

腕脚統合型ロボットの全方向移動

前 泰志*¹ 高橋裕也*² 新井健生*¹
井上健司*¹ 小谷内範穂*³

Omni-directional Locomotion of Robots with Limb Mechanism

Yasushi Mae*¹, Yuuya Takahashi*², Tatsuo Arai*¹,
Kenji Inoue*¹ and Noriho Koyachi*³

A new working robot has been designed and built on the basis of the concept "Limb Mechanism" that integrates functions of legged locomotion and arm manipulation. As one of feasible structures of the limb mechanism a six-limbed mechanism will be analyzed and evaluated in the aspects of omni-directional mobility. To evaluate the omni-directional mobility, a stroke and a stability margin are examined in all walking directions during six-legged and four-legged locomotion. The paper introduces two types of structures: radial and parallel arrangement of legs, and compares their stroke and stability in all directions during six-legged locomotion. The radial arrangement model will be proved to have the omni-directional mobility even in four-legged locomotion. Based on this evaluation the proto-type robot is designed and built. The developed robot has radially arranged six limbs that can be used for both locomotion and manipulation.

Key Words: Omni-directional Mobility, Integration of Leg and Arm, Manipulation and Locomotion

1. はじめに

近年、技術の進歩に伴い、様々なロボットの開発が行われている。アームを持つロボットは組み立て・塗装・溶接作業などを行い、移動機構を持つロボットは工場内での部品や工具の運搬などに使われている [1]~[4]。このような産業用ロボットは様々な分野で導入され、生産性の向上などに貢献している。一方、建築土木、海洋探査や宇宙開発など、危険が伴う作業空間では人間の代わりに作業を行う作業移動型ロボットが求められているが、屋外で非定型作業を行うためには、ロボットに高い作業能力と移動能力が要求される。

従来のロボットでは、移動機構の上にマニピュレータが搭載されたものが多いが、自然界では昆虫や動物が、肢を巧みに使って作業を行っている。この事実をもとに、作業能力と移動能力の二つを一つの機構に統合しつつ、屋外作業に適した作業移動型ロボットの新しい機構として、“リムメカニズム”が提案されている [5]~[9]。本論文では、一つの機構で腕と脚に両用できる機構を“リム(肢)”と呼ぶ。リムメカニズムでは、腕機能と脚

機能を“リム”に統合することで、作業能力の向上や実環境への適用拡大が可能となる。この概念の特徴として、

- 作業と移動の機能を状況に応じて使い分けることによる機構全体での効率化
- 本体を支えるリム群の協調動作によるリムの発生力や動作範囲の拡大
- 二つの機構の一つのリムへの統合による機構の小型化軽量化が挙げられる。

作業移動型ロボットを屋外で運用する場合、脚の踏み換えを行うことができない足場の悪い場所や狭い場所での作業も考えられる。作業と移動の両機能を一つのリムに統合することで、機構の簡素化と汎用性を持つことが可能となり、リムの使い分けによって、無駄を省いた効率的なロボットの運用が可能となる。従来の多くの脚ロボットでは、2組の脚が平行に配置され、移動能力に指向性を持つため、このような悪条件では作業が困難または不可能となる。ロボットが指向性を持たずに全方向に対して作業や移動を行うことができれば、作業移動型ロボットとして新たな運用が可能となる。六つのリムを放射状に配置することによって、リムの特徴を活かした全方向への作業、移動能力の高い作業移動型ロボットが構成できる。これまでも6脚を放射状に配置した脚ロボットはあるが [10]~[12]、その全方向の移動能力の定量的な評価はなされていなかった。

本論文では、六つのリムを放射状に均等に配置した機構と3本ずつ平行に配置した機構について、その全方向への移動能力

原稿受付 2001年8月6日

*¹大阪大学大学院基礎工学研究科

*²株式会社デンソー

*³産業技術総合研究所

*¹Graduate School of Engineering Science, Osaka University

*²DENSO Corporation

*³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

をストロークと安定余裕を基に評価する。リムを放射状に均等に配置することによって、全方向へのストロークや安定性が向上することが分かった。また、全方向性の評価に基づいて設計、試作した作業移動型ロボットについて述べる。試作した作業移動型ロボットは、作業能力と移動能力を統合した“リム”を有する腕脚統合型ロボットであり、我々は ASTERISK と呼んでいる [13]~[15]。ASTERISK は同じ構造のリムを 6 本持ち、作業時には静的安定を保ちながら最大 3 本のリムで作業を行うことができ、移動時には 6 脚歩行や対象物を把持しながらの 4 脚歩行などが可能である。

2. 6 リム 機 構

2.1 リムメカニズム

従来の脚機構を持つ作業ロボットでは、脚機構と腕機構の動作範囲は明確に区別されており、脚機構では本体下部や側面、腕機構では本体前方や上方に動作範囲を持っている。しかし、腕脚の機能を統合したリムメカニズムでは、一つのリムが腕と脚それぞれの動作範囲を併せ持つことができるので、Fig. 1 に示すように、作業に応じて脚や腕として用いるリムの変更や把持物体の持ち替えが可能となる。また、3 本以上のリムを腕として用いれば、対象物の 3 点支持などの複雑な操作が可能となる一方、作業に用いるリムを変更することによってロボット全体での作業範囲の拡大を図ることが可能である。

また、複数のリムを支持脚として使用する場合にはパラレルメカニズムと考えることができるため、作業時にベースとなる本体も動かすことでリムの作業範囲を拡大することが可能であり、重量物のハンドリングの際には、本体姿勢を適切に傾けることで、リムの発生力を向上することが可能となる。

2.2 6 リム機構の特長

様々なリム数のロボットを考えることができるが、4 リムでは作業時に 3 本のリムを脚として用いて静的安定を維持すると、自由に動かすことのできるリムは 1 本のみとなり簡単な作業しか行えない。8 リム以上の場合、複数のリムによる作業が可能となるが、制御が困難になる。そのため、移動と作業を両立しつつ、制御の容易な 6 リム構造を考える。

従来の脚機構を持つ作業移動型ロボットでは、脚機構の上に腕機構が搭載されたロボット [12] [16] が一般的である。また、6 本の脚のうち前脚の 2 本をリムに置き換えて、昆虫のように前

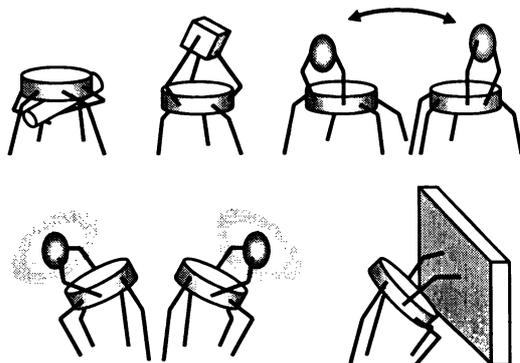


Fig. 1 Various tasks performed by limb mechanism

の 2 本は腕として作業も行える 4 脚 2 リムのロボットが提案されている [17]。そこで、6 本のリンクを持つ機構を 4 脚 2 腕型・4 脚 2 リム型・6 リム型の 3 種類に分類し、比較する (Fig. 2)。機構全体での重量および大きさ、作業時の動作精度、腕またはリム 1 本当たりの作業範囲と機構全体での作業範囲、歩行能力についてまとめたものを Table 1 に示す。

重量・大きさについては、6 リム型は腕部と脚部が統合されているため、小型化軽量化が可能である [5]。腕部の作業精度と 1 本当たりの作業範囲は、4 脚 2 腕型が腕部を作業に特化できるため、大きくなる。しかし、6 リム型ではすべてのリムで作業が行えるため、ロボット全体での作業範囲は他のものより大きく取ることができる。歩行能力は、4 脚 2 腕型の 4 脚歩行に対して、4 脚 2 リム型・6 リム型では 6 脚歩行が可能なため、不整定地での移動も考慮に入れた場合、6 脚歩行の方が優れている。

以上の考察より、6 本のリムを持つロボットの場合、作業内容に応じて最大 3 本のリムを用いて作業を行うことができる一方、歩行時には、6 本のリムを用いた安定な歩行や、対象物を把持しながらの 4 脚歩行など、状況に応じて腕機能と脚機能を使い分けることで効率的な運用が可能となることが分かる。本論文では、6 リム機構を対象に、その全方向性について考察する。

2.3 4 自由度のリム

6 リム機構の全方向性を評価する際に共通に用いるリムについて述べる。

リムには、作業能力を持たせるために広い動作範囲が要求される。リムの関節には、高トルクで動作角度の大きいモータを用い、リムの先に装着するエンドエフェクタの駆動には、軽量のモータを用いて、リムメカニズムを実現する。実現の容易さからリムを脚として利用する場合の自由度は 3 とし、関節を本体側から関節 1 (モータ 1)、関節 2 (モータ 2)、関節 3 (モータ 3) と呼ぶ。リムの先に装着するエンドエフェクタには、1 自由度のグリッパを採用する。リンクパラメータは、作業性と移動性を考慮に入れ、モータのトルクと負荷の制約条件から求める。

ロボットは水平に移動することが多いことから、本体が水平な姿勢を仮定して関節の配置を決定する。モータ 1 の回転軸を水平方向に配置する場合を考えると、負荷に対抗するためにト

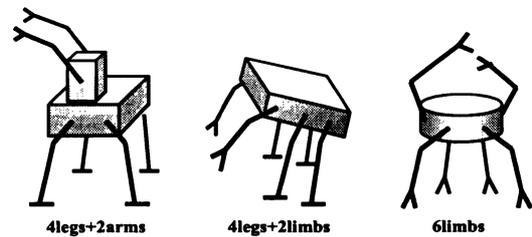


Fig. 2 Working locomotion robots

Table 1 Working locomotion robots

	4legs+2arms	4legs+2limbs	6limbs
size,weight	×	×	○
handling accuracy	○	×	×
handling space	○	△	△
working space	△	○	○
mobility	△	○	◎

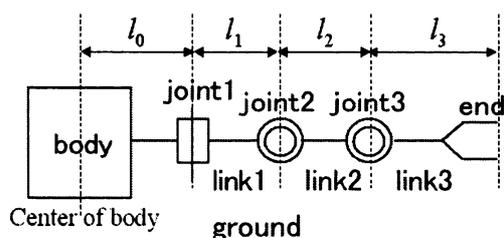


Fig. 3 Configuration of joints of a limb

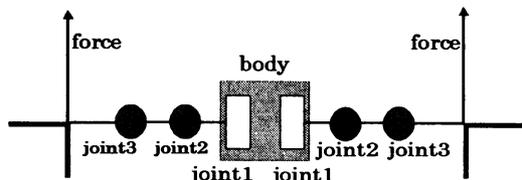


Fig. 4 Maximum load in joint2

ルクの大きなモータを選べば、モータ自体の重量も増加するので、負荷が増大するという問題が生じる。そこで、モータ1の回転軸を垂直方向に配置し、モータに直接負荷がかかることを防ぐように、本論文で扱うリムを、Fig. 3に示す三つの回転関節を持つリンク機構とする。本体側第一関節が水平方向、第二、第三関節が垂直方向に回転する。ロボットの本体中心から第一関節までの長さを l_0 、第一関節から第二関節までの長さを l_1 、第二関節から第三関節までの長さを l_2 、第三関節から脚先までの長さを l_3 とする。

ロボットが起立する場合、地面から受ける抗力がモータの負荷となる。Fig. 4のようにリムが水平な場合に、モータ2にかかる負荷が最大となる。リンクパラメータは、モータ2のトルクと負荷との釣り合いにより決定する。次章の全方向性の評価において、 $l_0 : l_1 : l_2 : l_3 = 60.0 : 63.4 : 75.6 : 85.6$ とした。また、各関節の動作角度は、 ± 90 度とした。これらの値は、4章で述べる試作した全方向移動能力を持つ6リムロボットで用いたモータ、リンクパラメータを参考にして定めた。

3. 全方向性

六つのリムを脚として用いる場合の6脚による歩行と、向かい合った二つのリムを除いた四つのリムを脚として用いる場合の4脚による歩行における全方向への移動能力を評価する。リムを脚として用いているので、これらを6脚歩行、4脚歩行と呼ぶ。ロボットは、進行方向にとりうる最大ストロークで歩行すると仮定し、リムの配置による移動能力の違いをストロークと安定余裕を基に評価する。

3.1 リム配置

6リムの配置については、昆虫の場合、リム(脚)が3本ずつ平行に配置されており、進行方向や作業能力に指向性を持っている。しかし、リムを平行に配置するよりも均等に放射状に配置することで指向性とリム間の干渉が減少し、作業・移動範囲を大きくできる。そこで、Fig. 5に示すように6リムを正六角形の頂点に放射状に配置する機構を考える。その結果、リム間の干渉が最小となるため、本体部が小さい場合でも動作範囲を

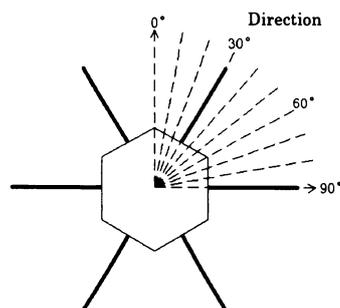


Fig. 5 Radial arrangement model

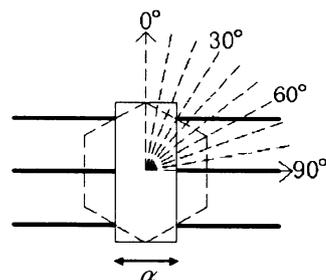


Fig. 6 Parallel arrangement model

広く取ることができ、全方向に対して同等な作業・移動能力を持つことができる。このようなリム配置を放射配置モデルと呼ぶ。6リムを放射状に配置することで、機構全体での前後左右に対する特性が平滑化され、全方向で作業能力を持ちつつ、進行方向によらない歩行が可能となる。この全方向性は、方向転換のためにリムの踏み換えが困難な場合でも、本体の方向転換なしで進行方向を変えられることから、足場の悪い場所や狭い場所での運用に適している。

本論文では、このリムが60度ごとに配置されたロボットの、全方向に対する歩行特性を評価する。ここでは、静歩行を仮定し、歩行特性として、ストローク、安定余裕を評価に用いる。安定余裕として、重心の水平面上への投影点から支持点包絡線の周辺までの最短距離を用いる。

放射配置モデルの比較対象として、6本のリムを3本ずつ平行に配置したモデルを考える。これを平行配置モデルと呼び、脚配置の比較に用いる。ここでは、最前と最後の脚間の距離と本体幅の比を $1 : \alpha$ とし、 α でロボットの本体の縦横比を表す。Fig. 6に、 $\alpha = 0.6$ の場合の平行配置モデルを示す。放射配置モデルと平行配置モデルとの比較では、同一構造のリムを用いる。しかし、リムの配置を変えたことで、本体の横幅や形状が変化しているので、ストロークや安定余裕をそのまま比較しても意味がない。そこで本研究では、ロボットの大きさに依存せずに、ロボットのリム配置の違いによる移動能力を比較するために、ストロークや安定余裕を無次元量化して比較することを考える。

ストロークはリンクの長さに依存するため、ストロークはリンクの長さで無次元化する。本体形状は、リムの配置が同じ場合には、縦方向、横方向への拡大や相似形で関連付けることができる。しかし、リムの配置が異なる場合には、拡大や相似

で表すことができないため、異なる方法が必要となる。安定性を考えてみると、同じ高さの重心を持つロボットであれば、支持多角形が大きいほど安定と言える。同じリムを用いた場合に、リムが本体側面に設置されていれば、本体の水平面への投影面積が大きいほど安定性が大きくなる傾向がある。安定性が高く、ロボットの本体を小さくできるリムの配置が望ましいので、安定余裕の無次元量化には、リムの配置や本体の大きさ、すなわち支持多角形の大きさ、形状が反映される値が望ましい。このような値は、様々考えることができる。例えば、第一関節が初期姿勢のまま第二第三関節のみで起立した姿勢を基本姿勢とし、基本姿勢における支持多角形と重心との距離の最大値 L_{max} と最小値 L_{min} とすると、

$$E_1 = L_{max} \quad (1)$$

$$E_2 = L_{min} \quad (2)$$

$$E_3 = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} \quad (3)$$

$$E_4 = \sqrt{L_{max}L_{min}} \quad (4)$$

がある。安定余裕と E_1 , E_2 , E_3 , E_4 のいずれかとの比をとれば安定余裕を無次元量化できる。この中で、相乗平均 E_4 が、支持多角形の大きさや形状の変化の影響を大きく受けるので、本論文では、安定余裕の無次元量化には相乗平均 E_4 を用いる。無次元量化した安定余裕の絶対値に意味はなく、ロボットの進行方向の違いにおける安定余裕の変化を調べ、脚配置の異なるロボットの全方向性を評価することが目的である。

3.2 6脚歩行の全方向性

歩行はトライポッド歩容を行うものとする。ロボットの進行方向を Fig. 5, 6 に示してある。軌道生成では、まず、ロボットの進行方向を定める。ストロークは、ある本体高さを決めるときに定まるリムの接地面上での進行方向の動作範囲を求め、遊脚、支持脚となるすべてのリムが同じストロークをとりうる最大ストロークとする。動作範囲は、リム間の干渉も考慮に入れる。進行方向が 20 度のときのストロークの例を Fig. 7 に示す。リム先端の進行方向の軌道は、進行方向に対して平行な往復運動とする。リムを上げるときと下ろすときの軌道は、始点、着地点を通り地面と垂直な軌道とし、その高さは、動作領域内できるとする。

脚の配置モデルや進行方向によらず軌道生成は上記のように行うものとして、各進行方向に対するストロークと安定余裕を

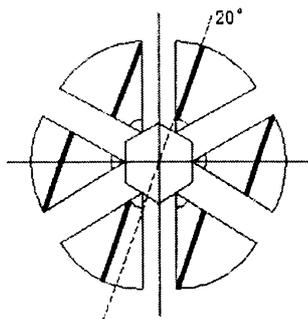


Fig. 7 Stroke in a direction

調べた結果を Fig. 8 に示す。ストローク、安定余裕とも、進行方向が 0 度のときの値を 1 として、相対値で表している。Fig. 8 より、放射配置モデルでは、ストロークと安定余裕は進行方向によらずほぼ一定であり、各進行方向に対してほぼ等しい歩行特性を持つことが分かる。

Fig. 6 に示す平行配置モデルのストロークと安定余裕を放射配置モデルと同様にして求め、放射配置モデルと平行配置モデルそれぞれの無次元量化されたストロークと安定余裕を Fig. 9, Fig. 10 に示す。平行配置モデルについては、本体縦横比 $\alpha = 1, 0.6, 0.5$ の 3 通りを示している。 α が変化しても前後の脚間距離は変化しないので、Fig. 9 では、平行配置モデルのストロークは同じ変化を示す。安定余裕は、トライポッド歩容の一周期における最小の安定余裕で見積もっている。最小の安定余裕は、おおよそ 0 度方向の安定余裕で決まり、その大きさは 90 度方向の大きさを決める α の変化によってはほとんど変化しない。無次元量化によって、Fig. 10 では、 $\alpha = 1.0$ の方が $\alpha = 0.5$ より安定余裕が低くなっているが、これは同じ安定余裕ならば

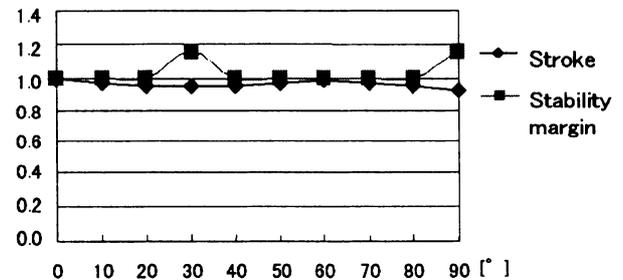


Fig. 8 Stroke and stability margin in six-legged locomotion

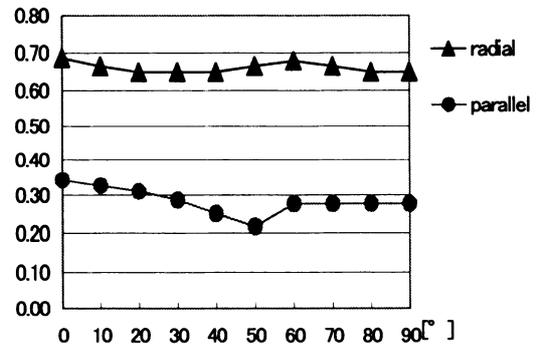


Fig. 9 Regularized stroke

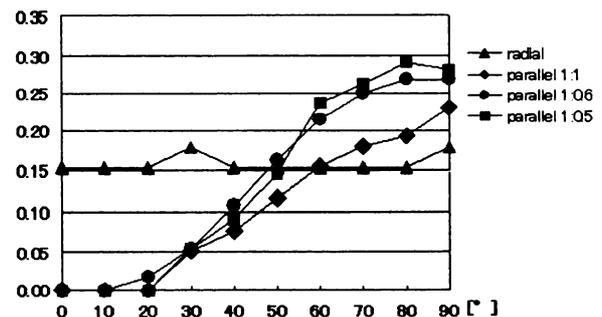


Fig. 10 Regularized stability margin

Table 2 Omni-directional stroke and stability margin

		radial model	parallel model
stroke	ave.	0.66	0.28
	s.d.	0.013	0.036
stability margin	ave.	0.16	0.13
	s.d.	0.010	0.112

本体の大きさが小さい方を高く評価するためである。Fig. 10 から、安定余裕の変化は、本体縦横比 α が異なる三つの場合について、ほぼ同じ傾向にあることが分かる。Fig. 9, 10 より、平行配置モデルの場合、進行方向によってストロークや安定余裕の値は大きく変化するが、放射配置モデルはほぼ一定の値となることが分かる。その結果、放射配置モデルが平行配置モデルよりも全方向に均一な移動能力を持つことが確認できた。

Fig. 9, 10 では、各進行方向での無次元量化したストロークと安定余裕を示したが、全方向性を評価する指標の一つとして、進行方向の違いによる安定余裕のばらつきを表す標準偏差を比較する。ここでは、無次元量化したストローク、安定余裕のすべての進行方向における平均を全方向ストローク、全方向安定余裕と呼ぶことにし、それぞれの標準偏差を全方向ストローク、全方向安定余裕の標準偏差と呼ぶことにする。Table 2 に、全方向ストローク、全方向安定余裕とその標準偏差を示す。Table 2 の平行配置モデルでは、 $\alpha = 0.6$ の場合を示している。放射配置モデルの方が全方向ストロークと全方向安定余裕の標準偏差が小さいことが分かり、放射配置モデルが、従来の平行配置モデルよりも全方向性に優れていることが確認できる。また、全方向ストローク、全方向安定余裕を比較した場合にも、放射配置モデルの値が、平行配置モデルの値よりも大きくなっていることが分かる。

放射配置モデルでは、各リムが同じ構成で、本体を中心として 60 度ごとに配置されているため、歩行パターンが 60 度ごとに等しくなるという特徴を持っている。60 度分の歩行パターンは、リムを中心として左右対称の関係にあるため、30 度分の歩行パターンを利用することで、全方向への歩行パターンを生成することができる。このようにリムの対称性を利用し、少ない歩行パターンで全方向の移動が実現できる。

3.3 4 脚歩行の全方向性

放射配置モデルでは、向かい合う二つのリムで物体を把持しながら、残りの四つのリムを脚として用いた 4 脚歩行が可能である。性能評価として進行方向の変化に対するストロークと進行方向安定余裕を調べた。進行方向は Fig. 11 のように定義し、物体を把持するために腕として用いるリムの番号は (1,4) とした。

歩行は、進行方向が 0 度の場合にはクロール歩容を行うものとする。他の進行方向の場合には、0 度方向のクロール歩容の場合と同じリムの動作順序でクリープ歩容を行う。デューティ比は 0.875 とする。リム先端の軌道は進行方向の往復運動とする。ストロークは、リム間の干渉を考慮に入れた接地面上での動作範囲内でとりうる最大ストロークとする。以上の条件より、各進行方向に対するストロークと安定余裕を調べた結果を Fig. 12 に示す。ストローク、安定余裕とも、進行方向が 0 度のときの値を 1 として、相対値で表している。

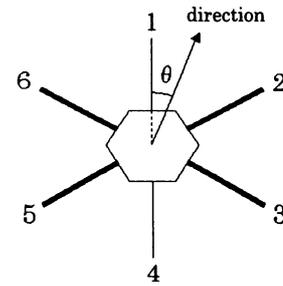
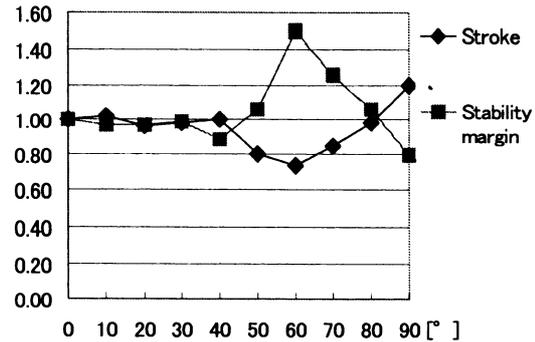
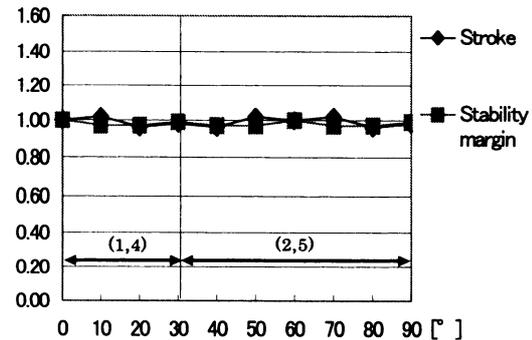
**Fig. 11** Definition of direction**Fig. 12** Stroke and stability margin in four-legged locomotion**Fig. 13** Constant stability margin

Fig. 12 より、30 度まではストローク・安定余裕ともにほぼ等しい値を保っており、60 度付近ではストロークが減少するものの安定余裕が大きくなっていることが分かる。ここで、作業に用いる 2 リムの変更、すなわち、移動に用いる 4 リムを変更することによる安定性の特性を変化を調べる。まず、全方向に対してストローク・安定余裕を一定にするために、Fig. 12 の 0 から 30 度までに注目して、腕として用いるリム (1,4) を 30 度以上では (2,5) に変更すると、Fig. 13 の結果が得られる。このとき、ストローク・安定余裕がほぼ一定となり、全方向に対して等しい安定性を持つことが分かる。また、ストロークによらず安定余裕を大きくする場合は、Fig. 12 の 60 度付近を利用することが考えられる。腕として用いるリムを (3,6) から始めて、60 度で (1,4) に変更すると、Fig. 14 の結果が得られる。このときには、安定余裕が改善され、特に足場の悪い場所での移動に効果があると考えられる。

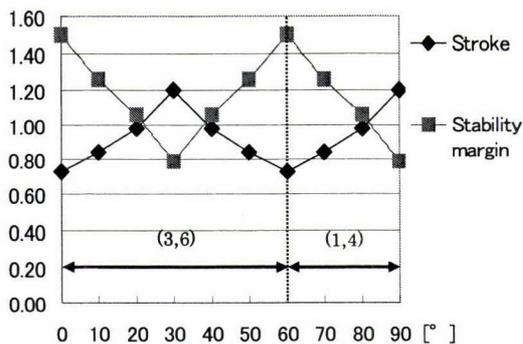


Fig. 14 Maximized stability margin

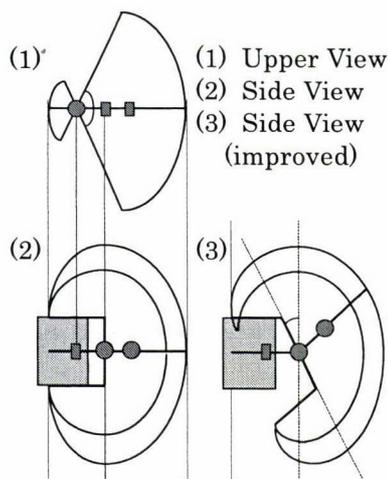


Fig. 15 Work space of a limb

4. 設計と試作

整地や不整地における様々な作業を安定に行うことを考えると、前章で述べた全方向性を有する作業移動ロボットが望ましい。そこで、全方向性を設計指針として、六つのリムを放射状に均等に配置した腕脚統合型ロボットの設計・試作を行った。

4.1 アクチュエータ

ロボットを屋外で運用することを想定すると、無線による制御が望ましい。そこで、アクチュエータにはラジコン用サーボモータを用い、外部に設置した制御用コンピュータから無線により制御を行う。サーボモータはモジュール化されており、ロボット開発の労力の低減や故障したサーボモータの交換を容易に行うことができる。その結果、小型化・軽量化やメンテナンス性が向上する。

Fig. 15 に、サーボモータの組み合わせによる動作範囲を示す。サーボモータは水平方向に配置され、各サーボモータの動作角度は 120 度である。Fig. 15 (2) では、動作範囲の上半分と下半分は同じであるが、実際の作業では、歩行や作業時に本体真下を利用することは少なく、また対象物の把持や搭載などのために本体上部の動作範囲を利用することが多いと考えられる。そこで、Fig. 15 (3) に示すように、サーボ 2 の取り付け位置を 30 度上方に傾け、リムの本体上部での動作範囲を拡大し、リムの先が本体上部に到達するようにする。



Fig. 16 Developed robot with limb mechanism: ASTERISK

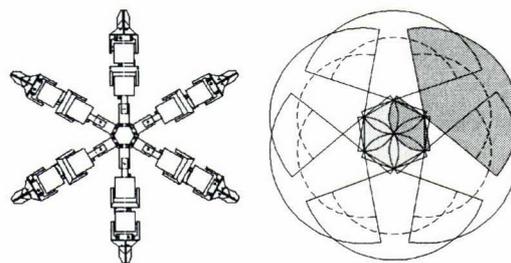


Fig. 17 Top view and work space of limbs

4.2 試作

以上の考察を基に、試作した腕脚統合型ロボット ASTERISK を Fig. 16 に示す。全長は 569.2 [mm]、高さは 105.0 [mm] で、重量は約 2 [kgf] である。リンクパラメータは、 $l_0 = 60.0$ 、 $l_1 = 63.4$ 、 $l_2 = 75.6$ 、 $l_3 = 85.6$ [mm] である。Fig. 17 は、ASTERISK を上から見た設計図と全体の動作範囲を示しており、その中心部にある正六角形がロボットの本体、扇型をした灰色の部分のリム 1 本当たりの動作範囲である。

4.3 歩行実験

試作したロボットは、制御コンピュータ内で動作生成を行い、無線で制御を行う。歩行時の軌道生成は、機構の対称性を利用して 30 度分の軌道を導出し進行方向をパラメータとして関数化している。また歩行パターンの切り替えでは、リム番号と歩行パターンの組み合わせによって実現している。その結果、六つのリムを脚として用いた全方向移動が可能となり、その歩行実験に成功した。

5. ま と め

本研究では、6 本のリムを全方向に均等に配置した機構と 3 本ずつ平行に配置した機構の全方向への移動能力を比較、評価した。リムを全方向に均等に配置した放射配置モデルが、機構の対称性を利用することで、全方向について均一なストロークや安定性を確保できることが分かった。この評価に基づき、腕脚統合型ロボットを試作し、歩行パターンの切り替えによる 6 脚全方向移動を行った。

今後の課題は、6 脚歩行から 4 脚歩行への滑らかな遷移の実現や、不整地における歩行のためのセンサの搭載、作業性に重点を置いた機構設計などがある。

参 考 文 献

- [1] E. Nakano, T. Arai, et al.: "First Approach to the Development of the Patient Care Robot," Proc. of 11th International Symposium on Industrial Robot, pp.87-94, 1981.
- [2] S. Skaar, I. Yalda-Mooshabad, et al.: "Nonholonomic Camera-Space Manipulation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.8, no.4, pp.464-479, 1992.
- [3] Y.F. Zheng and Q. Yin: "Coordinating Multilimbed Robot for Generating Large Cartesian Force," Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation, pp.1653-1658, 1990.
- [4] S. Sugiyama, et al.: "Quadrupedal Locomotion Subsystem of Prototype Advanced Robot for Nuclear Power plant Facilities," Proc. of Fifth International Conference on Advanced Robotics, pp.326-333, 1991.
- [5] 小谷内, 安達, 新井: "脚・腕統合リムメカニズム—腕転用脚機構の運動学解析—", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.7, pp.968-976, 1996.
- [6] N. Koyachi, T. Arai and H. Adachi: "Hexapod with Integrated Mechanism of Leg and Arm," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1952-1957, 1995.
- [7] T. Arai, N. Koyachi, H. Adachi and K. Homma: "Integrated Arm and Leg Mechanism and its Kinematics Analysis," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.994-999, 1995.
- [8] N. Koyachi, T. Arai, H. Adachi and A. Murakami: "Design and Control of Hexapod with Integrated Limb Mechanism: MEL-MANTIS," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.877-882, 1996.
- [9] J. Racz, N. Koyachi, T. Arai and B. Siemiatkowska: "MEL-MANTIS—the Walking Manipulator," Proc. of the 5th International Symposium on Intelligent Robotic Systems, pp.23-29, 1997.
- [10] K. Oohashi and K.J. Waldron: "Stability of a Six-Legged Walking Machine with an Axis-Symmetrical Leg Configuration," Proc. of 10th Applied Mechanisms Conference, 1987.
- [11] 岩崎, 秋園, 根本, 朝倉: "歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の水中実験について", 第4回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp.21-26, 1988.
- [12] J.S. Byrd and K.R. Devri: "A Six-Legged Telerobot for Nuclear Applications Development," Int. Journal of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.43-52, 1990.
- [13] 高橋, 新井, 前, 井上, 坂下, 小谷内: "腕脚統合型ロボットの設計と試作", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.349-350, 1999.
- [14] 高橋, 新井, 前, 井上, 小谷内: "腕脚統合型ロボットの開発 第二報 歩行動作", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-45-056, 2000.
- [15] Y. Takahashi, T. Arai, Y. Mae, K. Inoue and N. Koyachi: "Development of Multi-Limb Robot with Omnidirectional Manipulability and Mobility," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2012-2017, 2000.
- [16] Y.F. Zheng and Q. Yin: "Coordinating Multilimbed Robot for Generating Large Cartesian Force," Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp.1653-1658, 1990.
- [17] 常味孝幸, 岡野秀晴, 他: "極限作業(原子力)ロボット—実証実験の結果と考察および実用性の評価—", 火力原子力発電, vol.44, no.436, pp.46-54, 1993.



前 泰志 (Yasushi Mae)

1971年3月11日生。1993年大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業。1998年同大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年、同大学院基礎工学研究科助手。ロボットビジョン、複数ロボットシステム、作業移動型ロボット等の研究に従事。情報処理学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

員。



新井健生 (Tatsuo Arai)

1952年1月6日生。1977年東京大学大学院工学系修士課程修了。工業技術院機械技術研究所を経て、現在大阪大学大学院基礎工学研究科教授。パラレルメカニズム、マイクロマニピュレーション、作業移動型ロボット等の研究に従事。1986~1987年MIT 客員研究員。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)

会。



小谷内範穂 (Noriho Koyachi)

1957年2月14日生。1979年京都大学工学部機械工学科卒業。現在独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門フィールドシステム研究グループ主任研究員。1988~1989年米国オハイオ州立大学客員研究員。レーザー応用複合生産システム、作業用三次元車椅子、極限作業ロボット等の研究に従事。IEEE, JARA, システム制御情報学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

(日本ロボット学会正会員)



高橋裕也 (Yuuya Takahashi)

1975年4月30日生。1999年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。2001年同大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻修士課程修了。同年、(株)デンソー入社。在学中は、作業移動型ロボットの研究に従事。



井上健司 (Kenji Inoue)

1963年10月10日生。1988年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年、東京大学工学部助手。1993年大阪大学工学部助手。1995年同学部講師。1998年大阪大学大学院基礎工学研究科講師。2001年同研究科助教授となり現在に至る。超冗長マニピュレータ、ロボット協調システム、人間型ロボットの研究に従事。博士(工学)。日本機械学会、計測自動制御学会、精密工学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)

会。

(日本ロボット学会正会員)