

# 實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器適合作為 循跡式小型載具其方向速度控制器之設計

周立強 程安邦 張邦彥

國立宜蘭大學生物機電工程學系

26047 宜蘭縣宜蘭市神農路一段一號

## 摘 要

本文目的在於實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器 (programmable logical controller, PLC) 作為前輪導向結合後輪差速之循跡式小型載具其方向速度控制器之設計。我們運用區塊化電路的觀念，首先以布林代數演算法演繹控制核心之接點邏輯電路，接著以閃爍及自保持之群組接點電路，整合控制核心內之接點邏輯電路，再有系統地轉譯為 PLC 之階梯電路程式。經測試結果顯示此方式之實現是可行，且亦提供實現設計其他型式循跡自走載具方向速度控制器的一個發展範例。

**關鍵詞：**布林代數，可程式控制器，前輪導向，後輪差速，循跡式自走載具

## Design and Implementation of a Boolean Algebra-Algorithm-Based Programmable Controller Suitable for Use in Direction-Speed Control of a Line-Following Vehicle

LI-JOHN JOU, AN-PAN CHERNG and PANG-YEN CHUNG

*Department of Biomechatronic Engineering, National IILan University*

*No.1 Sec. 1, Shen-Lung Road, Yilan City 26047, Taiwan, R.O.C.*

## ABSTRACT

This study designs and implements a programmable controller based on a Boolean algebra algorithm for use in direction-speed control of a line-tracing vehicle with front-wheel-steering associated with a back-wheel-differential mechanism. Based on the concept of grouping circuits, switching logical circuits in the control core were deduced using a Boolean algebra algorithm. The grouped switching circuits with flicker and keeping functions were then integrated into core switching logical circuits. Using this design procedure, the integrated switching logical circuits can be systematically converted to a program used for a programmable controller. The performance results indicate that implementation of such a methodology works. The example can also serve as a case study to show how to design and implement a direction-speed controller for other automated guideline vehicles.

**Key Words:** Boolean algebra, programmable controller

## 一、緒論

布林代數式是離散數學的一支，尤其在計算機科學與數位邏輯電路設計上扮演相當重要的角色 [13]。早在 1938 年 Shannon 即以符號數學與邏輯 (symbolic mathematics and logic) 來演算化簡接點電路 (relay and switching circuits) [18]。在後來的應用於 1956 年 McCluskey 發表「布林函數之最小化」(Minimization of Boolean Function) [16]，即以列表的方法來化簡邏輯系統中輸入與輸出間布林函數式，可解決接點邏輯電路簡化問題。

黃與蘇氏在 1990 年將布林代數用於電腦輔助製程設計的最佳化。依一定的邏輯演算出每一加工物件的製造程序，並以布林代數結構來表示所有加工的順序與狀態，最後配合動態規劃以求出最佳的製造程序 [7]。1993 及 1995 年蘇等人連續以布林代數邏輯來推導在列載具運行時各種號誌顯示、速度與轉軸器反位關係，並研究出三種以布林代數式表示的模式，發展了鐵路自動控制數學模式 [8, 10]。1996 年游與黃氏將布林代數融入至類神經網路與模糊理論的系統設計理念中 [9]。1995 年 Tseng 與 Huang 提出以網路分割特性與交換邏輯理論，將前饋式類神經網路缺點改善，設計一邏輯函數類神經網路，使學習成功率提高及速度變快 [19]。周立強與游哲文將布林代數演算法則應用在避障載具的可程式控制器階梯電路程式演譯 [1]。2005 年 Jou 等人結合空調程序與濕空氣線圖原理以布林代數演算法實現嫁接苗癒合室之溫濕度聯控設計 [14]。Roanes-Lozano 等人 [17] 使用 Maple 軟體以布林邏輯模式決定嵌入於鐵道聯鎖安全控制系統。因此布林代數演算對於決定邏輯控制路徑而言，是一個嚴謹的運算法則。

差動變速在過去曾被證實相較以往的控制策略可以獲得較佳的方向及速度控制，以時間比例調控方式調整兩輪間速差可簡易獲得，也可隨著地面環境及載具本體之運動狀態不同而作改變 [11]。在前輪導向之自走載具研究開發上，必須掌握感測器控制系統，例如將裝置於載具上的感測器偵測預先位置於固定位置標記，然後藉由對控制系統馬達加以回饋補償，以校正其左右輪的位置及驅動輪之轉動角度 [15]。也有應用角度量測法作為無人搬運載具系統的導引控制，其系統裝置採用低功率雷射、旋轉鏡等光學元件，用以量測數個同性質的反射標記角度，並持續進行信號回饋及角

度更新工作 [20]。一般也有利用市售遙控開關之超音波感測器，以一個發射器及兩個接收器為一組，裝置於載具左右兩側，用以偵測載具與作物距離，一旦超過容許範圍則以複合脈寬調變控制左右輪差速進行路徑修正 [4]。若前輪選用滾輪式惰輪在修正方向時，載具易因滾輪側向磨擦而偏離路徑，為求系統穩定，本研究以前輪導引系統其類似方向盤之策略控制前輪方向，如此一來可達到節省行走時間及過彎時的圓滑度，使載具能以更圓滑的行進曲線修正方向，避免衝出軌跡和過度方向修正等問題。

本文以前輪導向之自走載具配合複合脈寬調變 (pulse width modulation, PWM) 原理及接點邏輯電路之方式控制調整後兩輪差速達到載具本體方向修正及變速功能，不同於過去僅以底盤動力馬達正反轉，配合有段變速在載具本體方向修正及變速的作法 [6]，此仍應用布林代數演算法演譯 PLC 的階梯電路程式，其可解決條件邏輯控制中存在的複雜邏輯問題，階梯電路程式演譯過程中以 Excel 電子試算表檢驗其邏輯的正確性 [2]，最後配合外部線路的實作實現此一類型循跡自走載具的方向速度控制。最後在同一載具本體分別以後兩輪馬達正反轉及前輪導向結合差動變速之輸出控制方式，在所規劃之循跡路徑上進行載具行進測試。

## 二、實驗設備與方法

### (一) 載具本體與硬體電路規劃製作

#### 1. 前輪導向與載具本體結構

前輪導向系統具有迴轉半徑小，機動性高等優點，更因前輪導向之自走載具對循跡路線作方向修正，較以往僅使用後輪正反轉，可降低行進方向過度修正問題，更能提升載具轉彎的流暢度。前輪轉向系統主要是藉由馬達通電時間長短，決定載具偏轉角度之大小。在前輪導向之自走載具設計方向上以聯結載具為構想，前頭為前輪導向系統，以直流驅動馬達帶動載具輪之轉動角度以修正自走載具行走方向。後身為載具結構，負責承載大部份的零件，並以兩後輪作為傳動輪。所以在前輪導向構造設計上，使用兩顆惰輪作為導向輪以增加迴轉半徑，並製作聯軸器作為導向系統與前輪驅動馬達的聯結。本體方面使用電木板做為底盤以方便加工，配合軸承座與聯軸器作為傳動聯結，於底盤上方再以壓克力板製作一層板，用以放置控制器及燈號。最後再組裝前輪導向

實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器適合作為循跡式小型載具其方向速度控制器之設計

系統與載具，利用前輪驅動馬達(固定於載具底盤上)與聯軸器(固定於前輪轉向系統上)做聯結，圖 1(a) 為前輪轉向之小型循跡載具三視圖，圖 1(b) 則為其製作完成全貌。

2. 底盤動力變速

自走載具原擬為三輪，由於單一前輪導向所驅動之轉動角度及迴轉半徑過小，一旦載具速度過快容易被後輪傳動影響，無法達到預期的偏轉角度及方向修正等功能。於是本自走載具行走部改為四輪，二個前輪為導向輪，左右兩後輪則從 12V 改至 24V 直流馬達傳動，前輪以 18V 直流馬達驅動，藉由前輪轉向機構及差動變速控制後輪正反轉以達到前進和轉彎的功能。馬達變速部分係利用 4 顆 6V 直流電瓶及 2 顆 4P 繼電器 (R<sub>7</sub>、R<sub>8</sub>)，並以迴路設計方式來達到有段變速，分別為 6V、12V、18V、24V 有段變速，如圖 2 所示。

3. 感測控制與燈號顯示

為達到更佳之偏轉角度及提高載具速度，採五支光電開關於載具前方作為循跡用。在燈號顯示方面，如圖 3 所示，由前方五顆紅色燈號的明滅表示光電開關感測訊號的有

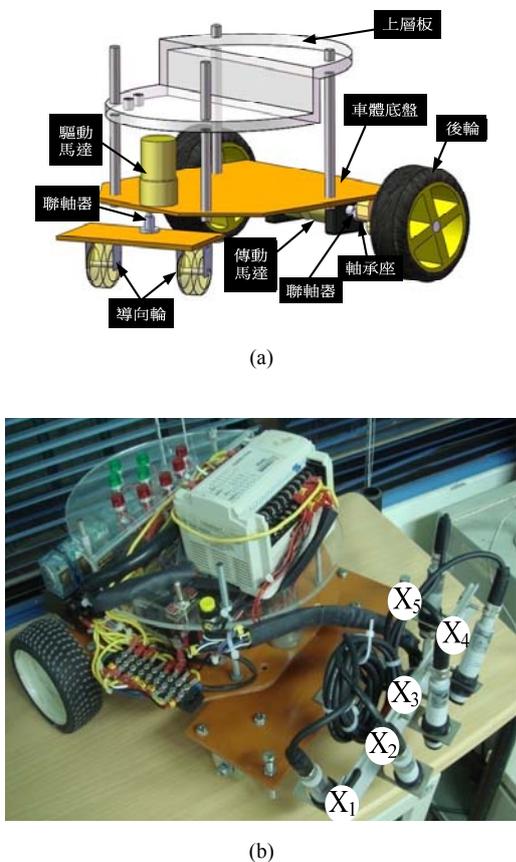


圖 1. 前輪導向之小型循跡載具製作圖示

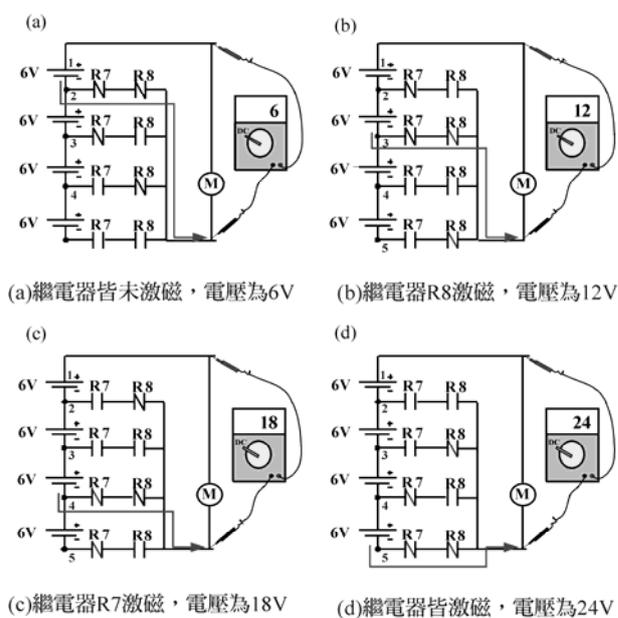


圖 2. 底盤後輪馬達四段變速示意

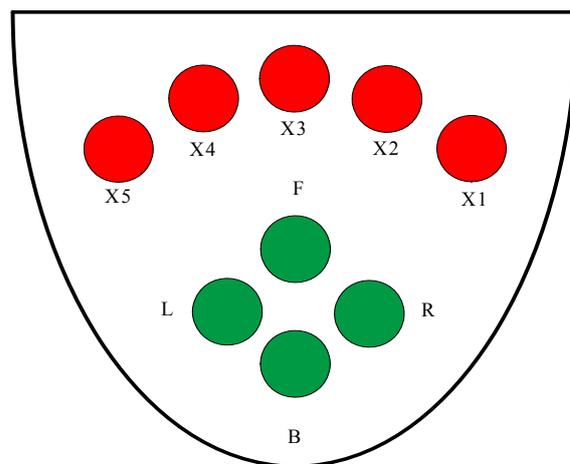


圖 3. 燈號顯示外觀

無，其排列方式與光電開關的擺設位置相同。後方使用四顆綠色燈號，排列方式為一菱形，用以顯示載具行走方向，如前進及左右轉彎等情形。前進燈號位於菱形的前方(F 位置)，以此類推。讓操作者可以直接看出載具行走方向，不須再記如左右馬達皆正轉為前進，反轉為後退等指令。

4. 外部線路規劃配置

本研究採用為 5 支光電開關作載具本體導向及行走控制輸入訊號源，並以一台可程式控制器 (TP02-28MRD) 作為控制核心。在線路控制方面 (如圖 4 所示)，採用可程式

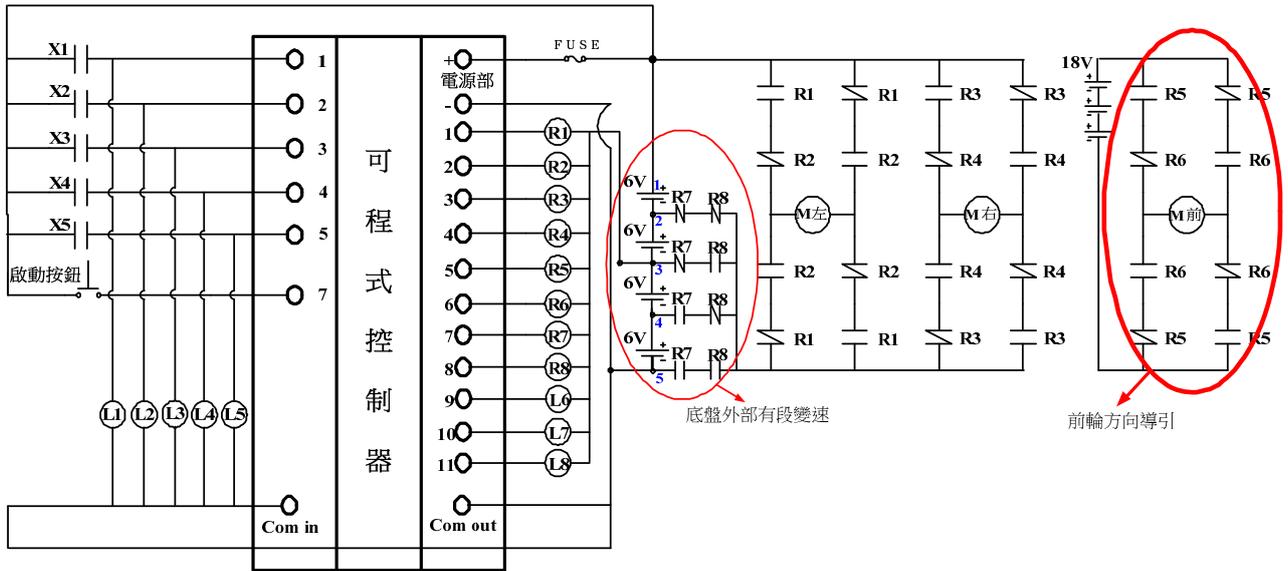


圖 4. 可程式控制器之外部負載線路

控制器之程式邏輯與傳統繼電器迴路的線路邏輯混合型式，以減少繼電器數目及線路數，每顆馬達配合兩顆 2P 繼電器以控制正反轉。可程式控制器內部的階梯電路，雖可做到馬達正反轉互鎖的功能，但因外部輸出繼電器有延遲作用，可能導致電路有瞬間短路的情形發生，因此在不增加繼電器數目及線路數的情況下，於馬達正反轉電路中，再加上第二道外部電路的互鎖在馬達正反轉電路。

(二) 差動變速

本文以閃爍電路與脈衝繼電器的概念，將閃爍電路修改成可產生週期性的時脈接點電路，以達到類似 PWM 的控速方法。而差動變速是將 PWM 方式分別輸出在左右輪馬達上。此應用之閃爍電路接點電路，如圖 5(a) 所示， $C_u$  為一訊號接點，當  $C_u$  導通時， $T_\alpha$  計時器開始計時， $M_L$  及  $M_R$  接點閉合輸出為 High，經過  $T_\alpha$  設定的時間後， $C_w$  接點閉合輸出為 High，此時  $T_\beta$  計時器開始計時，同時  $M_L$  由 High 變成 Low (也就是數位訊號的 0)，再經過所設定的時間後， $C_v$  輸出為 1， $C_w$  為 0，這時  $M_L$  恢復成 1。 $M_L$  隨著計時電驛 ON、OFF 交替動作，此為 50% 之 PWM 變速，而  $M_R$  始終為 1，如此左右輪馬達就達到差動變速的功能要求。將上述動作以時序圖 (圖 5(b)) 加以說明，圖 5(c) 則為此時脈電路之波寬比示意圖。此閃爍電路以邏輯式表示，則如 (1) ~ (5) 式所示。

$$(T_\alpha) = C_u \cdot \overline{C_v} = C_u \cdot \overline{T_\beta R} \tag{1}$$

$$(T_\beta) = C_w = \overline{T_\alpha R} \tag{2}$$

$$(C_v) = T_\beta R \tag{3}$$

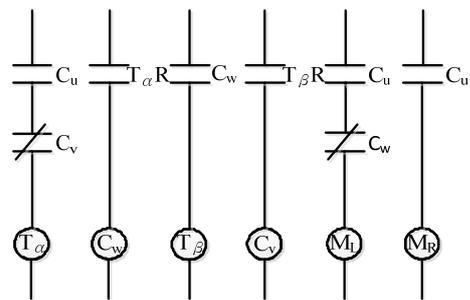
$$(M_L) = C_u \cdot \overline{C_w} = C_u \cdot \overline{T_\alpha R} \tag{4}$$

$$(M_R) = C_u \tag{5}$$

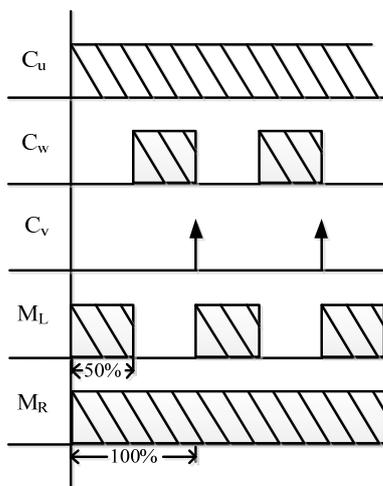
式中  $(T_\alpha)$  及  $(T_\beta)$  分別為計時器功能邏輯變數， $T_\alpha R$  及  $T_\beta R$  分別為前述相對應延時電驛 ( $T_\alpha$  及  $T_\beta$ ) 的延時接點邏輯變數。 $(M_L)$  及  $(M_R)$  分別為 50% PWM (紅色) 及全速 100% (藍色) 輸出電驛之邏輯變數。

過去在變速控制方面僅以迴路方式控制電瓶輸出並配合後輪馬達正反轉達到有段變速及方向修正，而差動變速是將複合脈寬調變 (PWM) 的輸出方式分別運用在左右輪馬達上。圖 6(a) 左所示為當載具需作轉彎動作時，若僅使用單輪正轉則兩輪狀態速差為 100%，圖 6(a) 右所示為載具在轉彎動作時，左輪馬達正轉輸出全載 100%，右輪馬達輸出 PWM70% 正轉，等同於兩輪狀態速差為 30%。當載具需作幅度較大的轉彎動作時，若左輪正轉及右輪反轉在全速下，則狀態速差為 200%，如圖 6(b) 左所示，同理使用 PWM10% 方式輸出於右輪反轉則狀態速差為 110%，如圖 6(b) 右所示。由於差動變速程式中其 PWM 時間比例係與地板材質、

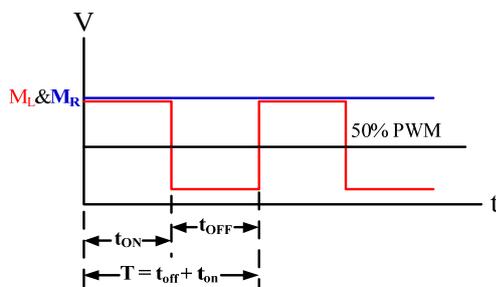
實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器適合作為循跡式小型載具其方向速度控制器之設計



(a) 應用閃爍電路邏輯之接點電路



(b) 應用閃爍電路邏輯的時序圖



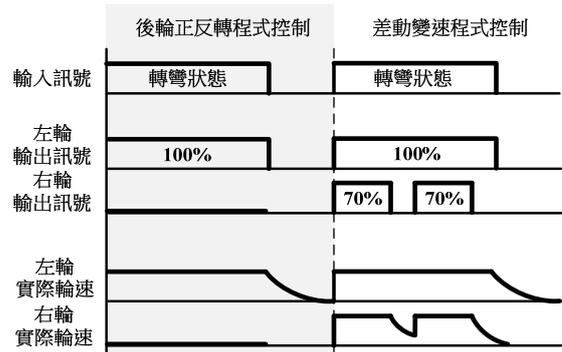
(c) 時脈電路之波寬比示意圖

圖 5. 說明週期性時脈差動電路原理

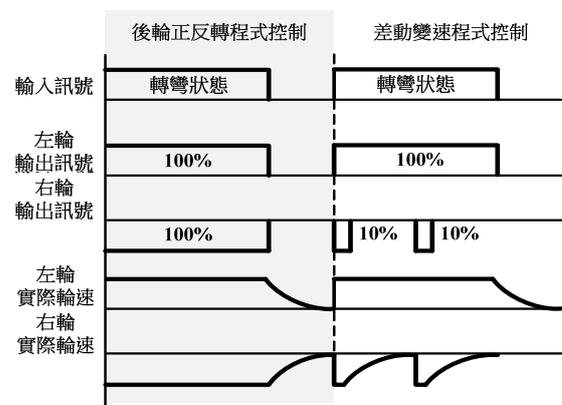
輪胎皮磨擦、兩輪輪徑、馬達轉速及減速齒輪之制動轉矩有關。因此差動變速程式中的 PWM 時間比例，在初始設定時必須比計算值還低，再以半間距法推求差動變速程式最適合的 PWM 時間比例，找出接近最佳方向修正及轉彎時所需差動變速的最適 PWM 時間比例，使自走載具在直線時僅做極小幅度方向修正，在彎道時能以圓滑的曲線行進。

(三) 布林代數演算法推演邏輯方程式

由載具上所設置 5 支光電開關感測黑色路徑的狀態，依



(a) 兩輪速差為 100% 及 30%



(b) 兩輪速差為 200% 及 110%

圖 6. 顯示在差動變速程式控制下，載具左右輪速變化差異

此定出載具方向修正及變速方式，再將其轉換成前輪轉向馬達之偏轉角度、行走部驅動馬達差動變速輸出及速度改變，最後制定對應的邏輯真值表（表 1）。圖 7 為邏輯系統中布林函數組之示意，根據所定義之邏輯真值表可顯示此邏輯系統中其輸入 ( $X_i$ ) 與輸出變數 ( $Y_i$ ) 間存在一布林轉換關係。

接著再以布林代數演算法，推演自走載具方向與速度控制的邏輯方程式。此推演過程將分述如下：

1. 輸入狀態定義描述

於自走載具前方裝設 5 支光電感測器用以感測路徑變化，每一支光電感測器皆有 ON 或 OFF 的狀態，因此光電感測器的狀態輸入點對可程式控制器有 5 點輸入 ( $X_1 \sim X_5$ )，並形成  $2^5=32$  種有限狀態的路徑變化。當感測到黑色電工膠布所貼出的路徑時，輸入接點閉合，定此邏輯值為 1，反之，定此邏輯值為 0，根據上述定義可先建立輸入狀態的真值表如表 1 欄位 (2) 所示。

表 1. 循跡載具其方向與速度控制器之邏輯真值表

序號	輸入變數(2)					動作(3)	中間變數(4)				外部變速(5)	輸出變數(6)		差動變速(7)		中間變數(8)											方向燈輸出(9)					
	X1	X2	X3	X4	X5		C50	C51	C60	C61		Y7	Y8	左輪	右輪	C11	C12	C13	C14	C15	C16	R	S	T	W	Y9	Y10	Y11				
0	0	0	0	0	0	前進	0	0	0	0	18V	1	0	100%	100%	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	左旋轉	0	0	0	1	12V	0	1	20%	100%	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	1	0	左轉彎	0	0	1	0	18V	1	0	40%	100%	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
3	0	0	0	1	1	左旋轉	0	0	0	1	12V	0	1	20%	100%	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
4	0	0	1	0	0	前進	0	0	0	0	24V	1	1	100%	100%	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	
5	0	0	1	0	1	左旋轉	0	0	0	1	12V	0	1	20%	100%	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
6	0	0	1	1	0	左轉彎	0	0	1	0	18V	1	0	40%	100%	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
7	0	0	1	1	1	左轉彎	0	0	1	0	18V	1	0	40%	100%	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
8	0	1	0	0	0	右轉彎	1	0	0	0	18V	1	0	100%	40%	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	
9	0	1	0	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	1	0	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	1	0	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	0	1	1	0	0	右轉彎	1	0	0	0	18V	1	0	100%	40%	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	
13	0	1	1	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	0	1	1	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	0	1	1	1	1	左轉彎	0	0	1	0	18V	1	0	40%	100%	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
16	1	0	0	0	0	右旋轉	0	1	0	0	12V	0	1	100%	20%	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	
17	1	0	0	0	1	前進	0	0	0	0	12V	0	1	100%	100%	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	
18	1	0	0	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	1	0	0	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	1	0	1	0	0	右旋轉	0	1	0	0	12V	0	1	100%	20%	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	
21	1	0	1	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	1	0	1	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	1	0	1	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	1	1	0	0	0	右旋轉	0	1	0	0	12V	0	1	100%	20%	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	
25	1	1	0	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	1	1	0	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	1	1	0	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	1	1	1	0	0	右轉彎	1	0	0	0	18V	1	0	100%	40%	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	
29	1	1	1	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30	1	1	1	1	0	右轉彎	1	0	0	0	18V	1	0	100%	40%	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	
31	1	1	1	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

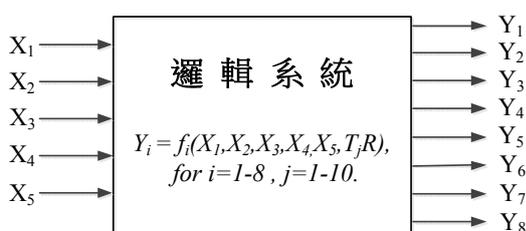


圖 7. 輸入與輸出變數之邏輯系統示意

2. 方向修正、速度變化策略及輸入出真值表的建立

由表 1 欄位 (3) 在載具方向修正的策略上分別為前進、左右旋轉及左右轉彎。根據前輪轉向馬達與底盤左右馬達之差動變速三種輸出狀態，Y<sub>1</sub>、Y<sub>3</sub> 分別表示底盤左右馬達正轉之輸出變數，Y<sub>5</sub>、Y<sub>6</sub> 表示前輪轉向馬達正反轉之輸出變數。當 Y<sub>1</sub> 及 Y<sub>3</sub> 之邏輯值分別輸出為 (1,1)，(1,0)，(0,1) 及 (0,0) 時，則分別表示載具狀態為前進，右前，左前及停止，本文循跡自走載具並未設定後退狀況，當 Y<sub>5</sub> 輸出為 1 時，為前輪轉向馬達正轉，載具則右轉彎，而 Y<sub>6</sub> 輸出為 1 時，則反之。

表 1 欄位 (4) 中 C<sub>50</sub>、C<sub>51</sub> (分別對應擇一輸出右轉彎及右旋轉之輸出) 及 C<sub>60</sub>、C<sub>61</sub> (分別對應擇一輸出左轉彎及左旋轉之輸出) 為決定前輪導向觸發或開啟狀態的中間變數，C<sub>55</sub> 及 C<sub>65</sub> 再分別為最後輸出變數 Y<sub>5</sub> 及 Y<sub>6</sub> 的中間變數。由於 Y<sub>5</sub> 及 Y<sub>6</sub> 是控制前輪導向馬達正反轉之邏輯變數，為防止偏轉角度過大，因此必須加入時間功能變數 T<sub>R</sub>(C<sub>51</sub>) 及 T<sub>S</sub>(C<sub>61</sub>) 限制其偏轉時間及角度。根據上述可定義 Y<sub>5</sub> 及 Y<sub>6</sub> 之邏輯方程式 (6) 及 (7)：

$$Y_5 \{ C_{55} [ C_{50}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{51}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), T_R(C_{51}) ], C_{65} [ C_{60}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{61}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), T_S(C_{61}) ] \} \tag{6}$$

$$Y_6 \{ C_{65} [ C_{60}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{61}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), T_S(C_{61}) ], C_{55} [ C_{50}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{51}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), T_R(C_{51}) ] \} \tag{7}$$

表 1 欄位 (5) 為外部有段變速輸出設定，以兩顆 4P

## 實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器適合作為循跡式小型載具其方向速度控制器之設計

繼電器來達到四段變速，分別為 24V、18V、12V（6V 省略不用），當繼電器激磁時邏輯值為 1，不激磁時邏輯值為 0。所以邏輯值為  $Y_7=0$  及  $Y_8=1$  則為第一段 12V 變速，邏輯值為  $Y_7=1$  及  $Y_8=0$  則為第二段 18V 變速，邏輯值為  $Y_7=1$  及  $Y_8=1$  則為第四段全速 24V，邏輯值為  $Y_7=0$  時沒有定義，以此方式定出欄位（6）。因此載具之有段變速輸出結果是由輸出邏輯變數  $Y_7$  及  $Y_8$  所決定。

表 1 欄位（7）為差動變速設定，左右輪分別定為 20%、40% 及全速（100%）共有九種控速方式，是以 PLC 中閃爍電路來產生週期性的時脈電路，達到類似 PWM 的控速方法。運用 PLC 中的內部電驛  $C_{11}\sim C_{16}$  為輸出變數。 $C_{11}\sim C_{13}$ （擇一輸出分別對應左輪輸出 PWM100%，40%，20%）及  $C_{14}\sim C_{16}$ （擇一輸出分別對應右輪輸出 PWM100%，40%，20%）分別為 R 及 T 的中間變數，如表 1 欄位（8）所示。而此 R 及 T 又分別為最後輸出變數  $Y_1$  及  $Y_3$  的中間變數。因此系統中  $Y_1$  及  $Y_3$  之邏輯方程式可由以下（8）及（9）式所定義表示：

$$Y_1 \{R[C_{11}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{12}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{13}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)], T_R(C_{12}, C_{13})\} \quad (8)$$

$$Y_3 \{T[C_{14}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{15}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), C_{16}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)], T_R(C_{15}, C_{16})\} \quad (9)$$

式中  $T_R(C_{12}, C_{13})$  及  $T_R(C_{15}, C_{16})$  為產生週期性時脈差動電路（即輸出脈寬比為 40% 及 20%）的功能變數。

為防止前輪轉向（輸出於控制前輪導向馬達正反轉之邏輯變數  $Y_5$  及  $Y_6$ ）及後輪之差速轉向（輸出於控制後輪馬達正轉之邏輯變數  $Y_1$  及  $Y_3$ ）此兩者不一致方向控制輸出抵觸，首先根據表 1 所列欄位（2）中各光電感測器偵測地面導引線之邏輯值狀態定出載具行進方向調整動作（見欄位（3））、後輪馬達驅動電力（見欄位（5））及對應輸出於左右輪之差速（見欄位（7））。接著由表 1 欄位（4）中間變數  $C_{50}$ 、 $C_{51}$  及  $C_{60}$ 、 $C_{61}$  分別對應擇一輸出以觸發前導向輪之方向調整狀態，最後輸出於變數  $Y_5$  及  $Y_6$ ，同時欄位（8）中間變數  $C_{11}\sim C_{13}$  及  $C_{14}\sim C_{16}$  亦分別對應擇一輸出於左及右後輪之 PWM 各值，最後輸出於變數  $Y_1$  及  $Y_3$  以形成後輪之差速轉向功能。經由上述對應列表方式並以布林代數演算之，可得到前輪轉向與後輪之差速轉向其一致性的邏輯控制輸出。

表 1 欄位（9）為載具方向燈控制輸出邏輯變數  $Y_9\sim Y_{11}$ ，相對應於載具方向控制之前進。右轉（右旋及右彎）及左轉（左旋及左彎）輸出變數。

## 3. 演算布林代數方程式及檢驗

依據表 1 所制定之邏輯真值表，顯示其輸入變數  $X_i$  與輸出變數  $Y_i$  之間存在一布林邏輯轉換關係，此關係可視為一邏輯系統，而這邏輯系統可運用布林代數演算法去推演。其推演過程可依據 Quine & McCluskey 氏所提出的列表法寫成 Matlab 程式 [2]，以求得自走載具方向與速度控制的數學函數式（(10)~(26)）。接著在 Excel 電子試算表中建立輸入與輸出變數的邏輯真值表，運用試算表中的邏輯函數指令，將此邏輯函數以轉換成邏輯值，藉以檢驗出此邏輯方程式的正確性 [2]。當邏輯正確時以「OK」表示，出現「NO」時表示邏輯錯誤，此時必須重新檢查邏輯方程式，直到邏輯正確為止（詳細過程資料可向通訊作者索取）。

變數的邏輯真值表，運用試算表中的邏輯函數指令，將此邏輯函數以轉換成邏輯值，藉以檢驗出此邏輯方程式的正確性 [2]。當邏輯正確時以「OK」表示，出現「NO」時表示邏輯錯誤，此時必須重新檢查邏輯方程式，直到邏輯正確為止（詳細過程資料可向通訊作者索取）。

$$C_{50} = X_2 \cdot \overline{X_5} \cdot (\overline{X_1} \cdot \overline{X_4} + X_1 \cdot X_3) \quad (10)$$

$$C_{51} = X_1 \cdot \overline{X_4} \cdot \overline{X_5} \cdot (\overline{X_2} + X_3) \quad (11)$$

$$C_{60} = \overline{X_1} \cdot X_4 \cdot (\overline{X_2} \cdot \overline{X_5} + X_3 \cdot X_5) \quad (12)$$

$$C_{61} = \overline{X_1} \cdot \overline{X_2} \cdot X_5 \cdot (\overline{X_3} + X_4) \quad (13)$$

$$Y_7 = \overline{X_1} \cdot \overline{X_5} \cdot (\overline{X_2} + \overline{X_4}) + \overline{X_1} \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \overline{X_5} \quad (14)$$

$$Y_8 = \overline{X_1} \cdot \overline{X_2} \cdot \overline{X_3} \cdot X_5 + \overline{X_2} \cdot \overline{X_4} \cdot (\overline{X_1} \cdot X_3 + X_1 \cdot \overline{X_3}) + X_1 \cdot \overline{X_4} \cdot \overline{X_5} \cdot (\overline{X_2} \cdot X_3 + X_2 \cdot \overline{X_3}) \quad (15)$$

$$Y_9 = \overline{X_2} \cdot \overline{X_4} \cdot (\overline{X_1} \cdot \overline{X_5} + X_1 \cdot \overline{X_3} \cdot X_5) \quad (16)$$

$$Y_{10} = \overline{X_5} \cdot [\overline{X_4} \cdot (X_1 + X_2) + X_1 \cdot X_2 \cdot X_3] \quad (17)$$

$$Y_{11} = \overline{X_1} \cdot [\overline{X_2} \cdot (X_4 + X_5) + X_3 \cdot X_4 \cdot X_5] \quad (18)$$

$$C_{11} = \overline{X_4} \cdot \overline{X_5} + X_1 \cdot (\overline{X_2} \cdot \overline{X_3} \cdot \overline{X_4} \cdot X_5 + X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot \overline{X_5}) \quad (19)$$

$$C_{12} = \overline{X_1} \cdot X_4 \cdot (X_3 \cdot X_5 + \overline{X_2} \cdot X_3 + \overline{X_2} \cdot \overline{X_5}) \quad (20)$$

$$C_{13} = \overline{X_1} \cdot \overline{X_2} \cdot X_5 \cdot (\overline{X_3} + \overline{X_4}) \quad (21)$$

$$C_{14} = \overline{X_1} \cdot \overline{X_2} + X_5 \cdot (X_1 \cdot \overline{X_2} \cdot \overline{X_3} \cdot \overline{X_4} + \overline{X_1} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4) \quad (22)$$

$$C_{15} = X_2 \cdot \overline{X_5} \cdot (X_1 \cdot X_3 + X_3 \cdot \overline{X_4} + \overline{X_1} \cdot \overline{X_4}) \quad (23)$$

$$C_{16} = X_1 \cdot \overline{X_4} \cdot \overline{X_5} \cdot (\overline{X_2} + \overline{X_3}) \quad (24)$$

$$R = C_{11} \cdot \overline{C_{12}} \cdot \overline{C_{13}} + \overline{C_{11}} \cdot C_{12} \cdot \overline{C_{13}} + \overline{C_{11}} \cdot \overline{C_{12}} \cdot C_{13} \quad (25)$$

$$T = C_{14} \cdot \overline{C_{15}} \cdot \overline{C_{16}} + \overline{C_{14}} \cdot C_{15} \cdot \overline{C_{16}} + \overline{C_{14}} \cdot \overline{C_{15}} \cdot C_{16} \quad (26)$$

4. 建構 PLC 階梯電路的程式區塊

依據表 1 真值表所演譯之布林函數，主要作為根據光電感測器輸入之 0 及 1 狀態，執行載具行進時方向與速度控制的邏輯判斷。同時我們以圖 6 週期性時脈差動電路之發生原理為觀念，將其整合至載具底盤左右馬達正轉之輸出變數 Y<sub>1</sub> 及 Y<sub>3</sub> 以類似 PWM 方式達成左右兩輪差速，其相對應之接點電路，如附錄圖 A 所示。

當載具由直線循跡進入彎折路徑時，常因其速度及慣性問題或光電感測器與控制器反應時間延遲，使載具偏離軌跡之外。在策略上，我們在 PLC 階梯電路程式加入自保持電路的觀念，作為修正。圖 8 為此策略流程，當光電感測器 X<sub>1</sub> 或 X<sub>5</sub> 對應到黑色膠布時，在表 1 真值表中狀態為前導向輪啟動左旋轉或右旋轉，表示載具偏離循跡路徑甚多，此時進入副程式開始執行自保持電路並切斷主循跡程式，避免第二次碰到 X<sub>1</sub> 或 X<sub>5</sub>，導致前輪偏轉角度過大，在此同時啟動差動變速增加兩輪速差，達到載具本體方向修正。當感測器 X<sub>2</sub> 及 X<sub>3</sub>（兩者擇一）或 X<sub>3</sub> 及 X<sub>4</sub>（兩者擇一）對應到黑色電工膠布時，將自保持電路解除並回到主循跡程式。

根據圖 8 的策略流程，控制前導向輪之邏輯變數為 C<sub>50</sub>、C<sub>51</sub>、C<sub>60</sub> 及 C<sub>61</sub>，當 X<sub>1</sub> 或 X<sub>5</sub> 感測到黑線時，則進入副層控制電路，C<sub>51</sub> 邏輯變數為 X<sub>1</sub> 感測到黑線之各觸發狀態，在表 1 真值表動作 (3) 之狀態為右旋轉，C<sub>61</sub> 邏輯變數為 X<sub>5</sub> 感測到黑線之各觸發狀態，在表 1 值表動作 (3) 之狀態

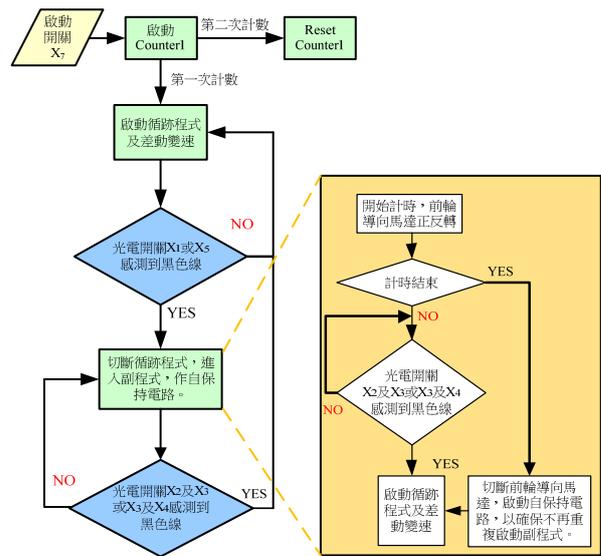


圖 8. 策略流程

為左旋轉，為了防止前導向輪偏轉角度過大，階梯電路設計必須加入時間功能變數 T<sub>R</sub>(C<sub>51</sub>) 及 T<sub>R</sub>(C<sub>61</sub>) 限制其偏轉時間及角度。C<sub>50</sub> 及 C<sub>60</sub> 邏輯變數分別表示為表 1 真值表動作 (3) 之右及左轉彎主層方向控制。上述對應邏輯變數 C<sub>51</sub> 及 C<sub>61</sub> 觸發副層控制之接點電路如附錄圖 B.(1) 及 (2) 所示。

本文中 Y<sub>1</sub>~Y<sub>4</sub> 及 Y<sub>7</sub>、Y<sub>8</sub> 代表載具速度控制的輸出變數 (C<sub>11</sub>~C<sub>16</sub> 代表速度變化控制變數)。Y<sub>5</sub> 及 Y<sub>6</sub> 為方向控制輸出變數 (邏輯變數 C<sub>51</sub> 及 C<sub>61</sub> 為對應修正偏離及限制前導向輪正反偏轉角度之輸出，而 C<sub>50</sub> 及 C<sub>60</sub> 則為前導向輪右及左轉彎方向控制之輸出)，將上述兩者整合可以得到 Y<sub>1</sub>~Y<sub>8</sub> 方向及速度的複合控制變數作為最後輸出變數，其對應之接點電路及布林邏輯函數式如圖 9 所示。本製作採用台安電機 TP02-28MRD 可程式控制器作為整體邏輯系統控制核心，最後將接點邏輯電路相對應地轉譯成 PLC 的階梯電路程式(附錄圖 C)，並建構程式區塊流程(圖 10)，根據圖 10 不僅可以了解整體程式架構，更可以看出訊號流向及方便除錯，同時顯示結構化區塊階梯電路程式(附錄圖 C)的優點。最後本文整合圖 10 中以 PLC 為控制核心之程式區塊，建構此前輪導向結合後輪差速之循跡式小型載具其方向差速控制器的整體系統方塊圖，如圖 11 所示。

(四) 載具行進測試

在功能測試方面本文以影像拍攝器 (charge coupled device cameras, CCD cameras) 擷取載具行進時的影像，以監測載具實際行進路徑是否更加擬合所規劃設定的路徑 [12]。

實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器適合作為循跡式小型載具其方向速度控制器之設計

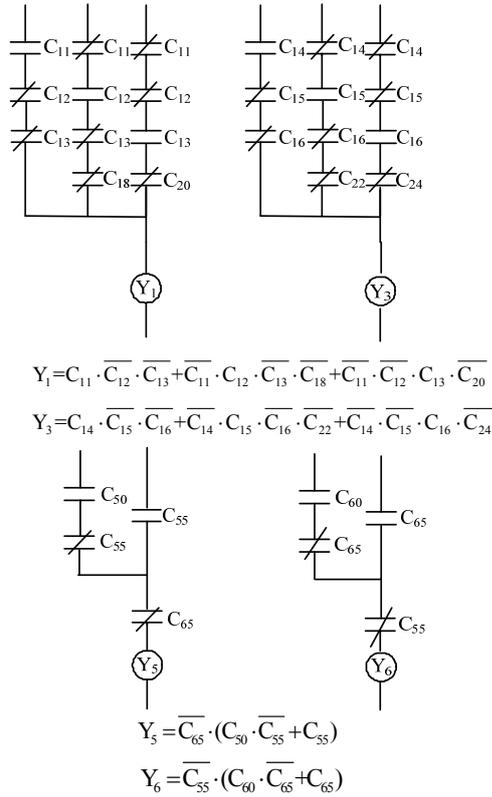


圖 9. 方向與速度複合控制輸出之接點電路

將等同於載具上視正投影面積之白紙置於其上，在白紙上以兩特徵點之中點（P）標示出載具之重心，以相機連續攝影載具行進之過程。將所拍攝之數位影像利用影像處理技術，先將數位影像作灰階化後取特徵點之樣本，即可比對後續影像其特徵點之座標位置，之後定出每次間拍時間  $\Delta t$  下載具行進時之重心座標位置  $(X_i, Y_i)$ ，此時將 P 點位置

向量化，可得知載具運動位置軌跡  $\vec{S}$  及位移變化  $\Delta \vec{S}$ ，根據速度定義： $\vec{V} = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t}$ ，可得知速度大小  $\bar{V}$  及方向，再利用

$$V_T = \frac{|r \times v|}{|r|} = \omega |r|$$

求得切線速度、重心座標位置與規劃路徑

之垂直相對位置距離 D（偏移量）。我們分別以後輪馬達正反轉及前輪導向結合差動變速這兩種控制方式，在所規劃之循跡路徑（彎道半徑 1.5 m 之圓）上進行載具行進測試。

三、結果與討論

圖 12(a) 及(b) 為位於載具正上方影像拍攝器所擷取之行進時的影像分析結果，拍攝時間均為載具由相同起始點循跡至回到起始點。圖 12(a) 為觀測載具行進使用後輪左右馬

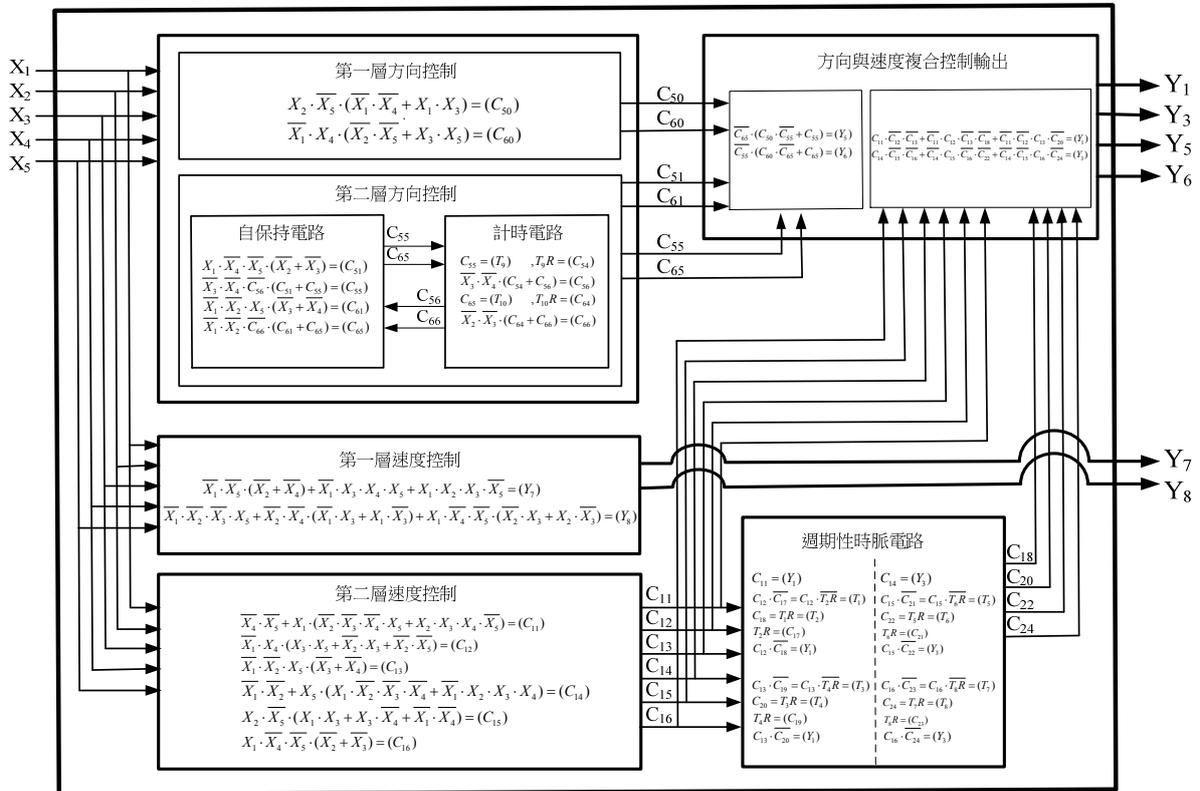


圖 10. 控制核心內各程式區塊架構組成

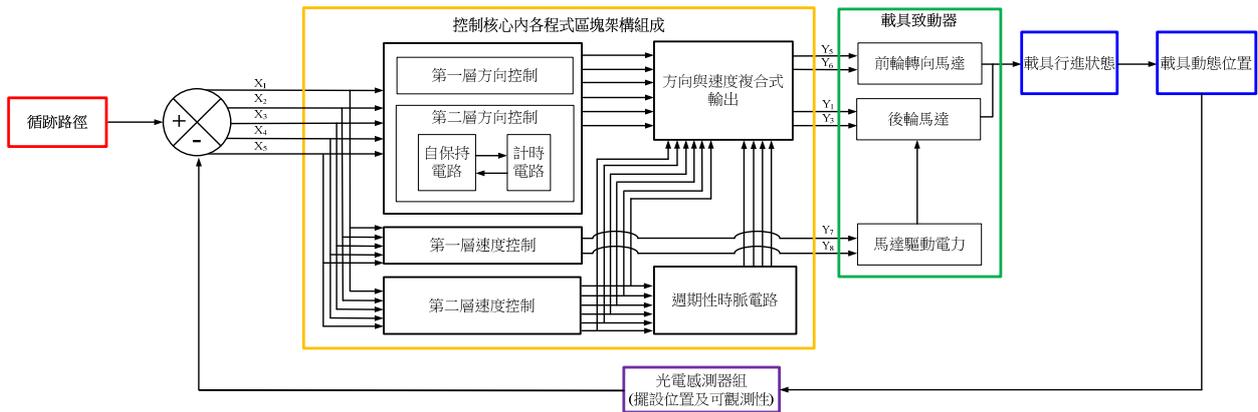
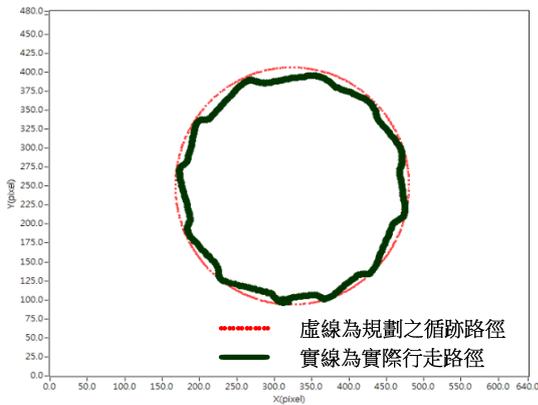
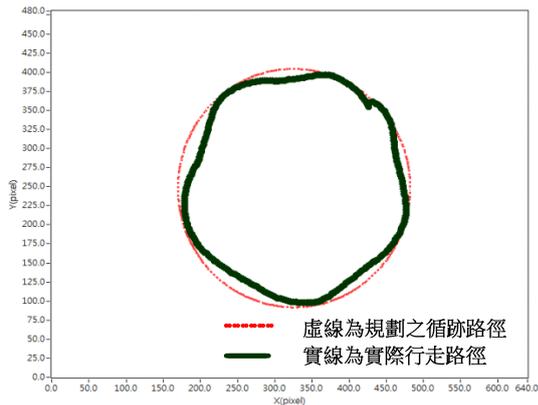


圖 11. 整體系統方塊示意圖



(a) 後輪左右馬達正反轉輸出方式



(b) 前輪導向結合後輪左右差速之控制方式

圖 12. 不同控制策略之規劃與實際路徑比較圖

達正反轉輸出方式，而圖 12(b) 則為觀測載具以前輪導向結合後輪左右差速之控制方式。很明顯地，以使用前輪導向結合後輪左右差速之控制方式，在方向修正幅度上較為圓滑平順，而使用後輪正反轉之輸出方式在方向修正幅度較大，行

走路徑狀似三角鋸齒波浪。

表 2 為觀測載具於行進過程中之平均速度、全程時間及載具運動軌跡與規劃之循跡路徑之平均偏移量，表 2 結果顯示採用前輪導向結合後輪差速之方向控制方式，其行進時間相較於後輪直接以正反轉方向控制方式為短，平均速度相對較快，平均偏移規劃之循跡路徑的距離也較小。

本文主要重點是實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器作為循跡式小型載具其方向及速度控制器設計應用案例，並未對載具的結構、運動機制及成效作深入分析，僅著重於階梯電路程式功能測試。本文中有關後輪之速度調變比例方式（20、40 及 100%）並非一成不變，實際上可依實際現場狀態擬合調整兩輪之速度比。由於場地因素會有參數上差異，依本文之方法只需更改程式中時脈電路的波寬比，而不需改變程式的整體架構，即可快速地調適實驗室與現場狀態之差異。本方法技術已實際運用於國內有關自動化載具競賽中，以第十一屆全國大專院校創思設計與製作自動組競賽為例（圖 13），此競賽場地以圓弧形彎道及直線構成，以前輪導向結合後輪差速應用於此競賽場地，可縮短比賽完成時間及降低載具行走時相對於循跡線之偏差量，使定點停車之定位相對精確。

表 2. 不同控制策略之數據分析比較表

控制方式	全程時間 (s)	平均速度 (cm/s)	平均偏移 (cm)
後輪馬達正反轉	86.70±1.2 <sup>a</sup>	6.45±0.5	4.37±2.2
前輪導向結合後輪差速	76.10±0.7	8.39±0.2	3.97±0.8

註：<sup>a</sup>Mean±sd (n=5)。

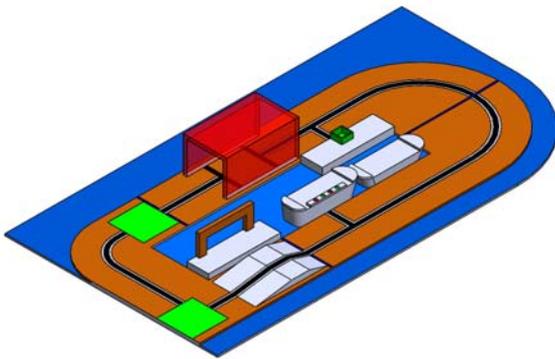


圖 13. 第十一屆全國大專院校創思設計與製作自動組競賽場地示意

#### 四、結論

本文運用區塊化電路的觀念，首先以布林代數演算法演譯控制核心之接點邏輯電路，在第二階段整合前輪導向、閃爍電路（差動變速）、自保持電路（副層方向控制）於控制核心內之接點邏輯電路，再進一步地將之轉譯為 PLC 之階梯電路程式。最後經由載具實地行進測試，不僅證明此方式之實現是可行，亦於本系參與各種循跡自走載具競賽當中獲得驗證實例。

#### 參考文獻

1. 周立強、游哲文（民 90），避障載具方向控制器的製作，宜蘭技術學報，7，67-84。
2. 周立強、程安邦（民 92），布林代數演算法在條件序控的應用－以線控機器人操控為例，宜蘭大學學報，1，105-116。
3. 周立強、高易宏、吳建昌（民 90），線控機器人與自走子載具製作在教學上之應用，宜蘭技術學報，6，85-102。
4. 陳偉森（民 85），農用自動導引載具系統之研究，國立中興大學農業機械工程學研究所博士論文。
5. 陳巧茵（民 92），小型自走載具以超音波避障之研究，國立成功大學工程科學研究所碩士論文。
6. 康世緯、林聖傑、呂宗訓、周立強（民 94），循跡式自走載具的方向與速度控制器之製作，2005 年農機與生機論文發表會，屏東。
7. 黃智傑、蘇純繡（民 79），應用語法外形辨識器之電腦輔助製程設計，七十九年度中國工業工程學會年會論

文集，台北。

8. 張有恆、蘇昭旭（民 84），台鐵裝設列載具自動控制系統以改善鐵路行載具安全之研究，中華民國第二屆運輸安全研討會，新竹。
9. 游寶達、黃仁竑（民 85），類神經網路與模糊理論的系統設計理念，模糊系統學刊，2(1)，29-36。
10. 蘇昭旭、陳木松（民 82），鐵路自動控制數學模式之研究與分析，大葉學報，2(1)，33-48。
11. 黃御其、楊雅傑、陳俊宏、楊俊雄、李永駿、張簡上揮、陳奕璇、陳詩欣、周立強（民 96），以 PLC 作為循跡式無人載具差動變速及方向控制器之應用例 (II)，2007 年農機與生機論文發表會，台北。
12. 廖名揚（民 96），應用即時影像及模糊 PID 控制自走載具於無線攔截任務，國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。
13. Buttner, W. and H. Simonis (1987) Embedding Boolean expressions into logic programming. *Journal of Symbolic Computation*, 4, 191-205.
14. Jou, L. J., C. M. Liao and Y. C. Chiu (2005) A Boolean algebra algorithm suitable for use in temperature-humidity control of a grafted seeding acclimatization chamber. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48, 1-18.
15. Komatsu, N. and Nakano, K. (1987) Dead reckoning guidance combined with guided path method for AGVs. *Automated Guided Vehicle Systems: Proceedings of the 5th International Conference, Tokyo, Japan*.
16. McCluskey, E. J. (1956) Minimization of Boolean function. *Bell System Technical Journal*, 35(6), 1417-1444.
17. Roanes-Lozano, E., A. Hernando, J. A. Alonso and L. M. Laita (2011) A logic approach to decision taking in a railway interlocking system using *Maple*. *Mathematics and Computers in Simulation*, 82(1), 15-28.
18. Shannon, C. E. (1938) A symbolic analysis of relay and switching circuits. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 57, 713-723.
19. Tseng, L. Y. and T. H. Huang (1995) The logic function neural network. *Proceedings of the National Science Council (Part A: Physical Science and Engineering)*, 19(6), 604-613.
20. Wiklund, U., Anderson, U. and Hyypa, K. (1988) AGV navigation by angle measurements. *Automated Guided*

---

Vehicle Systems: Proceedings of the 6th International  
Conference, Brussels, Belgium.

收件：101.02.08 修正：101.04.12 接受：101.06.05

附錄

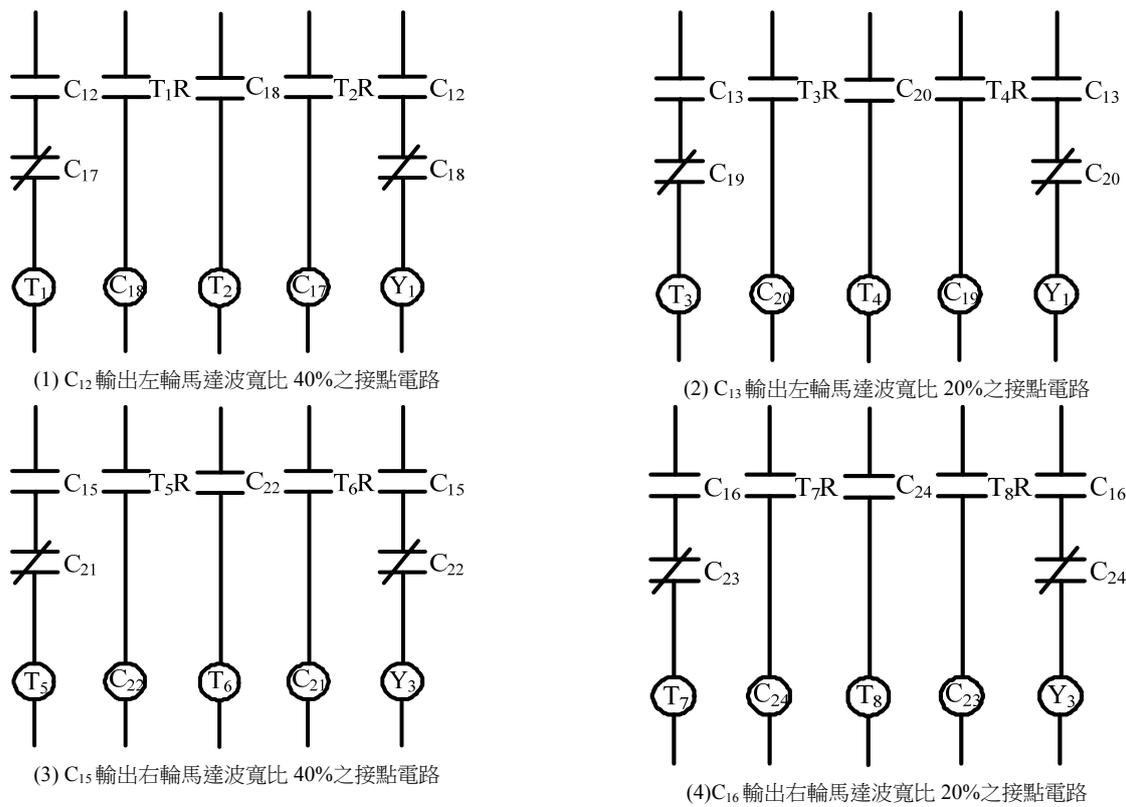


圖 A. 產生週期性時脈波寬比之接點電路

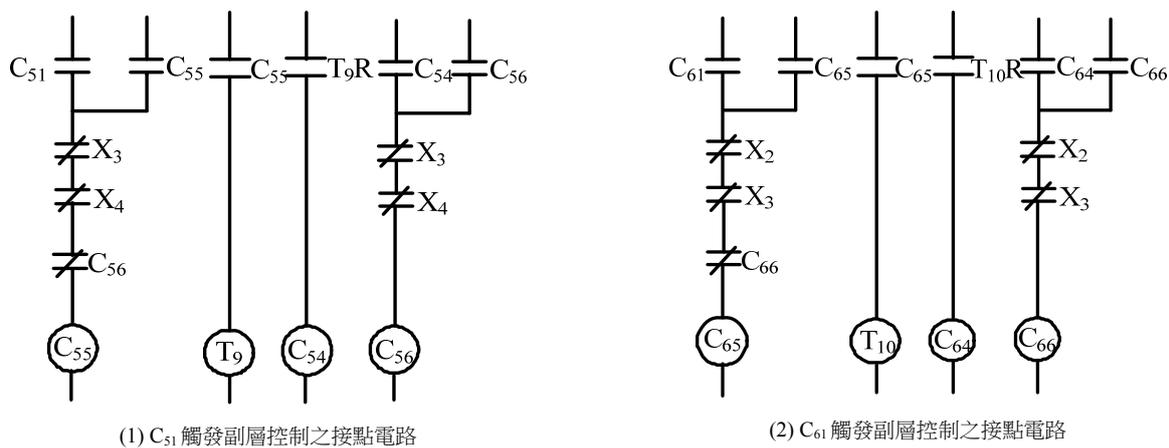
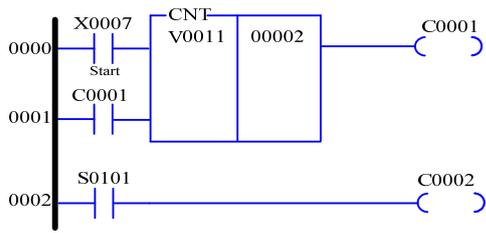
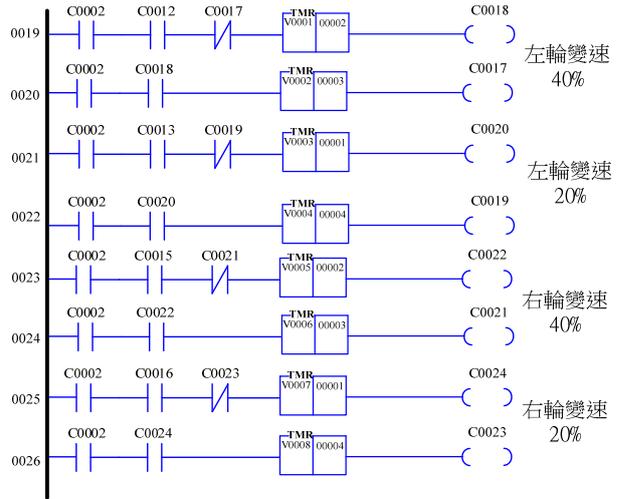


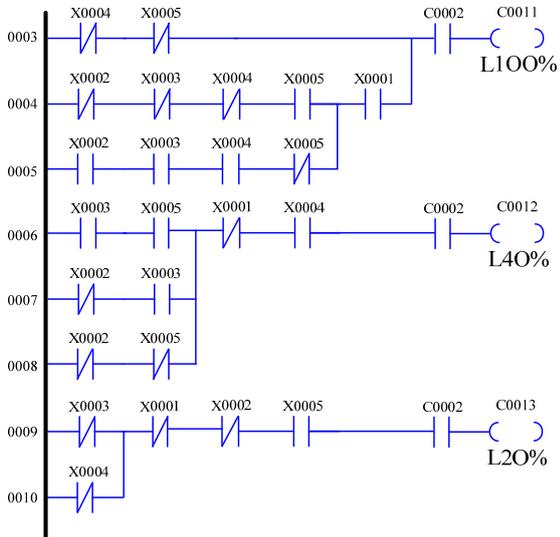
圖 B. 前導向輪對應右/左旋轉(C<sub>51</sub>/C<sub>61</sub>)及轉彎(C<sub>50</sub>/C<sub>60</sub>)控制之接點電路



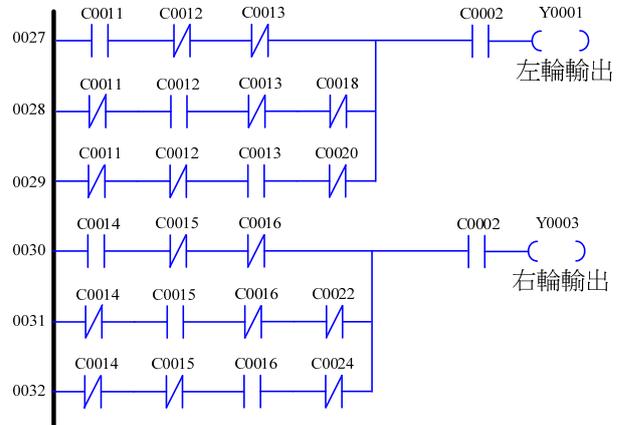
(1) 啟動程式



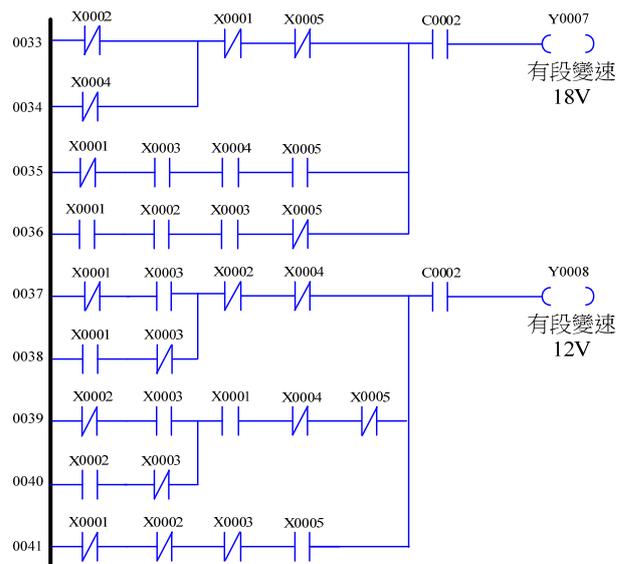
(3) 週期性時脈差動電路



(2) 第二層速度控制(差動變速)



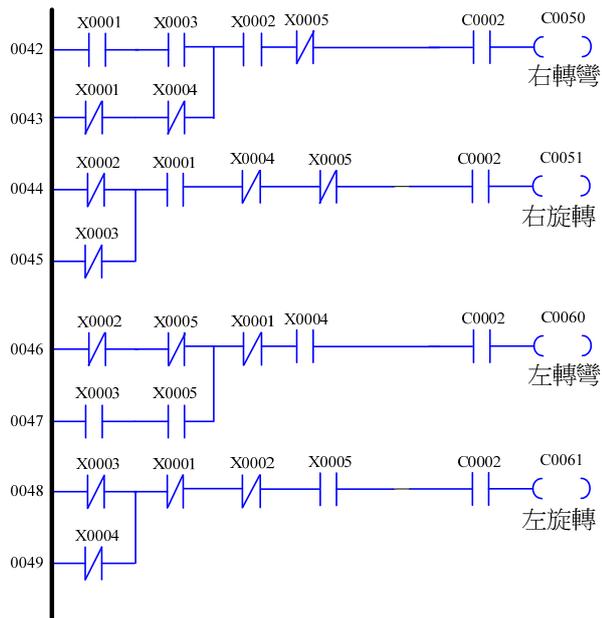
(4) 後輪輸出



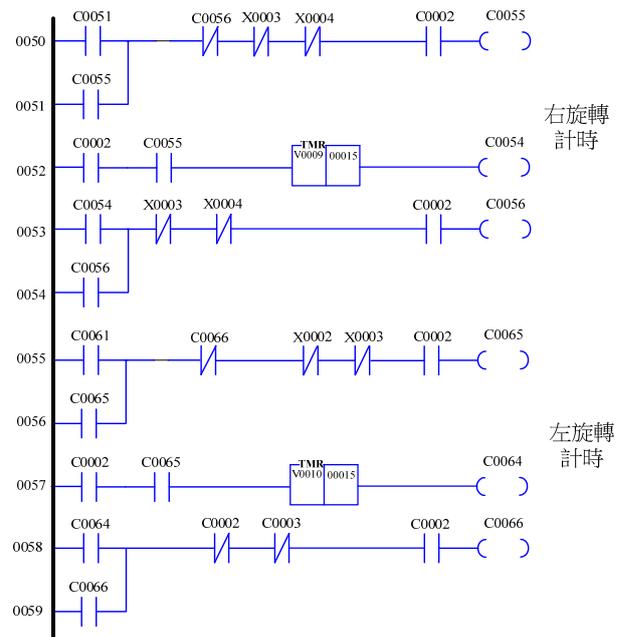
(5) 第一層速度控制

圖 C. PLC 之階梯電路程式

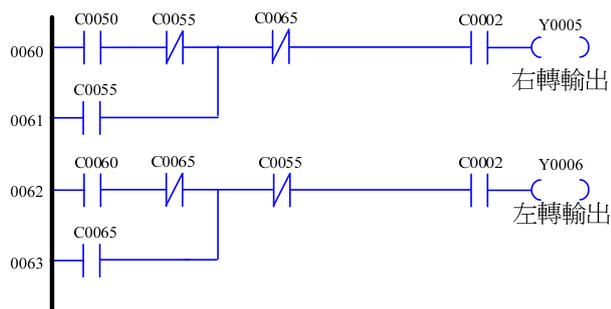
實現以布林代數演算為基礎之可程式控制器適合作為循跡式小型載具其方向速度控制器之設計



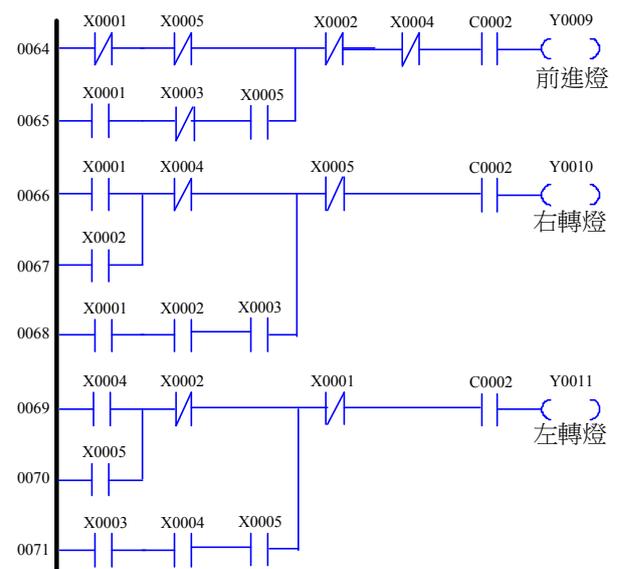
(6) 前導向輪方向控制



(7) 限制前導向輪偏轉角度計時電路



(8) 前導向輪驅動輸出



(9) 方向燈號顯示輸出

圖 C. PLC 之階梯電路程式 (續)