

逆解析法とスプライン補間法による複雑な曲線の創生と応用 (障害物を回避するトンネル検査用ガイドフレームの形状決定手法)

井上 文宏*

Creation and Application of Curves by Inverse Analysis and Spline Interpolation (Determination of Guide Frame Shape for Tunnel Inspection to Avoid Obstacles)

Fumihiko INOUE

Abstract:

In order to improve the method of automatically inspecting the inner wall of an aging tunnel, we have developed a method that can flexibly determine the shape of the inspection guide frame according to obstacles in the tunnel. The guide frame was composed of VGT, and its shape was controlled based on the obtained position information of the obstacle. The shape of the guide frame was determined by using the inverse analysis of the shape and spline interpolation to specify the points of the guide frame corresponding to the obstacles and to analyze the shape. Based on such analysis and experimental results, the shape of a practical guide frame could be determined, and it was expected that tunnel inspection could be performed efficiently.

Keywords : Guide Frame, Shape Detection, Inverse Analysis, Spline Interpolation

要旨:

老朽化したトンネルの内壁を自動で検査する方法を改善するため、トンネル内の障害物に応じて検査用ガイドフレームがフレキシブルに形状決定できる手法を開発した。ガイドフレームは可変形状トラスVGTで構成され、得られた障害物の位置情報に基づき、その形状を制御した。ガイドフレームの形状には、逆解析とスプライン補間法を利用し、障害物に応じたガイドフレームのポイントを指定してその形状を解析・決定した。このような解析および実験結果を基に、実用的なガイドフレームの形状決定ができ、トンネル検査を効率的に実施できる見込みを得た。

キーワード : ガイドフレーム、形状決定、障害物検知、逆解析、スプライン補間

1. はじめに

近年、高度成長期に大量に建設された橋梁やトンネルなどの多くは高齢化が進み、大規模な補修工事を必要としている。特にトンネルは完成後の改築が困難であるため、定期的な点検によって劣化の進行を把握し、将来予測に基づく補修・更新などの維持管理が行われている。一般に道路トンネルの定期点検は自動車の通行を規制し、高所作業車で点検員・補助点検員がトンネル壁面にできるだけ近接して行っている。しかし、点検範囲が広いため近接目視、打音検査には時間を要し、長時間の通行規制が必要になる。また、人による目視や打音の判定、検査結

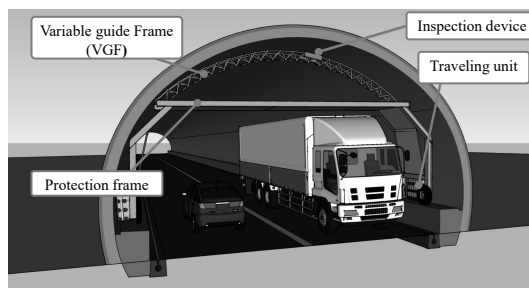


Fig.1 Schematic diagram of a guide frame using variable guide frame for tunnel inspection

*湘南工科大学 工学部 機械工学科 教授

果は個人差が生じ、定量的な判断が難しい。

本研究ではFig.1に示すように、トンネル形状に適合可能な可変形状フレームを用いることにより、トンネル内部を通常交通規制を行うことなく自走・移動し、かつ障害物（廃煙機、照明、表示板）を避けながら移動する検査用のガイドフレームを開発した^[1,2]。ガイドフレームは障害物の形状に応じフレキシブルに変化できるため、高分解能の3次元レーザ測域システムを構築し、その位置と形状を推定した^[3-9]。ガイドフレームは可変形状トラスVGT

(Variable Geometry Truss)で構成されるアーチ形状であり、得られた障害物の位置情報に基づき、その形状を制御した。ガイドフレームの形状変化は、逆解析法とスプライン補間法を利用することで、障害物を避けるガイドフレームを解析した。

本報では、ガイドフレームの形状決定、障害物の探査方法、実際のトンネルで使用するガイドフレームの形状決定を行い、その有効性を検証した。

2. トンネル内の障害物検知

2.1 計測装置と方法

ガイドフレームはトンネル内壁に沿って移動するため、内壁から突起した障害物はガイドフレームに接触する可能性がある。ここでは、ガイドフレームが設置された台車梁面部分の中央に、レーザ測域センサを設置し、前方約1~5mのトンネル天井面にある障害物を探査した。3次元の空間を探索するため、Fig.2に示すように測域センサLRF(Laser Range Finder, UTM-30LX, 北陽電機)とパンユニット(SPU-01c, Sustainable Robotics)を結合し、LRFの計測域 θ_1 と傾斜角 θ_2 を同期して変化できる計測システムを構築した。この結果、LRFからの反射距離 l と角度 θ_1, θ_2 を用いることで、障害物の形状を3次元的に表現できることが可能となった。

2.2 障害物の探査・解析方法

障害物の断面位置を確定するため、障害物の形状がその点群の輪郭から円であると仮定して、その中心位置を解析した。なお、矩形形状であっても円形状であると仮定することで、安全側に輪郭を推定できる。Fig.3に示した解析アルゴリズムを使用し、先ず、①すべてのレーザ反射点の導出、記録を行い、次いで②レーザ点が記録される始め位置と終わりの位置を割り出し、エッジを抽出した。またエッジ部分の点群が円状の周囲点であると仮定し、③最小二乗法を用いて円の中心位置を推定した^[10,11]。最後に、

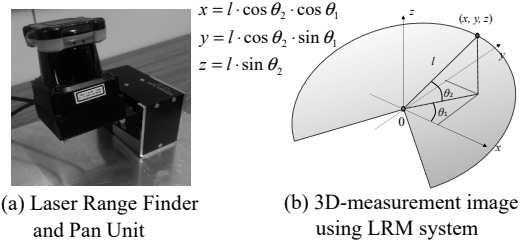


Fig. 2 Object detection by 3-D Laser Range Finder

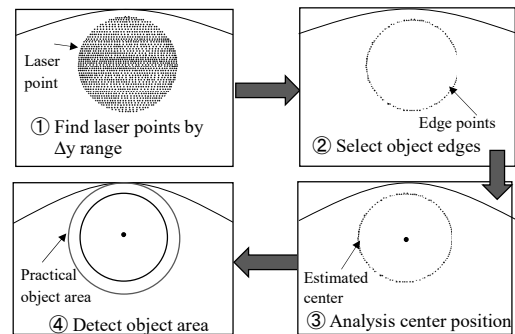


Fig. 3 Object detection method by 3D Laser Range Finder

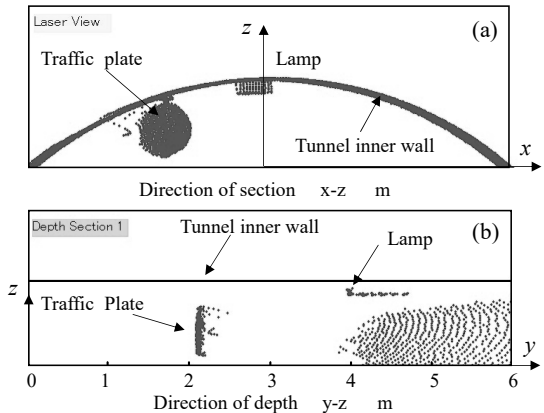


Fig. 4 Results of detection and analysis for objects by LRF

④障害物の中心位置と円周を推定し、さらにガイドフレームが余裕をもって避けるべき範囲を確定した。上記の工程を繰り返すことで、ガイドフレームが避けるべき障害物の形状と前方位置を定めた^[12,13]。

2.3 模型トンネルによる計測結果

実験用に建設した実大模擬トンネルを使用して内壁に取付けた障害物を計測した。Fig.4に測域センサで計測した結果を示す。x-y平面(Fig.4-(a))ではトン

ネル内にある道路標識や天井照明の輪郭を含めた形状が良く捉えられている。奥行方 y - z 平面(Fig.4-(b))では、標識や照明の位置がレーザ反射点の多く密集している部分から推定でき、その位置もほぼ正確な値であることが確認できた。

x - y 平面における障害物および照明周辺のデータを基に、その中心位置を計算した。その結果、集合データの輪郭位置から各障害物の中心位置が得られ、実際の位置と 10 mm 以下の誤差精度であることが確認された。計測および解析・処理時間は 1 分程度であり、ガイドフレームを用いる点検作業の時間内には、十分に障害物を検知することが可能である。

3. ガイドフレームの形状解析

3.1 ガイドフレームの構造

トンネル検査用ガイドフレームは、様々な障害物を避ける形状に変化することが求められるため。本開発では可変形状トラス VGT (Variable Geometry Truss) を直線状に結合した構造とした。VGT は伸縮機構とヒンジから構成されるトラス構造部材であり、伸縮長を制御するで、様々なトラス形状を作り出すことができる^[14,15]。VGT は元々展開型宇宙構造物として開発が試みられたもので、宇宙空間における様々なミッションに対応できる。

Fig.5 に VGT を複数台結合した梁部材の形状変化の例を示す。VGT の伸縮長を制御した直線状の梁材 (Fig.5-(a)) に対して、隣り合う垂直部材を共に伸ばすと梁材はバネが伸縮するような形状に変化し (Fig.5-(b))、一つおきに伸ばすと弧を描くような形状へと変化する (Fig.5-(c))。さらに、任意に部材を変化させることで、目的に応じた形状へと変化させることが可能である (Fig.5-(d))。また宇宙構造物への利用とは異なり、VGT を地上構造物に適用するには自重や地震力に代表される外力の影響、コストやメンテナンスに対する配慮も必要である。

3.2 ガイドフレームの形状解析

ガイドフレームを 2 次元の多関節のマニピュレーターに置き換えると、各 VGT のユニット先端 $q(x_0, y_0)$ は VGT のヒンジ外角を $\theta_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$ として、以下の式で表現できる。

$$x_n = l_0 \cdot \sum_{k=1}^n \cos \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) \quad (1)$$

$$y_n = l_0 \cdot \sum_{k=1}^n \sin \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) \quad (2)$$

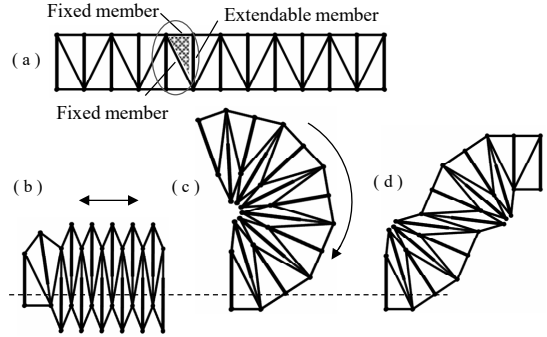


Fig. 5 Example of shape change of VGT structures

ここで、 l_0 は各トラスの斜辺の長さを表す。

ガイドフレームの形状を変化させるため、目的の形状に合わせて VGT のヒンジ角を変化させた。しかし、式 (1)、(2) で与えられたアーチの先端位置は変化してしまう。そこで、始点で支持された片持ちフレームの先端が常に終点に一致するように各 VGT の角度 θ_j を制御するいわゆる逆運動学を適用した。

フレーム全体の時間的変化を考慮すると、式 (3) と (4) はそれぞれ式 (9) と (10) として示される。

$$\dot{x}_n = -l_0 \cdot \sum_{k=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^k (\dot{\theta}_j) \sin \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) \right\} \quad (3)$$

$$\dot{y}_n = l_0 \cdot \sum_{k=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^k (\dot{\theta}_j) \cos \left(\sum_{j=1}^k \theta_j \right) \right\} \quad (4)$$

これらの方程式は、独立変数 $\dot{\theta}_n$ に関して次の方程式 (5) によってマトリックス形式で表される。

$$\dot{q}_n(x_n, y_n) = J \cdot \dot{\theta}_n \quad (5)$$

ここで、 J はヤコビアン行列 ($2 \times n$) を示す。ここで、逆ヤコビアン行列 J^{-1} は式 (6) で示されるが、正則行列ではないので必ずしも解は存在しない。そこで、 J^{-1} の代わりに擬逆行列 $J^\#$ などの適切な行列が一般化され、構造内の VGT の角速度は式 (7) で示される^[16-18]。

$$J^\# = J^T \cdot (J \cdot J^T)^{-1} \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_n = J^\# \cdot \dot{q}_n(x_n, y_n) \quad (7)$$

このようなフレーム形状変化の修正を繰り返すことで、元のガイドフレームの形状は、様々な形状に変化させることができる。

3.3 逆解析による障害物を回避する形状解析

3.2 に示した逆解析方法を用いて、トンネル断面内ある障害物を回避するガイドフレームの形状解析を検討した。ここでは、交通表示板のような円形の障害物を仮定する。まず、実際の障害物の位置に対して、ガイドフレームの垂直上部（ガイドフレームに接触しない位置）に仮想の障害物を設定する。次いでその障害物を徐々に低下させ、ガイドフレームのあるヒンジ接点 $P_i(x_i, y_i)$ が、式(8)で示される障害物の外周円より常に外側になるような条件を満たせば、障害物は回避できる。すなわち、

$$C_j(x_j, y_j) : (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 > r^2 \quad (8)$$

ここで、 $C_j(x_j, y_j)$ は障害物の外周中心点を r は外周半径を表す。形状解析の過程では、外周円の中心位置を変化させ、それに伴って式(8)を満たすように新しいヒンジ接点 P_i が決まり、その点とガイドフレームの先端部 B が常に等しい位置になるように逆解析を繰り返すことになる。最終的に、仮想の障害物と実際の障害物の位置が等しくなるまで繰り返すことで、ガイドフレームは障害物を避けられる形状に変化することが可能となる。

Fig.6 にシミュレーションによってガイドフレームの形状が変化し、円状の障害物を回避する過程を示す。実際の障害物は屋根の下側にあるが、計算ステップ 0 では障害物を屋根の外側まで引き上げ、その後ステップ毎に徐々に下げてガイドフレームが仮想障害物を避けて変化することを示した。逆解析によりガイドフレームの先端部 B は常に同じ位置になっている。最終のステップ 200 ではガイドフレームの片側が湾曲した形状となって、障害物を回避できることがわかる。計算処理時間は非常に短いため、各ステップのヒンジ角を実際のガイドフレームに当て填めても動きの遅延を引き起こすことはない。今回の計算では障害物に比較的優しい円形状を用いたが、異なる形状については、今後順次検討を続ける。

Fig.7 に VGT で構成させるガイドフレーム（支持点間 6 m）を実際に作製し、障害物を回避させる実験を実施した。円形の障害物の位置を予め与えることで、ガイドフレームはシミュレーションと同様の計算過程を繰り返し、ガイドフレームが障害物を回避することができた。

4. スプライン補間法による形状解析

初期状態のガイドフレームに対して、障害物を避けるための形状を解析するため、フレームの形状をスプライン補間^[2]で繋ぎ、全体形状を構成した。

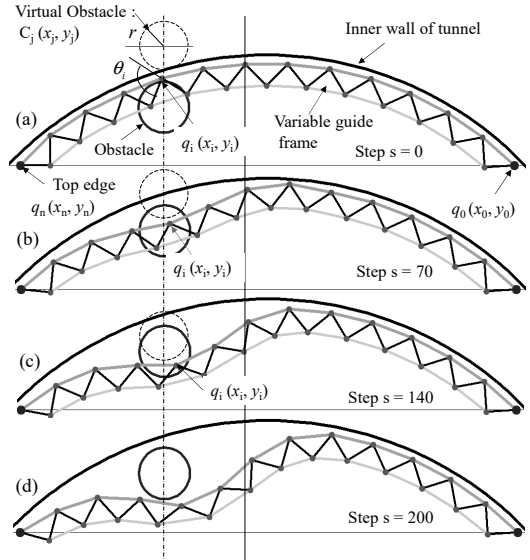


Fig.6 Flow of guide frame avoiding circular obstacles by simulation



Fig.7 Shape control of VGF in model tunnel obstacles

4.1 スプライン補間法

スプライン補間法は任意形状に対し、その補間する間を多項式で結合して、形状の連続性を持たせる手法である。形状の関数 $f(x)$ に対して、区間内 (x_k, x_{k+1}) で補間に使う関数を $S_k(x)$ とすると 3 次スプライン補間法で近似する多項式は式(9)で示される。

$$S_k(x) = a_k(x - x_k)^3 + b_k(x - x_k)^2 + c_k(x - x_k) + d_k \quad (9)$$

$$(k = 1, 2, 3, \dots, n - 1)$$

この 3 次式が滑らかな曲線となるためには、以下の条件が必要となる。

・条件(1): $S_k(x)$ が各接点 (x_k, y_k) を通る。

$$S_k(x_k) = d_k = f(x_k) \quad (10)$$

・条件(2): x_k 前後で $S_k(x)$ が (x_{k+1}, y_{k+1}) を通る。

$$S_{k+1}(x_{k+1}) = S_k(x_{k+1}) \quad (11)$$

・条件(3): x_k 前後で $S_k(x)$ の 1 次導関数の値が等しい。

$$\dot{S}_{k+1}(x_{k+1}) = \dot{S}_k(x_{k+1}) \quad (12)$$

・条件(4): x_k 前後で $S_k(x)$ の2次導関数の値が等しい。

$$\ddot{S}_{j+1}(x_{j+1}) = \ddot{S}_j(x_{j+1}) \quad (13)$$

・条件(5): 始点 x_0 と終点 x_n で $S_j(x)$ の2次導関数の値が0となる。

$$\ddot{S}_0(x_0) = \ddot{S}_{n-1}(x_n) = 0 \quad (14)$$

数点の補間点に対して、上記の条件を各々の式に適用させることで係数 a_k, b_k, c_k, d_k を求め、スプライン補間による関数を決定した。

ここで、各係数は以下のように定まる。

$$a_k = \frac{\ddot{S}_k(x_{k+1}) - \ddot{S}_k(x_k)}{6(x_{k+1} - x_k)} \quad (15) \quad b_k = S_k(x_k)/2 \quad (16)$$

$$c_k = \frac{y_{k+1} - y_k}{(x_{k+1} - x_k)} - \frac{(x_{k+1} - x_k)\{2\ddot{S}_k(x_k) + \ddot{S}_k(x_{k+1})\}}{6} \quad (17)$$

$$d_k = y_k \quad (18)$$

4.2 障害物を回避するガイドフレーム形状推定

4.1 で示したスプライン補間法を用いて解析を行い、障害物を回避するためのガイドフレームの形状推定方法を以下に示す。

(1) 障害物を避けるいくつかの補間点（両端点を含む）をガイドフレームの上弦の形状に選択し、式(9)の区分関数の定数を計算する。

(2) 各区分関数で示される形状曲線を接続し、ガイドフレームの上弦形状を構成することをチェックする。このとき、変換後のガイドフレームの上弦の長さは、元の上弦の長さとは異なる。

(3) ガイドフレームの上弦形状に合わせて、開始点から各VGTを連続的に配置する。ただし、ガイドフレームの先端部は元の固定端にあるとは限らない。

(4) したがって、各VGTの角度は、先端が元の固定端と一致するように逆解析によって計算し、最終的な形状が推定する。ただし、各VGTの角度の変化は小さいため、最終的なガイドフレームの形状にはほとんど影響はない。

なお、本研究ではタブレット画面のガイドフレームをタッチすることで補間点を視覚的に決定できる簡易なシステムを構築することで、実際の検査作業の効率化を図った。以下にいくつかの例を示す。

4.2.1 形状決定例(1)

Fig.8-(a)に示すように、トンネル天井の左側から吊り下げられた円形の障害物1は、ガイドフレームと重なった状態にある。障害物を避けるために6つの

Table 2 Each constant value of spline function for obstacle 1

$S_k(x)$	a_k	b_k	c_k	d_k
1	-0.022	0	0.47	0
2	0.086	-0.593	-0.071	0.264
3	-0.062	0.821	0.353	0.189
4	-0.003	-0.201	0.568	0.528
5	0.005	-0.293	-0.011	0.876

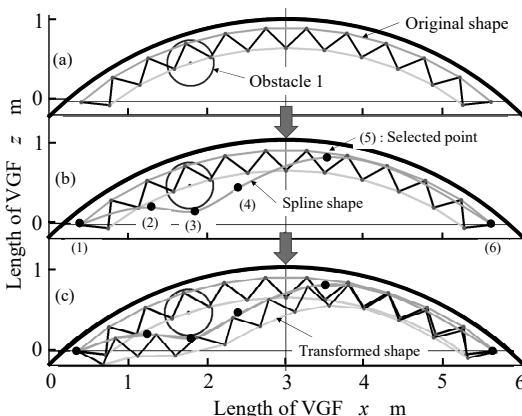


Fig.8 Shape decision of spline function for obstacle1

最適な補間点を選択し、スプライン補間法を使用して上弦の形状を解析した。Fig.8-(b)に示すように、得られたスプライン曲線は、選択した点を挟む5つの領域を連続的につなぐ滑らかな形状であり、障害物を避けて開始点と終了点を繋いでいる。不連続や大きな曲率がないため、ガイドフレームの形状は障害物をさける形状に適していた。式(9)によって分析された各定数値をTable 2に示す。

Fig.8-(c)で得られた上弦材の形状に合わせてガイドフレームを構成することにより、新しいガイドフレームを再現した。新しい形状のガイドフレームの全長は元の形状とわずかに異なるので、逆解析により形状の最適化を図った。形状に大きな変化はほとんどなく、障害物を十分に回避できると思われる。

上記の解析結果に基づいて、実際のガイドフレームの形状を実験的に検証した(Fig.7)。スプライン補間によって分析されたガイドフレームの形状は、障害物をシームレスに回避できる形状であることが実験的に検証された。

4.2.2 形状決定例(2)

この場合はトンネルの中心に排出ファンなどの障害物2(Fig.9-(a))を想定して、ガイドフレームの形状を解析した。Fig.9-(b)に示すように、6つの補間点を円形の障害物の下部円弧に対称的に配置し、この障

害物を回避するためのガイドフレームの形状を決定した。式(9)によって解析した各定数値を Table 3 に示す。なお、実際のガイドフレームの形状は、解析されたデータを使用して変換した。実験状況を Fig.10 に示す。ガイドフレームは障害物を避けるような形状となり、ガイドフレームと障害物の間に十分なマージンがあることが確認された。

上記の結果から、スプライン補間法を使用することで、解析可能な障害物の回避を可能にするガイドフレームの形状が決定できた。

5. ガイドフレームの形状決定フロー

上記で示したように、障害物の計測とガイドフレームの形状決定方法に基づき、実際のトンネルでの操作手順を検証した。Fig.11 にトンネル内の障害物の位置と形状に応じて、障害物を回避させるガイドフレームの適用フローを示す。

- (1) レーザ測域センサの計測による障害物の位置および形状の検証
 - (2) ガイドフレームと障害物の関係を確認し、タブレット画面で障害物を避けるために複数のポイントを選択
 - (3) スプライン補間法により、ガイドフレーム上弦材の形状決定
 - (4) 決定された形状に応じて VGT を選択し、逆解析を用いて、変形後のガイドフレーム全体の微調整を実施
 - (5) (4) の内容を実際のフレーム制御装置に転送し、ガイドフレームの形状を変更
- この形状決定フローでは、形状解析と決定、および実際のガイドフレームの変換を継続的に実行できるので効率的な検査作業への利用が可能である。ただし、実際にはトンネル検査に基づいてガイドフレームが常に動作しているため、その間に障害物を安全に回避する必要がある。

Fig.12 に、実際のトンネルに設置されたトンネル検査システムの概要と実験状況を示す。この実験では、走行車両の動作試験、障害物の検出、障害物を想定したガイドフレームの移動実験を実施した。予定時間内に障害物の検出を確認でき、障害物を想定したガイドフレームの変更を適切に実施できた。

6. 結 論

本報ではトンネル内の障害物を避けるガイドフレームの形状決定とその形状を決定するための数学的手法について報告した。トンネル内には任意の障害

Table 3 Each constant value of spline function for obstacle 2

$S_k(x)$	a_k	b_k	c_k	d_k
1	-0.15	0	0.708	0
2	0.459	-0.638	-0.194	0.577
3	-0.021	0.453	-0.363	0.251
4	-0.436	0.4	0.366	0.251
5	0.14	-0.612	0.202	0.572

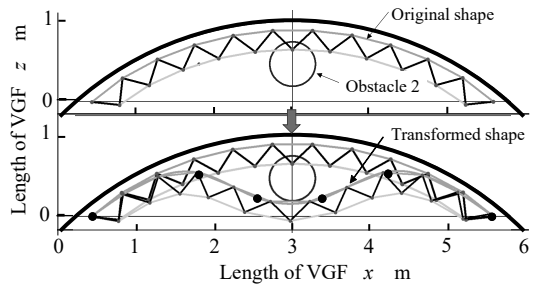


Fig.9 Shape decision of spline function for obstacle2



Fig.10 Shape control of guide frame for obstacle 2

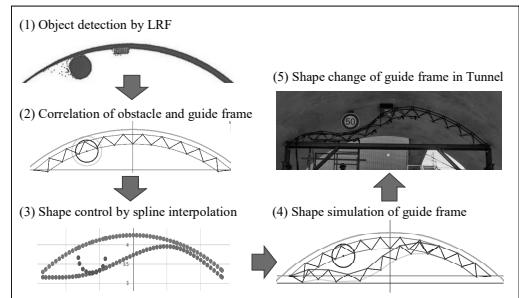


Fig.11 Shape decision flow of guide frame to avoid objects



Fig.12 Overview of an actual tunnel inspection system

物があるため、まずはレーザ測域センサを用いて、位置と形状を判定し、その障害物を避けるようにガイドフレームの形状を決定した。形状決定には逆解析手法とスプライン補間法を適用した。逆解析はある範囲の障害物には適用できるが、限定される場合も多い。スプライン補間は障害物の形状に合わせて、補間点を決められるので適用範囲が大きくなる利点がある。今後、この手法をより一般化することで、簡易にガイドフレームの形状を決定できるように検討して行く。

本研究開発にご協力頂いた関係各位に記して謝意を表す。また、本研究の一部は内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人；NEDO）によって実施された。

参考文献

- [1] Inoue F, Nakamura S, “Development of Variable Guid Frame to Inspect Inner Wall Tunnel”, Proceedings of the 6th International Conference on Advance Mechatronics (ICAM2015), Tokyo, Japan, PP. 284-285, 2010.
- [2] Fujii H, Yamashita A and Asama H, “Defect Detection with Estimation of Material Condition Using Ensemble Learning for Hammering Test”, Proceedings of the 20 16 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.847-3854 , Stockholm (Sweden), 2016.
- [3] Soh J, Lee J, Han C, “Development of Object Detection Technology Using Laser Sensor for Intelligent Excavation Work”, Proceedings of the 26th ISARC, Austin, TX, USA, pp.117-125, 2009.
- [4] Chang H, Choi J, Kim M, “Reliable Position Estimation Method of the Mobile Robot bme Laser Scanner and Indoor GPS System”, Proceedings of the 23th ISARC, Tokyo Japan, pp.505-510, 2006.
- [5] Teizer J, Bosche F, Carlos H, Carl T. Haas, “Real-Time, Three-Dimensional Object Detection and Modelling in Construction”, Proceedings of the 22th ISARC, Ferrara, Italy, pp.1-5, 2009.
- [6] Lee J, Kim C, Son H and Kim C, “Automated Pipeline Extraction for Modelling from Laser Scanned Date”, Proceedings of the 29th ISARC, Eindhoven, The Netherlands, 1-5, 2012.
- [7] Heikkila R, Jaakkola M, Pulkkinen P, “Connecting 3-D Concrete Vridge Design to 3-D Site Measurement”, Proceedings of the 20th ISARC, Eindhoven Holland, pp.259-264, 2003.
- [8] Makkonen T, Heikkila R, Kaaranka A, Naatsaari M, “The Applicability of the Rapid Handheld Laser Scanner to Underground Tunnel Surveying”, Proceedings of the 32th ISARC, Oulu, Finland, pp.1-7, 2015.
- [9] Han S, Cho H, Kim S, Heo J, “A Fast Automated Method for Extracting Tunnel Cross-Sections Using Terrestrial Laser Scanned Data”, Proceedings of the 28th ISARC, Seoul, Korea, pp.1013-1018, 20011.
- [10] Inoue F, “Shape Control of Variable Guide Frame for Tunnel Wall Inspection”, Proceeding of T 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017), Taipei, Taiwan, pp.675-682, 2009.5.
- [11] Tamura H, Sasaki T, Hashimoto H and Inoue F, “Circle Fitting Based Position Measurement System Using Laser Range Finder in Construction Fields,” 2010 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.209–214, 2010.
- [12] Chernov N, Lesort C, “Least Square Fitting of Circles”, Journal of Mathematical Imaging and Vision, Vol. 23, pp. 239-251, 2005.
- [13] Inoue F, Sasaki T, Huang X and Hashimoto H, “A Study on Position Measurement System Using Laser Range Finder and Its Application for Construction Work”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 26, No.1, pp. 226-234, 2012.
- [14] Koryo Miura, “Variable Geometry Truss Concept (Part I: Design and Operation of a Deployable Truss Structure) ”, The Institute of Space and Astronautical Science Report, No.614, 1984.
- [15] Koryo Miura, “Variable Geometry Truss Concept (Part II: Review on Special Application of Variable Geometry Truss) ”, The Institute of Space and Astronautical Science Report, No.614, 1984.
- [16] Chirikjian, “Binary paradigm for robotic manipulators”, ICRA, pp.3063-3069, 1994.
- [17] Chirikjian, “Kinematic synthesis of mechanisms and robotic manipulators with binary actuators”, ASME DE-72, pp.161-167, 1994.
- [18] Inoue F, “A Study on Adaptive Structure Applying Variable Geometry Truss (Mechanism of Movable Arch Roof with External Panel)”Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 21, No.2, pp.172-178, 2009.

