

## ロボットの移動機構に関する研究動向

山下 淳\*<sup>1</sup> 浅間 一\*<sup>2</sup> 新井 民夫\*<sup>2</sup>  
太田 順\*<sup>2</sup> 金子 透\*<sup>1</sup>

### A Survey on Trends of Mobile Robot Mechanisms

Atsushi Yamashita\*<sup>1</sup>, Hajime Asama\*<sup>2</sup>, Tamio Arai\*<sup>2</sup>, Jun Ota\*<sup>2</sup> and Toru Kaneko\*<sup>1</sup>

The wheeled robot's ability is one of the most important factors which is influential with efficiency of achieving tasks by robots. Demands for mobile robots change where environment and purpose does, therefore various mechanisms of mobile robots are proposed. However, there is no standard or general guideline of designing moving mechanisms. In this paper, we classify and denote characteristics of moving mechanisms systematically, and indicate the guideline when we design them. Especially we describe omnidirectional robots and irregular terrain robots.

**Key Words:** Mobile Robot, Wheeled Mechanism, Omnidirectional Robot, Offroad Robot

#### 1. はじめに

移動機構の性能は、そのロボットが行う作業の効率を決定づける最も大きな要因の1つであり、近年注目を集めているヒューマノイド型ロボット(脚型移動機構)をはじめ、様々な種類の移動機構が提案されている[1]。移動機構の構造に注目すると、下記のように分類することができる[2]。

- (1) 車輪型移動機構：車輪の回転により移動
- (2) クローラ型移動機構：履帯の回転により移動
- (3) 脚型移動機構：脚を用いた歩行により移動
- (4) その他：特殊機構や、(1)~(3)の組み合わせ

これらのうち、移動効率の良さ、機構・制御の簡便さ、長年に渡る技術的な蓄積の多さなどから、(1)が最も広く用いられている。(1)の典型的な機構では、左右の車輪の速度差を利用して姿勢を変化させる方法(Fig. 1 (a))や、ステアリングが付いた車輪を駆動させる方法(Fig. 1 (b))により移動を行う。しかし、これら典型的な車輪型移動機構には以下の制限が存在する。

- (a) 移動方向の制限
- (b) 移動領域の制限

(a)は進行可能な方向が特定の方向のみに制限されることを意味する。例えば、(1)の典型例である自動車は真横に移動できないため、目的位置に到達するためには時間をかけて切り返

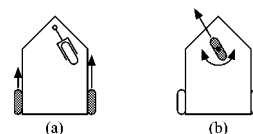


Fig. 1 Examples of mobile robot mechanism

しを行う必要がある。狭い場所を通り抜ける際や、複数ロボットが同一物体を協調搬送する際には、このことが大きな問題となる。(b)は床面の高低差がある領域への移動が制限されることを意味する。屋内外を問わず凹凸や段差は様々な場所に存在しており、今後多様な環境へのロボットの進出を阻む大きな問題となる。

上記の問題を解決することにより、(1)は更に活躍の幅を広げることができる。そこで、(a)の克服を目的とした全方向移動ロボットの研究や、(b)の克服を目指した不整地移動ロボットの研究が盛んに行われている。一般的な(1)に関しては、移動ロボット全般のサーベイ[3]や設計方法の解説[4]などがあり、機構学・運動学の解析も既になされている[2][4]~[11]。しかし、全方向移動機構と不整地移動機構に関しては、多種多様な機構が提案されてはいるが、その分類及び設計指針に関する体系化はほとんどさなれておらず、相互評価は難しい。また、それぞれのロボットが目標とする作業環境での要求仕様は各論文に述べられているが、全般的に取りまとめた記述はこれまでなかった。

そこで本論文では、全方向移動機構と不整地移動機構に関する研究動向の調査を行い、各機構の解説及び相互評価を行う。また、ロボットの移動機構を設計・開発する際に参考となるよう各産業分野でのロボットに対する要求仕様をまとめる。

原稿受付 2001年11月1日

\*<sup>1</sup>静岡大学

\*<sup>2</sup>東京大学

\*<sup>1</sup>Shizuoka University

\*<sup>2</sup>The University of Tokyo

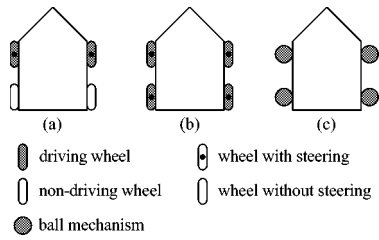


Fig. 2 Classification of movable direction

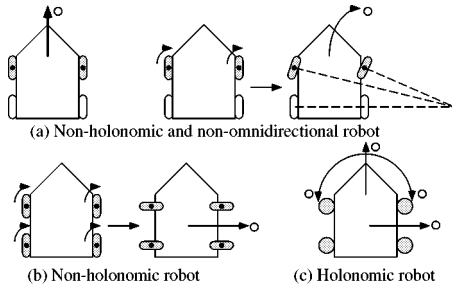


Fig. 3 Example of robot mechanism

ただし本論文では、最も研究が盛んに行われている (1) や (2) をベースとしたロボットを中心に扱う。(3) は全方向移動と不整地移動が可能であるが、多くの解説記事が存在するため、[12]~[15]などを参照されたい。また、モノレール上を移動するロボットや、移動壁面吸着型（あるいは磁気型）移動機構 [16] [17]、配管内ロボット [18]~[20]、水中遊泳ロボット [21]~[23]、浮上して移動するロボット [24] など、床面上を移動しない機構についても参考文献を示すのみとする。

## 2. 移動機構の比較評価と要求仕様

### 2.1 全方向移動性能

平坦な床面上を移動するロボットの運動の自由度は 3 であり、代表点の位置  $P(x, y)$  と姿勢  $\theta$  で表現できる。移動可能方向について考えると、移動機構は、(a) 非ホロノミック移動方向限定、(b) 非ホロノミック全方向移動、(c) ホロノミック全方向移動の 3 種類に分類される。それぞれの例を Fig. 2 に示す。

(a) 非ホロノミック移動方向限定：非ホロノミック移動方向限定機構では、3 自由度が独立に制御不可能であり、任意の方向に移動することができない。Fig. 2 (a) に示した機構では、直進、またはある点（任意の点ではない）を中心とした円軌道上での移動のみが可能であり (Fig. 3 (a))、真横方向への移動やその場で姿勢だけを変化させるその場旋回を行うことができない。現状の機構の大部分がこの分類に属する。また、2 自由度のみ同時に制御可能であるこの機構で 3 自由度を制御し目標の移動を行うことは、非ホロノミックな拘束を有した移動機構の経路生成問題として知られている [10]。

(b) 非ホロノミック全方向移動：非ホロノミック全方向移動機構では、ある瞬間に任意の方向に速度を出すことはできないが、時間をかければ全方向に移動することが可能である。例えば、Fig. 2 (b) に示す全車輪にステアリングを付けた機構では、任意方向への移動やその場旋回が可能である。ただし、真横に移

動する場合には、各車輪の方向をすべて横方向に揃えた後移動する必要がある (Fig. 3 (b))。

(c) ホロノミック全方向移動：ホロノミック全方向移動機構では、ある瞬間に任意の方向に速度を出すことが可能である。例えば、任意方向に回転可能な球をロボットの車輪として用いることにより (Fig. 2 (c))、すべての瞬間において、全方向 ( $(x, y, \theta)$  の 3 自由度) に速度を出すことが可能となる (Fig. 3 (c))。また、姿勢を変化させながら移動することができるなど移動方向の制限がなく、非常にフレキシビリティが高い。

### 2.2 不整地移動性能

不整地の定義及び表現方法は多種多様であり、かつ想定するロボットの種類によっても状況異なる (例えば、脚型移動機構に関する分類は [12])。従って一般的かつ定量的な記述法は存在しないが、大まかには [25] で示された不整地の分類で表現可能である。

- (a) 岩場、工事現場、そして階段などの「凹凸型不整地」
- (b) 砂地、沼地、灌木繁茂地などの「脆弱型不整地」
- (c) 岩場の隙間、瓦礫内、配管内などの「狭隘型不整地」
- (d) 大型建築物の壁面、配管系の外部などの「立体型不整地」

(c) や (d) については、床面以外の移動も必要となるため、前述の通り本論文では取り扱わない。また、(b) についても [25] に解説があるため、本論文では特に (a) の不整地について考える。(a) の凹凸型不整地では、以下の順番で移動が困難となる。

- 平地（水平で平らな床面、あるいは斜面）
- 段差（高さの異なる 2 つの平らな平面が交わった地点）・階段（連続的に続く段差）
- 凹凸面（任意の場所に高低差が存在する地形）

ただし、高低差が同じ段差を乗り越える場合でも、ロボット自身の大きさが異なると難易度は異なる。また、段差とロボットの性能が同じ場合でも、段差への進入角度が変化すると同様に乗り越えの難易度が異なる。つまり、不整地走破性能は、ロボットの性能や環境のみで決定されるものではなく、ロボットと環境の相対関係によっても変化する。

さて、段差乗り越え性能と不整地移動性能は非常に関連が大きく、段差乗り越え能力が高い場合には凹凸面を移動する能力も高いことが多い。一般には、以下の要素が車輪型移動機構の不整地移動性能（段差乗り越え性能）に影響を与える。

- (1) 車輪のトルク（駆動力）：車輪のトルクが大きいほど、段差乗り越え能力が高くなる。従って、駆動力のない補助輪はそれ自体では段差乗り越え能力がほとんどない。不整地走破を目的とするのであれば、全車輪を駆動輪にすることが望ましい。
- (2) 車輪と床面間の摩擦係数：摩擦係数が小さいとトルクが大きくても床面に伝わらないため段差乗り越え能力が低くなる。従って、摩擦係数が大きい車輪を用いることが重要である。ただし、一般に摩擦係数は最大 1 程度であり、極端に大きな摩擦係数を持つ車輪はないため、(1)(2) のみで不整地走破能力を向上させることは困難である。
- (3) 車輪の直径：車輪の直径の大きさに応じて乗り越え可能な段差の高さは大きくなる。ただし、駆動輪を用いた際でも車輪直径の 1/3 以上の段差乗り越えは基本的に不可能である。

**Table 1** Demands for mobile robots in the industrial fields

Field	Area	Road Surface			Demands
		State	Slope	Step	
Industry	Factory (Indoor)	Hard	Level	None	High speed
Agriculture	Paddy, Farm (Outdoor)	Soft, Mire	Easy slope	Rough	Move mire ground
Forestry	Forest (Outdoor)	Soft	Steep slope	Rough	Go over obstacles, Robot width: below 1800mm
Construction	Construction site (Outdoor) (Indoor)	Hard, A little soft	Level, Easy slope	Step	Go over 20-30mm step, Robot width: below 900mm
Nuclear power	Nuclear plant (Indoor)	Hard	Level	Step, Stairs	Move in narrow space, Go over obstacles
Space	Planet surface	Hard	Steep Slope	Rough	Go over obstacles
Welfare	Road (Outdoor) House (Indoor)	Hard	Easy slope	Step, Stairs	High speed, Go over 50mm step, Go over stairs

(4) 車輪が床面（段差面）から受ける反力：車輪が床面（段差面）に押しえつけられているほど、床面に伝わる駆動力が大きくなり、段差乗り越え能力が向上する。車輪が床面から離れる方向にある場合には、段差乗り越えが困難となる。従って、4輪車の場合、前輪と比較して後輪の段差乗り越えの方が難しい。段差乗り越え能力を向上させるためには、すべての車輪が段差乗り越え時に受ける反力が大きくなるようなサスペンションの工夫などが必要である。

(5) 車輪の柔軟性：ある程度柔らかい車輪を用いた方が段差乗り越え能力が向上する。空気の入ったゴム製タイヤのように柔軟であれば、小さな凹凸には車輪が変形することにより対応できる。また段差に対しても、車輪が変形して段差に引っかかることによって段差に適応した形状の車輪となる。しかし、車輪が柔らかすぎると高速移動が困難になる。そこで、高速移動能力と段差乗り越え能力を同時に持たせた車輪も提案されている [26]。

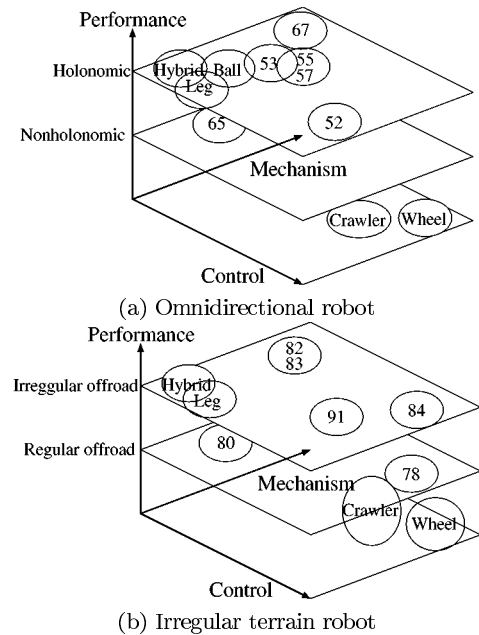
**2.3 移動機構に対する要求仕様**

移動ロボットの移動機構は使用環境・用途に応じて設計されており、作業の目的に応じた機構を用いることが重要である。そこで、各分野において移動機構に要求される仕様を **Table 1** に示す。なお詳細については、建設（建築・土木）分野 [27]~[29]、農業分野 [30]~[34]、林業分野 [35] [36]、原子力（保全）分野 [37]~[40]、宇宙分野 [41]~[44]、福祉（家庭）分野 [45]~[47]、その他特殊な分野 [48] [49] それぞれに関する文献を参照されたい。

**2.4 移動機構の比較評価**

ロボットの移動機構の特性は、以下の通り分類できる。

(a) 環境適応性：移動方向（旋回性能や全方向移動能力）、不整地走破能力（ただし、特に不整地環境を推進する移動ロボットの特性については、[25] に詳しい）



**Fig. 4** Difficulty of control and mechanism

(b) メカニズム：機構と制御の複雑さ

(c) 作業効率：エネルギー効率、移動速度、位置決め精度、信頼性 [50]、移動の滑らかさ、姿勢安定性、積載能力、稼働時間（電源）など

車輪型移動機構は、すべての要素をある程度満たしており、コスト面においても優れているため、最も広く用いられている。これらの特性のうち、(c) は移動機構を実用化する上で最も重要な要素であるが、長年に渡る実用化実績によって改善されることが多い。従って、研究レベルで新しい機構を提案する際に、(c) をすべて満たした設計を行うことは困難である。そこで、移動機構を設計する上での参考となるという本論文の主旨を考え、従来の移動機構について、(a) と (b) の特性の比較・検討を行う。

(a) のうち全方向移動能力については、機構と制御の複雑さの関係を **Fig. 4 (a)** に示す。ここでは、全方向移動が可能であるか否かに加え、ホロノミックか否かで分類し評価を行った。同様に、不整地移動能力についても、**Fig. 4 (b)** に関係を示す。前述の通り、ロボットの大きさや状況などの違いがあるため、直接的に乗り越え可能最大段差を比較することは無意味である。そこで、段差や階段（比較的整備された不整地）や凹凸面（整備されていない不整地）に対応可能かどうかで分類し評価を行った。ただし、制御や機構は軸正方向に向かうほど良い（簡単）とし、数字は参考文献番号を表している。

ホロノミック全方向移動能力を有するロボットでは、機構と制御の関係はトレードオフになっており、双方ともに優れた移動機構は提案されていない。それに対して、不整地移動性能に関しては、機構・制御の複雑さと性能の高さは必ずしも一致していない。これは、全方向移動を実現するためにはロボットの運動の自由度をすべて制御する必要があることに対し、不整地走破を行う場合にはその必要がないためである。

次章以降では、具体的にどのような機構を用いれば、全方向移動と不整地移動が可能となるかについて研究動向を具体的に詳細に調査し、移動機構の現状及び今後の課題について述べる。

### 3. 全方向移動機構

#### 3.1 全方向移動機構の構成法

球型ロボットのようにロボット自体が移動機構そのものである場合や、床面から浮いて移動する場合などを除いては、複数の駆動力発生機構をロボット本体に配置して、それぞれの駆動力発生機構が床面に伝える力の合力によりロボットは移動する。また、床面に安定に接地するためには床面との接触点が最低3必要である。現在実用化されている駆動力発生機構の大部分は車輪であるが、全方向移動を実現するためには、特殊な機構を用いることが多い。全方向移動を実現するための駆動力発生機構は、大きく分けて2種類が存在する。

1つは、1方向(1自由度方向)にだけ駆動力を発生できるような機構である。フリーローラを有する特殊な車輪(あるいはクローラ)は、ある1方向にだけ駆動力を発生可能であり、駆動力が発生する方向と垂直な方向に力を発生させることはできない。ロボット本体に、この機構の駆動力伝達方向を変化させて複数配置することにより、全方向に移動することが可能となる。もう1つは、すべての方向(2または3自由度方向)に駆動力を発生できるような機構である。すべての方向に回転可能な球状の車輪や、車輪の回転軸とステアリング時に中心となる点の間にオフセットを付けた特殊な機構などは、すべての方向に駆動力を発生できる。

前者と後者を比較すると、後者は駆動力を発生させることができる方向が多いため必然的にアクチュエータ数が多くなる。従って、機構が複雑となると同時に、制御すべきアクチュエータ数が多いため制御も困難となる。ただし、前者の機構は床面の凹凸に対して極めて弱く、段差乗り越え能力がほとんどない。

#### 3.2 全方向移動ロボットの分類

特徴に応じて全方向移動機構の分類を行い、その特徴について解説する。なお、ここで述べる機構は特別な記述がない限りすべてホロノミック全方向移動が可能である。

##### (1) フリーローラ付き車輪を用いた機構

フリーローラを有する特殊な車輪(またはクローラ)を用い、全方向移動を実現する。フリーローラ付き車輪は、ある1方向にのみ駆動力を発生することができ、それとは別の方向(ほとんどの場合は垂直方向)には、フリーローラが自由に回転することにより抵抗なく移動可能である。

フリーローラ付き車輪を用いた機構では、車輪形状・車輪配置・制御法それぞれに関して様々な工夫がなされている。

車輪形状は、(i) 車輪円周上にフリーローラを取り付けたもの (Fig. 5 (a)~(d))、(ii) クローラ上にフリーローラを取り付けたもの (Fig. 6 (a)~(b))、(iii) フリーローラ自体を回転させるもの (Fig. 7) の3種類に分類できる。

(i) に関しては、車輪円周上に曲率の付いた(中心部が太く両端が細くなった)円筒状フリーローラを取り付け、それらを2個重ねた機構 [51][52] (Fig. 5 (a)) や、球状フリーローラを

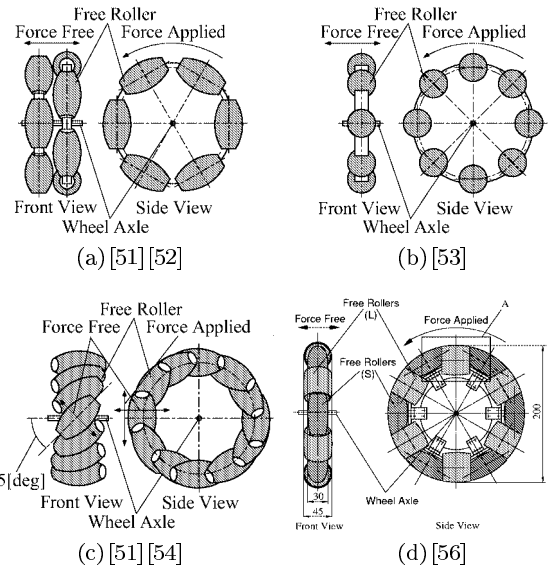


Fig. 5 Wheel structure (i)

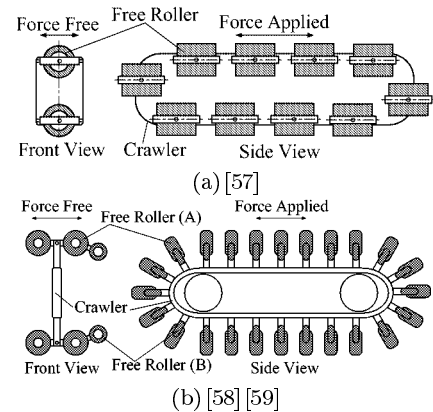


Fig. 6 Wheel structure (ii)

取り付けた機構 [53] (Fig. 5 (b)) が提案されているが、これらはフリーローラ間に隙間があるため移動時にがたつきを生じる。また、車輪の軸に対して45deg傾けて円筒状フリーローラを取り付けた機構(メカナムホイール) [51][54] (Fig. 5 (c)) も提案されているが、移動効率が悪く制御も容易でない。そこで、滑らかな移動を実現するために、車輪円周上に多数のリング状フリーローラを取り付けた機構 [55] や、大きさの異なる2種類の円筒状フリーローラを取り付けた機構 [56] (Fig. 5 (d)) が提案されている。

(ii) に関しては、円筒状フリーローラをクローラ上に取付けた機構 [57] (Fig. 6 (a)) や、車輪状フリーローラを用いた機構 [58][59] (Fig. 6 (b)) が提案されている。特に [57] で提案されている機構では、床面との接触面積が大きいので、座布団程度の大きさでありながら大荷重(1ton程度)に耐えることが可能となっている。また [58][59] では、不整地移動可能な全方向移動機構も提案されている。

(iii) に関しては、ある一方向に対しては駆動力を生じ、それに対して垂直な方向に対しては自由に回転する球状フリーローラを用いた特殊車輪 (Fig. 7 (a)) が提案されている。この機

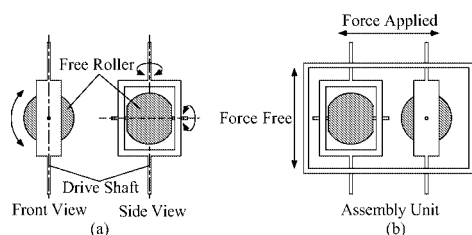


Fig. 7 Wheel structure (iii) [60][61]

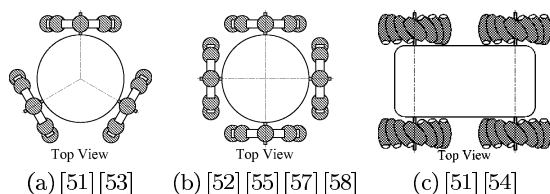


Fig. 8 Wheel arrangement with universal wheels

構では、駆動軸を回転させ続けると、フリーローラが床面に接触しない瞬間があるため、方向を変化させた2個以上の特殊車輪を組み合わせることが必要であり (Fig. 7 (b)), その組み合わせ方も1通りではない [60][61].

フリーローラ付き車輪のロボット本体への配置方法に関しても、様々な方法が存在する。車輪円周上にフリーローラを取り付けた機構を用いたロボットでは、3車輪を120deg毎に配置したもの [51][53] (Fig. 8 (a)) や、4車輪を90deg毎に配置したもの [52][55] (Fig. 8 (b)) がほとんどである。ただし、メカナムホイールを用いた場合には、Fig. 8 (c) のように自動車と同様に配置することもできる。また、クローラ上にフリーローラを取り付けた機構を用いた場合には、Fig. 8 (b) のように4車輪使用することが多い [57]~[59]。原理的には方向が一致しないように3車輪を配置すれば全方向移動は実現できるが、上記の通り実際には4個の車輪を用いた機構も多い。これは、4輪接地の方が安定性が高いこと、車輪の方向が直交していると制御が容易になることなどの利点があるためである。

車輪の駆動・制御方式に関しても、移動精度が高く、制御が容易となる方式が提案されている。ほとんどの機構では、車輪1個につき1個のアクチュエータで駆動を行っているため、アクチュエータの微妙な個差の影響により直進性が悪くなることがある。また、車輪を4個用いた場合、4車輪の回転速度に従属関係が存在するため制御も困難となる。そこで [52] では、平面内運動3自由度を3個のアクチュエータで独立に制御することにより、制御を簡単とすると同時に高い移動精度を実現している。

一般に、フリーローラ付き車輪を利用する方法では、その形状のため車輪製作が複雑であると同時に、移動時ががたつきが生じる危険性があり、段差にも弱い [62]。しかし、比較的アクチュエータ数を押さえて全方向移動が実現できるため、駆動部の機構が比較的簡単であり、その制御も容易とすることができる。

## (2) 車輪型機構

全車輪にステアリングを設置し、全方向移動を実現した機構である [63]。長いリンクの先に車輪を設置し各車輪の方向を変

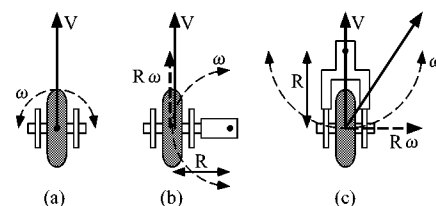


Fig. 9 Offset wheels

化させる機構も存在するが [64]、アクチュエータ数が多く制御が複雑となる。そこで、ステアリングの回転軸にオフセットを付ける (車輪の回転軸とステアリングの回転軸をずらす) ことにより、ホロノミック全方向移動を実現した機構が提案されている。Fig. 9 (a) のようにオフセットを付けない場合には、非ホロノミックな全方向移動のみ可能となる。また、Fig. 9 (b) のようにオフセットを付けた場合 [65][66] にも、同様に非ホロノミックな全方向移動のみ可能である。これらの方法で全方向移動を行う移動ロボットは従来から数多く提案されている。それに対して、Fig. 9 (c) のようにオフセットを付けることにより、ホロノミック全方向移動が可能となる [67]。これは、(a)、(b) の場合には、ステアリングの回転方向と駆動輪の速度の向きとの和が任意の方向に取れないことに対して、(c) の場合には任意方向に取ることが可能であるためである。

車輪配置に関しては、全方向移動を実現するためには、2個以上の車輪を用いれば良い。しかし、安定した移動を実現するために実際には4輪を用いる場合が多い。ただし、各車輪の回転速度及びステアリング方向に従属関係が存在するため、与えられた軌道に追従し移動するための制御は簡単ではない。[67] では、Fig. 9 (c) で構成された4車輪型ロボットについて、その制御則を構築している。また、自由度の数に対してアクチュエータ数が多い過拘束を回避するため、2駆動輪を平行に配置し、2車輪の中心から前方に離間した位置に操舵輪を配置した機構 [68] や、オフセット付車輪を4輪用い、1つのアクチュエータですべての車輪の方向を同時に変化させる機構 [69] も提案されている。

これら以外にも、[57] の機能を車輪で実現した機構も提案されている [70]。また、ロボット本体に対する車輪の角度を制御可能とし、床面と接触する車輪の位置を変化させることにより全方向移動を実現する機構も提案されているが [71]、可搬重量・安定性などで問題が残る。

一般に、車輪を用いて全方向移動を実現する場合には、ステアリング機構が必要となるため、アクチュエータ数が増えると同時に制御が困難となる。しかし、特殊な車輪を製作する必要はなく市販のゴム製タイヤを用いることが可能であるため、製作は比較的容易である。また、少々の段差ならそのまま乗り越えることが可能であり移動時のがたつきも小さいことから、移動時の安定性は非常に高い。

## (3) 球型機構

球型の移動機構を用いて全方向移動を実現している。

ロボット全体が球型移動機構であるもの [72] も存在するが、球型車輪をロボット本体に配置した機構が多い。球は平面並進2方向に回転する必要があるが、1方向の回転のみ駆動しもう

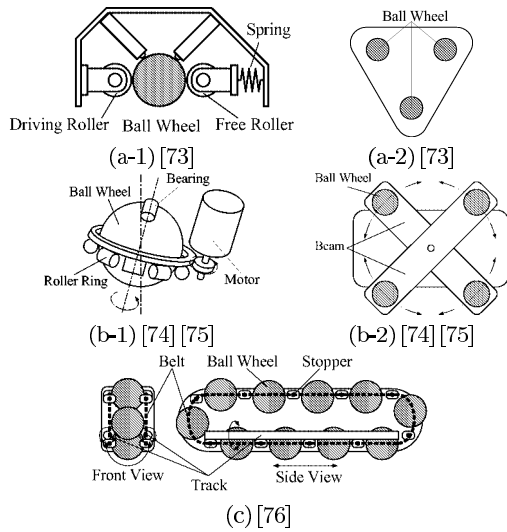


Fig. 10 Ball wheel mechanism

1 方向の回転はフリーローラ付き車輪と同様に自由に力を逃して回転させる機構と、2 方向に駆動させる機構が存在する。

駆動させる回転方向が 1 方向の場合、1 方向から球に回転を与える方式で駆動する機構 [73] (Fig. 10 (a-1)) や、ローリングとベアリングで支持された球をローリングを回転させることにより駆動する球型移動機構 (Fig. 10 (b-1)) が提案されている。これらの機構を、3 個ロボット本体に配置したものの (Fig. 10 (a-2)) や、4 個配置したものの (Fig. 10 (b-2)) がある。いずれの場合も、1 個の球に関しては、ある方向については駆動させ、それと直交する方向には自由に回転できるような構造となっている。それぞれの球が駆動可能な方向を異なった方向にすることにより、全方向移動が可能となる。球を用いた機構を車椅子に応用し、狭い場所でも自由に移動できるように車輪間隔を変化させることが可能な機構も提案されている [74] [75]。

駆動させる回転方向が 2 方向以上の場合、接点 (球と接触し駆動力を与えるアクチュエータ及び球と接触し支えるローラー) の数と配置により、様々な方式が存在する。アクチュエータ数が多くなると配置によっては過拘束が生じ、保守や調整も困難となるが、接点数が少ない場合には安定性が問題となる。

また、クローラを駆動することによる球の回転方向と、トラックを駆動することによる球の回転方向を直交させた機構 [76] (Fig. 10 (c)) も提案されている。この機構では、通常のカローラ機構と同様ロボットの左右に特殊クローラが配置されている。

球型機構では、車輪型移動機構と比較して、機構と路面との間のスリップが大きくなることが多いため、移動精度が悪くなる危険性がある。しかし、球型機構は他の機構とは異なりどの方向から見ても均等な形状をしていることから、全方向移動を実現するのに適した形状であると言える。

## 4. 不整地移動機構

### 4.1 不整地移動ロボットの構成法

不整地移動ロボットの構築方法は、2 通りに分類できる。1 つは段差 (凹凸面) に車輪が接触した際に、受動的にそれを乗り越える方法である。この方法は、原則的に段差乗り越え用のアクチュエータは必要とせず、段差に接触した力・状態を利用して段差乗り越えを行う。もう 1 つは、段差に車輪が接触した際に、能動的にそれを乗り越える方法である。この方法は、段差乗り越え用のアクチュエータを用意しておき、段差に接触した際にはアクチュエータを用いて段差乗り越えを行うものである。

前者は、段差乗り越え用のアクチュエータを必要とせず、制御を行うことなしに自動的に段差乗り越えを実現する。従って、段差乗り越えのための段差認識を行う必要がなく、アクチュエータ数が必要以上に増加することもない。また、そのため機構の軽量化を図ることが可能である。しかし、これらの機構を考案することは大変困難であり、様々な工夫が必要となる。後者は、必然的にアクチュエータ数が多くなると同時に、段差認識用のセンサを搭載する必要が生じることも考えられる。従って、機構・制御は複雑になるが、不整地適応能力を向上させるために何をしたら良いかが明確であるため、設計指針は立ちやすい。

### 4.2 不整地移動ロボットの分類

不整地移動を目的としたロボットに関する分類を行う。本論文では、不整地環境に加え、段差や階段を走破する能力についても議論を行う。なお、惑星ローバを設計する上での機構の分類に関しては [77] も参照されたい。

#### (1) 移動機構変形型機構

車輪やクローラの形状を変形させることにより、段差の乗り越えや不整地走行を行う機構である。

車輪型移動機構を基本としたものでは、車輪形状に工夫を加え、段差接触時に受動的に乗り越えを行う機構が提案されている。

[78] [79] では、複数の車輪を組み合わせることで 1 個の車輪を構成することによって、段差乗り越え能力を向上させた機構が提案されている。[78] では、大車輪の円周上に小車輪を 3 個配置した車輪 (Fig. 11 (a)) が提案されている。この機構は、平面を走行中は駆動力のある小車輪を用いて移動し、その小車輪では乗り越え不可能な段差に接触した場合には、大車輪を回転させて段差を乗り越えるというものである (Fig. 11 (b))。また [79] では、階段昇降のためのモータのかわりに遊星歯車機構を用いることにより、1 個のモータを用いて、平地移動時には小車輪を、段差に接触し車輪ユニットにトルクが加わった場合には大車輪を駆動させる機構を提案している。

段差に引っかかる足を車輪に取り付けることにより人工環境内を自由に移動可能な機構も提案されている (Fig. 12)。[80] では、走行用の車輪と、その車輪にオフセットを付けた平行リンクとで棒を挟み込み、その棒を段差に引掛けることにより、階段昇降を実現している。この機構は、建築基準法に定められた最大 230mm の段差を余裕を持って踏破できるようになって

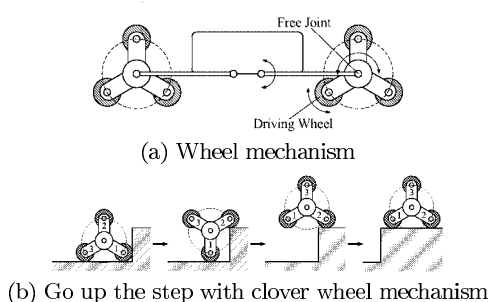


Fig. 11 Clover wheel mechanism [78][79]

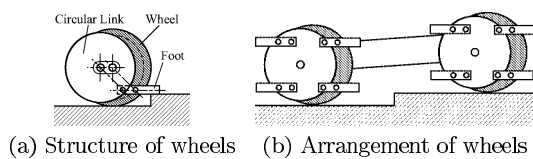


Fig. 12 Wheel-feet mechanism [80]

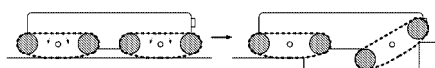


Fig. 13 Mechanism of rotatable crawler [82]

いる。

以上の機構では、段差・凹凸面に接触した場合にも、障害物検知用のセンサや段差乗り越え用アクチュエータを必要とせず、自動的かつ容易に乗り越えることが可能である。また、通常の車輪機構と同様、平面での移動性能は非常に高い。

クローラ型移動機構は元来不整地移動性能が高いため、クローラをベースとした機構も数多く提案されている。

[81]では、段差乗り越え能力を更に向上させるため、半月型クローラを用いることに加え、ロボット本体の左右にそれぞれ1個ずつ設置されているクローラをそれぞれ前後2個に分割し、計4個のクローラを用いた機構を提案している。通常の長いクローラを用いると、階段での安定性が向上するが、その反面、旋回性能が低下する。そこで、クローラを分割することにより、これらの問題を解決し、階段昇降能力も向上させている。

また、クローラを中心周りに回転させてクローラの姿勢を変化させることにより (Fig. 13), 段差乗り越え能力を向上させた機構も提案されている [82]。この機構では、アクチュエータ数が増えるものの、床面の状態に応じて柔軟に各クローラを回転させることにより、不整地走行能力を更に向上させている。

クローラの形状そのものを変化させて、段差乗り越え能力を向上させる機構も提案されている [83]。この機構では、Fig. 14のように段差を乗り越える際にクローラに取り付けられているアームの回転によりクローラの形状を変化させ、段差に適したクローラの形状を形成し、段差乗り越えを実現している。

クローラを基本とした機構では、基本的には通常のクローラの性能を受け継ぐため、移動性 (移動速度・旋回性能) が低いことが挙げられる。また、クローラ形状の姿勢変化や形状変化のためにアクチュエータが必要となる。しかし、上記の通り、工夫を加えることにより更に不整地移動能力を向上させつつ、その他の性能を向上させた機構が数多く提案されている。

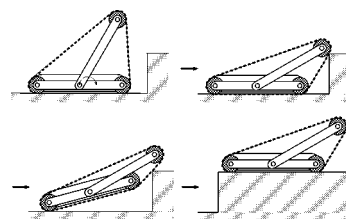
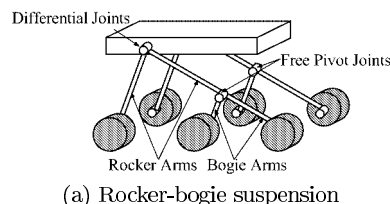


Fig. 14 Mechanism of shape-changeable crawler [83]



(a) Rocker-bogie suspension

(b) Go up the step with rocker-bogie suspension

Fig. 15 Rocker-bogie system [84]

## (2) 本体変形型機構

段差・凹凸面に接触すると、ロボット本体 (サスペンション) の形状を変化させて乗り越えを実現する機構である。これらの機構では、主にリンク機構を用いて本体の形状を変化させている。

惑星探査機においても、本体の形状を変化させることにより、不整地走破性能を向上させている機構が存在する。火星探査機に搭載された惑星探査機は、ロッカーボギーサスペンション [84] (Fig. 15 (a)) と呼ばれる特殊なリンク型サスペンションを用いている。この機構では障害物に接触した場合に、ロッカーアームとボギーアームを接続しているジョイントが自動的に回転することにより、常に床面に駆動力が伝達可能な形状に変形し、非常に滑らかな乗り越え動作を実現している (Fig. 15 (b))。ロッカーボギーサスペンションを用いることにより、車輪直径の約1.5倍の高さの障害物を乗り越えることが可能である。

また、より少ない車輪数で、ロッカーボギーサスペンションと同様に車輪を段差に押さえつける力を利用して、柔軟に自動的に段差を乗り越える機構も開発されている [85][86]。

ホロミック全方向移動機構に本体変形機能を持たせ、不整地移動性能を向上させた機構も提案されている。[58]ではフリーローラ付き特殊クローラ車輪を用いて全方向移動を実現し、リンク機構により段差に接触したクローラが持ち上がるようにして、Fig. 16に示すような手順で、段差乗り越えを実現している。その他、フリーローラ付特殊車輪とロッカーボギーサスペンションを組み合わせることにより、大きな段差を乗り越え可能なホロミック全方向移動ロボットも開発されている [87]。

以上の機構では、段差乗り越えのためのアクチュエータを必要とせず、段差に接触すると自動的にロボット本体の形状が変化し、段差乗り越えを実現する。

また、[88][89]では、左右にそれぞれ3個の車輪を配置した6

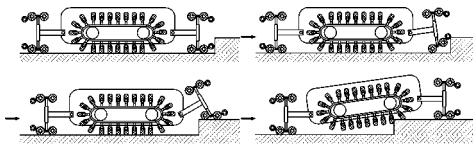


Fig. 16 Go up the step with special crawler mechanism [58]

車輪型移動機構を提案している。これらの機構では、それぞれの車輪をリンクで接続し、リンクの角度をアクチュエータで変化させることにより、段差乗り越えを実現している。特に[88]は、前輪及び後輪には低圧タイヤを用い、中輪には高圧タイヤを用いることにより、障害物接触時には低圧タイヤが有効に働き、平坦な場所では高圧タイヤが有効に働く機構となっている。

### (3) 体幹型機構

節型昆虫のように、移動機構が付いた節が数個連なっている機構である。各節間はリンクにより接続されており、路面形状に応じて節間の姿勢を変化させることにより不整地走破を実現している。蛟龍1号機（移動機構はクローラ型）[90]、2号機（移動機構は車輪型）[91]や、林業用ベースマシンの連結軌道車両[35]、火星探査ローバマーズホート[41]など、様々な機構が提案され、実際に用いられている。これらの機構でも、アクチュエータ数が多くなるものの、不整地移動能力は向上する。

### (4) ハイブリッド型機構

ハイブリッド型移動機構は、脚型移動機構の不整地移動能力の高さを活かしつつ、その移動速度の遅さを改善した機構である。具体的には、脚型移動機構に加え、脚以外の移動機構（車輪型やクローラ型）を装備した機構となる。[92]では、脚以外の移動機構の位置（脚先・本体など）や、脚以外の移動機構が駆動力の有無から、分類がなされている。

脚先に駆動力のある車輪が付いた機構[93]で階段を昇降できるものや、ロボット本体に駆動力のある車輪やクローラの付いたもの[94][95]、脚先に駆動力のない車輪が付いておりローラースケートの要領で移動するもの[92]など、様々な機構が提案されている。また、脚先に駆動力のない車輪が付いたものでも、より歩行に近い移動を行うもの[96][97]など、目的に応じて機構が設計されている。これらの機構では、アクチュエータ数が非常に多くなり、機構・制御ともに非常に複雑となるが、不整地移動能力も高く、高速移動も可能であるという特徴を持つ。

### (5) 協調型機構

単体の移動ロボットでは乗り越え不可能な段差を、複数移動ロボットの協調動作によって乗り越える手法も提案されている[56][98]。[56]では、リフトアップ機構を有したロボットが協調して他方のロボットを段の上に持ち上げることにより、段差乗り越えを実現している。以上のロボットには力の強いアームが必要となるが、アームを他の作業に利用することが可能である場合には、効率の良い方法である。

## 5. おわりに

移動ロボットに作業を行わせる場合、どのような使用環境・用途であるかによって、移動機構に対する要求が定まる。そこで本論文では、分野毎に移動機構に要求される仕様をまとめた。

また、車輪型移動機構や脚型移動機構などについての解説記事は多数存在しているが、全方向移動機構と不整地移動機構に関して体系的に論じられていなかった。そこで、これらの移動機構の研究動向を調査し、具体例を用いて比較・検討を行った。

全方向移動と不整地移動についてまとめると以下の通りとなる。

- 各車輪にステアリングをつけることにより、特殊な部品を用いずとも比較的簡単にホロミック全方向移動機構を設計することができる[74]。ただし、制御が多少困難となる。
- フリーローラ付き車輪を用いることで、ホロミック全方向移動が実現できる。ただし、一般的には床面が完全に平坦な場所での移動に限定される。
- 各車輪に過拘束が生じないように、アクチュエータ数3で運動の自由度3を制御することにより、ホロミック全方向移動機構の制御を容易にすることができる。ただし、ギアなどを組み合わせるの必要があり、機構は複雑となる[52][69]。
- 車輪単体での不整地移動能力を向上させるだけでは、ロボット全体としての能力は劇的に向上しない。従って、ロボット本体の形状を変形させることが重要である。
- 段差や床面の凹凸に応じてロボット本体の形状を自動的に変形させる機構では、段差乗り越え用のアクチュエータ・センサを必要としないため、制御は簡単であると同時に機構も複雑ではない。よって、リンク機構を利用して車輪の回転中心を変化させ、回転半径を大きくみせるようにして、受動的に段差乗り越えを行う機構が有効である[78][84]。
- 車輪型機構（[79][80]など）、または不整地走破性能に優れたクローラ型機構（[82][83]など）をベースとし、リンクを組み合わせた本体を用いることが不整地走破能力を向上させる有効なアプローチである。

以上のように、機構・制御のいずれかを簡単にするアプローチで設計することは非常に有効であるが、[25]でも述べられているように一般的な設計論は存在しない。また、同時に万能な移動機構も存在しない。よって、下記に示す通りその移動機構の用途を考えて設計を行うことが非常に重要である。最後に、ロボットの移動機構に関する需要と今後の課題について述べる。

**(1) 高性能脚型機構**：本論文では、車輪型移動機構を中心に解説を行った。しかし、日本や北欧の森林は非常に険しいこと（林業分野）、家庭内環境は人間の生活に適した環境であること（福祉分野）、特殊環境では目的を遂行することが最も重要となること（原子力施設内・災害環境）など、特定の用途では非常に高い不整地走破性能と全方向移動性能が必要であり、車輪型では対応できないこともある。よって、これら特定の分野においては、脚型移動機構をベースとしたヒューマノイド・脚型と車輪のハイブリッド型などが望ましいであろう。

**(2) パッシブな不整地移動機構**：特定の用途以外では、機構・制御が複雑な脚型移動機構以外で対応することが現実的である。建設現場や工場内・農業分野では、床面は完全な平地ではないが険しい不整地でもなく、数mm～数十mm程度の段差を乗り越え可能であれば良い。ただし、作業効率（移動速度）が重要である。従って、整地環境において、小さな段差を簡単に乗



り越える必要あるため、複雑なアクチュエータ・センサを用いずに、小さな段差は時間をかけずに自動的に乗り越え可能な機構（パッシブなサスペンション）が求められる。この要求を満たす機構は意外に少ないため、設計・開発を進めるべき分野である。

**(3) 不整地移動能力を有する簡単な全方向移動機構**：屋内の狭い場所での作業や畑を耕すときの端での方向転換など、ホロノミック・非ホロノミックを問わず全方向移動能力により作業効率が向上する。従って、多少の不整地走破能力を持った全方向移動機構を用いることは有効である。前述の通り、脚型移動機構は機構・制御が非常に複雑である。また、フリーローラ付き特殊機構では、フリーローラに駆動力はないことと、車輪直径の1/10以下であるフリーローラの直径が段差乗り越え性能を決定することにより、小さな凹凸でも乗り越え不可能となる。本体を変形させることにより不整地に対応可能な機構も提案されている[87]が、耐えられる荷重・最大速度・段差乗り越え能力などを考慮するならば、車輪型機構を用いることが有効であろう。よって、移動ロボットでの作業の自動化を進める上でも、車輪型をベースとし簡単な機構で構成された不整地全方向移動機構の研究・開発が盛んに行われることが期待される。

以上、コストを無視できる特殊な用途を除けば、車輪型移動機構をベースとした新たな移動機構に対する需要は決して小さいものではない。今後、移動機構を設計・開発するに当たり、本論文で体系化したこれらの知識が活用されることが望まれる。

### 参 考 文 献

- [1] “ロボット紳士・淑女録”，日本ロボット学会誌，Vol.14，No.3，pp.337-369，1996.
- [2] 高野：“自律移動ロボットの機構と移動制御技術”，日本ロボット学会誌，Vol.5，No.5，pp.384-390，1987.
- [3] 坪内：“移動ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.16，No.7，pp.902-905，1998.
- [4] 米田他：“はじめてのロボット創造設計”，講談社，2001.
- [5] 築島他：“車輪式移動ロボットの運動学および動力学的一般理論に関する研究”，日本ロボット学会誌，Vol.8，No.6，pp.699-711，1990.
- [6] Y. Zhao et al.：“Kinematics, Dynamics and Control of Wheeled Mobile Robots,” Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.91-96, 1992.
- [7] 市川：“車輪移動機構のABC 車輪移動機構のステアリング方式と駆動力伝達”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.1，pp.107-112，1995.
- [8] 酒井：“車輪移動機構のABC タイヤの力学”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.1，pp.113-118，1995.
- [9] 高野：“車輪移動機構のABC（第3回）運動学”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.3，pp.355-360，1995.
- [10] 坪内：“車輪移動体の制御”，日本ロボット学会主催第43回講習会ロボット工学入門シリーズVIII 移動技術編，pp.58-68，1995.
- [11] G. Campion et al.：“Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.12，No.1，pp.47-62，1996.
- [12] 広瀬他：“4足歩行機械の制御システム”，日本ロボット学会誌，Vol.3，No.4，pp.304-323，1985.
- [13] 古荘：“歩行ロボットの研究展開”，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.3，pp.306-313，1993.
- [14] 広瀬他：“実用的4足歩行機械の開発に向けて”，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.3，pp.360-365，1993.
- [15] 米田：“脚移動”，日本ロボット学会誌，Vol.16，No.7，pp.897-901，1998.
- [16] 西：“車輪またはクローラを用いた壁面移動ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.10，No.5，pp.570-574，1992.
- [17] 広瀬他：“歩行型壁面移動ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.10，No.5，pp.575-580，1992.
- [18] 福田：“プラント検査メンテナンスロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.4，No.5，pp.536-539，1986.
- [19] 藤原他：“文節型主要配管内検査点検ロボットの開発”，日本ロボット学会誌，Vol.12，No.2，pp.318-327，1994.
- [20] 宮川他：“1インチ用配管作業ロボットの開発”，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.3，pp.389-395，1999.
- [21] 浦：“海中ロボットの展開”，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.6，pp.818-821，1993.
- [22] 浦：“自律型海中ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.7，pp.933-936，2000.
- [23] J. Yuh et al.：“Underwater robotics,” Advanced Robotics, Vol.15，No.5，pp.609-640，2001.
- [24] 吉光他：“小天体探査ローバの新移動メカニズム”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.2，pp.292-299，2000.
- [25] 広瀬：“野外で活躍する移動ロボットの機構設計”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.7，pp.904-908，2000.
- [26] 内田他：“車輪の凹凸地踏破性能評価とHS車輪の開発”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.5，pp.743-751，2000.
- [27] 長谷川：“建設用ロボットの現状と今後の課題”，日本ロボット学会誌，Vol.8，No.2，pp.198-202,228，1990.
- [28] 村山：“建築作業における作業移動型ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.7，pp.920-923，1995.
- [29] 新井：“建設ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.7，pp.919-922，2000.
- [30] 藤浦：“ほ場作業システムとロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.12，No.7，pp.956-959，1994.
- [31] 佐藤：“農業における作業移動型ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.7，pp.924-927，1995.
- [32] 岡本：“農業ロボット研究の現状と課題”，農業機械学会誌，Vol.58，No.1，pp.128-132，1996.
- [33] 行本：“農業用車両のロボット化の課題と展望”，農業機械学会誌，Vol.58，No.1，pp.133-139，1996.
- [34] 嘉数：“自律農業ロボットの課題と現状”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.7，pp.951-954，2000.
- [35] 辻井：“林業分野におけるロボット研究”，日本ロボット学会誌，Vol.12，No.7，pp.971-974，1994.
- [36] 福田：“林業機械化の現状と問題点”，農業機械学会誌，Vol.57，No.6，pp.137-142，1995.
- [37] 極限作業ロボット技術研究組合：“極限作業ロボット（原子力ロボット）の研究開発”，日本原子力学会誌，Vol.34，No.12，pp.1108-1115，1992.
- [38] 佐藤他：“メンテナンス作業における作業移動型ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.7，pp.928-931，1995.
- [39] 木村元他：“原子力用ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.6，pp.784-787，1995.
- [40] 妻木：“危険作業ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.7，pp.946-950，2000.
- [41] 狼他：“月・火星探査ローバ”，日本ロボット学会誌，Vol.12，No.7，pp.979-985，1994.
- [42] J. D. Burke：“惑星探査ローバのアメリカにおける研究と開発”，日本ロボット学会誌，Vol.12，No.7，pp.986-992，1994.
- [43] A. L. Kemurdjian et al.：“1964～1990年にかけてのソビエトの惑星ローバの開発”，日本ロボット学会誌，Vol.12，No.7，pp.993-1001，1994.
- [44] 久保田：“宇宙ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.7，pp.941-945，2000.
- [45] 菅野：“家庭用ロボットの作業移動”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.7，pp.937-938，1995.
- [46] 藤崎他：“高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム”，日本ロボット学会誌，Vol.14，No.5，pp.619-623，1996.
- [47] 手嶋：“高齢者用福祉ロボットの現状と将来”，精密工学会誌，Vol.65，No.4，pp.507-511，1999.
- [48] 田所他：“レスキューロボット”，日本ロボット学会誌，Vol.19，No.6，pp.685-688，2001.
- [49] 柴田：“人道的対人地雷探知・除去ロボティクスの動向と展望”，日本ロボット学会誌，Vol.19，No.6，pp.689-695，2001.

- [50] 大道: “野外ロボットの实用化と制御システム”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7, pp.913-916, 2000.
- [51] B. Carlisle: “An Omni-Directional Mobile Robot,” *Developments in Robotics 1983*, IFS Publications Ltd., pp.79-87, 1983.
- [52] 浅間他: “3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, pp.249-254, 1996.
- [53] 坂田他: “ホロノミックな小型全方向移動ロボットの開発 (第 1 報) —メカニズムと基本制御システム—”, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.587-588, 1996.
- [54] 堀他: “メカナムホイールを用いた全方向移動ロボットの制御”, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.211-212, 1996.
- [55] 藤沢他: “四輪独立駆動型全方向移動ロボットの運動学と走行特性”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.62, No.604, pp.4573-4579, 1996.
- [56] 浅間他: “2 台の自律移動ロボットの相互ハンドリングによる協調搬送”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7, pp.1043-1049, 1997.
- [57] 広瀬他: “大荷重高効率全方向車両の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 講演会論文集, pp.350-355, 1993.
- [58] 磯田他: “オフロード走行用ローラ・クローラ型全方向移動ロボット”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.65, No.636, pp.3282-3289, 1999.
- [59] P. Chen et al.: “Omni-Directional Robot and Adaptive Control Method for Off-Road Running”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.18, No.2, pp.251-256, 2002.
- [60] F. G. Pin et al.: “A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.10, No.4, pp.480-489, 1994.
- [61] 湯他: “直交車輪機構を用いた全方向移動ロボット車の自律制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.1, pp.51-60, 1999.
- [62] L. Ferrière, D et al.: “Design of Omnimobile Robot Wheels,” *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3664-3670, 1996.
- [63] A. Bétourné et al.: “Kinematic Modelling of a Class of Omnidirectional Mobile Robot,” *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3631-3636, 1996.
- [64] 高橋他: “車両幅可変型全方向移動ロボットの機構と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.5, pp.638-645, 2001.
- [65] 森他: “新しい全方向移動台車 ODV9 の機構とその走行モードについて”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.64, No.619, pp.951-958, 1998.
- [66] 森他: “全方向移動ロボット ODV9 の基本原理と小段差乗り越えについて”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.1, pp.150-157, 2000.
- [67] 和田他: “ホロノミック全方向移動ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.8, pp.1139-1146, 1997.
- [68] 和田他: “双輪キャスト型駆動機構を用いたホロノミック全方向移動ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8, pp.1166-1172, 2000.
- [69] 和田: “同期キャスト駆動機構によるホロノミック全方向移動ロボットの設計と運動解析”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6, pp.784-792, 2001.
- [70] 駄本他: “Vutton-II: Omni-Disc を用いた全方向走行車の開発”, 日本機械学会第 6 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.255-260, 2001.
- [71] 古田他: “水平車輪式全方向移動ロボットの開発”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.245-246, 2001.
- [72] 越山他: “全方向形移動ロボットの制御に関する研究 (第 1 報 球状ロボットのコンセプトとロールおよび走行制御)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.58, No.548, pp.1128-1136, 1992.
- [73] 飯田他: “球を使った全方向移動機構及びその制御”, 日本ロボット学会第 3 回ロボットシンポジウム予稿集, pp.79-84, 1993.
- [74] 和田他: “車両幅可変機構を有する全方向移動車の設計とその車椅子への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.6, pp.816-823, 1998.
- [75] M. Wada et al.: “Design and Control of a Variable Footpoint Mechanism for Holonomic Omnidirectional Vehicles and its Application to Wheelchairs,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.15, No.6, pp.978-989, 1999.
- [76] 西川他: “ホロノミック特性を有する全方向移動ロボットと移動ロボットの高精度誘導方式の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.2, pp.249-256, 1995.
- [77] S. Hirose et al.: “Fundamental Considerations for the Design of a Planetary Rover,” *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1939-1944, 1995.
- [78] 高野他: “移動ロボット TO-ROVER の研究開発”, 精密機械, Vol.49, No.11, pp.1572-1577, 1983.
- [79] 森田他: “階段昇降移動ロボット TO-ROVER III の開発研究”, 精密工学会誌, Vol.60, No.10, pp.1495-1499, 1994.
- [80] 田口他: “足付き車輪による段差昇降機械の研究”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.118-123, 1997.
- [81] 竹原他: “原子力点検用ロボットに用いる半月形クローラ車の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.3, pp.238-243, 1984.
- [82] 広瀬他: “対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2, pp.283-291, 1992.
- [83] 岩本他: “地形変化に応じながら走行する形状可変クローラ走行車の機構と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.3, pp.200-208, 1984.
- [84] H. W. Stone: “Mars Pathfinder Microrover - A Small, Low-Cost, Low-Power Spacecraft,” *Proc. AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics*, 1996.
- [85] 広瀬他: “菱形 4 輪火星ローバーの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 講演会論文集, pp.356-359, 1993.
- [86] 黒田他: “惑星探査マイクロローバ用走行システム”, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1461-1462, 1998.
- [87] A. Yamashita et al.: “Development of a Holonomic Omni-Directional Mobile Robot with Step-Climbing Ability”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.13, No.2, pp.160-167, 2001.
- [88] Y. Uchida et al.: “Fundamental Performance of 6 Wheeled off-road Vehicle HELIOS-V,” *Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2336-2341, 1999.
- [89] 小柳他: “段差を踏破する 6 輪車輪型移動ロボット「六車士」”, 日本機械学会第 6 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.261-266, 2001.
- [90] 広瀬他: “簡体幹形移動ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.1, pp.56-61, 1989.
- [91] 広瀬他: “簡体幹形移動ロボット KR II の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5, pp.551-559, 1991.
- [92] 広瀬他: “ローラウォーカー: 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.62, No.599, pp.2758-2764, 1996.
- [93] 宮城他: “脚・車輪式による階段昇降可能な車椅子の開発 (第 2 報) —画像による階段計測システムを用いた自動階段昇降実験—”, 精密工学会誌, Vol.64, No.6, pp.840-844, 1998.
- [94] 安達他: “可動限界到達時の脚踏み換えルールに基づく 4 脚ロボットの操縦型歩行制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, pp.329-336, 1998.
- [95] 熊谷他: “予想型イベントドリフト歩容による脚車輪分離型ロボットの継続的推進動作”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6, pp.775-783, 2001.
- [96] 松本他: “走行モードを巧みに切り換えて段差昇降する 4 輪ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6, pp.822-829, 1995.
- [97] 松本他: “静的歩容を規範とした 2 足歩行型車輪ロボットの階段昇降制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.6, pp.868-875, 1998.
- [98] S. Hirose et al.: “A Proposal for Cooperative Robot “Gunryu” Composed of Autonomous Segments,” *Proc. 1994 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1532-1538, 1994.

**山下 淳 (Atsushi Yamashita)**

1973年10月9日生。2001年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年静岡大学工学部機械工学科助手。ロボットの動作計画・移動機構, 画像処理・ロボットビジョン等の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 精密工学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

**浅間 一 (Hajime Asama)**

1959年1月18日生。1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補。同研究所生化学システム研究室研究員, 工学基盤研究部技術開発促進室長を経て, 2002年分散適応ロボティクス研究ユニットリーダー。現在, 東京大学人工物工学研究センター教授。自律分散型ロボットシステムの研究や複数自律移動ロボットの協調技術, 知的データキャリアとその応用技術の開発等に従事。2001年日本機械学会ロボメカ部門学術業績賞等受賞。IEEE, 日本機械学会, 計測自動制御学会等の会員。工学博士(東京大学)。(日本ロボット学会正会員)

**新井 民夫 (Tamio Arai)**

1947年8月4日生。1970年東京大学工学部精密機械工学科卒業。1977年同博士課程修了。工学博士。1987年東京大学工学部精密機械工学科教授。2000年東京大学人工物工学研究センター長(併任)。自動組立, 複数移動ロボット等の研究に従事。IEEE, CIRP等の正会員。(日本ロボット学会正会員)

**太田 順 (Jun Ota)**

1965年2月19日生。1989年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。1991年東京大学工学部助手。1994年同講師。1996年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授。1996~97年Stanford大学客員研究員。群知能ロボット, 大規模搬送システム, ロボットの環境設計等の研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

**金子 透 (Toru Kaneko)**

1948年6月21日生。1974年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。1997年静岡大学工学部教授。工学博士(東京大学)。画像処理, ロボットビジョン等の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 情報処理学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)