

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	ロボットハードウェアの創造設計
Title(English)	How to Make Creative Hardware Design of Robots
著者(和文)	遠藤玄, 広瀬茂男
Authors(English)	Gen ENDO, Shigeo HIROSE
出典(和文)	設計工学会誌, Vol. 50, No. 5, pp. 216-222
Citation(English)	JSDE journal "Design Engineering", Vol. 50, No. 5, pp. 216-222
発行日 / Pub. date	2015, 5

# ロボットハードウェアの創造設計\*

## How to Make Creative Hardware Design of Robots

遠藤玄<sup>\*1</sup>, 広瀬茂男<sup>\*2</sup>  
(Gen ENDO) (Shigeo HIROSE)

**Key Words** : Creative Design, Robot Design

### 1. はじめに

筆者（遠藤）が東京工業大学広瀬研究室の一員となったのは1995年であった。小さい頃からモノづくりが好きで、NHKの大学対抗ロボコンを羨望の眼差しで見ている筆者は、ついに憧れの研究室に入ることが出来て心躍る気持であった。と同時に、今までTVや雑誌でしか見たことのなかったロボットが創れるようになるのか、一抹の不安もあった。

あれから（途中ブランクはあるものの）20年、広瀬研究室で研究活動に従事し、ロボット機械システムの創造設計を備に見て、また自身もいくつかのロボットシステムを構築した<sup>1~3)</sup>。ロボットの創造設計については広瀬茂男先生ご自身による解説記事（例えば発想法<sup>4)</sup>、移動ロボット技術<sup>5)</sup>、可変拘束機構<sup>6)</sup>など）があるが、本稿では従来とは異なる第三者的な視点から創造設計の現場を俯瞰し整理し直してみたい。特に今まであまり語られなかった「実際のところ、どのようにしているのか？」という現場の情報を記すことで、これからロボット機構を設計開発する技術者・研究者の一助となることを本稿の目的とする。

### 2. 戦略・作戦・戦術・兵站

広瀬研究室におけるロボットの研究開発を整理する上で、以下4つの用語を用いて分類する。それは「戦略(Strategy)」「作戦(Operation)」「戦術(Tactics)」「兵站(Logistics)」のアナロジーで説明する。辞書<sup>7)</sup>に依れば戦略とは「1. 戦争に勝つための総合的・長期的な計略, 2. 組織などを

運営していくについて、将来を見通しての方策」である。作戦とは「1. 戦いや試合を上手く運ぶ方法や策略. 転じて、物事をすすめていくうえでのほかりごと. 2. 歩兵・砲兵・騎兵などの、ある期間にわたる一連の対敵戦闘行動」である。さらに戦術とは「1. 個々の具体的な戦闘における戦闘力の使用法. 普通、長期・広範の展望をもつ戦略の下位に属する. 2. 一定の目的を達成するためにとられる手段・方法」と定義される。最後に、最も聞きなれない言葉である兵站とは「戦場の後方にあつて、作戦に必要な物資の補給や整備・連絡などにあたる機関」である。

つまり図1に示すように、戦略は最も抽象度の高い概念で長期的立場に立っており滅多に変更されることはない。（企業経営などでは競合に悟られないために明らかにされることすら少ない。）一方で作戦、戦術、兵站と下位にいくにしたがつて、実施内容は具体的で明らかとなり、また量的にも増大することになる。最終目標の戦略を実現するために、複数の作戦が実行され、個々の作戦の中にはそれぞれの戦術がある。そしてその戦術すべてを支える土台が兵站である。特にモノづくりの現場ではほとんどの実作業が兵站到分類されるように思われる。本稿では次章以降この4つの階層に従い整理して行く。

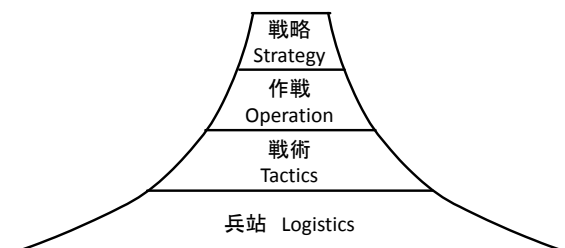


図1 戦略・作戦・戦術・兵站の階層

\* 原稿受付：2015年1月24日

\*1 非会員，東京医科歯科大学生体材料工学研究所(〒101-0062 千代田区神田駿河台 2-3-10)

\*2 正会員，(株)ハイボット(〒141-0001 品川区北品川 5-9-15)

### 3. 戦略 (Strategy)

筆者らの研究開発活動の戦略，すなわち究極的な研究目的は以下に集約されよう。

**従来にない高性能・高機能の機械（ロボット）システムを創出し，社会に貢献する。**

つまり実社会で役に立ち，従来に比してより高い性能あるいは機能を発揮する機械システムを創造しようという営みである。もちろんこれは研究ポリシーそのものであるため，研究者毎に違うであろう。例えば「ロボットを創ることにより人間の機能を理解する」と定めれば，以下の設計では必然的にヒトに近い形態を選択し，工学的最適性よりもむしろ生体を模した構造・機能を追求することになる。ここで敢えて記述したのは，本稿で扱う設計論はすべて高性能・高機能を目指し，工学的解を追求した役立つ機械システムを開発するためのものであることを明らかにするためである。なお，ここでロボットを括弧書きにした理由は，最善の機械システムであるならば，いわゆる「ロボット」という言葉で想起される形態にすら，こだわりが無いことを意味している。ある種「道具」のような単純なものであっても，最終的に有効であるならば積極的に採用する立場である。

### 3. 作戦 (Operation)

作戦に相当するのは，具体的な個々のロボット開発プロジェクトであろう。例を挙げると

- ・ヘビ型ロボット (ACM<sup>8)~10)</sup>)
- ・四脚歩行ロボット (TITAN<sup>11)~13)</sup>)
- ・地雷探査ロボット (Gryphon<sup>14)</sup>)
- ・水中探査ロボット (Anchor Diver<sup>15), 16)</sup>)

などである。これらはシリーズとして継続的に開発されてきた。前章の戦略，すなわち研究目的に対する貢献の具体例としては，ヘビ型ロボットにおける滑走理論の体系化や，サーペノイド曲線と河川の蛇行力学との相似性の発見などが学術的成果としての社会貢献であり，またレスキューや原発対応と言った実社会の要請に応える開発が挙げられる。四脚歩行ロボットは法面作業ロボットでの実用化，地雷探査ロボットでは紛争地域での実地試験，水中探査ロボットでは東日本大震災での捜索活動，ダムの堤体損傷診断などの具体的な開発が進められている。

### 4. 戦術 (Tactics)

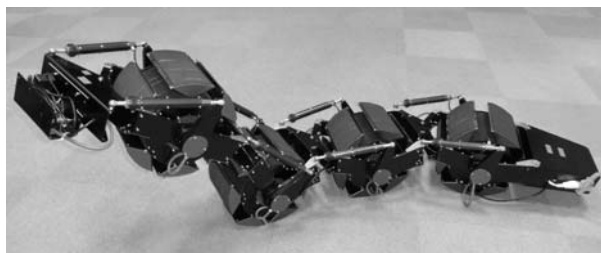


図2 能動車輪型ヘビ型ロボット ACM-R8

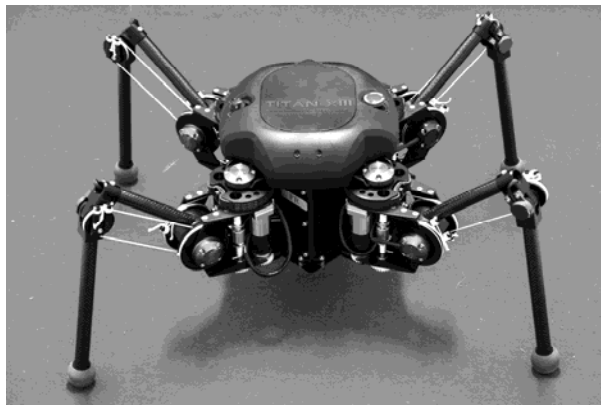


図3 小型軽量四脚歩行ロボット TITAN-XIII



図4 人道的地雷探査ロボット Gryphon



図5 ワイヤ牽引型水中探査ロボット Anchor Diver IV

上述の作戦，すなわち，各々のロボットを具体的に設計する上で，共通に使われてきた設計法について述べる<sup>5)</sup>。具体的に設計する際，これらの機構構成法を単数あるいは複数組み合わせることで機械システムの性能を可能な限り向上させる。

#### 4.1 連結差動機構の利用

連結差動機構とは、エネルギーポートが三つある機構要素を、それらの二つのポートを連結のためのポートとし、残りの一つを出力ポートとして順次連結し、エネルギーを複数の出力ポートに伝達する機構である。エネルギーポートが三つの機械要素は、例えば3つのシリンダから成る連通管や動滑車（滑車を通るワイヤの両端と滑車の支持金具が三つのポートとなる）、遊星歯車機構がその例である。そしてただの一本の棒も、左右と中心部に三つの出力端を想定すると3端子エネルギーポートの機構となる。これを連結するといわゆる rocker bogie 機構が実現できる。この機構は、車輪の支持力が機構的に均一化されるため不整地移動機構に有効であり、NASA が火星探査に使用した6輪駆動車の車輪のサスペンション機構に使用されている。筆者も歩道環境を走行する福祉車両のサスペンション機構に用いて通常車両の2倍の段差踏破性を実現している<sup>17)</sup>。

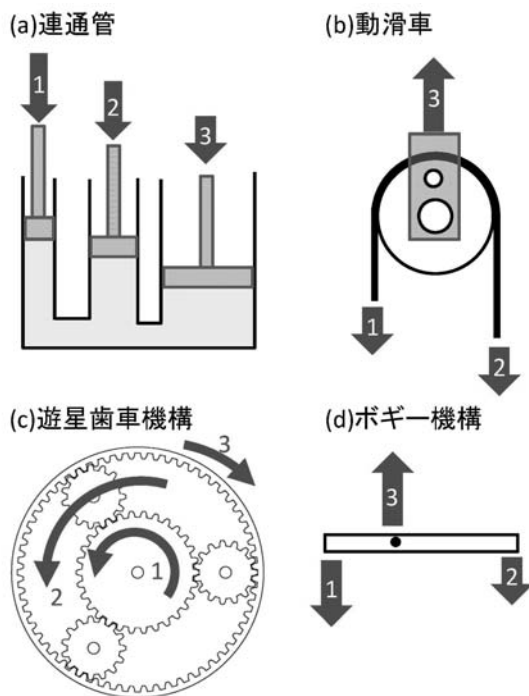


図6 差動機構の例

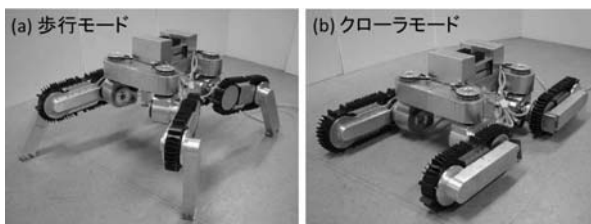


図7 脚 - クローラ複合移動体 TITAN-X

#### 4.2 運動切り替えを行う可変拘束機構の利用

単純な機構でできるだけ多様な機能性を発揮するための機構である。本機構については、文献<sup>6)</sup>に詳しいが、要約するとできるだけ多くの機能を発揮する機構を導入すること、機能性を切り替えるための機構はできる限り最小なものとする、そして切り替えのためには、主動力源の動力を利用すること、主動力源からの動力の切り替え時の「なご」を利用すること、などがポイントとなる。図7は脚型移動とクローラ移動を組み合わせた複合移動体 TITAN-X<sup>18)</sup>である。腿部に装備されるクローラベルトは脛関節の駆動にも用いられ、それぞれの移動方式への切り替えは小型のアクチュエータにより駆動されるロックピンで行われている。

#### 4.3 干渉駆動による搭載アクチュエータの有効利用

あるロボットに  $N$  個のアクチュエータが搭載され、それぞれがパワー  $P$  を生成できるとしたとき、そのロボットが生成できる最大の出力パワーは  $NP$  である。干渉駆動の設計原理は、そのロボットが最もパワーを必要とする動作状態において、発生できる最大のパワー  $NP$  にできる限り近いパワーを生成するように機構 and/or 制御法を構成しようとするものである<sup>19)</sup>。例えば、出力パワーが  $P$  の二つの駆動アクチュエータで推進される図8の2種類の車両を考えよう。図8(a)は(b)に比較すると推進の駆動系と操舵の駆動系が非干渉化され、制御性の点で好まれる。しかし、干渉駆動の面からは図8(b)の方が望ましい。なぜなら、もしも直進運動が主要運動であるとする(a)の機構では操舵用駆動アクチュエータは利用されず出力は推進用アクチュエータの出力  $P$  だけに依存する。しかし(b)の機構では左右の駆動アクチュエータが両者とも推進のために寄与し、車両の総合出力パワーは  $2P$  まで上げられるからである。この干渉駆動の考え方は、筆者らがこれまで設計してきたロボットに多く使用している。

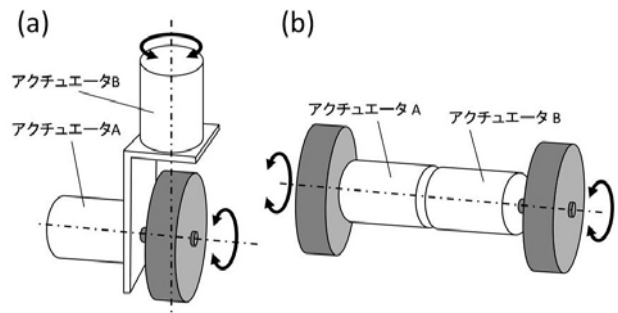


図8 非干渉型と干渉型の車輪推進機構

図9は高放射線下の原子炉内で作業するための超冗長ワイヤ駆動多関節アームの試作機<sup>20)</sup>である。駆動アクチュエータはすべて基部台座内にあり、関節はワイヤ駆動によって駆動される。長大なアームを片持ちで支えることを考えると、根元関節に生じるトルクは非常に大きくなる。このトルクを支えるため、先端関節を駆動するトルクも根本関節トルク生成に寄与できるようにワイヤの取り回しが工夫されている。第一次試作は6関節、全長2.4m程度であるが、全18関節、直径0.3m、全長14mの構成であっても実現可能であることを概念設計で確かめている。

#### 4. 4 負のパワー消費を生じない駆動系の導入

通常我々が使用できるアクチュエータは回生能力を持たない。つまり、外部の動きを規制するような制動運動を行うときで、外部からのパワーがアクチュエータに流れ込む状態の駆動状態において、アクチュエータに流入するパワーを貯蔵することはできない。この状態は、外にパワーを生成する動作状態を正のパワー消費状態とすると、逆の方向にパワーが流れるため負のパワー消費状態と呼べる。さて、回生能力のないアクチュエータを使う限り、この負のパワーは熱になって散逸し系のパワー効率著しく低下する。そのため、運動モードの中にこのような負のパワー消費がなされないようにする、あるいは負のパワーを回生する特別の機構を導入することが駆動系設計では重要となる<sup>21)</sup>。負のパワー消費を防止する機構設計の典型例として、歩行機械のGDA

(Gravitational Decoupled Actuation)がある。水平方向に等速直進運動を行う歩行機械は、原理的に移動のためにパワーを消費しない。しかし、関節機構で歩行運動を実現しようとするとき、関節駆動系に負のパワー消費状態が生じ、大きなパワーロスが生ずる。これを回避するため、GDAでは重力方向とそれと直交する方向の駆動軸を非干渉化し、負のパワー消費を防止している。なお、通常脚機構でもその歩行姿勢や脚に働く内力を変え

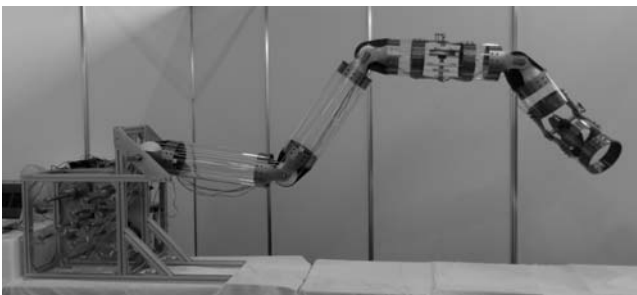


図9 超冗長ワイヤ干渉駆動型 Mini 3D CT-Arm

ることで負のパワー消費を防止することが出来る<sup>22), 12)</sup>。これは多様な機能性を発揮する歩行機械の実現のために有効である。

これに対し、負のパワーを生ずるときには、そのパワーをバネの歪エネルギーや、質量のポテンシャルエネルギーに変換して回生利用する手法も有効である。地雷探査用ロボット<sup>14)</sup>ではカウンターウェイトを、レンズを取り置きする軽作業用ハンド・アームシステムでは非円形プーリと線形バネを用いて自重を補償している<sup>23)</sup>。

### 5. 兵站 (Logistics)

実際にモノを作る実作業のほとんどはこの兵站到分類されるであろう。概念設計・詳細設計と移り、既成品の調達、予算見積、発注、納期確認、組み立て、電装系実装、プログラミング、実験、対外発表、と枚挙に暇がない。その中でも特に創造的な設計開発を持続的に行う上で重要と思われる事項について本章にまとめる。

#### 5.1 構想段階

実際の機構設計を行う際は、やはり手書きによるアイデアスケッチが最も手軽かつ強力な手段であろう。ゼミなどでの設計議論では、ホワイトボードや紙にポンチ絵を頻繁に描きながら議論を行ってきた。近年、PCによる3D CADモデリングや描画ソフトにより、手軽に概念図を作成することが可能になったが、それでもそのソフトの機能や習熟度により作成できる形状に制約が生じることは否めない。初期の構想段階では可能な限り制約を取り払うべきであろう。ポンチ絵の例を図10に示す。これは3自由度のレンズハンドリンググリッパ<sup>3)</sup>の初期概念図と最終試作である。

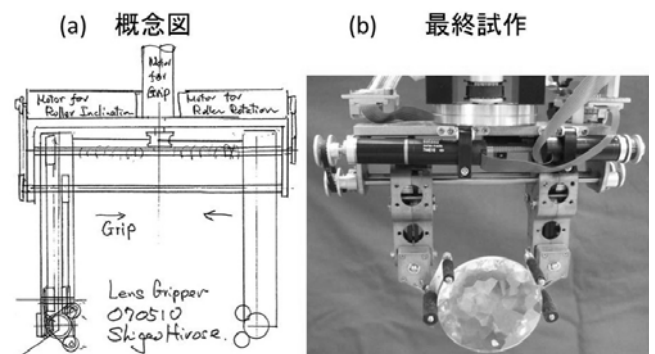


図10 レンズグリッパの初期概念図と最終試作

## 5.2 簡易モデルの試作

基本的なアイデアが創出された次は、しばしば簡易モデルを試作する。これは詳細設計に入る前に、機構メカニズムが想定通りの動きをするのか、また想定し切れない力・モーメントが各所に様々な作用した場合の問題点を洗い出すことを目的にしている。この時の試作は出来るだけ迅速かつ機動的に行うことが肝要である。（この試作をスタンフォード大学の Bernard Roth 教授は”Do these tests cheaply, be quick-and dirty.”と表現している<sup>4)</sup>。）この試作を通じて、基本的動作の確認と機構剛性、特異点、機械的な干渉などを体験的に把握することが出来る。例として図 11 に、直線状に伸びた際には高剛性、直角に屈曲した場合はバネ性をもつ屈曲リンク機構の木材による簡易試作と、3D CAD 図を示す。

## 5.3 生産財情報の収集

研究用ロボットはいわば既製品の寄せ集めで構成されることから、その構成要素となるアクチュエータ・センサ・機構部品・電子部品・制御用計算機などの情報は常にチェックし新しいものに更新することが必要である。新しいアクチュエータが発売されたから、この機構を使ってみよう、ということも当然あり得るし、逆にこの部品が手に入らないから根本的な設計変更を強いられることも多々あるからである。近年は多くの生産財のカタログがインターネット上で手に入るようになり、20年前に比して遥かに必要な部品を見つけやすくなった。しかしながらカタログ上では存在していたとしても、小ロットの試作対応はしていなかったり、極端に高額であったりする場合もある。研究室では研究試作に適した発注先などの情報を PukiWiki<sup>24)</sup>などで整理するようにしている。

## 5.4 様々な材料・加工法の試行

研究室では常時 10 程度のロボット製作プロジェクトが並行して進行していたが、その中である

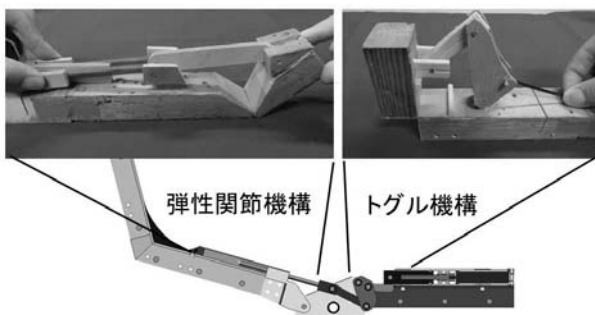


図 11 簡易試作による確認

特定の材料や加工法を各プロジェクトに水平展開し、いろいろな場面で利用する試行が行われた。材料でいえば超々ジュラルミン A7075、ガラス繊維強化プラスチックであるユニレートなどを様々な使ってみる。加工法でいえば、ワイヤカットによる歯車加工であったり、近年ではいわゆる 3D プリンタによる成形（熱溶解積層法、光造形法、ポリジェット方式）なども積極的に試行した。また機構構成法では工業用接着剤による設計の簡素化なども試行している。一通り様々な利用を試してみると、それぞれの長所・短所が分かることになり、設計の選択肢の幅を広げることが出来る。

## 5.5 加工業者との緊密な連携

ほとんどのプロジェクトでは研究室内で部品図までの詳細設計を行い、加工を外部の業者に依頼する形で試作を行って来た。この中で、詳細設計の段階から加工業者に意見を求め、検討中の部品が実際に製作可能なのか、より簡便・低コスト・単納期な方法は無いのか、頻繁に現場から提案頂いている。このような議論を通して新たなアイデアが生まれることもあり、実際のモノづくりには欠くことの出来ないプロセスと考えている。また加工業者により得意不得意の分野があることから、これらの情報も生産財と同様に PukiWikiなどで情報を整理している。

## 5.6 電装系の共通化

製作するロボットの形態は異なっても、機構を駆動するための制御回路・ソフトウェアなどは共通化出来る場合が多い。特に近年ではパワーエレクトロニクスやマイクロプロセッサ技術の進歩により小型高出力のモータドライバ、高性能マイコンが容易に入手可能となった。研究室ではこれらを標準品としてストックし、制御電装系の共通化を図っている。これによりモータ制御の下位コントローラ実装に時間を費やすことなく、効率的に研究開発を進めることが可能となった。また制御回路を共通化することで、配線類も共通化出来る。特に専用コネクタピンの自動圧着機を導入することにより、手ハンダによる結線箇所を極力少なくすることで格段に信頼性が向上した。

## 5.7 こたわらない思考

概念設計から詳細設計を行い、最後に出図となる訳であるが、この途中で頻繁に設計変更があり、時には出図間際にすべて振り出しに戻ることもさえあった。出図直前まで作業を進めていて変更とな



ると実作業者は大変な徒労感を感じたものである。しかし今になって考えるとより良い設計を目指し常に改善し続けるストイックな姿勢は、革新的な設計を行う上で極めて重要であると感じる。往々にして企業での設計はスケジュールありきで、一度スタートしてしまったプロジェクトの慣性は大きく、途中で方針変更することは企業規模が大きくなればなるほど困難となる。したがってアカデミアであるならば、例え今までの努力が水泡に帰すとしても、それが明らかに現在より優れた設計であれば、こだわらなく変更する柔軟な思考が重要である。

## 5. おわりに

本報では東京工業大学広瀬研究室で培われてきたロボットのハードウェア設計について、戦略・作戦・戦術・兵站というキーワードで整理し解説した。特に初学者であっても実際の進め方がイメージ出来るように実作業の部分を詳述した。とはいえ、やはり機械設計は何よりも経験を多く積むことが必要で、未熟な筆者がこのようなところで解説を書くなどおこがましいと思っているのが本音である。一方で、自らのアイデア、発想が実際の機械システムとして動く様は、エンジニアとしての一つの醍醐味であることは間違いがない。本稿をきっかけとしてロボット創造設計の魅力を感じて頂けたらこれ以上の喜びはない。

## 参考文献

- 1) 遠藤玄, 外川圭司, 広瀬茂男: 索状能動体に関する研究-システムの自立化と対地適応推進-, 日本ロボット学会誌, 18, 3 (2000), 419.
- 2) Endo, G., Hirose, S.: Study on Roller-Walker - Improvement of Locomotive Efficiency of Quadruped Robots by Passive Wheels-, *Advanced Robotics*, 26, 8-9 (2012), 969.
- 3) 遠藤玄, 山田浩也, 広瀬茂男: 軽作業用ハンド・アームシステムの開発-円筒回転指先をもつグリッパによる円盤状物体ハンドリング作業-, 計測自動制御学会論文集, 47, 12 (2011), 640.
- 4) 広瀬茂男: ロボット創造設計のコツ, 日本ロボット学会第63回ロボット工学セミナーテキスト (2005), 1.
- 5) 広瀬茂男: 屋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, 18, 7 (2000), 904.
- 6) 広瀬茂男: 「可変拘束機構」とその設計-特殊環境移動作業ロボットへの適用-, 日本ロボット学会誌, 17, 5 (1999), 615.
- 7) デジタル大辞泉, <https://kotobank.jp/>
- 8) 広瀬茂男: 生物機械工学, 工業調査会 (1987)
- 9) 千木崎俊太郎, 森淳, 山田浩也, 広瀬茂男: 水陸両用ヘビ型ロボット「ACM-R5」の機構と制御の研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2005), ALL-N-020
- 10) 古村博隆, 山田浩也, 広瀬茂男: 原発等の狭隘環境で作業を行う能動車輪ヘビ型ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2013), 1A1-R10.
- 11) Hodoshima, R., Doi, T., Fukuda, Y., Hirose S., Okamoto, T., Mori, J.: Development of a Quadruped Walking Robot TITAN XI for Steep Slope Operation-Step Over Gait to Concrete Frames on Steep Slopes-, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 19, 1 (2007), 13.
- 12) 小松洋音, 尾形勝, 程島竜一, 遠藤玄, 福島 E. 文彦, 広瀬茂男: 4足歩行ロボット TITAN XII の開発とその大型障害物踏破制御に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, 80, 813 (2014), DR0128
- 13) Kitano, S., Hirose, S., Endo, G., Fukushima, E.F.: Development of Lightweight Sprawling-type Quadruped Robot TITAN-XIII and its Dynamic Walking, *International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2013), 6025.
- 14) Fukushima, E.F., Freese, M., Matsuzuwa, T.: Humanitarian Demining Robot Gryphon, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 1, 3 (2008), 735.
- 15) Huang, Y.W., Sasaki, Y., Harakawa, Y., Fukushima, E.F., Hirose, S.: Development of Anchor Diver III: Easy-to-Operate Tensioned-Tether Type ROV for Underwater Search and Rescue Operations, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 24, 2 (2012), 399.
- 16) 原川幸紘, 広瀬茂男: ワイヤ牽引型水中探査ロボット Anchor Diver IV の開発-コンセプト提案と設計-, 日本ロボット学会学術講演会 (2012), 2A3-2.
- 17) 遠藤玄, 谷篤, 福島 E.文彦, 広瀬茂男, 入部正継, 田窪敏夫: 在宅酸素療法患者の外出を支援する追従型搬送移動体の開発, 日本ロボット学会誌, 30, 8 (2013), 779.
- 18) Hirose, S., Hodoshima, R., Fukumura, Y., Amano, H.: Development of Track-changeable Quadruped Walking Robot TITAN X-Design of Leg Driving Mechanism and Basic Experiment-, *International*

Conference on Intelligent Robots and Systems, (2010), 3340.

- 19) 広瀬茂男, 佐藤幹夫: 多自由度ロボットの干渉駆動, 日本ロボット学会誌, 7, 2 (1989), 128.
- 20) Horigome, A., Yamada, H., Endo, G., Sen, S., Hirose, S., Fukushima, E.F. : Development of a Coupled Tendon-Driven 3D Multi-Joint Manipulator, International Conference on Robotics and Automation (2014), 5915.
- 21) 広瀬茂男: 負のパワー消費防止による機械システムの改善, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集 A (1992), 303.
- 22) 有川敬輔, 広瀬茂男: 3D 荒地用歩行ロボットの研究 (GDA と干渉駆動に基づく最適化歩行), 日本ロボット学会誌, 13,5 (1995), 720.
- 23) Endo, G., Yamada, H., Yajima, A., Ogata, S., Hirose, S. : A Weight Compensation Mechanism with a Non-Circular Pulley and a Spring: Application to a Parallel Four-Bar Linkage Arm, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 3, 2 (2010), 130.
- 24) PukiWiki, <http://pukiwiki.sourceforge.jp/?PukiWiki>