

## 防犯カメラ映像の裁判における証拠能力を担保するための数理基盤

小西, 克巳 / KONISHI, Katsumi

---

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2019-06-20

令和元年6月20日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2015～2018

課題番号：15KT0021

研究課題名(和文) 防犯カメラ映像の裁判における証拠能力を担保するための数理基盤

研究課題名(英文) mathematical modeling of human behavior in video image

研究代表者

小西 克巳 (KONISHI, KATSUMI)

法政大学・情報科学部・教授

研究者番号：20339138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、防犯カメラ等で観測された人物行動を裁判の証拠として活用する手法について取り組んだ。防犯カメラ映像に映った人物の間接部位のうち、障害物に隠れて位置が計測できない部位の位置を推定する手法を導出した。また、人物行動を表現する数学モデル構築について取り組み、複数の線形システムの重み付き平均により、人物行動を表現する数学モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、防犯カメラ等で撮影された人物行動のうち、障害物により遮蔽されて観測できなかった行動を精度高く推定することが可能となった。これにより、本来であれば見えない行動も見えるようになり、防犯カメラの犯罪抑止能力の向上へとつながる。また、人物行動の推定は、低次元多様体上の信号修復問題と定式化され、本研究により、同問題を効率良く解く手法が導出された。この点に、本研究の信号処理分野における学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：This work provided a estimation method for unobserved human behavior in video image and proposed a new mathematical model to describe human behavior in video image by a weighted combination of linear systems.

研究分野：数理工学

キーワード：圧縮センシング 行列ランク最小化 信号修復

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

繁華街や空港など多くの場所に防犯カメラが設置されており、その目的は犯罪発生時の犯行を記録する点にある。映像記録により人物を特定し、犯罪捜査を円滑にするという点では目的を達成しているが、残念ながら、裁判の証拠として認められるまでには至っていない。例えば、人が見れば明らかに容疑者により犯行が行われている映像であっても、映像が不鮮明である場合、夜間の映像の場合、人物の一部が遮蔽されている場合など映像に欠損がある場合は、容疑者が否認する限り、その犯行が確実に行われたという証拠として扱われないのが現状である。一方で、目や鼻の位置、各部位の関節位置などを映像から計測し、主成分分析によって人物の同一性を立証する方法は裁判の証拠として認められるケースが多い。例えば、耳の形状や指関節の長さは、高い精度で人物の同一性を判定でき、裁判でも重要な証拠として採用されている。これは「指紋」や「DNA」が、生物学により証拠能力を担保されているのと同様に、『数学』によって主成分分析の正しさが担保されているためである。しかし、防犯カメラ等で観測された人物の行動を数学的に記述する適切な手法はないために、裁判の証拠として扱われていない。そこで、人物の行動を数学的に記述し、裁判の証拠として耐えうる数理モデルの構築が望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究では、防犯カメラ等で観測された人物行動を裁判の証拠として活用するため、人物行動を数学的に記述するモデリング手法を確立し、人物がどのような行動をしているのかを数学的に表現する手法を構築する。静止画像から得られる特徴量に対する主成分分析と類似した、防犯カメラ映像に映る人物行動の分析手法を確立するのが目的である。

### 3. 研究の方法

本研究では、防犯カメラ等で観測された人物の関節部位座標の時系列データに基づいて、人物行動を数学的に記述する手法を導出する。その実現のために、以下の項目の研究を行う。

#### (1) 防犯カメラ映像に映った人物の障害物に隠れた関節部位の位置を推定する手法の確立

防犯カメラ映像に映った人物の関節部位のうち、障害物に隠れて位置が計測できない部位の位置の推定手法を構築する。本研究では、人物の関節の位置を時系列データとして扱い、人物行動の数学モデルを構築するが、人物の関節が常に計測できるとは限らず、障害物等により遮蔽された場合には時系列データの欠損が生じる。時系列データが欠損している場合、データ解析やモデル構築を行うことができない。そこで、欠損した時系列データを修復し、障害物に隠れた関節部位の位置を推定する手法を確立する。

#### (2) 人物行動を表現する数理モデルの同定手法の確立

本研究では、関節部位の座標の時系列データの Hankel 行列の主成分分析を基本とした数理モデルにより人物行動をモデル化する。Hankel 行列の主成分分析でモデル化することは、自己回帰モデル (Autoregressive model) でモデル化手法することに等しい。人物行動は複雑であるため、その関節部位座標の時系列データを単純な自己回帰モデルのみで記述することは困難であることが予想される。そこで本研究では、一般化主成分分析のように、複数のモデルで記述される手法や、これを拡張した複雑なシステムを表現できる手法を導出する。

### 4. 研究成果

#### (1) 防犯カメラ映像に映った人物の障害物に隠れた関節部位の位置を推定する手法の確立

障害物に隠れた関節部位の位置を推定する手法として、Hankel 行列の低ランク化に基づく手法を導出した。関節部位座標の時系列データ  $\{y_t\}$  に対して、以下のような Hankel 行列を定義する。

$$X = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_{N-M+1} \\ y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{N-M+2} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \dots & y_{N-M+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_M & y_{M+1} & y_{M+2} & \dots & y_N \end{bmatrix}$$

もし、関節部位座標の時系列データが自己回帰モデルに従う場合、上記行列  $X$  は低ランクとなる。そこで、以下の行列ランク最小化問題を解くことにより、障害物に隠れて観測できなかった欠損信号を修復することが可能である。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \text{rank}(X) \\ & \text{subject to} \quad y_t = \bar{y}_t \text{ for } t \in \Phi \end{aligned}$$

ただし、 $\Phi$ は時系列信号が観測可能である時間の添え字集合であり、 $\{\bar{y}_t\}$ は観測された信号である。しかし、人物行動は複雑であるため、関節部位座標の時系列データが自己回帰モデルに従うことは考えにくい。そこで関節部位座標の時系列データ $\{y_t\}$ が、以下で定義される行列 $X_\phi$ を低ランクにするような多様体上に属すると仮定する。

$$X_\phi = [\phi(x_1) \ \phi(x_2) \ \dots \ \phi(x_{N-M+1})] \in \mathbb{R}^{m \times (N-M+1)}$$

ただし、

$$x_i = [y_i \ y_2 \ \dots \ y_{i+M-1}]^T,$$

であり、 $\phi$ は未知の非線形写像である。 $\phi$ が既知の場合は、以下のような行列ランク最小化問題で低ランク行列 $X_\phi$ の修復が可能である。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \text{rank}([\phi(x_1) \ \phi(x_2) \ \dots \ \phi(x_m)]) \\ & \text{subject to} \quad y_t = \bar{y}_t \text{ for all } t \in \Phi \end{aligned}$$

本研究では、機械学習分野の多様体学習で研究されている局所線形埋め込み (Locally Linear Embedding) の考えに基づき、写像 $\phi$ が未知の場合でも上記問題の精度の良い解を与える手法を導出した。多様体が局所的に線形部分空間で近似可能であると仮定し、注目する信号の近傍だけから構成される行列が低ランク行列で近似可能となるように信号を修復する以下のような手法である。

- Step 1. 全ての $x_i$ について、 $\{x_j\}_{j \neq i}$ の中から $K$ 個の近傍を求め、 $x_i$ とこれらの近傍信号を列ベクトルとする行列 $\tilde{X}_i$ を生成する。
- Step 2. 全ての $\tilde{X}_i$ に対して以下の問題を解く。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \|\tilde{X}_i\|_{*,r} \\ & \text{subject to} \quad y_t = \bar{y}_t \text{ for all } t \in \Phi \end{aligned}$$

- Step 3. 収束したら終了。そうでなければ Step 1 へ。

Step 2 において $\|\cdot\|_{*,r}$ は、行列の特異値を大きい順に並べたとき、 $r+1$ 番目以降の特異値の和を表す。

障害物により遮蔽された人物行動の推定結果を図1に示す。緑色の線が人物の関節部位を繋いだ骨格を表す。観測できなかった人物行動が適切に推定されていることが確認できる。

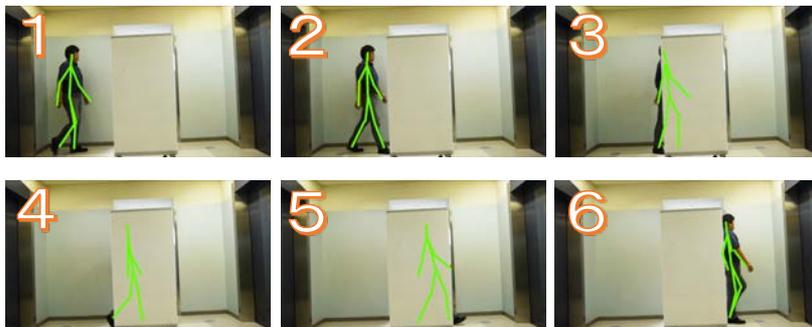


図1. 提案手法により推定された人物行動

## (2) 人物行動を表現する数理モデルの同定手法の確立

前項目と同様に、機械学習分野の多様体学習で研究されている局所線形埋め込みの考えに基づき手法を導出した。局所線形埋め込みは、多数の線形モデルにより非線形システムを近似していると考えられることができる。厳密には、観測データと同じ数だけの線形モデルにより近似している。本研究では、この多数のうち似たモデルと統合し、少数のモデルで非線形モデルを近似する手法を導出した。k-means法に基づく手法により観測データをクラスタリングし、各クラスタで線形モデルを求める方法である。このとき、複数のクラスタ数でクラスタリング、つまり、複数パターンのクラスタ分割を実施し、各クラスタの線形モデルを同定する。クラスタの重複した領域では、複数の線形モデルの重み付き平均により、出力を計算する方法である。1種類のみのクラスタ分割の場合は、区分的線形システムに対応する。数値実験により、複数パターン用意することにより、多数のクラスタ数を1パターンのみとした場合よりも計算時間が早く、出力の再現精度が高くなることが確認された。これにより、人物行動を効率よくモデル化することが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 小西克巳, “スパースセンシングとデータ駆動モデリング”, 計測と制御, 査読無, vol. 58, no. 3, pp. 171-175, 2019, <https://doi.org/10.11499/sicejl.58.171>
- ② R. Sasaki, K. Konishi, T. Takahashi, T. Furukawa, “Low-Rank and Locally Linear Embedding Approach to Image Inpainting,” Proc. of IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing, 査読有, DOI: 10.1109/VCIP.2018.8698655, 2018
- ③ R. SASAKI, K. KONISHI, T. TAKAHASHI and T. FURUKAWA, “Multiple Matrix Rank Minimization Approach to Audio Declipping,” IEICE Transaction on Information and Systems, 査読有, vol. E101.D(3), pp. 821-825, 2018
- ④ T. Takahashi, K. Konishi and T. Furukawa, “Block Adaptive Algorithm for Signal Declipping Based on Null Space Alternating Optimization,” IEICE Transaction on Information and Systems, 査読有, vol. E98-D, no. 1, pp. 206-209, 2015

[学会発表] (計 18 件)

- ① Atushi Kanayama, Tomoki Shise, Takashi Takekawa and Katsumi Konishi, “Locally Low Rank Approach to Human Motion Modeling and Inpainting,” Proc. of SICE annual conference, 2018
- ② 小西克巳, 至勢智貴, 佐々木亮平, 古川利博"局所低ランクアプローチによる多様体上の信号修復手法", 第5回制御部門マルチシンポジウム, 2018
- ③ T. Shise, R. Sasaki, K. Konishi and T. Furukawa, “Matrix Rank Minimization and Locally Linear Embedding Approach to Nonlinear Matrix Completion Problems,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2018
- ④ M. Kamikubo, A. Kanayama, K. Konishi, M. Fujii, K. Kunida, S. Uda and S. Kuroda, “Locally Linear Embedding Approach to System Identification of Signal Transduction of Cellular Systems,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2018
- ⑤ Atsushi Kanayama. Masaki Kamikubo, Ryohei Sasaki, Katsumi Konishi, Toshihiro Furukawa, “An Output Prediction Method for Nonlinear ARX Model based on Locally Linear Embedding,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2018
- ⑥ 佐々木 亮平, 小西 克巳, 高橋 智博, 古川 利博, "局所次元削減に基づく多様体上の部分欠損修復と画像修復への応用", 第31回回路とシステムワークショップ, 2018
- ⑦ 金山 睦, 至勢 智貴, 小西 克巳, "局所低ランクアプローチに基づく時系列信号修復と人物行動推定への応用", 第62回システム制御情報学会研究発表講演会, 2018
- ⑧ R. Sasaki, K. Konishi, T. Takahashi and T. Furukawa, “Low-Rank and Nonlinear Model Approach to Image Inpainting,” Proc. of EUSIPCO, 2017
- ⑨ T. Takahashi, K. Konishi, K. Uruma and T. Furukawa, “Subspace clustering and multiple matrix rank minimization approach to image inpainting algorithm,” SICE annual conference, 2017
- ⑩ R. Sasaki, K. Konishi, T. Takahashi and T. Furukawa, “Low-Rank Approach to Nonlinear System Identification for Image Inpainting,” SICE annual conference,

2017

- ⑪ Yurie Tajima, Yuho Tanaka, Ryohei Sasaki, Katsumi Konishi, Tomohiro Takahashi and Toshihiro Furukawa, “Estimation of walking movement based on particle filter using past observed signals,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2017
- ⑫ 佐々木 亮平, 小西 克巳, 高橋 智博, 古川 利博, "行列ランク最小化とスパース正則化を用いた複数の部分空間同定に基づく行列完成手法の提案", 第32回信号処理シンポジウム, 2017
- ⑬ 至勢 智貴, 佐々木 亮平, 小西 克巳, 古川 利博, "局所線形埋め込みと行列ランク最小化問題に基づく非線形行列完成問題の解法", 第32回信号処理シンポジウム, 2017
- ⑭ T. Takahashi, K. Konishi, K. Uruma and T. Furukawa, “Adaptive image inpainting algorithm based on generalized principal component analysis,” Proc. of IEEE Image Video and Multidimensional Signal Processing, 2016
- ⑮ S. Kikuchi, K. Konishi, T. Takahashi and Toshihiro Furukawa, “Estimation of Walking Movement of Human by Applying Particle Filter,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2016
- ⑯ A. Salman and K. Konishi, “Pedestrian Motion Estimation Based on Just-In-Time Method,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2016
- ⑰ K. Konishi, “Multiple Low Rank Matrix Approach to Switched Autoregressive Exogenous System Identification,” Proc. of Asian Control Conference, 2015
- ⑱ T. Takahashi, K. Konishi and T. Furukawa, “Simultaneous estimation of missing pixels and segmentations,” Proc. of International Conference on Simulation Technology, 2015

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：古川 利博

ローマ字氏名：Toshihiro Furukawa

所属研究機関名：東京理科大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：00190140

※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。