

未來工兵機械模擬系統物理模型發展 與軟體規劃

作者/李孟文中校

提 要

- 一、精練操作技術為徹底發揮機械效能的不二法門，運用訓練模擬器實施訓練，更能結合高科技、確保訓練品質及快速提昇戰力，運用模擬器可避免訓練者暴露在時機作業環境操控風險，也提供作業中可能發生的情況加以納入模擬器中訓練。
- 二、運用在模擬工程機械的運算程式中，包括了機械挖掘模式與土壤反作用力模式，因此挖掘工具於土壤中的挖掘行為，可以實際合理的方法受到適當的控制。若將模擬系統挖掘演算模式運用於未來發展之訓練模擬系統程式開發中，結合硬體需求後將能獲得精確、擬真度高之操作訓練效果，提升訓練實質效益。
- 三、國外有諸多業者投入開發或導入應用，工程機械訓練模擬系統已成為未來發展趨勢。本軍工兵機械訓練模擬器欲成功發展，其關鍵因素在於軟體設計之訓練課程能否結合目前國軍作戰與救災任務所需。

關鍵詞：虛擬實境、土壤反作用力模式、擬真度

前 言

機械化作業型態已成為國軍必須面臨轉型的模式，工兵機械為現代化戰場工兵部隊之要角，同時亦是精簡人力而能增強戰力之主要方法。精練操作技術為徹底發揮機械效能的不二法門，運用訓練模擬器實施訓練，更能結合高科技、確保訓練品質及快速提昇戰力^[1]。本軍工兵機械均源自於民間之土方工程機具，然而國外工程機械之教育訓練工作，亦逐漸採用模擬器取代實機作為機械操作人員之訓練平台，以節省訓練成本。目前資訊科技日新月異，模擬器開發所需之設備已臻成熟，在投入技術門檻降低、擬真度提升的情形下，模擬器之運用便能大幅提升投資效益。近幾十年，世界各國工程業者大量採用模擬器以避免訓練者暴露在時機作業環境操控風險，此外也提供不需等到危險狀況發生，在

註¹：林輝銘，〈訓練模擬器未來之展望〉《陸軍裝甲兵學校學術季刊》（新竹），178期，2006年，頁2。

模擬器中設定可能發生的情況納入訓練課程^[2]。工程機械機械模擬系統不僅能模擬整部機械每個動作細節，還必須具有土壤擾動的實境模擬效果，並考量與作業機具的互動模擬。本文主要探討本軍建置工程機械模擬系統之關鍵開發技術需求，以及模擬訓練軟體規劃與設計方向，使軟硬體設備能有效運用與整合，期能充分發揮未來模擬訓練具體效益，並作為未來訓練模擬器規劃建置之參考。

發展概況

工程機械訓練模擬系統，已在國外廣泛運用於營造、採礦等機械操作人員的員工訓練中，虛擬實境之工程機械訓練模擬器的運用不僅為了降低購製裝備的成本與訓練，亦能於裝備操作時即時應變與評估作業程序，虛擬實境模擬系統發展自早期的視覺、動感乃至土壤擾動模擬技術日益精進，本文就模擬技術之演進與類型逐一探討。

工程機械模擬器的發展，起初僅著重視覺呈現效能的模擬系統，使操作者能認知操作的視覺景象，並習慣使其在實際操作之前較不生疏。然而此類模擬器在操縱界面的真實性，尤其是力回饋的狀態無法具體呈現。

為確保工程機械操作訓練模擬器提供貼近實境的效果以及實際有助於作業者的資訊，模擬器開發的焦點應著重再挖土機操作時接觸土壤時回饋的反應是否真實。因此發展時需克服以下問題：

一、機械挖掘過程中操作挖掘工具接觸地面時的抵抗力。

二、如何在開發模擬器時結合能使呈現高品質虛擬影像同時提升動作運算速度之即時互動的知識。

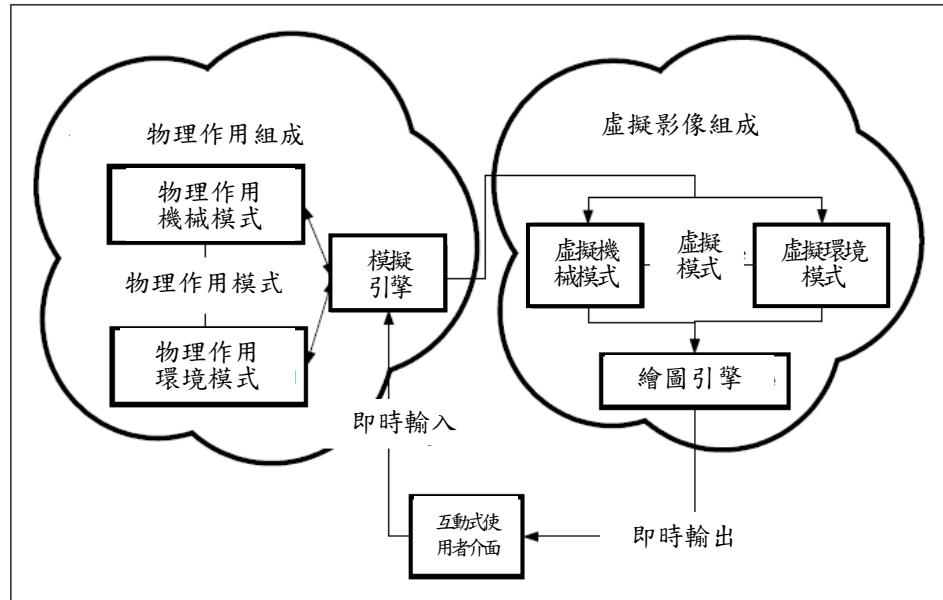
該類研究朝向藉由適當的機械挖掘模擬數學模式，與演算法來發展訓練模擬器，機械挖掘模擬數學模式提供模擬系統的開發有實際助益的資訊，演算法提供有效的計算方法，以確保模擬訓練系統與足夠的系統速度無縫整合接軌。

物理模型之演進

工程機械模擬器於規劃之初，不僅須考量其中由機械系統組成的工程機械本體，且要模擬整部機械每個動作細節，乃為模擬工程機械所呈現的挑戰性問題。此外，還必須達成土壤的實境模擬效果，包括考量與作業機械的互動模擬。在許多相關文獻中，部分學者提及土壤模擬模型。其他學者提出鏟挖工具任意角度挖掘時之數學模式，呈現的作用力與土壤表面的動作。即時互動土方挖掘模擬，主要是要提出在一個作業區地形呈現的物理模型的運用，以及建立簡單

註²：Marta Pla-Castells, Ignacio Garcia-Fernandez, Miguel A.Gamon, Rafael J. Martinez-Dura, Interactive earth-moving simulation in real-time, Instituto de Robotica, Universidad de Valencia, Spain , 2009,p1.

的土方挖掘互動模型^[3]，如圖一。土壤作用力模型的發展主要考量工程機械挖掘工具切入土壤產生切線、正交方向的作用力造成土壤形變位移之模擬，由於國外多位學者與研究機構致力研究，促使即時互動土方挖掘模擬模型的發展益趨成熟。



圖一 虛擬實境模擬器結構流程

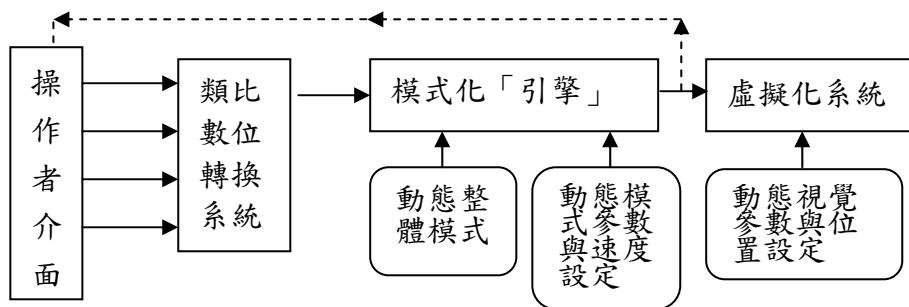
資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p13 .

一、物理作用模擬模型

Wakefield 與 O'Brien 於 1994 年提出模擬器發展的類型「物理作用型模擬器」，除了影像圖形顯示以外，其中包括了機械與地形的物理力學特性模式，於 1996 年發展一套即時互動虛擬實境挖掘機械模擬器，其主要核心的部份即是挖掘機械的電腦運算模式。它能呈現出實體挖掘機械內外部、液壓動作、動力回饋與控制系統。因此，實體機具真確的參數若能匯入模擬器之圖形影像系統中，便可讓操作者作動時及時回應動作影像。此系統亦採用一個土壤模型，用以計算機械挖掘工具與土壤間交互作用狀態，功能元件描述如圖二^[4]。

註³：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p13 .

註⁴：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p22 .



圖二 物理作用模擬器(Physics-Based Simulator)運作系統圖

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p22.

在挖掘土壤阻力模型中如果挖掘機械模擬系統的運用不僅僅只是操作機械本身而已，而是要結合周邊土壤環境，如同挖掘機械實際作業時將土壤由地面掘起，物理作用模型必須提供模擬器所需的圖形影像，由於機械挖掘工具施力接觸到土壤表面時會產生阻力並造成動力衰減的情形，有必要進行試驗土壤破壞的狀態。因此，物理作用模型應以鏟挖工具挖掘時之挖掘力回饋為來源的方程式演算之。除此之外，物理作用模型、土壤模型應扮演產生物理原理上合理之反作用力角色。因此它們必能用於挖掘機械規律的行為上^[5]。其優點為提供挖掘機模擬之影像場景物理作用行為資訊之能力，且為互動式之模擬系統；缺點則是在土壤模擬與演算方式仍欠完整。

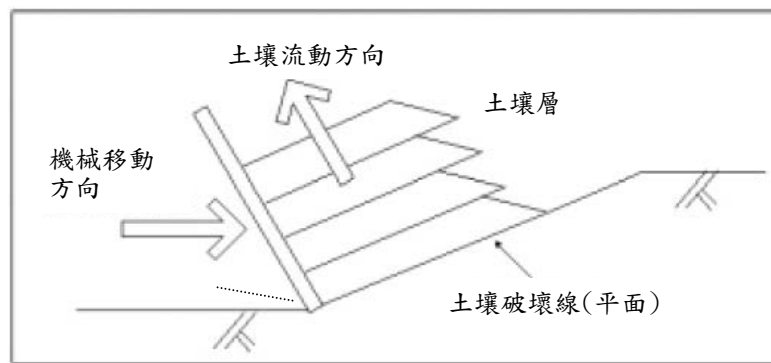
二、土方裂土作用模型

透過連續性分析模式的發展，來計算因挖掘工具挖掘土壤造成反作用力的問題，可得到一個令人滿意的解答，其稱之為裂土挖掘方程式模型，用於解釋土壤反作用力的一般型態，其中說明此反作用力是由重力、內聚力、黏著力與摩擦力所組成的，該模型假設當挖掘機械鏟推土壤時產生部分之形體破壞，藉由邊界線的對應力求解此靜態的平衡方程式來推論此反作用力，並劃分為Perumpral 提出 3D 反作用力模型，運用邊介面的力平衡來計算土壤反作用力，但其仍有限制因素；第一，在預測反作用力時這模型僅適用於推土式的挖掘法，挖掘土壤沿著鏟刀表面扯開流動最後流出鏟掘工具如圖三。然而，因為幾何形狀的關係，土壤會產生流動的現象。第二，此模型亦無法計算土方挖掘所造成的土壤破壞形式，這種分析模式只能解釋裂土作用而已^[6]，無法完全說明整個挖

註⁵：Ron Wakefield, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology,2002,p23 .

註⁶：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p26-27.

掘動作的土壤擾動變化歷程。

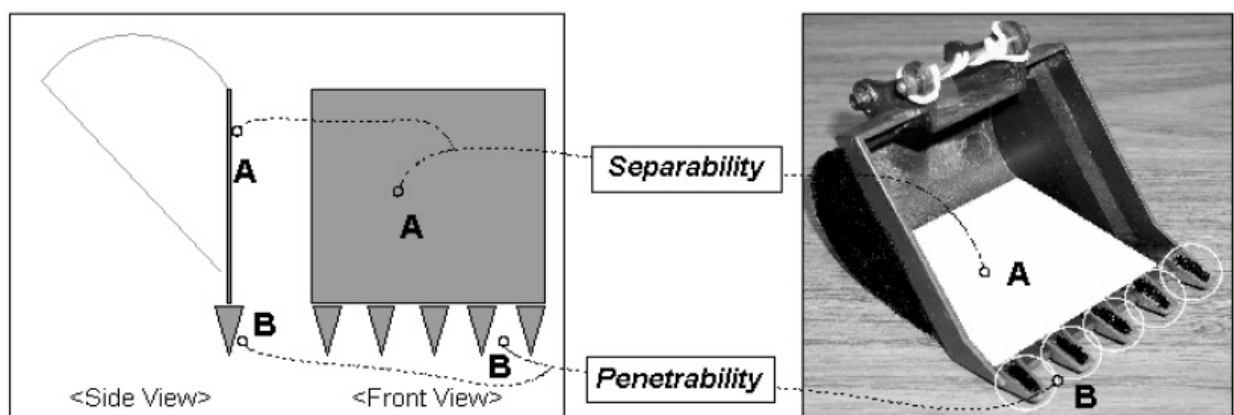


圖三 推土鏟動作土壤流動圖

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p28.

三、土方鏟切作用模型

貫穿理論係由切割土壤之裂土作用衍生而來的，但有別於推土機的推土鏟作業時產生的裂土作用。就形狀而言，挖土機挖掘工具主要由土斗與斗齒二個部份組成，圖四。首先土斗部份存在切割力，形狀為矩形，稱為土斗切割面，圖四中 A 區域。藉由切割面挖土機能將土壤移動推到破壞面中。此外另一個部份就是斗齒(圖 4，B 處)，他穿透到土壤中，使挖掘工作容易進行。更進一步不像推土機向前產土推進模式，挖土機依賴各自旋轉之動力轉換元件，各元件的動作變化使挖土機充分利用土斗切割與穿透的能力。

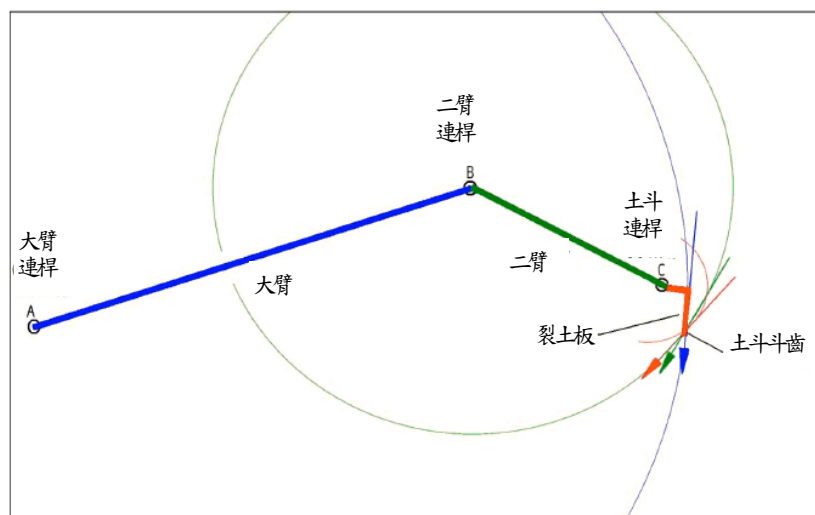


圖四 挖掘工具裂土與鏟切貫穿作用圖

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p31.

憑藉土斗尖部斗齒連結轉動的軌跡與切割鏟刀間的角度，土斗可承受之穿透與切割土壤阻力或兩者同時之阻力。圖五表示當大臂旋轉至 A 點時二臂與土斗之 B 與 C 點不動，土斗尖部以藍線表示。環型軌跡與切割鏟刀行程的角度幾

乎為 0（平行），意即切割鏟刀無法切割土壤，只有斗齒受力穿透至土壤中。因此以上情形表示土斗僅承受穿透之反作用力。然而，土斗能承受切割與穿透之反作用力是合理的。當二臂能順著 B 點旋轉，此環型軌跡以綠線表示，與切割鏟刀形成的角度即代表上述切割與穿透反作用力產生的情形了。值得注意的是，挖掘動作進行時為一連續的貫穿程序，土壤會因動作不同產生不一樣形變，因此數學運算程式須計算任意角度貫穿土壤的反作用力，意即呈現適當的破壞模式^[7]。



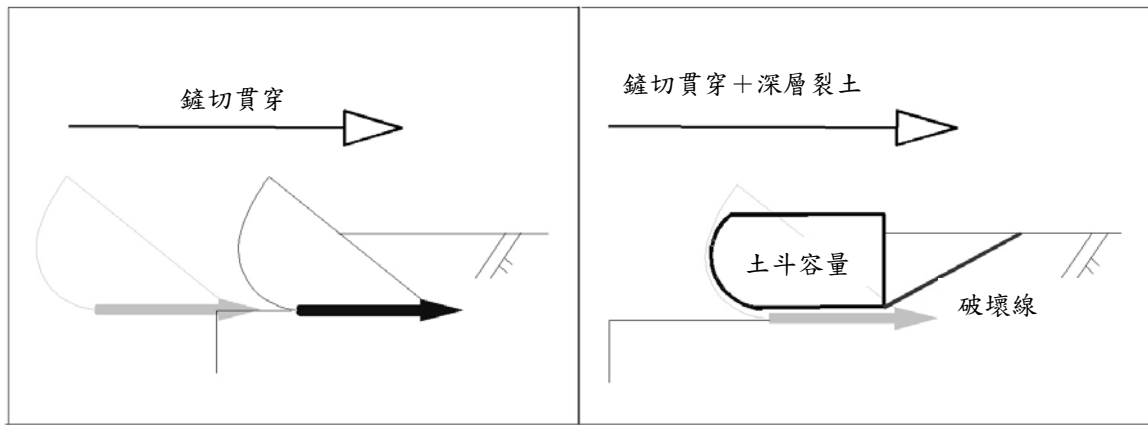
圖五 挖土機動作特性分析圖

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral & Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator: a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p31.

四、深層裂土作用模型

挖掘機械多變化的動作與挖掘工具形式，衍生另一種特殊的挖掘模擬演算技術，有如先前所述之土方回填現象。像圖六考量土斗斗齒水平的鏟入土中的挖掘實例來說，當土斗再進一步開始填滿土方並壓實（圖六左），到達某依程度時，土斗感受的阻力僅只有貫穿反作用力。因此，此時在土壤表面無法看見任何土壤遭破壞的現象，因為土壤已在底下形成破壞了。然而，一旦土斗像圖六右情形完全壓實後，土壤便呈現另一種破壞型態，此時只有裂土之反作用力存在。此種流逝的破壞型態可由另一種土壤破壞技術深層裂土來說明解釋。被完全壓實於土斗中的土壤形成有如方塊般的形體。其中前面的功用像是另一個裂土鏟刀般，依序地將土壤前推行程土壤破壞表面，如圖六右圖所示。由此可知，即使挖掘之初僅有貫穿力產生，但裂土作用亦隨之而來，計算反作用力所考量的原則時亦應納入其他的挖掘技術，深層裂土。

註⁷：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral & Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator: a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p30-32.



圖六 鏟切與深層裂土示意圖

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral & Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator: a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p38.

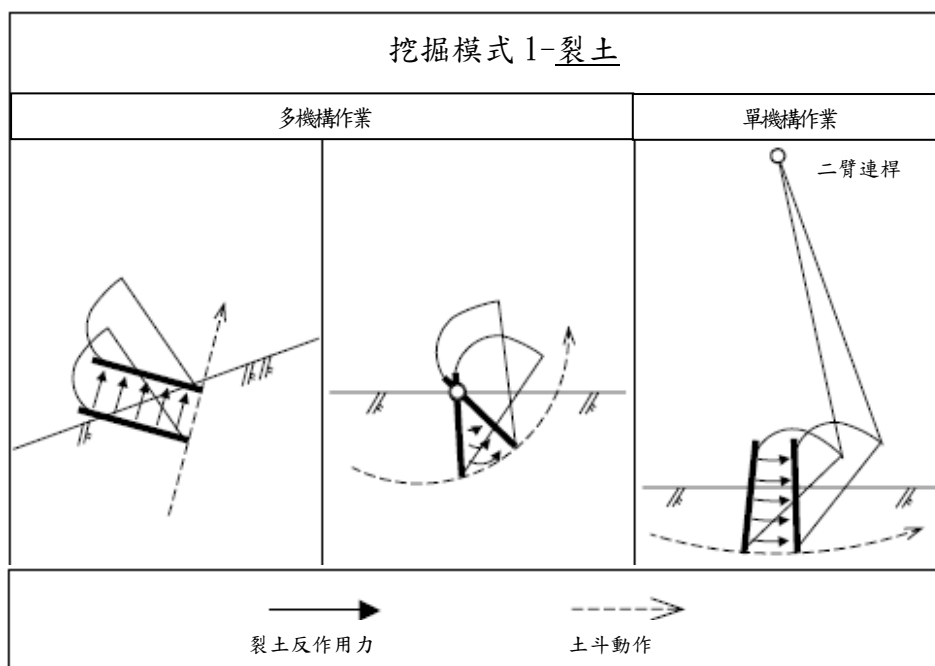
歸納以上模擬機械挖掘土壤之反作用力演算理論，其特性可分為裂土、鏟切與深層裂土等三種不同的挖掘技巧。當土斗挖掘土壤時會呈現斗齒之運動軌跡，然而挖掘方式會因操作者依據不同土壤狀況、挖掘區的限制與其意圖而不斷改變軌跡，擅用操縱桿不斷變換挖掘作業、方法，有時並非只有一個單純因素存在，而有可能2個或3個不同技巧同時存在。因此，一個挖掘軌跡細分成一連串的部份時，每一小部分會有一種或不同的挖掘技巧因素，他們每一部分呈現出不同的挖掘動作，亦需要特定土壤反作用力之計算方案。由於三種獨特的挖掘技巧被解析為不同形式的挖掘動作，每個動作型成一個挖掘的程序。因此就挖掘土壤的動作而言，不應只著重在挖掘技巧，亦要顧慮挖掘動作，才是解釋挖土機挖掘的過程完成的組成要素。

模擬系統挖掘演算模式

挖掘動作的模擬Ron Wakefield等學者將其分為單一機構與多重機構模式，所謂單一機構係指土斗挖掘動作時僅出現一種土壤反作用力；多重機構則是土斗動作產生時會造成二個（含以上）的反作用力。屬於單一機構模式的有裂土、鏟切模式。多機構模式區分鏟切裂土、鏟切深層裂土二種，依照挖掘特性區分為五種模式：

一、裂土模式

其所呈現出的挖掘動作（如圖七）係土斗仰賴裂土板進行裂土行程來破壞土壤表面。模式一土斗移動的方向為裂土板垂直方向，因此斗齒無法產生貫穿行為，動作方向如下圖所示，圖中裂土反作用力為實線，虛線代表土斗動作方向。

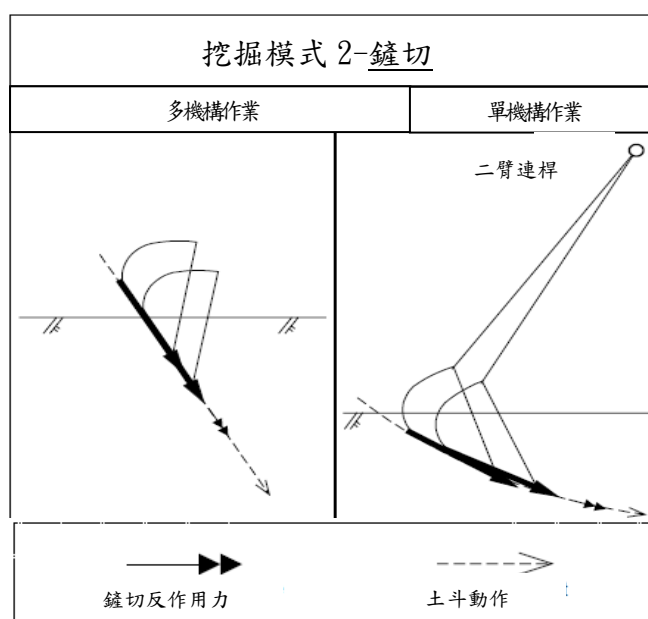


圖七 挖掘模式一，裂土

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p99.

二、鏟切模式

此挖掘模式呈現出另一個單一機構模式（如圖八），此時土斗斗齒扮演鏟切貫穿深入土壤之要角。裂土板則產生黏著與摩擦力，有別於模式一，土斗移動方向為裂土板與斗齒之切線方向。因此，此挖掘模式裂土所產生之反作用力並不存在，動作方向如下圖所示，圖中鏟切反作用力為實線，虛線代表土斗動作方向。

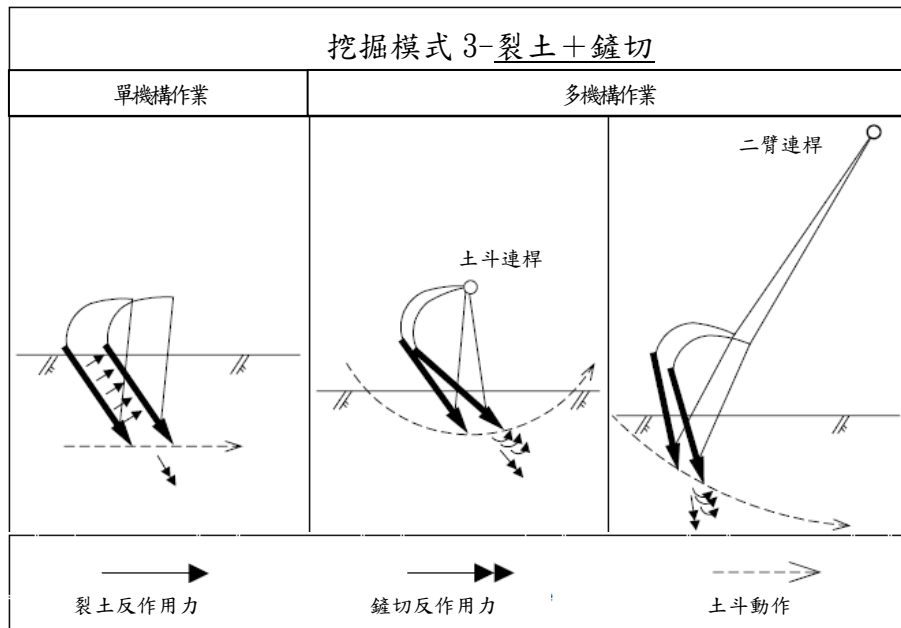


圖八 挖掘模式二，鏟切

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p101.

三、裂土鏟切模式

此挖掘模式屬於多機構同時運作的挖掘動作（如圖九），裂土與鏟切貫穿之反作用力藉由土壤與裂土板、斗齒之間交互作用形成的。此挖掘模式介於一與二之間，由土斗彎矩方向、裂土板與斗齒形成一定的夾角，因此貫穿與裂土反作用力均存在，圖中裂土反作用力為單箭頭實線，鏟切反作用力為雙箭頭實線，虛線則代表土斗動作方向。

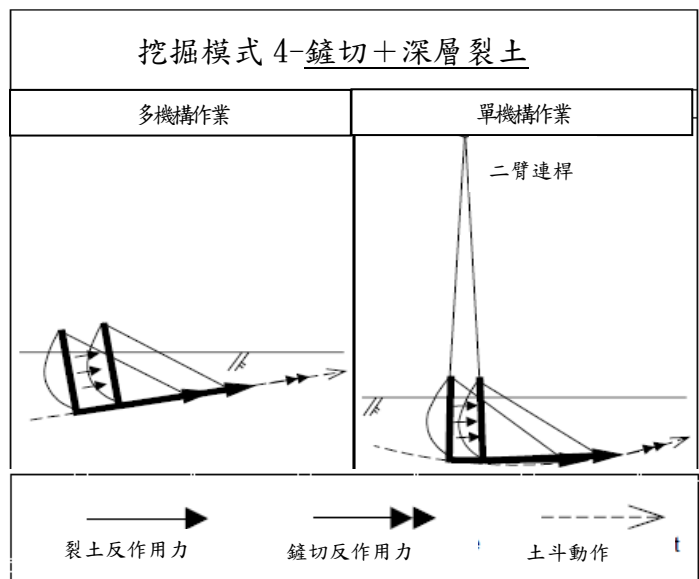


圖九 挖掘模式三，鏟切裂土

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p103.

四、鏟切深層裂土模式

此挖掘模式亦屬於多機構同時運作的挖掘動作模式（如圖十），鏟切貫穿、深層裂土反作用力是由斗齒與裂土底板所形成的，就動作需要來說，此模式與模式二是相同的。不同的是此模式的土斗係位於較深的土壤當中，因而使裂土底板產生深層裂土之反作用力，圖中各作用力表示方式與模式三相同。

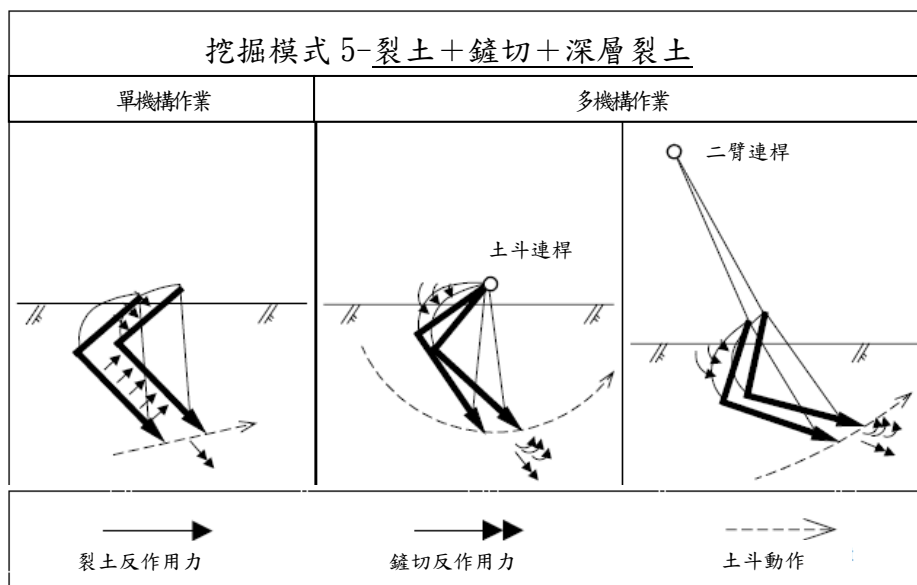


圖十 挖掘模式四，鏟切深層裂土

資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral & Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p1

五、挖掘綜合模式

最後一種挖掘動作，是由裂土底板與斗齒形成裂土、貫穿與深層裂土的反作用力（如圖十一）。模式五屬於模式三的延伸，不論動作模式、彎矩角度都如同模式三一般，唯一不同的是機具土斗必須沒入較深的土層中，致使裂土底板產生反作用力，圖中各作用力表示方式與模式三相同。



圖十一 挖掘模式五，鏟切裂土與鏟切深層裂土

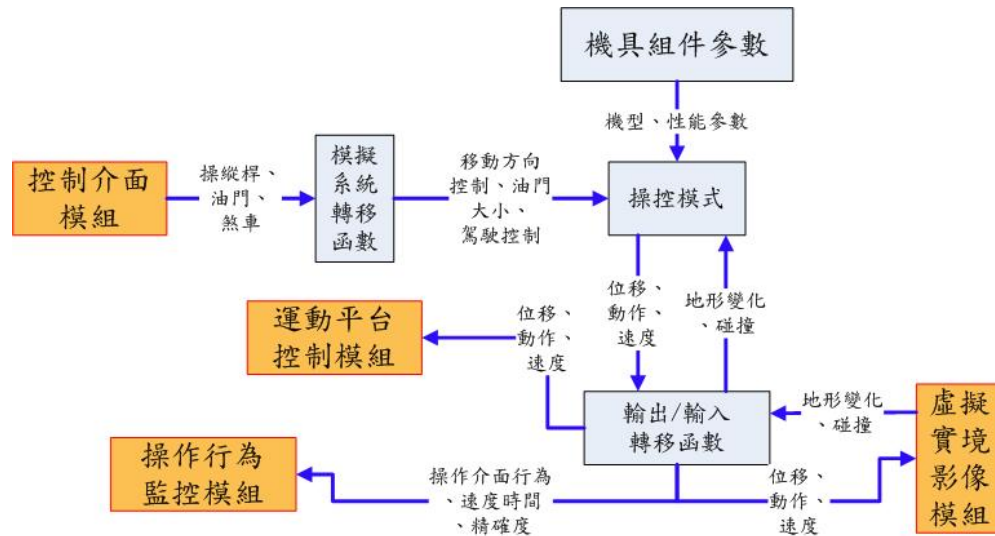
資料來源：Ron Wakefield、Dennis Jones、John Perumpral&Walid Thabet, Development of a Virtual Reality Excavator Simulator:a Mathematical Model of Excavator Digging and a Calculation Methodology, Borinara Park, 2002, p105.

挖掘數學模式是由其挖掘動作程序中，以許多因子來預測土壤可能產生之反作用力。其中包括了機械挖掘模式與土壤反作用力模式。並運用在模擬器的運算程式中，因此機具的挖掘工具於土壤中的挖掘行為，可以實際合理的方法受到適當的控制，將以上所述之模擬系統挖掘演算模式運用於未來發展之訓練模擬系統程式開發中，結合硬體需求後將能獲得精確、擬真度高之操作訓練效果，提升訓練實質效益。

模擬器需求規劃

訓練模擬器硬體運作模組部分主要包含控制介面、運動平台控制、虛擬實境影像以及操作行為監控等模組。操作人員以控制介面模組之操控裝置（油門、煞車等），將行為參數輸入模擬系統後，經由已設定之機械性能參數以程式進行演算，然後將訊號反覆傳送至運動平台模組以及虛擬實境影像模組中，產生動感回饋與圖像顯示，期使模擬機械操作型為達到擬真、流暢之呈現與感官反應。此外，操作行為監控模組會將整個模擬運作過程、擷取操作回饋參數（操控行為精確度、時間以及錯誤操作型為紀錄等），並紀錄操作人員之作業水準

與分析評等。訓練模擬器各單元模組運作流程如圖十二所示。



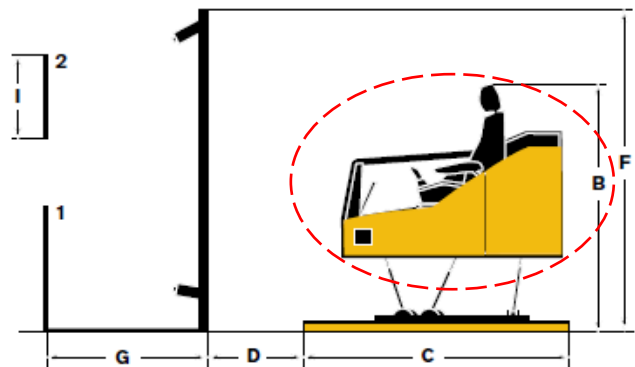
圖十二 訓練模擬器各單元模組運作系統圖
資料來源：作者繪製。

一、控制介面模組

控制介面模組包括模擬機械的駕駛座艙與艙內陳設之控制器，主要功能係將操作者操縱模擬器之動作，藉由感應器將訊號傳送至模擬系統主程式中，驅動各系統模組運作。駕駛座艙之操控和訊號擷取，其可操控的部份如同實際的工程機械一樣，包含方向盤、油門、煞車、排檔、啟動開關與控制桿等，儘可能採用原車之硬體和電路，使其有操控實車的感覺（如圖十三、十四）。在儀表板部份，依據操控動作，再有各種燈號產生。駕駛座艙所需擷取的訊號包括方向盤、油門、煞車、控制桿等，依不同的特性裝置不同的電阻器或感測開關，而產生數位或類比訊號送出，經由訊號擷取卡送回控制電腦。模擬器之駕駛座艙為使用者控制模擬器動作的主要機構，透過座艙的控制單元來驅



圖十三 Thoroughbred Technologies 公司開發之推土機訓練模擬器座艙配置圖
資料來源：Thoroughbred Technologies 公司網站，www.thoroughtec.com。



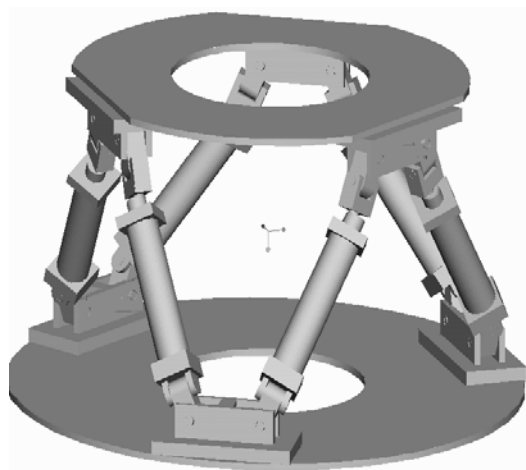
圖十四 Volvo 公司發展之訓練模擬器座艙示意圖
資料來源：Volvo Construction Equipment 公司網站，www.volvoce.com。

動整個模擬器的運轉包括顯示的圖像、動感平台動作以及程式運算等工作。同時，座艙配置規劃直接影響訓練操作者使用模擬器後，於操作實體機具的效用，因此操作介面配置時應著重與實體機具一致為要。

（一）運動平台控制模組

運動平台設置於模擬器駕駛座艙位置下方，主要是負責接收主程式電腦輸入訊號驅動動力機構，以產生如同實體機械般慣性動作的裝置。一般是由一六角平板構成，藉由幾何上的對稱，以簡化平台運動之分析與控制，亦有使用三角對稱架構的上平板，目的也是藉以簡化演算之複雜度。可動平台的功用主要是做為載物平台。

運動平台之硬體架構主要包含動力供應器（油壓泵）、致動器（油壓缸）、閥瓣（伺服閥）及位置感測器（LVDT 或位移計）。動力供應器主要提供系統運作時所需之能量，如：油壓泵供應高壓的液壓油驅動油壓缸。受控系統則由致動器、閥瓣及位置感測器三者組成。系統的控制分為伺服卡控制與電腦控制兩種。當系統藉由伺服控制卡搭配伺服閥進行控制時，首先由監控電腦產生一個參考輸入電壓，經過類比/數位轉換界面輸入至伺服控制卡與位移置測器所量測得之電壓值相比較，其誤差再經由伺服控制卡的 PI 控制電路作回授控制，最後輸出訊號給伺服閥，驅動致動器動作。此類控制模式可使用於油、氣壓系統。預估平台之上平板的重量約為 300kgw，而座艙、座椅的架設估計也須荷重 300kgw，並考量乘載人數一人，荷重約於 100kgw 上下，最後加上設備安全方面的考量，故以 1000 kgw 為平台的最大安全設計範圍。其制動器之最大行程將決定上平台的最大工作空間，制動器行程越長，所達到的工作空間自然越大^[8]。



圖十五 運動平台 3D 模型立體圖

資料來源：吳昌明，〈駕駛模擬器簡介與應用研究探討〉（桃園：國立中央大學車輛行車事故鑑定研究中心專題報告），2005，頁7。

註⁸：鄭銘章、何志宏、陳德懷、董基良、馮君平、魏健宏、林豐福、張開國、楊智凱，〈駕駛模擬器視覺系統之整體規劃研究〉（台北：交通部運輸研究所，2002年），頁103-104。

（二）虛擬實境影像模組（如圖十六、十七）

用以建構及顯示虛擬機具操作場景，並用以展示操作者的駕駛情形，產生互動式效果。虛擬實境影像模組包括硬體視覺系統與軟體程式設計二部分。在視覺系統方面，利用個人電腦、液晶螢幕以及整合網路同步連線技術，將虛擬駕駛場景分別顯示在液晶螢幕上，此外視覺系統之影像產生器即時運算系統，採用內建高階中央處理器與3D 圖形加速卡以及乙太網路卡PC架構，搭配視窗作業系統透過集線器構成整個同步影像即時運算產生器；影像投影系統則採用多部液晶螢幕，確保投影畫面之色彩、亮度與對比均能一致^[9]。在座艙的水平與垂直視角範圍中採用LCD液晶顯示器呈現操作者駕駛實體機具所見的場景與視界，使操作者於模擬訓練時能得到實體機具作業的一致感受。聲音輸出部分則模擬動力單元如引擎、液壓幫浦等操作產生的噪音，隨著操作介面的行程產生不同的噪音聲響。同時，模擬機具行駛與撞擊地面的聲音，使操作者因不當得到警惕，減少日後於實機錯誤操作的機會，亦能減少實體機械損壞的情形。

軟體程式設計由3D物件開發工具建構場景畫面。以模擬系統連結外部函數庫訊號，控制並偵測場景中的物件參數，並將訊號擷取模組所擷取的操作者對機具之操控訊號，依機具特性計算應有之行為反應，以達到互動之效果¹⁰。模擬系統開發時需規劃模擬操作機具所處的場景，依據課程安排建置不同的情境與腳本，讓使用者能置身於與實際作業場景相同的環境，熟練多樣的模式。軟體需求規劃包括訓練場景建置、訓練課程設計等主要項目：

1. 場景建置

場景建置用以設定場景、狀況以及設定位置、地質參數等資訊，依照各類



圖十六 虛擬實境影像投影於座艙內之情形 1
資料來源：Immersive Technologies 公司網站, www.ImmersiveTechnologies.com.



圖十七 虛擬實境影像投影於座艙內之情形 2
資料來源：Thoroughbred Technologies 公司網站, www.thoroughtec.com.

註⁹：鄭銘章、何志宏、陳德懷、董基良、馮君平、魏健宏、林豐福、張開國、楊智凱，〈駕駛模擬器視覺系統之整體規劃研究〉（台北：交通部運輸研究所，2002年），頁107。

註¹⁰：同前註⁹。

型工程機械訓練目標的差異，規劃使用機具的作業場景，其中需考量因素包括地形、土壤性質及天候等作業項目（如圖十八—廿一）。

（1）地形：

一般針對作業水平面平坦程度、作業空間限制、坡度以及特殊地區如河川地區、山區等。模擬不同地形條件下之機械作業方式與限制，使操作者克服地形障礙完成系統設定之作業項目。

（2）土壤性質：

主要呈現不同土壤材料如黏土、砂土與礫石等的模擬樣態，以及土壤含水量多寡，使模擬系統操作者能熟悉各種土壤類型、含水量條件下之作業情形。

（3）天候：

於視覺系統上呈現作業環境包括天氣陰晴、雨量大小與日夜間的能見度高低情形，對操作者視覺判斷與技術訓練產生的影響。



圖十八 模擬器軟體建置之地形實例
資料來源：Thoroughbred Technologies 公司網站，
www.thoroughtec.com.



圖十九 裝土機模擬器建置場景實例
資料來源：Thoroughbred Technologies 公司網站，
www.thoroughtec.com.



圖廿 挖土機模擬器建置作業平台場景
資料來源：Thoroughbred Technologies 公司網站，
www.thoroughtec.com.



圖廿一 模擬器場景中之土壤性質設定會影響操作效能
資料來源：Thoroughbred Technologies 公司網站，
www.thoroughtec.com.

2.訓練課程設計（如圖廿二—廿五）

工程機械模擬訓練課程主要針對初學者熟悉機械操作模式之初階訓練，以及一般作業人員對具操作危險訓練項目進行進階訓練。操作訓練課程設計著重工程機械操作特性，同時針對作業精確度與作業時效二方面設定訓練關卡，採取由減至繁由易而難之原則。此外，訓練課程設計也應結合未來機械作業任務目標譬如土石流河道淤積、山區落石坍塌或掏空路基阻斷聯絡道路、河床引道構築等皆可納入其中，使模擬訓練方向能強化部隊機械操作技能。

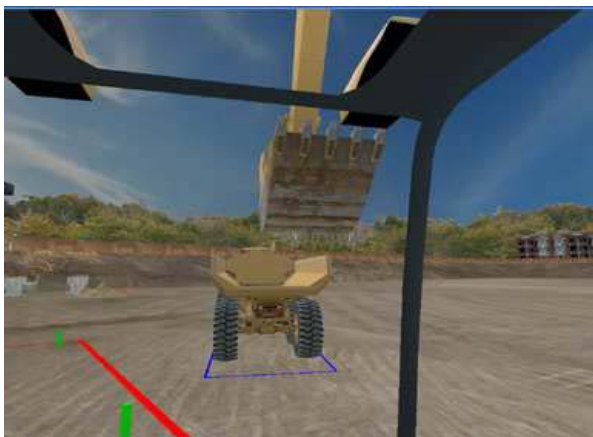
工程機械因類型不同，各項訓練課程設計之訓練項目亦有所差異，以下就挖土機、裝土機與平路機概略說明其差異性。以挖土機而言，需針對機具履帶控制位移角度、土斗定點擺放控制作為初階訓練課程；熟練後進而操作土斗二點間位移區分直線、弧線以及複雜曲線等進階課程；另一階段則實施指定區域挖掘作業，依據指定區域大小、深度完成挖掘、填覆等動作。再者，則實施機具協同作業包括傾卸車裝車作業、多部機具同時作業等訓練項目。



圖廿二 挖土機模擬器標定挖掘區域挖掘課程
資料來源：Caterpillar 公司網站, www.catsimulators.com.com.



圖廿三 挖土機模擬器土斗操作課程
資料來源：Caterpillar 公司網站, www.catsimulators.com.com.



圖廿四 挖土機模擬器指定路線駕駛課程
資料來源：Caterpillar 公司網站, www.catsimulators.com.com.



圖廿五 挖土機模擬器挖掘裝載課程
資料來源：Volvo Construction Equipment 公司網站, www.volvoce.com.

裝土機而言，針對機具駕駛轉向控制、土斗定點擺放控制作為初階訓練課程；熟練後進而操作土斗舉升轉角控制、行駛間土斗位移控制等進階課程；另一階段則實施指定區域挖掘作業，依據指定區域大小、深度完成掘土、整地等動作。再者，實施機具協同作業包括傾卸車裝車作業、多部機具同時作業等訓練項目（如圖廿六、廿七）。



圖廿六 裝土機模擬器土斗定位課程

資料來源：Caterpillar 公司網站，www.catsimulators.com.com。



圖廿七 裝土機模擬器裝載課程

資料來源：Volvo Construction Equipment 公司網站，www.volvoce.com。

平路機而言針對機具駕駛轉向控制、刮刀轉向與側傾等控制作為初階訓練課程；熟練後進而車體傾斜刮刀轉角控制、行駛間刮刀裂土深度控制等進階課程；另一階段則實施指定區域列土、整平、整坡作業，依據指定區域大小、深度完成整地、刮修與側向傾斜括土等動作。再者，則實施機具協同多部機具同時作業等訓練項目（如圖廿八、廿九）。



圖廿八 平路機模擬器刮刀操作課程

資料來源：Caterpillar 公司網站，www.catsimulators.com.com。



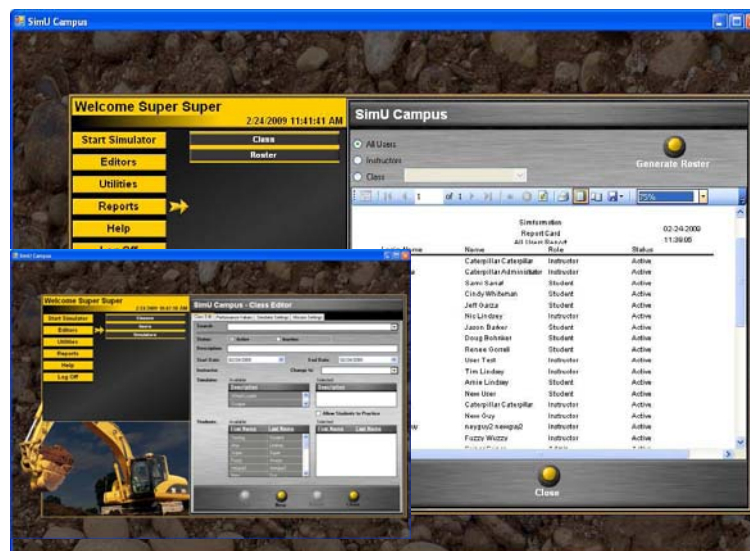
圖廿九 平路機模擬器駕駛課程

資料來源：Caterpillar 公司網站，www.catsimulators.com.com。

（三）操作行為監控模組

操作行為監控模組係指模擬系統終端設置使用者操作行為紀錄、分析之監控系統，主要功能在於提供對模擬環境之操作、設定與監控，監控每位學員操作情形、錯誤事件記錄，同時紀錄學員訓練情形與歷史資料。在硬體裝備上主要由數台個人電腦組成，並透過 Ethernet 與主計算機連線進行資料傳遞。

操作者在模擬系統的操作過程當中，隨著使用時間的長短，對操作的熟練度也會增加，但操作行為的矯正更可使學習者了解技術障礙的因素，讓操作者個別針對技術水準較差的訓練課目加強操作演練。在教學過程中，教官也能利用系統內記錄的操作者使用記錄了解學者錯誤的操作行為，進而給予適當的技術諮詢強化訓練效果。同時也能利用個人訓練紀錄與以評量標準。



圖卅 美國開拓重機公司開發之挖土機訓練模擬器「訓練記錄管理系統」之視窗介面圖
資料來源：Caterpillar 公司網站，www.catsimulators.com.com。

預期效益

國外有關工程機械模擬系統之發展日趨成熟，隨著電腦硬體設備資料處理速度不斷提升，模擬軟體開發也因市場需求日益精進，除了在技術門檻方面較於以往降低許多以外，系統成熟度與擬真度亦大為提升，同時減少了開發風險與經費需求。然而，訓練模擬器之運用能彌補現階段受限之訓練條件，可得之具體效益如下：

一、縮短訓練時程，延伸訓練效益：

在不同訓練條件之下，同一狀況可以反覆實施訓練，若學者不合格可以從頭實施，透過增加訓練次數，每次確實可逐次改善降低完成該訓練課程時間，

效果十分顯著。以VOVLO重機所發展工程機械模擬器而言，其研究結果顯示一般實機訓練效果隨時間增加技術水準曲線較為平緩，代表學習者訓練技術進步的幅度較小；另一方面若以模擬器訓練時學習曲線起初較為陡峭，代表在短時間內即能達到較高技術水準，但若持續使用模擬器則會減緩訓練效果，由二者技術曲線特性可以發現，於初階訓練時使用訓練模擬器可減少約75%以上的時間，便可達到實機訓練成效，但進階訓練時仍須配合實際的機械操作訓練。然而，當學習者已完成訓練後，模擬器仍然能提供特殊、危險作業的訓練項目，提供操作者於實機訓練中無法遭遇之狀況，藉由不斷演練克服技術障礙。因此，模擬器的學習曲線能再向上延伸。此外，模擬器亦能詳實記錄操作者訓練成效資料，直接檢討改進。

二、摒除天候因素，消彌訓練危安

模擬器之操作不受天候影響，受訓學員生可藉模擬器持續實施訓練，增大投資訓練效益。同時，利用模擬器可將訓練場地真實地在模擬器上顯示出來，且可運用在任何環境下操作。其可任意設定模擬各種不同訓練課程及可能之突發狀況，亦能提供特殊且複雜之虛擬作戰環境及難以遭遇之天候與地形，模擬高危險性場景，經預先訓練可提高實際操作之安全性，使學者熟悉各項緊急操作程序及危機處理，藉以增加乘員之應變能力，期於實際操作時，將裝備實際性能予以充分發揮^[11]。

三、降低訓練成本，強化資源效用

工兵工程機械除教學訓練外，仍需支援緊急救災等專案任務，使用狀況頻繁，壽限大幅縮短，影響戰力甚鉅。運用模擬器從事訓練，能減少裝備不當損耗，延長裝備使用壽限。藉由模擬系統可依據任務之需求，模擬各種真實狀況，減少油料及操作次數，大幅降低教學訓練成本，並避免人員受傷以及裝備之耗損、折舊且無安全顧慮。然而在學校訓量負荷過重的情形下，可彌補訓練裝備之不足，減輕主要裝備的負荷量，有效提昇支援能量。

結 語

即時互動土方挖掘模擬技術的運用是工程機械訓練模擬系統發展之重要元素，而其演算法則亦與時俱進且不斷進步。值得慶幸地，國外學者投入研究者眾，並且實際也有諸多業者投入開發或導入應用，工程機械訓練模擬系統已成為未來發展趨勢。此外，本軍工兵機械訓練模擬器欲成功發展，其關鍵因素應在於軟體設計之訓練課程能否結合目前國軍作戰與救災任務所需。基於先前921

註¹¹：林輝銘，〈訓練模擬器未來之展望〉《陸軍裝甲兵學校學術季刊》（新竹），178期，2006年，頁8。

震災以及芭瑪、莫拉克等風災之救援經驗，更應將各類救災類型與機具作業型態之參數詳實蒐整併納入模擬訓練軟體訓項當中，才能徹底發揮模擬器之最佳效益。

作者簡介

李孟文中校，中正理工學院 54 期（83 年班）、工校正規班 141 期（90 年班）、國立屏東科技大學企業管理所碩士；曾任排長、連長、教官，現任職於陸軍工兵學校戰工組主任教官。