

遠隔点検機器マストカム，S2ローバーの開発

Development of Tele-Inspection Devices “MastCam” and “S2 Rover”

高田 亮平*
Ryohei TAKADA

抄 録

製鉄設備のアクセス困難なエリアへの遠隔点検機器を開発している。遠隔ロボットによって、足場レス点検、操業中点検のメリットが期待できる。“マストカム”は汎用部品と省配線技術の最適な組み合わせで、手持ち型棒カメラとしては他に類の無い高機能を実現している。“S2 ローバー”はゴムタイヤ内にリング磁石を挿入した磁石車輪を持ち、各車輪の駆動力で複数の関節を持つ車体の屈曲を制御する方法によって、角部乗越えを可能とする自走式点検車両である。

Abstract

We are developing remotely controlled inspection devices for steel making plant. These kinds of robots may benefit us scaffold-free-inspection or inspection while factory runs. Our “MastCam” is the most functional hand-held pole camera system and a combination of off-the-shelf components and less-wire technology. “S2 Rover” is a self propelled inspection cart with magnetism wheels. They are made by rubber tire and inside ring-shape magnet. The chassis has multi-joint and can fold it via torque control of each wheel, hence this cart can run over the internal and external corner.

1. 緒 言

新日鐵住金(株)の生産設備は高齢化が進み、長期的な視点では更新が必須だが、その時期や方法を適切に見出すのは容易ではなく、また更新時期を如何に安全に引きのばせるかも、営利企業としては重要な課題である。例えば、建設後数十年、延長数十 km の地中配管の更新の方法を考えると、大きく3つの方向性が考えられる。

- ①一定期間休止して一斉交換：経営的には短期の大投資となり休止期間が発生する。
- ②既存系が使えるうちに、別の場所にもう1本建設して交換する（二重化）：休止期間を回避できるが土地などのリソースが必要となる。
- ③全体を分割してリスクの高い部位から部分的に迅速に交換して一定の期間で全体を交換（逐次更新）：実質休止を減らし、更新投資も平準化。しかし、リスク判定や迅速交換の技術が必要。

方法③が望ましく見えるが、どこから着手すべきかといった点検技術や、迅速な交換工事、といった課題を解決する必要がある。我々は、ロボット技術がこの課題克服のキー

技術になりうると考える。

2. 製鉄設備の点検，メンテナンスの特徴

2.1 製鉄設備の構造的特徴

鉄鋼業は、地中配管に限らず、高温、高荷重（大重量を含め）など、負荷の大きい機器装置で構成されている。そのため、大きさ、高さなどは保守点検を困難にする要素である。図1に高炉を中心とした製鉄所上工程の設備群を示



図1 製鉄所の高炉等の上工程設備
Plants in ironworks including a blast furnace

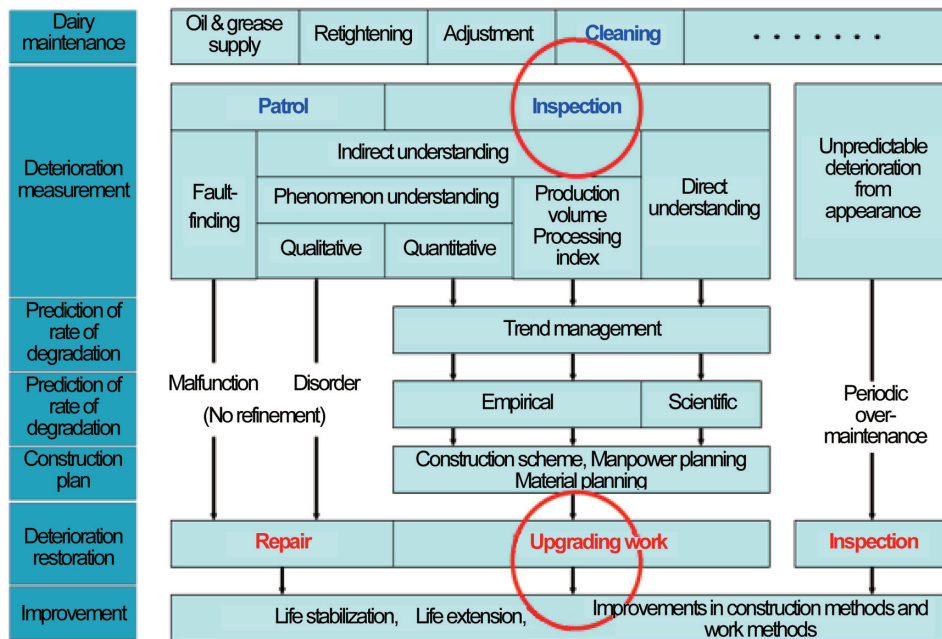


図3 メンテナンス工程とロボット化
Maintenance process and robotization

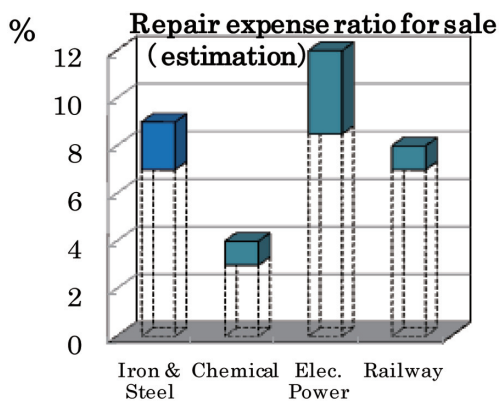


図2 各産業のメンテナンス費用の割合
Ratio of maintenance costs of each industry

す。高炉が全高 100m 余であることから高所に多くの設備がある状態が判る。

ひとつの製鉄所内での点検必要箇所は数十万点に及ぶと言われ、また国内の新鋭製鉄所と言われるものでも建設後 40 年以上の高齢であるため、保守点検に要する費用は大きい。図2には、設備インフラストラクチャを多く持つ基幹産業におけるメンテナンス費用が売上高に占める割合を示す。多くの装置産業で 10% 近いメンテナンス費用、修繕費を使っていることが判り、この費目の効率的運用は企業経営上重要である。

2.2 インフラストラクチャ点検、メンテナンスのロボット化

メンテナンス作業は多くのフェーズから成る。状況把握となる点検から、補修工事の立案、計画、手配、施工と進むが、対象物と接する点検と修繕工事には、機械化による効率向上の可能性が高い。鉄鋼業では、概ね図3に示すよ

うな工程に分けられるが、前述したように、アクセスが困難な点検箇所を含め、非常に多数の対象が存在するので、点検、検査の工程と、修繕工事のようなオンサイト作業の機械化、ロボット化が期待される。特に、高温、高所、狭隘などの人のアクセス困難な環境へ入って点検、計測できるロボットは有効である。

3. 製鉄設備向け点検、メンテナンスのロボット特性

点検、メンテナンスへのロボット適用のメリットのひとつは、高所や狭隘領域など人のアクセス困難なエリアへの寄り付き能力である。これは、単に人的安全に寄与するだけでなく、操業中点検や操業中補修の可能性もあり、保全作業の大幅な高精度化や低コスト化の可能性もある。ただ現状では、ロボット本体の自律的な移動の実現は、コスト対効果的に劣ると見られるので、当面の適用は遠隔操作型が主流と考えられる。

生産設備であり殆どが鋼構造物である製鉄設備の点検は、橋梁やビルのような大型コンクリート構造物と異なり、接触状態 ~ 1m 程度に接近しての点検が必要となるが、一般的な点検ロボットでは、接近する能力が必ずしも確保されていない。なお、点検は写真撮影を代表的な方法として議論するが、厚み計測など接触が必要な点検方法もロボット化が期待される。現在、実用的とされる、棒カメラ、磁石吸着型移動ロボット、マルチコプターに代表されるドローンなどの点検ロボット用プラットフォームの、遠隔移動距離（離隔距離）と対象接近の距離（撮像距離）との比較を図4に示す。

この図からは、当面マルチコプター等の UAV, UAS（無

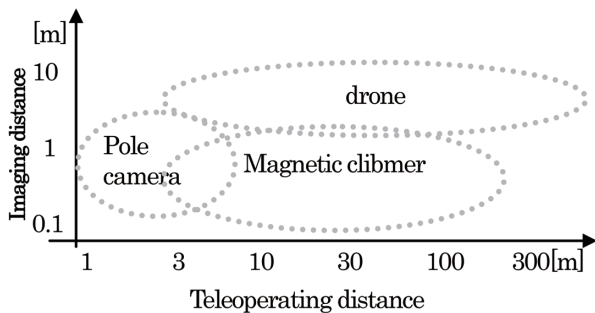


図4 メンテナンス向けロボットと遠隔化距離
Maintenance robot and teleoperation distance

人飛行装置／システム、最近ではドローンと呼ばれる)は、大きな移動機能を持つ反面、撮像距離の短縮、接近にまだ課題があることが判る。棒カメラ、磁石吸着型車両型ロボットなどが当面の適用には適しているが、適用範囲には限界がある。

4. 棒カメラ型点検ロボット

4.1 汎用機の事例と技術課題

工業用内視鏡などは点検用途で使われるが、大型の設備には、長尺の棒の先端にカメラ、ないしはファイバー窓を付加した点検機器が使われる。図5¹⁾、図6²⁾にその一例を示す。この機種は、伸長3m程度で、持ち運び可能、鉛直、水平と使用姿勢は自在であるが、撮像方向(首振り)は事前設定型であるなど、軽量、簡易化が優先されている。さらに伸長を10m程度まで伸ばすと、鉛直方向のみの使用形態となるが、撮像方向(首振り)、ズーム(画角調整)は電動遠隔化されて、対象へのアクセス後に撮像エリアを特定できる。価格的には前者で10万円、後者で50万円ほどである。

鉄鋼設備の点検作業としては、下記の機能が求められる。

- ①一人の手持ち操作で、自在な方向で使用可能
- ②カメラの首振り、ズームなどの撮像機能の遠隔化
- ③撮像のモニタリング(カメラの記録する画像を操作者が見て確認できること)

これらの機能を一台に集約した棒型カメラが市場には無かったため、新日鐵住金独自でこれらの機能を持つ棒カメラを開発した。その仕様目標を表1に示す。

4.2 開発機の構成と機能

開発された棒カメラは、通称“マストカム”と称し、その概観を図7に、概略仕様を表2に、先端部の動作状況を図8に示す。レバー操作で、約1.5mの縮長から最大5.2mへ伸縮可能で、途中の任意の長さに調整できる。屈曲型のみ先端に1m弱の180°旋回可能な屈曲軸が付属し、L字型にもなる。カメラの映像は、手元の小型モニタで時間遅れ無く確認可能であり、操作者の手元の操作スイッチ箱で操作して、カメラの根元に接続したホビー用サーボモーター



図5 グースネックカメラ¹⁾(クroda・オプトニクス(株)社製 FJ-EX310L/610L)
Goose-neck camera (FJ-EX310L/610L by Kuroda Optonics Corp.)

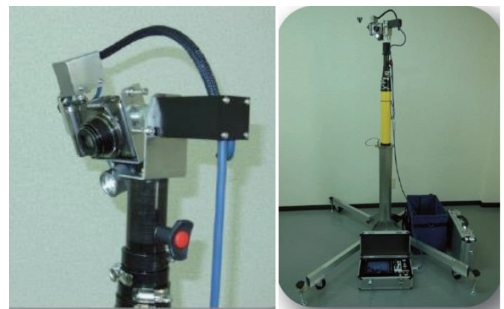


図6 ポールカメラ²⁾((有)インテス社製 PCS1201)
Pole camera (PCS1201 by Intes Corp.)

表1 棒カメラの仕様目標

Target specification of pole camera condition of corrosion-resisting evaluation test

	Goose-neck camera (Kuroda Optonics)	Pole camera (Intes)	Target spec.
Holding method	Hand held	Base holding	Hand held
Resolution	SD (VGA)	HD (Full HD)	HD (Full HD)
Camera pan & tilt	Preset	Tele-operation	Tele-operation
Expansion length (m)	3.2	11	5
Contraction length (m)	0.5	1.2	1.5
Weight (kg)	2.0	6.0	3-4
Price (M¥)	0.1	0.5	1.5 (cost)

で旋回、臥仰させて対象の方向にカメラ光軸を向けることができる。カメラのズーム、静止画シャッター、LED照明も操作者手元スイッチで操作可能で、動画撮影と並行して、ないしは独立して高解像度静止画(最大18M画素)まで撮影できる。コンパクトカメラ本来のフラッシュ撮影も使用可能である。

軽量化とコスト低減を考慮し、汎用のコンパクトデジタルカメラを、やはり市販のホビー用サーボモーターを用いて遠隔操作化と首振り制御している。一方、伸縮筒内にケーブルを内蔵し、信号伝送はシリアル通信による省配線化し、操作者単独での操作を可能としている。汎用部品と省配線技術の最適な組み合わせで、手持ち型棒カメラとしては他

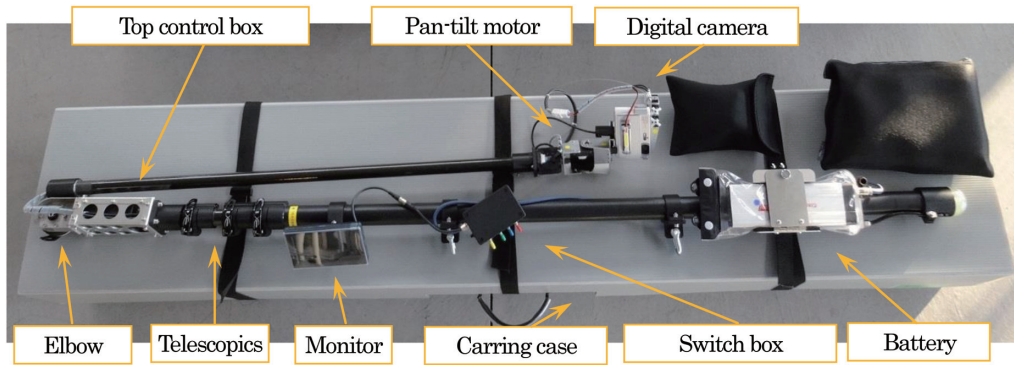


図7 マストカム (屈曲型 Version 2.0)
MastCam (Flexion type Version 2.0)

表2 マストカムの種類と仕様
Variation and specification of MastCam

Specification	Short type	Flexion type
Basic specification	Tip camera: Full HD compact (10x zoom) Imaging function: Still (18Mpix) / Motion (FHD) Pole end monitor: 4 inch LCD (VGA resolution) Operation: Pole end switches (camera control, flexion, and rotation), preset telescope and elbow Tip lighting: LED (3W) Pole: Telescopic CFPR poles Power supply: Pole end battery (rechargeable) Environmental: 0-50°C, Drip-proof (IP5x)	
Expansion and contraction length	4 m/1.5 m	5.2 m/1.6 m
Tip flexion and rotation	1 preset rotation + 1 flexion (motorized)	2 preset rotation & flexion + 2 rotation & flexion (motorized)
Weight	3 kg	3.5 kg
Accessory	Battery recharger, straps & fall-prevention hook	
Price (M¥)	Around 1.2	Around 1.5



図9 連続焼鈍炉防熱板亀裂点検への適用状況と撮像写真 (2015年4月)
Inspection and captured image of insulation plate crack in C.A.P.L. (at 2015.4)

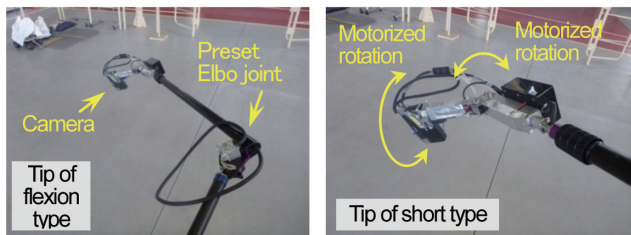


図8 カメラ方向遠隔操作機構とその動作
Camera orientation controller and its motion

に類の無い高機能を実現している。

4.3 棒カメラの最適伸長

マストカムは最大長5.2mの機種を全伸展させると重心位置は、手元端から概ね2.1mとなる。水平方向保持にて持ち手位置が手元端から0.7mとすると、モーメント効果で、操作者手元で100N超の負荷となり、実用上ではこの程度の伸長が限界と考えている。

4.4 オンラインの適用事例

現場での適用状況の一例を図9に示す。ライン停止中であるが、安全対策等の周辺処置が簡易化でき、迅速な調査が実現する。現在、社内数箇所の整備部門や工場に常備し、随時適用を図っている。また定常生産への適用も検討中である。

5. 磁輪吸着車型点検ロボット

5.1 汎用機、先行研究例と技術課題

鋼構造物の点検に、磁力吸着を利用して、立面を使って高所へアクセスする点検装置は多数実用化されているが、接触状態を維持する必要から、アクセス困難な部位も多く実用的な保全には課題もあった。

①既存機

多くの非破壊検査会社にて、磁力吸着式の自走式点検車を開発して使用している。図10に新日本非破壊検査(株)の一例を示す。遊星車輪型で乗越え可能な段差は最大75mmである。これは遊星車輪全体の半径程度である。

②特許上見られる構造

実際の鋼構造物では、リブ等の凹凸構造が存在し、点検車を到達させるには“入り隅”、“出隅”と称される、凹凸の角部の乗越えが必要となる。段差を乗り越える機構とし

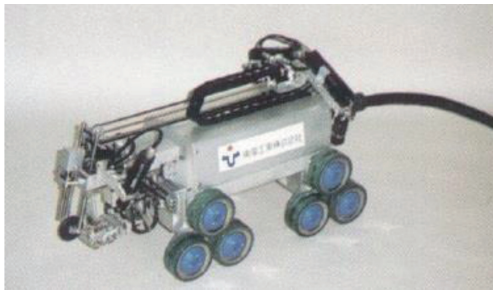


図10 煙突筒身肉厚測定ロボット(遊星車輪タイプ)(新日本非破壊検査(株), 東電工業(株)共同開発)
Chimney wall thickness measurement robot (planetary wheel type, joint development of Shin-Nippon Nondestructive Inspection Co.,Ltd. and Toden Engineering Co.,Ltd.)

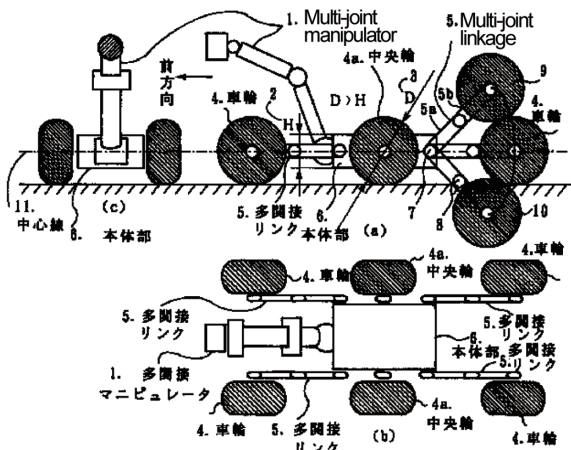


図11 不整地移動装置³⁾(特開平9-142347, 三菱重工業(株))
Uneven terrain mobile devices: J. U. P. A. P. No. 2007-142347 by Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

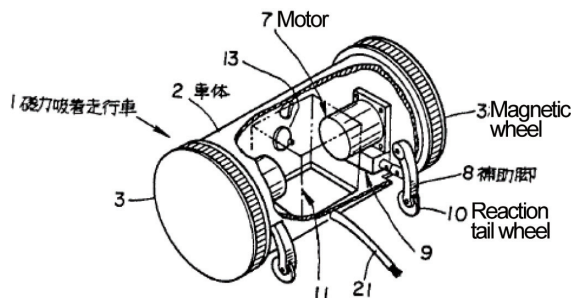


図12 磁力吸着走行装置⁴⁾(特開昭62-26172, バブコック日立(株))
Magnetic attraction vehicle: J. U. P. A. P. No. S62-26172 by Babcock-Hitachi K.K.

て、特開平9-142347(不整地移動装置, 三菱重工業(株)³⁾)にはマニピュレータで車輪を支持する構成が提案されており図11に代表図を示す。この構成では、強力なマニピュレータが必要となり重量、価格が増すため実用例は少ない。

一方、磁石車輪の特性上、角部でも吸着力があるので、車体構造を1軸2輪として角部の乗越えを図る特開昭62-26172(磁力吸着走行装置, バブコック日立(株)⁴⁾)の提案も見られる。図12に代表図を示す。この構成では、駆動反力を得るため補助車輪が必要となる。角部乗越えの不安

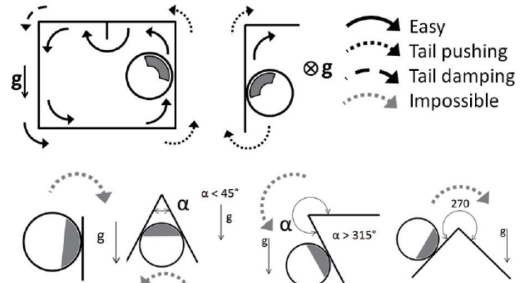
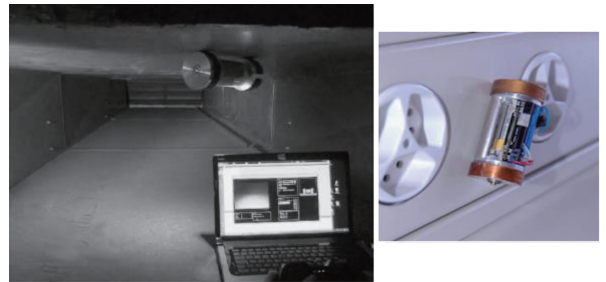


図13 CyMag3D⁵⁾(スイス連邦工科大学ローザンヌ校)
CyMag3D École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

定状態を通過する際に、2輪構成では一度吸着を失うと瞬時に全体の落下に繋がる。

③海外の研究例

前述の2輪型を作成した実例がスイス連邦工科大学にあり、前述の特許提案と同様の動作を実現している⁵⁾。しかし、高解像度のカメラなどの大きく重い点検装置を積載できないためか実用化されていない(図13)。

5.2 開発目標

磁石車輪を用いた自走式点検車として次の3点を掲げた。

- ①車輪自体で車輪半径程度、30mm程度の凸段差の乗越え能力
- ②車体の構造で、入り隅出隅の通過を可能とする
- ③2kg程度の積載能力

5.3 開発機の構成と機能

開発された磁石車輪自走式点検車は、通称“S2 ローバー”と称する。

①磁石車輪の開発

樹脂製ホイールにゴム車輪を装着し、その内部に希土類磁石(ネオジウム磁石)を装入した磁石車輪を開発した。直径約90mm、幅約35mm、でその構造を図14に示す。ゴム車輪は、やはりコスト低減を考慮し、市販のホビー用ラジオコントロール車用のゴムタイヤを用いる。オフロード用の低硬度かつ角部での摩擦力維持に適したパターンを選択している。立面移動には摩擦係数が高いことが必要で、タイヤゴムの硬度を入手可能な範囲で低くすることに留意している。

②開発機器の構成

S2 ローバーは上述の磁石車輪を用いて、3軸6輪、車軸

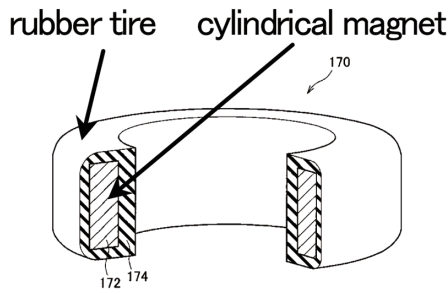


図 14 S2 ローバーの磁石車輪構造
Magnetic wheel structure of S2 Rover

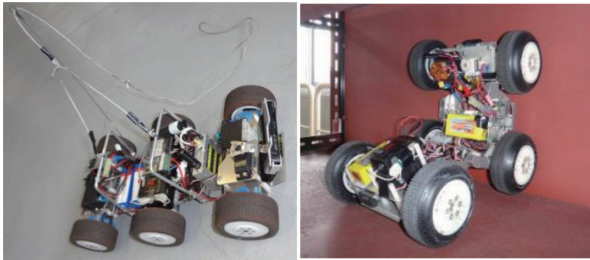


図 15 S2 ローバー (左:フラット型, 右:屈曲型)
S2 Rover (left: flat type, right: flexion type)

表 3 S2 ローバーの種類と仕様
Variation and specification of S2 Rover

Specification	Flat type	Flexion type
Basic specification	Wheel: Rubber tire + Magnet ring (rare earth mag.) Tele-operation: Steering/forward & backward, radio Power supply: On-board battery (rechargeable) Environmental: 0-100°C, Battery life: 1-2 h approx.	
Inspection function	Tip camera: HDV compact Imaging function: Still (18Mpix) / Motion (FHD) (10x zoom) Operating monitor: VGA Lighting: LED 3W	- (Loading equipments under consideration)
Characteristic	Flat surface, high load	Pass over corners
Weight	4-5.5kg	4.0g
Payload	3-10kg (up to friction situation)	1 kg approx.
Standard accessory	Radio transmitter, recharger, operating monitor, fall-preventive wire	
Cost (M¥)	4.5 approx.	4 approx.

と平行な車体関節軸を持つ電動自走車両である。6輪全輪駆動であり、概ね全長 420mm, 全幅 190mm, 重量 4 ~ 5 kg である。車体関節軸数が 1つのものをフラット型, 4個のものを屈曲型, と呼び、後者がリブ乗越え等の可能な構造である(図 15)。フラット型と屈曲型の比較を表 3 に示す。6輪なので、ステアリングは機構的に前後両端の車輪の方向を変え、中央車輪は固定にしているが、全輪駆動なので各車輪のモータードライブで回転力に左右差を発生させてステアリング効果を補助している。

③積載能力評価

フラット型を用いて車体の積載能力を調べた。図 16 に



図 16 S2 ローバーの積載能力テスト
Payload capacity test of S2 Rover

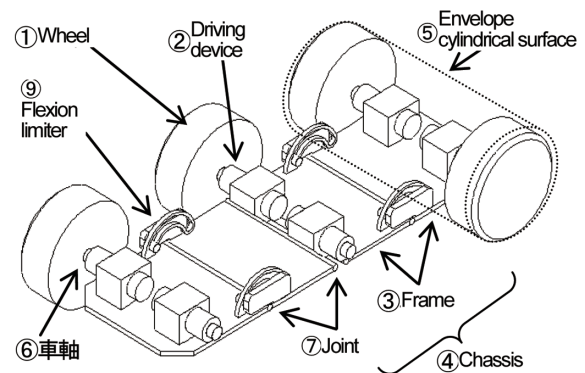


図 17 多関節車体構造
Flexion body structure of S2 Rover

立面での実験状況を示す。立面では摩擦係数が支配的なので、対象面の表面性状の影響を受けるが、実験棟内の塗装された鉄製扉の立面上で最大約 11kg, 天井裏面では約 5kg の負荷を牽引できた。最大負荷の状態では車輪のスリップが顕著で移動可能ではあるが自在な移動には困難が伴う。フラット型では、目標積載量 2kg を満足しているので、カメラ等点検機器が搭載可能で、現在超音波厚み計などの接触型点検機器の搭載も検討中である。

屈曲型では、車体関節軸の動作領域が大きいためカメラ等の点検機器の積載エリアの確保が課題で、開発を継続している。

④屈曲車体構造

リブ乗越えのために開発した屈曲型ローバーは図 17 に示すような車体関節構造を持つ。関節の可動範囲には制限を設けており、その作用で入り隅出隅の乗越え動作が安定する。車体関節軸の動作状況を図 18(a)~(c)に示す。実際の出隅乗越えの稼働状況を図 19 に示す。出隅に乗越えは、リブの方向が水平や垂直、上向き下向き横向きと試験し概ね同様の乗越え性能であるが、乗越え動作全般では、失敗

の確率が1%弱ほどある。現在も改善のための開発を継続しているが、角部への進入速度の最適化等が必要と考えている。

屈曲車体構造の比較を表4に示す。従来法に比して、各

車輪の駆動力で車体関節を制御する方法は、最も少ないアクチュエータで角部乗越えを可能とする方法で実用的である。

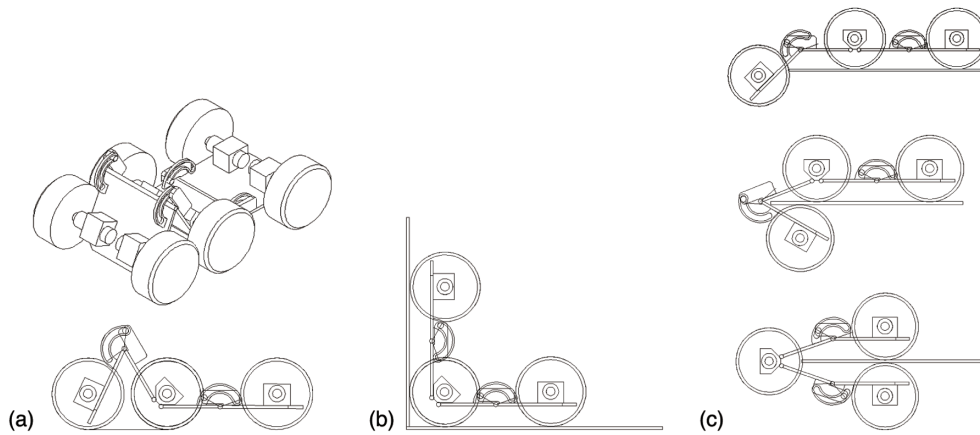


図18 車体関節軸の動作状況 (a) 関節角度制限, (b) 入り隅乗越え動作, (c) 出隅乗越え動作
Motion of flexion body joints (a) Limitation of joint angle, (b) Action over a concave corner, (c) Action over a convex corner

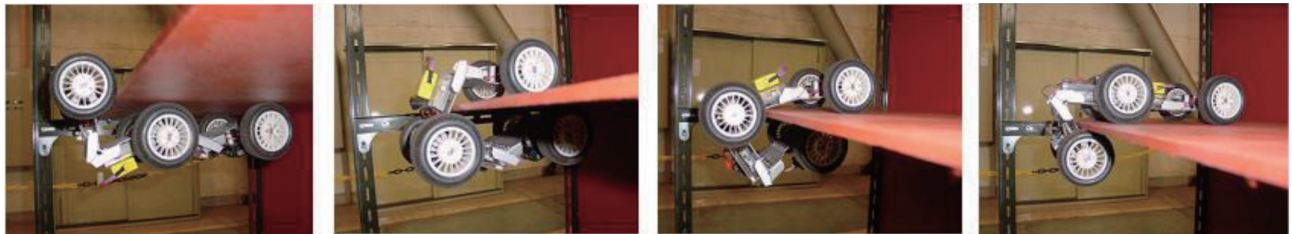
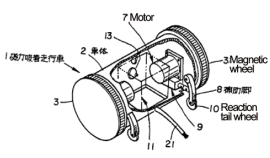
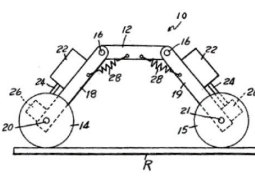
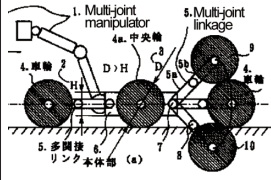
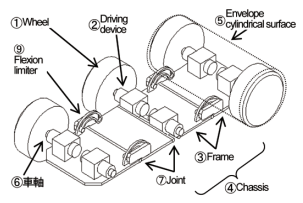


図19 実際の車体の出隅通過での関節の稼働状況 (左→右へ時系列)
Actual action of each joint over a convex corner (time series from left to right)

表4 既存技術と屈曲型S2ローバーの比較と特色
Comparison and characteristics of preceding researches and S2 Rover

	Two wheel and tail type	Jointed chassis type		
Structure	Reaction tail wheel	Passive joint	Controlled joint	Tension controlled
Applicant	Babcock-Hitachi (EPFL)	Individual (Kubota)	Mitsubishi Heavy Industries	Nippon Steel & Sumitomo Metal
Concept	Tail, i.e. legged wheel, takes reaction force (like toy bobbin car) 	Multi-jointed chassis, held by spring (J. U. P. A. P. No. S54-131209, magnet wheeled cart with all wheel drive) 	Multi-jointed chassis, controlled & held by actuator 	Multi-jointed chassis · Free joint with flexion limiter · Torque difference makes tension & repulsion, joint angle changes 
Advantages	Simple structure and light weight	Simple structure and low cost	Freely deformable chassis posture	Freely deformable chassis posture without joint actuator, light weight
Dis-advantages	Fluctuation of adhesion force → large fall risk	Lack of posture control, less adhesion control on vertical or uneven surface → large fall risk	Heavy joint actuators, complicated control law → expensive system	Control law for chassis tension & repulsion (may require to sense its posture)
Achievement	Test machine	Test machine (may hobby use)	Concept	Test machine - some application
Overall rating	△	×	×	○

○ : Practical, × : Impractical, △ : Experimental



図 20 S2 ローバー・フラット型のアンローダー橋脚部点検状況 (2011年6月27日)

Overview of inspection for gantry crane stanchion using flat type S2 Rover (at 2011.6.27)

5.4 適用実績

実際の点検作業への適用の一例として、2011年6月の新日鐵住金の岸壁クレーンへの適用状況を図20、図21に示す。これは東日本大震災において荷揚げ作業中の同クレーンが津波で浮遊する貨物船に衝突され船上に伸展するカンチレバーを破損、喪失した後の復旧工事前の点検作業である。クレーン脚部の健全性評価のため、S2 ローバー・フラット型で溶接部の点検を実施し、その撮像結果は現脚部が再利用可能の判断材料として使われた。フラット型でも30mm程度の段差乗越えが可能なので、他の製鉄設備の点検用途を検討中である。

6. 結 言

新日鐵住金で開発した遠隔点検機器、マストカムとS2ローバーについて、技術課題と開発の進捗を紹介した。市販の先行する点検機器の不足分を補う形で開発し、鉄鋼業点検に適した高機能な遠隔点検機器が開発できた。しかし、高機能化と併せて使用方法、適用工事など周辺技術の向上も必須であることが明確になっている。現在、これらの課題にも開発リソースを投入している。足場レス点検や操業



図 21 S2 ローバー・フラット型のアンローダー橋脚部点検撮影写真 (2011年6月27日)

Captured image at inspection for gantry crane stanchion using flat type S2 Rover (at 2011.6.27)

中点検の実現に依り、装置産業である鉄鋼業の設備状態監視機能の向上、効率化に寄与したい。

謝 辞

本件の研究開発に際して、開発機器の製作に当たって頂いた、(有)インテス代表取締役 神出明氏と同社御一同のご尽力と、開発の方向性の検討にご協力頂いた(株)メイテック、中沢征四郎氏、その他関係者御一同の支援に深い謝辞を表します。

参考文献

- 1) クロダ・オプトニクス(株):カタログ“伸縮ポール式・ゲースネットカラーカメラ FJ-EX310L/610L”
- 2) (有)インテス:カタログ“ポールカメラシステム PCS 1201D (PCS-1201D-H/PCS-1201D-L/PCS-1201D-HL)”
- 3) 特開平 9-142347 不整地移動装置. 三菱重工業(株)
- 4) 特開昭 62-26172 磁力吸着走行装置. バブコック日立(株)
- 5) Rochat, F., Schoeneich, P., et al.: Cy-mag3D: A Simple and Miniature Climbing Robot with Advance Mobility in Ferromagnetic Environment. Proceedings of Clawar2010. May 18, 2010



高田亮平 Ryohei TAKADA
設備・保全技術センター 機械技術部
機械技術開発室 主幹
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511