

SLAM を用いた 3 次元測量

点群データの取得と計測精度

岡田 雅史・伊藤 孝・田嶋 誠司

国土交通省が平成 28 年度より推進している i-Construction により、3 次元測量および 3 次元点群データは一般的な測量手段・データとなった。更に、インフラ分野の DX の取組が進められていく中でこれらは必要不可欠なものである。3 次元測量においては地上型レーザースキャナー、UAV を使用した空中写真測量など多岐にわたり、ユーザーが作業現場に適切な手法を選択する必要があるが、多様化する計測環境下においては従来の 3 次元測量機器では作業の効率化が見込めない場合もある。本稿では、近年急速に普及しており、非 GNSS 環境下でも移動計測が可能な小型の機器である、SLAM を用いた 3 次元測量を紹介する。

キーワード：SLAM, 3 次元測量, 点群データ, i-Construction, BIM/CIM, DX

1. はじめに

SLAMとは Simultaneous Localization And Mapping の略称であり、自己位置推定 (localization) と地図作成 (mapping) を同時に (simultaneous) 行う技術である。つまり、地図を作るためには自己位置推定が必要であり、自己位置推定をするためには地図が必要である。これを同時に実行している技術が SLAM である。それを繰り返すことにより移動軌跡を推定し、その軌跡に沿った 3 次元もしくは 2 次元の地図が作成されることとなる。

2. SLAM の種類¹⁾

SLAM は周囲の形状を計測するセンサの種類により、以下に分けられる。それぞれを単独もしくは複数を組み合わせて利用され、目的に応じたシステムの構築がされている。表-1 はセンサの一般的な仕様をまとめたものである。

(1) Visual SLAM

カメラで撮影された画像により SLAM を実行する技術である。カメラには単眼カメラ、ステレオカメラ、距離画像カメラなどがある。カメラは分解能が高く、色による識別が可能だが、暗闇などでは使用できず耐環境性能では劣る。

単眼カメラは 1 台のカメラしか持たないため、センサ自体としては距離を得ることができない。カメラを移動させて得た複数の視点から三角測量により距離を算出することになり、その処理自体が SLAM の一部となる。

ステレオカメラは 2 つのカメラを持ち、静止したまま 2 枚の画像から三角測量で距離が計算できるため、センサとして距離と方向を得ることができる。

距離画像カメラは通常のカメラに加えて赤外線などを発光して距離情報を画像として計測するため、物体までの距離と方向をセンサとして直接得ることができる。

表-1 センサの一般的な仕様

センサ		最大計測距離 (m)	点数	水平視野 (°)	照明	特徴量
LiDAR SLAM	レーザースキャナー	5 ~ 200	$10^2 \sim 10^5$	120 ~ 360	暗・屋外可	反射強度
Visual SLAM	単眼カメラ	-	$10^5 \sim 10^7$	60 ~ 180	暗不可	輝度・色
	ステレオカメラ	5 ~ 30	$10^5 \sim 10^6$	60 ~ 90	暗不可	輝度・色
	距離画像カメラ	1 ~ 5	$10^5 \sim 10^6$	60 ~ 90	屋外不可	輝度・色

(2) LiDAR SLAM

レーザースキャナーにより物体までの距離と方向を計測しSLAMを実行する技術である。広範囲の計測、暗闇でのデータ取得が可能などの特長がある。しかし、LiDARが高価である、物体の少ない環境ではSLAMが成立しないといった欠点もある。本稿では、測量機器として多く使用されているLiDAR SLAMについて述べる。写真-1はLiDAR SLAMシステムの一例である。小型、軽量のものが多く、ハンドヘルド、UAV、電動バギーなど複数のプラットフォームに取り付けて使用できるシステムもある（写真-2）。



写真-1 LiDAR SLAM システム



写真-2 システム使用例

3. SLAM を用いた 3 次元測量

SLAMは移動しながらデータの取得が行える、非常に簡単な計測手法であるが注意すべき点がある。

(1) 閉ループ

SLAMを用いた計測を行う場合、起終点を同じ場所とした移動軌跡とすることが望ましい（写真-3）。先述した通りSLAMは外部形状を計測すると同時に自己位置の推定を行い、それを繰り返して地図を作成している。外部形状が既存データとして与えられるのであれば自己位置推定の誤差が累積することはないが、計測誤差を持つ外部形状から自己位置推定を行うため誤差が累積し、起終点が一致することは難しい（写真-4）。この累積誤差を、起点および終点で共通する外部形状を判読し、合わせ込みを行うことで解消している。そのため計測の起終点は周囲に特徴のある場所を選定した方が良い結果が得られる。



写真-3 閉ループ



写真-4 SLAMの累積誤差

(2) 計測環境

SLAMは特徴のある外部形状を連続して計測することにより、累積誤差を抑えることができる。しかし以下に示す計測環境では特徴点が捉えにくく、自己位置推定の異常値もしくは誤差の増加が生じやすくなるため、屋内であれば机や椅子、屋外では車などを配置して特徴点を捉え易くする工夫が必要となる。

- ①グラウンドなど広く平坦な場所（Z軸方向の特徴点がない）
- ②直線の廊下やトンネル（移動しても外部形状に変化がない）
- ③模様のない壁（特徴点が捉えられない）

- ④密集した竹藪（似た特徴点が多くなり誤認識する）
- ⑤人混み（固定された特徴点がなく自己位置推定の誤差が大きくなる）など

(3) 座標変換

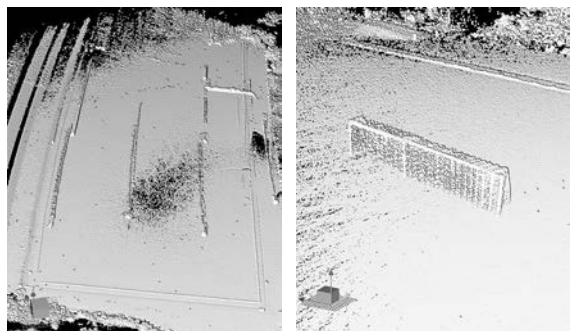
SLAM によって計測されたデータは、起点を原点とした任意の座標系となっているため、建設現場で使用する場合は標定点を用いた現場座標系への変換作業が必要となる。標定点には写真—5 に示すターゲットボードやスフィア（基準球）が使用できる。



写真—5 標定点の例

(4) 計測エラーデータ

SLAM 計測データの精度は自己位置推定の精度によって左右される。前述の計測環境から①のグラウンドにおいて計測を行った結果が写真—6 である。一見すると（写真—6 左）特に問題がないように見えるが、細部を確認するとサッカーゴールが伸びているのが分かる（写真—6 右）。このように自己位置推定が正しく処理されないと、計測対象物の形状を大きく変形させてしまうこととなる。



写真—6 計測エラーデータの例

4. SLAM による自己位置推定に関する検証

前述のような計測エラーを極力抑えるために、様々な環境下において SLAM による自己位置推定の傾向および精度の検証を行った。使用した SLAM 計測機

器の仕様を表—2 に示す。なお精度の基準は、SLAM と同様に撮影した画像からカメラ位置を計算する「UAV を用いた空中写真測量」にて定められた値を参照する（表—3）。

表—2 SLAM 計測機器仕様

LiDAR 計測範囲	0.4 m ~ 100 m
LiDAR 計測精度	± 30 mm
マッピング精度	一般的な環境 ± 20 mm
	地下及び室内 ± 15 mm
計測角度	360° × 360°
データ取得レート	300,000 点/秒
移動速度	車両 40 km/h
	飛行 5 m/s
	地下または閉所 2 m/s
レーザークラス	Class 1 EyeSafe
動作温度	0 ~ 50°C
重量	1.8 kg

表—3 UAV を用いた空中写真測量による要求精度²⁾

計測	測定精度
起工測量、岩線計測	(鉛直方向・平面方向) ± 100 mm 以内
部分払い出来高計測	(鉛直方向・平面方向) ± 200 mm 以内
出来形計測	(鉛直方向・平面方向) ± 50 mm 以内

(1) 計測データと自己位置推定の精度

写真—7 に示す特徴点の少ない平坦な地形、法面・橋梁など特徴点を捕捉しやすい地形が混在した環境での SLAM 計測データから、標定点による座標変換の残差および自己位置推定の精度を検証した。標定点は外周に4点設置しトータルステーションによる実測座標値を真値とした。表—4 は標定点による座標変換後の残差を示したものである。いずれの場合においても残差は 200 mm 以内であるため、i-Construction での部分払い出来高計測相当の計測データが取得できたこととなる。

次に SLAM 計測中の機器を自動追尾トータルス



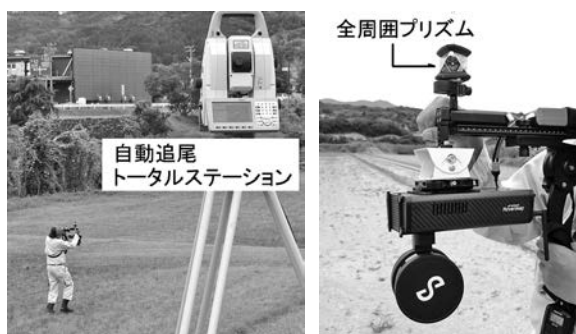
写真—7 計測現場の写真（上）と SLAM 計測データ（下）

表一4 座標変換の残差

標定点名	1回目			2回目			3回目		
	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
Pt.1	0.146	-0.033	0.067	0.162	0.003	0.088	0.176	0.026	0.098
Pt.2	0.108	-0.062	-0.075	0.147	-0.130	-0.099	0.184	-0.172	-0.111
Pt.3	-0.092	0.007	-0.051	-0.111	0.010	-0.066	-0.139	-0.027	-0.072
Pt.4	-0.161	0.088	0.059	-0.198	0.118	0.077	-0.198	0.173	0.084
最大値	-0.161	0.088	-0.075	-0.198	-0.130	-0.099	-0.198	0.173	-0.111
最小値	-0.092	0.007	-0.051	-0.111	0.003	-0.066	-0.139	0.026	-0.072
RMS	0.130	0.056	0.064	0.158	0.088	0.083	0.176	0.123	0.092

ーションにて座標測定を行い(写真一8), SLAMの自己位置推定による軌跡と測定座標値との較差を示す。先の標定点はポイントごとでの精度確認となるが、これにより計測データ全区間における精度を確認する。表一5, 図一1はこの座標較差を集計したもの

である。平均値は150mm前後であり、標定点による残差と同程度の結果である。また、測定距離に応じて較差が累積することなく自己位置推定がされたことが分かる。



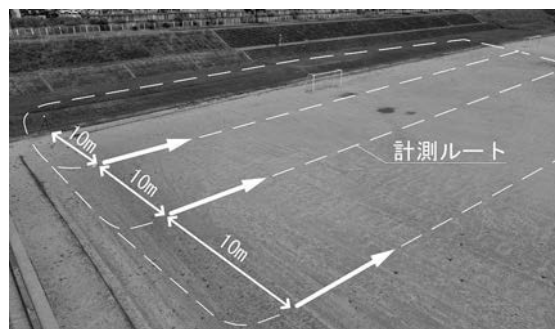
写真一8 全周囲プリズムの取付とTSによる観測

表一5 軌跡の自己位置推定値とTS観測値の較差

標定点名	座標較差		
	1回目	2回目	3回目
TSによる座標測定数	2361	2331	2321
データ計測時間(秒)	353	341	326
最大値(m)	0.251	0.290	0.411
最小値(m)	0.003	0.004	0.001
標準偏差(m)	0.051	0.070	0.088
平均値(m)	0.143	0.149	0.164
較差100mm以下の割合	22.49%	29.43%	27.23%
較差200mm以下の割合	94.96%	73.19%	67.21%

(2) 計測環境が自己位置推定に与える影響

特徴点の多い堤防法面からZ軸方向に特徴点がないグラウンドを連続して計測し、環境の変化が自己位置推定に及ぼす影響を検証する。グラウンドは法尻からの離隔を10m, 20m, 30mとした3コースのデータを比較し、より厳しい条件での変化を見る(写真一9)。



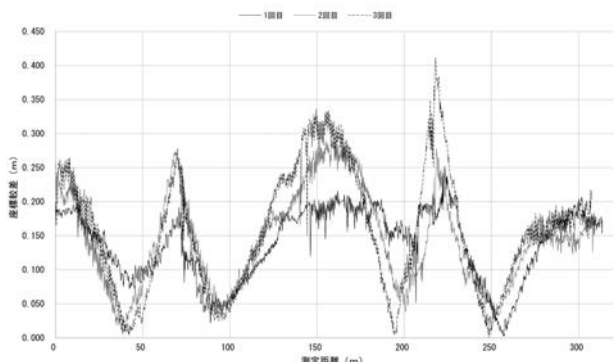
写真一9 計測環境

(a) 計測データの標定点残差

標定点は法尻付近に3点設置し座標変換を行う。表一6~8は各コースの残差である。前項の計測では全ての標定点で平均的な残差があったが、今回の計測では標定点ごとにばらつきが見られ、計測中いずれかの場所においてループの閉じ込みでは解消されない誤差が累積していることが予想される。

(b) トータルステーションによる測定座標値と自己位置推定の較差の推移

計測中に精度が低下している地点を、自動追尾トータルステーションによる測定座標値とSLAMによる自己位置推定値の較差によって検証する。図一2~4はその較差の推移を測定距離に対して示したものである。どのデータにおいてもグラウンド内では較差が大きくなっているが、外部形状に捉えられる特徴点が豊



図一1 TS測定座標と自己推定位置の較差の推移

表一六 離隔 10 m での座標変換残差

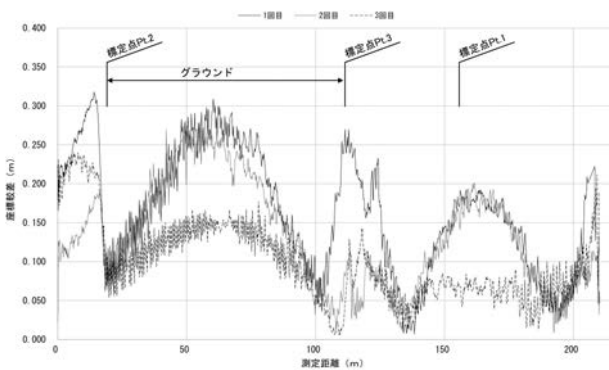
標定点名	1 回目			2 回目			3 回目		
	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
Pt.1	0.174	0.063	-0.011	0.155	0.102	-0.009	0.008	0.001	0.001
Pt.2	-0.103	-0.243	0.003	-0.060	-0.122	0.002	-0.040	-0.268	-0.001
Pt.3	-0.071	0.181	0.007	-0.095	0.020	0.007	0.032	0.193	0.001
最大値	0.174	-0.243	-0.011	0.155	-0.122	-0.009	-0.040	-0.268	0.001
最小値	-0.071	0.063	0.003	-0.060	0.020	0.002	0.008	0.001	0.001
RMS	0.124	0.179	0.008	0.111	0.093	0.007	0.030	0.191	0.001

表一七 離隔 20 m での座標変換残差

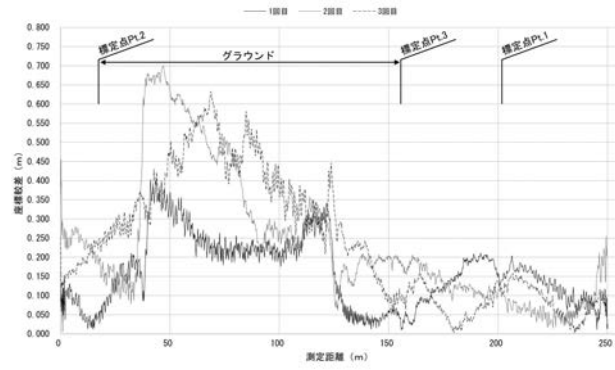
標定点名	1 回目			2 回目			3 回目		
	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
Pt.1	-0.009	0.163	0.003	-0.092	0.155	0.008	-0.136	0.380	0.011
Pt.2	0.026	-0.098	-0.003	0.055	-0.101	-0.005	0.029	-0.287	-0.006
Pt.3	-0.017	-0.065	0.000	0.036	-0.054	-0.003	0.108	0.149	-0.005
最大値	0.026	0.163	0.003	-0.092	0.155	0.008	-0.136	0.380	0.011
最小値	-0.009	-0.065	0.000	0.036	-0.054	-0.003	0.029	0.149	-0.005
RMS	0.019	0.116	0.002	0.065	0.111	0.006	0.102	0.288	0.008

表一八 離隔 30 m での座標変換残差

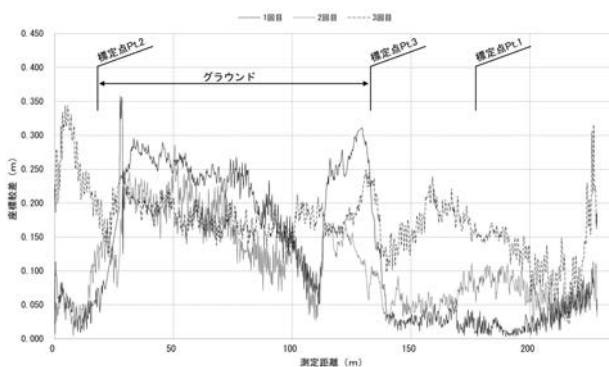
標定点名	1 回目			2 回目			3 回目		
	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
Pt.1	-0.167	0.078	0.012	-0.060	0.107	0.006	0.116	0.071	-0.007
Pt.2	0.073	-0.059	-0.006	0.004	-0.224	-0.004	-0.052	-0.118	0.002
Pt.3	0.093	-0.020	-0.006	0.056	0.117	-0.002	-0.064	0.047	0.005
最大値	-0.167	0.078	0.012	-0.060	-0.224	0.006	0.116	-0.118	-0.007
最小値	0.073	-0.020	-0.006	0.004	0.107	-0.002	-0.052	0.047	0.002
RMS	0.118	0.058	0.008	0.047	0.158	0.004	0.082	0.084	0.005



図一三 TS 測定座標と自己推定位置の較差の推移 (離隔 10 m)



図一四 TS 測定座標と自己推定位置の較差の推移 (離隔 30 m)



図一三 TS 測定座標と自己推定位置の較差の推移 (離隔 20 m)

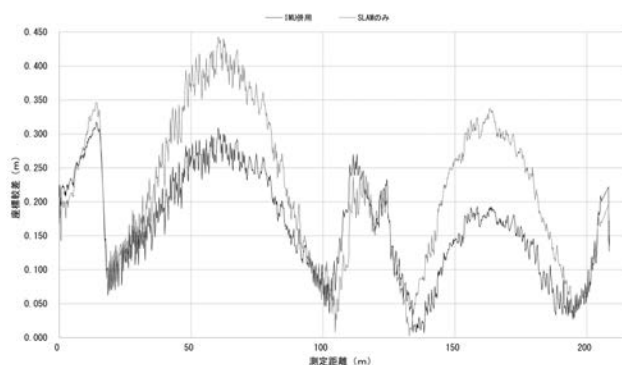
富にある場合では較差を収束している (図一三)。ただし特徴点が乏しい場合は較差を収束できず、計測ごとに異なる傾向を示しデータが安定していない (図一四)。したがって、グラウンドや広い河川敷のような平坦な地形は SLAM の使用には不向きであり、そのような環境で使用する場合には対策が必要である。

5. 内界センサの併用

Visual SLAM のカメラや LiDAR SLAM の LiDAR

などの外界センサによる計測なしに移動体の状態を知るセンサを内界センサと言い、ジャイロ스코プやIMU（慣性計測装置）がこれに含まれる。今回の検証で使用した機器にも低グレードのMEMS IMUが搭載されており、外界センサによる自己位置推定と内界センサによる姿勢情報を融合処理して地図が作成されている。そこで、内界センサの有無による計測データの差異を検証する。

図一5は先の検証で使用した離隔10m、1回目のデータを内界センサの有無で処理した結果である。外部形状に特徴点が多い地点は内界センサの有無に関わらず同程度の較差で推移しているが、自己位置推定の精度が劣るグラウンドでは内界センサの併用により精度が3割程度向上している。使用の際はシステムの外界センサだけでなく内界センサの種類・性能にも配慮されたい。



図一5 IMUの併用による軌跡に及ぼす効果（離隔10m）

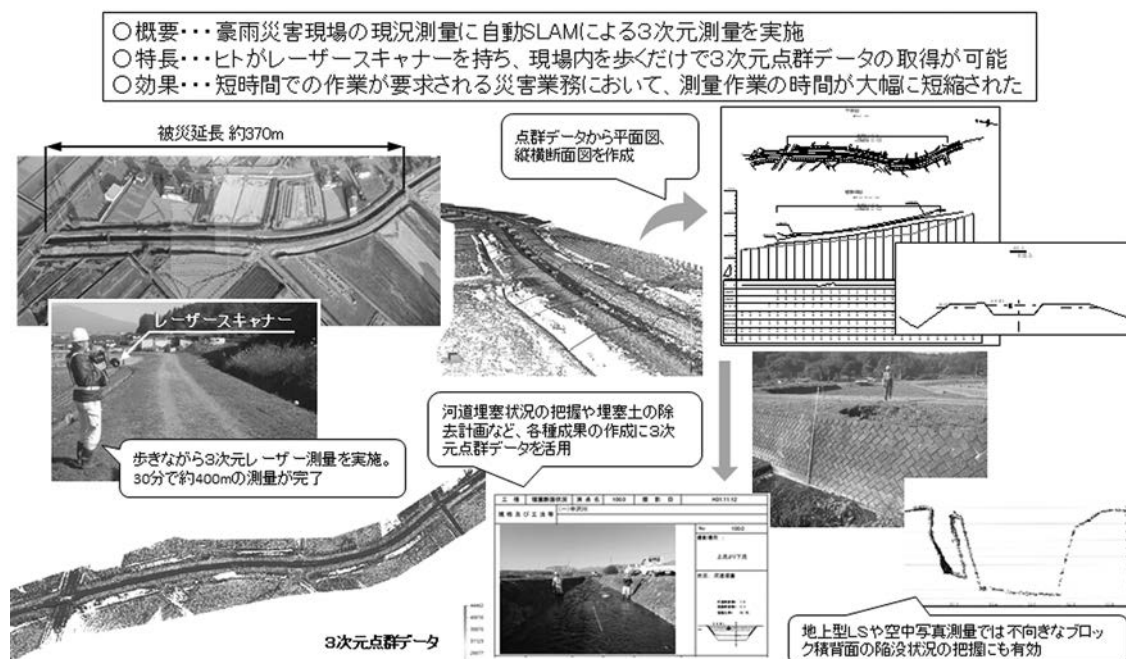
6. SLAMによる測量事例

図一6は豪雨災害現場の現況測量においてSLAMによる3次元測量を実施した事例である。延長約370mの現況測量が30分程度で完了している。同規模の作業量を従来の平面縦横断測量を実施した場合3～4日程度要する。内業においては、SLAM計測データの処理が必要となるため従来法に比べて時間を要するが、全工程では3割程度の短縮となった。また、小型・機動力のある機器のため、UAVを用いた空中写真測量、地上型レーザースキャナーでは不向きなブロック積背面の陥没状況も取得することができる。

7. おわりに

現在のところSLAMを用いた3次元測量の関連要領は「簡便な手法による屋内3次元地図作成・更新のためのマニュアル（案）平成30年3月 国土交通省 国土地理院」のみであり、公共測量作業規定には該当しない方法である。一方、i-Constructionの関連要領ではこの技術利用に対する明確な記載はないものの、ハンドヘルドや電動バギーでの使用に限っては、地上移動体搭載型レーザースキャナーの一つとして解釈が可能である。しかしながらその場合においても、当該作業における要求精度を満たしているか十分な精度検証を行い、監督員の承認が必要である。

JICMA

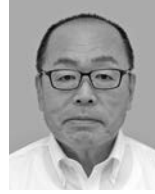


図一6 SLAMによる3次元測量事例

《参考文献》

- 1) 友納正裕：SLAM 入門 ロボットの自己位置推定と地図構築の技術，pp.25-28，オーム社，2018年3月。
- 2) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)，pp. 2-48，2021年3月。

【筆者紹介】



岡田 雅史（おかだ まさし）
TPホールディングス(株)
特販営業部
部長



伊藤 孝（いとう たかし）
(株)小林コンサルタント
技術部 設計課
課長



田嶋 誠司（たじま せいし）
(株)小林コンサルタント
技術開発部 技術管理室
室長

