

建設施工におけるロボット技術の活用

—油圧ショベルの自動化を例とした—考察—

吉田 正

油圧ショベルによる施工の自動化には、施工段階の情報化が大きな影響を持って考えられる。現在、CALS/ECや情報化施工が推進され、レーザーレンジスキャナなど新たなセンサー技術が実用化されてきており、施工の自動化にとって新たな段階を迎えつつあるといえる。このような施工の自動化・ロボット化技術の開発では機械、土質、施工、電気・電子工学等の幅広い分野にわたる研究の連携が必要であり、段階を追った継続的な研究開発と成果の蓄積を図っていくことが重要である。

キーワード：建設機械、施工、自動化、情報化、油圧ショベル、センサー、技術開発

はじめに

従来、「機械の自動化」として議論されることが多いが、ここでは油圧ショベルを例に建設機械の主目的である「施工」の自動化に着目し将来の技術の方向を考えたい。施工に着目するということは、単純に機械の動作のみを見るのではなく、現場で目的物を作っていく作業の実施の視点から自動化を考えるものである。

油圧ショベルは、現在、日本国内で最も利用されている建設機械である。我が国の建設工事において実施される工種、実施体制に最も適しており、利便性が高いと評価されていることの現れであろう。バケットによる土工作业だけを考えても、単純な地山の掘削・積込み作業、現場内の土砂の小移動、床堀、敷均し、法切り、法面仕上げ、材料（岩と土砂）の仕分け作業など、作業の目的に応じてオペレータが上手く使用することで数多くの作業に活用される。自動化という点ではそれぞれの作業毎に異なる技術、工夫が必要となる。

本報文では、建設施工の近未来の方向を想像しつつ、油圧ショベルによる施工を例に建設施工の自動化を考察してみたい。

1. 建設施工の自動化をめぐる環境、関連動向

建設施工の自動化を考える動機として、現在の建設施工の現場が抱える課題の面と自動化を実現するための関連技術動向の面から考えてみる必要がある。

(1) 建設施工の現場の課題

建設施工では依然として危険・苦渋作業が多い。災害発生時の緊急対応や復旧工事、急傾斜地や地中・水中、汚染箇所等での厳しい環境下での工事など、人の立ち入りが困難な箇所での作業がある。この点は従前から指摘されてきた課題であるが他産業に比べ依然厳しい環境である。例えば、土砂災害だけでも平均年間1,000件も発生している¹⁾。現在、このような人が立ち入ることができない箇所の施工では、遠隔操作による建設機械を用いた施工が行われているが、通常、施工効率が低く運転操作に特殊技能が必要である。遠隔地から容易に運転操作可能な技術あるいは人に代わって効率的に施工可能な（自動化施工）技術が必要とされている。

また、長期的には、日本の少子・高齢化の進展により就労人口が減少し²⁾、建設産業においても高齢化や若年労働者不足、熟練者不足の問題が懸念される。将来、高齢者にも、熟練技能を持たないオペレータでも効率的に現場の施工を行うことが出来るような技術が必要になると考えられる。

(2) 自動化のための関連技術の動向

自動化のための基盤技術として情報技術（IT）の高度化、進展が意味するものは大きい。その影響としては、ITの進展が建設事業全体の情報化を促すことによるものとセンサー等の関連技術を含むロボット技術として自動化実現の基盤を与えるものの二つが考えられる。

前者は、建設事業の調査・設計から施工、維持管理

まで一連のプロセスにおける情報化を推し進めている CALS/EC³⁾ や施工段階における情報化施工の進展として具体化してきている。後者のロボット技術については関連技術の高度化が進んでおり、レーザースキャナや GPS、トータルステーション、3次元 CAD など建設機械の作業の自動化を図るための基盤技術が整いつつある。

これまで、仮に施工の自動化を図ろうとしても技術的な困難あるいは高コストで現実的ではなかった面が多々存在したが、IT 等の技術の進展によりそのハードルが相当に低くなり自動化技術の開発、利用も現実味を帯びてきたと思われる。

これらの意義については、第3章で考察することとする。

2. 油圧ショベルによる施工の自動化技術

ここでは、現在、実用レベルで提供されている既開発技術やこれまでの研究に触れるとともに、最近の自動化の研究開発動向として、米国の自動掘削・積込み技術の研究と国土交通省の総合技術開発プロジェクトにおける研究動向を紹介する。

(1) 現在までの油圧ショベルの自動化技術の研究開発

機械の自動制御という点では、省エネルギーに向けて、エンジン-油圧ポンプの高効率運転の制御や無操作時にエンジンを自動的にダウンさせるオートアイドルシステム等の電子制御などが実用化されているが⁴⁾、ショベルの作業そのものを自動化する技術はまだ例が少ない。

作業の自動化としては、かつてティーチングによる

自動掘削機能等が開発されたが、実用には至っていない。最近では、特に水平掘削作業の効率化をねらいとした領域制限掘削機能が商品化されている⁵⁾ (図-1)。これは油圧ショベルが自身の姿勢計測等によりバケットの位置を検出する事を可能としたもので、バケットの位置をモニタ画面に表示したり、レーザー灯台など外部基準を活用して掘削深さを検出したりする事で制御を行う技術である。

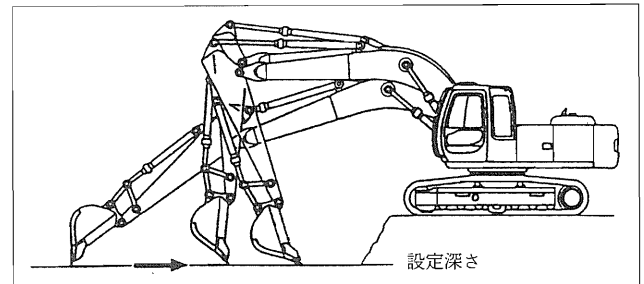


図-1 領域制限掘削機能のフロント動作例 (アーム引き+ブーム下げ)

また、イージーオペレーション化を目的として新しい操作方式の開発成果が発表されている^{6),7),8)} (図-2)。これは従来、熟練者でなければ難しい2本のジョイスティックによる円滑・微妙な操作を、より直感的で容易な操作で可能とする技術である。1本のレバーを用いたマスタースレーブ方式で構成され、作業状態をオペレータにフィードバックするためにバイラテラル制御が導入されている。この技術もロボットの電子制御技術の応用である。

(2) カーネギーメロン大学における自動掘削積込み技術の研究

米国のカーネギーメロン大学の Field Robotics Center および National Robotics Engineering Con-

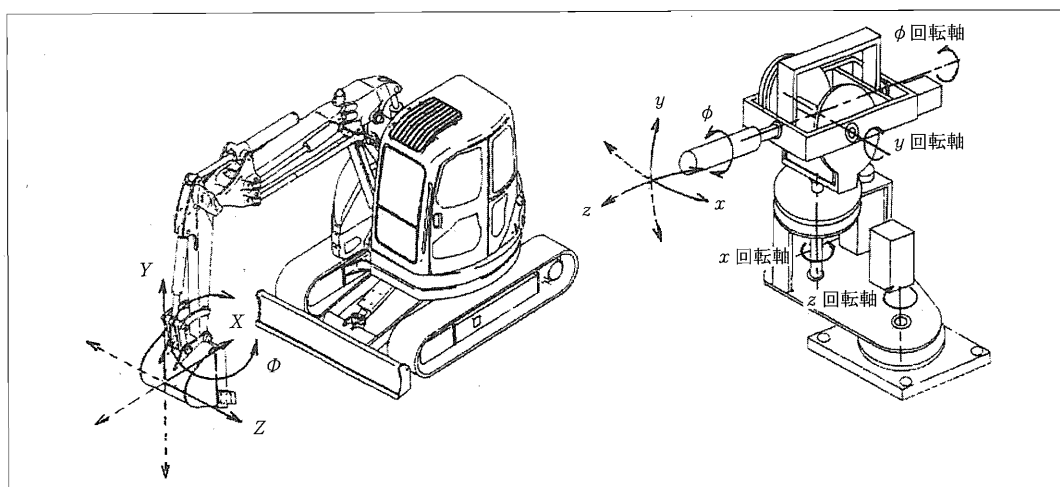


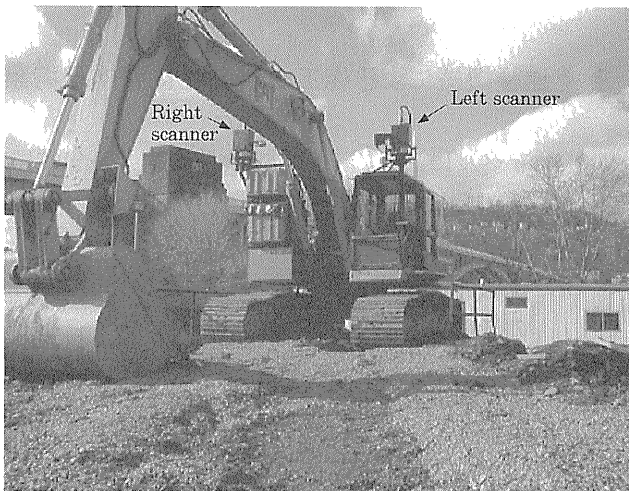
図-2 油圧ショベルと1本レバーの動きの関係

sortium においては、屋外作業ロボットの研究開発が継続して行われている。同大では 1990 年代後半に、油圧ショベルによるトラックへの土砂の自動掘削積込み技術の開発が行われ成果が報告されている^{9),10)}。

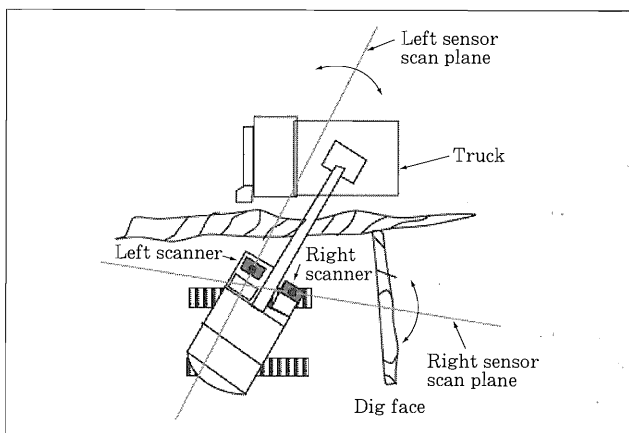
大規模土工や鉱山における大量の土砂の移動を行うためのシステムで、掘削対象土の上部に位置したショベルが土砂を自動で掘削し、側方に回送、駐車しているダンプトラックの荷台に自動で積込むものである



写真一 大規模土工における土砂の掘削・積込み



写真二 油圧ショベルに搭載したレーザーレンジスキャナ



図三 2台のレーザーレンジスキャナによる検知方法

(写真一)。掘削のための地山の形状や側方のトラックのベッセル位置、積載土砂の表面形状、障害物を検知するために2台のレーザーレンジスキャナをショベルに備えている(写真二、図三)。また、ショベルに搭載したソフトウェアが、掘削の都度変化する地山やベッセル内の土砂の形状に対応して掘削位置やベッセル内の積込み位置を決めるとともに、その間をいかに素早く移動するかを決定する。

この研究成果は 25 t の油圧ショベルに搭載することが可能で、数時間にわたる長期的な作業においては人間のオペレータによる作業と同等の作業能力を発揮したと報告されている。

(3) 国土交通省総合技術開発プロジェクトにおける研究動向

国土交通省では、土木施工における危険・苦渋作業の解消と IT、ロボット技術の活用による建設生産の合理化、効率化を目指して、平成 15 年度より総合技術開発プロジェクト「ロボット等による IT 施工システムの開発」に着手し、人に代わって土木作業を行う遠隔操作ロボット等による施工技術や 3 次元空間データを利用した施工技術の開発を進めている¹¹⁾。技術開発内容としては次の二つの目標が掲げられている(図四)。

(a) 遠隔操作ロボット等による施工技術の開発

本開発は、災害復旧現場で行う作業として必要となる頻度が高く、一般の工事においてもほとんどの現場で実施される土工作业(油圧ショベル、ダンプトラックによる土砂の掘削、積込み、運搬を行う施工工程)を主な対象とする。

この工程で、ロボット化された油圧ショベル等が、現場の施工状況を計測しつつある程度自律的に判断して作業を進めていくために必要な技術の開発を行う。

本技術は、従来、人間がリアルタイムの映像をとおして判断しリモコンで遠方より操作を行ってきた「これまでの遠隔操作」とは異なり、施工対象の完成形状を示す 3 次元空間データと施工対象の現況を計測した 3 次元空間データを施工システムに把握させ、丁張りなどを用いずに施工を行うことを目指している。完成形状と現況の二つの 3 次元空間データや建設機械の位置や姿勢などのデータを基に、建設機械(施工ロボット)がある程度自律的に作業を行い、遠隔操作するオペレータは作業内容や作業位置及び作業範囲などの簡単な作業指示と自律作業が困難な時に作業指示の変更やリモコン操作による作業支援を行う「マンマシン協調型の遠隔操作」を目指している(図五)。

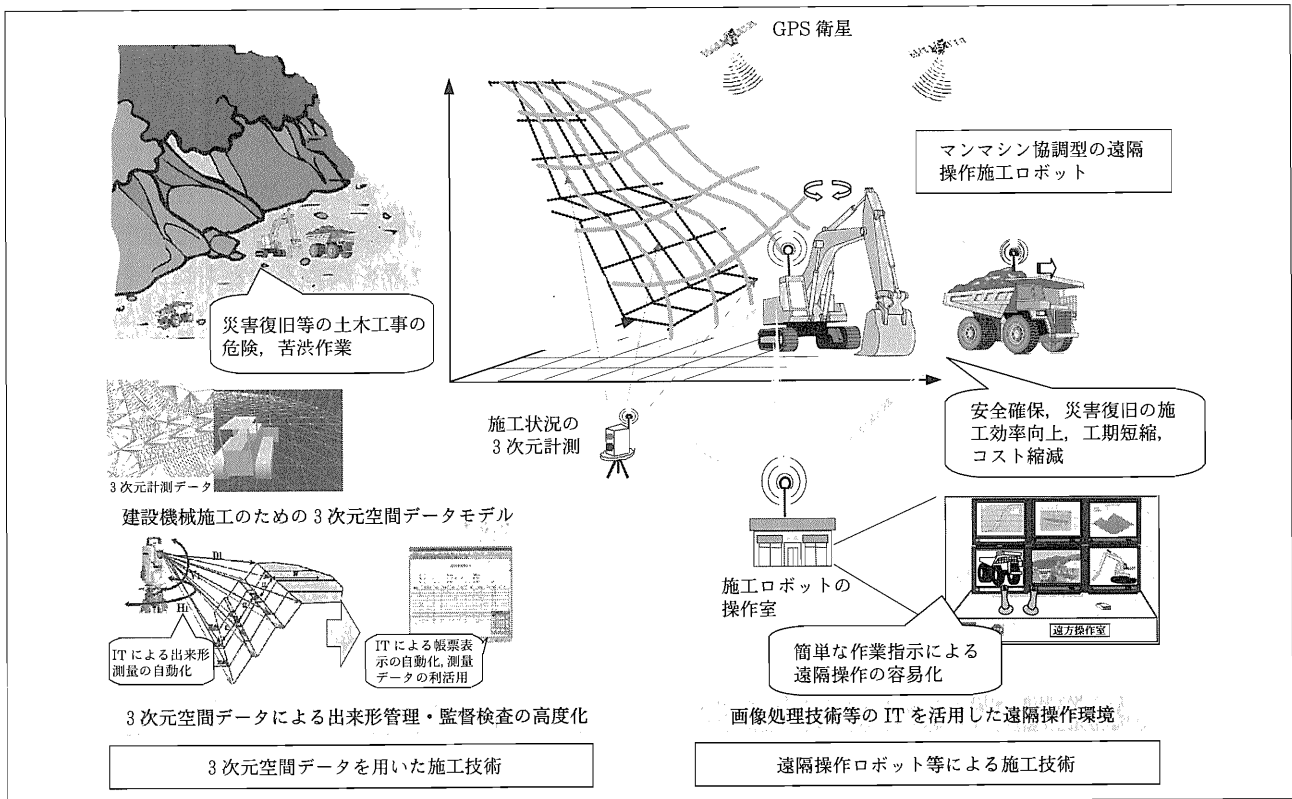


図-4 ロボット等によるIT施工システムの開発（イメージ）

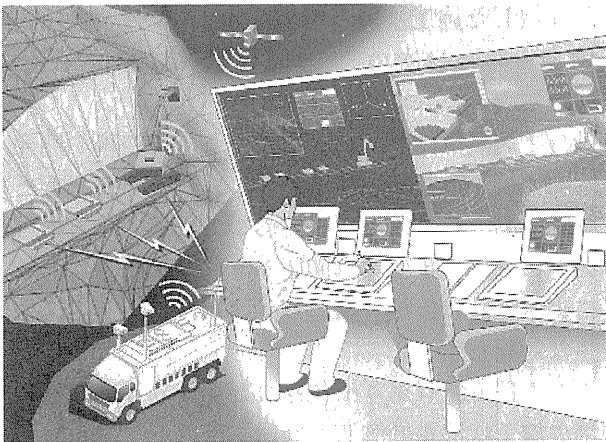


図-5 3次元空間データを用いた遠隔操作（イメージ）

平成19年度には、プロトタイプによる構内実験、現場試験においてロボット油圧ショベル及びロボットダンプトラックの組み合わせ施工を実現する計画としている。

(b) 3次元空間データを用いた施工技術の確立

本研究では、建設機械による土木施工において、作業対象物の形状、位置など3次元空間データを電子情報でとらえて、的確に伝達し、管理するための技術開発を行うものである。また、これらの技術は、一般施工現場での測量、設計、工程管理等業務に導入・活用され、土木施工業務全体の効率化、コスト縮減、品質向上を図るものである。

3. 建設機械による施工の自動化に関する考察

油圧ショベルによる施工自動化の技術開発を念頭に、今後の技術開発について考えたい。

(1) 情報の進展とセンサー等関連技術の実用化の影響

情報化の進展は、建設事業の今後のあり方に重大な影響を与える。

施工の段階においても、施工の目的物の設計情報が電子データとして提供されるようになり、施工指示も電子データで受け渡すことが可能となる。これは、従来、人間でなければ理解できなかった紙ベースの作業指示内容を、コンピュータで処理解釈することが可能になることを意味する。さらにこの状況は、機械施工の施工形態に関してこれまでの技術発展の中では見られなかった新たな段階に入ること示唆しており、施工の場面での機械と人間（オペレータ）の役割分担まで変化させる可能性がある。電子データによる作業指示内容の受け渡しが行われることで、施工機械がそれに応じた作業を自動で行うことが可能となり、その作業結果を計測して電子データで報告することが考えられる。

また、最近開発、実用化の進展が著しい各種センサー

技術が機械施工に活用可能となってきており、施工機械が施工状況や周りの環境を把握しながら同時に現場で作業を行うことが可能となりつつある。レーザーを利用して対象物までの距離や対象物の表面形状を計測するレーザーレンジスキャナの技術や建設機械の位置や姿勢を高精度で検知するGPSやトータルステーション、デッドレコニング技術などが活用可能となってきている。

前述の施工の情報化をベースとし、センサー技術を利用して施工状況や機械の位置等を把握して機械の動作を的確に制御することができれば、これまで考えられなかった施工の自動化が実現可能となってくる。このように、必要となる要素技術の点からは、現在は施工の自動化の新たな段階を迎えつつあるところということができる。

したがって、現時点で施工の自動化についての研究を進めていくのは、将来の施工合理化を図るうえからも大きな意味があると考えられる。

(2) 自動化・ロボット化技術の進展, 利用の方向

油圧ショベルの施工の自動化はどのように進むのだろうか。前述の動向を踏まえ自動化・ロボット化として技術面での段階的な進展を考えると、例えば次のような段階が考えられる。

- ① 施工状況の計測技術の開発・利用
(例) 施工の出来形計測・記録など。
- ② オペレータの運転操作支援
(例) 施工の出来形, 施工目標など施工状況のオペレータへの表示, 電子制御技術を応用した操作のイージーオペレーション化など。
- ③ 油圧ショベル作業時の部分自動制御
(例) 掘削深さをコントロールする領域制限掘削, 法面仕上げ時のバケット作業の自動制御など。
- ④ 油圧ショベル施工の一部作業の自律施工
(例) 掘削位置指定による自動掘削, 掘削範囲指定による自動掘削・積込み, 目標形状(範囲, 深さ)指示による自動掘削など。

しかし、実際の利用の進展プロセスは、自動化技術を活用するのが有利な場面、効果が上がる場面から進み、そのメリットや技術の評価が明らかになるに従って利用の場面が広がっていく形となるものと思われる。具体的には、無人化施工における掘削・積込み作業への活用や大規模土取り場等での繰返し継続作業(オペレータの単純繰返し苦渋作業の解消または施工能率の安定確保)のようなところから利用が始まることが考えられる。また、前述のように自動化技術の活用は施

工の場面における情報化の進展が大前提となることから、施工プロセスの情報化の動向に大きく影響されると考えられる。

一方、研究開発においては、研究成果が実用化に至るまでには、通常「死の谷」と呼ばれる苦しい期間を経過するといわれている。技術シーズが生まれてから実用レベルに成長するまでに経験する試練の時期である。研究においては忍耐強い継続的な研究が必要である。

したがって、調査研究では、将来の目標は長期的な視点から設定しつつも、マイルストーンとなる目標を上手く設定しながら研究を進め、中間段階でも利用可能な成果を出していくような取組みを進めていくべきであると思われる。

(3) 研究開発の実施

日本における屋外作業を前提としたロボット技術の研究開発は、世界をリードする2足歩行ロボットや産業用ロボット等の分野での取組みに比べるとその規模はきわめて小さいように思われる。建設用ロボットとしては、建設機械メーカーや建設会社において一時期数多くの実用研究が行われたが、現在その数はかなり減少している。また、大学等の研究機関では屋外の移動ロボットの研究がいくつか進められているものの、建設作業の自動化を前提としたものはまだ少ない。

土工作業の自動化を目指したものは、20年程度前に土木研究所において油圧ショベル掘削作業の操作制御を自動化しようとする研究が報告されており¹²⁾、最近では、産業技術総合研究所や大学におけるホイールローダによる自動積込み技術の研究が注目される^{13), 14)}外はあまり見あたらない。メーカーや建設会社において、最近、情報化のための研究事例は多いが、自動化を念頭においた研究は前述の領域制限掘削機能の例などの外は最近ほとんど見られない。

前述のカーネギーメロン大学の油圧ショベルの自動掘削・積込み技術の研究が1990年代に実施され、実機による施工が可能な成果を得ているのは注目される。特にレーザーレンジスキャナの実用化と並行してショベル作業の自動化への応用が実現されている。本研究は企業からのスポンサーシップにより実施され、成果は企業に報告され現在商業ベースの検討段階といわれている。また、その背景として、DARPAやNASAなど国の機関がスポンサーとなり研究開発を継続することで、屋外作業ロボットの研究体制や技術の蓄積がなされている点も参考となる重要な点であると思われる。

建設機械による施工の自動化のための技術を考える
と、単に機械の自動化技術だけでなく、機械と地盤の
相互作用や地盤や地形の計測技術など多くの研究分野
にわたる成果の総合化が必要であり、実用となる成果
が得られるまでに長期間を要し技術的ハードルも高
い¹⁵⁾。そのため取組み例が少ないのは自然なことかも
しれないが、日本における研究開発では、研究成果の
積上げ、継続性の点で課題を抱えているように思われ
る。海外の例も参考にしつつ、日本においても大学、
企業、国および関係研究機関が上手く連携して研究の
継続、研究成果の蓄積が進められるような取組みが望
まれる。

おわりに

建設機械による施工の自動化は、現場の実作業を考
えたと現在のロボット技術をもってしても容易には実
現できない高度な作業といえる。しかし、中長期的な
将来を考えると、情報技術の高度化、低廉化の進展に
より施工の情報化が進み、現場の施工プロセスの合理
化のために機械による施工の自動化も当然進められ
るものと考えられる。

国内においては災害等の危険な現場や汚染環境にお
ける作業現場など、さらに国外では、極寒地や砂漠等
の過酷な現場での施工においても活躍の場は広がるも
のと考えられる。また、将来は、人間が機械に搭乗し
ない特質を生かして、人間の居住性や運転能力に縛ら
れない建設機械の運転（高速動作や休憩時間を含まな
い連続作業など）を前提とした施工形態も考えられる。

施工の自動化を実現するには、系統的で継続的な取
組みが不可欠である。目先の成果のみの追求ではなく、

将来の技術の展開を意識した取組みが進められること
を期待する。

J C M A

《参考文献》

- 1) http://www.mlit.go.jp/river/sabo/kondankai_0103.htm
- 2) 総務省「国勢調査」、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」、平成14年1月
- 3) <http://www.mlit.go.jp/tec/it/cals/>
- 4) 宮木克己ら：建設機械の技術動向と開発課題，建設機械，Vol. 37，No. 1，pp. 41-46，2001. 1
- 5) 羽賀正和ら：油圧ショベル作業を支援する掘削機能，建設機械，Vol. 39，No. 10，pp. 19-22，2003. 10
- 6) 酒井 浩ら：バイラテラル操作系を用いた水中バックホウの遠隔操作技術の研究開発，建設の機械化，No. 643，2003. 9
- 7) 伊藤直幸ら：油圧ショベルのイーゾオペレーション化のための操作装置と支援システム，第10回建設ロボットシンポジウム講演論文集，pp. 353-362，2004. 9
- 8) 江川栄治ら：油圧ショベルのワンレバー式操縦システムの開発，第9回建設ロボットシンポジウム講演論文集，pp. 241-248，2002. 7
- 9) S. Singh: State of Art in Automation of Earthmoving, 2002, ジオメカトロニクスの高度展開と社会基盤整備に関するワークショップ講演論文集，pp. 51-69，2002. 10
- 10) A. Stentz, J. Bares, S. Singh and P. Rowe: A Robotic Excavator for Autonomous Truck Loading, in Proc. International Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1998.10
- 11) 森下博之ら：ロボット等によるIT施工技術の開発，土木技術，Vol. 59，No. 6，pp. 50-55，2004. 6
- 12) 樋下敏雄ら：油圧ショベルの制御システム，土木技術資料，Vol. 27，No. 11，pp. 15-20，1985. 11
- 13) 大隅 久ら：土砂の掬い取り動作におけるバケット反力解析，第10回建設ロボットシンポジウム講演論文集，pp. 201-208，2004. 9
- 14) 高橋 弘：資源工学とジオメカトロニクス，ジオメカトロニクスの高度展開と社会基盤整備に関するワークショップ講演論文集，pp. 25-50，2002. 10
- 15) 深川良一ら：ジオメカトロニクスの提案と展望，ジオメカトロニクスの高度展開と社会基盤整備に関するワークショップ講演論文集，pp. 5-12，2002. 10

【筆者紹介】

吉田 正（よしだ ただし）
財団法人先端建設技術センター
普及振興部長