OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	A Study on Loosely-Stabilizing Algorithms for Maximal Independent Set with Unreliable Communications
Author(s)	Dong, Rongcheng
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/93007
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (DONG RONGCHENG)	
論文題名	A Study on Loosely-Stabilizing Algorithms for Maximal Independent Set with Unreliable Communications (信頼性のない通信下での極大独立集合に対する緩安定アルゴリズムに関する研究)

論文内容の要旨

A distributed system comprises a set of autonomous processes, such as computers and processors, and communication links that connect processes in the system. Numerous processes and links in the distributed system make it more flexible and scalable compared with the traditional centralized system. Therefore, the distributed system has obtained more and more attention from both theoretical research and industry. It has extensive applications and is widely used all over the world, for example, the Internet, wireless sensor networks, cloud computing, multi-processor computers, and distributed databases. The maximal independent set (MIS) problem is one of the most fundamental problems in the field of distributed computing. Many problems of distributed computing can be reduced to the MIS problem or use MIS as a subroutine, including the matching problem and the set cover problem. Moreover, the MIS problem is applied in numerous areas, such as software engineering, economics, and biology.

However, the complexity of the distributed system also brings instability, since the crashes and failures of processes and communication links are always non-negligible. Self-stabilization, which is originally proposed by Dijkstra in 1974, is a promising paradigm for designing distributed systems that can autonomously adapt to dynamics caused by transient faults and topology changes of networks. A self-stabilizing system is characterized by two properties called convergence and closure. The convergence allows the system to eventually reach legitimate configurations (i.e., configurations satisfying the problem specification) regardless of the initial configuration, and the closure makes the system stay in legitimate configurations forever. This dissertation focuses on self-stabilizing algorithms in the distributed system with unreliable communications between processes in the graph, i.e., each communication channel suffers the corruption of the transmitted messages (stochastically or adversarially). An inherent limitation of conventional self-stabilizing algorithms is that it requires the system to be fault-free during its convergence. Thus, the design of self-stabilizing algorithms under the threat of perpetual faults is often recognized as a challenging problem. Probabilistic error models, where message corruption is modeled as a stochastic event that the adversary cannot control, are widely accepted as reasonable assumptions of perpetual faults. It is not only standard in information theory but also popular in distributed computing. Self-stabilizing solutions are, however, ruled out for most non-trivial problems. More precisely, it allows an execution starting from any legitimate configuration to some non-legitimate one with a non-zero probability.

To circumvent the impossibility of self-stabilization in probabilistic error models, this dissertation focuses on loose-stabilization, which is a relaxed variant of conventional self-stabilization. While keeping the same convergence property with self-stabilization, loose-stabilization relaxes the closure property: the system is allowed to deviate from legitimate configurations after being legitimate for a long time in expectation with high probability. Loose-stabilization is practically equivalent to self-stabilization if the duration when the system stays in legitimate configurations (called holding time) is much longer (e.g., exponentially longer) than the time required to reach a legitimate configuration (called convergence time). Therefore, even if some unexpected error occurs and causes the system to become illegitimate, in a relatively short time the system can converge to legitimate configurations again and keeps being legitimate for a sufficiently long time with high probability.

In this dissertation, we consider loose-stabilizing algorithms for the MIS problem adapting to unreliable communication links between processes. Chapter 2 is devoted to the formal definitions and concepts used in the dissertation, including the distributed system, the computational model, the erroneous communication model, the MIS problem, and loose-stabilization. In Chapter 3, we present three systematic approaches for designing loose-stabilizing algorithms in probabilistic error models: the redundant-state, the step-up, and the repetition approaches. All the approaches assume the atomic-state model (where each process can atomically change its state depending on its state and the neighbors' current states) with the stochastic scheduler and follow certain kinds of error-correction/detection mechanisms. The basic ideas of error-correction/detection mechanisms are

straightforward and adopted from information theory and coding theory. In Chapter 4, we present a relaxed notion of the MIS problem, named almost MIS (ALMIS), and show that the loosely-stabilizing algorithm for the MIS problem in Chapter 5 can be adopted to overcome the trade-off between space and holding time when considering ALMIS.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　　名	（ Dong Rongcheng ）		
論文審査担当者		（職）	氏　　名
	主 査	教授	増澤 利光
	副 査	教授	伊野 文彦
	副 査	教授	肥後 芳樹
	副 査	准教授	泉 泰介
	副 査	准教授	首藤 裕一（法政大学）

論文審査の結果の要旨

多数の自律的プロセスから構成される大規模分散システムは、インターネット、無線センサーネットワーク、クラウドコンピューティングなどとして、日常的に広く利用されている。しかし、複雑化した分散システムでは、プロセスや通信リンクの障害は不可避となっており、これらの障害による不安定なネットワーク環境下でも安定動作する分散システムが強く求められている。本論文では、不安定な環境において、さまざまなアプリケーションの基盤となる極大独立集合を適応的に構成するための緩安定分散アルゴリズムに関する研究に取り組んでいる。

不安定なネットワーク環境においても安定に動作する分散システムの概念として、「緩安定」が提案されている。これは1974年にダイクストラが提唱した「自己安定」を緩和した概念として、2009年に首藤らによって提案されたものである。自己安定分散システムとは、任意の状況から実行を開始してもやがて安全状況と呼ばれる状況に収束すること（収束性）、および一度安全状況に到達した後は所望の性質を満たし続けること（閉包性）の2つの要件を満たす分散システムであり、不安定な環境で安定動作する分散システムを実現するものである。一方、緩安定分散システムは、上記の閉包性の要件を緩和し、安全状況に収束後、十分に長い時間が経過した後はシステムが所望の性質から逸脱することを許容するものである。この緩和により、自己安定性の実現が不可能な環境においても緩安定性を実現可能となり、また、収束時間に対し所望の性質を満たし続ける時間を十分長くすることで、実用的には自己安定性と同等の安定性を実現できる。

これまで、自己安定性はさまざまな分散システムモデルを対象に研究されてきたのに対し、緩安定性は多数の移動個体で構成される個体群プロトコルモデルを対象とした研究がほとんどであり、従来のネットワークモデルへの緩安定性の適用は課題であった。本研究では、従来のネットワークモデルにおいて、通信リンクを用いて伝送されるメッセージが一定確率で改変される不安定な環境において、さまざまなアプリケーションの基盤となる極大独立集合を構成する緩安定分散アルゴリズムとして３つの手法を提案し、それぞれの性能を解析している。この結果は、不安定な通信を有する従来のネットワークにおける緩安定性の有効性を初めて示すものであり、当該研究分野の新たな展開を促すものである。

次に、緩安定性が所望の性質を満たさなくなる場合、要求される性質が部分的に満たされなくなることがほとんどであることに着眼し、所望の性質の緩和を許容することで、その性質を保持する時間を大きく延長することの可能性について検討した。極大独立集合の要件を緩和したほぼ極大独立な集合の概念を新たに導入し、独立集合問題に対する前述の緩安定アルゴリズムを用いることで、ほぼ極大独立な集合の要件を満たす時間を大きく改善できることを示している。多くのアプリケーションでは、要件を緩和したほぼ極大独立な集合でも十分に利用価値があると考えられ、この結果は、不安定な通信を有する従来のネットワークにおいて、緩安定性の適用範囲を拡大できることを示すものである。

これらの結果は、不安定なネットワーク環境における分散システムの安定化に大いに寄与するものである。よって、博士(情報科学)の学位論文として価値のあるものと認める。