

自律移動小型ロボットを実現する 統合リファレンスシステム

Integrated Embedded Reference System for Small Autonomous Mobile Robots

萱嶋 志門

渡辺 雄一郎

佐藤 雄一

■ KAYASHIMA Shimon

■ WATANABE Yuichiro

■ SATO Yuichi

近年、LSIの高性能化に伴って、サイバーフィジカルシステム (CPS) における自動運転車やロボットなど、認識技術とアクチュエータ制御技術に知能処理を加えた自律動作機器の実用化に向けた進歩が著しい。

東芝は、自律動作機器に必要な各種要素技術向けLSIを開発し提供している。今回、当社製LSIの優位性を顧客にわかりやすく紹介するために、これらのLSIを活用したソフトウェア開発フレームワークと、その上で動く統合リファレンスシステムを開発した。このシステムは、2輪の自律移動小型ロボットとその制御や可視化をするタブレットから成り、自動追従機能や遠隔操作機能を備えている。

With the improvement in performance of large-scale integrations (LSIs) in recent years, rapid progress has been made in the development of autonomous equipment in the field of cyber-physical systems (CPS), such as autonomous cars and robots, by integrating intelligent processing into recognition and actuator control technologies aimed at practical realization.

In response to this trend, Toshiba has been developing and supplying LSI products for a variety of elemental technologies required for such autonomous equipment. To introduce the advantages of these LSIs to users in an easy-to-understand manner, we have now developed both a software development framework for the LSIs and an integrated embedded reference system running on the framework. This system, which features small, two-wheeled autonomous mobile robots and a tablet to control them, is equipped with an automatic tracking function and a remote control function that can visualize the internal information of the robots.

1 まえがき

近年、電力や、自動車、交通、ロボット、医療といった事業領域のデジタル化やネットワーク化が進展しており、各半導体メーカーもこれらの市場に向けた製品を積極的に投入している。今後は更に、認識技術とアクチュエータ制御技術に知能処理を加えた自動運転車やロボットなど、サイバーフィジカルシステム (CPS)^(注1)における自律動作機器が実用化されると見込まれており、各所で研究開発が進められている。このような機器においては、認識用や制御用といった複数のプロセッサを協調動作させる処理が求められる。

東芝は、EV (電気自動車) やHEV (ハイブリッド電気自動車) といった自動車の電化に向け、機能安全規格に対応したモータ制御プロセッサ Vivaceシリーズ⁽¹⁾や低消費電力な高度運転支援向け画像認識プロセッサ Viscontiシリーズ⁽²⁾などの車載向け製品を積極的に展開している。しかし、そのデモンストレーションは、プロセッサ単体の機能や性能に関わるものが多く、複数のプロセッサが協調する例は少なかった。

今回当社は、これらのプロセッサが協調動作する統合リファレンスシステムを開発した。このシステムは、2輪の自律移

(注1) 様々なデータが潜在する実世界 (物理空間) と強力なコンピューティング能力を持つサイバー空間とをセンサネットワークなどによって結び付け、より高度で効率的な社会を実現するためのサービスやシステム。



動小型ロボット (図1) とタブレットから成り、自動追従機能や遠隔操作機能を備えている。更に、これらの機能を実装するだけでなく、プロセッサ間の協調動作を平易に開発できるフレームワークを実装し、その利用例となるように開発している。また、自律して移動する機械では、人に対する安心と安全を同時に担保する必要があるため、これを実現するセキュアディペンダブルプラットフォーム (SDPF) も実装している。

自律移動技術は発展途上であり、制御モジュールやアルゴ

リズムは今後も変化し続ける。その変化に合わせてハードウェアやソフトウェアの構成要素を柔軟に組み替え、迅速にアプリケーションを開発できることを意図してハードウェア及びソフトウェアの構成を構造化し部品化している。

2 ハードウェア構成

開発したシステムは、アプリケーションプロセッサ ApP Lite⁽³⁾、Visconti2 (TMPV7506XBG)、及び二つのVivace2 (TMPR454F10TFG) を主要なプロセッサとして採用している。

ハードウェア構成を図2に示す。アプリケーションに応じた柔軟なハードウェア構成の組替えや、プロセッサの更新や置換を想定し、1枚の基板に一つのプロセッサを搭載したモジュラー構造を採用した。

更に、テスト用に各基板のデバッグ信号を引き出すピンを実装したデバッグ基板を用意し、複数プロセッサ構成の開発における煩雑さを緩和できるように配慮した。

3 ソフトウェア設計

3.1 要件定義

一般的なプロセッサのリファレンスシステムでは、プロセッサの機能や性能を前面に出したデモンストレーションをすることが多い。しかし、前述のように要素技術やアプリケーションが多岐にわたり、アルゴリズムやデバイスも日々改良されるロボティクスドメインでは、ソフトウェアの移植性や、モジュールの独立性及び交換可能性がより重要なアピールポイントになると考えた。

この移植性などの品質特性を確保できるように、搭載するソフトウェアのアーキテクチャをトップダウンに設計して機能分割した。更に、特定のアルゴリズムだけを取り出して改善したり、プロセッサ間の機能配置を変更して他デバイス上で一部の

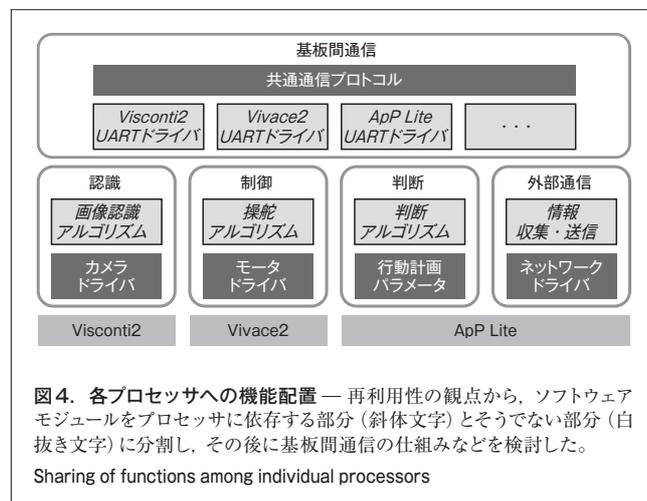
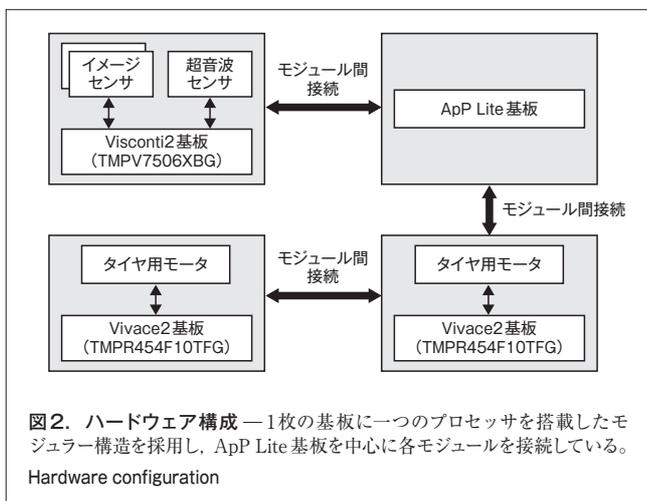
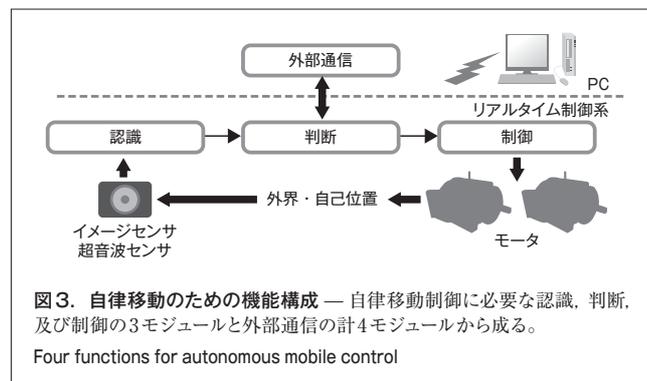
処理を実行したりできる構成とした。

また、このシステムは性能制約が強い組込みリアルタイムシステムでもあるので、デモンストレーション時にスムーズな追従動作ができることも要求事項として考慮して開発した。

3.2 ソフトウェアアーキテクチャの設計

自律移動機器は、“みずから認識し、みずから判断し、みずから制御する”という三つの機能から成る。このシステムは、これに外部通信を行うモジュールを加えた4モジュールで構成した(図3)。“認識”、“判断”及び“制御”の各モジュールは、その能力に特化したプロセッサに合わせて部品化した。これと前述した基板のモジュラー構造とにより、基板ごとモジュールを着脱できるように構成した。例えば制御に関する操舵(そうだ)アルゴリズムだけを検討する場合は、画像認識や判断処理を取り外し、Vivace2基板(制御モジュール)だけで動作確認できる。

また、組込み用のプロセッサは、PC(パソコン)などとは異なり性能制約が厳しく、複雑なアルゴリズムを一つのプロセッサで処理しきれなくなる場合もある。このような場合を考慮し、各プロセッサに置くソフトウェアモジュールをそのプロセッサに依存する部分と全プロセッサで共通に実行できる部分に分け、プロセッサ間で処理の移動や分担ができるようにしている(図4)。



3.3 外部通信モジュール

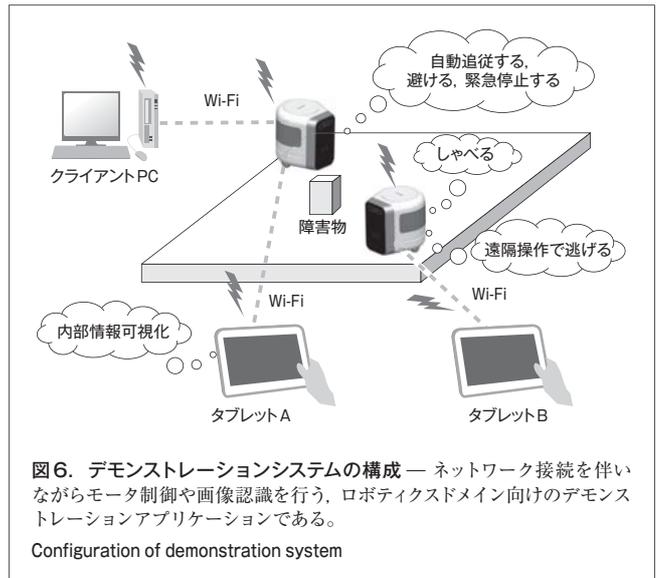
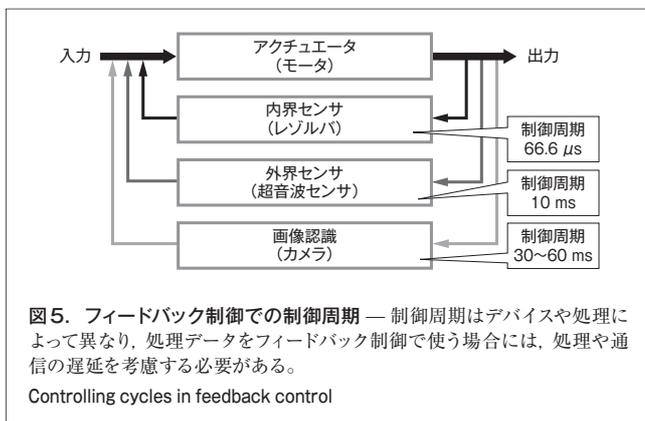
プロセッサ間の協調処理を実現するための通信には、プロセッサ付属のUART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) を使う。この理由は、①各プロセッサが自律して動作するのでプロセッサ間で常に大量のデータ通信を行うケースは少ないこと、②モジュール化された疎結合なシステムを目指すこと、③大抵のプロセッサに搭載されているので新しいハードウェアに容易に置換できる可能性が高いこと、の三つである。

UARTをプロセッサ間通信の基本に据え、画像データのような大きなデータは通信できない。そこで、大量のデータはできるだけ各プロセッサ内で処理するようにした。通信内容を、認識、判断、及び制御に関わる座標値や軌道計算パラメータなどの最小限の処理結果だけにすることで、UARTの帯域でもリーズナブルに動作するシステムを実現した。ただし、自律移動を実現している認識、判断、及び制御の多重ループのフィードバック制御(図5)では、制御の遅延がボトルネックとなってくる。このシステムでは、画像を取り込んでから画像認識結果を基にアクチュエータの制御を開始するまでに数十msの遅延が発生するため、設計ではこの遅延時間を見込んだ移動速度や制御周期を設定した。

また、タブレットからこのシステムをWi-Fi経由で操作したいという要求があるため、Wi-FiモジュールとUARTを透過的に利用できるように通信I/F(インタフェース)を統一部品化し、柔軟なネットワーク構成をとれるようにした。これにより、現在のシステム状態をタブレットへ送信してグラフィカルに可視化したり、自律移動機器を遠隔操作したりできるようになった。

4 デモンストレーションアプリケーション

Vivace2やVisconti2の能力を生かしたロボティクスドメイン向けのデモンストレーションとして、ネットワーク接続を伴いながらモータ制御や画像認識をリアルタイムに行うデモンストレーションアプリケーションを開発した(図6)。このデモン



トレーションでは、2台の自律移動ロボットを追従用及び遠隔操作作用として利用し、次の機能を表現している。

- (1) 自律移動ロボットからデータをリアルタイムに吸い上げ、タブレット端末に表示する。
- (2) タブレット端末から遠隔操作作用ロボットを操作する。
- (3) 追従用ロボットは、単色のターゲットを認識して、障害物を避けながらターゲットへ移動する。
- (4) 追従用ロボットは、タブレットで操作されたロボットをターゲットとして認識し追従する。

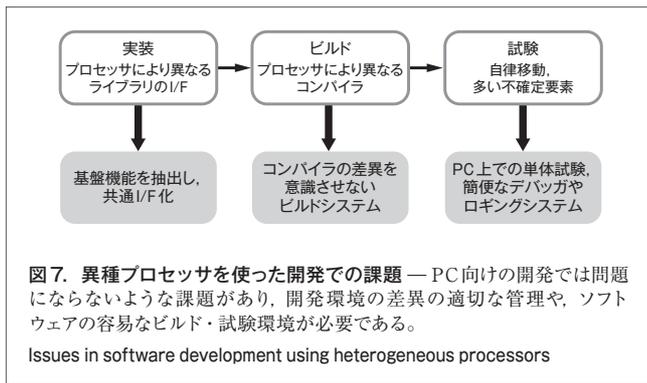
また、自律移動ロボット上にユーザーインタフェース(UI)として筋電センサや、音声合成ミドルウェア、SDPFといった他の要素技術を組み合わせたデモンストレーションも別途開発している。

5 開発環境の整備

5.1 リファレンスシステムの開発環境

このシステムに搭載したプロセッサは、それぞれ独自の開発環境を持っており、画像処理やモータ制御など、必要となるデバイスドライバやライブラリも様々である。複数のプロセッサを使うシステムの開発では、このような開発環境の差異を適切に管理し、常に正しいソフトウェアを容易にビルドして試験できる環境が必須である(図7)。そこで、このシステムにおいても同様の開発環境を整備した。

この開発環境では、各プロセッサの開発環境の差異を吸収する統一したビルド構成を導入し、ソフトウェアの開発効率を維持している。更に、プロセッサ固有のコード以外は一般のPC環境でもビルドできるように設定し、PCだけでモジュールの単体試験をある程度行えるようにした。実機によるデバッグも必須ではあるが、特に複数プロセッサにまたがる処理や、アクチュエータやセンサなどのデータの揺らぎ、故障といった物理



的な不確定要素が影響するコードは、いきなり実機に載せてもデバッグに手間と時間が掛かる。そのため、事前にPC上でソフトウェアロジックの品質だけでも担保しておくべきである。このPC上の単体試験環境は、継続的インテグレーションツールと組み合わせることでソフトウェア全体の品質を可視化できるようにしてあり、今回の開発では結合時の手戻りを抑えられた他、オフショアサイトとの分担開発にも貢献した。

5.2 デバッグ・ロギング環境

組込みソフトウェアのデバッグではICE (In-Circuit Emulator) の利用が一般的であるが、このシステムでは、複数の基板を同時に使い、かつ動作時はシステム本体が移動してしまうため、有線接続でのICEの利用が難しい。そこで、UART経由で各プロセッサのメモリ値やレジスタ値を読み書きできる機能を付加し、遠隔から任意のプロセッサやモジュールの簡易デバッグを行える環境を開発している。また、自律移動動作の性能チューニングを支援するため、各プロセッサに接続しているセンサからのデータやアクチュエータの制御パラメータなどのログを吸い上げる仕組みの追加も予定している。各プロセッサのログは、UART経由でApP Liteのファイルシステム上に蓄積し、必要に応じてWi-Fi経由で別のマシンに転送できるようにする。更に、取得したログを活用した機械学習ユニットへの拡張なども検討している。

5.3 オープンプラットフォームへの対応

ロボティクスドメインでは、ROS (Robot Operating System)⁽⁴⁾ やOpen-RTM (Robot Technology Middleware) といった標準プラットフォームが整備されつつある。このシステムでも、ApP Liteから、Visconti2やVivace2を画像認識及びモータ制御用のデバイスとして扱える、ROS向けの環境を試作した。オープンプラットフォームとの親和性を高め、そのプラットフォームで開発された様々なアプリケーションやデバイスと接続することで、より広い市場や製品分野に応用できると考えられる。

また、ハードウェアとソフトウェアの両面でモジュラー構造を意識したアーキテクチャを採った結果として、実際にこのシステムのハードウェアを置き換えられることも確認した。全体の動作性能は置き換えたハードウェアの性能に依存するが、

Arduino⁽⁵⁾やRaspberry Pi⁽⁶⁾といった、国内外で市販されている安価な既存ハードウェアへ比較的簡単に置き換えられ、協調動作できることも確認している。

6 あとがき

当社で開発している2輪の自律移動小型ロボットを一例として、プロセッサ間の協調動作の開発に適した統合リファレンスシステムの基本構想と設計内容について述べた。ロボティクスドメインでも、分散制御やアプリケーションの高度化が進んでソフトウェアの規模が増大しつつあり、機能配置の柔軟性や、移植性、開発の効率化などが強く求められ始めている。今回は大きく触れなかったが、開発したシステムは、複数のプロセッサを使った組込みシステムのリファレンス実装例としても整備を行っている。また、この開発例を基に東芝ソフトウェア開発ベトナム社への技術移管も効率的に進み、現在はここの並行開発も実現できている。

今後も、統合リファレンスシステムとしての完成度を上げるとともに、社内外の要素技術を取り込むための開発環境として、機能を整備していく。

文献

- (1) 東芝. “車載マイクロコントローラ”. 半導体&ストレージ製品. <<http://toshiba.semicon-storage.com/jp/product/automotive/micro.html>>, (参照 2016-05-31).
- (2) 東芝. “画像認識プロセッサ Visconti™ 特長”. 半導体&ストレージ製品. <<http://toshiba.semicon-storage.com/jp/product/automotive/image-recognition/features.html>>, (参照 2016-05-31).
- (3) 東芝. “ApP Lite™ (Application Processor Lite)”. 半導体&ストレージ製品. <<http://toshiba.semicon-storage.com/jp/product/assp/applite.html>>, (参照 2016-05-31).
- (4) Fernández, E. et al. "Learning ROS for Robotics Programming". 2nd ed., Packt Publishing Ltd., 2015, 458p.

• Arduinoは、Arduino LLCの商標。
• Raspberry Piは、Raspberry Pi Foundationの商標。



萱嶋 志門 KAYASHIMA Shimon

ストレージ&デバイスソリューション社 システム・ソフトウェア推進センター ソフトウェア・プラットフォーム担当主務。複数のLSIを利用したリファレンス開発に従事。情報処理学会会員。System & Software Solution Center



渡辺 雄一郎 WATANABE Yuichiro

ストレージ&デバイスソリューション社 システム・ソフトウェア推進センター ソフトウェア・プラットフォーム担当主務。複数のLSIを利用したリファレンス開発に従事。System & Software Solution Center



佐藤 雄一 SATO Yuichi

ストレージ&デバイスソリューション社 システム・ソフトウェア推進センター ソフトウェア・プラットフォーム担当主務。マイクロコンピュータ及びエレクトロニクス応用組込み機器、装置の開発に従事。電子情報通信学会会員。System & Software Solution Center