

# 振り子の画像解析による地震動の同定

須藤 敦史<sup>1</sup>・掘 宗朗<sup>2</sup>・斉藤 芳人<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 博士(工学) (株)地崎工業 土木技術部 (〒105-8488 東京都港区西新橋2-23-1)

<sup>2</sup> 正会員 Ph.D., 東京大学助教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

<sup>3</sup> 正会員 博士(工学) 前田建設工業(株)技術研究所 (〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

経済的かつ高密度の強震ネットワークの一つの候補として銀行やコンビニエンス・ストア等に設置されている監視用ビデオカメラ等に記録された画像の利用が考えられる。これより特別なハードウェアの新設は必要とせず、都市内に密な観測網を簡単に構築することができ、加えて測定機器の維持管理に手間をかけずに常時の地震観測が行える利点を有する。本研究は、都内の高層ビル最上階に設置された地震計の近傍にビデオカメラを設置し、実際の地震で観測された振り子の画像記録より入力した地震動の加速度波形の同定に関する基礎検討を行っている。

**Key Words:** Identification, Seismic Excitation, Image Analysis, Video Records

## 1. はじめに

構造物の耐震性能や都市防災を考える際に狭い範囲における地盤の振動特性やその分布を把握する必要がある。

しかし地震振動は一般に地質構造の不均質性や増幅特性の複雑さから10~100mのオーダーで変化し、加えて地震計は数多く設置されていないなどの理由により、構造物の被害調査やアンケートなどの定性的な調査によって震度として推定されることが多い。

そこで、経済的かつ高密度な地震観測ネットワークとしてコンビニエンスストアなどが保有する防犯カメラの画像記録から地震振動を推定する手法<sup>1,2)</sup>が提案されている。

本研究では、東京都内の高層ビル最上階に設置された地震計の近傍にビデオカメラを設置し、実際の地震で観測された振り子の画像記録(揺れ)より入力した地震動の加速度波形の同定に関する基礎検討を行っている。

## 2. 振り子を用いた地震観測手法

本システムは概存の画像装置の利用を前提としているため、経済的なメリットは大きいですが、ビデオカメラを所有している企業や店舗の協力や防犯上の問題点も多く抱えている。

しかし、現在の地震観測ネットワークを補完するシステムであることを考慮すると、地震防災上からも都市内にこうした高密度な観測網を構築する意義は高いと思われる。

本システムは図-1および写真-1,2に示すようにビ

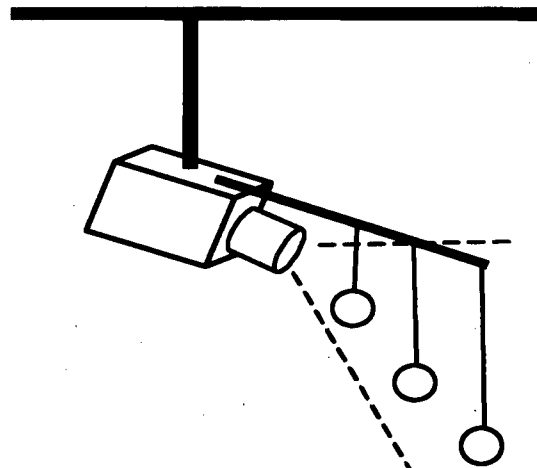


図-1 振り子観測の概念図

デオカメラに取り付けた適当な固有周期を持つ振り子(3つ程度)の動きから、画像解析により地震動の推定を行うものである。

ここで振り子は防犯上本来の目的である室内の監視を妨げないもので、かつ背景と一体化しない色・形・大きさを選定する必要がある。

## 3. 画像解析と地震動の同定解析

画像解析(振り子の揺れ)における入力地震動の同定では1)画像解析と2)地震動の同定解析の二段階の解析が必要となる。

つまり、ビデオ画像の解析より標点や振り子の動きを定量化し、さらに定量化された評点や振り子動きから入力地震動を同定するものである。



写真-1 振り子の揺れ観測(1)

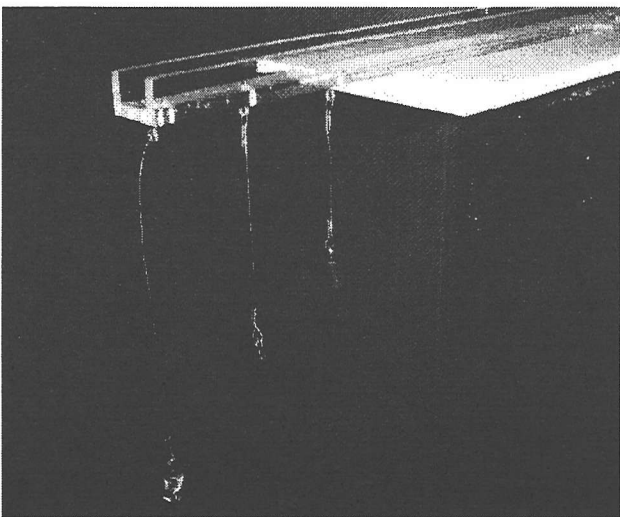


写真-2 振り子の揺れ観測(2)

### (1)画像解析

ビデオカメラを用いた高密度な地震観測ネットワークでは、膨大な画像データを解析しなければならないため、可能な限り解析を簡素化する必要が生じる。

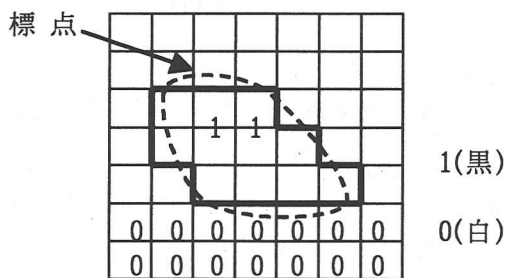


図-2 画像の二値化

そこで簡単に標点や振り子の位置を定量化するパターンマッチングを利用する。まず、画像の中で明暗がはっきりした振り子などの着目点(標点)に対して、図-2に示すようにピクセル(画素)<sup>3)</sup>単位で数値化<sup>4)</sup>する二値化処理もしくはRGB処理を行い特定のパターンを抽出する。

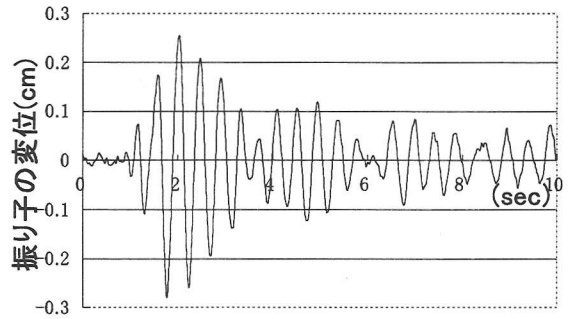


図-3 振り子の時刻歴変位波形(中)

次に、監視用ビデオカメラは一般に1秒間に30枚の画像(0.033sec間隔)を撮影するため、ビデオ画像を静止画像(画像フレーム)に分解し、分解された各画像フレームに対してパターンマッチングを行い標点や振り子の重心や境界の移動量をピクセル単位で順次求めて行く。

最後に、求められた各ピクセル移動量を変位に変換し、同時に時間方向にプロットして行くことで振り子の時刻歴変位波形が得られ、必要に応じて時刻歴速度波形・加速度波形に変換して用いることになる。

ここで、画像解析より得られた振り子の時刻歴変位波形を図-3に示す。

さらに本解析では画像の解析時間を短縮するために、解析範囲を画像全体ではなく振り子の揺れに合わせて縮小させている。

### (2)地震動の逆解析

画像から得られた変位波形における逆解析の簡略化のため、画像解析の応答変位波形をsin波形に近似する。

ここで本研究では2つの逆解析法によって加速度 $a(t)$ の推定を行っている。

**手法①:** 画像解析から算出された振り子の水平方向の変位 $x(t)$ を用いて式(4)を1自由度単振動の運動方程式と仮定する方法である。

**手法②:** 式(5)を基本として $x(t)$ を式(6)により $\theta(t)$ に置換し、式(6)に代入して $a(t)$ を推定する方法である。ここで $x(t)$ 、 $\theta(t)$ は微小なため、近似式を用いている。

ここで減衰定数 $\beta$ は、衝撃力を与えた時の振り子(3つ)の自由振動を画像解析して得られた応答変位と式(4)に固有振動数および衝撃力を入力加速度して応答変位を求めている。

手法①: 1自由度系単振動の運動方程式は式(1)で与えられる。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -ma(t) \quad (1)$$

式(1)を式(2)、(3)で置換すると式(4)が得られる。

$$\frac{k}{m} \equiv \omega_0^2 \quad (2)$$

$$\frac{c}{m} \equiv 2\beta\omega_0 \quad (3)$$

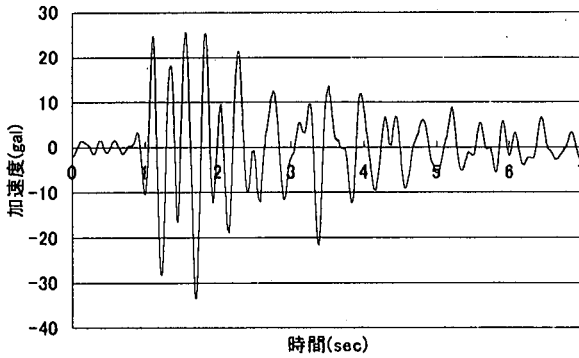


図-4 地震計の加速度波形

表-1 解析結果の比較

振り子長(cm)	長(9.1)	中(6.2)	短(4.1)
$\omega_0$ (rad/sec)	10.38	12.57	15.46
$\beta$	0.01	0.001	0.001
最大入力加速度			
手法①(gal)	21	30	-
手法②(gal)	23	31	-
地震計	約30		
最大入力加速度時の周波数			
手法①(Hz)	1.6	2.2	-
手法②(Hz)	1.6	2.2	-
地震計	2.3		

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2x(t) = -a(t) \quad (4)$$

$\beta$  : 減衰定数,  $\omega$  : 振り子の固有振動数,  
 $a(t)$  : 入力加速度

手法② : 振り子の運動方程式は式 (5) で与えられる。

$$\ddot{\theta}(t) + \omega_0^2 \sin \theta(t) = -a(t) \quad (5)$$

式 (5) を式 (6) で置換し, 減衰項を加えた式を仮定すると式 (7) が得られる。

$$\theta(t) = \sin^{-1}\left(\frac{x(t)}{L}\right) \quad (6)$$

$$\ddot{\theta}(t) + 2\beta\omega_0\dot{\theta}(t) + \omega_0^2\theta(t) = -a(t) \quad (7)$$

ここで, 東京都内 (高層ビルの最上階) で実際に観測された実地震の強震計データおよび振り子の画像記録から, 手法①・②より同定した入力加速度をそれぞれ図-5, 6 および解析結果を表-1 に示す。

図-5, 6 より画像解析により得られた加速度の最大値および波形のおおよその形状は似ているが細部において異なっている。

また, 表-1 より糸の長さが中間の振り子と長い振り子における最大加速度の同定値はほぼ適当な値が得られるが, 手法①・②共に周期に若干の相違が見られる。

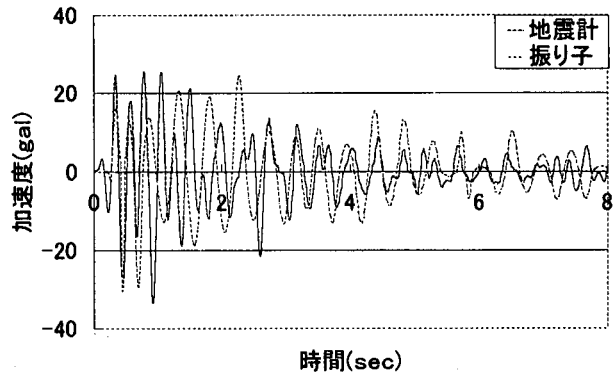


図-5 地震計と手法①による加速度

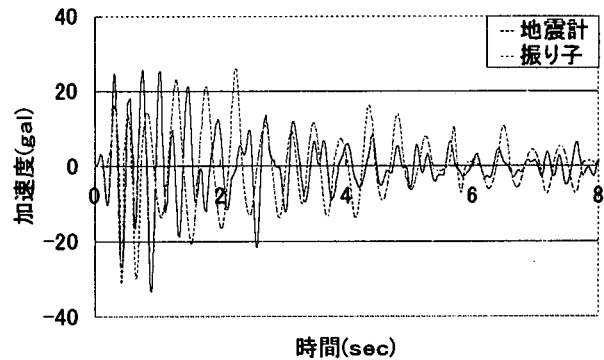


図-6 地震計と手法②による加速度

### (3) フーリエ解析

波形の周期特性を検証する目的で, 振り子の画像解析と地震計により得られた地震入力加速度を高速フーリエ変換した結果を図-7, 8 に示す。

図-7, 8 より, 最大加速度においては, 地震計より大きい値が得られたが, 周波数は表-1 より最大加速度時の周波数においては若干の誤差は有しているもののほぼ適当な値が得られている。

また, 糸の短い振り子は共振の影響を大きく受けたため, 妥当な解析値を得ることはできなかった。

## 4. 結論

本研究では経済的にかつ高密度な強震動観測ネットワークの構築とビデオカメラの画像から定量的に地震動を求める逆解析手法の開発を目的として, 振り子の揺れの画像解析から入力加速度波形を求める解析手法の基礎検討を行い, 以下に示す結論が得られた。

振り子の揺れ逆解析結果より地震入力加速度の厳密な再現までには至らなかったが, 最大入力加速度を定量的に推定することは十分可能であり, 地震震度の定量的な算出が可能になったと言える。

また逆解析された加速度波形の高速フーリエ変換より入力波形とほぼ同じ周波数でピークを示すことが分かった。

したがって, 本システムは観測機器や維持管理費を必要としない既設の地震観測ネットワークを補完する蜜な高密度な地震観測網として十分機能するものと考えられる。

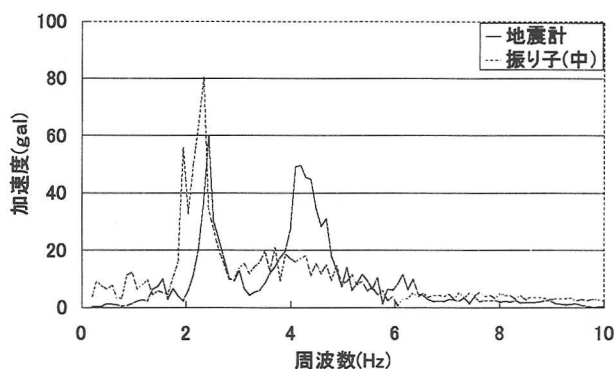


図7 手法①による周波数領域での比較

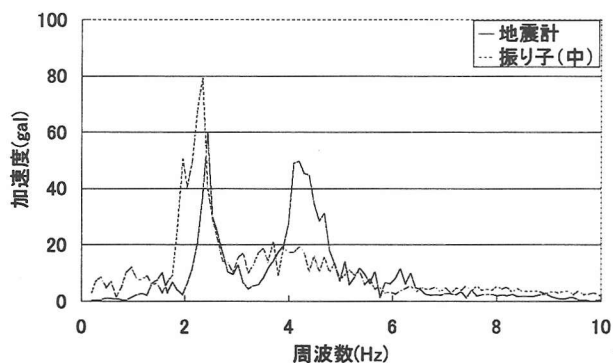


図-8 手法②による周波数領域での比較

最後に、今後の課題として解析精度の向上と振り子の固有周期による逆解析への影響の除去、および写真-3,4に示すように高密度観測ネットワークの構築・検証実験ならびに都市防災システムへの応用（震度分布の予測や被害予想）を考えていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 須藤敦史, 堀宗朗, 斎藤芳人: 画像記録を利用した地震同定システムの基礎検討, 第24回地震工学研究発表会, A8-1, pp.229-232, 1997. 水谷俊夫, 堀宗朗, 須藤敦史, 斎藤芳人: ビデオカメラを利用した強震計の提案, 第2



写真-3 防犯カメラへの地下駐車上の設置状況



写真-4 防犯カメラへの画像

- 5) 5回関東支部研究発表会, I-50, pp.67-68, 1998.
- 2) 水谷俊夫, 堀宗朗, 須藤敦史, 斎藤芳人: ビデオカメラを利用した強震計の提案, 第25回関東支部技術研究発表会, I-50, pp.67-68, 1998.
- 3) 安居院 猛, 長尾智晴: 画像の処理と認識, 昭晃堂1996. など
- 4) 安達修一・後藤寛英・堀宗朗: ビデオ画像を用いたシキリ盛土滑り面の応力-ひずみ関係の逆解析, 第31回地盤工学研究発表会, pp.15-16, 1996.

(2001.5.25 受付)