フィールドサーバによるユビキタス環境と センサネットワークの構築

Ubiquitous Network Environment with Sensor Networks Constructed by Field Servers

平藤雅之
独立行政法人　農業・生物系特定産業技術研究機構
中央農業総合研究センター
Masayuki HIRAFUJI
National Agriculture and Bio-oriented Research Organization (NARO)
National Agricultural Research Center (NARC)

1 はじめに

フィールドサーバは，畑や水田，畜舎などのフィールドに設置して，環境計測，画像による動植物生育モニタリング，防犯，温室・農業機械等の遠隔制御などを無線 LAN 及びインターネット経由でリアルタイムに行う Web サーバである。

センサネットワークの研究では SmartDust[1]が良く知られており，近年は様々なデバイスが開発されている。しかしながら，SmartDust タイプ（ワンチップ，少数のセンサ，近傍との通信を特徴とするもの）のセンサノードは，機能的にはセンサを搭載したアクティブタグに近いものであり，現在，RFID が用いられている用途（室内，工場，工作機械，流通）が主な適用対象となるだろう。

地球環境問題に目を転じてみると，現在，地球上の定点観測サイト数はアメダスや NOA の観測点を全て含めても，たかだか数万カ所程度しかない。しかも，地球温暖化で問題となっている CO_2 濃度を常時定点測定しているサイトはその１％に満たない。

コメや野菜の他，ハンバーガーやカップ麺などの加工食品も含めて全ての食料の大元は，植物の光合成がルーツである。植物の光合成速度は，日射量（正確には光合成有効光量子束密度），気温，湿度，CO_2 濃度，土壌水分等の環境要素に対して鋭敏に反応する。その応答は非線形性が強く，環境の変化によってカオティックに変動する[2]。したがって，農業生産・食料需給の管理や予測にはリアルタイムの環境データ及び過去の履歴情報が必須である。しかし，現状では利用できる情報はアメダスしかない。アメダスは，その名の通り雨量を計測するのが主目的であり，日射量，気温，湿度，CO_2 濃度，土壌水分などは計測されていない。

沙漠の拡大による耕地面積の消失は毎年 600 万 ha と言われており，これは我が国の耕地面積に相当する。砂漠化を食い止め，沙漠を緑化するためには，日射量，気温，湿度，土壌水分，植物生長に関する時系列データを長期間にわたって定点収集する必要がある。

残念ながら，このようなデータは SmartDust 等ワンチップ型のセンサノードによって収集することができない。例えば，真夏の直射日光下にセンサノードを置くと，直達日射や散乱光による影響を大きく受け，数℃～数 10℃の誤差が出る。また，CO_2 濃度，土壌水分等のセンサや植物の生育をモニタするための CCD/CMOS カメラセンサはまだ集積できていない。これらセンサ類をセンサノードチップに外付けした際には，台風や砂塵，紫外線等に長期間耐えることができる十分な耐候性・防塵性を持たせる筐体が必要となる。フィールドサーバはこれらの問題を考慮して設計されている[3]。

環境・生物を長期間定点観測するセンサネットワークの研究には，NASA の Sensor Web がある[4]。Sensor Web は，火星表面の計測が目的であるため，打ち上げコストを節約するためにセンサ

ノードの軽量化・小型化が極めて重要なファクターとなる。フィールドサーバのように地球上に設置するセンサノードの場合，コスト（設置・運用コストも含む），計測精度，機能の豊富さ，景観・プライバシー・安全性等への配慮が重要なファクターとなる。

2　基本コンセプト

農村において，ブロードバンド・インターネットサービスがユビキタスに利用できるようになると，旧来の農村における生活上の不便さのほとんどが解消される。逆に恵まれた自然環境と新鮮で安価な食材を活かして，都市生活に比べてストレスが少なく豊かな生活を実現することも可能であり，実際，I ターンや U ターンで農業と IT 技術者の兼業を行う者が増えつつある[4]。現在では，IT を活用した新農業ビジネスや海外への農産物輸出，海外農場の経営に乗り出すほどにまで活性化している[5，6，7]。農業の IT 化やトレーサビリティシステム等の「食の安全・安心」の実現にもユビキタスなインターネット接続環境は必須である。そのため，フィールドサーバは低コストに高速のワイアレス・ブロードバンド環境を提供できる機能を持たせた。

無線は電波法の規制を受けるため，海外での展開を考慮すると現状では Wi-Fi が最適である。フィールドサーバは従来のセンサネットワークのような専用無線通信モジュールに固定するのではなく，安価で高性能な市販の無線 LAN モジュールを適宜選択して利用するようにしている[8]。

無線 LAN の伝達距離は，見通しで数 100m～1 km，ビームアンテナを対向させると数 km～10km まで届く。そのため，フィールドサーバを数 10m～10km で配置することで，どこでもインターネットが利用できる無線 LAN 環境になる（図１）。今後，WiMAX (IEEE802.16)や Adaptive Radio (IEEE802.22)によって 60km 程度まで接続できるようになると，更に広域でユビキタスな無線ネットワーク環境を生成できると予想される。

農村や山間地におけるユビキタス通信環境とセンサネットワーク環境は，環境のリアルタイムモニタリングを行うと同時に，渓流釣りをしながらインターネットを楽しんだり，快適な環境状態にあるエリアを検索してキャンピングを楽しむなど，グリーンツーリズムやエコツーリズムの魅力アップにも寄与すると考えられる。

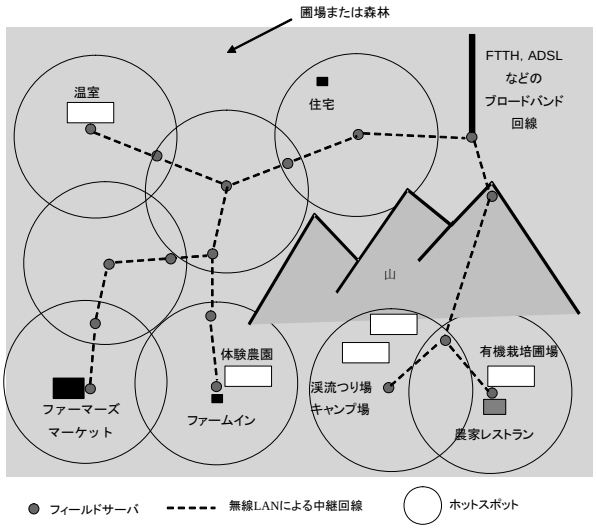


図１　フィールドサーバが生成する無線 LAN 接続サービスとセンサネットワーク

3　ハードウェア

従来，フィールドにおける長期定点観測を行うためには観測機器を風雨から守るプレハブの観測小屋を建てるのが普通であり，防暑・防寒のためのエアコン，商用電源，データ通信のための公衆電話回線が必須であった。フィールドサーバはこれと同等の機能を直径 200mm の小型アクリル筐体に詰め込んでおり，通信のための無線 LAN モジュール，計測のためのセンサ，データ表示のための Web サーバ基板（フィールドサーバ・エンジン），ネットワークカメラ，LED 照明，冷却用ファン等からなる（図２）。フィールドサーバは屋外のデジタル家電または屋外に設置する PC（Web サーバ）として，市販の安価な PC パーツや周辺機器をできるだけ利用するようにしている。また，内蔵機器間のデジタル接続は Ethernet，センサ等のアナログ接続は 3P ステレオ・ミニプラグに統一している。そのため，PC のように使用目的に合わせたカスタマイズが容易である。

フィールドサーバのためにオリジナルで設計・製作したパーツは，筐体，フィールドサーバ・エンジン基板，LED 照明モジュールである。その他のパーツは既製品であり，最新のものに変更可

能できる。無線 LAN 基板はとくに製品サイクルが早く，最新の製品に変更するだけで低コストに最新機能を利用することができるようにしたメリットは大きい。

センサは，気温，湿度，光合成有効光量子束密度をデフォールトで内蔵し，その他，用途に応じて土壌水分，葉の濡れ，CO_2 濃度等のセンサを追加できる。また，筐体に収まらない大型モジュールはフィールドサーバ下部に多段スタックで追加することができる。これによって，従来は研究室でしか利用できなかった高度な実験機器を屋外に設置して利用することが出来るようになった。

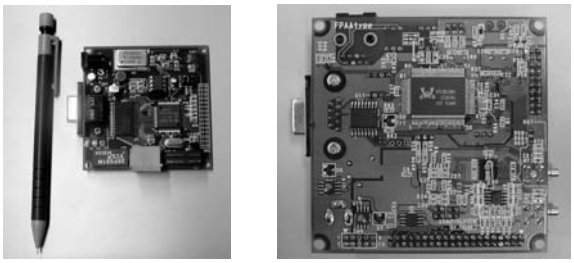
図２　フィールドサーバ（標準型）

大型太陽電池　　熱画像カメラ

図３　多段スタックによる各種拡張モジュールの追加

４　フィールドサーバ・エンジン

フィールドサーバ・エンジンは，フィールドサーバのセンサノードの機能を左右するコア・パーツであるため，常に改良及び機能の追加を行っている（図４）。フィールドサーバ・エンジンはＯＳなしで稼働する Web サーバ基板であり，操作及びデータの表示はブラウザのみで行うことができる（図５）。



DDS 搭載タイプ　　FPAA 搭載タイプ

図４　各種フィールドサーバ・エンジン

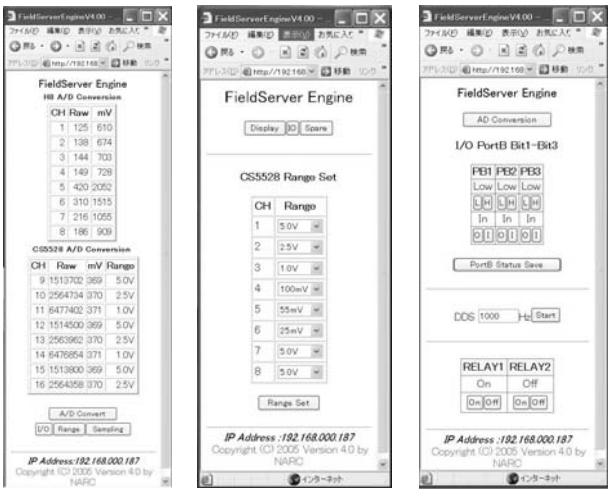


図５　フィールドサーバ・エンジンのブラウズ

一般に，センサノードに搭載するセンサの数を増やすと，センサのインターフェイス回路部分が複雑になる。しかも，アナログ回路は調整が非常に面倒であり，これを屋外で行うことは極めて困難である。そこで，フィールドサーバ・エンジンでは，DDS（Direct Digital Synthesizer）や FPAA（Field Programmable Analog Array：再定義可能な 20 個の汎用機能モジュールからなり，その間の配線を変更可能），アナログ乗算器（周波数変換や乗算演算を行う），24bit 精度 8ch のΔΣ型 AD コンバータを搭載している。フィールドサーバ・エンジンを使うと，フィルタ回路，スーパヘテロダイン受信機，送信機など種々の電子回路を

基板上にリアルタイムに生成することができる。DDS で生成された信号は，土壌や植物体などの水分計測，NMR などに利用できる。

５ データ収集・制御エージェント

フィールドサーバの遠隔操作やデータの閲覧はブラウザ操作だけでできる。しかし，各地のフィールドサーバのデータを収集し，長期間保存するのは外部のサーバで行っている。高度な制御機能をフィールドサーバ・エンジンに搭載することはコスト及び機能のアップデートの面で好ましくない。フィールドサーバが常時接続であることを利用して，高度な機能は外部の PC クラスタ上のプログラムが行う。例えば Web 巡回エージェント（フィールドサーバ・エージェント）は各地のフィールドサーバに一定周期で自動的にアクセスし，あらかじめ入力したルールベースに従って制御やデータの収集を行い[9]，Web[10]上でデータを公開している（図６）。

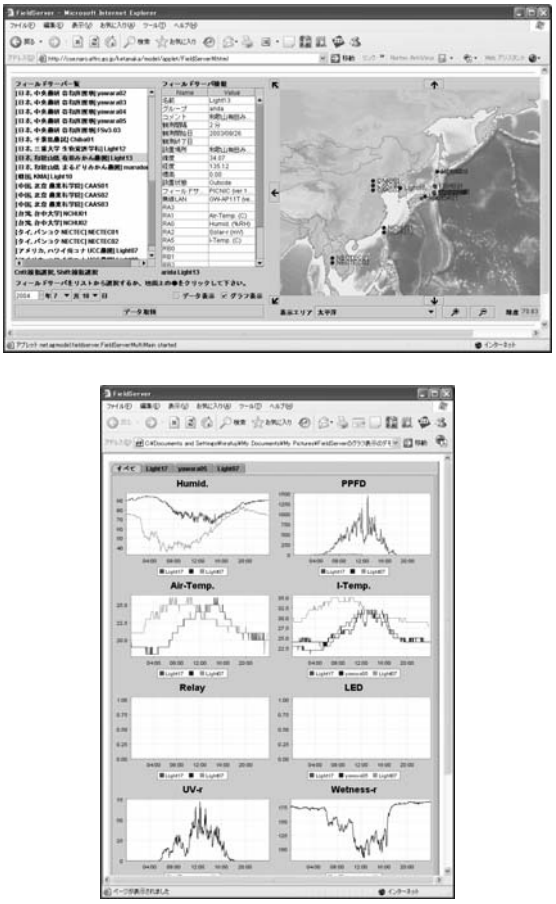


図６　各地のフィールドサーバが収集したデータの表示例

６　ネットワーク構成

基幹回線を構成するフィールドサーバは常時稼働するため，外部電源または大型太陽電池で駆動される（図７）。このフィールドサーバは WDS（Wireless Distributed System）またはメッシュネット[11]のプロトコルで相互接続され，アドホックネットワークを生成する。WDS の場合には周囲にホットスポットが生成され，その内部に内蔵の小型太陽電池のみで稼働する完全ワイアレスのフィールドサーバ(間欠動作)を設置する[12]。

フィールドサーバのネットワークはプライベートネットワークとして構成され，世界各地のフィールドサーバ・サイトとは VPN で接続されている。エージェントが一カ所だけの場合，インターネットの接続が不安定だとデータの欠則に繋がる。また，もともとインターネットに常時接続できない実験サイトもいくつか存在している。そのため，ローカルネット内で稼働するエージェント（エージェント・ボックス）を用意して補完している。多数のエージェントの協調動作によってデータ収集作業のロバスト化やストレージの分散が図られる。

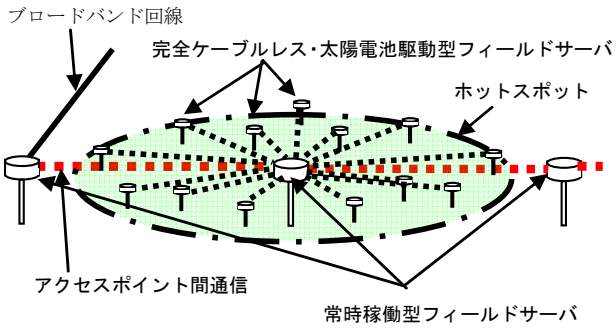


図７　ホットスポットの利用

７　データ・グリッド

フィールドサーバが収集するファクトデータは生態系・地球環境に関する一種の知的資産である。こういったファクト・データベースを仮想的な一つの巨大データベースとして利用することができるグリッド・ミドルウェア MetBroker が開発されている[13, 14]。MetBroker によってフィールドサーバや AMeDAS 等の様々な形式のデータベースの入出力が統合され，データ・グリッドとして総

合的に利用することができる（図８）。

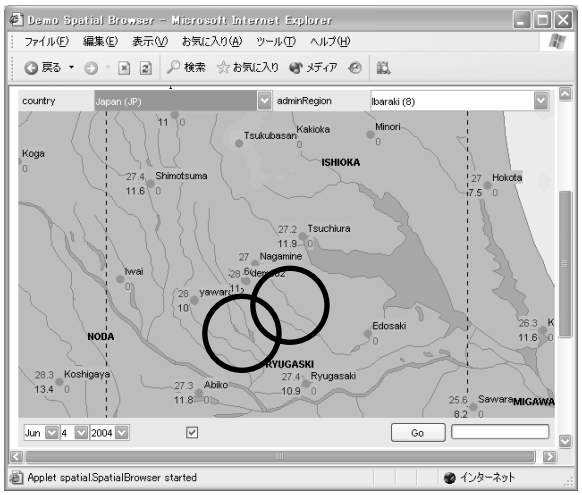


図８　データの統合利用（円内がフィールドサーバ，それ以外は AMeDAS）

８　アプリケーション

フィールドサーバが収集した環境データは MetBroker 経由で病害虫や霜害等気象災害の発生予測，生育管理等の様々なアプリケーション（Java Applet）で利用されている[15]。また，画像データは作物の生長モニタリング，防犯，農作業事故の早期発見，台風や地震等災害時の現況モニタリングに利用できる。

RFID 及び画像を組み合わせると詳細な生産履歴の開示ができる。消費者や監視機関が頻繁に訪問することが難しい遠隔地の農場や海外で生産される農産物に対して，トレーサビリティシステムの運用コストを大幅に引き下げることが出来る（図９）。例えば，消費者は生産現場の履歴画像を見て農薬散布の頻度等を直接確認できる。購入した農産物が食卓に届くまでの履歴（収穫，調整，ポストハーベスト処理，梱包等の作業の様子）も画像で見たり，クローズアップ画像によって手元にある農産物の形状等の生体情報から，手にしている農産物と同じものかどうかを目視で確認できる（農産物の生体認証）。

手元の農産物と画像の農産物が一致すれば，消費者は安心して食べることが出来るだろう。もし画像と実物が一致しない場合には，どこでその農産物がすり替えられたのかを RFID の情報と画像データを使って探索することができる。

a．海外の農場（ハワイ島ＵＣＣコーヒー農園）

b．水田（茨城県中央農研谷和原圃場）

c.みかん農園（静岡県）

d．野菜集荷場の無農薬野菜（埼玉県）

図９　リアルタイムに収集・蓄積されている各地の画像の例

９　おわりに

現在，フィールドサーバは国内外の各地において長期稼働実験が行われている（表１）。タイではタイ版フィールドサーバが 400 台製造され，タイ各地で稼働している。また，民間企業（elab-experience，松下電工）が市販または市販を計画しており，今後，設置サイト数は急速に増えると予想される。

2001 年，ハワイ・サイトの３基のフィールドサーバのうち１台が，突如，沈黙した（海外サイトの場合，現地に行くことが困難であり，これは火星を対象とした NASA の状況とほとんど同じである)。他のフィールドサーバのデータから，停止原因は野ブタが地面に埋設したケーブルをほじくり返したためであることが分かった。

2004 年，気温が 40℃近い真夏に内蔵カメラが突如停止した。環境データの解析から初期ロット品は高温時にハングすることが分かった。フィールドサーバ内部は Ethernet で接続されており，一部が停止しても他の情報は取得出来る。エージェントの遠隔操作によって，カメラの電源を撮影時のみ ON にするだけこの問題は回避できた。

各地の実験サイトではこのように，事前に想像できなかった様々な気象災害やトラブルに遭遇しているが，センサネットワークのロバスト性の有用性をその都度実感している。

表１　フィールドサーバの実験サイト（稼働中または稼働予定）

- 北海道，北海道農業研究センター，未来農業集団（芽室）
- 福島県，佐野農園
- 山形県，山形県農業試験場
- 新潟県，新潟大学
- 茨城県（石岡），松下電工茨城工場
- 茨城県（つくば市），中央農業総合研究センター（観音台）
- 茨城県（つくば市），中央農業総合研究センター（谷和原水田圃場）
- 茨城県（つくば市），住宅
- 茨城県（阿見町），茨城大学
- 茨城県（下館市），SANクラブ
- 栃木県，宇都宮大学
- 千葉県，千葉県農業総合研究センター
- 埼玉県，沃土会農場
- 東京都，武蔵工大
- 静岡県（三ヶ日），みかん農園
- 石川県，石川県立短期大学
- 京都府，京都大学
- 大阪府，大阪府大
- 兵庫県（西宮），北山緑化植物園
- 三重県，三重大学上浜キャンパス
- 三重県，三重大学紀伊・黒潮生命地域フィールドサイエンスセンター附帯施設農場
- 和歌山県有田市，早和果樹園
- 和歌山県有田市，野田農園
- 米国（ハワイ州），UCCコーヒー農園
- 米国（オハイオ州），オハイオ大学
- 米国（フロリダ州），フロリダ大学
- 中国（北京），農業科学院
- 台湾（台中），台中大学
- 韓国（水原），韓国気象庁
- タイ（バンコク），NECTEC
- タイ（チェンマイ），チェンマイ大学農学部露場
- タイ（チェンマイ），チェンマイTangerine農園
- フィリピン，ASTI
- シリア，ICARDA（国際乾燥地域農業研究センター）

参考文献

[1] Kahn, J. M., R. H. Katz and K. S. J. Pister, “Mobile Networking for Smart Dust”, ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99), Seattle, WA, Aug., 1999

[2] 平藤雅之，窪田哲夫，変動環境下における植物生長のカオス性，生物環境調節，32，1，pp.31-39，1994.

[3]深津時広，平藤雅之：圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発，農業情報研究 12(1), pp.1-12，2003

[4] Delin, K. A. and S.P. Jackson , Sensor Web for In Situ Exploration of Gaseous Biosignatures, the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2000 (http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/resources/Delin-Jackson2000.pdf)

[5]http://www.dgc.co.jp/ffg/

[6]http://www.anshin-shoku.jp/about/

[7]http://trace-sys.jp

[8] Hirafuji, M. and T. Fukatsu, Architecture of Field Monitoring Servers, Proc. of the Third Asian Conference for Information Technology in Agriculture”, pp. 405-409, 2002

[9] Fukatsu, T. and M. Hirafuji, “The Agent System for Field Monitoring Servers to Construct Smart Sensor-Network”, Fifth International Workshop on Artificial Intelligence in Agriculture, pp. 1-5, 2004.

[10]http://model.job.affrc.go.jp/FieldServer/

[11]http://www.thinktube.com/

[12]Hirafuji, M., T. Fukatsu and Hu Haoming, Full-Wireless Field Monitoring Server for Advanced Sensor Network, Proc. of AFITA/WCCA2004, pp.686-691, Bangkok, Thailand, Aug. 2004

[13]Laurenson, M. R., T. Kiura and S. Ninomiya, “Providing agricultural models with mediated access to heterogeneous weather databases”, Applied Engineering Agric., 18, pp. 617-625, 2002.

[14]http://www.agmodel.org/

[15]http://cse.naro.affrc.go.jp/ketanaka/model/applet/