

論 文 要 旨

平成 6 年 12 月 26 日

生産工学 専攻	氏 名	張 曉 林
論文題名	シーリングロボットの視覚センサと制御に関する研究	
<p>本論文は、自動車工場でのシーリングロボットによるシーリング作業の自動化を目的とし、シーリングロボットのための視覚センサ、およびシーリングロボットの視覚フィードバック制御に関する研究をまとめたものである。</p> <p>自動車工場でのシーリング作業において重要なことは正確に自動車鋼板の継目位置を検出することである。しかしながら、シール対象である車体の鋼板の板厚は薄く（0.6 mm程度）、スポット溶接などの工程によって鋼板自身が変形を生じることがあるため、視覚センサによる継目位置の検出はきわめて困難である。そのうえ、シーリング作業中のノズルが高速に走行するため、実時間の視覚フィードバック制御には、視覚センサの継目位置・姿勢の検出も高速に行う必要がある。以上の観点から、本論文の2章ではシール対象の変形や位置と姿勢の変化などの影響に強い、ニューラルネットワークを用いた継目位置認識法を提案し、さらに探索窓処理による検出速度の向上を図った。また、3章では、従来のシーリングロボットの視覚センサとして用いたことのない3次元視覚センサを開発し、この3次元視覚センサにより取り込んだシール対象の光切断画像の継目位置を検出するための画像認識アルゴリズムを開発した。この画像認識アルゴリズムは、著者が開発した探索窓法を用いたものであり、シール対象上における光切断画像の継目位置検出処理を高精度かつ高速に行うことができる。</p> <p>シーリング開始位置の検出は、シーリング作業の目標軌道補正にとって、きわめて重要である。それは、作業開始点の位置と姿勢を高精度に検出できれば、作業対象自身の変形以外の原因で生じた位置ずれはすべて算出できるからである。しかしながら、従来の光切断法を用いた視覚センサでは作業開始点の位置・姿勢の全ての情報を検出することができない。これを解決するため5章では、</p>		

4,000字以内

光切断法と濃淡画像処理法を併用することによって、シール対象におけるシーリング開始点での6自由度についての位置と姿勢を検出できることを示した。

視覚フィードバックによるロボットの自律走行や作業軌道の自動生成などについて数多くの研究がある。これらのほとんどの研究では、画像処理の周期が長い場合、センサから得られた環境や対象物の情報は、ロボットの目標軌道の生成にのみ用いられ、ロボットの制御システムの中には取り入れられていない。しかし、もしロボットの移動速度に対し、視覚センサの画像処理周期が十分短かければ、各サンプリング時点で視覚センサが検出した位置・姿勢の偏差値を単純なホールド（零次ホールド、一次ホールド）に通すことによって直接ロボット制御則で取り扱えることができる。このような観点から4章では、視覚センサの周期を教示システムのサンプリング周期に等しく選び、ロボットの目標軌道自動生成するための制御系を構築した。また、この教示システムはロボットをなめらかに走行させるため、制御系を臨界減衰するようにゲインを設定した。

シーリングロボットのシーリング作業時、ノズルが高速（0.2 m/s ~ 0.4 m/s）に走行するため、この走行速度に対して、現時点で開発した視覚センサの画像処理周期（100 ms）はまだ長い。すなわち、視覚センサにより検出したロボット目標軌道の偏差のサンプル値を零次または一次ホールドを通し、ロボット制御系の入力にするとロボットの関節が急加減速するため、滑らかな制御ができない。このため、従来のシーリング作業時における実時間の視覚フィードバック制御では、ロボットの手先の継目位置追跡サーボの1自由度のみの制御が行われた。しかし、本研究では視覚センサから検出したシール対象の多自由度の偏差をすべて補正するため、ロボットの各関節について補正の必要があり、加減速度を最小限におさえるため、偏差補正信号を滑らかにする必要がある。この場合、視覚センサからの位置・姿勢の偏差信号として予見情報を用いることが前提条件である。このような観点から、5章では予見制御法を提案し、予見情報を用いた二次ホールドにより、視覚センサから検出した多自由度についてのそれぞれの偏差を補正できることを実証した。各章の概要は、下記のとおりである。

2章では、ニューラルネットワークを用い、視覚センサより取り込んだ鋼板

継目部の光切断画像上の継目位置探索法を提案し、シミュレーションによってその有効性を確かめた。本探索法は以下の特長をもっているということが明らかになった。

(1) ニューラルネットワークが高い特徴抽出能力を持つため、これを用いた本手法は変形や回転などの継目パターンの検出にはきわめて有効である。

(2) (i) 変形や傾斜などの状況に応じた継目パターン、(ii) 継目以外の光切断画像の変形パターンを、本手法はオフライン学習によって認識することができる。

(3) 探索窓を用いて光切断画像上を追従探索するため、光切断画像に傾斜や曲率などがあっても、本手法は継目位置を検出することができる。

(4) 本手法では、光切断画像の特徴値抽出を行ったのちニューラルネットワークへの入力としているため、NNの構造が簡略化され高速処理が行われる。シミュレーションはパーソナルコンピュータ NEC PC-9801DA上で行われ、画像認識時間は70 ms~120 msである。

3章では、シーリングロボットのための3次元視覚センサとその画像処理法を提案し、実験によってその有効性を確かめた。本実験の結果、提案手法について以下のことがわかった。

(1) 提案した光切断画像処理法は、大きな変形をもつシール対象に対しても適用でき、継目位置を高速に認識をすることができる。それは本処理法が光切断画像の傾斜や湾曲の影響を除去できる探索窓を用いているためである。画像処理実験は(株)エー・ディー・エス製TBP06フレームバッファメモリボード(トランスピュータのプロセッサ速度は20 MHz)上でを行い、画像処理時間は30 msである。

(2) 提案した3次元視覚センサによるシール対象の位置・姿勢検出法では、シール対象の並進と回転が微小であるという条件のもとで演算を簡略化した。本手法は、画像処理の結果からシール対象の実際の継目位置と姿勢を高速(2 ms)に算出することができた。これらのことから、本視覚センサはシーリングロボットの作業目標軌道自動生成や実時間の視覚フィードバック制御に適用することができる。

4章では、3次元視覚センサを用いたシーリングロボットのシーリング作業

のための目標軌道自動生成する方法を提案した。ついで、実験によって本手法の有効性を確かめ、以下のことがわかった。

(1) 提案したシーリング作業の目標軌道生成法は、半径150 mm のカーブの場合、最高 0.04 m/s の高速で滑らかな目標軌道を走行しながら生成をすることができる。

(2) 本手法で生成するシーリング作業のための目標軌道の精度は、ロボットの教示走行軌道と実際の継目ラインとのずれによる影響を受けない、高精度(±1 mm)でシーリング作業の目標軌道を生成できることを実験で確認した。

(3) 教示システムの応答が臨界減衰するように制御系ゲインの値を設定することにより、滑らかな教示走行を実現することができる。

5章では、濃淡画像処理と光切断法処理を統合する手法を提案し、実験によって確かめた。開発した本視覚センサが以下の特長を持っているということが実験でわかった。

(1) この手法によって、シール対象のシーリングの初期位置・姿勢の合計6自由度について、偏差を検出することができる。

(2) 本視覚センサは光切断法のみでは検出できないシーリングの開始位置・姿勢を検出することができるため、シーリングロボットがシーリング作業を開始する前に、その値を基に初期位置・姿勢の偏差を修正することができる。

6章では、視覚センサより検出したシール対象の継目位置と姿勢を用いてロボットを予見制御する方法を提案し、実験によってその有効性を確かめた。本実験の結果、提案手法について以下のことがわかった。

(1) 開始位置で検出したロボットの偏差を用い、事前に教示した目標軌道全体を修正することによって、シール対象の位置と姿勢のずれを修正することができる。

(2) 継目位置の予見偏差を用いて目標軌道を実時間で補正する本手法は、視覚センサから検出した継目偏差を遅れなく補正することができる。

(3) 提案した二次ホールドを用いて、ロボット各関節の目標信号を補正することができ、継目位置追跡サーボ系を用いることなしに、視覚センサから検出した偏差を実時間で補正することができた。

シーリングロボットの
視覚センサと制御に関する研究

1995年3月

張 曉 林

①

シーリングロボットの
視覚センサと制御に関する研究

1995年3月

張 曉 林

目 次

第1章 序 論	1
1・1 概 説	2
1・2 従来の研究	3
1・2・1 従来の3次元視覚センサ	3
1・2・2 従来視覚センサ付きシーリングロボット	3
1・3 本論文の特色	6
1・4 本論文の構成	8
第2章 ニューラルネットワークを用いた継目位置検出法	10
2・1 概 説	11
2・2 シーリングロボットの視覚センサ	12
2・2・1 構 成	12
2・2・2 光切断画像	12
2・3 NNによる継目位置検出法	14
2・3・1 探索窓	14
2・3・2 継目位置検出のためのNNの構成	16
2・3・3 継目位置検出のための探索窓の移動則	20
2・3・4 NNの学習	22
2・4 シミュレーション	22
2・5 要 約	26
第3章 シーリングロボットのための3次元視覚センサ	27
3・1 概 説	28
3・2 3次元視覚センサの構成と座標系の設定	28
3・3 3次元視覚センサを用いたシール対象の位置と姿勢の検出	29
3・3・1 光切断画像	29
3・3・2 作業座標系	30
3・3・3 シール対象の位置と姿勢の算出法	32
3・4 3次元視覚センサにより取り込んだ光切断画像の処理	38

3・4・1	探索窓	38
3・4・2	シール対象の回転と変形が及ぼす影響の除去	40
3・4・3	スリットラインの段差位置と傾斜角の算出	42
3・5	視覚センサの計測誤差	42
3・6	実験結果	44
3・7	要約	44
第4章 3次元視覚センサを用いたシーリングロボットの目標軌道の		
	自動生成法	45
4・1	概説	46
4・2	視覚センサ付きシーリングロボットの構成とその座標系	46
4・3	ロボットの教示システム	48
4・4	シール作業のための目標軌道の生成	54
4・5	実験結果	57
4・6	要約	62
第5章 シーリングロボットのための濃淡情報と距離情報を統合する		
	視覚センサ	63
5・1	概説	64
5・2	視覚センサの構成	64
5・3	光切断画像による継目位置検出法	65
5・3・1	継目位置探索法	66
5・3・2	画像処理の結果から継目位置情報の算出	66
5・4	シーリング開始位置の検出	67
5・4・1	濃淡画像処理	70
5・4・2	光切断画像処理と濃淡画像処理の統合	70
5・5	実験結果	72
5・6	要約	73
第6章 濃淡情報と距離情報を統合する視覚センサを用いた		
	シーリングロボットの制御	74
6・1	概説	75
6・2	シーリングロボットの構成と座標系の設定	75

6・3	開始位置の偏差を用いた目標軌道修正法	76
6・4	シーリング作業中の目標軌道補正法	78
6・5	目標信号を補正するためのホルダの設置	80
6・6	実験結果	83
6・7	要約	84
第7章	結論	85
謝辞		88
文献		89
本研究に関連した著者の発表論文		94
付録		95
A	マニピュレータ	96
A・1	仕様	96
A・1・1	モータ, サーボドライバの仕様	96
A・1・2	制御装置・使用言語	100
A・1・3	制御用インタフェース	100
A・1・4	パワーシーケンス	100
A・2	マニピュレータの順運動学	101
A・2・1	同次変換	101
A・2・2	マニピュレータの順運動学関数	108
A・3	マニピュレータの逆運動学	108
B	視覚センサ	113
B・1	画像処理用コンピュータシステム	113
B・2	画像処理モジュール	113
B・3	CCDカメラの仕様	113
C	実験装置の写真	114

第1章

序 論

1・1 概 説

自動車工場では、車体にスポット溶接と下塗りなどの作業を行った後、水漏れやさびを防止するため、鋼板の継目にシール剤を塗布する作業が行われる。シールする鋼板の継目ラインは直線、曲線、角などを含む複雑な構造になっているため、シーリングロボットにシール作業を教示することは大変手間の掛かる作業である。また、スポット溶接などの工程によって、鋼板が変形を生じることがあるため、視覚センサによる継目位置の検出はきわめて難しい。このため、車体のシール作業は自動車工場の自動化において取り残された数少ない作業である。

シール作業の自動化は次の二つの課題を含む。すなわち、(1)シーリングロボットにシール作業を教示する作業を自動化する。すなわち、シーリングロボットの目標軌道を自動的に生成する。(2)シール作業時、シーリングロボットに教示された目標軌道と実際の継目ラインとの偏差をリアルタイムで検出し修正する。

産業ロボットに作業させるための教示は、オフラインティーチング^{(3)~(6)}（または、オフラインプログラミング）とオンラインティーチングとに大別されている。オフラインティーチングはプログラム中にロボットが拘束されていないので生産性を高めることができ、プログラミングと実行を分離できるのでオペレータや操作対象の安全性が確保できるという長所がある。しかし、作業環境を忠実に再現することができない場合には、高精度な作業軌道を生成できないため、教示内容を再生するとき、オンラインの微調整が必要になる。また、システム開発者やプログラマの負担が重くなる。一方、オンラインティーチングは、実際のロボットや作業環境を利用するものであり、プログラマーが実際に状況を把握できるため、プログラムしやすく、精度の高い作業軌道を生成することができるという長所を用いる。いままでの現場では、ほとんどオンラインティーチングで教示を行っている。オンラインティーチングの短所としては、教示する過程にロボットが用いられるため、安全性と生産性が落ちる。

本研究で行う教示の作業自動化、はオンラインティーチングに属すが、オンラインティーチングの長所を保ち、短所を回避することができる。すなわち、視覚センサを用いてシール対象の継目位置と姿勢を検出しながら目標軌道を生成するため、

人間とロボットの直接的なタッチをなくすことができ、安全性が高められる。また視覚センサを用いた目標軌道の自動生成は教示時間を大幅に短縮することができるため、生産性も向上する。本論文では、シーリングロボットの目標軌道を自動生成するために必要な3次元視覚センサを開発し、目標軌道自動生成法を提案した。

シーリングロボットを用いてシール作業を行う場合、シール対象の位置ずれや変形などの原因で、教示された目標軌道と実際の継目ラインとの間の偏差が許容範囲を超えることがある。この偏差をいかに修正するかは、シーリング作業を自動化するために解決しなければならない問題である。本論文では、この偏差を検出するための視覚センサを開発し、この視覚センサを用いて目標軌道の偏差をリアルタイムで修正するという制御アルゴリズムを提案した。また、この制御アルゴリズムは教示された目標軌道と実際の継目ラインとの間に一定範囲の偏差があっても対応できるため、オフラインティーチングで作成した作業目標軌道を修正しないまま用いることが可能である。

1・2 従来の研究

1・2・1 従来の3次元視覚センサ

対象物の3次元計測について、いままで、多数の手法を提案された^{(10)~(33)}。その中、代表的な方法は、両眼立体視法^{(23)~(25)}と光投影法(光切断法)^{(10)~(22)}である。両眼立体視法では、左右のカメラから得られた画像の対応点を検出することによって、画像内の任意の物体の距離を計測することができる。しかし、画像上全ての対応点を決定することは大変困難であり、かなりの計算処理時間が必要である。これに対して、光切断法は、対応点決定の問題を避けることができ、処理手法は比較的に単純であるため、実用技術としても、幅広く研究されている。

1・2・2 従来の視覚センサ付シーリングロボット

視覚センサ付シーリングロボットには、さまざまな方式がある⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、信頼性やコストなどの問題で、実際に現場で使われているシーリングロボッ

トのほとんどは、視覚センサが付いていないかごく単純の視覚センサしか用いられていないのが現状である。

シーリングロボットのための視覚センサには、(a) 鋼板の継目位置と姿勢を直接検出しているものと (b) 車体上の特徴的な形状 (基準穴など) をとらえ3次元位置ずれ量を算出するものの2種類がある。前者は視覚センサの測定誤差以外の全ての誤差を検出できるため高精度化しやすい。しかし、この方法ではシール対象の変形や破損などを生じる場合、継目の位置と姿勢を正確に検出することが困難であるため、実用化された例がまだ見あたらない。本研究で開発した視覚センサはこの種類に属する。後者は3次元の位置ずれを比較的簡単に算出することができ、大幅の車体位置決め誤差を検出できるという特長があるが、ロボット自体の誤差や車体製作の誤差を検出できない。

上記(a)の視覚センサを用いたシーリングロボットは沢野らが提案した方式がある(図1・1)⁽¹⁾。この方式は光切断法により検出した1自由度の継目位置の偏差

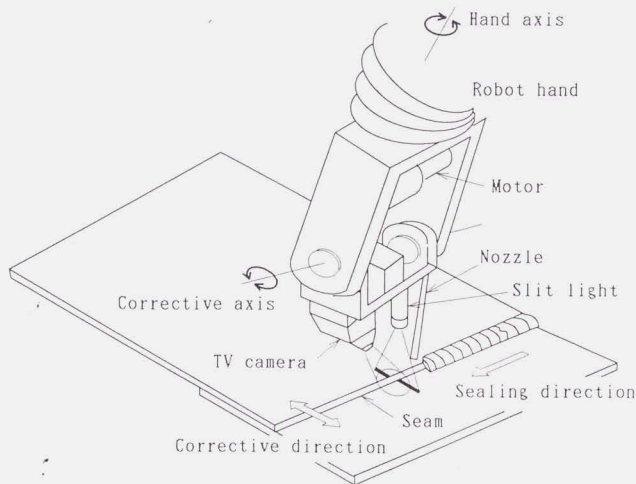


図1・1 サーボトラッキングを用いた視覚センサ付きシーリングロボット⁽¹⁾

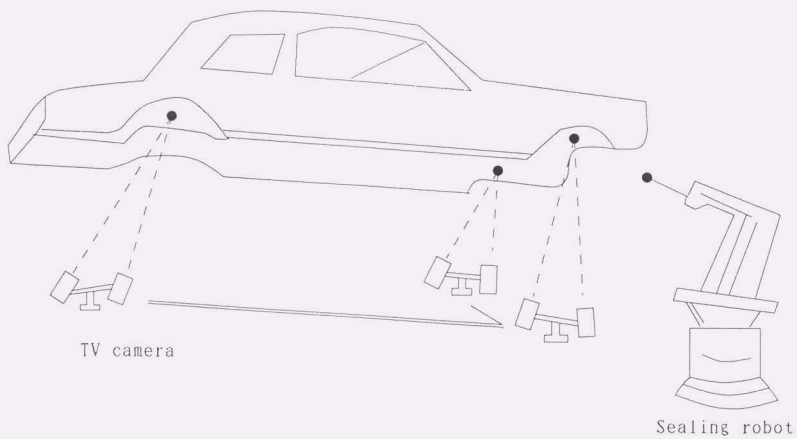


図1・2 固定した視覚センサによる車体の3次元位置検出⁽³⁾

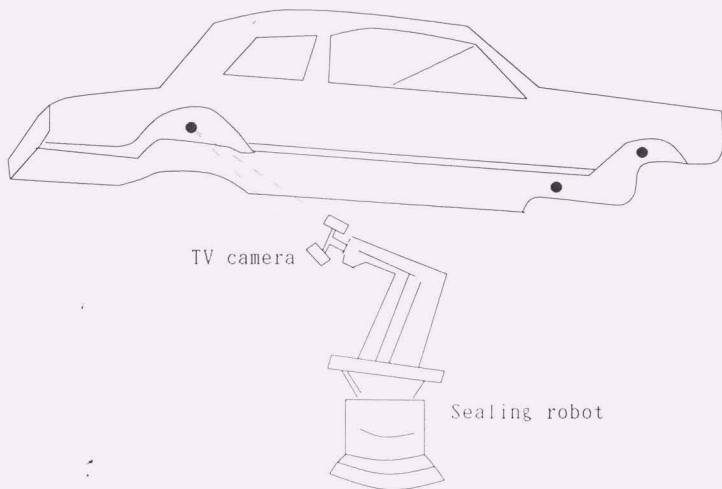


図1・3 ロボットの手先に取り付けた視覚センサによる車体の3次元位置検出

をサーボトラッキングにより補正する。

上記(b)の視覚センサを用いたシーリングロボットには二つの方式がある。その一つは複数の視覚センサを数箇所て固定して車体上の特徴点を認識し、3次元位置ずれを検出する。検出した3次元位置ずれを用いて、ロボット再生時の軌道を修正する(図1・2)⁽²⁾。もう一つの方式はロボットの手先に視覚センサを取り付け、視覚センサを移動して、数箇所の特徴的な形状をとらえ、3次元位置ずれを算出し、教示した軌道を3次元的にシフトさせ再生を行うものもある(図1・3)。

1・3 本論文の特色

現時点において、シール対象の継目位置と姿勢を実時間で検出する手法としては、光切断法が最も有効である。

近年、溶接ロボットのための光切断法を用いた視覚センサについては、数多くの研究^{(10)~(11)}がある。一方、ほぼ同じ原理と構造を持つシーリングロボットの視覚センサについての研究は、1984年の沢野ら⁽¹⁾の研究報告以来ほとんど見あたらない。シーリング作業は溶接と比べ作業対象の板が薄いため、視覚センサにより取り込んだ光切断画像の継目部の特徴は、板の変形や位置・姿勢の変化などからの影響を受けやすい。このため、シール対象の継目位置と姿勢の検出は難しく、これに溶接ロボットの視覚センサの画像処理アルゴリズムを適用することはできない。また、シール剤の性質によって、シーリング作業中のノズルが高速に走行(0.2 m/s~0.4 m/s)するため、視覚センサの継目位置・姿勢の検出も高速に行う必要がある。

以上の観点から、本論文の2章ではシール対象の変形や位置と姿勢の変化などからの影響を受けにくいという特長を持つニューラルネットワークを用い継目位置認識法を提案し、探索窓処理により検出速度の向上を図った。3章ではシーリングロボットのための3次元視覚センサを提案した。本3次元視覚センサは、J. E. Agapakisが提案した溶接ロボットのための3次元視覚センサ⁽¹⁰⁾の構造と基本的には同じ原理に基づいているが、計測する対象物が大きく異なるため、画像処理の手法が全く異なっている。本研究では、視覚センサにより取り込んだシール対象の光切断画像

の継目位置検出処理を高速かつ高精度に行うため、スリットラインの傾斜および湾曲の影響を除去できる探索窓法を提案した。

シーリングや溶接作業の場合の開始位置の検出は、制御系の目標値の補正にとってきわめて重要である。それは、作業開始点の位置と姿勢を高精度に検出できれば、作業対象自身の変形以外の原因で生じた位置ずれは、すべて算出できるからである。しかし、従来の光切断法を用いた視覚センサでは、作業開始点の位置・姿勢の全ての情報を検出することはできない。これを解決するため5章では、光切断法と濃淡画像処理法を併用することによって、シール対象の開始位置での6自由度についての位置と姿勢を検出できることを示した。

視覚フィードバックによるロボットの自律走行や作業軌道の自動生成などについて数多くの研究がある^{(2.8)~(4.3)}。これらのほとんどの研究では、画像処理の周期が長いと、センサから得られた環境や対象物の情報はロボットの目標軌道の生成にのみ用いられ、ロボットの制御システムの中には取り入れていない。しかし、もしロボットの移動速度に対し、視覚センサの画像処理周期が十分短かければ、各サンプリング時点で視覚センサが検出した位置・姿勢の偏差値を単純なホールド（零次ホールド、一次ホールド）に通すことによって直接にロボット制御則に取り扱えることができる。このような観点から4章では、視覚センサの周期を制御系のサンプリング周期に等しく選び、ロボットの目標軌道自動生成するための視覚フィードバック制御系を構築した。

シーリングロボットのシーリング作業時、ノズルが高速（0.2 m/s ~ 0.4 m/s）に走行するため、この走行速度に対して、現時点で開発した視覚センサの画像処理周期（100 ms）はまだ長い。すなわち、視覚センサにより検出した継目位置・姿勢とロボット目標軌道の位置・姿勢の偏差のサンプル値を零次または一次ホールドを通すとロボットの関節が急加減速するため、滑らかな制御ができない。このため、従来のシール作業時における実時間の視覚フィードバック制御では、ロボットの手先の継目位置追跡サーボ系の1軸のみの制御が行われていた。視覚センサから検出した多自由度の偏差をすべて補正するため、ロボットの各関節について補正する必

要があり、加減速度を最小限におさえるために偏差補正信号を滑らかにする必要がある。この場合、視覚センサからの位置・姿勢の偏差信号として予見情報を用いることが前提条件である。

このような観点から、5章では予見制御法を提案し、予見情報を用いた二次ホルダにより、視覚センサから検出した多自由度についてのそれぞれの偏差を補正できることを実証した。

本論文は視覚センサ付きシーリングロボットの理論的な可能性を示した。本論文で提案した視覚センサは、実際の工場でのシール作業時に起こりうるカメラレンズの汚れや画像信号のノイズなどの影響を考慮していないため、実際の応用に向けて解決しなければならない問題が残されている。

1・4 本論文の構成

本論文は次の内容から構成される。

第1章 序 論

視覚センサ付きシーリングロボットに関する概説と従来の研究、本論文の特色および構成について記す。

第2章 ニューラルネットワークを用いた継目位置検出法

視覚センサより取り込んだ光切断画像の継目位置をニューラルネットワークを用いて認識する手法を提案し、シミュレーションでその実用性を確認した。

第3章 シーリングロボットのための3次元視覚センサ

本論文で開発した3次元視覚センサの構成およびこの視覚センサより取り込んだ画像の処理と認識法について述べ、実験でその有効性を確認する。

第4章 3次元視覚センサを用いたシーリングロボットの目標軌道の自動生成法

3次元視覚センサを用いたシーリングロボットの目標軌道を簡単な手法で自動生成できる方法を提案し、実験でその有効性を確認する。

第5章 3次元視覚センサを用いたシーリングロボットの目標軌道の高速自動生成法

3次元視覚センサを用いたシーリングロボットを走行させながら継目位置と姿勢

を検出し、シール作業の目標軌道を生成する高速目標軌道自動生成法を提案し、実験によってその有効性を確認する。

第6章 シーリングロボットのための濃淡情報と距離情報を統合する視覚センサ
濃淡情報と距離情報を統合した視覚センサを開発し、この視覚センサより取り込んだ画像の処理、認識、統合する方法を提案し、実験によってその有効性を確認する。

第7章 濃淡情報と距離情報を統合する視覚センサを用いたシーリングロボットのシール作業の制御

視覚センサから検出した継目位置偏差の予見情報を用いてシーリングロボットのシール作業時の目標軌道の偏差をリアルタイムで修正する方法を提案し、実験によってその効果を確認する。

第8章 結 論

本論文で得られた結論をまとめる。

第2章

ニューラルネットワークを用いた 継目位置検出法

2・1 概説

薄板の接合部にシール剤を塗布するシーリングロボットはシール剤を塗布する継目部を実時間で検出する高速視覚センサを必要とする。自動車の塗装工程で使われているシーリングロボットは、そのような視覚センサを必要とする代表例である。実際の作業対象の検出位置は、スポット溶接が終了したのち下塗りされた車体の継目部である。この継目部は、へこみのある複雑な曲線状をしており、車体パネルは板厚1mm以下である。このため、視覚センサによる継目位置の高速検出はかなり困難である。

近年、ニューラルネットワーク（以下、NNと略す）について、研究が活発に行われている。予期せぬ変動のある複雑な継目の位置を検出するため、特徴抽出能力が高いとされているNNの利用が考えられる。これまでNNを用いた画像処理として、パターン認識、特徴抽出などの研究^{(7)~(9)}は多かったが、画像から特徴のある箇所的位置を検出する問題にNNを利用する研究はほとんど見あたらない。本章では、NNを用いた高速継目位置検出法を提案し、シミュレーションにより有効性を確かめる。

2・2 シーリングロボットの視覚センサ

2・2・1 構成

視覚フィードバック付きシーリングロボットの構成を図2・1に示す。ロボットの手先に視覚センサを取り付け、高速処理を行うために光切断法を用いた。視覚センサは図2・2のようにTVカメラと投光装置（スリット光）から構成されている。面に垂直にTVカメラを置き、光源と垂直線との傾斜角度を α とする。

2・2・2 光切断画像

光切断画像は、鋼板の重ね合わせ部や、端部に投影されたスリット光によって作られる。視覚センサによって光切断画像を取り込み、これを二値化し、継目位置探

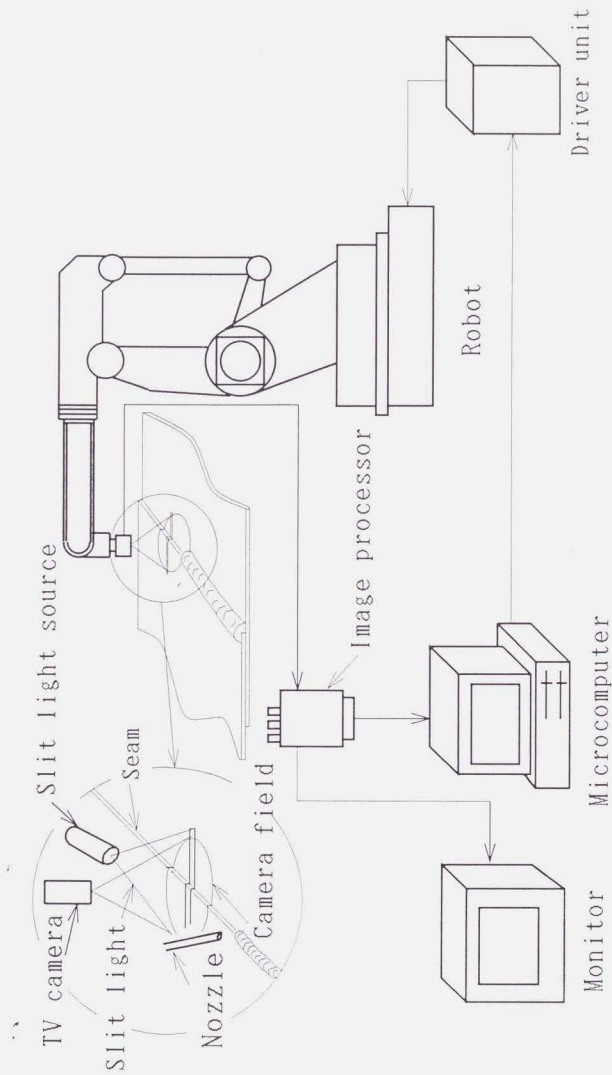


図 2・1 シーリングロボットの視覚フィードバック制御系の構成図

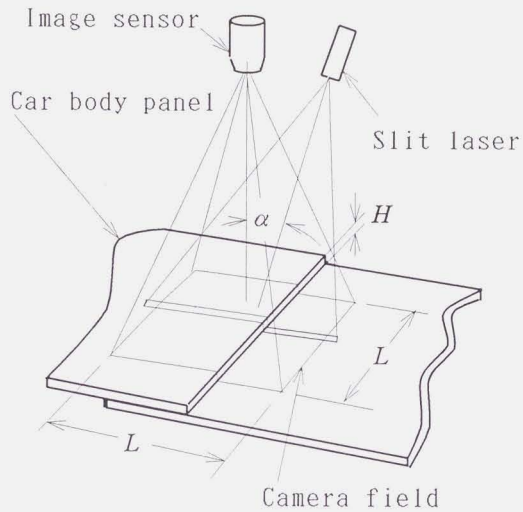


図2・2 視覚センサの光学系

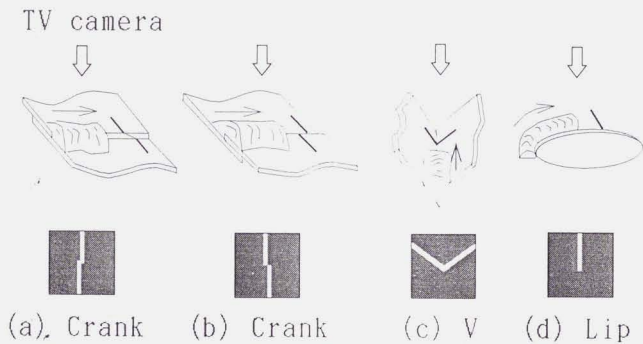


図2・3 継目形状(上図)に対応する光切断画像(下図)

索を行う。継目部の光切断画像の形状は、鋼板の重ね合わせの場合には、図2・3(a)、(b)のクランク型、鋼板の折り曲げ合わせの場合には、同図(c)のV型、鋼板の端部と穴の場合には、同図(d)のリップ型となることが知られている⁽¹⁾。

本論文では、ロボットのシーリング軌道は事前にティーチングされており、その軌道と実際の車体の継目部の位置偏差は $\pm L/2$ 以内とする。シールする薄板の厚さを H とする。カメラの撮影領域を $L \times L$ に設定し、カメラと継目位置間の距離変動などの影響を考え、画面上のスリット光の画像の幅は、 $W_1 \sim W_2$ の範囲で変動可能とする。カメラの撮像領域では、結像時の画素数が $P \times P$ になるように光学系を調整する。このとき、スリット光の画像の幅は、カメラ上の画素数で表すと、 $W_1 P/L \sim W_2 P/L$ 画素となる。

クランク型の場合、段差がイメージセンサ上に結像したときの画素数 P_c は

$$P_c = \frac{PH \tan \alpha}{L} \dots\dots\dots (2.1)$$

で与えられる。

本論文のシミュレーションでは、自動車工場の実データの基づいて、 $L=25.6$ mm, $H=0.6$ mm と仮定し、 $P=256$ 画素, $\alpha=\pi/6$ rad, $W_1=0.6$ mm, $W_2=1.2$ mmと設定する。したがって、式(2.1)から、 $P_c \approx 3$ 画素となる。

2・3 NNによる継目位置検出法

実際には、実車の鋼板の板厚の変化または接合部のすき間や傾斜などがあるため、段差は P_c より多くなることがある。このため、これらの影響を考え、本論文のシミュレーションでは、継目部の光切断画像の段差は3画素から15画素とする。

2.3.1 探索窓

シールする車体鋼板の板厚 H は0.6mm であり、クランク型の場合、段差がセンサ上に結像したときの画素数は3画素である。256×256画素の複雑な曲線状の光切断画像の上で、わずか3画素の段差を高速に見つけることは非常に困難である。ところで、画像を処理する範囲を小さくすれば、段差が相対的に大きくなる。また、全画面を走査するよりも光切断画像の存在する領域を検出し、画像に沿って継目位

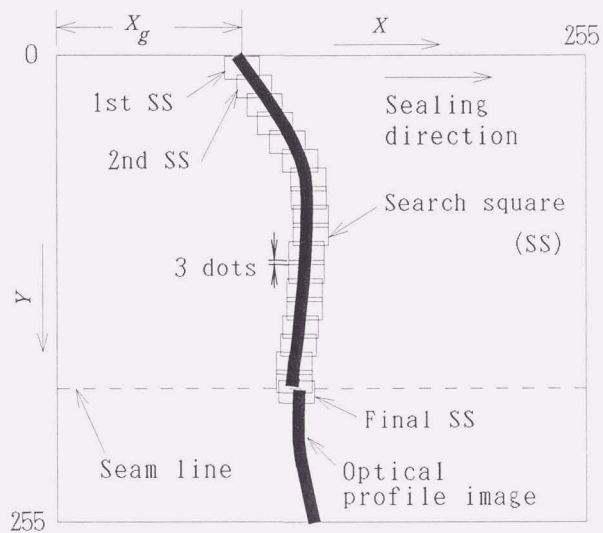


図2・4 探索窓を用いた継目位置検出法

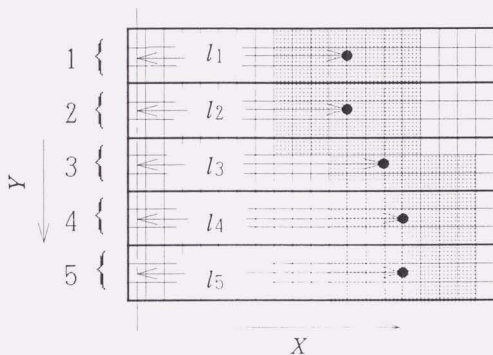


図2・5 探索窓の構成

置を検出するほうが、高速処理に適している。

そこで本論文では、図2・4のように画面上に小さい長方形の窓を設定し、この窓を用いて光切断画像上を追従することにより、継目位置を検出する。この長方形の窓を探索窓と呼ぶことにする。探索窓の大きさは、段差位置の検出速度、認識できる光切断画像の幅、回転角度などと直接関係があるため、実際にはシールする対象ごとに決めなければならない。一般的には光切断画像の傾斜や段差などに十分対応できる大きさが必要である。画面は、図2・4に示すように直角座標で表し、画面の左上隅を原点、横軸をX軸、縦軸をY軸とする。本論文の例では、探索窓の大きさは、X軸方向に20画素、Y軸方向に15画素とする。

図2・4のように第1番めの探索窓の位置を光切断画像の上端部に設定する。探索窓内に入った光切断画像に継目が存在するかどうかをNNで判断し、継目が存在しない場合は、次の探索窓の位置を求め、探索を続ける(2・3・3参照)。これに対して探索窓内に入った画像に継目が存在するとき、NNの出力から継目位置を求める。

2・3・2 継目位置検出のためのNNの構成

上述のようにNNを用いて、(1)探索窓内に継目が存在するかどうかの判定、ならびに(2)継目が存在するときの継目位置の検出を行う。

NNの入力として、すべての画素の値を用いると、NNにおける必要な結合数が多くなり、このため、演算時間が長くなる。さらに、探索窓上の各画素ごとに処理を行うと情報が過多になると思われる。ところで、人間は、例えば人の顔を覚えるには、(i)顔の形、(ii)目や鼻の位置 など特徴のある部分だけに着目している。このことから、全画面にわたる画素の値をNNの入力にするよりは、前処理によってパターンの特徴を表す値に集約したのち、これを入力とするほうが有効であると考えられる。

探索窓内のすべての位置においての光切断画像の継目が存在するかどうかをNNによって判定するには、NNを学習させる際に多くの教師パターンを必要とする。本論文では、光切断画像の段差位置を示す特徴量をどのように抽出するか、NNを学習させるために必要な教師パターンの数をいかに減少させるかが問題となる。

さて、計算時間を短縮するためには、継目位置を示す特徴を失わないかぎり、NNの入力数をできるだけ少なくすることが必要である。図2・3に示す光切断画像に共通な特徴は、画像の継目を表す部分がパターンの不連続点であるということである。このため、画像のY方向の画素位置の微分値は、その特徴を表す有効な値であると考えられる。高速処理を図るため、本論文では探索窓を図2・5で表し、Y方向の微分を次のようにして近似的に実現する。

(1) 探索窓をY方向に3画素ずつ5つの領域(図2・5の1, 2, 3, 4, 5)に分割する(この分割数は探索窓の大きさと要求される継目位置の検出精度によって決められる)。

(2) 図2・5のように、領域1, 2, ..., 5に存在する二値画像のX方向の重心位置を l_1, l_2, \dots, l_5 画素とおく。探索窓の近似微分 $\Delta l_{12}, \Delta l_{23}, \Delta l_{34}, \Delta l_{45}$ は

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_{12} &= l_1 - l_2 \\ \Delta l_{23} &= l_2 - l_3 \\ \Delta l_{34} &= l_3 - l_4 \\ \Delta l_{45} &= l_4 - l_5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

で表される。

式(2.2)から

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \Delta l_{23} - \Delta l_{12} \\ d_2 &= \Delta l_{34} - \Delta l_{12} \\ d_3 &= \Delta l_{45} - \Delta l_{12} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.3)$$

を算出し、 d_1, d_2, d_3 をNNの入力とする。

図2・6はクランク1(図2・3(a))の場合、図2・7は継目のない場合の近似微分 $\Delta l_{12}, \dots, \Delta l_{45}$ と d_1, d_2, d_3 の値を黒点で示す。

$\Delta l_{12}, \dots, \Delta l_{45}$ は、光切断画像のX方向の位置に影響しないため、NNを学習させるのに必要な教師パターンはY方向の継目位置だけになる。光切断画像が傾斜しているとき、継目位置が同じであっても、 $\Delta l_{12}, \dots, \Delta l_{45}$ の値が異なるが、 d_1, d_2, d_3 の値は傾斜の影響をほとんど受けないことが図2・6からわかる。これは、 $\Delta l_{23}, \dots, \Delta l_{45}$ から Δl_{12} を引くことによって、光切断画像の傾斜によって生じる偏差を補正したためである。

図2・8では、クランク1型の場合と継目部のない場合の例を取り上げた。

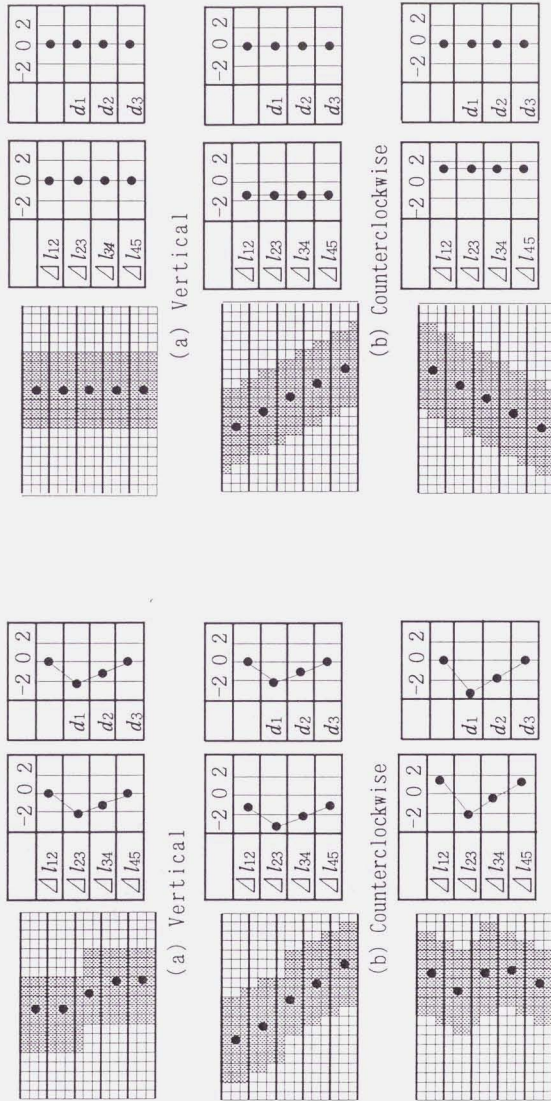


図 2・6 d_1 と d のパターン
(クラック型)

(c) Clockwise

(b) Counterclockwise

(a) Vertical

図 2・7 d_1 と d のパターン
(継目部分のない部分)

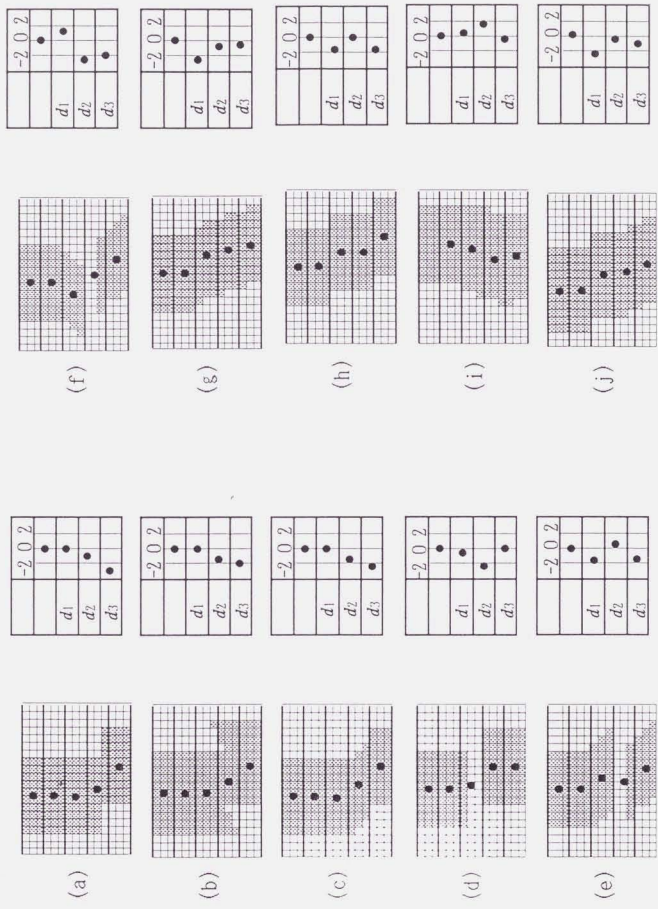


図2・8 dの複雑なパターン ((a)~(f)はクラランク1型の場合, (g)~(j)は継目部のない場合)

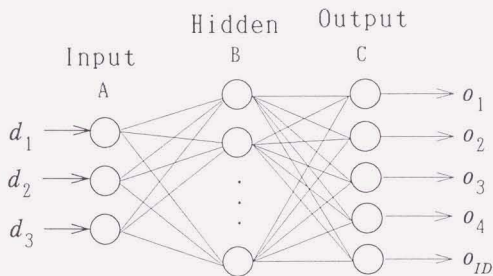


図2・9 NNの構成

図2・8でわかるように各変形したパターンに対する d_1, d_2, d_3 の値は大きく異なっている. とくに, 探索窓の分割数を多く設定するとNNの入力はさらに複雑になると思われる.

図2・9のように, 探索窓上の継目位置を検出するためのNNの入力数を d_1, d_2, d_3 の3個とし, NNの出力を o_1, \dots, o_4, o_{1D} の5個とする. 出力 o_1, \dots, o_4 は継目が探索窓のどの領域にあるかを表示する位置情報であり, 出力 o_{1D} は探索窓内にある光切断画像が継目位置であるかどうかを認識する情報である.

2・3・3 継目位置検出のための探索窓の移動則

第 k 番めの探索窓の位置座標 (X_k, Y_k) ($k=1, 2, \dots$) は, 図2・10に示すように第 k 番めの探索窓の領域5の中心線左隅の座標とする. 光切断画像の上端部の X 方向の重心位置 X_g を検出し, 第1番めの探索窓の位置座標 (X_1, Y_1) は $X_1 = X_g - 10$, $Y_1 = 13$ となるように作成する. 探索窓内に継目を示す特徴パターンが存在しない場合(すなわち, NNの出力 $o_{1D} = 0$ の場合), 図2・10に示す方法で探索窓を移動させる. すなわち, $k+1$ 番めの探索窓内の領域1の中心が, k 番めの探索窓の領域5の画像の重心と一致するようにして $k+1$ 番めの探索窓を作る.

上記のようにして探索窓を作成すると

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + l_5 \frac{1}{2} a \\ Y_{k+1} &= Y_k + b - f \\ (k &= 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.4)$$

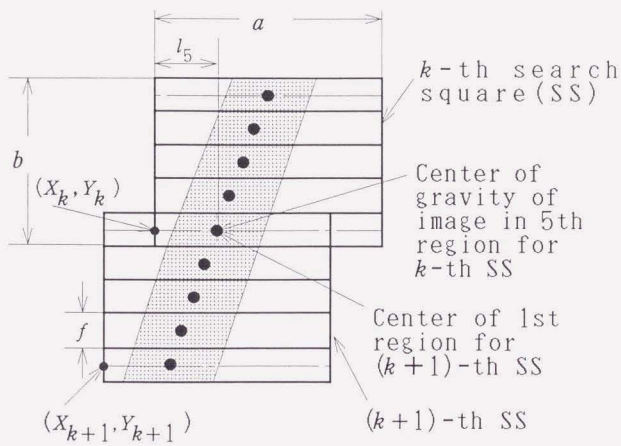


図2・10 探索窓の位置設定 (k=1, 2, 3, ...)

の関係がある。ただし、 a は探索窓のX方向の長さ、 b は探索窓のY方向の長さ、 f は1個の領域に含まれる画素の行数、 (X_k, Y_k) は現在の探索窓の位置座標、 l_5 は探索窓の5領域の重心位置である(図2・5を参照)。

継目が k 番めの探索窓内に存在する場合(すなわち、 $o_{1D}=1$ の場合)、継目位置 (X, Y) は

$$\left. \begin{aligned} X &= X_k + p \\ Y &= Y_k + q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$

から求められる。ただし、 p, q は k 番めの探索窓内の継目の位置座標であり

$$p \doteq \begin{cases} l_2 & (o_1=1) \\ l_3 & (o_2=1) \\ l_4 & (o_3=1) \\ l_5 & (o_4=1) \end{cases} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$q \doteq \begin{cases} -3f & (o_1=1) \\ -2f & (o_2=1) \\ -f & (o_3=1) \\ 0 & (o_4=1) \end{cases} \dots\dots\dots (2.7)$$

で与えられる。本論文のシミュレーションでは、 $a=20, b=15, f=3$ とする。

2.3.4 NNの学習

出力 o_1, \dots, o_4 に対する教師信号 v_1, \dots, v_4 は、それぞれ探索窓の領域 2, \dots , 5 の位置に対応する。継目が領域 2 にあるときは、 $v_1 = 1, v_2 = v_3 = v_4 = 0$ に設定する。継目が領域 3 にあるときは、 $v_2 = 1, v_1 = v_3 = v_4 = 0$ に設定する。継目が 4, 5 領域に存在するときも同様に設定する。継目が存在しないとき、 $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = 0$ に設定する。継目が領域 1 に存在することはない。それは、領域 1 は前の探索窓の第 5 領域と重なるため、継目が存在すれば、すでに検出されているからである。

認識情報 o_{1D} に対する教師信号 v_{1D} は、継目が探索窓内に存在するとき 1、存在しないときは 0 に設定する。

2.4 シミュレーション

本研究はパソコン PC-9801RA5 を用いて、シミュレーションを行った。OS は MS-DOS Ver. 3.3 を使い、C言語 (MS-C) でプログラムを記述した。

使用する NN の構成は、図 2.9 に示すように 3 層とする。中間層 (B 層) のニューロンの数を M とおくと、各層の入出力関係は、 $i (= 1, 2, 3)$, $j (= 1, 2, \dots, M)$, $m (= 1, 2, \dots, 5)$ に対して、次式で与えられる。

$$x_j^B = \sum_{i=1}^M (w^{Aj} \cdot y_i^A + h_j^B) \quad \dots \dots \dots (2.8)$$

$$x_m^C = \sum_{j=1}^M (w^{Bm} \cdot y_j^B + h_m^C) \quad \dots \dots \dots (2.9)$$

$$y_i^A = d_i \quad \dots \dots \dots (2.10)$$

$$y_j^B = f(x_j^B) \quad \dots \dots \dots (2.11)$$

$$o_m = f(x_m^C) \quad \dots \dots \dots (2.12)$$

ただし

- d_i, y_i^A : 入力層 (A 層) の i 番めのニューロンの入力, 出力
- x_j^B, y_j^B : 中間層 (B 層) の j 番めのニューロンの入力, 出力
- x_m^C, o_m : 出力層 (C 層) の m 番めのニューロンの入力, 出力

h_j^G : 出力層の j 番めのニューロンのしきい値

h_m^B : 中間層の m 番めのニューロンのしきい値

w_{ij}^{AB} : y_i^A と x_j^B との間の結合荷重

w_{jm}^{BC} : y_j^B と x_m^C との間の結合荷重

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(x/\mu)} \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 13)$$

で与えられる.

誤差逆伝ば法⁽⁵⁾を用い, 下記のようにして w_{ij}^{AB} , w_{jm}^{BC} の学習を行う.

出力層と中間層の誤差 δ_m^C , δ_j^B は

$$\delta_m^C = \frac{1}{\mu} (v_m - o_m) o_m (1 - o_m) \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 14)$$

$$\delta_j^B = \frac{1}{\mu} \sum_{m=1}^5 (\delta_m^C w_{jm}^{BC}) y_j^B (1 - y_j^B) \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 15)$$

で与えられる. ただし

δ_j^B : 中間層の j 番めのニューロンの誤差

δ_m^C : 出力層の m 番めのニューロンの誤差

v_m : 出力層の m 番めの教師信号

$n + 1$ 回めの値 $w_{jm}^{BC}(n + 1)$, $w_{ij}^{AB}(n + 1)$, $h_m^C(n + 1)$, $h_j^B(n + 1)$ は

$$\left. \begin{aligned} w_{jm}^{BC}(n + 1) &= w_{jm}^{BC}(n) + \eta_w \delta_m^C y_j^B \\ h_m^C(n + 1) &= h_m^C(n) + \eta_h \delta_m^C \\ w_{ij}^{AB}(n + 1) &= w_{ij}^{AB}(n) + \eta_w \delta_j^B d_i \\ h_j^B(n + 1) &= h_j^B(n) + \eta_h \delta_j^B \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 16)$$

($n = 0, 1, 2, \dots$)

により更新する. ただし, η_w , η_h は学習率である.

本論文では, スリット光以外の外乱光源は, 光切断画像に影響しないとした. 車体鋼板の継目部の傾斜, へこみなどの影響を考へて, 継目パターンを作り, 前章で述べた継目位置検出法を用いて, シミュレーションを行った.

シミュレーションでは, $M = 5$, $\mu = 0.8$, $\eta_w = \eta_h = 0.2$ と設定した. また, すべての結合荷重としきい値の初期値 ($n = 0$) は幅 ± 1 の乱数とした. 図 2・8 のような変形したクランク 1 型を各継目位置に対応して約 82 パターンを用意しオフラインで NN の学習を行った. 図 2・11 は, クランク 1 型の場合の学習回数と誤

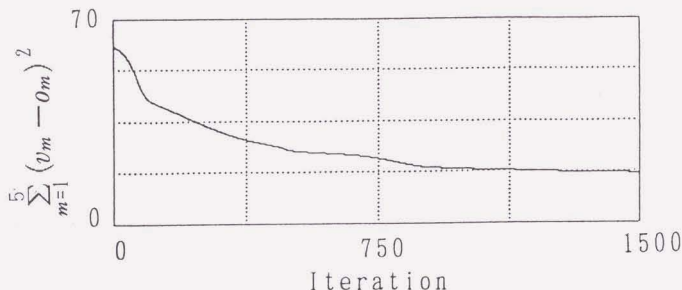


図2・1・1 学習過程

差二乗和 $\sum_{m=1}^5 (v_m - o_m)^2$ との関係を表す。約1500回の学習で、誤差二乗和は収束し、実用化の精度に達した。シミュレーション結果を図2・1・2に示す。同図(a)～(d)の左図は光切断画面であり、この画面の中の光切断画像の不連続になっている箇所が鋼板の継目ラインと光切断ラインとの交点(すなわち、継目位置)である。パターン認識を表すNNの出力 o_{1D} が、2回続けて1を出力した場合に継目であると見なす。すなわち、 k 番めの o_{1D} が1を出力するとき、次の探索窓の中心を k 番めで検出した段差の座標位置に置き、もう1回認識する。もし再度 $o_{1D}=1$ なら、継目が探索窓内にあると判断する。

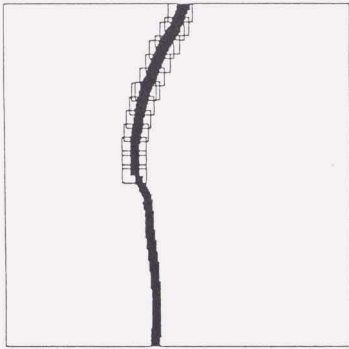
図2・1・2(a)～(d)の右上図は、継目位置を含む探索窓であり、右下図は、そのときのNNの出力 o_1, \dots, o_4, o_{1D} の値を棒グラフで示したものである。

式(2.5)を用いて図2・1・2のシミュレーション結果から継目位置 (X, Y) を求めることができる。図2・1・2(a)の場合、 o_3 の値が最も1に近いので、 $o_3=1$ と見なし、式(2.6)、(2.7)を用いると

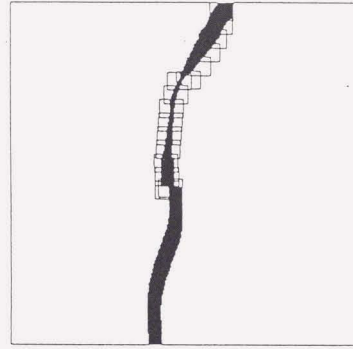
$$p = l_4 = 14$$

$$q = -f = -3$$

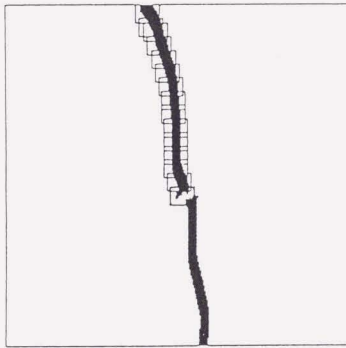
が得られる。この p, q の値と最終の探索窓の位置座標(100, 151)を式(5)に代入すると継目の位置 (X, Y) は



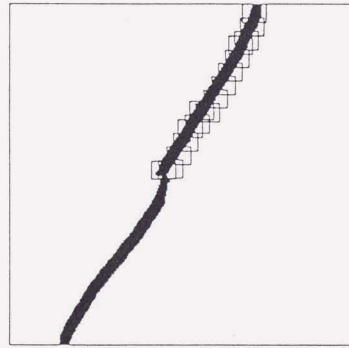
(a) 曲線状の場合



(b) 線幅が一定でない場合



(c) 継目部が変形している場合



(d) 傾斜のある場合

図2・12 継目位置の探索軌跡

$$X = X_k + p = 100 + 14 = 114$$

$$Y = Y_k + q = 151 - 3 = 148$$

と算出できる. 図 2・1 2 (b), (c), (d) の場合についても同様に図 (b) では (137, 158), 図 (c) では (154, 167), 図 (d) では (130, 148) となる. これらの値は図 2・1 2 の左図の実測と一致している. X, Y の単位は画素であるが, X, Y の値から実際の継目位置を求めることができる.

線幅が一定でない場合 (図 2・1 2 (b)), 傾斜のある場合 (図 2・1 2 (d)) に対しても, 良好に認識が行われていることがわかる.

以上の例のように, かなりくずれた画像に対しても, 本手法は確実に認識を行っており, これによって本手法の有効性が確かめられた.

2・5 要 約

本論文は, ニューラルネットワークを用い, シーリングロボットのための, 車体鋼板の継目位置探索法を提案し, シミュレーションによってその有効性を確かめた. 本探索法は以下の特長をもっているということが明らかになった.

(1) ニューラルネットワークが高い特徴抽出能力を持つため, これを用いた本手法は変形や回転などの継目パターンの検出にはきわめて有効である.

(2) (i) 変形や傾斜などの状況に応じた継目パターン, (ii) 継目以外の光切断画像の変形パターンを, 本手法はオフライン学習によって認識することができる.

(3) 探索窓を用いて光切断画像上を追従探索するため, 光切断画像に傾斜や曲率などがあっても, 本手法は継目位置を検出することができる.

(4) 本手法では, 光切断画像の特徴値抽出を行ったのち ニューラルネットワークへの入力としているため, NNの構造が簡略化され高速処理が行われる.

第3章

シーリングロボットのための
3次元視覚センサ

3・1 概 説

6自由度シーリングロボットが任意の位置と姿勢をとりながらシーリング作業を行う場合、シール対象の位置と姿勢の3次元情報を検出できるセンサを必要とするが、このようなセンサはいまだ見あたらない。そこで本章では、J. E. Agapakis が提案した3次元視覚センサ⁽¹⁰⁾の原理を用いて、シーリングロボットのための視覚センサを提案する。さらに、この視覚センサにより取り込んだシール対象の光切断画像の継目位置検出処理を高速かつ高精度に行うため、スリットラインの傾斜および変形の影響を除去できる探索窓法を提案する。ついで、本3次元視覚センサの実用性を実験によって確かめた。

3・2 3次元視覚センサの構成と座標系の設定

シーリングロボットのための3次元視覚センサは、1台のカメラと2台のスリット光源から構成される。図3・1のようにカメラと二つのスリット光源のそれぞれ

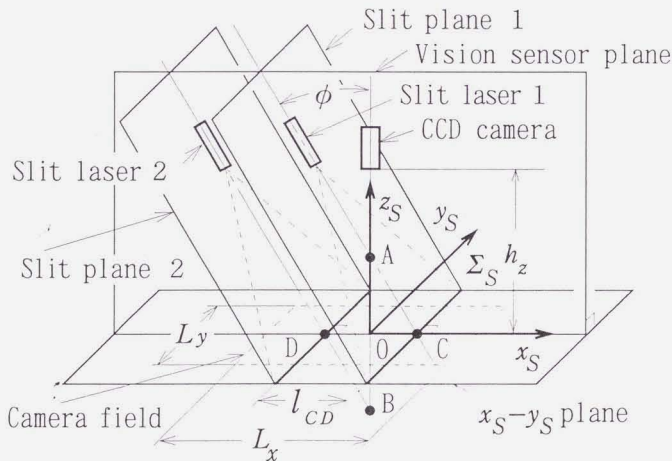


図3・1 視覚センサの光学系

の中心軸は一つの平面上にある（以下、この平面を視覚センサ平面と呼ぶ）。二つのスリット光源の中心軸は平行であり、これらの中心軸とカメラの中心軸とのなす角を ϕ とする。この二つのスリット光源より発生するスリット光を含む平面は、平行であり視覚センサ平面と直交する。

以下、カメラに近いほうのスリット光源をスリット光源1とし、この光源から発生するスリット光の平面をスリット平面1と呼ぶ。もう一つの光源をスリット光源2とし、その平面をスリット平面2と呼ぶ。

カメラの中心軸延長線とスリット光源1、2の中心軸延長線との交点をそれぞれA、Bとする。視覚センサ座標系を Σ_s とし、 Σ_s の原点を図3・1のようにカメラの中心軸上のABの中点Oに置いたのち、 z_s 軸をカメラの中心軸と一致させ、 x_s 軸を視覚センサ平面上に設定する。

カメラの x_s-y_s 平面に対する撮像領域を $L_x \times L_y$ とし、この領域に対応する画面の画素数を $M_x \times M_y$ とする。カメラレンズの中心から Σ_s の原点までの距離を h_z とする。スリット光源1の中心軸と x_s 軸との交点をCとし、スリット光源2の中心軸と x_s 軸との交点をDとする。CDの長さを l_{CD} とすれば、 Σ_s におけるスリット平面1は

$$x_s = 0.5l_{CD} - z_s \tan \phi \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

スリット平面2は

$$x_s = -0.5l_{CD} - z_s \tan \phi \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

で表される。

カメラの中心軸が x_s-y_s 平面に対し垂直となっているため、 x_s-y_s 平面上の図形とカメラより取り込んだ画像との間には相似関係がある。その比 ξ は

$$\xi = \frac{L_x}{M_x} = \frac{L_y}{M_y} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

で与えられる。

3・3 3次元視覚センサを用いたシール対象の位置と姿勢の検出

3.3.1 光切断画像

光切断画像は鋼板の重ね合わせ部や端部に投影されたスリット光によって作られ

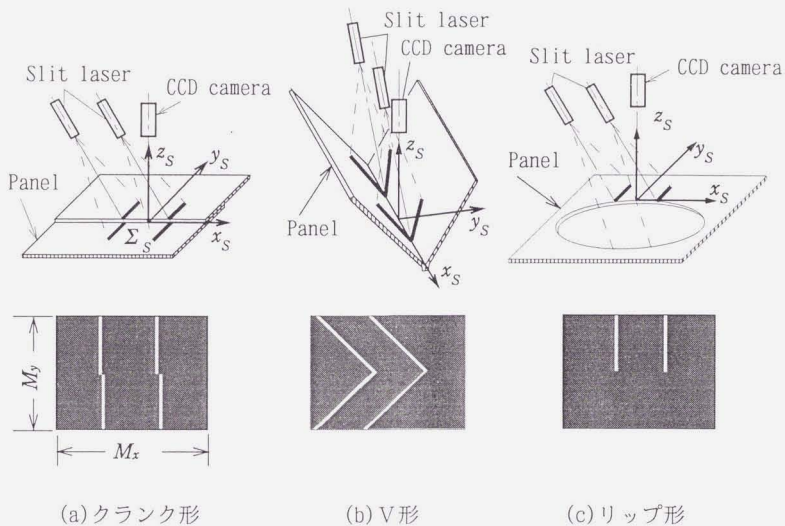


図3・2 継目形状（上図）に対応する光切断画像

る。ビデオカメラによって光切断画像を取り込み、これを2値化し、継目位置探索を行う。シール対象の継目部の光切断画像の形状は、鋼板の重ね合わせの場合には、図3・2のような3種類のパターンを考えられる。視覚センサから得た光切断画像は図3・2(a)のクランク形、鋼板の折り曲げ合せの場合には、同図(b)のV形、鋼板の端部と穴の場合には、同図(c)のリップ形となることが知られている⁽¹⁾。

3.3.2 作業座標系

シール対象の位置と姿勢を測定するため、シール対象の上に作業座標系 Σ_w を設定する。図3・3(a)のように板を重ね合わせる場合、 Σ_w の原点をシール対象の継目ライン上の作業点に置き、 x_w 軸をシール方向に、 z_w 軸をシール対象の接平面の法線に設定する。ただし、継目ラインが曲線状の場合、シール方向は作業点の接線方向とする。図3・3(b)のように2枚の板を曲げ合わせる場合、 Σ_w の原点をシール対象の継目ライン上の作業点に置き、 x_w 軸をシール方向に、 z_w 軸をシール対象の両接平面のなす角を2等分する平面上に設定する。図3・3(c)のように板の

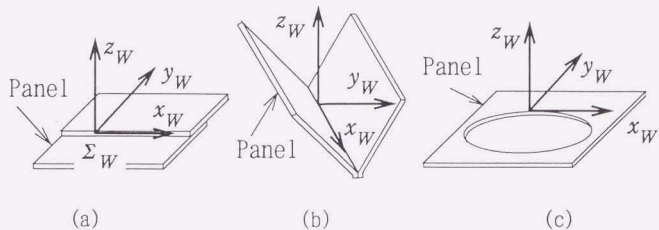


図3・3 継目形状に対応する作業座標系 Σ_W

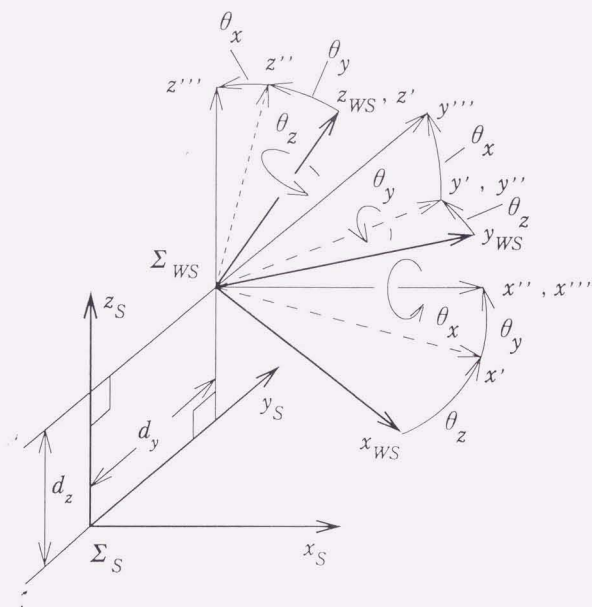


図3・4 座標系 Σ_S における作業座標系 Σ_{WS} の位置

穴の周辺をシールする場合、 Σ_w の原点をシール対象の継目ライン上の作業点に置き、 x_w 軸をシール方向に、 z_w 軸をシール対象の接平面の法線上に設定する。

以上からわかるように、シール対象の継目ライン上に無数の作業座標系 Σ_w が存在する。図3・4のように原点が座標系 Σ_s の y_s-z_s 平面上にある作業座標系 Σ_w を Σ_{ws} と呼ぶ。座標系 Σ_s における Σ_{ws} の原点位置を $(0, d_y, d_z)$ 、ロール角、ピッチ角、ヨー角をそれぞれ $\theta_z, \theta_y, \theta_x$ とし

$$\mathbf{f} = [0, d_y, d_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]^T \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

とおけば、本章で提案する3次元視覚センサを用いて \mathbf{f} を検出することができる。

座標系 Σ_{ws} から視覚センサ座標系 Σ_s への変換行列 ${}^s T_w$ は

$${}^s T_w = \begin{bmatrix} {}^s R_w & {}^s P_w \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

で表される。ただし、

$${}^s P_w = [0, d_y, d_z]^T \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$${}^s R_w = \text{Rot}(x_s, \theta_x) \text{Rot}(y_s, \theta_y) \text{Rot}(z_s, \theta_z) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

である。

シーリングロボットに対してシール対象が基準位置と基準姿勢にあるとき、座標系 Σ_s と Σ_{ws} は一致する。すなわち、 $d_y, d_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ はすべて0である。

本論文では、スリット光源がシール対象の上に投射したスリット光をスリットラインと呼び、スリット光源1, 2より発生したスリットラインをそれぞれスリットライン1, 2と呼ぶ。

3.3.3 シール対象の位置と姿勢の算出法

本論文では図3・5に示す2枚の薄板を重ね合わせたパターンを取り上げる。図3・6は座標系 Σ_{ws} が基準の位置と姿勢からずれたときの光切断画像である。画面上の座標系の原点を画面の中心に設定し、 x 軸をシール方向にとる。シール対象の継目と二つの光切断光との交点 P_1, P_2 は、画像上ではそれぞれスリットライン1, 2の段差位置 $P_{#1}, P_{#2}$ に対応する。点 $P_{#1}, P_{#2}$ の座標をそれぞれ $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ とし、画面上のスリットライン1, 2と x 軸とのなす角をそれぞれ α_1, α_2 とする。シール対象が基準位置と基準姿勢にあるとき、次式の関係がある。

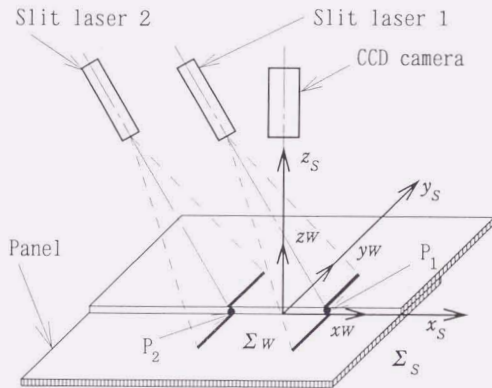


図3・5 重ね合わせパターンのシール対象の基準位置と姿勢

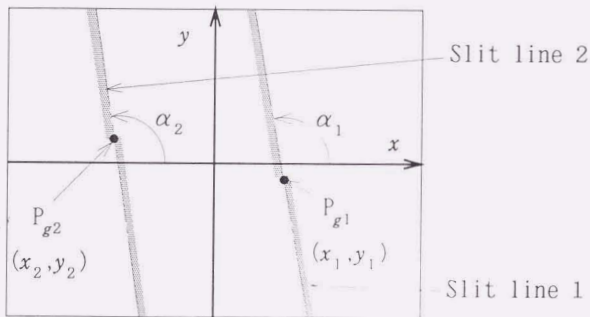


図3・6 基準位置と姿勢からずれたときの光切断画像

$$\left. \begin{aligned} x_1 = -x_2 &= \frac{1}{2\zeta} l_{CD} \\ y_1 = y_2 &= 0, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.8)$$

シール対象が位置ずれを生じるとき、 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) からスリット光と継目ラインの交点 P_1, P_2 の(座標系 Σ_s に対する)座標を求めることができる。図3.7はスリットライン1についての概念図である。図3.8で示すように継目ラインとスリット平面1との交点 P_1 の(座標系 Σ_s における)座標を (x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}) とし、ベクトル ${}^s p_1$ を

$${}^s p_1 = [x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}]^T \dots\dots\dots (3.9)$$

で定義する。 P_1 がスリット平面1上にあるため、式(3.14)から、

$$z_{s1} = (0.5l_{CD} - x_{s1}) \cot \phi \dots\dots\dots (3.10)$$

が得られる。 $hz \gg z_{s1}$ のとき、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} x_{s1} &= \zeta x_1, \quad y_{s1} = \zeta y_1 \\ z_{s1} &= (0.5l_{CD} - \zeta x_1) \cot \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.11)$$

スリット光源2の場合、継目ラインとスリット平面2の交点 P_2 の位置座標を (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}) とし、ベクトル ${}^s p_2$ を

$${}^s p_2 = [x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}]^T \dots\dots\dots (3.12)$$

で定義する。 (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}) は

$$\left. \begin{aligned} x_{s2} &= \zeta x_2, \quad y_{s2} = \zeta y_2 \\ z_{s2} &= (-0.5l_{CD} - \zeta x_2) \cot \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.13)$$

より求められる。また、ベクトル ${}^s p_{21}$ を

$${}^s p_{21} = {}^s p_1 - {}^s p_2 \dots\dots\dots (3.14)$$

と定義する。 ${}^s p_{21}$ は継目ライン上にあるため継目ラインの方向は ${}^s p_{21}$ より求めることができる(図3.8を参照)。

ベクトルの内積の定義より

$$\left. \begin{aligned} {}^s p_{21} \cdot i &= |{}^s p_{21}| \cos \omega_x = x_{s1} - x_{s2} \\ {}^s p_{21} \cdot j &= |{}^s p_{21}| \cos \omega_y = y_{s1} - y_{s2} \\ {}^s p_{21} \cdot k &= |{}^s p_{21}| \cos \omega_z = z_{s1} - z_{s2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.15)$$

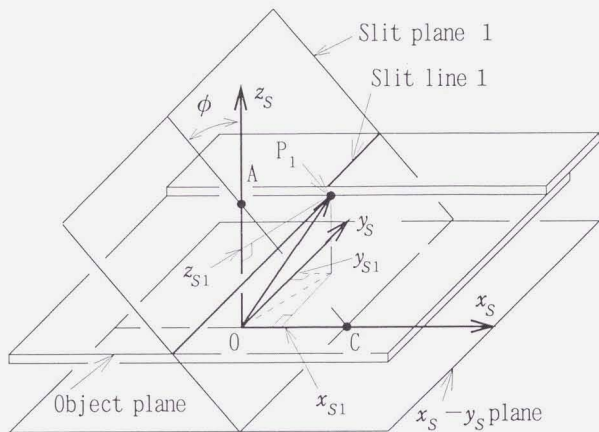


図3・7 シール対象が位置ずれを生じた場合

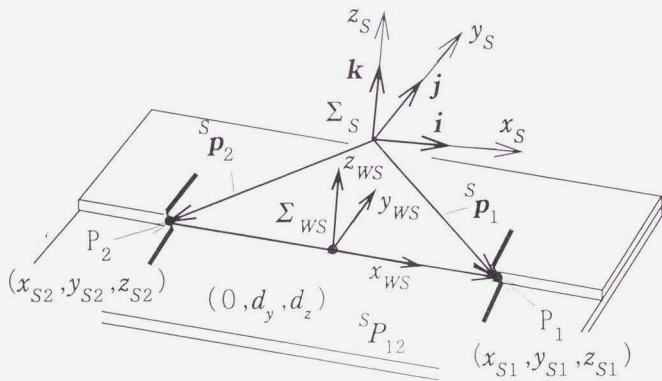


図3・8 シール対象の継目ラインの方向ベクトル

が成立する。ただし、 i, j, k は座標系 Σ_s の基本ベクトルであり、 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ はそれぞれベクトル ${}^s p_{21}$ と x_s, y_s, z_s 軸とのなす角である。 $|{}^s p_{21}|$ は ${}^s p_{21}$ の絶対値(長さ)であり、

$$|{}^s p_{21}| = [(x_{s1} - x_{s2})^2 + (y_{s1} - y_{s2})^2 + (z_{s1} - z_{s2})^2]^{1/2} \quad (3.16)$$

で与えられる。式(3.15)から、次式が得られる。

$$\omega_x = \cos^{-1} \frac{x_{s1} - x_{s2}}{|{}^s p_{21}|} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\omega_y = \cos^{-1} \frac{y_{s1} - y_{s2}}{|{}^s p_{21}|} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\omega_z = \cos^{-1} \frac{z_{s1} - z_{s2}}{|{}^s p_{21}|} \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

式(3.16)~(3.19)に式(3.11), (3.13)を代入することにより、 $|{}^s p_{21}|, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ は $x_1, x_2, y_1, y_2, l_{CD}, \zeta$ を用いて表される。

シール対象が基準位置にあるとき、

$$\omega_x = 0, \quad \omega_y = \omega_z = \pi/2$$

の関係がある。 θ_y, θ_z は微小であるため、

$$\theta_y = \frac{\pi}{2} - \omega_z, \quad \theta_z = \frac{\pi}{2} - \omega_y \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

で近似することができる。式(3.19), (3.18)を式(3.20)に代入すると

$$\theta_y = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{y_{s1} - y_{s2}}{|{}^s p_{21}|} \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

$$\theta_z = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{z_{s1} - z_{s2}}{|{}^s p_{21}|} \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

$\omega_x = 0$ のとき、 x_s 軸回りのシール対象の回転角 θ_x を、 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ の値から算出できないため、以下の方法で θ_x を求める。

シール対象が x_s 軸回りに角度 θ_x だけ回転したとき、スリットライン1は図3.9で表される(ただし、シール対象は平面とする)。図3.9における幾何学的関係から、次式が得られる。

$$\theta_x = -\tan^{-1}(\cot \phi \cdot \cot \gamma_1) \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

カメラが $x_s - y_s$ 平面に垂直であるため、

$$\gamma_1 = \alpha_1$$

である。すなわち、 θ_x は式(3.23)から

$$\theta_x = -\tan^{-1}(\cot \phi \cdot \cot \alpha_1) \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

になる。同様に、スリットライン2についても

$$\theta_x = -\tan^{-1}(\cot \phi \cdot \cot \alpha_2) \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

が成立する。式(3.24)、(3.25)から $\alpha_1 = \alpha_2$ となるが、シール対象が変形した場合を考慮し、精度を高めるため本論文では α_1 と α_2 の平均値 $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2) / 2$ を用い、 θ_x の値を算出する。すなわち、

$$\theta_x = -\tan^{-1}(\cot \phi \cdot \cot \alpha) \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

である。

$d_x, d_y, d_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ はすべて微小であるので、シール対象に設けた作業座標系 Σ_w の原点位置は点 P_1, P_2 の中点にあると近似できるため、 d_y, d_z は

$$d_y = \frac{1}{2}(y_{s1} + y_{s2}), \quad d_z = \frac{1}{2}(z_{s1} + z_{s2}) \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

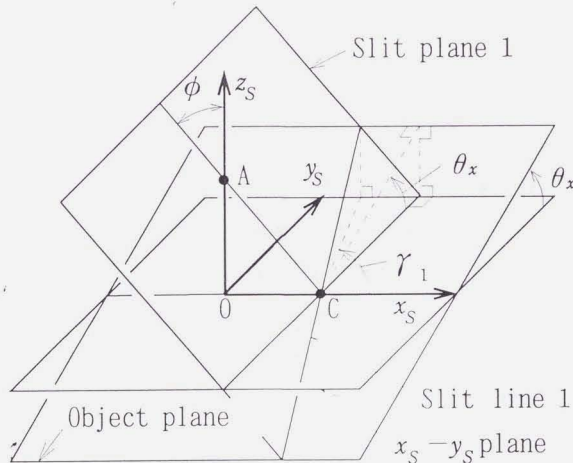


図3.9 シール対象が基準姿勢からx軸に回転した場合

より求められる。式(3・11)，(3・13)を式(3・27)に代入すると

$$d_y = -\frac{\xi}{2}(y_1 + y_2), \quad d_z = -\frac{\xi}{2}(x_1 + x_2) \cot \phi \quad \dots\dots\dots (3\cdot28)$$

で表すことができる。

3・4 3次元視覚センサより取り込んだ光切断画像の処理

3・3章からわかるようにシール対象の位置と姿勢は，光切断画像上のスリットラインの段差の位置 (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) ，およびスリットラインの傾斜角 α_1, α_2 から算出できる。本章では，これらを求めるための光切断画像処理法を提案する。

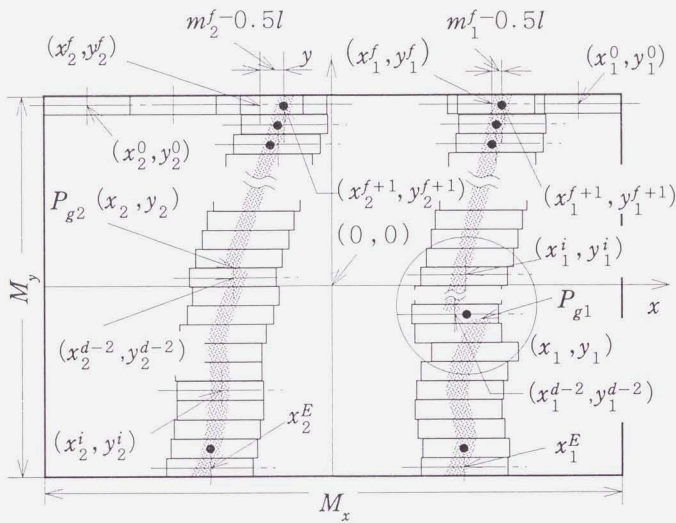
3・4・1 探索窓

実際のシール対象となる鋼板にはスポット溶接などの工程による変形があるため，画面上のスリットラインは直線でない場合がある。また，鋼板の継目の変形や，位置と姿勢のずれなどの影響で，画面上のスリットラインの継目に対応する部分は1点ではなく，一定範囲の中の不規則な変形として表される。本論文ではシール対象の継目が原因で画面上のスリットラインに生じた段差や曲折などを含めた不規則な部分を段差部と呼ぶ。

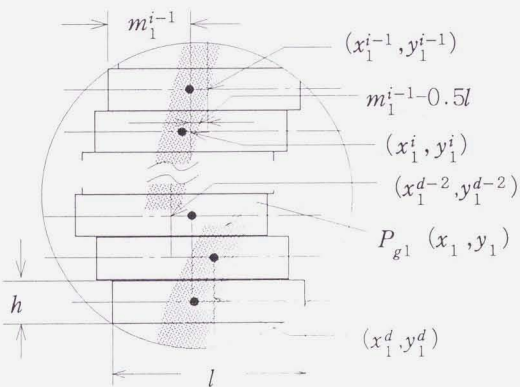
本論文では，探索窓を用いてスリットラインの段差位置を求める。図3・10(a)は探索窓法の原理図，同図(b)は拡大図である。

スリットラインは2本あるため，図3・10(a)のように探索窓は2系列になり，スリットラインを1本ずつ追従し探索する。探索窓のサイズを $l \times h$ とする。系列1の i 番めの探索窓の中心座標を (x_1^i, y_1^i) とし，系列2の i 番めの探索窓の中心座標を (x_2^i, y_2^i) とする。系列1,2の探索窓の中のスリットライン画像の重心(図3・10(a),(b)の・印)と探索窓の左端との距離をそれぞれ m_1^i, m_2^i とする(ただし， $i = 0, 1, 2, \dots, E$)。以下，探索窓の中心座標を探索窓の座標と呼ぶ。系列1, 2の最初の探索窓をそれぞれ画面の右上端と左上端に置く。すなわち，

$$\left. \begin{aligned} x_1^0 &= 0.5(M_x - l), & y_1^0 &= 0.5(M_y - h) \\ x_2^0 &= 0.5(l - M_x), & y_2^0 &= 0.5(M_y - h) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3\cdot29)$$



(a) 探索窓による段差位置の検出



(b) 探索窓の拡大図

図3・10 探索窓を用いた段差位置検出法

探索窓の中にスリットラインが存在するかを調べ、もし存在しなかったら、系列1では次の探索窓を左側（系列2では右側）に置き、もう1回調べる。このようにスリットライン1（または2）が探索窓に入るまで f 回繰り返し探索する。すなわち、

$$x_i^f = x_{i-1}^f - l, \quad y_i^f = y_{i-1}^f \quad (i = 1, 2, \dots, f) \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

$f+1$ 番めの探索窓の座標は次式から求められる。

$$x_{f+1}^f = x_f^f + m_f^f - 0.5l, \quad y_{f+1}^f = y_f^f \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

$f+1$ 番め以降の系列1の探索窓の座標 (x_i^f, y_i^f) は

$$x_i^f = x_{i-1}^f + m_{i-1}^f - 0.5l, \quad y_i^f = y_{i-1}^f - h \quad (i = f+2, f+3, \dots, E) \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

で与えられる。図3・10(a)では、系列1、2ではそれぞれ $f=1, 2$ の場合を示している。以上のように系列1の探索窓はスリットライン1に沿って画面の最下端まで追従し、最終の探索窓を E 番めとする。

系列2の探索窓は、系列1と同じ方法でスリットライン2に沿って設定する。

3.4.2 シール対象の回転と変形が及ぼす影響の除去

スリットラインの段差位置 P_{R1} 、 P_{R2} で x 軸方向の重心位置が急激に変化すが、シール対象の回転や変形によって光切断画像上のスリットライン上に傾斜や湾曲が生じるため、重心座標の変化の大きさから段差の位置を検出できない場合がある（図3・10(a)のスリットライン2を参照）。このため、傾斜や湾曲の影響を除いて重心位置の変化量を求める必要がある。式(3.32)からわかるように、 i 番めの探索窓の重心位置の変化量 $m_i^f - 0.5l$ は $x_{i+1}^f - x_i^f$ に等しい。

本論文では、画面上のスリットラインの x 軸方向の重心位置の変化は、(a)シール対象の継目によるもの、および(b)シール対象の回転と変形によるものに限定する。上記(a)が p 個の探索窓の中にのみ存在するとき、連続する $2p$ 個の探索窓の重心位置の変化量のうち、大きい p 個の変化量から残りの p 個の変化量を引くことにより(b)を除去でき、上記(a)の絶対値を求めることができる。

実際にはスリットラインの段差部が二つ探索窓の中に入るよう h の値を設定する（すなわち、 $p=2$ ）。以下、 $p=2$ の場合についてシール対象の回転と変形の影響を除去する方法を説明する。

スリットライン1と2の段差位置と傾斜角の検出方法は同じであるため、以下、スリットライン1について説明する。

スリットライン上の段差部は $q-1$ 番めと q 番めの探索窓の両方または片方の中に含まれるものとする。

系列1の $i-3, i-2, i-1, i$ 番め探索窓の重心位置の変化量 $m_{i-3}-0.5l, m_{i-2}-0.5l, m_{i-1}-0.5l, m_i-0.5l$ を大きい順に並べたものを ${}^1r_i, {}^2r_i, {}^3r_i, {}^4r_i$ とおく。すなわち、 ${}^1r_i > {}^2r_i > {}^3r_i > {}^4r_i$ であり、

$$\sum_{n=1}^4 {}^n r_i = \sum_{n=i-3}^i (m_n - 0.5l) \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

である。 D_i は、傾斜と湾曲の影響を除去し継目のみによる段差部の重心位置の変化量の絶対値であり、これは次式から求められる。

$$D_i = ({}^1r_i + {}^2r_i) - ({}^3r_i + {}^4r_i) \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

以下、 D_i は傾斜と滑らかな湾曲に影響されないことを証明する。

スリットライン1上の i 番めの探索窓の中のスリットラインはシール対象の継目のみによる重心位置の変化量を $\Delta \varepsilon_i$ とし、シール対象の回転と変形による重心位置の変化量を $\Delta \delta_i$ とすれば、

$$m_i - 0.5l = \Delta \varepsilon_i + \Delta \delta_i \quad (i=0, 1, \dots, E) \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

の関係がある。探索窓中のスリットラインが傾斜と湾曲をもたない場合、 $\Delta \delta_i = 0$ であり、探索窓がスリットラインの段差部以外の部分にあるとき、 $\Delta \varepsilon_i = 0$ である。

スリットラインの湾曲が滑らかである場合、 h は小さい値であるため、4個つながっている各探索窓の中の $\Delta \delta_i$ ($j=i-3, i-2, i-1, i$) の値は同じとする。すなわち、

$$\Delta \delta_{i-3} = \Delta \delta_{i-2} = \Delta \delta_{i-1} = \Delta \delta_i \quad (i=4, 5, \dots, E) \quad \dots\dots\dots (3.36)$$

とする。

段差部が $i-3, i-2, i-1, i$ 番めの探索窓の中に存在しないとき

$${}^1r_i = {}^2r_i = {}^3r_i = {}^4r_i = \Delta \delta_i$$

であるため、式(3.34)より $D_i = 0$ となる。

段差部が $i-3, i-2, i-1, i$ 番めの探索窓の中に存在する場合、スリットラインは (1) $\Delta \varepsilon_i > 0$ と (2) $\Delta \varepsilon_i < 0$ の2パターンに分類することができる ($j=q-1, q$)。式(3.35)、(3.36)を式(3.33)に代入すると

$$\sum_{n=1}^4 n r_i = 4\Delta\delta i + \Delta\varepsilon^{q-1} + \Delta\varepsilon^q \quad \dots\dots\dots(3\cdot37)$$

が得られる。

(1) $\Delta\varepsilon i > 0$ ($j = q-1, q$)の場合, 式(3・37)は次のように分離することができる。

$${}^1r_i + {}^2r_i = 2\Delta\delta i + \Delta\varepsilon^{q-1} + \Delta\varepsilon^q \quad \dots\dots\dots(3\cdot38)$$

$${}^3r_i + {}^4r_i = 2\Delta\delta i \quad \dots\dots\dots(3\cdot39)$$

式(3・38), (3・39)を式(3・34)に代入すれば

$$D_i^j = \Delta\varepsilon^{q-1} + \Delta\varepsilon^q \quad \dots\dots\dots(3\cdot40)$$

が得られる。

(2) $\Delta\varepsilon i < 0$ ($j = q-1, q$)の場合, 式(3・37)は次のように分離することができる。

$${}^1r_i + {}^2r_i = 2\Delta\delta i \quad \dots\dots\dots(3\cdot41)$$

$${}^3r_i + {}^4r_i = 2\Delta\delta i + \Delta\varepsilon^{q-1} + \Delta\varepsilon^q \quad \dots\dots\dots(3\cdot42)$$

式(3・41), (3・42)を式(3・34)に代入すると

$$D_i^j = -\Delta\varepsilon^{q-1} - \Delta\varepsilon^q \quad \dots\dots\dots(3\cdot43)$$

が得られる。

式(3・40), (3・43)からわかるように, D_i^j はスリットラインの傾斜と湾曲による重心位置の変化量 $\Delta\delta i$ に影響されないことが証明された。

3・4・3 スリットラインの段差位置と傾斜角の算出

式(3・34)を用いて, D_i^j ($i=4, 5, \dots, E$)の値を計算する。 $i=d$ のとき D_i^j が最大値をとるとすれば, スリットライン1の段差の位置座標(x_1, y_1)は近似的に次式で与えられる。

$$x_{1d} = x^{q-2}, \quad y_1 = y^{q-2} \quad \dots\dots\dots(3\cdot44)$$

画面上のスリットライン1の傾斜角 α_1 は(図3・6を参照)

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{M_y - 2h}{x^{q+1} - x^q} \quad \dots\dots\dots(3\cdot45)$$

から求められる。

3・5 視覚センサの計測誤差

継目位置を与える式の中で、画面上の継目位置座標 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ が誤差の要因である。以下では x_1, y_1, x_2, y_2 による誤差を検討する。 x_1, y_1, x_2, y_2 の計測値の標準偏差をそれぞれ、 $\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{y_2}$ とし、これらによって計測値である継目位置 d_y, d_z のそれぞれの標準偏差 $\sigma_{d_y}, \sigma_{d_z}$ が生じたとする。式(3・28)に誤差の伝播法則⁽⁴⁶⁾を適用して、

$$\begin{aligned} \sigma_{d_y} &= \left[\left(\frac{\partial d_y}{\partial y_1} \sigma_{y_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_y}{\partial y_2} \sigma_{y_2} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{\xi}{2} \frac{\partial (y_1 + y_2)}{\partial y_1} \sigma_{y_1} \right)^2 + \left(-\frac{\xi}{2} \frac{\partial (y_1 + y_2)}{\partial y_2} \sigma_{y_2} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \frac{\xi}{2} (\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3\cdot46) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{d_z} &= \left[\left(\frac{\partial d_z}{\partial x_1} \sigma_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_z}{\partial x_2} \sigma_{x_2} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{\xi \cot \phi}{2} \frac{\partial (x_1 + x_2)}{\partial x_1} \sigma_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\xi \cot \phi}{2} \frac{\partial (x_1 + x_2)}{\partial x_2} \sigma_{x_2} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \frac{\xi \cot \phi}{2} (\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3\cdot47) \end{aligned}$$

が得られる。シール対象の姿勢の計測誤差も同じ方法で求めることができるが、数式が大変煩雑のため、ここでは省略する。

3・4・2節での画像処理法では、継目部が二つ探索窓の中に存在することを前提にしたため、 y_1, y_2 の最大誤差は h 画素である。 x_1, x_2 の最大誤差はスリットラインの段差によって決まるが、ここでは探索窓の幅 l の $1/4$ とする。本論文の実験では $h=4$ 画素、 $l=50$ 画素、 $\xi=1/8$ 、 $\phi=\pi/4$ (3・6節参照) であるため、

$$\sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \frac{1}{3} h = \frac{4}{3}$$

$$\sigma_{y_1} = \sigma_{y_2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} l = \frac{25}{6}$$

が得られ、 $\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{y_2}$ の値を式(3・46)、(3・47)に代入すると

$$\sigma_{d_y} = 0.368 \text{ mm}, \quad \sigma_{d_z} = 0.118 \text{ mm}$$

が得られる。すなわち、継目位置の計測値の最大偏差 $3\sigma_{d_y}, 3\sigma_{d_z}$ (99.7%の確率) は

$$3\sigma_{dy}=1.10 \text{ mm}$$

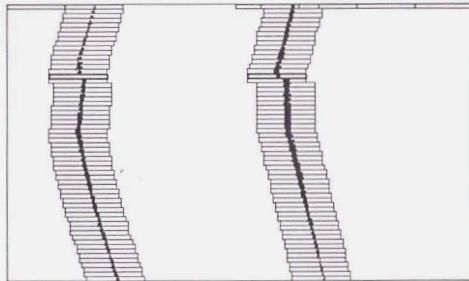
$$3\sigma_{dz}=0.354 \text{ mm}$$

になる。自動車工場で塗布するシール剤の幅は10 mm前後が多いため、ここでは、ノズルの走行制御の許容精度を5 mm とする。以上でわかるように、本論文で提案した視覚センサの精度を十分に許容精度以内におさえることができる。

3・6 実験結果

実験では、板厚0.6mmのシール対象を用いる。カメラの撮像領域を50 mm×30 mm、画面の画素数を400×240画素とし、 $\phi=45^\circ$ 、 $h=4$ 画素、 $l=50$ 画素とする。

画像処理結果の一例を図3・11に示す。本論文で提案した画像処理法は大きな変形をもつシール対象に対しても正確にスリットラインの段差位置と傾斜角を検出できることが図3・11からわかる。



$$x_1=212, \quad y_1=68, \quad \alpha_1=95^\circ$$

$$x_2=42, \quad y_2=64, \quad \alpha_2=93^\circ$$

図3・11 変形のあるシール対象の画像処理例

3・7 要約

本章では、視覚センサ付きシーリングロボットのための3次元視覚センサとその画像処理法を提案し、実験によってその有効性を確かめた。本実験の結果、提案手法について以下のことがわかった。

(1) 提案した光切断画像処理法は、大きな変形をもつシール対象に対しても適用でき、継目位置を高速(30 ms)に認識をすることができる。それは本処理法が光切断画像の傾斜や湾曲の影響を除去できる探索窓を用いているためである。

(2) 提案した3次元視覚センサによるシール対象の位置・姿勢検出法では、シール対象の並進と回転が微小であるという条件のもとで演算を簡略化した。本手法は、画像処理の結果からシール対象の実際の継目位置と姿勢を高速(2 ms)に算出することができた。これらのことから、本視覚センサはシーリングロボットの作業目標軌道自動生成や実時間の視覚フィードバック制御に適用することができる。

第4章

3次元視覚センサを用いた シーリングロボットの 目標軌道自動生成法

4・1 概説

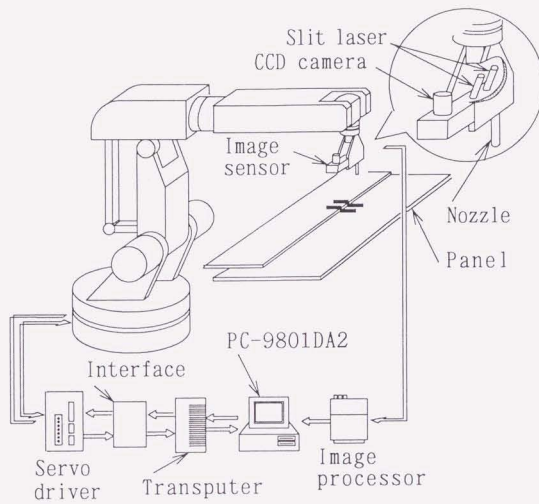
視覚フィードバックによるロボットの自律走行や作業軌道の自動生成などについて数多くの研究がある^{(28)~(43)}。これらのほとんどの研究では、画像処理の周期が長い場合、センサから得られた環境や対象物の情報はロボットの目標軌道の生成にのみ用いられ、ロボットの制御システムの中には取り入れられていない。しかし、もしロボットの移動速度に対し、視覚センサの画像処理周期が十分短かければ、各サンプリング時点で視覚センサが検出した位置・姿勢の偏差値を単純なホールド（零次ホールド、一次ホールド）に通すことによって直接にロボット制御則に取り入れることができる。このような観点から本章では、制御系のサンプリング周期を視覚センサの周期に等しく選び、ロボットの目標軌道自動生成するための制御系を構築した。

本手法を用いることにより、(1)継目ラインの曲率や、要求される継目ラインの検出精度などに応じて、画像を取り込むサンプル点の間の距離を前もって設定でき、かつ(2)走行しながら目標軌道を生成することができる。このため、本手法は高速に許容精度内の目標軌道を自動生成することができる。ついで、実験を行い本手法の有効性を確かめた。

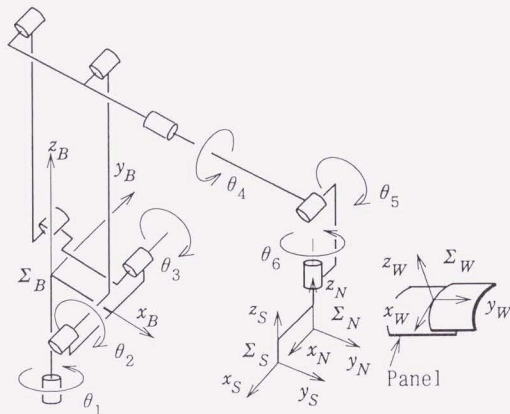
本手法では、まず操作盤で操作を行い、ロボットの視覚センサ座標系 Σ_s をシール対象のシール作業終点の作業座標系と一致させ、そのときの関節角 θ_r を記憶する。ついで、 Σ_s をシール作業の開始位置の作業座標系 Σ_w と一致させたのち、3次元視覚センサを用いて座標系 Σ_{ws} の位置と姿勢を検出しながら Σ_s を Σ_{ws} と一致するように継目ラインに沿って走行させる。ロボットの関節角 θ が θ_r に十分近くなったとき教示を終了する。シール作業の目標軌道（すなわち、 θ_{wn} の軌道）は、検出された Σ_{ws} の位置・姿勢から逆運動学関数 $\mathbf{A}^{-1}(\cdot)$ を用いて求められる。

4・2 視覚センサ付きシーリングロボットの構成とその座標系

図4・1(a)は視覚センサ付きシーリングロボットの構成であり、平行リンク機



(a) シーリングロボットの構成



(b) 運動学モデル

図4・1 視覚センサ付きシーリングロボット

構をもつ6自由度ロボットの手先にノズルと3章で提案した視覚センサが取り付けられている。図4・1(b)はその運動学モデルである。シーリングロボットの運動を記述するため三つの座標系 $\Sigma_B, \Sigma_N, \Sigma_S$ を設定する。ベース座標系 Σ_B は、ロボットベース上の関節軸の上に原点をもち、空間に固定された静止座標系とする。ノズル先端座標系 Σ_N は、ノズルの中心軸と基準位置にあるシール対象との交点を原点とする動座標系である。視覚センサ座標系 Σ_S は視覚センサ上に設定された動座標系である(3章を参照)。

座標系 Σ_B に対する座標系 Σ_N の位置を ${}^B p_N$ 、姿勢を ${}^B R_N$ とし、座標系 Σ_S の位置を ${}^B p_S$ 、姿勢を ${}^B R_S$ とする。座標系 Σ_N からベース座標系 Σ_B への変換行列を ${}^B T_N$ とし、座標系 Σ_S から Σ_B への変換行列を ${}^B T_S$ とすると、

$${}^B T_N = \begin{bmatrix} {}^B R_N & {}^B p_N \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^B T_S = \begin{bmatrix} {}^B R_S & {}^B p_S \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

の関係がある。

ロボットの関節角を θ 、 θ から ${}^B T_N$ への運動学関数を $\Lambda_N(\theta)$ とし、 θ から ${}^B T_S$ への運動学関数を $\Lambda_S(\theta)$ とすると

$${}^B T_N = \Lambda_N(\theta), \quad {}^B T_S = \Lambda_S(\theta) \dots\dots\dots (4.1)$$

である。ただし、

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T \dots\dots\dots (4.2)$$

図4・1(b)は $\theta=0$ のときの姿勢を表すものとする。座標系 Σ_N, Σ_S における位置と姿勢が与えられたとき、逆運動学関数をそれぞれ $\Lambda_N^{-1}, \Lambda_S^{-1}$ とすれば、

$$\theta = \Lambda_N^{-1}({}^B T_N) \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\theta = \Lambda_S^{-1}({}^B T_S) \dots\dots\dots (4.4)$$

の関係がある。

4・3 ロボットの教示システム

シール作業の目標軌道を生成するために、ロボットの手先に取り付けた視覚セン

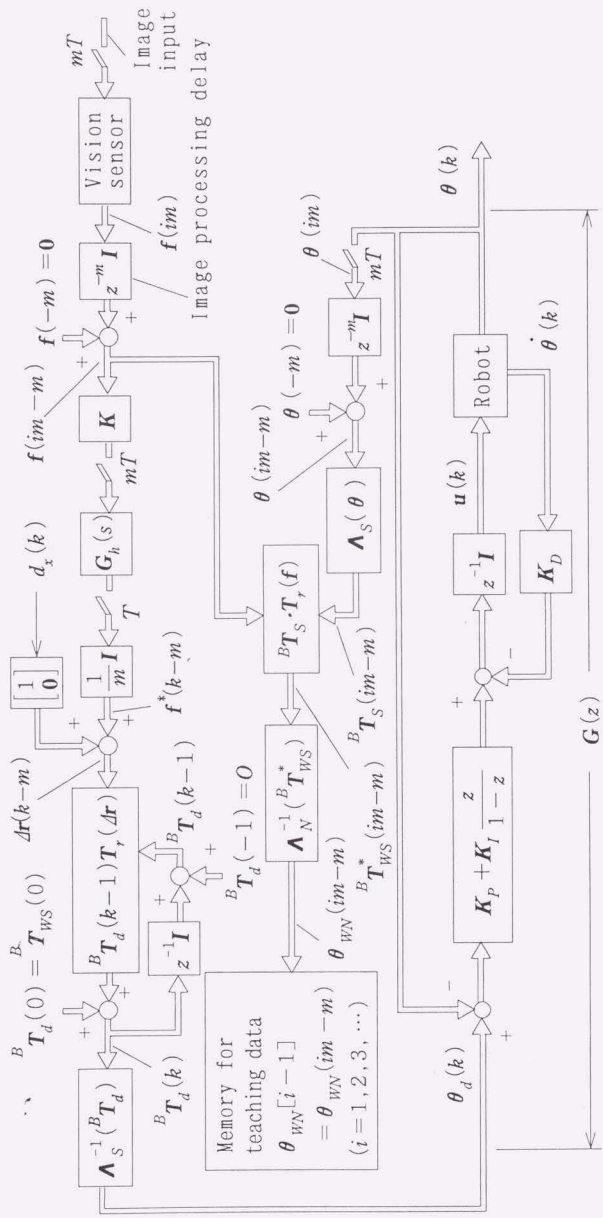


図 4・2 目標軌道を自動生成するための教示システム ($k=0, 1, 2, \dots; i=0, 1, 2, \dots$)

サをシール対象の継目ラインに沿って走行させる必要がある。このシール作業の目標軌道を自動生成するための教示制御システム(以後、教示システムと呼ぶ)を図4・2に示す。座標系 Σ_s が Σ_{ws} と一致するときのロボット関節角 θ_{ws} を教示システムの目標関節角と呼び、 θ_{ws} の軌跡を教示システムの目標軌道と呼ぶ。

ロボットを駆動する制御系 $G(z)$ のサンプリング周期を T とし、視覚センサによって画像を取り込む周期を mT とする。ただし、 m は正の整数とする。ロボットを駆動する制御系のサンプリング時点 $t=kT$ ($k=0, 1, 2, \dots$)とし、視覚センサのサンプリング時点 $t=i m T$ ($i=0, 1, 2, \dots$)とする。ただし、 $k=0$ のとき $i=0$ とする。

Σ_s から見た Σ_{ws} の位置・姿勢 ${}^s T_{ws}$ は

$${}^s T_{ws} = T_r(\mathbf{f}) \dots\dots\dots (4.5)$$

で表される。ただし、 $T_r(\quad)$ は並進回転変換行列であり、 $\mathbf{h} = [d_1, d_2, d_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ とおけば、

$$T_r(\mathbf{h}) = \text{Trans}(d_1, d_2, d_3) \cdot \text{Rot}(z_s, \theta_3) \cdot \text{Rot}(y_s, \theta_2) \cdot \text{Rot}(x_s, \theta_1) \dots\dots\dots (4.6)$$

で与えられる。 $\text{Trans}(d_1, d_2, d_3)$ はベクトル $d_1 \mathbf{i} + d_2 \mathbf{j} + d_3 \mathbf{k}$ だけ並進させる変換行列であり、 $\text{Rot}(x_s, \theta_1)$, $\text{Rot}(y_s, \theta_2)$, $\text{Rot}(z_s, \theta_3)$ はそれぞれ、 x_s, y_s, z_s 軸回りに角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ だけ回転させる変換行列である⁽¹⁹⁾。

\mathbf{h} が微小の場合、式(4.6)は

$$T_r(\mathbf{h}) = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_3 & \theta_2 & d_1 \\ \theta_3 & 1 & -\theta_1 & d_2 \\ -\theta_2 & \theta_1 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.7)$$

で近似できる⁽⁵⁾。本論文では、 \mathbf{f} を微小とし、式(4.7)を用いる。

$k=0$ のときロボットの初期位置・姿勢 ${}^B T_s$ がシール作業開始位置の作業座標系の位置姿勢 ${}^B T_{ws}$ と一致する。図4・2で示すロボットを駆動する制御系 $G(z)$ の Σ_B から見た目標位置・姿勢 ${}^B T_d(k)$ は

$${}^B T_d(k) = \begin{cases} {}^B T_s(0) = {}^B T_{ws}(0) & (k=0) \\ {}^B T_d(k-1) \cdot T_r(\Delta \mathbf{r}(k-m)) & (k=1, 2, 3, \dots) \end{cases} \dots\dots\dots (4.8)$$

で表される。ただし、

$$d\mathbf{r}(k-m) = [d_x(k), \mathbf{0}^T]^T + \mathbf{f}^*(k-m) \dots\dots\dots (4.9)$$

$$\mathbf{f}^*(k-m) = \frac{1}{m} \mathbf{K} \cdot \mathbf{f}(im-m) \dots\dots\dots (4.10)$$

である。

$d_x(k)$ は、サンプリング時点 kT から $(k+1)T$ までの間、座標系 Σ_s の原点がシール方向に走行する距離である。サンプリング時点 kT から $(k+1)T$ までの間の走行速度の平均値を $v(k)$ とおけば、この距離 $d_x(k)$ は

$$d_x(k) = v(k)T \quad (k=0, 1, 2, \dots) \dots\dots\dots (4.11)$$

で表される。

画像処理のサンプリング時点 imT から $(i+1)mT$ までの間に座標系 Σ_s の原点が走行した距離 $l(i)$ は

$$l(i) = \sum_{k=im}^{(i+1)m-1} d_x(k) \dots\dots\dots (4.12)$$

で表される。本論文では継目ラインの曲率や生成する作業目標軌道の許容精度などを考慮して $l(i)$ の最大値 l_{max} を指定し、 $l(i)$ が l_{max} を越えないように $v(k)$ を設定する。

$G_n(s)$ は零次ホールドのパルス伝達関数行列であり、

$$\mathbf{G}_n(s) = \frac{1 - e^{-mTs}}{s} \mathbf{I} \dots\dots\dots (4.13)$$

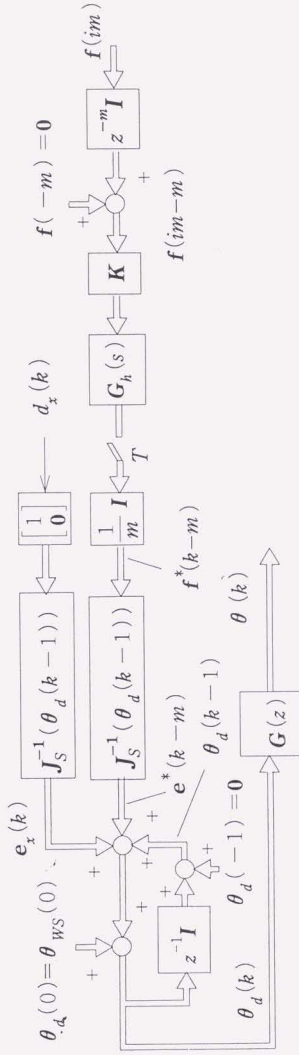
で表される。ただし、 \mathbf{I} は単位行列である。また、図4・2の中の \mathbf{O} は零行列である。

視覚フィードバック系の制御パラメータ \mathbf{K} を

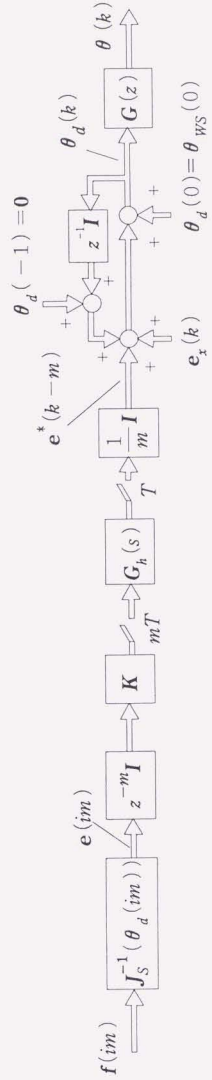
$$\mathbf{K} = \text{diag}[K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4 \ K_5 \ K_6]$$

とする。 \mathbf{K} の値を決定するため、図4・2のブロック線図を以下のように簡略化する。

逆運動学関数 $\Delta^{-1}(\cdot)$ を用いると、式(4.8)から、



(a) 図 4・2 の等価変換



(b) (a) の近似等価変換

図 4・3 図 4・2 の等価ブロック線図

$$\theta_d(k) = \begin{cases} \mathbf{A}_s^{-1} ({}^B \mathbf{T}_{ws}(0)) = \theta_{ws}(0) & (k=0) \\ \mathbf{A}_s^{-1} ({}^B \mathbf{T}_d(k-1) \cdot \mathbf{T}_r(\Delta r(k-m))) & (k=1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

が得られる。いま

$$\Delta \theta_d(k) = \theta_d(k) - \theta_d(k-1) \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

とおけば、 Δr の各要素が微小であるため、

$$\Delta \theta_d(k) = \mathbf{J}_s^{-1} (\theta_d(k-1)) \cdot \Delta r(k-m) \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

が成立する。 $\mathbf{J}_s^{-1}()$ は逆ヤコビ行列であり、式(4.9)を式(4.16)に代入すると

$$\Delta \theta_d(k) = \mathbf{e}_x(k) + \mathbf{e}^*(k-m) \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

が得られる。ただし、

$$\mathbf{e}_x(k) = \mathbf{J}_s^{-1} (\theta_d(k-1)) \cdot [d_x(k), \mathbf{0}^T]^T \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

$$\mathbf{e}^*(k-m) = \mathbf{J}_s^{-1} (\theta_d(k-1)) \cdot \mathbf{f}^*(k-m) \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

$\mathbf{e}_x(k)$ は、座標系 $\Sigma_s(k)$ の原点が x_s 軸方向に d_x だけ

移動したときロボットの各関節が回転する角度である。式(4.17)を式(4.15)に代入すると

$$\theta_d(k) = \theta_d(k-1) + \mathbf{e}_x(k) + \mathbf{e}^*(k-m) \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

が得られる。このため、図4・2は図4・3(a)のように等価変換することができる。

mT が十分小さいため

$$\mathbf{J}_s^{-1} (\theta_d(k-1)) \doteq \mathbf{J}_s^{-1} (\theta_d(im)) \quad (im \leq k < (i+1)m) \quad \dots\dots (4.21)$$

が近似的に成り立ち、また、 $\mathbf{G}_h(s)$ と \mathbf{K} は対角行列であるため、図4・3(a)は図4・3(b)のブロック線図で近似することができる。 $\mathbf{e}(im)$ は

$$\mathbf{e}(im) = \mathbf{J}_s^{-1} (\theta_d(im)) \cdot \mathbf{f}(im)$$

で表される。この $\mathbf{e}(im)$ は、視覚センサより検出した $k=im$ における座標系 $\Sigma_s(im)$ の位置・姿勢と作業座標系 $\Sigma_{ws}(im)$ の位置・姿勢との偏差をロボットの関節角に変換したものである。すなわち、

$$\mathbf{e}(im) = \theta_{ws}(im) - \theta(im)$$

である。このため、図4・3(b)は図4・4(a)のように変換することができる。図4・3の逆ヤコビ行列 $\mathbf{J}_s^{-1}()$ は説明便宜のために用いられているが、実際の制御

には不要である。

図4・4(b)は図4・4(a)を等価変換したものである、 $G_n^*(s)$ はホールドでのパルス伝達関数行列あり、 $G_n^*(s)$ の入力 $\theta_a^*(im)$ と出力 $\theta_a(k)$ との間には次のような関係がある。

$$\theta_a(k) = \theta_a^*((i-1)m) + \frac{\theta_a^*(im) - \theta_a^*((i-1)m)}{m} \cdot (k-im+1)$$

$$(im \leq k < (i+1)m) \quad \dots\dots\dots (4\cdot22)$$

ロボットを駆動する制御装置 $G(z)$ ではPI-D制御を行う。ただし

$$\left. \begin{aligned} K_P &= \text{diag}[K_{P1} \ K_{P2} \ K_{P3} \ K_{P4} \ K_{P5} \ K_{P6}] \\ K_I &= \text{diag}[K_{I1} \ K_{I2} \ K_{I3} \ K_{I4} \ K_{I5} \ K_{I6}] \\ K_D &= \text{diag}[K_{D1} \ K_{D2} \ K_{D3} \ K_{D4} \ K_{D5} \ K_{D6}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4\cdot23)$$

とする。ロボットを駆動する制御装置 $G(z)$ が安定ならば、 $m \gg 1$ の場合、近似式

$$\theta(im) \doteq \theta_a^*((i-1)m) \quad \dots\dots\dots (4\cdot20)$$

が成立する。すなわち、図4・4(b)の $G^*(z)$ は近似的に

$$G^*(z) = z^{-m} I \quad \dots\dots\dots (4\cdot21)$$

で表される。ただし、 $z = e^{Ts}$ である。

制御系のサンプリング周期を mT にし、 $Z = e^{mTs}$ とおけば、図4・4(b)は図4・5のように変換することができる。図4・5の特性方程式は

$$Z^2 - Z + K_j = 0 \quad (j=1, 2, \dots, 6) \quad \dots\dots\dots (4\cdot22)$$

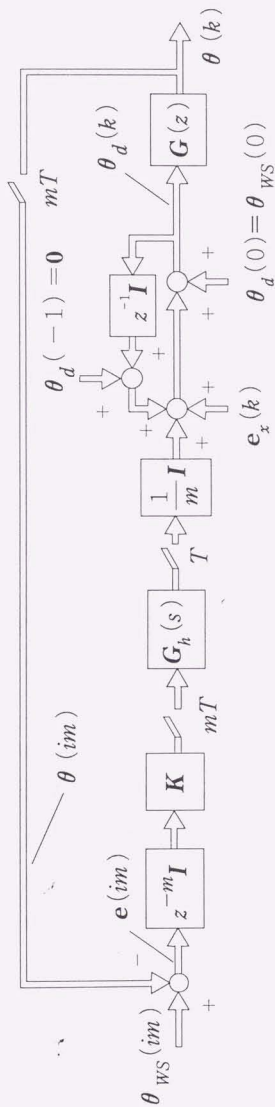
であるため、教示システムの安定条件は

$$0 < K_j < 1 \quad (j=1, 2, \dots, 6)$$

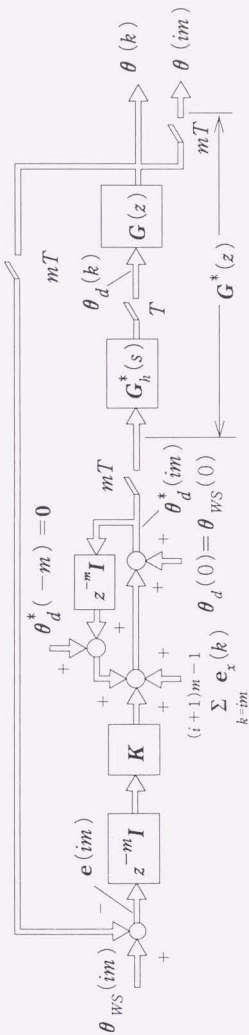
である。 $K_j = 0.25$ ($j=1, 2, \dots, 6$)のとき、応答 $\theta(im)$ ($i=0, 1, 2, \dots$)は臨界減衰となる。

4・4 シール作業のための目標軌道の生成

ベース座標系 Σ_B から見た座標系 Σ_S の位置・姿勢 ${}^B T_S$ はロボットの関節角から求められ、検出した f の値から作業座標系 Σ_{WS} の Σ_S における位置・姿勢 ${}^S T_{WS}$ を算出できるため、 Σ_B から見た作業座標系 Σ_{WS} の位置・姿勢 ${}^B T_{WS}$ を求めることができる。図4・2に示すように視覚センサの出力 f から算出した ${}^S T_{WS}$ の値を ${}^S T_{WS}^*$ 、 ${}^B T_{WS}$



(a) 図 4・3 (b) の等価ブロック線図



(b) (a) の等価変換

図 4・4 教示システム図 4・3 の等価ブロック線図

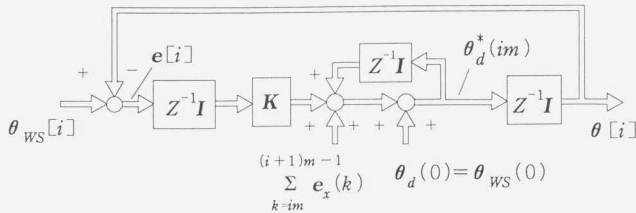


図4・5 サンプリグ周期 mT で表現した教示システム

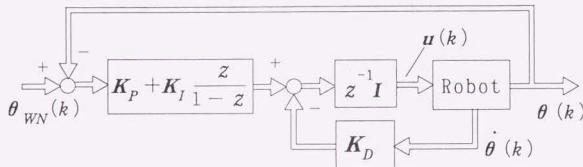


図4・6 教示された目標値を用いる制御系

の値を ${}^B T_{ws}^*$ とすると

$$\begin{aligned} {}^B T_{ws}^*(im-m) &= {}^B T_s(im-m) \cdot {}^S T_{ws}^*(im-m) \\ &= {}^B T_s(im-m) \cdot T_r(f(im-m)) \quad \dots\dots\dots(4\cdot 18) \end{aligned}$$

の関係がある。

シール作業の目標軌道 $\theta_{wN}(im-m)$ は

$$\theta_{wN}(im-m) = \mathbf{A}^{-1} ({}^B T_{ws}^*(im-m)) \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots(4\cdot 19)$$

から求められる。

本章では、自動生成された目標軌道を再生する制御系は、図4・2の $G(z)$ と同じ制御方式をとり図4・6で示される。図4・6の目標値 $\theta_{wN}(k)$ ($k=0, 1, 2, \dots$)には、教示時に記憶されている $\theta_{wN}[i-1] = \theta_{wN}(im-m)$ ($i=1, 2, 3, \dots$)の値を用いる。目標値 $\theta_{wN}(k)$ ($k=0, 1, 2, \dots$)を用いたシール作業の走行速度は $l(k)/T$ ($k=0, 1, 2, \dots$)であるため、これ以外の走行速度でシール作業を行いたい場合、記憶してある $\theta_{wN}[i-1]$ ($i=1, 2, 3, \dots$)の値から新しい目標軌道を算出する必要

がある。また、視覚センサには測定雑音がある場合には、 $\theta_{wN}(k)$ をフィルタに通すことによって、滑らかな作業目標軌道を作ることができる。

4・5 実験結果

シーリングロボットの本体には(株)安川電機製マニピュレータMotoman K3Sを用いて実験を行った。

表1 実験条件

i	K_{P_i} V/rad	K_{I_i} V/rad	K_{D_i} V/rad
1	7 360	6.25	8.05
2	5 790	7.08	6.86
3	6 910	8.22	6.08
4	581	14.72	3.32
5	1 356	18.51	2.57
6	740	21.00	2.43

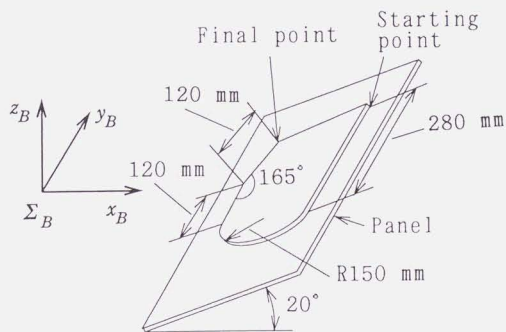
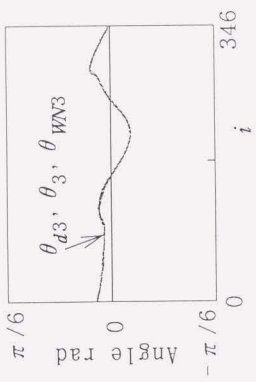
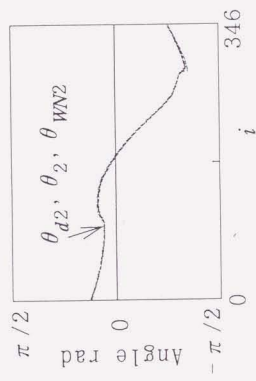


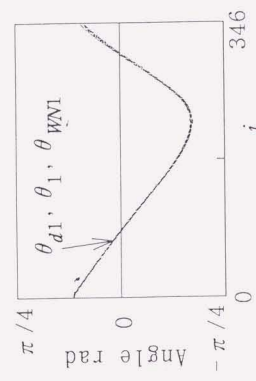
図4・7 実験で用いたシール対象



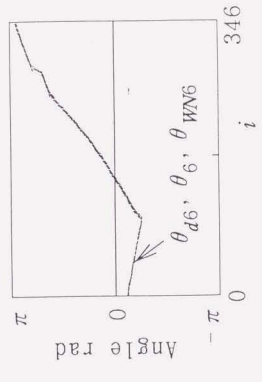
(a) 関節 1



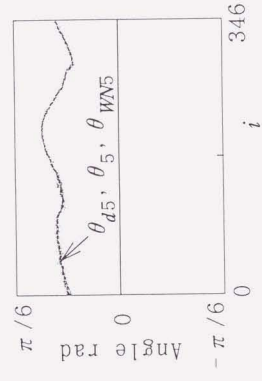
(b) 関節 2



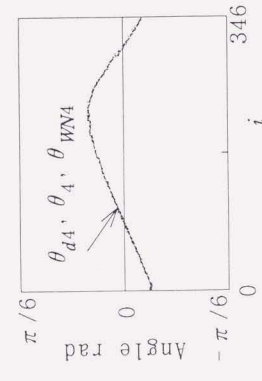
(c) 関節 3



(a) 関節 4

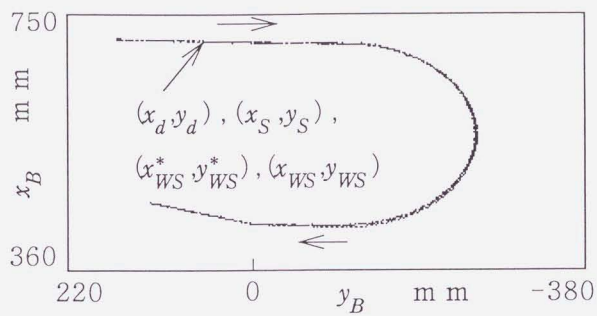


(b) 関節 5

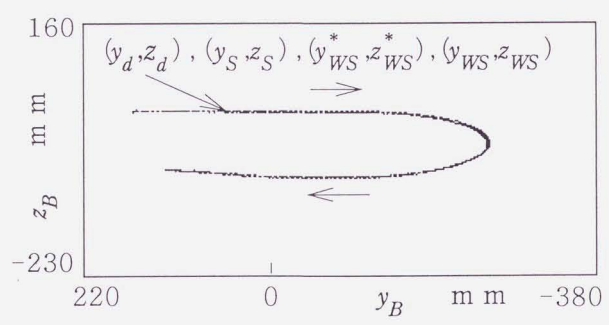


(c) 関節 6

図 4・8 ロボットの各関節軸の $\theta_d, \theta, \theta_{WN}, \theta_{ws}$ についての軌跡 ($m=20, T=5$ ms)



(a) $x_B - y_B$ 平面



(b) $y_B - z_B$ 平面

図4・9 座標系 Σ_B における ${}^B p_d$, ${}^B p_S$, ${}^B p_{WS}^*$, ${}^B p_{WS}$ の軌跡

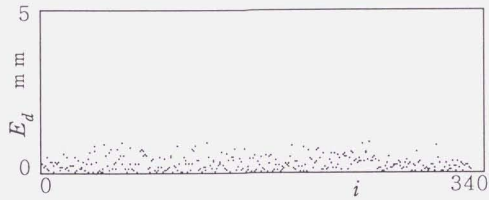


図4・10 ロボット駆動系の目標値と実測値との偏差

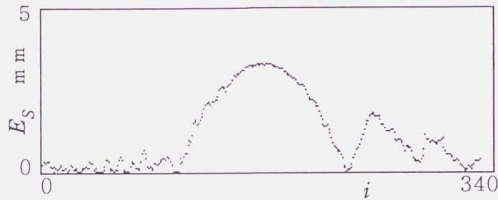


図4・11 教示するためにロボットが走行した軌道と実測値との偏差



図4・12 生成された目標道と実測値との偏差

実験で用いた制御パラメータ K_p , K_i , K_d の値を表1に示す. サンプル周期 $T=5$ msとし, $m=20$, $K=0.25I$ に設定する. 自動教示時におけるロボット手先の視覚センサの走行速度は台形とし, 加減速度は 0.2 m/s², 安定走行速度は 0.02 m/sである.

実験で用いたシール対象を図4・7に示す. 鋼板の厚さは 0.6 mmの鋼板であり, 継目ラインの形状は, 開始点から(1)直線(280 mm), (2)半円(半径150 mm), (3)直

線(120 mm), (4)直線(120 mm)の順になっている。(3)と(4)の直線のなす角は165°である。鋼板全体はロボットのベース座標系のy_B軸回りに20°だけ回転し座標系Σ_Bに対して図4・7のように設置する。

図4・8で示した曲線は、(1)ロボットを駆動する制御系G(z)の目標値θ_d(im), (2)ロボットの関節角θ(im), (3)生成されたシール作業の目標値θ_{WN}(im)である。ただし、θ_{WN}(im)をθ_d(im), θ(im)と比較しやすいため、図4・8では、Σ_NとΣ_Sが一致すると仮定する。すなわち、

$$\theta_{WN}(im-m) = \Lambda^{-1} ({}^B T_{WS}^*(im-m)) \quad (i=1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (4.26)$$

を用いてθ_{WN}[i]を算出する。実際にはΣ_NとΣ_Sとは一致していないため、シール作業の目標軌道を求めるときΛ⁻¹を用いる。θ_d, θ, θ_{WN}, θ_{WS}の各要素の数字の右下添字は関節番号を表す。

図4・9は、^BT_d(im), ^BT_S(im), ^BT_{WS}^{*}(im), ^BT_{WS}(im)の中の位置ベクトル^Bp_d(im), ^Bp_S(im), ^Bp_{WS}^{*}(im), ^Bp_{WS}(im)の軌跡である。ただし、^BT_{WS}(im)は、図4・7のシール対象の特徴点だけ計測し、これを画像サンプル点における値に換算したものである。

$$\begin{aligned} {}^B p_d(im) &= [{}^B x_d(im), {}^B y_d(im), {}^B z_d(im)]^T \\ {}^B p_S(im) &= [{}^B x_S(im), {}^B y_S(im), {}^B z_S(im)]^T \\ {}^B p_{WS}^*(im) &= [{}^B x_{WS}^*(im), {}^B y_{WS}^*(im), {}^B z_{WS}^*(im)]^T \\ {}^B p_{WS}(im) &= [{}^B x_{WS}(im), {}^B y_{WS}(im), {}^B z_{WS}(im)]^T \end{aligned}$$

である。

図4・10～図4・12はそれぞれ次式で定義される偏差値E_d(i), E_S(i), E_{WS}^{*}(i)を示す。

$$\begin{aligned} E_d(im) &= \| {}^B p_{WS}(im) - {}^B p_d(im) \|_2 \\ E_S(im) &= \| {}^B p_{WS}(im) - {}^B p_S(im) \|_2 \\ E_{WS}^*(im) &= \| {}^B p_{WS}(im) - {}^B p_{WS}^*(im) \|_2 \end{aligned}$$

ただし、 $\| \cdot \|_2$ はユークリッドノルムを表す。

図4・10～図4・12でわかるように、ロボットが走行した軌道が実際の継目ラインとの間に多少の偏差があっても、精度の高い目標軌道θ_{WN}(i)を生成することができる。それは、本論文で提案した教示システムにより生成したシール作業の

ための目標軌道の精度は、教示するためにロボットが走行した軌道と関係ないからである。すなわち、継目ラインが視覚センサの撮像領域中にあれば、作業座標系の正確な位置と姿勢を検出できる。

4・6 要約

本章では、3次元視覚センサを用いたシーリングロボットのシール作業のための目標軌道を高速に自動生成する方法を提案した。ついて、実験によって本手法の有効性を確かめ、以下のことがわかった。

(1) 提案したシーリング作業の目標軌道生成法は、走行しながら目標軌道を生成でき、かつ走行速度を自由に設定することができるため、従来の方法より高速に許容精度内の目標軌道を生成することができる。

(2) 本手法で生成するシール作業のための目標軌道の精度は、教示するときのロボットの走行軌道の振動や実際の継目ラインとの多少のずれによる影響を受けないため、高精度のシール作業の目標軌道を生成することができる。

(3) 教示システムの応答が臨界減衰するようにゲイン K の値を設定することにより、滑らかな教示走行を実現することができる。

第5章

濃淡情報と距離情報を統合する

視覚センサ

5・1 概説

従来の継目位置検出法⁽¹⁾では、光切断法だけを用いているためシーリングを開始する位置の情報が不足している。これを解決するため本章では、光切断法と濃淡画像処理法を併用することによって、シーリング対象のシーリング開始位置での6自由度についての位置と姿勢を検出することができる。本章では、問題を簡略化するため、スリット光源は1個にする。

5・2 視覚センサの構成

視覚センサは、図5・1のように1台のカメラと2台の光源（スポット光源とスリット光源）から構成され、ロボットの手先にあるノズルの前方に設置されている（シーリングする方向を前方と呼ぶ）。濃淡画像を取り込むとき、スポット光源をオン、スリット光源をオフ、光切断画像を取り込むとき、スリット光源をオン、スポット光源をオフに切り換える。

本論文では、シーリングの開始位置を検出するときのみ濃淡画像と光切断画像処

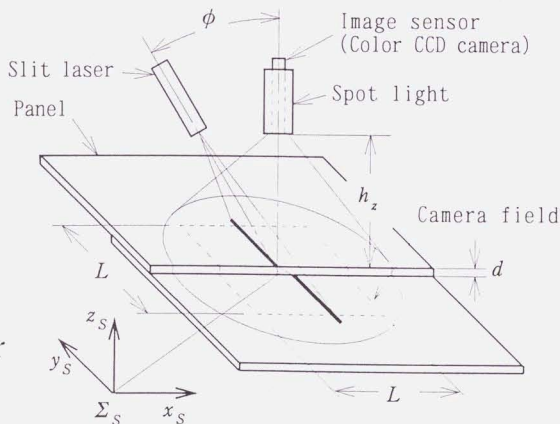


図5・1 視覚センサの構成

理を併用する。シーリング開始後の継目位置検出には光切断画像のみを用いる。

図5・1のように、カメラの中心軸とスリット光との交点を視覚センサ座標系 Σ_s の原点とする。カメラの中心軸方向を z_s 軸、シーリングする方向を x_s 軸とする。座標系 Σ_s の原点からカメラのレンズまでの距離を h_z 、スリット光源の傾斜角度を ϕ 、カメラの撮像領域を $L \times L$ とする。

継目部の光切断画像の形状を第2章の図2・3と同じである。すなわち、同図(a)、(b)は鋼板を重ね合わせる場合の形状、同図(c)は鋼板を折り曲げ合わせる場合の形状、同図(d)は鋼板の穴にシール剤を塗布する場合の形状である。本論文では、比較的検出しにくい同図(a)、(b)の場合の継目位置の検出を取り上げる。

5・3 光切断画像による継目位置検出法

図2・3(a)、(b)の場合、継目に相当する位置に光切断ラインでは段差が生じている。この段差の座標を検出すれば、シール対象の継目位置を算出することができる。また、継目ラインの傾斜角から、シール対象の x_s 軸回りの回転角を算出できる。

画像処理を高速にするため2章と同じように探索窓を用いた。画面の記号と座標

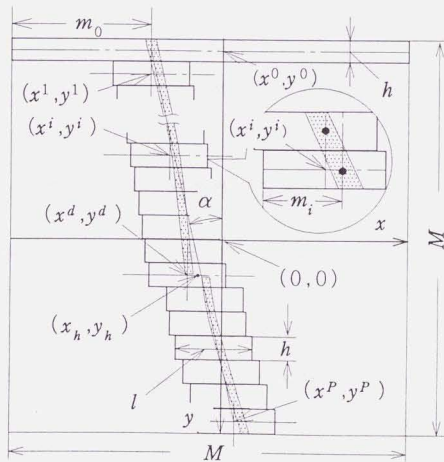


図5・2 探索窓を用いた継目位置検出法

系を図5・2のように設定する。すなわち、画面のサイズを $M \times M$ 画素とし、0番めの探索窓のサイズを横 $M \times$ 縦 h 、1番め以降の探索窓のサイズを $l \times h$ とする。画面の最下端まで探索するのに、0番めを含めて $P+1$ 個の探索窓を必要とする。画面の中心を座標系の原点とし、シーリングする方向を x 軸方向とする。 i 番めの探索窓の中の画像の重心から探索窓の左端までの距離を $m_i (i=0, 1, 2, \dots, P)$ とする。

5・3・1 継目位置探索法

図6・2のように最初の探索窓を画面の最上端に置く。すなわち、0番めの探索窓の中心の座標 (x^0, y^0) は

$$\begin{aligned} x^0 &= 0 \\ y^0 &= -0.5M + 0.5h \end{aligned}$$

である。1番めの探索窓の中心の座標 (x^1, y^1) は

$$\begin{aligned} x^1 &= -0.5M + m_0 \\ y^1 &= y^0 + h \end{aligned}$$

である。 i 番めの探索窓の中心の座標 (x^i, y^i) は

$$x^i = x^{i-1} + m_{i-1} - 0.5l \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$y^i = y^{i-1} + h \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

で表される。ただし、 $i=2, 3, \dots, P$ である。

継目位置 (x_n, y_n) の検出や、光切断ラインの傾斜角度 α は2章と同じ方法で算出する。

5・3・2 画像処理の結果から継目位置情報の算出

本論文では、画像処理の時間を考慮して、画像処理による継目位置の検出は(ロボット制御のサンプリング周期と異なる)一定のサンプリング周期ごとに行う。

j 回めの画像処理で検出した画像上の継目位置座標を $(x_n(j), y_n(j))$ とし、光切断ラインの傾斜角度を $\alpha(j)$ とする。 j 回めの画像取り込み時点での視覚センサ座標系 $\Sigma_s(j)$ に対する光切断ラインと継目ラインの交点の位置ベクトルを

$${}^s \mathbf{p}(j) = [{}^s x(j), {}^s y(j), {}^s z(j)]^T \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

とする(図5・3)。 $h_z \gg {}^s z(j)$ のとき

$$\frac{{}^s x(j)}{x_h(j)} \doteq \frac{{}^s y(j)}{y_h(j)} \doteq \frac{L}{M} \dots\dots\dots (5.4)$$

であるため、 ${}^s x(j)$ と ${}^s y(j)$ は近似的に

$${}^s x(j) \doteq \frac{L x_h(j)}{M} \dots\dots\dots (5.5)$$

$${}^s y(j) \doteq \frac{L y_h(j)}{M} \dots\dots\dots (5.6)$$

で与えられる。

図5.3に示すよう、 ${}^s z(j) = {}^s x(j) \cot \phi$ であるため、 ${}^s z(j)$ は近似的に

$${}^s z(j) \doteq \frac{L}{M} x_h(j) \cot \phi \dots\dots\dots (5.7)$$

で与えられる。

シーリング対象の x_s 軸回りの回転角度 ${}^s \theta_x(j)$ は図5.4に示すように光切断ラインの y_s 軸に対する傾斜角度 $\gamma(j)$ から次式を用いて算出することができる。

$${}^s \theta_x(j) = \tan^{-1} (\tan \gamma(j) \cdot \cot \phi) \dots\dots\dots (5.8)$$

視覚センサが $x_s - y_s$ 平面に垂直であるため、

$$\gamma(j) = \alpha(j)$$

である。すなわち、式(5.8)は

$${}^s \theta_x(j) = \tan^{-1} (\tan \alpha(j) \cdot \cot \phi) \dots\dots\dots (5.9)$$

となる。

3章に述べたように、シーリング対象の継目位置が教示された軌道上にあるとき、 ${}^s x(j) = 0$, ${}^s y(j) = 0$, ${}^s z(j) = 0$, ${}^s \theta_x(j) = 0$ である。

以上からわかるように、 $({}^s y(j), {}^s z(j), {}^s \theta_x(j))$ は、実際のシーリング対象の継目位置とシーリングロボットに教示されている目標軌道との偏差であり、式(5.6), (5.7), (5.9)を用いて求められる。

5.4 シーリング開始位置の検出

シーリング開始位置の検出は、制御系の目標値の補正にとってきわめて重要である。それは、シーリングの開始位置を高精度に検出できれば、シーリング対象自身の変

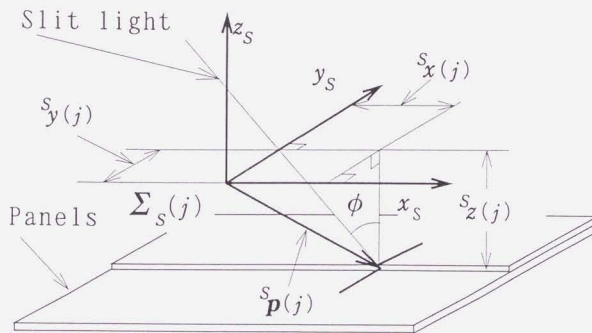


図5・3 継目位置座標の算出

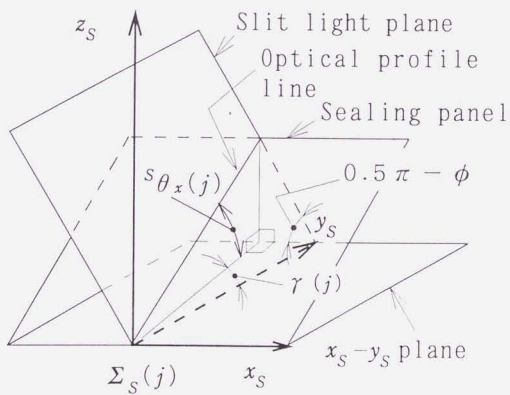


図5・4 シーリング対象が x_s 軸回りに傾斜する場合

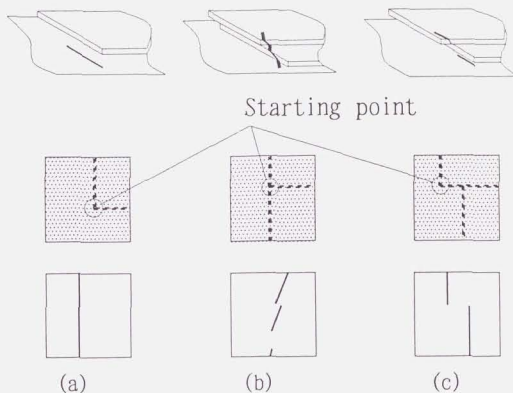


図5・5 シーリングの開始位置（上図）に対応する
濃淡画像（中図）と光切断画像（下図）

形以外の原因で生じた位置ずれはすべて算出できるからである。このため、本論文では6自由度についてのシーリング開始位置を検出することにする。

本論文では、教示されたシーリング軌道の開始位置のノズル座標系 Σ_n の位置に視覚センサ座標系 Σ_s を一致させてからシーリング開始位置の検出を始める。

シーリングの開始位置は実際のシール対象の構造によってさまざまである。一般的には、継目ラインの端部がシーリングの開始位置である。本論文では、図5・5のように継目ラインの端部のエッジが直線で構成されるパターンに限定する。

継目部の開始位置を検出するとき、図5・5(a)のように光切断ラインが鋼板の継目部に当たらない場合や同図(b)のように端部のエッジに掛かる場合があるため、光切断法だけで継目ラインの開始位置座標を検出するのは困難である。このため本論文では、光切断法と濃淡画像処理を併用することにする。継目ラインの開始位置の検出のための演算は、シーリングを開始する前に行うので、比較的長い演算時間を要する濃淡画像処理を用いることが可能である。

シーリングの開始位置偏差には、(1)シール対象全体の位置ずれと(2)シール対象自身の変形によるずれの両方があるため、シーリングの開始位置を検出する視覚センサの撮像領域をシーリング開始後より大きくとる必要がある。本論文では、シーリング開始位置を検出するための視覚センサの撮像領域を $L_x \times L_y$ 、画像の画素

数を $M_{\kappa} \times M_{\kappa}$ とする。ただし、カメラの焦点距離を調整しないため、

$$L_{\kappa} / M_{\kappa} = L / M$$

の関係がある。

5.4.1 濃淡画像処理

ほとんどの場合、図5.5のようにシール対象の継目の端部のエッジをいくつかの直線で表すことができる。このため本論文では、エッジの強調、2値化、細線化の処理を行ったのち、直線を検出するハフ変換の手法を用いてシール対象の継目部と端部のエッジを抽出する⁽²¹⁾。

抽出した直線間の交点の座標が、画像座標系のシーリングの開始位置座標 (x_{κ}, y_{κ}) となる。交点が二つ以上ある場合、パターンごとに事前に教示し、その教示に従って開始位置に相当する点を選ぶ。例えば図5.5(c)の場合、 x 座標の値が小さいほうの交点がシーリングの開始位置であることを事前に教示する。

5.4.2 光切断画像処理と濃淡画像処理の統合

シーリング開始位置での濃淡画像と光切断画像は同じ位置で取り込むため、濃淡画像と光切断画像を図5.6のように重ねて表すことができる。濃淡画像から検出した継目ラインに相当する直線は k 番めの光切断画像の探索窓の縦中心軸と交差するとする。この交点の座標を (x_m, y_m) とする(図5.6を参照)。式(6)を用いて光切断画像の傾斜角度 α を検出できる(4章を参照)。

本論文では $x_{\kappa}, y_{\kappa}, x_m, \alpha$ を用いて、ロボットの教示された開始位置での視覚センサ座標系 $\Sigma_s(0)$ におけるシーリングの開始位置座標 $({}^s x(0), {}^s y(0), {}^s z(0))$ 、および x_s 軸に対する回転角 ${}^s \theta_x(0)$ を式(9)~(12)と同じ原理で算出することができる。すなわち、

$${}^s x(0) \doteq \frac{L_{\kappa} x_{\kappa}(0)}{M_{\kappa}} \dots\dots\dots (5.10)$$

$${}^s y(0) \doteq \frac{L_{\kappa} y_{\kappa}(0)}{M_{\kappa}} \dots\dots\dots (5.11)$$

$${}^s z(0) \doteq \frac{L_{\kappa}}{M_{\kappa}} x_m(0) \cot \phi \dots\dots\dots (5.12)$$

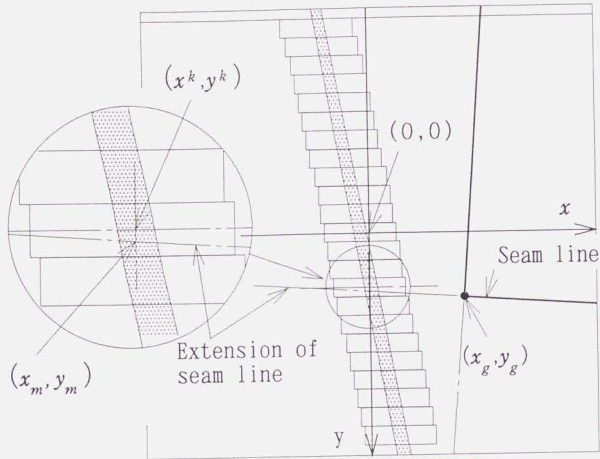


図5・6 継目端部の光切断画像と濃淡画像を重ねた画面 (図5・5 (a)に対応)

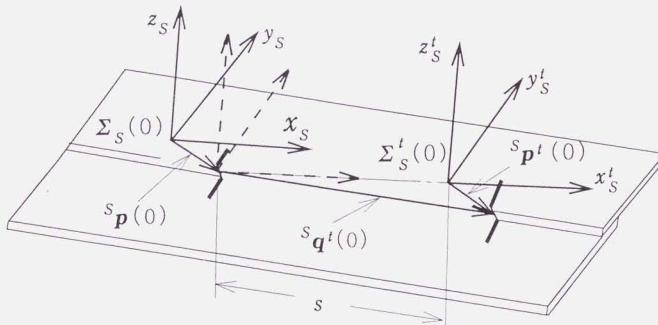


図5・7 シーリング開始位置での視覚センサ座標系

$${}^s\theta_x(0) = \tan^{-1} (\tan \alpha(0) \cdot \cot \phi) \quad \dots\dots\dots(5.13)$$

である。

開始位置でのシール対象の y_s 軸と z_s 軸回りの回転角度 ${}^s\theta_y(0)$ と ${}^s\theta_z(0)$ を求めるには、異なる位置で取り込んだ二つの光切断画像を必要とする。

図5.7に示すように $\Sigma_s(0)$ で検出した継目位置ベクトル ${}^s\mathbf{p}(0)$ は $[{}^s x(0), {}^s y(0), {}^s z(0)]^T$ である。視覚センサ座標系を $[{}^s x(0), {}^s y(0), {}^s z(0)]$ に並進し、 x_s 軸に対して ${}^s\theta_x(0)$ だけ回転する。さらに x_s 軸方向に距離 s だけ移動する。このときの視覚センサ座標系を $\Sigma_s^t(0)$ とする。この位置で検出した継目位置ベクトル ${}^s\mathbf{p}^t(0)$ を $[{}^s x^t(0), {}^s y^t(0), {}^s z^t(0)]^T$ とする。座標系 $\Sigma_s^t(0)$ に対する継目ラインのベクトル ${}^s\mathbf{q}^t(0)$ は

$${}^s\mathbf{q}^t(0) = [{}^s x^t(0) + s, {}^s y^t(0), {}^s z^t(0)]^T$$

である。このため、シール対象が y_s 軸、 z_s 軸回りに対する回転角度 ${}^s\theta_y^t(0)$ 、 ${}^s\theta_z^t(0)$ は

$${}^s\theta_y^t(0) = \tan^{-1} \frac{{}^s z^t}{{}^s x^t + s} \quad \dots\dots\dots(5.14)$$

$${}^s\theta_z^t(0) = \tan^{-1} \frac{{}^s y^t}{{}^s x^t + s} \quad \dots\dots\dots(5.15)$$

から求められる。

以上からわかるように、シーリング開始位置の6自由度についての偏差 (${}^s x(0)$, ${}^s y(0)$, ${}^s z(0)$, ${}^s\theta_x(0)$, ${}^s\theta_y^t(0)$, ${}^s\theta_z^t(0)$) を式(14)~(19)を用いて求めることができる。

5.5 実験結果

本実験では、シーリングロボットの本体には(株)安川電機製マニピュレータMoto man K3Sを用いた。ロボットの制御装置にはトランスピュータ(国際データシステム, TP-38 A)を搭載したPC9801 DAを用いた。また、視覚センサは、PC 9801 DA, フレームバッファメモリポート, ビデオ入力ボード, カメラ, マイクロカメラ内蔵式リングライトガイド, レーザラインマーカから構成されている。実験用シール対象の板厚は0.6mmである。

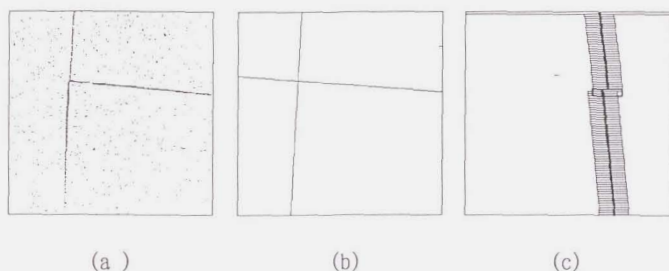


図5・8 画像処理の例

開始位置を検出するとき、カメラ撮像領域を54 mm×54 mm、画面の画素数を450×450画素とする。シーリング開始後はカメラ撮像領域を30 mm×30 mm、画面の画素数を250×250とする。スリット光の傾斜角度 ϕ を45°に設定する。光切断画像での探索窓のサイズについては、 $h=4$ 画素、 $l=50$ 画素とする。

継目位置を検出した結果の一例を図5・8に示す。図5・8(a)は開始位置における濃淡画像の微分処理後の結果であり、同図(b)はハフ変換より抽出した直線である。同図(c)は探索窓法を用いた継目位置検出例である。

5・6 要約

本章では濃淡画像処理と光切断法処理を統合する手法を提案し、実験によって確かめた。開発したこの視覚センサは以下の特徴を持っていることが実験でわかった。

(1) この手法によって、シーリング対象のシーリングの初期位置・姿勢の全部6自由度についての偏差を検出することができる。

(2) 本視覚センサは光切断法のみで検出できないシーリングの開始位置・姿勢を検出することができるため、シーリングロボットがシーリング作業を開始する前に、初期位置・姿勢の偏差を修正することができる。

第6章

濃淡情報と距離情報を統合する
視覚センサを用いた
シーリングロボットの制御

6・1 概説

従来の視覚センサ付きシーリングロボットの視覚フィードバック制御では、ロボットのシーリングの開始位置での偏差を修正することができなかった。これに対して、本章ではシール作業を開始する前、濃淡情報と距離情報の統合によって検出したシーリングの開始位置を用いて、シーリングロボットに事前に教示した作業軌道を修正する手法を提案し、実験によってその有効性を確かめた。また、従来のシール作業時のリアルタイムでの視覚フィードバック制御では、ロボットの手先の継目位置追跡サーボ系の1軸の制御のみに視覚の情報を用いていたため、光切断法から得られる多数の情報を有効に使用することができなかった⁽¹⁾。これに対して本章では、シーリングロボットの予見制御法を提案し、この方法を用いて、継目位置追跡サーボなしで視覚センサから検出した多自由度（シーリング開始後）についてのそれぞれの偏差を補正できることを実証した。議論を簡略にするため、本章では、6章で提案した視覚センサを用いた。すなわち、視覚センサはスリット光源を一本しか用いなく、光切断画像では3自由度 (y_s, z_s, θ_x) の偏差を検出できる。

6・2 シーリングロボットの構成と座標系の設定

図6・1は視覚センサ付きシーリングロボットの制御系の構成を示す。ロボットのシーリング軌道は事前に教示されている（本章では直線軌道の教示に限定する）。実際のシール対象の継目ラインは教示されている軌道との偏差があるため、その教示されている軌道と視覚センサからの情報を用いて、制御系の目標値を生成するものとする。

シーリングロボットの座標系を図6・2(a)のように設定する。視覚センサ座標系 Σ_s の設定については6章で述べた（図6・1参照）。ロボットの基準座標系を Σ_B とし、ロボットのノズル先端座標系 Σ_N の z_N 軸は、ノズルの先端を通り座標系 Σ_s の z_s 軸に平行とする。 x_N 軸方向を x_s 軸方向と同一とする。

ロボットの基準座標系 Σ_B からノズル先端座標系 Σ_N への順運動学行列を ${}^B T_N(\theta)$

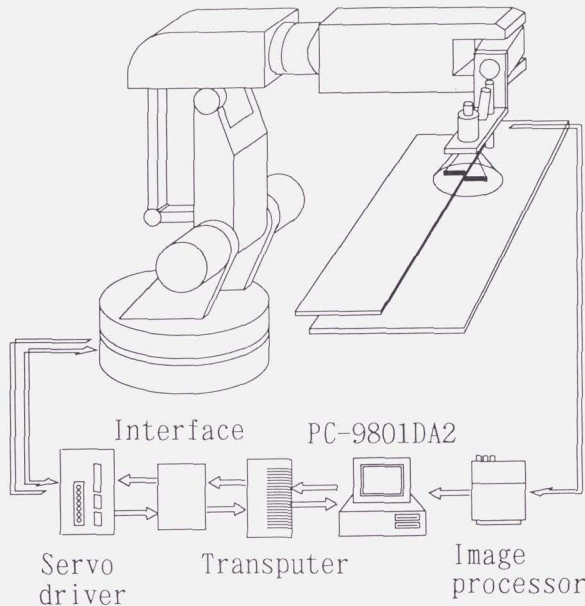


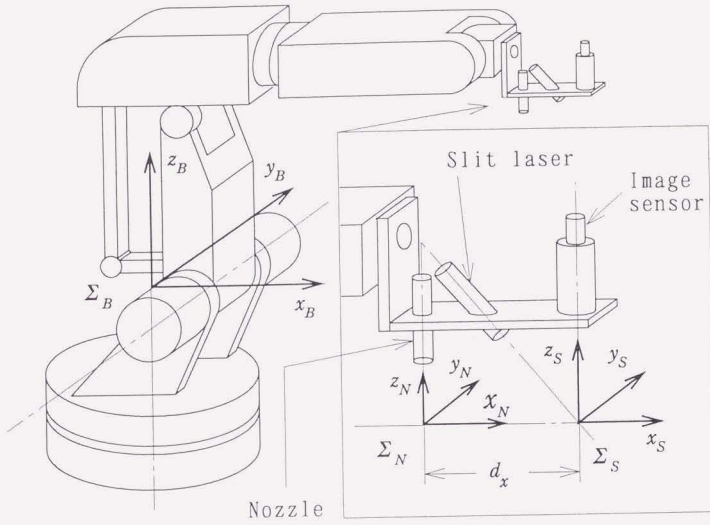
図6・1 視覚センサ付きシーリングロボットの制御系の構成

とし、その逆運動学方程式を $\theta = \mathbf{A}_N^{-1}({}^B T_N)$ とする。 θ はロボットの関節角度ベクトルであり、 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$ で表す。図6・2 (b) は $\theta = 0$ ときの姿勢である。座標系 Σ_b から視覚センサの座標系 Σ_s への順運動学行列を ${}^B T_s(\theta)$ とし、その逆運動学方程式を $\theta = \mathbf{A}_s^{-1}({}^B T_s)$ とする。

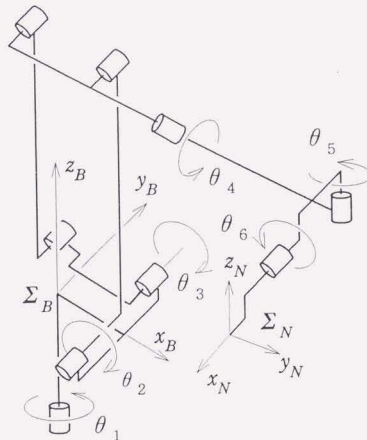
シール対象の姿勢とその継目位置がシーリングロボットに教示される軌道と一致するとき、座標系 Σ_s 、 Σ_N の原点は継目ライン上にあり、 z_s 軸と z_N 軸はシール対象に垂直であるとする。

6・3 開始位置の偏差を用いた目標軌道修正法

シーリングの開始位置偏差を検出したのち、教示された目標軌道全体をこの継目位置偏差 (${}^s x(0)$, ${}^s y(0)$, ${}^s z(0)$, ${}^s \theta_x(0)$, ${}^s \theta_y(0)$, ${}^s \theta_z(0)$) を用いて補正する。す



(a) シーリングロボットの構成



(b) 運動学モデル

図6・2 シーリングロボットの座標系

なわち、教示された目標値 $\theta_r(k)$ を次のように変換する。

$$\theta_{rs}(k) = A_N^{-1} [\Delta T_{st}^B T_N(\theta_r(k))] \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad (6.1)$$

ただし、 ΔT_{st} はシーリング開始位置の補正行列であり、

$$\Delta T_{st} = {}^B T_N(\theta_r(0)) \cdot \text{Trans}[^s x(0), ^s y(0), ^s z(0)] \cdot \text{Rot}[x_s, ^s \theta_x(0)] \\ \cdot \text{Rot}[y_s, ^s \theta_y(0)] \cdot \text{Rot}[z_s, ^s \theta_z^*(0)] \cdot {}^B T_N^{-1}(\theta_r(0)) \quad (6.2)$$

$$^s \theta_z^* = \tan^{-1} [\tan^s \theta_z(0) / \cos^s \theta_y(0)] \quad (6.3)$$

で与える。Trans[] は並進変換行列であり、Rot[] は回転変換行列である⁽¹⁹⁾。

6.4 シーリング作業中の目標軌道補正法

シーリング作業を開始後、基準座標系 Σ_B に対する視覚センサから検出した継目位置^B $T_R(i)$ は

$${}^B T_R(i) = {}^B T_S(\theta(i)) \cdot \text{Trans}(0, ^s y(i), ^s z(i)) \cdot \text{Rot}(x, ^s \theta_x(i)) \quad (6.4)$$

を満たす。ただし、 $\theta(i)$ は i 回目の画像を取り込む時点でのロボットの関節角ベクトルである。

$$\Delta(i) = \text{Trans}(0, ^s y(i), ^s z(i)) \cdot \text{Rot}(x, ^s \theta_x(i)) \quad (6.5)$$

とすると、式(6.4)は

$${}^B T_R(i) = {}^B T_S(\theta(i)) \cdot \Delta(i) \quad (6.6)$$

で表すことができる。

図6.3は、本論文で提案する制御系のブロック線図である。ロボットの制御系のサンプリング周期を T とし、シーリング開始後の光切断法による継目位置を認識する時間を mT とする。シーリングロボットがノズル先端座標系 Σ_N から視覚センサ座標系 Σ_S までの距離 d_z だけ移動するのに、 nT だけ時間がかかるとする。 m と n は正の整数であり、 $n \geq 2m$ とする。ロボットの制御系のサンプリング時点を $t = kT$ ($k=0, 1, 2, \dots$) とし、視覚センサのサンプリング時点を $t = imT$ ($i=0, 1, 2, \dots$) とする。 $k=0$ のとき、 $i=0$ とし、周期 mT のサンブラは全て同期するものとする。

$k = im$ ($i=1, 2, 3, \dots$) のとき視覚センサで検出した継目位置の変換行列を $\Delta(im)$ とすれば、継目位置行列^B $T_R(im)$ は

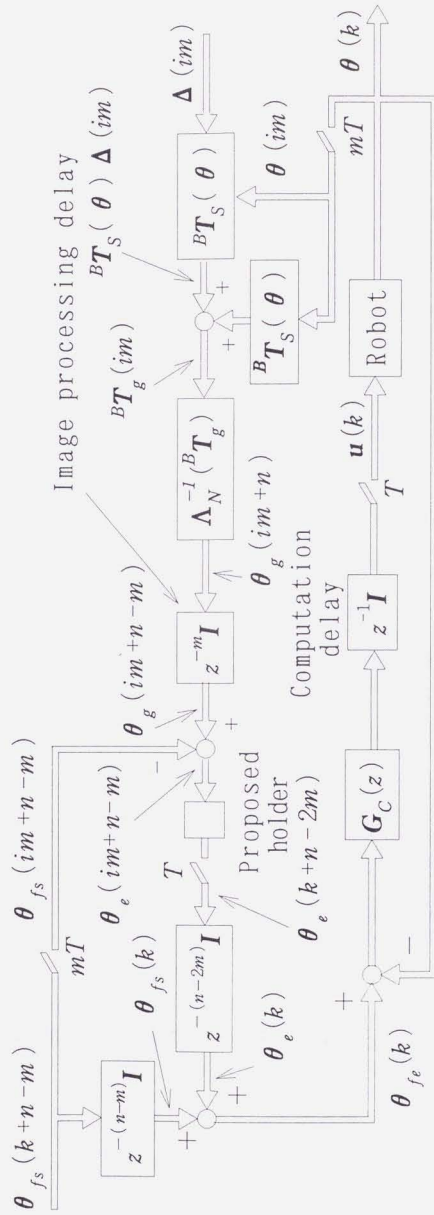


図 6・3 シーリングロボットのデジタル制御系

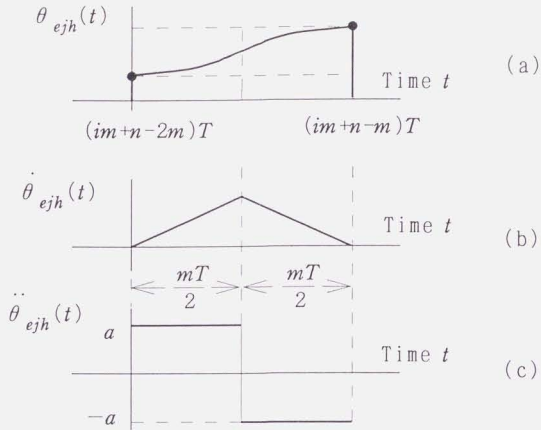


図6.4 三角速度を持つ二次ホールダ

$${}^B T_{\kappa}(im) = {}^B T_S(\theta(im)) \Delta(im) \dots\dots\dots (6.7)$$

で表される.

この継目位置行列 ${}^B T_{\kappa}(im)$ をノズル先端座標系 Σ_n への逆運動学変換をすることによって, n サンプルだけ未来の目標位置 $\theta_{\kappa}(im+n)$ を求められる. すなわち,

$$\theta_{\kappa}(im+n) = \Lambda_N^{-1} ({}^B T_{\kappa}(im))$$

画像処理の遅れ時間は mT であるため, この予見目標位置は $\theta_{\kappa}(im+n-m)$ となる. したがって, 偏差値 $\theta_e(im+n-m)$ は

$$\theta_e(im+n-m) = \theta_{\kappa}(im+n-m) - \theta_{rs}(im+n-m) \dots\dots (6.8)$$

で表される.

6.5 目標信号を補正するためのホールダの設定

視覚センサより得られたシーリングロボットの目標値の予見偏差 $\theta_e(im+n-m)$ のサンプリング周期は mT であるため, 目標値のサンプリング周期 T と同期するにはホールダが必要である. しかし, $mT > T$ であるため, 零次ホールダや一次ホール

ダを用いてロボットを滑らかに制御することはできない。すなわち、このようなホールダではロボットは $\theta_e(im+n-m)$ の値が大きく変化するとき急加速や急減速が生じる。

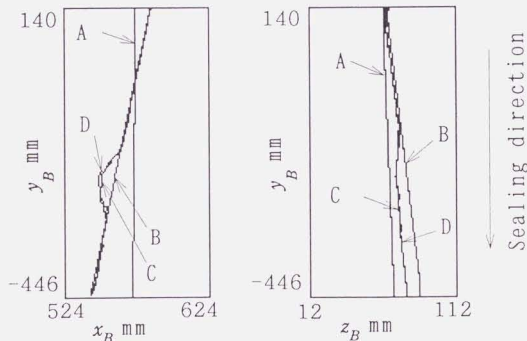
この論文では、 $\theta_e(im+n-m)$ は予見情報であるという点を利用した、予見形二次ホールダを提案する。ベクトル θ_e のj番目の要素を θ_{ej} とするとき、このホールダは時刻 $t=(im+n-2m)T$ から $(im+n-m)T$ までの間を図6・4(a)のように補間する。すなわち、このホールダの出力を $\theta_{ejh}(t)$ とおけば、 $\theta_{ejh}(t)$ を、1回微分すると図6・4(b)になり、2回微分すると図6・4(c)になるようにホールダを設定する。すなわち、ホールダの出力周期 T ごとにサンプルした値は

$$\theta_e(k+n-2m) = \theta_e(im+n-2m) + \frac{2[k-(im+n-2m)]^2}{m^2} \cdot [\theta_e(im+n-m) - \theta_e(im+n-2m)]$$

$$(0 \leq k - (im + n - 2m) < m/2) \quad \dots\dots (6.9)$$

$$\theta_e(k+n-2m) = \theta_e(im+n-2m) + (1 - \frac{2[k-(im+n-2m)]^2}{m^2}) \cdot [\theta_e(im+n-m) - \theta_e(im+n-2m)]$$

$$(m/2 \leq k - (im + n - 2m) < m) \quad \dots\dots (6.10)$$



A: 教示された軌道 B: 開始位置で修正した軌道
C: 補正された目標軌道 D: 実際走行した軌道

図6・5 予見視覚情報による制御結果の一例

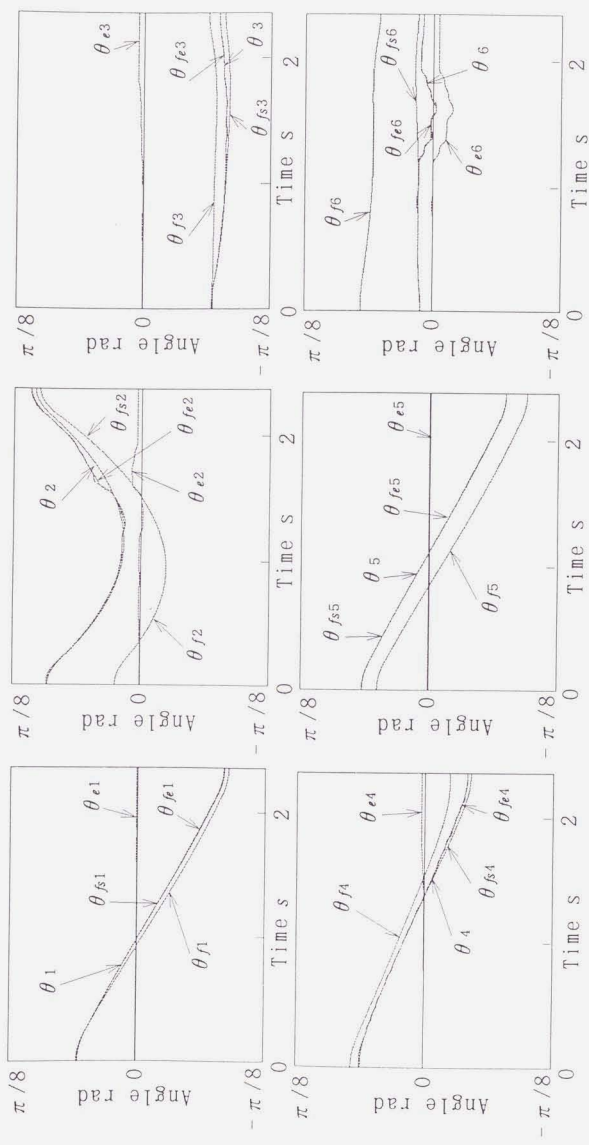


図 6・6 各関節の時間応答

から求められる。

図6・3に示す制御装置 $G_c(z)$ は

$$G_c(z) = K_P + K_I \frac{z}{z-1} + K_D(1-z^{-1}) \dots\dots\dots (6\cdot11)$$

で表される。ただし

$$\left. \begin{aligned} K_P &= \text{diag} [K_{P1} \ K_{P2} \ K_{P3} \ K_{P4} \ K_{P5} \ K_{P6}] \\ K_I &= \text{diag} [K_{I1} \ K_{I2} \ K_{I3} \ K_{I4} \ K_{I5} \ K_{I6}] \\ K_D &= \text{diag} [K_{D1} \ K_{D2} \ K_{D3} \ K_{D4} \ K_{D5} \ K_{D6}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6\cdot12)$$

6・6 実験結果

本実験では、シーリングロボットの本体には(株)安川電機製マニピュレータMoto man K3Sを用いた。ロボットの制御装置にはトランスピュータ(国際データシステム, TP-38 A)を搭載したPC9801 DAを用いた。

図6・5, 図6・6は、シーリングロボットのノズルの走行速度が0.3 m/sのときの制御実験の結果である。実験で用いた制御パラメータ K_P , K_I , K_D の値を表1に示す。

表1 実験条件

i	K_{Pi} V/rad	K_{Ii} V/rad	K_{Di} V/rad
1	7 360	6.25	8.05
2	5 790	7.08	6.86
3	6 910	8.22	6.08
4	581	14.72	3.32
5	1 356	18.51	2.57
6	740	21.00	2.43

6・7 要 約

本章では、視覚センサより検出したシール対象の継目位置を用いてロボットを予見制御する方法を提案し、実験によってその有効性を確かめた。本実験の結果、提案手法について以下のことがわかった。

(1) 開始位置で検出したロボットの偏差を用いて、事前に教示した目標軌道全体を修正することによって、シール対象の位置と姿勢のずれを修正することができる。

(2) 継目位置の予見偏差を用いて目標軌道を補正する本手法は、視覚センサから検出した継目偏差を遅れなく補正することができる。

(3) ロボット各関節の目標信号を補正するため、継目位置追跡サーボなしで視覚センサから検出した3自由度（シーリングが開始した後）の偏差を補正することができた。

第7章

結 論

本論文では、(1)シーリングロボットのための視覚センサの開発(第2章, 第3章, 第5章), (2)視覚センサ付きシーリングロボットの目標軌道生成法(第4章), (3)視覚センサ付きシーリングロボットのシール作業時の目標軌道の偏差をリアルタイムで修正する方法(第6章)について研究を行った。各章から得られた結果をまとめると下記のとおりである。

第2章では、ニューラルネットワークを用い、シーリングロボットのための、車体鋼板の継目位置探索法を提案し、シミュレーションによってその有効性を確かめた。本探索法は以下の特長をもっているということが明らかになった。

(1) ニューラルネットワークが高い特徴抽出能力を持つため、これを用いた本手法は変形や回転などの継目パターンの検出にはきわめて有効である。

(2) (i) 変形や傾斜などの状況に応じた継目パターン, (ii) 継目以外の光切断画像の変形パターンを、本手法はオフライン学習によって認識することができる。

(3) 探索窓を用いて光切断画像上を追従探索するため、光切断画像に傾斜や曲率などがあっても、本手法は継目位置を検出することができる。

(4) 本手法では、光切断画像の特徴値抽出を行ったのちニューラルネットワークへの入力としているため、NNの構造が簡略化され高速処理が行われる。シミュレーションはパーソナルコンピュータ NEC PC-9801DA上で行われ、画像認識時間は70 ms~120 msである。

第3章では、視覚センサ付きシーリングロボットのための3次元視覚センサとその画像処理法を開発し、実験によってその有効性を確かめた。実験の結果、以下のことがわかった。

(1) 提案した光切断画像処理法は、大きな変形をもつシール対象に対しても適用でき、継目位置を高速に認識をすることができる。それは本処理法が光切断画像の傾斜や湾曲の影響を除去できる探索窓を用いているためである。画像処理実験は(株)エー・ディー・エス製TBP06フレームバッファメモリボード(トランスピュータのプロセッサ速度は20 MHz)上で行い、画像処理時間は30 msである。

(2) 提案した3次元視覚センサによるシール対象の位置・姿勢検出法では、シール対象の並進と回転が微小であるという条件のもとで演算を簡略化した。本手法は、画像処理の結果からシール対象の実際の継目位置と姿勢を高速(2 ms)に算出することができた。これらのことから、本視覚センサはシーリングロボットの作業目標軌

道自動生成や実時間の視覚フィードバック制御に適用することができる。

4章では、3次元視覚センサを用いたシーリングロボットのシーリング作業のための目標軌道自動生成する方法を提案した。ついで、実験によって本手法の有効性を確かめ、以下のことがわかった。

(1) 提案したシーリング作業の目標軌道生成法は、半径150 mm のカーブの場合、最高 0.04 m/s の高速で滑らかな目標軌道を走行しながら生成をすることができる。

(2) 本手法で生成するシーリング作業のための目標軌道の精度は、ロボットの教示走行軌道と実際の継目ラインとのずれによる影響を受けない。高精度 (± 1 mm) でシーリング作業の目標軌道を生成できることを実験で確認した。

(3) 教示システムの応答が臨界減衰するように制御系ゲインの値を設定することにより、滑らかな教示走行を実現することができる。

5章では、濃淡画像処理と光切断法処理を統合する手法を提案し、実験によって確かめた。開発した本視覚センサが以下の特長を持っているということが実験でわかった。

(1) この手法によって、シール対象のシーリングの初期位置・姿勢の合計6自由度について、偏差を検出することができる。

(2) 本視覚センサは光切断法のみでは検出できないシーリングの開始位置・姿勢を検出することができるため、シーリングロボットがシーリング作業を開始する前に、その値を基に初期位置・姿勢の偏差を修正することができる。

6章では、視覚センサより検出したシール対象の継目位置と姿勢を用いてロボットを予見制御する方法を提案し、実験によってその有効性を確かめた。本実験の結果、提案手法について以下のことがわかった。

(1) 開始位置で検出したロボットの偏差を用い、事前に教示した目標軌道全体を修正することによって、シール対象の位置と姿勢のずれを修正することができる。

(2) 継目位置の予見偏差を用いて目標軌道を実時間で補正する本手法は、視覚センサから検出した継目偏差を遅れなく補正することができる。

(3) 提案した二次ホールドを用いて、ロボット各関節の目標信号を補正することができ、継目位置追跡サーボ系を用いることなしに、視覚センサから検出した偏差を実時間で補正することができた。

謝 辞

本研究を進めるに当たって博士課程前期から一貫して熱心にご指導くださった横浜国立大学 藤堂勇雄教授に厚くお礼申し上げます。

研究および実験を行うに当たって、貴重なご助言とご教示をいただいた大学院生（トキコ（株）研究所主任研究員）内海典之氏に深く感謝いたします。

また、論文をまとめるに当たって機会あるごとにご指導くださった関口 隆教授、山口 惇教授、田中 裕久教授、高田 一助教授に謝意を表します。

研究を遂行することに当たって、多大のご協力をいただいた桑原技官ならびに藤堂研究室の諸氏に謝意を表します。

文 献

視覚センサ付きシーリングロボットに関連する論文

- (1) Sawano, S., Ikeda, J., Utsumi, N., Ohtani, Y., Kikuchi, A. and Ito, Y.:
"A Sealing Robot System with Visual Seam Tracking," *Robotica*, 2(1984),
pp. 41-46.
- (2) 有馬仁志・蓮仏達也: "シーリングロボット用車体位置ずれ補正システムの
開発," *Tokico Review*, 32-3(1988), p. 1-8.

Off-Line teaching に関連する論文

- (3) Buchal R. O., Cherchas D. B., Sassani F. and Duncan J. P.: "Simulated Off-
Line Programming of Welding Robots," *International Journal of Robotics
Research*, 8-3(1989), pp. 31-43.
- (4) Hornick M. and Ravani B.: "Computer-Aided Off-Line Planning and
Programming of Robot Motion." *Int. J. Robotics Res.* 4-4(1986), pp. 18-31.
- (5) 沖野教郎: "ロボットプログラミングとシミュレーション," 日本ロボット
学会誌, 3-2(1985), pp. 118-123.
- (6) 長谷川勉: "マニピュレータの障害物回避動作の自動計画," 日本ロボット学
会誌, 5-6(1987), pp. 475-479.

ニューラルネットワークを用いた画像認識に関連する論文

- (7) 福見 稔・細川直史・大松 繁: "ニューラルネットワークによる位置ずれ
・回転に不変なパターン認識システム," 電気学会論文誌, 110-3, C(1990),
148-155.
- (8) 林 陽一・坂田正輝・中尾隆司・大橋新悟: "分散法による英数字認識能力,"
電気学会論文誌, 110-3, C(1990), pp. 156-165.
- (9) 渡辺澄夫: "ニューラルネットワークによる画像処理の産業への応用," テ

レビジョン学会誌, 46-11(1992), pp. 1454-1459.

光切断法を用いた視覚センサに関する論文

- (10) Agapakis, J. E. : "Approaches for Recognition and Interpretation of Workpiece Surface Features Using Structured Lighting," *International Journal of Robotics Research*, 9-5(1990), pp. 3-16.
- (11) 藤田 憲・松本 長 : "視覚センシング技術," 溶接学会誌, 63-7(1994), pp. 511-515
- (12) 二宮隆典・広井高志・中川泰夫 : "斜め十字型スリット光を用いたロボット用小型3次元センサ," 計測自動制御学会論文集, 23-10(1987), pp. 1009-1016.
- (13) 成瀬 央・野村由司彦・山本俊雄 : "スリット光投影法による高精度距離・姿勢計測," 電子通信学会論文誌, J 69-D-12(1986), pp. 1888-1895.
- (14) 小関 修・中野倫明・山本 新 : "距離画像を用いた3次元物体の認識方式," 電子通信学会論文誌, J 69-D-1(1986), pp. 111-112.
- (15) 小関 修・中野倫明・山本 新 : "光切断法を用いた実時間距離検出装置," 電子通信学会論文誌, J 68-D-5(1985), pp. 1141-1148.
- (16) 小関 修・樋口和則・山本 新 : "三次元視覚センサを用いた自動車部品の寸法検査システム," 電子情報通信学会論文誌, Vol. 111-C-6(1991), pp. 249-255.
- (17) 樋口和則・小関 修・山本 新 : "三次元視覚センサによる自動車パネル寸法検査システム," 電子情報通信学会論文誌, Vol. 112-C-2(1992), pp. 117-124.
- (18) 佐藤宏介・井口征士 : "空間コード化による距離画像入力," 電子通信学会論文誌, J 68-D-3(1985), pp. 369-375.
- (19) 荒木和男・田中伸宜・藤野智浩・佐藤幸男 : "高速3次元形状装置の試作," 電子情報通信学会論文誌, J 71-D-10(1988), pp. 2059-2068.
- (20) 小林康志・後藤有一郎・高橋秀年・畑中義式 : "CCDラインセンサとレーザスキャナを用いた3次元形状計測," テレビジョン学会誌, 46-11(1992), pp. 1505-1513.
- (21) 井口征士・有田秀禎・上杉満昭 : "画像計測システムと並列画像処理装置,"

テレビジョン学会誌, 46-11(1992), pp. 1429-1438.

- (22) Agapakis, J. E., Katz, J. M., Friedman, J. M. and Epstein, G. N. : "Vision-Aided Robotic Welding: An Approach and a Flexible Implementation," *International Journal of Robotics Research*, 9-5(1990), pp. 17-33.

光切断法以外の手法を用いた位置と姿勢を検出するための視覚センサとロボット制御への応用に関する論文

- (23) Skaar, S. B., Brockman, W. H. and Jang, W. S. : "Three-Dimensional Camera Space Manipulation," *International Journal of Robotics Research*, 9-4(1990), pp. 22-39.
- (24) Kriegman, D. J., Triendl, E. and Binford, T. O. : "Stereo Vision and Navigation in Buildings for Mobile Robots," *IEEE Transaction on Robotics And Automation*, Vol. 5-6(1989), pp. 792-803.
- (25) Zhang, Z. and Faugeras, O. : "A 3D World Model Builder with a Mobile Robot," *International Journal of Robotics Research*, 11-4(1992), pp. 269-285.
- (26) Raviv, D., Pao, Y. H. and Loparo, K. A. : "Reconstruction of Three-Dimensional Surfaces from Two-Dimensional Binary Images," *IEEE Transaction on Robotics And Automation*, Vol. 5-5(1989), pp. 701-710.
- (27) 田島譲二・岩川正人 : "Rainbow Range Finder による距離画像取得," 電子情報通信学会論文誌, J 71-D-II-10(1990), pp. 374-382.
- (28) 菅 泰雄・佐野嘉一・北岡利道 : "視覚センシング溶接ロボットにおけるC M V C法による溶接線追従制御性の向上," 日本機械学会論文集, C編, 60-572(1994), pp. 1453-1458.
- (29) 菅 泰雄・池田泉広 : "視覚溶接ロボットによる溶接線認識とその自動追従に及ぼす画像処理の効果," 日本機械学会論文集, C編, 58-552(1992), pp. 2566-2571.
- (30) 菅 泰雄・石井秀明 : "自律走行型パイプ溶接ロボットによる溶接線の検出と追従制御," 日本機械学会論文集, C編, 59-558(1993), pp. 593-599.

- (31) 農宗千典 : “自動車における画像処理,” テレビジョン学会誌, 46-8(1992), pp. 978-984.
- (32) Vincze, M., Prenninger, J.P. and H.Gander : “A Laser Tracking System to Measure Position and Orientation of Robot End Effectors Under Motion,” *International Journal of Robotics Research*, 13-4(1994), pp. 305-314.
- (33) Heeren, A.G., Veldpaus, F.E. : “An Optical System to Measure the End Effector Position for On-Line Control Purposes,” *International Journal of Robotics Research*, 11-1(1992), pp. 53-63.

視覚センサを用いたマニピュレータの制御に関する論文

- (34) Feddema, J.T. and Mitchell, O.R. : “Vision-Guided Servoing with Feature-Based Trajectory Generation,” *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 5-5(1989), pp. 691-700.
- (35) Weiss, L. E., Sanderson, A.C. and Neuman, C.P. : “Dynamic Sensor-Based Control of Robots With Visual Feedback,” *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. Ra-3-5(1987), pp. 404-417.
- (36) Ishii, M., Sakane, S., Kakikura, M. and Mikami, Y. : “A 3-D Sensor System for Teaching Robot Paths and Environments,” *International Journal of Robotics Research*, 6-2(1987), pp. 45-59.
- (37) 大嶋健司・山根 敏 : “ニューロ・ファジィ制御によるロボット溶接の適応制御技術,” 溶接学会誌, 63-7(1994), pp. 516-522
- (38) 橋本秀紀・久保田 孝・佐藤基夫・原島文雄 : “視覚情報によるマニピュレータの位置・姿勢制御,” 日本ロボット学会誌, 8-4(1990), pp. 390-396.
- (39) 大嶋健司・山本充義・藤井一男・金子裕良・多田隈 進 : “適応制御のGM A溶接への応用,” 電気学会論文誌, 108-3, D(1988), pp. 330-337.
- (40) Skaar, S. B., Brockman, W. H. and Hanson, R. : “Camera-Space Manipulation,” *International Journal of Robotics Research*, 6-4(1987), pp. 20-32.
- (41) Kabuka, M., Mcyey, E. and Shiponoshita, P. : “An Adaptive Approach to Video Tracking,” *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4-2 (1988),

- pp. 228-236.
- (42) Dzialo, K. A. and Schalkoff, R. J. : "Control Implications in Tracking Moving Objects Using Time-Varying Perspective-Projective Imagery," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. IE-33-3(1986), pp. 247-253.
- (43) Mochizuki, J., Takahashi, M. and Hata, S. : "Unpositioned Workpieces Handling Robot with Visual and Force Sensors," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. IE-34-1(1987), pp. 1-4.

書 籍

- (44) 南 敏・中村 納 : "画像工学," (1992), p. 103, コロナ社.
- (45) Paul, R. P. : "Robot Manipulators," (1981), p. 13およびp. 15, MIT Press.
- (46) Paul, R. P. : "Robot Manipulators," (1981), p. 90, MIT Press.
- (47) 谷口 修・堀込泰雄 : "計測工学", (1980), p. 10, 森北出版.

本研究に関連した著者の発表論文

1. 論文

- (1) 張 曉林・沢野 進・富川英亮・藤堂勇雄：“シーリングロボットのためのニューラルネットワークを用いた継目位置検出法”，日本機械学会論文集，C編，59巻，563号(1993-7)，pp. 2191-2198.
- (2) 張 曉林・藤堂勇雄：“距離情報と濃淡情報の統合に基づく継目位置検出法を用いたシーリングロボットの制御”，日本機械学会論文集，C編，60巻，577号(1994-9)，(論文No. 93-1879).

2. 講演論文

- (1) 張 曉林・沢野 進・富川英亮：“視覚センサ付きシーリングロボットのためのニューラルネットワークを用いた高速シール位置検出法”，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集，No. 910-31，B(1991-6)，pp. 227-232.
- (2) 張 曉林・藤堂勇雄：“シーリングロボットのための距離情報と濃淡情報の統合に基づく継目ライン検出法”，日本機械学会 第70期通常総会講演会講演論文集，No. 930-90，Ⅲ(1993-3, 4)，pp. 501-503.
- (3) 張 曉林・藤堂勇雄：“距離情報と濃淡情報の統合に基づく継目ライン検出法を用いたシーリングロボットの制御”，日本機械学会 第71期全国大会講演論文集，No. 930-63，F(1993-10)，pp. 4-6.

付 録

A. マニピュレータ

A・1 仕様

本論文では、シーリングロボットの本体として、安川電機(株)製の6自由度並行リンクマニピュレータ Motoman K3S と用いた。Motoman K3S には、位置決定用の軸に定格トルク0.955[N・m]のACサーボモータが3個、姿勢決定用の軸に定格トルク0.159[N・m]のACサーボモータが3個、減速機を介してそれぞれ用いられている。制御装置として、安川電機(株)製のティーチング・プレイバック・コントローラ YASNUC ERC が取り付けられ、ERCは、位置決め精度や、繰り返し精度は極めて高いが、ユーザに個々のモータの情報を提供するシステムを持っていない。本研究では、6個のモータを独自の方式で制御する必要があるため、個々のモータに適合するサーボドライバを用い、6個のモータを、パーソナルコンピュータで制御する方法を採用した。サーボドライバと、制御を行うパーソナルコンピュータの間のインタフェース回路については、(株)コンテック製のインタフェース・モジュールを中心に、設計・製作が行われている。

以下では、6自由度並行リンクマニピュレータ Motoman K3S と制御装置(パーソナルコンピュータシステム)を含む周辺装置の仕様を示す。

図A・1に実験装置を示す。マニピュレータの6個のモータは、サーボドライバ、インタフェース回路を介してパーソナルコンピュータで制御される。演算時間短縮のため、制御にはトランスピュータを用いている。

A・1・1 モータ、サーボドライバの仕様

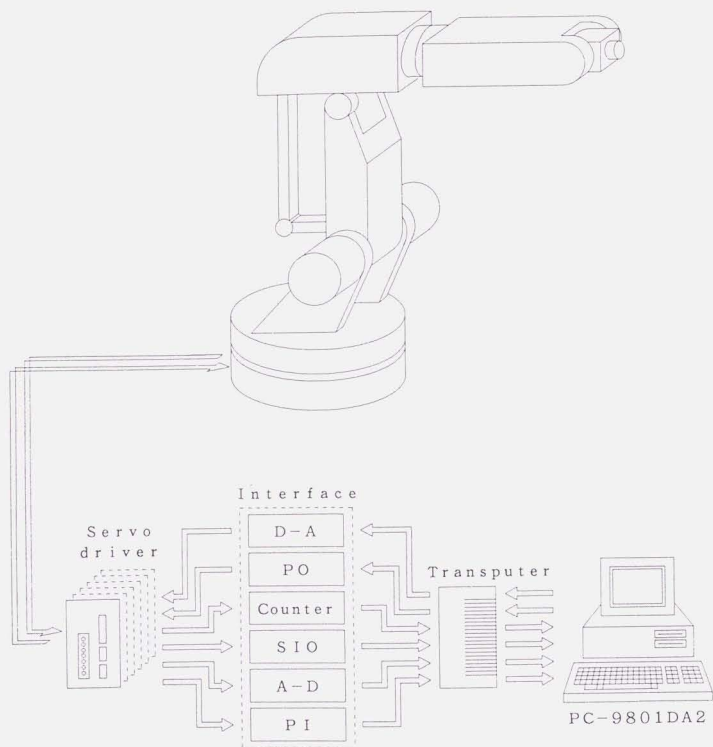
(1) モータ、サーボドライバの型名
位置決定用(ブレーキなし)

モータ : 安川電機(株)製 Pシリーズ USAPEM-03CW2X

ドライバ : 同 CACR-SR03AY1WP

位置決定用(ブレーキ付き)

モータ : 安川電機(株)製 Pシリーズ USAPEM-03CW2XB



図A・1 マニピュレータ Motoman K3S と制御装置

ドライバ： 同 CACR-SR03AY1WP
姿勢決定用
モータ：安川電機(株)製 Rシリーズ USAREM-A5CS2X
ドライバ： 同 CACR-SRA5AY1SR

(2) モータとサーボドライバの組み合わせ仕様

位置決定用

定格出力：300[W]
定格トルク：0.955[N・m]
定格回転数：3000[rpm]
連続最大トルク：0.955[N・m]
瞬時最大トルク：2.86[N・m]
最大回転数：4500[rpm]
許容負荷イナーシャ： 4.9×10^{-4} [kg・m²]

姿勢決定用

定格出力：50[W]
定格トルク：0.159[N・m]
定格回転数：3000[rpm]
連続最大トルク：0.19[N・m]
瞬時最大トルク：0.476[N・m]
最大回転数：4500[rpm]
許容負荷イナーシャ： 0.764×10^{-4} [kg・m]

(3) モータ仕様

位置決定用 (ブレーキなし)

ロータイナーシャ： 0.98×10^{-4} [kg・m²]
許容ラジアル荷重：196[N]
許容スラスト荷重：58.8[N]
温度変動：25±25[°C]
質量：2.3[kg]

外形寸法（直径×高さ）： $\phi 95 \times 100$ [mm]

位置決定用（ブレーキ付き）

ロータイナーシャ： 1.405×10^{-4} [kg·m²]

許容ラジアル荷重：196 [N]

許容スラスト荷重：58.8 [N]

温度上昇： 25 ± 25 [°C]

質量：3.3 [kg]

外形寸法（直径×高さ）： $\phi 95 \times 126$ [mm]

姿勢決定用

ロータイナーシャ： 0.0764×10^{-4} [kg·m²]

許容ラジアル荷重：78.4 [N]

許容スラスト荷重：39.2 [N]

温度上昇： 25 ± 25 [°C]

質量：1.5 [kg]

外形寸法（直径×高さ）： $\phi 50 \times 149$ [mm]

（４） サーボドライバ仕様

標準的なサーボドライバの制御方式は、入力信号として速度指令を与え、サーボドライバ内で行われる速度制御を、P制御にするか、P I制御にするかを、シーケンス入力により選択する方式である。本研究で用いているサーボドライバは、安川電機(株)によるトルク指令となるよう改造されている。速度フィードバック信号の短絡と、P I制御部の積分器のバイパスで、サーボドライバ内の制御方式は、トルク指令に対するP制御に固定されている。これにより、P制御、P I制御の選択を行うシーケンス入力と、速度指令の補助入力は無効になっている。

入力信号（トルク指令）：アナログ電圧DC ± 6 [V] / 定格トルク

（シーケンス）：DC 0 [V] (ON), DC 24 [V] (OFF)

出力信号（絶対位置）：シリアルデータ（調歩同期, 9600ボー）出力完了後

初期インクリメンタルパルス（パルス払い出し速度：約
2747 rpm相当）をラインドライバ出力（A相）

（位置）：ラインドライバ出力（A相, B相, C相）

（速度）：アナログ電圧DC ± 2 [V] / 1000 [rpm]

(トルク) : アナログ電圧DC±3[V] / 定格トルク

(シーケンス) : DC 0[V](ON), DC 24[V](OFF)

入力電源 : AC 200[V]

A・1・2 制御装置・使用言語

制御装置であるプロセッサの性能は、制御系の性能をほぼ決定するといつてよい。制御に用いるプロセッサの採用基準として、処理速度、記憶容量、操作性、対環境性、アプリケーションソフトの流通性、周辺機器の流通性などが上げられる。本研究では、制御用プロセッサとして、複数のプロセッサの並列演算を可能にするトランスピュータを採用した。

制御用コンピュータ

コンピュータシステム : 日本電気(株)PC-9801DA2 (80386+80387, 20MHz)

トランスピュータ : 国際データシステム(株)製TP-38A (T805×3, 30MHz)

プログラミング言語 : Microsoft-C (MS-C) Ver. 5.10

Parallel C Ver. 2.2.2

A・1・3 制御用インタフェース

制御用コンピュータとサーボドライバ間での信号の受け渡しの中心となるインタフェース回路の各モジュールは、以下のとおりである。このインタフェース・モジュールと制御用コンピュータ間、インタフェース・モジュールとサーボドライバ間の信号の受け渡しには、ユーザが設計するインタフェース回路が必要となる。

A・1・4 パワーシーケンス

サーボドライバに供給するAC 200[V]の電源は、主回路電源と制御用電源の2種類である。前者は、ドライバ内のパワー回路を介してモータに供給されるため、マニピュレータの運転状況に応じて、比較的頻繁にON/OFFされる。また、マニピュレータが暴走したときの非常停止スイッチとも連動してON/OFFされる。この主回路電源のON/OFFはコンピュータによってソフト的に行われ、マニピュレータの動作をソフト的に監視するソフトリミットシステムの異常動作検知信号とも連動している。後者は、サーボドライバ内の制御用電源であり、実験が続いている間は、ON

にしたままである。

A・2 マニピュレータの順運動学^(4,5)

本項では、マニピュレータの運動解析を行う際の基礎となる数学的記述法について述べ、本研究で用いる6自由度並行リンクマニピュレータの順運動学方程式を求める。

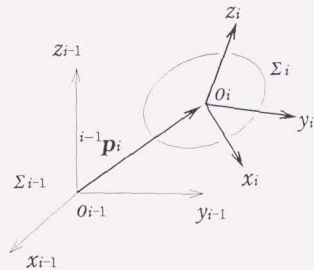
A・2・1 同次変換

ここでは、マニピュレータの座標変換を記述するための同次変換について説明する。3次元空間におけるマニピュレータ、工具、作業対象物などの位置、姿勢を数学的に表現するには、力学で一般に行われている、剛体の位置、姿勢の表現法を用いる。すなわち、ある直交座標系（基準座標系）から見た場合の、剛体に固定した直交座標系（物体座標系）の原点位置、および各座標軸の方向によって表現する。

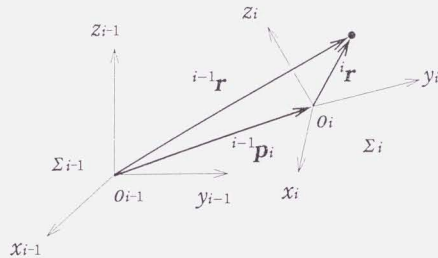
図A・2に示すように、基準座標系を Σ_{i-1} 、物体座標系を Σ_i とする。 Σ_{i-1} で表した Σ_i の原点 O_i の位置ベクトルを ${}^{i-1}\mathbf{p}_i$ 、 x_i 、 y_i 、 z_i 軸方向の単位ベクトルを ${}^{i-1}\mathbf{x}_i$ 、 ${}^{i-1}\mathbf{y}_i$ 、 ${}^{i-1}\mathbf{z}_i$ とすると、 Σ_{i-1} から見た物体の位置は ${}^{i-1}\mathbf{p}_i$ で、その姿勢は $\{{}^{i-1}\mathbf{x}_i, {}^{i-1}\mathbf{y}_i, {}^{i-1}\mathbf{z}_i\}$ で表現することができる。この姿勢を表す3つのベクトルをまとめて、

$${}^{i-1}\mathbf{R}_i = [{}^{i-1}\mathbf{x}_i, {}^{i-1}\mathbf{y}_i, {}^{i-1}\mathbf{z}_i] \dots\dots\dots (A\cdot1)$$

と表すことができ、この 3×3 行列 ${}^{i-1}\mathbf{R}_i$ を回転行列と呼ぶ。



図A・2 基準座標系と物体座標系



図A・3 同次変換

次に、図A・3に示すように2つの座標系 Σ_{i-1} と Σ_i が与えられ、 Σ_i の Σ_{i-1} に対する位置が ${}^{i-1}P_i$ で、姿勢が ${}^{i-1}R_i$ で与えられているとする。このとき、 Σ_i に関して ${}^i r$ で表現された点を Σ_{i-1} で表現すると、

$${}^{i-1} r = {}^{i-1} R_i {}^i r + {}^{i-1} p_i \quad \dots\dots\dots (A\cdot 2)$$

となる。この関係は、

$$\begin{bmatrix} {}^{i-1} r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{i-1} R_i & {}^{i-1} p_i \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^i r \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{i-1} T_i \begin{bmatrix} {}^i r \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A\cdot 3)$$

と表現することができ、ベクトル Σ_{i-1} に関する表現から Σ_i に関する表現への変換が、ただ1つの行列 ${}^{i-1} T_i$ を乗じるだけであるという表現の簡潔さが得られる。この 4×4 行列 ${}^{i-1} T_i$ を同次変換行列と呼び、同次変換行列 ${}^{i-1} T_i$ で表現されている変換を同次変換と呼ぶ。

マニピュレータの各関節に伴う座標系間の関係を表すには、各座標軸をリンクの主軸の方向や関節軸方向に一致させれば、変換は並行移動と座標軸回りの回転移動の2種類で表すことができる。

まず、座標系を点 (p_x, p_y, p_z) を原点とする座標系へ並行移動させる変換行列は、

$$\text{Trans}(p_x, p_y, p_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A\cdot 4)$$

で表せる.

次に, x, y, z 軸回りにそれぞれ角度 θ だけ回転した座標系へ移動させる変換行列は, 以下のようになる.

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A.5)$$

$$\text{Rot}(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A.7)$$

同次変換行列 ${}^{i-1}T_i$ は, Trans や Rot といった変換の組み合わせで表記できる. 一般にある座標系に対して, 並進と回転をさせて新しい座標系をつくる時, もとの座標系を表す変換行列に並進や回転を表す変換行列を右から掛けることにより, 新しい座標系を作ることができる.

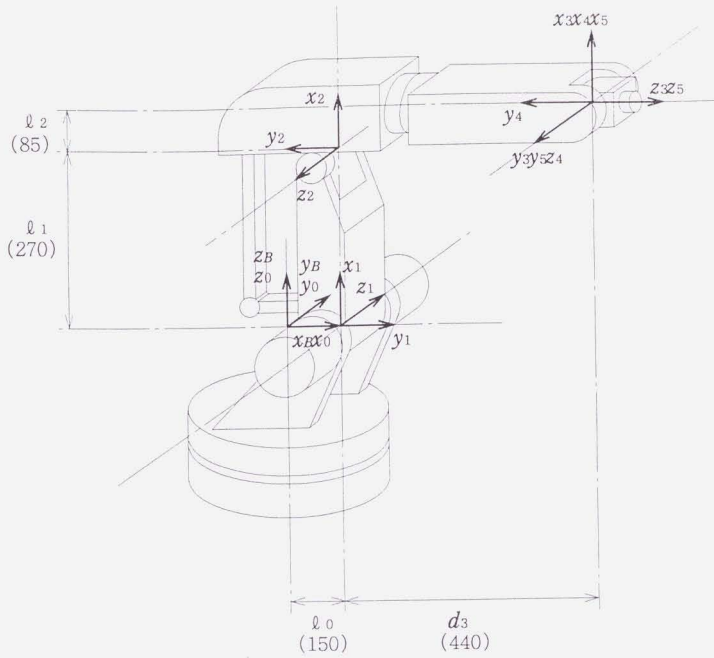
これら4つの変数をリンクパラメータとよぶ. i 番目の関節が回転関節の場合は θ_i が, 直動関節の場合は d_i が関節変数となる.

本研究で用いる6自由度並行リンクマニピュレータに配置したリンク座標系に関するリンクパラメータを表A.1に示す.

リンク座標系 Σ_{i-1} から Σ_i への変換は, リンクパラメータを用いると次のようになる.

- 1) x_{i-1} 軸回りに α_{i-1} だけ回転
- 2) x_{i-1} 軸方向に沿って a_{i-1} だけ並進
- 3) z_i 軸回りに θ_i だけ回転
- 4) z_i 軸方向に沿って d_i だけ並進

これらの変換を同次変換行列を用いて表すと,



図A・4 MOTMAN K3S と リンク座標系

表A・1 MOTOMAN K3S の リンクパラメータ

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
B	0	0	—	—
0	l_0	$-\frac{\pi}{2}$	0	θ_0
1	l_1	π	0	θ_1
2	l_2	$\frac{\pi}{2}$	d_3	θ_2
3	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	θ_3
4	0	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_4
5	—	—	0	θ_5

$$\begin{aligned}
{}^{i-1}T_i &= \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \\
&\quad \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \\
&= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A}\cdot 8)
\end{aligned}$$

となる。ただし、式の簡略化のため正弦、余弦を次のように略記している。

$$s\theta_i = \sin\theta_i, \quad c\theta_i = \cos\theta_i, \quad s\alpha_{i-1} = \sin\alpha_{i-1}, \quad c\alpha_{i-1} = \cos\alpha_{i-1}$$

以上より、本研究で用いる6自由度並行リンクマニピュレータにおける基準座標系 Σ_n から最先端のリンク座標系 Σ_5 への同次変換行列 ${}^B T_5$ を求める。

リンク座標系 Σ_{i-1} から Σ_i への同次変換行列 ${}^{i-1}T_i$ は次のようになる。

$${}^B T_0 = \begin{bmatrix} c_0 & -s_0 & 0 & 0 \\ s_0 & c_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A}\cdot 9)$$

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A}\cdot 10)$$

$${}^1 T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A}\cdot 11)$$

$${}^2 T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A}\cdot 12)$$

$${}^3 T_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A}\cdot 13)$$

$${}^A T_5 = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A \cdot 14)$$

式(2-13)～(2-18)より, 基準座標系 Σ_B からリンク座標系 Σ_i への同次変換行列 ${}^B T_i$ は,

$${}^B T_1 = {}^B T_0 \cdot {}^0 T_1 = \begin{bmatrix} c_0 c_1 & -c_0 s_1 & -s_0 & c_0 l_0 \\ c_1 s_0 & -s_0 s_1 & c_0 & s_0 l_0 \\ -s_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A \cdot 15)$$

$${}^B T_2 = {}^B T_1 \cdot {}^1 T_2 = \begin{bmatrix} c_0 c_{12} & c_0 s_{12} & s_0 & c_0 (c_1 l_1 + l_0) \\ s_0 c_{12} & s_0 s_{12} & -c_0 & s_0 (c_1 l_1 + l_0) \\ -s_{12} & c_{12} & 0 & -s_1 l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A \cdot 16)$$

$${}^B T_3 = {}^B T_2 \cdot {}^2 T_3 = \begin{bmatrix} r_{113} & r_{123} & r_{133} & p_{x3} \\ r_{213} & r_{223} & r_{233} & p_{y3} \\ r_{313} & r_{323} & r_{333} & p_{z3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A \cdot 17)$$

$$r_{113} = c_0 c_3 c_{12} - s_0 s_3$$

$$r_{123} = - (c_0 s_3 c_{12} - c_3 s_0)$$

$$r_{133} = -c_0 s_{12}$$

$$p_{x3} = c_0 (c_{12} l_2 - s_{12} d_3 + c_1 l_1 + l_0)$$

$$r_{213} = - (c_0 s_3 - c_3 s_0 c_{12})$$

$$r_{223} = - (c_0 c_3 + s_0 s_3 c_{12})$$

$$r_{233} = -s_0 s_{12}$$

$$p_{y3} = s_0 (c_{12} l_2 - s_{12} d_3 + c_1 l_1 + l_0)$$

$$r_{313} = -c_3 s_{12}$$

$$r_{323} = s_3 s_{12}$$

$$r_{333} = -c_{12}$$

$$p_{z3} = - (c_{12} d_3 + s_{12} l_2 + s_1 l_1)$$

$${}^B T_4 = {}^B T_3 \cdot {}^3 T_4 = \begin{pmatrix} r_{114} & r_{124} & r_{134} & p_{x4} \\ r_{214} & r_{224} & r_{234} & p_{y4} \\ r_{314} & r_{324} & r_{334} & p_{z4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A \cdot 18)$$

$$\begin{aligned} r_{114} &= c_0 c_3 c_4 c_{12} + c_0 s_4 s_{12} + c_4 s_0 s_3 \\ r_{124} &= - (c_0 c_3 s_4 c_{12} - c_0 c_4 s_{12} + s_0 s_3 s_4) \\ r_{134} &= - (c_0 s_3 c_{12} - c_3 s_0) \\ p_{x4} &= c_0 (c_{12} l_2 - s_{12} d_3 + c_1 l_1 + l_0) \\ r_{214} &= - (c_0 c_4 s_3 - c_3 c_4 s_0 c_{12} - s_0 s_4 s_{12}) \\ r_{224} &= c_0 s_3 s_4 - c_3 s_0 s_4 c_{12} + c_4 s_0 s_{12} \\ r_{234} &= - (c_0 c_3 + s_0 s_3 c_{12}) \\ p_{y4} &= s_0 (c_{12} l_2 - s_{12} d_3 + c_1 l_1 + l_0) \\ r_{314} &= s_4 c_{12} - c_3 c_4 s_{12} \\ r_{324} &= c_4 c_{12} + c_3 s_4 s_{12} \\ r_{334} &= s_3 s_{12} \\ p_{z4} &= - (c_{12} d_3 + s_{12} l_2 + s_1 l_1) \end{aligned}$$

$${}^B T_5 = {}^B T_4 \cdot {}^4 T_5 = \begin{pmatrix} r_{115} & r_{125} & r_{135} & p_{x5} \\ r_{215} & r_{225} & r_{235} & p_{y5} \\ r_{315} & r_{325} & r_{335} & p_{z5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A \cdot 19)$$

$$\begin{aligned} r_{115} &= c_0 c_3 c_4 c_5 c_{12} - c_0 s_3 s_5 c_{12} + c_0 c_5 s_4 s_{12} + c_3 s_0 s_5 + c_4 c_5 s_0 s_3 \\ r_{125} &= - (c_0 c_3 c_4 s_5 c_{12} + c_0 c_5 s_3 c_{12} + c_0 s_4 s_5 s_{12} - c_3 c_5 s_0 + c_4 s_0 s_3 s_5) \\ r_{135} &= c_0 c_3 s_4 c_{12} - c_0 c_4 s_{12} + s_0 s_3 s_4 \\ p_{x5} &= c_0 (c_{12} l_2 - s_{12} d_3 + c_1 l_1 + l_0) \\ r_{215} &= - (c_0 c_3 c_4 s_5 + c_0 c_4 c_5 s_3 - c_3 c_4 c_5 s_0 c_{12} + s_0 s_3 s_5 c_{12} - c_5 s_0 s_4 s_{12}) \\ r_{225} &= - (c_0 c_3 c_5 - c_0 c_4 s_3 s_5 + c_3 c_4 s_0 s_5 c_{12} + c_5 s_0 s_3 c_{12} + s_0 s_4 s_5 s_{12}) \\ r_{235} &= - (c_0 s_3 s_4 - c_3 s_0 s_4 c_{12} + c_4 s_0 s_{12}) \\ p_{y5} &= s_0 (c_{12} l_2 - s_{12} d_3 + c_1 l_1 + l_0) \\ r_{315} &= c_5 s_4 c_{12} - c_3 c_4 c_5 s_{12} + s_3 s_5 s_{12} \\ r_{325} &= - (s_4 s_5 c_{12} - c_3 c_4 s_3 s_{12} - c_5 s_3 s_{12}) \end{aligned}$$

$$r_{335} = - (c_4 c_{12} + c_3 s_4 s_{12})$$

$$p_{z5} = - (c_{12} d_3 + s_{12} l_2 + s_1 l_1)$$

ただし,

$$s_i = \sin \theta_i, \quad c_i = \cos \theta_i, \quad s_{12} = \sin (\theta_1 - \theta_2), \quad c_{12} = \cos (\theta_1 - \theta_2)$$

以上により, 関節角度から手先のリンク座標系 Σ_5 の, 基準座標系 Σ_B に対する位置, および姿勢を与える同次変換行列 ${}^B T_5$ が得られた.

A・2・2 マニピュレータの順運動学関数

運動学関数 $\Lambda (\theta)$ は, 関節座標系の位置である関節角度ベクトル θ から, マニピュレータ先端のリンク座標系 Σ_5 の, 基準座標系 Σ_B に対する位置・姿勢ベクトル \mathbf{x} を与えるものである. つまり,

$$\mathbf{x} = \Lambda (\theta)$$

で表される座標変換である. 一般的には, 位置・姿勢ベクトル \mathbf{x} は 6 次元の成分をもつ. 本研究では, 6×1 の位置・姿勢ベクトル \mathbf{x} を次のように定める.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} {}^B p_5 \\ {}^B k_5 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (A \cdot 20)$$

ただし,

${}^B p_5$: 基準座標系 Σ_B に対するリンク座標系 Σ_5 の位置ベクトル

${}^B k_5$: 基準座標系 Σ_B からリンク座標系 Σ_5 への回転に対する等価回転ベクトル

順運動学関数 Λ は, マニピュレータの同次変換行列 ${}^B T_5$ より求まる. 基準座標系 Σ_B に対するリンク座標系 Σ_5 の位置, 姿勢を表す同次変換ベクトル ${}^B T_5$ は,

$${}^B T_5 = \begin{bmatrix} {}^B R_5 & {}^B p_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (A \cdot 21)$$

で表される. ${}^B R_5$, ${}^B p_5$ の各成分は式 (A・19) により与えられる.

以上により, 関節角度からマニピュレータ先端のリンク座標系の位置, 姿勢を与える, 順運動学関数が得られた.

A・3 マニピュレータの逆運動学

本項では、順運動学の逆問題、すなわち、マニピュレータ先端の位置・姿勢ベクトル \mathbf{x} (${}^B T_5$ の全部または一部) が与えられた場合に、それを実現する関節角度ベクトル θ を与える逆運動学関数 (運動学関数の解)

$$\theta = \Lambda^{-1}(\mathbf{x}) = \Lambda^{-1}({}^B T_5)$$

を求める。運動学方程式の解法には、代数的、あるいは幾何学的考察により閉じた形の解を得る方法と、繰り返し計算アルゴリズムなどによって数値解を得る方法があるが、ここでは、代数的にマニピュレータの運動学方程式を解くことにする。

マニピュレータ先端のリンク座標系 Σ_5 の基準座標系に対する変換行列 ${}^B T_5$ は、

$${}^B T_5 = \begin{pmatrix} r_{115} & r_{125} & r_{135} & p_{x5} \\ r_{215} & r_{225} & r_{235} & p_{y5} \\ r_{315} & r_{325} & r_{335} & p_{z5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (A\cdot 22)$$

$$= {}^B T_0(\theta_0)^0 T_1(\theta_1)^1 T_2(\theta_2)^2 T_3(\theta_3)^3 T_4(\theta_4)^4 T_5(\theta_5)$$

で与えられる。 θ_0 に関する項を左辺に移すと、

$$[{}^B T_0(\theta_0)]^{-1} \cdot {}^B T_5 = {}^0 T_1(\theta_1)^1 T_2(\theta_2)^2 T_3(\theta_3)^3 T_4(\theta_4)^4 T_5(\theta_5)$$

あるいは、

$$\begin{pmatrix} c_0 & s_0 & 0 & 1 \\ -s_0 & c_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{115} & r_{125} & r_{135} & p_{x5} \\ r_{215} & r_{225} & r_{235} & p_{y5} \\ r_{315} & r_{325} & r_{335} & p_{z5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = {}^1 T_5 \dots\dots\dots (A\cdot 23)$$

式(A・23)の両辺の(2, 4)成分を取り出すと、

$$-s_0 p_{x5} + c_0 p_{y5} = 0 \dots\dots\dots (A\cdot 24)$$

となる。上式を解くために三角関数による置き換えを行う。

$$p_{x5} = \rho \cos \phi, \quad p_{y5} = \rho \sin \phi \dots\dots\dots (A\cdot 25)$$

ここで、

$$\rho = (p_{x5}^2 + p_{y5}^2)^{1/2}, \quad \phi = \text{Atan2}(p_{x5}, p_{y5}) \dots\dots\dots (A\cdot 26)$$

である。式(A・25)を式(A・24)に代入すると、

$$c_0 s \phi - s_0 c \phi = 0$$

加法定理を用いると、

$$\sin(\phi - \theta_0) = 0$$

となる。したがって、

$$\cos(\phi - \theta_0) = \pm 1 \quad \dots\dots\dots (A\cdot 27)$$

より、

$$\phi - \theta_0 = \text{Atan2}(0, \pm 1)$$

が得られる。以上より θ_0 についての解は、次のようになる。

$$\theta_0 = \text{Atan2}(p_{x5}, p_{y5}) - \text{Atan2}(0, \pm 1) \quad \dots\dots\dots (A\cdot 28)$$

式(A・28)の符号の正負によって θ_0 には2つの解が存在する。 θ_0 が求まれば、

式(A・23)の左辺は既知となる。式(A・23)の(1, 4)成分と(3, 4)成分を取り出すと、

$$c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5} - l_0 = c_{12} l_2 - s_{12} d_3 + c_1 l_1 \quad \dots\dots\dots (A\cdot 29)$$

$$p_{z5} = -c_{12} d_3 - s_{12} l_2 - s_1 l_1 \quad \dots\dots\dots (A\cdot 30)$$

式(A・29)、式(A・30)、式(A・24)の両辺を2乗して、辺々を加えると、次式を得る。

$$l_2 c_2 + d_3 s_2 = K \quad \dots\dots\dots (A\cdot 31)$$

ただし、

$$K = (p_{x5}^2 + p_{y5}^2 + p_{z5}^2 - 2l_0(c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5}) + l_0^2 - l_1^2 - l_2^2 - d_3^2) / 2l_1 \quad \dots\dots\dots (A\cdot 32)$$

である。同様に三角関数による置き換えを行えば、 θ_2 について解くことができ、

$$\theta_2 = \text{Atan2}(l_2, -d_3) - \text{Atan2}(K, \pm (l_2^2 + d_3^2 - K^2)^{1/2}) \quad \dots\dots\dots (A\cdot 33)$$

となる。式(A・33)の符号の正負によって θ_2 に2つの解が存在する。

ここで、式(A・22)について再び考えると、左辺は既知の変数と θ_1 のみの関数として次のようになる。

$$[{}^B T_2(\theta_1)]^{-1} \cdot {}^B T_5 = {}^2 T_3(\theta_3) {}^3 T_4(\theta_4) {}^4 T_5(\theta_5) \quad \dots\dots\dots (A\cdot 34)$$

あるいは、

$$\begin{bmatrix} c_0 c_{12} & s_0 c_{12} & -s_{12} & -c_{12} l_0 - c_2 l_1 \\ c_0 s_{12} & s_0 s_{12} & c_{12} & -s_{12} l_0 + s_2 l_1 \\ s_0 & c_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{115} & r_{125} & r_{135} & p_{x5} \\ r_{215} & r_{225} & r_{235} & p_{y5} \\ r_{315} & r_{325} & r_{335} & p_{z5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^2 T_5 \quad \dots\dots\dots (A\cdot 35)$$

式(A・35)の両辺の(1, 4)成分と(2, 4)を取り出すと、

$$c_0 c_{12} p_{x5} + s_0 c_{12} p_{y5} - s_{12} p_{z5} - c_{12} l_0 - c_2 l_1 = l_2$$

$$s_0 s_{12} p_{x5} + s_0 s_{12} p_{y5} + c_{12} p_{z5} - s_{12} l_0 + s_2 l_1 = -d_3$$

となる。上記の2式を連立すると、 s_{12} と c_{12} について解くことができる。

$$s_{12} = \frac{-(d_3 + s_2 l_1)(c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5} - l_0) - p_{z5} l_2 - c_2 l_1 p_{z5}}{(c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5} - l_0)^2 + p_{z5}^2}$$

$$c_{12} = \frac{(l_2 + c_2 l_1)(c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5} - l_0) - p_{z5} d_3 - s_2 l_1 p_{z5}}{(c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5} - l_0)^2 + p_{z5}^2}$$

両式の分母は等しく、正なので、 θ_{12} は次のようになる。

$$\begin{aligned} \theta_{12} = \text{Atan2} [& -(d_3 + s_2 l_1)(c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5} - l_0) \\ & - p_{z5} (l_2 + c_2 l_1), (l_2 + c_2 l_1)(c_0 p_{x5} + s_0 p_{y5} - l_0) \\ & - p_{z5} (d_3 + s_2 l_1)] \quad \dots\dots\dots (A\cdot36) \end{aligned}$$

θ_{12} は、 θ_0 と θ_2 のとりうる組み合わせによって4通りの値をとる。よって、 θ_1 のとりうる四つの解は次のようになる。

$$\theta_1 = \theta_{12} + \theta_2 \quad \dots\dots\dots (A\cdot37)$$

ここで、 θ_2 の値は θ_{12} を求める際に用いたものを用いる。

これで、式(A·35)の左辺は完全に求まったことになる。ここで式(A·35)の両辺の(1,3)成分と(3,3)成分を取り出すと、

$$\begin{aligned} c_0 c_{12} r_{135} + s_0 c_{12} r_{235} - s_{12} r_{335} &= c_3 s_4 \\ s_0 r_{135} - c_0 r_{235} &= s_3 s_4 \quad \dots\dots\dots (A\cdot38) \end{aligned}$$

となる。 $s_4 \neq 0$ であれば、 θ_3 は、次のように解ける。

$$\begin{aligned} \theta_3 = \text{Atan2} (s_0 r_{135} - c_0 r_{235}, c_0 c_{12} r_{135} + s_0 c_{12} r_{235} - s_{12} r_{335}) \\ \dots\dots\dots (A\cdot39) \end{aligned}$$

$\theta_4 = 0$ のときは、マニピュレータは特異状態であり、3軸と5軸は同一直線上にあるため、先端のリンクに対し同じ動きを与えることになる特異状態の場合、 θ_3 は任意の値をとることができ(通常は現在の値)、 θ_5 は θ_3 の値を用いて計算される。

再び式(A·23)に戻ると、式(A·23)の左辺は、既知の変数と θ_3 のみの関数として次のように表せる。

$$[{}^B T_3(\theta_3)]^{-1} \cdot {}^B T_5 = {}^3 T_4(\theta_4) \cdot {}^4 T_5(\theta_5) \quad \dots\dots\dots (A\cdot40)$$

ここで, ${}^B T_3(\theta_3)^{-1}$ は

$$\begin{bmatrix} c_0c_3c_{12}+s_0s_3 & -(c_0s_3-c_3s_0c_{12}) & -c_3s_{12} & -c_3(c_{12}l_0+c_2l_1+l_2) \\ -(c_0s_3c_{12}-c_3s_0) & -(c_0c_3+s_0s_3c_{12}) & s_3s_{12} & s_3(c_{12}l_0+c_2l_1+l_2) \\ -c_0s_{12} & -s_0s_{12} & -c_{12} & s_{12}l_0-s_2l_1-d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(A\cdot 41)$$

で与えられる. 式(A\cdot 40)の両辺の(1, 3)成分と(3, 3)成分を取り出すと,

$$s_4 = r_{135}(c_0c_3c_{12}+s_0s_3) - r_{235}(c_0s_3-c_3s_0c_{12}) - r_{335}c_3s_{12}$$

$$c_4 = -r_{135}c_0s_{12} - r_{235}s_0s_{12} - r_{335}c_{12}$$

が得られる. よって θ_4 について次のように解くことができる.

$$\theta_4 = \text{Atan2}(s_4, c_4) \quad \dots\dots\dots(A\cdot 42)$$

同様に, ${}^B T_4^{-1}$ を計算して式(A\cdot 23)を次の形に変形する.

$${}^B T_4^{-1} {}^B T_5 = {}^4 T_5(\theta_5) \quad \dots\dots\dots(A\cdot 43)$$

式(A\cdot 43)の両辺の(3, 1)成分と(1, 1)成分を取り出すと,

$$s_5 = -r_{115}(c_0s_3c_{12}-c_3s_0) - r_{215}(c_0c_3+s_0s_3c_{12}) + r_{315}s_3s_{12}$$

$$c_5 = r_{115}(c_0c_3c_4c_{12}+c_0s_4s_{12}+c_4s_0s_3) - r_{215}(c_0c_4s_3-c_3c_4s_0c_{12} - s_0s_4s_{12}) + r_{315}(s_4c_{12}-c_3c_4s_{12})$$

が得られる. よって θ_5 について次のように解くことができる.

$$\theta_5 = \text{Atan2}(s_5, c_5) \quad \dots\dots\dots(A\cdot 44)$$

以上より, マニピュレータ先端の位置・姿勢ベクトル \mathbf{x} (${}^B T_5$ の全部または一部)が与えられた場合に, それを実現する関節角度ベクトル θ を与える逆運動学関数

$$\theta = \Lambda^{-1}(\mathbf{x}) = \Lambda^{-1}({}^B T_5) = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$$

が求まる. ただし,

$$s_i = \sin \theta_i, \quad c_i = \cos \theta_i, \quad s_{12} = \sin(\theta_1 - \theta_2), \quad c_{12} = \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

B. 視覚センサの仕様

本論文で提案した視覚センサは1台のCCDカメラと複数台の光源より構成される。カメラから取り込んだ画像はトランスピュータを搭載した画像処理ボードで処理し、その結果をロボット制御用コンピュータに送る。以下、CCDカメラ、光源、画像処理装置の仕様を示す。

B・1 CCDカメラの仕様

型名 : 松下通信工業(株)製 WV-KS152
撮像素子 : インターライン転送方式1/2インチCCD
画素数 : 682(H)×492(V)
同期方式 : 内部同期/外部同期
水平走行周波数 : 15.734[kHz]
垂直走行周波数 : 59.94[Hz]
解像度 : 水平430[TV本]以上
最低照度 : 5[Lux]
S/N比 : 46[dB]

B・2 光源の仕様

スポット光源 : 日本ピー・アイ(株)製 マイクロカメラ用リングライトガイド
PLPG-MR-2000P-6 と多機能拡張ファイバー光源装置 PICL-NRX
スリット光源 : アプライド企画(有)製 ラインマーカー STK-L670P-21SW

B・3 画像処理用コンピュータシステム

コンピュータ : 日本電気(株)製 PC-9801RA21
トランスピュータボード : エー・ディー・エス(株)製 TBPO6 フレームバッファ
ボード
プログラミング言語 : Microsoft-C (MS-C) Ver. 5.10
: ANSI C Ver. D7214B

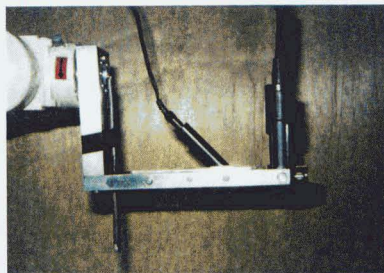
B・4 画像処理モジュール

画像入力ボード : エー・ディー・エス (株) 製 TDV08
フレームバッファボード : エー・ディー・エス (株) 製 TBP06
フレーム メモリ容量 : RGB各色水平1024×垂直512×色深度1[byte]

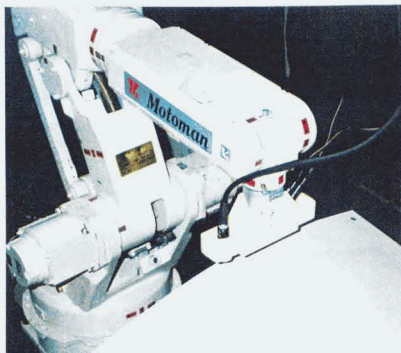
C. 実験装置の写真



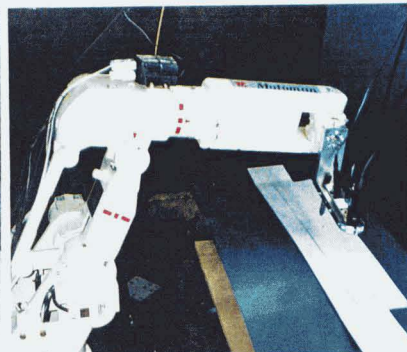
図C・1 3次元視覚センサ (第3章)



図C・2 濃淡情報と距離情報を統合する視覚センサ (第5章)



図C・3 目標軌道自動生成 (第4章)



図C・4 シール作業の予見制御(第6章)



図C・5 周辺機器

