ドローンと光カメラ通信による統合型農園デジタルツイン

代表研究者　　中　山　　悠　　東京農工大学　大学院工学府　准教授

1 はじめに

近年、農業は作物の水不足や耕作可能面積の減少といった深刻な課題に直面している［1],[2]。一方、世界人口の増加に伴い食料需要は 70%増加すると予測されており［3]、これらの問題への対処が急務である。こうした背景から､センサーデータの通信技術は飛躍的に進展している｡センサーデータのモニタリングは、人工知能や農業ロボットなど他の先進技術との連携によって農作業の自動化を促進し、収穫効率の向上に寄与する［4]。

センサーデータ通信にはさまざまな通信規格が利用されており、例えばエネルギーハーベスティングセンサーを用いた Sigfox ベースのリアルタイムデータ収集システムが提案されている［5]。また、ZigBee ノードを用いてセンサーデータを遠隔監視センターへ転送する手法も実装されている［6]。しかし、これらの技術は実装コストが高いという課題があり、広範な農業分野への適用が難しいという問題が残る。

近年、デジタルツイン技術が急速に注目されている［7]。実世界の環境を仮想空間に再現することで、シミュレーションや意思決定支援など多岐にわたる応用が期待される。農業分野におけるデジタルツインの導入は、灌漑の最適化や作物品質の向上など、数多くの利点をもたらすと考えられている［8],[9]。しかしながら、現時点ではデジタルツインの概念自体が新しいため、関連研究は限られている［8]。デジタルツインは､仮想モデルの生成､実世界データの取得､そしてそのデータをモデルに適用することで構築される［10]。写真測量は、画像から 3 次元点群を生成する手法として、既に農業分野で応用されており、例えば写真測量により生成された 3 次元モデルを用いて樹列体積（TRV）を推定する手法が提案されている［10]。また、3 次元点群マップからブドウ園を検出するアルゴリズムも報告されている［11]。しかし､現状ではモデル生成とセンサーデータの取得を統合して農地のデジタルツインを作成するシステムは存在していない。

本稿では、上記の背景を踏まえ、農地デジタルツインの統合的作成手法を提案する。提案手法は、写真測量により農地の 3 次元モデルを生成するとともに、OCC を用いてセンサーデータを取得するものである。これにより、カメラ一台で 3 次元モデル生成とセンサーデータの取得が可能となる。さらに、低価格な LED パネル等の光源を送信機として利用できるため、低コストで高密度なセンシングが実現される。以下、本稿の構成は、Section II に提案手法、Section III に実験結果、Section IV に結論を示す。

2 提案手法

2-1 コンセプト

本稿では、写真測量と OCC を用いて農地のデジタルツインを統合的に作成する手法を提案する。図 1 は、提案システムの基本概念を示す。対象領域内に多数のセンサーノードが配置され、それぞれにセンサーと光源が搭載される。各センサーノードで取得されたセンサーデータは、符号化および変調されて光信号へと変換され、光源から送信される。同時に、カメラは複数の角度から対象領域の多数の画像を撮影し、光源の映像を記録することで、光信号を受信する。撮影された画像から写真測量により対象領域の 3 次元点群モデルが生成され、受信された光信号からセンサーデータが復調される。こうして、センサーデータを 3 次元モデルに適用することにより、農地のデジタルツインが作成される。

このシステムにより､カメラ一台で 3 次元モデリングとセンサーデータ取得の両方が実現される｡さらに、OCC の特性を利用することで、低価格な LED パネルなどの光源を利用しつつ高密度なセンシングが可能となる。従来の 3 次元モデルでは得られなかった詳細な農地情報が、センサーデータレイヤーとして付加されるため、意思決定の補助に大いに寄与する。本手法は、農業分野におけるデジタルツインの導入促進とスマート農業の発展に資するものである。

図 1 コンセプト

2-2 統合アルゴリズム

（１）変数定義

ここでは、提案システムで用いる変数について説明する。グローバル座標系を（x, y, z）と定義し、仮想空間の座標系も（X, Y, Z）とする。センサーノードの集合を I とし、各ノードには i, j, k などの識別子を与える。I 内には、少なくとも 4 つのセンサーノードが非共面に配置される。i 番目のセンサーノードのグローバル座標は（xi, yi, zi）と定義し、仮想空間内の座標も（Xi, Yi, Zi）とする。

（２）仮想空間におけるセンサーノード座標の取得

センサーノードは、そのグローバル座標が既知であるため、写真測量による 3 次元モデル生成の際のグラウンドコントロールポイント（GCP）として機能する。センサーノードを GCP として利用すれば、グローバル座標系をそのまま仮想空間に再現できるが、そうでない場合は以下の手順により仮想空間内のセンサーノード座標を取得する。

a）基準点の定義

各軸のグローバル座標に対応する仮想空間の座標を取得するため、変換に用いる座標の集合 C を以下のように定義する。

$$C = \{ x\alpha,\ y\alpha,\ z\alpha,\ x\beta,\ y\beta,\ z\beta,\ X\alpha,\ Y\alpha,\ Z\alpha,\ X\beta,\ Y\beta,\ Z\beta \}$$

ここで、$X\alpha$，$Y\alpha$，$Z\alpha$ および $X\beta$，$Y\beta$，$Z\beta$ は、それぞれグローバル座標 $x\alpha$，$y\alpha$，$z\alpha$ および $x\beta$，$y\beta$，$z\beta$ に対応する仮想空間内の座標である。基準点とは、グローバル座標と仮想空間の両方でその座標が既知となる点であり、センサーノードから選定される。

b）基準点の選定

本手法では、全軸の変換に必要な最小限の基準点を集合 I から選定するアルゴリズムを提案する。アルゴリズム 1 に示すように、全軸変換を可能とする 2 点（または、2 軸、1 軸それぞれに対してペア）を順次探索し、選定されたセンサーノードを G として保存する。

c）グローバル座標の変換

選定された G から C を取得し、k 番目のセンサーノードの仮想空間内の座標は以下の式で表される。

$$Xk = ax \cdot xk + bx \qquad (1)$$
$$Yk = ay \cdot yk + by \qquad (2)$$

$$Zk = az \cdot zk + bz \qquad (3)$$

ここで、(1), (2), (3) はそれぞれ以下の条件を満たすように定義される。

$$X\alpha = ax \cdot x\alpha + bx, \quad X\beta = ax \cdot x\beta + bx$$
$$Y\alpha = ay \cdot y\alpha + by, \quad Y\beta = ay \cdot y\beta + by$$
$$Z\alpha = az \cdot z\alpha + bz, \quad Z\beta = az \cdot z\beta + bz$$

したがって、係数 ax, bx, ay, by, az, bz は次式により計算される。

$$ax = (X\alpha - X\beta) / (x\alpha - x\beta), \quad bx = (X\beta \cdot x\alpha - X\alpha \cdot x\beta) / (x\alpha - x\beta)$$
$$ay = (Y\alpha - Y\beta) / (y\alpha - y\beta), \quad by = (Y\beta \cdot y\alpha - Y\alpha \cdot y\beta) / (y\alpha - y\beta)$$
$$az = (Z\alpha - Z\beta) / (z\alpha - z\beta), \quad bz = (Z\beta \cdot z\alpha - Z\alpha \cdot z\beta) / (z\alpha - z\beta)$$

以上の式 (1)～(3) により、全センサーノードの仮想空間内の座標が算出される。

（３）撮影時刻の算出

各センサーノード i について、データ転送速度を Ri、受信カメラのフレームレートを F とする。すべてのシンボルを正確に受信するためには、F は Ri 以上でなければならない。i 番目のセンサーノードの最大伝送時間 Ti は、

$$Ti = Mi / Ri$$

と定義される (Mi は最大データサイズ)。また、i 番目のセンサーノードに対する撮影時刻を ti とすると、最大データサイズの受信を保証するためには、$ti \geq Ti$ となる必要がある。

4) センサーデータの適用

各センサーノード i のセンサー値を vi とし、点 (X, Y, Z) におけるセンサー値を返す関数を f(X, Y, Z) とする。このとき、以下の条件を満たす。

$$f(Xi, Yi, Zi) = vi \qquad (i \in I) \qquad (4)$$

関数 f(X, Y, Z) は、条件 (4) の下で補間処理を行うことにより確立される。得られた f(X, Y, Z) を用いて、3 次元点群モデルの全点に対してセンサーデータが適用され、センサーデータレイヤーが作成される。

３ 実験

3-1 実験条件

本節では、提案システムの実証実験について述べる。図 2 に実験環境の概略を示す。設置されたセンサーノードは円で表示されている。

使用したカメラは iPhone 14 Pro である。対象領域の画像は解像度 4032×3024 にて撮影され、これを用いて 3 次元モデルを生成する。同時に、光信号受信用に解像度 1080×1920、フレームレート 30 fps の動画が撮影された。

図 3 に示すように、センサーノードはバッテリー、各種センサー、マイコン、及び光源から構成される。本実験では、温度、湿度、照度、及び土壌水分を測定する 4 種類のセンサーを用いた。マイコンとして Arduino UNO を採用し、各センサーで取得されたデータは光信号に変換され、光源から送信された。センサーデータは、On-Off Keying (OOK) により符号化・変調された。送信機としては、各 64 個の LED が正方形に配置された WS2812B シリアル LED パネルを利用し、1 ビットあたり 0.1 秒間の発光を行った。

実験は、北海道千歳市に所在するハスカップ農場において実施した。対象領域は 8×4 メートルの正方形内に 16 個のセンサーノードが設置され、そのうち 5 個は地上から 1.6 メートルの高さに設置された。各センサーノードは、その位置においてセンサーデータを取得し、光信号として送信した。対象領域は、複数の角度から連続して撮影されるとともに、光信号も同時に記録された。

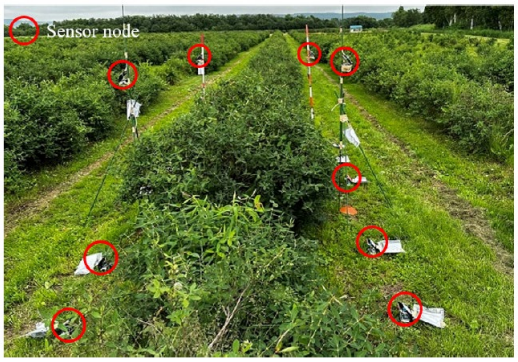


図 2 実験環境

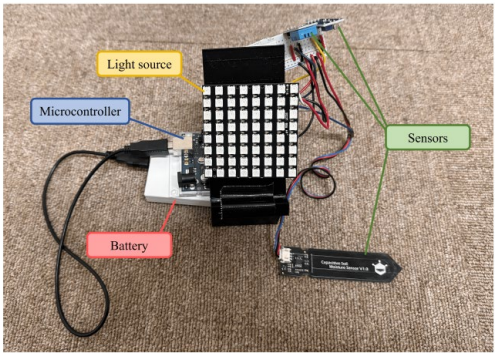
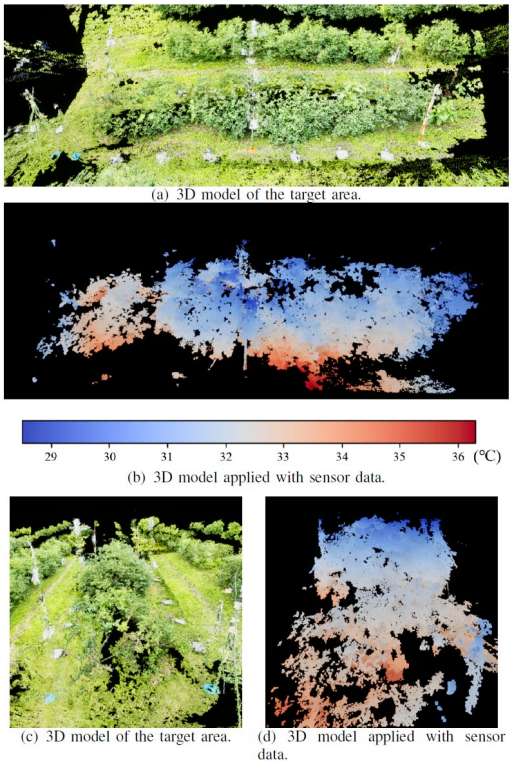


図 3 センサーノード



(a) 3D model of the target area.
(b) 3D model applied with sensor data.
(c) 3D model of the target area.
(d) 3D model applied with sensor data.

図 4 生成したデジタルツイン

3-2 実験結果

実験中、対象領域の画像を 296 枚撮影し、写真測量ソフトウェア Pix4Dmapper を用いて 3 次元点群モデルを生成した。生成された 3 次元点群モデルは、図 4(a)および 4(c)に示す通りであり、センサーノードの位置も仮想空間上で正確に再現されることが確認された。これにより、センサーノードがグラウンドコントロールポイントとして機能し、仮想空間内でその座標が把握できることが明らかとなった。

各センサーノードにおけるビット誤り率（BER）を、文献［12］で定義された Q-factor を用いて評価した。その結果を図 5 に示す。通信の正確性評価の基準として 1×10^{−3} を設定し、7% のハードディシジョン前方誤り訂正を考慮した。実験の結果、4 番目のセンサーノードを除くすべてのノードにおいて十分に低い BER が確認された。なお、4 番目のノードに関しては、他のノードに比べ撮影時の露出オーバーが見受けられたため、光源の撮影方法およびセンサーノードの設置方法の改良が今後の課題として示唆される。

本実験では、基準点として 9 番目および 17 番目のセンサーノードを採用した。これにより、全軸の変換が行われ、全センサーノードの仮想空間内の座標が算出された。その後、温度をセンサー値として関数 f(X, Y, Z) をスプライン補間により確立し、3 次元点群モデル上の各点に対して温度データを適用した。適用結果は、カラーマップによって視覚化され、図 4(b)および 4(d)に示される。これにより、対象領域の 3 次元モデルにセンサーデータレイヤーが付加され、農地デジタルツインが構築されたことが確認された。

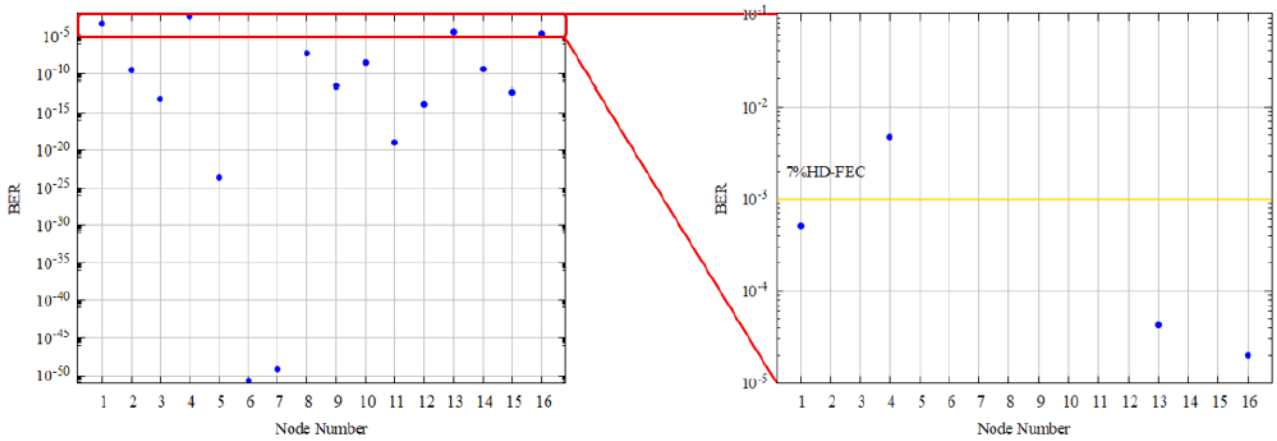


図 5 ビットエラー率

4 まとめ

本稿では、写真測量と光カメラ通信を組み合わせた、農地デジタルツインの統合的作成手法を提案した。提案手法により、カメラ一台で 3 次元モデル生成とセンサーデータの受信が可能となり、取得されたセンサーデータを 3 次元点群モデルに適用することで、詳細な農地デジタルツインが作成される。さらに、OCC のコスト効率の高さにより、低コストかつ高密度なセンシングが実現される。実験により、本システムが農地の状況を詳細に把握し、比較可能なデジタルツインの構築に寄与することが確認された。今後の研究では、本システムの自動化および環境条件に左右されない通信精度の向上に取り組むことが期待される。

【参考文献】

[1] M. Falkenmark, “Growing water scarcity in agriculture: future challenge to global water security,” Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 371, no. 2002, p. 20120410, 2013.

[2] T. Gomiero, “Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge,” Sustainability, vol. 8, no. 3, p. 281, 2016.

[3] W. P. Falcon, R. L. Naylor, and N. D. Shankar, “Rethinking global food demand for 2050,” Population and Development Review, vol. 48, no. 4, pp. 921–957, 2022.

[4] A. Subeesh and C. Mehta, “Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things,” Artificial Intelligence in Agriculture, vol. 5, pp. 278–291, 2021.

[5] J. Dai and M. Sugano, “Low-cost sensor network for collecting real-time data for agriculture by combining energy harvesting and LPWA technology,” in 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). IEEE, 2019, pp. 1–4.

[6] Z. Xiaojing and L. Yuanguai, “Zigbee implementation in intelligent agriculture based on internet of things,” in 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Atlantis Press, 2012, pp. 1842–1846.

[7] M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, “Digital twin: Origin to future,” Applied System Innovation, vol. 4, no. 2, p. 36, 2021.

[8] C. Pylianidis, S. Osinga, and I. N. Athanasiadis, “Introducing digital twins to agriculture,” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 184, p. 105942, 2021.

[9] A. Nasirahmadi and O. Hensel, “Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm,” Sensors, vol. 22, no. 2, p. 498, 2022.

[10] A. S. Anifantis, S. Camposeo, G. A. Vivaldi, F. Santoro, and S. Pascuzzi, “Comparison of UAV photogrammetry and 3d modeling techniques with other currently used methods for estimation of the tree row volume of a super-high-density olive orchard,” Agriculture, vol. 9, no. 11, p. 233, 2019.
[11] L. Comba, A. Biglia, D. R. Aimonino, and P. Gay, “Unsupervised detection of vineyards by 3d point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture,” Computers and electronics in agriculture, vol. 155, pp. 84–95, 2018.
[12] N. S. Bergano, F. Kerfoot, and C. Davidsion, “Margin measurements in optical amplifier system,” IEEE photonics technology letters, vol. 5, no. 3, pp. 304–306, 1993.

〈発　表　資　料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
Farm Monitoring System with Drones and Optical Camera Communication	MDPI Sensors	2024
Integrated 3D Farm Modeling with Photogrammetry and Optical Camera Communication	IEEE VTC2024-Spring	2024