滑り現象の映像解析による地震動の推定

横田 有光¹・浜本 隆之²・古賀 久志³・渡辺 俊典⁴

¹学生会員 電気通信大学大学院生 情報システム学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)
E-mail: yokota@sd.is.uec.ac.jp

²非会員 東京理科大学教授 工学研究科 (〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1)

³非会員 電気通信大学准教授 情報システム学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

⁴非会員 電気通信大学名誉教授 情報システム学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

近年、地震計の整備が進んでいるが、地震計のような専用の観測装置による観測網は、高密度化に限界がある。一般に地震動は、表層地盤の振動特性の違い等の影響を受け、局地的に変化するため、地震計による観測網だけでは、こうした局地的に異なる地震動の全容を十分に把握することができない。そこで、本論文では、地震計による観測網を補うための手法として、一般の店舗等に設置されている監視カメラの映像を解析することにより地震動を推定する手法を提案する。提案手法では、大きな地震の際に室内の備品等に生じる様々な種類の運動のうち、滑り運動に着目する。画像解析により、滑る物体の動き情報を抽出し、その動き情報を逆解析して地震動を推定する。縮尺模型を用いて振動台実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

Key Words : ground motion, motion analysis, tracking, surveillance camera, seismic intensity

1. はじめに

近年、高密度な地震観測網の必要性の認識が高まっており、様々な機関が地震観測網を整備している。例えば、日本国内では、(独)防災科学技術研究所、気象庁及び地方自治体等が全国規模の観測網の整備を進めており、それぞれの観測網をあわせると、現在、全国で4000か所以上、約5~20km間隔で地震計が設置されている¹⁾。これは世界的に見ても非常に高密度な地震観測網である。しかし、地震計のような専用の観測装置による観測網は、今以上の高密度化には限界がある。一般に地震動は、表層地盤の振動特性や地震波の伝播経路の地質構造の違い等の影響を受け、局地的(数十~数百メートル単位)に変化するため、地震計による観測網だけでは、こうした局地的に異なる地震動の全容を十分に把握することができない。1995年の兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)のときには、「震災の帯」と呼ばれた幅1km程度の被害集中地域にほとんど地震計が存在せず、被害の原因や対策を考える上で不可欠な地震動の記録を十分に得ることができなかった。

従来、被害が生じる大きな地震の際に地震計による観測網を補うため、墓石の転倒調査^{2),3)}、構造物の被害調査^{2),4)}、アンケート調査^{2),5),6),7)}による地震動推定が行われてきた。墓石の転倒調査は、歴史が古く、いくつかの手

法があるが、代表的なものは、墓地ごとに墓石の転倒率を求める手法である。日本の墓石は、形状が画一的であり、また、強い地震動に対して適度に倒れやすく、気象庁の震度階級でおおむね震度5から転倒する墓石が現れ、震度6になると転倒率50%、震度7では転倒率が100%に近くなるため³⁾、転倒率が地震動の強さの指標となる。アンケート調査法は、大田らが提案した手法⁵⁾が広く普及しており、気象庁も調査に活用している。この手法では、地震の際の周囲の物の様子、人の行動、被害状況等を聞き取り、回答内容から気象庁の震度に相当する指標であるアンケート震度を求める。以上の手法は、どこにでも存在する物や人を用いることで、地震計のない場所でも地震動の強さを求めることを可能にしているが、それぞれ問題点がある。例えば、墓石の転倒調査は、近年の耐震墓石の普及により精度が悪くなることが考えられる。また、アンケート震度は、回答の個人差の問題がある。実際の地震の調査で、同じ地区内の6人以上の回答を平均化し、統計的に個人差の影響を低減した場合でも計測震度との差が±0.6程度の範囲に分布したことが報告されている⁷⁾。さらに、いずれの手法も、地震波形は推定できないため、例えば、周波数成分ごとの揺れの強さを推定することは難しいという問題がある。このように上述の調査手法は、1つのみで完全なものではなく、様々な調査手法を合わせて用いることにより、より多くの地震

動の情報を得る努力がなされている。このため、既存の手法とは異なる特徴を持つ新たな手法が開発され、地震動に関する新たな知見が得られることが期待される。

既存の手法とは異なる手法として、監視カメラの映像から地震動を推定する2つの手法が提案されている⁸⁾。監視カメラは、近年普及が進み、様々な施設に設置されている。また、映像として記録が残るため、時間的に変化する地震動を地震波形としてとらえることができる可能性がある。提案されている1つ目の手法は、映像中の壁の模様の動き等からカメラ自身の揺れを求め、カメラ自身の揺れから地震動を推定するものである。この手法は、必要な装置が監視カメラのみであり、特殊な装置が不要であるという特長がある。一方で、カメラの共振の影響で推定可能な周波数帯域が制限されるという問題がある。一般的な監視カメラは地震動が加わると共振する。このため、カメラの揺れは、自身の固有周波数付近の周波数成分が支配的となり、それ以外の周波数成分の揺れは生じにくい。カメラの揺れに含まれない周波数成分の地震動は推定できないため、固有周波数以外の周波数成分の地震動は、求めることが原理的に難しい。2つ目の手法は、カメラの前に振り子を設置し、振り子の揺れ方を映像から求め、地震動を推定するものである。この手法は、地震動を逆解析するために必要な振り子の振動特性は容易に求められ、また、振り子の長さを調整する等して、共振しにくくすることで、推定可能な周波数帯域が制限されないようにできるという特長がある。しかし、振り子という特殊な装置を予め設置しなければならないという問題がある。

また、屋外に設置されたカメラで撮像された風景映像の揺れの周波数特性を、地震計により観測された地震動の周波数特性と比較し、類似した特徴が観察されたという報告もある⁹⁾。しかし、風景映像の揺れは、カメラ自身の揺れに起因するものであり、上述の文献⁸⁾の1つ目の手法と同様にカメラの振動特性に依存するため、風景映像の揺れの周波数特性と地震動の周波数特性が一般的に一致するとはいえない。その他、駐車車両の揺れ幅から最大加速度を推定した例¹⁰⁾も報告されているが、上述の手法と同様に、車両の振動特性に依存して推定可能な周波数帯域が制限されると考えられる。

さらに、MEMS加速度計を用いた簡易な地震観測網の構築に関する報告¹¹⁾もある。MEMS加速度計は既に普及しており、MEMS加速度計を用いた簡易地震計を作ることや、MEMS加速度計を内蔵したスマートフォンを簡易地震計として機能させることは技術的には容易である。しかし、地震計として機能させるためには、地面等に固定し、地震時に計測値を記録するようにする必要があり、何もせずに既存の機器が地震観測網になるわけではない。

そこで、本研究では、既存の監視カメラの映像から地

震動を推定する新しい手法を提案する。提案手法では、画像解析により、床の上を滑る物体の動き情報を抽出し、その動き情報を逆解析して地震動を推定する。提案手法は地震の際に物が滑る現象を利用しているため、文献⁸⁾の1つ目の手法のように、カメラの共振の影響で推定可能な周波数帯域が制限されることがないという点で優れている。また、多くの環境で滑る物体が存在するため、文献⁸⁾の2つ目の手法のように、予め特殊な装置を設置しなければならないという問題もない。さらに、提案手法は、MEMS加速度計を用いた地震観測網と異なり、監視カメラが通常備える記録機能により記録された映像を用いるため、既存の機器が地震観測網になる。なお、本論文は、既発表^{12) 13)}の内容に、提案手法の基本的な考え方や処理内容の詳細を追加するとともに、新たな実験による評価を追加し、総合的にまとめたものである。

本論文の構成は以下の通りである。まず2で提案手法の基本的な考え方について述べる。3では提案手法の処理の詳細について説明する。4では縮尺模型を用いた実験等により提案手法の有効性を示すとともに、実際の地震の際の監視映像への適用例を示し、5で結論を述べる。

2. 提案手法の基本的な考え方

本章では、地震動推定法の基本的な考え方を説明する。提案手法では、大きな地震の際に、天井等に固定された監視カメラの映像を解析し、被写体の運動の様子から地震動を推定する。一般に、大きな地震が発生すると、監視カメラの被写体、すなわち、店舗であれば、棚や商品、オフィスであれば、机や椅子等の備品が様々な種類の運動をする。例えば、床の上を滑る、転倒する、棚から落下するといった運動が地震動により引き起こされる。提案手法では、これらのうち、滑る物体の運動に注目する。物体の滑り運動は、転倒等の他の運動と比較して、地震動との関係が単純であるため、物体の運動から地震動を逆解析することが容易であると考えられる。

(1) 地震動と物体の滑り運動の関係

以下では、地震動とそれにより引き起こされる物体の滑り運動の関係について説明する。図-1は、監視カメラが設置されている建物内の様子を示している。大きな地震が発生し、建物の床面が加速度 $\ddot{\mathbf{U}}(t) = (\ddot{U}_x(t), \ddot{U}_y(t))$ (水平2方向) で揺れるとき、床面上の物体の質量を m とすると、物体には慣性力 $m\ddot{\mathbf{U}}(t)$ が加わる。慣性力が物体と床面との間の静止摩擦力より大きい場合、物体は床面に対する相対加速度 $\ddot{\mathbf{D}}(t) = (\ddot{D}_x(t), \ddot{D}_y(t))$ で滑り運動を開始する。また、滑り運動中は、滑り運動の方向とは

図-1 地震の際に生じる滑り運動

逆方向に動摩擦力がかかる。このとき、クーロンの摩擦法則が成り立つと仮定すると、ニュートンの運動方程式は次の式(1)のように表せる。

$$\begin{cases} -m\ddot{U}_x(t) - \mu mg \times \frac{\dot{D}_x(t)}{|\dot{\mathbf{D}}(t)|} = m\ddot{D}_x(t) \\ -m\ddot{U}_y(t) - \mu mg \times \frac{\dot{D}_y(t)}{|\dot{\mathbf{D}}(t)|} = m\ddot{D}_y(t) \end{cases}, \quad (1)$$

ここで、 μ は動摩擦係数、 g は重力加速度、 $\dot{\mathbf{D}}(t) = (\dot{D}_x(t), \dot{D}_y(t))$ は時刻 t における床面に対する滑り物体の相対速度である。

滑り運動の時間変化の具体例を図-2に示す。ここでは、簡単のため、地震動は x 成分のみ有し、 $\ddot{U}_y(t) = 0$ である場合を考える。また、静止摩擦係数 $\mu_s = 0.5$ 、動摩擦係数 $\mu = 0.3$ としている。

まず、時刻 t_1 において、慣性力が静止摩擦力を超え、床の上の物体は滑り運動を開始する（図-2の時刻 t_1 の直後に、破線で表される慣性力に対応する加速度 $-\ddot{U}_x(t)$ が $-490 \text{ gal} (= \text{cm/s}^2)$ を下回り、 $|\ddot{U}(t)| > \mu_s g = 490$ となり、相対加速度 $\ddot{D}_x(t)$ と相対速度 $\dot{D}_x(t)$ が0から負の値へ変化している。）。

その後、加速期間と減速期間を経て、時刻 t_2 において、相対速度 $\dot{D}_x(t) = 0$ となり、滑り運動は停止する（図-2の時刻 t_1 から t_2 の間、相対加速度 $\ddot{D}_x(t)$ は負の値から正の値へ変化し、相対速度 $\dot{D}_x(t)$ は負の値から0へ変化している。）加速・減速期間の物体の相対加速度 $\ddot{D}_x(t)$ は、図-2の上のグラフに示すように、慣性力と動摩擦力の合力に対応する加速度となる。

時刻 t_2 において、滑り運動が停止した後は、図-2の例では、時刻 t_2 の時点で慣性力が静止摩擦力を超えているので、すぐに今までと逆方向に滑り運動を再開する。

そして、加速・減速期間を経て、時刻 t_3 において、再度相対速度 $\dot{D}_x(t) = 0$ となる。

以上の運動を繰り返す。なお、滑り運動が停止したときに、慣性力が静止摩擦力を超えない場合は、慣性力が静止摩擦力を超えるまで停止し続ける。

 図-2 床面の加速度 $\ddot{U}_x(t)$ と、滑り運動する物体の相対加速度 $\ddot{D}_x(t)$ と相対速度 $\dot{D}_x(t)$ の例

(2) 地震動の求め方

式(1)を加速度 $(\ddot{U}_x(t), \ddot{U}_y(t))$ について変形すると、

$$\begin{cases} \ddot{U}_x(t) = -\mu g \times \frac{\dot{D}_x(t)}{|\dot{\mathbf{D}}(t)|} - \ddot{D}_x(t) \\ \ddot{U}_y(t) = -\mu g \times \frac{\dot{D}_y(t)}{|\dot{\mathbf{D}}(t)|} - \ddot{D}_y(t) \end{cases}, \quad (2)$$

となる。提案手法では、 $\ddot{\mathbf{D}}(t) = (\ddot{D}_x(t), \ddot{D}_y(t))$ と $\dot{\mathbf{D}}(t) = (\dot{D}_x(t), \dot{D}_y(t))$ を監視カメラの映像解析により求める。具体的には、映像中の特徴点を抽出し、滑り運動する物体に属する特徴点と床面に属する特徴点の動きの差を求めることにより、 $\ddot{\mathbf{D}}(t)$ と $\dot{\mathbf{D}}(t)$ を求める。一般に、建物や監視カメラは剛体ではなく、カメラは床面に対して揺れる。この揺れの影響は、いずれの特徴点にも及ぶため、2つの特徴点の動きの差を求めることで、カメラの揺れに起因する動きの成分を相殺する。動摩擦係数 μ は、監視カメラの設置されている場所で実際に測定した値を用いるのが理想であるが、床の材質や滑り運動する物体の種類から推定した値を用いることも考えられる。地震動の上下動成分はないと仮定し、重力加速度 g は一定とする。このように求められた $\ddot{\mathbf{D}}(t)$ と $\dot{\mathbf{D}}(t)$ と μ を式(2)に代入し、 $\ddot{\mathbf{U}}(t) = (\ddot{U}_x(t), \ddot{U}_y(t))$ を求める。なお、 $\dot{\mathbf{D}}(t) = (0, 0)$ となり、滑り運動が停止している期間は、 $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ は求まらない。

$\ddot{\mathbf{U}}(t)$ は、床面の加速度であるため、厳密には地面の地震動の加速度とは異なるが、監視カメラが1階に設置されている場合は、その差は小さく、地面の地震動に近いものが求まる。一方、監視カメラが上層階に設置され

ている場合は、地面の地震動ではなく、地震動に対する建物の応答（建物の揺れ方）を求めることができる。建物の様々な場所の揺れ方を求めることができれば、建物の振動現象の解明や健全性の評価等に活用できる。

提案手法は、以上のような考え方で地震動を推定するため、既存の手法のように、カメラの共振の影響で推定可能な周波数帯域が制限されることがない。

3. 提案手法

本章では、提案手法の具体的な処理の流れを説明する。提案手法では、滑る物体の動き情報を利用するが、実際の監視カメラにより記録される映像では、滑る物体だけではなく、転倒したり、落下する物体も存在することが考えられる。そこで、提案手法では、転倒や落下運動する物体も混在する環境下で、滑り運動する物体の動き情報と床面の動き情報を特定することを目標とする。加えて、複数の物体が滑り運動する場合は、それぞれ滑り量が異なることがあり得る。提案手法では、滑り量が異なる物体がある場合は、滑り量が最大のもの（以下、「滑り量最大物体」という。）の動きを選択的に抽出する。滑り量最大物体は、摩擦力により滑り運動が停止する期間が最も短いため、提案手法による地震動推定に適している。図-3に提案手法の処理の流れを示す。以下では、各ステップの詳細を説明する。

(1) 画像解析

ステップ1では、滑り物体と床面の動き履歴を取得する。動き履歴を取得するため、特徴点の検出と追跡を行い、特徴点の動きの軌跡を求める。この軌跡を求めることで、各特徴点の動きベクトル MV の時系列データである動き履歴が求まる。提案手法は、特徴点検出に Harris コーナー検出器¹⁴⁾を用い、動きベクトル検出にテンプレートマッチング法を用いる。また、動きベクトルの外れ値を除去するため、検出された各動きベクトルについて、近傍画素の動きベクトル、具体的には、検出された動きベクトルの始点を中心とする辺長 p の正方形の範囲内に始点がある動きベクトルと比較し（図-4(a)）、類似の動きベクトルが存在しない場合は、外れ値と判定し、除去する。辺長 p は、正方形の範囲内に同じ物体上の他の動きベクトルが含まれるように画像内での物体のサイズに応じてユーザが定めるパラメータである。なお、同じ物体上の他の動きベクトルがすべて含まれる必要はなく、少なくとも一部が含まれればよい。厳密に物体のサイズに合わせる必要はない（図-4(a)）。動きベクトルの類似度評価は、マンハッタン距離により行う。ステップ1は次のサブステップで構成される。

図-3 提案手法の処理の流れ

(a) 動きベクトルの外れ値判定のための範囲

(b) 動き軌跡とテンプレート領域の設定

図-4 動き履歴を求めるための処理の説明図

ステップ1-1

最初のフレームにおいて、特徴点検出を行い、検出された特徴点を軌跡の開始点として登録する。この時点では、軌跡の長さがゼロであるため、軌跡の開始点が軌跡の終了点でもある。そして、各軌跡の終了点にテンプレートマッチングのテンプレート領域を設定する。

ステップ1-2

k 番目 ($k \geq 2$) のフレームにおいて、以下の処理を行う（図-4(b)参照）。

まず、 $k-1$ 番目のフレームの軌跡の終了点に設定されたテンプレート領域（図-4(b)の特徴点 a を囲む領域）と、 k 番目のフレームに設定された探索領域を用いてテンプレートマッチングを行い、動きベクトル $MV(k)$ を求める。動きベクトルが外れ値と判定されなかった場合は、その動きベクトルにより軌跡を延長し、軌跡の終了点を

更新する。外れ値と判定された場合は、軌跡を延長せず、追跡を終了する。

次に、特徴点検出を行う。検出された特徴点の近く、具体的には検出された特徴点の座標(f_x, f_y)を中心とする辺長 q の正方形の範囲を調べ、既知の軌跡の終了点が存在しない場合は、検出された特徴点を新たな軌跡の開始点及び終了点として登録する(図-4(b)の特徴点 b)。 q は、テンプレートマッチングで特徴点を追跡した時の誤差値の分布から経験的にユーザが定めるパラメータである。 q が小さすぎると同一特徴点が重複登録され、上述の外れ値の判定の精度が下がる。逆に q が大きすぎると異なる特徴点が同一視され、本来登録されるべき新しい特徴点が登録されなくなる。

最後に、各軌跡の終了点にテンプレートマッチングのテンプレート領域を設定する。

ステップ 1-3

すべてのフレームに対してステップ 1-2 の処理が終了した後、軌跡の時間的長さ、すなわち、追跡の継続時間を求める。追跡の継続時間が 1 秒以下の軌跡の情報は削除する。削除されなかった軌跡について、軌跡を求める過程で得られる一連の動きベクトル群を動きヒストリとして出力する。

以上の処理により、転倒や落下運動する物体が存在していても、滑り運動する物体と床面の動きヒストリを選択的に求めることができる。これは、以下に述べるように、回転運動が少ない被写体ほど、動きベクトルが外れ値とならずに動きヒストリが求まるという性質による。提案手法では、テンプレートマッチングの際、テンプレートを回転させないため、回転運動が高速であるほど、マッチングに誤りが生じやすい。そして、誤マッチングにより得られた動きベクトルは、外れ値として除去される。仮に誤マッチングがなくても、回転する物体上の動きベクトルは、回転の中心からの距離や方向に応じて異なる値を取り、空間的近傍に類似の動きベクトルが存在する可能性が低く、外れ値として除去される。

一方、地震動発生時の被写体は次の 3 タイプが考えられ、それぞれ回転運動の性質に違いがある。

- ・滑る物体 (回転運動：あったとしても相対的に低速)
- ・転倒や落下運動する物体 (回転運動：相対的に高速)
- ・床面 (回転運動：なし)

提案手法では、動きベクトル検出をこれらの被写体の種類にかかわらず、すべてに対して行うが、回転運動が少ないほど、動きベクトルが外れ値とならず、除去されないため、滑り運動する物体と床面の動きヒストリが選択的に求まる。

なお、提案手法では、実装の容易さから単純な追跡手法を採用したが、例えば文献¹⁵⁾のような新しい追跡手法

を取り入れることで、更に性能が向上する可能性がある。本論文の主眼は、新しい追跡手法の提案ではなく、 $\ddot{\mathbf{D}}(t)$ と $\dot{\mathbf{D}}(t)$ から地震動を推定するアイデアにある。

(2) 滑り運動の逆解析

ステップ 2 では、カメラの外部・内部パラメータに基づいて動きヒストリの中の各動きベクトルを画像座標系の動きベクトル $\mathbf{MV} = (MV_x, MV_y)$ から実空間座標系の動きベクトル $\mathbf{RMV} = (RMV_x, RMV_y)$ へ変換する。 $\mathbf{MV}$ の各成分の単位は[画素/フレーム]で、 $\mathbf{RMV}$ の各成分の単位は[メートル/フレーム]である。この変換は各動きベクトル $\mathbf{MV}$ の始点と終点の画像座標を実空間座標に変換することにより行う。実空間座標系は、例えば、床面と平行に東西、南北方向にそれぞれ x 軸、 y 軸を設定し、床面と垂直な方向に z 軸を設定する。変換に用いるカメラパラメータは、最初のフレームにおいて、画像中の複数の点について、画像座標と実空間座標の対応関係を手動で調べ、Tsai の手法¹⁶⁾により求める。大きな地震の際には、カメラが揺れ、カメラの外部パラメータ(カメラの向きや位置)が画像シーケンス内で変化することが想定されるため、最初のフレームのカメラパラメータを用いて求められる $\mathbf{RMV}$ は、実際の動きと完全には一致しないが、カメラの向きや位置の変化が小さい場合、実際の動きに近い。提案手法は、固定された監視カメラを対象としており、このようなカメラは、地震動が加わっても向きや位置は変化しにくいいため、求まる $\mathbf{RMV}$ は実際の動きに近い。例えば、文献¹⁷⁾で紹介されている北海道東方沖地震の際の複数の監視カメラ映像の例では、激しい揺れの前でカメラの向きや位置は大きく変化していない。また、変換の際に必要な特徴点の高さ情報(z 方向の座標)は、手動で調べる。一般に、各特徴点の高さはそれぞれ異なるため、理想的にはすべての特徴点の高さ情報を調べる必要があるが、特徴点数が多く、調べるのが困難であるため、目視により滑り運動する物体の多くが存在すると認めた高さ(例えば床面の高さ)で代用する。

ステップ 3 では、ステップ 2 で求められた $\mathbf{RMV}$ の大きさ $|\mathbf{RMV}|$ に基づいてフレームごとに滑り量最大物体に属する特徴点と床面に属する特徴点を特定する。具体的には、 $|\mathbf{RMV}|$ が最大の特徴点を滑り量最大物体上の特徴点と判定し、 $|\mathbf{RMV}|$ が最小の特徴点を床面上の特徴点と判定する。このように判定できる理由を次に説明する。

ここで監視カメラとその取り付け部は非剛体であると仮定する。この場合、建物に地震動が加わったときに、床面とカメラが同じ動きをせず、カメラが床面に対して揺れ、カメラが撮像した映像の中では、床面が動いているように見える。このとき、滑り運動する物体上の特徴点の動きから求まる $\mathbf{RMV}$ を $\mathbf{RMV}_s$ とし、床面上の特徴

図-5 滑り運動する物体とカメラの地震応答
(カメラの固有周波数>地震動の周波数の場合)

点の動きから求まる $\mathbf{RMV}$ を $\mathbf{RMV}_g$ とすると、それぞれ次のように表される。

$$\mathbf{RMV}_s = \mathbf{C}_v + \mathbf{C}_s \quad (3)$$

$$\mathbf{RMV}_g = \mathbf{C}_v \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{C}_v$ は床面に対するカメラの揺れにより生じる動き、 $\mathbf{C}_s$ は床面に対する物体の運動により生じる動きを表す。 $\mathbf{C}_v$ はグローバルモーションであり、どの特徴点に対しても含まれる動きの成分である。ステップ2の変換において、最初のフレームのカメラパラメータを用いてすべてのフレームを処理しているため、カメラが揺れると $\mathbf{C}_v \neq (0, 0)$ となり得る。一方、 $\mathbf{C}_s$ はローカルモーションであり、滑り運動する物体上の特徴点の方にのみ含まれる動きの成分である。地震動に対するカメラや滑り運動する物体の動きの位相遅れの性質（後述）により、カメラの固有周波数>地震動の周波数であれば、 $\mathbf{C}_v$ と $\mathbf{C}_s$ が打ち消し合うことはほとんどない。よって、 $|\mathbf{RMV}_g| < |\mathbf{RMV}_s|$ となる。このため、 $|\mathbf{RMV}|$ が最大の特徴点は滑り量最大物体上の特徴点とみなすことができ、 $|\mathbf{RMV}|$ が最小の特徴点は床面上の特徴点とみなすことができる。

上述の、地震動に対するカメラや滑り運動する物体の動きの位相遅れの性質とは次のようなものである。地震動により生じるカメラの振動を考えるため、まずカメラの振動を1質点系でモデル化する。カメラの固有周波数>地震動の周波数のとき（図-5）、地震動により生じるカメラの振動は、地震動の位相とほぼ同じ位相となる。一方、床面上の物体の滑り運動は、常に地震動の位相とほぼ逆位相となる。このため、 $\mathbf{C}_v$ と $\mathbf{C}_s$ が打ち消し合わない。

上述の議論では、カメラの固有周波数>地震動の周波数の関係が成り立つことを前提としている。この前提条件が成り立つか確認するため、実際の地震の際の複数の監視カメラ映像を用いた予備実験によりカメラの固有周波数を調べた。具体的には、壁等の地震により移動しない被写体の領域の動きの周波数スペクトルを求め、振幅が最大の周波数を調べたところ、いずれの監視カメラも

7 Hz 以上であった。固有周波数に影響を与えるカメラの取り付け部の機構は、カメラごとに大きな違いはないので、一般的に同等の固有周波数を有すると考えられる。これに対し、通常地震動の卓越周波数は、5 Hz 以下であることが一般的であり、卓越周波数より高周波になるほど振幅は小さくなる¹⁸⁾。したがって、地震動の主要な成分について、カメラの固有周波数>地震動の周波数の関係が成り立つといえるため、提案手法では、この関係が成り立つと仮定する。

追跡中の特徴点はフレームごとに変化し得るため、 $|\mathbf{RMV}|$ が最大・最小の特徴点を特定する処理はフレームごとに行うが、 $|\mathbf{RMV}|$ の大きさとしては、1 フレーム期間の $|\mathbf{RMV}|$ ではなく、 $|\mathbf{RMV}|$ の一定期間の平均値を用いる。これは、一時的に動きがない期間等における誤評価を防ぐためである。具体的には、まずフレームごとに追跡中の特徴点群を特定する。次に各フレームにおいて追跡中の各特徴点の $|\mathbf{RMV}|$ の一定期間の平均値を比較し、最大・最小のものを探索する。

ステップ2で述べたように、各特徴点の高さ情報（ z 方向の座標）は、目視により滑り運動する物体の多くが存在すると認めた高さ（例えば床面の高さ）を用いる。このようにして求まる $|\mathbf{RMV}|$ は、高さの誤差に起因する誤差が含まれるため、 $|\mathbf{RMV}|$ が最大・最小の特徴点が正確に特定されない場合もあり得る。この対策としては、特定結果を目視で確認し、最大・最小の特徴点と動きが大きく異なる特徴点が最大・最小の特徴点と特定された場合は、手動修正することが考えられる。なお、最大・最小の特徴点と動きが大きくは異なる特徴点、例えば、最大と大差のない2番目、3番目に大きいものが最大と判定された場合は、誤特定による悪影響は小さく、手動修正の必要性は低い。この場合、滑り運動が生じず推定値が得られない期間が相対的に長くなるが、得られる期間については推定精度に大きな差はない。

ステップ4では、滑り運動の逆解析を行う。まず、次式により相対速度 $\dot{\mathbf{D}}(t)$ を求める。

$$\dot{\mathbf{D}}(t) = \mathbf{RMV}_{s,max}(k) - \mathbf{RMV}_g(k) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{RMV}_{s,max}(k)$ は、 k 番目のフレームの滑り量最大物体上の特徴点の $\mathbf{RMV}$ であり、 $\mathbf{RMV}_g(k)$ は、 k 番目のフレームの床面上の特徴点の $\mathbf{RMV}$ である。この計算では、滑り量最大物体及び床面と判定された特徴点にのみ、正確な高さ情報を改めて手動で与えて求められた $\mathbf{RMV}$ を使用する。提案手法は、主に地震後の調査で用いることを想定しているため、特徴点の高さ情報は、現地調査や、人が画像から判断することにより推定できる。また、特徴点の正確な高さ情報は、滑り量最大物体及び床面と判定された特徴点のみに与えるので、特徴点が多数検出

された場合でも作業量は増えない。次に、 $\dot{\mathbf{D}}(t)$ を時間微分し、 $\ddot{\mathbf{D}}(t)$ を算出する。最後に、 $\ddot{\mathbf{D}}(t)$ と $\dot{\mathbf{D}}(t)$ と動摩擦係数 μ を式(2)に代入し、 $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ を求める。前述したように、各RMVは2次元の動き情報であり、最終的に得られる $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ も水平2方向の成分で表される地震動である。これは、地震計が水平方向の地震動として南北方向と東西方向の2方向の成分の地震動を求めるのと同様である。

4. 実験

(1) 縮尺模型を用いた実験

a) 実験方法

提案手法の有効性を確認するため、縮尺模型を用いて実験を行った。図-6 に実験装置の構成を示す。本模型は、監視カメラが設置されている店舗を模しており、縮尺率は約 1/10 である。この模型を人工的に地震動を発生させることができる振動台の上に固定する。模型の床面には床材を敷き、その上に複数の物体を固定せずに置く。さらに、監視カメラに相当する小型 CCD カメラを取り付け金具により模型の天井付近の壁に取り付け、レンズを斜め下の方向に向けている(図-6 の右上の写真参照)。取り付け金具のうち、一部分は壁に固定され、壁に固定された部分とは反対側の端部には、カメラを接続するとともに、カメラの方向を変えることができる回動機構が設けられている。この回動機構は、ねじを緩めると容易に回動可能になり、ねじを締め付けるとカメラと取り付け金具の間に摩擦力が生じ、回動が抑制される構造となっている。カメラの設置時は、回動機構のねじを緩めた状態でレンズの方向を定めた後、回動機構のねじを締め付ける。この状態で振動台を振動させると、カメラには、視認可能な程度に顕著な回動は生じないが、撮像された映像は全体が揺れることが確認でき、カメラの揺れが生じる状態となっている。以上のカメラの取り付け状況は、一般的な監視カメラと同様である。振動台の振動方向は、図-6 に示すように水平 1 方向(x成分のみでy成分はない。)である。なお、3.(2)節で述べたように、提案手法の推定処理は、水平 1 方向の成分に限定されるものではない。また、振動台により発生させた地震動の正解値を得るため、静止カメラを模型の上方に設置し、レンズを真下の方向に向け、模型の上の標点を撮像する。静止カメラは、模型や振動台とは独立しており、振動台が揺れても静止し続けるため、静止カメラの映像中の標点の動きをテンプレートマッチング法により求めることで地震動を測定できる。このようにして求めた地震動を正解の地震動とする。監視カメラの映像を用いて提案手法による地震動推定を行い、正解の地震動と比較して提案手法の有効性を評価する。なお、標点は、監視

図-6 実験システム

図-7 撮像画像と追跡中の特徴点

カメラにはほとんど映らないようになっており、提案手法による地震動推定には用いない。監視カメラは 30fps, 720×480 画素のサイズで撮像する。これは標準解像度であり、一般的な監視カメラと同等の解像度である。監視カメラの振動方向の解像度は被写体の位置に依存して異なるが、0.35~0.6mm/画素に相当する。一方、静止カメラは 0.07mm/画素である。0.07mm/画素で空間的に標本化するため、得られる標点の位置の標本化による誤差は±0.035mm の範囲内であり、監視カメラよりも小さくなるように設定されている。

Test 1 と Test 2 の 2 つの実験を行った。Test 1 は、転倒、

図-8 特徴点 a~g の動き履歴 (MV_x) (Test 1)

(a) Test 1

(b) Test 2

図-9 加速度推定結果

表-1 気象庁の計測震度相当値の推定結果

JMA seismic intensity	Test 1	Test 2
Estimated value	5.69	5.63
True value	5.75	5.86

落下、滑り運動が観察されるシーンの映像を用いる。図-7(a)に示すように、Test 1 では、物体 A と棚が滑り運動する。棚上の物体 B は、揺れが加わると、転倒し、落下する。落下した後は、床面上を滑り運動する。物体 A と物体 B の動摩擦係数は、0.26 であり、棚の動摩擦係数は、それよりも高い。Test 2 は、2 つの物体が滑り運動するシーンの映像を用いる (図-7 (b))。Test 2 は、Test 1 とは異なる揺れを加え、複数の揺れ方で同様の推定結果が得られることを確認する。振動台により加振する揺れの最大加速度は、約 1000 gal (10m/s^2) とした。これは実際の大きな地震と同様のレベルである。一方、揺れの最

大変位は、約 1cm とした。これは模型の縮尺率を考慮し、実際の大きな地震の 10 分の 1 以下となっている。動き履歴取得のためのパラメータ p と q については、 $p=80$, $q=40$ とした。

b) 実験結果

図-7 に特徴点の追跡の様子を示す。矩形の枠は、テンプレートマッチング用に設定されたテンプレートに対応する。これらの特徴点のうち、a~g の記号を付した特徴点についての動き履歴の x 成分 (MV_x) を図-8 に示す。特徴点 a~g は次のような特徴点である (図-7 参照)。

- ・ a, b: 床面の特徴点 ・ c, d: 物体 B の特徴点
- ・ e: 物体 A の特徴点 ・ f: 棚の特徴点
- ・ g: 落下した後の物体 B の特徴点

図-7 及び図-8 より、以下のことがわかる。Test 1 では、同じ床面に存在する特徴点 a 及び b は、安定的に追跡を継続でき、かつ動きもほぼ等しい。特徴点 c 及び d は、物体 B が転倒し始めた時点で動きベクトルが外れ値と判定され、追跡を終了している。特徴点 f は、特徴点 e よりも全体的に動きが小さい。物体 B では、落下した後に特徴点 g が検出され追跡対象に追加されている。また、提案手法のステップ 3 の処理の結果、床面上の特徴点と判定されたのは、すべてのフレームにおいて特徴点 b であり、滑り量最大物体上の特徴点と判定されたのは、最初は特徴点 e、40 番目のフレーム以降は特徴点 g であった。また、Test 2 では、物体 A、物体 B 及び床面の各特徴点について、安定的に追跡を継続できた。Test 1 及び Test 2 では、各特徴点の動き履歴に目視で確認できる誤りはなく、また、滑り量最大物体と床面の各々に属する特徴点が正しく特定された。

図-9 に加速度推定結果を示す。図-9 より、加速度の大きい部分については、推定値が正解値に近いことがわかる。一方、加速度が小さい部分については、物体が滑らないため、加速度が求まっていない。しかし、被害が生じる大きな地震の際の地震動を推定するという提案手法の目的は達成している。提案手法は監視カメラ映像を用いるため、墓石の転倒調査法やアンケート調査法と違い、地震波形を求められる。地震波形の推定値と正解値の相関係数は、Test 1 の場合は 0.85、Test 2 の場合は 0.79 であった。この結果から両値に強い相関があることが確認できる。なお、簡単のため、値の得られない期間は推定値を 0 として相関係数を求めており、値の得られる期間に限れば相関係数は更に高くなると考えられる。表-1 は、気象庁の計測震度相当値の推定結果を示している。気象庁の計測震度は、加速度の時間履歴から算出する¹⁹⁾。同じ算出方法を用いて、加速度推定値から計測震度に相当する値を求めた。提案手法は、要求精度が明確に定まる特定の用途を想定しているものではなく、様々な用途

図-10 動摩擦係数と計測震度相当値の関係 (Test 1)

に用いることを想定しているため、誤差が要求精度を満たしているか否かの評価はできないが、最大誤差 0.23 という一定の精度で推定できていることがわかる。計測震度は、被害との相関を持たせるため、加速度の大きい部分に注目した指標となっている。このため、提案手法において、加速度の小さい部分の値が欠落しても一定の精度で推定可能である。監視カメラを用いる既存の手法⁸⁾では、震度推定は実現されておらず、提案手法により初めて画像認識技術を用いた震度推定が実現された。震度は、地震研究において広く用いられる地震動の強さの指標であるため、震度推定が実現されることにより、監視カメラ映像が地震研究に活用できる可能性が広がる。地震計を用いずに地震動を推定する手法は、精度は地震計より劣ることを許容しつつ、高密度な観測データを取得することが期待されており、提案手法はこのような推定手法の1つとして用いることができる。

表-1 に示した推定結果は、実測値の動摩擦係数 0.26 を用いて算出したものであるが、2 章で述べたように、実測値の動摩擦係数が得られず、推定値を用いることも考えられる。この場合の動摩擦係数の誤差が計測震度の推定値に与える影響を評価するため、動摩擦係数を変化させて計測震度の推定値を求めたところ、図-10 に示すように、動摩擦係数が 0.1 変化すると、計測震度の推定値は 0.15 程度変化する関係にあった。そして、一般的な滑り物体では、床との間の動摩擦係数は 10^{-1} のオーダーであるため、動摩擦係数の誤差が計測震度の推定値に与える影響は限定的と考えられる。

以上より、提案手法は、転倒や落下をする物体が存在する中でも滑り量が最大の滑り運動する物体の動き情報を選択的に抽出することが可能であることがわかる。また、地震動が摩擦力に対して十分大きい場合は、大きい部分の加速度が高い精度で推定可能である。

(2) 地震動の上下動成分の影響を評価する実験

提案手法では、地震動の上下動成分はないと仮定しているが、実際には上下動成分が存在するため、この仮定により誤差が生じる。この誤差を評価するため、実際の地震の際に地震計により観測された地震波形データを用

(a) 上下動なしとした場合 ($g=980 \text{ gal}$)

(b) 上下動を用いた場合 ($g=980+\ddot{U}_{ud}(t) \text{ (gal)}$)

図-11 上下動成分の影響の評価実験の加速度推定結果 (NIG019 東西成分)

いたシミュレーション実験を行った。

地震波形データに基づいて地震動により生じる物体の滑り運動を再現し (順解析)，その滑り運動から地震動を推定する (逆解析)。具体的には、まず (独) 防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET の観測データ (東西・南北・上下動の 3 成分の加速度時刻歴，100 Hz サンプリングデータ) を用い、東西及び南北成分の加速度 $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ の時刻歴から式(1)の関係に基づいて滑る物体の東西及び南北成分の速度 $\dot{\mathbf{D}}(t)$ の時刻歴を求める (順解析)。このとき、静止摩擦係数 $\mu_s = 0.3$ として 2 章で図-2 を用いて説明した動静状態の判定を行う。また、動摩擦係数 $\mu = 0.25$ ，重力加速度 $g=980+\ddot{U}_{ud}(t) \text{ (gal)}$ を式(1)に代入する。ここで $\ddot{U}_{ud}(t)$ は観測データの時刻 t における上下動成分の加速度を表す。次に、滑る物体の東西及び南北成分の速度 $\dot{\mathbf{D}}(t)$ の時刻歴に基づいて 3.(2)節で述べた提案手法のステップ 4 の滑り運動の逆解析を適用し、東西及び南北成分の加速度 $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ の時刻歴を推定する。このとき、動摩擦係数 $\mu = 0.25$ とする。また、上下動成分はないと仮定し、重力加速度 $g = 980 \text{ gal}$ とした場合と、実際の上下動観測データを用い、 $g = 980 + \ddot{U}_{ud}(t) \text{ (gal)}$ とした場合の $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ の推定値を比較する。実験に用いた地震波形データは、以下の地震の観測データである。

- ・2000年10月6日鳥取県西部地震(M7.3) 観測点:TTR007
- ・2003年5月26日宮城県沖の地震(M7.1) 観測点:MYG011
- ・2004年10月23日新潟県中越地震(M6.8) 観測点:NIG019,

表-2 上下動成分の影響の評価実験の計測震度相当値の推定結果

観測点	上下動なしとした 場合の推定震度 (A)	上下動を用いた 場合の推定震度 (B)	(A)-(B)
ISK005	6.370	6.365	0.005
ISK006	5.859	5.874	-0.015
MYG011	6.115	6.053	0.062
NIG018	6.379	6.359	0.020
NIG019	6.778	6.759	0.019
NIG021	5.931	5.906	0.025
TTR007	5.682	5.704	-0.022

平均誤差ME 0.013
平均二乗誤差RMSE 0.029

NIG021

- ・2007年3月25日能登半島地震(M6.9) 観測点:ISK005, ISK006
 - ・2007年7月16日新潟県中越沖地震(M6.8) 観測点:NIG018
- NIG019の東西成分の推定結果を図-11に示す。(a)は上下動成分がないと仮定した場合の加速度の推定値であり、(b)は実際の上下動観測データを用いた場合の加速度の推定値である。図-11より、上下動成分はないと仮定した場合と、実際の上下動観測データを用いた場合で、推定結果にほとんど差がないことがわかる。このようになるのは、ほとんどの時刻で上下動が重力加速度980 galより大幅に小さく、また、上下動の周波数が水平動より高いためであると考えられる。また、表-2に計測震度相当値の推定結果を示す。上下動を用いた場合の推定震度を真値とし、それに対する上下動なしとした場合の推定震度の誤差を算出した。この実験では、上下動なしと仮定することによる誤差は、平均誤差0.013、平均二乗誤差0.029であった。

(3) 提案手法の適用例

実際の地震の際の監視カメラ映像に提案手法を適用した例を示す。使用した映像は、2011年6月30日に長野県で発生した地震の際に、松本市の長野朝日放送中南信支社内で撮像されたものである（著作権を考慮し、映像は掲載していない）。映像のフレームレートは30fpsである。この地震では、松本市で震度5強が観測された。実験は、字幕領域を除外して処理対象の領域を設定して行った。カメラパラメータは、部屋内の備品の一般的な大きさから推定した実空間座標位置を用いて求めた。提案手法の処理の結果、107個の特徴点が検出され、キャスター付きの棚の特徴点が滑り量最大物体上の特徴点と判定され、滑らない備品の特徴点が床面上の特徴点と判定された。また、動きベクトルの検出結果を目視で調べ、ステップ3における滑り量最大物体に属する特徴点と床面に属する特徴点の判定処理の際に、動きベクトルの誤

図-12 加速度推定結果（実地震）

検出に起因する判定誤りがなかったことを確認した。このことから、実際の監視映像に対しても提案手法の画像解析が適切に行われたことがわかる。滑り量最大と判定された物体がキャスター付きの棚であったので、動摩擦係数を0とし、滑り運動の逆解析を行った。地震動の推定結果を図-12に示す。計測震度相当値は5.57と推定された。映像が撮られた場所の地震動の観測記録はないため、推定誤差の評価はできないが、約1km離れた気象庁の観測点では、震度5強（震度5.0以上5.5未満）が観測されている。地震動は局地的に変化するが一定の地理的相関があることから映像が撮られた地点の地表の震度は5強前後であったと考えられる。また、映像が撮られた場所は8階であるため、地表震度より高めになる可能性が高い。したがって、映像が撮られた場所の震度は5強前後より高めであった可能性が最も高い。

5. おわりに

本論文では、監視カメラの映像から地震動を推定する手法を提案した。提案手法では、物体の滑り現象に着目することにより、特殊な装置を用いず、監視カメラの映像から地震動を推定できる。提案手法では、滑り運動する物体の床面に対する相対速度から地震動を推定しており、既存の手法のように、カメラの共振の影響で推定可能な周波数帯域が制限されることがない。縮尺模型を用いた実験等により提案手法の有効性を確認するとともに、実際の地震の際の監視映像への適用例を示した。提案手法は、既存の監視カメラを用いて、大きな地震の際の地震動を地震波形として取得可能であり、また、その地震波形から一定の精度で計測震度相当値を算出可能であるため、従来の墓石の転倒調査、構造物の被害調査、アンケート調査による地震動推定と並ぶ新たな推定手法として用いることができる。

今後は、より多様な物体運動を含むシーンへの対応について検討する予定である。

参考文献

- 1) Japan Meteorological Agency : Monitoring of earthquakes, tsunamis and volcanic activity, <<http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/earthquake.html>> Accessed on October 10, 2013.
- 2) Fujimoto, K. and Midorikawa, S. : Iseisismal map of the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1670, 1999.
- 3) 石渡明, 小栗尚樹, 原田佳和 : 岩手・宮城内陸地震(2008)の墓石転倒率分布とその地質学的考察, 東北アジア研究, 第13号, pp.1-16, 2009.
- 4) Yamaguchi, N. and Yamazaki, F. : Estimation of strong motion distribution in the 1995 Kobe earthquake based on building damage data, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 30, Issue 6, pp. 787-801, 2001.
- 5) 太田裕, 後藤典俊, 大橋ひとみ : アンケートによる地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告, No. 92, pp. 241-252, 1979.
- 6) Fallahi, A., Miyajima, M. and Tobita, T. : Statistical study to determine JMA earthquake intensity by questionnaire survey in 2003 Bam (Iran) earthquake, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, No. 02-0045, 2008.
- 7) 森伸一郎, 掛水真一, 俵司, 村上ひとみ, 河原莊一郎, 向谷光彦, 重松尚久, 山下祐一 : 2001年芸予地震におけるアンケート調査による推定震度の精度とばらつき, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 11, pp. 5-10, 2002.
- 8) Hori, M., Sutoh, A. and Saitoh, Y. : Strong motion measurement using security video camera, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, Japan Society of Civil Engineers, No. 647/I-51, pp. 57-66, 2000.
- 9) Ohori, M., Nakamura, M. and Wakamatsu, K. : Digitized Waveforms Obtained from Videotaped Pictures of Landscape Shaking during Large Earthquakes, *Seismological Research Letters*, Vol. 72, pp. 430-439, 2001.
- 10) Yang, X., Wu, Z., Jiang, C. and Xia, M. : Estimating Intensities and/or Strong Motion Parameters Using Civilian Monitoring Videos: The May 12, 2008, Wenchuan Earthquake, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 168, Issue 5, pp. 753-766, 2011.
- 11) 吉田稔, 藤原広行, 田中洋一, 森野慎也, 小国正之, 結城昇, 黒田真吾, 中井俊樹, 東宏樹, 内藤昌平, はお憲 : i 地震クラウドシステム, 日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集, MTT034-07, 2011.
- 12) Yokota, A., Hamamoto, T., Koga, H. and Watanabe, T. : Estimation of Earthquake Ground Motion by Image Analysis of Sliding Objects Taken with a Fixed Camera, *Proceedings of the 21th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)*, pp. 784-787, 2012.
- 13) 横田有光, 浜本隆之, 古賀久志, 渡辺俊典 : 滑り現象の映像解析による地震動推定法の評価, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, pp. 463-464, 2013.
- 14) Harris, C. and Stephens, M. : A combined corner and edge detector, *Proceedings of Alvey Vision Conference*, pp. 147-151, 1988.
- 15) Wu, Y. and Fan, J. : Contextual flow, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009)*, pp. 33-40, 2009.
- 16) Tsai, R. : A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, 1987.
- 17) 大堀道広, 奥田暁, 若松邦夫, 安井譲 : コンビニエンス・ストアの防犯カメラが記録した1994年10月4日北海道東方沖地震, 地震第2輯, 48巻, 3号, pp. 423-427, 1995.
- 18) 気象庁 : 主な地震の強震観測データ, <<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/index.html>> Accessed on October 10, 2013.
- 19) 気象庁監修 : 震度を知る基礎知識とその活用, pp. 46-55, ぎょうせい, 1996.

(2013.10.21 受付)

ESTIMATION OF EARTHQUAKE GROUND MOTION BY VIDEO ANALYSIS OF SLIDING PHENOMENON

Arimitsu YOKOTA, Takayuki HAMAMOTO, Hisashi KOGA
and Toshinori WATANABE

The spatial density of the seismometers was not high enough to obtain an adequate spatial distribution of the earthquake ground motion. To interpolate the network of seismometers, we propose a method to estimate earthquake ground motion by using a surveillance camera. In our method, the motion of objects sliding on the ground or on a floor is estimated by image analysis. Then, the ground motion is obtained by inverse analysis of the sliding motion. We conducted scale model experiments to evaluate our method, and the experimental results show the effectiveness of our method.