振動ローラ自動転圧システムの開発とダム工事への適用

鹿島建設（株）　正会員　○浜本　研一，黒沼　出，大塩　真，小熊　正，三浦　悟

１．はじめに

重機土工に ICT を活用した，いわゆる情報化施工システムの導入が進められている．例えば振動ローラでは締固め管理システムの導入により，施工管理の合理化等の成果が得られている．しかし，将来的に熟練作業員が高齢化し就業者が減少することによる人手不足が予想される一方で，土木工事において生産性・安全性の向上が求められていることを見据えた場合に，我々は管理だけにとどまらない新たな ICT 施工技術として，「建設重機の自動化」が重要な開発課題であると考えている．本技術の実現により，少ない人数で現状と同等以上の施工効率を達成することができ，人手不足の解消が期待できる．

建設現場では多様な作業の中で種々の重機が用いられているが，我々は，土工事において繰り返し行われ，かつ施工作業をパターン化しやすい振動ローラの転圧作業に着目した．振動ローラの転圧作業では，Fig. 1 のように「与えられた領域」を，予め「所定の走行回数で前後に往復」しながら，盛り立て土やダムコンクリートを締め固める作業を行う．

これまでにも，振動ローラを自動化する試みは行われてきた[(1)]．1988 年に関谷らが光波距離計を用いて重機の位置・姿勢を計測する振動ローラの遠隔・自動制御システムを報告している[(1),(2)]．また 2000 年には小田らが Real Time Kinematic(RTK) GPS と光ファイバジャイロを用いた振動ローラの遠隔・自動制御システムを報告している[(3)]．最近では青木が光波距離計と MEMS ジャイロにより遠隔操作用振動ローラを自律制御で走行させた結果を報告している[(4)]．従来開発での走行制御精度は，関谷らや小田らは明らかにしておらず，青木の報告では±200mm 程度としている．しかし実用化を考えるとダム施工では転圧レーンのラップ幅が 200～300mm とされており[(5)]，±100～±150mm 程度の走行制御精度が必要である．

そこで我々は±100mm 以内の走行制御精度を有する振動ローラ自動転圧システムを開発する．そのために

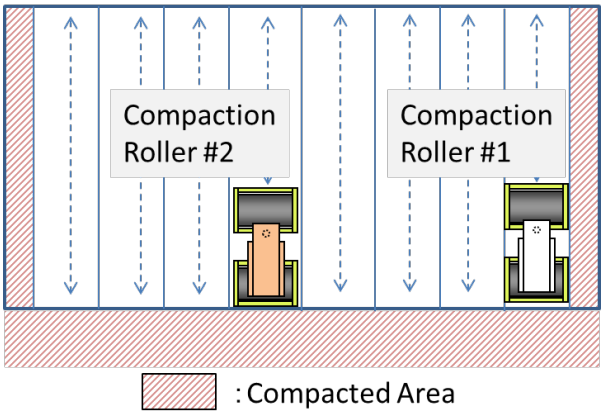


Fig. 1 Sheme of Compaction work

まずは熟練オペレータの操作を計測し，目標精度を実現する走行制御に必要な機能について検討する．次に実用化を見据えて，汎用の振動ローラに後付で自動化する装置を製作し本システムを実現する．最後に自動化した振動ローラを RCD コンクリートダムでの転圧作業に適用し，所期の走行制御精度が得られていることを確認する．

本報告の構成は次の通りである．2 章では，熟練オペレータが行っている振動ローラの転圧作業を計測し，その特徴を考察する．3 章では，自動転圧システムを開発した内容について述べる．4 章では，考察結果から得られた知見を基に構築した制御法を紹介する．5 章では，RCD コンクリートダムにおいて自動化した振動ローラで転圧作業を行った結果を示す．

２．オペレータの操作計測

2.1　操作計測の目的

振動ローラの転圧作業を自動化するにあたり，熟練オペレータの操作に対する振動ローラの軌跡を計測した．計測データの解析結果を用いて，自動化に必要となる機能や制御手法の検討を行う．

2.2　計測システムの概要

転圧作業計測で用いた振動ローラ（酒井重工業製 SV510DV）を Fig. 2 の写真に示す．オペレータの操作に対する重機の軌跡を計測するため．操作量（Fig. 3）と重機の状態量を計測した．軌跡を求める状態

キーワード　自動化，転圧作業，振動ローラ，コンクリートダム，効率化
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島建設（株）技術研究所　TEL 042 - 489 - 6256

Fig. 2　10t Vibration Roller (SAKAI SV510DV)

Fig. 3　Steer and Lever of Roller

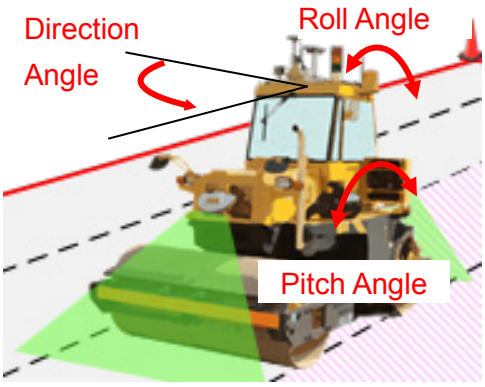


Fig. 4 Posture Angles of Roller

Fig. 5　Experimental Setting for Measurement of Operation

量として，位置（XY）と高さ（Z），姿勢角（ロール，ピッチ，方位）（Fig. 4）を， RTK－GPS（位置・高さ）とジャイロセンサ（姿勢角）で計測する．

2.3　計測実験概要

フィルダムのコア材により全長 40m×幅 12m の試験ヤードを整備し，以下の条件で計測走行を実施した（Fig. 5）．

① 4 レーン×3 往復（6 回転圧）分を計測．

② 1 レーン目はポールを目標に直線走行し，以後のレーンは隣のレーンを基準に一定のラップ幅（200mm）をとるように走行．

③ 熟練オペレータ（作業従事者）と初心者（作業経験無し）の各 1 名ずつの重機操作の計測とヒアリングにより，熟練度による操作の違いを比較．

2.4　計測データの解析

各オペレータの転圧軌跡を Fig. 6 に示す。熟練オペレータ（Fig. 6 左）は転圧回数に関わらず同じ軌跡を走行している．一方で初心者（Fig. 6 右）の場合は毎回の軌道が異なっていることが分かる．

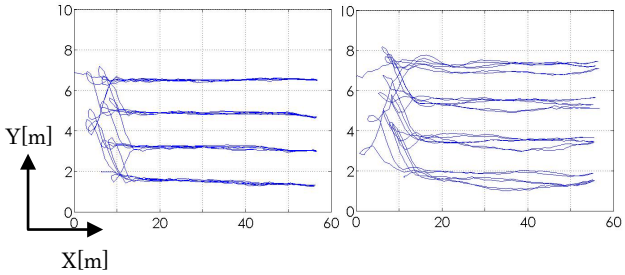


Fig. 6 Trajectory of Compaction Works by Skilled (left) and Unskilled Operator (right)

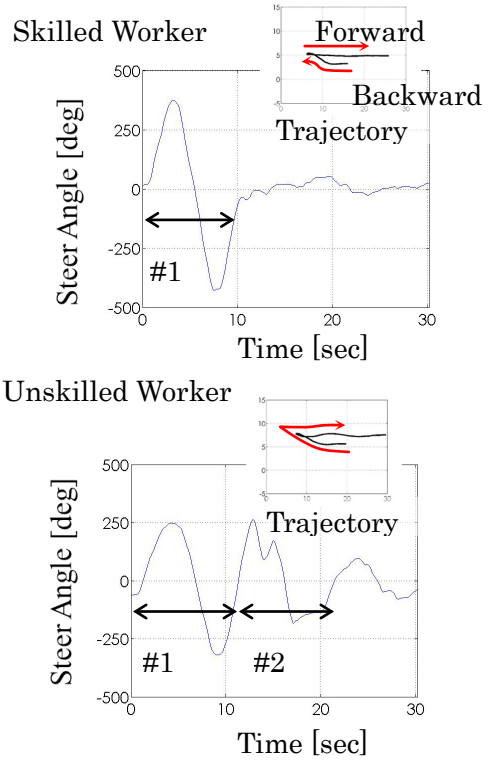


Fig. 7 Steer Operations and Lane Change Trajectories

このような違いが生じた要因として，ヒアリングの内容も考慮に入れると，熟練オペレータは遠方にある隣接レーンの転圧跡を目標に軌道修正しているのに対し，初心者はローラ前後のズレを基に軌道修正していることが分かった．

Fig. 7 に切り返し時の各オペレータのステアリング操作を示す． 熟練オペレータは 1 回切り返すだけで，隣接レーンへの方向を定めている．それに対し，初心者は 2 回の切り返しを行い，調整しているが，2 回目の切り返しの終了時でも方向が定まっていない．ここでの違いも走行精度に差が生じる要因の一つであると考えられる．

2.5　計測・ヒアリングでの知見

上記に報告した計測以外に， 20t ローラ（酒井重工業製 SV900）を用いてフィルダム・ロック材の転圧作業を計測した．計測やヒアリングから得られた知見としては，ステアリングを大きく切り過ぎないことである．特に，粒径の大きい石に乗り上げたときには，ローラの接触面積が減るため，ステアリングが変動しやすい．この場合，熟練オペは路盤を目視で確認し振動ローラの動きを予測して，ステアリングを切らずに保持しようと心掛けていることをヒアリングで確認している．

３．自動転圧システム

3.1　開発の概要

2 章で得られた知見を基に，振動ローラ自動転圧システムを開発した．汎用の振動ローラに計測機器や後付自動化装置を用いて自動化し，タブレット PC で指示した施工範囲を自動で振動ローラが転圧作業を行うシステムを実現した．ここでは 11t 振動ローラ（酒井重工業製 SD451）を用いて説明する（Fig. 8）．

Fig. 8　11t Vibration Roller（SAKAI SD451）

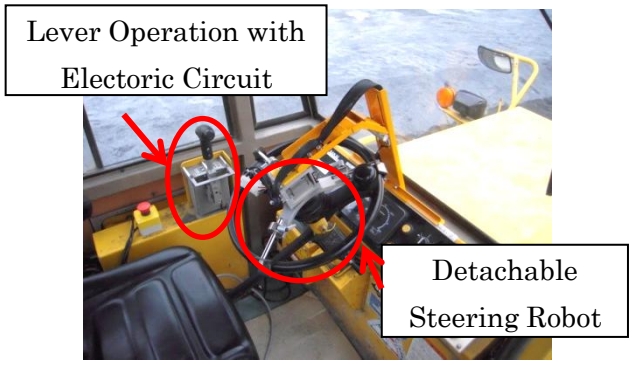


Fig. 9　Automation System of Steering and Lever (Movement and Compaction)

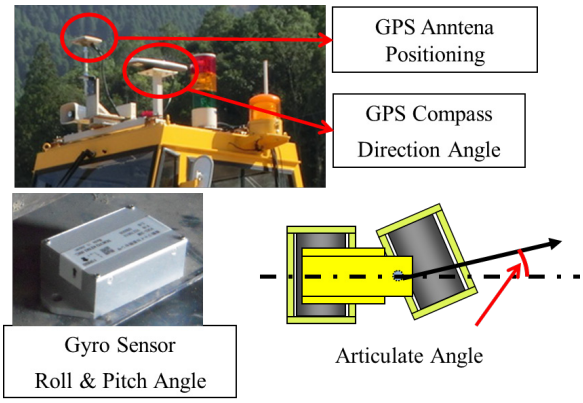


Fig. 10　Measurment Systems

3.2　後付自動制御装置及び計測センサ

既存の振動ローラを自動化するために次の制御装置や計測機器を設置した．

自動操舵を可能にするため，ステアリングに操舵ロボットを取り付けて，反力を取るための固定治具をキャビンの操作パネルに設置した（Fig. 9）．この操舵ロボットは脱着可能で，有人で振動ローラを操作する際には容易に取り外しが可能である．

また，前後進及び起振の制御は，レバー操作や起振ボタンで生じる電気信号を模擬する電子回路を製作し，電子制御システムに指令することで実現した（Fig. 9）．

計測機器としては，重機の状態量を計測するため，RTK-GPS（重機位置計測）， GPS 方位計（重機方位計測），振動ジャイロ（ロール・ピッチ角），アーティキュレート角（前輪ローラとキャビンの相対角）計測センサを搭載した（Fig. 10）．

3.3 安全装置

ダム工事現場に振動ローラ自動化システムを導入する際の安全性を確保するために，必要な機能の検討を行い，装置を製作した．

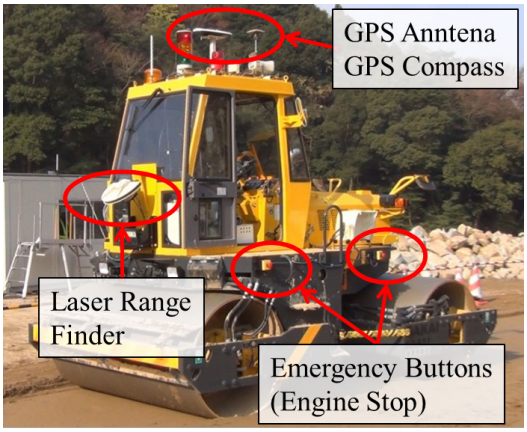


Fig. 11　Fail-safe devices

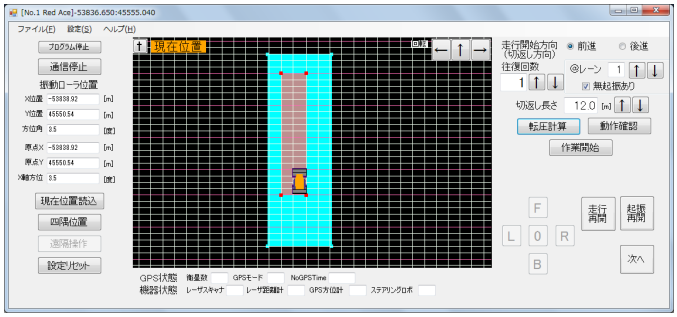


Fig. 12　Command Interface for Autonomous Compaction Work on a Tablet PC

Fig. 11 に振動ローラに取り付けている安全装置を示す（赤丸円内）．これらの装置はそれぞれ次のような機能を有する．

・GPS 測位・GPS 方位計測システム：振動ローラは設定された作業範囲を超えると自動的に停止する．

・レーザスキャナ障害物検知装置：振動ローラの前後に設置したレーザスキャナで，進行方向の 2m 以内に 30cm 以上高い障害物もしくは 50cm 以上の凹みを検出した場合は即時に振動ローラを停止する．

・エンジン停止ボタン：上記対策でも自動走行が停まらない場合は，振動ローラ側面に設置するスイッチ（左右それぞれ 2 ヶ所，計 4 ヶ所）を押すことで，直接エンジンを止めて振動ローラを停止させる．

これらの安全装置の他にも，本システムを操作・監視する作業員は，無線遠隔停止スイッチや後述する作業指示インタフェースで振動ローラの自動転圧作業を停止できる．

このように機械と人との接触を防止する複数の装置を施したことで，自動転圧作業中の危険防止に必要な安全機能を装備できたと考えている．実際の運用では，当然のことではあるが，始業前点検でそれぞれの安全装置が正常に働いているかを確認することが重要であることに注意する．

3.5 作業指示インタフェース

作業指示をするためのインタフェース画面を Fig. 12 に示す．インタフェースプログラムをタブレット PC 上で動かしタッチ動作により転圧範囲や作業内容の指示ができる．作業指示方法は次の通りである．

ステップ 1:作業指示を行う前に，振動ローラを転圧領域に手動で設置する．

ステップ 2:インタフェース上で作業動作範囲を設定する（Fig. 12 赤枠内の水色部分）．

ステップ 3:隣接レーンとのラップ幅，転圧回数および切返し方向（前後進）を設定する．

ステップ 4:転圧範囲（Fig. 12 赤枠内の薄赤色部分）を設定するために，作業動作範囲内で 4 隅をタップする．

ステップ 5:ステップ 3，4 での設定に従い，自動転圧パターンを自動計算する．

ステップ 6:ステップ 5 で計算した自動転圧パターンをシミュレーションし，問題がないことを事前に確認する．

ステップ 7: 問題がなければ，振動ローラに搭載された自動化装置に指示し，自動転圧作業を開始する．

ステップ 7 の後，振動ローラは作業指示で与えられた転圧パターンに従って，自動で転圧作業を行う．また周囲の施工状況に応じて，自動転圧作業を一旦停止するなどの操作も可能である．

4．走行制御アルゴリズム

4.1　前後進レバー信号制御

RCD コンクリートダムでの転圧作業時の走行速度は時速 1km と遅く，速度計測が難しいため，予め走行速度に対応する前後進レバー信号を求めておき，制御時には必要な速度に応じて前後進レバー信号を加えている．

4.2　ステアリング角度制御

自動車とは異なり，振動ローラはアーティキュレート機構で動作している．また現実の走行では地面と鉄輪との摩擦やすべりを生じており，それらを走

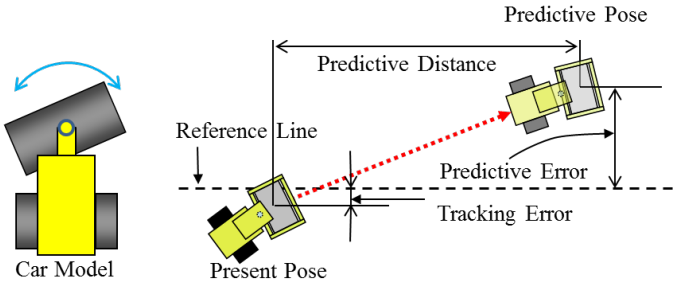


Fig. 13 Car Model and Prediction Error at Forward Movemet of Comaction Roller

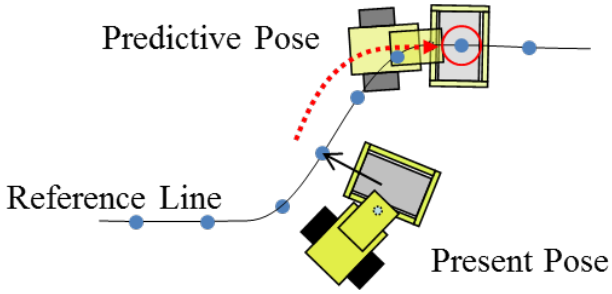


Fig. 14 Tracking for Curved Trajectory

行モデルに反映するのは難しいため，本報告では Fig. 13 左に示す簡易な車両モデルを用いて制御アルゴリズムを検討する．以下では転圧作業時の走行パターンを，直進走行での転圧作業と隣接レーンへの切返し走行の 2 つに分けて説明する．

4.2.1 直進転圧走行

Kanayama らの方法[(6),(7)]などを参考に，数 m 先の予測位置・姿勢での追従誤差を用いてステアリングを制御する（Fig. 13）．Fig. 13 の現在位置での追従誤差を用いて制御した場合，目標線より下に位置するため，ステアリングが進行方向に対して左に切られ，大きく行き過ぎる．一方，予測位置での追従誤差を用いれば，目標線より上に位置するため，ステアリングは右に切られ目標線に追従していく．追従誤差の計測位置として，前進時はローラ中心位置，後進時は後輪車軸中心位置を用い，追従誤差が小さくなる予測距離として，前進でローラ中心位置から 6m 前方，後進で後輪車軸中心から 5m 後方を採用した．このようにして得られた誤差 e_p と PI 補償器を用いて，ステアリング角度 ϕ_s の制御を行っている（式（1））．

$$\phi_s(t) = k_P e_p(t) + k_I \int e_p(t)\,dt \qquad (1)$$

ここで，k_P と k_I は適当なゲインである．

熟練オペレータも遠方の轍を目標にし直線性を保持していることから（2.4 節），本制御手法はオペレータの感覚にも整合した制御方法であり，また我々は本手法を用いてフォークリフト[(8)]やゴルフカート[(9)]の操舵制御も実現しており，一般性の高い手法といえる．

4.2.2 切返し走行

2.4 節の考察に基づいて切返し目標軌道を作成する．前進方向で切返す場合は，隣接レーン位置に移動する目標軌道を Fig. 13 の車両モデルに基づいて作成する．また後進の目標軌道は隣接レーンの直線軌道としている（後進時は，直進転圧走行の制御を行う）．

前進時の軌道追従制御は Kanayama の手法を用いる．しかし速度制御が難しいことから，時間に依存しない幾何学的な曲線を目標軌道として用い，予測位置を次のように求めている（Fig. 14）．まず，目標軌道を一定距離の離散の点群として表現しておく．現在位置から最も近い目標点を求め，その目標点から前方にある距離にある目標点を予測位置とする（Fig. 14 では 3 ステップ先）．現在位置と予測位置から誤差 e_p を計算し，ステアリング角度 ϕ_s を求める．

5．転圧作業試験

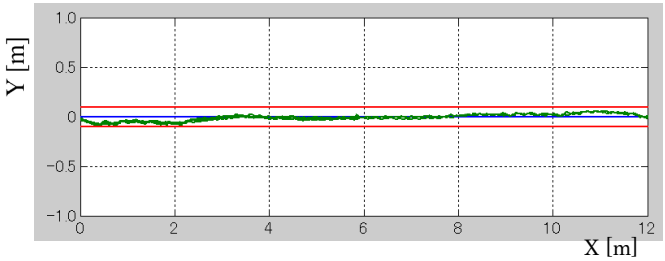
開発した自動転圧システムを SD451 （Fig. 8）に搭載し，RCD ダム施工における自動転圧作業での走行制御精度を評価した．

Fig. 15 に転圧走行時と切返し走行時の軌跡を示す．直進走行では直線 $y = 0$ を目標に転圧し，切返し走行では青線を目標軌道に走行し，その後直線 $y = 0$ を目標に転圧を開始する．赤線は直線 $y = 0$ に対する±100mm の誤差領域を示しており，どちらも転圧時の誤差は±100mm 内に収まっていることが判る．

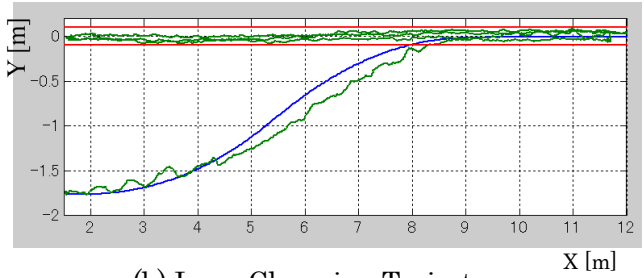
また本システムを振動ローラ二台分製作し，一人のオペレータで二台の自動化振動ローラを稼働・管理し，省人化が図れることも確認した（Fig. 16）．

RCD コンクリートダムで本システムを試験運用するに当たり，他重機の作業エリアとの干渉や転圧終了時間に対する制約があった．その中で自動化振動ローラを安全にかつ終了時間を守りながら運用するには，転圧パターンの検討が重要であった．

また制御に関連して，Fig. 15 の切返し走行において，施工上問題ではないが，切返し前進時の目標軌



(a) Compaction Work（Straight Line）



(b) Lane Changing Trajectory

Fig. 15 Trajectories of Compaction Work（Straight Line）and Lane Changing Behavior of the Automonous Vibration Roller

Fig. 16 Compaction Work by Two Autonomous Vibration Rollers

道との偏差が生じている．これはモデル化誤差や路面の凸凹が原因と考えられる．路盤条件については，これまで RCD コンクリートダム現場への適用前に，フィルダム・ロック材や砂質土の路盤での自動転圧走行実験を行っており，提案する制御手法による走行精度は，機種（20t ローラ（SV900），11t ローラ（SD451））による違いよりも路盤の形状（凸凹や斜面）に影響されることを知見として得ている．このことはシミュレーションでも確認しており，さらなる制御精度の向上に向けて，路盤形状に対応できる制御手法の検討を進める予定である．

６．おわりに

本報告では，熟練オペレータの作業を計測・分析し自動化の制御方法を考察し，その結果を基に製作した自動化装置を，汎用の振動ローラに後付し，自動転圧システムを実現した．また自動転圧の運用試験で本システムの有用性を明らかにした．本システムの実用導入では，自動化に合わせた施工手順や方法の検討を並行して実施していくことが必要である．

今後の主要な課題として，各種路盤材料において RCD コンクリートと同様の制御性能を実現することやネットワークによる遠隔管理システムの構築が挙げられる．

参考文献

(1) 室，荒井，深川，建山，“最新建設施工学―ロボット化・システム化”，朝倉書店，1994.

(2) 関谷，保坂，小笠原，藤原，橋本，“締固め機械の自動運行システム”，三菱重工技報， Vol. 25, No. 5，pp. 452 - 455．1988.

(3) 小田，小幡，藤岡，“土木無人化施工ロボット”，ロボット学会論文誌， Vol. 18，No. 7，pp. 923 - 927．2000.

(4) 青木，“振動ローラの自律走行の実証－建設技術研究開発助成制度を活用した次世代無人化施工システムの開発”，建設機械施工， Vol. 67，No. 3，pp. 32 - 38．2015.

(5) (財)ダム技術センター，“ 多目的ダムの建設－平成 17 年度版　第 6 巻　施工編”, 技報堂, 2009.

(6) Y. Kanayama，Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi，“A stable tracking control method for an autonomous mobile robot”，In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 384 - 389．1990.

(7) 深尾，“非ホロノミック移動ロボットの適応制御”, 計測と制御，Vol. 45, No. 3, pp. 602 - 607. 2006.

(8) 黒沼，浜本，大塩，片村，三浦，加賀美，S. Thompson，“放射線環境下における建設機械の自動運転システム”, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会論文集, pp. AC1H3-01 (1) - (4). 2013.

(9) S. Thompson，S. Kagami，M. Ohsio，K. Hamamoto，“Constrained 6DOF Localisation for Autonomous Navigation of a Golf Cart”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集，pp. 1A2-I03 (1) - (4)．2013.