

モノアイカメラに基づく空間座標の推定

向井厚志
Mukai Atsushi

1. はじめに

被写体の空間座標を推定する際に写真を用いる方法は、地形図を制作するための写真測量や、対象物の三次元構造を測定して3DCGを作成するイメージ・ベースド・モデリング（例えば、[3] 徐, 2001）、ロボットの運動制御のための位置測定（例えば、[4] 出口, 2000）などで活用されている。著者は、写真を用いて建物や室内の形状図や配置図を自動的に作成するシステムを構築するため、平成18年度および平成19年度に本学情報学部で開講された情報学演習Ⅱのテーマとして写真測量を設定し、受講生とともに基礎的な実験を行ってきた（[5] 山口・向井, 2006, [1] 井谷ほか, 2007a, [2] 井谷ほか, 2007b）。

写真測量では、一般に水平移動させた複数地点で撮影を行ない、それらの写真から地形の立体構造を再現する。その際、撮影地点となるカメラの位置を正確に決めておく必要がある。[1] 井谷ほか（2007a）は、デジタルカメラがレール上を移動する撮影システムを製作し、カメラの動きを1次元に限定するとともに、レール上の目盛からカメラの位置を読み取れるようにした。この撮影システムを用いて0.5m間隔でカメラを移動させながら撮影を行ない、本学10号館1・2階から踊り場へと上る階段の空間座標を推定した。その結果、カメラから最大7m以上離れた階段の各段の位置を数cmの誤差で推定することができた（[2] 井谷ほか, 2007b）。しかし、この撮影システムでは、撮影可能な領域がカメラの前方のみに限定されてしまい、カメラの背面および側面にあたる空間の位置測定を行なうことができない。この問題に対する対処法として、カメラの視線方向を動径としてカメラを回転させ、周囲360°の空間を撮影することが挙げられる。本稿は、平成18年度および平成19年度の情報学演習Ⅱの写真測量に関する活動成果をまとめ、回転する一台のカメラ（モノアイカメラ）に応用した実験結果について報告する。第2章は、モノアイカメラで撮影した写真を用いて被写体の空間座標を決定する方法を記す。第3章は、[2] 井谷ほか（2007b）のレポートに基づいて、デジタルカメラの焦点距離の測定方法および測定結果についてまとめる。第4章は、[5] 山口・向井（2006）のレポートに基づいて、カメラ画像のゆがみを測定した結果についてまとめる。第5章は、モノアイカメラを用いて被写体の空間座標を決定した室内実験の結果をまとめ、第6章で実験結果に関する考察を行なう。なお、本稿で取り扱う空間は、水平面内の2次元空間のみとする。

2. モノアイカメラによる座標推定

図1は、室内実験において被写体の空間座標を推定するために使用したモノアイカメラによる位置測定システムの概要を示している。アームの一端は原点で回転するようになっており、アームの他端にはデジタルカメラが固定されている。デジタルカメラの視線方向は、アームの中心軸の方向と一致する。図1では、デジタルカメラをピン

ホールカメラで近似し、原点からピンホールまでの距離を L とした。

アームの回転角を θ に設定したとき、座標 (x, y) に位置する被写体Aは、写真上の点Bに写し出される。このとき、被写体Aの座標 (x, y) と写真上の点Bの水平座標 h との間には、次式が成り立つ。

$$x(h \sin \theta - d \sin \theta) + y(h \cos \theta + d \sin \theta) = hL \quad (1)$$

ここで、点Bの水平座標 h は写真の中心を原点とし、デジタル画像からpixel単位で読み取る。アームの回転角 θ は、アームがY軸正方向と一致するときを 0° とし、図1で時計回りを正にとる。式(1)の d はカメラの焦点距離であり、ピンホールカメラの場合、ピンホールからフィルム面までの距離を表す。本稿で使用したデジタルカメラの d 値は第3章で示す方法を用いて推定され、1461pixelsと求められた。

計 N 個の回転角 θ_n ($n=1, 2, \dots, N$)の位置で被写体を撮影したとき、各写真上の被写体の水平位置 h_n に次式を当てはめることによって、被写体の空間座標 (x, y) を最小二乗的に推定することができる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_2 & \alpha_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、

$$\alpha_1 = \sum_{n=1}^N (h_n \sin \theta_n - d \sin \theta_n)^2$$

$$\alpha_2 = \sum_{n=1}^N (h_n \sin \theta_n - d \sin \theta_n)(h_n \cos \theta_n + d \sin \theta_n)$$

$$\alpha_3 = \sum_{n=1}^N (h_n \cos \theta_n + d \sin \theta_n)^2$$

$$\beta_1 = \sum_{n=1}^N (h_n \sin \theta_n - d \sin \theta_n) h_n L$$

$$\beta_2 = \sum_{n=1}^N (h_n \cos \theta_n + d \sin \theta_n) h_n L$$

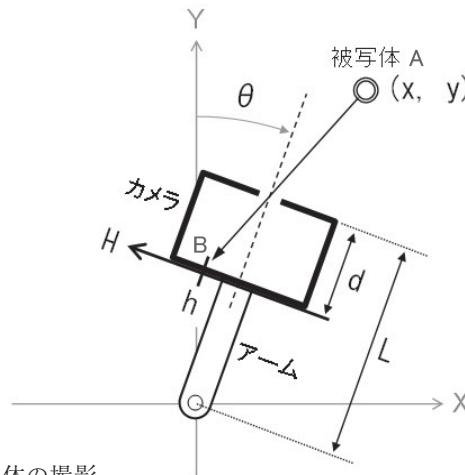


図1 モノアイカメラによる被写体の撮影

X軸およびY軸は実空間に設定された直角座標系であり、カメラの回転軸を原点とする。図は、カメラをY軸正方向から角 θ 回転させて、被写体 \odot を撮影した状況を表す。カメラは太線で描かれており、ピンホールカメラで近似してある。H軸はフィルム面上の横軸であり、フィルム面の中心を原点とする。 d はカメラの焦点距離、 L は回転軸からピンホールまでの距離を表す。

3. デジタルカメラの焦点距離の推定

式(2)で示されたように、被写体の空間座標を写真から推定するためには、カメラの焦点距離 d をあらかじめ求めておく必要がある。[2] 井谷ほか (2007b) はデジタルカメラ (SONY Digital Handycam DCR-PC101; 解像度 1152x864pixels:以降、カメラとして同一のものを使用した) の焦点距離を求めるため、カメラの視線上に置いた円筒を撮影し、円筒の横幅を写真から読み取った (図2)。実際の円筒の横幅を W [cm]、写真上の円筒の横幅を h_w [pixel]、原点からデジタルカメラのレンズ位置までの距離を L_a [cm]、原点から円筒の中心までの距離を L_b [cm] とすると、デジタルカメラをピンホールカメラで近似した場合、焦点距離 d [pixel] は次式を満たす。

$$L_b = d \frac{W}{h_w} + L_a \quad (3)$$

この式は、横軸を W/h_w 、縦軸を L_b としてグラフを描いたとき、その傾きが焦点距離 d となることを示している。

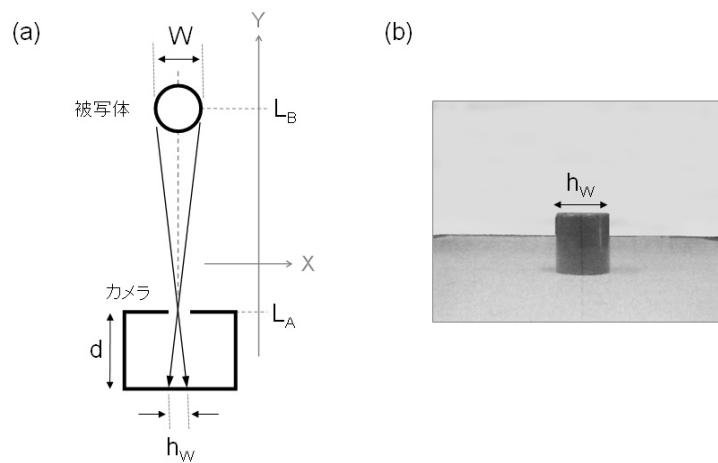


図2 カメラの焦点距離の測定

(a) 焦点距離の測定方法。直径 W の円筒を視線 (Y座標 L_b) に配置して撮影する。 L_a はピンホールのY座標、 h_w は写真上の被写体の横幅を表す。 d はカメラの焦点距離である。(b) 幅4.5cmの円筒を撮影した写真。

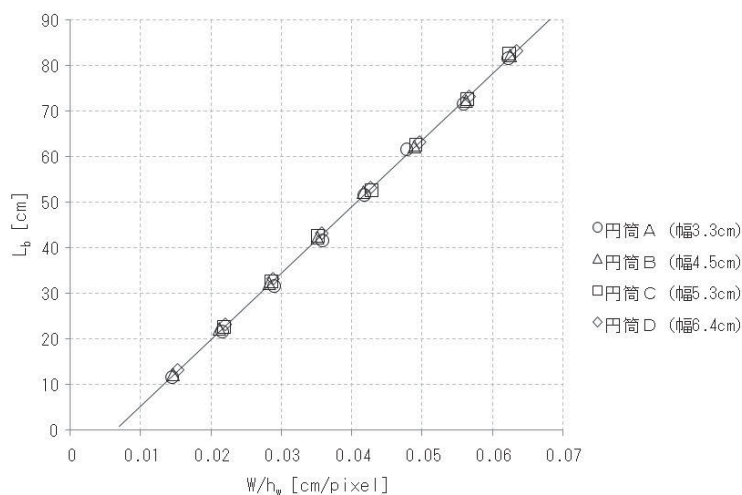


図3 カメラの焦点距離の測定結果

○, △, □, ◇は、それぞれ4種類の被写体; 円筒A, B, C, Dを用いて得られた測定結果を表す。図中の直線は、すべての測定値に最もよく当てはまる1次式を最小二乗的に求めた結果である。

[2] 井谷ほか (2007b) は、幅Wが3.3cm, 4.5cm, 5.3cm, 6.4cmの4種類の円筒を、カメラから視線方向に距離100cm以下の範囲内でそれぞれ計8ヶ所に配置して撮影を行なった。各写真のデジタル画像から円筒の横幅 h_w を読み取り、横軸を W/h_w 、縦軸を L_b として描いた散布図を図3に示す。図3の測定値はほぼ直線上にのっており、式(3)の関係が成り立つことを示している。測定値を最もよく説明する直線の式を最小二乗法で求めたところ、 d 値に相当する直線の傾きとして、 1461 ± 7 pixelsが得られた。

4. 写真のゆがみの推定

デジタルカメラはレンズを通して外界の光を取り込むため、写真に若干のゆがみが現れる。そのため、デジタルカメラをピンホールカメラに近似して被写体の空間座標を推定する際には、写真のゆがみをあらかじめ推定し、そのゆがみを補正する必要がある。[5] 山口・向井 (2006) は、図4(a)に示すような等間隔に並んだドットを撮影し、写真上の隣接する点の間隔から写真のゆがみを推定した。図4(a)に見られるように、縦または横のドットの並びは直線的であるにも関わらず、写真の周辺部で曲線を描いており、ゆがみが生じている。ただし、写真の周辺部に比べて、中心部ではゆがみが小さい。そこで、写真の中心を取り囲む4個のドットにはゆがみが存在しないと仮定して、写真のゆがみ分布を推定した。隣接するドットの間隔は実空間において4.8cmであり、写真中心部のドットの間隔は32pixelsであった。

写真の中心に最も近いドットを原点とし、右向きを h 軸、上向きを v 軸としたとき、ゆがみのない状態で本来撮影されるべきドットの座標 (h, v) は $(32k, 32n)$ と表される。ここで、 k および n は整数である。点 $(32k, 32n)$ に写し出されるべきドットが実際には点 (P_h, P_v) にあるとすると、点 (P_h, P_v) における補正量 $(\delta h, \delta v)$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \delta h &= 32k \cos \alpha + 32n \sin \alpha - P_h \\ \delta v &= -32k \sin \alpha + 32n \cos \alpha - P_v \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 α はカメラの傾き (ロール) を表す。この角 α の値は、式(4)で示す補正量の二乗和が最小となるように決定した。

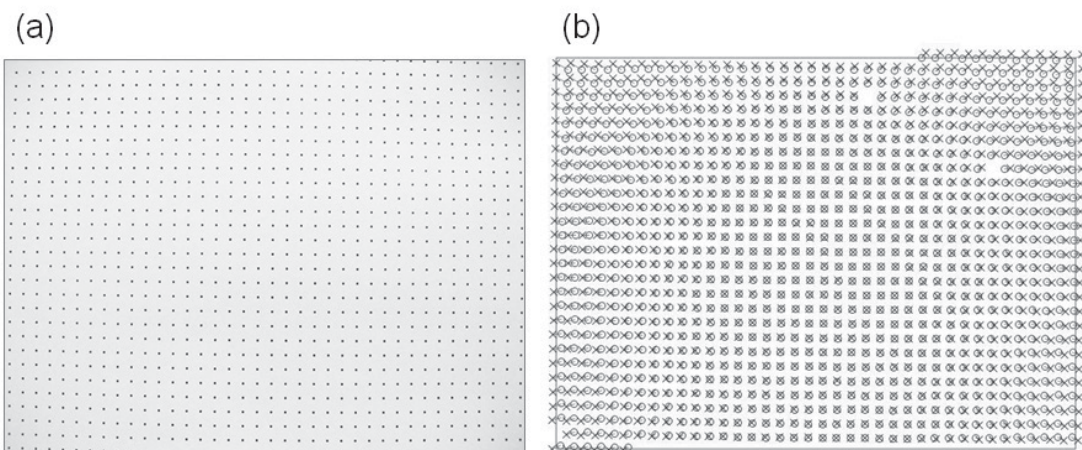


図4 写真のゆがみ分布の推定

(a) 縦横4.8cm間隔で記したドットを撮影した写真。(b) ○印は、左記の写真(a)から読み取ったドットの位置を表す。写真の汚れなどのためにプログラムでドットを読み取ることができなかった箇所は、○印が欠落している。×印は、写真のゆがみがない場合に写し出されるべきドットの位置を示す。

図4(b)は、写真から読み取ったドットを○印で、その本来の位置を×印で示している。この○印から×印への移動量がゆがみの補正量 (δh , δv) を表す。図5は、写真のゆがみの補正量分布をh方向の補正量 δh とv方向の補正量 δv に分けて示している。写真のゆがみは、風景を写真の中心方向に引き込む形で現れる。特に、h方向の補正量が大きく、周辺部で20pixelsを超えるゆがみが生ずる。次章で被写体の空間座標を推定する際には、あらかじめ図5で示した補正量で写真のゆがみを補正した。

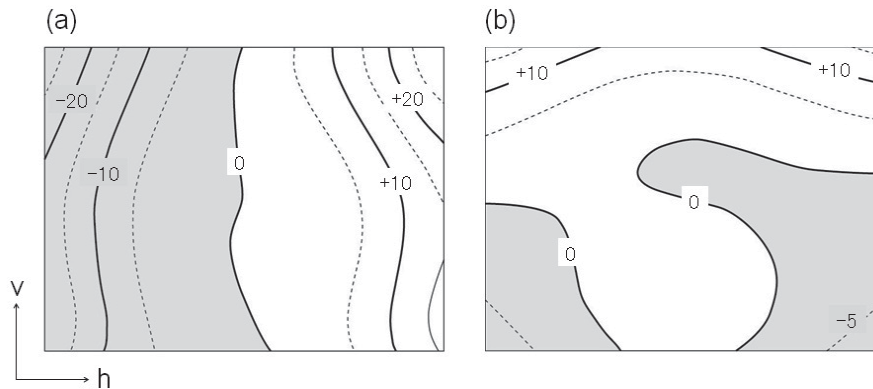


図5 写真のゆがみ分布

(a) h軸方向の補正量 δh の等値線図。図中の陰の領域は、本来の表示位置がh軸負方向にずれた場所であることを示す。(b) v軸方向の補正量 δv の等値線図。図中の陰の領域は、本来の表示位置がv軸負方向にずれた場所であることを示す。図中の数字は補正量であり、pixelを単位とする。

5. 室内実験

モノアイカメラによる空間座標の推定精度を評価するため、第2章の方法を用いて、図6(a)に示す被写体の水平座標を測定した。アームの回転軸となる原点からデジタルカメラのレンズ位置までの長さは30cmとした。被写体は、図6(a)で点(-25cm, +80cm)と点(+25cm, +160cm)を頂点にもつ矩形領域内において、X軸方向に5cm間隔、Y軸方向に20cm間隔で設置した。被写体の大きさは1cm四方であり、写真からの検出を容易にするため、その中央に円形の色付きシールを貼り付けた。図6(b)は、Y座標が100cmの位置に配置した被写体群を、アームの中心軸とY軸正方向とのなす角(以下、回転角) θ が+5°, 0°, -5° の場合に撮影した写真を示す。なお、モノアイカメラのアームは手動で動かし、その回転角は原点に設置した分度器から目測で読み取った。

回転するモノアイカメラを用いた空間座標の推定では、写真の左右中央に被写体が表示されるようにアームの回転角を調整することで、被写体が存在する方向を特定することができる。したがって、写真から求めるべき位置情報は、アームの回転軸である原点からの距離だけでよい。図6(a)の場合で言えば、アームの回転角が0° のとき、カメラの視線方向はY軸正方向を向き、被写体◎が写真中央に表示される。この表示位置から被写体◎がY軸上に存在することがわかるため、あとはモノアイカメラを左右に振って複数の写真を撮影し、式(2)を用いて被写体◎のY座標を求めることで、被写体◎の空間座標が推定できる。

実際の撮影では、回転角を-5° から+5° の範囲で1° 間隔で変化させながら、被写体◎ごとに計11枚の写真を得た。図7は、写真から読み取った被写体◎の水平位置hに式(2)を当てはめて、被写体◎のY座標を求めた結果を示す。なお、水平位置hの値は、あらかじめ、第4章で得られた写真のゆがみに関する補正を施した。

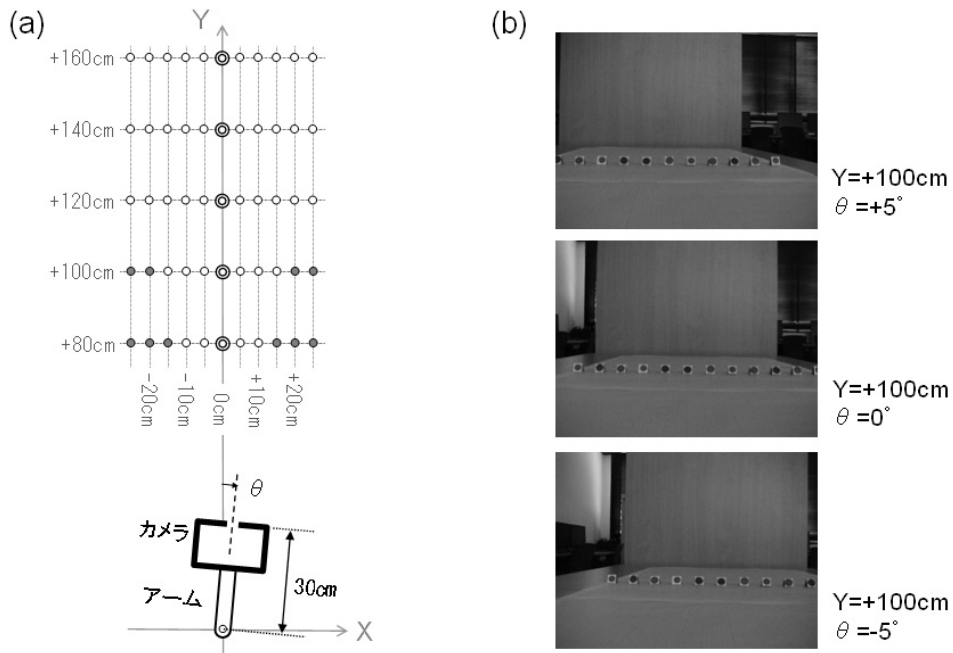


図6 モノアイカメラによる被写体の空間座標の測定

(a) モノアイカメラと被写体の配置。Y軸正方向は回転角 θ が 0° のときのカメラの視線方向であり、原点はアームの回転軸にある。◎はY軸上の被写体、○および●はそれ以外の被写体を表す。そのうち、●は一部の写真で撮影範囲外となった被写体を示す。(b) Y座標が100cmの位置に並べた被写体（丸いシール）を撮影した写真の例。上段から、モノアイカメラの回転角 θ がそれぞれ $+5^\circ$ 、 0° 、 -5° の場合の写真を示す。回転角 θ は、左図(a)において時計回りを正とする。

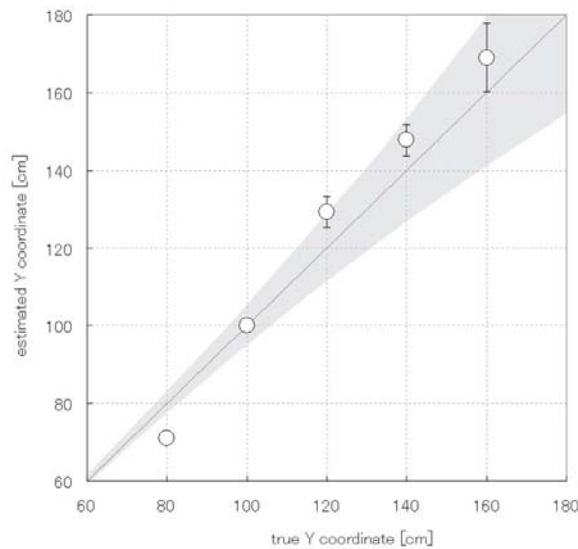


図7 被写体◎のY座標の推定

○印は、被写体◎の真のY座標（横軸）に対して、写真から推定したY座標の値（縦軸）を描いている。○印に付随する縦バーは推定誤差を表す。陰の領域は、モノアイカメラの回転角の設定誤差が 0.3° 以下である場合のY座標の推定値の分布領域を表す。

写真のゆがみの補正効果を確認するため、補正の有無による空間座標の推定結果の差異を調べた。図8(a)は補正を施さなかった場合、図8(b)は補正を施した場合に推定された被写体の空間座標を示す。ここでは、一部の写真で撮影範囲外となった被写体●を除き、図6(a)に示す被写体◎および○の空間座標を推定した。Y軸から離れた被写体ほど、ゆがみの大きな写真周辺部に写し出されるため、補正効果が顕著に現れている。なお、撮影は図7の場合と同様に、アームの回転角を -5° から $+5^{\circ}$ の範囲で 1° 間隔で変化させながら行なった。

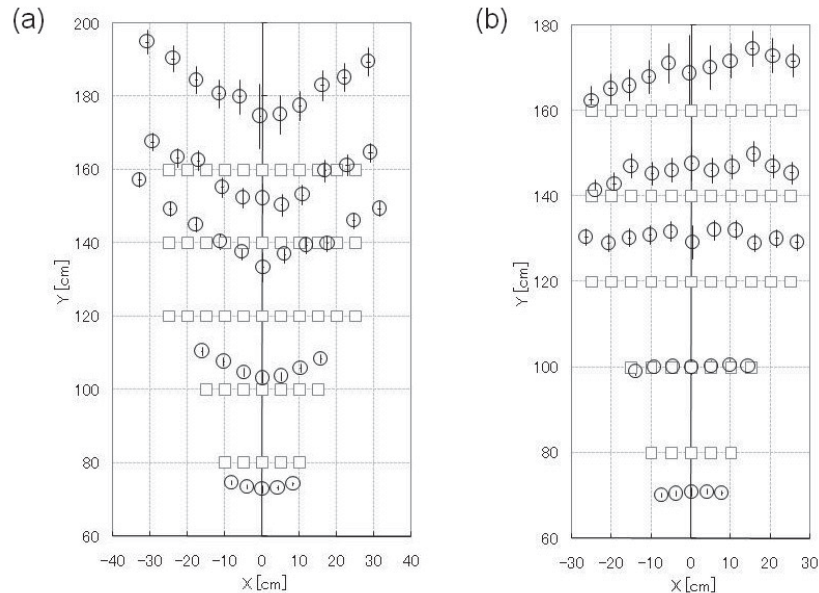


図8 被写体◎および○の水平座標の推定

□印は被写体の真の位置、○印は写真から推定した座標を表す。○印に付随する横バーおよび縦バーは、それぞれX座標およびY座標の推定誤差を示す。

6. 考察

360° 回転可能なモノアイカメラを用いた写真測量の場合、被写体が存在する方向は、カメラの視線方向であるモノアイカメラの回転角として測定できる。そのため、写真からはモノアイカメラの回転軸から被写体までの距離を求めるだけで、被写体の空間座標を決定することができる。被写体◎の場合、カメラの視線方向のひとつであるY軸上に存在することから、回転軸から被写体までの距離に相当するY座標を写真から求めるだけでよい。図7に見られるように、被写体◎のY座標は最大10cmのずれで推定されており、この推定値のずれは真値の11%程度となる。このずれの大きさは、[1] 井谷ほか (2007a) がレール上を移動するカメラで階段の空間座標を測定した場合のずれ(1%以下)と比べて1桁大きい。今回の実験では、原点に設置した分度器を用いて、モノアイカメラの回転角を読み取った。この操作では、目測で設定した回転角が数10分の 1° 程度ずれた可能性がある。例えば、モノアイカメラの回転角に 0.3° の誤差が含まれる場合、写真上の被写体の表示位置は本来の位置から約10pixelsずれることになる。図7に示す陰の領域は、このずれによるY座標の推定値の分布領域を表す。Y=80cm地点の被写体を除き、Y座標の推定値はこの陰の領域に含まれている。図7に見られる推定値と真値のずれの大部分は、モノアイカメラの回転角の設定ミスによって引き起こされた可能性があると言える。

図8に見られるように、Y軸から離れた被写体ほど、写真のゆがみの補正効果が大きい。これは、Y軸から離れ

た被写体が写し出される写真周辺部は、10pixels以上のゆがみが存在するためである。写真のゆがみを補正することによって、X座標は数cm以下の差異で推定できたが、Y座標の推定値には10cm程度のずれが残った。これらの推定値のずれは、約 0.3° の回転角の設定ミスによる推定誤差に相当するため、回転角を正しく設定することでそれを縮小することができる可能性がある。カメラの視線方向からは捉えることができない被写体の空間座標も、数cm以下の推定誤差で空間座標を求めると考えられる。

モノアイカメラによる写真測量を行なう場合、写真のゆがみを補正するとともに、カメラの視線方向を正確に決定する必要がある。被写体の空間座標の推定誤差を数cm以下に抑えるため、ステッピングモータを利用した回転装置を作成し、カメラの視線方向を機械的に制御するシステムを構築していきたいと考えている。

謝 辞

本稿の実験内容の多くは、平成18年度および平成19年度の情報学演習Ⅱにおいて学生とともに行なった演習内容に基づいている。同情報学演習Ⅱを受講した平成19年度卒業生の山口朗央君、ならびに、平成20年度卒業生の井谷正光君、桶田翔一君、黒川大介君、田中良典君、西谷芳優君、福知寛史君、山崎耕平君、若野吉治君に感謝の意を述べる。

参考資料

- [1] 井谷正光・桶田翔一・黒川大介・田中良典・西谷芳優・福知寛史・山崎耕平・向井厚志（2007a）：写真に基づく空間座標の決定，平成20年度前期・情報学演習Ⅱレポート
- [2] 井谷正光・桶田翔一・黒川大介・田中良典・西谷芳優・福知寛史・山崎耕平・若野吉治・向井厚志（2007b）：カメラのF値（レンズからフィルムまでの光路長）の測定，平成20年度後期・情報学演習Ⅱレポート
- [3] 徐剛（2001）：写真から作る3次元CG，近代科学社
- [4] 出口光一郎（2000）：ロボットビジョンの基礎，コロナ社
- [5] 山口朗央・向井厚志（2006）：デジタルカメラを用いた空間座標の決定，平成19年度後期・情報学演習Ⅱレポート