

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ผลการทดลองหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกล

กรณีที่ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm.

โหมดเซฟท์	ค่าความถี่จากสมการ*	ค่าความถี่จากการวัด
1	1.20	1.25
2	7.30	7.37
3	20.45	20.50

สำหรับแขนกลขนาด 5.8 x 0.3175 x 116.4 cm.

โหมดเซฟท์	ค่าความถี่จากสมการ*	ค่าความถี่จากการวัด
1	1.765	1.80
2	10.75	10.80
3	30.55	30.60

สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm. (แบบ 2 แผ่น)

โหมดเซฟท์	ค่าความถี่จากสมการ*	ค่าความถี่จากการวัด
1	1.0965	1.25
2	6.60	6.625
3	19.04	19.125

กรณีที่ใช้หน้าหนักที่ปลายแขน

สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm.

โหมด เซฟที่	ค่าความถี่จากสมการ*	ค่าความถี่จากการวัด
1	0.915	1.00
2	5.95	6.00
3	17.70	17.75

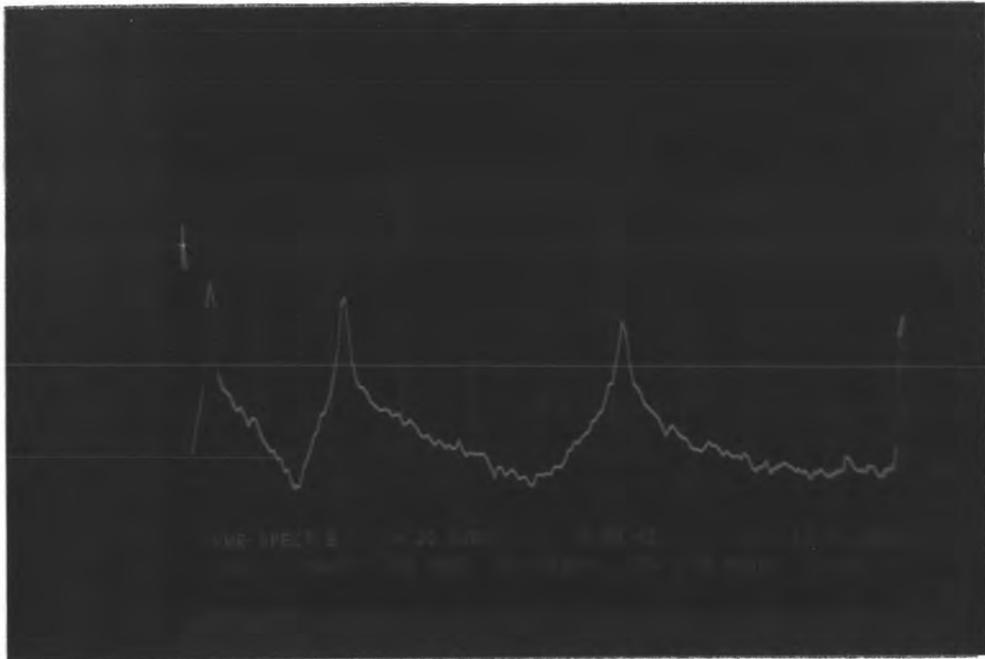
สำหรับแขนกลขนาด 5.8 x 0.3175 x 116.4 cm.

โหมด เซฟที่	ค่าความถี่จากสมการ*	ค่าความถี่จากการวัด
1	1.20	1.25
2	8.94	9.00
3	26.45	26.50

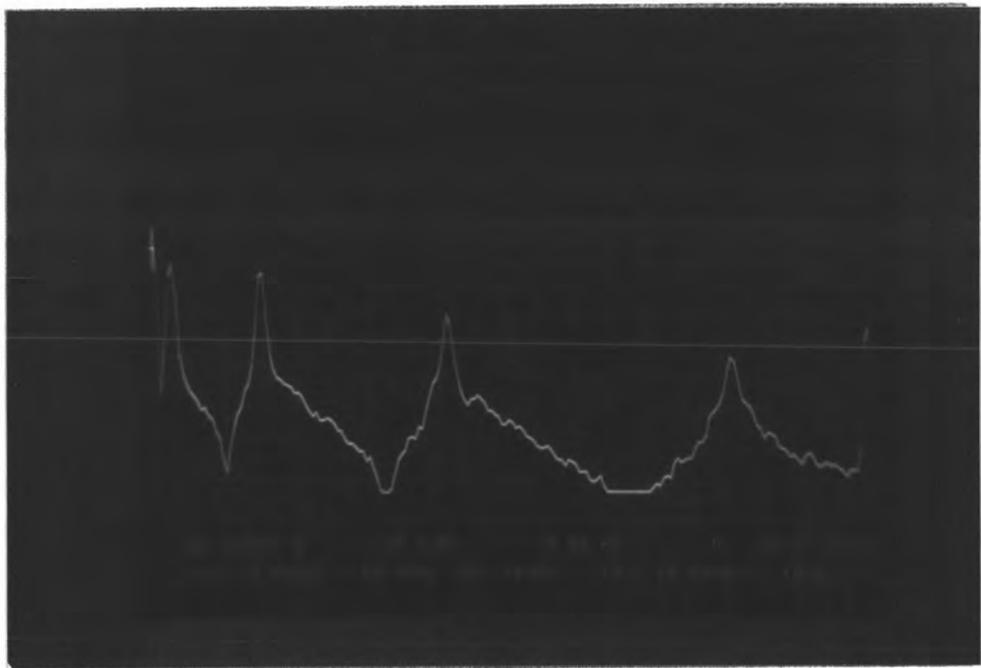
สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm. (แบบ 2 แผ่น)

โหมด เซฟที่	ค่าความถี่จากสมการ*	ค่าความถี่จากการวัด
1	0.884	1.00
2	5.70	5.75
3	17.70	17.75

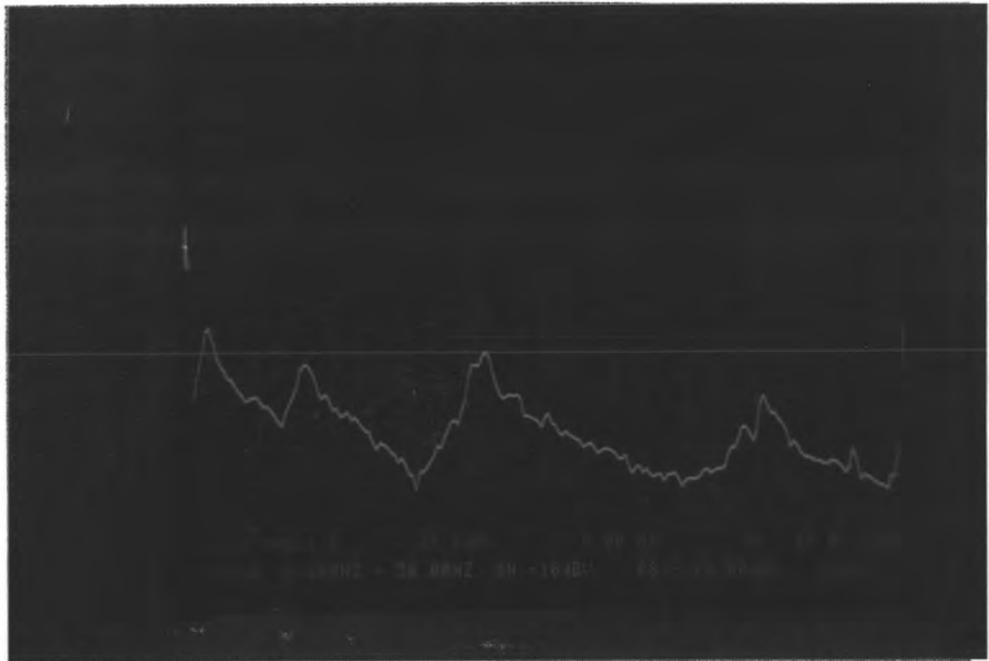
* สมการในการหาค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 จะใช้สมการที่ (30) ส่วนสมการที่จะใช้สำหรับหาค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 2,3 จะใช้สมการที่ (33)



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติ โดยใช้หมวด เพาเวอร์ สเปคตรัม
สำหรับแขนกลแผ่นหนา ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติ โดยใช้หมวด เพาเวอร์ สเปคตรัม
สำหรับแขนกลแผ่นบาง ไม่น้ำหนักที่ปลายแขน



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติ โดยใช้หมวด เพาเวอร์ สเปคตรัม
สำหรับแกนกลผ่านบางคู่ ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ค่าของเมทริกซ์ที่ใช้ในการทดลอง

เมทริกซ์สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm. โดยไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

$$[\phi_{i,j}(\xi)] = \begin{bmatrix} 3.33574E-4 & 1.19749E-3 & 3.00489E-3 \\ 6.54927E-1 & 1.25176E+0 & 8.64556E-1 \\ 2.00570E+0 & 7.52208E-1 & -1.85349E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 1.09091E+2 & 2.04630E+2 & 1.73330E+2 \\ 1.93437E+1 & -3.43820E+1 & -6.27100E+2 \\ 2.75253E+0 & -9.58049E+0 & 2.34648E+2 \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{i,j}(\xi)][\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 6.78249E-2 & -1.70118E-3 & 1.19659E-2 \\ 9.80402E+1 & 8.26970E+1 & -4.68591E+2 \\ 2.28254E+2 & 4.02322E+2 & -5.58977E+2 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm. โดยใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

$$[\phi_{i,j}(\xi)] = \begin{bmatrix} 3.26741E-4 & 8.84091E-4 & 2.58203E-3 \\ 6.48424E-1 & 1.05849E+0 & 9.68444E-1 \\ 2.00859E+0 & 1.24869E+0 & -2.14422E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 1.01763E+2 & 2.07678E+2 & 7.97729E+2 \\ 2.72299E+1 & -3.94260E+1 & -1.10255E+3 \\ 4.05968E+0 & -1.34115E+1 & 2.80274E+2 \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{i,j}(\xi)][\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 6.78062E-2 & -1.62789E-3 & 9.56928E-3 \\ -9.87400E+1 & 7.99433E+1 & -3.78345E+2 \\ 2.29697E+2 & 3.96666E+2 & -3.75408E+2 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์สำหรับแขนกลขนาด 5.8 x 0.3175 x 116.4 cm. โดยไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

$$[\phi_{i,j}(\xi)] = \begin{bmatrix} 4.13578E-5 & 2.58167E-4 & 7.22472E-4 \\ 3.16948E-1 & 1.15499E+0 & 1.46173E+0 \\ 1.04648E+0 & 9.61946E-1 & -1.23701E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 5.75748E+1 & 1.09025E+2 & 2.16045E+1 \\ 6.75992E+0 & -6.96898E+0 & -1.60846E+1 \\ 1.32580E+0 & -3.82794E+0 & 4.53419E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{i,j}(\xi)][\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 5.08265E-3 & -5.56997E-5 & 1.68285E-5 \\ 2.79869E+1 & 2.09109E+1 & -5.10223E+0 \\ 6.51079E+1 & 1.12124E+2 & 1.52735E+0 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์สำหรับแขนกลขนาด 5.8 x 0.3175 x 116.4 cm. โดยใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

$$[\phi_{i,j}(\xi)] = \begin{bmatrix} 3.85733E-5 & 2.33633E-4 & 6.56696E-4 \\ 3.02041E-1 & 1.13103E+0 & 1.56807E+0 \\ 1.02426E+0 & 1.32903E+0 & -1.06126E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 5.58675E+1 & 1.09363E+2 & 3.22536E+1 \\ 7.54886E+0 & -4.47285E+0 & -1.88262E+1 \\ 1.77146E+0 & -4.91397E+0 & 4.82312E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{i,j}(\xi)][\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 5.08196E-3 & -5.35022E-5 & 1.30385E-5 \\ 2.81900E+1 & 2.02677E+1 & -3.98800E+0 \\ 6.53757E+1 & 1.11287E+2 & 2.89696E+0 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์สำหรับแขนกลขนาด $4 \times 0.15 \times 98.2$ cm. โดยไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

$$[\phi_{i,j}(\xi)] = \begin{bmatrix} 3.32686E-4 & 1.04758E-3 & 2.74632E-3 \\ 6.54771E-1 & 1.16262E+0 & 2.74632E-3 \\ 2.01069E+0 & 9.96796E-1 & -2.03491E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 1.06410E+2 & 2.05081E+2 & 4.39990E+2 \\ 2.20858E+1 & -3.67816E+1 & -8.09758E+2 \\ 3.37764E+0 & -1.14164E+1 & 2.59425E+2 \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{i,j}(\xi)][\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 6.78140E-2 & -1.65722E-3 & 1.05529E-2 \\ 9.84493E+1 & 8.10480E+1 & -4.15427E+2 \\ 2.29100E+2 & 3.98923E+2 & -4.50385E+2 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์สำหรับแขนกลขนาด $4 \times 0.15 \times 98.2$ cm. โดยใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

$$[\phi_{i,j}(\xi)] = \begin{bmatrix} 3.26009E-4 & 8.07867E-4 & 2.53751E-3 \\ 6.49322E-1 & 1.00758E+0 & 9.87348E-1 \\ 2.01930E+0 & 1.36144E+0 & -2.17198E+0 \end{bmatrix}$$

$$[\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 9.77138E+1 & 2.08971E+2 & 1.00197E+3 \\ 3.08323E+1 & -4.17222E+1 & -1.28943E+3 \\ 4.35089E+0 & -1.42029E+1 & 2.85439E+2 \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{i,j}(\xi)][\partial^2 \phi_{i,j}(\xi) / \partial \xi^2]^{-1} = \begin{bmatrix} 6.78044E-2 & -1.61948E-3 & 9.26310E-3 \\ 9.88095E+1 & 7.96281E+1 & -3.66777E+2 \\ 2.29840E+2 & 3.96022E+2 & -3.52184E+2 \end{bmatrix}$$

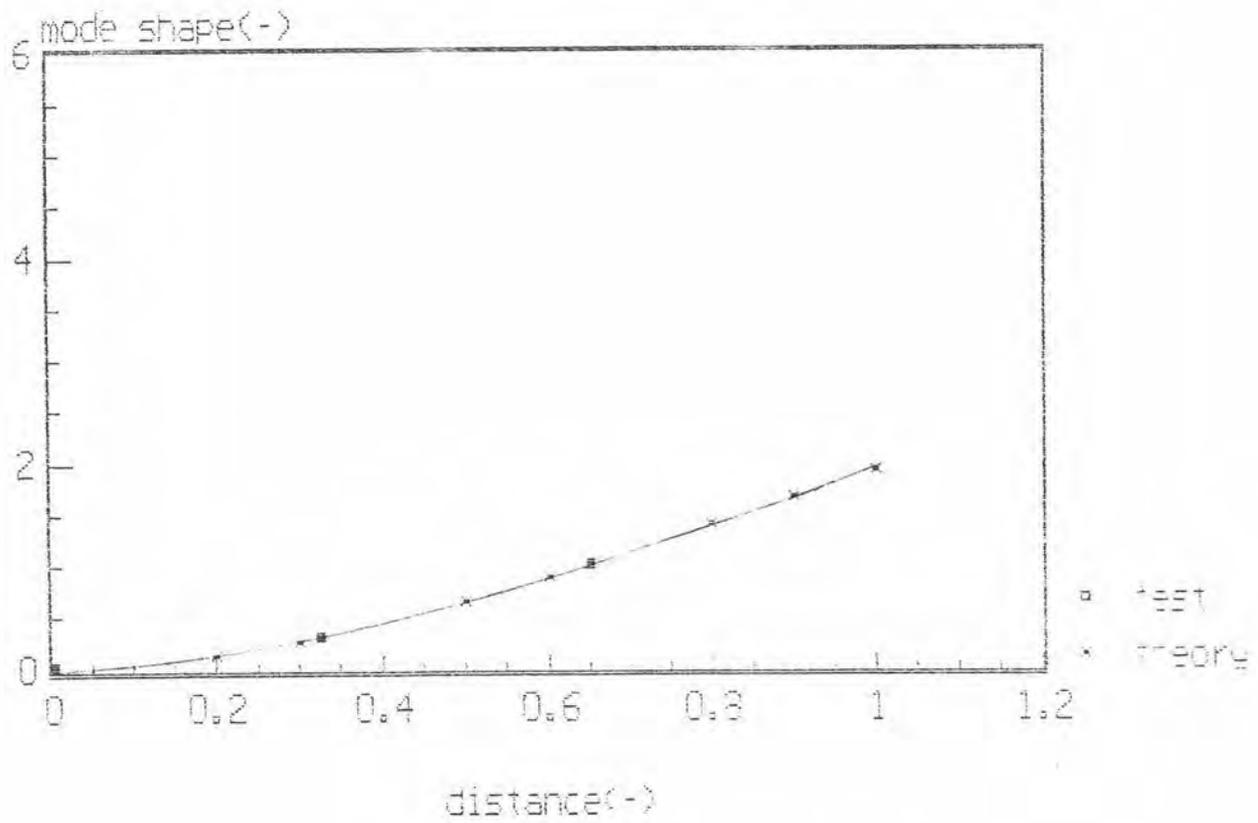
สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แทนแบบจำลองของแขนกล โดยสามารถแทนในรูปของสมการเมทริกซ์ซึ่งจะพบได้ในบทที่ 2 ส่วนค่าของเมทริกซ์ที่จะได้สำหรับระบบแบบต่อเนื่อง และระบบแบบเชิงตัวเลข

$$[A_e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2.798E+1 & 6.961E+1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.216E+2 & -1.902E+2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.009E+1 & -5.330E+3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

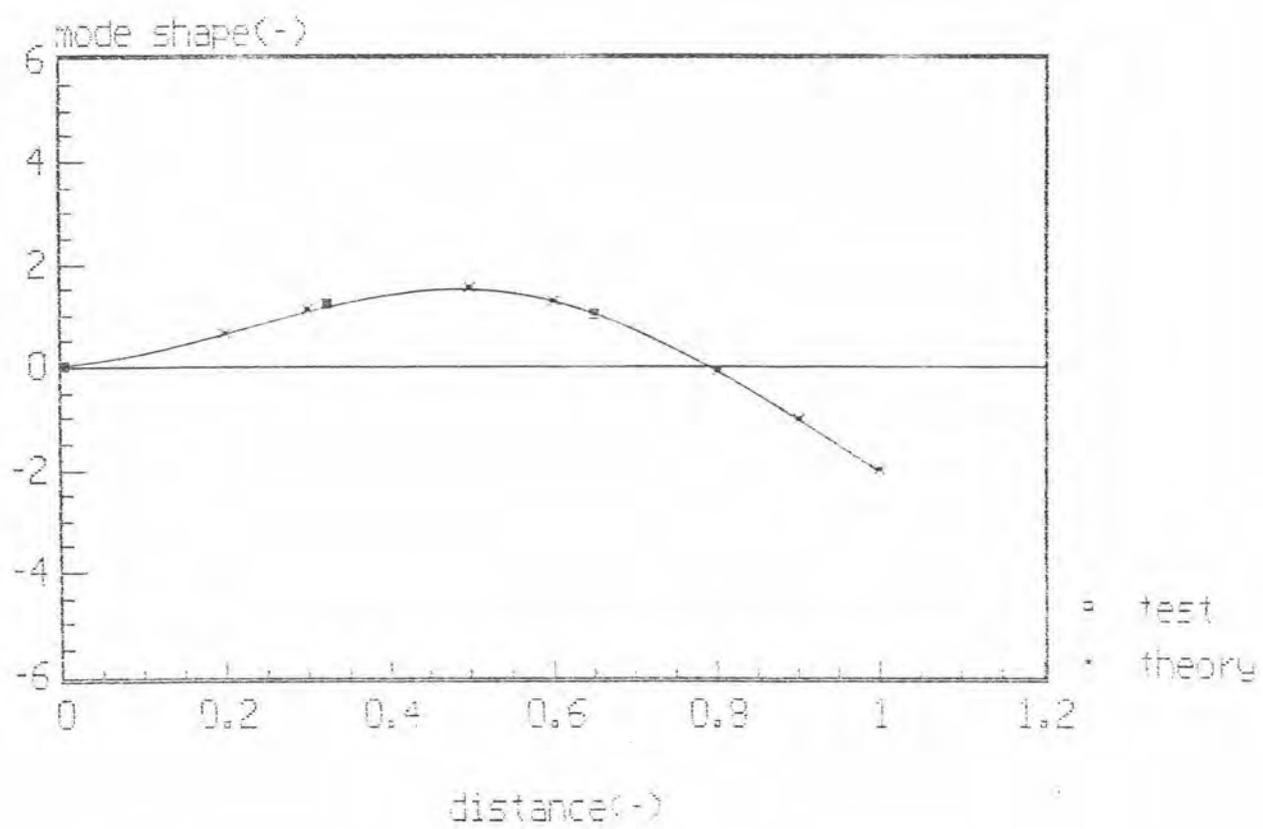
$$[B_e] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.9684E-1 \\ -1.7639E-1 \\ -2.3277E-2 \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1.39483E-3 & 3.32653E-3 & 1 & 4.6548E-6 & 1.12923E-5 \\ 0 & 9.83965E-1 & -9.06842E-3 & 0 & 9.94649E-3 & -3.08101E-5 \\ 0 & -4.80962E-4 & 7.45126E-1 & 0 & -1.63408E-6 & 9.13503E-3 \\ 0 & 2.78161E-1 & 6.35042E-1 & 0 & 1.39483E-3 & 3.32653E-3 \\ 0 & -3.19833 & -1.72727 & 0 & 9.83965E-1 & -9.06842E-3 \\ 0 & -9.16092E-2 & -4.86901E+1 & 0 & -4.80962E-4 & 7.45126E-1 \end{bmatrix}$$

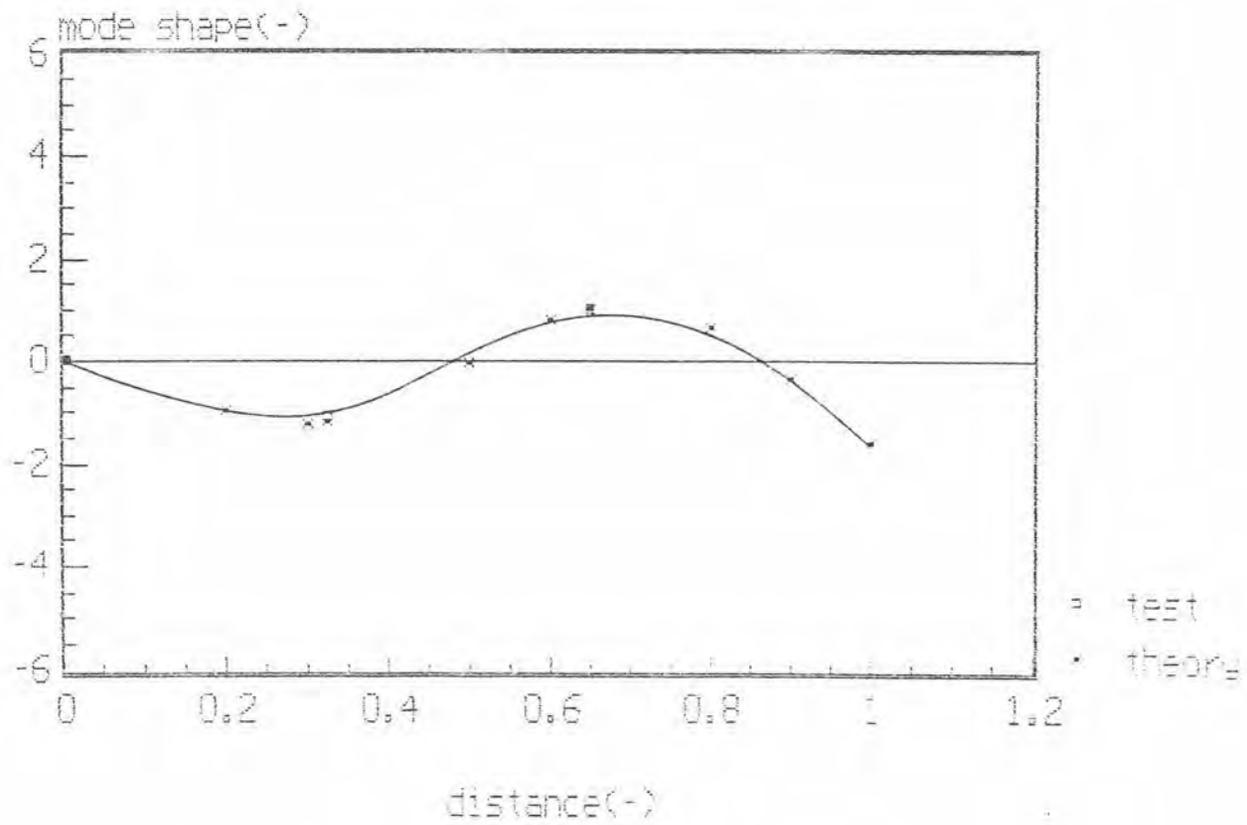
$$[B] = \begin{bmatrix} 9.8390E-6 \\ -8.7940E-6 \\ -1.1123E-6 \\ 1.9673E-3 \\ -1.7537E-3 \\ -2.1235E-4 \end{bmatrix}$$



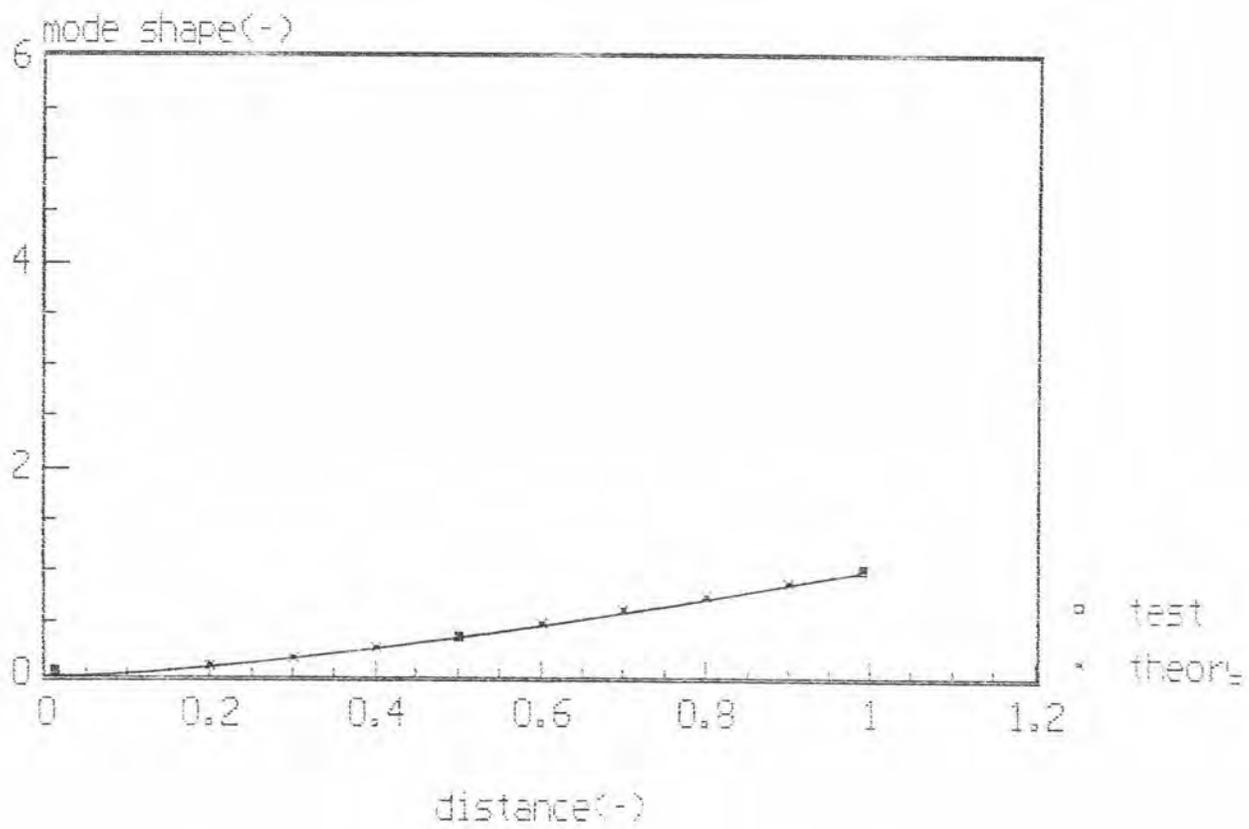
รูปที่ 4.4 โหมดเซฟที่ 1 สำหรับแกนกลมแผ่นหนา ไม่น้ำหนักที่ปลายแกน



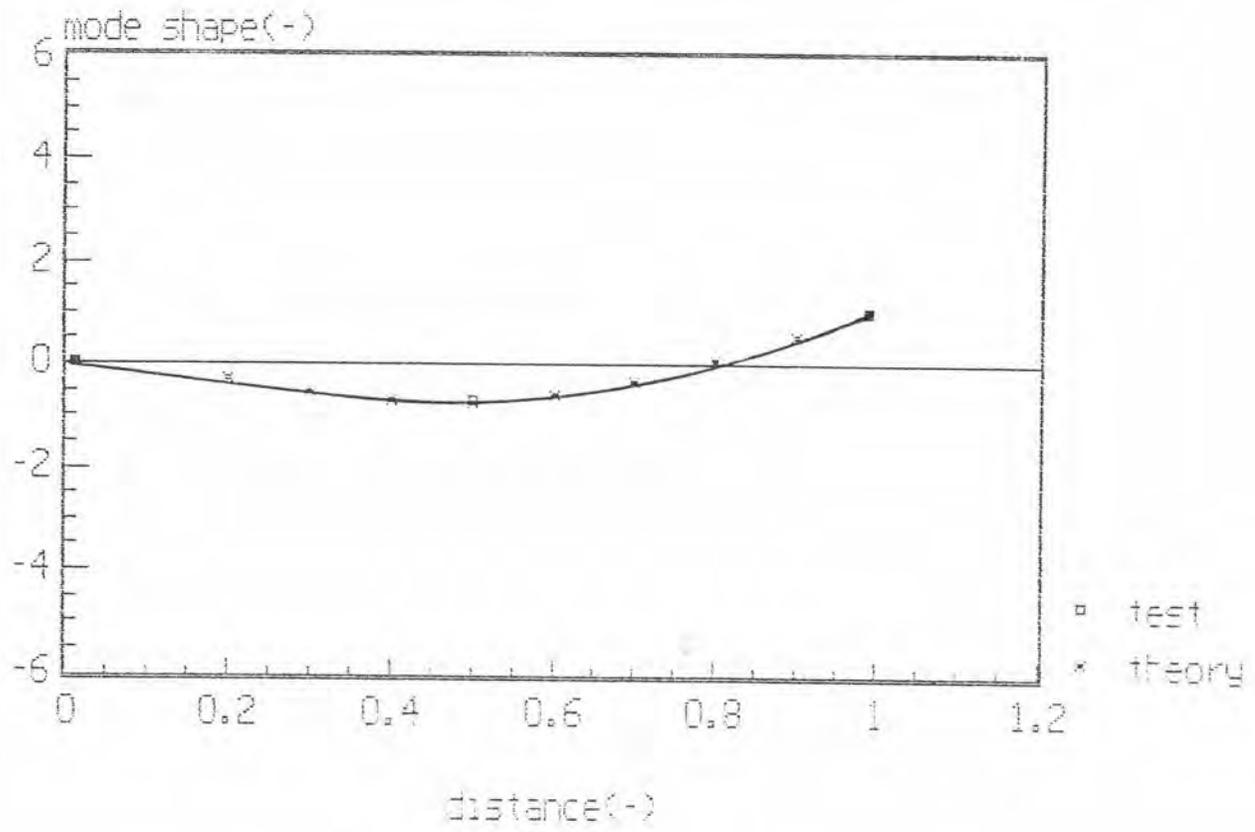
รูปที่ 4.5 โหมดเชนที่ 2 สำหรับแกนกลผ่านหน้า ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแกน



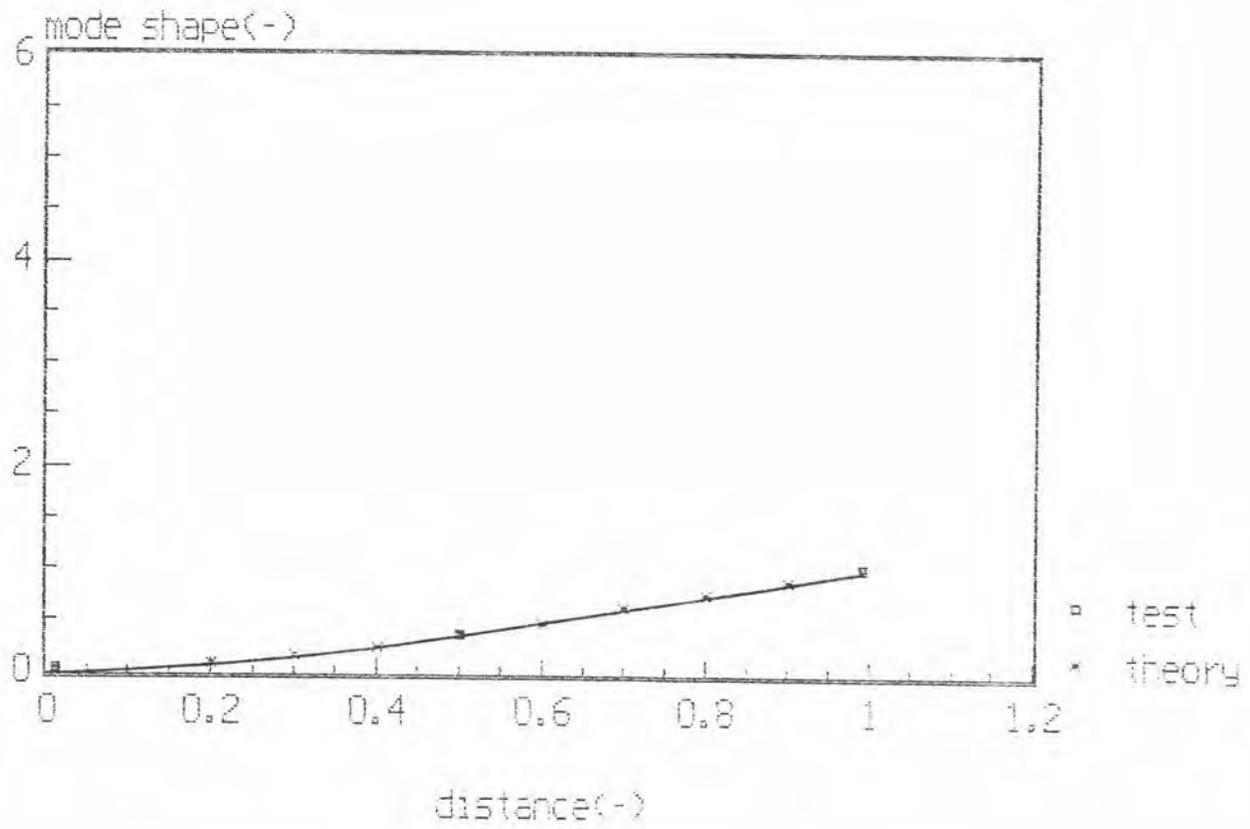
รูปที่ 4.6 โหมดเชฟที่ 3 สำหรับแกนกลผ่านหนา ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแกน



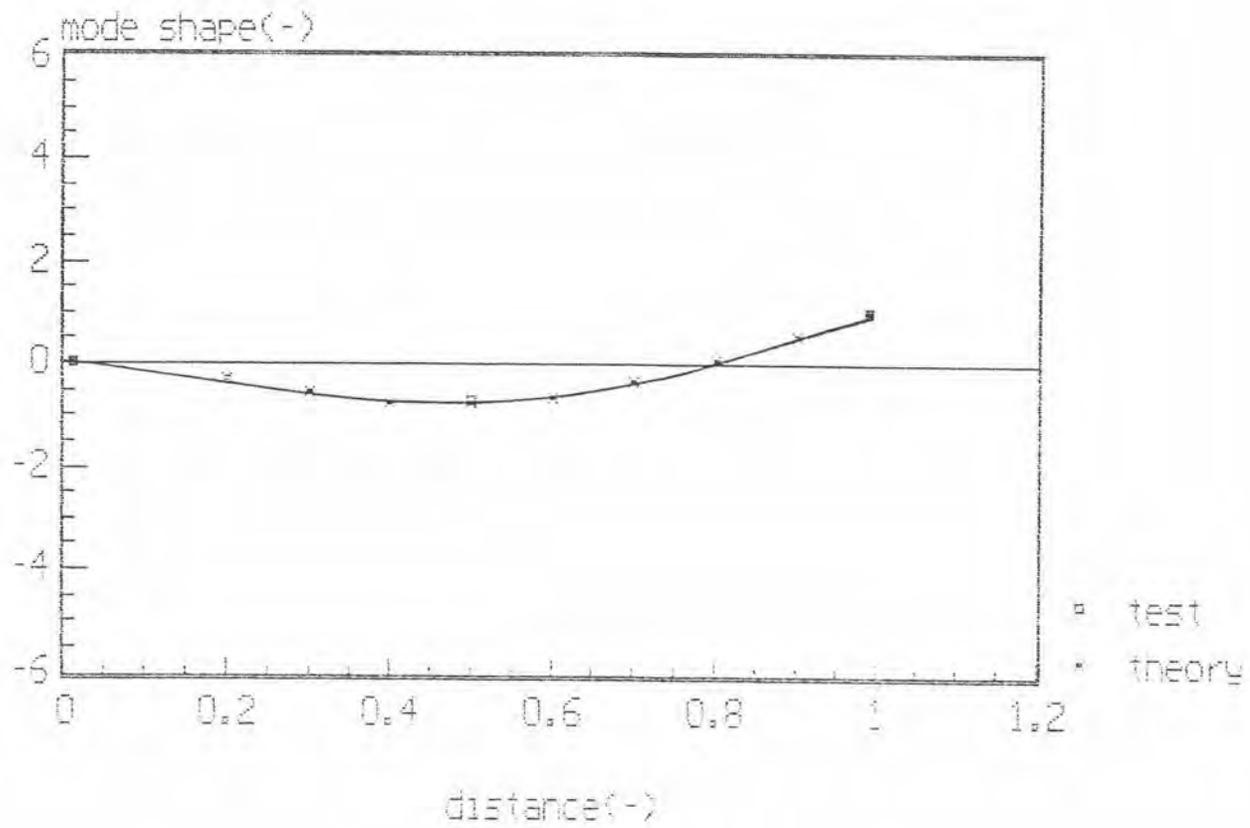
รูปที่ 4.7 โหมดเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลผ่านบาง ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



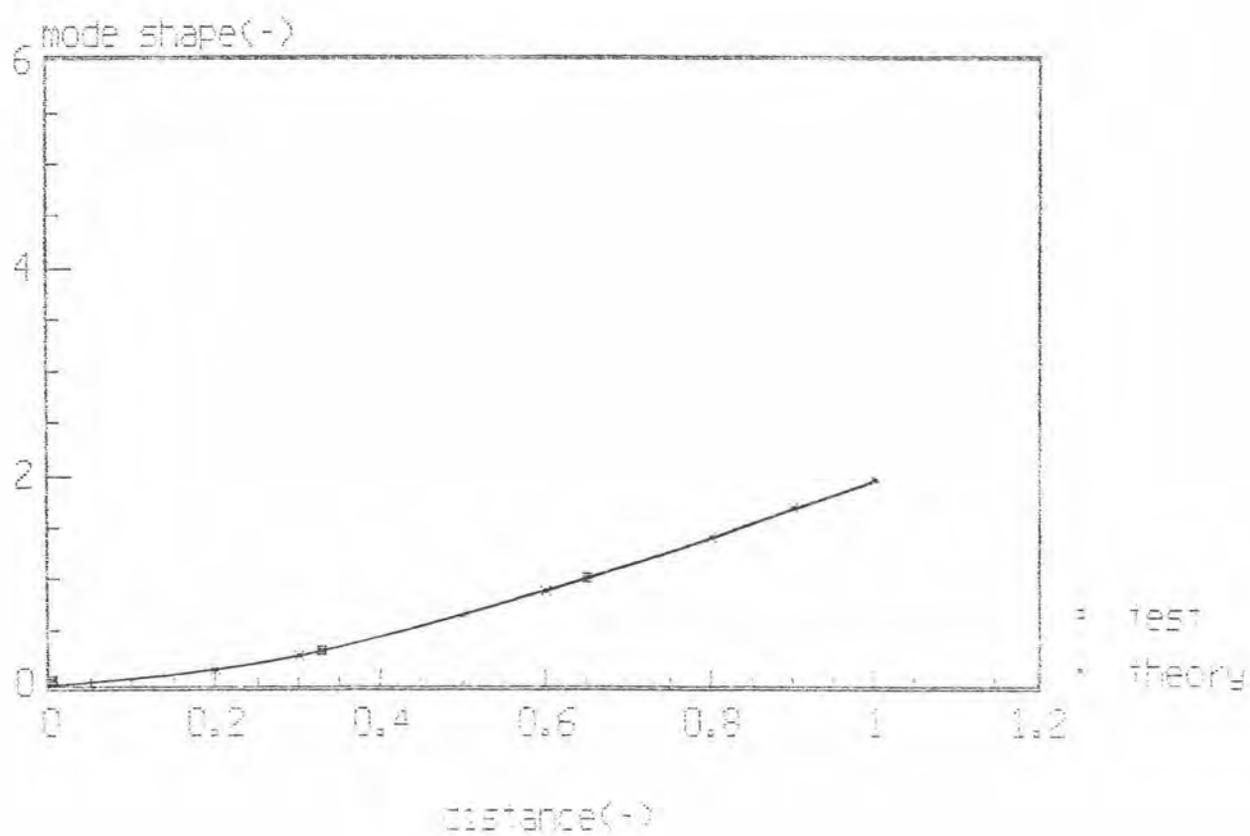
รูปที่ 4.8 โหมดเชฟที่ 2 สำหรับแขนกลแผ่นบาง ไม่ใส่ น้ำหนักที่ปลายแขน



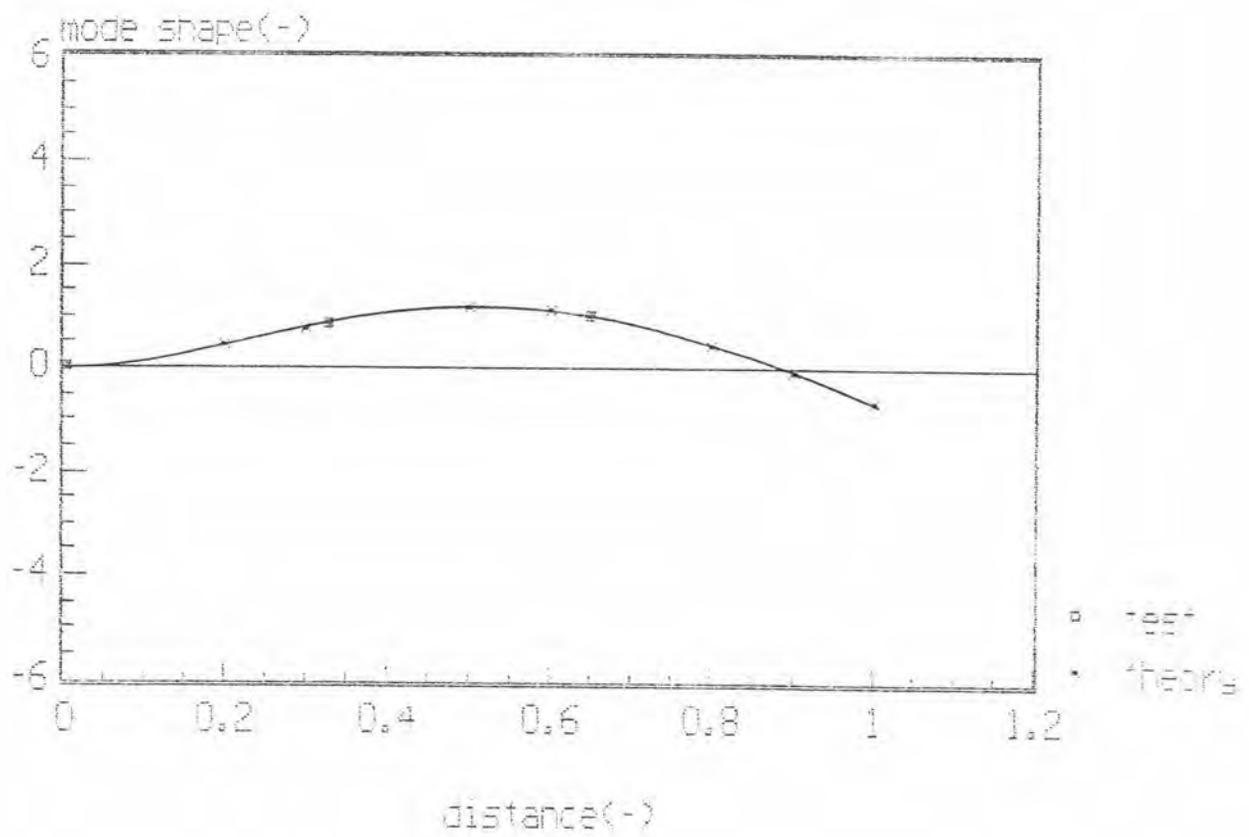
รูปที่ 4.9 โหมดเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลผ่านบางคู่ ไม่ใส่ น้ำหนักที่ปลายแขน



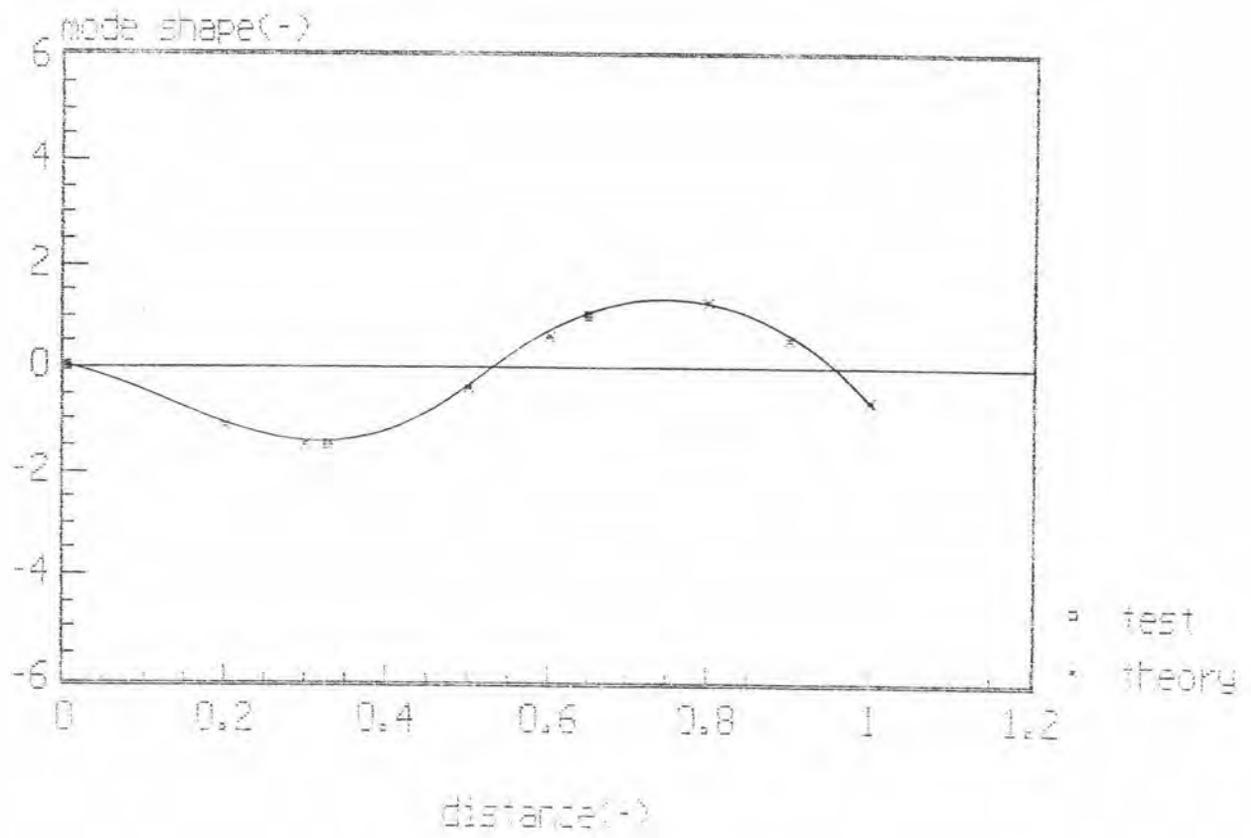
รูปที่ 4.10 โหมดเซฟที่ 2 สำหรับแกนกลแผ่นบางคู่ ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแกน



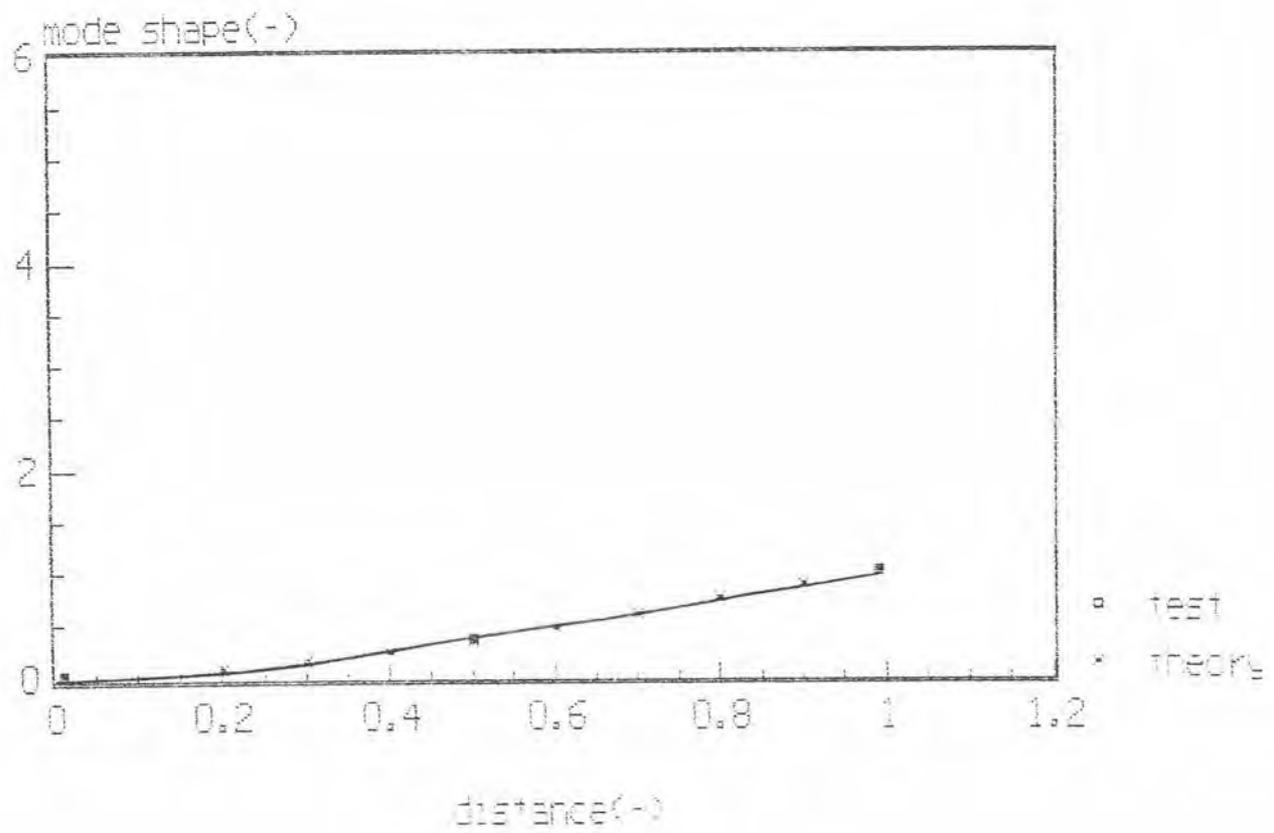
รูปที่ 4.11 โหมดเชฟที่ 1 สำหรับแขนกลผ่านหน้า ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



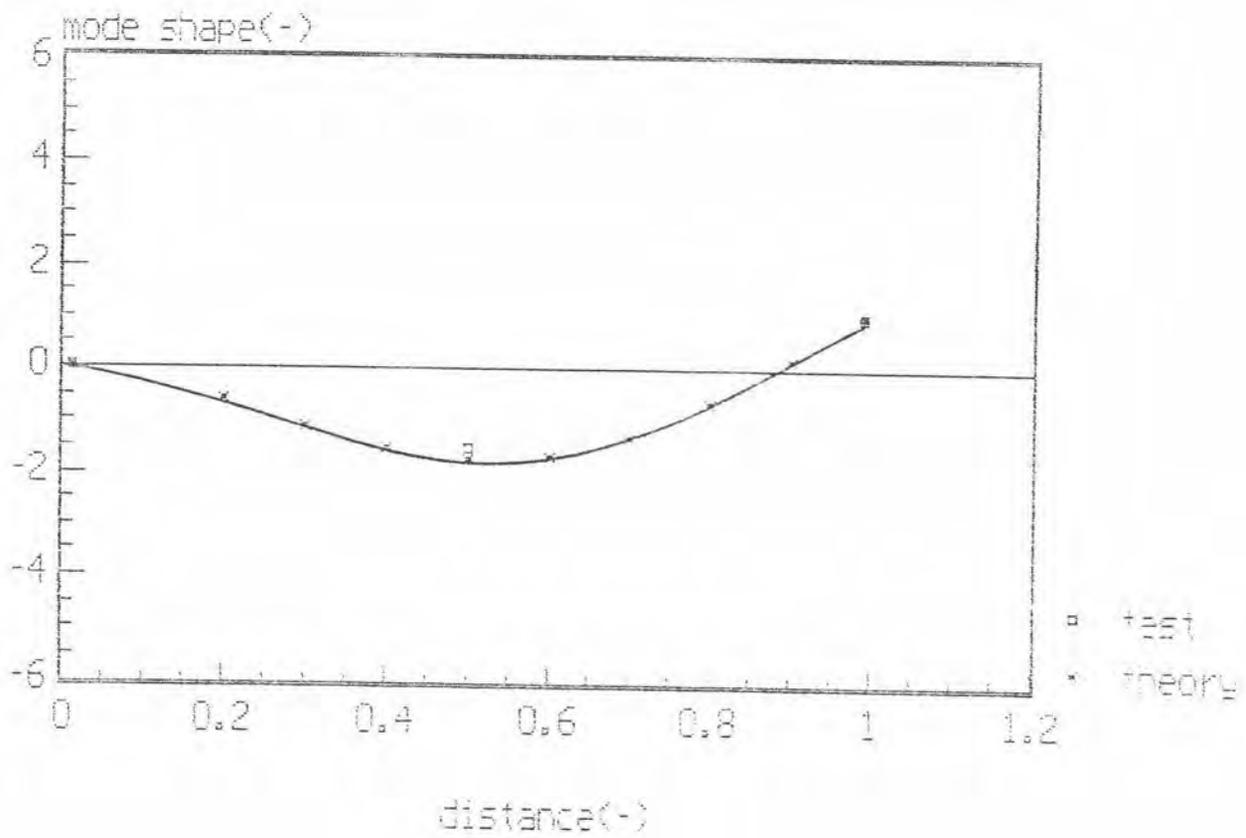
รูปที่ 4.12 โหมดเชฟที่ 2 สำหรับแกนกลแผ่นหนา ใส่น้ำหนักที่ปลายแกน



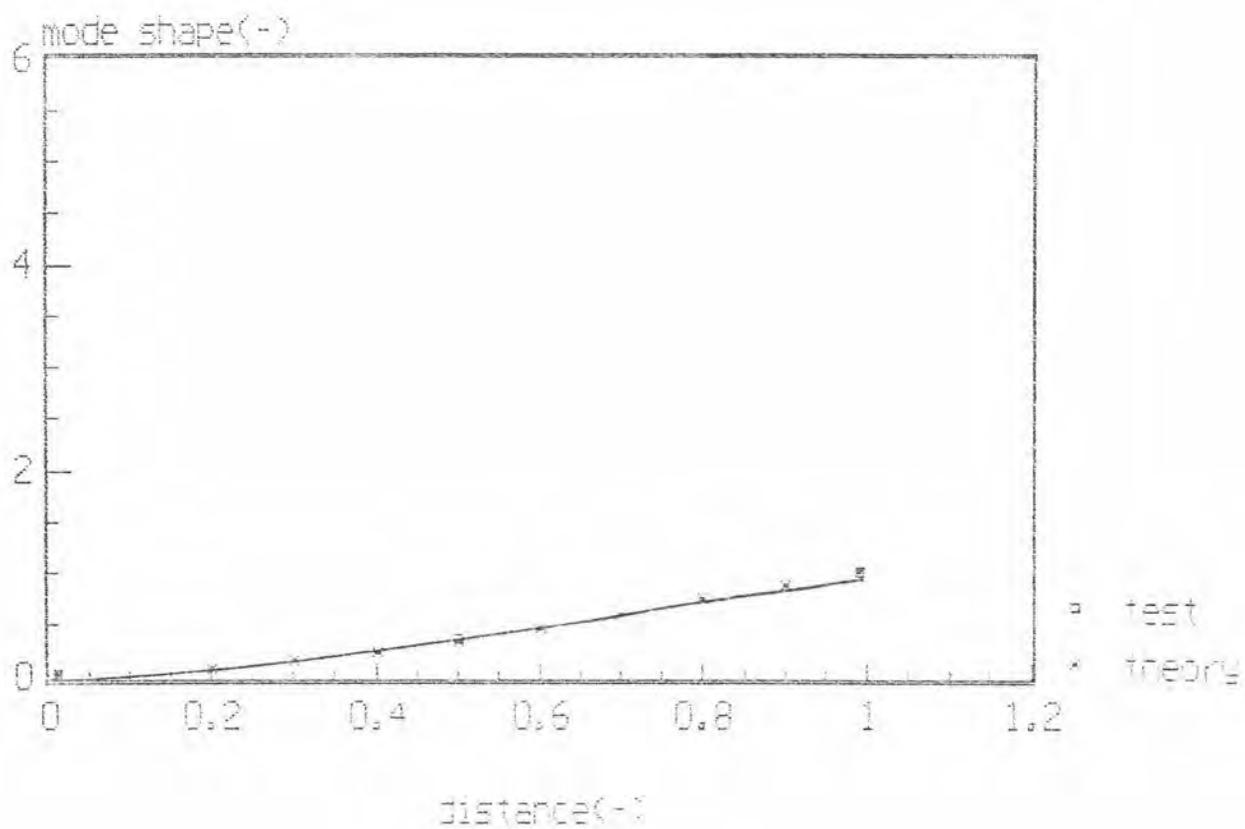
รูปที่ 4.13 โหมดเซฟที่ 3 สำหรับแกนกลมแผ่นหนา ใส่น้ำหนักที่ปลายแกน



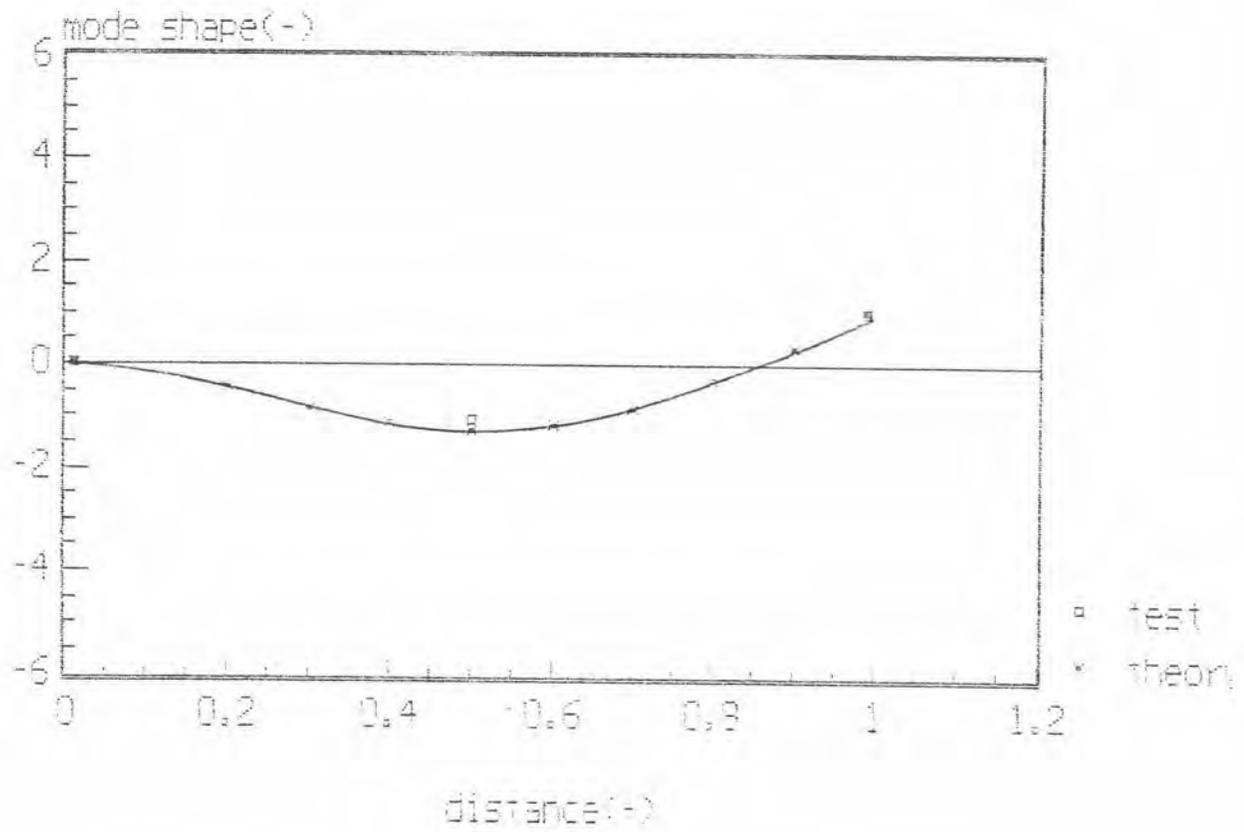
รูปที่ 4.14 โหมดเชฟที่ 1 สำหรับแขนกลแผ่นบาง ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



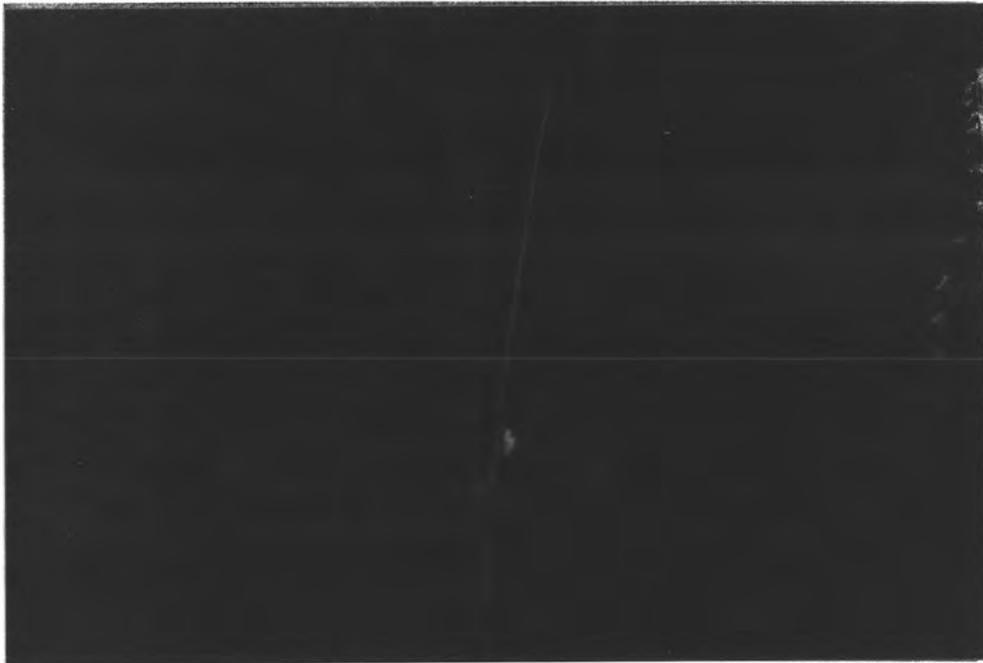
รูปที่ 4.15 โหมดเซฟที่ 2 สำหรับแกนกลผ่านขวาง ใสน้ำหนักที่ปลายแขน



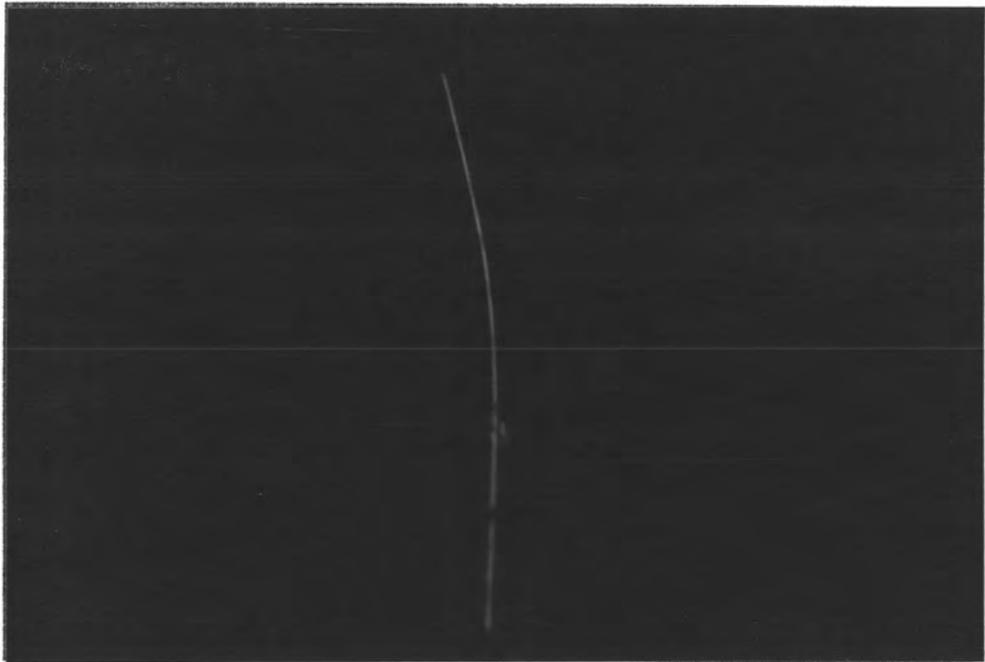
รูปที่ 4.16 โหมดเชฟที่ 1 สำหรับแกนกลผ่านบางคู่ ใส่น้ำหนักที่ปลายแกน



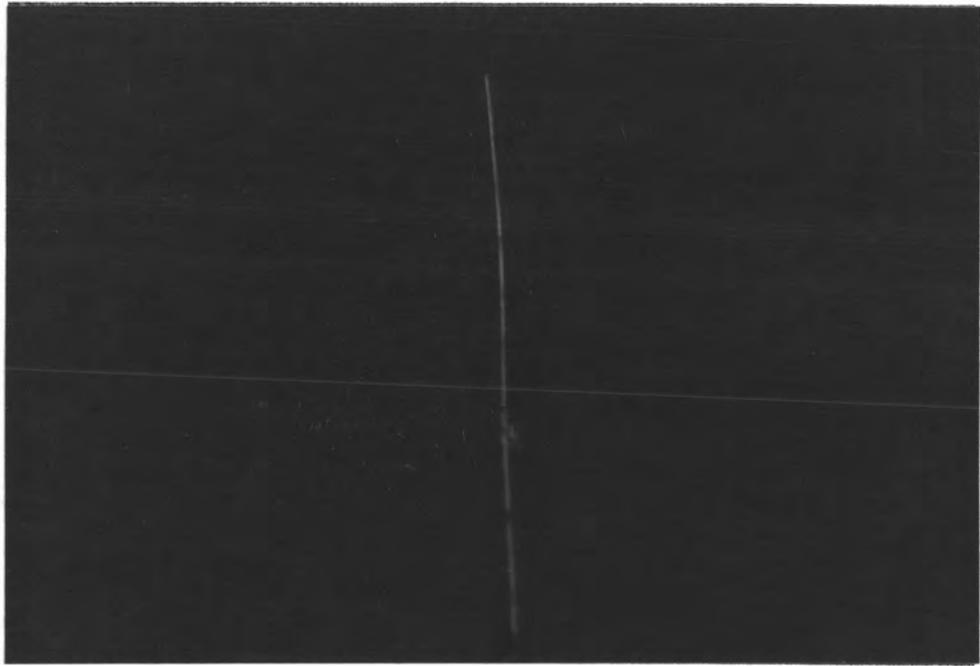
รูปที่ 4.17 โหมดเชฟที่ 2 สำหรับแขนกลแผ่นบางคู่ ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



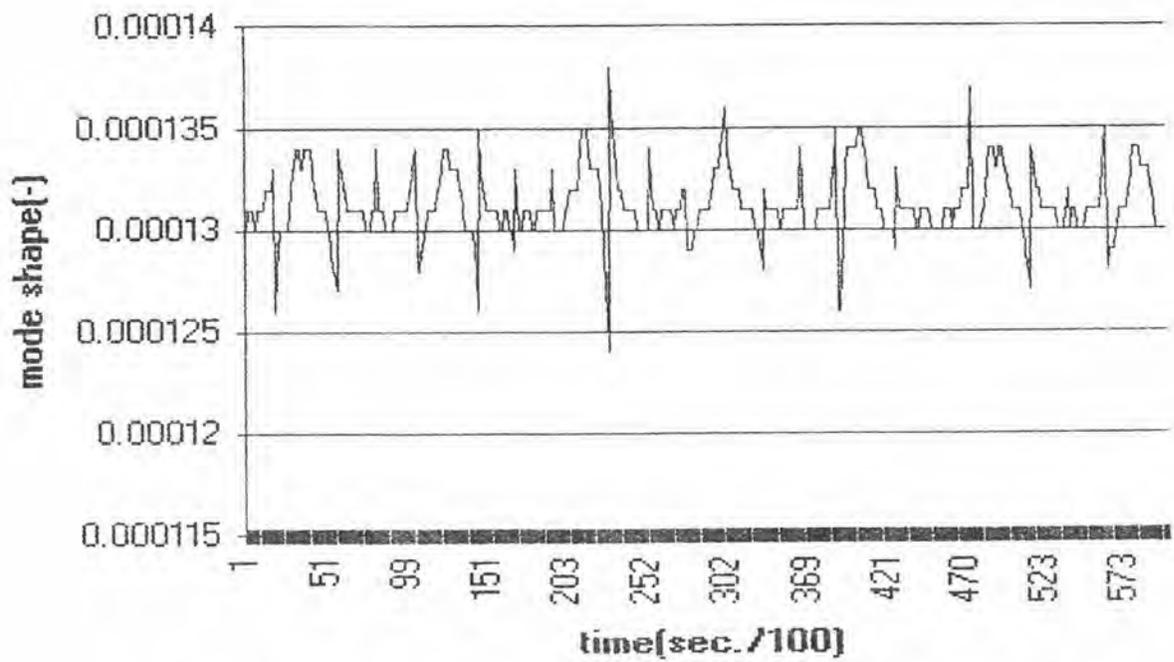
รูปที่ 4.18 แสดงรูปร่างของโหนดเชิงที่ 1 สำหรับแขนกลที่ทำจากวัสดุแผ่นหนา



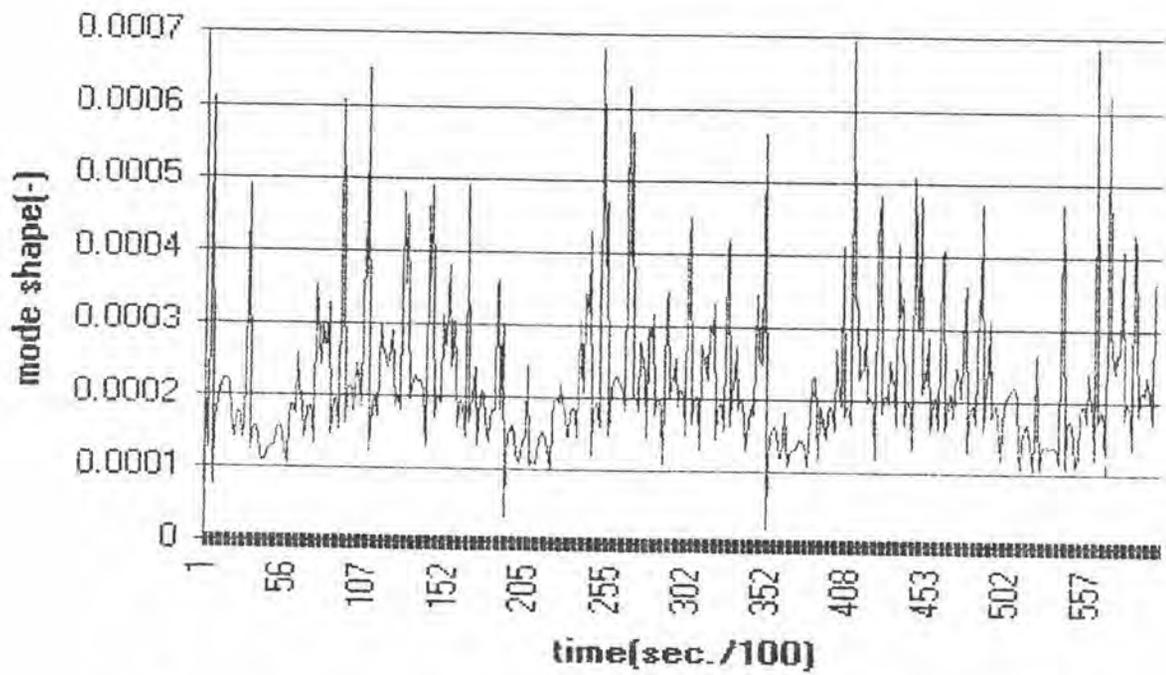
รูปที่ 4.19 แสดงรูปร่างของโหนดเซฟที่ 2 สำหรับแขนกลที่ทำจากวัสดุแผ่นหนา



รูปที่ 4.20 แสดงรูปร่างของโหนดเชฟที่ 3 สำหรับแขนกลที่ทำจากวัสดุแผ่นหนา



รูปที่ 4.21 โหมดเซฟที่ 1 สำหรับแกนกลผ่านหนา ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน ที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์โดยใช้ตำแหน่ง strain gauge ตัวที่ 1 และตัวที่ 2



รูปที่ 4.22 โหมดเชฟที่ 2 สำหรับแขนกลแผ่นหนา ไม่น้ำหนักที่ปลายแขน ที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์โดยใช้ตำแหน่ง strain gauge ตัวที่ 1 และตัวที่ 2

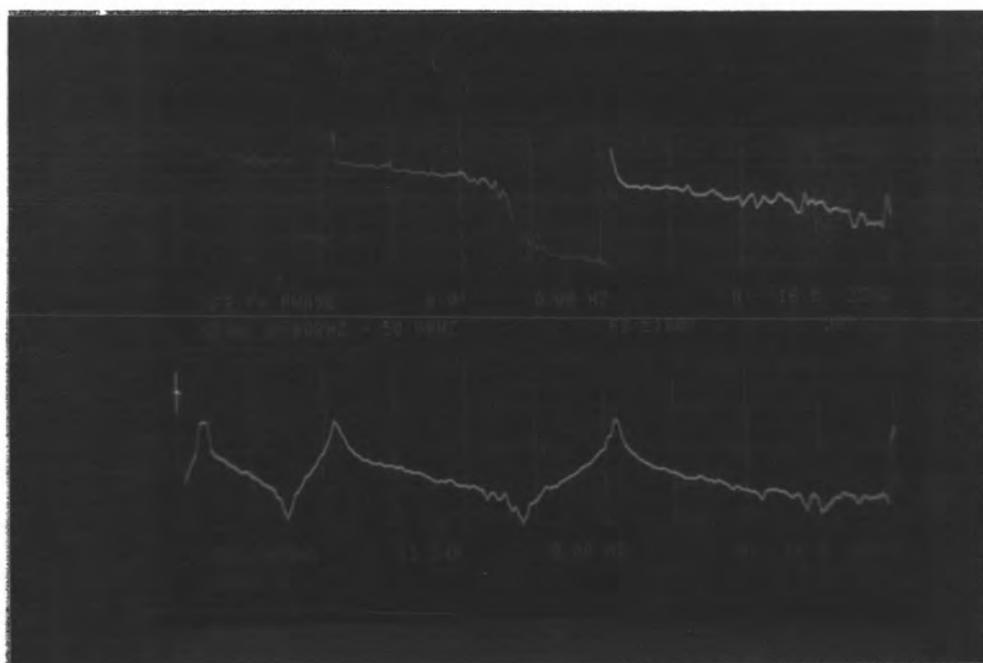
def.(mm)	section	cal.	exp(av.)	err.	%err
10.0000	a	0.0002	0.0002	0.0000	0.5643
	b	1.4106	1.3900	0.0206	1.4635
	c	4.9576	4.8941	0.0635	1.2806
-10.0000	a	-0.0002	-0.0002	-0.0000	0.4389
	b	-1.4106	-1.4047	-0.0060	0.4232
	c	-4.9576	-4.9850	0.0274	-0.5531
20.0000	a	0.0004	0.0003	0.0000	1.1381
	b	2.8213	2.7659	0.0553	1.9610
	c	9.9152	9.7666	0.1486	1.4987
-20.0000	a	-0.0004	-0.0003	-0.0000	1.4144
	b	-2.8213	-2.7733	-0.0480	1.7008
	c	-9.9152	-9.8334	-0.0818	0.8248
30.0000	a	0.0005	0.0005	0.0000	1.1286
	b	4.2319	4.1436	0.0883	2.0861
	c	14.8728	14.6146	0.2582	1.7364
-30.0000	a	-0.0005	-0.0005	-0.0000	0.6837
	b	-4.2319	-4.1868	-0.0451	1.0657
	c	-14.8728	-14.8338	-0.0390	0.2626
40.0000	a	0.0007	0.0007	0.0000	0.4274
	b	5.6425	5.5627	0.0798	1.4145
	c	19.8304	19.6110	0.2194	1.1064
-40.0000	a	-0.0007	-0.0007	-0.0000	0.1802
	b	-5.6425	-5.6017	-0.0408	0.7237
	c	-19.8304	-19.8186	-0.0119	0.0598
50.0000	a	0.0009	0.0009	-0.0000	-0.4986
	b	7.0532	7.0080	0.0452	0.6404
	c	24.7880	24.6600	0.1280	0.5164
-50.0000	a	-0.0009	-0.0009	-0.0000	0.2758
	b	-7.0532	-6.9862	-0.0669	0.9489
	c	-24.7880	-24.6862	-0.1018	0.4107
60.0000	a	0.0011	0.0011	-0.0000	-0.1234
	b	8.4638	8.3774	0.0864	1.0211
	c	29.7456	29.4757	0.2699	0.9074
-60.0000	a	-0.0011	-0.0011	-0.0000	0.2407
	b	-8.4638	-8.3725	-0.0913	1.0786
	c	-29.7456	-29.5501	-0.1955	0.6572

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองแบบสถิต สำหรับแบนกลแผ่นหนา
 (a = ที่ระยะ 0.4 cm. b = ที่ระยะ 37.80 cm. c = ที่ระยะ 75.809 cm.)

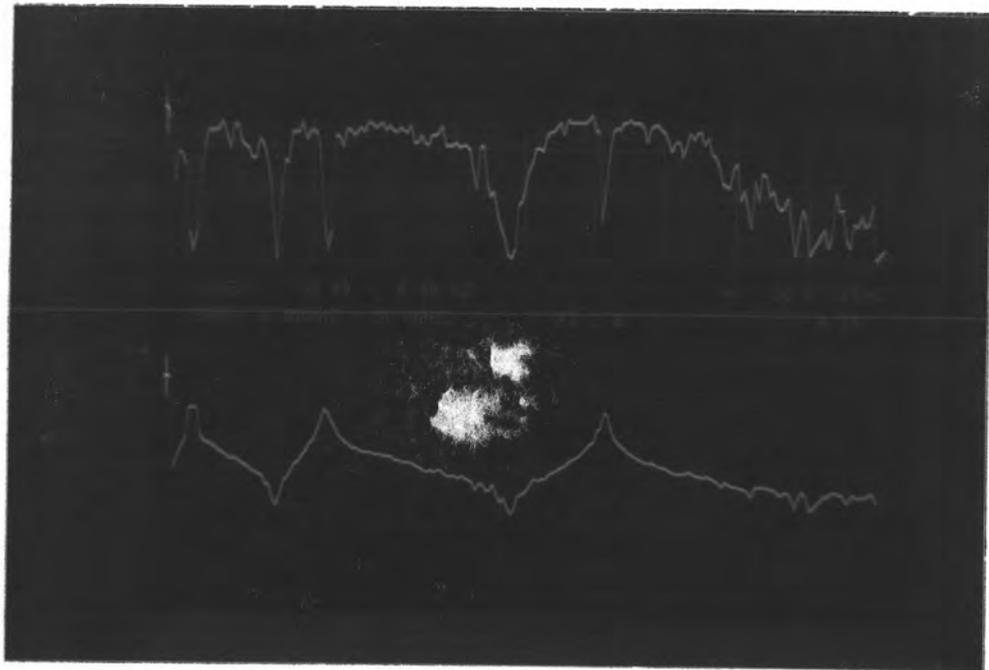
def.(mm.)	section	cal.	exp(av.)	err.	%err.
10.0000	a	0.0016	0.0015	0.0000	0.8355
	b	3.1250	3.1438	-0.0188	-0.6002
	c	9.8473	9.7282	0.1190	1.2090
-10.0000	a	-0.0016	-0.0016	0.0000	-1.7517
	b	-3.1250	-3.1972	0.0722	-2.3107
	c	-9.8473	-9.8492	0.0019	-0.0198
20.0000	a	0.0031	0.0031	0.0000	1.1395
	b	6.2500	6.2216	0.0284	0.4541
	c	19.9450	19.5308	0.4142	2.0767
-20.0000	a	-0.0031	-0.0031	0.0000	-0.7726
	b	-6.2500	-6.2748	0.0248	-0.3963
	c	-19.9450	-19.6415	-0.3035	1.5217
30.0000	a	0.0047	0.0047	-0.0000	-0.4732
	b	9.3750	9.3233	0.0517	0.5514
	c	29.5418	29.5250	0.0168	0.0569
-30.0000	a	-0.0047	-0.0047	0.0001	-1.3964
	b	-9.3750	-9.5025	0.1275	-1.3605
	c	-29.4180	-29.6519	0.2339	-0.7949
40.0000	a	0.0062	0.0063	-0.0001	-0.8622
	b	12.5000	12.4254	0.0746	0.5968
	c	39.3890	38.9320	0.4571	1.1603
-40.0000	a	-0.0062	-0.0062	0.0000	-0.0666
	b	-12.5000	-12.4278	-0.0723	0.5780
	c	-39.3890	-38.9488	-0.4402	1.1177
50.0000	a	0.0078	0.0077	0.0000	0.3976
	b	15.6250	15.4269	0.1981	1.2678
	c	49.2363	48.7026	0.5337	1.0840
-50.0000	a	-0.0078	-0.0077	-0.0000	0.4688
	b	-15.6250	-15.4124	-0.2127	1.3610
	c	-49.2360	-48.4882	-0.7478	1.5188
60.0000	a	0.0093	0.0093	0.0000	0.1662
	b	18.7500	18.6762	0.0739	0.3939
	c	59.0830	58.9102	0.1728	0.2925
-60.0000	a	-0.0093	-0.0093	-0.0000	0.2916
	b	-18.7500	-18.6119	-0.1381	0.7365
	c	-59.0835	-58.6366	-0.4470	0.7565

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองแบบสถิต สำหรับแขนกลแผ่นบาง

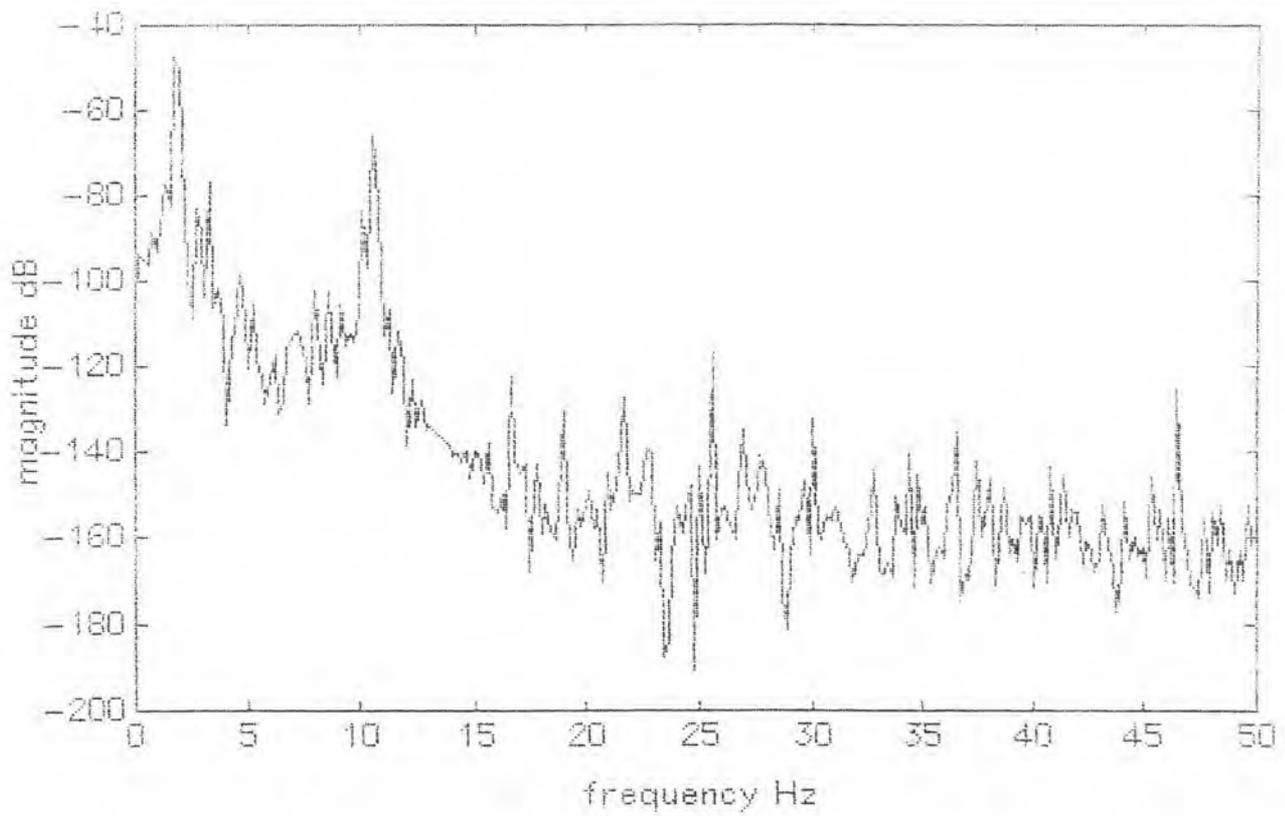
(a = ที่ระยะ 1 cm. b = ที่ระยะ 49.1 cm. c = ที่ระยะ 97.2 cm.)



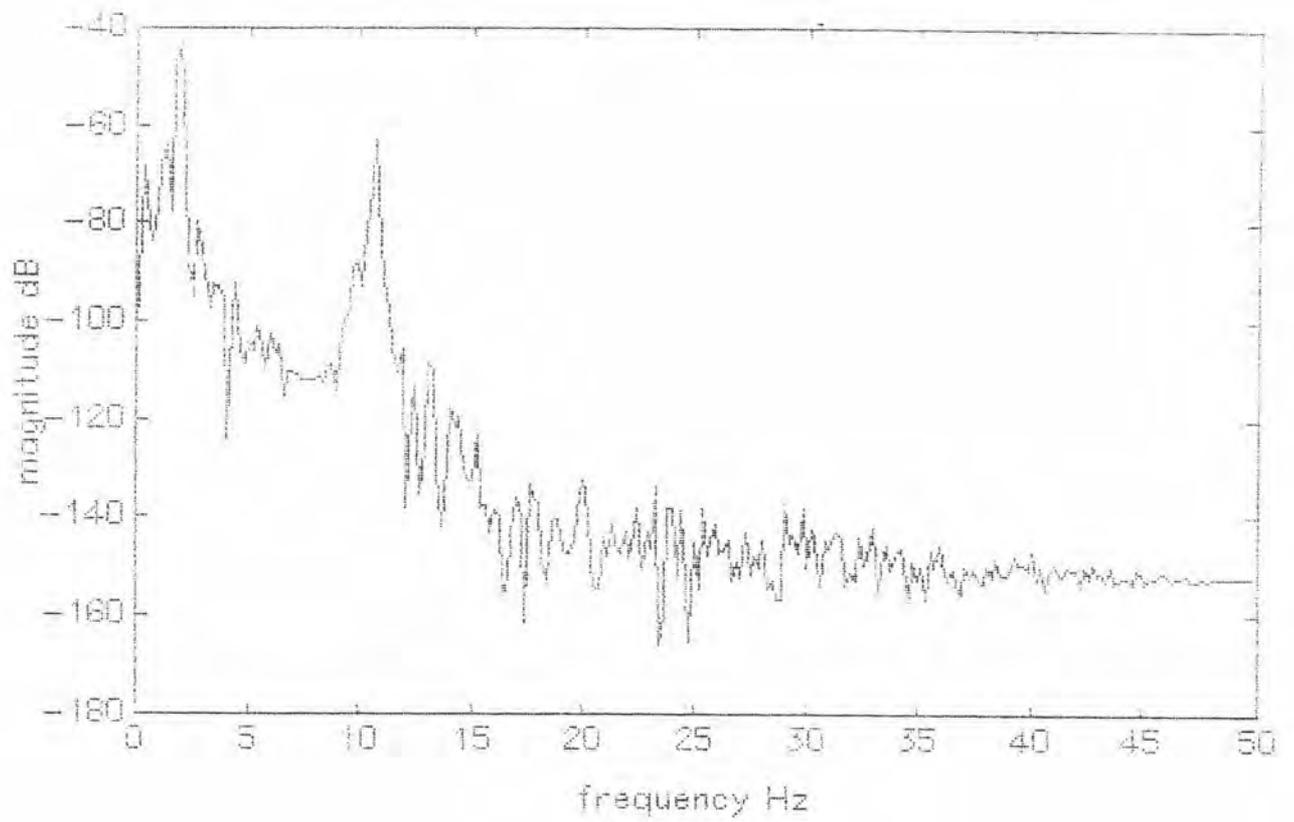
รูปที่ 4.23 แสดงขนาด และ เฟส ของทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน
สำหรับแบบจำลองแขนกลแผ่นหนา



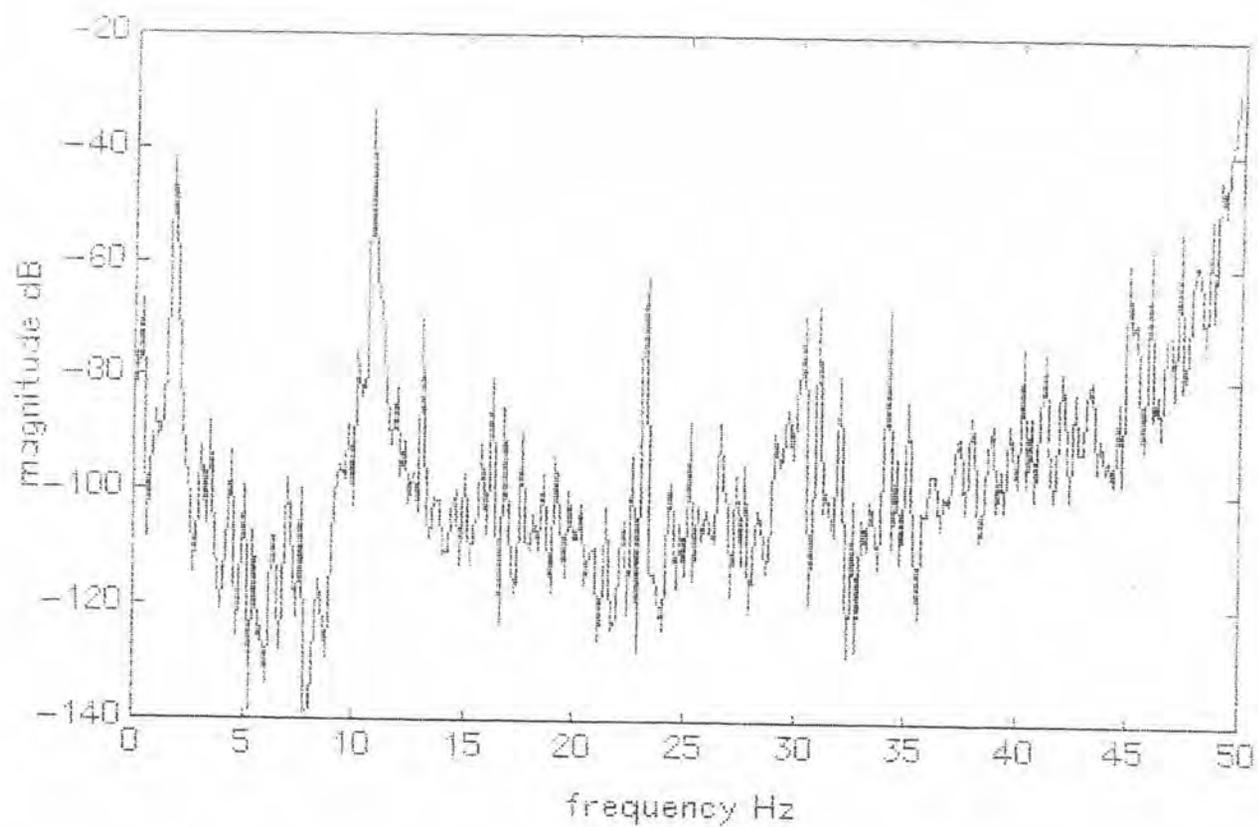
รูปที่ 4.24 แสดงขนาด และ โคฮีเรนซ์ ของทรานสเฟอร์ ฟังก์ชัน
สำหรับแบบจำลองแกนกลแผ่นหนา



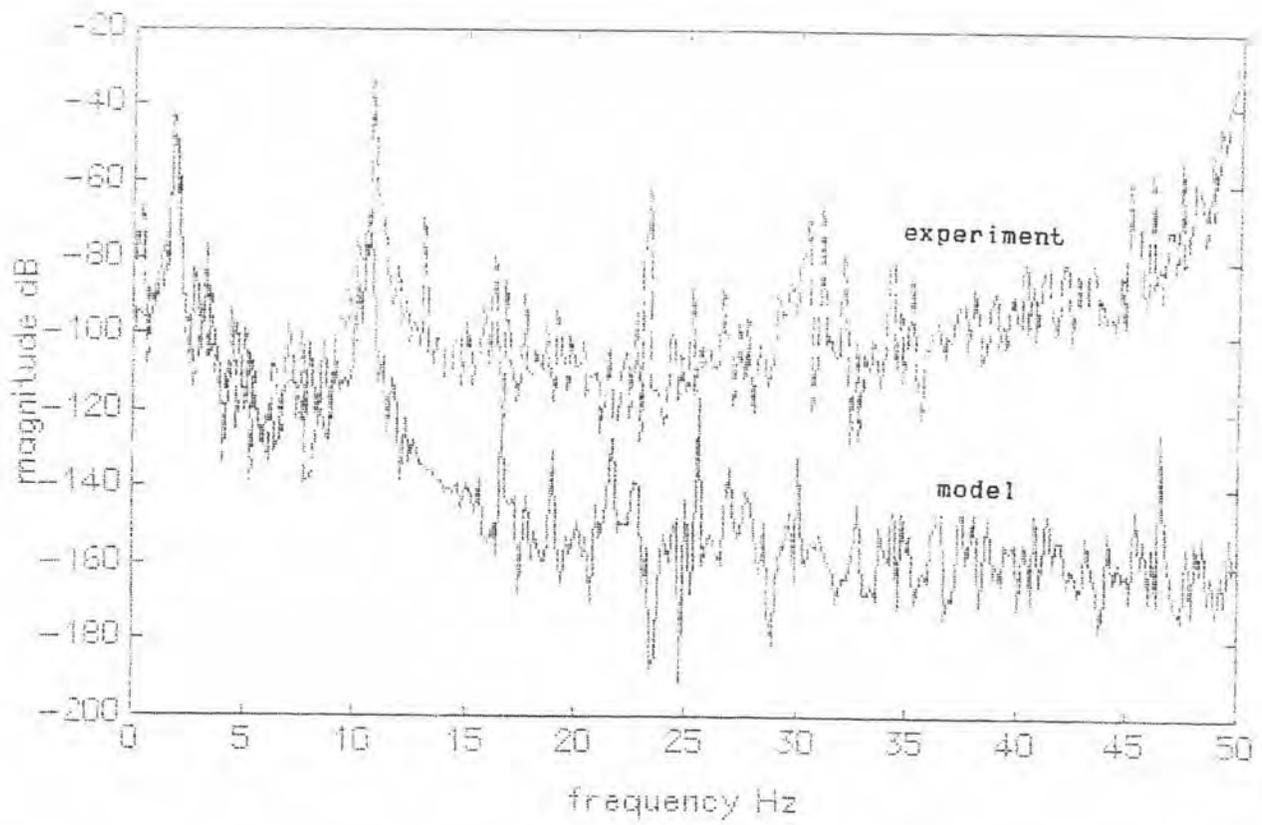
รูปที่ 4.25 แสดง ขนาดของทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์
ของแขนกลแผ่นหนา



รูปที่ 4.26 แสดง เพาเวอร์ สเปคตรัม สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแขนกลแผ่นหนา



รูปที่ 4.27 แสดงขนาดของ ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน สำหรับแขนกลแบบหุ่นตัวของแขนกลแผ่นหนา



รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบ ทรานสเฟอ์ ฝั่งกั้น ระหว่างผลจาก
การวัดและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแผ่นหนา

ผลการทดลองหาค่าโมดเชฟของแขนกล

กรณีที่ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm.

โหมดเชฟที่	ตำแหน่งที่	ค่าจากสมการ*	ค่าจากการทดสอบ	ค่าความผิดพลาด(%)
1	1	0.00018	0.00018	0
	2	0.34631	0.34522	0.328
	3	1	1	0
2	1	-0.00119	-0.00123	-2.710
	2	-0.76540	-0.71948	5.999
	3	1	1	0
3	1	0.00343	-	-
	2	0.02677	-	-
	3	1	-	-

สำหรับแขนกลขนาด 5 x 0.35 x 116.4 cm.

โหมดเชฟที่	ตำแหน่งที่	ค่าจากสมการ*	ค่าจากการทดสอบ	ค่าความผิดพลาด(%)
1	1	0.00004	0.00004	0
	2	0.29906	0.30002	-0.321
	3	1	1	0
2	1	0.00027	0.00027	0
	2	1.19607	1.22833	-3.145
	3	1	1	0
3	1	-0.00058	-0.00058	0
	2	-1.18940	-1.11134	6.207
	3	1	1	0



สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm. (2 แผ่น)

โหมค เซฟท์	ตำแหน่งที่	ค่าจากสมการ*	ค่าจากการทดสอบ	ค่าความผิดพลาด(%)
1	1	0.00018	0.00018	0
	2	0.34397	0.34399	0.078
	3	1	1	0
2	1	-0.00122	-0.00123	-0.916
	2	-0.79442	-0.73617	7.332
	3	1	1	0
3	1	0.00338	-	-
	2	0.02141	-	-
	3	1	-	-

กรณีใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

สำหรับแขนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm.

โหมค เซฟท์	ตำแหน่งที่	ค่าจากสมการ*	ค่าจากการทดสอบ	ค่าความผิดพลาด(%)
1	1	0.00017	0.00017	0
	2	0.33639	0.33804	-0.491
	3	1	1	0
2	1	-0.00225	-0.00231	-2.530
	2	-1.78093	-1.66399	6.566
	3	1	1	0
3	1	0.01130	-	-
	2	0.91331	-	-
	3	1	-	-

สำหรับแกนกลขนาด 5 x 0.35 x 116.4 cm.

โหมตเซฟที่	ตำแหน่งที่	ค่าจากสมการ*	ค่าจากการทดสอบ	ค่าความผิดพลาด(%)
1	1	0.00004	0.00004	0
	2	0.29176	0.29864	-0.692
	3	1	1	0
2	1	0.00017	0.00016	0.870
	2	0.81122	0.83919	-3.448
	3	1	1	0
3	1	-0.00062	-0.00062	0
	2	-1.51239	-1.41268	6.593
	3	1	1	0

สำหรับแกนกลขนาด 4 x 0.15 x 98.2 cm. (2 แผ่น)

โหมตเซฟที่	ตำแหน่งที่	ค่าจากสมการ*	ค่าจากการทดสอบ	ค่าความผิดพลาด(%)
1	1	0.00018	0.00018	0
	2	0.33749	0.33878	-0.381
	3	1	1	0
2	1	-0.00173	-0.00176	-1.273
	2	-1.29939	-1.23440	5.001
	3	1	1	0
3	1	0.00537	-	-
	2	0.26476	-	-
	3	1	-	-

* ค่าของโหมตเซฟที่ได้จากสมการ โดยโหมตเซฟที่ 1 จะใช้สมการที่ (32) และ โหมตเซฟที่ 2,3 จะใช้สมการที่ (34) ส่วนเครื่องหมายที่แตกต่างกันใน โหมตเซฟที่ 2 ของแกน แผ่นบางและแกนแผ่นหนาเนื่องจากแกนทั้ง 2 แบบมีการติดตั้ง

ตำแหน่งของ strain gauge ที่แตกต่างกัน

สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ ในส่วนแรกของการทดลองจะใช้ทดลองโดยการไม่ติดน้ำหนักที่ปลายแขนกล โดยในการทดลองจะดูผลของการเปลี่ยนแปลงแบบของแขนกลแล้วจะทำให้เกิดความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกันอย่างไร และจากการทดลองจะพบว่าแขนกลที่มีความขางจะให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ต่ำกว่าแขนกลที่มีความหนามากกว่า และเมื่อนำแขนกลที่มีความขางมาประกบกันเป็น 2 แผ่นแล้วใส่แผ่นประคองกันโคลงที่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นทั้ง 2 การกระทำลักษณะนี้จะทำให้แผ่นทั้งสองเคลื่อนที่ขนานกันไป และผลจากการทำในลักษณะนี้จะทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติลดลง ส่วนที่สองเป็นการทดลองโดยการใส่น้ำหนักที่ปลายแขน เพื่อที่จะดูผลค่าความถี่ธรรมชาติที่เปลี่ยนไป และจากการทดลองจะพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลมีค่าลดลง ในทุกๆโหมดเซฟของทุกขนาดแขนกล

การทดลองในส่วนที่สองเป็นการทดลองเพื่อหาค่าของโหมดเซฟของแขนกล ในการทดลองจะแบ่งเป็นกรณีของแขนกลที่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนและกรณีที่แขนกลไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน โดยการหาค่าโหมดเซฟจะใช้แขนกลทั้ง 3 แบบมาทำการทดลองซึ่งจากการทดลองจะพบว่ากรณีที่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนนั้น แขนกลแผ่นขางจะทำการหาค่าโหมดเซฟได้เพียง 2 โหมดเซฟและในโหมดเซฟที่ 2 จะให้ค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าในโหมดเซฟที่ 2 ของแขนกลแขนกลแผ่นหนา ส่วนแขนกลแผ่นหนาจะทำการวัดค่าโหมดเซฟได้ทั้ง 3 โหมดเซฟและค่าความถี่ธรรมชาติที่อ่านได้จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแขนกลแผ่นขางจากการทดลองข้างต้นเป็นผลมาจากการติดตั้งตำแหน่งของ strain gauge ซึ่งในแขนกลแผ่นหนาค่าแห่งการติดตั้งของ strain gauge จะให้ผลการตอบสนองของค่าความถี่ต่ำกว่าการติดตั้ง strain gauge ของแผ่นขาง ส่วนผลของการทดลองของแขนกลแผ่นคู้จะให้ผลใกล้เคียงกับผลของแขนกลแผ่นขางคือในโหมดเซฟที่ 3 อ่านค่าโหมดเซฟไม่ได้ ในส่วนของการทดลองกรณีที่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน จะให้ผลการทดลองดังนี้ ถ้าพิจารณาทางด้านความถี่ธรรมชาติจะให้ผลใกล้เคียงกับกรณีที่ใส่น้ำหนัก แต่จุดที่น่าสังเกตกรณีที่ใส่น้ำหนักคือขนาดรูปร่างของโหมดเซฟของกรณีที่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนจะมีขนาดรูปร่างของโหมดเซฟที่เล็กกว่า

การทดลองแบบสถิติที่แสดงดังตารางที่ 4.1 สำหรับแขนกลแผ่นหนาและตารางที่ 4.2 สำหรับแขนกลแผ่นขาง การทดลองแบบสถิติเป็นการทดลองเพื่อการทดสอบการใช้ค่าเมทริกซ์ของสมการที่ (38) โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกกจาก strain amplifier จะถูกอ่านโดยใช้คอมพิวเตอร์และคำนวณหาขนาดการโก่งตัวของแขนในขณะนั้น ค่าความถี่ธรรมชาติที่แสดงทางขวา

สลดของตารางจะมีผลโดยตรงกับการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านจาก strain amplifier สมการที่ (35) ในการทดลองจะหาสมการที่ (35) ก่อนและเมื่อได้เมทริกซ์ในสมการข้างต้นจะมาทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยการใส่สมการที่ (38) โดยการทดลองแบบลิตินี้ ดังนั้นการทดลองแบบลิตินี้จึงเป็นการทดลองความถูกต้องของเมทริกซ์ที่แปลงค่าจากความต่างศักย์ไฟฟ้าไปเป็นค่าการโก่งตัวซึ่งนับว่ามีความสำคัญมากก่อนการทดลองหาค่าโหมดเซฟต่อไป และจากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 จะพบว่าค่าความผิดพลาดทางช่องทางซ้ายมือมีค่ามากที่สุดประมาณ 2 % และน้อยสุดประมาณ 0.2 % ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำพอที่จะใช้ในการทดลองหาค่าโหมดเซฟได้

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์เพื่อที่จะเปรียบเทียบความเหมือนกันของแบบจำลองแขนกล กับแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบผลของค่าความถี่ธรรมชาติ และ ผลของค่า ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชัน โดยจากการกระทำหาค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว พบว่าให้ค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีของค่าทรานสเฟอร์ ฟังก์ชัน ที่ได้ดังกราฟที่ 4.28 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการทดลองที่อ่านค่าจากข้อมูลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านจาก strain amplifier กับค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะพบว่ารูปร่างของกราฟมีความใกล้เคียงกันมากในช่วงความถี่ต่ำๆ ส่วนที่ความถี่สูงๆ เส้นกราฟจะห่างกันออกมาโดยเป็นผลมาจากการจำกัดจำนวนของโหมดเซฟของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 2 โหมดเซฟ ดังนั้นจากข้อจำกัดนี้จึงทำให้กราฟมีความใกล้เคียงกัน 2 โหมดเซฟ จากรูปร่างของกราฟในช่วงที่พิจารณาสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมือนกับแบบจำลองแขนกลจริง ซึ่งสามารถนำไปใช้จำลองการทำงานเพื่อที่จะใช้งานรวมกับการจำลองการควบคุมแบบต่างๆ เพื่อคุมผลของการควบคุมที่มีผลต่อระบบแบบจำลองแขนกลแบบหุ่นตัว สำหรับส่วนของการใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำการวิเคราะห์หาค่าโหมดเซฟนั้น สามารถที่จะกระทำได้แต่ไม่ค่อยจะให้รายละเอียดมากนักทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนโหมดเซฟที่ใช้พิจารณาเพียง 2 โหมดเซฟ ดังนั้นจากเงื่อนไขนี้สมการจะให้ค่าการโก่งตัว 2 จุด สำหรับวิธีการหาโหมดเซฟโดยการใส่สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้สมการที่ (44) โดย u_x มีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ sine wave ที่ค่าความถี่ธรรมชาติโดยรูปที่ 4.21 จะใช้ความถี่ธรรมชาติโหมดแรก สังเกตค่าเฉลี่ยที่ได้จากรูป 0.000131 ส่วนค่าที่ได้จากสมการที่ (32) เท่ากับ 0.0001304 ส่วนรูปที่ 4.22 จะใช้ค่าความถี่เท่ากับโหมดที่สอง จากรูปจะให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0002 ส่วนค่าที่ได้จากสมการที่ (34) จะเท่ากับ 0.000225

ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และได้ทำการทดลองวัดค่าตัวแปรสเททที่ใช้ในการควบคุมเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าตัวแปรสเทท $q_1(t), q_2(t)$ สามารถที่จะทำการหาค่าได้และส่วนของการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ได้ทำการทดลองโดยการสร้างโปรแกรมการทำงานของระบบโดยการใส่เทอร์คที่ความถี่ธรรมชาติของระบบ เช่นเดียวกับที่ทดสอบในงานจริง และได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาหาค่าโมดเชฟของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้มั่นใจว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถแทนระบบแบบจำลองแขนกลแบบหุ่นยนต์ได้ และในส่วนสุดท้ายได้ทำการควบคุมระบบแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยการใช้ตัวควบคุมแบบ optimal control แบบ regulator และใช้ observer 2 แบบด้วยกันคือ แบบ full state observer และแบบ Kalman filter เพื่อต้องการจะทำการควบคุมระบบทางคณิตศาสตร์ว่าจะสามารถจะทำการควบคุมได้ ดังนั้นในส่วนของการวิจัยขั้นต่อไปที่ควรจะทำการศึกษาต่อไปก็ควรจะทำการศึกษาควบคุมระบบแบบจำลองของแขนกลจริงซึ่งตัวควบคุมที่ใช้ อาจจะเป็นแบบต่างๆเพื่อทำการวิจัยถึงผลการใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆว่าจะมีผลต่อระบบการควบคุมแขนกลแบบหุ่นยนต์ที่ศึกษากันอย่างไร และขั้นต่อไปควรจะทำการศึกษาโดยการเพิ่มจำนวนของแขนกลให้มีจำนวนมากขึ้นเป็น 2 แขนต่อกัน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใกล้เคียงกับการใช้งานมากขึ้น

วิจารณ์ผลการทดลอง

สำหรับการทดลองในส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ถึงค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลโดยการทดลองจะได้ตั้งเงื่อนไขไว้โดยให้ลักษณะการยึดแขนกลจะยึดแบบปลายด้านหนึ่งยึดติดแน่นส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเคลื่อนที่อิสระ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับคานในระบบต่อเนื่อง และได้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนในรูปของโหมดเชฟจะเป็นลักษณะแบบ cantilever และเงื่อนไขการทดลองอีกอย่างหนึ่งคือ โดยการใส่น้ำหนักที่ปลายแขนเพื่อที่จะดูผลกระทบต่อค่าของความถี่ธรรมชาติ

ในการทดลองในช่วงแรกจะไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกลเพื่อที่สังเกตความถี่ธรรมชาติของแขนกล โดยที่ขนาดและรูปร่างของแขนกลแบบต่างๆ ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่าขนาดของแขนกลที่มีขนาดบางจะให้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ต่ำกว่าขนาดของแขนกลที่มีความหนามากกว่า และถ้ารูปร่างของแขนกลเปลี่ยนแปลงไปโดยการใส่แผ่นประกบกันการบิดตัวของแขนขณะเคลื่อนที่ จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลลดลงได้เช่นกัน ในการทดลองในช่วงที่สองเป็นการทดลองโดยการใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกล สำหรับแขนกลแผ่นหนาน้ำหนักที่ใส่คิดเป็น 17.21 % ของน้ำหนักแขนทดสอบ ส่วนแขนกลแผ่นบางน้ำหนักที่ใส่คิดเป็น 14.90 % ของน้ำหนักแขนทดสอบ และ

ล่วนแขนกลผ่านบางคู้้น้ำหนักที่ใส่คิดเป็น 31.31 % ของน้ำหนักแขนทดสอบ จากการทดสอบจะพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของกลจะมีค่าลดต่ำลงในทุกโหมดเซฟ และทุกแบบของแขนกล

การทดลองค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลได้พบว่าถ้าแขนกลมีความบาง จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลลดลงซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานเกี่ยวกับการลดขนาดของแขนกลเพราะแขนกลที่บางจะทำให้น้ำหนักของแขนกลมีน้ำหนักน้อยจะทำให้พลังงานการขับและขนาดอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็นระบบของแขนกลก็นำไปใช้งานมีขนาดเล็กลง และ อีกอย่างที่พบในการทดลองก็คือค่าความถี่ธรรมชาติที่มีค่าต่ำซึ่งจะทำให้การควบคุมแขนกลมีความง่ายและควบคุมได้ดีกว่าแขนกลที่มีค่าความถี่ธรรมชาติที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาติที่ต่ำกว่าจะทำให้แขนกลเกิดการแกว่งแล้วแขนกลกลับสู่สภาวะนิ่งได้เร็วกว่า ทำให้การควบคุมจะควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการแล้วสู่สภาวะหยุดนิ่งได้เร็วกว่าในการทดลองสำหรับกรณีที่แขนกลมีการใส่น้ำหนักที่ปลายแขนซึ่งทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลลดลงนั้น แม้ว่าจะทำให้การควบคุมง่ายก็ตาม แต่จุดที่หน้าสังเกตจุดหนึ่งคือว่า เมื่อใส่น้ำหนักที่ปลายแขนจะทำให้การเคลื่อนที่ของแขนที่ปลายแขนมีค่ามากจะทำให้ที่ตำแหน่งต้นแขนเกิดการยึดตัวมากซึ่งก็จะทำให้เกิดความเครียดสูงจะทำให้ตัว strain gauge เสียหายได้โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ในโหมดที่ 1 ซึ่งเป็นโหมดที่ทำให้เกิดค่าความเครียดสูงสุดที่ตำแหน่งจุดต้นของแขนกล

รูปร่างของโหมดเซฟที่แต่ละความถี่ธรรมชาติของระบบจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป แต่ถ้านิยามารูปร่างที่แต่ละโหมดเซฟของแขนกลมาเปรียบเทียบกันจะมีรูปร่างที่เหมือนกันแต่ขนาดไม่เท่ากันซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น รูปร่างของแขนกล ขนาดของแขนกล ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้จะมีผลต่อขนาดของโหมดเซฟ จากการทดสอบจะพบว่า กรณีที่ใช้แขนกลที่มีความบางจะมีความอ่อนตัวมากกว่าจึงทำให้เกิดการโก่งตัวที่มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของรูปร่างของโหมดเซฟระหว่างแขนกลที่ทำจากวัสดุแผ่นบาง กับ แขนกลที่ทำจากแผ่นบางสองแผ่นประกบกันแล้วจะพบว่าขนาดรูปร่างของโหมดเซฟของแขนที่ทำจากแผ่นบางแผ่นเดียว จะให้ค่าขนาดรูปร่างที่มากกว่าทั้งนี้เนื่องจากแขนที่ทำจากแผ่นเดียวจะมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าน้อยกว่าแขนที่ทำจากแผ่นบางสองแผ่นประกบกัน ส่วนกรณีที่ได้เพิ่มน้ำหนักติดที่ปลายแขนกล จะมีผลต่อขนาดรูปร่างโหมดเซฟโดยจะทำให้ขนาดรูปร่างของโหมดเซฟลดลง ซึ่งถ้ามองในแง่ของการโก่งตัวของแขนจะพบว่า การใส่น้ำหนักที่ปลายแขนจะทำให้แขนมีการโก่งตัวมากขึ้นในขณะที่แขนถูกขับโดยแรงบิดจากมอเตอร์ แต่ถ้ามองในแง่ของโหมดเซฟซึ่งเป็นอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ตามระยะทางของแขนต่อการเคลื่อนที่ที่จุดอ้างอิงจุดหนึ่งบนแขนกลซึ่งก็คือจุดที่มี strain gauge ติดตั้งในตำแหน่งที่ 3 ดังนั้นจากที่น้ำหนักมาติดที่ปลายแขนกล จะทำให้เกิดความเฉื่อยที่ปลายแขนกลจะทำให้ที่ตำแหน่งต้นของแขนกลเกิดการโก่งตัวไปก่อนเมื่อเทียบกับระยะที่ห่างออกมา ดังนั้น ขนาดรูปร่างของโหมดเซฟที่ใส่น้ำหนักจึงมีขนาดที่น้อยกว่า ขนาดรูปร่างของโหมดเซฟที่ไม่ได้ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

จากข้อมูลที่ปรากฏในตารางจะพบว่า รูปร่างขนาดของโหนดเซฟในโหนดแรกจะมีค่าความถูกต้องมากกว่าในโหนดที่สอง และโหนดที่สาม ทั้งนี้เนื่องจากว่าในการแกว่งในโหนดแรกนั้น ระยะการโก่งของแขนมีค่ามากและเป็นที่ยอมรับกันคืออยู่ว่าในการแกว่งทุกๆไป จะเป็นการแกว่งที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำที่สุดเสมอ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จึงมีความถูกต้องมากกว่าโหนดเซฟอื่นๆ ส่วนในโหนดเซฟที่สอง ค่าโหนดเซฟที่อ่านได้จะมีความผิดพลาดมากขึ้น โดยเฉพาะในจุดที่มีการติดตั้ง strain gauge ของจุดที่สอง แต่จุดที่หน้าสังเกตเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแขนกลที่ทำจากแผ่นบางแผ่นเดียวกับแขนที่ทำจากแผ่นหนาแผ่นเดียว ซึ่งมีตำแหน่งการติดตั้ง strain gauge ต่างกันจะพบว่า การติดตั้ง strain gauge ในแบบของแขนที่ทำจากแผ่นหนาแผ่นเดียวจะให้ค่าความถูกต้องมากกว่า ดังนั้นตำแหน่งการติดตั้ง strain gauge ก็มีผลต่อความถูกต้องต่อการอ่านค่าการเคลื่อนที่ของแขนกล ส่วนในโหนดที่สาม ค่าของโหนดเซฟที่อ่านได้จะพบว่าแขนกลที่ทำจากแผ่นบางแผ่นเดียว และแขนกลที่ทำจากแผ่นบางประกบคู่จะให้ค่าความผิดพลาดมาก ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งการติดตั้ง strain gauge ในตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ให้ค่าการตอบสนองน้อยเมื่อเทียบกับจุดการติดตั้งในบางตำแหน่ง ดังในการติดตั้ง strain gauge แบบที่สอง ดังนั้นการอ่านค่าการตอบสนองมีค่าน้อยจะทำให้ผลที่ได้ที่จะนำไปพิจารณาในลมการโดยในสมการได้จะต้องใช้ค่าที่อ่านได้จาก strain gauge ทั้งสามจุดเอาไปใช้งานแต่ถ้ามีผลของการตอบสนองที่ไม่ดีของ strain gauge จะทำให้ค่าความถูกต้องของการหาค่าการโก่งตัวของแขนตกอยู่กับค่าที่อ่านจาก strain gauge เพียงบางตัวที่เหลืออยู่ ดังนั้นจึงทำให้ค่าความถูกต้องของค่าที่ได้ลดลงดังที่พบจากการทดลองสำหรับค่าของโหนดเซฟที่อ่านได้ในขณะที่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกลจะพบว่า มีผลลักษณะเช่นเดียวกับกรณีแบบที่ไม่ใส่น้ำหนักดังที่ได้อธิบายข้างต้น จากข้อมูลที่ได้แสดงทำให้ออกที่จะสรุปถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลได้ดังนี้

1. ตำแหน่งการติดตั้งของ strain gauge ที่ถูกต้องจะทำให้ได้รับผลการตอบสนองของระบบที่ดี โดยในการทดลองครั้งนี้จุดประสงค์ที่วัดคือต้องการวัดหาค่าโหนดเซฟ และจะต้องทำการวัดถึงสามโหนดเซฟ ดังนั้นตำแหน่งที่ถูกต้องควรจะหาตำแหน่งของ strain gauge ที่รับผลการตอบสนองของแขนกลครบทั้งสามโหนด เช่น การติดตั้งในแบบที่สองซึ่งแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5

2. ความไวในการเก็บข้อมูล เป็นความสามารถของอุปกรณ์การรับส่งข้อมูลว่าจะใช้เวลาในการรับข้อมูลแต่ละข้อมูลห่างกันเท่าไร โดยการทดลองครั้งนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้เวลาในการอ่านให้น้อยที่สุดเท่าที่ความสามารถของอุปกรณ์รับข้อมูลจะทำได้ ซึ่งในการทดลองจะใช้ความสามารถสูงสุดของอุปกรณ์โดยจะใช้ที่ 34 ไมโครวินาที ซึ่งข้อมูลจะให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ถึงแม้ว่าค่าที่ถูกต้องแล้วควรที่จะรับเข้ามาพร้อมกันทั้งสามจุด เพื่อที่จะให้ได้รูปร่างของโหนดเซฟที่ถูกต้อง

3. สัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์การวัด ซึ่งเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์การวัด คือ strain amplifier ในการทดลองได้ทำการสร้างชุด filter เพื่อกรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออก ในการทดลองจะกรองสัญญาณความถี่สูงออก แต่สัญญาณรบกวนในช่วงการทดลองก็เป็นสิ่งที่ทำให้ข้อมูลผิดพลาดได้

4. การแกว่งของแขนกลเนื่องจาก offset ของสัญญาณที่ขั้วมอเตอร์ขณะที่ทำการทดลองโดยจะสังเกตเห็นได้จากการทดลองในโหมดสูง เช่นในโหมดที่สามคือทำการทดลองในโหมดที่สามซึ่งมีความถี่สูงแต่ถ้ามีขนาดการโก่งของแขนมีค่าน้อยขณะการทดลอง จะเห็นว่าบางขณะจะมีการขยับของแขนเนื่องจาก offset ซึ่งจะทำให้แขนแกว่ง ซึ่งขณะการทดลองจะต้องพยายามวัดขณะที่รูปการแกว่งเนื่องจาก offset ไม่เกิดขึ้นเพื่อจะได้วัดเฉพาะในโหมดที่สามเท่านั้น

การเปรียบเทียบเพื่อแทนระบบจริง ก็คือ การแทนระบบแบบจำลองของแขนกลแบบหุ่นตัวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแขนกลแบบหุ่นตัวนั้น การเปรียบเทียบระบบทั้งสองมีจุดประสงค์เพื่อ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลสามารถแทนระบบแบบจำลองแขนกลจริงได้ เพื่อจะสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับผลของการใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ เพื่อดูผลการควบคุมของระบบว่ามีความเหมาะสมกับการใช้งานอย่างไร เพราะในการควบคุมนั้นจะมีตัวควบคุมอยู่หลายแบบที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปดังนั้นการวิเคราะห์โดยการจำลองการทำงานในรูปแบบของการใช้ผลลัพธ์ทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเป็นการสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัย มากกว่าการทดลองกับแขนกลโดยตรง ในการวิเคราะห์ถึงการแทนกันของทั้งสองระบบจะใช้วิธีการวิเคราะห์จากค่า ทรานสเฟออร์ ฟังก์ชัน โดยค่านี้จะป็นอัตราส่วนของผลที่ออกจากระบบ กับสิ่งที่เข้าสู่ระบบในการสร้างค่า ทรานสเฟออร์ ฟังก์ชัน สำหรับของระบบจำลองของจริงจะใช้เครื่อง cross channel spectrum analyzer ทำการวัดสัญญาณและสร้างกราฟแสดงผลของ ทรานสเฟออร์ ฟังก์ชัน โดยสัญญาณที่ออกจากระบบแขนกลคือ ค่าความเครียดบนตำแหน่งของแขนกลที่สามารถทำการวัดค่าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยการใช้วงจรรีจิด์และใช้ strain amplifier เพื่อขยายสัญญาณแล้วจึงเข้าเครื่องวัดต่อไป ส่วนค่าที่เข้าสู่ระบบที่ใช้วิเคราะห์คือ ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณแบบ random ที่ใช้ในการขั้วมอเตอร์ให้แขนกลทำงานสำหรับการสร้างค่า ทรานสเฟออร์ ฟังก์ชันของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะกระทำโดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองการทำงาน of ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมระบบจะสร้างเป็นแบบ random เพื่อควบคุมระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลลัพธ์ที่ได้คือค่า ตัวแปรที่เวลาต่างๆและจะถูกนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความเครียดที่เวลาต่างๆจากนั้นนำค่าความเครียดมาทำการวิเคราะห์โดยการใช้ fast Fourier transform (FFT) ซึ่งใช้วิเคราะห์ค่าของ discrete Fourier transform (DFT) หลังจากทีวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ FFT แล้วจะได้กราฟ

ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการเปรียบเทียบระบบจะพิจารณา จากรูปร่างของกราฟ ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน ในลักษณะความเหมือนของรูปร่างกราฟเกี่ยวกับความชันในช่วงของความถี่ต่างๆ จากรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.27 จะให้ค่าความชันที่คล้ายกัน จุดที่น่าสนใจสำหรับการวิเคราะห์รูปกราฟของ ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน คือตำแหน่งของกราฟที่ให้ค่า amplitude ที่ความถี่ต่างๆซึ่งที่จุดนี้ถ้าเปรียบเทียบกับระบบที่ศึกษาจากวิชาการสั่นสะเทือน จะพบว่า ตำแหน่งของความถี่ที่ให้ค่า amplitude ที่จุดเหล่านี้จะให้ค่าของความถี่ธรรมชาติของระบบ ดังนั้นในลักษณะเดียวกันนี้สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟของ ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน จะทำให้ได้ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบของแขนกลแบบหุ่นตัวด้วย และจากการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการใช้สมการที่ (30), (33) ค่าที่ได้จากการวัดของเครื่อง cross channel spectrum analyzer ในโหมด เพาเวอร์ สเปคตรัม และค่าที่ได้จากการวัดและค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในโหมดของการวิเคราะห์ของ ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน มีค่าที่ใกล้เคียงกัน อีกจุดที่แตกต่างกันก็คือรูปร่างของ ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน ที่ได้จากเครื่องวัด cross channel spectrum analyzer จะให้ค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 3 แต่จากรูปของกราฟที่ได้จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่ให้ค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 3 ทั้งนี้เพราะเงื่อนไขที่ตั้งขึ้นในการสร้างสมการคณิตศาสตร์ ที่จำกัดจำนวนของโหมดเซฟที่ใช้ในการพิจารณาเท่ากับ 2 โหมด ดังสมการ

$$u(x_1, t) = \phi_1(x_1)q_1(t) + \phi_2(x_1)q_2(t)$$

จากสมการข้างต้นจะทำให้ผลลัพธ์ของตัวแปรที่เกิดจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีผลของโหมดที่ 3 ซึ่งจะทำให้กราฟของ ทรานสเฟอ์ ฟังก์ชัน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ให้ค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 3 ดังปรากฏในกราฟ ซึ่งจากข้อแตกต่างทั้งสองข้างต้นจะเป็นข้อจำกัดที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นที่จำเป็นต้องเกิดขึ้น ดังนั้นการเปรียบเทียบการแทนกันของระบบแบบจำลองของแขนกลจริง กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเปรียบเทียบเกี่ยวกับรูปร่างความชันแต่ละช่วงความถี่ และเปรียบเทียบเกี่ยวกับค่าของความถี่ธรรมชาติของระบบและผลจากการเปรียบเทียบในทั้งสองหัวข้อ จะพบว่าระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำมาแทนระบบแบบจำลองแขนกลจริงได้ เพื่อที่จะนำไปทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับผลกระทบที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆทำการสร้างระบบการทำงานของระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานกับระบบแบบจำลองจริงต่อไป