

自動操舵付き農機ガイダンスシステムの開発

Development of Agricultural Machine Guidance System with Automatic Steering Control



笠原	暢	Toru Kasahara	①
堀川	成之	Shigeyuki Horikawa	②
三宅	寿英	Toshihide Miyake	③
森	裕二	Yuji Mori	④

あらまし

Hitachi日立造船は、グローバルな衛星測位システムGNSS（Global Navigation Satellite System）を用いた自動操舵付き農機ガイダンスシステム「SG100」を開発した。SG100は既存のトラクタに後付けする方式であり、低コストで熟練作業者並みの自動操舵が可能となる。SG100の自動操舵機能の特長は、2台のGNSSアンテナを用いて車両方位を算出することで、特に日本の作業環境で求められる低速時の直線保持走行を実現したことと、舵角センサの取付け誤差を補償する機能を有していることである。また、SG100では、トラクタと作業機の情報の相互利用によって効率的な農作業を実現するため、国際規格であるISO 11783（ISOBUS）への対応を積極的に進めている。

Abstract

Hitachi Zosen Corporation has developed an agricultural machine guidance system with automatic steering control, named as SG100, based on the Global Navigation Satellite System (GNSS). The SG100 is a low-cost system that enables automatic steering control on a par with skilled human resources simply by retrofitting to an existing tractor. The feature of the automatic steering function of SG100 is to achieve the straight-line running at low speed which is desired by the Japanese agriculture, calculating directions of the tractor using two GNSS antennas, and to compensate an installation's error of a rudder's angle sensor. On the other hand, we are developing a mutual communication function between the tractor and its working machine in conformity with ISO 11783 (ISOBUS), in order to achieve efficient agricultural work.

1. 緒言

近年、我が国の農業分野では、農業従事者の高齢化や離農などによって、熟練作業者が不足する状況となっている。一方、施肥、播種、資材散布等の農作業を行う場合、作業経路を直線かつ前の経路と一定間隔に保つようトラクタを運転しながら、作業機の稼働状況や農地の状態も確認する必要があるため、作業には高度な運転技術が要求される。このような背景から、トラ

クタのステアリングを自動制御することで、運転に不慣れな作業でも簡単に熟練作業者並みの直線保持走行が可能とする自動操舵システムの需要が高まっている。

自動操舵システムによって直線保持走行の精度が向上すれば、例えば施肥作業における経路の重複幅を最小限にできるため、無駄な肥料の削減や作業時間の短縮につながる。また、集中力が求められる直線保持運転から作業者が解放されれば、心身の負担が軽減される効果もある。

自動操舵システムの開発は、国内の農機メーカーや海外の測量機器メーカーが取り組んでおり、特にGNSSを利用して、トラクタの位置や方位を高精度に取得する技術が重要となっている。当社は30年以上前からGNSS事業に携わっており、図1に示す様々なGNSSアプリケーションシ

① 技術研究所 知能機械研究センター

② 機械事業本部 電子制御ビジネスユニット 検査・計測システム部

③ 技術研究所 知能機械研究センター 博士(理学)

④ 機械事業本部 開発センター

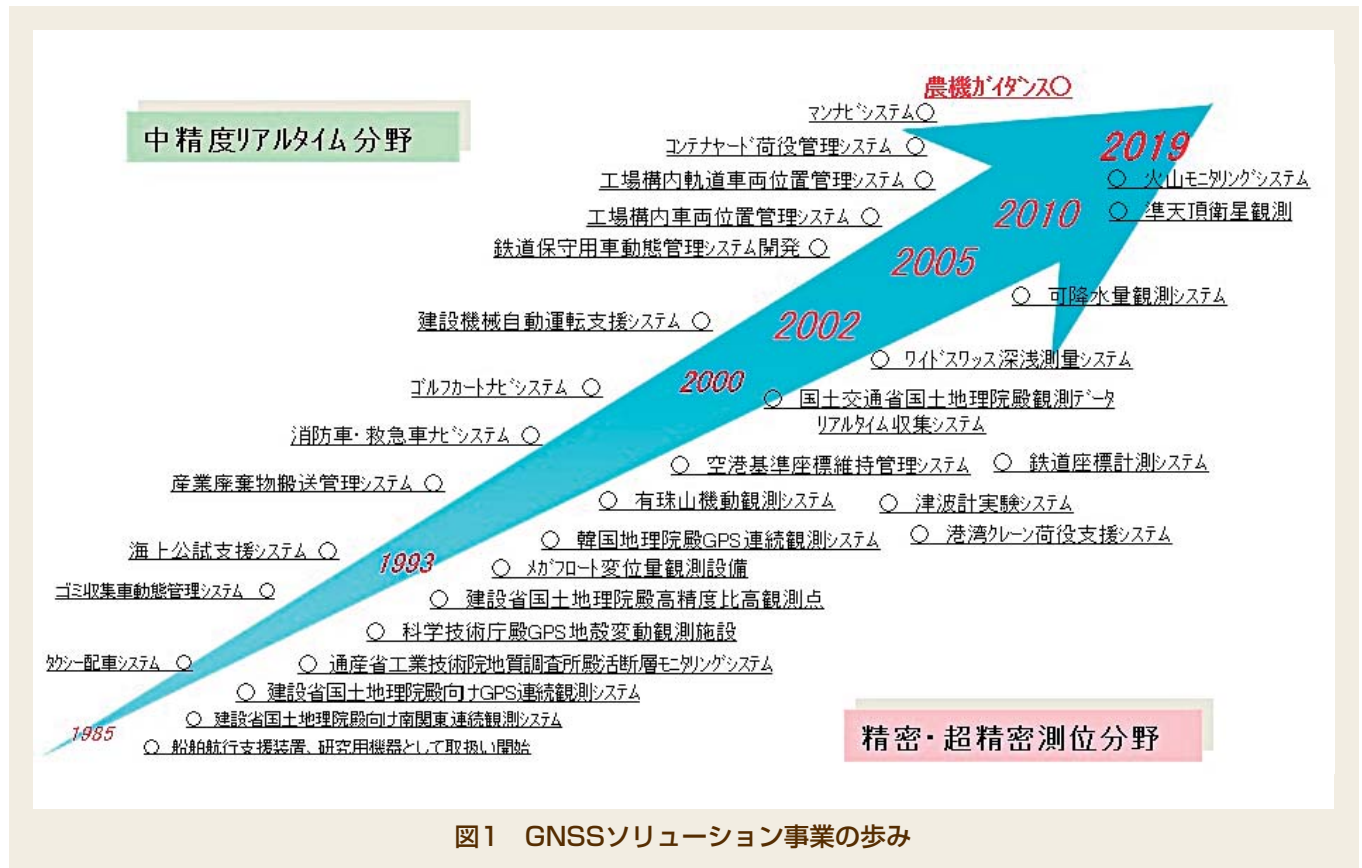


図1 GNSSソリューション事業の歩み

テムを構築してきた。また、近年ではGNSSによる測位のノウハウを生かして、表1に示すようなスマート農業に関する実証事業にも積極的に参加し、測位部分の技術提供を行ってきた。これらの経験に基づき、農機メーカ、ユーザなどの意見を反映させ、当社は自動操舵付き農機ガイダンスシステムSG100を開発した。次章以降でSG100の構成、特長および機能を説明する。

表1 当社のスマート農業実証事業実績(一部抜粋)

実施年度	名称	備考
2014	海外における準天頂衛星システムの高度測位信号の利用に係る電波の有効利用に関する調査(総務省)	オーストラリアにて実施
2018 ~2020(予定)	除染後農地の地力測定ロボットの開発及び検証(福島イノベーション・コースト構想に基づく先端農林業ロボット開発事業)	
2018 ~2020(予定)	生産から流通・消費までのデータ連携により最適化を可能とするスマートフードチェーンの構築(内閣府 SIP)	熊本県にて実施

2. SG100の構成と特長

2.1 システムの構成 開発したSG100の機器構成を図2に示す。SG100は、ガイダンス端末、GNSSアンテナ2台、操舵装置、舵角センサ、慣性計測装置IMU(Inertial Measurement Unit)、通信装置から構成されている。SG100は、農作業を行う際の作業経路を設定し、

トラクタの位置や方位をリアルタイムで表示するため、いわば農作業版のカーナビゲーションシステムであり、それに自動操舵機能も加わっている。ガイダンス端末はそのマンマシンインターフェースの役割を果たすもので、自動操舵時の制御演算や、圃場状態、作業経路および作業内容の記録も行う。ガイダンス端末の仕様を表2に示す。操舵装置は自動操舵時に車両のハンドルを回転制御する装置であり、舵角センサは車輪の舵角を、IMUは車両のRoll角とPitch角を計測する装置である。



図2 SG100構成図

表2 ガイダンス端末仕様

項目	仕様
ディスプレイ	10.4インチ液晶タッチパネル
インターフェイス	GNSS アンテナ(TNC コネクタ)×2
	RS-232C×2
	USB2.0×2
	LAN(RJ45)×1
	CAN×3
	Wi-Fi、Bluetooth 内蔵
	音声入出力
入力電圧	DC8~32V 対応※DCDC コンバータ(付属品)使用時
サイズ	W294mm×H242mm×D71mm ※コネクタなどの突起物を除く)
重量	約 3kg
取付方法	RAM マウント、VESA マウントに対応
動作温度	-20~60℃
保護構造	IP67(防水防塵)
EMC	EMI : IEC61000-6-2,4 CLASS A EMS: IEC61000-4-2,3,4 CLASS A
OS	Windows 10 IoT Enterprise

2.2 システムの特長 SG100の主要な機能の一つとして、当社独自の自動操舵機能が挙げられる。また、トラクタと作業機とのデータ通信は、国際規格であるISO 11783 (以後、ISOBUSと呼ぶ) への対応を進めており、既存の作業機に対して汎用的に接続が可能な機能を有している。これら二つの機能については次章で詳述する。

SG100では、日本の農機メーカーやユーザーの意見を反映することを重視し、使いやすいインターフェイスを心がけた。図3に示すガイダンス端末のメイン画面は、操作性と視認性を考慮して、10.4インチの大画面タッチパネルを採

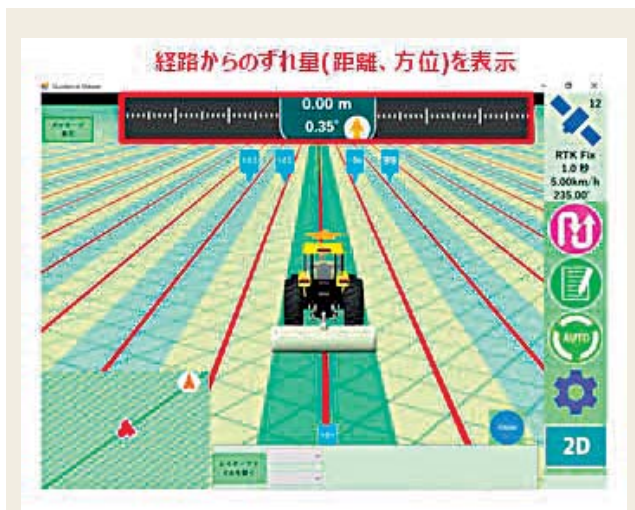


図3 ガイダンス端末画面

用した。このメイン画面には、車両の現在位置、方位および作業経路が表示され、リアルタイムで変化する作業経路とのずれ量は赤枠で囲われて強調される。さらに、ガイダンス端末のOS (Operating System) はWindowsを採用し、システムの拡張性とカスタマイズ性を高めた。このことにより、土壌の性質や作物の生育状況などのセンシング機器との連携において、柔軟な対応が可能となった。

以上の特長を持つ本システムは、既存のトラクタに後付けで装着することが可能であり、自動操舵トラクタを低コストで実現できることになる。

3. SG100の主要機能と技術的特長

3.1 自動操舵機能

3.1.1 制御系と車両方位検出機能

SG100の自動操舵システムのブロック図を図4に示す。SG100では、車両の屋根の上に2台のGNSSアンテナを設置して、その位置を計測している。車両の方位は、2台のGNSSアンテナの測位座標を結ぶ直線の向きとして算出できる。また、IMUで計測した傾斜角(Roll角、Pitch角)を用いて、トラクタの傾きによって生じる位置誤差を補正している。制御演算部では、車両の位置・方位(計測値)と各目標値との偏差を打ち消すような信号(指令舵角)をPI制御によって算出し、操舵装置へ送信する。操舵装置とは、与えられた指令舵角のとおり車輪舵角が得られるように、自動でハンドルを回転させる装置である。

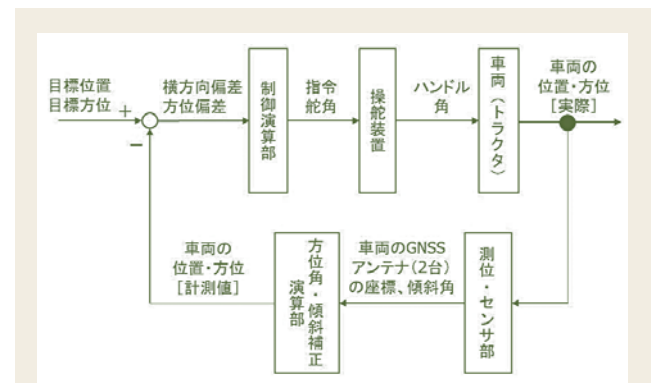


図4 自動操舵システムのブロック図

他社の農機ガイダンスシステムは、GNSS測位と加速度センサを併用する方式が主流であり、一定距離を助走しなければ車両方位が算出できなかった。また、低速走行の場合は、車両方位の計算において加速度センサの誤差の影響が大きくなるため、直線保持走行が困難になるという問題点があった。これらの欠点を克服するために、当社は加速度センサを使用せずに2台のGNSSアンテナを採用し、低速走行時にも精度良く車両方位を算出できるようにしたことで、安定した直線保持走行を実現した。

3.1.2 舵角バイアスの推定 SG100では、操舵装置は指令舵角と車輪舵角が等しくなるように動作するが、一方で舵角センサを用いて車輪の舵角を計測している。車輪舵角の実際の向きは、自動操舵の直進走行精度に影響するため正確な舵角計測が必要となる。しかし、舵角センサの計測値と実際の車両舵角にオフセット誤差が発生する場合があります、この誤差を舵角バイアスと呼んでいる。

当社は、車輪舵角の補正機能として、自動操舵制御における定常値から舵角バイアスを推定する方法を考案した(推定補正)。本方法の場合、舵角センサのキャリブレーション後に1回走行すれば舵角バイアスを推定できる。また、キャリブレーションと推定はSG100設置時に行うため、農作業毎に行う必要はない。

考案した舵角バイアス補正の有効性を検証するために、実際のトラクタに当社のSG100を設置し、畦道で速度約3.0km/hで走行した。推定補正を行った場合(推定補正有)と行わない場合(推定補正無)での結果比較を図5に示す。図5の上段は横方向偏差(作業経路とのずれ量)、下段は車両速度の時間変化を表している。車両速度が上昇し始めたタイミングで自動操舵が開始されているが、推定補正無では、舵角バイアスの影響で自動操舵開始直後に横方向偏差が大きくなっており、その後PI制御の積分効果により横方向偏差が徐々に小さくなるという結果になった。一方、推定補正有では、舵角バイアスを考慮して指令舵角を計算するため、自動操舵開始直後も横方向偏差が大きくなり、優れた直線保持性能が得られていることが分かる。まだ詳細に検証を行う余地は残しているものの、定性的には舵角バイアス推定の効果が得られていると考えられる。

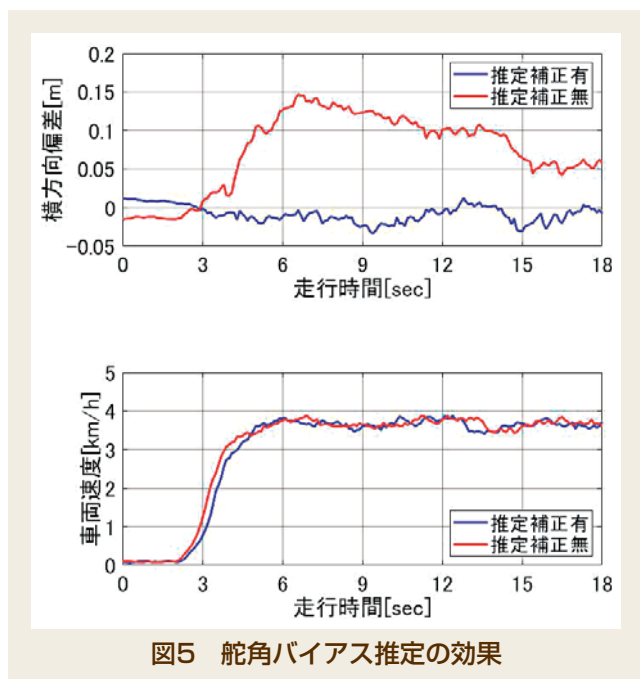


図5 舵角バイアス推定の効果

3.1.3 制御性能の検証 上述した車両方位検出機能および舵角バイアス推定機能を含む自動操舵システムの性能を検証するために、SG100を設置したトラクタで圃場脇の畦道を走行した。走行速度は低速(約3.5km/h)と高速(約10.0km/h)の2パターンとし、作業機は接続しない状態で、横方向偏差と方位偏差を計測した。初期状態は、横方向偏差-0.4m、方位偏差-5度、車両速度は0km/hとして試験を行った。

低速走行時および高速走行時の結果をそれぞれ図6および図7に示す。また、これらを総合した検証結果を表3に示す。

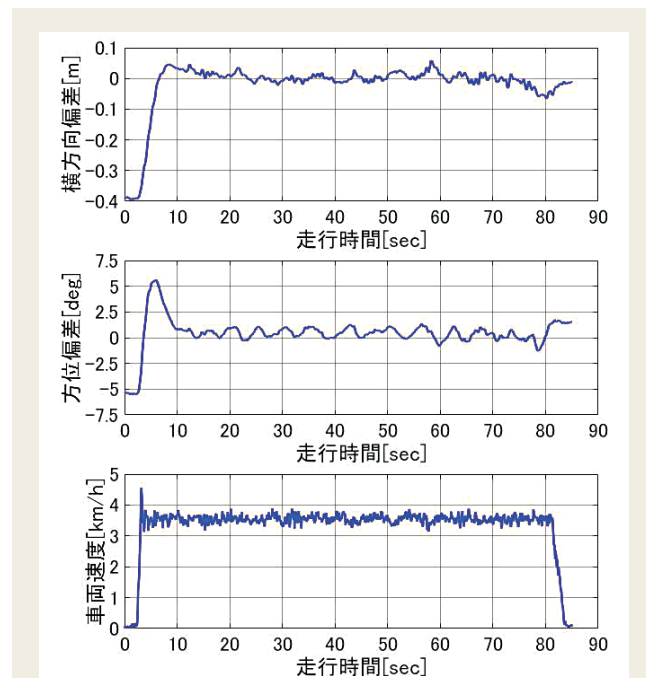


図6 低速走行検証結果

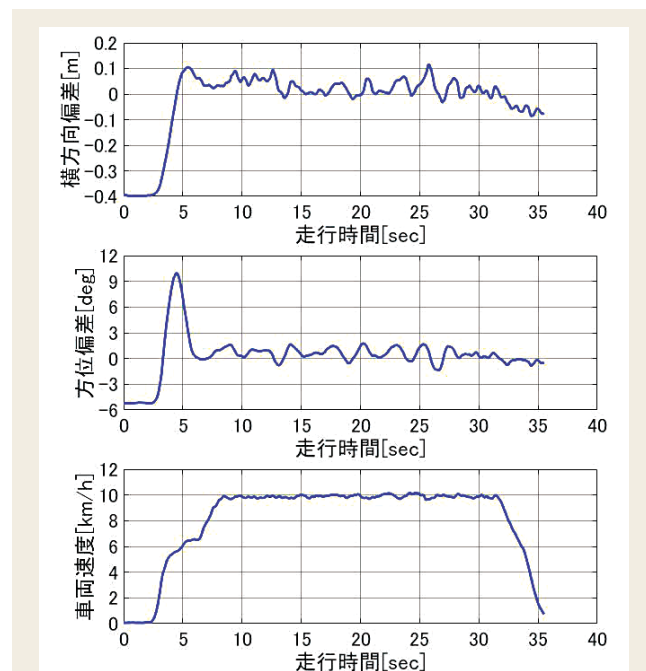


図7 高速走行検証結果

表3 自動操舵精度検証結果

走行速度	定常状態での偏差範囲	
	横方向偏差[m]	方位偏差[deg]
低速	-0.05~0.05	-1~1
高速	-0.05~0.10	-1~2

図6および図7から、直線保持走行における作業経路とのずれ量を意味する横方向偏差が、走行開始後にすみやかに0mへ近づいており、車両が設定した作業経路に良く追従できていることが分かる。表3に示すように、特に低速においては、最大誤差は±5cm程度という高い精度での自動操舵を実現できている。

また、一般的なトラクタの最低走行速度は機構上約0.1km/hとなっているが、そのような極めて低速でも表3と同等の偏差で直線保持走行できることを確認している。

3.2 トラクタと作業機との通信機能

3.2.1 ISOBUSによる通信ネットワーク構成

農業分野における生産性の向上が大きな課題となる中で、解決策の一つとして期待されているのが農業機械の電子制御による作業の高度化である。従来、トラクタと施肥、播種、資材散布などを行う作業機が一体となり、油圧機器を介した動力伝達のみで作業を行ってきた。次世代農業機械では、トラクタと作業機のそれぞれに搭載されたセンサの計測情報を相互利用することによって、より高度な作業機制御の実現を目指している。

トラクタと作業機のデータ通信において、機器間の相互接続性を確保するために国際標準規格ISOBUSが策定されている。ISOBUSに基づいた通信ネットワークの構成例を図8に示す。これを使用することによって、規格に準拠したトラクタと作業機であれば、メーカーに関わらず運用可能となるため機器の汎用性が増し、設備投資時におけるコスト削減効果が見込める。

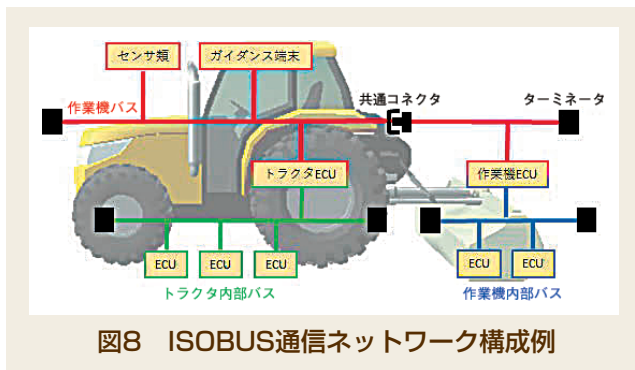


図8 ISOBUS通信ネットワーク構成例

3.2.2 ISOBUSの機能とその検証 ISOBUS仕様のモジュールに対する主要機能には、一般に以下のようなものがある。

- **UT (Universal Terminal)** : バス上に存在するISOBUS対応作業機を操作するための端末機能である。作業機から受信した情報の描画および画面操作による制御指示を行う。
- **TC (Task Controller)** : 作業機と圃場管理システム間で作業指示マップや作業履歴等のデータを受け渡しするための機能である。タスクコントローラを利用することで、例えば農薬散布の場合、スプレイヤの散布幅を分割し、個別に散布のON/OFFや噴霧量の自動調節を可能とする。
- **TECU (Tractor ECU)** : ECUはElectrical Control Unitの略号であり、トラクタから提供される車速やPTO (Power take-off) 装置のON/OFFおよび回転数等の情報を利用するための機能である。
- **AUX (Auxiliary Control)** : 作業機を操作するための補助入力装置(ジョイスティック、スイッチボックス等)との連携機能である。

本開発では第一段階として、SG100に上記UTを組み込んだ。UTはISOBUSネットワーク内に存在する作業機ECUとアドレス交換を行い、作業機ECUから送信される情報の描画と制御指示を実現する機能を有する。本開発では、作業機ECUをシミュレートするアプリケーションやISOBUSの策定団体であるAEF (Agricultural Industry Electronics Foundation) が提供するConformance Testと呼ばれるテストツールを用いて、規格への適合性に問題ないことを確認した。また、農機メーカーが開発中のISOBUS対応端末や作業機ECUを持ち寄り、机上にて相互接続性を確認しあうPlugfestにも参加し、SG100上に実装したUTを介して各社の作業機との接続が可能なることを随時確認している。

4. 今後の展望

本稿では主に、SG100の自動操舵機能における直線保持走行制御について述べたが、現在は圃場の枕地に近づくと自動的に旋回走行を行う枕時旋回機能の開発にも取り組んでおり、SG100の次期バージョンにはこの機能も搭載予定となっている。

また、今後は作業機の自動制御のためのISOBUS対応をはじめ、各種農業データとの連携を可能にするWAGRI (農業データ連携基盤) や各種営農クラウドサービスへの対応を行っていく予定である。そのデータ連携のイメージを図9に示す。様々な情報をSG100に取り込んで農作業に反映することで、更なる省力化や効率化を実現したいと考えている。



本稿では、当社の農機ガイダンスシステムSG100において、主要機能の一つである自動操舵機能、およびトラクタと作業機との通信に関する国際標準規格ISOBUSへの対応状況について述べた。今後の開発においては、ユーザの立場から作業の省力化、効率化に役立つ機能の新規開発を行っていき、我が国の農業が抱える問題の解決に貢献するシステムとなるよう、製品のバージョンアップを進めていきたい。

【謝辞】

本開発にあたり、北海道大学 大学院農学研究院 石井一暢准教授に多大な協力をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 木瀬ら：汎用ロボットトラクタのシステム開発に関する研究, 北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 25(1): 1-60.
- 2) ISO 11783 : 2007, Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業企画・技術開発本部
技術研究所 知能機械研究センター
笠原 暢
Tel : 06-6551-9312 Fax : 06-6551-9841
e-mail: kasahara_t@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Business Planning & Technology Development
Headquarters
Technical Research Institute
Intelligent Machinery Research Center
Toru kasahara
Tel : +81-6-6551-9312 Fax : +81-6-6551-9841
e-mail : kasahara_t@hitachizosen.co.jp



笠原 暢



堀川 成之



三宅 寿英



森 裕二