知能化掘削機械のための掘削機構の解明* (第4報, 知能化掘削機械に必要な掘削についての知見と試作)

花本 忠幸^{*1}, 山本 佳男^{*2}, 畑村 洋太郎^{*3}

Analysis of Excavation Processes for the Purpose of Realizing Intelligent Excavation Machinery (4th Report, Knowledge Assessment on Excavation Processes by Intelligent Excavation Machinery and Test Results)

Tadayuki HANAMOTO, Yoshio YAMAMOTO^{*4} and Yotaro HATAMURA

^{*4} Research Center, Research Division, Komatsu Ltd., 1200 Manda, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 254-8567 Japan

In order to investigate the problems related to soil and construction machinery, such as a hydraulic excavator, an understanding of the physical interactions between the soil and the machine is essential. The purpose of this study is to experimentally examine actual excavation processes by observing a variety of physical parameters, with the aim of realizing intelligent excavation machinery whose performance is not only to be automated but also optimized in terms of specific task criteria such as, energy consumption, operation time and excavation trajectory. In the previous three reports, we measured and analyzed excavation processes from the viewpoint of force interactions. In this article, we developed an automated excavator based on the knowledge acquired through the previous study and investigated essential factors for intelligent excavation machinery. As the final report of this study, we discussed how intelligent machinery should be realized from a design theoretic point of view.

Key Words: Construction Machinery, Excavation, Intelligent System, Force Sensing

1 緒 言

近年「知能化」という言葉が頻繁に使われるが、その言葉の意図する内容は適用例に応じて千差万別である。機械の知性は、一般的にシステムの具備するセンサ、アクチュエータ、機構、制御系、学習能力などに深く関連する場合が多い。本論文において対象とする知能化機械の定義は以下の通りである。機械の作業遂行に伴う物理現象に関する情報(力、温度、変位など)をセンサを通じて検出し、それを予め構築された内部モデルに入力し、今後どのような動きをとるべきかを自ら判断して行動する機能を有する機械を知能化機械と呼ぶものとする。ここで内部モデルとは事象の因果関係を記述する知識であったり、エネルギー方程式や運動方程式のような物理モデルを指している。建設機械のような大型機械の知能化を考える場合、土や岩石の破壊形態や土質の特性を把握することにより^{(1),(2)}、機械

の動作入力と作業指標出力(例えば省エネ作業や大容量掘削)との間に物理法則に基づく強固なリンクを確立することができる。近年掘削機械を始めとする大型機械の自動化に関する研究が随所に見られるが^{(3)~(6)}、障害物回避や軌跡制御等ロボット技術を流用したものも多く、必ずしも機械と作業対象との間に起こる物理現象に十分な注意が払われていないのが実情である。筆者らは土の掘削作業に着目し、掘削時に機械と被削材との間に生じる力学量を掘削抵抗・壁面応力・土中の応力とひずみの形で測定・解析を進めてきた^{(7)~(9)}。第1報ではモデルバケットを用いロームと砂を対象に土槽内で掘削実験を行った。掘削に伴う掘削トルクやバケット内壁面の応力分布(圧力及び摩擦応力)の変動、並びに土中の応力・ひずみ状態の計測を行い、土質による物理量の差異を定量的に認識した⁽⁷⁾。第2報ではこれを実機レベルで確認するため実機サイズの計測用バケットを開発し、併せて掘削トルク測定用の2方向ロードセル並びにバケット内壁面の3軸応力測定用の3方向壁面応力計を開発し、実機による3次元掘削時の力学量測定システムを確立した⁽⁸⁾。第3報では前記力学量測定システムを用い種々の掘削実験を行った。掘削時の掘削抵抗の大きさ・方向の変化と壁

* 原稿受付 2000年4月24日。

^{*1} 正員、(株)小松製作所(☎254-0913 平塚市万田1200)。

^{*2} 正員、東海大学工学部(☎259-1292 平塚市北金目1117)。

^{*3} 正員、工学院大学(☎163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-2)。

E-mail: tadayuki_hanamoto@komatsu.co.jp

面応力分布の計測を行い、掘削に伴う掘削土の破壊・変形を観察した。観察方法は以下の通りである。30 cm間隔に消石灰の柱を地中約 70 cmまで貫入して置き、バケットの掘削を行い一定の位置でバケットを停止し、掘削方向に平行な断面を一定間隔で順次切り出して、断面に線状に見える消石灰の切断の様子から、対象の土である砂とロームのせん断線の進行状況の特徴を比較観察した。さらに、一定の間隔毎に掘削を停止し、地表面に 10 cm間隔で描いた格子点の垂直変位を計測して、地表面の隆起の様子を観察した。また、バケット壁面の低摩擦化による掘削トルクの低減も試みた⁽⁹⁾。

本報では、掘削機構の解明の知見を生かした知能化掘削機械の試みとして掘削効率の良い自動掘削装置を試作し、知能化掘削機械実現のための今後の課題について考察する。最初に、掘削効率向上のためのバケットの形状・動かし方について検討する。特にバケットの動かし方の検討結果を知能化掘削機械の物理モデルの基本としている。次に、実機適用上の課題について機械の制約面やオペレータの操作ノウハウを理解することから考察し、その解決方法をプロセスの知識として整理する。ここでいうプロセスの知識とは、操作者側から見た制約条件下で操作目的を満足する為の知識をいい、掘削機械で掘削作業を効率良く行う為の操作上の知識のことである。次に、この物理モデルとプロセスの知識を併用したアルゴリズムを考案して、掘削効率の良い自動掘削の実現を可能にする。具体的には、バケットの動きを検知するポテンシオメータと掘削抵抗を検知する荷重センサの出力から、バケット刃先の軌跡に対するバケットの姿勢や、掘削動作開始時の地盤の固さや、途中で土をバケットに取り込んでいる時の土の取り組み状況や、バケットに取り込んだ土量などの状況を判断して、各シリンダへの流量指令を変更して掘削動作をコントロールする。

最後に、この試みを通じて得られた知能化機械の実現方法に関する知見を設計論的視点で整理する。

2 掘削効率向上方法の検討

2.1 基本的な考え方

掘削における 1 つの理想である、機械の能力を最大限に生かして最短時間で最大の掘削量を達成できるように、作業効率の良い掘削を検討する⁽¹⁰⁾。

掘削効率 Q_e (kg/kJ) は一般的に次のように定義される⁽⁷⁾。

$$Q_e = \frac{M_e}{R_m} = \frac{M_e}{\frac{R_e}{\mu_m}} = \frac{M_e \cdot \mu_m}{F_e \cdot d_e} \quad (1)$$

ここで M_e は実際の掘削土量 (kg)、 R_m は機械の消費エネルギー (kJ) で実効エンジン出力馬力と稼働時間との積と等価である。 R_e は土の掘削に消費する掘削エネルギー (kJ) で、 R_m と機械効率 μ_m との積と、掘削抵抗 F_e (N) と掘削距離 d_e (m) との積と等価である。

今までの研究^{(7)~(9)}で、掘削抵抗 F_e を小さくするためには、バケットと被削材である土との摩擦力の低減が重要であることがわかり、第3報⁽⁹⁾で低摩擦材の使用や振動で掘削抵抗を下げる試みについて報告した。ここでは、掘削抵抗 F_e の低減だけでなく、掘削軌跡やバケットの形状と動かし方を工夫することで、式(1)の $\frac{M_e \cdot \mu_m}{F_e \cdot d_e}$ を大きくする方法を考える。

まず、 $\frac{M_e}{d_e}$ を大きくするために、バケットの刃先の軌跡である掘削軌跡は、バケットが満杯になるためにバケット刃先が描く軌跡によって、バケットの幅で切り取られる土の体積 V が最小の値になり、かつ掘削軌跡長さ L が最短になるように決める。 V や L の値は掘削軌跡の形状により変わるので、掘削軌跡の形状が同一の V に対して、最短の L になる様に長方形・台形・三角形・半円について比較検討した。半円が一番良い結果を得たのと、パワーショベルのブーム・アーム・バケットがそれぞれのピンの周りを円弧状に動くことより、円弧状の掘削軌跡形状を基本とすることにした。また、 V の大きさは、実験結果を参考にバケット満杯の容積に対して一定の比率になるように決定した。

次に、 $\frac{M_e}{F_e \cdot d_e}$ を大きくするために、上記の円弧掘削軌跡に適したバケット形状とバケットの動かし方をすることで、バケットに加わる力の大きさと向きをコントロールして、バケットの満杯を確保して掘削抵抗 F_e を小さくする。また以上の取り組みが、機械効率 μ_m を小さくしないように配慮する。

2.2 掘削実験

バケットの掘削軌跡・掘削姿勢をコンピュータで制御し、掘削中の掘削抵抗を測定し、掘削軌跡で積分することで掘削エネルギー R_e を求め、掘削軌跡・掘削姿勢が掘削効率 Q_e に及ぼす影響を調べた。図1に計測実験装置の概要を示す。

バケットはY方向移動可能部AにAの先端のピン部Bと、リンクCを介したθ軸シリンダとで接続されていて、ピン部Bのピンを中心にθ軸周りにθ軸シリンダによって回転する。また、ピン部Bは2方向ロード

Fig.1 Control and measurement system of excavation experiments

セル (L_1) で Y 方向移動可能部 A に固定されており、リンク C には 1 軸ロードセル (L_2) が内蔵されていて、バケットに加わる力を検出している。バケット回転角 θ (deg) はピン部 B に取り付けられたポテンシオメータで検出している。

Y 方向移動可能部 A は X 方向移動可能部 D にリニアベアリングと Y 軸シリンダとで接続されていて、Y 軸シリンダによって Y 方向に上下する。

X 方向移動可能部 D は固定部 E にリニアベアリングと X 軸シリンダとで接続されていて、X 軸シリンダによって X 方向に前後する。

Y 方向、X 方向の移動量 (mm) はローラ式のエンコーダで検出している。

図 2 に同一掘削軌跡における掘削角 (刃先の移動方向とバケット底面のなす角度: 図中の α) の掘削抵抗・掘削土量・掘削効率に対する影響を見るために、バケット刃先の軌跡を同一の円弧として掘削角 α をパラメータとした掘削実験結果を示す。掘削軌跡の影響を極力同じにするために、軌跡形状については円弧形状に限定して考えることにした。掘削中の掘削角 α の変動は、実験装置の制御精度に依存するが、 $\pm 1^\circ$ 程度の精度

Fig. 2 Effect of digging angle on resistance, weight of excavated sand and efficiency of excavation

は実現できていたと考える。掘削実験は、数回掘り起こした後に整地した砂を用いて、各水準を数回ずつ実施し、図 1 のロードセル L_1 と L_2 の力ベクトルからバケットに加わる掘削抵抗の主ベクトルを求めることにより掘削中の掘削抵抗を計測し、X Y 方向の抵抗と移動量の積と θ 軸周りのトルク (図 1 におけるロードセル L_2 の値とバケットの回転中心から L_2 の力ベクトルまで距離との積) と回転角の積との和から掘削エネルギーを求め、掘削した土量は別のバケットに入れて土の重量を計測した。掘削抵抗 F_e 、掘削エネルギー R_e は次のような式で表される。

$$F_e = \sqrt{(L_{1x} + L_2 \cos f(\theta))^2 + (L_{1y} + L_2 \sin f(\theta))^2}$$

$$R_e = \int L_{1x} dx + \int L_{1y} dy + \int L_2 l \sin(\alpha - \theta + f(\theta)) d\theta$$

ここで、 $f(\theta)$ はロードセル L_2 のあるリンクと水平のなす角度であり、リンクの動きにより決まる。また l はバケットピン間の距離、 α はバケット形状で決まる角度である (Fig. 1 を参照)。本実験は、掘削エネルギー R_e を直接求めて掘削軌跡・掘削姿勢が掘削効率 Q_e に及ぼす影響を調べる目的なので、機械効率 μ_m は一定¹ として掘削効率 Q_e は掘削土量 M_e / 掘削エネルギー R_e で求めた。実際の機械効率 μ_m は 1 以下で、制御方法等に依存して値が異なるので、 μ_m を大きく保つことも掘削効率 Q_e の向上に重要となる。また、グラフの各水準の値は、各計測値の平均値であり、ばらつきは十分小さな値であった。

¹ ここでは理想状態の 1 とした。

Table 1 Effect of bucket shape

Bucket Type	Soil	D(mm)	B(mm)	V(m ³)	F _{max} (kN)	R _e (kJ)	M _e (kg)	E(kg/kJ)	Ratio(%)
Reformed	Sand	500	1005	0.82	22.6	29.5	820	27.8	66.7
Normal	Sand	500	1005	0.82	18.9	25.9	655	25.3	53.3
Normal	Sand	500	1005	1.13	25.5	39.8	846	21.3	49.9
Normal	Sand	600	1005	1.09	23.1	36.4	790	21.7	48.3

Digging depth

D (mm)	Digging depth
B (mm)	Width of bucket
V (m ³)	Volume of excavated soil
F _{max} (kN)	Maximum resistance during excavation
R _e (kJ)	Excavation work calculated according to the bucket motion
M _e (kg)	Mass of soil filled in the bucket
Q _e (kg/kJ)	Efficiency of excavation (Q _e = M _e /R _e)
Ratio(%)	Ratio of soil filled in the bucket to the excavated soil (= M _e / (1.5 · V · 1000) (%))

Digging angle is held constant.

掘削土量 M_e は掘削角 α が 0 度付近が最大となっているが、掘削中の最大掘削抵抗 F_{max} は掘削角 α が約 5 度で最小となっている。また、この実験結果から計算した掘削効率 Q_e は掘削角 α が約 5 度で最大となっている。これは、掘削角 α を 5 度以下にするとバケット背面が土と接触することから、バケット背面の掘削抵抗の影響が顕著になることを示していると考えられる。この結果から、バケットの背面を干渉させない範囲で掘削角 α を小さくすると効率良く掘削することができることがわかる。なお、バケット背面が土と接触するかどうかは、バケット刃先の軌跡形状を土の表面形状としバケットの動きを計測値より求めて作図にて確認した。また、実験途中に停止してバケットを上方に移動して、砂の表面のバケット裏面の痕跡によっても確認した。今回の実験は、土の条件をなるべく同一にする為に砂で確認したが、ロームに対しても同様な実験を行い、同様に掘削角 α が約 5 度で掘削効率 Q_e が最大になることを確認した。したがって、掘削効率 Q_e が最大になる掘削角 α は、掘削軌跡形状やバケットの形状により影響されるが、バケット底板の摩擦係数には影響されないと考える。

前報⁽⁹⁾の掘削実験結果では、掘削の進行に伴いバケット底板上を移動する土の流れを、応力分布の時間変化として計測したところ、掘削の後半で底板曲線部において応力が高くなることが確認された。また、実際の掘削において、掘削に伴うバケットと土の相対的な流れに着目すると、底板後部の曲線部において土の流れが阻害され、土の塊を盛り上げて崩しながらバケットに土を押し込んでいる様子が観察される。これらの

ことから、掘削角 α の影響の実験結果を生かして、効率の良い掘り方をしたときにスムーズな土の流れでバケットを満杯にすることができれば、掘削抵抗 F_e が低減するとともに掘削土量 M_e も増加し、掘削効率 Q_e が向上すると考えられる。これを検証するために、スムーズな土の流れが期待できる様に改造した形状のバケットと従来の形状のバケットを比較する掘削実験を行った。その結果を表 1 に示す。

バケット形状は Reformed と Normal、円弧状のバケット刃先の軌跡によって切り取られた部分の土の体積が V で掘削深さと円弧の曲率半径を変更して数種類の水準で実験した。

掘削実験は、数回掘り起こした後に整地した砂を用いて各水準を数回ずつ実施した。掘削中のバケットの移動量 d_e および掘削抵抗 F_e を計測し、両者の積として掘削エネルギー R_e を算出し、さらに計測した掘削土量 M_e を用いて、掘削効率 Q_e を機械効率 $\mu_m = 1$ として土量 M_e / 掘削エネルギー R_e の式により計算した。

Ratio は掘削した土量 M_e とバケット刃先の軌跡によって切り取られた部分の土の体積 V を重量換算した値との比であり、100% に近いほど効率良く土をバケットに掬い込んでいることになる。バケット形状の Reformed が Normal に比べて大きな値になっている。また、掘削深さの影響もあるが V の値を大きくすると掘削土量 M_e は増大しているが、Ratio は減少している。これは、 V の増大により掘削土量 M_e が最大値に近づくが、掬えない土の量が M_e よりも増加していることを示している。掘削効率 Q_e も、バケット形状の Reformed の方が良い結果である。

実際の掘削作業は、土工量といわれる時間あたりの掘削土量 M_e での評価も大事になるので、掘削土量 M_e が取り得る最大値となること、すなわちバケット満杯時の値となることを前提に掘削効率 Q_e が最大であることが望ましい。 M_e 最大で Ratio もなるべく大きくなるようなバケット形状・掘削軌跡・バケット姿勢にし、掘削抵抗 F_e を小さくし掘削エネルギー R_e をなるべく小さくする掘削が理想といえる。なお、バケット満杯時の値は、バケットに土砂を山盛りに入れて入れることのできる最大容量である。土砂の種類により、安息角が異なるので山盛部の形状が変わり値は変動するが、実用上、JIS の A8404 に定義される山積容量と同義と考えて良い。掘削効率 Q_e が最大の時の掘削角 α は、バケット裏面と土との干渉を避けて、なるべく小さい方が良く、その値は、バケット形状と掘削軌跡の

Fig. 3 System diagram of automatic excavator

関係で決まる。したがって、バケット形状を改造すると掘削効率 Q_e が最大の時の掘削角 α は変化するが、バケット形状の改造効果すなわちスムーズな土の流れでバケットを満杯にする効果を生かすためには、掘削角増大による掘削抵抗の増加を防ぐために、この掘削角をあまり大きくしない方が良く考える。

バケット形状の改造とバケットの掘削軌跡・姿勢制御によって、バケット内の土の流れが円滑に保たれることにより、掘削効率 Q_e が良くなるだけでなく、バケット内壁面と土との接触圧も小さくなるため、内壁への土の付着も少なくなる。これによって排土時に付着した土を落とすための余分な動作も少なくなり、土の付着によるバケットの実質容量の低下も起こりくくなるため、結果的に、さらに実質的な掘削効率 Q_e の低減防止にもつながると考えられる。前報⁽⁹⁾で報告したバケット壁面の低摩擦化による掘削抵抗低減の効果と合わせると、さらに大きな改善が期待できる。

今回の実験では、バケットと土との間の力学的関係のみに着目して、効率の良い掘削を検討した。その結果、掘削軌跡と掘削角 α を考慮したバケットの動かし方と、それを前提とした場合の掘削効率 Q_e の良いバケット形状に関し有効な知見を得ることができた。次にこの知見を利用して、実際の掘削機械における掘削効率 Q_e の向上を試みる。

3 知能化掘削機械の試み

前述の掘削効率 Q_e の向上方法に関する検討結果を利用して、常に効率の良い掘削を可能にする知能化掘削機械の実現を試みた。具体的には、バケットの動かし方に関する検討結果を知能化掘削機械の物理モデルの基本とした自動掘削機を試作した。ここでは、実機

適用上の課題について機械の制約面やオペレータの操作ノウハウを理解することから考察し、その解決方法を掘削機械における掘削作業プロセスの知識として整理した。そして、この物理モデルとプロセスの知識を併用したアルゴリズムを考案して、掘削効率の良い自動掘削の実現を可能にした。具体的には、バケットの動きを検知するポテンシオメータと掘削抵抗 F_e の代用特性としてポンプ負荷を検知する圧力計の出力から、バケット刃先の軌跡に対するバケットの姿勢や、掘削動作開始時の地盤の固さや、途中で土をバケットに取り込んでいる時の土の取り組み状況や、バケットに取り込んだ土量などの状況を判断して、各シリンダへの流量指令を変更して掘削動作をコントロールしている。

3.1 自動掘削機の概要

自動掘削機の概要を図3に示す。パワーショベルをベースにし、バケットの位置を検出するセンサとしてポテンシオメータを用いている。ポンプの負荷を検出するセンサとして圧力計を用い、コントローラ内ではセンサからの入力値をもとに計算された出力値を各アクチュエータ用の電磁弁・電磁流量制御弁に出力し掘削動作を制御する。なお、本システムでは、自動掘削の開始と掘削動作の停止を指示するペダルからの信号を操作信号として、コントローラへ入力している。

3.2 掘削効率向上をねらった自動掘削の基本的な考え方

掘削効率向上をねらった自動掘削の基本的な考え方は、“バケットを満杯にするためのバケット刃先の掘削軌跡を最短の経路にし、その際、バケットの姿勢は掘削軌跡に対してバケット背面が土に干渉しない範囲で掘削角 α を最小に保持するように動かし、掘削抵抗 F_e が小さくなるようにする。”というものである。ここで、バケットの満杯状態はバケットの容積と土の山盛り状態で変化するので、バケットの最大容量の期待値を満杯量としている。なお、バケットの最大容量の期待値は、実用上、JISのA8404に定義される山積容量と同義と考えて良い。掘削軌跡の形状は、バケット刃先の軌跡によって切り取られた部分の土の体積 V ・切断面の面積を一定にして考えたときに掘削軌跡が最短になる形状を考えた。断面形状を長方形・台形・三角形・半円で検討し、掘削軌跡長の面積に対する比の値が最小になる半円形状が一番望ましいとの結果を得たことと、パワーショベルのブーム・アーム・バケッ

Table 2 Solutions to the problems in automatic excavation in view of skilled operators

No	Issues in automatic excavation	Action taken by operator	How to realize the action in automatic excavation
1	Attempting to excavate an extremely hard soil may cause a hydraulic relief.	Raising the boom so that the excavation depth gets shallower, resulting in less resistance from the hard soil.	Monitoring the excavation load at the early part of excavation by means of measuring pump pressure enables it to alter the excavation trajectory when a high pressure is sensed. In order to excavate enough soil, the excavation distance can be set larger in the middle.
2	Continuing excavation with a fully loaded bucket merely wastes the excavation energy.	Operator ceases working when he judges the bucket becomes full.	By monitoring the excavation load toward the end of work, full loading of the bucket can be known as the hydraulic pressure exceeding a certain value
3	Common use of a hydraulic pump which supplies oil to multiple actuators may cause a control problem when the oil flow is to be controlled in a subtle way for adjusting the trajectory or configuration of the bucket, especially when the oil flow command is attempted to be regulated either below the lower resolution of the pump outlet or beyond the maximum capability. This will result in degraded excavations which often take a longer cycle time.	A rule of thumb says that, under such circumstances the arm and the bucket should be operated with a full throttle and further adjustment should be done primarily with the boom and secondarily with the bucket. This is because in general the arm cylinder and the bucket cylinder tend to be subjected to a heavier load.	The arm and the bucket in forward direction and the boom in downward direction are compared for the subjected load. Choose the one with the heaviest load and set it to a full throttle. Remaining two actuators are controlled according to the following procedures: Pp : pump pressure Pmax : maximum pressure among all the actuators Qmax : pump flow when Pp=Pmax holds P1~P3 : pressure of individual actuators Q1~Q3 : required oil flow of individual actuators When P1=Pmax, Pp=Pmax holds and the flow is kept under Qmax. Therefore assuming Q1=Qmax-(Q2+Q3), Q2 and Q3 can be computed such that Q1, Q2 and Q3 achieve a specified flow ratio. Since Q1 is kept at full throttle level, the pump flow always maintain Qmax, which can eliminate unwanted control loss.
4	Decreasing the excavation depth when a hard soil is met results in an insufficient excavation due to a small plunge of the bucket blade.	Giving a vibratory motion to the bucket often leads to a larger plunge or restoring the initial configuration and restarting again may simply help the situation.	Excavation loads to all the actuators are monitored and when they exceed a specific value, a swinging motion is given to the bucket while the tip of the blade is being kept still. In case of persistent immature plunge, a command is given such that the bucket attitude is restored with the same tip position
5	Inability of sensing the soil surface pattern often causes an insufficient excavation.	Operator tries to take a closer look to the soil surface while he/she is operating the machine.	Starting point is specified by the operator and the excavation trajectory is determined based on the tip position of the bucket blade and the body position of the car. Insufficient excavation can be terminated by means of the same as shown in 2.

トがそれぞれのピン周りを円弧状に動くことより円弧状の掘削軌跡形状を基本にすることとした。ただし、軌跡形状により、効率良くVを切り取る方策についてはまだ検討の余地があると考え。

今回は、満杯と期待できる掘削土量 M_e を得るために必要最小限と考えるVを M_e に対して一定の係数をかけた値と設定する。この係数は表2のRatioの逆数と同義であり、実験での M_e と掘削効率 Q_e によって、 M_e がバケットの最大容量の期待値以上で掘削効

率 Q_e が最大になるように修正した。Vを保証する掘削軌跡にする事で、 M_e の値を満杯に近い値にする事を考えている。次にこのバケット刃先の掘削軌跡に対して、バケットの姿勢をバケット背面の土との接触を考慮して一定の掘削角 α となるように決定する。

図4に掘削効率向上をねらった自動掘削の基本的な考えに基づくアルゴリズムの処理フローを示す。まずスタート地点を決めて、掘削軌跡を計算する。次に、掘削軌跡上の複数の地点を設定する。現在のバケット

の刃先の位置から進行方向で最も近い掘削軌跡上の設定地点を次の目標地点とする。目標値として掘削軌跡上の1点を決めるとバケットの位置・姿勢も決まるので、各アクチュエータの目標値も一義に決定できる。この目標値から各アクチュエータの必要流量を求め、ポンプ圧力から決まるポンプの流量に対して各アクチュエータの必要流量の比になる様に各アクチュエータの流量指令を決定する。また、ペダルのONにより自動掘削の開始・再開を指示し、OFFによって停止を指示する。自動掘削終了地点に達すると自動掘削を終了する。

Fig. 4 Flow chart of the basic algorithm of automatic excavation

3.3 実機適用時の課題とアルゴリズムの改善策

実機による掘削作業を考慮する場合、掘削軌跡とバケットの姿勢以外の影響も考える必要がある。その一つは、機械の能力（この場合パワー）を掘削作業に有効に使用することである。掘削作業以外に使用するパワーはロスとみなし、ロスが大きくなると機械効率 μ_m も当然低下する。もう一つは、対象とする土の強度と機械の掘削力との関係で、必ずしも機械の掘削能力が選択した掘削軌跡上の全てにおいて土の強度に勝るとは限らないという点である。また、掘削が進むに連れて土の表面形状が変化してくると、掘削軌跡の動的な計画方法も必要になるかも知れない。この様に、実際の機械に適用して実際の掘削でも効果を上げるためには、種々の解決すべき課題がある。これら課題の解決のため、機械の制約条件や対応するオペレータの操作方法を参考にして掘削機械での掘削作業プロセスの知識を理解し、この知識に基づいて自動掘削のアルゴリズムを改善した。表2に、自動掘削を実機へ適用する上で主要な課題と、同様な状況が手動操作の掘削作業で生じた場合の熟練オペレータの操作方法と、熟練オペレータの操作方法を参考にして変更した自動掘削のアルゴリズムの内容を示している。変更内容は、機械の能力が対象の土の強度に劣る時の掘削軌跡の修正方法や掘削土量を確保する方法であり、掘削効率 Q_e を良好に保つための機械ロスの低減方法や無駄な掘削動作を防止する方法に関してである。

問題解決には、他にもいろいろな方法が考えられるだろうが、ここでは熟練オペレータの機能をモデル化して考えることが有効な手法であった。

図5に自動掘削のアルゴリズムの改善内容を含んだ改良版のアルゴリズムの処理フローを示す。図4の処理フローから図5への主な変更点は次の2点である。

(1) 制御ロス低減のために、表2のNo.3の様にアームシリンダの負荷が大きい時にはアームシリンダ用のバルブを全開にしてその時のポンプ流量に対して各シリンダの必要流量比に応じてブーム、バケットシリンダへの流量指令を決定した点。

(2) 表2のNo.1の様に、掘削の前半で、ポンプ圧力が規定値より大きい時はブームシリンダを伸ばして掘削軌跡を浅くし掘削の負荷を小さくして、掘削が掘削軌跡の半分以上進展した時に掘削軌跡を再計算してVを確保する様にした点。

Table 3 Results of excavation experiments

Soils	Excavation method	Soil volume m ³	Fuel Consumption cc	Cycle time sec	Soil volume per hour m ³ /h	Fuel rate l/h
Sand	Skilled operator	0.89	121	20.5	156.29	21.25
	Automated	0.9	109	19.1	169.63	20.54
Soft loam*	Skilled operator	1.25	115.6	18.6	241.94	22.37
	Automated	1.28	115	18.6	247.74	22.26
Hard loam**	Skilled operator	1.03	118	19.7	188.22	21.56
	Automated	1.15	120	19.5	212.31	22.15

*: pre-excavated soil **: unexcavated soil

Fig. 5 Flow chart of the enhanced algorithm of automatic excavation

3.4 自動掘削による掘削実験結果

図5に示した改良版アルゴリズムの自動掘削による掘削実験結果を表3に示す。図4に示した改良前のアルゴリズムの自動掘削に比べて掘削時間が短縮された。この実験は、掘削後にバケットを持ち上げながら90度旋回して、ダンプトラックのベッセル内に排土するという作業を各水準で3回繰り返して行った。表3の値は平均値である。この内、掘削が自動で、バケット持ち上げ旋回時はバケット姿勢保持のみ自動で、他はオペレータの操作による。なお、自動掘削時のオペレータは筆者である。結果は、若干ではあるが熟練オペレータに優るレベルに達していることがわかる。掘削作業の比率の大きい大型の掘削機械になるほど、生産性の向上は大きな経済価値をもたらす。また遠隔作業などで人間による操作での作業効率が大きく落ちる条件下でも同様に生産性の改善が期待できる(11)~(13)。作業の指示のみで機械の自律的な判断により効率の良い掘削作業を行うため1人のオペレータで複数台の機械を操作することも可能になり、施工システムの中で群制御可能な掘削機械となることも期待できる。また、今回試作した自動掘削機械は地面の表面形状の認識を掘削開始点と本体の位置で近似的に決めているので、視覚技術の導入により表面形状の把握が正確に行えれば、さらに掘削軌跡の最適化が進み作業性の改善が期待できる。

4 知能化機械の実現方法に関する考察

知能化掘削機械の試みを通じて得た知能化機械の実現方法に関する知見を設計論的な視点で以下に整理する。

(1) 機械の主要な要求機能・性能を明確にし、実現すべき機能のメカニズムを解明し、利用可能な物理モデルを構築することは、知能化機械を実現するために有効である。

今回の知能化掘削機械の場合、主要な要求機能・性能は、掘削の土工量や掘削効率が熟練オペレータ以上

の自動掘削機能を有することであり、掘削土量 M_e がバケット満杯で、かつ掘削効率 Q_e が良い自動掘削機械と言い換えられる。この要求を満たすために、理想的に掘削効率 Q_e の良好な掘削軌跡・バケットの動かし方を検討し、自動掘削のための物理モデルとした。

(2) 種々な環境条件や制約条件に対応して、常に良好な性能を発揮するために、知能化する前の機械における人間と機械の役割を十分理解し、知能化機械の機能を設計する必要がある。これは、従来の機械が機械と人間の両方の機能によって初めて有効に機能していることを意味しており、知能化機械とはこの役割分担を見直して最適化することという見方もできる。

今回の知能化機械の場合、機械や現象に対する知識をベースにして、熟練オペレータが対処している操作上のノウハウ・知識の意味を理解し、対処方法をモデル化して、実際的な問題の解決に利用することも有効であった。ここで、実際的な問題の解決方法とは、制御ロスを防止し、機械効率 μ_m を高くすることや、機械の掘削能力と土の強度との関係に応じた操作方法など、掘削機械の土工量や掘削効率を高く維持するための方法である。

以上に述べた様に知能化機械の実現には、目的とする機能のメカニズムの理解とモデル化がポイントとなる。知能の役割を果たすセンシングや高度な情報処理は当然必須であるが、今回の知能化掘削機械の試みの様に理想状態の検討と制約条件への対処方法の両面からモデル化をアプローチすることは知能化機械の実現のために有効な方法であると考えられる。

5 結 言

これまでの掘削機構の解明に関して得られた知見を生かした知能化掘削機械の試みとして、掘削効率 Q_e の高い自動掘削装置を試作し、知能化掘削機械実現のための今後の課題について考察した。知能化掘削機械の試みを下記のステップで実施し、掘削効率 Q_e の良い自動掘削を実現することができた。

1. 掘削効率向上のためのバケットの形状・動かし方について検討し、特にバケットの動かし方の検討結果を知能化掘削機械の物理モデルの基本とした。
2. 実機適用上の課題について機械の制約面やオペレータの操作ノウハウを理解することから考察し、その解決方法をプロセスの知識として整理し

た。

3. 物理モデルとプロセスに関する知識とを併用し、センサ情報から状況判断を行うための自動掘削のアルゴリズムを開発した。

また、知能化掘削機械の試みを通じて得た知能化機械実現方法に関する知見は、「理想状態の検討と制約条件への対処方法の両面からモデル化をアプローチすることが知能化機械の実現のために有効な方法である」ということである。

文 献

- (1) 杉山昇, 建設機械と土の諸問題, (1982), 第8章, 鹿島出版会
- (2) 田中孝・笈田昭, 車両・機械と土系の力学 —テラメカニックス—, (1993), 第15章, 学文社
- (3) Bernold, L.E., Motion and Path Control for Robotic Excavation, *J. Aerospace Eng.*, **6-1** (1993), 1-18.
- (4) Huang, X. and Bernold, L.E., Control Model for Robotic Excavation and Obstacle Handling, *Proc. Robotics for Challenging Environments, Proc. of ASME Specialty Conf.*, (1994), 123-131.
- (5) Vaha, P.K. and Skibnieski, M.J., Cognitive Force Control of Excavators, *J. Aerospace Eng.*, **6-2** (1993), 159-166.
- (6) Shi, X., Lever, P.J.A. and Wang F.-Y., Experimental Robotics Excavation with Fuzzy Logic and Neural Networks, *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robotics and Autom.*, (1996), 957-962.
- (7) 畑村洋太郎・花本忠幸・山本佳男, モデルバケットによる土の2次元掘削時の力学量の測定, 機論, **63**-609, C (1997), 1516-1522.
- (8) 花本忠幸・山本佳男・畑村洋太郎, 実機バケットによる3次元掘削時の力学量測定方法の開発, 機論, **63**-616, C (1997), 4195-4200.
- (9) 山本佳男・花本忠幸・畑村洋太郎, 実機バケットで測定した土の3次元掘削時の諸力学量, 機論, **64**-621, C (1998), 1555-1561.
- (10) 杉山昇, 新編 土木施工法, (1989), 第1, 2章, 鹿島出版会
- (11) 室達朗・荒井克彦・深川良一・建山和由, 最新建設施工学, (1994), 第1, 4章, 朝倉書店
- (12) 掘削・採鉱・建設工事の自動化・無人化・ロボット化, (1983), 第5章, フジテクノシステム
- (13) 長谷川幸男, 建設作業のロボット化, (1999), 第1, 6章, 工業調査会