

水平多関節式展開型 3 輪惑星探査ローバ「Tri-Star」の開発

東京工業大学大学院 理工学研究科 機械宇宙システム専攻 博士課程 2 年 多田隼 建二郎

1. 緒言

惑星上を広範囲かつ詳細に探査する手段として、探査装置を積んで移動する方式を取るローバが有効であると考えられている。これまでに車輪・脚式・クローラ式など、様々な種類の惑星探査ローバが研究・開発されてきた[1][2][3]。しかしながら、現在もまだ軽量・低コスト・高い不整地走破性能の全てを満たす機体が完全には実現できていないのが現状である。本論文においては、搬送される際にはコンパクトな形態をとり、走行する際には大きく展開して安定性・走破性を高めて移動する展開型ローバの基本構成(図1)を取り入れ、新しく水平多関節式のアーム機構を採用した「Tri-Star」の基本構成、また、展開用の機構を不整地走破にも用いるという移動概念について説明する。さらに、実際に機械モデルを展開率の観点から設計・試作し、実機の基本的な動作について確認を行ったので報告する。

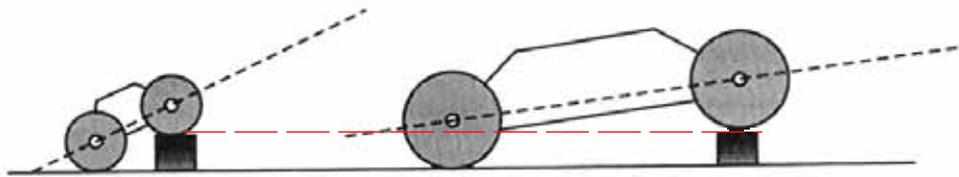


図1: 段差乗り越え時における展開の効果

2. 水平多関節式展開型惑星探査ローバ「Tri-Star」

2.1 基本構成

Tri-Star はローバ本体に水平多関節アームを 3 本装備し、それぞれのアームの先端に垂直支持軸を有する車輪モジュールが搭載された構造となっている。展開動作は図2の(a)から(b)のように、水平多関節型のアームを回転させて行う。このアームの関節はフリーとロックをそれぞれ切り替えることが可能で、関節がフリーに回転できる状態の時に車輪を駆動させると、車輪は車両本体に対して推進力を発生せずに、関節角度を変える動作を行う。関節がロックの際に車輪を駆動させると、車両本体に対して推進力を発生させる。関節を直接駆動させるモータなどのアクチュエータが搭載されているわけではないので、非常に軽く低コストに構成できるのが特徴である。また、車輪の個数が3つであるがゆえに、静的に安定であるため、サスペンションのような比較的複雑な機構無しにも常に全ての車輪が走行面に接地することが可能となる。また車輪の個数が少ないことは、それ自体で機体を軽量・安価に構成できる。このように、Tri-Star は比較的シンプル、最低限必要要素による構成にもかかわらず、走行時はホイールベースを大きく展開することにより、走破性能も確保できるという特徴を有する機体である。

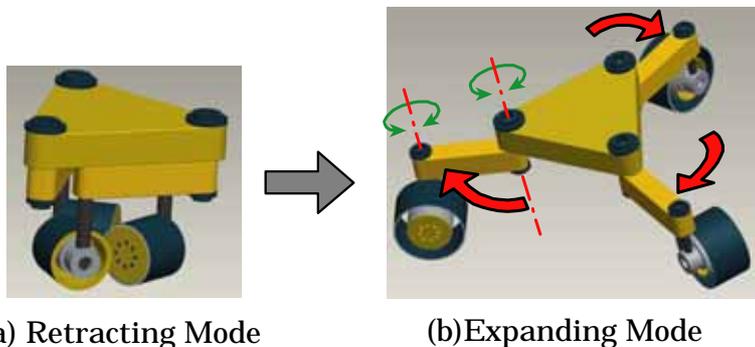


図2: Tri-StarIII の展開動作

Tri-Star においてはさらなる実用を考え、以下のように様々な点を改善・変更する。

() 防塵性機能向上

Tri-Star においては、展開動作を担うスライド式アーム、展開車輪の展開機構および車輪の防塵性が不十分であった。しかしながら、火星においては砂塵が、月環境においてはレゴリスの問題があるため、ローバに高い防塵性は必須であると考えられる。

Tri-StarIII においては、関節が全て回転関節であるため、高い防塵性を期待できる構成となっている。

() 車輪水平支持軸の無限回転可能構成

Tri-Star では配線の捩れのため、車輪の向きを Yaw 軸周りに変える垂直支持軸が無限回転することができない構造となっていた。

Tri-Star においてはこの車輪モジュールが無限回転できる構成とする。これにより、車輪の向きを戻す動作などを省け、歩行ロボットの足首関節のような動きも持たせることが可能になり、不整地を移動するローバとして非常に有効であると考えられる。

() ローバ単体での展開動作が可能な構成

Tri-Star では、ローバの展開動作を着陸船のホイストと同期させて行っていた。しかしながら、ローバ単体での展開動作が可能な方が、探査機全体として好ましいと考えられる。

Tri-StarIII においては、自身の車輪の駆動力のみによって、展開動作を行うことが可能な構成とする。

() 重心高さが不変な展開動作

Tri-Star においては、展開動作をする際に、車高が上がる構造となっている。転倒を防ぐ必要があるローバにとって、走行時の重心は低ければ低いほど、安定性があり好ましいと考えられる。そのため、この展開によって車高が上昇し、重心の位置が上がることはできる限り避ける設計にすることが望ましいと考えられる。

Tri-Star においては展開機構に水平多関節型のアームを用いているので、格納時から展開時まで重心の高さが変化することはない。従って車体を持ち上げるようなエネルギーを展開時に必要とせず、走行時も低重心で安定した状態を保つことが可能となる。

(v) 展開用アームの不整地移動への活用

Tri-Star において、展開用のスライドアームは一度展開したら、その後は伸展状態を保つ方式をとっていたが、今回開発する Tri-Star においては展開後もアームの関節角を変化させることを想定している。展開用の3本のアームの相対位置を積極的に変えることで、不整地走破性を上げることが可能であることが期待できる。この効果については本論文の4.3の項目にて検討している。

2.2 走行時における展開動作の有効利用

Tri-Star においては、水平多関節型アーム機構の動作を展開時のみならず、走行時にも活用することを考えている。具体的には、狭い場所や斜面において、図3に示すように環境に合わせて様々な形態をとるものである。

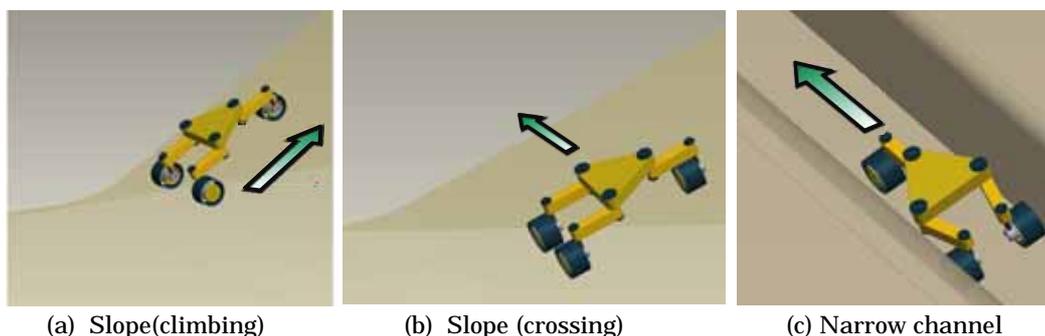


図3: 走行形態の変化

3. 展開率を考慮したアームの設計

3.1 展開性能評価の指標の必要性

搬送される際はコンパクトな形態で、走行時には展開して走行性能・安定性を向上させるという展開型のローバとして、従来様々な種類のものが研究・開発されてきた。CMUのNomad Rover[4]やNASAのSpirits, Opportunity[5]などがその例として挙げられる。しかしながら、これまで展開性能について

比較・議論した研究は今のところ無い。展開の性能を評価する尺度を設定し、その観点から展開機構の良し悪しについて議論・検討することは、より実用的なローバを開発する上で重要であると考えられる。そこで、本節では展開率という概念を定義し、スライド式・回転式の展開機構および、従来のローバの展開率について比較・検討を行う。

3.2 展開率の定義

本研究においては、展開率を次のように定義する。

「展開率： 展開後におけるアームの先端により構成される投影面積を
展開前の車体の投影面積で除した値」

本研究においては、展開率の値が高いものほど走行安定・不整地走破の面で性能が良いものであると考える。

3.3 各展開機構の比較

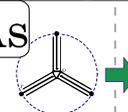
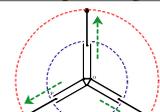
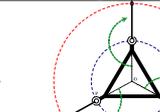
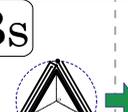
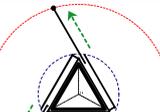
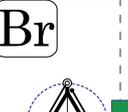
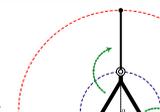
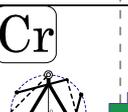
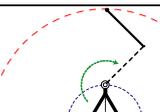
展開用のアーム機構の方式として、スライド式・回転式の大きく二つに分類する。またアーム長を車体の外接する円の半径、車体の一辺、車体の外接する円の直径の3種類にそれぞれ分類し、前項で定義された展開率に基づいて各値を出してまとめたものを Table 1 に示す。計算を簡易にするため、アームの幅などは長さが無いものとみなして展開率を計算している。また、表中の「E.R.」は展開率 (Expandable Ratio) の値を表している。従来機の Tri-StarII のアーム構成は Table 1 における 'As' に相当する。また、式 (1) は、表中の 'Bs' の展開率を算出する計算例である。

$$E.R. = [3r^2 + 2r^2 - 2r(3^{1/2} \cos(5\pi/6))]^{1/2} \quad (1)$$

展開機構として、各アームを対称的に配置することが望ましいと考えられる。しかし、表中 'Cs' のアーム構成においては、展開前においてアーム間の干渉が生じてしまい、実現不可能である。一方、回転式においては、'Cr' に示す 2 段式のアームをある角度で端部同士を固定して接続した構成にすることで、アーム間の干渉を防ぐことが可能となる (図 4)。しかしながら、この 'Cr' のアーム構成は比較的複雑な構成であるため、簡易さを考慮し、今回の第一次試作機としては 'Br' に相当する一直線状のアーム構成を採用した。'Br' の展開率は「7.46」と、従来機に比べて 1.87 倍の展開率である。前述した Nomad Rover, Spirits(Opportunity) の展開率はそれぞれ約 2.64, 1.29 (これらの展開機構に関しては、表 1 内に該当する項目がないほど特化した機構であるため、本論文ではこの二つの機構の分類を割愛する) であり、このことから 'Br' に相当する構成は、比較的簡易な構成でありながら高い展開率を持つものであることがわかる。

アーム幅、車輪幅、車輪のオフセット長などを考慮して、より実際に近いものを目指した定義や高さ方向の展開動作も考慮しての展開率の定義の一般化は今後の課題の一つである。

表 1: 展開率の分類

		Sliding Type		Rotary type	
		Retracting	Expanding	Retracting	Expanding
R L	L1	As  E.R. = 4	 E.R. = 4	Ar  E.R. = 4	 E.R. = 4
	L2	Bs  E.R. = 7	 E.R. = 7	Br  E.R. = (1+3^(1/2))^2 = 7.46	 E.R. = (1+3^(1/2))^2 = 7.46
	L3	Cs Impossible The interruption occur among the arms.		Cr  E.R. = 9	 E.R. = 9

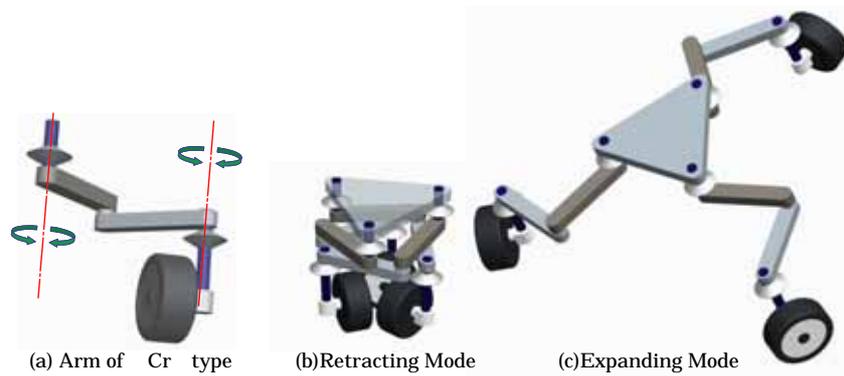


図 4: ‘Cr’ タイプのアーム

3.4 無限回転を可能にする車輪モジュールの機構検討

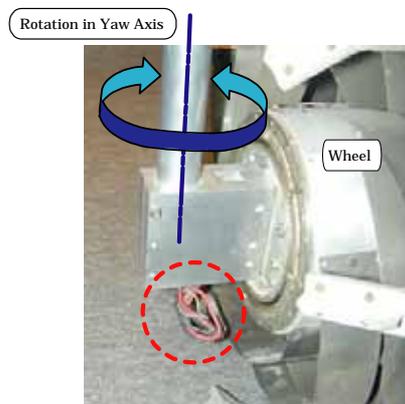


図 5: 配線の抜け

従来機の Tri-StarII においては、車輪駆動用のアクチュエータは車輪内部に配置されていた。そのため、車輪モジュールがそのヨー軸周りにステアリングを切る際、車輪駆動用のモータの配線の抜けが蓄積してしまう、という問題があった(図 5)。このことは Tri-StarII のみならず、同様のオフセット構造を持つ車輪ステアリング機構を有する車両全てにおいて共通の問題でもある。そこで、我々はこの車輪などの回転体内部から出る配線が、その回転体が垂直軸周りに向きを変える際に、配線の抜けが蓄積しない構造を持つ機構(以下「配線抜け防止機構」)を考案し、試作機でその機能を確認したので、本項において報告する。

配線抜け防止機構の断面図を図 6 に示す。この機構は二つの傘歯車、車輪駆動用モータ、モータにより駆動される車輪、車輪モジュール、配線よりなる。二つの傘歯車のうち、その軸が走行平面に垂直な方は、車体に対してその位置・回転が固定されている。車輪モジュールはこの傘歯車に対してフリーに回転可能である。また走行平面に対して平行なもう一方の傘歯車には、モータが固定されており、このモータと傘歯車が一体化したものは、車輪モジュールに対して回転可能な構成となっている。配線は一方の端部はモータ側に固定、もう一方の端部は垂直軸に沿わせて本体側に固定されている。また、二つの傘歯車の歯は共に同数である必要がある。車輪が本体に推進力を発生する際には、車輪モジュールが本体に対して回転がロックされており、車輪がステアリングを切る際には、車輪モジュールはロック解除されている。

図 6 において、説明を簡易にするため、各モジュールの回転方向を表す矢印および、視線方向を表す矢印を片側の回転方向にのみ付加してある。図 6 において、車輪が半時計回りに回転してステアリングを切る際に、車輪モジュールは ViewDirection(T)より見て、時計回りに回転する。このとき、モータが固定された方の傘歯車は、本体に固定された側の傘歯車とかみ合っているため、無理やり車輪の回転方向とは逆向きに回転させられる。つまり、ステアリングを切る際に、配線のうちで垂直軸に沿う部分は垂直軸周りに擦られるが、水平方向に向いた部分の配線は、傘歯車の回転により、その抜けをキャンセルする側にも同じ角度だけ擦れるため、全体として抜けがキャンセルされ、抜けの蓄積が無くなるという仕組みである。

図7は、配線擦れ防止機構を実際的设计に適應する際の一例である。図6における車輪の構造を殻状の構造とし、内部に駆動用モータなどを配置することで、機構全体をコンパクトかつ、バッテリーやモータドライバなどの主要な構成要素を車輪内部に入れることで、外界との接触を防ぐことが可能になっている。

配線擦れ防止機構の基本機能を確認するための機械モデル(図8)を試作した。このモデルを用いた実験の様子を図9に示す。この機械モデルを稼動させて下から撮影したものである。(a)~(d)の様に車輪がステアリングを切る際に、駆動用モータの赤黒ペアの配線自身も回転して、蓄積される擦れをキャンセルしているのがわかる。赤黒の配線の順番が(a)と(d)において逆になっていることからわかる。結果として、実験を通して、配線擦れ防止機構の機能を確認した。

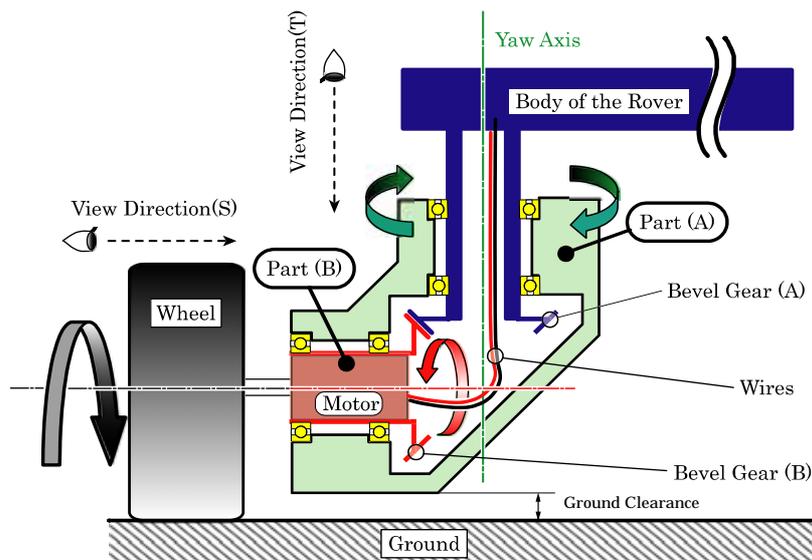


図6: 配線擦れ防止機構の仕組み

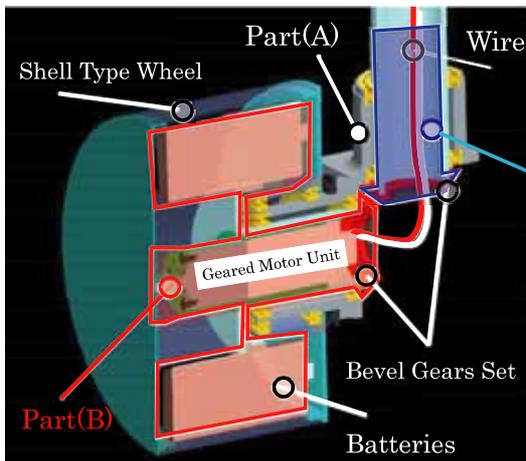
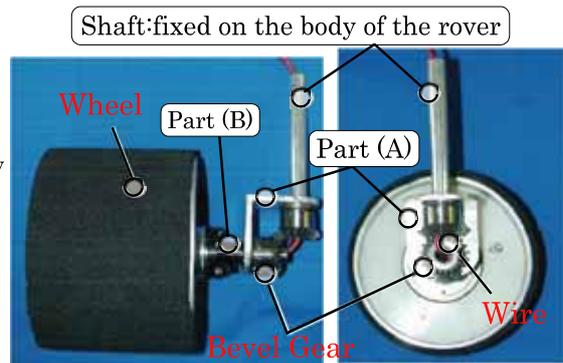
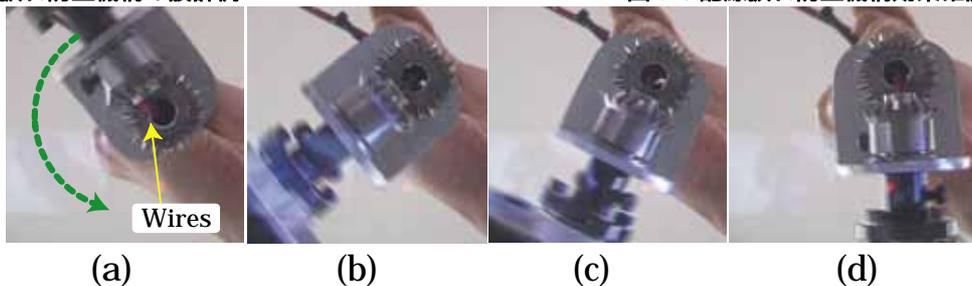


図7: 配線擦れ防止機構の設計例



(a) Front View (b) Side View

図8: 配線擦れ防止機構効果確認用簡易モデル



(a) (b) (c) (d)

図9: 簡易モデルによる機能確認試験(底面側より撮影)

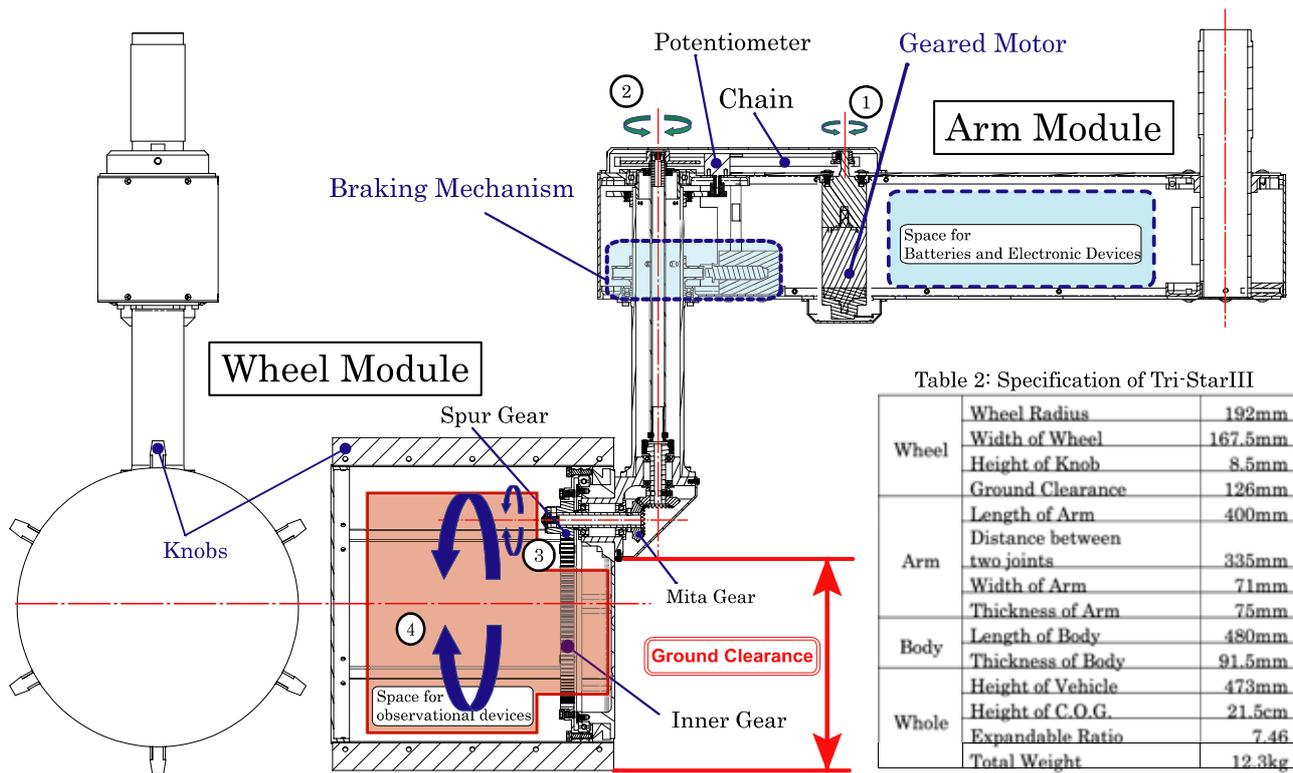


図 10: アーム・ホイールモジュールの構造

しかしながら、この機構において、グランドクリアランスがあまり大きく取れないという問題があった。また、車輪駆動用のモータを車輪内部ではなく車輪外部に配置し、トルクを伝達する方式を取れば、車輪駆動用モータの配線に関しては、捩れという現象そのものが発生しなくなる。よって、第一次試作機としては車輪駆動用のモータは車輪内部ではなく、車輪の外部に配置することを最終的に採用した。

3.5 アーム・車輪モジュールの構造

従来機 Tri-StarII においては、車輪駆動用のモータが車輪内部に配置されていたため、車輪が向きを変える操舵動作の際に、モータの配線が捩れるといった問題があった。Tri-StarIII においては車輪駆動用のモータを車輪内部でなく、アームの内部に配置してその動力を車輪まで伝達することにより、上記の配線捩れ自体が発生せず、無限回転が可能な構成とした(図 10)。

また、車輪の回転伝達においては、内歯車を用いることで傘歯車同士の噛み合い位置を車輪上部に配置することにより、走行面との距離 (Ground Clearance) を大きくとることの可能な構成とした。これにより岩などの障害物に傘歯車ユニット部が触れる可能性を減らしている。

4. Tri-StarIII の全体構成と基本動作実験

4.1 機体の全体構成

第 4 節で説明したアームを 3 つ組み付けることで Tri-StarIII を構成した。本体部分はアルミ溶接による箱型の構造とし、軽量ながらも強度を保つ構造となっている。また、内部には一辺 240mm 高さ 85mm の三角柱状の空間が確保されており、この部分に探査機器を搭載することが可能になっている。Tri-StarIII の全体像を図 11 に示す。また、その諸元を表 2 (スペースの都合上、図 10 の横) に示す。

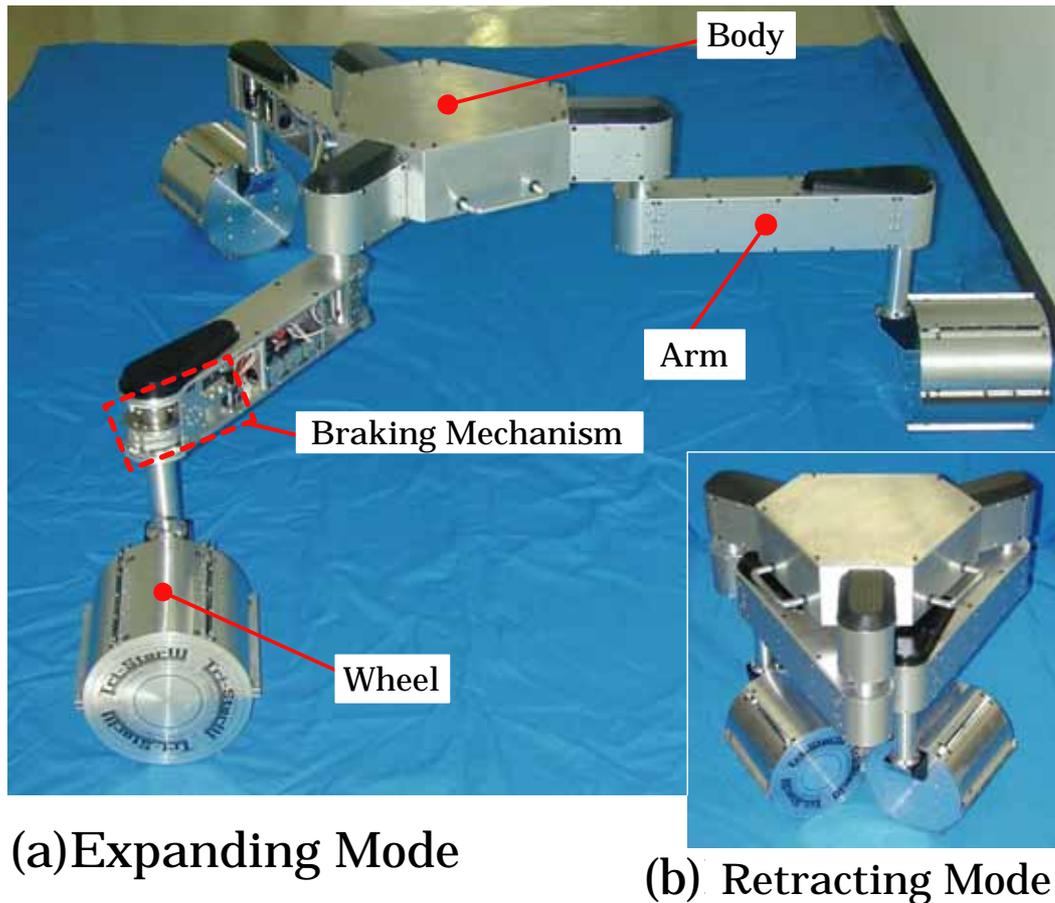


図 11: Tri-StarIII の外観

4.2 基本動作実験

本項においては、Tri-StarIII の展開動作、超信地旋回、段差踏破、斜面走行、狭隘地走行などの基本動作について述べる。

4.2.1 展開動作

展開動作の様子を図 12 に示す。この動作において、3つのアーム共に、第一関節のブレーキを利かせ、第二関節のジョイントをフリーにした状態で車輪を回転させている。実機が展開動作を車体を水平に保ちながらもスムーズに行える性能を持つことが確認できた。また、一連の動作手順を逆に行うことによって、格納動作をすることが可能であることも確認した。今後は不整地上での安定余裕やエネルギー最小化を考慮した展開動作などの検討を行っていく予定である。

4.2.2 超信地旋回

超信地旋回、つまりその場での旋回の様子を図 13 に示す。今回の超信地旋回においては、各車輪の軸およびアームの展開方向は実機を中心からアームの各第二関節側を通るそれぞれの直線上にある姿勢を取らせている。実機が車体を水平に保ちながらも超信地旋回をスムーズに行える性能を持つことが確認できた。

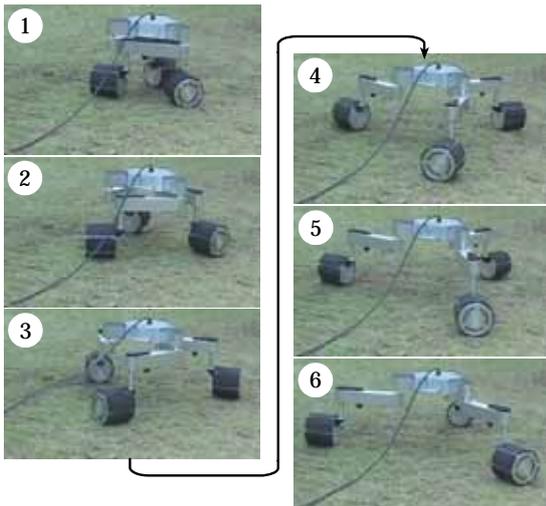


図 12: 展開動作

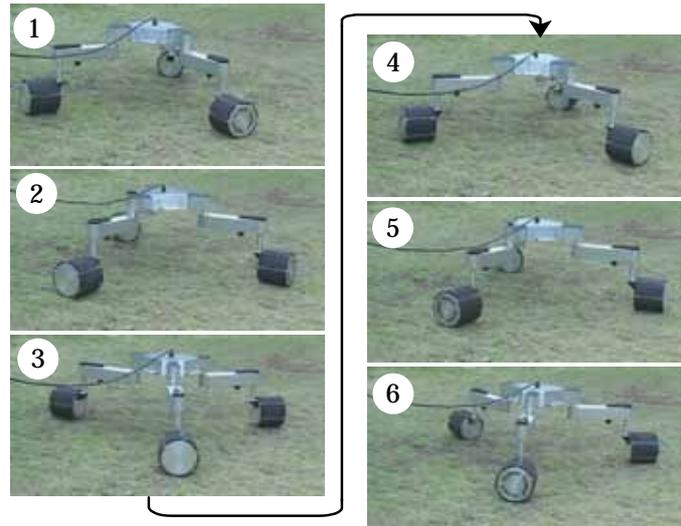


図 13: 超信地旋回動作

4.2.3 段差踏破

段差踏破の様子を図 14 に示す．設定した段差の高さは 385mm である．図 14 より，実機の段差踏破性能を簡易的にはあるが確認した． 今後は段差・床面表面の摩擦係数を考慮して，より高い段差や第 2，第 3 アーム目の乗り越え性能についても実験を通して定量的に確認し，Tri-StarIII の機体構成を生かした乗り越えシーケンスについても検討を行っていく予定である．
また，現在は車輪にグローサを搭載していない状態での段差踏破であるが，グローサを付加した車輪を用いた実機による段差踏破も今後行う予定である．

4.2.4 斜面走行

斜面走行の様子を図 15 に示す．設定した斜面の角度は 約 38[deg] である． 図 15 より，38[deg] 程度の傾斜面であれば，実機が安定して乗り越え可能であることを確認した．実際の惑星環境に近い土質上でのテラメカニクス等を考慮にいれた斜面走行試験を今後予定している．

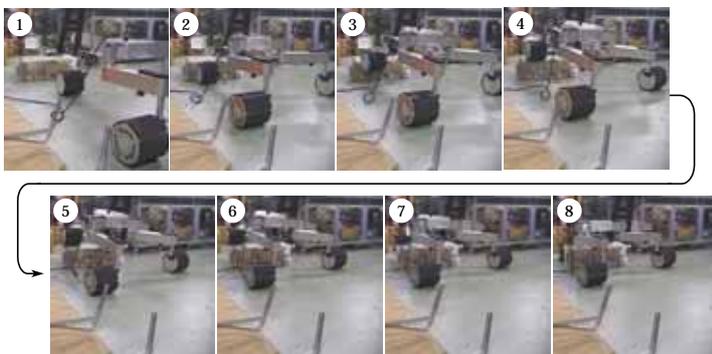


図 14: 段差踏破動作

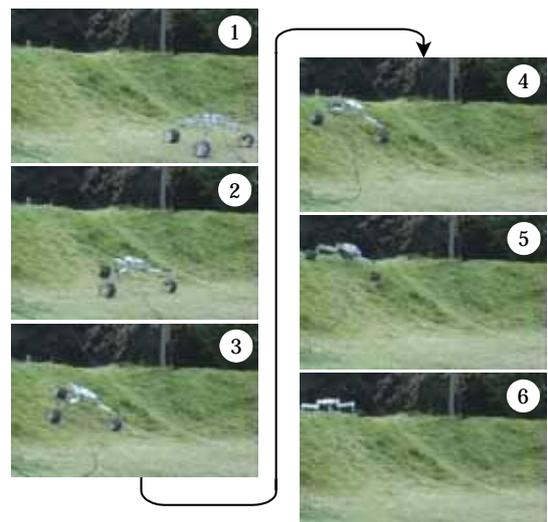
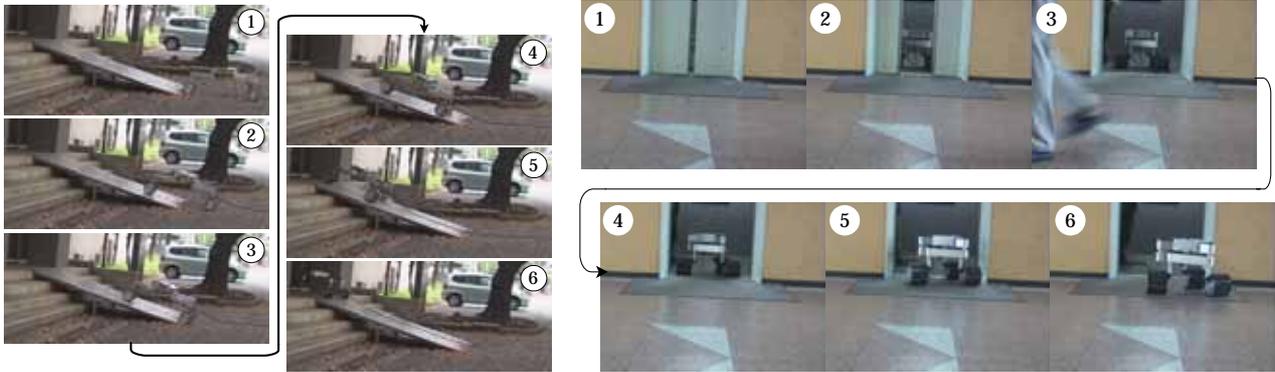


図 15: 斜面走行

以上，それぞれ簡易的ではあるが，実際に設計・製作した Tri-StarIII の基本動作については実験を通して確認できた．

4.3 惑星以外の環境での移動ベースとしての利用

Tri-Star は走行安定性に加え、高い不整地走破性を示す可能性があり、コンパクトな状態で現場への持ち運びが可能のため、惑星探査のみならず災害現場などでのレスキュー用車両としても効果的に使用できると考えられる。図 16 はその一例として、(a)では狭い斜面上で、形態を進行方向に細くした状態での走行動作を、(b)はエレベータ内でコンパクトモードになっており、ドアを通り抜ける動作をそれぞれ示している。特に (a) においては展開機構によって、進行方向にホイールベースを大型化したため、安定した走行を実現しているのが確認できた。本モデルをベースとし、将来的には図 17 に示すように災害現場での探索・搬送作業を行わせることも可能と考えている。



(a) Narrow Slope Climbing

(b) Passing Through the Door of the Elevator

図 16: その他のアプリケーションへの応用

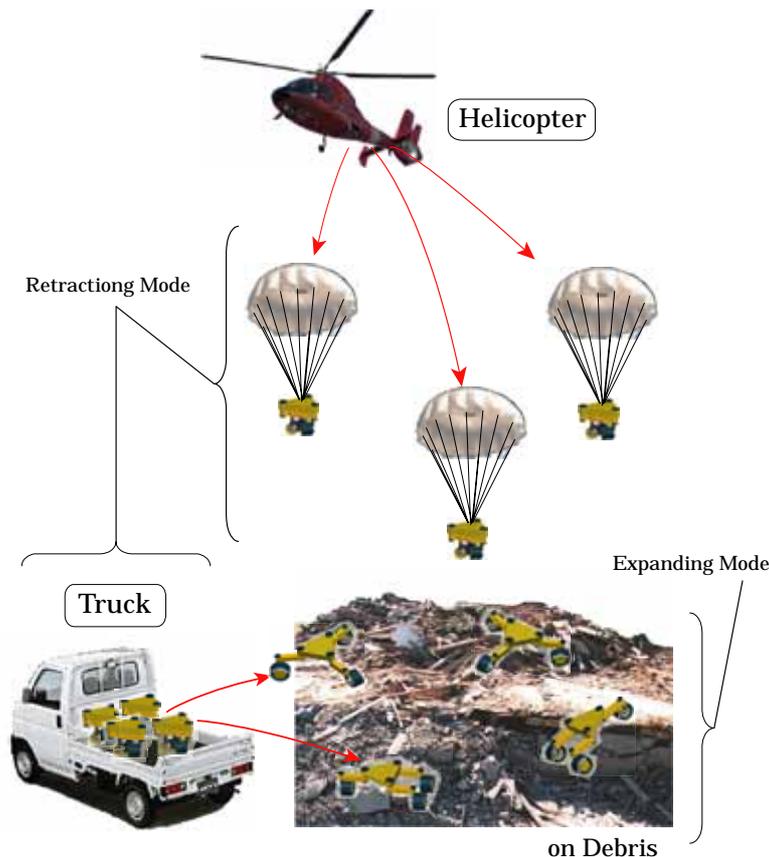


図 17: 災害時における探索活動の例

5. まとめと今後の展望

本論文では水平多関節式展開型3輪惑星探査ローバ「Tri-Star」の基本概念・構成および、走行時における展開動作の利用の効果について検討を行った。機構設計について展開率を定義し、展開機構について論じ、具体的なアーム・車輪モジュールの構成について説明した。実機を用いての基本動作実験を行い、その基本性能を確認した。

今後は実機における制御システムの開発および、走行実験を通してアームの関節角度を変化させ、機体構成を変化させることによる不整地移動能力向上の確認、操縦システムの最適化を行う予定である。本研究で開発された機体をベースとしたローバが実際に惑星探査を行う日が可能な限り近い将来実現できることを心より祈り、またそのためにこれからも研究に尽力していく次第である。

謝辞

本研究を行うにあたり、日々ご指導いただいている広瀬茂男教授に心より感謝する。

参考文献

- [1] 久保田 孝:“惑星別探査ローバ”, 日本ロボット学会誌 Vol.21 No.5, pp.468 ~ 471, 2003.
- [2] “Performance characteristics of lithium-ion cells for Mars sample return Athena Rover” Ratnakumar, B.V.; Smart, M.C.; Ewell, R.; Surampudi, S.; Marsh, R.; Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000. (IECEC) 35th Intersociety Volume 1, 24-28 July 2000 Page(s):638 - 645 vol.1
- [3] Shigeo Hirose, Hiroyuki Kuwahara, Yasufumi Wakabayashi, Nobuto Yoshioka : The Mobility Design Concepts/Characteristics & Ground Testing of an Offset-Wheel Rover Vehicle, Proc. Int. Conf. On Mobile Planetary Robots & Rover Roundup, pp.1-14 (1997) .
- [4] "Nomad: a demonstration of the transforming chassis" Rollins, E.; Luntz, J.; Foessel, A.; Shamah, B.; Whittaker, W.; 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volume 1, 16-20 May 1998 Page(s):611 - 617 vol.1, Digital Object Identifier 10.1109/ROBOT.1998.677040
- [5] <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html>
(2006年3月31日現在)