

マーカ画像の歪みを利用した移動距離推定方式

鈴木 雄貴 寺田 努 塚本 昌彦

神戸大学大学院工学研究科

近年、ナビゲーションシステムなど人や物体の位置に依存したサービスに関する研究が盛んに行われている。このようなサービスでは、低コストで高速な動きへ対応できる位置推定手法が求められている。これまでに筆者らの研究グループでは、環境内に設置されたマーカの移動をカメラにより検出することで移動距離を推定する手法に関する研究を進めてきた。しかし、従来手法では2枚の画像に映るマーカを比較することで移動を検出しているため、カメラが高速で移動する場合、撮影画像から対象物体が外れ、移動距離推定ができないという問題があった。そこで本稿では、カメラで撮影した1フレーム内のマーカの歪みを利用した移動距離推定手法を提案する。提案手法では1フレーム内の画像から移動距離を推定するため、従来手法より高速な移動へ対応できる。

A Method for Estimating Movement Distance using Distortion of a Marker

Yuhki SUZUKI, Tsutomu TERADA and Masahiko TSTUKAMOTO

Graduate School of Engineering, Kobe University

Recently, there are many researches on location-dependent services such as navigation system. In these services, the system needs a position estimation method that is low cost and adapts to high-speed movement of object. Although we have proposed a distance estimation method using interlace camera and markers, it cannot estimate the movement accurately in high-speed because it uses successive two images. In this paper, we propose a new distance estimation method using the distortion of a marker in one frame image to adapt high-speed movement. Since our method estimates the distance using one frame image, it can support high-speed movement compared with the conventional method.

1 はじめに

近年、コンピュータの小型化・軽量化やユビキタスコンピューティング環境の実現に伴い、ユーザの場所や状態に応じたサービスを提供するアプリケーションに対する要求が高まっている。このような背景から、正確にユーザ（人やロボットなど）の位置や移動量・移動方向を把握する技術が求められている。例えば、イベント会場において、ユーザの位置を推定し、道案内をしたり位置に応じた情報を提供したりするヒューマンナビゲーションシステム [1] や医療現場や災害現場での移動ロボットに関する研究 [2] が行われている。これらのアプリケーションを実用化するためには、低コストで汎用性が高く、人やものの素早い動きに対応できる位置推定手法が必要となる。

これまで筆者らの研究グループでは、インターレースカメラと位置情報を保有しない簡易マーカを利用した移動距離推定手法を提案した [3]。この手法では、インターレースカメラを利用することで、更新周期の短い2枚の画像を利用して移動量を推定できるため、カメラもしくは撮影対象物体が高速な動きをする場合でも正確な移動距離を推定できる。

評価実験の結果、従来の手法と比べて高速な動きに対応できたものの、この手法も複数画像間のマーカの移動を利用しているため、隣のマーカとの誤認識が起こるほど高速に移動した場合に、正確な推定が行えなくなる。

そこで本研究では、マーカの歪みを利用した移動距離推定手法を提案する。提案手法では1フレーム内の画像の歪みを利用して移動距離を推定するため、次の撮影画像にマーカが映らないということが起こらず、高速な移動へ対応できる。また、隣のマーカとの誤認識が生じないため利用環境に制限がない。

以降、2章では移動量推定に関する関連研究について述べ、3章では提案手法を説明する。4章では評価と考察を行い、最後に5章で本稿をまとめる。

2 関連研究

人や物体の位置を推定する手法をまとめると図1のようになる。

絶対位置を推定する手法の一つとして、GPSを利用した手法がある [4]。しかし、GPSは衛星からの電波が届かない屋内では利用できず、また単独で利用する場合、推定精度は荒い。屋内の位置推定に

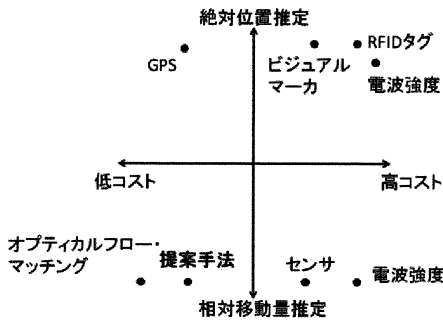


図 1: 位置・移動量推定手法の関係図

利用できる手法としては、RFID タグを利用した手法 [5, 6] やビジュアルマーカを利用した手法 [7, 8] などが存在する。Ni ら [5], Hahnel ら [6] は、周辺環境に配置した RFID タグを RFID リーダーで読み取ることでユーザの位置を推定している。また、Thomas ら [7], 羽原ら [8] らは、位置情報を有したビジュアルマーカを環境に配置し、それらをカメラで撮影することにより位置推定を行う。しかしこれらの手法は、広範囲に適応する場合、複数のタグやマーカなどのインフラを環境に埋め込む必要があり、設置コストが高い。

ユーザの相対移動量を推定する手法と絶対位置推定手法と組み合わせることで、効率の良い位置推定を行う手法も提案されている。Tenmoku らの手法 [9] では、IrID マーカや RFID タグといったインフラ情報をユーザに装着したカメラで認識することによりユーザの絶対位置を推定する。また、相対移動量は万歩計を利用して推定している。濱口ら [10] は、ユーザが装着した 3 次元位置姿勢センサで両足の相対位置姿勢と腰の絶対姿勢を連続的に計測し、移動軌跡を推定する手法を提案している。これらの手法では、相対移動量推定と絶対位置推定を組み合わせることで、絶対位置推定手法を単独で利用する場合と比較するとインフラの設置コストは抑えられる。しかし、歩行できる人に特化したシステムとなっているため、障害者や人以外のロボットなどへそのまま適応するのは難しい。

電波強度を利用して絶対位置または相対移動量を推定する手法も提案されている。Fang ら [11] は、ワイヤレスセンサネットワークを利用して絶対位置もしくは相対移動量を推定する手法を提案している。しかし、ワイヤレスネットワークの利用は環境構築コストが高い。

設置コストが低い移動量推定手法としては、オプティカルフローを利用した手法 [12, 13] や画像マッチングを利用した手法 [14, 15] などカメラ画像を利用した手法が存在する。木下ら [12], Brailion

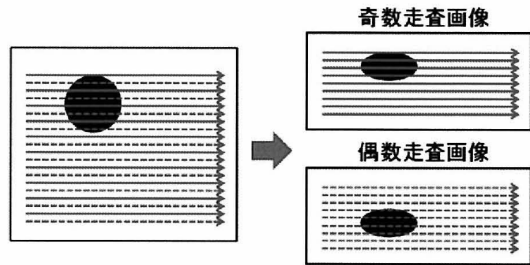


図 2: インターレーススキャンの特性

ら [13] は移動物体の検出や追跡を行うためにオプティカルフローを利用している。また、子安ら [14], Takita ら [15] は、画像マッチングを利用することでロボットなどの移動量を推定する手法を提案している。しかし、これらの手法では連続する 2 枚の画像に映る物体のずれを利用して移動量を推定するため、連続する 2 フレーム内の画像に共通物体が存在しないような速度で物体が動く場合は正確な推定が行えない。

筆者らの研究グループでは、インターレーススキャンと黒色円形マーカを利用した移動量推定手法を提案した [3]。この手法では、奇数走査画像・偶数走査画像に映る円形マーカの中心点のずれを利用して移動量を推定する。インターレーススキャン方式のカメラでは、図 2 のように、1 つの画面 (フレーム) のスキャンを 2 回に分けて行うため、1 枚の撮影画像から奇数走査画像・偶数走査画像という 2 枚の画像が得られる。奇数走査画像・偶数走査画像を別の画像と見なすと、1 つの画像を 1 回の走査でスキャンするノンインターレース方式のカメラより画像の走査線の数は半分であるため、ノンインターレースカメラを利用した移動量推定手法より、高速な動きに対応することができる。しかし、隣のマーカと誤認識が生じるほど高速に物体が移動する場合には対応できない。

3 提案手法

3.1 想定環境

図 3 のように、複数の黒色円形マーカが敷き詰められた平面上を、カメラが水平移動する環境を想定する。カメラの撮影方向はマーカが敷き詰められた平面方向である。

3.2 従来手法の問題点

想定環境において移動距離を推定する場合、従来手法では、図 4 のようにカメラで連続的にスキャンした画像を PC に取り込み、取り込まれた画像のうち連続する 2 枚の画像に映る物体の動きを比較することにより移動量を求める。例えば、固定されたカ

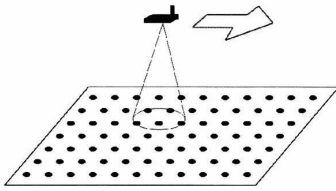


図 3: 想定環境

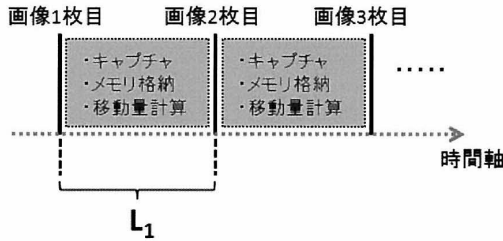


図 4: プログレッシブカメラによる移動量推定

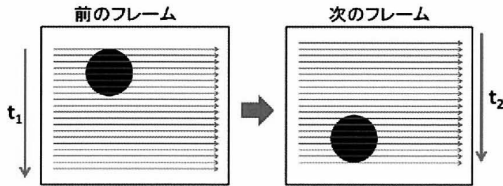


図 5: 画像のずれを利用した移動量推定

メラに図 5 のような黒色円形の物体が映り、次のフレームで図の方向に移動したとする。このとき連続する 2 フレームの黒色円形物体の位置を比較することにより移動量を求めるため、スキャンに必要な時間は少なくとも前のフレームと次のフレームのスキャン時間の合計である $t_1 + t_2$ かかる。そのため、時間 $t_1 + t_2$ の間に、次のフレームに映らない範囲に移動するほど、対象物体が高速で移動する場合、画像の移動を利用した手法では正確な移動量推定ができない。さらに、実際は t_1 と t_2 の間には様々な処理が挿入される場合が多い。したがって、このような環境において高速な動きに対応するためには、マーカの間隔を大きくしたり、マーカとカメラの距離を離すことが必要であるが、マーカの間隔を大きくすると低速時にマーカが映らないフレームが生じ、マーカとカメラの距離を離すとマーカが鮮明に

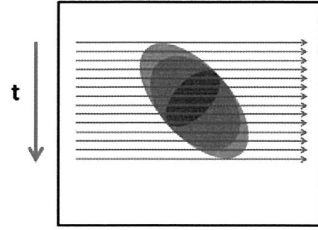


図 6: マーカの歪みを利用した移動量推定

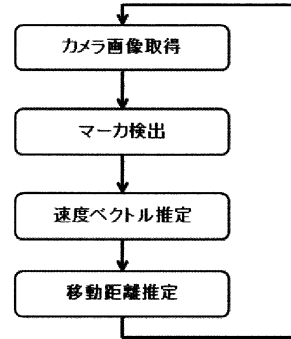


図 7: 移動距離推定のフローチャート

撮影できないという問題が生じる。

3.3 アプローチ

提案手法では、物体が高速で移動する場合でも正確な移動量推定を行えるようにするため、図 6 に示すような 1 フレーム内の画像の歪みを利用する。1 フレームの画像のみを用いるため、スキャンに必要な時間は t に短縮できる。また、複数画像間のマーカの移動を利用していた手法では次のフレームに対象物体が映らないため移動距離が認識できないような高速な動きをする場合でも、提案手法では対象物体が 1 枚の画像内に存在するため移動量を推定できる。さらに、撮影対象とカメラとの距離やマーカの間隔などの制約もほとんどなく、インターレースカメラでもノンインターレースカメラでも利用可能である。

3.4 移動距離推定アルゴリズム

提案するアルゴリズムでは、マーカ検出、速度ベクトル推定、移動距離推定という流れで移動距離推定を行う。

3.4.1 マーカ検出

提案手法ではマーカの歪みを利用して移動距離を推定するため、マーカのサイズを取得する必要がある。今回は図 8 のようにマーカの始点と終点を求め、始点終点間の距離をマーカのサイズとする。

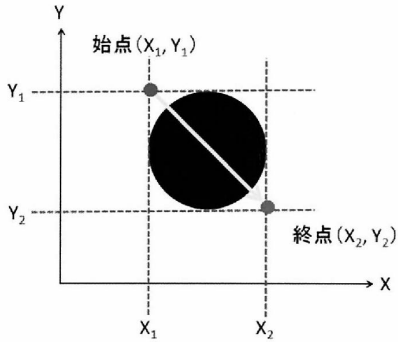


図 8: マーカの大きさ推定

マーカの検出は以下の手順により行う。まず、カメラで撮影した画像の二値化処理を行う（図 9-A）。次に、 x 座標方向の輝度値のヒストグラムを作成する（図 9-B）。ヒストグラムが存在する範囲がマーカがあると推測される範囲である。

さらに、個々のマーカの始点・終点の座標を求めるため、 x 座標方向のヒストグラムの頂点を軸としてサイズが横 128 ピクセル、縦 96 ピクセルの小窓を縦に 5 個作る（図 9-C）。小窓を作る目的は、より正確にマーカの座標を求めるためである。また、小窓のサイズは予備実験により適切であったものを用いた。各小窓内で x 方向、 y 方向ともにヒストグラムを作成し、各マーカの始点・終点の座標を求める（図 9-D）。

最後に、一つのマーカが複数の小窓にまたがってしまう場合についての処理を行う（図 9-E）。そのままでは、一つのマーカに複数の始点・終点求められる。そこで、マーカの一つの始点・終点を中心として、半径 R ピクセルの円内にある中心点を同じ点と見なす処理を加える。例えば、図 9-E のような場合、点 A と点 B、また点 C と点 D は近すぎる点であるため、点 A を始点、点 D を終点とする。 R の値は、カメラで撮影されたマーカの大きさにより決める。

3.4.2 速度ベクトル推定

カメラを固定し、カメラのスキャン方向へと黒色円形マーカを動かすと、マーカは図 10 左のように伸びて見える。しかし、マーカを適切に検出できる閾値を設定した二値化画像で見ると図 10 右のようにマーカが縮んで見える。これは、速度が速くなるにつれマーカの端の部分がぶれるため、黒色領域として認識されないことが原因である。したがって、カメラの移動速度が速くなるにつれマーカのサイズは小さくなり、図 11 に示すような関係が得られると予想できる。マーカのサイズを Y 、カメラの移動速度を V 、グラフの傾きを A 、静止時のマーカの

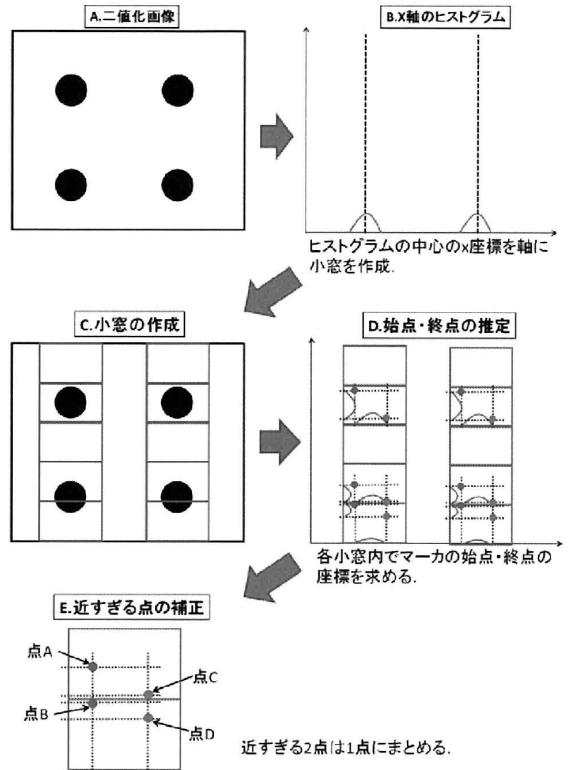


図 9: マーカの始点・終点の求め方

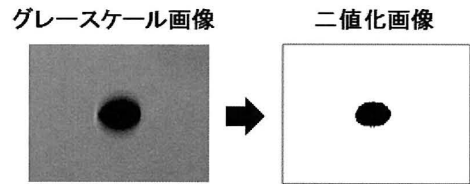


図 10: 縮んだマーカ

サイズを B とすると、 $Y = AV + B$ という関係が得られる ($A < 0$)。したがって、 $V = (Y - B)/A$ という式よりカメラの移動速度が求まる。もし 1 フレームの画像内に複数のマーカが写っている場合は、マーカのサイズの平均値を用いて計算する。

3.4.3 移動距離算出

現在のフレーム画像と次のフレーム画像との間で、カメラの移動速度が一定であると仮定した場合、速度推定で推定された速度ベクトル V とスキャンタイム t （現在のフレームと次のフレームとの間のスキャン時間）とを掛け合わせるにより各フレ

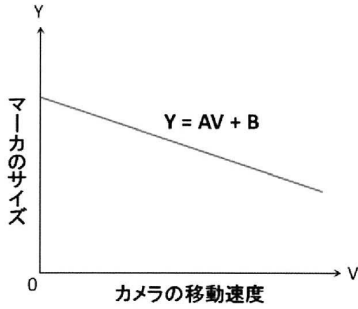


図 11: マーカのサイズとカメラの移動速度との関係

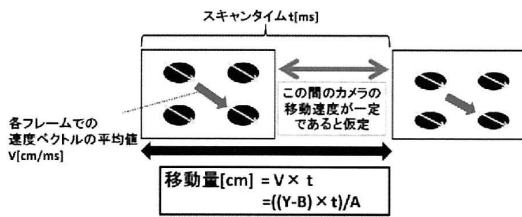


図 12: 移動距離推定方法

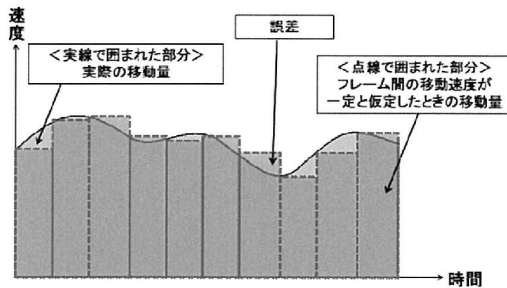


図 13: 実際の移動距離と推定移動距離の関係

ム間の移動量が求められる (図 12)。それらをすべてのフレームにおいて足し合わせることで移動距離が求められる。実際は、連続するフレーム間でのカメラの移動速度が一定とは限らないため、図 13 に示すように推定移動距離と実際の移動距離とは誤差が生じる。ただし、その誤差はそれほど大きいものではないと考え、本稿ではフレーム間のカメラの移動速度は一定であると仮定する。

4 評価実験

提案手法により算出された移動距離の推定精度が、カメラの移動速度の変化に応じてどのように変

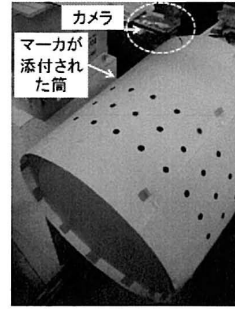


図 14: 実験装置

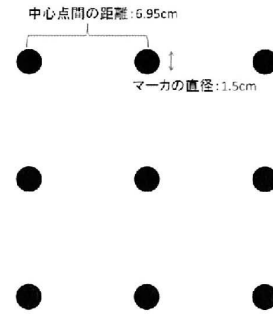


図 15: 使用したマーカ

化するかを確かめる。また、従来手法との精度の比較を行う。

4.1 実験装置

実験は、カメラを動かすのではなく、カメラを固定しマーカを動かすことで行う。図 14 に示すように株式会社アールエフ製、インターレーススキャン方式カメラ「The CARD 7RL」を設置した。撮影方向は垂直下向きとする。カメラの撮影素子は、27万画素、1/4 インチカラー CCD である。また、解像度は 680×480(VGA) であり、撮影された画像は USB ケーブルで PC に送られる。カメラから 18cm 離れた位置に、マーカを添付した筒を設置する。筒には、図 15 のような黒色、直径 1.5cm、同一色、同一形状の円形マーカを 6.95cm 間隔で三列に並べたものを 8 枚貼り付ける。筒の円周は 166.8cm であり、筒には合計 72 個のマーカが添付されており、マーカ以外の部分はすべて白色とする。マーカの大きさと、筒とカメラの距離は、カメラの撮影画像にマーカが常に最低九つ入り、かつマーカが鮮明に撮影画像に映るという条件から決めた。また、マーカ検出の際に必要な、閾値 Th は 5900、 R は 43 とした。これらの数値は、実際にカメラでマーカを撮影し、いくつかの値を試した中での最適な値である。尚、

実際にカメラでマーカを撮影した画像より、画面の中央付近での1cmが撮影画像上では31pixelに相当することが分かった。部屋の照度は約630LUXである。

実験で用いるカメラはインタレース方式のものを用了が、これは後述するように、筆者らがこれまでに提案したインタレースカメラの特性を利用した方式との比較を行うためである。提案手法では、インタレースカメラのうち奇数走査画像のみを用いて移動距離推定を行っている。

4.2 比較手法

従来の、2枚の連続する画像をもとに移動量を推定する手法を比較手法(1)とする。使用する画像は提案手法と同様に、インタレースカメラの奇数走査画像のみを利用し、連続する2枚の奇数走査画像に映るマーカの移動に基づき移動量を推定する。また、インタレーススキャンを利用して移動量を推定する手法[3]を比較手法(2)とする。インタレースカメラの1枚の撮影画像から得られた奇数走査画像、偶数走査画像の2枚の画像に映るマーカのずれを利用して移動量を推定する。

4.3 速度推定実験

マーカの歪みからカメラの移動速度を推定するために必要なパラメータである、図11のA、Bを求めるための実験を行う。また、マーカの移動速度を変化させ、高速移動時でも正確な速度ベクトル推定が行えるかどうかを評価する。

実験手順

マーカが添付された筒を一定方向に2周(333.6cm)動かし、筒を動かす速度とマーカの大きさ(提案手法)もしくはマーカのずれの大きさ(比較手法(1)、比較手法(2))を測定する。今回は、カメラの撮影方向に対してyの正の方向へ筒を動かした。すべてのフレームにおいてマーカの大きさおよびずれの大きさを平均したものを1回のデータとする。また、1回ごとにフレームレートを測定しておく。筒の移動速度を変えて同じ操作を60回繰り返した。

実験結果

実験結果を図16に示す。グラフの横軸は、マーカが添付された筒の移動速度[cm/s]、縦軸は、提案手法では観測されたマーカの大きさ[pixel]を、比較手法(1)、比較手法(2)では観測されたマーカのずれの大きさ[pixel]を示している。フレームレートは、提案手法で8.95fps、比較手法(1)で7.06fps、比較手法(2)で4.74fpsであった。

マーカのずれの大きさと筒の移動速度とが比例関係にあるとき、正確な速度ベクトル推定が行えていると見なし、正確な速度ベクトル推定が行えなくなる速度(限界速度と呼ぶ)を推察する。比較手法(1)では約25cm/s付近から、比較手法(2)では約80cm/s付近から、データのばらつきが大きくなって

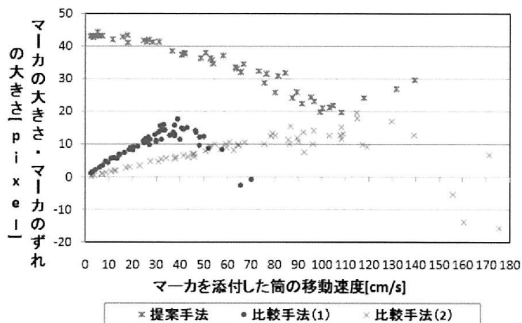


図 16: 速度推定実験結果

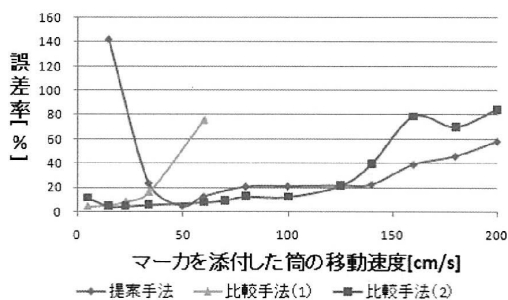


図 17: 移動距離推定実験結果 (誤差率)

いる。また、提案手法では約100cm/s付近からグラフの傾きが負から正へと変わり始めており、正確な推定ができなくなっていることが分かる。したがって、速度推定の限界速度は、提案手法で100cm/s、比較手法(1)で25cm/s、比較手法(2)で80cm/s程度であるといえる。以上のことから、提案手法と比較手法の限界速度を比較すると提案手法の方が高速な動きに対応できていることが分かる。

4.4 移動距離推定実験

実際にカメラを動かした距離と推定アルゴリズムにより算出された移動距離との差を求め、移動距離推定の精度を評価する。

実験手順

実験装置の筒を3周(500.4cm)回し、そのときの推定された移動距離と実際の移動距離との誤差を調べる操作を速度を変えながら50回行った。

実験結果

実験結果を図17に示す。図における誤差率とは、実際の移動距離500.4cmと推定された移動距離との差の絶対値の平均を実際の移動距離で割ったものである。グラフの横軸はマーカを添付した筒の移動速

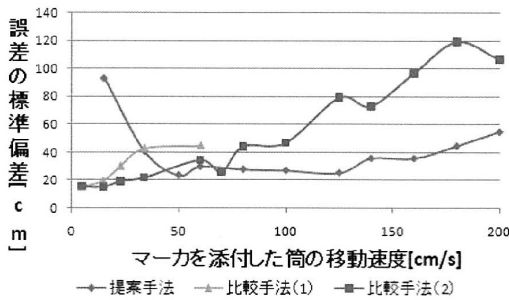


図 18: 移動距離推定実験結果 (標準偏差)

度を示す。また、図 18 は誤差の標準偏差と速度の関係を表す。

提案手法の誤差率は、速度が遅いときはとても大きいですが、30cm/s の辺りから低くなり、速度 50cm/s のとき最も小さい。50cm/s から 140cm/s までは安定しているが、それより速度が速くなると誤差率が高くなっていく。比較手法 (1) の誤差率と比較すると、速度が遅いときは比較手法 (1) の方が誤差率が低いですが、比較手法 (1) は速度 30cm/s を超えた辺りから誤差率が急に高くなり、正確な推定が行えなくなる。比較手法 (2) の誤差率と比較すると、速度 120cm/s 付近までは比較手法 (2) の方が誤差率が低い。しかし、120cm/s よりも速度が上がると、提案手法の方が誤差率が低くなる。

提案手法の標準偏差は、速度が遅いときは大きいですが、30cm/s 辺りから小さくなり、50cm/s から 120cm/s までは安定している。120cm/s よりも速くなると、速度が速くなるとともに偏差も大きくなる。比較手法 (1) と比較すると、速度が遅いときは比較手法 (1) の方が偏差が小さいが、34cm/s 付近からは提案手法の方が小さくなる。比較手法 (2) と比較すると、50cm/s ぐらいまでは比較手法 (2) の方が偏差が小さいが、それより速くなると提案手法の方が小さくなる。

以上より、極端に速度が遅い場合は比較手法 (1)、速度 15cm/s から 125cm/s までは比較手法 (2)、それより速度が速いときは提案手法の精度が最もいいことが分かる。つまり、提案手法は高速時に有効であるといえる。

4.5 考察

誤差の原因

全手法に当てはまる主な誤差原因としては、移動量を算出する際の補完方法が考えられる。今回は前のフレームと現在のフレーム間でカメラの移動速度は一定であると仮定したが、実際には連続するフレーム間で速度は少なからず変化している。フレーム間

の速度を滑らかに補完するための処理を取り入れれば、より誤差が小さくなると考えられる。

低速時に提案手法と比較手法 (2) の誤差が大きい理由は、蓄積誤差の影響が大きいことが考えられる。低速時、提案手法ではほとんどマーカが歪まない。また、比較手法 (2) ではほとんど画像にずれが生じない。しかし、マーカ検出の誤差により、マーカの歪みや画像のずれを認識してしまう場合があり、それが推定誤差につながると考えられる。また、低速時に比較手法 (2) より提案手法の方が誤差が大きい理由としては、マーカの歪みを利用している提案手法では、画像自体の歪みによる蓄積誤差への影響が比較手法 (2) より大きいと考えられる。

推定限界の理由

比較手法 (1) と比較手法 (2) の推定の限界の理由としては、隣のマーカとの誤認識が考えられる。今回利用したマーカは固有の情報を持っていないため、高速時は比較すべきマーカの間隔が大きくなりすぎて、他のマーカとの誤認識が起こる。マーカ間隔を広げれば防げるが、そうすると低速時に撮影画像にマーカが映らず移動量が推定できないということが起こり得る。提案手法では、マーカの歪みを利用しているため、他のマーカとの誤認識は起こらない。提案手法の推定限界の理由は、速度が速すぎてマーカがぶれ、撮影画像からマーカがほぼ認識できなくなっていることが原因であると考えられる。

提案手法の精度に関して

提案手法と比較手法 (2) とを比較すると、速度が約 50cm/s より遅い場合を除いて、提案手法の方が標準偏差が小さい。すなわち、提案手法の方がデータは安定している。しかし、誤差率を比べると、高速時以外では比較手法 (2) の方が誤差率が低い。したがって、提案手法の移動量推定の式自体に問題があるため誤差が生じていると考えられる。移動量推定のアルゴリズムを改良すれば、精度がより向上する可能性がある。

移動方向について

今回提案した手法では、カメラの移動方向は推定できないため、マーカの歪み方によりカメラの移動方向を推定する手法を提案する必要がある。

複数手法の同時利用

今回の結果より、各速度に適した移動距離推定手法があることが分かった。したがって、実際に提案手法を利用する際は、速度に応じて手法を使い分けるハイブリッド型での利用が有効であると考えられる。

5 まとめと今後の課題

本稿では、マーカの歪みを利用した移動距離推定手法を提案した。提案手法は、カメラで撮影された 1 フレーム内のマーカの歪みを利用して移動距離を

推定するため、2フレーム間のマーカの画像のずれを利用する場合より、カメラや物体の高速な動きに対応できる。評価実験により、従来手法と比較して提案手法の方が高速な動きに対応した移動距離推定が行えることが分かった。

今後は、移動量推定アルゴリズムの改良、移動方向を推定する手法の考案、移動量算出の際の補完方法の改良を考えている。

謝辞 本研究の一部は、連携創造本部先端研究推進部門の学内共同研究によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] M. Kourogi, N. Sakata, T. Okuma, T. Kurata: Indoor/Outdoor Pedestrian Navigation with an Embedded GPS/RFID/Self-contained Sensor System, *Proc. of 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence(ICAT2006)*, pp. 1310–1321 (2006).
- [2] 塚本昌彦, 松坂敬太郎: 飛ぶコンピュータの実現に向けて, 情報処理学会第39回モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL) 研究会報告, No. 120, pp. 111–118 (2006).
- [3] 鈴木雄貴, 荻原 崇, 塚本昌彦: インターレース方式カメラによる高速移動対応の位置推定手法, 情報処理学会第39回モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL) 研究会報告, No. 120, pp. 7–14 (2006).
- [4] M. Agrawal, K. Konolige: Real-time Localization in Outdoor Environments using Stereo Vision and Inexpensive GPS, *Proc. of 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2006)*, Vol. 3, pp. 1063–1068 (2006).
- [5] L. M. Ni, Y. O. Liu, Y. C. Lau, A. P. Patil: Indoor Location Sensing Using Active RFID, *Wireless Networks*, Vol. 10, No. 6, pp. 701–710 (2004).
- [6] D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin, M. Philipose: Mapping and Localization with RFID Technology, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 1015–1020 (2004).
- [7] B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. D. Bondi, M. Morris, W. Piekarski: ARQuake: An Outdoor/Indoor Augmented Reality First Person Application, *Proc. of International Symposium on Wearable Computers(ISWC 2000)*, pp. 139–146 (2000).
- [8] 羽原 寿和, 町田 貴史, 清川 清, 竹村 治雄: ウェアラブル PC のための画像マーカを用いた広域屋内検出機構, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 103, No. 640, pp. 77–82 (2004).
- [9] R. Tenmoku, M. Kanbara, N. Yokoya: A Wearable Augmented Reality System Using Positioning Infrastructures and a Pedometer, *Proc. of IEEE International Symposium on Wearable Computers(ISWC 2003)*, pp. 110–117 (2003).
- [10] 濱口明宏, 神原誠之, 横矢直和: 装着した3次元位置姿勢センサによるウェアラブルユーザの自己位置推定, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 105, No. 566, pp. 19–24 (2006).
- [11] L. Fang, W. Du, P. Ning: A Beacon-Less Location Discovery Scheme for Wireless Sensor Networks, *Proc. of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol. 1, pp. 161–171 (2005).
- [12] 木下浩二, 泉田正則, 村上研二: 1次元オプティカルフローを用いた移動物体の追跡, 工学ジャーナル, Vol. 4, pp. 111–117 (2004).
- [13] C. Brailion, C. Pradalier, J. L. Crowley, and C. Laugier: Real-time moving obstacle detection using optical flow models, *Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2006*, pp. 466–471, (2006).
- [14] 子安大士, 三浦 純, 白井良明: 不確かさを考慮した複数のスキャンマッチング結果の統合による移動ロボットの移動量推定, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 2, pp. 263–271 (2005).
- [15] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, K. Kobayashi: High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation, *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences*, Vol. E86–A, No. 8, pp. 1925–1934 (2003).
- [16] B. Lucas, T. Kanade: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, *Proc. of International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI)*, pp. 674–679 (1981).