

TITLE :

**Demonstration Schedule of Eurofix
Using Loran-C System**

By Minjung KIM. M.E.

CIN-KIN

IESTEK Co., Ltd.

CIN-KIN

Abstract

- **It was proposed and admitted at 9th FERNs Meetings** that FERNs countries, while recognizing that Loran-C is very important as a back-up for satellite systems, should consider whether the cost-effectiveness of the system could be improved by making use of its communication facilities to integrate more closely with satellite systems. Members were requested to give this proposal consideration before the tenth session of the Council (CS 9/8/1 paragraph 6.7) .
- **For this matter, Korea is planning to demonstrate transmitting EUROFIX** signals from Pohang station (Master of 9930 Chain) during FERNs meetings.

IESTEK Co., Ltd.

1. Definition of Eurofix

- Data Communication through LORAN-C transmission by Pulse Position Modulation of the Pulse trains of LORAN-C signals.

- Communication Message through EUROFIX
 - Sent by **additional time-modulation** of as followings:
- LORAN-C/CHAYKA synchronization signal between Master and Slave station (BALTICA)
- DGNS data
- Additional Skywave Factor(ASF) of LORAN-C/CHAYKA
- Short emergency message for distress situation.

2. Development

- 1989. Study initiated by Delft Univ. (D. Van Willigen, et al) with sponsorship of Megapulse Co., M.O.T. Netherland and Water Management Lab. of Delft Univ.
- 1994. Experiment carried out by Megapulse on Wildwood LORAN-C station in USA
- 1996. Simulation test carried out at Delft Univ.
- 1997. Test carried out at Sylt Station of German(NELS).
- 1998. Again tested at Wildwood.
- At present. Four LORAN-C stations of NELS under operation.

3. Merits

- Utilization of existing infrastructure and low cost required.
- Wide coverage with single station (up to 1000km)
→ It may cover the whole Korean geo-area including North Korea.
- Easy penetration of wave to mountainous topography and building jungle of cities, due to the long wave length concerned.

4. Demerits

- Very slow communication speed (19 – 47 bps), too slow for GNSS application in the presence of SA.

5. Modulation Scheme

- First 2 pulses of each repetition reserved for Blinking.
- Remaining 6 pulses are position modulated in 3 level (0 : prompt, + : 1 ⊕s advance, - : 1 ⊖s delay)
- Balanced patterns of 141 in 729(3⁶) 6 digital 3 level patterns only used to prevent undesired tracking biases, which allow parity check measure.

Modulation Pattern Combination	Example	Number of Combinations
6 : zero 0 plus 0 minus	'0' is prompt pulse '+' is delayed pulse '-' is advanced pulse 0 0 0 0 0 0	number = $\binom{6}{0} \binom{0}{0} \binom{0}{0} = 1$
4 : zero 1 plus 1 minus	0 0 0 0 + -	$\binom{6}{4} \binom{2}{1} \binom{1}{1} = 36$
2 : zero 2 plus 2 minus	0 0 + + - -	$\binom{6}{2} \binom{4}{2} \binom{2}{2} = 90$
0 : zero 3 plus 3 minus	+ + + - - -	$\binom{6}{0} \binom{6}{3} \binom{3}{3} = 20$
		total = 141

5. - continued

- 128 patterns of 141 are selected to represent 7 bits binary of data.
Take Example of translation of PPM signal to 7 bit symbol.

Modulation Pattern	Bit Representation
- - 0 0 + +	1 0 0 0 0 0 0
- - 0 + 0 +	0 1 0 0 0 0 0
- - 0 + + 0	0 0 1 0 0 0 0
- - + 0 0 +	0 0 0 1 0 0 0
:	:

- This type of modulation introduce only 0.79dB of signal loss and can be compensated easily at the receiver, resulting no signal loss.
- 63 bits (9 GRI x 7 bits) is decoded by Reed Solomon encoder through Forward Error Correction or a 7 bit Cyclic Redundancy Check to declare an invalid signal and to erase it.

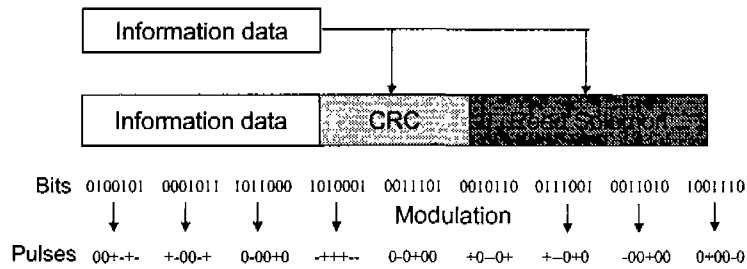
5. - continued

- Modulation Pattern

Decimal Hexa- decimal	Patam	Decimal Hexa- decimal	Patam	Decimal Hexa- decimal	Patam
0	0 --00++	43	2B 00+-++	86	56 ++-00-
1	1 --0+0+	44	2C 00+-++	87	57 ++0--0
2	2 --0+00	45	2D 00+-++	88	58 ++0-0-
3	3 --00+0	46	2E 00+-++	89	59 ++00--
4	4 --00+0	47	2F 00+-++	90	5A --0000+
5	5 --0++00	48	30 0+--+0	91	5B --000+0
6	6 -0-0++	49	31 0+--+0	92	5C --00+00
7	7 -0-0+0	50	32 0+--+0	93	5D --0+000
8	8 -0-+00	51	33 0+--+0	94	5E --+0000
9	9 -00-++	52	34 0+--+0	95	5F 0--00+0
10	A -00+--	53	35 0+--+0	96	60 0--00+0
11	B -00+0+	54	36 0+--+0	97	G1 0-0+00
12	C -0+0+	55	37 0+--+0	98	62 0--0000
13	D -0+0+0	56	38 0+--+0	99	63 00--00+
14	E -0+0-+	57	39 0+--+0	100	64 00--0+0
15	F -0+0+	58	3A 0+--+0	101	65 00--000
16	10 -0++-0	59	3B 0+--+0	102	66 000-0+
17	11 -0++0-	60	3C +-00+0	103	67 000-0+0
18	12 +-00+0	61	3D +-00+0	104	68 0000--
19	13 +-0+00	62	3E +-00+0	105	69 0000+-
20	14 +-+000	63	3F +-00+0	106	6A 000+0-
21	15 +-0+0+	64	40 +-00+0	107	6B 000+0-
22	16 +-0+0+	65	41 +-00+0	108	6C 00+--00
23	17 +-00+0	66	42 +-00+0	109	6D 00+0-0
24	18 +-00+-	67	43 +-00+0	110	6E 00+00-
25	19 +-0+0-	68	44 +-00+0	111	6F 0+--000
26	1A +-0+0-	69	45 +-00+0	112	70 0+0-00
27	1B +-+000	70	46 +-00+0	113	71 0+00-0
28	1C +-+00-	71	47 +-00+0	114	72 0+000-
29	1D +-+00-	72	48 +-00+0	115	73 +-0000
30	1E 0+00++	73	49 0+00++	116	74 0+0000
31	1F 0+00+0	74	4A 0+00+0	117	75 000-000
32	20 0+00+0	75	4B 0+00+0	118	76 000-000
33	21 0+00++	76	4C 0+00+0	119	77 +-+00+
34	22 0+00+0	77	4D 0+00+0	120	78 +-+00+
35	23 0+00+-	78	4E 0+00+-	121	79 +-+00+
36	24 0+00+-	79	4F 0+00+-	122	7A +-+00+
37	25 0+00+-	80	50 0+00+-	123	7B 4+-+0+
38	26 0+00+-	81	51 0+00+-	124	7C +-+00+
39	27 0+00+-	82	52 0+00+-	125	7D +-+00+
40	28 0+00+-	83	53 0+00+-	126	7E +-+00+
41	29 0+00+-	84	54 +-00+-	127	7F +0000-
42	2A 00--++	85	55 +-00+-		

6. Forward Error Correction

- Encoding and Modulation of information on the Eurofix datalink



1. Excludes the first two pulses of each Loran-C.
2. Provide a simple parity check to validate the received data per GRI.
3. Reed-Solomon code(RS) → correction of corrupted pulses.

IESTEK Co., Ltd.

7. DGPS Correction Generation

- Eurofix Messages Format (Based on RTCM Type-9 Correction)

Function	Number of bits	Resolution	Range
Message type	3		8 types of messages
Modified Z-count	13	0 to seconds	0 - 3599.4
Scale factor	1		
UDRE	2		4 states
Satellite ID	5		32 satellites
Pseudo-Range Correction	16	0.02 or 0.32 m	±655.34 or ±10485.44 m
Range Rate Correction	8	0.002 or 0.032 m/s	±0.254 or 4.064 m/s
Issue of Data	8		
CRC	7		Data integrity
Total	63		

IESTEK Co., Ltd.

8. Cost-Effectiveness

- NELS announced a total cost of 750 thousand USD funded for 4 LORAN-C station to serve EUROFIX.
- It means a cost of less than 188 thousand USD per station and it includes funds for DGNSS reference station equipment.
- Few extra running cost expected.
- Not comparable with the cost for 25 Radio Beacon type DGPS station with 200km coverage to cover 1000km x 1000km x 3.14 area.

9. Schedule Time Sequence of Introduction

- 20th Aug, 2001 : Communication Line Connect between Changgigot DGPS station and Pohang Loran-C station by Chartered Line of Korea Telecom.
- 1~5th Sept : Conversion of type 9 message to modified type 9 message and Modulation of Loran-C transmission.
- 5~10th Sept : System test with Integrated Receiver with EUROFIX Demodulator.
- 10th Sept : Commence Demonstration of EUROFIX transmission.
- 17~21th Sept : Invite the FERNS 10 Council Session to recommend FERNS Members for the introduction of EUROFIX.

10. Expected Cost for testing

Item	Maker	Price
New Timer Kit for Eurofix	Megapulse Inc.	Abt. 6,000.- USD
Eurofix Operation System with short term license (just 60 days S/W License for Testing)	Reelectronika	Abt. 50,000.- USD
Permanent or Long term license of S/W	Reelectronika	Negotiate with Reelectronika
Communication Line Charge	Korea Telecom.	Abt. 50.- USD per Month.
Trip Cost, etc ...		Abt. 1,000.- USD
Total		Abt. 57,050.- USD + α

实现船舶避碰自动化的新方法

姚 杰 吴兆麟

(大连水产学院, 大连海事大学)

摘要 计算机技术的飞速发展和人工智能的广泛应用, 为实现船舶驾驶自动化提供了强有力的技术支持。船舶驾驶自动化的研究在日本、英国、美国、德国等世界航运发达国家以及中国都取得了可喜的成果。但到目前为止, 在船舶避碰决策数学模型的建立以及船舶避碰推理机制的研究上仍然处于探索的阶段。本文从两个方面提出了实现船舶避碰自动化的方法。其一就是在前人在避碰决策模型上已经取得的研究成果的基础上, 利用近年来广泛应用的有限状态机理论, 以国际海上避碰规则中关于避碰行动的准则为船舶采取避碰行动的指南, 建立船舶避碰自动化系统; 其二就是利用最近在航空管理研究中所应用的自由航行概念, 混合系统技术、对策论等理论以及航海与航空管理所存在的共性特点, 建立未来的船舶避碰自动化系统理念。

1. 引言

随着航海技术的快速发展, GPS 全球定位系统、GMDSS 通信系统以及电子海图信息系统等在船舶驾驶上的广泛应用, 大大提高了航海的安全性, 使船舶管理和船舶驾驶自动化程度不断提高。但要实现船舶驾驶的全面自动化, 还有很长的路要走, 其关键问题就是船舶避碰自动化的实现。20 世纪八十年代以来, 随着计算机技术的飞速发展, 船舶避碰自动化的研究进入了暂新的历史阶段。避碰自动化的研究在日本、英国、美国、德国等世界航运发达国家取得了可喜的成果^{[1][2][3]}。中国的避碰自动化研究始于 20 世纪七十年代, 三十多年来, 专家学者围绕船舶避碰决策数学模型、船舶领域、船舶避碰自动化系统等问题进行了广泛深入的研究, 取得了一定的成果^{[4][5][6][7][8]}。

虽然国内外专家、学者对船舶避碰决策数学模型、船舶自动避碰系统等问题进行了大量、深入的研究, 但在模型、推理机制等方面还没有达成一致, 特别是对多船避碰方面的问题研究的还很少, 与路上交通和空中交通在这方面的研究相比还有较大的差距。国际海协秘书长威廉姆·奥内尔^[9]指出, 船舶交通管理与航空交通管理经常进行比较, 已经承认的事实是: 积极的交通管理是民用航空的基础。只要能够促进安全, 在其他运输形式中存在的控制原理完全可以应用于船舶运输。有鉴于此, 本文试图将航空交通管理研究的一些思路, 如自由飞行、混合系统、微分对策等概念用于船舶避碰自动化的研究, 提出实现船舶避碰自动化的新方法。

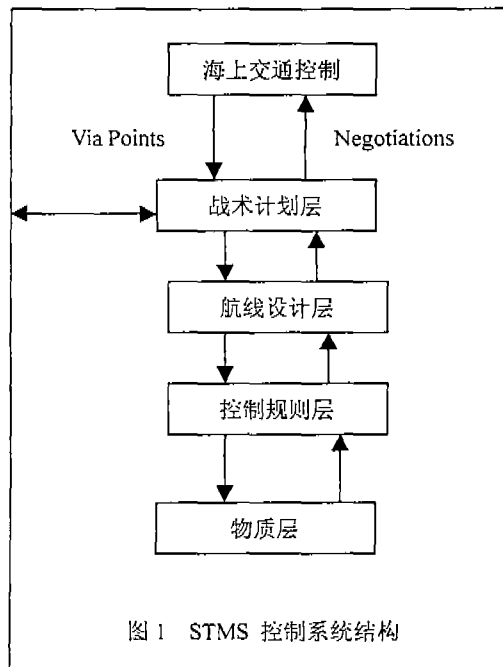


图 1 STMS 控制系统结构

2. 未来的海上交通管理系统

陶姆琳^{[10][11]}等通过对现行航空管理系统的分析研究,提出了未来的航空交通管理系统(ATMS)及其结构,在新的系统中,引入了自由飞行的概念,即将现在的飞机飞行完全由地面控制而被动飞行转变为以飞机为主,实时计划自己的航线。在新的系统结构中,当前一些航空交通控制功能被转移到飞机上。新的管理系统利用混合系统、对策论等对飞机间的冲突进行预测并提出了解决冲突的算法。

高德哈分^[12]等参照陶姆琳等的新航空管理系统提出了未来的海上交通管理系统,简称STMS。其结构如图1所示。这是层次混合控制系统(Hierarchical Hybrid Control System)。要想实现既有大量控制决策(离散事件)又有多种低层控制准则(连续系统)的高度复杂的系统,必须利用这样的层次混合系统。

最上层是海上交通控制器(STC),STC是一个离散事件控制单位,负责监视、协调和计划。海上交通的整体安全完全由这一层控制。STC用它的位置传感器(雷达系统)来监视船舶的运动。STC发给每艘船舶的指令是一系列航路点。一个航路点是一个坐标 (x_i, y_i) 和时间间隔 $[t_{i,min}, t_{i,max}]$ 的集合。船舶要在指定的时间内到达指定的航路点。

系统的第二层是战术计划层,一个详细的战术方案(船舶航行计划)要由STC所给出的信息产生。战术方案要利用STC给出的所有航路点并把航路分成不同控制模式的航段。如沿直线定速航行或沿圆周的部分航行模式;变速航行模式;停船并保持船位模式;靠泊模式(CAQ)。由STC产生的航路点必须具有足够的密度以确保安全。为了减少系统的负荷,增加其机动性,正常的交通希望只有有限个航路点。因此在这层必须有一些规则来指导船舶进行避碰,船上的自动驾驶仪应当能够预测可能的碰撞危险并予以解决,而不涉及STC。

系统的第三层是航线设计层,在该层作航线设计。要充分考虑船舶动力学模型、船舶性能的限制以及其他方面,产生一个平滑的设计航线。

第四层是控制规则层,前一层设计的航线传到控制规则层。各个鲁棒线性与非线性控制器应用于不同的控制模式,每个控制器都有自己的激励器和进行测量。

最下层是物质层,即船舶。控制规则层发出控制命令,而船舶通过激励器等将自身的动态反馈到控制规则层。

3. 未来的船舶驾驶自动化系统

实际上,我们换一个角度来观察上述海上交通管理系统,就可以得到未来的船舶驾驶自动化系统。交通管理系统的最上层STC的功能实际上就是未来VTS所应具备的功能。而从第二层到第五层所要完成的任务和具备的功能完全是船舶自身应当完成和具备的。因此,将第二层到第五层看做一个系统,就是船舶驾驶自动化系统。

船舶驾驶自动化系统的第一层主要目的是进行航线设计和解决船舶间的避碰问题。而其它各层的任务则是根据自身条件和特定环境情况控制船舶在设定的航线航行并到达目的地。因此,无论是实现未来的海上交通管理系统,还是完全实现船舶驾驶自动化,关键问题是要实现船舶避碰自动化。

4. 船舶碰撞危险评价

要实现船舶避碰自动化,首先要准确地预报船舶间是否存在碰撞危险。在这一问题上,国内外专家、学者经过多年广泛深入的研究,取得了累累硕果^[13]。目前用于船舶之间碰撞危险度评价的方法主要有:数值评价方法、碰撞概率评价方法;作图法,即危险范围评价方法;

预测危险区 (PAD) 评价法; 碰撞航向与航速评价法; 避航界限评价法; 船舶领域等等。而在数值评价法中, 由于所使用的计算方法不同, 又有代数算法, 模糊综合评判方法, 模糊推理评价方法, 神经网络评价方法等。

5. 船舶自动避碰决策系统

目前船舶自动避碰决策系统主要采用两种办法构建决策系统, 第一种方法^{[2][3][5][8]}也是最广泛采用的方法就是利用人工智能的研究成果构建系统, 系统由数据库、知识库、推理机等组成。而其核心部分就是避碰知识库, 其主要内容是《国际海上避碰规则》。这种系统的优点是: (1) 所作出的避碰决策符合避碰规则的要求; (2) 符合良好船艺的要求; (3) 符合驾驶员的操纵习惯与期望等。而其缺点是: (1) 在两船会遇局面, 如果一船不遵守避碰规则, 则避碰决策不容易作出; (2) 多船会遇局面决策非常困难。第二种自动避碰决策系统^[4]是利用微分对策理论中的定性微分对策构建系统。其优点是在一定条件下, 不论来船采取什么措施, 我船都能采取最优的措施, 使来船不能进入我船的安全领域。其缺点是: (1) 计算复杂; (2) 对于多船会遇局面, 很难作出避碰决策, 目前仍属于探索阶段, 距离实现尚存较大距离。

6. 实现船舶避碰决策自动化的新方法

6.1 利用有限状态机实现船舶自动避碰决策

一个有限状态机 (FSM) 表示一个事件驱动系统。在事件驱动系统中, 只要所规定的变化条件为真, 则系统将从一种状态向另一规定的状态转变。

例如, 用状态机来代表一辆轿车的自动传动系统。传动系统有一些操作状态: 停车、空挡、驱动、倒退等等, 当驾驶员将操纵杆从一个位置移动到另一个位置, 系统就从一种状态转变为另一种状态, 如从停车到空挡。

我们考虑可以将有限状态机用于第一种自动避碰决策系统的推理机制建立传统的船舶自动避碰决策系统。

关于混合系统的实现和验证可参阅文献[14]。

6.2 利用微分对策理论实现船舶自动避碰决策

非合作避碰决策方法^[15], 指会遇船舶间没有配合时每一船舶所采取的避碰行动。船舶作为一个 n 人零和非合作动态对策中的局中人。每一局中人只知道其它船舶可能采取的行动范围, 但不知道其确切值, 也不能控制。每一船舶只能考虑最坏的情况进行决策。每一船舶所追求的性能指标是船舶之间的距离要高于一阈值。

考虑一个两船相遇局面。设

$$\dot{x} = f(x, u, d, t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

是两船之间相对运动的数学模型。式中 $u \in U$ 是一艘船舶的控制输入, 该船称为逃逸者, $d \in D$ 是另一艘船舶的控制, 该船称为追逐者。逃逸者的行动是被控制的, 而追逐者的行动是未知的不受控制的。但是, 知道追逐者的行动在一定的扰动集合 D 内。这样, 逃逸者的行动作为输入控制, 而追逐者的行动作为干扰。

避碰的条件用支付函数 $J_s(x_0, u, d)$ 表示, 简单的形式是两船间的距离。如果满足下列条件

$$J_s(x_0, u, d) \geq C \quad (2)$$

式中 C 是由船舶领域的大小确定的常数, 则称 (1) 式的航线是安全的。在一个零和非合作

决策中，追逐者试图缩小两船间的距离，而逃逸者尽力扩大此距离。

当存在输入 u^* 和干扰 d^* 使下式成立

$$J_s(x_0, u^*, d^*) = \max_{d \in D} \min_{u \in U} J_s(x_0, u, d) = \min_{u \in U} \max_{d \in D} J_s(x_0, u, d) \quad (3)$$

则称对策的鞍点存在。

如果鞍点存在，则逃逸者的最优策略为 u^* ，而追逐者实施的最糟糕的干扰是 d^* 。如果与鞍点 (u^*, d^*) 相对应的航线是安全的，那么即使追逐者实施最差的干扰，逃逸者也可避免碰撞。在这种情况下，无论追逐者采用什么样的行动，只要逃逸者采用最优策略就可避免碰撞。这就允许逃逸者选用一个控制策略保证安全，而不需与追逐者联系或合作。这就是非合作避碰决策的根本思想。

某一特定控制策略的安全与否还取决于初始相对位置 x_0 。初始相对位置的安全集定义如下：

$$V_s = \{x_0 \in R^n \mid J_s(x_0, u^*, d^*) > C\} \quad (4)$$

如果初始相对位置不属于 V_s ，则避免碰撞就不能保证。那么，只用非合作方法就不能保证安全了。然而，如果 $x_0 \in V_s$ ，就可以通过选择最优策略 u^* ，保证安全。通常情况下，给定初始相对位置 $x_0 \in V_s$ ，定义集合

$$U_s(x_0) = \{u \in U \mid J_s(x_0, u, d^*) \geq C\} \quad (5)$$

为由初始条件 x_0 保证安全的控制策略集合。由于所有 $u \in U_s(x_0)$ 保证初始状态为 x_0 的安全，所以要找出控制策略 $u \in U_s(x_0)$ ，使与航线的偏差最小。航线偏差通常用支付函数 J_ε 表示，是航迹误差的二次函数。因此，从初始位置 x_0 使偏差最小，并保证安全，通过求解如下最优控制问题得到：

$$\min_{u \in U_s(x_0)} J_\varepsilon \quad (6)$$

6.3 采用势域与涡域^{[16][17]}进行自动避碰决策

文献[16]将势与涡域模型用于飞机的避碰决策，取得了较好的结果。我们在这里考虑可以将其避碰算法用于船舶的避碰决策。这里使用了船舶领域和动界的概念，当两船或多船的船舶领域有交叉重叠的时候，认为碰撞发生。在船舶的动界与领域之间，船舶可以采取行动避免他船进入船舶领域。

设有 m 艘船舶相遇，在第 i 艘船舶（位置在绝对坐标系中为 $\vec{x}_i = (x_i, y_i)$ ）周围有 n 艘船舶，其目的地（例如下航路点）为 $\vec{x}_{d,i} = (x_{d,i}, y_{d,i})$ 。则吸引势函数定义为：

$$\Phi_a = \frac{1}{2}(\vec{x}_i - \vec{x}_{d,i})^2 \quad (7)$$

为了到达目的地，需要有与 Φ_a 的负梯度成正比的力。

为了避免相邻的船舶 i 与 j 发生碰撞，在每一船舶周围设有一对称的排斥域：

$$\Phi_r = \begin{cases} -\frac{1}{2\delta_r}(r_y - (r + \delta_r))^2 & r \leq r_y \leq r + \delta_r \\ 0 & \end{cases} \quad (8)$$

其中 $r_y = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 是船舶 i 与 j 之间的几何距离， (x_i, y_i) 与 (x_j, y_j) 是时间的函数， r_i 是第 i 艘船舶的领域半径， δ_r 是动界的半径。排斥力由 Φ_r 的梯度产生。

涡域与排斥域相切，也与每艘船舶的动界相关，用来保证当有碰撞危险时，每艘船舶向同一方向转向：

$$\Phi_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_r}{\partial y} \\ -\frac{\partial \Phi_r}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

本船的航线由势与涡域产生的力叠加而生成。吸引力给出到目的地的航向，与到目的地的距离无关。在 $r \leq r_y \leq r + \delta_r$ 时船舶 i 的 x 位置由绝对坐标系中的微分方程给出：

$$\dot{x}_i = -\frac{x_i - x_{d,i}}{\sqrt{(x_i - x_{d,i})^2 + (y_i - y_{d,i})^2}} + k_r \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\delta_r} \left\{ \frac{r + \delta_r}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} - 1 \right\} (x_i - x_j) + k_v \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\delta_r} \left\{ \frac{r + \delta_r}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} - 1 \right\} (y_i - y_j) \quad (10)$$

$$\dot{y}_i = -\frac{y_i - y_{d,i}}{\sqrt{(x_i - x_{d,i})^2 + (y_i - y_{d,i})^2}} + k_r \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\delta_r} \left\{ \frac{r + \delta_r}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} - 1 \right\} (y_i - y_j) + k_v \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\delta_r} \left\{ \frac{r + \delta_r}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} - 1 \right\} (x_i - x_j) \quad (11)$$

其中 k_r 与 k_v 分别是排斥与涡域强度。假定所有船舶都有同样的域强度，对于 $r_{i,j} > r + \delta_r, \forall j$ ，可以简化船舶 i 的微分方程，因为此时只有吸引势函数对其速度势域有贡献。

通过解上述微分方程 (11)、(12)，就可以得到两船或多船相遇的避碰操纵行动。

6. 4 利用布朗运动理论进行船舶自动避碰决策

胡江海等^{[18][19][20][21]}将布朗运动理论应用于高速公路安全分析，预测飞机间的碰撞概率和进行避碰决策，并将辨群用于多架飞机相遇而进行避碰操纵，用 8 架飞机和 16 架飞机进行

了模拟。

我们考虑可以将布朗运动理论用于船舶间碰撞概率的计算，对多船会遇局面进行避碰决策可能是较好的方法之一。

船舶运动的不确定性是由于风浪等外界环境引起的，我们将它定义为扰动，用布朗运动来表示。直观地说，船舶碰撞的概率就是导致碰撞的航线与所有可能的航线数之比。布朗运动使我们有办法得到每一航线的概率。布朗运动模型使避碰决策方案的制定容易进行。

1. 船舶运动模型与碰撞概率近似公式

假设两艘船舶 1、2 相遇，船舶 1 在 $t=0$ 时的位置在坐标原点，从左向右以速度 $\bar{u}_1 = (u, 0)^T \in R^2$ 航行，船舶 2 在位置 $\bar{z}_0 \in R^2$ 以速度 $\bar{u}_2 \in R^2$ 与船舶 1 成 θ 角度航行。如果船舶 2 进入船舶 1 的船舶领域，则称碰撞发生。

对于两艘船舶的位置 $\bar{z}_1(t)$ 和 $\bar{z}_2(t)$ ，用如下的数学模型表示：

$$\bar{z}_1(t) = \bar{u}_1 t + \sum \bar{B}_1(t) \quad (12)$$

$$\bar{z}_2(t) = \bar{z}_0 + \bar{u}_2 t + T(\theta) \sum \bar{B}_2(t) \quad (13)$$

其中， $\sum = \text{diag}(\sigma_o, \sigma_c)$ 。 σ_o, σ_c 表示沿航线与垂直航线的方差增长率 ($\sigma_o > \sigma_c$)， $T(\theta)$ 是与逆时针旋转相对应的矩阵。 $\bar{B}_1(t)$ 与 $\bar{B}_2(t)$ 是独立的二维布朗运动。(13) 式减去 (12) 式得

$$\Delta \bar{z}(t) = \bar{z}_0 + \Delta \bar{u} \cdot t - \bar{W}(t) \quad (14)$$

通过变换，我们可以假定船舶 1 的运动为以原点为始点的二维布朗运动，而船舶 2 是以 $\bar{s} = (s_1, s_2)^T$ 为起点，以常速 $\bar{v} = (v_1, v_2)^T$ 运动，其中

$$\bar{s} = P^{-1} \bar{z}_0, \quad \bar{v} = P^{-1} \Delta \bar{u} \quad (15)$$

定义 x_d 为原点到船舶 2 航线的距离， a 为 $t=0$ 使船舶 2 到原点在其航线上的投影点的距离。在新的坐标系下

$$x_d = \frac{|s_1 v_2 - s_2 v_1|}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}, \quad a = -\frac{s_1 v_2 + s_2 v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}$$

在新坐标系中，正 a 表示艘船舶，最近距离为 x_d 。当 a 为负值时，表示艘船舶相互驶离， $t=0$ 时两艘船舶的距离最近。另外，船舶 2 的圆形船舶领域变换为以 \bar{s} 为初始中心位置的椭圆，边界为

$$\lambda_1^2 (x - s_1)^2 + \lambda_2^2 (y - s_2)^2 = R^2 / 2 \quad (16)$$

随船舶 2 运动。如果且只有当新坐标系中的船舶 1 进入该椭圆，则碰撞发生。

两艘船舶交叉相遇碰撞概率的近似计算公式如下：

$$P_{nm} \approx Q\left(\frac{x_d - L}{\sqrt{t_0}}\right) - Q\left(\frac{x_d + L}{\sqrt{t_0}}\right) \quad (17)$$

其中各项的意义参见文献[19]。

2. 避碰行动决策推算方法

在 6.3 中，避碰决策的算法是基于势域和涡域的方法，而其所定义的势域只与距离有关，其所生成的操纵有时包括突然或不符合实际的转向。由于 (17) 式包括距离与速度，因此是更好的避碰行动生成算法。

考虑这种情况，两艘船舶分别以常速 u_1, u_2 ，从距离分别是 d_1, d_2 的位置 $\bar{z}_1(0), \bar{z}_2(0)$ 驶往目的地。在每一瞬时 t ，可以根据各自的位置与速度计算 P_{nm} 。我们定义每艘船舶的三个航向如下：当前航向 C_c ：船舶目前所驶航向；目的航向 C_d ：从当前位置驶往目的地的航向；梯度航向 C_g ：与 PC 值下降最快所对应的航向，即由 P_{nm} 负值所确定的当前位置的函数。

推算步骤非常简单：按时间步长，船舶按下式更新其航向

$$C_{next} = \begin{cases} \bar{C} & \text{if } |\bar{C} - C_c| < \beta \\ C_c + \beta \operatorname{sgn}(\bar{C} - C_c) & \end{cases}$$

其中 β 为允许的最大转向角。 $\bar{C} = P_{nm} C_g + (1 - P_{nm}) C_d$ 。自然地，如果 P_{nm} 高，则首先要降低 P_{nm} ，就追求高 C_g 。反之，如果 P_{nm} 很小，可以忽略，就应继续保持 C_c 。从 C_c 到新的航向，其角度不应大于 β 。

7. 结束语

船舶避碰自动化研究的关键问题是避碰决策的自动化，而实现避碰决策自动化的根本问题是在断定碰撞危险存在以后，船舶采取行动的算法。一种办法是遵守避碰规则采用推理的方式，这是目前大多数自动避碰系统所采用的方式。但该方法缺点是规则中的很多不确定性，以及规则没有规定的局面（如多船会遇局面）等很难实现。第二种方法是不考虑规则，采用微分对策、混合系统等理论建立算法，其缺点是所得到的避碰行动可能不符合避碰规则。随着科学技术的飞速发展和计算机技术水平的不断提高，航海技术领域必将发生革命性的变化，相信船舶避碰自动化的实现不是非常遥远的事情。本文只是针对船舶自动避碰领域的研究的问题提出了一些新的解决思想，是否可行尚待进一步研究论证。

参考文献

1. 鹤田三朗等, 船舶航行专家系统的基础研究, 日本航海学会论文集, No.77, 1987
2. F. P. Coenen, G. P. Smeaton and A.G.Bole. A Knowledge-based collision avoidance. *The Journal of Navigation*. Vol.42, 1989
3. M. Grabowski and W. A. Wallace. An Expert System for Maritime Pilots: Its Design and Assessment Using Gaming. *Management Science*. Vol. 39, No. 12, 1993
4. 杨宝璋等, 面向未来的船舶避碰自动化系统, IAIN94' 论文集
5. 王敬权, 宽阔水域避碰专家系统, 日中航海学会交流论文集, 1995
6. 邱志雄, 船舶避碰综合决策系统, 大连海运学院学报, Vol.18, No.3, 1992
7. 翁跃宗, 船舶避碰领域的知识与专家系统, 中国航海, 1994
8. 郑中义, 船舶自动避碰决策系统的研究, 大连海事大学博士学位论文, 2000
9. William A. O'Neil, IPS-IMO International Conference on the Malacca and Singapore Straits. Singapore, 1999
10. Claire Tomalin, George J. Pappas, Jana Kosecka, John Lygeros and Shankar Sastry, A Next Generation Architecture for Air Traffic Management. In International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Grenoble, 1997.
11. Shankar Sastry, G. Meyer, Claire Tomalin, John Lygeros, D. Godbole and G. Pappas, Hybrid Control in Air Traffic Management Systems. UC Berkeley Memo UCB/ERL M95/82 October 1995.
12. John-Morten Godhavn, Trygve Lauvdal and Olav Egeland, Hybrid Control in Sea Traffic Management Systems. 1997
13. 赵劲松等, 船舶避碰学原理, 大连海事大学出版社, 1999
14. Alongkritt Chutinan, Hybrid System Verification Using Discrete Model Approximations. Ph. D thesis, Carnegie Mellon University, 1999
15. Claire Tomalin, George J. Pappas, and Shankar Sastry, Conflict Resolution for Air Traffic Management: A case study in multi-agent hybrid systems. Technical report, UCB/ERL M96/38, Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, 1996.
16. Jana Kosecka, Claire Tomalin, George J. Pappas and Shankar Sastry, Generation of Conflict Resolution Maneuvers for Air Traffic Management. In International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Grenoble, 1997.
17. A. Masoud. Using hybrid vector-harmonic potential fields for multi-robot, multi-target navigation in stationary environment. In Proceedings of IEEE conference on Robotic and Automation, 1996.
18. Jianghai Hu, A Study of Conflict Detection and Resolution in Free Flight, M. S. thesis, University of California, Berkeley, 1999.
19. Jianghai Hu, John Lygeros, Maria Prandini, and Shankar Sastry, Aircraft Conflict Prediction and Resolution using Brownian Motion, In IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, AZ, 1999.
20. Jianghai Hu, Maria Prandini, and Shankar Sastry, Optimal Maneuver for Multiple Aircraft Conflict Resolution: A Braid Point of View, In IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, 2000.
21. Jianghai hu, John Lygeros, Maria Prandini and Shankar Sastry, A probabilistic framework for highway safety analysis. In IEEE Conference on Decision and Control, 1999