

ボルト締緩用知能ロボットの開発

Development of Intelligent Robot for Tightening and Loosening Bolts

This intelligent robot consists of an image sensor (an ITV camera), a visual image processor, tactile sensors and a servo type handling device. Used in the manufacture of concrete poles and piles, the robot tightens or loosens bolts on the moving molds. First, the camera scans bolts and any other protruding objects. Then the image processor determines their positions. After locating the bolt by the tactile sensors, the robot tightens or loosens it with an impact wrench by means of the servo handling device, avoiding other protruding objects by moving the arm away from the mold. The robot can locate and tighten or loosen bolts at the high-speed rate of 2.5 seconds each.

磯尾修* *Osamu Isoo*
松岡慎二* *Shinji Matsuoka*
烏野武** *Takeshi Uno*
増田郁郎*** *Ikurô Masuda*

1 緒言

近年、人件費の上昇に伴い生産の合理化が急速に進んでいる中で、合理化の遅れている作業を分析してみると、組立、検査など人間の目によるパターン認識と器用な手作業に依存している工程が多い。この種の作業を省力化するには、従来の工業用ロボットに視覚、触覚などの感覚機能を付加して知能化する必要がある。

知能性をもったロボットに関する研究は、各種研究機関で活発に行なわれ、着々と成果をあげている。しかし、実用化を考えるとまだ困難な面が多く、今回コンクリート電柱成形用型わくのボルト締緩作業を対象として初めてこの実用化に取り組んだ。本作業は単純なうえ、レンチの振動が激しいこ

となどで作業者の定着率も悪かったが、型わくの種類が多く、その形状も複雑なことから自動化が困難とされていたものである。

本稿では、ボルト締緩用に開発したロボットの構成と特徴及びその性能について述べる。

2 装置の概要

電柱用ポール、建築用パイルなどのコンクリート柱体の成形は、円筒状に組まれた型わくの中に心金を組み込み、コンクリートを注入し、遠心機にかけて固化させる方法をとる。型わくは長手方向に二つ割で、その上型、下型をボルトで締

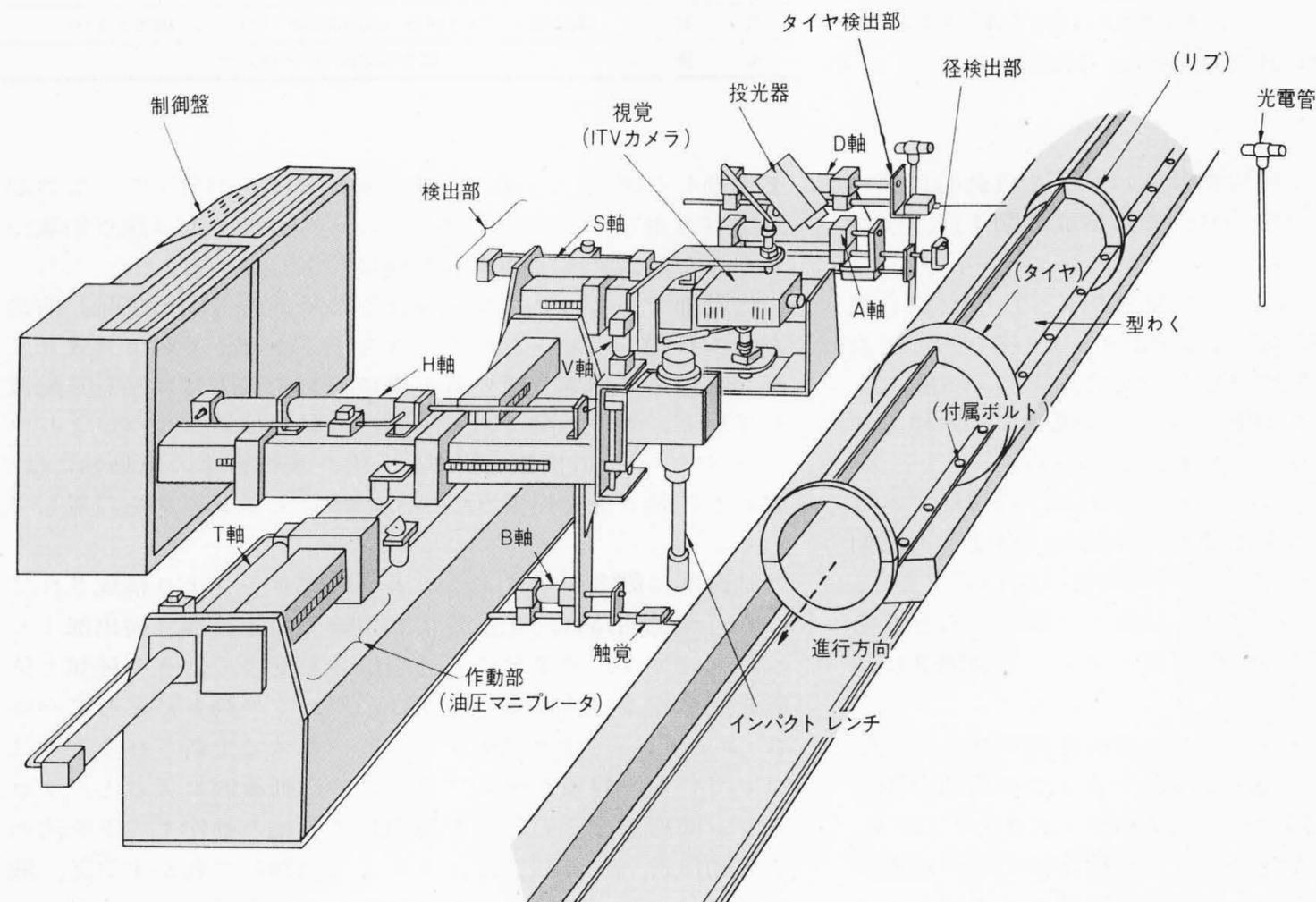


図1 装置の構成
装置の概略構成を示したもので、装置はT軸が型わくと同一方向になるように設置される。
Fig. 1 Configuration of System

* 日立製作所多賀工場 ** 日立製作所中央研究所 *** 日立製作所日立研究所

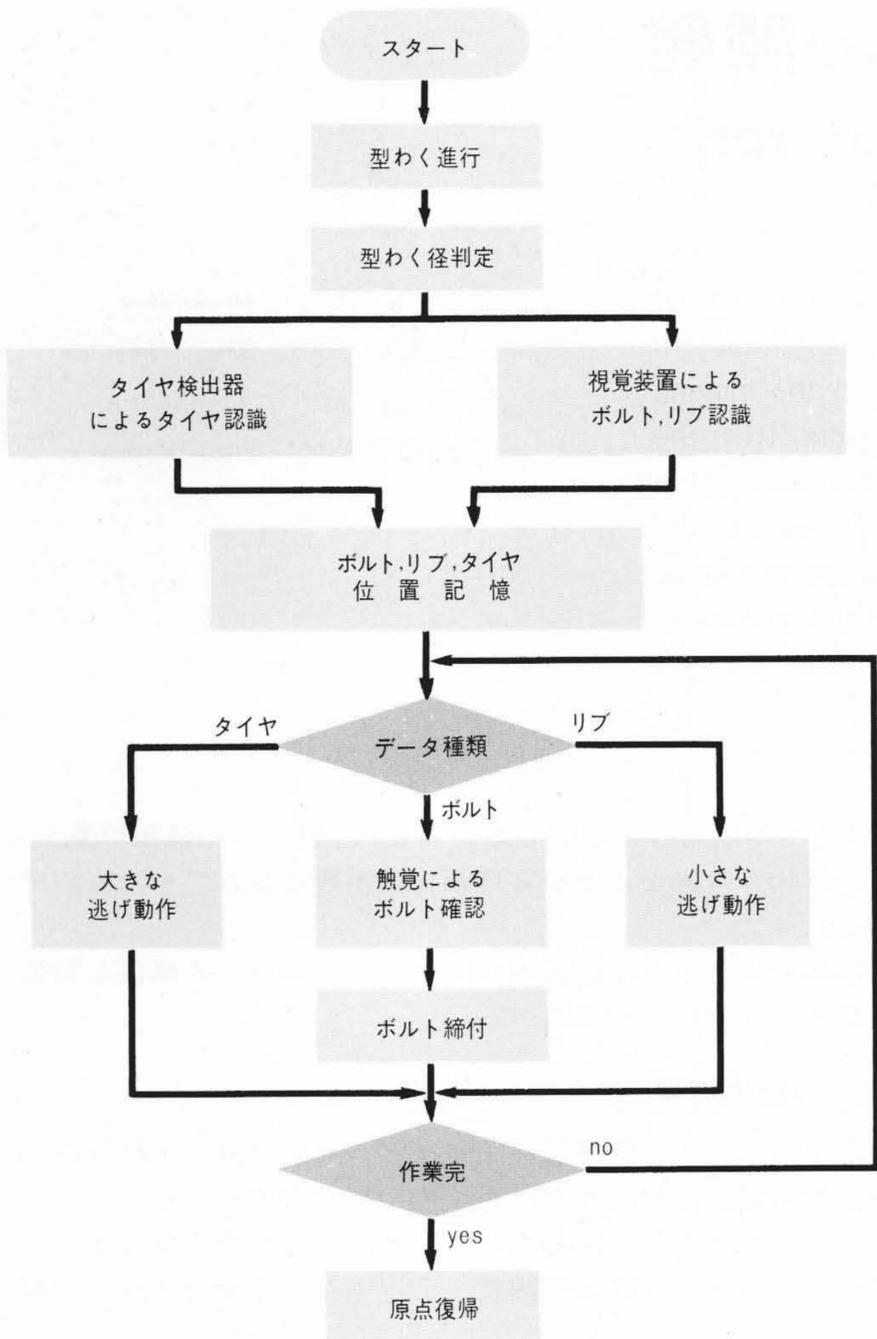


図2 概略動作フローチャート 締付け作業における一連の動作を示したもので、ボルト時には締付け、リブ、タイヤ時には逃げ動作をする。
Fig. 2 General Flow Chart of Tightening System

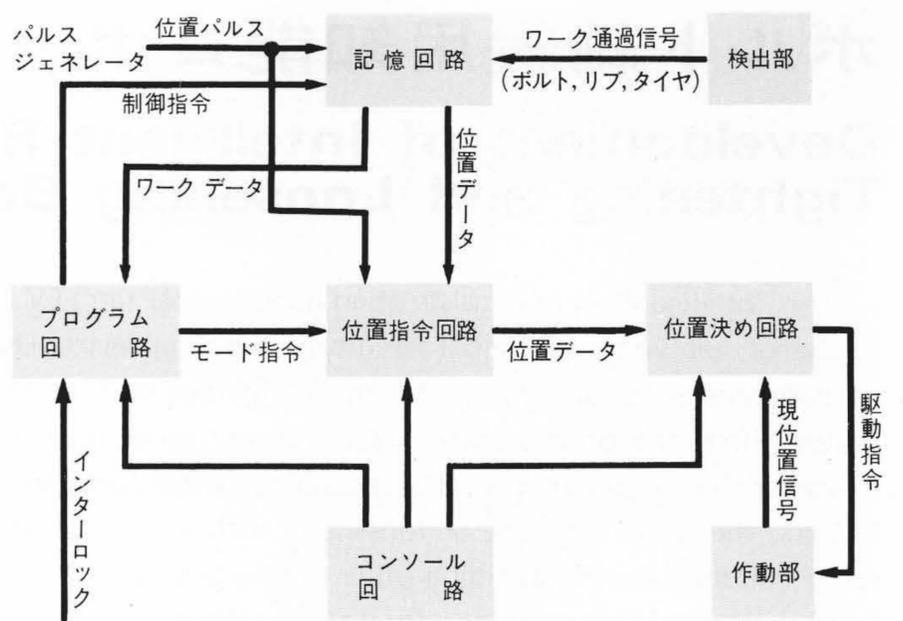


図3 制御装置構成図 ロボット制御部の構成を示したブロック図である。
Fig. 3 Block Diagram of Robot Controller

表1 ロボットの仕様 ロボットはサーボ3軸、ON-OFF 5軸の計8軸で、インパクトレンチを除いて油圧駆動である。
Table 1 Specification of Robot

能力		最大2.5s/ボルト1本処理			
	軸称	駆動方法	ストローク(有効)mm	最高速度mm/s	
マニ プ レ ー タ 部	検出部	S軸	サーボ油圧(60kg/cm ²)	300(280)	200
		A軸	ON-OFF油圧	170	400
		D軸	"	150	"
		T軸	サーボ油圧	700(610)	800
		H軸	"	300(280)	500
		V軸	ON-OFF油圧	75	400
		B軸	"	60	"
		I軸	(レンチ)空圧(5.5kg/cm ²)	—	4,000rpm
視覚	撮像部-ITVカメラ, 認識時間1/60sec, 精度±2mm				
触覚	二方向ON-OFFセンサ				

結している。装置は型わくの片側付属ボルトを自動的に締め付けたり緩めたりするものであり、その構成は図1に、仕様は表1に示すとおりである。

ボルト間隔は不規則であり、リブ(補強用)、タイヤ(遠心機上での転動面)と称する突起障害部が混在しているので、対象物の位置を非接触にその都度検出する必要があり、視覚による検出法を採用している。距離については視覚による検出が難しいため径検出部と触覚でそれを補っている。

締緩作業は型わく移動中に行なわれるから、締緩具であるインパクトレンチは締緩作業中型わくの動きに精度よく同期追従させる必要がある。一つのボルトの締付けが終了すると、次のボルト位置まで高速でもどり、以後この同期—もどりの動作を繰り返す。この一連の動作フローチャートは図2に示すとおりである。

最初に光電管が作動範囲への型わく進入を検知すると、径検出部が型わくのフランジ端面に接触するまで検出部全体が前進し、視覚装置の撮像部である工業用テレビカメラ(以下、ITVカメラと略す)の焦点合せとタイヤ検出部先端の位置決めをする。以後、テーパの付いたポール用型わくの場合、台車の動きに応じて検出部を前後進させテーパの補正をする。

型わくは85mm/sの速度で移動し、カメラ視野の中を左から右へと移っていく。視覚装置ではその対象が視野の特定位置

を通過した瞬間に、認識信号を制御装置へ出力する。なお認識すべきボルト、リブ、タイヤのうち、タイヤは焦点距離が異なるため、タイヤ検出器を別に設置している。

作動部であるマニプレータは型わく進行方向のT軸、前後方向のH軸、インパクトレンチを上下させるV軸より成り、直交座標系に構成している。更にレンチ後方には触覚を配置している。サーボ軸であるT軸、H軸ではレゾルバによりフィードバック位置情報を得る。一方、走行台車の駆動軸には、型わくの動きを検出するためパルスジェネレータを設置している。

制御部は図3に示すように五つのブロックより構成されている。記憶回路は、光電管より型わくの先後端、検出部よりボルト、リブ、タイヤの各通過信号を受けて、その種類と位置を記憶する。位置については、型わくの動きに応じてパルスジェネレータより発生する位置パルスで更新されるようになっている。対象がマニプレータの作動範囲に入ると、プログラム回路ではその対象を判別して各軸の動作モードを決める。動作モードとしては、ボルトに同期して動かす追従、低速で触覚を動かす探索、逃げ動作をさせる退避などがあり、位置指令回路ではこのモードに従って移動すべき位置データをつくる。位置決め回路では、この位置データとフィードバックされるマニプレータの現位置信号を比較して、両者が一

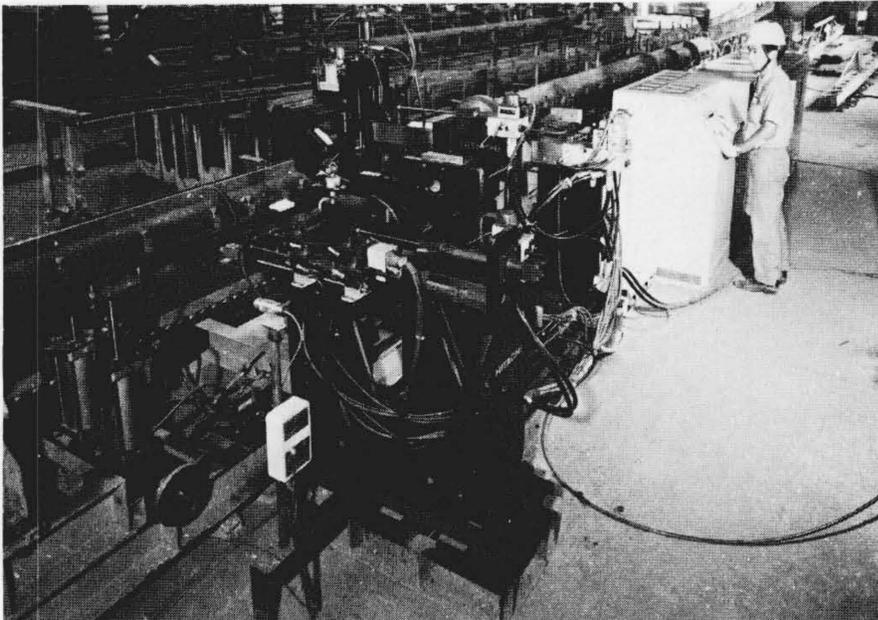


図4 全体外観図 実用試験での稼動状況を示したものである。

Fig. 4 Operating Scene of System

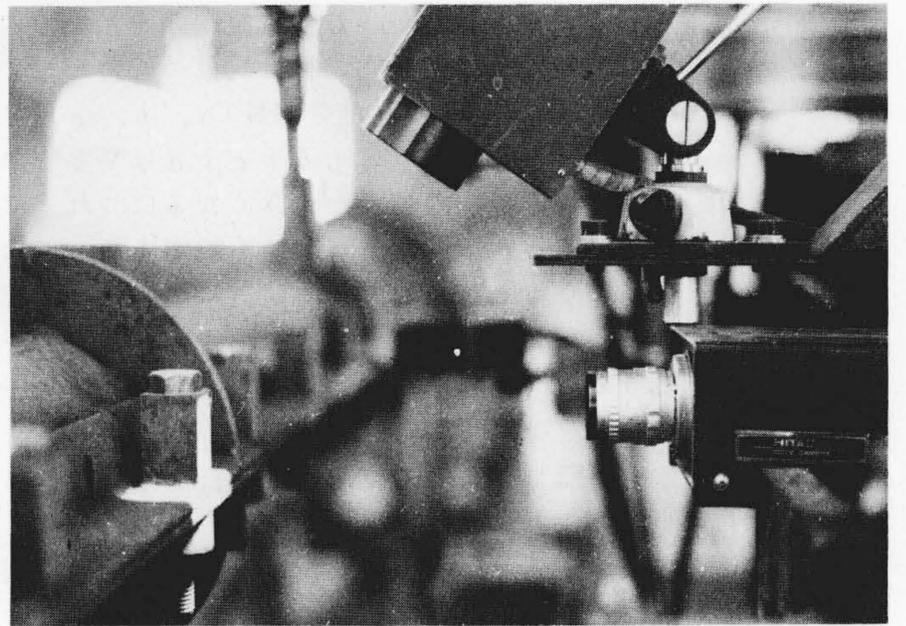


図6 照明方法 照明装置とその設置状況を示したもので、ボルト自立わく端面にのみ光を当てて背景より浮かせる。

Fig. 6 Lighting Device

致するようにサーボバルブを励磁する。プログラム回路は、各軸の位置決め完了信号や外部検出器(触覚など)からのインターロック信号によりステップを進め、ステップごとに動作モードを指令する。ボルトであれば触覚で位置を確認して締緩作業、リブ、タイヤであれば逃げ動作を行なわせるようにプログラミングしている。プログラム回路に型わくの後端信号が入ると、各軸を原点にもどし作業完了となる。

図4は、本装置を実際の作業現場に持ち込み、実用試験を行なっている状況を示すものである。

3 視覚による物体認識

視覚に関しては既に多くの研究がなされ、かなり高級な認識を行なうことができるようになってきたが、生産工程に用いる人工の目(インダストリアル アイ)としての実用化は困

難な面が多かった。その理由は、映像という膨大な情報量を記憶、処理するために一般には電子計算機を必要とし高価になること、認識時間が長く生産タクトに合わないことなどによる。

このため、実用化について考えると、対象物になんらかの制限を加え情報量を圧縮することが必要である。一方、信頼性の面から言えば入力映像が多少乱れても認識できる積分的な処理が望ましい。以上の点を考慮して、本装置では照明によって対象物を背景より浮き上がらせ、映像を明暗二値化情報にするとともに、対象物の一部の形状に着目して識別する方式を採っている。この方式では小規模の専用ハードウェアで装置化でき、認識時間も1/60秒と極めて短くできる。

この方式の認識原理は図5に示すとおりである。映像は対象部が白、背景が黒に二値化されているものとし、黒の部分

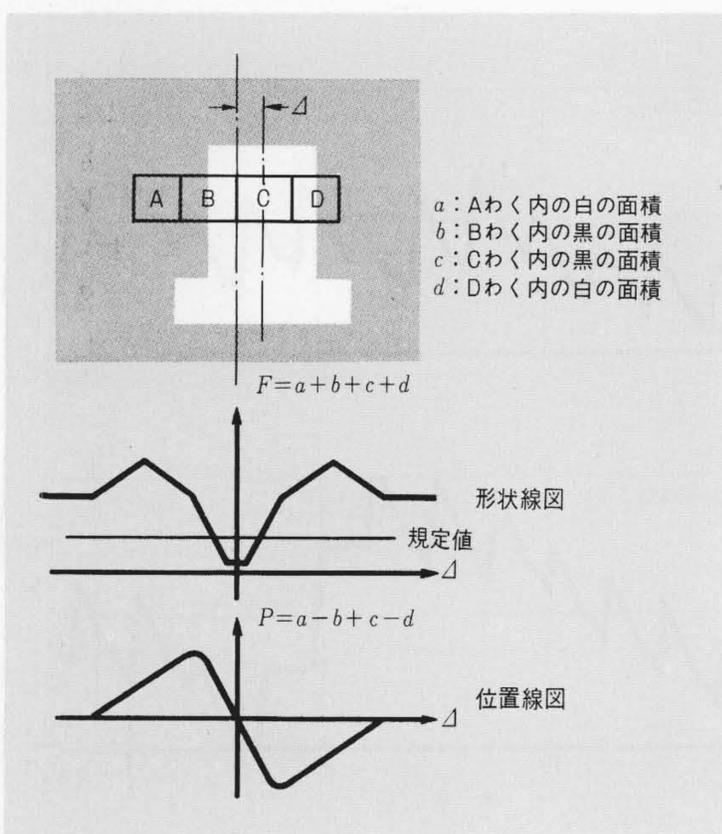


図5 視覚認識原理図 形状と位置の認識原理を示したもので、四つのわく面積を演算することによって認識する。

Fig. 5 Principle of Visual Pattern Recognition

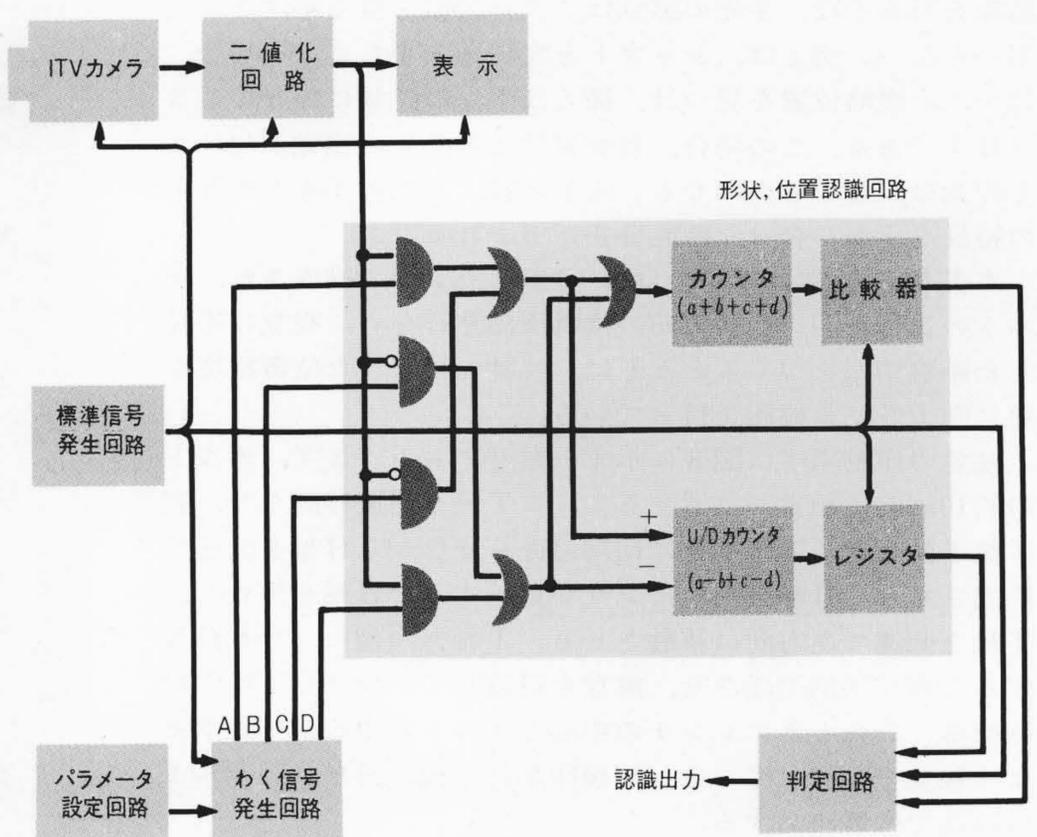


図7 視覚装置構成図 視覚装置の構成を示したブロック図である。

Fig. 7 Block Diagram of Visual Processor

を斜線で示している。A, B, C, Dが特定範囲を抽出するためのわくであり、わくBとCの幅の和は対象の幅に等しく設定する。図示のように誤り面積(積分演算) a, b, c, d を定義すると、それらの総和 $F = a + b + c + d$ はV字形の曲線になる。わくと対象の幅の違いが大きくなるにつれ、V字の谷の部分上昇するので、ある規定値を設定することによって形状を認識できる。しかし、その位置については正確に求まらないので、左右の面積バランスを示す演算値 $P = a - b + c - d$ を考える。これは対象と幅の大小に関係なく、常に両者の中心が一致したときに符号が反転する曲線になる。従って P の符号が反転したことで位置判定を行ない、このときに F が規定値以下であれば認識出力を出す。

一般に認識対象が複雑な形状をしている場合は、抽出用のわくを複数個設け、各わくの判定結果を合成して認識する。

ITVカメラと照明の状況は図6に示すとおりである。

図7は、視覚装置の全体構成を示すものである。従来のITVカメラは、モニタに映して人間が認識することを目的としており、少々の映像ひずみ又は映像出力信号の変動があっても支障なかった。しかし、機械が認識するにはそのことが障害となるため、映像処理用に新しくカメラを開発した。本装置では画面を 320×240 の絵素に分割し、その絵素単位で演算する。設定されたわく内を走査しているときだけの映像二値化信号が、形状、位置のカウンタに入力され、前述の認識原理に従って F, P が計測される。フィールド走査が終了すると、形状については規定値以下であるかが、位置についてはカウント符号が1フィールド前のものと異なっているかが判定され、両者が成立していれば認識信号が出力される。視覚装置では認識対象がボルト、リブと2種類あるため、認識回路を2組用意して各独立して認識できるようにしている。認識は1フィールドごとに行なわれるから、精度はその間(1/60秒)に対象が移動する距離となる。

4 触覚による探索

一般に人間がハンドリング作業を行なう場合、目はマクロ情報を得る手段、手先の感覚はミクロ情報を得る手段として用いられる。例えば、シャフトを穴に挿入するような場合、目で穴の概略位置を見つけ、挿入は手先の感覚に任せてしまうはずである。この場合、目が欠けても手先の感覚が欠けても作業は困難なものになる。人工の目、人工の手先もお互いの特長を生かし合った機能分担が望まれる。

本装置の触覚は二つのON-OFFセンサで構成され、ボルトの進行方向、前後方向の位置検出を行ない、視覚に不足した距離情報をつくとともに、視覚で得られた位置精度を更に向上させる機能を持っている。

触覚の作動順序は図8に示すとおりである。まず、ボルトの約10mm前に触覚が位置するようにT軸を高速移動させ、完了後T軸をボルトの動きに同期追従させながらH軸を低速で前進させる。H軸方向のセンサがONするとH軸を停止し、T軸を低速で逆方向に移動させる。T軸方向のセンサもONすると再び同期追従させ、触覚を退避してレンチを下げ作動させる。このときにレンチの中心とボルトの中心が一致するよう触覚を配置している。締緩作業終了後、再び次のボルトへ高速で位置決めする。

5 作業能力

型わくが一定速度で移動中に作業を行なう方式であるから、レンチがボルトに同期している間はT軸はストローク後端側

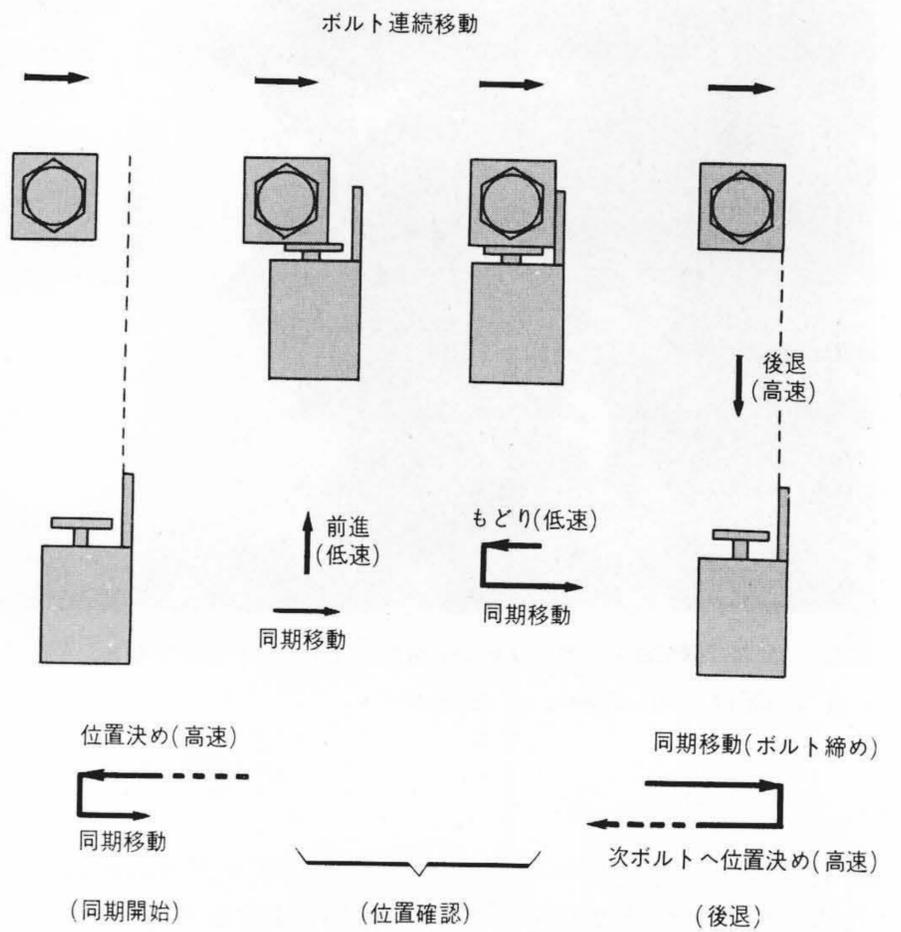


図8 触覚作動順序 触覚でボルト位置を確認する順序を示したもので、二方向センサを用いて確認する。

Fig. 8 Confirmation of Bolt with Tactile Sensors

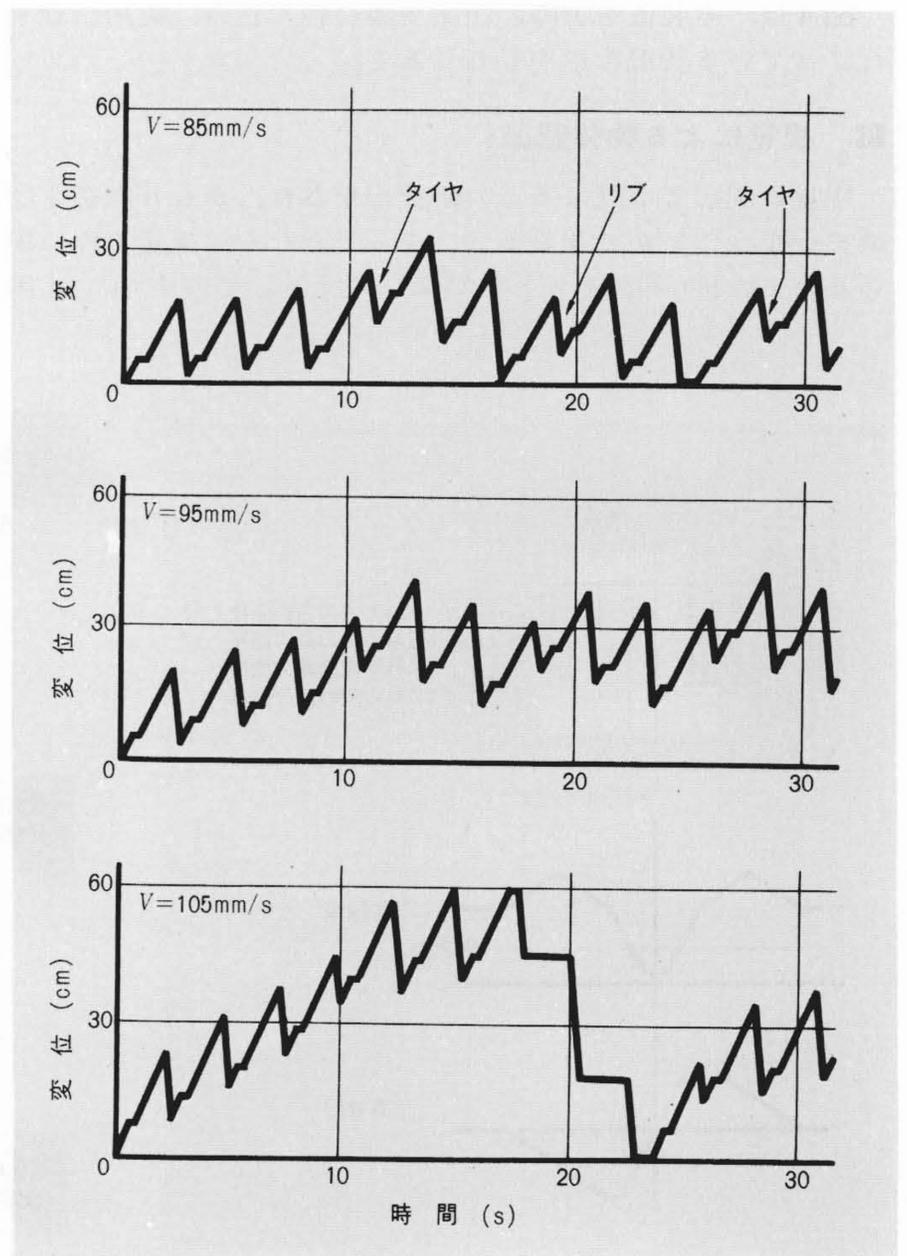


図9 T軸の追い込まれ状況 型わく速度をパラメータにT軸の追い込まれ状況を示したもので、100mm/s程度が台車を停止させない最大速度である。

Fig. 9 Displacement of axis T

に追い込まれる形となる。この追い込まれ量はボルトの密度と移動速度によって変わるが、この状況は図9に示すとおりである。

山状の立上がりはボルトの移動に同期して追い込まれるときで、下がりも高速で次のボルトへ位置決めするときを示している。立上がりの途中にあるフラットの部分は触覚の動作時を示す。全体的にはボルト間隔が小さく、逃げ動作を要するリブ、タイヤ部で急激に追い込まれ、他のボルト間隔の大きい部分でそれを取りもどすような形となっている。

速度85mm/sではストローク原点(変位0)にもどり、95mm/sで余裕はないが、ともにストローク内で作業は可能である。105mm/sになるとストローク後端に達してしまう。本装置ではストローク後端に追い込まれると、台車を一時停止して作業を続行するが、この停止時間が速度増加による短縮時間と相殺してしまうので、ストローク範囲内で作業を行なえる速度、すなわち100mm/s程度が最大の作業能力として与えられる。これは熟練した作業者の約1.5人分に相当する。

6 サervo系の応答特性

工業用ロボットには作業者に不安感を与えないような円滑な加減速特性が要求される。ここでは動いているボルトに位置決め(ステップ応答)、同期(ランプ応答)を繰り返すT軸の応答特性について述べる。

図10はマニプレータの電気-油圧サervo系のブロック線図

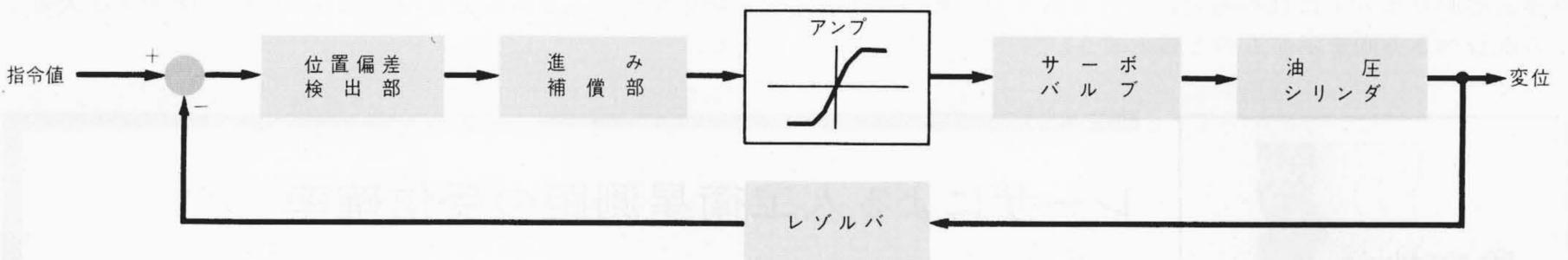


図10 サervo系のブロック図 電気-油圧で構成されたサervo系のブロック図を示す。

Fig. 10 Block Diagram of Servo System

を示すものである。検出器として用いたレゾルバは、500Hzの二相交流で励磁して位置偏差を位相差出力として検出し、その位相差出力をフィルタを通してアナログ量に変換している。このため、レゾルバの励磁周波数で決まるむだ時間と一次遅れ要素が含まれる。また系の安定化を図るため進み補償を行ない、更に円滑な減速特性を得るためアンプ特性を折線でルート関数近似したものになっている。アンプの出力電流によりサervo弁が励磁されて油圧シリンダが駆動され、その位置がレゾルバを介してフィードバックされる。

図11は、この系の実験結果を電子計算機で求めた計算値と併記して示すものである。(a)は50mmのステップ指令を与えたときの応答で、アンプ特性をルート関数近似したため、減速度0.9Gという円滑な減速特性を呈している。(b)は200mm/sのランプ入力を与えたときの応答で、0.1秒程度でオフセット量が一定になっており、十分な追従特性を示している。

7 締付け性能の検討

組み立てられた型わくはコンクリートを挿入して遠心機にかけるが、このとき型わく表面で約40Gの法線加速度を生じている。従ってボルトの締付けミス、締付けトルク不足は製品の品質を低下させる要因になるので、安定した滑合特性、締付け力を得る必要がある。

レンチをボルトにスムーズに滑合させるために次の点を考慮した。

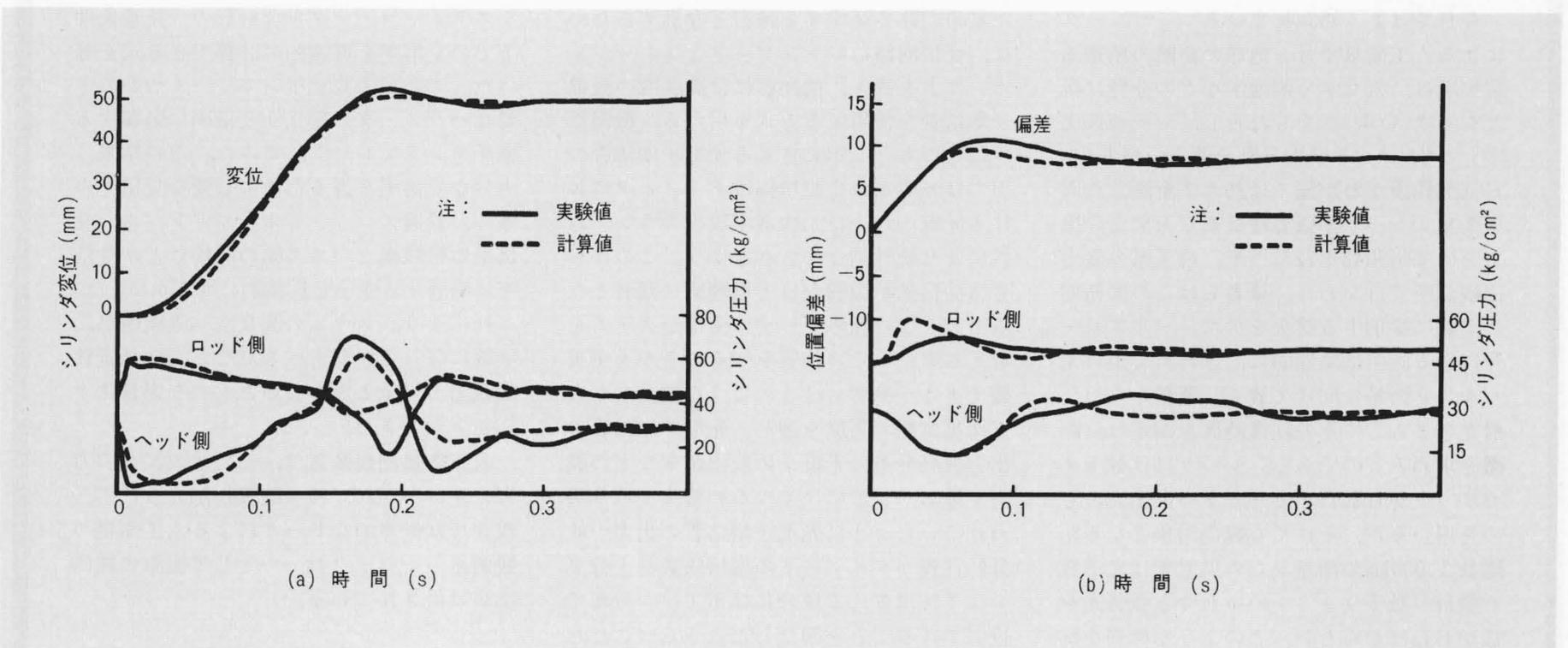


図11 T軸の応答特性 T軸に50mmのステップ指令と200mm/sのランプ指令を与えたときの応答で、円滑な減速、追従特性を呈している。

Fig. 11 Characteristic Response Curve of axis T

- (1) ボルト中心の位置ずれを吸収するため、インパクト レンチの保持部を X, Y 方向に微少移動できる構造とした。
- (2) ボルトの微少な倒れを吸収するため、レンチと先端アタッチメントの接続をある程度振れ回れるようにした。
- (3) 滑合しやすくするためにアタッチメントの 6 角穴を多角穴形状にし、すきま寸法も手動用のものに比べて多少大き目にした。
- (4) ボルト頭上での空転を防止するため、レンチが最高速 (約 4,000rpm) に達しないうちにボルトに接触するようにした。

以上の条件設定により実用試験において滑合ミスを皆無にすることができた。また締付けトルクについても、

- (1) 空気圧の最適化
 - (2) レンチ回転時間の最適化
- を図ることによって、図12に示すように手動時に比べて適性範囲に多く分布する良好な結果を得た。

8 結 言

視覚、触覚を持つ知能ロボットを開発し、従来自動化が困難とされていたボルト締緩作業に適用した。

本装置は、小規模の専用ハードで構成した視覚によりボルトや障害部を高速認識し、触覚で位置を補正して油圧マニプレータにより障害部を巧みに逃げつつボルト締緩を行なうもので、ボルト 1 本当たり約 2.5 秒という高速作業を実現し得た。

今回のものはボルト締緩という専用のものであるが、中に含まれる視覚、触覚、油圧マニプレータの各技術はすべて外界適応形ロボットには不可欠のものであり、今後のロボットの進むべき方向を示すものと言えよう。

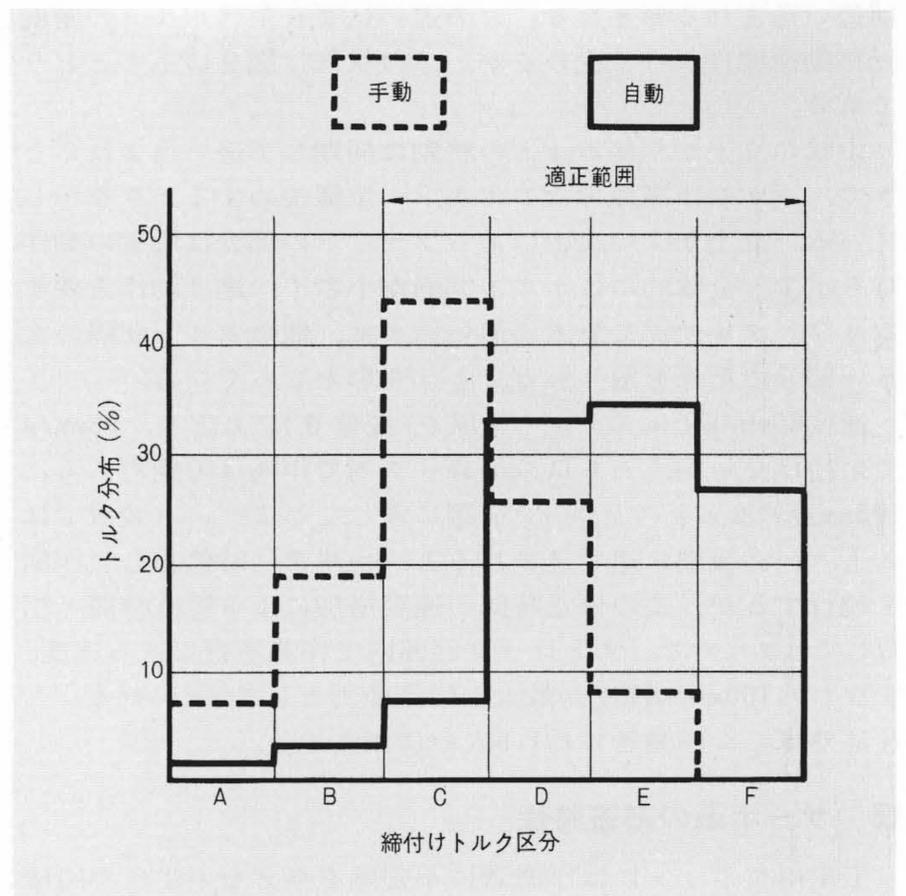


図12 締付けトルク分布 自動時と手動時におけるボルトの締付けトルクを比較したもので、自動化によりかなり改善されることが分かる。

Fig. 12 Distribution of Tightened Torque

終わりに本装置の開発にあたり、御協力をいただいた日本コンクリート工業株式会社の関係各位に対し深謝する次第である。

論文抄録

レーザによる人工衛星測距の受信確率

日立製作所 洲崎保司・橘 篤志

電子通信学会論文誌-B 55-B, 569 (昭47-10)

今日ではよく知られているレーザレーダによる人工衛星や月と地球の距離の精密測定実験は、天文学や測地学などの分野に新たな息吹(いぶ)きをもたらし、「レーザ天文学」ともいべき学術分野を開きつつある。日立製作所がわが国では初めて企画した人工衛星のレーザ測距実験は東京天文台の協力を得て昭和43年12月以来、埼玉県の大平山観測所で行なわれ、筆者らはこの開拓期の実験に参加する機会を得た。パルスレーザによる測距は時間的に、きわめて短い光パルスを衛星に向けて放ち、衛星からの反射光をとらえてその往復時間を測定し、距離を求めるものである。レーザには数十メガワットから数百メガワットの大出力のものを用いるが、それでも観測対象となる距離数 1,000km の衛星からの反射光は光子数で数百~数千フォトンのいわゆる微弱光を扱わねばならない。このような微弱な反射信号を背景光や大気からの逆散乱光、ま

た電子回路で発生する雑音と弁別するために、受信回路にレンジゲートとスレッシュホールドを置き、検知器には高感度の光電子増倍管を使用する方式を用いる。微弱な受信光のもとで作動させる光電子増倍管の出力は光電面および増幅段ダイノードにおける光電子および二次電子放出のランダム性により統計的なゆらぎを伴う。このゆらぎは受信光が微弱なほど原理的に顕著となるので、この種のレーダの受信システムを考える際にはその性質を知ることがまず重要である。筆者らはこのような観点から人工衛星測距の実験を通じ、光電子増倍管の出力波高分布、光電子の放出確率などの調査を進め、すでにいくつかの論文で取り扱われていたように光電子増倍管の出力の統計的性質がダイノードの増倍係数を十分高くして使用される場合にはポアソン分布で近似できることを確認した。さらにこれらの結果に基づいてレーザレーダのすべての

システムパラメータを含む形の、任意条件下での受信率を理論的に計算できる式を導いた。この理論式を用いて、いくつかの主要なパラメータの変化が受信率に影響する様子をシミュレートしてみた。その結果、十分な受信率を得るために必要な受信光の強さ、最適スレッシュホールドレベル、受信系の帯域幅とパルス幅の関係などが受信率に影響する様子を具体的に明らかにした。これによりシステムの改良すべき問題点、実験に際して注意すべき点など、従来定性的議論の対象となっていたものを定量化することができた。

人工衛星測距装置は、その後天文台の方向に受けつがれ、種々改良が加えられて、現在では世界的なレーザによる人工衛星の観測ネットワークの一つとして実際の観測業務に供されている。