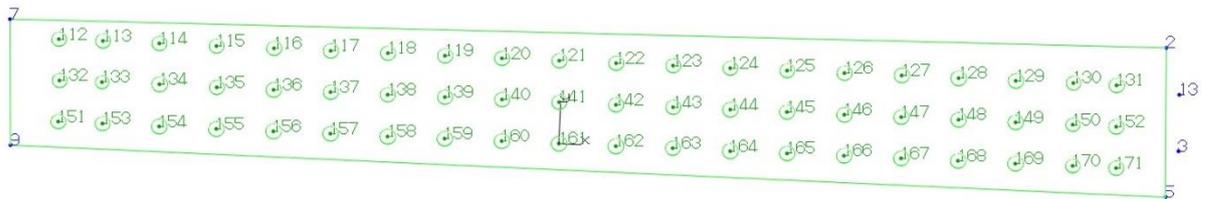
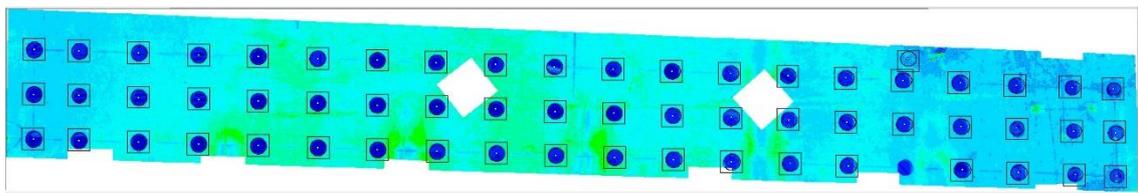
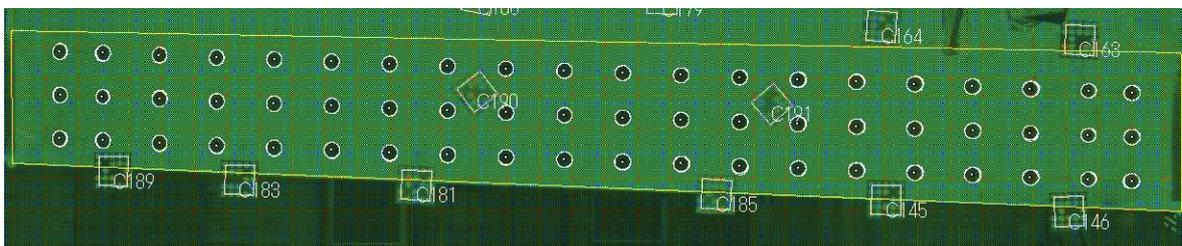


デジタルカメラ計測システム **PIXXIS 2**

鋸桁ボルト孔エッジ認識 計測試験報告書



第1版 2022年 6月 8日

MHI パワーエンジニアリング株式会社
Softbridge 株式会社

目次

1. はじめに.....	1-1
2. 試験環境と計測手順.....	2-1
2-1. 計測対象ブロック寸法.....	2-1
2-2. 試験環境.....	2-1
2-3. PIXXIS 2 のボルト孔エッジ認識による計測座標の求め方.....	2-1
2-4. 計測結果比較方法.....	2-2
2-5. 比較座標系.....	2-2
2-6. 実施する計測パターン.....	2-3
3. 計測状況.....	3-1
3-1. ボルト孔ターゲットを使用した PIXXIS2 計測状況.....	3-1
3-2. エッジ抽出を使用した PIXXIS2 計測状況.....	3-2
3-3. 反射シートを使用した PIXXIS2 計測状況.....	3-4
4. 比較検証.....	4-1
4-1. 作業に要する時間のまとめ.....	4-1
4-2. 計測値比較データまとめ.....	4-1
4-3. ボルト孔ターゲットを使用した PIXXIS2 計測値の評価.....	4-2
4-4. エッジ認識 PIXXIS2 計測値の撮影距離の違いによる評価.....	4-2
4-5. エッジ認識 PIXXIS2 計測値の撮影角度の違いによる評価.....	4-2
4-6. 反射シート PIXXIS2 計測値の撮影距離の違いによる評価.....	4-3
4-7. 反射シート PIXXIS2 計測値の撮影角度の違いによる評価.....	4-3
4-8. 実測添接板作成データ孔ピッチ比較.....	4-4
5. 考察.....	5-1
5-1. 計測方法の違いによる長所短所.....	5-1
5-2. 画像の色むらの問題.....	5-1
5-3. 斜め角度から撮影時のエッジ認識計測精度の向上.....	5-2

1. はじめに

本資料は、鋳桁ブロック端部ボルト孔を「デジタルカメラ三次元計測システム」のエッジ認識機能とレーザトラッカで計測した結果を比較したものである。

本資料の計測数値などは、2022年5月現時点での値である。今後ソフトウェア、ハードウェアの改善により値が変わることがある。

本資料に記載の会社社名、会社社製品名は、それぞれの会社の商標、又は登録商標です。

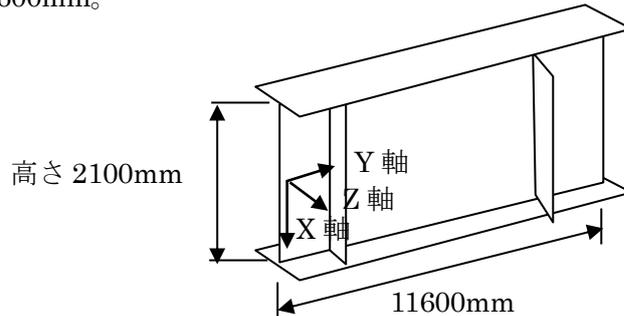
本文中には、商標マークは明記していません。

2. 試験環境と計測手順

2-1. 計測対象ブロック寸法

計測対象ブロック寸法は次の通り。

鋸桁 G1-B9、G1-B10 ブロック、長さ約 11600mm、桁高さ 2100mm、下フランジ幅 600mm。



2-2. 試験環境

実施日は、2022年4月14日（木）。

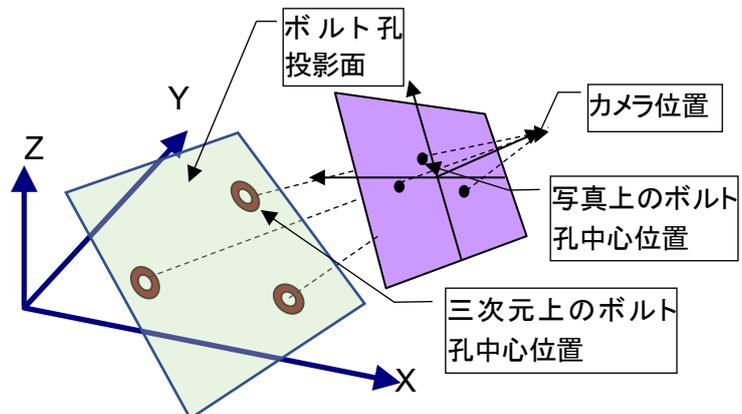
実施場所は屋外、計測場所気温は15度程度、天候は曇り。

2-3. PIXXIS 2 のボルト孔エッジ認識による計測座標の求め方

手順は次の通り。

- 1) 通常の PIXXIS 2 計測作業を実行
コードターゲットと基準バーを使用した通常の PIXXIS 2 計測を実施する。但し、ボルト孔にはボルト孔ターゲットを**設置せず**に撮影する。
- 2) 写真上のボルト孔エッジ抽出
ボルト孔が写る写真を1枚表示して、写真上のボルト孔中心をエッジ抽出機能で求める。
- 3) 三次元上の投影面を指定して三次元上のボルト孔座標値を求める。

通常の PIXXIS 2 処理が終了した写真は三次元空間上のカメラ位置（写真位置）がわかっている。右図の写真上で抽出されたボルト孔エッジ中心点と指定された投影面の交点からボルト孔中心三次元座標値を求める。



2-4. 計測結果比較方法

PIXXIS2 のボルト孔エッジ認識機能で求めた計測点とレーザトラッカで求めた計測点の誤差精度を検証する。またエッジ認識時の撮影方法の違いによる誤差も確認する。合わせて、以前に検討していたボルト孔ターゲットの代わりに、ボルト孔の背面に反射シートを貼り付けて撮影した場合の計測精度も比較する。

比較方法は、レーザトラッカ測定値と PIXXIS2 の各試験項目で測定した計測値を同じ座標系に変換し、それぞれのボルト孔中心座標の X,Y,Z 座標値の差を求める。

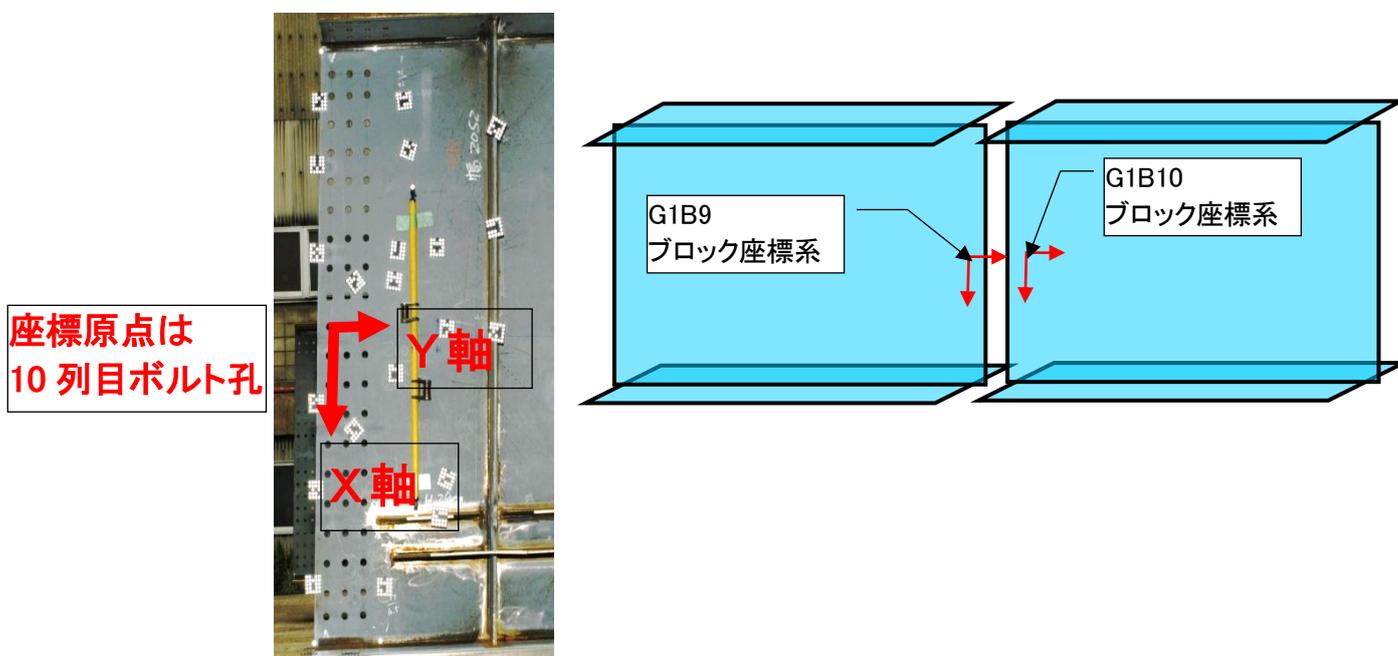
レーザトラッカと PIXXIS2 の測定値の全体的なずれ量は、差の平均値を求め確認する。PIXXIS2 の各試験項目での測定値のばらつきは、レーザトラッカ測定値との差を X,Y,Z 座標ごとに求め標準偏差をとることで確認する。

2-5. 比較座標系

レーザトラッカで計測した座標値と PIXXIS2 のエッジ抽出で計測した座標値を比較するため、計測した座標値を下左図のようなローカル座標系に変換する。X 軸はボルト孔両端を結ぶ方向とし、Y 軸はウェブ平面方向（下左画面では橋軸進行方向）とする。Z 軸はウェブ平面法線方向（下左画面では画像手前側方向）となる。

G1B9 ブロックと G1B10 ブロックの添接板ボルト孔間計測値を合成した作図（実測添接板）を行いやすくするため、下右図のように G1B9 ブロックの Y 軸方向と G1B10 ブロックの Y 軸方向を揃える。原点はいずれのブロックもブロック端側で上から 10 列目のボルト孔中心とする。

座標系変換後の計測データは X 軸昇順、Y 軸昇順に並べ替えを行う。たとえばウェブボルト孔ではウェブ上縁ボルト孔から下縁ボルト孔の方向に計測データを並べる。



2-6. 実施する計測パターン

ボルト孔に対し4通りの計測方法で計測を行い、計測精度を比較する。実施する計測方法は次の通り。

- ① レーザトラッカを使用した計測方法

レーザトラッカを使用してボルト孔を計測する。このデータを比較対象の基準値とする。
- ② ボルト孔ターゲットを使用した PIXXIS2 計測方法

ボルト孔ターゲットを使用した従来の方法による PIXXIS2 計測値をレーザトラッカ計測値と比較する。
- ③ エッジ認識機能を使用した PIXXIS2 計測方法

エッジ認識では、撮影距離や撮影角度によって計測精度が変わる可能性がある。そこでエッジ認識では次の項目でレーザトラッカ計測値との比較試験を行う。

 - 1) エッジ認識を使用した場合の撮影距離の違いによる計測精度
 - 2) エッジ認識を使用した場合の撮影角度の違いによる計測精度

エッジ認識機能は現時点では左右相反する角度で認識されたエッジ中心位置を基により正確な位置を補正する機能を持たないので、反射シートのように相反する角度で撮影された画像を使用した試験は実施しない。
- ④ 反射シートを使用した PIXXIS2 計測方法

ボルト孔ターゲットの代わりにボルト孔の裏側に反射シートを貼り付ける。これを従来の方法で PIXXIS2 計測し、レーザトラッカ計測値と比較する。

ボルト孔ターゲットを使用した計測ではウェブ表面にターゲットが設置されるが、この方式ではボルト孔の奥（背面）に反射シートが設置されることになる。この場合、撮影距離や撮影角度によって計測精度が変わる可能性がある。

そこで反射シート計測ではエッジ認識と同様に次の項目で試験を行う。

 - 3) 反射シートを使用した場合の撮影距離の違いによる計測精度
 - 4) 反射シートを使用した場合の撮影角度の違いによる計測精度

エッジ認識と異なり、反射シートの場合左右相反する角度で撮影した写真を使用すると、互いの誤差を打ち消しあい、計測精度が変わる可能性もある。相反する角度で撮影した写真を使用した場合の計測精度も確認する。

3. 計測状況

3-1. ボルト孔ターゲットを使用した PIXXIS2 計測状況

ボルト孔にターゲットを設置して PIXXIS2 で撮影した。ボルト孔ターゲット数に限りがあるため、端部、中央部付近にのみ設置した。

ターゲット類設置状況



撮影状況



3-2. エッジ抽出を使用した PIXXIS2 計測状況

ボルト孔ターゲットを外し撮影した。エッジに対し正対した位置からの撮影と、斜め方向からの撮影を行い計測精度の差を確認した。

ターゲット類設置状況



正面から撮影



離れた距離から撮影

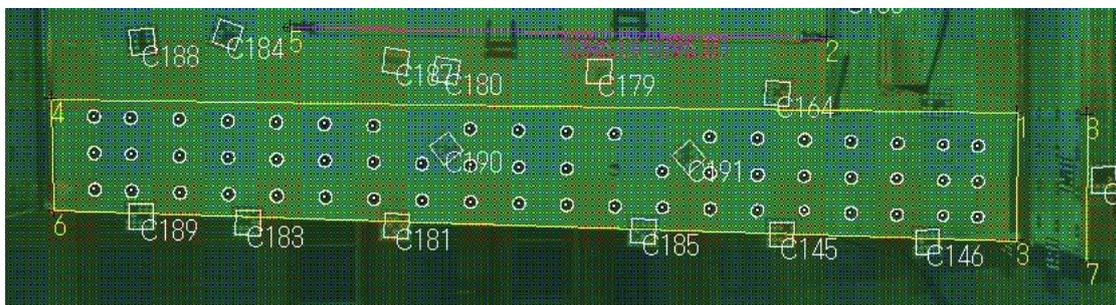


ウェブ面に対し斜め角度からの撮影

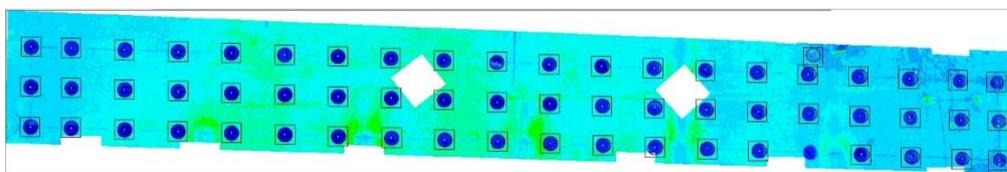


PIXIS2 でのエッジ処理画面は次の通り。

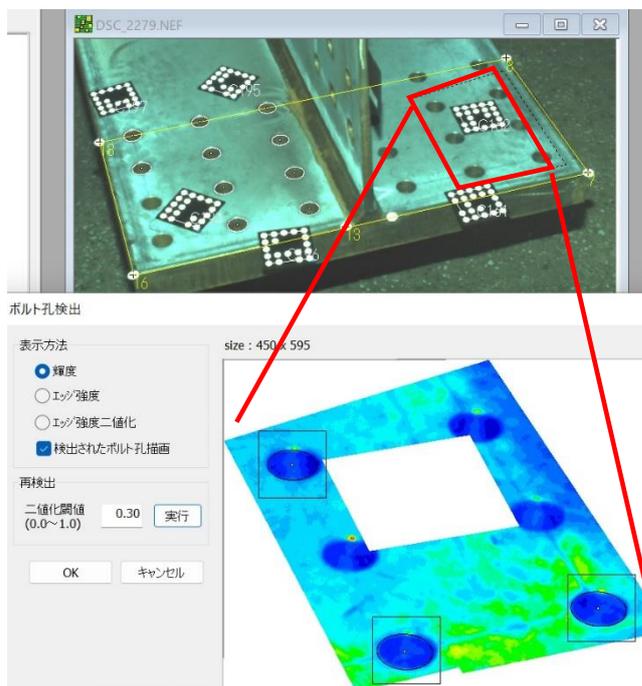
ウェブボルト孔エッジ抽出画面



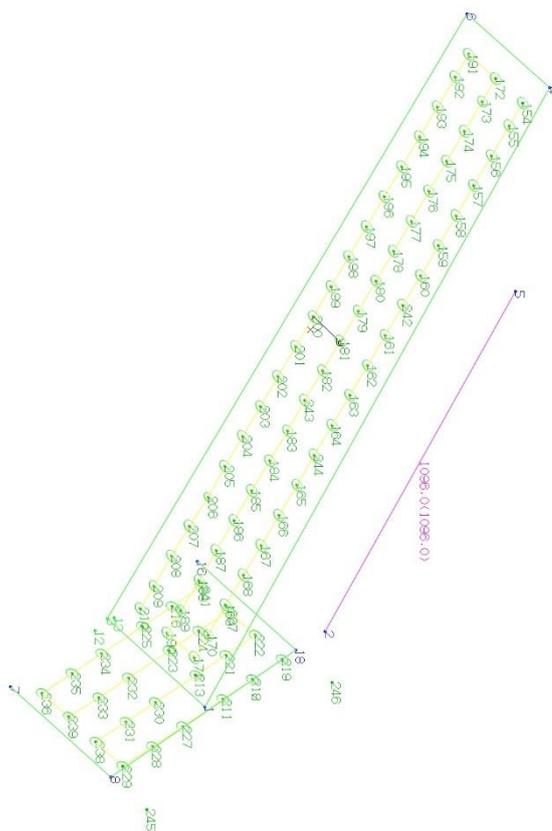
エッジ認識処理画面



フランジボルト孔エッジ認識処理画面



ボルト孔三次元計測点位置図



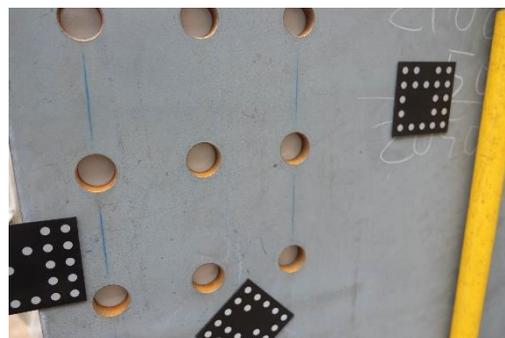
3-3. 反射シートを使用した PIXXIS2 計測状況

ボルト孔ターゲットの代わりにボルト孔背面に反射シートを貼り付けこれをボルト孔ターゲットとして撮影した。正対した位置からの撮影と、斜め方向からの撮影を行い計測精度の差を確認した。

背面への反射シート貼付け状況



表面から見た反射シート



撮影状況



4. 比較検証

レーザトラッカの測定値を基準として、エッジ認識機能や反射シートを使用して計測した場合の計測精度や注意点を検討する。

4-1. 作業に要する時間のまとめ

計測作業方法毎の1か所当たりの作業時間は次の通り。時間の単位は分。

計測準備作業とは、機材の設置や撤去作業に要する時間。データ処理作業は計測データを取得後、計測システムを実行してボルト孔データを添接板加工用データに変換するまでの時間。

	計測準備作業	計測作業	データ処理作業	備考
ボルト孔ターゲット使用 PIXXIS2 計測	10	5	10	全てのボルト孔にターゲットを設置する場合は準備作業が増加する
エッジ認識 PIXXIS2 計測	5	5	10	画像の状態によってデータ処理に時間がかかることがある
反射シート使用 PIXXIS2 計測	15	5	10	補剛材などがあると反射シートが貼りにくい。強力な磁石が必要。

4-2. 計測値比較データまとめ

レーザトラッカ計測値に対する各計測パターンのデータの平均値誤差と標準偏差をまとめた表は次の通り。

PIXXIS2 計測				平均差			標準偏差		
計測方法		ブロック	撮影枚数	μX	μY	μZ	ΔX	ΔY	ΔZ
ボルト孔ターゲット使用	撮影距離3m	G1B9	15	0.37	0.28	0.55	0.23	0.29	0.80
		G1B10	30	-0.73	0.04	0.27	0.45	0.42	0.90
エッジ抽出ボルト孔正面から撮影	撮影距離2m	G1B9	19	0.17	0.09	0.22	0.57	0.48	0.65
		G1B10	17	0.08	-0.19	0.20	0.38	0.35	0.53
	撮影距離3m	G1B9	17	0.18	0.18	0.22	0.51	0.39	0.65
		G1B10	15	-0.04	0.28	0.20	0.43	0.36	0.53
	撮影距離5m	G1B9	19	0.76	-0.03	0.22	0.84	0.95	0.65
		G1B10	12	-0.17	0.10	0.20	1.66	0.86	0.53
エッジ抽出ボルト孔斜めから撮影	左側から 60 度	G1B9	16	-0.33	0.16	0.22	0.72	0.92	0.65
		G1B10	17	0.35	0.10	0.20	0.77	0.80	0.53
	右側から 60 度	G1B9	23	-0.05	-0.23	0.22	0.64	0.42	0.65
		G1B10	17	-0.08	-0.12	0.20	0.96	0.72	0.53
	左側から 45 度	G1B10	17	0.17	-0.17	0.20	1.08	0.65	0.53
		G1B9	25	-0.60	0.35	0.22	1.54	0.68	0.65
G1B10	15	-0.32	-0.23	0.20	0.87	0.43	0.53		
下フランジ 30 度	G1B10	32	13.54	-0.64	13.65	0.24	5.75	0.76	
反射シート正面から撮影	撮影距離2m	G1B9	21	0.79	2.49	-6.35	1.42	1.07	3.24
		G1B10	28	1.01	1.97	-6.53	0.39	0.39	0.81
	撮影距離3m	G1B9	13	0.18	-0.07	-5.37	0.40	0.25	0.73
		G1B10	18	0.99	2.12	-7.38	0.51	0.61	1.34
	撮影距離5m	G1B9	11	0.15	-0.14	-5.88	0.59	0.39	0.59
		G1B10	11	0.15	-0.14	-5.88	0.59	0.39	0.59

反射シート 斜めから撮影	左側から 60 度	G1B9	16	0.14	-2.40	-5.57	0.76	0.71	1.16
		G1B10	12	0.15	-0.02	-6.01	0.45	0.50	0.56
	右側から 60 度	G1B9	16	0.24	2.04	-4.76	1.04	0.82	1.90
		G1B10	11	0.05	0.14	-5.66	0.36	0.34	0.46
	左側から 45 度	G1B10	12	0.25	0.00	-5.83	0.36	0.60	0.49
	右側から 45 度	G1B10	14	-0.14	-0.07	-6.04	1.03	1.29	1.56
	左右 60 度	G1B10	23	0.03	-0.01	-5.93	0.39	0.44	0.48
	左右 45 度	G1B10	26	0.04	0.13	-5.78	0.25	0.33	0.44

4-3. ボルト孔ターゲットを使用した PIXXIS2 計測値の評価

G1B9 は 2 回、G1B10 は 3 回計測を行い、その平均値で評価している。

ボルト孔ターゲットを使用した計測値とレーザトラッカ計測データの比較では、ウェブ面のデータばらつき (X 軸、Y 軸) はそれぞれ 0.3mm 程度であり、今回の計測方法の中では最もばらつきが少ない。しかし Z 軸 (ウェブ面法線方向) の誤差は 0.85mm とエッジ認識による計測方法よりばらつきが大きくなっている。これは、PIXXIS2 計測の原理により撮影面方向 (レンズ軸線方向) の誤差が撮影画像面方向 (画像縦横方向) より発生しやすいことが原因と思われる。

4-4. エッジ認識 PIXXIS2 計測値の撮影距離の違いによる評価

計測対象ウェブ面に対し、2 m、3 m、5 m の距離で撮影し計測精度を比較した。

2、3 m の距離の場合、ウェブ面のデータばらつき (X 軸、Y 軸) は 0.4~0.5mm 程度であり実用上問題ないと思われる。5 m の距離では 0.9~1.7mm 程度となるため添接板製作図のような 0.5mm 程度の精度が要求される計測には向かない。ボルト孔径は 24.5mm なので、この程度の径でエッジ認識による計測を行う場合は 3 m 以内の距離で撮影することが望ましい。

Z 軸方向のばらつき誤差はいずれも 0.6mm 程度となっているが、これは PIXXIS のエッジ認識の機能による影響と思われる。2-3 章で PIXXIS のエッジ認識の簡単な仕組みを説明したが、写真上で認識したエッジ中心点は、PIXXIS の 3D モデル上で作成した面に投影して三次元座標を求める。そのため Z 軸方向の計測精度は 3D モデル上に作成された面の計測精度に依存する。また複数のエッジ中心点は同一面上に投影されるため、投影面が平面の場合、計測データのばらつきは小さくなる。

4-5. エッジ認識 PIXXIS2 計測値の撮影角度の違いによる評価

計測対象ウェブ面に対し、60 度、45 度の角度で撮影し計測精度を比較した。

また撮影方向による精度の違いの有無を確認するため、Y 軸正方向に対し進行方向 60 度で撮影したものを左 60 度、Y 軸負方向に対し 60 度で撮影したものを右 60 度と表記している。60 度の場合、ウェブ面のデータばらつき (X 軸、Y 軸) は 0.5~1.0mm 程度とばらつきが多少大きくなる。これは撮影対象のボルト孔表面の傷等で認識した楕円の範囲がずれることによるものと思われる。ボルト孔位置がずれた画像を開き、一つずつ個別に修正していくことは可能であるが処理時間がかかる。

45 度の角度になるとウェブ面のデータばらつき (X 軸、Y 軸) は 0.5~1.5mm 程度と大きくなるためお勧めできない。

下フランジでエッジ認識を行ったデータでは Y 軸方向に 5.7mm のばらつきが生じる

結果となった。撮影方向はウェブ側面（Z 軸方向）ではなくブロック端面方向（Y 軸方向）から行っており、かつ撮影角度も 30 度程度とかなり鋭角な方向から撮影したためこのような結果になったと思われる。

4-6. 反射シート PIXXIS2 計測値の撮影距離の違いによる評価

計測対象ウェブ面に対し、2 m、3 m、5 m の距離で撮影し計測精度を比較した。

3、5 m の距離の場合、ウェブ面のデータばらつき（X 軸、Y 軸）は 0.3～0.6mm 程度であり実用上問題ないと思われる。2 m の距離では 1.1～1.4mm 程度と大きくなる。これは近づくとボルト孔奥のターゲット中心位置がカメラ画像周辺ボルト孔では鋭角となるためボルト表面の孔影となり正確な中心が求められないからと思われる。ボルト孔径は 24.5mm なので、この程度の径で反射シートによる計測を行う場合は 3～5 m の距離で撮影することが望ましい。

Z 軸方向のばらつき誤差は計測点がボルト孔表面と裏面の違いで大きくなっている。Z 軸方向の計測精度が要求される場合は向かない。

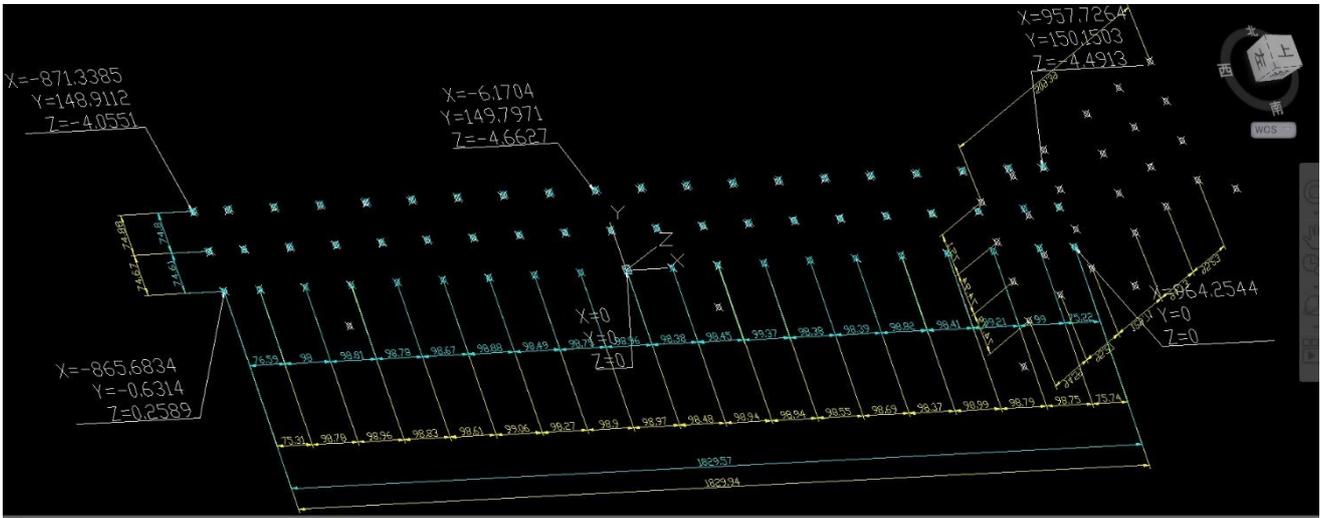
4-7. 反射シート PIXXIS2 計測値の撮影角度の違いによる評価

計測対象ウェブ面に対し、60 度、45 度の角度で撮影し計測精度を比較した。また撮影方向による精度の違いの有無を確認するため、Y 軸正方向に対し進行方向 60 度で撮影したものを左 60 度、Y 軸負方向に対し 60 度で撮影したものを右 60 度と表記している。左または右方向の一方方向から撮影した場合は、ウェブ面のデータばらつき（X 軸、Y 軸）は 0.4～1.3mm 程度とばらつきが大きい。これはボルト孔裏面の反射シートがボルト孔表面の影となり正確な中心が求められていないためと思われる。

反射シートを使用する場合、異なる角度から撮影された計測点を基に最適な計測点を求める PIXXIS 機能を使用できる。左右 60 度と 45 度から撮影した画像を一緒に PIXXIS 処理した場合、ウェブ面のデータばらつき（X 軸、Y 軸）は 0.3～0.4mm 程度と非常に小さくなった。この方式で Z 軸方向の誤差を無視できるのであれば問題なく使用できると思われる。

4-8. 実測添接板作成データ孔ピッチ比較

G1B10 ブロックの正面 3 m エッジ認識計測データを CAD にプロットして孔ピッチを比較した。作成した CAD 図を下図に示す。



水色はエッジ認識で求めたボルト孔位置のピッチを表示したもの。
 黄色はレーザトラッカで計測したボルト孔位置のピッチを表示したもの。
 設計値の孔ピッチは 75mm、100mm なので誤差は小さく実測添接板作成データとして使用可能と思われる。

5. 考察

現状の課題と対策を検討する。

5-1. 計測方法の違いによる長所短所

エッジ認識、反射シートの計測作業ごとの長所短所は次の通り。

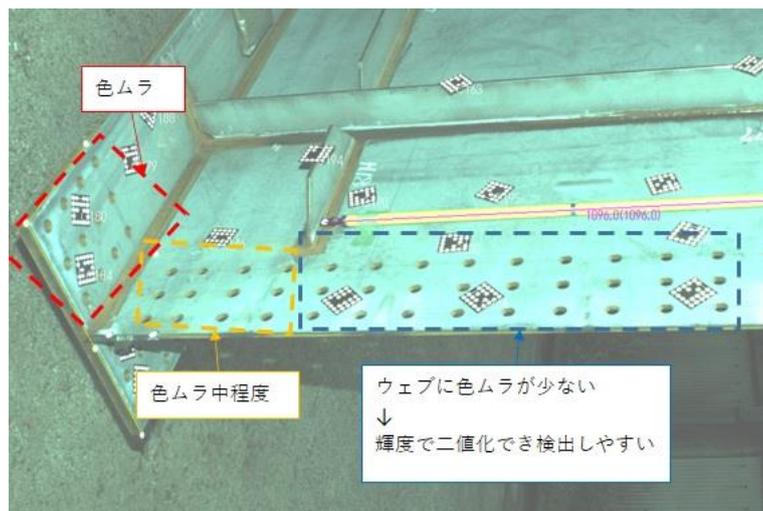
	ボルト孔ターゲット PIXXIS2 計測	エッジ認識 PIXXIS2 計測	反射シート PIXXIS2 計 測
計測精度	PIXXIS2 計測方法の中 では最もよい	撮影方法で大きく変わ る	適切な撮影方法であれ ばよい
操作性	ボルト孔が多くなるとター ゲット設置に手間がかかる	今回の比較計測では最も 簡単	反射シートの貼付けが めんどくさい
費用	ボルト孔ターゲットが多く なると購入費用が増加する	PIXXIS2 の標準機材 のみで運用可能	反射シートと貼付けマ グネットの費用が必要
適用場所	どこでも可能	どこでも可能	反射シートが貼付けに くい場所は不可
作業時間	今回の事例では 25 分程度	今回の事例では 20 分 程度	今回の事例では 30 分程 度

反射シートとエッジ認識を比較するとエッジ認識の方が計測精度は多少劣るが、作業時間と操作性を考えるとエッジ認識の方がよいと思われる。

エッジ認識は三次元空間上の平面に投影するため、計測対象物のボルト孔が曲面上にある場合は適用が難しい。

5-2. 画像の色むらの問題

画像上の濃淡を2値化して画像の輪郭線を抽出するため、画像の濃淡が薄い場合や、色むらが発生している部分ではエッジ抽出が難しい。下図の場合、下フランジの色むら部分はフランジの黒い汚れにエッジが反応して抽出がうまくできなかった。色むら中程度のウェブまでは問題なくボルト孔のエッジを抽出することができた。



色むらがある場合、ボルト孔単位で狭い範囲を指定してボルト孔を検出することは可能であるが、手間のかかる作業となるので、今後この色むら問題に対する対応方法を検討する。

5-3. 斜め角度から撮影時のエッジ認識計測精度の向上

現場計測でエッジ認識機能を使用する場合、現場条件により斜め角度からの撮影となるケースが多い。反射シート計測のように反対側角度から撮影してエッジ抽出したデータで相殺することで計測精度を向上させる方法を検討する。