

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫五-動態多代理器群組運動之路徑規劃(2/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2213-E-002-052-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：王立昇

計畫參與人員：吳宣誼、李璟和

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 5 月 31 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號： NSC93-2213-E-002-052

執行期間： 93年8月1日至 94年7月31日

計畫主持人：王立昇

計畫參與人員：吳宣誼、李璟和

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學應用力學研究所

中華民國 94 年 5 月 30 日

中文摘要

關鍵詞: 動態代理器、路徑規劃、即時追蹤、控制系統、剛體平面運動磨擦力

本計畫擬以三年時間完成多個動態代理器(Dynamic Agents)以群組方式運動時，避開障礙物之路徑規劃工作。本年度之主要工作為發展雙代理器之路徑規劃與控制系統。經過近一年努力，在過去的基礎上，我們完成了兩台無人自走車的硬體設計及其路徑規劃與控制系統之整合開發，利用無線網路傳輸建構各次系統間資訊的交換通路。在進行兩車協同推移物件任務時，我們推導了物件所受剛體平面運動磨擦力公式，對於受磨擦力之剛體平面運動能更精確的掌握。初步實驗結果顯示，我們已可實現雙代理器執行協同任務之目標，期望第三年能在現有的基礎上更進一步改善系統效能，並與其他子計畫之代理器結合，達成多代理器整合之目標。

英文摘要

Keywords: dynamic agents, path-planning, real time tracking, control system, Friction of Rigid Body's Planar Motion

The main theme of this project is to develop path-planning algorithms for the group motion of many dynamic agents (multi-agents) to achieve individual or common goals while possible collisions are avoided. The work of the second year is to design the path planning and control system for two agents. After nearly one-year endeavour, based upon previous achievements, we have completed the hardware design of two unmanned vehicle, and the associated integration of path planning system and control system. The data flow among subsystems is realized by using wireless network. In the development of the coordinated operation in jointly pushing an object, we derived the formula for the friction of rigid body's planar motion, which makes it possible to control such motion more precisely. Preliminary experimental results show that the developed system can indeed achieve the goal of group motion control of two agents. It is anticipated that the system performance can be enhanced greatly in the next year of the project, and the target of multi-agent coordination and control can be attained through the collaboration with other sub-projects.

1. 前言

本年度之主要任務為發展雙代理器之路徑規劃與控制系統。前一年我們已完成單代理器--無人自走車之設計，並發展了路徑規劃與控制系統，使得自走車能依所設計之最佳路徑行進。今年則完成第二台無人自走車之設計與硬體製作，並規劃雙車系統之群組運動及協同工作，使得雙自走車能合作推動一長條剛體物件。為求協同工作之順利進行，雙自走車間及其與主控站間必須時時交換資訊，前一年我們使用無線數據機(Radio Modem)傳輸主控站及單自走車之間的資料，但該方式受限於點對點的限制，並不適用於雙代理器及主控站系統。今年則採用無線網路建構各次系統間資訊的交換通路，成功地解決了訊號傳遞的問題。此外，在推移物件時，遇到了磨擦力如何決定的問題[7][8]，我們利用基本原理推導了物件所受剛體平面運動磨擦力之公式，使得受磨擦力之剛體平面運動能更精確的掌握。初步實驗結果顯示，我們所發展的整合架構與設計，已可實現雙代理器協同任務之目標。期望本計畫第三年能在現有的基礎上更進一步改善系統效能，並與其他子計畫之代理器結合，達成多代理器整合之目標。

本精簡報告除本節外，以下分成六節討論。第二節介紹雙無人自走車系統架構，我們採用的是半集中半分散的方式，路徑規劃由主控站執行，計算得到後傳至自走車實現。第三節討論各自走車追蹤控制法則，我們採用模糊控制的理論，但引入視線角的觀念，使得自走車受到干擾時，亦能很快回到規劃路徑。第四節討論雙無人自走車推動物件的控制法則，我們利用最小曲率的觀念設計各自走車輪速。第五節則探討剛體平面運動時磨擦力的影響，過去文獻多以作用在質心的磨擦力呈現，但若考慮面的接觸，事實上亦有磨擦力矩的出現，我們具體的導出了磨擦力與磨擦力矩的表示式。第六節呈現我們雙無人自走車協同推動一長條物件的實驗結果，雙代理器協同任務之目標已初步達成。最後，第七節作一簡單的結論。

2. 雙無人自走車系統架構

我們所規劃的雙無人自走車系統可分為三個部分來說明(參考圖2-1)。主控站依據雙自走車目前的的位置與姿態，配合任務需求，設計載具的運動路徑[1]，並將此路徑透過無線網路[2]送至載具端，主控端亦可指定載具的前進速度或命令停止，以達成各自走車間的合作。各自走車或載具端在接到啟動命令後，立即連線至GPS參考站接收導航資料進行自我定位，並利用電子羅盤判定姿態，俟與主控站連線正常後，傳送載具位置與姿態，並隨後接收主控站傳來之參考路徑。得到參考路徑後即進行路徑追蹤控制，此追蹤工作可隨時被停止或變換路徑。各載具均被視為被動端，即載具只能依主控端所設計的參考路徑移動，載具間並無通訊連線存在。第三部分則為GPS參考站，為求定位精度達公分級，我們採用KGPS(Kinematic GPS)[3]的方法，利用載波相位作差分定位，當載具連線至GPS參考站時，參考站即提供持續GPS的導航資料，載具端即可進行KGPS定位。系統各部分間資料的傳遞與連繫，皆使用無線網路(802.11)作為通訊媒介。整個系統採半集中半分散式控制架構，即所有的資訊雖均匯集至主控端，但載具的控制由載具自行負責，以期能同時控制多部載具。

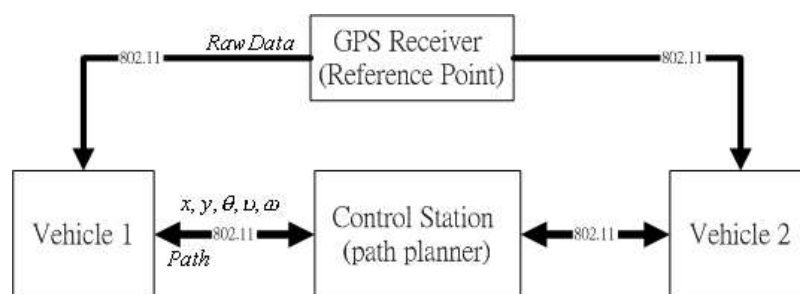


圖2-1

在前一年度工作中，我們已完成一台無人自走車之製作。今年則依據過去經驗，再設計並製作另一台無人自走車，圖 2-2 為載具的運動機構外觀，包括惰輪、馬達驅動器、減速齒輪、伺服馬達、驅動輪等。圖 2-3 為載具的整體外觀，包括 GPS 接收機、電子羅盤、控制用電腦及電源等設備。



圖 2-2 運動機構外觀

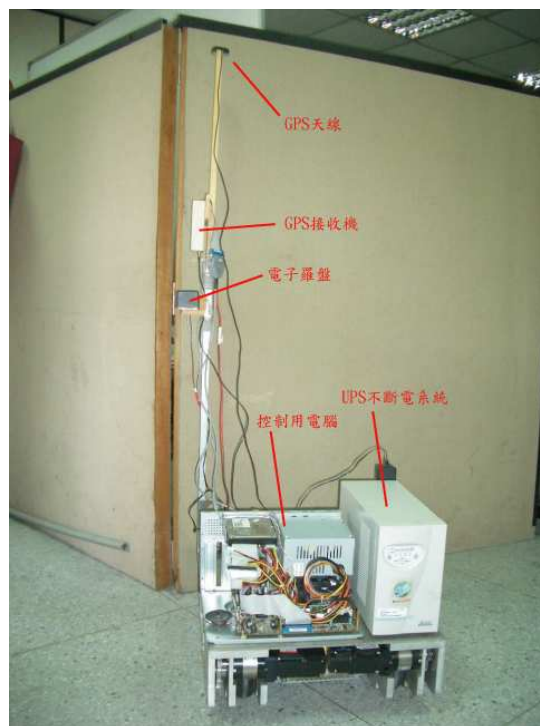


圖 2-3 無人自走車全貌

3. 自走車追蹤控制法則

在接受到主控站之規劃路徑後，自走車即進行追蹤控制之工作。我們從所設計路徑可得知載具在路徑上應有的線速度 v 及角速度 ω ，即可利用轉換公式，控制兩驅動輪速度，達到路徑追蹤的目的。然而，若載具的初始位置不在設計的路徑上，或載具在運動時由於環境或感測器的影響，以至於無法確實追蹤路徑時，我們必須對 v 及 ω 作補償使得載具能回到設計的路徑上。此概念在文獻[4][5]中提出，但未曾應用於實際追蹤控制問題上，其系統架構如圖 3-1 所示。

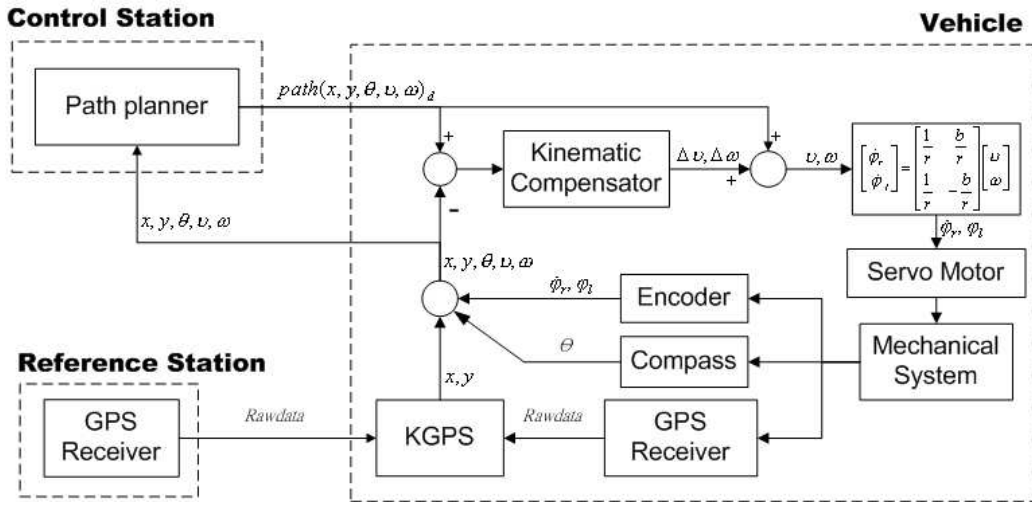


圖 3-1 載具的控制系統架構

我們採用模糊控制的理論計算速度的補償量，輸入變數除一般的距離 d_e 與姿態角 θ_e 外，我們納入視線角(line of sight angle)的觀念：(參考圖3-2)

$$\vartheta_e = \tan^{-1} \left(\frac{\eta_e / \xi}{\zeta_e} \right). \quad (1)$$

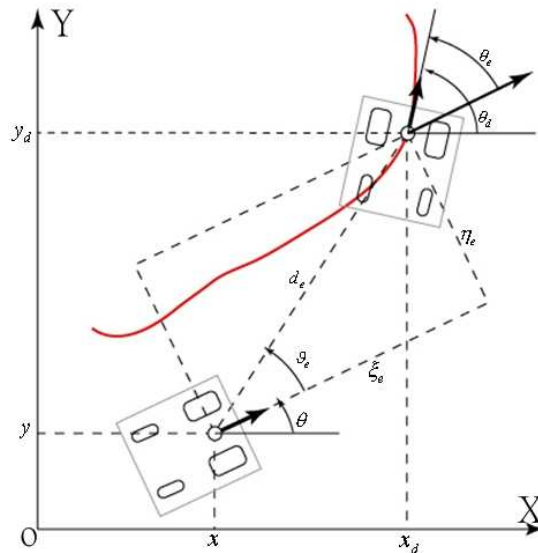


圖 3-2 參考路徑與載具姿態誤差

輸出則為 $(\Delta v, \Delta \omega)$ 。模糊規則建立的準則為：當距離 d_e 接近零時，調整載具的角速度 ω ，比調整線速度 v 來得重要，所以此時的 v 會較小；反過來說，當 ϑ_e 接近零而 θ_e 較小時，載具應較快速前進而不會有太大的轉彎動作，因此 v 等比於與 ϑ_e ，而 ω 較小；當距離 d_e 大， ϑ_e 較小而 θ_e 較大時，則應在大幅度前進前調整姿態角使得 ω 等比於 θ_e 。在此原則下所建立之規則庫，輔以適當的歸屬函數，即可利用高度法作解模糊化動作，得到輸出值。

上述的路徑追蹤控制系統可用於單一自走車，亦可用於雙自走車的架構，其系統的完整架構如圖 3-3 所示。

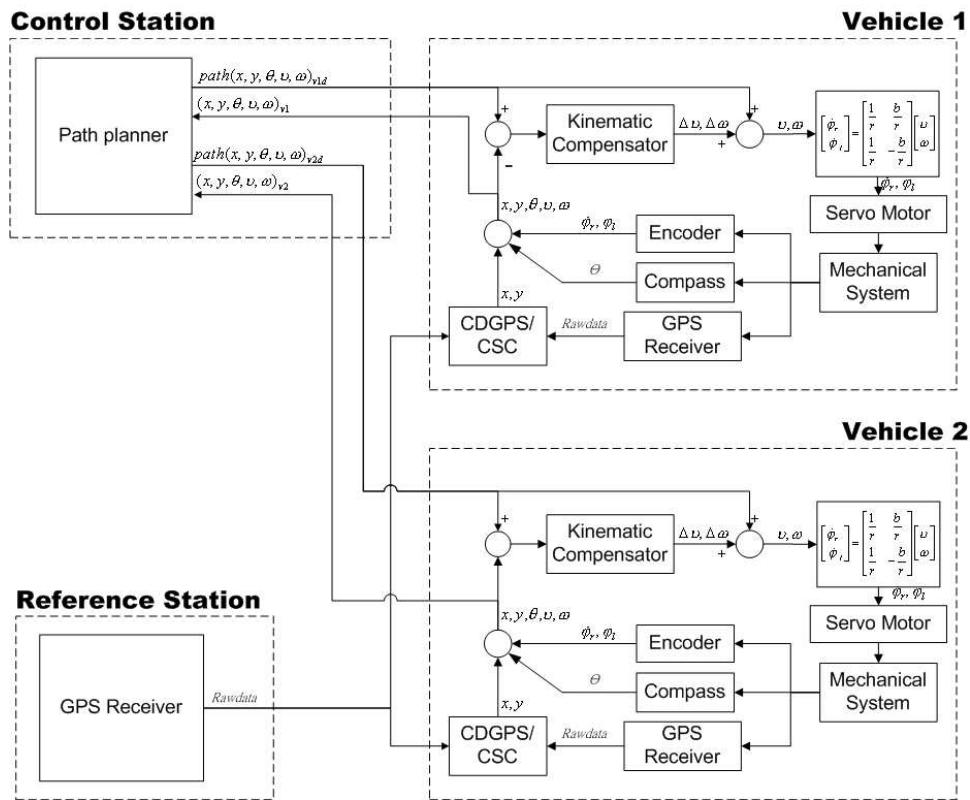


圖 3-3 完整系統架構

4. 雙無人自走車推動物件控制法則

我們所欲完成之雙無人自走車協同任務為推動一長方體在平面上運動，參考圖 4-1。假設載具推動物件的施力點不會隨著時間的變化而移動位置，且假設地面摩擦力夠大，只有當載具推動物體時物體才會產生移動。

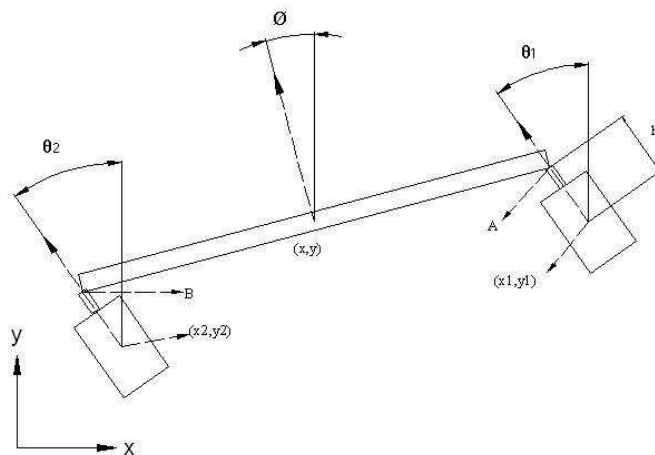


圖 4-1

令 A, B 為兩自走車與物件之接觸點，由圖中的幾何關係可得

$$\begin{cases} x_A = x_1 - h \sin \theta_1 \\ y_A = y_1 + h \cos \theta_1 \\ x_B = x_2 - h \sin \theta_2 \\ y_B = y_2 + h \cos \theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

對(2)式微分一次，得到 A, B 兩點的速度

$$\begin{cases} \dot{x}_A = \dot{x}_1 - h\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ \dot{y}_A = \dot{y}_1 - h\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{x}_B = \dot{x}_2 - h\dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \\ \dot{y}_B = \dot{y}_2 - h\dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

假設物件之質心在 A, B 的中點，我們有

$$(x, y) = \frac{(x_A, y_A) + (x_B, y_B)}{2}$$

再利用幾何與約束關係，可得物件質心速度、姿態角速度與各自走車左右輪轉速的關係：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \frac{R}{4c} \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 - \frac{h}{a} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 + \frac{h}{a} \cos \theta_1 & -\sin \theta_2 - \frac{h}{a} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 + \frac{h}{a} \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 - \frac{h}{a} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 + \frac{h}{a} \sin \theta_1 & \cos \theta_2 - \frac{h}{a} \sin \theta_2 & \cos \theta_2 + \frac{h}{a} \sin \theta_2 \\ I & J & K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{1r} \\ \omega_{1l} \\ \omega_{2r} \\ \omega_{2l} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 I, J, K, L 如下所示

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{D} \left[\left(\sin \theta_1 + \frac{h}{a} \cos \theta_1 \right) \sin \phi + \left(\cos \theta_1 - \frac{h}{a} \sin \theta_1 \right) \cos \phi \right] \\ J &= \frac{1}{D} \left[\left(\sin \theta_1 - \frac{h}{a} \cos \theta_1 \right) \sin \phi + \left(\cos \theta_1 + \frac{h}{a} \sin \theta_1 \right) \cos \phi \right] \\ K &= \frac{1}{D} \left[\left(-\sin \theta_2 - \frac{h}{a} \cos \theta_2 \right) \sin \phi + \left(-\cos \theta_2 + \frac{h}{a} \sin \theta_2 \right) \cos \phi \right] \\ L &= \frac{1}{D} \left[\left(-\sin \theta_2 + \frac{h}{a} \cos \theta_2 \right) \sin \phi + \left(-\cos \theta_2 - \frac{h}{a} \sin \theta_2 \right) \cos \phi \right] \end{aligned}$$

令

$$M = \frac{R}{4c} \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 - \frac{h}{a} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 + \frac{h}{a} \cos \theta_1 & -\sin \theta_2 - \frac{h}{a} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 + \frac{h}{a} \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 - \frac{h}{a} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 + \frac{h}{a} \sin \theta_1 & \cos \theta_2 - \frac{h}{a} \sin \theta_2 & \cos \theta_2 + \frac{h}{a} \sin \theta_2 \\ I & J & K & L \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad \omega = \begin{bmatrix} \omega_{1r} \\ \omega_{1l} \\ \omega_{2r} \\ \omega_{2l} \end{bmatrix}$$

若物件之軌跡為已知，可以得到向量 b 。係數矩陣 M 為一個 3×4 的矩陣，因此，欲求得 ω ，也就是控制時的輸入變數，未知數數目大於方程式的數目，解可能有無限多個。但我們希望載具運動軌跡的曲率不能太大，以滿足先前接觸點不會滑動的假設，因此我們尋求載具運動曲率最小的解。依曲率公式可得各載具軌跡曲率為

$$\kappa = \frac{(\omega_l - \omega_r)}{a(\omega_r + \omega_l)} \propto (\omega_l - \omega_r)$$

求解問題可因而轉化為一受約束最佳化問題：

$$\begin{aligned} & \min (\omega_{1r} - \omega_{1l})^2 + (\omega_{2r} - \omega_{2l})^2 \\ & \text{subject to } b - M\omega = 0 \end{aligned}$$

利用 Lagrange multiplier 法即可求得最佳解，進而達到協同任務控制的需求。

為求驗證上述方法的正確性，我們假設所擬推動的物件軌跡如圖 4-2 所示。模擬結果呈現於如圖 4-3，與圖 4-2 比較，可知規劃的與模擬的軌跡完全符合，而兩台載具也依照運動方程式的推導隨著被推物體的運動而移動，由此可說明此協同任務策略是可行且成功的。

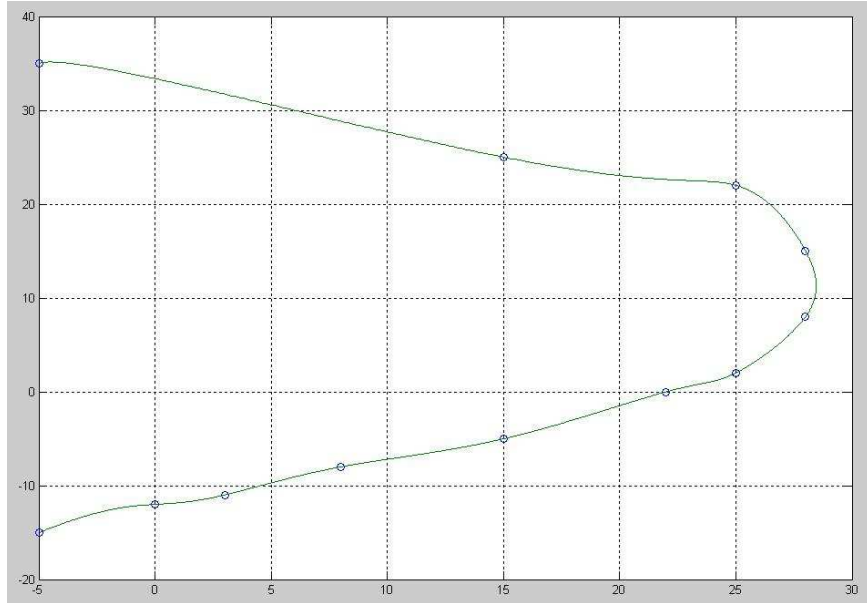


圖 4-2

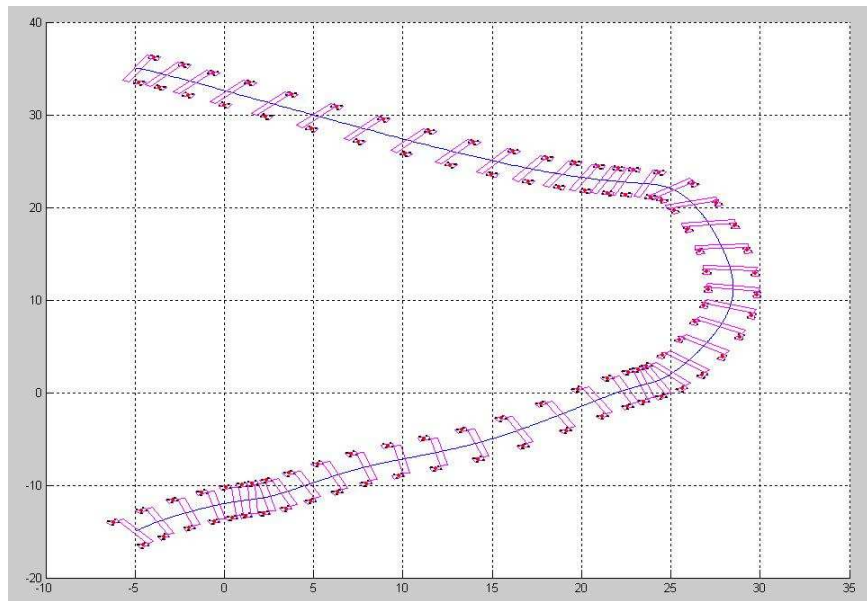


圖 4-3

5. 剛體平面運動之磨擦力與磨擦力矩

在雙無人自走車協同執行推動一長方體在平面上運動之任務時，為求精確地控制物件運動，必須考慮磨擦力的影響。過去文獻多僅納入作用在質心的磨擦力[9]，但若與地面接觸為一個面，磨擦力矩是不可避免的。假設此一長為 D 之長方體可分割成多個長度為 dl 的小單位體，則小單位體上所受之磨擦力為

$$F_p^f = -\frac{\dot{r}_p}{|\dot{r}_p|} \mu(dm)g = -\mu\rho g \frac{\dot{r}_p}{|\dot{r}_p|},$$

其中 μ 為摩擦係數， ρ 為長方體線密度， \dot{r}_p 為單位體的速度， g 為重力加速度。假設 μ 、 ρ 、 g 均為常數，對整個長方體做積分，可得到地面與長方體間的摩擦力與摩擦力矩

$$F^f = -\mu\rho g \int_{-D}^D \frac{\dot{r}_p}{|\dot{r}_p|} dl \quad (5)$$

$$T^f = \int_{-D}^D (-le_1) \times (-\mu\rho g) \frac{\dot{r}_p}{|\dot{r}_p|} dl.$$

現假設一載具推動此長方體，如圖 5-1 所示。納入上述之摩擦力與摩擦力矩後，載具之運動方程可推導得：

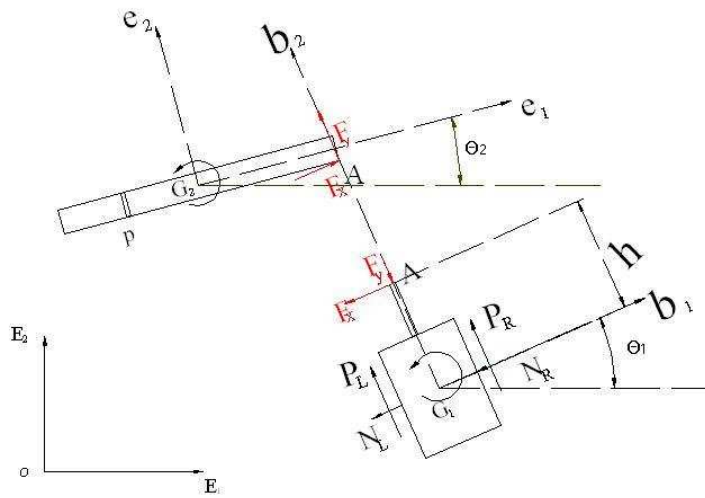


圖 5-1

$$\begin{aligned} (M_1 + M_2)\dot{V}_1 &= M_2(h\dot{\theta}_1^2 + D\ddot{\theta}_2 \cos\theta - D\dot{\theta}_2^2 \sin\theta) + (PL + PR) \\ &\quad - \mu\rho g(V_1 - D\dot{\theta}_2 \cos\theta) \int_{-D}^D \frac{1}{\sqrt{R}} dl + \mu\rho g\dot{\theta}_2 \cos\theta \int_{-D}^D \frac{l}{\sqrt{R}} dl \\ (I_1 + M_2 h^2)\ddot{\theta}_1 &= (PR - PL)a + M_2 h[-V_1\dot{\theta}_1 + D\ddot{\theta}_2 \sin\theta + D\dot{\theta}_2^2 \cos\theta] \\ &\quad - \mu\rho gh(h\dot{\theta}_1 - D\dot{\theta}_2 \sin\theta) \int_{-D}^D \frac{1}{\sqrt{R}} dl + \mu\rho gh\dot{\theta}_2 \sin\theta \int_{-D}^D \frac{l}{\sqrt{R}} dl \\ I_2\ddot{\theta}_2 &= D(P_L - P_R - M_1\dot{V}_1)\cos\theta - D(N_L + N_R + M_1V_1\dot{\theta}_1)\sin\theta \\ &\quad + \mu\rho g(V_1 \cos\theta + h\dot{\theta}_1 \sin\theta - D\dot{\theta}_2) \int_{-D}^D \frac{l}{\sqrt{R}} dl - \mu\rho g\dot{\theta}_2 \int_{-D}^D \frac{l^2}{\sqrt{R}} dl \end{aligned}$$

其中積分運算部分可利用積分表[10]求得：

$$\int_{-D}^D \frac{1}{\sqrt{R}} dl = \frac{1}{\sqrt{c}} * \sinh^{-1} \left[\left(\frac{2cD+b}{\sqrt{\Delta}} \right) - \left(\frac{2c(-D)+2b}{\sqrt{\Delta}} \right) \right] = A$$

$$\int_{-D}^D \frac{l}{\sqrt{R}} dl = \frac{\sqrt{(a+b*D+c*D^2)} - \sqrt{(a+b*(-D)+c*(-D)^2)}}{c} - \frac{b}{2c} A$$

$$\int_{-D}^D \frac{l^2}{\sqrt{R}} dl = \left(\frac{D}{2c} - \frac{3b}{4c^2} \right) \sqrt{(a+b*D+c*D^2)} - \left(\frac{(-D)}{2c} - \frac{3b}{4c^2} \right) \sqrt{(a+b*(-D)+c*(-D)^2)} + \left(\frac{3b^2}{8c^2} - \frac{a}{2c} \right) A,$$

其中

$$\Delta = 4(V_1^2 + \dot{\theta}_2^2 D^2 + h^2 \dot{\theta}_1^2 - 2DV_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta - 2hD \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta) * 2\dot{\theta}_2^2,$$

$$a = (V_1^2 + \dot{\theta}_2^2 D^2 + h^2 \dot{\theta}_1^2 - 2DV_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta - 2hD \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta),$$

$$b = 2(\dot{\theta}_2 D - V_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta - h \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta), \quad c = 2\dot{\theta}_2^2.$$

為檢驗磨擦力的效果，我們利用MATLAB 6.5進行模擬實驗，整個模擬環境假設是在一個絕對水平的平面上，載具的初始位置是在(5,5)、姿態角 $\theta_1=0$ ，被推物體的初始位置在(4,5.5)、姿態角 $\theta_2=0$ ，其餘的參數設定說明如下

$P_L = 0.2(N)$	$D=1(m)$	$M_2 = 1(kg)$
$P_R = 0.2(N)$	$a=0.3(m)$	$\mu = 0.2$
$N_L = \mu_1 * (M1/2) * g$	$h = 0.5(m)$	$\mu_1 = 0.01$
$N_R = \mu_1 * (M1/2) * g$	$M_1 = 10(Kg)$	$\rho = 0.5(kg/m)$

模擬結果如圖5-2所示。當左右兩側馬達給予車子正向推力相同時(僅有+y方向的位移)，若沒有考慮磨擦力時，在慣性座標上來看，物體只受y方向上的外力應該只會產生y方向的位移變化，但由上述模擬結果可知，物體質心隨著時間的增加，產生了+x及-y的平移、+ θ 轉動的變化，與我們日常生活中看到的現象符合，證明了所推導的方程式是正確的，成功的將磨擦力對物體運動的影響完整的表現出來。

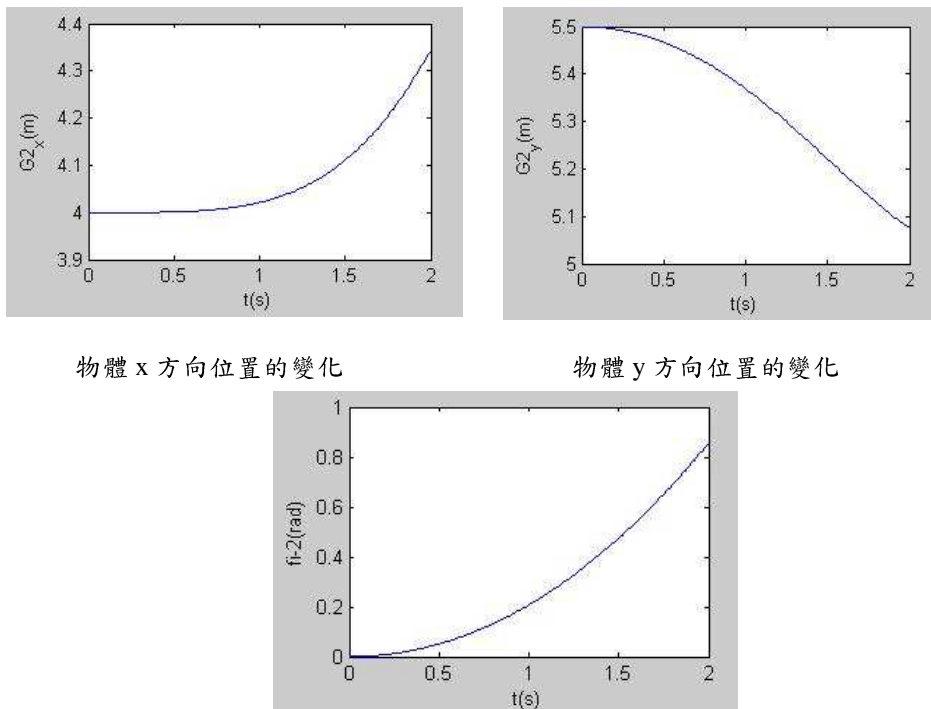


圖 5-2 物體姿態的變化

6. 實驗結果

在前述各面向探討雙無人自走車協同推動一長條物件的任務後，我們著手進行硬體實驗。首先檢測單自走車追蹤路徑的能力，其結果如圖 6-1 所示。可推論我們在第三節所發展之控制法則確實可行。

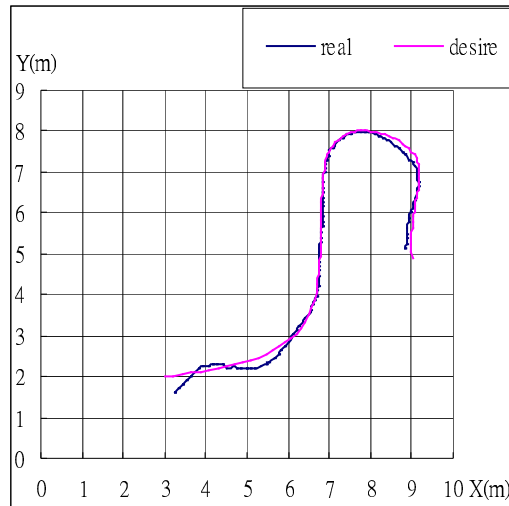


圖 6-1

其次，我們進行雙無人自走車協同實驗。至本報告撰寫日止，我們完成了平行推進的實驗。實驗過程如圖 6-2 所示。



圖 6-2

利用 KGPS 所測得的軌跡如圖 6-3 所示。其中突然的偏離並非載具位置突然變化，而是遇到 GPS 訊號周波脫落所致。該圖表現了兩部載具由不同的初始位置，各自向 y 軸前進，並同時調整前進速度以達到兩載具在行進時，其 y 軸的位置相同，方能完成協同推移長方體的任務。

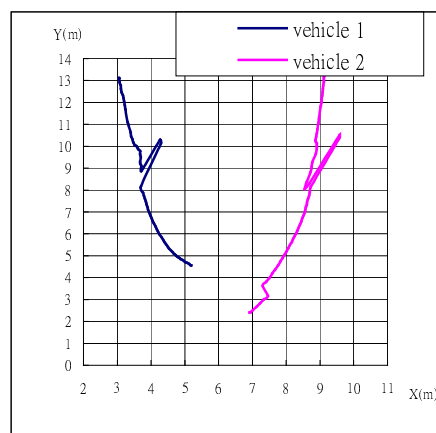


圖 6-3

7. 結論與展望

三年的整合型計畫進行迄今，可謂相當順利，亦已有若干的成果。在與其他子計畫的合作中，我們學到了網路控制設計的基本原則。第三年將進入實質整合的階段，期望能在現有的基礎上，更進一步改善系統效能，並與其他子計畫之代理器結合，達成多代理器協同完成任務之目標。

參考資料

- [1] Kambhampati, S and Davis. L, "Multiresolution path planning for mobile robots", Robotics and Automation, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol 2, Issue 3, Sep 1986 pp.135-145
- [2] Jon C.Snader, "Effective TCP/IP programming", Pearson, 2000
- [3] Chen, H.-S, Wang, L.-S and Chang, F.-R, "Long-duration carrier-smoothed-code algorithm for GPS positioning" Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000 13-16 March 2000 pp.112-117
- [4] Pu-Sheng Tsai, Li-Sheng Wang, Fan-Ren Chang, Yih-Hsing Pao "Hierarchical Tracking Control of Wheeled Mobil Robot," submitted for publication, 2005.
- [5] Kanayama, Y, Kimura, Y, Miyazaki, F, Noguchi, T, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot" 1990 IEEE International Conference, Vol.1 May 1990 pp.384-389
- [6] S,Sawada ,M.Inaba and H.Inoue, "Pushing Operation guided by Visual Feedback", Proc. of RSJ'87 pp.599-600,1987
- [7] M.A Peshkin "The Motion of Pushed ,Sliding Workpiece", IEEE.J of Robotics and Automation , Vol.4 , No.6, pp.269-298,1988
- [8] T.Yoshikawa and M.Kurusu "Identification of the Center of Friction from Pushing an Object by Mobile Robot", IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and System IROS'91 Nov 3-5, pp.449-454
- [9] Yoshikuni Okawa and Ken Yokoyama , "Control of a Mobile Robot for the Push-a-Box Operation", International IEEE Conference on Robotics and Automations pp.761-766,1992
- [10] I. S.GradshTEyn and I. M.Ryzhik , *Table of integrals, series, and products.*