

作業車両のための通信制御システムの開発

堤 大祐, 新井 浩成, 浦池 隆文, 多田 達実

Development of a Communication Control System for Work Vehicles

Daisuke TSUTSUMI, Hironari ARAI, Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA

抄 録

近年, 制御システムは通信ネットワークに接続した, 異なる機能を有する複数のECUによる分散処理によって多様な機能を実現している。本研究では, 作業車両の制御システムを高機能化するため, 走行制御にCANを, 外部ネットワークとの接続にEthernetを使用できる通信制御システムを開発した。また, センサ類にネットワーク接続機能を持たせたほか, 高度な走行制御を可能とするセンサ類の試作を行ったので報告する。

キーワード: 通信制御システム, 作業車両, CAN

1. はじめに

作業車両の電子制御化が進んでおり, 筆者らは, 作業車両の制御技術に関して研究を行っている。特に, 近年は農作業機械への活用を積極的に推進しており, これまでに, 果樹園の除草ロボットの開発¹⁾や, ポテトハーベスタの開発²⁾を行った。開発した除草ロボットの外観を図1(a), ポテトハーベスタの外観を図1(b)に示す。

作業車両の制御において, 従来は単一のECU (Electronic Control Unit: 電子制御装置) を用いて制御した。ECUはセンサおよびスイッチなどの入力情報を処理し, 油圧モータなどのアクチュエータの操作情報を出力する。これらの入出力の制御において, 時間管理や排他制御などが容易に実現できることから急速に普及した。その結果, より多くのスイッチやアクチュエータが接続され, 制御システムが複雑になった。この状態に対応するため, 更に, 内部状態を表示するために表示器を追加するなど, 制御システムは大規模化かつ複雑化した。

近年の制御システムでは通信ネットワークに接続した, 異なる機能を有する複数のECUによる分散処理によって多様な機能を実現している。作業車両系の通信ネットワークにはCAN (Controller Area Network) が広く使われている。筆者らは農作業機械を制御する制御用ECUと, 液晶画面と操作ボタンを有する操作端末とをCANで接続した通信システムを開発した³⁾。



(a) 除草ロボット



(b) ポテトハーベスタ

図1 除草ロボットとポテトハーベスタの外観

本研究では, 筆者らが研究開発用に使用している移動体プラットフォームの制御システムを高機能化するため, 走行制御にCANを外部ネットワークとの接続や大きなデータを扱うためにEthernetを使用できる通信制御システムを開発した。また, このシステムを用いて, センサ類をネットワークに接続することで高度な走行制御が可能になるセンサ類の試作等を行ったので報告する。移動体プラットフォームを図2に示す。

事業名: 経常研究[†], 研究職員奨励事業[‡]

課題名: 作業車両の協調動作のための制御技術に関する研究[†],
移動体プラットフォームのための通信制御技術の開発と成果の普及[‡]



図2 移動体プラットフォーム

2. 通信制御システムの構成

図1(a)に示す除草ロボットでは、おおむね図3に示す構成となっている。図3のGNSS⁴⁾センサはGlobal Navigation Satellite System (全球測位衛星システム) による位置情報を取得するセンサである。得られた位置情報はNMEAフォーマットにしたがって、UART⁵⁾ (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) によるシリアル通信で出力するセンサが多い。NMEAフォーマットはNational Marine Electronics Association (米国海洋電子機器協会) により管理されている。接触センサはI/Oポートに接続し、接触状態を取得する。

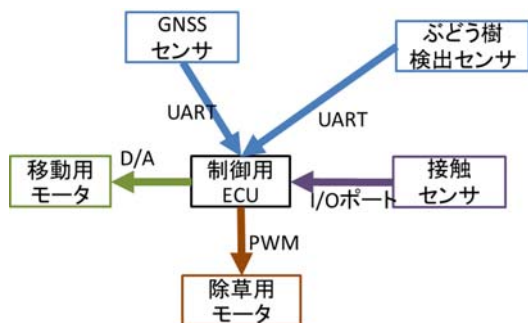


図3 従来の構成

一般に、制御用ECUには図3に示すように多くのセンサ、アクチュエータを接続する。さらに、制御の状態を外部から確認できるように表示器を接続することもある。このように、ECUの処理量は増える傾向にあり、高性能化が求められるようになった。システムが複雑になると、センサの追加や変更による制御プログラムの変更に多大な工数がかかるようになってきた。ECUには外部センサを接続する端子があるが、端子の不足や追加したセンサの処理のため、システム全体の処理のタイミングが変わったりする不具合が発生する可能性がある。

本研究では、センサに通信機能を持たせ、通信ネットワークに接続する通信制御システムを構築した。構成を図4に示す。これにより、センサの情報処理を制御用ECUから切り離すことができた。よって、センサの追加による制御用ECU

の負担が減少し、拡張性の高いシステムとなった。通信ネットワークにはCANを用いた。CANは最大8バイトの情報を送受信可能な通信規格であり、耐ノイズ性を備えていることから、車載系で標準的に使われている。

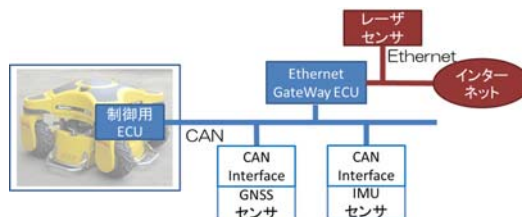


図4 開発した通信制御システム

通信機能を持たせたセンサは、GNSSセンサとIMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置) センサである。それぞれのセンサにCANインターフェースを付けて、通信ネットワークに接続した。IMUセンサは加速度や角速度などを出力するセンサで、移動する機器の姿勢制御に活用されているセンサである。

GNSSセンサはヘミスフィア製ssV-100で、その外観を図5に示す。位置情報の出力はNMEAフォーマットで115,200 bpsでUARTによるシリアル通信によって行う。また、CANインターフェースを図6に示す。



図5 GNSSセンサの外観

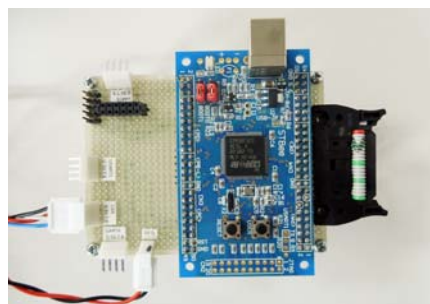


図6 GNSSセンサ用CANインターフェースの外観

GNSSセンサ用CANインターフェースはGNSSセンサが出力する図7に示すような文字列から位置情報を抽出し、図8に示すようなCANのメッセージとして出力する。図7にお

いて、下線部が緯度・経度を示す。図8において、00000441はCANのメッセージの識別子であり、その後続く8バイトのデータが緯度（4バイト）・経度（4バイト）を示す。GNSSセンサ用CANインターフェースはSTMicroelectronics製のCPU（STM32F103）を使用した。このCPUは内部動作周波数72MHzで動作できる。

```
$GPGGA,081819.00,4354.16005900,N,14440.63284059,E,2,06,1.6
                緯度                経度
,5.726,M,26.434,M,7.0,0129*4A
```

図7 GNSS センサの出力例

```
00000441 2B 52 9F 5E 90 3E 0A AC
ID      緯度(4バイト) 経度(4バイト)
```

図8 位置情報の CAN メッセージの例

IMUセンサはSTMicroelectronics製LSM9DS0を使用した。このセンサは3軸（x軸、y軸、z軸）の加速度、3軸の角速度、3軸の地磁気データを出力する。3軸の加速度、角速度、地磁気の合計9個のデータをIIC（Inter-Integrated Circuit）により取得する。各データは2バイトなので、加速度、角速度、地磁気の3種類合計6バイトをCANメッセージとして出力する。図9にIMUセンサの外観を、図10にIMU用CANインターフェースの外観をそれぞれ示す。このCANインターフェースにはSTMicroelectronics製のCPU（STM32F405）を使用した。このCPUは内部動作周波数168MHzで動作できる。今後、高度な補正処理や推定処理を実行することを考慮し高性能なCPUを使用した。



図9 IMUセンサ

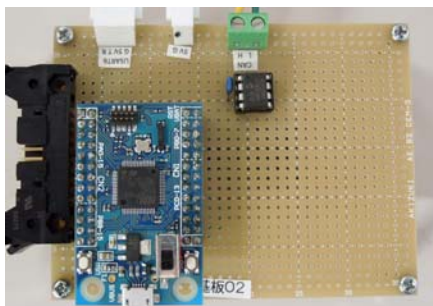


図10 IMUセンサ用CANインターフェースの外観

さらに、大きなデータや外部との通信が可能となるように、EthernetとCANが接続できるGatewayを設けた。このGatewayはEthernetを有しLinuxが動作するシステムにCANインターフェースを追加することで構築した。Linuxは無償で

利用できるOS（基本ソフトウェア）であり、一般的に使用されている。図11に構築したEthernetとCANインターフェースを備えたGatewayの外観を示す。

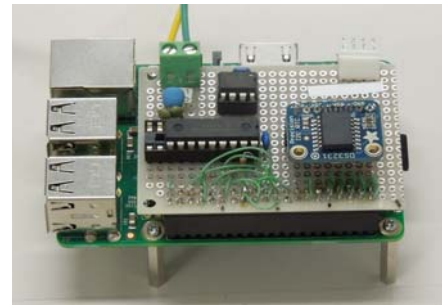


図11 CANインターフェースを備えたGatewayの外観

3. 通信制御システムの動作確認

センサ情報の通信状態の確認はCANのメッセージを監視することで行った。監視はCANのプロトコルアナライザ（CANoe）を用いた。

3.1 GNSSセンサ

図12はGNSSセンサを取り付けた移動車両において、GNSSセンサから得た位置情報をCANのメッセージとして取得し、あらかじめ指定した経路に沿って走行させた時の軌跡である。緯度・経度の情報を平面座標系に変換して図示した。図中、実線は実際の走行軌跡、始点を△、終点（目的地点）を□で示しており、点線は走行させたい経路である。

制御用ECUは図7に示すような受信データを処理する代わりに、図8に示すCANのメッセージを受信するだけで、位置情報を取得できる。これにより、制御用ECUは指定経路にそって走行する機能のみ行えば良い。

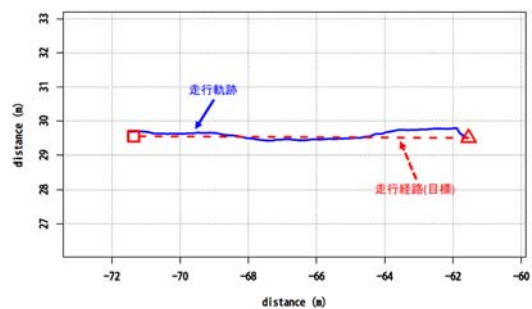


図12 GNSSセンサを用いた走行制御の例

3.2 IMUセンサ

同様にIMUセンサも9種類のデータをCANのメッセージを受信するだけで制御等に活用できる。プロトコルアナライザを用いて受信した様子を図13に示す。図13において、加速度の単位はG、角速度はdegree/sec、地磁気はgaussである。

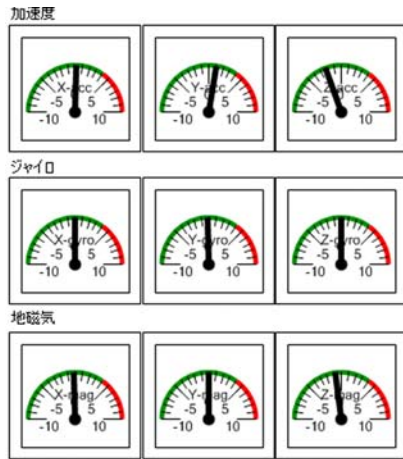


図13 加速度，ジャイロ，地磁気情報の受信例

図4に示した制御用ECUはCANのメッセージによって走行を制御することができる。移動体プラットフォームは前進後進の他、前側の2つの車輪と後ろ側2つの車輪を独立に操舵できる。図11に示すGatewayにWebサーバの機能を持たせ、一般のブラウザから走行の指示を与えることができる。操作画面を図14に示す。この画面は後輪の操舵は行っていない。前進または後進中に画面の後進または前進ボタンを押下すると、サーバ側で一度停止状態にしてから、後進または前進するように制御している。図14は車両の指示のみであるが、車両の状態を表示させることも容易である。Gatewayを追加することで、遠隔操作や遠隔監視が容易に行えるようになった。



図14 インターネット経由での車両の制御画面

4. 通信制御システムへ接続可能な追跡センサ

4.1 レーザセンサ

本通信制御システムではEthernetインターフェースを設けたことから、Ethernetでデータを出力するセンサの活用も容易になった。本研究では移動車両の周辺監視等によく使われているレーザセンサを用いて、周辺監視についての有効性に関する試験を行った。

試験は車両が人を追跡する用途を想定し、レーザセンサを用いて人の検出を行った。使用したレーザセンサは北陽電機

製UST-10LXで周囲270度の範囲にある物体までの距離を測ることができる。図15にセンサの外観を示す。

このセンサを用いて会議室内において人の追跡試験を行った。初期条件として、センサの近傍(0.5m以内)かつ正面(図16の縦方向)に人が位置することとした。図16において、×はセンサの位置を示す。+はレーザセンサの検出結果であり、何らかの反射物があることを示している。○は検出した結果から、初期条件を満たして、人として検出した結果である。検出後、追跡処理を行うことで、人の検出を継続できる。追跡している様子を図17に示す。図17において、人がセンサから遠ざかり約5m離れても検出し追跡していることを示す。

追跡した座標等の結果をCANのメッセージで制御用ECUに送信することで、車両が人を追跡するなどの走行制御に活用可能であることがわかった。

4.2 電波を用いた方位センサ

レーザは直進性が高く障害物があると検出が難しくなる特性がある。そこで、電波を用いて追跡対象の方位を計測するセンサの試作を行った。計測原理を図18に示す。検出対象に送信機を持たせ、計測側で2本のアンテナ(S₁, S₂)で電波を受信する。その際、受信電波の位相差から方位を計測する。

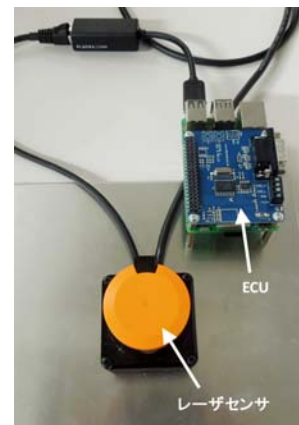


図15 レーザセンサの外観

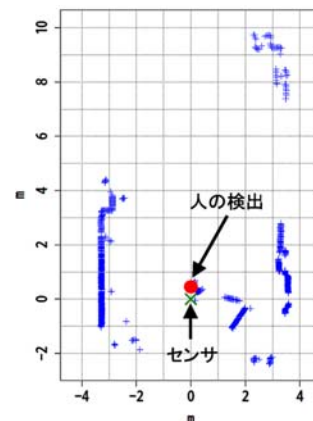


図16 レーザセンサによる人の検出結果

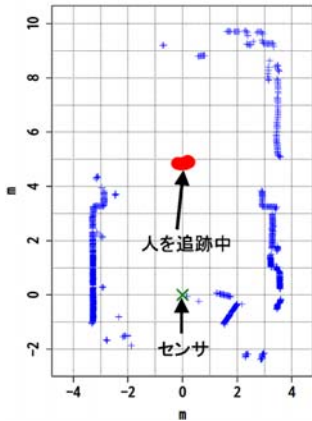


図17 レーザセンサによる人の追跡結果

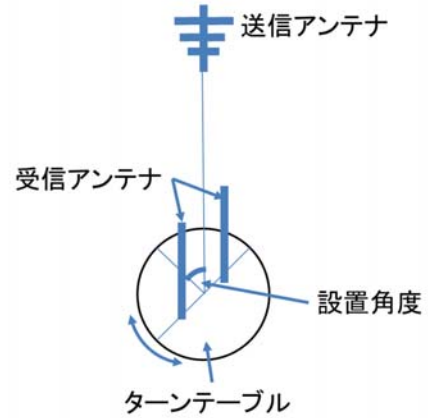


図20 計測試験の方法

位相差の計算は次々に更新されるデータを遅滞なく処理するため、FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた。FPGAはAltera社製 (現Intel) Cyclone Vを使用した。試作した計測システムを図19に示す。電波は図19の右側にある基板で受信しA/D変換され、左側のFPGA基板に送られる。FPGA基板では位相差の計算を行う。

電波暗室において、計測試験を行い、この計測システムを検証した。試験は図20に示すようにターンテーブル上に計測システムの受信アンテナを設置する。送信アンテナと受信アンテナの設置角度を変えて、計測システムから得られた送信アンテナの方位角度を計測する。設置角度の変更はターンテーブルを回転させて行う。図21に計測試験の様子を示す。



図21 電波暗室における計測試験

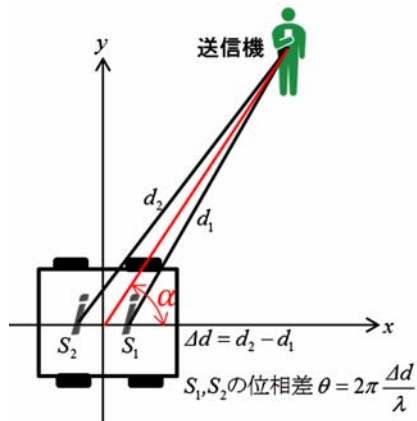


図18 検出原理



図19 計測システム

試験結果を図22に示す。受信アンテナに対する送信アンテナの設置角度と試験結果から求めた計測角度の誤差は最大8度であった。方位の検出のための計測誤差としてはやや大きいですが、試作した計測システムはサンプリング周波数などのパラメータを調整することで精度を向上させることが可能である。

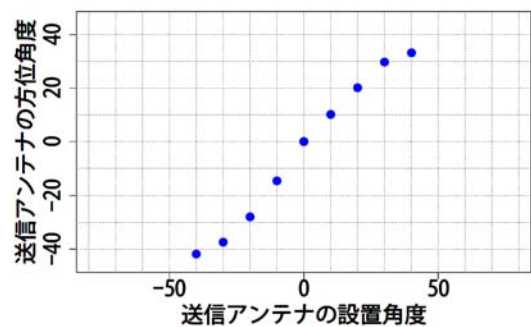


図22 送信アンテナの方位角度の計測結果

5. まとめ

CANによる通信を制御システムの軸にすることで、センサなどの追加接続が容易になり、制御手法の統一化を図るこ

とができた。また、データの送受信の手段としてCANのメッセージを使うため、センサの追加や、他のネットワークへの使用も容易になり、開発の効率化が期待できる。

また、移動車両の走行制御に関わる各種センサの試験をあわせて行った。その結果、電波による対象物追跡の有効性を明らかにし、走行制御の高度化に寄与することがわかった。今後は、多様なセンサを本通信制御ネットワークに接続し、高度な情報処理を行うことで、走行制御の高度化を図る。

参考文献

- 1) 鈴木慎一・多田達実・三田村智行他：醸造用ぶどう園向け除草作業支援ロボットの開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告No.313，2014
- 2) 多田達実・鈴木慎一・三田村智行他：ISOBUSポテトハーベスタの開発，北海道立総合研究機構工業試験場技術成果支援事例集，2015
- 3) 堤大祐・中西洋介・万城目聡他：国際規格を活用した農業機械の通信制御システムの開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告No.312，2013
- 4) GNSSとは，http://terras.gsi.go.jp/geo_info/GNSS.html
- 5) UART，<https://ja.wikipedia.org/wiki/UART>