

27. 全方向性移動機器人之研製

杜國洋¹、羅勢超²

¹國立高雄第一科技大學 系統資訊與控制研究所教授

²國立高雄第一科技大學 系統資訊與控制研究所研究生

摘要

移動機器人受到不完整運動限制(Nonholonomic Constraints)，大大降低其可移動性，因此本論文致力於全方向移動機器人的研發，在其機構上提供機器人完整運動能力的全方向性驅動裝置，在其運動學上導出簡化方程式，以方便即時運算。在機器人控制系統方面，使用控制晶片MC68332作為系統核心，設計專屬於全方向性機器人的微處理機控制系統，並依照控制晶片的模組化功能設計一系列的函式功能建構控制機器人運動行為的運作系統。研究成果包括全方向性移動機器人的實際實驗。

關鍵字：全方向性移動機器人、不完整運動限制、控制系統、縱向正交輪、側向正交輪

一、前言

移動式機器人(Mobile Robot)是一種可應用範圍的機器人，可以應用在多功能的載具或是偵查未知環境，例如NASA所研製的火星探測機器人精神號與機會號[1]。移動式機器人大多都是使用輪子驅動，最常見的是兩輪獨立驅動式機器人，雖然可以靈活的完成前進後退等移動行為，但受到不完整運動限制(Non-Holonomic Constraints)，卻無法自由地左右平移，也使移動機器人在狹窄的空間或複雜的環境，無法靈活運動，這樣的限制對於移動式機器人的應用是一大阻礙。

為了解決不完整性運動的限制，有一些研究者提出全方向性輪式移動機器人的研發，以各種不同著眼點提出實現方式。Borenstein首先研製順應連結多自由度(Multi-Degree-of-Freedom)移動式機器人[2]，並取得相關專利，Borenstein所研製移動機器人有四個自由度，由兩具有兩個馬達驅動的台車(Truck)所組成，且兩台車之間有一連桿連結，藉此控制兩台車之間的距離，透過如此複雜的結構，機器人可做完整運動(Holonomic Motion)，也就是全方向性運動(Omni-Direction Motion)。此外，Reister亦研製移動式機器人HERMIES-III[3]，同樣擁有全方向性運動的能力。以上兩種移動式機器人的共同特點是，同樣具有四個自由度，且均為結構的更動而改變施力點的位置，以達到任意方向運動的目的。

以改變施力點的位置以達到任意方向運動的方式，其驅動結構極為複雜，因此有些研究者以增加輪子本身的自由度為思考方向，除了車體本身驅動方向的自由度之外，另外增加垂直於動力方向的自由度。簡單來說，就是讓輪子擁有能在車體行進中具打滑(Slip)的能力。Dickerson和Lapin設計了具Mecanum輪的移動式機器人[4]，將四個輪子呈矩形的方式配置，使機器人可運動至三個方向：前後、左右與旋轉，使用特殊輪設計以及矩形配置的方式使機器人具有全方向運動的能力。而Francois和Killough則是首先提出了使用正交輪(Orthogonal Wheels)組成具有全方向性運動能力的完整運動平台[5]。將三個正交輪以呈120度相位差的配置方式組成一移動平台，由於各正交輪的作用力之間有120度相位差，使驅動機器人的合成力可指往任意一方向，以達到全方向性運動的目的。

但是當輪子的自由度增加，應用在輪子的力也增加，相對輪子的動態特性也變得更加複雜。Balakrishna和Ghosal將輪子打滑的動態行為建模[6]，研究打滑現象在全方向性移動機器員移動時的影響。這項研究提供了考慮輪子滑動現象的建議與更精確的方程式，以及對於改善全方向性移動式機器員移動效能的牽引(Traction Model)模型。隨後，Williams等人研究了另一種能夠測量全方向性移動式機器人摩擦力與合成力的實驗[7]。在此研究中，推導出的動態模型並加入經由實驗測量出的輪子摩擦係數。並依此做相關的實驗驗證。

在全方向性移動式機器人的控制方面，Watanabe對於全方向性移動式機器人提出其控制方式[8]。在研究中敘述實現全方向性移動式機器人的各種特殊輪機構設計方式，並針對機器員的各種控制方式做模擬驗證。

首先在RoboCup小型聯盟競賽當中使用全方向性驅動機構的隊伍是康乃爾大學的隊伍Big Red[9]，在當年RoboCup2000的賽事中首次登場，隨即得到該聯盟的優勝。雖然全方向性驅動機構使移動式機器人擁有完整的運動能力，但仍有許多細節需要考慮，除了基本的機構設計之外，還需要妥善的控制方式才能控制全方向性驅動機構複雜的動作特性。

因此，在本研究中除了實現全方向性移動式機器員的研製之外，還要針對機器人機構與行進方向之間的特性，以及全方向性驅動機構的控制方式做相關的實驗驗證。

二、全方向性移動機器人的動作原理

所謂全方向運動的移動機器人是指機器員在任意位置與方向時，可往其目前位置的任一鄰近位置運動。令機器人處於某一姿態(Pose)為 (x, y, θ) ，其中 x 和 y 為其位置， θ 則是其方向，全方向運動的移動機器人就是在下一時間可被控制到其目前所再位置的任何鄰近點。就一般移動式機器人而言，這是無法做到的，以一兩輪式獨立驅動方式的移動式機器員為例，其運動方程式為：

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{1}{2}(u_\gamma + u_\ell) \cos \theta \\ \dot{y} &= \frac{1}{2}(u_\gamma + u_\ell) \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \frac{1}{2W}(u_\gamma - u_\ell) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 x 及 y 為機器人的位置， θ 為機器人的方向， W 為機器人左右輪的距離， u_γ 和 u_ℓ 分別為機器人左右輪的速度。所以在機器人處於某一結構 (x_0, y_0, θ_0) 時，其下一時間可運動到的位置為：

$$x_1 = x_0 + \frac{1}{2}(u_\gamma + u_\ell) \cos \theta_0 \Delta t \quad (2)$$

$$y_1 = y_0 + \frac{1}{2}(u_\gamma + u_\ell) \sin \theta_0 \Delta t \quad (3)$$

其中 Δt 為到下一時間所經過的時間。方程式(2)與(3)限制機器人下一時間所到的位置，也使得機器員的整個運動軌跡受到限制。此限制使得移動機器員無法在狹窄的空間或複雜的環境，靈活運動。

由以往的文獻[5][8]，得知全方向性移動式機器人已知的建構方式有使用特殊輪或者是採用特殊的機構設計。而理論上，機器人只要具備三個自由度以上就可以突破方程式(1)的限制，擁有全方向移動的能力。上述的兩種全方向性移動式機器員實現方式也是根據相同的原理，都是為了增加機器員所擁有的自由度。

為了突破不完整運動限制的侷限，首要的工作就是設計能夠提供完整運動能力的全方向性驅動裝置。最有效的方式就是直接使用比一般輪子還要多出一個自由度的特殊輪，藉此增加移動式機器員的自由度。

如圖1所示，當輪子轉動時，萬向輪的結構配置提供了結合限制與非限制動作的能力，這樣的組合提供了全方向性運動的能力。萬向輪包含了一個較大的輪子結構以及在輪子邊緣配置的許多較小的滾輪。這樣的機構配置，除了提供原本垂直於輪軸動力來源的運動方向之外，還多了一個與輪軸平行的運動方向。例如：根據圖1的座標軸定義此輪的主要運動方向是輪子動力來源所產生的 X 軸運動方向，但同時擁有能夠自由滾動的滾輪可使往 Z 軸方向運動。

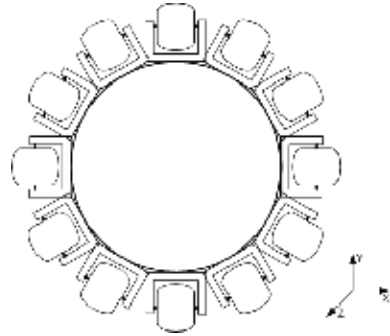


圖1 萬向輪的範例

使用萬向輪可以很容易的實現完整運動(Holonomic)和全方向性運動。但缺點是這樣的設計需要較大的空間提供滾輪的轉動，以及在每個滾輪與地面接觸時所產生的連續震動。

另一種常用的全方向性輪稱為正交輪(Orthogonal Wheels)，這種機構設計，所使用的觀念是除了提供一般垂直於驅動軸的動作方向之外，再增加一組軸心與馬達軸心平行的自由輪。其原理是基本原理在驅動裝置的運作當中由兩個相同直徑的球體組成，呈類似寬圓型的輪胎。透過滾珠軸承使輪子可以自由地環繞軸心轉動。透過支撐輪子軸心末端的框架，每個輪子可以驅動球體表面的部份環繞著 Z 軸旋轉，且垂直於馬達的軸心，如圖2所示。這樣的動作模式與萬向輪類似。基於這種觀念，可以實現兩種不同機構配置的正交輪：縱向正交輪(Longitudinal Orthogonal Wheel)以及側向正交輪(Lateral Orthogonal Wheel)。

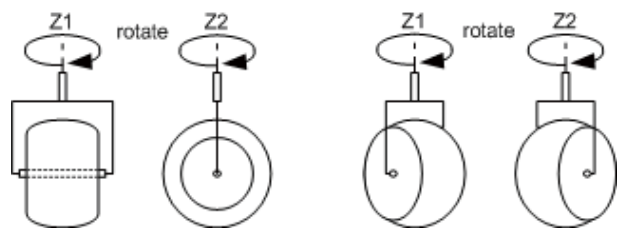


圖2 正交輪運作的基本原理(1)

縱向正交輪的機構配置如圖3所示。當主輪軸轉動輪子時，將提供垂直於主輪軸方向的動力，而在平行於主輪軸的方向，輪子本身可以自由轉動。在垂直於主要輪軸的方向，此輪的動作仍然有受到限制，這是因為此輪的動作是直接由主要輪軸的轉動所控制；然而，此輪平行於主要輪軸方向的動作卻是沒有這種限制。

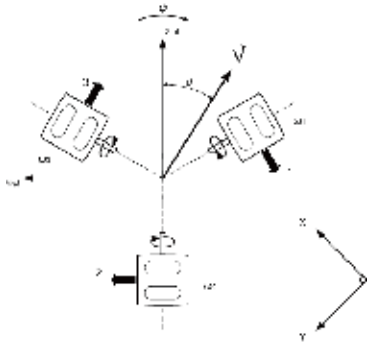


圖3 縱向正交輪組態配置

而這種機構設計的主要缺點是必須要預防對垂直軸做旋轉的動作，如果有繞著垂直軸方向作旋轉的動作，這樣的機構設計必須預防輪子滑動(Slip)。但這種機構設計相較於先前的萬向輪仍有以下幾項優點：

1. 所使用到的部份零件較少
2. 對於輪子體積的需求較小
3. 與地面的接觸更加的平穩

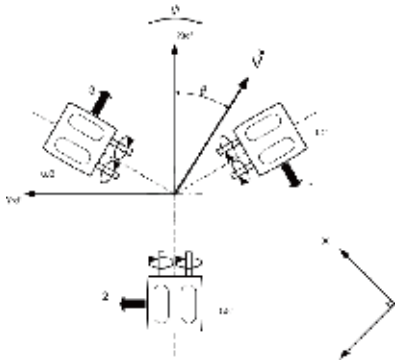


圖4 側向正交輪組態配置

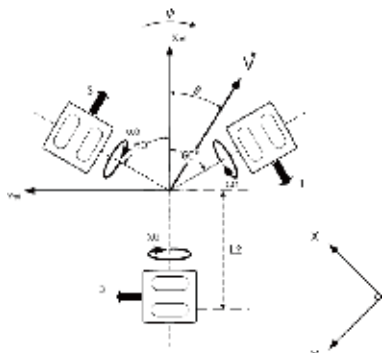


圖5全方向性移動式機器人三輪機構配置

側向正交輪相較於縱向正交輪的機構設計會比較複雜一點，側向正交輪的設計需要齒輪或是皮帶等零件的配合帶動。如圖4所示每個輪子都要用框架支承，並且與驅動軸連接在一起，垂直於輪軸的軸心。兩個驅動軸之間必須透過齒輪連接且互相平行，這樣的設計可以使這兩個輪軸經由同一顆馬達使用相同的速度驅動。因此，這種機構配置的動作會被限制且控制於驅動軸的方向，但平行於驅動軸方向的動作仍然是不受限制的。

圖5為全方向性移動式機器人的三輪機構設計，如圖所示，每一相鄰的兩個垂直軸之間夾角均為 120° 。這樣的機構設計，使在同一時間，三輪之間產生的牽引力會互相相等。圖5中同樣顯示了每一輪相對的牽引力方向。

若輪1和輪3以同樣的速度轉動，且輪1轉動的方向與輪3相反、輪2保持禁止；則輪1與輪3之間所產生的作用力會朝 X_{ref} 著的方向。以此類推，這樣的三輪機構設計可以使車體朝著任何方向前進。

這三個輪子之間的牽引力和機器人的移動關係，通常可以用直接(Direct Kinematics Equation)與反運動方程式(Inverse Kinematics Equation)來表示。為了推導出運動方程式，令圖5中 X_{ref} 與 Y_{ref} 為機器員的參考座標， \vec{v} 與 $\dot{\psi}$ 分別為其線性速度(m/s)與旋轉速度(rad/s)。則速度與輪子旋轉以及機器人移動之間的關係可以表示如下：

$$R\omega_1 = -|\vec{v}| \sin(60^\circ - \theta) + \dot{\psi}L_1 \quad (4)$$

$$R\omega_2 = -|\vec{v}| \sin \theta + \dot{\psi}L_2 \quad (5)$$

$$R\omega_3 = -|\vec{v}| \sin \theta + \dot{\psi}L_2 \quad (6)$$

在上列方程式中， ω_1 、 ω_2 與 ω_3 分別表示為輪1、輪2與輪3的角速度。而 L_1 、 L_2 與 L_3 分別是表示機器員中心到輪1、2、3之間的距離。而方程式(4)、(5)、(6)的右邊第一項是由 \vec{v} 對應到輪子運動方向所推導出來的。例如，在 \vec{v} 與輪1的垂直軸之間為 $(60^\circ - \theta)$ ，而對應係數就是 $-\sin(60^\circ - \theta)$ 。另外，方程式當中的第二項則是由角速度 $\dot{\psi}$ 預定到垂直軸的距離。

將方程式(4)、(5)與(6)的右項經過處理之後，我們可以得到下列幾個方程式：

$$\omega_1 = \frac{|\vec{v}|}{2R} (\sin \theta - \sqrt{3} \cos \theta) + \frac{\dot{\psi}L_1}{R} \quad (7)$$

$$\omega_2 = -\frac{|\vec{v}|}{R} \sin \theta + \frac{\dot{\psi}L_2}{R} \quad (8)$$

$$\omega_3 = \frac{|\vec{v}|}{2R} (\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta) + \frac{\dot{\psi}L_3}{R} \quad (9)$$

方程式(7)、(8)與(9)表示了線性速度、旋轉速度與輪子轉速之間的關係，稱為反運動方程式(Inverse Kinematics Equation)。當機器人以要求的線性速度與旋轉速度運動時，反運動方程式可以用以估計輪子的旋轉速度。

這些反運動方程式包含了非線性的部份 $\cos\theta$ 和 $\sin\theta$ 。為了取消非線性的部份，令線性速度分解成 X_{ref} 到 Y_{ref} 與兩個方向的速度。因此，我們可以得到以下方程式：

$$V_x = |\vec{V}| \cos\theta \quad (10)$$

$$V_y = |\vec{V}| \sin\theta \quad (11)$$

$$[\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^T = A[V_x \ V_y \ \dot{\psi}]^T \quad (12)$$

以及

$$A = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L_1 \\ 0 & -1 & L_2 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L_3 \end{bmatrix}$$

由於 $L_i(i=1, 2, 3)$ 一直是正整數，因此 A 為可逆矩陣。其逆矩陣為

$$A^{-1} = \frac{R}{L_1 + L_2 + L_3} \begin{bmatrix} \frac{-2L_3 - L_2}{\sqrt{3}} & \frac{L_1 - L_3}{\sqrt{3}} & \frac{2L_1 + L_2}{\sqrt{3}} \\ L_2 & -L_1 - L_3 & L_2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

因此

$$[V_x \ V_y \ \dot{\psi}]^T = A^{-1}[\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^T \quad (13)$$

方程式(13)為全方向性移動式機器員的直接運動方程式。

上述所推導出來的直接運動方程式與反運動方程式雖然與[5]中的類似，但是推導出方程式(4)、(5)、(6)所使用的觀念是更具有意義。在本研究當中，提供了一個使推導直接運動方程式和反運動方程式更容易了解並重新推導的新方法。

三、機構及控制電路的設計與實現

本論文所製作的全方向性驅動系統使機器員具有三個獨立動作的自由度(Degree of Freedom)，這表示可以藉由彼此的獨立完成想要達到的位置與方位。本研究使用縱向正交輪提供全方向性驅動系統必要的動作自由度。另外就是為驅動系統設計與正交輪相關的機構配置。因此，將三個直流馬達與其相對的全方向縱向正交輪以彼此相距 120° 的方式配置於機體平台的三個角落，如圖6所示。每一個全方向性正交輪都擁有兩個自由度，一個是馬達旋轉方向的主動自由度，另一個正交輪的滾輪所提供垂直於前者的被動自由度。

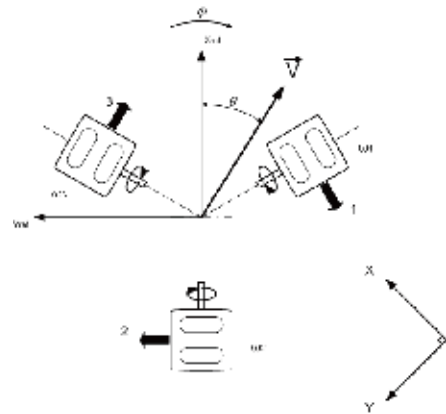


圖6 本研究所研製的全方向性驅動機構配置圖

為了瞭解全方向性驅動系統整體運作的運動方程式(Kinematics Equation)，首先必須研究每個全方向輪的運動方式。圖7說明了在全方向性驅動系統中每個驅動輪的限制(Constrained)以及非限制(Unconstrained)移動向量。圖中，全方向輪組態的限制運動是透過驅動馬達所直接控制。

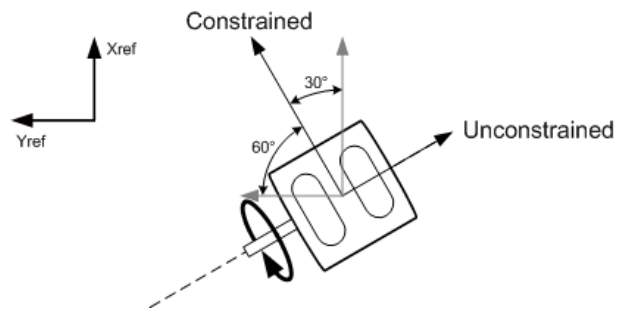


圖7 個別全方向輪的運動

此全方向輪的動力(限制方向)是由垂直於驅動馬達的軸心所產生，所產生的動力會因為其他全方向輪產生的動力影響而衰減。當全方向輪驅動時，整體動力所產生有關於機器員內部參考座標 X 方向的動力是： $V_x = \sin(60^\circ) = \sqrt{3}/2$ 。而有關於機器人內部

參考座標Y方向的是： $V_Y = \sin(30^\circ) = 1/2$ 。

在機器人三輪配置機構中的每一個輪子都可以使用相同的方式建模，建立一個由全方向性驅動系統提供動力的完整運動模型。圖8即表示全方向輪驅動系統中各個全方向輪所產生的動力關係。

由機器人的運動方程式(13)可以得知，當機器人朝著正前方移動時的動力是由全方向輪1以及全方向輪2所提供。當機器人在固定一點上旋轉時，所有全方向輪所產生的平移動力會互相抵消，造成機器人只有單純的旋轉。圖9說明機器員行進方向與各全方向輪組態所提供動力之間的關係。

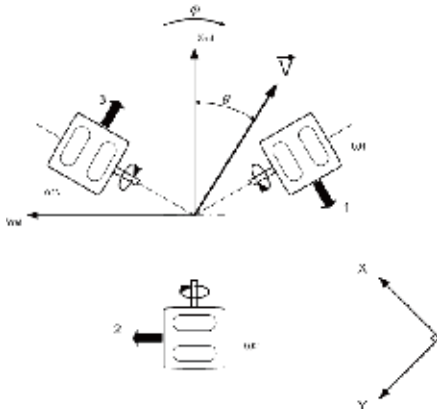


圖8 全方向性驅動系統所產生的動力

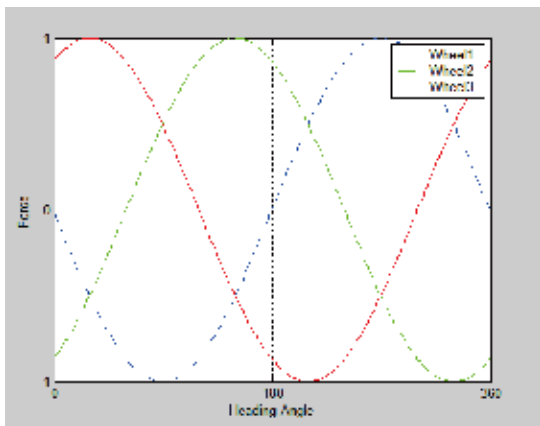


圖9 各全方向輪提供動力與機器員行進角度間的關係

本系統所使用的全方向輪[21](Omni-Directional Wheel)是類似於縱向正交輪(Longitudinal Orthogonal Wheel)的一種。主要的構造是由一對在四周平均排列4個聚氨酯(Polyurethane)製成的滾輪組結合而成，如圖10所示。因為這樣的構造配置，使得此全方向輪不論在什麼狀態下都能夠有一個滾輪與地面接觸，如圖11所示，滿足全方向輪的必要條件。類似這種形式的輪子，在全方向性或是一般移動式機器人(Mobile Robot)的設計上經常有廣泛的使用。

這樣的驅動裝置可以實現所有正交全方向性(Orthogonal Omni-Directional)驅動的特性，但卻沒有像一般正交輪的構成那麼複雜[5]。而且聚氨酯所

製成的滾輪在平滑的表面或是粗糙的地毯上，會比一般尼龍(Nylon)所製成的全方向輪具有更佳的摩擦力。



圖10 正交輪實體圖

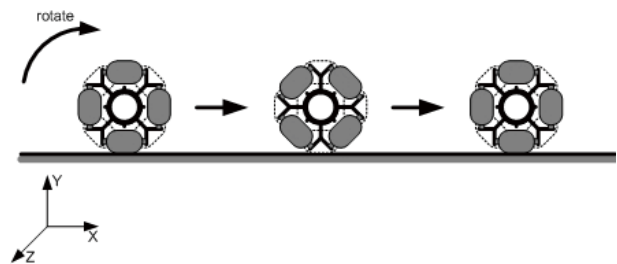


圖11 正交輪的工作原理

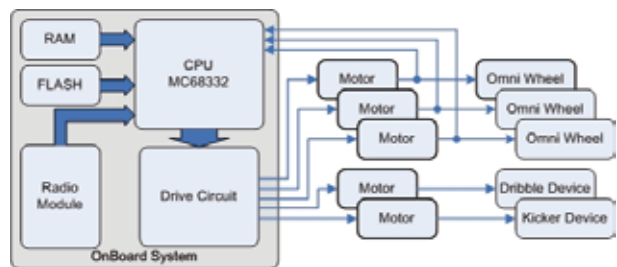


圖12 系統控制電路架構圖

為了實現全方向性移動式機器員，除了本身車體機構的特殊設計之外，還需要能夠配合控制車體動作的控制系統。本研究將設計一以MC68332作為核心的微處理器控制系統作為機器員的車體控制系統。MC68332是一32位元微處理器[13]作為CPU (Central Processing Unit; 中央處理單元)，有關於微處理器的詳細內容可以參考相關的使用手冊[14]。MC68332的其中一個特點就是具有可以與CPU同時運作的TPU (Time Processor Unit; 時間處理單元)，一個專門對於時序控制的半自動微處理器[15]。這項模組擁有兩種重要的功能，PWM(Pulse Width Modulation; 脈衝寬度調變)[16]以及QDEC(Quadrature Decode; 正交解碼)[17]。PWM是利用調變脈波寬度改變輸出電壓控制馬達，QDEC是用來為了位置計數器的增減，針對成對的反相(Out of Phase)信號解碼。MC68332的TPU一共有16個可程式化的Channel (通道)。

對於馬達控制所需要的TPU頻道數目是取決於我們想要控制的程度。一般而言，要控制一顆

馬達可能需要使用到4個TPU的Channel；其中兩個Channel用來控制馬達驅動方向的PWM，另外兩個Channel用來作為QDEC提供接收馬達轉速的回饋(Feedback)性號。依照本研究所設計規劃的機構配置，系統需要控制3個驅動(Drive)馬達、1個盤球(Dribbler)馬達以及1個踢球(Kicker)馬達。因此5個馬達必需要總共20個Channel才能控制，顯然地，16個Channel並不足以控制所有的馬達。因此在TPU的Channel分配方面就必須要有所取捨。

為了使TPU有限的Channel能夠有效運用，此系統規劃使用1個Channel控制馬達速度，改用普通的邏輯輸出控制馬達的轉向。而每樣機構裝置的需求：驅動馬達必須要得到完整的控制。盤球馬達在任何情況下，都只需要朝著一個方向旋轉。踢球裝置的機構設計需要得知踢球馬達必須在何時停止旋轉。在經過分配之後，TPU的Channel配置如下表所示：

表格 1 TPU Channel使用配置

裝置項目	使用Channel數目	一般I/O
驅動馬達*3	(1 PWM + 2 QDEC) * 3	(2 I/O) * 3
盤球馬達*1	1 PWM + 2 QDEC	1 I/O
踢球馬達*1	1 PWM + 2 QDEC	1 I/O
共用	15	8

如圖12所示，此系統控制電路除了做為主要核心的MC68332微處理器之外，還有其他幫助微處理器運算的主要元件，包含儲存系統控制程式的快閃記憶體(FLASH Memory)[18]以及幫助運算的隨機存取記憶體(RAM; Random Access Memory)[19]。MC68332同樣擁有一般微處理器的週邊。包括作為無線通訊模組介面的SCI(Serial Communication Interface; 序列通訊介面)模組，以及作為LEDs、觸碰開關等介面的一般I/O。

而跟以往所發展的機器員相比較[12]，過去的控制電路使用2000mAh的鎳氫充電電池提供控制系統工作電源，六顆1.2V的電池串聯可以為直流馬達提供7.2V的工作電壓。對於目前所研製的控制電路，為了蓄電量以及體積等因素，改用單顆2400mAh的分壓型鋰電池，不但減少電池的體積及載重量，在供電方面一樣可以達到相同甚至更好的效果。

由於機構尺寸的限制與其他因素的考量，系統控制電路的電路板希望能將體積縮減並且配合機構的設計。最後採用4層佈局的印刷電路板

(PCB; Printer Circuit Board)設計，其中包含元件層(Component Side)、接地層(Ground Plane)、電源層(Power Plane)以及焊接層(Solder Plane)。並且大幅採用SMD(Surface Mounted Devices; 表面黏貼元件)元件以節省佔用電路板的空間。

四、實驗與成果

全方向性機器足球員最主要的組成項目是全方向性驅動裝置以及控制電路，搭配全方向性機器員運作系統的控制，可以使機器員機體完成所指定的運動行為。但全方向性機器足球員的驅動裝置及機體構造在製作過程中難免發生誤差，或是其他裝置元件在結構上的缺陷，因為這些因素的影響很有可能造成機器人在動作時產生誤差，而無法達到預期的效果。

在此，將對於全方向性機器人的運作系統以及組成元件做相關的測試實驗，探討本研究所研製的機器人在運動方面的特性及效能。也藉此調整機器人運作系統的控制方式，希望能彌補改善無法改變的硬體缺失。

在本研究中將針對幾點全方向性機器人的組成元件及相關特性做實驗驗證，實驗的內容包含：機器人運作系統中的控制參數對於機器人運動情形之間的關係以及全方向輪與地面接觸面對於機器人移動誤差的影響。以下便是各實驗項目的詳細內容。

實驗一 反應控制迴圈的驗證

在著手開始機器人機體結構與運作系統之間的整合之前，首先驗證在本研究中針對機器人運動控制所設計的反應控制迴圈；先確定此控制迴圈與全方向性驅動裝置配合的工作情形正確無誤，再應用到全方向性機器人的機體上。

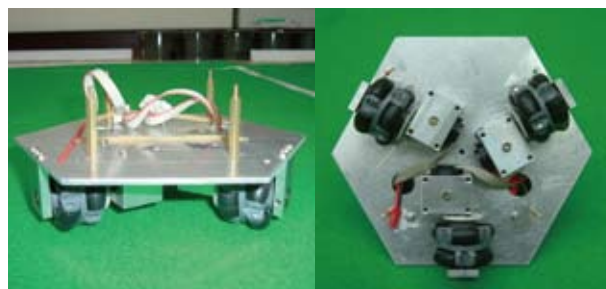


圖13 全方向機器人的正視圖與下視圖

機器人機構會影響在機器人控制效能上的因素很多，例如機體的重量、重心以及全方向輪與驅動馬達之間的咬合程度，軸承之間的相互關係等，都對機器人效能有很大的影響。圖13為全方向機器人，此原型機構上只有單純的全方向性驅動裝置，

這樣的初步整合工作可以簡化影響控制的因素，驗證反應控制迴圈的原始效能。

實驗的方式是使用我們所設計的操作測試界面(OMNISIM)的簡易遙控功能輸出無線電命令，命令機器員在平坦的地毯上以每次1000mm的距離進行前後移動的運動，並使用數據接收模式接收機器員在行進時的Encoder數據，並將取得的數據使用MATLAB畫出圖形分析。

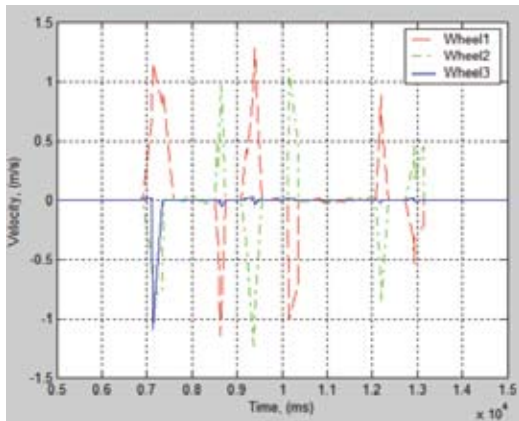


圖14 各輪速度關係圖(k_p 、 $k_i=1$, $acc=3m/s$)

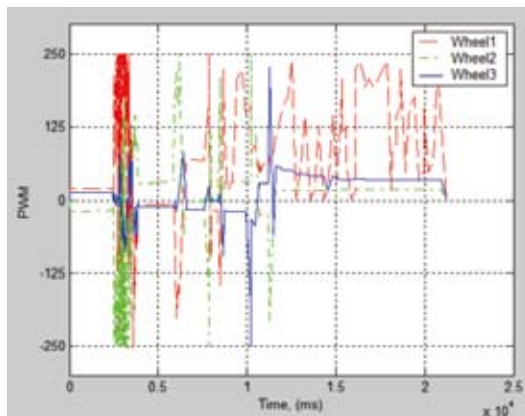


圖15 反應控制迴圈對於各馬達的輸入命令 (k_p 、 $k_i=1$, $acc=3m/s$)

將PI控制參數各設為1，加速度設為3m/s。將進行實測後的數值以圖形的方式表示。如圖14所示，可以看出當機器人進行運動時，各輪速度的變化情形。當輪1速度為正且輪2為負時，機器員會呈直線向前運動，若輪1速度為負且輪2為正時，機器員則是進行後退的運動。在機器員進行以上前進或後退的運動時，輪3應該是成靜止的狀態，但因為受到輪1及輪2之間作用力或是其他因素的干擾，輪3可能會有些許的偏移，此時機器員運作系統中的反應控制迴圈就會發揮應有的效能，馬上對輪3輸出反方向的補償命令將輪3反轉回初始狀態。

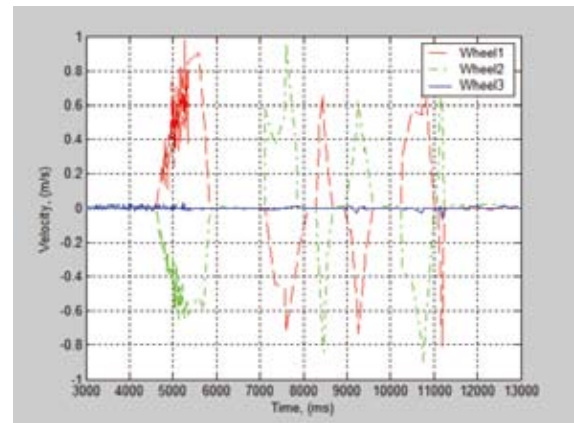


圖16 各輪速度關係圖(k_p 、 $k_i=1.5$, $acc=2m/s$)

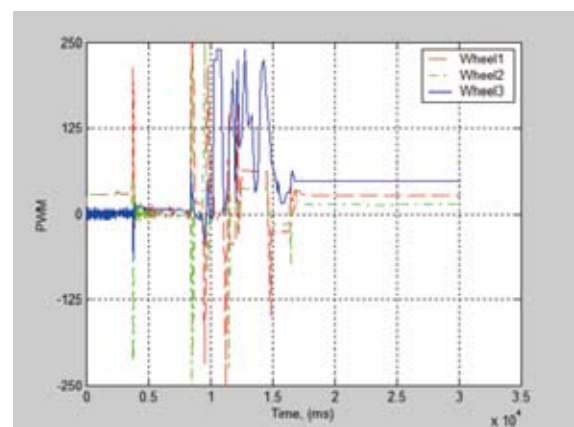


圖17 反應控制迴圈對於各馬達的輸入命令 (k_p 、 $k_i=1.5$, $acc=2m/s$)

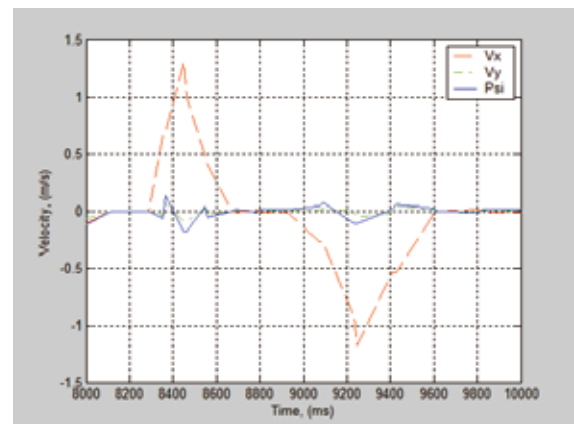


圖18 機器員在座標平面上的移動情形(X方向)

使用上述參數的反應控制迴圈在工作上的情形還算正常，但由圖15中可以看出，反應控制迴圈對於各馬達的輸入命令並不穩定，且機器人在加速度為3mm/ms時也容易造成輪子打滑的現象。因此將進行對於控制參數的調整。

以上是針對反應控制迴圈的PI控制常數以及各輪的加速度進行調整，在PI控制常數方面，將最後輸出的控制命令控制在 ± 250 的範圍裏面，並將加速度調整到使輪子不會發生打滑的程度，在經過調整

及測試後的實驗結果如圖16及17所示。

若將機器員進行運動時的各輪速度變化代入方程式(13)，可以求得、以及，並將以上參數對時間的關係以圖形表示，將可以了解機器員在座標上的移動情形。如下圖18及19所示。

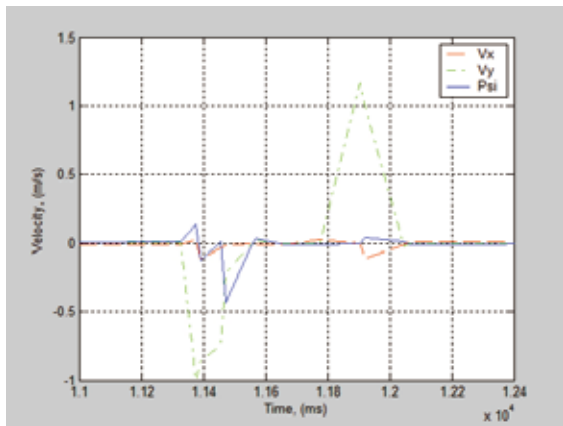


圖19 機器員在座標平面上的移動情形(Y方向)

實驗二 全方向輪接觸面對於誤差的影響

在先前的章節中，我們可以得知萬向輪與正交輪因為本身結構的不同而形成的優缺點。相同的影響也發生在本研究所研製的機器人上，在本研究中所使用的全方向輪雖然與縱向正交輪類似，但是最大的差異是此全方向輪的各個小滾輪是已呈交錯的方式排列，這樣的結構雖然提供了全方向輪在任何時刻都會有一個滾輪與地面接觸，但是卻會造成機器人的運動方程式中的L(全方向輪與機器員機體中心的距離)因此改變。在本實驗中將探討本研究中所使用的全方向輪組態在機器員進行運動時所可能造成的影響與誤差。

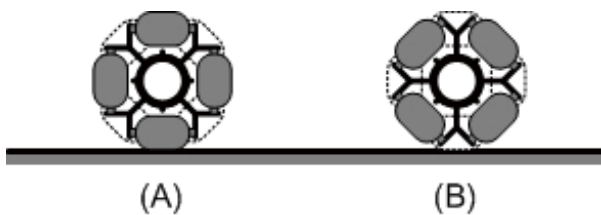


圖20 全方向輪與地面的接觸關係

實驗的方式是將機器員機構中的輪2分別設定成圖20的(A)與(B)兩種狀態，並進行行進距離1000mm的前進及後退運動，並將實驗的結果表示如下。

由上圖21及22中，我們可以看出全方向輪與地面的接觸狀態不同，確實會對機器員的運動造成一定程度的影響，尤其是在後退的運動中，因為全方向輪與地面的接觸不穩定造成輪子的偏移，會使得機器員的行進方向誤差加大。因此，這樣的影響因素對於在機器員進行長距離的運動時是必需要考慮的。

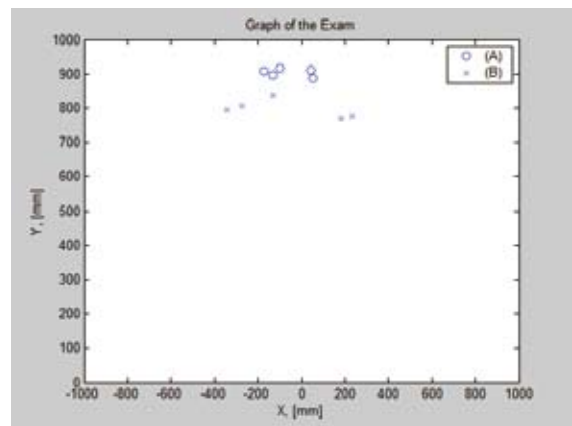


圖21 全方向輪接觸面對於機器員運動的誤差影響(前進)

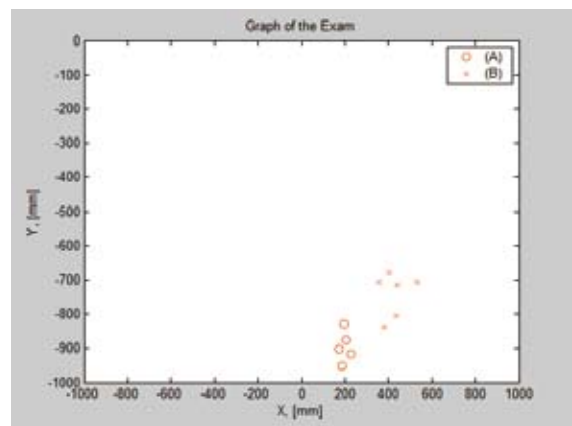


圖22 全方向輪接觸面對於機器員運動的誤差影響(後退)

五、結論

本研究完成了全方向性機器人的研製，並可藉由操作測試界面OMNISIM的操作呈現出全方向性機器足球員的各種完整運動過程。在研究的過程中，亦針對所研製機器員的運動特性與效能進行實驗驗證，從實驗中的結果，瞭解到機器人運作系統控制參數與機器人機體的整體工作情形以及全方向輪接觸面對於誤差所可能造成的影響，繼而調整控制參數。以上的成果將有助於繼續進行全方向性機器人相關領域的研究。

最後值得參考的是在本研究中透過MC68332所建立的控制電路，藉由修改相對應的機器人運作系統將可以繼續應用在其他有關於機器人控制的研究上。並且與其他類似研究中所研製的控制電路相較之下，花費的成本較少卻擁有相當甚至更好的工作效能。

參考文獻

1. <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html>
2. Borestein, J., "Control and Kinematic Design of Multi-Degree-of-Freedom Mobile Robots with Compliant Linkage," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, no. 1, pp.21-35, 1995.
3. Reister, D. B, "A New Wheel Control System for the Omnidirectional HERMIES-III Robot," Robotica Vol. 10, pp. 351-360, 1992.
4. Dickerson, S. L. and B. D. Lapin, "Control of an omni-directional robotic vehicle with Mecanum wheels," 1991 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 323-328, 1991.
5. Francois, G.P. and Killough S.M, "A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 10, no. 2, pp.480-489, 1994.
6. R. Balakrishna and Ashitava Ghosal, "Modeling of Slip for Wheeled Mobile Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, no. 1, pp.126-132, 1995.
7. Robert L. Williams, Brian E. Carter, Paolo Gallina, Giulio Rosati, "Dynamic Model with Slip for Wheeled Omnidirectional Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, pp. 285-293, 2002.
8. Keigo Watanabe, "Control of an Omnidirectional Mobile Robot," Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Adelaide, Australia, pp. 51-60, 1998.
9. Raffaello D' Andrea, Tamas Kalmar-Nagy, Pritam Ganguly and Michael Babish 'The Cornell RoboCup Team', RoboCup 2000: Robot Soccer World Cup IV, pp.41-51.
10. James k. Archibald and Randal W. Beard, 'GOAL! Robot Soccer for Undergraduate Students', Robotics & Automation Magazine, IEEE, Volume:11, Issue: 1, pp.70-75, 2004.
11. Christopher Messom, 'Robot Soccer:- Sensing, Planning, Strategy and Control, a distributed real time intelligent system approach' .
12. Kuo-Yang Tu, 'Design and Implementation of a Soccer Robot with Modularized Control Circuit', RoboCup 2001: Robot Soccer World Cup V, pp.459-464.
13. Motorola Inc., "MC68332 User's Manual," DataBook, 1990.
14. Motorola Inc., "MC68332 Technical Summary," DataBook, 1996.
15. Motorola Inc., "TPU Time Processor Unit Reference Manual," DataBook, 1996.
16. Motorola Inc., "Pulse Width Modulation TPU Function (PWM)," DataBook, 1997.
17. Motorola Inc., "Quadrature Decode TPU Function (QDEC)," DataBook, 1993.
18. M X I C , " M X 2 9 F 4 0 0 T / B 4 M - B i t [512k*8/256k*16] CMOS FLASH Memory," DataBook, 2002.
19. Winbond, "W24100 128 * 8 CMOS Static Ram," DataBook.
20. STMicroelectronics, "L298 DUAL FULL-BRIDGE DRIVER," DataBook.
21. <http://www.acroname.com/robotics/parts/R97-4CM-POLY-ROLLER.html>