

高爾夫球木桿振動品質特性分析

學生姓名：璩春暉 蔡鋒儒 劉建志

指導老師：王柏村

國立屏東科技大學

機械工程系

摘要

本文主要是對於高爾夫球桿木桿頭作振動特性分析，藉由實驗模態分析來獲得球桿之模態參數，包括自然頻率、振型和阻尼比，並利用振型來界定甜蜜區之位置。其實驗的方法為在木桿球頭處敲擊，並在離握把 2 公分處量測響應，以獲得球頭之模態參數。本文確定利用振動特性分析可用來判斷球頭甜蜜區之位置，並可由阻尼比及能量來判定對擊球員手部的舒適與否。因此本文所用之方法可提供高爾夫球頭設計者判斷甜蜜區範圍的方法之一，亦可做為整支高爾夫球桿品質之評鑑方法。

一、前言

近年來隨著國民生活水準的提升，休閒運動也漸漸成為國人生活中不可或缺的一部分，再加上最近高爾夫球風氣的興起，使國人對於高爾夫球具的要求也越來越講究；而高爾夫球具的進步從未間斷過，從材質的演進以增加擊球射程到球具所能提供保護的作用，所以應加強高爾夫球運動科學的研究，如球桿的振動特性或者甜蜜區的界定。高爾夫球桿的材質由先前的鐵桿、鋁桿到現在大多以碳纖維為主，主要是因為碳纖維這種材料具有高強度、高韌性、重量輕等特性，所以非常適合用在高爾夫球桿的材質上，但是對於碳纖維材質在打擊時的受力情形並未有詳細的參考資料，所以碳纖維桿的品質特性具有值得研究的價值，可以藉由振動特性的分析量測出碳纖維桿的品質特性，那麼將有助於高爾夫球桿的研發。

目前國內、外對於高爾夫球桿也有相關的研究文

獻，王和黃[1]不同球頭之高爾夫球桿振動特性及品質探討，此報告是以三種不同球頭來做有限元素分析及實驗模態分析。以套裝軟體 ANSYS 做有限元素分析以求得模態參數（自然頻率、阻尼比及振型），並與實驗所得模態參數做比對，以振動學的角度來探討球桿品質特性，以期獲得定義球桿品質的方法。劉等人[2]高爾夫球桿振動品質指標之探討，此報告是利用有限元素分析來對三種不同之單獨高爾夫球桿進行模態分析以求取模態參數，並與實驗模態分析所求取球桿之模態參數進行比較驗證，確定有限元素分析模型之正確性，並探討碳纖維球桿之材料性質，以及如何藉由球頭在實驗模態分析求得甜蜜區之範圍。邱佑宗[3]高爾夫球甜頭區計算，本文以向量化分析動力學來分析高爾夫球與球頭撞擊行為；以空氣動力學計算高爾夫球於空氣中之飛行軌跡得到最終射程與偏移量；最後分別以射程與球頭能量之觀點界定高爾夫球頭甜區之所在。王和黃[4]握把對高爾夫球桿振動特性影響之分析，本文主要是利用模態分析的實驗來求得有握把及無握把之高爾夫球桿的模態參數，並將兩者的實驗結果做比對，以探討握把的有無對高爾夫球桿品質的影響。王和黃[5]高爾夫球桿振動模態參數之測定，在理論分析部分，本文將球桿及球頭均以樑元素來模擬，並且在球頭部分加以集中質量來模擬，另外在加以實驗模態分析結果作為驗證，以確認理論分析的數學模型是否正確。

本文對木桿球頭打擊面之甜蜜區(sweet spot)作分析及討論。所謂甜蜜區之意涵為：一般運動器材打擊面中央區域，能使擊球射程最遠、震手程度最小舒適

三、實驗模態分析

度之區域，因握把處振動大小關係著擊球員手部感覺的舒適與否，而振動能量勢必是由擊球員的手臂所吸收，因此必需充分的瞭解握把處的振動特性，並針對此振動特性加以設計以降低振動的影響。但一般甜蜜區之界定多僅止於擊球者之手感，而未見定量化之研究文獻。所以本文研究之重點，即在於如何藉由球頭在實驗模態分析求得甜蜜區之範圍。

本文的目的就是要得到高爾夫球桿的品質特性，包括整支碳纖維桿的振動特性和木桿頭的甜蜜區，期望藉由實驗分析來得到球桿的振動特性（自然頻率、振型和阻尼比）。而在實驗分析中，將對於實際的木桿進行模態實驗分析，以期求得球桿的頻率響應函數及模態參數，也就是可以用來判斷出球桿的品質特性。

二、問題定義與分析目標

1. 問題定義：

本文是採用一號木桿(Driver)之高爾夫球桿，包括了以杜拉鋁(Duralumin)合金為材質的球頭，以及碳纖維桿，採用自由振動的邊界條件來進行實驗模態分析。在實驗模態分析部分，以兩條橡皮筋組成的彈性繩將球桿吊在支撐架上，藉此來模擬自由振動的邊界情況。球桿尺寸規格如表一。

2. 分析目標：

本文主要是以實驗模態分析所來求取木桿頭之模態參數和頻率響應函數，並由曲線嵌合得到振型和阻尼比，由振型特性來探討高爾夫球頭甜蜜區之位置，進而求得球頭的節點位置，以界定球頭甜蜜區之所在。

本文的實驗架構情形如圖一所示，首先將衝擊錘用導線接於訊號分析儀之 A 輸入模組，其次再將加速度計用導線經過電荷放大器接於訊號分析儀之 B 輸入模組，再透過 IEE-488 介面將訊號分析儀與個人電腦相連接。其實驗的動作原理為，利用衝擊錘對高爾夫球桿激振，利用加速度計作感測器，量取結構之響應訊號，經過電荷放大器將訊號傳入雙頻道訊號分析儀，由訊號分析儀對輸入之訊號作快速傅立葉轉換，求得球桿的自然頻率響應函數和關聯性函數，最後再將所得到的自然頻率響應函數傳入 CADA-PC 軟體作曲線嵌合(curve fitting)工作，則可得到球桿模態參數，即自然頻率、阻尼比和振型等。本實驗所使用之實驗儀器及其型號如表二。

實驗過程中，首先須完成 BK 3550 訊號分析儀之設定，頻寬設為 0~800Hz，解析條數為 800 條，本實驗驅動器因為使用衝擊錘，所以加入暫態加權函數，在感測器之加速度響應加 Exponential 加權函數。

實驗模態分析之方式是固定加速度計在離握把前端兩公分處的位置，移動衝擊槌在球頭面做激振。且分別對 Droop 及 Swing 平面進行完整之模態測試。先將球頭面劃分為二十五個測試點，見圖二，而移動衝擊槌在球頭面上的每一個測試點，由加速度計量測出的響應經由訊號放大器傳入訊號分析儀作分析，即可得到二十五組自然頻率響應函數，再將之傳入 CADA-PC 軟體作曲線嵌合，以求取球桿的模態參數。

表二、使用之儀器一覽表

儀器名稱	型號
雙頻道訊號分析儀	BK 3550
衝擊槌	BK 8202
加速度計	PCB 309A
加速度計之電荷放大器	PCB 480E09
曲線嵌合軟體	LMS CADA-PC

表一 球桿尺寸規格

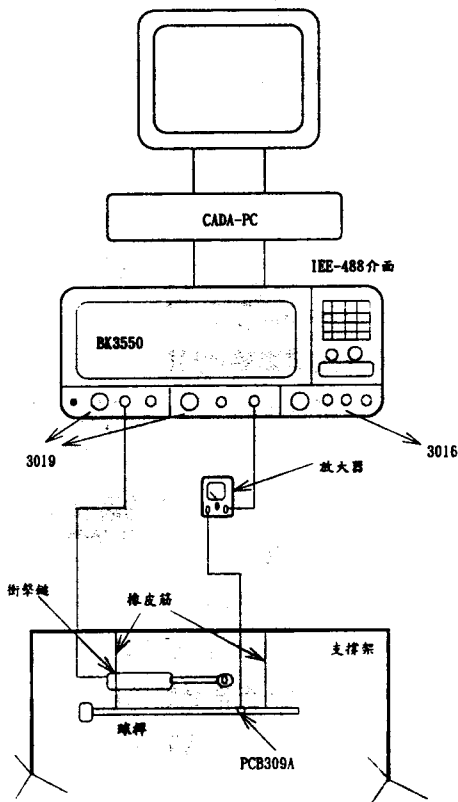
總長(mm)	1071
無阻尼長度(mm)	846
球桿之最大外徑(mm)	16.79
球桿之最大內徑(mm)	13.79
球桿之最小外徑(mm)	7.5
球桿之最小內徑(mm)	4.5
球桿之密度(kg/m ³)	1556

利用實驗
(1) 自然
之槌
鐵桿
有明
附錄
峰和
七和

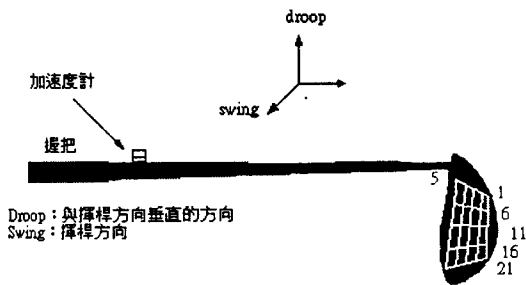
首先將衝擊錘
其次再將加速
儀之 B 輸入
個人電腦相
對高爾夫球
構之響應訊
號分析儀，
轉換，求得
最後再將所
軟體作曲線
參數，即自
之實驗儀器

號分析儀之
D 條，本實
權函數，
函數。

E 離握把前
激振。且
測試。先
而移動衝
計量測出
析，即可
將之傳入
態參數。



圖一、模態實驗架構圖



圖二、高爾夫球桿

四、結果與討論

利用實驗模態分析可以得到下列的結果：

- (1) 自然頻率：由表三中的實驗數據可看到 Swing 方向之頻率和 Droop 方向之頻率，皆十分接近，不像鐵桿在 Swing 方向上的頻率和 Droop 方向之頻率有明顯的差距，這是木桿和鐵桿差異的地方。由附錄 中可觀察到，在頻率響應函數圖中皆有雙峰和三峰的情況出現，也就是第二和第三個、第七和第八個、第九和第十個振型的自然頻率在頻

率響應函數圖中為一雙峰，相同的在第四、第五和第六個振型的自然頻率在頻率響應函數圖中為三峰，此現象可能為衝擊錘在木桿頭的敲擊面敲擊時，使得在 Droop 方向和 Swing 方向的效應會互相影響，無法順利得到單一方向的效應。

表三 加速度計於握把處之自然頻率

Direction / Mode	Droop	Swing
1	33	35
2	104	103
3	113	114
4	203	204
5	220	219
6	230	233
7	354	353
8	373	373
9	565	566
10	585	586

表四 加速度計於握把處之能量

Mode	Droop	Swing	$\sqrt{D^2 + S^2}$
1	3.644069	4.290726	5.629349
2	0.292941	0.70426	0.762756
3	2.900615	2.732577	3.98504
4	1.768865	1.943683	2.628077
5	0.759809	0.778568	1.087878
6	3.289782	1.829974	3.764501
7	2.927584	0.993961	3.091716
8	0.555224	0.104637	0.564998
9	2.977792	2.997729	4.225355
10	0.700258	0.865015	1.11293
合計	19.81694	17.24113	26.8526

- (2) 能量：高爾夫球球頭能量之計算，是以球頭 25 個

位置振型位移量之大小相加。其能量方程式表示為：

$$E = \sum_{i=1}^{25} |\Phi_i^1| \quad (1)$$

其能量值愈小，即表示其振動愈小，舒適性愈好，對擊球員的振動也相對的減小。表四為加速度計於離握把處 2 公分處之能量，可看出 Droop 方向上的能量大於 Swing 方向上的能量，而此量測可做為單獨球桿吸收振動能量性能的基準。

- (3) 阻尼比：球桿吸收振動的性能可以阻尼比值來表示，其阻尼比值越大，代表球桿吸收振動的性能越佳，即敲擊高爾夫球時傳遞給擊球者的能量會相對減少。表五為實驗所得的阻尼比值，其範圍約在 1.55~0.27%之間。

表五 加速度計於握把處之阻尼比(%)

mode	Droop	Swing
1	1.01	1.52
2	0.95	1.21
3	0.54	0.54
4	0.48	0.47
5	0.36	0.34
6	1.02	1.55
7	0.34	0.29
8	0.27	0.28

- (4) 振型：

(a) Droop 方向上的振型：如附錄 B，可觀察出在 Droop 方向上第二、第三、第四、第五、第六、第七、第八、第九、第十個振型上皆有出現節線為零的線段，表示此區為振動量最少的地方。

(b) Swing 方向上的振型：如附錄 C，可觀察出在 Swing 方向上第二、第三、第四、第五、第六、第七、第八、第九、第十個振型上皆有出現節線為零的線段，表示此區亦為振動量最少的地方。

方。

- (c) 結合 Droop 方向和 Swing 方向上的振型：振型的繪圖數據是由 Swing 方向之位移量的平方加 Droop 方向上之位移量的平方開平方。由附錄 D 可觀察出第二個振型其節點位於(3,3)之間，第三個振型其節點位於(3.5,3)之間、第四個振型其節點位於(2.5,3)之間、第五個振型其節點位於(3,3)之間，第七個振型其節點位於(2.5,2)之間，第八個振型其節點位於(3,3)之間，第十個振型其節點位於(3,3)之間。這些有出現節線少於 1 的區域，表示這應為「蜜區」，其振動量最少。

- (d) 振型驗證：由附錄 D 中可觀察出，經由模態分析所得的十個振型圖皆顯示其振動量最少的區域，此區域即為附錄 D 圖 D-2 中的陰影區域。歸納可得，其區域大都在球面中心附近，也就是如附錄 D 圖 D-1 中的線區域，由此驗證可得本球桿「蜜區」的位置大致位於擊球面中心處。

- (5) 關聯性函數：關聯性函數值都常都低於 1，關聯性函數值越接近 1 越好，代表訊號輸入與輸出間有線性之關係；反之，表示訊號之輸入與輸出間無關係。若關聯性函數值為零則表示輸入與輸出間之關係為正交。由附錄 E 中可觀察出 Droop 方向上的關聯性函數和 Swing 方向上的關聯性函數在低頻處和反共振點處，其關聯性函數值偏低，其原因為在低頻處及反共振點附近其能量不足所導致，但是大都接近於 1 表示量測品質都不錯，而 Swing 方向上的結果比 Droop 方向上的結果還要好，表示在 Swing 方向的量測品質比較好。
- (6) 頻率響應函數：頻率響應函數為曲線嵌合得到之模擬曲線，由附錄 A 觀察到 Droop 方向的曲線嵌合大致吻合，而 Swing 方向的曲線嵌合幾乎吻合，所以表示出在曲線嵌合的正確性上還不錯。

五、結論

本文對一顯示自然頻率相近，這是和差異的地方，與否所導致角度來看，本後，和一般認振動特性來辨

本研究員有成員對我們

1. 王柏村，動特性及品質指標之研究，八屆學術研討會。
2. 劉健烽，品質指標之研究，國立屏東科技大學。
3. 邱佑宗，第二十二屆全國力學會議。
4. 王柏村，性影響之分析，全國力學會議。
5. 王柏村，之測定，5 文集，新竹。
6. 聯經出版社，聯經出版。
7. 王柏村，析於高爾夫大學學報。

本文對一高爾夫球木桿做實驗模態分析，其結果顯示自然頻率在 Droop 方向和 Swing 方向上的值非常相近，這是和參考文獻[2]裡所提到的鐵桿之自然頻率差異的地方，推測是球頭之幾何形狀不同和球頭實心與否所導致，需要更進一步實驗來作確認。由振動的角度來看，木桿球頭甜蜜區的位置經由振型圖來判斷後，和一般認知之位置中心處附近相同，所以由球頭振動特性來判定甜蜜區位置為可行之方法。

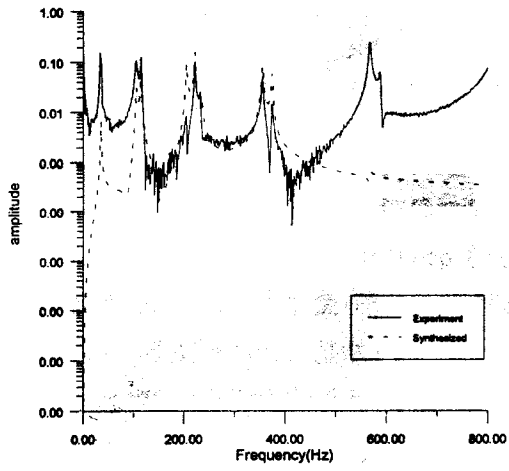
六、致謝

本研究感謝王柏村老師及振動與噪音實驗室的所
有成員對我們的指導和鼓勵。

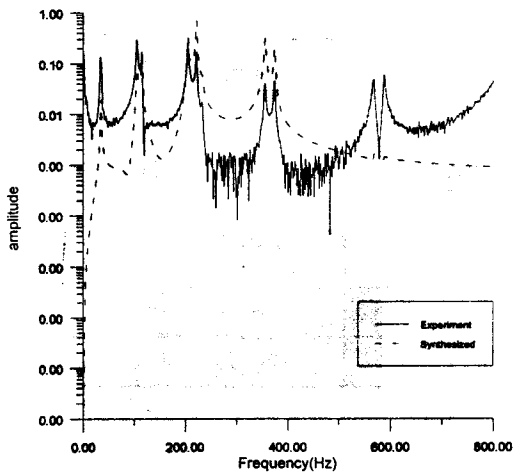
七、參考文獻

1. 王柏村, 黃瑞光, 2000, 「不同球頭之高爾夫球桿振動特性及品質探討」, 中華民國振動與噪音工程學會第八屆學術研討會, 第 209-216 頁。
2. 劉健烽, 黃必偉, 劉立晟, 2001, 「高爾夫球桿振動品質指標之探討」, 2001 年國立屏東科技大學論文集, 國立屏東科技大學機械工程系, 第 16-1~16-16 頁。
3. 邱佑宗, 1998, 「高爾夫球甜頭區計算」, 中華民國第二十二屆全國力學會議, 第 395-400 頁。
4. 王柏村, 黃瑞光, 2000, 「握把對高爾夫球桿振動特性影響之分析」, 89 年度中華民國力學學會暨第 24 屆全國力學會議, 第 109-116 頁。
5. 王柏村, 黃瑞光, 1999, 「高爾夫球桿振動模態參數之測定」, 中華民國力學學會第廿三屆全國力學會議論文集, 新竹市, 第 457-464 頁。
6. 聯經出版事業公司編輯部, 1993, 「高爾夫球入門」, 聯經出版事業公司, 台北市, 第 78-94 頁。
7. 王柏村, 趙志燁, 吳建德, 1999, 「應用實驗模態分析於高爾夫球頭素料之材料性質測定」, 國立屏東科技大學學報, 第八卷, 第四期, 第 311-317 頁。

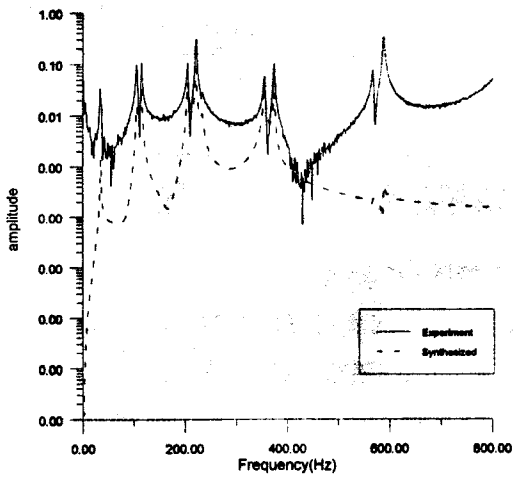
附錄 A 頻率響應函數圖



(a)第一點

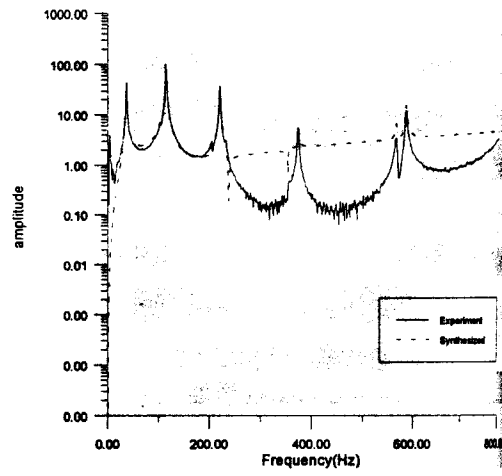


(b)第六點

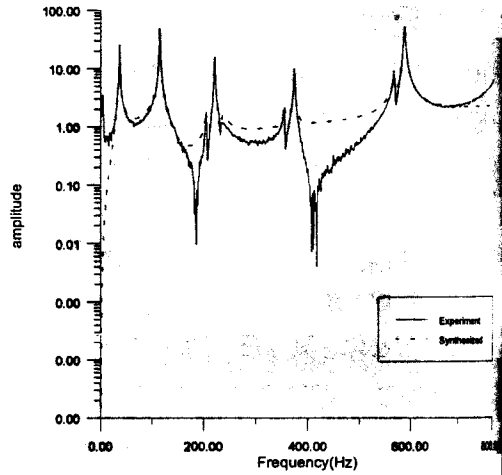


(c)第二十四點

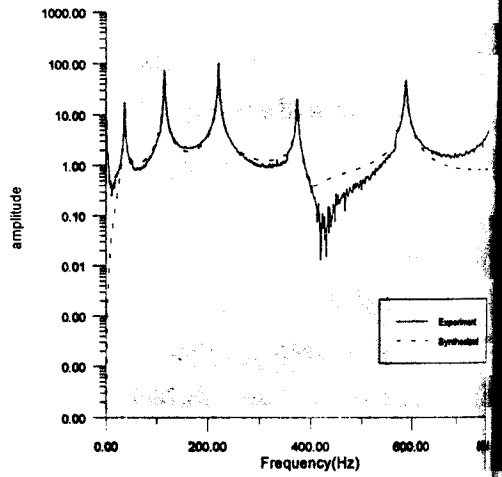
圖 A-1 Droop 方向



(a)第一點



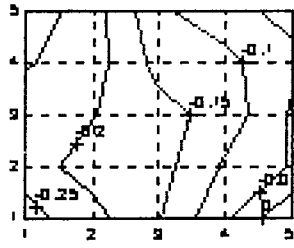
(b)第七點



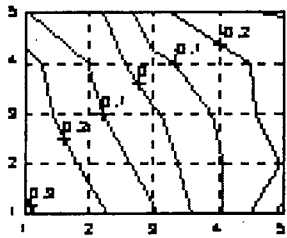
(c)第十八點

圖 A-2 Swing 方向

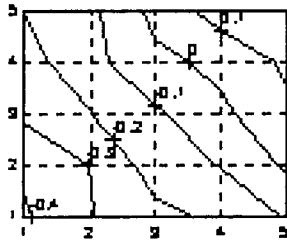
附錄 B Droop 方向之振型圖



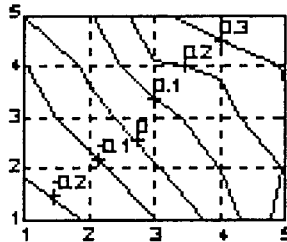
(a) mode shape 1



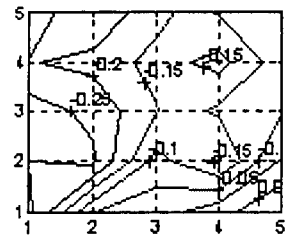
(b) mode shape 2



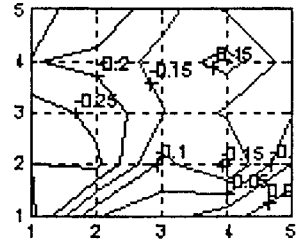
(c) mode shape 3



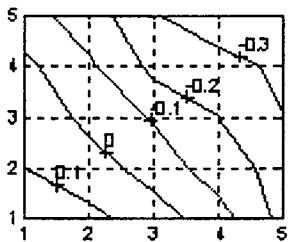
(d) mode shape 4



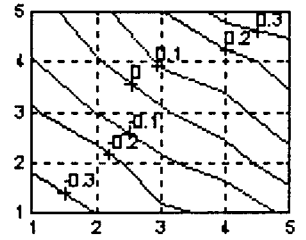
(e) mode shape 5



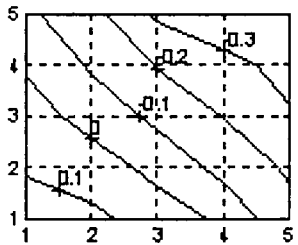
(f) mode shape 6



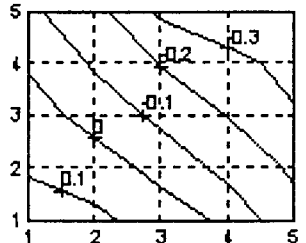
(g) mode shape 7



(h) mode shape 8



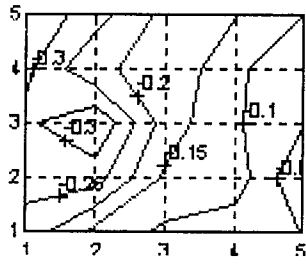
(i) mode shape 9



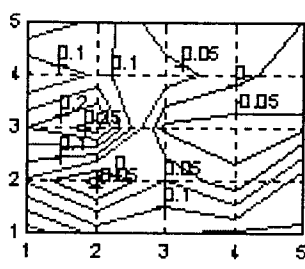
(j) mode shape 10

圖 B-1 Droop 方向上之振型

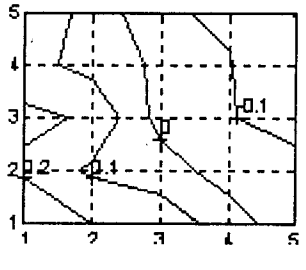
附錄 C Swing 方向之振型圖



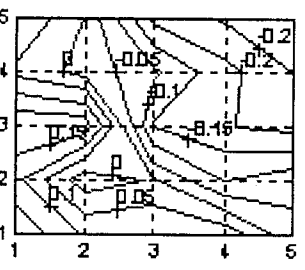
mode shape 1



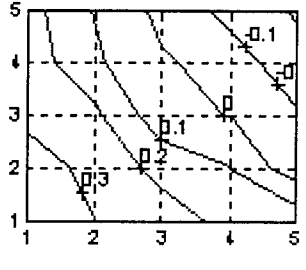
mode shape 6



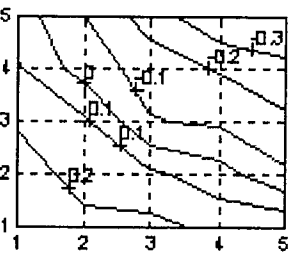
mode shape 2



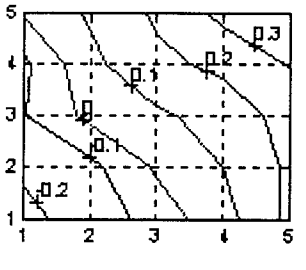
mode shape 7



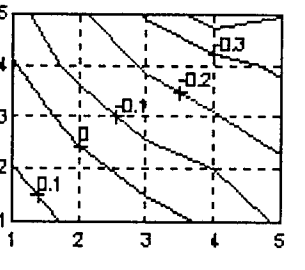
mode shape 3



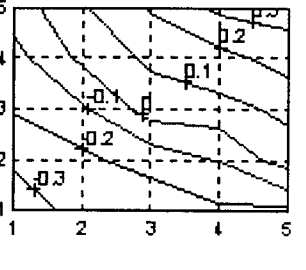
mode shape 8



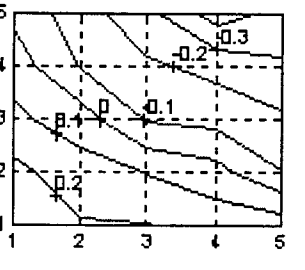
mode shape 4



mode shape 9



mode shape 5



mode shape 10

圖 C-1 Swing 方向上之振型

附錄 D 振型驗證

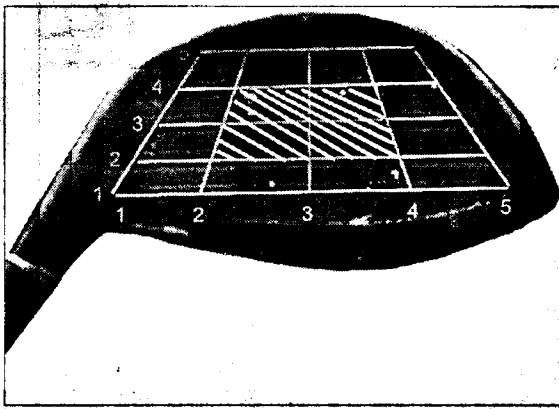
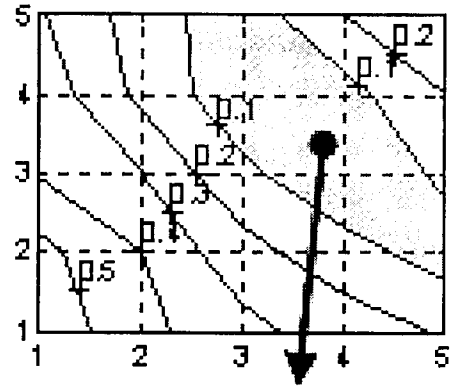
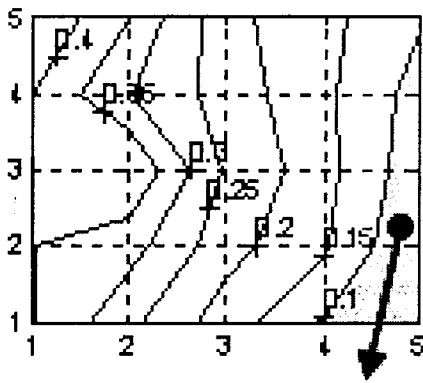


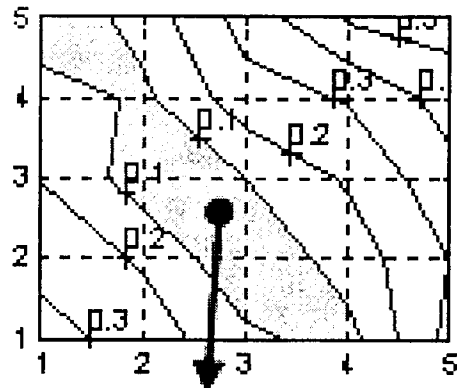
圖 D-1 實際球頭面



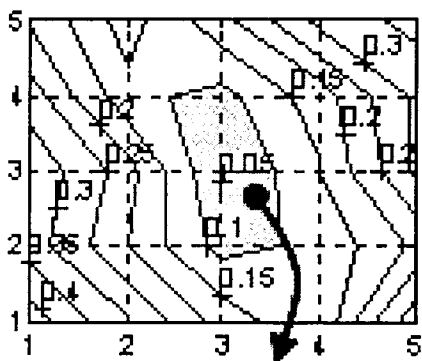
甜蜜區
(c) 第三個振型



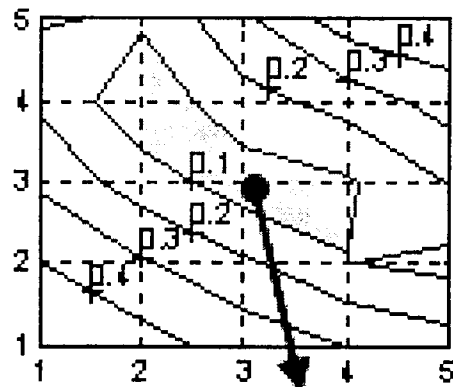
甜蜜區
(a) 第一個振型



甜蜜區
(d) 第四個振型

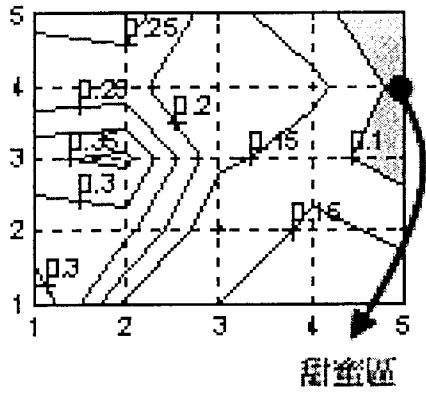


甜蜜區
(b) 第二個振型

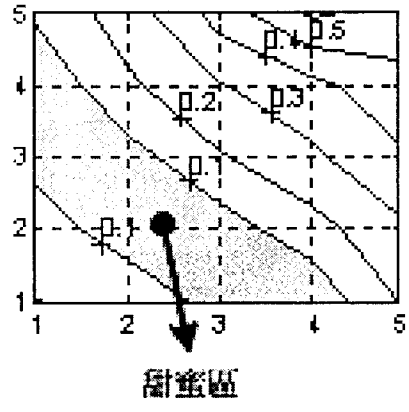


甜蜜區
(e) 第五個振型

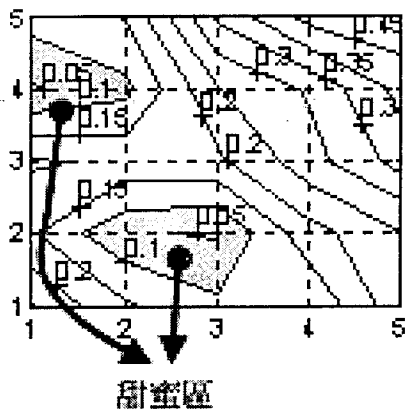
圖 D-2 EMA 振型



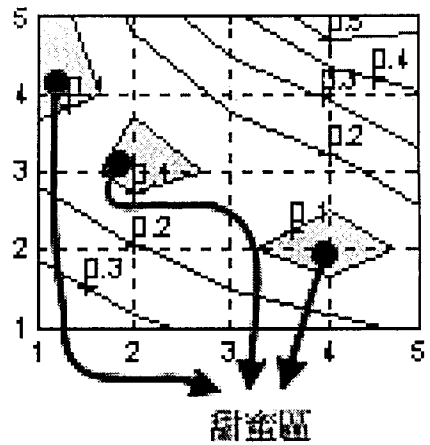
(f) 第六個振型



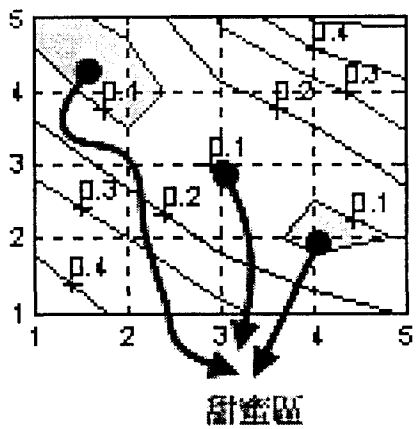
(i) 第九個振型



(g) 第七個振型



(j) 第十個振型

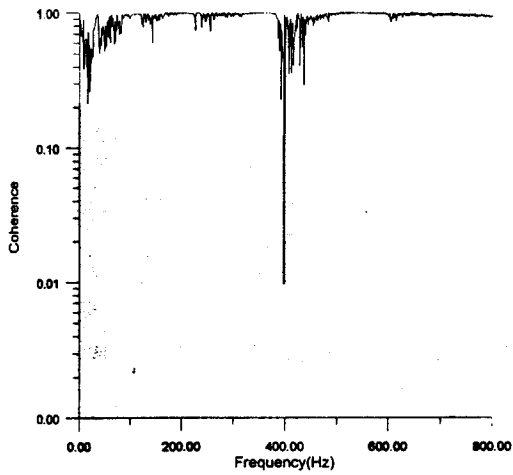


(h) 第八個振型

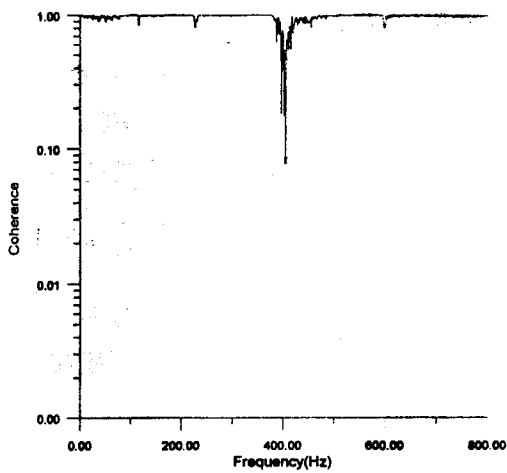


圖 D-2 EMA 振型

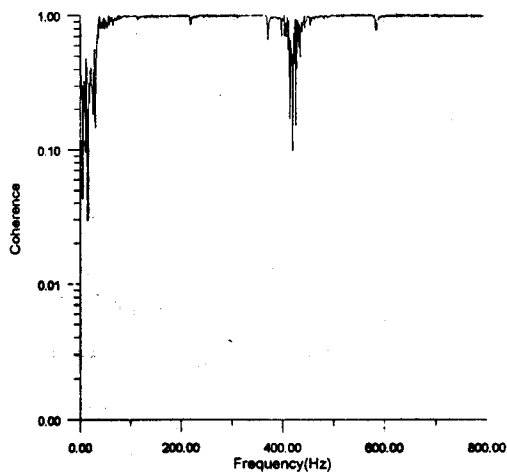
附錄 E 關聯性函數圖形



(a)第二點

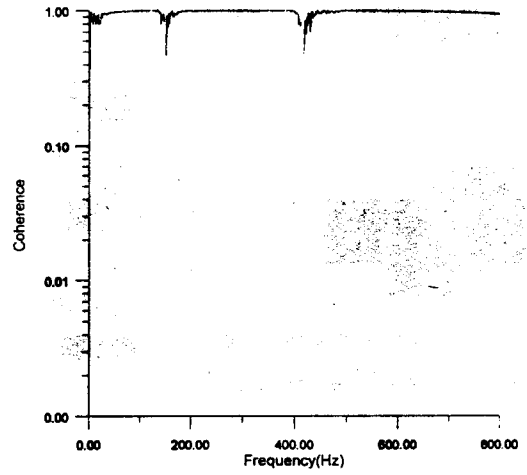


(b)第十五點

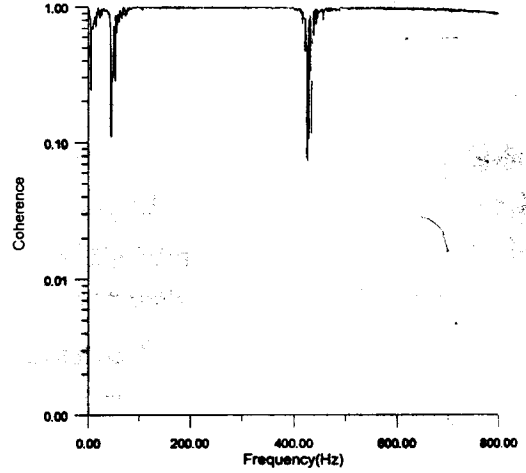


(c)第二十五點

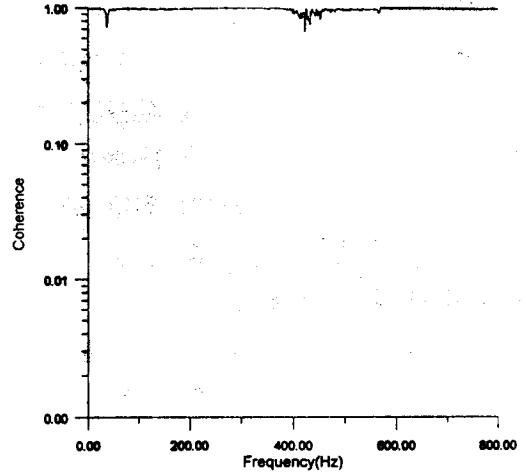
圖 E-1 在 Droop 關聯性函數圖形



(a)第二點



(b)第十五點



(c)第二十五點

圖 E-2 在 Seing 關聯性函數圖形