



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103003680 B

(45) 授权公告日 2015. 11. 25

(21) 申请号 201180033578. 1

(22) 申请日 2011. 06. 16

(30) 优先权数据

2010-156100 2010. 07. 08 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 01. 07

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2011/064325 2011. 06. 16

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/005114 JA 2012. 01. 12

(73) 专利权人 国立大学法人东京工业大学

地址 日本东京

(72) 发明人 R·克勒珀 大熊政明

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 史雁鸣

(51) Int. Cl.

G01M 1/12(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1523334 A, 2004. 08. 25,

JP 特开平 7-209129 A, 1995. 08. 11,

JP 昭 54-157684 A, 1979. 12. 12,

杜柏松等.《剪切效应梁单元刚度和质量矩阵的推导及应用》.《重庆交通大学学报》.2008,第 27 卷(第 4 期),

田万衡.《多弹簧支承空间组合刚体自振特性计算》.《大连铁道学院学报》.1982,(第 Z1 期),

审查员 孔芳芳

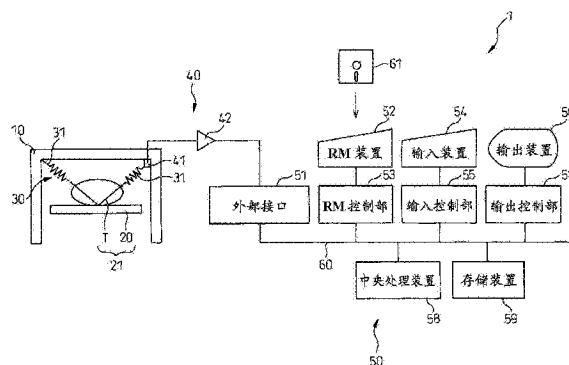
权利要求书2页 说明书18页 附图10页

(54) 发明名称

刚体特性识别装置及刚体特性识别方法

(57) 摘要

识别包含计测对象物的质量及重心位置的刚体特性识别装置包括:不能移动的静止部(10);包含计测对象物(T)的可动部(20),其能够相对于静止部移动;支承部件(30),其以使可动部能够相对于静止部自由振动的方式支承可动部;计测部件(40),其在可动部振动时计测用于算出可动部的固有频率所需的数据;解析部件(50),其被输入支承部件的支承条件及由计测部件计测出的计测数据,且基于这些支承条件和根据计测数据算出的固有频率进行演算处理。解析部件基于支承部件的支承条件和根据计测数据算出的固有频率识别上述计测对象物的刚体特性。由此,提供能减少测定点的数量,且高精度地识别刚体特性的刚体特性识别装置或刚体特性识别方法。



1. 一种刚体特性识别装置,其用于识别包含计测对象物的质量及重心位置在内的刚体特性,其中,

该刚体特性识别装置包括:不能移动的静止部;包含计测对象物的可动部,其能相对于该静止部移动;支承部件,其使可动部能以多自由度相对于上述静止部自由振动地支承可动部;计测部件,其用于在上述可动部振动时,计测用于算出该可动部的固有频率或固有角频率所需的数据;解析部件,其被输入上述支承部件的支承条件以及由上述计测部件计测出的计测数据,并且基于这些支承条件和根据计测数据算出的固有频率或固有角频率进行演算处理,

上述解析部件基于上述支承部件的支承条件和根据上述计测数据算出的固有频率或固有角频率,识别上述计测对象物的刚体特性,

上述解析部件基于在不同的多个计测条件下通过上述计测部件得到的固有频率或固有角频率的计测值 ω 和基于上述支承部件的支承条件算出的刚性矩阵 $[K]$,识别近似满足下述式 (1) 的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量,然后基于该识别的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量识别刚体特性,

$$\det([M]^{-1}[K] - \omega^2[I]) = 0 \cdots (1)。$$

2. 根据权利要求 1 所述的刚体特性识别装置,其中,

上述支承部件包括将可动部支承于静止部的多个支承构件,该多个支承构件中的至少一部分为弹性体,上述支承条件的变更,通过去除该多个支承构件中的一部分支承构件、追加其他支承构件、变更上述弹性体的支承构件的弹性系数、将上述弹性体的支承构件变更为非弹性体以及变更一部分支承构件的单侧或两侧的安装位置这些方法中的至少任一种方法来进行。

3. 根据权利要求 1 所述的刚体特性识别装置,其中,

上述可动部的结构的变更,通过变更该可动部中的计测对象物以外的部分的结构以及变更计测对象物相对于该计测对象物以外的部分的位置或姿势来进行。

4. 根据权利要求 2 所述的刚体特性识别装置,其中,

上述刚性矩阵 $[K]$ 基于上述支承构件向可动部安装的安装位置的坐标以及上述支承构件的弹性系数而算出。

5. 根据权利要求 4 所述的刚体特性识别装置,其中,

上述刚性矩阵 $[K]$ 除了上述支承构件向可动部安装的安装位置的坐标以及该支承构件的弹性系数之外,还基于上述支承构件向静止部安装的安装位置以及该支承构件的自然状态下的长度,作为上述计测对象物的质量以及重心位置的函数而算出。

6. 根据权利要求 1 ~ 5 中任一项所述的刚体特性识别装置,其中,

满足上述式 (1) 的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量的识别,通过基于通过上述计测部件获得的固有频率或固有角频率的计测值 ω 进行最优化来进行。

7. 根据权利要求 1 ~ 5 中任一项所述的刚体特性识别装置,其中,

上述可动部包括平台和载置于该平台上的计测对象物,上述支承部件支承上述平台。

8. 一种刚体特性识别方法,其使用刚体特性识别装置来识别计测对象物的刚体特性,该刚体特性识别装置包括:不能移动的静止部;包含计测对象物的可动部,其能相对于该静止部移动;支承部件,其使可动部能以多自由度相对于上述静止部自由振动地支承可动

部,其中,

该刚体特性识别方法包括:使上述可动部自由振动的步骤;在上述可动部自由振动时在不同的计测条件下计测多次可动部的振动的固有频率或固有角频率的步骤;基于上述支承部件的支承条件和固有频率或固有角频率的计测值识别上述计测对象物的刚体特性的步骤,

识别上述刚体特性的步骤包括:

基于由计测固有频率或固有角频率的步骤测得的固有频率或固有角频率的计测值 ω 以及基于上述支承部件的支承条件算出的刚性矩阵 $[K]$,识别近似满足下述式 (2) 的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量的步骤;

基于该识别的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量识别刚体特性的步骤,

$$\det([M]^{-1}[K] - \omega^2[I]) = 0 \cdots (2)。$$

9. 根据权利要求 8 所述的刚体特性识别方法,其中,

还包括变更计测条件的步骤,

计测上述固有频率或固有角频率的步骤在不同的计测条件下至少进行 3 次。

10. 根据权利要求 9 所述的刚体特性识别方法,其中,

上述计测条件的变更通过变更上述支承部件的支承条件来进行。

11. 根据权利要求 9 或 10 所述的刚体特性识别方法,其中,

上述计测条件的变更通过变更上述可动部的结构来进行。

刚体特性识别装置及刚体特性识别方法

技术领域

[0001] 本发明涉及振动解析方法以及振动解析装置。

背景技术

[0002] 在发动机等复杂构造物中,其刚体特性(质量、质量中心位置、三个主惯性矩以及与之对应的的三个主轴的朝向等)是左右该构造物的运动性能、振动噪音性能以及振动噪音控制性能的最大因素之一。事实上,刚体特性的值是开始进行用于设计支援的振动解析、振动解析、防振机构设计解析、控制系统设计解析等多种动态行为解析、设计、最优化时最为必要的参数。因此,容易且以实用的精度识别(测定)复杂构造物的刚体特性是非常重要的。

[0003] 作为这样的刚体特性识别法,本申请的发明人提出了名为“实验特性矩阵识别法(日文:実験の特性行列同定法)”的方法(专利文献1)。在该方法中,将计测对象物作为弹性体处理,在用弹簧等柔性支承计测对象物的状态下,进行单点激振多点响应试验,根据试验所得的1次到2次或3次的适当数量的共振振动特性来求出刚体特性。

[0004] 现有技术文献

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:日本特开2001-350741号公报

发明内容

[0007] 发明要解决的课题

[0008] 但是,在上述本申请发明人提出的方法中,尽管在用弹簧等柔性支承计测对象物的状态下进行计测,但识别计测对象物的刚体特性时,将其边界条件近似为“周边自由”。因此,未考虑用柔软的弹性体支承所带来的影响以及所谓的“几何刚性”,刚体特性的识别误差较大。

[0009] 此外,在上述本申请发明人提出的方法中,是在多个测定点进行测定的。但是,在这种情况下,需要在能表现弹性形变模型的程度上将测定点的数量设定得较多,因此,在同时进行计测的情况下需要与测定点的数量相应的许多传感器,在使用少数传感器的情况下,需要安装、拆卸传感器。此外,需要针对每个对象物进行测定点的坐标信息的输入等,因此,测定点数量多的话,激振试验的测定作业所需的时间增多。

[0010] 因此,鉴于上述问题,本发明的目的在于,提供一种能减少测定点的数量,且高精度地识别刚体特性的刚体特性识别装置或刚体特性识别方法。

[0011] 用于解决课题的手段

[0012] 作为解决上述课题的手段,本发明提供记载于权利要求书的各权利要求中的刚体特性识别装置及刚体特性识别方法。

[0013] 为了解决上述课题,第1技术方案提供一种刚体特性识别装置,其用于识别包含计测对象物的质量及重心位置在内的刚体特性,其中,该刚体特性识别装置包括:不能移动

的静止部；包含计测对象物的可动部，其能相对于该静止部移动；支承部件，其以使可动部能相对于上述静止部自由振动的方式支承可动部；计测部件，其用于在上述可动部振动时，计测用于算出该可动部的固有频率或固有角频率所需的数据；解析部件，其被输入上述支承部件的支承条件以及由上述计测部件计测出的计测数据，并且基于这些支承条件和根据计测数据算出的固有频率或固有角频率进行演算处理，上述解析部件基于上述支承部件的支承条件和根据上述计测数据算出的固有频率或固有角频率，识别上述计测对象物的刚体特性。

[0014] 为了解决上述课题，在第2技术方案中，上述解析部件基于通过上述计测部件获得的固有频率或固有角频率的计测值 ω 和基于上述支承部件的支承条件算出的刚性矩阵 $[K_q]$ ，识别近似满足下述式(1)的刚体质量矩阵 $[M_q]$ 的各分量，然后基于该识别的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量识别刚体特性，

$$[0015] \quad \det([M]^{-1}[K] - \omega^2[I]) = 0 \quad \dots (1)$$

[0016] 第3技术方案以第2技术方案为基础，其中，用上述计测部件进行的固有频率或固有角频率的计测在不同的计测条件下至少进行3次。

[0017] 第4技术方案以第3技术方案为基础，其中，上述计测条件的变更通过变更上述支承部件的支承条件来进行。

[0018] 第5技术方案以第4技术方案为基础，其中，上述支承部件包括多个将可动部支承于静止部的支承构件，该多个支承构件中的至少一部分为弹性体，上述支承条件的变更，通过去除该多个支承构件中的一部分支承构件、追加其他支承构件、变更上述弹性体的支承构件的弹性系数、将上述弹性体的支承构件变更为非弹性体以及变更一部分支承构件的单侧或两侧的安装位置这些方法中的至少任一种方法来进行。

[0019] 第6技术方案以第3～第5任一技术方案为基础，其中，上述计测条件的变更通过变更上述可动部中的计测对象物以外的部分的结构来进行。

[0020] 第7技术方案以第6技术方案为基础，其中，上述可动部的结构的变更，通过变更该可动部中的计测对象物以外的部分的结构以及变更计测对象物相对于该计测对象物以外的部分的位置或姿势来进行。

[0021] 第8技术方案以第5技术方案为基础，其中，上述刚性矩阵 $[K]$ 基于上述支承构件向可动部安装的安装位置的坐标以及上述支承构件的弹性系数而算出。

[0022] 第9技术方案以第8技术方案为基础，其中，上述刚性矩阵 $[K]$ 除了上述支承构件向可动部安装的安装位置的坐标以及该支承构件的弹性系数之外，还基于上述支承构件向静止部安装的安装位置以及该支承构件的自然状态下的长度，作为上述计测对象物的质量以及重心位置的函数而算出。

[0023] 第10技术方案以第2～第9中任一技术方案为基础，其中，满足上述式(1)的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量的识别，通过基于通过上述计测部件获得的固有频率或固有角频率的计测值 ω 进行最优化来进行。

[0024] 第11技术方案以第1～第10中任一技术方案为基础，其中，上述可动部包括平台和载置于该平台上的计测对象物，上述支承部件支承上述平台。

[0025] 为了解决上述课题，第12技术方案提供一种刚体特性识别方法，其使用刚体特性识别装置来识别计测对象物的刚体特性，该刚体特性识别装置包括：不能移动的静止部；

包含计测对象物的可动部,其能相对于该静止部移动;支承部件,其以使可动部能相对于上述静止部自由振动的方式支承可动部,其中,该刚体特性识别方法包括:使上述可动部自由振动的步骤;在上述可动部自由振动时计测可动部的振动的固有频率或固有角频率的步骤;基于上述支承部件的支承条件和固有频率或固有角频率的计测值识别上述计测对象物的刚体特性的步骤。

[0026] 第13技术方案以第12技术方案为基础,其中,该刚体特性识别方法还包括通过变更上述支承部件的支承条件或上述可动部中的计测对象物以外的部分的结构来变更计测条件的步骤。

[0027] 第14技术方案以第12或第13技术方案为基础,其中,识别上述刚体特性的步骤包括:基于由计测固有频率或固有角频率的步骤测得的固有频率或固有角频率的计测值 ω 以及基于上述支承部件的支承条件算出的刚性矩阵 $[K]$,识别近似满足下述式(2)的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量的步骤;基于该识别的刚体质量矩阵 $[M]$ 的各分量识别刚体特性的步骤,

$$[0028] \quad \det([M]^{-1}[K] - \omega^2[I]) = 0 \quad \dots (2)$$

[0029] 发明效果

[0030] 根据本发明,能够减少测定点的数量,且高精度地识别刚体特性。

[0031] 下面,根据所附附图与本发明的优选的实施方式的记载,能够进一步充分理解本发明。

附图说明

[0032] 图1是刚体特性识别装置的概略图。

[0033] 图2是刚体特性识别装置的框架、平台及支承装置的概略立体图。

[0034] 图3是刚体特性识别装置的框架、平台及支承装置的俯视图及侧视图。

[0035] 图4是概略性表示支承条件的变更方法的图。

[0036] 图5是用于说明本发明的识别原理的图。

[0037] 图6是概略性表示可动部的计测对象物以外的部分的结构变更方法的图。

[0038] 图7是表示根据计测器的输出所得的能量谱的例子图。

[0039] 图8是表示实施例1的试验状况的图。

[0040] 图9是表示实施例2的试验状况的图。

[0041] 图10是表示实施例3的试验状况的图。

[0042] 图11是表示实施例4的试验状况的图。

具体实施方式

[0043] 以下,参照附图详细说明本发明的实施方式。

[0044] 图1是本实施方式的刚体特性识别装置1的概略图。如图1所示,刚体特性识别装置1包括:框架10;平台21,该平台21能载置计测对象物T,且能相对于该框架10移动;支承装置30,该支承装置30以使平台21能相对于框架10自由振动的方式支承平台21;计测装置40,该计测装置40在平台20相对于框架10振动时,计测用于计算平台20的振动的固有频率或固有角频率所需的数据;解析装置50,解析装置50被输入上述支承装置30的

支承条件以及由计测装置 40 计测出的计测数据等,并且基于这些支承条件和根据计测数据计算出的固有频率或固有角频率进行演算处理。

[0045] 图 2 是本实施方式的刚体特性识别装置 1 的框架 10、平台 20 及支承装置 30 的概略立体图,图 3 的(A)及图 3 的(B)分别表示本实施方式的刚体特性识别装置 1 的框架 10、平台 20 及支承装置 30 的俯视图及侧视图。

[0046] 框架 10 例如形成为图 2 及图 3 所示那样的立方体状。但是,框架 10 未必是立方体状,可以是任何形状。此外,只要是能够借助支承装置 30 支承平台 20 的不能移动的静止构件,可以是任何构件。因此,只要是相对于平台 20 能够移动(振动)而言不能移动(振动)的静止构件,可以代替框架 10 使用任何构件。

[0047] 在图 2 及图 3 所示的例子中,平台 20 形成为大致长方形的平板,在该平台 20 上载置计测对象物 T。但是,平台 20 只要是能够在其上载置计测对象物 T 且通过支承装置 30 能自由振动地支承于框架 10,则未必非是长方形,另外也可以不是平板状。

[0048] 另外,在本说明书中,将能相对于框架 10 移动,即相对于静止部移动(振动)的部分称为可动部 21。因此,在将计测对象物 T 载置于平台 20 上的情况下,由于平台 20 及计测对象物 T 能够相对于框架 10 移动,因此,可动部 21 包括平台 20 及计测对象物 T。此外,如后所述,平台 20 上有时也会载置虚质量体(dummy mass),在该情况下,可动部 21 除了平台 20 及计测对象物 T 之外,还包括虚质量体。此外,有时计测装置 40 被安装于平台 20 而与平台 20 等一同移动(振动),在该情况下,可动部 21 除了平台 20 及计测对象物 T 之外,还包括计测装置 40。

[0049] 此外,在本实施方式中,计测对象物 T 借助平台 20 间接地由支承装置 30 支承。但是,平台 20 不是必需的构成要素,也可以不使用平台 20 而用支承装置 30 直接支承计测对象物 T。在该情况下,可动部 21 不包括平台 20,仅包括计测对象物 T,或者包括计测对象物 T、虚质量体和计测装置 40。

[0050] 支承装置 30 具有多个将可动部 21 支承于框架 10 的支承构件 31a ~ 31h(将支承构件 31a ~ 31h 统一用附图标记 31 表示)。各支承构件 31a ~ 31h 的 1 个端部安装于框架 10,且另一端部安装于可动部 21(在图示的例子中为平台 20)。在图 2 及图 3 所示的例子中,支承装置 30 具有 8 个支承构件 31a ~ 31h。具体而言,各支承构件 31a ~ 31h 配置于立方体状的框架 10 的上方角部 11 和平台 20 的各侧部的中央之间。如图 3 的(A)所示,立方体状的框架 10 的各角部 11 分别安装有两个支承构件 31,这两个支承构件 31 分别安装于平台 20 的不同部位。

[0051] 在图 2 及图 3 所示的例子中,上述多个支承构件 31 全部都具有弹簧 32。因此,平台 20 以能够相对于框架 10 弹性地自由振动的方式被支承于框架 10。另外,这些支承构件 31 无需全都具有弹簧,只要这些支承构件 31 中的至少一部分具有弹簧即可。此外,支承构件 31 具有弹簧而作为弹性体,但未必需要是弹簧,只要是弹性体,也可以具有橡胶等其他构件。

[0052] 另外,在上述实施方式中,支承装置 30 具有 8 个支承构件 31a ~ 31h,但支承构件的个数也可以不为 8 个。但是,支承构件至少需要为 3 个以上。此外,对于支承构件 31 向框架 10 及平台 20 安装的安装位置,只要各支承构件 31 中的至少 1 个支承构件 31 的安装位置与其他任一支承构件 31 的安装位置不同即可,可以是任何位置,未必是图 2 及图 3 所

示的位置。

[0053] 此外,如上所述,也可以代替框架 10 而使用其他静止构件,也可以不使用平台 20 而用支承装置 30 直接支承计测对象物 T,考虑到这点,支承装置 30 或各支承构件 31 可以说是以可动部能相对于静止部弹性地自由振动的方式支承可动部。

[0054] 支承装置 30 可以变更将平台 20 支承于框架 10 的支承条件(即,可动部相对于静止部的支承条件)。作为支承条件的变更方法,例如可以考虑概略性示于图 4 的(A)~图 4 的(C)的如下方法。

[0055] 首先,作为支承条件的变更方法,可以举出如图 4 的(A)那样变更构成支承装置 30 的支承构件 31 的数量、支承构件 31 的安装位置的方法。即,可以通过拆除多个支承构件 31 中的一部分支承构件、追加新的支承构件或者变更各支承构件 31 在框架 10 或平台 20 抑或它们双方上的安装位置,来变更支承条件。例如,在图 2 及图 3 所示的例子中,设有 8 个支承构件 31a~31h,但可以如图 4 的(A)那样,通过拆除这其中的 1 个或多个支承构件,或者追加新的支承构件用 9 个以上的支承构件支承平台 20,来变更支承条件。特别是,通过变更作为拆除对象的支承构件 31、变更追加的支承构件 31 的追加位置以及变更拆除或追加的支承构件 31 的个数等,能实现多种不同的支承条件。

[0056] 作为支承条件的另一变更方法,可以举出变更支承构件 31 的弹簧(弹性体)32 的弹性系数的方法。例如,可以如图 4 的(B)所示那样,通过将具有弹簧的支承构件 31 中的至少 1 个支承构件 31a 的弹簧 31a 更换为弹性系数不同的另一弹簧 31b 来变更支承条件。特别是,通过将各支承构件 31 的弹簧更换为弹性系数不同的多个弹簧,以及变更要更换弹簧的支承构件 31,能实现多种不同的支承条件。

[0057] 作为支承条件的再一变更方法,可以举出变更支承构件 31 有无弹簧(弹性体)的情况的方法。例如,可以如图 4 的(C)所示那样,通过将具有弹簧的支承构件 31 中的至少 1 个支承构件 31 更换为不具有弹簧的支承构件,即更换为普通的绳状构件,或者反过来将不具有弹簧的支承构件更换为具有弹簧的支承构件,来变更支承条件。特别是,通过在多个支承构件 31 中更换弹簧和绳状构件,能实现多种不同的支承条件。

[0058] 另外,可以组合上述支承条件的变更方法。因此,例如,可以通过拆除某个支承构件 31 并变更另一支承构件 31 的弹簧的弹性系数来变更支承条件。此外,这些支承条件的变更可以由用户手动进行,也可以在支承装置 30 上设置进行支承构件 31 的更换等的支承条件变更机构而自动进行。

[0059] 计测装置 40 包括例如安装于支承构件 31 之一上的应变仪 41、与应变仪 41 相连接的放大器 42。在图 1 所示的实施方式中,应变仪 41 配置在 1 个支承构件 31 与框架 10 之间,在可动部 21 振动的过程中,即在可动部的振动过程中,应变仪 41 计测作用于支承构件 31 的力,将该力转换为电信号后输出。该电信号经放大器 43 放大后,被输入到后述的解析装置 50 的外部接口部 51。在解析装置 50 中,基于由应变仪 41 计测到的支承构件 31 所受的力,计算出可动部的固有频率或固有角频率。

[0060] 另外,在上述实施方式中,作为计测装置 40 的计测器使用了应变仪 41,但只要能基于计测装置 40 的计测数据计算出可动部 21 的固有频率或固有角频率,也可以使用加速度计、利用了涡电流或激光的非接触位移仪、激光多普勒速度计等任何计测器。此外,从最终计算出固有频率或固有角频率的观点考虑,计测器仅设置于多个支承构件 31 中的 1 个支

承构件 31 上即可,但为了提高计测精度,也可以在多个支承构件 31 上设置计测器。另外,在以下的说明中,以基于计测装置 40 的计测数据计算可动部 21 的固有角频率的情况为例进行说明。

[0061] 解析装置 50 包括:作为解析装置 50 与外部设备的连接部位的外部接口部 51;向可移动介质进行写入等的可移动介质装置(RM 装置)52;控制可移动介质装置 52 的可移动介质控制部(RM 控制部)53;接受来自用户的输入的输入装置 54;控制输入装置 54 的输入控制部 55;向显示器等进行输出的输出装置 56;控制输出装置 56 的输出控制部 57;进行各种演算处理的中央处理装置 58;存储装置 59;将这些外部接口部 51、可移动介质控制部 53、输入控制部 55、输出控制部 57、中央处理装置 58、存储装置 59 等相互连接起来的总线 60。

[0062] 外部接口部 51 将自计测装置 40 输入的信号输出到总线 60。在可移动介质装置 52 中,能够将记录于可移动介质 61 的程序(例如,进行后述识别处理的程序)等安装于解析装置 50,或者将解析结果记录于可移动介质 61。另外,作为可移动介质 61,可以使用 FD、CD、DVD、MO 等任何存储介质。

[0063] 输入装置 54 是键盘、鼠标及数字化仪等输入设备,由输入控制部 55 控制。用户可通过该输入装置 54,输入支承装置 30 的各种支承条件(例如,各支承构件 31 的长度、各支承构件 31 的弹簧 32 的弹性系数、各支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置的坐标、各支承构件 31 向平台 20 安装的安装位置的坐标等)。输出装置 56 是显示器、打印机等输出设备,对输入到输入装置 54 的各种数据、用于执行程序的程序单、解析结果等进行输出。

[0064] 中央处理装置 58 借助总线 60 与外部接口部 51、可移动介质控制部 53、输入控制部 55、输出控制部 57 及存储装置 59 相连接,向这些控制部等发出指示,并且根据存储于存储装置 59 的各程序进行傅里叶变换、识别处理等各处理。此外,存储装置 59 由 RAM (随机存取存储器)、ROM (只读存储器)等构成,存储程序、执行各程序过程中的临时数据、解析结果等。

[0065] 在这样构成的刚体特性识别装置 1 中,进行计测对象物 T 的刚体特性(即,计测对象物 T 的质量 m_0 、重心的位置 $\{\zeta_{G0}\}$ 、主惯性矩 λ 及惯性主轴的朝向 $\{c\}$)的识别。以下,说明由这样构成的刚体特性识别装置 1 进行的刚体特性的识别处理。

[0066] 首先,通过解析装置 50 的输入装置 54 输入支承装置 30 的各支承构件 31 的支承条件。具体而言,输入各支承构件 31 的长度 l_p 、各支承构件 31 的弹性系数 k_s 、各支承构件 31 向平台 20 (即可动部 21)安装的安装位置的坐标 $\zeta_{a,p}$ 、各支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置的坐标 $\zeta'_{b,p}$ 。另外,符号 p 是表示第 p 个支承构件的符号,因此, l_p 表示第 p 个支承构件 31 的长度。

[0067] 在此,输入各支承构件 31 向平台 20 安装的安装位置的坐标 $\zeta_{a,s}$ 时的坐标系和输入各支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置的坐标 $\zeta'_{b,s}$ 时的坐标系使用了不同的坐标系。如图 5 所示,在输入各支承构件 31 向平台 20 安装的安装位置的坐标 $\zeta_{a,s}$ 时,使用了基于平台 20 或可动部 21 (即,与平台 20 或可动部 21 一同振动)的坐标系 O_{xyz} ,以下,在表示该坐标系中的坐标时,用 ζ (不带撇)表示。另一方面,在输入各支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置的坐标 $\zeta'_{b,s}$ 时,使用了基于框架 10 (即,即使平台 20 或可动部 21 振动也不移动)的坐标系 $O'_{x'y'z'}$,以下,在表示该坐标系中的坐标时,用 ζ' (带撇)表示。

[0068] 此外,在本实施方式中,除了支承装置 30 的支承条件以外,还可变更可动部 21 的结构。因此,在本实施方式中,除了支承装置 30 的支承条件以外,还可输入关于可动部 21 的结构的参数。

[0069] 在此,可动部 21 结构的变更,通过变更可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分的结构、变更计测对象物 T 在平台 20 上的位置及姿势来进行。

[0070] 可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分的结构变更,例如通过变更可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分的质量及重心位置来进行,具体而言,例如可以举出:如图 6 所示那样在平台 20 上的规定位置载置虚质量体(质量体) 22;变更虚质量体 22 的载置位置、姿势;变更载置的虚质量体的质量等方法。因此,在该情况下,解析装置 50 除了支承装置 30 的支承条件以外,还被输入可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分(例如平台 20、虚质量体 22 以及在计测装置 40 与平台 20 等一同振动時計测装置 40)的质量及重心位置。此外,在变更了计测对象物 T 在平台 20 上的位置及姿势的情况下,输入这些位置及姿势间的相对关系(例如,不同的两个位置坐标的各分量之间的差等)。

[0071] 另外,固有角频率的计测通过变更支承装置 30 的支承条件以及可动部 21 的结构而进行多次计测。以下,将由支承装置 30 的支承条件以及可动部 21 的结构而定的、进行某个计测时的条件称为计测条件。因此,可以说固有角频率的计测在不同的计测条件下进行多次计测。

[0072] 在输入了上述各种计测条件之后,将计测对象物 T 载置于平台 20 上的适当位置,然后,手动或自动地使平台 20 即可动部 21 振动。在手动使平台 20 振动的情况下,例如由用户用手推动平台 20。另一方面,在自动使平台 20 振动的情况下,例如通过用任何方法将平台 20 提起再放开来进行。

[0073] 当使载置了计测对象物 T 的平台 20 振动时,用计测装置 40 的应变仪 41 检测出作用于支承构件 31 的力。应变仪 41 的输出通过放大器 42 及外部接口部 51 被输入到解析装置 50。在解析装置 50 中,通过对由应变仪 41 检测出的随时间变化的力进行傅里叶变换,求出图 7 所示那样的相对于频率的能量谱。图 7 的横轴刻度为频率 [Hz],该能量谱的多个峰值等同于表示可动部 21 的固有角频率,在图 7 所示的例子中,可视为计测到 $\omega'_{1} \sim \omega'_{6}$ 这 6 个固有角频率。这样计测出的固有角频率与计测条件相关联地存储于存储装置 59。

[0074] 另外,以下,用 ω_{sq} 表示在第 q 个计测条件下计测出的第 s 个固有角频率。在各计测条件下能计测出的固有角频率最多为 6 个,因此, s 为 1 ~ 6。

[0075] 固有角频率的计测结束后,变更计测条件再次对固有角频率进行计测。计测条件的变更例如通过如上述那样变更支承条件,或变更可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分的质量、重心位置等来进行。

[0076] 这样变更计测条件后,再次进行计测条件的输入、平台 20 的振动及固有角频率的计测。这样的计测因后述理由至少要进行 3 次,在各计测条件下计测出的固有角频率与计测条件相关联地存储于存储装置 59。

[0077] 然后,基于存储在存储装置 59 中的计测条件和在各计测条件下计测出的固有角频率,由解析装置 50 基于如下所示的识别原理识别计测对象物 T 的刚体特性。

[0078] 另外,在上述说明中,每次都要进行计测条件的输入。但是,当在多个计测条件下对最初的计测对象物 T 进行了计测之后,再对其后的其他计测对象物 T 进行计测时,可以在

与对最初的计测对象物 T 进行计测时相同的多个计测条件下进行计测,因此,在对第 2 个以后的计测对象物 T 进行计测时,可以不进行计测条件的输入。或者,如果预先将多个计测条件存储于存储装置 59,在存储的计测条件下进行计测的话,则无需进行计测条件的输入。

[0079] 接着,说明由本实施方式的刚体特性识别装置 1 进行的识别处理的基本原理。在本实施方式中,如图 5 概略所示那样,包括计测对象物 T 及平台 20 等在内的可动部 21 以能自由振动的方式被多个支承构件 31 支承。当假定这样以能自由振动的方式被支承的可动部 21 为 1 个刚体时,自由振动时仅产生微少的衰减,因此,可动部 21 振动时的运动方程式(具有平移和旋转双方分量的运动方程式)如下述式(3)所示。

$$[0080] \quad [M_q] \{d^2x/dt^2\} + [K_q] \{x\} = \{0\} \quad \dots (3)$$

[0081] 在此,在式(3)中, $\{x\}$ 表示将基于可动部 21 的坐标系 0_{xyz} 保持可动部 21 静态平衡位置处的该位置和姿势地转换为固定坐标系,并能将该固定坐标系中的可动部 21 的 x 方向的平移位移 δx 、y 方向的平移位移 δy 、z 方向的平移位移 δz 、绕 x 轴的旋转位移 $\delta \theta_x$ 、绕 y 轴的旋转位移 $\delta \theta_y$ 、绕 z 轴的旋转位移 $\delta \theta_z$ 纵向排列而成的向量。此外, $\{f\}$ 表示能将基于可动部 21 的坐标系 0_{xyz} 中的作用于可动部 21 的 x 方向的力 f_x 、y 方向的力 f_y 、z 方向的力 f_z 、绕 x 轴的力的力矩 t_x 、绕 y 轴的力的力矩 t_y 、绕 z 轴的力的力矩 t_z 纵向排列的向量(参照下述式(4))。此外, $\{d^2x/dt^2\}$ 是表示位移的向量 $\{x\}$ 的二阶微分,即,是表示可动部 21 的加速度的向量。另外,在本说明书中,用 $[\]$ 表示矩阵,用 $\{ \}$ 表示向量。

$$[0082] \quad \{x\} = \begin{Bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta \theta_x \\ \delta \theta_y \\ \delta \theta_z \end{Bmatrix} \quad \dots (4)$$

[0083] 此外,上述式(3)中的 $[M_q]$ 是 6 行 6 列的刚体质量矩阵, $[K_q]$ 是 6 行 6 列的刚性矩阵。另外,如上所述, q 表示计测条件的编号,因此, $[M_q]$ 及 $[K_q]$ 分别表示第 q 个计测条件下的刚体质量矩阵及刚性矩阵。以下,说明该刚体质量矩阵 $[M_q]$ 及刚性矩阵 $[K_q]$ 。

[0084] 首先,说明刚体质量矩阵 $[M_q]$ 。

[0085] 刚体质量矩阵 $[M_q]$ 是由可动部 21 的刚体特性(质量、重心位置、主惯性矩、惯性主轴的朝向)而定的矩阵,由下述式(5)表示。

$$[0086] \quad [M_q] = \begin{bmatrix} m[I] & -m\{\zeta_G\}_L \\ m\{\zeta_G\}_L^T & [\Theta] - m\{\zeta_G\}_L\{\zeta_G\}_L^T \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

[0087] 在上述式(5)中, m 是可动部 21 的质量,当设计计测对象物 T 的质量为 m_t ,可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分(即,平台 20、虚质量体 22、计测器 41 等)的质量为 m_v 时, m 由下述式(6)表示。

$$[0088] \quad m = m_t + m_v \quad \dots (6)$$

[0089] 另外,对于表示基于可动部 21 的坐标系 0_{xyz} 中的可动部 21 的重心坐标的向量 $\{\zeta_G\}$,当设 $\zeta_{G,x}$ 为可动部 21 的重心的 x 坐标, $\zeta_{G,y}$ 为可动部的重心的 y 坐标, $\zeta_{G,z}$ 为可

动部的重心的 z 坐标时, $\{\zeta_g\}$ 可如下述式(7) 那样表示。此外, 对于坐标系 0_{xyz} 中的可动部 21 的重心坐标 $\{\zeta_g\}$, 当设计测对象物 T 的重心坐标为 $\{\zeta_{Gu}\}$, 可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分的重心坐标为 $\{\zeta_{Gv}\}$ 时, $\{\zeta_g\}$ 可如下述式(8) 那样表示。

$$[0090] \quad \{\zeta_g\} = \begin{Bmatrix} \zeta_{g,x} \\ \zeta_{g,y} \\ \zeta_{g,z} \end{Bmatrix} \quad \cdots (7)$$

$$[0091] \quad \{\zeta_g\} = \frac{1}{m}(m_u\{\zeta_{Gu}\} + m_v\{\zeta_{Gv}\}) \quad \cdots (8)$$

[0092] 此外, 在上述式(5) 中, $[I]$ 是 3 行 3 列的单位矩阵, $[\zeta_g]_{\times}$ 是表示与可动部 21 的重心相关的矩阵, $[\Theta]$ 是表示可动部 21 的惯性张量的矩阵, $[I]$ 、 $[\zeta_g]_{\times}$ 、 $[\Theta]$ 分别由下述式(9)、(10)、(11) 所示。

$$[0093] \quad [I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots (9)$$

$$[0094] \quad [\{\zeta_g\}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -\zeta_{g,x} & \zeta_{g,y} \\ \zeta_{g,x} & 0 & -\zeta_{g,z} \\ -\zeta_{g,y} & \zeta_{g,z} & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots (10)$$

$$[0095] \quad [\Theta] = \begin{bmatrix} I_{xx} & \text{sym.} \\ I_{yx} & I_{yy} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad \cdots (11)$$

[0096] 在此, 上述式(7) 中的 $\zeta_{g,x}$ 、 $\zeta_{g,y}$ 、 $\zeta_{g,z}$ 分别表示可动部 21 的重心的 x 、 y 、 z 坐标。此外, 在上述式(7) 及本说明书中, $[\]_{\times}$ 标记是将向量之间的外积转换成矩阵与向量的乘积所得的算式, 即 $\{a\} \times \{b\} = [\{a\}]_{\times} \{b\}$ 。因此, 例如设 $\{a\}$ 是分量为 a_1 、 a_2 、 a_3 的向量时, $[\{a\}]_{\times}$ 由下述式(12) 表示。

$$[0097] \quad [\{a\}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots (12)$$

[0098] 惯性张量 $[\Theta]$ 可如式(13) 那样表示。在此, $[\Theta_u]$ 与 $[\Theta_v]$ 分别是与计测对象物 T 及可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分相关的关于坐标系 0_{xyz} 的原点的惯性张量。

$$[0099] \quad [\Theta] = [\Theta_u] + [\Theta_v] - m_u[(\zeta_{Gu})]_{\times}[(\zeta_{Gu})]_{\times} - m_v[(\zeta_{Gv})]_{\times}[(\zeta_{Gv})]_{\times} + m[(\zeta_g)]_{\times}[(\zeta_g)]_{\times} \quad \cdots (13)$$

[0100] 另一方面, 上述式(11) 中的 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 是分别表示坐标系 0_{xyz} 中的绕 x 轴、绕 y 轴、绕 z 轴的旋转惯性的惯性矩, I_{yx} 、 I_{zx} 、 I_{zy} 是分别表示坐标系 0_{xyz} 中的 x 轴和 y 轴、 x 轴和 z 轴、 y 轴和 z 轴间的旋转惯性的耦合度的惯性积。

[0101] 因此, 式(3) 中的刚体质量矩阵 $[M_q]$ 可以说是表示可动部 21 的质量 m 、重心坐标

$\{\zeta_g\}$ 及惯性张量 $[\Theta]$ 的矩阵。

[0102] 在此,若能求出上述式(3)中的可动部 21 的刚体质量矩阵 $[M_q]$,则可求出可动部 21 的刚体特性。具体而言,可动部 21 的刚体特性中的质量及重心坐标可根据上述式(5)的 m 及 $[\{\zeta_G\}]_x$ 直接求出。另一方面,可动部 21 的刚体特性中的主惯性矩及惯性主轴的朝向可根据上述式(5)的惯性张量 $[\Theta]$ 求出。

[0103] 即,对于惯性张量(3 行 3 列),解下述式(14)的标准固有值问题而算出的 3 个固有值是可动部 21 的 3 个主惯性矩的值,规格化为与该 3 个主惯性矩的值相对应地获得的长度 1 而得到的固有向量是与各个主惯性矩相对应的惯性主轴的方向余弦向量(表示惯性主轴的朝向)。即,作为式(14)的固有值问题的解,可得下述式(15)。

$$[0104] \quad \begin{bmatrix} I_{xx} & & \\ I_{yx} & I_{yy} & \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{matrix} sym. \\ \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} \end{matrix} = \lambda \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} \quad \cdots (14)$$

[0105] 主惯性矩的值: $\lambda_i (i=1 \sim 3)$

$$[0106] \quad \text{惯性主轴的朝向(方向余弦向量表现): } \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} (i=1 \sim 3) \quad \cdots (15)$$

[0107] 因此,在上述式(3)中若能求出刚体质量矩阵 $[M_q]$,则能求出可动部 21 的刚体特性(质量、重心坐标、主惯性矩及惯性主轴的朝向)。

[0108] 另一方面,可动部 21 中的计测对象物 T 以外的部分的刚体特性预先通过计算或通过试验求得。因此,若能求出可动部分 21 的刚体特性,结果便能求出计测对象物 T 的刚体特性。因此,在本实施方式的识别处理中,可以说是先求上述式(3)的刚体质量矩阵 $[M_q]$ 的各分量,再基于求得的分量求计测对象物 T 的刚体特性。

[0109] 接着,说明刚性矩阵 $[K_q]$ 。

[0110] 上述式(3)中的刚性矩阵 $[K_q]$ 根据可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 而变化。但是,如上所述,计测对象物 T 的质量 m_u 及重心坐标 $\{\zeta_{gu}\}$ 是未知数,因此,可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 也是未知数。因此,在本实施方式中,刚性矩阵 $[K_q]$ 作为可动部 21 的质量 m 及重心坐标 ζ_g 的函数来求。

[0111] 在求刚性矩阵 $[K_q]$ 时,首先,算出可动部 21 处于静态平衡状态时,即可动部 21 处于未振动状态时可动部 21 相对于框架 10 的相对位置。在此,可动部 21 处于静态平衡状态时可动部 21 相对于框架 10 的相对位置,根据可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 而变化,即根据计测对象物 T 的质量 m_u 及重心坐标 $\{\zeta_{gu}\}$ 而变化。因此,可动部 21 处于静态平衡状态时可动部 21 相对于框架 10 的相对位置作为可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 的函数来求。

[0112] 在此,如上所述,各支承构件 31 向可动部 21(平台 20)安装的安装位置的坐标 $\{\zeta_{a,s}\}$ 用基于可动部 21 的(即,与可动部 21 一同振动的)坐标系 0_{xyz} 表示,各支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置的坐标 $\{\zeta'_{b,s}\}$ 用基于框架 10 的(即,即使可动部 21 振动也不移动的)坐标系 $0'_{x'y'z'}$ 表示。因此,在本实施方式中,在计算可动部 21 处于静态平衡状态

时可动部 21 的相对位置时,算出基于框架 10 的坐标系 $0'_{x'y'z'}$ 相对于基于可动部 21 处于静态平衡状态时的可动部 21 的坐标系 0_{xyz} 的相对位置 $\{x_{0'}\}$,以及算出这些坐标系的朝向的差异 $\{\theta\}$ 。

[0113] 在此,可动部 21 的力学能量函数 $V(\{x_{0'}\},\{\theta\})$ 作为相对位置 $\{x_{0'}\}$ 及朝向 $\{\theta\}$ 的函数如下述式(16)所示,该能量函数为最小那样的相对位置 $\{x_{0'}\}$ 及朝向 $\{\theta\}$,表示基于框架 10 的坐标系 $0'_{x'y'z'}$ 相对于基于可动部 21 处于静态平衡状态时的可动部 21 的坐标系 0_{xyz} 的相对位置 $\{x_{0'}\}$ 及朝向 $\{\theta\}$ 。

$$[0114] \quad V(\{x_{0'}\},\{\theta\}) = V_g + \sum_{p=1}^{N_p} V_{e,p} \quad \cdots (16)$$

[0115] 在上述式(16)中, N_p 表示支承构件 31 的总数。此外,在式(16)中, $V_{e,p}$ 表示多个支承构件 31 中的第 p 个支承构件 31 所积蓄的弹性能,由下述式(17)表示。

$$[0116] \quad V_{e,p} = \frac{1}{2} k_p (l_p - \|\zeta_{ba,p}\|)^2 \quad \cdots (17)$$

[0117] 另外,在上述式(17)中, k_p 是第 p 个支承构件 31 的弹性系数, l_p 是第 p 个支承构件 31 的自然状态下的长度, $\{\zeta_{ba,p}\}$ 是表示自第 p 个支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置到第 p 个支承构件 31 向平台 20 安装的安装位置的向量。该向量 $\{\zeta_{ba,p}\}$ 由下述式(18)表示。

$$[0118] \quad \{\zeta_{ba,p}\} = \{\zeta_{a,p}\} - \{x_{0'}\} - [R(\{\theta\})]^T \{\zeta'_{b,p}\} \quad \cdots (18)$$

[0119] 上述式(18)中的 $\{\zeta_{a,p}\}$ 是坐标系 0_{xyz} 中的第 p 个支承构件 31 向平台 20 安装的安装位置的坐标, $\{\zeta'_{b,p}\}$ 是坐标系 $0'_{x'y'z'}$ 中的第 p 个支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置的坐标。这样,由于 $\{\zeta_{a,p}\}$ 和 $\{\zeta'_{b,p}\}$ 用不同坐标系表示,因此,在上述式(18)中,使用这些坐标系的相对位置 $\{x_{0'}\}$ 及朝向 $\{\theta\}$,进行将第 s 个支承构件 31 向框架 10 安装的安装位置的坐标 $\{\zeta'_{b,p}\}$ 用坐标系 0_{xyz} 表示的变换操作。另外,式(18)中的 $[R(\{\theta\})]$ 由下述式(19)表示。式(19)中的 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别是上述向量 $\{\theta\}$ 的分量。

[0120]

$$[R(\{\theta\})] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots (19)$$

[0121] 另一方面,在上述式(16)中, V_g 表示作用于可动部 21 的重力能,由下述式(20)表示。

$$[0122] \quad V_g = (\{x_{0'}\} - \{\zeta_g\})^T \{f_g\} \quad \cdots (20)$$

[0123] 在式(20)中, $\{f_g\}$ 是表示坐标系 $0'_{x'y'z'}$ 中的重力的方向及大小的向量,由下述式(21)表示。另外,式(21)中的 $\{n'_g\}$ 是表示坐标系 $0'_{x'y'z'}$ 中的重力的方向的单位向量。

$$[0124] \quad \{f_g\} = m_g [R(\{\theta\})]^T \{n'_g\} \quad \cdots (21)$$

[0125] 并且,使用基于使上述式(16)最小化所得的位置 $\{x_{0'}\}$ 及朝向 $\{\theta\}$ 而得到的向量 $\{\zeta_{ba,p}\}$ 更详细而言是通过将这样所得的位置 $\{x_{0'}\}$ 及朝向 $\{\theta\}$ 代入到上述式(18)中

而得到的向量 $\{\zeta_{ba,p}\}$, 和由上述式 (21) 得到的 $\{f_g\}$, 利用下述式 (22) 算出刚性矩阵 $[K_q]$ 。另外, 上述式 (22) 中的 $\{T_p\}$ 、 $\{J_p\}$ 、 $\{f_p\}$ 分别由下述式 (23)、(24)、(25) 表示。

[0126]

$$[K_q] = - \sum_{p=1}^{N_p} [T_p]^T [J_p] [T_p] - \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} + \sum_{p=1}^{N_p} [f_p] \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} \quad \dots (22)$$

[0127]

$$[T_p] = \begin{bmatrix} [I] & [-\{\zeta_{ba,p}\}]_x \end{bmatrix} \quad \dots (23)$$

$$[J_p] = -k_p \left(1 - \frac{l_p}{\|\{\zeta_{ba,p}\}\|} \right) [I] - k_p \frac{l_p}{\|\{\zeta_{ba,p}\}\|^3} \{\zeta_{ba,p}\} \{\zeta_{ba,p}\}^T \quad \dots (24)$$

$$\{f_p\} = -k_p \left(\|\{\zeta_{ba,p}\}\| - l_p \right) \frac{\{\zeta_{ba,p}\}}{\|\{\zeta_{ba,p}\}\|} \quad \dots (25)$$

[0130] 刚性矩阵 $[K_q]$ 是表示可动部 21 从静态平衡状态进行了些许平移及旋转位移时作用于可动部 21 的力的矩阵。在此, 自各支承构件 31 作用于可动部 21 的力的方向伴随可动部 21 的振动而变化, 在本实施方式中, 由上述式 (22) 可知, 在计算刚性矩阵 $[K_q]$ 时, 已经考虑了伴随可动部 21 的振动的自各支承构件 31 作用于可动部 21 的力的方向的变化。

[0131] 在此, 由上述式 (16) ~ (25) 可知, 在计算刚性矩阵 $[K_q]$ 时, 需要作为未知数的可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 。反过来考虑, 则可以说刚性矩阵 $[K_q]$ 是可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 函数。

[0132] 另外, 对于可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$, 由于可动部 21 的计测对象物 T 以外的部分的质量 m_u 及重心坐标 $\{\zeta_{gu}\}$ 是预先知晓的, 因此, 只要知道计测对象物 T 的质量 m_u 及重心的坐标 $\{\zeta_{gu}\}$, 则可求可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 。在此, 与计测对象物 T 的主惯性矩、惯性主轴的朝向相比, 计测对象物 T 的质量 m_u 及重心的坐标 $\{\zeta_{gu}\}$ 即使通过本发明的方法以外的方法也能比较容易地求得。因此, 也可以预先算出计测对象物 T 的质量 m_u 及重心的坐标 $\{\zeta_{gu}\}$, 从而算出可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$, 预先确定刚性矩阵 $[K_q]$ 的各分量。由此, 刚性矩阵 $[K_q]$ 不是可动部 21 的质量 m 及重心坐标 $\{\zeta_g\}$ 的函数, 因此, 能简化可动部 21 及计测对象物 T 的识别处理。

[0133] 再回到上述式 (3)。

[0134] 对于以时间的微分方程式表示的上述式 (3), 通过拉普拉斯变换可如下述式 (26) 所示那样变换为频率的方程式。在式 (26) 中, $\{\Psi(\omega)\}$ 通过对式 (3) 的向量 $\{x\}$ 进行拉普拉斯变换而获得, 是频率 ω 的函数。

$$(-\omega^2 [M_q] + [K_q]) \{\Psi(\omega)\} = \{0\} \quad \dots (26)$$

[0136] 上述式 (26) 所示的系的固有值及固有向量可通过解下述式 (27) 的固有值问题而得到。在式 (27) 中, 固有向量 $\{\Psi_{sq}\}$ (6 行 1 列) 表示第 q 个计测时的第 s 次刚体模型的振型 (日文: モード形), 固有值 ω_{sq}^2 表示第 q 个计测时的第 s 次刚体模型的固有角频率的平方。

$$[0137] \quad ([M_q]^{-1}[K_q] - \omega_{sq}^2[I])\{\Psi_{sq}\} = \{0\} \quad \cdots (27)$$

[0138] 上述式(27)的固有值问题的固有值(即,求固有角频率)的解可通过解下述式(28)而得到。

$$[0139] \quad \det([M_q]^{-1}[K_q] - \omega_{sq}'^2[I]) = 0 \quad \cdots (28)$$

[0140] 在上述式(28)中, $[M_q]^{-1}[K_q]$ 包含 10 个未知数(即,可动部 21 的质量 m 、可动部 21 的重心位置的坐标 ζ_{Gx} 、 ζ_{Gy} 、 ζ_{Gz} 、惯性矩 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 以及惯量乘积 I_{yx} 、 I_{zx} 、 I_{zy})。

[0141] 但是,如上所述,在使用计测装置 40 计测固有角频率时,在各计测条件下最多计测到 6 个固有角频率,将它们以 ω_{sq}' 的形式表示($S = 1, \cdots, 6; q = 1, \cdots, N_q$)。通过将这样计测得到的固有角频率 ω_{sq}' 代入到上述式(28)中,可在各计测条件中的每个计测条件下得到 6 个等式。因此,若进行 N_q 次固有角频率的计测,则最多可得到 $6 \times N_q$ 个等式。

[0142] 因此,通过解上述最多 $6 \times N_q$ 个等式,可求得 $[M_q]^{-1}[K_q]$ 的 10 个未知数。具体而言,通过使用由计测所得到的最多 $6 \times N_q$ 个固有角频率 ω_{sq}' ,解下述式(29)及(30)所示的最优化问题,而求出上述 10 个未知数。作为最优化手法,可以使用牛顿-莱福逊法、高斯-牛顿法、Levenberg-Marquardt 法(神经网络法)等各种最优化手法。另外,在式(30)中, $[I]$ 为 6 行 6 列的单位矩阵, $\{r\}$ 表示组合了刚体特性的各参数的向量(因此, $\{r\}$ 的分量为 m 、 ζ_{Gx} 、 ζ_{Gy} 、 ζ_{Gz} 、 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 、 I_{yx} 、 I_{zx} 、 I_{zy})。

$$[0143] \quad \min_{r \in R^{10}} f(\{r\}) \quad \cdots (29)$$

$$[0144] \quad f(\{r\}) = \sum_{s=1}^6 \sum_{q=1}^{N_q} \det([M_q]^{-1}[K_q] - \omega_{sq}'^2[I])^2 \quad \cdots (30)$$

[0145] 具体而言,最初对于上述 10 个未知数代入适当的值,然后,使这些代入的未知数的值一点一点变化而反复进行计算,最终将上述式(30)的右边的所有矩阵式的解皆为最小那样的值识别为这些未知数的值。由此,识别可动部 21 的质量 m 、可动部 21 的重心位置的坐标 ζ_{Gx} 、 ζ_{Gy} 、 ζ_{Gz} 、惯性矩 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} 以及惯量乘积 I_{yx} 、 I_{zx} 、 I_{zy} ,基于这些识别出的值求出计测对象物 T 的刚体特性。

[0146] 另外,如上所述,在式(27)中未知数为 10 个。另一方面,在 1 个计测条件下进行计测最多能得到 6 个固有角频率,因此,能获得 6 个等式。因此,在不同计测条件下进行 2 次计测则最多能获得 12 个等式,由于该等式的数量多于未知数的数量,因此,也可认为用不同的计测条件在最少 2 次的计测条件下进行计测,便可根据上述式(27)识别 10 个未知数。但是,如上述这样得到的等式不全为独立的等式,因此,进行 2 次计测不能识别上述 10 个未知数。因此,在本实施方式中,最少需要进行 3 次计测。

[0147] 另外,上述式(29)及(30)的识别精度未必十分高,根据发明者的经验,与上述式(30)相比,使用用上述式(30)除以 ω_{sq}' 所得的下述式(32),基于下述式(31)及(32)进行最优化的情况下识别精度高。这是由数值计算上的问题引起的。

$$[0148] \quad \min_{r \in R^{10}} g(\{r\}) \quad \cdots (31)$$

$$[0149] \quad g(\{r\}) = \sum_{s=1}^6 \sum_{q=1}^{N_q} \det\left(\frac{1}{\omega_{sq}'}[M_q]^{-1}[K_q] - \omega_{sq}'[I]\right)^2 \quad \cdots (32)$$

[0150] 在此,考虑计测出的固有角频率 ω'_{sq} 中分散含有误差。因此,要高精度地识别上述未知数,优选用最小二乘法将作为 $[M_q]^{-1} [K_q]$ 的固有值的平方根的理论上的固有角频率 ω_{sq} 拟合成计测出的固有角频率 ω'_{sq} 。理论上的固有角频率 ω_{sq} 的拟合通过下述式(33)及(34)进行。

$$[0151] \quad \min_{r \in R^{10}} h(\{r\}) \quad \dots (33)$$

$$[0152] \quad h(\{r\}) = \sum_{j=1}^6 \sum_{q=1}^{N_q} (\omega'_{sq} - \omega_{sq})^2 \quad \dots (34)$$

[0153] 另外,在上述式(34)中,需要结合理论上的固有角频率 ω_{sq} 与计测出的固有角频率 ω'_{sq} 的对应关系进行计算。但是,在上述未知数完全不明的状态下,作为 $[M_q]^{-1} [K_q]$ 的固有值的平方根的理论上的固有角频率 ω_{sq} 与计测出的固有角频率 ω'_{sq} 的对应关系不明,因此,不能直接将通过计测求得的固有角频率 ω_{sq} 代入式(34)来进行最优化。因此,优选,通过上述式(29)及式(30)预先求出上述未知数,将基于求出的这些未知数算出的理论上的固有角频率 ω_{sq} 作为初始值,用上述式(33)及(34)进行最优化。由此,能提高可动部 21 的,也即计测对象物 T 的刚体特性的识别精度。

[0154] 接着,说明由解析装置 50 进行的识别处理。由解析装置 50 进行的识别处理基于上述的基本原理而进行。

[0155] 首先,随机生成多个计测对象物 T 的刚体特性(计测对象物 T 的质量 m_u 、重心的位置 $\{\zeta_{cu}\}$ 、主惯性矩 λ 及惯性主轴的朝向 $\{c\}$)的初始值的组合。其中,进行初始值的生成时,要考虑例如重心的位置位于包围计测对象物 T 的立方体的内部等物理上的制约条件。

[0156] 接着,将 N_k 个(例如 1000 个)生成的刚体特性的初始值的组合 r_k ($k = 1, \dots, N_k$) 代入到上述式(30)或式(32)中,选定该多个刚体特性的初始值的组合中 $f(\{r_k\})$ 或 $g(\{r_k\})$ 为最小的 N_l 组(例如 10 组)的组合 r_l ($l = 1, \dots, N_l$)。

[0157] 接着,将上述选定的各初始值的组合 r_l 代入到上述式(29)及(30)或上述式(31)及(32)中,进行最优化。在理想的情况下,在代入这些 N_l 组的初始值的组合 r_l 的所有情况下,上述式(29)及(30)或上述式(31)及(32)的最优化问题的解相同或大致相同。

[0158] 这样求得的上述式(29)及(30)或上述式(31)及(32)的最优化问题的解用作上述式(33)及(34)的最优化问题的初始值。通过解该最优化问题,算出最终的可动部 21 的刚体特性,然后,算出计测对象物 T 的刚体特性。

[0159] 另外,在用上述式(29)及(30)或上述式(31)及(32)进行最优化所得到的 N_l 组解中的一部分解不同的情况下,可认为该一部分的最优化问题的解不是全局最小点,而是局部最小点。因此,去除成为局部最小点的最优化问题的解,将其余的最优化问题的解用作上述式(33)及(34)的最优化问题的初始值。

[0160] 下面,说明利用上述手法识别计测对象物 T 的刚体特性的优点。

[0161] 例如,在上述专利文献 1 所示的刚体特性的识别手法中,尽管在用弹簧等柔性支承计测对象物的状态下进行计测,但在识别计测对象物的刚体特性时,将其支承边界条件近似为“周边自由”。与此相对,在本实施方式中,不将包含计测对象物在内的可动部 21 的支承边界条件近似为“周边自由”,而是将利用支承装置 30 的各支承构件 31 的弹性系数、安

装位置编入计算式中(特别是上述式(22))。因此,能使计测对象物 T 的刚体特性的识别精度为高精度。此外,如上所述,在式(22)中考虑了伴随可动部 21 的振动的自各支承构件 31 作用于可动部 21 的力的方向的变化,即,考虑了“几何刚性”。因此,通过考虑“几何刚性”,也能使计测对象物 T 的刚体特性的识别精度为高精度。

[0162] 此外,在本实施方式中,如上所述,作为计测对象的参数仅为固有角频率。因此,计测器 41 仅设 1 个即可,此外,作为计测器 41,只要能计测振动的周期,则可以使用任何计测器。因此,能降低刚体特性识别装置 1 整体的价格。

[0163] 此外,在用计测器 41 计测振动的周期时,无需准确求出由计测器 41 检测出的参数的绝对值(例如,若是应变仪,则为力的值),因此,无需准确进行计测器 41 的校准。因此,能在短时间内用刚体特性识别装置 1 进行识别。

[0164] 此外,采用本实施方式的刚体特性识别装置 1,仅通过改变框架 10、平台 20 的大小,便可适用于从小的计测对象物(例如,信息设备、精密机械及其零件等)到大的计测对象物(例如,大型车辆、集装箱、大型船舶用发动机、航空器等)的各种对象物。因此,例如,与使计测对象物主动摇摆来进行识别那样的以往的识别装置相比,可以说利用范围极其广泛。

[0165] 另外,本说明书中所用的符号的意思归纳如下。

[0166] $[\]$:矩阵

[0167] $\{ \}$:向量

[0168] p :第 p 个支承构件

[0169] q :第 q 个计测

[0170] s :固有角频率的次数

[0171] N_p :支承构件的总数

[0172] N_q :总计测次数

[0173] $[M_q]$:第 q 个计测时的可动部的刚体质量矩阵

[0174] $[K_q]$:第 q 个计测时的刚性矩阵

[0175] k_p :第 p 个支承构件的弹性系数

[0176] l_p :第 p 个支承构件的自然状态下的长度

[0177] O_{xyz} :基于平台 20 或可动部 21 的坐标系

[0178] $O'_{x' y' z'}$:基于框架 10 的坐标系

[0179] $\{ \zeta_{a,p} \}$: O_{xyz} 坐标系中的第 p 个支承构件向平台 20 安装的安装坐标

[0180] $\{ \zeta'_{b,p} \}$: $O'_{x' y' z'}$ 坐标系中第 p 个支承构件向框架 10 安装的安装坐标

[0181] $\{ n'_g \}$: $O'_{x' y' z'}$ 坐标系中的重力的朝向

[0182] 实施例

[0183] 〈实施例 1〉

[0184] 设计测对象物为图 8 所示那样的矩形的铝制框架 T_1 ($1.7 \times 1.5 \times 0.05\text{m}$),不使用平台而用支承构件直接支承计测对象物 T_1 。即,可动部 21 仅设为计测对象物 T_1 。作为支承构件 31,使用 8 个带有弹簧的带(strap) $S_1 \sim S_8$,固有频率利用加速度传感器进行计测。计测条件的变更通过将带有弹簧的带 S_1 更换为无弹簧的带 S'_1 来进行。将在这样的实验条件下使用上述的识别手法的情况的识别结果示于表 1。

[0185] 表 1

[0186] 实施例 1 的实验结果 (关于计测对象物 T_1)

[0187]

参数	单位	真实值	误差	
			$g(\{r\})$	$h(\{r\})$
m	kg	15.52	-0.0902	-0.0402 (0.26%)
I_{xx}	kgm^2	5.301	0.0361	0.0116 (0.21%)
I_{yy}	kgm^2	6.463	0.0840	0.0033 (0.05%)
I_{zz}	kgm^2	11.72	-0.0473	-0.0631 (0.54%)
I_{xy}	kgm^2	0	0.1493	0.0413
I_{xz}	kgm^2	0	0.0061	0.0022
I_{yz}	kgm^2	0	-0.0068	-0.0073
$\zeta_{G,x}$	mm	850	0.7	0.7
$\zeta_{G,y}$	mm	750	0.6	0.4
$\zeta_{G,z}$	mm	-50	7.5	-2.8

[0188] 表 1 中的真实值是通过根据计测对象的铝制框架 T_1 的形状进行计算而求得的值。此外,误差中的 $g(\{r\})$ 表示用上述式(31)及式(32)识别铝制框架 T_1 的刚体特性时识别结果相对于真实值的误差, $h(\{r\})$ 表示用上述式(33)及式(34)识别铝制框架 T_1 的刚体特性时识别结果相对于真实值的误差。此外, $h(\{r\})$ 栏中括弧内的内容表示相对于真实值的误差的比例。由表 1 可知,识别结果的误差皆为 1% 以下。

[0189] 〈实施例 2〉

[0190] 接着,使计测对象物为如图 9 所示那样,在矩形的铝制框架 T_{21} 的角部上载置了 1.87kg 的圆柱质量体 T_{22} 而成的对象物 T_2 。此外,不使用平台而用支承构件直接支承计测对象物 T_2 。作为支承构件 31,使用 8 个带有弹簧的带 $S_1 \sim S_8$,固有频率的计测利用加速度传感器进行。计测条件的变更通过将带有弹簧的带 S_1 更换为无弹簧的带 S_1' 而进行。将在这样的实验条件下使用上述识别手法的情况下对计测对象物 T_2 的识别结果示于表 2。

[0191] 表 2

[0192] 实施例 2 的实验结果 (关于计测对象物 T_{21} + 虚质量体 (1.87kg))

[0193]

参数	单位	真实性	误差	
			$g(\{r\})$	$h(\{r\})$
m	kg	17.39	-0.0043	0.0440 (0.28%)
I_{xx}	kgm^2	6.182	0.0825	0.0271 (0.51%)
I_{yy}	kgm^2	7.546	0.1000	0.0709 (1.10%)
I_{zz}	kgm^2	13.65	-0.2528	-0.1381 (1.28%)
I_{xy}	kgm^2	-0.959	0.0144	0.0073
I_{xz}	kgm^2	0.133	-0.0144	0.0012
I_{yz}	kgm^2	0.121	-0.0128	-0.0191
$\zeta_{G,x}$	mm	764	4.9	3.8
$\zeta_{G,y}$	mm	673	6.9	4.2
$\zeta_{G,z}$	mm	-39	-1.2	-1.4

[0194] 表 2 中的真实值是通过根据计测对象物 T_2 的形状进行计算而求得的价值。由表 2 可知,识别结果的误差皆为 1% 程度以下。

[0195] 〈实施例 3〉

[0196] 接着,如图 10 所示那样,使计测对象物为矩形的铝制的框架 T_1 ,不使用平台而用支承构件直接支承计测对象物 T_1 。作为支承构件 31,使用 8 个带有弹簧的带 $S_1 \sim S_8$,固有频率的计测利用加速度传感器进行。计测条件的变更通过在铝制框架 T_1 的四个角部之间变更 1.87kg 的圆柱质量体(虚质量体) D 的载置位置来进行。将在这样的实验条件下使用上述识别手法的情况下对计测对象物 T_1 的识别结果示于表 3。表 3 中的真实值是通过根据计测对象物 T_1 的形状进行计算而求得的价值。由表 3 可知,识别结果的误差皆为 1% 程度以下。

[0197] 表 3

[0198] 实施例 3 的实验结果(关于计测对象物 T_1)

[0199]

参数	单位	真实值	误差	
			$g(\{r\})$	$h(\{r\})$
m	kg	15.52	0.1745	0.0500 (0.32%)
I_{xx}	kgm^2	5.301	0.1082	0.0274 (0.51%)
I_{yy}	kgm^2	6.462	0.0154	0.0483 (0.74%)
I_{zz}	kgm^2	11.72	-0.1508	-0.0988 (0.84%)
I_{xy}	kgm^2	0	0.0149	0.0037
I_{xz}	kgm^2	0	-0.0053	-0.0479
I_{yz}	kgm^2	0	-0.1081	0.0299
$\zeta_{G,x}$	mm	850	2.2	3.1
$\zeta_{G,y}$	mm	750	-1.2	-3.0
$\zeta_{G,z}$	mm	-50	7.1	-1.3

[0200] 〈实施例 4〉

[0201] 接着,如图 11 所示那样,设计测对象物为矩形的铝制的板 T_3 ,不使用平台而用支承构件直接支承计测对象物 T_3 。作为支承构件,使用 8 个带有弹簧的带 $S_1 \sim S_8$,固有频率的计测利用力传感器进行。计测条件的变更通过去除作为支承构件的一部分的 S_1 而进行。将在这样的实验条件下使用上述识别手法的情况下对计测对象物 T_3 的识别结果示于表 4。表 4 中的真实值是通过根据计测对象物 T_3 的形状进行计算而求得的价值。由表 4 可知,识别结果的误差皆为 1% 程度以下。

[0202] 表 4

[0203] 实施例 4 的实验结果(关于计测对象物之板 T_3)

[0204]

参数	单位	真实值	误差	
			$g(\{r\})$	$h(\{r\})$
m	10^{-3}kg	844.0	-5.535	0.915 (0.11%)
I_{xx}	10^{-3}kgm^2	4.398	-0.028	0.027 (0.60%)
I_{yy}	10^{-3}kgm^2	4.398	-0.036	-0.052 (1.20%)
I_{zz}	10^{-3}kgm^2	8.792	-0.014	-0.025 (0.28%)
I_{xy}	10^{-3}kgm^2	0	-0.013	-0.013
I_{xz}	10^{-3}kgm^2	0	0.073	-0.007
I_{yz}	10^{-3}kgm^2	0	0.102	0.071
$\zeta_{G,x}$	mm	125.0	1.8	0.7
$\zeta_{G,y}$	mm	125.0	0.8	1.1
$\zeta_{G,z}$	mm	-2.5	-0.9	-1.9

[0205] 另外,基于特定的实施方式对本发明进行了详细说明,但是本领域技术人员能够在不脱离本发明的权利要求书及思想的情况下,进行各种变更、修正等。

[0206] 附图标记说明

[0207] 1:刚体特性识别装置;10:框架(静止部);20:平台;21:可动部;30:支承装置;31:支承构件;32:弹簧;40:计测装置;50:解析装置;51:外部接口部;52:可移动介质装置;54:输入装置;56:输出装置;58:中央处理装置;59:存储装置;T:计测对象物。

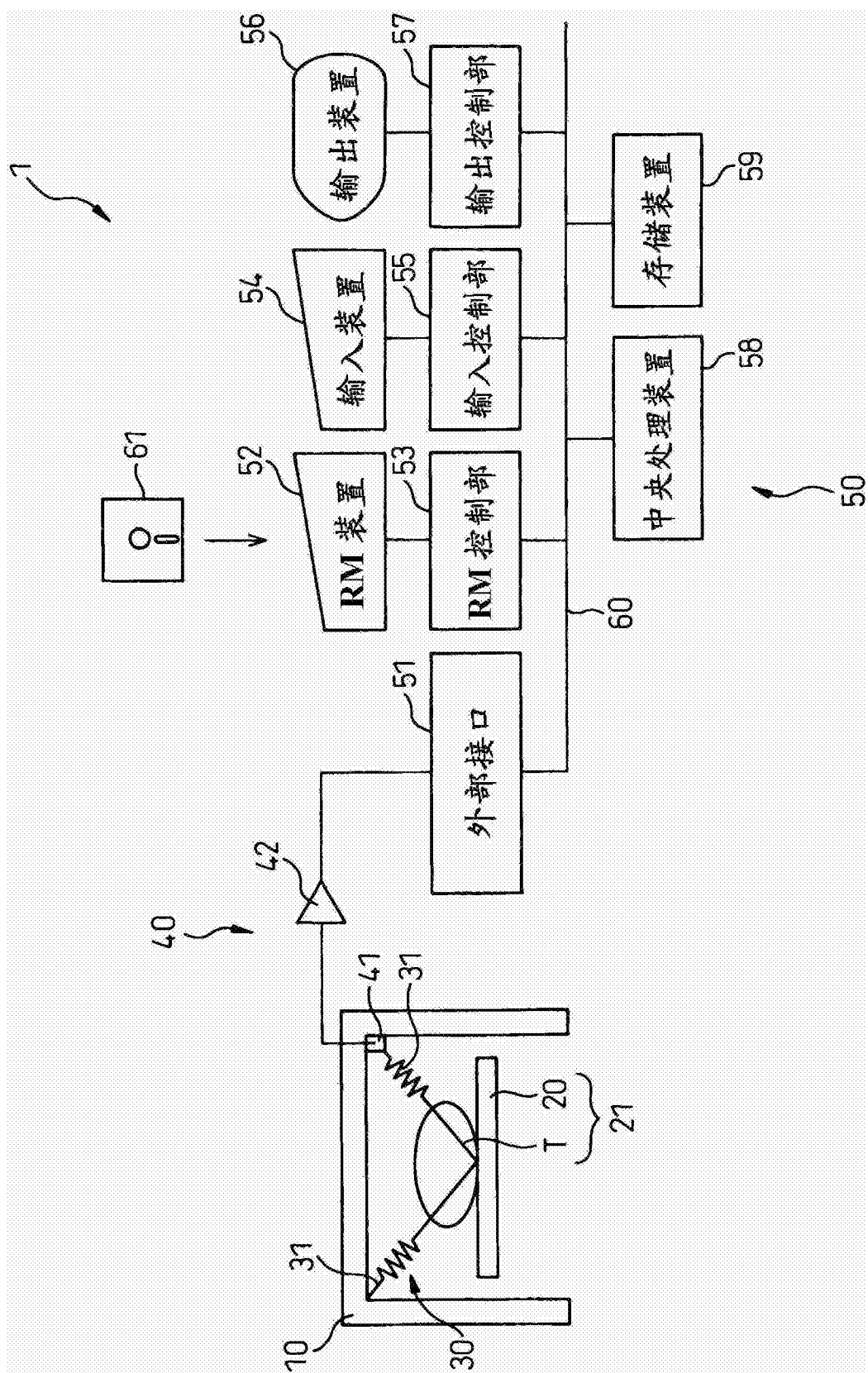


图 1

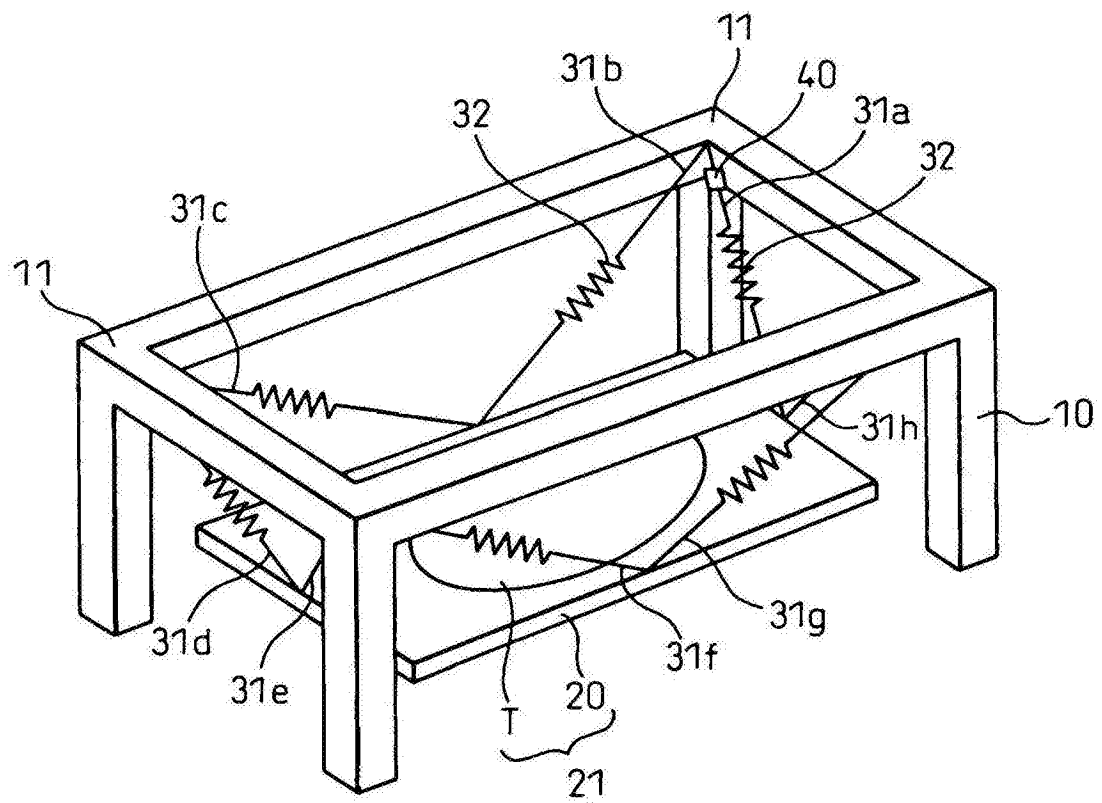


图 2

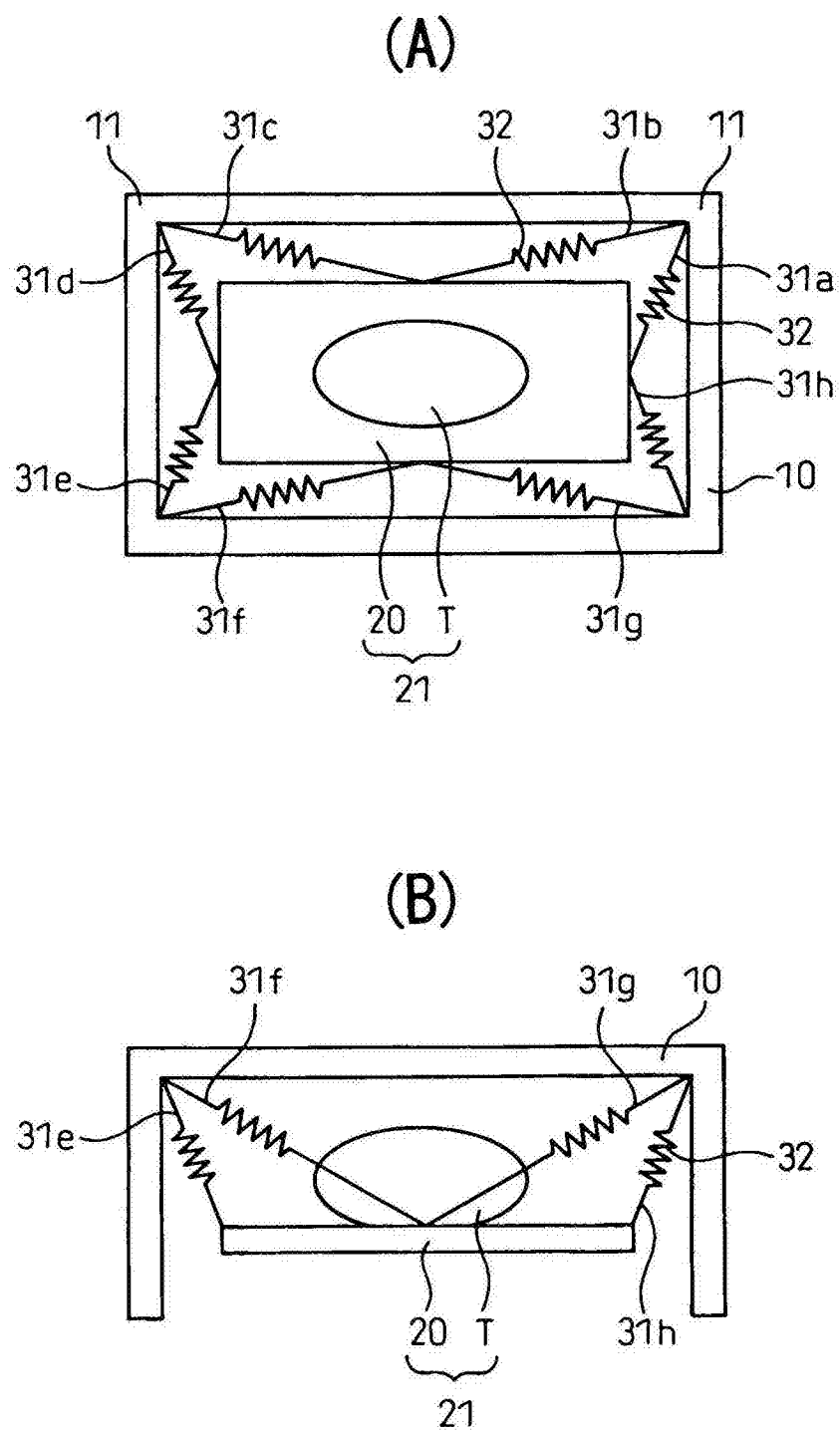


图 3

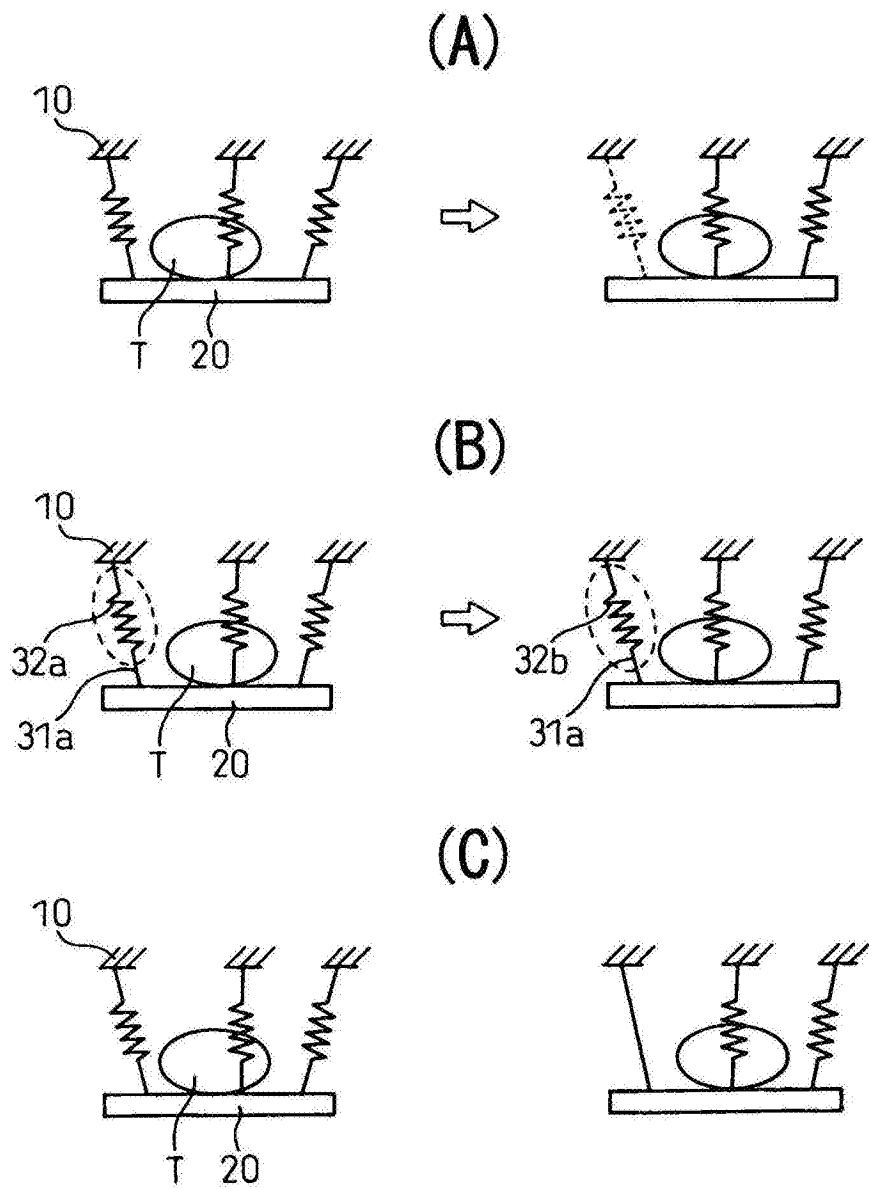


图 4

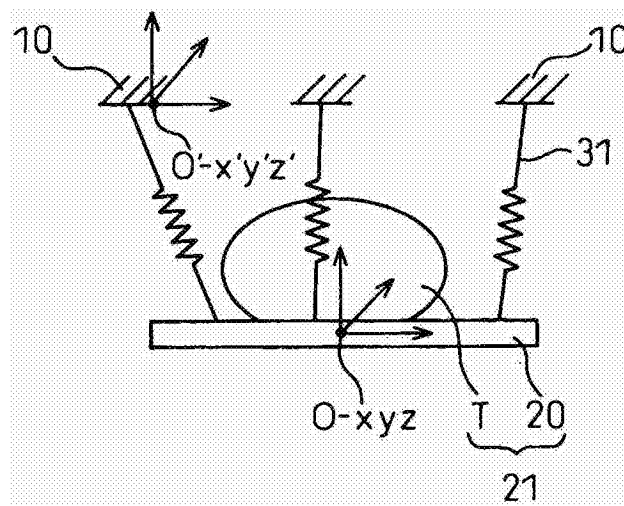


图 5

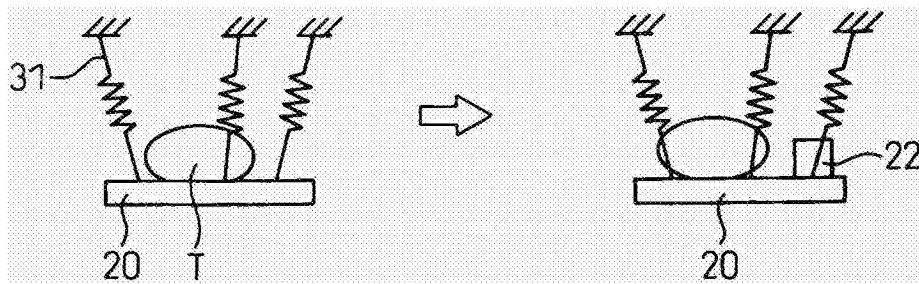


图 6

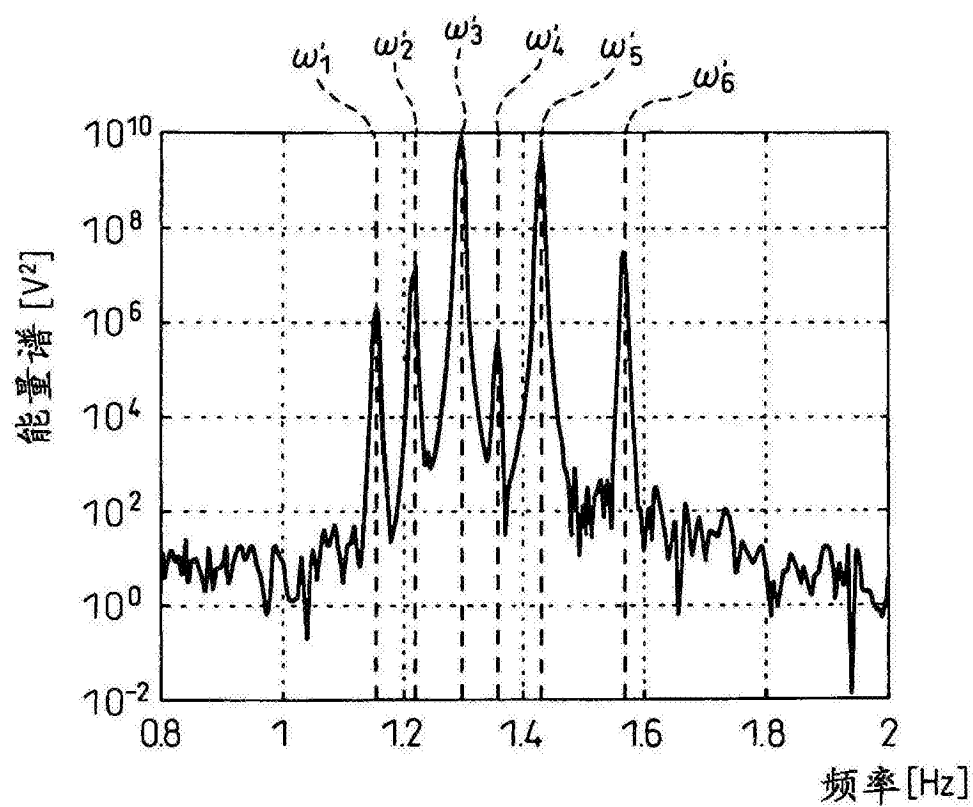


图 7

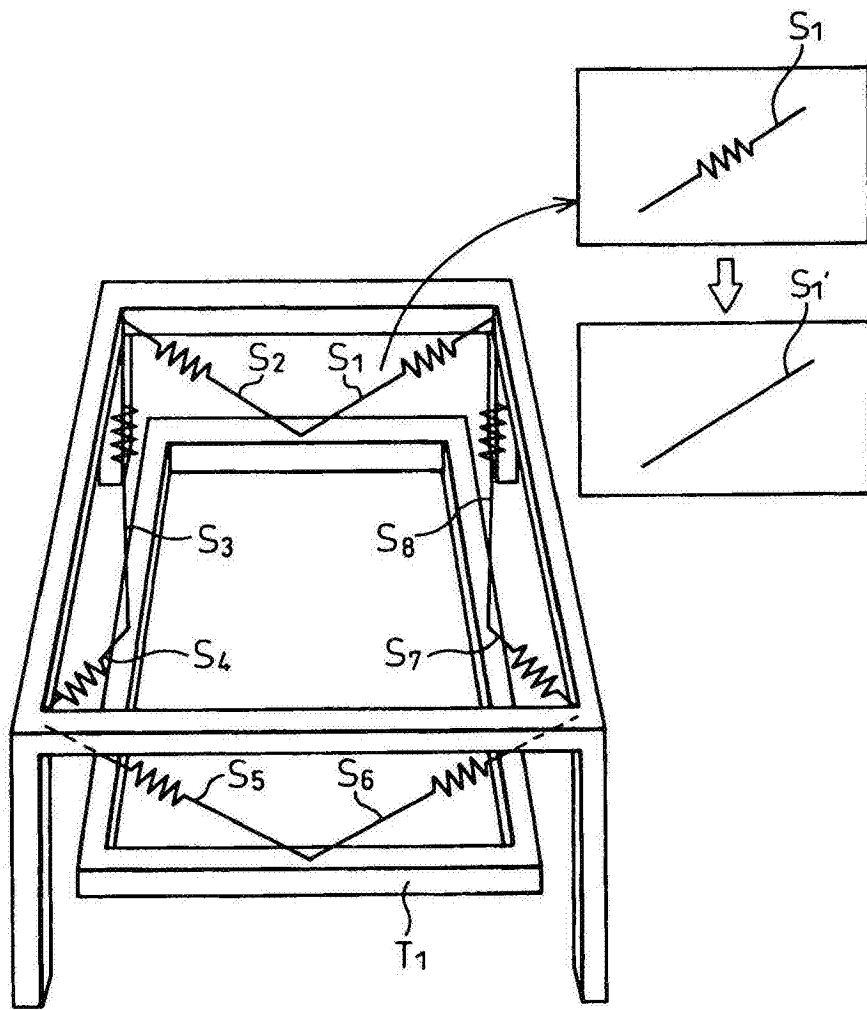


图 8

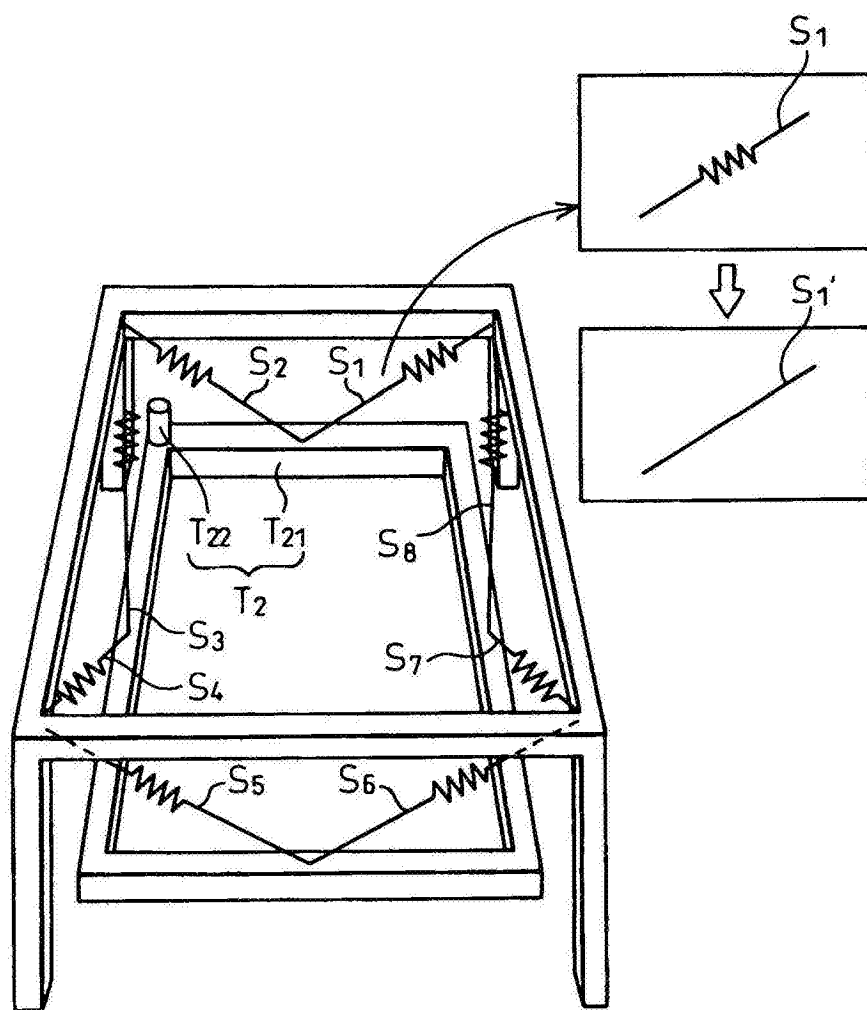


图 9

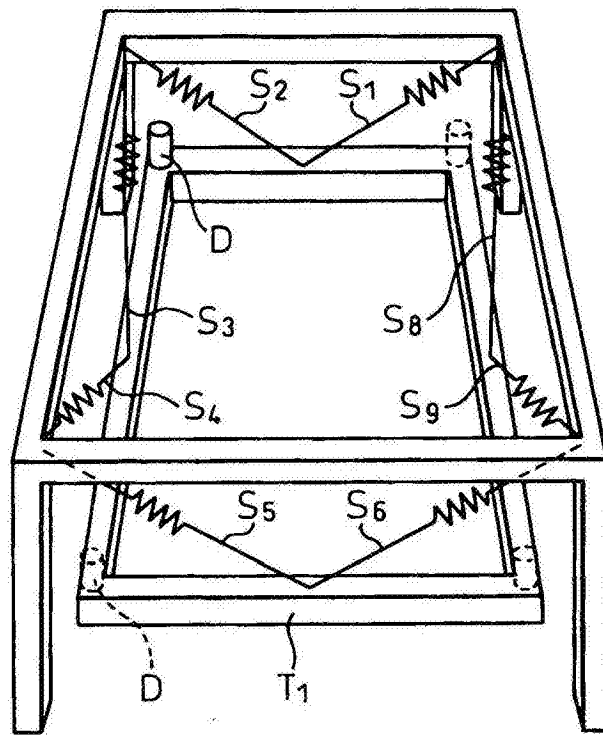


图 10

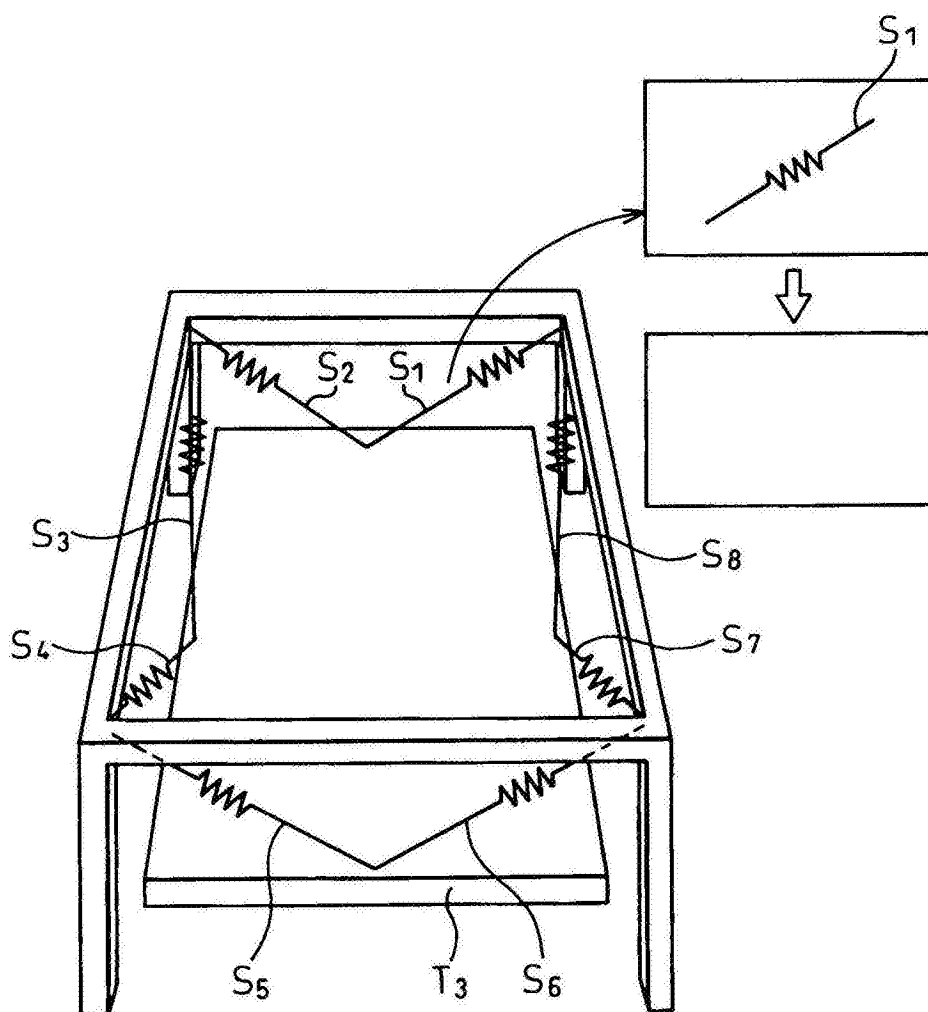


图 11