〔技術報告〕

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*

竹 原 健** 中 山 良 一**
前 田 嘉 則*** 八 田 衛 明***

ABSTRACT

An Automated Vehicle Robot has been developed for inspection for various components inside primary containment vessel with supported by Japanese Ministry of International Trade and Industries (MITI). The Inspection Robot consists of ; a floor-moving vehicle with four crawlers ; TV cameras for inspection and operation ; detectors and sensors ; multi-joint arm mechanism for TV camera ; a signal transmitter ; cable handling device.

In this paper the authors describe about the crawler type vehicle. This vehicle is developed for moving smoothly in Nuclear Power Plants. This vehicle has two steering mechanism in front and rear, and has wheelbase chaging mechanism at the center of the body. With these mechanism, this vehicle can climb up 45°-stairs (a step height ; 220 mm) and can rotate with short radius. The crawler type vehicle satisfied the design conditions, and system tests for inspection are now under going.

Key words : inspection, crawler, stairs, nuclear power plants

原子力発電所の運転、あるいは定期点検時における作業のロボット化が最近進められている。この一つとして、人に代わって様々な発電所内の機器装置を点検する点検用ロボットがある。現在、通産省補助事業である原子力発電支援システムとして「格納容器内自動点検システム」の開発が進められている。このシステムは床面走行車、点検および運転用テレビカメラ、各種センサ、多関節腕形機構、信号伝送装置およびケーブル処理装置から構成されおり、自動および遠隔で操作できるものである。

本報告では、本システムの床面走行車について述べる。格納容器内部は、狭あいでは床はグレーティング (grating: すのこ) 床であり、また各所に階段が設置されているなど、車の走行にとって厳しい条件となっている。これらの条件を満足する走行車として、前後輪に操舵機構を持ち、車体伸縮機構を車体内に持つ、半月形4輪クローラ車を開発した。

この半月形クローラ車は、傾斜角度 45° の階段 (1段高さ:220 mm) を昇降可能で、旋回半径が小さいので狭あいな走行路を自在に走行できることを各種走行試験を行い確認した。現在システム試験を実施中である。

1. はじめに

原子力発電所の運転、あるいは定期点検時における作業の自動化 (ロボット化) の動きは、1) 作業員の被ばく低減 2) 稼働率向上 3) 信頼性向上 4) 作業安全向上 5) 省力化などのニーズに応える一つの手段として、最近ますます盛んになってきている。

このような状況において、我々は導入効果が明確で、

原稿受付 1984 年 2 月 20 日

* Development of Crawler Driven Inspection Robot for Nuclear Power Plant

** (株)東芝 原子力事業本部

*** (株)東芝 交通事業本部

従来技術の延長上で開発の見通しのたて易い装置から順次開発し、実用化してきた。代表例としては、燃料自動交換機、CRD 自動交換機など¹⁾がある。

しかし、これらは専用機として使用され、自動機の範囲を脱していない。昨今のニーズは、ロボット技術の急速な進歩に伴い、人に代わって様々な発電所内の機器装置を点検し補修する、柔軟性に富んだロボットへと移行している。現在、通産省補助事業である原子力発電支援システムとして開発を進められている格納容器内自動点検システム^{2~4)}は、このようなロボットの一種である。

本報告では、床面走行式の格納容器内自動点検システムに適用する半月形クローラ車を用いた床面走行車につい

Fig. 1 Remote Inspection Robot inside the Containment Vessel

て述べる。

2. 格納容器内自動点検システムの概要

自動点検システムの概略構成を Fig. 1 に示す。このシステムは、格納容器内のグレーチング床や階段を走行できる走行車、テレビカメラやマイクロホンなどの点検用検出器、これら検出器を各機器に接近させるためのマニピュレータの一種である多関節腕形機構、点検車に電源や制御用信号を供給するケーブルを点検車の移動と同調して送り出すケーブル処理装置、以上の各構成要素を協調して動作させるために、格納容器外に設置されている操作卓と、運転の支援のための計算機システムから構成されている。

点検車の詳細は Fig. 2 に示す。自動点検をするために、点検車は床面に敷設されている電磁誘導線に沿って自動走行し、床面の各所に敷設されている位置検出器で車の位置を検知する。点検地点では多関節腕形機構を動作させて点検対象機器を観測し、操作卓の画面上にテレビ映像などの情報を点検データとして表示する。以上が自動点検の場合であるが、人が各種操作を遠隔で行うことも可能なシステム構成である。

3. 走行機構

格納容器内部は構造的に狭あいであかつ床はグレーチングであり、各所に階段が設置されているなどの車の走行にとっては厳しい条件となっている。したがって本走行機構では旋回性能、階段昇降性能などが開発課題である。以下に走行方式の選択および構造の検討結果について述べる。

3.1 走行方式の選択

現在、ロボットの走行方式として、1) 車輪方式 2)

クローラ方式 3) 脚方式の3方式が考えられる。これら方式について、格納容器内で使用することを条件として検討を行った。

条件の第1は、45°前後の急な階段の昇降が安定にできること、第2は入り組んだ狭い通路(約600mm幅)を容易に通過できること、第3は約150kg位の点検用装置に搭載できることである。第1の条件と寸法的制約を考慮に入れると、一般的な車輪方式は適用できず、A-MOOTY⁵⁾のような特殊形状の車輪方式にする必要がある。次に第1、第3の両条件を組合せた時に、現在各種開発されている脚方式の

走行ロボット⁶⁾は、走行速度、制御性に問題が多い。我々は第1、第3の両件を満足し、さらに、第2の条件を満たす方式として、多方面で実用化されているクローラ方式を選択することにした。

3.2 クローラ方式の基本構造

次にクローラの形状について検討した。階段の昇降を安定な状態で行うためには、階段に常時2点以上接しており、かつ走行車の重心は低くなければならない。このため、一般的な左右に各々1つのクローラを有する(1対クローラ方式)クローラ車では、階段高さに応じてクローラ長が長くなり、走行車全長もそれにつれて当然長くなり、通路上での旋回に広い面積が必要となる。そのため、階段昇降と旋回性能の要求を満足する方法として、車体伸縮をする機構をもち、クローラを前後に分割する2対クローラ方式の走行車を選んだ。

さらに、この2対クローラ方式にも各種⁷⁾の構造があるが、この点検ロボットの場合、格納容器内の狭い場所を走行することを考慮に入れ、次のような構造とした。旋回時に一般的クローラ車では、左右のクローラに速度差を与える方法で行っている。この時、クローラと床面

Fig. 2 Inspection Robot

間では必ずすべり現象を生じている。したがって、格納容器内の床が特にグレーチングであるため、速度差で旋回する時に横すべりやひっかかりなどが発生し、狭い場所でのクローラ走行車の旋回は困難である。この問題を解決するため、半月形のクローラに操舵機構を設ける形式を考えた。このように、2対クローラ方式で、かつ操舵機構を設けた方式を選択した結果、特別な制御をせずに階段の昇降ができ、かつ小回りの可能な走行車を提供できるようになった。

3.3 半月形クローラ車の構造

(1) 階段昇時の安定性

Fig. 3 に 45° の階段をこのクローラ車が走行している状態を示す。前後2つのクローラが階段と接している点(A, B)において、各々の点で階段に平行な直線と垂直な直線を引き、この両者の交点(C)を求める。クローラ車の重心Gが少なくとも三角形ABC内になければ、クローラ車は転倒し安定した階段走行は不可能である。そこでホイールベース長を $\overline{AB}$ から $\overline{AB'}$ に変えることにより、三角形 $AB'C'$ は大きくなり、許容される重心Gの範囲は広くなるようにした。このようにすると、重心Gが高い場合でも階段を安定して走行できることになる。

次に階段形状とクローラ形状との関係を検討した。Fig. 4 に傾斜角度 45° の階段をクローラが昇っている状態を示す。クローラ長 A, B は階段高さ 220 mm と傾斜角度 45° を考慮して約 400 mm 以上とした。また階段対向角度 ϕ は、階段高さとは後述の階段エッジとの関係から約 65° 位とした。またクローラ高さ H については、駆動輪位置と階段高さの関係からほぼ 370 mm とした。

なおこれらの値については、階段昇降実験結果を考慮して決定した。

さらにクローラ形状と、階段の各段にクローラ車が滑

Fig. 3 Climbing up Status at 45° -Stairs

Fig. 4 Outshape of Crawler

Fig. 5 Stairs Edge and Crawler

落しないよう設けたエッジ部の形状の関係を検討した。

Fig. 5 にエッジ部とクローラがかみ合っている状態を示す。このエッジを設けた結果、走行用電動機への負担を少なくすることができた。

エッジの寸法、形状はクローラ形状と密接な関係にあり、今回は階段角度やかみ合いを考慮し、エッジを 45° 傾けて取付けた。このエッジを設けることにより、クローラ車の階段昇降性能はより向上した。

(2) 旋回性能向上のための検討

操舵機構による旋回の理論図を Fig. 6 に示す。この旋回半径は、かじ取りリンクに関するアッカーマンの式⁸⁾を参照して、次のように求めることができる。

$$R_1 = \frac{L}{\sin \beta} + d \quad (1)$$

α : 内輪実操舵角 L : ホイールベース
 β : 外輪実操舵角 d : 操向輪中心とキングピン間距離

Fig. 6 はホイールベース、操舵角を一定とし、前輪のみ操舵機構を設けた例で、前後輪に各々操舵機構を設

Fig. 6 Status of Steering Front Wheel

けた例を Fig. 7 に示す。

後者の旋回半径は(1)式同様にして次のようになる。

$$R_2 = \frac{L}{2 \sin \beta} + d \quad (2)$$

このように L , B , d を一定とすると, R_2 は R_1 の約半分となり, 前後輪に操舵機構を設けることにより, 旋回半径は著しく小さくなる。したがって旋回性能向上のために, 前後のクローラに操舵機構を設ける構造とした。

階段走行時の安定性を考慮すると, 走行車長さは長い程よい。しかし, 旋回半径を考慮すると短い方が小廻りがきくことになる。したがって車体伸縮機構は, 旋回性能向上のためにも重要な役割を果たす。

以上2つの検討により, 階段高さが1段 220 mm である場合, ホイールベースを約 550 mm 伸縮すること

Fig. 7 Status of Steering Front and Rear Wheel

のできる車体伸縮機構を走行車体内に設けた。また, 通路幅 600 mm の場合, 操舵角度を最大で約 30° となる操舵機構を, リンク機構と駆動用電動機を車体の前後に設けた。

なお床面接地角度 θ (Fig. 4 参照) は, 操舵性能向上のため, クローラと床面間の接触面積を少なくすることを考えて設けたもので, 特に操舵用電動機容量および実験結果を考慮して決定した。

以上の検討により製作した半月形クローラ車が, 傾斜角度 45° の階段を昇っている状態を Fig. 8 に示す。またこのクローラ車の諸元を Table 1 に示す。

4. 走行制御

この走行制御システムの構成を Fig. 9 に示す。走行は自動および遠隔操作で行える。遠隔手動操作は操作卓からジョイスティックなどを用いて, 車載のテレビカメラの画面を見ながら行う方式とした。点検ロボットの自動走行に関しては, 1) 出発停車 2) 前後進 3) 走行速度 4) 操舵 5) 車体伸縮の各制御を行っている。

点検車の状態に関する情報は, 信号伝送装置を介して

Fig. 8 Vehicle Climbing up at 45° -Stairs

Table 1 Specification of Inspection Robot

LENGTH	1,430 mm 1,980 mm*	HEIGHT	470 mm
WHEEL-BASE	750 mm 1,300 mm*	WIDTH	500 mm
WEIGHT	220 kg	STEERING ANGLE	$\pm 30^\circ$
PAYLOAD	150 kg		
POWER SOURCE	(1) Crawler Motors : 4 (2) Steering Motors : 2 (3) Wheelbase Motor : 1		

* LONG WHEELBASE

計算機システムに入力され、処理した後、制御指令が点検車の各駆動用電動機に与えられる。制御対象の電動機は、Table 1 に示すように合計で7台あり、走行用電動機4台は各々個別に制御できるようなシステムとした。

1) 出発停止 2) 前後進 3) 走

行速度 5) 車体伸縮の各制御は、点検車の位置情報と連動して行う。床面の各所に敷設されている位置発生装置の信号を、点検車上のコイルで受け取ることにより位置情報は得られる。

格納容器内の走行経路は入り組んでいるため、多数個所で位置検知をする必要があり、また精度も高く、かつ耐環境性がすぐれている必要がある。以上の点を考慮し、交流磁界とコイルによる位置検知装置を採用した。

4) 操舵制御については、床面に敷設されている誘導線からの信号を点検車上のコイルで受信し、前述の計算機システムで処理して、制御信号として操舵角度を与える方式を採用した。その理由は、グレーチング床で走行車が横すべりした場合でも十分制御可能で、かつ耐環境性のすぐれた方式であるためである。

5. 性能試験および結果

試作した半月形クローラ車の性能試験を、1) 旋回走行性能 2) 平地走行性能 3) 階段走行性能 4) 自動走行性能の4項目について行った。

5.1 旋回走行性能

半月形クローラ車は前後に操舵機構が各々設けられている。これら2つの機構を一定角度操舵して、旋回した状態を上方からカメラで撮影し、その走行軌跡を測定した。この走行軌跡測定の結果、(3)式で求めた理論値よりやや大きな値となることがわかった。これはグレーチング床とクローラ間に生ずる横方向のすべりが原因であると考えられるが、制御面では特に問題とならない。

Fig. 9 Vehicle Control System Block Diagram

Fig. 10 Power of Crawler Motors Vehicle Climbing up at 45°-Stairs

5.2 平地（グレーチング床）走行性能

半月形クローラ車に、各種検出器などの機器 150 kg を搭載した状態で平地走行試験を行った。時速約 500 m の時の所要動力は約 700 W で、搭載機器のない場合の機械効率との変化はみられなかった。また、リンクを用いた操舵機構の操舵角を 0° とした状態で走行試験を行い、直進走行性が良好であることを確認した。

5.3 階段（傾斜角 45° 高さ 220 mm）走行性能

半月形クローラ車の 45° 階段昇降試験を行った。昇降時の挙動から、クローラおよび階段エッジ形状が妥当であることを確認した。半月形クローラ車が 45° 階段を昇っている時の所要動力・時間の測定結果の一例を Fig. 10 に示す。階段 1 段をクローラが昇り上げる毎に、所要動力は波を打ち、一部にピークを持つ。これらは、半月形クローラ車の重心移動による影響と、クローラとエッジ間のかみ合いの影響から生ずる現象である。

時速 300 m の時の所要動力は、平均的に約 900 W であり、この結果走行用電動機の容量は十分であることが確認された。

5.4 自動走行制御試験

グレーチング床に直線および曲線の組合せで構成される通路を設定して、電磁誘導線および位置検知用磁界発生装置を敷設し、半月形クローラ車の自動走行制御試験を行った。上記の通路において、クローラ車は誘導線と位置検知装置からの信号により、操舵および車体伸縮の動作を行いながら、円滑に自動走行できることを確認した。信号伝送装置を介して制御する方式であるが、時間遅れなどの問題もなく、設計条件を十分に満足する結果であった。

以上の項目について試験を実施し、半月形クローラ車が設計条件を満足し、本システムに十分適用できることを確認した。

6. む す び

通産省補助金で開発中の床面走行式の格納容器内自動点検システムに適用する半月形クローラ車の設計、試作を行い、また各種試験を実施して、点検用ロボットの移動機構として十分満足できるものであることを確認した。

また、この半月形クローラ車に各種検出器や信号伝送装置などを搭載し、点検用ロボットとしての性能を別途確認している。今後、さらに点検システム全体の耐環境性や耐久性の試験を実施して、格納容器内で使用できることを確認する予定である。

参 考 文 献

- 1) 竹原他, “原子力におけるロボット化の現状と動向”, 原子力工業, Vol.28, No.12, pp.28-35, 1982
- 2) 中山他, “原子力発電所格納容器内自動点検システムの開発”, ロボット学会第1回学術講演会予稿集, pp.5-6, 1983
- 3) 貞包他, “格納容器内点検装置の開発[Ⅲ]—高機能化—”,

- 日本原子力学会, 昭和 58 年年会要旨集, G2, 1983
- 4) 浅井他, “原子力発電所格納容器内作業移動マニピュレータの開発(第1報)”, 日本原子力学会, 昭和 58 年年会要旨集, G3, 1983
 - 5) 吉川他, “新しい時代の保全ロボット (A MOOTY 開発研究 I)”, 昭和 58 年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, pp.709-710, 1983
 - 6) 広瀬, “移動ロボット技術”, 計測と制御, Vol.21, No.12, pp.1129-1134, 1982
 - 7) Köhler 他, “Manipulator Vehicles of Nuclear Emergency Brigade in the Federal Republic of Germany”, Proceeding of 24 th Conference on Remote Systems Technology, pp.196-218, 1976
 - 8) 前田他, “無限軌道走行車輛”, 特許公開番号 57-134370
 - 9) 山本他, “自動車ハンドブック”, pp.395-396, 朝倉書店

竹原 健 (Ken TAKEHARA)

昭和 28 年 3 月横浜国立大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。現在、原子力事業本部原子力システム設計部主幹。原子力用各種ロボットの開発に従事。日本原子力学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

前田嘉則 (Yoshinori MAEDA)

昭和 22 年 3 月立川高校卒業。同年 4 月(株)東芝入社。鉄道車両の機械設計を経て、現在交通事業本部機械設計担当主査、特殊移動機構の開発に従事。

中山良一

(Ryoichi NAKAYAMA)

昭和 48 年 3 月電気通信大学電気通信学部機械工学科卒業。昭和 50 年 3 月同大学院修了。同年 4 月(株)東芝入社。現在原子力事業本部 原子力技術研究所自動化システム開発主務、原子力用各種ロボットの開発に従事。日本機械学会、日本原子力学会会員。

八田衛明 (Moriaki HATTA)

昭和 54 年 3 月横浜国立大学工学部機械工学科卒業。昭和 56 年同大学院工学研究科機械工学専攻修了。同年 4 月(株)東芝入社。現在交通事業本部。