

令和元年6月10日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06381

研究課題名（和文）スパース信号表現に基づいた高速移動物体追跡技術とそのスポーツ競技戦略分析への応用

研究課題名（英文）Accurate Moving Object Tracking Technique Based on Sparse Signal Representation and Its Application to Sports Analysis

研究代表者

市毛 弘一（ICHIGE, Koichi）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10313470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：スポーツ競技を想定して、選手に取り付ける小型無線送信タグ、およびフィールド外に設置する受信アンテナをモデルとして、高精度に選手（移動物体）をトラッキングするシステムならびにトラッキングアルゴリズムを開発した。不均一送信パルスならびに位相補正手法を用いることで、既存手法よりも優れたトラッキング精度を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、多数のビデオカメラによる画像解析により行われているトラッキングを、簡易な無線通信システムで代替することで、日常的に利用できる安価なシステムとして構築した。さらに、トラッキングアルゴリズムの高精度化を図ったことで、スポーツ競技への応用が可能な分析精度を実現しており、今後の戦略分析などへの応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We described our development of a radio-based moving object tracking system using non-uniform pulse transmission and phase difference compensation. We showed how we averaged the observed neighboring TDOA values and in so doing were able to improve the tracking accuracy over that of a conventional method.

研究分野：アレー信号処理

キーワード：トラッキング スパース信号表現 カルマンフィルタ アレー信号処理

## 1. 研究開始当初の背景

スポーツ競技における選手の移動の軌跡や運動量の解析手法として、複数のビデオカメラを用いた画像解析が用いられている。しかし、画像解析では、選手が入り乱れるなどすると誤判定が発生し、途中から他の選手を追ってしまうといった問題点があり、誤差が大きい。より高精度な解析のために、無線通信による位置推定技術を用いて、選手やボールの動きをリアルタイムで解析する研究が近年行われている。

無線通信による位置推定は、選手に信号送信用のタグを装着し、フィールドの周囲に信号受信用のアンテナを配置して行う。タグより送信された信号をアンテナで受信し、得た情報を利用して信号源であるタグの位置を推定する。位置推定の手法として、TOA (Time Of Arrival) や TDOA (Time Difference Of Arrival) などが挙げられる。TOA はタグとアンテナの時刻同期を必要とするのに対し、TDOA はアンテナ間のみ時刻同期ができれば利用可能という利点を持つため、本研究では TDOA を採用する。

TDOA は各アンテナ間での信号の到達時間の差分をもとに位置推定を行う手法である。各アンテナ間での到達時間差より双曲線を描き、それらの交点を信号源の位置として決定するため、到達時間に含まれる誤差が大きいと推定精度は悪くなる。そのため、最適化手法を適用することで、到達時間差を含む誤差を削減し、その結果をもとに位置推定を行う。一般的に位置推定技術に用いられる最適化手法として、カルマンフィルタが挙げられる。カルマンフィルタは推定値の他にその変化量も更新し、それをもとに次の状態を予測するという特徴があるため、速度を持ち、値が変化し続ける移動物体のトラッキングに適しているといえる。

## 2. 研究の目的

本研究は、より精度の高いトラッキングを目的として、新たに到達時間差の最適化に受信信号の位相情報を利用する手法を提案する。また、シミュレーションにより、提案手法の推定精度の評価を行う。さらに、アレーアンテナによる到来方向推定の考え方を援用することで、より高精度な位置推定・トラッキングへの応用を検討する。

## 3. 研究の方法

本研究課題における研究方法の一例を以下に示す。

### (1) 位置情報を導入したカルマンフィルタ

まず、新たに受信信号の位相変化量を導入したカルマンフィルタの状態変数ベクトルを示す。タグからの搬送波は到達の過程で位相が変化しているために、各アンテナで受信した際の位相がそれぞれ異なり、それは到達時間の差分に結び付くことを利用する。

TDOA では、到達時間差が観測値として利用できるパラメータであるので、状態変数ベクトルは一般に、時間項とその微分項によって定義される。提案手法では、時間微分項の代わりに、受信信号の位相の変化量を用いる。到達時間差とその変化量にそれぞれ別のデータを用いることで、推定精度の改善を期待できる。

### (2) 受信信号の位相回転とその位置推定への応用

キャリア周波数は固定のパラメータであるため、各アンテナでの受信信号の位相の差は信号の到達時間によるものである。

ここでは、前節で述べた位相回転数の概念の位置推定への利用法について述べる。伝搬の過程で位相回転数が 1 を超えると、受信信号から正確な位相回転数を知ることは不可能である。すなわち、タグからアンテナまでの距離  $d$  が  $c/f$  以上だと、 $a$  は 1 以上となり正確に算出できない。しかし、 $d$  が  $c/f$  以下であるという条件は現実的ではない。そこで、1 回の更新ごとの位相回転数の変化量に着目する。前述の通り位相回転数の情報は時間情報に結び付くため、回転数の変化量が分かれば到達時間の変化量を知ることができる。提案手法ではこの性質を利用している。

まず、受信信号より時刻を検出すると同時に、受信信号の位相回転量を求める。受信信号には雑音成分が含まれているために、そこから算出した位相にも誤差は含まれているが、信号と雑音の比である SNR (Signal Noise Ratio) が十分に高ければその誤差は小さくなり、真値に近い位相がわかる。

次の時刻でも同様に受信信号の位相より回転数の小数部分を算出する。ここで、更新ごとのタグの移動距離が微小であるならば、回転数のずれも微小であり、その変化量は 0.5 周以内であるという条件が成立すれば、回転数の変化量を正確に算出することができる。

前述の位相回転数の変化量の決定について図 1 を用いて説明する。現在の時刻において、複素平面における単位円上での位置を図の点 A とする。回転数の変化量は最大 0.5 という条件が成立するならば、次の時刻での単位円上の点の移動距離は正負ともに点 A' までである。すなわ

ち、次の時刻での位置が点 B であるならば、点 A から B までの分回転数は増加したことになる。一方、次の更新時の位置が点 C であるならば、変化量が 0.5 以内という条件から C まで増加することはありません、回転数は点 A から C の分まで減少したことになる。このように各時刻間での移動距離が微小で、移動による信号の回転数の変化が 0.5 以内であるならばその変化量を 1 つに決定できる。これにより、到達時間の変化量を位相情報から決定できる。

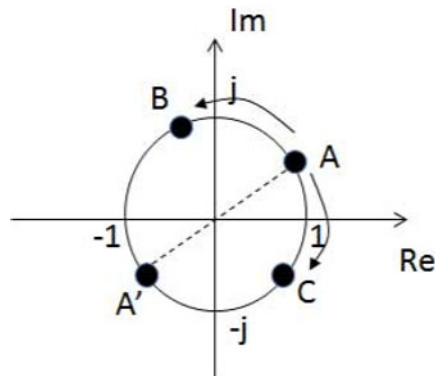


図 1：位相変化量の決定

#### 4. 研究成果

本研究課題における研究成果の一例を以下に示す。

##### (1) トラッキング精度の検証

シミュレーションによって、観測値として到達時間差のみを利用するカルマンフィルタと、提案手法である位相の変化量を利用するカルマンフィルタの推定精度を示し、その性能を評価する。推定精度の評価には、真値と推定値より算出される RMSE (Root Mean Square Error) を用いる。図 2 に示す通り 70×100m のサッカーコートを中心座標を(0,0)としてシミュレーションを行う。

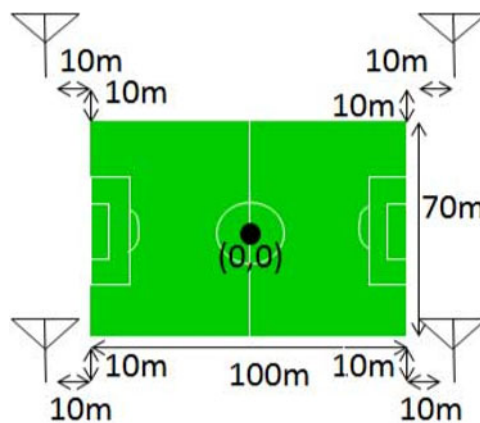


図 2：評価フィールド

また、ターゲットの移動モデルを図 3 に示す。位置推定の対象としては、試合中のサッカー選手を想定する。移動の最高速度を 10m/s と想定しているため、更新間隔を 0.04sec とし、推定点の間隔が 40cm 程度であれば移動の軌跡を再現できると判断する。移動の間隔が最大 40cm であるため、提案手法の利用のためにはキャリアの波長を 80cm 以上にする必要がある。すなわち、キャリア周波数は 375MHz 以下に設定する必要がある。本稿では、240MHz と設定してシミュレーションを行う。

まず、図 3a)の移動モデル 1 でのシミュレーション結果を示す。移動モデル 1 は 1 秒ごとに移動の方向転換をする。これにより、提案手法が頻繁に進行方向が変化する運動に有効であるか確認する。座標(-2.5,-6)を移動開始点 A として、到達時間差をもとに位置座標を推定した結果を図 4 に示す。図 4 より、到達時間差のみを利用するカルマンフィルタと提案手法ともに、観測値を真値に近づけることができている、またその性能は提案手法の方が優れていると判断できる。

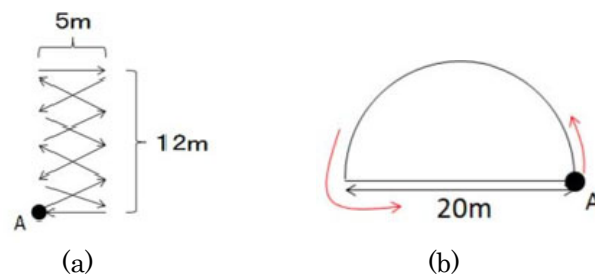


図 3：移動モデル

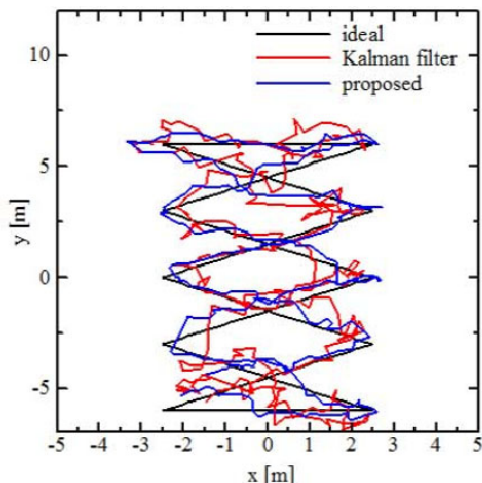


図 4：トラッキング結果（モデル 1）

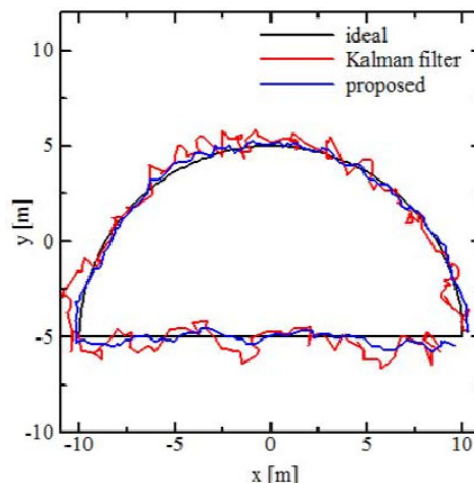


図 5：トラッキング結果（モデル 2）

次に、図 3(b)の移動モデル 2 でのシミュレーション結果を示す。移動モデル 2 は円弧上を 5 秒で移動し、その後直線で 3 秒移動する。これにより、提案手法が直線のみではなく、曲線で移動する場合でも有効であるかを確認する。座標 (10,-5) を移動開始点 A として、到達時間差をもとに位置座標を推定した結果を図 5 に示す。図 5 より、移動モデルを変更した場合でも、真値により近いものは提案手法であると判断できる。

さらに、推定値と真値との距離を誤差として、RMSE で提案手法の有効性を確認したところ、モデル 1、モデル 2 双方の場合で、提案手法は従来手法に対して約 40%ほど推定誤差を削減できていることがわかった。以上の結果から、提案手法は移動物体のトラッキングにおいて有効な手法であると言える。

### (3) その他の研究成果

その他の研究成果として、位置推定の高精度化を見据えたアレーアンテナによる到来方向推定、MIMO レーダによる位置推定などの検討を実施した。本研究課題からの応用として得られた研究成果としては、①到来方向推定における拡張アレー処理・スパースアレーの有効性、②スパースアレーとそのビームフォーミング応用、③MIMO レーダにおける拡張アレー処理の適用と高精度位置推定、などが挙げられる。これらの詳細は以下の発表論文を参照されたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① S. Iwazaki, K. Ichige, "Extended Beamforming by Sum and Difference Composite Co-Array for Real-Valued Signals", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E102-A, no. 7, July 2019. (accepted) (査読あり) .
- ② K. Ichige, N. Arakawa, R. Saito, O. Shibata, "Phase-Difference Compensation and Nonuniform Pulse Transmission for Accurate Real-Time Moving Object Tracking", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E102-A, no. 1, pp. 211-218, Jan. 2019. (査読あり) .
- ③ T. Basikolo, K. Ichige, H. Arai, "Nested Circular Array and Its Concentric Extension for Underdetermined Direction of Arrival Estimation", IEICE Trans. Communications, vol. E101-B, no. 4, pp. 1076-1084, Apr. 2018. (査読あり) .

- ④ 岩崎 翔, 市毛 弘一, "所望信号の位相遅延検出とフィードバック構造を利用したアダプティブアレイによる適応ビーム形成", 信学論 A, vol. J-100A, no. 1, pp. 70-78, Jan. 2017. (査読あり) .

[学会発表] (計 13 件)

- ① S. Nakamura, S. Iwazaki, K. Ichige, "Optimum 2D Sparse Array and its Interpolation via Nuclear Norm Minimization", Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1-6, May 2019.
- ② S. Wandale, T. Basikolo, K. Ichige, "Super Nested Sparse Circular Array for High Resolution DOA Estimation", Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1-6, May 2019.
- ③ S. Iwazaki, K. Ichige, "Underdetermined Direction of Arrival Estimation by Sum and Difference Composite Co-Array", Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), pp. 669-672, Dec. 2018.
- ④ R. Saito, K. Ichige, "Effect of Signal Correlation in FMCW-MIMO Radar with Augmented Array", Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 615-616, Oct. 2018.
- ⑤ S. Nakamura, S. Iwazaki, K. Ichige, "An Optimum 2D Sparse Array Configuration with Reduced Mutual Coupling", Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 617-618, Oct. 2018.
- ⑥ S. Iwazaki, K. Ichige, "Extended Beamforming by Sum and Difference Composite Co-Array for Radio Surveillance", Proceedings of the IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS), no. 61, Dec. 2017.
- ⑦ R. Saito, K. Ichige, T. Ishihara, A. Nakazawa, "Accurate RSSI-Based Indoor Localization Using Time-Domain Path Loss Compensation", Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), no. 207, Sep. 2017.
- ⑧ N. Arakawa, K. Ichige, "Multi-sensor Indoor Target Localization Based on Multipath Exploitation", Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), no. 218, Sep. 2017.
- ⑨ S. Iwazaki, K. Ichige, "Sum and Difference Composite Co-Array: An Extended Array Configuration toward Higher Degree of Freedom", Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEESE), pp. 351-356, Nov. 2016.
- ⑩ K. Ichige, N. Arakawa, O. Shibata, "Accurate Radio-Based Moving Object Tracking and Its Application to Sports Analysis", Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEESE), pp. 346-350, Nov. 2016.
- ⑪ N. Arakawa, K. Ichige, O. Shibata, "Kalman-based Moving Object Tracking Using Nonuniform Pulse Transmission Scheme", Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 496-497, Oct. 2016.
- ⑫ Y. Iizuka, K. Ichige, "Extension of Two-Level Nested Array with Larger Aperture and More Degrees of Freedom", Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 442-443, Oct. 2016.
- ⑬ T. Basikolo, K. Ichige, H. Arai, "Underdetermined DOA Estimation for Uniform Circular Array Based on Sparse Signal Reconstruction", Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1012-1013, Oct. 2016.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。