

博士論文

分散リアルタイムシステム用
ディペンダブルシステムオンチップに関する研究

2012年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

水頭 一壽

論文要旨

今日われわれの生活の大部分は情報システムに支えられており、その信頼性・安全性はきわめて重要な社会的関心事となっている。対象とするものが良質で信頼でき、安心してそれに依拠できる状態であることをディペンダビリティと言い、安心・安全な生活を送るために、情報システムのディペンダビリティの向上が望まれている。情報システムの実現には Very Large Scale Integration (VLSI) が必要不可欠であり、VLSI はあらゆる機器の中核として使用されている。そのため、VLSI の信頼性・安全性は、安心・安全な情報システム、延いてはわれわれの安心・安全な生活の実現に不可欠である。情報システムの中でも、ヒューマノイドロボットに代表される分散リアルタイムシステムは、産業的にも技術的にも、今後の日本にとって非常に重要な位置を占め続けると考えられる。このような背景から、本論文では、ディペンダブルな分散リアルタイムシステムを実現するために、ディペンダブルなシステムオンチップを研究・開発する。システム全体のディペンダビリティを実現するためには、多角的なアプローチを用いたソフトウェアとハードウェアの協調設計が必要になる。そこで、ディペンダブルなシステムオンチップを実現するために、分散リアルタイムシステム向けシステムオンチップ Responsive Multithreaded Processor をベースに、演算のディペンダビリティ、通信のディペンダビリティ、電源のディペンダビリティという3つの観点から、システムオンチップに必要な技術を研究開発する。

演算のディペンダビリティを実現するために、リアルタイム処理用プロセッサ Responsive Multithreaded Processing Unit (RMT PU) のタスクの実行速度を細粒度に制御する Instructions Per Cycle 制御機構、障害時の追跡可能性を向上するトレース機構を開発する。ノード内通信のディペンダビリティを実現するために、優先度付きオンチップルータ Virtual channel allocation integrated with crossbar allocation を開発する。ノード間通信のディペンダビリティを実現するために、分散リアルタイム通信機構 Responsive Link の符号化方式を拡張して、伝送路特性に最適な符号で通信可能な機構を開発する。電源のディペンダビリティを実現するために、モジュールレベルの再粒度な Dynamic Voltage and Frequency Scaling とクロックゲーティングを可能にする省電力機構、電圧センサと温度センサを用いた自己モニタリング機構、重要なハードウェアモジュールを障害から保護するためのバッテリバックアップ機構を開発する。

これらの多角的なアプローチを用いて、分散リアルタイムシステム用ディペンダブルシステムオンチップ Dependable Responsive Multithreaded Processor (D-RMTP) を設計実装する。D-RMTP システムオンチップは、リアルタイム処理用プロセッサ RMT PU、リアルタイム通信機構 Responsive Link、DDRSDRAM I/F、DMA コントローラ、PCI64 I/F、IEEE 1394 I/F、シリアル I/F、外部 I/F といったコンピュータ用 I/O、PWM ジェネレータ、パルスカウンタといった制御用 I/O を1チップに集積している。D-RMTP システムインパッケージは、D-RMTP システムオンチップと、メモリーモジュール、自己モニタリングのための電圧センサ、および温度センサが集積されている。

評価の結果より、D-RMTP は多角的なアプローチによってヒューマノイドロボットに代表される実用的な分散リアルタイムシステムを実現可能であることを示す。本研究で研究開発した D-RMTP は、ハードウェアレベルから多角的なアプローチを行うことでシステム全体のディペンダビリティを向上し、ディペンダブルな分散リアルタイムシステムの実現に貢献する。

Abstract

The majority of our lives is supported by an information system in recent times. The reliability and safety of the information system have become an important social concern. Dependability means that the condition of an object is safe and reliable, and we can rely on it with confidence. In order to realize a safe and reliable life, improving the dependability of information systems is desired. A Very Large Scale Integration (VLSI) is essential to the realization of the information system. The VLSI is used as the core of all devices. Therefore, the reliability and safety of VLSI are essential to the safe and secure information systems, and thus the safe and secure life for us. A distributed real-time system represented by the humanoid robot is going to be important in the future.

Against this background, in this paper, we research and develop a dependable system-on-a-chip (SoC) to achieve dependable distributed real-time systems. Distributed real-time systems including humanoid robots require a software and hardware co-design that satisfies the computation and communication time constraints with dependability, suggesting the need for a multifaceted approach. We research and develop a necessary technology to achieve dependable distributed real-time systems from the aspect of a dependability of computation, communication, and power-supply based on a Responsive Multithreaded Processor (RMTP) developed as a SoC for distributed real-time systems.

We developed an Instructions Per Cycle (IPC) control mechanism for a fine-grained execution time control of tasks and a trace buffer for a traceability, to achieve a dependability of computation. We developed a prioritized on-chip router Virtual channel allocation integrated with crossbar allocation (VIX) to achieve a dependability of on-chip communication. We developed a real-time communication mechanism by optimal coding combination based on channel characteristics expanding a coding system of a real-time communication standard Responsive Link to achieve a dependability of off-chip communication. We develop a low power mechanism and self-monitoring mechanism for dependable fine-grained module level dynamic voltage and frequency scaling, and battery backed-up mechanism to protect critical hardware modules from power failure to achieve a dependability of power-supply.

In this paper, we design and implement a dependable SoC named Dependable Responsive Multithreaded Processor (D-RMTP) using such a multifaceted approach to achieve dependable distributed real-time systems. The D-RMTP SoC integrates the RMT PU for real-time computation and the Responsive Link for real-time communication. The D-RMTP SoC, memory modules, and thermal and voltage sensors are integrated into the D-RMTP System-in-a-Package (SiP).

The evaluation results verified all the functions introduced in the D-RMTP and demonstrated that our multifaceted approach including precise priority control for all the levels of the computation and communication could realize practical distributed real-time systems, especially for humanoid robots. This study will contribute to achieve dependable distributed real-time systems using proposed multi-faceted approach.