原子力作業ロボット用4脚移動システム

杉 山 栄*

1. はじめに

ロボットの研究開発は、自動機械、プレイバックロボット、適応ロボットと推移し、現在では自律ロボットの開発が盛んである。我国の産業用ロボットの急激な増加がみられた1980年代初頭、原子力発電施設においては、構成機器の検査や保守作業の自動装置または遠隔操作装置が開発・導入された。これらは、予め決められたシーケンス動作を遂行する専用装置ではあるが、作業者の放射線量の低減や作業時間の短縮に実効を上げている^{1,2)}。

ロボット技術のより一層の高度化、汎用化などを目的として、1983年から8年間にわたり、通産省工業技術院の大型プロジェクト「極限作業ロボットの開発」が進められてきた。極限作業ロボットの1つである実用原子力発電施設作業ロボット（以下、原子力作業ロボット）は、原子力発電所等の原子力関連施設において作業環境内を移動し、遠隔におけるオペレータの支援をえながら、機器設備の点検・保守などの高度な作業を行なえるものとして、目標が設定された。

本プロジェクトの期間の前半ではロボットを構成する主要な要素技術の開発が行われ、後半では要素技術の中間評価をへて、実証機の開発が行われた。実証機の開発の目的は、要素技術をシステム化することによって、その性能を実証するとともに、近い将来の実用化に必要なデータを取得することにあった。開発した実証機は、ロボットの設計、製作、操作、メンテナンスなどの簡便化のために、サブシステムの構成にした。これは全体行動指令部、視覚情報処理サブシステム、マネジュレーションサブシステム、および移動サブシステムから構成される。

本報告では、移動の要素技術、および実証機の移動サブシステムについて概説する。

2. 要素技術

原子力発電施設の汎用ロボットは、人間と共通の行動

原稿受付 1991年8月28日

Quadruped Locomotion System of Prototype Advanced Robot for Nuclear Power Plant Facilities.

* (株)日立製作所日立工場

領域を移動する必要がある。通常通路の移動のみならず、階段の昇降や床面上の配管・機器類・堰などを乗り越えること（以下、乗り越し）、作業対象機器への接近、作業しやすい姿勢の保持など多様な動作が要求される。移動機構の形態には、車輪式、クローラ式、脚式などが挙げられるが、4脚歩行方式は、多様な建屋内設備が存在する移動経路において、より環境適応性が高く、フレキシブルな移動が可能であるものと考え、その機構および制御技術を開発した。また、所定の計画経路に沿って自律的に移動する技術（知能型運動制御技術）を開発した。

4脚歩行技術の開発成果についてはすでに幾つか発表されているので、それを以下に要約する。

2.1 4脚歩行³⁾

脚歩行には静的安定性を常時保ちながら移動する静歩行、および静的安定領域外でも重心の移動をしながら歩行する動歩行がある。4脚歩行の要素技術としては、平地直進、旋回、乗り越し、階段昇降などを行なうために静歩行を開発し、さらに平地直進を高速化するために動

表 1 4脚歩行機構の仕様

機構重量	300kg
脚 長	0.9m
関節構成	全16関節（各脚4関節） 腰、膝関節：ロータリ型油圧アクチュエータにより駆動 足部関節：3自由度ジンバル構成
歩行制御系	階層構造、各脚は並列に制御 9CPU（68000）+B16EX

写真 1 油圧駆動型4脚歩行機構

表 2 歩行パターンの種類

No.	項 目	種類	内 容
1	平地直進歩行	3	初期歩行, 定常歩行, 終期歩行 (歩幅1種類)
2	ステアリング歩行	4	左右ステアリング歩行 (歩幅1種類, ステアリング角度2種類)
3	旋 回 歩 行	16	左右スピントーン: 1動作ターン, 初期ターン, 定常ターン, 終期ターン (旋回角度1種類) 左右ビボットターン: 1動作ターン, 初期ターン, 定常ターン, 終期ターン (旋回角度1種類)
4	平地位置合せ歩行	48	前後位置合せ歩行 (歩幅11種類) 左右位置合せ歩行 (歩幅5種類) 左右スピントーン (旋回角度8種類)
5	階 段 歩 行	9	2段オーバーブリッジ乗り越え (9歩動作)
6	跨 ぎ 越 し 歩 行	4	前足跨ぎ, 中継ぎ歩行, 後足跨ぎ, 前足跨ぎ戻り (跨ぎ越し量1種類)
7	く ぐ り 抜 け 歩 行	3	初期歩行, 定常歩行, 終期歩行 (歩幅1種類)
8	しゃがみ込み動作	2	しゃがみ込み動作, 戻り動作 (しゃがみ込み量1種類)
9	特殊姿勢位置合せ歩行	16	前後位置合せ歩行 (階段上での姿勢4種類, 歩幅1種類) 左右スピントーン (階段上での姿勢4種類, 旋回角度1種類)
10	ロボット姿勢移行動作	6	直立姿勢から前足を踏台の上へ乗上げる動作, 戻り動作 (3歩動作)
11	特殊センシング動作	2	足底近接センサによる階段エッジのセンシング動作 (階段上での姿勢2種類)
合 計		113	

(a) スティック線図

(b) 安定領域と重心軌跡

図 1 歩行パターン生成例 (跨ぎ越し歩行)

歩行を開発した。

4脚歩行の開発内容を紹介する前に, 歩行実験のために試作した4脚機構について触れる。発電施設内のパトロールや軽作業の実用規模をねらい, 油圧駆動型4脚歩行機構を試作した。同機構の外観および主要仕様を写真1および表1に示す。機構の主要材料はアルミニウム合金である。

静歩行に関しては, 建家内での歩行という条件を想定し, 階段, 障害物などの歩行環境の既知の幾何学的情報

に基づき, 代表的な歩行パターンを生成した。これらを歩行環境に応じて選択するという制御方式を考えた。歩行パターンの種類は表2に示す。

歩行パターンは, 重心運動に基づく機構姿勢の安定性, 脚関節の可動範囲, 歩行環境との干渉, 歩行運動の継続性などを考慮し, 予め制御装置上のシミュレータを用いて生成している。図1に障害物の跨ぎ越し歩行の歩行パターンの生成例を示す。同図(a)は4脚の動作を側面からみたスティック線図である。同図(b)は安定領域と重心軌跡の歩行ステップ毎の変化であり, 重心が立脚に囲まれた安定領域内に収まっていることを示している。

実際の歩行では, 床面の状態や脚運動制御の誤差による歩行のずれが生じる。この問題に対し, 脚先端に設けた近接センサなどにより障害物との間の相対的な位置や方向ずれを検出し, これらの誤差情報に基づいて修正歩行パターンを起動し, 逐次位置および姿勢の修正を実行する制御手法を適用した。以上の制御手法により, 階段歩行, 障害物の跨ぎ越し, 旋回歩行, などを連続的に実行できることを要素技術の実験で確認した。

歩行の高速化に有効な方式として動歩行がある。動歩行は機構姿勢の不安定性を周期的な脚の運動により動的に安定化する。種々の脚歩行生物の形態で観察されるように, 動歩行による移動は本質的に運動が連続的であり, また, 移動時の慣性力を有効に活かせるため, 移動効率が良く移動速度の高速化が図れる。

図 2 動歩行の脚先端軌跡の比較

表 3 実証機仕様

	仕 様
1. 体 形 寸 法	- 幅 700mm - 長さ 1,200mm - 高さ 1,730~2,000mm (可変) 750kg (実測値)
2. 移動機能	・形 式 ・移動速度 (最大) ・通路最小幅 ・階段昇降 ・またぎ越し ・くぐり抜け ・脚駆動電源容量
3. 作業機能	・形 式 ・負荷能力
4. 視覚機能	・雲台 (カメラ台数) ・方 式
5. 通信機能	・光ファイバ
6. 電 源	・外部給電

図 3 移動計画のオンライン展開手順

基本的な歩容は、動物の歩行で顕著に現れ動的安定性に優れるものとして、2本の脚で機構を支えながら歩行するトロット歩行を採用した。動歩行の安定性には、歩行周期及び脚の着地衝撃が影響する。

油圧駆動型4脚歩行機構を用いた実験の結果、歩行周期は次式に示すように、脚の振子運動の固有周期に基づいて決めるのが有効であることを確認した。

$$T < \frac{1}{2}(2\pi\sqrt{L/g})$$

ここで、 T : 歩行周期、 L : 脚長

4脚歩行では歩行に伴い機構全体が揺動するが、脚に過渡の着地衝撃が加わると揺動が拡大されて歩行が不安定になる場合がある。そこで、脚の着地時の脚先端と歩行面の間の相対速度を最小にすることによって着地衝撃を低減する脚先端軌跡を開発した。図2にこれまでに開発した脚先端軌跡を示す。この内、合成サイクロイド軌跡は着地時の脚先端と歩行面の相対速度を鉛直方向、水平方向ともに0とすることができる。歩行実験により、

着地衝撃の低減効果と歩行の安定性を確認した。平地直進速度は2.6 km/hを実現することができた。

2.2 知能型運動制御⁴⁾

4脚機構が自律的に移動するための制御系として、知能型運動制御システムを構成した。このシステムは移動サブシステムの上位の全体行動指令部および視覚情報処理サブシステムとの情報交換を行いながら、4脚機構を誘導する。

具体的には、図3の手順に従い、全体行動指令部から入力された移動計画(始点S~終点A)を歩容、即ち、脚アクチュエータの時系列の関節角度波形($r_i(t)$)にオンラインで展開する。このオンライン展開には、視覚情報処理サブシステムが移動開始に先立って生成した移動用地図と移動中に連続的に提供する外界情景の特徴点情報を参照しながら、事前に4脚移動用データベースに格納した波形パターンの中から適切なパターンを選択して行うものである。

表 4 制御装置の機能概要

No.	装置名称	主 機 能
1	知能型運動制御装置	1) 上位計算機から現在位置と目的地が与えられると、移動計画を立案し、歩行制御装置に歩行シーケンスNo.を出力する。 2) 移動中、視覚装置からのビデオ信号を用いて視覚ナビゲーションを行い、歩行制御装置に歩行シーケンスNo.を出力する。
2	歩行制御装置	1) 知能型運動制御装置から歩行シーケンスNo.が与えられると、脚制御装置に該当する関節角度指令（歩行シーケンスデータ）を出力する。 2) ターミナルのキーボードから歩行シーケンスNo.が与えられると、脚制御装置に該当する関節角度指令（歩行シーケンスデータ）を出力する。
3	脚制御装置	歩行制御装置からの関節角度指令に従い、12関節の位置決めサーボ制御を行う。アクチュエータ駆動装置からは位置帰還信号を受け取り、速度指令信号を出力する。

3. 実 証 機

3.1 目標仕様と課題

要素技術の評価において、システム化の適合性検討に必要なものを主体に実証機を構成することにし、実証機の目標仕様は表3のように決定した。視覚情報処理サブシステム、マニピュレーションサブシステムなどのペイロードを270 kgとし、総重量を800 kg以下に設定した4脚歩行ロボットである。

4脚移動技術の要素技術開発として、4脚機構の評価研究、および歩行技術に関する研究を行ってきたが、実証機仕様を達成するためには、要素技術を更に発展させる必要があった。そのためには、特に下記の3つの課題が重要である。

- ① 軽量化設計：要素技術の外挿では高重量になるために脚自重の更なる軽量化。
- ② 耐ノイズ性：アクチュエータを油圧から電動に変えることに対するノイズ対策。
- ③ 歩容の検討：実証機にあわせた歩容（約100種類）の作成と検証、ならびに歩行速度の向上。

3.2 移動サブシステムの構築

実証機は、要素技術の結合が容易なように、サブシステムの構成とした。これは、オペレータがロボットに対して各種の作業や移動の指示を行なう全体行動指令部、視覚情報サブシステム、マニピュレーションサブシステム、および移動サブシステムからなる。さらに、移動サブシステムは、全体行動指令部に近い順に機能を分割し、知能型運動制御装置、歩行制御装置、脚制御装置、アクチュエータ駆動装置、および4脚機構の構成にした。各装置の機能概要を表4に示す。歩行は、歩行制御装置から、12関節の時系列の関節角度指令シーケンスデータを脚制御装置に出力することによって行なう。

ロボットのペイロードの制限と制御性の観点から、脚

図 4 実証機の概略図

制御装置およびアクチュエータ駆動装置は、4脚機構に搭載し、地上に設置した残りの制御装置との情報伝送は光ファイバケーブルで行なう構成にした。この構成により、4脚機構は自律的に歩行することができる。また、遠隔操作によっても、姿勢や位置合せができる。

(1) 軽量化設計

4脚機構の詳細設計結果を図4（側面図）に示す。4脚機構は、ペイロードを搭載する胴体と4本の脚とから構成される。脚は腰横振り関節、腰縦振り関節および膝関節の3つの駆動関節と足首関節（前後、左右、ねじりの3自由度のフリージョイント）とから構成される。関節内部に組込む電動アクチュエータは、本プロジェクトの一つの実施テーマで開発された高性能品を用いた⁵⁾。これは、同一容量の市販品に対し、自重は約10分の1のものである。

胴体は軽量化のため、素材として薄板チタンを使用した。また、構造的、強度的な評価として有限要素法を用いた構造解析も行った。マニピュレータを胴体に固定するためのマニピュレータ取付ベースは強度と仕上がり精度とが要求されるため、胴体と一体構造とした。

関節の基本的な構造は、機構の単純化、開発効率などのために、腰横関節、腰縦関節及び膝関節とも同じにした。関節構造の決定に当っては、それぞれの関節に作用する荷重条件の決定が必要となる。そこで、関節の動作範囲で発生し得る全ての荷重を評価し、それぞれの関節毎に一時的に作用する最大荷重とを評価し、これらを設計条件として決定した。関節の詳細設計に当って特に考慮した点を以下に示す。

- ① 関節軸受の片側をアクチュエータの軸受と兼用す

写真2 実証機の外観

ることにより、小形軽量化を図った。

② 荷重条件の厳しい腰横関節ケーシングにチタン合金を、他の部分は高張力アルミニウム合金を採用した。

③ 関節部材は軽量化のために一体削り出し構造にした。

④ アクチュエータの確実なトルク伝達のためにボルトーピン結合にした。

関節の強度評価は前記設計条件に基づいて実施した。関節シャフト部の肉厚は、強度解析により、負荷の小さな腰縦関節および膝関節を4mmに、腰横関節のそれを9mmとし、全体として小型軽量化を図った。関節の直径は、腰横関節が250mm、腰縦関節及び膝関節が235mmである。

足首関節は軽量化を目的とし、足底の安定化のために、アクチュエータの代わりに油圧ダッシュポットを装着した。

4脚機構には安定な歩行のために下記の各種センサを設けている。これらのセンサは、狭いスペースに実装できる光ファイバ型を採用した。

- ① 胴体周囲障害物センサ（胴体上面）
- ② 足底接地センサ（足首部）
- ③ 足先前方壁面センサ（足首部）
- ④ 足底下方床面センサ（足首部）

完成した外観は4脚機構の**写真2**のようである。この主要仕様は、

- ① 寸法：W 700×L 1200×H 1210
- ② 自重：530 kg
- ③ 脚長：810 mm

(2) 耐ノイズ性

脚制御装置は、4脚機構に搭載するために小型軽量化が要求され、今回新たに開発した専用ボードを使用している。この設計条件は、振動3G、衝撃10G、周囲温度

(a) 堰の跨ぎ越し (b) 配管の跨ぎ越し
写真3 実証実験状況

0~55℃と設定した。

脚制御装置は12関節のサーボ制御を行う主演算部と、歩行制御装置及びセンサ部との通信を行う総括伝送部とで構成した。この設計、製作には耐ノイズ性のために十分な注意をはらった。その主な対策として下記を実施した。

① 脚制御装置とアクチュエータ駆動装置を接続するインタフェースケーブルのシグナルグラウンドを強化。

② 制御信号の伝送は光ファイバを使用。

③ ロボットへの給電ケーブルおよびアース線をサブシステム毎に独立に配線。

(3) 歩容の検討

要素技術で開発した歩容（表2）を実証機の寸法に合わせて作成した。

平地静歩行の速度は、アクチュエータ回転数、4脚の寸法、歩行時の重心移動量、足上げ高さなどで決まる。シミュレーション結果によって、足上げ高さが脚長の20%（16cm）の場合、歩行速度は100m/hがえられた。これを向上させるために、重心の移動を脚の移動中に同時に行なうシーケンスに改良するとともに、4脚機構の位置決め精度や足首の追従の安定性を実験的に確認しながら足上げ高さを脚長の10%（8cm）程度まで変更した。実験では、速度214m/hを達成することができた。

3.3 実証実験

原子力プラントを模擬した環境内での実験により、指定地点への移動、オーバーフリッジの昇降、床上障害物の跨ぎ越え、マニピュレータと協調してのドアの通過等を組み合わせながらの自律的な移動が可能であることを実証した。**写真3**に代表的な歩行実験の状況を示す。上位の全体行動指令部から、現在位置と目的地が指示されただけで、自律的に移動できることが確認できた。このダイナミックな展開により達成した4脚移動機構の誘導精度は±2cmであり、通常歩行に支障のない結果がえ

られた。

☆ ☆

実証機の4脚移動システムを完成し、実証機の目標仕様を達成させることができた。このような実証実験により、近い将来の実用機の設計に有効なデータを得ることができた。この実用化のためには、さらに、小型・軽量化、柔軟な動作のための歩行パターンの自動生成、ロボット自体に異常が発生した場合の対応策向上、等の検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) S. Sugiyama et al., "Development of Ultrasonic Testing System for Nuclear Power Plant", 4th International Conf. on Nondestructive Evaluation in Nuclear Industry, pp.117-124, May 1981.
- 2) M. Sasaki et al., "Remote-automated Inspection and Maintenance of Nuclear Power Plant Equipment", Hitachi Review, Vol.33, No.6, pp.295-298, 1984.
- 3) 藤江, 他, "移動ロボット研究における動物観察の効果", 日本産業技術振興協会, 1月号, 1991.
- 4) 亀島, 他, "再帰型画像処理機構を用いた移動ロボットの視覚誘導", 日本ロボット学会誌, No.5, pp.343-350, 1987.
- 5) Y. Hachisuka et al., "Compact and High Torque Actuator for Locomotion Robot", '91 International Symposium on Advanced Robot Technology, Mar., 1991.

杉山 栄 (Sakae SUGIYAMA)

昭和 35 年茨城県立日立工業高校卒業、(株)日立製作所 日立研究所に入所。38年日立茨城工業専門学院電気工学科修了。38年から1年間、東京工業大学制御工学科学研究生。原子力プラント制御、機器診断などの研究開発を経て、現在、原子力プラントなどの分野のロボット開発に従事。(株)日立製作所日立工場主任技師。計測制御学会、日本原子力学会、火力原子力協会の会員 (日本ロボット学会正会員)