階段昇降搬送機の開発*

池村 澄男^{*1}, 石原 莊一^{*1}

Development of a Motor Driven Cart Ascending and Descending Stairs

Sumio IKEMURA^{*2} and Soichi ISHIHARA^{*2} Department of Transportation Engineering, Meijo University,
1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya-shi, Aichi, 468-8502 Japan

We have developed a cart which could ascend and descend stairs carrying about 490 N (50 kg) load (corresponding to 2 cases with 20 of 633 ml filled bottles). This cart has two wheels consists of six spokes with small rollers on the tip of each one. Dimensions of six spokes were decided to ascend stably various stairs. It is driven by a motor with built-in reduction gears through an endless chain to transmit and increase torque, designing to counteract motor torque reaction by load moment.

Key Words: 490 N Load, Wheel with Six Spokes, Stable Ascent, Unstable Ascent, Ideal Ascent, Counteracting Torque Reaction, Reducing Hand Load

1. まえがき

重い荷物を運ぶ際、人の手では不安定で能力的にも限界があり、車輪付の台車で運ぶことが多いが、建物の通路の段差や階段が障害となり自由には移動できない。対策として、車輪径を大きくすることで昇段を可能にした台車がいくつか作られているが、何れも人力によって牽引するもので、取り扱い易くはなるが、人の負担する力をそれほど軽減することはできない。

そこで電動モータを動力源として使用し、先端に小型ローラを備えた車輪スポークを回転させることで、490N(50kg)程度の荷物を載せて階段を容易に昇降できる搬送機を開発した。

2. 開発の基本計画

2.1 階段形状 搬送機の階段昇降の機構を考える上で必要となるのが階段形状である。表1に示す「建築基準法施行令第23条⁽¹⁾」より階段形状の基準を調査した。階段形状に関する記号は図1に示す通りである。表1中の屋内用の階段①～③を昇降できるものを開発することとした。

2.2 積載量 積載物の基準として、大瓶20本入り2ケース相当とした。重量は490Nとなり、ケース1つの寸法は315×450×365 mmである。

2.3 昇段機構についての検討 次に示すような各種機構について比較検討した。

- ① 歯付ベルト方式 台車の下に外周に歯の付いたベルトを配置し、これを回転させて昇段するもの。
- ② キャタピラ方式 台車の下に設置したキャタピラを回転させて昇段するもの。
- ③ エアロー方式 空気圧が低く径の大きいエアローラを駆動して、階段の角に食い込ませることで大きな駆動力を得るもの。
- ④ スポーク方式 スポークを回転させ、階段に引っ掛けるようにして昇段するもの

Fig.1 Dimensions of stairs

Fig.2 Cart with spoked-wheels

* 原稿受付 2002年10月21日。

^{*1} 正員, 名城大学理工学部(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜 口1-501)。

E-mail: ikemura@ccmfs.meijo-u.ac.jp

Table1 Building standard law enforcement ordinance Article 23⁽¹⁾

	Classification of stairs		Tread & landing width	Rise A	Run B
①	For dwelling houses with more than 200m ² total floor area, for under-ground dwelling places with more than 100m ² total floor area		≥120cm	≤20cm	≥24cm
②	For children in elementary school		≥140cm	≤16cm	≥26cm
③	For students in lower or upper secondary school, for stores with more than 1500m ² total floor area and for theaters, movie houses, public halls and meeting places		≥140cm	≤18cm	≥26cm
④	For other stairs except for ①~③		≥75cm	≤22cm	≥21cm
⑤	For dwelling houses(except for apartment houses)		≥75cm	≤23cm	≥15cm
⑥	For outdoor stairs	Direct stairs(statute 23 proviso)	≥90cm	Above to be applied in compliance with use	
		The others	≥60cm		
⑦	For elevator machinery rooms		No regulation		
	For watch towers				
	For stairs for exclusive special use				

以上の4種の昇段方式を検討した結果、図2に示す④の方式がもっとも構造が簡単で、安価で軽量なものを作成することが期待できるので、これを採用することとした。

2.4 車輪スポークの階段昇降時の運動

2.4.1 階段昇降時の運動と定義 スポークによる昇降は階段形状によって異なるので、起こりそうな昇降時の運動をあらかじめ予測して、各運動の定義付けをした。

(1) 昇段時車輪の運動 図3

- ① 安定昇段 下側のスポークが蹴上げ面に沿って昇段する。
- ② 不安定昇段 スポークの回転以前に2段目の蹴上げ面に当たった後、蹴上げ面に沿って踏面に接触するまで落ちる。
- ③ 理想昇段 次の条件を満足するときで、最も安定した昇段となる。スポーク先端小型ローラピッチ : L = 階段ピッチ : C

(2) 降段時車輪の運動 図4

- ① 回転降り 角度 $\phi < 90^\circ$ のとき車輪が回転して降段
- ② 滑り降り 角度 $\phi \geq 90^\circ$ のとき車輪が回転せず降段

昇段時は理想昇段になるのが望ましいが、これは $L = C$ を満足するときだけで、 C は階段によって異なるので、すべての階段で理想昇段をすることはできない。したがってすべての階段で安定昇段となるようにスポークを設計することとした。

Fig.3 Motion of ascending spokes

Fig.4 Motion of descending spokes

2・4・2 車輪スポークの諸元と階段寸法の関係

(1) 理想昇段の場合 図5より(3.1)式で表わせる.

$$B = \sqrt{\left\{ 2\ell \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \right\}^2 - A^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

(2) 不安定昇段の場合 図6より(3.2)式で表わせる.

$$B = \sqrt{\left\{ 2\ell \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \right\}^2 - (2A)^2} - r \dots\dots\dots (3.2)$$

Fig.5 Ideal ascent Fig.6 Upper limit of unstable ascent

2・5 車輪スポークの諸元の決定

2・5・1 スポーク本数 n の決定 図7

- ① スポークの本数nによって階段昇降時の中心軌跡が影響され, 中心の上下移動量がスポークの本数小では大きく, スポークの本数大では小さくなる.
- ② スポーク本数が多くなると重量が増加することと, 製作の容易さも考慮して, n=6とした.

Fig.7 Locus of wheel center

2・5・2 スポーク先端小型ローラ中心距離:Lの決定

表1中の①～③の数値を満たす領域を図8に表示する.
階段角度: γ は $20^\circ \sim 50^\circ$ が限度⁽²⁾⁽³⁾なので, 下限の $\gamma \geq 20^\circ$ とした.

式(3.1),(3.2)でn=6, L=40cm とした時の理想昇段および不安定昇段の領域は図9に示すようになるが, ここでLを変化させて不安定領域となるLの範囲を決定する.

(i) 図10より, $25\text{cm} < L < 65\text{cm}$ のとき不安定昇段となる可能性があることが分かる.

(ii) 図11に示すように, 階段上で静止できることを条件とすると, Lは最小踏面寸法 $B_{\min}$ より小さくなるので,

Fig.8 Limited area for stair shape

Fig.9 Domain of stable and unstable

$$\text{Roller pitch : } L = 2\ell \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right), n = 6, L = 40 \text{ cm}$$

Fig.10 Upper limit of roller pitch L

Fig.11 Condition to rest on the tread

$L \leq 24\text{cm}$ (最小踏面寸法 $B_{\min} = 24\text{cm}$)

(iii) 安定昇段にするためには、図12に示すように、車輪スポーク先端小型ローラの中心間の垂直高さ h が、階段の蹴上げ面寸法 A より大きい必要があるので、

Fig.12 Condition for stable ascent

$$h = L \cos 30^\circ \geq A$$

表2より A の最大値は 20cm であるから、

$$L \geq \frac{20}{\cos 30^\circ} \doteq 23\text{cm}$$

(i), (ii), (iii) より, $L = 23\text{cm}$ とした.

2・5・3 小型ローラ半径 r の決定 図13のように階段の包絡線を描き、階段の角がスポークに接触しないようにしなければならない。ローラの規格から条件に合うものを選択した結果、 $r = 37.5\text{mm}$ とした.

Fig.13 Envelope of stair corner

3. 手動式階段昇降搬送機の評価

以上で決定した車輪スポークを使用して設計の条件を満足した手動式階段昇降搬送機を試作したので、昇段の各過程における牽引力を求めて、力学的な評価を行う。

なお、手動式の場合は手で牽引するが、牽引の方向は最も効率の良い方向を考えて、搬送機を引くための柄の軸方向と一致するという条件で計算した。

(1) 平地走行時 図14

$$p = \frac{b \cos \phi - c \sin \phi}{a + b \cos \phi - c \sin \phi - c \sin^2 \phi} \dots\dots (3.3)$$

Fig.14 On level land

(2) 蹴上げ面にローラが接触する時 図15

$$p = \frac{b \cos \phi - c \sin \phi}{a - c} \dots\dots (3.4)$$

Fig.15 Roller just touched on riser

(3) ローラが上段の踏面に接触する時 図16

$$\alpha = 90^\circ - \theta - \frac{360^\circ}{n}$$

$$\tan \alpha = \frac{S}{R} = \frac{pW \cos \phi}{W(1 - p \sin \phi)}$$

$$p = \frac{\tan \alpha}{\sin \phi \tan \alpha + \cos \alpha} \dots\dots (3.5)$$

Fig.16 Roller just touched on upper tread

Fig.18 Second roller on stair corner

(4) 昇段途中 図17

$$p = \frac{\cos \theta}{\cos \phi \cos \left(\frac{180^\circ}{n} - \theta \right) + \cos \theta \sin \phi} \dots (3.6)$$

Fig.17 In process of ascent

(5) ローラが上段端にある状態 図18

$$\beta = \sin^{-1} \left\{ \frac{r(2 - \sqrt{2})}{4l \sin \frac{180^\circ}{n}} \right\}$$

$$p = \frac{l}{\sin \phi + \cos \phi \left(1 + \frac{2\sqrt{2}}{\sin \beta + \sqrt{3} \cos \beta} \right)} \dots (3.7)$$

以上の関係を $n=6$, $\phi=35^\circ$ の条件にて図19に示すが, p の値が最大となるのは昇段途中の $\theta=10^\circ$ である。

 Fig.19 Pull ratio while ascending
 $p=P/W$, $n=6$, $\phi=35^\circ$

図19より昇段初期で p は最大となるが, (3.6)より p の値は荷台傾斜角度 ϕ の関数なので, (3.6)式を $\theta=10^\circ$ の条件で, ϕ との関係で示すと図20となる。 p の最小値を求めると, (3.8)式より, $\theta=10^\circ$, $n=6$ の条件で, $\phi=46.5^\circ$ のとき最小となり, 牽引係数 p は最小値でも 0.723 である。

搬送機の荷物積載時全重量 W が 784N (80kg) の場合, 牽引力は最小でも 567N (58kg) となり, 手動では期待したように牽引力を軽減できないことが分かったので, 電動モータの使用を検討する。

$$\frac{dp}{d\phi} = \frac{-\cos\theta \left\{ \cos\left(\frac{180^\circ}{n} - \theta\right) \cos\phi - \cos\theta \sin\phi \right\}}{\left\{ \cos\left(\frac{180^\circ}{n} - \theta\right) \cos\phi + \cos\theta \sin\phi \right\}^2} = 0 \dots\dots (3.8)$$

Fig.20 Relation between cart angle and pull ratio

4. 電動式階段昇降搬送機の開発

4.1 電動モータ⁽⁴⁾の選定 昇段時に必要なトルクを算出する。

図21に示すように、搬送機の重量を持ち上げるには、1本のスポークで支える範囲 ($0^\circ \leq \theta < 60^\circ$) において、 $T > W \ell \cos\theta$ が成立する必要がある。

Fig.21 Selection of motor

Fig.22 Reduction mechanism in cart

最大となるのは $\theta=0^\circ$ のときであるから、 $T > 784 \times 230 \times 10^{-3} = 180.32 \text{ N}\cdot\text{m}$ となるモータと減速比を選定する。

図22に示すようにモータに直結するモータ内蔵ギアで減速、さらにモータと車軸の間のチェーンで減速および動力伝達を行うこととし、表2に示すようなモータおよび減速比を選定した。

Table2 Motor dimension and Reduction gear ratio

Nominal power	Nominal revolution	Nominal voltage	Nominal torque	Reduction gear ratio in motor	Reduction gear ratio in cart
40 w	2,000 rpm	24 V	0.2 N·m	150	$48 / 14 = 3.43$

モータの定格回転数は2,000rpmであるが、人が荷物を運びながら昇段する速度に合わせると、モータの使用回転数は1,000rpmが適当で、このとき毎分12段の昇段が可能となる。回転数を2分の1にすることで、トルクが2倍の値になるので、出力トルクは次の通りとなり、昇段が可能である。

$$T = 0.2 \times 2 \times 150 \times 3.43 = 205.8 \text{ N}\cdot\text{m} > 180.32 \text{ N}\cdot\text{m}$$

4.2 トルク反力の相殺 モータを用いると牽引力:Fは必要でなくなるが、図23に示すように、モータで発生するトルクの反力を手で支える力:Fが必要になる。

手動式搬送機そのままにモータを追加すると、図23 ①に示すようにモータのトルク反力と、荷台を傾けたときの積荷によるモーメントが同じ方向に働くため、Fが大きくなる。このFを減少させるために積荷によるモーメントを利用することとした。

F: Supporting effort, T_R : Torque reaction
w: Carrying load weight $= 490\text{N}$, M: Moment produced by w
K: Length between wheel center and grip
 $K_1 = 0.845\text{m}$, $K_2 = 1.329\text{m}$

Fig.23 Counterbalance of torque

図23 ②に示すように荷台が傾斜した状態における、積荷重心位置を車軸の前方から後方に変更することで、電動モータによって発生するトルク反力を、積荷によって発生するモーメントで相殺するように設計した。

図23に示す諸元にて力Fの大きさを比較すると、表3のようになり、約3分の1に軽減することができた。

Table3 Comparison of supporting effort : F

Cart angle 30deg.	① Motor added to manual cart	② Changed load position for motor driven cart
F	247.0 N	88.5 N

5. 電動式階段昇降搬送機の評価

手動式階段昇降搬送機に電動モータを追加し、モータのトルク反力を相殺するべく荷台位置を変更して、図24に示すような電動式階段昇降搬送機を開発したので、電動モータ有無の両場合について、昇段の各過程で手にかかる力を求めて、力学的な評価を行う。

Fig24 Motor driven cart

5・1 測定方法 ひずみゲージを柄に貼り、トルク反力を支える力Fを計測し、車輪スポーク回転角度 θ および荷台傾斜角度 ϕ をデジタルビデオで録画、パソコン上で解析した。

手動の場合は、モータの抵抗を無くするためにチェーンをはずして、柄の軸方向の力Pのみで昇段してPを測定した。なお実測値としては、10回の平均値を採用した。

5・2 手にかかる力の評価 手にかかる力の実測値は図25に示す通りで、 $\theta = 10^\circ$ における最大値を比較すると、電動式に必要な力Fは、手動式に必要な力Pの約6分の1になっており、電動モータを使用することにより、牽引者の負担を大幅に軽減することができた。

Fig.25 Comparison of handling effort

6. まとめ

建築基準法施行令第23条に規定されている居室、学校、店舗、劇場・映画館類、公会堂などに使用されている各種階段を昇降できる簡易的なスポーク車輪式階段昇降機を開発することができ、次のような結果が得られた。

- (1) スポーク式車輪の昇段時の運動について考察し、安定昇段、不安定昇段、理想昇段の定義を、降段時の運動について考察し、回転降り、滑り降りの定義をした。
- (2) 設計対象の各種階段を安定昇段できる条件を満たす車輪スポークを、幾何学的に求めて開発した。
- (3) 手動式階段昇降機にて牽引荷重を求めた結果、最小値でも総重量の0.723倍にしかならないことを確認した。
- (4) 電動式階段昇降機を、電動モータによって発生するトルク反力を積荷によるモーメントによって相殺する設計をした。
- (5) 電動式階段昇降機が完成し、昇段時に手にかかる力を実測した結果、手動式と比較して牽引車の手の負荷が約6分の1に軽減することを確認した。

謝辞

本搬送機の開発に当たって、(株)東海特装車様からご援助とご指導を戴いたことを、ここに記し謝意を表します。

参考文献

- (1) 川崎攝, 山崎孝一: 建築法規, 鹿島出版会, 1980, p43
- (2) 福島正人: 建築構法汎論, 森北出版, 1991, p186
- (3) 日本建築学会編: 建築資料集成5, 丸善, 1982, p40
- (4) 坪島茂彦, 中村修照: 新版 モータ技術百科, オーム社, 1993