

文章编号 1004-924X(2011)07-1695-06

用智能规划解空间树法生成测试数据

李 杨, 宋克非*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 讨论了软件测试中常用的两因素组合覆盖测试方法。针对该方法求解困难, 并考虑系统中各种因素以及因素间的制约关系对解空间树法生成测试数据产生的影响, 提出了采用基于智能规划的解空间树法来生成测试数据。该方法将所有的可用测试数据生成为一棵解空间树, 通过搜索找到一条从根节点到叶节点的路径即一条测试数据。实验结果表明, 该方法可以更好地生成覆盖面大且规模较小的测试用例集, 实现对测试参数的两因素组合覆盖, 从而解决了传统解空间树法由于不考虑参数间的制约关系而无法求得最简测试数据集或得到的数据集不完全的问题。将该数据生成方法应用于空间相机软件测试中提高了生成有效测试用例的效率和准确度, 对测试起到了很好的指导作用。

关键词: 空间相机; 软件测试; 智能规划; 两因素组合覆盖; 解空间树; 待测软件系统(SUT)

中图分类号: TP311.52 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111907.1695

Generation of test data by solution space tree based on intelligent planning

LI Yang, SONG Ke-fei*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: songkefei@sina.com

Abstract: Pairwise combinatorial coverage testing which is a significant method for test data generation in functional test fields was discussed. As the method is difficult of solution, a improved method of test data generation for the solution space tree based on intelligent planning was proposed according to the relationship of different factors in the system. The method generates all the available data into a solution space tree, then searches a path from a root node to a leaf node to produce a test data. Experimental results show that this method can test adequately and cover more effect factors of software system by using less test data and can achieve the combinatorial corerage of two factors for test data. As compared with traditional methods, it can obtain the simplest and more complete data sets. In conclusion, it improves the efficiency and veracity of generating test data when this method is taken to a bear space camera software test.

Key words: space camera; software testing; intelligent planning; pairwise combinatorial coverage; solution space tree; Software under Testing(SUT)

收稿日期: 2011-01-19; 修订日期: 2011-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61077016)

1 引言

软件测试是为了发现错误而执行程序的过程,是软件生存期中的一个重要阶段,是软件质量保证的关键步骤。设计和生成有效的测试用例是决定软件测试质量的重要因素之一^[1],而有效的测试数据生成方法可以生成高质量的测试用例,从而降低测试用例的规模和软件开发的成本^[2]。

在功能性测试领域,组合覆盖测试因为能充分考虑系统中各因素的相互关系,使得生成的测试用例规模较小且较多地覆盖影响系统的因素,因此比较具有代表性^[3,4]。

组合覆盖测试一般分为单因素覆盖、两因素组合覆盖和三因素组合覆盖等。目前两因素组合覆盖测试方法在软件测试领域应用比较广泛,但两因素组合覆盖测试数据的生成方法至今还没有得到很好的解决,所以一直是研究的重要课题。近年来,关于这方面研究的报道很多,也提出了很多方法^[5],其中史亮等人提出的基于解空间树模型的两因素组合覆盖集生成算法在许多情况下都能够生成最小测试数据集,较同类方法有一定的优势^[3]。上述方法在进行解空间树的扩张时没有考虑接口间参数的制约关系,因此在求最小规模测试用例覆盖集时,得到的不是最简的测试用例集,有时得到的测试数据集也是不完全的。

智能规划是人工智能(AI)中较早的研究领域之一,有大约 50 年的历史,是一个多领域交叉的研究学科,涉及知识表达、知识推理、非单调逻辑、情景演算、人机交互和知识挖掘等各个方面^[8]。寻找一个规划就是求解一个动作序列,通过执行这个动作序列能够达到某一特定目标,解决一个特定问题,这个求解动作序列的过程就是规划过程,所得到的动作序列为规划解。智能规划中最经典的是图规划。

为解决上述传统解空间树的缺点,本文将图规划中的互斥关系思想引入到解空间树中,针对解空间树的实际,只考虑边之间的互斥关系,对经典图规划中的互斥关系进行重新定义,提出了一种基于智能规划的有效规划测试数据生成算法。将该方法应用到空间相机软件测试中提高了生成有效测试用例的效率和准确度,对测试起到了很好的指导作用。

2 解空间树有效规划测试数据生成原理

2.1 智能规划中的互斥关系

智能规划的经典规划-图规划中定义了两种结点和三种边。两种结点分别是命题结点和动作结点。三种边分别是前提条件边、添加效果边与删除效果边^[9]。互斥关系也分为动作互斥和命题互斥,定义如下:

定义 1 如果两个动作 a 和 b 是规划图同一层的两个动作,如果不存在一个有效规划能同时包含两者,就说动作 a 和 b 是互斥的。

定义 2 如果两个命题 p 和 q 是规划图同一层的两个命题,如果不存在一个有效规划能同时包含两者,就说命题 p 和 q 是互斥的。

2.2 解空间树有效规划测试数据生成模型

设影响待测软件系统(Software under Testing, SUT)的配置参数、内部变量或外部输入等参数有 n 个: P_1, P_2, \dots, P_n , 设参数 $P_i (1 \leq i \leq n)$ 可在有限离散点集 T_i 中取值, T_i 中有 t_i 个元素(即 $t_i = |T_i|$), 且 $t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n$ 。

定义 3 称 n 元组 (v_1, v_2, \dots, v_n) 为 SUT 的一个测试数据, 其中 $v_1 \in T_1, v_2 \in T_2, \dots, v_n \in T_n$ 。 $T_{all} = \{t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n\}$, 为实现对 SUT 所有参数取值全部组合覆盖需要的测试数据的个数。

将经典图规划中的互斥思想引入后,在解空间树中只有一种结点即参数结点和一种边即路径,也就是结点的取值。此时图规划中的互斥关系并不能完全适用,需要对其进行适当修改。在这里结点间不存在互斥关系,因此只考虑边之间的互斥关系,这里对互斥进行重新定义。

定义 4 设 SUT 的对外接口由 n 个参数 P_1, P_2, \dots, P_n 组成, 向量 $parm[n]$ 记录了每个参数 $P_i (1 \leq i \leq n)$ 的取值个数, 令 $parm[1] = parm[2] = \dots = parm[n]$, 则 SUT 对应的解空间树 T 是一棵高度为 $n+1$ 的树。第一层的根结点即参数 P_1 的 $parm[1]$ 个取值用 $parm[1]$ 条边分别标记为 $1, 2, \dots, parm[1]$; 第 2 层的每个结点即参数 P_2 的 $parm[2]$ 个取值用 $parm[2]$ 条边分别标记

为 $1, 2, \dots, parm[2]$; 第 n 层的每个结点即参数 P_n 的 $parm[n]$ 个取值用 $parm[n]$ 条边分别标记为 $1, 2, \dots, parm[n]$ 。

定义5 设 SUT 的某对外接口参数 p_i 和 p_m , 向量 $parm[i]$ 和 $parm[m]$ 分别记录了它们各自的取值个数, 参数 p_i 的每个取值用一条边来表示, 被标记为 $E_{p_i}(1), E_{p_i}(2), \dots, E_{p_i}(i)$; 参数 p_m 的每个取值用一条边来表示, 被标记为 $E_{p_m}(1), E_{p_m}(2), \dots, E_{p_m}(m)$ 。如果参数 p_i 取值 $E_{p_i}(x)$ 时则参数 p_m 不能取 $E_{p_m}(y)$, 称 $E_{p_i}(x)$ 与 $E_{p_m}(y)$ 互斥。

定义6 基于智能规划的解空间树的一条从根节点到叶节点的路径 (v_1, v_2, \dots, v_n) 就是 T 的一个解即一条测试数据, 记为 t , 其中 v_i 为第 i 层节点到第 $i+1$ 层节点的边的标记。

定义7 基于智能规划的解空间树的两个测试数据 $t_1 = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 和 $t_2 = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 的重叠数记为 $c = |\{i | v_i = w_i\}|$ 。

由上述描述可以看到, 基于智能规划的解空间树中必然存在一组重叠数小于等于 1 的路径, 该路径对应的测试数据可以最大限度地覆盖参数间的组合对^[4]。

定理1 互斥关系不具有传递性。

3 解空间树有效规划测试数据生成算法

将整个测试数据生成过程分为两个部分。第一部分是树的扩张, 即树的生成过程, 同时要标记互斥关系; 第二部分是树的搜索, 即树的遍历过程, 找到有效的测试数据。

3.1 树的扩张

树的扩张过程主要是生成树, 并标记互斥关系。因为对所生成的树要进行遍历, 为了遍历的方便, 对参数即树中的结点采用三重链接存储方式, 进行如下相关定义。

定义结构体类型 ArrayList, 记录参数的取值和与其他参数取值间的互斥关系如下:

```
typedef struct ArrayList
{
    参数的取值数组;
```

大于 n 位的一个标志位;

```
}
```

在存储时, 其中参数的取值数组中的值按重要程度顺序排列

定义参数即树中的结点结构 node 如下:

```
typedef struct node
```

```
{
```

ArrayList 类型的变量, 用来表示参数取值及互斥情况;

struct node 类型的分别指向父结点、指向子女的指针数组;

```
}
```

3.2 树的搜索

树的搜索算法如下所示:

(a) 建立初始为空的 OPEN 数据集和 TESTCASE 数据集。

(b) 采用深度优先算法遍历状态树:

(1) 将第一层参数节点放到 OPEN 数据集中

(2) 如果 OPEN 为空, 则退出 (b)。

(3) 将 OPEN 中第一个节点(节点 n)从 OPEN 中删除。

(4) 如果节点 n 为叶节点则转向 2)。

(5) 扩展节点 n , 将节点 n 的所有子女节点(即下一层参数)中与 n 及 n 的所有父辈节点不互斥的节点放在 OPEN 集的最前面。

(6) 如果后继节点是叶节点, 则找到一条测试数据, 选择后继节点中没被选择过的任一个节点, 比较该测试数据即路径集与 TESTCASE 集中所有数据的重叠数是否小于 1:

* 如果小于则将其加入 TESTCASE 集中, 返回 (2);

* 如果不小于则重复 (6)

* 如果所有节点均被选择仍没找到小于 1 的节点则返回 (2);

(7) 如果后继节点不是叶节点, 返回到 (2)。

(c) 输出测试数据集。

3.3 算法流程图

解空间树有效规划的测试数据生成算法流程

如图 1 所示:

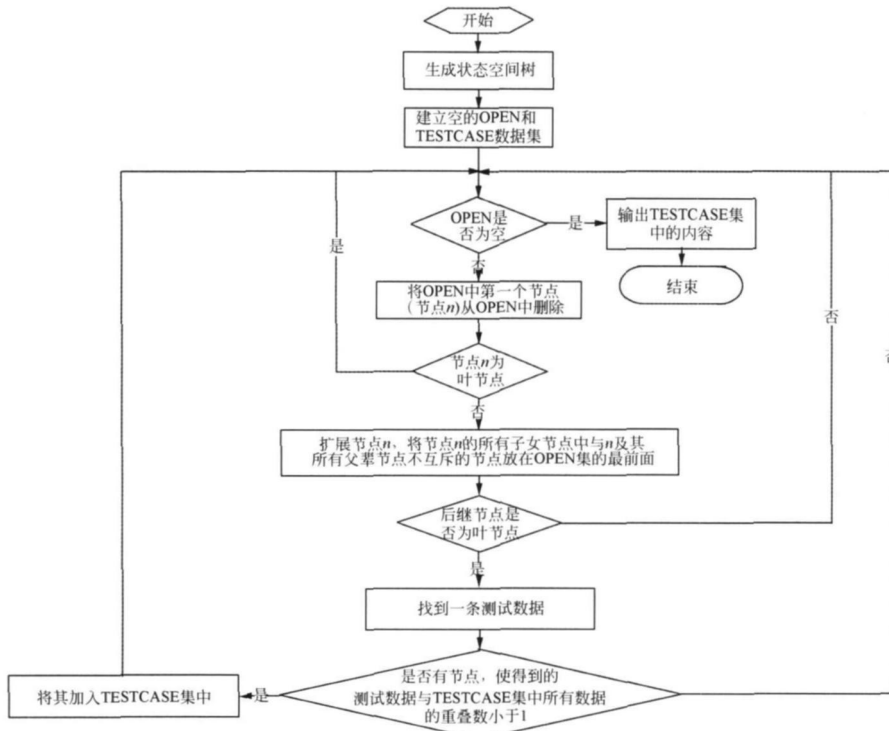


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

3.4 算法性质

a) 算法的可终止性: 任何 SUT, 其解空间树的规模有限, 参数的两两组合对也有限, 因此算法可在有限时间内终止, 同时算法有出口, 因此算法具有可终止性。

b) 时间复杂度分析: 设 $m = \text{param}[1]$, 则最坏情况下算法的时间复杂度为 $O = m^{n+3} n^2$ 。

4 实验结果比较

以某空间相机软件测试为例, 在对空间相机进行整体功能联试时, 和软件测试有关的接口参数有: 相机工作方式 $P_1 = \{ \text{自检、摄像、自校图形 1、自校图形 2} \}$; 相机热控方式 $P_2 = \{ \text{开、关} \}$; 调焦方式 $P_3 = \{ \text{注入参数调焦、温度自动调焦、连续调焦、不调焦} \}$; 调偏流方式 $P_4 = \{ \text{注入参数调偏流、计算参数调偏流、实时调偏流、不调偏流} \}$; 调光方式 $P_5 = \{ \text{注入参数调光、相机自动调光、不调光} \}$; 像移补偿方式 $P_6 = \{ \text{注入参数像移补偿、计算参数像移补偿、实时像移补偿、不像移补偿} \}$ 。如果将所有参数均两两覆盖到, 则组合用例数 $T_{all} = 4 \times 2 \times 4 \times 4 \times 3 \times 4 = 1536$ 。

假如现在只考虑参数调偏流方式 P_4 和像移补偿方式 P_6 , 因为调偏流方式和像移补偿方式之间有一定的对应关系, 当进行基于功能的测试时, 如果不考虑异常情况, 有些测试用例是没有意义的, 因为实际工作中根本不会出现, 它们之间不互斥的对应关系如图 2 所示:

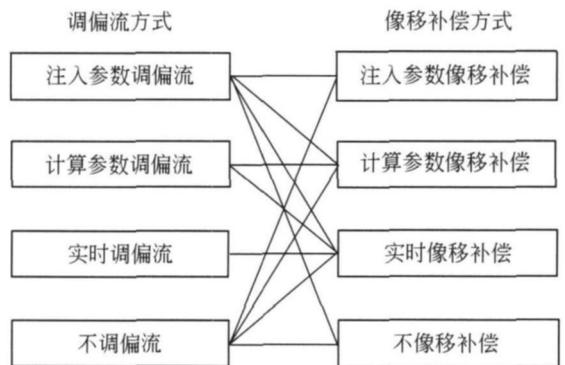


图 2 调偏流方式与像移补偿方式间的关系

Fig. 2 Relation of drift angle adjusting and image motion compensation

如果用传统解空间树方法, 而不考虑参数间关系, 可以得到一个解空间树, 如图 3 所示:

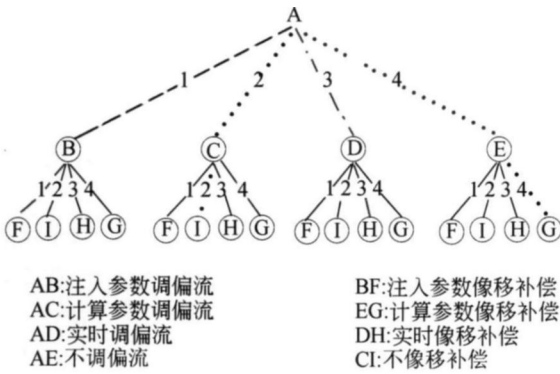


图 3 不考虑偏流方式与像移补偿方式关系的解空间树
Fig. 3 Space tree for taking no account of drift angle adjusting and image motion compensation

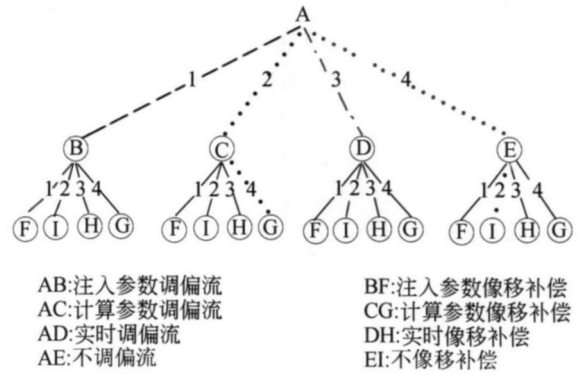


图 4 考虑偏流方式与像移补偿方式关系的解空间树
Fig. 4 Space tree for taking into account of drift angle adjusting and image motion compensation

图中不同形状的线标出了一组相互间重叠数为 0 的路径集(11、22、33、44), 在不考虑两参数间制约关系的情况下, 这组路径对应的测试数据可以最大限度地覆盖两参数间的关系。但是很明显 22 路径代表的测试用例- 计算参数调偏流且不像移补偿在正常情况下是不会出现的, 仅测试软件功能而不考虑异常情况, 在不能完全进行覆盖测试时是可以不进行测试的。

当采用本文提出的解空间树有效规划测试方法, 考虑参数间关系, 即可以得到一个解空间树, 如图 4 所示:

图中不同形状的线标出了一组相互间重叠数为 0 的路径集(11、24、33、42), 此测试数据没有上述方法中出现的互斥路径集即实际工作不会出现的情况, 是一个有效的测试数据。

参考文献:

[1] GOKHALES S, LYU M R. Regression tree modeling for the prediction of software quality [C]. *Proceeding of the Third ISSAT International Conference of Reliability and Quality in Design. ISSAT*, 1997: 31-36.

[2] PATTON R. *Software Testing* [M]. 2nd ed. SAMS& Pearson Education, 2006.

[3] 史亮, 聂长海, 徐宝文. 基于解空间树的组合测试数据生成 [J]. *计算机学报*, 2006, 29(6): 849-857.

SHI L, NIE CH H, XU B W. Pairwise test data generation based on solution space tree [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(6): 849-857. (in

5 结 论

本文讨论了软件测试中一种非常有效的测试方法, 即两因素组合覆盖测试方法。针对目前两因素组合覆盖测试方法为 NP 难题, 求解很困难, 以及传统解空间树方法不考虑参数间的制约关系, 直接影响生成组合覆盖测试用例集的规模甚至影响测试例集生成的完全性的缺点, 提出了一种基于智能规划的解空间树有效规划测试数据生成算法。该方法将图规划中的互斥关系思想引入解空间树中, 针对解空间树的特点进行了重新定义。从而解决了上述问题。将此方法应用于某空间相机软件测试过程中, 取得了很好的效果, 使得生成有效测试用例数据的效率大为提高。

Chinese)

[4] 史亮. 测试数据自动生成技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.

SHI L. *Research on test Data automatic generateon* [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)

[5] KUHN D, WALLACE D. Software fault interaction and implication for software testing [J]. *IEEE Transaction on Software Engineering*, 2004, 30(6): 1-4.

[6] COHEN M, COLBOUNS C, IBBONS P. Constructing test suites for interaction testing [C]. *Proceedings of the Intl. Conf. On Software Engineering (ICSE2003)*, Portland, 2003: 38-48.

- [7] KOBAYASHI N, TSUCHIYA T, KIKUNO T. A new method for constructing pair-wise covering designs for software testing [J]. *Information Processing Letters*, 2002, 81(2): 85-91.
- [8] 一德路, 姜云飞. 智能规划及其应用的研究[J]. *计算机科学*, 2002, 29(2): 100-103.
DING D L, JIANG Y F. The research of intelligence plan and its applications [J]. *Computer Science*, 2002, 29(2): 100-103. (in Chinese)
- [9] BLUM A L, FURST M L. Fast planning through planning graph analysis[C]. *Proceeding of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1995: 1636-1642.
- [10] 李杨. 空间相机软件可靠性分析和测试方法研究[D]. 北京: 中国科学院, 2009.
LI Y. *Research on software reliability analysis and software test method of space camera* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [11] 李杨, 徐抒岩, 韩诚山, 等. 量化故障树分析技术在空间相机软件开发中的应用[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2180-2186.
LI Y, XU SH Y, HAN CH SH, *et al.*. Application of quantitative fault tree analysis to software development for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2180-2186. (in Chinese)

作者简介:



李 杨(1981-), 女, 黑龙江安达人, 博士, 助理研究员, 2009 年于中国科学院研究生院获博士学位, 主要从事软件工程、可靠性工程和质量管理工作。E-mail: victoria_liy@163.com



宋克非(1967-), 女, 吉林长春人, 硕士, 研究员, FY-3 卫星紫外臭氧垂直探测仪副主任设计师, 1998 年于中国科学院研究生院获得硕士学位, 主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。E-mail: songkefei@sina.com

下期预告

基于 PDMS 和玻璃材料的毛细管被动阀的临界压力分析

杜 新^{1,2,3}, 张 平¹, 刘永顺¹, 吴一辉^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中科院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022)

计算毛细管被动阀的阻力在微流体系统的设计中具有重要意义。当矩形截面毛细阀用亲水性很好的玻璃做盖板的时候, 已有的数值仿真计算还不能够准确地计算临界压力。本文使用 Surface Evolver (SE) 自由软件, 通过设置和实际流动相符的边界条件并监测在扩张段入口处接触角的变化范围, 实现了对由玻璃盖板和 PDMS 微通道构成的被动阀的临界压力的计算。此时, 接触线应该设置为可以进入到扩张段的侧壁上, 而不能固定在扩张段入口处。对于深度 25 μm, 宽深比 2, 4, 8, 16 的毛细管被动阀, 得到的临界压力分别为 0.77, 0.45, 0.33, 0.24 kPa。仿真结果和转台实验结果基本相符, 证实 SE 方法是有效的。最后, 分析了接触角对毛细阀有效性的影响, 指出当通道和平板材料的接触角之和大于 90 度时, 毛细阀才能控制流动。