画像データによる 3 次元ベクトルの推定

岡崎 崇史*・笠原 包道**

A Feasibility Study on Estimating Three Dimensional Vector in Image Data of Ship

Takashi OKAZAKI and Kanemichi KASAHARA

Abstract

A Camera image has the excellent resolution comparable with human's sight. In an integrated navigation-bridge system, various information are supplied to bridge console. So, it would be helpful to replace the look-out by navigator's eye with the camera image.

From the image, many navigational informations can be extracted quantitatively by the number of pixels, instead of eye-measurement. A CCD-camera is a quite useful device for such purposes.

The authors made experimental studies to estimate ship's heading, using the theory of "vanishing point and three dimensional vector". Picking out two parallel components from target ship's photograph, a vanishing point is decided as the apparent intersection of parallels. Then, three dimensional vector m is calculated by following formula.

$$m = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + f^2}} \begin{pmatrix} a \\ b \\ f \end{pmatrix}$$

where, a , b is x , y coordinates of vanishing point and f is the focal distance. The result of experiment shows average estimation error of ship's heading remains less than 10° and this method is feasible, provided if some improvements are made.

1. 緒 言

船舶運航の自動化において、沿岸航行時の見張り業務は最後に残る難問題だろうと言われているが、その理由はレーダ等では対応しきれない細かい分解能と識別及び判断能力に適応性が要求されることにあると考えられる。現状では、レーダ以外にそれほど一般性を有するセンサーは実用化されていないが、人間の視力による見張りを自動化するには、人間の目が得ているのと同等か又はそれに近い媒体やシステムを使用するのが得策であろう。カメラによる画像は、レンズの選択や撮影用の架台の制御を考慮すれば、人間の目に匹敵する性能を期待できるから、この画像から得られる情報は見張り情報に代替できる可能性を有する。画像処理技術やその為の装置に解決すべき問題は多いが、他船の航行情報を推定したり、航路標識等の構築物を識別して位置決定を行うような限定された内容についての研究成果は逐次発表されている。

(1)(2)(3)

本論では、航行情報の一つとして他船の針路（船首尾方向）を推定する方法を取り上げ、当該船舶の映像から得られる一対の平行線に着目し、射影幾何学の定義するその平行線の「消失点」を画像から求めて、平行線の三次元ベクトルとして当該船舶の船首尾方向を推定することを試みた。撮影に CCD-カメラを用い

* 学生会員 神戸商船大学大学院（〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1）

**名誉会員 神戸商船大学（〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1）

れば、平行線の読み込みは線上の2点をクリックするだけで良いので、この操作は短時間で簡単に行うことができる。今回の実験では撮影に広角レンズを使用した為、解析結果は必ずしも満足いくものばかりではなかったが、撮影条件の良い事例からは実用に供し得る結果が得られており、データ取得方法の改善により実用可能な方法になり得ると考えている。集積船橋システムでは、一人で船橋コンソールを監視する態勢になることが予想され、システム化の容易なカメラ画像による見張りが重視されてこよう。今回は画像によるベクトル推定法が見張り画像に適用できる可能性を検証することを主目的としたので、推定精度の評価や改善等については、後日の検討課題としたい。

2. ベクトル推定の理論と方法

2.1 2次元射影と遠近法

「2次元射影空間」である画像面において、点や線等の幾何学的関係を「射影幾何学」の視点から統一的に定式化することで3次元空間中での点や直線が、その透視変換による2次元投影像から直接的に推定できる⁽⁶⁾。人間は写真等の2次元画像を見て、様々な3次元情報を推測することができるが、これは射影幾何学に通ずる遠近法の概念を根底に持っているからである。例えば、空間中の平行線を認識する場合、画像上では平行線は遠近法によって、ある一点、即ち「消失点」で交わるように見えるという知識を利用している(図1-a)。

また、空間中で複数の直線が互いに平行な平面上にあれば、画像上ではそれらの消失点は同一直線「消失線」上に存在すると言う原理も知られている(図1-b)。このような消失点や消失線は、画像の3次元解析に際して重要な手掛かりとなる。本論では、画像中の被写体で確認できる平行な要素の映像から消失点を計測し、撮影したレンズの焦点距離とによって測定対象とした平行線のベクトルを算定する事を試みる。平行線を舷側の各層のデッキラインやデッキと平行な構造物の境界線に選べば、平行線のベクトル方向は船首尾方向を示すので、対象船の対水針路やアスペクトを知ることができる。但し、ベクトルの推定精度は消失点の決定精度に大きく依存するので、消失点を良好な精度で求められるような平行線が測定対象に存在するかどうかを実証的に調べる必要がある。

2.2 同次座標と透視変換

直交座標系 $x-y$ を持つ画像面を2次元射影空間とすると、点や直線を総てが0でない3個の実数からなる同次座標で表すことができる。同次座標 (m_1, m_2, m_3) の点は $m_3 \neq 0$ のとき画像座標上の点 $(f \cdot m_1/m_3, f \cdot m_2/m_3)$ を表すものとする(f は焦点距離)。

このような同次座標は計算上の問題を解決するのに都合が良く、同次座標の3要素が常に単位ベクトルになるようにして置く。

このように正規化した同次座標の組を単位列ベクトルとして表しNベクトルと呼んでいる。以上の定義から画像面上の点 (a, b) のNベクトルは式(1)のようになる。

$$m = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + f^2}} \begin{pmatrix} a \\ b \\ f \end{pmatrix} \quad (1)$$

以上の同次座標やNベクトルは2次元画像面 $x-y$ について定義したが、これは画像の3次元解釈と密接な関係を持っている。図2のように、原点Oを視点とする透視変換を考えると、空間中の点 (X, Y, Z) は画像座標 (x, y) に投影され幾何学的関係から

図1-a 直方体の消失点

図1-b 消失線のモデル

$$\begin{aligned} x &= f \frac{X}{Z} \\ y &= f \frac{Y}{Z} \end{aligned} \quad (2)$$

のように表すことができる。この透視変換は、図3に示したようなカメラによる撮像の数学モデルとなっている。レンズの光軸がZ軸に、そしてレンズの中心が視点にそれぞれ対応する。レンズの中心と撮像面との距離が定数 f に対応しており、既に引用しているように、これを焦点距離と呼ぶ。

2.3 消失点と3次元方向ベクトル

図4に示したように、空間中で単位ベクトル m を持つ直線の投影像はNベクトルが m の消失点を持つ。即ち、消失点のNベクトルは直線の3次元方向そのものを表しており、その直線が置かれた位置によらないので、「空間中で平行な直線群は、画像面上で共通の消失点を持つ。」という良く知られた定義が得られる。このことから逆に画像面上で消失点を決定できれば、対応する空間中の直線の3次元方向が分かることになる。いま、消失点を (a, b) 、焦点距離を f とすれば、Nベクトルの単位ベクトル m は前掲の(1)式で表すことができる。

3. 他船の船首方位の推定実験

3.1 船首方位推定の手順

(1)式の原理を船舶に適用する場合に、船首尾線方向の平行線を見つけてその消失点を求めれば、船首尾方向のベクトルが得られるので、対水針路を推定することができる。勿論、この場合の撮像カメラの焦点距離 f は既知とする。

ベクトルの方向基準はフィルム面を $x-y$ 平面、光軸をZ軸方向としているから、光軸が定義されないとベクトルの方向は定まらない。カメラを架台に据えて光軸を固定したり、サーボ機構で基準に一致するよう追従する方法も考えられるが、動揺する船上では制約があり装置も大掛かりになるので、カメラはフリーハンドで目標を視野の中央付近に位置させるよう注意するだけで、通常の方法で撮影した。ただし、対象船舶の船橋部のコンパス方位と距離を同時に測定しておいたので、撮影画面の中央（光軸）と船橋部との差を画面上で計測して船橋部のコンパス方位に改正し、光軸方向とした。目標の俯角や仰角に起因する撮像面の修正は今回は行わなかった。35mmサイズを用いた今までの実験で、光軸が画像面の中心方向と良く一致することは確かめられている。⁽⁴⁾

他船の実際の船首方位は、生の値を直接入手する方法が無かったので、ARPAによる他船真針路を読み

図2 原点Oを視点とする透視変換

図3 カメラ撮像のモデル

図4 消失点のNベクトルの向き

取った。ARPAによる他船の運動は、一般には流潮と合成された対地運動とされるが、今回の実験のように他船が近距離にあった場合には、両船は殆ど同じ流潮を受けていたと考えられるから、流潮の影響は相殺されてARPAによる他船針路は対水針路として処理した。

そして、画像から推定した針路とARPAからの針路の差を針路の推定誤差と定義した。尚、ARPAはATRAS社の8600型を使用した。推定針路の精度についての性能の記述や実測データは得られていない。しかし、IMOの性能基準によれば、他船との出会い状況のシナリオによっては 7.4° の推定誤差が許容される場合もあるが、概ね 3° 程度以下の誤差が定められている。

3.2 実験方法

各種船舶の色々な航行状態について、この方法による船首方位の推定が可能かどうかを検証するため、神戸商船大学付属練習船「深江丸」の平成8年度夏季研究航海において、7月31日から8月1日にかけて、備讃瀬戸南航路から播磨灘に至る海域を航行中、出会った船舶の映像をCCD-カメラにより撮影した。カメラはNikon N90、レンズはAF Nikkor28mm,1:1.4Dを使用し、Kodak DCS 460Sのデジタルシステムとリンクした。画像は600万画素($3,000 \times 2,000$)から構成されているので、28mmレンズを使用した場合の1画素の分解能は $1.3'$ となる。撮影は日中に行い、当日の天候は晴れ、視程は約10海里であった。

焦点距離の短いレンズしか使用できなかったため、解析に耐える映像を得られたのは1海里程度以下の近距離を航過する船舶に限られてしまったが、撮影した映像の中から船種・船型の別も考慮して14枚の映像を選んでこれらについて解析を行った。撮影と同期して対象船の方位・距離及び真針路・実速力をARPAにより、また、自船針路・速力はコンパスと電磁ログにより、そして参考としてARPAのauto-drift機能によって求めた流潮を記録して解析に用いた。

3.3 解析方法

画像データを処理用計算機(Power MAC 8500)に転送し、ディスプレイ上で比較的明確に識別できる平行線上の画素の座標点を数個ずつマウスで読み取り、最小自乗法により2本の直線の方程式を決定して、それらの交点として消失点の座標(a, b)を求めた。そして消失点とレンズの焦点距離とにより(1)式によってNベクトルを算出した。平行要素は、厳密には当該船舶の一般配置図等を参照しなければならないが、船舶工学の専門家の助言により、水線とデッキライン、デッキラインや上部構造物の各層の境界線等は一般的に平行なものとして採用した。平行要素は必ずしも船首尾方向と一致するものに限定されるものではなく、垂直方向や船横方向のものでも、その方向が確定したものであれば座標の回転技術によって船首尾方向の推定に利用できる。

但し、Nベクトルは反方位の判別ができないので、自動処理の場合には船首か船尾かを判別する別の手段を準備しておく必要がある。連続観測の場合には、対象船の位置変化の方向等を考慮すれば判別は容易に行えるものとする。

3.4 解析結果

表1 船首方位の推定結果と誤差

No.	船種	撮影距離(mile)	夾角 θ (deg)	船首方位(deg)		
				実測値	推定値	推定誤差
1	外航鉱石船	0.26	0.201	294.3	279.3	15
2	外航鉱石船	1.18	0.056	142.9	135.1	7.8
3	外航鉱石船	0.88	0.014	143.4	142.1	1.3
4	外航鉱石船	0.73	0.197	142.9	127.2	15.7
5	PCC	0.64	0.219	253.6	250.1	3.5
6	PCC	0.43	0.063	266.7	272.5	5.8
7	内航貨物船	0.12	0.503	79.4	81.2	1.8
8	内航貨物船	0.27	0.235	294.1	291.8	2.3
9	内航貨物船	0.31	1.325	288.9	303.1	14.2
10	内航貨物船	0.6	6.195	324.7	309.6	15.1
11	GAT船	0.27	1.101	254.4	242.9	11.5
12	コンテナ船	0.72	0.497	222.3	240.1	17.8
13	フェリー	0.51	0.417	233.7	229.5	4.2
14	内航タンカー	0.17	1.689	265.8	271.9	6.1

実験結果を纏めたものが表1である。色々な船型のデータを撮影したが、使用レンズが28mmの広角レンズであったため、対象船舶が1海里以内に入らないと解析に耐えるだけの良好な画像が得られなかった。また、同一船舶の重複はできるだけ避けるようにし、適当な長さの平行要素が明確に把握できる写真画像を選出し、船種のバラエティも考慮した結果、解析データは14個になった。結局、無駄な撮影が多かったことになるが、データ取り込み要領を認識している者が撮影すれば、特殊な船舶以外は解析できる感触を得ている。14例の推定誤差の平均は 8.5° で、経験者の目測より幾分劣るかも知れないが、航海者の状況判断の手助けになり得ると思われる。標本は撮影条件や画像の質によって選んだもので、データ処理の結果による作為は加えていないので、全体の結果を代表すると考えている。

3.4.1 消失点の夾角と推定船首方位の誤差

表に示しているように、平行線の夾角 θ が 1° 以下の場合が大部分であったが、これは交叉方位法における方位線の交角と同義で消失点の決定精度に大きく影響を及ぼし、延いては推定ベクトルの精度を左右する要素である。図5に夾角と誤差の関係を示しているが、誤差は夾角の大きさに反比例する筈という推論は、この図によって裏付けることは無理であろう。

図5 消失点における夾角 θ と誤差

図6 被写体の撮影距離と誤差

図7 光軸と消失点と距離と誤差

図8 レンズ収差と誤差

3.4.2 被写体の距離と推定船首方位の誤差

被写体が近距離にあれば、一般的に計測すべき平行線の長さが画像上で有義な距離差となるので、平行線の画像上での収束が顕著になって消失点が決定し易い。従って、図6において誤差の分布は距離に比例して増大する右上がりの傾向を示す筈であるが、図からこれを立証することは難しい。距離以外に対象船舶のアスペクト等が影響しているものと思われる。

3.4.3 消失点の距離と推定船首方位の誤差

Nベクトルは(1)式により算定されるから、消失点の座標(a, b)が推定精度に影響すると考えて図7を作成した。座標はレンズの光軸を原点としているので、消失点が遠距離にあることは消失点の夾角が小さくなることと似た条件になると考えられるが、データの分布から見れば、逆に距離に反比例する傾向が読み取れる程で、ここでも結論は保留して置きたい。

3.4.4 レンズの収差の影響

広角レンズを用いているので、光軸から離れた測定点ではレンズの収差の影響を考慮しなければならないが、図8の結果だけでは収差の影響を指摘することはできない。

4. 実験方法及び結果についての考察

4.1 撮影レンズの焦点距離の選定

今回の実験では、諸種の事情により28mmの広角レンズで撮影しなければならなかったが、このために撮影条件が極めて束縛され、良好な結果を得ることを妨げたことは否めない。

その第一は撮影距離で、対象船が1海里以内でないと画像の中で明確に平行要素を識別して計測することができなかった。それを意識し過ぎて、近距離に拘泥して対象船が最も接近する正横航過時付近に撮影したため、他船を真横に近い方位から見る結果になり、平行要素の収束点が求めにくい(消失点の夾角が小さい)結果になった。

CCD-カメラの画素数は全画像面で定義されているので、小さく写った対象物をディスプレイ上でズームアップしても解像度は向上せず、消失点の推定精度が低下することになる。

広角レンズのもう一つの欠点は視野の周辺部分の収差が大きい事で⁽⁷⁾⁽⁸⁾、これは特に平行線の消失点の決定精度に影響を及ぼす。

理想的には、対象船を視野一杯に写すような焦点距離のレンズを使用すれば、撮影時期の自由度が大きく、又、解像度も一杯に活用できるが、ズームレンズの使用は撮影時の焦点距離を把握しにくいので、通常は不適當である。

4.2 画像上の平行要素の選定と測定

測定対象とする平行要素は、画像で明確に識別できるものでなければならず、又、平行線を正確に定義できる長さを持つことが必要である。平行要素に必要な長さは、対象船の距離に関して相対的なものであるが、直線上の数個以上の点により直線を定義することによって、消失点の決定位置がかなり安定することが、今回の解析によって確認できた。

平行要素の間隔は、原理的には消失点の決定精度に影響を持たない筈であり、今回の実験でも鉾石船のデッキラインとハッチのように近接したものでも良い結果が得られた例もある。

図9は右舷正横前方約20°に同航する距離約1海里の他船の映像であるが、外舷の水線の塗色の境界線は上甲板と平行に描かれるのが一般的であるとの示唆を受けて居たので、この線と甲板上のパイプラインとの組み合わせ及び船尾楼の白・黒塗色の境界線とその上部の甲板外縁の組み合わせの二通りで測定したが、平行線の長い前者の方がARPAによる針路に近かったのをそちらを採用した。

図9 対象船舶画像の一例

平行要素は当該船舶の一般配置図に当たって選定すべきであるが、今回の対象船は偶々実験海域で遭遇した船舶であって資料が入手しにくかったため、船舶工学の専門家の見解を得て測定対象を決定した。前述の通り平行要素は船首尾方向のものに限定されないが、長さの点で船首尾方向の部材に測定対象として適するものが多い。然し、対象船のアスペクトによっては船首尾方向以外の要素を測定する必要が生ずるので、検討して置く必要がある。

4.3 実験結果についての考察

筆者の一人は、実験室で 2 組の平行線の消失点からカメラの焦点距離を推定する方法を試み、一応の結果を得ている⁽⁴⁾⁽⁵⁾が、至近距離から直方体の被写体を撮影したもので、同じ原理に基づくこの方法が、実際の航海環境に適用できるかどうかの可能性を知る事が今回の実験の主目的であった。その結果として、前々節で触れたように、撮影レンズの焦点距離の問題が色々な点で精度を劣化させる方向に作用したものと考えられ、実験としては不十分な結果であったと反省すべき点が多い。焦点距離の問題は事前に予測していたが、長焦点のレンズを準備できなかったため、可能な道を進んだ結果である。画素の分解能については 50mm 程度のレンズで人間の肉眼視力に匹敵するので、更に長焦点のレンズを使用すれば、本章で指摘した問題点の多くは解決可能と考えるので、これからの課題としたい。

5. 結 言

射影幾何学で定義される平行線の消失点の理論を応用して、航行中の船舶の画像上で平行要素から消失点を算出し、撮影したカメラの焦点距離とによって、対象船の船首方位を推定することを試みた。使用したレンズが広角であったため推定誤差にばらつきがあり、平行要素を識別できなかったり、消失点が計算に適さないような値になるものもあり、本法を実行するためには幾つかの撮影条件があることが判った。また、流線形をした高速艇や特殊な船舶では、平行要素を探しにくいものがあるので、このような場合には、「平行線」でなくても「平行な位置関係にある点」を探すことも考慮しなければならない。今回の実験では、解析に耐えるような条件で撮影した画像の解析によって、船首方位は平均 8.5° 程度の誤差で推定できる結果が得られたので、問題点を改善することによって実用に供せるだけの精度を実現できる目途が得られた。今後は資料の明確な対象物を系統的に測定して、本法の有効性を定量的に立証していきたい。

6. 謝 辞

本研究は、神戸商船大学石村信道助教授の取り組んで来た課題の延長に位置するものであるが、今年 3 月に石村助教授が急逝された為、研究室に残された者で氏の遺志を継承して実験結果を纏めたものである。謹んで氏のご冥福をお祈り申し上げると共に、実験要員及びデータの解析に尽力してくれた商船システム学課程航海学コース第 4 学年澤田完君に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 黒川・今津：他船視覚情報の収集自動化に関する研究，日本航海学会論文集第 82 号 pp.85～91.
- (2) 林 祐司他：他船実画像からの航行情報抽出についての研究-II，日本航海学会論文集第 85 号 pp.143-151.
- (3) 稲石・杉崎：針路推定ニューラルネットワークシステム日本航海学会論文集第 89 号 pp.81～88.
- (4) 岡崎崇史：消失点に基づく焦点距離と三次元ベクトルの推定，神戸商船大学卒業研究論文，平成 6 年度.
- (5) 江崎 茂：焦点距離の算出について，神戸商船大学卒業研究論文，平成 5 年度.
- (6) 金谷健一：画像理解－3 次元認識の数理－，森北出版.
- (7) 吉田昭太郎：カメラマンのための写真レンズの科学，地人書房.
- (8) 渡邊恵一郎：写真計測，共立出版.

質 疑 応 答

佐藤尚登 (海技大学校) : (1) 測定結果の精度を向上するために取得データ数を増やすという説明がありましたが、データ数以外に何か他の方法を考えていますか。

(2) 船首方位の推定結果のバラツキが大きいと言われましたが、何かのフィルターを採用することで精度改善ができるのではないですか。

(3) 透視面をX-Y平面として傾きを考慮していないようですが、画像データの精度を上げるためには考慮した方が良いのではないですか。

岡崎崇史 : (1) データ数というより、測定の方式や条件を吟味する必要を感じています。特に対象物を適切な大きさに撮像できる焦点距離のレンズの選択が重要と考えます。

(2) フィルターは有効と思いますが、今回は消失点の推定に最小二乗法を適用して精度向上を図りました。

(3) 今回は光軸方向を決定するための適当な方法を見いだせなかったもので、X-Y平面の傾きは修正しませんでした。最終的には修正法を考えたいと思います。

石田廣史 (神戸商船大学) : アブストラクトの図1及び図2の訂正があるとのことであったが、どのように変わったのですか。

岡崎崇史 : 発表中にOHPで提示しましたが、詳しくは本文をご覧ください。