

## 振動速歩型移動機械の基礎的研究\*

小泉 邦雄<sup>\*1</sup>, 日下 善雄<sup>\*2</sup>, 佐々木 基文<sup>\*1</sup>  
笹木 亮<sup>\*1</sup>, 木下 功士<sup>\*3</sup>

## Study on Vibratory Trot Type Mobile Machine

Kunio KOIZUMI, Yoshio KUSAKA, Motofumi SASAKI,  
Tohru SASAKI and Kohji KINOSHITA<sup>\*4</sup><sup>\*4</sup> Faculty of Engineering, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

The problem investigated involves development of the moving mechanism for a soft floor and a low projection, a step. Behavior of the mechanism discussed looks like quickly small step running by twin legs. It has pair of big feet with kneeless short legs, which are alternatively driven out of phase with twin eccentric discs. The feet trot along, that is, vibratory motion, so its motion is called the vibratory trot. Its toe is pulled up by a coil spring corresponding to a tendon at the leg's step width and projection clear ability is effectively increased by swing motion of the leg. It may be available to move slowly in the house with the soft floor and some projections. Theoretical considerations have clarified fundamental properties of the machine on some kinds of floor, tatami mat, carpet and woody floor, and clear some heights of the woody step. Analytical results are proved by many experiments with the first trial.

**Key Words:** Machinery, Mechatronics and Robotics, Material Handling Equipment, Moving Robot, Mobile Machine, Trot, Step Clear, Soft Floor

## 1. 緒 言

移動機械が変形の無視できるかたい固体表面上を移動する原理としては、最大静止摩擦力が関与する脚やクローラ、さらにコロガリ摩擦の関与する車輪、動摩擦力の関与するシュートやトラック上のすべりなどがあるが、運動に摺動が伴うと、運動制御が困難となるので、転動あるいは接地把持面が床面に対して静止して、グリップしている状態を用いることが多い。

床面が柔軟な場合は、接地面の沈下を抑止せねばならず、面圧を下げるためには有効面を大きくする必要がある。タイヤでは、幅および直径、脚では足の裏面積を増して接地面を大きくした結果、通常は必然的に大きくなって高さが増し、所要パワーも増大する。

座る生活を基本とする和式住宅内での移動機械では、

移動はゆっくりでよいが、移動機構部高さを抑え、かつ小型軽量なものが求められる。床面となるカーペットなどの敷物や畳は柔軟面であるが、移動に関する別の問題として敷居のような段差の乗り越えがある。車椅子前輪キャストが、敷居程度の段差の乗り越えで難渋することが多いように、通常車輪は凹凸面はそれほど強くない。このため従来数多くの工夫がなされており、凹凸の激しい不整地用としてクローラと車輪の性能を組み合わせた台車<sup>(1),(2)</sup>、段差の昇降に適応する足と車輪を組み合わせた車輪<sup>(3),(4)</sup>などがある。

本研究では、簡単な機構、かつ単純な動作で、高齢者が適応し難い在宅環境<sup>(5)</sup>での生活支援(自立、介護)を行う機械(ロボット)<sup>(6)</sup>を目指し、運搬・移動作業を担う。住宅内の柔軟面と段差の問題をクリアするひとつの方策として、脚歩行を基礎として、細かく早く、いわば振動的に足踏みをして、一步当たりの移動量は少なくとも、繰り返し回数で稼いで移動する方式を検討した。乗馬の足運びにたとえると、速歩(Trot)に対応するので、これを振動速歩と呼ぶことにする。

\* 原稿受付 2000年11月17日。

<sup>\*1</sup> 正員, 富山大学工学部(〒930-8555 富山市五福3190)。<sup>\*2</sup> 准員, 富山大学大学院。<sup>\*3</sup> 富山大学工学部。

E-mail: precm@eng.toyama-u.ac.jp

本研究で試作した移動機械は、互いに逆相の2つの偏心板に取り付けた短い足で、振動的に速歩をする両足をひとつの台として、この台を4つ配置している。足は固定されているが、左および右半分の前後の足の組を別個のモータで独立に駆動して、進行方向を変えることができる。もしも、足を旋回可能な台車に取り付けられれば、全方向移動を実現できる。この移動機械が、畳、カーペットおよび木製床板の上を走行し、木製の段差を乗り越えるときの問題を理論的に考察し、走行動作の重要因子を把握して構造の合理的設計に資するとともに、実験を行って解析結果を実証した。

本方式は脚と比べて足のリフトが小さく、段差乗り越し能力および走行速度を如何に高めるかが問題である。早く歩行するには、足の場合、一定の歩度で足首にスナップを効かせて足を前へ踏み出すように歩幅を増やせばよく、本研究では、脚長が偏心ピンと足首との距離に相当することから、筋に対応するばねをつけて脚を前へ振り上げ、つま先を上げることでこれを実現した。これは同時に段差問題に対しては、かかと立ちで、これのみ込むように踏み出すことになるので、段差乗り越え能力を増す作用を出して解決している。本報では、本機械の基本動作特性のみについて論じる。

## 2. 記号

$\lambda_1$ : 前後足間距離,  $\lambda_2$ : 足支持板長さ,  $\lambda_3$ : 足板長さ,  $\lambda_4$ : エキセントリックディスク偏心量,  $\lambda_5$ : ばねにより余分に進む量,  $\lambda_6$ : 左右足間距離,  $h_w$ : 積載物重心高さ,  $s$ : 持ち上げ時のばね静的長さ,  $h$ : 段差高さ,  $h_{lim}$ : 限界段差高さ,  $\mu$ : 足板と床面間の摩擦係数,  $W$ : 積載物の重さ,  $W_1$ : 段差側足板荷重,  $W_2$ : 後足板にかかる荷重,  $N_1, N_2$ : 左右のモータの回転数,  $\theta_1$ : ばね自然長時の足支持板傾斜角,  $\theta_2$ : 段差乗り越え時のベース板の傾斜角,  $\theta_3$ : 戻り角,  $\theta_4$ : 段差乗り越え角,  $\theta_5$ : 段差の等価摩擦角,  $R$ : 旋回曲率半径,  $v_1, v_2$ : 左右駆動部の速度,  $y$ : 柔軟床面での潰れ量として、次の無次元量を定義する。

$$L_j = \lambda_j / h_w \quad (j=1 \sim 3), \quad S = s / h_w, \quad H = h / h_w, \quad H_{lim} = h_{lim} / h_w, \\ V_k = v_k / (4 \lambda_4 N_k / 60) \quad (k=1 \sim 3), \quad Y = y / h_w.$$

## 3. 動作原理と構造

### 3.1 特長

本機構を車輪と比べると、

- 1) 高さに比して接地面寸法、特に幅を広くとれ、かつ平面ゆえ面圧を下げて平均化できるので、同一

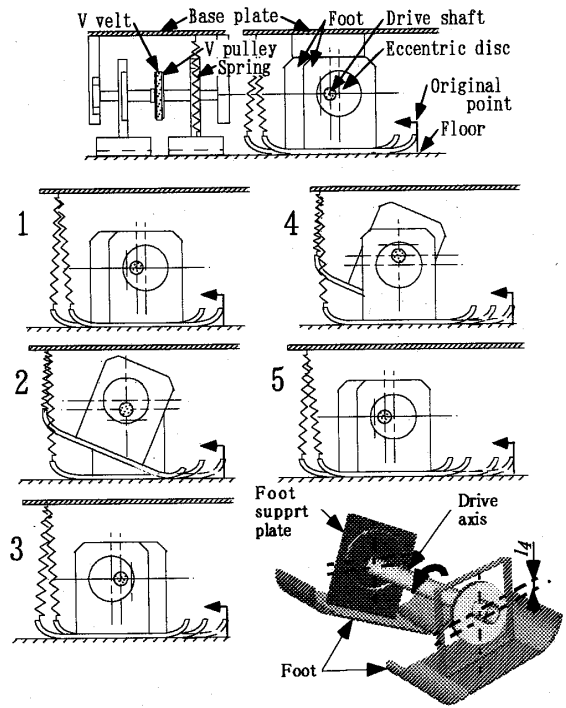


Fig. 1 Trot motion of foot

投影面積で比べて、高さを1/2以下にできる。

- 2) 脚の付け根は車輪と同様に回転するが、接地面は転がらず、抵抗がない。
- 3) カンジキと同様、接地した足を後上方に抜き、前下方に降ろして、広い足面で柔軟面を把持できる。
- 4) 同一高さの車輪では、乗り越え困難な段差も可能であり、段差乗り越え能力が高い。

また、歩行脚と比べて、

- 1) 回転駆動のため、機構が極めて簡単である。
  - 2) 高さが極めて低い。
- であり、その他、次のような特長がある。
- 1) ゆっくりと移動すればよい場合に適合する。
  - 2) 段差乗り越えは、徐々に登ってゆく「よじ登り」であり、所要パワーが小さくてよい。
  - 3) 段差にかかったとき、前足はつま先を上げるので、乗り越え能力が増す。このとき、後ろ足は前足の乗り越え抵抗で、自動的にかかと立ちとなり、本体の後傾を減らす効果が出る。
  - 4) 歩行が足踏み状態ゆえ、台車を徐々に旋回すれば、スリップなしで方向変換できる。

### 3.2 動作原理

エキセントリック・ディスク（以後、エキセンと呼ぶ）の偏心回転を用いた駆動による足の動きを図1に示す。状態1から2に変わる時、駆動軸が $\pi/2$ 回転すると手前のエキセン中心取付けの足支持板が持ち上げられる。足支持板はエキセンの回転方向に拘束されて



等価的に  $y$  を小さく抑える。図 4 に示すようにばねで足板のつま先を引き上げるとき、エキセンが回転すると足支持板が傾き、床と接する点 P (かかと設置点と称す) を基準として、足裏が床面に付く。したがって、ばねのない場合と比べ、 $\lambda_5$  だけ長い歩幅で足を前へ出すことができる。

移動速度は幾何学的関係より、次式で求められる。

$$v = \frac{1}{60}(4\lambda_4 + \lambda_5)N = \frac{N}{60}\sqrt{b_0^2 - 4y^2} \quad (1)$$

ここで、 $b_0 = 4\lambda_4 + \lambda_5$  ,

$$\lambda_5 = \frac{\lambda_3}{2} - \lambda_4 - \sqrt{\left(\frac{\lambda_3}{2}\right)^2 - 4\lambda_4(\lambda_2 + \lambda_4)}$$

$y \ll \lambda_2$  とみなせるとき、式(1)を無次元化すると、

$$V \doteq 1 + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2L_4} \left\{ L_3 - \sqrt{L_3^2 - 16L_4(L_2 + L_4)} \right\} - 1 \right] \quad (2)$$

ただし、式(2)の成立条件は、根号内が正のときなので、

$$L_3 > 4\sqrt{L_4(L_2 + L_4)} \quad (3)$$

が成り立つ必要がある。

特に  $L_4 \ll 1$  ,  $L_2, L_3 \gg 1$  ならば、式(2)は次式で近似でき、 $L_2/L_3$  に比例するとみなせる。

$$V \doteq 2 \frac{L_2}{L_3} + 0.5 \quad (4)$$

式(2)より足板と足支持板との長さ比による移動速度の変化を図 5 に示す。ばねによるつま先の引き上げで、 $L_2/L_3$  を大きくすると、移動速度を数倍早くできる。すなわち、つま先の引き上げで、エキセン偏心量を仮想的に大きくした効果が得られている。また、 $V > 1$  , すなわちばねによるつま先の引き上げで歩幅が増すための条件は、式(4)から  $L_2/L_3 > 0.25$  となるので、足板長さ  $l_3$  に対して、足支持板長さ  $l_2$  をかなり短くでき、脚部の高さを十分抑えた設計が可能となる。

#### 4.2 段差乗り越え

機械の幾何学的形状から決定される段差乗り越え角  $\theta_4$  を、負荷運搬時の機械の重量バランスと摩擦係数の関係から求められる見掛けの摩擦角  $\theta_5$  と比較して、段差乗り越えが可能であるか、否かが判断できる。  $\theta_4 > \theta_5$  ならば、段差から滑り落ちるモーメントよりも段差に乗り上げようとする方が大きくなるので、足は滑らず、段差乗り越えが可能となる。ここで、段差側の足板は床面と段差の両方に必ず接触するものとし、床面を離れないとする。また、段差側の足に関しては、条件的に最悪な場合を想定し、最も滑りやすい条件とするため、段差から機械が滑り落ちないため支える保持

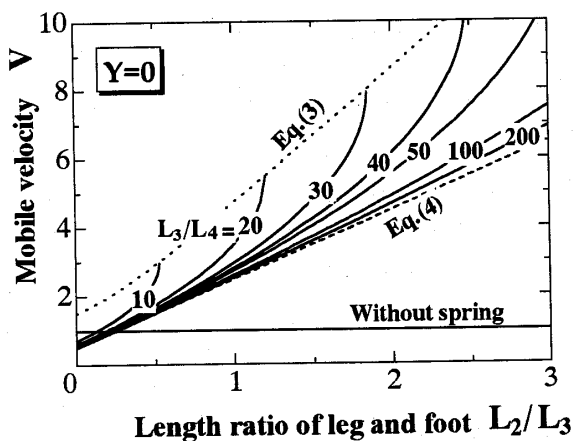


Fig. 5 Change of foot shape with velocity

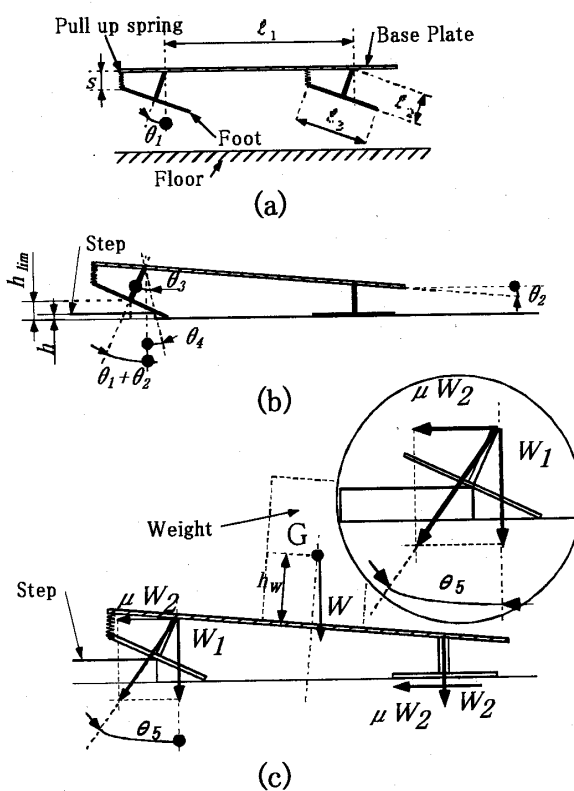


Fig. 6 Crossing over step

力は段差と反対側の足にのみ発生するものとする。

$0 \leq \theta_1 + \theta_2 \leq \pi/2$  として、図 6(a)より、

$$(-L_3/2)\sin\theta_1 + L_2 \cos\theta_1 = S \quad (5)$$

$$\left(\frac{L_3}{2} \cos\theta_1 - L_2 \sin\theta_1 - L_1\right) \sin\theta_2 + \left(L_2 \cos\theta_1 + \frac{L_3}{2} \sin\theta_1\right) \cos\theta_2 = L_2 \quad (6)$$

同図 (b)より、

$$H_{lim} = \frac{L_3}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (7)$$

$$\tan \theta_3 = \frac{\left\{ \frac{L_3 - H}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \right\}}{L_2} \quad (8)$$

以下、前足で説明するが、後足もほぼ同様である。

同図 (b)で、駆動軸の中心から段差の角を結ぶ直線と、床面に垂直な線とのなす角度

$$\theta_4 = (\theta_1 + \theta_2) - \theta_3 \quad (9)$$

を段差乗り越え角と定義し、鉛直下向き方向から時計回りを正とする。機械を床面から持ち上げ、足板すべてを床面から離れた同図 (a)の状態では、ばねによるつま先の引き上げで、ベース板に垂直な方向に対して、足支持板が  $\theta_1$  傾く。次に、機械を床面に下ろした同図 (b)のとき、ベース板が  $\theta_2$  傾く。式(5)で決定される  $\theta_1$  を式(6)に代入して、 $\theta_2$  を得る。足支持板と足板の結合点と同じ高さの段差以下ならば段差乗り越えの可能性が高くなるので、このときを限界段差高さ  $H_{lim}$  とする。同図 (b)のように、段差が  $H_{lim}$  よりも低い  $H$  であったときの、段差側の足支持板中心線方向と駆動軸中心と段差の角を結んだ直線との間の角  $\theta_3$  を戻り角と呼ぶことにする。式(5)から(9)に、 $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  および  $S$ ,  $H$  を与えて、駆動軸中心から床面および駆動軸中心と段差の角を結ぶ直線のなす角  $\theta_4$  が決定される。

次に、段差乗り越え角  $\theta_3$  を求める。同図(c)のように、負荷を機械に搭載し、段差に乗り上げてベース板が  $\theta_2$  傾いた状態のとき、重心は高さ  $h_w$  で位置後へ移動し、駆動部の荷重  $W_1$ ,  $W_2$  が変化する。後足にかかる荷重  $W_2$  は、段差から滑り落ちるのを支える摩擦力を生ずる。モーメントのつりあいより、

$$W_1 = \frac{L_1 - 2 \tan \theta_2}{2L_1} W, \quad W_2 = \frac{L_1 + 2 \tan \theta_2}{2L_1} W \quad (10)$$

摩擦力  $\mu W_2$  と、段差側の足にかかる鉛直下向きの力  $W_1$  とのなす角  $\theta_5$  を摩擦係数拡大率  $\Theta_5$  と定義すると、

$$\tan \theta_5 = \frac{\mu W_2}{W_1} = \frac{L_1 + 2 \tan \theta_2}{L_1 - 2 \tan \theta_2} \mu \equiv \Theta_5 \mu \quad (11)$$

式(11)は真の摩擦係数  $\mu$  が  $\Theta_5$  倍されたことを示し、一般に  $\theta_2$  が微小角なので、 $\Theta_5 > 1$  となって、等価的に摩擦係数が拡大されて大きくなる。 $\Theta_5 = \tan \theta_5 / \mu$  は、見掛けの摩擦角  $\theta_5$  を表すパラメータであるから、見掛けの摩擦係数であり、この値が大きいほど段差で足が滑りにくくなる。乗り越しが可能な段差の高さは、式(9)および式(11)を用いて、 $\theta_4 = \theta_5$  のときの  $H$  である。このときのベース板長さ  $L_1$  と段差乗り越え高さ  $H$  の関係を図 7 に示す。ある  $L_1$  での  $H$  と  $H_{lim}$  を比較して、小さい方がそのときの段差乗り越えが可能な高さとなり、 $L_2 = 0.4$  では  $H_{lim}$ , 0.2 と 0.1 では  $H$  の方を取る。

図 8 の  $L_2$  と  $H$  の関係から、乗り越え高さは  $H$  の

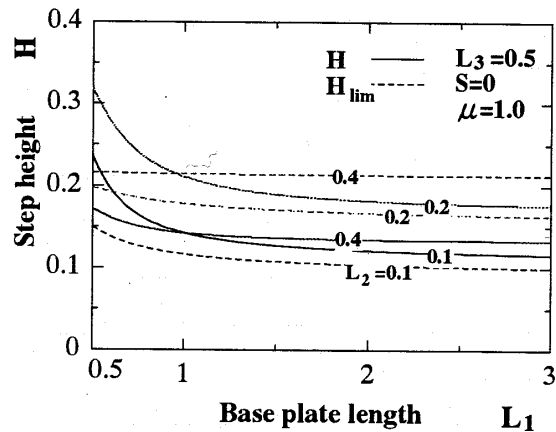


Fig. 7 Change of step height with base plate length

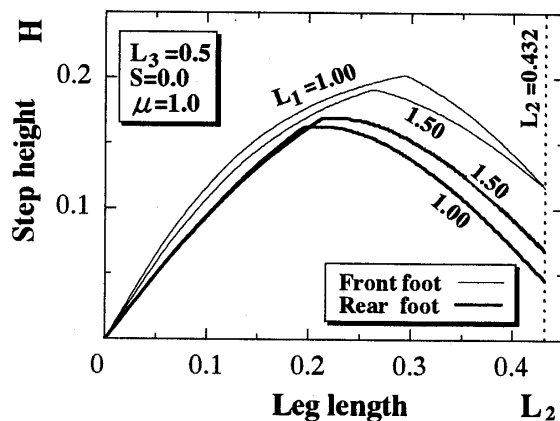


Fig. 8 Change of step height with leg length

小さな後足で規定され、後足の  $H = H_{lim}$  となる  $L_2$  で  $H$  は最大となる。これは、足支持板が短いとつま先が上がらず、段差乗り越え時に段差のかどにつま先がとどかないので、 $L_2 \rightarrow 0$  で  $H \rightarrow 0$  となり、逆に長すぎると、 $\theta_1$  の値が  $\pi/2$  に近づいて、段差に足がかからず、乗り越えできないので、 $H$  が低下するためである。前後の足が絶対に干渉しない条件は、 $L_1 \geq L_3$  である。縦点線は  $0 \leq \theta_1 + \theta_2 \leq \pi/2$  に入る  $L_2$  の限界値を示す。

### 5. 実験

負荷荷重を積載した図 2 の機械を駆動して、ばね秤を引く力を前進駆動力とした。足裏には高密度発泡ウレタン (t:2.5mm, 25%かたさ 35.3Pa), シリコンゴム (t:1mm, 50Hs) を両面テープで貼り付けた。

機械上面の  $\phi 100$  のターゲットをデジタルビデオカメラでとらえ、画像解析ソフト (ライブラリー, Move-tr32/2D) でターゲットの面積重心を算出し、サンプリング時間 1s で自動追跡を行って、移動速度を測定した。直線走行の結果を荷重  $W$  に対する潰れ  $y$  の

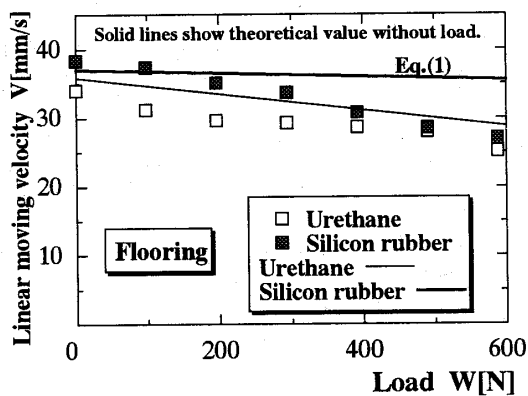


Fig. 9 Change of moving velocity with Load

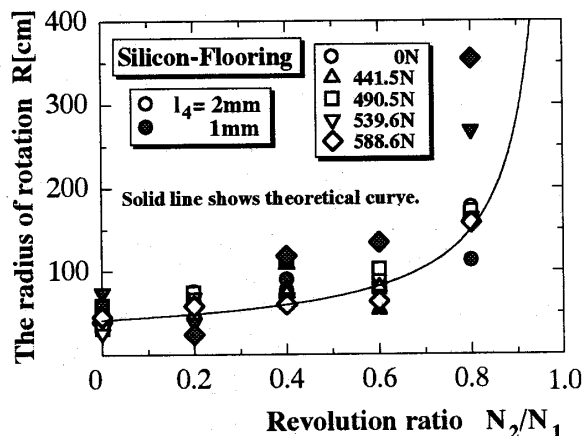


Fig. 10 Change of the radius of rotation with revolution ratio

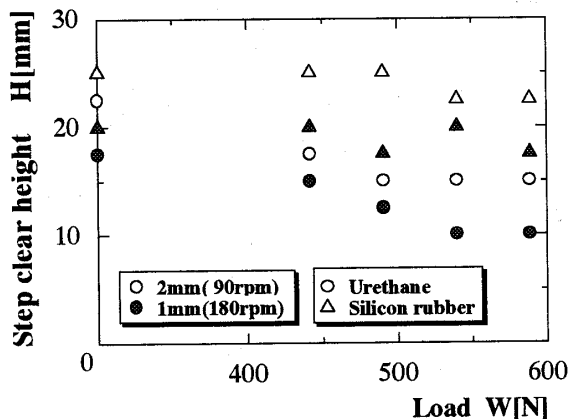


Fig. 11 Change of step clear height with load

測定値を用いた理論とともに図 9 に示す。

機械左側のモータ回転数を最大にし、右側のモータ回転数を変化させると移動方向変換ができ、機械の中心は、ある点を中心とする曲率半径  $R$  の旋回運動をするとみなせる。機械の移動座標データを円の公式に代入して求めた曲率半径  $R$  を運動学解析して得た理論曲

線とともに図 10 に示す。

カンナがけした杉板の段差を、高さ 0mm から 2.5mm ごとに高くし、段差の 150mm 前から機械を走行させて、段差に対して直角方向から乗り越えさせた。段差を乗り越えた最大高さの結果を図 11 に示した。負荷の増大とともに、床の沈みと足裏材の潰れが増して、段差乗り越え高さが低下する。ウレタンはシリコンゴムよりも柔らかいため段差の角に食い込み、足板が持ち上がりにくくなる。式(5)~(11)から求められる理論値は、床や足裏の柔軟材の変形を考慮していないために、負荷に無関係に 29.0mm となる。これは、実験値を上廻る理想限界値を与える。

## 6. 結 言

試作したエキセン駆動による振動速歩型移動機械について得られた主な結果は次のとおりである。

- 1) 足板を長く、かつ足板に対し足支持板を 4 倍以上長くすれば、移動速度を増すことができる。
- 2) つま先の引き上げにより、エキセン偏心量を大きくして歩幅を増す効果が得られる。
- 3) 段差乗り越え能力を高めるには、足裏の摩擦と足板を大きくし、最適な足支持板長さをとる。
- 4) くるぶし点を段差の角に置いて、足板のかかたが接地したときに、くるぶし点の床からの高さが最大乗り越え高さとなる
- 5) 杉板床・無負荷のとき、16mm/s(偏心 2mm, 60rpm), 17mm/s(偏心 1mm, 120rpm)の移動速度を得た。
- 6) 乗り越え最大段差は、シリコンゴム足材で、20mm(偏心 1mm), 25mm(偏心 2mm)を得た。このときの摩擦係数拡大率は、ともに 1.01 である。
- 7) 理論解析結果は、実験と比較的よく一致した。

## 文 献

- (1) 金子学, 他 6 名, 不整地走行用ロボットの研究(第 1 報), 日本ロボット学会第 14 回学術講演会予稿集, (1996), 589.
- (2) 広瀬茂男, ロボットを工場からどう出すか, 日本機械学会誌, 93, 865(1996), 956.
- (3) 森田哲・高野政晴・井上健司・佐々木健, 階段昇降移動ロボット TO-ROVER III の開発研究, 精密工学会誌, 60, 10(1994), 1495.
- (4) 柳田直人・菅沢深・鈴木夏夫・池田隆之・金海吉秀, 車輪付き回転十字アームを用いた階段昇降車椅子の力学解析, 日本ロボット学会第 17 回学術講演会予稿集, (1999), 1143.
- (5) 高橋儀平, 高齢者用在宅に要求される技術課題, 精密工学会誌, 65, 4(1999), 517.
- (6) 加藤一郎, リリースロボット—生活支援ロボット—の構想, 日本ロボット学会誌, 11, 5(1993), 614.