

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12025

研究課題名(和文)直積量子化の大幅な高速化と安定化による超高性能最近傍探索

研究課題名(英文) Large Scale Nearest Neighbor Search by Acceleration and Stabilization of Product Quantization

研究代表者

相澤 清晴 (Aizawa, Kiyoharu)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：20192453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：大規模画像に対する高速最近傍探索の有力技術の一つが直積量子化(PQ)である。この直積量子化に対して、飛躍的に計算効率、メモリ効率を高めることを目的として、以下の研究を行った。
(1) 効率的な密空間分割PQ：複数のクラスタ中心ベクトルの組み合わせによる効率的な密な空間分割による最近傍探索 (2) PQTable：ハッシュテーブルを用いた直積量子化の効率化 (3) PQkmeans：大規模クラスタリングを可能にするPQ領域での高速、省メモリなkmeans (4) Residual Expansionアルゴリズム：kmeans等の非凸最小二乗問題に対する効果的な高速最小化手法

研究成果の概要(英文)：Product Quantization (PQ) is the most promising technique for high-speed nearest neighbor search for large-scale images retrieval. For this product quantization, we carried out the following research in order to dramatically increase computational efficiency and memory efficiency.

(1) Dense space partitioning PQ: Efficient dense space partitioning by combining multiple centroids of clusters (2) PQTable: Efficient product quantization using PQ code as a hash table (3) PQkmeans: Fast and memory efficient kmeans in PQ domain achieving very large scale clustering (4) Residual Expansion Algorithm: Efficient and Effective Optimization for non-convex least square problem such as kmeans

研究分野：マルチメディア、画像処理、コンピュータビジョン

キーワード：直積量子化 最近傍探索

1. 研究開始当初の背景

インターネットや検索エンジンの普及に伴い、扱わなくてはならない情報量は指数関数的に増大している。大規模データベースを扱う上で最も基本的かつ重要な操作は所望のデータを探ること、すなわち「検索」であるが、データ量の増加により精度低下や速度低下を招いている。上記の問題を解決するために、様々な最近傍探索技術が開発されてきた。近年注目を集めているのが直積量子化 [Jegou, PAMI11] であり、現在最高性能を誇る技術の 1 つである。その後、様々な改良手法が提案されている。しかし、直積量子化はデータベースのサイズに対して線形に処理コストが増大する ($O(N)$) という問題がある。また、現在のところ平均検索速度のみが評価尺度とされ、最悪値やばらつきについての議論は殆どなされていない。

2. 研究の目的

近年、大規模画像に対する高速検索技術の重要性が高まっている。現在、高速最近傍探索技術の中で最高性能を誇る技術の一つが直積量子化 (Product Quantization, PQ) である。この直積量子化に対し、以下の 2 つを実現することを研究目的とする。

- (1) 高速化：直積量子化はデータベースのサイズに対して線形に処理コストが増大する。これに対し、ハッシュを用いた独自技術により高速な検索を実現する。
- (2) 演算・メモリ消費量の安定効率化：直積量子化は、平均検索時間は高速である反面、演算時間などが安定せず最悪値は平均値の数倍に及ぶこともある。データの分布を考慮した内部データ構造の最適化を行うことで一定化・安定化を図る。併せて、パラメータの自動設定手法を確立する。

3. 研究の方法

具体的には、以下の項目についての研究を進めた。

- ✓ 効率的な密空間分割 PQ
複数のクラスタ中心ベクトルの組み合わせによる効率的な密な空間分割による最近傍探索
- ✓ PQTable：ハッシュテーブルを用いた直積量子化の効率化
- ✓ PQkmeans：大規模クラスタリングを可能にする PQ 領域での高速、省メモリな kmeans
- ✓ Residual Expansion アルゴリズム：kmeans 等の非凸最小二乗問題に対する効果的かつ高速な最適化手法

4. 研究成果

■ 効率的な密空間分割 PQ

直積量子化では、事前に空間分割を行い、複数のクラスタを作る。クラスタ中心点との距離を計算することで、特徴ベクトルを一番近いクラスタに割り当て、特徴量のインデクシングを行う。大量の高次元特徴量ベクトルに対する最近傍探索のためには、大量のクラスタを持つ密な空間分割が必要である。しかし、空間分割の処理時間はクラスタ数に比例するため、大量のクラスタを生成するには、長時間が必要となる。本提案では、特徴量ベクトルの複数近傍のクラスタ中心点を用いることで、大量のクラスタを生成する手法を提案した。この密な空間分割により、最近傍探索の効率を向上した。既存の IVFADC に比して、同一のクラスタ中心数でも、分割密度を上げることができ、検索時間を半分にすることができることを示した。

(本研究は、画像処理最大の会議である IEEE ICIP に採択され、発表を行った。)

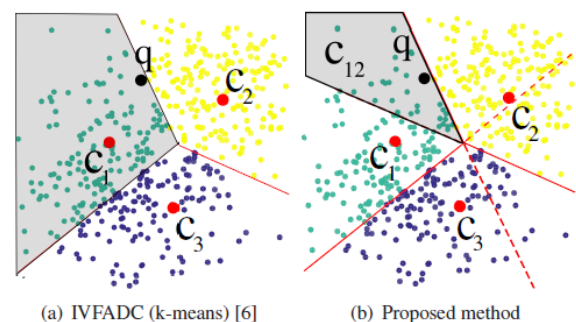


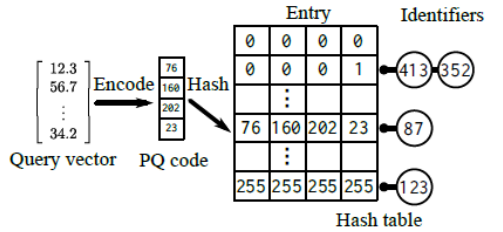
図 1 効率的な密空間分割 PQ

従来型の空間分割が (a) のように、空間代表点に対して一つの分割が与えられるのに対し、提案手法では、(b) のように同一の代表点を用いて、その組み合わせで密な空間分割を行うことができる。

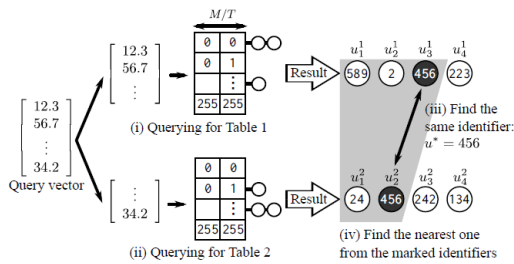
■ PQTable (ハッシュテーブルを用いた直積量子化の効率化)

PQ コード自身を利用したハッシュテーブルである PQTable を提案した。クエリに対するデータエントリが空の場合に対応するために、近傍候補の生成法を提案し、大きな次元数に対応するため、テーブルの分割・統合法を提案した。PQTable を用いることで、線形探索 PQ と全く同一の検索結果を導くことができるとともに、高速であり、10 億個の 128 次元データを有するデータセットに対して、通常の PQ に比して、2 桁から 5 桁倍高速に動作することを明らかとした。なお、転置

インデックスを用いた従来の検索手法等と比べて、提案手法では、種々のパラメータの人手による調整が不要である。
(本研究は、コンピュータビジョンのトップコンファレンスである ICCV に採択され、発表を行った.)



Proposed PQTable (Single table)



Proposed PQTable (Multitable)

図2 提案手法のアウトライン

入力のカエリーベクトルをPQし、データベースをPQをハッシュとみなして効率的にサーチする. PQによる線形探索と同一の結果を2桁から5桁早い速度で得ることができる.

■Residual Expansion アルゴリズム: 非凸最小二乗問題に対する効果的な高速最適化手法

クラスタ中心を求めるKmeans アルゴリズムといった非凸の最小二乗問題に対して効果的な新しい解法を提示した. Kmeans を例にとれば、最適化の繰り返しのたびに、データ点をわずかに代表点に対して残差方向に拡大する。縮小を繰り返すこれまでの手法と対比すれば、あえて最適からずらすような拡大処理を行う。このプロセスにより、不良な局所最適状態から抜け出し、より良い最適化が、高速に行えることを示した。最適化手法であるため、広い応用がありえて、Kmeans、点群レジストレーションといったありふれた処理はもちろん、OPQ (Optimized Product Quantization)、ボケ除去など広い適用を示した。

(本研究は、コンピュータビジョンのトップコンファレンスである CVPR に採択され、発表予定である.)



(a) 原画



(b) ボケ画像



(c) 最良の既存手法による復元



(d) 提案手法での復元

図3 提案のRE最適化によるボケ画像の復元

■PQkmeans: PQ コード領域における kmeans

PQ を用いて、すべてを PQ のコード領域で計算することで、極めて大規模な 10 億以上のデータ点のクラスタリング処理を 1 台の PC 上で可能とする PQkmeans を実現した。通常の kmeans によるクラスタリングでは、計算量が多すぎて、これほどの大規模なクラスタリングは行われたことがない。PQ の省メモリかつ高速演算の特徴を活用し、PQ コード領域のまま交互最適化を行う手法を示した。(本研究は、国際会議に投稿中である。)

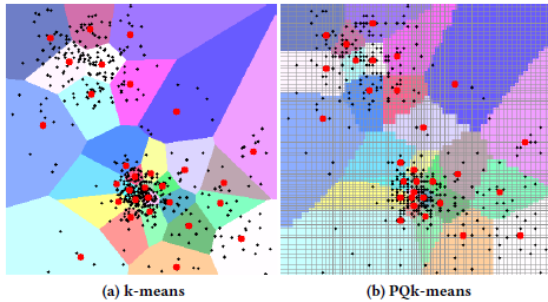


図 4 PQkmeans の提案手法

(a)の通常の kmeans によるクラスタリングに対して、(b)のように PQ 化されたデータ点をそのまま扱うことで、省メモリで高速な処理が可能になる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

[学会発表] (計 6 件)

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] Daiki Ikami, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, Residual Expansion Algorithm: Fast and Effective Optimization for Nonconvex Least Squares Problems, Proc. CVPR2017, July 22-25, Hawaii (USA) (査読有)
- [2] Yusuke Matsui, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, PQTable: Fast Exact Asymmetric Distance Neighbor Search for Product Quantization using Hash Tables, Proc. ICCV (Int. Conf. Computer Vision) 2015, pp. 1940-1948, Dec. 11-18, 2015, Santiago (Chile) (査読有)

- [3] Tuan Anh Nguyen, Yusuke Matsui, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, Selective K-means Tree Search, Proc. ACM Multimedia, pp. 875-878, Oct. 26-30, 2015, Brisbane (Australia) (査読有)
- [4] Nguyen Anh Tuan, Yusuke Matsui, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, Searching for Nearest Neighbors with a Dese Space Partitioning, Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing (ICIP2015), ARS-07.5, Sep. 27-30, 2015. (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- [1] Daiki Ikami, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, Residual Expansion Algorithm: Fast and Effective Optimization for Nonconvex Least Squares Problems, CVPR2017, July 22-25, Hawaii (USA)
- [2] Yusuke Matsui, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, PQTable: Fast Exact Asymmetric Distance Neighbor Search for Product Quantization using Hash Tables, ICCV (Int. Conf. Computer Vision) 2015, pp. 1940-1948, Dec. 11-18, 2015, Santiago (Chile)
- [3] 松井勇佑, 山崎俊彦, 相澤 清晴, PQTable: ハッシュテーブルを用いたプロダクト量子化ベクトルの高速探索, 画像符号化・映像メディア処理シンポジウム (PCSJ・IMPS2015), I-2-01, pp. 58-59, Nov. 18-20, 2015, ラフォーレ修善寺, (静岡県伊豆市) (映像メディアシンポジウム学生論文賞受賞)
- [4] Tuan Anh Nguyen, Yusuke Matsui, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, Selective K-means Tree Search, ACM Multimedia, pp. 875-878, Oct. 26-30, 2015, Brisbane (Australia)
- [5] Nguyen Anh Tuan, Yusuke Matsui, Toshihiko Yamasaki, Kiyoharu Aizawa, Searching for Nearest Neighbors with a Dese Space Partitioning, IEEE Int. Conf. Image Processing (ICIP2015), ARS-07.5, Sep. 27-30, 2015,

- [6] ゲン アン トゥアン, 松井 勇佑,
山崎 俊彦, 相澤 清晴,
複数近傍を用いた密な空間分割による
最近傍探索,
画像の認識・理解シンポジウム
(MIRU2015) SS2-21, July 26-30, 2015,
ホテル阪急エキスポパーク (大阪府吹
田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相澤 清晴 (Aizawa, Kiyoharu)

東京大学大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：20192453