

レーザ・レンジ・ファインダを用いた杭芯の位置計測システムの開発

井上文宏 土井 暁

Development of Position Measurement System for Construction Pile Using Laser Range Finder

Fumihiro Inoue Satoru Doi

Abstract

This paper describes the development of highly accurate and low-cost position measurement system with a laser range finder (LRF) and a cylindrical reference bar. The LRF is a laser apparatus that measures the distance of a target object; therefore, a measurement system analyzing a true target position using considerable data about the target arc was devised. In the proposed system, data was obtained using the LRF assuming a bar with arc-shaped contours, and the central position was studied using the least squares method and maximum likelihood estimation. As a result, the central position was located with an accuracy exceeding that of an LRF alone. Hence, a real-time position display system was developed. When this system is applied to the position measurement of a construction pile, it affords advantages such as ease of use, cost-efficiency, and working-hour efficiency because it is operated by only one worker.

概要

本研究ではレーザ・レンジ・ファインダ (LRF) を用いて円柱状の基準バーを計測することにより、精度が高くかつ低コストを可能にする位置計測システムを開発した。LRF から得られる距離データは対象物の輪郭の一部であるため、複数の輪郭データを用いて物体の位置を解析する手法を考案した。本システムではLRFのデータが円柱基準バーの外輪郭であると仮定し、円柱の中心位置を最小二乗法および最尤推定法を用いて解析・推定した。この結果 LRF 自体の精度を越える高い精度で円柱の中心位置を推定でき、ほぼリアルタイムで位置表示が可能となった。本システムを用いて建築杭芯の位置計測を実施した結果、従来の高精度計測と同程度の位置計測が安価なシステムで実現され、計測は1人で実施できるため、作業効率の向上、作業の省力化が可能となった。

1. はじめに

近年、測量システムの高度化に伴い、建築基礎工事における敷地測量や杭芯の墨出し作業にはトランシットやトータルステーションなどの測量機器が使用され、作業の効率化が図られている。また広域な敷地や周囲に遮へい物のない空間ではGPSによる測量も精度の向上と共に適用されつつある。しかしながら、このような高度な測量機器は精度が高い反面、1) 購入価格やレンタル費が高額である、2) 複数の位置計測を同時にできない、3) 周囲環境や測量範囲が限定される、4) リアルタイムな位置計測ができるものが少ない、5) 計測に複数の作業員が必要など、多くの改善課題も残されている。

そこで、本研究では建築現場内にレーザ・レンジ・ファインダ (以下、LRFと示す) を配置し、精度が高くかつ低コストを可能にする位置計測システムを開発することを目的とする。LRFはレーザ光線を照射し、その反射光を読取ることでTOF (Time of Flight)の原理から物体表面までの距離を測定できる安価な測域センサであり、移動物体の環境センサとして幅広い利用が見込まれている。また、LRFを配置することで空間内の複数の移動物体の位置及びトラッキングをリアルタイムで計測できるため、建築ばかりでなく土木現場などの広域な測量にも応用す

ることができる。

提案する位置計測システムは、建築現場内を作業員が基準バーを地面に対して垂直に持ちながら移動し、作業員よりも高所に設置したLRFを用いることで基準バーの位置をリアルタイムに計測するシステムである。一般にLRFから得られるデータは対象物の輪郭の一部分に過ぎないため、回転に不変形状であるやや大きめの円柱平板を基準バーに取付け、その円柱平板の位置計測を行なった。これにより基準バーの向きに関わらず、LRFから得られた輪郭データは円弧となり、解析的に円弧の中心位置を推定することで、LRF自体の分解精度に比べ、より精度の高い位置計測が可能となる。ただし、上記で示した位置計測は、高精度なトータルステーションの精度にはやや劣るため、ここではLRFの分解精度を補完するハードの導入やソフトの改善を行い、より精度が高い計測システムの実現を目指した。本計測システムの運用例として、建築杭芯の位置計測への適用を行い、計測精度の検証や作業状況を確認した。

本稿では、開発した位置計測システムの構成、計測原理や解析アルゴリズムの検証、計測結果に対する考察を踏まえた本システムの有効性を示す。また実際の建築現場における杭芯の位置計測状況や作業性能・効果についても報告する。

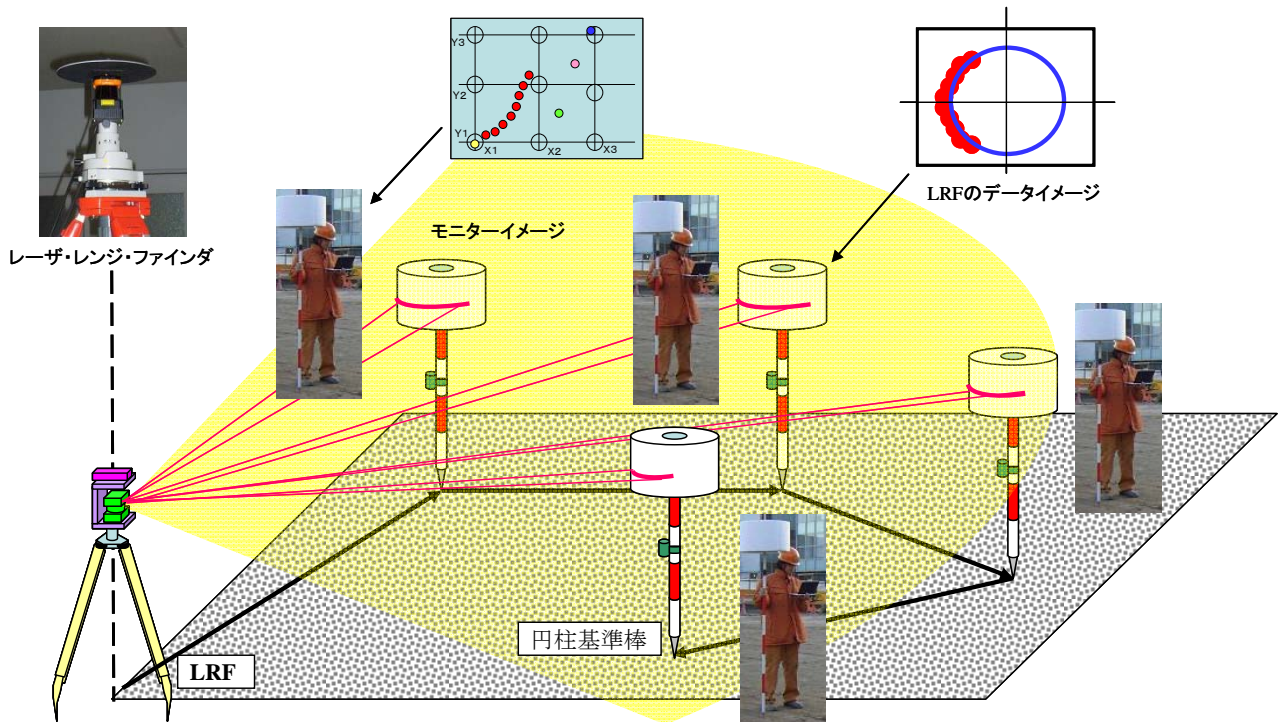


Fig. 1 レーザ・レンジ・ファインダを用いた位置計測システムの概要
Outline of Proposed Position Measurement System Using LRF

2. LRFを用いた位置計測システム

2.1 LRFの原理と位置推定

本計測システムではFig.1に示すように、自己位置が確定できる測量用三脚の上部に設置されたLRFと作業員が手に持ちながら移動し、計測ポイントを指示する基準バーを使用する。使用したLRFの仕様 (Table 1)はレーザ波長870[nm]、測定可能距離30[m]であり、後述する建設分野への適用を目的とするため中距離計測用 (5~30 [m])を採用した。またLRFは走査時間25 [ms]で高速スキャンを行なうが、レーザ照射分解能は0.25 [deg]であるため、計測距離が長くなると小さな対象物は捉えられなくなる。そこで基準バーの上部に円柱平版 (半径250 [mm])を設置し、計測範囲内における対象物の認識を可能にした。

本計測では、円柱の外周面でLRFからのレーザを反射させTOFの原理から各円柱縁までの距離を測定し、この測定結果を基に円柱の中心位置を解析的に推定した。

2.2 位置計測のプロセス

Fig. 2にLRFのレーザ反射によって得られた各物体の位置データの例を示す。LRFの周囲には様々な物体が混在しており、各物体から得られる生データだけでは特定の基準バーの位置を確定することはかなり難しい。そこで、Fig.3に示すように、得られたデータに対して4段階の位置推定プロセス (背景差分, クラスタリング, 中心位置

Table 1 レーザ・レンジ・ファインダの仕様
Specification of Laser Range Finder

項目	適用
機種タイプ	UTM-30LX
光源	半導体レーザ λ=905nm
距離範囲	0.1~30m, 270 deg
計測精度	0.1~10m, ±30 mm
	10~10m, ±50 mm

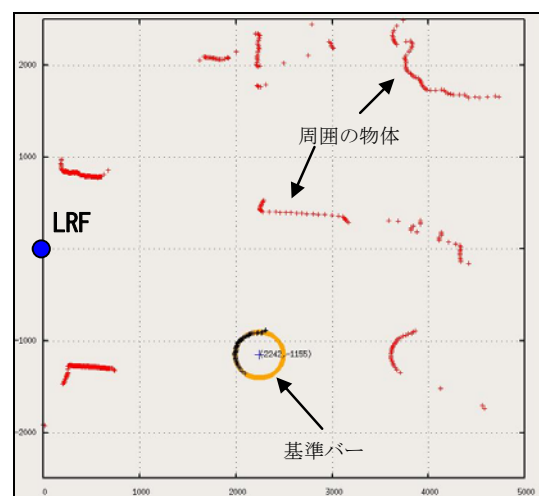


Fig. 2 LRFの周囲にける各物体の位置データの例
Example of Position Measuring Data of Target Objects around LRF

推定、カルマンフィルタによる誤差除去)を順次経ることにより、基準バーの中心位置を高い精度で推定する手法を考案した⁽¹⁾。

まず、LRFのスキアンデータから移動物体領域(前景領域)と静止物体領域(背景領域)を分離し、次いで背景差分法により前景領域に属すると判断された点に対して、最短距離法(ユークリッド距離)に基づいたクラスタリングを行う。これにより、各クラスタの中心位置(x_{cl}, y_{cl})を得ることができる。しかしながらLRFは物体の一方の側面しかスキャンできないため、クラスタ中心と物体中心は必ずしも一致しない。そこで、Fig. 4に示すようにクラスタ中心から一定距離: d だけ進んだ点をそのクラスタが表す物体の中心位置(x_{obj}, y_{obj})と仮定した(以後、一定距離法と呼ぶ)⁽¹⁾。

$$\begin{aligned} x_{obj} &= x_{cl} + d \cos \beta \\ y_{obj} &= y_{cl} + d \sin \beta \end{aligned} \quad (1)$$

ここではLRFの原点とクラスタ中心を結ぶ直線がLRFのX軸の正方向となす角、 d は物体の半径に応じたパラメータである。得られた中心位置に対してカルマンフィルタを通すことで誤差を低減させた。

式(1)で表される一定距離法はどのような形状の物体に対しても大まかな中心位置を推定できるという点で利便性はあるが、物体の形状を考慮し、クラスタ中心だけでなく全てのスキアンデータを利用した方がより正確な位置推定が期待できると考えられる。そこで、Fig. 4に示すように、基準バーの円弧状の輪郭に円の方程式を当てはめ、中心位置をより正確に推定する手法を検討した⁽²⁾。

2.3 位置推定手法

一般に二次元平面上における円の方程式は次式で表される。

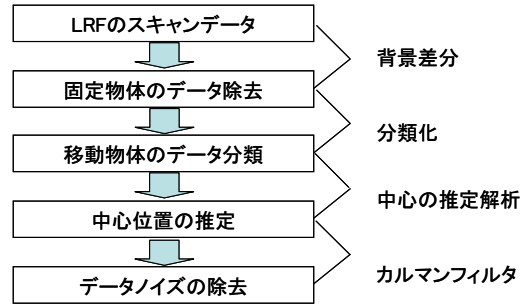
$$x^2 + y^2 - 2ax - 2by + a^2 + b^2 - r^2 = 0 \quad (2)$$

ここで a, b は円の中心、 r は半径を表す。Fig. 4に示すように、LRFから得られた基準バーの輪郭に属するデータ点(x_α, y_α), $\alpha = 1, \dots, N$ から、円のパラメータ a, b, r を推定するために、以下の2つの手法を採用した。

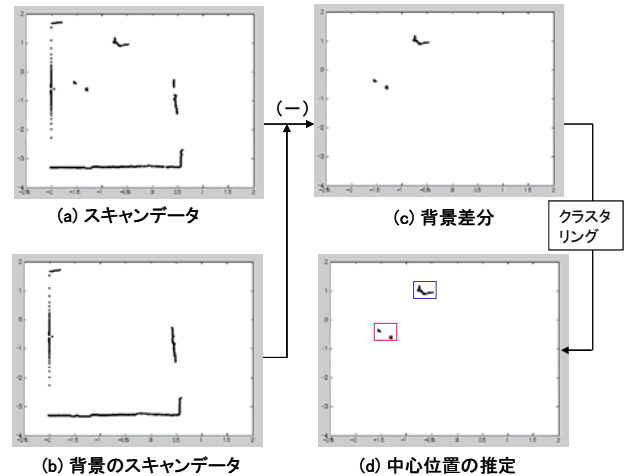
2.3.1 最小二乗法 円の最小二乗法では式(3)に示す誤差の二乗和 J_{LS} を最小化するようなパラメータ a, b, r を推定する⁽³⁾。

$$J_{LS} = \sum_{\alpha=1}^N (x_\alpha^2 + y_\alpha^2 - 2ax_\alpha - 2by_\alpha + a^2 + b^2 - r^2)^2 \quad (3)$$

しかしながら、ここで提案する位置計測システムのように、基準バーの半径 r が既知である場合は求めるパラメータは a, b の2つとなり、式(3)は非線形最小二乗問題となる。そこで本開発では非線形方程式の反復解法として



(a) 位置推定の処理フロー
Flow of Position Estimation



(b) 計測データの処理過程
Process of Measuring Data

Fig. 3 位置推定システムのプロセス
Process Position Estimation System

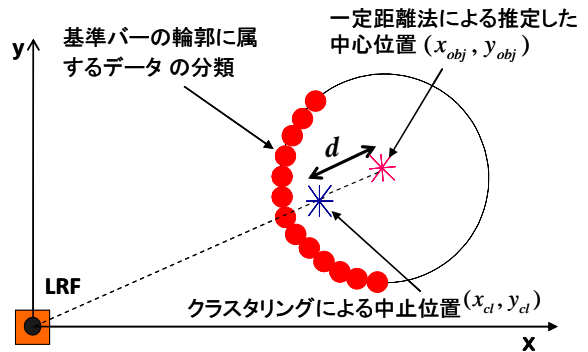


Fig. 4 一定距離法による位置推定の原理
Principle of Constant Distance Method

ニュートン・ラプソン法を採用した。初期値には、式(1)に示した一定距離法の推定値(x_{obj}, y_{obj})を使用した。

2.3.2 最尤推定法 得られたデータが仮定した誤差分布から最も得易いと思わせるように、各種のパラメータを推定する手法を最尤推定と呼ぶ^(4, 5)。本研究ではLRFから得られた各データ点(x_α, y_α)が、真値座標に対して期待値0、標準偏差 σ の正規分布に従う誤差を独立に含むものと仮定した。この結果、円の最尤推定は次式に示す J_{ML} を最小化するようなパラメータ a, b, r を推定することに等しくなる^(2, 3)。

$$J_{ML} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{[x_{\alpha}^2 + y_{\alpha}^2 - 2ax_{\alpha} - 2by_{\alpha} + a^2 + b^2 - r^2]^2}{x_{\alpha}^2 + y_{\alpha}^2 - 2ax_{\alpha} - 2by_{\alpha} + a^2 + b^2} \quad (4)$$

しかしながら、一般に円の最尤推定は式(4)に示すように非線形方程式になってしまうため、最小二乗法と同様に反復解法として一定距離法の推定値を初期値としたニュートン・ラブソン法を採用した。

2.4 計測システムの構成

LRFを用いた位置計測システムをコンポーネント化して作業の効率化を図るために、産業技術総合研究所が中心となって開発を進めている共通プラットフォームであるRT-ミドルウェアを用いて各プロセスを実装した⁶⁾。RT-ミドルウェアを使用した場合、様々な機能を有するRT-コンポーネント（各ソフトウェア要素をモジュール化した単位）をそれぞれ結合することで、必要なシステムが構成できる利点がある。

Fig.5に示す本計測システムは、LRFデータ取得コンポーネント、位置計測コンポーネント、位置表示コンポーネントから構成されている。また、異なるコンポーネントを結合することで他のシステムとの通信も可能であり、計測のリアルタイム化や自己位置の確認、誘導制御などに活用した⁷⁾。

3. 円の中心位置推定と計測による検証

3.1 実験検証

2章で示した計測システムの有効性を検証するため、屋外環境下に設置したLRFを用いて、基準バーに取り付けた半径250[mm]の円柱の周囲をスキャンし、一回のスキャン結果に対してその中心位置を推定した。なお、得られるスキャンデータは円柱の表面の材質によって大きく変化するため、ここでは赤外でも反射率の高い白色紙を円柱に張り付け、2章で述べた3つの手法、(1)一定距離法、(2)非線形最小二乗法、(3)非線形最尤推定を用いて解析を行った。

Fig.6に実験状況を、Fig.7にその実験結果を示す。横軸はLRFからの距離を表し(0[m]から30[m]まで2[m]毎に計測)、縦軸は推定された中心位置の誤差を基準距離で割った誤差率[%]を表している。ここで基準距離は高精度なトータルステーションを用いて計測した距離データを使用している。また図中のCDM (Constant Distance Method) は一定距離法を、LSM (Least Square Method) は最小二乗法を、MLE (Maximum Likelihood Estimation) は最尤推定法による誤差率をそれぞれ示している。

Fig.7より、一定距離法では半径を予め与えているため近距離では誤差率は大きい、遠距離(15m以上)では小さい値となり、距離によっては円の中心位置推定が難しい。一方、最小二乗法及び最尤推定法を用いた場合には、計測した範囲内では共に精度の高い中心位置推定が可能で

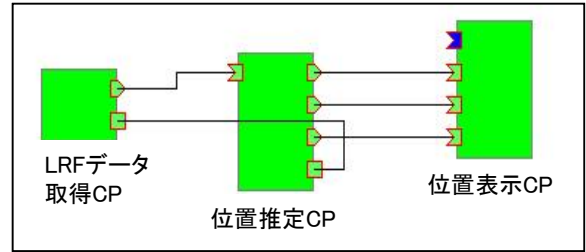


Fig. 5 RTミドルウェアによる計測システムの構成 Software Implement Using RT-middle Ware



Fig. 6 LRFを用いた位置計測システムの実験状況 Experiment Situation of Proposed Position Measurement System Using LRF

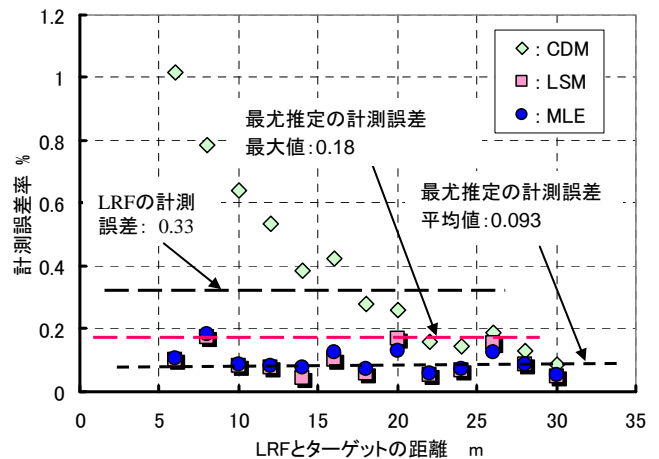


Fig. 7 各解析方法による計測誤差率の比較 Comparison of Measurement Errors by Three Methods

あり、特に最尤推定の方が遠距離での誤差率が小さいことがわかる。

円柱の中心位置の誤差率は、

- ・最小二乗法
最大誤差率：0.19 [%]，平均誤差率：0.095 [%]
- ・最尤推定法
最大誤差率：0.18 [%]，平均誤差率：0.093 [%]

となり、Table 1に示すようにLRF本体の誤差率は0.33～1.0 [%]であることから、解析的に円柱の中心位置を求めた方がより精度の高い位置推定手法と言える。

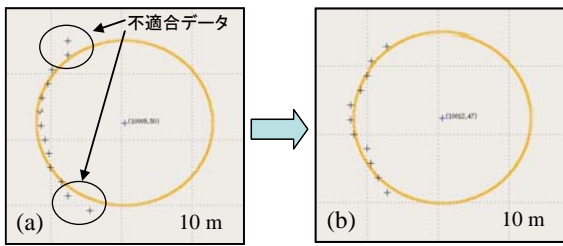
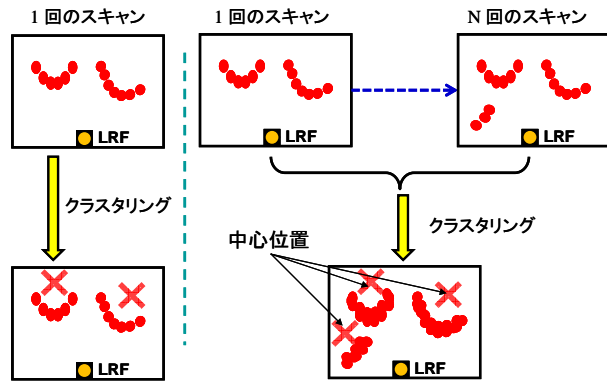


Fig. 8 RBIFを用いたスキャンデータのノイズ除去
Elimination of Scan Data Noise Using RBIF



(a) 1回のスキャン
One Scan Data
(b) N回のスキャンデータ
N-step Multiple Scan Data

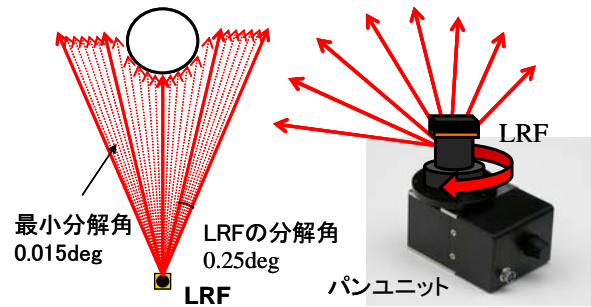
Fig. 9 位置推定精度を向上させる複数回計測の導入
Introduction of Multi-scan Method for Robust Estimation

3.2 計測システムの改善

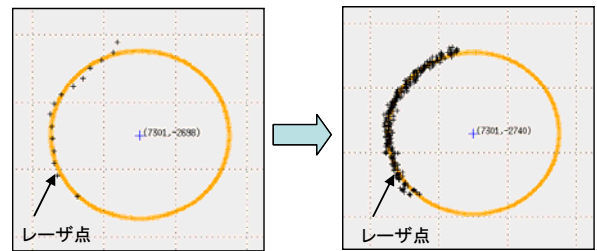
3.1に示した位置計測の誤差率は、高精度なトータルステーションの誤差に対してはやや大きい値となるため、ここではLRFのデータ取得の改善や計測分解能を補完する機器の導入を行い、より高精度な計測システムを検討した。

3.2.1 データ取得の改善 Fig.8 (a) に示す基準バーのスキャンデータを見ると円弧の端部で適合しないデータが含まれることが分る。これは端部で反射して戻って来る光が鏡面反射成分ではなく、実際には乱反射成分のみが戻って来るため、反射光のS/N比が低下するためと考えられる。そこで測域センサコマンドインタフェース研究会が制定したSCIP 2.1プロトコルを用いて基準バーの各スキャンデータの反射光強度を測定し、強度が小さいデータはそれをノイズと判断して除去した⁸⁾。この反射光強度フィルタ(RBIF: Reflected beam intensity filter)を用いることで、Fig.8 (b) に示すようなより正確な円弧形状を得ることが可能となった。

一方、Fig.9に示すように、一回のスキャン結果のみではノイズに大きく影響され、対象点を見逃す場合もあるため、複数回のスキャン結果に対して円柱の中心位置を推定し、ノイズに対してロバストな推定手法を検討した。ここでは反射光強度フィルタを用いてノイズを除去し、また10回分のスキャン結果に対して中心位置を推定することで、円柱の中心位置推定に対する改善を実施した。



(a) パンユニットの導入による計測分解角の改善
Improvement of Scan Angular Resolution by Pan-unit



(b) 位置推定のためのデータ数の改善
Improvement of Data Numbers for Position Estimation

Fig. 10 パンユニットの導入による位置推定の改善
Improvement of Position Estimation Introducing Pan-unit

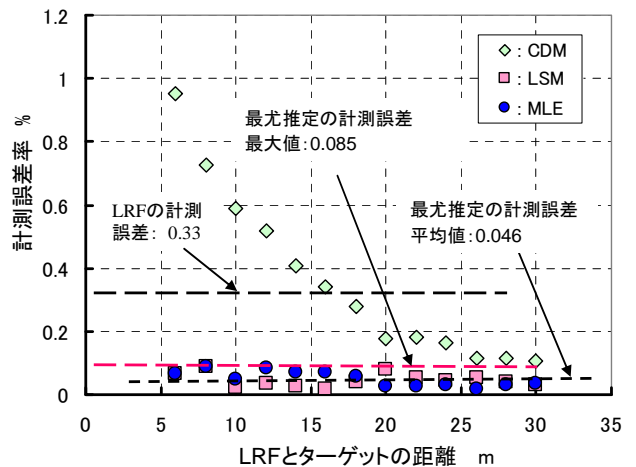


Fig. 11 高分解角パンユニットを用い各解析方法による計測誤差率の比較

Comparison of Measurement Errors by Three Methods with Pan-unit Drive High Angular Resolution

3.2.2 角度分解の改善 本計測システムで使用したLRFはレーザ照射角の分解能が0.25[deg]と比較的粗いため、解析に必要なデータ数が十分とは言えない。特に計測距離が長くなると円柱の円弧に対応するレーザ点は数点と少なくなるため、円弧の推定は難しくなる。そこで、Fig.10(a)に示すようなLRFの分解角よりも小さい角度で回転できるパンユニット(分解角:0.015 [deg])を導入し、LRFと同期させて駆動することで、計測データ

数の増加を図った⁹⁾。その結果、Fig.10(b)に示すようにレーザポイントのデータ数はかなり増加でき、遠距離での計測に対しても位置推定が可能となった。

データ取得の改善を行なった後に、3.1に示した実験と同様の中心位置の推定を実施した。Fig.11に実験結果を示す。データ取得の改善を行なった後では、円柱の中心位置の誤差率は、

・最小二乗法

最大誤差率：0.087 [%]，平均誤差率：0.046 [%]

・最尤推定法

最大誤差率：0.083 [%]，平均誤差率：0.046 [%]

となり、改善によって誤差率は1/2程度低下し、極めて高い精度で中心位置を推定できることが確認できた。また最尤推定法は遠距離になるほど誤差率が小さいことが分り、建築現場における計測システムとしても十分に使用できるものと考えられる。

4. 計測システムの建築基礎工事への適用

4.1 建築現場への適用検討

3章の結果より、提案する計測システムは、遠距離でも高い精度の位置計測が可能であることが確認された。しかしながら、建築工事における建物の建て方精度は、遠距離であっても数ミリ程度の精度が求められる場合が多く、現状のLRFを用いた計測システムでは必ずしも十分とは言えない。

そこで比較的許容寸法の範囲が広い基礎杭打工事の計測への適用を試み、まずは杭芯点の墨出しや杭打設後の杭芯位置の計測を行い、既に計測された墨出し点や部材位置の簡易チェックをリアルタイムで実施した。従来、杭打ち工事における杭芯位置の精度についてはあまり調査されておらず、微小な杭頭処理でその誤差を吸収していたが、本計測システムの適用により精度の高い杭打ち工事が行えるようになり、基礎工事の精度向上と手直しのない効率的な施工が行なえることが期待できる。なお、本計測システムを利用した適用例としては、以下に示す例が考えられる

- ・杭打設機械の移動や杭打設時のリアルタイム計測
- ・資材運搬など自己と目標位置をリアルタイム誘導
- ・人や資材の位置計測から危険域の立入りを警告する安全システム、作業管理

4.2 実現場における杭芯計測への適用¹⁰⁾

本計測システムの適用として、既に測量器等で杭芯点が墨出された敷地に対し、杭芯位置の再確認計測を行ない、計測誤差や杭芯点など含む確認実験を実施した。

4.2.1 計測の準備と計測方法 Fig.12に再確認計測を実施した杭芯図面の一部を示す。

本図面はLRFの設置点からの計測可能範囲を表し、丸印が杭点に相当する。

計測システムの準備として、以下の作業を実施した。

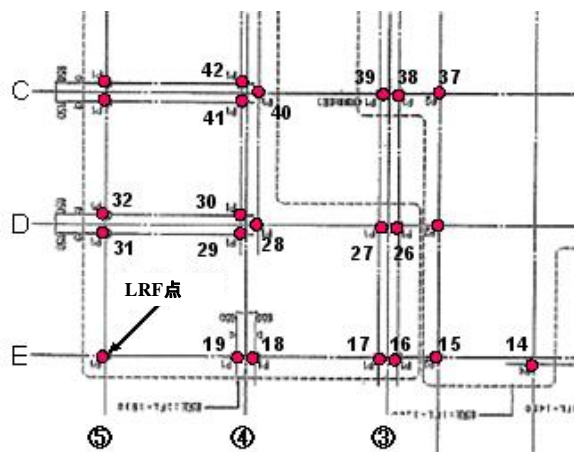


Fig. 12 確認計測を行なう杭芯位置の建築マップ
A Construction Map for Pile Drive Positions

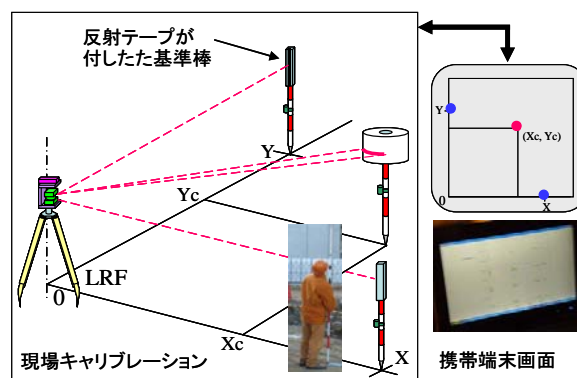


Fig. 13 LRFを用いたリアルタイム杭芯位置計測準備作業
Calibration Work of Real-time Pile Position Measurement Using LRF



Fig. 14 LRFを用いた杭芯位置計測の準備作業状況
Site Calibration of Position Measurement System Using LRF

(1) LRFの設置 測量用の三脚上に設置したLRFを測量の原点（ここではE-⑤）に正確に設置した。LRFのレーザ照射位置は約2.5[m]の高さに設置し、作業者による反射、未確定な物体の出現を極力排除した。

(2) LRFの角度調整 次にLRFのレーザ照射原点をX

通り上に一致させた。Fig.13に示すように、反射輝度が高い数ミリの反射テープを貼り付けた基準バーをX通り上に置き、その点を計測機器に取り込むことで、敷地面と計測画面との座標軸を一致させた。上記の作業をY通り上でも行い、直角度の確認と修正を行なった。この調整により、レーザの反射点はすべてモニター画面の上の対応する点に表現することができた。

(3) 計測点の入力 図面上の杭芯点を計測プログラムに入力し、敷地面に置いた基準バーの位置と計測画面との対応位置が一致することを確認した。同様にターゲット側のモニターを調整し、基準バーの自己位置をモニターにリアルタイム表示した(Fig.14)。

(4) 計測方法 Fig.15に示すように、LRFに対して計測者が基準バーを持ち、モニター画面で自己位置を確認しながら杭芯点まで移動して、既に墨出された点が近傍に存在するかを確認した。次いで墨出された点上にターゲットバーを垂直に設置して、位置計測を実施した。

Fig.15の上部に基準バーを持った作業者のモニター画面の状況を示す。画面上の十字点が基準バーの位置に対応し、その座標点が表示されている。丸点(桃)は既に確認した杭芯点であり、丸点(緑)は未確認の杭芯点に対応する。作業者の位置と移動方向が画面に表示されるため、目標点を定め易いことが分る。また作業者が自己位置をリアルタイムで確認しながら移動できるため、計測作業の確認は極めて迅速に実施できた。

4.3 計測結果と効果

Fig.16に測量器で墨出された杭芯点と本システムで計測した杭芯位置との差に対する基準距離の割合(誤差率)を示す。円柱の中心推定には最尤推定法を採用し、杭芯の確認チェックが主目的であるため、高分解能ユニットは使用せず、LRF単体で計測を行なった。杭芯点の誤差率は計測距離が長くなる程大きくなるが、0.19%以内(距離30mでは57mm以内)にあることを確認した。

次いでFig.17に示すように、本システムを用いて杭打設後の杭芯位置を再度計測した。その結果、杭芯位置の誤差率は0.25%以内にあり、杭打設後の許容誤差が杭芯点から100mm以内(距離30mでは誤差率0.33mm以内)であることから、計測したすべての杭芯位置が許容誤差以内にあることが確認できた(Fig.16)。

なお、本計測の精度はトータルステーションなどの計測機器にはやや劣るものの杭芯計測の許容精度を十分満たすことができた。システムの構成は極めて安価であり、作業員1人で容易に計測ができるため、コストの削減、作業の効率化、省力化が図られた。

5. まとめ

LRFを使用した簡便、低コスト且つ高精度な位置計測システムの概要と本システムを使用した建築基礎工事における杭芯位置の確認チェックを実施した。基準バーに取付けた円柱の中心位置を解析的に推定する手法を考案

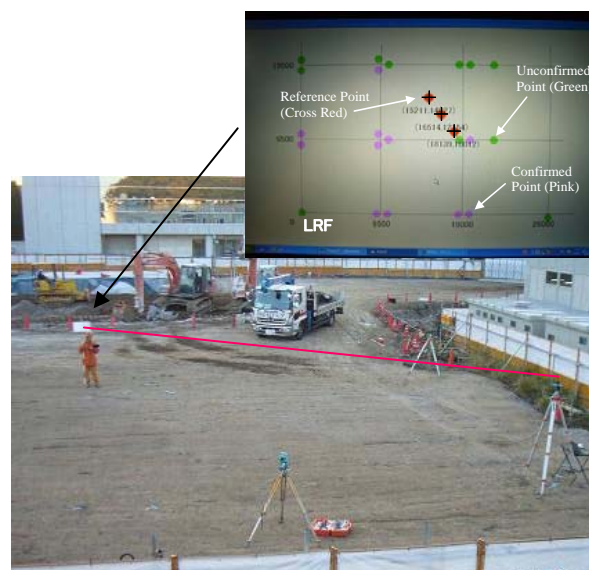


Fig. 15 LRFを用いた杭芯位置のリアルタイム計測の現場実験
Site Experiment of Real-time Pile Position Measurement Using LRF

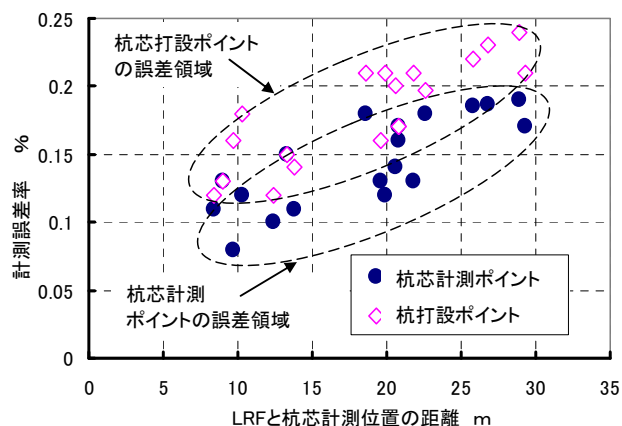


Fig. 16 LRFを用いた杭芯および杭打設位置の計測誤差比較
Comparison of Measurement Errors Rate for Pile Position Using LRF

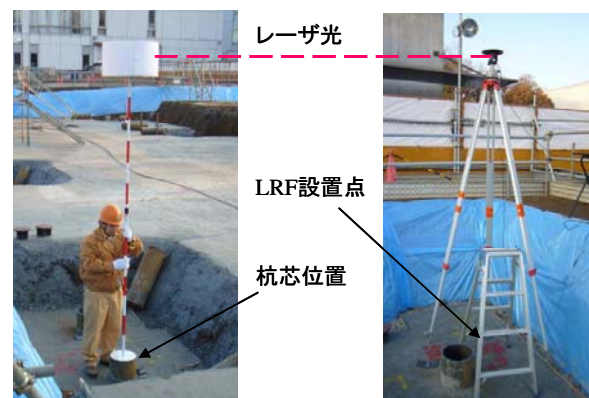


Fig. 17 LRFを用いた杭打設ポイントの位置計測
Measurement of Pile Drive Positions Using LRF

し、データ取得の改良を行うことで、精度の高い位置計測システムを確立した。杭芯計測では杭芯位置および杭打設位置を高精度で計測でき、実現場で適用が可能と思われる。また計測は作業者がモニターを見ながらリアルタイムで自己位置を確認、迅速に移動できるため、作業効率の向上、省力化が実現された。

今後は計測精度の向上を目指すと共に、建設分野における様々な計測作業に適用し、その普及を実施して行く

謝 辞

本研究は東京大学生産技術研究所橋本秀紀准教授との共同研究による成果であり、本計測システムにおける解析や計測実験に際して、佐々木毅氏(同大学特別研究員)、田村一氏(同大学大学院)に多大なご協力を頂いた。記して関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Hajime Tamura et. al: Shape Based Position Measurement Method Using Laser Range Finders, The 6th Int. Conf. on URAI2009, pp.570-574, 2009.10, Korea.
- 2) J. Ryde et. al: Fast Circular Landmark Detection for Cooperative Localization and Mapping, Proc. of the IEEE Int. Conf. on
- 3) N. Chernov et. al: Least Square Fitting of Circles, Journal of Mathematical Imaging and Vision, Vol. 23, pp. 239-251, 2005.
- 4) K. Kanatani: "Statistical Optimization for Geometric Fitting Theoretical Accuracy Analysis and High Order Error Analysis" Int. Journal of Computer Vision, Vol. 80, no. 2, pp.167-188, 2008.
- 5) 山田 純平, 他: 楕円当てはめの高精度計算法との性能比較, 情報処理学会研究報告, 2005-CVIM-154-36, pp. 339-346, 2006.
- 6) N. Ando et. al: RT-Middleware: Distributed Component Middleware for RT, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems, pp. 3555-3560, 2005.
- 7) T. Sasaki et. al: Design and Implementation of Distributed Sensor Network for Intelligent Space Based on Robot Technology Component, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Human System Interaction, pp.400- 405, 2009.
- 8) 田村一, 他: レーザ・レンジ・ファインダを用いた円柱対象物の位置推定システム, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 1755-1758, 2009.12.
- 9) H. Tamura et. al: Circle Fitting Based Position Measurement System Using Laser Range Finder in Construction Fields", Int. Conf. on IROS 2010, on print.
- 10) F. Inoue et. al: A Study on Position Measurement System Using Laser Range Finder and Its Application for Construction Work", Proceeding of 5-th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM 2010), on print.