

統合機能モデルを用いた不具合対策知識再利用について

Reuse of countermeasure knowledge to prevent failures through the use of integrated functional models

小路 悠介
Yusuke Koji

來村 徳信
Yoshinobu Kitamura

溝口 理一郎
Riichiro Mizoguchi

大阪大学産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

In the conceptual design of artifacts, designers often add functions which help prevent potential undesirable states or failures of a required function, which are unintended by designer. We call such functions supplementary functions. Although these supplementary functions play a crucial role in improving the design of an artifact, the designer's intentions (so-called design rationale) in view of supplementary functions often remain implicit. This implies that the design rationale of supplementary functions has not yet been sufficiently shared among designers. In order to explicate design rationale in the form of a model, it is necessary to deal not only with the functional structure but also the unintended phenomena to be prevented by supplementary functions. Based on ontological engineering, we have been doing research on an integrated functional model which can consistently represent both the functional structure and the unintended phenomena. In this article, we therefore discuss the reuse of such design rationale through the intermediary of integrated functional models.

1. 緒言

人工物の部品が果たす役割や設計意図を表す機能的設計知識は、概念設計において大きな役割を果たすにもかかわらず表現方法が確立されておらず、属人的で暗黙である場合が多い。筆者らはこのような機能的設計知識を一般性と一貫性を持って明示的に概念化するための枠組みの開発を進めてきた[來村 02]。この記述枠組みは住友電気工業(株)生産技術部における通常業務において実用されており、技術者から暗黙的だった知識を明示的に表現することができ、それを共有することができるようになったという評価を得ている[溝口 02]。

このような企業における実用において明確になったことの一つが、補助機能と呼ばれる付加的な役割を果たす機能に関する知識の有用性である。補助機能とは、人工物の要求機能を達成するために本質的に貢献するのではないが、それがないと発生するであろう望ましくない機能状態(不具合と呼ぶ)を防ぐ機能を指す。一方、その装置の要求機能を達成するために必須な役割を果たす機能を本質機能と呼ぶ。設計・製造現場においては設計された人工物の効率や製品品質を更に向上させることが必須の課題であり、そのためには補助機能の追加や、従来あった補助機能を他のやり方で達成するなど、補助機能を改良することが多い。従って、補助機能の設計意図やノウハウは蓄積され再利用されるべき重要な知識である。

このような補助機能の設計意図を十分に明示するためには次の二点を明示する必要がある。

- ・ 不具合過程(補助機能が防いでいる不具合が起こる過程)
- ・ 不具合防止方法(不具合過程を防ぐために、補助機能が不具合過程の中のどこをどのように変化させているか)

このような設計意図知識には、設計者が意図している機能と設計者が意図していない現象(意図外現象と呼ぶ)の両方が関係しているので、これらを記述するためには、機能と意図外現象を一つのモデル上で統合して記述する必要がある。このような

モデルを統合機能モデルと呼ぶ。統合機能モデルを記述できるように、筆者らはこれまで、前述した機能的設計知識記述枠組みを拡張し、開発してきた[Koji 04]。

補助機能は起こりえる不具合(その人工物の要求機能が望ましくない状態へ変化すること、と定義する)に対する対策を表している。つまり、補助機能の設計意図を表す統合機能モデルは、不具合対策知識と見なすことができる。

オントロジーに基づき、不具合対策知識を統合機能モデルとして一般性、一貫性を保って記述することで、暗黙的だった部分が明確になる。そのため、対象への記述者自身の理解が深まり、また、他者へその内容を伝えることが容易になる効果が期待できる。更に、統合機能モデルの利用法として、大量の文書の中に埋もれがちであった、過去に用いられてきた不具合対策知識を統合機能モデル上で記述し、知識ベースへ蓄積することにより、新たな不具合に対策を打つ場合や、既に対策として設計されている補助機能を改良する場合に、過去の知識を検索・再利用することが考えられる。

本稿では、そのような、不具合対策知識の検索・再利用について述べる。検索によって提示された不具合対策知識は、解決したい問題へ適用可能であるとは限らないが、設計者が解決しようとしている問題と類似の事例や適用性の高そうな不具合対策知識を提示することは、設計者が新たな問題点や解決策に気づく機会を増やす。そのため、このような不具合対策知識の再利用は人工物の効率や製品品質の向上に有効である。

本稿ではまず、統合機能モデルの概要について説明し、それを用いた不具合対策知識の知識ベースへの蓄積について述べる。そして、その知識を、設計、再設計時に再利用することについて述べる。

2. 統合機能モデルの概要

本節では、例題としてワイヤソーという装置を用いて、統合機能モデルについて説明する。ワイヤソーは半導体製造プロセスにおいてインゴットをワイヤで切断する装置である。このワイヤソーでは、摩擦熱が原因でワイヤが断線し、それによってインゴットを切断する機能が達成できなくなるという不具合が発生する。そのため、スラリを流してワイヤを冷やすという補助機能が設計さ

れており、それによってこの不具合が防がれる。この例では1節で述べた不具合過程と不具合防止方法は以下ようになる。

・ 不具合過程

摩擦熱が発生し、それによってワイヤの温度が上昇し、ワイヤが劣化し、断線しインゴットを切断することができなくなるという一連の過程

・ 不具合防止方法

ワイヤを冷やすという機能が、不具合過程の途中で摩擦熱を取り除くことでワイヤの温度上昇を防ぎ、結果として不具合を防いでいること

これらの概要を図1に示す。統合機能モデルでは、このような不具合過程と不具合防止方法を、機能構造を表すモデルに付加して記述できる。図2はこれらのうち、主に機能構造と不具合過程を記述したワイヤソーの統合機能モデルである。以下では図2を参照しながら統合機能モデルの各部分について述べる。

まず、機能構造モデルについて述べる。統合機能モデルでは機能構造を、機能を達成する部分機能に展開していくことで表す。この木を機能分解木と呼ぶ。図2では、右側の木が、この機能分解木にあたる。ワイヤソーが達成する全体機能はインゴットを切断しウエハを生成すること(「インゴットを分割する」と呼ぶ)であるので、「分割する」という機能が最上位に位置している。また、部分機能が全体機能を達成する根拠になる原理・理論、起こるとされる現象等を方式と呼び概念化している。例えば、ワイヤソーでは、インゴット間の結合力をなくすために必要な力を生成する方式として摩擦方式が用いられている。

次に、不具合過程のモデルについて述べる。不具合過程の中で、機能が望ましくない状態(機能不具合状態と呼ぶ)へ変化する直接の原因が発生する過程を機能不具合発生過程と呼ぶ。上記のワイヤソーの不具合過程では、摩擦熱が発生することからワイヤが断線するまでがこれに当たる。この機能不具合発生過程を示したものが図2の左側の木で機能不具合発生木と呼ぶ。機能不具合発生過程で最上流に記述される事象をトリガースタートと呼び、最下流に記述される、機能を望ましくない状態(機能不具合状態と呼ぶ)に変化させる直接の原因となる事象を機能不具合原因事象と呼ぶ。

機能不具合状態は他の機能へ伝播していき最終的に全体機能(ワイヤソーでは「インゴットを分割する」)が機能不具合状態になる。この過程を機能不具合伝播過程と呼び、各機能に吹き出しをつけることで表す。機能不具合伝播過程で最上流に記述される機能不具合状態を第一機能不具合状態と呼ぶ。このように、不具合過程は機能不具合発生過程と機能不具合伝播過程によって構成される。

統合機能モデルを規定するオントロジーでは、機能を、システムまたは部品の振る舞いを要求機能を達成するという目的

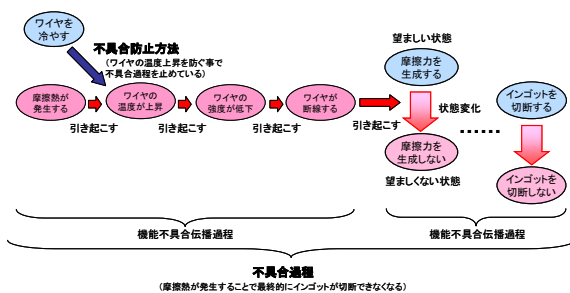


図1 ワイヤソー装置における不具合対策知識

(設計者の意図)の下で解釈した結果と定義している。ここでの「振る舞い」概念は装置の入出力の状態の変化を表す事象を装置の観点から捉えたものを意味している。一方、システムで起こる事象のうち設計者によって意図されていないものは「意図外事象」と定義する。意図外事象は、要求機能を果たすという目的とは違う架空の(意図のない)目的を達成しているとみなすと、機能と同様な達成関係に基づく木構造を構成することができる。このように機能と意図外事象の両者を事象と関係づけることで、図2に示すように、機能不具合発生過程を機能分解木と同様の記述様式、すなわち共通の語彙と共通の達成方式を用いてモデル化できる。図2では、機能不具合発生過程の最下流として「ワイヤが分割されてしまう」、「ワイヤの断線が起こる」等と表現せずに「ワイヤを分割する」として表現しているのもこのためである。

また、ワイヤが断線することで、ワイヤの機能が失われるという事象間の影響・被影響関係を事象属性変化影響として概念化している。図2では事象属性変化影響(a)がそれに当たる。また、不具合防止方法は、補助機能から、その補助機能が直接に影響を与えている意図外事象へこの事象属性変化影響を結び、それによる影響の伝播を機能不具合伝播過程と同様に記述することでモデル化できる。図2の事象属性変化影響(b)は不具合防止方法の一部を表す事象属性変化影響である。

3. 不具合対策知識の蓄積

3.1 方式知識

ある人工物の機能分解木として記述された方式を一般化して機能(事象)達成方式知識として、体系化異なる人工物の設計で再利用することができる。この方式知識は、機能分解木記述時に、ある機能をそれを達成する部分機能へ分解する際に用いられる知識に相当する。そのため、機能達成方式知識には、実現したい機能(全体機能)とそれを達成できる部分機能の列が記述され、それに加えて、方法に基づく理論的な裏付けである原理と、原理を使うことによって生じる性質、原理を使うために必要な制約などが記述される。

例えば、ワイヤソーの機能分解木ではインゴットの切り代部分に力を加える方式として線状摩擦方式が用いられている。この方式はワイヤソーのみで使える方式という訳ではなく、様々な人工物へ応用可能である。このような知識を機能オントロジーに基づき、一貫性、一般性を保って記述することで異なる対象領域においても同じ機能達成方式知識を再利用することができる。

また、機能分解木と同様に、不具合過程の一部として記述さ

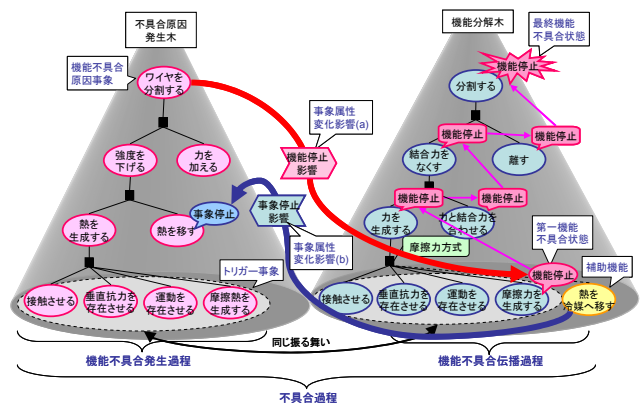


図2 ワイヤソーの統合機能モデル例

れた機能不具合発生木内の方式を一般化して機能達成方式知識と同様に蓄積することが出来る。これは、機能と一般意図外事象の違いはその事象が用いられるコンテキストに依存する目的のみであり、コンテキストが違えば、機能と解釈されていたものが意図外事象として解釈されることもありうるという、機能と一般意図外事象の共通性に起因する。そのため、ある人工物内の一般意図外事象の方式知識として記述されていたものを、違う人工物の機能達成方式知識として再利用することも可能である。

3.2 補助機能と不具合過程・不具合防止方法

本枠組みでは、補助機能は 3.1 節で述べた機能達成方式知識内の部分機能の一部として記述される。本枠組みでは、記述される補助機能は同じグレンサイズの他の本質機能が第一機能不具合状態になることを防いでいるとモデル化するので、補助機能が記述される方式は、その本質機能が部分機能として記述される方式である。

例えば、ワイヤソーでは、摩擦熱によるワイヤの断線を防ぐために、ワイヤを冷やすための補助機能“熱を冷媒へ移す”が設計されている。この摩擦熱による一連の不具合過程のなかで、第一機能不具合状態になる機能は、“摩擦力を生成する”という機能であり、これを防いでいる“熱を冷媒へ移す”が、線状摩擦方式に記述される。

ここで、補助機能は本質的に必要ではない機能であり、コンテキストに依存して付随するかどうか決まる機能であるので、この方式知識を他の設計へ再利用する場合には、その補助機能が必要かどうかを設計者が判断する必要がある。これを判断するためには、その補助機能の設計意図である不具合過程、不具合防止方法を参照する必要がある。そのため、統合モデルとして記述された、不具合過程、不具合防止方法は、補助機能と関係づけられ、蓄積される。

3.3 事象変化影響知識

事象変化影響知識は、ある事象の状態がその事象の装置などを変化させる事象により影響を受け変化することを表す知識であり、統合機能モデルでは事象属性変化影響と呼ばれる関係概念を用いて記述される。例えば、ワイヤソーでは“摩擦力を生成する”という機能の状態が、その装置であるワイヤを“分割する”という一般意図外事象によって影響を受け、機能停止状態へ変化している。このような関係を一般化したものが事象変化影響知識である。

事象変化影響知識も、機能達成方式知識の場合と同様に一般意図外事象と機能の共通性に基づき、一般意図外事象から機能への影響として記述されていたものを、機能から一般意図外事象への影響として再利用することが可能である。

4. 過去の不具合対策知識の再利用

3 節で述べた知識は、改良設計などを行う際の様々なケースで参照し、生かすことが出来る。本節では、不具合対策知識や方式知識が十分に知識ベースへ蓄積されていたと仮定し、それがどのように検索・活用されるかについて、統合機能モデルを記述する際のいくつかのケースに分けて述べる。

4.1 設計への利用

設計者は機能分解木を記述する際に、ある機能を達成する方式はどのようなものがあるかを、知識ベースへ蓄積されている方式知識を参照して、検討できる。その際、設計者が望めば、部分機能として本質機能だけでなく、過去にその方式が選択さ

れた際に付加されていた補助機能が列挙される。設計者は得られる多くの補助機能の中から必要な補助機能を選択する。防ぐ対象となる不具合がその人工物内で発生しなかったり、発生しても問題とならなかつたりする場合は、その補助機能は必要ない。その判断をするために、設計者がより詳しく知りたい補助機能を選択すると、その補助機能と関連づけられた不具合過程や不具合防止方法が示される。

例えば、ワイヤソーでは、線状摩擦方式を用いているため、インゴットを切断した際に、切りくずが発生する。この切りくずにより切断面が荒れるのを防ぐため、ワイヤソーでは切りくずを除去するための補助機能が付加されている。これはワイヤソーが、半導体の基板という精密な製品を作るための装置であるため、切りくずによる切断面の荒れが、許容範囲を超えるためである。しかし、線状摩擦方式を選択すると、原理的にこのような切りくずは必ず発生するが、切りくずによる切断面の荒れが必ず問題になるとは限らない。このような判断を設計者が行うために、不具合過程や不具合防止方法といった知識を参照することは重要である。

4.2 不具合解消への利用

ある人工物において何らかの不具合が発生することが分かっている場合に、その不具合を防ぐために何らかの補助機能を付加したり、既にある補助機能を置換したりすることがある。この場合、設計者がその不具合過程を統合機能モデルとして記述すれば、それを防ぐ可能性のある過去の補助機能を検索することが出来る。検索するための条件として以下の 2 つが考えられる。

1. 現在、検討対象の機能分解木 t_1 中の方式の集合を w_n とする。 w_n のクラス W_n に記述されている、過去に付加されたことのある補助機能。
2. 現在、検討対象の不具合過程中的意図外事象の集合を $p1_n$ としそのクラスの集合を PI_n とする。知識ベース内の補助機能の集合を sf_m とし、影響を与えて停止させるなどしている意図外事象の集合を $p2_m$ としそのクラスの集合を $P2_m$ とする。 $P2_m$ 内のある $P2_k$ が集合 PI_n 中に存在するような補助機能 sf_k 。

不具合過程を防ぐという点では、二つ目の条件を満たしていれば十分であるが、原理的に付加できない場合があるので、一つ目の条件を満たしていることが望ましい。

例えば、ワイヤソーでは、摩擦熱によるワイヤの断線を防ぐために熱を冷媒へ移すという補助機能が付加されているが、これ以外の補助機能を検索する場合を考える。その際の様子を図 3 に示す。上記の后者の条件を満たす補助機能を検索すると、例えば断熱材による“熱をなくす(通さない)”という補助機能が検索される。この補助機能は確かに不具合過程中的“熱を移す”を事象停止へ変化させようため、断線を防ぐようにみえる。しかし、ワイヤソーの場合、摩擦で発生する熱を断熱材で遮断することは原理的に不可能であり、適用することが出来ない。上記の一つ目の条件を満たしていれば、このような補助機能を検索

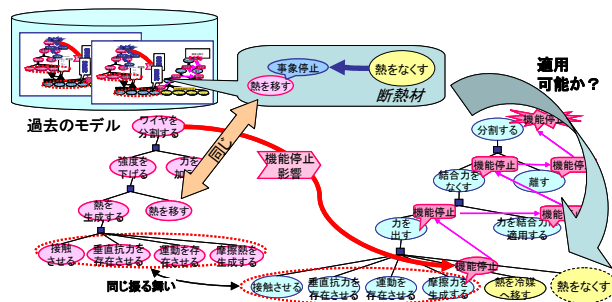


図 3 補助機能“熱をなくす”の検索・検討

することを減少できると考えられる。過去に同じ方式で用いられたことがある補助機能ならば、原理的に適用不可能な場合が減少すると考えられる為である。

4.3 潜在不具合の同定への利用

ある人工物に対して、それを動作させるとどのような不具合が発生しうるかを検討する際に、過去の不具合発生過程の知識を役立てることができる。ある機能分解木を検討中に、有効な過去の機能不具合発生過程を検索する条件として以下の二つが考えられる。

1. 現在、検討対象の機能分解木中の方式の集合を w_n とし、 w_n のクラスの集合を W_n とする。知識ベース中に蓄積されている不具合発生過程の中で、 W_n のインスタンスを用いたことでトリガー事象が発生している不具合発生過程
2. 現在、検討対象の機能分解木中の機能の集合を f_n とし、そのクラスの集合を F_n とする。知識ベース中に蓄積されている不具合発生過程の中で、 F_n のインスタンスを過去に機能不具合状態にした不具合発生過程

上記に示した条件は、機能不具合発生過程を構成する事象のうち、最上流のトリガー事象や最下流の不具合原因事象が、検討対象のモデルに対し合致するものを検索するための条件である。そのため全く同じ不具合が起こることは保証されない。しかし、過去の事例から「どのような意図しない現象が起こるか」、「機能不具合の直接的な原因としてどのようなものがあり得るか」という知識を提示することは、潜在的な不具合を考える上での糸口を設計者へ与えるため、有効であると考えられる。また、機能不具合発生過程の全体を提示することで、同じような過程が起こりうるかを検証できる。

一つ目の条件によって得られた不具合発生過程に対し、設計者は、「トリガー事象が発生した後、どのように機能不具合原因事象が達成されるか」、また、「機能不具合原因事象が達成されたとして、それが機能不具合状態を引き起こすかどうか」といったことを考慮し、現在、検討対象である機能分解木へ還元する。機能不具合原因事象が機能不具合状態を引き起こすかどうかについては、事象属性変化影響が結ばれるかどうかに対応するため、過去の事象変化影響知識が利用できる。

また、二つ目の条件によって得られた不具合発生過程に対し、設計者は、「機能不具合原因事象を達成する部分事象が同じように起こりうるか、違うならどのように起こりうるか」といったことを考慮し適用する。

5. 検討課題と展望

4.3 節では、機能不具合発生過程の再利用について述べた。しかし、ある機能不具合発生過程が起こりうるかと判断された場合でも、それによって引き起こされる第一機能不具合状態が機能分解木上で最上位の機能へ伝播し、望ましくないと判断されるかどうかは分からない。この機能不具合伝播過程の検討を行うために、過去の知識を再利用することについて現在、研究中である。一つの再利用法として、一段の部分機能から全体機能への機能不具合状態の伝播を、機能属性の依存関係として方式知識へ記述して蓄積し再利用することを検討中である。機能不具合状態は機能属性の変化として定義されるため、属性間の依存関係が分かれば、部分機能の機能属性の変化から全体機能の機能属性の変化が分かると考えられるためである。このような依存関係については、ナノテク材料の研究分野を対象として研究が進められている[垂見 05]。

また、機能不具合発生過程について、最上流の事象であるトリガー事象としてどのような事象が起こりうるかということ、最下

流の事象である機能不具合原因事象が分かっているときに、不具合原因発生木としてどのような構造を用いるかを設計者が検討することを支援することについて、現在、研究を進めている。機能分解木と違い、不具合原因発生木は、それを構成する意図外事象が、熱伝導や重力など、単なる自然現象に基づく単純な達成関係を持ったものであることが多い。そのため、過去の設計例から不具合原因発生木内に表れる典型的な方式の組み合わせを抽出し、新たな設計へ生かすことが有効であると考えられる。

これまで述べてきた不具合対策知識は、信頼性解析の分野で幅広く使用されている FMEA (Fault Mode and Effect Analysis) で用いられる知識と共通する部分がある。これまで、筆者らは統合機能モデルで記述された知識を、故障診断や信頼性解析といったタスクへ特化したモデルへ変換し、設計者へ提示するための、知識変換システムの開発について研究をすすめてきた[小路 04]。不具合対策知識を、本稿で述べたような概念設計タスクで再利用するだけでなく、関連するその他のタスクでの再利用も進めていくことで、知識の相互運用性、共有性がより促進されると考えられる。

6. まとめ

本稿では、人工物の概念設計時における不具合対策知識を、統合機能モデルを用いて記述し、蓄積することについて述べた。またその知識を、改良設計などを行う際の様々なケースで再利用することについて述べた。このような知識の再利用を行うことで、過去の多くの事例へ触れることは、設計者が気づいていなかった不具合やその防止方法を検討することを促し、より安全性や安定性の高い人工物を設計することに貢献すると考えられる。

参考文献

- [來村 02] 來村徳信, 溝口理一郎: オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み, 人工知能学会論文誌, 17(1), pp.61-72, 2002.
- [溝口 02] 溝口 理一郎, 他: オントロジー工学の成功事例 ~ 機能オントロジーに基づく生産技術知識の共有・再利用~, 人工知能学会研究会資料, SIG-KBS-A202-07, 2002.
- [Koji 04] Koji, Y., Kitamura, Y., and Mizoguchi, R.: Towards Modeling Design Rationale of Supplementary Functions in Conceptual Design, Proc. of the 5th international Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE2004), 2004, pp117-130.
- [垂見 05] 垂見 晋也, 古崎 晃司, 來村 徳信, 田中 秀和, 川合 知二, 中山 忠親, 新原 皓一, 溝口 理一郎: オントロジー工学に基づくナノテク材料の機能・製造プロセス知識統合的記述システムの開発, 情報処理学会研究報告 (2005-ICS-139), pp151-156, 2005.
- [小路 04] 小路悠介, 來村徳信, 溝口理一郎, : オントロジーに基づく統合機能モデルとその知識変換~FMEA シートへの変換~, 人工知能学会全国大会(第 18 回)論文集, 2004.