

## 適形越障探測載具之全域行動分析與模擬

李敏暘

台灣科技大學 機械工程研究所

余志成\*

國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系

NSC 91-2213-E-008-020

關鍵字：探測車、虛擬原型、動態機構模擬、路徑規劃

### 摘要

本文提出一套建立適形越障探測載具 (Adaptive Terrain Vehicles) 全域模擬環境的架構流程，藉以作為機構設計評估和路徑規劃與控制策略的驗證，減少實作模型與設計修改的成本。ATV 常使用於無人環境的探測，為了具有高度的移動能力，在機構設計上常需搭配主動式關節以達到攀爬大型障礙的目的，因此與環境間的互動關係也將影響設計的參數。筆者利用動態模擬系統軟體 (ADAMS)，以輪行探測車的設計為例，將探測車的運動模式予以模組參數化，並藉由 ADAMS 所提供的 Macro 功能撰寫成運動指令與障礙環境檔，進行運動的累加模擬和建立全域的障礙物環境。模組化的運動指令可簡化 ATV 的模擬控制方式，並配合路徑規劃程式 (Modified Tangent Bug)，自動轉換成控制指令，以模擬所規劃的行進過程，藉以驗證路徑規劃模組的正確性與 ATV 在全域環境中行動的能力。所建立的模擬環境與規劃流程，可作為未來 ATV 設計分析的參考。

### 前言

「適應地形探測載具」(Adaptive Terrain Vehicle, ATV)[1]可應用於危險環境的探勘、導盲機器人、無人搬運車、等非固定人為道路的移動，乃至於外行星的探勘，因此常需具有高度的移動及越障能力，便於崎嶇地形的穿越。而配合電腦視覺與自動控制，便可應用於危險場所或無人場合的遙測，然而這類的工作環境都存在著許多障礙物，這時機械人就必需能安全地避開或必要是穿越某些障礙，於是就產生了許多「避障」(Obstacle Avoidance)與「越障」(Obstacle Crossing)的相關問題。簡單地說，「避障」就是在有限的工作環境中找到一條可行的無障礙

(Obstacle-free) 路線或者是可穿越的路徑，使得機械人能安全地抵達目的地。

所謂「適應地形探測載具」，在於能主動調整本身結構來適應地形，便於在凹凸不平的地形行進與探勘。這和傳統載具最大的不同，在於傳統的載具只能藉用被動式的懸吊機構來適應鋪設的路面，這種被動懸吊式的車輛適合於平坦的地面與斜坡的行駛，但在非人為路面的使用上則常會遭遇問題。

「適應地形探測載具」的行進方式大致上可分為三種；有如坦克一樣的履帶式，模仿動物、昆蟲以腳的方式來移動的機構，或是最常見的藉著輪子的滾動來達到移動的目的。履帶車的特點是接地壓力低，越野性能較輪型車輛佳，易於超越障礙及壕溝。但履帶車行駛時運動噪音高，且能量消耗率高，最重要的是當履帶有滑動現象發生時並不容易偵測，因此定位就會發生問題。

以「足」為移動機構的「適應地形探測載具」，常見有六足機器人[2]、四足機器人[3]，另外還有雙足機器人。整體來說，步行機器人的行進速度較慢，但可以應用在較複雜的地形，如凹凸不平的路面或是跨越階梯，靈活性高，最不受地形限制的設計，不過由於機構的自由度大，相對的它的結構就會比較複雜，甚至於較為笨重，伺服馬達的需求也相對的較多了。

而使用輪子作為其移動機構的 ATV，傳動方式是由馬達直接驅動輪子。它的特點在於機動性高、運動噪音低、結構簡單操作成本低、燃料消耗率低，可有較大的巡行里程。但越野性能較履帶車差，只能穿越高度小於輪子半徑的障礙，在跨越較大的障礙方面就必須依靠機構上的設計，如在多節式的車體間加裝主動式關節，便可

增加自由度改變車身的形體，以達到跨越障礙的目的。[4]

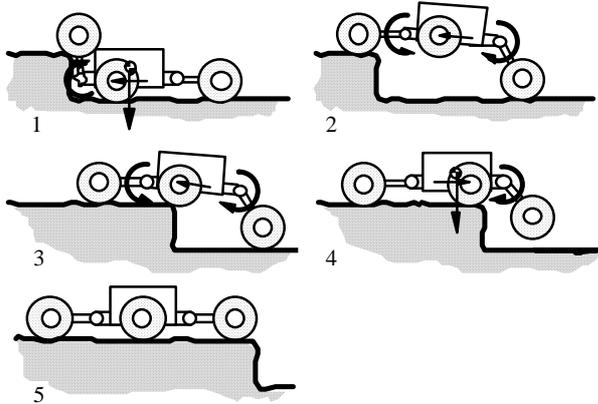


圖1 具主動式關節探測車跨越高台障礙

因 ATV 常應用於危險或無人環境的探勘，環境中存在著許多不同類型的障礙物。在此所討論的障礙主要分為可穿越障礙，如高臺、小型壕溝，與不可穿越的障礙如巨石、河流等。原則上探測車應盡量規劃一條可行的平坦路線，以避開大型的障礙，但當非穿越部分障礙不得到達指定目的時，則需考量跨越部分障礙，此時探測車就需具備攀爬障礙物的能力。

而為增加移動效率，探測車需具有自主的行動智慧，找出適當的行進路線，快速而安全的到達指定地點。而路徑規劃的能力是自主行動智慧的要素，路徑規劃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[5]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[10]，藉由搜尋一些可行網格點的中心連線，找出前往目標的最佳路線。

不論是哪一種 ATV，在設計上需考慮與環境間的互動，包括避障與越障，同時需配合路徑規劃的動作控制，因此設計上相當複雜。為確保探測車的設計能滿足穿越障礙的各種需求與路徑規劃的可行性，動態機構模擬與虛擬環境的建立，便有助於設計與控制參數的決定。但現有研究多著重在特定類型路面或路線對車輛系統動

態特性的影響[11][12]，並未結合路徑規劃與機構控制進行全域環境的行動模擬。本文將以輪行探測車為載具，以 ADAMS 分析其運動方式，並將其運動模態的模擬模組化與參數化，藉由設計介面產生全域環境，以結合路徑規劃，進行三維動態模擬的自動化。

### 適形越障探測車

當「適應地形探測載具」應用在已知環境如危險工廠與實驗室的偵測時，一般移動的路面雖是平坦的，但環境中會有機臺、固定物、管路、水溝、台階等障礙物，因此探測車除需具有靈活的平面移動能力外，也需具有攀爬台階、水溝的功能，以增加探勘範圍與路線規劃的彈性。適形越障探測車(Adaptive Configuration Explorer, ACE) [6]便是在這個需求下產生的設計，ACE 採四輪獨立傳動的設計，搭配主動式輪臂關節的設計，可改變車身形體以適應不同障礙地形，具有高度的移動性、障礙穿越能力。

ACE 結構可分成三個部分，如圖 2 所示。包括中間車體以及兩旁對稱式的輪臂，中間的主車體用於控制模組與環境辨識的置放，前輪關節部分可作為轉彎的機構，兩邊的輪臂可利用來攀越障礙，而尾輪是在跨越障礙輪臂舉起時所用以支撐車體的功用。此車體在於行走於平坦路面時，可以當成單一車體結構，當遇到障礙時則以多節車體的方式，利用較高的自由度來跨越障礙。

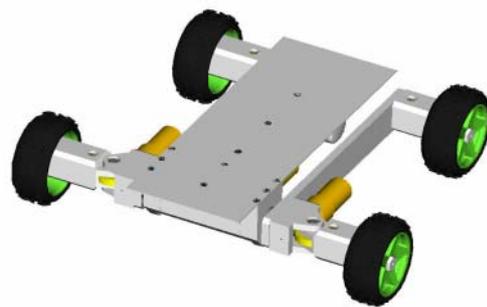


圖2 ACE 結構示意圖

ACE 設計共使用了八顆直流馬達，FR、FL、BR、BL 四顆作為四輪獨立驅動，TR、TL 兩顆作為前輪轉向，AR、AL 兩顆作為輪臂抬舉使用。馬達配置及編號如圖 3 所示。

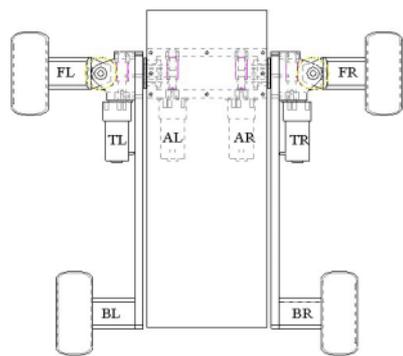


圖3 ACE 馬達配置

### 適形越障探測車的動態運動模擬

#### 動態機構模擬 ADAMS

本文採用動態機構模擬系統 ADAMS 作為虛擬機構分析的平台，藉以整合機構模擬、控制策略、路徑規劃、與環境穿越的分析。ACE 的 3D 模型以 PRO-E 實體建模軟體建構，在設定好各物件質量後，再轉入到 ADAMS 中為模擬的實體，進而建立接點、動力等模擬中所需的設定，而 ACE 的環境也由 ADAMS 來建立，是以 ADAMS/TIRES 的功能來設定 ACE 輪胎與路面的關係，進行 ACE 在不同環境下與路面互動的動態模擬。

#### ACE 運動模擬

我們將 ACE 的機動能力區分為九種運動模態，其中有以四輪傳動的前進、後退，利用主動式關節來做運動的有以兩個後輪的中點為中心的原地左右轉彎、圓弧左右轉彎和以輪臂作上下高台與跨越壕溝。這些動作分別用八顆馬達以不同時序作動來完成，故在模擬上 ADAMS 以 Step Functions 的語法來描述這些馬達的時序，藉以控制機構模型進行一連串預設動作的模擬。

因 ACE 在輪臂和前輪關節上採用主動式關節的設計，故具有強大的越障能力，除了直行前進、後退和原地轉彎、圓弧轉彎之外，也可藉由主動式輪臂關節跨越高台與壕溝等，如圖 4。

ACE 的轉彎方式可分為原地旋轉與圓弧轉彎兩種方式，原地旋轉是改變輪子的角度，將四個輪子的圓心法線相交在同一點上，其作法是轉動前輪臂，使其輪心法線交於後輪中點的位置，因此便可以交點為軸心，前後輪配合不同的轉速，而達到改變行進方向的目的。而圓弧轉彎則是以障礙物離後輪中點的距離為半徑，改變前輪

的角度使之四個輪子之軸線相交於一點，以此點為中心，四個輪子依照離中心不同的距離，各分配不同的速度，便可以特定圓弧半徑繞著障礙物轉彎的目的。

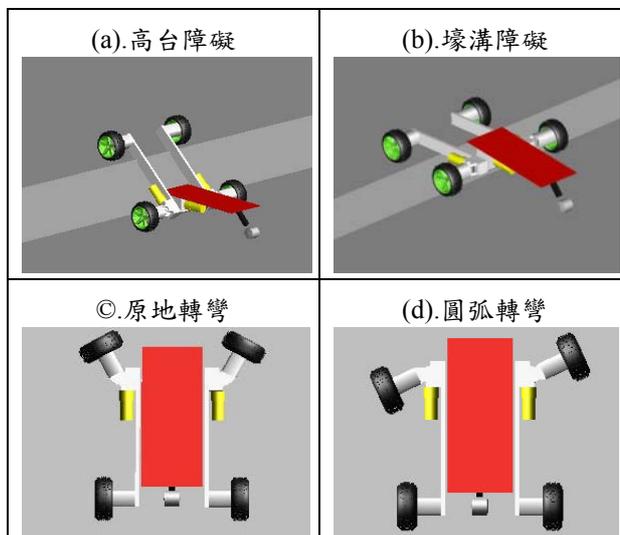


圖4 ACE 機動能力示意圖

當遇到高台其地形的高度已超過輪子的直徑，無法直接穿越障礙高台時，可利用主動式關節將兩輪臂旋轉，使後輪跨上高台，再將車身抬起，在前進時以輔助輪支撐車體，直到四個輪子都跨上高台後，再將輪臂收回，完成跨上高台的動作。而在地表裂縫的跨越方面，如其縫隙的寬度已超過輪子的直徑但小於前後輪距時，ACE 雖無法直接穿越，但可仿照攀爬高台的方式，以兩個主動的關節，完成整個越過壕溝的動作。

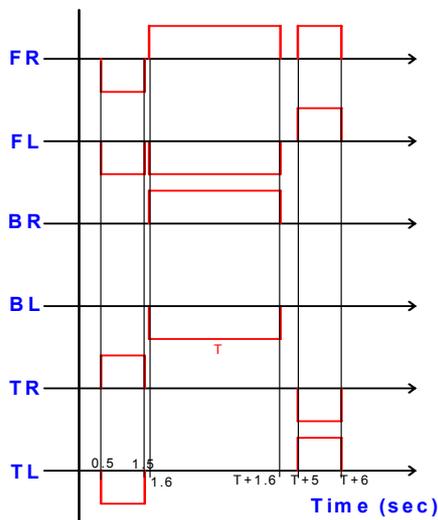
#### 參數化模擬指令的建構

本文利用 ADAMS 的開放語法架構，以巨集 (MACRO) 指令的方式，將 ACE 的運動模態以參數化的方式寫成運動指令 (Motion Commands)，如表 1 所示。如此便可自訂行進的速度、距離、角度等，進行一連串動作順序的模擬，便於結合路徑規劃。而要將這些動作指令參數化，要先將每個動作做動力學的分析，找出每個指令的參數與其運動方程式的關係，利用所輸入的參數得到馬達所需作動的時間，最後經由計算可以得到每個動作的參數化時間公式。ADAMS 提供一個 Function Builder 的功能，配合設計變數的建立，來寫入控制方程式，而重點就是要利用運動方程式來推導出正確的速度與距離後，個別解出馬達時序與各參數間的關係。

表1 ACE 運動指令

Motion commands	Motion Descriptions	Motion Parameters
FWM	Straight forward moving	V(前進速度) D(前進距離)
BWM	Straight backward moving	V(後退速度) D(後退距離)
USTP	Climb up a step	V(馬達轉速) H(階梯高度)
DSTP	Climb down a step	V(馬達轉速) H(階梯高度)
CRG	Stride over the gap	V(前進速度) D(壕溝距離)
RTN	Right turn by arc	H(離障礙物中心距) D(繞中心旋轉角度)
LTN	Left turn by arc	H(離障礙物中心距) D(繞中心旋轉角度)
LSPIN	Spinning on the middle of the rear wheel pair	W(旋轉速度) D(旋轉角度)
RSPIN	Spinning on the middle of the rear wheel pair	W(旋轉速度) D(旋轉角度)

以原地轉彎模擬為例，首先旋轉前輪臂機構，使其輪心法線交於後輪中點的位置，因此便可以交點為軸心，前後輪配合不同的轉速，而達到改變行進方向的目的。各驅動馬達的 STEP functions 控制時序圖如圖 5，以向右轉彎 90 度為例，其模擬結果如圖 6 所示。而其他的動作模擬，皆依此來做參數化模擬的建立。



$$\text{參數化時間 } T = \frac{\theta}{\omega} + \frac{\omega}{\dot{\omega}}$$

圖 5 原地轉彎馬達控制時序圖

為了讓 ACE 能在全域的環境中依照路徑做完整的行動，故本文將參數化指令做了累加模擬的處理。首先將寫好的動作指令 (Motion Command) 檔將所要執行的命令排序好 Import

到 ADAMS 裡，ADAMS 就會依照 Command 檔，每個動作指令和所需的參數來執行此模擬動作，而當每一個模擬動作結束後，便會自動儲存成新的模型，以便輸入下一個指令進行之後的模擬。

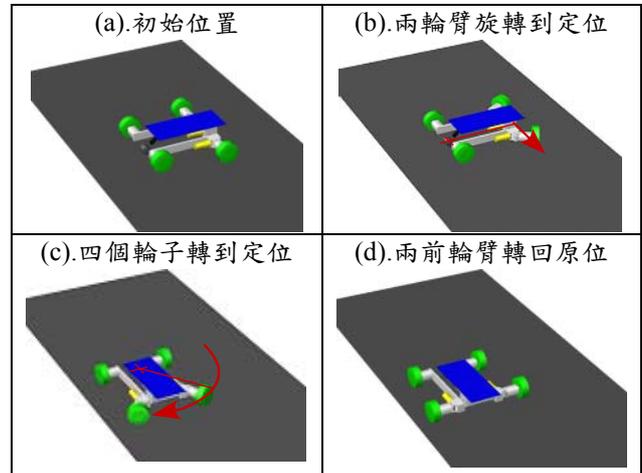


圖6 原地轉彎模擬示意圖

### 路徑規劃與運動模態的結合

本文採用 Modified Tangent Bug (MTB) 路徑規劃法[8]作為全域行動模擬的應用說明，MTB 修改 Kamon 所提出的 Tangent Bug 演算法[7]，簡化其行進型態，並加上穿越高台與壕溝障礙的行進策略，透過障礙物外形的簡化、並將障礙物外形加上安全距離、分解障礙物等動作，以減少 ACE 判斷路徑的時間與控制成本。

MTB 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控制成本的路徑，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 首先將環境障礙簡化成多邊形與圓形的障礙地圖，藉由障礙地圖的建立，簡化判斷時間與控制成本。主要目的是使 ACE 能夠依據此地圖資訊來識別障礙物的幾何外形，並將障礙物區分為可穿越與不可穿越兩種類型，以規劃出可行路徑來。

圖 7 為 MTB 的判斷流程，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，直到以下兩種情況產生：(1) 已到達終點，(2) 偵測到障礙物的邊界。若探測車已到達終點，表示任務

已達成，則可停止動作；反之若行進過程中偵測到障礙物邊界時，亦即探測車已到達障礙物所延伸的安全距離交點，此時則會判斷下一步的障礙處理方式。若所遇到的障礙屬於不可穿越的障礙，則進入「沿著障礙物邊緣行走」模式，因為障礙物邊界已簡化成多邊形與圓弧的組合，因此行進的模態也將會是直線前進、原地旋轉、與圓弧旋轉三種運動模態的組合，直到這個障礙不再阻擋探測車前進至目標為止。

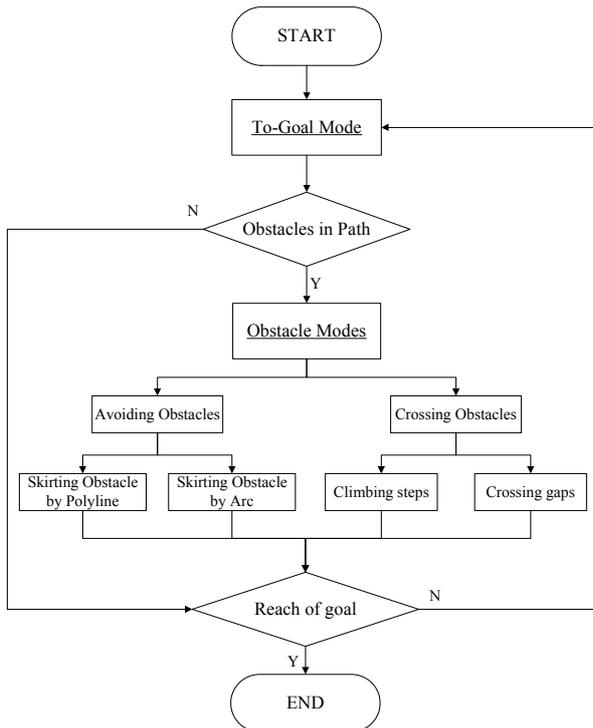


圖 7 ACE 路徑規劃的流程

圖 8 為一個 MTB 路徑規劃的範例，圖中的障礙物皆已經簡化成多邊形與圓形，並將障礙物外形加上安全距離（障礙外圍的虛線）以避免探測車轉向時碰撞到障礙。首先 MTB 採取向目標前進的行進模態，建立一條起點到終點 A 的參考連線，ACE 即會沿著此參考虛線 "s1" 前進，直到 ACE 遇見障礙物或到達終點。當 ACE 到達加上安全距離後的障礙物外形時，即 e 點，接下來進入「障礙模態」(Obstacle Mode)，此障礙為不可穿越的高牆，因此 MTB 採取避障的行進策略，因此時必須進行方向權重的判斷，由 e 到障礙物兩端的可見點之距離來作判斷，在不影響後續路徑的前提下，於此的方向權重顯示 ACE 必須向右轉，進行沿著障礙物邊緣行走之動作，直到 ACE 到達障礙物與終點連線的切點 f 時，則停止沿繞動作，此時 ACE 會再作朝著目標前進

的直線運動，直到遇到新的障礙物再作判斷規劃出新的路徑，如此反覆的執行 ACE 朝著目標前進的直線運動與 ACE 沿著障礙物邊緣行走兩種運動模式直到終點 A。

當 ACE 依據 Modify Tangent Bug 模式到達終點後，表示已經規劃出一條初始的參考路徑，由於此參考路徑可能不是最佳的路徑，可以再將此參考路徑再進行最佳化的動作，如圖 8 中 s1 與 s2 這兩條繞行障礙的路徑，可簡化成 s1' 這條路徑，因 s1' 並未碰到任何障礙，其餘以此類推，可減少探測車動作時間與行進距離。

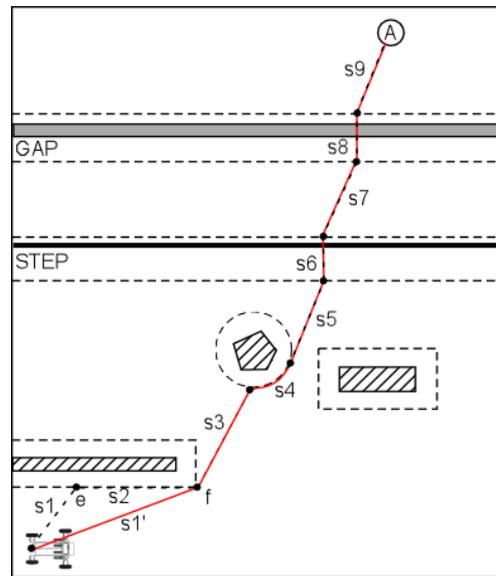


圖 8 路徑規劃範例

### 全域環境行動模擬

#### 全域環境的建立

要進行路徑規劃全域模擬前，必須要具有一個障礙物的整體環境，而在 ADAMS 的障礙環境是由路面檔所建構的，其路面建構的方法，就是在將障礙物以三角形網格(mesh)組立起來，成為多邊型或是方形的障礙物。本研究以二維的障礙地圖作為障礙環境的設定檔，所謂「障礙地圖」紀錄著每個障礙的位置與特性，而筆者設計了一個三維環境的建構介面，由環境的設定檔自動建構全域環境，以簡化路面檔的建立方式。圖 9 為全域環境的一個範例，障礙包括高牆、多邊形不可穿越障礙、高臺、壕溝等。

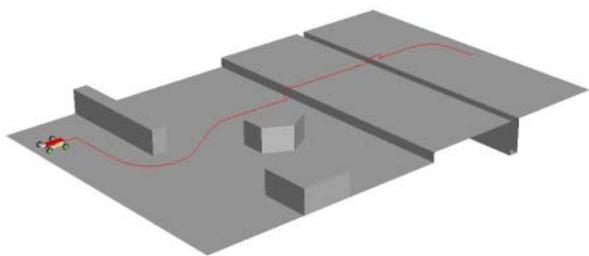


圖9 ADAMS 全域環境

在 ADAMS 障礙物的建構可分為兩種，一種為不可穿越的障礙物，利用 MACRO 來建構；另一種為可穿越的障礙物，則用路面檔來建立。在不可穿越的障礙物部分，在 ADAMS 中是先將這些障礙物寫成 MACRO 如表 2，定義參數後，便可用 Command 檔 Import 到 ADAMS 中執行建構障礙物的命令，最後便可建構出在程式中所規劃好的障礙物。

而在可穿越障礙部份，高台與壕溝則是以路面檔來建立，以 MATLAB 程式先將路面檔格式建立好，只要輸入高台與壕溝的位置與整個路面環境的大小，便可輸出 ADAMS 所需的路面地形檔，將此檔案 IMPORT 到 ADAMS 裡，便會建構出指定高台與壕溝的障礙物地形。

表2 障礙物參數

MACRO	大小	位置	高度
Circle	R	XYZ	H
Polygon(N)	由輸入的位置座標，來決定其形狀大小		H

### 路徑規劃模擬

最後將路徑規劃與全域環境模擬做結合來驗證出 MTB 策略的正確性，如流程圖 10 所示，藉由輸入障礙設定檔，將三維的障礙環境建立之後，藉由所設計之指令接收路徑規劃程式[9]所規劃的動作指令，而藉由事先撰寫的模組化運動模態指令，對應路徑規劃的動作檔(Motion Command)，便可依序進行完成模擬。

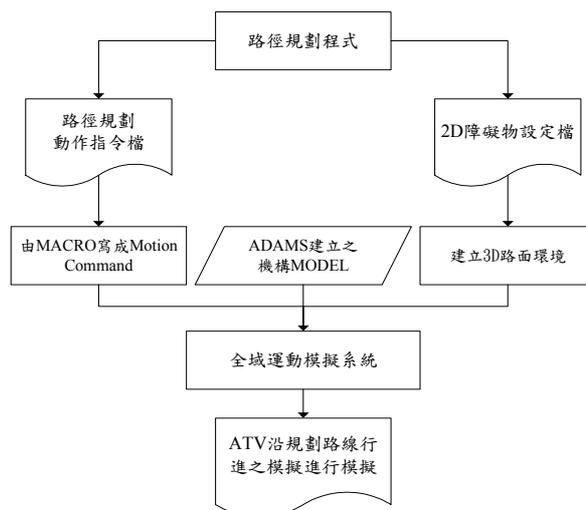


圖10 ADAMS 路徑規劃流程圖

### 應用實例

最後將整個全域行動模擬的流程以一個實例作為應用說明，首先藉由由路徑規劃程式的介面，設定環境的大小，再輸入起點與終點，接著依照座標建立各個種類的障礙物，最後開始執行路徑的規劃，如圖 11。而在程式規劃完成後，會自動輸出三個記錄檔：Motion Command、障礙物檔和路面檔，將這三個檔案 IMPORT 載入 ADAMS 之後，便會依照所規劃的進行模擬，如圖 12 所示，完成了整個路徑規劃模擬的概念。

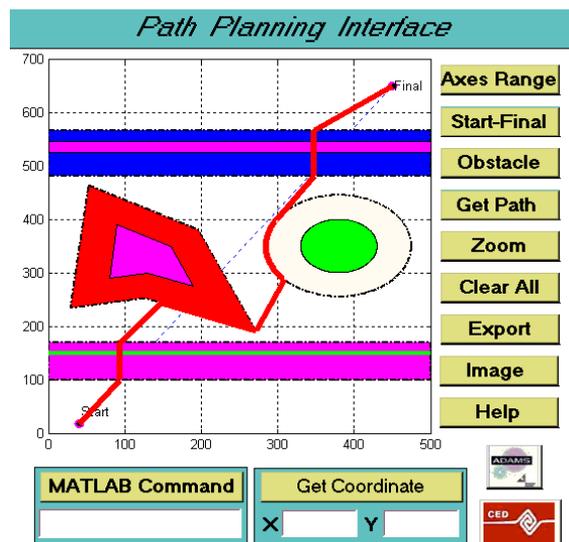


圖11 路徑規劃介面

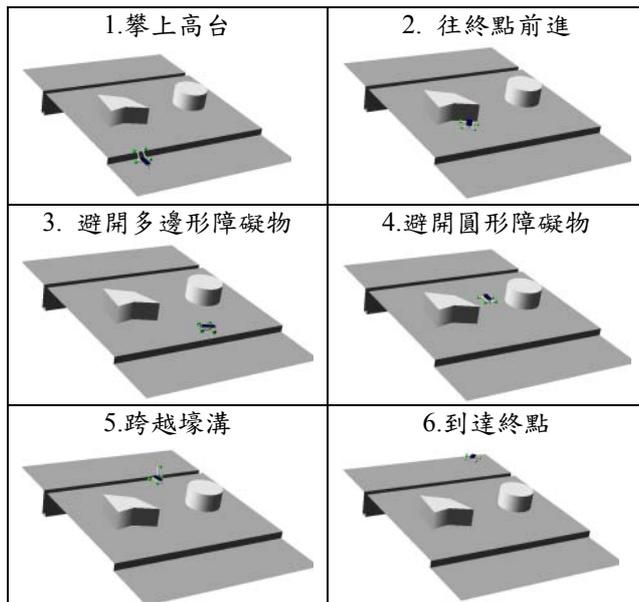


圖12 路徑規劃模擬示意圖

### 結論

本文說明如何利用動態模擬軟體建構出探測車的全域模擬環境，並以適形越障探測車(ACE)為載具，驗證結合機構模擬與路徑規劃的分析架構。其中包括了個別運動模態的參數化模擬，且利用 MACRO 的開放式建構的語法，設計出自動建構整體障礙物環境與運動累加模擬的功能，最後利用 MTB 路徑規劃法則結合了全域環境模擬，在全域的障礙物環境裡，任意指定 ACE 的起點與終點，便可自動規劃路徑避開障礙或越過障礙，得到全域環境的模擬結果，藉以驗證機構控制的策略與路徑規劃法則的正確性，減少因製作原型車所需的時間與成本。

### 誌謝

本研究承蒙國科會支持，計劃編號 NSC 91-2213-E-008-020，特誌謝意。

### 參考文獻

- [1] Waldron, K. J., Vohnout, V. J., Pery, A., McGhee, R. B., "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle", *International Journal of Robotics Research*, Summer, 1984.
- [2] Ozguner, F., S.J. Tsai and R.B. McGhee (1984), "An Approach to the Use of Terrain Preview Information in Rough Terrain Locomotion by a

Hexapod Walking Machine", *The International Journal of Robotics Research* 3 (2), 134-146.

- [3] Hirose, S., 1984, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle", *International Journal of Robotics Research* 3 (2), 113-133.
- [4] Yu, J. and Waldron, K. J., (1991), "Design of Wheeled Actively Articulated Vehicle." *Proceedings of the 2nd National Applied Mechanism and Robotics Conference*, Cincinnati, OH, USA, Vol. 1, VIB.1-1~VIB.1-6.
- [5] Kamon, I., Rimon, E., and Rivlin, E. (1996) "A New Range-Sensor Based Globally Convergent Navigation Algorithm for Mobile Robots," *Proc. 1996 IEEE Conf. Robotics Automat.*
- [6] 李志強, 1999, 可變形越野探測車之動態模擬與分析, 國立台灣科技大學機械工程研究所碩士論文。
- [7] Laubach, S. L., Burdick, J., and Matthies, L.( 1998 ), "An Autonomous Path Planner Implemented on the Rocky 7 Prototype", *IEEE International Conference on robotics & Automation*, May, pp. 292-297
- [8] Yu, J., Liao J. W.-C., Li, M.-Y. and Li, H.-H. , (2003) ,"Design and Motion Simulation of the Autonomous Exploration Vehicle, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> international Conference on Automation Technology*, 9/12~9/14, Chia-Yi, Taiwan.
- [9] 李顯宏, 「適形越障探測車之行動規劃與機電整合」, 國立台灣科技大學機械工程研究所碩士論文(2003)
- [10] Latombe, J.-C. (1991), *Robot Motion Planning.*, Kluwer Academic Publishers
- [11] 周安正, 「汽車操控動態模擬與控制」, 大葉大學碩士班論文(2001)。
- [12] 丁建仁, 「履帶車輛三維運動模擬與動態分析」, 大葉大學碩士班論文(2001)。

## **Locomotion Analysis And Navigation Simulation of Adaptive Terrain Vehicles**

**Min Yang LI**

*Department of Mechanical Engineering  
National Taiwan University of Science and Technology  
Taipei, Taiwan 106, R.O.C.*

**Jyh-Cheng YU**

*Mechanical and Automation Engineering  
National Kaohsiung First University of Science and  
Technology, Kaohsiung, Taiwan 811, R.O.C.*

### **ABSTRACT**

The paper describes a virtual environment for the locomotion analysis and navigation simulation of Adaptive Terrain Vehicles (ATV). The simulation environment can be applied in the verification of the mechanism design, control strategy, and path planning to reduce the prototyping expense and unnecessary design changes. ATV's are usually used in unmanned exploration. The application of the active joints in the vehicle design greatly increases vehicle mobility. The interactions between the navigation terrain and the vehicle are essential to determine the design parameters of vehicle mechanisms. This study applies the advanced dynamics and mechanism simulation system, ADAMS to construct an integrated virtual environment. The motion of ATV is modulized into parametric motion commands using the macros of ADAMS. An interface to establish a 3D navigation environment from an obstacle data file is also designed using the macro functions. A path planner, Modified Tangent Bug, is then adopted and integrated with the simulation commands. The path planner will decompose the generated path into a sequence of motion commands that can be readily used in the navigation simulation to verify the planning strategy. A wheeled explorer, ACE, is investigated as an illustrative example to demonstrate the integration scheme.

Keywords: Terrain vehicle, Virtual prototype, ADAMS,  
Path planning