

グループ内インタラクション解析に向けた 非定常歩行動作の検出

橋本 知典¹ 波部 齊² 満上 育久³ 八木 康史³

概要: 歩行している人物の見え方の変化から、様々な情報を得ることができる。歩いている、止まっているなどといった歩行に関する情報だけでなく、顔向きを別の人の方へ変化させた、身振り手振りなどのジェスチャー行為を起こした、他人の呼びかけに反応したなどといった他人との関わりを含んだインタラクションに関する情報も得ることが可能である。こういった情報を用いて、空間内のどの人物がグループを形成しているか、グループとして何を行おうとしているのか、などが分かれば、彼らに対してよりよいサービスの提供などを行うことができると考えられる。本論文では、このような人物の見え方の変化から得られる特徴量を用いて、インタラクションを構成するイベントを検出する手法を提案する。一般に、歩行している人物の見え方は変化するが、その変化は規則的・周期的なものとなる。一方、インタラクションによる見え方変化は定常歩行とは異なるため、その規則には当てはまらないと考えられる。本研究では、この考えに基づき、見え方の変化を定量化するための尺度を定義、計算し、その結果を用いて、インタラクションイベントの検出が行えるかどうかの評価実験を行い、提案手法の有効性について検討した。

キーワード: インタラクション, 見え方変化, 定常歩行

1. はじめに

近年では、公共空間での効果的な情報提供やロボットによるサービスを行う技術が注目されている。サービスの対象となる空間内の人物の関係性を理解し、発信する情報を選択することができれば、空間内の人物に対してよりよいサービスの提供、効率のよい宣伝などを行うことができる。そのためには、空間内のどの人物がグループを構成しているのか、グループとして何をしようとしているのか、グループの中でどのような役割分担が行われているのか、などが分かれば非常に有用な情報になると考えられる。例えば、図1のようにグループごとに目的が分かっているならば、発信する情報を選択することが可能である。ここでグループとは、家族・同僚・友人などの社会的なつながりがあり、空間内において、一緒に何かを行おうとしている複数人の人物のことである。

防犯カメラなどの環境に設置されたセンサは、不特定多数が通行する公共空間でのグループ行動解析に適しており、これまでにも多くの事例が提案されている。例えば、比較的古くから行われている事例としては、それぞれの人物が

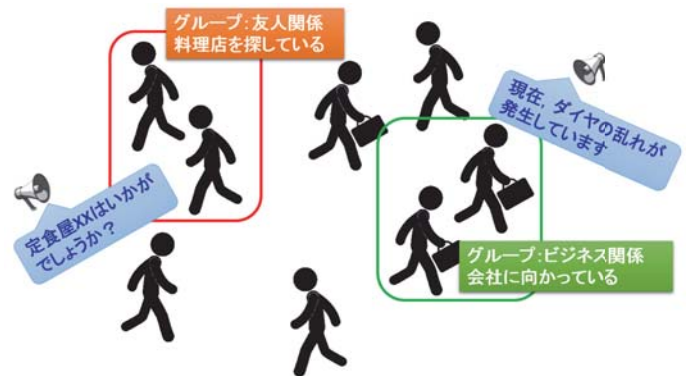


図1 グループの目的に応じた情報発信

どのグループに属しているかを推定するグループ推定があり、最近ではそのグループの属性推定やグループ内の役割推定も取り上げられるようになってきている。グループ推定をはじめとするグループ行動解析の手がかりとしては、人物間の距離が広く用いられている [2], [3]. しかし、空間内の人物の数が多くによって、同じグループに属する人物でも距離が離れている、逆に、同じグループに属していないが距離が近い、などの事例が考えられ、対人距離のみのグループ推定だけでは正確に判別できない例があると思わ

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻
² 近畿大学理工学部情報学科
³ 大阪大学産業科学研究所

れる。

対人距離だけでは不可能なグループ行動解析を可能とするには、観測する複数の人物間に発生するインタラクションに着目することが有用であると考えられる。具体的には、複数人が互いの顔を見合っている、ある人がある方向を指差したときに別の人がその方向に顔を向ける、などといった動作の共起関係があれば、観測している複数人はグループである可能性が高いと考えられ、さらには動作の相互関係からグループ内の役割も推定可能になると考えられる。

そこで本研究では、歩行者間のインタラクション検出によるグループ行動解析を最終目的とし、歩行している人物の見え方の変化から人物間に発生するインタラクションを構成するイベントを検出する手法を提案する。一般に、歩行している人物の見え方は変化するが、その変化は規則的・周期的なものとなる。一方、インタラクションによる見え方変化は定常歩行とは異なるため、その規則には当てはまらない。例えば、カメラ画像内の歩行人物の脚や腕は歩行に伴って動くため、その運動は歩行と同じ周期で発生するといえる。一方、その人物が友人と会話するために顔向きを変えたとする、その運動は歩行とは全く関係のないものとなる。そのため、ある人物が歩行中に横にいる友人を話をするために顔を横に向けたとすると、それによる見え方変化と、歩行時の手足の動作による見え方変化との間には時間的・空間的な性質に大きな違いがあると考えられる。本研究では、このような着想に基づく歩行内変化検出手法を提案する。そこでは、対象領域をいくつかの小領域に分割し、小領域での、時間変化による明度値ヒストグラムの変化に相関があるかどうかによって、歩行中に変化が起こっているかどうかの判定を行う。

2. グループ行動解析

駅、商業施設、博物館や美術館といった公共施設において、来訪者の目的や状態を推定し、よりよいサービスの提供に役立てようという試みが行われている。来訪者が保持するデバイスで取得できるデータを用いることができれば推定は容易になるが、一般環境下では様々な制約によって困難なことが多い。そのため、防犯カメラ映像やレンジセンサなどの受動的なセンサ群によって観察することが必要となり、特に、すでに広範囲に設置されているカメラ映像を用いた解析が重要となる。

公共施設におけるサービス提供を考えたとき、来訪者がどのようなグループを形成しているのか、また、どのグループはどのような状況にあるのか、などが有用な情報となる。例えば、仕事に訪れた同じ職場の同僚に対して特価品情報を提供してもあまり意味がなく、交通機関の情報やニュースなどを提供したほうが効果的であると思われる。グループとしての人物の行動解析(以下、グループ行動解析と呼ぶ)は、社会科学の観点から研究されているが、このよう

にアプリケーションの観点からも注目を浴びつつある。

グループ行動解析の目的を詳細に考えると、まず、グループに所属する人物を特定するグループ推定が挙げられる。その結果を踏まえてさらに、主導的な立場は誰かといったグループ内での人物の役割、家族連れ、若者の友人同士といったグループの属性や、何かを探している、目的に向かっていているといったグループの状態などを推定することが考えられる。さらに、これらの要素とグループの行動履歴を対応付けることで、グループの属性やグループの状態と、その行動の関連を知ることもできると考えられる。

先に挙げた様々な要素の中で、第一段階となるグループ推定が多くの研究者によって注目され、多くの研究が行われている [1]-[5]。その中では、最も基本的であり、かつ効果的な特徴量である対人距離を用いた例が多い。井上ら [2] は、大型ディスプレイ広告の前で立ち止まった複数人がどのような関係にあるのかを推定し、推定結果に基づいた広告を提示することで、より訴求効果のある広告提示ができる可能性があることを示している。ここでは、対人距離に着目し、人が他人と接するときは互いの距離を調整しており、その距離によって関係(夫婦・恋人、友人、家族、ビジネス、個人)も変化することを利用している。また、岡本ら [3] は、歩行者は互いの関係に応じて、近づいたり離れたりを距離を調節しながら歩行を行っていることに着目し、歩行者間の人間関係の推定を行っている。しかしながら、空間内の人物の数が多く、人物関係と対人距離が対応しないことがある場合などは、対人距離だけでは不十分であると思われる。そのため、対人距離以外の特徴量が必要となる。

そこで近年、距離だけではなく人物の顔向きにも着目する例が提案されている。Chamveha ら [4] は、同じグループに属する人間は頻繁に視線を合わせたり、同じ対象物を見ることが多い、などといった人間の注意方向に関する性質を用いてグループ推定する手法を提案している。二人の歩行者の顔向きや、その差といった特徴量を定義し、それと人物の位置関係を用いて推定を行っている。この研究は、二人の間で顔を見合わせる、などグループ内の人物同士に発生するインタラクションに着目していることになる。しかしながら、特徴量は各時刻での視線方向を捉えるものであり、視線を向けるなどのイベントが起こった時刻やその時刻同士の関係(前後関係や共起性)は考慮に入れていないため、インタラクションの有無を完全に捉えることはできない。例えば、ペアの友人のうち一人が話しかけたときに、他方がそれに呼応して顔を向けるような場合は、それぞれのイベントは時間的に近くに起こるはずであるが、Chamveha らによる特徴量ではそれを表現することはできない。すなわち、インタラクションを特徴付けるイベントの発生を検知し、その時間関係を考慮した解析が必要である。

そのような観点からの関連研究としては、波部ら [5] による人間関係の推定や異常行動抽出を行う手法がある。ここでは、立ち止まる、歩き始める、曲がるといった歩行者の歩行パターン変化を検出し、他の人間がその変化にどれだけ影響を与えたかを測る尺度を導入している。しかしながらこの研究では、人物の移動軌跡のみを用い、顔向きの変化、身振りや手振りといった、インタラクション理解に有用な情報は一切利用していない。

そこで本研究では、歩行者間のインタラクション検出によるグループ行動解析を最終目的とし、そのために必要なインタラクションを構成するイベントの検出を行う手法を提案する。ここでのイベントとしては、顔向き変化、指差し、身振り手振りの変化など多様なものが考えられるが、本論文の範囲では、もっとも頻繁に見られる顔向き変化に着目する。しかしながら、提案手法を応用すれば、顔向きの変化以外の、身振り手振りのジェスチャー行為や、比較的微細な仕草といったインタラクションとなり得る行動の検出も期待できる。以降の章で、提案手法の詳細について述べていく。

3. 見え方変化を用いた顔向き変化の検出

3.1 概要

本章では、人物領域における見え方の変化から、歩行者の顔向きの変化を検出する手法について述べていく。図2は同一人物における顔向きの変化の例である。なお、本稿では商業施設での通行人映像を用いて実験を行っている。図2・図3など以降で示す図もその映像のサンプルであるが、プライバシー保護の観点から人物の目を隠すように画像を加工している。処理に用いたデータはこのような処理を施していない。このとき頭部では、顔向きの変化の前後で、頭部付近の見え方が大きく変化している部分があり、その変化は図3のような定常歩行による見え方変化とは大きく性質が異なるといえる。

本論文の範囲では、図2や図3に示すように歩行者に正対するように設置されたカメラで撮影した画像を利用する。そうすると、歩行の周期性や対称性によって、歩行による見え方に規則性が見られる。例えば、体の中心線に対して対称な領域(両肩など)で同じ変化が現れたり、また、腕の領域での変化は左右で同じ周期を持つ、などが考えられる。先に述べたように、顔向きの変化による見え方変化

は、これらの規則性には当てはまらないと考えられる。つまり、これらの規則性の有無を識別できれば、顔向き変化を検出できるといえる。

本論文では、このようなアイデアに基づき、以下に示す手法で見え方変化から顔向き変化を検出する。その過程は、大まかに以下の2つである。

(I) 頭部付近を左右2つの小領域(以下、ブロック)に分割し、それぞれのブロックについて明度値のヒストグラムを作成する。

(II) 2つのヒストグラムの差を用いて、定常歩行と、顔向きの変化を伴う歩行とを区別し、顔向き変化を検出する。

頭部付近の明度値ヒストグラムには、顔向き変化以外にも、定常歩行時の運動(主に肩の上下移動)が影響を与える。このうち、定常歩行時の肩の運動は周期的に発生するので、左右のブロックでの明度値ヒストグラムの変化も周期的であると考えられる。これが、先の述べた規則性であり、上記の手法はその有無を識別するために設計したものである。

以下では、各処理の内容について述べる。なお、本手法の実装のために用いるデータは、先ほど述べた、歩行者に正対するように設置されたカメラで撮影した画像である。また、映像を撮影するカメラと世界座標系の間のキャリブレーションは行っているものとし、カメラの他に別のセンサによって獲得された世界座標系での人物位置が既知であるものとする。今回は後述のようにレンジセンサを用いた計測結果(図5)を用いるが、他にも通行人が所持するタグを用いるような場合も想定できる。

3.2 人物領域の切り出し

まず、カメラ画像から対象となる人物領域の切り出しを行う。ここで人物領域の切り出しとは、図4のように、元のカメラ画像から(a)、人物を囲むバウンディングボックスを作成し(b)、ボックス内における背景を差分により取り除くことで、人物の切り出しを行う(c)ことである。

3.2.1 一時バウンディングボックスの作成

最終的なバウンディングボックスを決定するために、最初に大まかに人物を囲えるような一時的なバウンディングボックスを作成する。先述のように、カメラのキャリブレーションデータと人物の足元座標が既知であるので、カ



図2 顔向き変化の例



図3 定常歩行



図4 人物領域の切り出しの過程



図 5 レンジデータによる人物位置情報

メラ画像における人物の足元座標を求めることができる。その点をボックスの最下点の中心として、人物の頭が入るように矩形を定めることにより、一時的なバウンディングボックスを作成する。

3.2.2 頭頂座標の決定とバウンディングボックスの決定

先ほど作成したバウンディングボックスは、キャリブレーションによって求められた、カメラ画像における足元座標を基に作成したものである。これは、図5の人物位置データの精度やキャリブレーションの精度に大きく依存し、安定したバウンディングボックスではない。そこで、バウンディングボックスのブレを小さくするために、人物の頭頂部の座標を決定し、その座標を基準としてバウンディングボックスを作成することにする。

3.2.2.1 頭頂座標の決定

頭頂座標の決定は、一時バウンディングボックスから背景を差分した画像を用いて行う。背景が差分された画像は主に人物領域が前景として残っていると考えられる。この画像の上半分を使って、頭頂座標の決定を行う。

x 座標 まず頭頂座標の x 座標は、前景領域の画素数を画像の高さ方向に和をとったものに注目する。図6のように、体の中心であればあるほど画素は多くなると分かる。よって、画素の多いところを頭頂座標の x 座標とする。

y 座標 次に頭頂座標の y 座標は、前景領域の画素数を幅方向に和をとったものに注目する。画像の胴体部から頭部に向かって見ていくと、図7のように頭頂部で画素数が大きく減少すると分かる。よって、この点を頭頂座標の y 座標とする。

こうして求めた頭頂座標をボックスの最上点の中心として人物を囲う矩形を人物の位置に注意して(画像の奥にいれば小さく、手前に来る毎に大きく)定めることで、バウンディングボックスを決定する。最後に、背景の差分を行って人物領域の切り出しを完了とする。

3.3 顔向き変化の明度値変化としての表現方法

与えられた人物領域を用いて、顔向きの変化を明度値変

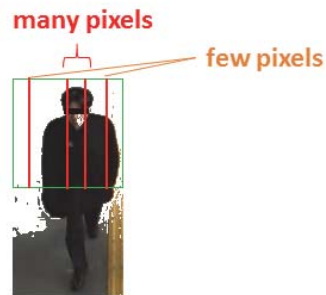


図 6 x 座標の決定

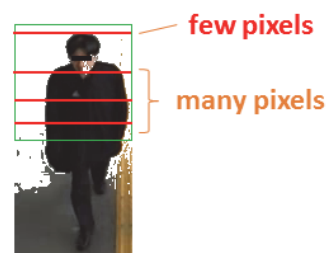


図 7 y 座標の決定

化として表す。明度値の変化を捉える方法として、頭部付近の領域の明度値をヒストグラムとして表し、ヒストグラムの変化が時間変化によってどのように変わっているのかを観察する、という方法が考えられる。しかし、単に注目領域についてヒストグラムを作成すると、顔向きの変化という規則に当てはまらない変化と、肩の上下運動のような規則的な変化を識別できないと思われる。そこで提案手法では、人物領域のうち、顔付近の画素にのみ注目し、明度値の変化は同様にヒストグラムで表すが、注目領域を二つのブロックに分割し、各ブロックにおいて明度値をヒストグラムで表すこととする。

図8は、顔付近の領域についてブロックに分割したものである。ブロック分割は人物領域を縦に二分分割しており、頭部を中心とした分割になっている。このとき、顔向きが変化する前後で、各ブロック内の明度値に変化が起きていることが分かる。各ブロックにおける明度値のヒストグラムの差をとると、肩の上下運動のような規則的な動作に関

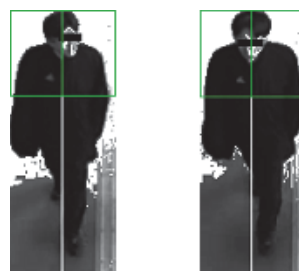


図 8 ブロック分割

してはその差は規則的な変化をしており、顔向きの変化のような規則に当てはまらない動作が起こると、その差は規則的な変化ではなく、不規則になることが期待される。

このようにして、分割された頭部領域の各ブロックの明度値のヒストグラムを作成する。それぞれのヒストグラムは、画像をグレースケールで扱い、明度値 (0~255) を 32 ずつに分け 8 ビンとする。

3.4 顔向き変化の検出のための計算

前節で述べたように、2つのヒストグラムの差を求めると、定常歩行時における規則的な動作と、顔向き変化のような不規則な動作との間で、挙動が異なることが期待される。そのため、定常歩行と顔向きの変化を伴う歩行を区別することができると考えられる。その境界は不規則な動作の開始、または終了を表す、すなわち、顔向きの変化が起こったタイミングを表すと考えられる。この考えに基づき、以下の処理を行った。

3.4.1 ヒストグラムの差の計算

すでに述べたように、2つのヒストグラムの各ビンのそれぞれの差を求めると、そこで、時刻 t における、ビン i に対する左ブロックのヒストグラム $h_L^i(t)$ と右ブロックのヒストグラム $h_R^i(t)$ の差 $d^i(t)$ を、式 (1) で表す。

$$d^i(t) = |h_L^i(t) - h_R^i(t)| \quad (1)$$

定常歩行を行っている人物は、顔の動きを含めた体全体の動作は規則的であると考えられ、顔付近の明度値の変化も規則的であると考えられる。一方、顔向きが変化するタイミングは、このような明度値の規則的な変化には当てはまらない変化をすることが期待される。そのため、式 (1) で表される 2つのヒストグラムの各ビンの差 $d^i(t)$ は、定常歩行時は規則的な変化をし、顔向きの変化が起こるタイミングでは、不規則な変化が発生すると考えられる。

3.4.2 顔向き変化タイミングの推定

先ほどから述べているように、すべてのビン i において $d^i(t)$ は定常歩行時は規則的な変化を起こし、顔向き変化時にその規則から外れた変化を起こすと期待できる。そのため、 $d^i(t)$ の変化を定常歩行時と顔向きの変化が起こっている時間とに区別することができることが考えられる。ある時刻 t から、 $t+T$ までの T 秒間の歩行と、時刻 $t+T$ から、 $t+2T$ までの T 秒間の歩行を比較し、その変化が小さければ歩行の様子に変化がほとんど起こっていない、大きければ変化が起こった、として捉えることができる。その変化の尺度を式 (2) に示す $D(t)$ として定めた。

$$D(t) = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T \sum_{i=1}^8 (d^i(t+\tau) - d^i(t+T+\tau))^2 \quad (2)$$

この $D(t)$ の値を実験的に求めた閾値 (以下、 D' とする) と比較し、 $D(t) \geq D'$ となる時刻が顔向きの変化が起こっているタイミングと考えることができる。

4. 評価実験

提案手法で顔向き変化の検出が行えるかの評価実験を行った。以下に詳細を示す。

4.1 概要

今回の実験で用いたデータは、大型商業施設に歩行者に正対するように設置されているカメラで撮影された映像である。このカメラ映像は、解像度が 640×480 、フレームレートが 25fps である。この映像と [6] によって取得された歩行人物の移動軌跡を利用して処理を行った。

人物領域は、3.2 節で説明した処理で与えるが、そのうち、領域に他の人が入るなどによってバウンディングボックスが安定しない人物領域については除外し、バウンディングボックスが安定しているフレームの間を実験の対象とした。

顔向きの変化を検出できるかどうかの評価については、注目した人物について、予め顔向きの変化動作が始まったフレームと、その動作を終了したフレームを Ground Truth として与える。そして、式 (2) に示す $D(t)$ が、 $D(t) \geq D'$ となったフレームを顔向き変化発生時と捉え、そのフレームが Ground Truth に収まっているかを見た。本論文は、 $T = 3$ 、 $D' = 0.01$ として結果を出している。

4.2 実験結果・考察

まず、対象とした人物のうちの 1 人の結果を図 9 に示す。グラフにおいて、青の折れ線グラフは、式 (2) に示す $D(t)$ を表す。また、結果の挙動を捉えやすくするために閾値 D' を赤線で、Ground Truth を緑の矩形波として表している。矩形波が高くなっているところが顔向きの変化が起こっている区間である。これは以下でも同様である。

図 9 では、実際の顔向き変化のタイミングで $D(t)$ の値が D' を超えており、顔向きの変化のタイミングを捉えることに成功している。このときの実際のシーンが図 10 となっている。また、 $D(t)$ の値が D' を超えているフレームが顔向き変化のタイミング以前に見られるが、これは写っ

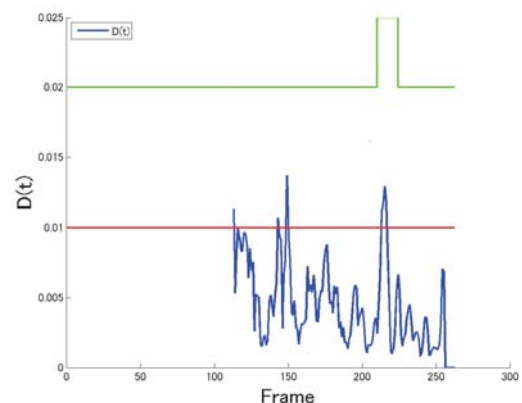


図 9 結果 1



図 10 結果 1 の実際のシーン

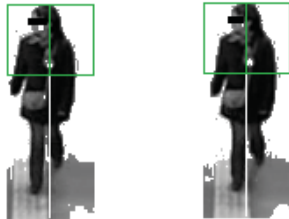


図 11 頭頂座標のズレが生じた例

ている人物が小さく、背景差分により人物領域も差分されていたり、その影響で頭頂座標にズレが生じ、バウンディングボックスが安定しないなどの理由で、ヒストグラムに予期せぬ影響を与えたと考えられる。図 11 は $D(t)$ の値が D' を超えているフレームの実際の映像で、二つの画像は時刻がほぼ変わらず同じような姿勢であるが、顔付近の左右の領域がそれぞれ異なっていると分かる。これにより、ヒストグラムに大きな変化を与えてしまったと考えられる。

また別の人物に対する結果である図 12 でも、実際の顔向き変化のタイミングで $D(t)$ の値が D' を超えており、顔向きの変化のタイミングを捉えることに成功している。この結果について、図 13 が対象人物の実際のシーンである。このシーンではカメラに対して真正面ではなく、少し斜めの位置に人物が写っていると分かる。このとき図 13 内の (a) のように、顔向き変化時に頭頂部に基づくブロック分割が人体の中心から大きく外れることが起こり、左右のヒストグラムに大きな影響を与えることが考えられる。そのため、このシーンでの顔向きの変化の検出は、顔領域の見え方の変化ではなく、顔向きが変わったことにより胴体部の見え方変化が大きくなり、その結果、顔向き変化検出ができたと考えられる。

このように、ヒストグラムの変化はカメラ画像における人物の位置に大きく依存しているところがある。図 14 は先ほどのようなカメラに対して真正面にいない人物であるが、手の振りを大きくして歩行しており、カメラに対して角度があるので手の振りによる見え方変化が大きくなる。そのため、ヒストグラムが大きく変化してしまい、図 15 のように顔向き変化検出が上手くいっていない。

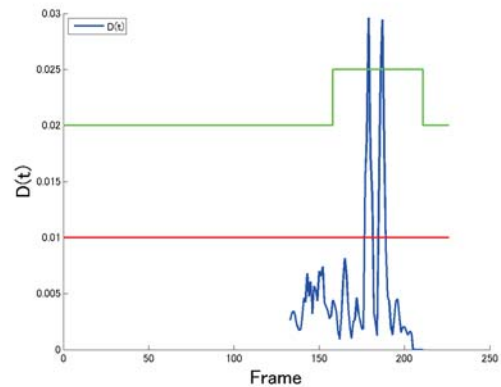


図 12 結果 2



図 13 結果 2 の実際のシーン



図 14 人物位置が影響する別のシーン

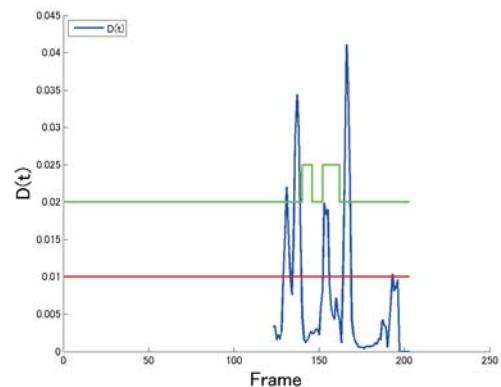


図 15 結果 3

5. おわりに

本研究では、歩行している人物の見え方の変化から、インタラクションを構成するイベントの検出として、顔向き変化の検出を行った。定常歩行時には見え方の変化は規則的であり、一方、顔向きの変化が起こったときには見え方の変化は不規則である、という点に着目し、見え方の変化を定量化するための尺度を定義し、これを設計・計算した。その結果を用いて、定常歩行と顔向きの変化を伴う歩行を分節化し、分節点が顔向きの変化にあたるのかどうかの評価実験を行った。

実験としては、計算結果から顔向きの変化が起こったフレームを定め、それを Ground Truth と比べることにより顔向き変化検出が行えているかどうかを確かめた。いくつかの例では顔向き変化を検出することができており、この手法の基本的な有効性は示した。しかし、バウンディングボックスの些細なズレでヒストグラムに影響を出したり、人物の位置に大きく依存してしまう点は、今後の解決すべき課題である。また、今回は 3.4.2 で示した T や閾値 D' は手で実験的に決めており、自動検出には向いていない。顔向き変化の検出を自動的に行えるようにするには、これらの値を上手く扱わなければならない、その扱い方の検討も今後の課題といえる。

さらに、今回用いた画像は照明環境が変化しないものであったが、一般環境では太陽が当たる時間と当たっていない時間があるように、照明環境の変化が十分に考えられる。そのため、照明環境に依存しない方法の検討も今後の課題と考えている。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構「JST」の戦略的創造研究推進事業「CREST」における研究領域「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」の研究課題「歩容意図行動モデルに基づいた人物行動解析と心を写す情報環境の構築」の支援により行った。また、本研究を行うにあたり貴重なデータを貸与いただいた国際電気通信基礎技術研究所の神田崇行室長はじめ皆様に感謝する。

参考文献

- [1] 神田崇行, 石黒浩: “対話型ヒューマノイドロボットからの日常生活の中の友達関係の推定”, 情報処理学会論文誌 vol.45, no8, pp.2098-2104, 2004.
- [2] 井上智雄, 瓶子和幸: “グループに適応する公共空間向け広告システム GAS”, 情報処理学会論文誌 vol.49, no6, pp.1962-1971, 2008.
- [3] 岡本宏美, 西尾修一, 馬場口登, 森井藤樹, 萩田紀博: “移動軌跡を用いた歩行者間の人間関係の推定”, 情報処理学会研究報告, CVIM, 第 2009 巻, pp.299-304, 2009.
- [4] Isarun Chamveha, Yusuke Sugano, Yoichi Sato and Akihiro Sugimoto: “Social Group Discovery from Surveillance Videos: A Data-Driven Approach with Attention-Based Cues”, in Proc. British Machine Vision Conference (BMVC 2013), September 2013.

- [5] 波部齊, 本田 和久, 木戸出正繼: “歩行パターン変化に着目した人物間インタラクションの解析”, 「画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009)」, 2009.
- [6] Brscic, D., Kanda, T., Ikeda, T., and Miyashita, T.: “Person Tracking in Large Public Spaces Using 3-D Range Sensors.” IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 43(6), pp.522-534, 2013.