

設計與以非圓形齒輪主控步態協調之仿生六足機器人

Design of a bio-inspired hexapod robot with non-circular-gear-based gait control

陳慎強 藍奕中 林沛群*

台灣大學機械工程學系

*corresponding email: peichunlin@ntu.edu.tw

摘要

本論文介紹一部六足仿生機器人的設計與製作。機器人以「簡單」的概念為主軸，使用一顆驅動馬達和一顆轉向伺服馬達來達成六足機器人前後左右的運動。單馬達的動力藉非圓形齒輪對的機構設計，使足在每一運轉週期內產生特定的運轉時序，來建構六足穩定運動的步態，並發揮足式機器人的特有的運動與越障功能。論文中並依序對機器人中的轉向系統、傳動配置、非圓形齒輪設計、腳部設計、實驗測試等依序有詳細的說明。

1. 前言

生命藉由演化來進行改良、更新、與適應，而地面大部分的動物經過漫長的演化過程之後，都形成具高度靈活性且有力的「腳」，以利生物本身在崎嶇的自然環境中迅速移動。雖然人類的發明「輪」已廣泛應用在我們所處的周遭，但論及能在崎嶇環境中移動的能力時，人類之發明仍難與各式陸上動物比擬。因此，藉由觀察生物運動的方式，來設計適當的足部以及驅動方式來建構移動平台，來達到和動物相仿的運動模式便有科學與工程上的價值。

這二三十年來學業界產出了各式的足式機器人。在二足機器人方面，以日系為首要[1]，如Honda的Asimo[2-3]、Sony的Qrio[4-5]等，此類型機器人多半利用預先側錄的人類運動軌跡，來探討空間中各自由度的軌跡對時間的關係，再直接將該關係編程到機器人中，來進行靜態步態之研發。四足也是廣泛被模仿的對象，如Scout series，一開始是小尺寸的每足具有1個主動自由度的Scott II[6]，以半被動半主動的方式將機器人體體運動進行行走、越障、上樓梯等步態，之後有較大型且自身動力版(power autonomous)的Scott II[7-8]，在膝部更加上自由度進行測試，而後再進行更完整的動態步態測試。另外也有四足的Patrush I，每足2個DOF，並嘗試在不規則地面上行走，之後更有更新為每足3個自由度的Tekkenseries[9-11]來進行步態研發與控制，後續更回歸到簡易版每足1個DOF的Rush[12]。各式六足機器人更是被廣泛的研發與探索，在教育娛樂商業界也有諸多的產品，這其中主要的原因，便是因機器人在六足架構之下，較易產生穩定的運動步態。方法是將六足分為兩組三足的運動，以相互交替的方式進行（一般稱為tripod gait），而當單組三足接觸地面時，本身即具有較穩定特質，這也是昆蟲類所廣泛使用的步態。目前六足的機器人中，有每足三個自由度的Lauron家族[13]，有每足兩個自由度的Sprawl家族[14-16]，也有每足一個自由度的RHex[17-22]，每一足具有單一個旋轉自由度，配上彈性足，便可以開發出許多不同的步態，如走、跑、上下樓梯、越障等。自由度的減低，於某些層面上代表控制的

簡易化，因此，我們想要探討，若針對一般常用的走跑步態，是否能更進一步來減低自由度，以更簡單的設計來達成，畢竟於架構上來進行如汽車般前後左右的運動時，僅需兩個自由度即能達成。

Tripod gait的產生，一般需具有兩個條件：一為三足在地面上和在空中回正的時間需要相近，二為兩組三足之間需具有時間上的相位差。相較於一般機器人採用馬達控制的方式，本機器人以非圓形齒輪(Non-circular gear)和傳動機構的設計，配合「單DC馬達」之驅動來達成上述之要求，除此之外，為能使機器人具有轉向能力，並配置一小型RC伺服馬達來達成功能。如此一來，便能以兩個自由度達到在一般地面上所需的運動操控，也建構出本機器人之獨特性。非圓形齒輪的設計，可以控制機器人在一個運轉週期下的速度；使得機器人腳在不同的狀態下產生速度變化。同時保持住腳輸出端的圓周運動特性，加大腳的步幅進而強化機器人越障的能力。當然，以如多連桿機構的方式等也可以達到僅用一顆單DC馬達便可以驅動全部足部的功能，但往復式的運動以及腳小的地面淨空空間(ground clearance)難免使腳的功能受到限制。本論文採用非圓形齒輪的方式，一方面同方向連續的旋轉使足部驅動保有慣性，一方面也使腳在空中回位時騰出極大的地面淨空空間，使機器人有較佳的越障效果。

本機器人為了減輕機身的重量，考量兩組腳的步態有其固定的規律性及對稱性，故簡化系統僅以一顆馬達控制機器人的運動，由遙控器控制馬達轉速，馬達透過傳動系統將動力分別輸出給兩組腳，再透過非圓形齒輪控制機器人腳在不同的運轉角度下產生需要的速度或扭力。最後，在前腳裝置轉向系統以控制機器人移動方向。機器人因此可以以兩個自由度運動。

論文第二章節說明機體以及傳動機構的架構，第三章節概述轉向機構的構成，第四章節說明非圓形齒輪的設計，第五章節概述腳部設計。機器人實體化後的實驗測試結果在第六章節中詳述，在第七章節進行總結。

2. 機體及傳動設計

驅動用DC馬達本體輸出為高速低扭力，為符合機器人是足驅動低速高扭力的需求，於傳動系統中配置渦輪減速機構，其優點除了高減速比之外，更具有反向自鎖的功能(not back-drivable)。低速的輸出再透過皮帶傳動的方式將馬達旋轉動力傳送至至前、中、後足轉軸附近，再配上六組非圓形齒輪對，來產生兩對三足間適當的相位差以及單組三足間所需要的非等速運動。足分組配置如前所述，左前腳、右中腳和左後腳為一組，右前腳、左中腳和右後腳為另一組，運作時每一組的三隻腳在地面上剛好以三點接觸支撐整個軀幹，使整個移動

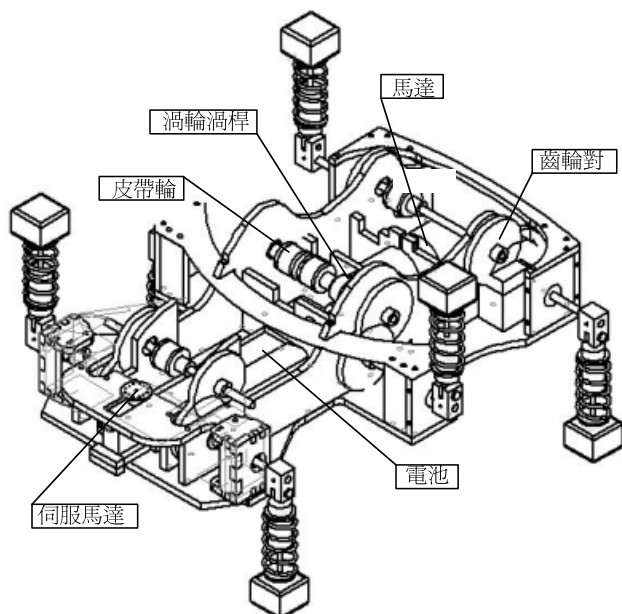


圖1 機器人零件配置圖

平台在運動中維持穩定。

在六足機器人的六隻腳上分別都裝了非圓形齒輪對，將等角速的 ω_{in} 轉換成不等速的 ω_{out} ，讓腳在旋轉中可以達到上快下慢的效果，以加長腳分佈於機器人本體下方的時間，進而達到與地面接觸的時程，又非圓形齒輪對為以雷射切割機切割塑膠之自製品，本身強度有所不足，因此將其設計在動力輸出的末端，一方面該齒輪僅需承受單足運動時的扭力，對齒輪的磨耗，一方面也有利於零件的更換。除此之外，屆時我們也可以將每支腳設計使用不同的非圓形齒輪對，來改變機器蟲行走的動態特性，可以增加機器蟲的研究價值。

機器人零件配置如圖1所示，內部結構採取左右對稱的型式設計，以均衡兩邊腳在行進間所承受的重力。重量均勻分佈以維持重心平衡，避免在行進間頭重尾輕，有向前傾倒的情形。前腳的底板需要內切，以提供前腳轉向時所需的空間。前後腳的間距間隔為兩倍腳長以上，以免前後腳互卡。

機器人之本體結構為以幾何上二維造型的板件所構成，因此每一個結構件可以直接以雷射切割機切割壓克力來製作。經由結構上的設計，這些平面的結構件便可相互接合以建構機器人本體所需的三維結構，並具有可輕易拆裝的特性。另外，為避免機器人運轉非圓形齒輪時發生斷齒及噪音過大的現象，因此於材料選用上採用比壓克力材料更具有彈型且表面摩擦力較小的acetal(乙縮醛二乙醛、塑鋼)材料。

3. 轉向機構設計

轉向裝置有三個主要部分：伺服馬達、連桿機構與萬向接頭。先建立簡單的數學模型，預估它們可能的動態行為，以採取適當的尺寸與幾何形式來組裝。

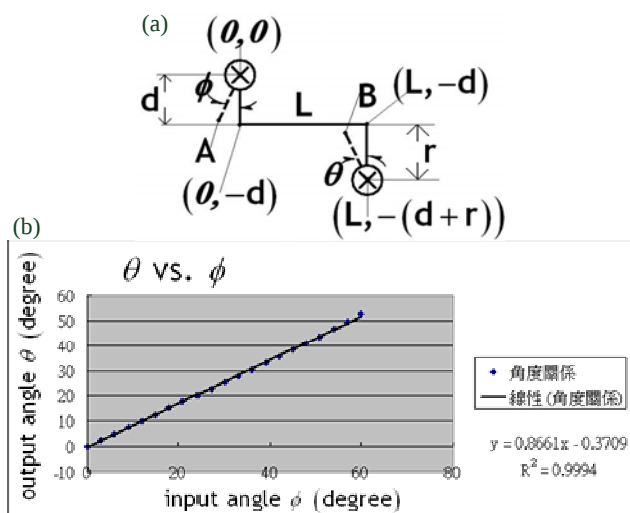


圖2 (a)四連桿設計(b)輸入 ϕ 與輸出 θ 的角度線性關係

伺服馬達：採用Futaba® 所生產的類比伺服馬達(analog servos)。該公司所生產的伺服馬達概括可分為大中小三種尺寸。因為機器蟲空間有限，所以不考慮大型的伺服馬達；但擔心小型伺服馬達之扭力或許不足，因此採用中型伺服馬達。

連桿機構：轉向裝置採取左右各一的對稱四連桿裝置，考慮角度輸入 ϕ 與輸出 θ 的角度損耗程度將四連桿如圖2(a)所示設計，調整L、d、r常數值的大小，若是L越大、r越大，或是d越小，則角度的耗損都會加大。因此，我們應該要讓L盡可能小、r盡可能小，而且d盡可能大；就是所使用的牽引桿要適當地短、牽引桿右端距萬向接頭中點的距離要適當地小，而伺服馬達所選用的轉盤半徑要適當地大。然而實際上，伺服馬達轉盤都有固定規格，而本組底板尺寸也已經預定了，所以主要的部分，就是設計萬向接頭在底板上的擺放位置，以決定適當的r值。

萬向接頭的基本架構，當萬向接頭的輸入軸與輸出軸之間未保持一直線時，則隨著輸入軸旋轉，輸入與輸出的角速度比不為一個定值，而且這個比值時而小於一，時而又大於一，蟲腳的轉速不是原先預計輸入的轉速，並且忽快忽慢。不過，因為機器蟲的轉向角度通常不會很大，再加上伺服器的轉角幅度有一定的限制，所以曲線的波峰與波谷實際上應更向-1這條水平線收縮；也就是說，轉速比在-1的上下作微幅的震盪。故容忍這樣的轉速比震盪。

4. 非圓形齒輪對設計

兩輪作純滾動，利用不同的半徑的接觸傳遞出不同的速度。兩輪相切的位置設計於兩輪心連心線間來回移動，固定角速度 ω_{in} 輸入，利用相切點速度一樣，及兩輪心的距離s，可以得到(輸出的半徑 R_{out})及(輸入的半徑 R_{in})進而獲得到非圓形齒輪對的形狀：

$$\omega_{in} R_{in}(t) = \omega_{out} R_{out}(t)$$

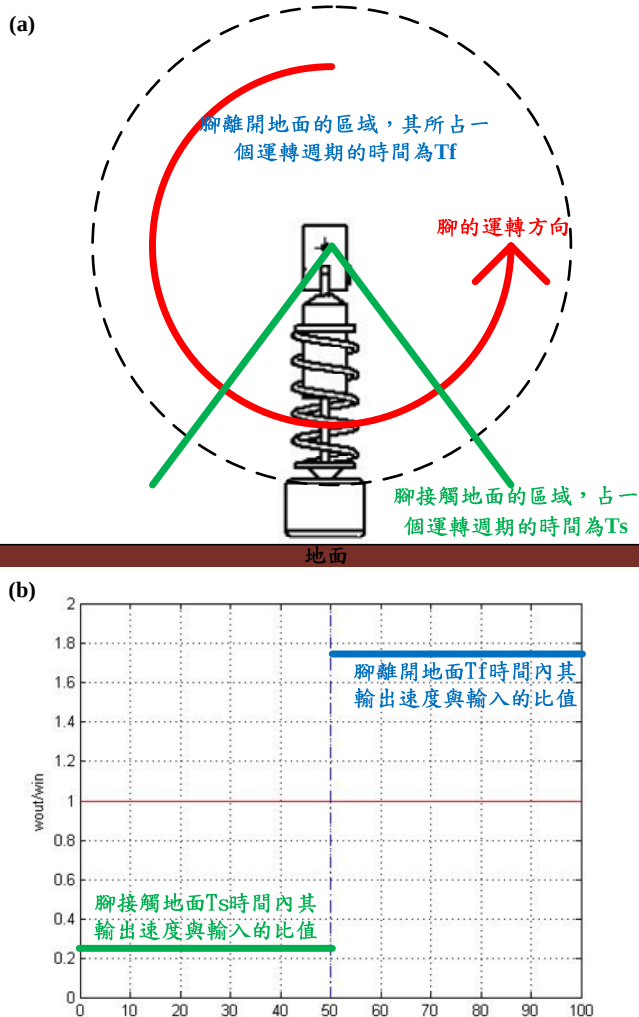


圖3 (a)腳部運動概念圖(b)在一個週期內輸出速度與輸入速度的比值概念圖

得出： $R_{out}(t) = s/(1 - \omega_{out}/\omega_{in})$, $R_{in}(t) = s - R_{out}(t)$

如圖 3(a)所示希望腳在接觸地面的時間(T_s)占整個週期的比例要大, 且 T_s 占全部運行的角度要小。也就是使減少所有腳離地的機會, 目的在於避免身體軀幹觸地。故先決定 ω_{out}/ω_{in} , 如圖三(b)所示, 大體上隨著輸入(中間線), 輸出(上下兩線)所期望的低速和高速在一個週期內呈現出來, 並把期望它調整成為一個連續的波形。利用傅立葉級數來組合圖三(b)的波形, 以獲得最佳曲線, 如圖 4(a)所示

考慮高低速分別占運轉週期的比率以及掛齒後壁面干涉的情況後, 求理想的齒輪形狀。另外低速部分不可太接近輪心(Win 左輪), 仍須考慮掛齒及輪心的軸所需要的空間, 劇烈的變化會使齒輪無法咬合, 如圖 4(b)所示。

因此, 為了齒輪節線的圓滑度, 低速部分採用等速, 高速部分用一個完整週期的餘弦函數表現, 紅線上上面面積補上紅線下不足的面積, 如圖 5(a)所示。再進一步修

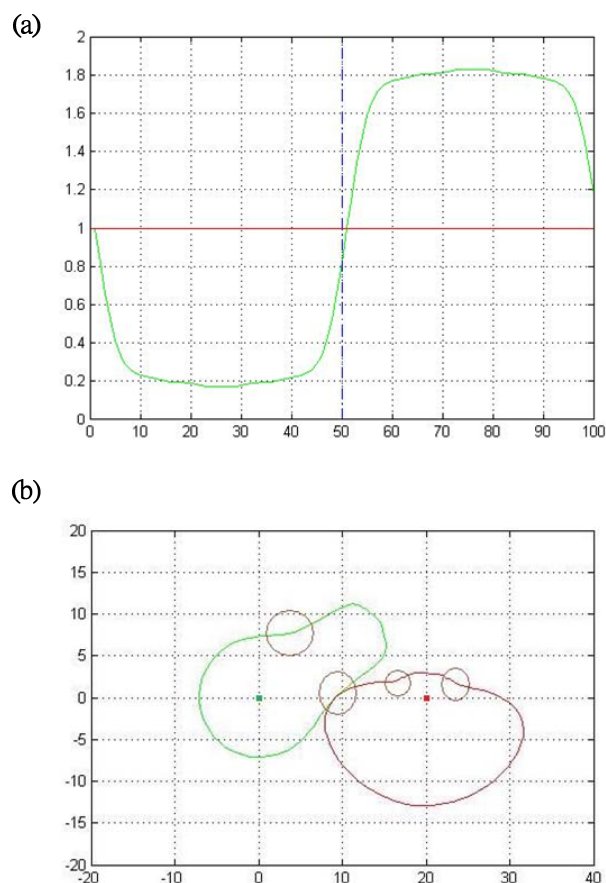


圖4 (a)依概念圖逼近的速度與輸入速度的比值(b)非圓形齒輪對街原示意圖

改, 利用低速跟高速部分的波形分開調整來達到更大的 T_s 及低速角, 再利用 Fourier Series 逼近圖 5(a) 的波形, 如圖 5(b) 所示, 使低速跟高速部分都用複合級數調整找出更圓滑也夠理想的非圓形齒輪輪形, 如圖 5(c) 所示。

下一步為齒輪掛上可以在不使齒輪干涉的情況下有效傳遞齒輪對減速比的齒形, 由正齒輪之漸開線齒型設計

$$\begin{aligned} x_c &= r * \cos(\text{ang}) & x &= x_c + (s * \sin(\text{ang})) \\ y_c &= r * \sin(\text{ang}) & y &= y_c - (s * \cos(\text{ang})) \end{aligned}$$

使用以該周長為周長的正齒輪所擁有的漸開線齒的齒型, 並利用轉移矩陣的方式, 依照節圓法線方向之角度, 在固定的 pitch 上掛齒, 如圖 6(a) 所示, 最後依照機器蟲腳上的軸所鑽的孔位調整固定器安置在齒輪上的相位, 如圖 6(b) 所示, 非圓形齒輪對及設計完成。

5. 腳部設計

主要目的是期望機器蟲做為可以面對各種崎嶇的路況, 依然可以向前爬行, 要分成 3 個部份: 鋁塊連接器、彈簧避震器、橡膠塊, 如圖 7 所示。

鋁塊連接器: 主要選用鋁塊較易設計、重量較輕且對於整個馬達扭力的韌性以及震動的剛性都可以符合要

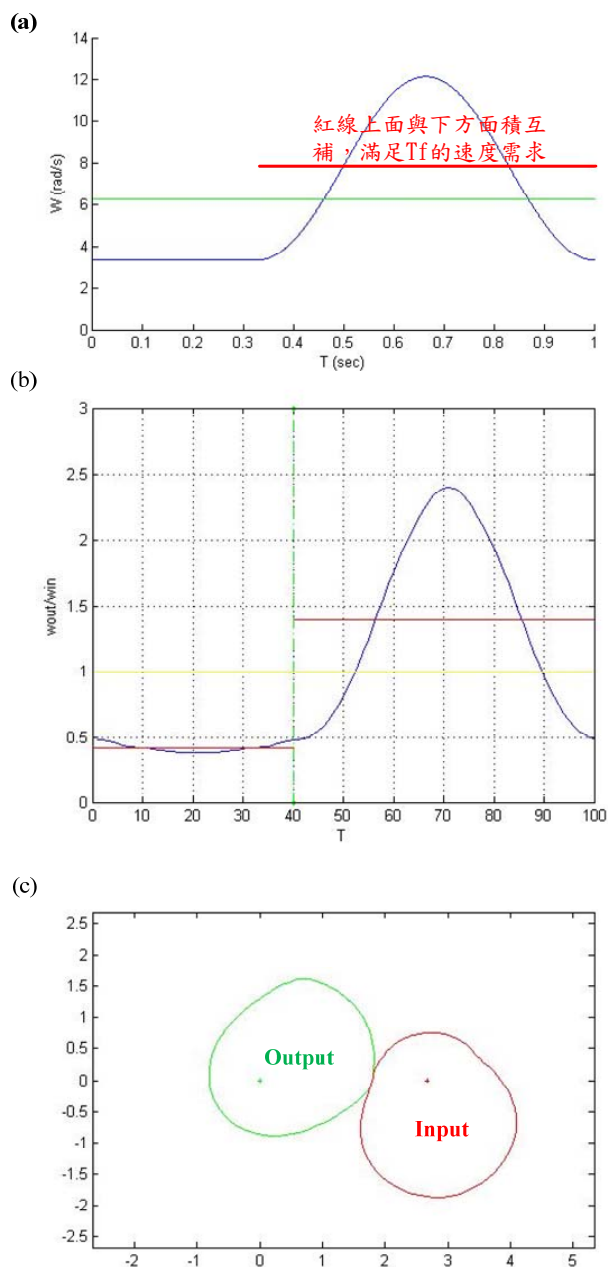


圖5 (a)速度分配圖(b)利用Fourier Series調整(c)較理想的非圓形齒輪輪形

求。彈簧避震器：由於期望達到動態阻尼的效果甚至在蟲運動時有跳躍的效果，所以選用模型車的避震器來當作腳的軸心；根據空間上的限制，選擇避震器的長度，並且要選擇彈簧係數較大以及裡面所當作阻尼的油要較濃，才可以應付在跑動甚至在跳動的過程中，承受較大重量以及扭力；在挑選時，盡量選用彈簧為較硬較粗的材質，而油管也使用金屬的材質，加強剛性。橡膠塊：選用橡膠塊來作為腳與地面接觸的底座，其好處是加工設計較容易，以及有吸震緩衝的效果，可以加強身體的

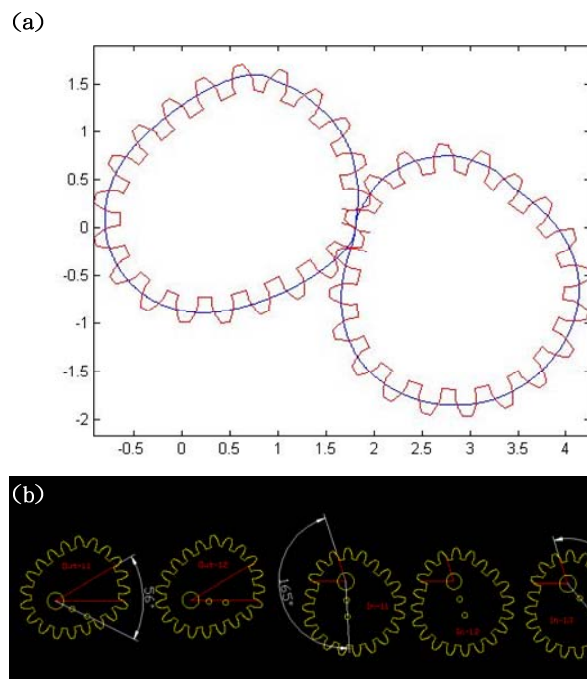


圖6 (a)將非圓形齒輪對掛齒(b)依情況調整齒輪相位



圖7 機器人腳

穩定度；並且在對於地面設計可以設計不同的紋路去增加與地面的吸附面積。

6. 實驗測試

組裝完成之機器人如圖8所示，首要便進行機器人騰空未接觸地面受力時的傳動測試，觀察後得知馬達的扭力可以順利經由皮帶輪傳動至足部，並根據非圓形齒輪的設計，機器人足部的運動會有週期性的高低速變化，並確實可以依照設計，使得馬達的等速度轉動經過非圓形齒輪傳動後，在足部表現出變速度轉動之效果。在轉向系統上，也可以經由伺服馬達控制前足的轉動角度，產生側向推力以達改變前進方向之目的。

利用非圓形齒輪的設計，可以使機器足依照所需的目的進行運動，齒輪的運轉過程順利，沒有卡齒的情形發生，由驅動結果可以觀察出機器足的運動確實和當初設計的非圓形齒輪所期望的結果相同。

圖9為由錄製機器人實際在地面上運動之影片所擷取出的數張畫面（完整電影請參考本論文附件）。同樣的，藉由非圓形齒輪產生的高低速差異，使兩組腳能連續的切換接替彼此接觸地面的時間，進而使機器人能維持平穩向前的運動。



圖8 機器人完成圖

整體而言，機器人可以依照原本設計產生前進後退之運動，證實這一個實施方法可行。但因為選用壓克力材料強度不足的緣故，以及加工精度的問題，會使機器人在實際運作時，因為受力過大使傳動系統之支撐孔有擴大之情形，逐漸減低腳運動之定位精度，除此之外，於腳抓地力、齒輪背隙等方面也有改善的空間。

7. 結論

本論文介紹一部六足仿生機器人的設計與製作。機器人以「簡單」的概念為主軸，使用一顆驅動馬達和一顆轉向伺服馬達來達成六足機器人前後左右的運動。單馬達的動力藉非圓形齒輪對的機構設計，使足在每一運轉週期內產生特定的運轉時序，來建構六足穩定運動的步態，並發揮足式機器人的特有的運動與越障功能。論文中並依序對機器人中的轉向系統、傳動配置、非圓形齒輪設計、腳部設計實驗測試等依序有詳細的說明。

我們設計並製作一部六足仿生機器人，其使用一顆驅動馬達來帶動六足，以及一顆RC伺服馬達來進行轉向。在馬達動力到足部之間，並配置非圓形齒輪對來進行六足間相對位置的協調，使機器人能以三足三足交替的方式持續前進。實體製作後並進行測試，確認本設計方式於實務上可達到預設的要求。

未來期許新一代的機器人能夠針對目前的缺點如精度不足等加以改進，並且能著手進行如走路跑步步態之特性分析與開發，以及希望在機器蟲運動方式及功能上有不一樣的創意，例如在行走時同時具有跳躍的效果等。

8. 參考文獻

- [1] Kusuda, Y., The humanoid robot scene in Japan. *Industrial Robot*, 2002. 29(5): p. 412-419.
- [2] Hirai, K., The Honda humanoid robot: development and future perspective. *Industrial Robot*, 1999. 26(4): p. 260-266.
- [3] Hirose, M. and K. Ogawa, Honda humanoid robots development. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering*

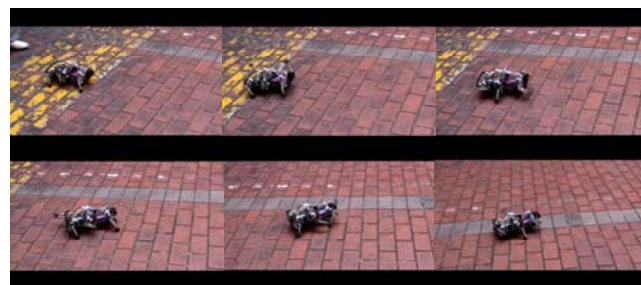


圖9 機器人測試影片擷取畫面

Sciences, 2007. 365(1850): p. 11-19.

- [4] Ishida, T. and Y. Kuroki, Sensor system of a small biped entertainment robot. *Advanced Robotics*, 2004. 18(10): p. 1039-1052.
- [5] Geppert, L., QRIO the robot that could. *Ieee Spectrum*, 2004. 41(5): p. 34-36.
- [6] Talebi, S., et al., Quadruped robot running with a bounding gait. *Experimental Robotics Vii*, 2001. 271: p. 281-289.
- [7] Poulakakis, I., J.A. Smith, and M. Buehler, Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The Scout II robot. *International Journal of Robotics Research*, 2005. 24(4): p. 239-256.
- [8] Poulakakis, I., E. Papadopoulos, and M. Buehler, On the stability of the passive dynamics of quadrupedal running with a bounding gait. *International Journal of Robotics Research*, 2006. 25(7): p. 669-685.
- [9] Fukuoka, Y., H. Kimura, and A.H. Cohen, Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts. *International Journal of Robotics Research*, 2003. 22(3-4): p. 187-202.
- [10] Kimura, H., Y. Fukuoka, and A.H. Cohen, Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts. *International Journal of Robotics Research*, 2007. 26(5): p. 475-490.
- [11] Kimura, H., Y. Fukuoka, and K. Konaga, Adaptive dynamic walking of a quadruped robot using a neural system model. *Advanced Robotics*, 2001. 15(8): p. 859-878.
- [12] Zhang, Z.G. and H. Kimura, Rush: a simple and autonomous quadruped running robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I-Journal of Systems and Control Engineering*, 2009. 223(I3): p. 323-336.
- [13] Gassmann, B., et al., Localization of walking robots, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005. p. 1483-1488.
- [14] Cham, J.G., et al., Fast and robust: Hexapedal robots via shape deposition manufacturing. *International Journal of Robotics Research*, 2002. 21(10-11): p. 869-882.
- [15] Cham, J.G., J.K. Karpick, and M.R. Cutkosky, Stride period adaptation of a biomimetic running hexapod. *International Journal of Robotics Research*, 2004. 23(2): p. 141-153.

- [16] Kim, S., J.E. Clark, and M.R. Cutkosky, iSprawl: Design and tuning for high-speed autonomous open-loop running. *International Journal of Robotics Research*, 2006. 25(9): p. 903-912.
- [17] Lin, P.C., H. Komsuoglu, and D.E. Koditschek, A leg configuration measurement system for full-body pose estimates in a hexapod robot (vol 21, pg 411, 2005). *Ieee Transactions on Robotics*, 2005. 21(4): p. 778-778.
- [18] Lin, P.C., H. Komsuoglu, and D.E. Koditschek, Legged Odometry from Body Pose in a Hexapod Robot, in *Experimental Robotics IX*. 2006, Springer. p. 439-448
- [19] Lin, P.C., H. Komsuoglu, and D.E. Koditschek, Sensor data fusion for body state estimation in a hexapod robot with dynamical gaits. *Ieee Transactions on Robotics*, 2006. 22(5): p. 932-943.
- [20] Saranli, U., M. Buehler, and D.E. Koditschek, RHex: A simple and highly mobile hexapod robot. *International Journal of Robotics Research*, 2001. 20(7): p. 616-631.
- [21] Altendorfer, R., et al., RHex: A biologically inspired hexapod runner. *Autonomous Robots*, 2001. 11(3): p. 207-213.
- [22] Saranli, U., A.A. Rizzi, and D.E. Koditschek, Model-based dynamic self-righting maneuvers for a hexapedal robot. *International Journal of Robotics Research*, 2004. 23(9): p. 903-918.