

FPAA⁺に基づく自律移動ロボットのためのロバストANN制御システムの設計と構築

Thair A. Salih^{*}

オマル・イブラヒム・イエヒヤ^{**}

要旨

実環境において特定のサービスを実施可能な自律ロボットを見つけることは困難である。ロボットの利点の一つは、人間と比較して高い効率で委託された多くのタスクを達成できる能力にある。本論文は、事前定義された経路に沿って移動し、多様な形態の場所を裁量をもって移動する能力を有するロボットシステムの設計と実装を目的とする。ロボットの経路制御には、フィールドプログラマブルアナログアレイ (FPAA) 技術を用いた人工ニューラルネットワーク (ANN) 制御システムを採用した。これにより目標点への追跡誤差を最小化すると同時に、障害物からの距離を最大化する。提案したロボットシステムを試験した結果、所定の経路に沿って高精度で動作し、要求されたタスクを完了できる可能性が示された。

キーワード- ロボット、人工神経ネットワーク、制御装置、FPAA。

تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

الروبوتات المتحركة ذاتية التحكم في تصميم وبناء منظومة سيطرة موثوقة على إ

近年、車輪式移動ロボットは様々な産業・サービス用途で大きな注目を集めている。これらの用途では、移動ロボットに

* 2011年12月9日受理、2012年11月21日採択

* レチャール / テクニカルカレッジ / モスル

** テクニカルカレッジ / モスル

指定された経路を安定して追跡する能力[1]。コンピュータとソフトウェア開発ツールの着実な進歩に伴い、最適制御などの現代的な制御技術の開発、シミュレーション、実装が格段に容易になっている。その結果、従来はより単純な古典的制御技術で対処されていた制御問題に対処するため、これらの高度なアルゴリズムを活用する機会が増大している[2]。特に作業空間に障害物が存在せず、比較的平坦な地面や表面上での動作が制限される場合、産業用およびサービス用ロボットにおいてその重要性はますます高まっている。車輪の縦方向・横方向のスリップを想定しない完全な転がりが拘束条件により、ほとんどの車輪式移動ロボット（WMR）は非ホロノミックシステムの典型例である。この特性は理論的課題として研究者の関心を集めている[3]。

フィールドプログラマブルアナログレイ（FPAA）は、オペアンプ、受動素子、およびプログラマブル接続ネットワークで構成される構成可能アナログブロック（CAB）に基づいている。スイッチドキャパシタ技術を用いて所望のアナログ機能を実装するこの時変離散システムの許容誤差は、キャパシタの比率にのみ依存する。したがって、0.1%までの許容誤差が容易に達成される。CABIは構成可能アナログモジュール（CAM）に組み合わされる。CAMはフィルタ、積分器、増幅器などの高度な回路である。CAMの構成はメーカーが提供するライブラリで指定される。図1はFPAAであるAnadigm AN221E04のブロック回路を示す[4]。

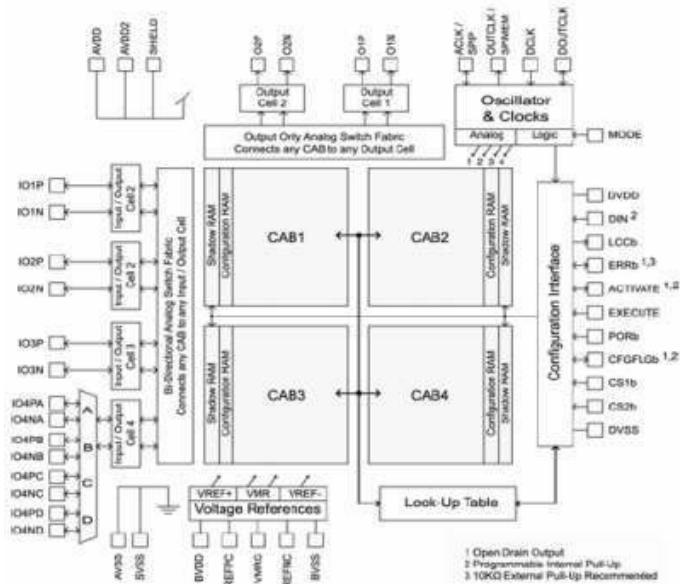


図1 AN221E04のブロック回路

人工ニューラルネットワーク（ANN）は、複雑な制御アプリケーションにおいて極めて有用なツールであることが実証されている。進化型ANNは、困難な問題（ソート、制御、パターン認識、分類など）に対する望ましい解決策を見つける効果的な手法であることが証明されている。しかしながら、ハードウェア上で再構成可能なANNを効率的に実装する方法は、現在も研究が進められている段階である。RoggenらはFPGA上でのスパイク型ニューラルネットワークの実装に成功したと報告している。彼らの研究は有望ではあるものの、宇宙探査アプリケーションにおける電力・スペース制約を満たす必要性から、アナログソリューションが望まれる。また、アナログ実装であれば、システム間のインターフェースをほぼ不要にできる。

センサーのアナログ世界では、追加リソースを必要とする作業である。マイクロプロセッサプラットフォーム上でANNを実装する際にも、同様の問題が数多く存在する[5]。ANNとは、相互に連携して協調的に作用する人工ニューロンの集合体である。ノードは入力接続を通じて他のノードからの重み付けされた活性化値を受け取る。まずこれらが加算（和算）される。その結果は活性化関数を通過し、その出力がノードの活性化値となる。活性化関数は、結合された活動レベルが特定の値に達した場合にのみ情報を通過させるしきい値関数でも、結合された入力の連続関数でもあり得る。この目的で最も一般的に用いられるのは、非線形活性化関数としてのシグモイド関数である[6]。近年、動的システムの同定と制御におけるフィードフォワードニューラルネットワーク（NN）の応用に関する多くの研究が行われている。フィードフォワードNNが任意の連続関数を近似できることはよく知られている。しかしフィードフォワードNNは静的写像である。動的問題に対処するためタップ遅延付きフィードフォワードNNを用いた研究は多いものの、時間領域における動的応答を表現するには大量のニューロンが必要となる。さらにフィードフォワードNNの重み更新は内部情報を活用せず、関数近似は学習データに敏感である[7]。リハビリテーションロボット工学における従来の研究では、主に従来型の位置ベースPID制御器またはインピーダンス制御器が採用されてきた。PID制御器は、多様な患者層や様々なタスク・条件に対応するため、制御ゲインの継続的な調整を必要とする。さらに、位置ベースPID制御器は直接的な力制御には適さない[8]。本論文の目的は、人工ニューラルネットワーク（ANN）を用いて、黒線を可能な限り高速・安定・正確に追跡するスマートロボットを設計・実装することである。論文の構成は以下の通り：第II章でシステム設計を紹介し、第III章でシステムの入力と出力を扱う。第IV章で制御システムを実証する。第V章にはFPAAベースのANN制御器の実装が含まれる。最後に、結論と将来の研究は提示され、第VI章で議論される。

システム設計：

経路追跡とロボット停止を実行するブロック図を図2に示す。ロボットのハードウェアには車輪式移動ロボットプラットフォームが含まれる。車輪式ロボット本体前端には2つのセンサーが配置されている。この移動ロボットはFPAAカードによって制御される。PID制御器は、広範囲のタスクや条件に対応するため、制御ゲインの継続的な調整を必要とする。提案する制御器はFPAAボード上に実装され、ロボットをリアルタイムで制御する。あるいは、ANNの応答をオフラインで計算し、ルックアップテーブルを用いて制御器が再構築することも可能である。目標軌道経路とロボットの経路間の誤差は急速にゼロに収束し、ロボットがタスクを実行するにつれて制御器はロボットパラメータを学習し、より優れた制御信号を生成する。実装されたニューラルネットワークの構造は、単一隠れ層と各層に2つの隠れノードを持つ多層フィードフォワードネットワークである。入力パラメータは、ANNは、センサー1、およびセンサー2である。

ロボットはFPAAカード、駆動回路、IRセンサー、モーターで構成されています。提案システムの最初のタスクは、地面の黒い線を大きく外れることなく追従することです。黒い線は幅4cm（曲がり角では多少の変動が生じる場合あり）で、白い背景上に描かれています。図3はロボットシステムで使用するコースを示しています。他のコースを提案することも可能です。

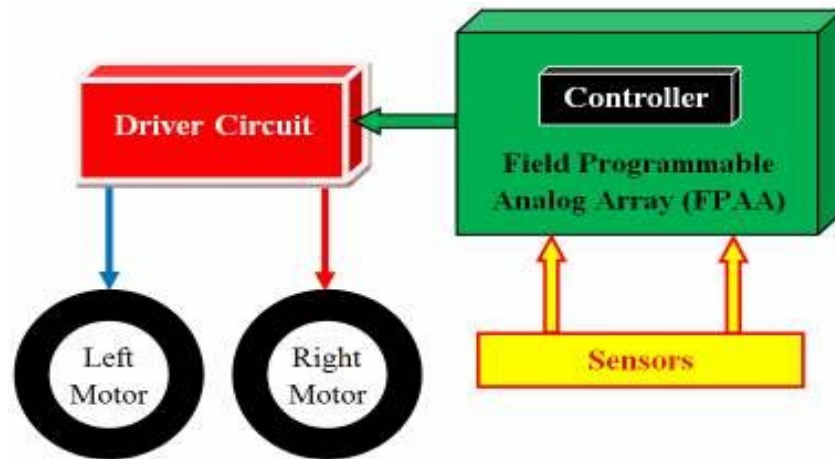


図2 ロボット経路追跡システムモデル

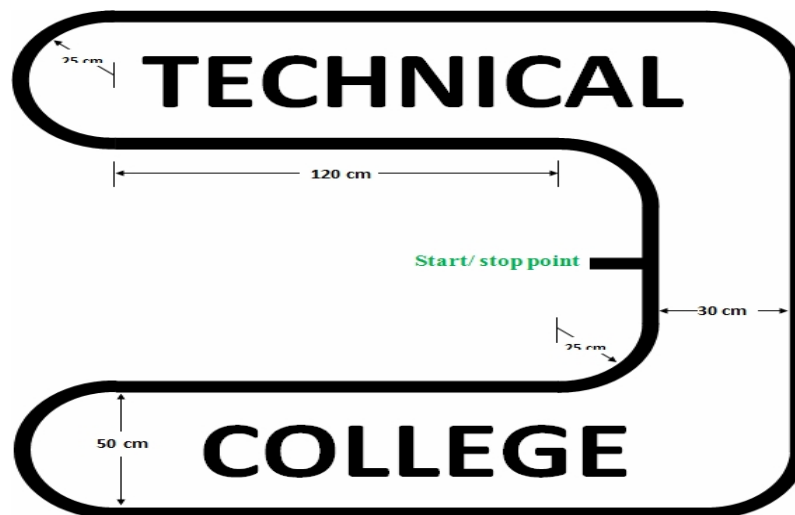


図3 経路追跡形状のサンプル

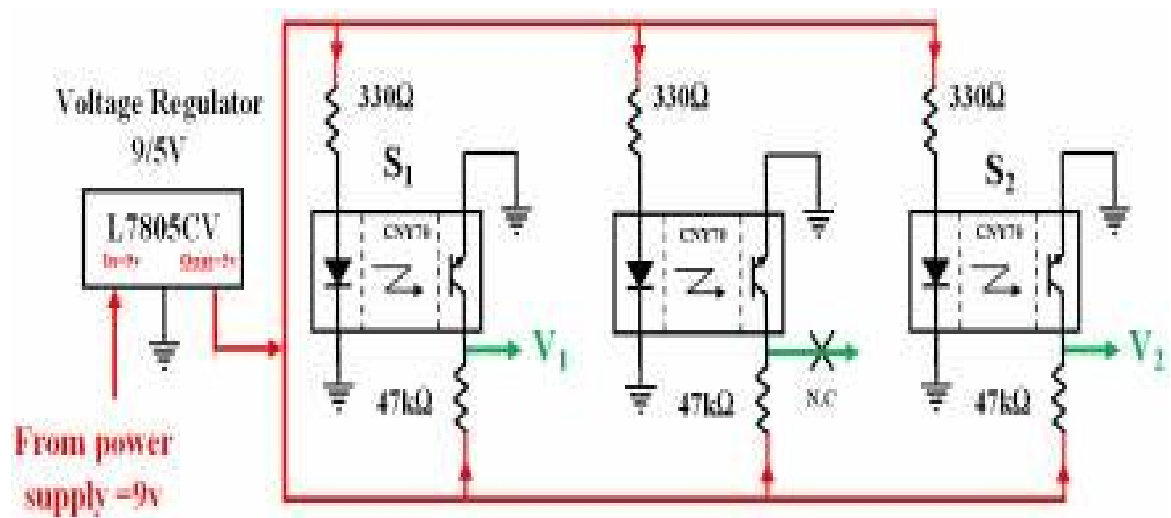
ラインフォロワーの基本動作は以下の通りである：

- 1- ロボット前端に設置した光学センサーでライン位置を捕捉する。このため、赤外線LEDとフォトトランジスタを組み合わせた「トランジスタ出力式反射型光学センサー」を使用する。ライン検知プロセスには高解像度と高い堅牢性が求められる。
- 2- 任意の操舵機構を用いてロボットをライン追従方向に操舵する。これを実現するため、図2に示すように車輪の動作制御に2つのモーターを使用する。

システムの入力と出力:

経路追跡システムの入力、1つの発光素子（IR LED）と1つの受光素子（フォトトランジスタ）からなるIR反射式センサーで構成される。表面が白色の場合、光を反射して受光素子が検知する。同様に、表面が黒色の場合、光を吸収するため受光素子は光を検知できない。ダイオードから発せられた光が物体に反射されフォトトランジスタに戻ると、赤外光の量に応じて出力電流が発生し、これによりフォトトランジスタのベース電流がトリガーされる。

黒色ラインで反射される光の量は白色背景に比べてはるかに少ないため、黒色ラインを検出できます。ロボット下部の黒色ライン位置を特定し、センサーを常時作動状態に保つため、センサーはロボット前端下部に取り付けられています。センサー内縁間の距離は2.4cm、外縁間は4cmに設定され、センサー間の赤外線干渉を最小限に抑えています。車輪の幅は通常、センサー1 (S₁) の左端とセンサー2 (S₂) の右端の距離よりわずかに大きい。光学センサーの実用接続回路を図4に示す。ここではCNY70チップをトランジスタ出力式の反射型光学センサーとして使用している。



$R_{CE}=188k\Omega$ (無光時/黒色表面)、 $R_{CE}=11.75k\Omega$ (有光時/白色表面)

図4 反射型光学センサの実用回路。

図4から、 V_1 および V_2 はそれぞれ S_1 および S_2 の出力電圧であり、FPGAカードを用いて実装されたコントローラに入力される信号を表す。 S_1 または S_2 が完全に軌道上、すなわち完全に黒線にある場合、トランジスタのベースへの赤外線ビームの反射は発生しない。したがって、トランジスタは遮断領域で動作し、その出力 V_1 または $V_2 \approx 4V$ となる。 S_1 または S_2 が完全にトラック外、すなわち完全に白部分にある場合、赤外線ビームの反射が完全にトランジスタのベースに届くため、トランジスタは飽和領域で動作し、その出力 V_1 または $V_2 \approx 1V$ となる。

図5に示す回路において、コントローラへ供給される出力電圧 V_1 は以下のように計算できる：
無光状態：（黒色表面上）

$$V_1 = \frac{R_{CE}}{R_{CE} + R_C} * V_{CC} = \frac{188}{188 + 47} * 5V = 4V \quad (1)$$

光照射時：（白色表面上）

$$V_1 = \frac{R_{CE}}{R_{CE} + R_C} * V_{CC} = \frac{11.75}{11.75 + 47} * 5V = 1V \quad (2)$$

同様に V_2 も計算可能であり、 V_1 と同じ値が得られる。

測定された V_1 または V_2 の値は計算値と一致する。 S_1 または S_2 がトラックから部分的に外れた場合、その出力 V_1 または V_2 は前述の2条件の中間値となり、これはセンサーが接触しているトラック面積に比例する。実用上の問題を回避するため、9V DCの電源は主電源とは別個かつ独立して使用される。反射型光学センサーの電圧供給 (V_{cc}) を実現するため、L7805CV電圧レギュレータを用いて5V DCを生成する。

経路追跡システムの出力は、車輪のギアに取り付けられた2つのDCモーターによってロボットを移動させる。その方向は電源の極性を反転させるだけで変更できる。DCモーターは車輪を直接接続してロボットを駆動するのに十分なトルクを持たないため、速度を犠牲にしてDCモーターのトルクを増大させるためにギアが使用される。DCモーターはコントローラーに直接接続できないため、モーターを回転させるのに十分な電流または電圧を流すためにドライバ回路が使用される。Hブリッジドライバ回路L293Dは、誘導負荷（リレーやDCモーター）を駆動するために特別に設計されており、モーターの正転・逆転を可能にする。図5は、FPAA（ ）と2つのDCモーター（ ）の出力（ ）をインターフェース（ ）として接続するドライバ回路を示している。

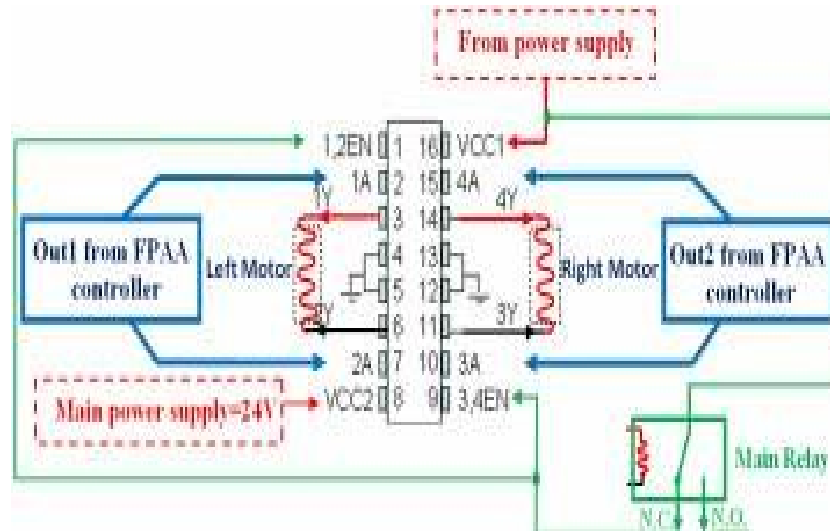


図5 ドライバ回路の実用的な回路接続。

制御システム:

FPAAカードで構成される制御システムは、ロボットの頭脳として機能し、入力に対応する望ましい出力を生成する決定を行います。制御システムはロボットプラットフォームを軌道中心に維持しようとします。曲線軌道ではロボットが軌道中心から外れることは確実であり、これにより2つのセンサーのいずれかが軌道から外れる（完全または部分的に）状態が生じます。ここで、ロボットを自動的に軌道中心に戻す制御システムの重要性が生じる。FPAAベースの経路追跡制御を実行するため、人工ニューラルネットワーク制御器が実装されている。

FPAAベースのANN制御器の実装:

FPAA技術を用いたANNのハードウェア実装は二段階で実現される：第一段階が学習、第二段階がテストおよび使用である。学習段階では通常、

特定のターゲット（出力）に対する入力のネットワーク。最も典型的なニューラルネットワークの設定では、学習は一連の学習ベクトル（パターン）を提示することで達成され、各パターンには関連するターゲット出力ベクトルが関連付けられる。その後、学習アルゴリズムに従って重みが調整される。このプロセスは教師あり学習[9]として知られ、本制御システムで使用される。本研究では、より精度が高く要求されるシステムに適合するため、バックプロパゲーションニューラルネットワーク（BPNN）アルゴリズムを採用した。学習には、入力数、出力数、隠れ層数、各層のニューロン数、入力データとその目標値（出力）を指定する必要がある。実装したニューラルネットワークの構造は、単一隠れ層を持つ多層（2層）フィードフォワードネットワークであり、各隠れ層には2つのニューロンが配置されている。ANNの入力パラメータはセンサー1とセンサー2である。全ての隠れノードの伝達関数はpureline、出力ネットワークノードの伝達関数もpurelineであり、ネットワーク構造の構成を図6に示す。ネットワーク内のニューロン数はシステムの性能に影響を与え、ニューロン数が増加するにつれてシステムの誤差は減少するものの、ネットワークはより多くの学習データを必要とする。一つの考え方は、学習の初期サイクルでは少数のニューロンでネットワークを構築し、訓練が継続するにつれて、より新しいネットワークが構築され、より多くのニューロンが追加される。

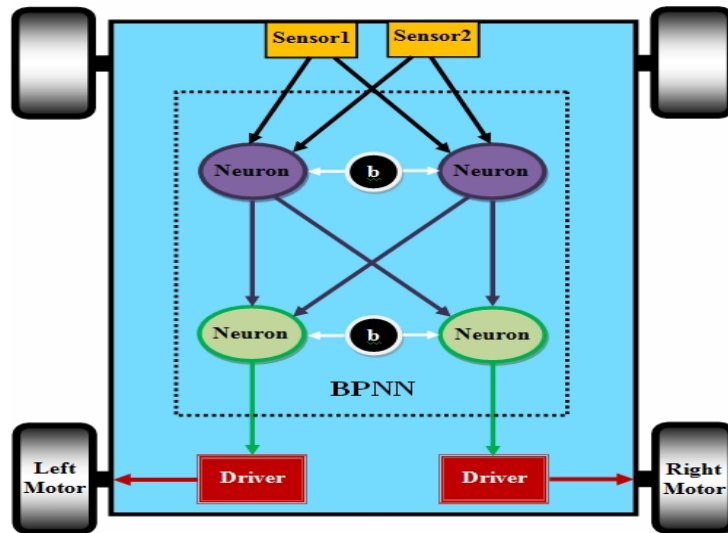


図6 実装されたBPNNのアーキテクチャ

バックプロパゲーションニューラルネットワークの学習には、以下の3段階が含まれる：

- 入力トレーニングパターンのフィードフォワード。
- 関連する誤差のバックプロパゲーション。
- 重みの調整。

重みは、ネットワークポロジを正確にシミュレートし重みを最適化するために、MATLABソフトウェアを用いたオフライン学習手順から得られる。図7に示すように、ANN学習は664エポックを経て誤差0.0009978で目標を達成した。

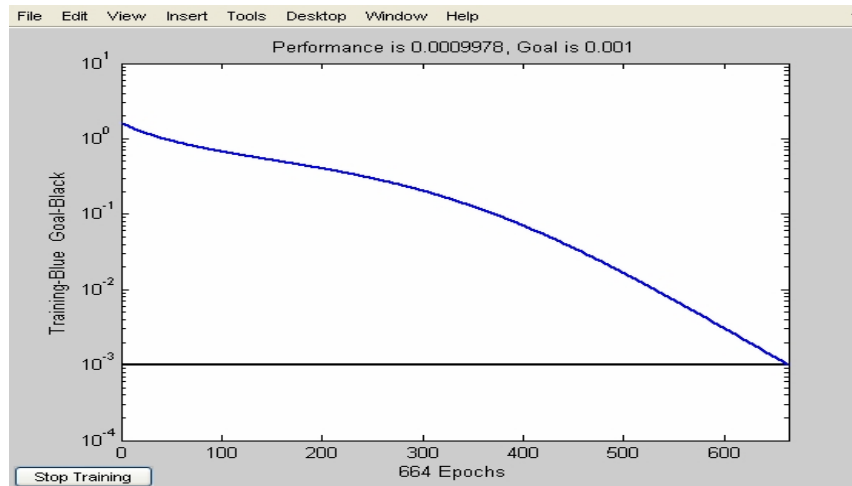


図7 MATLABプログラムを用いたANNトレーニングのシミュレーション結果。

最適化された重みは、移動ロボット制御のための対応するリアルタイム動作のためにFPAAチップにダウンロードされる。ANN制御回路は、図8に示すようにFPAAカードを用いて実装される。

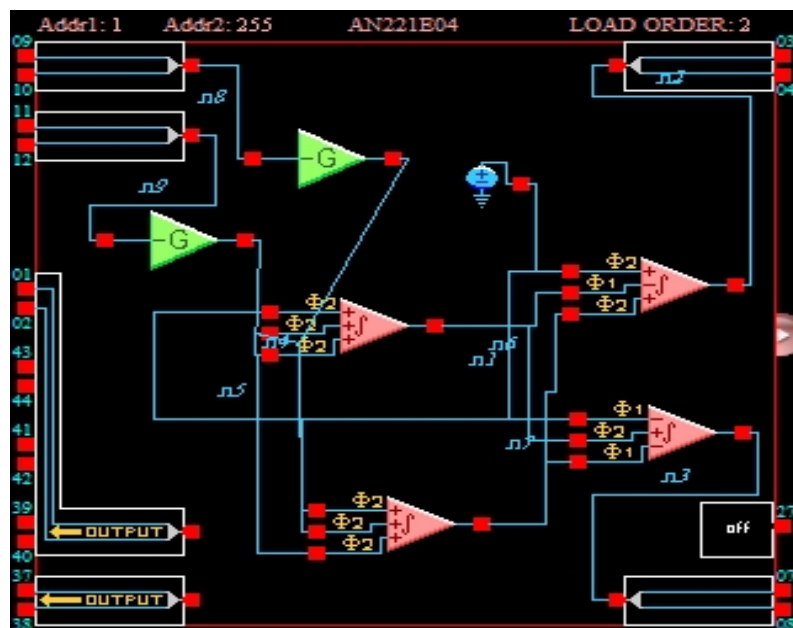


図8 FPAAベースのANNコントローラ。

本回路は2つの入力と2つの出力を受け入れるように設計されており、各出力は2つの電圧値を持つ。各ニューロンは単純に加算器と積分器で構成される。AnadigmDesigner2ソフトウェアを用いたANNコントローラの入力・出力シミュレーション結果を図9に示す。ANNコントローラの入力・出力の実測値を図10に示す。

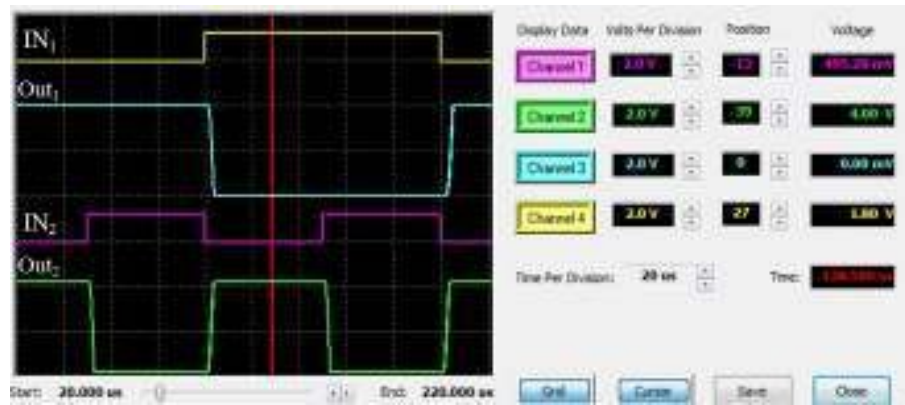
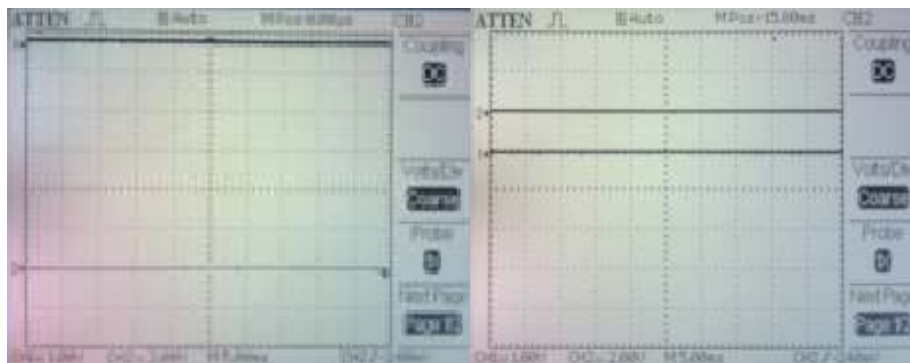


図9 2種類のデータを分類するANNのシミュレーション結果。



(a)

(b)

図10 実用的な値 (a) センサーが白色部分にある場合、(b) センサーが黒色部分にある場合。

実用実装作業全体：回路設計・製作、ロボット本体の筐体、フライングホイール、DCモーターなど...図11および図12に示す通り。

結論：

本論文は、車輪式移動ロボットの追跡制御におけるニューラルネットワークの応用を概説する。提案する制御器はFPGAカード上で実装可能であり、ロボットをリアルタイム制御できる。あるいは、ANNの応答をオフラインで計算し、ルックアップテーブルを用いて制御器が再構築することも可能である。目標軌道経路とロボットの経路間の誤差は急速にゼロに収束し、ロボットがタスクを実行するにつれて制御器はロボットパラメータを学習し、より優れた制御信号を生成する。制御器の性能はシミュレーションおよび実マニピュレータ上で検証され、良好な結果が得られた。



図11 ロボット内部構造の概観。



図12 経路追跡の様子。

参考文献

- 1- 白間直司、宮内亮、松野文敏、「仮想ロボットによる移動ロボットの遠隔操作」、第17回IEEE国際ロボット・人間相互通信シンポジウム論文集、Technische Universität München、ミュンヘン、ドイツ、477-482 ページ、2008 年。
- 2- ミチヨ・ラドヴニコヴィッチ、カ・C・チョーク、パヴァン・ヴェンパティ、「自律移動ロボットのための最適経路計画アルゴリズムの比較」、IEEE実用ロボット応用技術会議、pp.35-39、2011年。

- 3- Le QiA、Baoli Ma、Wei Li、「不確実な車輪式移動ロボットのための新しい経路追従制御器」、*IEEE 電気・制御工学国際会議*、p.p. 205-209。
- 4- Kerstin Eckstein, Peter Möhringer、「フィールドプログラマブルアナログアレイAN221E04の動的再構成」、
www.fh-sw.de/sw/fachhb/et/pp/vuv.html, 2005.
- 5- Dmitry Berenson および Hod Lipson、「
現場でのロボット故障回復のためのアナログ回路のハードウェア進化」、*IEEE NACA/DoD会議*、pp. 12-19、2005年。
- 6- Ali T. Hasan、N. Ismail、A.M.S. Hamouda、Ishak Aris、M.H. Marhaban、H.M.A.A. Al-Assadi、「特異構成を通過する直列マニピュレータのための人工ニューラルネットワークベースの運動学ヤコビアン解」、*Advances in Engineering Software* No.4、p.p. 359-367、2002年。
- 7- Rong-Jong Wai, and Chia-Ming Liu, "Design of Dynamic Petri Recurrent-Fuzzy-Neural- Network for Robust Path Tracking Control of Mobile Robot", *IEEE International joint conference on neural networks*, pp.1-8, 2010.
- 8- Duygun Erol、Vishnu Mallapragada、Nilanjan Sarkar、Gitendra Uswatte、Edward Taub、「ロボット支援リハビリテーションへの新しい制御アプローチ」、*IEEE 論文集、第9回リハビリテーションロボット工学国際会議*、323-328 ページ、2005 年。
- 9- Laurene Fausett、ニューラルネットワークの基礎、アーキテクチャ、アルゴリズム、およびアプリケーション。