

應用環場影像器於自主式越障車之定位與路徑規劃系統

徐名彥 余志成*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

摘要

本文探討以環場影像器 (Map Cam360) 作為座標與角度量測, 藉以結合路徑規劃作為越障車 (Adaptive Configuration Explorer) 自動行進與導航之控制, 可應用於已知環境如無人化工廠及危險環境之監控。在機器人與無人自走車的行進的控制中, 車輛行進時與地面之間不免會發生滑動的現象, 為了配合路徑規劃的最佳化, 因此需要一個車輛的定位裝置, 藉以校正滑動時所造成之誤差, 並修正行進路線, 以最短距離前進至指定地點進行監控。本文應用環場影像器所擷取之全域影像, 藉由固定於天花板之已知參考點, 推算車輛之座標與方位, 當行進當誤差超過容許值時, 將由影像器定位所得之方位, 重新規劃到達指定目的地之新路徑。最後, 本文以實驗結果證實所提出方法與系統之可行性。

關鍵字: 路徑規畫、環場影像器、無人探測車、座標定位

1. 前言

無人探測車之發明可應用於危險性工作的監控及未知環境探勘, 引起各國產學界廣泛地研究。其中『適形越障探測車』(Terrain Adaptive Vehicle, 簡稱TAV) [2], 泛指能夠適應各種崎嶇地形的車輛, 它能夠有效的感應到環境中地形之變化, 且能與之產生良好的互動, 進而調整車身結構來適應地形, 再透過已知障礙物位置的環境訊息一一越過的障礙物或避開不可穿越的障礙物到達指定的目標。除可應用於外太空[3]與未知地形的探堪之外, 在無人工廠或危險實驗室的監視方面也有許多實用價值。

電腦視覺在機器人的導航是非常重要的課題, 為了自動導航車在室內環境中行走, 並有效地閃避障礙物及估測出物體知距離, 由鄭芝怡[13]提出之立體視覺系統找出實際環境中障礙物與成像平面之間的關

係, 並可找出障礙物之深度。藉以配合陳柏安[11]提到之同軸幾何來說明立體視覺的幾何關係來解決自走車之初始路徑的位置判段。劉睿智[8]提出之自動航行及監控環境, 以多隻相機所構成的視覺系統做為走廊之安全巡邏。Chiu與Tsai [6]所提出的自動導航系統, 則利用環場影像器 (圖 2) 控制車輛自動停車系統為概念。

路徑規劃是機器人自動導航的基本問題, 路徑規劃可分全域與局部兩種方式, 其中局部路徑規劃主要適用於未知的環境如海底、叢林、外星球等。Tangent Bug Algorithm (TBA)[4]即藉由探測車上的視覺系統, 在目前位置的環形周圍, 找出前往目標的最短路徑。若遇到障礙則採用繞行障礙的方式, 到達局部邊界點後, 再反覆進行環境辨識與路徑判斷, 直到抵達目標為止。而全域路徑規劃則主要應用於已知環境的探測, 如工廠、實驗室等。而這些規劃法則大部分先將環境切割成方格或多邊形的網格點[5], 藉由搜尋一些可行網格點的中心連線, 在欲以平滑化後, 找出前往目標的最佳路線。Yu等[6]則應用TBA的概念於全域路徑規劃, 結合機器人的指令化的行動控制, 推演出最短的行進路徑。侯惠傑[12]則以人工智慧的技術提出之避障路徑規劃演算法, 第一種為遺傳演算法之應用; 第二種則是模糊系統的應用來控制機器人到達指定之目的地。

由於機器人行進不免與地面會有滑動的現象, 造成行動規劃與實際位移之間的差異, 影響原先的路徑規劃。因此本文將提出以環場影像器作座標與方位量測的系統, 應用於已知環境中機器人的行動控制。並以之前所設計的可變形越障探測車(ACE)[6]為載具, 結合其路徑規劃系統, 說明其視覺定位系統應用架構與全域環境監控的可行性。

* 聯絡作者: jcyu@ccms.nkfust.edu.tw

2. 自主式適形越障車

2.1 越障車的設計

越障探測車可應用於危險或無人環境下的探勘，如工廠與實驗室，但由於工廠中包含許多類型的障礙物，如：水管、貨物、機器等，故設計上需考量各式障礙閃避和跨越部分障礙所需的機構自由度。適形越障探測車(Adaptive Configuration Explorer, ACE)便是基於以上需求所設計[9]。一般行走時可以當成單一車體結構轉向與前進，當遇到高台或壕溝等障礙時，則可以多節車體的方式，利用較高的自由度來跨越障礙。

ACE的車身結構可分為三部分如圖 1所示，分成中間部分的主要車體以及兩旁對稱、臂式的輪架。共使用了八顆馬達分別為前、後輪各兩顆，轉向機構兩顆、輪臂兩顆。中間車體主要是用於控制模組與影像方位系統的放置，兩邊的輪臂主要是要跨越障礙物，前輪關節主要應用於轉向功能，後輪主要用於跨越障礙輪臂舉起時所用以支撐車體之功用，圖 1為ADAMS的建構圖。。

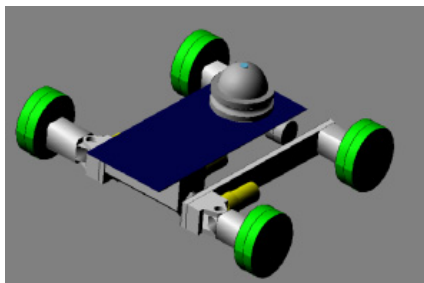


圖 1 自動越障車外觀圖

2.2 已知環境自走控制的策略

Modified Tangent Bug (MTB) [6]主要是應用於一個已知的環境中，使ACE能夠選擇出較快速的與較低成本的路徑，並且依據此路徑安全的避開障礙物以到達目的地之一種路徑之演算法。MTB修改Kamon所提出的Tangent Bug Algorithm[1]，簡化其行進型態，並加上穿越階梯及橫跨壕溝的行進策略，發展出新一套路徑規劃理論。主要分為 (1)朝著目標前進的直線運動(To-Goal Mode); (2)沿著障礙物邊緣行走(Avoiding Obstacles); (3)跨越可穿越障礙(Crossing Obstacles)等三種運動模式。首先ACE由設定的起點出發，在未遇到障礙物前都是使用朝著目標前進的直

線運動模式，直到障礙物的邊界，由障礙的類型進入越障或繞行障礙的模式，反覆直到達終點為止。

但在實際執行規劃路徑時，因機器人在移動過程中不可避免會因移動滑動所造成實際行進與規劃路徑之間的差異，因此需要一個機器人的定位系統，藉以修正路徑，使機器人的行進控制更為準確。在每一次行進動作之後，以定位量測車輛所在方位，倘若與預期方位超過所設定的容許物差範圍，則會以現今位置為原點，重新進行路徑規劃直到抵達終點為止。以下將介紹本研究所提出的影像方位量測系統。

3. 影像方位量測系統

3.1 環場影像器

一般傳統的影像系統常會受到攝影機取像範圍及架設位置而有所限制，因而無法達到監控之效果並可能有監控死角之疑慮。為了增加監控範圍，勢必將會架設多台攝影機在各個不同位置上。本文所使用的攝影機為360度環場影像器(Panoramic Camera) (圖 2)，此影像器具有監控全域環境及高畫質取像之能力。影像器採用雙曲面反射式光學設計，如圖 3所示，透過座標轉換可將部分或全部被扭曲的環場影像，還原成平面影像。



圖 2 360 度環場影像器

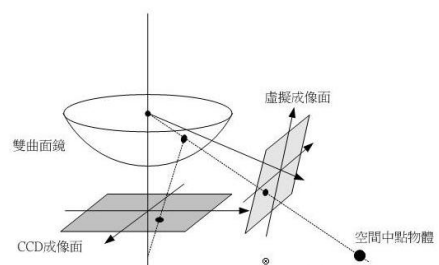


圖 3 環場影像器成像原理圖

環場影像器的有效監控範圍從 $-10^{\circ} \sim 78^{\circ}$ (圖 4)，Masker area為CCD攝影機所遮蔽的範圍，本研

究將影像器安裝於機器人上，往上取像，以天花板之固定參考點作為方位量測，同時作為ACE行進時的環境監視。

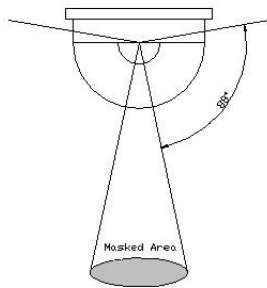


圖 4 Panoramic Camera 影像器所監控範圍

3.2 座標系統

當ACE行走至定點藉由影像器擷取到影像傳送至電腦做路徑規劃，再回授至ACE執行座標與方位計算，在此流程中三個座標系統相互著轉換；影像座標系統(ICS)、載具車座標系統(VCS)、世界座標系統(GCS)，其關係如圖 5所示。

1. 世界座標系統(Global coordinate system ; GCS)，主要以G為中心的座標體系，其座標為 x' 、 y' 、 z' 軸。在地面上的座標為標示 x' 、 y' 軸。
2. 影像座標系統(Image coordinate system ; ICS)，主要以影像器的中心I為為原點的平面座標，其座標標示為 u 、 w 軸。
3. 載具車座標系統(Vehicle coordinate system ; VCS)，以兩個後輪中心連線的中間點為準之座標原點，其座標系標示為 x 、 y 軸，VCS相對於世界座標軸及為機器人目前的方位。

因環場鏡頭係固定於ACE上，因此ICS與VCS之間的關係為固定的，由環場影像所取得的影像，可計算影像中已知參考點在ICS的座標，藉由與原先已知參考點在GCS的座標，便可估計機器人目前的方位(VCS)。

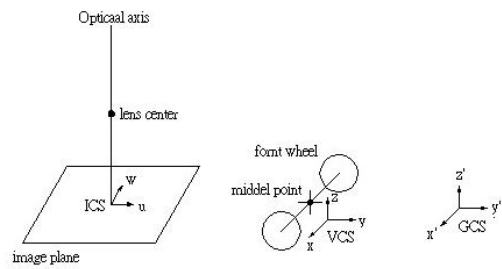


圖 5 三個座標系統 ICS、VCS、GCS 的關係

3.3 影像與距離曲線方程式

3.3.1 像素距離方程式的解析

因為環場影像器所擷取到的影像為環形曲面，所以必須找出實際距離與影像距離間之間的曲線方程式；步驟如下。未來可藉由上述之方程式就可以推算影像中任一點於ICS的座標。

1. 在天花板上制定CCD的原點，並將CCD置於離地面一固定高度，其高度為 H ，如圖 6所示。
2. 以原點為中心，每一個固定距離為一單位標示一個參考點進行量測，如圖 6所示。
3. 由CCD中得到各參考點間的像素值，並記錄該值，如圖 7所示。
4. 得到一條橫軸為像素值及縱軸為實際距離，當 $H = 15$ 公分，相當於影像器架於車身之高度位置，並以最小均方差的方式可得擬合的像素距離方程式，如圖 8所示。

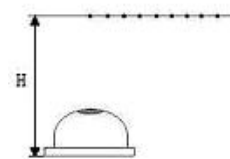


圖 6 固定高度的距離量測



圖 7 環形影像與參考點

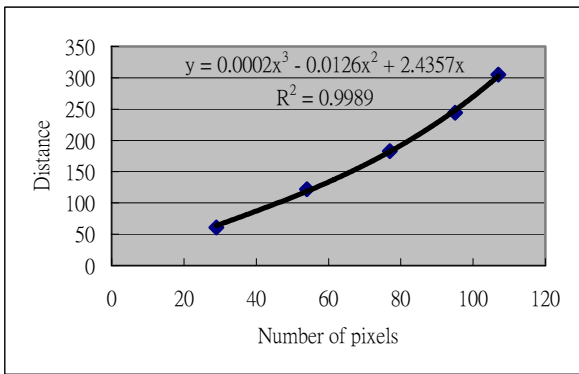


圖 8 像素距離曲線方程式

3.3.2 環場影像器解析度的誤差

環場影像器的圖像解析度將會控制量測的解析度，當影像器取像時，每一像素所代表的距離會與距離影像器中心位置遠近而有所不同，當量測點距離中心較近，每一像素的代表距離較小，反之，較遠時所造成之距離也會隨之增加，因此距離也會因解析度而造成量測誤差。本節藉由圖 8 之曲線方程式找出每一像素的等效長度，以找出量測距離與解析度的關係，如圖 9 中的 L2 曲線所示。

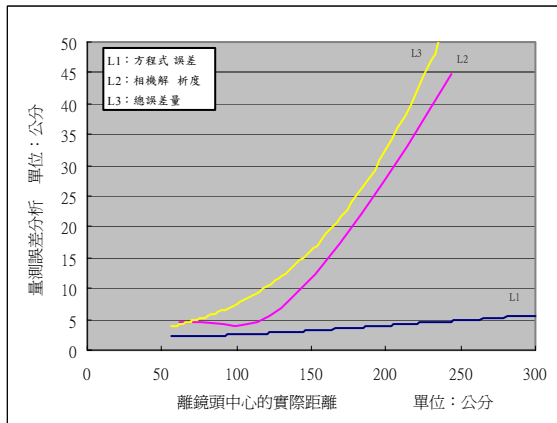


圖 9 解析度誤差曲線圖

3.3.3 擬合方程式的誤差

本研究以單一曲線方程式圖 9 估計各點相對於 ICS 的座標，但影像系統的製造與組裝誤差，如反射鏡的曲率誤差、取像鏡頭的偏心誤差與組裝的平行度誤差，會影響實際環形影像的對稱性，造成曲線方程式之擬合誤差，本研究計算在影像中不同距離與角度的採樣點，以像素距離方程式所估計的距離誤差如表 1 之數據，由於環形影像的特性，其量測誤差將隨離

影像中心的距離而增加(表 1)，分析出估計距離的誤差如圖 9 中的 L1 曲線。

表 1 影像器在不同角度之誤差分析表

角度 距離	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
61 公分	5.4	1.71	7.04	4.07	3.92	6.18	2.42
122 公分	7.5	1.47	11.88	1.59	3.6	7.15	5.55
183 公分	27.26	33.62	30.44	13.18	15.9	15.36	18.61
244 公分	47.67	56.24	55.91	29.18	40.33	50.93	32.47
誤差平均值	21.96	23.26	26.32	12.01	15.94	19.91	14.76

藉由表 1 可得知，當量測點距離影像器中心位置之遠近及角度會造成不同之誤差。當量測點距離影像器中心位置較近時，所造成的誤差約為 6 公分，倘若量測點距離影像中心位置較遠時，誤差量則會大幅之增加約超越 20 公分。而角度不同時，所造成的誤差也會不同，藉由表 1 可以瞭解如何佈置量測點之位置。

3.3.4 參考點的佈置

圖 9 中的 L3 所示之曲線為 L2 與 L1 相加之誤差量總和。因為所造成之誤差不會超過 L3 曲線，所以本文可藉由 L3 之曲線及表 1 之數據，可以訂定誤差之範圍，若將範圍定好即可知道如何佈置量測點。以量測誤差 5 公分為例，可獲得佈置參考點之距離大約為 1.2 公尺，本文將以此距離佈置天花板的參考點，作為未來估計影像座標系統 (ICS) 相對於 GCS 的方位。

3.4 方位量測

藉由環場影像與參考點量測，本文提出一套方位量測系統 (Coordinates and Orientation Measurement using Panoramic Camera, COMPC)，吾人先使用矩陣方程式找參考點的 ICS 座標，藉由座標軸轉換方程式主要可以將 ACE 的座標與其方向求出。

$$\begin{bmatrix} Rx \\ Ry \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & Xc \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & Yc \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ru \\ Rv \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

R_x ：影像中特定点在 WCS 的 x' 座標

R_y ：影像中特定点在 WCS 的 y' 座標

R_u : 影像中特定点在ICS的 u 座標
 R_v : 影像中特定点在ICS的 v 座標
 X_c : 影像器ICS相對於WCS於 x 方向的位移
 Y_c : 影像器ICS相對於WCS於 y 方向的位移
 θ : 影像器ICS相對於WCS旋轉的角度 θ

$$R_{x_1} = R_{u_1} \cos \theta - R_{v_1} \sin \theta + X_c \quad (2)$$

$$R_{y_1} = R_{u_1} \sin \theta + R_{v_1} \cos \theta + Y_c \quad (3)$$

$$R_{x_2} = R_{u_2} \cos \theta - R_{v_2} \sin \theta + X_c \quad (4)$$

$$R_{y_2} = R_{u_2} \sin \theta + R_{v_2} \cos \theta + Y_c \quad (5)$$

本文假設機器人在同一平面運動，至少需要兩個參考點於ICS的量測，代入上述所列之方程式，便可求出ICS相對於GCS的座標與角度 X_c 、 Y_c 、 θ ，也就是ACE目前的方位。方程式所提到的 R_x 、 R_y 在固定環境中為已知值，而 R_u 、 R_v 則可藉影像量測方程式獲得，本研究藉由影像器取得二個已知參考點，再配合最小均方差，藉以推算 X_c 、 Y_c 、 θ ，即機器人的座標及角度。若取得四個參考點相對於 X_c 、 Y_c 、 θ 之數值也較準確，然而方程式必須由上述的(2)~(5)延伸至八個方程式，再以最小均方差求得解，在第4章有詳細的說明及實驗數據。

4. 方位量測誤差分析

所以吾人將影像器裝置在固定位置上，由原點移動至特定点，以影像器擷取影像並得知參考點，藉由參考點可以推算出影像器所移動之距離。為考量環場影像器因製造誤差造成影像的不對稱，所以要先校正影像器使其能在不同高度上所使用。

本文以對稱參考點及單側參考點作為實驗依據，再以四個對稱之參考點互相比對，實驗的結果為，四個對稱參考點所得到的數據比較好，所以設定的參考點靠近影像器時，實驗值較接近實際值，反之，實驗值與實際值相差較大。所以造成實際值與由實驗值差距較大的因素為設定參考點之位置。同時比較若增加參考點的數目對準確度的影響，如表2及表3所示。

表 2 兩個參考點之誤差分析表 (單位:公分)

	距離圓心對稱參考點			距離圓心單側參考點		
	Xc	Yc	θ	Xc	Yc	θ
誤差平均	0.126	1.922	0.692	0.041	4.283	4.683

表 3 四個參考點之誤差分析表 (單位:公分)

	距離圓心四個對稱參考點		
	Xc	Yc	θ
誤差平均	0.001	1.309	1.027

影像所取得的天花板影像將會如所示的參考點格點，以選取兩個參考點為例，參考點的選擇對量測結果也會有影響。我們分析當選取距離圓心最近之兩個對稱參考點如圖10之中的編號2與編號7或編號4及編號5時，與選擇單側兩個較遠的參考點如編號1與編號3或編號6與編號8時，所量測出的ICS相對於GCS的方位誤差如表2所示。由表中的數據可知選取對稱的最近兩參考點會比單側參考點得到所較準確的推算結果。另一方面，當選擇點為對稱於影像中心時當四個對稱之參考點為編號2、4、5、7，利用此四個參考點就可求得表3之數據，會比取兩個參考點之準確度會較為準確。



圖 10 參考點分佈位置

當車子移動時，遇到顛頗路面時，必多出 Z_c 這個未知數，分別在 Y_c 與 Z_c 相對於多出了 ϕ 與 γ 這兩個未知數。所以本文將方程式改制成六個未知數，當未知數增加時，相對之偵測的參考點也要增加。由上述之方程式提到，本文利用兩個參考點就可以列出四個式子，並可以將 X_c 、 Y_c 、 θ 解出，所以若要找出六個未知數將要取三個參考點作為標準，這樣就可以知道機器人旋轉角度及其座標位置，做為未來全域監控的應用。

5. 結論與未來方向

本文利用環場影像器找出作為特徵點的座標量測裝置，並配合座標系統轉換與最小均方差的方式求出機器人在世界座標系統的方位，做為機器人路徑規劃之位置迴授裝置。

目前所假設的應用環境為平面運動，未來可配合環場影像於三度空間的像素—距離擬合，求出機器人於三度空間的座標與方向。但未知數增加時，相對於參考點也為之增加。未來關於參考點的佈置與量測誤差之間的關係，也是一個重要的研究課題。

本研究將進行原形車的設計，以期將環場影像器裝置於車輛上，並結合無線數據機與無線影像傳輸器作為傳輸模組，進行COMPC與路徑規劃結合的驗證。

參考文獻

- [1] Sharon L. Laubach, Joel Burdick, and Larry Matthies (1998), "An Autonomous Path Planner Implemented on the Rocky 7 Prototype", *IEEE International Conference on robotics & Automation*, May, pp. 292-297
- [2] K. Waldron (1995), "Terrain Adaptive Vehicles", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 117B, June, pp. 107-112
- [3] R. Volpe, J. Balaram, T. Ohm, and R. Ivlev, "Rock 7: a next generation rover prototype", *Advanced Robotics*, Vol. 11, No. 4, pp. 341-358. (1997)
- [4] I. Kamon, E. Rimon, and E. Rivlin (1996) "A New Range-Sensor Based Globally Convergent Navigation Algorithm for Mobile Robots," *Proc. 1996 IEEE Conf. Robotics Automat.*
- [5] J.-C. Latombe (1991), *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers.
- [6] J. Yu (余志成), J. W.-C. Liao, M.-Y. Li, and S.-H. Li, (2003), "Design and Motion Simulation of the Autonomous Exploration Vehicle", *The Proceedings of the 7th International Conference on Automation Technology*, Sept. 12-14, Chia-Yi, Taiwan.
- [7] Hsien-Yi Chiu and Wen-Hsiang Tsai, "Automatic Vehicle Navigation and Parking in Building Corridors Using Panoramic Sensing and 2D Image Analysis Techniques", *Proceedings of the 15th IPPR Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 2002
- [8] 劉睿智, 「利用多隻相機之電腦視覺與自動車航行技術作建築物走廊之安全巡邏利用多隻相機之電腦視覺」, 碩士論文, 國立交通大學資訊科學系(2000)。
- [9] 李志強, 「可變形越障探測車之設計與動態模擬」, 碩士論文, 國立台灣科技大學機械工程系(2000)。
- [10] 李敏暘、余志成(2003) "適形越障探測載具之全域行動分析與模擬" 中國機械工程學會第二十屆全國學術研討會, 2003/12/5-6, 國立台灣大學。

- [11] 陳柏安, 「利用電腦視覺做自走車之障礙物定位與環境掃描」, 碩士論文, 國立成功大學工程科學系(2002)。
- [12] 侯惠傑, 「機器人之避障路徑規劃與FPGA實現」, 碩士論文, 淡江大學電機工程學系(2000)
- [13] 鄭芝怡, 「利用電腦視覺在室內走廊環境作障礙物偵測與距離估測」, 碩士論文, 國立交通大學電機與控制工程系(2001)

The Application of the Panoramic Camera to the Positioning and the Path Planning of An Automatic Navigated Vehicle

Ming-Yan Hsu and Jyh-Cheng Yu*

Department of Mechanical and Automation Engineering
National Kaohsiung First University of Science and
Technology

Abstract

The paper presents the coordinate and orientation measurement system using the Panoramic Camera (COMPC) for the automatically navigated vehicles, Adaptive Configuration Explorer (ACE). COMPC is used as a position feedback system in the path planning of ACE, which can be applied to the monitoring of unmanned factories and hazardous environments. Terrain vehicles are liable to contact slip that leads to the position errors of vehicle movement. A position and orientation feedback system is required to calibrate the vehicle path. Some reference points are fixed in the ceiling of a known environment. COMPC can measure the coordinates of the reference points, and derives the position and orientation of the camera that is fixed on the moving vehicle. The path-planning scheme, MTB, will be applied again for a new route if the error of each target movement is beyond the tolerance. The experimental analysis of the measurement error of the COMPC is presented to demonstrate the feasibility of the measurement system.

Keyword: Path planning, Panoramic Camera,

Unmanned vehicle, Coordinate measurement