



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103732895 A

(43) 申请公布日 2014. 04. 16

(21) 申请号 201180072727. 5

G05B 13/00(2006. 01)

(22) 申请日 2011. 08. 09

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2014. 02. 07

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/JP2011/068099 2011. 08. 09

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02013/021453 JA 2013. 02. 14

(71) 申请人 丰田自动车株式会社  
地址 日本爱知县

(72) 发明人 家村晓幸

(74) 专利代理机构 北京市中咨律师事务所  
11247

代理人 段承恩 徐健

(51) Int. Cl.

F02D 45/00(2006. 01)

F02D 21/08(2006. 01)

F02D 23/00(2006. 01)

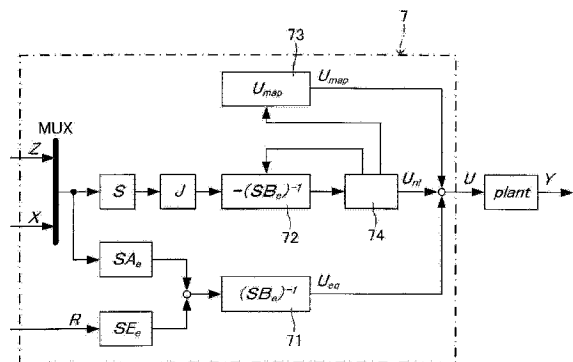
权利要求书1页 说明书11页 附图5页

(54) 发明名称

滑模控制器和内燃机系统控制装置

(57) 摘要

本发明涉及使用自适应滑模控制来对控制对象系统进行控制的滑模控制器。另外,本发明涉及使用自适应滑模控制来控制内燃机系统的内燃机系统控制装置。本发明的特征在于,具备自适应律输入项学习单元,其以将自适应滑模控制中的趋近律输入项的稳定偏差转入自适应律输入项的方式学习自适应律输入项。



1. 一种内燃机系统控制装置,使用自适应滑模控制来控制包括内燃机和附带于该内燃机的装置的内燃机系统,所述内燃机系统控制装置的特征在于,

具备自适应律输入项学习单元,该自适应律输入项学习单元以将所述自适应滑模控制中的趋近律输入项的稳定偏差转入自适应律输入项的方式学习所述自适应律输入项。

2. 根据权利要求1所述的内燃机系统控制装置,其特征在于,

所述自适应律输入项学习单元按所述内燃机系统的每个运转区域学习所述自适应律输入项。

3. 根据权利要求2所述的内燃机系统控制装置,其特征在于,

所述自适应律输入项学习单元,

按表示所述内燃机系统的状态的、与构成所述运转区域的参数不同的多个参数的每一个而具有自适应律输入项学习映射,

通过按每个所述运转区域更新所述自适应律输入项学习映射,学习所述自适应律输入项。

4. 根据权利要求3所述的内燃机系统控制装置,其特征在于,

所述多个参数是分别与多个修正值相对应的参数,所述修正值是对所述内燃机系统的控制目标的修正值,

所述自适应律输入项学习单元根据所述多个修正值之间的大小关系,将所述稳定偏差转入所述自适应律输入项学习映射。

5. 一种滑模控制器,使用自适应滑模控制来控制控制对象系统,所述滑模控制器的特征在于,

具备自适应律输入项学习单元,该自适应律输入项学习单元以将所述自适应滑模控制中的趋近律输入项的稳定偏差转入自适应律输入项的方式学习所述自适应律输入项。

6. 根据权利要求5所述的滑模控制器,其特征在于,

所述自适应律输入项学习单元按所述控制对象系统的每个运转区域,学习所述自适应律输入项。

7. 根据权利要求6所述的滑模控制器,其特征在于,

所述自适应律输入项学习单元,

按表示所述控制对象系统的状态的、与构成所述运转区域的参数不同的多个参数的每一个而具有自适应律输入项学习映射,

通过按每个所述运转区域更新所述自适应律输入项学习映射,学习所述自适应律输入项。

8. 根据权利要求7所述的滑模控制器,其特征在于,

所述多个参数分别是与多个修正值相对应的参数,所述修正值是对所述控制对象系统的控制目标的修正值,

所述自适应律输入项学习单元根据所述多个修正值之间的大小关系,将所述稳定偏差转入所述自适应律输入项学习映射。

## 滑模控制器和内燃机系统控制装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及使用自适应滑模控制对控制对象系统进行控制的滑模控制器。另外，本发明涉及使用自适应滑模控制来控制内燃机系统(包括内燃机及其附带的装置)的内燃机系统控制装置。

### 背景技术

[0002] 对于各种系统而言适用滑模控制(滑动模态控制)的尝试从以往以来广泛进行。滑模控制是指如下这样的可变构造型的反馈控制方法:预先构筑由切换函数表示的超平面(切换超平面),通过趋近律输入使控制对象的状态量在超平面上收敛(趋近模式),进而,在超平面上约束所述状态量的同时通过等价控制输入使其收敛于预定的点(滑动模式)。在此,切换函数是以控制对象的状态量为变量的线性函数。

[0003] 在该滑模控制中,一旦使状态量在超平面上收敛,则以后几乎不会受到干扰等的影响,而能够使状态量稳定地收敛于超平面上的预定的平衡点(收敛点)。但是,在状态量收敛于超平面上之前(即在趋近模式中),会受到干扰等的影响。

[0004] 因此,对于各种系统而言适用自适应滑模控制的尝试也从以往以来广泛进行。自适应滑模控制在进行状态量向超平面的收敛时,除了使用通常的滑模控制的趋近律输入,还使用自适应律输入(依存于切换函数的时间积分的输入)。使用该自适应律输入实质上相当于移动超平面本身。通过使用这样的自适应滑模控制,能够以更高的稳定性实现状态量向目标值的收敛。

[0005] 此外,滑模控制和自适应滑模控制是周知的技术,例如,在野波健藏、田宏奇著作的“滑模控制-非线性鲁棒控制的设计理论-”(株式会社日冕社、1994年)中有详细记载。另外,作为对包括车辆的内燃机系统的控制(例如,空燃比控制、EGR控制、阀门系统控制、制动控制、变速器控制等。)的自适应滑模控制的适用例,例如,参照专利第3261038号公报(日本特开平9-273440号公报)、专利第3261059号公报(日本特开平9-324681号公报)、专利第3819257号公报(日本特开2002-364430号公报)、专利第4145520号公报(日本特开2003-155938号公报)、专利第4263448号公报(日本特开2004-114764号公报)、美国专利第5,845,491号说明书、美国专利第7,813,867号说明书等。

[0006] 现有技术文献

[0007] 专利文献1:专利第3261038号公报(日本特开平9-273440号公报)

[0008] 专利文献2:专利第3261059号公报(日本特开平9-324681号公报)

[0009] 专利文献3:专利第3819257号公报(日本特开2002-364430号公报)

[0010] 专利文献4:专利第4145520号公报(日本特开2003-155938号公报)

[0011] 专利文献5:专利第4263448号公报(日本特开2004-114764号公报)

[0012] 专利文献6:美国专利第5,845,491号说明书

[0013] 专利文献7:美国专利第7,813,867号说明书

## 发明内容

[0014] 在以往的这种装置中,状态量的最终收敛值的因系统个体差异等导致的偏差被自适应律输入项吸收。因此,状态量向超平面上的收敛速度根据每个系统个体而变化。因此,在以往的这种装置中,关于状态量向目标值的跟随性能,有进一步改善的余地。本发明是为了应对所述问题而提出的。

[0015] 本发明的特征在于,具备自适应律输入项学习单元,该自适应律输入项学习单元以将自适应滑模控制中的趋近律输入项的稳定偏差转入自适应律输入项的方式学习所述自适应律输入项。

[0016] 在具备所述结构的本发明的装置中,在因系统个体差异等而在所述趋近律输入项产生了所述稳定偏差的情况下,所述稳定偏差被转入(更换或替换到)所述自适应律输入项。由此,尽可能地抑制了所述趋近律输入项振动地动作,因此,尽可能地抑制了控制对象系统(内燃机系统等)振动地动作。因此,根据本发明,能够得到所述控制对象系统中的控制对象量即状态量(作为内燃机系统的具体例为增压压力等)的向目标值的良好跟随性能。

[0017] 此外,所述自适应律输入项学习单元可以按所述控制对象系统的每个运转区域(作为内燃机系统的具体例为内燃机转速、内燃机负荷等)学习所述自适应律输入项。由此,即使在系统个体差异的影响伴随所述控制对象系统的运转状态的变化而变化这样的情况下,也能够得到所述状态量的向所述目标值的良好跟随性能。

[0018] 具体而言,可以按表示所述控制对象系统的状态的、与构成所述运转区域的参数不同的多个参数(作为内燃机系统的具体例为冷却水温、外部气温等)的每一个而具有自适应律输入项学习映射。在该情况下,通过按每个所述运转区域更新各自的所述自适应律输入项学习映射,进行所述自适应律输入项的学习。

[0019] 进而,在所述多个参数是分别与多个修正值相对应的参数的情况下,所述自适应律输入项学习单元可以根据所述多个修正值之间的大小关系,将所述稳定偏差转入所述自适应律输入项学习映射,所述修正值是对所述控制对象系统的控制目标的修正值。即,作为内燃机系统的具体例,例如为 EGR 率的目标值由冷却水温、外部气温以及外部气压修正的情况(参照日本特开 2000-2122 号公报等),所述自适应律输入项学习单元可以根据目标 EGR 率的冷却水温修正值、外部气温修正值以及外部气压修正值的大小关系(例如与基准状态下的值的差分之间的比),对将所述稳定偏差分别转入基本冷却水温用自适应律输入项学习映射、基本外部气温用自适应律输入项学习映射和基本外部气压用自适应律输入项学习映射的值进行调整(分配)。由此,即使在与设置于所述控制对象系统对应的稳定时的指令状态(指令值)伴随环境条件等的变化而变化这样的情况下,也能够得到所述状态量的向所述目标值的良好跟随性能。

## 附图说明

[0020] 图 1 是表示作为适用了本发明的一个实施方式的控制对象系统的内燃机系统的概略结构的图。

[0021] 图 2 是图 1 所示的作为本发明的一个实施方式的控制单元的框线图。

[0022] 图 3 是用于说明本实施方式的动作的概要的时间图。

[0023] 图 4 是表示通过图 1 和图 2 所示的控制单元执行的处理的一例的流程图。

[0024] 图 5 是表示通过图 1 和图 2 所示的控制单元执行的处理的其他的例的流程图。

### 具体实施方式

[0025] 以下,针对本发明的实施方式,参照附图进行说明。此外,当将能够对本实施方式实施的各种变更(变形例:modification)插入该实施方式的说明中时,并不妨碍一贯的实施方式的说明的理解,因此在末尾汇总记载。

[0026] [结构]

[0027] 图 1 是表示作为适用本发明的一个实施方式的控制对象系统的内燃机系统 1 的概略结构的图。在本实施方式中,内燃机系统 1 具备:内燃机 2、与该内燃机 2 连接的进气系统 3 和排气系统 4、在进气系统 3 与排气系统 4 之间设置的 EGR 系统 5 (EGR 是“Exhaust Gas Recirculation (排气再循环)”的略称。)以及增压器 6。本实施方式的控制单元 7 被设置为控制所述内燃机系统 1 的动作。

[0028] 在进气系统 3 安装有节气门 31、中间冷却器 32 等辅机类、以及用于检测 EGR 率、增压压力(进气管内压力)等的传感器 33、34 等各种传感器类。此外,在排气系统 4 也安装有未图示的排气净化装置(催化剂)等辅机类、传感器类。

[0029] EGR 系统 5 具备:EGR 通路 51、EGR 阀 52 和 EGR 冷却器 53。EGR 通路 51 被设置为对进气系统 3 的与节气门 31 相比更靠近内燃机 2 侧(进气流通方向的下游侧)和排气系统 4 的与后述的涡轮 61 相比更靠近内燃机 2 侧(排气流通方向的上游侧)进行连接。EGR 阀 52 安装在 EGR 通路 51,以对 EGR 通路 51 中的排气的流通状态(从内燃机 2 排出的排气向进气系统 3 的导入量)进行控制。EGR 冷却器 53 安装在 EGR 通路 51,以对在 EGR 通路 51 中流通的排气进行冷却。

[0030] 增压器 6 具备:涡轮 61、喷嘴叶片 62、压缩机 63 和轴 64。涡轮 61 被设置在排气系统 4 的与上述的未图示的排气净化装置相比更靠近内燃机 2 侧(排气流通方向的上游侧)。本实施方式的增压器 6 是所谓的可变喷嘴涡轮增压器,喷嘴叶片 62 设置在与涡轮 61 相对的位置,以使喷射到涡轮 61 的排气的流速可变。压缩机 63 设置在进气系统 3 的与节气门 31 和中间冷却器 32 相比更靠近进气流通方向的上游侧。涡轮 61 与压缩机 63 通过轴 64 而联结。

[0031] 控制单元 7(以下,称为“ECU7”。)是包括处理器(CPU:Central Processing Unit)、RAM(Random Access Memory)、ROM(Read Only Memory)、闪存(可擦写非易失性存储器)、A/D 变换电路、D/A 变换电路等的微型计算机。ECU7 与用于取得 EGR 率、增压压力(进气管内压力)、发动机转速、加速操作量、冷却水温、进气温、外部气温、大气压、等的各种参数的上述的各种传感器类电连接。另外,ECU7 与用于控制内燃机系统 1 的运转状态的节气门 31、EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 等操作部(也能够称为动作部或操作对象。)电连接。

[0032] 本发明的滑模控制器和内燃机系统控制装置的一个实施方式,即 ECU7 通过由 CPU 读出预先存储于 ROM 的程序(program)、表格(映射)等并使 CPU 执行该程序,基于通过上述的各种传感器类取得的各种参数来控制上述的操作部的动作。具体而言,在本实施方式中,ECU7 使用自适应滑模控制,控制 EGR 率和增压压力(进气管内压力)。

[0033] 图 2 是图 1 所示的 ECU7 的框线图。如图 2 所示,ECU7 具备等价控制输入项产生部 71、趋近律输入项产生部 72、自适应律输入项产生部 73 和自适应律输入项学习部 74。

[0034] 等价控制输入项产生部 71 产生应提供给操作部的控制输入  $U$  中的等价控制输入项(也能够称为“线性输入项或线性项”)  $U_{eq}$ 。另外,趋近律输入项产生部 72 产生控制输入  $U$  中的趋近律输入项(也能够称为“非线性输入项或非线性项”)  $U_{nl}$ 。另外,自适应律输入项产生部 73 产生控制输入  $U$  中的自适应律输入项(也能够称为“自适应项”)  $U_{map}$ 。自适应律输入项学习部 74 通过将趋近律输入项  $U_{nl}$  的稳定偏差转入自适应律输入项  $U_{map}$  来进行自适应律输入项  $U_{map}$  的学习。

[0035] [动作的概要]

[0036] 以下,使用图 1 和图 2 并根据需要使用数学式,对本实施方式的 ECU7 的动作的概要进行说明。

[0037] 首先,ECU7 基于通过上述的传感器类取得的各种参数,决定要求燃料喷射量。接着,ECU7 至少基于发动机转速和要求燃料喷射量,设定目标 EGR 率和目标增压压力。在 ECU7 的 ROM 或闪存中预先存储有表示根据发动机转速和要求燃料喷射量而应设定的各目标值的映射数据。因此,ECU7 将发动机转速和要求燃料喷射量作为键来检索映射,取得 EGR 率和增压压力的目标值。

[0038] 然后,ECU7 基于传感器 33、34 输出的信号,取得(检测) EGR 率和增压压力的当前值。然后,ECU7 根据各控制量的当前值与目标值的偏差,对 EGR 阀 52、喷嘴叶片 62、和 / 或节气门 31 的操作量(开度)进行运算,通过将各自的开度对应的驱动信号输入至这些操作部,来控制 EGR 率和增压压力。

[0039] 图 3 是用于说明本实施方式的动作的概要的时间图。在图 3 中,横轴表示时间(经过)。另外,在图 3 中,(1)的实线表示控制对象量(增压压力等)的实际变化的状况,单点划线表示目标值。(2)的实线表示自适应滑模控制的等价控制输入项(线性输入项)  $U_{eq}$  的变化状况,(3)的实线表示趋近律输入项(非线性输入项)  $U_{nl}$  的变化状况,(4)的实线表示自适应律输入项(自适应项)  $U_{map}$  的变化状况。并且,(i)表示自适应律输入项学习前的状况,(ii)表示学习后的状况。此外,虽然针对自适应滑模控制的内容,在本申请提出时就已经周知(例如参照上述的各文献),但是为了慎重起见,其概略内容在后面叙述。

[0040] 如图 3 的(i)所示,趋近律输入项  $U_{nl}$  有时因系统个体差异等而产生稳定偏差(参照图中  $\Delta U_{nl_{ss}}$ )。认为这是因为以下的理由。即,在通常(以往)的自适应滑模控制中,自适应律输入项  $U_{map}$  基于标称模型中的控制对象量的收敛值而设定。因此,控制对象量的最终的收敛值的因系统个体差异等导致的偏差被自适应律输入项  $U_{map}$  吸收。

[0041] 这样,在因系统个体差异等而在趋近律输入项  $U_{nl}$  产生稳定偏差时,控制对象量的向超平面的约束特性也根据系统个体差异等而变化,并且趋近律输入项  $U_{nl}$  振动地动作。其结果,如图 3 中的(i)所示,控制对象量也振动地变化。

[0042] 因此,在本实施方式中,以将趋近律输入项  $U_{nl}$  的稳定偏差  $\Delta U_{nl_{ss}}$  转入(更换或替换到)自适应律输入项  $U_{map}$  的方式学习自适应律输入项  $U_{map}$  (参照图中  $\Delta U_{map}$ )。于是,如图 3 中的(ii)所示,趋近律输入项  $U_{nl}$  的稳定偏差被消除,并且趋近律输入项  $U_{nl}$  的动作特性稳定。由此,能够得到控制对象量的向目标值的稳定的跟随性能。

[0043] 以下,关于 EGR 率和增压压力的自适应滑模控制进行补充记载(如有必要,参照例如,日本特开 2010-229968 号公报、日本特开 2010-229974 号公报、日本特开 2011-111966 号公报等。)

[0044] 在本实施方式中,进行将 EGR 率  $y_1$  和增压压力(进气管内压力) $y_2$  设为控制输出变量(输出矢量  $Y$ )、将 EGR 阀 52 的开度  $u_1$ 、可变涡轮的喷嘴叶片 62 的开度  $u_2$  以及节气门 31 的开度  $u_3$  设为控制输入矢量  $U$  的 3 输入 -2 输出的反馈控制。但是,如下述的状态方程式(数 1)所示,在本实施方式中,设为能够根据输出矢量  $Y$  直接得知状态量矢量  $X$  的构造(即将能够经由传感器 33、34 等各种传感器类检测的量作为直接的控制对象)。由此,不需要状态推定观察器,能够避免伴随使用状态推定观察器时的推定误差而导致的控制性能的降低。状态方程式和输出方程式如以下式(数 1)所示。

[0045] [数 1]

$$[0046] \quad \dot{X} = AX + BU$$

$$[0047] \quad Y=CX$$

[0048] 在上述式中,矩阵  $C$  为已知(在本实施方式中设为单位矩阵)。设备的模型化(确定标称模型)如下这样进行:向 EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 以及节气门 31 输入包括各种频率的  $M$  系列信号来对开度进行操作,观测 EGR 率和增压压力的值。根据此时的输入输出数据,确定状态方程式(数 1)的矩阵  $A$ 、 $B$ 。

[0049] 在此,“标称模型”就本实施方式而言是指,在利用与 EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 以及节气门 31 相关的状态方程式控制这些 EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 以及节气门 31 的动作状态时的体现了 EGR 率和增压压力(进气管内压力)的举动的模型。此外,通过使输入到 EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 以及节气门 31 的  $M$  系列信号彼此不相关,能够制成考虑了各控制量的相互干涉的模型。

[0050] ECU7 的滑模控制器(参照图 2:以下简称为“滑模控制器”)的设计步骤如周知那样包括超平面的设计和用于将状态量约束在超平面的非线性切换输入的设计。当定义对应构成一种形式的伺服系统的当初的状态量矢量  $X$  附加上矢量  $Z$  而得到的新的状态量矢量  $X_e$  时,能够得到下式(数 2)所示的放大系统的状态方程式。在此,矢量  $Z$  是将目标值矢量  $R$  (将 EGR 率的目标值和增压压力的目标值作为要素的矢量)与输出矢量  $Y$  的偏差的积分值作为要素的矢量。状态量  $X_e = [x_{e1} x_{e2} x_{e3} x_{e4}]^T$  包括控制输出  $Y$  与目标值  $R$  的偏差的时间积分  $x_{e1}$ 、 $x_{e2}$  和控制输出  $Y$  本身  $x_{e3}$ 、 $x_{e4}$  作为其成分。状态变量  $x_{e3}$  是 EGR 率  $y_1$  本身,状态变量  $x_{e4}$  是增压压力  $y_2$  本身。

[0051] [数 2]

$$[0052] \quad \dot{X}_e = A_e X + B_e U + E_e R$$

$$[0053] \quad X_e = \begin{bmatrix} Z \\ X \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} 0 & -C \\ 0 & A \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}, E_e = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0054] 考虑稳定余裕,在超平面的设计中使用利用了系统的零点的设计方法。即,设计超平面,以使在上式(数 2)的放大系统产生滑模时的等价控制系统稳定。在由下述式(数 3)定义切换函数  $\sigma$  时,在状态被约束在超平面的情况下, $\sigma = 0$  且下述式(数 4)成立。

[0055] [数 3]

$$[0056] \quad \sigma = SX_e$$

[0057] [数 4]

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= S\dot{X}_e \\ [0058] \quad &= S(A_e X_e + B_e U + E_e R) \\ &= 0 \end{aligned}$$

[0059] 所以,在产生滑模时的等价控制输入(线性输入)成为下式(数 5)。

[0060] [数 5]

$$[0061] \quad U_{eq} = -(SB_e)^{-1}(SA_e X_e + SE_e R)$$

[0062] 在将上式(数 5)的等价控制输入代入放大系统的状态方程式(数 2)时,成为下式(数 6)的等价控制系统。

[0063] [数 6]

[0064]

$$\dot{X}_e = (A_e - B_e(SB_e)^{-1}SA_e)X_e + (E_e - B_e(SB_e)^{-1}SE_e)R$$

[0065] 由于以使该等价控制系统稳定的方式设计超平面等价于对无视目标值 R 得到的系统进行设计,所以下式(数 7)成立。

[0066] [数 7]

$$[0067] \quad \dot{X}_e = (A_e - B_e(SB_e)^{-1}SA_e)X_e$$

[0068] 对上式(数 7)的系统考虑稳定度  $\varepsilon$ , 使用最佳控制理论求出反馈增益,在将该增益设为超平面时,成为下式(数 8)。

[0069] [数 8]

$$[0070] \quad S = B_e^T P_s$$

[0071] 矩阵  $P_s$  是下述的黎卡提方程式(数 9)的正定解。

[0072] [数 9]

$$[0073] \quad P_s A_e' + A_e' {}^T R_s - P_s B_e R_s^{-1} B_e^T P_s + Q_s = 0$$

$$[0074] \quad A_e' {}^T = A_e + \varepsilon I$$

$$[0075] \quad Q_s = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4]$$

$$[0076] \quad R_s = \text{diag}[r_1, r_2, r_3]$$

[0077] 在黎卡提方程式(数 9)中,  $Q_s$  是控制目的的加权矩阵,并且是非负定的对称矩阵。 $q_1$ 、 $q_2$  是相对于偏差的积分  $Z$  的加权,由控制系统的频率响应的速度差异而决定。 $q_3$ 、 $q_4$  是相对于输出  $Y$  的加权,由增益的大小的差异而决定。 $R_s$  是控制输入的加权矩阵,并且是正定对称矩阵。 $\varepsilon$  是稳定余裕系数,被指定为  $\varepsilon \geq 0$ 。

[0078] 此外,也可以取代上述式(数 8)、(数 9)而使用以下所示的离散系统的超平面构筑式(数 10)和代数黎卡提方程式(数 11)。

[0079] [数 10]

$$[0080] \quad S = (R_s + B_e^T P_s B_e) B_e^T P_s A_e$$

[0081] [数 11]

$$[0082] \quad A_e' {}^T P_s A_e' - P_s - A_e' {}^T P_s B_e (B_e^T P_s B_e + R_s)^{-1} B_e^T P_s A_e' + Q_s = 0$$

[0083] 在用于将状态量约束在超平面的输入的设计中使用最终滑模法。在此,将控制输入  $U$  作为等价控制输入(线性输入)  $U_{eq}$  与新的输入即趋近律输入(非线性输入)  $U_{nl}$  之和,由



下式(数 12)表示。

[0084] [数 12]

$$\begin{aligned} [0085] \quad U &= U_{eq} + U_{nl} \\ &= -(SB_e)^{-1}(SA_e X_e + SE_e R) + U_{nl} \end{aligned}$$

[0086] 由于想使切换函数  $\sigma$  稳定,所以如下式(数 13)那样选择关于  $\sigma$  的李雅普诺夫函数,若对其进行微分则成为下述式(数 14)。

[0087] [数 13]

$$[0088] \quad V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma$$

[0089] [数 14]

$$\begin{aligned} [0090] \quad \dot{V} &= \sigma^T \dot{\sigma} \\ &= \sigma^T S(A_e X_e + B_e U + E_e R) \end{aligned}$$

[0091] 若将式(数 12)代入式(数 14),则成为下式(数 15)。

[0092] [数 15]

$$[0093] \quad \dot{V} = \sigma^T (SB_e) U_{nl}$$

[0094] 若将趋近律输入  $U_{nl}$  设为下式(数 16),则李雅普诺夫函数的微分成为下述式(数 17)。

[0095] [数 16]

$$[0096] \quad U_{nl} = -(SB_e)^{-1} k \frac{\sigma}{\|\sigma\|}$$

[0097] [数 17]

$$[0098] \quad \dot{V} = -k \frac{\sigma^T \sigma}{\|\sigma\|}$$

[0099] 因此,若将切换增益  $k$  设为正,则能够将李雅普诺夫函数的微分值设为负,从而保证滑动模式的稳定性。

[0100] 然后,若由下式(数 18)置换式(数 16)中的切换增益  $k$ ,则趋近律输入  $U_{nl}$  成为下述式(数 19)。

[0101] [数 18]

$$[0102] \quad k = J \|\sigma\|$$

[0103] [数 19]

$$[0104] \quad U_{nl} = -(SB_e)^{-1} J \sigma$$

[0105] 非线性增益  $J$  如下式(数 20) 所示,是在矢量因数  $J_k$  上乘以标量因数  $k$  得到的增益。

[0106] [数 20]

[0107]  $J=kJ_k$

[0108] 式(数 20) 中的矢量  $J_k=[j_{k1}, j_{k2}, j_{k3}]^T$  基于 EGR 阀 52 的开度  $u_1$ 、喷嘴叶片 62 的开度  $u_2$  以及节气门 31 的开度  $u_3$  的各个开度与 EGR 率  $y_1$  以及增压压力  $y_2$  各自之间的输入输出特性而决定。若观测各控制输出  $y_1$ 、 $y_2$  相对于各控制输入  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  的阶跃响应,则能够知道在 EGR 阀 52 的开度  $u_1$ 、喷嘴叶片 62 的开度  $u_2$  以及节气门 31 的开度  $u_3$  发生了单位量(典型而言,开度值 1%) 变化时的 EGR 率  $y_1$  和增压压力  $y_2$  的变化量。

[0109] 优选  $J_k$  被确定为使阶跃响应中的相对于 EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 以及节气门 31 的控制输出  $y_1$ 、 $y_2$  的贡献度均等化。即,由于控制输出  $y_1$ 、 $y_2$  相对于 EGR 阀 52 的开度变化的灵敏度比较低(即使操作 EGR 阀 52,控制输出  $y_1$ 、 $y_2$  也不太变化),所以为了算出与 EGR 阀 52 相关的趋近律输入值  $u_{nl1}$  而应乘的增益  $j_{k1}$  设为比较大的值。相反地,由于控制输出  $y_1$ 、 $y_2$  相对于喷嘴叶片 62 的开度变化的灵敏度比较高(通过操作喷嘴叶片 62 而使控制输出  $y_1$ 、 $y_2$  变化不少),所以为算出与喷嘴叶片 62 相关的趋近律输入值  $u_{nl2}$  而应乘的增益  $j_{k2}$  设为比较小的值。

[0110] 矢量  $J_k$  决定为例如  $J_k=[2.18, 0.68, 1]^T$ 。该例示值  $J_k$  意味着认为:在阶跃响应中在使 EGR 阀 52 的开度  $u_1$  变化 2.18% 时产生的控制输入  $y_1$ 、 $y_2$  的变化量、在使喷嘴叶片 62 的开度  $u_2$  变化 0.68% 时产生的控制输入  $y_1$ 、 $y_2$  的变化量、和在使节气门 31 的开度  $u_3$  变化 1% 时产生的控制输入  $y_1$ 、 $y_2$  的变化量大致相等。

[0111] 另外,式(数 20) 中的标量  $k$  是拟合系数,并且通过滑模控制器设计时的拟合而适当决定。

[0112] 因此,滑模控制器所算出的控制输入  $U$  成为下式(数 21)。

[0113] [数 21]

[0114]  $U=-(SB_e)^{-1}(SA_e X_e+SE_e R+J \sigma)$

[0115] 但是,在本实施方式这样的 3 输入 -2 输出的系统中,由于  $\det(SB_e)=0$  成立,所以矩阵  $(SB_e)$  不是正则矩阵。因此,逆矩阵  $(SB_e)^{-1}$  作为广义逆矩阵而计算。广义逆矩阵例如使用穆尔 - 彭罗斯型的逆矩阵  $(SB_e)^\dagger$ 。

[0116] 进而,对作为等价控制输入  $U_{eq}$  与趋近律输入  $U_{nl}$  之和的控制输入  $U$  (数 25) 考虑修正项  $U_{map}$ 。在滑模控制器的设计中,如上所述,确定特定的运转区域、即某特定的发动机转速和要求燃料喷射量下的内燃机系统 1 的标称模型(矩阵 A、B),得到上述的状态方程式(数 2),导出切换超平面  $S$ 。在此,标称模型与实际设备之间的模型化误差(摄动)在离开标称点的区域(低转速低负荷域或高转速高负荷域等)中扩大。修正项  $U_{map}$  是用于缩小该模型化误差使趋近律输入(非线性输入)  $U_{nl}$  迅速向 0 收敛的自适应律输入项(映射项)。

[0117]  $U_{map}$  映射的初始值(进行作为本发明的特征的上述的学习之前的值)如以下那样制成:首先,按各运转区域[发动机转速,要求燃料喷射量]的每一个,确定与该运转区域相适应(或代表性的)目标 EGR 率和目标增压压力,对在实机的内燃机系统 1 实现该目标的、稳定状态下的各操作部(EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 以及节气门 31)的操作量  $U_{base}$  进行计测。与此同时,将同一目标提供给滑模控制器,运算无偏差的稳定状态下的线性输入  $U_{eq}$ 。若从实机下

的各操作部的操作量(开度)的实测值  $U_{base}$  减去由滑模控制器产生的线性输入的算出值  $U_{eq}$ , 则能够得到与各个运转区域[发动机转速, 要求燃料喷射量]对应的映射项  $U_{map}=U_{base}-U_{eq}$ 。

[0118] 在 ECU7 的闪存中预先存储有表示根据发动机转速和要求喷射量而应设定的自适应律输入项  $U_{map}$  的映射数据。ECU7 通过将发动机转速和要求喷射量作为键检索映射而得知自适应律输入项  $U_{map}$ , 对滑模控制器算出的控制输入  $U$ (等价控制输入  $U_{eq}$  和趋近律输入  $U_{nl}$ ) 加上该值  $U_{map}$ 。最终, 提供给各操作部(EGR 阀 52、喷嘴叶片 62 以及节气门 31) 的控制输入  $U$  成为在式(数 21)上追加了自适应律输入项  $U_{map}$  得到的下式(数 22)。

[0119] [数 22]

$$[0120] \quad U = -(SB_e)^{-1} (SA_e X_e + SE_e R + J \sigma) + U_{map}$$

[0121] [动作的具体例]

[0122] 图 4 是表示由图 1 和图 2 所示的控制单元 7 执行的处理的一例的流程图。以下, 针对本实施方式的自适应律输入项(自适应项)  $U_{map}$  的学习处理的一个具体例, 使用流程图进行说明。此外, 在图 4 的流程图中, 将“步骤”略记为“S”(在后述的变形例的图 5 中也同样)。

[0123] ECU7 所具备的 CPU (以下, 简称为“CPU”。) 每经过预定时间反复启动图 4 所示的自适应项学习处理程序 400。在该程序 400 启动时, 首先, CPU 在步骤 410 中, 基于上述的各种参数、各操作部的操作量的变化量以及状态量相对于目标值的收敛度来判定当前的运转状态是否为稳定状态。在当前的运转状态不为稳定状态的情况下(步骤 410=否), 跳过步骤 420 以后的处理, 暂时结束本程序。因而, 在以下的说明中, 当前的运转状态为稳定状态(步骤 410=是)。

[0124] 接着, 处理前进至步骤 420, CPU 判定趋近律输入项(趋近项)  $U_{nl}$  的值是否已稳定(即变动幅度是否处于预定范围内)。在趋近律输入项  $U_{nl}$  的值已稳定的情况下(步骤 420=是), 处理前进至步骤 430 以后, 另一方面, 在趋近律输入项  $U_{nl}$  的值不稳定的情况下(步骤 420=否), 跳过步骤 430 以后的处理(即本次跳过自适应律输入项  $U_{map}$  的学习), 暂时结束本程序。

[0125] 在处理前进至步骤 430 时, CPU 判定在趋近律输入项  $U_{nl}$  是否产生了稳定偏差(参照图 3 的  $\Delta U_{nl_{ss}}$ )。在趋近律输入项  $U_{nl}$  产生了稳定偏差的情况下(步骤 430=是), 处理前进至步骤 440 和 450, 在进行与运转区域对应的自适应律输入项  $U_{map}$  的学习之后, 暂时结束本程序。该学习时, 在步骤 440 中, CPU 对当前的运转区域[发动机转速, 要求燃料喷射量]进行判定。然后, 在步骤 450 中, CPU 对自适应律输入项  $U_{map}$  的映射中的与当前的运转区域对应的值进行更新。另一方面, 在趋近律输入项  $U_{nl}$  没有产生稳定偏差的情况下(步骤 430=否), 跳过步骤 440 和 450 的处理(即本次不进行自适应律输入项  $U_{map}$  的映射中的与当前的运转区域对应的值的更新), 暂时结束本程序。

[0126] [变形例的例示列举]

[0127] 此外, 上述的实施方式只不过仅例示了申请人在本申请提出时暂且认为最适合的本发明的代表的实施方式。因而, 本发明最初就不限定于上述的实施方式。因此, 在不变更本发明的本质部分的范围内, 理应能够对上述的实施方式实施各种变形。

[0128] 以下, 例示几个代表的变形例。但是, 自不必说, 作为变形例, 并不限定于以下所列举的变形例。另外, 多个变形例在技术上没有矛盾的范围内能够适当组合适用。

[0129] 本发明(特别是构成用于解决本发明的问题的手段的各结构要素中的表现为作用性或功能性的要素)并不基于上述的实施方式、下述变形例的记载而被限定性解释。这样的限定性解释不当地妨害了(特别是在先申请原则下急于申请的)申请人的利益,相反地,使模仿者不当获利,且不被允许。

[0130] 本发明并不限定于在上述的实施方式中所公开的具体的装置结构。即,本发明的适用对象并不限定于内燃机系统。具体而言,例如,对于将本发明适用于车辆的情况,不具备内燃机的车辆(燃料电池车、电动汽车等)的制动控制等,本发明能够良好地适用。

[0131] 另外,在将本发明适用于内燃机系统(包括除了内燃机以外还具备了马达等驱动源的所谓的“混合动力车辆”。)的情况下,在具备了其他任意类型的内燃机例如汽油发动机、柴油发动机、甲醇发动机、生物乙醇发动机的车辆中,本发明也能够良好地适用。气缸数、气缸排列方式(串联、V型、水平相对)、燃料供给方式、点火方式、增压方式也没有特别限定。

[0132] 本发明并不限定于上述的实施方式所公开的具体的处理方式。例如,在上述的具体例中,作为规定运转区域的内燃机负荷,可以取代要求燃料喷射量而使用加速操作量和/或吸入空气流量等。

[0133] 作为将趋近律输入项  $U_{nl}$  的稳定偏差  $\Delta U_{nl\_ss}$  转入自适应律输入项  $U_{map}$  的方法,除了将产生的稳定偏差  $\Delta U_{nl\_ss}$  一次转入自适应律输入项  $U_{map}$  的方法以外,还能够使用一阶滞后(一次なまし)的方法等任意方法。

[0134] 另外,在实际的内燃机系统 1 的控制中,即使运转区域[发动机转速,要求燃料喷射量]相同,也可能发生应实现的目标值(目标 EGR 率、目标增压压力)不同的情况。因此,在实际的控制中的目标与映射制成时所确定的目标不同的情况下,认为最适合的自适应律输入项  $U_{map}$  也会变化。因此,更优选在参照映射而取得的自适应律输入项  $U_{map}$  上进一步加上环境修正。环境修正是根据对目标值的基本值进行修正的参数(冷却水温、进气温、外部气温、大气压等)来修正自适应律输入项  $U_{map}$  的修正。

[0135] 具体而言,例如,对于从基于预定的标准的环境状态(以下,称为“基准状态”。)而制成的映射读出的自适应律输入项  $U_{map}$ ,乘以上述的参数的修正系数(例如目标 EGR 率修正系数)得到的值,能够用作修正后的自适应律输入项  $U_{map}$ 。此时,上述的修正系数可以全部用于乘法运算,也可以仅使用代表值(最大值或最小值)。

[0136] 另外,按这些参数的每一个准备自适应律输入项  $U_{map}$  的映射,将趋近律输入项  $U_{nl}$  的稳定偏差  $\Delta U_{nl\_ss}$  转入各自的映射的程度可以根据修正系数之比来进行适当调整(转入量根据修正系数之比而分配)。在该情况下,具体而言,例如,在相对于目标 EGR 率的冷却水温修正值为 0.4、外部气温修正值为 0.8、外部气压修正值为 0.9 的情况下,按与基准状态(1.0)的差之间的比即  $(1-0.4):(1-0.8):(1-0.9)=6:2:1$  的比例,将趋近律输入项  $U_{nl}$  的稳定偏差  $\Delta U_{nl\_ss}$  转入基本冷却水温用自适应律输入项学习映射、基本外部气温用自适应律输入项学习映射和基本外部气压用自适应律输入项学习映射。由此,能够得到状态量的向目标值的良好跟随性能。

[0137] 图 5 是与所述变形例对应的流程图。本变形例的程序 500 的步骤 510 ~ 530 与上述的具体例的程序 400 中的步骤 410 ~ 440 同样。即,在当前的运转状态为稳定状态(步骤 510=是)、趋近律输入项  $U_{nl}$  的值稳定(步骤 520=是)、且在趋近律输入项  $U_{nl}$  产生了稳定偏差

的情况下(步骤 530= 是),处理前进至步骤 540 以后,与冷却水温( $T_w$ )、外部气温( $T_{air}$ )以及外部气压( $P_a$ )对应而设置的自适应律输入项映射  $U_{map\_Tw}$ 、 $U_{map\_Tair}$  以及  $U_{map\_Pa}$  的学习分别与运转区域[发动机转速,要求燃料喷射量]对应进行。

[0138] 具体而言,首先,CPU 在步骤 540 中对当前的运转区域[发动机转速,要求燃料喷射量]进行判定。接着,CPU 在步骤 545 中,对基准状态下的全部的运转区域中自适应律输入项映射是否学习结束进行判定。在学习未完成的情况下(步骤 545= 否),跳过之后的处理(即本次跳过学习),本程序暂时结束。另一方面,在基准状态下的全部的运转区域中自适应律输入项映射都结束学习的情况下(步骤 545= 是),处理前进至步骤 547。

[0139] 在步骤 547 中,用于将趋近律输入项  $U_{nl}$  的稳定偏差  $\Delta U_{nl\_ss}$  转入自适应律输入项映射  $U_{map\_Tw}$ 、 $U_{map\_Tair}$  以及  $U_{map\_Pa}$  的学习值  $\Delta U_{map\_Tw}$ 、 $\Delta U_{map\_Tair}$  以及  $\Delta U_{map\_Pa}$  根据目标 EGR 率的修正系数  $K_{Tw}$ 、 $K_{Tair}$  以及  $K_{Pa}$  而分配。即,例如,在相对于目标 EGR 率的冷却水温修正系数  $K_{Tw}$  为 0.4、外部气温修正系数  $K_{Tair}$  为 0.8、外部气压修正系数  $K_{Pa}$  为 0.9 的情况下,设定学习值  $\Delta U_{map\_Tw}$ 、 $\Delta U_{map\_Tair}$  以及  $\Delta U_{map\_Pa}$ ,以使得  $\Delta U_{map\_Tw} : \Delta U_{map\_Tair} : \Delta U_{map\_Pa} = (1-0.4) : (1-0.8) : (1-0.9) = 6:2:1$ 。然后,在步骤 547 中,自适应律输入项映射  $U_{map\_Tw}$ 、 $U_{map\_Tair}$  以及  $U_{map\_Pa}$  中的学习值由  $\Delta U_{map\_Tw}$ 、 $\Delta U_{map\_Tair}$  以及  $\Delta U_{map\_Pa}$  进行更新,本程序暂时结束。

[0140] 此外,在上述的变形例中,能够省略步骤 545。另外,作为修正值,除了 EGR 修正值以外,还能够使用增压压力修正值(参照日本特开 2005-248910 号公报等)。

[0141] 针对其他的特别是没有言及的变形例,在本发明不变更本质部分的范围内,当然也包含在本发明的范围内。

[0142] 另外,构成用于解决本发明的问题的手段的各要素中的表现为作用性或功能性的要素,除了在上述的实施方式、变形例中公开的具体的构造以外,还包括能够实现该作用或功能的任何构造。进而,针对在本说明书中引用公报编号、文献名的各文献,在技术上不矛盾的范围内,其记载内容(包括说明书和附图)能够被适当引用作为本说明书的一部分。

1

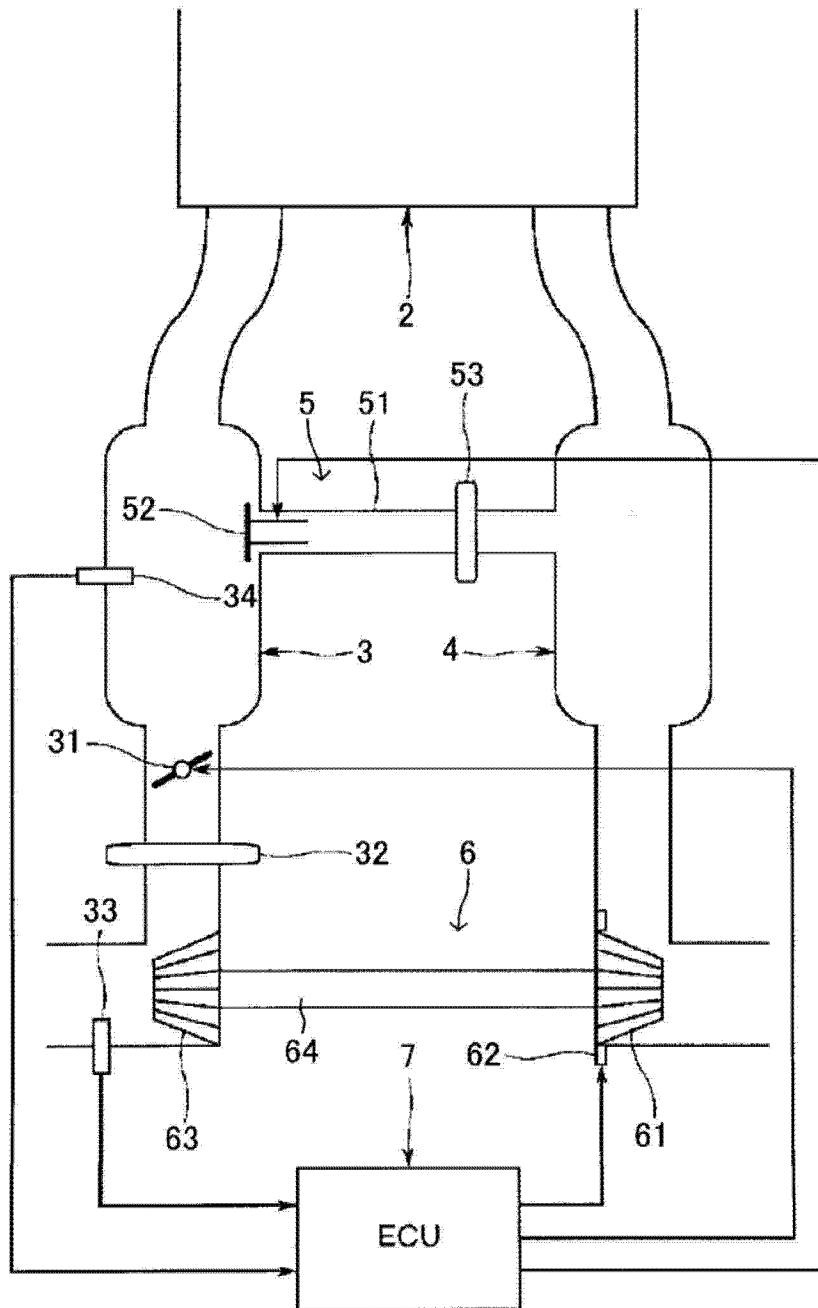


图 1

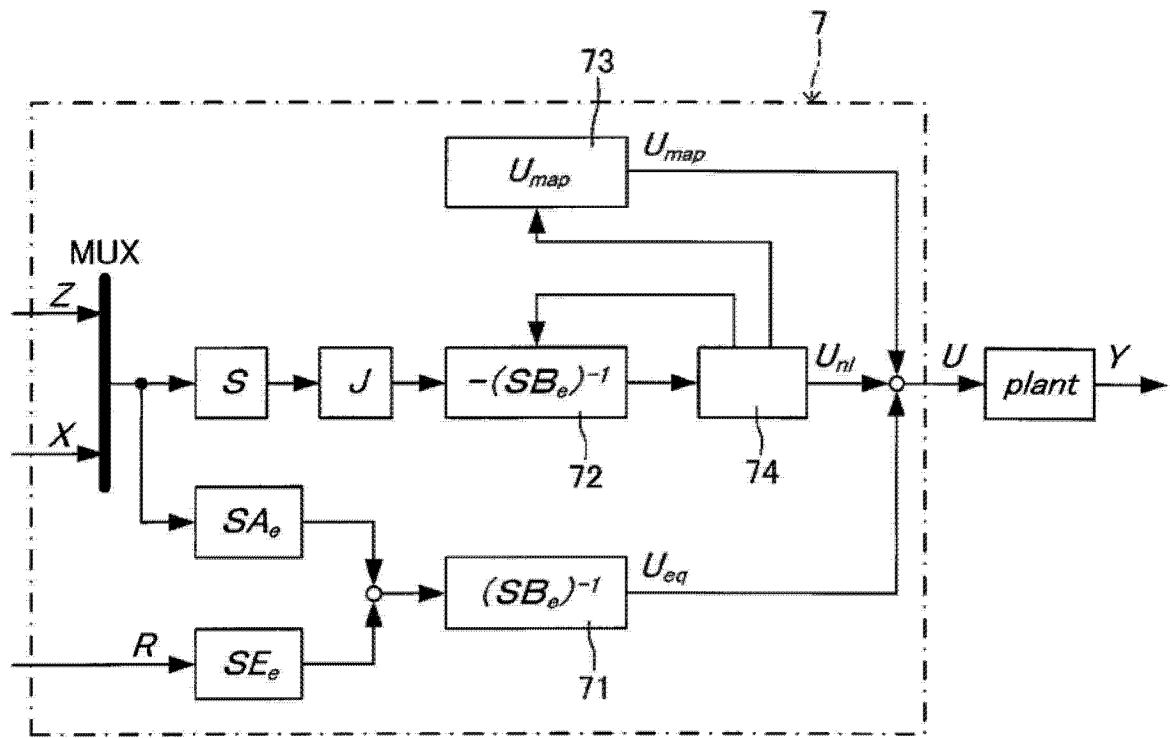


图 2

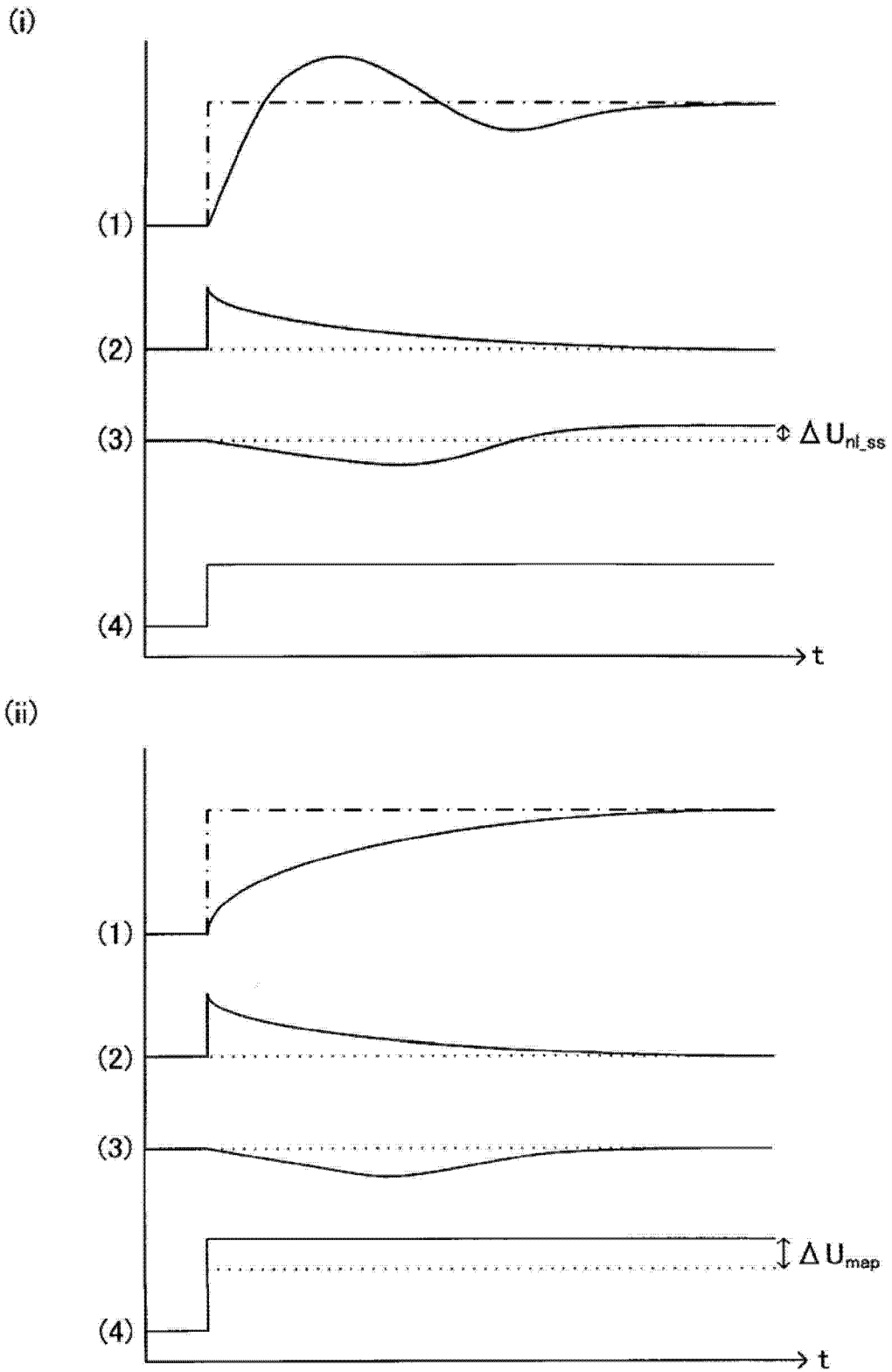


图 3



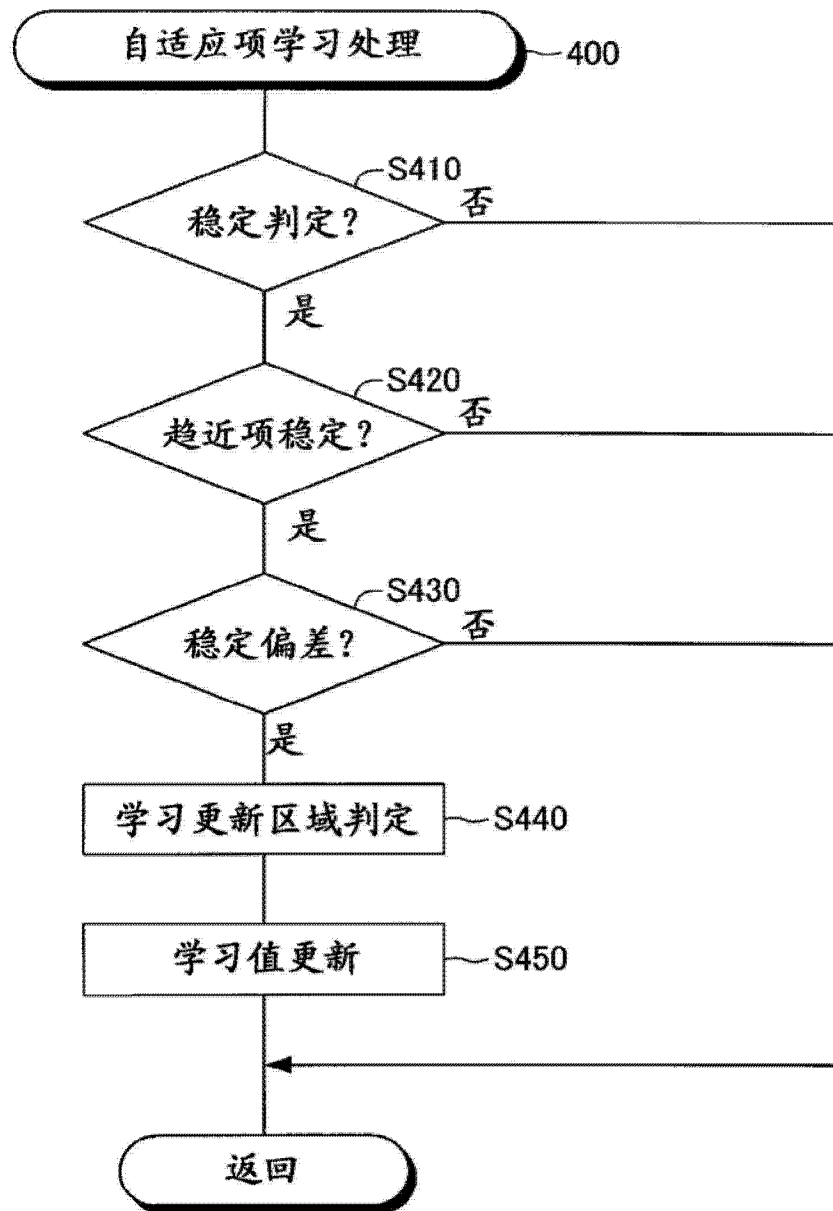


图 4

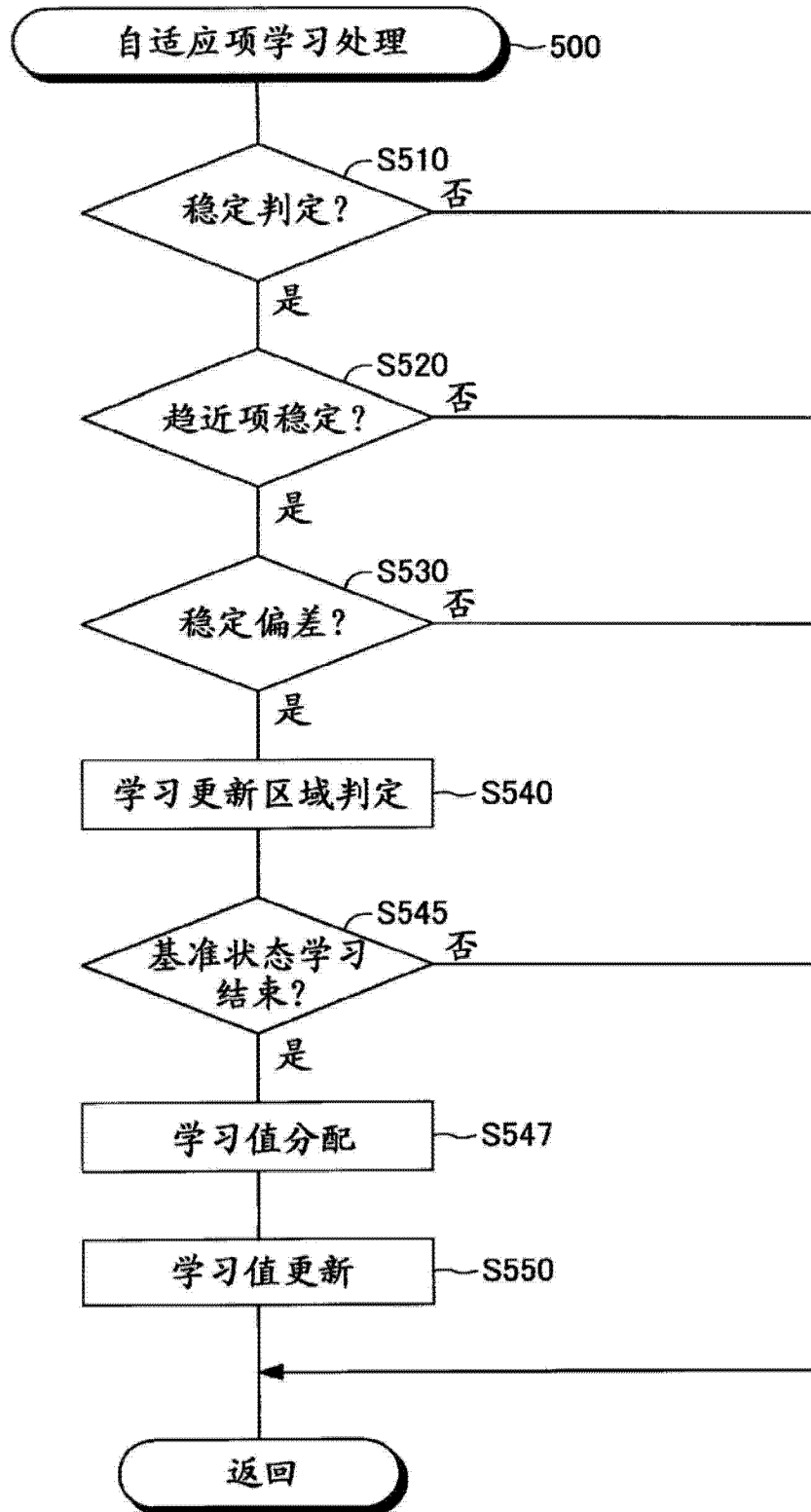


图 5