

インドの農村部での土壌センシングシステムの実証：期待と現実

林 直人¹ 繁田 亮¹ 高木 雅¹ 川原 圭博^{1,2} 浅見 徹¹

概要：農作物を育て収穫するというのは、単に種を蒔き、育つのを待つだけでない。自然環境を考慮した上で、環境をできる範囲で制御し、農作物の収量と品質の向上を目指す取り組みである。近年こうした取り組みが精密農業として世界中で注目を集めており、インドにおいてもこのような取り組みの1つとして、土壌水分モニタリングが行われている。土壌水分量に基づいて散水量を適切に制御することで、水資源の浪費を防ぎ、単位水量あたりの収量が向上する。また、水を媒介とする感染症の蔓延を防止する効果もあるため、収量のみならず品質の向上にも役立つ。しかしながら、こうした途上国の問題を解決するためには、単に先進国の既存システムを輸入すれば良いというわけではなく、途上国ならではの要因を考慮した上で、システムを設計する必要がある。本稿では、インドの柑橘類の圃場において、適切な灌水を農業従事者ができるようにするための要件を定義し、その一部に実際に取り組み、現地にて実証実験を行った内容を紹介する。

Deployment of a soil monitoring system in Indian farming villages: expectation and reality

Naoto Hayashi¹ Ryo Shigeta¹ Masaru Takagi¹ Yoshihiro Kawahara^{1,2} Tohru Asami¹

1. はじめに

農地や農作物の状態をよく観察し、きめ細かく制御してその結果に基づき次年度の計画を立てる一連の農業管理手法は精密農業と呼ばれている [1], [2]. 精密農業では、Field Server や衛星リモートセンシングなどを用いて農作物の生育状況を把握する観察ツール、肥料の投入量を自動調整するような制御ツール、収穫物の収量や状態を自動測定できるコンバインのような収穫ツール、収量などを視覚化して営農計画に活用する解析ツールなどを組み合わせて、農作物の収量と品質の向上を目指す [8]. こうした精密農業は大規模農業が営まれているアメリカにおいては既に導入している農家が多く、徹底した効率の追求が行われている [3].

このような精密農業の技術は、先進国のみならずインドのような途上国においても有用である。特にインドでは、

近年爆発的に増加している人口を支えるだけの食糧生産が求められる一方で、雨季と乾季が明瞭な気候ゆえに河川から1年を通して安定的に農業用水を確保することが難しい。それゆえ、従来は地下水に頼って営農活動を行ってきたが、近年その枯渇が問題となっている [4]. そこで、灌水における散水量を制御し、単位水量あたりの収量向上を目指すことが重要である。

そこで我々は、水の影響を大きく受ける柑橘類に着目して、精密農業の実現に向けて実証実験を含めた取り組みを行っている。インドの柑橘類の栽培においては、Gummosis という疫病による問題があり、一度感染すると、Fig.1 のように樹皮に裂け目ができ樹液が滲み出て、最後には木が朽ちてしまう。この Gummosis の原因となる病原菌 *Phytophthora* は土壌中に存在し、低音多湿を好み、水とともに移動する。そのため、過度に灌水すると、*Phytophthora* が木から木へ移動し、圃場全体の木々に蔓延してしまう [5]. この病害の規模は土壌水分量に密接な関係性があるため、病気発生と水分量の変化のモデル開発が早急に求められている。

¹ 東京大学大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo

² 国立研究開発法人科学技術振興機構さきがけ
JST, PRESTO



図 1 Gummosis caused by Phytophthora

しかし、こうした途上国の問題を解決するためには、単に先進国の既存システムを輸入すれば良いというわけではない。日本ではたとえ農村においても、安定的な電力や通信のインフラが整備されている。一例として、圃場をモニタリングをする Field Server というシステムは日本の農村に設置され、正常に機能している [6]。一方で、電力や通信のインフラが整備されてない途上国では、このようなインフラを前提として設計されているシステムは、機能しない恐れがある [7]。したがって、途上国の問題解決を図るためには、途上国ならではの要因を考慮した上で、システムを設計する必要がある。

本稿では、2 章で関連研究として途上国におけるセンシングに触れ、途上国固有の問題点を述べる。また、土壌センシングの手法についての関連研究についても触れる。その後、3 章でインドの農業従事者が低コストで圃場の土壌水分を適切に管理できるようにするシステムの要求仕様を述べる。4 章では今回取り組んだ要件に対する設計と実装について記す。そして、5 章で実証実験と今後の課題点について述べ、6 章で締めるくくる。

2. 関連研究

2.1 途上国におけるセンシング事例

2.1.1 タイにおける圃場モニタリング

Field Server とは、圃場の環境や対象となる動植物のモニタリングを行うセンシング機能と通信機能を一体化したデバイスである [8]。本デバイスは日本では当たり前な安定した商用電源やモバイル通信環境を前提としており、クラウドサーバ上にデータを集約するため、ローカルにデータロガーを持たないという特徴がある。Mizokuchi らは、この Field Server を用いてタイの農村部で 3 年間の圃場モニタリング実験を行い、その運用の難しさについて述べている [7]。運用にあたっての技術的な課題は主に電力と通信であった。タイの農村部においては、インドの農村部とは異なり、多くの学校にインターネットの環境が整備され

ていたため、学校の近くの圃場において学校のネットワークを利用できた。しかし停電が頻繁に起こるため、校内のネットワーク機器への電力供給が止まり、圃場からサーバにデータをアップロードできないことが多々あり、停電期間中のデータを失ってしまった。また、熱と紫外線によりプラスチック製の外装部分が劣化してしまったという報告もある。

一方、コスト面に目を向けると、Field Server は 1 台あたり数十万円と非常に高価であり、途上国の農業従事者が手軽に導入できるものではない。また、機器にトラブルが発生した際には、日本から技術者を送り込む必要があり、メンテナンスにもコストが掛かる。このように、機能面以外にも、環境要因やコスト面の都合も考慮した上で、仕様を調整する必要がある。

2.1.2 インドにおける気象モニタリング

Yamanouchi らはインドのハイデラバードの厳しい環境下で、実際に気象モニタリングシステムを設置し運用している [9]。本システムは、高密度にセンサノードを配置しモニタリングをすることで、より局所的な自然現象を観測できる。システムはセンサノードとネットワーク、サーバから構成されており、それぞれ冗長性を持たせてある。サーバはインド国内に 2 つ設置してあり、片方に停電などの問題が起きても、他方が代替することでサービスを継続できる。また、サーバ上のデータを表やグラフで手軽に見ることができるアプリケーションも提供されている。さらに、インドでも問題となる通信と電力についてだが、ネットワークは GPRS, WiFi, Ethernet の中から、電力はソーラ発電、圃場の AC 電力、Power on Ethernet の中から、場所に合わせ適当なものを用いることで、安定した運用を可能にしている。しかしながら環境要因以外にも、現地の技術的問題や文化的な問題も存在する。例えば、インドは職による労働階級が明確なため、多分野にわたる土木工事などの交渉は非常に時間がかかることが述べられている。また、現地の技術レベルが低いため、インドで購入した無停電電源装置も日本のものに比べ性能が悪く、機能しない場合があった。さらにネットワークや電力に問題が発生した際、現場の人には専門知識が全くないため、対応できないという問題もある。

2.2 土壌センシングの手法

農業において灌水量を適切に制御することは、水資源の節約以外にも収穫物の甘味調整、水分の過多による病気の防止、灌水に必要なエネルギーの抑制など様々なメリットを持つ。しかし灌水量の最適化を実現するためには、低コストに 3 次元の土壌水分の分布情報を得ることが重要である。

2.2.1 衛星画像によるリモートセンシング

低コストで土壌水分を観測する手法として、衛星画像に

よるリモートセンシングがある。衛星画像から地形や温度の影響を考慮した上でマイクロ波の放射量を測定することにより、土壌水分をマッピングできる。Fangらは植生の分布状況や活性度と地表面温度のデータと組み合わせ、1kmまで分解能を上げることに成功した[10]。しかしながら、我々が想定する灌水量を調整する用途に対しては、分解能は十分とは言えない。また、観測できるのは土壌の表面付近の水分量であり、深さ方向の水分量の分布は観測できないため、灌水を適切に制御することは難しい。

2.2.2 土壌水分プロファイルプローブ

土壌中の水分量を測るセンサとして多深度に水分センサがついた土壌水分プロファイルプローブがある。例えばDelta-T社のPR2や、Sentek社のENVIROSCANが土壌水分プロファイルプローブとして有名である[11],[12]。しかしながら、これらはいずれも100MHz程度の高周波を使って計測するため、センサプローブが1本数十万円と高価であり、途上国の圃場に多数設置するのは難しい。この土壌水分プロファイルプローブを安価に生産できるようになれば、圃場に多数導入し、圃場全体を低コストにモニタリングできるようになる。

3. インド農村部における土壌センシングシステムの要求仕様

3.1 目的

本稿で提案するシステムの目的は、ユーザであるインドの農業従事者が低コストで圃場の土壌水分を適切に管理できるようにすることである。以下、3.2節でこれらの問題の解決に向けて必要な要件について議論する。

3.2 システムの要件

2.1節を踏まえ、インドの農村におけるシステム要件について以下に記す。

3.2.1 機能要件

機能面からは、以下の2つが考えられる。

- (1) 適切な必要十分量の灌水量が分かること
- (2) 適切な灌水のタイミングが分かること

土壌水分センシングだけに留まらず、ユーザである農業従事者が、散水量やタイミングを判断できることが重要である。その際、1章で記述したような理由により、散水量を最小限度に抑えられることが望ましい。

3.2.2 ユーザの制約による要件

ユーザであるインドの農村の農業従事者の特性から、以下の3つの要件が考えられる。

- (1) ITリテラシーが低くても簡単に利用できること
- (2) 電子回路の知識がなくても簡単に利用できること

近年、スマートフォンの価格が下がり、インドの農村部にもスマートフォンが普及し始めている。したがって、スマートフォンを操作するための最低限のITリテラシーは

あると考えられ、単純なスマートフォンの操作のみで本システムを使用できるようにすれば良い。また設置の際、電子回路の知識がなくても組み立てられるように設計する必要がある。

3.2.3 環境の制約による要件

途上国の農村部という特性から、以下の5つの要件が考えられる。

- (1) 通信環境が劣悪でも機能すること
- (2) 不安定な電源でも機能すること
- (3) 高温多湿な環境でも機能すること
- (4) 性能の低いスマートフォンでシステムが機能すること
- (5) 盗難されにくいこと

通信環境は2Gを想定しており、安定的なインターネット接続は期待できない。また、商用電源を利用できない場合があり、たとえ利用できたとしても不安定である。さらに夏季の気温は50°C近くになり、このような環境下であってもシステムが機能する必要がある[13]。また、インドの農村で普及しているスマートフォンの性能を考慮して、設計する必要がある。加えて、盗難の恐れは日本とは比べものにならず、盗難されにくい設計にしなければならない。

3.2.4 コスト削減に向けた要件

設置や運用は農業従事者ができるように、修理に関しては、低コストで現地のサービス提供者が対応できるように考えると、要件は以下の4つである。

- (1) イニシャルコストが低いこと
 - (2) 設置しやすいこと
 - (3) システム稼働率が十分に高いこと
 - (4) 万一システムが止まっても簡単に復旧可能であること
- まず低コストにシステムを導入できることが必要だと考えられる。また、農業従事者が自分たちで簡単に設置できるような設計だと、交換する場合も手間がかからない。加えて、修理等のためにサービス提供者が圃場を訪れるのは非常に手間がかかるので、システムがなるべく停止しないようにすることが望ましい。たとえば故障をしないようにすることや、SIMカードのチャージ金額の適切な管理を行うといったことが挙げられる。さらに、システムが止まっても農業従事者が修理できる、またはサービス提供者が手間をかけずに修理できる設計をする必要がある。例えば、サービス提供者が電話で対応することや、途上国の農村部でも入手可能なパーツで設計することなどが考えられる。

4. 設計と実装

今回、3.2.1節の機能的な要件を満たすため、[14]と同様の低コストな土壌水分プロファイルプローブを採用し、3.2.3節のインドの農村の環境下における要件を満たすよう設計と実装を行った。本システムはセンサプローブ搭載の子機、親機、サーバから構成される。なお、子機、ソーラ発電部を除く親機、サーバの仕様策定および実装は株式



図 2 Left: soil moisture sensing pattern, Right: profile probe[15]



図 3 A slave node

会社 SenSprout の支援を受けた。

4.1 子機

子機は、センサ部、計測モジュールから構成される。

4.1.1 センサ部

低コストで圃場全体をモニタリングをするため、センサ部は薄膜金属土壌水分プロファイルプローブを実装した [14]。本センサは、Fig.2のように低コストで大量生産が可能な薄膜金属フィルムの電極パターンを形成し、これを樹脂製のポールに巻きつけて、静電容量センサ用のプローブを安価に実装している。圃場ごとのニーズに合わせてプローブの長さ、電極パターンを変えることで、深さ 10cm から 1m 程度までの垂直水分分布を 10cm ごとの細かさで計測可能である。今回は 10cm, 20cm, 30cm の深度が測定可能なプローブを用いた。センサプローブの薄膜金属フィルムの静電容量は、計測モジュール内のマイクロコントローラによって測定される。

4.1.2 計測モジュール

計測モジュールは、Fig.3 のようにロガーボックスと無線モジュールからなり、マイクロコントローラを用いて制御される。

4.1.1 節で測定されたセンサ値は、ロガーボック

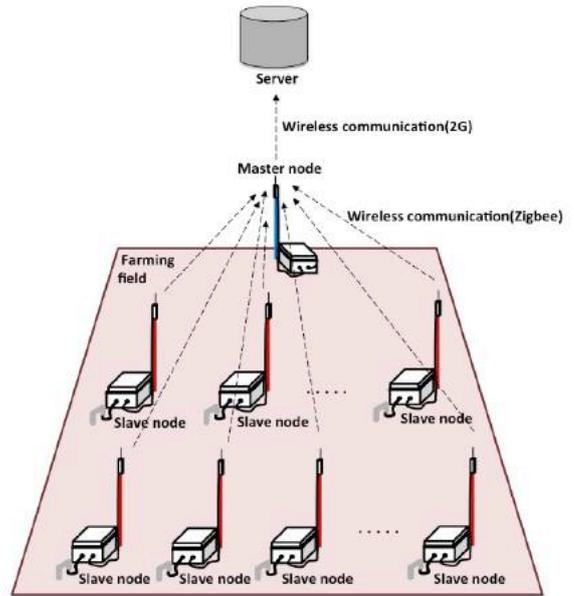


図 4 System configuration

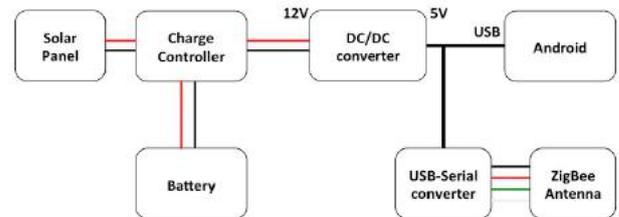


図 5 Structure of a master node with solar power

ス内の SD カードに貯められた後、Fig.4 のように IEEE802.15.4/ZigBee 通信を使って親機へ 1 時間に 1 回送信される。2.1.1 節で紹介したシステムとは異なり、本システムでは子機側にストレージと再送制御機構が実装されているため、親機との間の通信が失敗しても、センサデータが失われることはない。また、920MHz 帯の ZigBee は、見通しであると通信距離は 1km ほどであり、圃場の大きさに比べ十分であるため、マルチホップを組み入れる必要はなく、シングルホップの通信を実装してある。

4.2 親機

親機は、Fig.5 のような構造になっている。ZigBee モジュールで子機から受信したデータは USB-Serial 変換されてスマートフォンに送られ、定期的に 2G または 3G 回線でサーバへアップロードされる仕組みとなっている。このとき三又ケーブルを用いて、ZigBee モジュールとスマートフォン、DC/DC コンバータを接続した。親機にスマートフォンを採用した理由は、スマートフォンには画面がついており、農業従事者が使うにあたってシンプルな UI のアプリが作りやすいことにある。今回はスマートフォンとして Nexus5 を使用した。

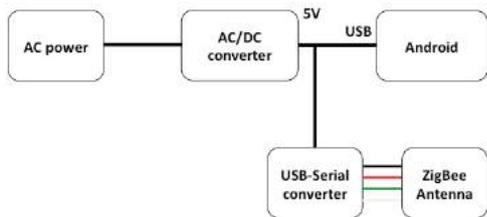


図 6 Structure of a master node with AC power



図 7 Lead storage battery

また、日本とは違い、インドの農村においては安定的な電力を得るのは難しいため、本システムでは Fig.6 の仕様を変更し、ソーラ発電システムを電源として採用した。Fig.5 のようにチャージコントローラにソーラパネル、鉛蓄電池、DC/DC コンバータを接続した。チャージコントローラはソーラパネルから得た電力の充放電を効率的かつ安全に鉛蓄電池に貯蔵する役割を持つ。インドの雨季には 1 ヶ月間で降水日数が 20 日近くある場合もあり、気候やシステムの不具合によって発電ができない恐れがある。そこでソーラ発電ができなくても、スマートフォンが鉛蓄電池により 1 週間動き続けるように設計した。スマートフォンの 1 日の放電量を電池容量である 2300mAh として、定格電圧が 3.8V であることより、1 週間で約 60Wh の電力量を消費する。それゆえ、鉛蓄電池は定格電圧 12V で蓄電容量が 60Wh のものを使用した。鉛蓄電池は、安定して使うことができる点に加え、車やバイクに使われているため、インドの農村部においても入手しやすい点が利点である。なお、ソーラパネルも定格 12V のものを使用した。また、USB ケーブルを用いてスマートフォンに電力を送るため、DC/DC コンバータは出力が 5V になるよう実装した。

4.3 サーバ

サーバは Microsoft Azure を用いて構築した。Microsoft



図 8 Left: the site satellite photograph, Right: the citrus field



図 9 Deployment. Left: a slave node, Right: a master node

Excel の外部サーバ連携機能を用いて Fig.10 のように、土壌水分量、気温、土壌中の温度、スマートフォンの電池残量などをグラフで閲覧できる。

5. インドにおける実証実験と課題

5.1 設置

今回の実証実験では、2016 年 2 月にインド国内の下記 4 か所にセンサを設置した。

- Benoda(N 21°45', E 78°16') に 2 か所
- Bapatla(N 15°90', E 80°47') に 1 か所
- Anantapur に 1 か所

Fig.8 は Benoda における圃場の写真であり、Fig.9 のように導入した。

5.2 評価実験

ソーラ電源と商用電源の比較のため、Bapatla の場合のみ Fig.6 のように AC 電源に繋いでセンシングシステムを構築した。その結果、Fig.10 に示すように、親機内のスマートフォンの電池残量が 61%から 0%に 15 時間となってしまったのが観測された。

5.3 課題点

5.3.1 電源の問題

10 のように親機内のスマートフォンの電池残量がなく

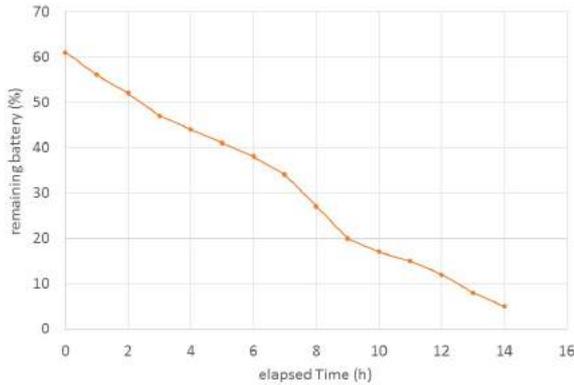


図 10 Remaining battery

なってしまった原因として、AC 電源の問題、または三又ケーブルの問題が考えられる。Fig.10 の電力の下がり方を見ると、電池残量が増えるという時間帯が観測されていない。これは、インドの農村部では頻発する停電が原因か、またはスマートフォンの正式な仕様でない三又ケーブルが原因なのか特定できていない。しかし、この2つの可能性を考え、ソーラでシステムに即したエネルギーマネジメントを行うことと、三又を含むハードウェアを改善することに取り組みたいと考えている。

5.3.2 通信の問題

インドの農村部は通信環境が悪いため、時間と場所によっては 2G のパケット通信すら難しい。そこでインドでは Hike というメッセージアプリが広く使われている [16]。このアプリはメッセージを送る際、パケット通信が難しいときは、SMS を用いるという機能を持つ。また、インドではデュアル SIM のスマートフォンが普及しており、複数のキャリアの通信を併用できる。先進国におけるデュアル SIM のスマートフォンの主な用途は、通話料金の安いキャリアとパケット通信の安いキャリアを併用することでコストの低減を図ることである。一方、インドのような発展途上国では、単独のキャリアだけでは満足に通信できないエリアや時間帯が存在するため、時事刻々と変化する通信環境の中で通信可能なキャリアを選択的に利用できるようにするため人気を博している。これらの点を踏まえ、本システムにおいてもパケット通信が難しい際、SMS に切り替えて送ることを考える。

今回、SMS とパケット通信で通信する際の電力消費を測定する実験を日本で行った。Fig.11 のように Nexus5 のバッテリー端子に定電圧源をつなぎ電力を供給する。抵抗として 0.45Ω を用いて、ワニくちクリップに加わる電圧を電圧計で測定し、SMS とパケット通信でデータを送る際の電力消費を測定した。なお、SMS のデータ長は 160Byte が上限のため、今回の実験では SMS、パケット通信ともデータ長は 160Byte とした。消費電力は Fig.12, Fig.13, Fig.14, Fig.15 のように測定された。

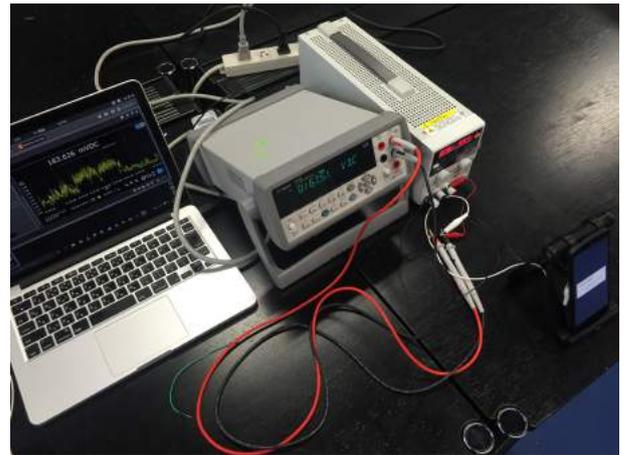


図 11 Experiment of communication power consumption

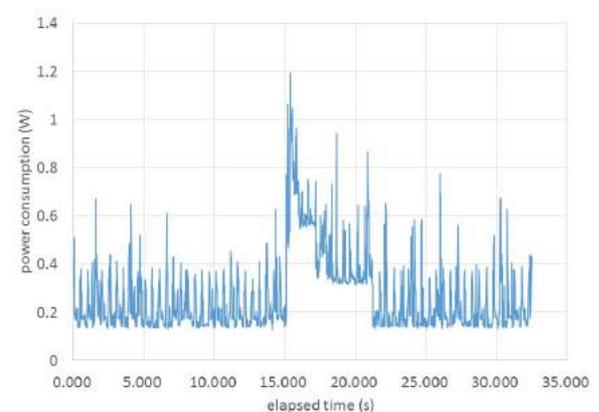


図 12 LTE SMS

LTE に接続している場合、

- SMS を送信した際の消費電力は 1.7J (Fig.12)
- パケット通信で送信した際の消費電力は 3.0J (Fig.13) と分かる。したがって、端末側から 160Byte のデータを送る際、SMS はパケット通信と比べ電力消費を 43%削減できる。

また、3G に接続している場合、

- SMS を送信した際の消費電力は 3.2J (Fig.14)
- パケット通信で送信した際の消費電力は 6.0J (Fig.15) と分かる。よって、端末側から 160Byte のデータを送る際、SMS はパケット通信と比べ電力消費を 47%削減できる。今回は日本で実験を行ったため、2G 接続時の評価をできていないが、パケット通信を利用できない場合において、または定期的に小さなデータをアップロードするような場合においても、SMS を使ってデータを送るのは電力の面でも有効な手段となり得る。

5.3.3 その他の問題

現在は親機としてスマートフォンを使用しているが、温度が高くなりすぎると動作が停止してしまうため、端末自身の発熱も考慮すると、夏季にシステムが停止する恐れがある。さらに技術的な話ではないが、日本人とインド人の時間感覚が異なるため、圃場設置の計画を組む際は非常に

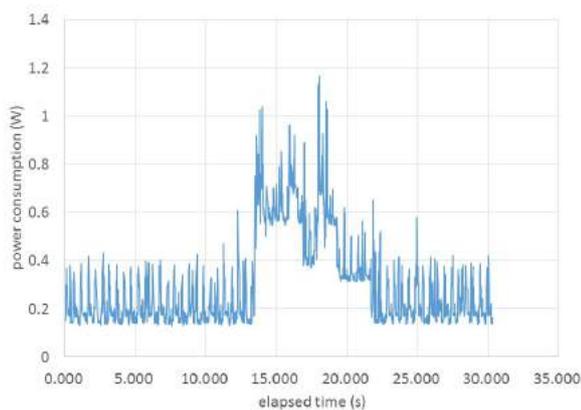


図 13 LTE packet

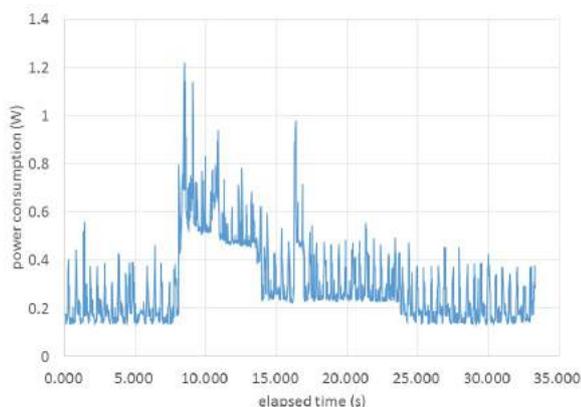


図 14 3G SMS

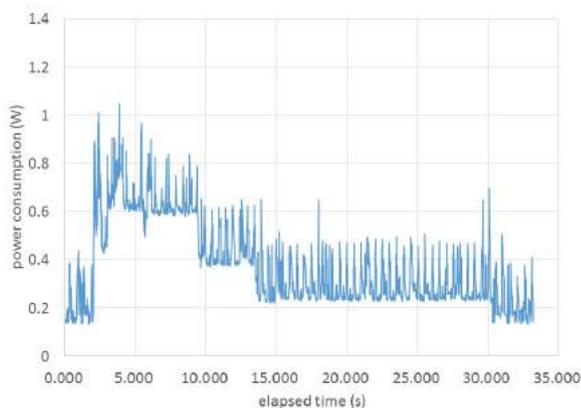


図 15 3G packet

旅程に余裕を持ち、予想外のことにも対応できるよう注意する必要がある。

6. おわりに

本稿では、システムの機能における要件、環境の制約による要件を考え、実際に現地に足を運び、現地ならではの問題に直面しながら実証に取り組んだことを報告した。その際、インドの実証実験では一筋縄ではいかず、電力や通信問題だけでなく、日本人とインド人の文化の違いといった社会的な障害も見受けられた。今後、引き続き機能に

おける要件、環境の制約による要件を満たすだけでなく、ユーザの制約による要件、低コストに向けた要件も満たせるよう取り組み、ユーザであるインドの農業従事者が低コストで圃場の土壌水分を適切に管理できるようシステムの構築を目指す。

参考文献

- [1] “日本型精密農業を目指した技術開発,” 農林水産省, 農林水産研究開発レポート No. 24, 2008.
- [2] 川原圭博, 白浜妥知, 山本啓太, 西岡一洋, 溝口勝, “低コストな圃場センシングに向けた情報学的アプローチ,” 信学技報, vol. 114, no. 290, ASN2014-103, pp. 129-132, Nov. 2014.
- [3] G. Vellidis, E. Barnes, and H. S. Brannen, “Why yield maps?,” Cotton Incorporated, 2013.
- [4] Global Water Forum, “India’s groundwater crisis,” <http://www.globalwaterforum.org/2012/07/30/indias-groundwater-crisis/>, July, 2012.
- [5] J. H. Graham, L. W. Timmer and M. M. Dewdney, “2014 Florida Citrus Pest Management Guide: Phytophthora Foot Rot and Root Rot,” University of Florida IFAS Extension, PP-156, Sep. 2013.
- [6] K. Oki, S. Mitsuishi, T. Ito and M. Mizoguchi, “An Agricultural Monitoring System Based on the Use of Remotely Sensed Imagery and Field Server Web Camera Data,” GIScience and Remote Sensing, vol. 46, no. 3, pp. 305-314, 2009.
- [7] M. Mizoguchi, T. Ito and S. Mitsuishi, “Ubiquitous Monitoring of Agricultural Fields in Asia using Sensor Network,” Proc. of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010.
- [8] eLAB experience, <http://www.elab-experience.com/fieldserver>
- [9] M. Yamanouchi, H. Ochiai, Y. K. Reddy, H. Esaki and H. Sunahara, “Case study of constructing weather monitoring system in difficult environment,” Ubiquitous Intelligence and Computing, 2014 IEEE 11th Intl. Conf. on and IEEE 11th Intl. Conf. on and Autonomic and Trusted Computing, and IEEE 14th Intl. Conf. on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops, pp. 692-696, Dec. 2014.
- [10] B. Fang, V. Lakshmi, R. Bindlish, T. J. Jackson, M. Cosh, J. Basara, “Passive Microwave Soil Moisture Downscaling Using Vegetation Index and Skin Surface Temperature,” Vadose Zone Journal, vol. 12, no. 3, 2013.
- [11] Delta-T Devices Ltd., <http://www.delta-t.co.uk/product-display.asp?id=PR2%20Product&div=Irrigation%20and%20Horticulture>
- [12] Sentek, <http://www.sentek.com.au/products/enviro-scan-probe.asp>
- [13] Time, “More Than 2,300 People Have Now Died in India’s Heat Wave,” <http://time.com/3904590/india-heatwave-monsoon-delayed-weather-climate-change/>, June 2015.
- [14] Y. Shirahama, R. Shigeta, Y. Kojima, K. Nishioka, Y. Kawahara, and T. Asami, “Implementation of Wide Range Soil Moisture Profile Probe by Coplanar Plate Capacitor on Film Substrate,” Proc. of IEEE Sensos 2015, pp. 1758-1761, Nov. 2015.
- [15] 川原圭博, “農業情報センシングの低コスト化,” 応用物理, vol. 85, no. 4, p. 296, 2016.
- [16] Hike messenger, <https://get.hike.in/>