光形近接覚センサを装着した8自由度マニピュレータによる障害物の局所回避制御

正員 山田 陽 滋 (豊田工業大)

正員 土田 縫 夫 (豊田工業大)

故上 田 実 (豊田工業大)

1. ま え が き

本研究は、マニピュレータの動作に冗長性を付加し、作業環境の変化の認識に近接覚を適用して再構成したロボットシステムに関するものである。このシステムは、従来の6自由度汎用形マニピュレータを母体としてその先端に2自由度をもつリンクを付加し、また、アームの表面上で障害物との干渉が予想される部分に光形近接覚センサを装着したものである。このシステムの改良によって、マニピュレータはその先端の位置および姿勢を保持しつつ接近する障害物との衝突をリアルタイムで自動回避するという、もとの6自由度マニピュレータのままでは不可能であった動作ができるようになった。

近年、産業用マニピュレータが高性能化ならびに知能化されるにつれて、多様な作業に対してロボットが適用し得るようになり、その作業内容にもわかに複雑化してきている。このような状況の下で、マニピュレータのワークや、作業環境あるいは同一作業環境内で稼動する他のロボットなどとの衝突が大問題化してきた。

そして、この障害物回避問題を解決するために、主に2リンクのマニピュレータに対して、障害物を避けながら目的となる位置まで移動させるための経路計画を与える方法として、障害物を単純な形状に近似したり⁽¹⁾、マニピュレータの肉厚だけを加味して記述して

おき⁽²⁾、これをマニピュレータの作業空間の中から除いておいて最短経路を見出すもの⁽³⁾、あるいは、関節角をパラメータとする状態空間の中でポテンシャル場を形成して、そのポテンシャルの谷間経路を発見するもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾などが提案されている。

これらはいずれも、マニピュレータの数値制御化や頻繁な生産ラインの工程変更に伴う柔軟性に対する要求、更にはグラフィック技術の進歩とともに主流となりつつある、オフラインシミュレータをターゲットとしているものである。

しかし、以上に掲げたシミュレータを用いる方法においては、あらかじめ障害物の存在がわかっており、その記述が可能であるという前提条件が必要であり、不意の侵入物や⁽⁶⁾ライン上などを移動するワークが障害物となる場合については対応が容易でないこと、また、既知障害物の正確な記述⁽⁷⁾にも労を要するなどの不具合が存在する。

この点を補う目的で、障害物の発見すなわち環境のモデリングにTVカメラを利用する方法⁽⁸⁾が提案されているが、TVカメラでは、例えばマニピュレータの裏側での干渉など作業環境の所々に局所的な死角を有する場合があります、また、画像処理に要する時間も軽視できないため、これだけでは必ずしも適当ではない。そこで筆者らは、冗長性を有するマニピュレータが、近接覚センサによって障害物を検出し、与えられた作業を継続しつつも、許容される回避空間内でマニピュレータがその形態を変化させることによって障害物を局所的に回避するという、センサを用いた局所回避制御を提案し⁽⁹⁾そのためのシステムを構成してきた。

本稿では、まず、以上の目的で開発された光形の近接覚センサを含めたシステム全体を紹介し、つづいて

Dodging Control of An Eight Degree-of-freedom Manipulator with An Optical Proximity Sensor for Collision Avoidance. By Yoji Yamada, Member & Nuiro Tsuchida, Member & Minoru Ueda, Member (Control and Information Engineering, Toyota Technological Institute).

山田陽滋: 正員, 豊田工業大学制御情報系

土田縫夫: 正員, 豊田工業大学制御情報系

(故)上田 実: 正員, 豊田工業大学制御情報系

センサ情報に基づいて障害物を局所的に回避するためのマニピュレータの形態制御の方法について述べる。更にベルトコンベア上を流れる障害物を回避させる実験を通じて、本システムについての評価を行う。

2. システムの構成

図1は本研究で用いた障害物自動回避システムの構成ブロック図である。システムは主として、ホストコンピュータ、6自由度マニピュレータ、冗長2自由度リンク、および近接覚センサという4つのサブシステムから成りたっている。以下にそれぞれのサブシステムについて概説する。なお、図2は8自由度マニピュレータの運動機構を示している。

〈2.1〉ホストコンピュータ システムのホストコンピュータには、 μ PDP-11を採用している。これは以下に述べる、6自由度マニピュレータとはシリアルインタフェース（以下、インタフェースをI/Fと略す）で、また、冗長2自由度リンクおよび光型近接覚センサとはパラレルI/Fでそれぞれ通信を行って

図1 システムの構成
Fig. 1. System structure.

図2 8自由度の運動機構図
Fig. 2. Skeletal diagram of the 8 degree-of-freedom manipulator.

図3 冗長な2自由度リンクの機構図
Fig. 3. Mechanism of a redundant link with 2 degrees of freedom.

いる。OSはVENIXであり、通信や、第3章以下に述べる制御パターンの判断、諸制御角の計算を行うプログラミングの言語にはCを用いている。

〈2.2〉6自由度マニピュレータ 本システムの運動系の母体となる6自由度マニピュレータはPUMA 560型である。これはロボット言語VALで制御されるが、そのVALコマンドおよび位置や姿勢、角度などのデータはASCIIコードのまま、マニピュレータコントローラとホストコンピュータの間をRS 232C I/Fで伝送される。

PUMA 560はR-P-P-R-P-R型の垂直多関節マニピュレータで（図2参照）、 θ_1 から θ_6 の制御角の入力によって、動作する。

〈2.3〉冗長2自由度リンク 図3に2自由度をもつ冗長リンクの構造図を示す。この冗長リンクは1ジョイントに二つのピボット動作軸P7, P8（図2参照）が直交するもので⁽¹⁰⁾、DCサーボモータにより駆動される。これらの2軸は制御角 θ_7, θ_8 のデータをホストコンピュータよりパラレルI/Fを介して専用のDCサーボモータコントローラに伝送することによって制御される。

〈2.4〉光型近接覚センサ 光を媒体とした近接覚センサは二つの機能を有し、ローカルなセンサの知能化を実現している。その一つは障害物がセンサの近傍にある決められた距離内に存在するかを検出する機能、もう一つは、障害物がセンサに対して動的に接近してきているかを検出する機能である。そしてセンサはこれらの機能に関する検出結果をON・OFFの出力信号で答える。

センサはマニピュレータアームの表面に装着されている⁽¹¹⁾ので、結局、一つのセンサ素子から障害物のマニピュレータに対する相対的な接近状態および接近動作という二つの情報に関するON・OFFの信号が得られることになる。

図 4 光形近接覚センサ素子のブロック図

Fig. 4. Block diagram of an element of the optical proximity sensor.

図 5 光形近接覚センサ素子

Fig. 5. An element of the optical proximity sensor.

図 4 は本センサ素子一つの回路のブロック構成を表している。また、図 5 はアーム表面に取付けられたセンサ素子一つの外観写真である。素子は発光源である赤外 LED と受光デバイスのフォトダイオード (PD) を中心として構成されている。LED から投光された赤外光は、接近した障害物の表面で反射されるが、この反射光の一部は PD に捉えられる。障害物が近づくほど、その反射光量は増加するため、PD からの光電流の変化を逐次検出していれば、間接的に障害物の接近を知ることが可能である。LED は周囲の定常的な外乱光と区別するために、4.7 kHz の周波数で振幅変調を行って点灯している。受光回路側では、検出された交流の光電流を電圧に変換した後、中心周波数 4.7 kHz、バンド幅 0.1 kHz の多重帰還型バンドパスフィルタによって信号を復調し、整流器を通して直流電圧を得ている (この段階で 1 V オーダ)。その後信号は、上述した二つの機能を果たすための回路部分に入力される。一方は、直接比較器に通されて受光量その

ものに比例した電圧がある基準電圧と比較され、障害物の近接の有無を 2 値で検出する信号 A が出力される。もう一方は、別の比較器の前でカットオフ周波数が 0.3 Hz の微分器に通されることにより受光量の変化量に比例した電圧が別のある基準電圧と比較され、障害物の動的な接近の有無を 2 値で検出する信号 C として出力される。

このセンサ素子のもつ二つの機能に関する定量的な評価については第 4 章で述べるが、センサからのこの 2 つの出力 A あるいは C はパラレル I/F を介してホストコンピュータに伝送されており、これらの信号の立上がりによる割込み処理は、PUMA が 1 ステップ動作を終えた時点で行われる。そして更に、これらの論理 AND をとった 3 番目の信号 A and C が PUMA コントローラのインタロック信号端子へと出力されている。この信号 A and C の立上がりは PUMA の非常停止を導き、その後はホストコンピュータに制御権が渡される。

3. 障害物回避動作

〈3.1〉 センサ信号による回避動作パターン 本システムは、近接覚センサからの A および C の信号の ON・OFF 状態に応じて、以下の (a), (b) に示すパターンに分けてマニピュレータを動作させる。

(a) 非常退避動作 センサから、

A and C

の信号が出力される場合には、障害物が近くにあるにもかかわらずお接近中であり、マニピュレータは与えられた作業を継続実行しているだけのゆとりがないと判断される。〈2.4〉節で述べたように、この場合にマニピュレータの動作は直ちに中断されるので、その直後に制御権を得たシステムは、ホストコンピュータからの指令によって、安全な場所へマニピュレータを退避させる。

(b) 障害物の局所回避動作 センサから、

A or C

の信号を得た場合には障害物が近くにあっても相対的な距離が変わらないか、あるいはある速度で接近していても距離的に非常に近いところにはない状況を表している。このような場合に、マニピュレータはその冗長性を利して、衝突を避けるために障害物から遠ざかる動作を加えながらも、与えられた作業を継続することが可能であると判断され、システムはマニピュレータに対し次節に述べる局所的な回避動作を行わせる。

〈3.2〉 形態制御アルゴリズム 本節では前節 (b) をうけて、マニピュレータが局所回避動作を行う際に

用いられる形態制御アルゴリズムについて説明する。

本システムのマニピュレータはリンク形状が4角柱であること、また関節が二つあることからその移動方向として4つの基本パターンを考えた。すなわち、まず、障害物の P3 関節付近への接近に対して、

①; P3 を上腕の上面あるいは底面方向へ移動させるパターン、

②; P3 を上腕の側面方向へ移動させるパターン。

次に、障害物の P5 関節付近への接近に対して、

③; P5 を前腕の相対する1対の面方向へ移動させるパターン、

④; P5 を前腕の別の相対する1対の面方向へ移動させるパターン、

である。図6は以上の4パターンによる該当腕の移動方向を示したものである。

冗長性を有するマニピュレータの障害物回避制御に対する有用性はすでに良く認識されているが⁽¹²⁾、筆者らは、上に掲げた4つの局所回避動作パターンを実現

図 6 マニピュレータによる局所回避パターン
Fig. 6. Dodging patterns of the manipulator.

図 7 リンク座標系
Fig. 7. Link coordinate frames.

するうえに必要な最小限の冗長な自由度の数が2であることから、マニピュレータの全自由度数を8と決定した。図7に本マニピュレータの運動を総合、解析するために用いたリンク座標系を示す。

ここで、この冗長な2自由度を局所回避制御に利用する際に、単位回避制御角 $\Delta\theta$ なる値を定義し、導入する。これはマニピュレータが局所回避動作を行うた

$$\textcircled{1}; \theta_1' = \theta_1, \theta_2' = \theta_2 + \Delta\theta \dots\dots\dots (1)$$

$$\textcircled{2}; \theta_1' = \theta_1 + \Delta\theta, \theta_2' = \theta_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\textcircled{3}; \theta_7' = \theta_7, \theta_8' = \theta_8 + \Delta\theta \dots\dots\dots (3)$$

$$\textcircled{4}; \theta_7' = \theta_7 + \Delta\theta, \theta_8' = \theta_8 \dots\dots\dots (4)$$

そして、上の4パターンの局所回避動作が、上腕(P3)あるいは前腕(P5)の移動を基準として行われていることに留意すれば、更に二つのアルゴリズムに大別し直せることがわかる。

①, ②; P3 を移動させる局所回避動作。 θ_1, θ_2 を冗長な回避のための制御角とし、 $\theta_3 \sim \theta_6$ をマニピュレータ先端の位置および姿勢決定のための制御角とする。

③, ④; P5 を移動させる局所回避動作。 θ_7, θ_8 を冗長な回避のための制御角とし、 $\theta_1 \sim \theta_6$ をマニピュレータ先端の位置および姿勢決定のための制御角とする。

以上の方針のもとに、本システムでは以下に示す運動方程式を直接、三角法を用いて解くことにより⁽¹³⁾、制御角を与える方法を採用し、アルゴリズム化した。

(a) P3 を移動させる形態制御のための運動方程式

冗長な二つの制御角 θ_1' および θ_2' に(1)あるいは(2)の値を代入し、残る $\theta_3 \sim \theta_6$ の決定に座標変換の関係式、

$${}^2T_8 = {}^A_2{}^{-1}(\theta_2') \cdot {}^A_1{}^{-1}(\theta_1') \cdot {}^0T_8$$

を利用する。ここで A_i は図7に定めた、 $(i-1)$ から i のリンク座標間の相対的な並進と回転の移動を表す (4×4) の同時変換行列であり、また、 ${}^i T_j$ は A 行列の積で、

$${}^i T_j = A_{i+1} A_{i+2} \dots A_j$$

である。

(b) P5 を移動させる形態制御のための運動方程式

この場合は、 θ_7' および θ_8' を冗長な自由度に充てて(3)あるいは(4)を代入し、残りの θ_1 から θ_6 の6自由度の決定には、

$${}^0T_6 = {}^0T_8 A_8^{-1}(\theta_8') A_7^{-1}(\theta_7') \\ \cdot \text{Trans}^{-1}(0, 0, Lf)$$

を用いて PUMA の逆運動方程式問題に帰着させる⁽¹⁴⁾。

ここで、 $\text{Trans}(x, y, z)$ は (x, y, z) の並進移動を表す変換で、この項は $-z_0$ 軸の方向に前腕の長さ Lf だけ $P7$ が移動した点が 6 自由度の先端に相当することにより生じる (図 7)。

4. 障害物回避制御への応用

実時間性をもつ本システムの有用性を検討するために、組み立てラインにおいてマニピュレータがラインの反対側の部品を扱う作業を想定した実験を行った。この実験では、一定の速度で流れるライン (ベルトコンベア) 上にランダムな間隔で置かれたワークがマニピュレータにとって障害物となる。

〈4.1〉作業環境 図 8 は設定された作業環境をロボットのワールド座標系 W の $y-z$ 平面上で捉えたところを表している。コンベア越しの作業地点 T は、 $(y, z) = (900 \text{ mm}, -600 \text{ mm})$ の位置にある。コンベアは 20 mm/s の速さで運転されており、その高さは $z = -500 \text{ mm}$ である。コンベア上に置かれるワークはアルミ製で、外表面が圧延されたままの障害物(I)と、400 番のサンドペーパーで研磨された障害物(II)の 2 種類を用意した。形状はいずれも、縦 180 mm 、横 140 mm 、高さ 180 mm の直方体で、各かどの丸みは $R = 0.8 \text{ mm}$ である。図 9 は本実験の外観写真である。

〈4.2〉光形近接覚センサの検出特性 一般に光センサを反射形で物体検出に利用する場合に、その感度は物体の表面の光学的特性に依存する⁽¹⁵⁾が、この点に関して以下に示す実験を行った。

いま、障害物がセンサによって最も検出されやすい姿勢および最も検出されにくい姿勢は、図 10 の (a)、

図 8 実験環境

Fig. 8. Experimental surroundings.

図 9 実験風景

Fig. 9. View of the experiment.

図 10 障害物の姿勢角の影響を調べる実験

Fig. 10. Experiment to see the affect of the posture of the obstacle.

(b)のようにそれぞれ考えられる。そして同図に示すように、センサ正面から θ の方向で遠方に姿勢 (a) あるいは (b) で障害物を置き、この姿勢を保ちながらセンサ方向へ接近させて行ったときに、センサがこれを検出し始める距離 d を各 θ について求めれば、センサの障害物に対する検出指向特性を得ることができる。

図 11 は試作したセンサの検出指向特性を、その幾何学的対称性を考慮して、右半面だけ示したものである。同図から、表面の光沢度の高い障害物(I)でも姿勢によらず $\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$ にわたって $d = 70 \text{ mm}$ の距離で検出が可能となることがわかるが、これは障害物のかどの丸みの影響によると考えられる。また、障害物(II)はその粗い表面で光が乱反射するために、その姿勢によるセンサ感度の差が小さいことを示している。

一方、障害物の動的接近の検出に関しては、図 10 に示した $\theta = 0^\circ$ 、 $d = 20 \text{ mm}$ の地点を姿勢 (b) で接近する障害物(I)は 4 mm/s 以上、障害物(II)については 1.5 mm/s 以上の速度であれば検出可能であることが類似の実験により明らかとなった。

なお、本章で述べる回避制御実験においては、同じ地点において姿勢 (b) の障害物(I)が 200 mm/s 以上

図 11 光形近接覚センサ素子の検出指向特性
Fig. 11. Detection area of the sensory element.

図 12 障害物回避の軌跡
Fig. 12. Trajectory of the manipulator in collision avoidance.

の速度で接近して来る場合にこれを検出できるように、センサ出力部の比較器の基準電圧(〈2・4〉節参照)を調節して用いている。この設定値 $v_s=20$ mm/s はマニピュレータが非常退避動作に移る際の所用時間 $T_s \leq 100$ ms を考慮して、 $v_s=d/T_s$ から算出した。

〈4・3〉近接覚センサの取付け マニピュレータが作業を行う際に、その中腕が障害物と干渉を生じる危険性を有するため、この部分に近接覚センサを取付けることにした。その際、マニピュレータが $\Delta\theta$ だけ局所回避動作を行うのに要する時間を $T_d=200$ ms 程度と考えると(〈4・6〉節参照)、図 12 より $10 T_d=2$ s で全体の局所回避動作が完了する。また、コンベアの速度は $v=20$ mm/s であるから、障害物がマニピュレータ表面から少なくとも $D=10 \cdot T_d=40$ mm 離れている地点でセンサによって検出されなければ、局所回避が完了する前に、作業中のマニピュレータに衝突してしまう。これをセンサの検出指向特性と考え合わせると、図 11 に示す L を用いて、マニピュレータ表面

に $2L$ (同図でおおよそ 90 mm) 間隔ごとにセンサを配置する必要があることがわかる。

なお、本章の回避実験では、ベルトコンベアの幅が 300 mm であって、障害物の置かれる位置はこの幅内に制限されるので、1 個のセンサを中腕中脛寄りの部位に設置することでいかなる姿勢の障害物も検出が可能となる。

〈4・4〉センサ情報を利用した回避制御 正常に作業を実行している間、マニピュレータは前腕と中腕を一直線上に伸ばした(図 7 では $\theta_4=\theta_5=0^\circ$ とした)形態をとっている。

まず、センサから A and C の出力がなされたときは、〈3・1〉節(a)で述べたように、マニピュレータは直ちに安全な場合(ホームポジション)へ移動する。この障害物との衝突が懸念される場合としては、障害物が作業付近のコンベア上を流れているところへマニピュレータが作業地点に向かって移動してくる場合が考えられる。

次に、センサから A or C の出力がなされたときには、マニピュレータは障害物を局所的に回避するための形態変更動作を行う。

ところで本システムは、障害物を回避するために作業環境を大域的に把握しておいて回避経路を計画するという機能は有していないので、局所回避の方向は人間が決定しなければならない。実験においてはマニピュレータの前腕(P5)付近において障害物との干渉が予想されるため、P5 の位置を障害物から遠ざける動作が要求される。また、障害物がコンベア上を流れていることを考えて、局所回避動作は $y-z$ 平面内に限って行うのが適当と判断される。そして、A or C のセンサ信号によって局所回避動作が必要と判断された時点で、〈3・2〉節で述べた単位回避制御角を利用した局所回避動作を行う。

筆者らは、図 8 において、P5 を移動させつつも E9 の位置と姿勢を保持しなければならない作業条件を考慮して、Petrov ら⁽¹⁶⁾の手法を本システムの冗長なマニピュレータに応用した。すなわち、マニピュレータ関節角を、許容される状態空間の中でセンサから A or C の信号が入力されるたびに、

$$\theta_8' = \theta_8 + \Delta\theta$$

とヒューリスティックに変更することによって P5 を移動させる局所回避制御を行う。本実験では $\Delta\theta=3^\circ$ と定義した。図 12 にマニピュレータが作業目的にかなうように形態変更動作を行ったときの骨子の軌跡変化の一例を示す。この例では P5 が P5' へ移されたことによって、高さにして 100 mm 程度の回避空間

図 13 冗長性による回避効果
Fig. 13. Effectiveness of redundancy.

を生じている。

なお、マニピュレータの各ジョイント角に許容される状態空間を考えたとて、 $\theta_a < 90^\circ$ になってもまだ A or C の信号が出力される場合には、それ以上の局所回避動作を行っても効果が見込まれないとして、マニピュレータを安全なホームポジションへ移動させるようにしてある。

〈4.5〉 回避効果 ここでは、マニピュレータが冗長な 2 自由度の付加によってどれだけ形態変化が可能な空間を生じたかを調べることで局所回避による効果を表現した。図 13 では、6 自由度のままのマニピュレータと本システムの 8 自由度マニピュレータの先端が共に到達しうる点を指しており、身動きの取れない 6 自由度マニピュレータと比較して、8 自由度マニピュレータが最大でどれだけ回避のために形態を変化し得るかが示されている。同図は、回避可能な角度が付加されるリンクの長さに依存していることを明らかにしている。

〈4.6〉 局所回避動作所要時間 本マニピュレータが P3 あるいは P5 について $\Delta\theta$ だけ局所回避動作を行う制御に必要な時間を調べた結果、160 ms 程度と判明した。このうちの 75% は計算時間によって費やされており、三角関数や行列計算のサブルーチン化による不要な行列要素の計算量の多さが支配的な影響を及ぼしていると考えられる。また、センサからの信号が I/F されるのには 15 ms 程度を要している。

5. ま と め

これまでに述べてきた本論を以下の 3 点にまとめる。

(a) 光形の近接覚センサを製作し、これを用いて静的に近接、あるいは動的に接近する障害物の存在を検出することによって、作業内容の頻繁な変化に伴う環境の記述作業の煩わしさを軽減することが可能となった。

(2) 汎用の 6 自由度マニピュレータの先端に冗長な 2 自由度をもつリンクを付加し、回避パターンに応じた局所的な回避動作を行うための形態制御アルゴリズムを作成した。

(c) 単位回避制御角を導入したヒューリスティックな局所回避動作計画を提案して、マニピュレータにベルトコンベア上を流れる障害物をリアルタイムで回避させる実験に応用した。

今後はより信頼性の高い近接センサの開発を目指すとともに⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、本システムの特徴を生かし、より複雑な作業への適用が可能となるように、大域的に作業環境を把握した作業経路計画も併せて開発して行きたい。

(昭和 61 年 11 月 4 日受付、同 62 年 3 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 尾崎・毛利・高田：「マニピュレータの占有空間を考慮した障害物回避動作の決定法」，計測自動制御学会論文集，18，9，942～949 (昭 57)
- (2) T. Lozano-Pérez：「Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements」，IEEE Trans. System, Man, And Cybernetics 11，10，681～698 (1981)
- (3) W.E. Red：「Minimum distances for robot task simulation」，Robotica 1，231～238 (1983)
- (4) O. Khatib & J.F. Le Maitre：「Dynamic Control of Manipulators Operating in a Complex Environment」，3rd CISM-IFTOMM Symp. 267～282 (1978)
- (5) 奥富・森：「ポテンシャル場を用いたロボットの動作決定」，日本ロボット学会誌，1，3，226～232 (昭 58)
- (6) N. Sugimoto, K. Kawaguchi：「Fault Tree Analysis of Hazards Created by Robots」，Proc. 13th ISIR 1，9-13～9-28 (1983)
- (7) 長谷川：「ロボットの作業環境のモデリングとモニタリング」，計測自動制御学会論文集，17，5，61～67 (昭 56)
- (8) H.B. Kuntze & W. Schill：「Methods for Collision Avoidance in Computer Controlled Industrial Robots」，Proc. 12th ISIR，519～530 (1982)
- (9) Y. Yamada, N. Tsuchida & M. Ueda：「Control of an industrial robot manipulator with four articulations to continue tasks while avoiding obstacles」，Proc. 14th IS-IR 139～148 (1984)
- (10) 斎喜・山田・土田・上田：「1 関節で 2 自由度をもつロボットアームについて」，第 2 回ロボット学会学術講演会予稿集，23～24 (昭 59)
- (11) 山田・土田・上田：「簡易な分布型近接センサを利用した産業用ロボットの障害物回避制御」，昭 59 電気学会大会，No. 1335，1732
- (12) 花房・吉川・中村：「関節形ロボットアームの冗長性の解析とその優先順位をする作業への応用」，計測自動制御学会論文集，19，5，63～68 (昭 58)
- (13) R.P. Paul：Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control, 41～84 (1981)
- (14) C.S.G. Lee & M. Ziegler：「A Geometric Approach in Solving the Inverse Kinematics of PUMA Robots」，Proc. 13th ISIR，2，16-1～16-18 (1983)
- (15) A.R. Jehnston：「Optical Proximity Sensors for Manipulators」，JPL Technical Memorandum 33-612，1～16 (1973)
- (16) A.A. Petrov & I. M. Sirota：「Control of A Robot-Manipulator with Obstacle Avoidance under Little Information about the Environment」，8th Triennial World Congress, 1903～1908 (1981)
- (17) 米倉・山田・土田・上田：「超音波を利用した近接センサによる接近物体の感知」，第 2 回ロボット学会学術講演会予稿集，81～82 (昭 59)
- (18) 広瀬・山田・土田・上田：「静電容量型近接センサの開発」，第 3 回ロボット学会学術講演会予稿集，9～10 (昭 60)