

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

感測器影像模擬系統開發--子計畫二：夜視鏡影像模擬系統開發 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 100-2623-E-216-001-D
執行期間：100年01月01日至100年12月31日
執行單位：中華大學電機工程研究所

計畫主持人：駱樂

計畫參與人員：碩士級-專任助理人員：楊景琦
碩士級-專任助理人員：黃湧益

公開資訊：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中華民國 101 年 03 月 29 日

中文摘要： 仿真即時影像輸出乃為模擬系統不可或缺之關鍵項目，諸如「夜間作戰模擬系統」、戰機模擬器、戰車模擬器等。特別在現今高科技戰爭中，「夜間作戰模擬系統」尤其扮演軍事夜間奇襲訓練極重要任務，提供現代戰爭常出現真實場景，是戰場決勝關鍵，如伊拉克戰爭即為最佳範例。仿真即時夜視影像系統內之視覺影像產生器(Image Generator, IG)將由資料庫中之資訊提供夜視視覺影像產生器之基本元素。資料庫資訊包含貼圖影像資料(Texture)、材質資料(Material)、地形資料(Terrain)、物件三維多邊形資料(Polygon)等。進而產生視訊訊號(Video Signal)，並由視訊顯示裝置(如顯示器、單槍投影機、頭盔顯示器)輸出夜視視覺影像，藉由高逼真影像輸出(High Realistic Output)，以達夜視高階模擬訓練系統之應用(Advanced Training System Application)。本計畫預估完成一套高階高逼真之「夜視鏡影像模擬系統」，我們將使用以原材質貼圖資料庫(包括材質光色追蹤(Color Tracking)屬性，如對材質對周遭光線(Ambient Light)、漫射光線(Diffuse Light)及反射光線(Specular Light)等屬性之資料庫)、光模型(包括周遭光線、漫射光線及反射光線等模型)及視覺效果(如混合(Blend)、霧化(Fog)、飽和(Blooming)等效果)等，且研發設計夜視轉換單元(Night Vision Conversion Unit, NV Conversion Unit)，然後經由夜視轉換單元，輸出灰階強度資訊，再經由視覺影像產生器產生夜視鏡視訊訊號。結案時可以完成展示一個夜視鏡影像模擬系統，以 3D 即時繪圖技術驗證模擬前述所提夜視影像模擬轉換研究目標。我們將用夜視鏡實際量測約 20 種材質之夜視影像，以建立各材質實際夜視影像資料庫，分析材質影像及採用影像處理技術，模擬產生高階逼真模擬夜視影像。同時將設計完成軟體，讓電腦可以輕易的達成各物質夜視影像模擬轉換功能。

中文關鍵詞： 夜間作戰模擬系統、仿真即時影像系統、夜視鏡影像、影像處理技術、3D 即時繪圖

英文摘要： The real-time simulated image is an indispensable item for Model and Simulation System, such as Night Vision Battle Simulation System, Flight Simulator, Tank Simulator. Especially, for today's high technique battle (e.g. Iraq campaign), the Night

Vision Battle Simulation System plays an important role of military night-time training mission, and provides a practical scenario for modern battle to win. The element of Image Generator (IG) in Real-time Sensor Image Simulation System is generated from database. The contents of database include the texture, material, terrain, polygon of the simulated image, the night vision simulated image is then generated via display, projector, and helmet display for advanced training system application accordingly. This project will accomplish a high-end and vivid Night Vision Image Simulation System. The simulated night vision image will be formulated with the paste information and color tracking property of the simulated image, such as ambient light, diffuse light, specular light, model of light, and visual effect (e.g. Blend, Fog, Blooming, etc.). The Night Vision Conversion Unit will be built for exporting the gray-level of simulated night vision image. After the accomplishment of this project, a Night Vision Image Simulation System will be demonstrated and verified by 3D graphic technique. The night vision image of twenty materials will be also measured for construction of the database in this project. By the techniques of 3D animation, image processing, and our designed software, the whole function for Night Vision Simulated Image for any material can be easily and effectively implemented on computer.

英文關鍵詞： Night vision battle simulation system, real-time simulated image system, night vision sensor image, image processing, 3D animation

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

(夜視鏡影像模擬系統開發)

※ 本計畫完整報告部分內容因屬軍事機密，已親交需求單位，不方便公開

※ 如有需求請先經原需求國防部軍備局中科院航發中心同意後索取，不便之處，尚祈見諒。

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 100-2623-E-216 -001 -D

執行期間：100 年 01 月 01 日至 100 年 12 月 31 日

執行機構及系所：中華大學電機系

計畫主持人：駱 樂

共同主持人：

計畫參與人員：楊景琦、黃湧益、張文聰

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

- 赴國外出差或研習心得報告
- 赴大陸地區出差或研習心得報告
- 出席國際學術會議心得報告
- 國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

中 華 民 國 100 年 12 月 31 日

國科會專題研究計畫成果報告撰寫格式

99年5月5日本會第304次學術會報修正通過

一、說明

國科會基於學術公開之立場，鼓勵一般專題研究計畫主持人發表其研究成果，但主持人對於研究成果之內容應負完全責任。計畫內容及研究成果如涉及專利或其他智慧財產權、違異現行醫藥衛生規範、影響公序良俗或政治社會安定等顧慮者，應事先通知國科會不宜將所繳交之成果報告蒐錄於學門成果報告彙編或公開查詢，以免造成無謂之困擾。另外，各學門在製作成果報告彙編時，將直接使用主持人提供的成果報告，因此主持人在繳交報告之前，應對內容詳細校對，以確定其正確性。

本格式說明之目的為統一成果報告之格式，**精簡報告內容之篇幅以4至10頁為原則**，完整報告內容之篇幅不得少於10頁。

成果報告繳交之期限及種類(精簡報告、完整報告、期中精簡報告、期中完整報告等)，應依本會補助專題研究計畫作業要點及專題研究計畫經費核定清單之規定辦理。

二、報告格式：依序為封面、目錄(精簡報告得省略)、中英文摘要及關鍵詞、報告內容、參考文獻、計畫成果自評、可供推廣之研發成果資料表、附錄。

(一)報告封面：請至本會網站(<http://www.nsc.gov.tw>)線上製作(格式如附件一)。

(二)中、英文摘要及關鍵詞(keywords)。

(三)報告內容：**包括前言、研究目的、文獻探討、研究方法、結果與討論(含結論與建議)**...等。

(四)計畫成果自評部分：請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值(簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性)、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估，並請至本會網站線上製作。(格式如附件二)

(五)頁碼編寫：請對摘要及目錄部分用羅馬字I、II、III.....標在每頁下方中央；報告內容至附錄部分請以阿拉伯數字1.2.3.....順序標在每頁下方中央。

(六)附表及附圖可列在文中或參考文獻之後，各表、圖請說明內容。

(七)可供推廣之研發成果資料表：

1.研究計畫所產生之研發成果，應至國科會科技研發成果資訊系統(STRIKE系統，<https://nscnt66.nsc.gov.tw/strike/>)填列研發成果資料表(如附件三)，循執行機構行政程序，由研發成果推廣單位(如技轉中心)線上繳交送出。

2.每項研發成果填寫一份。

(八)若該計畫已有論文發表者(須於論文致謝部分註明補助計畫編號)，得作為成果報告內容或附錄，並請註明發表刊物名稱、卷期及出版日期。若有與執行本計畫相關之著作、專利、技術報告、或學生畢業論文等，請在參考文獻內註明之。

三、計畫中獲補助國外或大陸地區差旅費、出席國際學術會議差旅費或國際合作研究計畫差旅費者，須依規定分別撰寫心得報告，並至本會網站線上繳交電子檔，心得報告格式如附件四、五、六。

四、報告編排注意事項

(一)版面設定：A4紙，即長29.7公分，寬21公分。

(二)格式：中文打字規格為每行繕打(行間不另留間距)，英文打字規格為Single Space。

(三)字體：以中英文撰寫均可。英文使用Times New Roman Font，中文使用標楷體，字體大小以12號為主。

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

- 達成目標
- 未達成目標（請說明，以 100 字為限）
- 實驗失敗
- 因故實驗中斷
- 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

- 論文：已發表 未發表之文稿 撰寫中 無
- 專利：已獲得 申請中 無
- 技轉：已技轉 洽談中 無
- 其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

夜視鏡影像模擬系統的設計屬於軍事用途，在歐美國家均屬機密資料，因此在國外相關文獻參考資料獲得不容易，同時此項研究在國內亦沒有人做過。本項計畫經分析夜視鏡影像成像原理，深入進行相關實驗設計規劃，因此所獲得的研究成果，非常重要且寶貴，因次對於未來於相關後續研究具有重要影響與參考價值。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期：100年12月31日

國科會補助計畫	計畫名稱：夜視鏡影像模擬系統開發 計畫主持人：駱樂 計畫編號：NSC 100-2623-E-216 -001 -D 領域：電機、資訊		
研發成果名稱	(中文) 夜視鏡影像模擬系統		
	(英文) Night Vision Sensor Image Simulation System		
成果歸屬機構	中華大學	發明人 (創作人)	駱樂
技術說明	(中文) 夜視鏡影像模擬系統的設計屬於軍事用途，在歐美國家均屬機密資料，因此在國外相關文獻參考資料獲得不容易，同時此項研究在國內亦沒有人做過。本項計畫經分析夜視鏡影像成像原理，深入進行相關實驗設計規劃，因此所獲得的研究成果，非常重要且寶貴。其應用範圍包括飛行訓練場景模擬器、載具操作運動模擬器、駕駛訓練系統、遙測探勘、3D 遊戲模擬平台、虛擬實境等。		
	(英文) Night vision image simulator is mainly designed for using in military. That is, it is top secret in many country including U.S and Europe. There is few reference appeared, and difficult to acquire from any known publication. Meanwhile, it is never been touch in this research field. This project firstly analysis the display principle of the night vision sensor, deeply go through each planning and related experiments. The acquisition is very important and valuable. The application can be spread to flight training scenario simulator, vehicle operation simulator, drive training system, remote-sensing, 3D game simulation, platform, virtual reality, etc.		
產業別	軍事、航太、光電、遊戲		
技術/產品應用範圍	包括飛行訓練場景模擬器、載具操作運動模擬器、駕駛訓練系統、3D 遊戲模擬平台、虛擬實境等		
技術移轉可行性及預期效益	技術移轉可行及預期經濟效益極高		

註：本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

目 錄

	頁次
1.前言	5
2.研究目的	6
2.1 研究動機	6
2.2 計畫目標	7
3.文獻探討	7
3.1 夜視鏡原理簡介與發展	7
3.2 感測器影像模擬系統概念	10
3.3 全世界夜視鏡影像模擬系統研發現況	11
4.研究方法	15
4.1 感測器影像模擬系統設計	15
4.2 夜視鏡感測器影像特性分析	18
4.3 夜視鏡影像模擬系統設計	20
4.4 實驗設計與建立方式	21
5.結果與討論	49
6.參考文獻	51
Appendix A	53
Appendix B	63

1.前言

仿真即時影像輸出乃為模擬系統不可或缺之關鍵項目，諸如夜間作戰模擬系統、戰機模擬器、戰車模擬器、戰場模擬等。而夜視信號(或熱影像)視覺影像產生器(Image Generator, IG)可由資料庫中之資訊(包含貼圖影像資料(Texture)、材質資料(Material)、地形資料(Terrain)、物件三維多邊形資料(Polygon)等)提供視覺影像產生器之基本元素，進而產生視訊訊號(Video Signal)，並由視訊顯示裝置(如顯示器、單槍投影機、頭盔顯示器等)輸出三維實境顯示(3D Reality Display)之視覺影像，藉由高逼真影像輸出(High Realistic Output)，以達高階模擬訓練系統之應用(Advanced Training System Application)。然而，大部分即時影像輸出系統均以可見光(Visible)之貼圖影像資料為主，而可見光之影像並無法滿足愈趨複雜之高階模擬訓練系統或夜間戰術感測器之模擬等(如夜視鏡影像模擬系統、紅外線熱影像模擬系統)，同時夜視鏡影像之貼圖影像資料不易取得，特別是物件之夜視鏡影像極其敏感，非常受週遭環境光線干擾不同而產生不同之影像效果，因此很難由單一影像貼圖(Texture)之效果應用於不同時間、不同地點及不同環境夜視鏡影像模擬系統。

本計劃配合國防部某單位需求，總計劃需研發完成「感測器影像模擬系統開發」，包含子計畫一「熱像鏡影像模擬系統開發」與子計畫二「夜視鏡影像模擬系統開發」。為研發結果同時實際應用於嚴苛之軍事高階模擬訓練系統(同時須具模擬夜視信號與熱象信號功能)，必須研發高效率有效之演算法，將資料庫中之資訊(包含貼圖影像資料(Texture)、材質資料(Material)、地形資料(Terrain)、物件三維多邊形資料(Polygon)等)提供視覺影像產生器之基本元素，進而產生視訊訊號(Video Signal)，並由視訊顯示裝置(如顯示器、單槍投影機、頭盔顯示器等)輸出三維實境顯示(3D Reality Display)之視覺影像，以達高逼真影像輸出。

在這整合型計劃子計畫二「夜視鏡影像模擬系統開發」中，我們將首先專注在需求單位指定之材質在不同時間、不同地點及不同環境之夜視鏡影像資料庫建立。由於物件夜視影像非常易受環境光線干擾，與物質熱影像不同，其光模型也較難建立，需研發有效的建模方式。然後研發快速有效的演算法，包含其如何建立不同材質之「夜視影像資料庫及可見光材質貼圖轉換至夜視影像之演算法則」核心技術。如此才能達成總計畫含夜視影像與熱影像之「感測器影像模擬系統」計畫目標。一項很重要要考慮問題是除能產生逼真之感測器影像模擬系統效果外，還要符合軍事高階訓練模擬系統即時3D動畫顯示之需求。

2.研究目的

2.1 研究動機

如前述仿真即時影像輸出乃為模擬系統不可或缺之關鍵項目，諸如夜間作戰模擬系統、戰車模擬器、戰場模擬等。夜視信號(或熱影像)視覺影像產生器(Image Generator, IG)可由資料庫中之資訊(包含貼圖影像資料(Texture)、材質資料(Material)、地形資料(Terrain)、物件三維多邊形資料(Polygon)等)提供視覺影像產生器之基本元素，進而產生視訊訊號(Video Signal)，並由視訊顯示裝置(如顯示器、單槍投

影機、頭盔顯示器等)輸出三維實境顯示(3D Reality Display)之視覺影像，藉由高逼真影像輸出 (High Realistic Output)，以達高階模擬訓練系統之應用。然而，大部分即時影像輸出系統均以可見光(Visible)之貼圖影像資料為主，而可見光之影像並無法滿足愈趨複雜之高階模擬訓練系統或夜間戰術感測器之模擬等(如夜視鏡影像模擬系統、紅外線熱影像模擬系統)，同時夜視鏡影像之貼圖影像資料不易取得，特別是物件之夜視鏡影像極其敏感，非常受週遭環境光線干擾不同而產生不同之影像效果，因此本計劃研發能實際應用於軍事高階模擬訓練系統，且研發有效之演算，以利將來提供計畫需求機構，將資料庫中之資訊(包含貼圖影像資料(Texture)、材質資料(Material)、地形資料(Terrain)、物件三維多邊形資料(Polygon) 等)提供視覺影像產生器之基本元素，進而產生視訊訊號(Video Signal)，並由視訊顯示裝置(如顯示器、單槍投影機、頭盔顯示器等)輸出三維實境顯示(3D Reality Display)之視覺影像，以達高逼真影像輸出。

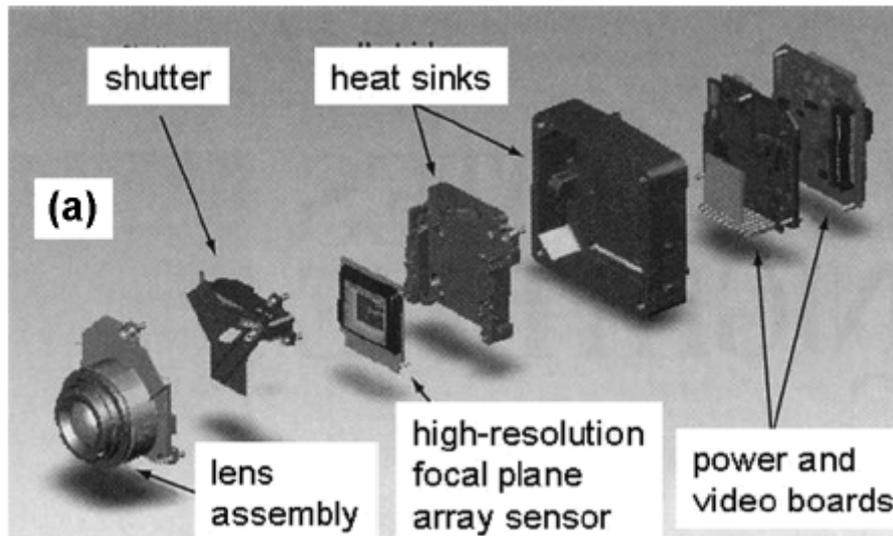
2.2 計畫目標

- (1)完成需求單位之若干種常用物質之夜視影像動態量測。
- (2)建立若干種物質之原始量測夜視影像資料庫。
- (3)分析若干種物質夜視影像之特徵參數與環境關聯。
- (4)建立若干種物質夜視影像資料庫。
- (5)預定發表 1-2 篇研討會或論文 1-2 篇期刊論文。

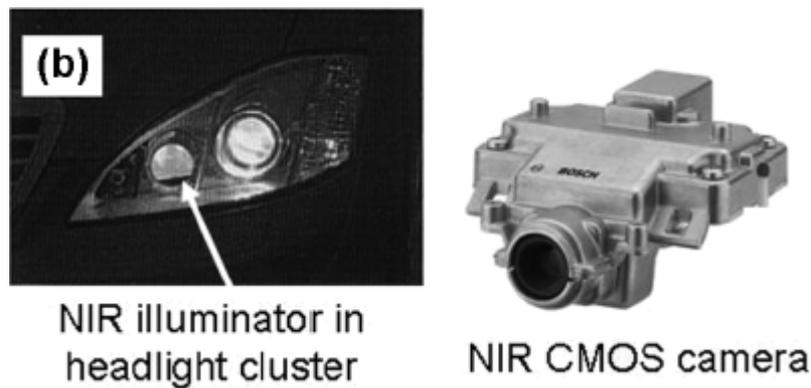
3. 文獻探討

3.1 夜視鏡原理簡介與發展

感測器主要是能將如壓力、加速度等物理信號轉換成提供給控制系統電子信號之裝置，視工程應用範圍，有時又稱「轉換器」[1]。因此按照不同物理感測性質與範圍，夜視鏡也屬感測器，可將夜間環境影像擷取投射在夜視鏡的顯示窗上。夜視鏡主要是輔助人類於低照度環境的視覺，通常可使用兩種技術應用在夜視鏡的設計上:(1)遠紅外光(Far-infrared,FIR)，可用來長波段的 IR 紅外線熱源輻射，(2)近紅外光(Near-infrared,NIR)，可擷取短波段的不可見 IR 明亮度，以提供類似日間效果的夜視影像。這兩款夜視鏡如 Fig.1 所示。這兩類夜視鏡技術於歐洲、日本、北美，甚至應用於奢華的運輸工具上。以下分別對這兩種技術做說明。



(a) FIR warm body-detect camera



(b) NIR illuminator and camera

Fig. 1 Two types of automotive night vision technology are used

- FIR 熱輻射感測器

FIR 熱像機是屬於被動式-即非輻射形式。這類感測器可偵測來自溫度物件(warm-body)所發射出的不可見光 $8-14 \mu m$ 的遠紅外波長。由於不需照明的需要，FIR 系統可使具此夜視功能的載具不需其他額外的電子裝備即具夜視功能。因 FIR 系統具強大偵測物體熱特性，所以可較 NIR 系統能偵測更遠距離的物體。FIR 系統內部通常使用焦點平面陣列(Focal plane arrays)，典型焦點平面陣列為 $244 \times 320 = 78080$ 點像素，每個點像素接收到信號，可被 FIR 系統內 On-chip 的電路即時處理以提供連續夜視影像顯示[2]。

- NIR 照度感測器

NIR 照度感測器可偵測來自物件照度(Illumination)所發射出的不可見光 $0.78-1 \mu m$ 的短紅外波長，此波長略大於可見光。NIR 系統可偵測所有物體的夜視影像(不考慮溫度)。NIR 使用玻璃光學技巧，它比 FIR 系統低價，因此可提供廣泛的夜視影像應用。

- 夜視鏡研發現況

由於夜間之光線微弱，夜間作戰之利器—夜視鏡，就像是我們多長了一副眼睛，化暗為明。翻開世界戰史，使用夜間作戰而獲勝者，更是不計其數。蘇聯與美國海軍最早採用，國軍自民國八十五年起即加強夜間作戰訓練，更訂定九十一年為「夜戰訓練年」，期間投入大量經費及人力，目的就是要強化國軍部隊在夜暗無光狀況下的作戰能力。夜視技術之定義是人眼在低照度條件下觀測物體的能力，而「夜視技術」是「低光度夜視技術」(Low Light Level Technique)的簡稱，泛指應用光電感測與光學成像技術將夜間肉眼不可視之目標轉換(增強)成肉眼可見影像之相關技術。通常可將特定波段的頻譜(約 600~900nm)光源放大約 2,000~7,000 倍[3,4,5,6,7]。

夜視技術從 30 年代初期發展至今，大致經過幾個階段：

(1)紅外線轉換技術：

在 60 年代前佔有一席之地。它是應用變像管將近紅外光線輻射轉換成可見光影像之技術，故稱之為紅外線轉換技術。因紅外線變像管之增益低，故需以外加之紅外線將被觀測區域、目標物照明，所以是主動式夜視技術。

(2)微光影像增強技術：

是 60 年代後發展的一種較新的夜視技術。是將夜間景物所射的微弱物光利用微光影像增強管放大成適合人眼觀看的亮度，因工作時不需要配合紅外線探照燈照明，僅需由物體之微弱物光即可成像，是一種被動式的夜視技術。第一代之微光影像增強管是由二至三個真空管串聯而成，故其體積相當龐大，並不適合人員攜帶，其解析度亦有限制。第二代之微光影像增強管一般稱之為光放管 (Image Intensifier)，其工作原理與第一代相近，但其中之元件不同。第二代之光放管將串聯真空管以微通導板 (MCP, Micro Channel Plate) 取代，體積大幅縮小，可見光波長範圍區(300-800nm)響應較佳。第三代光放管其構造與第二代相同 (如圖 Fig. 2)，最大之差異僅在於光陰極使用之材質「砷化鎵(GaAs)」，大幅提升了光放管之亮度，波長可達 800nm 外近紅外線區響應特佳。

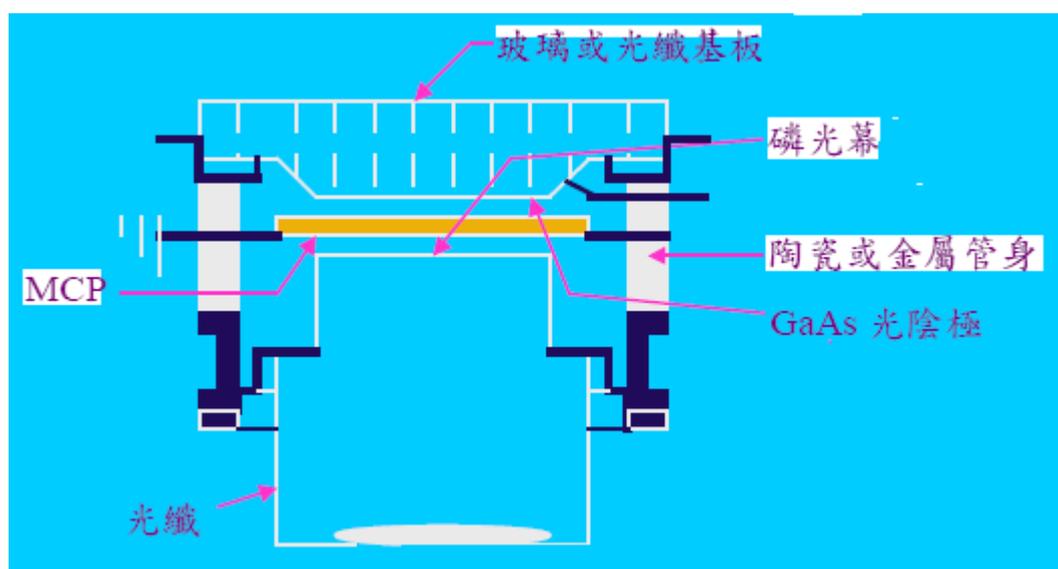


Fig. 2 第三代光放管構造示意圖

在 70 年代空用電子蓬勃發展時期，地面攻擊機僅能有效操作在白天，過去作法通常採用火焰(Flares)

來照明戰場，或者採用發射 IR(Infra-red)搜尋光源於目標上，然後利用可偵測到 IR(Infra-red)裝置來察覺被紅外光源照到的目標，但如果敵方也採用能偵測紅外光源的裝置，這樣如此將也曝露觀察者的位置。就因為如此，夜視鏡的發展非常重要，當然夜視鏡發展也必須是可操作於全天候。夜視鏡的研究如今持續朝高解析度研究發展，配合由於夜視鏡影像增強器(Image-Intensifier)與熱像感測器發展，使得相關武器系統現在可操作於夜間與惡劣天氣環境。類似的地貌貼地飛行雷達也因此可操作於夜間，其系統操作概念如 Fig. 3 and Fig. 4。

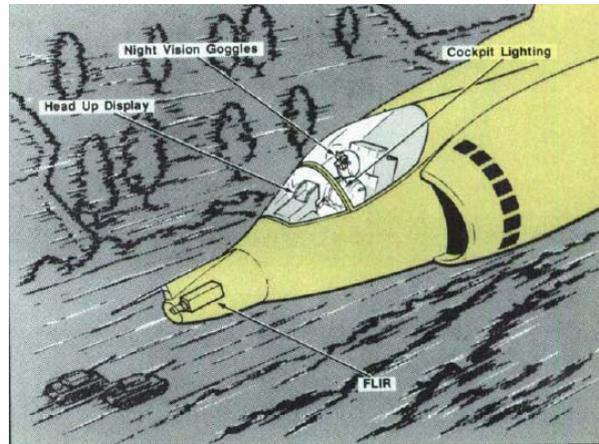


Fig. 3 System concept and FLIR system



Fig. 4 F16 with FLIR pot

3.2 感測器影像模擬系統概念

在現今戰場中，戰略型飛機越來越多需要執行夜間軍事任務，因此就需要在執行任務時使用 Infra-red(IR)熱像感測器、夜視鏡(NV)、或者能偵測低光源電視影像(low-light television, LLTV)等裝備。為贏取戰場勝利，重複執行這些夜間高危險任務的軍事訓練是非常重要的，但基於夜間訓練特殊環境，常苦於沒有可重複訓練的空間與動態場景。因為人類眼睛在夜間時會進入所謂「夜視模式」，使能在低光源下，增強夜間辨識偵測目標能力，所以更重要的是讓訓練者具有就像真實夜間場景的夜視影像模擬場景。隨著科技突飛猛進，現今電腦技術發展到能模擬光電系統或是紅外線影像感測器等系統已變成可行。採用電腦技術模擬這類感測器時，需首先對於這些感測器的基本特性有所了解，如此才能讓電腦模擬出與實際感測器相同的逼真輸出。要設計與實際感測器輸出影像同逼真的「感測器影像模擬

器」(Sensor Simulator)無庸置疑地是個極具挑戰但也是非常有價值的科研課題，因此近幾年已成為非常熱門的研究主題[8]。

在現代軍事感測器影像模擬器的設計中，尤其需結合實際環境的合成(synthetic environment)、導航系統、感測器、場景威脅模式等。不正確的合成，會導致模擬場景錯誤，嚴重影響軍事演訓。所以感測器模擬器必須產生精確呈現與真實戰場中相同場景與效果，包括如白天、季節、空氣溫度、目標物材質特性反應等[8]。因此本研究主要研究方向，即是蒐集與建立物件於夜視感測器所觀看到的影像資料庫，且基於材質於夜視鏡呈現特性，嘗試發展演算法產生夜視鏡影像模擬系統的模擬場景。

3.3 全世界夜視鏡影像模擬系統研發現況

—Harmony、Ensemble 與 Integrator 公司開發夜視鏡影像模擬系統[8]

現今全世界夜視鏡影像模擬系統研發，包括有美國製 H-60 (TSTARS 計畫)、德國 SimNTF 計畫、英國的防衛型直昇機與攻擊直升機等計畫，其中較具代表性的如 **Harmony**、**Ensemble** 與 **Integrator** 系統。就最新發展 **Harmony** 系統來說，它結合先進的演算法於特定開放式系統，具高效能、即時、全天候演訓能力。**Ensemble** 則為較低價的系統，如 Fig. 5，它是第一台 PC-Based 即時的影像產生器，內含(a)全 z-buffer 結構，防雜訊，(b)具真彩紋裡解析度，(c)光源控制，(d)霧與大氣環境控制，(e)可與 **Harmony** 結合。**Integrator** 則為另一款感測器影像模擬器，它發展在專業的可支援 Windows NT 與 OpenGL 的電腦工作站上，它可提供合成的視覺環境。其輸入資料庫元素的格式可為 MultiGen Creator 或 Adobe PhotoShop，來建立合成環境。上述國際發展出的感測器影像模擬系統，可模擬如 IR 感測器影像模擬器、夜視鏡影像模擬系統、低光源電視影像模擬器等[8]。

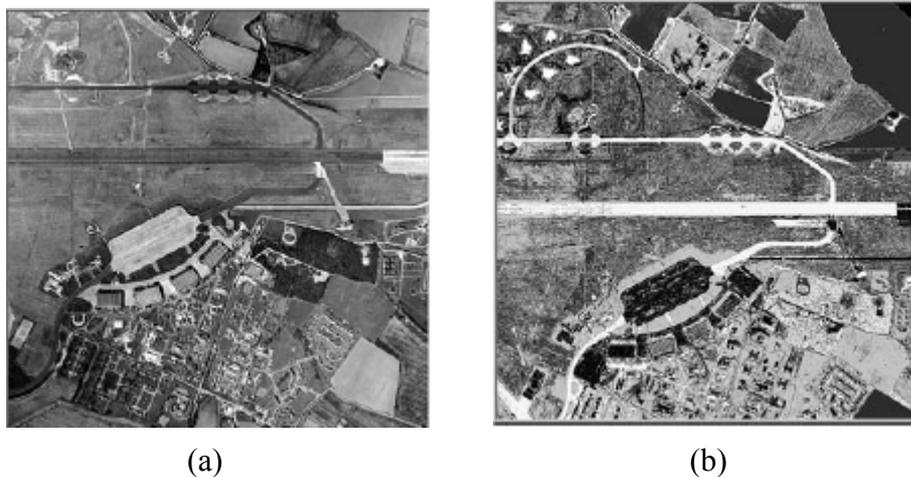


Fig. 5 (a)僅含原光源資料的影像呈現 (b)含材質紋理映射的影像呈現

—L-3 Communications Link Simulation & Training Cooperation 公司開發[9]

美國德州 L-3 Communications Link Simulation & Training Cooperation (P.O Box 5328 Arlington, Texas 76005)也開創新挑戰，嘗試將許多夜視鏡影像模擬系統的子系統如影像場景產生系統(Image generation System)、夜視鏡感測器模擬(NVG Sensor Simulation)、頭盔追蹤器(Head Tracking)、顯示器、以及相關資料庫系統整合。基本上此公司出產的 NVTS 系統也是建立目標物高動態物理模型，此系統模型建立是利用 PC-Based 電腦繪圖技術，可模擬 F4949G AN/AVS-9NVG 的夜視鏡。Link NVTS 產品

可提供嚴苛的現代夜視戰場訓練，駕駛員可透過高解析度的顯示器，結合頭盔顯示器，進入此夜視鏡影像模擬系統。同時配合內建頭盔預測追蹤系統，其 PC-Based 的 SimuView™ 模擬影像產生系統可產生 AFRL F4949G AN/AVS-9 夜視鏡影像模擬系統輸出的模擬影像。模擬訓練系統同時藉由植入豐富目標物的材質屬性、全控式月光模式於資料庫中，搭配頭盔顯示器、座艙儀表顯示，以增強模擬效果，如 Fig. 6。完整 Link NVTs 產品主要特性包括

- (1) 具等同 AN/AFS-9 NVG 夜視鏡的逼真模擬場景-具有高動態範圍的物理模型及相關雜訊/增益模式，
- (2) 具 200+動態月暈/光曝(Halos/Light Blooms)可調整的目標物照明，
- (3) 具模擬輻射/散射(Radiant/Emissive)處理的效果，
- (4) SimuView™ PC-based 的夜視鏡影像模擬系統影像輸出模擬，以及影像產生(操作在 60Hz)，
- (5) 感測器模擬主機，
- (6) 材質屬性編碼及輻射/散射(Radiant/Emissive)效果，
- (7) 同 NVG 夜視鏡的顯示器 1152×1152(806×806 active)
- (8) 藉由內建的 10,000 顆星與月光數學模型，可提供完整的照明控制。
- (9) 具大氣數學模式，可提供場景天氣控制—包含雲(Cloud)、霧(Fog)、光效果(Lightning effects)
- (10) 夜視鏡本質效果(NVG Special Effects)—星光發射(Shooting Stars)、水的反射(Water reflections)、雷射指向器(Laser Pointer)
- (11) 頭盔追蹤器—具部份聲音、慣性座標預測。
- (12) 結合座艙儀表顯示狀態於頭盔顯示器

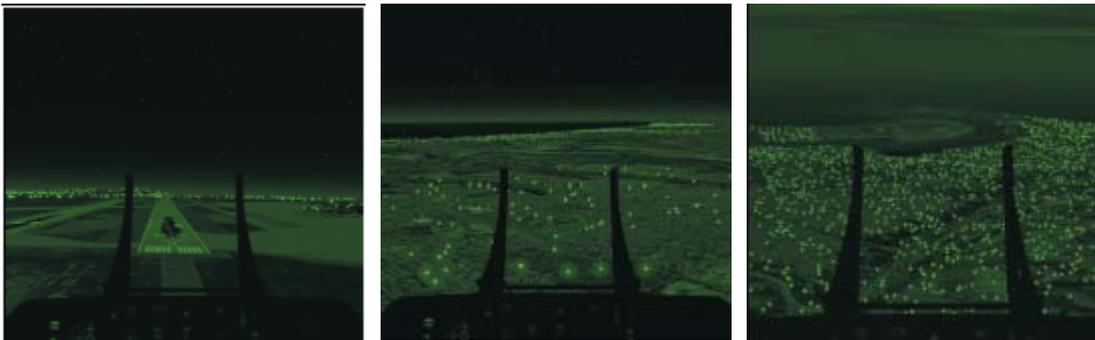
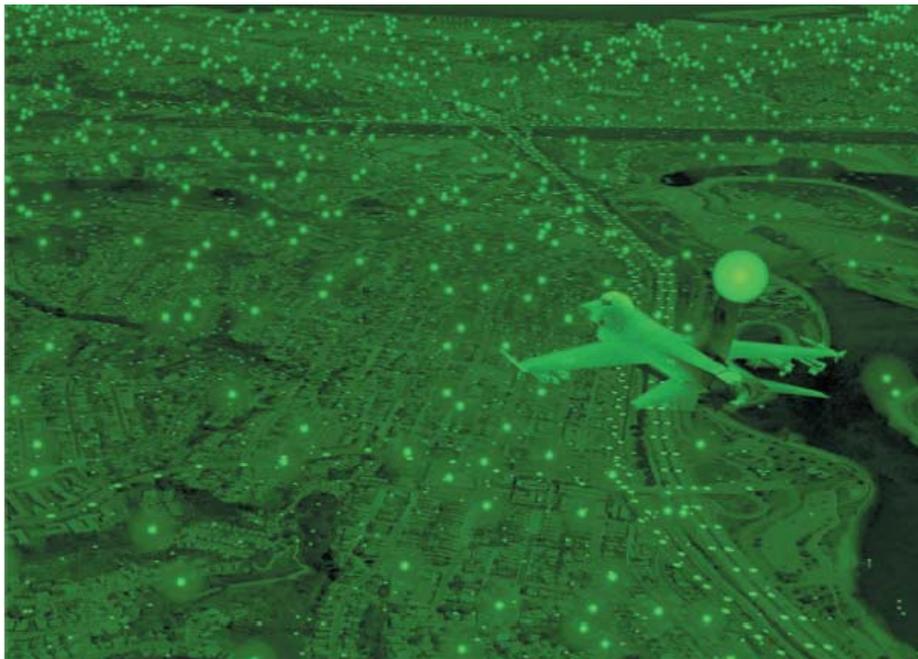


Fig. 6 L-3 Communications Link Simulation 公司開發的夜視鏡影像模擬系統

—REDCOM 公司開發的夜視鏡影像模擬系統[10]

另外還有 REDCOM 公司開發的夜視模擬系統，同時結合指管通情概念(C4I)

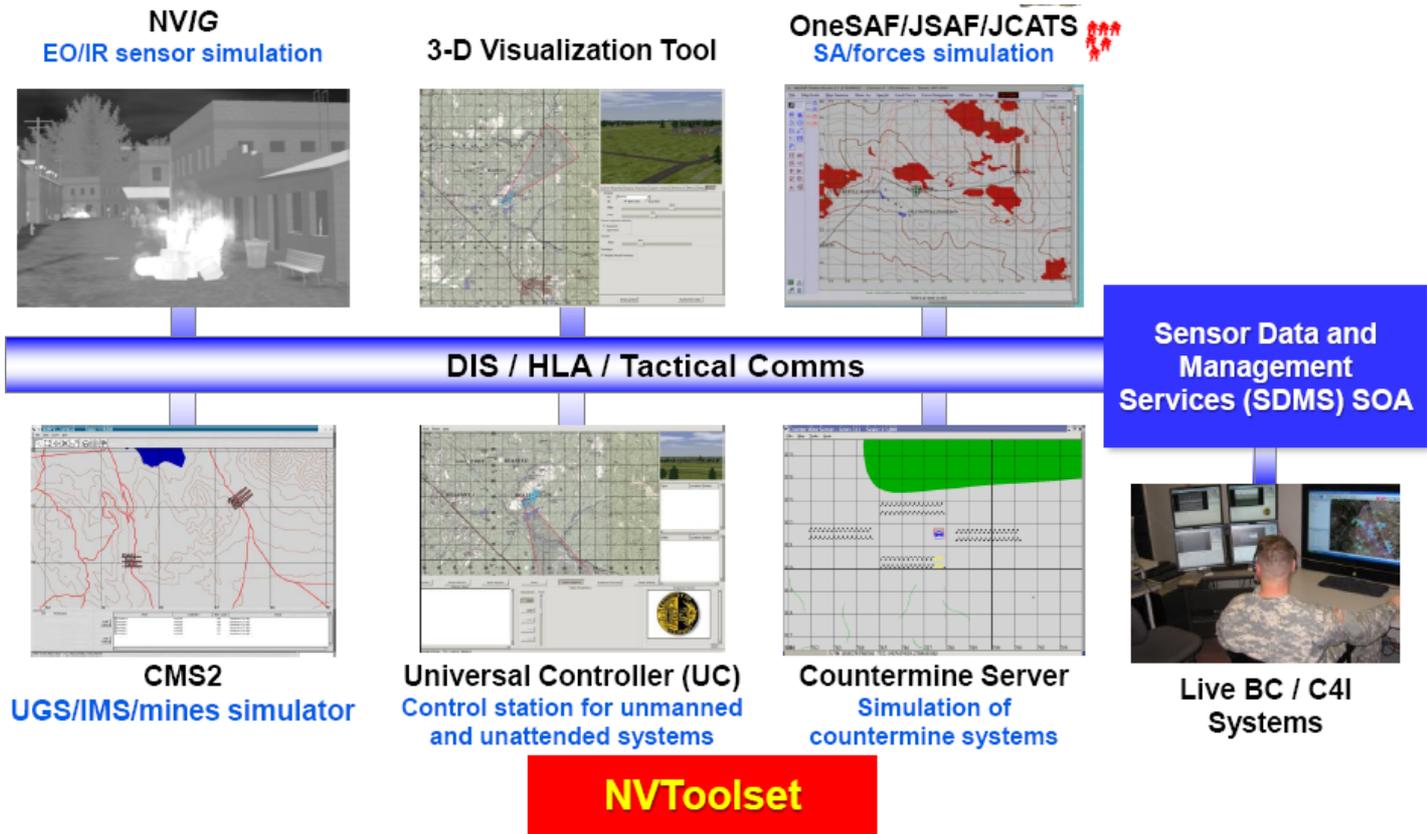


Fig. 7 REDCOM 公司開發的夜視鏡影像模擬系統

其系統內部的夜夜視鏡影像模擬系統之夜視影像模擬產生器，建立了許多各種目標物的數學模型、戰鬥模式。



Fig. 8 REDCOM 影像模擬系統內各種目標物物件

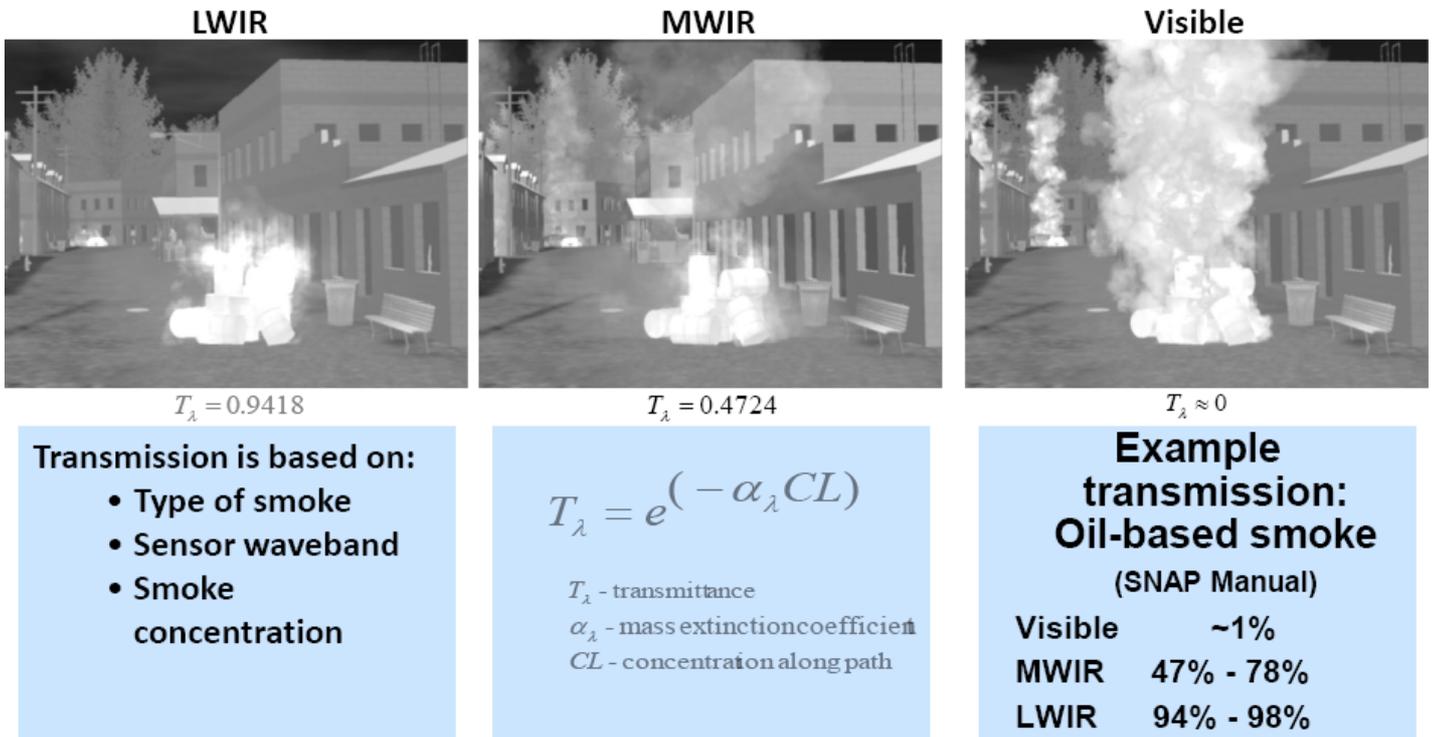


Fig. 9 REDCOM 影像模擬系統內各種目標物的數學模型、戰鬥模式

—DIRSIG 公司開發的夜視鏡影像模擬系統[1]

DIRSIG 所設計的夜視鏡影像模擬系統所採用技術與架構如 Fig. . DIRSIG 系統之輸入參數包括有場景資料庫(如物件屬性、熱動態模型、反射係數等)、大氣資料庫(傳輸路徑 path transmissions, 散射輻射 scattered radiances、氣象資料 meteorological data)、以及外太空大氣資訊、其他人為資料等。夜視鏡影像模擬系統分為數個物理模型。每個感測器之模擬單元，呈現出對輸入光源輻射的不同處理程序。光源光子呈現微弱強度影像之變化情形，將以光均勻分布射入方式，通過光學模型來產生模擬夜視影像。光學模型在此僅介紹由於光進入孔徑的影像的 wide MTF (*Modulation Transfer Function (MTF)*) 效果來描述。然而，在光學中因非均勻所產生的幾何效果也可建立數學模型。另外夜視鏡之影像放大器(Image intensifier)也將其視為「增益級」特性來建模描述。在高亮度與高增益影像場景，CCD 之呈像可能會飽和，此時會產生"blooming" 效果。另外由後端電子裝置所產生的雜訊(如放大器雜訊、數位量化等問題，都會置入模型中。

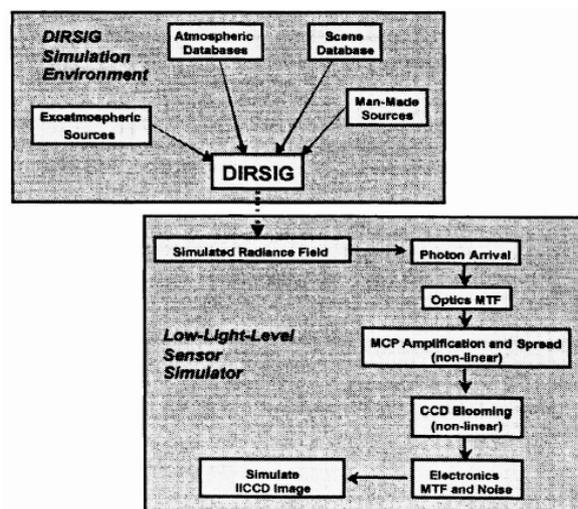


Fig 10. The DIRSIG based low-light-level imagery simulation environment.

4.研究方法

4.1 感測器影像模擬系統設計

—感測器影像模擬系統

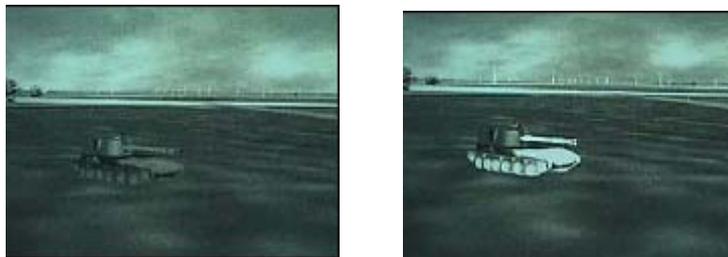
任何高效能感測器影像模擬器之核心就在其視覺影像產生器，此部份包含

- (1) 場景影像產生器，
- (2) 感測器後處理器—用來產生感測器裝置效果，
- (3) 與感測器影像模擬器緊密結合的資料庫
- (4) 顯示器
- (5) 演算法

通常要模擬感測器影像(如紅外線熱像感測器(IR)、夜視鏡感測器(NVG)、微弱光源電視視訊(LLTV))，需提供包含目標物件的特性(如熱特性等)，以利能於白天夜晚均正確呈現原來實際感測器該呈現的行為與影像輸出。感測器影像模擬器的影像產生方法，是使用事先存於資料庫中的目標物材質特性，來計算在特定感測器工作頻段時，目標物輻射及散射出的影像強度(Intensity)。接著視訊處理器再將 2D 效果加在影像上，以便模擬此實際感測器影像所該產生的效果。像類似這樣模擬目標物在特定感測器的影像輸出，或者產生相關的合成環境就稱為建模(Modeling)。

模擬特定感測器影像輸出(Modeling)，需建立資料庫包括目標物可能材質屬性等，以便當在產生模擬影像時，能將這些特性輸出在影像上。在設計建立目標物可能材質屬性時，為了能達到隨時動態快速改變特定感測器模擬影像，資料庫中的材質屬性通常是以參考映射連結方式，而非直接取用實質材質屬性。另外，提供配合特定感測器如熱像儀(IR/Thermal Sensor)，夜視鏡(NVG)，或是雷達等模擬影像所需的材質屬性通常是以物件導向(Object-Oriented)資料庫方式來儲存，維護者可隨時編輯增添資料庫內容。這些在資料庫中包括針對特定物質的材質屬性，如材質表面特性(emitance, reflectance, absorptance)等，它將材質屬性與入射光源波長(或者輻射光源)函數關係，以及目標物特性(如密度、熱傳導性、散熱等)與溫度函數關係，儲存在資料庫中。

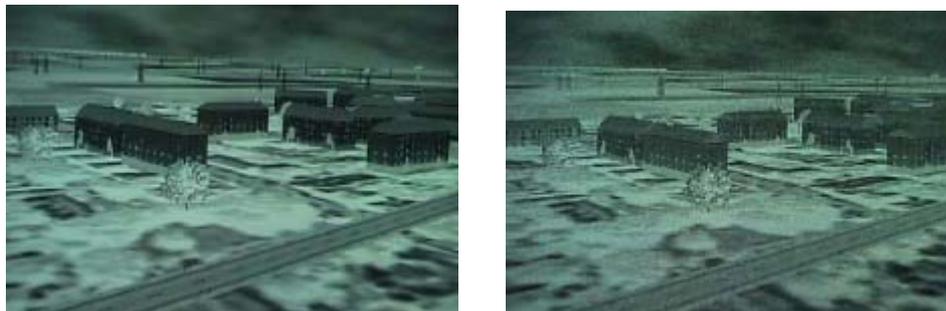
上述的感測器影像模擬系統的建模概念，可以 3.3 節 Integrator 產品來做說明。觀念上主要考慮是如何將資料庫中目標物材質屬性與各種情況下目標物的紋理映射資訊做適當應用，以提升感測器影像模擬系統的逼真度。Integrator 產品製作想法是建模子系統將單一材質於表面屬性的該有的影像呈現，均看做是視覺要模擬產生的一部分。除了材質資訊，建模子系統也應將目標物的熱邊界條件(如熱邊界溫度、熱傳導、溫度傳導變化軌跡、控制變數)、目標物表面厚度等考慮在內。據此，配合目標物的邊界條件、材質屬性、及即時模擬程序，來決定出目標物當被感測器觀測時，其所發射出的熱狀態或熱模型，另外要達到高逼真全彩視覺也要將詳細的材質屬性置入感測器紋理映射表中。其它如大氣物理特性(溫度、溼度、壓力等)、感測器特性效果(特定感測器本質雜訊、自動增益、位準控制、感測器元件失效、顯示對比)，均可以程式化方式來模擬特定感測器應具有的特性及效果，如 Fig. 11 及 Fig. 12。



(a)

(b)

Fig. 11 (a)不含熱資訊的影像呈現 (b)含熱資訊的影像呈現



(a)

(b)

Fig. 12 (a)不含感測器本質雜訊的影像呈現 (b)含感測器本質雜訊的影像呈現

一 夜視鏡影像模擬系統[9]

要使軍事人員於戰場中熟悉現今贏得空戰勝利關鍵與主導空中優勢的利器的夜視系統(NVG)，必需發展具高解析高逼真的「夜視鏡影像模擬系統」(NVGs)。夜視鏡影像模擬系統的設計架構大致與前述一般感測器影像模擬器類似，其主要是辨識微弱光源下的場景物。直到現今，要發展高逼真的夜視鏡影像模擬系統仍存在許多技術挑戰與困難。「夜視鏡影像模擬系統」(NVGs)必須可持續調適各種光源亮度的改變-從極黑低月光、到明曜奪目的城市夜景光源、再到巨大爆炸能量光釋放。要處理大量動態變化夜視影像事實上是「夜視鏡影像模擬系統」(NVGs)在計算量上的很大挑戰。除此之外，NVGs 模擬系統需提供使駕駛員浸入高度反應逼真的模擬場景，同時需在即時狀態呈現夜視鏡各種本質效果，以及結合動態月暈(halos)等夜視場景。

一 高逼真夜視鏡影像模擬系統設計與限制[11]

事實上，要發展高逼真適於執行夜間任務的模擬訓練系統有其技術上的限制。國外有許多政府研究機構投入研究經費於此技術，使得夜間軍事訓練模擬系統能與真實夜間作戰場景相同，美國空軍也正在致力突破於在夜間任務中如何提升嚴苛且高逼真的夜視影像模擬系統的限制，如 Fig. 13。其一限制是，為了配合演訓，模擬器的視覺顯示裝置是被設計在可見光的的頻段，但是實際夜視鏡是真正操作在紅外線頻段。也就是說透過物理建模所製造的夜視影像模擬系統之顯示器，與實際經由光學設計製造的夜視鏡是不相同的，因為實際夜視鏡能看到較距距離的目標物。實際夜視鏡是非常易受人為環境(artifacts)影響的，這個現象很難使用模擬系統將其模擬出來。因為用來建構夜視鏡影像模擬系統之視覺模型所需的目標物的材質以及地貌資料庫，通常沒有包含足夠的參數細節以利模擬高逼真的紅外

線或者夜視效果，如目標物內部熱來源(Internal heat sources), 熱轉換特性(heat transfer properties)等。



Fig. 13 The U.S. Air Force's current efforts to NVGs

對於上述問題，CAE 公司使用最新發展的 Liquid Crystal on Silicon (LCOS) 投影機以及影像產生器去高逼真地模擬實際夜視鏡於有限制低見度、降雨雪、低光源、及大霧條件遇到的類似場景。這些降雨雪及低光源數學模型是使用點狀建模方式(Particle-based modeling approach)，如雪片(snowflakes)、雨點(raindrops)、灰塵(dust)等，將其模擬顯示在軍事演練系統上。雖然在過去十年許多早期方式被使用，但今日高逼真的模擬演訓系統，漸漸改採 photo-perfect modeling 方式。CAE 公司就曾被美國陸軍要求執行有關前述低光源限制計畫，來幫助阿巴契直升機(Apache Helicopter)到伊拉克戰役的先期派遣。各式武器系統如果操作在類似如此嚴苛條件(即便使用夜視鏡)，是屬於高危險操作，它必需經過特殊的訓練，因為這些軍事演練者將很容易由於低光源無法掌握戰場狀態而曝入危險中。雖然夜視鏡影像模擬系統已漸漸改善其視覺模擬部份，但是由於其光源模式與真實夜視鏡差異，因此當飛行員在實際使用夜視鏡時，由於視野(FOV)限制了觀看景窗，將可能誤判觀是距離深度(Depth perception)。舉例來說，紅光看起來會比藍光較亮(即紅光看起來距離較近)，這些實際夜視鏡會有的現象，要改善且實現於夜視鏡影像模擬系統上。因此要實現高逼真夜視鏡影像模擬系統的首要初步作法就是，要建立關聯緊扣的資料庫。近年夜視鏡影像模擬系統已改採較激進做法(Stimulated approach)，即將實際的夜視鏡直接用在夜視鏡影像模擬系統。由於實際夜視鏡對光源很敏感，此時模擬器的座艙環境光源需要特殊設計與考慮，使其要跟真實載具座艙的環境光源相同。由於大多數夜視鏡可敏銳偵測低頻譜光源，包括可見光附近的頻譜，也包含近紅外光頻譜(Near IR)，所以這些特性都必須建模在夜視鏡影像模擬系統內。

綜合上述，要設計高逼真的夜視鏡影像模擬系統，有兩點關鍵挑戰：

- (1) 為了展現模擬器最佳性能，在其影像產生器(Image generation)與資料庫(Database)中，需做適當精確的建模，確保能將目標物各屬性作最好的呈現。
- (2) 模擬器的投影機(Projectors)需具有高對比及低背光(High contrast and Black levels)，且能同如真實夜視鏡操作，呈現紅外線特性。

除此之外，CAE 公司更發展高科技的 Augmented Visionics System (AVS)系統，它可同時提供在極低能見度狀況下的即時情境威脅分析(Real-time situational awareness)，提供飛行員在極嚴苛環境下的 3D 模擬場景。

從基本觀念來看，事實上人眼視力受限於可見頻寬與靈敏度，特別是在低光源環境下。同時人眼也不能察覺中低熱輻射，也不能解析低光源環境場景之對比，因此夜視鏡就是要能提供這樣的協助。所以夜視鏡或是夜視鏡影像模擬系統不僅僅只是將目標物以單綠色光呈現，其挑戰在於設計製造高信賴度且精確的計算模型，但同時又要非常智慧有效的在極短時間內(包括系統初始化、資料更新率)將模擬影像產生。另外在影像模擬系統中，較看不到紅外線輻射特性。事實上，因為環境中各種參數變化，所以要知道待模擬目標物的本身精確溫度通常是不容易，有時甚至要用猜測。

4.2 夜視鏡感測器影像特性分析

如前述，夜視鏡基本功能就是「夜視影像放大器」，其能於軍事夜戰及民用搜救中，將「低光度」(Low-light-level LLL)場景影像有效擷取。它主要作法是將場景中可資擷取的可見光之「光子」(Photons)蒐集且予以放大而產生「高對比」的影像[1]。當環境中光度對比微弱時，為提升夜視影像品質，通常還可以融合「紅外線熱影像」來改善擷取的夜視影像。另外現在還有人發展能修正「多頻譜校正」演算法，以提供高真度的模擬夜視影像。關於此可採「環境模型」(modeling environment)方式[1]，採取(1)從任意場景中預測 Low-light-level 的輻射情況，(2)在已知給定此任意場景中，從感測器輸出模擬夜視影像，以提供影像逼真度。

由於夜視鏡屬軍事用途，大部分國外雖有相關研究，但文獻上有關於物質低光度輻射於夜視鏡影像成像的關鍵參數資料，均不公開。夜視鏡影像成像模型[1]，其主要是根據在待測物上方的投射光源，來偵測與預測待測物的反射模型，如 Fig. 13。

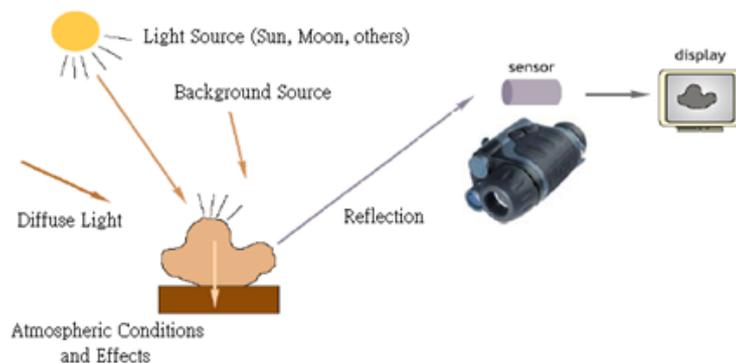


Fig. 14 受環境背景光線干擾之夜視鏡影像

還有所謂 MODTRA 更計算光線路徑傳輸、散射、漫射等模型。其所採取光源包含太陽、月光、以及人造光源(如燈光)。通常較短波長的光之頻譜主要跟待測物質反射係數、每天不同時候月亮光度照射所反射光子。在[1]DIRSIG 模型中，就利用「星歷表」決定太陽與月亮的當時的狀態。然後利用其自行設計的 MODTRAN 模型計算待測物的反射模型。除此之外，MODTRAN 甚至考慮全天空的 illumination。即當在白天狀態時，此全天空的 illumination 仍同時考慮在反射模型中。當在夜晚時，除月光外，「星光」也對待測物反射模型提供很重要的參數。另外待測物的附近物體所產生的光源有時亦需要考慮。

要設計高逼真夜視鏡影像模擬系統實質上有很多技術困難與挑戰[12-15]，通常基本模擬作法是將白天物件影像轉成黑色及白色，然後改以綠色顯示。但是這樣作法並沒有考慮同物件於夜間與白天環境時，夜視鏡影像呈像會不同。舉例來說，Fig. 15 含有葉綠素成份的樹或農作物，其在夜視鏡影像中呈現亮色系，但是對於黑色物件或白色物件，夜視鏡呈現黑暗色系。所以為了有效精確模擬，這些錯覺(Illusions)或是限制必須加入在模擬系統內。



Fig. 15 The differences between (right) black-andwhite daytime images and (left) night-vision goggle (NVG) performance.

很多產生感測器特效的方法被提出，如雜訊(Noise)、光暈(Halos)效果，但是 夜視鏡(或可稱微弱光源影像強化器)特別對近紅外光(Near-IR)敏感，所以這些特效通常被忽略。除此之外，如果降低影像對比與降低解析度，會使夜視鏡影像在白天與夜間會呈現嚴重與差別。所有這些效果都會讓夜視鏡呈現嚴重錯覺。因此在設計夜視鏡影像模擬系統，就要特別考慮這些問題。下圖 Fig. 16 就可以看出近紅外光對夜視鏡呈像影響。Fig.16 左上原來白天影像，左下是原景的黑白影像，右上是近紅外線呈像，右下就是夜視鏡呈像。從 Fig.16 中可以了解，通常物件於夜視鏡所呈像的影像與近紅外光線感測器呈像影像極為接近。



Fig. 16 NVG-the-day color transformation. While a standard black-and-white conversion looks very different from the near-IR (NIR) image, the NVG-the-day result closely resembles the NIR image.

由於設計夜視鏡影像模擬系統是高挑戰與非常複雜的研究主題，在本「夜視鏡影像模擬系統」研究目標中，僅針對下列問題做先做討論，主要是(1)搜集若干種材質常用物質之夜視影像動態量測，(2)建立若干種材質之原始量測夜視影像資料庫。其中關鍵要了解在低光度環境中，物質低光度 (low-light-level) 輻射於夜視鏡影像成像的關鍵參數。至於「物質光子隨機分部模型」、「夜視鏡放大效果」、「雜訊模型」、或「不同夜視鏡特性」，以及模擬產生夜視鏡影像或相關產生模擬影像所需的演算法不在本次計畫目標，也許在下階段研究計畫中再做探討。

4.3 夜視鏡影像模擬系統設計

由於夜視鏡影像模擬系統的設計方法在各國均屬極高軍事機密，因此國內外相關文獻非常缺乏，完全沒有足夠的設計參考資料，況且其設計影響因素又非常複雜，在國內是首創的研究。根據前述第 3 節約略的概念及 Fig. 14 的基本描述，本計劃夜視鏡影像模擬系統設計概念首先專注在物件之材質在不同時間及不同環境之夜視鏡呈像之初步資料建立，設法探討分析了解物件於夜視鏡呈像的相關特性。基於物件於夜視鏡呈像極易受人為或環境光線(包含有週遭環境光線強弱、物件對周遭光線(Ambient Light)影響、漫射光線(Diffuse Light)以及反射光線(Specular Light)干擾，這些干擾使非常難模擬夜視鏡影像，即便收集建立物質夜視影像資料庫，也可能不容易從中獲得足夠資訊整合以模擬產生符合真實之夜視鏡影像。由於受限本計劃經費，不能購置龐大精密的儀器設備，包括基本最需要的夜視鏡，也礙於經費，僅能夠買非專業的低價位夜視鏡來進行測試，因此很難對相關因素如物件對周遭光線(Ambient Light)影響、漫射光線(Diffuse Light)以及反射光線(Specular Light)等干擾進行大量蒐集測量。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/02/18

國科會補助計畫	計畫名稱: 子計畫二: 夜視鏡影像模擬系統開發
	計畫主持人: 駱樂
	計畫編號: 100-2623-E-216-001-D 學門領域: 其他研究
無研發成果推廣資料	

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：駱樂		計畫編號：100-2623-E-216-001-D				計畫名稱：感測器影像模擬系統開發--子計畫二：夜視鏡影像模擬系統開發	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	1	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	2	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	1	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	1	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	0	2	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	2	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	1	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	1	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>獲國內光學廠商興趣，討論開發產品可行性，有助產業技術具體效益發展。</p>
--	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科教處計畫加填項目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

夜視鏡影像模擬系統的設計屬於軍事用途，在歐美國家均屬機密資料，因此在國外相關文獻參考資料獲得不容易，同時此項研究在國內亦沒有人做過。本項計畫經分析夜視鏡影像成像原理，深入進行相關實驗設計規劃，因此所獲得的研究成果，非常重要且寶貴，因次對於未來於相關後續研究具有重要影響與參考價值。