

# アナログとデジタルを比較する教材の開発

## — 表面実装によるライントレーサーの小型化 —

加藤良将\*1・宮下十有\*2・亀井美穂子\*2・鳥居隆司\*2

Email: kato@nua.ac.jp

\*1: 名古屋芸術大学 芸術学部

\*2: 椋山女学園大学 文化情報学部

◎Key Words アナログ, デジタル, プログラミング, センサー, アクチュエーター

### 1. はじめに

現代社会は、高度に情報化された社会であり、人と人、人とモノ、モノとモノの間でコミュニケーションが可能となっているが、それは基本的にデジタル化の恩恵であるため、情報技術に関する科学的理解に基づいた状況判断能力が不可欠である。2021年に閣議決定された第6期科学技術・イノベーション基本計画においても、Society5.0実現に向けた科学技術・イノベーション政策のひとつである「ひとりの多様な幸せ (well-being) と課題への挑戦を実現する教育・人材育成」においても、「初等中等教育段階からのSTEAM教育やGIGAスクール構想の推進」を示し<sup>(1)</sup>、科学技術に関する教育を推進する方針を打ち出している。

科学技術に関する教育は、1945年から2年間ほど一部の師範学校において特別科学教育<sup>(2)</sup>が行われていたが、その後のいわゆる平等主義<sup>(3)</sup>を経て、その後1991年の第14期中央教育審議会答申「新しい時代に対応する教育の諸制度の改革について」で、「個性を尊重するこれからの時代においては、特に能力の伸長の著しい者に対しては教育上の例外措置を認め、その能力の一層の伸長を図ることが必要である。」として、「まず、数学や物理などの特定の分野に関しては、特に能力の伸長の著しい中等教育段階の生徒に対して大学レベルの教育研究に触れる機会を与えることが望ましい。」との記述もある。このような方針は、1996年に策定された科学技術基本計画へとつながっている。

しかしながら、科学技術が高度化するにしたがって、科学技術のブラックボックス化が進展する。このことは、1994年に発行された科学技術白書<sup>(4)</sup>に、若者の科学技術離れという文脈で懸念が示され、『科学技術に関する展示、行事等を実施するに際して、今後これまでに以上期待されることのひとつとしては、生活の中における「科学技術のブラックボックス化」に対応した視点からの工夫が考えられる。』との記述がある。そして、2000年頃から、ものづくりの基盤の整備として、『プロジェクトの複雑化、製造現場の自動化等が進展する中で「技術のブラックボックス化」を回避するため、プロジェクト全体のスコープやコスト、品質、リスク等の適切な管理のための知識・手法の体系化を行い、高いプロジェクトマネージメント能力を有する技術者を養成する。』<sup>(5)</sup>などの施策が行われている。

また、このような科学技術に関する発明は、知的財産権に関わる制度の活用や論文発表によって、ある程度一定期間保護されているが、特許は基本的に公開され、その権

利の存続期間には限りがあること、特許の取得や維持のためのコスト、国際特許をすべての国で取得することは困難であること、特許権が侵害された場合の対応の煩雑さ等の様々な理由から、技術開発上の成果や製造のノウハウのブラックボックス化は常に検討されており、最近では、研究開発費に対する特許出願件数の減少も報告<sup>(6)</sup>されている。

いずれにしても、科学技術の進展や社会の複雑化によって、あらゆるものが入力と出力の関係や使い方を知らずして使用するブラックボックスとなっており、それぞれの分野の専門家でなければ、原理や仕組みを理解していないことも多く、因果関係や影響の大きさを推測することが困難である。

最近話題のChatGPTについても、機械学習がどのようなデータを用い、どのようなプロセスを経て結果を導き出したのか、理解せず、説明されないまま使用されている事例がほとんどであるが、今後は、ある程度、仕組みが透明化された機械学習<sup>(7)(8)</sup>の活用へと変化するようになるのかもしれない。

我々は、ものづくりを通して部品の構成や動作の仕組みを理解し、情報の科学的な内容の理解を支援できるライントレーサーを制作<sup>(9)</sup>しているが、表面実装部品の使用とギアードモータの配置等を改良し、安価な部品で手作業のはんだ付けで組み立てることが可能なまま、さらに小型化することで、一般的な授業時に使用される机上であっても十分活用することができるライントレーサーを開発した。

### 2. ライントレーサー

#### 2.1 ライントレース

メカニカルな仕組みを備えて動作するものは、紀元前1世紀頃の古代ギリシャ時代に制作されたとされるアンティキティラ島の機械と言われるものであるが、天体の運行をシミュレートする装置<sup>(10)</sup>であったことが解明されており、自動的に移動するロボットではないとされている。自動的に移動するロボットは、ゼンマイで動作する茶運び人形<sup>(11)</sup>やトイ・ビートル<sup>(12)</sup>があり、その後、光に反応し、バッテリーを電源としてモーターで移動するロボット<sup>(13)</sup>が作られているが、このロボットは、光に向かって走行するもので、光センサー、真空管、リレー等を用いた電気回路による自動制御フィードバックによって自動的に動作<sup>(14)</sup>するサイバネティクスによる生物のシミュレーションに関するものである。

ライントレースに近いものとしては、60m以内の距離の黒い床に引かれた白いラインの周回コースをトレースすることを競うロボットレース競技がある。ロボットレース競技は、マイクロマウス大会で行われている競技であるが、マイクロマウスの大会が始まった当初から行われていた競技ではない。マイクロマウス大会は、1977年にIEEEより提唱<sup>(45)</sup>されて始まり、日本では、1980年から開催されている。競技内容としては、18cm×18cmを単位区画とする迷路を走行するというもので、2009年からは9cm×9cmを単位区画とするハーフサイズのマイクロマウスの規定も設定された。その後、ハーフサイズを通常のマイクロマウス競技、従来のサイズで参加する競技はクラシック競技となっている。

## 2.2 教材としてのライントレーサー

ロボットレース競技が、マイクロマウスの大会に設定されてから、初心者から参加できるレベルになったため、中学生や高校生も多数参加するようになってきている。この競技でも、次第に技術レベルが上がり、ライントレースであるロボットレース競技でも、多数のセンサーによる位置計測、高性能のCPU、精密なアクチュエーター機構等のハードウェアだけでなく、ソフトウェアの技術も進化し、かなりの高速走行を実現している。

このようにマイクロマウス大会でも、ライントレースであるロボットレース競技は、出場者の幅が広い競技であり、小学校段階から大学の初学者が、電子、機械、材料、プログラミング等に関する学びを総合的に獲得できる教材である。ライントレーサーは、特に大学の工学系、高専、中学校技術科で、一般的な教材として使用され、最近では、小学校におけるプログラミングや高等学校の教科「情報」においても活用されている。

このような教材は、それぞれの教育現場で開発されたものの他、アナログ回路のものとしては、(株)タミヤのかたつむりライントレーサーII<sup>(46)</sup>、(株)イーケイジャパンのライントレースカーMR-002<sup>(47)</sup>やハイパー・ライントレーサーMR-973等がある。デジタル回路でマイコンを使用し、プログラミングによってライントレースの動作に対応できるものとしては、(株)アーテックのアーテックロボ2.0<sup>(48)</sup>、LEGO社のマインドストーム<sup>(49)</sup>や(株)ソニー・インタラクティブエンターテインメントのtoio<sup>(50)</sup>の他、ヴィストン(株)のビュートローパー<sup>(51)</sup>やビュートレーサー<sup>(52)</sup>、スイッチエデュケーション(株)のMicro:bitを活用するライントレーサー<sup>(53)</sup>等々、様々なタイプのものも市販されている。

## 2.3 様々な場面での活用について

教育現場で、このような教材を使用する場合、PBL型授業としてグループでの取り組みで実施されることが多い。PBLでないにしても、グループ学習を選択する場合、他者の意見や多様な考え方に触れるという面もあるが、教材の大きさやコストの問題も大きい。また、グループでの取り組みの場合、受講者は、興味・関心や意欲、知識や経験等の差によって依存関係や作業の役割分担、それぞれの体験や学びに差異が生じる。

最近では、プログラミング、データサイエンス等、情報科学の分野の学びが重要とされ、初等中等教育、高等教育

まで様々な場面で、これらの内容に関する取り組みが行われている。そうすると、環境も様々で、それぞれにPCを使用しながら授業等を受講するだけでなく、対面とオンライン環境を併用することさえある。グループ学習に適した環境を確保できない場合も多く、受講者一人が占有できる机等の大きさは限度があり、電子教科書やBYODのPCを使用しながらの場合には、さらに制限が大きい。大学等でよく見かける固定机の大講義室は典型的な例であるが、このような教材を扱いたい場合に、固定機の講義室を割り当てられた場合には、絶望しかない。教材を選択する場合、発達段階や個別の進度に応じた展開の可能性は、重要な要素であるが、大きさやコストも、受講者それぞれが、体験を伴いながら実感をもって学ぶ個に応じた活動のための教材としては、大きな要因である。

ライントレーサーは、前述のようにマイクロマウス競技のロボットレース競技で様々なタイプが開発されており、基本的に速さを競う競技であるため、ラインを検出するセンサーの数を増やす手法を用いることが一般的である。競技のラインの幅が規定で決まっている以上、センシング部分を含めたライントレーサー全体の大きさは、それほど小さくはならない。大きさという点では、1990年から、公益社団法人精密工学会が主催するマイクロメカニズム(以下MM)コンテストで開発されているものがある。MMコンテストは、現在、国際化され、障害物走破・作業MM、相撲MM、自慢MM等の種目があり、小型化された様々なメカニズムのマシンが参加している。1993年にセイコーエプソン株式会社が制作した超小型自律走行ロボット「ムッシュ」がある。自立動作のためのソフトウェアの高度化よりも、1辺が10mm程度の立方体に収まるようにメカニズムの小型化やアクチュエーター技術に重点が置かれる方針で、外部電源の他、有線や無線による操作を必要とするものが多い。

前述の市販のライントレーサーの大きさは、10cm×10cm程度のものから25cm×25cm程度であるため、A4程度の大きさのコースを走行させることは困難であるが、そのコストは比較的安価(数千円程度)である。Micro:bitを活用するライントレーサー(はんだ付けが必要なキット)は、別途Micro:bitが必要であるが、数千円程度である。現在のマイクロマウス大会用で使用されるものは、A4程度のコースを十分走行可能であるが、本体のみで、数万円以上のコストがかかる。LEGO社のマインドストームや株式会社ソニー・インタラクティブエンターテインメントのtoioは、多様な付属品を併用することで、様々な学びが展開できるが、かなり高価な教材である。

## 3. 小型ライントレーサー教材の開発

### 3.1 ライントレーサーの小型化

ライントレーサーは、初等中等教育では、中学校技術・家庭科技術分野の内容「D 情報の技術」における「計測・制御のプログラミング」と関連付けられることが多い。しかし、アナログ回路により動作するライントレーサーは、「C エネルギー変換の技術」でも活用可能であるだけでなく、同等の機能をもつデジタル回路のライントレーサーを併用することで、計測・制御やエネルギー変換を含めたハードウェアの理解を伴ったプログラミングを展開でき、ビジュアルプログラミングも可能なため、初等教育が

ら、高等教育の初学者までも十分対応可能である。

そして、小型化することによって、活用できる場所の制限が少なくなる。コンピュータに関する基礎的で科学理解のためには、実感を伴った体験が重要である。例えば、未知の現象について、公式や法則を最初から知っている科学者はいない。基本的には、具体的な様々な現象から抽象化した方向性、特定の現象に定性的な一致、定量的な合致を経て、一般的な公式や法則の導出を行うはずである。文科系の学部学科等において、基礎的な知識や概念が理解されていないにもかかわらず、公式や法則を提示し、その本質にかかわる洞察や実践的な課題解決を求めたとしても、困難であると考えられる。

### 3.2 ライトレーサーの回路図と基板デザイン

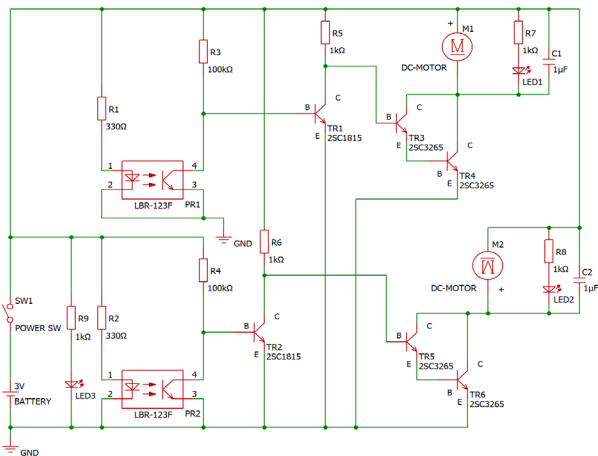


Fig. 1 アナログ回路のライトレーサーの回路図

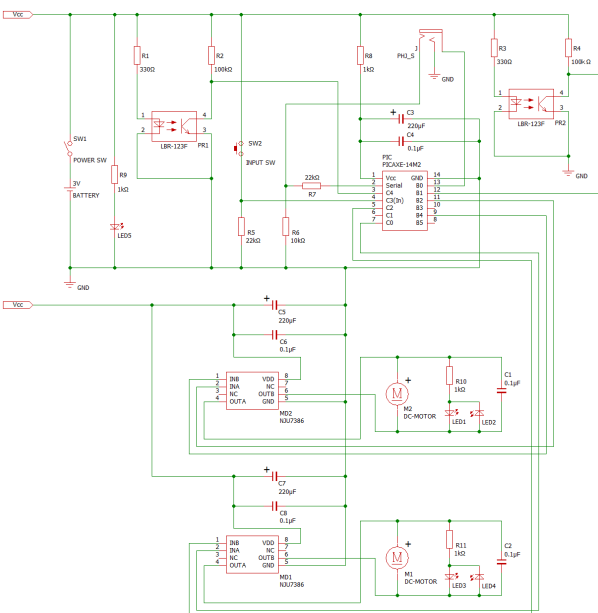


Fig. 2 デジタル回路のライトレーサーの回路図

今回、開発したライトレーサーは、フォトリフレクタ及び前部のキャスター機能を果たすLED以外は、小型化のため、すべて表面実装部品とし、28mm×40mmの基板デザインとし、抵抗やコンデンサ等は、基本的に3216サイズ程度の部品を用いた。3216サイズの表面実装部品を用いるのは、小学校3年生程度から、問題なくはんだ付

けが可能であるためである。これは、我々が、これまで行ってきた電子工作ワークショップの経験の結果である。以下のFig.1～Fig.4に回路図と基板デザインを示す。

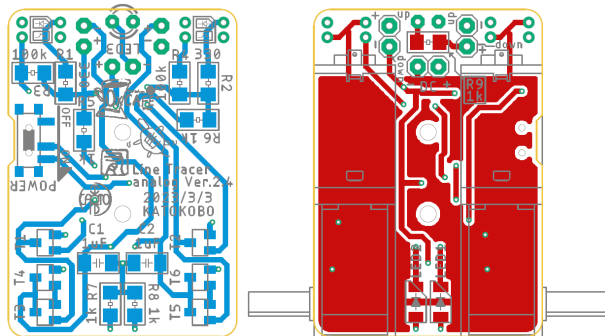


Fig. 3 アナログ回路のライトレーサーの基板デザイン、車体上側 (左)、車体下側 (右)

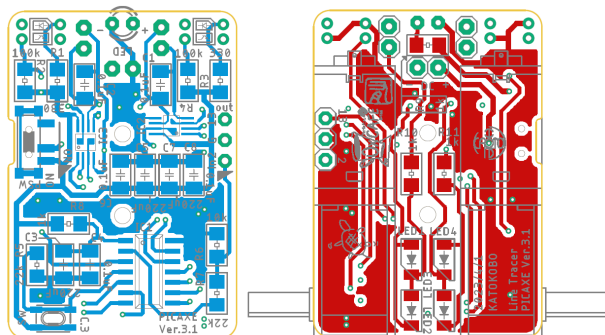


Fig. 4 デジタル回路のライトレーサーの基板デザイン、車体上側 (左)、車体下側 (右)

### 3.3 ライトレーサーの形状

開発したライトレーサーをFig.5に示す。図の説明にも記述しているが、アナログ回路、デジタル回路のライトレーサーともに、ボディの大きさは、34mm×43mmで、車輪を含んでも45mm×50mmに収まる。



Fig. 5 アナログ回路 (それぞれの写真の左側) とデジタル回路 (それぞれの写真の右側) で構成された同等の機能のライトレーサーの背面 (左の写真) と側面 (右の写真)、一緒に写っている定規や格子模様のマットからもボディ幅3cm程度、長さ4cm程度であることがわかる。

### 3.4 ライトレーサーの走行

Fig.6にライトレーサーがA4のコピー用紙に印刷されたコースを走行している様子を示す。デジタル回路のライトレーサーでは、曲がる場合にモーターを逆回転させる可能性もあるため、左右のモーターそれぞれにLEDを2つずつ配置し、正転と逆転で別の色のLEDが点灯するようにした。

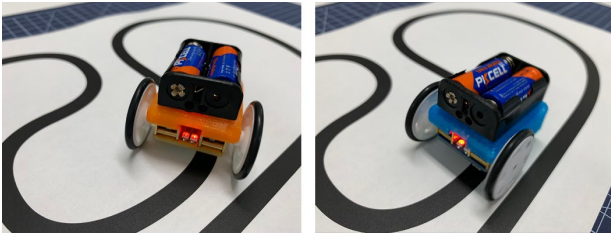


Fig.6 アナログ回路 (左の写真) とデジタル回路 (右の写真) のライントレーサーが A4 サイズのコースを走行する様子、動作しているモーターの LED が点灯する。

#### 4. 考察

教材を考えるには、文部科学省が学習指導要領の趣旨等を踏まえた学習目標の達成に必要な教育環境を整えるための「教材整備指針」がある。学習指導要領の改訂に伴い「教材整備指針」も一部改訂され、技術革新に関連した教材について、「プログラミング教育用ソフトウェア・ハードウェア」と記述されているが、現実の環境等を考慮した上で、学びの内容に適した教材を選択する必要がある。

本研究では、できるだけブラックボックスにならず、仕組みがシンプルで想像しやすいことを考慮して開発し、さらに、何のための教材かわかりやすく身近に感じられること、自ら組み立てることが可能であること、幅広い発達段階に対応可能であること、狭い机上でも安全で、手軽に活用でき、丈夫で壊れにくいこと、幅広い発達段階に対応可能であること、車体や車輪を溶融型の家庭用 3D プリンタで作成できること、遊びながら学ぶことに適すること、数千円以内であることをほぼ満たす教材として開発することができたと考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では、ライントレーサーを安価な部品で手作業のはんだ付けによって組み立てることが可能なまま、表面実装部品の使用とギアードモーターの配置等を改良し、さらに小型化した。このことにより、アナログ回路、デジタル回路のライントレーサーのいずれも A4 サイズのコース走行が可能のため、学校現場等で A3 サイズ程度の機が確保できれば、電子部品の性質やセンサーとトランジスタによる制御、センサーからの情報のコンピュータへの取り込み、コンピュータからのデジタル信号によるモーターの制御やギアによる機械機構の動力伝達の他、3D プリンタによるボディ設計と出力等の統合的な学びが可能になる。今後は、これらに加え、ペットボトルのキャップを粉碎し、溶融、押し出しを行うことで、3D プリンタのフィラメントを制作し、その素材を用いて 3D プリントを行ったリサイクル素材ボディの活用も考えている。

#### 参考文献

- (1) 内閣府：“科学技術・イノベーション基本計画”，2021 年 3 月 26 日，<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (2) 田中紀子，“京都における特別科学教育学級の記録 (数学史の研究)”，数理解析研究所講究録別，B85，pp.93-115 (2021)。
- (3) 坂本保富，“GHQ 占領下における教育制度改革の現代的意義『米国教育使節団報告書』の教育制度史的研究”，教職研究，平成国際大学教職支援センター紀要，No.2，pp.79-120

- (2017)。
- (4) 科学技術庁，“平成 5 年版科学技術白書科学技術白書 -若者と科学技術-”，1994。  
<https://whitepaper-search.nistep.go.jp/white-paper/view/16863> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (5) 文部科学省，“平成 13 年版科学技術白書-我が国の科学技術の想像力-”，2001。  
<https://whitepaper-search.nistep.go.jp/white-paper/view/38749> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (6) 高橋政治：“技術開発・研究開発成果のブラックボックス化”，化学経済，化学工業日報社，Vol.62，No.3，pp.56-61 (2015)。
- (7) Alejandro Barredo Arrieta, Natalia Diaz-Rodriguez, Javier Del Ser, Adrien Bennetot, Siham Tabik, Alberto Barbado, Salvador Garcia, Sergio Gil-Lopez, Daniel Molina, Richard Benjamins, Raja Chatila & Francisco Herrera, “Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI”, Information Fusion, Vol. 58, pp.82-115, 2020.
- (8) Riccardo Guidotti, Anna Monreale, Salvatore Ruggieri, Franco Turini, Fosca Giannotti & Dino Pedreschi, “A Survey of Methods for Explaining Black Box Models”, ACM Computing Surveys, Vol. 51, No.9, pp.1-42, 2019.
- (9) 加藤良将, 宮下十有, 亀井美穂子, 鳥居隆司, ”あいまいなアナログとデジタルの境界の理解を支援する教材の試作”, PC カンファレンス論文集, CIEC, pp.226-229, 2022.
- (10) Tony Freeth, Alexander Jones, John M. Steele & Yanis Bitsakis, “Calendars with Olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera Mechanism”, Nature, Vol. 454, pp.614-617, 2008.
- (11) 細川半蔵, 機巧図彙, 1796.
- (12) A.J. Lotka, Moving Toy, U.S. Patent No 1,017,066, Patented Feb. 13. 1912.
- (13) Benjamin Franklin Miessner, “The Electric Dog -Use of the Selenium Cell to Make an Orientation Mechanism -”, Scientific America Supplement No.2267, 1919.
- (14) “Exploration and High Adventure: The Legacy of Grey Walter”, The Royal Society, Owen Holland, pp.2085-2121, 2003.
- (15) Donald Christiansen, “Announcing the Amazing Micro-Mouse Maze Contest”, IEEE Spectrum, IEEE, Vol.14, p.27, 1977.
- (16) かたつむりライントレーサーII 工作セット, エレクラフトシリーズ, No.27, 株式会社タミヤ,  
<https://www.tamiya.com/japan/products/75027/index.html> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (17) ライントレーサー MR-002, 株式会社 イーケイジャパン, <https://www.elekit.co.jp/product/MR-002> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (18) アーテックロボ 2.0, 株式会社アーテック,  
<https://www.artec-kk.co.jp/artecrobo2/ja/> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (19) レゴ® マインドストーム, LEGO 社,  
<https://www.lego.com/ja-jp/themes/mindstorms/about> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (20) toio, 株式会社ソニー・インタラクティブエンタテインメント, <https://toio.io/> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (21) ビュートレーサー, ヴェイストーン株式会社,  
[https://www.vstone.co.jp/products/beauto\\_racer/index.html](https://www.vstone.co.jp/products/beauto_racer/index.html) (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (22) ビュートレーサー, ヴェイストーン株式会社,  
[https://www.vstone.co.jp/products/beauto\\_rover/index.html](https://www.vstone.co.jp/products/beauto_rover/index.html) (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)
- (23) micro:bit 用ハンダづけキット (ライントレーサー), 株式会社スイッチエデュケーション,  
<https://switch-education.com/products/microbit-linetracer/> (最終アクセス 2023 年 6 月 29 日)