

ET ロボコンにおけるモデルを取り入れたロボット制御の教育とソフトウェア品質

鷲崎 弘宜*

1. はじめに

ET ソフトウェアデザインロボットコンテスト (以降、ET ロボコン) とは、モデルを取り入れたソフトウェアシステム開発およびロボット制御を、原則として複数名からなるチームで競うコンテストである [1]. ET ロボコンは、組込みシステムのエンジニアやエンジニアを目指す学生、さらには初学者に対して学習機会を提供することを目的とし、組込みシステム技術協会の主催および SESSAME の特別協力により、スポンサーおよび多くの協力者・団体を得て全国規模で毎年開催されている。

本稿では、ET ロボコンの概要や、組込みソフトウェアシステムのモデルおよび品質の観点から技術的な特徴を解説したうえで、学びの機会としての狙いも解説する。なお本稿の内容は、ET ロボコンの一端に携わる筆者の個人的視点に基づくものであり、主催側の公式見解を意味するものではないことに留意されたい。

2. ロボット制御とモデルのコンテスト

ET ロボコンは 2002 年に始まった UML ロボコンを前身とし、2021 年大会は 20 回目となる。2021 年大会では全国を 9 地区に分けて 9-10 月に地区大会が実施され、参加した約 200 チームのうちで好成績を収めた約 40 チーム (エントリークラスを除く) が 11 月に ET&IoT 展と連動して開催されたチャンピオンシップ大会において技術を競った。2020 年および 2021 年はコロナ禍のためシミュレータを用いたオンライン開催のみとなったが、2022 年は実機を用いたリアル開催も計画されている。コロナ禍以前は毎年 300 チーム前後が出場しており、2022 年以降は再びチーム数の増大が見込まれる。

2.1 ET ロボコンの部門

ET ロボコンにはエントリークラス、プライマリークラス、アドバンストクラスの 3 部門があり、コロナ前とコロナ中の開催実績を総合すると、概ね表 1 に示す内容

を扱う。ただし毎年一定の改訂があることに留意されたい。

ET ロボコンでは、ロボット機材を用いた走行競技の正確さと速さ、および、その実現のためのソフトウェアや制御を表現するモデルの分かりやすさや妥当性をそれぞれ独立に評価し、評価結果を総合する形をとる。

2.2 走行競技

走行競技では、直近ではレゴマインドストーム EV3 による自律走行ロボットを共通機材とする。ロボットは年々改訂されており、2022 年はレゴエデュケーション SPIKE プライムおよび Raspberry Pi を組み合わせたものも用いられる予定である。過去のものも含めて例を図 1 に示す。ただしエントリークラスはシミュレータで実施され、実際の機材は用いない。

参加者がハードウェアを変更できないため、ET ロボコンはソフトウェアのコンテストである。黒いラインが描かれたコース上をロボットにより自律走行させるライントレースを基本とし、部門に応じて、ブロックの運搬 (初歩) や段差・障害物の攻略 (基礎)、さらには、カメラ画像について AI で色判定したブロックの移動操作 (高度) といったタスクが課される。

2.3 モデルの審査

ソフトウェアの面では、ロボットを制御するプログラムを評価するのではなく、その導出に至り、機能や制御の仕組みを説明するモデルを審査員が評価する。

エントリークラスでは機能実現に必要なソフトウェアの構造および振る舞いのモデルのみを扱い、対してアドバンストクラスでは機能実現のためのソフトウェアの要求から分析、設計に至る詳細なモデルと、要素技術を用いて高性能にタスクを達成するための制御戦略を表す制御モデルの両方を扱う。プライマリークラスはそれらの中間にあたる。競技やモデルの課題設定の変遷については [2] が詳しい。



図 1. ET ロボコンの過去のロボットの例

* 早稲田大学 / 国立情報学研究所 / システム情報 / エクスマーシオン

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo

Key words: Embedded software development, software modeling, software quality, robot contest, education

表 1. 部門ごとに扱う内容 (今後, 変更可能性あり)

項目	エントリー	プライマリー	アドバンスド
対象	入門者, 未経験者	組込みシステム初級者	組込みシステム中級者
ハードウェア	無し(ロボットシミュレータ)	EV3, または, SPIKE + Raspberry Pi に基づく規定ロボット	EV3, または, SPIKE + Raspberry Pi に基づく規定ロボット
競技	ラインレースおよび初歩タスク	ラインレースおよび基礎タスク	ラインレースおよび高度タスク
ソフトウェアモデル	限られた機能に対応する限られた側面(構造, 振る舞い)	限られた機能に対応する様々な側面(機能, 構造, 振る舞い)	複数の機能に対応する様々な側面および抽象度(要求, 分析, 設計)
制御モデル	無し	オプション	制御戦略や要素技術が必須

3. 組込み開発におけるモデルの必要性

携帯電話や家電, 自動車の変革に見て取れるように, かつての組込みシステムは小さくシンプルな機能を高性能に実現することが目的であったものが, ハードウェアおよび通信の発展を受けて, 快適で新たな価値を生み出す大規模かつ複雑なサービスを実現することが目的へと変容しつつある. こうした中で, コード中心の開発では限界があり, モデルを組み入れた開発の必要性が叫ばれて久しい [3].

モデルとは広義には, 認知上の目的のために, 対象そのものの代わりに抽象化により効率よく扱えるように表現したものである [4]. 概念の歴史を辿ると, プラトンが紀元前 360 年頃に灌漑用の水路を用いて, 直接に実験できない血管の機能を議論したことが知られている [4]. 時代や表現方法は異なっても, 組込みシステムにおけるモデルの狙いは同様である. 組込みシステムおよびその制御プログラムが複雑化しつつあるなかで, 特定の機能や側面に絞ってそれらを実際に近い環境で直接に実験することはしばしば困難であり, まして開発の早い段階で実機やプログラムを得る前には検証できない. そこで抽象化により図や数式などで表現した結果を代わりに用いることで, システムやプログラムの仕組みを効率よく, それも様々な人々の間で議論できる.

具体的にはモデルにより, 組込みシステムやプログラムの異なる機能や各種の制約および側面といった関心事を分離検討し, その理解を共有しながら, モデル上で早期に検証し品質を早い段階で高めたうえ, モデルからコードへと体系的に落とし込むことで, 高品質および高効

率な開発の実現を期待できる. 加えて, モデルからモデルへの変換やコード生成の自動化を通じた試行錯誤を含めたプロセス全体のさらなる効率化, さらには, 抽象度やプラットフォームへの依存性に応じた再利用をも期待できる. ただしその効用を得るためには, エンジニアおよびチームにおいて, 対象を抽象化し, その結果を皆で共通理解できる形で表現し, そのモデル上で仕組みや性質を検討するスキルが求められる. ET ロボコンは, 組込みエンジニアに対してそうしたモデリングスキルの学習機会を提供する.

4. モデルの種類と役割

組込みソフトウェアにおいて扱うモデルは, ソフトウェアモデル (Modeling by Analysis [3]に相当) と, 制御モデル (Modeling by Rule [3]に相当) に大別できる. 前者は要求定義や分析の早い段階から用いられることに対して, 後者は主として設計以降において扱う.

高付加価値のサービス実現が求められるこれからの IoT・組込み開発においてますます必要となっていくことから ET ロボコンは前者を主に扱うが, 制御にあたり後者の重要性は依然として変わらないため, 後者も一部の部門において明示的に扱う.

4.1 ソフトウェアモデル

サービスや機能を検討および要求として定義し(機能・要求モデル), その実現のために必要なソフトウェアシステム上の要素や要素間の関係を表し(分析・設計モデルにおける構造), さらに要素を用いて機能を実現するための振る舞いを表したものである(分析・設計モデルにおける振る舞い). 汎用のモデリング言語としては UML が頻繁に用いられる. モデルを中心にモデル変換やコード生成を通じて進める開発はモデル駆動開発と呼ばれる.

ET ロボコンではすべての部門において, ソフトウェアの構造と振る舞いを中心に機能実現のための構成や方法の設計・表現に用いられる. 表記法として, 機能についてはユースケース図やアクティビティ図が, 構造についてはクラス図が, 振る舞いについてはシーケンス図やステートマシン図および状態遷移表がよく用いられる. クラス図による分析レベルの構造モデルの簡略化された例を図 2 に示す.

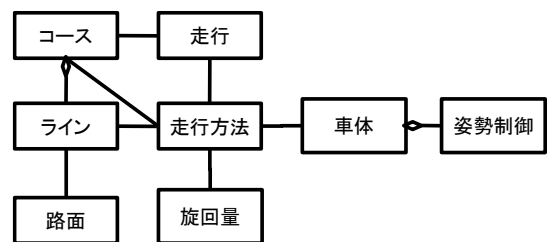


図 2. UML クラス図による構造の分析例

4.2 制御モデル

制御・性能モデルは, 性能を満たすために必要な要素

技術やそれを用いた制御の方式をモデリングしたものであり、一般に物理法則や標準・規格に従う。物理現象のフィードバック制御の仕組みを表した数式およびブロック線図のような連続系モデルや、通信プロトコルの仕様記述のような離散系モデルが該当する [3]。これらは組込みや関連の開発において古くから用いられ、領域によってはほぼ必須という場合がある。特に制御系においてモデルに基づいてシミュレーション検証やコード生成を中心に進める開発はモデルベース開発と呼ばれる。モデルベース開発環境 MATLAB/Simulink を用いた制御モデルの表現例を図 3 に示す。

ET ロボコンでは特にアドバンストクラスにおいて、ロボットの高性能な制御や、高度タスクの達成に必要な制御戦略の設計・表現に用いられる。表記法は、ブロック線図や数式、実験結果を記録したグラフなど様々である。UML のアクティビティ図やステートマシン図が用いられることもある。なお提出可能な紙面の都合から、滑らかなライントレースの実現のためのフィードバック制御 (PID 制御など) の式や、モータ角度からの位置推定式といった基本的なモデルは省略されることが多い。

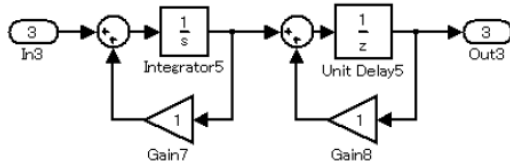


図 3. 制御モデルの表現例

5. モデルを通じた品質と追跡性

モデル上で品質を組み入れて、コードやシステムの品質へと反映させることが重要である。モデルの審査と品質の関係、および、追跡性に基づく反映を説明する。

5.1 モデル審査の観点と品質

ET ロボコンにおいて参加チームから提出されたモデルは、表記法上の正しさ・分かりやすさ、機能実現上の妥当性、制御上の有効性、モデル間の一貫性・追跡性などの観点で審査員から評価される。審査規約の詳細については [1][5] を参照されたい。これらの審査上の観点を、システムおよびソフトウェア品質の主要な特性を定義した ISO/IEC 25010:2011 [6] における製品品質モデルに照らすと、表 2 のように整理できる。表 2 において、審査上の観点により高く評価される場合に、システムの製品品質特性に寄与する関係を表している。なお、ET ロボコンにおいて強くは考慮されない品質特性として互換性、使用性、セキュリティは省いている。また、表 2 に未記載の組み合わせについても、間接的な寄与を検討しうる。

表 2 に示すように、ET ロボコンにおいてソフトウェアモデルのモデリングを通じて機能適合性を高め、制御モデルを通じて性能効率性や信頼性を高められることを期待できる。さらに、モデルの表記の正しさや分かりや

すさ、および、モデル間の一貫性・追跡性を高めることで、開発上の保守や環境適応のしやすさを向上できることを期待できる。

例えば筆者らは、ET ロボコンのある大会における審査員による評価の低い構造モデルほど、小規模かつ Coupling Factor (全体におけるモジュール間の結合関係の多さ) によって複雑さが大きいと測定されるものが多いことを確認している [7]。そうした複雑さの大きさは、修正や試験のしやすさに代表される保守性の妨げとなるものであり、機能を保ちつつも複雑さを抑え分かりやすいものとなるようにモデルを改訂することが望ましい。

5.2 追跡関係に基づく品質の反映

こうしてモデル上で早期に品質を作り込むことは、モデルとコードの適切な対応・追跡関係が確保されているのであれば、コードおよびそれを通じたシステム全体の品質の向上に寄与することが期待できる。

筆者らは ET ロボコンのある大会について、参加者有志からコードを借り受けて保守性を定量評価した結果、審査員によるモデルの評価の高さとコードの保守性の高さには弱い正の相関があることを確認している [8]。さらに、モデル上の要素がコード上で網羅されている割合をあわせて調査した結果、網羅率の低いモデル・コード対をデータから除くことで、モデルの評価の高さとコードの保守性の高さには強い正の相関が認められることを確認している [8]。これは、コードとの対応・追跡性を高めることで、モデルの高い品質をコードへと反映させられることを示唆している。

表 2. 審査観点から品質特性へ想定される関係の例

	表記の正しさ・分かりやすさ	機能実現上の妥当性	制御上の有効性	モデル間の一貫・追跡性
機能適合性	機能の完全、正確性等に寄与	機能の完全、正確、適切性に直接寄与	機能の正確性に寄与	機能の完全、正確性等に寄与
性能効率性			時間効率性に直接寄与	
信頼性			成熟性や回復性等に寄与	
保守性	修正性や試験性等に寄与			修正性や試験性等に寄与
移植性	適応性に寄与			適応性に寄与

6. ゲーム要素と教育上の意義

ここまで、ソフトウェアモデルや制御モデルを組み入れた組込み開発が重要であり、モデル上での品質の作り込みを通じて、対応・追跡性が確保されている限りにおいてコードやシステムの品質の向上へと繋げられる可能性を示してきた。そうしたモデルで考えられるエンジニアを育成する場として ET ロボコンは貴重である。競技に加えて各種の教育セミナーが提供されることもあり、ET ロボコンの教育効果は様々に報告されている [5][9]。

筆者は ET ロボコンの教育上の優れた特徴を次の三つと捉えている：ゲーミフィケーション、一通り揃った安全なプロジェクト、および、業界標準プラットフォーム。

第一に、ET ロボコンはコンテストであり、段階的チャレンジと達成、短いフィードバックサイクル、試行錯誤、報酬、スコアと競争、協調といったゲーム要素が多く含まれている [10]。これらにより、参加者が楽しみながら学びを深めることに適している。取り組みの結果がロボットの動作という実世界への働きかけとして得られる点も、学びの動機づけとして好ましい。

第二に、大規模な組込みソフトウェア開発の分業や派生開発が進む中で、要求から実機制御までの一通りの実践的な技術を心理的に安全な形で、それもモデル中心に抽象化能力を鍛えながら存分にチームで実験できるプロジェクトである。

第三に、20 年間続き、今後も内容を進化させつつ継続が期待される全国規模のものであり、コンテストを共通の言葉として、講師陣や参加者間、さらには過去・未来の参加者をつなげる機会が豊富に得られる。参加者が次回以降の講師陣や審査員となり、次世代の育成を担うというエコシステムを形成している点も大きい。参加年のみならず長期にわたり成長の機会が得られ、それを拠り所に組織としても安心して派遣計画や社内育成プログラムを設計でき、いわば業界標準の組込みモデリング人材育成プラットフォームである。

7. おわりに

本稿では、モデリングや組込み開発の背景を抑えたいうえで、ET ロボコンがモデルを組み入れたロボット制御および組込み開発の学びの機会として重要であることを解説した。またモデルを通じた品質の扱いも解説した。

筆者自身、学生を引き連れて参加して以来、多くの方々と出会い、モデリングやソフトウェア品質の研究を深め、それを通じて審査や会場ホストの担当、さらには協業機会を得るなど、ET ロボコンに育てていただいた。今後も多くの方々に参加いただき、多様な参加者や関係者を得てコンテスト自体が試行錯誤し進化していくことを願ってやまない。本稿がその一助となれば幸いである。

謝 辞

ET ロボコンは長年にわたり多くの運営関係者やスポンサー他皆様に支えられており敬意と謝意を表します。執筆にあたり ET ロボコン実行委員会 平谷恵里氏、土樋祐希氏のご支援をいただきました。御礼申し上げます。

参 考 文 献

- [1] ET ロボコン, <https://www.etrobo.jp/>
- [2] 土樋祐希, “ET ロボコンの課題設定変遷とその効果”, 工学教育, 69(1), pp. 1_59-1_64, 2021.
- [3] 渡辺政彦, “組み込みソフトウェア向け開発環境”, 情報処理, 45(1), pp. 10-15, 2004.
- [4] 日高宗一郎, Jean BÉZIVIN, 胡振江, Frédéric JOUAULT, “『モデル駆動工学の原理と応用』 (1) モデル駆動工学の歴史と背景”, コンピュータソフトウェア, 30(3), pp. 3_25-3_44, 2012.
- [5] 吉留忠史, “ET ロボコンを通じた組込みソフトウェア技術教育”, 日本ロボット学会誌, 38(9), pp. 805-808, 2020.
- [6] ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuARE) — System and software quality models
- [7] Hironori Washizaki, et al., “Experiments on Quality Evaluation of Embedded Software in Japan Robot Software Design Contest,” Proceedings of the 28th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering (ICSE), pp.551-560, 2006.
- [8] 鷺崎弘宜, 阿左美勝, 田邊浩之, “モデル活用の効能: 第 1 回 モデルを書く意味”, 日経エレクトロニクス, 日経 BP 社, 2011 年 8 月 8 日号, 2011.
- [9] 土樋祐希, “企業の ET ロボコン参加活動と教育効果”, 工学教育, 64(3), pp. 3_67-3_72, 2016.
- [10] 鷺崎弘宜, “君の実力を試してみよう! -「ラーニング・スルー・コンテスト」のすすめ-”, 情報処理, 57(10), pp. 7-10, 2016.

著 者 略 歴



わしざき ひろのり
鷺崎 弘 宜

早稲田大学グローバルソフトウェアエンジニアリング研究所所長・教授, 国立情報学研究所客員教授, システム情報取締役 (監査等委員), エクスモーション社外取締役. ET ロボコン審査アドバイザー. IEEE Computer Society 副会長, ISO/IEC/JTC1 SC7/WG20 議長, 情報処理学会ソフトウェア工学研究会主査, リカレント教育 スマートエスイー代表. 著書・訳書に『機械学習デザインパターン』『ソフトウェア品質知識体系ガイド SQuBOK Guide』『演習で学ぶソフトウェアメトリクスの基礎』ほか.