

振動解析によるロボット運動の状態分析と異常診断技術の開発

著者	神谷 好承
雑誌名	平成4(1992)年度科学研究費補助金 試験研究(B) 研究成果報告書
巻	1990-1992
ページ	97p.
発行年	1993-03-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/48267

KAKEN

1992

1

振動解析によるロボット運動の 状態分析と異常診断技術の開発

(研究課題番号 02555049)

平成4年度科学研究費補助金(試験研究B(2))
研究成果報告書

平成5年3月

研究代表者 神谷好承
(金沢大学工学部)

振動解析によるロボット運動の 状態分析と異常診断技術の開発

(研究課題番号 02555049)

平成4年度科学研究費補助金(試験研究B(2))
研究成果報告書



8000-24299-0

金沢大学附属図書館

平成5年3月

研究代表者 神谷好承
(金沢大学工学部)

はしがき

平成2年度において、研究の主要構成要素としての実験用ロボットの試作を行い、そのロボットを具体的にマイクロプロセッサを用いて駆動し、当初考えていたのと大差ないロボット運動を確認することができた。その一方で、駆動時にロボット用力覚センサに発生するであろうと思われる振動波形の様子をシミュレーションし、振動解析のためのアルゴリズムの検討を行ってきた。

平成3年度においては、ロボット用力覚センサの使用法を含め、その情報をマイクロプロセッサ中に取り込めるようなシステムを構築した。その結果、ロボット用力覚センサに発生する振動波形はロボット運動に伴う非線形系における非定常過程であることがわかった。このためこれまでも研究されている周波数分析のような一般的な振動解析手法ではその物理的意味があいまいになり、ロボット運動の状態分析を行うことは困難であることがわかった。これに対し本研究ではこうした非定常過程である振動波形に対する異常診断手法として、振動波形の逐次振幅分布を χ^2 適合度検定して正常と異常の判断を行う手法を確立した。

平成4年度においては、本研究で開発した異常診断手法の適用範囲を明らかにするために、さまざまな状況の異常を想定して本研究の手法を試みると同時に、ロボットの姿勢変化によるアーム系の複雑な動特性の変化が異常診断手法にどのような影響を与えるかについて調べた。他方、アーム系の動特性がその姿勢により変化するとそれだけ正常と異常の判断基準があまくなるため、各アームの重量バランスをとることにより、ロボットの姿勢変化によりアーム系の動特性が変化しないようなロボットアーム系の構造を提案し、異常診断手法の信頼性の向上をはかることができた。

研究組織

研究代表者：神谷好承（金沢大学工学部 助教授）

研究分担者：岡部佐規一（金沢大学工学部 教授）

青柳誠司（金沢大学工学部 助手）

研究経費

平成2年度	1,600千円
平成3年度	200千円
平成4年度	200千円
計	2,000千円

研究発表

1. 学会誌等

- (1) 神谷好承, 岡部佐規一, 横山恭男: 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・11)
- (2) 神谷好承, 青柳誠司, 岡部佐規一: ロボット運動の異常動作判別に関する研究, 精密工学会誌, 58, 5, (1992・5)
- (3) Y. Kamiya, S. Okabe, Y. Yokogawa, T. Kobayashi: On-Line Recognition of Robot Operation by Using a Vibration Analysis, Journal of Robotics and Mechatronics, 1, 2, (1989)

2. 口頭発表

- (1) 神谷好承, 青柳誠司, 岡部佐規一, 横山恭男: ロボット運動の振動解析による把持物の状態分析, 第2回インテリジェントFAシンポジウム(システム制御情報学会), (1989・7・20)
- (2) 伊東輝樹, 青柳誠司, 神谷好承, 岡部佐規一: ステップモータにより

駆動されるロボットの駆動状態のモニタリング，日本機械学会北陸信
越支部第29期総会講演会，（1992・3・13）

研究成果報告

目次

第1章 序論

1. 1	緒言	1
1. 2	ロボットの異常	2
1. 2. 1	現在の産業用ロボットの誤動作問題	2
1. 2. 2	モニタリングの対象	3
1. 3	異常検知問題	4
1. 3. 1	異常検知システム	4
1. 3. 2	信号検出	6
1. 4	状態分析法の開発手順と信号処理法の条件	7
1. 5	研究の目的	8

第2章 振動利用によるロボットの状態分析

2. 1	振動を利用したロボットの状態分析	10
2. 2	2自由度関節型ロボットアーム・モデル	12
2. 2. 1	2自由度関節型ロボットアーム・モデル	12
2. 2. 2	実験装置	14
2. 2. 3	ロボットアームに生じる振動の様子	16
2. 3	ロボットの状態変化を反映した振動の様子	18
2. 3. 1	ロボットアームの速度変化	18
2. 3. 2	ロボットアームの不動作	20
2. 3. 3	物体との接触	22
2. 3. 4	ワークの不把持	23

第3章 統計的手法を用いたロボットの状態分析法

3. 1	ロボットの状態分析に適した信号処理法の選択	26
3. 2	統計的仮説検定	28
3. 2. 1	統計的仮説検定の考え方	28
3. 2. 2	カイ2乗検定	32
3. 3	カイ2乗検定によるロボットの状態分析	36

第4章 統計的手法による状態分析の実験

4. 1	統計的手法によるロボットの状態分析の検討手順	39
4. 1. 1	状態分析に必要な設定量の決め方	39
4. 1. 2	ロボットの状態分析についての実験手順	41
4. 2	ロボットの正常状態における分析	44
4. 2. 1	ロボットの正常動作	44
4. 2. 2	ロボットの正常動作における状態分析	51
4. 3	ロボットの状態変化の分析	58
4. 3. 1	定常速度区間での速度変化	58
4. 3. 2	加速度変化の分析	64
4. 4	まとめ	67

第5章 振動利用によるロボットの状態分析法の実用性

5. 1	様々な状態変化の分析	69
5. 1. 1	ロボットアーム不動作についての分析	70
5. 1. 2	物体と接触した場合の分析	74
5. 2	PUMAに生じる振動現象	76
5. 3	ロボット運動中における状態監視法	80
5. 4	振動利用による状態監視に適したロボットの設計指針	85

第6章	結論	87
-----	----	----

参考文献

1. 1 緒言

近年、産業界では生産の無人化、省力化が重要な課題となっており、その実現のために生産システムを極力自動化する方向に進んでいる。そのため生産過程におけるロボットの使用頻度もますます高まってきており、その役割も重要なものになっている。

生産ラインの中にロボットを導入する場合、特に単純な繰り返し作業に用いられることが多い。このような作業をロボットに行わせる場合、このロボットに異常が生じたとき、それが生産システム全体に与える影響は大きなものとなる。従って、ロボットが作業を行う場合、その動作には一般に高い信頼性が要求される。実際に作業を行う場合、そのほとんどは正しく動作するわけであるが、時に不正確な動作、例えば、アームの速度や軌跡が変化したり、アームが急停止または暴走したり、あるいはワークを把持しそこなったり、異なったワークを把持したりする場合がある。従って、ロボットの作業の信頼性を高めるためには、ロボットの運動を単に制御するだけでなく、まずその基本としてロボットの不正確な動作の発生を認識する、すなわちロボットの動作状態を監視し、現在行われている作業が真にその目的に合ったものであるかどうかを判断する機能が必要となってくる。

ロボットが通常とは異なる不正確な動作をした場合、その発生はロボットの動特性の変化としてとらえることができる。従って、この動特性を監視し通常の場合と比較すれば、ロボットの状態分析や認識、あるいは予期しないロボットの異常動作の検知が可能となる。

この動特性を表現するものとしてロボットアームのたわみ振動が挙げられる。ロボットの剛性を評価するにおいてアーム自身の剛性は十分高いものであっても駆動力伝達材まで含めたアーム系というものを考えた場合、その剛性は不足しているとみななければならないことが多く、この剛性不足がアームに振動を発生させている。特に、ロボットを高速にしかも加減速時間を短く設定して駆動

すると、アームの剛性に起因する振動が発生する。従って、この振動を測定・分析して比較し得るデータとして表せば、ロボットの状態分析を行うことが可能となる。

ロボットアームの振動を利用してロボットの状態を分析する方法の利点を挙げると、この状態分析法はロボットアームにセンサを取り付けて振動を測定するので、ロボットアームの駆動モータの電流などを測定するという間接的に監視する方法と違って、直接アームの運動を監視することができる。

また、いろいろな状態変化に対応することができる。個々の不正確な動作、例えば、アームの軌跡や速度の変化を知りたい場合には、エンコーダ等を回転部分に取り付けることによって知り得るし、ワークを持ったかどうかということだけを知りたい場合には、ハンド部分にセンサを設ければよいであろう。しかし、そのいずれの方法であっても両方の状態変化を認識することはできない。このような観点から見ればアームの振動解析による状態分析法は、コンピュータを解析に使用すればソフトウェア次第で様々な異常動作を監視することが可能であり、一つのシステムで検知、対処できる不正確な動作の幅を広くすることができる。

さらに、振動を取り入れるセンサと解析用のコンピュータ以外に多くの機器を必要としないので、システムの構成自体をシンプルにできるというメリットも持っている。

以上のような観点から、本研究ではロボットの動作時に発生するアームの振動を一つの情報源とみなし、この振動解析の手法を用いてロボットの状態を監視し、状態変化を検知することにする。

1. 2 ロボットの異常

1. 2. 1 現在の産業用ロボットの誤動作問題¹⁾

今日、産業用ロボットの使用頻度は高まってきており、設置台数も年々増加している。それに伴いロボット関係のトラブルの件数も増加傾向にある。産業用ロボットの主なトラブルとして以下のようなものが挙げられる。

- (a)急停止・突然の暴走
- (b)位置決め不良
- (c)プログラムの内容変化
- (d)移動径路のずれ
- (e)運転不能

これらのトラブルの発生原因は機械的構成要素の劣化によるものもあるが、そのほとんどは雑音（ノイズ）によるものである。

アナログ技術全盛の時代は、アナログ信号波形を正確に送受するための雑音対策を行ってきたが、デジタル機器の普及とともに雑音問題の性格が変わり始め、雑音によるシステムの誤動作が大きな課題として浮かび上がってきたのである。例えば、LSIの集積度が上がるとともに電源電圧は低下し、外来雑音の影響を受けやすくなり、電源をオン・オフしたときのトランジェント雑音などもシステム誤動作の原因になりやすくなった。アナログ回路に雑音が混入するとS/Nが低下し、機器の性能が落ちることになるが、デジタル回路に雑音が入ると一般にどのような動作をするか予測できない。つまりデジタルの時代は雑音によって機器の機能が危うくなってきたのである。

雑音の発生源として雷、電磁弁、人の静電気、電磁誘導、モータなどがあるが、発生源が不明の場合も多い。また、この雑音対策としてフィルタの強化、接地系の強化などがあり、実際にこの対策を行ってトラブルを解決した例もある。

今後、雑音の原因究明、対策を行ってトラブルに対処し、産業用ロボットの安全対策を十分に行うことが、ますます重要になってくるだろう。

1. 2. 2 モニタリングの対象

本研究では、ロボットアームの振動を解析することによってロボットの動特性の変化を知り、状態を分析、認識することを提案した。

この手法を用いれば、状態分析用のソフトウェアを用意することで、様々な状態変化の分析を行うことが可能となる。

ここで、ロボットの動作時に起こりうる異常動作（状態変化）で主なものを以下に示しておく。

(a) ロボットアームの異常動作

- ・ ロボットアームの速度や軌跡の変化
- ・ ロボットアームの不動作
- ・ ロボットアームの暴走

(b) 物体、人体との接触

(c) ワークの不把持

ロボットアームから得られる振動を解析する場合、注目できる変量として振動数、振幅、減衰定数が挙げられ、上記の異常動作が生じたとき、これらの変量に影響を及ぼすと考えられる。

ロボットの異常として上記に示したものの他に機械的構成要素の経年劣化など様々な要因が考えられるが、本研究ではロボットの機械構造体の異常ではなく、その動作に正確さを求めるという点から上記(a)~(c)のような異常に注目し、その中でロボットアームの速度変化を主な例として取り上げ、この状態変化の認識について検討する。

1. 3 異常検知問題

1. 3. 1 異常検知システム

異常とは、運動中のあるシステムの特徴が予期せざる理由によって変化することであるといえる。システムの特徴の変化は出力（観測値）の変化をもたらすから、出力を常時監視することによってその性質の変化を捕らえれば、システムの異常を検知することができる。従って、異常検知手法は正常時と異常時の観測値の性質の差違に基づいている。しかし、異常箇所、異常原因、異常のメカニズムによっていろいろな異常モードが考えられるから、観測値の中から異常の兆候を抽出するのは必ずしも容易ではない。

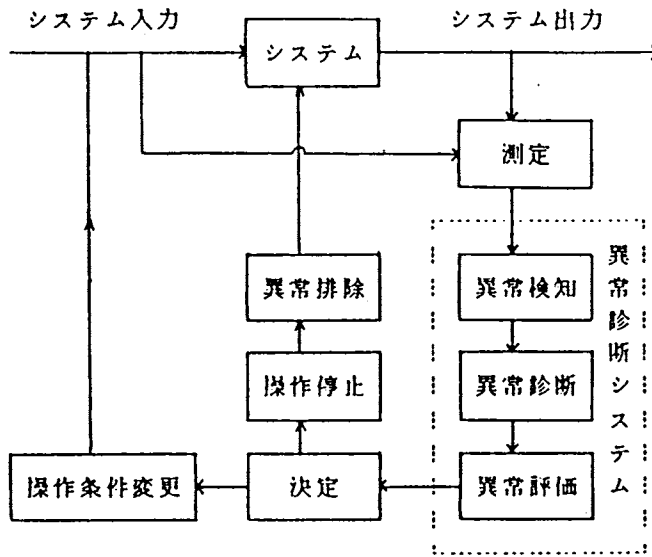


図 1. 1 異常検知システム³⁾

システムの異常を検知し、診断する機能の概念図は図 1. 1 のように表すことができる。

まず、システムに発生する異常またはその前兆を検出するために、観測値に基づいて異常かどうかの判別を行い、その結果として異常の発生が確認されれば、これを修復・補償するために異常箇所、原因、程度を推定し、その情報に基づいて制御則やフィルタゲインの調整、予備機への切り換えなどによって補償もしくは修復処理を行う。したがって、システムに装着される異常検知システムは、一般に次に示す三つの機能を持っていなければならない。

(1)異常検知

システムに発生する異常またはその前兆を速やかに検出する機能。これは異常発生のアラーム機能であり、正常か異常かの判別問題に帰着する。

(2)異常診断

異常の発生が確認されたとき、これを修復・補償するために異常箇所、原因・程度に関する情報を取り出す機能。

(3) 異常評価

異常の伝播拡大を予測し、その異常がシステムの性能にどのような影響を与えるかを評価し、その情報に基づいて操作を続行するか、操作条件を変更するか、あるいは停止するかなどの決定を行う。

しかし、すべての異常検知システムが上記の三機能を常に具備しているとは限らず、例えば操作員または保守員が配置されたシステムでは異常発生を知らせるだけでよく、以後の精査と処理は人間の判断に委ねればよいから、この場合には異常検知の機能のみ持てばよいことになる。

当然のことながら、機能を増せばアルゴリズムはそれだけ複雑になり、その装置化を困難にする。利用できる計算機の構造と能力に適合したメモリサイズと計算時間を持つアルゴリズムを開発しなければならない。ここに異常検知システムの性能と複雑さとの間のトレードオフが問題となる。異常検知システムの性能を決める尺度はシステムの目的によっても異なるが、検知可能な異常のモード、誤検知（システムが正常であるにもかかわらず異常であると判断する誤り）と不検知（システムが異常であるにもかかわらず正常であると判断する誤り）の確率、検知の速応性（検出時間の遅れ）などが重要である。

先にも述べたが、すべての異常検知システムが常に上記の三機能を必要としているとは限らない。しかし、この三機能の中で異常検知の機能は重要であり常に必要とする機能である。システムの異常を検知し診断するときに、まず必要とする情報はシステムの状態が正常か異常かということであり、異常検知の機能が具備されていれば、その判断を行うことができる。そこで本研究では、ロボットの状態が変化したかどうか、すなわち異常かどうかの判断が行えるようにし、ロボットに異常検知機能を持たせることにする。

1. 3. 2 信号検出

信号処理に基づく異常検知において最も重要なことは観測される信号の中に必要な情報が含まれており、しかもそれが感度高く検出されることである。実

際に観測された信号から異常に関する情報を適切に抽出するためには観測信号の中に異常に関する情報がどんな形で埋もれているかによってその処理方法が異なり、そのためには信号検出器の配置や信号処理は、できる限り信号発生源の物理的性質やセンサの特性を考慮して行われなければならない。

このような点で異常検知のための信号検出と処理は、システム制御のための信号検出とは異なった側面を持っている。

1. 4 状態分析法の開発手順と信号処理法の条件

異常検知で重要なことは、前節でも述べたように発生した異常を速やかに検出することである。すなわち、異常であるか否かを決定することであり、これは標準的な統計的仮説検定問題として定式化できる。そこで、本研究では統計的仮説検定法を用いてロボットの状態分析を行うことにする。

状態分析法の開発においては、分析対象の特性および想定される異常事象について十分に調べることが重要である。統計的手法を用いる場合には、この過程において、統計量と事象との対応づけが必要となる。以下に統計的手法を用いた状態分析法を開発する場合の基本的な検討手順を述べる。

手順(1) 計測信号の特性・統計的性質を明らかにする。特に、信号の発生要因を十分に抑えておく。

(2) 異常事象が計測信号の統計量の変化となって現れるかを検討する

(3) 計測信号のどのような統計量に着目するかを選択する。(1), (2)の解析結果をもとに決める。状態分析法の優劣は、状態分析を行う対象の現象把握がどこまで適切に行われたかにより決まる。すなわち信号処理に基づく状態分析では、適切な統計量が設定されたか否かが、その成果を左右する最も重要なポイントである。

(4) 状態分析対象の運転状態（正常時の状態）における統計量の分布

を評価する。異常と判断するための警報値を設定するために必要であり、実測データを用いて分布を評価する。

さらに、状態分析を行うための信号処理法に要求される条件を次に示す。

- (a) 正常時と状態変化時の比較が容易である。
- (b) 計算時間が短い。

(a)の比較の容易さということは、状態変化の認識に適した信号処理法を選択する上で重要な問題である。これは認識という作業そのものだからである。

(b)は検知の速応性（検出の時間遅れ）に関係し、計算時間が短ければ速応性が良くなる。そのためには、使用する計算機の能力に適合した計算時間をもつアルゴリズムを開発しなければならない。

以上に述べたことを十分に考慮しながら、ロボットの状態分析について検討すべきであろう。

1. 5 研究の目的

本研究ではロボットアームを駆動した際の振動現象に注目し、これに適切な信号処理を施すことによって、ロボットアームの状態を認識することを目的とする。

本研究の内容は大まかに分けて以下のような構成になる。

(1) ロボットアームの振動現象の分析

アーム系のコンプライアンスによって生ずる振動の様子を明らかにする。また、ロボットの状態変化が振動現象にどのような影響を与えているかを示し、振動を利用してロボットの状態分析を行うことの有効性を示す。

(2) 統計的手法を用いた状態分析法の選択

ロボットの状態変化を認識するための手段としての信号処理について述べる。本研究では統計的な手法を状態分析に用いることにし、その具体的な手法について検討する。

(3) 実測データに基づくロボットの統計的状态分析法の検討

実際に実験用ロボットを使用し、そのデータをもとに(2)で選択した状態分析法（信号処理法）を用いて、まず正常時の状態についての分析を行い、次に正常か異常かを判定することができるか、速度が変化した場合について検討する。

(4) 振動利用によるロボットの統計的状态分析法の適用範囲と実用性についての検討

様々な状態変化（異常動作）に対して、この状態分析法を適用することができるか、また実際に使用されているロボットにも通用できるか、検討する。さらに、ロボットの運動状態を常時監視して状態変化を速やかに検出する方法を示す。

ロボットの運動あるいはその制御を論じている多くの研究においては、ロボットアームを剛体として扱っていることが多い。しかし、ロボットアームの駆動系および駆動力伝達系を含めたアーム系全体の剛性は不足していることが多く、アームに振動を発生させている。

以下に、アーム系のコンプライアンスによってどのような振動現象がみられるか、その様子を剛性の不足するロボットアームモデルを使って明らかにする。

また、この振動という情報を処理してロボットの状態分析を行うために、ロボットの状態変化が振動現象にどのような影響を与えているかを示す。

2. 1 振動を利用したロボットの状態分析

ロボットが通常とは異なる不正確な動作をした場合、その発生はロボットの動特性の変化としてとらえることができる。従って、この動特性を監視し通常の場合と比較すれば、ロボットの状態分析や認識、あるいは予期しないロボットの異常動作の検知が可能となる。

この動特性を表現するものとしてロボットアームのたわみ振動が挙げられる。ロボットの剛性を評価するにおいてアーム自身の剛性は十分高いものであっても駆動力伝達材まで含めたアーム系を考えた場合、その剛性は不足しているとみなければならないことが多く、この剛性不足が振動を発生させている。特に、ロボットを高速にしかも加減速時間を短く設定して駆動した場合、アームの剛性に起因する振動が発生し易い。従って、この振動を測定・分析して比較し得るデータとして表せば、ロボットの状態分析を行うことが可能となる。

ロボットアームの振動を利用したロボットの状態分析法の利点として次のようなことが挙げられる。

- (a) ロボットアームの運動を直接モニタリングしている。
- (b) 様々な状態変化に対応することができる。
- (c) ロボットの状態分析を行うシステムの構成が簡単になる。

(a)は、この状態分析法はロボットアームにセンサを取り付けて振動を測定するので、ロボットアームの駆動モータの電流などを測定するという間接的に監視する方法と違って、直接アームの運動を監視することができる、ということである。

(b)は、コンピュータを解析に使用すれば、ソフトウェア次第で様々な異常動作を監視することが可能であり、一つのシステムで検知・対処できる異常動作の幅を広くすることができる、ということである。個々の異常動作、例えば、ロボットアームの軌跡や速度の変化を知りたい場合には、エンコーダ等を回転部分に取り付けることによって知り得るし、ワークを持ったかどうかということを知りたい場合には、ハンド部分にセンサを設けることによって知り得るが、そのいずれの方法であっても両方の状態変化を認識することはできない。しかし、ロボットアームの振動解析による状態分析法ではそれが可能であり、その他の状態変化についても認識が可能である。

(c)は、振動を取り入れるセンサと解析用のコンピュータ以外に多くの機器を必要とせず、システムの構成自体をシンプルにできる、ということである。

その他にも、振動を利用したロボットの状態分析法をロボット以外の機械システムにも応用できる、ということなどがある。特に、エンジンや変速機などの周期的動作機械は、振動の一定パターンをある時間間隔で繰り返し発するので、これを監視することによって機械の状態分析を行うことができる。

以上のような観点から、ロボットアームに生ずる振動を一つの情報源とみなし、振動解析の手法を用いてロボットの状態を監視し、状態変化を検知することにする。振動解析の手法を用いたロボットの状態分析機構の概念を図2. 1に示す。

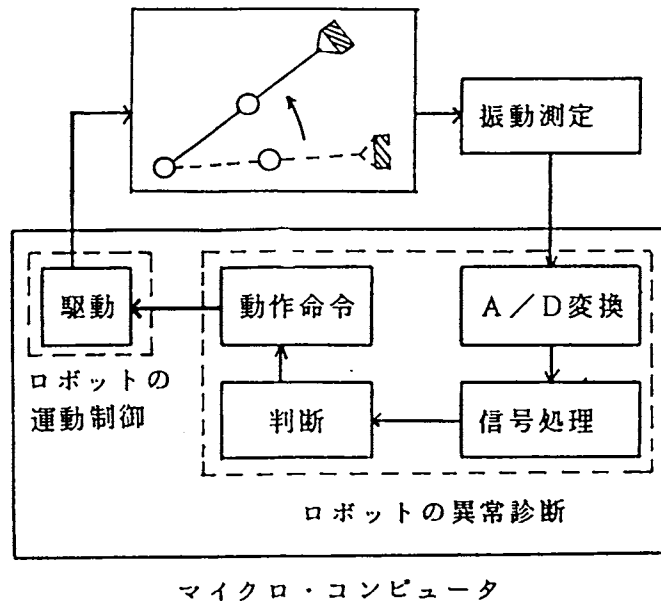


図 2. 1 ロボットの状態分析機構

2. 2 2自由度関節型ロボットアーム・モデル

2. 2. 1 2自由度関節型ロボットアーム・モデル

本研究ではロボットの一例として、図 2. 2 に示すような 2 自由度関節型ロボットアームを使用する。このロボットアームモデルは、組立用ロボットとして一般的な水平面内で駆動するスカラ型ロボットアームの形式をとり、その剛性を低下させたモデルである。そのため、実験用ロボットのアームは振動し易くなり、実際の産業用ロボットとは異なったものになるが、本研究では剛性不足をアームに代表させることにし、またロボットから得られる振動をどのように処理するかが目的であり、それを容易に行えるようにするためにこのようなロボットを使用することにした。

一般に、このような 2 自由度関節型ロボットアームは第 1 アームと第 2 アームのたわみを比較した場合、第 1 アームの方がたわみ易いから、ここではこのロボットアームの第 1 アームの剛性を特に不足させている。図中②に示した第 1 アームの構成材料は高いコンプライアンスを得る目的のため、厚さが 0.6 mm のリン青銅であり平行ばねの形をなしている。これにストレイン・ゲージを貼

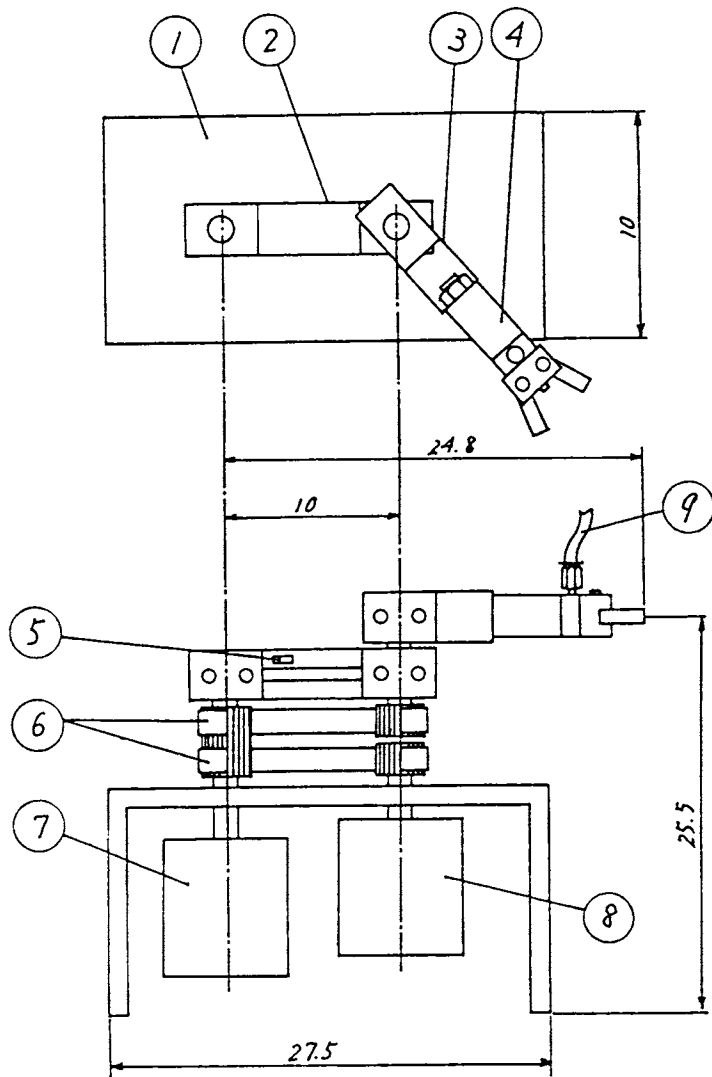


図 2. 2 自由度関節型ロボットアーム・モデル

- ① フレーム
- ② 第 1 アーム
- ③ 第 2 アーム
- ④ ロボットハンド (ERACON MINI MAND MH-15A-1)
- ⑤ ストレイン・ゲージ (2 ゲージ法)
- ⑥ タイミング・ベルト (UNITTA B-132MXL)
- ⑦ 第 1 アーム駆動用ステッピング・モータ (ステップ角 1.8°)
(SANYO DENKI STEPPING-MOTER 103-810-1)
- ⑧ 第 2 アーム駆動用ステッピング・モータ (ステップ角 1.8°)
(SANYO DENKI STEPPING-MOTER 103-810-1)

⑨ 配管用チューブ (Chiyoda TP-6-46)

り、アームの振動の様子を検出する。

図中③に示した第2アームには、空気圧で開閉するロボットハンドを取り付け、ワークの把持を行えるようにした。本研究ではロボットの状態分析の対象として、アームの速度、軌跡の変化を中心に検討するが、将来的にはワークの不把持のような異常動作についても検討できるように、ロボットハンドを取り付けた。

ロボットアームの駆動にはステッピング・モータを用い、マイクロ・コンピュータで制御している。

以下に、実験用ロボットのアーム系の固有値として、FFTアナライザ測定による固有振動数（機械系のみ）および先端集中質量として換算した等価的なアームの質量（第2アームのみ）を示す。

(a)固有振動数 : 7.75 Hz

(b)アーム質量 : 0.26 kg (= 260 g)

2. 2. 2 実験装置

ロボットアーム・モデルを含む実験装置全体の構成を図2.3に示す。またステッピングモータや電磁弁の駆動、開閉に必要なPull-up回路をソリッド・ステート・リレー回路を含めて図2.4に示す。

図2.3に示した使用機器は、以下のようなものである。

⑩ ステッピングモータ・ドライバ (SANYO DENKI PMM-CS-406 B)

⑪ 5 V定電圧電源 (ELCO HMC-3A)

⑫ Pull-upインターフェース (図2.4参照)

⑬ ソリッド・ステート・リレー

(TOSHIBA SOLID STATE RELAY S16G.12S-12)

⑭ 電磁弁 (コガネイ SOLENOID AIR VALVE 050 EI-01)

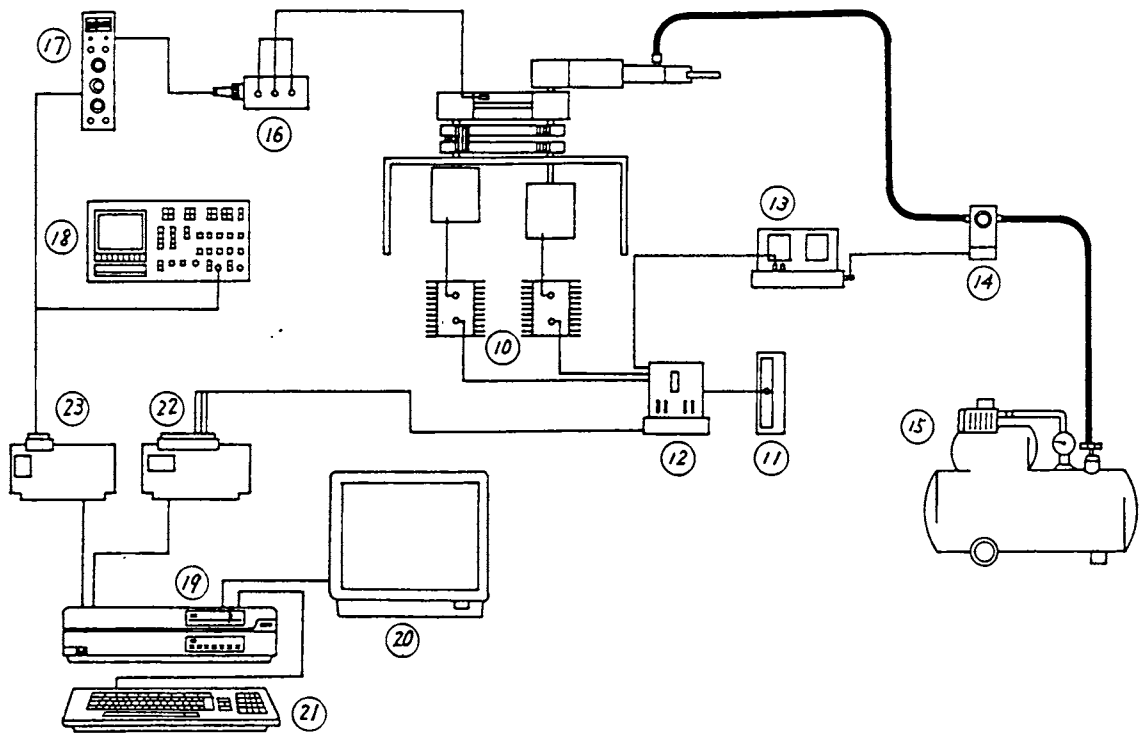


図 2. 3 システム構成図

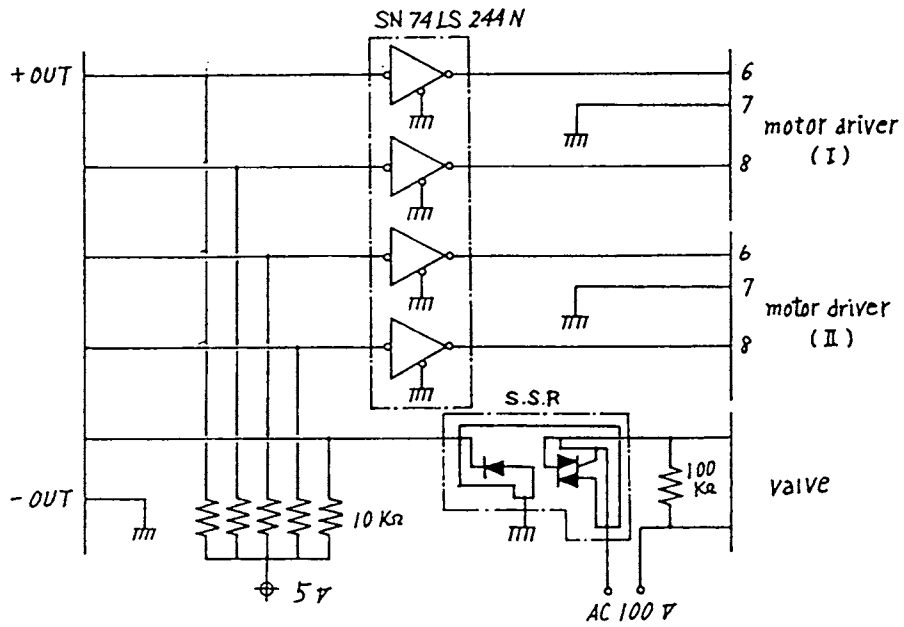


図 2. 4 Pull-up 回路図

- ⑮ エア・コンプレッサ (HITACHI SH-5S4)
- ⑯ ゲージ・ブリッジ (Shikoh gage bridge)
- ⑰ ストレイン・メータ (ミネベア DSA-603)

- ⑱ F F Tアナライザ (ONO SOKKI CF-920)
- ⑲ マイクロ・コンピュータ本体 (NEC PC-9801F)
- ⑳ ディスプレイ (NEC PC-8853n)
- ㉑ キーボード (NEC PC-9801)
- ㉒ 出力ボード (PC module PIO 16/16-T(98))
- ㉓ A/D変換器 (PC module AD-12-16S(98))

2. 2. 3 ロボットアームに生じる振動の様子

ロボットアームを図2. 5のように25pps(25ステップ/s = $\pi/4$ rad/s) で駆動したときの第1アームに生じる振動の様子をFFTアナライザで観察した。

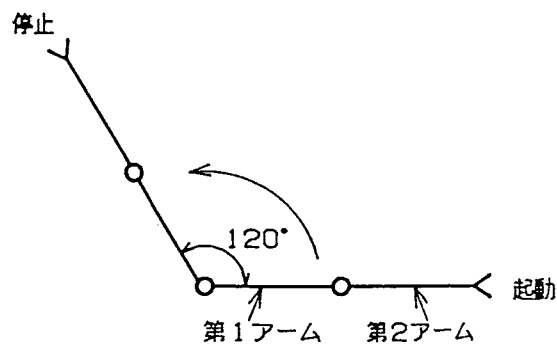
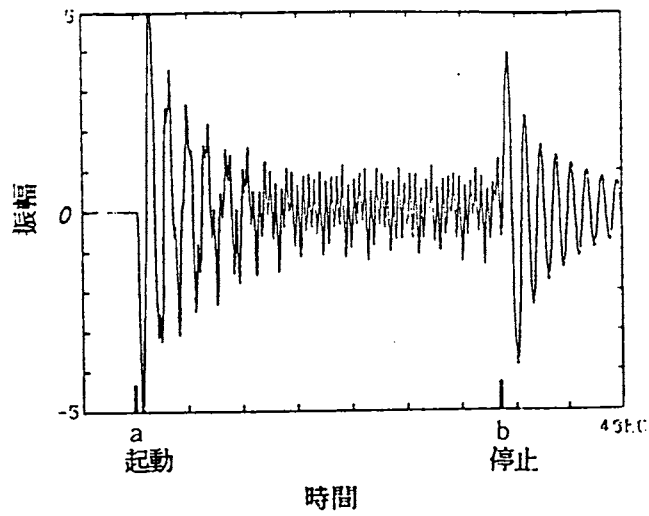


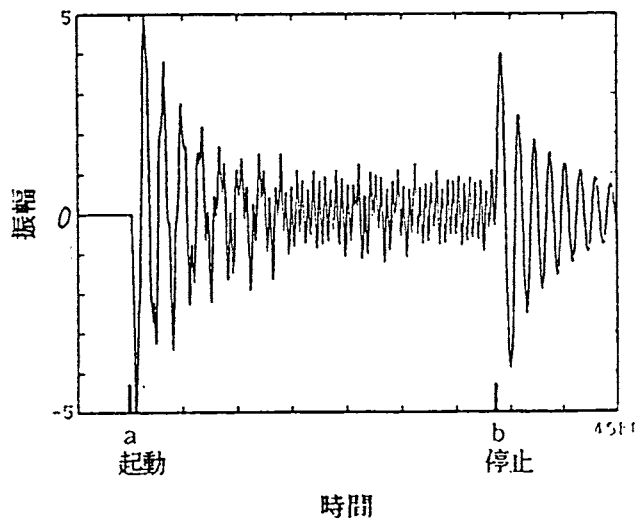
図2. 5 ロボットアームの駆動範囲 (速度 25 pps)

このとき、再現性を調べるためロボットアームに全く同じ動作を3回行わせて、そのときに得られる振動波形がどの程度一致するか調べてみた。この再現性の良さは、ロボットアームの振動波形からロボットの状態変化を認識するためには重要なことである。

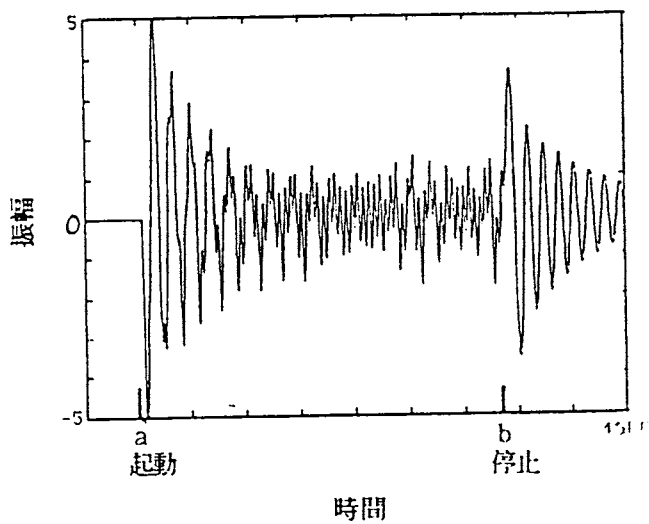
この実験の結果を図2. 6に示す。図中のa点でロボットアームが起動し、b点で停止している。それぞれの波形を見てみると、起点と終点の間では起動時に生じた減衰自由振動と駆動時の強制振動が重なり、終点後は停止時の残留振動が生じているのがわかる。起動時と停止後の振動数は7.75Hzとなり、駆動中の振動数は25Hzとなっている。図2. 6の3つの波形を比較すると振幅、周期、形状などの特徴がよく一致しており再現性は良いと言えよう。



(a) 1 回目の振動波形



(b) 2 回目の振動波形



(c) 3 回目の振動波形

図 2. 6 ロボットアームに生じる振動波形の様子

2. 3 ロボットの状態変化を反映した振動の様子

前節において、アーム系の剛性が不足する場合にどのような振動が発生するか、その様子を示した。そこで、次にロボットの状態変化がロボットアームの振動現象にどのような影響を与えているかを検討する。

ロボットの状態変化として、

- (1) ロボットアームの速度変化
- (2) ロボットアームの不動作
- (3) 物体との接触
- (4) ワークの不把持

について、それぞれのロボットアームの振動波形を示し、ロボットの状態変化がロボットアームの振動にどのように反映されるかを調べることにする。

ここで正常時と状態変化時の振動波形の比較を行うため、ロボットアームが 25 pps の速度で図 2. 5 に示された運動を行った場合を正常とする。

2. 3. 1 ロボットアームの速度変化

図 2. 7 のようにステッピングモータの速度を途中で 25 pps から 30 pps に速くした場合と 25 pps から 20 pps に遅くした場合について実験を行い、振動波形の様子を観察した。その結果を図 2. 8 に示す。図中の a 点でロボッ

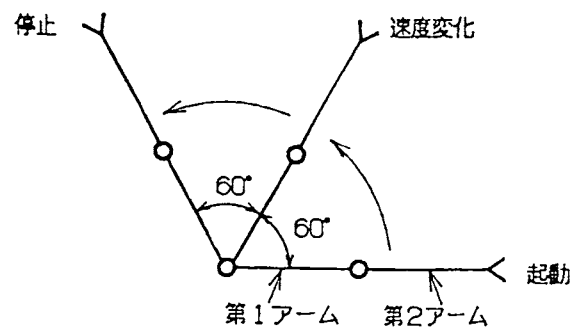
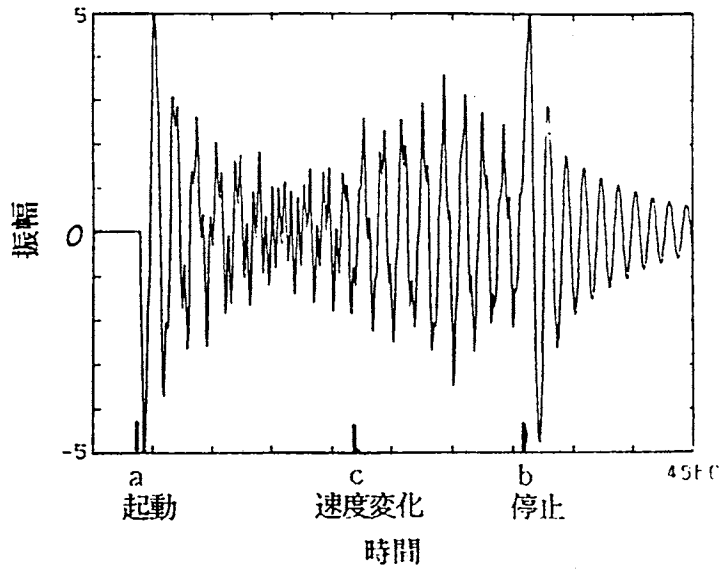
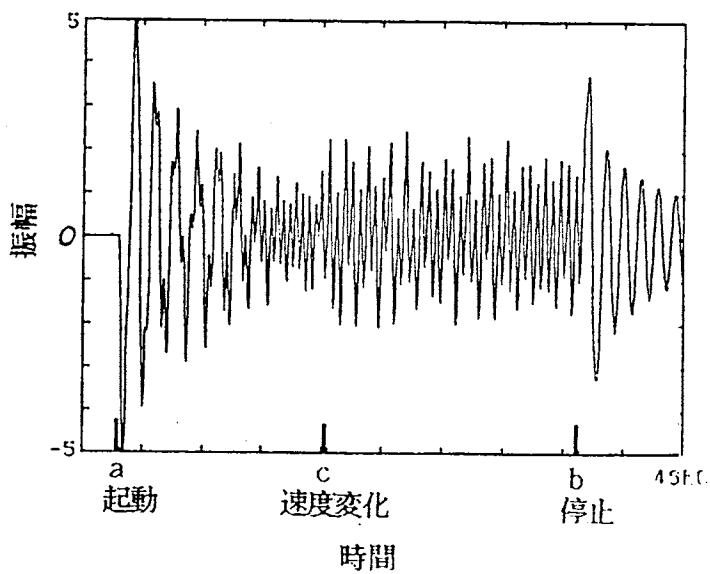


図 2. 7 ロボットアームの速度変化



(a) 25 pps から 30 pps への変化



(b) 25 pps から 20 pps への変化

図 2. 8 速度が変化したときの振動の様子

トアームが起動し、c 点で速度が変化し、b 点で停止している。

図 2. 6 の波形（正常時の波形）と図 2. 8 の波形を比較すると、c 点以降では波形の振幅、周期、形状などが異なっている。例えば、振幅は図 2. 6 と比べて両者とも大きくなっている。これは c 点で速度が変化したときに生じた振動によるものである。

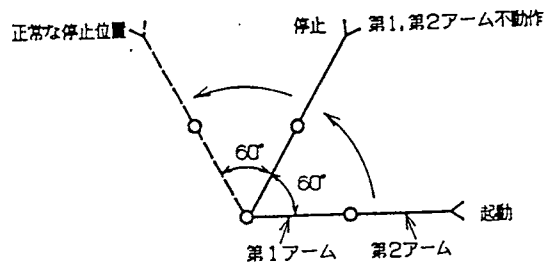
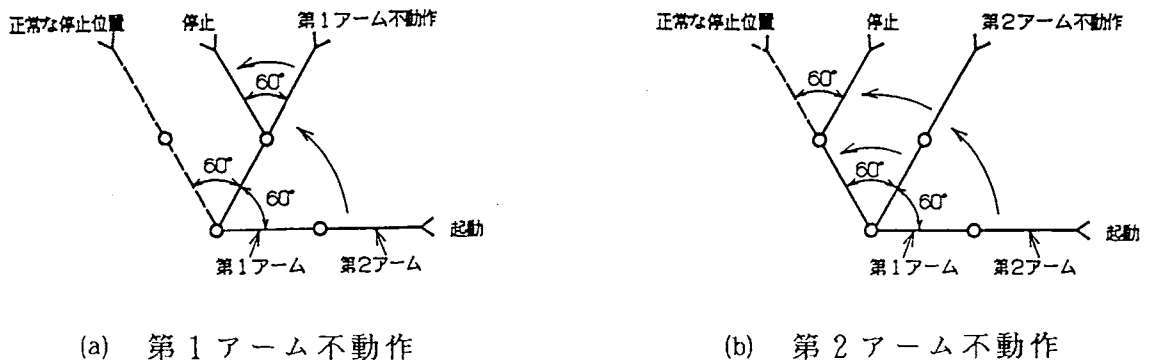
以上のことから、このような波形の差異はロボットアームの速度変化によって生じたものである、ということが判断できる。

このようにロボットアームの速度変化という状態変化は、ロボットアームの振動に反映されており、振動を利用して状態分析を行うことが可能である。

2. 3. 2 ロボットアームの不動作

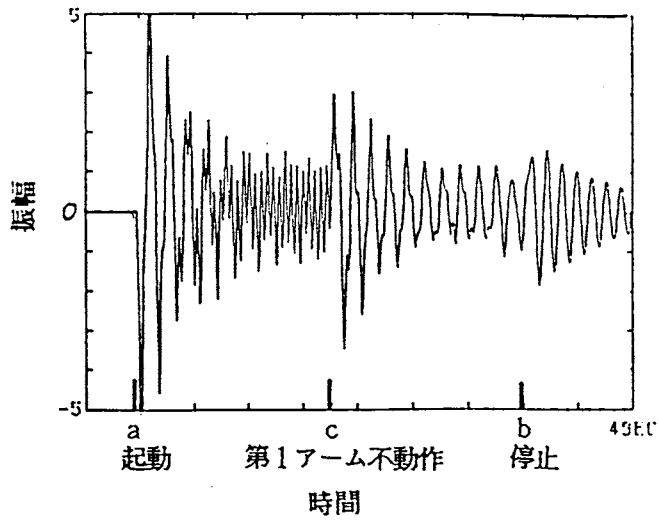
正常時と同じ 25 pps で駆動し、図 2. 9 (a) のように第 1 アームのみが途中で停止した場合、図 2. 9 (b) のように第 2 アームのみが途中で停止した場合及び図 2. 9 (c) のように第 1, 第 2 アームの両方が途中で停止した場合について実験を行い、振動波形の様子を FFT アナライザで観察した。その結果をそれぞれ図 2. 10 に示す。図中の a 点でロボットアームが起動し、c 点で状態変化が生じ、b 点で停止している。

図 2. 6 の波形と図 2. 10 の波形を比較すると c 点以降は波形が異なっていることがわかる。第 1 アームのみ停止した場合 (図 2. 10 (a))、及び第 2

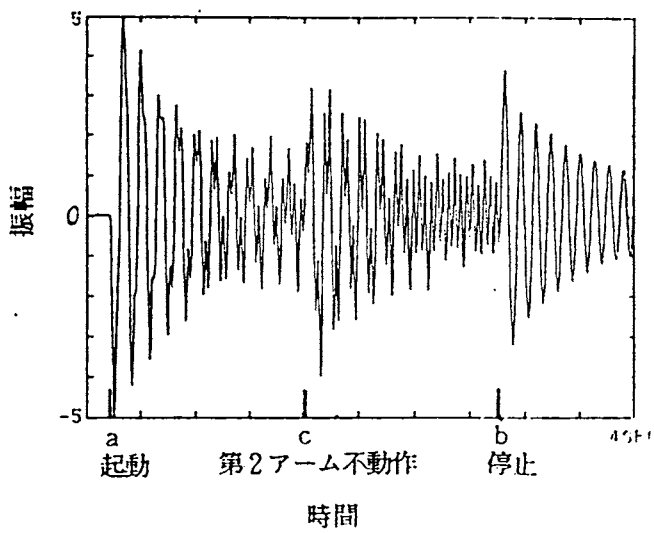


(c) 第 1, 第 2 アーム不動作

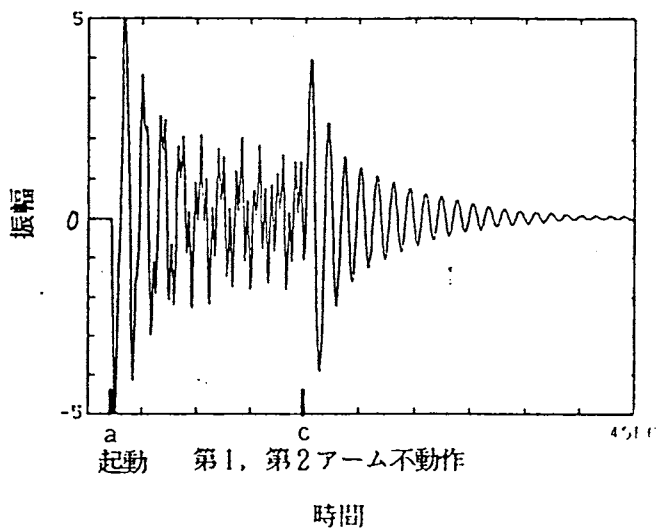
図 2. 9 ロボットアームの不動作



(a) 第1アーム不動作時の振動の様子



(b) 第2アーム不動作時の振動の様子



(c) 第1, 第2アーム不動作時の振動の様子

図2. 10 ロボットアーム不動作時の振動の様子

アームのみ停止した場合（図2. 10 (b)）については、正常時（図2. 6）に得られた波形との違いで特に目立つ部分は、c点の部分でともに振幅が大きく異なり、それ以降でも振幅が異なっている。これはc点からb点の範囲で 図2. 10 (a)の場合は第2アーム駆動時の振動に第1アームの停止時の残留振動が重なり、図2. 10 (b)の場合は第1アーム駆動時の振動に第2アームの停止時の残留振動が重なったためである。第1、第2アームの両方が停止した場合、c点以降は停止による残留振動が生じ、正常時とは明らかに異なっている。

以上のことから、このような波形の差異はロボットアームが途中で停止したことにより生じたものである、ということが判断できる。

これらの結果よりロボットアームの不動作という状態変化はロボットアームの振動に反映されており、その振動を解析することによってこの場合の状態変化の認識・判断を行うことができる。

2. 3. 3 物体との接触

正常時と同じ25ppsで駆動し、図2. 11のように途中で物体と接触させた場合について実験を行い、振動波形の様子を観察した。図2. 12にその結果を示す。図中のa点でロボットアームが起動し、c点で接触し、b点で停止している。

図2. 6の波形（正常時の波形）と図2. 12の波形を比較すると、c点以降ではやはり波形が異なっており、波形の振幅は図2. 6と比べて大きくなっ

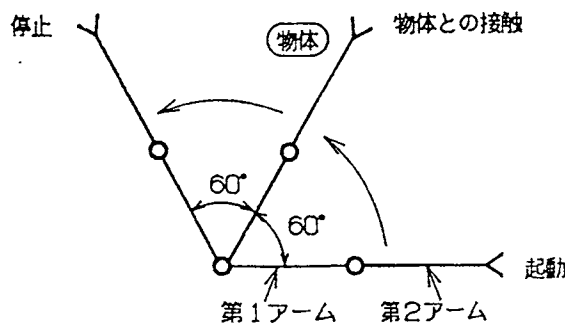


図2. 11 物体との接触

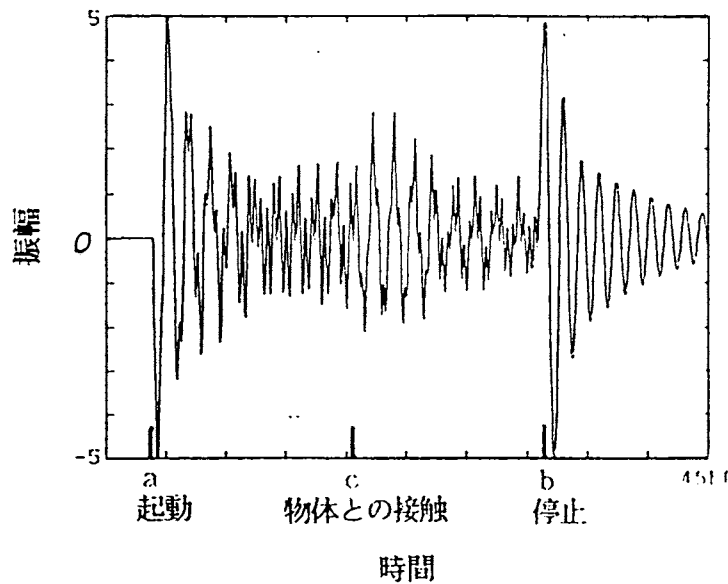


図2. 12 物体が接触したときの振動の様子

ている。

従って、このような波形の差異はロボットアームと物体の接触によって生じたものであり、この場合の状態変化についても、ロボットアームの振動に反映されており、振動を利用して状態分析を行うことが可能である。

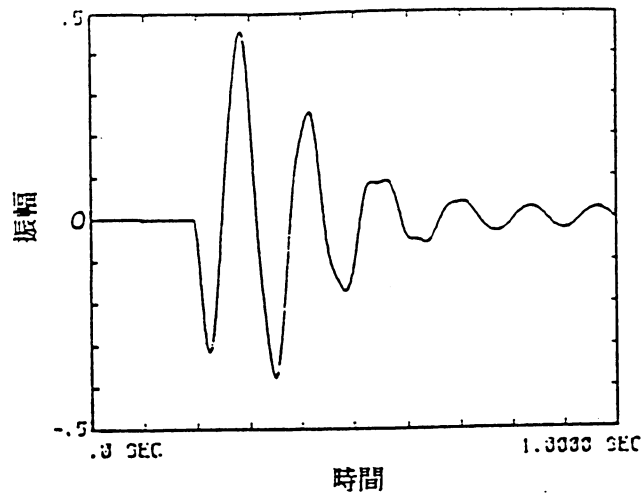
2. 3. 4 ワークの不把持

ワークの把持、不把持、あるいはワークの質量の差異によって、ロボットアームの振動の様子がどのように変化するかをここで検討するが、この状態変化はロボットアームの速度変化や不動作のようなアーム自身の運動についてのものではない。そこでこの場合、ロボットアームを1パルス分駆動してその残留振動の波形を観察することにする。

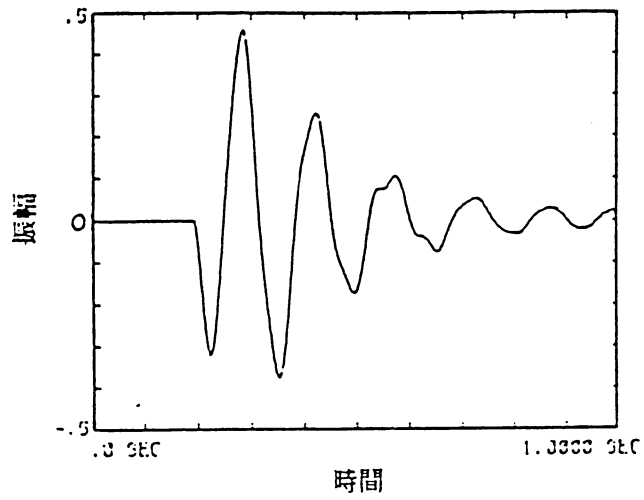
ロボットアームに対し、何も把持していない状態で1パルス分駆動した場合に得られる残留振動の波形と、二種類の負荷 W_1, W_2 をそれぞれ付加し、同様に1パルス分駆動した場合の残留振動の波形を図2. 13に示す。

ただし、 $W_1=12$ [g]、 $W_2=24$ [g]であり、第1、第2アームが相対的になす角度を 180° として両アームを同時に駆動した。

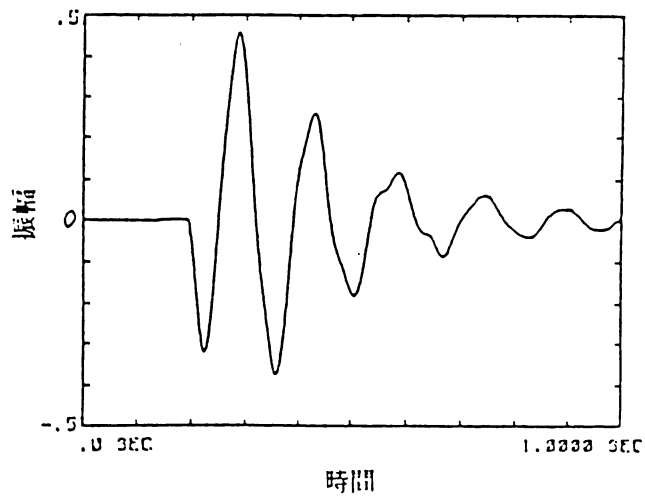
図2. 13より、無負荷状態(a)の波形に比べてワークとしての負荷を与えた



(a) 無負荷状態



(b) 12 g 負荷状態



(c) 24 g 負荷状態

図 2. 13 負荷の有無による振動波形の変化

(b)と(c)の波形は、順次周期が長くなり、また減衰の過程にも違いが認められる。減衰過程で見られる波形のひずみは、ロボットハンドの開閉のための空気を送る配管用チューブの影響と考えられる。

このような振動波形の差異は、負荷を与えたことによって生ずるものでありすなわち、ロボットアームの慣性モーメントが増加したという、動特性の変化が振動に反映されていることを示すものである。

以上の結果より、それぞれの状態変化について、ロボットアームの振動現象にこの状態変化が十分反映されることがわかり、振動分析による手法が有効であると言えよう。

また、振動をモニタリングする場合、注目できる変数として振動数（周波数特性）、振幅（振幅特性）が挙げられるが、この場合、振動波形の振幅が状態変化を良く反映しているので、振幅の変化を情報源にして、これに適切な信号処理を施せばロボットの状態を認識することが可能である。

前章において、ロボットアームの剛性が不足する場合に、どのような振動が発生するか、その様子を示し、またロボットの状態変化がアームの振動現象にどのような影響を与えているか検討した。この結果、ロボットの状態変化がアームの振動に反映されることが分かり、本研究ではこの振動を情報源とみなして、振動解析を用いてロボットの状態変化を検知することにした。

そこで、この振動の変化をどのようにして読み取るか、その手段としての信号処理の方法について以下に述べる。

3. 1 ロボットの状態分析に適した信号処理法の選択

一般に、ロボットなどのシステムに装着される異常検知（異常診断）システムは、次に示す三つの機能を持っていなければならない。

(1)異常検知

システムに発生する異常またはその前兆を速やかに検出する機能。これは異常発生のアラーム機能であり、正常か異常かの判別問題に帰着する。

(2)異常診断

異常の発生が確認されたとき、これを修復・補償するために異常箇所、原因・程度に関する情報を取り出す機能。

(3)異常評価

異常の伝播拡大を予測し、その異常がシステムの性能にどのような影響を与えるかを評価し、その情報に基づいて操作を続行するか、操作条件を変更するか、あるいは停止するかなどの決定を行う。

しかし、すべての異常検知システムが上記の三機能を常に具備しているとは限らず、例えば操作員または保守員が配置されたシステムでは異常発生を知らせるだけでよく、以後の精査と処理は人間の判断に委ねればよいから、この場合には異常検知の機能のみ持てばよいことになる。

このように、異常検知システムは上記の三機能全てを、常に必要としていない。しかし、この三機能の中で(1)の異常検知の機能は、前述の例でもわかるように、常に必要であり重要な機能である。システムの異常を検知し診断するときにはまず必要とする情報は、システムの状態が正常か異常かということであり、異常検知の機能が具備されていれば、その判断を行うことができる。

そこで本研究では、ロボットの状態が変化したかどうか、すなわち異常かどうかの判断が行えるよう、ロボットにこの異常検知機能を持たせることを主な目的とする。

異常検知機能はいわゆる異常発生のアラーム機能であって、正常か異常かの判別問題であるから、この判別方法として、いろいろな統計的検定法が直接適用できる。このような観点から本研究では、ロボットの状態が異常か否かを決定することが状態分析の目的であるから、これを標準的な統計的仮説検定問題として定式化する。

統計的検定法にも様々な手法があり、その中から信号処理法として適した手法を選択するために、この信号処理に要求される条件を次に示す。

- (a) 正常時と状態変化時の比較が容易である。
- (b) 計算時間が短い。

(a)の比較の容易さということは、状態変化の認識に適した信号処理法を選択する上で重要な問題である。これは認識という作業そのものだからである。また、(b)は検知の速応性（検出の時間遅れ）に関係し、計算時間が短ければ速応性が良くなる。そのためには、使用する計算機の能力に適合した計算時間をもつアルゴリズムを開発しなければならない。

本研究では、ロボットの状態が正常か異常かをロボットアームの振動波形から読み取り、その判断は、振動波形の振幅分布を正常時と観測時とで比較して

行われる。具体的には、振幅分布ヒストグラムを作成し、ヒストグラムの各階級（クラス）に属する度数を正常時と観測時とで比べ、両者が適合するかどうかで観測時の状態が正常か否かを判断するのである。

このような適合の度合いを検定する方法として、カイ2乗検定が広く利用されており、この場合もカイ2乗検定問題として定式化できる。カイ2乗検定を用いれば、正常時と状態変化時の比較を容易に行うことができ、検定を行う時間も少なくすみ、先に述べた信号処理の条件を満たしている。

本研究では、ロボットの状態分析法を統計的仮説検定問題として定式化し、様々な統計的検定法の中からカイ2乗検定を用いることにする。これらについてさらに詳しく述べることにする。

3. 2 統計的仮説検定

3. 2. 1 統計的仮説検定の考え方

統計的仮説検定とは、調査対象についてある予想を立ててこれを仮説としておき、この仮説に対してその正誤を標本データに基づき、一定の統計的手続きを経て正しいか否か判定することである。ところで、一般に標本データによって、仮説の正誤を完全に決めることができるケースは稀である。むしろ、正誤どちらか一方に決めることはできないという結論になるケースがほとんどである。これは、検定が一部の標本データから母集団全体に対する判定を行おうとする行為であるために生じる曖昧さである。

しかし、仮説が正しい確率はいくらで、誤っている確率はいくらという言い方はできる。つまり、統計学においては、仮説の正誤の判定は確率的表現をよりどころにしておこなわれる。そのためには、標本データの持つ特性を十分に把握しておかねばならない。

以下に統計的仮説検定の基本的な考え方を述べる。

(1) 検定統計量

ある仮説 H_0 の検定を行うためには検定統計量を決めなければならない。統

計量とは標本データの分布状態を表す特性値のことで、母集団に関する知識を何ら必要とすることなく観測値のみから計算される量である。一般に、一つの検定対象に対して何種類もの検定統計量が考えられる。その中から分布状態（すなわち、確率の計算ができる）がよくわかっていて、しかも正誤の判定がつけやすい統計量が検定統計量として選ばれる。

そして、実際に検定を行うには、母集団からデータを取り出して検定統計量の観測値を得る必要がある。この観測値が異常な値かどうか、すなわち検定統計量の分布に照らし合わせてその値が異常値か否か判断する。

(2) 棄却域、採択域

検定統計量の観測値が異常な値か否かの判定を行うとき、判定のための客観的な評価基準が必要である。そのために、その統計量がある領域に入ったら仮説を棄却するようにしておく。この領域を棄却域といい、データを取り出す前に、あらかじめ仮説 H_0 の棄却域と採択域（棄却できない領域）とを用意しておくのである。すなわち、検定統計量の観測値が棄却域の範囲内に入ってきたら、それは異常値と見なして元の仮説 H_0 を棄却してしまう。反対に、観測値が採択域に入ってきた場合には、仮説 H_0 は棄てないで態度を保留する。このことを示したのが図 3. 1 である。

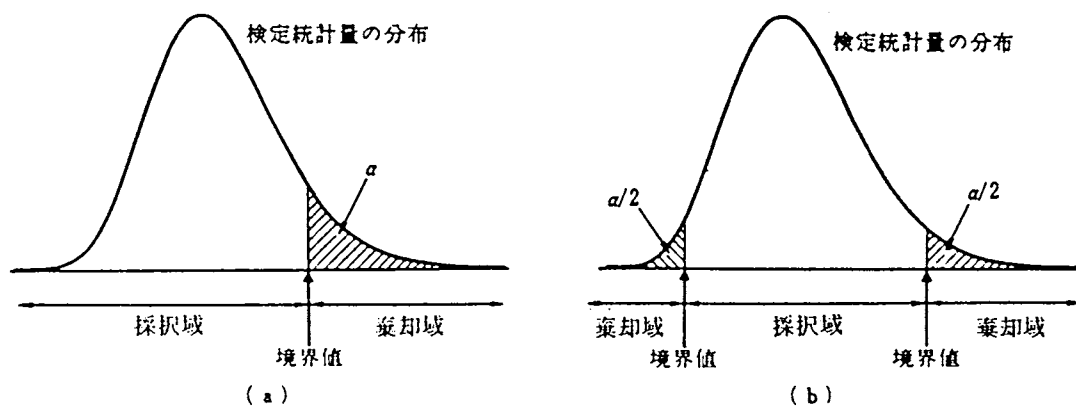


図 3. 1 仮説 H_0 の棄却域と採択域 ((a)片側検定, (b)両側検定)

(3) 帰無仮説、対立仮説

検定統計量の観測値が採択域に入ったならば、仮説 H_0 は棄てないが、その

場合でも仮説 H_0 が正しいことが検証されたとはみなされない。むしろ、仮説 H_0 が正しくないことは、今回の調査では検証されなかったという消極的な態度をとり、白紙に戻すのである。その意味で、この仮説 H_0 を帰無仮説という。一方、仮説 H_0 が棄却されたときに採用する仮説 H_1 を対立仮説という。この仮説 H_1 は積極的に採用することができる。なぜならば、検定統計量の観測値が棄却域に入り対立仮説 H_1 を採用するとき、この判断が誤っている確率（図 3. 1 中の α ）は小さい値であるからである。したがって、証明したい仮説を対立仮説として設定し、棄却するのが目的で設定するのが帰無仮説であると言える。帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は、いずれか一方だけが必ず成立し、同時に成立することはない。

(4) 二種類の判断の誤り

このような仮説の検定を行おうとする際、誤った判断をする二通りの可能性が考えられる。一つは帰無仮説 H_0 が正しいにもかかわらず、検定統計量が棄却域にあったため、これを棄却してしまう誤りである。この誤りを第一種の誤りという。もう一つは仮説 H_0 が正しくないにもかかわらず、検定統計量が棄却域の外にあったため、これを棄却しない誤りである。この誤りを第二種の誤りという。この第二種の誤りは対立仮説に関係して決まるものである。正しくない判断をするこれら 2 通りの可能性と、正しい判断をする 2 通りの可能性を一括して表 3. 1 に示す。

表 3. 1 二種類の判定の誤り

	仮説 H_0 を採択	仮説 H_1 を採択
仮説 H_0 が真	正しい判定	第一種の誤り
仮説 H_1 が真	第二種の誤り	正しい判定

検定統計量を t として表して、仮説 H_0 のもとでの確率密度関数を $f(t | H_0)$ とすると、第一種の誤りの確率 α は

$$\alpha = \int_{\epsilon}^{\infty} f(t | H_0) dt \quad (3.1)$$

で与えられる。同様に仮説 H_1 のもとでの確率密度関数を $f(t | H_1)$ とすると第二種の誤りの確率 β は

$$\beta = \int_{-\infty}^{\epsilon} f(t | H_1) dt \quad (3.2)$$

となる (図 3. 2 参照)。ただし、確率密度関数 $f(t | H_1)$ は未知となる場合も多く、確率 β を直接求められない場合もある。

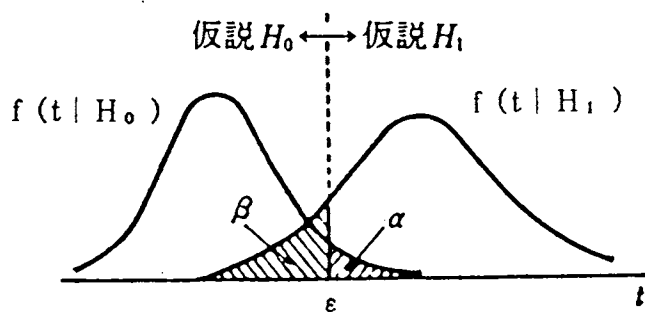


図 3. 2 第一種、第二種の誤りの確率

α と β は、いずれも小さいほうが望ましいが、図 3. 2 からわかるように一方を小さくしようとすると他方が大きくなってしまい、両者とも小さくすることは一般に不可能である。したがって、この種の問題で重要なことは、 α と β の相対的な大ききで満足できるような棄却域を選ぶことである。しかしこのような棄却域の選び方をすることは、二種類の誤りの相対的な重要性について個々に議論しなければならないし、また複雑な計算を必要とすることにもなる。

ここでは、このような複雑な議論を避けるために、第一種の誤りの確率 α が常に、ある値になるように棄却域を定める方法を用いる。この時の α を有意水準または危険率という。

仮説検定の具体的手順は、まず観測データによって造成される適当な統計量 t を決め、その標本分布を利用して有意水準 α をある値に固定して、これよりしきい値 ϵ を定めれば、

$t \geq \varepsilon$ なら H_0 を棄却 (H_1 を採択)

$t < \varepsilon$ なら H_0 を棄却しない

のような判定方法が得られる。

これまでに述べた統計的仮説検定の考え方をまとめたものを、図 3. 3 に示す。

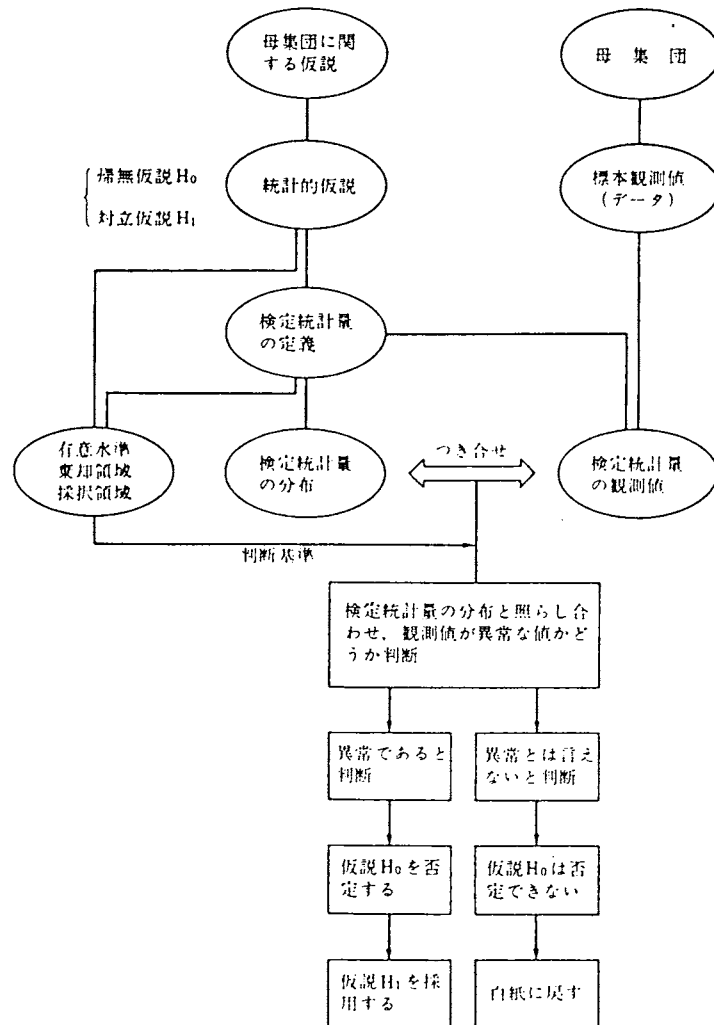


図 3. 3 統計的仮説検定の考え方

3. 2. 2 カイ 2 乗検定

大きさ n の標本を k 個の互いに重なり合わないクラス C_1, C_2, \dots, C_k に分類して、各クラスに入る度数 (観測度数) が、仮定したある理論から予想され

る度数（期待度数）に適合するかどうかの検定を適合度検定という。

いま、ある既知の多項分布 $f(x|\theta)$ に従うと仮定したときの各クラスに入る期待度数 $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_k$ を求めておき、標本としての観測値が各クラスに属する観測度数が $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_k$ となったとき（表 3. 2 参照）、観測度数と期待度数との適合の度合いを検定する方法について、以下に述べる。

表 3. 2 期待度数と観測度数

クラス	C_1	C_2	C_k
期待度数	N_1	N_2	N_k
観測度数	F_1	F_2	F_k

これら二組の値のくいちがいを表す統計量を次のように定義する。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_i - N_i)^2}{N_i} \quad (3.3)$$

式 (3. 3) を見れば明らかなように、 χ^2 の値は観測度数と期待度数が完全に一致したとき 0 となり、その差が大きくなれば χ^2 は大きくなる。したがって、 χ^2 の値が大きくなればなるほど、観測値と仮定した多項分布 $f(x|\theta)$ との一致は弱くなると考えられる。

式 (3. 3) で求めた統計量 χ^2 は標本の大きさ n が大きいとき、近似的に自由度 $k - 1$ のカイ 2 乗分布に従うことが知られている。ここで、カイ 2 乗分布について簡単に説明する。

自由度 m のカイ 2 乗分布をする χ^2 というのは、

$$f(\chi^2) = \frac{(\chi^2)^{m/2-1} \exp(-\chi^2/2)}{2^{m/2} \Gamma(m/2)} \quad (3.4)$$

をその確率密度関数とする連続確率変数である。ここで $\Gamma(x)$ はガンマ関数で

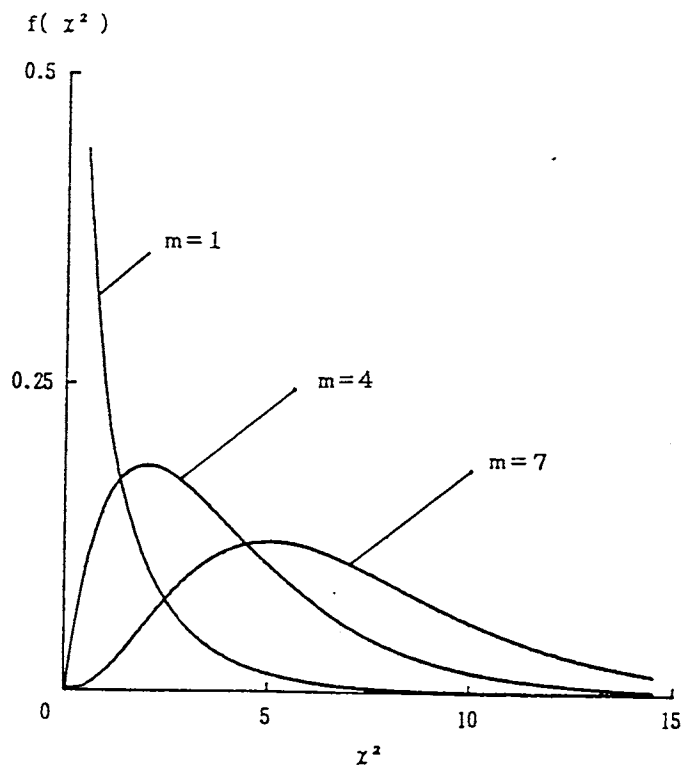


図 3. 4 カイ 2 乗分布の確率密度関数 $f(x^2)$

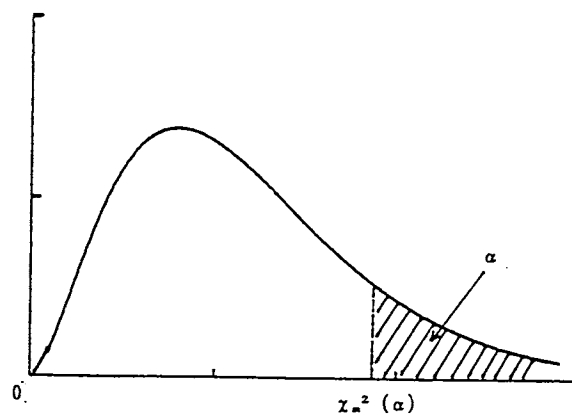


図 3. 5 カイ 2 乗分布の α 点

ある。カイ 2 乗分布の期待値（平均値）は m 、分散は $2m$ となる。

カイ 2 乗分布の注目すべき特徴は、その確率密度関数のグラフの形状が自由度 m の値のみで決まることである。そのグラフは自由度 m によって形は異なり、 m の値が大きくなると $f(x^2)$ の値を最大にする x^2 の値は右の方へ移動し、分散も大きくなる。図 3. 4 はいくつかの m の値に対するカイ 2 乗分布のグラフの概形を示したものである。

x^2 が自由度 m のカイ 2 乗分布に従うとき、与えられた確率 α に対して

$$\alpha = \int_{\chi_0^2}^{\infty} f(\chi^2) d(\chi^2) \quad (3.5)$$

となる χ_0^2 を自由度 m のカイ 2 乗分布の α 点といい、 $\chi_m^2(\alpha)$ で表す。確率 α の値に対する自由度 m のカイ 2 乗分布の α 点は、カイ 2 乗分布表として表されている。

以上に述べたことは、 χ^2 という統計量を用いて適合度検定ができることを示している。すなわち、仮説を

帰無仮説 H_0 : 母集団分布は $f(x | \theta)$ である。

対立仮説 H_1 : 母集団分布は $f(x | \theta)$ でない。

のように設定し、適当な α の値を決めて $\chi_{k-1}^2(\alpha)$ を求めておけば

$\chi^2 \geq \chi_{k-1}^2(\alpha)$ なら H_0 を棄却して H_1 を採択

$\chi^2 < \chi_{k-1}^2(\alpha)$ なら H_0 を棄却しない (H_0 を採択する)。

という検定を行うことができる。

カイ 2 乗検定の手順をまとめて示すと、以下のようなになる。

手順(1) 観測値の分布がある分布に従うと仮定したとき、この仮定した分布の期待度数 N_i を計算する。

(2) 観測度数 F_i とのくいちがいを表す統計量 χ^2 の値を求める。

(3) カイ 2 乗分布表を用いて自由度 $k - 1$ の α 点 $\chi_{k-1}^2(\alpha)$ の値を求める。

(4) $\chi^2 \geq \chi_{k-1}^2(\alpha)$ ならば検定仮説 H_0 を棄却する。

ただし、カイ2乗検定を用いるときに注意しなければならないことがありこのことについて以下に述べる。

カイ2乗分布曲線は χ^2 の真の離散型分布に対する近似でしかないため、この曲線によるカイ2乗検定は近似がよいときにのみ用いるべきである。過去の経験と理論から、各クラスの期待度数が少なくとも5以上であれば、一般に近似は十分であることがわかっている。

したがって、もしあるクラスの期待度数が4以下のときは、上の条件が満たされるようにそのクラスを他のクラスとあわせ、期待度数を5以上にすることがある。カイ2乗検定にはこのような制約がある。

クラス	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
期待度数	4	8	8	10	10
観測度数	5	12	10	8	5

↓

クラス	C _{1, C₂}	C ₃	C ₄	C ₅
期待度数	12	8	10	10
観測度数	17	10	8	5

図 3. 6 カイ2乗検定の制約

3. 3 カイ2乗検定によるロボットの状態分析

前節で述べた統計的仮説検定の考え方を、実際にロボットの状態分析に適用してみる。本研究では、ロボットアームから得られる振動を利用してロボットの状態分析を行うことを提案し、振動分析を行うにあたって、振動の振幅の変化に注目することにした。以下に、その具体的な手法について説明する。

ロボットの状態分析を行うためには情報源であるロボットアームの振動が必要であるから、このアームの振動を測定して、そこから得られた振動波形を等時間間隔でサンプルしながらA/D変換を行い、振動波形データとして取り込む。その振動波形の振幅を図3.7のようにクラス(振幅の階級)C₁, C₂, ..., C_i, ..., C_kに分割し、振幅分布のヒストグラムを作成する。(今後、振幅を分割して求めた各区間C₁, C₂, ...をクラスと呼ぶことにする。)

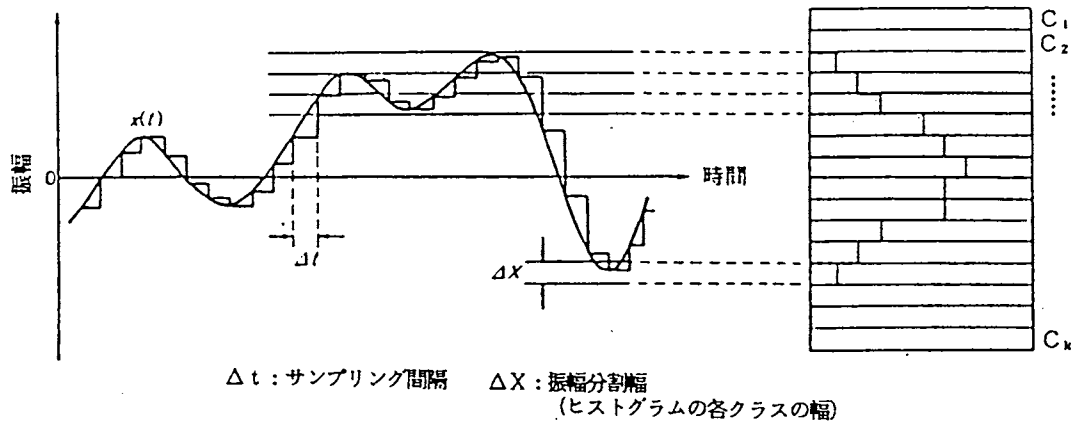


図 3. 7 振動波形とその振幅分布ヒストグラム

ある一定時間内での振動波形の振幅分布のヒストグラムにおいてクラス 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) とする。ただし、 N_i が 5 より小さいときは他のクラスと合わせ、それら全てを一つのクラスとし、 F_i もそのときのクラスに対応させて求める。

これら 2 組の値のくいちがいを表す統計量を

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_i - N_i)^2}{N_i} \quad (3.6)$$

とすれば、これは近似的に自由度 $k - 1$ のカイ 2 乗分布に従うことが分かっており、このことを利用してロボットの状態に関する仮説

仮説 H_0 : ロボットの状態が正常 (帰無仮説)

仮説 H_1 : ロボットの状態が異常 (対立仮説)

を検定することができる。

ロボットの状態が正常 (仮説 H_0) であれば χ^2 は相対的に小さな値となり、異常 (仮説 H_1) であれば χ^2 は相対的に大きな値となることが予想される。従って、有意水準 (危険率) α をある値に固定して、 $\varepsilon = \chi^2_{k-1}(\alpha)$ となるしきい値 ε をとり

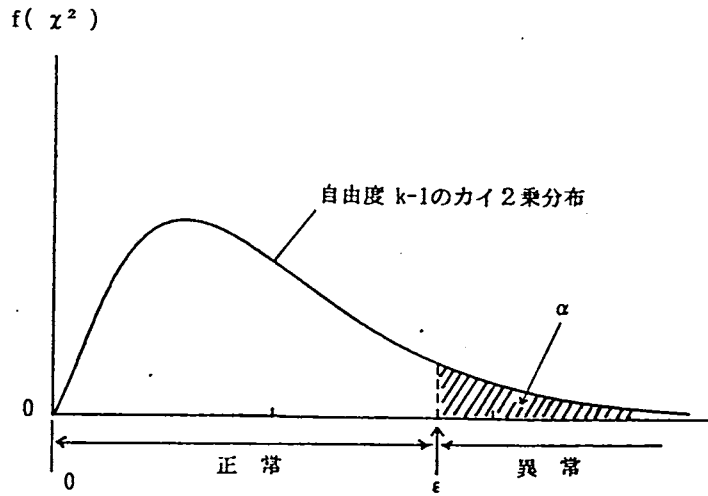


図 3. 8 カイ 2 乗検定による状態の判定

$$\chi^2 < \varepsilon \Rightarrow \text{正常 (H}_0\text{)}$$

$$\chi^2 \geq \varepsilon \Rightarrow \text{異常 (H}_1\text{)}$$

のような決定則が得られ（図 3. 8 参照）、これを用いてロボットの状態を認識することができる。

この方法は判定するまでの演算処理が簡単であり、容易に実現できる。ここでロボットの状態分析法の概念図を図 3. 9 に示す。

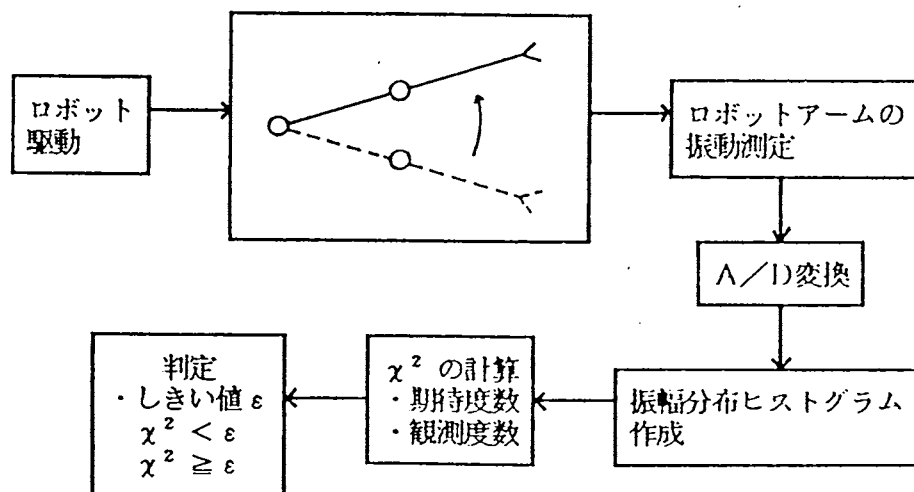


図 3. 9 ロボットの状態分析の手順

第4章 統計的手法による状態分析の実験

前章では、ロボットの状態分析法を統計的仮説検定問題として考え、カイ2乗検定を状態分析に適用することにした。このロボットの状態分析法の効果を検討するにあたって、個々の対象について実験などを通して経験的に行うのが、むしろ実際的手段であると考えられる。

そこで本章では、第2章で用いた2自由度関節型ロボットアームを使って、統計的手法によるロボットの状態分析を行うことにする。

4.1 統計的手法によるロボットの状態分析の検討手順

4.1.1 状態分析に必要な設定量の決め方

本研究では、ロボットアームの振動を情報源としてその信号処理にカイ2乗検定を応用した手法を用いて、ロボットの状態分析を行うことを提案したが、この手法を実際に用いるときには以下の設定量を決めておく必要がある。

- (a) 波形データ（アームの振動波形）のサンプリング間隔 Δt
- (b) 判定に必要なデータ数（サンプル数） N
- (c) 振幅分布のヒストグラムにおける振幅分割幅（各クラスの幅） ΔK
- (d) 有意水準 α および正常かどうかの判定基準となるしきい値 ε

これらの設定量の決め方を以下に示す。

(1) サンプリング間隔 Δt

アナログ波形のサンプリングを行う場合、サンプリング間隔が短ければそれだけアナログ波形情報は忠実に取り出される。しかし、そのためにはA/D変換が高速である必要があるうえに、データ数が膨大になり直接収納メモリの容

量に影響してくる。そこで、できるだけサンプル点数を減らし、かつ、もとのアナログ波形情報が失われないようにしなければならないが、この要求を満たすための基本的なルールが、一般にサンプリング定理として知られているものである。

ここで、サンプリング定理を簡単に表現すると、

「もし波形データが f_c (Hz) 以上の高周波成分を含まないとするならば、 $\Delta t \leq 1 / 2 f_c$ の間隔でサンプリングすれば、元の波形を再現することができる。」

となる。

本研究の実験では、サンプリング間隔をあらかじめ 12 msec と決めておく。理由は、実験において設定量を変化させる場合、変化させる設定量の数が多いと、それぞれの組み合わせによる場合分けが多くなるためである。サンプリング間隔の決め方は、アームの振動波形の周波数成分を FFT アナライザで調べ、それをもとにしてサンプリング定理を用いてサンプリング間隔を決定する。このときある程度オーバ・サンプリング状態にするのが無難である。

(2) データ数 N とヒストグラムの振幅分割幅 ΔK

データ数 N とヒストグラムの振幅分割幅 ΔK を決定する場合には、

- (a) ロボットの状態変化をよく反映する (感度がよい)。
- (b) 演算時間をなるべく短くする。

という点を考慮しなければならない。

(a) の条件については、データ数 N に関しては、この数が多いほど波形情報も多くなり、状態を読み取り易くする、ということである。また振幅分割幅 ΔK に関しては、 ΔK の値によってクラスの個数も決まるわけであるが、この個数が多過ぎると、度数の変化が不規則になり分布全体としての特徴が読み取れず、逆に少な過ぎると、細部の情報が得られず分布の特徴が現れてこなくなるので、適当なクラスの個数すなわち振幅分割幅 ΔK を考えなければならない、ということである。

(b)の条件については、データ数 N が少なくなる、あるいは振幅分割幅 ΔK が大きくなるほど、判定を行うまでの演算時間が短くなる、ということである。

これらのことを考慮してデータ数 N と振幅分割幅 ΔK を決めるが、この場合 N と ΔK を別々に検討しないで N と ΔK の組み合わせで検討し、決定しなければならない。

(3) 有意水準 α としきい値 ε

自由度が求められているとき、しきい値 ε は有意水準 α の関数として計算することができる。しきい値 ε と有意水準 α の関係はすでにカイ2乗分布表にしめしてあり、有意水準 α を決めればしきい値 ε が求まる。

しきい値 ε を決定するとき、前章で述べたように、正常であるにもかかわらず異常と判断する誤り（第1種の誤り）と、異常であるにもかかわらず正常と判断する誤り（第2種の誤り）をどうするか考慮しなければならない。特に後者は、状態変化をどの程度読み取るか、ということに関係してくる。この2つの誤りの確率は一方を小さくしようとするとは他方が大きくなってしまい、両者とも小さくすることは不可能である。したがって、この二つの誤りの確率が相対的に満足できるように、しきい値 ε を決めなければならない。

4. 1. 2 ロボットの状態分析についての実験手順

統計的手法によるロボットの状態分析を用いて、ロボットの状態が正常か異常かを判定することができるか、実際に、第2章で用いた2自由度関節型ロボットアームモデルを使用して、判定してみることにする。

そこで、そのためにはロボットが正常な動作を行っているときのロボットの状態、および異常な動作を行っているとき（状態変化が起きたとき）のロボットの状態、それぞれの観測データから得られる統計量の分布について検討しなければならない。第一種の誤りの確率および第二種の誤りの確率が少なくなるよう、考慮しておかなければならないためである。

そこでまず、ロボットの状態が正常であるときの観測データより求めた統計量の分布（ばらつき）について調べ、しきい値 ε の変化によって判定がどうなる

か検討し、次に状態変化が生じたときについても同様に検討して、これらの結果をもとに判定に適したしきい値 ε を決めることにする。このとき、データ数 N およびヒストグラムの振幅分割幅 ΔK を、それぞれいろいろな値に変えてみ

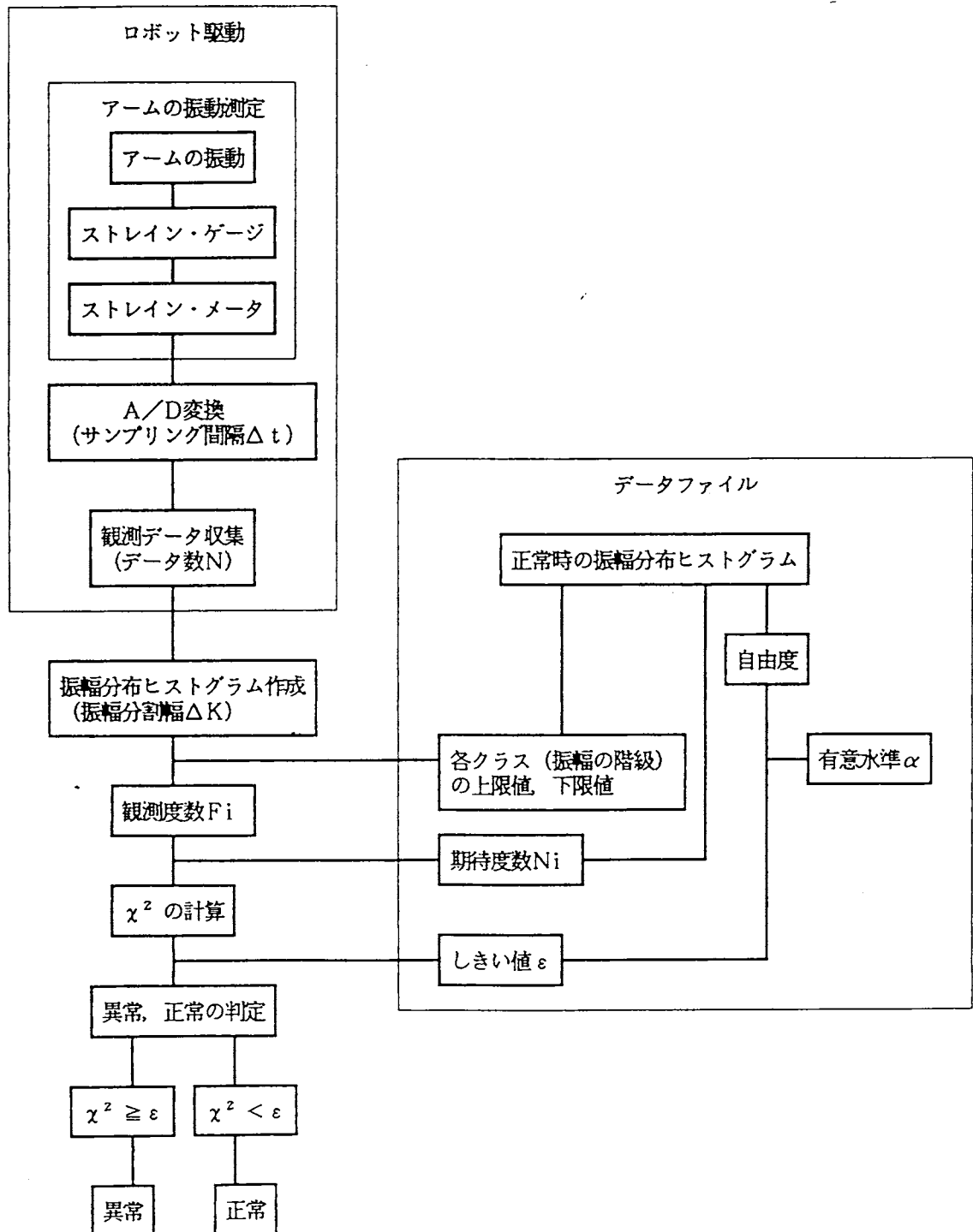


図 4. 1 実験手順

て、その影響についても検討する。

以下に、ロボットの状態が正常か異常かの判定を行う実験の手順を示す。

- 手順(1) ロボットアームに、あらかじめ決められた動作を行わせる。
- (2) ロボットアームを駆動しているときの、アームのたわみ振動をストレイン・ゲージにより測定する。
- (3) ストレイン・メータからの信号（観測データ）をA/D変換によってマイクロ・コンピュータに取り込む。
- (4) 観測データをもとにして、ある決まった時間内での振幅分布のヒストグラムを作成する。
- (5) あらかじめデータファイルに保存された期待度数を読み出して、(4)で求めた観測度数とのくいちがいを表す統計量 χ^2 の値を求める
- (6) しきい値 ε と χ^2 の値を比較して正常か異常かの判定を行い、正しく判定しているか、検討する。

次に、判定を行うための基準となる期待度数の作成手順を以下に示す。

- 手順(1) ロボットアームに正常な動作を行わせ、そのときのアームの振動をストレイン・ゲージにより測定する。
- (2) ストレイン・メータからの信号をA/D変換によって、マイクロコンピュータに取り込む。
- (3) このデータをもとにして、振幅分布のヒストグラムを求め度数分布表を作成する。ここで、各クラスの度数が4以下のものがあれば

5以上になるように他のクラスと合わせる。この度数を観測度数とする。またこのときのクラスの個数を求めておき、この個数から自由度を定めておく。

(4) 以上の結果をデータファイルとして保存しておく。

以上の手順に従って実験を行うが、今回の実験では観測データ収集後の演算処理は非実時間で行うことにする。つまり、ロボット駆動中に得られる振動波形データをいったんマイクロ・コンピュータのメモリ内に取り込み、ロボットの駆動命令が終了してから、判定するためのデータ処理演算を行うことにする。

この実験の対象とする状態変化（異常動作）として、いろいろと考えられるものの中から、本章ではロボットアームの速度変化、つまり決められた速度パターンと異なった場合を取り上げ、これについて検討する。他の状態変化については、次章で述べることにする。

4. 2 ロボットの正常状態における分析

この節では、ロボットの正常な動作を定めておき、状態分析に必要なデータを求めておく。そして、この正常動作をロボットに何回か行わせて、そのときの統計量 χ^2 を、それぞれについて計算して χ^2 の値のばらつきを調べ、データ数 N 、振幅分割幅 ΔK 、およびしきい値 ε の決め方によって、判定結果がどうなるか検討する。

4. 2. 1 ロボットの正常動作

ロボットの正常動作を次のように定める。

図4. 2に示すように第1、第2アームを同時に同じ方向へ 180° （つまりそれぞれのステッピング・モータを100ステップ）駆動する。このとき、両者の駆動ステッピング・モータの台形速度パターンは

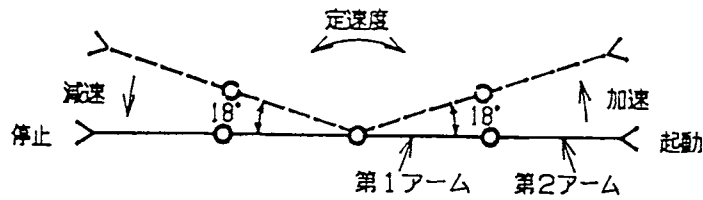


図 4. 2 ロボットの正常動作

加減速時間 0.72 sec (加減速時のステップ数 10ステップ)
 到達速度 25 pps
 定常速度時間 3.2 sec (定常速度時のステップ数 80ステップ)

となるように設定する (図 4. 3 参照)。

このときのロボットアームの振動波形を図 4. 4 に示す。ただし、停止後の残留振動は示していない。

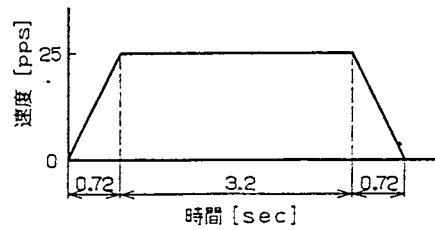


図 4. 3 正常動作の速度パターン

この図より、加速区間では起動時に生じた減衰自由振動と強制振動が重なっており、振幅が大きくなっていることが分かる。

波形データを処理するために設定したサンプリング間隔は 12 msec であるから、サンプル数 (観測データの数) は、加減速区間でそれぞれ 60 個、定常速

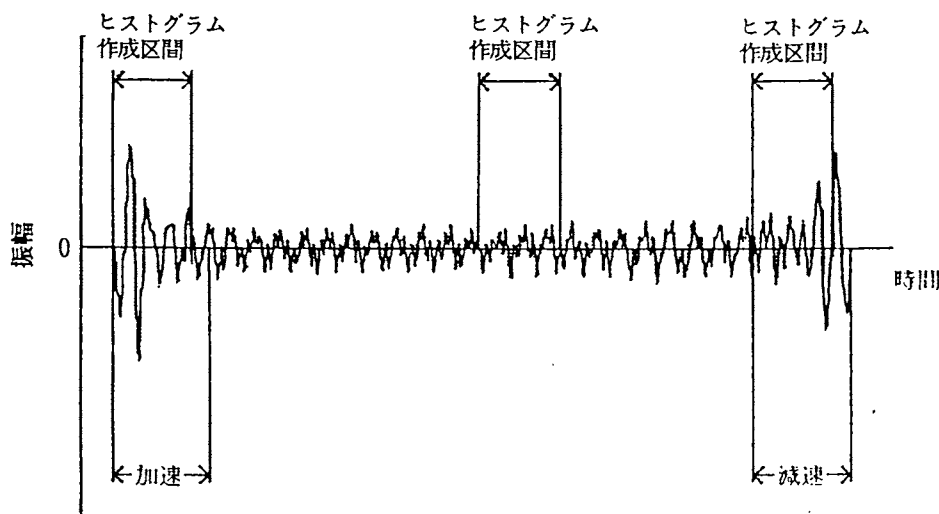


図 4. 4 正常動作時の振動波形

度区間では266個、全体では386個である。

状態の分析を行うために、振動波形の振幅分析のヒストグラムを、定常速度区間、加速区間、および減速区間でそれぞれ作成し、これの各クラス（階級）の度数を求め、判定の基準となる期待度数を決める。このとき、期待度数が4以下であれば、5以上になるように他のクラスとあわせる。また、このときのクラスの個数を求めておく。これは自由度に関係する量である。

以上に述べたことを、データ数Nを40個、振幅分割幅（各クラス幅） ΔK を $1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の場合を例にして、これから具体的に説明する。

この場合の振幅分布を表す度数分布表とヒストグラムを、

- (a) 定常速度区間：観測データはサンプル番号が194～233
- (b) 加速区間：観測データはサンプル番号が1～40
- (c) 減速区間：観測データはサンプル番号が327～366

それぞれについて表4.1、図4.5に示す。表4.1の期待度数(1)は度数を

表4.1 正常時の度数分布表

(a) 定常速度区間

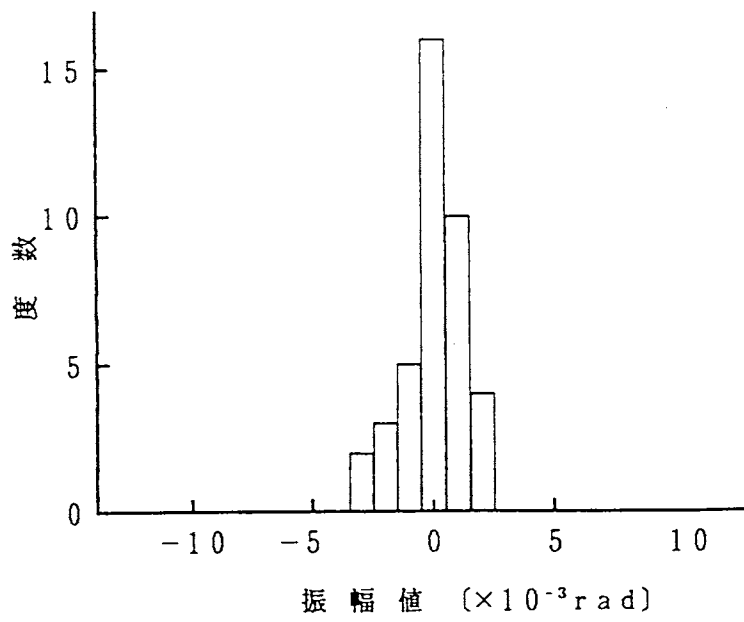
振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)
~-3.5	0	5
-3.5~-2.5	2	
-2.5~-1.5	3	
-1.5~-0.5	5	
-0.5~0.5	16	16
0.5~1.5	10	14
1.5~2.5	4	
2.5~	0	

(c) 減速区間

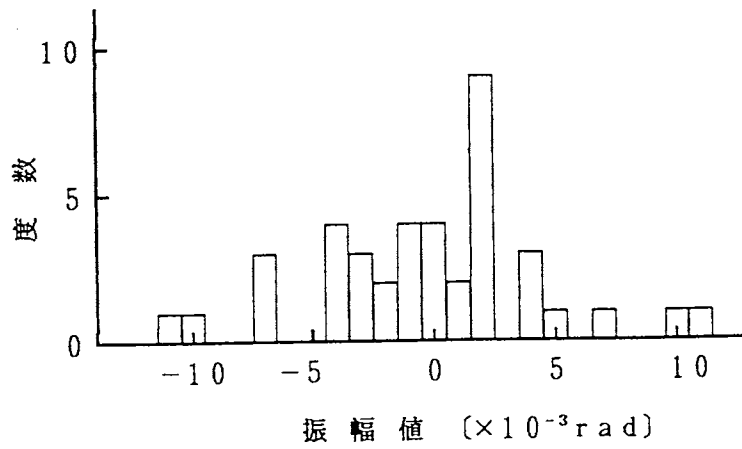
振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)
~-4.5	0	8
-4.5~-3.5	1	
-3.5~-2.5	2	
-2.5~-1.5	5	
-1.5~-0.5	9	9
-0.5~0.5	3	13
0.5~1.5	10	
1.5~2.5	3	
2.5~3.5	7	10
3.5~	0	

(b) 加速区間

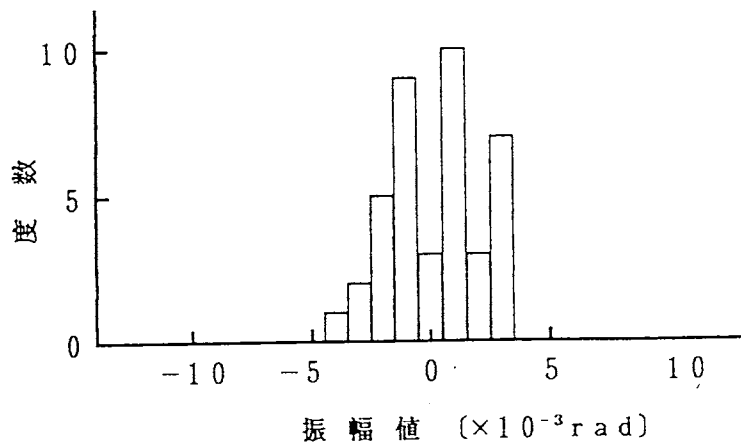
振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)
~-11.5	0	5
-11.5~-10.5	1	
-10.5~-9.5	1	
-9.5~-8.5	0	
-8.5~-7.5	0	
-7.5~-6.5	3	7
-6.5~-5.5	0	
-5.5~-4.5	0	
-4.5~-3.5	4	
-3.5~-2.5	3	6
-2.5~-1.5	2	
-1.5~-0.5	4	
-0.5~0.5	4	6
0.5~1.5	2	
1.5~2.5	9	9
2.5~3.5	0	
3.5~4.5	3	
4.5~5.5	1	
5.5~6.5	0	
6.5~7.5	1	
7.5~8.5	0	
8.5~9.5	0	
9.5~10.5	1	
10.5~11.5	1	
11.5~	0	



(a) 定常速度区間



(b) 加速区間



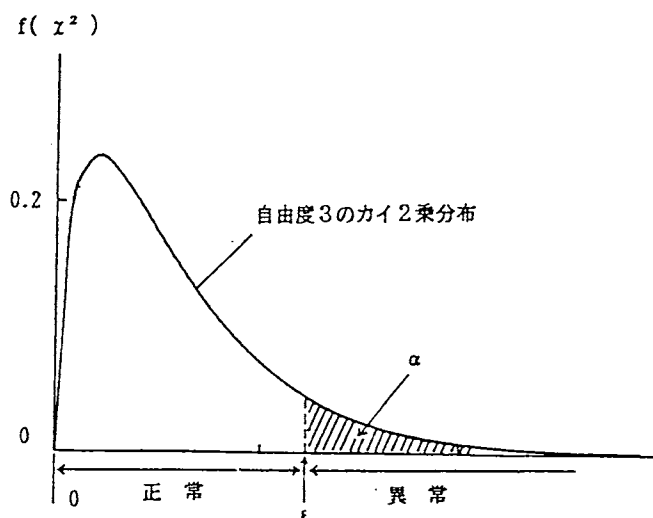
(c) 減速区間

図4. 5 正常時の振幅分布ヒストグラム

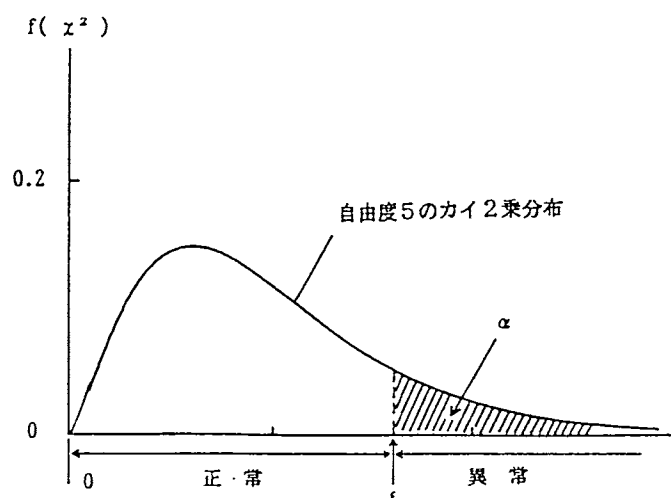
5以上に修正するまえの期待度数で、期待度数(2)は度数が5以上になるように修正した期待度数である。以後このような表現を用いる。

このときの度数分布表のクラスの個数は、定常速度区間で4、加速区間で6、減速区間で4となっている。これは、自由度がそれぞれ3、5、3ということの意味している。

統計量 χ^2 はカイ2乗分布に従うので、このように自由度が分かれば、その確率密度関数がすでに決まり、有意水準 α が定められると、しきい値 ε もカイ2乗分布表より決定される。この例の場合では、統計量 χ^2 の分布を表す確率密度関数は図4.6のようになり、有意水準 α としきい値 ε の関係は表4.2のようになる。



(a) 自由度3の場合



(b) 自由度5の場合

図4.6 統計量 χ^2 の確率密度関数

表 4. 2 有意水準としきい値の関係

有意水準	0. 1	0. 05	0. 01
自由度3のときのしきい値	6. 25	7. 81	11. 34
自由度5のときのしきい値	9. 24	11. 07	15. 09

状態分析を行ったとき、統計量 χ^2 の値が図 4. 6 の斜線外に入った場合は状態は正常で、斜線内に入った場合は状態は異常である。したがって、状態が正常であるときは斜線外に χ^2 の値が入り、異常であるときは斜線内に入るようにし、その逆の場合が起こる確率を少なくしなければならない。

以上に述べたことを、データ数 N を 20、30、40、50、60 とした場合、かつ、振幅分割幅 ΔK を 1、2、3、4 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$) とした場合のそれぞれの組み合わせで行った。そのときの自由度を定常速度区間、加速区間、および減速区間それぞれについて表 4. 3 に示す。

表 4. 3 の中で自由度が 0 となるものがあるが、これについて以下に説明する。

カイ 2 乗検定の制約として、期待度数が 5 以上でなければならず、そのため度数が 4 以下の場合、他のクラスと合わせる必要があり、その結果として、クラスの個数が一つになったことを意味する。このことを具体的に表 4. 4 に示す。

表 4. 3 データ数、振幅分割幅と自由度の関係

(a) 定常速度区間

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	1	1	0	0
	30	2	1	0	0
	40	3	2	1	0
	50	4	2	2	0
	60	4	2	2	2

表 4. 3 データ数, 振幅分割幅と自由度の関係

(b) 加速区間

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	2	2	2	2
	30	4	3	3	3
	40	5	4	3	3
	50	5	5	3	3
	60	5	5	3	3

(c) 減速区間

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	2	1	1	0
	30	3	2	2	1
	40	3	2	2	2
	50	4	4	2	2
	60	6	5	4	3

そこで判定を行うとき、観測データのクラスもこの正常時のクラスと同じでなければならないから、クラスの個数は一つとなり、その中にデータ値がすべてはいってしまう。したがって、観測度数と期待度数は当然一致することになり、判定が不可能ということになる。

以上より、自由度が0の場合は判定することができない。この場合でも判定を行いたいときは、振幅分割幅 ΔK をさらに小さくするか、あるいは別の方法を考えなければならない。

表 4. 4 自由度 0

振幅 ($\times 10^{-3}$ rad)	期待度数 (1)	期待度数 (2)
~ -6.0	0	18
$-6.0 \sim -2.0$	1	
$-2.0 \sim 2.0$	18	
$2.0 \sim 6.0$	1	
$6.0 \sim$	0	

4. 2. 2 ロボットの正常動作における状態分析

先に決めた正常動作と同じ動作をロボットアームに10回行わせ、それぞれについてロボットの状態が正常と正しく判断するか、調べてみた。その過程を10回行ったうちの一つを例にとって説明する。

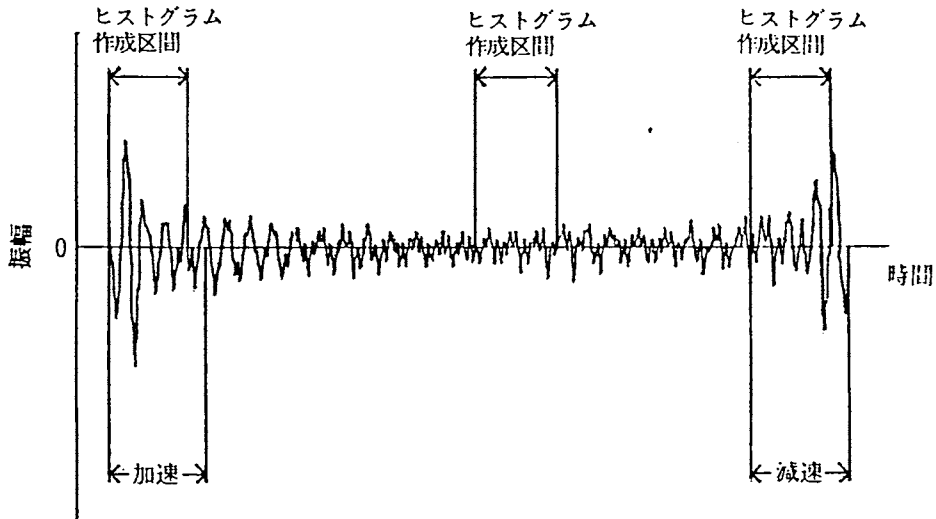


図4. 7 正常動作と同様な動作のときの振動波形

この例の場合、ロボットの動作時の振動波形は図4. 7のようになり、波形の様子は正常動作のとき^の波形（図4. 4）とほぼ同じである。

この振動波形の振幅分布を表すヒストグラムおよび観測度数分布表を、定常速度区間、加速区間および減速区間のそれぞれについて、図4. 8、表4. 5に示す。このときのデータ数 N は40個、振幅分割幅 ΔK は $1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ である。表4. 5の観測度数(1)は、各クラスが期待度数(1)に対応するように作成したもので、観測度数(2)は、期待度数(2)に対応させたものである。以後このように表現する。

この結果をもとにして、統計量 χ^2 を計算すると次のようになる。

定常速度区間	$\chi^2 = 2.61$	(自由度 3)
加速区間	$\chi^2 = 2.62$	(自由度 5)
減速区間	$\chi^2 = 1.43$	(自由度 3)

表 4. 5 期待度数と観測度数の分布

(a) 定常速度区間

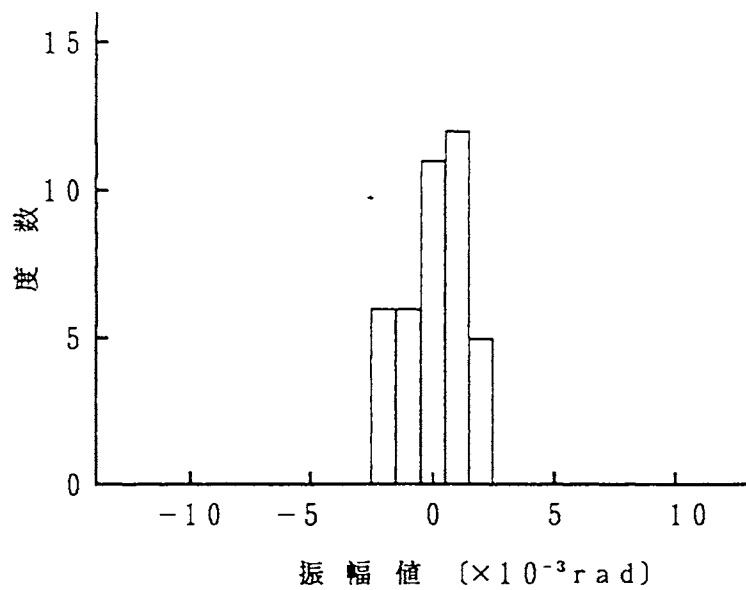
振幅 ($\times 10^{-3}$ rad)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)
~-3.5	0	5	0	6
-3.5~-2.5	2		0	
-2.5~-1.5	3		6	
-1.5~-0.5	5	5	6	6
-0.5~0.5	16	16	11	11
0.5~1.5	10	14	12	17
1.5~2.5	4		5	
2.5~	0		0	

(b) 加速区間

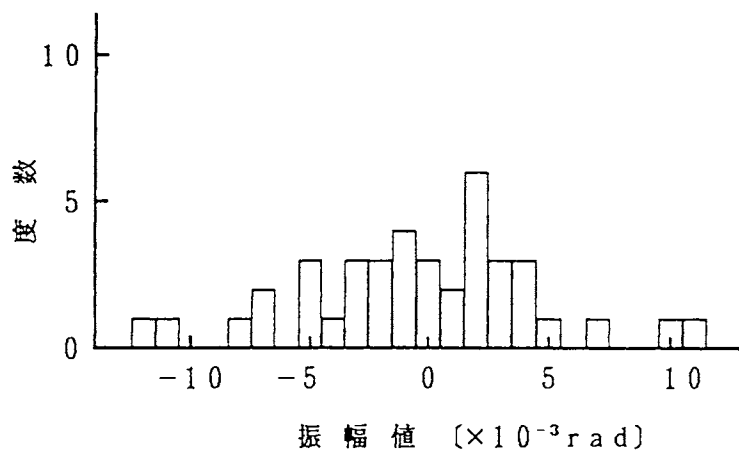
振幅 ($\times 10^{-3}$ rad)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)
~-12.5	0	5	0	5
-12.5~-11.5	0		1	
-11.5~-10.5	1		1	
-10.5~-9.5	1		0	
-9.5~-8.5	0		0	
-8.5~-7.5	0		1	
-7.5~-6.5	3	2	7	
-6.5~-5.5	0	0		
-5.5~-4.5	0	3		
-4.5~-3.5	4	1		
-3.5~-2.5	3	3		
-2.5~-1.5	2	3		
-1.5~-0.5	4	4	7	
-0.5~0.5	4	3		
0.5~1.5	2	6	2	5
1.5~2.5	9	9	6	6
2.5~3.5	0	7	3	10
3.5~4.5	3		3	
4.5~5.5	1		1	
5.5~6.5	0		0	
6.5~7.5	1		1	
7.5~8.5	0		0	
8.5~9.5	0		0	
9.5~10.5	1		1	
10.5~11.5	1		1	
11.5~	0		0	

(c) 減速区間

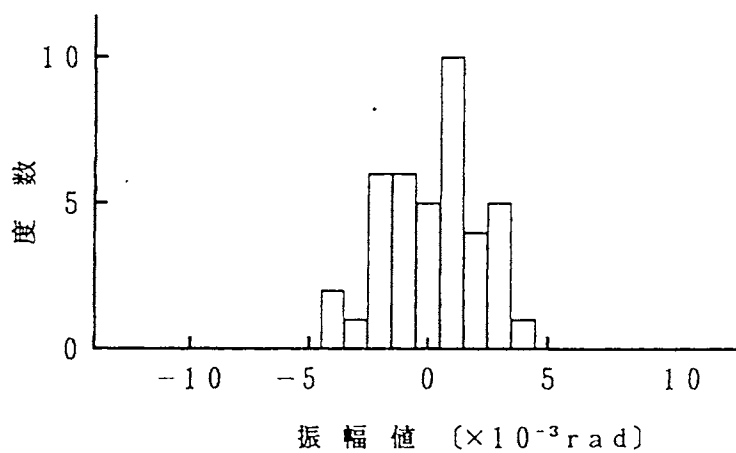
振幅 ($\times 10^{-3}$ rad)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)
~-4.5	0	8	0	9
-4.5~-3.5	1		2	
-3.5~-2.5	2		1	
-2.5~-1.5	5		6	
-1.5~-0.5	9	9	6	6
-0.5~0.5	3	13	5	15
0.5~1.5	10		10	
1.5~2.5	3	10	4	10
2.5~3.5	7		5	
3.5~4.5	0		1	
4.5~	0		0	



(a) 定常速度区間



(b) 加速区間



(c) 減速区間

図4. 8 正常動作と同じ動作をしたときの振幅分布ヒストグラム

有意水準 α を 0.1、0.05、0.01 とした場合のしきい値 ε はカイ 2 乗分布表より、表 4.6 のようになる。

表 4.6 有意水準としきい値

有意水準		0.1	0.05	0.01
しきい値	定常速度区間	6.25	7.81	11.34
	加速区間	9.24	11.07	15.09
	減速区間	6.25	7.81	11.34

状態の判定方式は

$$\chi^2 < \varepsilon \Rightarrow \text{正常}$$

$$\chi^2 \geq \varepsilon \Rightarrow \text{異常}$$

であるから、これを用いて判定を行うと表 4.7 のようになる。

表 4.7 判定

有意水準	0.1	0.05	0.01
定常速度区間	正常	正常	正常
加速区間	正常	正常	正常
減速区間	正常	正常	正常

表 4.7 より、この場合、 $\alpha = 0.1, 0.05, 0.01$ のすべてにおいて、ロボットの状態が正常であったと、正しい判断をしていることになる。

10 回の実験において、このような作業をデータ数 N を 20, 30, 40, 50, 60 (個) としたとき、および振幅分割幅 ΔK を 1, 2, 3, 4 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$) としたとき、それぞれの組み合わせの場合について行った。

その結果、10 回の実験のうち何回、状態が正常であると正しく判断したかを、(正しく判断した回数) / 10 の形式で表 4.8 に示す。

この結果について考察すると、定常速度区間、加速区間および減速区間のそれぞれにおいて、 $\alpha = 0.05, 0.01$ のときは、ほとんど判断の誤り (第一種の誤り) が生じていないといえる。しかし、 $\alpha = 0.1$ のときに判断の誤

表 4. 8 (a) 正しく判断した回数 (定常速度区間)

$\alpha = 0.1$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	——	——
	30	8/10	10/10	——	——
	40	8/10	8/10	9/10	——
	50	9/10	9/10	9/10	——
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

$\alpha = 0.05$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	——	——
	30	10/10	10/10	——	——
	40	9/10	9/10	10/10	——
	50	10/10	10/10	10/10	——
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

$\alpha = 0.01$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	——	——
	30	10/10	10/10	——	——
	40	10/10	9/10	10/10	——
	50	10/10	10/10	10/10	——
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

表 4. 8 (b) 正しく判断した回数 (加速区間)

$\alpha = 0.1$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	10/10	10/10
	30	10/10	10/10	10/10	10/10
	40	10/10	10/10	10/10	10/10
	50	9/10	9/10	10/10	10/10
	60	8/10	9/10	8/10	9/10

$\alpha = 0.05$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	10/10	10/10
	30	10/10	10/10	10/10	10/10
	40	10/10	10/10	10/10	10/10
	50	10/10	10/10	10/10	10/10
	60	9/10	10/10	10/10	10/10

$\alpha = 0.01$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	10/10	10/10
	30	10/10	10/10	10/10	10/10
	40	10/10	10/10	10/10	10/10
	50	10/10	10/10	10/10	10/10
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

表 4. 8 (c) 正しく判断した回数 (減速区間)

$\alpha = 0.1$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	10/10	—
	30	10/10	10/10	10/10	10/10
	40	10/10	10/10	10/10	10/10
	50	10/10	10/10	9/10	10/10
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

$\alpha = 0.05$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	10/10	—
	30	10/10	10/10	10/10	10/10
	40	10/10	10/10	10/10	10/10
	50	10/10	10/10	10/10	10/10
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

$\alpha = 0.01$:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	10/10	10/10	10/10	—
	30	10/10	10/10	10/10	10/10
	40	10/10	10/10	10/10	10/10
	50	10/10	10/10	10/10	10/10
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

りが生じることがある。 $\alpha = 0.1$ というのは、判断を誤る確率が0.1（10%）つまり10回のうち1回は判断の誤りが生じる可能性があるということであり、このため、このような結果が出たと思われる。しかし、データ数や振幅分割幅の値の選び方によっては、全て正しく判断している場合もある。

データ数、振幅分割幅と判定結果との関係について調べると、ここでは、両者の関係があまりはっきりしていない。データ数が多くなる、あるいは、振幅分割幅が細かくなると判断の誤りを生じる割合が多くなっているようにみえるが、これは実験装置に何らかの外乱が加わり、ロボットアームの動作自体が正常でなかったため、判断を誤った可能性もあり、はっきりと結論を述べることはできない。

以上より、実際に状態の判断を行う場合、有意水準 α を0.05、あるいは0.01にしてしきい値 ε を決めれば、判断の誤りをかなり少なくすることができる。

4.3 ロボットの状態変化の分析

本節では、ロボットの状態が変化したとき、そのことを正しく判断するか、ということについて検討する。特に、データ数 N や振幅分割幅 ΔK 、または、しきい値 ε の値によって判定結果がどうなるか、検討することにする。

状態分析の対象として、ロボットアームの速度が途中で変化した場合を取り上げ、速度の変化を台形速度パターンにおける定常速度の変化として考える。また、加速区間や減速区間での加速度の変化についても合わせて検討する。

4.3.1 定常速度区間での速度変化

ロボットアームの正常動作時の速度パターン（図4.3を参照）において、図4.9のように定常速度区間で速度が変化するとき、これを読み取ることができるか、つまり状態が異常であると判断す

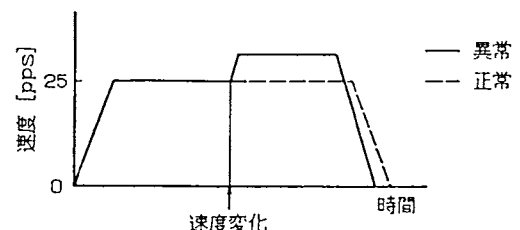


図4.9 速度変化

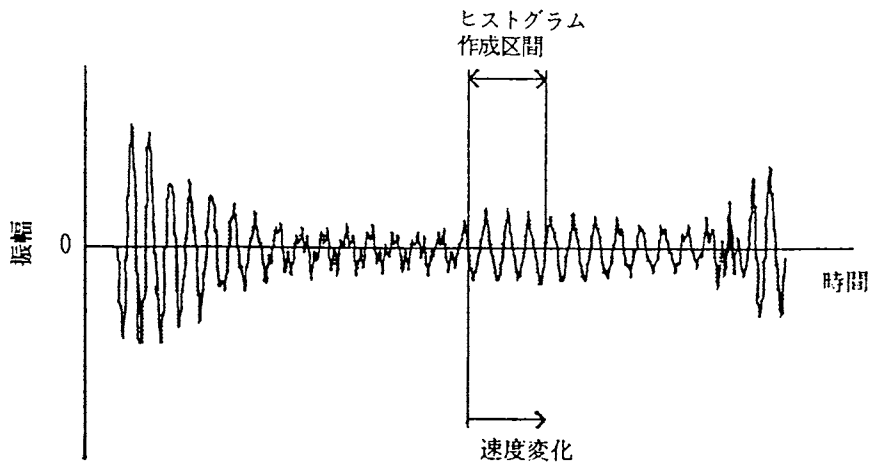


図 4. 10 速度が変化したときの振動波形

ることができるかどうかの実験を行った。

速度の変化として 25 pps の定常速度が、ステッピング・モータが 1 ステップ駆動する間に、20 pps , 30 pps , 35 pps , 40 pps , 45 pps , 50 pps に変化した場合の六通りについて検討する。この中で、速度が 25 pps から 30 pps に変化した場合を例に、判定を行うまでの過程を説明する。

この場合のアームの振動波形を図 4. 10 に示す。この波形と正常なときの波形 (図 4. 4) との比較より、速度が変化したとき振動波形の振幅にその変化が反映しているのが分かる。

速度が変化したときの、振動波形の振幅分布を表すヒストグラム、および観測度数分布表を、データ数 N が 40 個、振幅分割幅 ΔK が $1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の場合について、図 4. 11、表 4. 9 に示す。

表 4. 9 期待度数と観測度数の分布 (速度変化)

振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)
~-3.5	0		0	
-3.5~-2.5	2	5	10	15
-2.5~-1.5	3		5	
-1.5~-0.5	5	5	3	3
-0.5~0.5	16	16	6	6
0.5~1.5	10		5	
1.5~2.5	4	14	6	16
2.5~3.5	0		2	
3.5~4.5	0		3	
4.5~	0		0	

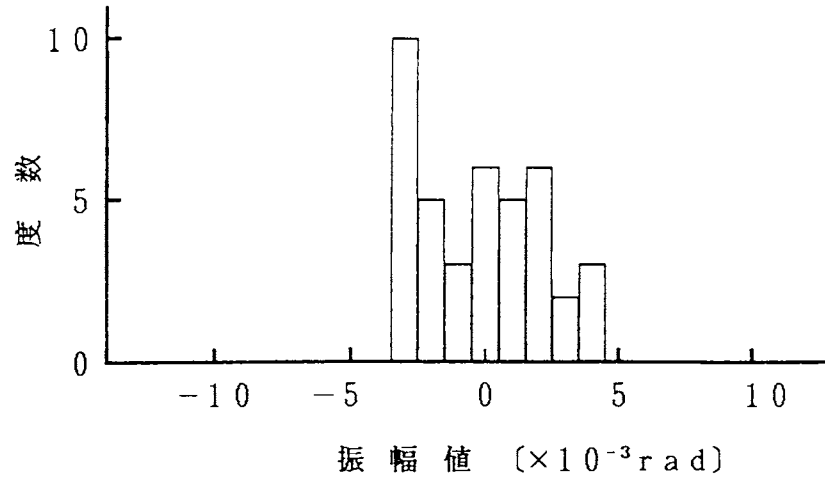


図4. 11 状態変化時の振幅分布ヒストグラム

観測度数と期待度数をもとにして、統計量 χ^2 の計算を行うと次のようになる。

$$\chi^2 = 22.52$$

有意水準 $\alpha = 0.05$, 0.01 に対するしきい値 ε は

$$\text{有意水準 } \alpha = 0.05 \text{ のとき、 } \varepsilon = 7.81$$

$$\text{有意水準 } \alpha = 0.01 \text{ のとき、 } \varepsilon = 11.34$$

となり、両者とも $\chi^2 \geq \varepsilon$ であるから、 $\alpha = 0.05$, 0.01 の両方の場合でロボットの状態は異常であると正しく判断している。

以上に述べた判定作業を、速度が 25 pps から 20 pps , 30 pps , 35 pps , 40 pps , 45 pps , および 50 pps に変化した場合について、それぞれ行う。このとき、データ数 N と振幅分割幅 ΔK は、 $N = 20, 30, 40, 50, 60$ (個)、 $\Delta K = 1, 2, 3, 4$ ($\times 10^{-3}$ rad) の組み合わせとし、それぞれについて判定を行う。この実験を 10 回ずつ行い、そのときの結果の一部を表 4. 10 に示す。この場合、異常と判定したものが正しく判断したことになり正常と判定したものが誤った判断をしたことになる。表 4. 10 では、(正しく判断した回数) / 10 の形式で示している。

この結果について考察すると、データ数 N と振幅分割幅 ΔK の値の選び方によって、誤った判断をする確率が大きくなったり、判定が不可能 (自由度が 0 ということ ; - で表現している) になったりする場合がある。

表 4. 10 (a) 正しく判断した回数 ($\alpha = 0.05$)

25pps → 30pps:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	4/10	0/10	—	—
	30	10/10	0/10	—	—
	40	10/10	10/10	10/10	—
	50	10/10	10/10	10/10	—
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

25pps → 35pps:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	4/10	1/10	—	—
	30	10/10	4/10	—	—
	40	10/10	10/10	10/10	—
	50	10/10	10/10	10/10	—
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

25pps → 40pps:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/10	1/10	—	—
	30	10/10	2/10	—	—
	40	10/10	10/10	10/10	—
	50	10/10	10/10	10/10	—
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

表 4. 1 0 (b) 正しく判断した回数 ($\alpha = 0.01$)

25pps → 30pps:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	3/10	0/10	—	—
	30	10/10	0/10	—	—
	40	10/10	10/10	10/10	—
	50	10/10	10/10	10/10	—
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

25pps → 35pps:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	4/10	0/10	—	—
	30	10/10	0/10	—	—
	40	10/10	10/10	10/10	—
	50	10/10	10/10	10/10	—
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

25pps → 40pps:

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/10	0/10	—	—
	30	10/10	2/10	—	—
	40	10/10	10/10	10/10	—
	50	10/10	10/10	10/10	—
	60	10/10	10/10	10/10	10/10

判定を誤る確率の傾向としては、データ数 N が多くなる程、または振幅分割幅 ΔK が小さくなる程、正確に判定を行う確率が大きくなる。この理由は、データ数が少ない場合、十分な情報が得られないことと、振幅分割幅が大きいとクラスの個数が少なくなり、度数分布が大まかになって度数分布状態を把握しにくくなったことによる。

データ数 N と振幅分割幅 ΔK の値は、分析を行う計算時間に関係することも考慮しなければならない。 N が少なくなる程、または ΔK が大きくなる程計算時間は短くなる。したがって、 N と ΔK の値を決定する場合、判定の正確さと計算時間の短さの兼ね合いを考慮しなければならない。今回の実験では、

$$(N, \Delta K) = (40, 3 \times 10^{-3}), (60, 2 \times 10^{-3})$$

の場合が適当である。この両方から最適なものを選ぶには、両者の計算時間の差が分からなければならない。しかし、この計算時間の差は、データ数と計算時間、および振幅分割幅と計算時間の関係を、定量的に表すことができなかったため、今の段階では分からなかった。したがって、両方の中から最適なものを決めることはできなかった。

有意水準 α については、この実験では $\alpha = 0.05$, 0.01 について検討したが、特にこれらの違いはみられなかった。

速度の変化として、25 pps の定常速度が、ステップング・モータが5ステップおよび10ステップ駆動する間に、徐々に30 pps まで変化した場合についても、同様の実験を行った。これは、前に行った実験と比べて、速度の変化がゆるやかな場合を意味している。

この実験をそれぞれ三回ずつ行い、異常であると正しく判断したかどうか、調べた。その結果を前と同様の形式で表4.11に示す。

この結果について考察すると、前の実験と同様に、データ数 N が多くなる程、または振幅分割幅 ΔK が小さくなる程、正確に判定する確率が大きくなる。この場合、データ数 N と振幅分割幅 ΔK の値の組み合わせで、適しているものは、

$$(N, \Delta K) = (40, 1 \times 10^{-3}), (50, 3 \times 10^{-3}), \\ (60, 4 \times 10^{-3})$$

である。

表 4. 1 1 正しく判断した回数 (ゆるやかな速度変化)

(a) 5ステップ間で変化したとき
 $\alpha = 0.05$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	1/3	2/3	—	—
	30	1/3	1/3	—	—
	40	3/3	3/3	3/3	—
	50	3/3	3/3	3/3	—
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

(b) 10ステップ間で変化したとき
 $\alpha = 0.05$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	1/3	2/3	—	—
	30	1/3	1/3	—	—
	40	3/3	3/3	3/3	—
	50	3/3	3/3	3/3	—
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

$\alpha = 0.01$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	—	—
	30	1/3	1/3	—	—
	40	3/3	3/3	3/3	—
	50	3/3	3/3	3/3	—
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

$\alpha = 0.01$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3}$ rad)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	1/3	—	—
	30	1/3	1/3	—	—
	40	3/3	1/3	2/3	—
	50	3/3	3/3	3/3	—
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

次に、有意水準 α が0.05と0.01の場合で比較すると、 $\alpha = 0.01$ のときに判断の誤りが生じているものがある。これは、有意水準 α が小さくなれば、この場合の判断の誤り、つまり異常を正常と判断する誤り（第二種の誤り）の確率が大きくなるためである。しかし、だいたいにおいて α が0.05と0.01で大きな違いはみらない。

4. 3. 2 加速度変化の分析

正常時の速度パターンにおいて、加減速区間で速度パターンが変化した場合、つまり加速度が変化した場合についても、その状態変化を読み取って異常と正しく判断することができるか、検討することにする。

加速区間において図 4. 1 2 のように、同じステップ数（10ステップ）で

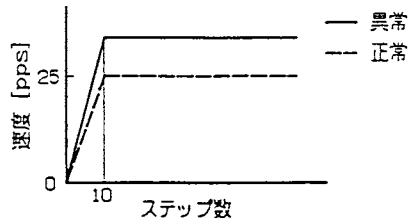


図 4. 1 2 加速度変化(1)

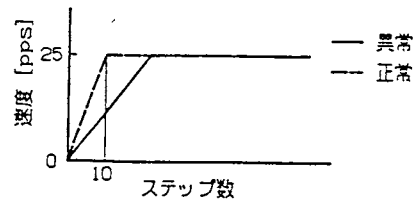


図 4. 1 3 加速度変化(2)

到達速度が 25 pps から 20 pps , 30 pps , 40 pps に変化した場合 : 加速度変化(1)と、図 4. 1 3 のように定常速度までに到達するステップ数 (正常時では 10 ステップ) が 5, 15 に変化した場合 : 加速度変化(2)について、三回ずつ実験を行った。有意水準 α を 0.05 , 0.01 にしたときの判定結果を、これまでと同様の形式で表 4. 1 2 に示す。

表 4. 1 2 (1) 正しく判断した回数 (加速度変化(1))

(a) 到達速度 30 pps の場合

(b) 到達速度 20 pps の場合

$\alpha = 0.05$

$\alpha = 0.05$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	3/3	3/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	3/3	3/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

$\alpha = 0.01$

$\alpha = 0.01$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	3/3	0/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	2/3	0/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

表 4. 1 2 (2) 正しく判断した回数 (加速度変化(2))

(a) 定常速度への到達ステップ数 5

$\alpha = 0.05$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	3/3	2/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

(b) 定常速度への到達ステップ数 15

$\alpha = 0.05$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	3/3	0/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

$\alpha = 0.01$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	3/3	0/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

$\alpha = 0.01$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	0/3	0/3	0/3
	30	3/3	3/3	0/3	0/3
	40	3/3	3/3	3/3	3/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

また、減速区間において、停止地点 (減速開始から 10 ステップ目) でまだ 20 pps の速度で動いている場合についての実験を三回行った。この実験結果を表 4. 1 3 に示す。

表 4. 1 3 正しく判断した回数 (減速時の加速度変化)

$\alpha = 0.05$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	2/3	1/3	2/3	—
	30	1/3	1/3	2/3	1/3
	40	3/3	1/3	0/3	0/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

$\alpha = 0.01$

		振幅分割幅 ΔK ($\times 10^{-3} \text{rad}$)			
		1	2	3	4
データ数 N (個)	20	0/3	1/3	0/3	—
	30	1/3	1/3	0/3	0/3
	40	0/3	0/3	0/3	0/3
	50	3/3	3/3	3/3	3/3
	60	3/3	3/3	3/3	3/3

これらの結果について考察すると、データ数 N 、振幅分割幅 ΔK 、およびしきい値 ε の値と、判定を誤る確率の関係については、定常速度区間の実験結果と同じ傾向といえる。つまり、データ数 N が多くなる程、または、振幅分割幅 ΔK が小さくなる程、正しく判定する確率が大きくなり、しきい値 ε が小さい程、判定を誤る確率が大きくなるといえよう。

さらに、データ数 N と振幅分割幅 ΔK についていえることは、定常速度区間、加速区間、および減速区間の状態の判定を誤る確率と N 、 ΔK の関係を、それぞれ比較した場合、加速区間では他と比べて N が少ない、あるいは ΔK が大きい値のときでも、判定を誤る確率を小さくすることができる。この理由は、正常動作時での加速区間の振動波形の振幅が大きくなっているため、状態変化が生じたとき、振幅変化の割合も大きくなるからである。

4. 4 まとめ

以上の結果より、速度の変化という状態変化に対して、本研究で提案したロボットの状態分析法、すなわち、ロボットアームの振動を情報源とし、その信号処理にカイ2乗検定を応用した手法が、十分通用することが確認できた。

しかし、このような統計的手法を用いる場合、判断の誤りを生じる可能性があるため、判断を誤る確率を常に考慮しなければならない。そこでこの判断を誤る確率について、実験結果から分かったことをこれから述べる。

判断を誤る確率は振幅の変化量に関係し、状態が変化したときに振幅が大きく変化すれば判断を誤る確率は小さくなり、あまり大きく振幅が変化しなければ、判断を誤る確率は大きくなるといえる。したがって、振幅変化が大きくなるようにすればよく、そのためにはアームから得られる振動波形の振幅値が大きく現れるようにすればよい。

また、判定を誤る確率はデータ数 N 、振幅分割幅 ΔK 、およびしきい値 ε に関係している。

まずデータ数 N については、この個数が多くなると判定を誤る確率は小さくなることが、実験によって確かめられた。同様に振幅分割幅 ΔK については、今回の実験結果では、この値が小さくなるほど判定を誤る確率が小さくなるこ

とが分かった。データ数 N と振幅分割幅 ΔK の値は、判定を行う計算時間と関係があり、 N が少ないほど、または ΔK が大きいほど計算時間は短くなる。したがって、 N と ΔK の値を決定するときは、 N と ΔK の値をいろいろ組み合わせたものの中で、判定を誤る確率が小さくなるものを選び、さらにその中で計算時間がなるべく短くなるものを選び、それを N と ΔK の値とする。

しきい値 ε についていえることは、 ε が大きくなるほど判定を誤る確率も大きくなる、ということである。 ε は、有意水準 α が決まるとカイ 2 乗分布表を用いて決めることができ、 α を小さくすると ε は大きくなる。有意水準 α は、正常を異常と判断する誤り（第一種の誤り）の確率である。したがって、 ε が大きくなると第一種の誤りの確率が小さくなり、その逆として、第二種の誤りの確率、すなわち異常を正常と判断する誤りの確率が大きくなる。そのため、状態が変化したかどうかという判断を行うとき、 ε を大きくする（ α を小さくする）と判定を誤る確率が大きくなるのである。

今回の研究で検討した速度変化（加速度変化も含む）を分析する場合、有意水準 α ，データ数 N ，および振幅分割幅 ΔK の値を、実験結果をもとにして決めると次のようになる。

$$\alpha = 0.05$$

$$(N, \Delta K) = (40, 1 \times 10^{-3}), (50, 3 \times 10^{-3}),$$

$$(60, 4 \times 10^{-3})$$

この場合、速度変動率（速度変動量／正常速度）が 20% 以上であれば、状態変化を読み取ることができる。

しきい値 ε は、有意水準 α の他に自由度によって決まる値であり、正常時の振動波形の振幅の形すなわち振幅分布によって自由度は違ったものとなり、しきい値 ε もそれによって値が変わってしまう。したがって、しきい値 ε は正常時の振幅分布が与えられたときに、そこから自由度を求め、有意水準 α と自由度から決定する。今回の実験結果からしきい値 ε を決めると、次のようになる。

$$\text{しきい値 } \varepsilon = \begin{cases} 7.81 & (\text{定常速度区間}) \\ 11.07 & (\text{加速区間}) \\ 7.81 & (\text{減速区間}) \end{cases}$$

前章では、ロボットの状態変化として、ロボットアームの速度が変化した場合について、カイ2乗検定を応用した手法を用いて、この状態変化を読み取ることが十分可能であることを示した。

しかし、ロボットの状態変化には速度変化以外にも様々なものがあり、これらについても、カイ2乗検定を応用した手法が通用するか、といった問題がある。また、現場で用いられるような実際のロボットアームに対して適用できるか、という問題もある。

そこで、本章では、他の状態変化の認識の可能性を検討し、また、川崎重工業株式会社製の川崎ユニメート・PUMAに生ずる振動の様子を示し、振動利用による状態分析の可能性を示す。

また、運動中のロボットの状態を始動から停止まで常時監視し、状態変化が発生したとき、それを速やかに検出する方法についても述べる。

5.1 様々な状態変化の分析

ロボットアームの状態変化には、速度変化以外にも様々なものが考えられるが、ロボットアームの運動中に起こり得る状態変化として、

- (a) ロボットアームの不動作
- (b) ロボットアームの暴走
- (c) ロボットアームと物体、人体との接触

が挙げられる。

(a)~(c)の状態変化が生じたとき、どの場合もロボットアームの振動に反映して、それを振幅の変化として捉えることができる。そこで本節では、この三つのうち、ロボットアームの不動作と、物体との接触について検討する。

5. 1. 1 ロボットアーム不動作についての分析

ロボットアームが動作の途中で停止したとき、これを認識することができるか、つまり状態が異常であると判断することができるかどうかの実験を行った。

ロボットアームの不動作として、(a)第1アームの不動作、(b)第2アームの不動作、および(c)第1、第2アームの不動作の三つの場合（図5. 1参照）について実験を行った。このときに得られた振動波形を図5. 2に示し、状態変化が起きた直後の振幅分布を表すヒストグラムと観測度数を図5. 3、表5. 1に示す。ただしデータ数 N は40個、振幅分割幅 ΔK は $1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ である。

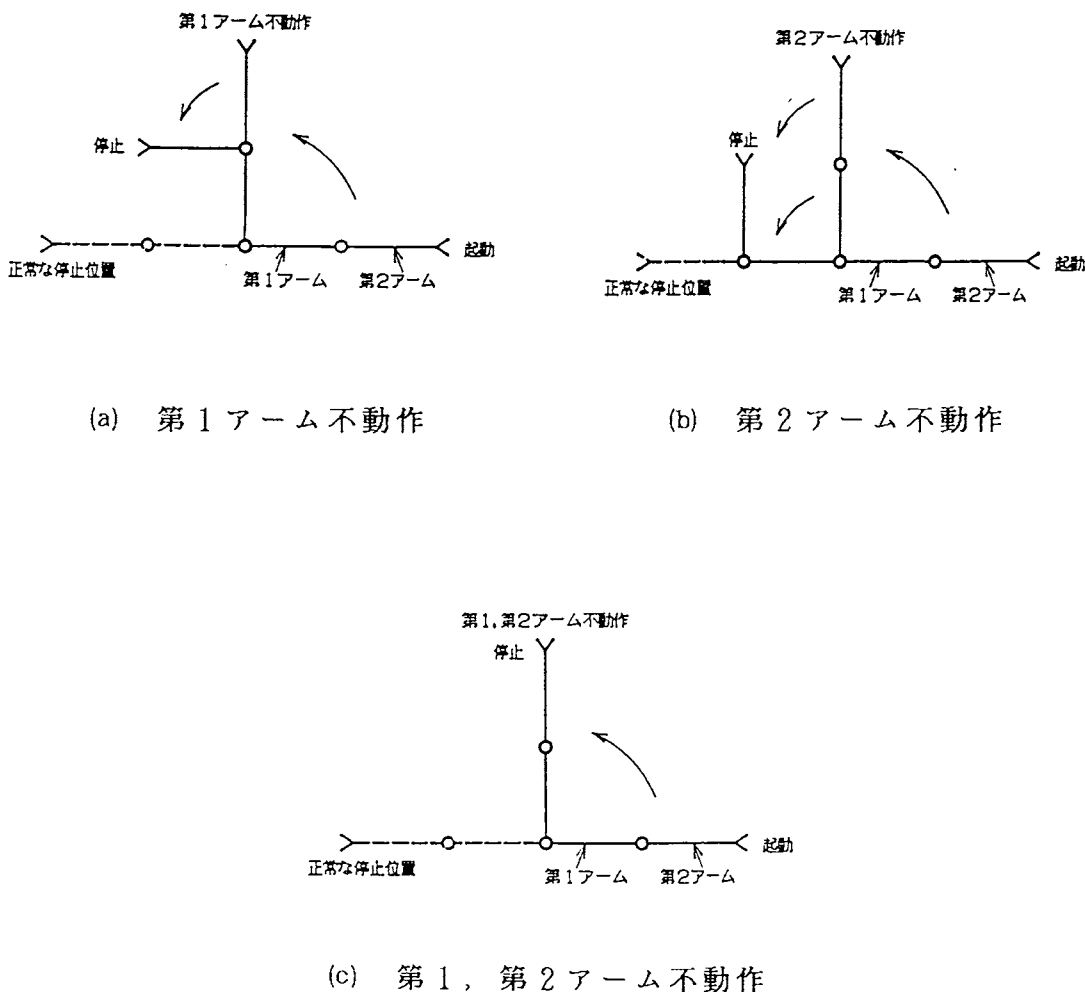


図5. 1 ロボットアーム不動作

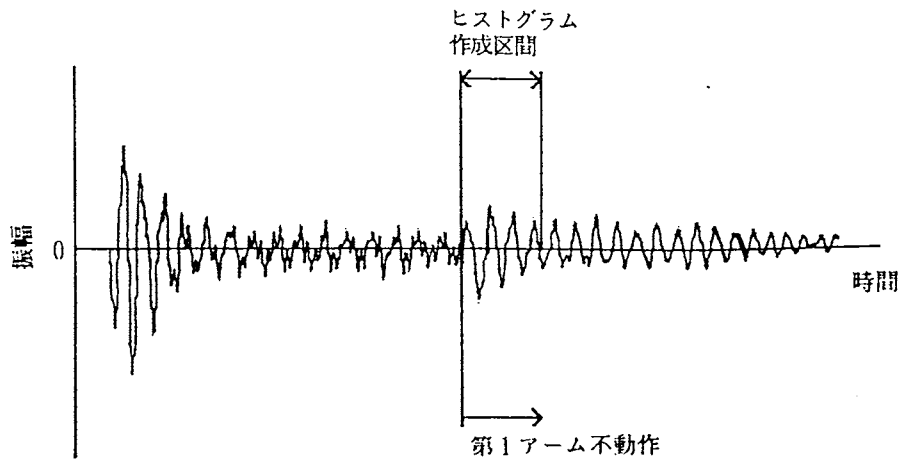


図5. 2(a) 第1アーム不動作時の振動波形

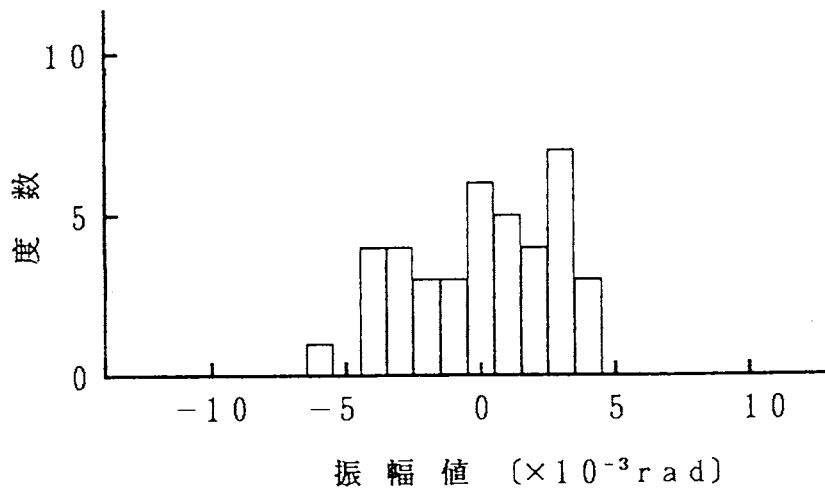


図5. 3(a) 振幅分布ヒストグラム (第1アーム不動作)

表5. 1(a) 期待度数と観測度数 (第1アーム不動作)

振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)
~-6.5	0	5	0	12
-6.5~-5.5	0		1	
-5.5~-4.5	0		0	
-4.5~-3.5	0		4	
-3.5~-2.5	2		4	
-2.5~-1.5	3	3	3	3
-1.5~-0.5	5	5	6	6
-0.5~0.5	16	16	5	19
0.5~1.5	10	14	4	
1.5~2.5	4		7	
2.5~3.5	0		3	
3.5~4.5	0		0	
4.5~	0			

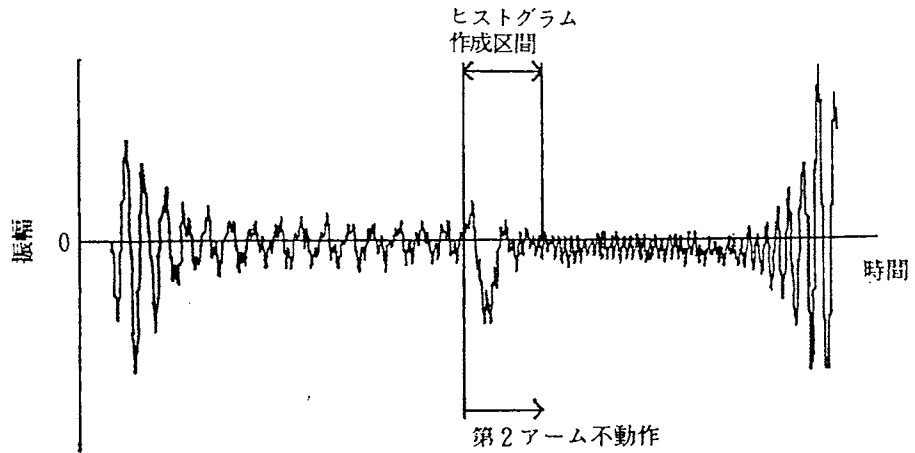


図5. 2(b) 第2アーム不動作時の振動波形

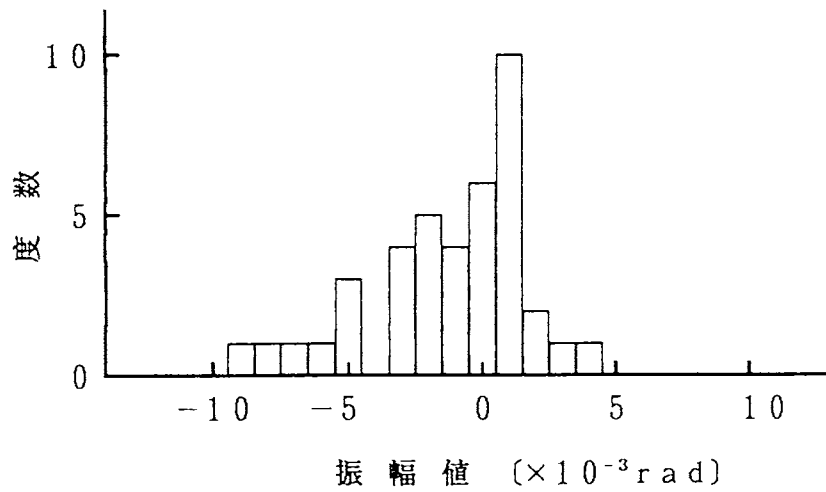


図5. 3(b) 振幅分布ヒストグラム (第2アーム不動作)

表5. 1(b) 期待度数と観測度数 (第2アーム不動作)

振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)
~-9.5	0	5	0	16
-9.5~-8.5	0		1	
-8.5~-7.5	0		1	
-7.5~-6.5	0		1	
-6.5~-5.5	0		1	
-5.5~-4.5	0		3	
-4.5~-3.5	0		0	
-3.5~-2.5	2		4	
-2.5~-1.5	3		5	
-1.5~-0.5	5		5	
-0.5~0.5	16	16	6	6
0.5~1.5	10	14	10	14
1.5~2.5	4		2	
2.5~3.5	0		1	
3.5~4.5	0		1	
4.5~	0		0	

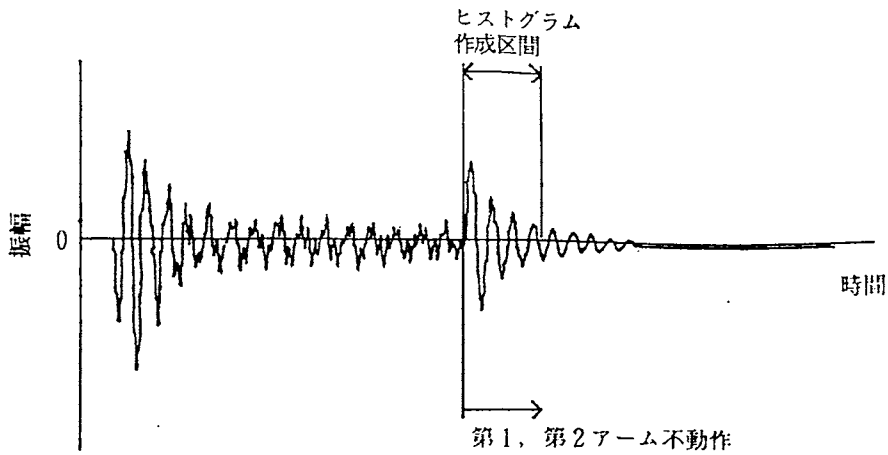


図5. 2(c) 第1, 第2アーム不動作時の振動波形

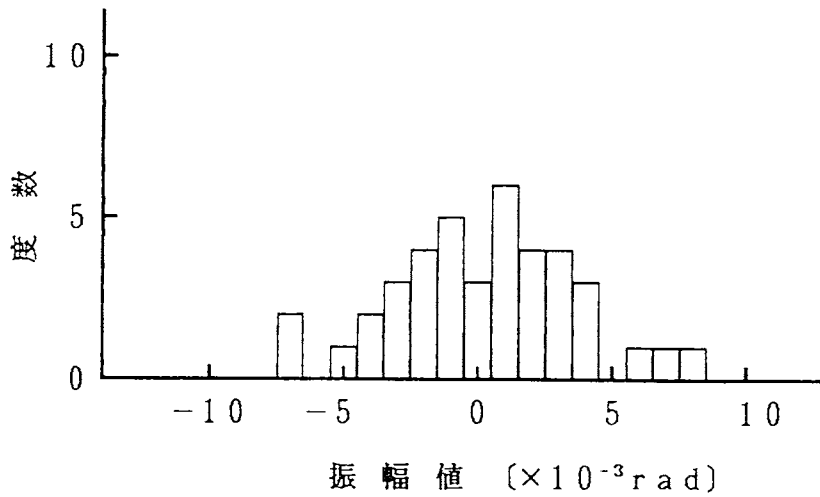


図5. 3(c) 振幅分布ヒストグラム (第1, 第2アーム不動作)

表5. 1(c) 期待度数と観測度数 (第1, 第2アーム不動作)

振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)
~-7.5	0		0	
-7.5~-6.5	0		2	
-6.5~-5.5	0		0	
-5.5~-4.5	0	5	1	12
-4.5~-3.5	0		2	
-3.5~-2.5	2		3	
-2.5~-1.5	3		4	
-1.5~-0.5	5	5	5	5
-0.5~0.5	16	16	3	3
0.5~1.5	10		6	
1.5~2.5	4		4	
2.5~3.5	0		4	
3.5~4.5	0		3	
4.5~5.5	0	14	0	20
5.5~6.5	0		1	
6.5~7.5	0		1	
7.5~8.5	0		1	
8.5~	0		0	

観測度数と期待度数をもとにして、統計量 χ^2 の計算を行うと次のようになる。

$$\text{第1アームの不動作} \quad \Rightarrow \quad \chi^2 = 18.64$$

$$\text{第2アームの不動作} \quad \Rightarrow \quad \chi^2 = 30.65$$

$$\text{第1, 第2アームの不動作} \quad \Rightarrow \quad \chi^2 = 22.93$$

有意水準 $\alpha = 0.05$ に対するしきい値 ε は、自由度が3であるから、
 $\varepsilon = 7.81$

である。

したがって、三つの場合すべてが $\chi^2 \geq \varepsilon$ であるから、ロボットの状態は異常であると、それぞれ正しく判断している。

5. 1. 2 物体と接触した場合の分析

ロボットアームが、動作の途中である物体と接触したとき（図5.4参照）、これを認識することができるか、つまり状態が異常であると判断することができるかどうかの実験を行った。

このときに得られた振動波形を図5.5に示し、状態変化が起きた直後の振幅分布を表すヒストグラムと観測度数を、図5.6、表5.2に示す。ただしデータ数 N は40個、振幅分割幅 ΔK は $1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ である。

観測度数と期待度数をもとにして、統計量 χ^2 の計算を行うと次のようになる。

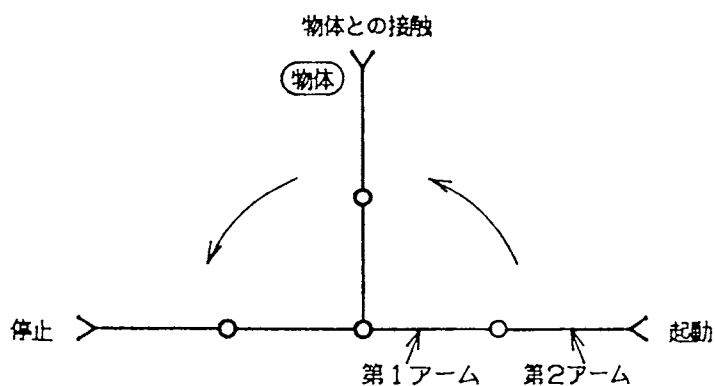


図5.4 ロボットアームと物体の接触

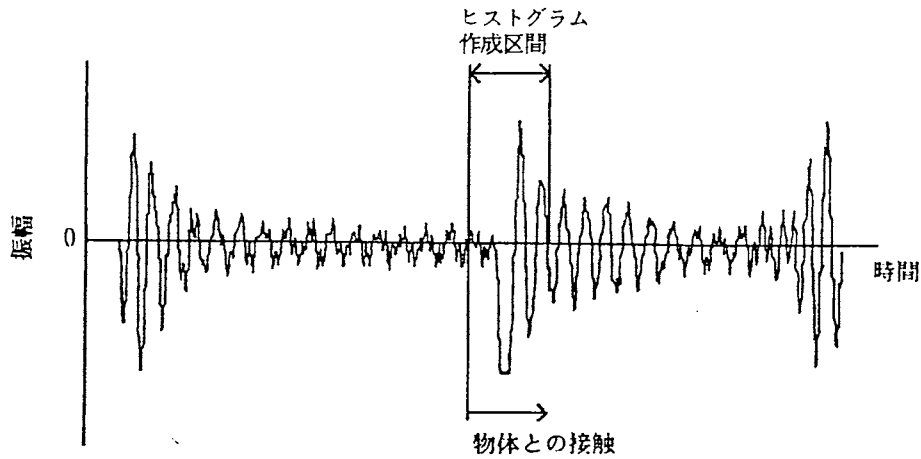


図5.5 ロボットアームが物体と接触したときの振動波形

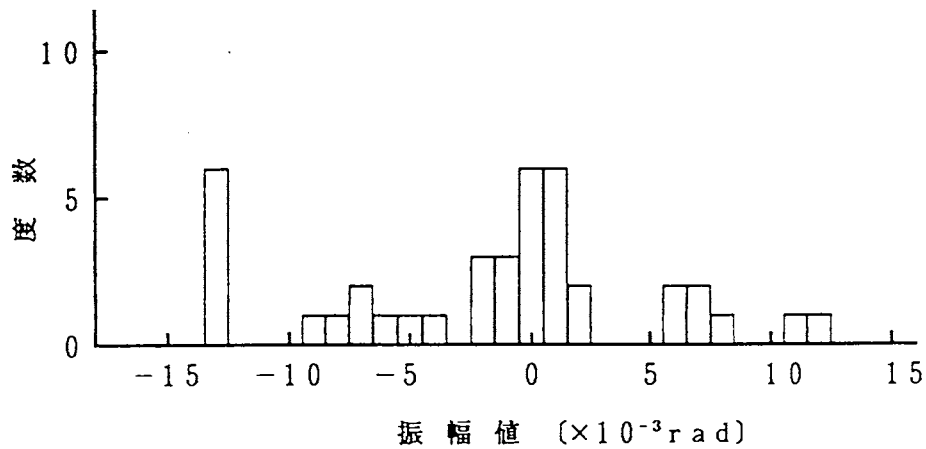


図5.6 振幅分布ヒストグラム (ロボットアームと物体の接触)

表5.2 期待度数と観測度数 (ロボットアームと物体の接触)

振幅 ($\times 10^{-3} \text{ rad}$)	期待度数 (1)	期待度数 (2)	観測度数 (1)	観測度数 (2)		
~-13.5	0	5	0	16		
-13.5~-12.5	0		6			
-12.5~-11.5	0		0			
-11.5~-10.5	0		0			
-10.5~-9.5	0		0			
-9.5~-8.5	0		1			
-8.5~-7.5	0		1			
-7.5~-6.5	0		2			
-6.5~-5.5	0		1			
-5.5~-4.5	0		1			
-4.5~-3.5	0		1			
-3.5~-2.5	2		0			
-2.5~-1.5	3		3			
-1.5~-0.5	5		5		3	3
-0.5~0.5	16		16		6	6
0.5~1.5	10		14		6	15
1.5~2.5	4	2				
2.5~3.5	0	0				
3.5~4.5	0	0				
4.5~5.5	0	0				
5.5~6.5	0	2				
6.5~7.5	0	2				
7.5~8.5	0	1				
8.5~9.5	0	0				
9.5~10.5	0	0				
10.5~11.5	0	1				
11.5~12.5	0	1				
12.5~	0	0				

$$\chi^2 = 31.32$$

有意水準 $\alpha = 0.05$ に対するしきい値 ε は、自由度が3であるから、

$$\varepsilon = 7.81$$

である。

したがって $\chi^2 \geq \varepsilon$ となるから、ロボットの状態は異常であると正しく判断している。

以上のように、ロボットアームの振動を情報源とし、その信号処理にカイ2乗検定を応用した手法を用いることで、ロボットアームの不動作や物体との接触という状態変化を、読み取ることができる。またロボットアームの暴走についても、同様に認識できるであろう。

5. 2 P U M A に生ずる振動現象

これまでの議論は、剛性の不足するアームをもった2自由度関節型ロボットアームモデルを用いてのものであった。そこで、実際に現場で用いられるような産業ロボットについても、振動を情報源とすることで、同様に状態の分析を行うことが可能であることをこれから示す。

実用されているロボットとして、川崎重工業株式会社製の多関節ロボットマニピュレータである、川崎ユニメートP U M Aを用いることにする。その概観図を図5. 7に示す。

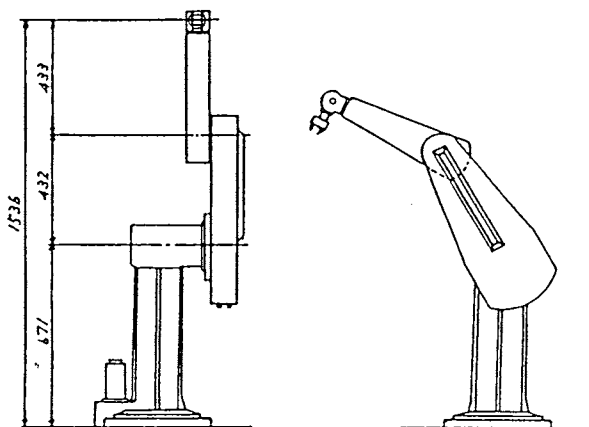
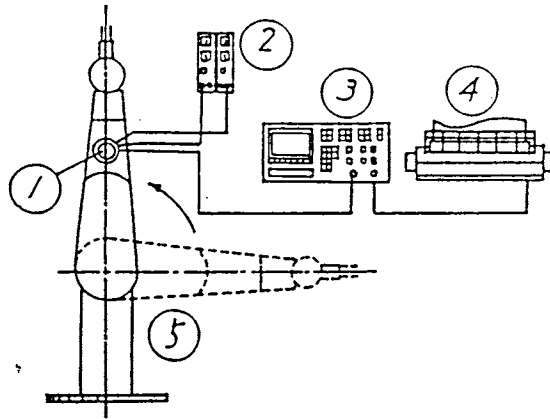


図5. 7 P U M A の概形



- ① サーボ加速度計 (日本航空電子工業 JA-45G)
- ② 15V安定化電源 (2基 Metronix 521A)
- ③ FFTアナライザ (ONO SOKKI CF-920)
- ④ カラー・プロッタ (ONO SOKKI CX-337)
- ⑤ PUMA (川崎ユニメート 560 RS2S9)

図5.8 PUMAに生じる振動の測定

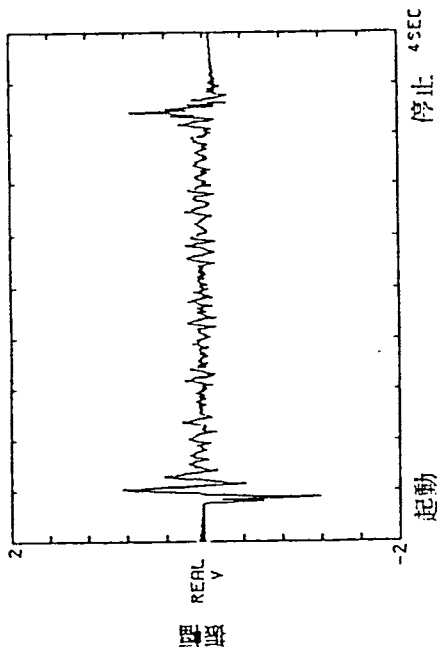
PUMAの基本的な仕様は次のようなものである。

・ロボット仕様

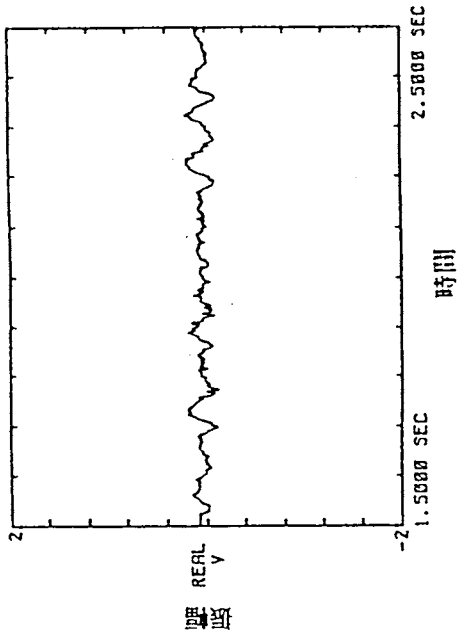
- (1) 型式 川崎ユニメート 560 RS2S9
- (2) 座標系 関節型
- (3) 自由度 6
- (4) 負荷容量 負荷重量 2.5kgf (手首フランジ面)
静的負荷 6kgf (手首フランジ面)
- (5) 最大速度 500mm/sec
- (6) 繰返し精度 ± 0.1 mm (定常時)
- (7) 重量 95kgf

・制御部仕様

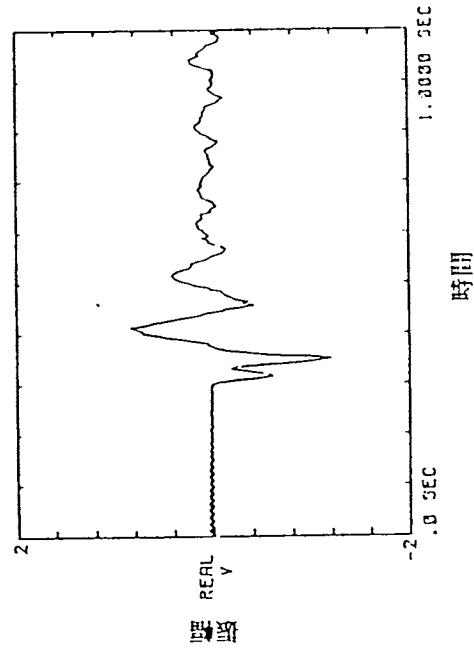
- (1) 制御方式 コンピュータ制御電気サーボ



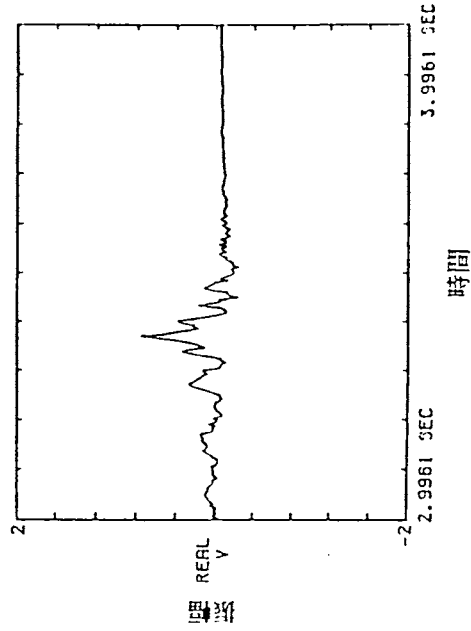
(i) 全過程の振動の様子



(iii) 定速駆動時の振動の様子

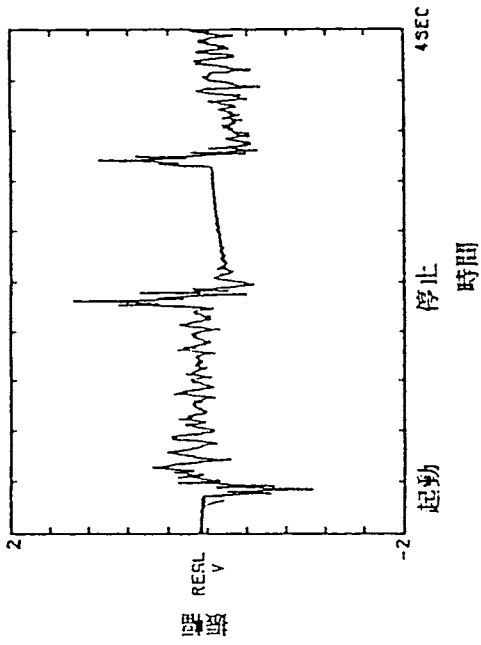


(ii) 起動時の振動の様子

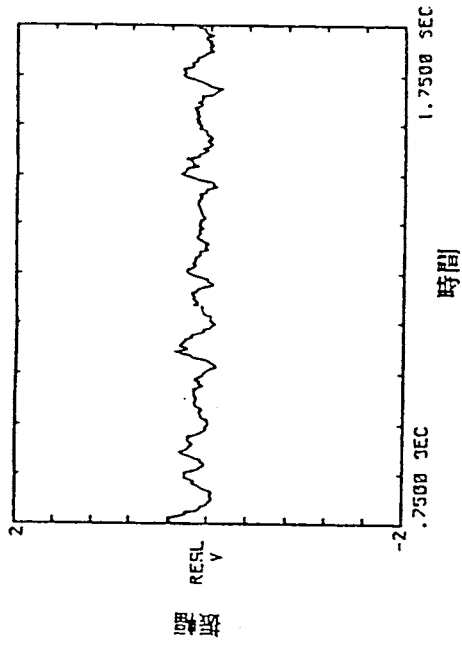


(iv) 停止時の振動の様子

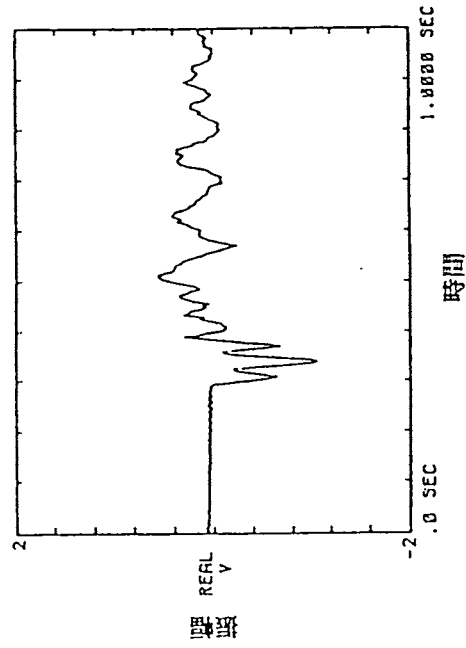
図 5. 9 (a) P U M A に生じる振動の様子 (角速度 0. 5 rad/sec)



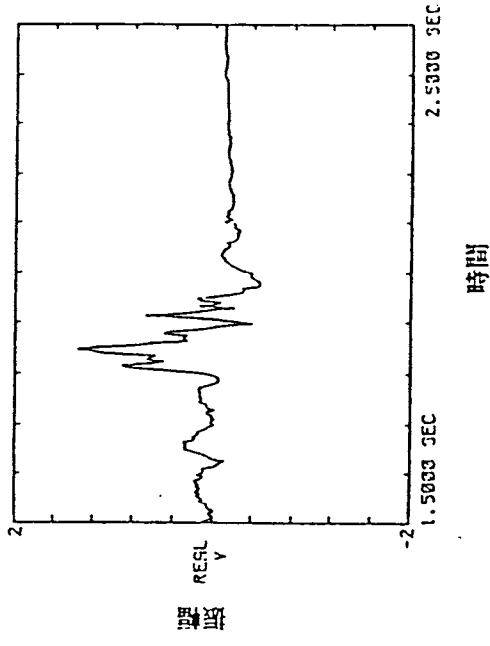
(i) 全過程の振動の様子



(iii) 定速駆動時の振動の様子



(ii) 起動時の振動の様子



(iv) 停止時の振動の様子

図 5. 9 (b) P U M A に生じる振動の様子 (角速度 0. 9 4 rad/sec)

- (2) 制御軸数 完全同時 6 軸
- (3) 再現方式 完全直線補間, 各軸補間
- (4) 教示方式 ティーチングプレイバック方式
- (5) 速度 任意時変更可 (1 ~ 5 0 0 mm/sec)

一般的なロボットとして想定した P U M A にどのような振動現象が見られるのか、サーボ加速度計をアームに取り付け、振動の様子を F F T アナライザによって観察した (図 5. 8 参照)。

アームの駆動範囲は、水平状態から垂直状態までの 90° の範囲である。図 5. 9 にアームの速度を二通りに変えた場合の振動の様子を示す。また、その各々について、起動時、定速駆動時、停止時の振動の様子を、時間軸方向に拡大して示す。なお、本加速度計の感度は $1 \text{ V} / \text{G}$ である。

図 5. 9 より、速度の違いによって、起動時や停止時の振動の様子が異なることが分かる。特に、速度を変えた場合の両者間の振幅に差異が認められるので、振幅分布の変化から速度変化を読み取ることができる。したがって、本研究で提案した振動利用による状態分析法を適用することができる。

5. 3 ロボット運動中における状態監視法

本研究では、ロボットの状態を認識する方法として、ロボットアームの振動を観測し、また、その信号処理にカイ 2 乗検定を応用した手法を用いることを提案した。そして、これまでに行った実験の結果より、この手法を用いて状態変化を認識することができることを確認した。

そこで、この手法を用いて、運動中のロボットの状態を始動時から停止時まで常時監視し、状態変化が発生したときにそれを速やかに検出する方法、すなわち実時間で実行する方法について、これから述べることにする。

この手法を実際に用いるには、一定時間内での振動の振幅分布 (振幅分布ヒストグラム) が必要である。つまり状態を分析するために、ロボットが起動してから停止するまでのアームの振動波形を等時間間隔でサンプルし、その中である一定期間のサンプル値を取り出して、これを用いて振幅分布ヒストグラム

を作成する必要があるからである。観測データであるサンプル値を取り出す一定期間を、以後、本論文では観測区間と表現し、このときの時間を観測時間と表現する。

ロボットの運動を始動から停止まで常時監視し、異常の発生を速やかに検出するには、観測区間をどのように決め、また、観測時間をどの程度にするか、考慮しなければならない。

例えば、観測区間を始動時から停止時までの一つとした場合、途中で状態変化が起こったとき、ロボットの動作が終了してから状態変化を判断することになり、したがって、状態変化が発生してから、かなり遅れて判断することになる。また、観測時間も長くなるため、このことはデータ数が多くなることを意味するから、判断のための演算時間も長くなり、データ収集が終了してからの判断が遅くなる。したがって、このような場合、実時間（リアルタイム）で状態変化を認識することはできないため、判定結果を直ちにフィードバック制御入力として用いることができない。つまり、状態変化が発生した時点でそれを認識し、ロボットを停止させたり修正させたりすることができない、ということである。

ロボットの運動状態を常時監視するための方法として、始動から停止までの時間を単純にいくつかの区間に区切って、その区間を観測区間として、各観測区間ごとにロボットの状態が変化したかどうかの判断を行う方法がある。このことを示したのが図5. 10である。この監視方法では、観測時間 T ごとにロボットの状態を判断している。観測時間 T は、観測区間で得られるデータ数 N

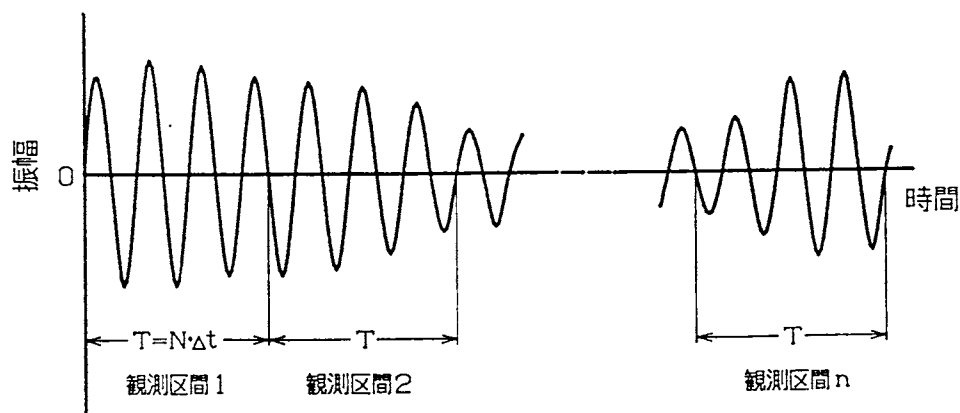


図5. 10 観測区間の決め方 1

およびサンプリング間隔 Δt と関係があり、

$$T = N \times \Delta t \quad (5.1)$$

の関係式で表せる。

この方法では、各観測区間ごとに状態分析を行うために必要な情報を用意しておかなければならない。その情報とは、

- (a) 振幅の分割パターン、すなわち振幅分布ヒストグラムを作成するための各クラスの境界の振幅値
- (b) 各クラスの度数（期待度数）
- (c) しきい値 ε

である。(a)と(b)は、あらかじめ正常な動作を行わせて求めておく。(a)は、観測時の振幅分布のヒストグラムを作成し、観測度数を求めるために必要であり、また、自由度を決めるためにも必要である。(b)は、統計量 χ^2 を計算するために必要とする。(c)は、判定を行うために必要であり、(a)で求めた自由度と有意水準 α から、カイ2乗分布表を使って求める。

(a)~(c)を各観測区間ごとに決めておく理由は、正常な動作の起動時から停止時までの振動波形の振幅が不規則であるため、各観測区間ごとに異なるためである。この振幅が規則的であるならば、各観測区間、共通にできる。

この監視方法を実時間で行わせるためには、観測区間数を多くする、すなわち、観測時間を短くすればよい。そのためには、データ数 N を少なくする、もしくは、サンプリング間隔 Δt を小さくすればよい。しかし、これらの値は判断の正確さ、および計算機の能力に関係するものであり、判断の正確さを満足させ、かつ、計算機の能力に合う範囲で、最適な観測時間 T を決めるべきであろう。

起動してから停止するまでの間の観測区間の区切り方として、先に述べた方法以外に、図5.11のように観測区間をそれぞれ少しずつらして重ねる方法も考えられる。各観測区間の間隔（ i 区間目のデータ収集開始時刻と $i+1$ 区間目のデータ収集開始時刻の差）を ΔT とすれば、各観測区間での、判断を行う演算が終了する時間間隔も ΔT となり、したがって、 ΔT ごとに判断すること

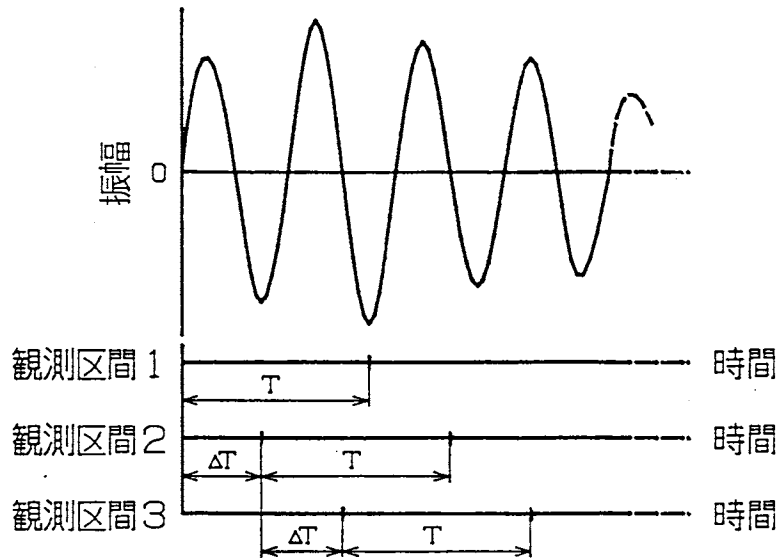


図 5. 1 1 観測区間の決め方 2

ができる。

この方法を実時間で行わせるには、 ΔT を小さくすればよく、この場合、観測時間 T は関係しない。ただし、このときの ΔT は、状態の判定を行うためのデータ処理演算時間を τ とすると、

$$\Delta T = h \cdot \Delta t \quad (h = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (5. 2)$$

$$\Delta T > \tau \quad (5. 3)$$

という条件を満たす最小値である。したがって、 ΔT を小さくするには τ を小さくしなければならない。

以上に述べた方法を用いれば、ロボットの運動状態の監視を実時間で実行することができる。この二つの方法のうち、どちらかを選ぶには、それぞれのアルゴリズムが使用する計算機の能力に合っているか、を考慮しなければならない。また、これらの方法は、振動波形データを等時間間隔でサンプルしてサンプル値（観測データ）を収集する作業と、観測区間内のサンプル値を取り出して判断のための演算処理を行う作業の、平行処理ができなければ、用いることはできない。この平行処理ができない場合は、 $\tau < \Delta t$ という条件も満たなければならない。

以上の考えにもとづいて、次のような実験を行った。

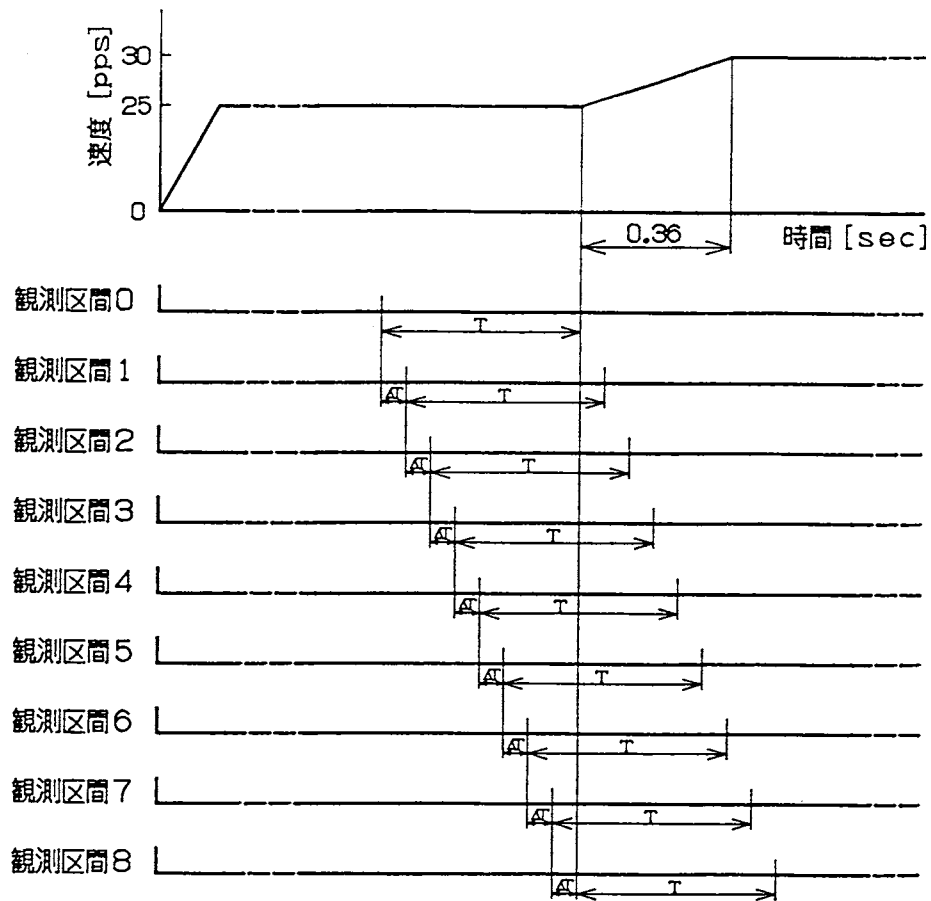


図 5. 1 2 観測区間

表 5. 3 各観測区間の判定結果

	自由度	しきい値	χ^2	判定結果
観測区間0	4	9.49	3.52	正常
観測区間1	4	9.49	2.06	正常
観測区間2	4	9.49	6.68	正常
観測区間3	4	9.49	6.36	正常
観測区間4	4	9.49	14.73	異常
観測区間5	4	9.49	18.18	異常
観測区間6	4	9.49	18.50	異常
観測区間7	3	7.81	16.73	異常
観測区間8	3	7.81	22.35	異常

ロボットアームの速度が途中で変化した場合、観測区間を図5. 12のように決め、それぞれの観測区間における判定がどのようになるか、調べてみた。その結果を表5. 3に示す。なお、判定に必要な設定量を以下に示す。

- ・ サンプル間隔 Δt 12 msec (0.012 sec)
- ・ データ数 N 40 個
- ・ 振幅分割幅 ΔK 1×10^{-3} rad
- ・ 有意水準 α 0.05

各観測区間の観測時間 $T (= N \cdot \Delta t)$ は 0.48 sec である。

表5. 3より、観測区間4で異常、すなわち速度が変化していることを検出しており、この場合、速度が変化してから $0.18 + \tau$ (sec) (τ は判定を行うまでの演算時間) の時間で異常を検出することができる。

以上より、本節で示した方法を用いれば、運動中のロボットアームの状態を常時監視して、異常の発生を速やかに検出することができる。

5. 4 振動利用による状態監視に適したロボットの設計指針

従来のロボットの設計では、ロボットアームの動作時に発生する振動を抑制するため、あるいは耐久性をよくするため、アームの剛性を高くする方法がとられていた。そして、ロボットアームを完全剛体と仮定して制御を行ってきた。しかし、アームの駆動系および駆動伝達材を含めたアーム系全体の剛性は、高いとはいえず、そのため依然として振動が生じている。

また、ロボットアームの運動を高速化し、かつ消費エネルギーを小さくするためには、アームを軽量化することが必要であり、最近ではこのような考えにもとづいたロボットの設計も行われている。ロボットアームの軽量化を行えば、これに伴ってアームの振動が発生しやすくなる。

このように、ロボットアームに振動が発生するのなら、その振動を積極的に利用する立場に立って、いたずらに高剛性を追求するのではなく、把持すべきワークの重量や耐久性の面から必要最小限の剛性を確保したうえで、高いコン

プライアンスを持ったロボットアームを設計する、という方針も成り立つ。

振動を情報源として扱う場合、ノイズ等との比を考えれば、当然、情報源である振動は大きく現れた方がよい。このためには、ロボットを設計するうえで、アームの構成材料自体にコンプライアンスを持たせ、アームの軽量化を行うという方針を立てることができる。

このような設計方針によって、ノイズに埋もれない明瞭な振動を得ることができ、また、ロボットの運動状態の微かな変化が振動現象に大きく反映され、感度の向上が望める。

ただし、ロボットアームに生ずる振動が大きくなれば、停止時の位置決め精度などに影響を及ぼすので、その低減について考慮しなければならない。つまり、必要なデータを測定した後、多自由度アームの相対的な駆動などによって速やかに振動を減衰させる、といった制御方法をあらかじめ求めておき、組み込む必要がある。

本研究では、ロボットアームを駆動したときに生じる振動を、一つの情報源とみなし、その振動に適切な信号処理を施すことによって、ロボットアームの状態を認識することへの可能性について検討してきた。以下にその結果を示しておく。

- (1) ロボットアームを駆動したとき、アームの剛性不足によって振動が発生しており、ロボットの状態が変化したとき、その振動に状態変化が反映されることが分かった。したがって、その分析を行うことによって、ロボットの状態変化を読み取ることが可能である。
- (2) ロボットの状態が変化したかどうかを認識する方法として、振幅分布ヒストグラムを作成し、正常時のものと観測時のもので比較を行い、この判定にカイ2乗検定を用いることにした。この手法を用いれば、観測時と正常時の比較を容易に行うことができ、かつ、処理アルゴリズムが簡単になる。
- (3) (2)で述べた手法を用いてロボットの状態認識の実験を行い、有効性を示した。この実験では、ロボットの状態変化としてロボットアームの速度変化を例に挙げ、2自由度関節型ロボットアーム・モデルを使用して状態分析を行った。
- (4) 本手法によるロボットの状態分析の実用性を示すため、速度変化以外の様々な状態変化について、(3)と同様な実験を行ってその有効性を示し、実用されている一般的なロボットについても、アームの振動の様子を観測し、振動利用による状態分析の可能性を示した。また、本手法を用いて、運動中のロボットの状態監視を実時間で実行し、状態変化が発生したときに、それを速やかに検出する方法を示した。

以上より、本研究で提案したロボットの状態分析法、すなわちロボットアームの振動を情報源にし、その信号処理にカイ2乗検定を応用した手法を用いて、ロボットの状態を分析することが十分可能である。

本研究で提案した手法をさらに実用的なものにするためには、次に述べるような課題について検討しなければならない。

- (1) 本研究の実験用に開発した状態分析の演算プログラムは、BASIC (MS-DOS版N88-日本語BASIC(86))により作成されているため、演算処理速度が遅く、言語を変える等によってさらに高速化しなければならない。
- (2) 既存のシステムでは、ロボットの駆動とデータ処理を平行して行うことができないため、平行処理を行えるようにしなければならない。

以上のような点について検討すれば、本手法を用いてのロボットの状態分析が容易になり、かつ実用的なものになるであろう。

参考文献

- 1)日経エレクトロニクス：日本経済新聞社，6月13日号（1988）449。「産業用ロボットの安全対策に問題あり、減らない雑音トラブルの件数」
- 2)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 Vol.18 No.6（1979）
- 3)中溝 高好：信号処理と故障診断法，システムと制御 Vol.29 No.4（1985）
- 4)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 Vol.24 No.11（1980）
- 5)小林 透：ロボット運動のオンライン状態分析技術の研究，昭和61年度修士研究論文
- 6)久志本 茂：教育のための基礎統計学，宝文館出版（1978）
- 7)南 茂夫：科学計測のための波形データ処理，CQ出版（1986）