

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

具有教育及競賽功能的人形機器人系統之設計與開發 子計畫一：人形機器人自主動態平衡之研究(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2218-E-032-002

執行期間：96年8月1日至97年7月31日

計畫主持人：黃志良

執行單位：淡江大學電機工程學系

中華民國 97 年 5 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中精簡報告

具有教育及競賽功能的人形機器人

子計畫一：人形機器人自主動態平衡之研究(1/3)

計畫編號：NSC 96-2218-E-032-002

執行期間：96年8月1日至97年7月31日

主持人：黃志良 淡江大學電機工程學系

計畫參與人員：伍寒楨、陸念聞、許庭嘉、黃俊豪、葉時禹 淡江大學電機工程學系

中文摘要

本子計畫將著重於人形機器人自主動態平衡之研究，建立一套能適應不同動作(例如，走路、上下樓梯、不平坦地面與跑步)及狀況(例如，有無與環境互動、有無搭載重物)的機器人之動態平衡策略。相關的研究主題包括如下主題：(一)機構設計，(二)伺服控制系統之設計，(三)設計動態感知系統，(四)走路、上下樓梯、不平坦地面及跑步之步態規劃，(五)運動學及反運動學之推導，(六)以具有粒子群聚學習的類神經網路近似反運動學，(七)無支撐面(即跑步)動態方程式之推導，(八)單(及無)支撐面狀態之自我平衡，(九)搭載重物與環境互動之自我平衡，及(十)具有可搭載重物及跑步能力的人形機器人之開發。本計畫第一年的研究主題為具有可搭載重物及跑步能力的人形機器人之機構及伺服控制系統的設計，其中以加強伺服韌性及應用被動元件(例如，彈簧)改善因跑步所引起地面衝擊力或搭載重物所須額外力矩。

關鍵字：人形機器人、機構設計、伺服控制系統、步態規劃。

Abstract

The main theme of this subproject is focused on the autonomous dynamic balance of humanoid robot. A strategy of the autonomous balance for different operating conditions is established. The related topics of this subproject include the following ten parts: (i) mechanism design, (ii) design of servocontrol system, (iii) design of dynamic sensing system, (iv) gait plannings of the walking on flat surface, step and uneven surface, and running, (v) the derivatives of kinematics and inverse kinematics of hand and leg, (vi) the approximation of inverse kinematics using a MLP (multilayer perceptron) with PSO (particle swarming optimization) learning, (vii) the derivative of dynamics for running, (viii) autonomous

dynamic balance for the single and without support phases, (ix) autonomous balance for the condition of large payload or interaction with environment, and (x) development of payloaded and running humanoid robot. The project of the first year concentrates on the designs of mechanism and servo control system. Most important subjects are the enhancement of servo stiffness and the passive dynamic walking and running using springs.

Keywords: humanoid robot, servo control system, plannings of the walking, mechanism design.

一、計畫緣由及目的

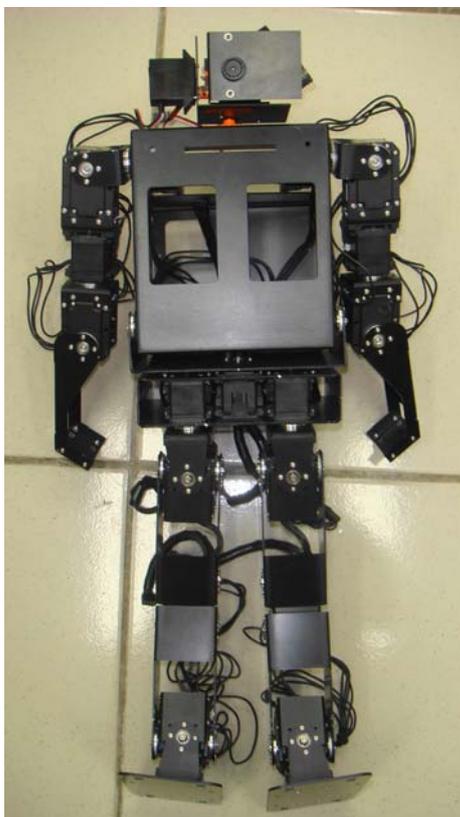
本計畫之目的乃是設計與開發一個人形機器人系統，除了發展多項機器人關鍵技術外，希望所完成的系統亦具有教育及競賽的功能，故本計畫之名稱為「具有教育及競賽功能的人形機器人系統之設計與開發」。計畫之主軸將以發展實現多台雙視覺自主且具有無線溝通來進行多機器人合作的人形機器人，以完成所設定的研究任務，例如走路、上下樓梯、不平坦地面及跑步之步態規劃[1-10]，搭載重物與環境互動之自我平衡[11-14]，完成可搭載重物及跑步能力的人形機器人之開發。

國內在機器人相關領域的研究，學術界已發展多年，而且在人形機器人的研究亦有一些相關研究成果。智慧型機器人產業是結合機械、自動化、電機、光學、電子、資訊軟體、通訊、安全系統、創意內容等相關技術，為一個高度技術整合、高度關聯性且具有高附加價值的明星產業，未來應用之範圍非常廣泛，除了產業用機器人外，更擴展到服務、娛樂、軍事、救災與保全用機器人，對國內整體經濟效益提升具有舉足輕重，因此2005年政府已將智慧型機器人產業列為發展重點。目前由四大法人研究單位(即工研院機械所、金屬中心、精密機械中心及中科院)帶頭投入在智慧型機

器人產品與技術之研究。其中「工研院機械所」的主要領域包括：生活伴侶-Smart Toy、清潔機器人-超靜音自動吸塵器、足球機器人、接待/導覽機器人與保全機器人；而「金屬中心」主要以休閒益智機器人為主，應用足型機器寵物平台，研發(或設計)相關機構、多軸伺服控制及環境感測等關鍵技術；至於「精密機械中心」是以導覽服務機器人為主，其特色(或任務)為導引、巡視、提供相關資訊等事務；最後「中科院」乃以災害處理型機器人為主。此外，台灣已經在2007年春季成立「台灣機器人產業發展協會」，為台灣第一個專為智慧型機器人產業設置的協會，它集合了機械業、玩具業、保全業、資電業、家電業等各產業代表，以及學界、法人代表，一起來推動機器人產業，發展台灣經濟的新紀元。

本年度之報告內容包括具有七個自由度之腳部機構、具有四個自由度之手部機構、具有二個自由度之身體與頭部的機構、伺服馬達之驅動電路、動態感知系統。此外，亦進行每個次系統之測試、調整及校正，以達到盡善盡美的境界[15-22]。

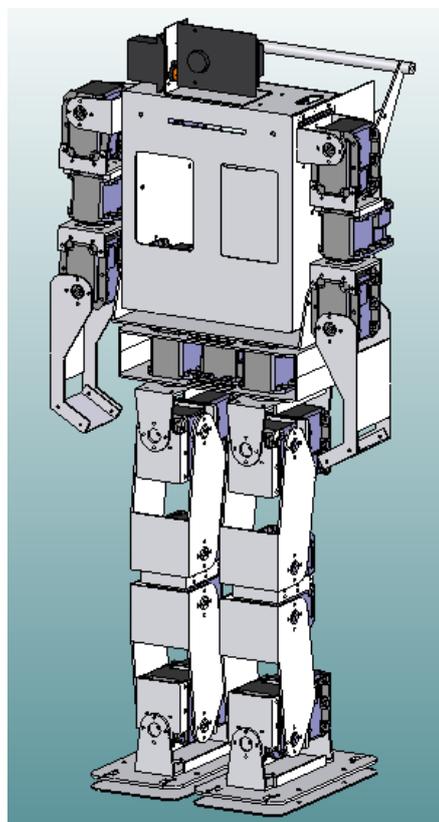
二、研究方法及成果



圖一、人形機器人實體圖

表一、人形機器人之規格

身高	542mm
重量	4.2kg
自由度	頭部：2 個自由度 手部：4 個自由度x 2 腰部：2 個自由度 腳部：7 個自由度x 2 合計：26個自由度
伺服馬達	腳部：Robotics伺服馬達RX-28 手部：Robotics伺服馬達RX-28 腰部：Robotics伺服馬達RX-28 頭部：廣營(GWS)伺服馬達Micro MG
電池	鋰聚合物電池DC 14.8V 鋰聚合物電池DC 7.4V

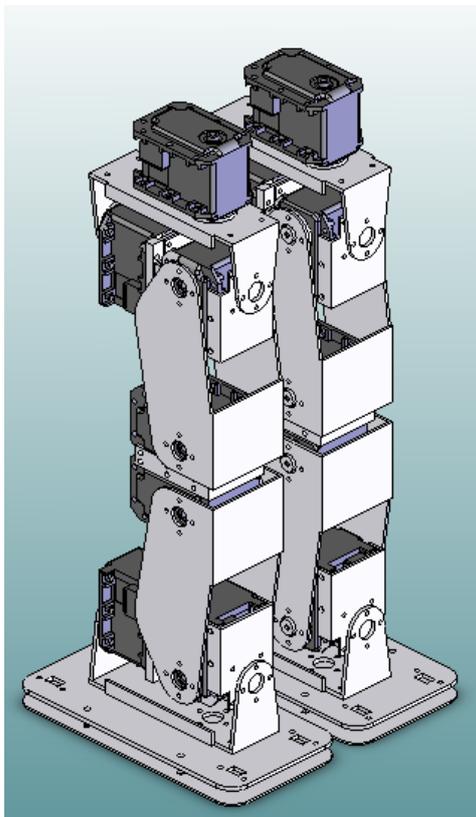


圖二、人形機器人 3D 結構圖

本計畫第一年目標主要是完成一台具有可拿起與搭載重物及跑步能力的人形機器人之機構及伺服控制系統的設計及製作。其中以加強伺服韌性及應用被動元件，改善因跑步所引起地面衝擊力或拿起與搭載重物所須額外力矩。在此目標下，本計畫已完成一台如圖一所示的人形機器人，其規格如表一所示。而圖二為整體人形機器人 3D 結構圖，我們將分如下五個次研究主題

進行介紹：(1)具有七個自由度之腳部機構，(2)具有四個自由度之手部機構，(3)具有二個自由度之身體與頭部的機構，(4)伺服馬達之驅動電路，與(5)動態感知系統。

2.1 具有七個自由度之腳部機構



圖三、人形機器人之腳部機構 3D 結構圖

第一年的目標是完成一具有七個自由度適合搭載重物及跑步之腳的機構及伺服系統 [20-22]。圖三為所完成之人形機器人腳部機構 3D 結構圖。其設計重點包括如下五點：(1)伺服馬達扭力增強，(2)多維度同軸化結構，(3)馬達線路少量化，(4)機構精簡，與(5)維修便利。現在分別敘述如下：

- (1) 於伺服馬達扭力增強部分，我們採用扭力高達 37.7kg-cm 的伺服馬達，如此本計畫所設計之人形機器人之腳部機構可以承受搭載重物與跑步所產生的衝擊。
- (2) 於多維度同軸化結構部分，我們將腕關節與踝關節的三維度與雙維度分別設計成，多個馬達的旋轉軸相交於同一點或同一平面上，如此一來，可減少機器人正反運動學推導的複雜度及計算負載。
- (3) 於馬達線路少量化部分，我們串接並聯所有伺服馬達，如此一來可大量地減少馬達的線路，同時也減少機構干涉的情形。
- (4) 於機構精簡部分，我們運用馬達上的連接

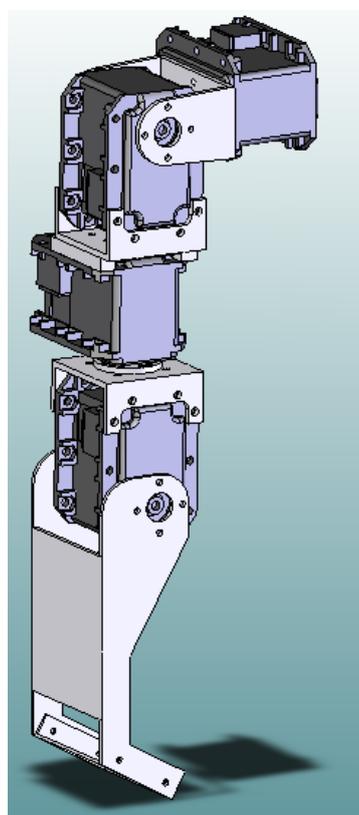
孔進行機器人的組裝，如此一來可以減少自行設計的機構零組件，同時也可減少機器人不必要的重量。

- (5) 於維修便利部分，在不減損結構強度的前提下，減少機器人機構的固定點之數目，如此一來，增加機器人維修上的便利性，同時也減輕機器人的重量。

至於跑步的機器人的腳部機構設計，可歸納如下四點 [20-22]：

- (1)腳趾機構堅硬且有力，(2)腳腹用來做為主要吸收地面反作用力的地方，(3)腳趾跟腳腹的摩擦力要足夠避免打滑，(4)膝蓋和腳踝關節要安裝彈簧吸收衝擊。

2.2 具有四個自由度之手部機構



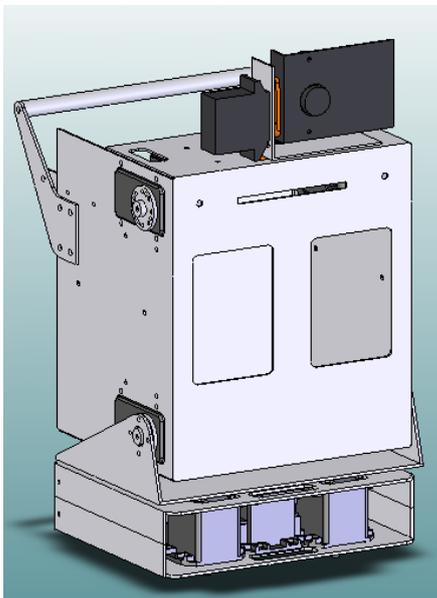
圖四、人形機器人之手部機構 3D 結構圖

第一年的目標是完成具有四個自由度適合拿起與搭載重物及跌倒再爬起之手的機構及伺服系統。圖四為所完成之人形機器人手部的機構 3D 結構圖。其設計重點包括如下四點：(1)伺服馬達扭力增強，(2)雙維度同軸化結構，(3)馬達線路少量化，與(4)重心集中化。現在分別敘述如下：

- (1) 於伺服馬達扭力增強部分，我們採用與腳部相同的伺服馬達，因此所設計的人形機器人可承受搭載重物及跌倒再爬起所產生之衝擊。

- (2) 於雙維度同軸化結構部分，我們在肩關節雙維度部分的設計，將兩個馬達的旋轉軸相交於同一平面上，如此一來，可減少機器人正反運動學推導的複雜度及計算負載。
- (3) 於馬達線路少量化部分，我們同樣也是採用串接並聯的方式，因此可大量的減少馬達的線路，也減少機構干涉的機會。
- (4) 於重心集中化部分，我們將肩關節其中一維度的馬達內移至身體內部，因此在機器人的左右平衡中，重心將更靠近機器人中心，有助於提升機器人的平衡性能。

2.3 具有二個自由度之身體與頭部的機構

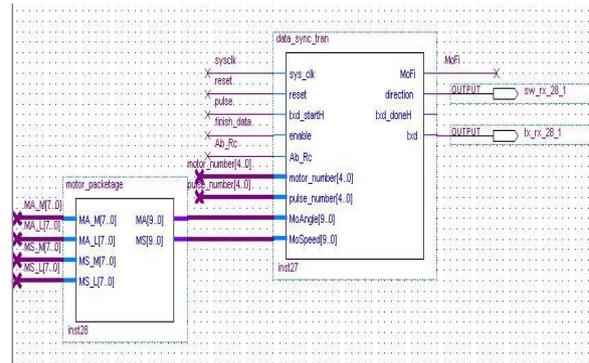


圖五、人形機器人之身體與頭部 3D 結構圖

第一年的目標是完成具有二個自由度之身體(含腰部)及二個自由度之頭部的機構及伺服系統，圖五為所完成之人形機器人身體與頭部機構 3D 結構圖。其設計重點包括如下二點：(1)頭部採用金屬齒輪之伺服機構與(2)強化腰部與腳部維度空間節約之設計。現在分別敘述如下：

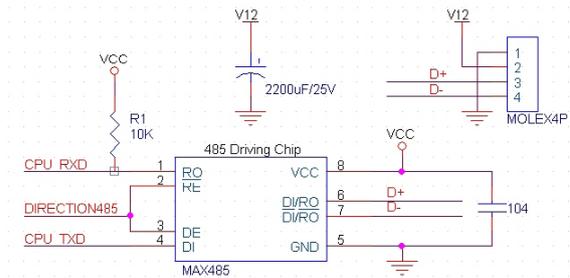
- (1) 於頭部採用金屬齒輪之伺服機構部分，其目的為克服機器人於跌倒時所產生衝擊對機器人所造成的損壞，同時也能減少機器人在行走時的震動對影像擷取的影響。
- (2) 於腰部與腳部維度空間節約設計部分，我們將腰部的左右自由度與雙腳腕關節的左右自由度結合於同一平面上，其目的為節省機器人有限的空間並增加機器人機構的強度。

2.4 伺服馬達之驅動電路



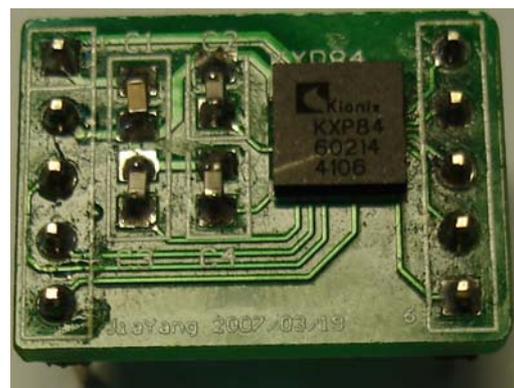
圖六、馬達驅動電路模組

第一年的目標是完成具有角度與速度調整、溫度與角度回授的驅動電路模組。我們於圖六之 FPGA 內設計此一電路以降低人形機器人操作時所產生的震動，達到改善動態平衡的目的。至於馬達的傳輸控制則採用 RS-485 的介面，其傳輸電路圖與電源電路如圖七所示。



圖七、馬達 RS-485 傳輸與電源電路圖

2.5 動態感知系統

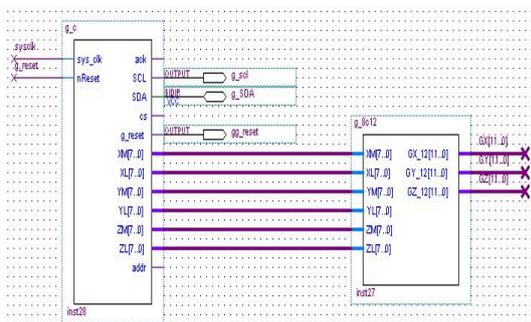


圖八、三軸加速度儀電路實體圖

第一年的目標為完成三軸加速度儀電路圖與壓力感測器模組之設計與實現。圖八為本計畫所完成的三軸加速度儀電路實體圖，其中之三軸加速度儀 KXP84-1050 [23]為電容式。其原理敘述如下：當加速度儀連同外界物體

(該物體的加速度就是待量測之加速度)一起加速運動時,就受到慣性作用力而朝相反的方向運動,此時物體會產生位移,而物體發生的位移受到彈簧和阻尼器的限制。顯然地,該位移與外界加速度具有相互對應之關係:外界加速度固定時,物體具有確定的位移;外界加速度變化時(只要變化不是很快),物體的位移也發生相應的等比變化。

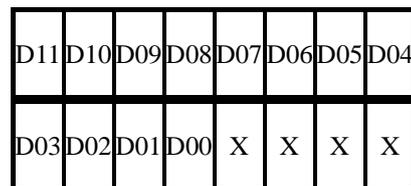
三軸加速度儀會將 X、Y 與 Z 三個方向加速度的類比訊號透過 A/D 轉換器轉成數值後,再使用 I²C(Inter-Integrated Circuit) 傳輸模組[24]或是 SPI(Series Peripheral Interfac, 串列周邊界面)傳輸模組[25]將資料送出。考慮到機器人研究的擴充性及便利性,我們規劃進行 I²C 的傳輸模式。



圖九、三軸加速度儀傳輸模組

因此在機器人系統內部,使用 VHDL 架設一個傳輸模組,使得機器人能夠快速地獲得三軸加速度儀的訊號,以加速程式之執行,其模組如圖九所示,圖中之 g_c 模組的功能為負責初始化、寫入及讀取三軸加速度儀。其主要分成如下三個區塊:第一個是 I²C 傳輸模組,第二個是初始化封包模組,第三個是讀取封包模組。簡言之,I²C 傳輸模組,是把 8bit 的資料以 I²C 的方式送給三軸加速度儀,也將以 I²C 方式所回傳的三軸加速度資料轉換成 8bit 的格式送回。初始化封包模組,是要寫入初始化的資料編碼成三軸加速度儀的封包格式,再透過 I²C 傳輸模組將封包轉換成 I²C 的傳輸格式,將資料寫入三軸加速度儀內的暫存器做初始化的動作。當初始封包模組結束時,會有一致能訊號啟動讀取封包模組,讀取封包模組則將要讀取前須寫入三軸加速度儀的資料編碼成三軸加速度儀的封包格式,再透過 I²C 傳輸模組將封包轉換成 I²C 的傳輸格式,通知三軸加速度儀現在開始傳輸資料,接著 I²C 傳輸模組就會開始收到三軸加速度儀的所送來的三軸加速度儀的資料,再送到讀取封包模組解碼

成六筆 8bit 的資料,分別是 XM、XL、YM、YL、ZM 與 ZL。因為傳輸方式是 8bit 為一個封包,而用來表示的三個方向的加速度為 12bit,因此三軸加速度儀會把其資料分割成 2 個 8bit 如圖十所示,D 為資料的 bit 數,所以從讀取封包所解碼的資料會為六筆 8bit 的資料,因此要正確使用這些資料必須將兩個 8bit 合成一個 12bit,最後得出三筆的 12bit,所以在 g_c 出來的六筆資料接上 g_8c12 這個模組,將從讀取封包模組所得到的六筆 8bit 轉換成三筆 12bit 的資料,此為三軸加速度的值。其腳位之功能如表二所示 [23]。

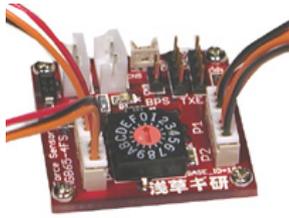


圖十、三軸加速度儀資料切割方式

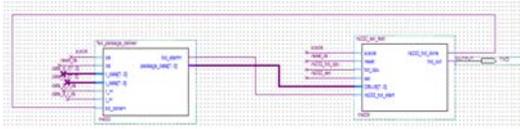
表二、g_c & g_8c12 之腳位功能

腳位名稱	功能
sys_clk	系統時脈
nReset	重置模組
SCL	I2C CLK腳位
SDA	I2C資料腳位
Ack	確認與三軸加速度儀的溝通無誤
g_reset	重置三軸加速度儀
Cs	升為Hi時啟動I2C傳輸模式
Addr	降為Low啟動I2C傳輸模式
XM、XL	X方向的高位元與低位元資料
YM、YL	Y方向的高位元與低位元資料
ZM、ZL	Z方向的高位元與低位元資料
GX_12	X方向的加速度數值
GY_12	Y方向的加速度數值
GZ_12	Z方向的加速度數值

所採用的壓力感測器為圖十一所示的 AGB65-4FS 模組,同樣地設計一如圖十二所示的電路來控制此壓力感測器。接著,根據感測器所回傳的數值,進行機器人 ZMP 的估測,最後藉由控制機器人的 ZMP 位置達到動態穩定機器人的目的。



圖十一、壓力感測器實體圖



圖十二、壓力感測器控制模組

三、結論與討論

本計畫在第一年已完成具有可拿起與搭載重物及跑步能力的人形機器人之機構及伺服控制系統的大部分預期工作。我們將再加強機器人動態感知系統的功能，並且針對本計畫於第一年所設計的機器人機構與動態感知器進行實際操作及效能評估，以提供第二年機器人製作及整合的參考。此外，跑步的機器人的操作應該滿足如下兩個條件：(1)雙臂擺動與雙腳有一定的節奏配合，右臂往前擺動則左腳往前跨步，左臂往前擺動則右腳往前跨步，(2)機器人身體微壓低向前，使得身體重心置放於前方，以利跑步的動作。

四、參考文獻

[1] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi and K. Tanie, "Planning walking patterns for a biped robot," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 17, no. 3, pp.280-289, 2001.

[2] S. Kajita, T. Nagasaki, K. Yokoi, K. Kaneko and K. Tanie, "Running pattern generation for a humanoid model," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington DC, pp.2755-2761, May, 2002.

[3] T. Nagasaki, S. Kajita, K. Yokoi, K. Kaneko and K. Tanie, "Running pattern generation and its evaluation using a realistic humanoid model," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei Taiwan, pp.1336-1342, Sep. 14-19, 2003.

[4] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei Taiwan, pp.1620-1626, Sep. 14-19, 2003.

[5] 俞舒文, "Walking pattern analysis and control of a humanoid robot," Master Thesis of

Taiwan University, 2006.

[6] J. E. Pratt and S. V. Drakunov, "Derivation and application of a conserved orbital energy for the inverted pendulum bipedal walking model," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.4653-4659, Apr. 10-14, 2007.

[7] M. E. Abdallah and K. J. Waldron, "A physical model and control strategy for biped running," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.3982-3988, Apr. 10-14, 2007.

[8] H. Hirukawa, S. Hattori, S. Kajita, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, "A pattern generator of humanoid robots walking on a rough terrain," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.2546-2551, Apr. 10-14, 2007.

[9] F. Iida, J. Rummel and A. Seyfarth, "Bipedal walking and running with compliant leg," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.3970-3975, Apr. 10-14, 2007.

[10] R. Niiyama, A. Nagakubo and Y. Kuniyoshi, "Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.2546-2551, Apr. 10-14, 2007.

[11] K. Harada, H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, S. Kajita and M. Nakamura, "Dynamical balance of a humanoid robot grasping an environment," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, Sendai Japan, pp.1167-1173, Sep. 28-Oct. 2, 2004.

[12] K. Harada, S. Kajita, H. Saito, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "A humanoid robot carrying a heavy object," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Baelon, Spain, pp.1712-1717, Apr., 2005.

[13] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "Dynamic balance of a humanoid robot during manipulation tasks," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 22, no. 3, pp.568-575, 2006.

[14] K. Harada, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, K. Yokoi and H. Hirukawa, "Real-time planning of humanoid robot's gait for force-controlled manipulation," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 12, no. 1, pp. 53-62, Feb., 2007.

[15] T. C. F. Wong and Y. S. Huang, "Stabilization of biped dynamic walking using gyroscopic couple," *IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems*, pp.102-109, 1996.

[16] K. Kaneko, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Yokoi, K. Fujiwara, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, and T. Isozumi, "Design of advanced leg module for humanoid robotics project of

- METI,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington DC, pp.38-45, 2002, May, 2002.
- [17] N. Kanechira, T. Kawasaki, S. Ohta, T. Isozumi, T. Kaawada, F. Kanechiro, S. Kajita and K. Kaneko, “Design and experiments of advanced leg module (HRP-2L) for humanoid robot (HRP-2) development,” *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, Lausanne Switzerland, pp.38-45, Oct., 2002.
- [18] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko and H. Hirukawa, “ZMP analysis for arm/leg coordination,” *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, Las Vegas, Nevada, pp.75-81, 2003.
- [19] K. Loffler, M. Gienger, F. Pfeiffer and H. Ulbrich, “Sensors and control concept of a biped robot,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp.972-980, 2004.
- [20] R. Sellaouti, O. Stasse, S. Kajita, K. Yokoi and A. Kheddar, “Faster and smoother walking of humanoid HRP-2 with passive toe joints,” *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, Beijing China, pp.909-4914, Oct. 9-15, 2006.
- [21] S. Kajita, K. Kaneko and M. Morisawa, “ZMP-based biped running enhanced by toe springs,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp.3963-3969, Apr. 10-14, 2007.
- [22] M. Wisse, D. G. E. Hobbelen and A. L. Schwab, “Adding an upper body to passive dynamic walking robots by means of a bisecting hip mechanism,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 23, no. 1, pp.112-123, 2007.
- [23] <http://www.kionix.com/accelerometers/accelerometer-KXP84.html>
- [24] <http://zh.wikipedia.org/wiki/I2C>
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/SPI_bus