

動的制約に基づくレジリエントなシステム的设计に関する一検討

A study for Dynamic Constraint-Based Resilient System Design

沖本 天太^{1,2} SCHWIND Nicolas² 陳 希^{1,2} RIBEIRO Tony⁴ 井上 克巳^{2,4} 南 和宏^{1,3}

丸山 宏^{3,4}

新領域融合研究センター¹ 国立情報学研究所² 統計数理研究所³ 総合研究大学院大学⁴

1 序論

2011年3月11日の東日本大震災とそれに伴って発生した津波及び福島第一原発の事故は、いずれも想定外の事象であり、未曾有の大被害をわが国にもたらした。震災以降、外的な擾乱に対してレジリエント (resilient) なシステム設計が求められている。あるシステムがレジリエントであるとは、外的な擾乱に対して耐性があり (resistant) かつ、実際に擾乱が起きて機能が低下したとしても回復性がある (recoverable) ことをいう [3]。

レジリエンスとは、生態学、環境科学及び社会学など、様々な研究分野において広く知られているシステムレベルの性質に関する概念である。自然界、人工物及び社会システムを問わず、レジリエントなシステムの例は多数存在する。しかし、レジリエンスに関する統一的な基礎原理の研究はほとんどない。人工知能分野では、レジリエンスに類似した概念として、離散事象システムにおける安定性 (stabilizability) や保全性 (maintainability) に関する研究がある [1]。また Bruneau は、失われたシステム機能を時間軸上で積分したものと捉えることにより、レジリエンスを定量化する方法を示した [2] (図 1)。

本論文では、レジリエンスに関する統一的な基礎原理の研究を目的とし、その第一歩として、動的制約に基づくレジリエントなシステムを定式化する。またシステムの耐性、回復性及びレジリエンスを評価する方法を示す。提案モデルは、(i) 制約最適化問題 [4] に基づくモデルであり、(ii) 変数、変数値及び制約の動的な変化が表現可能である。また (i) 及び (ii) は、既存のモデル [1, 2] との大きな相違点でもあり、提案モデルでは、既存のモデルと比べ、より一般的な動的な変化が表現可能である。制約最適化問題とは、有限で離散的な領域から値を取る複数の変数に、ある目的関数を最小化するように値を割当てる問題である。

2 モデル

レジリエンスに関する基本用語、モデル、簡単な例を与える。

定義 1 (システム). 変数の有限集合 $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ 及び変数値の有限集合 D に関して、 $X \subset \mathbb{X}$ を変数の部分集合、 dom を X から D へのドメイン関数、 $\Omega(S) = \Pi\{dom(x_i) | x_i \in X\}$ を変数への割当、 c を $\Omega(S)$ から $\mathbb{N}^+ \cup \{\infty\}$ へのコスト関数として、あるシステム S は $\langle X, dom, c \rangle$ の組により定義される。

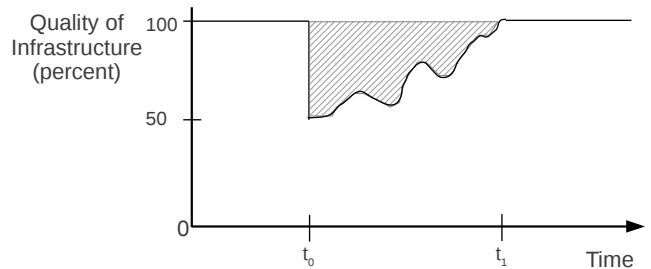


図 1 横軸は時間、縦軸はシステムの機能をそれぞれ表す。システム機能は t_0 で急激に低下し、 t_1 でその機能を完全に回復している。Bruneau は t_0 から t_1 間の三角形の領域を計算することにより、レジリエンスを定量化する方法を示した。

$\Omega(S)$ の要素を S の割当と呼び、 α と記述する。また S の割当 α に関して、各 $x_i \in X$ の変数値を $\alpha(x_i)$ と記述する。すべての割当 α' において $c(\alpha) \leq c(\alpha')$ が成立するとき、割当 α は最適であるという。 \mathbb{S} をすべてのシステムからなる集合とする。

定義 2 (動的システム). システムの集合 \mathbb{S} に関して、 $S_0 \in \mathbb{S}$ を初期状態、 α_0 を S_0 の割当、 Φ を \mathbb{S} から $2^{\mathbb{S}}$ への写像として、動的システム DS は $\langle S_0, \alpha_0, \Phi \rangle$ の組により定義される。

定義 3 (システム経路). 動的システム $DS = \langle S_0, \alpha_0, \Phi \rangle$ に関して、 Φ_T を $\forall S \in \mathbb{S} : \Phi_T(S) \in \{S\} \cup \Phi(S)$ が成立するような \mathbb{S} から \mathbb{S} への写像として、 DS 内のシステム経路 (System Trajectory, ST) は $\langle S_0, \alpha_0, \Phi_T \rangle$ の組により定義される。

ST は、すべての $i \in \{1, \dots, |ST|\}$ において、 $S_i = \Phi_T(S_{i-1})$ となる \mathbb{S} 内のシーケンス (S_1, S_2, \dots) により記述され、 ST の i 番目のシステム S_i を $ST(i) = \langle X_i, dom_i, c_i \rangle$ と記述する。

定義 4 (割当経路). システム経路 $ST = (S_1, S_2, \dots)$ に関して、 ST の割当経路 (Configuration Trajectory, CT) は、すべての $i \in \{1, \dots, |ST|\}$ に対して α_i を S_i の割当として、サイズが $|ST|$ の割当からなる列 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{|ST|})$ により定義される。

CT の部分経路は部分列 $(\alpha_a, \dots, \alpha_b), a \leq b$ により定義する。

定義 5 (耐性). 割当経路 CT 及び非負整数 l に関して、以下が成立するとき、 CT は $\langle l \rangle$ -耐性 (Resistance) があるという。

$$\forall i \in \{1, \dots, |CT|\} : c_i(\alpha_i) \leq l. \quad (1)$$

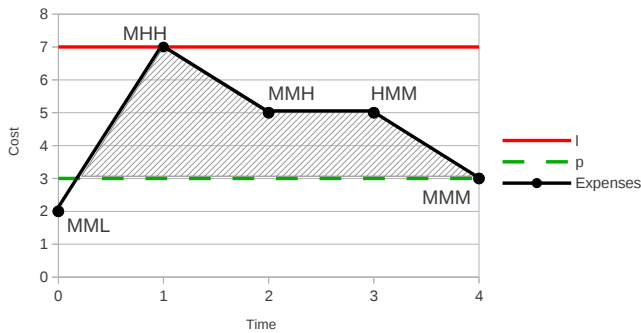


図2 レジリエントな割当経路の例.

システム経路 ST に関して, ST が $\langle l \rangle$ -耐性がある割当経路をもつとき, ST は $\langle l \rangle$ -耐性があるという. また動的システム DS に関して, すべてのシステム経路が $\langle l \rangle$ -耐性をもつとき, DS は $\langle l \rangle$ -耐性があるという.

定義 6 (回復性). 割当経路 CT 及び非負整数 p, q に関して, $\{\alpha_a, \dots, \alpha_b\}$ を CT の部分集合とし, 以下が成立するとき, CT は $\langle p, q \rangle$ -回復性 (Recoverability) があるという.

$$\forall i \in \{a, \dots, b\}, c_i(\alpha_i) > p : \sum_{i=a}^b (c_i(\alpha_i) - p) \leq q. \quad (2)$$

システム経路 ST に関して, ST が $\langle p, q \rangle$ -回復性がある割当経路をもつとき, ST は $\langle p, q \rangle$ -回復性があるという. また動的システム DS に関して, すべてのシステム経路が $\langle p, q \rangle$ -回復性をもつとき, DS は $\langle p, q \rangle$ -回復性があるという.

定義 7 (レジリエンス). 割当経路 CT 及び非負整数 l, p, q に関して, CT が l -耐性があり, かつ $\langle p, q \rangle$ -回復性があるとき, CT は $\langle l, p, q \rangle$ -レジリエンスであるという.

システム経路 ST に関して, ST が $\langle l, p, q \rangle$ -レジリエンスな割当経路をもつとき, ST は $\langle l, p, q \rangle$ -レジリエンスであるという. また動的システム DS に関して, すべてのシステム経路が $\langle l, p, q \rangle$ -レジリエンスであるとき, DS は $\langle l, p, q \rangle$ -レジリエンスであるという.

本モデルの簡単な例を示す. ある地域 A における経済情勢を考える. システム $S = \langle X, dom, c \rangle$ は地域 A を表しているとする. 地域 A は 3 つの島から構成されており, $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ は 3 つの島の集合を表す. 各変数を取る値を $dom(x_1) = dom(x_2) = dom(x_3) = \{Low, Medium, High\}$ とする. 各変数値は各島への投資額のレベルを表す. 3 つの島への投資額は, システム S の割当 α により表される. 例えば, S の割当を $\alpha = MML$ とすると, はじめの 2 つの島, すなわち x_1 及び x_2 への投資額は普通であり, 3 つ目の島 x_3 への投資額は低いことを表している. すべての割当に対して, c_{ref} を 3 つの島への投資額の総和を求める関数とし, 以下で定義する.

$$c_{ref}(\alpha) = \sum_{i=1}^3 local_{c_{ref}}(\alpha(x_i)), \text{ where } \forall x_i \in X,$$

$$local_{c_{ref}}(\alpha(x_i)) = \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha(x_i) = L, \\ 1 & \text{if } \alpha(x_i) = M, \\ 3 & \text{if } \alpha(x_i) = H. \end{cases} \quad (3)$$

例えば, 割当 $\alpha = MML$ における投資額の総和は 2 となる. ここで, 地域 A では, 3 つの島の内, 少なくとも 2 つの島に対して, 普通以上の投資をしなければならない制約があるとする. このとき, システム S のコスト関数 c は以下で定義される.

$$\forall x_i \in X : c(\alpha) = \begin{cases} +\infty & \text{if } |\{\alpha(x_i) = L\}| \geq 2, \\ c_{ref}(\alpha) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

図 2 にレジリエントな割当経路の例を示す. 横軸は時間, 縦軸は 3 つの島への投資額の総和をそれぞれ表す. 黒線 (Expenses) はシステム S の割当経路 CT を表し, 非負整数 l, p, q の値はそれぞれ $l=7, p=3, q=9$ とする. このとき, CT の各割当 MML, MHH, MMH, HMM, MMM における投資額の総和はそれぞれ 2, 7, 5, 5, 3 である. したがって, 割当経路 CT は $\langle 7 \rangle$ -耐性がある (定義 5). また, 投資額の総和が $p (=3)$ 以上の割当 MHH, MMH, HMM, MMM の総和 $(7-3)+(5-3)+(5-3)+(3-3)=8$ は $q (=9)$ 以下である. したがって, 割当経路 CT は $\langle 3, 9 \rangle$ -回復性がある (定義 6). 以上より, 割当経路 CT は $\langle 7, 3, 9 \rangle$ -レジリエンスである (定義 7).

本モデルの open problems として, 例えば, あるシステムがレジリエンスであるかという決定問題や, 各パラメータの最小値を求める最適化問題などが挙げられる. これらの問題では, 多目的制約最適化問題の技術が大きな役割を果たすと考える.

3 結言

本論文では, レジリエンスに関する統一的な基礎原理の研究を目的とし, その第一歩として, 動的制約に基づくレジリエントなシステムを定式化した. またシステムの耐性, 回復性及びレジリエンスを評価する方法を示した. 本研究はコンピュータ・サイエンスだけでなく, 生態学, 環境科学及び社会学など, 様々な研究分野に応用可能である. 今後の課題として, open problems の計算複雑性の解析やアルゴリズムの開発がある. また, 生態学や経済学における実問題への応用を考えている.

参考文献

- [1] C. Baral, T. Eiter, M. Bjärelund, and M. Nakamura. Maintenance Goals of Agents in a Dynamic Environment: Formulation and Policy Construction. *Artificial Intelligence*, 172(12-13):1429–1469, 2008.
- [2] M. Bruneau. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. In *Earthquake Spectra*, volume 19, 2003.
- [3] P. Logstaff. Building Resilient Communities. In *Homeland Security Affairs*, volume 6, 2010.
- [4] T. Schiex, H. Fargier, and G. Verfaillie. Valued constraint satisfaction problems: Hard and easy problems. In *IJCAI*, pages 631–639, 1995.