階段昇降ロボット機構の一方策*

鍵 和 田 忠 男^{*1}

Method for a Robot Able to Navigate Stairs

Tadao KAGIWADA

In the several methods of mobile robots, the wheel method is unfavorable for stairs or obstacles. The leg method and the creeping method demand very intricate control systems and are not efficient on flat floors. The caterpillar method is not reliable and not stable in the navigation of stairs. In the former arm-wheel method, the sensor which discriminates stairs and the mechanism which changes wheel-running and arm-rotation are intricate. In this paper, a means of mobile mechanism for a robot able to navigate stairs is developed, which requires neither sensor which discriminates stairs nor a mechanism which changes wheel-running and arm-rotation. Since there is no sensor, the reliability in a severe environment is high. Moreover, since it has no intricate mechanism, it can also be used in a wheelchair, for example, which is not powered. Through the experiment using a prototype of a robot able to navigate stairs it is clear that the mechanism developed here functions as intended.

Key Words: Moving Robot, Machine Element, Gear, Friction, Materials Handling Equipment, Stairs, Environmental Engineering, Human Engineering, Mechanics

1. 結 言

移動ロボットの移動機構には、車輪式、脚式、ほふく式、キャタピラ式、アーム車輪式がある。車輪式は段差や階段あるいは障害物等がある場合には不向きである。脚式は制御系が複雑であり、また平坦面での移動能率が悪い。ほふく式も同様である。キャタピラ式は上がり下がり の 確 実 さ と 安 定 性 が 定 か で な い⁽¹⁾⁽²⁾。これらのほかに回転するアームの先端に車輪をつけ、平坦面では車輪で移動し階段等ではアームを回転させるタイプが開発されているが⁽¹⁾、階段を識別するためのセンサおよび車輪とアームの回転を切換えるための機構が複雑である。また脚の先端に車輪をつけ、平坦面では車輪で移動し階段等では脚を伸縮させて移動するタイプも開発されている⁽²⁾。これは機構が比較的簡単で本体が水平に保たれる利点があるが、センサおよび切換えの機構を必要とする点は同じである。

そこで本研究においてはアーム車輪式において、平坦面と階段における車輪走行とアームほふくの切換え

を力学的な現象として生じさせることにより、階段を識別するためのセンサも、車輪とアームの回転を切換えるための機構も不要の移動機構を開発した。本移動ロボット機構においては、センサ類を必要としないために過酷な条件下における信頼性も高く、また複雑な機構を要しないため動力を用いない車椅子等にも使用される可能性がある。本論文においては本移動ロボット機構の基本原理について述べ、市販のラジオコントロール模型を改造した試作機の製作と、それによる平坦面の走行から階段の登行および下降にいたる一連の走行実験による動作の確認について報告する。

2. 機構の特色と基本原理

図1は本移動ロボットの基本構成を表す概念図である。本体には4輪の自動車と同様に前後2軸の駆動軸を有するが、ここで4個の車輪の代わりに4組のアーム車輪を有している。そして平坦面および一定高さ未満の障害物や階段等に対しては図2(a)のように車輪走行で移動するが、一定高さ以上の障害物や階段等に対しては図2(b)のようにアームほふくがなされる。

ここで本移動ロボット機構の特色は以下のとおりである。

(1) 平坦面の走行、階段の昇降、障害物の乗り越

* 平成4年9月2日 北海道支部第33回講演会において講演、原稿受付 平成5年6月28日。

^{*1} 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

えが可能である。

(2) 平坦面と階段の識別および車輪走行とアームほふくの切換えが純粋に力学的な現象として行われる。

(3) 平坦面と階段あるいは障害物の識別のためのセンサを必要としない。

(4) 平坦面の走行と、階段の昇降あるいは障害物の乗り越え切換えのための機構を必要としない。

図3は一組のアーム車輪(4輪車に例えればその1輪に相当)の模式図である。図3において半径 R のアームはその中心が駆動軸の中心に一致し、駆動軸および本体のおのおのには拘束されずに自由に回転する。駆動軸には歯数 N の駆動歯車(または駆動スプロケット)が固定されている。アームの両端の半径 r の車輪には歯数 n の車輪歯車(または車輪スプロケット)が

図1 4組のアーム車輪を有するロボットの基本構成

図2 移動ロボットの動作の概念図

図3 一組のアーム車輪の模式図

固定され、アームに対するこれらの相対回転は自由である。ここで駆動軸から2個の車輪に対して、歯車機構またはチェーンによって同一方向の回転を伝えることにより、駆動歯車、アーム、車輪歯車は遊星歯車装置⁽³⁾の変形されたものを形成する。ここで駆動歯車と車輪歯車とは直接にはかみあわず、間に1個の歯車を介して同一方向に回転する点が通常の遊星歯車装置と異なる。

駆動軸、車輪、アームの角速度 $\omega_x, \omega_w, \omega_a$ の間には遊星歯車装置の速比の式⁽³⁾に準じて次式の関係が規定される。

$$\omega_x = \left(1 - \frac{n}{N}\right)\omega_a + \frac{n}{N}\omega_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

いま、アーム車輪が右方へ移動する際に前側の車輪が階段等の障害物に接したとして、その接点 P の車輪上の位置を接地点となす角 θ で表す。車輪が P に乗り上げて回転するために必要な P の回りの回転モーメント m は次式で与えられ、これは同時に車輪の回転モーメントである。

$$m = \left(\frac{W}{2} + \frac{M_a}{2R}\right)r \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし W は一組のアーム車輪に加わる荷重、 M_a はアームの回転モーメントである。式(1)の関係により、 m と M_a および駆動軸の回転モーメント M_x の間には次式の関係が与えられる。

$$M_a = \left(1 - \frac{n}{N}\right)M_x, \quad M_x = \frac{N}{n}m \quad \dots\dots\dots (3)$$

m および M_a は式(2)、(3)に従って θ とともに増加するが、アームが荷重にうちかって回転し始める値が M_a の限界値だから次式を得る。

$$M_a \leq WR \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって式(2)は式(3)、(4)を用いて

$$m = \frac{nWRr \sin \theta}{2nR - (N-n)r \sin \theta} \quad \left(\sin \theta < \frac{nR}{(N-n)r}\right),$$

$$m = \frac{nWR}{N-n} \quad \left(\sin \theta \geq \frac{nR}{(N-n)r}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

と変形される。式(5)の上段が車輪走行の条件で、下段がアームほふくの条件である。このように幾何学的条件のみによって車輪走行とアームほふくが自然に切換わることがわかる。図4は一つの R/r のもとで N/n をパラメータとして、車輪および駆動軸の無次元化された回転モーメント $m/(WR)$ および $M_x/(WR)$ の θ に対する変化を示したものである。 M_x は m に比例して変化し、 θ の増加により始めは式(5)の上段に従って増加し、アームほふくに切換わる点以降で一定となる。パラメータ N/n を大きく取ると、より小さい θ で

アームほふくが生じ、またそのときの回転モーメントの値も小さいことがわかる。また図には示していないが、 R/r を小さく取ることによってもより小さい θ でアームほふくが生じるが、アームほふくにおける回転モーメントの一定値は図4の値と変わらない。

なお本論文の試作機では $R/r=1.16$, $N/n=3.33$ としたので、 $\theta=29.8^\circ$ で車輪走行とアームほふくが切替わる。

3. 動作実現のための条件

3.1 車輪の摩擦係数 式(5)の回転モーメントは車輪がスリップしないことによって維持されるから、このために必要な車輪と床面・障害物との間の摩擦係数 μ について検討する。図5は接点Pにおける力の関係を示し、(a)は車輪走行の場合、(b)はアームほふくの場合である。図5(a)の車輪走行の場合の必要最小の摩擦係数は、Pにおける垂直力と摩擦力に式(2)を考慮して次式で与えられる。

$$\mu = \tan \theta \left(\sin \theta < \frac{nR}{(N-n)r} \right) \dots \dots \dots (6)$$

これは通常の傾斜角 θ の斜面における μ と同じである。図5(b)のアームほふくの場合は、接地点および接点Pの2箇所に作用する力の平衡から f_v, f_θ を求めた上で、 $\mu(f_v + f_\theta)r = m$ とおいて式(5)を考慮し、結果は二次方程式の根として次式で与えられる。

図4 車輪と駆動軸の回転モーメント(無次元)

図5 接触点に作用する垂直力と摩擦力

$$\mu = \frac{-b_7 + \sqrt{b_7^2 - 4a_7c_7}}{2a_7} \left(\sin \theta \geq \frac{nR}{(N-n)r} \right),$$

$$a_7 = (N-n)r(1 - \cos \theta) - nR \sin \theta,$$

$$b_7 = (N-n)r \sin \theta,$$

$$c_7 = -nR \sin \theta \dots \dots \dots (7)$$

図6は一定値 $R/r=1.16$ のもとで N/n をパラメータとして式(6), (7)による θ に対する μ の変化を示したものである。 μ は θ の増加に伴って式(6)に従って増加し、切替わり点でピーク μ_p となったのち式(7)に従って緩やかに減少する。また N/n を大きくすると μ が小さくてよいことがわかる。試作機の値 $N/n=3.33$ については、 $\theta=29.9^\circ$ のピーク値で $\mu_p=0.57$ が必要である。ゴムタイヤと木板を用いた最大静止摩擦係数の実測によると、 $\mu=1.0$ が得られているので、上の値を十分に満足している。また通常の階段昇降においては $\theta=90^\circ$ であるから必要な摩擦係数は $\mu=0.41$ であり、十分に満足する。

図7は必要な摩擦係数のピーク値 μ_p の N/n に対する変化を R/r をパラメータとして表したものである。 N/n を大きくすると μ_p が小さくなることは上に述べたとおりであるが、 R/r を小さくすることによっても μ_p が小さくなることがわかる。なお図7中の $R/r \leq 1$ の実現は設計上困難であり、これら二つの曲線は参考値である。

図6 θ に対する車輪に必要な摩擦係数 μ の変化

図7 車輪に必要なピーク値の摩擦係数 μ_p の変化

3.2 自重によるアームの先行回転 アームの回転に必要な回転モーメントは図4の右方の一定値で示されるが、これはアームが水平の状態における値であり、図2(a)のように車輪が障害物に乗り上げるか図2(b)のようにアームが回転することによってアームが傾いた状態では、その傾き角によってこれらの回転モーメントが変化する。図8はアームはふく状態におけるアームの傾き角 ψ に対する駆動軸およびアーム、車輪の無次元化された回転モーメント $M_x/(WR)$ 、 $M_a/(WR)$ 、 $m/(WR)$ の変化を表したものである。階段を登る際のアーム回転の初期の状態である $\psi < 0$ から $\psi \leq 90^\circ$ の範囲で回転モーメントは正であり、アームが水平の状態($\psi = 0$)で最大である。ここで問題なのは $\psi > 90^\circ$ において回転モーメントが負になることである。 m が正の場合には前方に回転しようとする車輪が障害物によって阻止されて $\omega_w = 0$ が保たれるから、駆動歯車と与えられる原運動により ω_x と ω_a が確定される。これに対して m が負の場合には、後方に障害物がないためその回転はほぼ自由であり、アームが自重によって先行回転すると同時に車輪が後退して段を踏み外すことが生じる。

このアームの先行回転を防止するためには、アームの先行回転にうちかつだけの駆動回転速度を駆動軸にもたせるか、自重によるアームの回転モーメントを支えるだけの抵抗モーメントをアームに加えることが考えられる。前者の方法は目的によっては不都合な点が多くまた不確実である。本論文の試作機においては駆動軸の速度が大きく、前者の防止作用が自然に生じてはいるが、確実な動作を得るため後者の方法を用いている。具体的には4.3節で述べるように、板ばねによる抵抗をアームに作用させる方法をとっている。

4. 設計上の条件と試作機

4.1 車輪およびアームの径 図9(a)はアーム

図8 アームの傾き ψ に対する回転モーメントの変化

両端の車輪がともに階段のステップに接地している状態を示している。駆動歯車または駆動スプロケットの半径を r_x とし、これがステップに干渉しないための条件として $r \geq r_x + h/2$ を得る。ただし h は階段のステップ高さである。一方、図9(b)に示されるように階段のステップ幅を b として、車輪がステップから外れないための条件として次式を得る。

$$4R^2 \leq h^2 + (2b - r)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

これと車輪同士が接触しないための条件 $r < R$ から r 独自の不等式が得られ、これと先のステップ高さによる条件を合せて次式を得る。

$$\frac{h}{2} + r_x \leq r < \frac{-2b + \sqrt{16b^2 + 3h^2}}{3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

実際の階段において、 $h = 175 \text{ mm}$ 、 $b = 280 \text{ mm}$ が一つの代表的な数値であり、 r_x を仮に実在の値である 51 mm とすると $138.5 \text{ mm} \leq r < 200 \text{ mm}$ であり、 r_x を無視したとしても $r \geq 87.5 \text{ mm}$ が必要である。しかし試作機は市販のラジオコントロール模型を改造した関係で、車輪半径がすでに $r = 77.5 \text{ mm}$ と決まっており、逆に階段のステップ高さを変えざるを得なかった。駆動スプロケットの半径が $r_x = 25 \text{ mm}$ なので式(9)から $h \leq 105 \text{ mm}$ を得る。したがって試作機の走行実験用に実際の階段の60%の模型である $h = 105 \text{ mm}$ 、 $b = 168 \text{ mm}$ の木製階段を製作した。これらの数値と式(8)から $R < 139.5 \text{ mm}$ を得るが、3.1節に述べたように R/r は小さいほうが有利なため、 $R = 90 \text{ mm}$ とした。したがってこの試作機で登れる階段は、式(8)から $h \leq 105 \text{ mm}$ 、 $b \geq 112 \text{ mm}$ (有効斜度は最高で 43°)となる。

逆に、実物大のロボットにおいて試作機を相似形で拡大すると $r_x = 42 \text{ mm}$ となり、直径 258 mm 以上の車輪を用いればよく、前述のように $r_x = 51 \text{ mm}$ では直径 277 mm 以上を用いればよいことになる。

4.2 本体の仰転運動の防止と軸間距離 図10は階段上のロボットの模式図である。ロボットは前軸および後軸のアームの角度によって本体の傾斜角 ϕ を変化させながら登行するが、その際に重心 G の水平

(a) r の最小値 (b) R の最大値

図9 車輪半径 r とアーム半径 R の決定

位置が後軸の前側の車輪の接地点より前方にないと本体が仰転してしまうから、本体の重心の位置と軸間距離 L を調整する。これについては高野ら⁽¹⁾によって検討されているので参考にした。ただしここでは試作機および模型階段の具体的な数値をもとに、図 10 を用いた図式解法による確認にとどめた。図 10 は 4・1 節で決定した数値と階段の有効斜度 $\alpha=32^\circ$ 、重心の後軸からの長手方向の距離 $L_G=L/2$ 、軸からの高さ H_G が約 70 mm のもとで、 $L=650$ mm と決定した場合の本体の傾斜角 ϕ がほぼ最大の状態を表すが、重心の水平位置は後軸の前側の車輪の接地位置より十分に前方にあり余裕のあることがわかる。さらに図には示していないが、4・1 節で得られた r と R から定まる階段の最大の有効斜度 $\alpha=43^\circ$ でも登行が可能であることが図式解法によりわかる。

4.3 試作機の製作 試作機の本体として、市販のラジオコントロール模型(田宮模型製: CLOD BUSTER)を用い、前後左右の車輪の先端部分を改造して 4 組のアーム車輪を取付けた。車輪は市販の模型本来の部品を追加して 8 個にしたものであり、幅 105 mm である。駆動軸から車輪への回転の伝達にはチェーン(椿本チェーン製: マイクロチェーン RS 11 SS)を用い、駆動および車輪スプロケットとして歯数 40 および 12 のモジュール 1.25 mm (同: RS NT 40 および RS NT 12) を用いた。駆動スプロケットにチェーンが掛けられた状態での直径 $2r_x$ は約 50 mm である。駆動を確実にしチェーンの外れを防止するため、図 11 に示したように駆動軸に 2 枚の駆動スプロケットを固定して二つの車輪スプロケットを同時にかつ独立に駆動させた。

先に 3・2 節で述べた自重によるアームの先行回転を防止するため、図 11 に示されるようにアームのそれぞれ半径 60 mm の位置から 2 本の棒をアームと垂直に本体側へ突き立て、それが駆動軸の軸受上部に直立

して取付けられた長さ 100 mm の板ばね(焼入れされた厚さゲージ)を押曲げるようにした。アームの本体に対する傾き角 90° 付近から棒が板ばねと接触しはじめ、回転が進むにつれ板ばねのたわみが増して正の抵抗モーメントが増加する。これが図 8 の $\phi > 90^\circ$ における負の回転モーメントの増加と対応して自重による先行回転が防止される。回転が進んでアームが本体と平行に近づくころに、棒は板ばねの先端から外れて抵抗モーメントが零になる。

本体の軸間距離 650 mm は市販模型の本来のものよりはるかに大きいため、模型の本体を切断して間に延長用のフレームを入れて実現した。

5. 走行実験

製作された 60% 模型の試作機と 60% の木製の模型階段を用い、平坦面の走行から階段の登行および下降にいたる一連の走行実験を行った。なおラジオコントロール模型のステアリングは本ロボットの走行速度に対しては追従性が悪いため、ここでは使用していない。

図 12 は走行のようすをビデオ撮影したものからの抜粋コピーであり、走行開始の時点をも $t=0$ としている。図 12 (a) の $t=0.33$ s から (b) $t=0.63$ s までの走行距離は約 320 mm であり、この時点の走行速度が約 1.1 m/s であることがわかる。(b) で車輪走行からアームほふくに切りかわり、(c)、(d) とアームが回転し (e) で完了する。(b) から (e) の回転に要した時間は 0.7 s である。(e) から 0.4 s の間に二つの車輪が壁面およびステップに接するように走行して $t=1.73$ s で前側の車輪が新たな壁面に達する。そして (f) のようにアームほふくが繰返される。前軸が階段に達してから 2.70 s 後の $t=3.03$ s に後軸が階段に達し、その後 (g)、(h) のように前軸・後軸の双方によるアームほ

図 10 図式解法による軸間距離の決定

図 11 アーム車輪の駆動軸部分の外観(駆動スプロケット 2 枚を駆動軸に固定。アームから垂直に出る 2 本の棒が、軸上に直立した板ばねに接触する)

図 12 試作機による走行および階段登降の実験(走行開始時が $t=0$)

ふくがなされる。後軸が階段に達してから 1.87 s 後の $t=4.9$ s に前軸が階段上部の平坦面に達する。この間に本体は階段のほぼ 1 段(直線距離で 193 mm)を登っているの、前後軸による完全なアームほふく状態におけるほふく速度は約 0.1 m/s であり、先の平坦面の走行速度のほぼ 1/10 であることがわかる。

前軸は平坦面に達したのちも、後軸のアームほふくの影響で(i), (j)のようにアームほふくの名残をとどめている。(j)以後階段上部を車輪走行し、(k), (l)のように下降する。ここで(k), (l)に見られるように、下りにおいてはアームほふくは行われず車輪走行がなされ、その際にアームの揺動によって段差を滑らかに下降することが確認された。なお下降における走行速度はほぼ 1 m/s である。

6. 結 論

平坦面および階段昇降を行うアーム車輪式の移動ロ

ボット機構を開発し、走行実験を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) 平坦面と階段等の識別および車輪走行とアームほふくの切換えが純粋に力学的な現象として行われることが理論的に説明され、走行実験により確認された。

(2) 上記(1)により、本方式によれば階段等の識別のためのセンサおよび、車輪走行とアームほふくの切換えのための機構は必要としないことがわかった。

(3) 階段等の登りにはアームほふくがなされるが、下りにおいては車輪走行がなされ、アームの揺動によって滑らかに下降することが確認された。

文 献

- (1) 高野・ほか 2 名, 精密機械, 49-11(1983), 1572.
- (2) 加藤・ほか 3 名, 機論, 54-503, C(1988), 1500.
- (3) 吉沢, 大学演習 機械要素設計, (1977), 291, 裳華房.