

極小 ID マーカー「mIDoT (マイドット)」の自動付与による 大量生産電子部品の個体識別

Individual Identification of Mass-produced Electronic Parts by Automatic Marking of Tiny ID Marker “mIDoT”

エ藤 佑太[†] ズワーン フーゴ[‡] スーレン スタイン[‡] 高橋 徹[†] 石山 塁[†]
Yuta Kudo Hugo Zwaan Stijn Seuren Toru Takahashi Rui Ishiyama

1. はじめに

工業製品の大量生産に伴い、製品リコール（不具合による回収）の規模やリスクが年々拡大している[1]。近年では、自動車等の最終製品のエレクトロニクス化に伴い、電子部品の欠陥に起因するリコールが多数報告されている[2]。リコールの損害を最小限に抑えるためには、製品を構成する各部品を IC タグやバーコード等の ID マーカーを用いて個体管理し、不具合発生の原因を絞り込むことが重要である。しかし、個々の電子部品には、スペースやコストの制約から、識別のための IC タグやバーコードが付与されていないことが多い。そのため、ある電子部品がリコールの原因であった場合に、その部品の不具合原因の究明に役立つ製造履歴情報、例えば製造年月・生産ラインといった情報を得ることは困難である。一方、電子部品の生産数は膨大であり、その全てを点検するには膨大な時間を要する。このようなリスクを最小化するために、IC タグやバーコードが付与できない小型電子部品にも適用可能な ID マーカーが必要とされている。

小型電子部品の ID マーカーには、次の 2 つの条件が求められる。

1. 付与対象（小型電子部品）より十分小さい物理的サイズであること
2. 付与対象の製造コストの増加を抑えられる安価な ID 付与手段であること

現在用いられている ID マーカーには、バーコード、レーザーマーキング、RFID 等がある。しかし、これらの ID マーカーを個々の小型電子部品に付与するのは、サイズの制約上難しい。なお、これまでに、微小サイズの RFID も発表されている[3]が、現状では多数の電子部品一つ一つに付与するには高コストである。このように、既存の ID マーカーは小サイズ・低コストの 2 条件を同時に満たさず、小型電子部品に適用することは実用上困難である。

小型電子部品に適用可能な ID マーカーとして、ペンで付与した微粒子入りのインク 1 滴の点「mIDoT; マイドット (micro Identifier Dot on Things) [4,5]」が提案されている。インク 1 滴中には微粒子が多数含まれ、この微粒子のパターンにはエラー率 100 万分の 1 以下の十分なランダム性があることがこれまでに確認されている[4,5]。同じペンで付与したインクであっても、1 滴 1 滴を拡大撮影した画像を個体識別することができ、このインク 1 滴を、バーコードのような ID マーカーとして使うことが可能である。

[†] NEC データサイエンス研究所

[‡] デルフト工科大学, Delft University of Technology

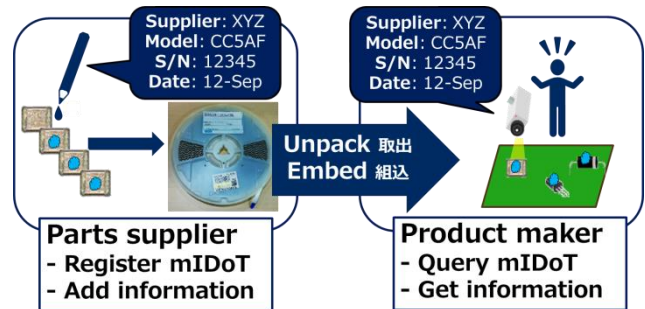


図 1 mIDoT を ID マーカーとして用いる手順

mIDoT を小型電子部品の ID マーカーとして用いる手順を図 1 に示す。mIDoT は、既存の市販文具ペンで付与した場合でも、サイズが 1 mm 程度と小さくすることが容易であり、コストもインク 1 滴分でほぼゼロとみなせる。mIDoT を ID マーカーとして用いるには、個々の部品上に付与した mIDoT を登録し、パーツの情報と紐付けて記録する。これにより、部品がリールから取り出され、基板に組み込まれた後であっても、mIDoT を照合することで、それに紐付けられた部品の情報を得ることができる。このようにして、mIDoT を用いた小型電子部品のトレーサビリティが実現される。

これまでに、mIDoT を付与するペンを手で持ち 1 点ずつ手動付与した場合に、十分な個体識別精度があることがわかっている[4,5]。しかし、大量に自動製造される電子部品に手動でインクを付与することは非現実的である。また、自動で均一に付与された mIDoT は、互いに十分識別可能なランダム性をもつのか検証する必要がある。mIDoT 中の粒子分布のランダム性は、手動付与時の揺らぎに依る可能性もあり、自動付与時の識別性はこれまで確かめられていない。

本稿では mIDoT の自動付与について、1)自動付与機構、2)自動付与時の個体識別性評価、3)大量生産電子部品の個体識別、の 3 点を報告する。まず 2 章で、mIDoT の自動付与を可能にする、ペンを一定の強度・向きで機械的に動かす直動機構について述べる。続いて 3 章で、上記機構を用いて自動付与された個々の mIDoT が十分な個体識別精度をもつことを実験結果から示す。さらに 4 章で、小型電子部品への mIDoT 自動付与機構を試作し、1 万個以上の部品を個体識別できることを示す。

2. mIDoT の自動付与

本章では、mIDoT を自動付与するために試作した、ペンを一定の強度・向きで機械的に動かす直動機構について述べる。また、mIDoT を付与・撮影するための機材および、撮影画像の照合アルゴリズムについて説明する。

2.1 自動付与機構

mIDoT を付与するペンを一定の強度・向きで機械的に動かす直動機構を図 2 に示す。ミニチュアリニアガイド (SSEB6-40, ミスミ) にペンを取り付け、直動機構を実現した。ペンの押下・復帰動作には、ソレノイド (67-120-610-620, BLP 社) および丸線コイルばね (WY13-30, ミスミ) を用いた。ソレノイドに所定時間 (100 msec) 電圧印加したときペン先を mIDoT 付与対象物に押し付け、電圧解放後はバネの復元力によりペン先を付与対象物から離し、元の位置に原点復帰する仕組みとした。ソレノイドはモータドライバ (SN754410NE, Texas Instruments) を用いて駆動し、モータドライバの電圧は Arduino Uno (A000066, Arduino Foundation) を用いて制御した。また、各部品を固定する筐体は 3D プリンタ (Objet Eden 250, stratasys 社) を用い、アクリル系硬質樹脂で製作した。

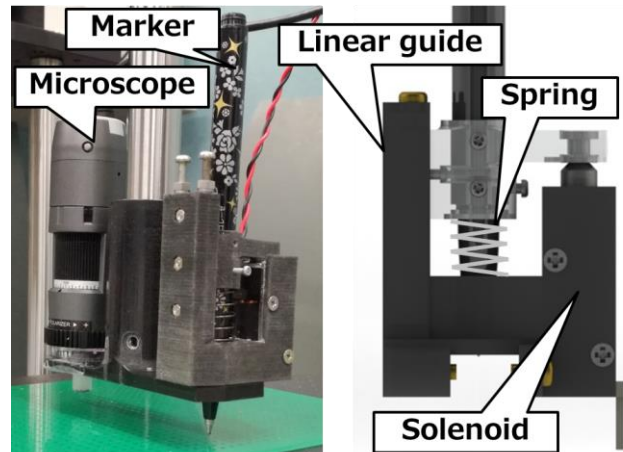


図 2 mIDoT 自動付与機構

2.2 付与・撮影機材

図 3 に、付与・撮影に用いる機材を示す。mIDoT の付与には、市販のラメ粒子入りゲルインクペンであるデコレーゼラメラック (DB206#649, サクラクレパス社) を用いる。このペンのインク 1 滴中には微粒子が多数含まれ、この微粒子の配置が 1 滴ごとに個々に異なり、個体識別が可能である。さらに、このインクはプラスチック、ガラス、金属などの多様な素材に付着させることができる。そのため、多種多様な物品に mIDoT を付与することが可能である。

mIDoT を撮影するカメラとしては、市販の USB 顕微鏡 Dino-Lite Edge (DINOAM4815ZT, ANMO 社) を用いる。撮影画像の解像度は $1,280 \times 1,024$ 画素である。カメラ内蔵の LED 照明は、点光源が離散的に 45 度おきに並んでいるので、カメラが mIDoT に対して回転すると、画像に写りこむ直接反射が大きく変化する。そこで、照明に乳白色の拡散アタッチメントを取り付け、LED 光を均等に拡散させる。さらに、カメラ内蔵の偏光フィルタを用いて、LED の直接反射光を低減する。これにより、カメラ回転の影響なく均一な画像パターンを撮影できる。

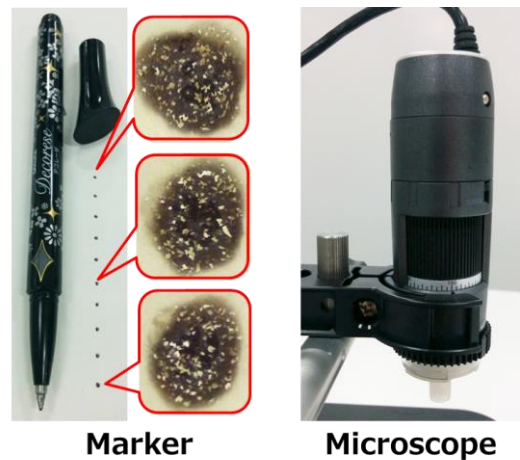


図 3 mIDoT 付与・撮影機材

2.3 画像照合アルゴリズム

画像照合には、文献[4, 5]と同様に、ORB [6] を用いた局所特徴マッチングを採用する。具体的な照合アルゴリズムを以下で述べる。まず、Oriented FAST による特徴点 (キーポイント) の検出を行い、各特徴点に対して ORB 特徴量を記述する。次に、ORB 特徴量間のハミング距離に基づき全特徴点のマッチングを行い、登録画像とクエリ画像間の対応点を取得する。さらに、得られた対応点に対して RANdom SAmple Consensus (RANSAC) [7] による幾何検証を行い、登録画像とクエリ画像間の幾何整合がとれる対応点 (インライア) を求め、画像ペア間の照合スコアとする。なお、RANSAC の幾何拘束、すなわち変形モデルとしては、相似変換を用いる。これは、mIDoT の画像撮影はカメラが mIDoT と正対した条件で行うため、平行移動・回転のみを考慮すればよく、射影歪みやアフィン歪みは微小とみなせるためである。

図 4 に、2.1 節で述べた USB 顕微鏡カメラを用いて撮影した mIDoT の画像同士の ORB 局所特徴マッチング結果の例を示す。図 4 (a) に示すように、同一個体同士の画像間では、mIDoT 上に多くの対応点が得られる。一方、図 4 (b)

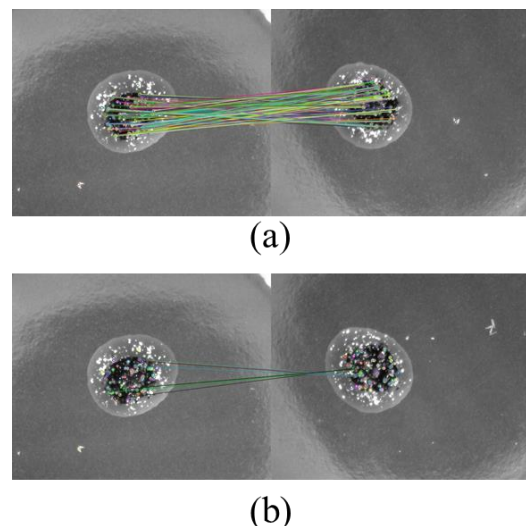


図 4 自動付与された mIDoT の画像照合例
(a)同一個体 (b)異なる個体

に示すように、異なる個体同士の画像間では、得られる対応点は同一個体同士の画像間に比べ十分少ない数であることがわかる。したがって、対応点数を照合スコアとして用いるシンプルな方法で個体識別が可能である。

3. 自動付与時の個体識別性評価

本章では、試作した直動機構を用いて、平板上へ mIDoT 1,350 個体を自動付与し、個体識別実験を行った。以下にその手順と実験結果を述べる。

3.1 方法

自動付与にあたっては、二軸自動ステージ (OSMS33-300(XY)-M6, シグマ光機) 上に平板を置き、付与・撮影のたびにステージを一定距離動かすことで、mIDoT 1,350 個体の付与および撮影を一括で行った。図 5 に実験に用いた平板と撮影画像の例を示す。平板(レジスト塗布電子基板)上に、mIDoT 1,350 個体を自動付与した。その後、平板上に自動付与した mIDoT 1,350 個体を 2 回撮影し、1 回目の撮影を登録画像、2 回目の撮影をクエリ画像として照合実験を行った。

撮影にあたっては、撮影画像のカメラ回転不変性のため、1 回目の撮影と 2 回目の撮影ではカメラの向き(LED 配置)を回転させ、照明変動を含む条件で画像を撮影した。カメラ内蔵の LED 照明は、点光源が離散的に 45 度おきに並んでいるため、最も照明条件の差異が大きくなるのは、角度差が $(22.5 + 45n)^\circ$ (n は整数) のときである。そこで、2 回目の撮影は、1 回目の撮影からカメラを反時計回りに 67.5° ($\pm 3^\circ$ 程度の角度誤差を含む) 回転させた状態で実施した。

画像照合にあたっては、2 章で述べたとおり、照合する画像ペアの各画像から ORB で特徴点を検出し、特徴量を照合して得られた対応点のうち、RANSAC で幾何拘束(相似変換)を満たしたインライアの数を照合スコアとした。撮影画像(1,280×1,024 画素)を 0.5 倍に縮小した 640×512 画素の画像から、ORB 特徴点を 200 点ずつ検出し、対応点を求めた。RANSAC の幾何拘束を満たす許容誤差は 5 画素、試行回数は 1,000 回とした。なお、ORB および RANSAC の実装には、OpenCV 2.4.11 を用いた。

3.2 結果と考察

図 6 に、照合スコア(インライア数)の累積分布を示す。x 軸は照合スコアに対する閾値、y 軸は FAR (閾値を上回った異なる個体の割合) と FRR (閾値を下回った同一個体の割合) を表す。実線は、今回実施した自動付与時の FAR/FRR、破線は文献 [5] で実施した手動付与(1,012 個体)時の FAR/FRR である。実験の結果、閾値をたとえば 40 とし、手動付与時と同様の閾値設定で、自動付与した 1,350 個体の mIDoT 全てを誤りなく個体識別できた。なお、図 4 に示した自動付与された mIDoT 同士の画像照合結果を見ると、異なる個体間では mIDoT の外形は似ているものの、対応点数は少ない。これより、自動付与された場合であっても、個々の mIDoT に含まれる微粒子のパターンは互いに十分異なっていると考えられる。

本実験において、同一個体同士の照合数は、1,350 回であり、異なる個体同士の照合数は、 $1,350 \times 1,349 = 1,821,150$ 回である。よって、mIDoT は均一な条件で自動付与した場合であっても、EER (Equal Error Rate) が 100 万分の 1 以下という高精度で個体識別可能である。すなわち、mIDoT は大量自動付与が可能であり、小型電子部品の個体トレーサビリティに適用可能と言える。

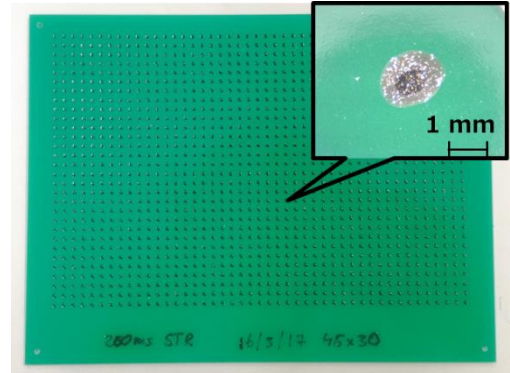


図 5 1,350 個体の mIDoT を自動付与した平板

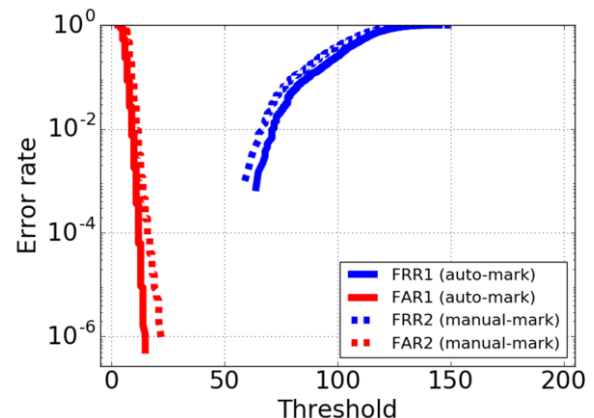


図 6 照合スコア(インライア数)の累積分布
FRR1/FAR1 (実線): 自動付与時
FRR2/FAR2 (破線): 手動付与時

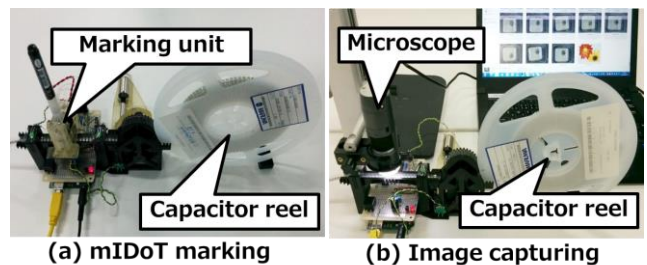


図 7 チップコンデンサへの mIDoT 自動付与機構
(a)mIDoT の自動付与 (b)画像の自動登録

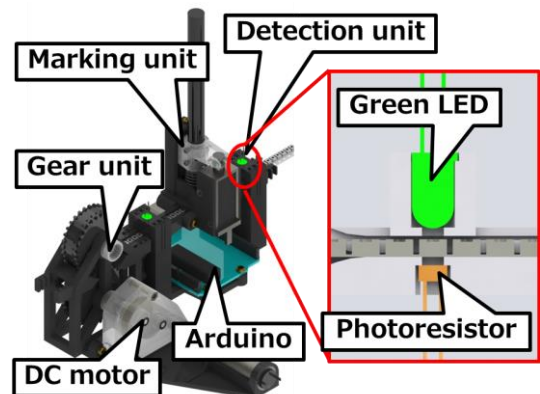


図 8 電子部品への mIDoT 自動付与機構の模式図

4. 大量生産電子部品の個体識別

本章では、実際の生産ラインへの mIDoT の適用をイメージした、チップコンデンサへの mIDoT 自動付与方法および、個体識別実験の結果について述べる。

4.1 方法

電子部品への自動付与を行うために、図7に示すような、チップコンデンサへの自動付与・撮影機構を製作した。リールパッケージをモータで位置送りし、2章で述べた直動機構を用いて、パッケージ内のチップコンデンサに mIDoT を付与した(図7(a))。直動機構を取り外し、代わりに同位置にカメラを置くことで、画像撮影・登録も可能である(図7(b))。図8に、製作した機構の模式図を示す。ギア機構とリールをかみ合わせることで、モータの回転力をリールに伝え、リールを位置送りした。モータや、後述する位置検出機構の制御には Arduino を用いた。

mIDoT を付与するチップコンデンサ(VC40R2E473K-TS, MARUWA)の大きさは 3.2×2.5 mm であり、長手方向両端の電極領域を除くと、mIDoT 付与可能な領域は半径 1 mm 程度である。この領域内に正確に mIDoT を付与するには、コンデンサの位置検出を行い、mIDoT を付与する直動機構とコンデンサの位置を正確に合わせる必要がある。そこで、図8に示すように、フォトレジスタ(HW5P-1, Haiwang sensor) および、緑色 LED (G502DC, Chengguangxing) を用いた位置検出機構を製作した。フォトレジスタと緑色 LED を向かい合わせに配し、LED 光の遮蔽によるコンデンサの位置検出を可能とした。図9に、mIDoT が自動付与されたチップコンデンサの例を示す。いずれの個体に対しても、正確に部品上に点打ちができて見ることが取れる。

個体識別実験にあたり、コンデンサ 11,423 個体上に mIDoT を自動付与した後、全個体を 2 回撮影した。その後、1 回目の撮影を登録画像、2 回目の撮影をクエリ画像として、画像照合を行った。実験にあたり、ORB の検出特徴点数などのパラメータはすべて 3 章と同一条件とした。

4.2 結果と考察

図10に、コンデンサ 11,423 個体の照合スコアの累積分布を示す。3.2 節と同様、x 軸は照合スコアに対する閾値、y 軸は FAR/FRR を表す。実験の結果、3.2 節と同様の閾値設定(インライア数 40 点)で、コンデンサ全個体を誤りなく識別できた。図11に、同一個体同士、異なる個体間の画像照合結果の例を示す。図11に示す通り、コンデンサ本体からも特徴点が一部検出されているものの、大半の特徴点は mIDoT 上に検出されており、同一個体同士の画像間では mIDoT 上で多数の対応点が得られていることがわかる。これは、mIDoT を電子部品の上に付与した場合であっても、mIDoT の識別性の大半は保たれていることを意味する。すなわち、電子部品本体の模様によらず、mIDoT を付与することで高精度な個体識別が可能と考えられる。

本実験において、同一個体同士の照合数は、11,423 回であり、異なる個体間の照合数は、 $11,423 \times 11,422 = 130,473,506$ 回である。よって、mIDoT が自動付与されたチップコンデンサを EER (Equal Error Rate) が 1 億分の 1 以下という高精度で個体識別可能であると言える。さらに、本章で述べた機構と類似の構成によって、その他の電子部品の個体トレーサビリティにも適用可能と考えられる。

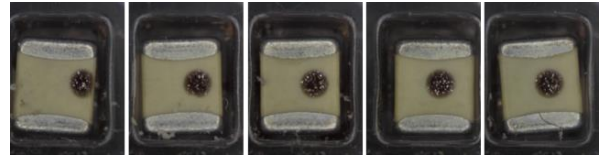


図9 mIDoT が自動付与されたコンデンサ

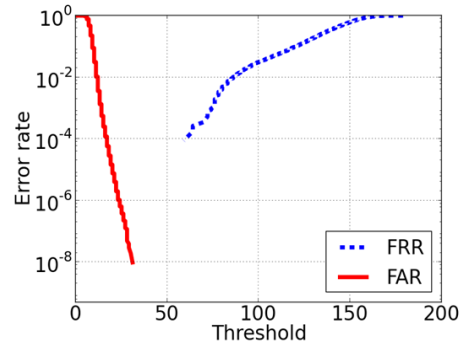


図10 コンデンサ 11,423 個体の照合スコア累積分布

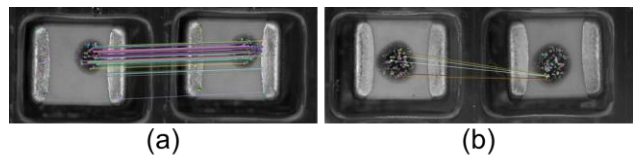


図11 mIDoT が自動付与されたコンデンサの画像照合例
(a)同一個体 (b)異なる個体

5. おわりに

本稿では、小型電子部品の個体トレーサビリティを実現するために必要な、mIDoT の自動付与について、1)自動付与機構、2)自動付与時の個体識別性評価、3)大量生産電子部品の個体識別、の3点を報告した。まず、mIDoT の自動付与を可能にする、ペンを一定の強度・向きで機械的に動かす直動機構について述べた。そして、自動付与時も個々の mIDoT が十分な識別精度をもつことを実験的に示した。さらに、小型電子部品への mIDoT 自動付与機構を試作し、11,423 個の部品を個体識別できることを示した。今後は実用化に向け、チップコンデンサ以外の多種類の部品に汎用的に適用可能な自動付与システムの開発を進めていく。

参考文献

- [1] 小林 通也, “自動車部品・部材のリコールリスクー部品・部材メーカーから見たリスクの特徴とポイント”, 損保ジャパン日本興亜RMレポート, Issue 93 (2013).
- [2] 銀泉リスクソリューションズ株式会社, “部品メーカーにとってのリコールリスク”, Risk solutions Report 月刊 (2015)
- [3] M. Usami, “An ultra-small RFID chip: μ -chip,” Proc. IEEE AP-ASIC'04, pp.2-5 (2004)
- [4] R. Ishiyama, Y. Kudo, and T. Takahashi, “mIDoT: micro Identifier Dot on Things -A tiny, efficient alternative to barcodes, tags, or marking for industrial parts traceability-,” Proc. 17th IEEE ICIT'16, pp. 781-786 (2016).
- [5] 工藤 佑太, 高橋 徹, 石山 壘, “極小 ID マーカー「mIDoT」による小型電子部品のトレーサビリティ”, 信学総大'17, p. 95 (2017).
- [6] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, “ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF,” Proc. IEEE ICCV'11, pp. 2564-2571 (2011).
- [7] M. Fishler and R. Boles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” Communications of the ACM, pp. 381-395 (1981).