

ホイールローダによるダンプトラックへの積み込み作業の自動化に関する基礎的研究

高橋 弘¹・沖田 謙²

¹正会員 工博 東北大学助教授 工学研究科地球工学専攻 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

²学生員 東北大学工学部地球工学科 (同上)

論文においては、ホイールローダによるダンプトラックへの土砂の積み込み作業の自動化を実現するための制御アルゴリズムについて検討した。すなわち、この作業の自動化を実現するためには、ローダはダンプとの相対位置を認識しなければならないことから、ローダ上にカメラを設置し、カメラからの画像を処理することにより位置関係を認識し、移動するアルゴリズムを提案した。またローダとダンプの模型を作製し、本研究で提案するアルゴリズムを用いて土砂の自動積み込みに関する実験を行い、アルゴリズムの有効性を確認した。

Key Words: robotics, wheel loader, dump truck, image processing, automation

1. はじめに

近年、ロボット化技術の発展にともない各種産業分野において、種々のロボットが利用されてきている。また、センサ技術の向上にともない、自ら周囲の環境を認識し、作業を実行する知能ロボットの導入も試みられている。土木・建設業の分野においても同様であり、過酷な作業環境からの作業員の解放および安全確保の面から、さらに熟練オペレータ不足の解消を目的として、作業ロボットの導入が進められてきている。しかし、現在稼働中のロボットの大半は、工場などロボット用に整備された環境下にて使用されているのに対し、土木・建設業の分野では作業現場が自然環境下であるため作業対象物の形状が複雑であり、また作業の進展にともない、その形状が変化することが多い。従って、予めプログラムされた作業の繰り返し、すなわちティーチングプレイバックでは対応しきれない作業が多いなどの理由から、他の分野に比べてロボット化が遅れているのが現状である¹⁾。

ところで、土木・建設業の分野における作業の一つに、土砂の積み込み・運搬作業がある。この作業は、積み込み機械であるホイールローダ(以下、ローダと記す)と運搬機械であるダンプトラック(以下、ダンプと記す)との組み合わせで行われるのが一般的である。この土砂の積み込み・運搬作業の内容は、以下の3つの作業により構成される。すなわち、1)「ローダが土砂をすくい取る」、2)「土砂をすくい取った状態

でローダがダンプの位置まで移動し、ダンプのベッセルに土砂を積み込む」、3)「ダンプが目的の場所まで土砂を運搬する」という作業である。従って、土砂の積み込み・運搬作業を自動化するためには、上に述べた1)~3)の作業を自動化する必要がある。この1)~3)の作業の中で、3)のダンプの無人走行に関しては実用化の域にあり、既に一部の鉱山で無人ダンプが稼働中である²⁾。これに対して、1)および2)の作業に関しては要素技術の検討の段階である。特に、1)の土砂の積み込み作業の自動化に関してはいくつか研究例が見られるが^{3),4)}、先に述べたように、作業対象物である土砂の堆積山は作業の進展とともに形状が変化すること、また土砂とバケットとの相互作用は複雑であり、解析が困難であることなどの理由から、無人化施工の実績はあまり見られず、現在、遠隔操作適用の段階である⁵⁾。また2)の作業に関しては、1)に関する研究が要素技術の検討の段階であるため、1)の作業に続く2)の作業を自動化・無人化しようとする研究はほとんど見受けられない。従って、現時点では、オペレータにとって危険な環境下で、この土砂の積み込み・運搬作業を実施する場合には、遠隔操作によって土砂をすくい取り、ダンプに積み込む方式を採用せざるを得ない。そこで、土砂のすくい取り作業には遠隔操作を適用するにしても、土砂をすくい取った後、ローダが自らダンプの位置まで移動し、積み込み作業を行うことができれば、すなわち2)の作業が自動化されれば、オペレータの負担は大幅に軽減される。またその後1)

の作業の自動化が実現されれば、土砂の積み込み・運搬作業の一連の作業の自動化につながる。

さて、ローダの移動に関しては、基本的には既に実績のあるダンプの無人走行の技術を参考にすることができる。このダンプの無人走行では、最初にオペレータが走行ルートに従ってダンプを運転し、そのルートをメモリに記憶させる。ダンプはメモリ上のルートに従うように速度・ステアリング等を制御して移動することになる。すなわち、一種のティーチングプレイバックである。またこの他に、地下に電磁誘導線を埋設し、その電磁誘導線に従って機械の移動を制御する方法⁶⁾、機械とトンネル壁面との距離を超音波距離計により計測することにより機械の移動を制御する方法⁷⁾および坑道の天盤に白色のペンキで誘導ラインを描き、光学カメラによりその白線を捉えることにより機械の移動を制御する方法⁸⁾などが提案されている。しかし、ローダの移動がこれらの機械の移動と大きく異なる点は、ローダは土砂の積み込み位置が作業の進展にともない変化することから、自らダンプとの相対位置を認識しなければならないこと、かつ効率的な積み込み作業を行うためには、ローダはダンプのベッセルに対して垂直に接近する必要があることである。すなわち、移動技術に関しては、従来の方法を用いることができるにしても、ローダは常にダンプとの相対位置および方向を認識しなければならない。

それゆえ、本研究ではローダに CCD カメラを搭載し、この画像を処理することによりローダ自らがダンプとの相対位置および方向を認識し、ダンプの位置まで接近して積み込み作業を自動的に実行するアルゴリズムを提案するとともに、ローダとダンプの模型を用いた実験を通して、本アルゴリズムの有効性について検討することを目的とする。

2. 画像処理による相対位置の認識および移動制御のアルゴリズム

ローダがダンプに土砂を積み込む作業を行う際、ローダはダンプに対して垂直に、かつベッセルのほぼ中央の位置に接近して積み込みを行うことが望ましい。そこでローダとダンプとの相対的な位置関係を得るために図-1に示すようなパラメータを定義する。ここで角度 θ は「ベッセル側面の中央の点とローダを結んだ線」と「ベッセルから垂直に延ばした線」とのなす角であり、距離 L はベッセル側面の中央の点とローダとの距離、また角度 ϕ は「ベッセル側面の中央の点とローダを結んだ線」と「現在のローダの進行方向」とのなす角度である。

これらのパラメータを取得するために図-2に示す

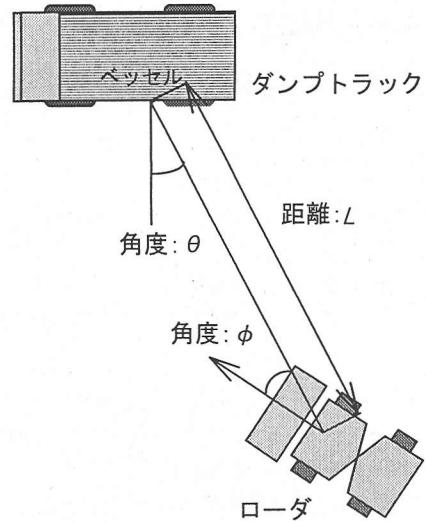


図-1 位置パラメータの定義

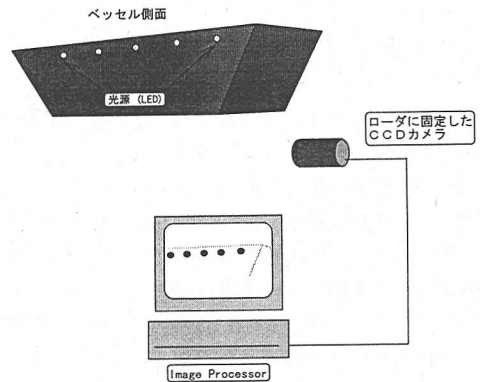


図-2 位置パラメータ取得のためのシステム図

ようなシステムを用いる。すなわち、ベッセルの側面上部に5つの光源を設け、それをローダに固定した CCD カメラにより画像処理装置に取り込み、光源の個数の検出および画像座標系における光源の座標を取得する。光源の検出に対してローダに搭載された CCD カメラを回転可能とすることも考えられるが、この場合はダンプの方向、ローダの方向およびカメラの回転角度の3つの相互関係を得なければならず、解析が複雑になる。そこで、本研究ではカメラは、その光軸方向がローダの進行方向と一致するようにローダ上に固定することにする。なお5つの光源のうち1つはベッセルの中央に設け、その左右に2つずつ等間隔に配置する。

光源の検出およびその座標の取得のために画像処

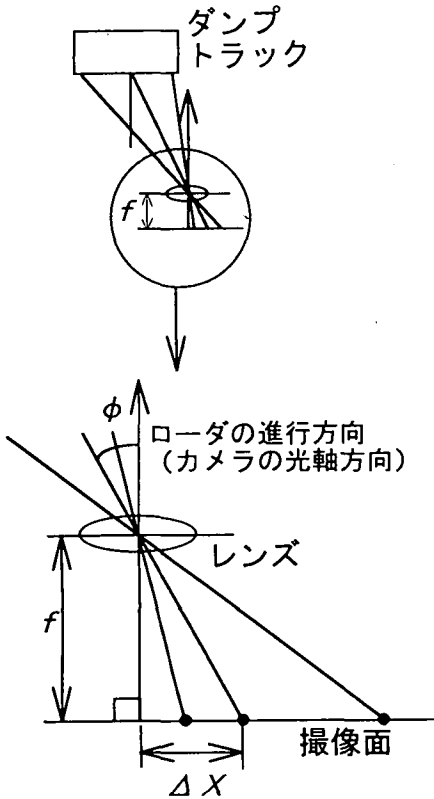


図-3(a) 光源検出の概念図 ($\phi \neq 0$)

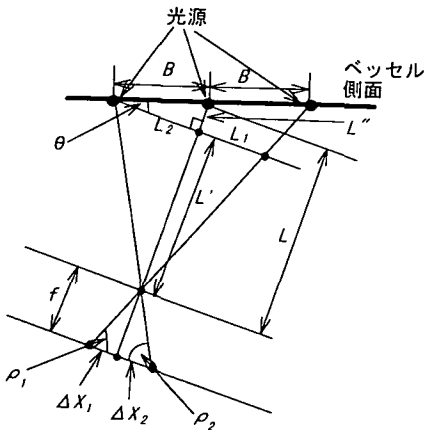


図-3(b) 光源検出の概念図 ($\phi = 0$)

理装置内で、ウインドセット、2値化・反転および重心計算を行う。この時、画像処理の領域が小さいほど処理時間は短くなる。従って、処理時間を軽減させるためにウインドセットを行うが、これは予備実験により光源が写るおおよその範囲を予め特定しておき、その範囲にウインドをセットし、上述の画像処理を行う。

上述のパラメータは、5つの光源のうち3つの光源の座標が得られれば算出可能である。しかし、撮影される画像のほとんどは図-3(a)に示すように中央の光源がカメラの光軸方向にない場合であり、この状態では角度 θ の値を正確に取得するのは困難である。そのため、初めに図-3(b)に示すように中央の光源がカメラの光軸方向に位置するように進行方向を角度 ϕ だけ変化させる。角度 ϕ の値は、検出された中央の光源のX座標を ΔX とすると、次式で求められる。

$$\phi = \pi/2 - \arctan(f / \Delta X) \quad (1)$$

進行方向を角度 ϕ だけ変化させた状態で再び画像の入力および画像処理を行い、図中の ΔX_1 および ΔX_2 を求めれば、パラメータ θ および L の値は以下のように算定される。

$$\rho_1 = \arctan(f / \Delta X_1) \quad (2)$$

$$\rho_2 = \arctan(f / \Delta X_2) \quad (3)$$

$$\tan \theta = (1/2) \cdot (\tan \rho_2 - \tan \rho_1) \quad (4)$$

$$L = B \cdot (\sin \theta + \cos \theta \cdot \tan \rho_2) \quad (5)$$

以下、 θ と L を合わせて位置パラメータ(θ, L)と記す。なお、光源を5つ設けた理由は、ローダとダンプとの位置が遠い場合は、光源の間隔が広いほどパラメータの値の精度は良くなること、またローダとダンプとの距離が近い場合、例えば積み込み作業を実行する時にも3個の光源が画像内に存在することが必要であるためである。

さて、ローダの移動制御は基本的には画像によりローダとダンプとの位置関係を認識すること、すなわち上述の位置パラメータを取得することから始める。この位置パラメータの値に応じて、制御アルゴリズムはローダの前進・後退・角度補正・積み込みといった動作を行うように各アクチュエータに指令を出すことになる。すなわち、制御のアルゴリズムを簡単に述べると次のようになる。

- 1) 画像処理により光源を検出し、角度 ϕ を算出する (Image Processing Routine 以下IRと記す)。
- 2) 角度 $\phi \neq 0$ ならば、ローダの進行方向を角度 ϕ だけ変化させる (Direct Routine 以下DRと記す)。 $\phi = 0$ ならばパラメータ θ および L を算出する (IR)。
- 3) 位置パラメータ (θ, L) の値により位置関係を認識し、その結果を基に、次の動作 (前進・後退 (Move Routine 以下MRと記す)・積み込み (Dumping Routine 以下DURと記す)) の指令

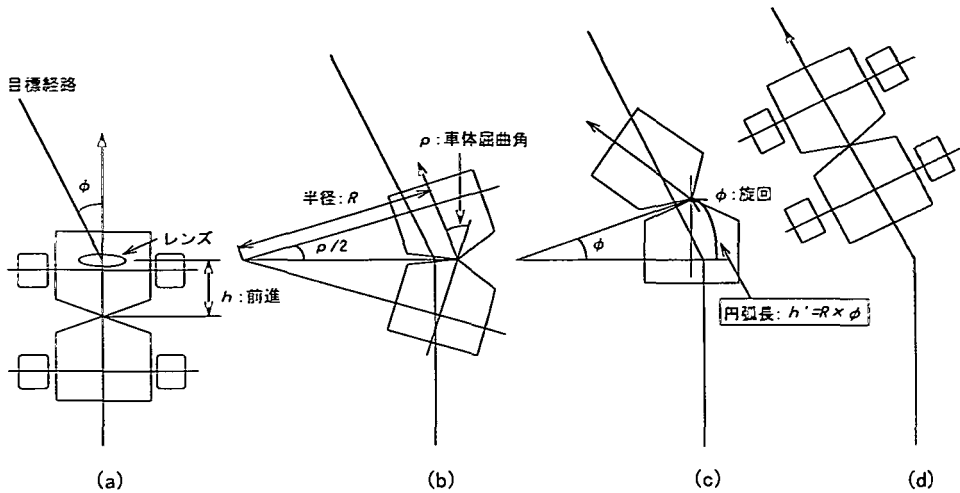


図-4 ロードの目標経路への追従過程

を出す。

- 4) 動作が終了した後、再び1)のルーチンに戻り、積み込み作業が終了するまで同様の動作を繰り返す。

以下、各ルーチンの内容について述べる。

a) Image Processing Routine

ここでは、ロード上のCCDカメラからの画像が画像処理装置へ入力され、画像処理装置内で、ウィンドセット、2値化・反転、光源の個数の検出および画像座標系における光源の位置の計算を実行する。この時、上述したように位置パラメータ (θ, L) の算出には、3個の光源を必要とする。従って、5個の光源のうち全てが画像内にあるときは、その両端と中央の光源の3個を選択し、検出された光源が4個の場合は、便宜上X座標の小さい方から3個の光源を選択する。それ以外の場合は、連続した3個の光源を選択し、位置パラメータの算出を行う。一方、検出された光源の個数が2個以下の場合は、ロードの方向を変え3個以上の光源を画像内にとらえる必要がある。ロードの方向を変える制御は、検出された個数が0個の場合と1個あるいは2個の場合とで別々に行う。

まず、検出された個数が0個の場合、ロードはダンブとの位置関係の認識が不可能となるため、ロードはその位置でステアリングを切って、一定時間だけ後進し光源を検出する動作を3度繰り返す。この状態で検出された光源の個数が0個の場合は、次に前進し光源を検出する動作を3度繰り返す。この状態でも光源を検出できない場合は、ロードは光源を見失ったものとして制御プログラムを終了し、作業を中止させる。移動の途中で光源を検出した場合には、次の光源が検出

された場合の処理に移行する。

検出された個数が1個の場合は、その光源への方向を計算し、その値を入力値としてDRへ移行する。検出された個数が2個の場合は、便宜上、画像中の左側の光源への方向を計算し、同様の制御を行う。画像内に最低3個の光源を検出した時点で位置パラメータの算出が可能となるため、初めに角度 ϕ の値を算出し、次の動作を決定する。なお、この動作の決定には以下の条件を用いた。

- 1) 角度 $|\theta| < 20^\circ$ かつ 距離 $L < 50\text{cm}$ の場合、DR
- 2) 角度 $|\theta| < 40^\circ$ かつ 距離 $L < 40\text{cm}$ の場合、MR (後退)
- 3) 上記以外の場合、MR (前進)

ただし、上述の条件判断における数値は、次章で述べる模型実験に対する値であり、予備実験を通して決定した値である。従って、別な模型あるいは実機を対象とする場合には、予め予備実験によりこれらの値を把握しておく必要がある。

b) Direct Routine

本ルーチン内では、IRで得られた角度 ϕ を入力値とし、ロードの進行方向を角度 ϕ だけ変化させる。ロードの進行方向を変える場合、ロードの操舵方法の特徴である車体屈曲方式を考慮しなければならない。車体屈曲方式とは車体を前後に分け、それらを中央のリンクで接続し、リンクを中心に前後の車体を曲げることにより操舵を行うものである。この操舵方式の特徴として、中央のリンクから4つのタイヤは等しい距離にあるため、前後のタイヤは同じ軌道上を走り、不整地における踏破性に優れているという点がある。

画像より得られる距離 L は中央の光源とカメラのレ

レンズ間の距離であるから、ローダの移動経路として図-4(a)のような目標経路が設定される。この経路へローダを追従させるために、レンズと車体中央のリンクの間の距離 h だけ前進した後、最大車体屈曲角まで車体を屈曲させ(b)、その状態で入力角度 ϕ だけ回転してローダの方向を変化させた後(c)、車体屈曲角を元に戻せば図-4(d)の状態になる。この状態で車体を停止させ一連の動作を終了する。

ところで、本ルーチンを終了し、MRへ移行するか否かの判断は、図-4(d)の状態でも再び画像を入力し、角度 ϕ の値を算出した後、この値が0であるか否かによって行われる。しかし、画像処理装置の分解能等を考えると、 ϕ の値に対して許容範囲を設定しないと、永遠にDRから抜けることができない危険性がある。 $\phi = 0$ ならば中央の光源は画像の中心に一致するはずであるから、ここでは許容範囲として ± 20 画素を考え、中央の光源が画像の中心から ± 20 画素内に検出された場合は、 $\phi \approx 0$ と考える。なお、 ± 20 画素という値はDRによる角度 ϕ の補正の後、位置パラメータをほぼ正確に得ることのできる中央の光源のずれの許容範囲および移動制御における誤差を考慮し、予備実験より求めたものである。

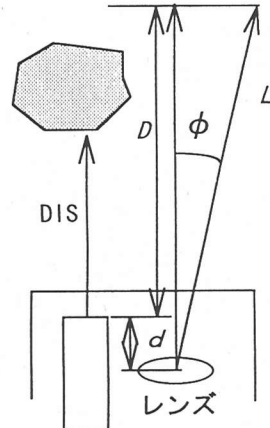
c) Move Routine

本ルーチンでは、画像処理によりパラメータを取得した後、前進あるいは後進しながら、ベッセルに対して垂直な方向になるようにローダをダンブに接近させる。前進および後進の判断は、距離 L の値が 40 cm より小さく、かつ角度の絶対値 $|\theta|$ が $(2\pi/9) \text{ rad}$ より大きい場合は後進、それ以外の場合は前進とする。なお、本ルーチン内では予め移動時間を設定しておき、一定の距離だけ前進あるいは後進した後に停止し、再びIRのルーチンに戻り、位置パラメータを取得する。

d) Stop Routine

本ルーチンは、ローダに設置された超音波距離計によりローダ前部に何かの物体を検出した際、ローダを停止させるルーチンである。この場合、検出された物体が障害物であるか、それともダンブであるかを判断する必要がある。そのために画像よりダンブまでの距離を取得すると同時に超音波距離計の出力との比較を行う。図-5に示すように超音波距離計の出力をDISとし、また画像から得た距離 L を超音波距離計の方向へ変換した値を D として両者の比較を行い、それらがほぼ等しい場合は、ローダ前部の物体はダンブであると判断でき、また著しく違う場合は障害物であると判断できる。

ローダ前部の物体がダンブであると判断された場合は、次に積み込み作業を行うことになるが、上述のようにローダはダンブのベッセルに対してほぼ垂直



超音波距離計

$$D = L \cos \phi - d$$

$D \approx \text{DIS} \rightarrow$ 対象はダンブトラック

$D \neq \text{DIS} \rightarrow$ 対象は障害物

図-5 ローダ前部の物体の認識の概念図

の方向から積み込み作業を行うことが望ましい。このローダとダンブの角度は θ によって定義され (垂直ならば $\theta = 0$)、DURへの移行の判断はこの値による。この場合、角度 θ の許容範囲を小さくすると、ローダはダンブのベッセルまで近づいたが、そこで角度 θ の値が許容範囲内に入るまで何度も後進・前進を繰り返すことがしばしば起こり実際的ではない。そこで、本研究では許容範囲として $(\pi/18) \text{ rad}$ を設け、角度 θ の絶対値が $(\pi/18) \text{ rad}$ より小さい場合には、DURへ移行し、それより大きいときは中心の光源への方向を算出し、DRにより後進した後、IRへ戻ることとする。ローダ前部の物体が障害物であると判断された場合、障害物とダンブとの間の間隔を推定し、障害物とダンブとの間に十分なスペースがある場合には、その障害物を回避して作業を継続させることが可能であるが、障害物がダンブの間近にある場合は、積み込み作業を実行することが不可能であると判断した場合は、作業を中止する。

e) Dumping Routine

本ルーチンには、ローダの前の物体がダンブであり、かつローダのダンブに対する角度 θ が許容範囲内にあると判断された場合に移行してくる。ここでは、バケット制御用のアクチュエータを稼働させ、実際に土砂をベッセルに積み込む。

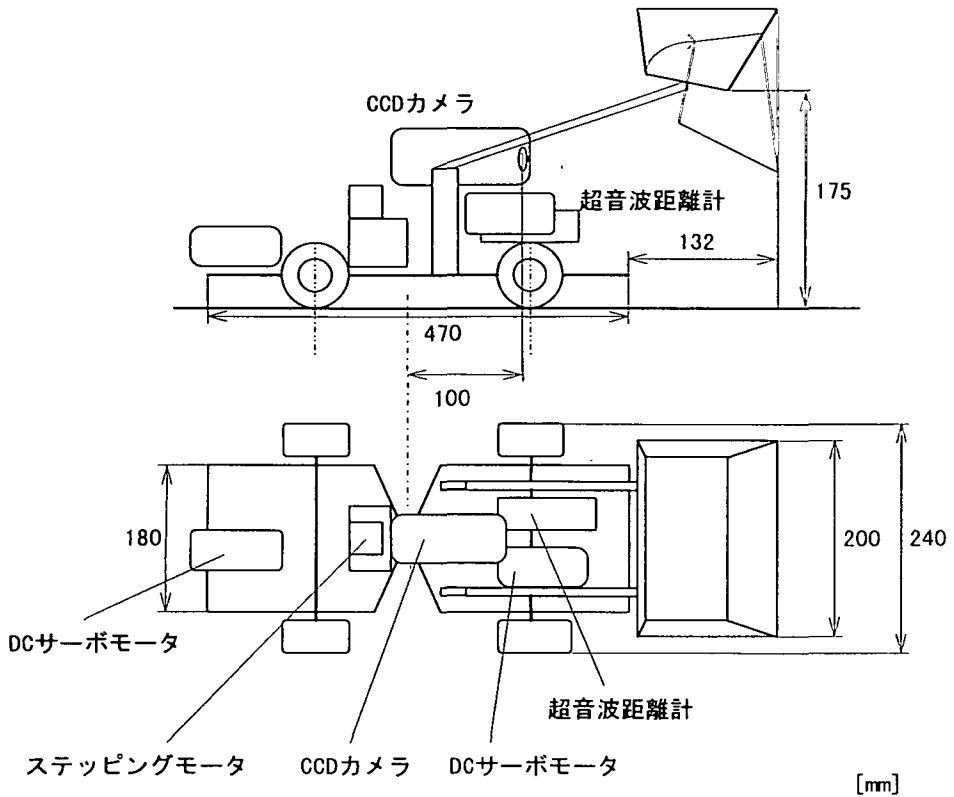


図-6 ロダ模型の概略図

3. 実験装置および実験結果

(1) 実験装置

本研究で提案する位置認識のためのアルゴリズムの有効性を検討するために模型実験を行った。図-6および図-7にロダ模型およびダンプ模型の概略を示した。ロダ模型には駆動用およびバケット制御用アクチュエータとしてDCサーボモータを用いた。実際のロダはバケットで土砂のすくい取りおよびダンプへの積み込みの2つの作業を行うことから、2自由度を有するが、本研究では土砂のすくい取り作業は考慮しないことから、機構を簡単にするため、1自由度のみを有する構造になっている。また、操舵用アクチュエータとしてはステッピングモータを用いた。2つのDCサーボモータはパーソナルコンピュータよりD/Aコンバータボードおよびモータドライバを介して作動させた。また、ステッピングモータはパーソナルコンピュータよりパラレルボードおよびモータドライバを介して動作させた。

本制御法ではダンプの画像を画像処理装置に入力する必要があるため、ロダ上にCCDカメラを搭載した。なお、上述したようにカメラの光軸方向がロダの進行方向と一致するようにカメラを設置した。レンズの焦点距離 f は6.744mmである。撮影された画像は、画像処理装置により512×512画素に標準化され、それぞれの画素に対して256階調に量子化され、デジタル画像に変換される。

なお、ロダ模型には障害物検出用として超音波距離計を設置した。本研究で用いた超音波距離計の測定範囲は60～300mmであり、分解能は1mmである。超音波距離計からの信号は、A/Dコンバータボードよりパーソナルコンピュータに取り込み、この信号の大きさによりロダと障害物あるいはダンプとの間の距離を計測した。

ダンプ模型のベッセル側面部には、図-7に示すように5個の光源を50mm間隔に設置した。また車体側面には超音波距離計による距離計測を容易にするために反射板を便宜上設けてある。

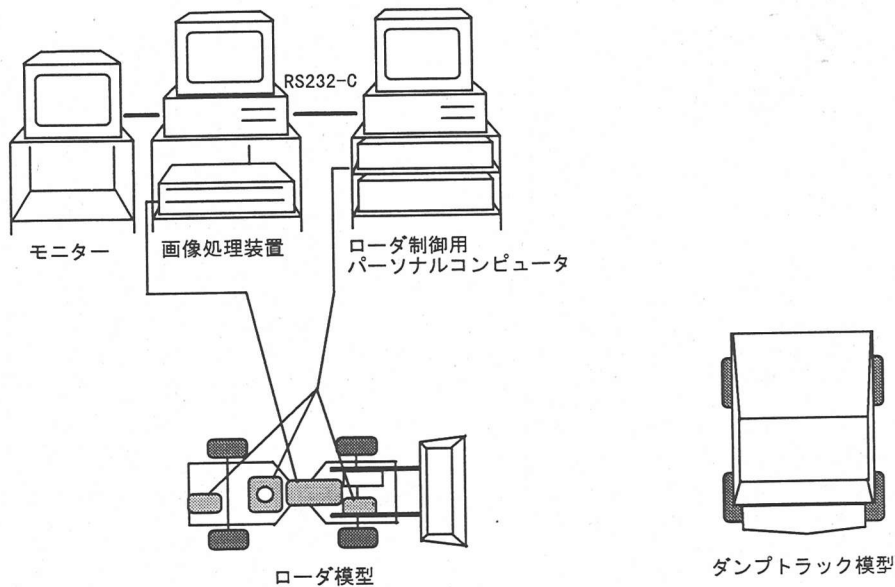


図-8 本実験装置全体の概略図

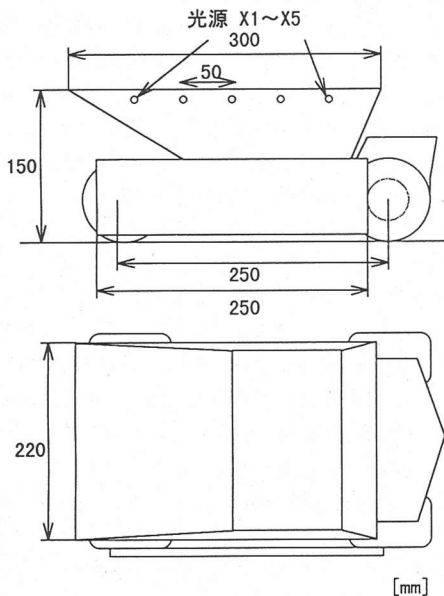


図-7 ダンプトラック模型の概略図

図-8に実験装置全体の概略を示した。本実験では2つのパーソナルコンピュータを用いた。1つは画像処理装置のためのホストコンピュータであり、もう1つはローダの制御用コンピュータである。なお2つのコンピュータはRS-232Cケーブルにより接続されており、データの送受信を行うようになっている。

(2) 積み込み位置に関する実験結果

初めにローダの積み込み位置に対する実験を行った。実験では初めにローダ模型を所定の初期位置に置き、本アルゴリズムをスタートさせる。ローダの初期位置および方向を図-9に示した。図中のA~Eの黒丸がローダの中心（本模型では車体屈曲の中心とした）位置を示しており、矢印はローダ模型の初期の方向を示している。各初期位置の間隔は200mmであり、またローダの初期方向としては各初期位置に対して3通りに設定し、それぞれ15度間隔になっている。ローダがダンプの側面に近づき、積み込みを行う際のローダ位置の精度を評価するために、ローダ模型の最終的な積み込み位置およびダンプの側面に対する積み込み角度の測定を行った。積み込み位置としては図-10に示すようにバケットの中心と中央の光源とのずれを測定した。また積み込み角度としては、図-1あるいは図-10に示される角度 ϕ により評価した。その結果を表-1に示す。

表-1より、いずれの初期位置から出発しても積み込み位置に関しては $\pm 15\text{mm}$ 程度の範囲内にあり、また積み込み角度に関しては $\pm (\pi/18)\text{rad}$ 程度の範囲内にあることが分かる。なお移動に要する所要時間は約1分から1分30秒程度であった。いずれの場合もローダはダンプに衝突することなく、また土砂をベッセルからこぼすことなく作業を終了することが確かめられ、さらに積み込み位置および積み込み角度の値か

表-1 積み込み位置の精度に関する実験結果

初期位置		積み込み角度 ϕ : [deg.]	積み込み位置 δ : [cm]	所要時間
(A)	①	+5	+7	1分13秒
	②	+6	-14	1分12秒
	③	+3	-5	1分15秒
(B)	①	+4	+16	1分9秒
	②	+2	0	1分10秒
	③	-2	+5	1分14秒
(C)	①	+3	+8	1分30秒
	②	0	-12	1分19秒
	③	-3	-5	1分8秒
(D)	①	+8	+16	1分18秒
	②	-1	-7	1分18秒
	③	+2	0	1分10秒
(E)	①	-3	+11	1分16秒
	②	-5	-7	1分11秒
	③	-4	-1	1分18秒

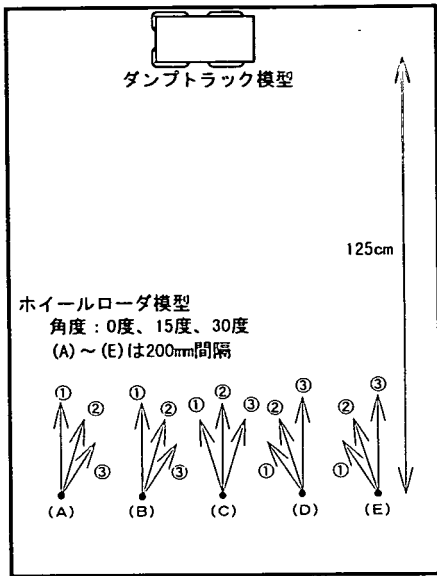


図-9 ローダの初期位置

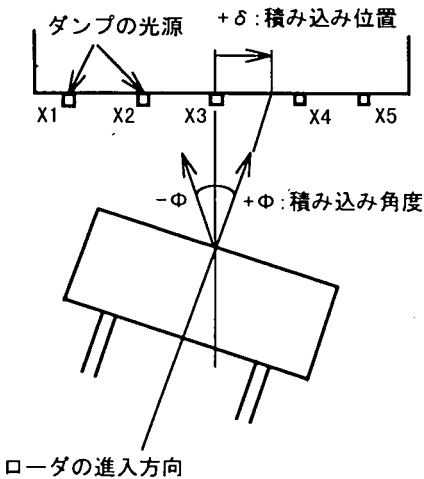


図-10 積み込み位置の精度の測定概念図

ら、ローダはベッセルの中央付近でベッセルに対してほぼ垂直の方向から積み込み作業を行っていることが確認された。

(3) ローダ模型の目標経路と実際の移動経路との比較

制御アルゴリズムにて生成される目標経路とローダ模型が実際に移動した経路との比較検討を行うために、ローダ模型の全作業をビデオカメラにより撮影し、移動軌跡をX-Yコーディネータにより取得した。この際、撮影された画像上のローダ模型の座標を実際の移動平面における座標に変換する必要がある。そのため画像中にスケールを設置して移動軌跡の撮影を行った。任意の初期位置より作業を開始させた時のローダの経路の一例を図-11から図-15に示した。図中の実線はローダ模型が実際に移動した経路であり、矢印はローダ模型の初期位置および方向を表す。また破線は初期位置にて生成された目標経路である。

図-11はローダの初期位置をダンプのベッセルに対してほぼ垂直の位置にセットした時の結果の一例である。このときローダ模型はDRにより積み込み可能な位置へ移動し、姿勢を調整しながらダンプ模型へ接近して積み込み作業を実行している。また、ローダ模型の移動経路と目標経路はほぼ一致していることが分かる。

図-12はローダの初期位置をダンプからずらしてセットした時の結果の一例であり、DR→MR→DURへと制御アルゴリズムが移行して全作業を終了している。またダンプ模型に接近した位置で実線が重なっているのは、DUR内で積み込み角度の調整を行うため、ローダ模型が前後に移動しているためである。

図-13はIR内にてローダ模型が「自分の初期位置がダンプ模型に近すぎる、また角度 θ が大きすぎる」とを認識し、MRの後進パターンにより移動した結果の一例である。この図を見ると実線と破線、つまり

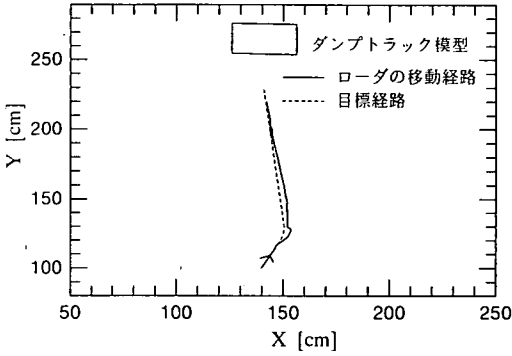


図-11 ローダの移動経路

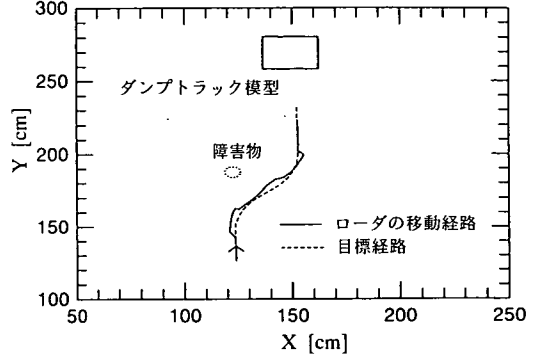


図-14 ローダの移動経路

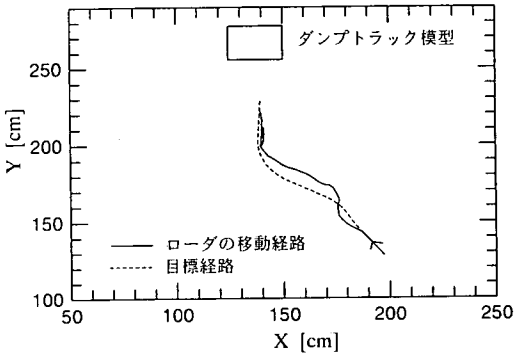


図-12 ローダの移動経路

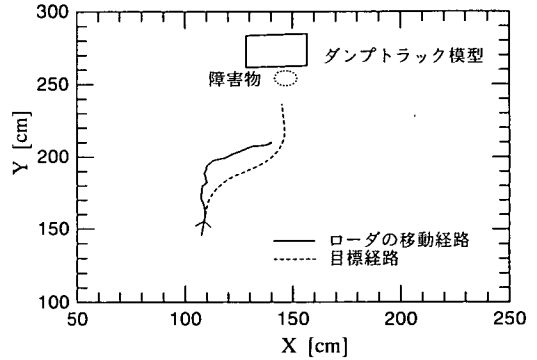


図-15 ローダの移動経路

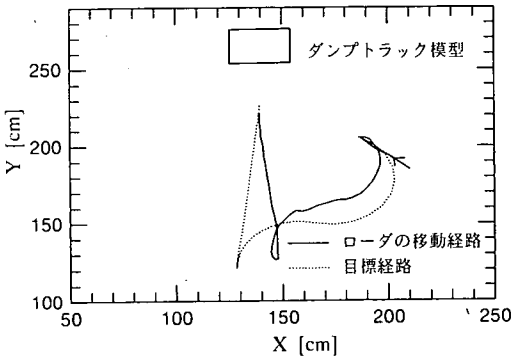


図-13 ローダの移動経路

ローダ模型の移動経路と目標経路とのずれが大きくなっていることが分かる。これは初期位置において取得した位置パラメータ(θ , l)の誤差が大きかったためであるが、本アルゴリズムでは画像を入力し、処理する毎に位置パラメータの取得を行い、それと同時に目標経路を設定し直して進んでいくので、最終的には

適切な位置で積み込みを実行している。

図-14は、ローダ模型の移動経路途中に障害物に模擬した円筒形の物体を置いた時、それを検出して回避している一例である。なお、ここでの目標軌跡は障害物がないときのものである。いずれもローダ模型の前面に障害物を検出した後、光源検出および位置パラメータの算出を行い、「ダンパが障害物より右側($\theta < 0$)に位置している」ことをローダ模型が認識し、障害物の右側を通して回避している。

図-15はダンパ模型の直前に障害物を設置して実験を行った例である。このときローダ模型はSTOP ROUTINEにより停止し、ローダ模型前部の物体を障害物であると判断するが、障害物とダンパ模型との間隔が狭く、これ以上ダンパに接近できないと判断して作業を中止している様子が見られる。

4. まとめ

本研究では、ローダに搭載されたCCDカメラからの画像を処理することにより、ローダ自らがダンパとの

相対位置を認識し、ダンプの位置まで移動した後、土砂の積み込みを自動的に行うアルゴリズムを提案した。またローダとダンプの模型を用いた実験を通して、本アルゴリズムの有効性について検討した。その結果、本アルゴリズムを用いることにより、ローダはダンプとの位置関係を認識し、積み込み作業を自律的に実行することが確かめられた。

なお、本研究ではダンプは所定の位置に停止していることを前提としたが、今後は移動中のダンプを認識し、ローダがダンプの停止する位置まで予め移動する制御アルゴリズム等についても検討する必要がある。

補遺 式(4)および(5)の誘導

図-3(b)より $L_2 = B \cos \theta$, $L' = B \sin \theta$ であり、相似関係から $L_1 = L' B \cos \theta / (L' + 2B \sin \theta)$ となる。ここで、 $S = \Delta X_1 / \Delta X_2 = L_1 / L_2$ とすると

$$S = 1 / (1 + 2B \sin \theta / L') \quad (A1)$$

が得られる。さらに $\Delta X_2 : f = L_2 : L'$ より L' は次式のように表される。

$$L' = B \cos \theta \tan \rho_2 \quad (A2)$$

従って、 L は $L + L'$ で与えられるため、本文中の式(5)が得られる。また S は次式のようになる。

$$S = 1 / (1 + 2 \tan \theta / \tan \rho_2) \quad (A3)$$

一方、 $\Delta X_1 : f = L_1 : L'$ の関係を用いると、 S は次式で与えられる。

$$S = 1 / (1 + \frac{2 \sin \theta}{\cos \theta \tan \rho_1 - 2 \sin \theta}) \quad (A4)$$

式(A3)の右辺と式(A4)の右辺を等置すると、本文中の式(4)が得られる。

参考文献

- 1) 小中元秀：極限作業ロボット開発について、第2回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 1-6, 1991.
- 2) 大島 寛：ダンプトラックの無人運行システム、第2回西日本資源開発シンポジウム論文集, pp. 73-76, 1995.
- 3) Hezani, A.: FORCE ANALYSIS IN THE SCOOPING/LOADING OPERATION OF AN LHD LOADER, Proc. of 2nd Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp. 415-424, 1993.
- 4) 高橋 弘, 塚本佳明, 中野栄二：破砕堆積物すくい取り作業時におけるバケットに作用する抵抗力に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集(C編), 第63巻, 609号, pp. 1491-1497, 1997.
- 5) 浜田展男, 絹笠真也, 種子田定博：テレビカメラを用いたLHDの遠隔操作, 第2回西日本資源開発シンポジウム論文集, pp. 67-72, 1995.
- 6) Gocho, T., Yamada, N. and Hamaguchi, T.: AUTOMATIC WHEEL LOADER IN ASPHALT PLANT, Proc. of 9th Int. Symp. On Automation and Robotics in Construction, pp. 803-812, 1992.
- 7) King, R. H., Lever, P. J. A., Strickland, W. and Lane, J. D.: ULTRASONIC RANGERS FOR UNDERGROUND MINE EQUIPMENT NAVIGATION, Proc. of 1st Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp. 6/31-6/44, 1991.
- 8) St-Amant, M., Laperriere Y., Hurteau, R. and Chevrette, G.: A SIMPLE ROBUST VISION SYSTEM FOR UNDERGROUND VEHICLE GUIDANCE, Proc. of 2nd Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp. 6/1-6/10, 1991.

(1997. 4. 8受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON AUTOMATIC LOADING OF SOILS TO DUMP TRUCK BY WHEEL LOADER

Hiroshi TAKAHASHI and Ken OKITA

In this study, the control algorithm was investigated to carry out the automatic loading of soils to the dump truck from the wheel loader. A CCD camera was set on the loader and the image from the camera was processed to recognize the relative location between the dump truck and the loader. Through the experiment by using the dump truck model and loader model, it was confirmed that the algorithm proposed here works well.