ステレオ画像を使用する地形形状計測システム

正員 藤原伸行 ((株) 明電舎)

正員 恩田寿和 ((株) 明電舎)

非会員 五十嵐 貴 ((株) 明電舎)

正員 庭川 誠 ((株) 明電舎)

非会員 組田良則 ((株) フジタ)

非会員 小田博志 ((株) フジタ)

非会員 越山浩次 ((株) フジタ)

A Measurement System of the Shape of the Land Using Stereo Vision

Nobuyuki Fujiwara, Member, Toshikazu Onda, Member, Takashi Igarashi, Non-member, Makoto Niwakawa, Member (MEIDENSHA CORPORATION), Yoshinori Kumita, Non-member, Hiroshi Oda, Non-member, Hirotugu Koshiyama, Non-member (Fujita Corporation)

We have developed a measurement system of the shape of the land using a stereo vision. When we use a stereo vision system to measure points in the image, we need to know the parameters for each camera. Usually, the camera parameters are calculated from a camera calibration technique, but it is difficult to apply to outdoor scenes. Our system calculates the camera parameters using the surveying instrument and makes the surface data of the land using a stereo ranging technique. In this paper, we describe the stereo vision system, the system configuration, the process of the measurement system of the shape of the land and an experiment to measure an actual slope.

キーワード：形状計測, ステレオ画像, 地形形状, コンピュータビジョン
 Keywords: topographic surveying, stereo ranging, computer vision

1. はじめに

土木建設の分野でも情報化が進んでいる。筆者らは土木工事の中で土を動かす工種である土工事において、設計・施工管理を効率的に行うための情報化システムとして LASCULS を開発した⁽¹⁾。これは土地造成工事の設計から出来高管理業務を一貫して支援するシステムで、現場で計測したデータの取り込みから土量計算・作図・シミュレーションまでをサポートしており、既に多くの工事で使用されている。山間部における造成工事では山部を切り崩した土砂を谷部に移動することで平坦な土地を作る作業が行われるが、工事期間が数ヶ月以上にわたる大きな造成工事では掘削の現状把握と工程管理のために工事現場の測量が行われ、LASCULS に入力される。現状測量は工事現場の全範囲にわたって一定の間隔で行うのが原則であるため、現場では大きな負担となることもあり、1~3ヶ月ごとにしか行われていないのが現状である。また、現状測量は測量器または GPS を利用して行われ、計測対象個所にターゲットミラーまたは GPS アンテナを設置してその位置を計測する。この方法は平坦部では問題がないが崖部についてはターゲットミラーを設

置することができないため、直接計測を行わず崖部の上部と下部の計測値を補間して使用している。さらに、現況の視覚的な把握を目的に航空写真測量も併用されるが、撮影が晴天の日に制限されることや、解析に一定の時間がかかるために連続的なデータが得られず、補助的な使用に限定されている。

これらの問題点を解決するために地上から地形形状の計測をするアプローチが提案されている。関本ら⁽²⁾は、レーザ式形状認識装置を提案した。これはレーザレーダによる距離計測を二次元に走査することで対象物の形状認識を行う装置であるが、レーザレーダ装置自体が高価であり取扱にも注意が必要なので現場への導入が難しい。また、クラボウ⁽³⁾ではステレオ写真を使って地形形状を復元する提案もある。これは、対象物を複数の方向から撮影した 2 枚以上の画像を使用し、各画像中の 10 ~ 20 点程度の計測点に対応する点をオペレータが指定することでカメラパラメータを計算し、画像中に基準長さのスケールを置くことで形状データのスケーリングを行い、これを元に形状計算するものである。しかしながら、画像ごとに必要な 10 点以上の対応点の指定は煩雑な作業

であり、造成工事の現場に基準長さのスケールを設置することも現実的ではないため、これらの作業を自動的に行うことが求められている。

ところで、筆者らは2台のカメラを使用するステレオ計測、特にステレオ画像間の対応点探索に関してファクトリーオートメーションの分野で高精度ステレオ計測の実績がある⁽⁴⁾。ここでは2台のカメラを設置して事前のキャリブレーションを行い、2台のカメラの位置と傾きの関係を計算して高精度な三次元計測を実現した。さらに、筆者らの独自の手法である階層的ステレオマッチングなどを導入し、安定した対応点探索と対応間違えの排除などに有効な方法を提案した。そこで本研究では、カメラキャリブレーションを行うかわりにカメラの位置と姿勢について測量器を使用して直接計測することでカメラパラメータを設定し、これを使ってステレオ画像間の対応点探索を自動で行い三次元計測を行う地形形状計測システムを提案する。

本編では、ステレオ計測の原理と測量器を使用したカメラパラメータの取得方法、地形形状計測システムの構成と動作および対応点探索方法を含む独自の計算手順を述べ、実際の崖面の形状を計測した結果でその有効性を示す。

2. ステレオ画像を用いた三次元位置計測

(2.1) ステレオ計測の原理 対象地域の三次元的な位置を計測するために CCD カメラを2ヶ所に設置して同じ場所を撮影し、それより得られた1組のステレオ画像を使用した領域相関法によるステレオ計測を導入した。

屋外において対象地域を別々の場所から撮影した場合、同じ場所を撮影しても一般にはそれぞれの撮影位置によって撮影した画像の明るさが異なり、領域相関法による対応点探索を行った場合は相関値が低下するため、間違っただ対応点を検出したり対応点が検出できないといった問題を生じる。そこで、相関計算に正規化相関式(1)を使用して全体的な明るさの違いを吸収し、さらに、後述する対応点探索処理の工夫により精度の良い計測を行った。

$$\text{Corr}(x_R, y_R) = \frac{\sum_i L(x_L, y_L) \times R(x_R, y_R)}{\sqrt{\sum_i L(x_L, y_L)^2 \times \sum_i R(x_R, y_R)^2}} \quad (1)$$

ここで、 $L(x_L, y_L)$ と $R(x_R, y_R)$ はそれぞれ左右画像の濃淡値を示す。 $L(x_L, y_L)$ について全ての $\text{Corr}(x_R, y_R)$ を計算し、最大となる (x_R, y_R) を計算し、空間上の点の左カメラ座標 (x_L, y_L) および空間上の点の右カメラ座標 (x_R, y_R) を決定する。

ステレオ計測の模式図を図1に示す。図に示すように左右のカメラレンズ中心をそれぞれ (x_{oL}, y_{oL}, z_{oL}) および (x_{oR}, y_{oR}, z_{oR}) とし、左右カメラの CCD 上の座

図1 ステレオ計測の模式図

Fig. 1. Coordinate system of stereo ranging

標をそれぞれ (x_L, y_L, z_L) および (x_R, y_R, z_R) とすると、計測点の位置 (x_i, y_i, z_i) は式(2)で求められる⁽⁷⁾。

$$\begin{cases} x_i = t_1(x_L - x_{oL}) + x_{oL} = t_2(x_R - x_{oR}) + x_{oR} \\ y_i = \{t_1(y_L - y_{oL}) + y_{oL} + t_2(y_R - y_{oR}) + y_{oR}\} / 2 \\ z_i = t_1(z_L - z_{oL}) + z_{oL} = t_2(z_R - z_{oR}) + z_{oR} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\begin{vmatrix} x_{oR} - x_{oL} & z_{oR} - z_{oL} \\ x_R - x_{oR} & z_R - z_{oR} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_L - x_{oL} & z_L - z_{oL} \\ x_R - x_{oR} & z_R - z_{oR} \end{vmatrix}} \\ t_2 = \frac{\begin{vmatrix} x_{oR} - x_{oL} & z_{oR} - z_{oL} \\ x_L - x_{oL} & z_L - z_{oL} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_L - x_{oL} & z_L - z_{oL} \\ x_R - x_{oR} & z_R - z_{oR} \end{vmatrix}} \end{cases} \quad (3)$$

本来ならば点 p_1, p_2 は左右カメラからの2つの光束の交点として三次元空間で一致するのだが、実際にはレンズ歪みや観測誤差などのため僅かにズレが生じる、そこで計測点 (x_i, y_i, z_i) を式(2)により計算する。

(2.2) 測量器を用いたカメラ位置姿勢データの検出 ステレオ計測によって対象物の位置を計測するためにはカメラの位置と姿勢を正確に求めておく必要がある。カメラの位置姿勢を求める方法として、位置の分かっているランドマークを計測範囲に設置し、そのランドマークを撮影した画像とランドマークの位置データを用いてカメラの位置姿勢を計算するカメラキャリブレーションが広く利用されている⁽⁶⁾。実験室内にカメラを設置したような場合はそのようなランドマークを用いて一度カメラキャリブレーションを行っておけば良いのだが、屋外の対

象地域の形状計測を行う場合は撮影場所が変る度にカメラ位置姿勢が変化するため撮影する対象地域毎にランドマークを設置してカメラキャリブレーションを行う必要がある。また、地形形状の計測は対象地域が広くランドマークを広範囲に設置する必要がある、さらに崖や急斜面などにランドマークを設置することは非常に困難な作業であるため、屋外の地形形状を計測するためのカメラ位置姿勢計算方法としてはランドマークを用いたカメラキャリブレーションによる方法は現実的に適用が難しい。

そこで我々はカメラの位置と姿勢を検出するため測量器を利用する方法を提案する。測量器は我々が計測対象としている土木建設現場に常備しており、測量器自身で自己位置、測量器の向いている方位角、仰角を計測することができる。そこで、図2に示すように測量器の上部にカメラを固定し、測量器を動作させてカメラを計測対象地域に向け撮影することで、測量器の位置、角度データとカメラ固定器具の設計データから、ステレオ計測に必要なカメラの位置姿勢を計算することができる。

今回の計測には「自動追尾トータルステーション」と呼ばれる光波測量器を利用した。この測量器は、パソコンからの制御によりプリズムの自動検索から自動追尾・観測を実現し、移動体計測、定点観測の無人化・システム化が可能である。その仕様は以下の通りである。

表1 測量器の仕様

Table 1. Typical performance of the surveying instrument

追尾角速度	10°/秒
視準精度	2' (移動時: 8°/秒), 3" (静止時)
測距範囲	7 ~ 1000m (視程 20km)
測距精度	ファイン測定 ± (3mm + 2ppm × D) m.s.e トラック測定 ± (10mm + 2ppm × D) m.s.e
測角精度	3"

図2 測量器に設置したカメラ

Fig. 2. A surveying instrument and a camera

3. 地形形状計測システムの構成

〈3・1〉 地形形状計測システムの構成 地形形状計測システムの構成を図3に示す。地形形状計測システムは

大きく2つのサブシステムに分けられる。1つは地形計測データ収集システムで図3において点線で囲んだ部分である。これはカメラ、測量器、データ収集用パソコンから構成されており、計測する地形データの収集のため屋外へ行く際はネットワークから切り離して使用する。データ収集時はカメラからの画像データの保存、測量器からの測量データの保存、測量器の操作、形状計測データの設定を行い、データ収集後はネットワークに接続して、収集した画像や形状計測データをネットワーク上の指定の場所へ保管する。もう1つは三次元形状計算システムで、常時ネットワークに接続した三次元形状計算用パソコンから構成される。地形形状計測に使用する画像や形状計測データをネットワーク上の指定の場所から読み込み地形形状の計算を行う。システム内のデータの流れを図4に示す。

図3 システム構成

Fig. 3. System configuration

〈3・2〉 地形形状計測のプロセス 地形形状計測のフローチャートを図5に示す。地形形状を計測するためには先ず測量器位置姿勢の基準となるローカル測量座標系を設定する。これには測量器から見える位置に2つの目標物を設置することにより行い、これらの目標物を通る直線を基にローカル測量座標系を設定する。次に撮影位置に測量器を設置し2つの目標物を測量することでローカル測量座標系における測量器の現在位置を計算する。こうして測量器の位置を求めた後計測対象地域の撮影を行い、その時の測量器のデータや画像内での計測範囲等のデータをまとめて形状計測データを設定する。測量器

図4 データフロー

Fig. 4. Data flow of the system

位置の計算、対象地域の撮影、形状計測データの設定はステレオ計測のために左右画像それぞれの撮影位置について行う。地形形状計測に必要なデータを収集の後、三次元形状計算システムで地形形状の計算を行う。三次元形状計算のプロセスは、まず、ステレオ画像とそれに付随する形状計測データを基に地形形状データを作製する。次に形状計測データの表示指定に従って等高線表示データと断面形状表示データを計算する。

4. 地形形状計算

〈4・1〉対応点探索 地形形状計算では、対象地域を撮影した画像上に矩形の計測範囲を設け、その矩形範囲において指定した間隔で格子状に計測点を設定し、その計測点について位置計測を行い、計測した点群のデータとして地形形状データを作製する。この際計測点の位置計測方法としてステレオ計測を用いるのだが、屋外にある地形形状を計測するために対応点探索方法を工夫した。まず撮影位置や撮影時間の差によって生じるステレオ画像間での明るさの違いについては相関計算に正規化相関式(1)を用いて対処することを先に述べた。地形を計測する場合は、対象物は土砂、芝、林、崖といった自然な景観が対象となる。この場合侵食による細かい溝や土の色、もしくは植物や岩石の個体差等でそれぞれ見た目に差はあるものの画像としては同じような模様が連続する状況が多く発生する。このような画像に対して今回採用した領域相関法にて対応点探索を行う場合、計測点近傍

図5 地形形状計測のフローチャート

Fig. 5. Flowchart of a measurement of the land

の画像小領域に含まれる画像データと似た領域が参照画像側の探索範囲に複数点存在する事が多く、左右画像の見え方によっては誤対応点を検出する場合があります、これが地形形状データのノイズとなる。

我々は以前ファクトリーオートメーションの分野において工業部品の三次元位置決めにステレオ計測を適用した際同じような問題に遭遇した⁽⁴⁾。図6に工業部品の三次元位置を計測するため、部品上に計測点を指定し、その計測点について画像小領域のサイズを変えて対応点探索を行った時の探索位置に対する相関値のグラフを示す。この例では真の対応点が72[dot]の位置に存在する。サイズAの場合は相関値の最大となる点が36[dot]の位置にあり誤対応となっている。また、サイズAのような小さな画像小領域ではその画像データと似た領域の位置に急激なピークを持つグラフとなり、サイズ4A, 9Aのような大きな画像小領域では画像データと似た領域の位置に相関値のピークが存在するものの、そのピークが明確でない緩やかなグラフとなった。そこで対応点探索方法として、まず相関値グラフのピークがはっきりした小さな画像小領域の対応点探索により複数個の対応点の候補を検出し、次に先に検出した対応点候補に対して大きな画像小領域により相関値を計算し、大きな画像小領域による相関値が最も良い対応点候補を対応点として選択する、階層的な対応点探索方式を用いることで、類似のテクスチャが連続する状況でも正しい対応点を検出できるように対処し、工業部品による実験では位置決め精度の

図6 画像小領域のサイズに対する相関値
Fig. 6. Correlation chart of stereo analysis

向上に効果があることを確認した。

そこで我々は、地形形状のように類似のテクスチャが連続した状況においても正しい対応点を検出する方法として、工業部品の三次元位置決めに用いた階層的な対応点探索方式を用いることにした。これに加え、例えば左画像を原画像、右画像を参照画像とした場合、対応点探索では左画像で指定した計測点近傍画像データと同じ画像データをもつ対応点を右画像から探索するのだが、探索された対応点の正当性を評価するため、対応点探索後に右画像上の対応点近傍画像データと同じ画像データを左画像上で探索し、その位置が元の計測点と一致するかどうかを確認することで対応点間違いの減少を図った。

〈4・2〉計測ミスの排除とデータ補間 領域相関法による対応点探索を行った場合、その原理上一般的に前述した様々な工夫を行ったとしても何点かの誤対応による計測ミスが発生し、また、相関値が低くて対応点が検出できないため計測データの無い部分が存在する。そこで良好な地形形状データを得るためには、ステレオ計測によって求められた点群のデータから計測ミスを排除し、さらにデータ抜けを補間して滑らかな形状を復元することが重要になる。まず計測ミスについて、地形形状を計測対象とした場合スパイクノイズのような地上に針のよう

に突き立った形状もしくは氷柱のように急激に低くなった部分という形状は存在しないものと考えて良い。そこで計測した点の近傍に対してその点がスパイクノイズのように著しく異なる位置データを持つ場合はそれを排除することとする。次に計測データの無い部分について、地形形状を計測対象とした場合計測範囲に空が入らない限りデータの無い場所は有り得ない。そこでデータ抜けのある部分は抜けた部分の周りの位置データを用いて補間を行いデータの穴を埋めることとする。

5. 実験と考察

地形計測データ収集システムを使用して実際の地形を撮影し、収集した画像と測量データを元に設定した形状計測データを用いて対象地域の地形形状データを作製した。図7, 8はその時撮影した法面の左右画像である。これら是对岸約580[m]の位置からカメラ間距離約50[m]で撮影した。このステレオ画像に対して左画面上で法面全体を囲むように計測範囲を設定し、横方向に2[dot]縦方向に4[dot]の間隔で格子状に計測点を設定し、ステレオ計測を行って各計測点の位置を求め、計測ミスの排除とデータ欠落部分の補間を行って作製した地形形状データを距離画像で示したものが図9である。この距離画像は計測した地形の位置が手前にある程明るく、奥へ行く程暗く表示している。地形形状データに対して20[m]おきの等高線を計算したものが図10である。また、地形形状データの中央右側の断面形状を図11に示す。この断面形状の表面位置を1/25,000スケールの地形図から抽出したデータと比較したグラフを図12に示す。今回は20[m]間隔で9コの断面形状を計算し地形図から抽出したデータと比較したところ、地形図との位置偏差は5.476[m]であった。これはカメラから対象地形までの距離の0.944%にあたり、撮影距離に対して1%以下の計測精度で地形形状データを計測することができた。

作製した地形形状データの距離画像を見ると下のほうが手前にあり上に行くに連れて奥へ離れて行く形状が良く

図7 法面画像(左画像)
Fig. 7. Left image of the slope

図8 法面画像(右画像)
Fig. 8. Right image of the slope

図9 地形形状データ
Fig. 9. Landform of the slope

図10 等高線表示
Fig. 10. Contour map of the slope

図11 断面形状表示
Fig. 11. A section of the slope

表現されている。元の左右画像ではかなり明るさの差があるが、地形形状データが良好に作製されたことから考えて、この濃淡差の対処については対応点探索の相関式に正規化相関式を採用した効果が現れていると考えられる。ただ距離画像左上の方がやや手前に出ているがこれは対象地域ではない後ろの山や空が矩形計測範囲に入ったことによるものと思われる。インタフェース上の使い易さから計測範囲の設定を矩形範囲としているのだが対

図12 断面形状の位置
Fig. 12. the position of a section of the slope

象範囲のみを計測するためには折線で囲む等、より細かな計測範囲設定方法を採用する必要があるものとする。等高線表示を見ると計測ミスを排除してスパイクノイズを取り除く処理を行ったものの、等高線にしてみると凹凸の変化が大きく残った。計測ミスの排除は検査対象点に対してごく近傍の位置データとの比較によって処理を行うため針のように急峻な変化に対しては有効であった。しかしながら、等高線は本来もっと緩やかな曲線となることが望ましいので、等高線に対しては平滑化処理を行ってもっと滑らかなものに加工すべきである。等高線の平滑化については今後検討したい。計測した法面の全体の形状を考えた場合、等高線表示全体を見ると直線的な等高線がある間隔においてはほぼ順序よく並んでおり、また斜面が中央やや左で折れ曲がっている様子が良く再現されている。また断面形状表示を見ると、山肌を削り取った人工的な直線斜面の状況が良く再現されており、地形図と比較したデータでは撮影距離に対しての1%以下の計測精度を実現し、ステレオ画像から良好に地形形状が計測できた。

6. まとめ

ステレオ画像を使用する地形形状計測システムを提案した。このシステムはステレオ計測に必要なカメラの位置と姿勢のデータを測量器を使用することで正確に求め、撮影したステレオ画像とその時の測量データを元に設定した形状計測データを用いて対象地域の地形形状データを作製する。このシステムを用いて実際に崖部の地形を撮影し地形形状データを作製する実験を行った。実験で作製した地形形状データの断面形状表示データと市販の地形図を比較し良好な結果が得られることを確認した。

謝辞 本研究はIPA（情報処理振興事業協会）の次世代アプリケーション開発事業の助成を受けて行った。

(平成13年7月10日受付, 同14年1月15日再受付)

文 献

- (1) (株)フジタ: ICHIKEN Operation Guide, 1995
- (2) 関本, 久光, 石井: レーザ形状認識装置, 石川島播磨技報, Vol.38, No.4, 1998
- (3) 倉敷紡績(株): Kuraves-K 三次元写真計測システム(カタログ), 2001
- (4) 恩田, 庭川, 藤原: ステレオ法を用いた特徴マッチングによる物体認識- 鋳造部品の三次元視覚位置決め -, 平成9年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, pp.21-24, 1997
- (5) 藤原, 恩田: 三次元部品位置決めのための階層的ステレオ対応点探索, 平成11年電気学会産業応用部門大会講演論文集 [I], pp.497-498, 1999
- (6) 鈴木, 森谷, 砂原: 拡張DLT法による両眼立体視, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '95 講演論文集, Vol.B, pp.1090-1093, 1995
- (7) (社)日本写真測量学会: 解析写真測量 改訂版, (社)日本写真測量学会, 1997

藤原 伸行 (正員) 1967年生. 1991年3月山形大学機械工学科卒業. 1993年3月東北大学大学院修士課程機械工学科修了. 同年(株)明電舎入社. 以来画像処理およびコンピュータビジョンの実用化開発に従事. 現在, 同社総合研究所主任. 1999年日本ロボット学会研究奨励賞受賞. 計測自動制御学会, 日本ロボット学会正会員.

恩田 寿和 (正員) 1954年生. 1977年3月東京工業大学電子物理工学科卒業. 1979年3月東京工業大学大学院電子システム専攻修士課程修了. 同年(株)明電舎入社. 以来電子回路応用, マニプレータ制御の研究開発を経て, 画像処理およびコンピュータビジョンの実用化開発に従事. 現在, 同社総合研究所主管技師. 1997年電気科学技術奨励賞オーム技術賞受賞. 日本ロボット学会正会員. 博士(工学).

五十嵐 貴 (非会員) 1970年生. 1993年3月東京大学機械情報工学科卒業. 1995年3月東京大学大学院機械情報工学専攻修士課程修了. 同年(株)明電舎入社. 以来パルス電源の研究開発を経て画像処理およびコンピュータビジョンの実用化開発に従事. 日本ロボット学会正会員.

庭川 誠 (正員) 1967年生. 1989年3月山梨大学精密工学科卒業. 1991年3月山梨大学大学院修士課程精密工学専攻科修了. 同年(株)明電舎入社. 以来画像処理およびコンピュータビジョンの実用化開発に従事. 現在, 同社総合研究所主任. 1999年電気学会論文発表賞受賞. 電気学会正会員.

組田 良則 (非会員) 1960年生. 1983年3月名古屋大学工学部建築学科卒業. 同年(株)フジタ入社. 建築系施工管理を経て, 1986年に技術開発系部署に転属. 以来建設工事関連における省力化・自動化・情報化技術開発に従事. 現在, 同社技術センター イチケン 担当課長.

小田 博志 (非会員) 1965年生. 1989年3月日本大学理工学部海洋建築工学科卒業. 同年(株)フジタ入社. 建築系施工管理を経て, 1992年に技術開発系部署に転属. 以来無人化施工ロボット制御技術開発やWEBアプリケーション開発に従事. 現在, 同社技術センター イチケン 主査.

越山 浩次 (非会員) 1952年生. 1975年3月工学院大学建築学科卒業. 同年フジタ工業(株)入社. 社名変更により現在(株)フジタ. 以来建築設備の設計とエンジニアリング設計に従事. 現在, 同社建築設計センター設備設計部リーダー