

## 脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作

木村 浩\* 中野 栄二\* 野中 洋一\*\*

Development of Leg-Wheel Robot and Cooperational Motion of Legs and Wheels

Hiroshi KIMURA Eiji NAKANO Youichi NONAKA

The wheel mechanism is effective for the flat terrain because of its speed and efficiency. The leg mechanism is effective for the irregular terrain because of its flexibility. Until now, several leg-wheel mobile robots which have both benefits have been constructed. But those have several disadvantages. We have constructed a leg-wheel mobile robot called *Chariot* which has mechanically separated wheels and legs. *Chariot* has two large wheels at the center of the body and has two legs attached to the body. *Chariot* can move at a speed of 20 km/h on a flat plane. It can rotate around the vertical axis with small radius. It also can get over step and ditch by changing the phases (the leg-support phase and the wheel-support phase) one after the other. In this paper, as the motion utilizing one of advantages of separated leg-wheel mechanism, we describe the cooperational motion of legs and wheels when *Chariot* goes over step. Pushing the wheel to the step by legs makes the wheel torque be effective and reduces the load of legs. This causes the reduction of the energy consumption.

**Key Words:** Leg-Wheel Robot, Cooperational Motion, Energy Consumption, Quadratic Programming

## 1 まえがき

現在、移動機構に関して様々な研究が行われている。その機構形態は車輪型と脚型に分類できる。車輪機構は、高速性と効率性において優れ、整地での移動に適している。脚機構は、対地適応性において優れ、不整地での移動に適している。これまでも両者の利点を兼ね備えた脚車輪型移動ロボットがいくつか製作されている。それらは「クローラ・脚型」<sup>[1]~[3]</sup>と「車輪・脚型」<sup>[4]~[5]</sup>に大別されるが(Fig.1), 両者とも脚と車輪が機構的に一体化されているので、両機構の本来の特性がじゅうぶんに活用されているとはいえない。その理由としては、

- (a) 車輪が小さいので、高速な移動が困難である。
- (b) 車輪移動時にも脚によって胴体を支持していることによるエネルギー損失がある。

(b)の問題を解決するために、広瀬らはHELIOS-II<sup>[3]</sup>において脚関節をクローラを中心に配置している。他の方法として、車輪と脚を機構的に分離することが考えられるが、Schweitzerらの開発したROBOTRAC<sup>[6]</sup>のように車輪または脚だけで移動することができないものでは両機構の利点を生かすことができない。そこで著者らは、機構的に分離された車輪と脚を持つ脚車輪型口

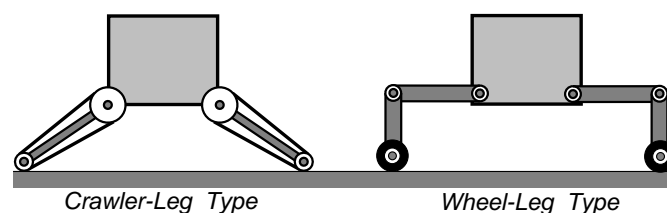


Fig.1: Conventional leg-wheel robots

ロボット“Chariot”を開発した。Chariotは、環境に応じて両機構の利点を生かした移動を行うことができる。すなわち、Chariotは胴体の左右に平行に配置された2つの大きな駆動輪のみを用いて任意の旋回半径の軌道上を高速に移動することができ、脚のみを用いて段差乗り越えや溝の跨ぎ越えを行うことができる。また、機構的に分離されたことにより、車輪だけでは移動不可能な不整地においても、脚の補助により車輪機構の持つ利点を生かしながら移動することも可能となった。従来このような観点から脚と車輪の協調動作を扱った例はなく、本脚車輪ロボットの特徴の一つとなっている。

本論文では、Chariotの基本動作について述べたあと、脚と車輪の協調動作による段差乗り越えの解析と実験について述べる。

\*東北大学工学部 \*\*ソニー(株)



Fig.2: Leg-wheel robot *Chariot*. The radius of the wheel is 32cm and the length of the leg is 85cm when expanded. The weight of *Chariot* is about 20Kg.

## 2 機構と基本動作

### 2.1 機構とシステム

本研究で開発した脚車輪ロボット *Chariot* は、胴体の左右に平行に配置された 2 つの大きな駆動輪と胴体の前後に配置された 2 本の脚を持っている (2)。大きな車輪は、整地を高速に移動することを可能としている。

2 つの車輪は独立に胴体に取り付けられているので、小さい回転半径で鉛直軸まわりに回転することができる。また、各脚の自由度は 2 であり、脚のつま先には横棒が取り付けられている。従って、脚の運動は sagittal 平面内に拘束され、脚支持期におけるロボットの lateral 運動は、この横棒によって拘束される。*Chariot* はあとで述べるように、脚と車輪を交互に接地することにより sagittal 平面内で歩くことができるが、脚のみを用いて鉛直軸まわりに回転することはできない。

*Chariot* のシステムを 3 に示す。*Chariot* は自立可能であり、VME ボードコンピュータ (CPU-MC68030) を搭載して PWM 駆動によりモータを制御している。ソフトウェアは SUN ワークステーション上で開発され、イーサネットを通してダウンロードされる。*Chariot* の動作時のホストコンピュータとの通信は無線 (RS232C, 9600 baud) によって行われる。

### 2.2 車輪による整地走行

*Chariot* は、整地を 20km/h の速度で直進走行することができ、また、胴体の中心まわりに旋回こともできる。

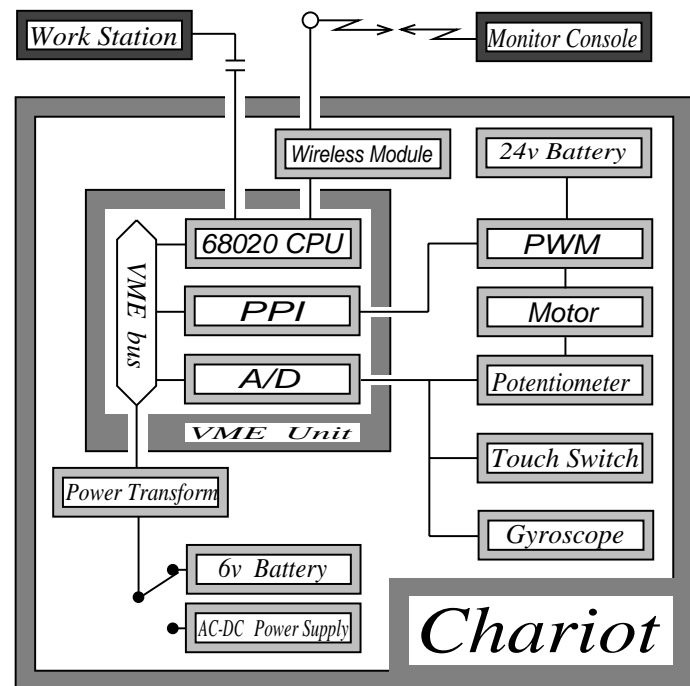


Fig.3: Control system of *Chariot*

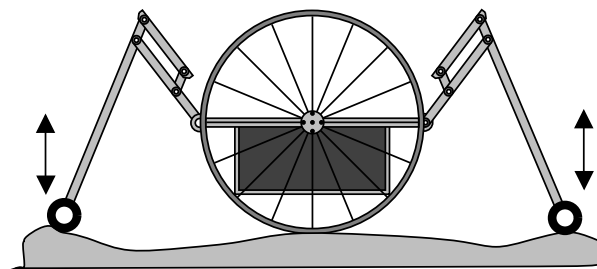


Fig.4: Leg-wheel robot *Chariot* with wubwheels at the toes

大きな 2 車輪のみを用いた場合には、小不整地であるならばサスペンションなしで走行することができるが、車輪による加減速時に胴体の揺れが生じる。これは、胴体と床との衝突を生じたり、将来胴体にカメラを搭載したときの視覚処理を妨げるので、出来るだけ抑える必要がある。著者らは胴体角度の自乗積分値を最小にする軌道を用いて、加減速時の胴体の揺れを抑えている [9]。また、出し入れ可能な従輪を脚先に取り付け (4)、胴体の揺れを抑えることも可能である。この場合は、小不整地を走行するときでも、脚をサスペンションのように制御する必要がある。

### 2.3 脚と車輪による歩行

*Chariot* は 2 本しか脚をもっていないが、脚支持期と車輪支持期という 2 つの相を交互に繰り返すことにより歩くことができる。*Chariot* は、段差乗り越えや溝の跨

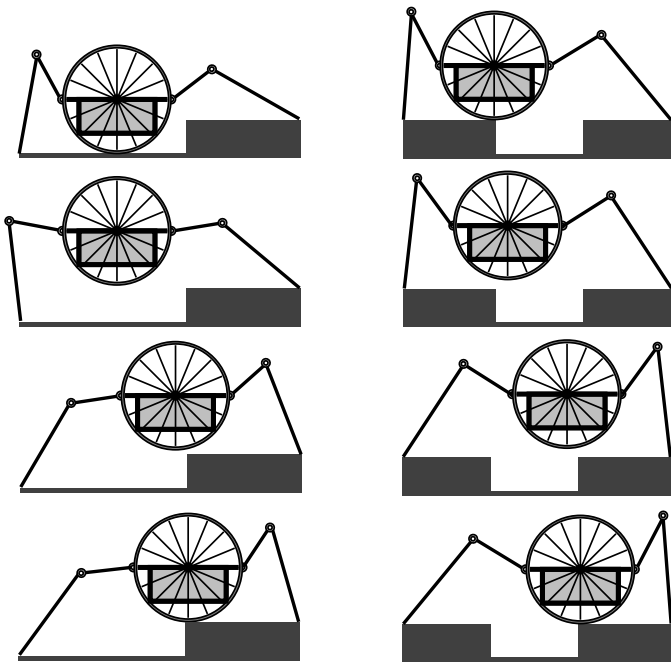


Fig.5: Going over the step (a) and the ditch (b)

ぎ越えを行うことができる (5).

### 3 脚と車輪の協調による段差乗り越え

#### 3.1 協調動作の意義

Chariot においては、脚と車輪は独立に胴体に取り付けられているので、胴体重量は、脚と車輪それぞれの接地点における鉛直方向床反力によって支持される。車輪接地点において法線方向の床反力はアクチュエータの負荷とならないので、通常は車輪接地点がより望ましい。従って、脚を用いなければならない不整地においても、できるだけ車輪を接地することにより脚への負荷を減らすような動作が考えられ、「脚と車輪の協調動作」と呼ぶことにする。

ここでは Chariot の代表的な運動として、6に示すような段差越えを考える。車輪の中心は車輪と段差との接触を保つために接触点を中心とする円弧を描くように動き、脚は車輪と協調して動作する。平坦ではない面においては、車輪接地点における鉛直方向床反力  $F_{wz}$  は、法線力  $F_{wn}$  と接線力  $F_{wt}$  に分解される (7-a)。車輪駆動トルクは法線力と釣合い、胴体重量を支える助けとなる。ここで段差が高く、6に示される角度  $\alpha$  (車輪接地点から鉛直方向への角度) が大きくなると、車輪接地点での法線力と接線力間の静摩擦条件が満たされない場合が生じる (7-a)。これは、車輪接地点においてすべりが生じ車輪駆動トルクが有効に働かなくなることを意味する。しかし、

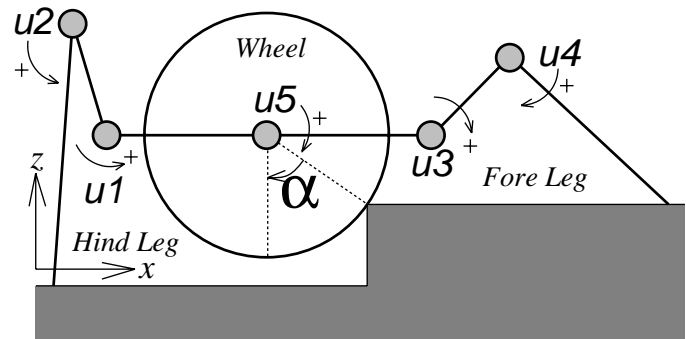


Fig.6: The Cooperational motion when Chariot goes over step

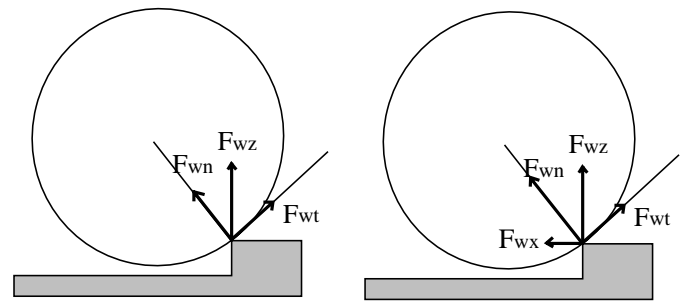


Fig.7: The reaction forces at the wheel contacting point. When the wheel is pushed to the step, the normal force becomes large and the tangential force becomes small as (b). Then the friction condition is satisfied.

このような場合でも、車輪が脚によって段差に押しつけられるならば、車輪接地点における水平方向床反力  $F_{wx}$  が法線力と接線力をそれぞれ増加・減少させるので、静摩擦条件が満たされるようになる (7-b)。すなわち、脚と車輪の協調動作により、車輪駆動トルクが有効となり、脚への重量負荷が減少したといえる。

#### 3.2 協調動作の解析

協調動作を解析するとき、簡単のために以下の仮定を設ける。

- 仮定 1. 運動は sagittal 平面内に拘束され、2つの車輪は1体と見なされる。
- 仮定 2. 胴体角度は常に水平に保たれる。
- 仮定 3. Chariot の動作は遅いので、速度、加速度の影響を無視することができる。

協調動作の静的釣合いの式と幾何拘束条件式を以下のように表す。

$$\mathbf{o} = \mathbf{C}\mathbf{u} + \mathbf{g} + \mathbf{E}^t \mathbf{F} \quad (1)$$

$$e(q) = \mathbf{0} \quad (2)$$

ここで,  $q$  : 状態変数  $\in \mathbf{R}^n$   
 $e$  : 拘束条件  $\in \mathbf{R}^m$   
 $C$  :  $\in \mathbf{R}^{n \times k}$   
 $u$  : 脚関節および車輪駆動トルク  $\in \mathbf{R}^k$   
 $g$  : 重力項  
 $E = \partial e / \partial q \in \mathbf{R}^{m \times n}$   
 $F$  : 床反力  $\in \mathbf{R}^m$   
 $k = 5, m = 6, n = 8$

脚および車輪接地点においては, 静摩擦の条件が成り立つ必要がある.

$$|(\text{接線方向床反力})| \leq (\text{静止摩擦係数}) |(\text{法線方向床反力})| \quad (3)$$

Chariot のある姿勢を維持するために必要なトルク  $u$  とそのときの床反力  $F$  は式 (1), (3) を満たすが, これだけでは一意に定まらない. ここでは, 消費エネルギーを最小にする条件を付け加える.

Chariot のようにアクチュエータの減速比が比較的小さく, 高トルクをモータに流れる大電流によって発生するようなロボットでは, 動作に必要なエネルギーは主にモータの電機子で消費されるジュール熱損失である [7]. ここでは, 次式で定義される単位時間あたりのジュール熱損失を消費エネルギーとして用いる.

$$\frac{dE_e}{dt} = \sum_{i=1}^k R_i \left( \frac{u_i}{G_i K_i} \right)^2 \quad (4)$$

ここで,  $u_i, R_i, G_i, K_i$  は, それぞれ, 駆動トルク, 電機子抵抗, 減速比, トルク定数である.

式 (4) を最小にし, 式 (1), (3) を満たすトルクと床反力を求める問題は, 3.3. のように 2 次計画法に帰着される.

### 3.3 2 次計画法としての定式化

$F_{fz}, F_{fx}, \mu_f, F_{hz}, F_{hx}, \mu_h, F_{wn}, F_{wt}, \mu_w$  をそれぞれ, 前脚 (fore leg), 後脚 (hind leg), 車輪 (wheel) の各接地点における法線方向床反力, 接線方向床反力, 静摩擦係数であるとする. 接触を維持するために床反力は次式を満たす必要がある.

$$\begin{aligned} F_{fz} &\geq 0, & F_{fx} &\leq \mu_f F_{fz} \\ F_{hz} &\geq 0, & F_{hx} &\leq \mu_h F_{hz} \\ F_{wn} &\geq 0, & F_{wt} &\leq \mu_w F_{wn} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, 接線方向床反力の向きは, 値が正になるようにとられていると仮定する. 計算結果がこの仮定を満たしていない場合は, 向きを変更して再計算するものとする.

式 (5) は, 式 (6) の変数変換により, 式 (7) のように表される.

$$\begin{aligned} f_1 &= F_{fz}, & f_4 &= \mu_f F_{fz} - F_{fx} \\ f_2 &= F_{hz}, & f_5 &= \mu_h F_{hz} - F_{hx} \end{aligned} \quad (6)$$

$$f_3 = F_{wn}, \quad f_6 = \mu_w F_{wn} - F_{wt}$$

$$f \geq \mathbf{0}, \quad f = [f_1, \dots, f_6]^t \quad (7)$$

また, 式 (1) と式 (6) より, トルク  $u$  は  $f$  で表される.

$$u = Jf \quad J \in \mathbf{R}^{k \times m} \quad (8)$$

式 (8) を用いて式 (1) から  $u$  を消去すると, 次式が得られる.

$$Af = b, \quad A \in \mathbf{R}^{(n-k) \times m}, b \in \mathbf{R}^{(n-k)} \quad (9)$$

式 (4) で定義された消費エネルギー  $dE_e/dt$  は, 式 (8) を用いて次式のように表される.

$$dE_e/dt = u^t W u = \frac{1}{2} f^t Q f \quad (10)$$

ここで,

$$W = \text{diag}[R_i(1/G_i K_i)^2], \quad Q = 2J^t W J$$

結局, 静摩擦の条件を満たし消費エネルギーを最小にする解を求める問題は, 次式で表される 2 次計画の問題の特殊な場合 ( $x = f, p = \mathbf{0}$ ) となり, 効率良く計算することができる [10]. そして, トルク  $u$  は式 (8) から求められる.

$$\begin{aligned} Ax &= b, \quad x \geq \mathbf{0} \\ h(x) &= px - \frac{1}{2} x^t Q x \longrightarrow \max \end{aligned}$$

### 3.4 計算結果

段差の高さ 7cm, 静摩擦係数 0.3 のときの計算結果を 8 と 9 に示す. 8 と 9 において, 縦軸はそれぞれトルクと摩擦角を表し, 横軸  $\alpha$  は段差を越えるとき右から左に 0 まで減少する. 計算結果より, 以下のことが分かる.

- (1) 8 において,  $\alpha$  が小さくなるにつれて各トルクは 0 に近づく. これは,  $\alpha$  が大きいときは胴体重量は主に脚によって支持され,  $\alpha$  が小さくなるにつれて負荷が脚から車輪に移っていくことを表している.
- (2) 9 において, 前後の脚接地点での摩擦角は正の値をとり, 常に静摩擦角に等しい. これは, 車輪駆動トルクが有効に働くように, 脚ができるだけ車輪を段差に押しつけようとしていることを表している.

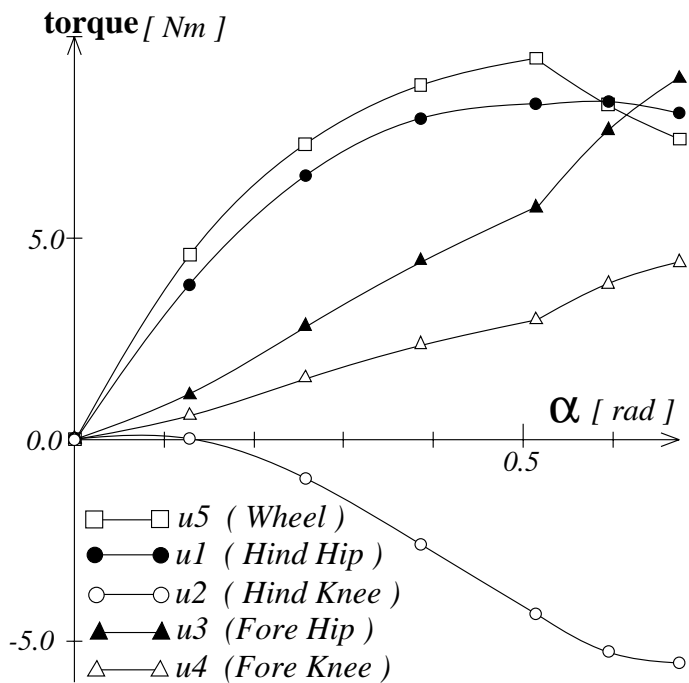


Fig.8: The calculation results of torques when Chariot goes over step with cooperation of legs and wheels

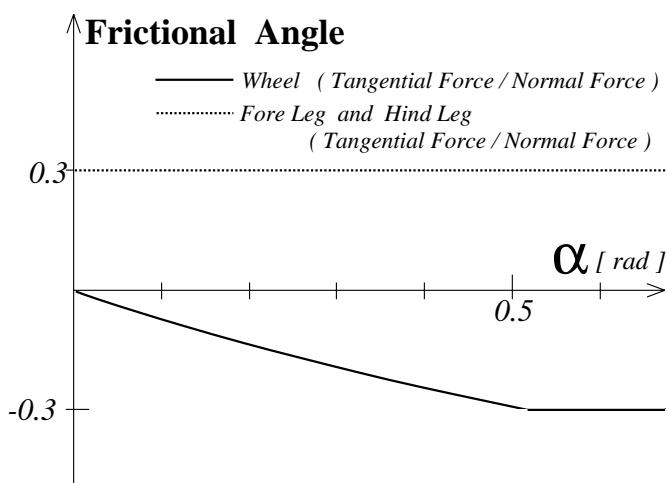


Fig.9: The calculation results of friction angles when Chariot goes over step with cooperation of legs and wheels

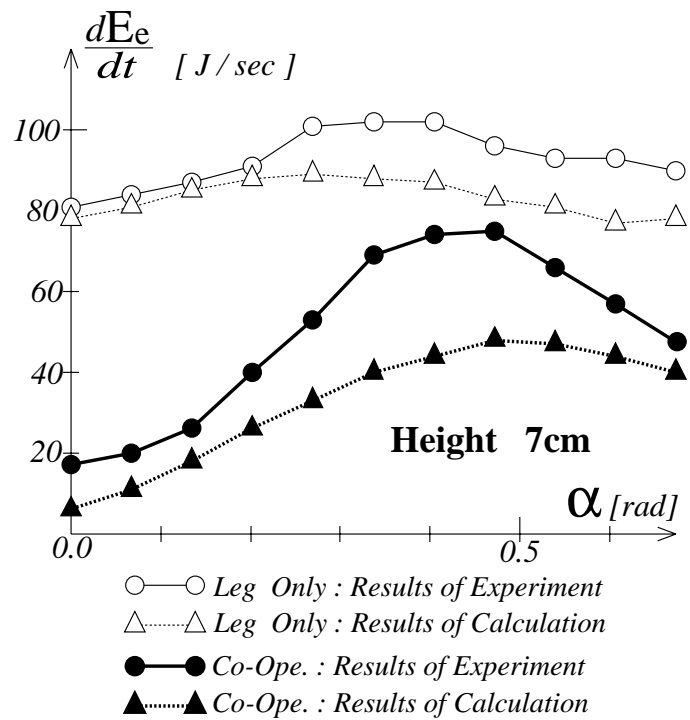


Fig.10: The comparison of the cooperational and the non-cooperational motion of legs and wheels

### 3.5 段差乗り越え実験

Chariot を用いた段差乗り越えの実験を行い、半径 32cm の車輪に対して、脚と車輪の協調により高さ 20cm の段差乗り越えを実現した。この段差を車輪のみや脚のみで乗り越えることはアクチュエータの出力の点から不可能であり、このことは協調動作の有効性を示しているといえることができる。

また、高さ 7cm の段差乗り越えについて、脚と車輪の協調動作のある場合と脚のみの場合の消費エネルギーを比較した結果を 10 に示す。この結果から、脚と車輪の協調動作による乗り越えは、脚のみによる乗り越えと比較して、消費エネルギーに関してかなり有利であることが分かる。

## 4 まとめ

本論文では、整地における車輪機構の高速かつ効率的な移動と、不整地における脚機構の対地適応性をあわせもった移動ロボットの開発を目的として、新しい型の脚車輪型ロボット Chariot が提案された。Chariot は、脚と車輪という 2 つの機構の利点を十分に生かすために、胴体の中心に平行に配置された 2 つの大きな駆動輪と、胴体の前後に配置された 2 本の脚を独立に持っている。Chariot は、整地を 20km/h の速度で直進走行すること

ができ、また、胴体の中心まわりに旋回こともできる。また、Chariot は、脚支持期と車輪支持期という2つの相を交互に繰り返すことにより、段差乗り越えや溝の跨ぎ越えを行うことができる。

さらに、独立に配置された脚と車輪という機構をより有効に利用する動作として、脚と車輪の協調動作による段差乗り越えの解析・実験を行った。そして、脚が車輪を段差に押しつけることにより、車輪駆動トルクが有効に働くようになり、脚への負荷を減少させることができることが示された。これは、全体の消費エネルギーの低減だけでなく、脚に必要なアクチュエータの軽量化をも促すといえる。

今後は、車輪機構にサスペンションを組み込むことや脚機構の改良を図ることにより、一般的な不整地においても脚と車輪の協調動作を可能とし、速度・効率・可搬重量・対地適応性においてより実用に近い移動ロボットの開発を目指す予定である。

## 参考文献

- [1] G.W.Köhler, M.Selig and M.Salaske, "Manipulator vehicles of the nuclear emergency brigade in the Federal Republic of Germany", Proc. of 24th. Conf. on Remote System Technology, pp.196-218, 1976.
- [2] Y.Maeda, S.Tsutani and S.Hagihara, "Adaptable motion of multifunctional robot vehicle", Japan-USA Symp. on Flexible Automation, pp.365-372, 1986.
- [3] 広瀬, 三宅, 青木, 対地適応型4クローラ HELIOS-2 の開発, 第7回日本ロボット学会講演会予稿集, pp.115-118, 1989.
- [4] G.Belforte, N.Dalfio, C.Ferraresi, M.Sorli, "Mobile robot with wheels and legs", Proc. of the 19th ISIR. pp.610-622, November 1988.
- [5] S.Hirose and A.Morishita, "Basic motion regulation of articulated body mobile robot", Proc. of 5th ISRR, pp.433-440, August 1989.
- [6] G.Schweitzer and M.Werder, "ROBOTRAC - a Mobile Manipulator Platform for Rough Terrain", Proc. of '91 ISART, pp.411-416, March 1991.
- [7] 木村, 下山, 三浦: 四足動歩行ロボットの力学的解析, 日本ロボット学会誌, 6-4, pp.367-379, 1988.
- [8] 野中, 木村, 中野, 脚車輪型ロボットの機構と制御に関する研究, 第1報: 機構の考案、シミュレーション、設計, 第7回日本ロボット学会講演会予稿集, pp.121-122, 1989.
- [9] 野中, 木村, 中野, 脚車輪型ロボットの機構と制御に関する研究, 日本ロボット学会第1回ロボットシンポジウム予稿集, pp.287-292, 1991.

- [10] 三根, オペレーションズ・リサーチ 上巻, 朝倉出版, 1966.



中野 栄二 (Eiji NAKANO)

1942年3月24日生。1965年東京大学工学部産業機械工学科卒業。1970年同大学院工学系研究科産業機械工学専門課程博士課程修了。同年より通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。1987年現職(東北大学工学部機械知能工学科教授)この間、(1976~1977)米國スタンフォード大学人工知能研究所客員研究員。現在、不整地移動ロボット、建設ロボット等の研究に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)



木村 浩 (Hiroshi KIMURA)

1961年2月5日生。1983年東京大学工学部機械工学科卒業。1988年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻博士課程修了。工学博士。同年、東北大学工学部助手。現在東北大学工学部機械知能工学科勤務。歩行ロボット、知能ロボットの研究に従事。1989年度日本ロボット学会論文賞受賞。日本機械学会、情報処理学会、計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)



野中 洋一 (Youichi NONAKA)

1976年7月神奈川県生まれ。1989年筑波大学第三学群基礎工学類構造工学科卒業。1991年東北大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、東北大学大学院在学中、脚型ロボットの制御に関する研究に従事。(日本ロボット学会正会員)