

レーザスキャナによる モータグレーダ自動制御システムの開発

杉 迫 泰 成

近年、舗装の品質向上、出来形精度向上、施工効率の向上といった観点より、建設機械の自動制御技術が注目されている。モータグレーダに適用する自動制御技術には、トータルステーションやGNSSを用いた3次元マシンコントロール(3D-MC)があるが、小規模な現場や舗装修繕工事の場合などには適用が困難なことがある。そのため、汎用性が高く簡便に利用できるモータグレーダの自動制御技術の開発が望まれる。

そこで、アスファルトフィニッシャの自動制御で実績のあるレーザスキャナを改良し、モータグレーダに適用したブレード自動制御システムを開発した。本報では、その概要と適用事例を紹介する。

キーワード：レーザスキャナ、路盤、自動制御、モータグレーダ、平坦性、品質確保

1. はじめに

近年、性能規定発注方式や総合評価落札方式による入札・契約方法が普及していく中で、快適な走行性と乗り心地の確保といった観点より、舗装の平坦性について一段と高い性能が求められている。

舗装工事では、求められる高い性能を実現するために、施工する各層に使用する材料の特性に応じて、専用の施工機械を用いた機械施工が行われており、施工の機械化によって、施工精度や効率の向上が図られている。しかし、刻々と変化する作業状況に応じて、施工機械を操作するには熟練が必要であるため、施工の精度や効率はオペレータの技量によるところも大きい。そこで、施工機械の操作を自動化することで、オペレータの技量に依存しない施工技術の開発がおこなわれてきた。

アスファルト混合物層の施工で使用されるアスファルトフィニッシャの自動制御技術には、計画高にセンサラインを設置しグレードセンサを這わせて所定の仕上がり高さを確保する方法、仕上がった舗装または構造物の上面を基準としてショートスキーを用い段差等が生じないようにする方法、機械的なロングスキーを用いて下層の凹凸を長い距離で平均化して平坦性を向上させる方法等がある。最近では障害物との接触や、合材のこびりつき等による誤作動を防止することを目的に、超音波やレーザを用いた非接触センサの使用も多く見受けられる。このようにアスファルトフィニッシャの自動制御技術^{1), 2)}は様々で、広く現場で活用

されている。

ところで、良好な平坦性を実現するためには、アスファルト混合物層の敷きならし高さだけでなく、より下の層である粒状路盤面の施工精度も重要である。粒状路盤の施工では、モータグレーダが一般的に使用されている。モータグレーダの自動制御技術では、トータルステーションやGNSSを利用した3D-MC技術が開発されている。この施工技術は、高い精度で路盤を築造できるものの、施工仕上がり面の設計データを事前にコンピュータに入力することや、使用機材も多く、施工前準備に多くの労力を要することから空港等の比較的大規模な現場で適用されている。

一方、一般的な舗装工事における路盤の施工は土木工事などに比べると施工規模が小さい。また、修繕工事などでは、舗装の仕上がり高さを既設の構造物などの取り合いで現場あわせとするため、事前に施工仕上がり面を設計データとして準備できないことも多い。このように、一般的な舗装工事ではモータグレーダの自動制御技術の適用が困難な場合もある。

以上の背景より、路盤の出来形精度向上、施工効率の向上等を目的とし、中小規模工事や修繕工事などに活用することを念頭に、アスファルトフィニッシャの自動制御に用いられているレーザスキャナを転用し改良を施すことで、新たなモータグレーダブレード高さ自動制御システムを開発した。本報では、開発したシステムの概要について述べると共に、実路での試験施工の検証結果について報告する。

2. レーザスキャナのモータグレーダへの適用

(1) レーザスキャナ概要

レーザスキャナは、路面に向かって放射状（180°）に一定角度（0.5°）で順次レーザ光を走査し、戻ってきたレーザ光の反射時間により斜距離Lを計測し、斜距離Lと発射角度 θ （既知）より、路面高さHと水平距離Xを順次算出（図-1）することができる非接触センサである。レーザスキャナは取付け位置にもよるが、前後10m程度までの地盤高の計測が可能で、計測した路面の凹凸を平均化することで、平坦性の向上が図られる。

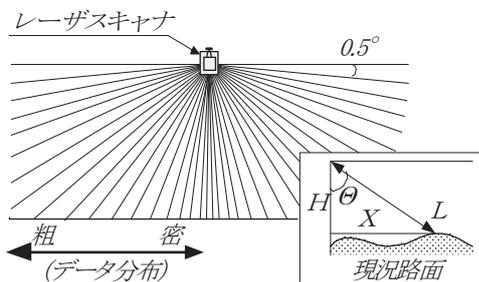


図-1 スキャナの機構

アスファルトフィニッシャにレーザスキャナを取付ける場合は、舗設中はスクリードの向きが施工方向と常に直角であるため、スクリードとつながっているレベリングアームにポールを介して設置し、レーザスキャナと平均化された地盤高の差が一定となるように、スクリード高さを直接制御する機構（図-2 参照）となる。

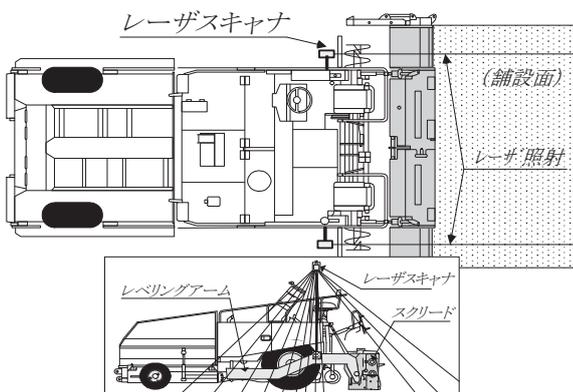


図-2 アスファルトフィニッシャへ適用した場合

(2) 制御システムの改良

アスファルトフィニッシャ用に開発されたレーザスキャナを、モータグレーダにそのまま適用すると不具合が生じた。そこで、モータグレーダに適用するために、データ処理のアルゴリズムを変更し、試験施工等

で施工機械の実挙動を見ながら、制御システムの改良をおこなった。以下におこなった主な改良点について述べる。

(a) ブレード高さと路盤高の同時計測

モータグレーダにアスファルトフィニッシャと同様の方法でレーザスキャナを取り付ける場合、ブレード上にポールを介して設置することになる。しかし、ブレードを回転・スライドさせた場合、レーザ照射位置が変わるため、正確に既設地盤の高さを測定することができない（図-3 参照）。モータグレーダでの施工では、ブレードの回転とスライド操作を駆使し、路盤の整正作業を行うため、ブレードを回転・スライドさせた場合でも、ブレードの高さと地盤高を同時に測定できるシステムの構築が不可欠となる。

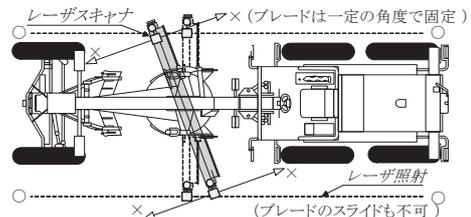
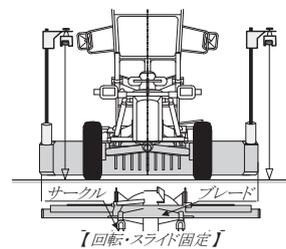


図-3 モータグレーダへ適用した場合

図-4 はブレードの直上にレーザスキャナを配置した時のスキャナ走査結果であるが、レーザスキャナ直下ではデータ密度が高いため、ブレード上端といった延長方向に幅が狭いものであっても計測可能であることがわかる。そこで、レーザスキャナをブレード直上付近に、取付金具を介してモータグレーダ本体に設置し、レーザスキャナ直下の前後1mずつの範囲の内

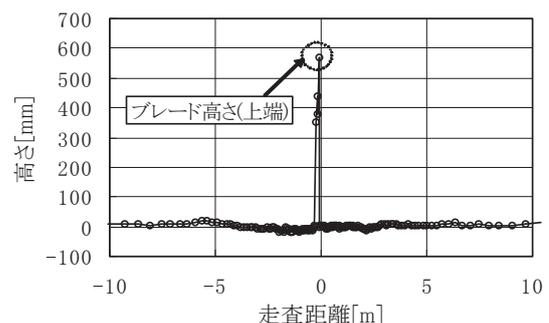


図-4 スキャナ走査結果一例

で一番高い計測データをブレードの上端の高さと認識することとし、地盤高さとブレード高さを同時に計測し、その相対高さでブレード高さをコントロールできるようにした。

この改良により、作業中にブレードを回転・スライドさせた場合でも、レーザスキャナの向きが変わることが無く、正確に地盤高さとブレード高さの相対的な位置関係を測定する事が可能となった。

(b) 計測データ処理の高速化

レーザスキャナをアスファルトフィニッシャに適用した場合、レーザスキャナは毎秒2～3回程度の制御命令の更新をおこなっている。アスファルトフィニッシャの施工速度は3～5m/分程度なので、制御命令が更新されるまでにアスファルトフィニッシャは30mm程度移動することになるが、この程度の移動距離により生じる自動制御の遅れは実用上では問題になっていない。

ところが、モータグレーダの施工速度は20m/分程度と速い上、ブレードの回転・スライド操作によって変化するブレードの高さも同時に計測し、制御命令に反映させる必要がある。毎秒2～3回程度の制御命令の更新では、制御命令が更新されるまでにモータグレーダは150mm程度移動することになる。また、回転中のブレードの高さを計測したところ、ブレードは延長方向に幅が狭く移動の影響を大きく受けるため、正確に計測できないことがわかった。そこで、演算方法や処理方法の最適化を図り、毎秒20回程度の制御命令の更新を実現した。

この改良により、制御命令が更新されるまでの移動距離は十分小さくなり、ブレードを回転させながらグレーダを高速で移動させても、正確に地盤高とブレード高さを測定することが可能となった。

3. 開発したブレード自動制御システムについて

レーザスキャナを用いて地盤高を平均化し、モータグレーダのブレード高さを自動制御して施工をおこなうと、滑らかで平坦な路盤を整形することができても、所定の高さに仕上げるためには20mピッチなどの適当な間隔で仕上がり高さを確認しながら施工を進める必要がある。また、施工中はブレード片側から碎石が溢れ出るため、レーザスキャナがブレードから溢れ出た碎石の高さを計測しないように注意して走行する必要があり、左右のレーザスキャナを用いてブレード両側の高さを同時に制御して施工をおこなうことは困難である。

そこで、施工性を改善することを目的に、本体スロープセンサ等のセンサを追加することでブレード高さ自動制御方法を追加した。開発したブレード高さ自動制御システム（以下、本システム）を搭載したモータグレーダを図-5に、ブレード高さ自動制御方法を表-1に示す。以下に、それぞれの自動制御方法の概要について述べる。

表-1 自動制御方法一覧

	使用センサ	自動制御方法
グレードコントロール (高さ制御)	レーザスキャナ	(1) 地盤高平均式
		(2) ジョイントマッチ式
スロープコントロール (勾配制御)	本体スロープセンサ ブレードローテーションセンサ ブレードスロープセンサ	(3) スロープコントロール

(1) 地盤高平均式グレードコントロール

レーザスキャナで走査した高さの中で、ブレードの高さと前後の地盤高さを利用して、ブレード高さを制

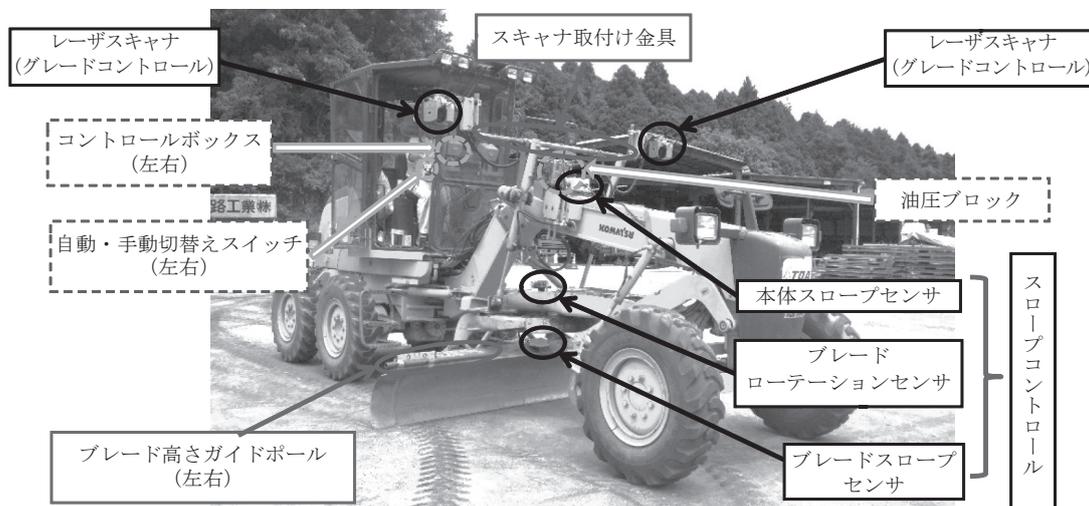


図-5 システムの構成

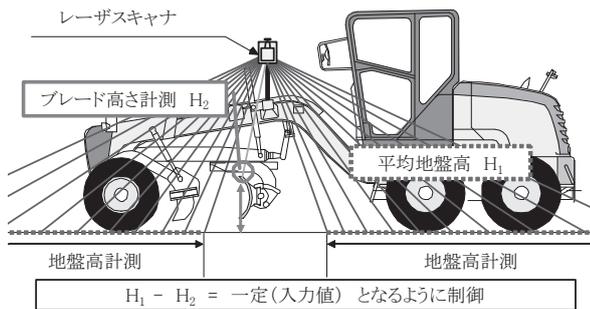


図-6 地盤高平均式グレードコントロール

御する自動制御方法である（図-6参照）。アスファルトフィニッシャーでの適用方法を，モータグレーダに適用した自動制御方法であり，路盤の凹凸を長い距離計測し平均処理するので，平たんで滑らかな施工面となる。

(2) ジョイントマッチ式グレードコントロール

レーザスキャナで走査した高さの中で，ブレードの高さとブレード近傍の10点の地盤高さを利用し，ブレードの高さを制御する自動制御システムである（図-7参照）。スキャナが構造物の上を通過するように施工をおこなうことで，構造物の高さを基準に路盤を整正することができる。

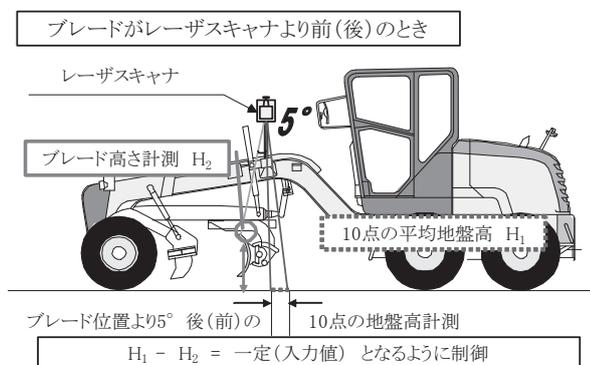


図-7 ジョイントマッチ式グレードコントロール

(3) スロープコントロール

本体スロープセンサで計測するグレーダ本体の縦断勾配，ブレードローテーションセンサで計測するブレードの回転角より，モータグレーダの上下の傾きやブレードの回転・スライド等の姿勢を考慮しつつ設定横断勾配に対応したブレード傾斜角を計算により求める（式-1）。この計算値と，ブレードスロープセンサで計測する実際のブレード傾斜角を比較し，ブレード傾斜角が計算値になるように自動で制御するシステムである。

施工中にブレードの片側から碎石が溢れ出る場合

に，碎石が溢れ出ない側をグレードコントロールによりブレードの高さを制御し，スロープコントロールを併用し所定の高さ及び横断勾配に仕上げる場合に活用することを想定している。

$$\text{設定横断勾配} (\%) \times \cos \Phi + \text{縦断勾配} (\%) \times \sin \Phi = \text{ブレード傾斜角} (\%) \quad \text{(式-1)}$$

- ・本体スロープセンサ
グレーダ本体の縦断勾配 (%) を計測
- ・ブレードローテーションセンサ
ブレード回転角 (Φ) を計測
- ・ブレードスロープセンサ
ブレード傾斜角 (%) を計測

4. 実路施工

本システムを実路において適用し，施工性，施工精度，施工量の調査をおこなった。

【現場概要】

- 施工面積：8,090 m² (幅員 12 ~ 16 m, 延長 600 m)
- 施工厚：下層路盤 15 cm (2層目)
- 使用材料：RC-40
- 使用機械：モータグレーダ 3.1 m (KOMATSU GD405A-3)

(1) 現場条件及び施工方法

横断形状は片側にL型側溝が設置されており，横断勾配は2.0%，縦断勾配は0.3%で一定である（写真-1参照）。

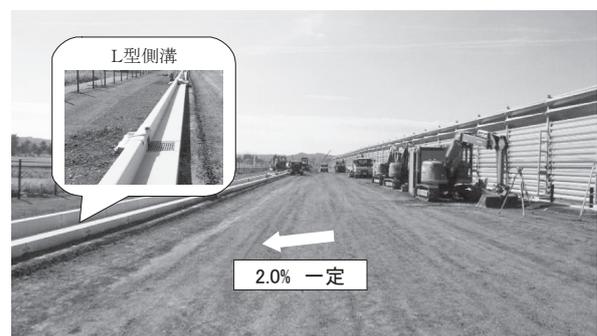


写真-1 現場状況

今回の実路施工では，本システムを用いた自動制御での施工と，通常の熟練オペレータ（経験年数 20 年以上）による手動での施工の差異を確認するため，図-8に示すように現場内を自動区間と手動区間に分割し手動での施工をおこなった。

自動区間の施工方法は，はじめに，レーザスキャナ

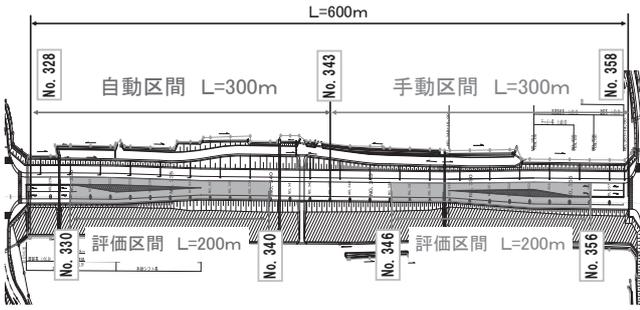


図-8 現場平面図

がL型側溝の上を通過する位置にグレーダを走行させ、ブレード片側はL型側溝の高さを参照して、ジョイントマッチ式グレードコントロールを、もう片側はスロープコントロールで路盤を整形（整形1）した。次に隣接レーンに移り、ブレード片側は整形1で仕上げた路盤面の高さを参照し、地盤高平均式グレードコントロールを、もう片側はスロープコントロールで整形（整形2）をおこなった（図-9参照）。

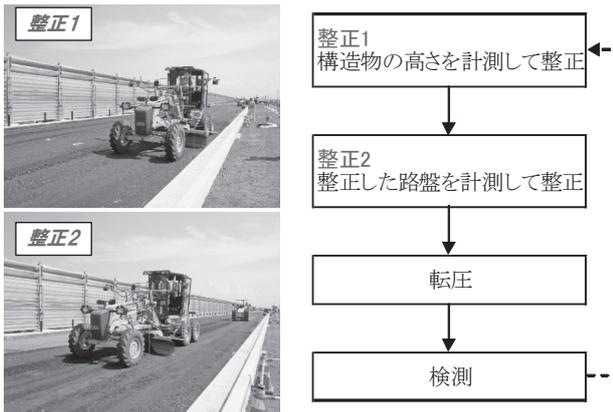


図-9 施工方法

(2) 施工結果

(a) 施工性

本システムは、「自動」・「手動」の切替えや3つの自動制御方法の切替えはスイッチでおこなえるようにユーザーインターフェースを整備しているの、オペレータはすぐに操作方法を習得し自動制御で路盤施工をおこなえた。また、「自動」運転中はブレードの高さは自動制御され、オペレータは走行操作に集中できるため安全な施工にも寄与するシステムである。

(b) 施工量

今回の施工では、路盤材の粗均しから仕上げまでを一台のモータグレーダで実施し、一日あたりの施工量を確認したところ、自動区間・手動区間ともに、4,000 m² 施工するのに2.5日かかり（1,600 m² /日）差異は見られなかった。

(c) 施工精度（基準高，平坦性）

仕上がり路盤面に対して縦断方向1mごとに3測線（L,CL,R）をレベルにて測量し、縦断方向10mごとに測量したL型側溝の高さと設定横断勾配から計算される設計値との差を算出した。自動区間での路盤高さ測定結果を図-10に、自動区間と手動区間における施工精度の一覧を表-2に示す。本システムを用いて仕上げた路盤は、下層路盤の仕上がり高さの規格値（±40mm）を全ての箇所を満たしている。表-2より、自動区間の施工精度は熟練オペレータによる手動での施工と同等の精度であり、路盤の凹凸具合を示す標準偏差では手動での施工よりもわずかに小さい値を示している。

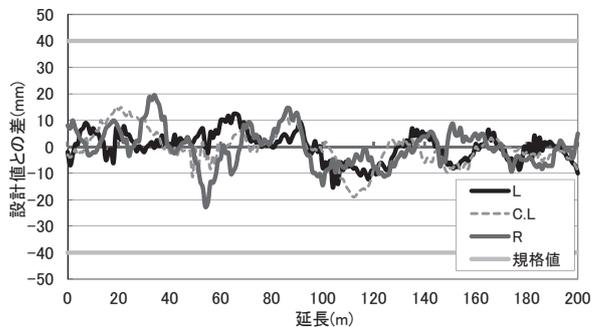


図-10 路盤高さ（設計値との差）

表-2 施工精度一覧

	自動	手動
計測点（箇所）	603	603
最大値（mm）	20	23
最小値（mm）	-23	-16
平均値（mm）	-0.3	0.7
標準偏差（mm）	6.5	7.2

路面の連続的な凹凸具合を確認するため、3mプロファイルメータ（LP-300S）による平坦性の測定を行なった。測定結果を表-3に示す。本システムを用いた路盤の平坦性は、熟練オペレータが手動にて仕上げた路盤の平坦性よりわずかに大きな値を示しているが、下層路盤の段階で表層の平坦性の規格値2.40mmを下回っており、凹凸が少なく滑らかに仕上がっている。

表-3 平坦性測定結果

計測箇所	自動			手動		
	L	C.L	R	L	C.L	R
平坦性（mm）	2.16	1.90	2.53	1.87	1.95	1.96
平均（mm）	2.20			1.93		

5. おわりに

アスファルトフィニッシャ用に開発されたレーザスキャナを、ブレード高さと路盤高を同時に計測するなどの改良をおこない、モータグレーダへの適用が可能となった。また、モータグレーダ施工での利便性を考慮して、スロープセンサ等を取り付け、地盤高平均式、ジョイントマッチ式、スロープコントロールの3つの自動制御方法を搭載したシステムとすることで、路盤施工における新しい自動制御システムを開発できた。

本システムを用いて実路施工をおこなった結果、本システムの操作は容易ですぐに使いこなせるようになることが分かり、熟練オペレータによる手動での施工と同等の施工量が確保された。本システムを用いて仕上げた路盤面は、凹凸が少なく滑らかであり、熟練オペレータが手動で仕上げた路盤面と比較すると同等程度の仕上がり精度である。

本システムは、使用する機器類も少なく、事前に設計データを入力する必要はない。また、レーザスキャ

ナはアスファルトフィニッシャ自動制御に兼用でき、汎用性が広く、いままでは規模等の問題により路盤施工の自動化を見合わせていたような現場への適用も見込まれる。

最後に本システム開発に御協力していただいた東京計器(株)の関係者ならびに、実路施工にあたり現場の提供をしていただいた、国土交通省東北地方整備局湯沢河川国道事務所の関係各位に感謝いたします。

JICMA

《参考文献》

- 1) 山口達也：「高い平坦性の確保に貢献する舗装の最新機器」舗装 vol.38, No.2, pp.3-7 (2003.2), 建設図書発行
- 2) 福川光男：舗装技術者のための建設機械の知識, 舗装 vol.42, No.2, pp.31-36 (2007.2), 建設図書発行

【筆者紹介】

杉迫 泰成 (すぎさこ やすなり)
東亜道路工業(株)
技術本部 技術研究所
主任研究員

