

# 不 整 地 移 動 機 械 の 研 究

田 口 幹

## Development of a Rough Terrain Locomotion Machine

Kan TAGUCHI

### Abstract

The author has already developed and reported some legged locomotion machines, and mentioned that a fixed gait type walking machine has superiority in walking flat terrain locomotion to the walking machine equipped with three degrees of freedom per each leg.

Although wheels have much more superiority in flat terrain locomotion than legs, they are not able to pass through even a step.

In this paper, the author proposes such a new type wheel-foot hybrid system, named as EWS-1 (Enhanced Wheel System 1), for passing through a step or stairs. The prototype machine has four wheels with several 'foot's on each wheel. Every 'foot' is kept horizontal by parallel link mechanism driven by a servo-mechanism. Using this 'foot' mechanism, the machine can not only run on a flat terrain but can climb up and down stairs without slipping down at all.

Experiments are carried out to certify the EWS mechanism.

### 1. は じ め に

現在、産業用ロボットは、生産工場における自動化の主役としての地位を確立した。さらに原子力・海洋・建設・運輸・医療・福祉・消防・宇宙など、非製造業の分野にも新しくロボット化の需要が求められている。これらの新分野のロボットには、極めて高度な技術が、広範囲にわたって確立される必要がある。中でも特に製造業の分野のロボットと異なるのは移動技術である。

ロボットの移動機構は、その形態から以下のように大別できる。

- 1) クローラ型
- 2) 脚型
- 3) 車輪型
- 4) およびそれらのハイブリッド型

クローラ型は、回転機構に基づくために移動速度を増し易く、連続面を移動するための制御が容易である。

また車輪型では昇れない階段、障害物などの不連続面に対しても、無限軌道を敷設して連続面にしなが踏破できるという特徴がある。だが、構造が複雑で大型になり、小回りが利かない点が問題となる。

クローラを用いた移動機械としては東京工業大学と(株)高岳製作所が工事現場での資材輸送用に開発した「HELIOS-II」<sup>1)</sup>が挙げられる。

「HELIOS-II」はそれぞれ独立に揺動できる平衡型クローラを4台使用したクローラ走行車である。段差乗り越え時などには、クローラを揺動させ本体の姿勢を制御することができる。クローラ全体に横から見て「V」字、あるいは「ハ」の字型をとらせて旋回させる、といったことも可能である。

また、クローラを応用したロボット用クローラ機構としては、補助クローラ方式、ステアリング付き4クローラ方式、6クローラ方式、中折れ方式、形状可変クローラ方式、半月クローラ方式などが開発されている。

一方、脚型移動機械は接地点が不連続な移動が出来ることが最大の特徴である。したがって障害物の跨ぎ越し、階段の安定な昇降等が可能となる。しかし、平坦地に対しても接地点が不連続になり、脚の着地点を

決定するための複雑な制御が必要である。このため、移動速度を計算機の処理速度に依存することになり高速化を妨げられている。

一般に自由歩容を行う歩行機械は、制御が複雑になり、移動速度が遅くなる。反対に、固定歩容を行う歩行機械は、制御が簡単で平地での移動速度を速くすることができるが、不整地での移動に対処するためにはさらに自由度が必要になり、やはり複雑な制御が必要となる。

車輪による移動は、平坦な場所を移動するには構造が簡単で、移動に要するエネルギーが少なく速度も速いという特徴がある。ただし、踏破可能な段差の高さは、一般に車輪半径に満たない。

車輪を利用した不整地移動機械としては、東京工業大学と(株)高岳製作所の「HELIOS-III」<sup>2)</sup>、東京工業大学の「蛟龍」<sup>3)</sup>などがある。

「HELIOS-III」は、スプリング車輪と呼ばれる車輪を導入した不整地移動機械である。スプリング車輪とは、ゴム製のタイヤの代わりにコイルスプリングの両端をつないでドーナツ状にしたスプリングタイヤを使用する車輪である。スプリングは荷重に応じて変形し、階段等の段差では段の角が食い込み駆動力を得る。これは機構が簡単で複雑な制御をほとんど必要としないが、スプリングの変形がエネルギーのロスにつながることもある。

「蛟龍」は、節体幹型移動ロボットと呼ばれ多数の節を複数連結した、ヘビのような形態を成す。節相互の連結部には垂直軸方向の並進と回転、節下部の車輪には推進の、1節につき3自由度を有する。「蛟龍」にはこの節が6つ直列に接続されているため先頭節以外は自分が将来どのような凸凹面を走行するかを予測することができる。しかし蛟龍全体の自由度が15自由度以上となるため、さまざまな制御の可能性をもっているが複雑化は避けられない。

ハイブリッド型は、車輪の持つ効率の良さ、脚の持つ不連続な接地面移動能力を併せ持つ。

ハイブリッド型の不整地移動機械のうち脚と車輪をつけた脚車輪型移動ロボットとしては、東北大学の「Chariot」<sup>4)</sup>などがある。

「Chariot」は2脚・2車輪を有し、進行方向に対して前後に1本ずつ脚が配置され、進行方向に対して本体左右に車輪が配置された型になっている。車輪のみを接地させた状態で走行し静止し続けることができ、また車椅子のように旋回することができる。段差及び溝

に対しては脚を使い、乗り越え・跨ぎ越しをする。また段差を昇るときには車輪と脚を協調させることにより、各アクチュエータの出力を下げることもできる。

都市内など我々の生活環境では、移動すべき場所はほとんどの部分が平坦であり最も大きな障害は段差である。この段差が産業用の輸送機器だけでなく車椅子などの福祉機器においても大きな障害となっている。

このような現状を踏まえ、筆者は、高速走行という利点を持つ車輪型を基本にし、機構的に簡単、制御も容易で段差を乗り越え可能な移動機構の開発を行ってきた。今回、不整地移動機械の基本的機能としての段差乗り越えの実現を図ることを目的として不整地移動機械、「EWS-1」を設計試作したので報告する。

## 2. 試作移動機械の基本的機構

水平面移動においてエネルギー効率の良い移動の条件は以下の3点である。

(1) 本体の自重及び積載物の重量を支えるエネルギーを最小にすること

(2) 本体の上下動を少なくすること

(3) 本体がなるべく等速運動をすること

車輪による移動はこれらの条件を満たし、水平面の移動において、最もエネルギー効率の良い移動方法である。

しかし、車輪は不整地移動という面では他の手段に比べてやや不利である。踏破面の凹凸が車輪の直径に対して十分小さければ車輪の特性は発揮できるが、車輪がやや大きな段差にさしかかると、段差と車輪との接点における車輪の接線と水平面との間の角度が大きくなり、段差を乗り越えようとするときにスリップしてしまう。

このスリップをなくし、車輪の回転から垂直方向の力をうまく誘導することができれば、車輪の特性を生かしたまま段差の乗り越え能力を持った新しい機構を実現することができる。

以下に本研究で提案する「平行足付き車輪」(以下回転足という)について述べる。

### 2.1 平行足付き車輪(回転足)

この機構はFig. 2-1に示すように平行な2枚の円盤(車輪)の間に段差を踏むための板(足)を(複数)持った構造をしている。

すなわち、基本的な平行リンク(Fig. 2-2 参照)の短

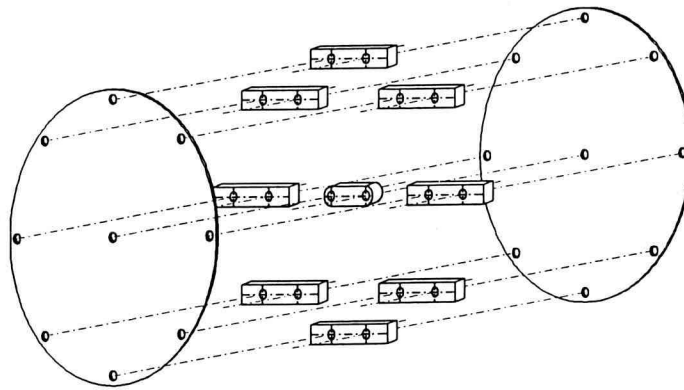


Fig. 2-1 回転足の構造

いリンクのうち1本を, 8つの平行リンク全てについて重ね合わせ共通な1本のリンクとする。もう一方の短いリンクを, 8つの平行リンクをそれぞれ前後に伸長して足とする。1つの平行リンクのうち長いリンクの1つを, 8つのリンクそれぞれ1点を中心に重ね合わせ, 他点をそれぞれ等角度となるよう放射状に配置し1枚の円盤型リンク (Fig. 2-3 参照) とする。これをもう1つのリンクについても同様にする。

この回転足機構は, Fig. 2-4 に示すように合同な平行リンク 8つを位相をずらして重ね合わせた形になっている。これらの足は平行リンクによって互いが常に平行に保たれている。

平地を移動するときには, 円盤型リンクによって通常の車輪と同様に走行する。段差にかかると Fig. 2-5 に示すように足の先端が段差にかかりその足を中心として, 車輪が段差を昇ることが可能である。

ただし本試作機では段差乗り越え時には, 左右の輪が同時に段差を乗り越え始め, 斜めからは段差に進入しないものとする。

## 2.2 足の水平維持

前節で提案した回転足機構では各足は常に平行になるが, Fig. 2-5 に示すように本体が傾いたときには足が本体とともに傾いてしまう。足が傾くと段差乗り上

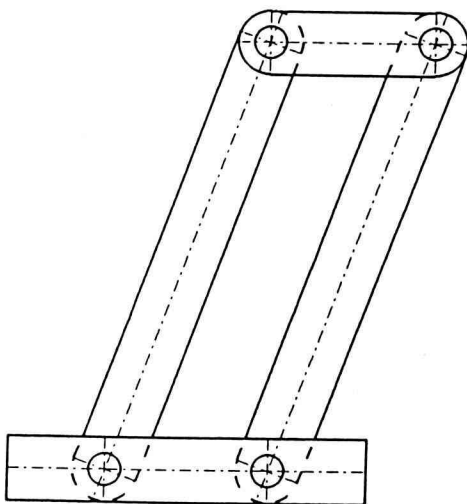


Fig. 2-2 基本のリンク

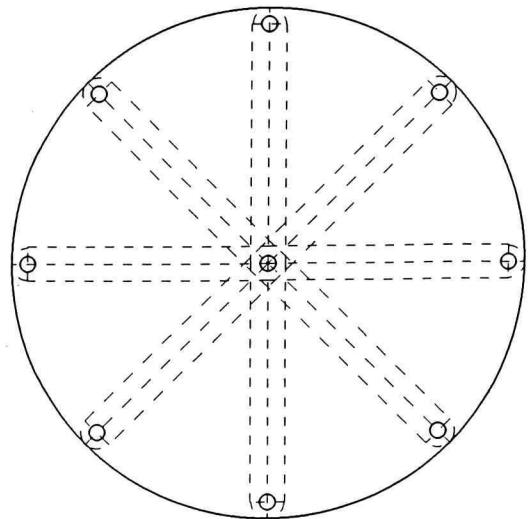


Fig. 2-3 円盤型リンク

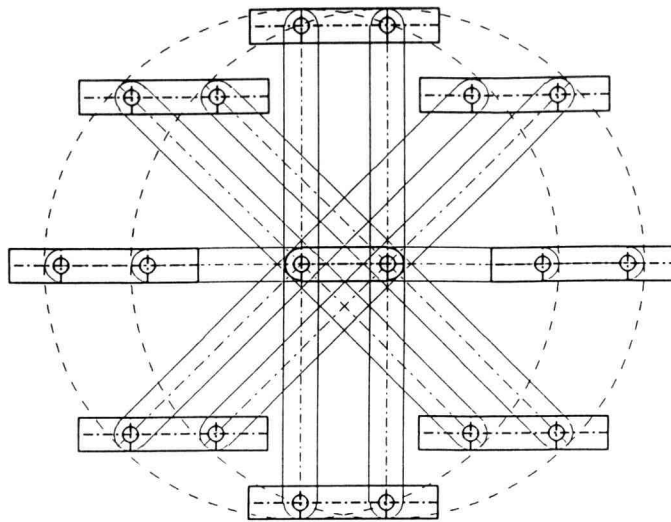


Fig. 2-4 回転足機構

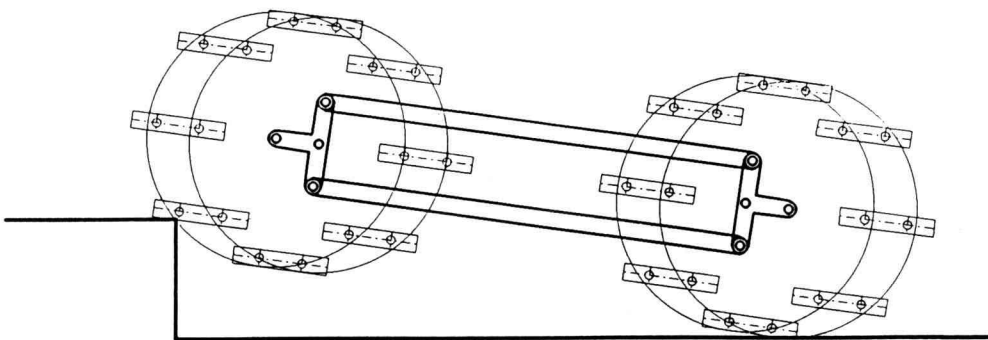


Fig. 2-5 水平維持なしの段差乗り越え

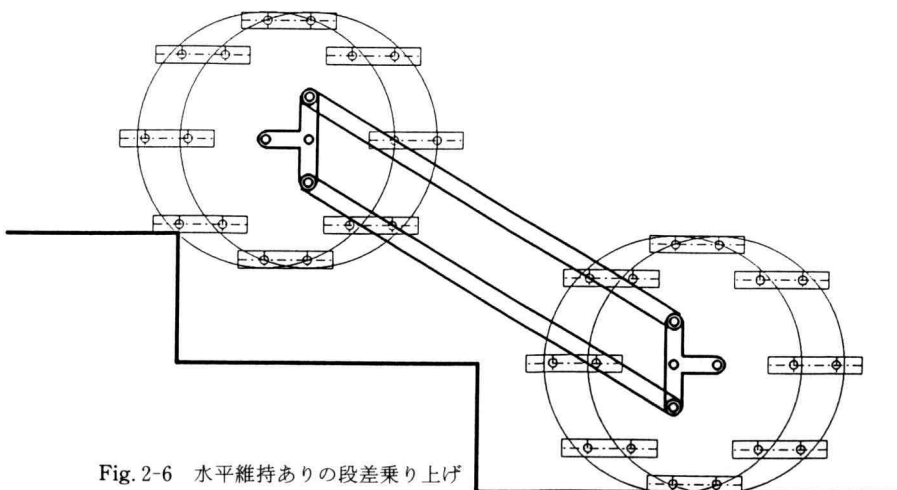


Fig. 2-6 水平維持ありの段差乗り越え

げ時に滑落する恐れがあるので足が常に水平になるよう足の水平維持機構が必要である。

Fig. 2-6 に示すように本体を平行リンク機構で構成する。振り子が常に鉛直下方向を指すことを利用して垂直を感知し、サーボ機構を用いて本体の平行リンクを変形させて縦のリンクを常に垂直に保つ。足は本体の縦のリンクと常に直角になっているので、これにより足の水平維持を行う。

この機構により、段差乗り越え時にも足が常に水平になり、足をかけることができる高さの段差では十分に大きな直径を持つ車輪が段差を乗り越えようとしているのと等しくなる。本試作機全体では足が常に水平を保つため、足の一部が段差に乗れば確実に段差を昇ることができる。

### 3. 試作移動機械の概要

本移動機械は、段差のある環境への適応として、乗り越え及び跨ぎ越しには回転足機構で対処し、その際の滑落防止に足の水平維持機構を用いることで複雑な制御を排除する。試作移動機械では、回転足機構による乗り越え及び跨ぎ越しの動作と、段差乗り越え時に発生する本体の傾きによる足の水平維持機構の動作の確認を主眼に置く。

胴体を3段の平行リンクとし中段に走行用及び姿勢変形用のモータを搭載する。また姿勢変形用のモータ

により本体平行リンクを駆動し足の水平維持を行う。

目標の仕様を満たしたうえで、シンプルで軽量の構造とした。本体の重心が高い位置にあると、後輪の段差乗り上げ時に必要とするトルクが大きくなるので、なるべく胴体の中心に位置する構造とした。回転足円盤状リンク直径の半分の高さの段差に乗り上げたときに、足の水平維持を行えるだけの可動範囲を十分に持つ本体形状とした。

各部の設計終了後、最終的な仕様は Table 3-1 のようになった。

## 4. 試作移動機械の基本動作

### 4.1 平坦地での走行実験

まず不整地移動の前段階として平坦な移動環境のもとで走行実験を行った。

この実験の結果、本実験機は通常の車輪と同様に走行可能であることが確認できた。

### 4.2 段差の乗り越え実験

本実験では、移動環境を段差を有する平面とし、1段当たりの高さ 15 cm、奥行き 35 cm の段差 3 段で構成される素焼きブロック製の階段の乗り越えを試みた。

この実験の結果、Photo 4-1～4-5 に示すように、階段のの昇降時において、足の水平を維持しながら段差を踏み外すことなく移動可能であった。

Table 3-1 最終仕様

全 長	940 [mm]
全 幅	405 [mm]
全 高	300 [mm]
本体部全長	640 [mm]
本体部全幅	205 [mm]
本体部全高	110 [mm]
円盤状リンク直径	300 [mm]
円盤状リンクの足リンク取付位置のピッチ円直径	280 [mm]
2つの円盤状リンクの中心軸の距離	50 [mm]
円盤状リンクの幅	45 [mm]
重 量	23 [kg]
足 長 さ	105 [mm]



Photo. 4-1 段差乗り越え実験 (a)

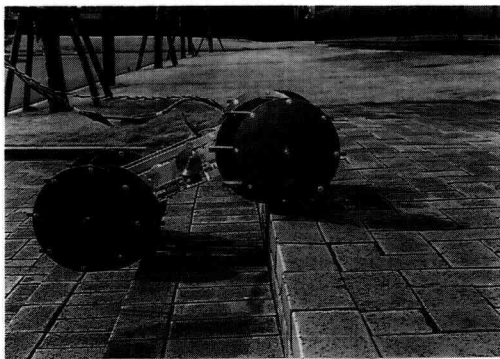


Photo. 4-4 段差乗り越え実験(d)



Photo. 4-2 段差乗り越え実験 (b)



Photo. 4-5 段差乗り越え実験(e)

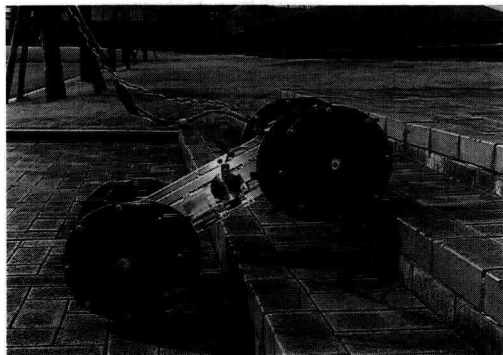


Photo. 4-3 段差乗り越え実験(c)

またこの実験では、階段の距離が実験機に比較して長く、実際には連続した段差を昇降可能であることを確認した。

## 5. 結論及び今後の課題

本研究において、不整地の内、特に段差に限定し複雑な制御を用いずに段差を乗り越える機構を提案し試作した移動機械により、前章のような実験を行った結果、以下のような結論を得た。

- 1) 複雑な制御を用いずに、段差（特に階段）の昇降が可能であることを確認した。
- 2) 本体を平行リンクとすることにより足の水平維持が可能であることを確認した。

以上の結果、次のような課題が残った。

- 1) 車輪が段に当たってから足が段の上面に当たるまでの間車輪が空回りするが、車輪が段に当たってすぐに昇りはじめるように足の数を多くする必要がある

る。

2) 角の丸い段の時などのために足が伸びるようにする必要がある。

また今後の発展としては以下のようなことが考えられる。

1) キャリアを設け、足の水平維持と同様にキャリアの水平維持をおこなう。

2) 軟らかい地面を移動するときには、足を積極的に傾け足裏の面を後方に向けることにより地面を後方に蹴る力を増大させ、駆動力を増すことが可能であると考えられる。

### 参 考 文 献

- 1) 広瀬茂男 青木実仁：対地適応型4クローラ走行

車 HELIOS-II の開発と実験, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 303 (1991)

- 2) 広瀬茂男 宇佐 稔 大森直睦 青木実仁 鶴澤克巳：対地適応型4輪走行車 HELIOS-III の開発, 第9回ロボット学会学術講演会予稿集, p. 305 (1991)
- 3) 広瀬茂雄 森島昭男：節体幹型移動ロボット「蛟龍」の研究, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 623 (1991)
- 4) 野中洋一 木村 浩 中野英二：脚車輪型ロボットの機構と制御に関する研究 機構の考案, シミュレーション, 設計, 第7回ロボット学会学術後援会予稿集, p. 121 (1989)