

ローダとダンプトラックの協調作業による積み込み 作業の自動化に関する基礎的研究

高橋 弘¹・森川 康弘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 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
²東北大学大学院工学研究科地球工学専攻博士前期課程 (同上)

論文においては、ローダとダンプトラックの知的協調作業による土砂積み込み作業の自動化を目指し、ダンプトラックがローダに接近する場合の制御アルゴリズムについて検討した。この作業の自動化を実現するためには、ダンプトラックはローダとの相対位置を認識しなければならないことから、ダンプトラック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、ダンプのベッセルの位置と積み込み地点との差を調べた結果、誤差はベッセル長さの約 1/25 程度に収まり、本アルゴリズムの有効性が確認された。

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。特に製造業の分野においては、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。しかし、これらのロボットの大半は、一般に工場内等のロボット用に整備された環境下において使用されているのが現状である^{1), 2)}。土木・建設業および資源開発分野あるいは2次災害の危険性のあるような復旧現場での作業においても、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、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ことから、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のため、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³⁾。

ところで、土木・建設業あるいは資源開発の分野における基本作業の1つに、土砂・鉱石の積み込み・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・鉱石の積み込み・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。3)のダンプの無人走行に関しては実用化的域にあり、既に一部の鉱山で無人ダンプが稼働中である^{4), 5)}ことから、著者らは2)の作業の自動化を目指し、前報⁶⁾においてローダがダンプのベッセルを認識し、ダンプに接近して積み込み作業を行うアルゴリズムを提案し、模型実験によりその有効性を検証した。

さて、土砂・鉱石の積み込み・運搬作業現場には、ローダ1台に対して複数のダンプが投入される。ダンプの最適な台数は、ローダのパケット容量、ダンプのベッセル容量、運搬距離、運搬速度などから計算されるダンプのサイクルタイムから求められる⁷⁾。運搬距離が大きくなるとそれにつれて最適なダンプの投入台数は増大するが、実際にはコストの関係から、ダンプの投入台数は最適な台数よりも少なくせざるを得ないのが一般的である。したがって、どうしてもローダの作業の方に余裕が生じてしまうことになる。この場合、ローダは新たに土砂をすくい取った後、一

一旦停止し、ダンプの到着を待ち、ダンプが積み込み地点に到着してから、ローダはダンプの到着を確認し、ダンプに向かって発進する。すなわちダンプが到着してから移動を開始するため、時間的なロスが常に存在する。そこで、ローダが土砂・鉱石をすくい取った後、積み込み地点まで移動しておき、そして、待機しているローダにダンプが接近すれば、作業効率の向上が期待できる。これに似た作業形態は、国内のいくつかの石灰石鉱山で実際に採用されており、クロスローディングと呼ばれている。これらの現場では、重機はマニュアル操作されているが、ローダは鉱石を積み込んだ後、一定距離だけバックし、ダンプの到着を待つ。空のダンプはローダの前面に、それぞれの進行方向が直交するように接近する。ダンプはローダが一回の積み込み作業を終えた後、一定距離だけ前進し、ローダの前を開ける。ローダはバケットを下げて前進し、破碎堆積物から鉱石をすくい取った後、再び積み込み地点までバックし、その後、ダンプが積み込み地点までバックしてローダが積み込み作業を行うといったサイクルをベッセルが満杯になるまで繰り返している。ダンプの動きとローダの動きがクロスすることから、クロスローディングと呼ばれているが、このような作業形態の場合、それぞの重機の自動化が達成されると作業性向上が期待でき、さらにはダンプトラックとローダがお互いの位置を認識し、最適な積み込み地点へ両者が移動して積み込み作業を実行するといった次世代自動化作業も可能になってくると思われる。しかしながら、ダンプがローダに自律的に接近するアルゴリズムは、十分に検討されているとは言い難い。

それゆえ、本研究ではローダとダンプの積み込み作業の自動化に資るために、ダンプがローダに接近する場合について、画像によるダンプとローダとの相対位置の認識方法を提案することおよび画像から得た情報を基に、ダンプの移動制御アルゴリズムを提案することを目的としている。

2. ダンプの自己位置・姿勢推定法

(1) 位置パラメータの取得

重機の自動化・無人化システムを実現する際、車輛の暴走は大事故につながる危険性が極めて大きいため、車輛の安全性・信頼性を十分に確保する必要がある。このためには、種々のセンサを車輛に設置し、多方面から車輛の状態を検知することが必要になるが、視覚センサは、短時間で比較的広範囲の環境を画像として得ることができ、また画像は柔軟に対応できることから、環境認識のためには必要不可欠なセンサであり、また安全性・信頼性確保のためにも不可欠なセンサの1つと考えられる。そこで、本研究では、画像を用いたダンプの自己位置・姿勢推定法

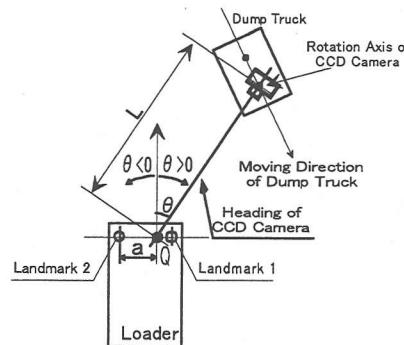


図-1 ダンプとローダの相対的な位置関係

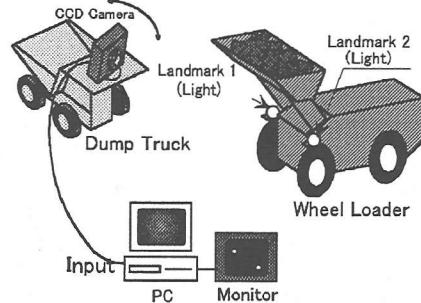


図-2 本研究における位置パラメータ導出装置

について検討する。

ダンプがローダに接近する場合、ダンプはローダとの位置関係を把握していないなければならない。本研究では、ローダ本体に設置した2つの光源をランドマークとして、ダンプ本体に設置したCCDカメラから得られる画像情報をもとに自己位置・姿勢を推定する方法を提案する。ここでは、簡単のためダンプとローダは平坦な2次元平面上におかれていると仮定する。ダンプとローダの相対的な位置関係の算出に必要なパラメータは、図-1に示すように、「Q点からカメラのレンズ中心までの距離L」および「ローダ方向とカメラ方向のなす角度θ」であり、以下、これらのパラメータを位置パラメータと呼ぶこととする。ただし、Q点はカメラの光軸を含み地面に垂直な面が2つの光源を結ぶ直線と交わる点である。

これらの位置パラメータを導出するため必要な装置を図-2に示す。ローダの前輪の上方に2つの光源を設置し、ダンプに設置した回転可能なCCDカメラによりその画像情報を取得する。また、本研究で提案する方法では光軸が2つのランドマークの間にに入る必要がありますため、カメラを回転させてその状態にした後、画像情報を取得する。そして、画像情報を画像処理装置に取り込み、2値化、重心計算等により、画像座標系における2つの光源の座標を取得する。

カメラとランドマークの関係を表す立体図を図-3に示す。入はカメラの仰角、 l_1 は光源間距離、 h はレンズ中心と光源との高さの差、 f は焦点距離であり、これらは全て

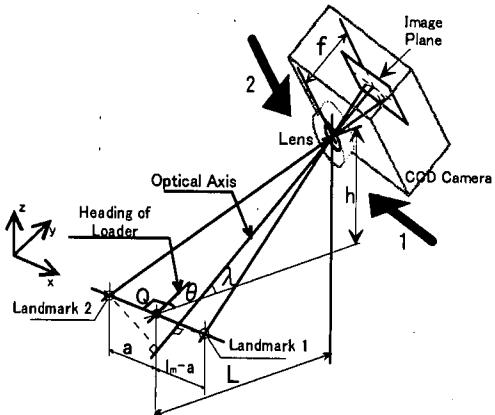


図-3 カメラとランドマークとの位置関係

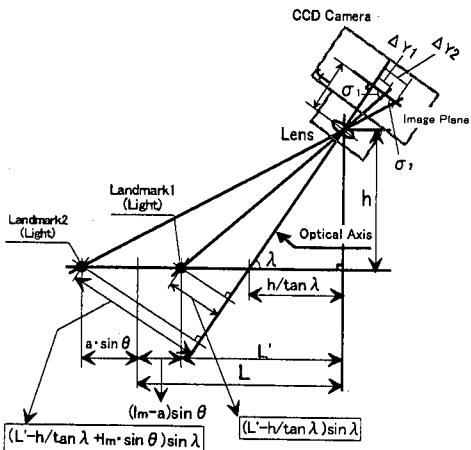


図-4 横方向から見たカメラとランドマークとの位置関係

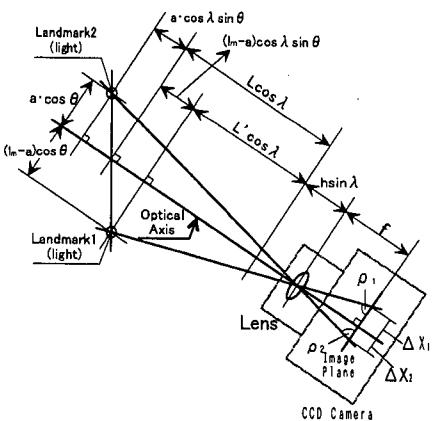


図-5 縦方向から見たカメラとランドマークとの位置関係

既知の値である。ここで、撮像面に平行で横方向を方向1とし、また撮像面に平行で縦方向を方向2とする。これら2つの方向からそれぞれ図-3の立体図を見た場合の幾何学的関係から相似関係を導出することを考える。撮像面に平行に見るため、撮像面を含め、撮像面に平行な平面は、幾何学的関係を示す図中では直線に見えることとなる。ま

た、光軸は撮像面に垂直である。

図-4に撮像面に平行で横方向(方向1)から見た図を、また図-5に撮像面に平行で縦方向(方向2)から見た図を示す。撮像面および撮像面に平行で2つの光源をそれぞれ通る平面は、これらの図中では直線となっている。これらの図に示される幾何学関係を用いると、位置パラメータ λ および θ は以下のように算出される。ただし、式(4)で示される a は、Q点とランドマーク2との間の距離を示す。

$$\theta = \sin^{-1}(-h / \sin \lambda \cdot (A - B) / l_m) \quad (1)$$

$$L = h / \sin \lambda \cdot A + h / \tan \lambda + (l_m - a) \sin \theta \quad (2)$$

$$L = (l_m - a) \left(\frac{f}{\Delta X_1 \cos \lambda} + \sin \theta \right) - h \tan \lambda \quad (3)$$

$$a = l_m \left(\frac{1}{\Delta X_1} + \frac{\tan \theta \cos \lambda}{f} \right) / \left(\frac{1}{\Delta X_1} + \frac{1}{\Delta X_2} \right) \quad (4)$$

$$A = \frac{\cos \sigma_1}{\sin \sigma_1 \sin \lambda - \cos \sigma_1 \cos \lambda} \quad (5)$$

$$B = \frac{\cos \sigma_2}{\sin \sigma_2 \sin \lambda - \cos \sigma_2 \cos \lambda} \quad (6)$$

L を与える式は、図-4および図-5のそれぞれに示される幾何学関係から得られ、式(2)は図-4に示される関係より、また式(3)は図-5に示される関係より得られる。取得される画像情報に誤差がなければ式(2)および式(3)より計算される値は一致する。しかしながら、装置の限界上の問題より両者の値が一致することは希である。式(2)および式(3)の精度は、主としてランドマークが画像上でどのような状態で写るかに依存する。そこで、本研究では予備実験により、どちらの式を選択するかの判断基準を以下のように求めた。すなわち、画像座標系で2つのランドマークの座標が得られるが、これら2つの座標の x 座標および y 座標の差をそれぞれ ΔL_x および ΔL_y とした時、 $\Delta L_y / \Delta L_x$ の値が0.18より小さい場合、 $\Delta L_y > 40$ の場合は、式(2)の精度が式(3)の精度より優れており、また逆に $\Delta L_y \leq 40$ の場合は式(3)の精度が式(2)より優れていることが確認された。また $\Delta L_y / \Delta L_x$ の値が0.18より大きい場合は、 ΔL_y の値に拘わらず式(2)の精度が式(3)の精度より優れていることが確認されたため、制御実験では、上述した判断基準より精度が良いと判断される式を自動的に選択し、距離 L を算出することとした。

なお、この判断基準は使用する模型あるいは実際の重機によって異なると考えられる。汎用性のある判断基準が望ましいが、これについては今後の課題としたい。

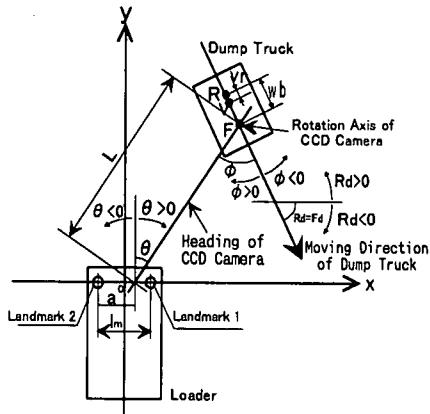


図-6 ダンプの位置・姿勢の定義

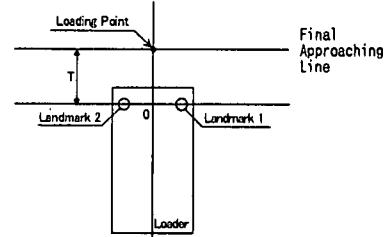


図-7 積み込み位置の定義

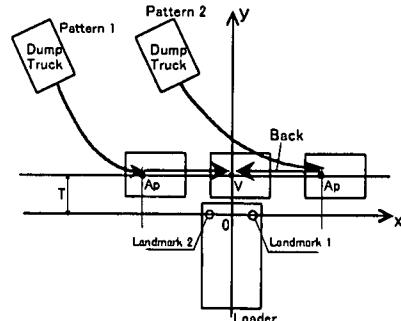


図-8 ダンプのローダへの接近パターン

(2)自己位置・姿勢の算出

ここでは、位置パラメータを用いてダンプの自己位置・姿勢を算出する。位置パラメータとダンプの位置・姿勢との関係を図-6に示す。ここに、 θ はカメラの回転角度、 wb はホイールベース、 vr はベッセル中心と後輪軸との距離であり、これらは既知の値である。また、図中のF, R, Vはそれぞれ「前輪軸中心(カメラのレンズ中心は前輪軸中心上に存在する)」、「後輪軸中心」および「ベッセルの中心」を示す。

本研究では、ダンプの状態は代表点Rの位置(R_x , R_y)と姿勢 R_d によって表すことにする。図-6に示す関係より、ダンプの位置・姿勢は以下のように求められる。

$$R_x = a - \frac{l_m}{2} + L \sin \theta - wb \cos(R_d) \quad (7)$$

$$R_y = L \cos \theta - wb \sin(R_d) \quad (8)$$

$$R_d = -\frac{\pi}{2} + \phi - \theta \quad (9)$$

なお、 R_d はx軸方向を0とし、反時計まわりの方向を正とする。

3. 経路生成法

(1)経路生成の概要

積み込み地点の定義を図-7に示す。本研究では、積み込み地点はローダのパケットの真下であるのか理想であると考え、積み込み地点をランドマークからローダの前方にTだけ離れた点とする。また、積み込み時におけるダンプの状態は、積み込み地点にベッセルの中心が来るようになり、かつローダと直角の方向を向くような状態とする。ここでは、便宜上、この状態を「理想的な積み込み状態」と呼ぶことにする。さらに、ランドマークからTだけ離れた

直線を「最終接近線」と定義する。本研究では、ダンプが最終的にこの直線上に沿って、積み込み地点に接近するような制御を行う。

本研究では、図-8に示すように、最終接近線上のローダから左または右に一定距離だけ離れた点Apを考え、まずダンプはAp点まで移動し、その後ローダまで接近することを想定し、経路生成を行う。つまり、Ap点がダンプ側に存在する場合にはパターン1で接近し、Ap点がダンプと反対側に存在する場合にはパターン2で接近することにする。パターン2ではAp点まで前進で接近し、最終的に後進で接近を行う。また、本研究では、接近に要する時間はパターン1の方が短いと考えて、優先的にパターン1で接近するような経路生成を行い、ローダに接近することを考える。ただし、パターン1の経路では、ダンプがローダに衝突してしまうような場合、あるいはダンプの機構上経路が作れないような場合は、パターン2で経路を生成する。

さて、本研究は経路生成に関する詳細な検討を目的としているのではなく、ダンプの移動制御法の提案とその妥当性の検証を目的としているため、ここでは、簡単のため直線と円弧の組み合わせによって経路を生成することとし、図-9に示すように3段階に分けて経路生成を行う。

まず、ダンプはA点で停止しており、カメラを回転させて光源を探し、2つのランドマークの間に光軸を入れ、画像情報から自己位置・姿勢を推定する。第1段階ではダンプの車体をローダの方向に向かせる。すなわち、初期位置からB点まで移動した後、一旦停止する。B点で再び自己

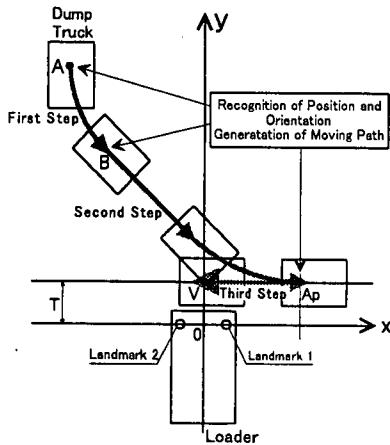


図-9 ダンプのローダへの接近経路(パターン2の例)

位置・姿勢を推定し、第2段階ではAp点まで移動する。第2段階終了後、ダンプはAp点に停止しているはずであるが、推定した自己位置・姿勢の誤差、外乱あるいはステアリングのあそび等の理由によって、実際にはAp点からはずれた地点にダンプが停止していることが多いにも拘わらず、ダンプ自身はAp点に停止していると誤判断する可能性がある。第3段階ではそのようなずれを修正するような移動を行う。具体的には、Vx(ベッセルの中心のx座標)と積み込み地点の差が許容範囲内に入るまで、小刻みに自己位置・姿勢の推定と移動を繰り返しながら、ローダに接近する。第3段階では、ダンプはパターン1の場合には前進で、パターン2の場合には後進で接近することになる。

[第1段階]

図-10中のR0(Rx0,Ry0), Rd0はダンプの現在の位置・姿勢を、またR1(Rx1,Ry1), Rd1は移動後のダンプの位置・姿勢を示す。すなわち、R0点およびR1点は、それぞれ図-9におけるA点およびB点に対応する。R0通りダンプの進行方向に伸びる直線①を「ダンプの方向直線」と呼ぶことにする。この直線①上のR0から距離D1だけダンプの前方の点をE1とする。また、最終接近線上のAp点から距離D2だけダンプ側の点をE2とし、E1とE2を結んだ直線②を考える。直線①と直線②にそれぞれR0点およびR1点で接する円弧を考え、この円弧上を移動させることによって、ダンプの車体をローダの方に向けることができる。

生成した経路を移動させるためには、制御値として曲率Cvおよび移動距離Sを与える必要がある。曲率半径をrとすると、曲率Cvは次式で与えられる。

$$Cv = 1/r \quad (10)$$

つまり、直線の場合はCv=0となる。距離D1およびD2を予め一定値として与えておけば、図-10に示される関係より、図中の角度Rd1が求められ、したがって曲率半径

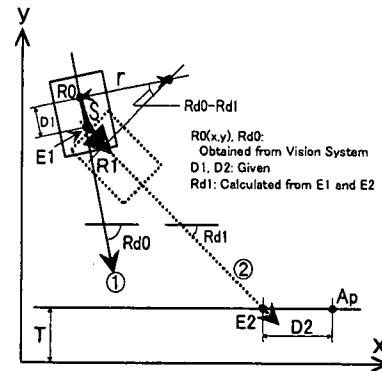


図-10 第1段階におけるダンプの移動経路

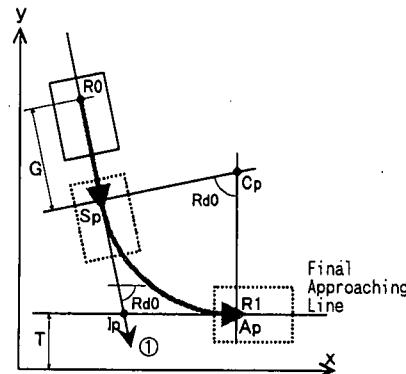


図-11 第2段階におけるダンプの移動経路

が次式で与えられる。

$$r = D1 / \tan\left(\frac{Rd0 - Rd1}{2}\right) \quad (11)$$

また移動距離Sは、

$$S = r \cdot (Rd0 - Rd1) \quad (12)$$

で求められる。したがって、R0点より曲率Cvで距離Sだけダンプを旋回させれば、ダンプはR1点に到達することになる。

[第2段階]

図-11に示すように、ダンプの方向直線①にSp点を取り、Sp点およびAp点で直線①および最終接近線に接する円を考える。まず、Sp点まで直進し、その後、Sp点とAp点の2つの接点を両端とする円弧上を移動させることによって、ダンプをAp点まで移動させることができる。直線①の式は既知であるので、最終接近線と直線①との交点Ipの座標は求められる。Rd0は認識結果より得られるので、既知であるAp点の座標を用いると、Sp点の座標が求められる。Sp点、Ip点およびAp点の座標を用いると、図中のCp点の座標が得られるので、曲率半径を求めることができ、また移動距離Sは、 $S=r \cdot Rd0$ で求められるので、初めにダンプをR0点からSp点まで直進させ、Sp点より曲率Cvで距離Sだけダンプを旋回させれば、ダンプ

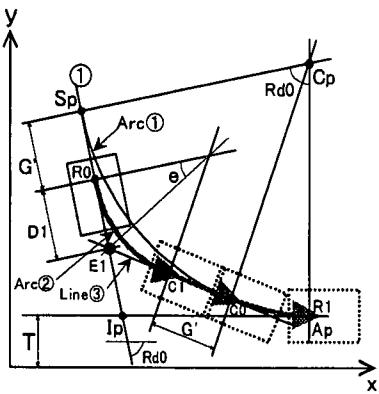


図-12 第2段階におけるダンプの移動経路

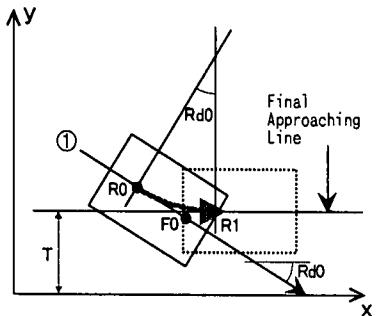


図-13 第3段階におけるダンプの移動経路

は Ap 点に到達することになる。

基本的には、上述のように、「直線+円弧」で Ap 点まで到達する経路を生成するが、ダンプの位置によっては、Sp 点を R0 点の後方に設定しなければならない場合がある。この場合は、図-12 に示すように、まず上述したように Sp 点と Ap 点の 2 つの接点を両端とする円弧を考える。便宜上、その円弧を円弧①とする。次に、R0 点から距離 D1 だけ前方の点(E1)を通り円弧①に接する直線③を考える。直線③と円弧①との接点を C0 とし、また、直線③とダンプの方向直線①に R0 点で接する円を考える。その円と直線③との接点を C1 点とし、R0 点と C1 点を両端とする円弧②を求める。

まず、ダンプを円弧②によって C1 点まで移動させ、その後、C1 点から C0 点まで直進させて、さらに円弧①上を C0 から Ap 点まで移動させることによって、ダンプを Ap 点まで移動させることができる。すなわち、この場合は、「円弧+直線+円弧」の経路で Ap 点まで到達することになる。

[第3段階]

第3段階では、第2段階終了後の Ap 点からのダンプのずれを修正する移動を行うための経路を生成する。また、第3段階にはローダの左側または右側からそれ前進ま

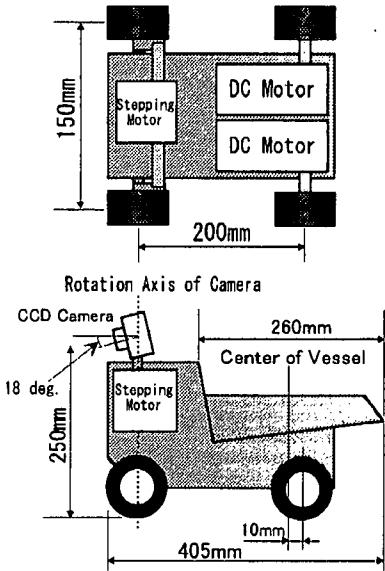


図-14 ダンプ模型の概略

たは後進で接近する場合があるが、同じ考え方で経路を生成することができる。

ダンプが最終接近線上に乗っていない場合、図-13 に示すように、ダンプの方向直線①と最終接近線に R0 で接する円を考え、その円の 2 つの接点を両端とする円弧を移動することによって、最終接近線に乗り、かつ、最終接近線と平行な方向を向くことができる。ダンプが最終接近線上に乗っている場合は、そのまま直進する。

ダンプは常に自己位置を認識し、ベッセルの中心位置を推定しながら移動する。本研究では、推定されたベッセルの中心の x 座標と予め与えられている積み込み地点の x 座標の差が許容範囲内に入ったと判断された場合、ダンプを停止させ、ローダによる積み込み作業を実行させた。なお許容範囲は、ベッセル長さの ±1/50 とした。

4. 実験結果および考察

↓

(1) 実験装置

前章にて提案したダンプの移動制御法の妥当性を検証するために、図-14 および図-15 に示すようなダンプ模型およびローダ模型を作成し、制御実験を行った。ダンプ模型はベッセル容量 24m³級の実機の 1/20 サイズである。車輪の駆動には 2 個の DC サーボモータを用い、左右の車輪を別々に駆動させた。また、前輪の操舵はステッピングモータを用いて行った。キャビンに相当する部分の上に CCD カメラを設置し、ステッピングモータにより 360 度回転可能とした。なお、回転中心は前輪軸中心上にあり、CCD カメラの有効画素数は H512×V492(約 25 万画素)である。

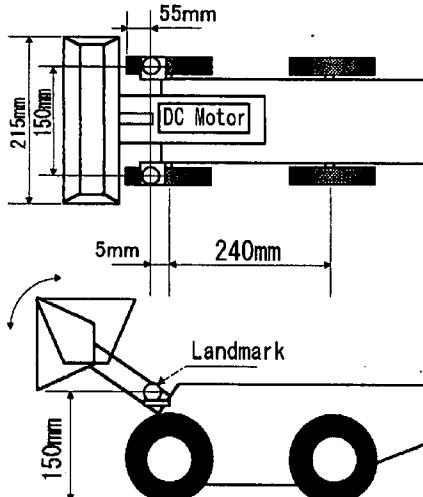


図-15 ローダ模型の概略

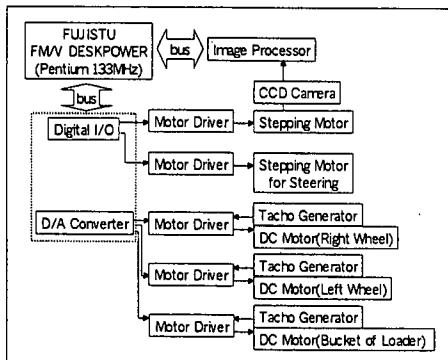


図-16 実験装置全体の制御系

ローダ模型はパケット容量 8m^3 級の実機の 1/20 サイズである。本研究では、ローダは停止してダンプの到着を待っている状態を想定しているため、DC サーボモータによってパケットを制御し、積み込み動作のみを行わせた。また、ランドマークとして 2 つの電球を前輪の上方に設置した。

実験装置全体の構成を図-16 に示す。本実験では 1 台のコンピュータによって画像処理、移動制御およびパケット制御を行う。各 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、サーボコントローラを介して動作させ、ステッピングモータはパーソナルコンピュータより I/O ボード、ドライバユニットを介して動作させた。画像処理装置としては、(株)日立製作所製の画像処理ボード(IP-2000)を用いた。この画像ボードでは CCD カメラからのアナログ画像データを 256 階調の濃淡画像に量子化して、画像ボードに内蔵された基本的な画像処理ルーチンを用いることにより高速な画像処理が可能である。

なお、ダンプ模型のベッセルの長さは 260mm であるた

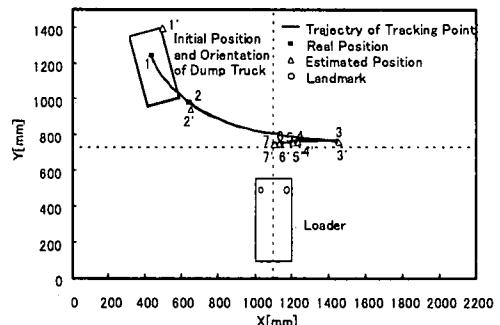


図-17 ダンプの移動軌跡の一例

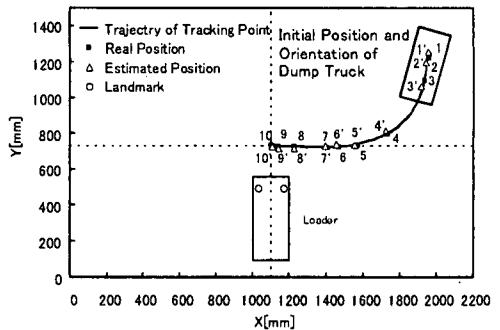


図-18 ダンプの移動軌跡の一例

め、上述の許容範囲は約 $\pm 5\text{mm}$ となる。

(2) ダンプ模型の位置・姿勢と推定された自己位置・姿勢の比較実験

ダンプの実際の位置・姿勢と推定された自己位置・姿勢とのずれを検討するため、ダンプ模型が移動する実験フィールドを真上からビデオカメラによって撮影した。その後、X-Y コーディネータを使用してダンプの移動軌跡を求めるとともに、一時停止して自己位置・姿勢の推定を行った位置も同時に取得した。任意の初期位置より作業を開始させた際のダンプの移動軌跡の一例を図-17 および図-18 に示す。図中の実線は、ビデオ画像より得られた「ダンプ模型が実際に移動した際のベッセル中心の軌跡」を示している。その実線上にある■印はダンプが自己位置・姿勢の推定を行った位置(すなわちダンプが一時停止した実際の位置)であり、その付近にある△印は、そのときに推定した自己位置である。つまり、推定誤差がなければ■印と△印は一致する。数字は自己位置・姿勢の推定を行ったときの実際の位置と推定した位置に対応しており、「」は推定した位置であることを表している。また、破線の交点は積み込み地点となっている。

これらの結果を見ると、実際の位置と推定した位置がほぼ一致していることが分かる。ダンプがローダから遠く離れている場合、または位置パラメータ θ が大きい場合には、推定された自己位置が実際の位置よりも若干ずれている。

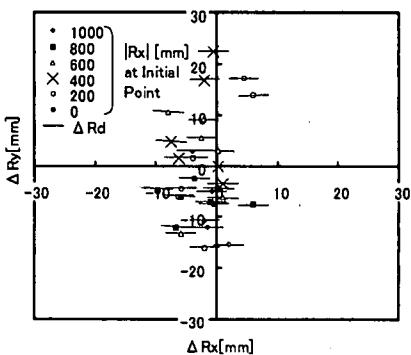


図-19 ダンプの停止位置と積み込み地点との誤差

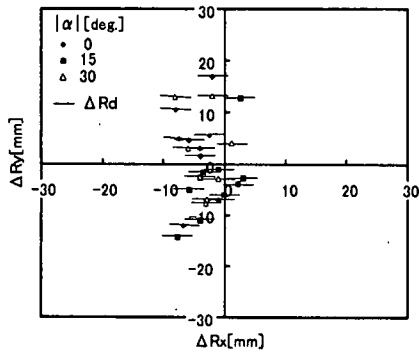


図-20 ダンプの停止位置と積み込み地点との誤差

しかしながら、積み込み地点付近での自己位置・姿勢推定の精度は位置にして土5mm程度の誤差である。よって、本研究で提案した自己位置・姿勢推定法は有効であると言える。

次にダンプの停止状態の評価を行った。ダンプの停止状態は、「ダンプが実際に停止した位置」と「理想的な積み込み状態」とのずれによって評価した。ここでは、x方向のずれを ΔRx [mm]、y方向のずれを ΔRy [mm]、姿勢のずれを ΔRd [deg.]とする。なお、 ΔRd はx軸方向を0とし、反時計回りの方向を正とする。

実験では任意の初期状態からダンプの接近作業をスタートさせ、最終点での停止状態を評価するために、前述した ΔRx 、 ΔRy および ΔRd を測定した。実験結果を図-19および図-20に示す。これらの図の横軸は ΔRx 、縦軸は ΔRy であり、プロットされた点が原点に近いほど停止位置のずれが小さいことを表す。また、これらの図中の各点から伸びる直線は ΔRd を表しており、この直線がx軸に平行であれば、姿勢のずれはないということを意味する。図-19は初期のダンプの姿勢を一定にし、初期位置を変化させた場合の実験結果を示している。初期位置にかかわらず、 ΔRx は土10mm以内、 ΔRd は土6deg.以内に収まっていることが確認された。上述したように、接近を停止するかどうかの判断の許容範囲は、土5mmであるため、いず

れの実験においてもダンプは自ら推定したベッセルの中心位置と積み込み地点のx座標の差が土5mm以内と判断した際に停止し、ローダによる積み込み作業が行われているが、実際のベッセルの位置座標は、推定誤差などのため推定値とは異なり、実際の誤差は許容範囲よりも大きくなっているが、土10mm以内におさまる、これはベッセルの長さの約1/25程度の大きさである。 ΔRy は、場合によつては多少大きな値となることもあったが、実際にローダから碎石粒子をダンプのベッセルへ積み込んだ際、荷こぼれなどは観察されず、本実験におけるずれ程度では積み込み作業にあまり影響はないことが確認された。

ΔRy が大きな値を示す場合がある原因としては以下のようないわが考えられる。ダンプとローダが遠い場合、推定した自己位置・姿勢の誤差が大きくなる。さらに、実験模型のステアリングのあそび等の理由が考えられる。このような理由より、第2段階終了時のAp点からのずれが大きくなり、第3段階で誤差を修正しきれなくなったためと考えられる。

図-20はダンプの初期位置のy座標 Ry を一定にし、x座標 Rx と姿勢 α を変化させた場合の実験結果を示している。図-19の結果と同様に、 ΔRy がやや大きくなる場合も一部に見られるが、 ΔRx は土10mm以内に収まっており、また ΔRd も土5deg.程度である。したがって、これらの図より、本研究で提案した移動制御法ではダンプの初期位置および姿勢に拘わらずダンプを積み込み地点まで誘導することが可能であると言える。

5. むすび

本研究では、ローダとダンプの積み込み作業の自動化に資るために、ダンプがローダに接近する場合について、画像によるダンプとローダとの相対位置の認識方法を提案し、さらにダンプ上に設置されたCCDカメラからの画像情報を基に、ダンプの移動制御法について検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1)ダンプが自律移動を行う際、ダンプとローダとの位置関係の認識のために必要なパラメータを定義し、そのパラメータを画像より取得し、自己位置・姿勢を推定する方法を提案した。さらに、その自己位置・姿勢推定法によって推定された自己位置・姿勢から接近のための経路を生成し移動する制御法を提案した。
- 2)ダンプの移動制御法の妥当性を検討するために、ダンプおよびローダの模型を用いて移動制御実験を行った。その結果、ダンプの実際の位置と推定した位置がほぼ一致しており、本研究で提案した自己位置・姿勢推定法は有効であることが確認された。また、作業終了後のダンプの停止状態と理想的な停止状態の比較を行い、その結果から、本研

究で提案した移動制御法の妥当性が確認された。

今後は、本研究をさらに発展させ、クロスローディングの自動化へと結び付けていく予定である。

参考文献

- 1) 戸貝方規: 知能ロボット・システム, pp.1-2, 1995(マグロウヒル株式会社).
- 2) 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.
- 3) 久武経夫: 建設用屋外作業機械の知能化, 計測と制御, Vol.30, No.1, pp.57-61, 1991.
- 4) Hori, A., Nakamura, S., Okuda, T. and Hirose, S. :

Off-highway Truck Unmanned Navigation Systems, Proc. of the 2nd Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.425-434, 1993.

- 5) 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.
- 6) 高橋 弘, 沖田 謙: 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, 土木学会論文集, No.581/VI-37, pp.145-154, 1997.
- 7) 竹田 篤三: 建設機械, pp.66-68, 1978(森北出版株式会社).

(2000.7. 27 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE AUTOMATIC LOADING OF SOILS BY COOPERATIVE TASK BETWEEN WHEEL LOADER AND DUMP TRUCK

Hiroshi TAKAHASHI and Yasuhiro MORIKAWA

In this study, the control algorithm was investigated to carry out the automatic loading of soils to the dump truck by cooperative task between the wheel loader and dump truck. A CCD camera was set on the dump truck and the image from the camera was processed to detect the landmarks on the wheel loader. From the coordinates of two landmarks in the image coordinate, the location and orientation of the dump truck was recognized. In the experiment, the path of the dump truck from the initial position to the wheel loader was generated and the dump truck was controlled to follow the generated path. It was confirmed that the algorithm proposed here works well.