智能会议室系统
——形式语言与自动机课程大作业

张煌昭 † 信息科学技术学院

摘要—物联网（IoT）技术目前已经逐步进入人们的生活之中，设备通过互联的方式进行自动调控，创造宜居、舒适、方便的生活和工作环境。本次大作业，我们设想了一个基于 IoT 应用系统的智能会议室的场景，对会议室内进行自动的调温和调光。此外，我们在 UPPAAL 工具上对该系统进行了建模，并对该系统进行了性质验证。该智能会议室系统通过了所有安全性和时间性质的验证。

I. 系统的非形式化描述

我们假设存在这样的一个基于 IoT 应用系统的智能会议室系统，其中安装有灯、电动窗帘、空调、投影仪灯设备，室内还安装有光强传感器和温度传感器用于监测室内的光强和温度，设备和传感器在控制系统的控制下对会议流程和室内环境进行控制；此外，系统支持手动模式，可以通过开关直接控制所有设备。系统需要提供的服务如下：

1) 会议系统。在开始会议时，系统首先自动关闭窗帘和灯，之后打开投影仪；会议进行的过程中，需要保证投影仪打开，并且保证投影仪和窗帘、投影仪和灯不能同时打开；会议结束后，投影仪关闭，灯和窗帘根据情况进行自动调节。

2) 温度控制。系统根据温度控制器采集到的温度信号（过冷、过热或适宜）控制空调系统（制热、制冷或关闭），温度传感器的采样间隔不大于一分钟。在接收到传感器信号后，空调的响应时间需要少于 5 秒。

3) 光强控制。光强控制系统只会在没有会议进行时启动，系统每分钟采样一次光强信号（强光、柔光或黑暗）。当光强过强时，窗帘自动拉上，灯自动关闭；在柔光时，可以拉开窗帘并关灯或合上窗帘并开灯，为了节能减排，规定拉开窗帘并关灯；在黑暗情况下，无需考虑窗帘直接自动开灯。在接收到传感器信号后，灯和窗帘的响应时间需要少于 5 秒。

4) 手动模式。手动模式下，所有自动控制系统全部关闭，用户可以通过开关来直接控制所有设备，为了保证系统安全性，在手动控制的过程中，投影仪和窗帘、投影仪和灯不能同时打开必须被保证。用户可以通过开关来切换手动模式和自动模式。

结合上述要求，可以总结出系统需要满足如下性质：

- 系统内各个组件不发生死锁；
- 投影仪和窗帘、投影仪和灯不会同时打开；
- 温度传感器和光强传感器采样间隔时间小于 60s；
- 接收到温度信号后，空调在 5s 内响应；
- 接收到光强信号后，窗帘和灯在 20s 内响应。

II. 系统的形式化描述

我们设计的智能会议室系统中的实体如表I中列出，包括 IoT 设备、开关和控制器三类。与第I节不同的是，我们的设计中加入了重置器，用于在模式切换时对系统状态进行重置；相应的，设计中加入了重置按钮，用于手动的对系统进行重置。

各个设备、传感器和中央控制器的部分状态在表II中列出，由于 UPPAAL 的软件限制，在实现的过程中需要通过加入很多没有时延的 Commited 状态来进行同步。状态转移以及信号等将在第III节进行详细说明。

类型	实体	标识符	类型	实体	标识符
设备	灯	Lamp	开关	灯的开关	setLamp
	窗帘	Curtain		窗帘开关	setCurtain
	空调	AC		空调遥控器	setAC
	投影仪	Projector		投影仪开关	setProjector
控制器	中央控制器	Controller		会议开关	setConf
	重置器	Reset		模式开关	setAuto
传感器	光强传感器	envLight		重置按钮	setReset
	温度传感器	envTemp			

表 I
系统中的实体

† 学号：1901111303 邮箱：zhang_hz@pku.edu.cn

实体	状态及含义	初始状态
Lamp	on-打开，off-关闭	on
Curtain	open-打开，close-关闭	open
Projector	on-打开，off-关闭	off
AC	off-关闭，warm-制热，cool-制冷	off
envLight	wait-等待，check-采样	wait
envTemp	wait-等待，check-采样	wait
Controller	auto-自动，dark-黑暗，subdued-柔光，strong-强光，manual-手动，high-过热，low-过冷，comfortable-适宜	auto

表 II
系统中的各设备的状态

属性	类型	标识符	值域及含义
光强	int	envLight	0-黑暗，1-柔光，2-强光
温度	int	envTemperature	0-适宜，1-过冷，2-过热
系统模式	int	autoMode	0-手动，1-自动
灯是否打开	int	lampOn	0-关闭，1-打开
窗帘是否拉开	int	curtainOpen	0-合上，1-拉开
空调模式	int	acMode	0-关闭，1-制热，2-制冷
投影仪是否打开	int	projectorOn	0-关闭，1-打开
会议是否开启	int	confOn	0-关闭，1-开启
光强传感器时钟	clock	lightSenserClock	光强传感器采样间隔
温度传感器时钟	clock	tempSenserClock	温度传感器采样间隔
调光系统时钟	clock	lampClock	调光系统响应时间
调温系统时钟	clock	acClock	调温系统响应时间

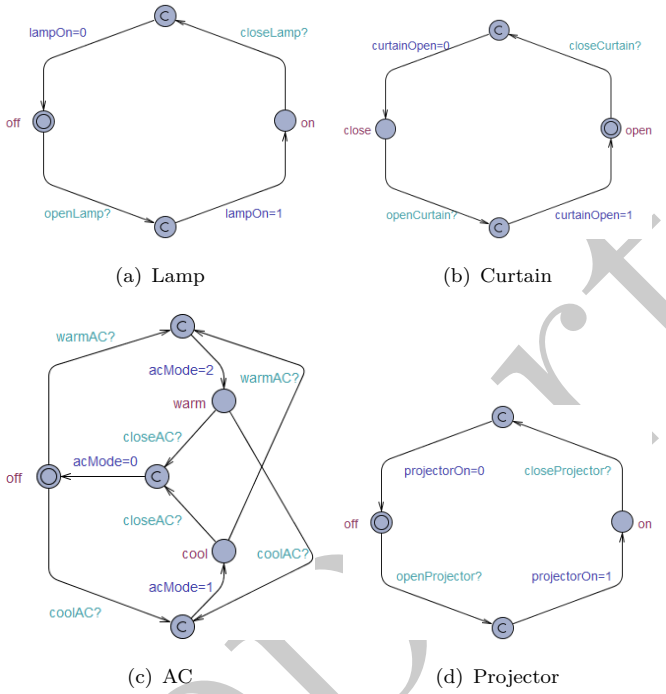
表 III
系统中的属性

系统中的属性如表III中列出，包括环境属性（光强和温度）、模式属性、开关属性（设备是否打开等）和时钟属性，各个属性的取值及相应的含义均在表III中列出。

III. 系统成分及自动机建模

整个系统由表I中的设备、控制器、传感器、开关各一个构成，我们使用 UPPAAL 工具对其进行自动机建模，下面对各个部件分的自动机建模分别进行说明。

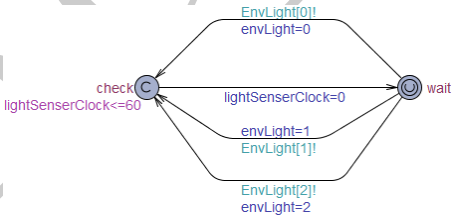
图1所示为系统中所有物联网设备的自动机建模，包括灯、窗帘、空调和投影仪。其中灯、窗帘和投影仪均具有两个稳定状态，即打开（on 或 open）和关闭（off 或 close），这些设备在接收到开启（或关闭）信号后执行开启（或关闭）动作，将自己的打开属性设置为 1（或 0）。以灯为例，初始状态为 off，在收到打开灯的 openLamp 信号后，将灯的打开状态设置为 1，到达 on 状态（由于中间的状态为 Commited，不存在时延，因此可以视为同时完成）；同样的，在 on 状态时，收到关闭灯的 closeLamp 信号后，将灯的打开状态设置为 0，回到 off 状态。窗帘和投影仪同理。空调具有三



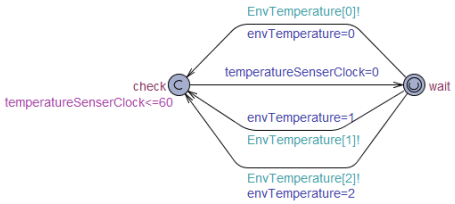
(a) Lamp (b) Curtain

(c) AC (d) Projector

图 1. 物联网设备的自动机建模。图1(a)-图1(d)分别对应灯、窗帘、空调和投影仪的自动机建模。



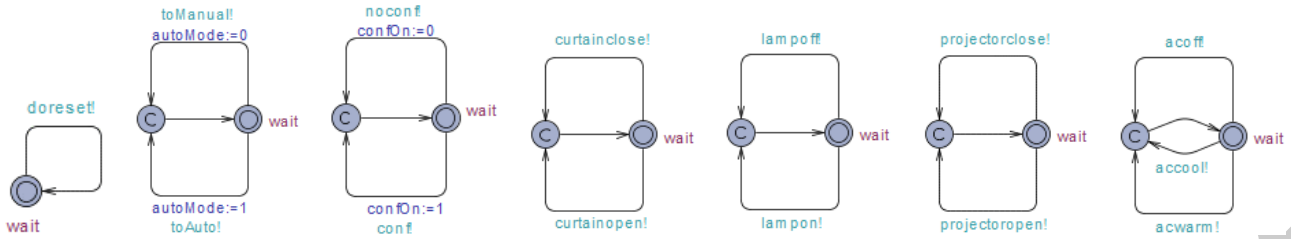
(a) envLightSenser



(b) envTemperatureSenser

图 2. 传感器的自动机建模。图2(a)和图2(b)分别光强传感器和温度传感器的自动机建模。

个稳定状态，分别为关闭（off）、制热（warm）和制冷（cool）。与灯类似的，空调的初始状态为 off，在接收到 warmAC 信号后把 acMode 设置为 2 开始制热并跳转为 warm 状态，在接收到 coolAC 信号后把 acMode 设置为 1 开始制冷并跳转为 cool 状态；同样的，在 warm 状态收到 closeAC 或 coolAC 信号时会关闭或制冷并跳转为 off 或 cool 状态，在 cool 状态收到 closeAC 或 warmAC 信号时会关闭或制热并跳转为 off 或 warm 状态。



(a) setReset (b) setAuto (c) setConference (d) setCurtain (e) setLamp (f) setProjector (g) setAC

图 3. 开关的自动机建模。图3(a)和图3(g)分别对应重置按钮、模式开关、会议开关、窗帘开关、灯开关、投影仪开关和空调遥控器的自动机建模。

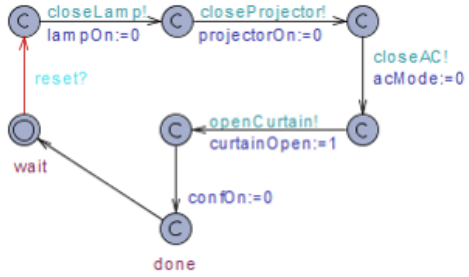


图 4. 重置器的自动机建模。

图2所示为系统中的传感器的自动机建模，包括光强传感器和温度传感器。其中光强传感器的初始状态为 wait，跳转时设置光强等级，并发出相应的光强信号，转移至 check 状态；在 check 状态停留一段时间（小于 60s）后，重置时钟并返回至 wait 状态。温度传感器同理。

图3所示为系统中的开关的自动机建模，包括重置按钮、模式开关、会议开关、窗帘开关、灯开关、投影仪开关和空调遥控器。所有开关都只有一个稳定状态 wait，通过从 wait 状态跳转到 Commited 状态再回到 wait 状态，开关可以发出相应的开关信号（或模式切换信号），该信号被设备或中央控制器接收，执行对应的动作。模式开关和会议开关在切换的同时，还需要分别设置模式属性（autoMode）和会议开始属性（confOn）。重置按钮可以在 wait 状态，通过回路跳转发出 doreset 重置信号，使得整个系统重置到初始状态。

图4所示为系统中的重置器的自动机建模，由于在系统切换时需要对系统中的设备进行状态重置，以及允许用户通过重置按钮来直接重置系统，必须在系统中引入这一模块。重置器分别发送 closeLamp、closeProjector 和 closeAC 信号来关闭灯、投影仪和空调，并与此同时直接将灯（lampOn）、投影仪（projectorOn）和空调（acMode）的开关状态置零关闭；之后重置器发送 openCurtain 信号并将 curtainOpen 置 1 来打开窗帘；最后将 confOn 置 0 以关闭会议，到达 done 状态，完成系统重置。

图5所示为系统中的中央控制器的自动机建模，该模块可以分作手动模式、自动模式和切换模式三个子模块，三个子模块分别在图5中用蓝色虚线、红色点横线和黄色点线框出。

手动模式（蓝色虚线框）下，控制器只有 manual 一个稳定状态，并在 manual 状态等待开关被拨动传来的信号。控制器收到重置按钮发出的 doreset 信号后，发出 reset 信号对系统进行重置。控制器收到空调遥控器发出的 acwarm、accool 和 acoff 信号后，分别发出 warmAC、coolAC 和 closeAC 信号给空调，最后回到 manual 状态。由于有投影仪和灯、投影仪和窗帘不能同时打开的限制，打开这三个设备时需要关闭不能共存的设备。例如，当控制器收到投影仪开关发来的 openProjector 信号后，必须先发出 closeCurtain 和 closeLamp 信号，再发出 openProjector 信号。当控制器收到灯、窗帘和投影仪开关发出的关闭信号后，直接发出关闭信号来关闭对应的设备即可。

自动模式（红色点横线框）下，控制器一般停留在 auto 状态等待信号。当控制器收到会议开关发来的开始会议的 conf 信号后，发出 closeLamp 和 closeCurtain 信号关闭灯和窗帘，之后发出 openProjector 信号打开投影仪开始会议；当控制器收到会议结束的 noconf 信号后，直接发出 closeProjector 信号关闭投影仪，灯和窗帘会通过自动调光逻辑进行调整。auto 状态右下方的三个回路从左到右分别为黑暗、柔光和强光下自动调光的控制逻辑：黑暗时，若正在进行会议则说明投影仪打开、则不进行开灯操作，否则发出 openLamp 信号开灯；柔光时，首先发出 closeLamp 信号关灯，之后根据是否正在进行会议来决定是否发出 openCurtain 信号打开窗帘；强光时，直接发出 closeLamp 和 closeCurtain 信号关灯和合上窗帘。auto 状态左下方的三个回路从左

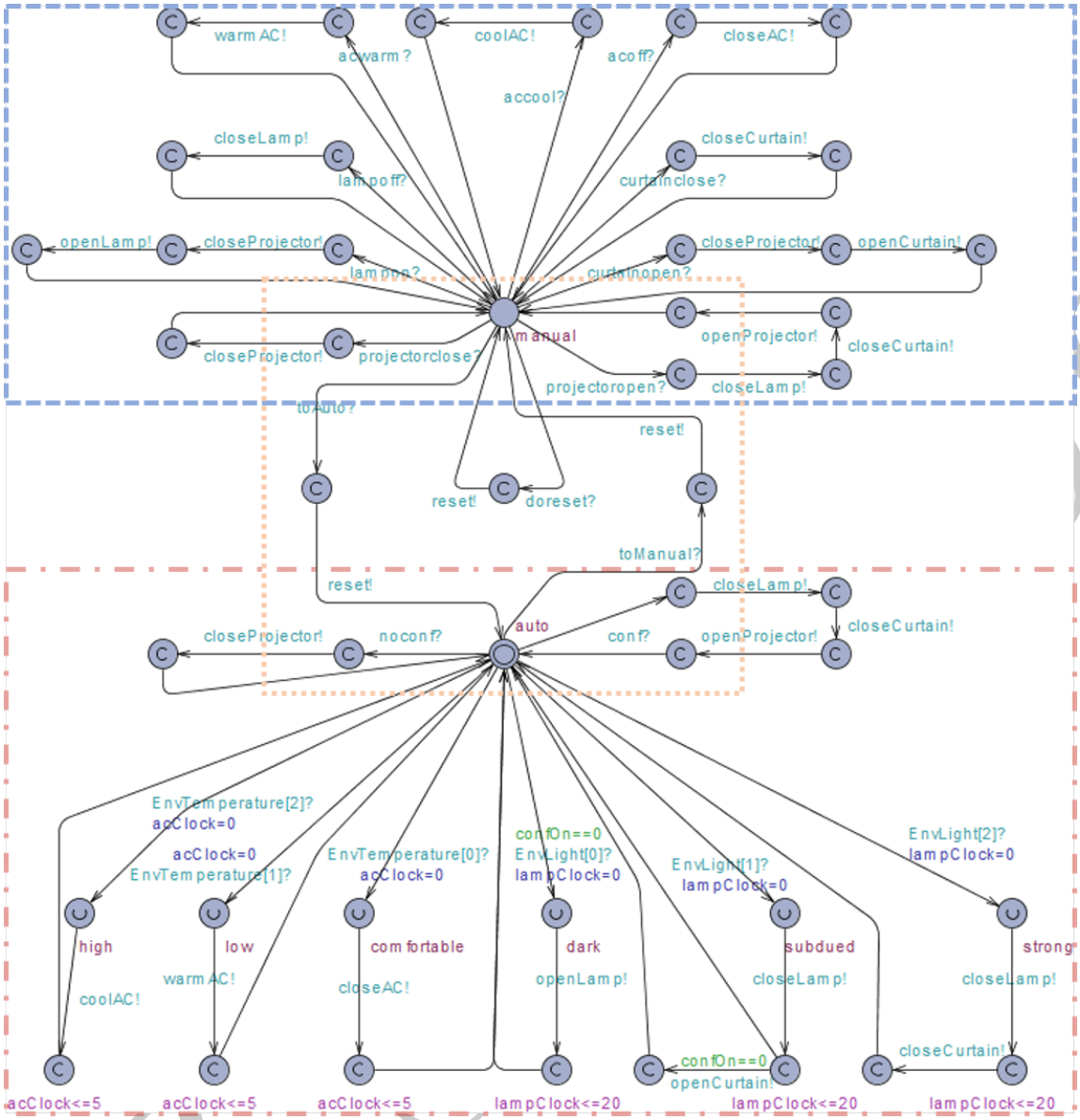


图 5. 中央控制器的自动机建模。与 manual 状态相连的回路（蓝色虚线框出）对应手动模式下的控制逻辑，与 auto 状态相连的回路（红色点横线框出）对应自动模式下的控制逻辑，manual 状态与 auto 状态相连的部分（黄色点线框出）对应模式切换的控制逻辑。

到右分别为过热、过冷和适宜气温下自动调温的控制逻辑：过热时，发出 coolAC 信号启动空调制冷；过冷时，发出 warmAC 信号启动空调制热；温度适宜时，发出 closeAC 信号关闭空调。

模式切换（黄色点线框）时，需要发出 reset 信号对整个系统进行重置，否则会使得投影仪与灯、投影仪与窗帘不同时打开的安全性约束出错。

IV. 系统定义

整个系统包含第III节中定义的自动机各一个，其代码如下所示。

```
_Lamp = Lamp();
_Curtain = Curtain();
_Projector = Projector();
_AC = AC();
_Controller = Controller();
_envLightSenser = envLightSenser();
_envTemperatureSenser = envTemperatureSenser();
_setConference = setConference();
_setAuto = setAuto();
_setLamp = setLamp();
_setAC = setAC();
_setCurtain = setCurtain();
_setProjector = setProjector();
_reset = Reset();
_setReset = setReset();
system _Lamp, _Curtain, _Projector, _AC, _Controller,
    _envLightSenser, _envTemperatureSenser, _setConference,
    _setAuto, _setLamp, _setAC, _setCurtain, _setProjector,
    _reset, _setReset;
```

系统中的实体属性定义如下，其分别与表III对应。

```
int envLight = 0, envTemperature = 0;
int confOn = 0, lampOn = 0,
int projectorOn = 0, curtainOpen = 0, acMode = 0;
clock lampClock, acClock;
clock lightSenserClock, temperatureSenserClock;
int autoMode = 1;
```

系统中进行通信的信号定义如下。其中第 1 行为室内光强和温度的信号，第 2-5 行为中央控制器控制各个设备及重置器的信号，第 6-8 行为各个开关被拨动时发送给中央控制器的信号。

```
chan EnvLight[3], EnvTemperature[3];
chan conf, noconf
broadcast chan warmAC, coolAC, closeAC, openLamp, closeLamp;
broadcast chan openCurtain, closeCurtain;
broadcast chan openProjector, closeProjector, reset;
chan toAuto, toManual, lampon, lampoff, acwarm, accool, acoff;
chan curtainopen, curtainclose, projectoropen, projectorclose;
chan doreset;
```

对系统进行模拟。在模拟光强变化时，系统的通信如图7所示，符合预期，所有自动调光逻辑运行正常；在模拟温度变化时，系统的通信如图8所示，同样符合预期，所有自动调温逻辑运行正常；在模拟手动模式时，系统的通信如图9所示，也符合预期，模式切换、手动开关及重置按钮的逻辑正常。

V. 系统性质

根据第I中定义的约束，可以逐条在 UPPAAL 的验证其上写出如下性质验证。

```
A[] _Projector.on+ _Curtain.open < 2
A[] _Projector.on + _Lamp.on < 2
A[] _envTemperatureSenser.check imply temperatureSenserClock <=
    60
A[] _envLightSenser.check imply lightSenserClock <= 60
A[] _Lamp.on imply lampClock<=20
A[] _Lamp.off imply lampClock<=20
A[] _Curtain.open imply lampClock<=20
A[] _Curtain.close imply lampClock<=20
A[] _AC.cool imply acClock<=5
A[] _AC.warm imply acClock<=5
A[] _AC.off imply acClock<=5
A[] _reset.done imply confOn==0 and lampOn==0 and projectorOn==0
     and curtainOpen==1 and acMode==0
A[] not deadlock
```

其中第 1-2 行要求投影仪和窗帘、投影仪和灯不会同时打开，第 3-4 行要求光强和温度传感器采样间隔不大于 60s，第 5-8 行要求自动调光的反应时间不大于 20s，第 9-11 行要求自动调温的反应时间不大于 5s，第 12 行要求重置器能够对系统进行初始化，第 13 行要求系统不发生死锁。

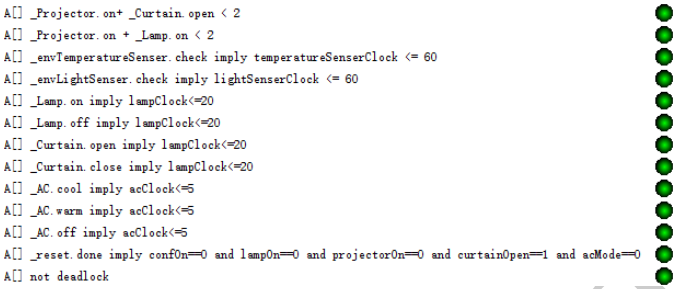


图 6. 性质验证结果。所有性质均通过验证。

对以上性质逐条进行验证，结果如图6所示，所有性质均通过了性质验证。

VI. 感想与建议

一个系统从构思到成功进行系统建模并通过性质验证，并没有想象中的那么容易。在人类脑海中很简单的过程，在变迁系统中可能需要十几乃至几十个状态才能很好地表示。在何处进行时间性质的控制、如何处理每个状态的所有条件跳转、如何通过合并尽可能简化系统，都是需要额外费脑筋的事情。

建议之后布置使用 UPPAAL 的大作业时，附上经过挑选的软件教程或者 tutorial。因为网上论坛里鲜有关于该软件的入门教程和问答，本次作业前期搜集 Uppaal 的使用方式花了不少时间，效果也一般，需要同学间互帮互助，才勉强能用起软件的基本功能。许多功能都是在 [1] 和 [2] 两份英文教程中发现的，而这些功能却恰好能够大大提升建模效率。

参考文献

[1] Gerd Behrmann, Alexandre David, and Kim G Larsen. A tutorial on uppaal. In *Formal methods for the design of real-time systems*, pages 200–236. Springer, 2004.

[2] A David, T Amnel, M Stigge, and P Ekberg. Uppaal 4.0: Small tutorial, 2011.

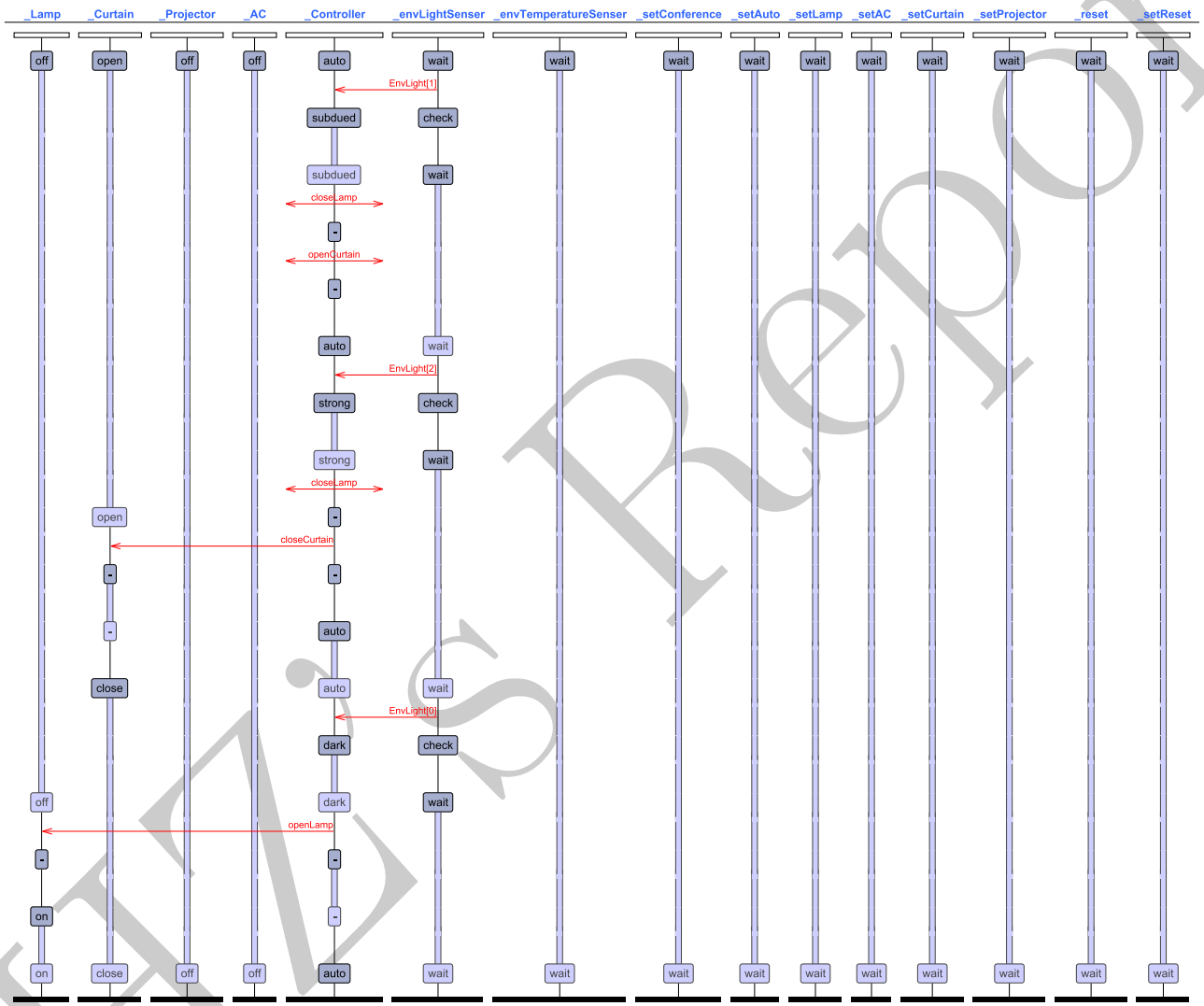


图 7. 系统在光强变化下的通信情况的 trace。

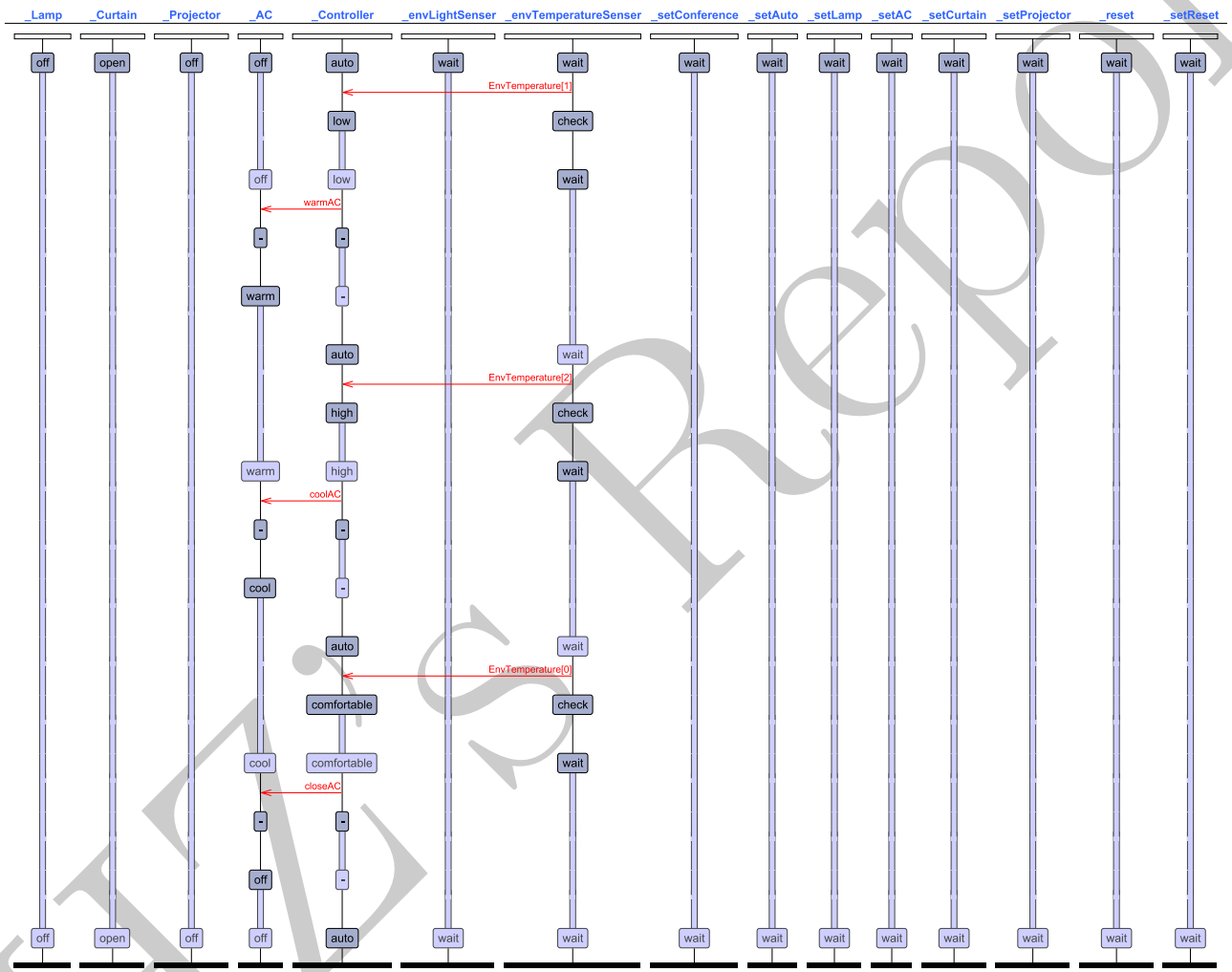


图 8. 系统在温度下的通信情况的 trace。

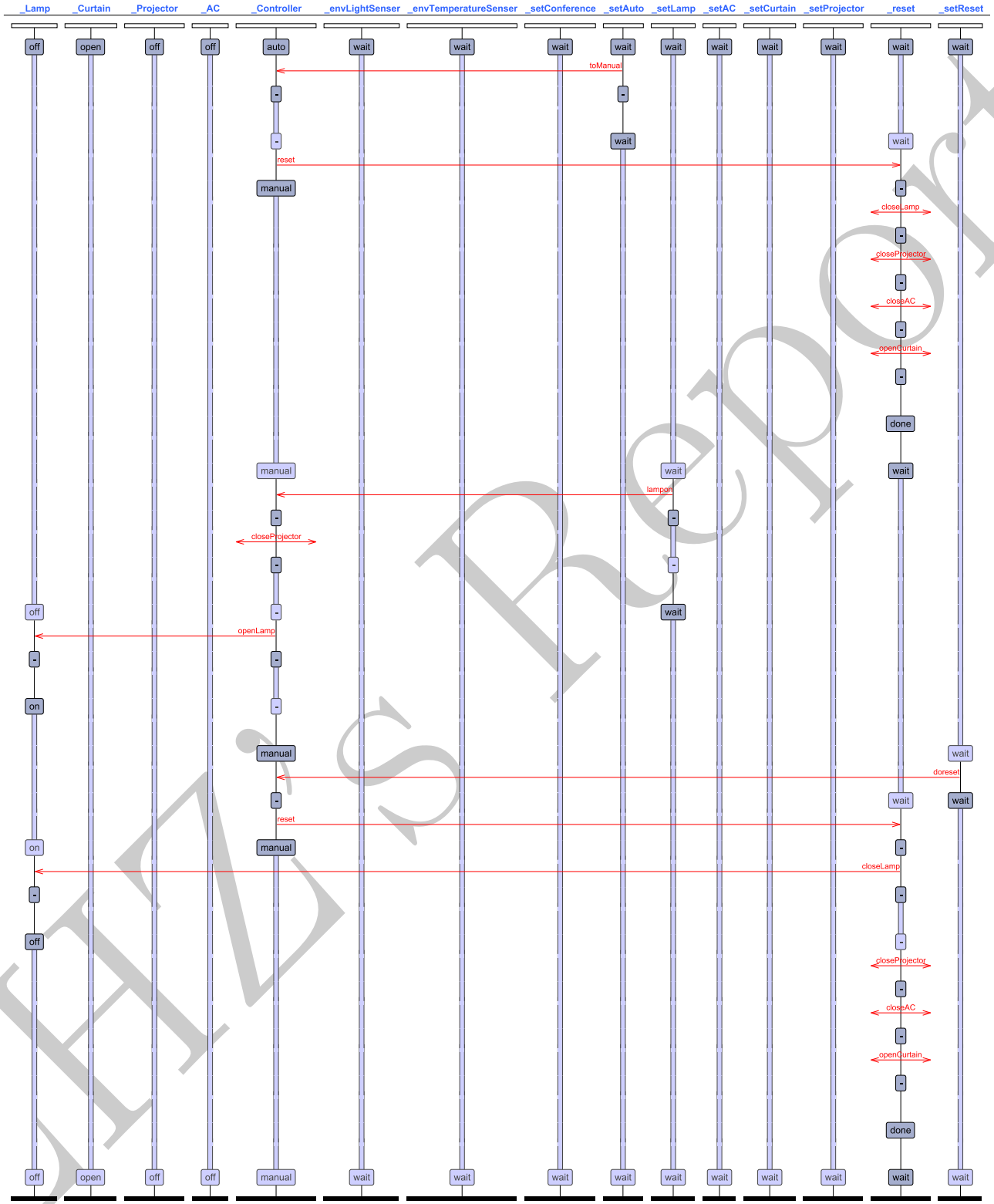


图 9. 系统在手动模式下下的通信情况 trace。