手すり加速度を用いたエスカレーターチェーンの弛み異常診断

薦 田 広 幸*・平 位 隆 史*・鷺 見 和 彦*
伊 藤 寛**・志 賀 諭***

Fault Detection of Chain Tension in Escalator Using Handrail Acceleration

Hiroyuki TSUTADA*, Takashi HIRAI*, Kazuhiko SUMI*,
Yutaka ITOH** and Satoshi SHIGA***

This paper proposes a new method of chain tension fault detection for escalators. This method can detect the loose tension in the chain automatically using an accelerometer attached to the handrail without overhauling the escalator, which is effective for maintenance. First, the transitional pattern of the handrail vibration when starting up the escalator in the reverse direction was studied. The first pattern involves the vibration generated by starting up the upper sprocket, and the second pattern involves the vibration generated by starting up the handrail. When tension of the chain is loose, the time delay between the first pattern and the second pattern, called the “start up delay time”, is increased. Therefore, the loose tension of the chain can be detected by the start up delay time. Based on these characteristics, this paper proposes a method of detecting the start up delay time automatically using signal processing techniques. A chain fault detection system was produced, and system tests were conducted to evaluate the performance for several loose tension conditions using real escalators. The test results showed that the start up delay time increased in proportion to the looseness of the chain tension. Therefore, it is possible to detect chain tension faults using the proposed method.

Key Words: fault diagnosis, inspection, maintenance, escalator, accelerometer, vibration, chain tension fault, condition based maintenance

1. ま え が き

エスカレーターの品質・信頼性向上は、近年の公共機関への適用推進によりますます重要となっている。また、流通系顧客の休業日減少や営業時間の延長により、保守時間が十分に確保できない場合も多くなっている。このような背景のもと、最低限の停止時間で効果的な保守を実現するために、状態を自動で診断する技術への要求が高まっている^{1)~6)}。そこでわれわれは、加速度センサや音センサを利用してエスカレーターの異常兆候・劣化進行状況を定量的に把握する方法について検討してきた^{7),8)}。本論文では新たに、エスカレーター手すり上の加速度を用いて、手すりチェーン

の弛み異常を定量的に検出する方法を提案する。

現行のエスカレーター保守点検作業においては、手すりチェーンテンションを1~3ヶ月ごとに点検し、手入れ要否を判定している⁹⁾。この作業は、一般的に手作業で行なわれており、ステップを数段取り外した上で、複数の手すりチェーンに触って振幅を測定するため、約30分程度の作業時間を要していた。また、磁気センサを用いてチェーンの連結部位間の寸法伸びを直接測定することで、手すりチェーンの伸びを定量的に測定する装置¹⁰⁾が提案されているが、装置の取り付けに必要なコストや作業時間を考慮すると、既設エスカレーターの保守点検用途には不適であった。

これに対し提案手法では、手すり上に加速度センサを仮設し、エスカレーター起動時における1秒程度の加速度波形を測定して分析することで、手すりチェーンテンション弛みを検出する。本手法は、エスカレータを分解することなく、短時間で手すりチェーン弛みを定量的に検出することができるため、現行方式と比較して大幅な時間短縮を図ることが可能である。

最初に、今回の検討対象である手すり駆動装置の概要と、エスカレーター起動時における手すりチェーン挙動について分析した結果を述べる。そして、本論文においてキーポイントとなる概念である「起動遅延時間」について説明する。つ

* 三菱電機(株)先端技術総合研究所 尼崎市塚口本町8-1-1

** 三菱電機(株)稲沢製作所 稲沢市菱町1番地

*** 三菱電機ビルテクノサービス(株) 東京都荒川区荒川7-19-1

* Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R&D Center, 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki

** Mitsubishi Electric Corporation, Inazawa Works, 1 Hishimachi, Inazawa

*** Mitsubishi Electric Building Techno-Service Co., LTD., 7-19-1 Arakawa, Arakawa-ku, Tokyo
(Received March 12, 2008)

(Revised July 3, 2008)

ぎに、手すり加速度を用いた起動遅延時間の算出方法を説明する。具体的には、チェーン異常検出システムのハードウェア概要、および加速度波形から起動遅延時間を算出する信号処理手法について述べる。最後に、提案システムで算出された起動遅延時間に基づいて、さまざまな手すりチェーン弛みが検出可能かどうか、複数の実機エスカレーターを使用して評価を行なった結果について述べる。

2. エスカレーター起動時のチェーン挙動

2.1 手すり駆動装置

今回の検討対象である手すり駆動装置について、Fig. 1 に示した4個ローラタイプの模式図を用いて説明する。

ドライブユニットを駆動させると、駆動チェーンが循環して、上部スプロケットが回転する。上部スプロケットにはステップチェーンと第1手すりチェーンが巻かれており、上部スプロケットが回転すると、ステップチェーンが循環してステップが動作するとともに、第1手すりチェーンが循環して手すり駆動主軸が回転する。手すり駆動主軸には第2手すりチェーンが巻かれており、手すり駆動主軸が回転すると、第2手すりチェーンが循環して手すり駆動ローラが回転する。手すり駆動ローラと手すりは圧接されており、手すり駆動ローラが回転すると、手すりが動作する。Fig. 1では第2手すりチェーンは1本しか図示していないが、実際には手すり駆動主軸を介して左右の手すりを駆動するため、左右におのおの1本ずつ存在する。なお、手すり駆動装置には、Fig. 1よりも手すりチェーンや手すり駆動ローラがさらに多いタイプも存在するが、基本的に動力の伝達機構は同様と考えてよい。

手すりチェーンの弛みが進行すると、チェーンとトラスの接触による異音の発生、チェーンの歯飛び、スプロケットの異常磨耗、チェーンの切断、手すり停止などの重大故障につながる。ここで、トラスとはエスカレーターの自重および積載荷重を支える鋼製の構造・骨組み部分のことを指す。そこ

Fig. 1 Schematic of handrail driving unit

で、1~3ヶ月ごとに実施される保守点検作業において、手すりチェーン弛みの兆候を検出することが必要とされている。本論文では、エスカレーターを分解することなく、この手すりチェーン弛みを検出することを目的とする。

2.2 起動遅延時間

ここでは、エスカレーターを反転起動させたときのチェーン挙動について検討する。第1手すりチェーン弛み発生時の挙動を例として、Fig. 2を用いて説明する。

エスカレーターを上昇運転させると(Fig. 2(1)の状態)、第1手すりチェーンの下部が弛んだまま循環する。つぎに、運転を停止させると(Fig. 2(2)の状態)、第1手すりチェーン下部が弛んだ状態で停止することになる。つぎに、先ほどと反対方向に運転開始させる、すなわち下降運転させると(Fig. 2(3)の状態)、上部スプロケットの動作開始直後に、第1手すりチェーン下部に発生している弛みを巻き取ることになる。第1チェーンの弛みを巻き取っている間は手すり駆動主軸は停止して手すりは動作しない。完全に第1手すりチェーンの弛みを巻き取った時点で手すり駆動主軸が回転し、第2手すりチェーンが循環して手すり駆動ローラが回転し、手すりが動作することになる(Fig. 2(4)の状態)。

このときの上部スプロケット動作開始時刻と手すり動作開始時刻との時間差を「起動遅延時間」と定義する。反転起動時においては、手すりチェーンが弛むにつれて、手すり

Fig. 2 Chain behavior when starting up the escalator in the reverse direction

チェーンの弛みを巻き取るのに時間を要するため、起動遅延時間が増加すると考えられる。よって、起動遅延時間の変化を測定することができれば、手すりチェーンの弛みを検出可能であると考えられる。

なお、ここでは説明を省略したが、下降運転から上昇運転へと反転起動させた場合も同様の原理により検出可能であるし、第2手すりチェーンの弛みについても同様の原理により検出可能であると考えられる。

3. 手すり加速度を用いた起動遅延時間の算出

本章では、エスカレーターを分解することなく、起動遅延時間を算出する方法として、手すり加速度を利用した方法を提案する。

3.1 システム構成

チェーン異常検出システムの構成を Fig. 3 に示す。

左右おのおの手すり加速度を測定するデータロガー2個、データロガーから無線伝送された測定データを受信するレシーバー、測定データを分析するPCで構成される。データロガーは、1軸半導体加速度センサ、信号測定・記録を行なうメイン基板、無線モジュール、2.4 GHz アンテナ、バッテリー、で構成される。加速度センサの測定レンジは $\pm 1.7\text{ G}$ 、周波数帯域はDC $\sim 2.5\text{ kHz}$ であり、感度方向を手すりの進行方向とした。入力部にカットオフ周波数100 HzのRCフィルタ(ローパスフィルタ)を挿入し、サンプリング速度1 k sample/secでデータ収集を行なった。なお、データロガーには、手すりへの脱着が容易なアタッチメントが取り付けられており、点検に要する時間はセンサ脱着を含めて数分程度である。

3.2 起動遅延時間の算出

反転起動時における手すり加速度の測定波形例を Fig. 4 に示す。Fig. 4 の各グラフについて、(a)は上昇運転後停止 $\rightarrow$ 下降運転 $\rightarrow$ 停止時の測定波形全体、(b)は(a)の先頭部分を拡大した波形、(c)は(b)の加速度軸を拡大した波形、(d)は(c)の加速度を積分して得られた速度波形、を示している。

Fig. 3 System configuration

Fig. 4 に示した加速度波形には、二つの過渡的な振動パターンが見られている。時刻 t_1 から始まる第1の振動パターンは、振幅約 $\pm 20\text{ mG}$ の微小振動で、20 Hz $\sim 100\text{ Hz}$ 程度の比較的高い周波数成分を有している。これは、上部スプロケットが各ステップとステップチェーンを介して連結されているため、動作開始に伴って発生したエスカレーターの全体振動を捉えていると考えられる。一方、時刻 t_2 から始まる第2の振動パターンは、最大振幅 $\pm 100\text{ mG}$ 以上で、DC $\sim 20\text{ Hz}$ 程度の比較的低い周波数成分を有している。これは、手すりの動作開始に伴う手すりの加速度変化そのものであり、低周波振動はリング状の手すりが長手方向に引っ張られることで生じた弾性変形を捉えたものといえる。なお、第1の振動パターンと比較して周波数成分が低くなったのは、手すりの主成分がゴムであるためと考えられる。ビデオカメラや各種センサを用いて、手すり駆動装置の起動時挙動と加速度波形を詳細に照合した結果、時刻 t_1 は上部スプロケット動作開始時刻に一致し、時刻 t_2 は手すり動作開始時刻に一致することを確認した。よって、加速度波形から時刻 t_1 と t_2 の時間差を検出できれば、起動遅延時間を求めることが可能となる。

Fig. 4 Sample of measured signal

つぎに、加速度波形から起動遅延時間を求める信号処理方法について、Fig. 5のフローチャートを用いて説明する。

手順(1)では、上昇運転→停止→下降運転→停止といった動作を数秒程度の時間間隔で繰り返し、反転起動時における加速度波形を複数回測定する。

手順(2)では、加速度波形全体から起動前後部分のみを切り出す。Fig. 4(a)に見られるように、起動時には明瞭な振幅ピーク値が観測されるので、単純なしきい値処理により、起動前後1 sec程度の波形をおおまかに切り出すことができる。

手順(3)では、加速度センサおよびA/DコンバータにおけるDCドリフトの影響を最小化するため、手順(2)で切り出された波形に対して、オフセット除去を行なう。また、エスカレーター振動以外の高周波ノイズを除去するため、カットオフ周波数100 Hzのデジタルローパスフィルタを適用する。

手順(4)では、上部スプロケット動作開始時刻 t_1 を検出する。Fig. 4(c)に示すように、静止状態の振幅に基づいてしきい値を設定し、最初にしきい値を超えた時点をもととする。

手順(5)では、手すり動作開始時刻 t_2 を検出する。手順(3)で得られた波形を積分して速度波形(Fig. 4(d))を求めた後、速度波形が定常時の手すり速度の1%(本エスカレーターでは5 mm/sec)を超えた時点をもととする。加速度振幅の最大値は、チェーンの弛み具合やエスカレーターの設置条件に応じて大きく変化するため、しきい値設定を一意に行なうことは難しい。一方、手すり速度の最大値、すなわち定常時の手すり速度は、エスカレーターの運用条件で一定に決定されるため、しきい値設定が容易である。よって、手すり速度を用いて時刻 t_2 を求めることで安定した検出が可能となる。

手順(6)では、以上の方法により求められた時刻値をもと

に、起動遅延時間を $(t_2 - t_1)$ により求める。

以上の手順(2)～(5)を繰り返し、複数回の起動遅延時間平均値を得る。

4. 実機評価試験

本章では、提案システムで算出された起動遅延時間に基づいて、さまざまな手すりチェーン弛みが検出可能かどうか、複数の実機エスカレーターを使用して評価を行なった結果について述べる。

4.1 試験ケース1

Fig. 1に示した手すり駆動装置を有するエスカレーター(4個ローラタイプ、モータ容量3.7 kW)に対し、前章で述べたシステムを用いて反転起動時における起動遅延時間を調べた。まず、エスカレーターを上昇運転させ、データロガーを手すり駆動ローラの上部直近に停止させた後、下降運転させた際における左右手すりの起動遅延時間を測定した。

試験条件は、下記の2パターン実施した。

(a) 第1手すりチェーンの弛み量を変化させた場合

(b) 第2右手すりチェーンの弛み量を変化させた場合

弛み量は、チェーンテンション調整用ボルトを用いて調整し、チェーンの振れが最も大きくなる位置で、ゲージを用いて振れ幅を実測した。起動遅延時間は各条件につき3回ずつ測定した。

チェーンテンション正常時と弛み時の手すり加速度波形の一例をFig. 6に示す。Fig. 6上のグラフは第2右手すりチェーン振れ幅が23 mm(正常時)、Fig. 6下のグラフは第2右手すりチェーン振れ幅が95 mm(弛み時)の結果を示している。チェーン弛み時には起動遅延時間が明らかに増加していることが確認できる。

つぎに、チェーン振れ幅と起動遅延時間の関係をプロット

Fig. 5 Flow chart of calculating start up delay time

Fig. 6 Comparison of measured signal for normal and loose tensions

したグラフを Fig. 7 に示す。プロット点は各条件における起動遅延時間算出結果の平均値を示している。

Fig. 7(a) は第1手すりチェーンの弛み量を変化させた結果である。チェーン弛み量が大きくなるにつれて、左右手

Fig. 7 Variation of start up delay time by changing the tension of the first and second handrail chains (4 roller type)

Fig. 8 Schematic of handrail driving unit (6 roller type)

りの起動遅延時間がともに増加していることが確認できる。

また、Fig. 7(b) は第2右手すりチェーンの弛み量のみを変化させた結果である。チェーン弛み量が大きくなるにつれて、右手すりの起動遅延時間のみが増加していることが確認できる。なお、右手すりチェーンの弛み量増大に伴い、左手すりの起動遅延時間が若干減少している。これは、左手すりの動作開始時点において、右手すりチェーンは弛んでいて負荷が軽くなっているため、左手すり側に大きな駆動力が与えられ、起動遅延時間が小さくなったと考えられる。

以上の結果から、起動遅延時間の増大を測定することで、第1または第2手すりチェーンの弛み発生を定量的に検出できることが確認された。

4.2 試験ケース 2

試験ケース 1 とは異なる構造の手すり駆動装置 (Fig. 8) を有するエスカレーター (6 個ローラタイプ、モータ容量 7.5 kW) に対して、同様の方法で起動遅延時間を測定した。なお、エスカレーター全長が大きく、手すり駆動力をより必要とする場合には、Fig. 8 の主軸 (x) 部分に第2手すりチェーンおよび手すり駆動ローラが追加されたタイプが使われている。ただし、一般的には第2手すりチェーンが存在しないタイプが多く使用されていることから、本論文では後者を使用して試験を実施した。また、Fig. 8 中では第4手すりチェーンは1本しか図示していないが、実際には主軸 (y) を介して左右手すりを駆動するため、左右に各1本ずつ存在する。

試験条件は、下記の3パターン実施した。

- (a) 第1手すりチェーンの弛み量を変化させた場合
- (b) 第3手すりチェーンの弛み量を変化させた場合
- (c) 第4右手すりチェーン弛み量を変化させた場合

チェーン振れ幅と起動遅延時間の関係をプロットしたグラフを Fig. 9 に示す。プロット点は各条件における上昇・下降運転 5 回分の起動遅延時間平均値を示している。

Fig. 9 の結果から、試験ケース 1 と同様、いずれかの

Fig. 9 Variation of start up delay time by changing the tension of the handrail chains (6 roller type)

チェーン弛み量が大きくなるにつれて、起動遅延時間が増加する傾向が確認された。また、条件(c)においては、試験ケース1(b)と同じ理由により、右手すりチェーンのみ弛み量が増大することで、左手すりチェーンの起動遅延時間が減少していく傾向が見られた。特に、条件(c)では第4右手すりチェーンの振幅85 mm以上において、チェーン歯飛びと呼ばれる重大故障が発生したが、これよりも振幅の小さい段階においても、正常時と比較して起動遅延時間が明らかに増大することを確認した。

以上の結果から、手すり駆動装置の構造にかかわらず、起動遅延時間の増大を測定することで、チェーンの弛みを定量的に検出できるとともに、重大故障発生に至る兆候を捉えられることがわかった。

4.3 考察

本節では、起動遅延時間へ影響を及ぼす要因として、手すりチェーン弛み量以外の以下の項目について考察する。

- (1) 起動時におけるセンサ位置
- (2) 起動間隔
- (3) モータ容量・手すり走行抵抗・全長

(1)の起動時におけるセンサ位置については、前記試験において手すり駆動ローラの上部直近としたが、異なる位置であっても起動遅延時間の測定が可能であった。ただし、手すりの主成分はゴムであるため、センサ位置によって動き出し時における振動の伝播時間遅延差が生じる。全長約10 mのエスカレーターでは上端・下端で最大5 msec程度の起動遅延時間差が発生した。ただし実運用においては、上部乗場にてエスカレーター運転を操作する必要があるため、センサ位置については設置および目視が容易な上部乗場付近とするのが妥当である。±数 m程度の誤差範囲内でセンサを設置している限り、起動遅延時間平均値の差異は無視できるため、実運用上は問題ないと見られる。

(2)の起動間隔の影響については、頻繁に起動・停止を繰り返すことで起動遅延時間が増大する傾向が見られた。これは起動・停止時の負荷によりモータ温度が上昇していき、駆動力が徐々に低下していくためと考えられる。起動遅延時間の測定精度を高めるためには複数回測定することが望ましいが、多数回動作させることで起動遅延時間自体が変化してしまうことや実運用上の点検時間を考慮すると、3往復程度のデータから判定するのが妥当であると考えられる。

(3)のモータ容量については、起動遅延時間の絶対値および変化量に影響を及ぼすと考えられる。容量の大きいモータほど手すりチェーンの弛みを巻き取る速度は速くなるので、起動遅延時間の絶対値および変化量は小さくなるからである。前記試験においても、モータ容量の小さい試験ケース1(3.7 kW)では、正常時の起動遅延時間が約300 msecであるのに対して、モータ容量の大きい試験ケース2(7.5 kW)では、正常時の起動遅延時間が約260 msecと小さくなっていることが確認できる。そのほかに、手すりの走行抵抗やエスカレーターの全長なども起動遅延時間の絶対値や変化量に

影響を及ぼす可能性がある。これらを勘案すると、構造やサイズが異なるエスカレーターに対しては、異なる判定しきい値を準備する必要があると考えられる。

5. あとがき

本論文では、エスカレーター反転起動時における手すり加速度を測定し、起動遅延時間の増大を測定することで、エスカレーターを分解することなく、手すりチェーン弛みの有無を検出する方法を提案した。また、異なる構造の手すり駆動装置を有する二種類の実機エスカレーターを用いた試験により、手すりチェーン弛みを定量的に検出できることを示した。本手法により、手すりチェーンテンションの手入れ要否を判定するための作業時間を、現行方式の1/10程度に短縮することが可能となる。

今後、フィールド試験を通じて、さまざまな機種のエスカレーターのデータサンプルを蓄積して有効性を検証するとともに、モータ容量・手すりの走行抵抗・エスカレーターの階高などに応じた適切なしきい値設定方法について具体的に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 中野光倫：建築設備の劣化診断 機械設備編・昇降機，建築保全，76，108/115 (1992)
- 2) 寺園，松倉：エレベーターハイテク技術，53/64，オーム社 (1994)
- 3) 中野政輝：昇降機の劣化診断技術，エレベータ界，35-137，4/8 (2000)
- 4) 長沼，山田，井元：モニタリングを活用したエスカレータの新検修体系，JREA，47-7，30185/30187 (2004)
- 5) 横地，谷藤，副島，西沢：LonWorks データの分析による効率的なメンテナンス方法の研究，Roll Stock Mach，12-9，22/25 (2004)
- 6) 河野真一郎：昇降機リモート・メンテナンスの技術動向，鉄道と電気技術，18-3，10/15 (2007)
- 7) 鳶田，平位，伊藤，志賀：加速度・音センサを搭載した点検ステップによるエスカレーター異常診断，計測自動制御学会論文集，43-9，735/740 (2007)
- 8) 鳶田，堀，平位，伊藤，志賀：回転軸巻付型センサを用いたチェーン駆動装置の異常診断，計測自動制御学会第23回センシングフォーラム予稿集，349/352 (2006)
- 9) (社)日本エレベータ協会：エレベータ・エスカレーターの維持保全，建築防災，341，3/22 (2006)
- 10) 松尾，安藤，竹井，阿部，京家，松崎：特許第3570914号 (2004)

[著者紹介]

鳶田 広幸 (正会員)

1997年大阪大学大学院基礎工学研究科システム工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所において、昇降機・電力機器などの機器診断技術、監視制御技術に関する研究に従事。博士(工学)。電気学会会員。

平 位 隆 史

1989年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻博士後期課程研究指導認定退学。同年三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所において、セキュリティシステム、電鉄向け信号システム、設備診断システムに関する研究に従事。工学博士。システム制御情報学会および電気学会会員。

鷺 見 和 彦

1982年京都大学工学部電気電子工学科卒業。84年同大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。現在先端技術総合研究所にてセンサ情報処理の研究に従事。その間、89年メリーランド大学客員研究員、2003年-2005年京都大学大学院情報学研究科研究員(COE)客員教授。工学博士。情報処理学会および電子情報通信学会員。

伊 藤 寛

1980年新居浜工業高等専門学校電気工学科卒業。同年三菱電機ビルテクノサービス(株)入社。2007年より三菱電機(株)。現在、同社稲沢製作所において、昇降機の遠隔監視・診断技術に関する研究に従事。

志 賀 諭

1996年東京都立大学工学部電気工学科卒業。同年三菱電機ビルテクノサービス(株)入社。現在、同社昇降機保守事業本部において、昇降機の遠隔監視・診断技術に関する研究に従事。