

締固め計測ロボットの開発

三井建設㈱	梅園輝彦	三井建設㈱	中川良文
三井建設㈱	高田知典	三井建設㈱	桜井 浩
建設省土木研究所	嶋津晃臣	建設省東北地方建設局	見波 潔

1. はじめに

近年、建設工事の安全性の向上、効率化、省力化、品質・精度の向上といった点から、建設技術の高度化が強く望まれている。とりわけ、施工作業の自動化・ロボット化あるいはシステム化にける期待には大きなものがある。本研究では、このような背景を踏まえて、フィルダムや道路建設における締固め作業について、締固め程度の自動計測システムの開発に取り組み、ここに締固め計測ロボットを開発したので報告する。

なお、本ロボットの開発は建設省総合技術開発プロジェクト「エレクトロニクスを利用した建設技術高度化システムの開発」の中の建設省土木研究所を主管とした共同研究（昭和60年度～62年度）の一環として行ったものである。

2. 開発の方針

締固め計測ロボットの開発にあたっては、与えられた作業指示に従って締固め地盤上を走行しつつ、締固め程度の計測やロボット自身の位置計測などを連続的に、しかも自動的に行うロボットの開発を目標とした。

具体的には、

- ・締固め地盤上を傷つけることなく円滑に走行できる機能。
- ・締固め程度を非接触、非破壊で定量的に、しかも連続的に計測できる機能。
- ・広範囲で起伏のある作業領域を、指示どおり精度良く走行するための位置検出機能および姿勢制御機能。
- ・他の作業への障害や作業域外への逸走を防止する安全機能。
- ・ロボットの動作状況（位置や計測結果等）をリアルタイムで把握できる通信・表示機能。

といった各機能を合わせもった高度な計測ロボットの開発を目指した。

本稿では、ロボットの概要について簡単に触れた後、これらの機能のうちで最も重要かつユニークな考え方を取り入れている位置計測システムと締固め程度計測システムについて述べる。

3. 締固め計測ロボットの概要

締固め計測ロボットは、上述の要求機能に応じたかたちで主に7つのシステムから構成されている。これらのシステムについて概略説明すると次のとおりである。なお、ロボットの全容について図-1に、システム構成を図-2に、また性能諸元を表-1に示す。

①ロボット全体制御システム

与えられた作業指示に従って各システムを制御・統括し、ロボットを円滑に稼働させる頭脳部分である。Z80CPUをメインプロセッサとした



図-1 締固め計測ロボット

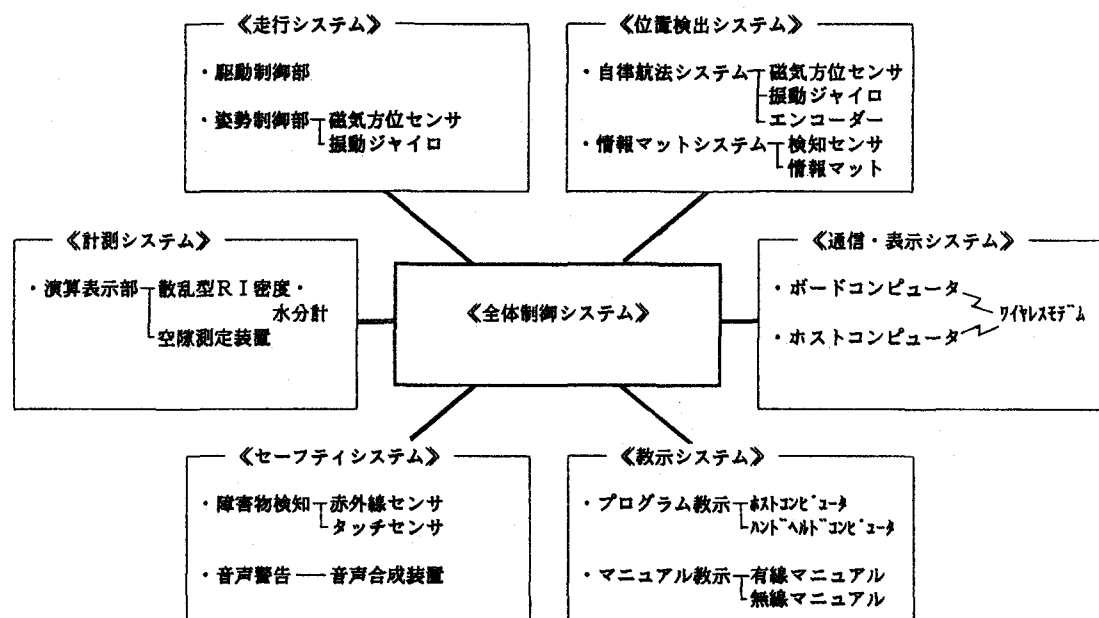


図-2 システム構成

表-1 ロボットの仕様

項 目	内 容	
自 重	150Kg	
最大積載重量	200Kg (バッテリー含む)	
走行速度	20m/min ± 5%	
走行機能	前・後進、左右スピンターン、左右操舵	
登板力	1/10 勾配 (150Kg 搭載時)	
電 源	バッテリー式	AC100Vケーブル式
	DC12V×2 50Ah	
制動距離	非常停止時	20~30mm
	走行停止時	260mm
非常停止機能	接触検知非常停止	
警告機能	音声による接近警告	
外形寸法	1400×1300×750mm	

ボードコンピュータにて構成している。

②走行システム

締固め地盤上での安定した2次元走行を可能とする足まわり機構、および駆動システム。ロボットは、中央部に左右1輪づつ配された駆動輪と前後4つの特殊構造のキャスターの合わせて6輪にて走行する。この機構によって、前・後進、左右操舵、左右スピンターンなどの自由度の高い走行が可能になるとともに、起伏のある地盤にも十分に対応でき、締固め地盤を傷つけることなく滑らかに安定した走行を行うことができる。

また、ロボットをまっすぐに直進させたり、望む方向に転回させたりといった姿勢制御は慣性センサの情報をもとにプログラムにて制御される。

③位置検出システム

ロボットが現在置かれている自分自身の位置を把握するためのシステム。本ロボットは、自律航法式に加えて、情報マットによる境界情報検知システムを併用することにより、フィールドにおける位置検出としては極めて良好な精度を確保している。詳細については後述する。

④散乱型R I 密度・水分計による計測システム

ロボットに搭載された散乱型R I 密度・水分計により、地盤の締固め程度（湿潤密度、水分量など）をロボットを停止させた状態、あるいは走行させた状態にてリアルタイムに、かつ非破壊・非接触で、連続的に計測するためのシステムである。詳細については後述する。

⑤通信・表示システム（図-3、図-4）

締固め程度の計測結果や、ロボットの現在位置等の情報をワイヤレスモデムを介してリアルタイムにホストコンピュータに通信するとともに、これらの情報をわかり易いかたちでモニター表示するためのシステムである。これにより管理者は、すみやかに締固め状況を把握し施工にフィードバックできる。

⑥教示システム

ロボットに対して、計測仕様や走行仕様を教示するためのシステム。管理者がその都度測定仕様に応じて適切かつ容易に指示・教示できるように、次の4種類の方法を用意している。

- ・マニュアル操作（有線マニュアル教示）。
- ・ホストコンピュータからの遠隔操作（無線マニュアル教示）。
- ・ホストコンピュータからのバッチ処理。
- ・ハンドヘルドコンピュータ（ロボット本体に搭載）からのバッチ処理。

⑦セーフティシステム

ロボットが走行することによって生じるおそれのある危険を未然に防止するためのシステム。これによって作業員の安全を確保するとともに、他の重機の妨げになることを防ぐ。加えて、ロボット自身の保護も行う。

このためのセンサとして、赤外線センサ（障害物非接触検知用）およびタッチセンサ（接触検知用）の2種類のセンサを搭載するとともに、音声応答装置により障害物の接近状態に応じて警告のためのアナウンスを発する機構となっている。さらに、状況に応じてはロボットを緊急停止させる制御も行う。

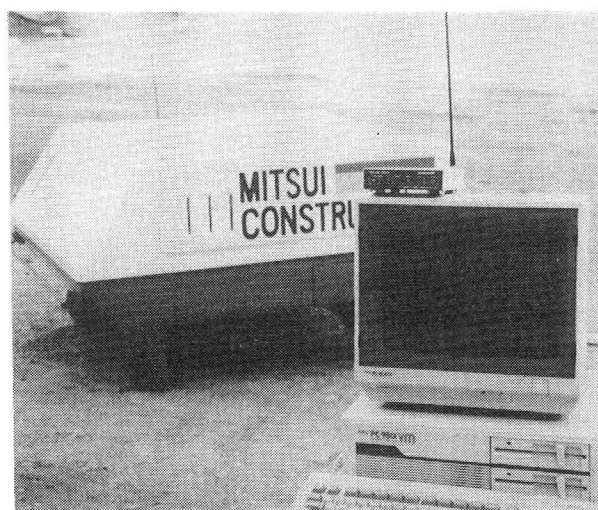


図-3 ホストコンピュータとワイヤレスシステム

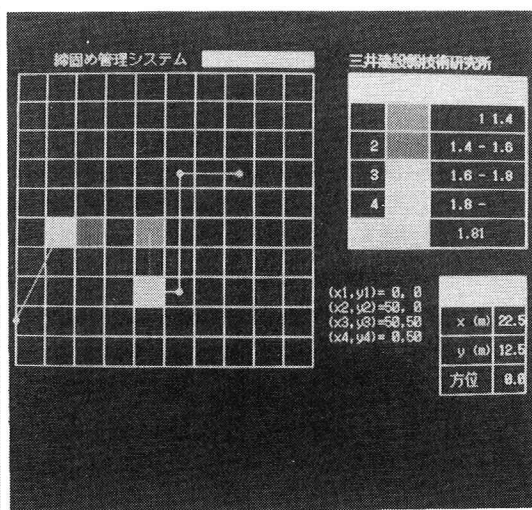


図-4 計測結果表示画面

4. 位置検出システムの開発

フィールド作業を対象とした建設用ロボットを開発する上で、最も重要な鍵を握るものの1つに、如何に精度の良い位置検出システムを構築できるかといった問題がある。本ロボットでは、計測作業領域の内にあるのは、搭載された慣性センサにより自分自身で走行した距離と方向を検知して現在位置を把握し（自律航法システム）、領域境界部にあるのは、敷設された情報マットから位置情報を教示されて現位置を把握する（情報マットシステム）といった2つの位置検出方法を併用することにより、常に位置精度を一定水準以上に保つといったまったく新しい考え方による位置検出システムを開発した。

このように、自律航法をベースに情報マットによる位置教示方法を併用したユニークかつ独創性の高い本システムは、建設フィールドを対象として考えた場合、現状のメカトロニクスの技術レベルから推し量って、極めて実用的で信頼性の高い位置検出システムといえる。

4. 1 自律航法システムによる位置検出

ロボット自身に搭載された距離センサと方向センサにより走行した距離と方向を検知し、これより自分自身の現位置（X、Y座標）を算出する方法を一般に自律航法と呼んでいる。具体的には、センサから得られた距離データと方向データから走行ベクトルを求め、この処理を単位時間ごとに繰り返し、順次走行ベクトルを合成することにより現位置を把握している。ただし、このために用いる慣性センサの種類、あるいは組合せ方法、計算ロジック等は、位置精度を高めるために各ロボットごとに工夫されており、ノウハウでもある。

本ロボットでは、次のようなセンサおよびロジックを用いている。なお、表-2に各センサの仕様を示す。

(1) 距離センサ

距離センサにはエンコーダを使用している。これは、回転角度に応じてパルスが出力される機構のもので、車軸に装着すれば車輪の回転数などを簡単に求めることができる。

本ロボットでは、左右駆動輪に連動して動作するように設置されており、ここから検知される回転数をマイコンにて処理し、走行した距離を算出している。構造的には、フィールドでの使用を対象とし、かつ足まわり付近に外付けで設置されることから防滴・防油構造となっている。

(2) 方向センサおよびロジック

方向センサとしては、磁気方位センサと振動ジャイロといった機構の異なる2つのセンサを併用している。これらのセンサには次のような特徴がある。

①磁気方位センサ（図-5）

リング状の鉄芯にコイルを巻いて外部磁界（地磁気）を検出するもので、磁界の強さに応じた電圧出力から磁界の方向を算出し、これより基準方向（例えばロボットの前進方向）との角

表-2 センサの仕様

項 目	磁気方位センサ	振動ジャイロ	距 離 計
検出情報	方 位	水平回転角	回転数
単 位	度	度	r p m
分解能	0.1°	0.1°	0.9cm
精 度	±1°	±1°	±90cm
その他	検出範囲 0~359°	検出範囲 -180~+180	

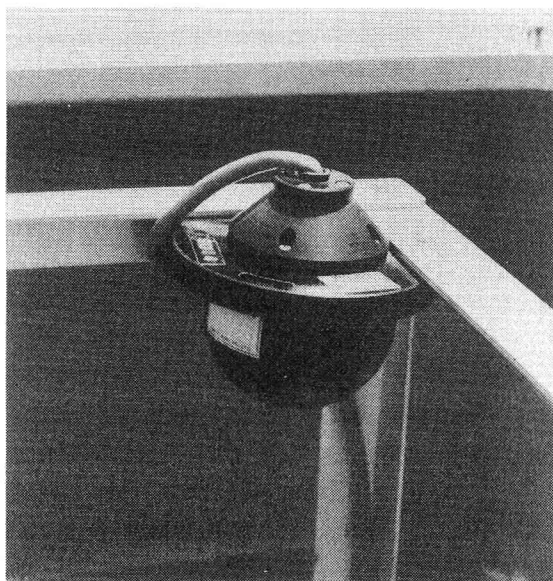


図-5 磁気方位センサ

度を検出する。

磁界の変化をもとに方向を導き出すため、磁性体の接近や高電圧の発生などといったセンサ周辺の地磁気に影響を与えるような要因からは、精度的にかなりの悪影響を受ける。しかし逆に、動揺や傾斜による誤差を防ぐために検出部が常に水平を保持するよう工夫されているため、走行中の姿勢や振動等の影響は受けにくい。

②振動ジャイロ（図-6）

「振動している物体に角速度が加わると、振動方向と垂直にコリオリの力が生ずる」という力学現象を利用した、回転体をもたない角速度センサである。得られる情報が角速度であるため、これを時間で積分して角度変化に変換して用いる。

角運動量を力学的に検出するため、振動やロボットの姿勢などの影響をそのまま角速度変化として検出してしまうという問題がある。逆に、

磁性体の接近などの地磁気の変化には何ら影響を受けない。また機構的に回転体をもたないため、ジャイロ特有の起動時間が長いといった問題もない。

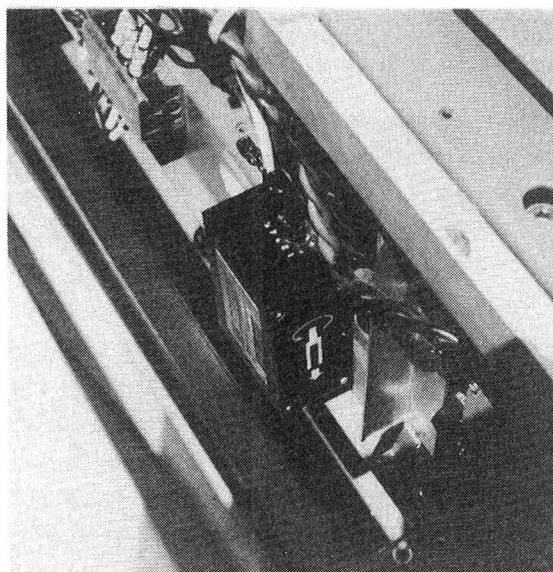


図-6 振動ジャイロ

このように、力学的ノイズ（振動やロボットの姿勢変化等）には影響を受けないが、電磁的ノイズ（磁性体の接近、高電圧の発生等）にはかなりの影響を受ける磁気方位センサと、その逆に電磁的ノイズには強いが、力学的ノイズには弱い振動ジャイロのそれぞれの特徴を利用して互いの短所を補い合うことにより、方向データの精度向上を目指したのが本自律航法システムの大きな特徴である。

2つのセンサを用いた方向検出のための基本的なロジックを簡単に述べると次のとおりである。

- ・各センサの検知する方向データを単位時間ごとに比較し、同一位相で変化する場合にはこれらの値の平均を方向データとする。位相が大きく異なる場合には、値の変動の小さなものを方向データとする。
- ・長い区間にわたって直進走行する場合には磁気方位センサから得られるデータに重みを置き、短時間に大きく回転運動を伴うような走行時には振動ジャイロからのデータに重みを置いた扱いとする。

なお、建設フィールドを対象とした使用環境、取扱状況から考えると各機器の故障は避けられない。これらのセンサは慣性センサの中でも安価な部類に入るため、万が一故障した場合にも比較的容易に代替できるといったメンテナンス面からのメリットもある。

4.2 情報マットシステムによる位置検出

本システムは、フィールドに敷設される情報マットと、これを検知するためにロボットに搭載される情報読み取り用センサから構成される位置検出システムである。

情報マットには識別パターンが含まれており、このパターンと敷設される地点の位置情報との関係はあらかじめロボットに入力されている。したがって走行中にこのパターンを検知・識別すれば、あらかじめ入力されている位置情報をもとに現位置を容易かつ確実に把握することができる。すなわち、情報マットはフィールドにおける一種のマーカーの役目を担っていると考えることができる。

しかし、マーカーであるが故に、作業領域全てにわたって敷設することは到底無理であり、走行仕様に合わせて必要最小限の敷設により効果的に位置情報が教示できることが重要である。本ロボットシステムでは、計測領域の境界部に敷設することによって、

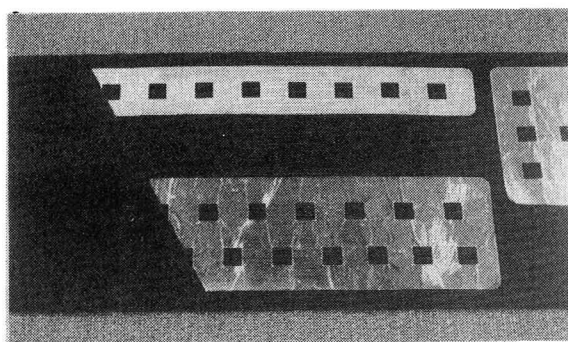


図-7 情報マットの構造

表-3 情報マットの仕様

長さ	32 m
幅	300 mm
情報量	40 バイト
1情報量当りの分解能	0.75 mm/バイト

- ・境界であることの情報
- ・境界上のどの位置にあたるかの情報

をロボットに教示している。情報マットおよび読み取り用センサの構造は次のとおりである。

(1) 情報マット

マット内部に金属箔を含み、これを保護するためにゴムでシールドしたものである(図-7)。金属箔は極めて薄いものであり、情報に応じたパターンを形成する。パターンはすべて異なる形をしており、これを識別することで情報を検知できる。今回使用した情報マットの仕様を表-3に示す。

(2) 読み取りセンサ

情報マットから金属箔のパターンを読み取るためのセンサとして、電磁近接センサを用いている。このセンサは非接触で磁性体を検知することができ、今回用いているものについてはおよそ 100mm以内の範囲であれば十分検知することができる。本システムでは、情報マットを走行中に読み取る必要があること、マットが敷設されている地盤に不陸ることなどから、センサを複数配して読み取り精度を高めている。読み取られた情報は、搭載しているマイコンによりパターンとの識別が行われ、位置情報に変換される。

なお、電磁近接センサは耐環境性(熱・温・湿度、ほこり、直射日光など)にも優れたセンサであり、出力される信号の処理も比較的容易で、価格の面でも安価であるといった利点をもつ。

ここで、情報マットシステムの特徴をまとめると次のようになる。

- ・最小読み取り単位長さ(分解能)は、使用するマット幅と検知距離により任意で設定できる。
- ・耐候性に優れ、水中、地中でも使える。
- ・メンテナンスフリーであり、耐久性に優れている。
- ・漏電やなノイズなどがなく、他機器への影響がない。
- ・締固め工事サイトで各種作業機械(ブルドーザー、ローラーなど)の作業を妨げない。
- ・各種作業機械の通過等に伴う振動、粉塵などに影響されない。

このように、情報マットシステムは極めてユニークな特徴をもつ情報伝達手段であり、位置検出以外にも様々な建設現場にて幅広く応用できるシステムと考える。さらに、計測領域の境界部に情報マットを敷設することにより、ロボットの領域外への逸走防止はもちろんのこと、作業員の計測領域内への不必要な進入を未然に防ぐこともできる。

5. 締固め程度計測システムの開発

(1) 概要

締固め施工の自動化・効率化を計るためには、施工中に締固め程度を迅速かつ連続的に測定し、その情報を締固め作業にフィードバックさせるシステムが必要である。そのために、次に示すような条件を設定し、

これらの条件を満足するような締固め程度の計測システムの開発を行った。

- ・迅速かつ定量的な測定が可能で、測定結果は施工管理上十分な精度をもつこと
- ・所定のエリアを連続的に移動して測定できること
- ・非破壊検査であること

締固め度を迅速かつ定量的に測定する方法としてR Iを利用した方法があるが、現在普及している表面透過型R I密度・水分計のように線源棒を打ち込む方法では、連続移動測定は不可能であり、厳密な意味での非破壊検査とも言えない。一方、表面散乱型のR I密度・水分計は、連続移動測定や非破壊検査といった条件には適合するものの、従来の研究（建設省土木研究所資料第434号・第580号）で測定精度に多くの問題点が指摘され、広く実用化されるには至らなかった。

今回開発した散乱型R I密度・水分計（図-8）は、散乱型の特徴を十分に生かした上で、計器の構成や、データ解析方法に最新の技術を応用し、測定精度を向上させたものがある。図-9に散乱型R I法による測定原理の概要を示す。

（2）特長および仕様

①測定範囲（深度方向）

従来の研究（土木研究所第434号、第580号）では、測定範囲が表面ないしは、非常に浅い部分に偏っており、施工管理上、適切な深度までの測定範囲を得る必要がある。そのために、本計器では計器の構成やエネルギー分別などの解析法の検討を行い、実際の締固め土の場合で15～20cmの深さまでの測定を可能とした。

②較正式

本計器では、連続移動測定を行うことを目的としているため、計器と地盤との間の空隙量の変化を考慮した較正式を求める必要がある。そこで、本計器では空隙と湿潤密度、空隙と水分密度の交互作用を含んだ次のようなモデル式を設定し、回帰分析を行った。

$$\text{モデル式：} R = a + bG + c\rho + dG\rho$$

目的変数：R（計数比）

説明変数： ρ （湿潤密度、水分密度 g/cm^3 ）

G（空隙 cm）

この結果、次のような較正式を得た。



図-8 散乱型R I密度・水分計（ロボット搭載時）

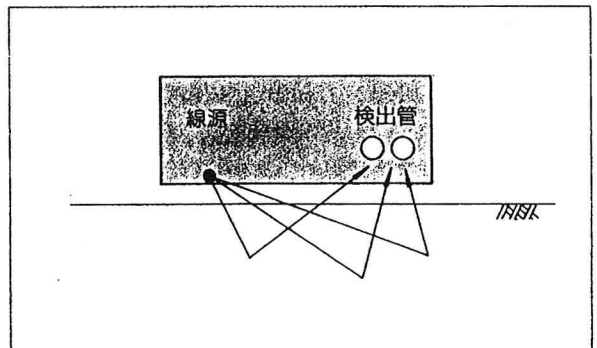


図-9 散乱型R I法の原理

表-4 散乱型R I密度・水分計の仕様

項 目		内 容
測定方法	密 度	ガンマ線散乱型
	水 分	熱中性子散乱型
測定範囲	湿潤密度	1.00~2.50 t/m
	水 分	0.05~0.90 t/m
測 定 時 間		15秒以上 (秒単位任意)
線 源	ガンマ線	2.3MBq (70 μ Ci) Co-60
	熱中性子	1.1MBq (30 μ Ci) Cf-252
外 部 出 力		16ビットパラレルI/F
測 定 指 示 方 法		外部信号指令 パネル操作
そ の 他		測定面との空隙測定機能

湿潤密度の較正式 : (相関係数=0.976)

$$R_g = (1.834 + 0.065G) - (0.520 - 0.070G) \times \rho_t$$

水分密度の較正式 : (相関係数=0.996)

$$R_n = (0.118 - 0.015G) + (1.730 - 0.261G) \times \rho_m$$

このように、本計器では「較正式中に空隙の影響を取り込む」ことにより、原理的には空隙に起因する誤差をなくすることができ、連続移動計測を可能とした。

③仕様

散乱型R I密度・水分型の仕様をまとめると表-4のとおりである。

6. まとめと今後への課題

本ロボットは、フィールドでの計測を目的とした我国初の自動走行計測ロボットである。本ロボットの開発により得られた位置計測、締固め程度の計測等の各技術は、建設用ロボットの開発をはじめ今後様々な分野への応用が考えられる。

特に位置計測システムについては、一般にFA用搬送ロボットによく見られる自律航法システムに加え、情報マットという一種のマーカーをフィールドに設置するといった新しい考え方により、建設用ロボットの開発において問題とされるフィールドにおける無人走行のための位置検出として、極めて実用的な1方法を提案することができた。

また、締固め程度の測定システムについては、従来の散乱型R I法について機器構成、解析手法といったハード、ソフト両面からの見直しにより、測定範囲(深度)を20cm程度に拡大できたとともに、計器底面と地盤との空隙による誤差を取り除くことができ、従来法で指摘された問題点をクリアして非接触、非破壊、連続的な締固め程度の計測方法として十分実用に耐えうる測定法を開発できた。

最後に、システムの高度化を図る上での開発課題を列挙すると概ね以下の点があげられる。

- ・凹凸、軟弱、傾斜地盤などの悪路走行機能の開発
- ・位置計測精度の向上
- ・計測仕様(頻度、時間など)の選択や、計測結果の判定などの建設用ロボットAIシステムの開発。
- ・CPUの高速化、メモリの容量増加による制御、通信の高速化。
- ・R I計測技術の応用手法、応用分野の検討

今後はこれらの機能の充実を図り、実工事への適用、実用化を目指したいと考えている。

《参考文献》

- 梅園輝彦 他: 締固め計測ロボット、第5回国際建設用ロボットシンポジウム講演集、1988
(社)日本産業用ロボット工業会: 特集-建設・鉱業ロボット、ロボット第58号、1987.6