

代表了不同类型的组合服务,图 8 显示 SLAFT 方法针对不同类型的组合服务均适应良好。

图 9 为不同可靠性取值下,采用 SLAFT 方法的组合最优度实验结果.随着可靠性取值的降低或者原子特性任务数占总任务数比率的增加,组合最优度会降低.这是因为可靠性较低时,组件服务在执行过程中出故障的概率将增加;而随着原子特性任务数占总任务数比率的增加,恢复规划中包含任务数将会增多.而这两种情况都会导致组合最优度的降低.但从图 9 可以看出,SLAFT 方法均可计算出最终组合最优度值。

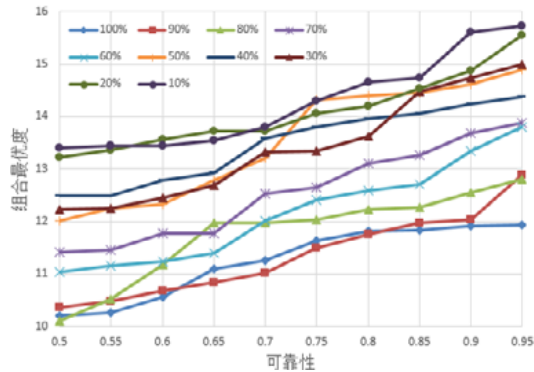


Fig.9 Experimental results of composition optimization for different value of reliability

图 9 不同可靠性取值的组合最优度实验结果

通过实验对比和参数分析可以看出:SLAFT 方法与对比算法相比,拥有较低故障处理时间的同时,还具有较高的组合最优度,且对不同故障规模适应良好。

5 相关工作

针对事务性组合服务的事务特性与容错方法,许多学者提出了研究思路或解决方法,并取得了较好的成果.限于篇幅原因,本文只对一些与本文类似的文献予以分析。

传统的服务选择方法根据组合服务的功能性需求,满足用户要求的 QoS 约束,而不考虑组合过程中的事务性约束(transactional constraints).而文献[41]认为,事务属性是确保组合服务可靠执行的必备条件之一,所以必须在服务选择过程中兼顾事务性属性.并提出了一种用于组合服务设计阶段的自动服务选择方法,其在选择过程中整合(integrate)QoS 和事务性需求.通过该方法为组合服务选择的每个组件服务,在确保满足全局事务约束的前提下,是满足局部 QoS 约束中最好的.文献[42]采用用户查询(user query)方法形式化定义组合服务问题,采用扩展的 CPN(colored petri-nets)技术来实现在服务选择过程中兼顾事务性属性.但上述两个文献仅在组合服务执行前的服务选择阶段考虑事务性,其只能在组合服务能完全正确执行时才能确保事务特性,而一旦遇到执行故障,事务特性将无法保障。

文献[43]针对事务性组合服务提出了一种容错方法,该方法可支持向后和向前错误恢复,而向后错误恢复采用松弛的原子执行(relaxed atomic execution)策略实现,向前错误恢复采用异常处理实现.为了实现原子执行,还提出了一种可扩展的交付协议 SCP(scalable commit protocol),其允许一个组合服务包含异质的事务性 Web 服务.同时还提出了一个恢复算法,其可以确保出现故障的组合服务的继续执行.但文献[43]提出的 SCP 比较低效,可能出现资源被未知过程占用一段时间的现象。

文献[44,45]采用 CPN 技术处理事务性组合服务执行过程中出现的故障.文献[44]提出了一个高效、可容错和保证事务性组合服务正确执行的框架,该框架通过组件服务替代和补偿协议支持向前或向后的恢复,具体实现过程采用 CPN.文献[45]也提出一个框架,名称为 FaCETa(fault tolerant cws execution based on transactional properties),其基于 CPN 的展开过程来处理故障.虽然 CPN 技术可以用来处理事务性组合执行过程中出现的故障,但 Petri-Nets 构建出来的模型一般比较庞大,且不支持构造大规模模型,所以文献[44,45]所提框架只适应应

用于组件服务比较少的事务性组合服务的故障处理过程。

文献[9]为事务型组合服务提出了一种容错框架 FACTS,其为容错提供了一个包括规范、验证和执行的集成环境.且该框架与组合服务执行逻辑分离,使得故障处理逻辑易于开发、维护和更新.其次,采用 ECA(event-condition-action)规则来描述何时和如何触发故障处理逻辑.另外,提出 EXTRA(exception handing+transaction)机制,其融合了异常处理和事务技术(transaction techniques)两种容错机制,用于增强组合服务的可靠性.EXTRA 采用八类高层异常处理机制来修复组合服务执行过程中的故障,给出了一种新的 Web 服务事务型分类,分析了事务型组合服务的关键特性,即服务转移(service transfer)和活力程度(vitality degree).同时也定义了一个协议 STTP(service-transfer-based termination protocol),其可使得组合服务产生不可修复的故障时终止在一个一致的状态.但该文献存在一些局限性:1) 故障处理过程只能在组合服务的全状态空间中寻找恢复规划,势必会导致所提方法的扩展性较差;2) 故障处理过程中没有考虑 SLA 属性,而具有较低 SLA 属性值的恢复规划可能导致组合服务的 SLA 违反.

文献[16]对 BPEL 进行了扩充,使之更适合应用于事务性组合服务执行过程中的补偿操作和恢复规划的执行.并对传统遗传算法进行了改进,用于恢复规划的制定,具体改进为:1) 通过采用动态长度染色体(dynamic-length chromosomes)来保存恢复规划,其在递归过程中可根据实际需求申请存储空间,可降低算法的空间复杂度;2) 制定的恢复规划除了满足组合服务的 QoS 约束外,且在在组合服务的部分状态空间中制定得到,又进一步减少了算法执行时间,使之可更容易扩展到组件服务较多的组合服务的故障处理之中或者应用到在线实时故障处理;3) 收集递归过程中的中间解信息,结合组合服务的结构,共同作用于后面的递归过程,使得得到最优解的几率加大.虽然文献[16]对遗传算法进行了改进,但遗传算法对参数取值比较敏感,不同参数设置会得出不同结果,且其实现较复杂的特性还是没有根本改变.所以,与本文所提 SLAFT 方法相比,文献[16]故障恢复时间较长,且组合最优度偏低(详见第 4.2 节).也就是说,虽同为启发式算法,针对本文所提场景,差分进化算法要优于遗传算法.

6 结论与未来工作展望

针对事务性组合服务执行期间出现的故障,本文提出了一种容错方法 SLAFT.首先,SLAFT 方法独立于组合服务的执行逻辑,只有在出现故障的时候才会被触发,因此其易于开发、维护和更新;其次,为了确保组合服务出现故障时能停留在一个一致的状态,SLAFT 采用有限状态机建模其的执行状态,并对其进行状态监控;再次,为了不违反服务使用者和服务提供者事先商定的 SLA 属性,采用监控自动机进行执行监督;最后,进行补偿操作时,SLAFT 采用改进的差分进化算法,其可以快速且精确的找到最优恢复规划.基于两个真实数据集的实验,验证了本文所提 SLAFT 方法在故障处理时间和组合最优度上均优于对比方法,且对不同故障规模适应良好.

虽然所提 SLAFT 方法与其他方法相比有一定的优势,但其也存在不足:(1) 不是通过严格的数学证明 SLAFT 方法优于其他对比方法,只是从实验结果上给予了验证;(2) 差分进化算法的初始种群是随机生成的,如果能找到对初始种群地生成优化算法,有可能进一步减少算法执行时间,进而提高容错的实时性;(3) 仅在模拟环境下实现 SLAFT 方法,其应如何在实际的网络环境中进行部署、其有效性如何以及是否优于其他对比算法均没有得以验证.我们未来的工作将针对存在的这些不足,进一步提高 SLAFT 方法的有效性.

致谢 在此,对提供 QWS 数据集的加拿大圭尔夫大学的 Mahmoud 博士和 Al-Masri 博士,以及提供 WS-DREAM 数据集的中山大学的郑子彬副教授表示衷心感谢.

References:

- [1] Delac G, Silic M, Srbljic S. A reliability improvement method for SOA-based applications. *IEEE Trans. on Dependable and Secure Computing*, 2015,12(2):136-149. [doi: 10.1109/TDSC.2014.2327971]
- [2] Li G, Zhao ZF, Han YB, Liang Y. CAFISE Framework based development for service oriented applications with high adaptability. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2006,17(6):1372-1380 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1372.htm> [doi: 10.1360/jos171372]

- [3] Zhuang Y, Zhang PC, Li WQ, Feng J, Zhu YL. Web service QoS monitoring approach sensing to environmental factors. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2016,27(8):1978–1992 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4850.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004850]
- [4] Yu WD. A software fault prevention approach in coding and root cause analysis. *Bell Labs Technical Journal*, 1998,3(2):3–21. [doi: 10.1002/bltj.2101]
- [5] Littlewood B. Stochastic reliability-growth: a model for fault-removal in computer-programs and hardware-designs. *IEEE Trans. on Reliability*, 1981,30(4):313–320. [doi: 10.1109/TR.1981.5221099]
- [6] Vergura S, Acciani G, Amoroso V. Inferential statistics for monitoring and fault forecasting of PV plants. In: *Proc. of the Int'l Symp. on Industrial Electronics*. Cambridge: IEEE, 2008. 2414–2419. [doi: 10.1109/ISIE.2008.4677264]
- [7] Randell B. System structure for software fault tolerance. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 1975,SE-1(2):220–232. [doi: 10.1109/TSE.1975.6312842]
- [8] Issarny V, Tartanoglu F, Romanovsky A, Levy N. Coordinated forward error recovery for composite Web services. In: *Proc. of the Int'l Symp. on Reliable Distributed Systems*. Florence: IEEE, 2003. 167–176. [doi: 10.1109/RELDIS.2003.1238066]
- [9] Liu A, Li Q, Huang L, Xiao M. Facts: A Framework for fault-tolerant composition of transactional Web services. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2010,3(1):46–59. [doi: 10.1109/TSC.2009.28]
- [10] Wu GQ, Wei J, Huang T. A dynamic QoS assessment approach for internetware with uncertainty reasoning. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2008,19(5):1173–1185 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1173.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01173]
- [11] Ludwig H, Keller A, Dan A, King RP, Franck R. Web Service Level Agreement (WSLA) Language Specification. Watson: IBM Corporation, 2003. 815–824.
- [12] Wieder P, Butler JM, Theilmann W, Yahyapour R. *Service Level Agreements for Cloud Computing*. New York: Springer-Verlag, 2011. 13–20.
- [13] Jordan D, Evdemon J. *Web Services Business Process Execution Language Version 2.0. Vol.2. OASIS Standard*, 2007.
- [14] Baresi L, Guinea S. Self-Supervising bpel processes. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2011,37(2):247–263. [doi: 10.1109/TSE.2010.37]
- [15] Foster H. A rigorous approach to engineering Web service compositions [Ph.D. Thesis]. London: Imperial College of London, 2006.
- [16] Tan TH, Chen M, André É, Sun J, Liu Y, Dong JS. Automated runtime recovery for QoS-based service composition. In: *Proc. of the Int'l Conf. on World Wide Web*. New York: ACM Press, 2014. 563–574. [doi: 10.1145/2566486.2568048]
- [17] Alrifai M, Risse T. Combining global optimization with local selection for efficient QoS-aware service composition. In: *Proc. of the Int'l Conf. on World Wide Web*. New York: ACM Press, 2009. 881–890. [doi: 10.1145/1526709.1526828]
- [18] Parra-Hernandez R, Dimopoulos NJ. A new heuristic for solving the multichoice multidimensional knapsack problem. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2005,35(5):708–717. [doi: 10.1109/TSMCA.2005.851140]
- [19] Wang SG, Sun QB, Yang FC. Web service dynamic selection by the decomposition of global QoS constraints. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22(7):1426–1439 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3842.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03842]
- [20] Qin AK, Huang VL, Suganthan PN. Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2009,13(2):398–417. [doi: 10.1109/TEVC.2008.927706]
- [21] Mallipeddi R, Suganthan PN, Pan QK, Tasgetiren MF. Differential evolution algorithm with ensemble of parameters and mutation strategies. *Applied Soft Computing*, 2011,11(2):1679–1696. [doi: 10.1016/j.asoc.2010.04.024]
- [22] Das S, Abraham A, Konar A. Automatic clustering using an improved differential evolution algorithm. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2008,38(1):218–237. [doi: 10.1109/TSMCA.2007.909595]
- [23] Storn R, Price K. Differential evolution—A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 1997,11(4):341–359. [doi: 10.1023/A:1008202821328]
- [24] Wang Y, Cai Z, Zhang Q. Differential evolution with composite trial vector generation strategies and control parameters. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2011,15(1):55–66. [doi: 10.1109/TEVC.2010.2087271]

- [25] Tang L, Dong Y, Liu J. Differential evolution with an individual-dependent mechanism. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2015,19(4):560–574. [doi: 10.1109/TEVC.2014.2360890]
- [26] Wang SG, Sun QB, Zhang GW, Yang FC. Uncertain QoS-aware Skyline service selection based on cloud model. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(6):1397–1421 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4084.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04084]
- [27] Wang SG, Sun QB, Yang FC. Reputation evaluation approach in Web service selection. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(6):1350–1367 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4051.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04051]
- [28] Ma Y, Wang SG, Sun QB, Yang FC. Web service quality metric algorithm employing objective and subjective weight. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014,25(11):2473–2485 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4508.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004508]
- [29] Wang SG, Zhou A, Yang FC, Chang RN. Towards network-aware service composition in the cloud. *IEEE Trans. on Cloud Computing*, 2016. [doi: 10.1109/TCC.2016.2603504]
- [30] Zhang JN, Wang SG, Sun QB, Yang FC. Fast and reliable fault-tolerance approach for service composition in integration networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2017,28(4):940–958 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5051.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005051]
- [31] Zeng LZ, Benattallah B, Ngu AH, Dumas M, Kalagnanam J, Chang H. QoS-Aware middleware for web services composition. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2004,30(5):311–327. [doi: 10.1109/TSE.2004.11]
- [32] Zeng LZ, Benattallah B, Dumas M, Kalagnanam J, Sheng QZ. Quality driven Web services composition. In: *Proc. of the Int'l Conf. on World Wide Web*. New York: ACM Press, 2003. 411–421. [doi: 10.1145/775152.775211]
- [33] Wang SG, Ma Y, Cheng B, Yang FC, Chang R. Multi-Dimensional QoS prediction for service recommendations. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2016. 1–12. [doi: 10.1109/TSC.2016.2584058]
- [34] Zhou A, Wang SG, Cheng B, Zheng ZB, Yang FC, Chang R, Michael L, Buyya R. Cloud service reliability enhancement via virtual machine placement optimization. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2016. 1–13. [doi: 10.1109/TSC.2016.2519898]
- [35] Al-Masri E, Mahmoud QH. Investigating Web services on the World Wide Web. In: *Proc. of the Int'l Conf. on World Wide Web*. New York: ACM Press, 2008. 795–804. [doi: 10.1145/1367497.1367605]
- [36] Zheng ZB, Zhang Y, Lyu MR. Distributed QoS evaluation for real-world Web services. In: *Proc. of Int'l Conf. on Web Services*. Miami: IEEE, 2010. 83–90. [doi: 10.1109/ICWS.2010.10]
- [37] Zhang YL, Zheng ZB, Lyu MR. Exploring latent features for memory-based QoS prediction in cloud computing. In: *Proc. of the IEEE Symp. on Reliable Distributed Systems*. Madrid: IEEE, 2011. 1–10. [doi: 10.1109/SRDS.2011.10]
- [38] Wang SG, Hsu CH, Liang ZJ, Sun QB, Yang FC. Multi-User Web service selection based on multi-QoS prediction. *Information Systems Frontiers*, 2014,16(1):143–152. [doi: 10.1007/s10796-013-9455-4]
- [39] Deng SG, Wu J, Li Y, Wu ZH. Automatic Web service composition based on backward tree. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,18(8):1896–1910 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1896.htm> [doi: 10.1360/jos181896]
- [40] Liu XZ, Huang G, Mei H. Consumer-Centric service aggregation: Method and its supporting framework. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,18(8):1883–1895 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1883.htm> [doi: 10.1360/jos181883]
- [41] El Hadad J, Manouvrier M, Rukoz M. TQoS: Transactional and QoS-aware selection algorithm for automatic Web service composition. *IEEE Tran. on Services Computing*, 2010,3(1):73–85. [doi: 10.1109/TSC.2010.5]
- [42] Cardinale Y, El Haddad J, Manouvrier M, Rukoz M. Web service selection for transactional composition. *Procedia Computer Science*, 2010,1(1):2689–2698. [doi: 10.1016/j.procs.2010.04.302]
- [43] Liu A, Huang LS, Li Q, Xiao MJ. Fault-Tolerant orchestration of transactional Web services. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Web Information Systems Engineering*. Evanston: Springer-Verlag, 2006. 90–101. [doi: 10.1007/11912873_12]
- [44] Cardinale Y, Rukoz M. A Framework for reliable execution of transactional composite Web services. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Management of Emergent Digital EcoSystems*. San Francisco: ACM Press, 2011. 129–136. [doi: 10.1145/2077489.2077513]

- [45] Angarita R, Cardinale Y, Rukoz M. Faceta: Backward and forward recovery for execution of transactional composite ws. In: Proc. of the Extended Semantic Web Conf. Montpellier: Springer-Verlag, 2012. 343–357. [doi: 10.1007/978-3-662-46641-4_26]

附中文参考文献:

- [2] 李刚,赵卓峰,韩燕波,梁英.基于CAFISE Framework的高适应性面向服务软件开发.软件学报,2006,17(6):1372–1380. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1372.htm> [doi: 10.1360/jos171372]
- [3] 庄媛,张鹏程,李雯睿,冯钧,朱跃龙.一种环境因素敏感的 Web Service QoS 监控方法.软件学报,2016,27(8):1978–1992. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4850.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004850]
- [10] 吴国全,魏峻,黄涛.基于非确定性推理的网构软件服务质量动态评估方法.软件学报,2008,19(5):1173–1185. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1173.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01173]
- [19] 王尚广,孙其博,杨放春.基于全局 QoS 约束分解的 Web 服务动态选择.软件学报,2011,22(7):1426–1439. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3842.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03842]
- [26] 王尚广,孙其博,张光卫,杨放春.基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择.软件学报,2012,23(6):1397–1412. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4084.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04084]
- [27] 王尚广,孙其博,杨放春.Web 服务选择中信誉度评估方法.软件学报,2012,23(6):1350–1367. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4051.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04051]
- [28] 马友,王尚广,孙其博,杨放春.一种综合考虑主客观权重的 Web 服务 QoS 度量算法.软件学报,2014,25(11):2473–2485. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4508.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004508]
- [30] 张俊娜,王尚广,孙其博,杨放春.融合网络环境下快速可靠的服务组合容错方法.软件学报,2017,28(4):940–958. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5051.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005051]
- [39] 邓水光,吴健,李莹,吴朝晖.基于回溯树的 Web 服务自动组合.软件学报,2007,18(8):1896–1910. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1896.htm> [doi: 10.1360/jos181896]
- [40] 刘譞哲,黄罡,梅宏.用户驱动的服务聚合方法及其支撑框架.软件学报,2007,18(8):1883–1895. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1883.htm> [doi: 10.1360/jos181883]



张俊娜(1979—),女,河南周口人,副教授,主要研究领域为服务计算.



孙其博(1975—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为网络服务与网络智能化,物联网应用技术.



王尚广(1982—),男,博士,副教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为服务计算,移动云计算,车联网及网络安全.



杨放春(1957—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为通信软件,网络安全,网络智能化.