

# 國立交通大學

多媒體工程研究所

## 碩士論文

基於 Homography 的自動車定位研究



Vision-based Mobile Robot Localization using Homographies

研究生：陳光兆

指導教授：莊仁輝 教授

中華民國九十六年六月

基於 Homography 的自動車定位研究

Vision-based Mobile Robot Localization using Homographies

研究生：陳光兆

Student : Guang-Zhao Chen

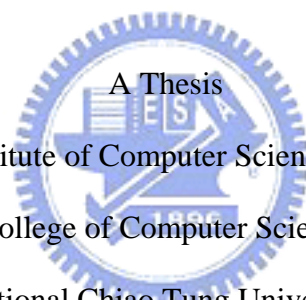
指導教授：莊仁輝

Advisor : Jen-Hui Chuang

國立交通大學

多媒體工程研究所

碩士論文



Submitted to Institute of Computer Science and Engineering

College of Computer Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Computer Science

January 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年六月

# 基於 Homography 的自動車定位研究

學生：陳光兆

指導教授：莊仁輝 教授

國立交通大學  
多媒體工程研究所

## 摘要

本論文的目標是探討利用電腦視覺技術來完成自動車在室內環境所做定位工作。其最主要的概念在於建立架設於自動車上的攝影機所擷取之影像與工作空間環境兩者的平面投影轉換關係，以求出自動車在空間中的正確位置。更具體來說，我們提供兩種定位的方法：1. 對每一張所擷取的影像特徵反覆計算其對應於工作空間之平面轉換關係，以此來計算自動車在地圖中的位置。2. 利用單一的平面轉換矩陣計算特徵點在空間中相對於自動車的運動向量，以此推估自動車位置。其中第一種方法，相較於早先我們所曾經使用的 Cross-Ratio 定位方法，兩者在使用最少特徵點數目（4 點）之下有等價關係，但對於特殊情況的處理，實驗結果顯示本論文所提之方法，有著較優的處理效能以及精確性。而第二種方法的特色在於能夠對自動車較小範圍的運動提供簡單的定位，其精確性雖然不及第一種方法，卻仍能提供使用者一定程度的定位結果作為參考。

# Vision-based Mobile Robot Localization using Homographies

Student : Guang-Zhao Chen

Advisor : Jen-Hui Chuang

Institute of Computer Science and Engineering

National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The goal of this study is to automatically calculate robot locations in an indoor environment using computer vision-based techniques. The main concept is based on homographies that model the geometric transformations between images captured by a camera and the workspace of a planar environment. Specifically, we propose two localization methods: (i) localization based on repeated computation of homographies using image features in each frame and (ii) localization based on a single planar transformation by evaluating relative motion of landmarks in the workspace w.r.t. the robot. For (i), one can show that it is equivalent to the localization method based on cross-ratio proposed previously. If minimum number of image features are used. While (i) can be extended directly to take into account more image point features, extensions of the cross-ratio based method is not straightforward. On the other hand, experimental results show that (i) is more accurate than (ii); however (ii) is more simple and can provide useful localization results by locating robot positions in small range.

# 致謝

首先誠摯的感謝指導教授莊仁輝博士，老師悉心的教導讓我了解電腦視覺領域的深奧，不時的討論並指點我正確的方向。老師對論文的嚴謹更是讓我受益良多

本論文的完成另外亦得感謝高中同學們的大力協助，及大學同學的支持。因為有你們的關心與陪伴，使得本論文能夠更完整而嚴謹。

兩年裡的日子，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論、言不及義的閒扯、讓人又愛又怕的宵夜、趕作業的革命情感、.....，感謝學長姐、同學、學弟妹的幫助，有你們的陪伴讓兩年的研究生活變得絢麗多彩。

感謝博班學長泓宏的細心指導以及阿曝、阿狗學長、思慧在閒暇時間陪我打發空閒時間，一起耍笨耍智障，也感謝同組的郁婷以及蝦姐、蔡亞瑟、杯口、怡玲等同學的幫忙，恭喜我們順利走過這兩年。實驗室的學弟妹當然也不能忘記，大家的幫忙及搞笑我都銘感在心。

女朋友在背後的默默支持更是我前進的動力，沒有的體諒、包容，相信這兩年的生活將是很不一樣的光景，感謝你的陪伴。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親，你們是最體貼最善解人意的父母，我由衷的感謝你們的體貼與包容。

# 目 錄

目 錄.....	1
圖目錄.....	3
一、背景 .....	5
1.1 相關研究 .....	5
1.1.1 室內導航 (Indoor Environment Navigation) .....	5
1.1.2 戶外導航 (Outdoor Environment Navigation) .....	8
1.2 Cross-Ratio方法簡介 .....	9
1.3 Homography方法簡介 .....	11
1.4 研究目的與動機 .....	12
1.4.1 以工作空間為中心定位方法與以Cross-Ratio定位方法比較 .....	13
1.4.2 在同一組參考點下兩者方法等效性 .....	13
二、自動車導航系統介紹 .....	15
2.1 系統簡介 .....	15
2.2 應用範圍 .....	16
2.3 夜間影像前置處理 .....	16
2.4 自動車定位演算法 .....	17
2.5 環境限制 .....	18
三、以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法 .....	19
3.1 平面投影轉換 .....	20
3.1.1 最小對應點數 .....	21
3.1.2 Over-determined .....	21
3.1.3 DLT (Direct Linear Transformation) .....	22
3.2 自動車定位估算 .....	23
四、以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法 .....	26
4.1 以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法流程 .....	27
4.2 最小平方法 (Least Squares Solution Method) .....	29
4.3 離群值 (Outliers) 的偵測 .....	30
4.3.1 利用特徵點在空間平面中的走向做篩選 .....	31
4.3.2 主成分分析法 (Principal Components Analysis) .....	32
4.3.3 利用環境的分佈特性做矯正 .....	34
4.4 總結 .....	36
五、實驗結果與探討 .....	37
5.1 以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法探討 .....	37
5.1.1 自動車定位結果比較 .....	38
5.1.2 效能與時間複雜度討論 .....	41
5.2 以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法討論 .....	42

5.3 以工作空間座標系與以自動車座標系為中心之定位方法比較 .....	45
5.4 自動車實際定位探討 .....	46
六、結論 .....	48
6.1 總結.....	48
6.2 未來工作 .....	48
參考文獻 .....	50



# 圖目錄

圖 1-1 利用Cross-Ratio計算 .....	10
圖 1-2 平面轉換示意圖 .....	12
圖 1-3 利用Cross-Ratio方法與Homography方法定位 .....	13
圖 1-4 在取樣相同特徵點定位結果 .....	14
圖 2-1 場景配置圖與擷取影像 .....	16
圖 2-2 影像前置處理一例 .....	17
圖 3-1 自動車之虛擬定位 .....	24
圖 3-2 用於計算自動車的標記 .....	25
圖 3-3 自動車虛擬定位計算示意圖	26
圖 4-1 特徵點於工作空間運動向量實例(紅點、黑點為t-1及t時間的特徵點位置) .....	27
圖 4-2 以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法流程 .....	28
圖 4-3 最小平方解一例 .....	30
圖 4-4 自動車定位軌跡 .....	30
圖 4-5 紅外線攝影機所擷取影像 .....	31
圖 4-6 以走向做篩選結果(黑色為尚未改進,紅色為改進後) .....	32
圖 4-7 特徵點佈設與分群結果 .....	33
圖 4-8 以PCA做矯正之定位結果(黑色為原始資料,紅色為未利用PCA所得,綠色為利用PCA改進後所得) .....	34
圖 4-9 以幾何分佈特性做定位分析 .....	35
圖 5-1 自動車定位實例:(a)原圖(b)局部放大圖(x3)(紅色為本論文方法,黑色為Cross-Ratio方法) .....	38
圖 5-2 圖 5-1 之影像特徵點更換示意圖 .....	39
圖 5-3 自動車定位結果放大圖:(a)原圖,(b)局部放大圖(x2.5) .....	40
圖 5-4 圖 5-2 編號I之特徵點更換 .....	40
圖 5-5 圖 5-2 編號II之特徵點更換 .....	40
圖 5-6 使用單一特徵點之定位結果(編號0、1、2、3、4、5依序對應黑、黃、綠、粉、藍、青) .....	43
圖 5-7 使用最靠近自動車的1個(粉紫)、2個(黑)、3個(綠)及4個(藍)影像特徵點之定位結果 .....	44
圖 5-8 使用單一特徵點之定位結果(編號6、7、8、9、10依序對應黑、黃、粉、藍、青) .....	44
圖 5-9 利用最鄰近的路標定位(紅色為以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法,黑色為以Cross-Ratio為基礎之定位方法) .....	45
圖 5-10 基於平面轉換定位結果(紅色為以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法,藍色為以自動車座標係為中心之平面轉換定位方法):(a)原圖,(b)局	



部放大圖(x2).....46

圖 5-11 自動車實際行走路線 (a) 利用沙袋所留下的軌跡以及 (b) 重建於場景地圖上.....47


圖 5-12 基於工作空間座標系方法路線與實際行走路線 (藍色為以工作空間座標系為中心之平面 轉換定位方法所得, 紅色為以自動車座標係為中心之平面 轉換定位方法所得, 黑色為自動車真實路徑重建結果) .....47



# 一、背景

在自動車的研究中，定位的方法與其精確度探討是相當常見的，本論文所探討的主題是自動車在工作環境中先針對架設於車上攝影機所擷取之影像做分析，將已知地標之影像資訊（含自動車影像位置）與其空間資訊以 Homography 理論相結合，以取得自動車在工作空間中的定位座標。另一方面，針對自動車定位我們曾提出利用 Cross-Ratio 方法計算之定位，在本論文中，我們亦將使用 Cross-Ratio 方法與本論文所提出方法做一優劣性以及效能的比較。在過程中，我們發現，本論文所提出的方法是較有效率且能夠節省計算資源的較佳選擇，並且也大大的減低了解決雜訊問題的困難度與計算複雜度。另外，基於 Homography 理論，我們亦提供了兩種方法，讓使用者能夠更有彈性的選用。

## 1.1 相關研究



有關於自動車的定位研究在學術領域中已經越來越受到矚目，且相關的研究也不斷的推陳出新，而自動車的研究可以依照使用的理論基礎分為多個方向。其中大致包含以全球定位系統（Global Positioning）、超音波（Ultrasonic）以及視覺為基礎（Vision based）等三種，本論文所用的理論是基於電腦視覺領域之相關研究成果，而這個領域的應用內容以環境為區分的條件又可分成室內導航(Indoor Navigation)以及戶外導航（Outdoor Navigation）兩種來做研究。底下我們針對這兩大類的相關研究以及本論文所使用的方法作個概述。

### 1.1.1 室內導航（Indoor Environment Navigation）

在室內的環境中，以視覺為基礎的定位導航可以大致上分成三類，包含以地圖為基礎的方法（Map-based Approaches）、以地圖建立為基礎的導航方式（Map-building-based Navigation）、以及無地圖的導航（Mapless Navigation）等三種方式。

第一種是以地圖為基礎的方法（Map-Based Approaches），這類的方法是運用使用者在環境或是工作空間所建立的地圖，做為定位導航的依據。早期當這類型的方法已經可以實際應用在自動車上時，許多的研究隨即以此想法為基礎，導入路標（Landmark）的資訊，藉由搜尋以及辨別影像上的路標，利用這些前置處理所得到的資訊，自動車即可利用已知的地圖，以及地圖上路標之座標位址，運用其相互間的關係，做自我定位的運算。此類以視覺為基礎的定位大致上可以分成四個步驟：（1）首先經過攝影機取得影像資訊，（2）偵測影像中的路標，（3）將步驟二的結果利用特定方法找出路標的資訊，例如：資料庫比對，以及（4）利用路標資訊計算自動車的位置。

除了上述的方法外，Hashima [1]亦提出另一種藉著追蹤影像中的數個路標的方式，來取得路標的資訊定位，再利用此結果並配合計步器（Odometer），計算出自動車的定位以及朝向的資訊，並投影於已存在的現有地圖上。此類定位方法皆稱為路標追蹤法（Landmark Tracking Method），其缺點是自動車的定位誤差會累積，如果在開始的時候不精準，長時間行駛後的定位誤差會越來越嚴重，而且方法中也沒有提供自動車做重新定位的修正。在近幾年的研究中[2][3]皆針對以路標為定位之方法做適度以及有效的改進，這些方法在定位上皆利用計步器資訊計算自動車的位移以及轉向角度。另外，為了避免在定位時所造成的誤差累積（包括轉向以及位移的滑動），更特別著力於偵測路標之座標的計算方法，做為自動車定位的修正。對於上述這類型利用修正計步器的方式做定位，即使可以減少誤差的累積，但仍無法避免，容易導致自動車偏離所規劃之路徑。

第二種以地圖建立為基礎的導航方式（Map-building-Based Navigation）是利用攝影機或是感應器（Sensor），由擷取到的影像建立出自動車周圍幾何（Geometric）或是拓樸（Topological）地圖，接著利用所建立的地圖當作依據，在地圖上定位，達到導航的效果。因為這類地圖通常需要自行產生，因此有很多的研究也著重於自動車全自動或是半自動的建立工作空間的地圖。早先是由Cartby利用[4]的方法在50公分的長廊拍攝九張影像，接者運用特徵點（Interest

Points) 將這些點轉換成可用於影像重建的特徵點，利用這些特徵點當作重建三維場景的依據，然而其運算效能在穿越20公尺的工作空間需要花上五小時之久。因此，即使此方法可以找出在環境中障礙物的座標也可以用於路徑規劃，但是運算所花費的時間使得這個方法其可行性大為降低。在研究出上述方法後，有更多的研究人員投入地圖重建的演算法，其中主要可分為以座標為基礎表示法 (Occupancy-grid-based Representation) 以及拓樸表示法 (Topological Representation) 兩類，前者的方法是由Moravec以及Elfes等人在1985年所提出[5]。他們首先經由超音波來獲取累計資訊 (Accumulating Data)，以此建立一個佔據座標系 (Occupancy-grid)，在這個座標系裡的細胞 (Cell) 皆給定機率值。而這個機率值可用來判別此細胞在這個座標系所佔有的空間大小及位置。拓樸表示法[6]則是將地圖的資訊以節點 (Nodes) 方式儲存，節點與節點之間是由拓樸關係所建立，且節點都包含著公制資訊 (Metrical Information)，自動車的導航可以藉由這樣的拓樸選擇路徑導航以及估算自動車定位的效果。而後，Thurn[7]為了找出最好的地圖重建效能，利用類神經網路 (Neural Network) 以及貝氏整合 (Bayesian Integration) 的方法重建以座標為基礎的表示法 (Grid-based Representation)。接著再利用以座標為基礎的表示法產生拓樸，以期效能以及定位準確度皆能兼顧，實用性也較高。近幾年的研究中[8][9]，也導入全像攝影機來重建地圖，雖然利用此種攝影機可以在同一地點中的同一時間獲取豐富的資訊，也簡化了地圖製作 (Map Building) 的程序，但缺點是利用此類型的攝影機重建場景容易增加系統負擔，且所擷取的影像解析度相對於單一攝影機，相對的較低，以至於容易降低搜尋或追蹤用來重建影像特徵點 (Interest Point) 的效能。

最後一種是無地圖的導航 (Mapless Navigation)，這類方式與前兩類方法所不同的是，這個方法在自動車執行任務的過程中，不會產生任何的地圖作為導航的依據，而是利用一些行駛路徑上的其他物件當作導航的媒介，例如牆壁上的畫作、書桌、門口或是牆壁的轉角。在自動車執行過程中，並不需要知道這些物件確切的座標位置，而是利用影像與路標的相對關係判斷自動車已經到達目的地或

是查核點 (Checkpoint)。例如Hayet等人的研究中[10]就是利用牆壁上的畫當作導航的路標，比對行徑路徑的畫作，並辨識其編號，用以告知自動車已經走到了查核點 (Checkpoint) 或是目的地。但是這類方法的缺點是導航的可靠性端視偵測路標的準確度，而且只能知道自動車的粗略位址，卻無法精確估算出自動車的定位。

### 1.1.2 戶外導航 (Outdoor Environment Navigation)

相對於室內導航，在戶外環境的導航方法通常包含避開障礙物 (Obstacle Avoidance)、路標偵測 (Landmark Detection)、地圖建立 (Map Building)、更新以及定位座標的運算。在戶外的環境中，地圖很難在事先就知道，也因此導航的方法可分為在已建構的工作環境之導航方法 (Outdoor Navigation in Structured Environments)、在未建構的環境之導航方法 (Unstructured Outdoor Navigation) 以及特別針對亮度所作的導航方法 (Illumination and Outdoor Navigation) 等三類。

第一種導航方法是運用在已建構的工作環境中 (Outdoor Navigation in Structured Environments)，在這類方法的環境中，通常都存在某種特徵 (Feature)，研究人員可以利用已有的特徵做分析並且辨別之。在Tsugawa[11]的研究中，實驗的目的是針對可以在道路上行走的車子做導航，並且利用道路上的特徵物做巡行的依據，儘管有著時速30km的限制，但執行導航成效相當好。此系統並在車上架設兩台攝影機作為偵測道路障礙物的工具，因此可藉由避開障礙物作為導航的依據。另外也有像在高速公路上藉由辨識道路分隔線來達到導航的效果[12]，但是這類方法的缺點在於車子在行走的過程中皆無法提供精確的定位座標，也很容易因為光線變化造成不穩定的導航效果。

第二種導航方法是運用在未建構的環境中 (Unstructured Outdoor Navigation)，這類型方法主要是處理自動車在工作空間中任意行走的情形，而沒有終點 (Goal) 的設定，在Lorigo等人的研究中[13]，自動車是以避開障礙物做導航的憑藉，而辨識障礙物的方法是利用低解析度的影像分析其RGB以及HSV特徵

值，以將路徑上的障礙物儲存在一維的位置向量中，因此回傳的資訊相當簡易，但是缺點是無法規劃路徑，亦無法知道自動車的確切座標。

最後是針對亮度變化所作的導航 (Illumination and Outdoor Navigation) 分析，在一般的導航方法中，亮度的變化往往對環境特徵的偵測效能有相當大的影響，當影像的對比或是亮度產生變化時，往往就會造成導航失敗的結果。在Thorpe[14]的研究中，利用彩色資訊 (RGB) 去分辨並補償障礙物上的陰影，作者並利用更多的視覺模式，如BW、RGB、HSV來辨識障礙物的座標，以加強辨識的準確性。另外，Mori[15]也利用彩色資訊來解決光影的問題，利用光學的特性將影像中紅色扣除藍色的資訊來補償亮度所產生的變化。此法對於亮度變化的敏感度相當低，也因此優於使用一般色彩資訊 (RGB) 的方法。

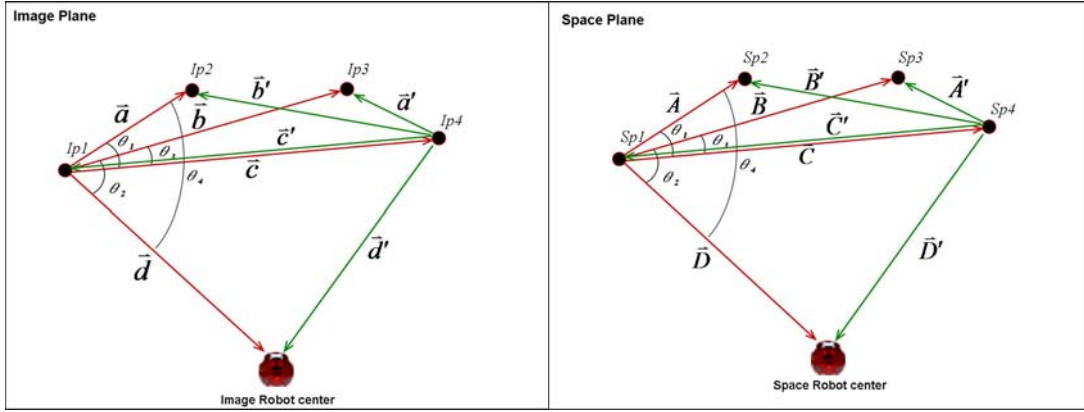
## 1.2 Cross-Ratio 方法簡介

在自動車定位研究方面，早先我們曾經利用 Cross-Ratio 的方法來計算自動車的位置，這個方法的核心想法是運用影像以及空間中特徵點之間相對的位置有一恆等的角度關係，也因為此關係，我們可以先求得影像中的自動車位置，接著再利用此位置推估空間中自動車位置。以下我們將該方法作詳細說明。

首先，假設在影像中有四個特徵點  $Ip1$ 、 $Ip2$ 、 $Ip3$ 、 $Ip4$ 。我們利用  $Ip1$  對其餘四點 (包含自動車影像座標  $IRC$ ) 做連線，即圖 1-1(a) 中的紅色線段，則存在 4 個向量

$\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ 、 $\vec{c}$ 、 $\vec{d}$ ，其中  $\vec{a} = (a_x, a_y)$ ， $\vec{b} = (b_x, b_y)$ ， $\vec{c} = (c_x, c_y)$ ， $\vec{d} = (d_x, d_y)$ ，如圖 1-1(a)

所示，而且可以得到影像平面中的 Cross-Ratio 等式：



(a) Image Plane

(b) Space Plane

圖 1-1 利用 Cross-Ratio 計算

$$CR_{image} = \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin \theta_3 \sin \theta_4} = \frac{|\vec{a}| |\vec{c}| \sin \theta_1 |\vec{b}| |\vec{d}| \sin \theta_2}{|\vec{b}| |\vec{c}| \sin \theta_3 |\vec{a}| |\vec{d}| \sin \theta_4}$$

$$= \frac{|\vec{a} \times \vec{c}| |\vec{b} \times \vec{d}|}{|\vec{b} \times \vec{c}| |\vec{a} \times \vec{d}|} = \frac{\begin{vmatrix} a_x & c_x & b_x & d_x \\ a_y & c_y & b_y & d_y \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_x & c_x & a_x & d_x \\ b_y & c_y & a_y & d_y \end{vmatrix}} = \frac{q_1}{q_2} \quad (1.1)$$

接著，利用 Cross-Ratio 投影不變的特性，亦即

$$CR_{image} = CR_{space} \quad (1.2)$$

我們可以得到在 3D 空間平面的 Cross-Ratio 等式：

$$CR_{space} = \frac{|\vec{A} \times \vec{C}| |\vec{B} \times \vec{D}|}{|\vec{B} \times \vec{C}| |\vec{A} \times \vec{D}|} = \frac{\begin{vmatrix} A_x & C_x & B_x & X - P_{1x} \\ A_y & C_y & B_y & Y - P_{1y} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} B_x & C_x & A_x & X - P_{1x} \\ B_y & C_y & A_y & Y - P_{1y} \end{vmatrix}} = \frac{q_1}{q_2} \quad (1.3)$$

其中  $(X, Y)$  為自動車之位置座標， $\vec{A} = (A_x, A_y)$ ， $\vec{B} = (B_x, B_y)$ ， $\vec{C} = (C_x, C_y)$ ，

$\vec{D} = (X - P_{1x}, Y - P_{1y})$ ，接著可以利用(1.1)以及(1.2)兩式得出一條射向自動車定位的

直線方程式

$$(q_1K_2A_y - q_2K_1B_y)X + (q_2K_1B_x - q_1K_2A_x)Y = q_2K_1 \begin{vmatrix} B_x & P_{1x} \\ B_y & P_{1y} \end{vmatrix} - q_1K_2 \begin{vmatrix} A_x & P_{1x} \\ A_y & P_{1y} \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

其中  $K_1 = \begin{vmatrix} A_x & C_x \\ A_y & C_y \end{vmatrix}$ ,  $K_2 = \begin{vmatrix} B_x & C_x \\ B_y & C_y \end{vmatrix}$  接著，我們利用同樣的方式，從影像平面中的特

徵點  $Ip4$  發出射線，射向  $Ip1$ 、 $Ip2$ 、 $Ip3$  以及  $IRC$ ，即圖 1-1(a)中的綠色線段，同樣的我們可以得到另一條空間平面中射向自動車位置的直線方程式：

$$(q'_1K'_2A'_y - q'_2K'_1B'_y)X + (q'_2K'_1B'_x - q'_1K'_2A'_x)Y = q'_2K'_1 \begin{vmatrix} B'_x & P_{4x} \\ B'_y & P_{4y} \end{vmatrix} - q'_1K'_2 \begin{vmatrix} A'_x & P_{4x} \\ A'_y & P_{4y} \end{vmatrix} \quad (1.5)$$

利用(1.4)以及(1.5)兩式求聯立方程解，則可以得到一交點，此交點即為我們所請求之自動車工作空間定位座標。

### 1.3 Homography 方法簡介

在了解如何利用 Cross-Ratio 方法做自動車定位後，接著我們也針對本論文所使用的 Homography 做簡單的介紹。首先，對於 2D 平面，我們的目標是希望利用影像平面中重建出我們所製定的目標空間平面，方法是利用影像中的特徵點集合  $x_i$  與空間中的特徵點集合  $x'_i$ ，其中這樣的兩組平面特徵點集合(以齊次座標表示)之間存在投影轉換矩陣  $H$ ，使得  $Hx_i = x'_i$ ，這樣的矩陣可以將影像中的特徵點轉換並且重建出空間場景，如圖 1-2 所示。在得到平面轉換矩陣  $H$  後，我們就可以利用這樣的矩陣求出在影像平面中任意點投影至空間平面的位置。有了這樣的想法，因為我們所要定位的自動車位置在影像平面中是已知的，將此點的座標定為  $r$ ，則要求得自動車在空間平面的位置  $R$ ，只需要利用公式  $Hr = R$  即可。



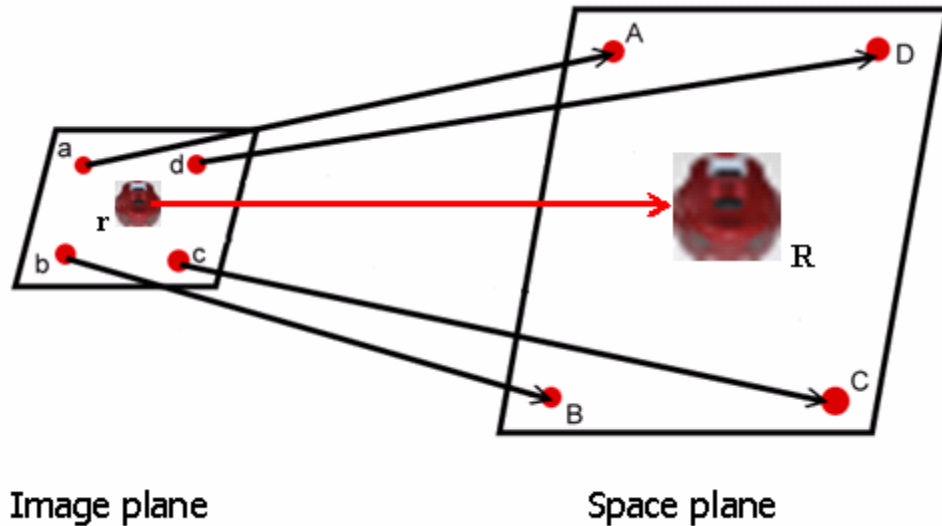


圖 1-2 平面轉換示意圖

#### 1.4 研究目的與動機

在本論文提出以 Homography 理論為基礎的方法做自動車定位之前，我們曾經使用過 Cross-Ratio 方法做自動車定位研究，且在研究的過程中，我們發現使用 Cross-Ratio 在運算上，有相當的複雜性，在多點( $n>4$ )的情形下沒有一個明確的參考點選擇策略。因此，本研究目標是希望藉由提出運算效率高且能達到與 Cross-Ratio 之實驗結果相當或是更好的演算法來進行自動車定位。除此之外，對於定位的運算我們也做了適當的簡化，期望在執行效率與定位結果之間平衡，而能整合至即時運算之自動車系統中，並達到高效率且具有高可信度的定位結果。在此我們提出兩種方法：(1) 以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法以及 (2) 以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法。前者的方法與 Cross-Ratio 在運用相同參考點的情形下，有一定的等效性，利用這樣的觀點，接著我們再研究將參考點推廣至超過四點的情形，來顯示該方法的完整性；而後者是藉著分析以自動車當作座標系的中心，考慮相對於參考點在影像中的運動向量，這樣的向量包含了移動的大小以及方向，以此來計算自動車在空間中的確切位置。最後，在我們的探討與研究中，期望能找出簡單且能顧及準確性的演算法。

### 1.4.1 以工作空間為中心定位方法與以 Cross-Ratio 定位方法比較

在提出我們方法的細節之前，首先來比較基於Homography的方法與相對於Cross-Ratio方法的結果。圖1-3為上述兩種定位方法結果的例子，(a)為X方向之定位，(b)為Y方向之定位，其中橫軸單位為拍攝張數，縱軸則是以實驗場景中的磁磚大小為單位，每單位為40cm，而紅色線段為Cross-Ratio方法所計算之自動車定位，黑色線段為本論文所提出方法之定位結果。早先我們使用Cross-Ratio方法時，選擇參考點的方式是利用手動做選取的；而這裡所看到黑色線段是我們利用基於Homography 理論所做的方法，在此處選擇特徵點的方法是以Homography在Over-determined情形下，可以利用最簡易的SVD方式將所有參考點都融入運算的過程中。可以發現的是，此兩種方法在定位的結果上有一定的相似性，即便是所利用的特徵點數目並不盡相同，也有可能造成相似的定位結果產生。如果考慮定位問題之幾何特性，上述兩個方法應具有相當的等效性，而下一節以實例作為這個論點之簡易佐證。

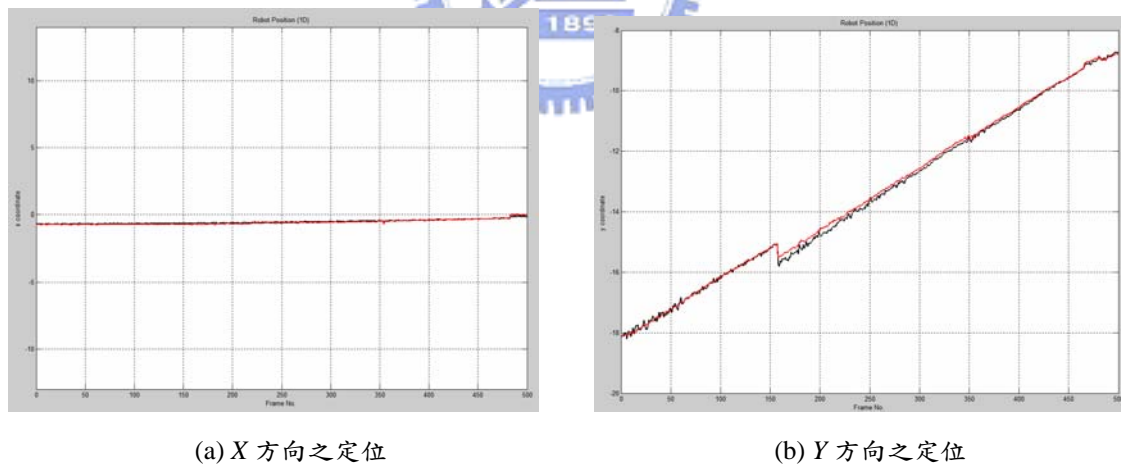
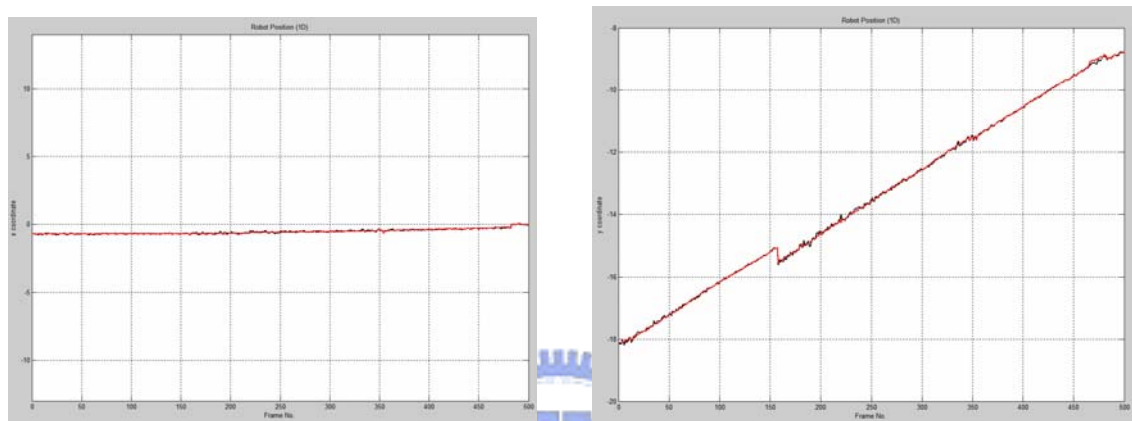


圖 1-3 取樣特徵點為多點之定位方法比較(紅色為利用 Cross-Ratio 方法所得，黑色為利用 Homography 方法所得)

### 1.4.2 在同一組參考點下兩者方法等效性

在證明前述論點前，我們先來觀察運用同樣特徵點時，兩者定位方法結果的相似度。因為Cross-Ratio方法在定位執行的過程中需要的參考點數為四點，而我

們所使用的方法也將利用與Cross-Ratio方法執行過程相同的四點做運算。圖1-4為兩種方法利用相同參考點的定位結果，左圖為X方向之定位，右圖為Y方向之定位，從圖中可以觀察出兩者的所定位出的實驗結果幾近相同。此乃因為兩者在平面空間中所運用的參考點，其平面幾何關係是相同的，因此理應會造成相同的定位結果產生，而實驗的結果也驗證了這樣的想法。



(a) X 方向之定位

(b) Y 方向之定位

圖 1-4 取樣特徵點為相同之定位方法比較(紅色為利用 Cross-Ratio 方法所得，黑色為利用 Homography 方法所得)

## 二、自動車導航系統介紹

隨著科技的日新月異，自動化的趨勢是顯而易見的，為了取代人力資源的耗費，科學家希望能利用智慧型系統來幫助人類執行任務或者讓任務更為簡化。在我們所研究的夜間自動車導航系統中，利用此系統可以在夜間快速且有效的對自動化車輛做定位計算以及物品偵測的能力，例如夜間巡邏、夜間物品保全等。在本章裡面，將會介紹完整的自動車導航系統架構，和目前所採用的一些處理方法，包含影像的前置處理、特徵辨識以及自動車定位等等。

### 2.1 系統簡介

夜間自動車導航系統的基本功能包括利用環境的特徵，以擷取行進時的影像特徵，並且比對資料庫加以辨識，而且可以整合多項功能進行車輛巡邏行為。一套夜間導航系統主要分成兩大部分組成，一是自動車以及架設於自動車上的硬體系統，另外則是有關於分析擷取影像的軟體核心技術。為了在黑暗無照明的情況下，能夠順利擷取符合需求的影像，一些特殊的硬體設備也成為必要，而夜間自動車導航系統硬體設備及其功能包括：

1. 近紅外線 LED 燈：提供自動車導航之路標。
2. 高性能取像裝置：可擷取近紅外線 LED 所發出的光源。
3. 網路通訊介面：利用無線網路的介面傳送影像，將使得自動車導航更具有其便利性，並且使得巡邏環境所涵蓋範圍更加廣闊。
4. 影像終端裝置：處理透過網路通訊介面所蒐集到的所有影像資訊，進行辨識、分析以及管理等各項必要的動作，並且可與資料庫建立聯結。

而夜間自動車導航系統的核心則是以紅外線路標辨識軟體為主。取得紅外線影像並完成路標座標資訊，就可交給自動車定位軟體進行計算的程序。以下，我們將就自動車定位系統的各個步驟作大略的介紹。

在自動車定位的執行過程中，考慮空間與影像之間的相互關係，以圖 2-1 為例，(a)為場景配置圖而(b)為自動車上所架設之攝影機所拍攝影像。我們研究出基於 Homography 理論的定位技術，利用工作空間與影像間的幾何轉換關係，提出兩種方法用以取得自動車在工作空間的定位並運用至導航之中。在實驗結果方面，我們將舉例實證利用這樣兩種方法，在計算效能以及定位分析兩方面都能夠得到令人滿意的結果。

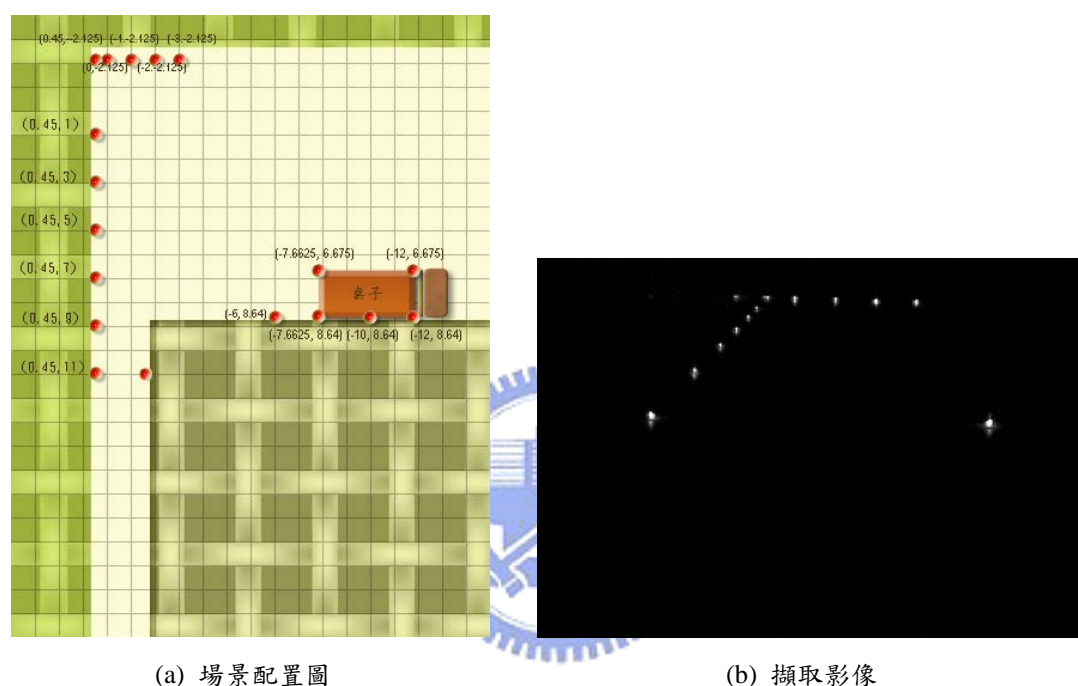


圖 2-1 場景配置圖與擷取影像

## 2.2 應用範圍

在夜晚無照明的環境下，若是需要保全巡邏，人力巡邏的方式通常需要配戴手電筒，也因此燈光的照射常常會造成小偷們的警覺而逃跑。而因為另外有其他很多人為不確定因素，如偷懶，或是某些路徑上勘查的遺漏，我們希望以自動車裝備紅外線攝影機的方式，規劃自動導航保全的路徑，以取代人力資源的浪費並提高巡邏的效率。而其可以運用的範圍與場所也相當的廣泛，例如：畫廊、博物館、停車場以及一般住家等。

## 2.3 夜間影像前置處理

夜間影像的前置處理是對影像做特徵點的搜尋以及偵測，主要的目的在於取

得我們需要的影像資訊並且辨識我們所需要的特徵資訊。這是相當重要的步驟，處理得好的話，就可以獲取準確且有利的路標資訊，幫助我們提高辨識效能；萬一處理得不好，使得影像中我們有興趣的資訊受到干擾，則會降低辨識的效果，甚至根本無法辨識。圖2-2為處夜間影像處理的一例。其中我們針對每一個近紅外LED燈作追蹤以及標記，偵測每一個亮點的中心位置，並由左到右依序編號之。

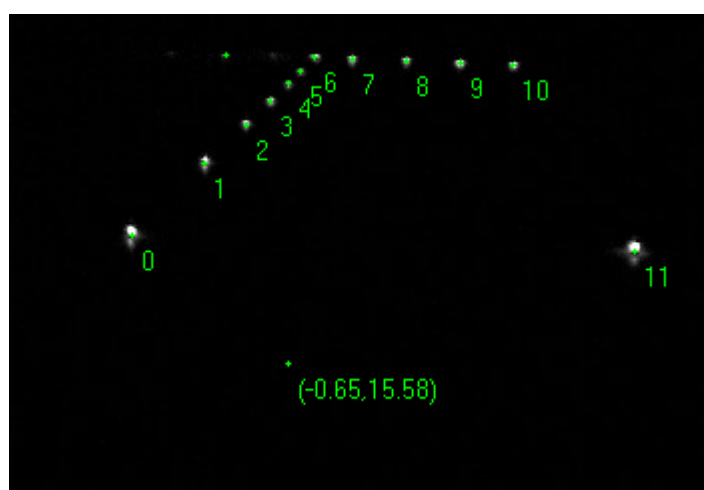


圖 2-2 影像前置處理一例

## 2.4 自動車定位演算法

在夜間影像經過上述前置處理後，我們可以獲取所需的資訊，並且進入自動車定位計算程序。利用如圖2-2所示的資訊，我們研究出兩種基於Homography理論的方法，分別是以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法以及以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法。兩種方法的不同點在於，前項方法是利用影像上的參考點，針對其於影像以及工作空間的幾何轉換關係，加以運用以計算出自動車在工作空間的定位；而後者的方法則針對影像中參考點之運動量做分析，必要時亦可以訂定篩選法則，選擇適當數目的參考點做一整合性的運算，藉以求得自動車的可能運動向量，來推算其相對於起始座標系之目前所在位置。

## 2.5 環境限制

在自動車導航系統的影像擷取設備方面，存在若干限制因素。例如架設於自動車上的紅外線攝影機角度不宜過大或者過小，否則容易造成影像的過度扭曲，在影像中的路標特徵點也可能因此而無法分辨，造成無法取得正確的路標特徵點空間座標。也因為本系統是在夜間環境下所作的監控，若是環境的亮度與路標特徵點的亮度對比不夠明顯，也有可能造成在進行自動車定位時，取樣特徵點定位錯誤的情形發生。因此，在實作時，光線的控制是必要的考量。另外，路標特徵點的佈設也是考量的因素之一，若是特徵點的數量不夠或是佈設的相對位置所對應的結構過於扭曲，都有可能造成計算平面投影矩陣的可信度不足或是有著過大的誤差產生。最後要考慮的是自動車的車速，如果車子以太高的速度移動會使得所擷取到的影像因為位移而模糊，這點我們可透過控制自動車的行駛速度與提高快門的速度來解決。



### 三、以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法

在以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法中，我們先將影像前置處理偵測到影像參考點一一編號，接著利用資料庫比對的方式，比對出其於工作空間中的定位。而後，再運用影像與工作空間的幾何轉換關係求得這些特徵點在影像上的位置 $(x, y)$ 與其對應的空間座標 $(x', y')$ 之間的投影轉換矩陣 $H$ （注意這裡所需要的參考點數目需大於四點）。最後，利用 $H$ 對影像中自動車的虛擬定位做計算，藉此取得自動車於工作空間場景中的定位。利用上述的想法，我們可以規劃出如圖3-1的演算法流程。在此演算法之中，我們需要知道如何求得平面轉換矩陣 $H$ ，以及如何用以求得自動車在工作空間之位置，下面兩個小節將說明這兩個步驟的細節。





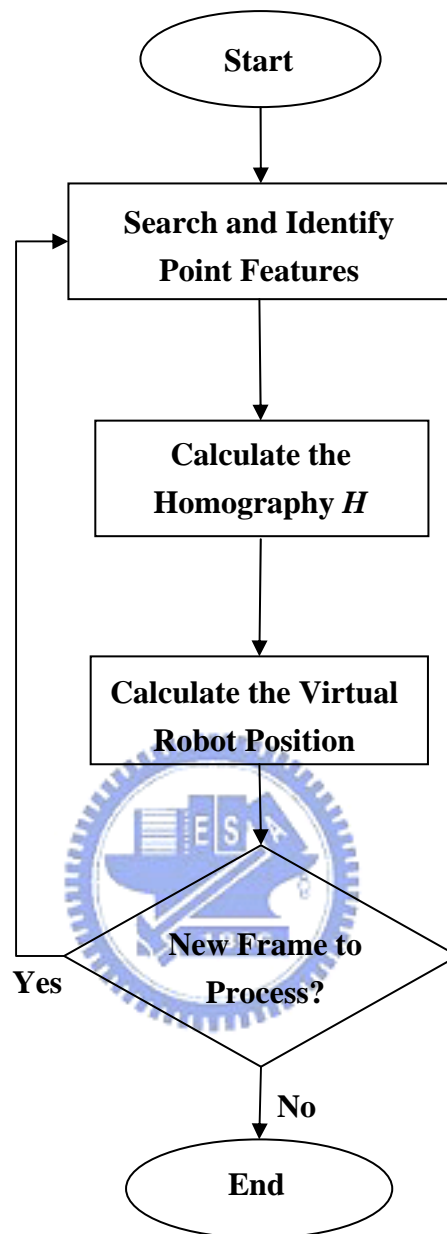


圖 3-1 以工作空間座標系之定位流程

### 3.1 平面投影轉換

在基於工作空間中的自動車定位方法中，我們利用 Homography 觀念在擷取影像平面 (Image Plane) 與工作空間平面 (Workspace Plane) 之間建立平面投影轉換關係，然後利用此一轉換，求得自動車在工作空間的確切座標。傳統上，解析  $H$  的方式有三種：(1) 非線性幾何解 (Non-linear Geometric Solution) (2) 非齊次線性解 (Non-homogeneous Linear Solution) 以及 (3) 齊次線性解 (Homogeneous

Solution)。第一種方式是從幾何的關係做探討，藉由投影後的預測點座標與實際的投影座標之間，找出最小的誤差當作解集，此種方法因為不一定保證有解，也因此並不適用於我們的系統。第二種是非齊次線性解是將投影轉換矩陣  $H$  中的一個元素固定，在將剩餘的八個元素對應到線性方程式中，利用反矩陣 (Pseudo-inverse) 的方式求解。這種方法在固定元素被設定為 0 時，會造成有極大誤差的結果，且不適用於我們環境中多個參考點的情形，因此本論文不採用此法。最後一種齊次線性解方法是使用 SVD (Singular Value Decomposition) 求解，此方法在對非齊次線性解的特定情形下，仍然可以產生最小平方差的結果，因此我們選用此種方法求解。接下來，我們便詳細說明此種方法。

在2D的XY平面中，給定一組點集合的對應關係  $x_i$  及  $x_i'$ ，則存在一個投影矩陣  $H$ ，可以將  $x_i$  中的每個點轉換為對應至  $x_i'$  中的點。也就是說，利用齊次座標的表示法，存在一個  $3 \times 3$  的矩陣  $H$ ，使得  $Hx_i = x_i'$ 。



### 3.1.1 最小對應點數

在要求出投影轉換矩陣  $H$  之前，首先我們要先知道最少的對應點數，亦即有幾個  $x_i \leftrightarrow x_i'$  才能求出  $H$ 。這個問題的目標是希望瞭解對應點數目的最小數目 (Lower Bound)，透過自由度 (Degree of Freedom) 以及限制條件數目 (Number of Constraint) 的計算，即可求出其解。首先，觀察投影矩陣  $H$  為一  $3 \times 3$  的矩陣，共有 9 個項，但是其中包含一個縮放係數，因此實際上  $H$  的自由度為 8。接著，在所運用的 2D 平面上，每個點都有其  $X$  座標和  $Y$  座標，所以每一組所對應的點，就會有 2 個限制數條件 ( $X$  座標和  $Y$  座標)。因此，當限制條件為 8 時，至少需要 4 組的對應點才能求出投影矩陣  $H$ 。

### 3.1.2 Over-determined

為了符合實驗中對應點可能會超過4點的情形，我們考慮Over-determined的情形。假設多出來的對應點與原來的4點相容，對於計算結果是不會有影響的；但是如果多出來的對應點與原來4點並不盡相容時，則我們無法找到一個投影矩陣 $H$ 可以將所有由 $x_i$ 對應到 $x_i'$ 的點都能完美的對應。但是，我們還是有辦法在最小可能誤差範圍之內求出 $H$ ，在此我們需要提出一個cost function，來計算最小誤差。在本論文中，我們採用的方法是最小平方誤差法（Least Square Error）。

### 3.1.3 DLT (Direct Linear Transformation)

假設在2D平面上的點對應集合， $x_i \leftrightarrow x_i'$ ，其中存在透視投影的關係，則存在一個轉換投影矩陣 $H$ ，能滿足方程式 $Hx_i = x_i'$ 。假設允許 $Hx_i$ 不完全等於 $x_i'$ ，而只是具有相同方向的向量，則 $\overline{Hx_i} = c\overline{x_i'}$ ，其中 $c$ 是一個不為零的實數。為了求解上的方便，用外積的形式來表示 $Hx_i = cx_i'$ ，則是

$$x_i' \times Hx_i = 0, \quad (3.1)$$

有了這樣的觀念，接著我們進入到投影矩陣 $H$ 的推導過程。首先將 $H$ 的第 $j$ 列表示為 $h^{jT}$ ，可以得到

$$Hx_i = \begin{pmatrix} h^{1T} x_i \\ h^{2T} x_i \\ h^{3T} x_i \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

其中 $x_i' = (\chi_i', \gamma_i', \omega_i')$ ，而原方程式可改寫為

$$x_i' \times Hx_i = \begin{pmatrix} \gamma_i' h^{3T} x_i - \omega_i' h^{2T} x_i \\ \omega_i' h^{1T} x_i - \chi_i' h^{3T} x_i \\ \chi_i' h^{2T} x_i - \gamma_i' h^{1T} x_i \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

又因為矩陣運算的關係，則可得 $h^{jT} x_i = x_i^T h^j$ ，所以可以把(3.3)式重寫為：

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_i' x_i^T & \gamma_i' x_i^T \\ \omega_i' x_i^T & 0 & -\chi_i' x_i^T \\ -\gamma_i' x_i^T & \chi_i' x_i^T & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (3.4)$$

(3.4)式可以利用  $A_i h = 0$  表示之，其中  $A_i$  為一個  $3 \times 9$  的矩陣， $h$  為一個  $9 \times 1$  的矩陣， $h_i$  為  $h$  的第  $i$  個元素，如(3.5)式所示：

$$h = \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

此處要注意的是，雖然(3.5)式有三個等式，但是其中只有兩個等式是線性獨立的，而可以將(3.4)式改寫可得(3.6)式：

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_i' x_i^T & \gamma_i' x_i^T \\ \omega_i' x_i^T & 0 & -\chi_i' x_i^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (3.6)$$

因此，給定平面上  $n$  個  $2D \rightarrow 2D$  的對應點  $x_i \leftrightarrow x_i'$ ，其中  $n \geq 4$ ，我們可以利用下面的演算法使得  $Hx_i = x_i'$ 。

- (1) 對於  $x_i \leftrightarrow x_i'$  中每組對應的點，可從(3.6)式得到一個  $2 \times 9$  的矩陣。
- (2) 將  $n$  個  $2 \times 9$  的矩陣結合成一個  $2n \times 9$  的矩陣  $A$ 。
- (3) 將  $A$  做SVD分解，得到  $A = UDV^T$ ，其中  $D$  為  $A$  的Singular Value所構成的對角矩陣 (Diagonal Matrix)、 $V$  為 Singular Vector所構成的正交矩陣 (Orthogonal Matrix)。這邊要注意的是，SVD在分解後會將Singular Value由大到小排列，而所要求的  $H$  即為  $V$  中第 9 行的九個元素。
- (4) 將矩陣  $V$  中第 9 行的九個元素  $[h_1 h_2 h_3 h_4 h_5 h_6 h_7 h_8 h_9]^T$ ，利用 (3.1) 式重新排列得到  $H$ 。

### 3.2 自動車定位估算

在上一節中，我們已經求得了投影矩陣  $H$ ，本節將接著詳細說明估算自動車在場景中所在位置的流程。因為自動車座標於自動車上的攝影機所擷取的影像中是不存在的，如圖 3-2 所示，在此只能說它在影像上其實是一個虛擬的位置。在圖 3-2 中，我們將架設於自動車上的攝影機所擷取之影像作延伸，其中紅色箭頭指出攝影機之視角，而攝影機的位置則在圖中假想的虛擬位置上。



圖 3-2 自動車於擷取影像向下延伸之虛擬位置

接者我們需要計算攝影機在工作空間中的虛擬定位。舉例來說，我們可以利用影像上所標記的兩個特徵點，如圖3-3所示，用來計算自動車的可能位置，但若是這樣的特徵已經從影像中消失時，對於之後的影像，我們也可以延續這樣的想法，利用假定在影像中相同位置的虛擬特徵點來求得自動車的位置。因此，上述兩個特徵點其實是為了方便定位計算，卻不是始終必要的。在有關於自動車的定位計算方面，我們的方法是經由影像參考標記點所對應的兩組工作空間的座標位置，在工作空間向後延伸至自動車的虛擬中心位置。而自動車的定位中心，是定義為自動車兩輪的中心的連線中心與地面的鉛直投影點。有了這樣的想法，利用

早先所求出的投影矩陣 $H$ ，可以將影像中假定的兩個標記特徵點作轉換，並計算出他們在工作空間中的定位座標 $M'_1$ 、 $M'_2$ 。接著可以求出轉換過後的座標點距離 $D = M'_2 - M'_1$ ，而自動車的座標則可以簡單的計算為 $M'_1 - 3 * D$ ，如圖3-4所示。

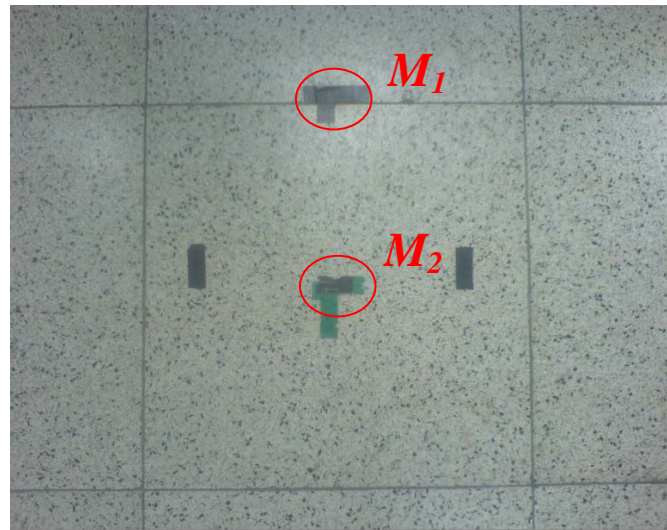


圖3-3 用於計算自動車的標記

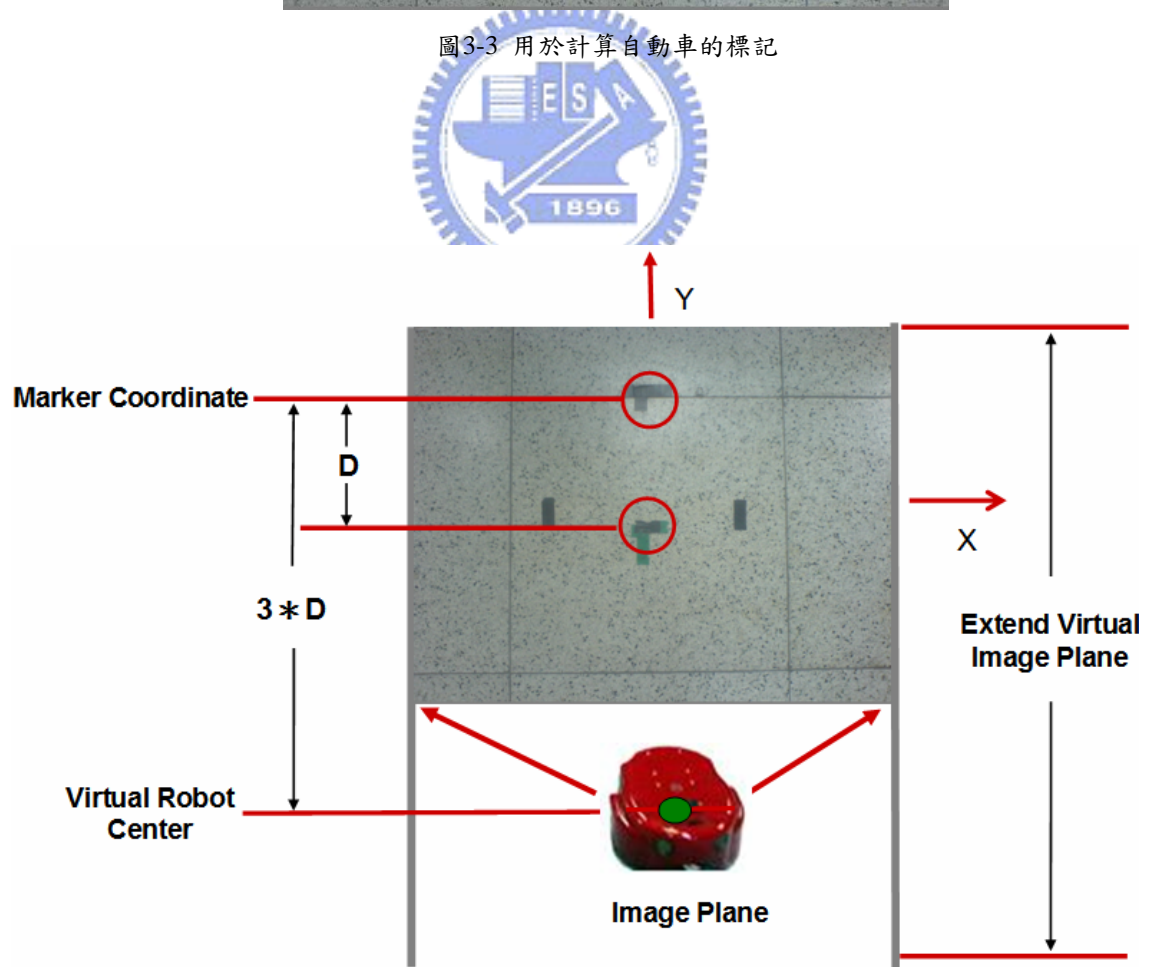


圖 3-4 自動車虛擬定位計算示意圖

## 四、以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法

除了以前一章所述的以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法之外，本論文也探討另一種取得自動車在空間場景中位置的方法。與前一章方法所不同的是，我們將自動車當作是定位環境的中心，並針對特徵參考點與自動車之間相對的位置關係，分析前者相對於後者運動向量的大小以及方向，藉此估算自動車在空間場景中的定位座標。而在此用來計算自動車定位座標的特徵參考點，可能不只一個，如圖4-1所示，其中也有可能包含離群值（Outliers）的存在。因此，我們在4.1節中概述這個方法的流程之後，除了在4.2節中將介紹如何利用最小平方法（Least Squares Solution），將所有特徵點運動向量整合成單一自動車的運動向量的計算方法，亦將在4.3節中針對運動向量組合機制制定篩選去除不適當之運動向量的法則，希望能夠利用篩選後的特徵點組合，找出理想的自動車運動向量。

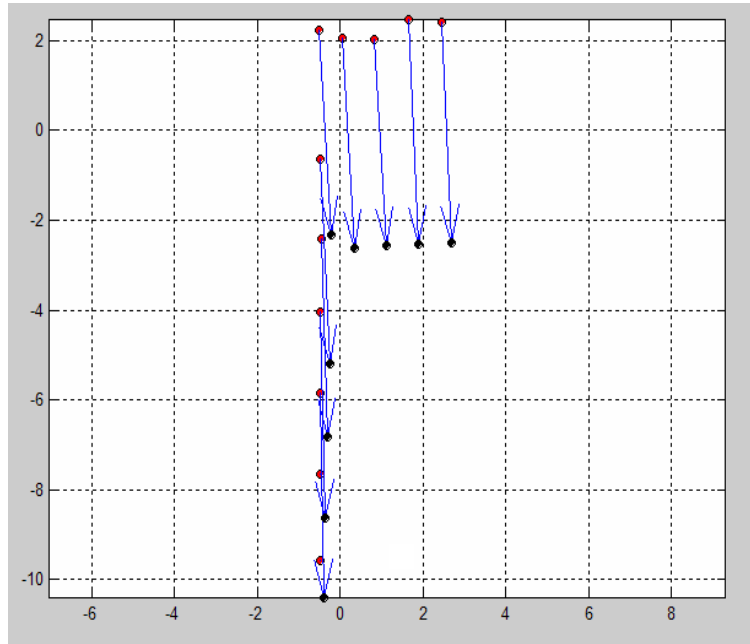


圖 4-1 特徵點於工作空間運動向量實例 (紅點、黑點為 t-1 及 t 時間的特徵點位置)

#### 4.1 以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法流程

有別於前一章的自動車定位方法，本章所提出之以自動車座標系為中心之定位方法，是利用影像前置處理取得之影像特徵點資訊，先計算這些特徵點的空間座標，再計算每一點在經過一段時間間隔後，於工作空間中對應之運動向量 (Motion Vector)。而這些計算的過程，包括取得 Frame 與 Frame 之間所有特徵點在工作空間中的運動向量，以及有效的去除離異值(Outliers)。最後我們將篩選後的參考點運用最小平方法(Least Square Solution)做一個整合性的運算，並將得到的定位結果投影至工作空間的地圖上，用以取得自動車在空間場景中的確切位置。圖 4-2 為此演算法運算之流程圖。不同於圖 3-1，此處因為是以自動車座標系為中心，因此對於投影矩陣  $H$  僅針對自動車執行任務時所擷取的第一張影像做運算，而非每個時間間隔都做  $H$  的運算。在定位方面，是利用第一張所求之  $H$ ，計算自動車在執行任務過程中特徵點相對移動所產生的位置差，作為自動車的運動向量。



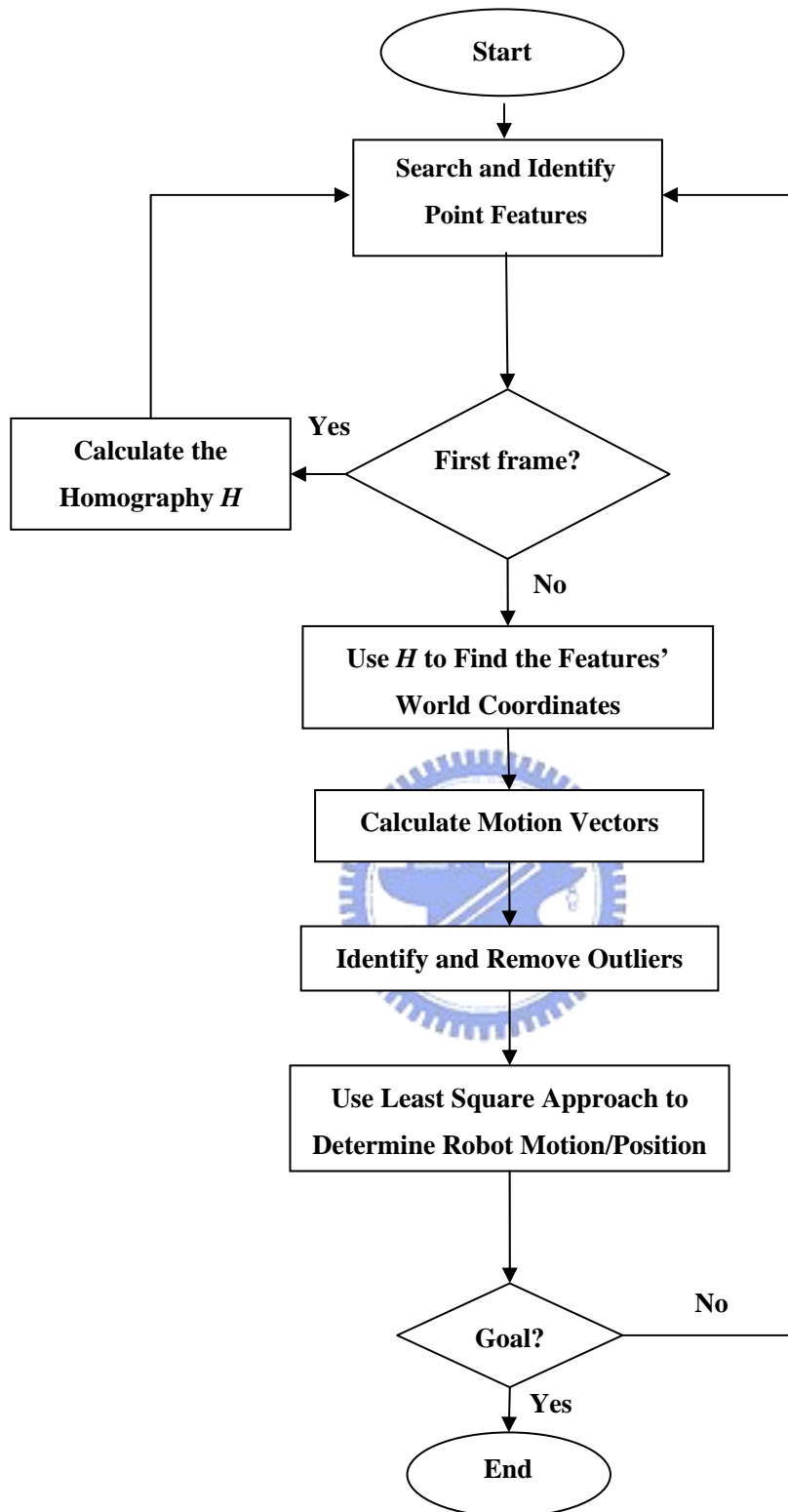


圖 4-2 以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法流程

## 4.2 最小平方法 (Least Squares Solution Method)

在前一小節中我們有提到本章的自動車定位是利用特徵點的相對運動來估算的。由於特徵點數目不只一個，在得到一組運動向量之後，我們採用最小平方法 (Least Squares Solution Method) 將之整合成為一個目標向量解，並使得所有的運動向量對此目標向量有最小的平方誤差值總和。下面將說明這樣的方法之證明及流程。

首先我們假定有 $n$ 個的運動向量 $(V_i, V_j) \quad 1 \leq i, j \leq n$ ，而 $(X, Y)$ 為所求的目標解。如果令 $F = \sum_{i=1}^n (X - V_{ix})^2 + (Y - V_{iy})^2$ 為其最小平方誤差值總和，其中 $(V_{ix}, V_{iy})$ 為第 $i$ 個運動向量，則可得到

$$\frac{\partial F}{\partial X} = 2nX + 2 \sum V_{ix} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y} = 2nY + 2 \sum V_{iy} \quad (4.2)$$

所以可得到目標向量

$$(X, Y) = \left( \frac{\sum V_{ix}}{n}, \frac{\sum V_{iy}}{n} \right) \quad (4.3)$$

亦即此解為該組運動向量之平均值。圖4-3為此結果應用於整合各個特徵點的運動向量所得到自動車走勢之一例。為了更方便分析自動車定位的準確性以及方向性，我們將圖4-3的定位分成兩個一維方向的結果來顯示，如圖4-4所示，其中圖 (a) 為 $X$ 方向之定位結果圖 (b) 為 $Y$ 方向之定位結果，而橫軸為自動車所拍攝連續畫面之張數。

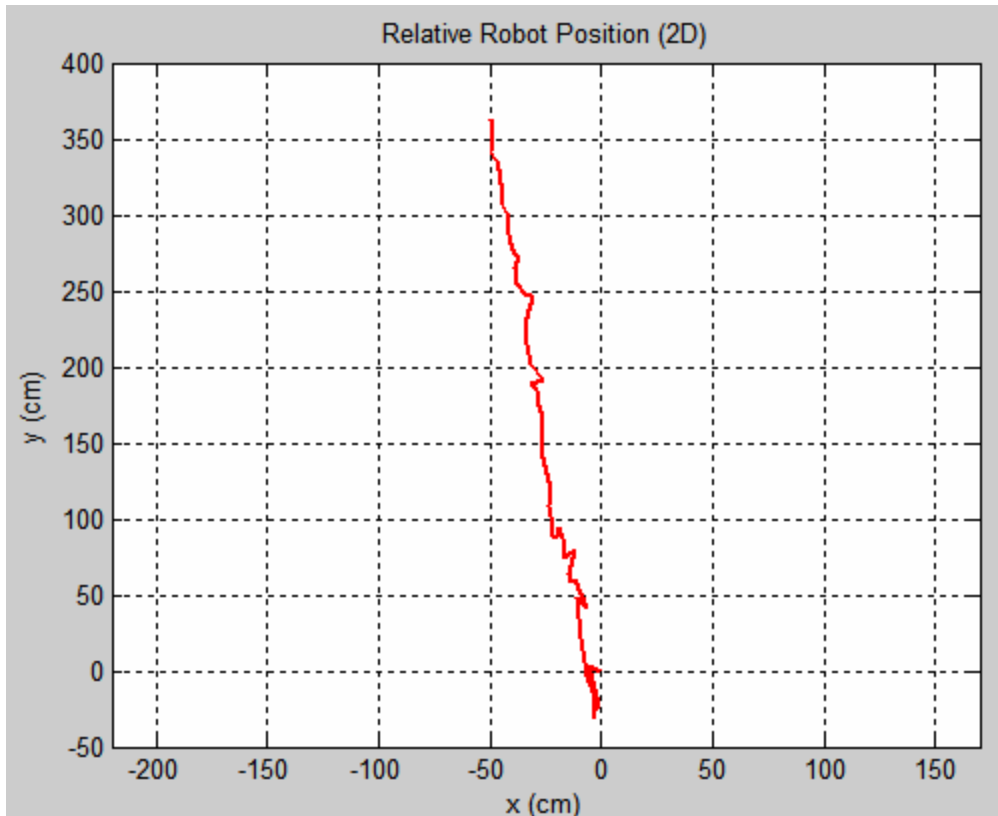
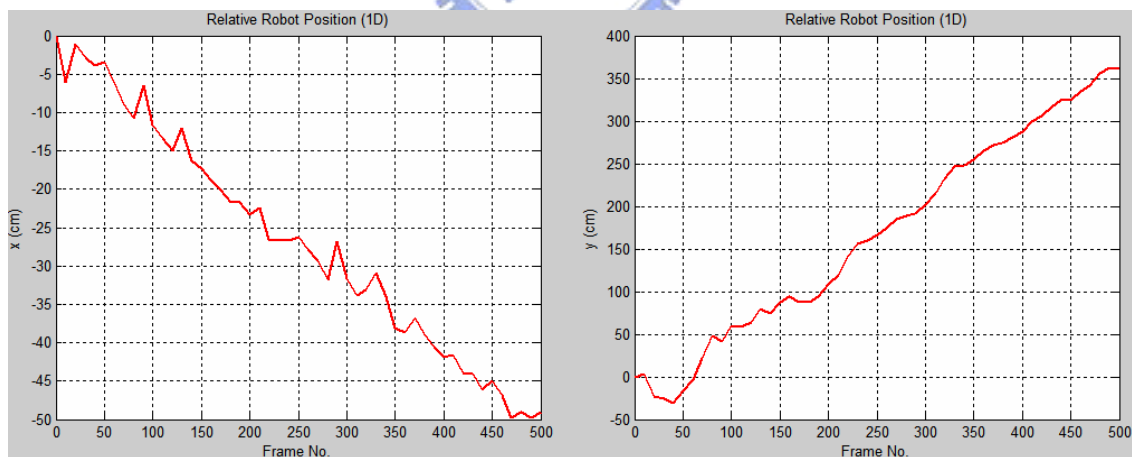


圖 4-3 最小平方解一例



(a) X 方向之定位

(b) Y 方向之定位

圖 4-4 自動車定位軌跡

### 4.3 離群值 (Outliers) 的偵測

在上節方法所得到的自動車軌跡，等速運動下的理想軌跡應非常平緩，而在圖 4-3 中的結果，也應符合這樣推論。但我們如果分析圖 4-4(b)，可發現其定位結

果並不如預期。問題發生的主因，在於利用多個特徵點的運動向量做整合時，有些特徵點的運動向量經過分析後，有不合理的情形產生（如逆向而行的運動向量），因此會造成不精確的定位結果。在此，我們希望能找到篩選的法則刪去或是保留它。而這些需要被除去的特徵點運動向量，我們稱它是離群值（Outliers）。在實驗的過程中，因為自動車為直線前進且  $X$  方向之定位的影響非常微小，這裡我們暫且忽略而不去分析它，只考慮  $Y$  方向之定位的影響以及改變。下面幾個小節我們將提出幾個分析以及去除離群值的法則，用以取得改進的定位結果。

### 4.3.1 利用特徵點在空間平面中的走向做篩選

首先我們利用執行過程中每張自動車上所擷取的影像（Frame）中，特徵點在空間平面的運動方向必須為彼此一致的條件。舉例來說：如圖 4-5 所示，當車子向前行走時，影像上的特徵點應該是越來越接近畫面下方，在工作空間上的概念即是說：特徵點  $Y$  方向行進是往自動車所在的  $Y$  方向接近。此時在取得影像與影像中特徵點運動向量的量值，若是產生不一致的運動向量方向，將他視為離群值篩選並且除去它。利用這個方法，可得圖 4-6 的改進後軌跡。圖中在開始的部份就有顯著的改進，與未使用篩選的線段有相當明顯的差異。這個方法在處理自動車起步時能有效的改進以及較為準確的定位結果。



(a) 第 1 張

(b) 第 120 張

圖 4-5 紅外線攝影機所擷取影像

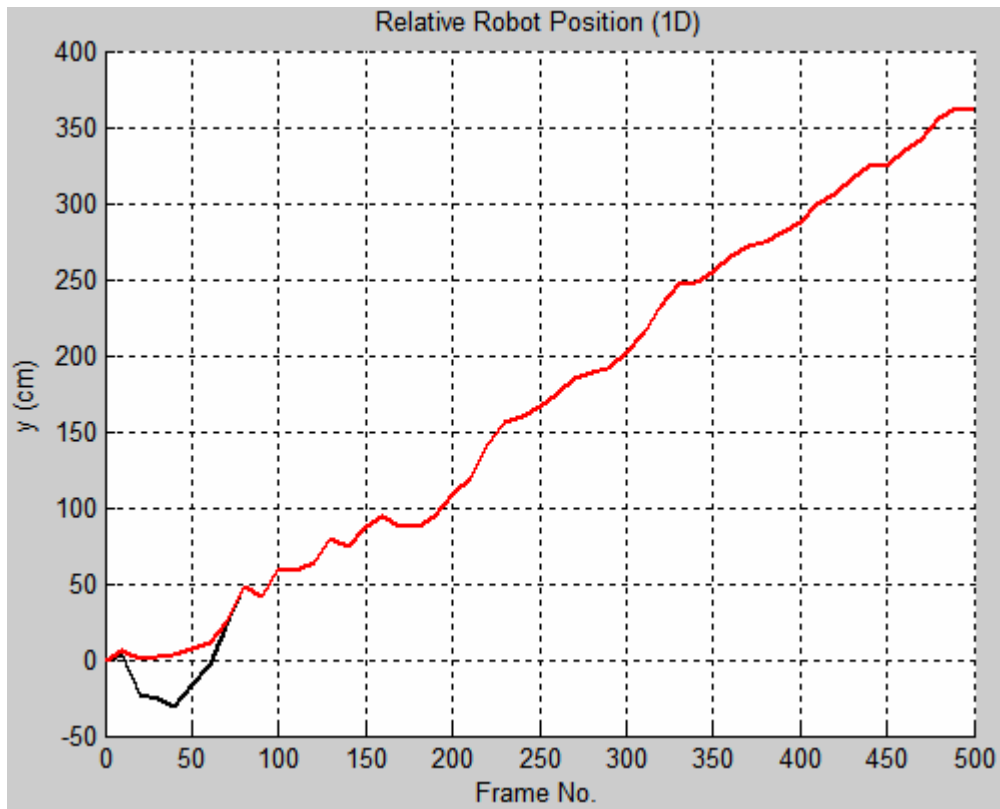


圖 4-6 以走向做篩選結果 (黑色為尚未改進，紅色為改進後)

### 4.3.2 主成分分析法 (Principal Components Analysis)

在前一節中，我們利用特徵點轉換至工作空間中的特性，依據運動向量需要符合一致的特性，改進自動車的行進軌跡。從實驗結果中可知，效果仍然有限。在此，我們研究了另一個改進方法。首先，觀察 LED 燈在場景環境佈設的幾何關係，如圖 4-7 所示，可知場景中的 LED 燈是沿著牆壁成直線佈設。利用這樣的特性，我們將 LED 燈分成兩個群集，如圖 4-7(b)所示，對此兩群集做最適直線分析。接著，利用所求出之最適直線，將原始特徵點投影在此直線上，可求出新的特徵點座標，再以此座標計算特徵點運動向量。這裡我們利用 PCA (Principal Components Analysis) 來找出最適直線，下面將介紹如何利用此方法之流程。

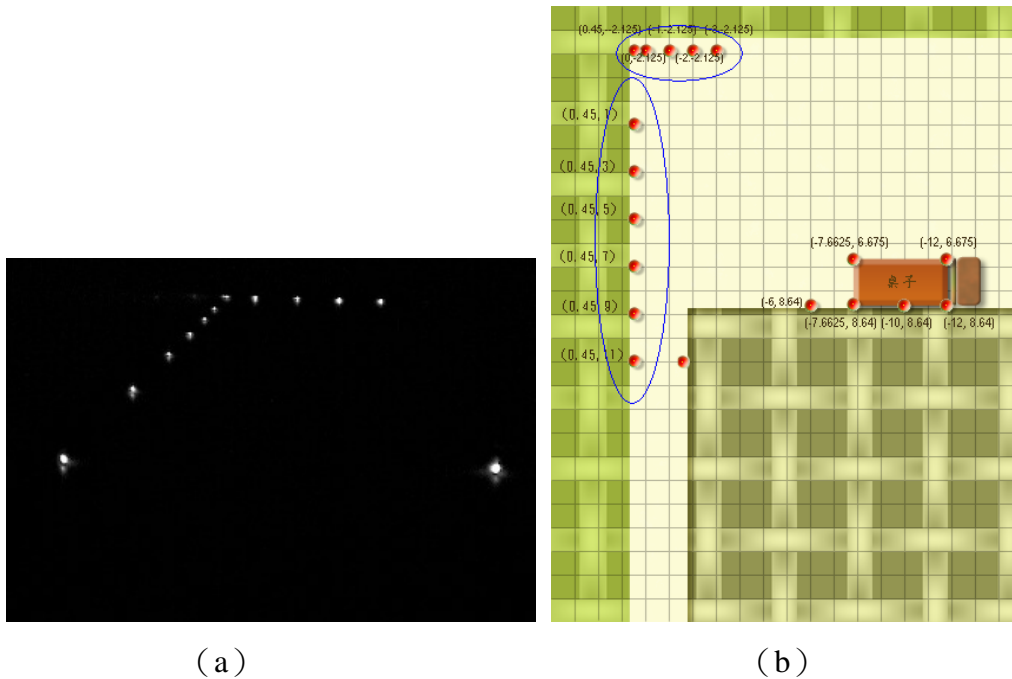


圖 4-7 特徵點佈設與分群結果

假設有  $n$  個二維空間的特徵點， $(x_i, y_i)$ ， $1 \leq i \leq n$ ，且這些點集主要分佈於某一特定方向。接著希望以 PCA 找出最適合的線段表示各個點群的分佈，並將此  $n$  點垂直投影在此直線上。利用式(4.5)計算出這些點群的重心：

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (4.5)$$

接著將每一個資料點減去重心得新的座標：

$$(x_i', y_i') = (x_i - \bar{x}, y_i - \bar{y}) \quad , \quad 1 \leq i \leq n \quad (4.6)$$

在得到平移後的新座標後，我們便可以利用這些點計算出此  $n$  點的變異係數矩陣 (Covariance Matrix)：

$$C = \begin{pmatrix} \text{cov}(X, X) & \text{cov}(X, Y) \\ \text{cov}(Y, X) & \text{cov}(Y, Y) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

其中  $\text{cov}(X, Y) = E((X - \bar{X})^T (Y - \bar{Y}))$ 。當我們得到變異係數矩陣  $C$  後，此矩陣所代表的涵意即為原始資料相互間的變異關係，接著下一步就是對式(4.7)中的變異係數矩陣做特徵向量分解法 (Eigenvector Decomposition)，可求得兩個特徵值 (Eigenvalue) 以及其對應的特徵向量 (Eigenvector)。由於選取越大的特徵值可

以得到越大的變異量，基於此想法，我們選擇大的特徵值之特徵向量做為這些資料的朝向，而將原始特徵點投影在最適直線上得到新的特徵點座標。圖 4-8 為利用這樣的方法來改進後的結果。在實驗結果的分析中，我們發現使用 PCA 與未使用 PCA 的情況下，只有在一開始的定位結果有些許的改進。下一節我們將提到另一個改進定位的法則來找出並去除離群值，期望能獲取更理想的自動車定位結果。

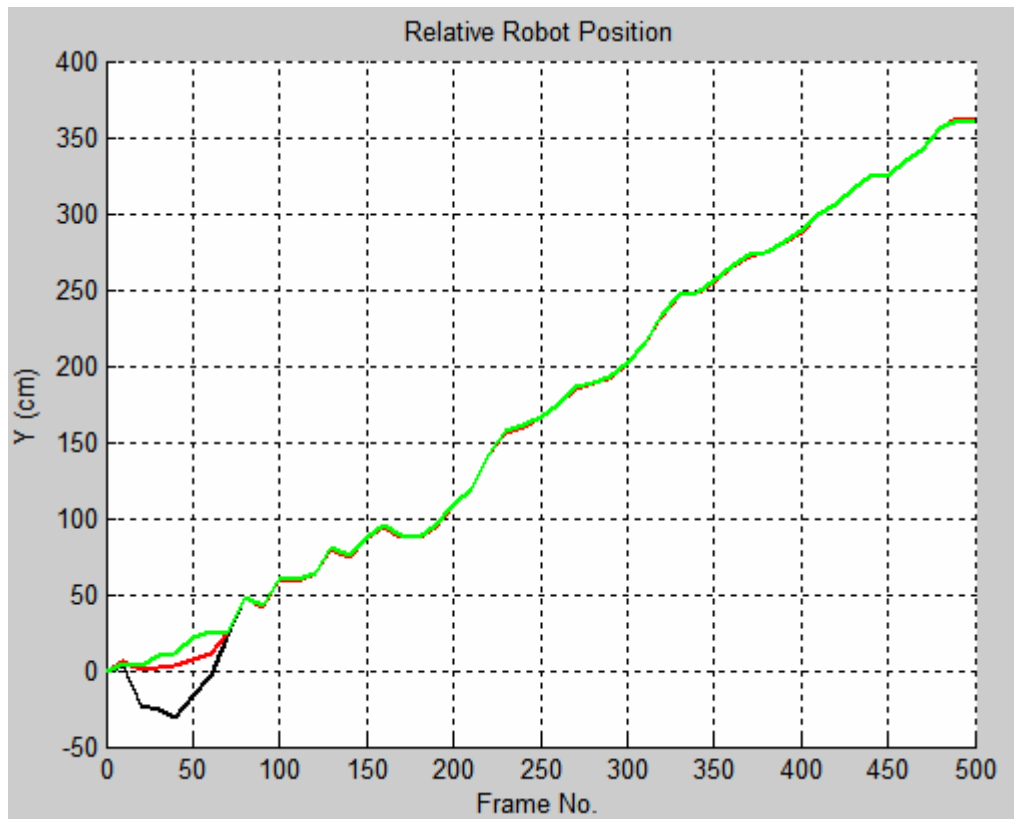
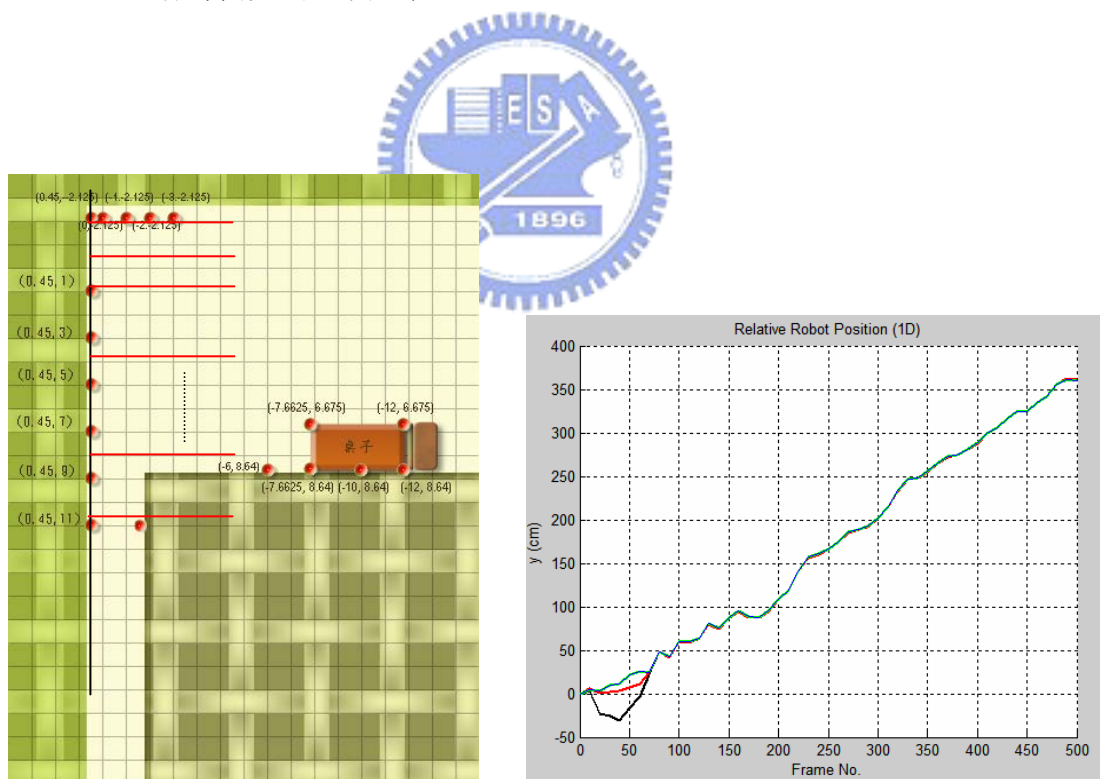


圖 4-8 以 PCA 做矯正之定位結果(黑色為原始資料，紅色為未利用 PCA 所得，綠色為利用 PCA 改進後所得)

### 4.3.3 利用環境的分佈特性做矯正

在利用影像空間以及工作空間的特性做矯正後，由圖 4-9(a)的空間配置圖所示，我們亦可利用紅外線 LED 燈所佈設的幾何分佈特性當作運動向量的篩選條件，如圖 4-9(a)所示。利用上排的点集合與側邊的点集合需要互相垂直的特性，我們運用上節 PCA 方法另一特性，對影像特徵點以及經過平面投影轉換後所得到的工作空間特徵點達到兩組点集合互相垂直的關係，以降低動作向量時所產生的誤

差。這裡的方法是以側邊集合當作是一個方向基準（圖 4-9(a)中黑色線段），再找出一條垂直於這個基準的線段（圖 4-9(a)中多條紅色的備選線段），並且最能代表上排點集合的線段。在此方法中，關鍵是需要找到垂直於基準線段的方向向量，要找到這樣的向量，只需要利用前一節中所提到之 PCA 方法，取用次大的特徵向量（Eigenvector）。在得到這樣的特徵向量以及空間中上排點集合的重心，我們即可得此點集合的最適直線，接著將這樣原始特徵點投影在此最適直線而得到新座標。圖 4-9(b)為利用上述方法後，Y 方向改善後之定位的結果，其中綠色線段為改進前，藍色線段為改進後。從實驗結果可以看到，改進相當有限，且兩定位軌跡幾乎重疊。另外，附加這樣的方法也可能造成自動車系統多餘的負擔。有鑒於此，在實際執行實驗時，使用者在整合定位演算法時，可以選擇性放棄這樣的演算法，用以減輕負擔並提高執行效能。



(a) 垂直關係示意圖

(b) 自動車定位結果(綠色為未利用垂直特性所得，藍色為利用垂直特性改進所得)

圖 4-9 以幾何分佈特性做定位分析



#### 4.4 總結

利用特徵點在畫面間的位置差值所產生的運動向量，經過前一節所述的篩選法則，有些方法能改進定位準確性，但也有些方法並沒有實質的幫助。因此，使用者在選用這些法則時，應該衡量是否採用這些可能會造成系統負擔的方法。在下一章實驗結果與探討中，我們將會探討除了利用本章節所敘述之篩選法則之外，定位的方法亦可靠著一些簡易的方式做自動車定位計算，來達到較為理想的實驗結果。



## 五、實驗結果與探討

本章內容將依照前兩章所提到的兩種自動車定位方法，利用程式進行實驗並分析之。影像分析主要是由Matlab7.0所完成，而自動車整合系統的則是由Borland C++ Builder 6.0開發，測試的電腦環境為PENTIUM IV 2.4G，1G RAM，作業系統則是Windows XP。我們將在5.1節針對以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法與以Cross-Ratio為基礎之定位方法做精確度以及執行運算複雜度比較，接著在5.2節探討以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法以及其於效能上所具有的優缺點，在5.3節中我們將就定位準確性比較以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法以及以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法兩種方法。最後在5.4節中將會對自動車在場景空間的實際路徑與本論文所提之方法所計算之路徑作比較。

### 5.1 以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法探討

先前在第一章之中，我們曾經提及以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法與以Cross-Ratio為基礎之定位方法在幾何觀念上有一定的等價性，因此這裡我們更進一步想知道兩者在定位運算的精確度、穩定性，以及執行效能方面是否有所差異。在我們研究的過程中，試圖探討對於參考點的敏感度、定位穩定性以及效能評比上，利用以工作空間座標系為中心的平面轉換定位方法是否有其優勢。我們將利用實驗的一例討論此兩種定位方法。首先，見圖5-1(a)的俯視圖，自動車在這個實驗中的起步位置位於畫面的左下方（軌跡的起始位址），當自動車沿著走道行走的過程中，特徵點會在所拍攝的影像中（如圖5-2）一一消失。對影像資訊有了這樣初步的認識，接著我們將探討這樣的情形對自動車定位有何影響。

### 5.1.1 自動車定位結果比較

在圖5-1(a)中，利用以工作空間座標系為中心之平面空間轉換定位方法與以Cross-Ratio為基礎之定位方法在自動車在起步時的定位結果差異並不明顯，但是當導航的過程到了接近轉角處，二者在定位上就有較大落差的情形產生。為了更清楚說明並且探討這區間的定位狀況，我們將它放大來看，如圖5-1(b)所示。圖中我們可以看到兩種定位方法在空間場景的定位上都有不穩定的定位結果，而究其原因，乃是因為部份需要用於定位的特徵參考點在影像中消失。在此，我們自圖5-1(a)標出此處定位時所更換的特徵點，黑色圓圈為以Cross-Ratio為基礎之定位方法中原先所使用之特徵點，紅色者會在之後的過程中替換最靠右方的特徵參考點。而以工作空間座標系為中心之平面空間轉換定位方法所利用的特徵點則為影像中的所有特徵點，因此只會有特徵點消失而無法參照的情形，如圖5-2(a)中編號為10的點。由圖5-1(b)可見，相較於以Cross-Ratio為基礎之定位方法，以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法，明顯地對於處理影像特徵點的改變有著更精確並且和緩的定位結果。

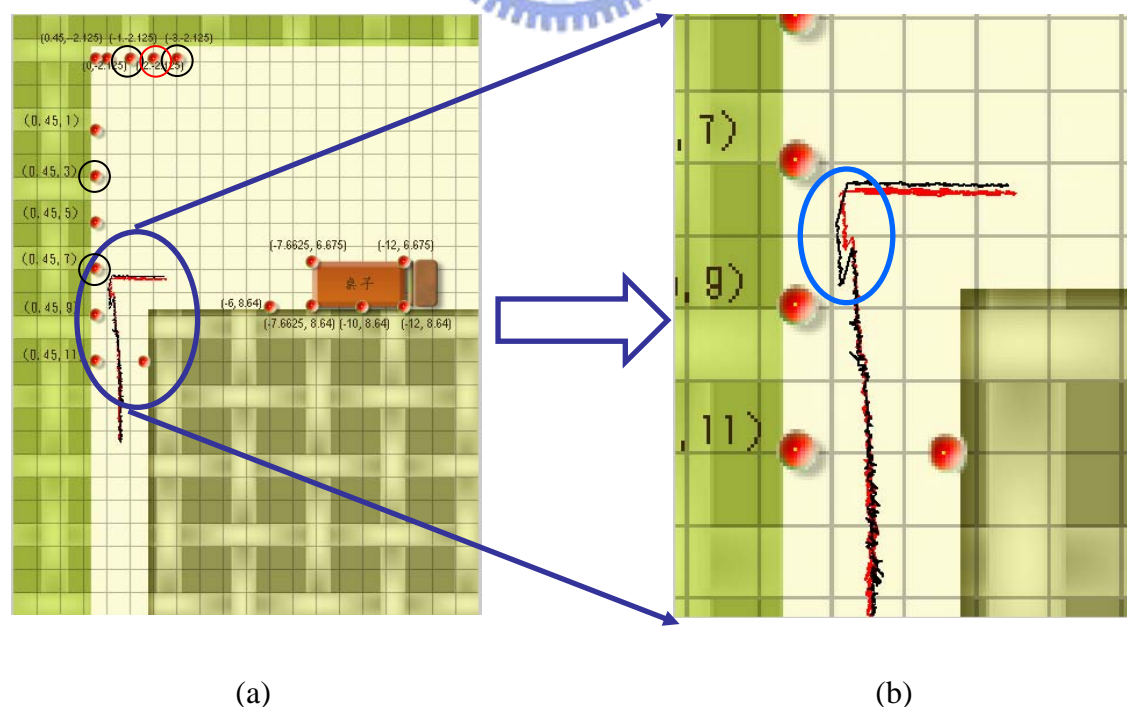
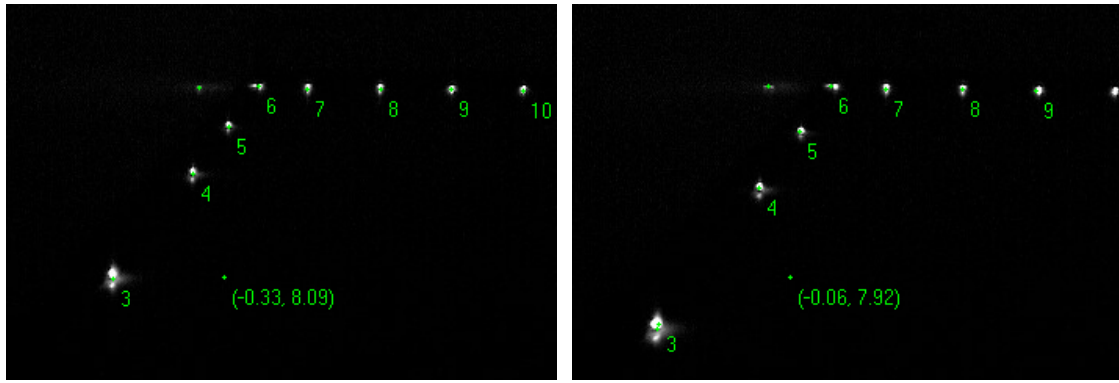


圖 5-1 自動車定位實例：(a)原圖(b)局部放大圖(x3) (紅色為本論文方法，黑色為 Cross-Ratio 方法)

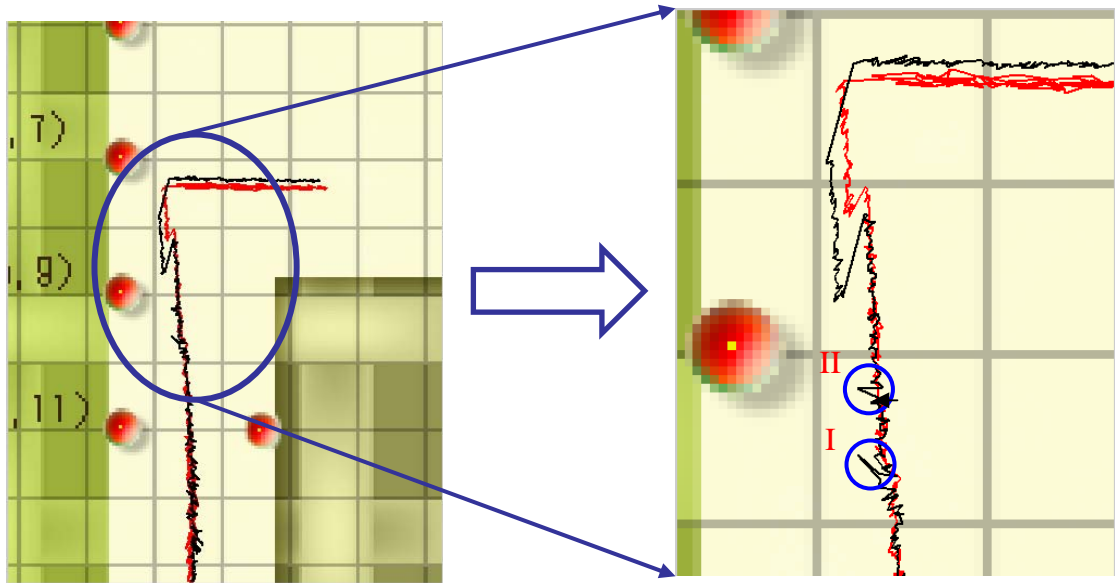


(a) 第 960 張

(b) 第 1010 張

圖 5-2 圖 5-1 之影像特徵點更換示意圖

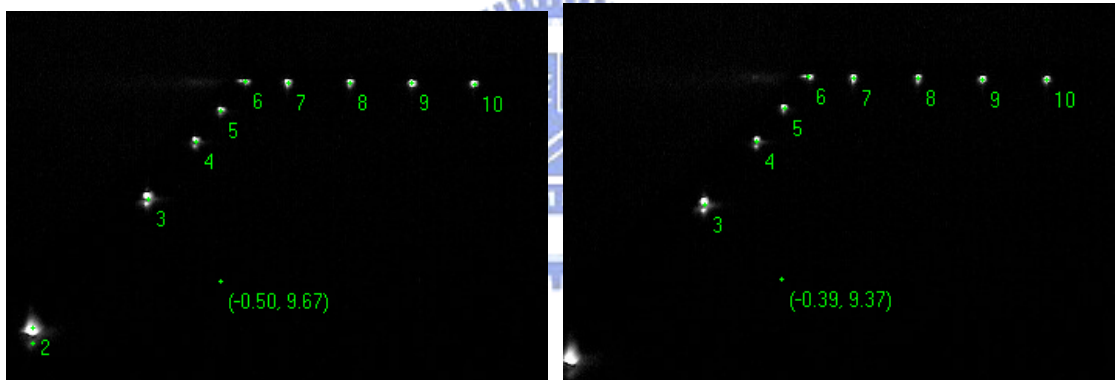
在自動車定位的穩定性問題方面，由圖5-1(b)的放大圖，圖5-3(b)，我們可以觀察另一個明顯的現象。以Cross-Ratio為基礎的定位方法有著數個擾動產生，這也是肇因於影像中用於定位自動車的取樣特徵點更換的情形，見圖5-4及圖5-5。雖然同樣是發生特徵點的更換，但是此處的取樣參考點它們所具有的影像幾何形狀，並沒有像圖5-2所利用的特徵點位置分佈改變得情形明顯，因此只有幾個擾動的產生。但是以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法，卻清楚看到可避免以及降低這樣的情況發生。因此在兩者定位方法的比較中，可以推論出以Cross-Ratio為基礎的定位方法對於特徵參考點分佈的敏感度較高，而當參考的特徵點更換時，對自動車的定位會有較明顯的干擾。而以工作空間座標系為中心的平面轉換定位方法，是利用所有影像中可見的特徵點，以最小的SVD模型估測誤差結果求得 $H$ ，因此可以利用較強健的方式降低特徵點轉換所造成的誤差（在特徵點數大於4的情形下）。相較於以Cross-Ratio為基礎的定位方法，以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法，對於特徵點有更換情形產生時，處理上有其一定的優勢。最後我們將此兩種方法的優缺點列表，如表一所示。



(a)

(b)

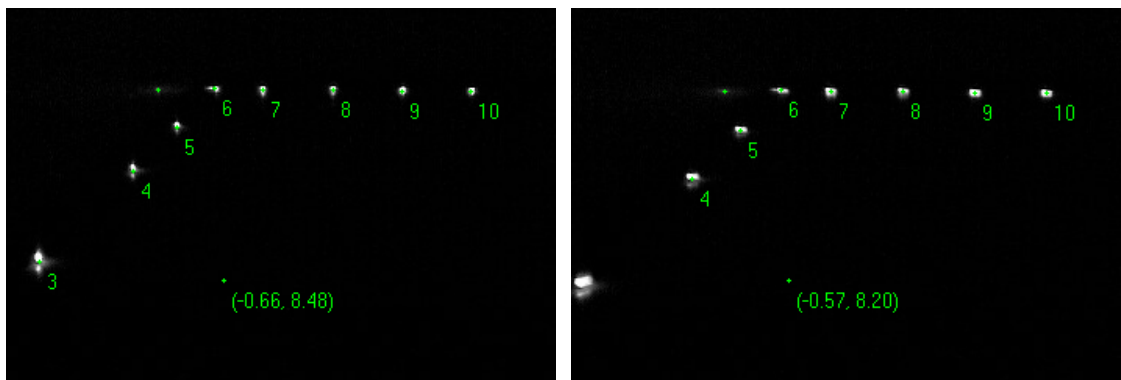
圖 5-3 自動車定位結果放大圖：(a)原圖，(b) 局部放大圖(x2.5)



(a)第 780 張

(b)第 800 張

圖 5-4 圖 5-2 編號 I 之特徵點更換



(a)第 900 張

(b)第 920 張

圖 5-5 圖 5-2 編號 II 之特徵點更換

表- 1 以 Homography 定位方法與以 Cross-Ratio 定位方法優缺點比較

	Advantage	Disadvantage
<b>Homography (Method I)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Robust to feature point noise.</li> <li>2. Robust to reference point configuration.</li> <li>3. Flexible in choosing reference point.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Iterative calibration of <math>H</math>.</li> <li>2. Sensitive to outliers.</li> </ol>
<b>Cross-Ratio</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Simple.</li> <li>2. Efficient.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sensitive to reference point change.</li> <li>2. Lack of a reference point selection scheme.</li> </ol>

### 5.1.2 效能與時間複雜度討論

在考慮兩種定位方法：(1) 以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法與 (2) 以 Cross-Ratio 為基礎的定位方法，雖然兩者的執行結果相似，但在我們的研究中，做定位計算所花費的時間複雜度與運算所需的計算量卻有明顯的差異。在 Cross-Ratio 方法中，所需要的參考點最低要求為四點，且需選取兩參考點作為射線的原點。因此，假設參考點的數目為  $n$ ，其中  $n > 4$ ，則所需要考慮的組合情形將有  $\binom{n}{4} * \binom{4}{2}$  種，另外還需要考慮的是如何整合這些特徵點計算後結果情形的機制，這樣的情形也必然造成計算更多的負擔。另一方面，以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法的複雜度只取決於計算投影轉換矩陣  $H$ ，而此時  $H$  的計算需要包含一個反矩陣以及 SVD (Singular Value Decomposition) 的運算，若是在參考點超過四點的情形下，則只需考慮求 SVD 的計算複雜度。值得一提的是，在 Brand[16] 的研究中指出，對於 SVD 的運算量，假設所需要的矩陣大小為  $N \times M$ ，最少的秩 (Rank) 為  $R$ ，則計算可以在時間複雜度為  $O(NMR)$  下完成。而對於自動車定位環境的運算，假設所需要的參考點數目為  $n$ ，且假定每列 (Row) 皆彼此呈

線性獨立，則時間複雜度為 $O(n^3)$ 。在此情況下，計算所花費的時間與參考點數目為四點的情況相似。有鑒於以上的討論，可知利用Cross-Ratio理論並不是最合宜的定位方法。因此本論文提出以Homography為基礎的方法，期望對於複雜特徵點定位整合有大幅度的效能改進以及並可提供較具有可靠性的運算結果。

## 5.2 以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法討論

在先前第四章中我們所提出的以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法，雖然運用了數個方法刪除某些離異值以改進自動車定位的結果，但是仍然無法獲致理想的定位路徑。在此，我們回歸到以不同特徵點取樣的定位結果探討有哪些特徵點是明顯的離異值。圖 5-6 是在自動車行進過程所拍攝影像中，只針對影像中的單 1 個特徵點所做的定位結果。可以發現，如果利用最靠近自動車之可見特徵點的運動向量估算自動車定位任務時，自動車的軌跡相當穩定，加上運算是取樣單一的特徵點轉換至空間平面，複雜度也降低許多。接著，如果我們再利用圖 5-6(a)在影像中最靠近自動車的 1 個、2 個、3 個或 4 個四種特徵點做追蹤，則可得圖 5-7 的定位結果。從圖中可以發現，當採用的特徵點數越多，利用最小平方方法，越容易產生不穩定的結果產生。這在我們的實驗場景跟測試影像是可預期的。原因是由於當我們所參考的特徵點數越多，且所利用的特徵點距離自動車位置越遠，則每一個特徵點在影像與影像之間平移的量值彼此之間變異量較大。這時若利用最小平方方法的方式求解，容易造成龐大的誤差而干擾定位的結果。因此，若是要加入多數的特徵點運動向量，我們應改進篩選的方式，藉此整合定位所需的特徵點運動向量以達到嚴謹自動車定位方法。

接著，我們討論其他的單一特徵點定位結果，利用圖 5-6(a)編號為 6 至 11 點的特徵點做自動車定位分析。由圖 5-8 可看出利用這些距離自動車較遠的影像特徵點，即使只採用一點做自動車定位的計算其定位結果亦無法達到理想定位軌跡。因此，依據以上的討論，我們採用影像中最接近自動車的單一特徵點運動向

量做自動車的定位計算，其定位結果如圖 5-9 所示。此方法其實就是將圖 5-6(b) 的單一影像特徵點定位結果做銜接，以得到穩定的運動向量。而相較於以 Cross-Ratio 為基礎的定位方法，定位出來的自動車軌跡也較為平緩。但這樣的方法有幾個缺點：(1) 需要自動車中心的起始位置，自動車只能針對所架設攝影機擷取到的影像特徵，計算其相對的運動向量。若是缺少了這樣的資訊，自動車即無法定位，(2) 自動車的定位都是利用當下轉換至空間場景的影像特徵點與第一張轉換至平面空間的特徵點計算差值，當自動車執行了一定時間之後，因特徵點更換，將會造成誤差累積，到後期自動車定位準確性將會劇降，這樣的缺點是我們需要注意的。

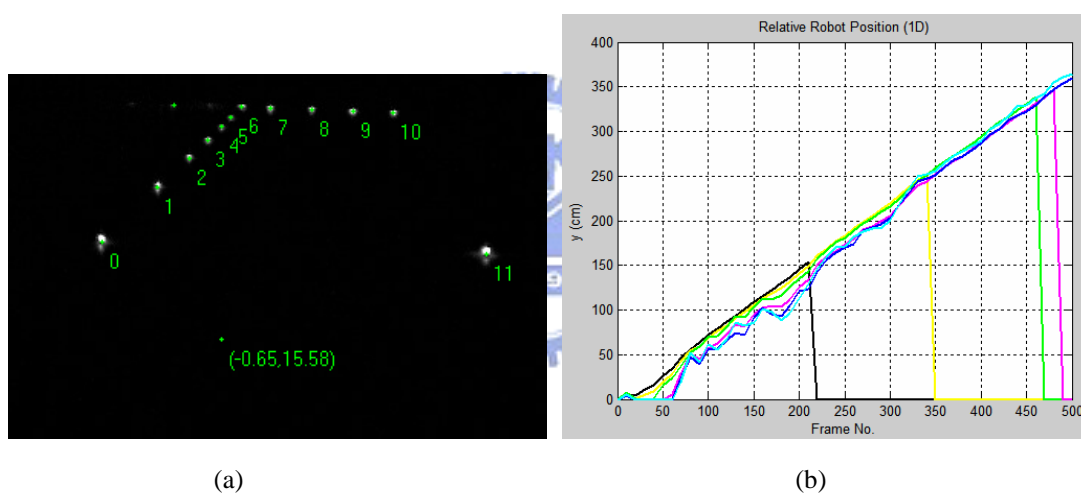


圖 5-6 使用單一特徵點之定位結果 (編號 0、1、2、3、4、5 依序對應黑、黃、綠、粉、藍、青)



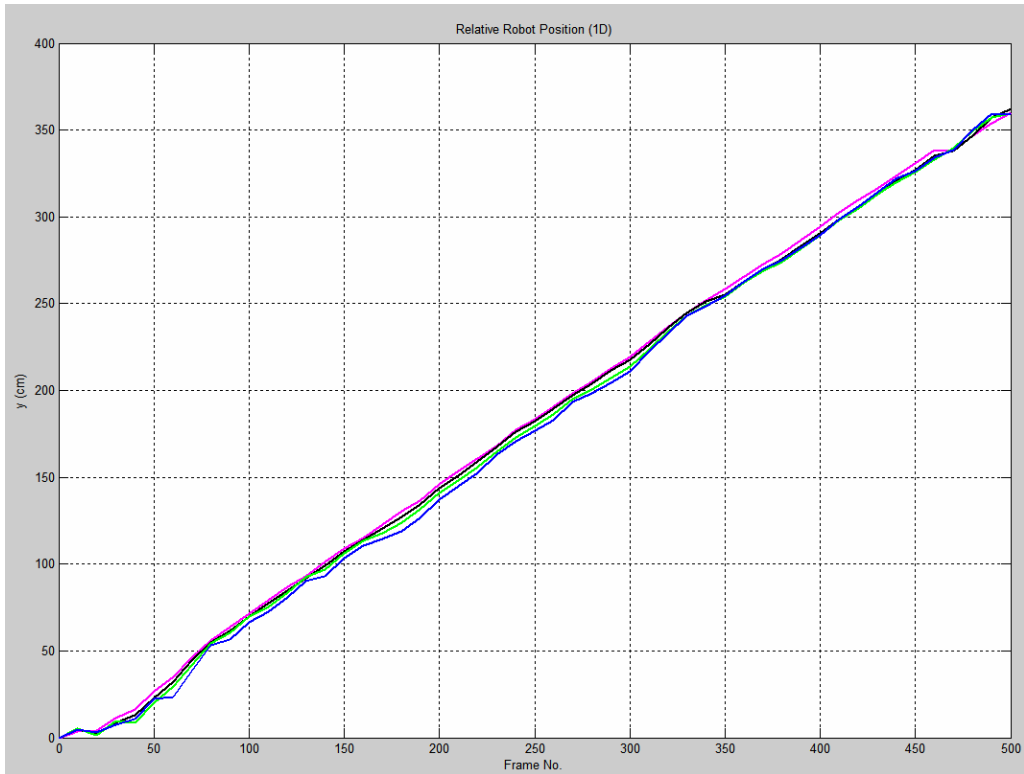


圖 5-7 使用最靠近自動車的 1 個（粉紫）、2 個（黑）、3 個（綠）及 4 個（藍）影像特徵點之定

位結果

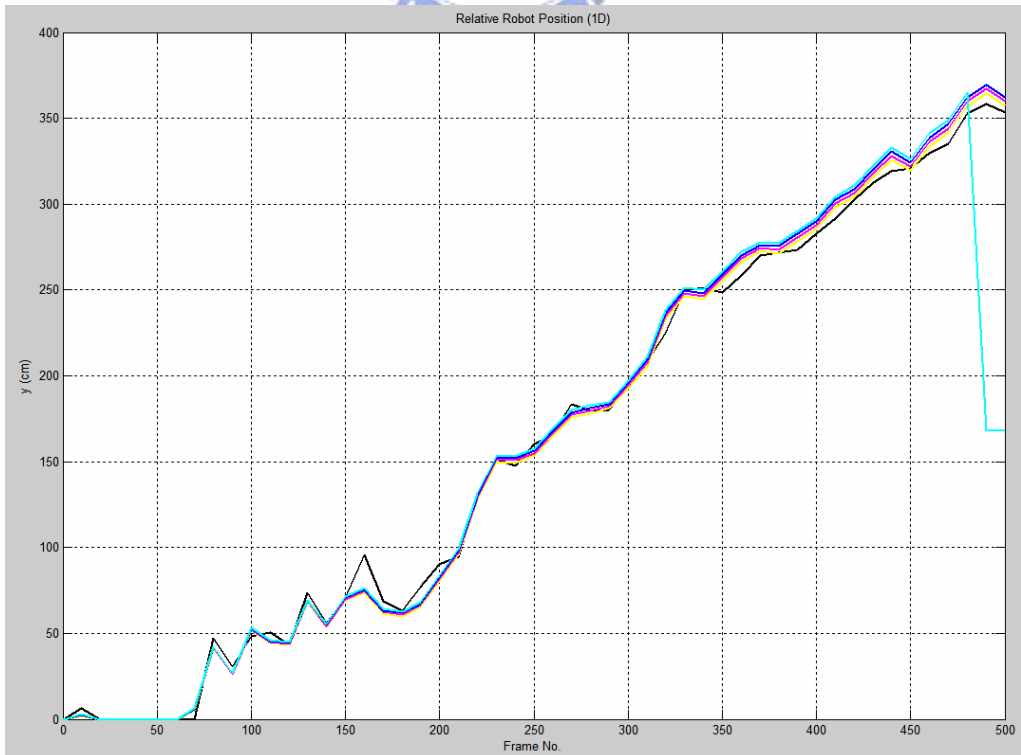


圖 5-8 使用單一特徵點之定位結果（編號 6、7、8、9、10 依序對應黑、黃、粉、藍、青）

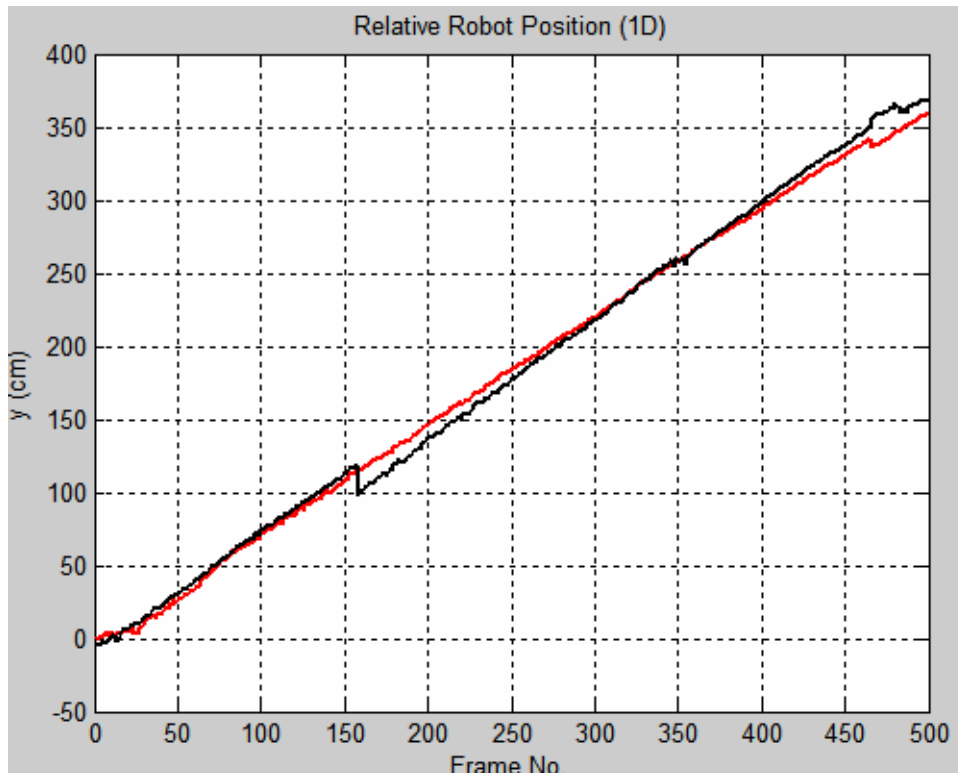


圖 5-9 利用最鄰近的路標定位（紅色為以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法，黑色為以 Cross-Ratio 為基礎之定位方法）

### 5.3 以工作空間座標系與以自動車座標系為中心之定位方法比較

對於所運用前兩章的兩種自動車定位方法有了深刻的瞭解與認識之後，接著我們比較此兩種基於平面轉換方法的定位精確性。圖 5-10 為兩種定位方法的實驗結果，圖中左下角軌跡的起點為起始位置，當自動車走到轉角處時，即做轉彎的動作。在此，藍色軌跡為以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法，而紅色軌跡為以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法。由圖 5-10(b)可以看出，利用方法一（以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法）實驗結果相較於方法二（以自動車座標系為中心之平面轉換定位方法）在轉角區段中定位所產生的跳動顯而易見，而方法二所定位出的結果則較為平緩，抖動的情形較不明顯，較合乎自動車可能走勢。在瞭解了方法二優於方法一的特點之後，要注意的是，雖然方法二的定位結果較為平緩也較為合乎自動車的可能行進軌跡。但是利用方法一所定位出來的自動車位置與真實路徑的實驗結果叫為接近，下一節將驗證這樣的論點。

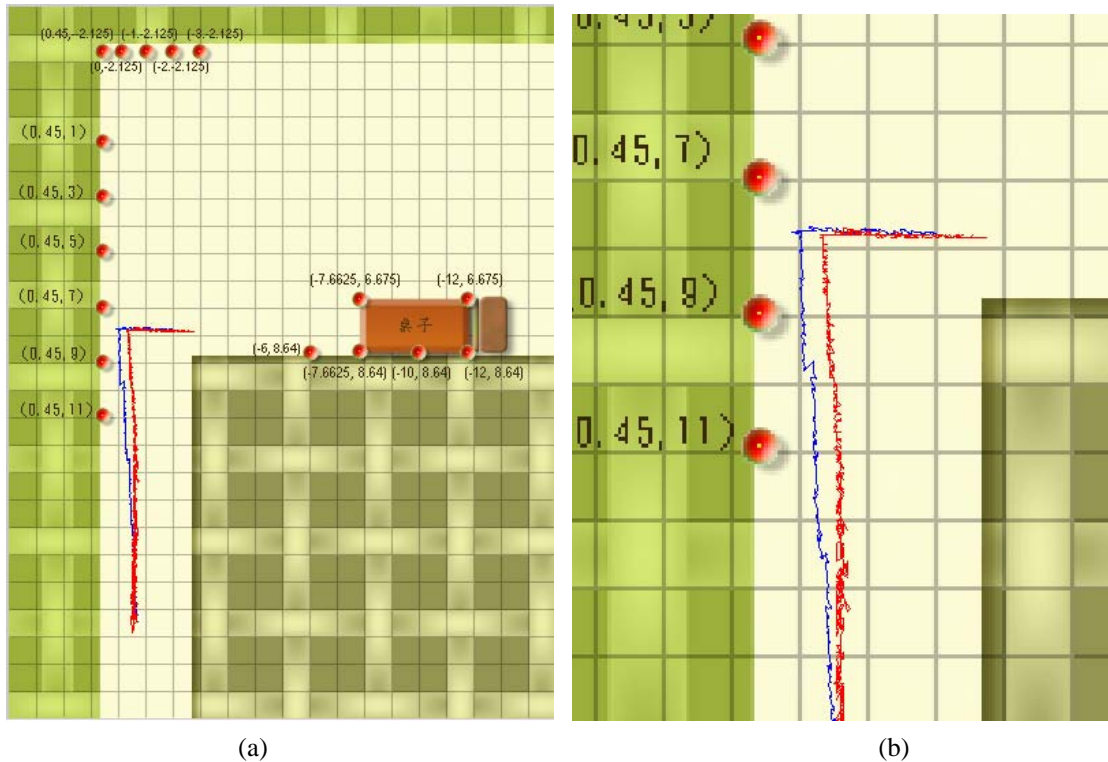


圖 5-10 基於平面轉換定位結果（紅色為以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法，藍色為以自動車座標係為中心之平面轉換定位方法）：(a)原圖，(b)局部放大圖(x2)

## 5.4 自動車實際定位探討

經過前面的實驗結果可以得知，利用以工作空間座標系的自動車定位方法，在定位過程中的穩定性並不及以自動車座標係為中心之平面轉換定位方法。在實驗過程中，我們也需考慮自動車定位準確性。為此，我們需要有實際的自動車軌跡作為比較之基準，而在這裡我們利用一個簡易的方法達到此目標。方法是在自動車後放置沙袋，在自動車執行的過程，沙袋內的沙子便能留下其軌跡，如圖 5-11(a) 所示。有了這樣的軌跡，我們可以對其手動量測並重建至空間場景地圖中，如圖 5-11(b) 所示；接著再將先前以工作空間座標系為中心的平面轉換定位方法與以自動車座標係為中心之平面轉換定位方法結果也貼於在地圖上，如圖 5-12 所示。由此結果可知以工作空間座標系為中心的平面轉換定位方法所定位出來的軌跡與實際重建的路徑較為吻合。因此更確信利用工作空間座標系的自動車定位方法，即使起步的穩定性不及以自動車座標係為中心之平面轉換定位方法，但是整體來說，其軌跡較為接近真實路徑。

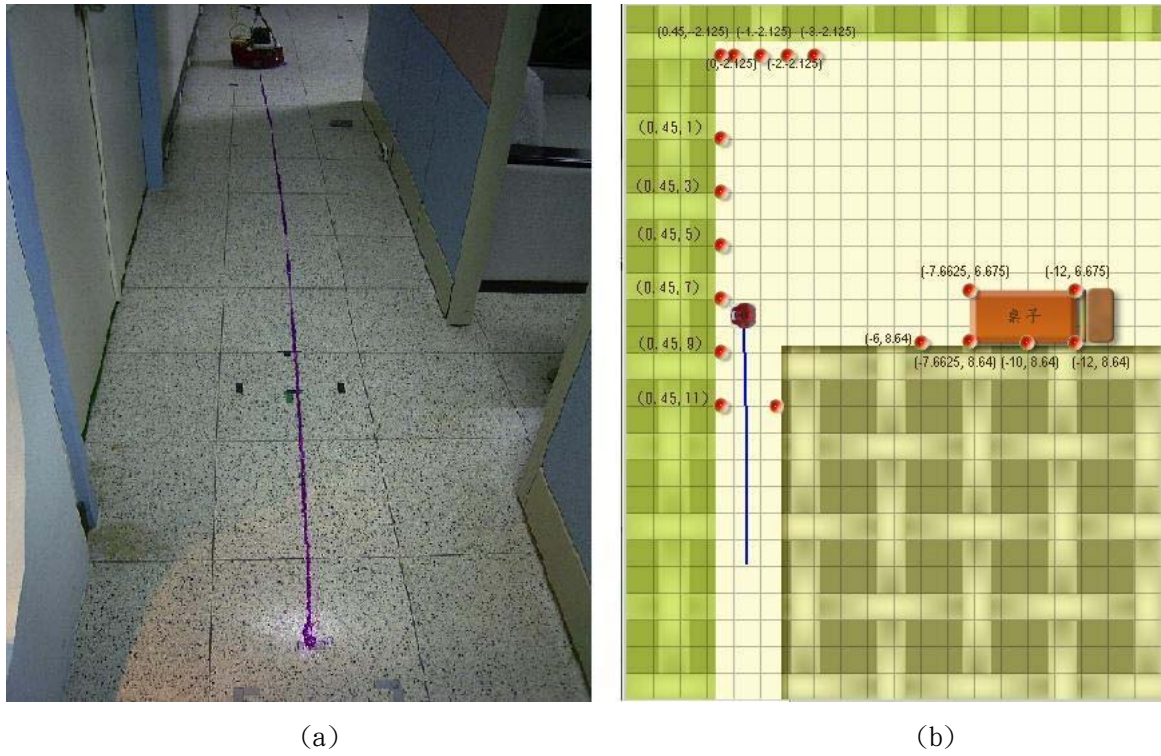


圖 5-11 自動車實際行走路線 (a) 利用沙袋所留下的軌跡以及 (b) 重建於場景地圖上



圖 5-12 基於工作空間座標系方法路線與實際行走路線 (紅色為以工作空間座標系為中心之平面轉換定位方法所得，藍色為以自動車座標係為中心之平面轉換定位方法所得，黑色為自動車真實路徑重建結果)

# 六、結論

## 6.1 總結

將影像處理、圖形辨識的概念應用於自動車導航系統的研究探討已越來越多，可以運用的範疇包括監控保全、巡邏以及老人居家看護等。有別於一般的視覺環境，本論文的目的是探討在基於夜視影像中，利用平面轉換的方法做影像特徵點的偵測辨識以及追蹤，以此進行自動車的定位。為了能夠適用於不同的特徵點佈設環境中，我們提供兩種基於平面轉換的方法讓使用者能夠更彈性的選用。

在實驗結果方面，對於以Cross-Ratio為基礎之定位方法所產生的參考點轉換以及考慮定位不穩定的情形，利用我們的方法皆能夠有效的改進定位結果。在運算的時間複雜度方面，對於環境中存在較多特徵點(點數大於4點)的情形，利用平面轉換之處理能夠更有效的整合這些資訊，這些都是我們一般利用手動選擇特徵點的Cross-Ratio方法所無法達到的。實驗結果也佐證了本論文所提出的兩種方法在自動車定位都有其一定的準確性以及穩定性。

## 6.2 未來工作

本論文的特色在於用簡單的定位方式將自動車的位置回傳給工作電腦用以告知使用者已經到達查核點或是終點。實驗結果顯示自動車在執行定位任務時可以達到一定程度的定位效果。

最後，本論文需改進的地方是：

- (1) 無論在基於Homography方法或是在基於Cross-Ratio的自動車定位方法中，各方法皆有其優劣性。因此，如何彈性的選用兩種定位方法，以獲取更穩定的定位結果以減少擾動的產生，將是未來努力的方向之一。
- (2) 以自動車座標系為中心的定位方法中，可以研究出更多有效的方法來篩選與去除離異值 (Outliers)。對此，未來或許可以透過特殊演算法判斷出各影像

特徵點的優劣，給予適當的權重，以當作篩選的法則。

- (3) 針對平面轉換矩陣 $H$ ，計算中仍然存在一些誤差，如何矯正這樣的平面轉換矩陣，使得定位的準確性能夠提昇也是我們未來改進的空間之一。



## 参考文献

- [1] M. Hashima, F. Hasegawa, S. Kanda, T. Maruyama, and T. Uchiyama, "Localization and Obstacle Detection for a Robot for Carrying Food Trays," in *Proc. IEEE Int'l Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 345-351, 1997.
- [2] W. Chen, X. Wang, T. Wu, and X. Xu, "Visual Protractor Based Localization Algorithm for Mobile Robot," in *Proc. Sixth Int'l Conf. Intelligent Systems Design and Applications*, pp. 67-71, 2006
- [3] A. Bias, R. Sablatnig, and J. Gu, "Single Landmark Based Self-localization," in *Proc. 3rd Canadian Conf. Computer and Robot Vision*, pp.67-67, 2006.
- [4] H. Moravec, "Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover," *PhD thesis, Stanford Univ.*, 1980.
- [5] H. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," in *Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, pp. 116-121, 1985.
- [6] H. Choset, I. Konukseven, and A. Rizzi, "Sensor Based Planning: A Control Law for Generating the Generalized Voronoi Graph," in *Proc. Eighth IEEE Int'l Conf. Advanced Robotics*, pp. 333-338, 1997.
- [7] S. Thrun, "Learning Metric-Topological Maps for Indoor Mobile Robot Navigation," *Int'l Journal of Artificial Intelligence*, pp. 21-71, 1998.
- [8] G. Wichert, "Mobile Robot Localization Using a Selforganized Visual Environment Representation," in *Proc. EUROMICRO workshop*, pp.29-36, 1997.
- [9] G. Adorni, M. Mordonini, S. Cagnoni, and A. Sgorbissa, "Omnidirectional Stereo Systems for Robot Navigation," in *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision and Camera Networks*, pp. 79, 2003.

- [10] J. B. Hayet, F. Lerasle, and M. Devy, “Visual Landmarks Detection and Recognition for Mobile Robot Navigation,” in *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, pp. 313-318, 2003.
- [11] S. Tsugawa, T. Yatabe, T. Hirose, and S. Matsumoto, “An Automobile with Artificial Intelligence,” in *Proc. Int’l Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 893-895, 1979.
- [12] N. Simond, and P. Rives, “Homography from a Vanishing Point in Urban Scenes,” in *Proc. IEEE/RSJ Int’l Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1005-1010, 2003.
- [13] L. Lorigo, R. A. Brooks, and W. E. L. Grimsou “Visually-guided Obstacle Avoidance in Unstructured Environments,” in *Proc. IEEE/RSJ Int’l Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 373-379, 1997.
- [14] C. Thorpe, M. Herbert, T. Kanade, and S. Shafer, “Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab,” *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 362-372, 1988.
- [15] H. Mori, K. Kobayashi, N. Ohtuki, and S. Kotani, “Color Impression Factor: An Image Understanding Method for Outdoor Mobile Robots,” in *Proc. IEEE Int’l Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 380-386, 1997.
- [16] M. Brand, “Incremental Singular Value Decomposition of Uncertain Data with Missing Values,” in *Proc. European Conf. Computer Vision*, pp. 707-720, 2002.