

基于缓存开销的信息中心网络缓存协作策略

蔡 凌¹, 汪晋宽², 王兴伟³, 韩来权⁴
(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
3. 东北大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110169; 4. 东北大学秦皇岛分校 计算机与通信工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 网络化缓存策略影响 ICN 网络的传输性能, 考虑到缓存执行时的开销不仅包含访问缓存节点时的路径代价, 还应包含替换旧信息的替换代价, 因此提出一种基于路径访问代价和节点替换代价的缓存协作策略 (path and node cost based cooperative caching strategy, 简称 PNC3S)。该策略对两种代价进行整体考虑, 将代价总量作为是否进行信息与节点匹配缓存的依据, 对提出的策略模型进行优化分析, 将最优解作为缓存部署方案。实验结果表明, 与 CEE, LCD 策略相比, PNC3S 可以改善网络的信息缓存率、服务器的负载率、网络链路平均利用率, 以及访问跳数减少率。

关 键 词: 信息中心网络; 缓存网络; 缓存开销; 缓存策略; 优化算法
中图分类号: TP 393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)02-0166-06

Cooperative Caching Strategy Based on Cache Cost for Information-Centric Networking

CAI Ling¹, WANG Jin-kuan², WANG Xing-wei³, HAN Lai-quan⁴
(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;
2. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Software, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 4. School of Computer and Communication Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: CAI Ling, E-mail: cailing9852@126.com)

Abstract: In-network caching is one of the core issues in information-centric networking (ICN) which will directly restrict the data dissemination performance of the network. Considering the cache cost contains not only the path cost raised by accessing a cache node on the path but also the replacement cost of old information, a path and node cost based cooperative caching strategy (PNC3S) is proposed. The PNC3S considers the path cost and replacement cost comprehensively, and whether information matches a node or not depends on the total cost. Then the optimization algorithm is introduced into the proposed strategy to make caching decision. The simulation experiments demonstrate that the proposed PNC3S, compared with CEE (cache everything everywhere) and LCD (leave copy down), improves such performance as cached information ratio, server load ratio, average link utilization ratio and hop reduction ratio.

Key words: information-centric networking (ICN); caching network; cache cost; caching strategy; optimization algorithm

随着互联网应用模式由端到端通信向海量信息获取的转变, 学者提出了一种以信息为中心的网络架构 (information centric networking, ICN)^[1]。在 ICN 中, 缓存是作为一种基础设施服务提供给网络的, 因此, 提高缓存利用率, 将不同的信息缓存在不同的匹配节点上, 在最大化利用有限的缓存资源的同时实现缓存开销最小, 是缓存研究的核心问题。

ICN 网络化缓存机制可分为显式协作和隐式协作两类. 显式协作通过节点间相互通告各自缓存的信息来实现缓存决策, 因而伴随大量的通告开销, 如文献[2-4]. 与显式协作不同, 基于隐式协作的缓存决策中, 每个缓存节点无需知道其他节点的信息或仅需交互很少的信息, 如 ICN 原始提案中的处处缓存策略 CEE (cache everything everywhere)^[5]. 为了提高缓存资源的利用率, 文献[6]设计了 LCD (leave copy down) 方案, 当缓存命中时, 仅在命中节点的下游节点缓存信息. 文献[7]从网络的社团特性出发, 把信息缓存于社团内和社团外用户容易访问的节点处. 文献[8]提出的基于加权概率的缓存机制, 认为信息的缓存概率与节点和请求者的距离成反比. 文献[9]提出的 CRCache 缓存策略, 在最重要的路由节点缓存流行度高的信息. 文献[10]提出的缓存策略, 通过在边缘路由器提前缓存流行的信息来减少用户感知信息的延时.

这些文献着重强调节点位置对缓存决策的重要性, 但由于节点上缓存的信息不同, 替换操作所产生的代价也不尽相同. 假如在某一节点上缓存信息时需要替换掉一个或若干个更能提升系统收益的信息时, 代价可能大于收益. 通过分析可知, 替换数量可反映出当前节点的负载和缓存状态, 对替换信息的分析可以获得信息在节点的时效性^[11]. 因此本文引入节点替换代价, 将其作为缓存部署的重要参考因素, 提出了基于路径访问代价和节点替换代价的缓存协作策略 PNC3S, 以访问代价和节点替换代价总量最小为依据, 将信息缓存在匹配的节点上.

1 PNC3S 缓存策略

1.1 PNC3S 运行机制

假设路径访问代价和节点替换代价等信息会跟随 Interest 包转发到原始信息服务器 OCS, OCS 根据这些信息计算出缓存部署方案, 确定出路径上节点与信息匹配关系, 然后将该关系随 Data 包转发到相应节点, 实现缓存信息的差异化部署.

1.2 路径代价

图 1 显示了一条数据访问路径. 假设从节点 u 到节点 v 的路径上需要依次经过 n 个节点, 令节点 u 的编号为 0, 节点 v 的编号为 n , 则路径代价描述了不同信息在不同节点上缓存时用户的访问代价.

定义 RR_i^c 表示单位时间内在节点 i 处观察到

的对信息 c 的请求次数, 称为请求率. 由图 1 可知, 请求来自两个方向: ①来源于上一跳节点转发的请求, 定义访问次数为 RRL_i^c ; ②来源于访问路径外的其余节点的请求 (包括节点 i 产生的请求), 定义访问次数为 RRO_i^c , 则

$$RRO_i^c = RR_i^c - RRL_i^c. \quad (1)$$

当 $i = 0$ 时, 令 $RRO_i^c = RR_i^c$; 当 $i < 0$ 时, 令 $RR_i^c = 0$.

定义 HP_i^c 为节点 i 到距其最近的有缓存信息 c 的节点 y 的跳数, 则节点 i 访问信息 c 时的路径代价可表示为

$$PC_y^c = RR_i^c \cdot HP_i^c. \quad (2)$$

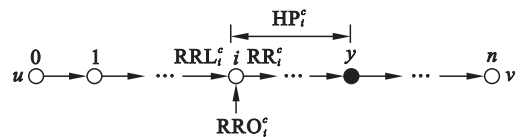


图 1 ICN 中的信息访问示意图

Fig. 1 Information access schematic in ICN

由于到达节点 i 的请求必然经过节点 $i-1$, 则在整个访问路径上, 所有节点对信息 c 的访问总代价可表示为

$$TPC_y^c = \sum_{i=0}^{y-1} (RR_i^c - RR_{i-1}^c) \cdot HP_i^c = \sum_{i=0}^{y-1} RRO_i^c \cdot HP_i^c. \quad (3)$$

当 y 位于不同位置时, 如图 2 所示, HP_i^c 的计算方法不尽相同, 需分别研究其路径访问代价.

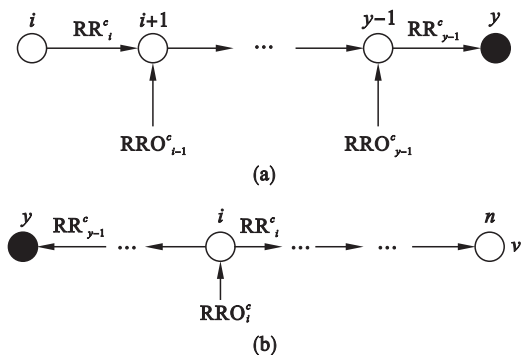


图 2 信息的访问开销

Fig. 2 Access cost of the information

- (a) 信息缓存在上游节点处;
- (b) 信息缓存在下游节点处.

1) 假设信息 c 缓存在请求者的上游节点 y 处, 如图 2a 所示, 所有从 i 到 y 的访问请求均由节点 y 响应, 则请求节点 i 到节点 y 的跳数 $HP_i^c = y - i$, 路径访问代价为

$$TPC_y^c = \sum_{i=0}^{y-1} RRO_i^c \cdot (y - i), 0 \leq i < y \leq n - 1. \quad (4)$$

2) 假设信息 c 缓存在请求者的下游节点 y 处, 请求者将基于就近原则从 y 处或服务器处获

取信息, 则路径访问代价为

$$\text{TPC}_y^c = \begin{cases} \sum_{i=y+1}^{\lfloor \frac{n+y}{2} \rfloor} \text{RRO}_i^c \cdot (i-y), & 0 \leq y+1 \leq i \leq \frac{n+y}{2}; \\ \sum_{i=\lfloor \frac{n+y}{2} \rfloor+1}^{n-1} \text{RRO}_i^c \cdot (n-i), & 0 \leq \frac{n+y}{2} + 1 \leq i \leq n-1. \end{cases} \quad (5)$$

1.3 节点代价

若信息 c 想缓存在节点 y , 而节点 y 的缓存空间已被占满时, 需进行替换操作。

定义 RV^c 为被替换信息 c_j 的黏度, 描述不同信息间的相对重要性:

$$\text{RV}^{c_j} = \lg \frac{n}{n(c_j)}. \quad (6)$$

式中 $n(c_j)$ 是缓存有信息 c_j 的节点数量. 从式(6)可以看出, 黏度值是节点集合范围的一种全局因子, 只与节点集合相关, 与具体节点无关, 描述的是不同信息间的相对重要性; 获得相同请求的节点越多, 该值越小, 即信息和节点相关性越低。

定义 RC^{c_j} 是信息 c_j 的流行度:

$$\text{RC}^{c_j} = \frac{\sum_{i=0}^n \text{RR}_i^{c_j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{c=0}^m \text{RR}_i^c}. \quad (7)$$

式中: $\sum_{i=0}^n \text{RR}_i^{c_j}$ 统计的是单位时间内整条路径上对信息 c_j 的访问次数; $\sum_{i=0}^n \sum_{c=0}^m \text{RR}_i^c$ 统计的是单位时间内整条路径上对所有信息的访问次数; n 是节点数量; m 是信息的集合。

定义 NC_y^c 是在节点 y 处缓存信息 c 时的节点代价, 假设被替换的信息集合为 R , 则节点代价表达式为

$$\text{NC}_y^c = \sum_{c_j \in R} \text{RC}^{c_j} \cdot \text{RV}^{c_j} \cdot \text{RR}_y^{c_j}. \quad (8)$$

1.4 缓存部署的目标函数

定义一个二维变量 $a(c, y)$, 当节点 i 请求的信息 c 缓存在节点 y 处时, 令 $a(c, y) = 1$, 否则 $a(c, y) = 0$. 由于缓存策略的目标是, 追求在最大化利用有限的缓存资源的同时, 实现缓存开销最小, 因此, 定义缓存代价为

$$\text{CC} = \min \sum_{c=0}^m \sum_{y=1}^{n-1} a(c, y) [\varphi \text{TPC}_y^c + (1 - \varphi) \text{NC}_y^c]. \quad (9)$$

其中 φ 为均衡系数。

为消除路径访问代价和节点替换代价数量级差异对优化准确性的影响, 采用高斯法对 TPC 和 NC 分别进行归一化处理, 得到 NTPC 和 NNC . 将数据映射到 $[0, 1]$ 区间, 则式(9)转化为

$$\text{CC} = \min \sum_{c=0}^m \sum_{y=1}^{n-1} a(c, y) [\varphi \text{NTPC}_y^c + (1 - \varphi) \text{NNC}_y^c]. \quad (10)$$

由于从节点 i 发出的对每一个信息的请求最少可以在一个缓存节点处得到响应, 因此需满足的约束条件是

$$\sum_{y \in n} a(c, y) \geq 1. \quad (11)$$

在缓存的过程中, 还需考虑链路容量的限制, 避免缓存节点不能提供足够的链路带宽来满足其余节点对其访问时产生的流量. 定义满足链路容量的限制条件的表达式如下:

$$\sum_{c \in m} a(c, y) \cdot \text{RRL}_y^c \leq \text{LC}(y). \quad (12)$$

式中 $\text{LC}(y)$ 为节点 y 入口链路容量。

最终的目标函数表达式如下:

$$\begin{aligned} \text{CC} &= \min \sum_{c=0}^m \sum_{y=1}^{n-1} a(c, y) [\varphi \text{NTPC}_y^c + (1 - \varphi) \text{NNC}_y^c]; \\ \text{s. t.} \quad &\sum_{y \in n} a(c, y) \geq 1, \\ &\sum_{c \in m} a(c, y) \cdot \text{RRL}_y^c \leq \text{LC}(y). \end{aligned} \quad (13)$$

在对缓存部署优化问题进行求解的过程中, 本文设计了一种离散粒子群优化算法。

1.5 离散粒子群优化算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种源于鸟群运动模型的搜索算法. PSO 最初被应用于连续论域中搜索函数的最优值, 但本文将缓存问题归纳为一个离散优化问题, 因此提出一种基于二进制编码方式的粒子群算法, 用于指导适应度函数的演化过程。

1.5.1 编码

假设对全网的 n 个节点和 m 个信息进行匹配选择, 记 $a_{cy} = a(c, y)$, 则匹配关系的集合为 $\{a_{11}, \dots, a_{1n}, a_{21}, \dots, a_{mn}\}$, 为简化表达, 对每一个匹配关系进行顺序标号, 依次为 $1, 2, \dots, m \times n$. 则一个粒子就代表缓存部署的一个可行解, 粒子在某时刻的位置可表示成一个 $m \times n$ 元的一维向量, 例如, 粒子 k 在时刻 t 的位置可表示为 $X_k^t = (x_{k1}^t, x_{k2}^t, \dots, x_{k, m \times n}^t)$, 其中 $x_{kl}^t (l \in [1, m \times n])$ 表示顺序编号为 l 时所对应的节点和信息的匹配关系, $x_{kl}^t = 1$ 表示将当前信息缓存在该节点上, $x_{kl}^t = 0$ 表示不缓存当前信息. 粒子 k 在时刻 t 的个体极值记为 PB_k^t , 群体极值记为 GB_k^t .

LFU. 为了进一步比较不同的替换算法对 PNC3S 的影响,分析了当采用 LRU 替换时的 PNC3S 缓存效果.

2.3 实验结果

图 4 为 3 种缓存策略在单位时间内缓存率随缓存容量的变化情况;3 种缓存策略在单位时间内缓存率随着容量的增加而逐渐减少. 通过对 CEE 和 LCD 策略的定义分析可知,CEE 的缓存率将高于不断地在命中节点的下游节点缓存信息的 LCD 策略. 而 PNC3S 策略将不同的信息定向缓存在不同的节点,无需冗余的缓存操作,因此,在单位时间内,缓存率的平均值最低. 进一步分析可知,LRU 替换的是最近利用率最低的信息,LFU 替换的是访问次数最少的信息,而文中流行度的定义强调的是单位时间内对信息访问的热度,因此 LRU 替换算法更为适用,缓存率稍微高于 LFU 算法.

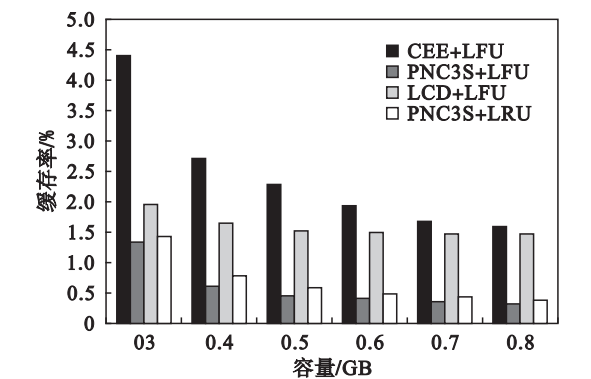


图 4 缓存率随缓存容量的变化

Fig. 4 Cache rate vs cache capacity

图 5 为 3 种缓存策略单位时间内服务器的负载率. 这 3 种缓存策略的服务器的负载率分别随着缓存容量的增大而减少. 这是因为,随着缓存容量的增大,可缓存信息的数量增多,用户在缓存节点获取所需信息的概率加大,因此到服务器节点进行请求的概率降低,负载率相应减少. 进一步分析可知,PNC3S 策略用较低的缓存率获得了与 CEE 近似相同的对服务器的访问率.

图 6 为 3 种缓存策略的网络链路平均利用率随缓存容量的变化情况. 从图中可以看出,这 3 种链路利用率随着缓存容量的增加而减小. 由于 LCD 服务器的负载率最高,意味着有很多请求被转发到了服务器,因此链路的利用率最高.

图 7 为 3 种缓存策略的访问跳数减少率随缓存容量的变化情况. 可以看出,这 3 种缓存策略的访问跳数减少率分别随着缓存容量的增大而增加.

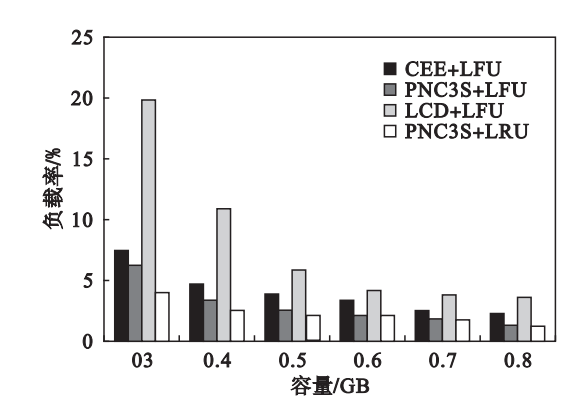


图 5 服务器负载率随缓存容量的变化

Fig. 5 Server load rate vs cache capacity

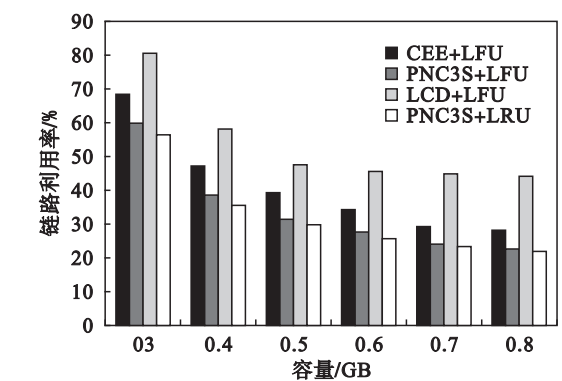


图 6 链路利用率随缓存容量的变化

Fig. 6 Link utilization rate vs cache capacity

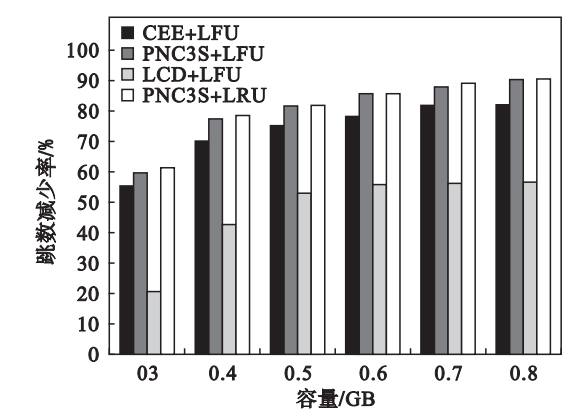


图 7 跳数减少率随缓存容量的变化

Fig. 7 Hop reduction rate vs cache capacity

3 结 语

为了合理利用 ICN 有限的缓存空间,在优化缓存部署时实现缓存开销最小,提出了一种在分布式缓存中嵌入中心式缓存的机制,即基于路径访问代价和节点信息替换代价的缓存协作策略. 通过在服务器节点进行缓存的优化部署计算,并依据计算结果指导缓存的部署. 实验结果表明,该策略不但降低了网络的运行开销,还提高了用户的体验质量.

参考文献：

[1] Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content [J]. *Communications of the ACM*, 2012, 55 (1) : 117 – 124.

[2] Saino L, Psaras I, Pavlou G. Hashing routing schemes for information-centric networking [C] // ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking. New York: ACM, 2013: 27 – 32.

[3] Wang S, Bi J, Wu J. Collaborative caching based on hash-routing for information-centric networking [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43 (4) : 535 – 536.

[4] Wang J, Zhang J, Bensaou B. Intra-AS cooperative caching for content-centric networks [C] // ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking. New York: ACM, 2013: 61 – 66.

[5] Ghodsi A, Shenker S, Koponen T. Information-centric networking: seeing the forest for the trees [C] // HotNets-X Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM, 2011: 483 – 510.

[6] Chai W, He D, Psaras I. Cache “less for more” in information-centric networks [J]. *Computer Communications*, 2013, 36 (7) : 758 – 770.

[7] 蔡君, 余顺争, 刘外喜. 基于节点社团重要度的 ICN 缓存策略 [J]. *通信学报*, 2015, 36 (6) : 1 – 10.
(Cai Jun, Yu Shun-zheng, Liu Wai-xi. Caching strategy based on node’s importance to community in information-centric networks [J]. *Journal on Communication*, 2015, 36 (6) : 1 – 10.)

[8] Psaras I, Chai W, Pavlou G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks [C] // ICN Workshop on Information-Centric Networking. New York: ACM, 2012: 55 – 60.

[9] Wang W, Yi S, Yang G, et al. CRCache: exploiting the correlation between content popularity and network topology for ICN caching [C] // IEEE International Conference on Communications. Sydney: IEEE, 2014: 3191 – 3196.

[10] Lim S H, Ko Y B, Jung G H, et al. Inter-chunk popularity-based edge-first caching in content-centric networking [J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18 (8) : 1331 – 1334.

[11] 崔现东, 刘江, 黄韬, 等. 基于节点介数和替换率的内容中心网络网内缓存策略 [J]. *电子与信息学报*, 2014, 36 (1) : 1 – 7.
(Cui Xian-dong, Liu Jiang, Huang Tao, et al. A novel in-network caching scheme based on betweenness and replacement rate in content centric networking [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36 (1) : 1 – 7.)

(上接第 157 页)

求机器人在期望轨迹上运动即可,更适合用于康复训练.

本文采用了速度场控制 + 主动控制策略的双闭环结构,满足了上肢辅助康复机器人在临床使用中的安全性和平稳性及患者主动参与康复训练的要求.最后,对速度场控制 + 主动力矩控制策略的仿真实验,证明了控制策略的可行性、有效性及优越性.

参考文献：

[1] Kim H M, Hong T K, Cho H J, et al. Development of wrist bending rehabilitation robot [C] // International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Vienna, 2014: 272 – 279.

[2] Ponomarenko Y, Aubakir B, Hussain S, et al. An end-effector based upper-limb rehabilitation robot: preliminary mechanism design [C] // 2014 10th France-Japan/8th Europe-Asia Congress on Mechatronics. Tokyo, 2015: 168 – 172.

[3] Lee G D, Wang W W, Lee K W, et al. Arm exoskeleton rehabilitation robot with assistive system for patient after stroke [C] // 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Jeju Island, 2012: 1943 – 1948.

[4] Rahman M H, Rahman M J, Cristobal O L, et al. Development of a whole arm wearable robotic exoskeleton for rehabilitation and to assist upper limb movements [J]. *Robotica*, 2015, 33 (1) : 19 – 39.

[5] Loópez R, Aguilar-Sierra H, Salazar S, et al. Adaptive control for passive kinesiotherapy ELLTIO [C] // 2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). Montevideo, Uruguay, 2013: 27 – 32.

[6] Ye W, Li Z, Su C Y. Development and human-like control of an upper limb rehabilitation exoskeleton using SEMG bio-feedback [C] // 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu, 2012: 2077 – 2082.

[7] Erdogan A, Patoglu V. Slacking prevention during assistive contour following tasks with guaranteed coupled stability [C] // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura, Portugal, 2012: 1587 – 1594.

[8] Erdogan A, Patoglu V. Online generation of velocity fields for passive contour following [C] // 2011 IEEE World Haptics Conference (WHC). Istanbul, 2011: 245 – 250.

[9] Saddegh N, Horowitz R. Stability and robustness analysis of a class of adaptive controllers for robotic manipulators [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1990, 9 (3) : 74 – 92.

[10] Ortega R, Spong M W. Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial [J]. *Automatica*, 1988, 25 (6) : 877 – 888.