

## 小型 UAV を用いた水田におけるイネ群落の 3次元リモートセンシングの精度評価

### Accuracy Assessment in 3D Remote Sensing of Rice Plants in Paddy Field Using a Small UAV

鄧 博慶、張 煜、清水 庸、細井文樹、大政謙次\*  
Poching Teng, Yu Zhang, Yo Shimizu, Fumiki Hosoi and Kenji Omasa\*

東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8567 東京都文京区弥生 1-1-1  
The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences  
1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

(2016年6月21日受付、2016年7月25日受理)

#### ABSTRACT

It has become an important solution for the modern agriculture to monitor rice plants in paddy field by remote sensing. In recent years, many researchers have employed some low-cost and high-performance UAVs with cameras for this purpose. Especially, the structure from motion (SFM) has been considered as a method of reconstructing a three-dimensional (3D) model by repeatedly calculating a feature projection point for a plurality of images overlapping. In this paper, to use the SFM method, we took many videos of the rice filed by a color video camera mounted on a small UAV and picked a series of still images from the videos at different video sampling rate. And, we found that 3D models of rice plants in paddy field were well reconstructed from the four processing steps of point cloud building, dense point cloud building, mesh modelling, and textured mapping. The result showed that high sampling rate led to high accuracy and 3D dense point cloud model was better in the accuracy than others. In the sampling rate of 6 still images/s, the error of 3D model was RMSE=12.8 cm ( $R^2=1.00$ ) in X-Y axis and RMSE=7.3 cm ( $R^2=0.97$ ) in Z axis.

**Key words :** 3D, paddy field, rice plants, remote sensing, SFM, UAV

#### 1. はじめに

イネは日本の主要な農作物であるため、その生育状況をモニタリングし、生産量や品質を評価することはリモートセンシングの重要な課題である (Matsuda et al., 2010; Akiyama et al., 2014)。過去に、人工衛星や航空機からのリモートセンシングにより、イネの生育状況をモニタリングすることが行われてきたが、3次元化の精度的な問題から、2次元的な生育状況のモニタリングに限定されていた。また、適切な時期に観測を行うことが難しく、コスト的な問題もあった (Matsuda et al., 2010)。さらに、一般的に、農作物の構造や環境は3次元的に

変化するので、2次元的な解析では限界があり、3次元リモートセンシングによるモデル解析が望まれている (Omasa et al., 2007; Jones and Vaughan, 2010)。

近年、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 技術が発達し、動画や高解像度の画像が得られるカメラを搭載した高性能の小型 UAV を比較的安価に入手でき、また、GNSS/INS (Global Navigation Satellite System /Internal Navigation System) と無線通信技術の進歩により、比較的簡便に自動飛行制御ができるようになってきた (Díaz-Varela et al., 2015)。そして、コンピュータの高性能化や SFM (Structure From Motion) などの3次元構築アルゴリズムの進歩により、UAV で得られた連続画像から

\*Corresponding author : E-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

3次元構築を行い、イネなどの農作物の3次元生育モニタリングが可能になってきた (Zarco-Tejada et al., 2014)。UAV 利用の利点は、人工衛星や航空機からの観測では困難であった、利用者が望む時期や時間帯での高空間解像度観測を容易に行える点にある。また、地上観測に比べて、広範囲に、かつ、上空から観測が行える。しかしながら、UAV を用いたイネなどの農作物の3次元リモートセンシングにおいては、3次元モデル構築の方法と精度の問題について、これまで十分な検討がされていなかった。

このため、本論文では、UAV に搭載されたカラービデオカメラで撮影された動画を用いて、高精度で3次元モデルを構築する手法について検討し、その精度検証を行った。特に、録画した動画から、異なるサンプリングレートで作出した静止画群を用い、SFM 法による3次元モデルの精度と計算時間や画像オーバーラップなどの関係について検討を行った。

## 2. 計測対象及び方法

### 2.1 現地調査

調査地域は、茨城県つくばみらい市の収穫間近のイネが生育している水田を対象とした (2015年8月24日)。そして、UAV での観測にあわせて、イネの高さと周辺の農道、水路、通路や区画境界のコンクリートなどの距離・寸法を、誤差を評価するために、巻尺を用いて実測した。また、再構築される3次元モデルの精度を向上するために、UAV の観測区域内 (約 50 m x 50 m) に基準点を設定し、GCP (Ground Control Point) に GNSS の地理情報データを記録した。

### 2.2 観測に使用した小型 UAV と観測方法

水田の観測には、小型 UAV (Phantom 3 Professional, DJI China) を使用した。この小型 UAV には、カメラ (センサー: Sony Exmor 1/2.3" 12.4M Pixel Comos、レンズ: FOV94° 20 mm (35 mm 換算) f/2.8 パンフォーカス) と一体化した3軸の防振ジンバルが装着されており、機体振動や気象条件、飛行状況にかかわらず、安定した動画や静止画の撮影が可能である。電池の充電時間は約1時間で、満充電での飛行時間は約20分である。飛行に際しては、GNSS/INS の信号により飛行姿勢の調整が可能で、撮影画像に加えて、フライトや機器の情報を無線によりスマートフォンに転送し、地図上で位置を確認しながら簡単に遠隔操作できる。

観測の際の UAV の操作はマニュアルで実施し、飛行高度は地上約 10 m、飛行時間は8分で、撮影ビデオフォーマットは Full HD (1920Hx1080V 60FPS (Frames/s)) で、MP4 で保存した。画像をできるだけオーバーラップするように飛行させた。

### 2.3 3次元モデルの作成方法

Fig. 1 に、観測された MP4 動画から、3次元モデルを作成し、精度検証を行うための研究の流れ図を示す。まず、前処理として、撮影した MP4 動画からサンプリングレート 10、20、50、100、200 フレーム毎の単位で画像を切り取り、3840H\*2160V の JPEG のフォーマットに変換した (Fig. 1A)。MP4 動画は 60Fps であるので、1秒当たりの画像の枚数は、それぞれ6枚、3枚、1.2枚、0.3枚、0.6枚である。そして、カメラぶれの画像を除いた後、3次元モデルを作成するための画像セットとして保存した。

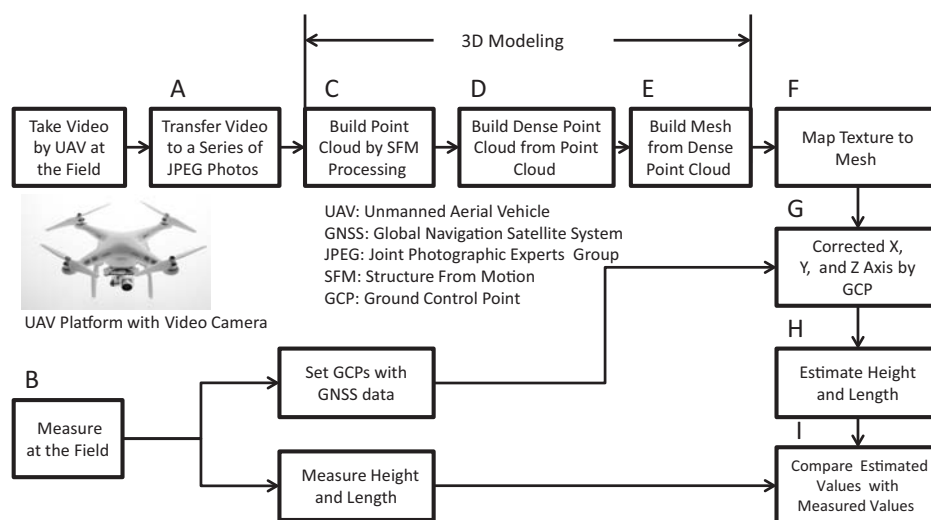


Fig. 1. Workflow chart of 3D modeling from video taken by UAV.

3次元モデルの作成は、SFM法での解析が可能な Agisoft Photoscan (Agisoft LCC, Russia) を用いて行った。SFM法は重なる複数画像の特徴投影点を繰り返し計算により求め、3次元モデルを再構築する手法である (Besl and McKay, 1992)。本研究では、SFM法が膨大なデータ処理を必要とするので、使用する画像セットの枚数 (1秒当たりの画像の枚数) の違いによる演算時間と精度の比較検証を行った。パソコンは Intel® Xeon® CPU E5-2600 v2 (グラフィックカード Nvidia® Quadro®, メモリ 32GB) を使用した。

SFM法では、計算結果は3次元の点群データ (Point Cloud Data) として得られる (Fig. 1C)。そして、得られた3次元点群データを基準として各点を補間計算し、誤差が大きい点を除去した後、3次元高密度点群データ (Dense Point Cloud Data) を作成した (Fig. 1D)。さらに、3次元高密度データから、3次元メッシュモデルを作成し (Fig. 1E)、得られたメッシュモデルにテクスチャマッピングを行い、カラー情報を持った3次元モデルを作成した (Fig. 1F)。

3次元モデルを作成した後、精度を向上させるため、現地調査で計測したGCPのGNSS情報データを各位置に合わせて3次元モデルに入力し、3次元モデルの補正を行った (Fig. 1G)。この後、現地で実測したイネと周辺の農道、水路、通路や区画境界のコンクリートに対応する3次元モデル上での値を求めた (Fig. 1H)。その際、水平面はX-Y軸として定義し、垂直面はZ軸として定義した。さらに、3次元モデルと実測した値を比較し、X-Y軸とZ軸の誤差を求めた (Fig. 1I)。この処理をそれぞれのサンプリングレートで繰り返し、サンプリングレートの違いによる誤差を求めた。最後に、SFM法による3次元モデルの作成の際の画像のオーバーラップ率と誤差の関係を比較した。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 2は、Aが小型UAVに搭載されたビデオカメラから下方の水田を撮影した動画から切り取った静止画像の例で、Bが現場において汎用カメラで撮影した写真である。Figs. 2A、2Bの写真を見ると、イネや農道、水路などが観察される。また、Fig. 2Aは、上方からの撮影であるが、植物の間と水路の部分には黒い影が見える。

UAVで撮影されたビデオを用いて、Fig. 1の流れ図に基づいて得られた3次元モデルの例をFig. 3に示す。3次元モデルは、1秒で6枚のサンプリングレートの静止画像から作成し、表示は、Fig. 2Bの方向に合わせた。

Fig. 3Aは3次元点群モデル、Fig. 3Bは3次元高密度点群モデル、Fig. 3Cはメッシュモデル、Fig. 3Dはテクスチャマッピングしたモデルである。Fig. 3Aでは農道と水路のおおよその形状がわかるが、この点群モデルの周辺には輪郭が曖昧な点群が存在する。なお、この点群モデルの全部の点を合計すると、2,015,993点であった (Table 1)。Fig. 3Aの点群モデルから、輪郭形成のためにノイズになる点群を除去し、補間計算した3次元高密度点群モデルがFig. 3Bである。Fig. 3Bの3次元画像はFig. 2Bの写真とよく一致していた。なお、3次元モデルは側面の点数が撮影角度の制限のため少なく白く示されるが、他の部分は、実際の農道、水路、イネ、土壌等の色調が付加された正確な3次元モデルが構築されており、これらの対象の識別が容易にできる。3次元高密度点群モデルの点の数は15,645,491点であり、おおよそFig. 3Aの点群モデルの8倍弱に増加した (Table 1)。そして、Fig. 3Aの点群モデルの周辺にあった不明確な点群が、3次元高密度点群データでは大部分修正された。さらに、3次元高密度点群データの点から構築したFig. 3Cのメッシュモデルでは、メッシュにより3次元の表面形状が生成され、切り取った写真のテクスチャマッピングが可能になった (Fig. 3D)。このテクスチャマッピング画像から、地面や農道等の表面が比較的大きい部分はきれいに作成されたが、植物の間や影があるところでは、精度が低くなる傾向があった。

Fig. 4は、サンプリングレートが1秒6枚の静止画像を用いて作成した、3次元高密度点群モデルから推定したイネや道路、水路、コンクリート橋などの構造物などの寸法と実測データの関係を示す。Fig. 4AはX-Y軸平面、つまり水平面での関係で、Fig. 4BはZ軸、つまり垂直方向の関係を表している。Fig. 4Aは構造物のみ、Fig. 4Bはイネと構造物データで、構造物が白点、イネが黒点である。水平方向 (Fig. 4A) の決定係数 $R^2$ は1.00で、2乗平均平方根誤差 (RMSE) は12.8cmであり、また、垂直方向 (Fig. 4B) の $R^2$ は0.97で、RMSEは7.3cmであった。このことから、垂直方向の方がやや高い精度で推定できるが、いずれにしても実用上十分な精度で推定できることがわかった。

Table 2は、研究方法で述べた5つのサンプリングレート、即ち、1秒0.3枚から1秒6枚の静止画像をもとに構築した、3次元高密度点群モデルから推定したイネや構造物の $R^2$ とRMSEを示す。まず、水平方向の結果を見ると、サンプリングレートが1秒0.3枚の画像の時に精度が一番悪く、RMSEは27.0cmであった。しかし、

1秒3枚の画像の時は精度が改善し、RMSEが10.6cmであった。1秒6枚の方がやや悪くなった原因については不明であるが、この程度のサンプリングレートであれば、比較的高い精度が担保できていた。次に、高さ方向の結果を見ると、サンプリングレートが1秒0.3枚の画像の時はRMSEが13.4cmで、 $R^2$ は0.86であった。しかし、サンプリングレートが1秒6枚の画像の時には、RMSEは7.3cmで、 $R^2$ は0.97であった。全体を見ると、サンプリングレートが大きければ大きいほど、精度が高くなったことが分かる。筆者らが以前行ったヘリコプ

ターライダーによる計測の精度に比べて (Omasa et al., 2000)、UAVを用いた計測の方が高い精度での計測が可能であることがわかった。

なお、Table 1は、サンプリングレートと使用した静止画像の枚数、3次元点群モデルと高密度3次元点群モデルの点数を示す。サンプリングレートが1秒6枚の画像の時には800枚以上の画像を解析に使用する必要があり、計算時間が膨大になった。

Fig. 5は異なるサンプリングレートから作成した3次元モデルと静止画像のオーバーラップ枚数の関係を示

Table 1. Parameters for 3D modelling at each sampling rate

Sampling rate (Images/s)	Used Still Images	Point Cloud (Pixels)	Dense Point Cloud (Pixels)	Process Time
0.3	16	11,952	978,324	10 mins
0.6	48	41,413	2,962,768	40 mins
1.2	93	110,064	4,643,131	26 mins
3	360	597,157	10,460,229	3h 3 mins
6	829	2,015,993	15,645,491	14h 16mins

Table 2. Accuracy of 3D model at each sampling rate

Sampling Rate Images/s	X-Y Axis		Z Axis		Percentage of Area Overlapped over 9 Still Images
	$R^2$	RMSE (cm)	$R^2$	RMSE (cm)	
0.3	1.00	27.0	0.86	13.4	9.9%
0.6	1.00	24.4	0.91	10.6	31.8%
1.2	1.00	14.4	0.94	8.4	40.6%
3	1.00	10.6	0.95	7.8	83.6%
6	1.00	12.8	0.97	7.3	100.0%

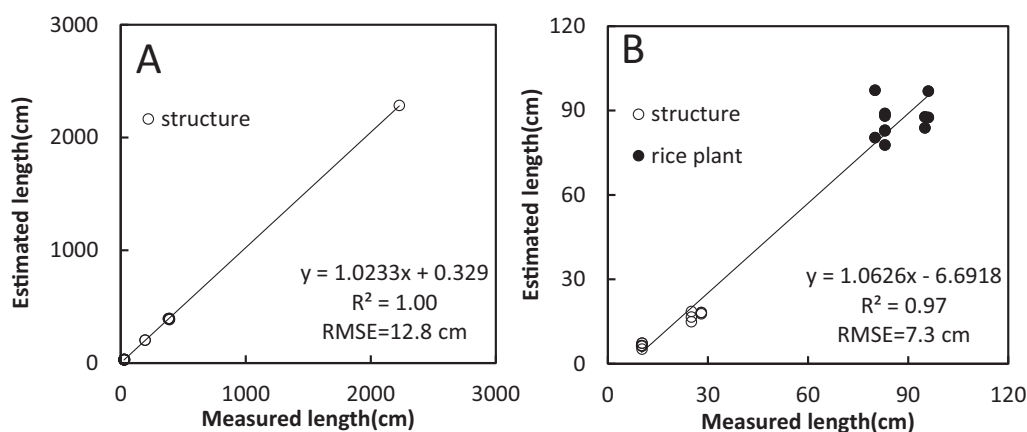


Fig. 4. Relationships between the estimated values from 3D dense cloud model and measured values. A: X-Y axis, B: Z axis.

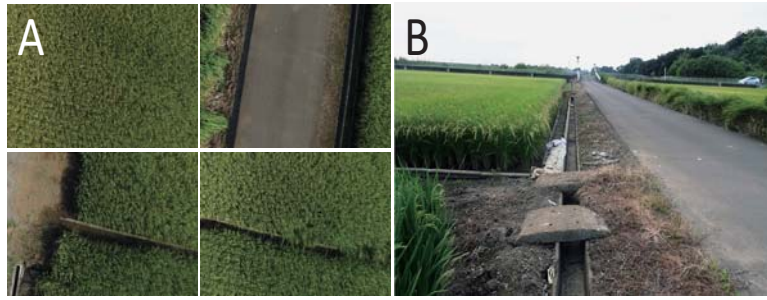


Fig. 2. Still images (A) cut from UAV video and photo (B) at the rice field.

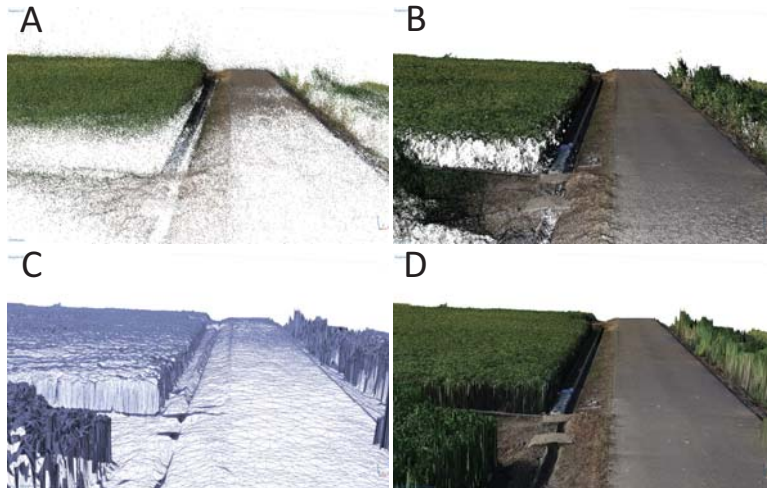


Fig. 3. 3D models reconstructed at sampling rate of 6 still images/s. A: Point cloud. B: Dense point cloud. C: Mesh model. D: Texture mapping model.

	Point Cloud	Dense Point Cloud	Mesh Model	The Number of Overlapped Still Image
6 Images/s				
3 Images/s				
1.2 Images/s				
0.6 Images/s				
0.3 Images/s	 			 The Number of Overlapped Still Images >99 8 7 6 5 4 3 2

Fig. 5. Relationships between 3D models and the number of overlapped still images at each sampling rate.

## 引用文献

す。この図では、左から順に、3次元点群モデル、3次元高密度点群モデル、メッシュモデルおよびオーバーラップ枚数の図である。この結果から、モデルのサンプリングレートによって、オーバーラップの枚数が異なり、モデルの可能作成領域も広がることからわかる。Table 1 と Fig. 5 の結果から、精度を向上させるためにはオーバーラップ枚数が多い方がよく、比較的複雑な形状を持つイネのような植物でも、9枚程度のオーバーラップ枚数があると、比較的高い精度で3次元モデルの構築ができることがわかった。植物よりも形状が単純な構造物は、オーバーラップの枚数が少なくても精度的に問題のない3次元モデルが構築できる。

Jensen and Mathews (2016)によると、同じ観測環境において、SFMにより作成した点群データの点数はLIDARから作成したものよりも多く、単位面積あたりの点群密度も高い。しかしながら、SFMでは、影部分や密生している植物群落では、撮影角度を変更しても内部構造の再構成ができなかったことを報告している。最近、本研究のように、UAVとSFMを用いて、3Dモデルを構築する研究が増加している。Zarco-Tejada et al. (2014)は、オリーブの計測で樹高のRMSEが35cm-39cmであったと報告している。また、Dandois and Ellis (2013)は、ある範囲内の樹高(アメリカブナ、オーク、ヒッコリー、ホワイト・アッシュ、ユリノキ)でRMSEが320 cm-440 cm、さらに、Jensen and Mathews (2016)は、*Quercus fusiformis*、*Diospyros texana*、*Agarita*、*Elbow bush*でRMSEが89 cm-91 cmであったと報告している。本研究では、水平方向のRMSEが12.8 cm、垂直方向のRMSEで7.3 cmでこれまでの報告よりも高い精度での計測ができた。これは、比較的風の影響の少ない小型のUAVで、ジンバルと一体化した高解像度のカメラを用い、飛行高度も約10 mと、比較的低高度で撮影した画像を用いたためと考えられる。また、SFMの解析においては、サンプリングレートを大きくとり、9枚以上の画像のオーバーラップ枚数を確保したことが精度向上の重要な要因であった。

LIDARに比べて、SFMによる3次元モデルの構築は安価で簡便で、精度的にも解析の際のオーバーラップ枚数を考慮することにより高い精度での推定が可能であることがわかった。しかし、Dandois and Ellis (2013)によると、SFMの結果に影響する要因としては、飛行高度と飛行速度、センサの性能、SFMの計算方法、GNSSデータの精度、前処理、風速、光条件、それに植物の種類等があり、今後、これらの要因との関係も検証していく予定である。

- Akiyama, T., Fujiu, W., Hirano, S., Ishizuka, N., Ogawa, S., Okamoto, K., Saito, G., Uchida, S., Yamamoto, Y., Hiroshi, Y. and Zukemura, C. (ed.), 2014: Handbook of agriculture remote sensing. The Japanese Agricultural Systems Society, Tokyo, 512 pp. (秋山侃・富久尾歩・平野聡・石塚直樹・小川茂男・岡本勝男・齋藤元也・内田諭・山本由紀代・吉迫宏・瑞慶村知佳, 2014: 農業リモートセンシング・ハンドブック, システム農学会, 東京, 512 pp.)
- Besl, P. J. and McKay, H. D., 1992: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **14**(2), 239-256.
- Dandois, J. P. and Ellis, E. C., 2013: High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. Remote Sensing of Environment, **136**, 259-276.
- Díaz-Varela, R. A., Rosa, R. D., León, L. and Zarco-Tejada, P. J., 2015: High-resolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: application in breeding trials. Remote Sensing, **7**(4), 4213-4232.
- Jensen, J. L. R. and Mathews, A. J., 2016: Assessment of image-based point cloud products to generate a bare earth surface and estimate canopy height in a woodland ecosystem. At <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/1/50>. Remote Sensing, Basel, **8**(1), **50**, pp. 1-13. Accessed 30 May 2016.
- Jones, H. G. and Vaughan, R. A., 2010: Remote sensing of vegetation -principles, techniques, and applications-. Oxford University Press Inc., New York, 353 pp.
- Matsuda, M., Hosaka, Y. and Omasa, K., 2010: Quality assessment of grains using functional remote sensing. Iden, **64**(2), 81-86 (松田真典・保坂幸男・大政謙次, 2010: 機能リモートセンシングによる穀類の品質評価, 遺伝, **64**(2), 81-86)
- Omasa, K., Akiyama, Y., Ishigami, Y. and Yoshimi, K., 2000: 3-D remote sensing of woody canopy heights using a scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution. Journal of Remote Sensing Society of Japan, **20**(4), 394-406.
- Omasa, K., Hosoi F. and Konishi, A., 2007: 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. Journal of Experimental Botany, **58**, 881-898.
- Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V. and Loudjani, P., 2014: Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. European Journal of Agronomy, **55**, 89-99.