

---

航空機エンジン部品のプラズマ自動溶射システム

Automatic Plasma Flame Spray System for the Aircraft Engine Parts

森岡 泉(Izumi Morioka) 佐々木 吉哉(Yoshiya Sasaki) 白石 紀慶(Noriyoshi Shiraishi) 大貫 弘志(Hiroshi Oonuki)

---

要旨：

日本航空(株)は、航空機のジェットエンジンの整備工程の一つであるプラズマ溶射工程の自動化システムを開発し、1992年10月より稼働を開始した。著者らは、全体システムを制御するプロセスコンピュータのシステム開発を行った。本システムで特に要求されたことは、多数の部品に対し溶射皮膜の均一性とミル(1000分の1インチ)オーダーの溶射厚み精度を確保することである。これを溶射ロボットの動作を短周期の反復動作とし、統計的処理によって次回の溶射条件を決定する学習効果を持たせ、また、各種実績値をデータベース化することにより、多種多様の部品に対する溶射工程が自動化できた。

---

Synopsis：

Japan Airlines Co., Ltd. developed a system to automate the plasma flame spray process which is one of the aircraft maintenance processes. The system has been running since October 1992. The authors have achieved system development of the process computer which controls the whole system. What this system especially requires is thickness repeatability and 1-mil-order thickness accuracy of coating many engine parts. This system has fulfilled these requirements by using short-range repeated robotic motions and self-learning functions to obtain the most proper condition statistically after each process. It also has realized to automate the flame spray process of many kinds of parts by a database which consists of various actual values.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

## Automatic Plasma Flame Spray System for the Aircraft Engine Parts



森岡 泉  
Izumi Morioka  
川鉄情報システム(株)  
リエンジニアリング事  
業推進部 主任部員(主  
席課長)



佐々木 吉哉  
Yoshiya Sasaki  
川鉄情報システム(株)  
応用システム事業部  
テレマーケティングシ  
ステム部 副主任



白石 紀慶  
Noriyoshi Shiraishi  
日本航空㈱ 整備本部  
エンジン整備工場表  
面処理課 課長



大貫 弘志  
Hiroshi Oonuki  
日本航空㈱ 整備本部  
エンジン整備工場表  
面処理課 係長

### 要旨

日本航空㈱は、航空機のジェットエンジンの整備工程の一つであるプラズマ溶射工程の自動化システムを開発し、1992年10月より稼働を開始した。著者らは、全体システムを制御するプロセスコンピュータのシステム開発を行った。本システムで特に要求されたことは、多数の部品に対し溶射皮膜の均一性とミル(1000分の1インチ)オーダーの溶射厚み精度を確保することである。これを溶射ロボットの動作を短周期の反復動作とし、統計的処理によって次回溶射条件を決定する学習効果を持たせ、また、各種実績値をデータベース化することにより、多種多様な部品に対する溶射工程が自動化できた。

### Synopsis:

Japan Airlines Co., Ltd. developed a system to automate the plasma flame spray process which is one of the aircraft maintenance processes. The system has been running since October 1992. The authors have achieved system development of the process computer which controls the whole system. What this system especially requires is thickness repeatability and 1-mil-order thickness accuracy of coating many engine parts. This system has fulfilled these requirements by using short-range repeated robotic motions and self-learning functions to obtain the most proper condition statistically after each process. It also has realized to automate the flame spray process of many kinds of parts by a database which consists of various actual values.

### 1 緒 言

航空機の整備作業のなかで、航空機エンジンの整備工程は旅客輸送の安全性を担う点で、とりわけ重要な作業の一つであるが、特徴としては部品群がTi等の特殊で高価な素材を用いていることや、構成される部品の多くが苛酷な動作環境の中でその表面が互いに磨耗したり、あるいは熱や衝撃等により劣化することから、非常に高度な金属表面のリカバリー処理技術が要求されることにある。

溶射とは、セラミックや金属材料を加熱し、溶融あるいはそれに近い状態にまで加熱した材料を、素材表面に吹きつけて皮膜を形成する表面処理技術である。エンジンの整備工程の中では、エンジンを構成する部材の内、摩耗・劣化する部分に対して、耐食性・耐熱性・耐摩耗性の向上、寸法回復、すき間調整等の目的で以前から適用されている。

また、溶射工程の現場では、ミル(1000分の1インチ、約

0.025 mm) オーダーの厳密な精度の作業の要求に対して、閉め切られたブースの中で(騒音対策と有害物質の流出対策のため)人間が手作業で危険な溶射ガンを持つての作業が必要であるため、作業者自身に苛酷な作業環境の中での作業と、高度な職人芸を強いてきたのが実体であった。

日本航空㈱では、従来から採用してきた大型航空機ボーイング747型の最新鋭機種である“ボーイング747-400”の配備を順次進めているが、それにともない、エンジン自身も高性能化かつその構造が複雑化し、その結果、皮膜そのものに機能を持たせる、「機能皮膜」としての役割が重視されつつある。したがって、溶射作業に、より一層の高精度化および効率化が求められるようになった。

そこで、世界初の試みとして、作業者に課せられた負荷を軽減することにより、溶射工程を高度に管理することを目的としてプロセスコンピュータを核とした溶射作業の全自動化システムの開発が検討されるに至った。そこで、プロセスコンピュータ部分のハードウ

\* 平成6年5月11日原稿受付

ウェアおよびソフトウェアを開発した。本システムは1992年10月の本稼働開始以降順調に稼働を続けている。

本稿では、本システムをプロセスコンピュータ機能を中心に紹介する。

## 2 従来の溶射工程とその解決すべき課題

### 2.1 航空機エンジン整備の特殊性

航空機はすべての部品が整備記録により管理され、それらはそれぞれ自身の動作条件により定められた条件により整備が行われる。

エンジン整備工場には、その条件を満たしたエンジンが運ばれ、検査の後、必要に応じて部品に分解されたあと、溶射設備のある表面処理工場へと運ばれてくる。

それらのうち、ごく一部の再生不能な傷みのひどいものを除き、すべての部品が整備の対象となる。エンジンを構成する部品は、形状的には簡易なものでも、その苛酷な運転環境に耐えるために素材はすべて高価な特殊金属素材が使用されている。そのため、自動車整備のように「不良な部品は新品と交換する」ではなく、「不良となる前に定期的に部品一つ一つに磨きをかけて長持ちさせる」といった方式の整備作業になり、溶射のような表面処理技術が高度に駆使されることになる。

### 2.2 現状の溶射工程

航空機エンジン部品の溶射は前処理としてのブラスト工程と、溶射工程の二つの工程から構成される (Fig. 1)。

ブラスト工程は、後工程である溶射処理時に皮膜が付きやすくなるために、母材表面に微細なセラミックをブラストガンの先端部のノズルから強く噴射し一様に粗く削り取る作業工程である。

溶射工程は、母材を加熱 (プリヒート) した後、高温 (10 000°C 強) のプラズマガス (Ar, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He 等) を溶射ガンの先端部のノズルから高速で噴射し、また同時にノズル付近に取りつけられたインジェクタからコーティング材 (溶射材料) をプラズマガス中に注入し、瞬時に溶融状態まで達したコーティング材を、高速に母材表面に吹きつけることにより、皮膜を形成する工程である。

一般的に、溶射を行う作業現場環境は良くないとされているが、それはこの作業が手作業により行われ、かつ閉め切られたブース内で行われているからである。また、皮膜厚に対する精度の要求も高まり、手作業では5ミル程度であった厚み精度の要求が、最近では1ミル程度の要求に変わりつつあり、作業により高度な熟練度が要求されているのが現状である。

### 2.3 溶射皮膜のヴァリエーション

溶射で形成される皮膜は、1種類の皮膜層だけで満足する場合もあるが、2種類以上の異なる皮膜から形成されたり、表面に近づくにつれて、セラミックと金属の混合比率がリニアに変化していくもの等がある。また、使用される材料も多種にわたり、近年の航空機技術の進化に伴って、このような多様性が増加する傾向にある。

このようなヴァリエーションが必要となるのは、皮膜そのものに求められる機能が多岐にわたるためであり、従来から最も一般的である耐摩耗性の他に、耐熱性、耐振動性、密着性、あるいは母材そのものを極力保護するために「アブレダブルコーティング」とよばれる皮膜の損傷を前提にするタイプの機能等の「機能皮膜」が求められるようになったためである。

また、この他にも母材を構成する素材や形状、あるいは母材そのものの摩耗度の違い等により、溶射装置はさまざまな条件で動作することが要求される。それら諸条件としては、

- (1) 皮膜の種類 (グレーデッド, 1層, 2層, 3層)
  - (2) コーティング材種
  - (3) コーティング材の供給量 (インジェクターからの供給量)
  - (4) インジェクターの種類
  - (5) プラズマガスの種類 (N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Ar, He 等)
  - (6) プラズマガスの流量
  - (7) ノズル電極に供給する電流, 電圧 (プラズマガスの温度設定)
  - (8) 母材とノズルの距離
  - (9) 溶射時間 (4章で詳細に説明)
- などがある。

これら諸条件は従来方式では溶射装置側に対して作業者が手作業で設定してきた項目であるが、基本的に作業者の経験とカンによる要素が多く溶射そのものの作業の難しさとともに、溶射品質の阻害要因となっていた。

### 2.4 解決すべき課題

ここで解決すべき課題を整理する。

- (1) 最近の航空機エンジンは、高性能化・複雑化しており、主要部品に対する機能皮膜としての溶射が必要とされ、これまでとは違った意味の高度な品質が求められ、これまで頼ってきた職人芸でもこなせきれなくなってきた。
- (2) ブラスト工程と溶射工程がバラバラに行われ、作業手順に無駄が生じがちであった。
- (3) 溶射・ブラストの一連の作業の流れの中で、データの一貫

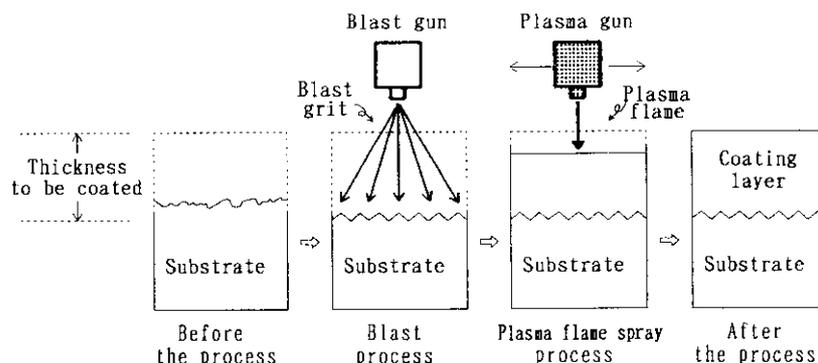


Fig. 1 Concept of plasma flame spray

性がとられていず、作業者の技量に負うところが多く、品質的なバラツキが多かった。

- (4) 皮膜厚の精度を1ミル以内にコントロールする。
- (5) 作業環境を改善する。
- (6) 将来的な拡張性を考慮する。

これら課題を解決することが本システムの命題であった。

### 3 システム概要

#### 3.1 システムの概要

開発したシステムの外観を Photo 1 に示す。左右それぞれに溶

射ブース、プラストブース、中央に搬送装置が見える。

システムの構成を Fig. 2 に示す。プロセスコンピュータと溶射装置、プラスト装置、ロボット2台、搬送系との連携をはかり全自動化システムを実現している。

中央のターンテーブル上に部品をセットすれば後は制御室内に設置したプロセスコンピュータからの簡単な指示により自動的に作業がプラスト、溶射の順に進み終了した時点で再度中央に出てくる仕組みにした。

プロセスコンピュータには、リアルタイム UNIX マシンを採用し、高速なトランザクション処理を実現させ、またリレーショナルデータベースを搭載することにより複雑にして膨大な作業指示と作業実績管理を実現している。

Photo 1 Outward appearance of the whole system

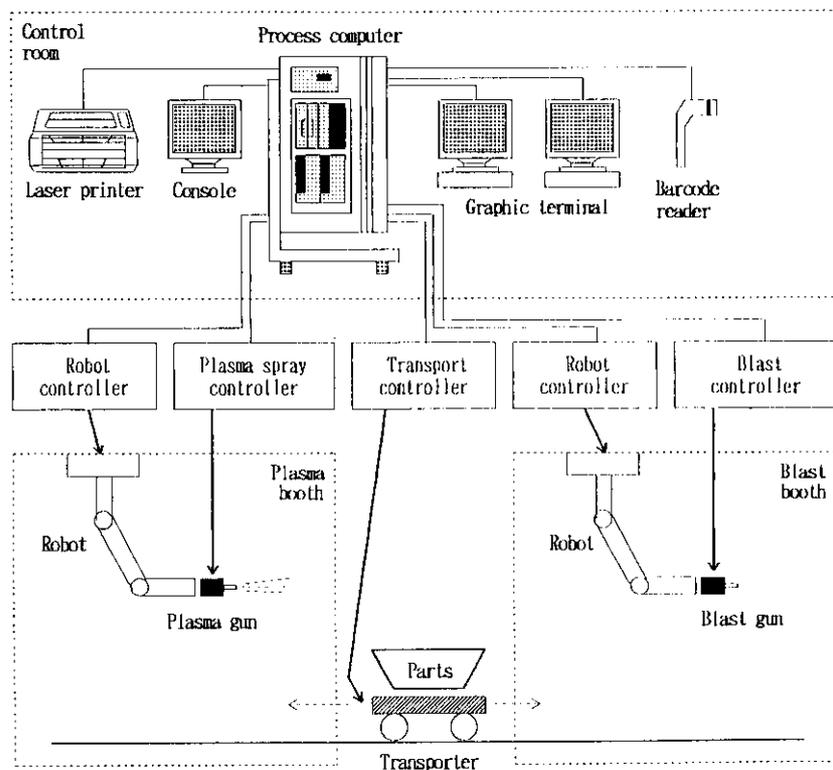


Fig. 2 Hardware configuration of the whole system

### 3.2 プロセスコンピュータの役割

全体システムの中におけるプロセスコンピュータの役割を次に要約する。

#### 3.2.1 自動化制御

各装置の動きをすべて通信ラインを経由して自動制御する。自動制御に必要な情報は、その都度操作端末やデータベースから取り込む (Fig. 3)。

作業員は一つの部品に関して、搬送装置に部品をセットし、不足厚を測定し、操作端末にその部品の諸条件を入力したら、あとはプラスト工程終了時にプラスト結果の良否を入力するのと、溶射工程後に溶射の結果、つまり皮膜の評価と実績厚とを入力するだけでよい。

全体工程の中における多種多様な部品に対応したループ制御や、煩雑な各種パラメータの設定もシステムにまかせておけばよい。

#### 3.2.2 作業進捗のモニタリング機能

操作端末では、実運転時に、リアルタイムに経過時間、電流、電圧、プラズマガスの圧力、コーティング材の供給量等の実績がリアルタイムにグラフィックに表示され、実運転が終了すると、必要な

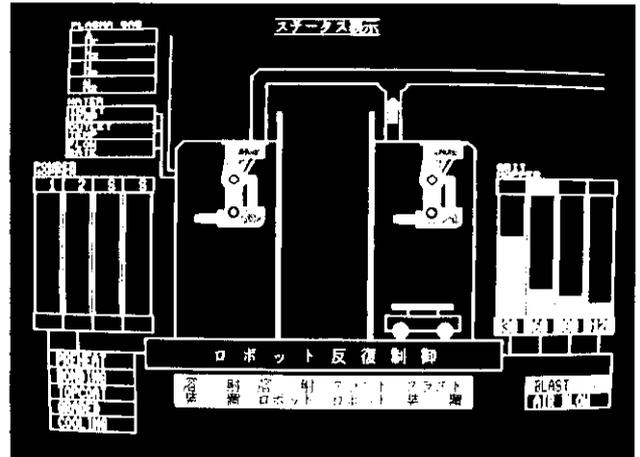


Photo 2 Graphic screen of process status display

入力を促す。

制御室には、操作端末と溶射ブース内に設置したテレビカメラで撮られた実際の作業現場のモニタが並んで設置されてあるが、一部の入力操作を除けば、この二つの画面を監視しているだけでよい。

#### 3.2.3 設備全体の監視機能

モニター端末では、全体設備をグラフィックに表示 (Photo 2) する。その中に部品の所在位置や設備内を循環する冷却水の温度、ブース内に取り付けられている集塵機の運転状況等をリアルタイムに表示し、設備全体の稼働状況を一日で知ることができる。

#### 3.2.4 データベースの管理保存

一連の溶射作業の経過、実績を全てデータベースに保存し、学習機能に役立てるのはもちろん、トラブル発生時の要因分析や日報、月報等の帳票出力や実績の傾向分析等を行う。これにより、作業員は一切の記録作業から開放される。

#### 3.2.5 ロボットプログラムの管理

ロボットプログラムも他のデータ同様にデータベースの中に保存する。ロボットプログラムはロボットにより作成し、動作確認まで完了したプログラムをプロセスコンピュータにアップロードし、以降プログラムの保管場所はプロセスコンピュータとなる。

実際の作業実行時には、あらかじめ部品と使用するプログラムはひもつけされるので、部品を両面から特定しさえすれば、ロボットに自動的にダウンロードされる。

## 4 本システムの効果

本システムは、溶射工程の自動化を実現したばかりではなく、さまざまな技術的課題に対して具体的な効果を上げている。

### 4.1 1 ミルオーダーの厚み精度の実現

これまでの手動による溶射工程では、溶射厚の精度を±5ミルの範囲で抑えるのが限度であった。それは、手作業のためどうしても作業にむらがあることに加え、溶射時間が正確に捉えられず、過去の実績を作業に十分には活用しきれなかったことと、溶射装置を構成する部品にも徐々に劣化が生じるため、作業条件が日々変化していくことに原因がある。

対策として、本システムでは、厳密なロボット動作制御と正確な実績収集を行い、かつその実績値を学習機能を用いて処理し、今回の溶射工程に活用することにより、Fig. 4 に示すように、従来の手

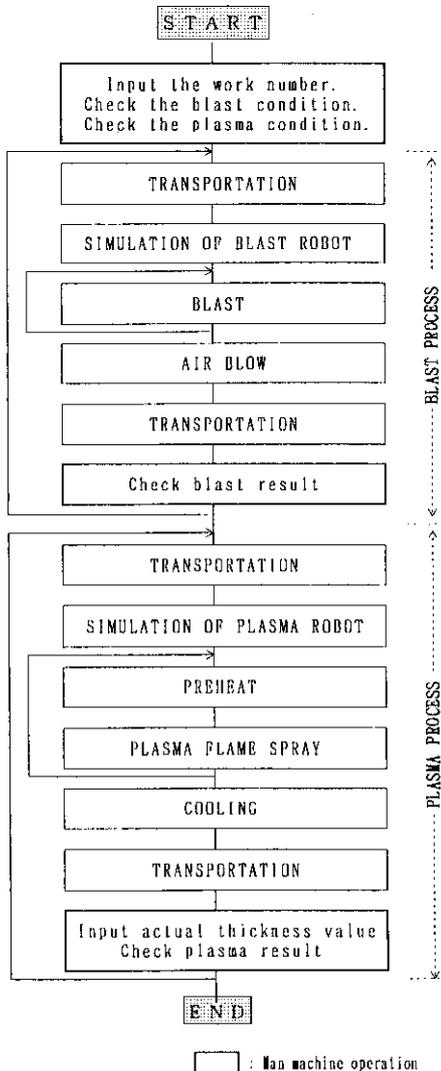


Fig. 3 Outline flow of automated process

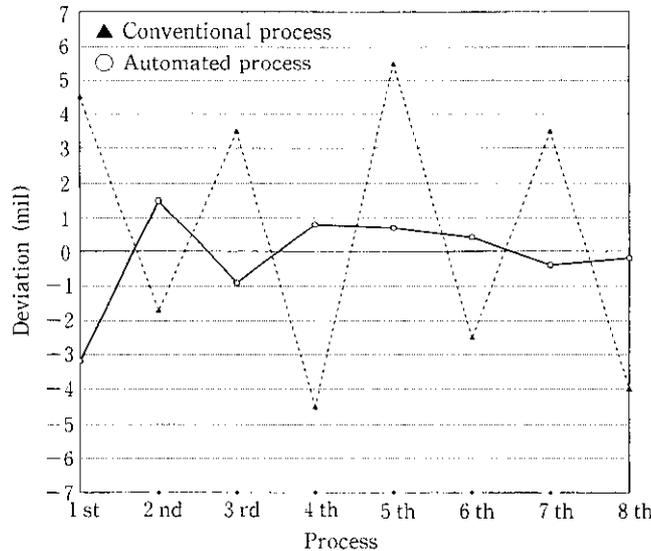


Fig. 4 Improvement of accuracy

作業による作業結果より、回数を重ねるにつれ求める1ミルの精度内に収束する結果を得た。

時間コントロールと学習機能について説明する。

4.1.1 時間コントロール

通常の溶射作業は、その溶射対象のエリアを皮膜の均一性を保証するために、溶射フレームが反復してなぞる形で行われる。ロボットを用いた自動運転でもこのやり方を用いるが (Fig. 5), より高い精度を目的として次のような考え方でやっている。

目的の溶射時間を  $T_c$ , 最初にA点B点間の1往復に要した時間を  $T_1$ , A点に到着時点の経過時間 (最初にA点を離れた時からの累計時間) を  $T$  とすると,

$$T \geq T_c - T_1$$

を満たした時点で、システムは次のA点到着時点で、B点ではなくF点に移動するようロボットに対し命令を出すのである。

この制御方法により、厳密な反復制御に成功したわけであるが、その前提として、反復時間を短くする必要がある。この方法でも、最大1周期分の時間誤差が発生してしまうからである。そのため、動作が確実に動作速度の速いロボットが必要となる。

4.1.2 学習機能

学習機能とは、これから溶射しようとする部品とその目標厚に対し、いかほどの時間を要せば、目標の溶射厚に近づくかを、過去の同一部品に対する作業実績を基に算出する機能をいう。

(1) 式に示すように、求める溶射時間  $T_c$  を、目標厚  $\Delta D$  に過去のインチ単位の実績時間  $T_i$  の平均値を乗ずることにより得ている。ただし、直近の作業の実績時間  $T_p$  に重きを置くため、その重み係数  $d$  を用いてそれ以前の実績時間の影響を減らした。

$$T_c = \Delta D \times \left\{ (1-d) T_p + \frac{d}{p-1} \sum_{i=1}^{p-1} T_i \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

- $T_c$ : 求める溶射時間 (秒)
- $\Delta D$ : 今回の付けようとする必要厚 (inch)
- $T_p$ : 直近 ( $p$  番目) のインチあたりの溶射時間 (秒/inch)
- $T_i$ :  $i$  番目のインチあたりの溶射時間 (秒/inch)
- $d$ : 調整係数 (直近の値を50%反映する場合は0.5となる。)

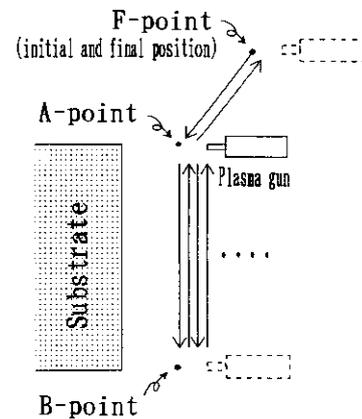


Fig. 5 Typical repeated robotic motion

4.2 ロボットプログラムの作成・管理の半減化

本システムは、プラスト、溶射それぞれにロボットを使用しており、通常は一つの部品に対し、2種類のロボットプログラムが必要となり、プログラムの作成・管理に二重の手間がかかる。

これを、一つのプログラムを双方で共有させることによりプログラム本数の半減化を実現し、大幅にプログラムの作成・管理の作業量を削減することに成功した。ただ、共有させたといっても、二つのロボットが全く同一の動きをするわけではない。なぜなら、ロボット先端部に取りつけるガンの長さや位置が異なるし、また部品とガンの距離もことなるので、基本的な動作は同じでも、ロボット全体の動きとしては異なる動きをしなければならないからである。

ここで活用したのがロボットの相対ジョブ機能である。それぞれのロボットに外部変数として別々の値をプロセスコンピュータから与え、動作全体を絶対座標を基準に常に相対座標で動作させることにより実現することができた。

4.3 端末操作の極少化

通常、プロセスコンピュータの操作画面は作業員の判断ですべての機能が使用できるように、メニュードリブンの構成をとるのが普通であるが、ここでは工程の流れが、作業条件さえ決めれば一定で

あるため、一切のメニュー表示はしていない。つまり、装置側が安定的に稼働しているときは、装置の動作を監視するモニター画面になり、稼働が一段落して作業員のアクションを待っているときには、自動的に入力画面に切り換わる、といった仕組みを採用することにより、操作上の快適さと簡便さを実現した。

#### 4.4 異常対応処理

本システムのように、一つの工程を複数の装置を連携して進行する時、装置の異常発生時の対処と、そのリカバー処理は重要である。特に、本システムのように、各装置よりも高価な部品のメンテナンスを行う場合、異常発生時に即座に全システムを停止することは当然として、その後の異常復帰後の継続処理は特に重要である。もし、作業を最初からやり直すとする、溶射の場合、厚みが付きすぎて実用に耐えなくなり、またその後の学習機能に悪い結果をもたらすからである。

本システムでは、装置側に異常が発生すると、即座にプロセスコンピュータを介して全装置に非常停止処置を行う。オペレータはこの状況を、モニター端末の異常状況表示により知り、障害対策をとるが、復帰させる時には、その障害が発生した時点の動作条件に戻って作業を継続することができる。

これは、平常の作業状況を細かく収集する（例えばロボットの反復動作の一周期ごとに実績時間をデータベースに記録する）ことに

より実現できた。復帰時は、異常発生前の状態にパラメータをセットした後、通常に開始すればよいのである。

## 5 結 言

整備場の表面処理工程の一つである溶射工程の自動化を実現するプロセスコンピュータシステムを開発した。その結果は以下のとおりである。

- (1) 溶射工程とその関連処理に対し自動化を実現し、作業者の作業負担を大幅に削減することに成功した。
- (2) コンピュータ操作を極力最小限に抑えることができた。
- (3) 学習機能を有効に利用することにより、過去の作業実績を最大限に活用することに成功した。
- (4) ロボットの反復動作をリアルタイムな動作制御により実現し、高精度な皮膜作成に役立つことができた。
- (5) 複数のロボットに対して、ロボットプログラムの一元管理を実現した。

以上のように、このシステムは航空機の整備あるいは他業界で行われている溶射工程の業務改善に貢献するものであり、日本航空㈱の他の整備場はもとより、他の溶射工程を伴う工場へも適用が可能であると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 大貫 弘志：「自動溶射システム」, 航空技術, (1993) No. 459, 16-19
- 2) 吉田廣太郎：「航空機分野における溶射技術応用の現状と将来」, 溶射技術, 13 (1993) 1
- 3) 渡部 浩, 桜田和之：「リアルタイム UNIX の FA への適用」, 自動化技術, 22 (1960) 6, 38-42
- 4) 桜田和之, 黒岩 恵, 岩城研介, 関川 修：「リアルタイム UNIX 「UNOS」とその適用事例」, 川崎製鉄技報, 24 (1992) 1, 1-7