

## 管内事故防止のための特定作業に着目した異常状態判定 Detection of Abnormal conditions Focusing on Specific Tasks in Sewer Maintenance

中内 亮介<sup>†</sup> 林 利毅<sup>†</sup> 原田 史子<sup>‡</sup> 島川 博光<sup>‡</sup> 中川 晃一<sup>§</sup>  
Ryosuke Nakauchi Toshiki Hayashi Fumiko Harada Hiromitsu Shimakawa Koichi Nakagawa

### 1. はじめに

全国の下水管の総延長は約 400,000km に及び、その中でも施工から 50 年を経過した管延長は 7000km にも達しており、管の老朽化が進んでいる。下水道サービスを安定的かつ継続的に提供していくためには、定期的な点検、補修が不可欠である。そのような状況の中、管内の点検、補修作業中に埋設物破損や転落や転倒といった事故が発生している。

これらの事故が発生する原因として、作業員が疲労などの異常状態に陥ったまま作業を続けてしまっていることが考えられる。管内は環境が悪いので、地上よりも作業中に疲れやすく異常状態に陥りやすい。そのため管内作業中に異常状態に陥った作業員を発見する必要がある。

人は疲労などの異常状態に陥ると作業中の身体の動きに変化が現れる。このことから作業中の身体の動きを分析することで異常状態を判定できると考えられる。

本論文では、作業中の身体の動きから作業員の異常状態を発見する手法を提案する。本手法では、作業員の作業中の身体の動きと事前に取得した正常状態時の身体の動きを比較して、どの程度異なる動きをしているのかを分析することで異常状態を判定する。

本手法で異常状態時を判定できるかどうかを検証するために、被験者 8 人に正常状態時と異常状態時で管内で想定される動作をしてもらい、どのくらい精度の高い閾値を作成できるのか実験により評価した。その結果、再現率を 100% に保ち、適合率がある程度高い閾値を求められた。これより、ある程度誤検出してしまおうが、この手法で作業員の異常状態を検出できることが確認できた。

### 2. 管内作業における作業員の異常状態

#### 2.1 管内事故の現状

現在下水管内での作業中に事故が多発している。事故の内容には作業員の過失による埋設物の破損や墜落、転倒がある。これらの事故が起こる原因としては、疲労などの異常状態に陥ったまま作業を続けてしまっていることが考えられる。異常状態とは疲労などが原因で作業員がふらついたり、正確に作業ができない状態のことを指す。作業員が異常状態に陥ると、作業中にミスが発生しやすくなり事故に繋がる。このような異常状態を早期に発見し、適切な対処をすることで事故を未然に防げる。

作業員は管内に入る前に健康状態を確認する。管内に入る前から異常状態に陥っていた場合はこの時点で発見できる。下水管内での点検作業は基本的に午前と午後 3 時間ずつ行いが、管内はライトがないと手元が見えないほど暗く、悪臭もする。同じ 3 時間の作業でも地上に比べて、管内で作業をしているほうがはるかに早く異常

状態に陥る。そのため管内での作業中に異常状態に陥ってしまった作業員を発見することが求められている。

管内の作業員の状態を把握する手段として既存研究 [1] のように、管内の壁にカメラを設置し、作業員を監視する方法が考えられる。しかし、管内には電源がないためにカメラを設置できない。さらに、管内が満水になるとカメラが流されてしまったり、流れてきた固形物がカメラに衝突して破損してしまう可能性がある。カメラを設置できる環境にするためには大掛かりな処置が必要があり、非現実的である。下水管内で異常状態を発見するさいに管内に機器を設置することは難しく、作業時に地上から機器を持ち込むことが有効である。

#### 2.2 既存研究

管内でも適用可能な方法で異常状態を検出している研究もある。

既存研究 [2] は頭に加速度計を装着することにより重心動揺評価をしている。人の重心保持機能は心理的・精神的負荷に影響されやすく管内作業員の異常状態時に低下する可能性がある。しかしこの方法では重心動揺を評価するために作業員が静止する必要があり、作業に支障をきたす可能性がある。管内作業中での適用は難しい。

既存研究 [3] では左側頭部に加速度センサを装着し、人の歩行動作中の頭の傾きから歩行中のバランスを保つシステムを提案している。しかし、点検作業では頭が常に前に向いていることは少なく、壁や地面を見回しながら歩くことが多いので、歩行中の頭の傾きが大きく変化してしまい正確な分析が困難である。異常判定時には頭以外の部分に着目する必要がある。

既存研究 [4] では靴に取り付けた圧力センサを用いることで歩行時の疲労検知を行っている。この手法では歩行時の下半身の異常状態しか発見できない。疲労が原因で異常状態に陥った場合に、必ずしも下半身の動きに変化が現れるとは限らない。また、圧力センサでは地面に足がついたときの圧力を測るので、歩行時の足の上がり具合や腰の揺れ具合がわからない。異常状態では歩行時にふらついたり、足があがらなくてつまずくことが予想されるが、圧力センサではそのような異常検出は難しい。

### 3. 身体の動きに着目した異常状態の検出

#### 3.1 事故防止のための異常状態の検出

作業員は異常状態に陥ったときに、作業中の身体の動きに変化が現れる。そこで本論文では、管内での事故防止のために、作業員の作業中の身体の動きを分析することで作業員の異常状態を判定する手法を提案する。本手法の流れを図 1 に示す。複数の加速度センサを身体に装着して作業をしてもらうことで、作業中の身体の動きを取得し、事前に取得しておいた正常状態時の身体の動きと比較することで異常状態を判定する。

<sup>†</sup>立命館大学大学院 理工学研究科

<sup>‡</sup>立命館大学 情報理工学部

<sup>§</sup>三菱電機株式会社

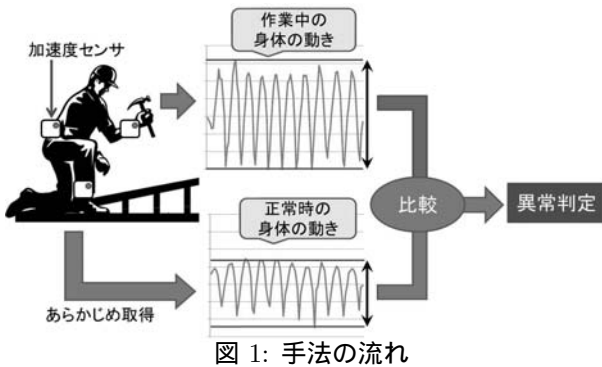


図1: 手法の流れ

本手法により、異常状態を発見し、作業員本人や管理者に異常状態に陥っていることを通知する。作業員本人に通知することで、作業員は自分が疲れていることを自覚し、注意して作業するようになる。また、管理者に通知し、異常状態に陥っている作業員に対して、管理者が休憩や帰還を促すことで、事故を防止できる。異常状態であると通知された作業員に対して管理者は注意を払うようになるので、万が一事故が発生しても対応が早くなることが期待される。

### 3.2 作業中の身体の動きの取得

本手法では、作業中の身体の動きを取得し、これを正常状態時の身体の動きと比較することで、どの程度動きが異なるかを分析して異常状態を判定する。異常状態を判定するには作業中の身体の動きを異常と判断するための閾値が必要である。閾値を作るために事前に作業員の正常状態時と異常状態時の身体の動きを取得する。

本手法での正常状態というのは正確に作業ができる状態のことを指す。しかし、正常状態時の身体の動きは日によってある程度変化する可能性がある。そこで本手法では、正常状態時の身体の動きを複数日に分けて取得し、その中から選出した代表的な身体の動きを閾値を作成するときの正常状態時の身体の動きとする。

閾値を作るために、本手法では作業員の異常状態の身体の動きも事前に取得する必要がある。作業員に管内作業中に加わる負荷と近い負荷を与えて作業員の異常状態を再現することで、異常状態時の身体の動きを取得する。

本手法では、作業員は手首、腰、足首の3箇所に加速度センサを装着する。加速度センサは小型化が進んでいて身体に装着しても違和感が少なく作業に支障がない。さらに、本手法では作業中の作業員の身体の動きから異常状態を判定するので、作業以外の特別な行動が必要なく、作業員の負担とならない。腕の怪我などの下半身には影響がでにくいですが、上半身に影響がでやすい異常状態も加速度センサを用いれば検出できる。また、腰の揺れや足の上がり具合といったより細かい動きを取得できる。

### 3.3 異常状態の身体の動き

本手法では、作業員が異常状態に陥ったときの变化が現れる身体の動きとして、以下の3つに着目する。

- 管内で壁を叩き、壁の状態を確かめる動作時の腕の振りの大きさ
- 管内での歩行動作時の腰の揺れの大きさ
- 管内での歩行動作時の足の動き

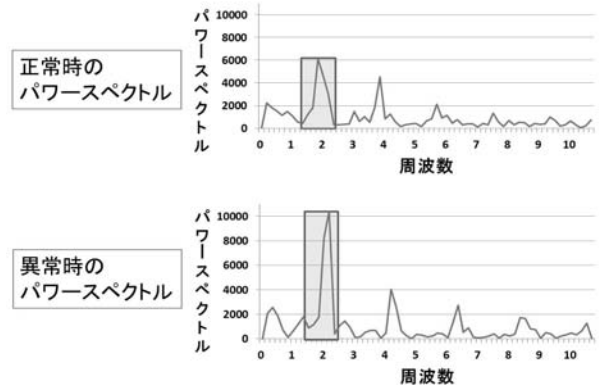


図2: 正常状態時と異常状態時のパワースペクトル

異常状態時の壁を叩く動作時の腕の振りの動きに変化が現れるかを検証するために簡易実験を以前に行った。実験では手首に加速度センサを装着し、管内で想定される壁の状態を確かめるための壁を叩く動作において、10km 走る前を正常状態、走った後を異常状態とし、身体の動きを取得した。正常状態時と異常状態時の身体の動きに変化が出ているかどうかを調べるため、取得した手の動きをフーリエ解析した。その結果が図2となった。図2からわかるように、異常状態時の周波数が2のときのパワースペクトルが正常状態時と比較して4000ほど上昇しているため、異常状態時には壁を叩く動作時の腕の振りが大きくなっていると判断できる。腕の振りが大きくなったのは、異常状態に陥ったことにより壁を叩く動作時の腕の振りに歯止めが効かなくなっていることが原因と考えられる。歯止めが効かないということは作業の正確さが欠けている状態といえる。この状態は作業員の過失による事故が起きやすい状態である。この状態を発見できれば作業員の過失による事故を未然に防げる。

既存研究 [4][5] から、異常状態下の歩行動作時にバランスが悪くなるということが明らかになっている。バランスが悪くなるということは、身体の重心がぶれるということである。よって、異常状態下での歩行動作時には身体の揺れが大きくなることが予想される。

同様に、既存研究 [4][6] から、異常状態下での歩行動作時に足の動きに変化が現れることが明らかになっている。異常状態時は足が上がらなくなり、足を引きずりながら歩くことが予想される。

身体の重心がぶれたり、足が上がらなくなると、歩行時にふらついたり、つまずいて転んだりする可能性が高い。ふらついていることから集中力も低下していると判断できる。この状態を発見し、的確な対策を講じることで、作業中の事故を未然に防げる。

### 3.4 身体の動きの数値化

本手法では、作業員の作業中の一連の行動の加速度データから叩く動作と歩行動作の部分があらかじめ切り出されていることを前提とする。身体の動きを比較するには、身体がどれだけ動いているかの指標が必要である。そこで本手法では、身体の動きを捉えるのに加速度の分散値を用いる。分散値を用いることで身体の動きのばらつきを数値化し、比較しやすくする。しかし、管内で壁を叩く動作は叩く場所が変わる場合がある。叩

く場所が変わると加速度センサにかかる重力方向が変わり身体の動きの比較が難しい。本手法では3軸加速度の3軸それぞれの分散値の和を用いることで身体の動きを数値化して比較する。重力は3軸のどこかに必ず掛かっているため3軸加速度の分散値を合成することにより加速度センサのどの向きに重力が掛かっているかを意識せずに比較できる。

手の動きは壁を叩いている動作中の叩き初めから叩き終わりまでの加速度から分散値を算出する。腰や足の動きは歩行動作中のデータから一定時間ごとに区切って分散値を算出する。身体の動きが大きく速く動けば加速度の波の振幅が大きくなるので分散値は大きくなる。逆に、動きが小さく遅い場合の分散値は小さくなる。

異常状態時の身体の動きの変化は個人によって異なる。作業員が異常状態に陥ると、手、腰、足のどの部分にどのような変化が現れるのかによって閾値を作成し異常状態を判定する。異常状態時に分散値が大きくなる場合、作業中に取得した身体の動きの分散値が閾値よりも大きければ異常状態と判定する。分散値が小さくなる場合、分散値が閾値よりも小さければ異常状態と判定する。身体の動きが一定に定まらなくなり、分散値のばらつきが大きくなる場合、異常状態時の分散値のばらつきが大きい場合、1の場合と2の場合の両方の閾値を設定する必要がある。よって事前に正常状態時と異常状態時の身体の動きを収集し分析することで、どの部分にどのような変化が現れるのかを調査する必要がある。

## 4. 実験・評価

### 4.1 実験目的

本手法では事前に、作業中の身体の動きが異常状態かどうかを判定するための閾値を決める。本実験では正常状態時と異常状態時の身体の動きを取得する。取得した正常状態時と異常状態時の身体の動きから、すべての異常状態時の身体の動きを検出し、可能なかぎり正常状態時の身体の動きを誤検出しないような閾値を作成する。このときに作成した閾値の精度が高ければ、正常状態時と異常状態時の身体の動きの変化を本手法を用いることで捉えられていると判断できるので、異常判定を行う上で本手法が有用であるといえる。本実験では、閾値の精度を表す指標としてどの程度異常状態時の身体の動きを異常と判定できるかを表す再現率と、どの程度正常状態時の身体の動きを異常と判定してしまうかを表す適合率の2つを用いる。これらの指標が高い数値を表すと閾値の精度が高いと判断でき、本手法の有用性を証明できる。

### 4.2 実験内容

本実験の被験者として20代男性8名を対象とする。図3に実験の様子を示す。被験者は手首、腰、足首に加速度センサを着ける。本実験では、管内で想定される壁を叩いて壁の状態を確認する動作と、管内での歩行動作中の身体の動きを取得した。壁を叩く動作は、叩く場所が日によって変わらないように地面から高さ1.4mの場所に固定して身体の動きを取得した。歩行動作は、被験者に制限を設けずに普段どおり10m歩行してもらい身体の動きを取得した。被験者は「歩行動作 壁を叩く動作」の流れで2回を1セットとして、1日5セット行った。

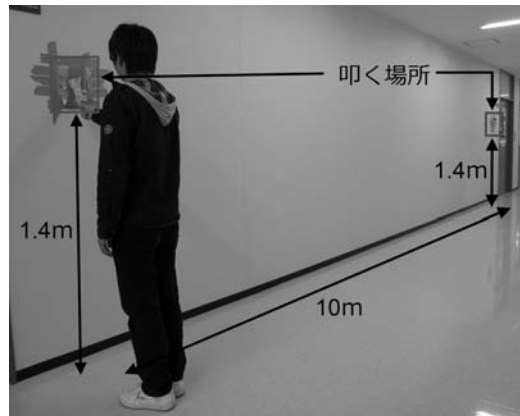


図3: 実験の様子

加速度のデータは50msに一回の間隔で取得した。

正常状態時であっても、日によって作業中の身体の動きはある程度変化する可能性がある。そこで本実験では、閾値を作成するときの正常状態時の身体の動きの代表値として、試験的に5日に分けて取得した身体の動きの最頻値を採用した。叩く動作などでは被験者は慣れていないため外れ値が多く存在する。平均値を使うと代表値が外れ値に大きく影響されてしまい、正確なデータとして扱えないが、最頻値を採用することによって正常状態時に現れる外れ値を除外できる。

本実験では、被験者が3時間の歩行をした後を異常状態時として身体の動きを取得した。管内の点検作業は3~4時間くらい行うので、3時間の歩行をすることで、管内の点検作業中に加わる肉体的負荷と同じ負荷を与えられる。さらに、3時間の歩行にはスポーツなどのように面白味がなく、管内作業のような仕事をするときに加わる精神的負荷も与えられる。3時間の歩行では、8人の被験者は3つのグループに分けて行った。

正常状態時のデータは5日分で50個、異常状態時のデータは1日分で10個それぞれ収集した。

正常状態時と異常状態時に取得した3軸加速度から分散値をそれぞれ算出し、それらの和を求める。個人によって異なる変化の現れる部分と変化の種類を分析することで、精度が高くなるような閾値となる値を見つける。管内の事故は作業員の人命がかかっているため、異常状態をとりこぼしなく検出する必要がある。閾値作成時には再現率を100%に高めた上で、適合率が最大となるような値を閾値として作成した。

### 4.3 実験結果

歩行動作については異常状態を判定するときには腰と足の2つの指標を組み合わせることで閾値の精度を上げられる。組み合わせの種類には、腰と足の両方で検出すると異常状態と判定するANDの組み合わせと腰または足のどちらかで検出すれば異常と判定するORの組み合わせがある。腰と足の組み合わせが7名の被験者、残りの1名には足の動きのみを用いて閾値を作成した。叩く動作については手の動きのみを用いて閾値を作成した。

実験の結果を表1、表2に示す。表1は、被験者それぞれの叩く動作に対しての閾値の精度をまとめたものである。表2は、被験者それぞれの歩行動作に対しての閾

表 1: 叩く動作の閾値の精度

| 被験者 | 検出 | 異常検出 | 再現率  | 適合率 |
|-----|----|------|------|-----|
| A   | 10 | 50   | 100% | 17% |
| B   | 10 | 47   | 100% | 18% |
| C   | 10 | 45   | 100% | 18% |
| D   | 10 | 49   | 100% | 17% |
| E   | 10 | 50   | 100% | 17% |
| F   | 10 | 50   | 100% | 17% |
| G   | 10 | 49   | 100% | 17% |
| H   | 10 | 43   | 100% | 19% |

表 2: 歩行動作の閾値の精度

| 被験者 | 検出 | 異常検出 | 再現率  | 適合率 | 閾値を設けた部分 |
|-----|----|------|------|-----|----------|
| A   | 10 | 16   | 100% | 38% | 腰 OR 足   |
| B   | 10 | 38   | 100% | 21% | 腰 OR 足   |
| C   | 10 | 1    | 100% | 91% | 腰 AND 足  |
| D   | 10 | 17   | 100% | 37% | 腰 AND 足  |
| E   | 10 | 14   | 100% | 42% | 腰 AND 足  |
| F   | 10 | 41   | 100% | 20% | 腰 OR 足   |
| G   | 10 | 25   | 100% | 31% | 足        |
| H   | 10 | 29   | 100% | 26% | 腰 AND 足  |

値の精度をまとめたものである。

叩く動作に対しての異常判定の閾値では、すべての被験者で適合率が 20%を下回った。

歩行動作に対しての異常判定の閾値では、適合率が 20%~30%の被験者が 3 名, 30%~40%の被験者が 3 名, 適合率が 40%以上の被験者が 2 名となった。再現率は 100%であるが, 6 名の被験者の適合率が 40%を下回った。

#### 4.4 考察

実験結果より, この手法だけでは異常状態だけを検出することは難しいが, 正常時の身体の動きを異常状態と判定してしまうことを防ぐことがわかった。本手法を, 異常状態を判定するためのフィルタとして活用することで事故発生リスクを大きく削減できる。

歩行動作の結果より, 適合率が 91%の被験者に対して, 適合率が 20%の被験者もいることから, 異常状態時の身体の動きに現れる変化の大きさが人によって異なることがわかる。変化の小さい被験者は今回の実験では身体の動きに変化が現れるような負荷が与えられなかった。変化の少ない被験者の異常状態時の身体の動きの特徴を発見するには, 段階的に負荷をかけてどのような変化が現れるかを見る必要がある。負荷をかけて実験をすることを繰り返すことで, 徐々に身体の動きに変化が現れる部分を見つけられる。変化の特徴を見つけられるなら, その部分を分析して異常状態を判定できる。

歩行動作時の異常判定で, 被験者 C と他の被験者との適合率の差が大きいことがわかる。被験者 C は初めに実験を行ったので 3 時間歩行から実験までの待ち時間がなかったが, 他の被験者は実験開始まで 5~10 分の待ち時間があつた。疲労状態では注意力が散漫になるが, この待ち時間で, 疲労状態から少し回復し注意して歩くことを意識するようになった可能性がある。全被験者が 3 時間歩行の最後の 10 m を異常状態時の歩行として計測できれば, 本実験で異常状態時に腰や足に変化が少なかった被験者でも, 変化が大きくなることを期待される。

本実験では叩く動作の異常判定の閾値は精度が低かつ

た。被験者のすべてが点検作業の未経験者なので, 歩行動作に比べて, 壁を叩く動作に慣れていない。叩く動作に慣れていないので正常状態時のデータでばらつきが大きくなり, 誤検出が増え適合率が下がってしまった。

2 名の被験者から疲れると 10m 歩行した後すぐに静止できないという意見を頂いた。このことから, 異常状態時に陥ると, 動作が終了してから身体を静止させるまでの時間が長くなることが考えられる。この時間を分析することで異常状態を判定できると期待できる。

## 5. おわりに

本論文では, 管内の事故防止のために, 作業中の作業員の身体の動きに着目し, 異常状態を判定する手法を提案した。作業員の身体に複数の加速度センサを装着することで作業中の身体の動きを取得し, 事前に取得した正常状態時の身体の動きと比較することで異常状態を判定をする。作業員の異常状態を検出し, 作業員と管理者に通知することで, 適切な対策をとり事故を未然に防げる。

本手法の有用性を確認するために, どの程度精度の高い閾値が作成できるか評価実験を行った。その結果, 再現率を 100%に保ちながら, ある程度適合率を高められた。これより, ある程度誤検出してしまうが, 本手法で作業員の異常状態を検出できることが確認できた。

被験者から疲れると歩行した後すぐに静止できないという意見があつた。そのため, 人は異常状態に陥ると動作が終了してから身体を静止させるまでの時間が長くなることが考えられる。この時間を分析することで異常状態を判定できる可能性がある。

今後は, 静止にかかる時間の分析も含めより異常判定の精度を高めるため研究を続ける予定である。

## 参考文献

- [1] 南里卓也, 大津展之: 複数人動画像からの異常動作検出, 情報処理学会論文誌, コンピュータビジョンとイメージメディア, vol.46, No.15, pp.43-50, 2005
- [2] 柘幸伸: 3次元加速度計による重心動揺評価, 理学療法科学, vol.19, No.4, pp.305-309, 2004
- [3] III. Wall, C., M.S. Weinberg, P.B. Schmidt, and D.E. Krebs. Balance prosthesis based on micromechanical sensors using vibrotactile feedback of tilt. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, Vol. 48, No. 10, pp. 11531-161, Oct 2001
- [4] 米川賢治, 米澤拓郎, 由良淳一, 中澤仁, 高汐一紀, 徳田英幸: FASH: 圧力センサを用いた歩行時の疲労検知, 情報処理学会全国大会講演論文集, vol.71, No.3, pp.3-301, 2009
- [5] 吉野 公三, 元重 朋子, 荒木 勉, 松岡 克典: ストレスと疲労がヒトの生理・歩行リズムに与える影響に関する研究, パイオエンジニアリング講演会講演論文集, vol.2003, No.15, pp.113-114, 2003
- [6] 谷川 智宏, 太田 茂, 長尾 光城, 宮川 健: 携帯型 3 軸加速度計を用いた歩行状態の計測・加速度による加齢の影響の評価, 川崎医療福祉学会誌, vol.12, No.1, pp.103-107, 2002