



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

利用衛星定位(GPS)建立工程施工作業路徑即時管控系統之研究

**A Study on Real-time Motion Planning and Controlling for Construction Equipment Using Global Positioning System (GPS)**

計畫編號：89-2211-E-002-069

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：曾惠斌 國立臺灣大學土木工程學系

電子郵件信箱：[hptserng@ce.ntu.edu.tw](mailto:hptserng@ce.ntu.edu.tw)

## 一、中文摘要

本研究探討的對象是工地現場之各類營建機具，透過電腦化、自動化的方式，來事先規劃、協調營建多機具之整體最佳路徑，並利用全球衛星定位系統(Global Positioning System)來取得機具 1~3 公分之高精度定位資訊，而後將定位數據以無線電數據機(wireless radio modem)即時傳回基站電腦。經過座標轉換所即時解算出來之機具移動軌跡，可與本研究發展之路徑規劃、協調演算法所規劃之路徑，來進行路徑差異比對，用以提供即時監控、引導之功能。本研究之最終目的為建構一套以 GPS RTK SURVEY (Real-Time Kinematic Survey；即時動態測量)為基礎，無線電傳輸、電腦化、自動化的營建多機具路徑規劃管控系統。

**關鍵詞：**全球定位系統、最佳路徑、營建機具管理、施工作業規劃、即時管控

### Abstract

This research will discuss the problems and deficits of the construction management in engineering contract from the view of management of job-site, building an effective construction management model which is working with automatic construction method, building a set of tools for project management and job-site manager by applying GPS (Global Positioning System) associated wireless radio modems. The purpose of this program is to build a effective construction job-site management model, and develop a complete construction path planning and real-time management system. The information tool used is GPS RTK SURVEY and the self-developed algorithm of solving multi-equipment optimal path.

**Keywords :** GPS、Optimal Path、Construction Equipment、Motion Planning、Real-time Control

## 二、緣由與目的

由於 GPS 具有即時性、全天性、全球性高精度定位的特性，近年來廣泛地應用在各領域，例如：車輛導航系統、無人機具導控之應用、大地測量等。

然而，國內營建業在應用 GPS 時，多是侷限於測量及 GIS (Geographic Information System)上。本研究則是想拓展 GPS 在工程上的應用範圍，利用 GPS 快速高精度定位的特性，將 GPS 應用於工地機具移動時的路徑規劃與協調避撞上，使工地機具能安全且有效率地移動。

此外，目前營建業在利用 GPS 定位時，都是用資料收集器收集測量數據後，再帶回實驗室進行後續處理解算。本研究則是想突破此一延遲性問題，希望將 GPS 數據即時傳輸至電腦，並進行座標轉換，將經緯度座標轉換成 2D 座標，以使用於路徑規劃與機具協調避撞，並可用來即時監控機具的移動狀況。

再者，目前車輛導航系統內建之 GPS 晶片，精度大多都在公尺級範圍；而本研究採用之 GPS，其精度可達 1~3 公分，特別適合工程上對精度之嚴密要求。

綜言之，如果能將其即時性、全天性、高定位精度等特性之定位系統應用於工地機具之路徑管控，則可避免人為操作之疏失，進而增加效率、降低成本、提高施工品質。故本研究希望將營建機具施工作業路徑與 GPS 作一整合性應用，建構出多機

具的施工作業路徑即時管控系統。

### 三、GPS 系統之建構

全球定位系統 (GPS, Global Positioning System) 早先為美國國防部因軍事用途，為進行高精度導航與定位作業所建立發展之衛星定位技術。GPS 目前是以 WGS-84 (World Geodetic System 1984) 座標為所使用的空間參考座標，以地球質心為原點並隨地球同步旋轉。其測量乃是利用接收儀收錄的衛星時間、位置以決定接收儀所在之點位座標及其它相關未知數。

GPS 測量採用的方法，視接收儀功能及測量的目的而異。可分為<sup>[1][2]</sup>：(1)靜態：靜態基線測量(Static GPS Surveying)、快速靜態測量(Rapid GPS Surveying)，(2)動態：半動態測量(Semi-Kinematic GPS Surveying)、虛擬動態測量(Pseudo-Kinematic GPS Surveying)、即時動態測量(Real-time Kinematic GPS Surveying，簡稱 RTK Survey，即本研究使用之法。)

### GPS 系統之架設<sup>[1][2][9]</sup>

1. 基站儀器之架設包括：4600LS Surveyor、附 5/8 螺距接合器的三腳架、外接電源的充電電池、Trimtalk 900 radio、相關傳輸接線、Survey Controller、無線電數據機(如 Fig. 1)。

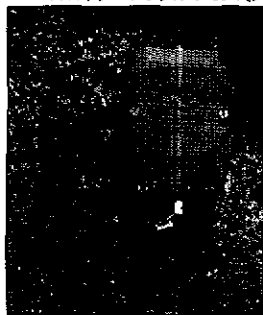


Fig.1 無線電數據機

2. 移動站儀器之架設包括：4600LS Surveyor、外接電源的充電電池、Trimtalk 900 radio、5db 天線、相關傳輸接線。整體系統架設詳見 Fig. 3。
3. 將基站三腳架上之鐵板尺約略朝向北，並將移動站之 GPS 接收器連同鐵杆一並靠在鐵板尺另一端圓形開口處。如此，兩個 GPS 接收器之間之距

離為一已知固定長度，以便進行測量前之初始化工作。

4. 輸入基站 GPS 接收器之基本位置資料：水平高程、經緯度座標(可由儀器自行接收 GPS 定位衛星傳來之資訊，做初步之座標給定。)
5. 由 GPS 接收器自行搜尋太空中之 GPS 定位衛星，至少 4 顆以上，進行 GPS 的初始化工作。一旦測量精度收斂達許可範圍之後，即可開始操作 RTK Survey。
6. 以基站的 GPS 接收器為一固定已知點，基站在原地不動，移動站則任意移動至要測量的位置。當移動站移動時，移動站和基站的無線電會聯繫兩者的衛星訊號，並利用 GPS 上之微型電腦即時算出移動站之座標。
7. 移動站之座標透過無線電數據機即時傳輸至筆記型電腦，利用本研究開發之軟體，將經緯度座標換算成平面座標，並在電腦上畫出機具之路徑，

### 四、座標轉換

#### 3-1 地球座標系統<sup>[10][11]</sup>

全球衛星定位系統(Global Navigation Satellites System; GNSS)中，如美國 GPS 衛星所用的 WGS-84(World Geodetic System 1984)座標系統與俄羅斯 GLONASS(Global Navigation Satellites System)衛星系統所用的 PZ-90 座標系統，皆屬於 ECFE 座標系統。其相關座標系統之歸納比較可見 Tab. 1

Tab. 1 相關座標系統之歸納比較

座標系統	表示法	定義
WGS-84 橢球座標	$(\phi, \lambda, h)$	以地球質心為中心，根據參數建立一個橢球體
WGS-84 直角座標	$(X, Y, Z)$	以地球質心為中心，X, Y 方向分別為赤道面之東經 0 度、東經 90 度，Z 方向由右手法則所決定。
區域直角座標	$(X, Y, Z)$	以選定參考點為原點，X, Y, Z 方向分別為區域平面正東、正北、正上方。

而其中 WGS-84 座標系統又可以用橢球座標或直角座標表示。所謂橢球座標，

是以地球質心為中心，根據參數建立一個橢球體。地球附近任一點 P，都可以用經度  $\lambda$ 、緯度  $\phi$ 、高度  $h$  表示，下圖 Fig.2 即為橢球座標示意圖

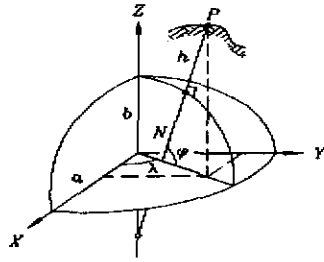


Fig.2 橢球座標示意圖

### 3-2 座標轉換之說明

由於 GPS 接收器採用的座標系統是 WGS-84 橢圓座標系統，而我們所需要的是區域性的直角座標系統。因此需要藉著數學模式來進行座標轉換的工作，以便將 GPS 接收到的座標正確無誤轉換到所需的座標系統上；以下即介紹座標轉換的步驟與所使用的公式。

#### (一)WGS-84 橢球座標轉換至 WGS-84 直角座標<sup>[10][11]</sup>

GPS 收到的座標是 WGS-84 系統的經、緯度，它是屬於橢球座標系統 (Ellipsoidal coordinate)，表示成  $(\phi, \lambda, h)$ ，其轉換成直角座標系統 (Cartesian coordinate)，表示成  $(X, Y, Z)$  的公式如下：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h) \times \cos \phi \times \cos \lambda \\ (N+h) \times \cos \phi \times \sin \lambda \\ \left(\frac{b^2}{a^2} \times N+h\right) \times \sin \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： $a$ 、 $b$  為橢球體之長半徑與短半徑， $(\phi, \lambda, h)$  分別為橢球座標中的緯度、經度與幾何高度。 $N$  為卯酉圈之曲率半徑 (radius of curvature in prime vertical)，

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{(a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)}} \quad (2)$$

WGS84 參考橢球體的長、短半徑分別為：  
 $a=6378137$  公尺  
 $b=6356752.314$  公尺

#### (二)WGS-84 直角座標轉換至區域直角座標<sup>[10][11]</sup>

兩個直角座標系統轉換時，不外乎作平移 (Shifting)、縮放 (Scaling) 和旋轉 (Rotation) 三種方式。平移為兩個座標系統原點間相差而引起的。縮放為兩個座標系統其三軸使用不同的單位所造成的。旋轉則是兩個座標系統的指向不同而產生的。我們需要處理的只有平移和旋轉，如 Fig.3 所示。

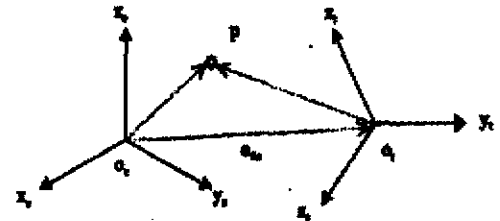


Fig.3 兩個直角座標系統轉換

兩座標系統間的轉換公式如下

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} = R_{e2t} \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{oe} \\ Y_{oe} \\ Z_{oe} \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 五、路徑控管軟體之開發

### 4-1 控管軟體的功能及其假設與限制

#### 1. 軟體之預期目標

結合第二、三章所說的資料傳輸與座標轉換，本研究目的是開發出一套路徑規劃與控管的軟體，以便能在工地現場快速規劃各機具移動的最短路徑，並能事先做好機具協調的工作，以避免發生碰撞。此外，當機具移動時，本軟體需要有即時監控的功能，換言之，就是要能即時顯示機具實際移動的狀況，以便和事先規劃的相比較，一旦有碰撞的危險，則會發出警告訊號。

#### 2. 設計控管軟體前的假設與限制

(1) 在機具行進過程中，假設其速度不變。

- (2) 由於機具可以旋轉，故以圓形來表示機具之形狀，以安全半徑來表示機具之大小。
- (3) 不考慮動態之障礙物。
- (4) 障礙物形狀以矩形來表示。

#### 4-2 管控系統所需之演算法

本軟體所需演算法包括:(1)最短路徑規劃(2)機具之協調避撞。以下分別說明。

##### 1.最短路徑規劃的演算法

假設給予一個有向圖形<sup>[4]</sup> (如 Fig.4)，我們的問題是要找一條從起點到終點的路徑，在每一邊附加一個的加權值，加權值代表的可能為成本、時間，或是某些不是距離的數量，這些加權值必須是非負值的，然後最後使這條路徑上的加權之總和為最小，我們稱這條路徑為最短路徑。

本研究在單一機具路徑規劃演算法中採用的是 Dijkstra 方法<sup>[4]</sup>，在一個有向圖形裡，已經有標示出起點與終點，而各邊的加權值也已經標示上去，我們可以製作一個鄰接陣列來表示這個有向圖形，將原來儲存 1 和 0 的陣列元素換成各頂點的加權值，若是頂點之間無連接，則可以用無限大 $\infty$ 來表示。<sup>[13]</sup>舉例來說，Fig.7 即可用 Tab.1 來表示：

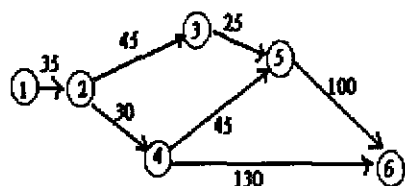


Fig.4 此圖代表各點間的連接狀況，箭號旁邊的數字代表兩點間距離

Tab.1 此表為 Fig.4 之鄰接陣列。陣列元素(point1, point2)的值表示 point1 到 point2 的距離，若兩點無連接則以 $\infty$ 表示

	1	2	3	4	5	6
1	$\infty$	35	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	$\infty$	$\infty$	45	30	$\infty$	$\infty$
3	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	25	$\infty$
4	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	45	130

5	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	100
6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

接著開始利用 Dijkstra 方法：

首先將鄰接陣列內開始頂點的那一列，拷貝到鄰接此頂點最短距離的一維陣列 dist 內，也就是將頂點那一列加到最近距離頂點的下一列 dist 當中。

接著執行頂點總數減 1 次的迴路。

- (1) 從陣列選擇一個最短距離的頂點 W，且此頂點沒有被選過。
- (2) 將陣列 dist 內所有沒有被選過的頂點 X 之距離和鄰接陣列(W,X)加上 dist(W)的距離來比較長短，將距離較短的值存入 dist(X)。其公式如下所示：

$$\text{MIN}(\text{dist}(X), \text{dist}(W) + \text{鄰接陣列}(W, X)) \quad (4)$$

其中函數 MIN 傳回兩個距離的最短距離。其過程與結果如 Tab.2 所示

Tab.2 此表顯示在這個例子中，運用公式(4)來尋找最短路徑的過程。最後一列的數值表示第 1 點至各點的最短距離。例如由第 1 點至第 6 點距離為 195；第 1 點至第 5 點距離為 105

迴路	陣列 dist						最近的距離頂點 W
	1	2	3	4	5	6	
1	0	35	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	--
2	0	35	80	65	$\infty$	$\infty$	2
3	0	35	80	65	110	195	4
4	0	35	80	65	105	195	3
5	0	35	80	65	105	195	5

用以上演算法即可寫出規劃最短路徑程式。

##### 2.機具協調避撞的演算法

本次研究是針對多機具的路徑規劃，因此除了要規劃最短路徑外，還必須做路徑協調，以避免機具發生碰撞。當兩機具將發生碰撞時，本研究採用的方法是讓一

台機具在安全的地方停下來，等待另一台機具通過後再依其最短路徑繼續前進。本研究目標是在規劃最短路徑的同時，程式便找出可能的碰撞點，並規劃機具避撞的方式以及機具在避撞時等待的位置及等待的時間。如此一來，駕駛便可根據程式指示前進或停止，快速且安全的到達目的地。

在機具協調避撞前，首先必須訂出機具的優先順序。因為當機具即將發生碰撞時，必須以機具的優先順序決定何者該停、何者該前進。此優先順序是使用者根據機具重要性、速度及機具對工程進度的影響大小等因素，綜合考量後由使用者決定並輸入程式。程式將根據此順序來規劃路徑，使優先性愈高的機具等待的時間與次數愈少。相反的，優先性低的機具由於必須禮讓使優先性愈高的機具，因此其等待的時間與次數愈多。

優先順序決定之後，程式根據之前規劃的最短路徑，先找出各機具在尚未協調避撞之前每一秒的位置，並儲存在陣列中，如 Tab.3 所示。然後利用此陣列來做路徑協調。

Tab.3 儲存機具路徑之陣列。A1 表示 A 機具第一秒之位置，以此類推

A 機具	A1	A2	A3	A4	A5	...
B 機具	B1	B2	B3	B4	B5	...

此方法最重要的原則就是必須依優先順序由高至低來逐一為機具做路徑協調。舉例來說，假設有 A、B、C 三機具，優先順序為 A>B>C，相關位置如 Fig.5 所示：

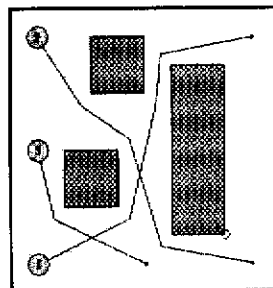


Fig.5 障礙物及各機具的最短路徑。矩形區域為障礙物，圓形代表機具，內含數字為機具之優先順序

其協調步驟如下。

步驟一：

由於 A 機具優先順序最高，所以 A 機具不必禮讓任何機具，它只要依其最短路徑前進即可。其路徑記錄在陣列中，如 Tab.4 所示

Tab.4 路徑矩陣紀錄 A 機具每一秒的位置。A1 表示 A 機具第一秒之位置，以此類推

A 機具	A1	A2	A3	A4	A5	...
------	----	----	----	----	----	-----

步驟二：

A 機具路徑確定後，接下來規劃 B 機具。此時必須檢查每一秒內 A、B 機具彼此的距離是否有小於安全距離，如 Tab.5。Tab.5 檢查 A、B 機具的路徑矩陣可找出何時可能碰撞。陰影處為可能碰撞點。

A 機具	...	A20		A23...
B 機具	...	B20		B23...

這個例子是在 21、22 秒的時候 A、B 機具距離小於安全距離，此時優先性較低的 B 機具必須尋找合適的避撞點，在該點等待 A 機具通過後 B 再通過，如 Tab.6，Fig.6、7 所示。

Tab.6 B 機具必須在第 20 秒的位置上多等 2 秒讓 A 機具先通過。B 機具的路徑矩陣改變如表所示。

A 機具	...	A20	A21	A22	A23...
B 機具	...				B21...

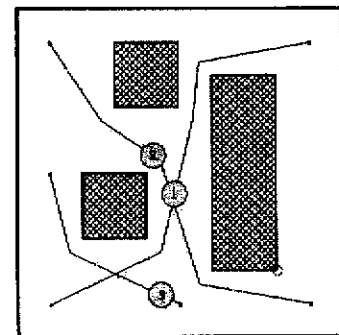


Fig.6 第 20 秒時，B 機具停下來等待 A 機具通過後 B 再通過

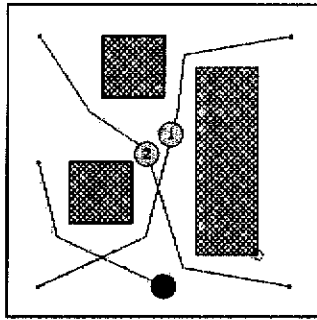


Fig.7 A 機具已通過可能碰撞點，故 B 機具可繼續前進  
步驟三：

B 機具路徑協調完成後，接下來再規劃 C 機具。由於 C 機具優先性最低，它必須同時考慮優先順序比它高的 A、B 機具。如同規劃 B 機具路徑一樣，C 機具必須檢查每一秒內它是否會和 A、B 機具距離過近。若距離過近，則 C 機具必須尋找合適的避撞點。要注意的是當檢查 B、C 機具是否距離過近時，C 機具必須是和 B 機具協調過的路徑(步驟二)來比較，而不是 B 機具尚未協調避撞過的原始路徑。經由以上三步驟即可完成協調避撞的工作。

## 六、研究成果與自我評估

本研究結合最短路徑演算法和協調避撞演算法，開發出一套工程機具的路徑規劃軟體，並具備及時監控機具的功能，使本軟體能協助工地現場機具快速而安全地移動。使用者將可藉由 GPS，以 RTK 定位的方式，得知障礙物的位置，並輸入軟體。使用者將障礙物位置及各機具的速度、大小、優先順序、起終點等資料輸入軟體後，控管軟體能快速規劃出各機具的最短路徑及機具在協調避撞時的等待位置，並可事先模擬機具實際移動的情形。在機具實際移動時，本軟體可即時接收機具上 GPS 傳回的資料，並將此數據由 GPS 格式轉換成 2-D 座標。監控人員可在控管軟體上看到目前各機具實際移動狀況，並將其與事先規劃的路徑相比較。一旦發現駕駛員偏離了預先規劃的路線，則監控人可以馬上提醒駕駛員，以達到即時監控的目的，使機具的調度更為快速、安全、便利。綜言之，本軟體具備四大功能：

- (1) GPS 數據即時傳輸與轉換。
- (2) 規劃機具短路徑。
- (3) 協調各機具的移動以避免碰撞。
- (4) 即時監控機具之移動。

## 八、參考文獻

- [1] Trimble Navigation Ltd. (1989). "GPS, A Guide to the Next Utility"
- [2] Trimble Navigation Ltd. (1993). "Defferencial GPS Explained"
- [3] Kyle Loudon. (1999). "Mastering Algorithms with C." O'Reilly.
- [4] Robert Kruse, C.L. Tondo, Bruce Leung (1999). "Data Structures & Program Design ." Prentice Hall.
- [5] J. Barraquand and J. Latombe. (1991). "Robot motion planning: A distributed representation approach ." The Internation Journal of Robotics Research., 10 (6) : 628-649.
- [6] M Erdmann and T. Lozano-Perez. (1987). "On multiple moving objects. Algorithmica ." 2(4):477-521.
- [7] P. A. O'Donnell and T. Lozano-Perez.. (1989). "Deadlock-free and collision-free coordination of two robots manipulators." Proceeding of the OEEE International Conference on Robotics and Automation, 484-489.
- [8] D. J. Zhu. (1992). "Exploring the interaction of geometry and search in path planning. " Department of Computer Science, Stanford University.
- [9] 黃俊榮，「應用衛星定位 (GPS) 於施工作業路徑即時管控之研究」，國立台灣大學土木研究所碩士論文，民 89
- [10] 蔡宜學，「GPS/GLONASS 整合式之導航系統」，國立台灣大學電機工程學研究所碩士論文，民 89
- [11] 李良輝，「遙測影像之幾何處理與數值地形模型之整合應用」，國立高雄科學技術學院土木工程技術系，民 86
- [12] 林川暉，「有效協調多輛無人搬運車軌跡規劃之研究」，國立交通大學機械工程學研究所碩士論文，民 88
- [13] 洪錦魁、陳會安，「看程式實例學資料結構」，文魁資訊，民 86
- [14] 蘇牧生，「多機器人之路徑規劃」，國立台灣大學資訊工程學研究所，民 82