論　文

ライントレースロボットを用いた組み込みシステム教育

博多哲也*，柴里弘毅*，嶋田泰幸*，大塚弘文**，

永田正伸*，松本勉*，山本芳一*

Education of Embedded System for Senior Students via Line Tracer Robot

Tetsuya HAKATA, Koki SHIBASATO, Yasuyuki SHIMADA, Hirofumi OHTSUKA,
Masanobu NAGATA, Tsutomu MATSUMOTO, Yoshiichi YAMAMOTO

The KOSEN, whose mission is to foster creative and practical technical engineers, has gained a fine reputation from industry. In order to continue accomplishing this aim, the KOSEN conduct practical and professional engineering education based on a five-year integrated system with general subjects and specialized subjects. This system is called “wedge-shape configuration of subjects”. In our department, the fourth and fifth grade students learn advanced technology concerning control theory, instrumentation engineering, programming language, software computing, and advanced technique concerning embedded technology through these lectures. The feature of the curriculum in our department is “line tracer robot oriented”. In this curriculum, basic line tracer robots are developed to high technology ones as grade in college advanced. Basic tracers are developed with simple logic devices. High technology tracers are controlled by microcomputers, such as H8. This paper describes details of the line tracer robot experiments and contests using microcomputer. Proposed idea in this paper can be applied to other education sector from an educational perspective.

キーワード：ライントレースロボット，組み込みシステム教育，システムインテグレーション

Keywords：Line Tracer Robot, Education of Embedded System, System Integration

１．はじめに

高専の卒業生は産業界や大学において高い評価を得ている[(1),(2)]．高専のカリキュラムは，幅広く豊かな人間教育を目指して，一般科目と専門科目がバランスよく配置されている．このカリキュラム配置は一般にくさび形配置と呼ばれており，実験・実習を重視した専門教育を行い，大学とほぼ同程度の専門的な知識，技術が身につけられるよう工夫されているのが特徴である[(3)]．

高専に設置されている学科の多くは工学系学科で，制御，システム，ロボット，メカトロニクスといった分野に深く関連した学科が多く存在する．これらの学科の教育カリキュラムにおいて，メカトロニクス教育用教材の開発などの個々の教材開発に関する興味深い報告がある[(4)]．また，機械系学科におけるロボット教育の視点から制御工学教育について，電子機械工学科のカリキュラム設計の事例なども報告されている[(5)]．著者らの所属する学科でも数年前からカリキュラム設計についてさまざまな検討を行い，広範な技術分野の素養を持ち，幅広い視野で物事を捉えシステムのインテグレート能力を有する組み込み技術者の育成を目的としている．組み込みシステムとは，特定の機能を実現するために専用化されたコンピュータシステムシステムのことで，社会のインフラストラクチャを支える技術として注目されている．本学科では，このような技術者育成に向けた取り組みとして，ライントレースロボットを機軸にしたカリキュラムを構築し実践している．複数の学習科目を横断した学生実験を導入することで，個々の要素技術の復習，応用の機会にすると同時に，システムインテグレート能力が育まれることを期待している．このような能力はさまざまな試行錯誤を通して獲得されるものも少なくなく，実験はそのための「気づき」が得られる教科の一つである．このような取り組みにおいては，基礎学習段階での意欲減退や，理解不足により期待した学習効果が得られないなどの問題をいかに防ぐかが課題となる．この問題を解決するために，ライントレースロボットの競技会を開催し，要素技術の習得段階での意欲が保たれるように工夫を行った．

本論文では，カリキュラム設計全般，ライントレースロボットを中心に据えた学生実験，競技会の実施内容について詳細に述べる．特に，4，5 年次の実施内容に的を絞り，

＊ 制御情報システム工学科
〒861-1102　熊本県合志市須屋 2659-2
Dept. of Control and Information Systems Engineering,
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102
＊＊ 専攻科 電子情報システム工学専攻
〒861-1102　熊本県合志市須屋 2659-2
Dept. of Electronics and Information Engineering,
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

教育効果について検討する．

２．ライントレースロボットを用いた取り組み

本節では，はじめにカリキュラム全体の設計指針とライントレースロボットの位置づけを示し，次に高学年での実験と競技会について説明する．最後に，実施結果について考察する．

２．１　カリキュラム設計

著者らの所属する電子制御工学科では，広範な技術分野の素養をベースに幅広い視野で物事を捉えシステムのインテグレート能力を有するエンジニアの養成を目標に，システム制御教育を実践している．この目標を達成するためにカリキュラムが含むべき主な技術分野を下記の 4 分野と設定し，学科カリキュラムを構成している．

① 計算機・情報技術
② 電気電子工学技術
③ 計測制御工学技術
④ 機械工学技術

ライントレースロボットは工学技術教育に適した教材としてよく知られている．この理由として，ライントレースロボットに用いられている要素技術が，インターフェイス回路や電子回路の作成技術，マイクロコンピュータでのプログラミング，ソフトウェア開発環境の構築および利用技術，DC モータの制御，センサによる外界信号の計測技術，機構および機械要素利用技術といった技術要素全般を網羅していることが挙げられる．そして，これらの要素技術を融合させたものが組み込み技術に他ならない．

ライントレースロボットによる教育は他高専でも実施されており，木更津高専での例ではマイクロコンピュータの導入教育として用い，ある程度の目的が達成されたと報告されている．しかし，実施学年が，1 学年と 3 学年であり，1 年間の学習の空白期間を問題点として挙げている[7]．ライントレースロボットを軸に，継続して教育教材として使用することにより，個々の学習領域ならびに，それらを結合したシステム構築において，学習者の理解を促進する効果が期待できる．

一方で，著者らの学生教育の経験から，次の項目が懸念された．

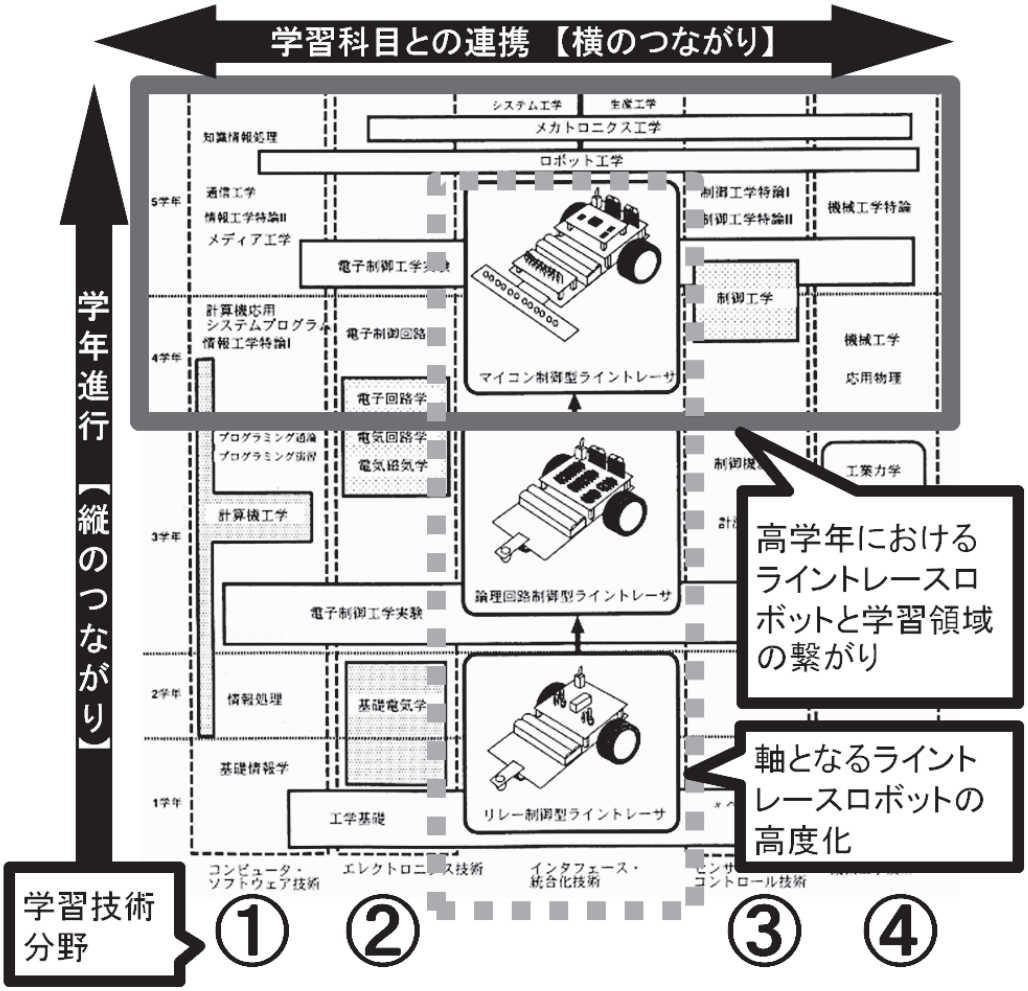


図１　学習科目とライントレースロボットの位置づけ

・　関連技術分野の学習内容の広範さに起因する，基礎学習段階での学習意欲減退
・　学習内容の理解が不十分なことにより，教師の設定した目標に到達できない事例の発生

この問題に対応するために次の 3 つの要件を設け，それに基づき 5 年間のカリキュラム設計を行った[6].

[要件 1]
講義や演習科目と有機的に連係した実験課題の設定
[要件 2]
教師と学習者との間での学習到達目標の共有
[要件 3]
学習した知識や技術レベルに対応した複合的技術を応用するステップアップ型ものづくり教材の開発

２．２　実験カリキュラム

前述の要件に沿って，ライントレースロボットを軸にしたカリキュラム設計を行った．カリキュラム設計当時に作成した図 1 に示す．設計当時のもので解像度が低いため，重要な個所を吹き出しと矢印で補足している．図の下方から上方に向かって学年が進行する様子を，横方向に 4 つの技術分野ごとの科目の連携を示している．また，破線で囲んだ中央には，学年に応じた適度な難易度を有するライントレースロボットの成長する様子が図示されている．

例えば,2 年次の計算機工学では 2 値論理回路を学習する．この教科を利用したライントレースロボットは，左右のモータに電力を供給するためのリレーの ON/OFF を 1/0 で制御することで実現される．したがって，この学年に適したライントレースロボットは，リレー制御型である．また，4 年次では，計測工学でフォトカプラの動作原理，計算機工学でマイコンプログラミング，制御工学で古典制御理論を学ぶ．これらの科目を応用すると，フォトカプラからの信号をマイコンのアナログポートに接続して，モータへの指令電圧を PID 制御により連続的に変更する追従精度の高いライントレースが可能である．したがって，高学年での学習に適したライントレースロボットは高機能なマイコン制御型となる．このように，科目を横断した学習が可能なように学年に応じてロボットの構成を変更することを成長と呼んでおり，このような取り組みを可能にする専用の基板回路を実験教材として新たに開発した．これにより，縦（学年）と横（教科）の連係，すなわち，要件 1,3 を満たす実験カリキュラムの構築が可能となる．また，要件 2 については，何を身につけることを目的としているか，教材を用いて繰り返し説明することで満たすようにしている．

太い実線で囲んだ箇所には，4，5 年次のライントレースロボット教材と学習科目との連携が描かれている．ライントレースロボットがそれぞれの科目を有機的につなぐ接着剤の役割を果たしながら，設定した 4 分野を網羅するように実験項目を設定している．

２．３　ライントレースロボット実験

次に，平成 22 年度の 4 年生に実施した学生実験について詳説する．学科カリキュラムは試行から数年経過しており，該当学年の学生は 1 年次より系統立てたカリキュラムにより科目を学習している．4 年次の学生実験は，前期は授業の学習項目と密接に関連した実験課題を班ごとに実験テーマをローテーションさせながら実施する通常型の実験で，後期はすべてライントレースロボットを用いた科目横断型の実験とした．

平成 21 年度において，プレ卒業研究ともいえる創造性開発実験を 4 年次後期に実施し，5 年次後期にライントレースロボット実験を実施した．実施内容について検討した結果，卒業研究とライントレースロボット実験を並列して実施したため，放課後などの課外時間の利用において制約が大きく，試行錯誤的な取り組みを制限する原因となっていることを反省材料とし，実施時期を 4 年次後期から 5 年次の前期にかけて実施するように変更した．負荷が集中する時期を分散させ，実験に注力できる環境を提供することで学生の学びの機会を増やし，より高い教育効果が得られることを期待している．

また，学習意欲向上の取り組みとして，2 段階のステップアップ型実験とし，(1) 4 年後期の半年でライントレースロボットのハードウェアの完成度を高めることを，(2) 5 年前期の 1 か月でソフトウェアを成熟させることを主たる目標に設定した．期間を区切って目標を細分化したのは，長期の実験や卒業研究では途中の実施ペースがうまくつかめず，最終的に最低限の目標達成に留まり，深く掘り下げて取り組んで欲しいと教員が期待している領域にまでたどり着けない事例があるという学生実験や卒業研究の指導の経験に基づいている．また，学生が実験の進捗状況を意識できるよう，定期的なレポート提出を義務付けた．加えて，4，5 年次の実験の締め括りとしてロボット競技を計 2 回実施した．競技を実施することで，相対的な達成度を肌で感じることができる．

表 1 に 4 年後期に実施した学生実験の主な実験項目を，表 2 に使用したマイコンと開発環境を示す．なお，3 年から 4 年の前期にかけて，H8 マイコンの SCI ポート通信，I/O ポート制御などのマイコンの基礎についての基礎実験を実施済みであり，ライントレースロボット制御はそれらを発展させたものである．初回のガイダンスにおいて，1 年次からこれまでのライントレースロボット実験を振り返る．例えば，制御用の電気回路においては，低学年次ではリレーを

表 1　実験項目と実施回数

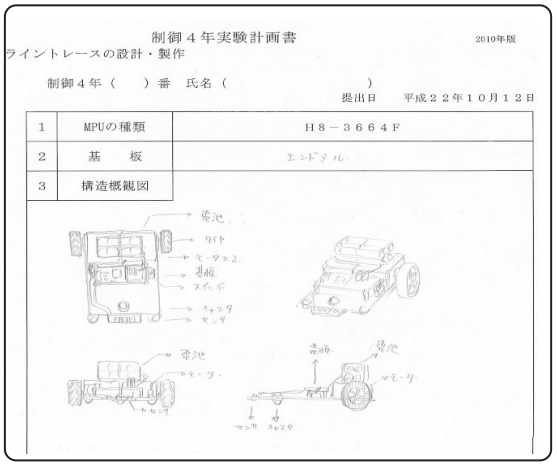
実験項目	実施回数
ガイダンス	1 回
プリント基板の設計と製作	3 回
センサ回路・マイコン回路の作成	4 回
移動機構部の作成	2 回
ソフトウェア制作	2 回
試験走行と調整	2 回
競技会	1 回

表 2　開発環境

項目	型式・名称
マイコン	H8/3664（ルネサスエレクトロニクス）
言語	C 言語
クロス開発環境	GCC Developer Lite (BestTechnology Co.,LTD.)
回路設計ソフト	PCBE(フリーウェア)

使用した電気回路を使用するが，4 年次はマイコンを使用した電子回路に高度化・発展させていること，4，5 年次に学習する科目との関連などを説明する．次に，ライントレースロボットの実験計画書に外観図を記入し，モータ類，回路基板，センサ，バッテリーの配置イメージを固めさせる（図 2）．電子回路を学習の後，プリント基板エディタを使用してセンサ部の回路図を設計する（図 3）．数人分の基板回路図を A4 サイズに集約し，透過フィルムに印刷，ポジ感光基板装置を用いて回路基板作成を行う（図 4）．センサ回路基板は，素子と素子を単純なラインで結合したもの，ノイズ対策として GND ラインで基板全体を覆うように設計したもの，パターンが複雑化しないよう素子配置に工夫したものなどさまざまである．お互いの設計回路を目にする機会を設けた効果として，回路設計時にどのような配慮をすべきであるかに気づかせることができた．また，エッチングの水洗い時に薬品の除去が十分でなかったり，素手で銅箔部を触れたために汗が付着したケースでは数週間後に劣化が進み回路不良を起こした事例があった．学生がこれらの経験から実作業の注意点について学ぶことができたことを，レポートの考察の記述などから確認した．

これらの製作過程を経て実施した 4 年次の競技課題は，フォトカプラを利用してライントレースロボットの基本動作ができることを最低限の到達目標にしながらも，基本動作が達成された学生に対するプラスαの取り組みが可能なように，次のように設定した．


制御４年実験計画書　2010年版
ライントレースの設計・製作
制御４年（　）番　氏名（　）
提出日　平成２２年１０月１２日

1	MPUの種類	H8－3664F
2	基　板	エンドミル
3	構造概観図	

図 2　実験計画書の例

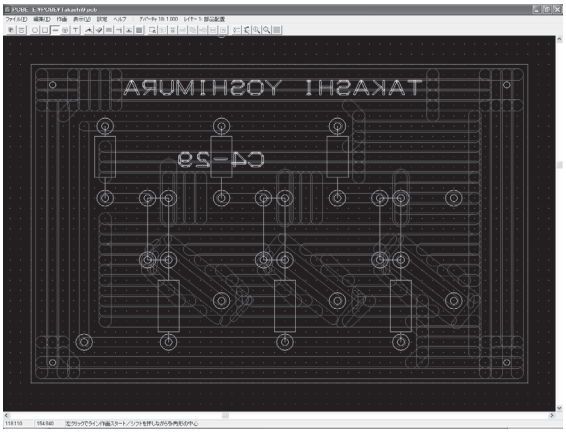


図 3　センサ回路の例

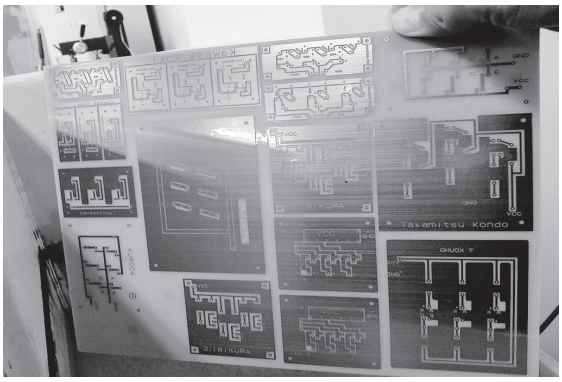


図 4　エッチング直後の回路基板

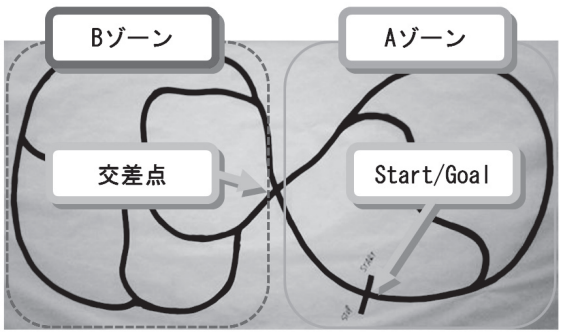


図 5　競技コース

［競技課題］

- 競技コースは図 5 に示されるように，交差した二つのゾーン，A ゾーンと B ゾーンより構成される（競技コースは当日まで非公開）．
- ライントレースロボットは，A ゾーンの所定の位置からスタートする．ただし，スタートの方向は任意とする．
- ライントレースロボットが完全に B ゾーンに入り，再び A ゾーンのスタート位置を通過することによりゴールとみなす．
- 競技会中のプログラムの修正を認め，何度でも挑戦可能とする．
- 完走までの時間が短いロボットを勝者とする．

順位と走行時間の関係を図 6 に，成績優秀者のアルゴリズムを図 7 に示す．最短の完走時間は 4.61 秒で，ライントレースをしながら A ゾーンから B ゾーンに入り十字路の検出後一定時間前進し 180° ターンをしてゴールをするというものである．10 秒未満でゴールできたものは，基本的には同様の戦略で動作するタイプのものであった．また，ライントレース動作実現に PID 制御を用いた学生も見受けられた．この学生のレポートを確認すると，単に比例ゲインを大きくするだけではオーバーシュートが生じラインを中心に大きく振れながら進むが，微分ゲインを適切に加えることでオーバーシュート抑制の効果があることが理解できていると推察できた．

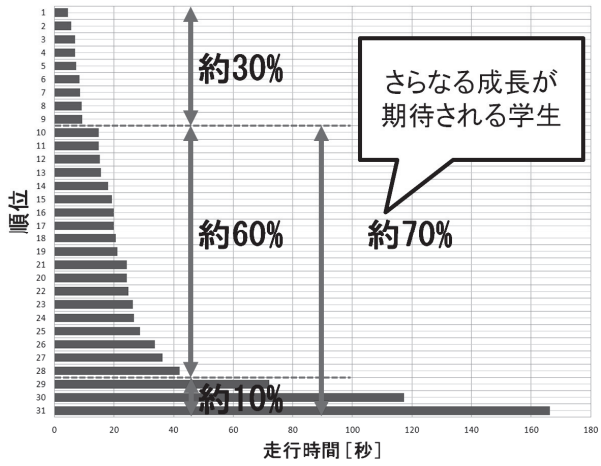


図 6　順位と走行時間

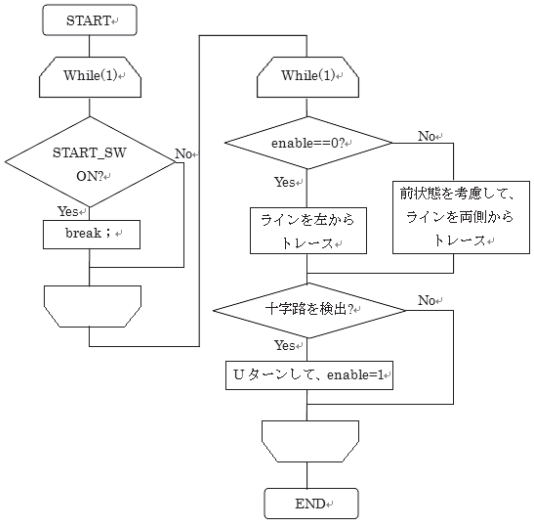


図 7　成績優秀者のアルゴリズム

また，約 40 秒以内で走行を完了しているものは，十字路の検出が十分ではないものの，ライントレースロボットとしての基本動作が可能なレベルに達したものである．60 秒以上経過している 3 台は，センサ回路などのハードウェア面での完成度に課題を残したものである．これより，参加学生全体の約 30%がライントレースロボットの基本動作に加え十字路検出などのプラス α の改良を達成でき，約 60%が基本動作のみを達成することができたといえる．このことは逆に，約 70%の学生については，もう一工夫をする機会を設けることで，さらなる成長が期待できるとも考えられる．

次に，5 年次に実施したライントレースロボットを用いた競技を紹介する．4 年次に製作したロボットを使用し，特に競技テーマに対する戦略とアルゴリズム改良に特化させ，競技名を“C1-グランプリ”と名付けた．これは電子制御工学科の頭文字 C に由来したもので，電子制御工学科で学んだ総合的な力を発揮する場として，学生たちが親しめるように考えてのことである．

［C1-グランプリ　競技課題］

- ロボットは指定されたコースをスタート地点からゴール地点まで走行し，走行時間と得点を競う．コースは 1 か月前に提示する．
- 図 8 に示されるコース内の特定の場所を通過することで 10～30 点の通過得点 P_0 が加算される．ただし，ひとつの場所で得点が加算されるのは競技中一回のみとする．
- 制限時間は 3 分間で，制限時間を過ぎるかゴールした時点で競技終了となる．
- 競技中に得た得点 P_0 と経過時間 t によって変動する倍率が掛け合わせ，次式により総得点を決定する．

  $P = P_0\{1+(180-t)/90\}$

  P :総得点，P_0 :通過得点，t :経過時間［秒］
- 総得点の高いロボットを勝者とする．
- 競技中ロボットに不具合が生じた場合，時間内であれば何度でもスタート地点から競技を再開することができる．その際，再開前の通過得点は継承される．

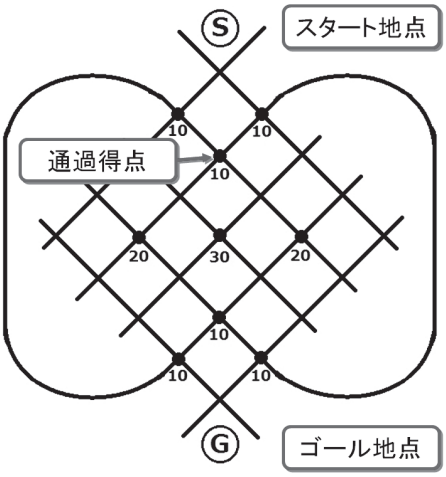


図 8　C1-グランプリ競技コース

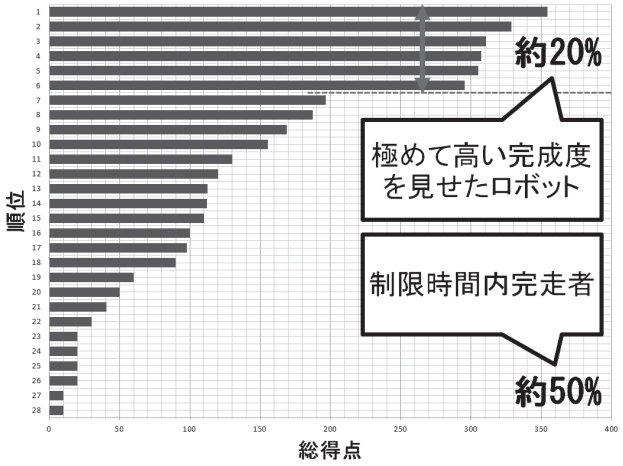
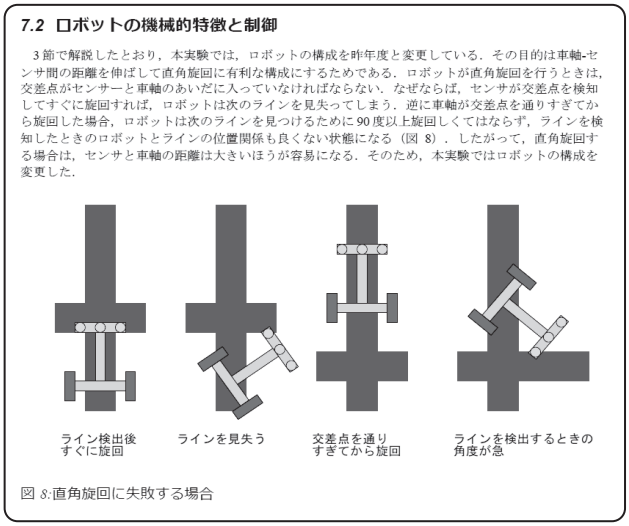


図 9　順位と総得点

この競技での総得点 P は，通過得点 P_0 とゴールタイムによって決まることから，旋回の回数（交差点の検出精度），経過時間，獲得ポイントのどこにポイントを絞るかでロボットの制御アルゴリズムが大きく異なる．このように，戦略やアルゴリズムに多様性が生まれるように競技課題を工夫した．優勝者はあらかじめ提示されたコースで試走を重ね，経過時間と通過ポイントのどちらを優先させると総得点が高くなるかの損得分岐点をシミュレーションにより求め，実機の走行タイムから最終的にすべての通過ポイントを獲得するポイント重視型の戦略を取った．また，交差点の検出とブロック移動の再現性を高めるために，メインルーチンに加えて，脱線回避ルーチン，交差点判定ルーチンを備えており，4 年次の優勝者のアルゴリズムと比較してもより複雑なプログラムを実装している学生も見受けられた．

極めて高い完成度を見せたロボットは参加学生全体の約 20%で，得点は 300 点以上を獲得した（図 9）．また，制限時間以内の完走者は 50%で，完走者の多くは交差点を検出し移動経路を制御するタイプであった．4 年次の競技と比べると競技難易度が高くなったにもかかわらず，複雑な制御に挑戦し成功した学生が増加した．典型的なレポートを図 10 に示す．この学生は，直角旋回時の誤動作の原因を考察し，ロボットのセンサと車軸間隔を広げることで改善できると結論づけている．その考察に基づき，ロボットの構造を一部改良し，構造に適した旋回プログラムとなるよう修正を加え，直角旋回動作の再現性を著しく向上させた．


7.2 ロボットの機械的特徴と制御

3 節で解説したとおり，本実験では，ロボットの構成を昨年度と変更している．その目的は車軸-センサ間の距離を伸ばして直角旋回に有利な構成にするためである．ロボットが直角旋回を行うときは，交差点がセンサーと車軸のあいだに入っていなければならない．なぜならば，センサが交差点を検知してすぐに旋回すれば，ロボットは次のラインを見失ってしまう．逆に車軸が交差点を通りすぎてから旋回した場合，ロボットは次のラインを見つけるために 90 度以上旋回しくてはならず，ラインを検知したときのロボットとラインの位置関係も良くない状態になる（図 8）．したがって，直角旋回する場合は，センサと車軸の距離は大きいほうが容易になる．そのため，本実験ではロボットの構成を変更した．

ライン検出後
すぐに旋回
ラインを見失う
交差点を通り
すぎてから旋回
ラインを検出するときの
角度が急

図 8:直角旋回に失敗する場合

図 10　学生のレポート（機構についての考察抜粋）

図 11　C1-グランプリ記念撮影(H23.5)

最後に，図 11 に記念撮影写真を示す．学生は競技を楽しんでおり，印象的な学習であったに違いないと確信した．

3．おわりに

本論文では，ライントレースロボットを用いた科目横断型の学生実験について述べた．図 10 のレポート例に示されるように，段階的に実施内容をステップアップすることで，ロボットの構造やソフトウェアを試行錯誤的に改良し，複数の科目の学習内容を融合させることが可能な実験であったと考えられる．学生数名にヒアリングを行ったところ，学生が興味の持てる課題であったことや，製作期間中に機構やソフトウェアの改良によるタイムの競い合いの場面で雰囲気が盛り上がったことが，高いモチベーションを維持できた理由と推察された．

以上より，提案する学生実験により，学習意欲を損なうことなく組み込みシステム技術の体系的な学習が可能であると判断する．

今後の展開として，教材については現在の取り組みの方向性を維持しつつ，課題の解決手法にさらに多様性を持たせる工夫について検討したい．また，リアルタイム組み込みOSに関しては今回の実験の対象外であったが，リアルタイムOSによる制御を導入すると，OSとサンプル値制御理論の融合技術についても深く学ぶことができ，深みが増すと思われる．教育効果の観点からは，技術的な到達度だけではなく，学生が課題を克服し成長していく過程についてもより一層研究を深めていきたいと考えている．

（平成23年11月9日受付）

参考文献

(1) 鈴木浩平：高等専門学校からの編入学制度について考える，日本機械学会誌，Vol.101，No.960，pp.803-805 (1998)

(2) 山本廣 他：総合エンジニアリング企業における高専卒業生に対する社内評価，日本機械学会誌，Vol.101，No.960，pp.799-800 (1998)

(3) 吉田正道：「くさび形配置」と低学年時における専門教育のあり方，日本高専学会誌，Vol.14，No.1，pp.26-27 (2009)

(4) 豊増豊 他：ライントレースロボットを題材としたメカトロニクス教育用教材の開発，日本機械学会誌，SI2003 (CDROM) (2003)

(5) 三浦宏文 他：東京大学工学部機械系におけるロボット教育，日本ロボット学会誌，Vol.3，No.6，pp.59-62 (1985)

(6) 嶋田泰幸 他：成長型ライントレースロボットを機軸とするシステム制御教育カリキュラムの設計，工学教育，Vol.55，No.3，pp.99-104 (2007)

(7) 鈴木聡 他：ライントレーサの製作 －工学概論と情報処理教育の融合－，高等専門学校の教育と研究(日本高専学会誌別冊)，日本高専学会，No.2，pp.10-15 (2000)