

# 船舶同士が相互に感じる衝突リスクの推移の可視化

千葉 大輝<sup>1,a)</sup> 三末 和男<sup>2,b)</sup>

**概要：**海上の衝突事故防止において、各船舶同士が相互に感じるリスクの大きさは重要な指標である。そのようなリスクを定量化する研究が既に行なわれており、海上交通の監視においては、定量化されたリスク値の推移をもとに多数の船舶から経過観察すべき船舶を絞り込むことが可能である。著者らは、そのような監視タスクを支援するための可視化手法の開発を行なっている。ここでのリスク値データは、 $N$  船舶あたり同時に  $N(N-1)$  の値がある膨大な時系列データである。経過観察の必要性の判断は、単一の時系列だけでなく、その時系列と相互関係のある時系列など、同じ船舶が関係している全ての時系列を考慮する必要がある。それらの調査を効率よく行える可視化手法が求められる。著者らは、これまでに時系列間の関係性の表現方法が異なる 2 つのアプローチとそのプロトタイプを作成した。1 つはインタラクティブなリンクを用いた動的な表現方法、もう 1 つはパネル行列を用いた静的な表現方法である。本論文ではいずれのアプローチでも複数の船舶が絡む経過観察な状況の発見が可能であることをユースケースにより示した。

## Visualization of changing collision risk which $N$ ships felt mutually

CHIBA HIROKI<sup>1,a)</sup> MISUE KAZUO<sup>2,b)</sup>

### 1. はじめに

海上交通の安全確保のため、船舶が混雑する航路では海域の集中的な監視が行なわれている。監視者は衝突リスクのある船舶を見つけて経過観察し、必要であれば事故回避のため船舶に指示を出す。

そのような監視タスクにおいて重要な指標となるのが、船舶の操船者が他船に対して意識する衝突リスクの大きさである。井上らによる研究 [1] をはじめとして、そのような衝突リスクを定量化する研究が既に行なわれており、定量化された衝突リスク値の推移をもとに多数の船舶から経過観察すべき船舶を絞り込むことが可能である。

しかしながら、監視海域上の全ての衝突リスク値をリアルタイムに監視することは容易ではない。衝突リスク値は

どの船舶の操船者がどの他船に対して感じるかによって値が異なり、さらにそれが時間変化する。従って、衝突リスク値データは監視する  $N$  船舶あたり最大で  $N \times (N-1)$  の時系列をもつ量的データとなる。監視する船舶の数が  $N = 20$  であるとすれば、時系列の数は最大で 380 にも及ぶため、そのような膨大な時系列データを基に経過観察が必要な船舶を特定するのは容易ではない。それゆえに、監視を支援するための視覚的表現が必要である。

また、どの船舶に経過観察を行うべきかの判断は、衝突リスク値によるインデックスだけでは適切に行うことができない。例えば、大きい衝突リスク値を持つ船舶があったとしても、それが減少傾向であれば、経過観察の必要性は低い。一方で、衝突リスク値が大きくなっても、その相手となる船舶の数が多ければ、経過観察の必要性は高い。また、ある船舶から見た他船の衝突リスク値が小さかったとしても、その反対側から見た衝突リスク値が高ければ、それは一方が危険に気がついていない可能性があるため、経過観察の必要性が高い。このように、衝突リスク値を用いた経過観察の必要性の判断は、1 時刻の 1 つの値に注目す

<sup>1</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科  
Graduate School of Systems and Information Engineering,  
University of Tsukuba

<sup>2</sup> 筑波大学システム情報系  
Faculty of Engineering, Information and Systems, University  
of Tsukuba

a) chiba@vislab.cs.tsukuba.ac.jp

b) misue@cs.tsukuba.ac.jp

るのではなく、各船舶が関係する全ての時系列を調査する必要があり、そのようなタスクを支援できる視覚的表現が求められる。

そこで、本研究では複数の関係する時系列を跨いだリスクの調査を行いやすい衝突リスク値の監視向け可視化手法の開発を目的とする。我々は、この目的に対して、既存の知見に基づき2つのアプローチで可視化手法の開発を行った。1つ目のアプローチは我々が叩き台として最初に考えたもので、2つ目のアプローチはそれに対する船舶監視システムの専門家からのフィードバックを反映し、改善したものである。本論文では2つのアプローチの表現設計とユースケース、及び課題を順を追って説明する。

## 2. 関連研究

衝突リスク値データは複数時系列を持つ量的データである。複数時系列を持つ量的データの表現では、基本的なアプローチとして Shared-space と Split-space がある [2]。Shared-space は全ての時系列で表示領域を共有する方法であり、Split-space は各々の時系列を別々の表示領域で表示する方法である。Shared-space は時系列間で値軸と時間軸を共有するため、同時刻の数値の比較を行いやすいが、表示領域を共有するため、時系列の数が増えると表現の遮蔽が生じ、各々の時系列を調査しにくくなる問題がある。反対に、Split-space は時系列間で表示領域を共有しないため、各々の時系列は調査し易いが、時系列間で値軸と時間軸のうち片方または両方が共有されないため、同時刻の数値の比較を行にくい。また、いずれの方法でも、衝突リスク値データにおける船舶名のような時系列に紐づく情報を同時に提示しようとする、視覚的混雑や表示領域の問題が生じる。これらの問題は、時系列の数が増えるほど深刻になり、データから有益な情報を得ることが難しくなる。

多数の時系列を持つ量的データの可視化に関する研究では、それらの問題に対処する試みが行なわれている。

その代表的なアプローチとして、データ全体を表現するビューに加え、範囲選択などのユーザーの操作に応じて一部分の拡大ビューを提供するような方法がある [3][4]。このアプローチを用いる手法は、いずれも分析向けに開発されたものであり、大規模なデータから必要に応じて表示するデータを絞り込むことで、各々の時系列に紐づく情報を調査しやすくするものである。しかし、本研究が目的とする監視タスクの支援では、これらの分析向け手法で用いられているような繊細なインタラクションや画面切り替えを行っているうちに、危険な状況を見落とす可能性がある。

また、その他のアプローチとして、クラスタリングによって表現する時系列をフィルタリング・集約するアプローチがある [5][6]。このアプローチを用いる方法は、複数の時系列を要約した上で表現する方法であるため、多数の時系列の中にどのような特徴を持つ時系列が存在するのかを把握

するのに役立つ。しかし、本研究で行う衝突リスク値データの可視化は、データに含まれる時系列の特徴を発見する事が目的ではなく、危険な状況を時系列とその間の関係性をもとに発見した上で、それに紐づく全ての船舶を把握することが目的である。

これらの既存研究に対し、本研究では各々の時系列やその関係性を調査し易いような可視化手法を開発する。

## 3. 衝突リスク値データ

本研究で扱う衝突リスク値データは、衝突リスク値の一件ごとに次の情報を含んだレコードで構成されるものとする。

- 衝突リスク値
- 衝突リスクを感じた船舶（自船）の ID または船名
- 衝突リスクを与えた船舶（他船）の ID または船名
- 時刻

使用するデータにおいて、衝突リスク値は  $[0, 1]$  の実数値であり、値が大きいほど自船の操船者が大きな衝突リスクを感じていることを示す。これらのデータは、一定間隔ごとに監視対象の船舶の複数の組み合わせに対して計算されたものであるが、船舶間の距離等の関係で衝突リスクの無い組み合わせも存在する。データ提供元において同時に監視対象となる船舶は最大 20 隻程度とされており、本研究も現段階ではその規模の監視のサポートを目指している。

## 4. アプローチ 1

我々が最初に考えたアプローチ 1 は、繊細な操作を要求しない監視タスクに適した設計のもとで、時系列間の関係性を強調するリンクをインタラクティブに表示するというアプローチである。本節では、そのようなアプローチのもとで作成したプロトタイプについて説明した後、その設計において検討した事柄について言及する。

### 4.1 プロトタイプ

作成したプロトタイプを図 1 に示す。図 1 は、5 分間分のデータを表現したものである。この手法にはマウスオン操作が導入してあり、マウスの位置によって表示が変わる。図 1 は白のカーソルマークで示した位置にマウスオンされている状態である。

アプローチ 1 は、大別して2つの表示領域で構成される。左側の大きな領域では、衝突リスク値の全時系列が表現されている。横一列に並んだ矩形が単一の時系列を表現しており、矩形の水平方向の位置で時刻を、色で値を表している。時間は右側が最新であり、色は図 2 のように値を表現する。時系列表現は自船 ID が同じものをグループ化して連続するように並べてあり、異なるグループの間に間隔を空けている。

右側の狭い領域では、時系列に紐づく船舶 ID とリンク

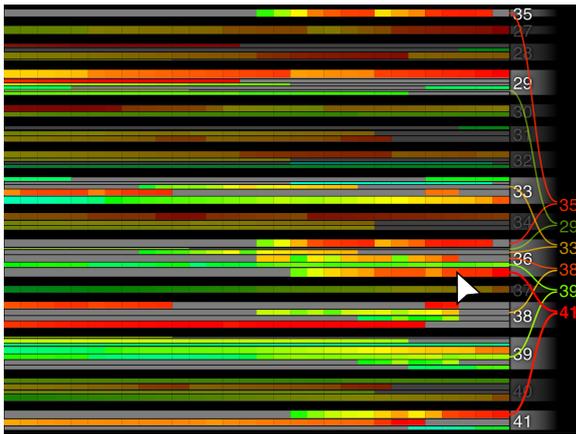


図 1 アプローチ 1 のプロトタイプ



図 2 色による衝突リスク値の表現

が表現されている。時系列表現のすぐ右側に配置されている文字列は、左に表現されている時系列の自船 ID をグループごとに表現している。右端に配置されている文字列は、マウスオンされているグループの時系列に紐づく全ての他船 ID である。マウスオンされているグループから他船 ID に伸びるリンクは、時系列と他船 ID の対応関係を示している。また、他船 ID からその他のグループへ伸びるリンクは、リンクされている時系列表現が、マウスオンされているグループの時系列と相互関係をもつ時系列、つまり他船から見た自船の衝突リスクを表現していることを示している。他船 ID から伸びる 2 本のリンクを追うことにより、マウスオンされているグループの自船から見た他船の衝突リスクと、他船から見た自船の衝突リスクの両方の時系列を調査することが可能である。なお、これらのリンクが無いグループの時系列表現は明度を落としている。

#### 4.2 複数時系列の時刻と値の表現

2 節で述べた通り、複数時系列の表現方法には表示領域の使い方の違いで Shared-space と Split-space の 2 つがある。衝突リスク値データの監視においては、時系列間で数値を正確に比較することよりも、時系列各々で数値の大小を読み取ることのほうが重要である。そのため、複数時系列の表現においては、遮蔽の問題が起きず各々の時系列を調査しやすい Split-space を用いることにした。ただし、数値の正確な比較を行う必要はないものの、大まかな比較を行う必要はあるため、時間軸は共通であることが望ましい。そこで、水平方向に時間軸を設けた上で、垂直方向に時系列表現を並べる配置とした。

一方、そのような配置によって、各時刻の衝突リスク値を表現する上では表示領域の制約が生まれる。量的データの表現には、図形の位置、長さ、角度、大きさ、色を使用する事ができるとされており [7][8]、位置を用いた表現が

最も数値の表現精度が高いとされている。しかし、位置を用いた表現は広い表示領域が必要となることや、値の表現精度がそれほど要求されていないことから、本手法には適していない。そのため、表現精度が劣るものの、最も狭い表示領域で表現可能なものとして、色を値の表現に用いることとした。

プロトタイプにおいて、この時の配色には、直感的に値の大きさを理解しやすいようにヒートマップでよく用いられる様な図 2 の配色を使用している。ただし、値が 0.6 以上の場合は全て同じ赤色を割り当て、変化しないようにしている。これは入手しているデータにおいて衝突リスク値が 0.6 を超える場合が少なく、最大値の 1.0 で赤色になるようなグラデーションを作成してしまうと、相対的に衝突リスクの高い時系列に対して注意が向きにくい配色となってしまうためである。つまり図 2 の配色は、データでの衝突リスク値の分布を確認した上で、衝突リスクが相対的に高い時系列に注目しやすいよう、調整した配色である。

#### 4.3 他船 ID と相互関係の表現

本手法では、同じ自船 ID を持つ時系列を調査しやすいように、それらをグループ化し連続するように並べることとした。それにより、自船 ID を表示する上では、時系列表現のすぐ横に十分な表示領域を確保可能である。一方で、他船 ID に関しては、各時系列表現に割り当てられる縦幅がわずかであるため、時系列表現の真横に全ての ID を表示する領域を確保するのが難しい。そこで、他船 ID の表現においては、まずは時系列表現上へのマウスオン操作に応じて他船 ID を表示することを考えた。

しかし、時系列毎のマウスオン操作では、時系列を調査する効率が悪い。そこで、同じ自船 ID を持つ時系列に関して、他船 ID をまとめて表示することにした。同じ自船 ID を持つ時系列は連続して配置されるため、この設計が繊細なマウス操作の緩和にも繋がる。ただし、それゆえに時系列表現の真横に他船 ID の表示領域を確保することが難しいため、離れた位置に十分な領域を確保した上で ID を表示し、時系列表現との間にリンクを描くことで対応関係を示すことにした。

ここまでの設計により、各々の船舶が感じる全ての衝突リスクを調査することは容易になった。一方で、各々の船舶が与える衝突リスク値の時系列については分散して配置されており、それらの時系列を同時に調査することは未だ困難である。しかし、それらの時系列はここで表示した他船 ID と 1 対 1 の関係にあるため、他船 ID からそれぞれの相互関係を持つ時系列へリンクを表示することで強調が可能である。この設計により、ある船舶に注目したとき、その船舶が感じる衝突リスクと与える衝突リスクの全ての時系列を同時に発見することができ、さらにその中に存在する相互関係を確認することも可能となった。



図 3 時系列表現の縦幅を均等にした場合 (左) と時系列の重要度によって重み付けた場合 (右)

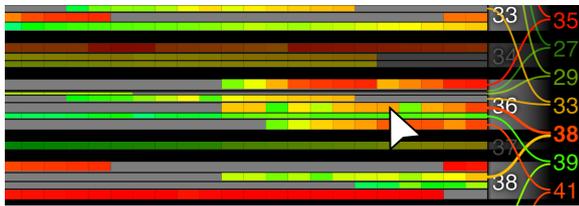


図 4 ユースケースで調査する状況

#### 4.4 繊細なマウス操作の緩和

ここまでの設計でマウス操作を導入しているが、監視向け手法においては繊細なマウス操作を避けたいという要求が有る。4.3 節で述べた自船別のグループ化によってマウスオンターゲットが拡張されるため、すでにある程度問題が緩和されているが、グループに属する時系列が少ない場合は、未だマウスオンしにくいことが考えられる。また、衝突リスク値は値が大きく最新であるほど重要なデータだと考える事ができる。リスクの調査を行う際はそのような重要な時系列を優先的に調査すべきであるが、各時系列表現の表示領域が均等である場合は、図 3 左図のように古いデータしか無いグループでも時系列の数さえ多ければマウスオンし易いという状況が生じてしまう。このような状況を避けるために、時系列に重要度を定義した上で、それを重みとし各々の時系列表現の縦幅を図 3 右図のように変更することにした。これにより重要な時系列ほど素早いマウスオンが可能となる。

#### 4.5 ユースケース

作成したプロトタイプにおいて、図 4 のような状況からどのような発見が可能であるかを示す。

まず、図 4 において時系列表現の右端に注目する。右端が赤に近い色になっている時系列を探し、その近くの自船 ID を確認することで、船舶 34, 36, 38 が大きな衝突リスクを感じていることが分かる。

次に、それらの船舶の中でも、右端が赤色に近い時系列が多い船舶 36 のグループに注目する。図 4 は既に 1 つの船舶 36 の自船別グループにマウスオンした状態である。このとき、船舶 36 に対する全ての他船 ID と時系列表現へのリンクが表示されている。ここで、右端が赤に近い色となっている時系列から伸びるリンクと他船 ID に注目することで、大きな衝突リスクを与えているのが船舶 35, 38, 41 であることが分かる。

最後に、確認した他船のうち、船舶 38 に注目する。船舶 38 の ID から、船舶 38 のグループに伸びるリンクをたどると、船舶 38 から見た船舶 36 の衝突リスク値の時系列

表現に到達する。この時系列表現の右端と、船舶 36 から見た船舶 38 の衝突リスク値の時系列表現の右端を比較すると、前者が黄色に近い色であるのに対し、後者が赤い色であるため、後者が感じる衝突リスクが一方向的に大きいことが分かる。また、前者の時系列表現の上には右端がより赤に近い色の時系列表現があるため、船舶 38 は船舶 36 よりも大きな衝突リスクを別の船舶に感じていることが分かる。この状況は、船舶 38 が船舶 36 以外の船舶に気を取られているという事を示しており、船舶 36 への回避行動が遅れるリスクが考えられるため、両船舶の経過観察が必要であると判断できる。

以上により、提案手法のプロトタイプを用いて関係する複数の時系列を調査し、衝突リスクの感じ方の違う 2 隻を発見できた。この例は、そのうち一方がさらに他の船舶に衝突リスクを感じているため、3 隻が絡んでいるような状況である。海上交通での事故は、3 隻以上の船舶が絡む事故がおおく、特に今回のような状況の発見は事故防止に有用である。

#### 4.6 フィードバック

ユースケースを元に船舶監視システムの専門家へデモを行なったところ、4.5 節で取り上げたような、3 隻以上の船舶が絡む状況の発見は有用であるという意見を得た。その一方で、マウスオンによる船舶 ID や時系列の関係性の表現については、時系列間の関係性をインタラクションを経なければ確認出来ないという問題点の指摘を受けた。監視を行う上では、経過観察の必要性の判断に必要な船舶の情報をインタラクション無しで得られる方が望ましい。また、最新の値だけではなく、推移の情報も活かせるとういとの意見もあった。

フィードバックでは、実際の監視環境についての情報も得た。実際の監視環境では、船舶の最新の位置などの動的情報を表現する地図ベースのビューと、船舶の種別などの静的情報を表示する 2 つのビューが用いられている。ここで開発する時系列表現は、動的情報のうち、どの部分に注目すべきかという情報を得る為のものである。したがって、時系列表現で見つけた状況を地図ベースのビューで確認するというフローを考慮して手法の設計を行う必要がある。

我々は、これらのフィードバックで得た要求を元に新たにアプローチ 2 を考え、そのプロトタイプを作成した。

### 5. アプローチ 2

アプローチ 2 は、複数時系列の表現にパネル行列を用いることで、時系列間関係性を常に表現するというアプローチである。本節でも、4 節と同様、まずはプロトタイプについて説明した後、その設計において検討した事柄について言及する。

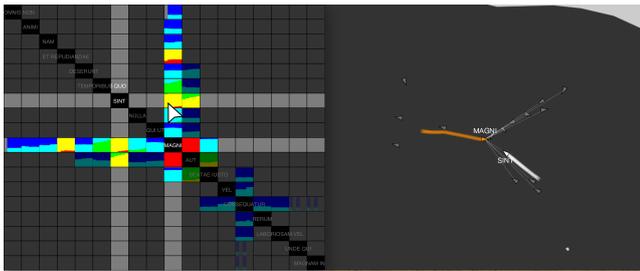


図 5 アプローチ 2 のプロトタイプ



図 6 二色塗り分け擬似カラー表示による衝突リスク値の表現

### 5.1 プロトタイプ

作成したプロトタイプを図 5 に示す。図 5 は 1 分間のデータを表示したものである。この手法でも、マウスオン操作を導入しており、図 5 は白のカーソルマークで示した位置にマウスオンされている状態である。

可視化ツールの画面は、左側の時系列ビューと右側の地図ビューの 2 つの画面で構成される。

時系列ビューは単一の時系列を表示した矩形領域が縦と横に並ぶパネル行列である。パネル行列の対角要素には、船舶名が表示され、各列にはその船舶が他船に感じた衝突リスク、各行にはその船舶が他船に与えた衝突リスクの時系列が並ぶようになっている。相互関係のある時系列のペアは、衝突リスクを感じるか、与えるかが逆の関係、すなわち行と列が逆の関係であるため、パネル行列上では対角要素を挟んで対称の位置に配置される。各時系列表現では、右側が最新の時刻となるように時間軸が横にとってあり、二色塗り分け擬似カラー表示 (Two-tone pseudo coloring) [9] によって値を表現している。二色塗り分け擬似カラー表示による値の表現方法は図 6 のとおりである。加えて、最新の衝突リスクの有無を値表現の透明度で表しており、透明度が 0 の物は最新の衝突リスクがあることを、透明度が高いものは最新の衝突リスクが無いことを示している。

地図ビューでは、最新の船舶の位置と針路が、三角形のアイコンで表現されている。アイコンが配置された場所が船舶の位置であり、最も鋭い角が向いている方向が針路である。地図ビュー上に橙色で示された船舶は、時系列ビューでマウスオンされている時系列の自船にあたり、そこから周囲の船舶に伸びているエッジは、その船との間に最新の衝突リスクがあることを示している。それら周囲の船舶のうち、高い明度の白色で示されているものが、マウスオンされている時系列の他船にあたる。また、船舶のアイコンから伸びる残像は、船舶の軌跡を表している。

このとき、時系列ビュー上ではマウスオンした時系列の自船と他船が関係する全ての時系列がハイライトされる。マウスオンした時系列と同列の時系列は、その時系列の自船が感じている全ての衝突リスク、同行の時系列は他船が

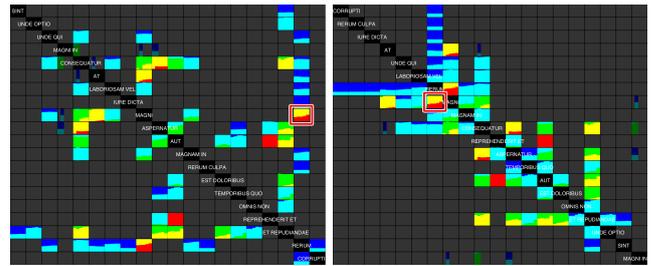


図 7 無作為に船舶を整列した例 (左) と Multi-scale アルゴリズムにより船舶を整列した例 (右)

与えている全ての衝突リスクを表している。また、残るもう 1 つの列はその時系列の他船が感じている全ての衝突リスク、もう 1 つの行はその時系列の自船が与えている全ての衝突リスクを表している。

### 5.2 パネル行列による複数時系列の表現

この手法では、パネル行列を用いて複数時系列を表現することにした。パネル行列は、同じ規則で作成された複数の視覚的表現を行列状に配置する表現方法である [10]。パネル行列は、変数を対角要素に割り当て、行列の各要素で交差する 2 変量の可視化を行うのが一般的である。衝突リスク値データの場合、1 つの時系列は自船と他船の 2 船舶の組み合わせで識別されるため、対角要素に船舶 ID を割り当てることで、パネル行列内の位置により各時系列と船舶の関係性を表現することができる。その上で今回は、列方向にその船舶が自船となる時系列、行方向に他船となる時系列を並べることにした。これにより、ある時系列に注目し、それと同列の時系列を読み取れば、同じ船舶が感じている衝突リスクを比較することができ、同行の時系列を読み取れば、同じ船舶が与えている衝突リスクを比較することができる。また、相互関係のある時系列は、自船と他船の関係が逆の時系列であるため、パネル行列上の対角要素を挟んで対称の位置の時系列を読み取れば、それらの比較が可能である。なお、対角要素に表示する船舶 ID は、分かりやすさのため船名に置き換えることにした。本論文の船名は、すべて仮名化を施したものである。

パネル行列を構成するにあたって考慮した点は、対角要素の船舶の整列方法である。各時系列の位置は、対角要素の船舶の順序によって決まるため、その順序次第で時系列間の関係性の読み取りやすさが大きく変わってくる。

例えば、ある時系列に注目し、その時系列が配置される位置が図 7 左図のように対角要素から離れた位置にある場合、それと相互関係のある時系列は、対角要素を挟んで対象の離れた位置に配置されているため、比較が行いにくい。一方で、複数時系列をパネル行列によって可視化することにより、衝突リスクの有無が隣接行列のように表現されたため、パネル行列上に Block pattern や Line pattern [11] の様な構造が見えれば、相互に衝突リスクを感じている 3

船以上のグループの発見が容易になる。従って、時系列がなるべく対角要素付近に配置され、衝突リスク値データに含まれるそのようなパターンを可能な限り表出できる順序にする必要がある。

この要求を満たし得る行列並べ替えの最適化問題として、Minimum Liner Arrangement (MinLA) 問題 [12] が知られている。ここでは、最新の衝突リスクがある船舶対をエッジとする無向グラフを構成した上で、MinLA 問題の解法として知られる Multi-scale アルゴリズム [13] を用いることにした。Multi-scale アルゴリズムは、グラフの隣接する頂点对を頂点とするより粗いグラフを再帰的に生成し、問題を低レベルにした状態で求めた正確な解をより高レベルの問題へ投影していく方法である。グラフのトポロジに依存せず、計算時間も比較的短い [11]。Multi-scale アルゴリズムを実行する際、ある程度適切な初期順序を与える必要があるが、そのアルゴリズムには実装コストの低い Successive augmentation [12] を用いることにした。なお、Successive augmentation に対して与える船舶の初期順序は、暫定的に次数の降順とした。図 7 右図は、左図と同じ状況のパネル行列を、そのような実装の MinLA を用いて整理し直したものである。それぞれの図の赤枠は、同じ時系列である。左図と比較し、右図では対角要素に近い位置に配置されており、相互関係のある時系列との比較が容易であり、Line pattern が表出していることもわかる。

### 5.3 時系列の値の表現

パネル行列の各要素(対角要素以外)では、衝突リスク値の単一の時系列を表現する。アプローチ 1 では値を色のみで表現していたが、アプローチ 2 では時系列の変化をより理解しやすくするため、色と位置を組み合わせた表現方法である二色塗り分け擬似カラー表示を用いて表現することにした。二色塗り分け擬似カラー表示は、2 色の組み合わせと割合で値を表現する方法であり、その割合を垂直方向の位置で表現する。従来の単色のグラデーションでの値の表現の場合、その凡例がなければ値の増減を理解することができなかったが、二色塗り分け擬似カラー表示では 2 色の境目を追うことで、凡例無しで増減を理解することが可能である。また、グラデーションを用いず、使用される色の色差が固定されるため、より衝突リスクが大きい時系列に注目しやすくなる効果も期待できる。さらに、色の明度で値を表現しないため、透明度などによる別の情報の表現と組み合わせても、値の表現の精度を損ないにくい。図 8 は、単色のみで値を表現するアプローチ 1 の方法と、二色塗り分け擬似カラー表示とで同一のデータを表現し、比較したものである。

### 5.4 インタクションと詳細な調査の補助

5.2 節で述べたように、このアプローチでは、パネル行

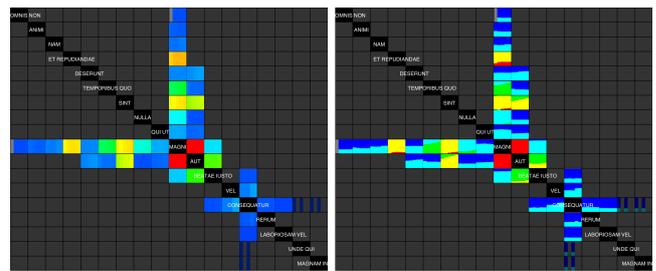


図 8 単色による値の表現 (左) と二色塗り分け擬似カラー表示による値の表現 (右)

列を再整理することで、関係する時系列を調査しやすくする工夫を施している。しかしながら、相互関係を持つ時系列は依然として対角要素を挟んだ少し離れた位置に配置されるため、対応する時系列を見つけるのが困難な場合が考えられる。そこで、インタクション操作を用いて、それらの時系列をパネル行列内でハイライトすることにした。図 5 の様にある時系列にマウスオンすると、その時系列と自船が共通の時系列、他船が共通の時系列、また、相互関係のある時系列について、同様の 2 種類のハイライトを行う。このようにすることで、ハイライトしている行と列が交差する場所にある時系列が相互関係のある時系列となる。ここでハイライトされている時系列は、すべてマウスオンした時系列の自船または他船が関係する時系列であるため、関係する全ての時系列がどれかを一度に把握できるという利点も考えられる。

また、実際の監視フローでは、経過観察が必要な時系列を発見した際に、その船舶がどのような状況であるか、船舶の位置などの動的情報を確認することが考えられる。ここでは、その確認を補助するため、船舶の位置や針路を表現する地図ビューを用意し、その上でマウスオンした時系列に対応する船舶をハイライトするようなインタクションを追加した。地図ビューでの船舶へのマウスオンもサポートし、その際は行列ビューで該当する船舶が自船または他船となる時系列がハイライトされる。

### 5.5 ユースケース

作成したプロトタイプにおいて、図 9 の様な状況からどのような発見が可能であるかを示す。

まず、時系列ビュー上で各時系列表現の色に注目すると、時系列表現が真っ赤になっている 2 つの時系列に目が行く。その行と列の対角要素を確認すると、MAGNI と AUT の船舶名を確認できる。これにより、MAGNI と AUT が、相互に高い衝突リスクを感じていることがわかる。このときの海上の状況を確認するため、MAGNI の列の AUT の行にマウスオンすると、地図ビュー上で図 10 のように船舶がハイライトされ、両船舶がかなり接近している状況であることが確認できる。

次に、時系列ビュー上で両船舶の列を確認すると、色が

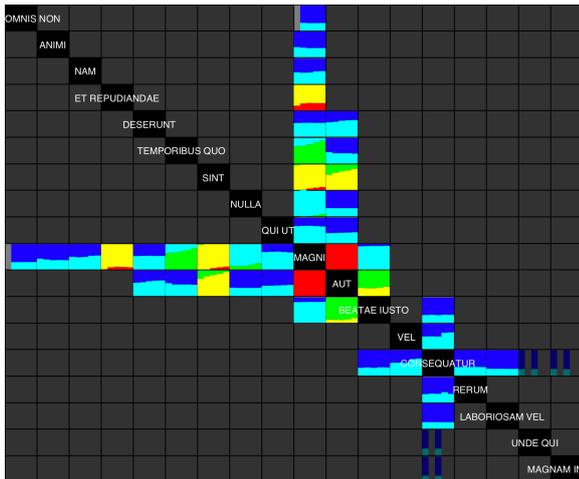


図 9 ユースケースで調査する状況

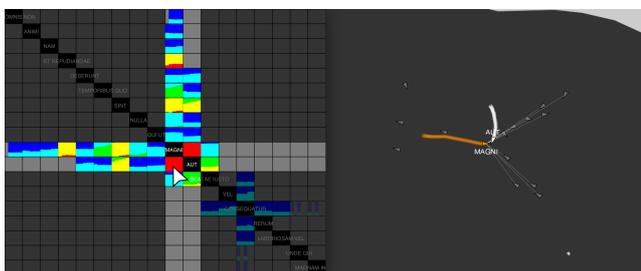


図 10 MAGNI と AUT の位置関係を確認する様子

付いている時系列が長く連続して並んでおり、Line pattern のようになっていることが読み取れる。さらに、そのうちほとんどの行が、MAGNI と AUT で共通であることがわかる。これは、MAGNI と AUT が多くの船舶に衝突リスクを感じており、さらにその相手のほとんどが共通の船舶であることを示している。2つの船舶の列を比較すると、色の付いている時系列が比較的少ないことから、AUT の方が衝突リスクを感じている船舶が少ないことがわかる。また、AUT の列のうち、赤色で大きな衝突リスクが示されているのは MAGNI だけである。これに対して、MAGNI の列は3つの行で赤色が現れており、大きな衝突リスクをより多くの船舶に感じている複雑な状況であることが考えられる。したがって、AUT のほうが MAGNI よりも状況の緩和のために何らかの対処行動を起こしやすいものと考えられることができる。

MAGNI で赤色が現れる行に注目すると、ET REPUDIANDAE のみが他の列で色が付いておらず、MAGNI のみに衝突リスクを与えていることがわかる。したがって、MAGNI の複雑な状況を緩和するためには、まず ET REPUDIANDAE に何らかの対処行動をさせればよいということが考えられる。また、その対角要素を挟んで対象の位置の時系列を読み取ると、MAGNI 列、ET REPUDIANDAE 行よりも ET REPUDIANDAE 列、MAGNI 行の方が赤の領域が少なく、ET REPUDIANDAE が感じる衝突リスクの方が小さくなっている事がわかる。この状況

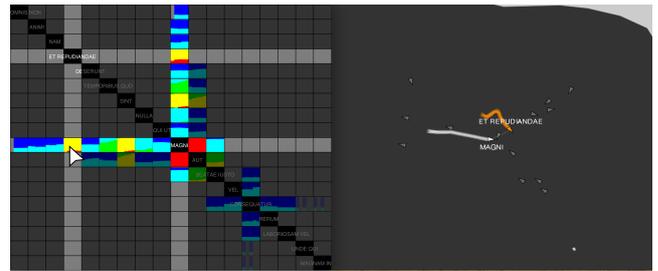


図 11 ET REPUDIANDAE と MAGNI の位置関係を確認する様子

をマウスオンで地図ビューで確認すると、MAGNI が ET REPUDIANDAE の後方に存在する状況になっており、ET REPUDIANDAE が MAGNI の存在に気づいていない可能性が考えられる。したがって、ET REPUDIANDAE へは何らかの指示が必要であると考えられることが出来る。

このようにして、アプローチ2では、アプローチ1と同様に、3隻以上が絡む状況を見つけることができた。アプローチ1と異なる点は、3隻以上が絡む複雑な状況を、マウスオン無しで発見可能であったという点である。途中で実際の状況を地図ビューで確認するためにマウスオン操作を使用した。その発見自体は時系列ビューのみで可能であった。アプローチ1では、関係する時系列を順番に見つけて調査することで3隻以上が絡む状況を発見したが、このアプローチでは予め配置によって時系列の関係性が示されており、それらの時系列を俯瞰的に見ることでそのような状況を一度に発見することができた。また、さらに異なる点は、複雑な状況を解消する方法も時系列ビューのみで考察できたという点である。アプローチ1では、2船舶が共通して衝突リスクを感じている船舶を確認するには2回以上のマウスオン操作が必要であったが、このアプローチではマウスオン操作無しでそれが可能であった。このユースケースでは、共通ではない船舶を見つけることで、複雑な状況を解消する方法を導くことができた。

## 5.6 課題

現在のアプローチ2において、3つの課題が存在する。1つ目は、相互関係のある時系列での差の表現である。ユースケースで述べたように、相互関係のある時系列では、双方で感じる衝突リスクに差があると、一方が他方の船舶を察知していない可能性が考えられるため、衝突リスクに大きな差のある時系列の発見は重要である。現在のアプローチでは、全ての時系列での値をそのまま表現しており、衝突リスクの大きい時系列に目が行くものの、その時系列と相互関係のある時系列に差があるかどうかは、相互関係のある時系列を探して発見した上で見比べる必要がある。これは経過観察が必要な状況を見つける上で手間のかかるタスクとなるため、そのような時系列間の差を表現する何らかの工夫が必要である。現段階ではそのアプローチとし

て、Explicit encodig を用いる方法を考えているが、まだ使い勝手の良い表現を見出すことができていない。

2つ目は、パネル行列上の時系列の位置の急な変化である。現段階では、パネル行列内の船舶の順序が各瞬間で最適になるようなアルゴリズムを用いている。そのため、データ内での船舶の増減によって、行列内の順序が大きく代わり、例えばある時系列に注目してその変化を追っている最中に順序が変わってしまい、見失ってしまうということが考えられる。この点に関しては、順序の計算に使う船舶間の重みを工夫して前の瞬間の順序に影響させるようにしたり、順序の変化にモーフィングを与えたりすることで改善したいと考えている。

3つ目は、パネル行列の整列に関してである。現在は、最新の衝突リスクがある時系列が、できるだけ対角要素に近くなるような配置を行っているため、各時系列の重要度などは考慮していない。そのため、衝突リスクが大きい、または相互関係のある時系列で衝突リスクの差が大きいといった、優先的に調査する必要がある時系列が、対角要素から離れて配置され、調査しにくくなってしまいうケースが有る。現段階ではこの問題に対するアプローチとして、衝突リスク値データから無向グラフを構築する際に、エッジの重みとして船舶のペアの重要度を付す方法を考えている。幾つかの重要度の定義を試しているが、結果として本論文のユースケースなどで示した様なきれいな Line pattern が崩れてしまい、時系列の関係性を把握しにくい表現となってしまう。したがって、現段階では時系列の重要度を踏まえた適切な整列方法を見出すことができてない。

また、その他検討が不十分な点として、時系列表現の配色や船名の表示がある。例えば、衝突リスク値の配色は、重要な値ほど注目しやすく、長時間の監視でも疲労が少なく、さらに見栄えが良いような物が望ましいが、現段階ではそれら全ての要求を満たすような設計ができていない。図2の配色は、大きな値への注目しやすさのみを考慮した暫定的なものである。船名の表示については、対角要素を中心にそのまま文字を表示するようにしているが、要素からはみ出して両隣の時系列表現と重なり、可読性が良くない状態であるため、工夫が必要である。

## 6. まとめ

本研究では、複数時系列を持つ量的データである衝突リスク値データの監視向け可視化手法の開発を行っている。衝突リスク値データは船舶の監視において経過観察の必要性の判断に有用であるが、その判断の際には単一時系列だけではなく関係する複数の時系列を調査する必要があり、それを支援する可視化手法が求められる。本研究ではこれまでに2つのアプローチとそのプロトタイプを作成し、本論文ではいずれのアプローチでも関係する複数の時系列を調査した上で、複数の船舶が絡む要経過観察な状況の発見

が可能であることをユースケースにより示した。それらのアプローチのうち、パネル行列を用いて時系列の関係性を表現するアプローチは、多数の船舶が絡む複雑な状況の発見と、その状況の緩和策の考察を、インタラクション無しで可能であったため、より目的に沿ったアプローチであったと言える。今後は、このアプローチについて、現段階で明らかである課題の改善と、客観的な評価を行なってゆく。

**謝辞** 本研究を進めるにあたり、富士通株式会社および株式会社富士通研究所の皆様には貴重な意見をいただきました。深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 井上欣三, 久保野雅敬, 宮坂真人, 原大地: 危険の切迫に対して操船者が感じる危険感の定量化モデル, *日本航海学会論文集*, Vol. 98, pp. 235–245 (1998).
- [2] Javed, W., McDonnell, B. and Elmqvist, N.: Graphical Perception of Multiple Time Series, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 6, pp. 927–934 (2010).
- [3] Imoto, M. and Itoh, T.: A 3D Visualization Technique for Large Scale Time-Varying Data, *Proceedings of 2010 14th International Conference Information Visualisation (iV2010)*, pp. 17–22 (2010).
- [4] Buono, P., Aris, A., Plaisant, C., Khella, A. and Shneiderman, B.: Interactive Pattern Search in Time Series, *Proceedings of Visualization and Data Analysis 2005*, pp. 175–187 (2005).
- [5] Kumatani, S., Itoh, T., Motohashi, Y., Umezumi, K. and Takatsuka, M.: Time-Varying Data Visualization Using Clustered Heatmap and Dual Scatterplots, *Proceedings of 2016 20th International Conference Information Visualization (IV2016)*, pp. 63–68 (2016).
- [6] Yagi, S., Uchida, Y. and Itoh, T.: A Polyline-based Visualization Technique for Tagged Time-varying Data, *Proceedings of 2012 16th International Conference on Information Visualisation (iV2012)*, pp. 106–111 (2012).
- [7] Bertin, J.: *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*, University of Wisconsin Press (1983).
- [8] Mackinlay, J.: Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 5, No. 2, pp. 110–141 (1986).
- [9] Saito, T., Miyamura, H. N., Yamamoto, M., Saito, H., Hoshiya, Y. and Kaseda, T.: Two-Tone Pseudo Coloring: Compact Visualization for One-Dimensional Data, *Proceedings of 2005 IEEE Symposium on Information Visualization (INFOVIS 2005)*, pp. 173–180 (2005).
- [10] Wong, P. C. and Bergeron, R. D.: 30 Years of Multi-dimensional Multivariate Visualization, *Scientific Visualization - Overviews, Methodologies and Techniques*, IEEE Computer Society Press, pp. 3–33 (1997).
- [11] Behrisch, M., Bach, B., Henry Riche, N., Schreck, T. and Fekete, J.-D.: Matrix Reordering Methods for Table and Network Visualization, *Computer Graphics Forum*, Vol. 35, No. 3, pp. 693–716 (2016).
- [12] Petit, J.: Experiments on the Minimum Linear Arrangement Problem, *Journal of Experimental Algorithmics*, Vol. 8, Art. No. 2.3 (2003).
- [13] Koren, Y. and Harel, D.: A Multi-scale Algorithm for the Linear Arrangement Problem, *Proceedings of 28th International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science (WG 2002)*, pp. 296–309 (2002).