



ロボット運動の異常動作判別に関する研究*

神谷好承** 青柳誠司** 岡部佐規一**

A Study on Fault Diagnosis of Robot Motion

Yoshitsugu KAMIYA, Seiji AOYAGI and Sakiichi OKABE

Fault diagnostic technique of the industrial robot will be greatly needed in the various automatic systems. When the robot moves irregularly, it must be generally done that the movement of robot should be stopped as soon as possible as one of the safety factor. In this study, one fault diagnostic technique of robot motion is proposed to resolve the above mentioned problem. It is the proposed technique in this study that the small vibration of robot arm that is caused by the operation of robot is always been monitoring and the decision whether the robot moves regularly or irregularly is done statistically compared with the regular small vibration of robot arm. Due to the experimental results of fault diagnosis of robot motion, it is found that χ^2 inference technique about the amplitude distribution of small vibration is good fault diagnostic technique of robot motion.

Key words: dynamics of robot, fault diagnosis, monitoring of small vibration, amplitude distribution, χ^2 test for goodness of fit

1. 序 論

ロボットが異常と思われる動作をしたとき、ロボット運動を直ちに止めるといった機能は無人工工場等におけるロボット使用上の一つの安全策として最近特に要求されるようになってきている。こうした要求に対して本研究ではロボットの運動時にアームに発生する微小振動を常時モニタし、モニタしたアームの振動状況からロボット運動の正常と異常の区別を行おうとするものである。アーム系に発生する微小振動はロボット自身の運動そのものの影響を受け、例えばロボットの暴走、一部アームの故障による動作不能、ならびにロボットの周辺環境との干渉などといった異常な動作はすべて運動中のアーム系の微小振動にその影響を及ぼすものと思われる。こうした状況下では直ちにロボット運動を停止させることがとりあえず求められるが、現実には繰返し動作中のロボット運動における微小振動は毎回多少のばらつきを含む。このため繰返し動作時の微小振動は毎回よく似てはいるが全く同じであることはなく、これより現在運動中のその運動を正常と判断してよいのかあるいは異常と判断すべきなのかといった判断基準と、その判断を行うための信号処理方法が最大の関心事となってくる。

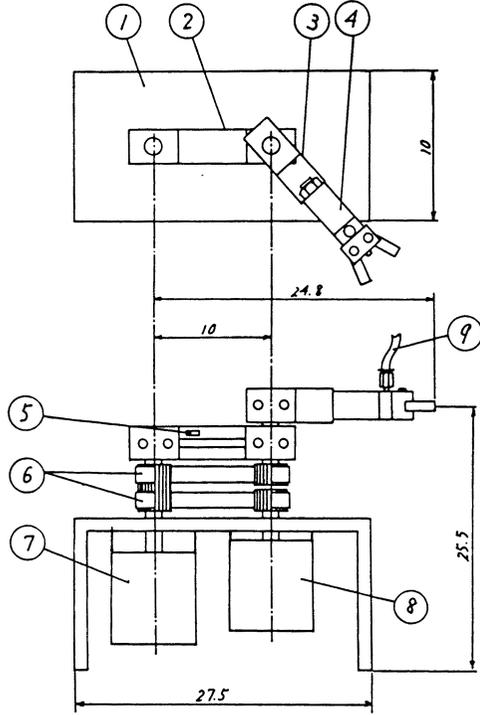
これまでも振動による設備診断技術^{1)~3)}の一つとしてFFT等による周波数分析手法例もあるが、ロボット運動においては系が非線形系であると同時に加減速を伴うためアームに発生する微小振動は非定常過程となり、必ずしも適切な信号処理方法であるとはいえない。これより本研究ではもっと簡単に波形を直接比較する方法として、ロボット運動中にサンプリングされる振動波形の振幅分布を得て、次に正常な運動をしているとしたときの振幅分布との間で χ^2 適合度検定を行い、その結果に基づいて正常と異常の判断を行うことを提案する。そして、ここでは簡単なロボットを用いることにより、本研究で提案する信号処理方法の有効性について検討した結果について述べる。

2. ロボット運動中における微小振動例

本研究では図1に示すような2つの自由度をもつ水平多関節型ロボットアーム系を試作し、平行ばねで構成されている第1アームにひずみゲージを取り付け、アーム系の動的な微小振動をモニタリングした。それぞれのアームの駆動にはステップモータを用いている。第1アームの固有振動数はアーム系の姿勢により変化し、その固有振動数の変化の範囲は約7.5~12 Hzである⁴⁾。一方、第2アームの振動をモニタすることも考えられるが、本研究の目的とすることに対して第1アームの振動をモニタすることと基本的に等価

* 原稿受付 平成3年7月19日

** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

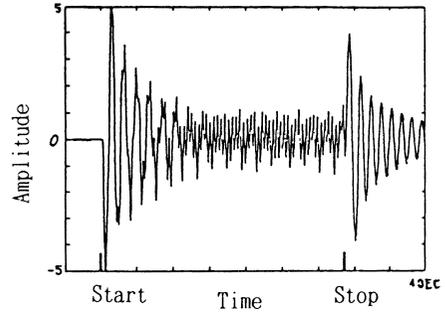


① Frame base ② Arm I ③ Arm II ④ Robot hand
⑤ Strain gauge ⑥ Tooth belt ⑦ Stepping motor for arm I ⑧ Stepping motor for arm II ⑨ Air supplying tube

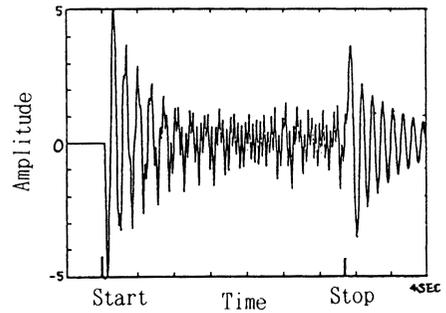
Fig. 1 Experimental robot arm with two degrees of freedom

であるため、ここでは第1アームの振動のモニタによりロボット運動の正常と異常の判断を行うこととした。図1に示すようなロボットはロボットとして最も基本的なモデルであり、そのもつ自由度は少ないが、2つの自由度をもてばロボットとしての基本的な動作は可能であり、またロボットのもつ振動問題とその応用に関する基本的な考え方は明らかになるものと思われる。

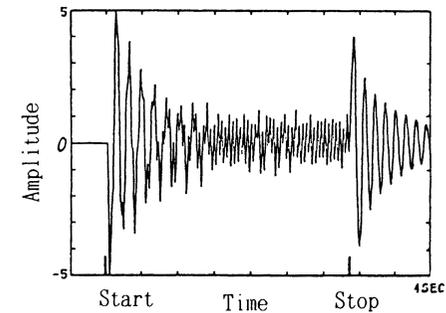
同じ初期姿勢から運動を開始し、同じ終端姿勢に至るロボット運動の3回の繰返し動作時における第1アームの微小振動波形例を図2に示す。これらの微小振動波形例は非常によく似てはいるが全く同じではない。これらの動作はロボット運動としては正常とみなしたい範囲であるため、微小振動の再現性には装置固有のある程度のばらつきを許容することが必要であることがわかる。これより、ロボット運動の正常と異常の判断にある幅を考慮に入れることのできる信号の処理方法についての検討が重要になってくることがわか



(a) Small vibration at the first time



(b) Small vibration at the second time



(c) Small vibration at the third time

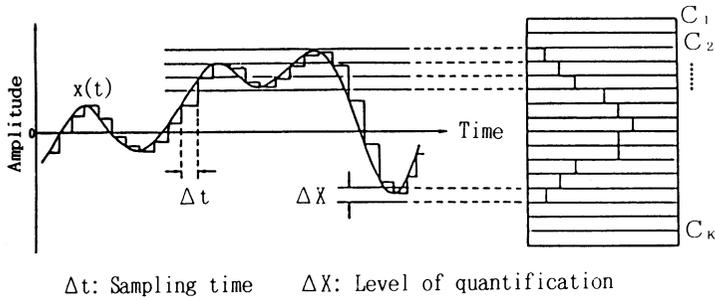
Fig. 2 Examples of small vibration at the repeated operation

る。

3. 信号処理方法に関する検討

3.1 信号処理方法の選択

本研究のようなロボット運動の異常検出ではオンラインで信号を処理し、即座に正常か異常かを判断し、異常と判断されたときには大事に至る前にロボット運動を停止させなければならない。このためその信号処理方法についてはアルゴリズムが簡単であり、その計算にはあまり時間を要さない、と同時にロボット運動の毎回の微小振動には多少のばらつきが含まれるため



Δt: Sampling time ΔX: Level of quantification

Fig. 3 Wave form of vibration and its histogram of the amplitude distribution

正常と異常の判断にはあるはばを持たせられることが必要である。また図2の微小振動例にも見られるように、ロボット運動は加減速を含むため微小振動波形には定常性が成り立たない。他方、区分的に定常性を仮定し、FFT等の周波数分析によりロボット運動の正常と異常の判断をすることも考えられるが、周波数分析の計算を含め正常と異常の判断をあるはばを持たせて小型計算機中でオンライン処理することは大変である。またこの時の周波数分析結果はステッピングモータの駆動周波数が基本となり、ロボットハンドのもつ質量(ワーク)の変化といったアーム系の状態変化には鈍感であることが予想される。これより、もっと単純に波形を直接比較できないかという観点で考えていくことにした。その結果、本研究では正常な運動時にあらかじめ得てある微小振動の振幅分布とロボット運動中に得られる微小振動波形の振幅分布を区分的に比較することにした。そしてこの比較には χ^2 適合度検定を用いることとし、この結果に基づいてロボット動作の正常と異常の判断を行うことを一つの異常検出方法として提案することにする。

3.2 微小振動の振幅分布

図3に一例としての振動波形とその時の振幅分布のヒストグラムを示す。こうした振幅分布のヒストグラムにおいてはそのパラメータとしてサンプリング間隔 Δt とデータのクラス分けのための量子化レベル C_i が存在する。この時サンプリング間隔 Δt については基本的には通常用いられているサンプリング定理に基づくものとし、そして量子化レベル C_i については、そのとり方により検出精度にも影響してくるが、ほぼ微小振動振幅が十数クラス程度にクラス分けできるような量子化レベルを設定するものとする。また異常検出の判断に即時性を持たせるために微小振動の数周期分を一つのまとまりとし、逐次区分的に振幅分布の比較を行っていくものとする。こうした振幅分布のヒストグラムはある一定時間内の微小振動の平均的性質

を表しているものとみなせる。

3.3 χ^2 の適合度検定

以上のようなパラメータ設定に基づき、ある一定時間間隔での振動波形の振幅分布のヒストグラムを逐次比較していく。このとき、ヒストグラムにおいてあるクラス C_i に入る度数を、基準となる正常時では N_i (期待度数)、観測時では F_i (観測度数)とし、これら2組の値のくいちがいを表す統計量を

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_i - N_i)^2}{N_i} \quad (1)$$

とすれば、これは近似的に自由度 $k-1$ の χ^2 分布に従うことがわかっており、この性質を利用してロボット運動の状態に関する仮説

仮説 H_0 ; ロボット運動の状態は正常である。

仮説 H_1 ; ロボット運動の状態は異常である。

を検定することにする。ロボット運動の状態が正常(仮説 H_0)であれば χ^2 は相対的に小さな値となり、また異常(仮説 H_1)であれば χ^2 は相対的に大きな値になることが予想される。従って有意水準 α をある値に固定し、 $\epsilon = \chi_{k-1}^2(\alpha)$ なるしきい値 ϵ をとれば

$$\chi^2 < \epsilon \Rightarrow \text{正常} (H_0)$$

$$\chi^2 \geq \epsilon \Rightarrow \text{異常} (H_1)$$

のような決定則が採用できる。

ここで有意水準 α は微小振動の再現性に依存するものであり、ロボット固有の値ということになる。微小振動の再現性が非常に高いロボットでは有意水準 α は非常に大きくとれるため異常という判断の検出精度をそれだけ高くしうることになる。他方、微小振動の再現性が低いロボットでは有意水準 α をそれほど大きくすることはむずかしく、従って異常を検出する能力がそれだけ低下することになる。

本研究のように振動波形の振幅分布のヒストグラムを正常と異常の判断に用いれば正常としたい時の波形の多少のばらつきは波形の量子化と微小振動の数周期分を一つのまとまりとしてとった振幅分布のヒストグラムおよび検定時の有意水準 α により吸収できるものと思われる。本研究で提案するこうした方法は量子化されたデータをもとにヒストグラムを得、次に式(1)の計算だけで正常と異常の判断が可能であるため演算が非常に簡単であり、その処理時間も非常に短いといった特徴をもつ。ただし、正常な動作であるとする時のヒストグラムとロボット固有の有意水準 α があらかじめ得られていることが条件であり、このため

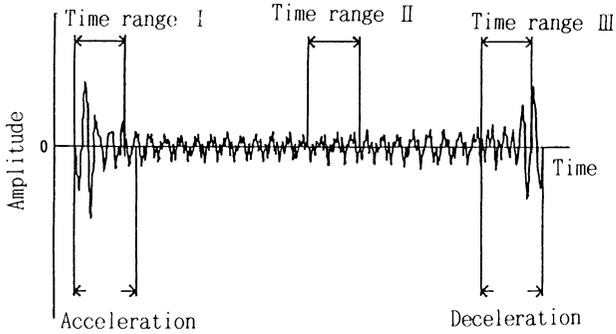


Fig. 4 Small vibration of the robot arm on one operation

本研究の手法はこうした判断が可能であるようなロボット運動としての単純繰返し作業に向く異常の診断技術であるといえる。しかし、ロボット運動のシミュレーションが完全に行われておれば計算機中でその運動に対する振幅分布のヒストグラムをあらかじめ得ておくことも可能であり、このとき本研究の適用範囲はロボットの単純繰返し作業だけではなくても期待される。

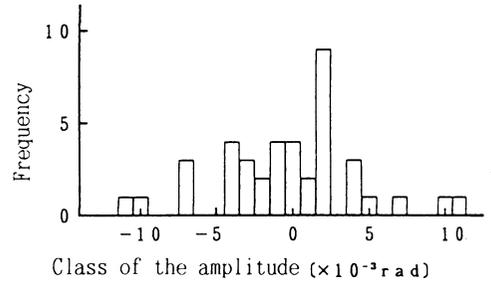
4. ロボット運動の異常動作判別例

図1に示すロボットのある初期姿勢から運動を開始し、ある終端姿勢に至るアーム系の加減速を伴う運動における第1アームの微小振動例を図4に、またその時の振幅分布のヒストグラムの一部を図5に示す。図5(a)は加速区間、(b)は定常速度区間、(c)は減速区間におけるそれぞれの振幅分布のヒストグラムである。

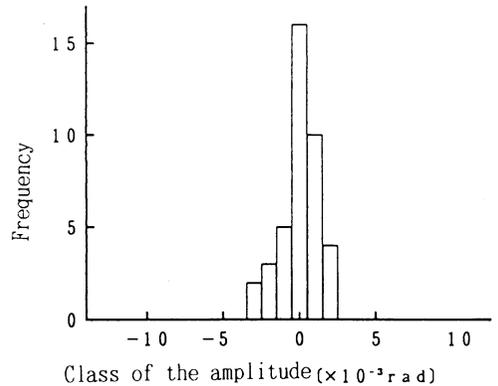
これよりまず本研究ではロボット固有の有意水準 α をまず決定する必要がある。これは図4に示される微小振動を発生させたと同じ動作を繰り返して行い、その時に発生した微小振動のもつばらつきにより異常と判断しないように有意水準 α を決定することである。本研究で使用したロボットについては有意水準として $\alpha=0.01, 0.05, 0.1$ の3種類を与え、それぞれについて50回のロボット運動の異常診断を行った結果、いずれの有意水準においてもロボットが正常な運動をしたという判断を正しく行うことが確認された。

以上の準備をもとに本研究では図4に示す振動波形の振幅分布のヒストグラムを正常な運動時におけるヒストグラムとし、種々の異常状態における振幅分布のヒストグラムを比較し、 χ^2 の適合度検定により異常であると正しく判断できるかどうかを検討することにする。

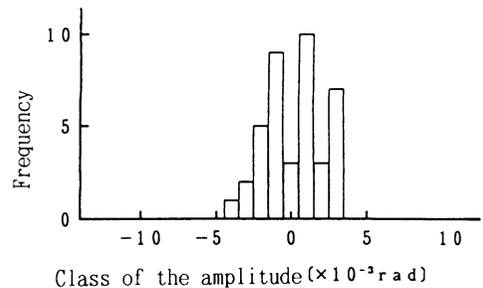
図6は図4のときと同じ条件でかつ同じ初期姿勢で



(a) Histogram at time range I



(b) Histogram at time range II



(c) Histogram at time range III

Fig. 5 Histograms of the amplitude distribution

運動を開始したロボットがその定常速度区間において速度変化(ステップモータの駆動周波数を25 ppsから30 ppsに変化)を起こした場合の第1アームの微小振動である。速度変化を起こした部分の振幅分布は図7のようになり、図5(b)における振幅分布のヒストグラムとは明らかに異なっている。この場合の正常(期待度数)と異常(観測度数)との間で統計量 χ^2 (自由度3) を計算すれば $\chi^2=22.52$ となり、例えば有意水準 α を0.05としたときのしきい値 $\varepsilon=7.81$ と比較すればその結果は $\chi^2 \leq \varepsilon$ となり、このときのロ

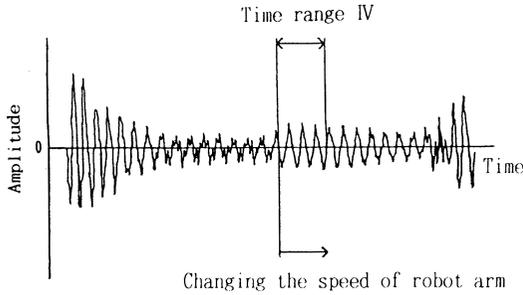


Fig. 6 Small vibration of the robot arm when changing the speed of robot arm

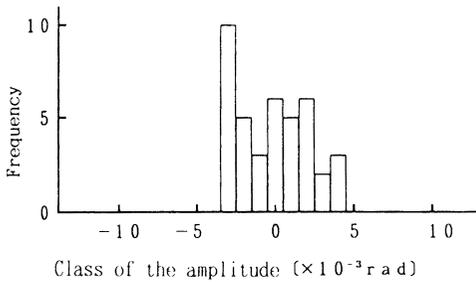


Fig. 7 Histogram of the amplitude distribution when changing the speed of robot (Time range IV)

ロボット運動は異常であると正しく判断してくれる。

図8は、ロボットが図4と同様の運動を開始したが、その途中で第2アームが運動しなくなったときの第1アームの微小振動である。この時の振動振幅のヒストグラムは図9のようになり、またこの場合における統計量 χ^2 (自由度3) は $\chi^2=30.65$ となり、このときのロボット運動は異常であると正しく判断してくれる。

また、図10と図11はロボットアーム系の周辺環境との干渉があった場合の第1アームの微小振動と振動振幅のヒストグラムである。この場合にも統計量 $\chi^2=31.32$ (自由度3) となりロボット運動の異常を正しく判断してくれる。

5. 考 察

運動時の微小振動にロボット固有のある程度のばらつきを許容しなければならないため、本研究のような統計的検定を用いた異常診断技術ではどの程度の異常まで正しく異常と判断してくれるかという異常の感度基準をはっきり決めることは一般的にはむずかしい。

他方、こうした点を考慮にいれ、ロボット運動の異常に対して非常に高い感度を持たせることを意図したとき、多くの正常な繰返し動作における微小振動の振幅分布のヒストグラム自身の χ^2 検定を行い、それら

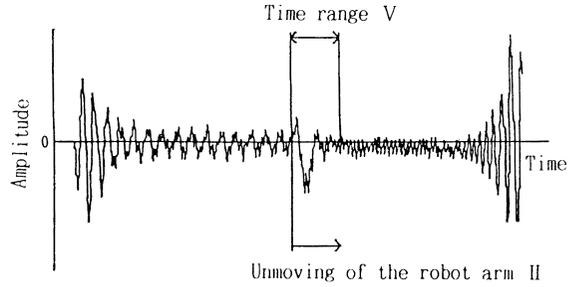


Fig. 8 Small vibration of the robot arm when unmoving of the robot arm II

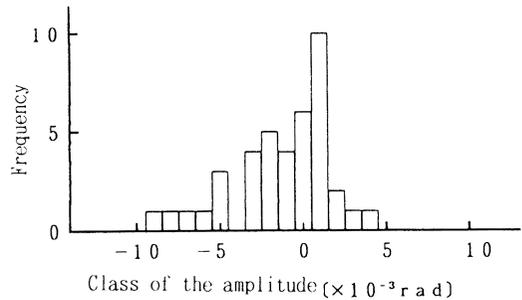


Fig. 9 Histogram of the amplitude distribution when unmoving of the robot arm II (Time range V)

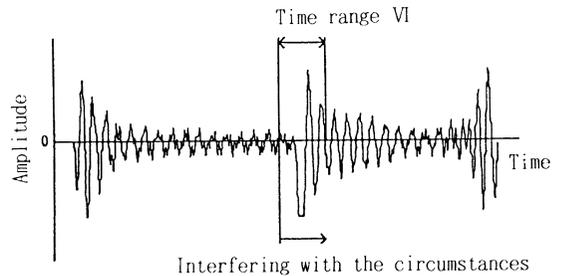


Fig. 10 Small vibration of the robot arm when interfering with the circumstances

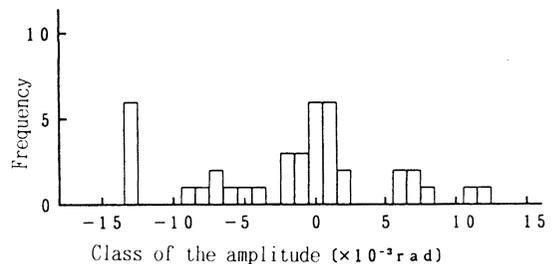


Fig. 11 Histogram of the amplitude distribution when interfering with the circumstances (Time range VI)

を異常としない限界値から有意水準を決めるのもその一つの方法であろうと考えられる。こうした考え方にに基づき正常な動作相互間の微小振動の統計量 χ^2 を計

算したとき $\chi^2=2.61$ (自由度 3) のような値が求まり、有意水準 α として $\alpha=0.45$ を採用すればロボット運動の異常に対し最も感度を高くしうる有意水準を決めることができるものと思われる。

ただし、このような有意水準を選べば正常と思われる運動であっても異常と判断する可能性はそれだけ多くなることも予想できる。またこれらの値はクラス分けの量子化レベルおよびヒストグラムの度数の高さにも影響を受けることは事実であり、このためこれらの値を設定した後の正常な繰り返し動作により異常診断に最も有効な有意水準を設定することになる。

6. 結 論

本研究ではロボット運動の異常動作判別に関してロボット運動中の微小振動をその情報源として利用することを提案した。この中で繰り返し動作中のロボット運動における微小振動は毎回多少のばらつきを含むため、微小振動の再現性に装置固有のある程度のばらつ

きを許容する信号の処理方法として振動波形の振幅分布のヒストグラムを χ^2 適合度検定する手法を提案し、その有効性について検討した。この結果いくつかのロボット運動の異常に対して正しく異常と判断できたことを示すことができた。

終わりに本研究の実験にご協力いただいた金沢大学工学部・濱憲一郎氏および野村久直氏に感謝致します。また本研究は平成 2 年度文部省科学研究費補助金 (試験研究 (B)) の交付を受けて行ったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 中溝高好, 秋月影雄, 添田 喬: システムの統計的故障検知法, 計測と制御, 18, 6 (1979) 471.
- 2) 中溝高好: 信号処理と故障診断法, システムと制御, 29, 4 (1985) 232.
- 3) 荻野敬迪, 犬島 浩, 秋月影雄: 統計的手法を用いた異常診断の適用例, システムと制御, 24, 11 (1980) 710.
- 4) 神谷好承, 岡部佐規一, 横山恭男, 小林 透: 振動解析によるロボット運動のオンライン状態分析に関する研究, 精密工学会誌, 54, 11 (1988) 2188.

編集後記

最近の科学技術, 産業の発展において, 超 LSI のような小さなものに対するナノテクノロジー技術ばかりでなく, 大型の構造物やロボットなどのような大きなものに対しても, 高精度化, 構造の複雑化が要求されています。このために, 大きな寸法を高精度・高能率で測定する技術が重要となってきています。しかし, ナノテクノロジーに対して大寸法に対する技術はその体系化が遅れ, 技術が散発的に開発されていて, 大きな流れになっていません。

最初の「大寸法測定技術の課題と展望」で, 大園先生も述べられているように, 大寸法技術での最大の問題点は技術が個々の分野の固有技術の範囲を出ていないことだと考えられます。私たちが大寸法技術の研究会を組織したり, このような学会の特集号を企画したのも, この問題をはっきりさせて今後の各分野の情報交換と相互の協力による研究開発のきっかけになることを期待したからでした。

もうひとつの大きな問題は, 大寸法の標準化ということ。す。「大寸法の標準」で大石先生が解説されているよう

に, 5 m を越える大寸法ではブロックゲージのような使いやすくトレーサブルな基準を作ることは容易ではありません。大きな構造物を作っていく工程を考えても, 使用される機械部品はメートルの定義にトレーサブルな基準によって製造されているわけですから, 大きな構造物もメートルの定義にできるだけ忠実な基準によって構築されなければ, 互いの整合性が取れなくなってしまいます。

大寸法の計測技術に関しては, 鏡面, 機械部品から天文測地学まで, 非常に幅広い分野, 長さにわたって解説していただき, 個々の問題点が他の分野と関係して理解していただけたと思います。この特集では, 以上のような 2 つの問題を中心に大寸法の測定技術を考えてみていきました。大きな寸法としては, 1 m, 10 m, 100 m から地球, 宇宙の大きさ, 無限大の大きさまでが守備範囲として入る, 非常にロマンのある研究分野であり, 相対精度からみれば, 微細寸法の技術を上回る高精度な技術であることが理解できたと考えます。この特集号が, 大寸法の計測技術の体系化, 今後の発展に少しでも貢献できることを期待しています。(高増 潔)