U.D.C. 621.774.21:621.791.947.55-52:〔681.772.7.014.3:681.323〕

画像処理装置を使ったUO鋼管タブ板自動切断システム

Automatic Tab Cutting System used Image Processor

最近，画像処理装置の高速化・高性能化により，従来困難とされていた製鉄所の検査工程や人間の視覚を使った特殊作業の自動化が可能となってきた。UO鋼管の造管工程の中でのタブ切り作業については，対象物が大形重量物であることから，位置決めやハンドリングが困難で自動化が遅れていた。今回，新日本製鐵株式会社と日立製作所は，協力してHIDIC-IP画像認識解析装置と汎用の日立プロセスロボットを使ったUO鋼管タブ板自動切断装置を開発した。切断トーチのハンドリングはロボットにより行ない，画像認識解析装置はロボットの位置決めに使用している。切断性能は，切断面性状，切断精度ともに良好であることを確認したので，概要を紹介する。

田辺哲夫*　Tetsuo Tanabe
山崎訓由*　Kuniyoshi Yamazaki
浅沼真二*　Shinji Asanuma
高木陽市**　Yôichi Takagi
清水　信***　Makoto Shimizu
古川　隆****　Takashi Kogawa

1　緒　言

製鉄設備は自動化の最も進んだ分野の一つといえるが，一部の自動化困難な部分は，現在でも手作業として残存している。最近，このような箇所についても新技術を投入することで解決できるようになってきた。

図1にUO鋼管ラインの鋼管製造過程を示す。この鋼管は厚板をUプレス，Oプレスを介して製造することからUO鋼管と称呼されている。プレスにより管状に成形後，シーム部の溶接を行なうが，管端溶接部の品質を保つため，鋼管シーム両端部にタブが付けられている。このタブは後工程で熟練工により手作業で切断されている。

UO鋼管タブ板切断の自動化が遅れたのは，次のような理由による。

(1)　UO鋼管は大形・大重量であり，精密な位置決めが難しい。

(2)　高精度の切断を実現しようとすると，特殊なロボットや専用NC(数値制御)装置などが必要となり，非常に高価となる。

しかし，タブ切断の作業がパイプ間での挟まれの危険性のある不安全作業であり，熟練工の確保が困難で自動化が強く望まれていた。

今回，画像処理装置，汎用ロボット及びプラズマ切断機などによるUO鋼管タブ板自動切断システムを開発した。本論文では，タブ切断精度に影響の大きい画像処理とロボットを中心に記述する。

2　システムの概要と特徴

UO鋼管タブ板自動切断システムの全体構成を**図2**に示す。本システムでは，ITV(工業用テレビジョン)カメラ画像の解析によりタブ位置を計測している。ロボットは，このタブ位置計測結果により切断機トーチを操作して，タブ板を切断する(**図3**は，正面からみた写真である)。切断機は，切断性能からプラズマ切断機を採用している。画像処理装置及びロボットは，汎用品を使用することによって設備コストの低減を図った。

本システムの特徴は次のとおりである。

(1)　画像処理のパターンマッチングを用いたタブ位置計測

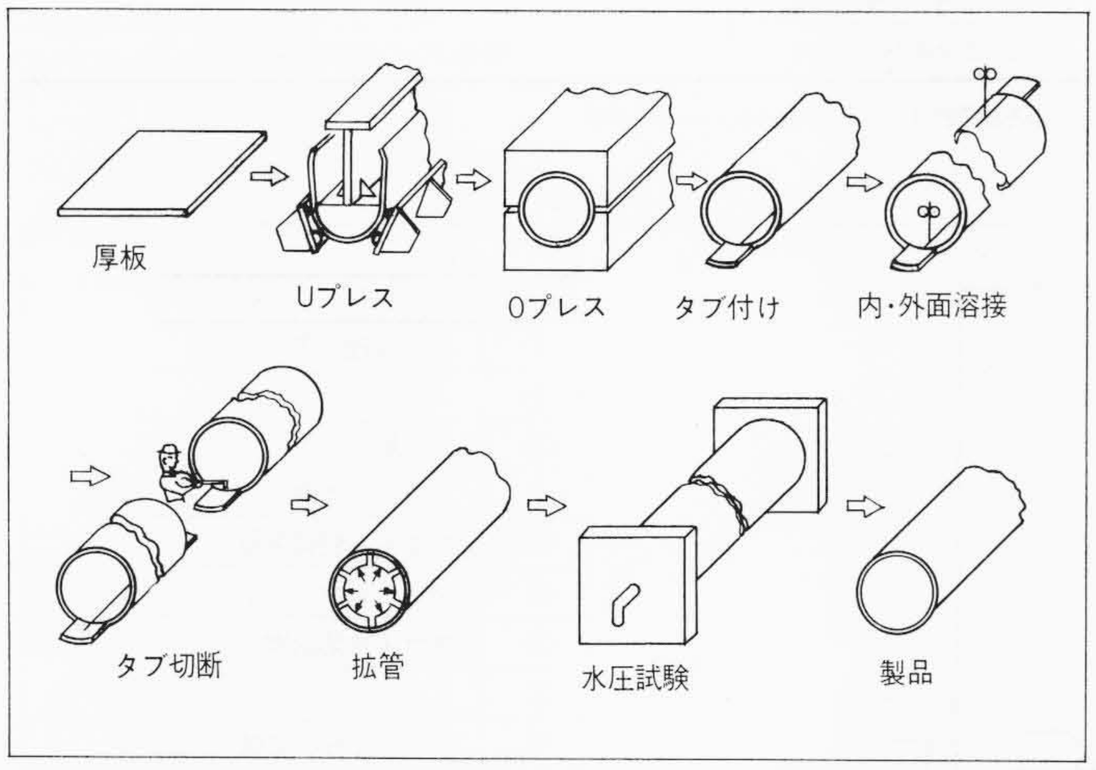


図1　UO鋼管製造工程　厚板からUプレス，Oプレスを用いて鋼管を製造する。タブは内・外面溶接後に切断されるが，最終工程で水圧試験を行なうため，切断部の精度が特に問題となる。

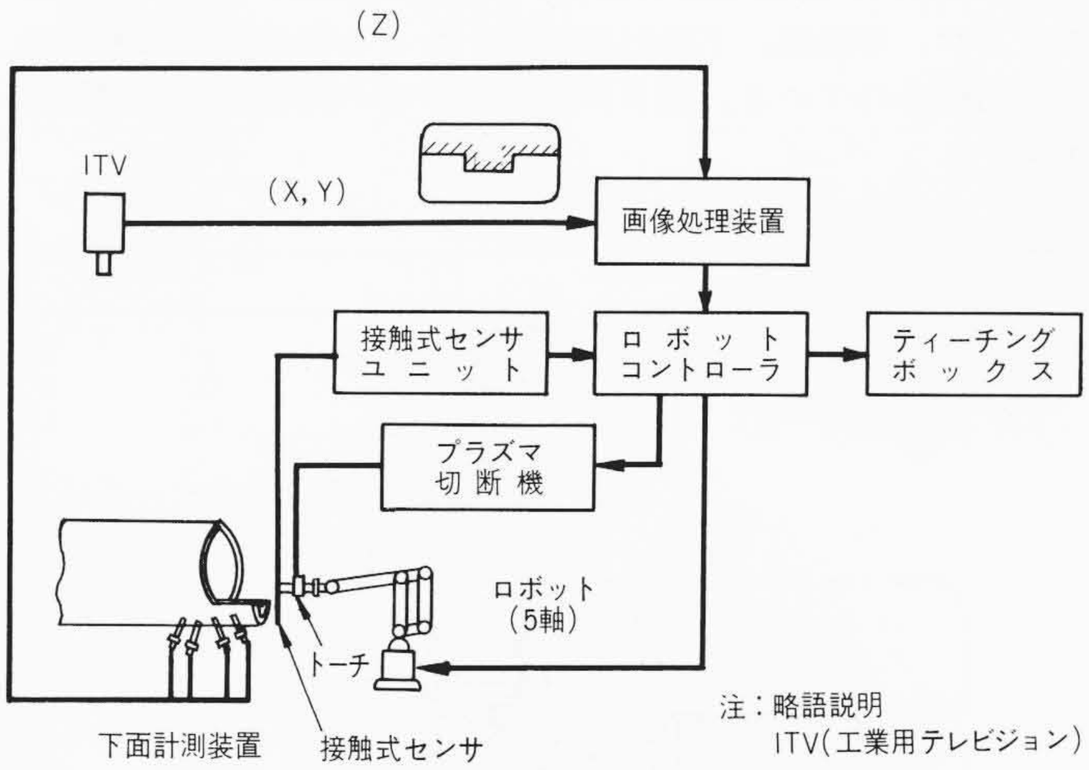


図2　UO鋼管タブ板自動切断システムの全体構成図　本装置の特徴は，タブ位置をITVカメラからの画像を解析して得ており，位置精度を上げるために機械的な接触式センサを併用している点である。

* 新日本製鐵株式会社君津製鐵所　** 日立製作所大みか工場　*** 日立製作所日立工場　**** 日立製作所習志野工場

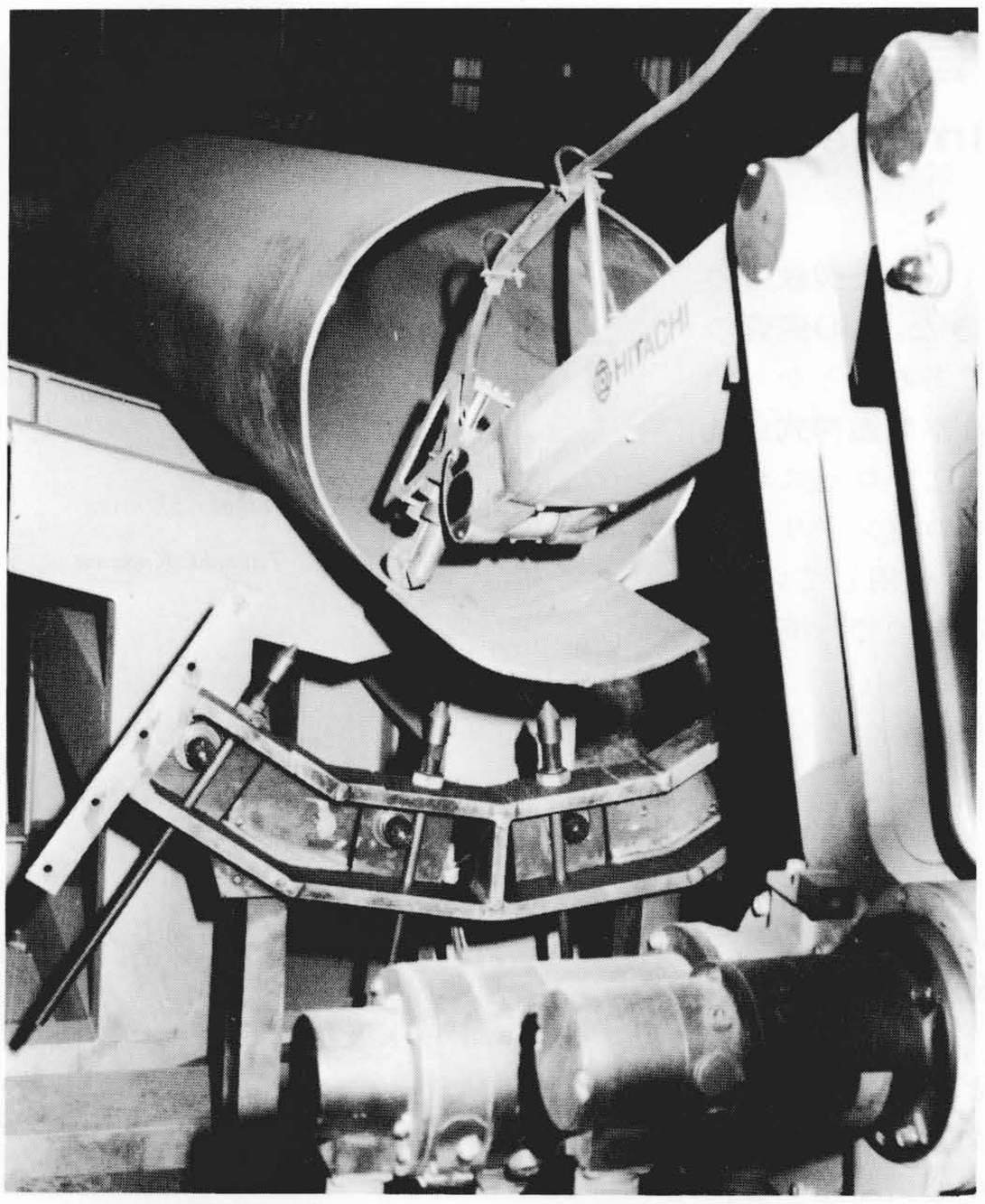


図3 UO鋼管タブ板の自動切断の実験状況 UO鋼管の位置は下面計測機構により計測し，画像によるタブ位置計測精度の向上を図っている。ロボットアームには切断トーチ，接触センサが取り付けてある。

(2) 画像処理装置と接触センサを併用したタブ板の高速で高精度な3次元位置計測

(3) 高速濃淡画像処理機能を使った自動2値化方式の採用により環境の変化に強い画像認識システムを構築した。

(4) 切断機トーチのハンドリングは汎用プロセスロボットを使用し，合理的で安価なシステムとした。

3 システムの構成

UO鋼管タブ自動切断装置は，画像処理装置，ロボット，精密センサ，切断機，下面計測機構，ならい機構，照明装置などで構成されている。**図4**に本システムの実験装置の構成を示す。

3.1 画像処理装置

タブ板の自動切断作業の環境を考えると，外部光の遮断は難しく，天候，季節などによる照明効果の変動要因がある。画像認識処理を安定的に行なうには，2値化のしきい値の自動設定などを考慮する必要がある。また，本システムの画像処理装置は，濃淡画像処理やパターンマッチング処理の高速性能が要求され，画像専用VLSIを搭載したHIDIC-IP/10画像認識解析装置を採用した。画像処理装置の概略性能を**表1**に示す。

3.2 ロボット装置

本システムでは，汎用産業用ロボットを導入し，必要機能及び達成精度を確証することも目的の一つとなっていたため，現在製品として実績の最も多い日立プロセスロボット[2]を使用した。本ロボットの基本仕様の主なものを**表2**に示す。今回のシステムでは，標準仕様でもっている機能のほかに，

表1 画像処理装置主要仕様 画像処理装置の主要仕様を示す。

項目	仕様
システムプロセッサ	68000CPU
主メモリ	512kバイト
画像メモリ	2値メモリ：512×512×1ビット×4チャネル 濃淡メモリ：512×512×8ビット×3チャネル
機能	2値化，画像間演算，パターンマッチング，非線形近傍演算，ヒストグラムなど
処理速度	16.7ms/1画面(256×256)

表2 ロボットの主な仕様 日立プロセスロボットの主な仕様を示す。

項目	仕様
構造	多関節形
動作自由度	5軸
最大速度	1 m/s
最大許容可搬重量	10kg(グリップ重量含む。)
位置繰返し精度	±0.2mm
教示方式	リモートティーチ
経路制御方式	ポイントティーチによるCP制御
制御軸数	同時5軸
位置検出方式	増分式パルス発生器

注：略語説明 CP(Continuous Path)

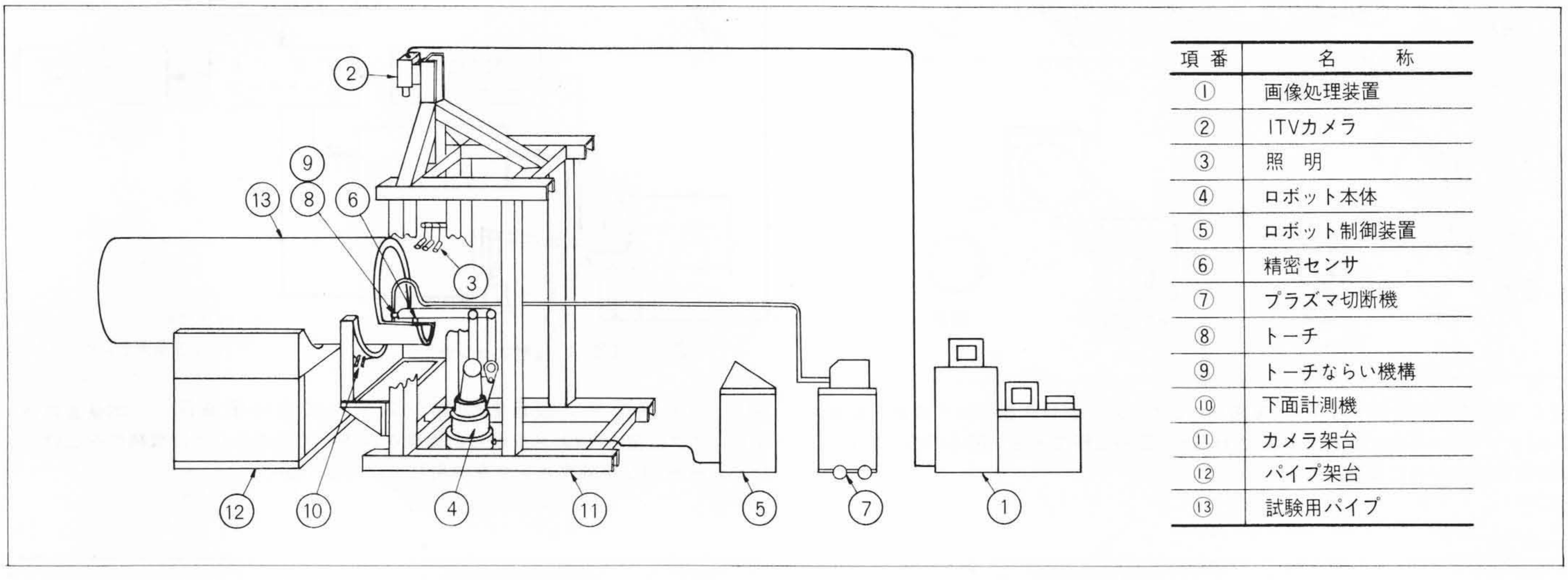


図4 UO鋼管タブ板切断実験装置 画像処理装置，ロボット，切断機，下面計測機，精密センサなどから構成されている。

本システムの要求仕様として次のような機能を付加した。

(1)　画像処理装置とロボット間のインタフェース

(2)　精密センシング機能

(3)　3次元回転シフト機能

(4)　プラズマ切断機とロボット間のインタフェース

これらの追加機能に関して，日立プロセスロボットのオプション機能を活用したが，(3)の回転シフト機能だけ当該オプションがないので特別に作製した。その機能内容に関しては**4.2**節で画像処理装置とのインタフェースと併せて述べる。

3.3　精密センサ

最終的な切断精度を確保するために必要となる精密センサに関しては，精度，耐久性，安定性など種々の観点からの検討を行なった。その結果，耐環境性(プラズマの高温，切断時の粉じん)，耐久性の面から接触式センサを採用した。

本センサの検出原理は，**図5**(a)に示すように，適当な電圧を印加した電極間の導通を検出する方式である。センシングは，同図(a)に示すように，あらかじめセンス動作方向を，始点Aと検出点Bとしてロボットにティーチングしておく。次に実際にプレイバックを行なう際に，同図(b)に示すように，ワークがティーチング時の位置(破線)に対してずれていたとすると，ロボットはティーチングされたセンシング方向に従ってA点からB点を通過し，ワークを検出するB′点に至るまでセンシング動作を行なう。このとき，先ほどティーチ情報として記憶していたB点の座標と，実際にワークを検出したB′点の座標を引算することによって，シフト量Dを求めるのである。

3.4　切断機

タブ切断用には，切断面性状，切断速度などに優れているプラズマ切断機を使用している。プラズマ切断機を自動化機器として使う場合は，切断速度，アークスタート時の高周波の他機への影響，切断時のドロスの状態，使用ガス種類，チップ寿命などの検討が必要であった。

本試験装置に用いたプラズマ切断機の概略仕様を**表3**に示す。

3.5　下面計測装置

本装置は，鋼管位置(鋼管軸心座標)と鋼管半径を計測するためのものである。**図6**(a)はその概略構造を示したもので，鋼管下方位置から鋼管の下面4点の位置計測ができるようになっている。計測点を4点にした理由は，下面計測の内側2点が管外周にもっているシーム溶接ビードに当たる可能性があり，たとえ内側の計測点のうちの1点がビード部を検出しても，他の正常な3点の計測値により，正確な鋼管位置を求められるようにしたためである。

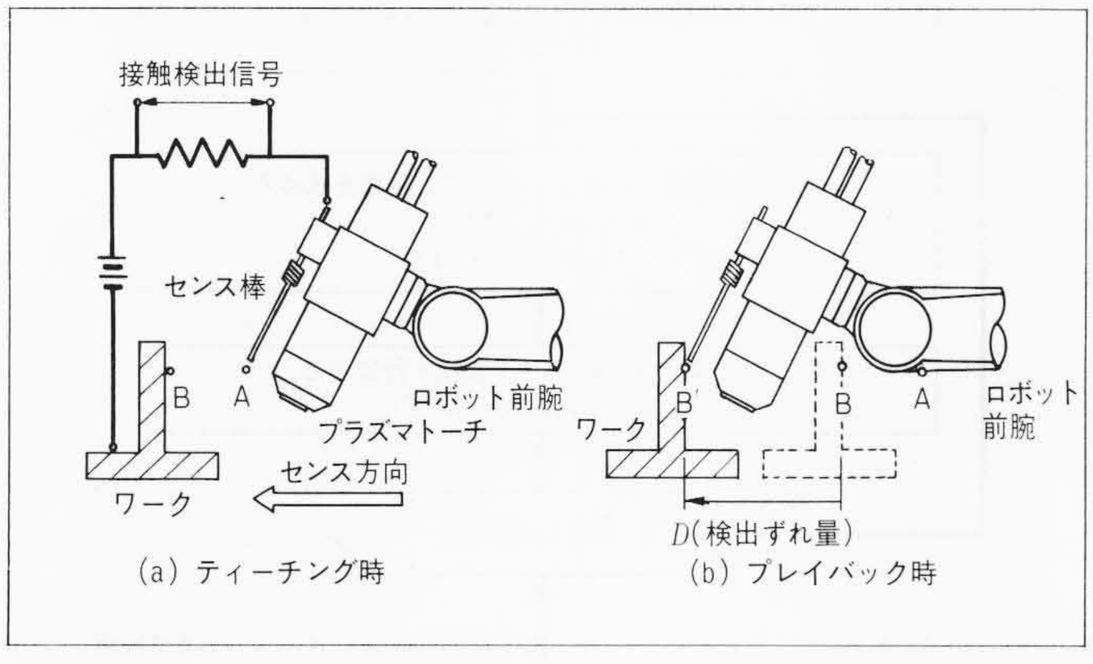


図5　タッチセンシング機能　ティーチング時のワーク位置(a)図に対して，始点Aとワーク検出点Bによりセンス方向をティーチし，プレイバック時のワーク(b)図のずれ量Dを，検出点B′の座標とティーチ時の検出点Bの座標の差によって求める。

表3　プラズマ切断機仕様　プラズマ切断機の主な仕様を示す。

項　目	仕　様
形　式	移行式プラズマ切断機
入力容量	100kVA
入力電流	288A
切断電流	100～250A
負荷電圧	100～210V
無負荷電圧	400V
使用ガス	酸素・空気
最大切断板厚	40mm

計測は，計測棒の上昇量をラック，ピニオンを介してエンコーダへ伝え，基準位置(戻り端)からの上昇量を読み取るようにしている。

3.6　ならい機構

UO鋼管のシーム部近傍は，円形形状が変形している場合がある。このような場合，プラズマ切断機のトーチ高さを鋼管内面に対し一定に保つことが難しい。したがって，正確な切断を行なうためには，更にトーチ高さの補正機能を付加する必要がある。

今回の切断装置では，ロボット手首先端部にならいローラを設け，これにトーチを付けて鋼管内面に追従できるようにした。

4　UO鋼管タブ自動切断の処理内容

4.1　画像処理の内容

本システムでは，UO鋼管の上方に設置したITVカメラからタブを含む画像を取り込み，画像処理を行なってタブ位置を計測している。処理内容は，2次元画像からタブ付け根位置を計測する処理と，得られたタブ板の2次元座標からタブの3次元位置を計算する処理から成っている。前者は，画像処理技術のノイズ除去，2値化，テンプレートマッチングなどの技術を，後者は下面計測を含む幾何学モデルを使用している。

4.1.1　画像処理によるタブの2次元座標位置の計測

画像処理によるUOタブ位置計測の手順は，次のようである。

原画像入力→画像前処理→2値化→テンプレートマッチング

以下，処理内容を順に説明する。

(1)　原画像入力

ITVカメラからの入力画像は，128階調，画像サイズ256×256画素の濃淡画像である。

(2)　画像前処理

ITVカメラから入力したままの画像は，カメラ画像素子や信号伝送路などのノイズが含まれているため，原画像に対して平滑化処理で濃淡画像のノイズ除去を行なう。平滑化フィルタとしては，3×3のマトリックスを用いた。

$$wij=\begin{pmatrix} a & b & a \\ b & c & b \\ a & b & a \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots(1)$$

(3)　2値化

パターンマッチングを行なう前に，濃淡画像を2値化する必要がある。本システムでは，環境適応2値化処理を採用し

ている。**図7**にそのアルゴリズムを示す。背景とタブ板の境界を輪郭強調で求め，この境界部分の平均輝度をしきい値とする方法である。環境(明るさ)が変わった場合にも，背景とタブ板のコントラストさえ保たれていれば2値画像上，タブ板と背景は明確に区別できる。

(4) テンプレートマッチング

2次元画像からタブ板の付け根を検出するために，テンプレートマッチング法を用いた。テンプレートのサイズは8×12画素を用い，パターンマッチングの処理速度は，16.7msである。

4.1.2 幾何学モデルを用いた三次元座標への変換

本システムで取り扱う大径UO鋼管は，パイプの曲がり，搬送系の停止精度，パイプの回転位置などにより，タブ位置は3次元的に取り扱う必要がある。前述の画像処理により得られたタブ板の2次元的な位置情報から3次元位置を得るために，**図6**に示すような幾何学モデルを使用した。幾何学モデルを用いた処理手順は，次のようである。

下面計測パイプ位置の計算→タブ板の3次元位置の計算

以下，幾何学モデルを用いたタブ板の3次元位置計算方式について記述する。

(1) 幾何学モデルとパイプ位置計測

幾何学モデルは，下面計測機構，パイプ，タブ板，ITVカメラなどから構成されており，パイプが搬送されてくると下面計測機構の4本の計測棒が上昇し，パイプの下面位置を計測する。計測棒の上昇量は，画像処理装置に取り込みパイプ位置を示す$l1$～$l4$の値を得る。パイプと4本の計測棒の接点$A1$～$A4$の座標が$l1$～$l4$から得られ，4個の接点のうち3点$A1, A2, A4$からパイプ中心と曲率半径を得る。

$$\left.\begin{aligned} X0&=X0(A1,\ A2,\ A4)\\ Z0&=Z0(A1,\ A2,\ A4)\\ R&=R(X0,\ Z0,\ A1)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(2)$$

また，他の3個の組$A1$，$A3$，$A4$から同じくパイプの中心と半径が得られる。

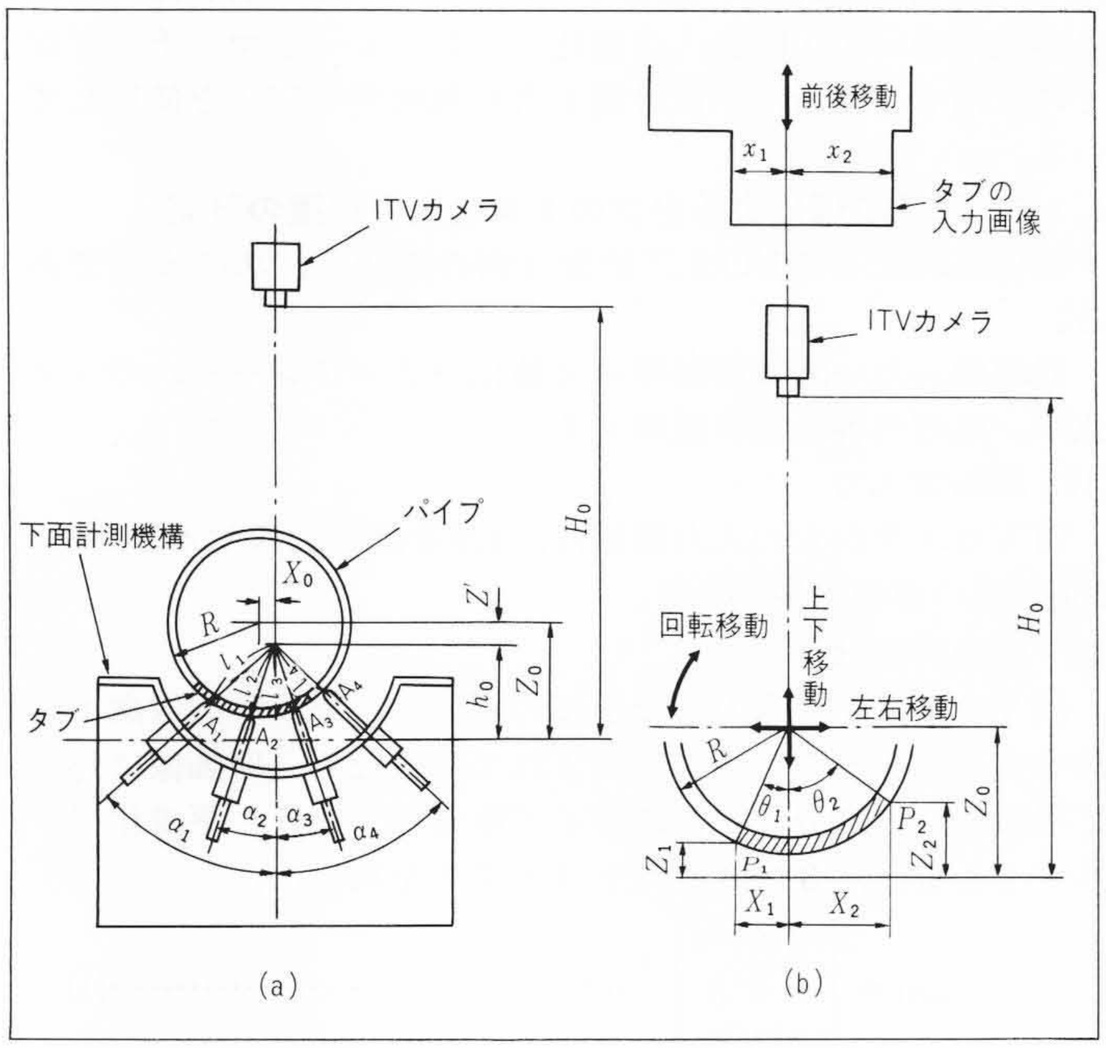


図6 タブ位置計測の幾何学モデル 幾何学モデルは，カメラ，下面計測機構，パイプ及びタブ板で構成する。パイプ位置は，カメラ画像から得られた値を本モデルにより補正する方式とした(パイプが上下，左右，前後に大きく崩れることに加えて，パイプ回転によりタブ位置の計測は非常に複雑である)。

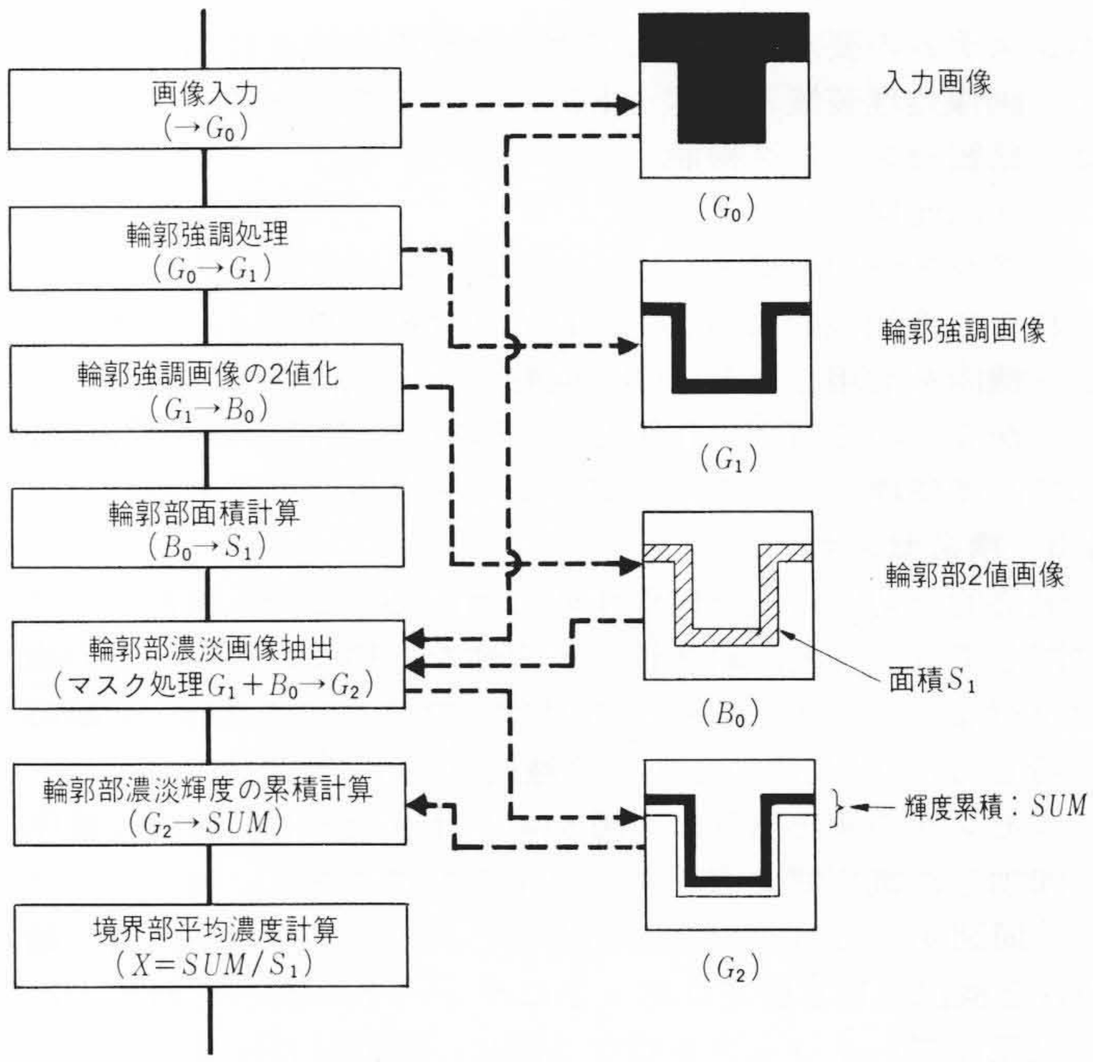


図7 自動しきい値設定アルゴリズム 濃淡画像処理機能を使うことにより，照明の変化に強いシステムを構築することができる。

$$\left.\begin{aligned} X0'&=X0(A1,\ A3,\ A4)\\ Z0'&=Z0(A1,\ A3,\ A4)\\ R'&=R(X0',\ Z0',\ A1)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(3)$$

真円の場合には，上記2組の値は一致する。本システムでは，この二つの計算結果を使ってパイプ表面のビードの山を計測しないための判定に使用している。

(2) タブ板の3次元位置の計算

パイプ位置が正確に決定できたので，次にこのパイプ位置と画像処理から得たタブ板の2次元位置($x1$，$x2$)から3次元位置($X1$, $X2$)を計算する方式について以下述べる〔**図6**(b)参照〕。

2次元画像上のタブ座標($x1$，$x2$)から3次元座標系での正確なタブ板の位置($X1$，$X2$)を得るには，計算式中に非線形の式を含むので，**図8**に示す収束計算を実行して近似値を得る方式をとった。

上記収束計算は，大略3回の繰返しで実用的な精度($\frac{1}{10}$画素)に収束する。本システムでは，以上述べてきた方式により，

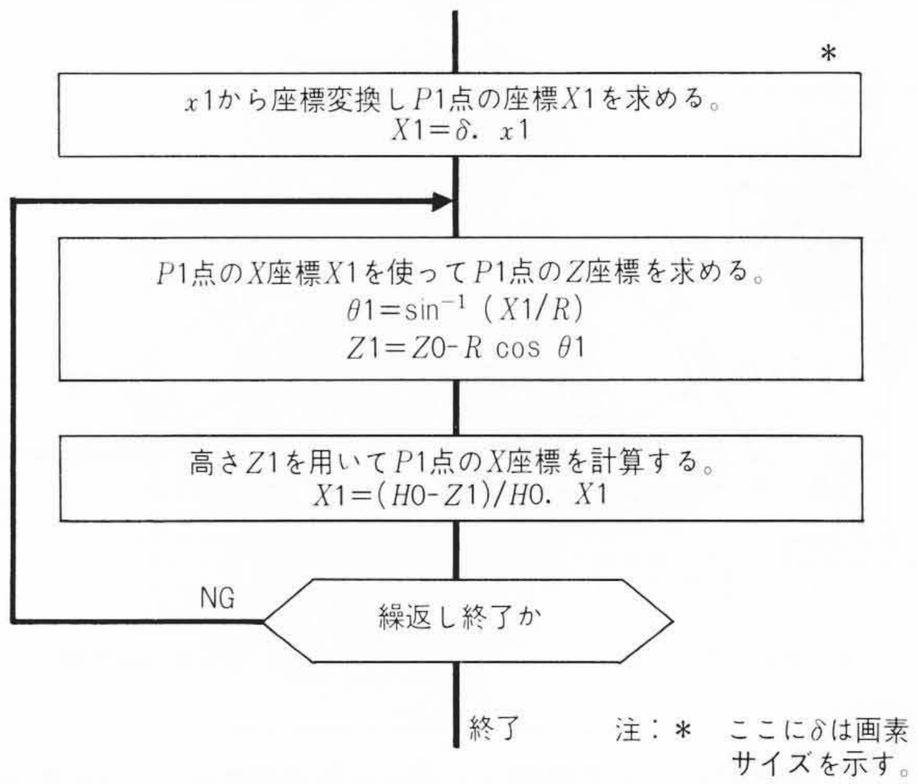


図8 幾何学モデルによる3次元座標変換方式 画像解析で得たタブ位置(2次元)を，パイプ中心座標の移動やパイプ回転を考慮して3次元座標に変換する。変換式は，図6(b)の幾何学的な関係から得られる。

ITVカメラからの入力画像と下面計測の情報からタブ板の3次元位置を決定し，ロボットの位置決めに使用した。

4.2　ロボットの処理内容

画像処理装置によって検出されたシフト量を基に，精密センシングを行ない，あらかじめティーチされた切断軌跡を回転シフトして，タブ板を切断する処理について述べる。このロボットの処理概要のフローチャートを**図9**に示す。

4.2.1　画像処理・ロボット間インタフェース

画像処理装置によって検出されたタブ板の付け根位置は，左右一対のシフト量に変換されてロボット側へ送信される。このとき，画像処理装置とロボットの間はコンピュータリンケージ機能を用いて接続されている。本機能は，ロボットと他の計算機の間をRS232-Cで結んで，上位計算機によるロボットの起動・停止といった遠隔操作や，あるいはジョブやプログラムのアップローディング※1)，ダウンローディング※2)を可能とする機能である。コンピュータリンケージ機能の仕様の主なものを**表4**に示す。

4.2.2　タブ切り処理

受信したシフト量を基にロボットは回転シフトのためのパラメータを計算する。今回のシステムで想定している平行シフト，回転シフトを始めとして，反転，拡大・縮小といった3次元空間での変換は同時座標表現※3)を用いて次のように表わすことができる。

$$Y = AX \quad \cdots\cdots (4)$$

ここに　X：変換前の座標（4×1）
　　Y：変換後の座標（4×1）
　　A：変換を表わすマトリックス（4×4）

(4)式により，同一平面内にない4組の対応するXとYの組が与えられれば変換Aが求められる※4)。しかし，実際のワークには検出可能な特徴をもった点は2点(左右のタブの付け根)しかないため，このままでは変換Aを定めることはできない。

そこで実際のワークの回転を，**図10**(a)に示したパイプの長手方向を軸とする回転と，同図(b)に示した左右の回転の二つに分離して，個々の回転を求めた後で合成する方式を採用した。これにより，個々の回転に関して次の仮定を置くことに無理がなくなり，2組の対応する点だけで変換

(1)　$e = (X_2 - X_1) \times (Y_2 - Y_1)$
　　ただし　e：回転軸を表わすベクトル

(2)　ひずみ変換は考えない。

Aを求めることが可能となる※5)。この結果，画像処理，精密センシングの2段階で個々に求めた回転を合成することが必要となるが，反面，センシングの回数が半減するので，そのタクトタイムも半分で済むことになった。

計算されたパラメータをもとに，前述(4)式により既にティーチングされているタッチセンシング動作を回転シフトして，精密センシングを行なう。この結果，**図11**に示すように，パイプ長手方向の回転に対応してセンシングを行なうことになり，センシングの空振りやワークとの接触も避けることができる。

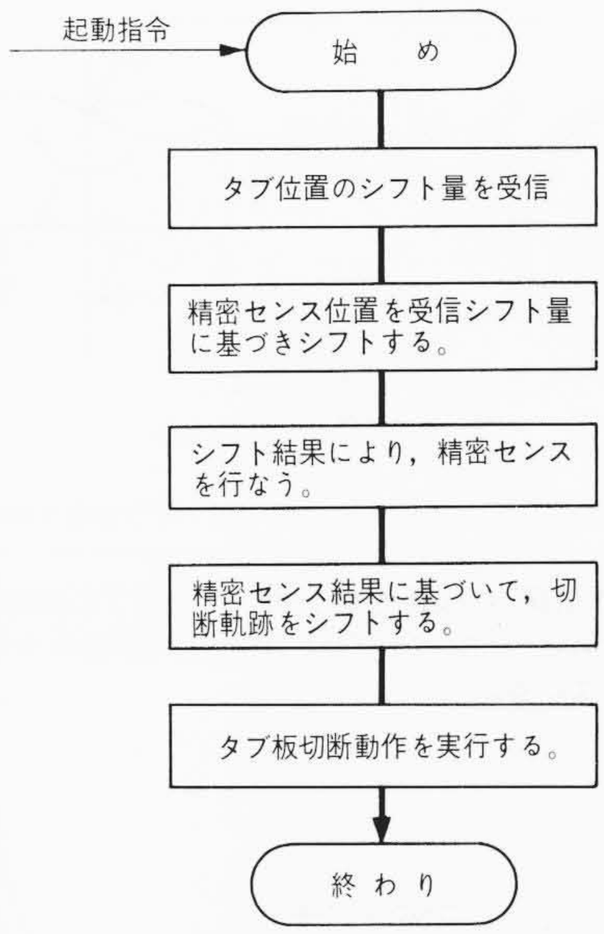


図9　ロボットの処理概要のフローチャート　ロボットがパイプのもつ広範囲な回転を含む位置ずれに対して，柔軟に対応して動作するための処理の概要を示す。

表4　伝送制御仕様　画像処理装置，ロボット間のコンピュータリンケージ機能の伝送制御仕様を示す。

項　目	仕　　様
伝送方式	直列伝送
伝送速度	150bps, 300bps, 600bps, 1,200bps, 2,400bps, 4,800bps又は9,600bps
通信方式	半二重通信
同期方式	調歩同期(スタートビット・ストップビット) ストップビットの数：1ビット，1½ビット又は2ビット
伝送手順	基本形データ伝送制御手順(ISO R1745, JIS C6362)
起動方式	ポーリング・セレクティング方式
応答方式	ACK, NAK
通信コード	ASCIIコード キャラクタ ビット長：7ビット
誤り検出	垂直パリティチェック 水平パリティチェック
誤り回復	NAK

注：略語説明　ACK(Acknowledge), NAK(Negative Acknowledge)

※1)　ロボットのもっているティーチデータを，上位計算機へ送る機能

※2)　上位計算機で作成したティーチデータをロボットへ送る機能

※3)　コンピュータグラフィックスなどで変換を統括的に簡潔に表現するために，3次元のベクトルを4次元で表現する手法をいう。

※4)

$$X_1 \xrightarrow{A} Y_1,\quad X_2 \xrightarrow{A} Y_2$$
$$X_3 \xrightarrow{A} Y_3,\quad X_4 \xrightarrow{A} Y_4$$

が与えられれば，

$$\left[Y_1 Y_2 Y_3 Y_4\right] = A\left[X_1 X_2 X_3 X_4\right]$$
$$A = \left[Y_1 Y_2 Y_3 Y_4\right]\left[X_1 X_2 X_3 X_4\right]^{-1}$$

※5)

$$X_3 \triangleq X_1 + (X_2 - X_1) \times (Y_2 - Y_1)$$
$$Y_3 \triangleq Y_1 + (X_2 - X_1) \times (Y_2 - Y_1)$$
$$X_4 \triangleq X_1 + (X_2 - X_1) \times \{(X_2 - X_1) \times (Y_2 - Y_1)\}$$
$$Y_4 \triangleq Y_1 + (Y_2 - Y_1) \times \{(X_2 - X_1) \times (Y_2 - Y_1)\}$$

と置けば，次の4組の関係が得られる。

$$X_1 \xrightarrow{A} Y_1$$
$$X_2 \xrightarrow{A} Y_2$$
$$X_3 \xrightarrow{A} Y_3$$
$$X_4 \xrightarrow{A} Y_4$$

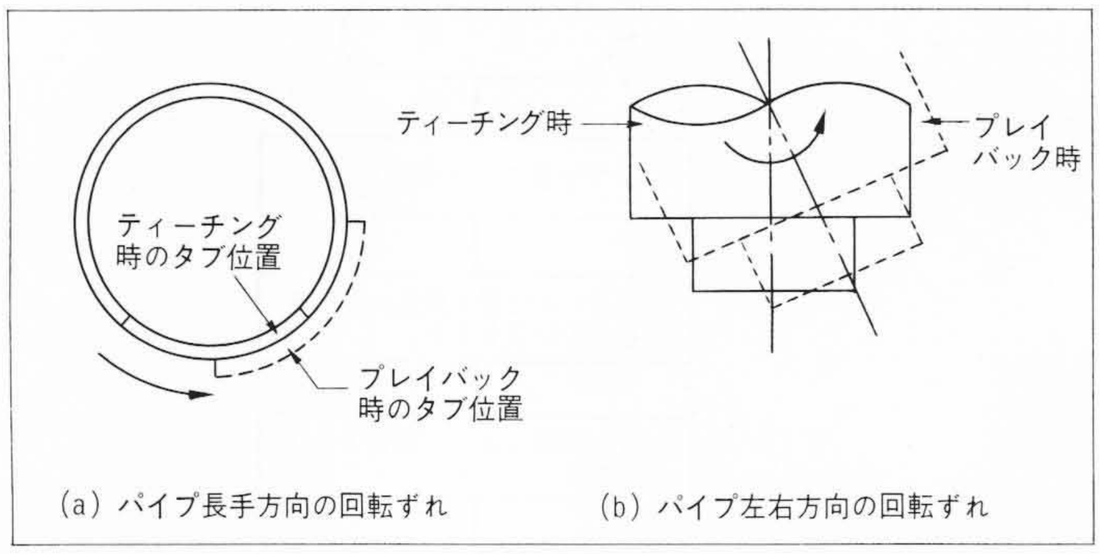


図10 パイプの位置ずれ要因の分解 パイプの回転位置ずれは，(a)図長手方向の回転ずれと，(b)図パイプ左右方向の回転ずれに分けて考えることができることを示している。

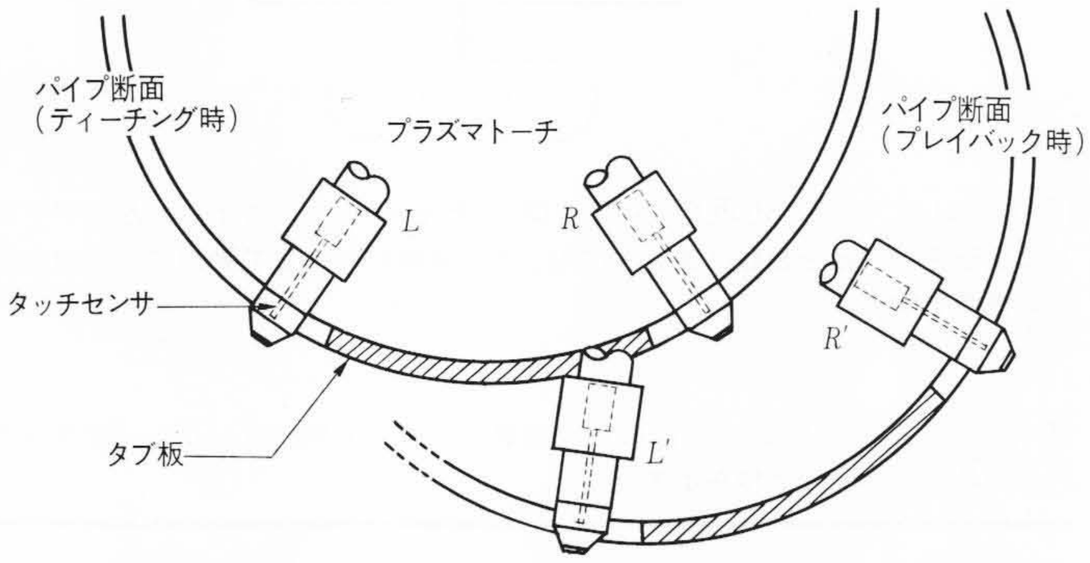


図11 精密センシング動作のシフト ティーチングされた精密センシング動作(*L*, *R*)を画像処理結果に基づいて回転シフト(*L′*, *R′*)し，実際のセンシング動作を行なう。この手順を省略すると，管端の検出に失敗したり(*R*)，逆にパイプとトーチが接触(*L′*)してしまうことを示す。

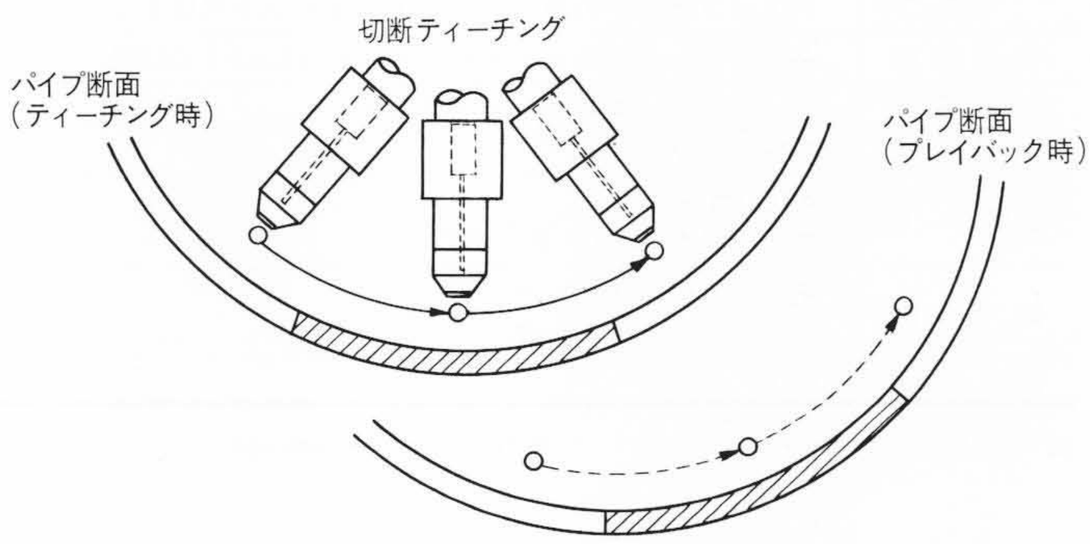


図12 切断軌跡の生成 ティーチングされた切断軌跡(実線)を，検出したワークの位置ずれに合わせて回転シフトして，実際のパイプ位置に適応した切断軌跡(破線)を生成することを示す。

精密センサで検出した左右の回転を，画像処理装置の検出したパイプ長手方向の回転と合成した回転パラメータを計算し，**図12**に示すようにあらかじめティーチングされているタブ板切断動作を回転シフトして切断する。

以上の処理を経て，広い範囲に位置決めされたワークに対し，ティーチングされたデータ(位置)を実時間で変換してプレイバック時の軌跡を生成するという，柔軟な適応性をもったロボットサブシステムとすることができた。

5 実験結果

本実験装置を用いて，外径1,422mm×板厚15.7mm，711mm×6.9mm，1,066mm×40mmの実管の切断テストを行ない，すべて滑らかな切断面が得られた(**図13**に切断面の写真を，**表5**に検出精度を示す)。

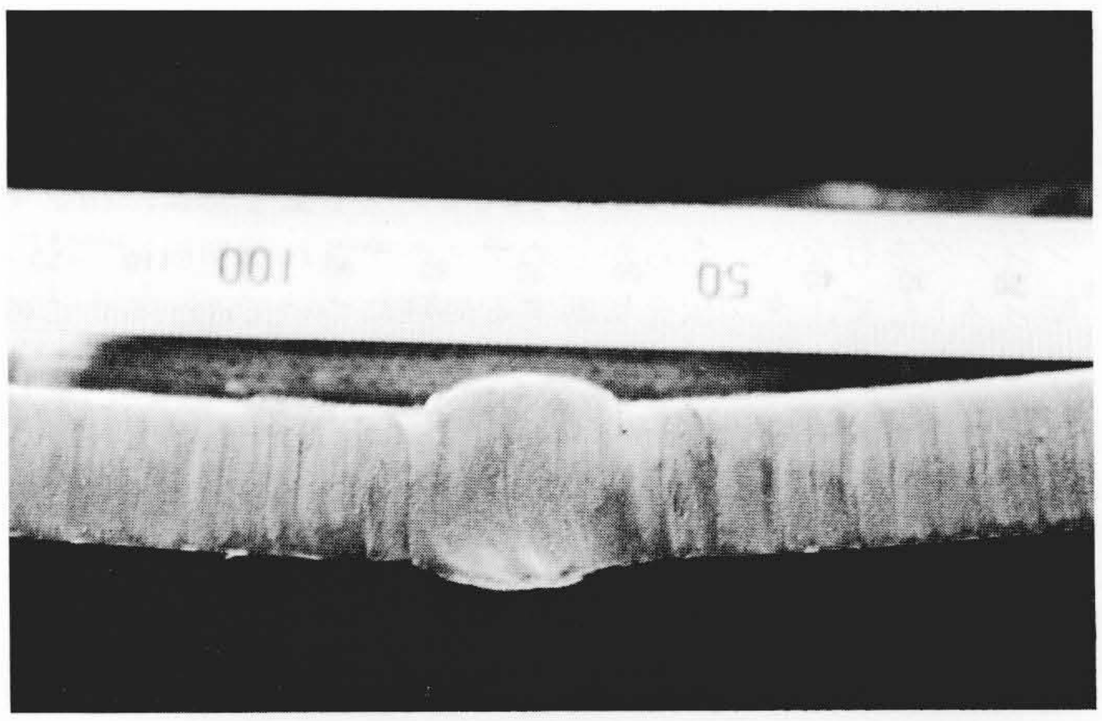
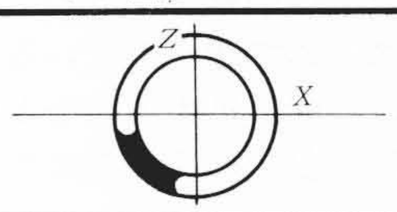
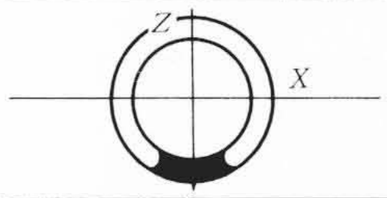
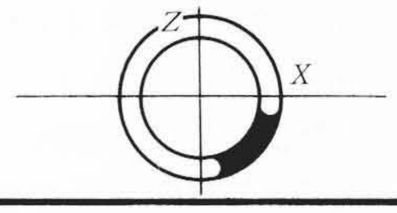


図13 UO鋼管のタブ板切断結果 切断面は滑らかである。

表5 タブ切断精度 パイプ左右方向を*X*，軸方向を*Y*，上下方向を*Z*とした。

No.	タブ位置	エラー	ΔX	ΔY	ΔZ
1		左	+6.5	−1.2	+0.5
		右	−0.3	+1.4	+0.7
2		左	−3.5	+0.8	−1.9
		右	−2.4	−1.1	−1.6
3		左	+6.5	−1.5	+1.5
		右	−4.5	+0.7	−1.2

注：単位(mm)

6 結 言

以上，画像処理技術を使ったUO鋼管タブ板自動切断システムの概要について述べた。視覚を使った製鉄所内での自動化による合理化は，高性能な画像処理装置の開発とあいまって急速に推進されるものと思われる。既に鋼材のきず検出，寸法計測，数量のカウント，文字の読み取りなどについて実用化が試み始められている。本システムの開発により，UO鋼管のような大形の重量物に対しても，人工視覚を使った自動化が可能であることを確認した。また本システムの導入により，以下のような成果が期待できる。

(1) UO鋼管タブ板切断工程の無人化が可能である。

(2) タブ板の切断性能(切断精度，切断面性状及び切断能率)は熟練工に比べて同等以上である。

参考文献

1) T. Fukushima, et al.: An Image Signal Processor, 1983 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, pp.258～259, Feb. 1983

2) 井田，外：新形日立プロセスロボット，日立評論，**64**, 12, 871～876(昭57-12)

3) 小林，外：汎用画像認識解析装置HIDIC IPシリーズ，映像情報，Vol. 16, No. 10, p.19～25(1984)