

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計劃一：微型仿生機器之動態分析、伺服設計與製作(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2213-E-002-052-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：顏家鈺

計畫參與人員：劉書宏；許凱棋

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 6 月 12 日

研究計畫中英文摘要：

計畫中文摘要

蟑螂是一種人人討厭的生物，但是我們經常玄疑於這種古老的生物如何從百萬年前會滅恐龍的浩劫中生存下來，我們也會想到如果可以控制一種像蟑螂一樣的東西，可以鑽進人們無法達到的小洞中，不會引起危險，在災難救援的時候就會很有用。製作一個仿生的蟑螂其實是很多學者很希望達成的工作。當然以今日的科技似乎我們逐漸邁向這一個目標，不過也許科技的發展還不夠，本子計畫就是希望製作總計劃中的實體載具，進行仿生甲蟲的機構設計與製作，本子計畫所發展的仿生昆蟲載具需搭載子計劃二的感應與溝通模組與子計劃三的大腦與小腦模組。為達成類似昆蟲的運動功能，本子計畫進行昆蟲運動模式分析，藉由我們對昆蟲運動模式的了解，設計適合本計畫使用的昆蟲腳步機構，初步將以蟑螂的運動機構為模仿的目標，蟑螂的機構對地形有極大的適應性，對於本計畫所發展的仿生昆蟲日後的應用有較大的幫助。為達成類似蟑螂的複雜運動功能與機構微小化的目的，本子計畫使用以形狀記憶合金為基礎的腳步驅動裝置，本計畫對形狀記憶合金的特性進行探討，同時以所收集的資料進行驅動裝置的設計，並對驅動裝置進行性能測試。

計畫英文摘要

Bio-mimetic designed robot has been catching people's imagination for centuries. People have always wondered how could the cockroach survive the mass destruction that killed all the dinosaurs. People have also admired the ability of the cockroach to climb into rubbles and tunnels without getting hurt. This ability would be very helpful during the hazard recovery action. This subproject works with two other projects to build a bio-mimetic insect. This subproject will take charge of actually fabricate the robot payload. The payload will include the communication gear and the

sensory system from subproject II, and the brain and cerebellum from subproject III. This subproject analyzes the different gait that is used by insect. By investigating the different insect lag design and comparing their effectiveness, we select the appropriate gait and leg design for the bio-mimetic insect. For the lag portion, this project will look into the means for generating large stroke with relatively large force. We are currently using shape memory alloy as the actuator, and discuss the characteristics of the shape memory alloy. We also design the actuation mechanism, and establish the characteristics of the actuator. This will also serve as a reference to the other subprojects.

一、前言

近幾年來，許多工程師熱衷於仿生機械的開發。所謂的仿生機械，是在結構或控制架構上有一部份採取與生物相同的架構或原則。因為用腳行走的動物（昆蟲）在表面粗糙及不規則地形上的操控及性能上都可輕易勝過最靈巧的機械人，故我們可以藉由研究這些生物體的系統特性來改良我們的機械人。微型仿生機械可用於在惡劣的地形下進行探索，具有昆蟲特性的仿生機械可藉由其特性有效率的橫越困難地形，並利用微型感測器進行探查，在進行災難救援時能發揮卓越的性能。

二、研究目的

本子計畫之目的為進行仿生甲蟲的機構設計與製作，以作為總計劃中的實體載具，本子計畫所發展的仿生昆蟲載具需搭載子計劃二的感應與溝通模組與子計劃三的大腦與小腦模組。為達成類似昆蟲的運動機能，本子計畫將進行昆蟲運動模式分析，藉由我們對昆蟲運動模式的了解，設計適合本計劃使用的昆蟲腳步機構，初步將以蟑螂的運動機構為模仿的目標，蟑螂的機構對地形有極大的適應性，對於本計畫所發展的仿生昆蟲日後的應用有較大的幫助。

三、文獻探討

近年來，設計仿生機器人一直是一個熱門的研究項目，不論是機器人的機構或是運動形式，都盡量設計成與生物體相近。六足機器人多以模仿昆蟲為對象，有模仿蟑螂的如[1,6,8]，有模仿竹節蟲的如[2,3,4]，四足機器人多模仿哺乳類，如[5]。而在行走的動力來源方面則眾人選擇皆不盡相同，如使用直流馬達的較大型傳統行走機器人[4]，或使用空氣活塞，如[1,6]，

也有使用熱動式致動器(thermal bimorph actuator)，如[7]，或 IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)致動器[8]，以及使用形狀記憶合金致動器的仿生機械，如[3]。

四、研究方法

為達成類似蟑螂的複雜運動功能，本子計畫將先探討六足機器人的步態分析，進而再針對蟑螂的步態作研究。為達成機構微小化的目的，本子計畫嘗試使用以形狀記憶合金為基礎的腳步驅動裝置，形狀記憶合金可以使致動器的體積有效的縮小，重量減輕，且易於加熱，但要使其快速冷卻可能不易做到。本計畫將對形狀記憶合金的特性進行探討，同時以所收集的資料進行驅動裝置的設計，同時對製作完成的驅動裝置進行性能測試。

五、結果與討論

(一) 六足機器人之步態分析

要對六足機器人進行之步態分析前，我們首先將將機器人的六支腳進行編號，如圖 1 所示。接著我們探討兩種會讓六足機器人不穩定的情形，如圖 2 所示，空心圓圈表示此腳目前已舉起在空中；而實心圓圈則表示此腳目前為支撐在地面的狀態；打叉符號代表機器人之重心。若六足機器人相鄰的兩隻腳同時在空中，則重心會落在由支撐腳連接而成之多邊形的邊上，如圖 2 所示之二例，這樣會導致機器人發生不穩定甚至傾倒的情形。故我們在做步態分析時先定一個準則：相鄰的兩支腳不可能同時在空中。

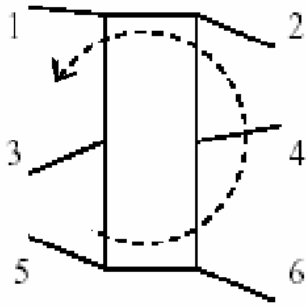


圖 1 六足機器人各肢腳之編號順序

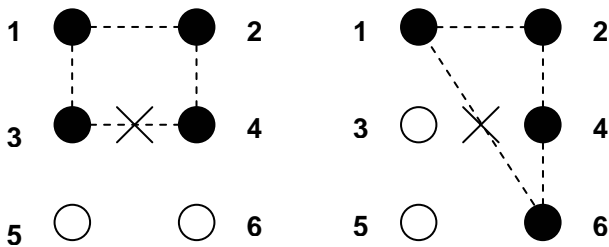


圖 2 不穩定之步態

接著我們定義步態序列(gait sequence)為表示一串連續步伐的序列，如：

$$\dots, L_2, L_4, (L_3, L_6), L_5, L_1 \quad (1)$$

表示六足機器人之最後六步依序為先跨出 L_2 ，再跨出 L_4 ，接著同時跨出 L_3 和 L_6 ，接下來跨出 L_5 ，最後跨出 L_1 。在括號中的腳代表同時跨出。

接下來定義步伐關係(stepping relation)為相鄰的兩支腳其跨出步伐之先後順序關係。如 $L_a > L_b$ 則表示 L_b 比 L_a 先跨出。

我們可以利用先前所定義的步態序列與步伐關係來表示步態分析中最重要的名詞一步態狀態(gait state)。步態狀態即為將每支腳依逆時針順序排列並用步伐關係表示相鄰兩肢腳之關係。例如先前的步態序列(1)其步態狀態表示為：

$$L_1 > L_3 < L_5 > L_6 > L_4 > L_2 < L_1 \quad (2)$$

為了方便我們對步態狀態做分類，我們定義一個參數「R」，R 表示步態狀態中腳比其逆時針方向的相鄰腳還慢跨出的腳的數目，簡單的說，即步態狀態中「>」出現的次數。如步態狀態(2)中之 $R=4$ 。

令(a,b,c,d,e,f)代表($L_1, L_3, L_5, L_6, L_4, L_2$)之任意

逆時針排列。我們觀察步態狀態表示法中共出現 6 個「<」或「>」符號，故共有 $2^6=64$ 種排列組合情形扣除 6 個符號皆為「<」和皆為「>」的兩種不合理情形，剩下的 62 種情形我們依據 $R=1\sim 5$ 分為 5 大類，並可再細分為如圖 3 所示之 12 類型。在同一類型中的步態狀態具有相同的特性。

R	Class Name	Number of Elements	Generic Gait State
1	A_1	6	$a > b < c < d < e < f < a$
2	A_2	6	$a < b < c < d < e > f > a$
	B_2	6	$a < b < c < d > e < f > a$
	C_2	3	$a < b < c > d < e < f > a$
3	A_3	6	$a > b > c > d < e < f < a$
	B_3	6	$a > b < c > d > e < f < a$
	C_3	6	$a > b > c < d > e < f < a$
	D_3	2	$a > b < c > d < e > f < a$
4	A_4	6	$a > b > c > d > e < f < a$
	B_4	6	$a > b > c > d < e > f < a$
	C_4	3	$a > b > c < d > e > f < a$
5	A_5	6	$a > b > c > d > e > f < a$

圖 3 步態狀態之 12 種類型

(二) 波狀步態

波狀步態是在平坦地形上直線進行時最有效率且最穩定的步態。六足機器人的波狀步態符合下列方程式：

$$t_i^n = t_{i+2}^n + T_p \quad 1 \leq i \leq 4$$

$$t_6^n = t_5^n + T_w / 2$$

其中 t_i^n 是第 i 支腳開始跨出第 n 步的時間； T_p 為一常數，代表每跨出一步所需花費的時間； T_w 是完成一個步態週期所需的時間，根據不同的波狀步態其值會呈現在 $2T_p$ 到 $6T_p$ 之間；符合波狀步態的步態序列可分為四類，如下所示：

1. Slow sequence: $L_6, L_4, L_2, L_5, L_3, L_1$

2. Ripple sequence: $L_6, L_1, L_4, L_5, L_2, L_3$

3. Crossed sequence: $(L_1, L_6), L_4, (L_2, L_5), L_3$

4. Tripod sequence: $(L_1, L_4, L_5), (L_2, L_3, L_6)$

波狀步態是一種週期性的步態，即一個週期內所有的腳都只跨出一次。他的特性是在跨步的過程當中 R 的值保持固定，且此定值為 $R=3$ 。

我們抓到一隻蟑螂並透過錄影來觀察牠的步態，觀察到的結果顯示蟑螂在做直線移動時其使用的步態序列為前述的 tripod sequence，如圖 4 所示之兩種狀態交替。使用 tripod sequence 的步態狀態稱為三腳步態(tripod gait)。三脚步態是六足機器人所能使用的穩定步態中移動速度最快的，我們將使用此種步態來進行微型仿生機械的步態設計。

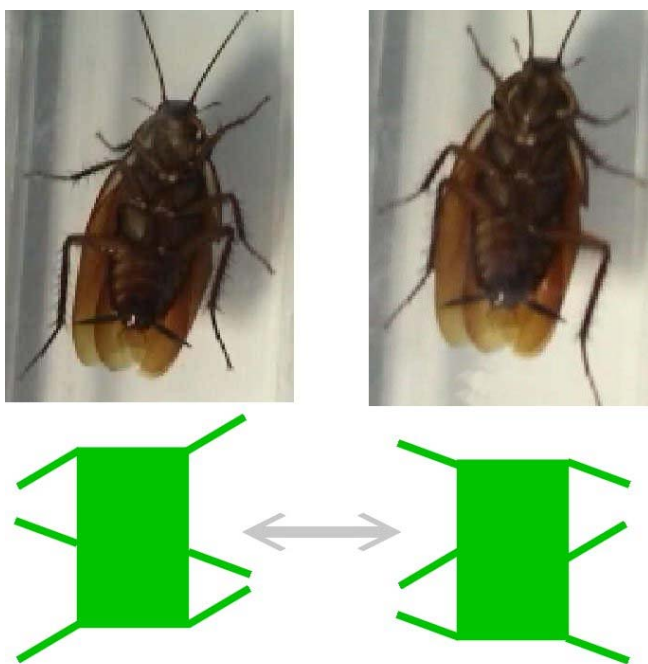


圖 4 Tripod sequence 示意圖

(三) 形狀記憶合金

形狀記憶合金是一種能夠記憶原先形狀的機能材料，在特定溫度以下，受到有限大小的應變時，將其加熱到臨界溫度以上，則材料會回復到原來的形狀，此即為形狀記憶效應(shape memory effect, SME)。一般金屬材料之彈性回復應變量不超過 0.1%；而形狀記憶合金卻擁有約

7~8%的形狀回復量此為與一般金屬最大的不同。目前最被廣泛利用的形狀記憶合金為 NiTi、CuZnAl 和 CuAlNi 合金。

形狀記憶合金之所以會有形狀記憶效應，是因為此種合金在固態的時候會因溫度的改變而發生相變化，高溫的沃斯田體相較強壯，而低溫的麻田散體相則較柔軟，易變形。麻田散體相受到外力變形時會導致晶格排列方式改變，如圖 5 中所示。而整個形狀記憶效應之示意圖如圖 6 所示，首先高溫相的沃斯田體相經冷卻變態為 twinned 麻田散體，而 twinned 麻田散體受外力變形後晶格排列發生改變，形成 deformed 麻田散體，deformed 麻田散體再經加熱會變態回沃斯田體相，並回復到受外力變形前的形狀，此即為形狀記憶效應。

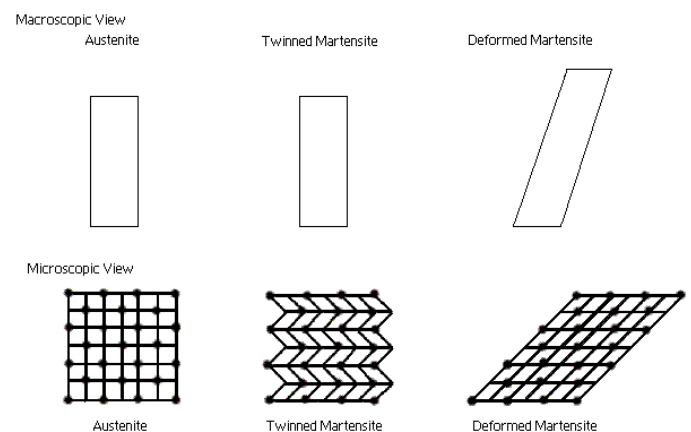


圖 5 沃斯田體相與麻田散體相巨觀及微觀之比較，其中未經外力變形的麻田散體稱為「twinned martensite」，而經外力變形後的麻田散體稱為「deformed martensite」

形狀記憶合金的另一特性為擬彈性(pseudo-elasticity, PE)，示意圖如圖 7 所示，圖中的 M_s 表示麻田散體開始變態的溫度； M_f 表示麻田散體結束變態的溫度； A_s 表示沃斯田體開始變態的溫度； A_f 表示沃斯田體結束變態的溫度。擬彈性是在固定溫度下所發生的特性，在溫度高於 A_f 時，逐漸增加外力，會使形狀記憶合金由沃斯田體變態為麻田散體，由於麻田

散體較柔軟，易受外力變形，而當外力減少時，又會變態回沃斯田體相，回復成施加外力前的形狀。

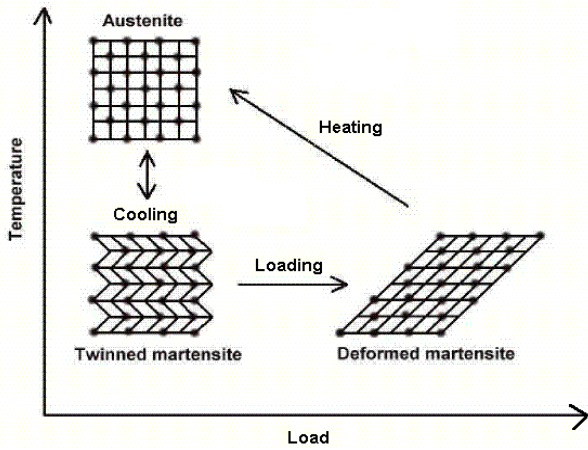


圖 6 形狀記憶效應示意圖

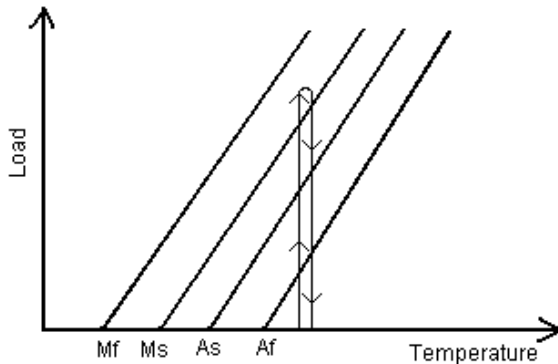


圖 7 擬彈性示意圖

(四) 形狀記憶合金致動器

傳統機械人所使用的致動器，一般皆為馬達或是氣壓缸、油壓缸；其體積均較大，輸出功率與重量比非常小，效率低，不適用於小型機械人使用。利用形狀記憶合金的致動器具有體積小、重量輕的優點，適合應用於微型仿生機械的開發。

形狀記憶合金致動器與一般的形狀記憶合金的不同之處，在於一般的形狀記憶合金通常用於記憶某種形狀；而形狀記憶合金致動器則

是發生長度方向的改變，相當於可收縮長度的人造肌肉。

目前形狀記憶合金致動器大多分為兩類：纖維型和螺旋型。纖維型形狀記憶合金致動器 (BioMetal Fiber, BMF) 是一種線型的金屬致動器，當溫度升高時在長度上會產生約 5% 的收縮；而當溫度降低時，會伸展回原來的長度。故可藉由溫度的控制使其產生如肌肉般的伸縮運動。圖 8 為其動作之示意圖。其特色為體積小，重量輕，可在低電壓下藉由電流加熱驅動，可產生強大的拉力，高穩定度，可長時間往復動作，可用來作高解析度的微小動作，價格低廉。

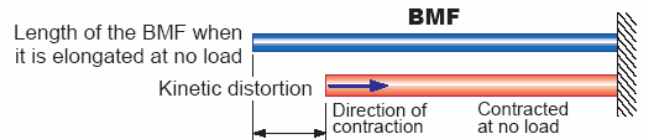


圖 8 纖維型形狀記憶合金致動器之動作示意圖

螺旋型形狀記憶合金致動器 (BioMetal Helix, BMX) 是將纖維型形狀記憶合金致動器捲成螺旋狀，目的是產生較大的長度收縮比率，其動作方式如圖 9 所示，其收縮量約為收縮後長度的 200%。其特色為長行程，可產生強大的拉力，可在低電壓下藉由電流加熱驅動，產生平滑、柔順的動作。

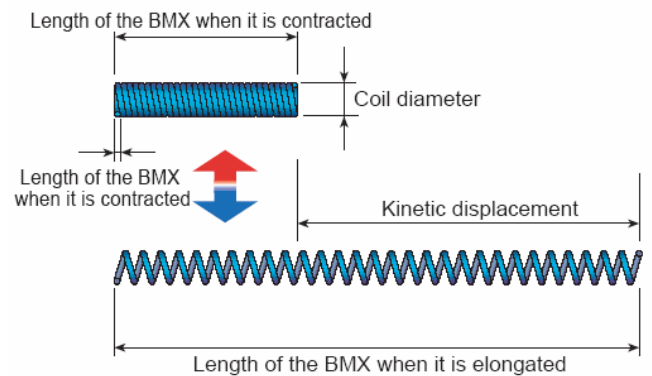


圖 9 螺旋型形狀記憶合金致動器之動作示意圖

我們向日本 TOKI CORPORATION 購買了編號 BMF100 的形狀記憶合金致動器，其線直徑為 $100\mu\text{m}$ ，可拉動約 80g 的重量。我們取 12.75cm 的長度來作試驗，將 BMF 的一端固定，另一端接上一個彈簧，接彈簧的目的是因為 BMF 只有在縮短時會產生力，伸長時並不會產生力，故接上彈簧當作一個回復偏壓。測試如圖 10 所示，圖 10(a) 為 BMF 未經加熱時的長度，圖 10(c) 為其局部放大圖，可看出原長度為 12.75cm。圖 10(b) 為 BMF 經過通電流加熱收縮後的長度，圖 10(d) 為其局部放大圖，可看出長度變為 12.2cm。其伸縮量約為原長的 4.3%。

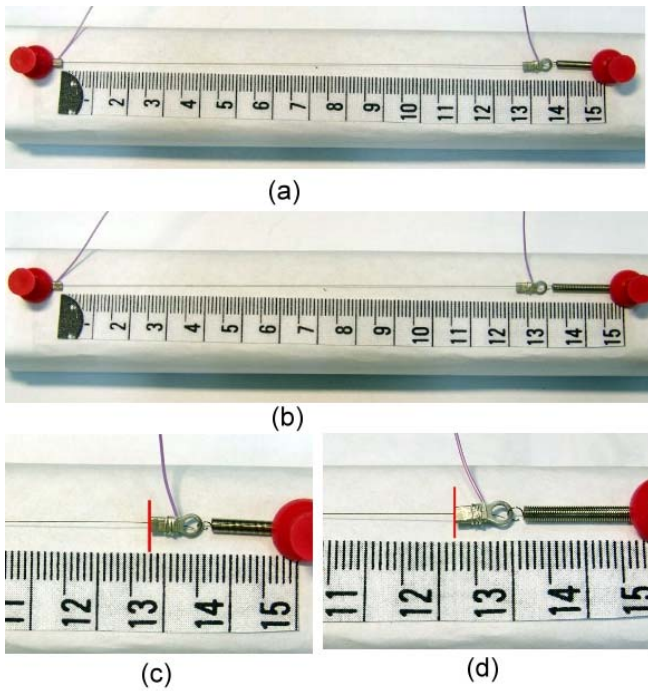


圖 10 BMF 之伸縮量試驗圖

(五) 形狀記憶合金致動器之長度調整電路

由於形狀記憶合金致動器若受到一固定電壓加熱，會發生收縮直到最大收縮量為止，故若要使其維持在某固定長度，必須給予一個間歇性的電壓，如脈波寬度調變 (pulse width modulation, PWM) 信號，我們利用如圖 11 之電路產生 PWM 信號，其中信號高準位和低準位的時間長度可透過電路中的兩個可變電阻來調

整，透過調變 PWM 信號的脈波寬度。透過此電路我們成功的將前述之 BMF 調整在 12.5cm，如圖 12(a) 所示，圖 12(b) 為其局部放大圖。

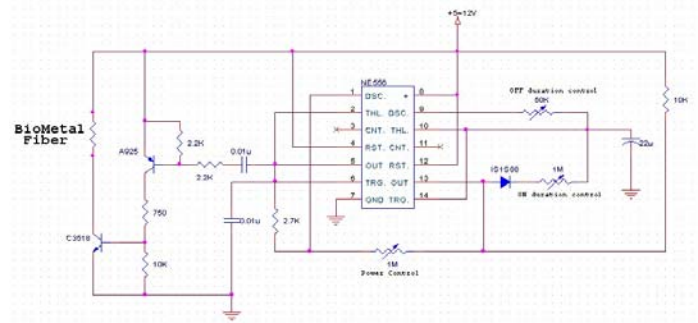


圖 11 BMF 之長度調整電路

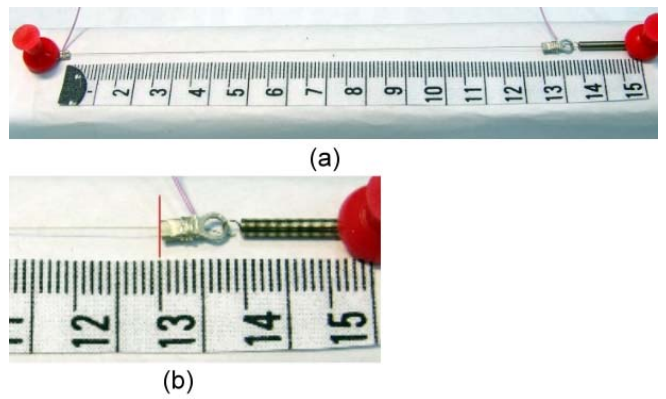


圖 12 將 BMF 之長度調整在 12.5cm

(六) 利用 BMF 進行關節彎曲設計

利用形狀記憶合金致動器來驅動關節彎曲通常有兩種形式：偏壓形式 (bias force type) 及差動形式 (differential force type)。圖 13 為其示意圖。圖中之「SMA wire」即為形狀記憶合金致動器。圖 14 為我們參考偏壓形式所自行設計的關節，我們使用一條 6cm 的 BMF100 做為關節的動力來源，使用一顆 AA (1.5V) 的鹼性電池作為電壓源，BMF 的伸縮量約為 0.3cm，可產生約 50 度的旋轉角度。由此可知雖然形狀記憶合金致動器所產生的伸縮量約只有原長的 5%，但我們可以透過機構的放大來達到我們所需要的較大行程。

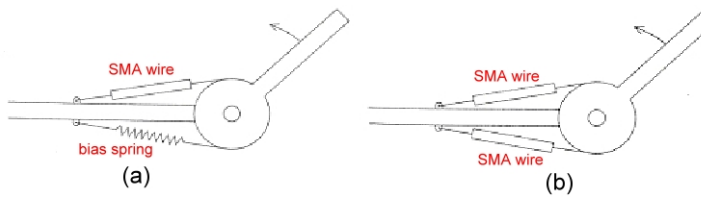


圖 13 關節之設計形式 (a)偏壓形式 (b)差動形式

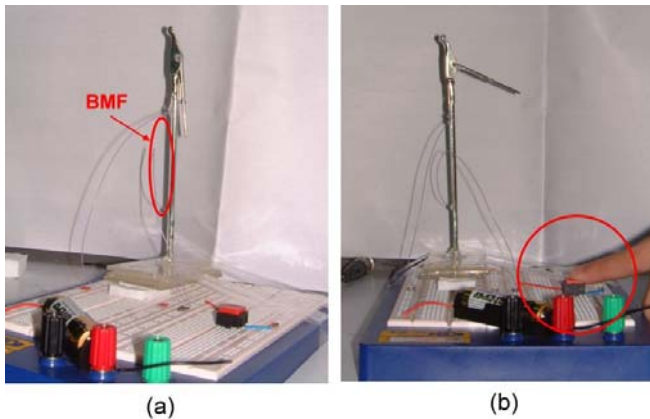


圖 14 偏壓形式之關節設計 (a)未通電壓前 (b)按下開關使通電壓

(七) 微型仿生機械之足部設計

我們針對微型仿生機械足部的設計提出了如圖 15 的設計概念，設計原則是讓肢腳可提供身體做 x ， y 以及 z 三度空間的運動。

首先看圖 15 中，肢腳與身體靠著一個旋轉接點(revolute joint)連接，此接點限制肢腳只能在 z 方向作轉動，在肢腳上靠近旋轉接點的部分我們使用一條纖維型的形狀記憶合金致動器 (BMF)以及一條偏壓彈簧使其可作 z 方向的轉動，也就是 x - y 平面上的移動；在肢腳的末端為分離式的兩小節，靠著一條螺旋型的形狀記憶合金致動器(BMX)以及一對偏壓彈簧使兩小節彼此連結，並可產生 z 方向的位移。

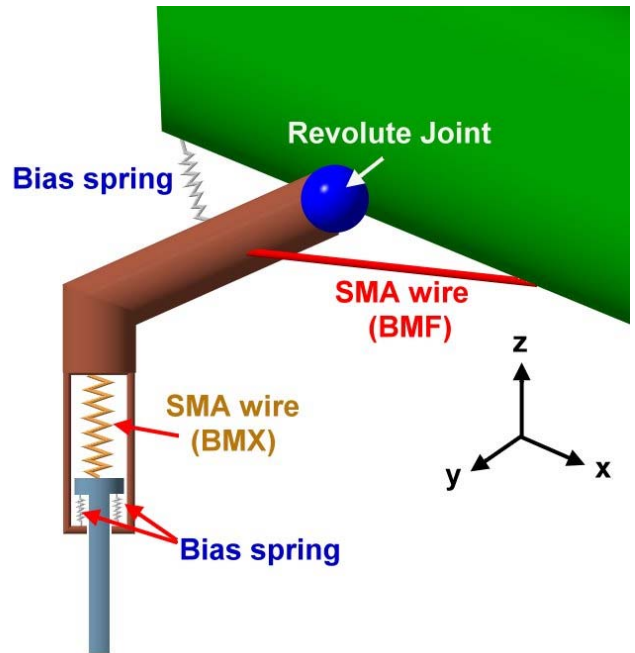


圖 15 微型仿生機械之足部設計圖

參考文獻

- [1]. Fred Delcomyn, Mark E. Nelson, "Architecture for a biomimetic hexapod robot," *Robotics and Autonomous Systems* 30 (2002) 5-15
- [2]. H.-J Weidemann, F. Pfeiffer, J. Eltze, "The Six-Legged TUM Walking Robot," *Proc. of the 1994 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, München, Germany, Sept. 12 - 16, 1994, pp. 1026 - 1033
- [3]. Mills, J., "Lukasiewicz' Insect: The Role of Continuous-Valued Logic in a Mobile Robot's Sensors, Control, and Locomotion", *Proc. 23rd Int. Symp. On Multiple-Valued Logic*, IEEE Computer Society, 1993.
- [4]. Weidemann, H. J., Pfeiffer, F., Eltze, J., "A Design Concept for Legged Robots Derived from the Walking Stick Insect", *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Yokohama, Japan, July, 1993.

- [5]. W. Ilg, J. Albiez, R. Dillmann, "Adaptive Posture Control of a Four-legged Walking Machine using some Principles of Mammalian Locomotion", In *Proceedings International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, Montreal, Kanada, 4.-8. Aug.2000
- [6]. Clark, J. E., Cham, J. G., Bailey, S. A., Froehlich, E. M., Nahata, P. K., Full, R. J. and Cutkosky, M. R., "Biomimetic Design and Fabrication of a Hexapedal Running Robot," *International Conference on Robotics and Automation (ICRA2001)*, Seoul, Korea, May 21-26 2001.
- [7]. Byungkyu Kim, Jaewook Ryu, Younkoo Jeong, Younghun Tak, Byungmok Kim, Jong-Oh Park, "A ciliary based 8-legged walking micro robot using cast IPMC actuators," *ICRA 2003*: 2940-2945
- [8]. R. J. Bachmann, D. A. Kingsley, R. D. Quinn, R. E. Ritzmann, "A cockroach robot with artificial muscles," *5th international conference on climbing and walking robots*, pp. 659-666, 2002.
- [9]. http://www.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mem/sma.html
- [10]. <http://www.toki.co.jp/biometal>
- [11]. M. Hashimoto et al, "Application of shape memory alloy to robotic actuators," *J. Robotic systems*, Vol.2, No.1, pp.3-25, 1985.
- [12]. Porta J. M., Celaya E. "Gait analysis for six-legged robots" Document Tècnic de l'Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, IRI-DT-9805, 1998.
- [13]. Song S. M., Waldron K. J. "An Analytical Approach for Gait Study and its Application on Wave Gait", *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 60-71, 1987.
- [14]. Brooks R. A. "A Robot that Walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network", *Neural Computation*, 1, pp. 253-262, 1989.
- [15]. N. Rode and A. P. Paplinski, "Dynamic gait changing for hexapod walking robots," in *Proc. IASTED International Conference on Robotics and Manufacturing*, (Cancun, Mexico), pp. 37-40, May 1997.
- [16]. Dilip Kumar Pratihar, Kalyanmoy Deb, Amitabha Ghosh, "Optimal path and gait generations simultaneously of a six-legged robot using a GA-fuzzy approach", *Robotics and Autonomous Systems*. Vol.41, No.1, pp. 1 - 20, 2002
- [17]. Full, R. J., Blickhan, R. and Ting, L. H., "Leg design in hexapedal runners" *J. exp. Biol.* 158, 369-390, 1991.
- [18]. M. Wen, G. F. Tu, Q. Y. Zong and C. X. Xie, "A study of NiTi shape memory alloy springs and its application in a new robotic actuator," *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp-215, 1994
- [19]. TiNi 形狀記憶合金薄膜製程之研究 鄧克立
- [20]. Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga (x=-5~+5 at.%) 磁彈型形狀記憶合金之研究 官岱瑩

計畫成果自評

本子計畫目前已完成計畫書中所預計完成之--收尋昆蟲動態資料，了解世界研究趨勢，設計昆蟲腳驅動機構，進行昆蟲腳驅動機制特性分析。本子計畫目前已提出昆蟲腳之驅動機構，現正進行整體微型仿生昆蟲機構設計。預計完成之建立仿生昆蟲動態模型目前已完成仿生昆蟲之步態分析，正著手進行動態模型之

推導。本子計畫所提出之步態分析方法，可提供同領域的研究者一個簡單、清楚的分析方法。本子計畫所提出之昆蟲腳驅動機構設計方式可供同領域之研究者作為設計驅動機制的參考，也可作微型狀記憶合金應用的參考。