

画像処理による杭施工精度の管理

Navigation System for Pile Construction by Image Processing

森田修二* 塚本耕治**

要旨

先掘り式の基礎杭施工の管理は杭打ち機の位置や鉛直精度の確保によって行われている。本報では、画像データを利用して基礎杭の施工精度の向上を図る手法を提案する。従来の同種の技術は、杭打ち機の画像を提示するのみで鉛直精度の確保に十分に活用されていない。

本システムでは、画像データから杭打ち機の傾きや駆動部位等の上下動をデジタル化する。リアルタイムに杭打ち機の傾斜計測と削孔深度の計測を行い、地中の孔曲がりを推定して修正ガイドラインを提示する技術である。オペレータの手元で画像表示するとともにインターネットを介して現場事務所などの拠点でも確認できる。今回は、アースオーガとアースドリルによる基礎杭施工で実証試験を行い実施工に有効な精度を確認したので報告する。

キーワード：杭の孔曲がり、画像処理、リアルタイム、傾斜計測、深度計測

1. まえがき

基礎杭の施工において、先掘り式の杭施工の管理は杭打ち機の位置や鉛直精度の確保によって行われている。施工完了後は、杭頭の出来形検査や孔壁測定器によって孔曲がりを測定することも行われる。また、既往の技術には、施工中にオーガ等の掘削機を撮影した CCD カメラなどの画像をオペレータに提示して、鉛直精度を維持する技術もあるが、十分に施工精度の管理に活用することは難しい。施工中では、杭打ち機のオーガやロッド軸は前後左右にぶれながら下降するため、画面内にガイドライン（鉛直度を示す直線）を表示するだけでは、オペレータが参考にするのは非常に難しい。

本研究では、リアルタイムに画像データの処理を行うことで、施工管理に活用する方法を提案する。杭打ち機の傾斜角や駆動部等の上下動の画像処理を行い、傾斜角の数値表示や地中の孔曲がりを推定して修正すべき傾斜角を提示する技術である。これは、傾斜計測と深度計測を連続的に行って地中の孔曲がりを推定することで可能となる技術である。ただし、地中に障害物などがなく大きな孔曲がないことが適用範囲である。

また、削孔中にもデジタル値で杭打ち機の傾斜角を表示するので、オーガやロッド軸のぶれに影響されず安定した誘導が行える。なお、データ処理の過程で座標変換などを行い、オペレータの目線で傾斜角を提示できる。今回は、アースオーガとアースドリルによる基礎杭施工で実証試験を行ったので報告する。

2. 画像処理システムの概要

2.1 全体構成

図-1にシステムの全体構成を示す。杭打ち機を2方向からビデオカメラで撮影し、その画像データを連続的にメイン PC（杭打ち機内の PC）に送信する。メイン PC ではリアルタイムで画像処理を行い、杭のオーガ軸などの傾斜角と上下の移動量を算出する。これらのデータを基に算出される孔曲がりや深度計測などの情報を画面表示する。また、オペレータの手元で画面表示するとともにインターネット経由で現場事務所などの拠点でも閲覧できる。なお、サブ PC を配置して補助員が画像処理や設定作業を行い、メイン PC で画面表示することもできる。



図-1 システムの全体構成

*西日本支社土木技術部 **技術研究所

2.2 画面表示の概要

図-2の画面表示では、杭打ち機（アースオーガの例）のオーガ（ロッド）軸を2方向から撮影した画像とその傾斜角や掘削深度、推定される地中の孔曲がりとその修正傾斜角を表示する。また、オペレータが容易に操作できるように、画面をワンタッチすることで画像処理の開始や一時停止、終了ができる。

オーガ軸の傾斜角は、オペレータの視線に変換して、左右と前後の傾斜角を表示する。オーガ軸は前後左右にぶれながら下降するので、オペレータが参考にしやすいようにデータ処理を行っている。また、ロッド継ぎやトラブル時の中断などでターゲットが一定範囲以上に移動した場合は、自動認識して通常施工のデータ収集から除外する。なお、想定外の事象については、オペレータにより一時中断などの対応が取れる。

2.3 画像処理による傾斜計測と深度計測

画像処理によって④傾斜計測と⑤深度計測を行う。図-3には、これらの処理のフローを示した。2台のビデオカメラ（図-1参照）のメインカメラでは、傾斜計測と深度計測を行い、サブカメラでは傾斜計測のみを行う。画像処理は6フレーム/秒の頻度で傾斜計測とテンプレート（自動設定するオーガ軸上の矩形面）の移動探索を行うが、テンプレートマッチング（移動前と移動後の矩形面の照合）が成立しない場合は、傾斜角の履歴を保存しながら傾斜計測を繰り返す。テンプレートマッチングが成立した時点で移動量（深度）算定と偏芯量算定を行い地中の孔曲がりを推定する。孔曲がりは鉛直移動量に傾斜角を乗じた偏芯量を積分して算定¹⁾している。

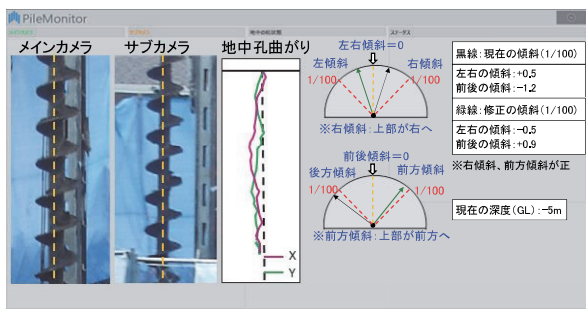


図-2 画面表示の例

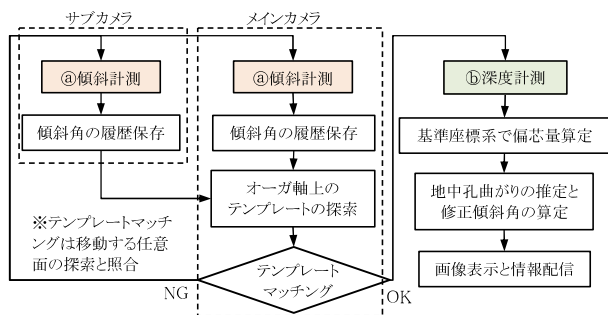


図-3 画像データの処理フロー

図-4には、画像処理によってオーガ軸の輪郭を捉えて傾斜角を算出する手順を示す。ターゲット範囲（ROI）の中で、Sobel フィルター²⁾を利用して傾斜計測を行う手順である。①エッジ抽出では、画素ごとに水平断面の輝度の変化を捉える。A-A断面、B-B断面、C-C断面における輝度変化をグラフ化した例を図-5に示す。オーガ軸の輪郭以外の輝度変化も含まれるので、単一の断面だけではオーガ軸の輪郭を正確に捉えることができない。ターゲット範囲の上端から下端まで画素ごとに水平断面の輝度変化を捉える。次に、②線分探索（図-4）に示す黄色線を回転・移動させながら水平断面ごとに黄色線が通過する輝度変化量を積分（図-5の破線）して、最も輝度変化量大きい黄色線をオーガの輪郭線として決定したものが、③線分照合（図-4）に示す赤線である。この赤線をオーガ軸の輪郭と認識して傾斜角度を算出する。

図-6には、深度計測の概要を示す。時々刻々変化するオーガ軸の画面の中で同一の部分画像を検出して、部分画像の移動量から深度計測を行う。この部分画像とは、①初期テンプレートに示すように、オーガ軸上で一定幅のマージンを取って、オーガ表面に自動で設定する画像である。この部分画像の情報を画素単位で記憶する。

次に、移動したオーガの画像上で初期テンプレートに合致する部分画像を探索する。この探索は連続的に行い、

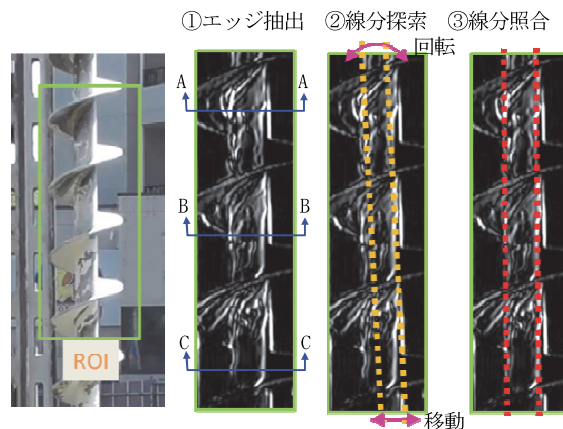


図-4 Sobel フィルターによる傾斜計測の手順

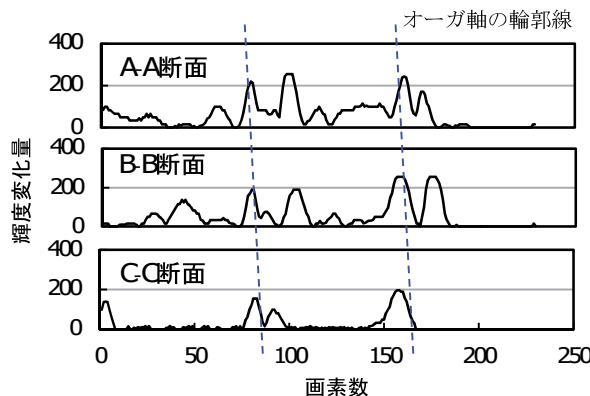


図-5 オーガ軸の水平断面の輝度変化

対象画像を画素ごとに照合（図-7参照）し、合致率が設定条件（例えば95%以上）を満たした場合に、部分画像が初期テンプレートに合致したと判定する。部分画像が合致した時点で、初期テンプレートの位置からの鉛直方向の移動量（ Δh_1 や Δh_2 ）を求めて、これらを積分することで深度計測を行う。なお、合致すべき部分画像がカメラから見て裏側にある場合は合致しないので、ほぼ1回転ごとに画像を検出する。また、削孔が進行すると、移動後の部分画像がターゲット範囲から逸脱するので、初期テンプレートを自動的に再設定し、同じ処理を繰り返す。なお、画像の照合が続けて成立しない場合も自動的に再設定する。

2.4 座標変換

現地の状況に応じてカメラが任意の場所に設置されるので、カメラ画像はオペレータの目線で見た画像とは異なる。したがって、座標変換を行ってオペレータの目線

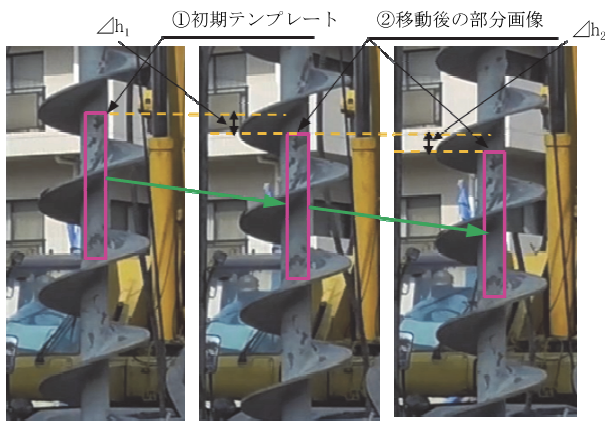


図-6 深度計測におけるテンプレートの設定と探索

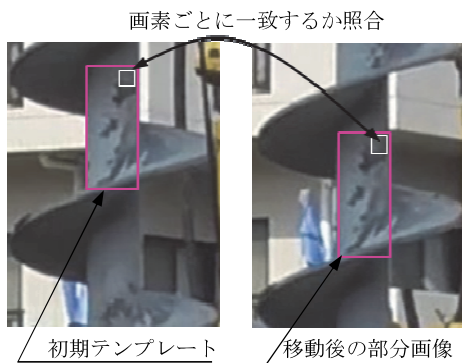


図-7 オーガ軸上の部分画像の照合

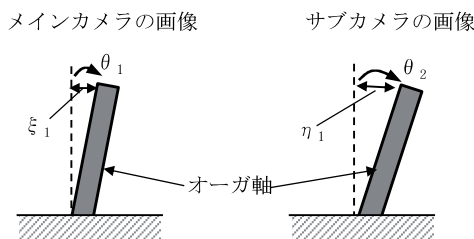


図-8 オーガ軸の傾斜角から偏芯量の算出

と一致する傾斜情報を提示する必要がある。基準座標系における杭とカメラ、オペレータの座標からオペレータ座標系へ座標変換を行った情報を提示する。この座標変換の処理を行うことで、正しくオペレータを誘導することができる。座標変換の手順を以下に示す。なお、基準座標系（X-Y）は杭伏図などにより設定する。

a. カメラ画像から点Aの偏芯座標を算出

図-8に示すように、オーガ軸の傾斜角から求められる単位長さあたりの偏芯座標（ ξ_1, η_1 ）を算出する。ここで、 $\xi_1 = \tan(\theta_1)$ 、 $\eta_1 = \tan(\theta_2)$ 、 θ はオーガ軸の傾斜角（ θ の添え字はカメラ番号）である。カメラから向って右傾斜（上部が右へ）が正とする。図-9は、杭中心を原点とし、メインカメラとサブカメラが示すカメラ座標系におけるオーガ軸の偏芯座標の点Aを表している。

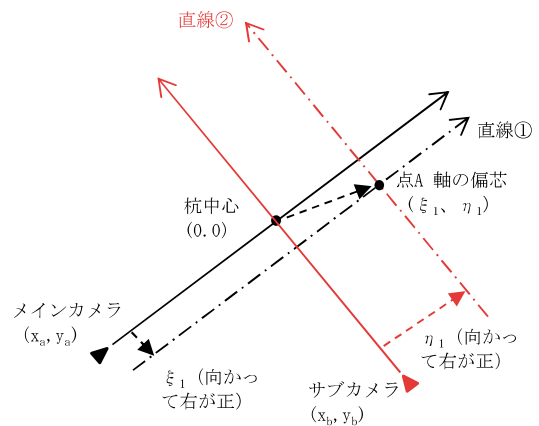


図-9 杭を中心とするカメラ座標系（平面）

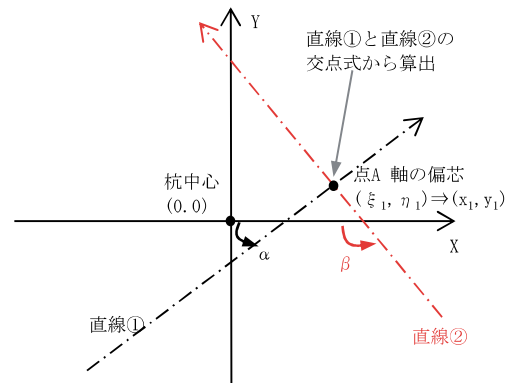


図-10 基準座標系における杭の偏芯（平面）

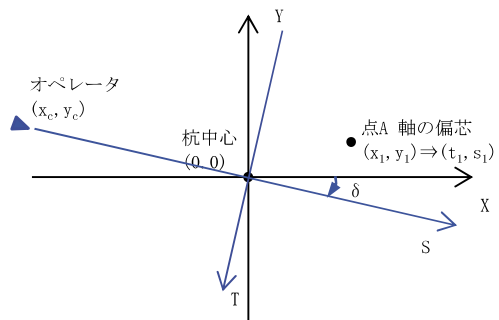


図-11 オペレータ座標系への変換（平面）

b. 基準座標系の点Aの偏芯座標を算出

図-10には、基準座標における杭の偏芯座標を示す。カメラ座標系は必ずしも直交座標ではないので、一般の座標変換式は適用できない。そのため、カメラ座標系と基準座標系のなす角 α と β を用いて、基準座標系における直線①と②の式(点Aを通る直線)を導出する。直線①と②の交点を式計算することで、基準座標系における偏芯座標 (x_1, y_1) が求められる。

c. オペレータ座標系の点Aの偏芯座標を算出

図-11に示すように、一般の座標変換式により基準座標系における点Aの座標をオペレータ座標系(T-S)における座標 (t_1, s_1) に変換する。 (δ) は基準座標系とオペレータ座標系のなす角度

$$t_1 = x_1 \times \sin(\delta) - y_1 \times \cos(\delta) \quad (1)$$

$$s_1 = x_1 \times \cos(\delta) + y_1 \times \sin(\delta) \quad (2)$$

d. オペレータ目線の傾斜角の算出

オペレータ座標系の点Aの偏芯座標から左右傾斜 (θ_l) と前後傾斜 (θ_s) を算出

$$\theta_l = a \tan(t_1), \quad \theta_s = a \tan(s_1)$$

3. 杭偏芯量の推定と修正傾斜角の設定

杭の地中の孔曲りは、杭打ち機の鉛直精度や地層分布、地盤の硬さによって生じる。地層や地盤の影響は杭打ち機の軸の傾斜に反映すると考えると、軸の傾斜角によって孔曲りの傾向を把握できる。杭打ち機の軸の(傾斜角)×(スパン長)が杭の偏芯量を表すと仮定し、この偏芯量を積算して杭先端位置や孔曲りを推定¹⁾した。スパン長は傾斜角を区分する間隔であり、短いほど滑らかな推定曲線となる。図-12に、この仮定に基づく杭の孔曲りを示す。式(3)は地表から n 番目の杭先端の推定位置を表している。地中の障害物等で大きな孔曲りが生じる場合は本推定式の適用外とする。

$$Dx_n = \sum_{i=1}^n dl \times Gx_i \quad (3) \quad \text{[アースドリル]} \quad \text{[アースオーガ]}$$

$$SDx_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Dx_i + Dx_{i-1}) \quad (4)$$

$$Gx_{n+1}' = -\kappa \times \frac{SDx_n}{n \times dl} \quad (5)$$

$$SDx_n < SDx_{n-1} \Rightarrow \kappa = 1$$

$$SDx_n \geq SDx_{n-1} \Rightarrow \kappa = \kappa_a$$

Gx_i : 軸の傾斜角、 Dx_i : 偏芯量

SDx_n : 平均偏芯量

dl : スパン長、 n : 分割数

κ : 修正係数

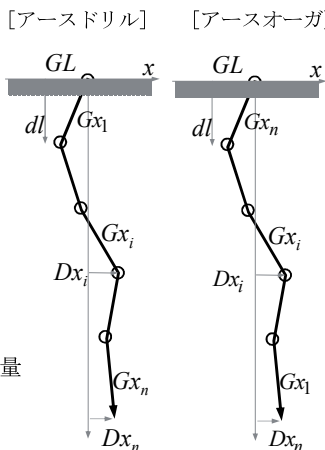


図-12 杭の孔曲がり

図-13に示すように、アースドリルは軸先端でのみ削孔するので、地表から削孔順に孔曲がりが決まる。一方、アースオーガはオーガ全体で削孔するので、地上での軸の傾斜角が地中でも維持されるとして、杭先端から施工順に孔曲がりが決まるものと仮定した。

Gx_i は画像から求められた地上の軸の傾斜角、 dl はスパン長、 n は削孔した杭長を dl で分割したスパン数、 Dx_i は n 番目の杭先端の中心線からの偏芯量、 SDx_n は n 番目までの杭の平均偏芯量である。スパン長 dl は画像処理におけるテンプレートマッチングの間隔とその間の深度計測によって決定される削孔長とする。

図-14には孔曲がりの修正フローを示す。式(5)は修正傾斜角を示しており、式(4)の平均偏芯量の逆方向に杭打ち機の軸を傾斜させる。孔曲がりの修正は杭打設の負担を軽減するために削孔済みの地中の杭長と同じ杭長の中で修正することを基本として、軸の修正傾斜角 Gx_{n+1}' を決定する。平均偏芯量 SDx_n が前ステップの SDx_{n-1} より増加している場合は、修正係数 κ を割増した修正係数 κ_a を乗じて修正傾斜角を決定する。ただし、限界角(例えば1/100)以内で修正を行う。

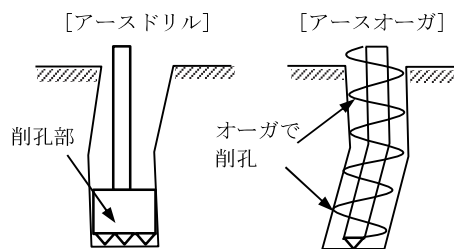


図-13 工法ごとの杭の孔曲がりの想定

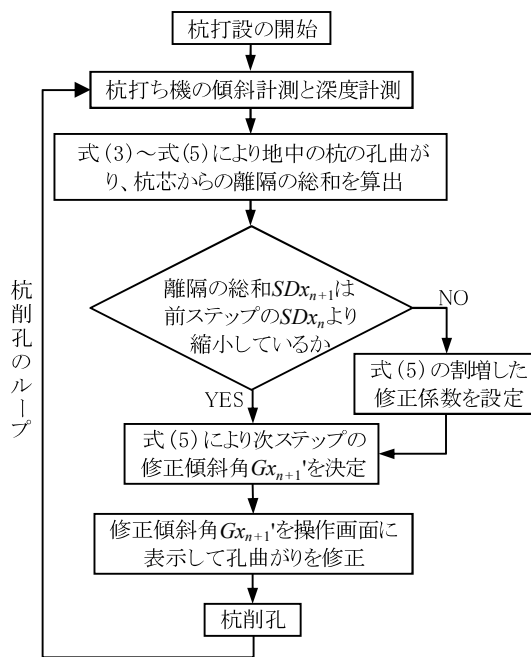


図-14 杭の孔曲がりの修正フロー

4. 現場実証試験

4.1 画像データによる検証

杭偏芯量の推定について、過去に実施された基礎杭工事の画像データを利用して推定精度の検証を試みた。本工事は鹿児島県の甫木水門改築工事であり、平成 27 年 3 月に施工完了している。基礎杭は径 700mm (p41~p136 の 96 本)、径 450mm (44 本)、径 350mm (40 本) をアースオーガ工法により施工されている。また、トータルステーションに取り付けた CCD カメラによる鉛直精度の管理を行っている。オペレータに杭打ち機の画像を提示している。この画像を利用して主要な基礎杭 (径 700mm) について、推定式による評価を試みた。保存画像は、データの間隔 (1 分間隔) が粗いので、大まかな傾向を検討した¹⁾。

図-15 には、直交 2 方向の変位を合成した推定の偏芯量を示す。偏芯量に幾分のばらつきは見られるが、概ね一定の勾配で推移し、深度 40m で杭先端の偏芯量は概ね 20cm 以下である。平均傾斜角は 1/200 以下である。

図-16 には画像処理による杭偏芯量の推定値から求めた傾斜角と出来形検査による傾斜角を比較した。本工事では、先掘した掘削孔に既成杭を挿入しており、出来形検査では杭頭の傾斜角と杭芯の偏芯量を計測している。杭頭の傾斜角は比較的浅層部の孔曲がりを反映していると考えられるので、推定値は GL-10m までの傾斜角の平均値と比較した。推定値と出来形検査の傾斜角の相関係数は 0.60 であり、推定値によって杭の孔曲がりの傾向は評価できている。

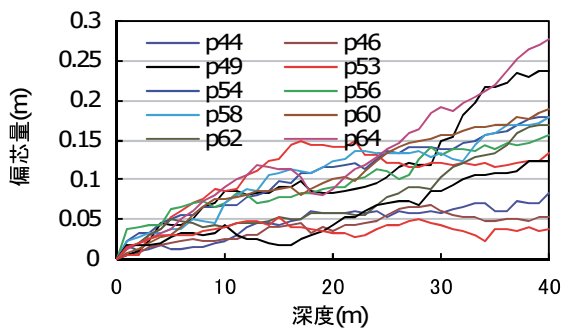


図-15 杭の深度と偏芯量

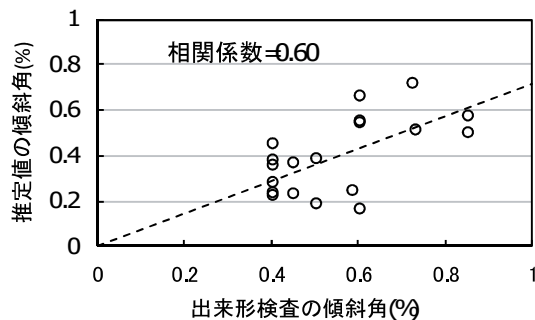


図-16 推定値と出来形検査の相関

4.2 適用事例 1 (アースドリル工法)

愛媛県伊予市本庁舎改築第 2 期工事におけるアースドリル工法による基礎杭施工で本システムの実証試験を平成 28 年 3 月に実施した。削孔径はφ1.5m、削孔長は約 20m である。写真-1 に杭打ち機の撮影状況を示す。1 期工事で完了した新庁舎の 2 階屋上から撮影している。図-17 には、杭とカメラの配置を示し、カメラ位置には対象の杭番号とカメラ番号を付記する。表-1 には、撮影条件の一覧を示す。座標値は東西南北の基準座標である。仰角は杭 no.23 がやや大きい。視準角は杭に対するカメラ①と②のなす角度であり、90 度が最も望ましいが、杭 no.13 が最も小さく比較的條件が厳しい。計測間隔は画像処理でプレートマッチングが成立した平均間隔で概ね 5cm 程度で推移している。

写真-2 には杭打ち機のオペレータ室におけるタブレットの設置状況を示す。事前にメイン PC にカメラと杭、オペレータの座標を入力して補正や変換を行い、タブレットにはオペレータ目線のデータを表示している。

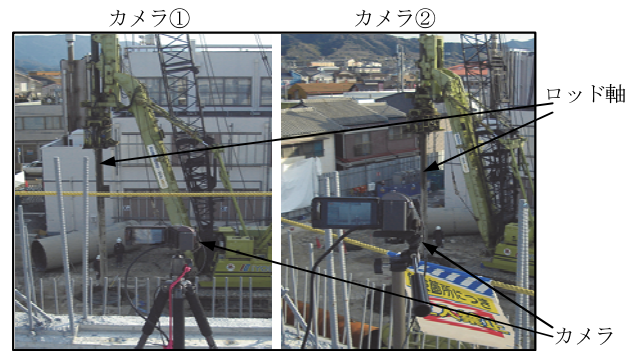


写真-1 杭打ち機の撮影状況 (杭 no.13)

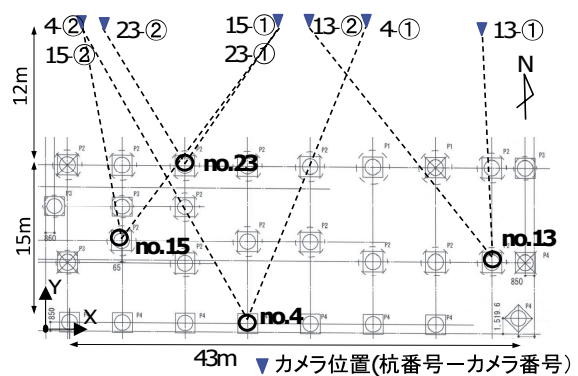


図-17 杭とカメラの配置 (事例 1)

表-1 撮影条件の一覧 (事例 1)

杭番号	杭座標		カメラ①座標		カメラ②座標		仰角	視準角	計測間隔
	X	Y	X	Y	X	Y			
4	19.3	0.9	30.5	28.7	3.6	28.3	18	52	4.8
13	42.7	6.9	41.7	28.2	25.3	28.7	24	36	4.5
15	7.3	8.7	22.3	28.7	3.6	28.3	26	48	5.2
23	13.3	15.9	21.8	28.2	5.5	28.7	32	66	5.5

※単位は、座標は m、角度は degree、計測間隔は cm

写真-3と図-18には、杭削孔後に行った孔壁測定
の状況（KODEN 社製の DM-602）と結果の例を示す。
計測装置を東西南北に一致するように設置して、各方向
の孔壁までの距離を超音波で測定している。

図-19には、孔壁測定結果と本システムによる推定
偏芯量の比較を示す。測定結果は、深度ごとに測定方向
の両端の孔壁位置の中心を杭軸の中心とした。拡底部分
（GL-17m～21m）は除外して、GL-15m までの比較を
示している。X方向が東西方向、Y方向が南北方向であ
り、推定偏芯量は仰角補正を行ってXY方向に変換した
結果を示している。部分的には推定値と計測値に差違が
見られるが、偏芯方向の傾向は概ね一致している。



写真-2 オペレータ室の機器設置状況

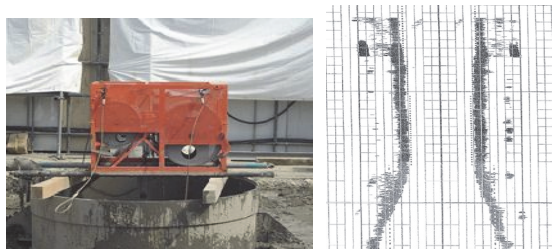


写真-3 孔壁測定状況

図-18 孔壁測定データ

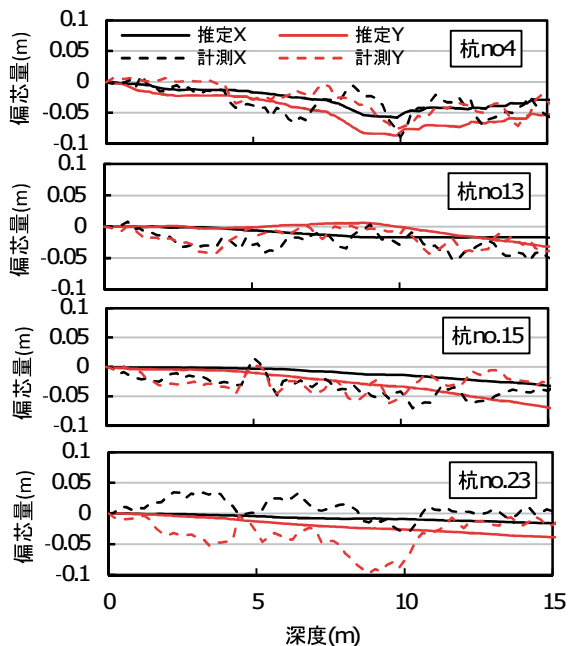


図-19 杭の偏芯量（事例1）

深度 GL-15m までの偏芯量は 0.1m 以下、傾斜角は
1/100 以下に抑えられている。

4.3 適用事例2（アースドリル工法）

アースドリル工法について、本システムの実証試験を
平成27年7月に実施³⁾した。アースドリルの削孔径は
φ1.3m、削孔長は約30mである。写真-4に撮影状況、
図-20に杭とカメラの配置を示す。

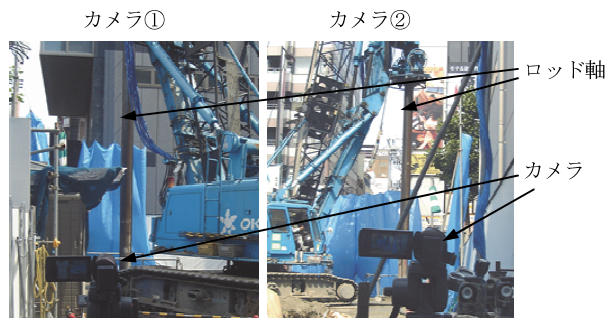


写真-4 アースドリルの撮影状況（杭no.3）

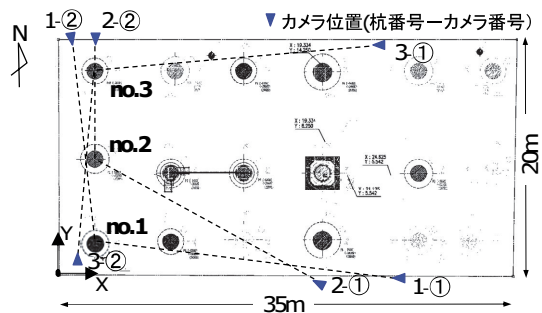


図-20 杭とカメラの配置（事例2）

表-2 撮影条件の一覧（事例2）

杭番 号	杭座標		カメラ①座標		カメラ②座標		視準角	計測 間隔
	X	Y	X	Y	X	Y		
1	3.3	3.1	27.5	0.0	1.6	18.7	103	4.7
2	3.3	9.7	21.0	0.0	3.4	18.7	118	5.7
3	3.3	16.8	25.5	18.7	2.0	2.0	99	7.6

※単位は、座標はm、角度はdegree、計測間隔はcm

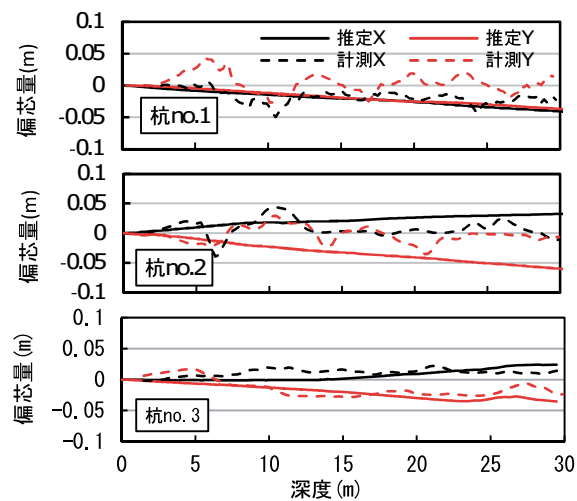


図-21 杭の偏芯量（事例2）

表-2に撮影条件の一覧を示す。敷地は20m×35mと街中の狭隘な状況であったが、問題なく本システムを適用できた。図-21には、孔壁測定結果と推定偏芯量の比較を示す。偏芯量は1/100を大きく下回り、方向性はほぼ一致している。特に杭no.3では、偏芯量と偏芯方向ともによく一致している。

4.4 適用事例3 (アースオーガ工法)

アースオーガ工法について、本システムの実証試験を平成27年8月に実施³⁾した。アースオーガの削孔径はφ0.6m、削孔長は約25mである。アースオーガ工法ではオーガを地盤に回転させて排土し、オーガを継ぎながら支持層まで削孔する。写真-5に撮影状況、表-3に撮影条件の一覧、図-22に杭とカメラの配置を示す。

図-23には、推定偏芯量と計測結果の比較を示す。杭削孔後に設置した既成杭の杭頭の傾斜角をデジタル傾斜計で計測(写真-6参照)した。既成杭の構成(上杭(5m)、中杭、下杭)を考慮して、傾斜角はGL-5mまでの推定値の結果と比較したが、傾向は一致している。図-24には、計測値と推定値の傾斜角の相関を示す。XYの両方向の結果を合わせて示した。ややばらつきはあるが、相関係数としては0.77という結果であった。

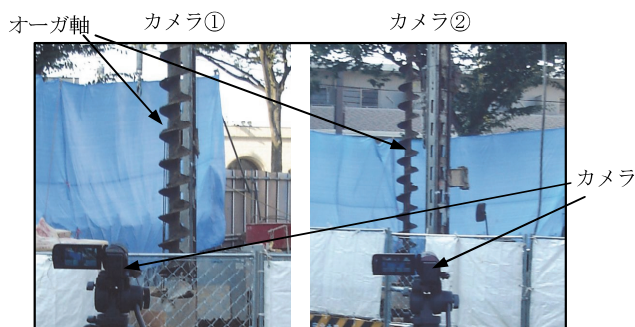


写真-5 アースオーガの撮影状況 (杭 no. 11)

表-3 撮影条件の一覧 (事例3)

杭番号	杭座標		カメラ①座標		カメラ②座標		視準角	計測間隔
	X	Y	X	Y	X	Y		
7	8.4	12.1	6.0	-8.5	23.0	12.5	98	5.3
11	0.0	0.0	-2.0	-7.0	18.0	-9.0	79	12.3
12	0.0	6.6	-2.0	-7.0	13.8	-9.5	48	8.6

※単位は、座標はm、角度はdegree、計測間隔はcm

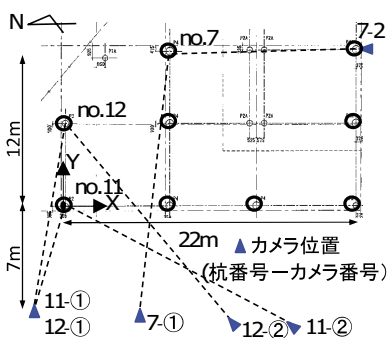


図-22 杭とカメラの配置 (事例3)

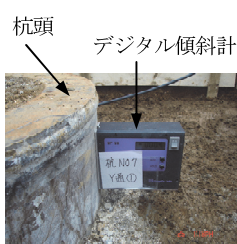


写真-6 傾斜計測

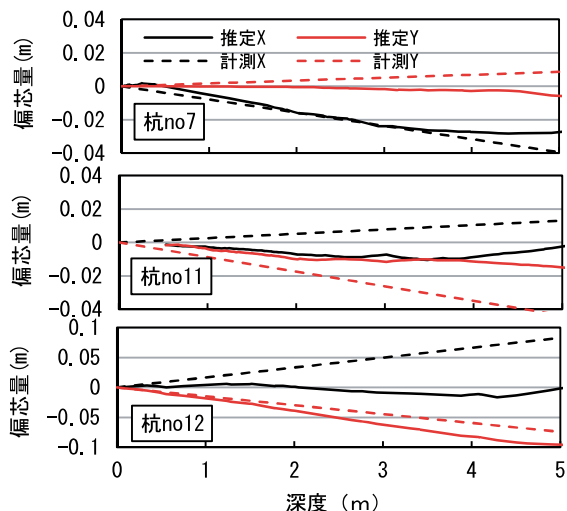


図-23 杭の偏芯量 (事例3)

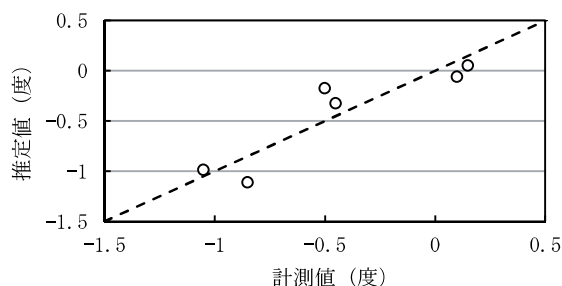


図-24 推定値と計測値の傾斜角の相関

6. あとがき

本研究では、杭打ち機の画像をリアルタイムで処理して傾斜計測と深度計測を行い、施工精度の管理に有効な情報をオペレータや現場事務所に配信するシステムを開発した。現場実証試験をアースドリル工法とアースオーガ工法で実施したが、類似の工法にも適用可能である。なお、今回の実証試験は、本システムの適用性の検証を目的とし、施工精度の管理に活用するには至っていない。

課題には、撮影環境によって画像不鮮明になる場合の解析精度の確保や施工状況に柔軟に対応できるシステムの構築が挙げられる。今後は適用事例を積み重ねて改良していきたい。最後に、愛媛県伊予市役所など関係者の方々には実証試験の場を提供いただいたことに感謝する。

【参考文献】

- 1) 森田修二、井 君人、宮本達哉、辻 栄治、「画像データによる杭施工精度の検証と施工管理への活用」、土木学会第 69 回年次学術講演会、第 6 部門、pp.595-596、2014.9
- 2) 田村秀行、「コンピュータ画像処理」、オーム社、2002.12
- 3) 森田修二、塚本耕治、坂元一雄、庄司正弘、「画像処理による杭施工精度の管理」、土木学会第 71 回年次学術講演会、第 6 部門 (投稿中)