

令和 2 年 9 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00363

研究課題名(和文) 多解像度グラフ地図を利用した移動ロボットの屋外ナビゲーションシステムの開発

研究課題名(英文) Outdoor Navigation System for Mobile Robots Utilizing Multi-resolution Maps

研究代表者

田崎 勇一 (Tazaki, Yuichi)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10547433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題研究では、移動ロボットや自動運転車などの智能化モビリティを実現する上で不可欠であるデジタル地図に着目し、単に実環境を精緻に表現するだけでなく、データ量や計算の効率性の観点からロボットにとって使いやすい地図表現を明らかにすることを目的とした。具体的には、三次元レーザ測域センサ(3DLiDAR)から得られる三次元点群データから近接点と呼ばれる特徴点を抽出することで、計測データに含まれる重要な環境の特徴を保存しつつデータ量を大幅に削減することを提案した。また、近接点の幾何学的性質を利用したループ検出、自己位置推定、移動物体検出などのナビゲーション技術に必要な様々な手法の提案とその評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、三次元点群データから単純なアルゴリズムにより抽出可能な特徴点を提案し、その特徴点を持つ幾何学的性質を明らかにした点にある。また、その性質を基礎として観測データ間の類似性を特徴点に基づいて評価する方法を提案し、ループ検出や自己位置推定などの種々の手法へ展開したことに意義が認められる。社会的な意義としては、近年急速な普及を見せているものの処理コストの高さが課題であった3DLiDARに対して、膨大な点群データを比較的小さな計算コストで処理する方法論を明らかにしたことで、ナビゲーションシステムの組み込み計算機などへの実装が可能となり、移動ロボットの低コスト化に寄与した点にある。

研究成果の概要(英文)：This research focused on digital map, which is a crucial element for realizing intelligent mobile robots and autonomously driving cars, and aimed at revealing the mathematical representation and characteristics of maps that are not only precise enough to capture the real world but also easy to use for the robots from the viewpoint of data size and efficiency of computation. More concretely, this research proposed a special keypoint called proximity point that can be extracted from pointcloud data produced by 3D laser range finders (3D LiDARs). By detecting proximity points from pointcloud data, the data size can be reduced dramatically while preserving the characteristics of the observed scene. Based on the geometric characteristics of proximity points, a number of techniques necessary for realizing autonomous navigation including loop detection, self-localization, and moving object detection were developed and their performance was tested in field experiments.

研究分野：ロボット工学

キーワード：移動ロボット 地図生成 自己位置推定 SLAM LiDAR

1. 研究開始当初の背景

移動ロボットや自動運転車などの智能化モビリティを実現する上で、環境を表現した「デジタル地図」は不可欠な要素である。デジタル地図は実環境中の建造物などの単なる見取り図ではなく、経路生成や自己位置推定などの様々な用途において「使いやすい」地図でなければならない。自動運転分野では衛星測位システムを援用して地図生成を行う MMS (Mobile Mapping System) と呼ばれる事業が展開されている。ただしデジタル地図の作成における道路線形の編集などは人の手に依存する部分が多い。他方、自動運転車とくらべて小型な移動ロボットの主たる実用分野は市街地や施設の敷地内、建物内といった中小スケールの環境における配送、道案内やパトロールなどである。移動ロボット分野では過去 20 年に渡り SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) の呼称でセンサ情報から環境の地図を自律生成する研究が続いており、すでに成熟の域にある。しかしながら、既存の SLAM 手法により生成される地図は 2,3 次元ユークリッド空間中の障害物の幾何学的形状を示すものに過ぎず、移動ロボットが実現すべき機能を実装する上で「使いやすい」表現形式とはいいたいがたい。実際、地図を用いて経路生成や自己位置推定を実現するには RRT (Rapidly Exploring Random Trees) や A*探索、スキャンマッチング、パーティクルフィルタといった高い計算コストを要するアルゴリズムが用いられている。加えてこれらの多くは乱数を用いるため、可解性や解の質に関して保証を与えることが難しい。このような高い計算能力の要求や品質の不安定性は技術の普及に対する妨げとなることが予想される。また、自動運転分野と移動ロボット分野に共通する課題として、地図のデータサイズが膨大となる点が問題視されている。

2. 研究の目的

低データ容量、低計算コストで移動ロボットの屋外ナビゲーションを可能とする「機能的デジタル地図」の実現に向けて、環境のトポロジー (移動可能領域のネットワーク構造) をコンパクトかつ可変粒度で表現できる多解像度グラフ型地図を提案し、その理論的性質を明らかにした上で自律的生成手法を確立する。移動ロボットの基本機能である経路生成と自己位置推定の精度や計算コストとグラフ型地図の解像度との関係性を理論的に解明し、これによりデジタル地図の機能性を損なうことなくデータサイズを劇的に削減 (数テラバイトから数メガバイトへ) する。また、レーザ測域センサを搭載した移動ロボットと無線通信装置から構成される試験システムを構築し、実環境にてグラフ型地図の自律生成とこれを用いたナビゲーションの実験的評価を行う。

3. 研究の方法

【近接点に基づく三次元点群データの特徴点抽出】

三次元測域センサが出力する大量の点群データに対して、必要な情報を保持しつつデータ量を大幅に削減するために、筆者らが近接点と呼ぶ特徴点を活用している (文献[1][2])。近接点とは観測点 (原点) への距離が近傍点群中で最小となる点である。近接点は建物の壁や角、柱、樹木などの近傍物体上に検出され、周辺物体への距離と方位の情報を含む。このため、近接点のみを含む地図を生成することで、ナビゲーションのために必要な情報を残しつつ、データ量を大きく節約できる。図 1 は近接点の模式図、図 2 は実測データから検出された近接点の例である。

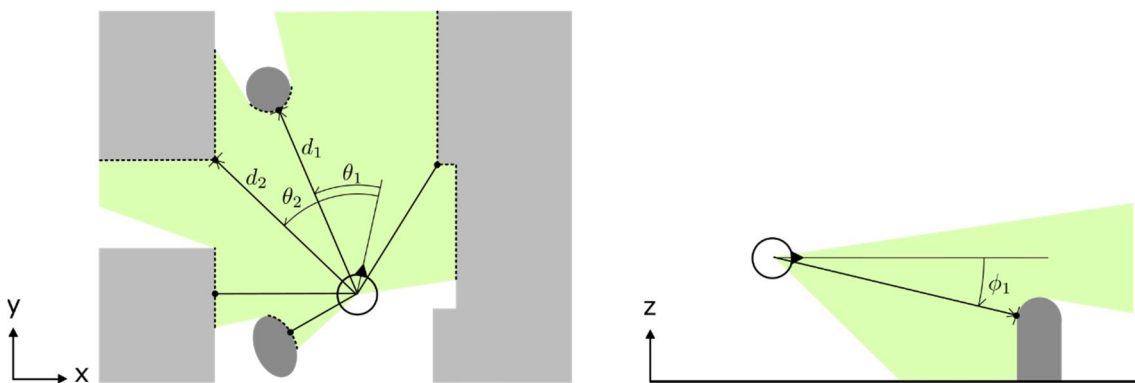


図 1. 近接点の模式図 (左: 上面図, 右: 側面図)

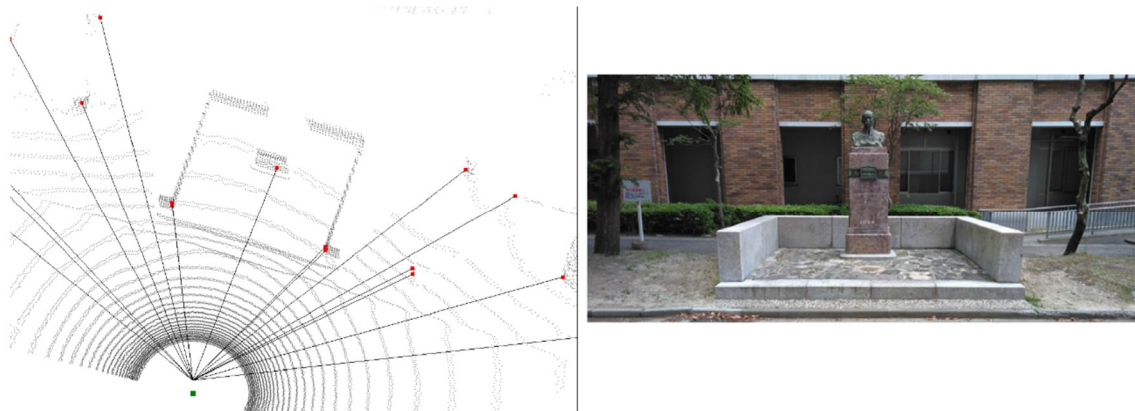


図 2. 実測データから検出された近接点の例
(左：点群データと近接点（赤）の可視化，右：同じ地点のカメラ画像)

【近接点を用いた類似性評価にもとづく時系列データからのループ検出】

移動ロボットの走行データをもとに地図を自動生成するには、ロボットが同一地点を複数回通過したことを自動認識するループ検出技術が重要となる。本研究では近接点の幾何学的性質を利用したループ検出技術を考案した（文献[1][2]）。本手法では異なる時刻で検出された近接点の類似性を近接点マッチングと呼ぶ方法により評価する。ただし異なる地点でも類似した観測が得られることが考えられるため、類似系列の検出手法として知られている Swith-Waterman アルゴリズムを用いることで検出精度の向上を図った。図 3 は建物の周りを 2 度周回した走行データに対してループ検出手法を適用した際に得られた類似度行列を可視化したものである。左側の図のように時刻ごとの類似性評価ではループ箇所が一見して明らかではないが、右側の図のように類似系列検出手法を適用すると連続して高い類似性を示す時系列が浮かび上がる。これによりロボットが同一箇所を通行した時系列データを抽出できることが確認された。

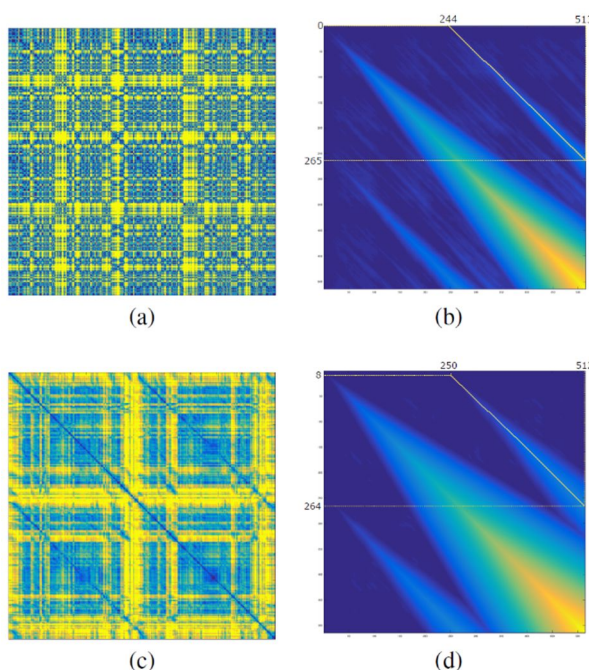


図 3. 時系列の類似度評価にもとづくループ検出

【近接点地図を利用した自己位置推定】

パーティクルフィルタにもとづく自己位置推定アルゴリズムを開発した。ここで、各パーティクルの尤度計算において、地図中の近接点とセンサデータから検出した近接点の照合（近接点マッチング）を用いる。大まかに述べると、二つの近接点集合に対して近接点同士の距離に基づいて近接点对を定義し、近接点对の幾何学的誤差の合計値を尤度とする。点群データをそのまま用いたスキャンマッチングにもとづくパーティクルフィルタと比較すれば計算コストは大幅に削減できる。

【近接点の幾何学的性質を利用した動体検出】

近接点を持つ幾何学的性質を応用することで、近接点が発見された物体とロボット自身との相対速度を推定できることを明らかにした。実測データに対する有効性を評価するために、人の通行のある屋外環境（図）でデータ計測を実施し、収集された時系列データに対して判別手法を適用した。図(a), (b)はそれぞれカメラ映像の目視により判別した移動物体と静止物体を表す（黒い線がロボットの移動経路、灰色が近接点）。これに対し、図(c), (d)は提案手法により自動判別した結果である（赤は移動物体と判定された近接点、青は静止物体と判定された近接点）。このように目視による判定に近い結果を自動的に得られることが確認できた。

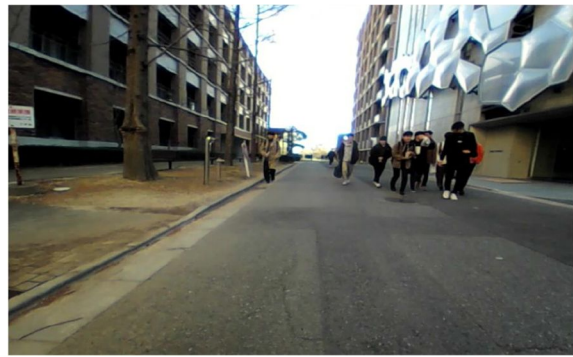
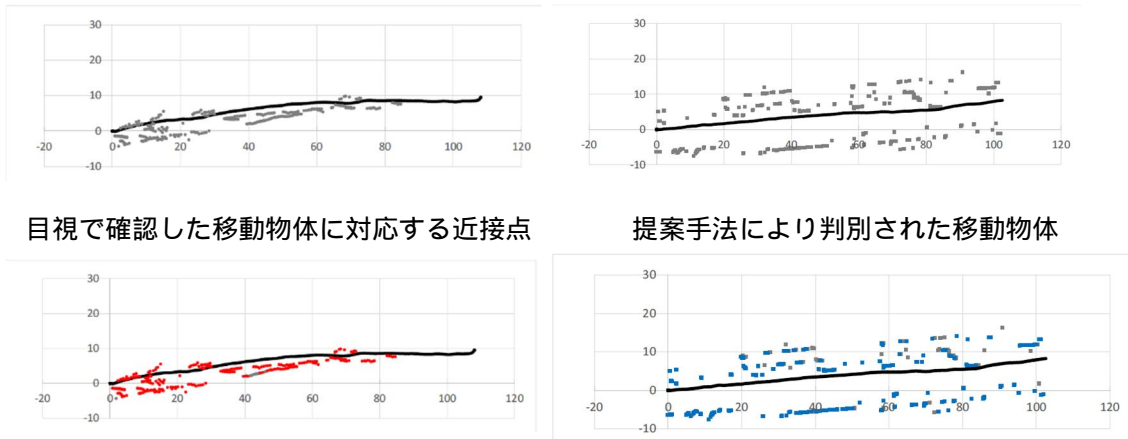


図 4. 歩行者のいる環境



目視で確認した移動物体に対応する近接点

提案手法により判別された移動物体

目視で確認した静止物体に対応する近接点

提案手法により判別された移動物体

図 5. 移動物体と静止物体の識別結果

4. 研究成果

1 件の国内会議, 2 件の国際会議にて発表した他, つくばチャレンジ (後述) 2018, 2019 の参加レポート集にて報告を行った。また, 学術論文誌への投稿を 1 件行った (査読中)。さらに, つくばチャレンジや中の島チャレンジなどの公開実験に積極的に参加し, 研究成果の実用性評価に役立てた。

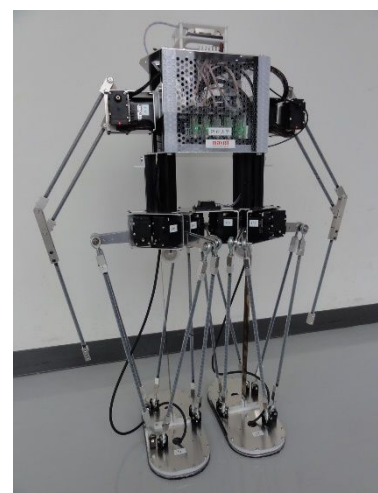
図 6 左はつくばチャレンジ 2018 および中の島チャレンジ 2019 に出場した車輪式移動ロボットである。また, 図 6 右はつくばチャレンジ 2019 に出場した二足歩行型移動ロボットである。

中の島チャレンジ 2019 において作成した近接点を含む地図データを図 7 に示す。手動走行により規定コースを走行し, 収集された計測データにもとづいて地図を作成した。その後, この地図を利用した自己位置推定法 (前述) を用い, 自律走行を行った。地図が簡易な一本道地図であるので, ナビゲーションは地図中のノードを一つずつ辿るのみとした。ループ検出技術と組み

合わせることで分岐や合流のある地図の作成およびこれを用いたナビゲーションを実現することは今後の課題の一つである。また, 今回は時間的制約が大きかったため地図からの移動物体の除去は行わなかった。このため, 計測時に映り込んだ歩行者などが地図に残ってしまった。



車輪式移動ロボット
Omnia3



二足歩行型移動ロボット
パラレル二足ロボ

図 6. 実証用に開発したロボット

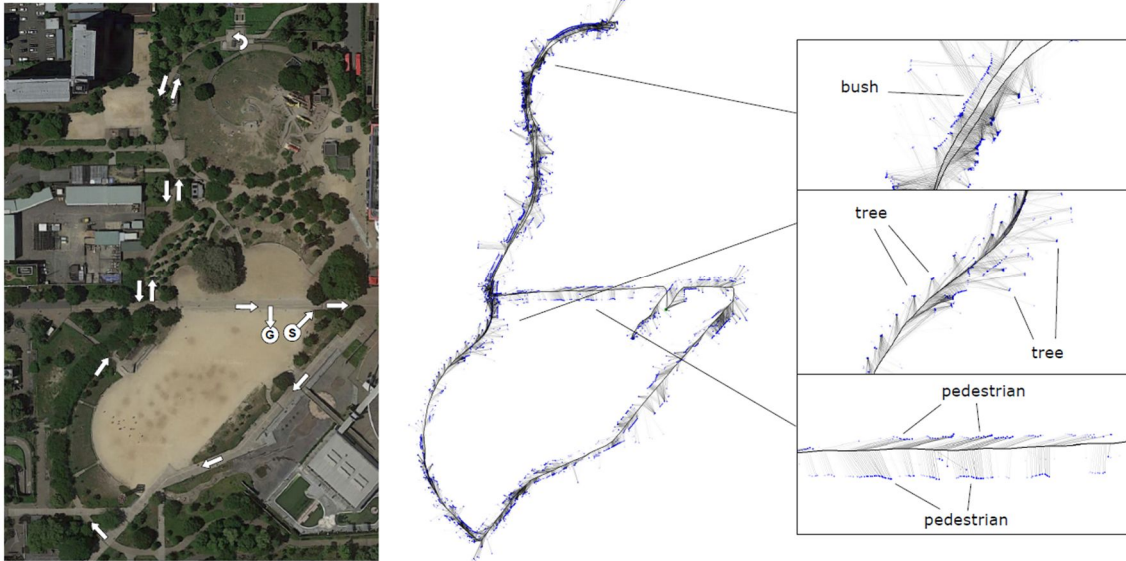


図7. 中ノ島チャレンジ2019 エクストラチャレンジ会場の扇町公園
(左, Google Maps) と作成した近接点地図(右)

以上のように, 当初目的として掲げた大規模環境に適用可能なコンパクトな地図という点については, 近接点という特徴点を中心として地図生成, 自己位置推定, 移動物体検出などの種々の手法を開発し, その有効性をある程度確認できたという意味で成果をおさめることができた。ただし, 個々の手法の完成度を研究期間内に高めることができなかったため, 手法の統合や実用性の向上は今後の継続研究の課題となっている。

主要発表文献

- [1] 宮内勇貴, 田崎勇一, 横小路泰義: 近接点特徴量を用いた屋外環境におけるループ検出, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-A01, 2017.
- [2] Y. Tazaki, Y. Miyauchi, Y. Yokokohji: Loop Detection of Outdoor Environment Using Proximity Points of 3D Pointcloud, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2017.
- [3] Y. Tazaki: Parallel Link-based Light-Weight Leg Design for Bipedal Robots, 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.596-602, 2019.
- [4] 田崎勇一: つくばチャレンジ2018 報告書(No.44), つくばチャレンジ2018 参加レポート集, pp. 150-151, 2018.
- [5] 田崎勇一: つくばチャレンジ2019 報告書(No. 61) 二足歩行式自律移動ロボットの実現に向けて, つくばチャレンジ2019 参加レポート集, pp. 178-181, 2019.
- [6] Y. Tazaki and Y. Yokokohji: Outdoor Autonomous Navigation Utilizing Proximity Points of 3D Pointcloud, Journal of Robotics and Mechatronics, Special Issue on Real World Robot Challenge in Tsukuba and Osaka (under review).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuichi Tazaki, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki	4. 巻 Vol.2, No.4
2. 論文標題 Parking Trajectory Planning Using Multi-resolution State Roadmaps	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Vehicles	6. 最初と最後の頁 pp.298-307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIV.2017.2769882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 G. Kim, H. Kuribayashi, Y. Tazaki, Y. Yokokohji
2. 発表標題 Omni-Directional Fall Avoidance of Bipedal Robots with Variable Stride Length and Step Duration
3. 学会等名 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天竺航, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 二機のロボットによる合意形成に基づく自律地図生成
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片岡俊, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 踵接地・つま先離地を行う二足歩行ロボットの軌道計画とシミュレーションによるエネルギー効率の評価
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗林拓輝, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 鉛直方向の重心運動を考慮した二足ロボットの転倒回避軌道生成
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Tazaki, Yuki Miyauchi, Yasuyoshi Yokokohji
2. 発表標題 Loop Detection of Outdoor Environment Using Proximity Points of 3D Pointcloud
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 沢田雄介, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 三次元点群の近接点特徴を用いた走行データからの複数ループ検出
3. 学会等名 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
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮内勇貴, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 近接点特徴量を用いた屋外環境におけるループ検出
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Tazaki
2. 発表標題 Parallel Link-based Light-Weight Leg Design for Bipedal Robots
3. 学会等名 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西口弘太郎, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 移動ロボット群の観測情報の共有による環境探索の効率化
3. 学会等名 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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田崎勇一
2. 発表標題 6自由度パラレルリンク脚機構を有する小型二足ロボットの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----