

農業におけるセンサネットワークの応用事例

平藤 雅之

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター

筑波大学大学院 生命環境科学研究科

1. はじめに

ワイヤレス・センサネットワークは、無線通信機能と計測機能を備えた複数のセンサノードをネットワーク化し、特定の空間を分散的に計測するシステムである。ワイヤレス・センサネットワークの例としては、Smart Dustプロジェクトで開発されたMote [Khan et al. 99]に代表されるように、数m～数百m程度の距離の範囲で特定の計測項目に関して低ボレートで計測するタイプが多く、最近ではZigBee (<http://www.zigbee.org>) を用いた製品が数多く市販されている。

一方、植物の栽培管理や食の安全・安心、生態系や地球環境の観測のためには、気温、湿度、日射量、CO₂濃度などの数値データの他、高精細画像や動画などのデータが必要であり、これらの巨大なデータを数100m～数10 km程度の範囲で伝送できるワイヤレス・センサネットワークが必要とされている。

たとえば、農業生産においては、環境や動植物のモニタリングと同時に灌水などの環境制御も行う必要がある。食料生産の安全性を確保するには、「気象災害や害虫の発生はないか?」、「違法な農薬を使っていないか?」、「毒物や有害微生物を混入させていないか?」、「産地偽装を行っていないか?」、「タグのすり替えや詐称はないか?」など多岐にわたって生産過程をモニタリングする必要があるが、農業生産や食品加工の現場は消費者の目の届かない遠隔地にある。農場は屋外にあるため盗難やテロ行為に対してほとんど無防備であり、最近の冷凍ギョーザ事件のようなリスクに対しては、農場及び農場から食卓までの要所要所を的確に監視する技術が求められている。このような用途には、ワイヤレス・センサ

ネットワークが適している。

フィールドサーバは、無線LANでメッシュネットワーク回線とホットスポットを構築し、センサとカメラでモニタリングし、LEDで照明し、さらにサーボや電磁弁などのアクチュエータを遠隔制御する屋外用Webサーバである(図1)。



図1 フィールドサーバの例

2. フィールドサーバ

1977年に打ち上げられた惑星探査機ボイジャー1号と2号は今でも稼働し、太陽系の外からデータを送って来ている。宇宙に比べれば地球上の観測は極めて簡単に思えるかもしれないが、地球環境は宇宙よりも多様であるため、実際にはかなり難しい。地球上では、たとえば、ハリケーンや台風、砂漠の高温、極地の低温、積雪、豪雨、紫外線、動植物や大気汚染による浸食がある。惑星探査機では原子力電池によるほとんど無尽蔵のエネルギー源が利用でき、内部の温度も一定に保つこ

とができるが、フィールドサーバは太陽電池や風力などによるわずかなエネルギーしか利用できない。惑星探査機は1基数百億円のコストでも許容されるが、フィールドサーバではパソコンや携帯端末機のみ、できればそれ以下の価格が望まれている。

2.1 無線LANによるセンサネットワーク

フィールドサーバでは、耐候性の高い筐体、環境や動植物の計測技術、長期間利用できるセンサ、外気を取り込んで計測と内部の冷却を行う吸排気システム、安価で多機能な電子回路、国内外で安価かつ簡単に利用できるネットワーク技術、自然エネルギーによる発電技術などの要素技術を統合し[深津ら 03]、さらに現場に行かずに機能を柔軟に変更できるエージェント技術を組み合わせている[Fukatsu et al. 06a]。

農場等においてもっとも欠如しているのは通信インフラである。ラスト1マイル（場合によっては数十マイル）を、自力で無線ネットワークを敷設しながら展開できる必要がある。そのため、世界各地の農場や山林、砂漠などでインターネットを誰もが簡単に使えるようにすることがフィールドサーバの目的の一つであった。海外では電波法による規制がそれぞれ国によって異なるが、ユーザにとっては世界各地で同じデバイスを利用できる方が好ましい。フィールドサーバのアーキテクチャを検討していた2000年当時の選択肢としては、このような条件を満たすものは無線LAN (IEEE802.11b) しかなかった[Hirafuji 00]。その後、IEEE802.11gの登場でスループットが向上し、今後もIEEE802.11n等による高速化が期待される。また、PSPやニンテンドーDS Lite、Wii等のゲーム機に採用され、コストパフォーマンスも大幅に向上した。

このような経緯から、フィールドサーバ間の通信には無線LANを用いたメッシュネットワークまたはWDS (Wireless Distribution System)を使用している。フィールドサーバ間の通信だけでなく、周囲に無線LANホットスポットを提供してインターネットの通信インフラを提供する。フィールドサーバを多数設置することによって、屋外にユビキタス環境を構築することができる。無線LANは、ZigBee等に比べて消費電力は大きいですが、消費電力当たりに送信できる通信量で比較すると数倍～数十倍のデータを送信することができる

(表1)。

表1 主な無線通信における性能の比較

	Telemeter ARIB STD-T67	ZigBee IEEE802.15.4	Bluetooth IEEE802.15.1	Wireless LAN IEEE802.11b/g
周波数	429MHz	2.4G/915MHz	2.4GHz	2.4GHz
通信速度	4.8kbps	250kbps	768kbps	11/54Mbps
消費電力	130mW	60mW	110mW	1200mW
通信距離	~2km	~75m	~100m	~300m
通信効率	0.04kbps/mW	4.2kbps/mW	7.0kbps/mW	45kbps/mW

フィールドサーバはWebサーバとして機能するが、それには以下のような理由がある、

■ スケーラビリティ

フィールドサーバは自らデータを送信することではなく、外部からのアクセスを待つPull型デバイスである。エージェントによってWebクローラのようにフィールドサーバにアクセスしてデータを収集すれば、通信回線とエージェントの能力に応じたスケーラビリティが得られる。計測データを特定の時刻に送信するPush型デバイスでは、センサノードの数が増えてくると、特定のセンサノードやデータストレージサーバにトラフィックが集中し、そこでの処理がボトルネックになる。

■ プログラミング

Windows等のOS上で走るプログラムからUSB等を経由してハードウェアを直接制御するのはきわめて面倒である。ハードウェアがWebサーバであればHTTPで制御でき、Javaやスクリプト言語で簡単にアプリケーションを開発できる。

■ 無線LANとの親和性

フィールドサーバがWebサーバであるため、TCP/IPによる通信及び無線LANとの親和性が高い。

■ ユーザへの親和性

ブラウザでメニューを見ながらインタラクティブに操作でき、機能に関する説明も必要に応じてWeb画面上で詳しく表示できる。

■ レガシー化対策

電子デバイスや通信インターフェイスはレガシー化が速い。RS-232Cは既にレガシーデバイスとされ、計測器の標準的インターフェイスであったGPIBもレガシー化しつつある。一方、Ethernet, TCP/IP, HTTPは、今後、10～20年は利用できる可能性が高い。

2.2 ハードウェア

フィールドサーバ内では、PCのマザーボードに相当するField Sever Engine（以下FSEと呼ぶ）、ネットワークカメラなどのIP機器がEthernetで接続されている(図2)。Webラジオ基板や画像認識基板など、Ethernetインターフェイスを有するデバイスであれば簡単に増設できる。

FSE（図3）は計測制御機能を備えたWebサーバ基板であり、A/Dコンバータ、信号発生用LSI（Direct Digital Synthesizer）、半導体リレー、リアルタイムクロック等を搭載している。また、FPAA（Field Programmable Analog Array）を搭載して、回路構成を動的に変更できるタイプもある[Hirafuji et al. 06]。

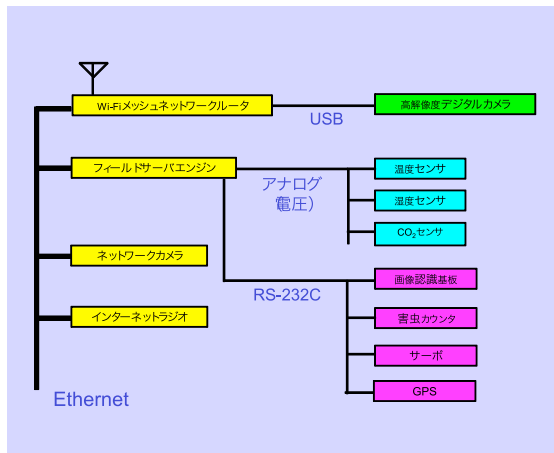


図2 フィールドサーバ内の構成例

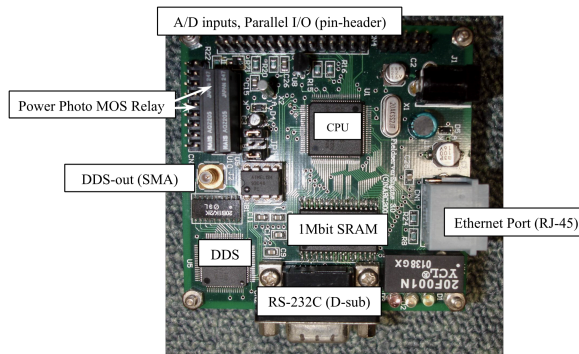


図3 フィールドサーバ・エンジン

気温、相対湿度、CO₂濃度、土壌水分、日射量（光合成有効光量子束密度）などのセンサは電圧でアナログ信号を出力するため、FSEのA/Dコンバータでデジタル値に変換して取り込む。A/Dコンバータは全部で24chあり、最大24個のセンサを接続できる。

各センサの出力はフィールドサーバ・エンジン

のA/Dコンバータによってデジタル値に変換されて、Web画面上にそのまま表示される。フィールドサーバは強制通風によって内部の電子機器の冷却を行うとともに、アスマン式温湿度計測によって計測精度の高い測定を実現している。

転倒ます式雨量計、粉塵・花粉カウンタ、害虫カウンタ（フェロモンで特定の害虫を誘引し電撃殺虫機で殺虫した個体数を計数する）など計数型センサやGPSはFSEのRS-232Cインターフェイスを経由してデータを取り込む。FSEのRS-232Cインターフェイスを使ってサーボの制御も可能であり、一眼レフデジタルカメラの撮影方向の制御やデジタルカメラ等のスイッチを機械的に押すために利用している。

USBデバイスはデバイスドライバを必要とするため、Linux基板（Wi-Fiメッシュネットワーク基板と兼用）を利用して遠隔操作している。

CPUを搭載したデバイスは長期間稼働させるとメモリリークや高温等でハングすることが意外と多い。そのため、FSEに搭載した半導体リレーでこれらのデバイスの電源をON/OFFできるようにしている。

FSEのファームウェアはCで書かれた組み込みプログラムであり、OSを使用していない。そのため、OSに起因するバグで停止することがない。また、OSによるオーバーヘッドがないので電源ONで直ちに起動する。万一、FSEが停止すると他のデバイスを制御できなくなるため、CPU内蔵のウォッチドッグタイマで動作を監視するだけでなく、外部のタイマ（リアルタイムクロックまたはアナログICタイマ）で一定時間ごとに再起動させて万全を期している。これは、信頼性の高い単純なデバイスが上位の複雑なデバイスの電源を制御するという階層構造になっている[Hirafuji et al. 05]。

商用電源が使えない場所では、フィールドサーバへの電源供給は太陽電池によって行われる。太陽電池パネルは強風を受け流すために水平に固定され、限られた設置面積で大きな電力を得られるよう、垂直方向に多層化している（図4）。太陽電池駆動の場合、使用するデバイスの電源をこまめに制御して消費電力を削減している。バッテリーの残存電力量に応じてデータ収集の頻度やカメラの稼働時間などを変更する必要があるが、ファンの電源をONにしたとき、外気温が内部の部品よりも低温だと結露する可能性がある。結露を防ぐためには、「LED等発熱の大きいデバイスを先にONにして内部を暖める」といったアドホックな方策が

いくつかあり、最適な方策を環境条件に応じて決定する必要がある。こういった高度な知的制御は、遠隔地にあるエージェントシステムによって行われる。

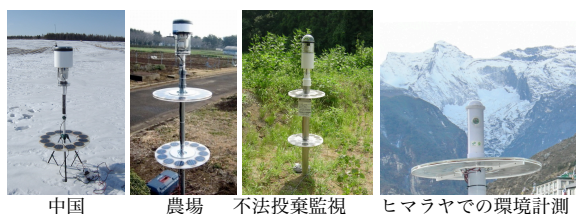


図4 太陽電池駆動のフィールドサーバの例

3. エージェントシステム

3.1 基本構成

エージェントシステムは、フィールドサーバを始めとするWebサーバにアクセスして、データの収集や機器の操作などを自律的に行う。エージェントシステムは、エージェントプログラム本体、エージェントの動作を定義する設定ファイル、エージェントを操作するためのWebインターフェイスから構成されている。エージェントは設定ファイルの内容に基づいてフィールドサーバやインターネット上のデータベース、Webアプリケーションなどにアクセスし、複雑な操作をユーザの代わりに自動的に行う。

エージェントシステムはWebクローラとしてデータ収集を行うと同時に、ユーザのリクエストや状況変化に柔軟に対応しながらインテリジェントに動作する[Fukatsu et al. 06b]。人間がWebブラウザを使ってフィールドサーバを操作する作業をコマンド列として記述し、さらにその組み合わせによって複雑な動作を行う。その際に、複数のIF-THENルールから成るプロダクションルールを組み合わせることで状況に応じた動作を行わせる。これによって、フィールドサーバに様々な機能を付与することができる。

フィールドサーバ内のCPUでは必要最小限の処理だけを行い、大きな演算能力を要する処理はエージェントシステムがリモートで処理することで、フィールドサーバ側の消費電力とコストを削減している。

3.2 アプリケーションの例

エージェントはフィールドサーバのセンサの生データ (A/D変換値) をメタ情報 (設定ファイル中に記述されたセンサに関するプロパティ情報)

に基づいて物理量に変換し、それをXML形式でストレージサーバに保存する。この機能によって定期的なキャリブレーションやセンサの交換・追加に対応できる。エージェントは、画像データも同様にストレージサーバに保存する。そのとき、エージェントは、画像データリスト (XMLファイル) の生成と簡易表示用Webページ (HTMLファイル) の生成も行い、ストレージサーバに書き込む (<http://model.job.affrc.go.jp/FieldServer/Data-Storage.htm>)。このようにして保存されたストレージサーバ上のデータは、アプレットまたはWebサービスによって、グラフやタイムラプス・ムービーとして閲覧できる[Tanaka et al. 06] (図5)。このデータは、世界各国の気象データベースを統合するMetBroker [Laurenson et al. 02]からもアクセスできるようになっており、MetBrokerに対応した多数のアプリケーションから利用できる。

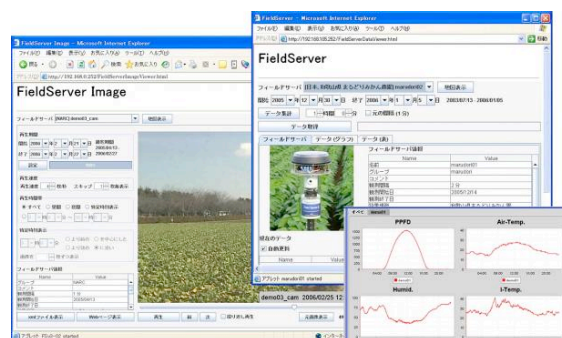


図5 計測データ表示用アプリケーション
<http://model.job.affrc.go.jp/FieldServer/Data-Viewer.html>

メタルールでエージェントのルールを動的に切り替えるとフィールドサーバに複数の機能を持たせることができる。図6は、メタルールを用いて環境モニタリングと監視システムを同時に実行させた例である。通常は環境計測を定期的に行いながら、夜間に人感センサの反応があった場合のみ動作内容を監視モードに切り替える。監視モードは階層化され、エージェントがより詳細な計測を行う必要があると判断した場合には、ユーザにメールを送信し、最終判断を入力させる [Fukatsu et al. 05]。

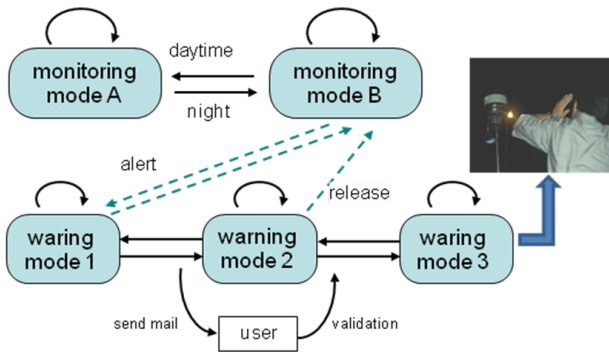


図6 エージェントによる監視システム

3.3 マルチエージェント

エージェントシステムでは、各エージェントプログラムにWebインターフェイスを持たせることで、エージェント自身もフィールドサーバと同じように扱うことができる。この仕組みを使うと複数のエージェントが協調動作するマルチエージェントシステムを構築でき、スケーラビリティとロバスト性を大幅に向上させることができる[Fukatsu et al. 06c]。

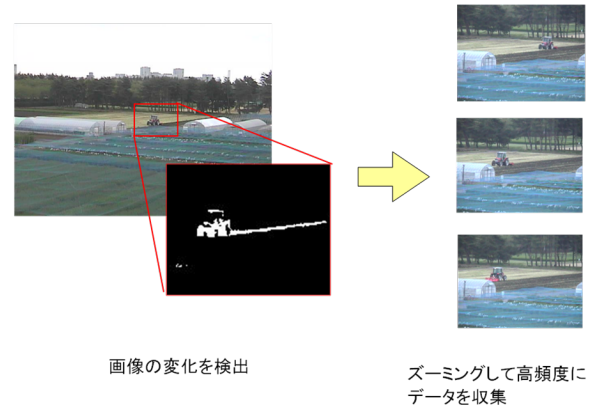
複数のエージェントを並列動作させると、一部のエージェントに障害があっても安定的にデータ収集を行うことができるが、フィールドサーバへのアクセスが増え、輻輳やフィールドサーバ側の消費電力の増大を招くという問題がある。そこでエージェント間に優先順位を設定し、「上位のエージェントが停止した場合のみ下位のエージェントが管理を引き継ぐ」というメタルールを用いて協調動作させることで、この問題を解決している。

多数のフィールドサーバを管理するために複数のエージェントを用いる場合、各エージェントの負荷が均一になるようエージェント間で互いの負荷をモニタリングしながらフィールドサーバの管理を配分する。この調整によって、より多くのフィールドサーバを効率的に管理することができる。

3.4 分散データ処理

エージェントシステムは任意のWebサーバをパーツとして利用できるため、たとえば、画像処理などは他のWebアプリケーションに任せている。Webアプリケーションは人間のユーザもブラウザで利用できるため、計算リソースの共有化に寄与する。また、複数のWebアプリケーションを呼び出して分散的に実行することで大規模な処理を行うことができる[Fukatsu et al. 08]。

フィールドサーバで取得した画像データを解析する場合、エージェントは画像解析Webアプリケーションに画像データを送信し、解析結果を取得する。画像解析には様々な手法が存在するが、Webアプリケーションを換えるだけで、様々な手法を試すことができる。また、プロダクションルールと組み合わせることで、画像の変化によるイベント検出、異常事態の通報、高頻度な画像の取得、ズーム操作による拡大撮影などの処理を状況に応じて自動的に実行できる(図7)。



画像の変化を検出

ズームして高頻度にデータを収集

図7 画像処理Webアプリと連動したエージェントの動作事例

3.5 エージェントボックス

フィールドサーバはエージェントシステムの支援がないと、その機能を十分に発揮できないため、海外や僻地において安定的なインターネット接続が維持できない場合にはエージェントボックスを現地に設置する[Fukatsu et al. 07]。

エージェントボックスは、エージェント、データストレージ、Webサーバ、VPN、ネットワーク管理機能などを組み込んだ安価な小型PCである。多様な環境下で長期間安定稼働できるよう、スピンドルレス化を徹底している。また、フラッシュメモリの書き換え限界を超えないようにするため、RAMディスクを組み合わせている。インターネットが切断されている場合には、現地のエージェントボックスがフィールドサーバのデータ収集や管理を自動的に実行する。

4. 実証実験

フィールドサーバは、これまでに日本国内の農場や公園等の他、アメリカ、タイ、中国、台湾、デンマーク、韓国、フィリピン、シリア、ネパールなどに設置して改良及び機能向上を図ってきた[Hirafuji et al. 07]。データはインターネットを通じて、中央農研のPCクラスタ上で稼働するエー

ジェントシステム及び現地に設置したエージェントボックスで収集している。

都市エリアに向けたフィールドサーバの開発の一環として、不法投棄の監視など地域の安全・安心のための実験をつくば市と共同で実施している。農研機構は、産総研が開発した画像変化検出アルゴリズム[Kita 06]を組み込んだWebアプリケーションを開発し、異常行動・不法投棄・路上犯罪などの監視を行うテストを行っている。

2007年11月、地球環境研究の一環として、慶応大学等と共同でヒマラヤにフィールドサーバを設置した。これは、厳しい環境で長期間安定稼働できる極限環境フィールドサーバの開発を兼ねている。同時に、地球温暖化の実態解明と氷河湖決壊早期警戒システムの開発なども行っている。フィールドサーバは、エベレストの近くにあるナムチェ及びそこから30数km離れたイムジャ氷河湖に設置され、標高3550~5000mの高地にWi-Fiホットスポットを構築しながら、データを収集している(図8)。

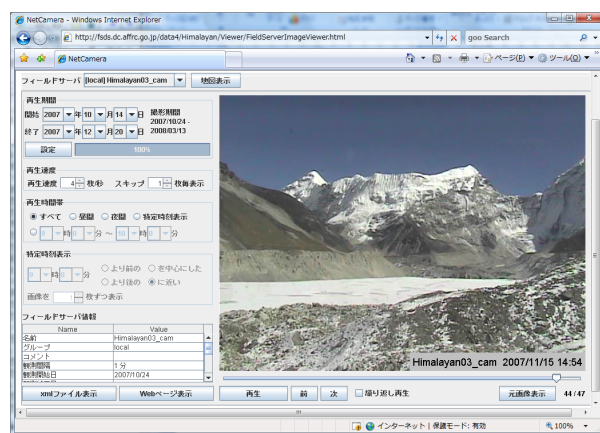


図8 ヒマラヤでの観測例(上がナムチェ, 下がImja氷河湖)

5. おわりに

環境に関わる要素は多様であり、その詳細を把握するには多数のセンサを搭載する必要がある。一方、生物の生理的メカニズムや生態には未知の要素が多く、どのように計測すれば良いかを試行錯誤的に試みながらセンサ開発に取り組む必要がある。そのためのツールとして、フィールドサーバ・エンジンには、多チャンネルのA/Dコンバータ、周波数を任意に変更できるDDS、リコンフィギュラブル・アナログデバイスのFPAAなどを搭載した。画像データに関しては、画像処理チップ(東芝, VISCONTI)を搭載した基板を内蔵して画像の特徴を符号化し、それを伝送して遠隔地の画像認識サーバで処理する実験を筑波大と共同で実施中である。こういった複雑な機能を現地に行かずに遠隔操作で安定的かつ柔軟に利用するため、フィールドサーバでは、操作対象となるすべてのデバイスをWebサーバ化し、個々の機能をWebインターフェイスによってインタラクティブに操作できるようにした。また、エージェントシステムもWebサーバの集合体とした。

TVドラマ「Star Trek Next Generation」では、敵の攻撃でみるみる被害を受ける宇宙艦「エンタープライズ号」のブリッジで、技術士官のラフォージがエンタープライズ号を構成する機器の組み合わせをディスプレイ上で素早く変更し、戦闘中に新しい武器を開発しながら反撃するというエピソードがある。世界各地に分散するフィールドサーバとエージェントシステムはこれと似ている。フィールドサーバ及びそれを構成する部品はそれぞれが独立して稼働するWebサーバであり、事前に考慮しきれない多様な環境やトラブルに対しては日本国内にあるエージェントのルールベースを書き換えて迅速に対処するというアプローチをとっている。

参考文献 ◇

- [深津ら03] 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, Vol.12, No.1, pp. 1-12 (2003) .
- [Fukatsu *et al.* 05] Fukatsu, T. and M.Hirafuji: Field monitoring using sensor-nodes with a Web server, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.17, No.2, pp. 164-172 (2005) .
- [Fukatsu *et al.* 06a] Fukatsu, T., M.Hirafuji and T.Kiura: An agent system for operating Web-based sensor nodes via the Internet, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.2, pp. 186-194 (2006) .

- [Fukatsu *et al.* 06b] Fukatsu, T., M.Hirafuji and T.Kiura : Agent program for providing seamless management to Web-based monitoring system, Proc. of AFITA2006, pp. 581-589 (2006) .
- [Fukatsu *et al.* 06c] Fukatsu, T., M.Hirafuji and T.Kiura : A distributed agent system for managing a Web-based sensor network with field servers, Proc. of 4th World Congress on Computers in Agriculture, pp. 223-228 (2006) .
- [Fukatsu *et al.* 07] Fukatsu, T., T.Kiura, K.Tanaka and M.Hirafuji : Hierarchical Agent System for Web-based Sensor Network, Proc. of Practical Application of Sensor Networking, SAINT2007, ISBN 0-7695-2757-4 (2007) .
- [Fukatsu *et al.* 08] Fukatsu, T., Y.Saito, T.Suzuki, K.Kobayashi, and M.Hirafuji : A Long-Term Field Monitoring System with Field Servers at a Grape Farm, Proc. of Application of Precision Agriculture for Fruits and Vegetables (2008) .
- [Hirafuji 00] Hirafuji, M. : Creating Comfortable, Amazing, Exciting and Diverse Lives with CYFARS (CYber FARmerS) and Agricultural Virtual Corporation, Proc. of the Second Asian Conference for Information Technology in Agriculture, 424-431 (2000).
- [Hirafuji *et al.* 05] Hirafuji, M., T. Fukatsu, H. Hu, H. Yoichi, T. Kiura, S. Ninomiya, M. Wada, H. Shimamura : Field Server: Multi-functional Wireless Sensor Network Node for Earth Observation, Proceedings of SenSys'05 : the Third International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 304 (2005).
- [Hirafuji *et al.* 06] Hirafuji, M., H.Hu, T.Fukatsu, H.Yoich, S.Ninomiya, J.Itoh and H.Shimamura : Field server engine as hardware core of field servers, Proc. of 4th World Congress on Computers in Agriculture, pp. 240-245 (2006).
- [Hirafuji *et al.* 05] Hirafuji, M., S. Ninomiya, T. Kiura, T. Fukatsu, H. Hu, H. Yoichi, K. Tanaka, K. Sugahara, T. Watanabe, T. Kameoka, A. Hashimoto, R. Ito, R. Ehsani, H. Shimamura : Field Server Projects, Proc. of Practical Applications of Sensor Networking, SAINT2007 (2007).
- [Kahn *et al.* 99] Kahn, J.M., R.H.Katz and K.S.J.Pister : Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust", ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking, pp. 271-278 (1999) .
- [Kita 06] Kita, Y. : Change detection using joint intensity histogram, Proc. Int. Conf. of Pattern Recognition 2006, pp.351-356 (2006).
- [Laurenson *et al.* 02] Laurenson, M.R., T.Kiura and S.Ninomiya : Providing agricultural models with mediated access to heterogeneous weather databases, Applied Engineering in Agriculture, Vol.18, No.5, pp. 617-625 (2002) .
- [Tanaka *et al.* 06] Tanaka, K., M.Hirafuji and T.Fukatsu : Data and Image Viewer Application for Field Server, Proc. of SICE-ICCAS International Joint Conference, pp. 4852-4855 (2006) .