

広角アクションカメラを用いた災害初動調査システムの開発

○山田 耕司*¹ 根本 樹李*²

キーワード：防災 災害調査 広角アクションカメラ パノラマ展開

1. はじめに

建築基準法に定められる耐震設計法は、1978年宮城県沖地震や、1995年兵庫県南部地震などの巨大地震の被害を踏まえて変遷を重ねてきた。私たちは稀に起こる地震災害から被害の教訓を学び、今後活かしていく必要がある。近年危惧されている南海トラフ地震などの巨大地震が発生した際、迅速に被害の全体像を把握し、特殊な破壊形状を持つ建物を拾い出すことで、今後の耐震設計法に反映させることができる。

まず、本稿でいう初動調査の位置づけを図1に示す。これまでの初動調査は徒歩¹⁾や自動車²⁾、近年ではドローン³⁾によって行われている。しかし、ドローンでの初動調査の場合は、上空からの撮影となり、1995年の兵庫県南部地震で多数生じた中間層崩壊や外壁落下の破壊等の位置の特定が困難であると想定される。また、ドローンの稼働時間は約15~30分と短い上に高価である点から、本稿での使用は断念した。一方、自動車の場合は、災害直後の混乱や瓦礫による通行制限などが予想され、円滑に調査することが困難な状況であると考えられる。

そこで本稿では、発災後初期に特殊な破壊形状を持つ建物を拾い出すことを目的とし、原動機付自転車または自転車に広角アクションカメラを設置し、沿道の建物を撮影する災害初動調査法を提案する。コスト面を考慮し撮影するカメラが1台で済むよう、広角でGPS機能を搭載し、かつ長い稼働時間を要しているE社製のカメラを使用した。

この調査法は、アクションカメラで動画と位置情報を取得し、後にそのデータを処理し詳細調査建物を特定する方法である。なお、本稿の一部は既発表⁶⁾である。

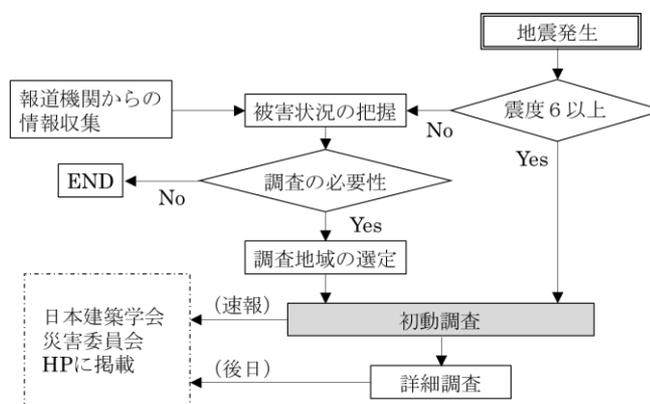


図1. 初動調査の位置づけ

2. システムの概要

最終成果として図2に示すように、1つのWebページ上に、広角アクションカメラを使用して取得した動画と、パノラマ展開で作成した正面画像、撮影地点の位置情報を表示する。本稿では、3章でパノラマ展開に関して説明し4章でシステムを活用した試験調査報告を行う。

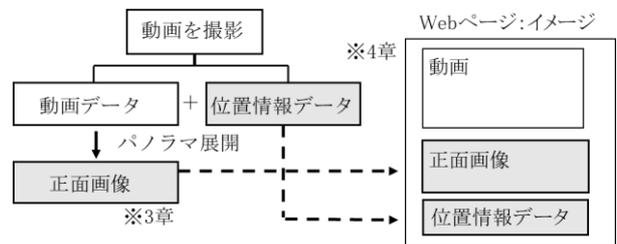


図2. システムの概要

3. パノラマ展開の概要

3.1. 画像処理範囲の設定

本稿では、JavascriptとHTML5を用いて³⁾、ピクセルの色情報を補間式で座標変換させてパノラマ展開を行った。パノラマ展開をする際、画像の処理範囲を定める必要がある。実際の災害調査では主に道路から建物の撮影となるため、校舎を用いて初動調査時の撮影状況を仮定して撮影した(図3)。真横を0°とすると、左右約40°までの画像を処理範囲として設定する。

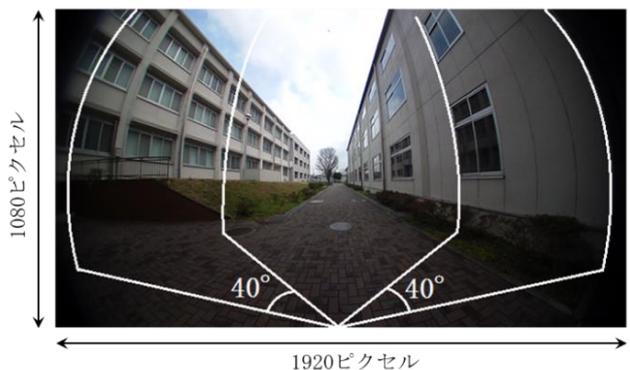


図3. 画像処理範囲

3.2. 補間式の算出方法

本節ではパノラマ展開を行うために、広角アクションカメラで撮影した際の歪みの補間式を算出する。

50mm 角のグリッド用紙を床に対して垂直に貼り付け、方眼紙から 300mm、床から 495mm の高さの点に方眼紙と平行方向を撮影できるように広角アクションカメラを設置し、写真を撮影した。撮影した画像のグリッド交点ピクセル値をもとに補間式を算出する。

画像の歪みは左右対称であることから、はじめに画像左側の画像処理を行い、右側は左側で算出した補間式を対称補間した。図 4 に示すように、画像の左上を原点(0,0)とし、元画像の交点ピクセル値を(x,y)、グリッド用紙のマス目座標を(X,Y)とした。マス目座標 (X,Y) に対応する元画像(x,y)の方眼紙の交点のピクセル値をもとに、最小二乗法を用いて近似される式として求めた。

式(1)によって求めた $f(X,Y)$ 、 $g(X,Y)$ と実際のピクセル値の差を 2 乗した和を求め、総和が最小となる係数 A_{ij} 、 B_{ij} を算出した。算出方法としては、表計算ソフトのソルバー機能を用いて最適値を求めた。

$$\left. \begin{aligned} X(x,y) = f(X,Y) &= \sum (A_{ij} \times X^i \times Y^j) \\ Y(x,y) = g(X,Y) &= \sum (B_{ij} \times X^i \times Y^j) \end{aligned} \right\} \dots \text{式(1)}$$

A_{ij} 、 B_{ij} : 係数

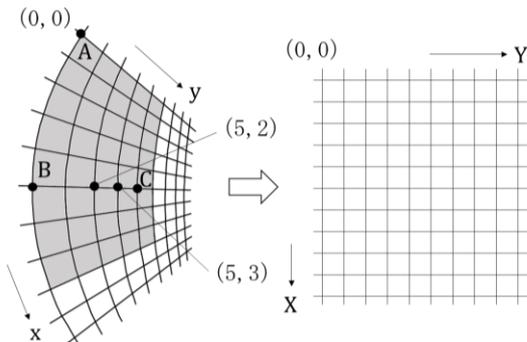


図 4. 元画像(x,y)とマス目画像(X,Y)

3. 3. 画像処理評価

本節では、画像処理での補間式を提案し精度を評価することで、補間式を選定する。

ここでは、算出方法の違う補間式 1~3 を提案する。まず、補間式 1 は図 4 の A 点を原点に、着色部内の交点ピクセル値を代入して算出した式である。次に補間式 2 は B 点を原点に、補間式 3 は C 点を原点に全ての交点ピクセル値を代入して算出した式である。図 5 で示すように、デジタルカメラ(焦点距離 28mm)で撮影した画像と各補間式を用いて画像処理した画像を比較し、次に示す 2 つの評価方法で画像の精度を検討する。

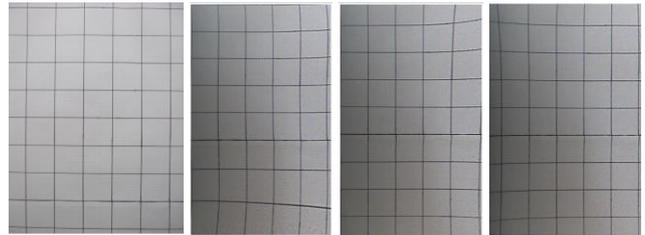
まず、1 つ目の評価 I の算出法を式(2)、図 6 に示す。画像の中央にある交点(5,2)と(5,3)の間のピクセル距離(L)を基準とした理論値と、取得したマス目画像の各交点間距離の実測値との相対誤差を算出し、評価 I と定義する。

次に、2 つ目の評価 II の算出法を式(3)、図 7 に示す。交点(5,2)と(5,3)の中央点(S_0, T_0)を中心とした理論値と、中

心から各交点距離の実測値との相対誤差を評価 II と定義する。評価 I、II ともに数値が小さいほど、画像処理精度が高いと評価できる。また、S, T は変換したマス目画像の交点ピクセル値、X, Y は元画像のマスの値とする。

$$\text{評価 I(\%)} = \frac{|S_{i+1} - S_i| - L}{L} \times 100 \quad \dots \text{式(2)}$$

$$\text{評価 II(\%)} = \frac{\sqrt{|S_i - S_0|^2 + |T_j - T_0|^2} - \sqrt{(X^2 + Y^2)L^2}}{\sqrt{(X^2 + Y^2)L^2}} \times 100 \quad \dots \text{式(3)}$$



デジタルカメラ 補間式 1 補間式 2 補間式 3

図 5. 各手法で取得したマス目画像

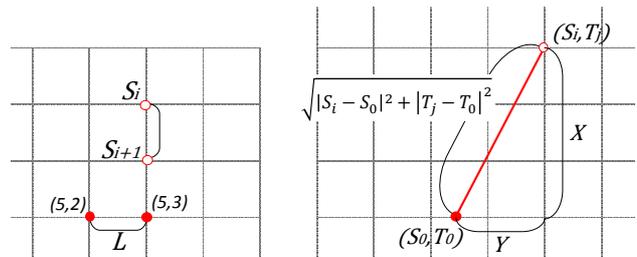


図 6. 交点間距離の評価

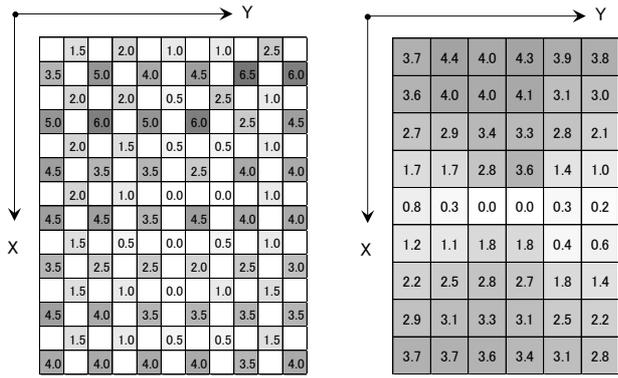
図 7. 交点位置の評価

はじめに、a)のデジタルカメラに関しては、中心から離れるほど、評価 II の精度が低下していることが分かる。これは、デジタルカメラは中心投影画像であり、正射投影法を理論値とした評価では、中心から離れるにつれて誤差が大きくなるからである。

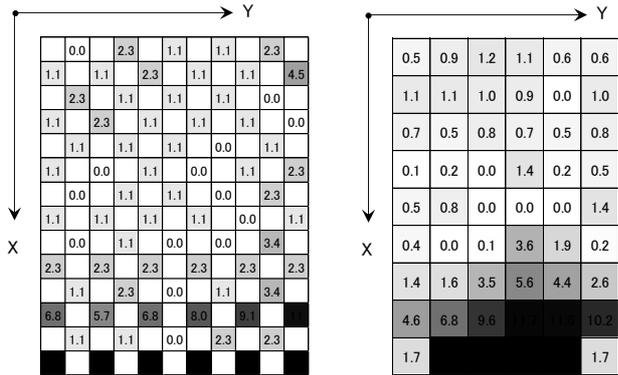
次に、b)の補間式 1 で取得した画像では、X が増加すると、評価 I、II ともに精度が低下していることが分かる。これは、補間式 1 では原点を(0,0)として、最適値を算出したため、原点からの距離が大きい点、いわゆる X の値が大きい点での精度が低下したのではないかと考えられる。

また、c)の補間式 2 で取得した画像では、原点を(5,0)としたため、補間式 1 と比較して、X の値が大きい点での精度は低下していないことが分かる。しかし Y の値が大きい点で、局所的に評価値が 12% を超える点がある。

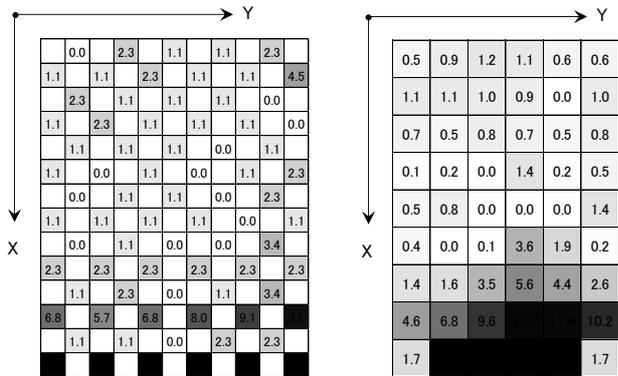
一方、d)の補間式 3 では X と Y が小さい点で局所的に評価値が 8% を超える点がある。しかし、全体の精度は高く、デジタルカメラや補間式 1, 2 と比較し、大きな誤差がないといえる。したがって、本稿では補間式 3 を選定し、正面画像を取得する画像処理を行う。



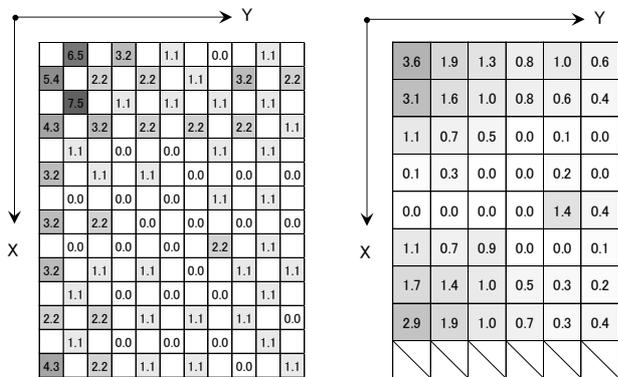
a) デジタルカメラ



b) 補間式 1



c) 補間式 2



d) 補間式 3

評価 I

評価 II



図 8. 画像処理評価結果

4. システムを活用した試験調査報告

本章では実際の災害初動調査を想定し、豊田市内で古い木造住宅の町並みが健在する上挙母地区（A～C 区）および豊田市越戸地区、豊田市三河八橋地区、鳥取市白壁土蔵群を対象に試験調査を行った(図 9)。事前に走行ルートを記入した地図をもとに走行し、広角アクションカメラを自転車の前方に取り付け、沿道の建物を撮影した。

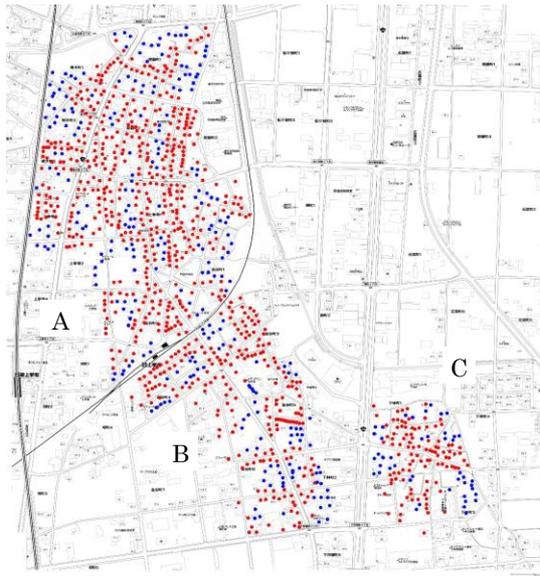
4. 1. 調査効率の検討

本節では、調査効率（調査区域面積／調査時間、 $\text{km}^2/\text{分}$ ）と調査割合（調査済み棟数／調査区域内全棟数）を検討する。ここで、調査済み建物とは試験調査によって撮影した動画を確認し、建物の外観を一方向からでも確認できたものとした。その際、図 9 中の赤丸は調査済み建物、青丸は未調査建物を示す。また、調査済み建物の識別における特例を図 11 に示す。塀や石垣等の工作物に囲まれている場合は道路から調査した場合でも、建物の破壊状況は確認し難いと考え調査済みとし、植栽等の非工作物によって建物の外観を確認できなかった場合は未調査建物とした。図 10 に調査効率と調査割合を示す。

図 10 より、A、B 区での調査効率はともに約 $0.01(\text{km}^2/\text{分})$ であるが、C 区の調査効率は低いことが分かる。これは C 区では自転車を手押しする荒れた道路が多くあったことが原因である。また、鳥取市では、地図なしで方位や調査範囲の面積を把握することが困難であったこと、地面の浮き上がりや沈下・道路に瓦礫が散乱した地点が多くあったこと、調査実施中に地元の方や通行者と挨拶を交わす等で足を止めることが多くあったことにより、調査効率が低下した。したがって、効率よく調査できれば、一般道路を走行する際の調査効率は約 $0.01(\text{km}^2/\text{分})$ 程度である。

一方で、本稿で用いる広角アクションカメラの稼働時間は 150 分間である。したがって、調査効率 $0.01(\text{km}^2/\text{分})$ より、1 台のカメラで最大約 $1.5(\text{km}^2)$ の範囲での初動調査が実施できると言える。2016 年 4 月に生じた熊本地震では、益城町役場を中心とした約 $1.44(\text{km}^2)$ で悉皆調査が実施された⁴⁾。したがって、熊本地震での中心被害地を調査するには、本研究で使用した 1 台のカメラで調査可能であるといえる。

次に調査割合を考察する。三河八橋を除けば、調査効率は、約 70% であると言える。また 30% の未調査建物の要因としては、非工作物による障害や、道路から奥まった土地に建っていることが挙げられる。三河八橋の調査効率の低い要因として、図 9 より走行ルートの網羅不足が原因による未調査建物が多々あることが分かる。これらを未踏査建物と称し、全棟数から除外して調査割合を計算すると、調査割合は 70% 程度となり、他の地区とほぼ同等となる。したがって、本提案法を用いる場合でも、入念な地域の事前調査が必要といえる。



A) 豊田市上挙母地区



b) 豊田市越戸地区



c) 豊田市三河八橋地区



d) 鳥取市白壁土蔵群

図 9. 試験調査地区

4. 2. 位置情報精度の検証

本節では、システム上の位置情報と、画像で表示された建物の実際の位置情報との精度を検証する。試験調査実施後、本システムを稼働し撮影開始 10 分毎に 70 分までの計 7 地点の位置情報と沿道建物画像を取得する。そして、システム上に表示された位置情報と、実際の沿道建物の位置情報との直線誤差を計測する。計測結果を表 1 に示す。

撮影開始 20 分後や 50 分後の地点は、下り坂で自転車の速度が速かったため誤差が大きくなった。また、7 地点における平均の直線誤差は 17.8m である。これは、本研究で用いるアクションカメラは位置情報を 5 秒毎に収録するため、自転車の平均速度は 20(km/h)で走行すると、5 秒間で最大約 28m の誤差が生じる。したがって、平均 17.8m の誤差は妥当であり、20m 圏内であれば、取得した位置情報をもとに現地調査を実施可能であると考えられる。

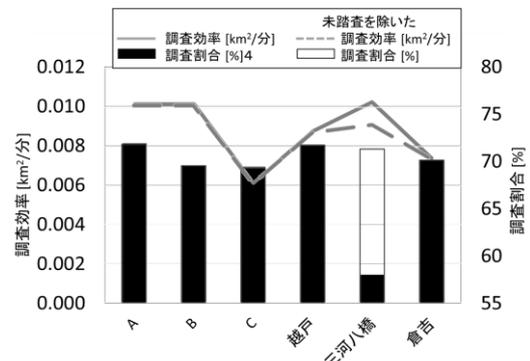


図 10. 調査効率と調査割合



図 11. 試験調査地区

表 1. 位置情報の精度

開始後(分)	直線誤差(m)
10	21.0
20	28.1
30	18.2
40	10.0
50	22.9
60	11.3
70	13.4

Ave. 17.8

5. システムの実施例

まず、開発したシステムの Web ページの画面を図 10 に示す。

システムの実行方法としては、ウェブページ上の再生ボタンを押すと動画が再生され、緯度経度情報が表示される。正面画像取得ボタンを押すと動画は停止し、停止時の画像を取得してパノラマ展開から正面画像を表示する。したがって初動調査時に動画を再生し、被害状況の気になる点があった時に正面画像取得ボタンを押す、建物の破壊形状などを確認する。その後、現地調査が必要な建物であるかを検討し、必要であれば位置情報をもとに、現地調査を行うことを可能とする災害初動調査システムである。

また本システムの開発、実行に用いたパーソナルコンピュータ (PC) の仕様を表 2 に示す。



再生 正面画像取得

831.7523577



【位置情報】

【緯度経度】 35.07631833333333,137.15212333333332

図 10. Web ページの災害調査システム

表 2. 用いた PC の仕様

	仕様
CPU	Intel® Core™ i7-3537U CPU@2.00GHz
OS	Windows 10 Home
メモリー	8GB
Webブラウザ	Internet Explorer®11

6. おわりに

本稿では災害初動調査として、広角アクションカメラを用いて災害地の動画と位置情報を取得し、後にそのデータを処理して詳細調査建物を特定するためのシステムにつ

いて報告した。GPS 搭載の広角アクションカメラを用いることで 1 台のカメラ済み、低コストで且つ既存の自転車や原動付自転車等に対して、容易に取り付けが可能な初動調査システムの提案を行った。

以下に本研究で得られた知見を整理する。

1. グリッド用紙を撮影した際に生じる湾曲から、レンズの歪みに対する最適な補間式を算出した。この補間式をもとにパノラマ展開を施すことで、視覚的に建物の被害状況を判断可能な画像を提示することが可能となった。
2. 本システムでは、最大の調査効率が約 0.01(km²/分)でカメラの稼働時間が最大 150 分であることから、カメラ 1 台で最大調査可能面積は約 1.5 km²であることが分かった。また、撮影された動画データとともに、収録された位置情報を表示することで、後日現地での詳細調査が可能なシステムを開発した。
3. 試験調査の結果調査地域の約 70%の建物を調査可能であることが分かった。

本システムの目的「発災後初期に特殊な破壊形状を持つ建物を拾い出すこと」に対し、調査地域の建物の 70%の正面画像を 1km²を 2 時間弱で収集できる利点がある。しかし、実際に被災地で調査を実施する時は、対象地区の地理的条件によって自転車のみでは調査しきれない可能性がある点と、被災者が調査員に不信感を持たずに、安心して避難や生活できる調査方法を検討しなければならない点の、2つの問題点が挙げられる。前述に関しては、必要に応じて自動車・徒歩を併用して調査を実施することで解決できる。また後述に関しては、調査目的や調査員の所属を明確に表記する等、調査員側から情報発信を実施することで軽減できると考えられる。

【参考文献】

- 1) 国土交通省 国土地理院 : UAV による動画
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>
- 2) 日本建築学会 災害委員会
<http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/saigai/>
- 3) 国土交通省 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jp/quake/>
- 4) 松田晃一: HTML5+Javasprict による画像・動画画像処理入門 2014. 6
- 5) 高山峯夫: 調査概要, 「2016 年熊本地震」地震被害調査速報会, pp. 3-11, 2016. 5
- 6) 根本樹生, 山田耕司: 広角アクションカメラを用いた災害初動調査システムの開発, 第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, H01, pp. 85-88., 2016. 12

*1 豊田工業高等専門学校 教授 博士(工学)

*2 大成建設

Initial Damage Investigation with a Wide-angle Action Camera

○Koji YAMADA*¹

Juri NEMOTO*²

Keywords : Disaster Prevention, Damage Investigation, Wide-angle Action Camera,
Panorama Expansion

The transportation devices for initial damage investigations are on foot or by car. The initial damage investigation needs a fast and whole investigation method. Recently, drones are used to take pictures of damages. The picture by drone is a bird's-eye photo, which is not an elevation surface of buildings. The traditional damage investigation needs elevation surfaces of damaged buildings. A drone is also able to fly the front of damaged buildings, and take pictures of them. But the flight duration of a drone is 10 – 30 minutes nowadays. It is too short to investigate whole damage area. A car is a good device with a long utilization if there is no block on roads.

We propose a new initial damage investigation method with a bicycle and a wide-angle action camera which takes animation of damaged buildings with position information. After a user rides a bicycle in damaged area and takes animation, he can analyze whole damaged area in his office and identify the specific buildings to do an in-depth study. Our wide-angle action camera is too wide-angle to get an elevation surface of damaged building. We make the image transformation program with JavaScript and HTML5. This program makes a proper elevation surface on a level with 28mm focal distance camera. Results may be summarized as follows: we make the image processing system on a web browser with JavaScript and HTML5. We propose the complementarity equation of the image transformation by the picture of grids. This equation gives a proper elevation surface on a level with 28mm focal distance camera. We are able to take animation at 0.01 km² per minute, and investigate 1.5 km² with 1 action camera. The position information of the movie makes us to do an in-depth study. Test investigations show that the 70% buildings in the damaged area are able to be investigated. Test investigations also show that we cannot do an initial investigation with a bicycle because of wide-spread quake-hit area, and that the investigator must identify oneself at quake-hit area to decrease inhabitants' alarm.

*1 Professor, Department of Architecture, National Institute of Technology, Toyota College, Dr. Eng.

*2 Taisei Corporation