

# 写真測量法による太陽光発電システムの日影予測

学生員 ○池 さつき (東京農工大学)

会員 黒川 浩助 (東京農工大学)

Estimation of shading of PV systems by using photogrammetry

Satsuki IKE and Kosuke KUROKAWA

Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588, Japan  
Fax: +81-42-388-7445, E-mail: sike@cc.tuat.ac.jp

## ABSTRACT

In order to decide the place to install a PV system and to estimate its performance, it is important to consider the effect of shadow on the PV array before and after PV system comes into operation. However, the shading effect cannot be evaluated easily on site because the position of obstacles surrounded the PV system is difficult to calculate. Therefore, the paper is intended to develop new software for estimating the position of obstacles and shadowing by using the triangulation with two photographs or more.

キーワード: 太陽光発電システム, 日影, 写真測量  
Keywords: photovoltaic systems, shading, photogrammetry

## 1. 研究の背景および目的

太陽光発電 (以下PV) アレイの設置場所は、日射が障害物でさえぎられないことが望ましい。しかし、実際はそのような理想的な場所に設置できるのはごくわずかであり、建物や木などの影がかかる場所に設置することがほとんどである。設置予定のPVアレイの出力を予測推定するためにも、影の影響を調べることは大変重要である。アレイにかかる影を予測することにより、影により低下する日射量の推定、PVの発電量の予測、推定が可能となる。さらに適切なモジュール配置の事前検討ツールに発展させることが期待できる。

本研究室では、写真測量により容易にPVアレイと障害物の位置関係を把握し、アレイにかかる影予測の手法検討を行っている<sup>(1)(2)</sup>。これまでに、写真2枚一組を用いて三次元計測を行う立体写真測量法による障害物の推定手法の開発を行い、精度良く推定できる結果を得ている<sup>(2)</sup>。そこで、本論文では、写真測量で障害物測量を行った後、任意日時における傾斜のあるPVアレイ上の影形状推定が可能なソフト開発を目的とした。

## 2. 写真による障害物の測量方法<sup>(3)</sup>

2枚の写真を用いた障害物の測量方法を以下に示す。例としてFig.1に示すように、距離 $d$ だけ平行移動した左右2箇所( $O_L$ ,  $O_R$ )にて撮影した写真より、図内の注目点 $P$ の位置を求めることを想定する。まずFig.1に示すように、全体の座標とそれぞれの撮影写真での座標空間を設定する。ここで利用しているレンズの焦点距離を $f$ とする。左位置で撮影した画像中の点 $P_L$ 、右位置で撮影した画像中の点 $P_R$ が、注目点 $P$ に対応している。 $P$ 点の座標は、それぞれで撮影された写真の座標データを用いて式(1)で表すことができる。

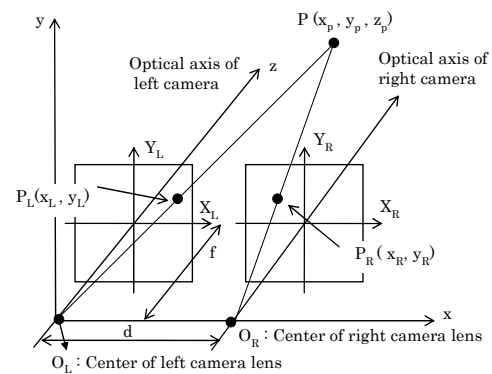


Fig.1 Calculation of the coordinates by triangulation

$$x_p = \frac{d \cdot x_L}{x_L - x_R}, y_p = \frac{d \cdot y_L}{x_L - x_R}, z_p = \frac{d \cdot f}{x_L - x_R} \quad (1)$$

## 3. 日影の推定

### 3.1 太陽位置と影の推定

写真撮影地点における任意日時の太陽の高度角 $h$ 、方位角 $\alpha$ を計算により求める<sup>(4)</sup>。(1)で算出した障害物の高さ $y_p$ を併せて考えると影の位置はFig.2に示すようになる。Fig.2より $P'P''$ は式(2)で表せる。 $P'$ を中心に東西方向に $X$ 軸、南北方向に $Z$ 軸をとると、式(2)より $P''$ の座標は式(3)(4)で表せる。以上のことを障害物の各指定点で行えば、影を予測することができる。

$$P'P'' = \frac{y_p}{\tan h} \quad (2)$$

$$X = \frac{\sin \alpha}{\tan h} y_p \quad (3)$$

$$Z = \frac{\cos \alpha}{\tan h} y_p \quad (4)$$

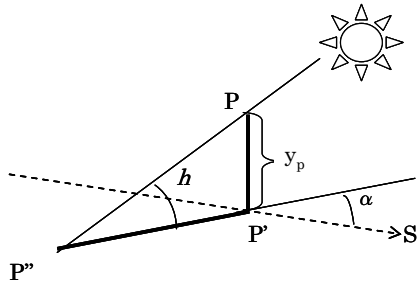


Fig.2 Estimation of shading

### 3.2 傾斜面上での影の推定

3.1では平面上の影の推定について記したが、PVアレイは通常傾斜面に設置されるので、傾斜面上での影推定が必要である。例として、Fig.3に示すようなPVアレイと障害となる点Pの傾斜面上の影の位置 $P_A$ の求め方を示す。Fig.3において $X, Z$ は点Pの地表面上の影の位置、 $H_0$ は点Pの高さ、 $\alpha$ はPからみた $P_A$ の方向、 $H_A, D_A, i$ はそれぞれアレイの高さ、奥行き、傾斜角、 $d$ は点Pからアレイの前端までの距離を示している。推定手順を以下に示す。

まず、アレイの奥行き方向を考える。Fig.4はFig.3を真横から見た図である。灰色で示した三角形の関係から、①、②は以下のように求められる。また、Fig.4中の拡大した図から③と④が求められる。①~④を利用して、点Pがアレイに影を落とす点のアレイ前端からの距離 $Z_A$ は、式(5)のように表すことができる。

$$\textcircled{1} = \frac{Z-d}{Z} H_0$$

$$\textcircled{2} = \frac{Z-d-D_A}{Z} H_0$$

$$\textcircled{3} = H_A - \frac{Z-d-D_A}{Z} H_0$$

$$\textcircled{4} = \frac{D_A}{\cos i}$$

$$Z_A = \textcircled{4} \times \frac{\textcircled{1}}{(\textcircled{1} + \textcircled{3})} = \frac{D_A}{\cos i} \times \frac{\frac{Z-d}{Z} H_0}{H_A + \frac{D_A}{Z} H_0} \quad (5)$$

次に、アレイの幅方向について考える。Fig.5はFig.3を真上から見た図である。Fig.5から⑤、⑥は以下のように求まる。図内の灰色で示した部分において、⑤、⑥、 $d$ を組み合わせて計算すると、点Pがアレイに影を落とす点の幅方向の距離 $X_A$ は、式(6)となる。

$$\textcircled{5} = d \times \tan \alpha$$

$$\textcircled{6} = Z_A \times \cos i$$

$$X_A = \frac{\textcircled{5} \times (d + \textcircled{6})}{d} = \tan \alpha \times (d + Z_A \cos i) \quad (6)$$

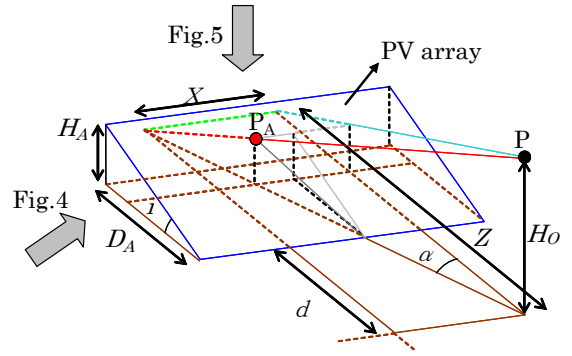


Fig.3 Relation between point P and PV array

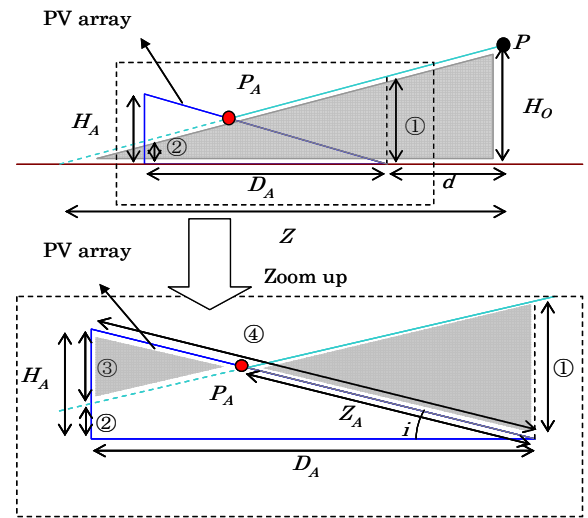


Fig.4 Side view of PV array in fig.3

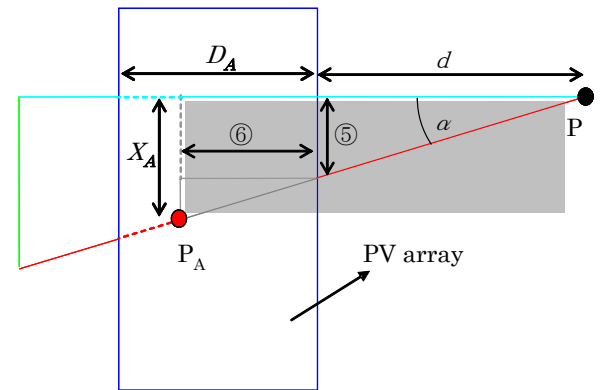


Fig.5 Top view of PV array in fig.3

### 4. 回転撮影画像による検討<sup>(2)</sup>

2節の通り、写真2枚一組を用いて三次元計測を行う立体写真測量法は確立されている。しかし、写真撮影時にカメラを平行に保つ必要があった。現場での写真の撮影の簡便さなど汎用性を高めるためには、任意のカメラ向きで撮影した写真を用いる必要がある。

カメラを平行に保たず、撮影方向を任意とした場合、カメラを平行に保ち撮影された写真(以下、カメラ平行画像)への画像変換が必要となる。ここでは、カメラを水平に保ちながら、向きを変えて左右画像を撮影した(以下カメラ回転画像)写真を用いて、カメラ平

行画像への変換手法について、以下の2つのパターンについて検討を行った。

(1) 逆回転変換

逆回転変換とは、カメラ平行画像上とカメラ回転画像上の基準点のずれより、カメラの回転角を算出し、逆回転をカメラ回転画像に掛ける手法。

(2) 平行移動変換

カメラを平行して撮影した画像上の基準点に合わせて画像を移動させる手法。

4.1 変換手法による補正結果

Fig.6 に両手法で変換した y 座標の測量誤差を示す。横軸はカメラ間距離と注目点までの距離の比、縦軸は測量誤差である。逆回転変換の誤差は、平均で 35.6% でありうまく補正できていない。これは、カメラの光軸中心が画像中心と一致していないことを考慮せず、画像中心にあるとして回転角を計算したためと考えられる。一方、平行移動変換では、測量誤差を 4.7% まで軽減できうまく補正を行えていることが分かる。これは、光軸中心のずれも補正できると考えられる。

光軸中心のずれているカメラ平行画像について、平行移動変換を適用した結果を Fig.7 に示す。平均誤差が 40.0% から 2.6% になり、光軸中心のずれが補正できていることが分かる。以上の結果から、平行移動変換は、回転および光軸中心のずれを同時に補正できることから、カメラ回転画像へ有効性が確認できた。

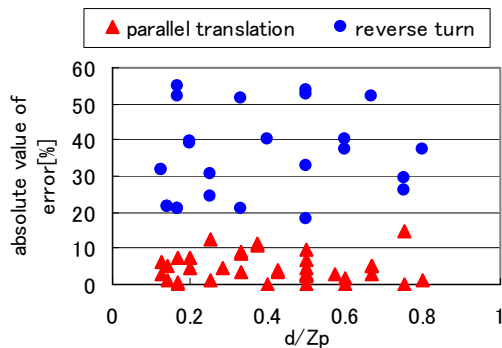


Fig.6 Estimation of errors of y coordinates by using turning camera images

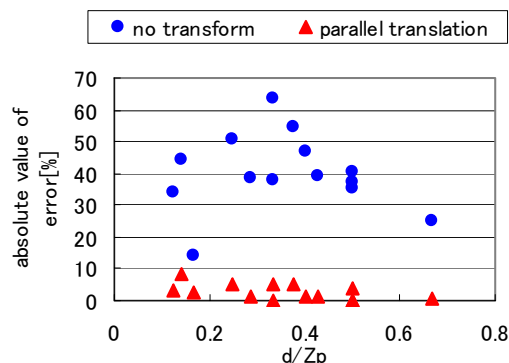


Fig.7 Estimation of errors of y coordinates by using parallel camera images

5. 作製ソフト

5.1 写真測量・影予測ソフト

4.1 の結果を踏まえ、画像変換手法に平行移動変換を採用し、3 節の影推定方法を用いた写真測量・影予測ソフトを C++ Builder を用いて作製した。ソフトの外観を Fig.8 に、ソフトの流れを Fig.9 に示す。

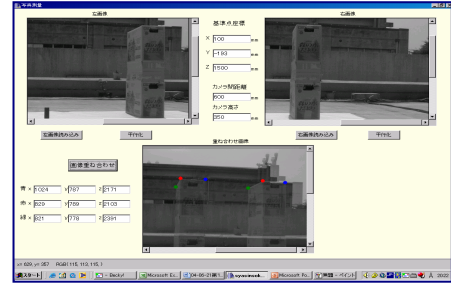


Fig.8 Software for photogrammetry and estimation of shading

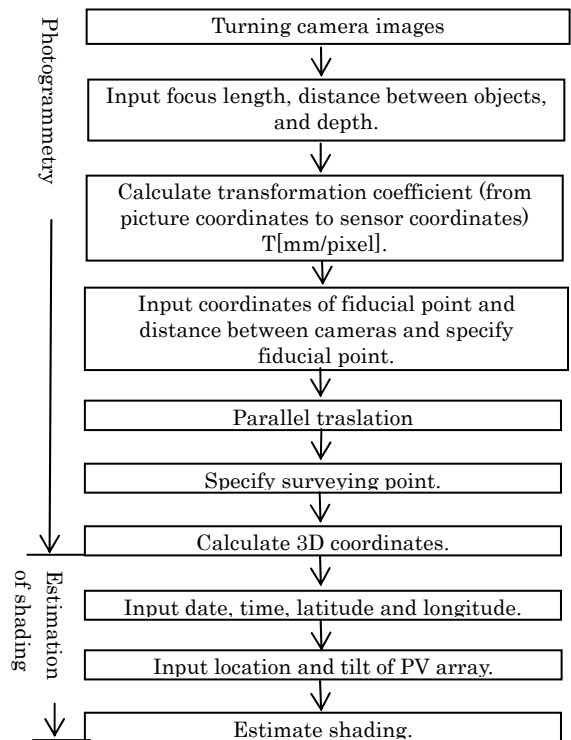


Fig.9 Flow of photogrammetry and estimation of shading in software

5.2 作製ソフトによる推定精度の検証

作製したソフトによる推定精度の検証のため、写真撮影を実際の障害物測量に近い条件である屋外で行い、作製した測量ソフトを用いてカメラ回転画像による障害物測量を行った。撮影した撮影条件を Fig.10 に示す。障害物には、縦×横×幅 = 81.5×18×34cm の直方体を用いた。撮影方法は、障害物から 200cm 離れた点から、カメラ間距離 40cm で右側面の測量、カメラ間距離 60cm で左側面の測量を行った。

5.2.1 写真測量推定精度

作製したソフトを用いた写真測量結果を Fig.11 に示す。結果より x, y 方向は四隅の点で最大誤差 4.5cm

と精度良く推定できている。z（奥行き）方向では、最大誤差が 17.1cm と比較的大きな値となったが、障害物の形状を再現していることが確認できた。

### 5.2.2 影推定結果

影予測ソフトを用いて 2004 年 7 月 13 日東京農工大学 3 号館屋上における障害物の影を予測推定し、実測の影との比較を行った。結果を Fig.12 に示す。10:30~14:30 までは、精度よく推定できている。夕方、太陽高度が低くなった際の実測との誤差が最大 5.6cm と比較的大きくなっているが、影の形状を良く再現していることが分かる。

### 6. まとめ

カメラの向きを平行に揃えずとも、基準点を一点用いることで写真測量が行えることを確認した。また、日時・緯度経度を与えることにより、太陽の高度角・方位角を計算し、影の形状推定を行い、傾斜のある PV アレイ上の影形状推定を可能にした。

作製した写真測量・影予測ソフトを用いることで、専門の器具や技術を用いることなしに、容易に障害物の測量を行ない、最大推定誤差 8.6%にて推定できることを確認した。影に関しては、最大推定誤差 3.3%で推定でき、比較的誤差大きくなる時間帯においても、障害物がつくる影の形状は大きく外れなかった。

今後は、写真測量の z（奥行き）方向の誤差の軽減を目指す。また、夕方における影推定の誤差が大きいため、標高が太陽高度に与える影響を調べ、誤差の軽減を目指す。更に、実際の PV システムを用いて、作製ソフトの妥当性を調べていく予定である。

### 参考文献

- (1) 登守他, 「写真測量法による太陽光発電システムの日照障害特性の推定」, 平成 11 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会(1999)
- (2) 池他, 「写真測量法による太陽光発電システムの日照障害物の推定」, 平成 16 年電気学会全国大会(2004)
- (3) 安居院猛, 長尾智晴, 「C 言語による画像処理入門」, 昭晃堂, (2000)
- (4) 日本太陽エネルギー学会, 「新太陽エネルギー利用ハンドブック」

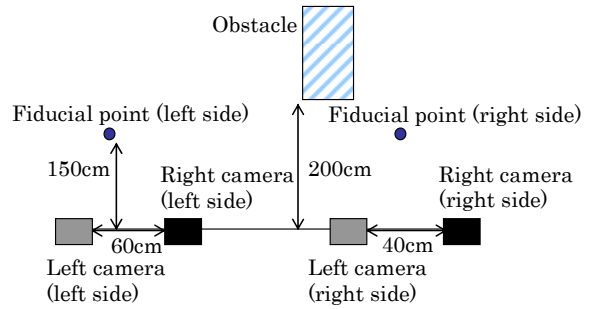


Fig.10 Schematic diagram of photogrammetry and the condition

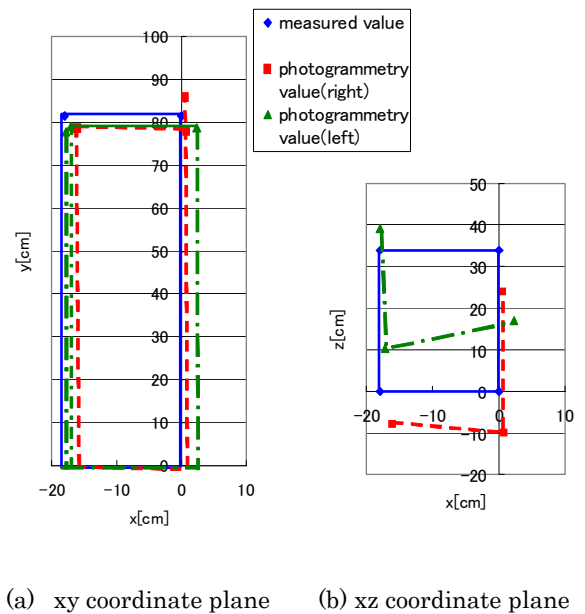


Fig.11 Estimation results of the obstacles position

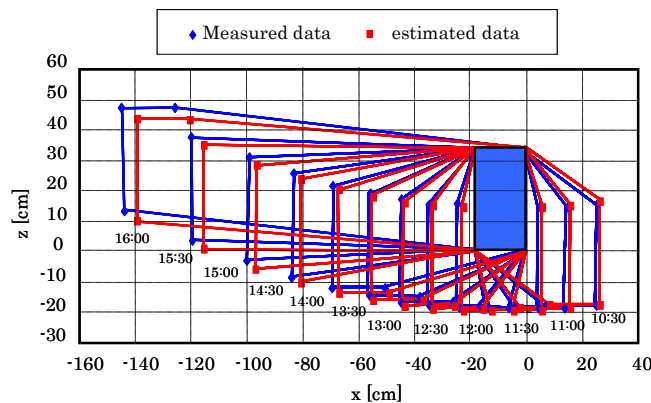


Fig.12 Estimation results of shading by using developed software