

デジタルカメラを用いた路面横断形状の測定法

田中良明・山口智・鈴木秀典・中澤昌彦・吉田智佳史・岡勝（森林総研）

要旨：デジタルカメラによる路面横断形状の測定法を検討した。方法は、ポール2本を路面横断線の両端に垂直に立て、数珠状につながれた球をポールの下部の間に置いて撮影するというものである。2本のポールの上部と下部の4点をコントロールポイントとしてカメラのパラメータを算定、カメラの撮影位置と画像上の球の位置を結ぶ直線と、ポールの下部2点を含む垂直平面との交点を求めて横断形状を測定する。シミュレーションの結果、横位置、高さとも4mm程度の誤差で計測が実施できることが示され、室内実験の結果もこの予測を裏付けるものであった。シミュレーションはまた、2つのポール間の高さを正確に計測することが、誤差を少なくする上で重要であることを示した。球の色を蛍光色にすることにより、球の位置は画像解析によって抽出可能なことが明らかになった。

キーワード：デジタルカメラ、横断面形状、画像解析

I はじめに

近年、間伐を低成本で実施することを目的とした、作業道の建設が盛んである。こうした作業道の路面が、雨水による浸食を受けた場合、道としての機能に支障が出るばかりでなく、周辺の環境にも影響を与える。路面の安定がはかられているか評価するためにしばしば路面の横断形状が測定される。林道や作業道の横断面の測定法としては、ポールやコンベックスを使った方法に加えて、水平に設けた2本の柱に路面に垂直に同じ長さの串をさす方法（3）、また路面をレーザープロファイラにより測定、断面を抽出する方法（2）等がある。手間や費用において一長一短であるが、これらの方に加えて、写真測量によって横断面を測定することが考えられる。写真測量には座標が既知であるコントロールポイントの設置、写真上での測定など、煩雑な外業、内業が必要であるという欠点があるが、画像により付近の路面の様子が残されるという利点がある。本研究の目的は、作業道等の横断面形状測定をデジタルカメラによって簡易に測定する手法を検討することである。

II 方法

1. 測定方法 デジタルカメラによる写真測量のモデルは文献（1）のモデルをPC上での利用に適したものに改良したものを使用した。モデルにはカメラの撮影位置、撮影角度、焦点距離、レンズディストーションによる画像周辺部の歪みを補正するパラメータなど12個のパラメータを含んでいる。撮影位置、撮影角度を除いた6つのパラメータは室内実験で求めることができる。図-1に示すように、

実験台に幅、長さ、高さ、それぞれ約18, 38, 20cmのブロックを置いて、直尺、曲尺を使って、座標既知の16点のコントロールポイントを作成、上方1mから撮影を行った。撮影位置と角度をわずかに変えながら100枚の画像を撮影、パラメータを求めた。使用したデジタルカメラはRICOH社のGR DIGITAL IIで、画像のサイズは2048×1536ピクセルである。この室内実験では、オートフォーカスによって、ブロックの上面にピントがあって、実験台上のコントロールポイントがぼけることを防ぐために、ピントを合わせる距離を1mに設定して撮影を行った。以降の実験は、すべてこの設定で撮影を行った。

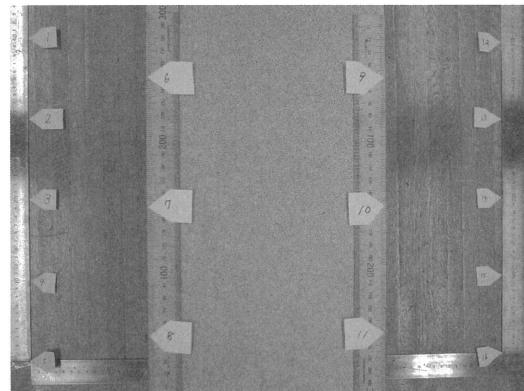


図-1 室内実験によるパラメータの算定

撮影位置と撮影角度の6つのパラメータは横断面を測定する現場で定める必要がある。デジタルカメラによる写真測量では、1つの測点に対して2つの測定値、すなわち、画像の横座標uと縦座標vが得られるので、4点のコントロ

Yoshiaki TANAKA, Satoshi YAMAGUCHI, Hidenori SUZUKI, Masahiko NAKAZAWA, Chikashi YOSHIDA, and Masaru OKA (For. and Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305-8687)

Measurement of the cross section of a forest road surface using a digital camera

ールポイントがあれば、残りのパラメータが最小二乗法で求めることができる。この4点のコントロールポイントの作成に2本のポールを用いることとした。つまり、測定を行いたい横断面の横断線の両端にポールを垂直に立て、このうちの一方のポールの下部を原点として、上方向をZ軸に、2本目のポールの下部を正方向か、負方向のX軸にする。ポール間の距離と高さの差を測定することで4点のコントロールポイントC1～C4が得られる（図-2、3）。

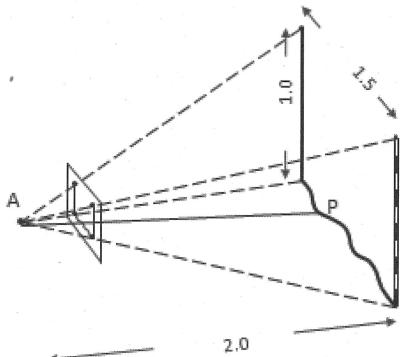


図-2 横断面測定法（単位はm）

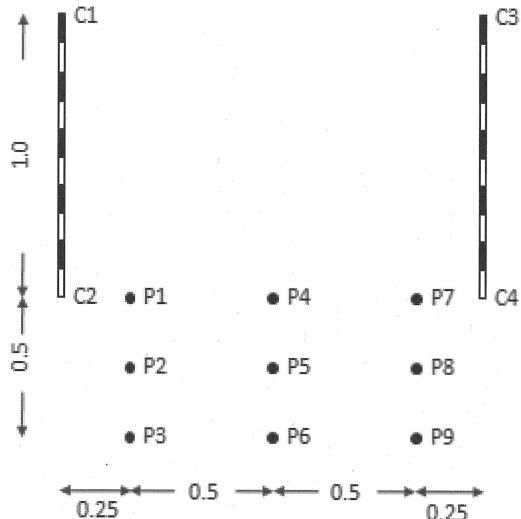


図-3 測定モデル（単位はm）

ここで、図-2のように2つのポール間の断面が画像に映されていれば、断面の1点Pの像を画像上でポイントした時に撮影位置Aと像を結ぶ直線と、2本のポールの下部点を含む垂直平面の交点としてPが測定できる。問題となるのは、断面をいかに撮影するかであり、ここでは、魚釣りで使われるシモリと呼ばれる蛍光色の6mmの球を釣り糸でつなぎ、シモリの間を2cm間隔で鉛のおもりで固定したものを使って断面を撮影するものとした（図-4）。断面で50cmの深さまで撮影できるように撮影方法を検討した結果、ポールは下端とその上部1mの位置をコントロールポイントとして使用、1.5mの断面を2m離れたところか

ら撮影するものとした（図-2）。したがって3m程度の道幅の作業道の測定には、道の両側に設けられた基準点を原点として2回の測定が必要となる。

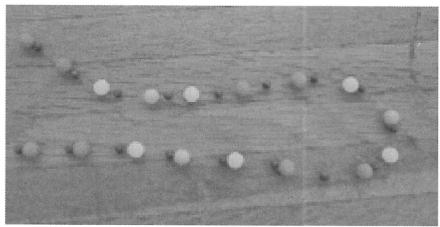


図-4 数珠状につながれたシモリとおもり

2. 測定のシミュレーション 測定のシミュレーションを行って、この測定方法の誤差を検討した。測定において考えられる誤差はまず、画像上の点を読み取るときの誤差である。マウスや矢印キーを使って画像上のピクセルを読み取るときに生じる誤差で、画像が不鮮明なものであると増加する。この誤差 σ_{uv} は室内実験によるパラメータの算定で行う最小二乗法の残差より推定できる。さらに誤差の原因となるのはコントロールポイントに生じる座標誤差である。原点は1本のポールの下部として定められるが、2本目のポールはその座標を定めるために、原点からの水平距離と高さの差を測定する必要がある。水平距離の測定はコンベックスなどで測定できるのに対して高さの差は水準器をつけたポールとコンベックス等の組み合わせにより測定するため、2本目のポールの下部のZ座標には誤差が生じやすいものと考えられる、この誤差を σ_z とする。さらにポールは垂直方向に立てる必要があるが、実際には垂直方向から傾き、左右のポールの上部には横方向や奥行き方向の誤差 σ_{xy} が生じる。横断面形状の測定値の誤差は、実際にはこうした誤差がコントロールポイントに含まれているのにもかかわらず、誤差なしの座標を使い、誤ったカメラの撮影位置と角度を得て、横断面を計算することによって生じる。こうした状況は次のようにシミュレーションできる。図-3に示すように2本のポールによるコントロールポイントと、ポールを含む平面上、ポールより下部に設けた9点の計測点を用いる。右側のポールのZ座標には σ_z を加える。また両側のポールの上部のXY座標にそれぞれ σ_{xy} を加える。カメラの撮影位置のある点に定めて、カメラをX軸に対して水平に、横断面に対して直角に向けて撮影する。この撮影位置と撮影角度で、誤差を含むコントロールポイントと測定点の画像座標 u , v を求めておく。こうして得られたコントロールポイントの u , v 値と誤差なしのコントロールポイントの座標値をつかってカメラの撮影位置と角度を求めるとその結果には誤差が含まれる。この値を使って測定点の位置を計算すれば、コントロールポ

イントの誤差が測定値に与える影響が評価できる。測定点は図-3に示すP1からP9までの9点である。撮影位置はXYZ座標を、それぞれ0.75, -2.0, 0.4mとした。シミュレーションは、読み取る誤差 σ_{uv} のみを加える場合、読み取る誤差に加えて、 σ_z だけ、 σ_{XY} だけ、両方を加える場合の4通りとし、それぞれ1,000回ずつ計算を行った。誤差には正規乱数を用い、 σ_z と σ_{XY} の値はそれぞれ5mmとした。

3. 室内実験 シミュレーションと同じ条件で室内実験を行った(図-5)。書庫の背面に対してレーザー水準器で水平線を作りそこに直尺を固定して基準とした。ポールはやはり水準器を使って垂直にたてたが、原点を上部に設ける必要があるため、テープで背面に固定した。撮影位置と角度を少しづつ変えながら100枚の画像を撮影、P1からP9の測定を行い、誤差を計算した。

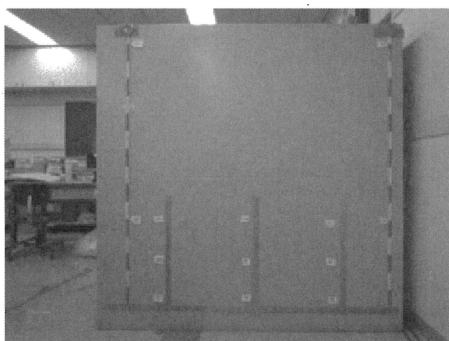


図-5 室内実験

4. 野外実験と画像解析 茨城県城里町の国有林の作業道において、断面測定の実験を行った(図-6)。



図-6 野外実験

ポールの水平距離および高低差は134.4, 2.25mmであった。測定では、コントロールポイントの位置はマウスでポイントして求めるが、断面に配置した蛍光色の球は路面の背景色に対して目立っており、画像解析をすればその位置が自動測定できることが期待された。そのため、次のような方法で球の位置を検出することとした。撮影された球はおよそ半径4ピクセルの円であり、その大きさの円パターンを用意する。画像上の1つの球をマウスでポイントして

パターンにその周辺の画像の色、つまり蛍光色の色をコピーする。探索を行う画像上1点 P_{ij} においてパターン上のすべてのピクセルとその位置に対応する画像上の色の差を計算する(図-7)。色の差としてはパターンのピクセルのRGB値と画像のピクセルのRGB値のそれぞれの成分の差の二乗和の平方根を用いた。パターン内の全ピクセルに対してこの値の総和をもとめて、 P_{ij} における値とし、ある閾値以下となるピクセルを検出するものとした。

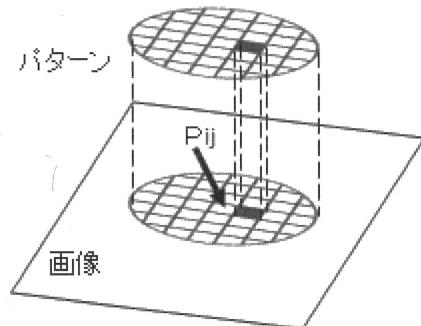


図-7 画像とパターン

III 結果

室内実験によるパラメータの算定の結果、最小二乗法による当てはめの残差は、100回の平均値で1.1であった。この値を σ_{uv} の推定値として使用した。図-8, 9はそれぞれシミュレーションと室内実験の結果である。シミュレーションでは誤差の平均は、ほぼゼロとなったので標準偏差のみを示した。図-9の平均は絶対値である。図-10に野外実験で得られた断面図を示した。断面図には1.3m幅の路面に15cm程度の起伏が生じていることを示されている。また図-11は図-6の一部分を拡大したものである。蛍光色のうち黄色のものをポイント、色の差の総和が2,200以下となったピクセルに対して白色の+記号を描いたものである。

VI 考察

シミュレーションの結果は全体的に、読み取る誤差のみ、水平誤差のみ、垂直誤差のみ、両方を加えたものの順で、誤差の程度を示す標準偏差が大きくなっている。室内実験の結果、誤差はほぼ2mm以内である。しかし、最下段であるP3, P6, P9のZ座標の誤差が大きい。水準器を使ってできるだけ正確に基準点は配置したものの、背面にテープで張り付けた影響などから、誤差が生じた可能性も考えられるが、他の測定値の誤差が2mm以内であることと、P3, P6, P9は目印をつけず直尺の交点として計測したので読み取る誤差が生じた可能性がある。読み取る誤差のみというのは基準点に誤差がない場合であり、ポール2本を使った屋外の測定では実現することは難しいであろう。そのことか

ら 5mm 程度の誤差でポールの設置ができれば、断面は水平位置、垂直位置とも 4mm 程度の誤差で測定できるものと考えられる。

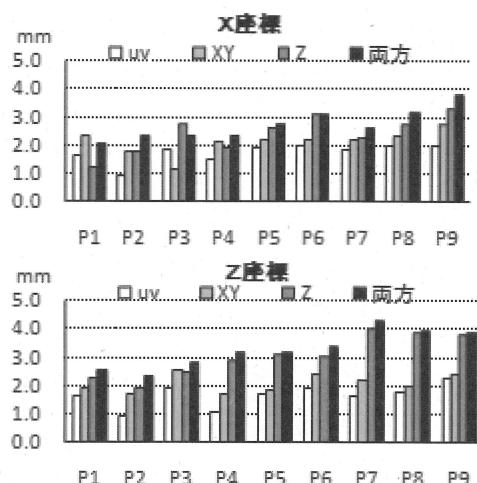


図-8 シミュレーションによる誤差の標準偏差

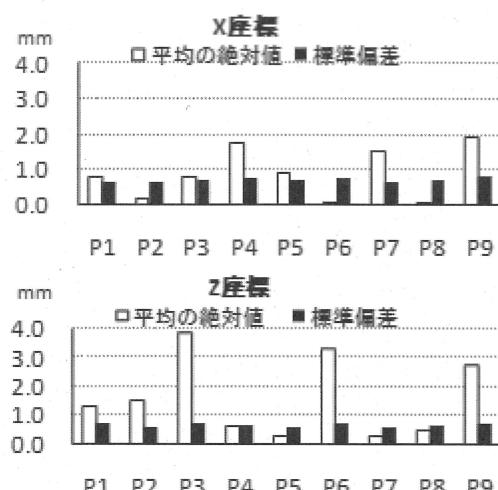


図-9 室内実験の結果

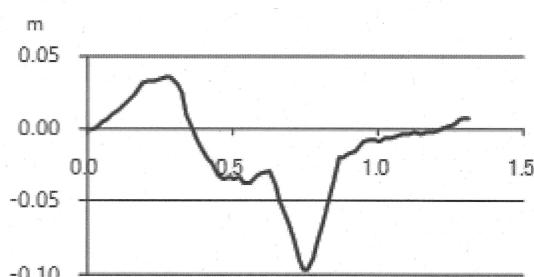


図-10 断面計測の結果

さらに、シミュレーションの結果からは X Y 方向より、Z 方向の誤差を与えた場合の測定誤差が大きく、測定には 2 本のポールの高さの差をできるだけ正確に求めることが重要であることを示している。室内実験での誤差の標準偏差は、シミュレーションに比べて小さいが、これは同じコントロールポイントをつかえば、撮影位置や撮影角度が多少違っても結果はほぼ一定であることを示している。

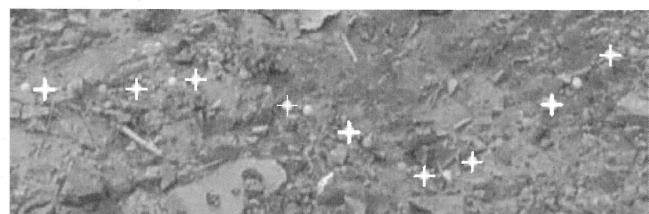


図-11 画像解析の結果

画像解析では、1つの球をポイントすれば、同色の球が、ほぼ、検出されることを確認した。蛍光色とはいえ光線にあたる部分はより白く、影はやや暗く撮影されるため、パターンに球の色をコピーして画像上で比較することは、天候や撮影時間による影響を除くのに有効な方法である思われる。実際に測定点を得るには、こうして抽出されたピクセルを球別にグループ分け、その最小値をもとめるといったアルゴリズムを追加する必要があるが、シモリをすべて同色とすることによって、コントロールポイントの4点、サンプルとなる球1点、合計5点をマウスでポイントすれば、断面が測定できるシステムが作成できるものと考えられる。しかし、障害物の陰に隠れた球が閾値によっては検出されないこともあります、視認による確認か、検出された球の隣接距離をチェックするなど対策は必要であろう。今回は 6mm のシモリを用いたことから、カメラの解像度の制限から測定幅は 1.5m 程度であるが、より大きな目印を用いれば、測定間隔は広がるもの、道の断面を一度に測定するシステムの構成も可能であろう。今後、実際の断面測定にこの方法を適用、目的に応じたシステム構成やより簡単なコントロールポイントの作成方法を検討していく。

引用文献

- (1) 近津博文：写真測量とリモートセンシング 32(6) : 22-24, 1993.
- (2) 鈴木秀典・梅田修史・山口智：レーザープロファイラによる路面形状の測量：日林関東支論 57 : 321-323, 2006.
- (3) 藤井喜雄・古谷士郎・酒井徹朗・佐々木功：林道路面におけるリル浸食の形状およびその変化：林道建設が自然植生、景観、土砂生産量に及ぼす影響とその対策に関する研究報告書 : 46-56, 1982.