

1. はじめに

ロボットの様な機構の振動解析では、動作中の各時点で姿勢が変わるので、各姿勢毎の振動特性を高速に繰り返し求める必要がある。しかし、ロボット全体を有限要素法でモデル化し解析したのでは高速に効率よく計算できない場合がある。この様な場合、全系を比較的小さな部分構造に分割して各分系を有限要素法などでモデル化して解析した後、分系を再結合して全系の挙動を解析する方法(部分構造合成法¹⁾)がある。その中にモード合成法がある。モード合成法のなかでも、区分モード合成法は全系の自由度を縮小する点で有効な方法である。本報告では、4自由度ロボットについて区分モード合成法を多重化して用いて固有振動解析を行い、多重化した区分モード合成法の計算時間と計算精度を通常の区分モード合成法の結果と比較し、その有効性を確かめる。

2. 区分モード合成法とその多重化

モード合成法は分系の結合部以外の領域(内部領域)の変位を低次のモードを用いて近似することにより、系の自由度を縮小して解析を行うもので、系の低い振動数での動的挙動を解析するのに適した方法である。中でも区分モード合成法は結合領域の変位もモード座標によって近似するので、系の自由度を大幅に縮小することができる有力な方法である。しかし、通常の区分モード合成法では結合部領域の変位をモード座標に直すときに、結合部のみの自由度で書かれた各分系の運動方程式を一度に重ね合わせて固有値解析を行うので、分系の数が多くなると自由度が増えて計算に時間がかかる。この点を改良した方法に区分モード合成法の多重化¹⁾がある。多重化の一例として図1に示す分系の分け方がある。この方法は、系を分割する際に1次分系、2次分系というように階層的に分け、結合する際にはその逆をたどって分系を結合していく。しかし、本報告で用いる区分モード合成法の多重化は、全系を適当な大きさの分系に分け、結合部のみで表された各分系の方程式を一つずつ結合していき、その結合部を新たな内部領域として、その都度区分モード合成法を用いて自由度を縮小していく方法(本報告の中ではRCMSと呼ぶことにする)をとった。この方法による固有振動解析のフローを図2に示す。

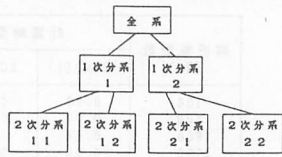


図1 区分モード合成法の多重化の一例

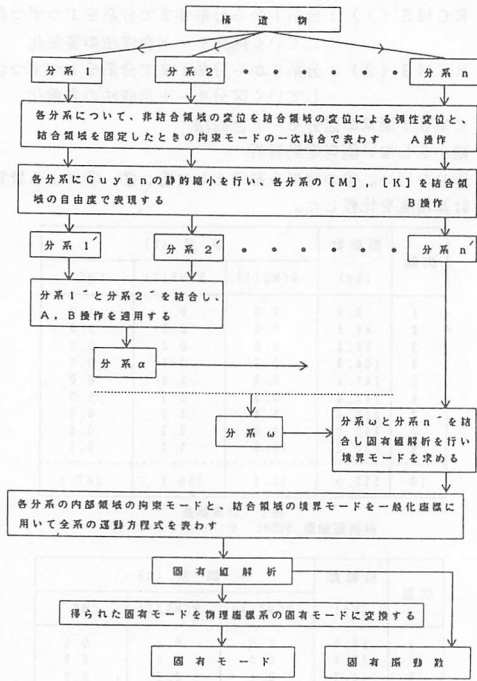


図2 RCMSの計算手順

3. 解析

3.1 解析例

解析に用いたモデルは図3に示す4つの腕要素(A1, A2, A3, A4)と4つの関節要素(J1, J2, J3, J4)を持つ4自由度ロボットである。初期状態を直立したとき($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0^\circ$)として、J1はZ軸、J2, J3, J4はX軸回りに回転するものとする。これを8個の分系(分系1: J1、分系2: A1、分系3: J2、分系4: A2、分系5: J3、分系6: A3、分系7: J4、分系8: A4)に分け、それぞれの分系について質量マトリクス、剛性マトリクスを求め運動方程式をつくる。全系の自由度は48自由度である。腕要素は円筒形とし、通常ロボットの腕要素の剛性は関節要素の剛性に比較して

大きいことを考慮して単純な3次元ラーメン構造として、剛性マトリクスを求めた。質量マトリクスはエネルギー原理に基づく整合質量マトリクスを用いた。関節要素としては、玉軸受系からなるものを考える。軸受の変形と荷重の関係はヘルツの理論により非線形であるが、最大たわみを仮定して、蓄えられる歪エネルギーが等しいという仮定のもとに、軸方向、半径方向の等

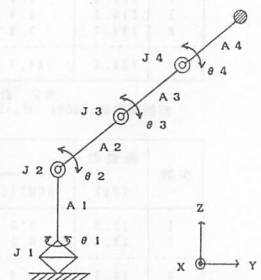


図3 4自由度ロボット

価な線形ばね定数を求めた。このばね定数を用いて、関節要素J1(回転型)とJ2, J3, J4(旋回型)について剛性マトリクスを求めた。質量マトリクスは集中質量マトリクスを用いた。腕要素の材質は鋼、形状は円筒とし諸寸法は以下の通りとした。
 A1: 外径75mm、内径69mm、長さ300mm
 A2: 外径65mm、内径61mm、長さ200mm
 A3: 外径60mm、内径56mm、長さ200mm
 A4: 外径55mm、内径53mm、長さ200mm
 関節要素に用いられる玉軸受は、材質はSUJで呼び番号とベアリング間距離は、J1: 6304、30mm、J1, J2, J3: 6900、65mmとした。また関節要素の質量は、J1: 2kg、J2, J3, J4: 1kgとした。なお、腕要素A4の先端には1kgの質量が取り付けられているものとする。

3.2 解析方法

図3に示したロボットについて、数種の姿勢において固有振動解析を行った。各段階におけるモード座標による近似については、解析振動数を設定しそれ以下の振動数のモードを採用する方法と、各段階において採用するモードの次数を一定に設定する方法、の2通りの近似法について計算を行った。計算方法は、

- ① RCMS (1) : 分系1から分系8まで分系を1つずつ合成していく区分モード合成法の多重化
- ② RCMS (2) : 分系8から分系1まで分系を1つずつ合成していく区分モード合成法の多重化
- ③ CMS : 通常の区分モード合成法
- ④ 縮小をしない固有振動解析

の4通りを行い、④の結果を基準として①、②、③による計算時間と計算精度を比較した。

次数	振動数 (Hz)	誤差 (%)		
		RCMS (1)	RCMS (2)	CMS
1	9.9	0.0	0.1	0.0
2	49.6	0.0	0.5	0.0
3	55.3	0.6	0.4	0.0
4	104.9	0.2	0.5	0.0
5	147.1	0.9	5.4	0.0
6	163.4	0.3	0.5	0.0
7	212.4	5.8	4.2	0.0
8	290.0	14.8	9.2	0.1
9	330.2	18.0	5.8	0.1
10	552.0	19.1	250.1	287.1

表1 計算誤差
解析振動数 500Hz $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0^\circ$

次数	振動数 (Hz)	誤差 (%)		
		RCMS (1)	RCMS (2)	CMS
1	10.5	0.0	0.1	0.0
2	27.4	0.0	0.1	0.0
3	44.3	0.1	0.2	0.0
4	64.4	0.0	0.5	0.0
5	68.0	0.2	0.4	0.0
6	151.1	0.2	0.5	0.0
7	275.2	1.9	5.2	0.0
8	299.7	7.9	10.3	0.0
9	724.6	184.7	64.4	0.0

表2 計算誤差
解析振動数 500Hz $\theta_1 = 0^\circ$ $\theta_2 = -90^\circ$ $\theta_3 = 0^\circ$ $\theta_4 = 0^\circ$

次数	振動数 (Hz)	誤差 (%)		
		RCMS (1)	RCMS (2)	CMS
1	10.5	0.0	0.1	0.0
2	27.4	0.0	0.1	0.0
3	44.3	154.9	0.6	890.0

表3 計算誤差
打ち切り次数 2 $\theta_1 = 0^\circ$ $\theta_2 = -90^\circ$ $\theta_3 = 0^\circ$ $\theta_4 = 0^\circ$

次数	振動数 (Hz)	誤差 (%)		
		RCMS (1)	RCMS (2)	CMS
1	10.5	0.0	0.1	0.0
2	27.4	0.0	0.0	0.0
3	44.3	0.0	0.1	0.0
4	64.4	0.0	0.4	0.0
5	68.0	121.9	0.1	544.9

表4 計算誤差
打ち切り次数 4 $\theta_1 = 0^\circ$ $\theta_2 = -90^\circ$ $\theta_3 = 0^\circ$ $\theta_4 = 0^\circ$

3.3 解析結果

3.3.1 計算精度について

表1、表2、表3、表4は各方法の計算精度を比較したものである。RCMS (1)、RCMS (2)、CMSとも採用モードの次数を一定にした場合と解析振動数を設定して採用モード数を決定した場合でも、解析振動数、打ち切り次数以下の低次の振動数の計算精度は良好であった。RCMS (1)とRCMS (2)を比較すると若干RCMS (1)の方が精度が高かった。精度の点においては多重化を行わないことによりCMSの精度は極めて良かった。

3.3.2 計算時間について

表5と表6は各方法の計算時間を比較したものである。縮小をしない固有振動解析を行ったときの計算時間を1とした。多重化を行ったRCMS (1)、RCMS (2)は解析振動数を低く設定し、採用するモードの数を少なくした場合には大幅に計算時間を短縮することができた。特にRCMS (1)は解析振動数を100Hzにすると、計算時間はCMSの1/20、縮小をしない場合の1/50程度まで短縮することができた。また、CMSは解析振動数をどんなに低く設定しても縮小をしない場合の1/2程度までしか短縮することができない。また、解析振動数を高くしていても計算時間の増加は緩やかである。これはCMSが結合領域の境界モードを求める際に、結合領域で表された各分系を一度に重ね合わせるため、解析振動数をどんなに低く設定しても結合領域の自由度数の42次の固有値計算を行わなければならないからである。

4. 結論

4自由度ロボットに対して区分モード合成法による固有振動解析を行い、多重化した区分モード合成法が、低次の振動数において有効な計算精度を確保して通常の区分モード合成法よりも計算時間を大幅に短縮することができることを確認した。

参考文献

- 1) 長松昭男: 「モード解析」 培風館 (1985) pp. 189-249
- 2) 五十嵐 他: 「モード合成法による機構の振動解析」 昭63年度精密工学会秋季大会論文集 pp. 887-888

解析振動数 (Hz)	計算時間 (比率)		
	RCMS (1)	RCMS (2)	CMS
100	0.03	0.04	0.61
500	0.07	0.09	0.63
1000	0.14	0.20	0.65
3000	0.30	0.64	0.73
5000	0.60	0.74	0.80

表5 計算時間 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0^\circ$

解析振動数 (Hz)	計算時間 (比率)		
	RCMS (1)	RCMS (2)	CMS
100	0.02	0.02	0.61
500	0.05	0.08	0.62
1000	0.07	0.12	0.63
3000	0.31	0.54	0.69
5000	0.52	0.69	0.76

表6 計算時間 $\theta_1 = 0^\circ$ $\theta_2 = -90^\circ$ $\theta_3 = 0^\circ$ $\theta_4 = 0^\circ$