2 次元の自由移動体の管制方式に関する考察

(第 2 報)

正員 石 谷 久* 深 川 正 一*

A Study on a Control System for Two-dimensional Free Moving Vehicles
(Second Report)

by Hisashi Ishitani, *Member* Masakazu Fukagawa

Summary

For a traffic control system for ships passing through the control region arbitrarily, optimization techniques can be effectively utilized to get smooth and safe courses avoiding dangerous encounters where miss distance and destination error for each ship are evaluated as a criterion function. In the paper, the control algorithm shown in the previous paper is applied to more real situations to investigate the applicability and limitation of the algorithm, where

- 1) ships have their own priority levels,
- 2) fixed point obstacle exists in the region, and
- 3) ships are passing continuously through the control area.

Through the investigation, it is shown that the control system can be applied to those situations with slight modification of the algorithm and proper parameter selection, and the following results are obtained.

1) Priority of ships can be taken into account in the control algorithm by selecting weighting parameters evaluating the destination errors according to the priority level of the ships. An obstacle in the region can also be considered as a stationary ship with extreme priority.

2) In order to realize reasonable priority reporting, a concept to collect priority charge from each ship equal to the expected gain, i. e., the decrease of the course deviation loss by adopting the reported priority instead of equal priority, is proposed. If the base priorities are chosen adequately according to the average cost of ship type or its objective, this charging system makes it possible to optimize total expected cost including the charge in the minimax sense when ships report the priorities based on actual cost.

3) Control performance is evaluated by simulation study for the third situation, and the proposed algorithm can control 97% of total time interval clearing 1 km miss distance only by changing the direction, when ships pass 12 km $\times$ 12 km region arbitrarily with 4 minutes average arrival time. Average delay time by the course deviation is about 0.15 min. Comparing this result with that of the control system on parallel route crossings proposed by Kobayashi and Koyama, the delay time is decreased as the ship speed is kept in this case.

1 緒 言

船舶等の 2 次元の移動体がそれぞれの目標地点へ向かって錯綜して通行する際に、衝突回避のための安全距離を保つ条件のもとで目標地点への最短経路を実現するような移動体群全体の管制を行うためには、これを適当な最適問題に定式化し、最適化手法を応用して各移動体の経路を決定することが有効である。筆者は先にこのよう

な方式の定式化並びに求解手法についてその基本的な特性並びに実用性を検討した結果、gradient 法により 2 次元平面上の最適経路の求解が可能なが示され、小型計算機による実時間管制的可能性が確認された¹⁾。本研究においては船舶の管制に適当と考えられる定速航行を前提として、その進路変更角並びに目標誤差を評価関数に定式化した衝突回避経路の最適化手法について、より実際の状況における応用上の問題点並びに現実的な対応手法の検討を更に進めた。具体的には

* 東京大学工学部

- (1) 各移動体間に優先順位のある場合
- (2) 航路上に固定障害物がある場合
- (3) 領域に連続的に船舶が進入・通過する場合

について、問題の定式化手法並びに求解上の諸問題と対応策を検討し、この管制方式の基本特性と適用可能性を数値例によって検証した。

2 優先順位のある場合の管制方式

2.1 最適問題の定式化と求解手法

2.1.1 問題の定式化

船舶等流体中を航行する慣性の大きな移動体は加減速、方向変更が容易でないため、その衝突を回避しつつ目標地点への最短経路を求めるための最適化問題としては以下の定式化が適当である¹⁾。

今 m 個の移動体を考え、第 i 移動体 ($i=1, 2, \dots, m$) の k 時点 ($k=1, 2, \dots, N$) における 2 次元位置座標を X_k^i 、進路変更角を θ_k^i とした時、各移動体の始点 X_0^i 、および目標地点 X_{N0}^i 、並びに移動体間の安全距離 R_0 を与えられて評価関数、

$$2J = \sum_i^m \left\{ \sum_k^N \theta_k^{i2} \cdot W_1 + |d_N^i|^{m_0} \cdot W_2 \right\} + \sum_{i \neq j}^m \sum_k^N f_k^{ij}(X_k^i, X_k^j) \quad (1)$$

を最小とする θ_k を求める。ここで d_N^i は管制終了時 (N) における位置と目標地点との経路誤差、 f^{ij} は移動体 i, j 間距離 d^{ij} が安全距離以下に接近した時に禁止的コストを加えるペナルティ項であり、

$$f_k^{ij}(X_k^i, X_k^j) = W_f \{ (d_k^{ij}/R_0)^2 \}^{-M} \quad (2)$$

で表わされる。また、各移動体速度は一定とする。

上の定式化は不等号制約条件をも評価関数に含むペナルティ法であってきわめて一般的な問題に適用可能であるが、前回の報告では手法の基本的特性を把握するために全移動体を等順位とし、障害物のない領域に対してアルゴリズムの実用性を検証した。本章では管制を行う際に直面する、より現実的な状況、即ち

- (1) 航路上の固定障害物
- (2) 船舶、船種による優先順位

の存在する状況に対する適用可能性、適用上の問題点並

Fig.1 Geometrical relations of X, V and θ

Fig.2 Representation of a fixed obstacle area

びに実際の対応手法を検討する。

上記の状況においても、(1)式第3項の衝突回避項は絶対的なペナルティ項であるが、第1項及び第2項は各移動体固有の評価項であり、その評価パラメータ W_1 または W_2 を移動体に応じて変化することにより、優先順位をつけた管制が可能になる。特に通行経路の優先順位は回避による経路誤差 d_N^i の評価パラメータ W_2 により対応可能である。定性的には W_2^i が大きい時、対応する d_N^i を小さくする解を得るので移動体 i の優先権が確保される。固定障害物については、これを最も優先順位の高い(停止した)移動体と考えることにより、一点または半径 R の包絡領域が障害物形態と一致するような m_1 個の点の集合により表現可能なので、本節において優先順位の存在する場合と共に定式化する。以上の状況に対して評価関数(1)式は、単に以下のように修正すればよい。

$$2J = \sum \{ \sum \theta_k^{i2} \cdot W_1^i + |d_N^i|^{m_0} \cdot W_2^i \} + \sum \sum f_k^{ij} \quad (1)'$$

より複雑な固定障害物 ($m+1$ と表わす) に対しては、直接に(1)式第3項に(2)'式に示されるペナルティ項を付加することにより対応できる。

$$f^{m+1,i} = \{ (d_k^{m+1,i})^t (d_k^{m+1,i}) \}^{-M} \quad (2)'$$

ここに、

$$d_k^{m+1,i} = X_k^i - X_B(X_k^i)$$

であって、 X_B は障害物 B の領域内点の中で X_k^i への最短距離の点を表わすものとする。ただし X_k^i が B に入った場合は適当な手順により外部へ移動させる必要がある。この計算は一般に複雑となるが、 B が突多角形として表現されれば簡単化される。

文献1)においては、開いた領域に5個の移動体が同時に進入し、各直線経路が中央部で互いに交差する Fig. 3 の状況についての衝突回避経路を例として分析した。本研究においては手法の適用限界を明らかにする目的で、更に固定障害物(1地点)を付加し、 W_2^i を順次変化してその内の1機を優先する状況に対して手法の適用可能性を検討する。移動体、あるいは障害物の初期・

Fig.3 Basic trajectories of five crossing vehicles

Table 1 The basic allocation of vehicles

Vehicle Number	1	2	3	4	5	6 (obstacle)
Xo x	0	0	80	100	50	30
y	0	100	100	60	0	30
Xn x	95	100	50	0	30	32
y	100	0	0	50	100	32

Note: W1=1.0, RD=10, Wf=200, W2: VARIABLE

目標位置は Table 1 に要約される。Fig.3 において、移動体 #1, #2 の直線経路は領域を2分するので、これらの経路に高い優先権を与えると、その他の経路に厳しい制約となり管制の対象として非常に困難な状況例と考えられる。

なお管制領域外からの進路角との連続性を保つために(1)式の評価項には、

$$1000 W_1 (\theta_1 - \theta_0)^2 \quad (1)'$$

なる項を同時に付加している(一般に $\theta_0 = 0$)。これは直線経路をとって管制領域内に進入した時点で、管制による急激な進路変更を避けるために付加する項で、管制経路の始点においてそれ以前の経路と滑らかに接続させる効果がある。

2.1.2 計算上の問題点と対応手法

特定の移動体に優先順位をつけた(1)'式による評価式に対して従来の gradient 法を用いた最適化計算の適用性を検討した結果、 W_2 が大きい場合に以下のような問題点を生じることが示された。

(1) 従来の手法は W_2 がすべて等しい場合に有効なことが示されたが、特定の W_2 を大きくするとその比が50以上となった時に、 W_2 の大きい(優先権の高い)経路が発散する傾向が示される。これは、該当する経路に関して W_2 に比例する修正感度が非常に高くなり、単純な gradient 法では経路が変動しやすいことによる。逆にこのような経路の安定性を保つために修正ゲインを十分に小さくおさえると、他の(優先順位の低い)経路の移動量が減少して最終解に収束しにくくなる。

(2) 優先順位の高い経路が領域を分断するため、局所的な極値解に落ち入りやすくなり、初期段階で M を小さくして広い範囲の最適化を行う必要性が一層高くなる。他方 W_2 の大きい経路は M の増加時の振動に敏感なので、 M の急激な増加は解の発散を招きやすい。

以上の問題に対しても、本問題のように物理的意味の明確な問題は gradient 法の適用が可能であり、以下の修正を行うことにより W_2 の比は500~1,000程度まで適用可能なことが上例により確認された。

(A) M をくり返し回数に応じて徐々に拡大していくこと。具体的にはくり返し回数 i に応じて

$$M = \begin{cases} 0.5 & i < 50 \\ 0.5 i / 50 & 50 \leq i \leq 200 \\ 2.0 & i > 200 \end{cases} \quad (3)$$

を用い、かなり厳しい状況に対しても安定に収束することが確認されたが、 M の増加率を2倍にした場合には発散し得ることが認められた。

(B) 移動体 i の修正を $(W_2)^{-1}$ に比例させること、即ち(A-8)式のように修正項を

$$\Delta \theta_i = (dJ/d\theta_i) / W_2^i \quad (4)$$

とする。これは付録1に示されるように一般の最急傾斜法に対して近似的に2次微係数を考慮した修正を施すことに対応する。この結果、初期状態から最終解に収束していく過程で優先順位の高い経路の安定性が増して発散を防ぐ効果を持ち、収束途中の無駄な経路振動を避けることがとできる。ただし、最終状態においては安全距離の評価項の影響が大きく、これを無視した2次項は意味が失われるため最終段階では一般の gradient 法にもどすことが必要となる。

以上、簡単なアルゴリズム修正により従来の計算方法では困難であった W_2 の比が100以上の場合も安定に収束可能なことが確認された。ただし、(A)の修正、または(B)の修正打ち切り時点の振動を防ぐために、従来200回であった収束計算を現在500回程度に増加して十分に収束したと考えられる時点で計算を打ち切っている。ゲインを低下するため一般に最近接対象を過度に回避する経路を得た後に、無駄な曲線が直線化されて d_N が小さくなると共に相互距離を徐々に拡大して(ペナルティ項も減少し)経路最適化が行われる。ただし、 W_2 全体が極端に大きい時は振動することが確かめられている。

2.1.3 優先経路、固定障害物を設定した経路変化

前項の修正アルゴリズムにより、Fig.3の状況において優先順位を表わすパラメータを変化させた場合の解経路を示す。ここに Fig.4 は固定障害物のない場合に移動体 #2 の優先度を増加した場合に他の経路が迂回していく状況を示し、Fig.5 は固定障害物の存在する場合の同じ状況を示している。他の経路と干渉が強いため、優先化の効果が顕著に現われ、計算も不安定化しやすい困難な状況となることより、#2 を優先させた結果を検討している。これらの定量的な結果は Table 2 に要約され、同表よりパラメータ W_2^2 を変更した場合の本方式

の一般的特性が定量的に示される。

まず Fig. 4 の各ケースでは W_2^2 の増加と共に #2 の経路誤差 dN^2 が減少していく一方で、最接近距離 $R_{\min}$ が減少し、迂回のため他の移動体の経路誤差 $dN^j (j \neq 2)$

Table 2 Summary of optimization with vehicle priority

2-1: Results of changes of the priority parameter W_2 , 2

$W_2, 2$	Rmin	AV.DN	DN1	DN2	DN3	DN4	DN5
1.0	13.5	3.51	4.81	4.58	1.53	1.90	3.38
2.0	13.5	3.37	4.83	3.99	1.61	1.99	3.35
5.0	12.9	3.30	5.26	3.32	1.70	2.16	2.89
10	12.2	3.29	5.78	2.90	1.66	2.24	2.13
20	11.5	3.32	6.19	2.55	1.73	2.18	1.59
50	10.6	3.33	5.91	2.18	2.40	2.55	1.85
100	10.1	4.05	5.82	1.92	3.77	4.80	2.70
200	9.9	6.46	9.81	1.64	7.88	5.14	4.65
500	11.9	6.92	7.98	0.03	11.89	2.56	5.27

Rmin: minimum distance, AV.DN: Average destination error
DNi: Destination error for vehicle #i

2-2: Results of the priority parameter changes with the obstacle #6

$W_2, 2$	Rmin	AV.DN	DN1	DN2	DN3	DN4	DN5	DN6
1.0	13.4	3.78	6.21	4.54	1.35	2.33	2.25	0.0016
2.0	13.8	3.73	5.82	3.93	1.53	2.96	3.02	0.0014
5.0	11.9	5.97	8.31	3.50	5.90	6.11	5.00	0.0001
10	11.5	6.07	8.28	2.82	5.87	7.31	4.47	0.0002
20	11.0	6.21	8.49	2.35	5.86	7.81	4.45	0.0002
50	10.1	6.33	8.63	1.88	6.70	7.58	4.47	0.0003
100	9.9	6.39	8.52	1.68	7.24	7.62	4.25	0.0003
200	9.9	7.45	11.30	1.59	8.54	6.94	5.11	0.0003
500	10.5	7.99	7.28	0.05	11.74	6.45	9.34	0.0011

2-3: Results of the priority for different vehicles

# of P	Rmin	AV.DN	DN1	DN2	DN3	DN4	DN5
1	11.3	7.861	0.002	9.352	2.834	3.427	14.204
1*	11.4	7.384	0.005	9.034	3.047	3.781	12.923
2	11.9	6.335	7.984	0.032	11.894	2.556	5.272
3	12.0	5.269	6.865	7.662	0.003	1.560	5.526
4	13.6	4.325	5.791	5.688	2.370	0.010	4.694
5	12.9	4.886	7.710	6.544	3.372	2.393	0.004

of P: Number of vehicle with the priority
1*: Initial Course is deviated 0.5 radian.

が増大する。 W_2^2 の増加と共に #2 は直線経路に近づくが、これに対する安全距離を保つために他の経路は相当無理な迂回路をとることになる。経路誤差 dN^i は W_2^2 により評価されるので、#2 以外の経路は dN^i が一定範囲内にある時は、その経路を改善するための収束がきわめて遅くなる。また #2 と #3 の経路が交差するため W_2^2 が 200 以上になると #3 の経路の変動が大きくなる。 $W_2^2=500$ の場合は解のモードが代わり、#3 の経路が極端に劣化することにより、それ以外の経路の誤差は却って減少する。このように W_2 を優先度に応じて変化させると、一部の経路を犠牲にして優先経路の改善をはかることにより、全体の最適化が行われるので、パラメータの決定には十分な根拠が必要とされる。

Fig. 5 は更に固定障害物 X を配置した場合を示しており、基本的には Fig. 4 と差がないが、障害物 X を避けるため、全体的に経路のずれが拡大している。Table 2-2 の結果も、障害物のない場合 (Table 2-1) に比べて $R_{\min}$ が小さく、平均経路誤差 (AV.DN) が増大することを示している。絶対的な優先度を持つ障害物が追加されることにより、全体の経路配分が一層困難になることから当然の結果であるが、このような障害物が存在する場合も同じアルゴリズムにより容易に求解可能なことが示される。

Fig. 6 の各ケースは、優先権を各移動体毎に変化した場合の経路を示している。Table 2-3 には、対応する dN が示され、#1, #2 を優先した時、特に影響が大きく、経路の変動も大きいこと、これに反して #4, #5 は相対的に影響が少ないことが示される。これは #1, #2 の経路が全領域を2分割するため、他の経路との相互干渉が強いことによる。#i に優先権を与えた時に #j に及ぼす影響を E_{ij} とすると、 E_{ij} と E_{ji} は非対称とな

Fig. 4 Variation of trajectories according to the degree of the priority for #2 vehicle without obstacle

Fig. 5 Corresponding trajectories with the obstacle

Fig. 6 Trajectories for cases when preference vehicle changes

る点は興味深い。また、各ケースの最接近距離並びに平均経路誤差は特定の移動体が優先経路をとった時の領域全体に及ぼす影響を示すが、この結果も #1, #2 の時に困難な状況となることを示している。

前述のように、この状況は閉領域に同時に5機が進入する極端な場合を想定しているため、当然他に及ぼす影響が大きくなるが、上例の結果から優先順位あるいは固定障害物を適当なパラメータによって表現することにより、このような状況においても所期の管制目的を達成する経路が得られることが確認された。

2.2 最適回避方式の概念

2.2.1 最適化のための評価関数の決定

現実には多数の運航主体(例えば異なる組織に属する船舶)が競合する状況で上の経路決定を行って航行管制を実施するには全主体が納得できる合理的な優先順位、即ち優先パラメータ W_2 の決定が行われる必要がある。一般の道路交通においては道路の種別に応じて異なる通行料金が定められ、利用者は通行による利益と費用に関して、全体の経済性を考慮した上で経路を決定する。これに対して、2次元平面上の航行においては、経路区分が明確でなく、連続的な変化が可能になることと、通行料金の徴収は特定の場所を除き困難であることから、決定された経路の経路誤差 dN^t に基づく損失

$$L_i = (dN^t)^t (dN^t) W_2^t$$

によって評価せざるを得ないが、優先権を主張することに対する料金 ΔP_i の徴収、即ち通行料金に相当する概念の導入は不可欠である。

この問題は一般にゲームの問題と考えられ、 m 個の主体が S_i ($i=1, 2, \dots, m$) の決定をとった時の自己の総費用を C_i とすると(解が存在する条件のもとで)、各主体が C_i の最悪の場合の値を最小とする決定 S_{i0} をとると考え、

$$\min (\max_{S_i} C_i(S_i, S_j)), \quad S_i, S_j (j \neq i) \quad (5)$$

の解が S_{i0} となる。ただし

$$C_i = L_i + \Delta P_i$$

経路決定問題においては、全船舶が同一組織に属さない限り客観的な優先順位の決定は困難なので、 W_2^t を自己申告することを考えると、これが各船舶の決定とな

り、以後は(1)'式に従った解経路(並びに自船の損失 L_i) が示されることになる。 W_2^t は自己の優先権を主張するパラメータであり、これに対して以下の概念による通行料金を考える。

基準状態として、適当な基準パラメータ W_2 を設定し、 W_2 に基づく最適解を X_0 、その時の経路誤差を dN_0^t とする。各主体は自己申告した W_2^t により経路並びに L_i が変化した時、これによって得られるはずの利益

$$\Delta P_i = \{(dN_0^t)^t (dN_0^t) - (dN^t)^t (dN^t)\} W_2^t \quad (6)$$

を通行料金として支払い(負の場合は逆に補償として与えられる)、全体の利益

$$P_t = \sum_i \Delta P_i \geq 0 \quad (7)$$

を適当に関係者(必要なら管制主体も含む)間で再配分することを考える。基準状態としては、各船舶が同格である場合は $W_2=1$ が妥当であるが、重量、用途の異なる場合は目的に応じた標準的なパラメータ値 W_{20}^t を設定することが適当である。この時、各船舶は $W_2^t = \alpha_i \cdot W_{20}^t$ となる優先係数 α_i を自己申告するものとする。

今経済性を客観的に考慮した真の優先パラメータを W_{2r}^t と考えた時、このようなゲームによって期待される、各船舶の再配分を除く総費用は

$$\begin{aligned} C_i &= (dN^t)^t (dN^t) W_{2r}^t + \Delta P_i \\ &= (dN_0^t)^t (dN_0^t) W_2^t \\ &\quad + (dN^t)^t (dN^t) \{W_{2r}^t - W_2^t\} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。 dN^t は W_2^t の他、他船舶の状況及びその申告値 W_2^j 、並びにかなり複雑な管制アルゴリズムを介して決定されるため、ゲーム問題の求解のようにこの結果をあらかじめ計算して C_i を最小化するのは不可能に近い。定性的には W_2^t を小さくすれば dN^t が大きくなり、 W_2^t を大きくした場合 dN^t は減少するが、 ΔP_i は増大する。従って適当な範囲で総費用を最小化するように W_2^t を定めることになるが、特に $W_2^t = W_{2r}^t$ であれば(8)式第2項は消えて第1項のみが残ることになり、再配分だけの利益を得る。つまり $W_2^t = W_{2r}^t$ の時には少なくとも優先経路によってより経済的な経路となることが保証される。

付録2に示されるように、基準状態からの優先権の差が明白な状態では W_{2r}^t と異なる W_2^t を申告すること

が有利 (C_i を最小化する) となるが, 重量, 用途に応じて平均的な遅延コストを算出した上で, これに基づいたパラメータ W_{20} による解を基準状態と設定した場合には, C_i の期待値を最小化するために $W_{2r}^i = W_{2r}^i$ とする必要があることが示される。従って, 上の概念による通行料金の設定により, 自己申告による経路最適化の解は各移動体の費用の期待値を最小化すると共に, 真の意味での全移動体の損失を最小化する回避経路を実現することができて, 経済的な意味での最適管制方式を実現に近づけることが可能となる。

2.2.2 応用例による最適化の効果

本項では前項の最適回避方式の基本特性を, 前述の例によって示す。今 (1)' 式の評価関数が成立する時, 船舶 #2 に注目して, 基準状態 $W_{20}=1$ から W_{2r}^i のみが変動する時に #2 の申告パラメータ W_{2r}^i を適当に変化する状況を仮定する。即ち #2 のみが非常に緊急度が高く, 他の経路を排除して通過する状況である。

Fig. 7 は W_{2r}^2 が 0.5 から 100 まで変化した時, W_2^2 を同じ範囲で変化した時の各船舶の解経路に対して, 真のパラメータ W_{2r}^2 を用いて計算した (1)' 式の第 2 項, 即ち全船舶を考えた真の経済的評価値 J' を示している。最適化は (1)' 式に従って行われるので, 各曲線は本来 $W_2 = W_{2r}$ の時 (Fig. 7 の * の位置) に最小となるべきであるが, W_2^2 が大きい時, その値が僅かにずれている。これは最適解への収束状況等の計算上の誤差の他, (1)' 式第 1 項及び第 3 項の影響による偏移と理解される。特に第 3 項のペナルティ項は最接近時以外も考慮されるため, 状況が切迫する W_2^2 の大きい時に影響が大きくなる。しかしながら, いずれの W_2^2 の場合も基準状態 $W_2^2=1$ の解に比べればかなりの改善率になっていることが示され, 全体として優先権に応じた最適化の効果が現われることが確認される。

これに対して Fig. 8 は (8) 式による #2 の費用 C_2

Fig. 7 Variation of total loss J' for various values of the priority parameter W_2

Fig. 8 Variation of cost function of #2 vessel C_2 for the priority parameter change

を示す。前述のように W_{2r}^2 が大きくなるにつれて $W_2^2 = W_{2r}^2$ と申告することによる費用増加が大きくなること (この例では), かなり少なめに W_2^2 を申告することにより C_2 が最小となることが示される。これは付録 2 に示されるように, 基準状態のパラメータに比べて W_2 に大きな格差がある場合に生じる結果であり, 基準パラメータの設定に無理があることを示している。実際に W_2^2 が十分 1 に近い時には W_2^2 が真値 W_{2r}^2 に近い時, C_2 が最適化されることが認められる。この結果は付録に示されるように, 緊急度の極端に低いことが明白な船舶が過大な優先権を主張して補償を要求する場合は, 利益を極大化可能なことに対応する。この時はあらかじめ基準状態に格差をつけて, その基準からはずれた優先権主張を希望する船舶にこの優先航行を適用すれば, 優先係数は 1 に近づくと共に真のパラメータを申告することが各船にとっても最適となる。更に上例のように格差が大きい場合でも (8) 式の代りに他の船舶の迂回による損失部分のみを #2 から補償することを考えれば, #2 の費用は Fig. 7 と一致するので, 全体の最適化と #2 の最適化はよりよく一致する。

以上の結果が示すように, 非常に単純化された問題設定ではあるが, 限られた容量の通行路に多数の主体が競合的に進入した場合に全体としての最適性を保ちつつ, 各主体が満足できるような経路決定の可能性が示され, 今まで示してきた管制方式に経済的意味が与えられた。このような考え方は, 上例のような開領域の航路決定に限定されず, 港湾・航路等, より限定された領域の経済的な管制を実現する時に一層必要と考えられる。

3 フィードバック最適化による管制シミュレーション

3.1 問題の定式化と設定状況

現実の航行管制においては, 上例のように全移動体の

Fig. 9 Origin and destination of passing vehicles in the simulation study

出発、目標到着が同時刻となることは少なく、連続的に領域に到着、通過する。従ってこの種の経路最適化による管制においては、各時点で航行中の船舶を対象に最適化を行い、新たに通過船が到着した時点で最適化を更新するフィードバック最適化が必要となる。このアルゴリズムは基本的には従来と同じであるが、既に進行中の船の進行方向変更は困難なので、(1)式の評価項が重要である。また(1)式の $\sum$ は従来の検討では N 時点まで一律に評価されているが、連続的な通過においては目標到達時点が異なるので、個々の i に応じた到着時刻 N_i までの和となる。

本章では以上の修正により、連続的な通過状況における管制シミュレーションを行った結果を示す。簡単のため通過船は同格として指数分布に従う時間間隔で Fig. 9 に示される太線区間に現われ、領域を横断するものと仮定している。ただし、始点、終点位置、並びに始点の存在する辺(即ち方向)も一様分布に従うものとする。従って各通過船はあらゆる方向から20ステップでランダムに領域を横断する状況を想定している。時間・距離は無次元化されているが、文献2), 3)と対応させると、安全距離 $R_0=10=1$ km, 時間ステップ=1分に相当する状況となる。従って安全距離1 km, 船速=10m/secに相当する。平均時間間隔は全体で4ステップとしており、これは4方向含めて4分に相当する。

文献2)では約 $24\text{ km} \times 24\text{ km}$ の管制領域に各方向8分間隔の到着状況を設定しているが、本文の状況は $12\text{ km} \times 12\text{ km}$ の領域に16分間隔で到着する。交差部の航行においては各方向は航路幅が2倍になれば通行量は1/2に分散して通行できるので、本文の状況は、時間管制と経路の分散化との差はあるが、ほぼ同一オーダーと考えてよい。

3.2 シミュレーション結果

前項の状況を設定して、800ステップ(13.3時間相当)のシミュレーションを行った。この間の通過船は226隻となる。計算時間はデータ出力転送時間を含んでU-1500ミニコンシステムで約3.3時間であり、実時間の25%である。この最適フィードバックでは最悪の場合

Fig. 10 Situations of the simulation study (without control)

(a) Standard control ($R_0=10$)

(b) Safety control ($R_0=12$)

Fig. 11 Simulation results

合各ステップ毎に最適化経路を更新する必要があるが、1回の収束計算は40秒以内で、最悪の場合も実時間の67%で計算は完了する。

Fig. 10, 11は上記のシミュレーションを行った結果をまとめて示している。図において横軸は時間変化を示し、Fig. 10は領域内を航行中の船舶数と管制を行わない場合の各時点の領域内の最短船間距離の変化を示す。Fig. 11は本管制方式による最短距離並びに迂回による経路誤差の2乗平均値を示している。この内(b)は計算上の安全距離を20%大きくした場合($R_0=12$)を示している。同図(a)より、管制によって船間距離はほとんど全期間にわたって設定安全距離($R_0=10$)を確保

できることが確認された。ただし、途中、通行隻数が増加した時点で R_0 を下まわる時点が 26 ステップ (3.3%) 存在し、この内 $0.9 R_0$ を下まわる時点が 1.3% に及んでいる。また最悪の場合に $0.83 R_0$ まで接近する。これに対して平均経路誤差 dN は 1.37 (遅れ時間 $\Delta T = 0.14$ 分) となる。管制上の安全距離を 20% 大きくした場合は、本来の $R_0 (=10)$ 以下となる比率は 1% ($0.9 R_0$ 以下は 0.05%) に改善されるが、 dN は 1.52 ($\Delta T = 0.15$ 分) に拡大する。安全距離確保不能時の通行隻数は配置関係にも依存するが、およそ 10 隻以上存在し、航行中の船舶の目標地点付近に新規到着船が進入する時に管制が困難になる。 R_0 だけ確保して各船舶を密に停止させた場合、領域内には 180 隻収容できるが、定速を保ちつつ回避を行うためには約 2 km の半径内に 1 隻程度の通行密度の航行が限度であることが示される。

交差部の通行の立場から文献 2) の結果と本手法とを比較すると、文献 2) の手法は船速調整のみで航路を通行するのに対し、本手法は速度を維持する代りに全領域の利用を認めている。従って本手法は平面利用効率が遙かに高いにもかかわらず、その容量は前者の航行不能船 15% に対して 3.3% であって余り改善されず、文献 3) の複数航路の結果の 1/3 以下の容量となる (ただし、本手法では船間距離が R_0 以下となる期間を管制不能比率と考えている)。これは主として、船速調整の効果によるものであるが、その反面で文献 3) における遅れ時間は本手法より大きくなる。また、文献 3) の場合は R_0 を船種及び前後関係に応じて変化する等よりきめの細かい管制を行っていることと、航路進入船のみを対象にするため不規則に通過船が発生する本シミュレーションより容量が拡大する可能性がある。しかしながら文献 2) の手法の限界が船速調整の限界によることを考えると、本手法の概念を併用することにより、一層の容量拡大が期待されると考えられる。

4 結 言

船舶を対象として、優先順位のある 2 次元移動体群の、固定障害物の存在する領域における管制方式について定式化と現実的な対応手法を検討し、その基本的特性、実用性に関して以下の結果を得た。

(1) 移動体に優先順位のある場合は、衝突回避経路を求めるための評価式中の経路誤差の評価パラメータを優先順位に応じて変化するにより対応可能である。また固定障害物は最も優先順位の高い (静止) 移動体として同様に定式化できる。その最適経路は、パラメータの格差を補正する処置を講じることにより gradient 法で求解可能であり、経路誤差に関して 1,000 倍程度まで

の優先権を持つ状況に対して安定に計算できる。

(2) 優先順位を客観的に決定するのは困難なので、自己申告による優先経路と適当な基準経路の差に対応する利益を徴収する最適管制の概念を示した。この方式は適正な基準経路を設定することにより、全体として経済的にも最適となる管制を実現可能なことが示される。

(3) 管制領域に連続的に船舶が進入・通過する場合は、新たに通過船が到着した時点で領域内の全船舶を対象に経路最適化を更新するフィードバック最適化により対応可能であり、この場合、現存の小型計算機でも十分に実時間管制が可能である。

(4) シミュレーションにより、12 km × 12 km 程度の領域に平均 4 分間隔で任意に発生する通過船を 1 km の安全距離 R_0 で管制した場合、3.3% の時間、 R_0 以下に接近し、迂回による経路誤差は平均 0.14 km となる。管制パラメータを変更して R_0 以下となる比率を 1% に改善すると、経路誤差は 0.15 km に拡大する。

これらの結果を航路上の船速調整による航行管制^{2),3)}と比較すると、本方式は全領域を利用することにより遅れ時間を減少することが示され、船速調整による航行管制に本方式を併用することにより、その航行容量を拡大することが期待できる。

終りに、本研究において平素より種々御指導、御教示頂いている東京大学工学部、小山健夫教授に厚く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 石谷, 山本: 2 次元の自由移動体の管制方式に関する考察, 日本造船学会論文集, 第 153 号.
- 2) 小林, 小山: 井形航路交差部に対する航行管制について, 日本造船学会論文集, 第 153 号.
- 3) 小林, 小山: 井形航路交差部に対する航行管制について (第二報), 日本造船学会論文集, 第 154 号.
- 4) P. R. Escobar: Methods of Orbit Determination, John Wiley, 1965.

付録 1 Gradient 法の修正アルゴリズム

本文に指摘される発散現象は、一般に評価関数を

$$J = f(X_1, X_2) \quad (A-1)$$

として、 X_2 の比重が極端に大きい時に gradient 法を用いる場合、

$$\frac{df}{dX_2} \gg \frac{df}{dX_1} \quad (A-2)$$

となるため、修正項が $\Delta X_2 \gg \Delta X_1$ となって不安定化することによる。さらに修正ゲインを $\text{Max} |\Delta X_i|$ でおさえると、 $|\Delta X_1| \rightarrow 0$ となって収束しにくくなる。

このような状況に対しては、 J の X に関する 2 次微係数まで考慮した逐次最小化計算が有効であり⁴⁾、この計算は

$$D = \frac{dJ}{dX} \quad (\text{A-3})$$

とした時, $D(X)$ に対して D の 1 次微係数を用いて,

$$D(X + \Delta X)^2 = (D(X) + dD/dX \cdot \Delta X)^2$$

の最小値を求める。すなわち

$$(D(X) + dD/dX \cdot \Delta X)^2 dD/dX = 0$$

より

$$\begin{aligned} \Delta X &= - \left\{ \left(\frac{dD}{dX} \right)^t \left(\frac{dD}{dX} \right) \right\}^{-1} \left(\frac{dD}{dX} \right)^t D(X) \\ &= - \left\{ \left(\frac{dD}{dX} \right)^t \left(\frac{dD}{dX} \right) \right\}^{-1} \left(\frac{dD}{dX} \right)^t \left(\frac{dF}{dX} \right) \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

と逐次修正する。特に

$$f(X_1, X_2) = W_1 \cdot F(X_1) + W_2 \cdot F(X_2) \quad (\text{A-5})$$

であって, $F(X_i)$ が同型の 2 次形式で W_2 が極端に大きい場合は

$$D = dJ/dX = [W_1 \cdot dF/dX_1, W_2 \cdot dF/dX_2]$$

より

$$\frac{dD}{dX} = \begin{bmatrix} W_1 \frac{d^2 F}{dX_1^2} & W_2 \frac{d^2 F}{dX_1 dX_2} \\ W_1 \frac{d^2 F}{dX_2 dX_1} & W_2 \frac{d^2 F}{dX_2^2} \end{bmatrix} \quad (\text{A-6})$$

これより

$$\begin{aligned} \Delta X &= - \left[\frac{dD}{dX} \right]^{-1} D(X) = \\ &= - \begin{bmatrix} W_1 \frac{d^2 F}{dX_1^2} & 0 \\ 0 & W_2 \frac{d^2 F}{dX_2^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} W_1 \frac{dF}{dX_1} \\ W_2 \frac{dF}{dX_2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A-7})$$

以上より

$$\Delta X \doteq - \begin{bmatrix} \frac{1}{W_1} \frac{dF}{dX_1} \\ \frac{1}{W_2} \frac{dF}{dX_2} \end{bmatrix} \quad (\text{A-8})$$

は近似的に 2 次微分までを考慮した修正となり, これは一般の gradient 法における修正項 dF/dX_i を $(W_i)^{-1}$ で補正したものとなる。ただし (1) 式には, この 2 次形式の評価項の他に衝突防止項があるので (A-7) 式も近似に過ぎず, 最終段階では一般の gradient 法にもどすことが望ましい。

付録 2 自己申告の W_2^i による損失の変化

いま, 2 個の競合する運航主体 #1, #2 を考え, 経路 x (全経路を多次元ベクトル x と表わす) を通ることによる評価項をそれぞれ $f_1(x), f_2(x)$ とする。今両者の優先度に応じた重味パラメータをそれぞれ, u_1, u_2 (本文の W_2 に相当する) とし, 評価関数を

$$F(u_1, u_2, x) = u_1 f_1(x) + u_2 f_2(x) \quad (\text{A-9})$$

と表わすと, 両者を同格とした基準解 x_0 は $F(1, 1, x)$ を最小とする解となる。また, $u_2 = 0$ または $u_1 = 0$ の時の解をそれぞれ x_1, x_2 とすると, x_i は i 番目主体の絶対優先経路に相当する。

いま, 各主体の申告パラメータを u_1, u_2 として, これに対応する $F(u_1, u_2, x)$ の解を x_s とした時, 各主体に課せられる通行料金は

$$P_i = u_i (f_i(x_0) - f_i(x_s)) \quad (\text{A-10})$$

となり, 全体の見かけ上の利益 G は x_s が F を最小化することより,

$$G = P_1 + P_2 = F(u_1, u_2, x_0) - F(u_1, u_2, x_s) \geq 0 \quad (\text{A-11})$$

となる。各主体間でこの利益を配分すると考えると, 主体 i の総費用は真のパラメータを u_{i0} として

$$C_i(u_i) = u_{i0} f_i(x_s) + u_i (f_i(x_0) - f_i(x_s)) - k_i \sum_{j \neq i} P_j \quad (\text{A-12})$$

となる。ここに k_i は G の $\#i$ への配分率を示し, $0 < k_i < 1$ である。

前述のように C_i を最小化する u_i を決定するのは u_j を知った場合でも容易ではないが, u_i に対して C_i は以下の特性を持つことが示される。

x_s は (A-9) 式の最小値であるから

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dx} \Big|_{x=x_s} &= \left[u_1 \frac{df_1}{dx} + u_2 \frac{df_2}{dx} \right]_{x=x_s} = 0 \\ \frac{d^2 F}{dx^2} \Big|_{x=x_s} &= \left[u_1 \frac{d^2 f_1}{dx^2} + u_2 \frac{d^2 f_2}{dx^2} \right]_{x=x_s} \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{A-13})$$

であり, さらに一般に最小値問題においては

$$d^2 f_i/dx^2 \geq 0 \quad (\text{A-13}')$$

も成立する。いま u_1 を変化した時の x_s の変化を求めると, x_s において恒等的に (A-13) 式が成立するので

$$\delta u_1 \frac{df_1}{dx} \Big|_{x_s} + \left(u_1 \frac{d^2 f_1}{dx^2} + u_2 \frac{d^2 f_2}{dx^2} \right) \delta x_s = 0$$

すなわち

$$\frac{dx_s}{du_1} = - \frac{\frac{df_1}{dx}}{\left(u_1 \frac{d^2 f_1}{dx^2} + u_2 \frac{d^2 f_2}{dx^2} \right)} = - \frac{\frac{df_1}{dx}}{\frac{d^2 F}{dx^2}} \quad (\text{A-14})$$

となる。

C_i の u_i による変化率は (A-12) 式より

$$\begin{aligned} \frac{dC_i(u_i)}{du_i} &= u_{i0} \frac{dx_s}{du_i} \cdot \frac{df_i}{dx} + (f_i(x_0) - f_i(x_s)) \\ &\quad - u_i \frac{dx_s}{du_i} \frac{df_i}{dx} - k_i \frac{dG}{du_i} \end{aligned} \quad (\text{A-15})$$

となる。ここに (A-10, 11) 式より

$$\begin{aligned} \frac{dG}{du_i} &= \sum_j \frac{dP_j}{du_i} = (f_i(x_0) - f_i(x_s)) \\ &\quad - \sum u_i \frac{df_i}{dx_s} \frac{dx_s}{du_i} \end{aligned} \quad (\text{A-16})$$

であるが, (A-13) 式より,

$$\begin{aligned} \sum u_i \frac{dx_s}{du_i} \frac{df_i}{dx} \Big|_{x_s} &= - \frac{dx_s}{du_i} \sum u_i \frac{df_i}{dx} \Big|_{x_s} \\ &= - \frac{dx_s}{du_i} \frac{dF}{dx} \Big|_{x_s} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-17})$$

となるため, (A-16) 式は第 1 項のみが残り, (A-15) 式は

$$\begin{aligned} \frac{dC_i}{du_i} &= (1 - k_i) (f_i(x_0) - f_i(x_s)) + (u_{i0} - u_i) \frac{dx_s}{du_i} \frac{df_i}{dx} \\ &\quad \left(\frac{df_i}{dx} \right)^2 \\ &= (1 - k_i) (f_i(x_0) - f_i(x_s)) - (u_{i0} - u_i) \frac{\frac{d^2 F}{dx^2}}{\frac{d^2 F}{dx^2} \Big|_{x_s}} \end{aligned} \quad (\text{A-18})$$

となる。特に $u_i = u_{i0}$, すなわち真の値においては

$$\frac{dC_i}{du_i} = (1 - k_i) (f_i(x_0) - f_i(x_s)) \quad (\text{A-19})$$

となる。また一般に

$$\begin{aligned} u_i > u_j \text{ の時 } & f_i(x_0) > f_i(x_s) \\ u_i < u_j \text{ の時 } & f_i(x_0) < f_i(x_s) \end{aligned} \quad (\text{A-20})$$

となるので (A-19, 20) 式は

$$\begin{aligned} u_i > u_j \text{ の場合には } & u_i \leq u_{i0}, \\ u_i < u_j \text{ の場合には } & u_i \geq u_{i0} \end{aligned}$$

に最適値のあることを示している。従って $u_i > u_j$ と期待される時には u_i を少なく, $u_i < u_j$ の時には u_i を大きくすることが最適となる。すなわち, 真値よりも通行料金の基準となる状態に近い点に最適値が存在する。

なお $u_i = 0$, すなわちまったく優先権を主張しない場合には $P_i = 0$ (補償なし) でかつ損失を生じるので, 明らかに C_i は増加するが, この時は (A-18) 式より

$$\left. \frac{dC_i}{du_i} \right|_{u_i=0} = (1-k_i)(f_i(x_0) - f_i(x_s)) - u_{i0} \frac{\left(\frac{df_i}{dx} \right)^2}{\left(\frac{d^2F}{dx^2} \right)} \quad (\text{A-21})$$

において $f_i(x_0) < f_i(x_s)$, かつ $u_{i0}(df_i/dx)^2/d^2F/dx^2 > 0$ より

$$dC_i/du_i|_{u_i=0} < 0$$

となって, 実際に u_i を増加することによって損失を減

少可能なことが示される。

現実には, 明らかに回避コストの異なる大型船 j とレジャーボート i が同じ基準で回避を行う時に, 前述の料金体系によれば, 緊急性の少ないレジャーボートは大型船の u_j を越えぬ範囲で大きな u_i を申告すれば, 補償金額を極大化することが可能となる。このような不合理は明白に差のある移動体群を同格とみて基準状態を定めることによるので, 適当な尺度 (重量, 用途, 航路, 使用料等) により, 事前に適当な範囲の格差をつけた状態を基準とし, その状態からの変化を申告パラメータにより修正することにより是正される。

このように基準状態と他船の申告値との差が予測不能の時には, Min. Max. 的評価によれば, (A-19, 20) 式より自己の損失を増大させないために

$$u_i \geq u_{i0} \quad \text{かつ} \quad u_i \leq u_{i0}$$

すなわち

$$u_i = u_{i0}$$

を選択する必要があることを示している。従って適当な基準状態を選択することにより, 申告パラメータを真値と一致させることが可能となり, 経済的意味を考えて最適といえる管制方式を実現させることができる。