論文

視覚・力覚センサを用いたトンネル支保 のマニピュレーション*

小 原 雄 一¹ 佐 藤 一 彦² 皿 田 滋³

Timbering of Tunnel Support by Mechanical Manipulator Equipped with Vision Systems and Force Sensors

by Yuichi KOBARA¹, Kazuhiko SATO² and Shigeru SARATA³

1. Graduate Student, Muroran Institute of Technology, Muroran 050

2. Muroran Institute of Technology

3. National Institute for Resources and Environment, Tukuba 305

The present paper describes a hybrid controlling method for a mechanical manipulator which works for timbering of tunnel support. The manipulator was equipped with two CCD cameras and one force and moment sensor consisting of four elements to implement visual and tactile functions respectively. The vision systems allow the manipulator to recognize a support member placed on the floor whose image has been taken by a camera, and also to determine a destination, on which the work piece is to be hung, using the image of the other camera. The force and moment sensor complements the vision systems when the manipulator approaches to, grasps and releases the work piece, by sensing contact forces with the object or surroundings. A laboratory experiment has confirmed that the mechanical manipulator with visual and tactile functions can manipulate timbering of tunnel support reasonably.

KEY WORDS : Mechanical Manipulator, Tunnel Support, Robot Vision, Force and Moment Sensor

1. 結 言

シールド掘進機によるトンネル掘削では、セグメント化された支保部材の搬送と設置・組立工程が自動化され始めている^{1)~3)}。これに対して、部分断面掘進機や発破工法によるトンネル掘削では、鋼製支保の設置・組立作業は、専用の支保施工機の導入も図られているが⁴⁾⁵⁾、まだ熟練のオペレータを必要とする段階にある。しかし作業の危険性と労働力確保の困難さから、トンネル支保の自動化が切迫した課題であることはシールド工法の場合と同じである。

トンネル支保の完全自動化を達成するには、2つの問題を解決しなければならない。1つは支保部材を資材供給点から設置点まで搬送できるマニピュレータの開発である。一般的には、作業空間内で任意の位置と姿勢をとり得る6自由度のマニピュレータが必要である。これは可搬重量が2 kN程度の産業用ロボット、もしくは専用のマニピュレータで実現できる。もう1つの問題は、このマニピュレータに所定の支保作業をさせるために、支保部材を供給点で把持し、設置点で解放するまでの一連の工程を制御するのに必要な知覚機能をもたせることである。

本研究ではマニピュレータは利用し得るものとして、外界センサによる支保工程の制御に重点を置いた。用いたセンサ・システムは2つである。1つはマニピュレータと座標系を関係づけた2台のCCDカメラから成るロボット・ビジョン・システムで、これによりマニピュレータは視覚機能を得る。もう1つはマニピュレータ・ハンドに装備した力覚センサで、これによりマニピュレータは力覚機能を得る。これら2つの外界センサからの情報にもとづいて、マニピュレータは位置と力のハイブリッド制御を行う。

以下、本論文では視覚・力覚センサに基づく情報の取得方法と5自由度のマニピュレータを用いた室内実験の結果について述べる。

2. トンネル支保のタスク構成と室内実験のシステム構成

本題に入る前に、トンネル支保の作業工程を一般の産業用ロボットによる対象物のマニピュレーションとみなし、タスクに分解する。分解されたタスクを模式的にFig. 1に示す。またこの図に示したタスクのフローをFig. 2に示す。

Fig. 1では、トンネル床面または作業台上に搬入された支保部材をトンネル冠部に敷設された先受けレールの所定の位置に懸下する作業工程を模式的に表している。マニピュレータは掘削機械に搭載されているであろうが、ここでは掘削機械は略されている。

図中のPOS [1] からPOS [5] まではマニピュレーションの主要点を表し、それぞれの点での動作は視覚および力覚センサの情報に基づいて制御される。すなわちPOS [1] は支保部材を把持する位置で、カメラ#1のロボット・ビジョンで検出する。POS [2] は

* 1994年6月6日受付 8月10日受理 資源・素材学会平成5年度春季大会にて一部発表

1. 学生会員 室蘭工業大学大学院 工学研究科情報工学専攻

2. 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部情報工学科

3. 正会員 資源環境技術総合研究所 地殻工学部開発システム研究室

キーワード: マニピュレータ, トンネル支保, 力覚センサ, ロボット・ビジョン

Fig. 1 Tasks included in timbering for tunnel support.

Fig. 2 Flow of tasks included in manipulation of a support member.

POS [1] の真上に位置し、POS [1] から POS [2] への移動は力覚センサにより支保部材の把持を確認した後に実行される。POS [3] ~ POS [5] はカメラ # 2 のロボット・ビジョンにより位置情報を取得する。POS [2] から POS [3] への移動は、これら 2 点を結ぶ軌道に沿って支保部材が搬送される時、トンネル内壁にも、マニピュレータ本体にも衝突しないことを確認したうえで実行される。なお、この搬送経路で予期しない衝突が発生した場合には、力覚センサにより異常が検知され、動作が停止する。POS [3] は支保部材を懸下する先受けレール前方であり、POS [4] は先受けレールに沿って後退し、支保部材を静置する点 POS [5] の真上に位置する。POS [3] から POS [4] への移動は位置制御に基づき実行される。POS [4] から POS [5] への移動は力覚センサの情報に基づき制御される。すなわちマニピュレータ・ハンドに所定の負荷が生じたときには、支保部材が先受けレール上に乗架したと判断し、POS [4] から鉛直下方への移動を停止する。この点を POS [5] とみなし、マニピュレータは支保部材を解放し、再びホーム・ポジションに復帰し、次の動作の準備に入る。

本研究では以上の作業計画に沿った各タスクの実行を実験により検証するために、Fig. 3 と Table 1 に示したシステム構成の実験装置を用いて室内実験を行った。以下、このシステムを構成する主要なサブシステムの特徴について述べる。

Fig. 3 Schematic diagram of a robot system implemented with visual and force sensors.

Table 1 A robot and sensory systems employed in the laboratory experiment.

Equipment	Item	Specification
Robot Eshed Robotec SCORBOT -ERV plus	Mechanical structure	Vertical articulated robot Five axes plus servo gripper
	Operating range:	
	Base rotation	310°
	Shoulder rotation	+130° - 35°
	Elbow rotation	±130°
	Wrist pitch	±130°
	Wrist roll	±570°
	Radius of operation	610 mm
	End effector	DC servo gripper including optical encoder, parallel finger motion
	Gripper opening	75 mm: Excluding rubber pads 65 mm: Including rubber pads
Image digitizer Photolon Ltd. FRN2-512	Feedback	Optical encoders on all axes
	Actuators	Electrical DC servo motors
	Maximum workload	1 kg
	Maximum path velocity	600 mm/sec
	Weight	Approx 11.5 kg
	Input/Output signal	
	Image signal	1 V p-p
Camera #1 SONY CO., Ltd. C-TEC xc-77	Horizontal frequency	15.734 kHz
	Vertical frequency	59.94 kHz
	Image memory	512 kbytes
	A/D converter	8 bits (256 resolution)
	D/A converter	8 bits (256 resolution)
	Pixels	512×512 in an image
Camera #2 BURLE TC7055C	Focal distance	16 mm
	Max. magnification	1:1.4
	Iris	F1.4-F16
Force and moment sensor element KYOWA KSN-2-120-E3-11	semi-conductor strain gauge	
	Resistance	120Ω
	Gauge factor	100

Fig. 4 Camera model

3. 視覚センサによる位置情報の取得

3.1 視覚センサによる位置情報取得の原理

一般に視覚センサに用いられる CCD カメラは Fig. 4 のようなピンホール・モデルで表すことができる⁶⁾。図のように、原点をピンホールに置き、 z 軸を光学系の光軸と一致させたカメラ・フレーム {C} をとる。画像面は z 軸に垂直で、原点から焦点距離 f だけ離れた位置にある。空間内の点 P のフレーム {C} における座標を (x_c, y_c, z_c) とし、画像上の対応点 P^* を (x_c^*, y_c^*, z_c^*) とすると、 $z_c^* = -f$ で

Fig. 5 Point P in a camera frame.

$$\frac{x_c}{z_c} = -\frac{x_c^*}{f}, \quad \frac{y_c}{z_c} = -\frac{y_c^*}{f} \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係が成り立つ。

一方、画像解析装置によって、画面上の点は画像フレーム {S} の点 $P^*(x_s, y_s)$ に変換される。フレーム {C} における点 P は次式で関係づけられる。

$$x_c = k_x'(x_s - x_{s0}), \quad y_c = k_y'(y_s - y_{s0}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで (x_{s0}, y_{s0}) は光軸と画像面との交点のフレーム {S} における座標であり、また k_x', k_y' はそれぞれ x, y 方向の変換係数である。(2) 式に (1) 式を代入すると

$$\frac{x_c}{z_c} = k_x(x_s - x_{s0}), \quad \frac{y_c}{z_c} = k_y(y_s - y_{s0}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし $k_x = -k_x'/f, k_y = -k_y'/f$ である。

さて本研究では、前述のようにカメラ #1 は作業床面に置かれた支保部材位置 POS [1] の検出を行う。カメラ #1 に固定したフレームを $\{C_1\}$ とする。カメラの光軸は床面に垂直に設定されており、設置高さは既知なので、支保部材上の任意の点 P_1 につき z_c は既知となる。したがって (3) 式により画面上で検出される点 P_1^* の $\{S_1\}$ での座標 (x_s, y_s) から、 $\{C_1\}$ での対応する点 P の 3 次元位置 (x_c, y_c, z_c) を算出できる。

一方、カメラ #2 は作業床面に仰角 α で設置されている。カメラに固定したフレームを $\{C_2\}$ とする。先受けレールは床面と平行に延びており、床面からの高さは既知である。2 本の先受けレールを含む平面とカメラ光軸との交点 P_0 から $\{C_2\}$ の原点までの距離を d とすると、この平面上の任意の点 P_2 の z 座標は、Fig. 5 に示すように

$$z_c = d - x_c \cot \alpha \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。これを (3) 式の第 1 式に代入して x_c を消去すると

$$\frac{d - z_c}{\cot \alpha} = k_x(x_s - x_{s0}) z_c$$

$$\text{or } z_c = \frac{d}{1 + k_x(x_s - x_{s0}) \cot \alpha} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式により z_c が算出できるので、画面上に検出される点 P_2^* のフレーム $\{S_2\}$ 上の座標 (x_s, y_s) から対応点 P_2 の $\{C_2\}$ における 3 次元位置が算出できる。

2 つのカメラに設定したフレーム $\{C_1\}, \{C_2\}$ は、3・4 で述べるように、マニピュレータのベース・フレーム $\{B\}$ と関連づけることができる。こうして 2 つのカメラでとらえた対象物の画像フレーム $\{S_1\}, \{S_2\}$ 上での点はいずれも $\{B\}$ での 3 次元位置に変換することができる。

3・2 対象物のグリップおよびリリース位置算出のアルゴリズム

視覚センサからの画像情報には、対象物である支保部材、および先受けレールのほかに、背景が含まれている。本研究ではマニピュレーションに必要な位置情報を取得するために、前述のタスクにおける POS [1] と POS [5] の検出では、それぞれ対象物と背景、お

Fig. 6 An object viewed in the camera frame.

Fig. 7 Identification of the grip point for grasping a support member.

Fig. 8 Determination of the release point for resting a support member on the guide rails.

よび先受けレールと背景の分離が容易になるように照明によりコントラストを強調した。この環境整備により支保部材または先受けレールの輝度値が 1、背景の輝度値を 0 とする 2 値化画像が得られる。これらの 2 値化画像から POS [1] のグリップ位置と、POS [5] のリリース位置を算出するアルゴリズムは次のとおりである。

カメラ・フレームにおける 2 値化画像を、Fig. 6 に示すように $f(x_i, y_i)$ とする。このときフレーム内の対象図形の図心 $(\bar{x}, \bar{y})$ は次式で求められる⁷⁾。

$$\bar{x} = \frac{m_y}{A}, \quad \bar{y} = \frac{m_x}{A} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし m_x, m_y は x 軸および y 軸に関する対象図形の断面 1 次モーメント、また A は対象図形の面積で、それぞれ次式で算出する。

$$m_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) y_j, \quad m_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) x_i$$

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) \quad \dots\dots\dots (7)$$

m, n はカメラ・フレームにおける x, y 方向のピクセル数である。

(6), (7) 式により対象図形の図心が得られる。しかし本研究で扱う支保部材の場合、Fig. 7 に示すように図心は対象図形の外部にあり、一方 POS [1] は対象図形の内部に設定されるので、両者は一致しない。また先受けレールを含む図心も POS [5] のものではない。そこで POS [1] と POS [5] の検出には、さらに対象図形に関する次の幾何学的性質を抽出する。

まずいずれの画像についても、対象図形の慣性主軸を求める。次いで POS [1] については、Fig. 7 に示すように慣性主軸が対象図形を横切る 2 点 A, B の中点 C を POS [1] と同定する。また POS [5] については、Fig. 8 に示すように慣性主軸と前工程で設置された支保部材との交点 P を求め、次に P から先行支保部材のエッジに沿って先受けレールとの交点 Q_1 , Q_2 を検出する。リリース点 POS [5] は Q_1 , Q_2 の中点 N から慣性主軸に沿って支保工ピッチ R だけ先受先端に進んだ点として算出する。点 Q_1 , Q_2 の検出には P 点から発したエッジの単位ベクトルに注目し、連続する 1 組の単位ベクトルの交角が所定の値に達したときをもって交点と判定する。

なお慣性主軸の方向 θ は、対象図形の断面 2 次モーメント・テンソルの成分 I_{xx} , I_{yy} , I_{xy} から次式により算出する⁷⁾。

$$\tan 2\theta = \frac{2I_{xy}}{I_{xx} - I_{yy}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) y_j^2, \quad I_{yy} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) x_i^2, \\ I_{xy} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) x_i y_j \quad \dots\dots\dots (7)$$

3・3 高速画像走査法

(6)～(9)式で対象図形の慣性主軸を算出するには、本研究で用いた $m = n = 512$ の画像情報の場合で、 2^{18} 個のピクセルについての積和演算を要する。これに要する演算時間は 1 画面当たり 120～180 sec に達し、実用性が損なわれる。そこで、本研究では演算時間を短縮するために、以下に述べるような画像走査の圧縮法を考案した。

最初に Fig. 9 に示すように、原画像を $N \times N$ ピクセルの正方形領域に規則的に分割する。次にこの正方形領域内の 4 隅について検索し、この 4 隅のいずれにも輝度値 1 のピクセルがないならば、この領域内には対象図形は存在しないものとみなす。もし輝度値 1 のピクセルが含まれるならば (Fig. 9 (a) の中の○印)、この正方形領域をさらに $M \times M$ ピクセルの正方形領域に分割する。この再分割されたそれぞれの領域の (1, 1) ピクセルの輝度値に注目し、これが 1 ならば (Fig. 9 (b) の中の○印) カメラ・フレームでの座標値 (x_i, y_j) を求め、 $f(x_i, y_j) = 1$ とする。(7), (9) 式の断面 1 次モーメントおよび断面 2 次モーメント成分の演算での積和は、 $\text{mod}(i, M) = 1, \text{mod}(j, M) = 1$, かつ $f(x_i, y_j) = 1$ のピクセルについてのみ選択的に行う。

実験の結果 $N = 16, M = 4$ の場合、図心の位置が精度を損なうことなく算出され、しかも 1 画面の処理時間を 2～3 sec とほぼ 1/60 に短縮し得る結果となった。

3・4 ロボット・ビジョン・システム

カメラの画像フレーム {S} で同定した POS [1] または POS [5]

(a) Segmentation of the image into squares each of which consists of $N \times N$ pixels. (b) Resegmentation of a square including a part of the object into squares whose sides are M pixels.

Fig. 9 Fast scanning of a binary image.

Fig. 10 Three coordinates systems and their configurations; A base frame {B} referring to the manipulator, camera frame {C} referring to the camera and goal frame {G} attached to the object.

の位置にマニピュレータのハンドを移動するには、画像フレームとマニピュレータのベース・フレーム {B} を事前に関連づけ、一方のフレームの座標から他方のフレームの座標に変換できなければならない。この画像フレーム {S} とカメラ・フレーム {C} は (3) 式で関連づけられているので、ここでは {C} から {B} までを関連づけられたい。

Fig. 10 に示すように、マニピュレータのベース・フレームを {B}、カメラ・フレームを {C}、また対象位置 (POS [1] または POS [2]) に設定した目標フレームを {G} とする。また {C} から {G} への同次変換を ${}^C_G T$, {B} から {C} への同次変換を ${}^B_C T$ とすれば、{B} から {G} への同次変換 ${}^B_G T$ は次式であたえられる⁸⁾。

$${}^B_G T = {}^B_C T {}^C_G T \quad \dots\dots\dots (10)$$

それゆえ {S} 内で POS [1] または POS [5] が同定され、慣性主軸が (8) 式から算出されれば、{G} と ${}^C_G T$ が同時に決定されるので、あとは ${}^B_C T$ を事前に決定してさえおけば、{G} と {B} が (10) 式により関連づく。

${}^B_C T$ は Fig. 11 に示したキャリブレーションにより決定できる。すなわち

$${}^B_C T = \text{Trans}(x, x_{R0}) \text{Trans}(y, y_{R0}) \text{Trans}(z, z_{R0}) \\ \text{Rot}(z, \theta) \text{Rot}(y, \alpha) \quad \dots\dots\dots (11)$$

${}^B_C T$ は次の 3 つの操作から成っている。最初は Fig. 11 (a) に示すように {C} の原点を x, y, z 方向にそれぞれ x_{R0}, y_{R0}, z_{R0} だけ並進させる。次に Fig. 11 (b) に示すように水平面内で θ だけ回転し、最後にカメラの光軸を α だけ傾ける。これらの操作により ${}^B_C T$ には 5 つのパラメータが関与することになるがこれらはキャリブレーションにより決定できる。{C} の原点の座標成分と水平、垂直方位がキャリブレーションで決定されれば、(11) 式の行列演算により ${}^B_C T$ は次のように表される。

$${}^B_C T = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \alpha & -\sin \theta & \cos \theta \sin \alpha & x_{R0} \\ \sin \theta \cos \alpha & \cos \theta & \sin \theta \sin \alpha & y_{R0} \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & z_{R0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11')$$

(a) Translation (b) Rotation about the z-axis (c) Rotation about the y-axis

Fig. 11 Transform from the camera frame {C} to the base frame {B}.

Fig. 12 Robot vision system.

カメラ・フレーム $\{C\}$ とロボットのベース・フレーム $\{B\}$ が同次変換 ${}^B_C T$ によって関連づけられると、カメラはロボットの目となり、ロボットは視覚機能を得る。本研究で用いたロボット・ビジョン・システムは Fig. 12 の構成となっており、カメラ #1, #2 についてそれぞれの ${}^B_C T$ を計算する。

2 台のカメラがとらえた画像は、イメージ・ディジタイザで 2 値化処理し、ビデオ・モニタに出力すると同時にパーソナル・コンピュータに転送する。パーソナル・コンピュータは前述のアルゴリズムと高速画像走査法により画像フレーム内で POS [1] と POS [5] の目標フレーム $\{G\}$ を算出した後、これらをフレーム $\{B\}$ に変換して、その情報をロボット・コントローラに出力する。パーソナル・コンピュータとロボット・コントローラ間の通信は RS-232 C による。

4. 力覚センサによる力・モーメント情報の取得

4.1 力覚センサの構成と入出力関係式

トンネル支保に導入されるマニピュレータは、作業空間の広がりやベィ・ロードの大きさから、大型の多関節マニピュレータとならざるを得ない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。このようなマニピュレータでは、視覚センサにより所定の位置情報を取得しても、位置制御のみで POS [1] や POS [5] に正確にハンドを位置づけることは困難である。そこで本研究では位置制御を補完する目的で、力覚センサに基づく力制御を行うことにした。

力覚センサでは、最も一般的にはハンドに加わる力とモーメント、6 成分の分離・検出が必要とされ、この目的に合致したセンサも市販されている。しかし本研究では、構造上の制約からハンドの部分に既製の力覚センサを装着することができなかったため、ハンドの指に相当する部分に高感度のひずみ・ゲージを貼付け、力覚センサを構成した。このセンサにより検出できる力・モーメント成分を Fig. 13 に、またゲージの貼布位置は、Fig. 14 (a) に示すように、4 本の指を横切りアプローチ・ベクトル $\mathbf{a}$ に垂直な平面と各指との交点で、それぞれの指の 4 側面に $\mathbf{a}$ 方向のひずみを受感するように貼布した。これら計 16 個のひずみゲージを Fig. 14 (b) に示すように結線し、4 個のブリッジ回路を構成した。

Fig. 13 に示したように、この力覚センサではハンドに加わる力の 3 直交成分 F_n , F_o , F_a のほかにアプローチ・ベクトル $\mathbf{a}$ まわりのモーメント成分 Ma を検出する。この中、 F_a は POS [1] から POS [2] にハンドを持ち上げるとき、支保部材が把持されているか否かの判定と、POS [4] から POS [5] にハンドを下げる時、支保部材が先受けレールに接触したか否かを判定する情報となる。また F_n は POS [1] が対象物の慣性主軸からノーマル・ベクトル $\mathbf{n}$ 方向にずれて検知されるか、またはハンドを位置づけるときにずれ

Fig. 13 Force and moment components to be detected by force and moment sensors.

(a) Locations of strain gauges mounted on the manipulator hand.

(b) Four strain bridge circuits. D1 and D2 in the top circuit denote dummy gauges.

Fig. 14 Sensory elements of force and moment sensors.

場合、ハンドの $\mathbf{n}$ ベクトル方向に加わる非対称的な荷重に対応する。したがって F_n の情報から POS [1] の $\mathbf{n}$ ベクトル方向に沿ったずれ量を検知することができ、これは POS [5] の補正に利用される。 F_o および Ma 成分は搬送工程で衝突が発生した場合など、ハンドに異常な外力が加わった場合の情報をあたえる。

Fig. 14 に示した 4 つのブリッジ回路からの出力 4 成分からなるベクトルを $\mathbf{W}$ とし、 F_n , F_o , F_a , Ma の力・モーメント 4 成分からなるベクトルを $\mathbf{F}$ とすると、 $\mathbf{F}$ の各成分が $\mathbf{W}$ の成分のいずれにも線形の関係がある場合には、 $\mathbf{F}$ と $\mathbf{W}$ の関係は分解力行列 $\mathbf{R}_F$ を用いて次式で表される⁹⁾。

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}_F \mathbf{W} \quad \dots \dots \dots (12)$$

R_F は 4×4 行列で、以下のようにキャリブレーションにより全成分を決定できる。

いま F の 4 成分の中、いずれか 1 成分について既知の力またはモーメントを実験的に加える。このときのベクトル F を F_i とする。 F_i によって生じる出力 W の値を W_i とする。このキャリブレーションを F の全成分について合計 N 回行くと、(12) 式から R_F に関する次の観測方程式が得られる。

$$F_M = R_F W_M \quad \text{ただし} \quad (13)$$

Fig. 15 Force and moment sensor system.

$$F_M = [F_1, F_2, \dots, F_N]$$

$$W_M = [W_1, W_2, \dots, W_N]$$

で、どちらも $4 \times N$ 行列である。最小 2 乗法により (13) 式から R_F の最確値を求めると

$$R_F = (F_M W_M^T) (W_M W_M^T)^{-1} \quad (14)$$

ただし W_M^T は W_M の転置を表し、また $()^{-1}$ は逆行列の演算を表すものとする。

4・2 力覚センサシステム

本研究で用いた力覚センサ・システムを Fig. 15 に示す。 W の 4 成分はストレイン・アンプで増幅された後、A/D コンバータを経てパーソナル・コンピュータに取り込まれる。パーソナル・コンピュータで (12) 式に従って F の成分が算出されると、その結果は TTL レベル・パラレル入出力ボードからロボット・コントローラの通信ポートに送信される。ロボット・コントローラは通信ポートの入力情報に基づいてロボットに動作命令を指示する。

以上が本研究で用いた力覚センサ・システムの構成と機能である。

5. 実験結果と考察

5・1 視覚センサによるグリップ、リリース位置の検出

カメラ #1 からの入力画像の例を Fig. 16 (a) に示す。画像は 512×512 ピクセル、各ピクセルの輝度は 256 階調である。ただしこの図では疑似 5 階調で輝度を表している。この入力画像を 2 値化し、2・2 で述べたアルゴリズムに従って算出した対象図形の慣性主軸とグリップ・ポイント、POS [1] の {S} での位置を Fig. 16 (b) に示す。この図から明らかなように、POS [1] は正しく検出されてい

Fig. 16 Identification of a grip point on a support member.
(a) An image including support member taken by the camera #1.
(b) An inertia axis (dotted line) and the grip point (small circle) determined from the method described in the text.

Fig. 17 Determination of a release point between guide rails.
(a) An image including guide rails and a support member set in the previous timbering.
(b) An inertia axis (dotted line) and a release point (small circle) determined from the method described in the text.

Fig. 18 Change in force and moment imposed on the hand of the manipulator during moving from POS[1] to POS[5].

る。

次にカメラ#2からの入力画像の例を Fig. 17 (a) に示す。ピクセル数や輝度はカメラ#1の入力画像と同じである。この入力画像を2値化し、2・2で述べた検索アルゴリズムに従って求めたリリース・ポイント POS [5] の {S} での位置を Fig. 15 (b) に示す。POS [5] も前出の POS [1] と同様、正しく算出されていることがわかる。

以上、視覚センサによるグリップ、リリース位置の検出は達成された。ただし室内実験では照明および支保部材模型と背景との際立ったコントラスト等、環境整備が理想的に行われている。しかし実際のトンネル掘削現場では照明設備の制約、支保部材と背景とのコントラストが弱いこと等、2値化による対象図形の抽出が困難なことが予想される。したがって環境整備の条件を緩めた場合の対象物の特徴抽出を今後さらに検討していく必要がある。

5・2 力覚センサによるグリップの確認とリリース動作の制御

POS [1] から POS [5] までの支保部材のマニピュレーションにおける力覚センサの出力例を Fig. 18 に示す。POS [1] から POS [2] にハンドを持ち上げるときには、 F_a の成分は支保部材模型の自重に相当する荷重を検出しており、対象物を把持したことが確認される。POS [2] から POS [3] への軌道では、ハンドが下向きの状態から上向きの状態に回転するので、 F_a の向きは反転する。POS [3] ではリリース動作に備えて出力をリセットし、次の POS [4]、POS [5] への動作に移行する。なお出力のリセットは、POS [3] での出力の値 W^* を相対的の原点として、POS [3] 以降の F の値は (12) 式での W の代わりに $W - W^*$ を用いて算出することを意味する。POS [5] では支保部材が先受けレールに接触し、さらにハンドが下方に移動するに伴い、先受けレールから反力を受けるので、 F_a は再び符号が反転する。この符号の反転と F_a の大きさが一定値を越えたことをもって、POS [5] を確認することができる。一方 F_n 成分については、カメラ#1の画像情報から検出したグリップ・ポイントが正しい位置であることから、ほとんど偏心荷重は検出さ

れていない。また F_o 成分は POS [1] でグリップ命令を出したとき、対象物が把持されていなくとも、一定のグリップ力を指示する。これは対象物を持ち上げるときに、対象物が自重によりすべり落ちるのを防ぐために必要な力である。

以上のようにハンドに装備した力覚センサは、対象物の把持の確認、把持した点の対称軸からの偏位、ならびに対称物を解放する位置の判断に有効に機能することが確認された。本研究の支保部材のマニピュレーションでは、力覚センサで受感するひずみは 15×10^{-6} strain 程度の大きさにとどまったため、マニピュレータの動作に伴う雑音や、零点移動の影響も受ける結果となった。実際の現場では力覚センサが受感するひずみは支保部材の重量に見合った大きさになるので、室内実験よりも測定条件は有利となる。したがって、実用的には力覚センサを力制御のための外界センサとして用いるのに不都合はない。

6. 結 言

本研究ではトンネル支保を自動化するうえで解決すべき問題の中、マニピュレータにより支保部材を資材供給点から設置点までハンドリングする工程を外界センサを用いて制御する問題を取り上げ、その解決方法を提案し、室内実験により検証した。得られた主要な結果は以下のとおりである。

(1) ロボット・ビジョン・システムと対象物の幾何学的特徴を抽出するアルゴリズム、ならびに高速画像走査法により、支保部材の供給点と設置点における位置情報を得ることができる。

(2) ハンドに力覚センサを構成することにより、支保部材を把持したことの確認、支保部材を設置する際の解放位置の確認が可能となる。

(1) と (2) により大型の多関節マニピュレータを用いても、位置制御のみに頼ることなく、位置と力のハイブリット制御により支保作業を自動化し得る可能性を示した。またハンドリングする対象物が作業空間と同程度というトンネル支保作業の特質から、搬送工程での衝突判定問題は不可避である。この問題に関しても本研究ではスパイラル軌道を選定することにより回避し得ることを見出したが、紙数の関係で本論文では言及できなかった。この問題は機会を改めて報告することにしたい。

なお本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般研究 B-04452262）の交付を受けて行われたことを附記する。また室蘭工業大学大学院生・港 高学君にはロボット・ビジョンの検証実験に協力していただいた。ここに記して謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) 高野文哉ほか：第1回建設ロボットシンポジウム論文集, p.263-270, (1990)
- 2) 布村 進・宮脇国男・松永登志夫：第1回建設ロボットシンポジウム, p.279-286, (1990)
- 3) 羽畑 修・真鍋隆夫・佐藤安美・岩田博吉：日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 講演論文集, Vol.B, p.441-446, (1992)
- 4) 太平洋炭鉱(株)路館業所：炭鉱技術, 平成2年7・8号, p.2-7, (1990)
- 5) 碓 尚博・江原利雄：資源・素材 '93 (福岡) 分科研究会資料 G 1, (1993)
- 6) 高橋裕信・富田文明：日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2, p.177-184, (1992)
- 7) 谷内田正彦：ロボットビジョン, p.92-94, (1990), 昭晃堂
- 8) Craig, J. J. : Introduction to Robotics - Mechanics and Control, p.19-59, (1989), Addison-Wesley
- 9) Fu, K. S, Gonzalez, R. C. and Lee, C.S.G. : Robotics - Control, Sensing, Vision, and Intelligence, p.289-293, (1987), McGraw-Hill