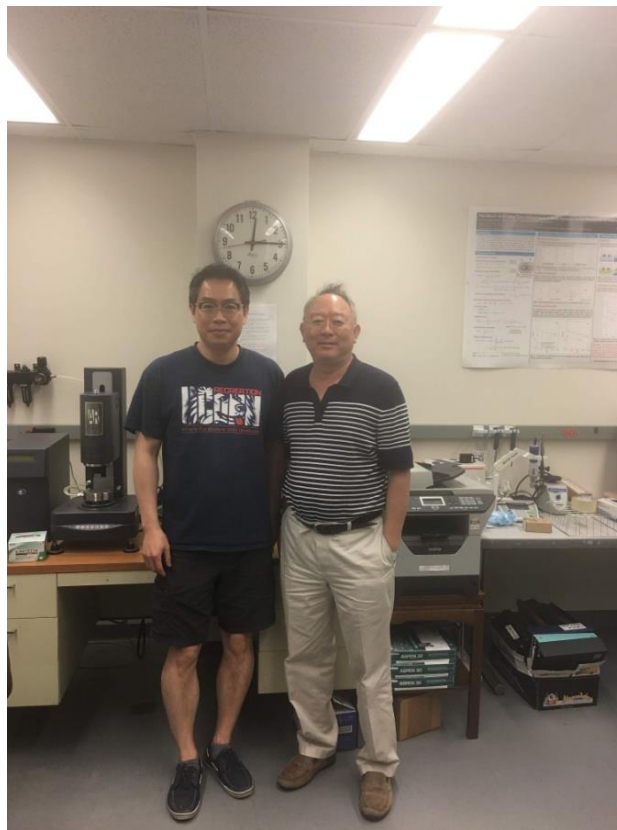
主講人：Stefano Dolci

內 容：本研究團隊(包括George Mason大學、Ohio州大、NASA及FAA)以

LS-DYNA中的表格及*MAT_224材料模型，發展出可以精確輸入材料數據的分析模型。這個模型的輸入參數為依據許多實驗測試試片，包括拉伸、壓縮、衝擊、剪、及雙軸拉伸等應力測試結果，且材料模型亦包括溫度及應變率效應在內。鎳基超合金-718dr1衝擊物理現象，為以LS-DYNA的*MAT_224材料模型進行探討。材料模型的破壞，是在Ohio州大所進行的多次不同的幾何形狀，及不同應力狀態的測試結果。而彈道衝擊實驗，則是在NASA的Glenn研究中心進行。此種材料的材料常數，則是利用*MAT_224的表格輸入方法，在不同已知應變率及溫度效應條件下，經比較機械性質及彈道衝擊實驗而確認。*MAT_224材料模型性能預測，包括穿出速度及破壞模式，則是以測試結果來進行評估。本研究結果顯示，應變率敏感度高之鎳基超合金-718，在現行機械性質測試很難取得應變率的狀況下，對彈道衝擊預測有很大的影響。本研究也顯示，鎳基超合金-718及Ti6Al4V，在材料反應的應變率大於 10^3S^{-1} 下，具有線性的應力-應變率敏感性。在建模時正確的建立敏感性，對於在彈道模擬時預測彈道極限是極為重要的。此外，精確的對此種行為建模，可讓我們在彈道測試時，觀察到與破壞一致的物理行為模型。

由於至下一行程飛機起飛時間關係，本人參加的第15屆LS DYNA國際研討會到此結束。

二. 參訪康乃狄克大學機械工程學系流體及傳播現象實驗室(107年6月13日~107年6月15日)



與 Tai-Hsi Fan 教授於實驗室合影留念

實驗室主持人：Tai-Hsi Fan 教授

基本資料：

級職：副教授

學歷：喬治亞理工學院博士

研究方向：

1. 多相傳播現象(Multiphase Transport Phenomena)
2. 積層製造流程之理論分析及計算(Theoretical Analysis and Computation of Additive Manufacturing Process)
3. 流變動力學，軟性力學(Dynamics of Complex Fluids, Soft Matter Mechanics)

通訊住址：191 Auditorium Rd., Unit 3139, Storrs, CT 06269

辦公室：UTEB 386

電話：(860) 486-0553

實驗室：UTEB 375

E-mail: thfan@engr.uconn.edu

三天參訪期之活動：

107年6月13日（星期三）

上午十時抵達康乃狄克大學機械工程學系，Tai-Hsi Fan 教授見面後，在 Tai-Hsi Fan 教授的帶領下，當天全部行程為認識康乃狄克大學以及機械工程學系，包含康乃狄克大學的歷史及演變。

107年6月14日（星期四）

與 Tai-Hsi Fan 教授進行研究議題的深度會談，本日主要的議題為能量奈米燃料，以及分子聚合流動性之研究。

107年6月15日（星期五）

與 Tai-Hsi Fan 教授進行研究議題的深度會談，本日主要的議題為藥物奈米盤一步性製造，水凝膠功能、射流學、以及微流控系統等研究。

Tai-Hsi Fan 教授研究議題及各項成果：

1. 能量奈米燃料之多相流動力及蒸發動力學(Multiphase Flow Dynamics and Evaporation Kinetics of Energetic Nanofuels)

奈米燃油為含具能量之奈米粒子燃油，其發展將會影響石油工程、乾淨能源、及各種化學及材料製程技術。若使用奈米燃油進行燃燒，相較於傳統燃油，其具備較短的點火延遲時間、較高之能量密度、蒸發率、與燃油氧化率等。本項計畫著重於燃油中粒子分佈之複雜蒸發動力學理論及實驗分析。

2. 分子聚集及其在抗體聚合流動性之角色(Molecular Crowding and the Role of Mobility in Antibody Aggregation)

分子聚合在要求生化反應及蛋白質穩定之限制運動方案中，佔了很重要的角色。本項

研究著重於奈米粒子運動的理論計算及其範圍預估，以及因分子聚合產生遲緩的解決方案。在藥品的應用上，本項研究目標為單株抗體解決方案的蛋白質聚合動力學計量分析。其理論與數值模型著重於蛋白質流動性，及蛋白質與蛋白質之交互反應。本研究之模型係經由光散色儀及超聲波流變儀確認，其目標為加強以抗體為基礎藥物及濃縮物的穩定性。

3. 藥物運送之親和性奈米盤一步製造(Single-Step Manufacture of Affinity Nanodisks for Drug Delivery)

本研究之目的為建立穩定及具生物功能之奈米運送盤，以運送大量之疏水性藥物。盤型脂質系統為經由一步性自我組合流程所產生。其主要的成分為磷脂及作為自發性結構之適體肽鏈、藥物膠囊、及特定標的物。本研究之理論部份著重在了解奈米盤之結構、成分互動、合併、以及擴散與/或反應限制成長運動學。奈米運送盤之材料結構與動態行為，為經由小角度中子散射及動態光散射分析。

4. 水凝膠功能化及蛋白質持續釋放(Hydrogel Functionalization and Sustained Protein Release)

蛋白質持續釋放可被修正後之適體肽鏈水凝膠，經由轉化適體肽鏈蛋白質黏著力，達成對其之調控。了解水凝膠性質與散播流程的反應/運動機制，為蛋白質初始密度及散播率最佳化的關鍵。本研究提供一個平台，可用來發展新藥物及多重藥物，依據可轉化反應控制動力學之散播機制

5. 射流學及細胞力學在控制顯微注射下之新觀念(New Concepts in Fluidics and Cellular Mechanics for Controlled Microinjection)

胞漿精子注射(ICSI)為將精子注射入卵母細胞，達到體外人工受孕的方法。這個流程包含以微吸管穿透卵母細胞的透明膠質層及卵膜，再將精子送入細胞群。為增加成功率，本研究發展一項最佳控制協定，依動態流體-吸管-薄膜互動之理論分析，觸發穿透薄膜。了解本流程的機制，再加上開發新的薄膜物理性質量測技術，可能會對生物醫學應用有潛在性的影響。例如基因轉殖、低溫貯藏、及原核 DNA 遞送等。

6. 微流控系統中幹細胞培養之分子運動及動力學計量分析(Quantitative Analysis of Molecular Transport and Population Kinetics of Stem Cell Cultivation in a Microfluidic System)

使用微量系統之最大優勢，為因其具備調節及評估局部細胞培養之狀態。本研究發展一套以灌注為主之微型細胞培養系統，以維持老鼠胚胎幹細胞的增長。其最佳灌注率是在確保原有之細胞分泌因子下，經由養分補充與排泄移除後平衡計算出。

三. 參訪 TREX 企業公司(107 年 6 月 18 日~107 年 6 月 22 日)



與 TREX 企業公司執行長 Kenneth Tang 博士於該公司合影留念

TREX 企業公司簡介

TREX Enterprise Corporation 於 1978 年在加州聖地牙哥建立，創始時名為西方研發公司(Western Research Corporation)。從 1988 年至 2000 年，該公司均為熱電公司(Thermo Electron Corporation)的一部分，名為熱電公司 Trex 研發部(Thermo Trex's R&D division)。西元 2000 年，Trex 研發部員工買下該部門，並改名為 Trex 企業公司。現今，Trex 企業公司為一私有公司，其總部仍然在加州聖地牙哥，但設備則分布於新墨西哥州、夏威夷州、及麻賽諸塞州。Trex 企業公司現在有專業員工約 200 人。

TREX Enterprise Corporation 是一間多樣化高科技研發公司，以其尖端技術提供解決方案，以及改善橫跨各電磁光譜產品的性能。該公司曾經發展出微波感測、高解析度影像、數位訊號處理、光電材料等高強度自有科技。該公司亦曾獲得美國政府支援，進行與美國及其盟邦的國防、國安、及軍事保全等相關計畫。該公司研發之產品，透過該公司的商業培育策略，進一步建立及投資新創產業及子公司，以達成市場需求。至目前為止，該公司已經建立六個新創產業，並開放大眾投資。

五天參訪期之活動：

107 年 6 月 18 日（星期一）

本日為移動日，由康乃狄克州哈特福市搭機轉往加州聖地牙哥市。但由於天候因素，造成所搭乘的聯合航空公司班機，在芝加哥轉機時嚴重延誤，以致於至當晚十一時才抵達芝加哥，抵達時已無班機可飛往聖地牙哥，因此只好在芝加哥機場等待了一個晚

上。聯合航空公司安排搭乘清晨於七時四十五分的第一班飛往聖地牙哥班機，於周二早上十時才抵達聖地牙哥。

107年6月19日（星期二）

早午十一時抵達 TREX 企業公司，在該公司執行長 Kenneth Tang 博士的帶領及說明下，參觀該公司位於聖地牙哥總公司的廠房設施。並於下午立即與毫米波平台發展人員，開始進行詳細的研究技術討論，以彌補時間上的損失。

107年6月20日（星期三）

在 TREX 企業公司執行長 Kenneth Tang 博士帶領下，與該公司光學影像平台發展人員進行詳細的研究技術討論。

107年6月21日（星期四）

在 TREX 企業公司執行長 Kenneth Tang 博士帶領下，與該公司感測器平台發展人員進行詳細的研究技術討論。

107年6月22日（星期五）

在 TREX 企業公司執行長 Kenneth Tang 博士帶領下，與該公司先進材料平台發展人員進行詳細的研究技術討論。

TREX 企業公司現有技術

1. 毫米波平台(Millimeter-Wave Platform)

TREX 企業公司從 1990 年即因進行航空支援系統，而開始研發毫米波影像。經過 15 年的研究發展，該公司終於開發出『被動式毫米波即時影率地面突破影像系統(ground breaking real-time video-rate passive millimeter-wave imaging systems)』。TREX 企業公司的專利技術，可讓該公司生產最高敏感度及解析度，但相對低成本的產品。這項技術的發展，使該公司加速獲得美國政府於航空系統、反恐、軍事安全、及尖端射頻通訊等計畫。這些研發，也讓該公司新創兩個商業子公司。其中 Sago Systems 子公司為將在安全領域應用的『被動式毫米波影像技術』，另尋新的商業應用。另一個子公司 Loea Corporation，則應用這些創新元件及技術，創造出第一個以毫米波頻率帶(E-band)、1.25 Gbps 高速的無線數據通訊系統，目前這個系統已經應用在夏威夷州的檀香山。

另一項應用毫米波關鍵技術的產品，為機場跑道異物偵測系統 FOD Finder。FOD Finder 原先為美國國防部所提供之研究案，本案須發展出偵測直升機前方，是否有影響飛安的高壓電線的異物。而後該公司發現其發展的毫米波雷達，亦可偵測位於路面的電線，再進一步發現毫米波雷達可偵測路面大約直徑一公分以上的碎石等異物。因此，該公司發展出符合美國『聯邦航空管理局(FAA)』規定，且經 FAA 認證後機場跑道異物偵測系統。TREX 企業公司也宣稱該公司的 FOD Finder，符合低成本且為全世界偵測最精確系統。

2. 光學影像平台(Optical Imaging Platform)

TREX 企業公司源起於替美國能源部及國防部，開發高能雷射及複雜光學控制系統。在 1980 年代，該公司開發了全世界最強的雷射系統、最複雜的光學系統，以及全世

界最快速的數位訊號處理系統與各式雷射雷達系統。該公司光學影像處理能力，可應用在目前各項政府計畫活動，如可調式光學影像、星際影像處理、雷射雷達、及雷射通訊等。該公司的光學影像平台，也發展出兩家子公司。其中可調式光學影像技術，成為 CrossFiber 子公司的主要技術。

3. 感測器平台(Sensors Platform)

以該公司發展的高解析度影像技術為基礎，TREX 企業公司剛開始是建立於醫學影像應用的感測器。但該公司將發展的光導體應用在 Active Pixel 技術上，可提升具成本效益的高敏感度與解析度的互補式金屬氧化物半導體(CMOS)影像(POAP™)。該公司又將此影像技術擴展至可視之 X-光偵測，再進到電磁光譜的近紅外線頻譜。這個平台亦讓該公司產生一個名叫 e-Phocus 的子公司。目前 TREX 企業公司將感測器平台擴展到許多多孔矽應用技術，這項技術也產生了一家名叫 Silicon Kinetics 的子公司。

4. 先進材料平台(Advanced Materials Platform)

TREX 企業公司也建立了化學氣相複合技術，本技術可產生具高強度、輕量化、高熱傳導的碳化矽(Silicon Carbide)材料。目前碳化矽的研究重點在大型輕量化的反射鏡，以及具有環境要求的少見形狀零件，如半導體製造等。

四. 參訪 Livermore 軟體科技公司(107 年 6 月 25 日~107 年 6 月 29 日)



與 Livermore 軟體科技公司資深軟體開發師 Jason Wang 博士進行研討



與 Livermore 軟體科技公司資深軟體開發工程師 Jason Wang 博士合影留念

五天參訪期之活動：

107 年 6 月 25 日（星期一）

上午十時抵達 Livermore 軟體科技公司，當日在該公司研發部門經理 Tsai Chen-Shyh 博士的帶領及說明下，參觀該公司總部的各部門及設施。

107 年 6 月 26 日（星期二）

與該公司資深資深軟體開發工程師 Jason Wang 博士，開始進行有關 Mashless method 與 Particle method 的理論研討

107 年 6 月 27 日（星期三）

與該公司資深資深軟體開發工程師 Jason Wang 博士，開始進行有關 Mashless method 與 Particle method 在 LS-DYNA 軟體上之建置，以及使用方式研討。

107 年 6 月 28 日（星期四）

與該公司資深軟體開發工程師 Jason Wang 博士，進行有關 Discrete Element method (Particle method) 應用於霰彈槍霰彈運動及散布面等膛內彈道分析之可行性探討，與現行 LS-DYNA 軟體應用上之缺點。經向 Jason Wang 博士展示後，確認現行 LS-DYNA 尚無法達成霰彈槍霰彈膛內彈道分析。但 Jason Wang 博士同意進行修改，以讓本人研究得以順利進行。

107 年 6 月 29 日（星期五）

由舊金山機場返國

Livermore 軟體科技公司

總部坐落在加州舊金山附近的 Livermore 的 Livermore 軟體科技公司(LSTC)，主要開發的軟體為 LS-DYNA 以及其支援軟體。Livermore 軟體科技公司是在 1987 年由 John O. Hallquist 博士成立，成立之初為將 John O. Hallquist 博士在 Lawrence Livermore 國家實驗室所開發的免費公開軟體 DYNA3D，商業化成為 LS-DYNA 軟體。LS-DYNA 為一

非線性有限元素分析軟體，其軟體開發著重在包括顯示(Explicit)與隱式(Implicit)、單核(SMP)與多核(MPP)運算在內的單一有線元素分析方法軟體。LS-DYNA 可以在 UNIX、LINUX、與 WINDOWS 等作業系統上執行，目前國內多所大學及研發單位、及國家高速電腦中心均有購置。該公司總部由三座建築所構成：辦公室、會議室、以及具備影音設備的先進教育訓練室。Livermore 軟體科技公司內有工程師、數學家、及電腦科學人員所組成的團隊，進行 LS-DYNA、LS-PrePost、LS-OPT、LS-TaSC (拓樸)、及 LSTC 的假人與屏障模型等開發，以使用在如汽車設計、航太製造、生化等各工業領域上。本人的研究則在於將 LS-DYNA 非線性有限元素分析軟體，應用於國防科技領域。

討論重點：離散元素法(Discrete Element Method)

離散元素法對於球體物的定義為一質點，已使用於某些特定研究如破裂分析、混凝土攪拌等。使用時須輸入其體積及慣性矩(moment of inertia)。而對於質點與質點間之碰撞行為（圖 1），則分別定義了垂直(Normal)及剪(Shear)方向的接觸勁度(Contact Stiffness)，NormK 及 ShearK、垂直及剪切線方向的接觸阻尼(Contact Damper)，DAMP 及 TDAMP、以及滑動及滾動的摩擦力係數，Fric 及 FricR。

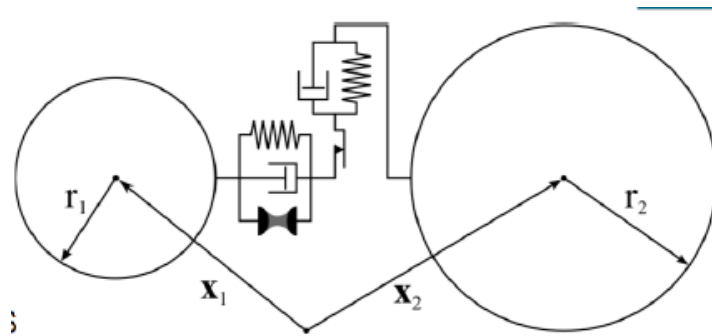


圖 1、質點間之碰撞定義

離散元素的碰撞，可能有三種狀態（見圖 2）。其互動距離 d_{int} 之定義如下：

$$d_{int} = r_1 + r_2 - |x_1 - x_2| \tag{1}$$

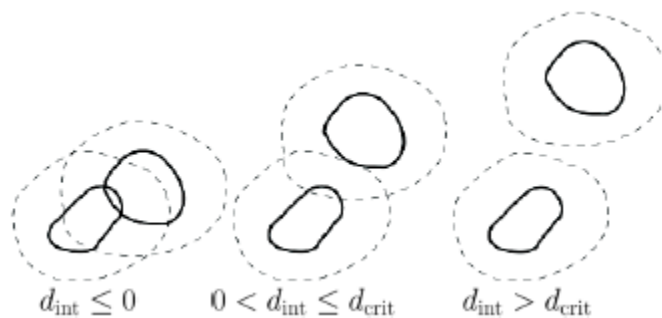


圖 2、可能的碰撞狀態

碰撞時彈性(Elastic)部分的貢獻，在垂直方向接觸力的計算為：

$$F_n = K_n d_{int} \tag{2}$$

K_n 為垂直方向彈簧常數，其值為

$$K_n = \begin{cases} \frac{\kappa_1 r_1 \kappa_2 r_2}{\kappa_1 r_1 + \kappa_2 r_2} \times \text{NormK} & : \text{if NormK} > 0 \\ \text{NormK} & : \text{if NormK} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

κ_i : 壓縮模數

切線方向的彈簧常數設定為與垂直方向彈簧常數相關，如下：

$$K_t = K_n \times \text{ShearK} \quad (4)$$

碰撞時阻尼部分的貢獻，在垂直方向的阻尼力為：

$$F_n = D_n d_{\text{int}} \quad (5)$$

D_n 為垂直方向阻尼常數，其值為：

$$D_{n/t} = \text{DAMP} \times \eta_{\text{crit}} = \text{DAMP} \times \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} K_{n/t}, \text{ 其中 } 0 \leq \text{DAMP} \leq 1.0 \quad (6)$$

碰撞時摩擦力的貢獻如下：

$$F_{fr} \leq \mu_{fr} \times F_n \quad (7)$$

其中 μ_{fr} 為摩擦係數， F_n 為正向接觸力。

在粒子與物體的接觸設定上，則以阻尼及摩擦為主，如圖 3。

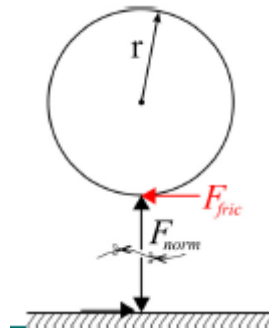


圖 3、粒子與物體的碰撞

阻尼係數 DAMP 介於 0 與 1 之間，決定碰撞時之能量吸收

$$\text{DAMP} = \begin{cases} 0, \text{ 彈性碰撞} \\ 1, \text{ 塑性碰撞} \end{cases}$$

在 LS-DYNA 軟體中的離散元素模組，存在兩個問題：

1. 離散元素的碰撞，雖有正向及切線方向的彈簧、阻尼、與摩擦力的設定，但沒有放大係數的設定，以至於再遭受巨大撞擊力時，會產生穿透的現象。
2. 離散元素自動產生器所產生的元素數量，與實務相差太大。因此建議 LSTC 公司，

修改現行離散元素自動產生器法則，以更貼近實際應用。

以上兩個問題經與該公司資深軟體開發師 **Jason Wang** 博士討論後確認，並同意在短期內改善，以符合本人研究之需求。

參、心得報告

一. 第 14 屆 LS DYNA 國際研討會

本次參加LS DYNA國際研討會除觀察各國公司及研究人員最新的非線性有限元素應用於各種不同領域的發展。經觀察後發現，兩年一度的LS DYNA國際研討會，本年度在軍事領域的論文發表，較上一屆減少許多。不知是軍事領域的發展趨於低調，或是近期內並無較多的突破所致。而本人過去在槍砲的機構與結構耦合分析，以及子彈在槍管內的膛內運動與結構分析突破性研究，仍未見於研討會中有所討論。兩年前本人於研討會中與LSTC人員的建議離散元素法(Discrete Element Method)改善事項，卻仍未見改善。經與該公司人員短暫的討論後，該公司表示研討會中事務繁忙，建議於兩周後本人赴該公司參訪時，再進行詳細溝通。但經由參加本研討會後得知，非線性有限元素分析發展的未來趨勢，在於Meshfree Method，以及以NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spine)取代現行的網格切割方法。

二. 康乃狄克大學機械工程學系流體及傳播現象實驗室

康乃狄克大學機械工程學系流體及傳播現象實驗室在Tai-Hsi Fan教授的帶領下，和坐落於康乃狄克州的醫藥大廠輝瑞公司(Pfizer, Inc.)緊密接合，以流變學的理論從事生物醫學上的研究，其成果斐然。然在其成果之外，本人對於該校之博、碩士研究生所具備的理論與程式基礎，亦大為驚艷。該實驗室所開發的技術，均非以商業軟體所能完成。因此，研究生均須具備程式開發能力，才得以進行創新的理論與實務應用。相較於國內的碩、博士班研究生，除少數及優秀大多人才外，大多已不具備程式開發能力，而多以商用軟體進行研究，使得教授的研究方向及成果備受限制。在此建議本國的碩、博士班研究生，必須加緊自我要求及訓練，才能跟上國際水準。

三. TREX 企業公司

本次經由TREX企業公司執行長Kenneth Tang博士的邀請，赴該公司參訪，了解到TREX企業公司雖為中小型企業，但以技術創新作為該公司座右銘，公司內曾經多達四百名碩、博士等級研究人員。該公司長期以其研發之基礎，向美國國防部提案，獲得資金的挹注，發展出多項光電方面的關鍵技術。其中尤以毫米波關鍵技術發展出高速的無線數據通訊系統，以及機場跑道異物偵測雷達等產品。光學影像關鍵技術發展出雷射雷射雷達系統。感測器關鍵技術發展出衛星等級超高解析度CMOS數位鏡頭。先進材料關鍵技術發展出應用於航太級訊號接收站可用之高強度、輕量化、高熱傳導的碳化矽(Silicon Carbide)材料。至目前為止，這些關鍵技術已經為該公司新創了六個尖端領域的分公司。由此可見美國在尖端科技發展的結構鍊，由政府出資私人企業發展的模式，創造出成功且領先國際社會的先進科技領域產業。

四. Livermore 軟體科技公司

本人有幸在LSTC公司研發部門經理Tsai Chen-Shyh博士邀請下，參訪該公司研發部門。該公司長期發展的非線性有限元素分析軟體LS-DYNA，被公認為市場上的最佳非線性有限元素分析軟體。這個軟體除應用在車輛研發的撞擊分析外，另有一部分應用於國防科技如爆炸、貫穿防彈等分析上，而本人則為第一個將此軟體應用於槍管內彈道分析者。有關非線性有限元素分析的近期發展，為將Meshless Method (如Element-Free Galerkin, EFG)，以及Particle Method (如Smoothed Particle Galerkin, SPG)，

及Smooth Particles Hydrodynamics, SPH)寫入其中，使得土壤分析、爆炸分析及貫穿防彈分析可得更精確的解答。但這個部份的發展，亦可發展成為霰彈槍霰彈彈粒的噴發運動分析以及噴發散布面積分析。兩年前本人曾建議修改部分程式，但未獲積極與正面的發展。本次特別利用機會前往LSTC公司，當面與該公司資深程式發展人員Jason Wang博士，進行理論與經驗回饋及研討，且經確認後可行。Jason Wang博士同意立即進行理論推導與程式修改，完成後即通知本人，以後續執行霰彈槍槍管彈道分析及霰彈彈粒出槍管後之噴發運動分析，以及噴發散布面積分析研究。

肆、建議事項

本次以國防工業發展基經會所提供的研究經費，赴美參訪共計二十三天、四個行程，分別為 1. 參加第 15 屆 LS DYNA 國際研討會、2. 參訪康乃狄克大學機械工程學系流體及傳播現象實驗室、3. 參訪 TREX 企業公司、4. 參訪 Livermore 軟體科技公司。這種學術性的交流，除可開闊吾人的國際觀外，亦可經由互相之間的討論，激勵出未來研究方向的火花。例如參加第 15 屆 LS DYNA 國際研討會中，可確立本人目前的槍管內彈道結構與應力分析與模擬，在國際上尚未見相關研究，因此繼續下去仍有可為；參訪康乃狄克大學機械工程學系流體及傳播現象實驗室中，可了解美國大學如何與產業界之間進行合作研究，以及生化領域在機械工程系的研究方向；而在參訪 TREX 企業公司的行程，則見識到美國中小型以研發關鍵技術為主的企業，如何與美國政府合作，進行國防領域相關的研究。尤其是 TREX 企業公司所研發的機場跑道 FOD 毫米波雷達，與碳化矽管之成品，與本人專長與研究吻合，期待未來有合作的機會；至於參訪 Livermore 軟體科技公司，則是進行有關 LS-DYNA 中的離散元素法改善，也希望 Livermore 軟體科技公司能在近期內完成，以配合本人的研究。總而言之，此次參訪行程，本人收穫良多，也期許院內老師能以同樣方式，進行學術參訪，以提升本身的本質學能。在此也再度感謝校、院內各級長官的協助，使得本次參訪得以順利成行。