

#### **、** 別言

回顧 1973 年 · Waseda 大學的 KATO 團 隊開發出 WABOT-I 人形機器人 [1] · 使得 人們開始慢慢的對人形機器人產生興趣 · 自此人形機器人這個名詞在日常生活中並 不陌生 · 到了 1990 年代 · 許多團隊紛紛開 始對於人形機器人進行研究 · 各單位也先 後釋出研究成果 · 機器人產業逐漸露出了 檯面 · 近年來 · 機器人產業还漸露出了 檯面 · 近年來 · 機器人產業在日本、韓國 與美國等國家均有進步的技術發展與研究 成果 · 包含由日本本田公司 ( Honda ) 所 製造的 ASIMO[2]、日本產業技術綜合研究 所 ( AIST ) 開發的 HRP 系列 [3-6]、以及 韓國 KAIST 的 KHR 系列 [7-9] 等 ·

Unit : mm 346 225 253 35 Waist 95.5 Hip Hip Pitch 51 Total 240 Thigh length: Knee Pitch 700.5 125 240 Shank Ħ Ankle Pitch 30 125 The height of ankle

雙足機器人相較於輪型機器人更能在崎

▲圖1 雙足機器人真實尺寸圖

嶇的路面上行走,然而如何讓人形機器人穩定行走、轉彎甚至跑步等動作,都是開發過程中所會遭遇的 困難。和工廠中的機械手臂不同,雙足機器人並非固定在地面上,因此雙足機器人在行走時非常容易因 為力的不平衡而傾倒。雙足機器人身上的自由度非常多,不考慮上半身的情況,雙腳大致有 10~15 個 自由度,每個桿件之間的結合方式也不盡相同,要用數學模型來描述整體機器人的運動相當困難,因此 我們在數學模型上作適度的簡化,規畫出可使機器人穩定步行及轉彎的動作軌跡,並藉模擬與實驗來確 認軌跡的正確性。

在本研究中·機器人計畫目標的身高體重為 120 公分、60 公斤。腳長(腳踝關節到髖關節的長度) 為 480mm 約佔身高的 40%,其中小腿長和大腿長各為腳長的一半 240mm。腳踝關節到腳底板的高度 為 125mm。髖關節到腰部的連接機構高度為 95.5mm。圖 1 為本研究的雙足機器人尺寸圖。

## 二、 步行軌跡設計

當機器人行走時,為了保持平衡,其全身零合矩點(Zero-Moment Point,簡稱 ZMP)[10]必須落 在腳掌支撐平面之內。在機器人行走過程中,大致上可分為單腳支撐階段和雙腳支撐階段,由於在兩階

#### 段中的動力學模型不同,所以這兩個階段必須分開考慮。

機器人從靜止開始,經歷一連串的步行,最後回歸靜止的過程,可以分割成數個階段,其階段流程如圖2所示,包含從一開始的蹲下,把重心位從雙腳中央移動到其中一支腳上,開始走路前的一小段暫停, 跨出第一步,雙足支撐階段,單足支撐階段,最後一步,將重心移動回雙腳中央,站起回到初始狀態, 結束步行到關閉程式前的一段緩衝時間。



要推導機器人在單足支撐階段的動態方程式時,先做幾個簡化假設。假設一、全身質量集中在質心上; 假設二、機器人的腳無質量,腳和地面接觸點為一可旋轉關節;假設三、地面的摩擦力足夠大,腳掌和 地面無相對滑動;假設四、只先考慮二維的 xz 平面。在此假設下,機器人可以簡化為如圖 3 所示的倒 單擺模型。

產生質心在單足支撐階段之軌跡時,為了簡化演 算複雜度,假設機器人在運動時,質心 z 方向的高 度始終保持一定,此假設之動力學模型稱為線性倒 單擺模型。

在雙足支撐階段的質心軌跡,則是用多項式 (Polynomial)建接兩個倒單擺模型。如圖4所示, 前面的單足支撐階段為SS1,後面的單足支撐階段 為SS2,SS1和SS2中間為用多項式連接的雙足 支撐階段(DS)。多項式的初始條件為SS1的終端 狀態,多項式的終端條件為SS2的初始狀態。



專題報導



▲圖4多項式連接兩個線性倒單擺型

定義步行過程中的每個階段後,質心軌跡依照 每個步行階段的不同的動力學模型而進行規劃。 依據每個階段的規畫出的質心軌跡,設計出兩腳 底板在步行過程中的軌跡。有了質心軌跡和雙腳 腳掌軌跡後,用逆運動學即可求得全步行階段中 馬達轉角的軌跡。根據質心軌跡與腳板軌跡,用 動力學演算出ZMP軌跡,當ZMP軌跡落在腳掌 的支撐範圍內時,機器人就能保持平衡,即完成 整個步行軌跡產生流程。機器人完整的步行軌跡 規畫流程如圖5所示。圖6為全步行中之雙足支 撐階段模擬圖。圖中綠色線條為機器人質心軌跡, 紅色圓圈為關節位置,左腳為紫色線條,右腳為 深藍色線條,粗黑色線條為兩個髖關節的連線, 細黑線條為ZMP軌跡,淺藍線表兩髖關節的婆態。

#### 三、 轉彎軌跡設計

人形機器人的研究中,如何讓機器人的動作更 貼近於人類真實運動是一個重要的課題,因此除 了直線行走步行外,其他的動作也陸續成為研究 的方向。而若考慮平面運動的完整性,除了前進 後退的運動外,還必須加上方向調整,因此在步 行運動成功被開發後,研究上,機器人的轉彎運 動也開始受到關注 [11-14]。

在此,本研究完成步行軌跡的設計開發後,進 而設計規劃機器人轉彎軌跡。在轉彎步態設計, 依據質心運動狀態區分為原地轉彎與邊走邊轉。 原地轉彎為機器人由靜止站立姿態開始執行轉彎 動作,完成轉彎動作後站立靜止,無需考慮線性 倒單擺模型;邊走邊轉為機器人同時執行步行與



▲圖5步行運動軌跡的產生流程





轉彎動作,使用線性倒單擺運動模型進行設計。 以下分別討論此原地轉彎與邊走邊轉的軌跡設計 開發。

#### I.原地轉彎

原地轉彎設計時,而根據身體姿態和腳部姿態 的旋轉時間點不同,可分成三種運動模式:身體 姿態先轉 (Body turn first)、腳部姿態先轉 (Leg turn first)、身體與腳部姿態同時轉 (Simultaneity turn)。圖 7 為三種原地轉彎模式上視圖。

# **TECH FEATURES**

創刊歴程

專 題

報

道

術專欄

市場焦點

廠

商園

地

國際視窗

活動快報

本研究所開發之機器人因其機 構設計,兩腳在 Hip Yaw 軸向 轉動範圍介於-40 度至+40 度 之間。由於身體姿態先轉和腳部 **姿態先轉模式**,轉動皆僅是藉由 單腳 Hip Yaw 軸向馬達旋轉, 因此轉向的最大角度被限制在 40 度內。不過在腳部姿態先轉 彎模式下,可藉由轉動第一階段 的擺動腳踩點,決定身體在轉彎 時的動作範圍,相較於身體姿態 先轉·此模式在身體的運動範圍 的限制較小。若機器人執行轉向 角度大於40度的原地轉彎時, 可採用身體與腳部姿態同時轉的 模式,兩腳之 Hip Yaw 軸向馬



達皆貢獻了一半的轉向角度 使得機器人的最大轉向角度為前兩種模式的兩倍 最大可轉彎約80度左右。

#### Ⅱ.邊走邊轉

邊走邊轉的模式下,機器人同時進行步行與轉彎 動作,因此在規畫邊走邊轉的軌跡時,必須考慮線 性倒單擺模型來進行設計。運動過程為機器人先步 行幾步後,銜接邊走邊轉的軌跡,最後再步行。 詳細過程包含轉彎前步行之單足支撐階段、轉彎 第一階段雙足支撐(TDS1)、轉彎第一階段單足支 撐(TSS1)、轉彎第二階段雙足支撐(TDS2)、轉彎 第二階段單足支撐(TSS2)、轉彎第三階段雙足支撐 (TDS3)和轉彎後回復步行之單足支撐階段。運動流 程如圖 8 所示。

邊走邊轉時質心軌跡的設計如同步行軌跡設計, 利用線性倒單擺模型加上座標轉換,設計轉彎單足 支撐階段間的質心軌跡,得到每個單足支撐階段初 始及終端的質心位置、速度、加速度後,利用五次 多項式連結出雙足支撐階段的質心軌跡,最後藉由 參數調整得到最圓滑的質心軌跡。圖9即表示機器 人步行一個 Step 後,右轉 30 度,最後步行一個 Step 的轉彎模擬等角視圖;圖中三個時刻分別為開 始、TSS1 與結束,綠線為質心軌跡、紫線與深藍線 條分別為左右腳,粗黑線條為腰部。



▲圖8邊走邊轉動作階段流程圖



▲圖9機器人邊走邊轉模擬等角視圖

以右轉 30 度為例,當機器人步行運動至單足支 撐狀態後,進行轉彎第一階段雙足支撐 (TDS1), 此時左腳和右腳之 Hip Yaw 軸向的馬達皆旋轉 -30 度,使得身體姿態右轉 30 度。在轉彎第一階段單 腳支撐 (TSS1)時,右腳為擺動腳,其 Hip Yaw 方 向的馬達回轉 30 度,將右腳姿態右轉 30 度。而 在轉彎第二階段單足支撐 (TSS2)時,擺動腳為左 腳,其 Hip Yaw 軸向馬達旋轉 30 度回正,將左 腳姿態右轉 30 度,最後再繼續銜接步行動作。

### 四、 運動模擬結果

由前述的理論基礎設計步行及轉彎運動參數, 可透過 Matlab 計算出機器人軌跡,而在讓機器人 實際執行之前,必須盡可能確認該軌跡可讓機器 人在實際環境下穩定步行及轉彎。在本研究中, 使用 Matlab 及其 Simulink 模組和 Adams 進行 運動模擬。運動模擬的流程,先利用 Matlab 演算 繪圖進行機器人整個運動過程機構幾何的模擬, 確認幾何上的軌跡合理後,再將機器人軌跡輸入 Simulink 模組,透過 Simulink 與 Adams 的連結, 在 Adams 內進行外力下動態模擬,觀察 Adams 動態模擬出來的結果,確認所規劃之運動軌跡是 否能使機器人保持平衡穩定動作。

如圖 10 · 在 SolidWorks 軟體下繪製好雙足機 器人腳部機構後匯入 Adams。接著建立機構的 連結關係 · 設置驅動器到各個關節上來控制關節 轉動。最後 · 設定機器人的腳與地面的接觸關係 並調節重力場的大小與方向 · 讓機器人能夠藉由 地面的摩擦力以及正向力 · 模擬在地面上行走。 在 Adams 模型建構完成後 · 將 Adams 模型納入 Simulink 中 · 由 Simulink 輸入先前所生成的步行 軌跡進行模擬。

Adams 進行模擬時,我們使用兩種不同的輸入 控制,角速度輸入控制及扭力輸入控制。如以角 速度作為輸入時,Adams 視為使用者擁有極大效 能的驅動器,每個時間點下的角速度均符合使用 者的要求,缺點是此方法較不實際。扭力輸入的 優點在於會比較接近實際的情形,不過會衍生出 許多複雜的計算過程;在此研究先行測試以角速



▲圖10 建構Adams模型步驟



▲圖11 Adams中·角速度輸入控制行走模擬

度的輸入作為驅動端,以了解是否機器人會跌倒 或是有其他的問題,接著再修正軌跡,如果以角 速度輸入模擬成功時,則再進行扭力輸入作為驅 動端,並在 Matlab simulink 的方塊圖下安置 PID 控制器來控制機器人運動。

由圖 11 為角速度輸入 Adams 的模擬成果 · 機器人初始時在地面呈現直立的姿勢 · 接著各軸將因為驅動器的建立依照軌跡規劃的角度旋轉 · 並達成機器人行走的目標。

## TECH FEATURES

圖 12 為角速度輸入控制行走 模擬時,機器人 y 方向 ZMP 軌 跡圖。線線為 y 方向 ZMP 軌跡, 藍線內灰底部分為穩定範圍,在 加入與地面碰撞的因子後,機器 人 ZMP 軌跡皆符合理論所述, 完全落在腳掌支撐平面內,所以 保證機器人可以穩定的在地面行 走。

扭力輸入控制模擬時會產生許 多的誤差 · 當取樣時間太長或是



▲圖12 角速度輸入控制行走模擬時,機器人y方向ZMP 軌跡圖

動作過於劇烈時均有可能造成模擬失真,所以在一開始使用扭力輸入控制時,先將在 Adams 裡的機器 人模型的腰部固定住,減少其不穩定性,簡單的測試各軸經過 PID 控制器控制的效果。然而,實際的機 器人的架設也與模擬設定相同,機器人的腰部架設在穩定的架子上,觀測模擬的成果來修改每一次規劃 的軌跡,接著再輸入修改過後的軌跡藉由程式來控制機器人運作。輸入雙腳各軸旋轉的軌跡來做回授控 制。而模擬結果顯示各軸的誤差幾乎都在1度以內,確認動作的正確性,軌跡規劃達成所希望的目標。

由於機器人步行軌跡與轉彎軌跡規畫的設計控制參數大致上相近,且在 Matlab 的模擬下其參數的調整無太大差異下,可以預期轉彎軌跡亦可如同步行 軌跡,動作可以符合設計的目標。

#### 五、實驗測試

在經過 Matlab 與 Adams 的模擬,確認軌跡的 規劃的正確性後,將軌跡實際交由機器人執行。但 由於模擬模型無法完全考慮機器人實體機電系統與 機構可能遭遇的問題,因此在確保並提升穩定度而 足夠讓機器人動作時不會傾倒的前提下,實驗時, 機器人所執行為較為靜態慢速的動作。

步行實驗中,蹲低高度為 2cm,一步長為 0.1m, 每一步的週期(一次雙足支撐與單足支撐)為 5.4 秒,從第一步到最後一步共步行 1.3m。圖 12 是 機器人步行實驗的側面截圖。原地轉彎實驗中,進 行三種模式包含身體姿態先轉、腳步姿態先轉及 身體與腳步姿態同時轉,分別左轉 10 度。圖 13 是原地轉彎的實驗截圖。邊走邊轉實驗中,步行 3 個 Step 後,連續 4 次右轉 20 度,再步行 1 個 Step。圖 14 是邊走邊轉的實驗截圖。



專題報導



## 六、結論

在此研究中·藉由線性倒單擺模型和運動學·規畫設計人型機器人的步行、三種模式的原地轉彎及 邊走邊轉·並利用 Matlab 軟體計算出步行與轉彎時的馬達軌跡。再者·透過 Matlab、Simulink 與 Adams 軟體的模擬·確認所生成的軌跡符合設計預期。最後·由實驗室所開發的人形機器人執行步行 與轉彎軌跡·機器人可以穩定地完成給定動作。

由實驗可得,目前的機器人第一步後可穩定步行至少10個 Step,每一步距約10cm,在開回路控制 下最快的步行速度為0.018(m/sec)。而原地轉彎三種模式,皆可轉彎至30度。邊走邊轉的軌跡亦可達 成連續30度轉彎。

## 七、未來展望

在機器人軌跡產生方面,本研究提供的步行方式使用倒單擺模型,未來可以考慮與評估使用其他方式 產生行走的步態。在模擬的部分,需要加入六軸力規、IMU、加速規等感測器的回授訊號,使模擬中的 機器人行走的更加穩定。程式的部分,建構出機器人整體控制程式的架構,加入感測器的回授系統,如 腰部的傾斜控制、腳掌落地時間控制、ZMP 位置控制、擺動腳的角動量補償控制等等。並完成更多的 運動控制程式,如加入走斜坡、上下樓梯等機制,使機器人更能在真實環境中行走,為往後的目標。

## 八、 Reference

[1] 早稲田大学ヒューマノイド研究所. Available: http://www.humanoid.waseda.ac.jp/index-j.html [2 Honda, Asimo. Available: http://world.honda.com/ASIMO/

- [3] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi, "Design of prototype humanoid robotics platform for HRP," in Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on, 2002, pp. 2431-2436 vol.3.
- [4] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi, "Humanoid robot HRP-2," in Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, 2004, pp. 1083-1090 Vol.2.
- [5] K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori, and K. Akachi, "Humanoid robot HRP-3," in Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, 2008, pp. 2471-2478.
- [6] K. Akachi, K. Kaneko, N. Kanehira, S. Ota, G. Miyamori, M. Hirata, S. Kajita, and F. Kanehiro, "Development of humanoid robot HRP-3P," in Humanoid Robots, 2005 5th IEEE-RAS International Conference on, 2005, pp. 50-55.
- [7] KHR. Available: http://hubolab.kaist.ac.kr/index.php
- [8] P. Ill-Woo, K. Jung-Yup, P. Seo-Wook, and O. Jun-Ho, "Development of humanoid robot platform KHR-2 (KAIST humanoid robot-2)," in Humanoid Robots, 2004 4th IEEE/RAS International Conference on, 2004, pp. 292-310 Vol. 1.
- [9] P. Ill-Woo, K. Jung-Yup, L. Jungho, and O. Jun-Ho, "Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot 3: HUBO)," in Humanoid Robots, 2005 5th IEEE-RAS International Conference on, 2005, pp. 321-326.
- [10] M. Vukobratovic and B. Borovac, "Zero-moment point thirty five years of its life," International Journal of Humanoid Robotics, vol. 1, No.1, pp. 147-173, 2004.
- [11] E. Kim, T. Kim, and J. W. Kim, "Three-dimensional modelling of a humanoid in three planes and a motion scheme of biped turning in standing," Control Theory & Applications, IET, vol. 3, pp. 1155-1166, 2009.
- [12] H. S. Shengjun PENG, Hongxu MA, "A Simulation and Experiment Research on Turning Gait Planning of Blackmann-II Humanoid Robot," presented at the 8th IEEE International Conference on Control and Automation Xiamen, China, 2010.
- [13] K. Miura, M. Morisawa, S. Nakaoka, F. Kanehiro, K. Harada, K. Kaneko, and S. Kajita, "Robot motion remix based on motion capture data towards human-like locomotion of humanoid robots," in Humanoid Robots, 2009. Humanoids 2009. 9th IEEE-RAS International Conference on, 2009, pp. 596-603.
- [14] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "A realtime pattern generator for biped walking," in Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on, 2002, pp. 31-37 vol.1.