

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

多功能虛擬實境動態模擬系統(第三年)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC-89-2218-E-009-041
執行期間：89年08月01日至90年07月31日

計畫主持人：林進燈 教授
共同主持人：

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：國立交通大學電機與控制工程研究所

中 華 民 國 90 年 7 月 31 日

多功能虛擬實境動態模擬系統

Multipurpose Virtual-Reality-Based Motion Simulator

計畫編號：NSC-89-2218-E-009-041

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

主持人：林進燈 教授 ctlin@fnn.cn.nctu.edu.tw

執行機關：國立交通大學電機與控制工程研究所

計畫摘要與目的

工安是目前台灣社會的一個重要課題，其中有關各種載具及機器設備的安全操控，更是各方矚目的重點。為了避免利用在實際環境中以真實載具或機器進行人員訓練或測試所造成之高消費（包括時間、空間及金錢）及高危險性，本計畫將發展一個多功能的虛擬實境動態模擬系統，經由虛擬實境（VR）與運動模擬器的結合，以逼真地模擬實際場景與設備或載具，而協助達到工安所要求的多種訓練與考核任務。本計畫執行期限共計三年，在第一年執行成果中，我們已經初步結合各個子計畫的第一年成果，完成虛擬車輛駕訓的工作，在第二年的執行中，進一步完成虛擬遊艇操控系統，今年度整體目標在於完成虛擬飛機模擬系統。本計畫乃以四個子計畫的型式所合力完成，以下分別就各個子計畫所完成的工作做簡要報告。

子計畫一：虛擬實境動態模擬系統中之行為轉換及階層式控制法

本計畫是在發展一個多功能的虛擬實境動態模擬系統，經由虛擬實境的技術與運動模擬器的結合，以逼真地模擬實際場景與設備或載具的運動行為。這整個系統中，因為行為轉

換模組的設計扮演實際環境裡物體運動狀況以及虛擬環境中操控員身體感受之間橋樑，如何讓操控員有身歷其境的感受，有賴於在動態模擬系統發展過程中，適當的人（操控員）機（動態模擬器）溝通界面及迴饋學習技術，以獲得最符合人類感覺的行為轉換模式。

在虛擬實境的動態模擬系統中，當虛擬系統接收到控制命令而設法產生應有的運動行為描述時，在虛擬實境的顯示以及在模擬運動平台的運動行為則是要儘可能地模擬並使其有身歷其境的感受，以達到虛擬實境的目的。而為了達到此一目標，上述的運動行為描述必須恰當的轉換給虛擬實境的顯示系統以及運動平台的控制系統。本子計畫將以階層式的智慧控制概念來追求更高階而抽象之控制目標，也就是說將六軸運動平台的運動控制當成低階控制系統，而我們的系統則是設法設定控制輸入以使運動行為更符合需求。而高階系統部分為一模糊控制器，因此在研究中我們也探討了線上穩定模糊控制器的設計。而在高階系統中，由於模糊預估器的存在，我們也提出了一全補償式的穩定模糊控制器之設計法。

另一重要的因素是操作者的力感受，而力感受則大部分是由加速度所形成的反作用力和離心力所造成的。也就是在目標之設定上以更多樣化的目標來求最佳化。因此本計畫期望

透過對目標的更多樣的設計而來達到較好的虛擬實境感受。一般而言在研究上，此部份的實現是利用 washout filter 的方式來實現，而在實際上，由於用於動態電影院，所以可事先規劃，而再建入軌跡時，直接以 motion cue 的方式來修改平台的動作以達到虛擬感受的目的。然而這些 motion cue 為一堆軌跡段，無法以傳統的點對點的網路來架構，因此我們也探討了以頻域為輸入的函數型類神經網路，以便對 motion cue 區段的紀錄與參數化。

本計畫第一年主要的研究為階層式控制器的理論探討及預估器的建立及分析比較。在第二年的主要研究為學習方法上，我們將針對不同的方法來分析。探討的方向分為線上學習及離線學習兩部分。在線上學習方面，目前我們是以模糊系統及以小腦模式運算 (CMAC) 為基礎的線上學習系統。並提出信用分配的觀念，以學習頻率來當可性度據以做誤差修正比例的分配參考。如是簡單的學習改變，確實增加了 CMAC 的學習速率。在第三年的研究為主要模糊控制上及如何將 motion cue 加以參數化。

在行為的轉換方面，目前文獻上所提到的是利用 washout filter 的方式來處理的。如是的方式是可以將在無限空間中的運動設法在有限空間中呈現，可是在動態模擬器中許多的運動效果並非只是簡單的物理運動定律所能描述的。較多而必要的是若干的特效運動感受，而這些感受則是要利用所謂 motion cue 來設計。而傳統的動態模擬器，由於其設計上也不是利用真實的運動物體的模擬建構來產生虛擬之運動感受，而是去設計不同的 motion cue 來搭配。在 washout filter 上，一般在飛行模擬時都是擺在機頭的固定位置，畢竟飛機和人體

的重量相差非常大，所以調整 washout location 所造成的影響也不大，因此目前在飛行模擬方面都是固定的常數。現在關於的研究不局限於飛機，也越來越多關於汽車，甚至於機車的研究，由於這些交通工具的重量比飛機小的多，washout location 很難用固定的點，因為這麼做不合實際狀況。在騎機車時往往會改變身體的姿勢，這個時候運動的軌跡也會跟著改變。目前關於這方面的問題常常還是設固定常數，就是假設駕駛者的身體垂直於車身，所以還有很大的改善空間。關於 motion cue 不管是即時或是離線表現，都很難做到很好的瞬間動作改變，因為平台的工作空間限制。在離線的部分可以設計動作，所以問題可以解決。而在即時的方面，飛機的模擬以往都做的還不錯，我想是因為飛機的動作比較呆板，變化少，只有在起飛和降落的時候動作有較大的變化，在飛行時動作是很平穩的。然而若要將汽車作動態模擬所遇到的問題就大很多，汽車會緊急煞車，急轉彎，遇到險惡的路面等等。motion cue 不管在即時或是離線的設計往往都是憑經驗。即使即時是用 washout filter，但是 filter 的參數的調整，filter 的設計卻沒有一定標準，依所要模擬的狀況而設計，我想是因為上述的問題還沒有很好的解決方法，所以只能用實驗測試的方式設計 filter。

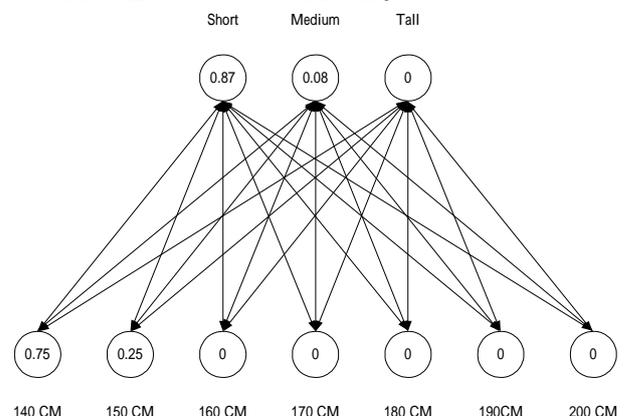
力感受則大部分是由加速度所形成的反作用力和離心力所造成的。而在實際上，由於可事先規劃，而再建入軌跡時，直接以 motion cue 的方式來修改平台的動作以達到虛擬感受的目的。然而這些 motion cue 為一堆軌跡段，無法以傳統的點對點的網路來架構，因此我們也探討了以頻域為輸入的函數型類神經網路，以便對 motion cue 區段的紀錄與參數化。

函數近似能力，使得我們可以將其運用在系統之頻域響應當中。長久以來，頻域的脈衝特性在傳統的類神經網路，通常以點對點的方式在時域當中進行系統的建構。而所建構的網路以適應性網路進行網路鍵結值的學習，學習演算法在進行學習時容易發生學習時間過長且落入區域性最小值之中。近來，一種函數型類神經網路架構已發表出來，函數型網路架構使用數學的方式進行函數對函數的輸出輸入對訓練網路之鍵結值。因為函數型網路使用平行處理之數學計算，可以快速估計出約略所需的輸出鍵結值。由於它優異的使得傳統性的點對點網路難以學習，在這當中還有頻域之中的複數特性需要比較精確的比例才能使系統之輸出正確還原。我們以函數型網路為網路主體，運用其良好函數近似能力去趨近受建構系統之頻率響應；進行系統分析之後，此時的網路已經近似於受控體，加上複數型學習網路機制，適當地調整複數鍵結值並且保持相位的正確。為使學習可以達到所期望的輸出，列舉三種複數網路學習機制，其中兩種傳統學習法並不能正確還原受建構系統時域輸出。因此我們依照系統所需還原及複數網路特性去打造另一種學習法，結合原有之函數型神經網路主體，為頻域中之混合式函數型類神經網路。經由模擬的結果可以明顯驗證函數型網路在頻域展現出比時域更優良的性能，加以學習機制的參與網路，頻域中混合式函數型網路表現出速度快、高近似度、以及強健度的效果。

子計畫二：虛擬實境動態模擬系統中之 人機溝通技術及其方法

如何表示動態模擬系統使用者之感覺概念，並忠實地傳遞給本系統中之行為轉換與控

制模組以及力回饋模組做適當的參數調整與控制，是本子計畫之重點。模糊集合的提出雖然對人類常用概略性質描述提供一個表示方法，但是對於人類之概念或觀念的描述，模糊集合則明顯的不足。本子計畫擬採用日本學者 T. Takagi, M. Sugeno, 及 T. Yamaguchi 等人所提出的觀念模糊集，此法在觀念的對應上，可大大地彌補模糊集合的不足。在觀念模糊集中，每一個觀念節點代表一個抽象或具體的觀念，而節點的活性的就等於傳統模糊集合歸屬函數的歸屬度值，由零到 1 之間的數值表示觀念的符合程度，每一個觀念的意義，則是以標示節點的活性度分佈來表示，因此觀念模糊集有別於一般模糊集合，它不需要有一歸屬函數，也不需要有一數值集合點來映射出歸屬函數值，在觀念的意義上，更可以有重疊的表示方法。T. Takagi 等人提出以聯想記憶體來實現觀念模糊集，但由於聯想記憶體在實現上需使用二元表示法，由於觀念節點活性度皆為 0 到 1 之間的實數，因此，若使用此法，精確度非常差且可供記憶的觀念個數有限，並不實用，因此我們在這一年的計畫中提出以下兩種方法來實現觀念模糊集的對應。



圖一：身高的觀念模糊集對應實例

對於觀念對應，我們先以一身高的觀念模糊集對應實例來測試模糊關係方程式表示法於觀念對應的效果。如圖一所示，上層有三個觀念節點，分別為矮，中等，與高，皆是比較抽象的觀念，下層具有七個觀念節點，由身高約 140 CM 到 200 CM 等。首先我們利用雙極式 S 型歸屬函數的方法來解決觀念對應。給定一個基本的觀念 Z_x ，分布在 X ，其餘定義在相同的 X 上的基本觀念，以 Z_{mx} 代表，可以經由對 Z_x 變形而得到，也就是

$$z_{mx} = u_{p^*k^*}(x) = \frac{x^{k^*} - p^{*k^*}}{x^{k^*} + p^{*k^*}} = \frac{y^w - q^w}{y^w + q^w}$$

其中 $y = \frac{1+Z_x}{1-Z_x}$ ， $w = \frac{k^*}{k}$ ， $q = \left\{ \frac{p^*}{p} \right\}^k$

我們可以使用上面的方程式而使得兩個歸屬函數是有關係的，而且可以將一個觀念轉換到另一個觀念而得到。因為雙極式 S 型歸屬函數不能直接近似三角形的歸屬函數，所以我們利用 S 型函數的左邊與右邊函數組的最小值來近似。其係由下列公式而達成：

$$y_k = \frac{1+Z_k}{1-Z_k}$$

$$\frac{1}{y_m} = \sum_{k=1}^L \left(\frac{q}{y_k} \right)^w$$

$$z_m = \frac{y_m - 1}{y_m + 1}$$

現以三組觀念節點至七組觀念節點的對應中， k 與 p 的值定為

$$k = [-3.5 \ 3.8 \ -10.0 \ 10.0 \ -14.0 \ 16.0 \ -18.0 \ 21.0 \ -29.0 \ 24.0 \ -33.0 \ 39.0]$$

$$p = [3.0 \ 3.0 \ 8.5 \ 8.5 \ 14.0 \ 14.0 \ 19.5 \ 19.5 \ 24.5 \ 24.5 \ 30.0]$$

結果與標準值之均方誤差為 4.1839×10^{-5} ，在七組觀念節點至三組觀念節點的對應為例， k 與 p 的值設定為

$$k = [-3.3 \ 3.2 \ -11.0 \ 7.6]$$

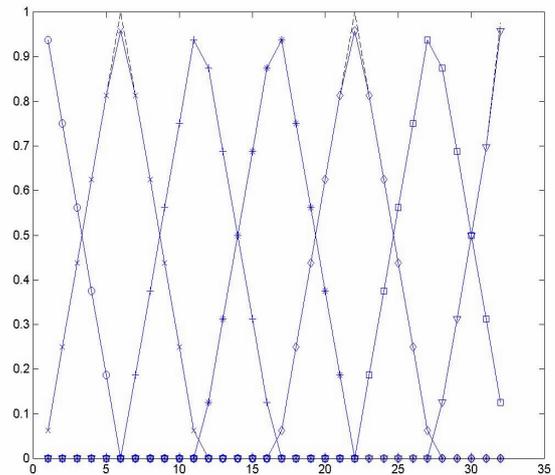
$$p = [5.5 \ 8.5 \ 22.0 \ 25.0]$$

結果與標準值之均方誤差為 4.4738×10^{-7} 。

第二種方法為求解模糊關係方程式(Fuzzy Relation Equation)組的方法，若以上層觀念對應到下層抽象觀念為例，即 3 至 7 對應，可分解成 7 組 3 對應 1 關係，第 i 組關係矩陣 R_i 的解可由下列公式求出

$$R_i = \min_{k=1}^3 (A_k \circ Y_1)$$

依此方法求出的結果如圖二所示。圖中虛線代表實際值連線，實線代表獲得的結果值連線，標準值之均方誤差 RMSE 為 0.0041。



圖二：求解模糊關係於 3 to 7 觀念對應結果

子計畫三：虛擬實境動態模擬系統中之六軸運動平台的智慧型控制

本子計畫可視為整個計畫的控制本體，而負責在虛擬世界中複製真實載具的動態反應。在第一年執行裡，我們已初步針對六軸運動平台作了一些分析與控制法則發展，第二年重點在發展虛擬遊艇操控系統。本年度，則深入探討一些問題發展，並發展虛擬飛機模擬系統，以完成第三年整體計畫之目的。

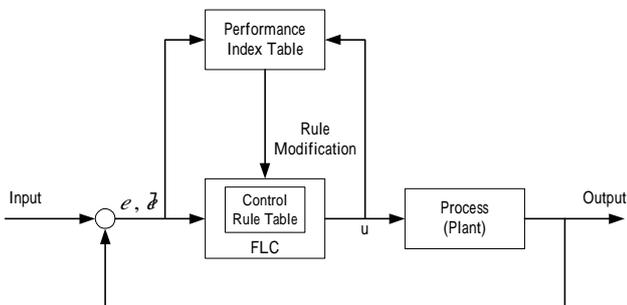
1. 六軸平台之控制：

在完成平台的各種動力學分析及位置控制法則發展後，在第三年度裡，我們利用這些已有的資訊，進一步發展了進似的速度控制方式。此外為了使六軸運動模擬器能克服平台工作空間的限制，使模擬動作能更逼真，並真正實現六軸運動平台的速度控制與加速度控制，我們利用「動作提示(Motion Cues)」的觀念，以人類身體對力的感受配合眼睛在視覺上的假像，藉由「沖淡演算法」來實現平台的速度與加速度控制，並與實驗室自行發展的飛機動態模型結合，完成一個完整飛機操控訓練的虛擬實境。

2. 動作提示：

沖淡濾波器主要是由固定係數的線性高通濾波器和低通濾波器所組成。其輸入為駕駛員所受的比例力 f_{AA} 和角速度 w_{AA} ，輸出為六軸平台所需的控制資料。第二年度我們已針對沖淡濾波器進行分析，今年度我們以汽車做為實驗與模擬的對象，分別做直線加速與加速轉彎的實驗模擬。此外我們亦分別以模糊控制器及適應控制器進行沖淡濾波器參數之調整。

在模糊控制器部分使用的是一具自我組織能力之控制器。架構如圖三所示：



圖三：具自我組織能力模糊規則控制器架構圖

此模糊控制器中，包含了兩個模糊規則庫，一個是 Control Rule Table 其功能主要是記

錄輸入變數和輸出變數間的映射對應關係，透過它我們能容易的對受控體做控制，但對於可變動的受控環境，其效果並不好，為彌補此缺點，還需二個模糊規則庫，稱為 Performance Index Table，用來調整 Control Rule Table 中的模糊規則，使控制器具有學習能力。

而針對適應性控制法則部分，由於低頻平移通道中的傾斜座標對駕駛員來說是一種欺騙感覺的技巧，所以必須隨時知道低通濾波器的運作情形，並確保其運作不會和高頻轉動部份混淆，因此其參數並不需隨時間而改變。所以要調整的濾波器參數分別為高頻平移通道與高頻轉動通道中的兩個高通濾波器。

對於傳統型沖淡濾波器之運作原理，X 軸方向之加速度運動經低頻平移通道中的傾斜座標後，會造成俯仰的角度。因此我們將俯仰與 X 軸之運動視為一組，並利用一代價函數來調整。相同地，旋轉及 Y 軸、側轉及 Z 軸之運動亦利用一代價函數來調整。故在此架構中，我們利用三組代價函數來進行參數之調整。和模糊控制器主要針對模擬器錯誤動作的修正的不同是，本適應性控制之調整架構乃透過一代價函數，來調整濾波器的參數。

3. 嵌入式系統之發展：

在過去兩個年度裡，我們是以 PC-Based 整合系統為發展方向，而在第三年度裡，我們的整合系統則進一步試著朝著小型嵌入式硬體單板的發展，以取代整台 PC 之功能。

這裡我們所採用的是由 Apply Data System 公司所生產的 Graphics Client Plus 產品。選擇這塊板子的原因是因為它有豐富的序列傳輸介面，包括 IrDA、RS-232、RS-485 及 CAN-Bus，也有內建 10Base-T 網路以及觸控式螢幕及鍵盤等，並且支援包括 Linux、WinCE

等五種嵌入式作業系統，可以發展的嵌入式種類及相關應用程式可謂相當豐富。

目前我們在 GCPlus 單板上發展嵌入式系統來控制虛擬實境動態模擬器並未完全成功。現在已做到的為移植 Linux 作業系統至 GCPlus 單板上，使單板成為 Linux 嵌入式系統，並成功撰寫一些周邊驅動程式。未來則打算自己發展一塊嵌入式的板子，並加入六軸平台的驅動電路，以完成與平台的結合。

4. 飛機虛擬場景之發展

在虛擬場景的發展上，我們可分硬體及軟體兩部份分別述說之。首先在硬體設備上，我們在交通大學電子資訊大樓 416 室建購一個專屬的虛擬實境展示室，其更增加了本計畫展示上的生動效果。而在軟體發展上，我們延續以往累積的經驗，將原有單純的虛擬實境場景擴大發展成為分散式模擬操控訓練系統。不過由於第三年總計畫的目的在於發展一虛擬飛機操控系統，因此在虛擬場景的開發上，我們是針對飛機場景來發展。下列即為軟體部分在第三年所完成的事項：(1) SGI 飛機模擬操控訓練系統雛型之建立、(2) PC 雙人飛機模擬操控訓練系統雛型之建立。



圖四：飛機場景之畫面成果展示



圖五：雙人飛機模擬操控訓練系統成果展示

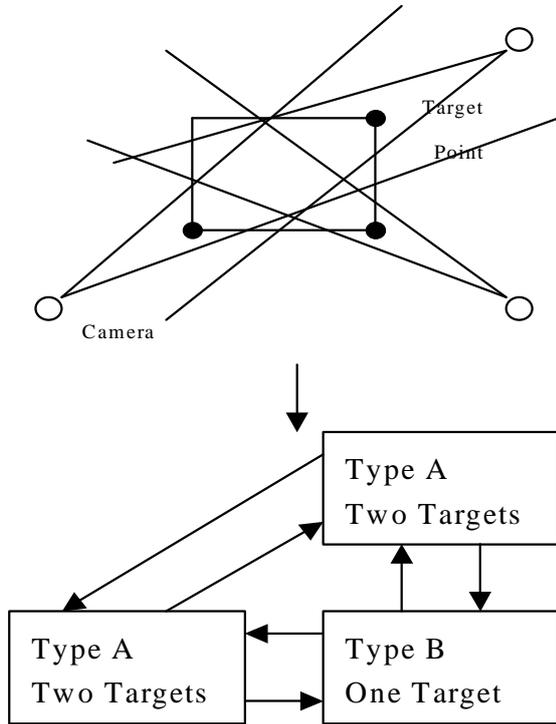
子計畫四：虛擬實境動態模擬系統中之六軸運動平台的影像定位系統研發

在第一年我們所研究的計畫中，我們所提出的立體影像定位系統是經由三部雙眼 CCD 取得目標物的影像，接著使用自我校正過程而得到目標影像在三度空間絕對座標系統中的位置，進而利用三個目標點來估測六軸平台在三度空間絕對座標系中的姿態。第二年度，我們進一步研發這一套立體影像定位系統，並將其獨立於六軸平台之外，而估測平台運動時絕對座標中的姿態。

而這一年的計畫最主要是將複製成三台同樣的系統，置於六軸平台外側，經過適當地連結與計算並校正相對位置關係，能將在六軸平台上所放置的三個特定的特徵點給找出來，並透過立體成像等等的影像處理技巧，找出三個特徵點相對於世界座標的位置，並計算出六軸平台的中心點的位置，以平台中心點跟基底中心點的相對位置來定義整個六軸平台的整個姿態。

而我們所設計的定位系統包含了三個子系統，每一個子系統各自擁有一部雙眼 CCD 攝影機用來擷取目標物的影像、及一個影像處理單元，並且連成一個簡單的網路來傳輸彼此

所獲得的資料，這些都可以藉由狀態轉移映圖來表示，如圖六所示。在這裡，由於 CCD 所擺設的位置的不同，我們可以得到不一樣的狀態，而藉由彼此狀態在網路中的交換資料，我們可以得到六軸平台運動中的所有參數。



圖六：狀態轉移映圖

當每一個子系統一旦被啟動，將開始傳遞訊息給其他的子系統，而其他的子系統也會送出他們所擁有的資料來當作回應，而這些狀態訊息包含了攝影機的位置和自我校正的參數，所以每一個子系統都可以得到彼此的子系統所有的資訊。

而我們所處理的影像中，由於我們使用了點光源來當作特徵物，它的擺設位置也如圖三所示，在六軸平台頂點各設其一。透過影像處理的方法，如果每一點像素的表示如下：

$$x = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) \geq 252 \\ 0 & \text{if } f(x, y) < 252 \end{cases}$$

之後，將每個灰階值標示為 255 的像素聚合起

來成一個區域，並將這些區域的左上方點 (u_l, v_l) 跟右下方的點 (u_r, v_r) 依下式計算可以得到目標物中心點的位置：

$$(u_c, v_c) = \frac{(u_l, v_l) + (u_r, v_r)}{2}$$

而整個在網路傳輸資料過程中所會造成的延遲可以表示為 $N=(V,E,b,p,q)$ ，其中 $G=(V,E)$ 包含了網路中的頂點 V 跟連結 E ，而 $b(u,v) > 0$ 跟 $p(u,v) = 0$ 分別代表代表一個單向連結的 bandwidth 和 propagation delay, $q(u) = 0$ 則代表佇結在每一個傳輸節點上 queuing delay。

如果 $\delta = \langle v_1, v_2, \dots, v_k \rangle$ 為一個 $v_j - v_l$ 的路徑，則在 這條路徑上的 delay 可表示成

$$D(\delta) = \sum_{1 \leq j \leq k} p(v_{j-1}, v_j) + q(v_j)$$

其中 p 跟 q 如前所述為分別為 propagation delay 跟 queuing delay。而沿著路徑 δ 傳輸一個訊息 > 0 且 $b = B(\delta)$ 所需的時間 T 為

$$T(\delta, b, \delta) = D(\delta) + [\delta/\delta] - 1$$

在網路中傳輸每一個資料可視成一個 multi-path 傳輸的問題，可將一個訊息資料分解成

$$t = \sum_{1 \leq i \leq k} t_i, \quad t_i \geq 0$$

而每一條相對應的路徑的 bandwidth 也可被分解成

$$b(u, v) = \sum_{1 \leq i \leq k} b_i(u, v), \quad b_i(u, v) \geq 0$$

藉由每一條路徑的傳輸，我們可以快速地将由 CCD 所獲得並處理過後的影像資料，傳至主電腦去計算出平台的姿態。