

蘇澳港防波堤改善工程規劃

第八子計劃

進出港操船及繫纜船舶運動計算系統之研究

邱逢琛 蔣德普 洪憲忠

委託單位：省交通處基隆港務局蘇澳港分局

承辦單位：省交通處港灣技術研究所

協辦單位：國立台灣大學造船及海洋工程研究所

中華民國八十六年二月

第八子計劃

第一部份

進出港操船系統之研究

計劃主持人：國立台灣大學
造船及海洋工程研究所
教授 邱逢琛博士

共同主持人：國立台灣大學
造船及海洋工程研究所
副教授 蔣德普博士
港研所海岸工程組
副研員 洪憲忠博士

中文摘要

本研究針對邱、曾採用日本的深水域 MMG 為數學模式，以評估平靜開闢深水域中的船舶操縱性能為目的所發展之模擬計算系統予以擴充，使之能在考慮風、浪、流等環境外力作用下，進行操船模擬計算，並建立可輸入實際港口幾何及階段式操船指令，而於給定港池內外之風、浪、流分布下進行操船模擬之計算系統，以供港埠規劃時進行進出港操船評估之用。

目錄

中文摘要	1
目錄	II
圖目錄	IV
表目錄	V
符號說明	VI
第一章前言	1
第二章操縱運動之數學模式	2
第三章環境外力之處理	3
3-1 波浪漂流力與力矩	3
3-2 風力與力矩	3
3-3 潮流力與力矩	4
第四章港埠佈置與環境資料整合	6
4-1 流場資料整合	6
第五章操船運動模擬	7
5-1 環境資料的擷取	7
5-2 程式規畫與計算流程	7
第六章計算實例	8
6-1 供試船	8
6-2 供試港埠	9
6-3 計算項目	9
(1)滿載狀況且無外力作用下進港	9
(2)滿載狀況及外力作用下進港	10

(3)滿載狀況且無外力作用下出港.....	12
(4)滿載狀況及外力作用下出港.....	12
6-4 計算結果之探討.....	13
第七章結論與展望.....	14
參考文獻.....	15
附錄.....	16
附錄 1. 程式介面簡介.....	16
附錄 2. 各資料檔之建立.....	17
2-1. 船體資料檔.....	17
2-2. 港埠資料檔.....	20
2-3. 環境資料檔.....	20
2-4. 初始資料檔.....	21
附錄 3. 程式操作簡介.....	22
3-1. 輸入介面.....	22
3-2. 操船模擬介面.....	24

圖目錄

圖一	港口佈置與風、浪、流漸化區示意圖	26
圖二	環境資料網格配置圖	27
圖三	計算所擷取之環境資料網格點示意圖	28
圖四	操船螢幕顯示圖	30
圖五	程式流程圖	31
圖六	蘇澳港平面佈置圖	32
圖七	港灣佈置及流場網格	33
圖八	供試船於滿載狀況且無外力作用下進港之軌跡圖	34
圖九	供試船於滿載狀況及外力作用下進港之軌跡圖 2	35
圖十	供試船於滿載狀況且無外力作用下出港之軌跡圖	36
圖十一	供試船於滿載狀況及外力作用下出港之軌跡圖	37

表目錄

表一	供試油輪基本尺寸與特性表	38
表二	供試油輪之線性阻尼與附加質量與慣性矩	39
表三	供試油輪之其他相關流體力係數	39

符號說明

A_f	水面上船體正向投影面積
$\bar{A}_f$	水面下船體正向投影面積
A_s	水面上船體側向投影面積
$\bar{A}_s$	水面下船體側向投影面積
g	重力加速度
I_{xx}	船體繞 Gx 軸之轉動慣性矩
I_{prop}	螺槳在空氣中之極慣性矩
I_{ps}	軸系(不含螺槳)之極慣性矩
I_{zzG}	船體繞 Gz 軸之轉動慣性矩
K	橫搖力矩
m	船體質量
n	軸系轉速
$\dot{n}$	軸系轉動加速度
N	平擺力矩
Q	作用於軸系(含螺槳)之扭矩
u	重心移動速度在 Gx 軸的分量
$\dot{u}$	重心移動加速度在 Gx 軸的分量
v	重心移動速度在 Gy 軸的分量
$\dot{v}$	重心移動加速度在 Gy 軸的分量
V_R	相對風速
$\bar{V}_R$	相對潮流速度
X	縱移力
Y	橫移力
α_R	相對流向角
β_R	相對波向角

γ_R	相對風向角
ζ_a	有義波振幅
ρ	水的密度
ρ_a	空氣的密度
ϕ	橫搖角
$\dot{\phi}$	橫搖角速度
$\ddot{\phi}$	橫搖角加速度
ψ	平擺角
$\dot{\psi}$	平擺角速度
$\ddot{\psi}$	平擺角加速度

第一章 前言

傳統上的港埠規畫普遍著重於港池遮蔽效應的考量上，而較忽略對船舶進出港操船的考慮，因此有可能形成進出港操船不易的港口佈置，而使港的功能大受影響。國外如日本港灣技術研究所早於十幾年前即注意及此，而導入了簡易式的操船模擬計算系統應用於港埠規畫上，而國內於近年對這方面的問題也已逐漸重視，並有利用大型操船模擬機進行操船模擬以檢討港埠碼頭佈置之案例。惟大型船模擬機之主要功能是在於操船訓練，且由於使用成本頗高，故較適用於最終佈置的確認或操船方法的檢討上，至於初步階段的規畫評估則以使用簡易式操船模擬計算系統應是較佳的選擇。

台灣大學造船及海洋工程研究所曾於數年前為了檢討船舶操縱性能建立了以日本的深水域 MMG 為數學模式，以評估平靜開闊深水域中的船舶操縱性能為目的之模擬計算系統，並附加簡易碼頭幾何輸入及階段式操船指令輸入功能而構成一在平靜深水的港內之操船運動模擬計算系統。現因港灣技術研究所進行港埠規畫應用上之需要，擬委託本所在現有深水域 MMG 數學模式之理論架構下，建立可輸入實際港口幾何並於給定港池內外之風、浪、流分布下進行操船模擬之計算系統，以供港研所進行進出港操船評估之用。

第二章 操縱運動之數學模式

本研究所採用的操船運動模式主要參考日本 MMG 的研究成果，除考慮船舶縱移(u)、側移(v)、平擺(ψ)、橫搖(ϕ)四個自由度的耦合運動之外，並針對不同形式的主機(蒸汽渦輪機(steam turbine)及低速柴油機(low speed Diesel))，考慮操船過程中主機轉速的變動。建立運動方程式如下：

$$\begin{aligned}m(\dot{u} - v\dot{\psi}) &= X_H + X_P + X_R + X_W + X_{WV} + X_C \\m(\dot{v} + u\dot{\psi}) &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_W + Y_{WV} + Y_C \\I_{zzG}\ddot{\psi} &= N_H + N_P + N_R + N_W + N_{WV} + N_C \\I_{xx}\ddot{\phi} &= K_H + K_P + K_R + K_W + K_{WV} + K_C \\(I_{prop} + I_{ps})\dot{n} &= Q_E + Q_P\end{aligned}$$

上式中 X ， Y ， N ， K 分別代表作用於船體之 X 方向、 Y 方向力及 Z 方向、 X 方向力矩； m 為船體質量； I_{zzG} 與 I_{xx} 分別為船體繞 Gz 及 Gx 軸之質量慣性矩(mass moment of inertia)； u 、 v 分別為船體重心 G 之移動速度在 Gx 與 Gy 軸的分量； ψ 、 ϕ 分別為船體運動角速度在 Gz 與 Gx 軸的分量；各力與各力矩之下標 H 、 P 、 R 、 W 、 WV 及 C 則分別代表主船體(Hull)、螺槳(Propeller)、舵(Rudder)、風(Wind)、波浪(Wave)及潮流(Current)之作用力與力矩。至於主船體流體動力、螺槳力、舵力、主機扭矩之數學模式描述，可詳見於文獻[1,2]，在此不再另做贅述。

第三章 環境外力之處理

本研究欲探討的目標之一為模擬計算船舶在航行中受環境外力(風、浪、流)作用之下，對船舶航行所產生的影響。以下將分別對各環境外力與力矩之數學模式作一簡單的描述並說明本研究如何處理船舶所遭遇之各環境外力與力矩。

3-1 波浪漂流力與力矩

作用於船舶之波浪漂流力與力矩可表示如下：

$$X_{wv} = X'_{wv}(\beta_R) \times \frac{1}{2} \rho g L_{pp} \zeta_a^2$$

$$Y_{wv} = Y'_{wv}(\beta_R) \times \frac{1}{2} \rho g L_{pp} \zeta_a^2$$

$$N_{wv} = N'_{wv}(\beta_R) \times \frac{1}{2} \rho g L_{pp} \zeta_a^2$$

$$K_{wv} = 0$$

式中， ζ_a 為(有義)波振幅， X'_{wv} 、 Y'_{wv} 、 N'_{wv} 為波浪漂流力係數，是船速、(有義)波長船長比及相對波向角 β_R 的函數， ρ 為海水密度。

目前考慮船速效應的波浪漂流力實驗值或理論計算仍不多見，是而本研究採用之波浪漂流力係數為文獻[3]所提供之數種船型在靜止狀態下的波浪漂流力係數之實驗結果。

3-2 風力與力矩

作用於船舶之風力與力矩可表示如下：

$$\begin{aligned}
X_W &= X'_W(\gamma_R) \times \frac{1}{2} \rho_a A_f V_R^2 \\
Y_W &= Y'_W(\gamma_R) \times \frac{1}{2} \rho_a A_s V_R^2 \\
N_W &= N'_W(\gamma_R) \times \frac{1}{2} \rho_a A_s L_{PP} V_R^2 \\
K_W &= K'_W(\gamma_R) \times \frac{1}{2} \rho_a (A_s^2 / L_{PP}) V_R^2
\end{aligned}$$

式中， X'_W 、 Y'_W 、 N'_W 、 K'_W 為風力係數，是相對風向角 γ_R 的函數， A_f 及 A_s 分別代表水面上船體之正向及側向投影面積， V_R 為對風的相對船速， ρ_a 為空氣密度。

模擬計算所需之供試船的各项係數可由實驗求得，若無法得知各項係數之實驗數據，則文獻[4]亦提供了相當數量之各型船舶試驗結果，依船型主要參數回歸得出各項係數之經驗公式，可供初步估算之用。

3-3 潮流力與力矩

作用於船舶之潮流力與力矩可表示如下：

$$\begin{aligned}
X_C &= X'_C(\alpha_R) \times \frac{1}{2} \rho \bar{A}_f \bar{V}_R^2 \\
Y_C &= Y'_C(\alpha_R) \times \frac{1}{2} \rho \bar{A}_s \bar{V}_R^2 \\
N_C &= N'_C(\alpha_R) \times \frac{1}{2} \rho \bar{A}_s L_{PP} \bar{V}_R^2 \\
K_C &= K'_C(\alpha_R) \times \frac{1}{2} \rho (\bar{A}_s^2 / L_{PP}) \bar{V}_R^2
\end{aligned}$$

式中， X'_C 、 Y'_C 、 N'_C 、 K'_C 為潮流力係數，是相對流向角 α_R 的函數， $\bar{A}_f$ 及 $\bar{A}_s$ 分別代表水面下船體之正向及側向投影面積， $\bar{V}_R$ 為對潮流的相對船

速， ρ 為海水密度。

相較於風力及力矩，潮流力與力矩計算主要差別在於海水與空氣的密度及水面上、下之船體正向與側向投影面積不同，故模擬計算上對於潮流力與力矩之作用其作法跟風力與力矩之作法是一致的。唯文獻[4]亦提供了各型船舶之相關經驗數值，以供計算水面上船體之正向與側向投影面積，可作為風力與力矩預估之用。

又以相對速度計算潮流力與力矩時，此力以力矩中亦包含了船舶航行在平靜水域時主船體所受的力與力矩，故在此為重複計算需予以扣除。

第四章 港埠佈置與環境資料整合

本研究採用的地面固定座標系為右手直角座標系，原點訂於港埠的最左下角，正北向的方位角為 0° (或 360°)，正東向的方位角為 90° 並分別定義為 Y_0 及 X_0 軸的正向，如此整個港埠佈置及船體運動皆位於第一象限，為了操船模擬計算初始條件之便，本研究於港口附近之風、浪、流區臨近操船進入區周圍，設定一適當範圍之風、浪、流漸化區，使其在該範圍內逐漸向外趨近於無風、浪、流之狀況，如圖一所示。

4-1 流場資料整合

本研究並結合另一子計畫所進行的港口附近及港內之風、浪、流分佈計算結果作為輸入，結合港口佈置在虛線及水陸邊界所夾區域內(如圖一所示)，以適當的間距顯示其流場分佈，如此形成一個結合港口佈置及流場網格的地圖，以供操船計算模擬系統計算在此區域內船體於任一位置、任一方向角、任一航速及航向下所受之風、浪、流作用力與力矩。

第五章 操船運動模擬

本研究所採用的數值解法可分為多變數牛頓法(Multi-variable Newton method)與 Newmark- β 時間積分法，前者乃用於模擬計算之初決定計算所需之初始條件，後者則為計算時迭代求解運動聯立方程式之用，可詳見文獻[1,2]。

5-1 環境資料的擷取

為了能正確的估算船體所受之環境外力，則必須要能得到船體所在位置之環境資料(風、浪、流)，由於目前得到之環境資料(風、浪、流)，其網格分佈為密集且不等間距(如圖二)，亦即船體本身便涵蓋了數個網格點；目前程式的作法為以船體重心做為原點，搜尋一適當邊長之正方形面積內所涵蓋的所有網格點(如圖三)，將所有網格點上之環境資料(風、浪、流)取平均值當作船體所在位置之平均風、浪、流數值。

5-2 程式規畫與計算流程

為期使模擬計算能簡便的應用在操船命令頻繁的進出港操船上，本研究企圖建立一個在現有 PC 架構下，能夠方便使用者操作並能即時顯示港埠佈置、船體運動軌跡、運動狀態以便於使用者能即時修正測試船之航向與速度之模擬計算程式。

程式是以 Lahey Fortran 配合 Uniplot 繪圖函數庫發展，程式架構主要可分為三個階段：起始階段、計算階段與輸出階段。

起始階段：首先輸入船體、舵、螺槳及主機等基本特性參數，而後再由程式中之經驗式或資料庫估算模擬計算時所需的數據，如船體阻力、推進因子、螺槳單獨性能、主船體流體力係數及舵力係數等。(如果上述資料已有其他更確實的來源，亦可由程式選擇另外輸入)

計算階段：起始階段中輸入的初始條件，由前節所述之多變數牛頓法求解模擬計算所需之其餘初始條件而後即可進行操船模擬，由程式控制介面輸入所欲進行之操船參數如主機轉速、舵角、舵速等操控變數或迭代週期 Δt 等計算變數及是否考慮風、浪、流等條件變數(參考圖四)，於每個時刻依數學模式計算出作用於船舶的外力及流體力，而後再由 Newmark- β 時間積分法解聯立運動方程式，求得各個時刻船體的運動狀態，再轉換至地面固定座標系上，得到船體所在之位置與方位。

輸出階段：計算程式的結果輸出可由電腦螢幕即時顯示出港埠佈置、船體的運動軌跡、運動狀態、時間歷程及船體所在位置流場狀態供使用者參考便於即時修正各項操船參數(如圖四)，並將模擬計算之結果記錄於檔案中，以供稍後進行分析處理或列印。

程式流程如圖五所示。

第六章 計算實例

在本所現已發展之操縱性能模擬計算配合流體力係數之經驗式預估法，對於一般船舶在平靜開闊之深水域已可提供一可信度相當良好之模擬計算預估結果(參考文獻[1,2])。本研究乃延續現有之操縱性能模擬計算結合各環境外力之作用下進行各型船舶進出港操船之模擬計算，將可做為港灣規畫或進出港操船模式評估之工具；如模擬計算之結果能搭配實船測試數據之回饋，則一方面將可以驗證模擬計算之可信度，另一方面亦可以對模擬計算之相關流體力係數作適當之修正以改進模擬計算之精確度，如有足夠數量之實驗數據，亦可發展成資料庫供程式使用。

以下將對一艘全長 191m，排水量 55,500 噸之油輪進行各種情況下之進出港操船計算。

6-1 供試船

供試船為一全長 191m，排水量 55,500 噸之油輪，該船的主要尺寸及特性如附表一所示。

在進行模擬計算時，其螺槳 K_T 、 K_Q 曲線選用 Troost-B 系列螺槳資料估算，採用此特性曲線需特別注意其僅可用以計算正常狀況($u > 0$ ， $n > 0$)下的螺槳性能。線性流體阻尼力係數採用 Wagner 公式預估，附加質量採用 Matora's Chart 估算；以上各資料之預估均為本次模擬計算實例所選用，亦可在程式中選用其他經驗式估算或選用確知之實驗值輸入。

其他相關之流體力係數分別列於表二、三。

6-2 供試港埠

供試港埠為蘇澳港，其港埠佈置平面圖如圖六所示，為了讓使用者能簡便的輸入港灣佈置，如前述採用右手直角座標系，並定義港埠之最左下角為原點，選用港灣之明顯凹折點量取其座標建立成港灣佈置檔，以供程式繪製港灣佈置之用，其繪製之結果如圖七。

圖七並顯示了港內流場網格，在實際模擬計算上為了能清楚的顯示船隻的運動軌跡與方位可以隱藏此流場網格，但是由於流場網格之資料乃由另一子計畫而來，其對於流場網格之座標定義並不相同，所以必需經過座標轉換，為了檢查流場網格是否確實與港灣佈置圖吻合，故於程式執行之初顯示此流場網格仍是必要的。

由於目前得到的環境資料僅有流場部份，所以在進行風、浪之外力計算時是當作在模擬計算時間及區域內其風、浪場不變；風場定為整個模擬計算區內風場均一致，浪場定為港外浪場一致，港內則為無浪之狀態。

另外在本次的計算例中，由於港外流場資料仍在整理當中，故暫時僅採用港內流場之部分；即港外流場定義為無潮流狀態。

6-3 計算項目

以下所有計算項目中，迭代週期 Δt 均訂為 2 秒，操舵角速度均訂為 2.3(degree/second)。

(1)滿載狀況且無外力作用下進港

定義船舶的初始位置在港口之東南沿海，初始船速 5 節，一開始船舶朝正北方向前進中；所有操船命令列表如下：

時間歷程(Second)	舵角(Degree)	主機轉速(RPM)
0	-8.0	50.0
234	6.0	40.0
816	2.0	30.0
1158	-3.0	20.0

全部操船過程在 1590 秒時結束，操船過程之運動軌跡如圖八所示。

(2)滿載狀況及外力作用下進港

定義船舶的初始位置在港口之東南沿海，初始船速 5 節，一開始船舶朝正北方向前進中；風場為東北方向(45 度角)，風速 15m/s；港外波浪為東北方向(45 度角)，波高 1.5m，波長 76m，港內無波浪作用；流場僅限港內，港外無潮流作用；所有操船命令列表如下：

時間歷程(Second)	舵角(Degree)	主機轉速(RPM)
0	-10.0	80.0
230	-20.0	80.0
340	5.0	80.0
402	-10.0	80.0
506	-20.0	80.0
718	-5.0	30.0
868	-35.0	20.0

全部操船過程在 1208 秒時結束，其中在船舶在 718 秒時進入港口，程式開始設定為無浪狀態，操船過程之運動軌跡如圖九所示。

(3)滿載狀況且無外力作用下出港

定義船舶的初始位置在港池內側，初始船速 1 節，一開始船舶朝正東方向前進中；所有操船命令列表如下：

時間歷程(Second)	舵角(Degree)	主機轉速(RPM)
0	8.0	20.0
1230	-15.0	30.0
2026	20.0	40.0
2278	-10.0	45.0
2714	10.0	50.0

全部操船過程在 3288 秒時結束，操船過程之運動軌跡如圖十所示。

(4)滿載狀況及外力作用下出港

定義船舶的初始位置在港池內側，初始船速 1 節，一開始船舶朝正東方向前進中；風場為東北方向(45 度角)，風速 15m/s；港外波浪為東北方向，波高 1.5m，波長 76m，港內無波浪作用；流場僅限港內，港外無潮流作用；所有操船命令列表如下：

時間歷程(Second)	舵角(Degree)	主機轉速(RPM)
0	10.0	50.0
984	20.0	60.0
1280	-10.0	70.0
1544	30.0	80.0
1680	-10.0	80.0
1864	20.0	80.0
1998	-15.0	80.0
2188	10.0	80.0
2414	-10.0	80.0

全部操船過程在 2664 秒時結束，其中船舶在 1998 秒時離開港口，
程式開始計算波浪作用，操船過程之運動軌跡如圖十一所示。

6-4 計算結果之探討

在進行風力估算時，Isherwood 之經驗預估法提供了風力係數預估經驗式，供估算船體之特性參數 A_f 、 A_s 及 C ，其中 C 為水線以上側向投影面積中心至船艏的距離。以此經驗公式算出之供試船的參數如下：

$$A_f=693(\text{m}^2), A_s=1731(\text{m}^2), C=108.5(\text{m})$$

而實際供試船之參數如下：

$$A_f=409(\text{m}^2), A_s=1062(\text{m}^2), C=100(\text{m})$$

由上可知由經驗供試估算之船體參數較實際值大了許多，若以此估算結果帶入風力與力矩之計算，則計算所得之風力與力矩亦會較實際值大上許多，故建議在作風力與力矩之估算時最好能有 A_f 、 A_s 及 C 之實際資料，以免因模擬計算時估算之風力與力矩遠大於實際所受之風力與力矩而影響了計算結果之準確性。

第七章 結論與展望

本研究係根據日本 MMG 發展之數學模式，配合利用流體力係數之經驗預估法及相關資料之實用計算方式，延續本所現有之深水域操縱性能模擬計算系統，並結合港埠佈置及環境外力之影響，建立一套進出港操船模擬計算系統。

為確認本模擬計算系統之可用性，本研究針對一艘 55,500 噸之油輪在滿載狀況下分別進行考慮有、無外力作用時進出蘇澳港之操船模擬計算，顯示了合理的結果。由於文獻[1,2]之驗證，已知模擬計算在平靜深水中，若船速不低，偏流角不大，可以提供可信度良好之預估結果。唯外力作用下可供模擬計算結果作定量比較之文獻有所不足，故此點確實有待今後實際應用本研究以及實測數據之回饋與驗證。

此外，港灣操船由於港灣內之水深通常較淺，而船舶航行於淺水中時，由於流體邊界之效應，導致流體力係數之頻率相依性與運動之記憶效應均較深水域中顯著。故為了進一步提昇港內操船模擬計算之精確度，建立考慮淺水效應之淺水域操縱運動模擬系統應為今後之研究發展重點。

參考文獻

- [1]邱逢琛、曾國正“船舶操縱性能預估法之探討”，NTU-INA-Tech. Rept 275, 1988。
- [2]邱逢琛、曾國正“港內操船運動模擬計算系統”，中華民國第十屆海洋工程研討會論文集，1988。
- [3]Hirano, M., Takashina, J., Takashi, Y. and Saruta, T., “Ship Turning Trajectory in Regular Waves”, Trans. West-Japan Soc. Nav. Archit., No. 60, 1980.
- [4]Isherwood, R. M., “Wind Resistance of Merchant Ships”, Trans. RINA, Vol. 115, 1973.

附 錄

附錄 1. 程式介面簡介

程式介面分為兩部份：輸入介面與操船模擬介面；前者主要為輸入模擬計算程式所需之各項資料，後者則為迭代計算船體運動狀態與繪圖。

欲進行模擬計算，使用者必須給予模擬計算程式相關之資料輸入，模擬計算程式所需之資料可分為兩類：

固定不變之資料：如主要尺寸、主機、螺槳等主船體相關之特性參數以及港埠佈置、風、浪、流等環境資料；通常進行模擬計算乃針對某艘特定船舶、特定港口、特定環境之下反覆的進行進出港操船模擬，這些資料均具有不易變動之特性，故為了方便使用應將這些資料建立成檔；如此若有數個船舶與數個港口資料，則可以對某特定船舶進行不同港口或對某特定港口進行不同船型之船舶進出港操船模擬。

選擇性的參數：針對不同之船型之差異，程式提供了數種預估流體力係數之經驗公式供使用者選擇，為求達到較高之精確度仍需配合主船體與模擬計算時的環境選擇適當的流體力係數經驗公式進行計算。為了能方便使用者操作，程式採用兩種輸入模式：交談模式(Interactive)與檔案模式(Metafile)；前者為使用者依程式之提示逐步輸入各項參數，程式亦提供記錄各項參數的功能，可以此建立一參數檔供檔案模式使用，當參數檔建立完成，以後進行重複性的計算模擬即可採用此參數檔輸入，直接快速進入操船模擬介面，不必再經過繁複的輸入。

附錄 2. 各資料檔之建立

模擬計算程式所需之資料依種類不同可分為船體、港埠、環境、初始狀態等四種，除了港埠與環境資料檔為相依之外，其餘各資料檔均為獨立分開可交互使用。

以下將說明模擬計算程式所需之各資料檔的建立方法，所有檔案均以文字方式儲存，使用者可依下面所述自行以編輯器編輯所需之資料。

2-1. 船體資料檔

記錄船體之主要尺寸、主機、螺槳等特性參數資料，檔案內容如下：

Line	範例	說明	
1	Ship Name	船名	為文字可隨意輸入，僅為方便使用者查詢之用，與模擬計算之結果無關。
2	Tanker	船型	為文字，同上。
3	191	L_{OA}	為數字，各項係數間以空格隔開。 h_B 為球艏橫斷面積中心與基線的距離。 A_{BT} 為球艏橫斷面積。
	181	L_{PP}	
	29.5	B	
	0.831	C_B	
	0.8306	C_P	
	12.13	T_A	
	12.13	T_F	
	0.9984	$C_M,$	
	0.86	$C_{VP},$	
	0.0296	LCB/L_{PP} (舢前為正)	
	0.0317	LCG/L_{PP} (舢前為正)	

	2.56 18.6 12.7	h_B A_{BT} V_{CG}	
4	4651 0.85 15.76	主甲板上船樓及甲板室之側向投影面積。 上甲板面積係數。 模船深	各項係數間以空格隔開。
5	Steam Turbine	主機形式	分為兩種：Diesel 與 Steam Turbine
6	2261.5	初始馬力 (Steam Turbine)	特別注意，若主機為 Diesel 則此行為 Q_E 之最大值
7	1 5 .782 5.07 3.623 -89.37	螺槳數目 螺葉數目 A_e/A_0 (螺葉展開面積比) 直徑 螺距 螺葉所在之 X 座標值	各項係數間以空格隔開。
8	1 37.15 1.539 7.712 -92.16	舵數目 舵面積 舵之幾何展弦比 舵高 舵所在之 X 座標值	各項係數間以空格隔開。
9	0.0756	m_x/m	可以自行由 Motora Chart 查表而得
10	0.944	m_y/m	可以自行由 Motora Chart 查表而得

11	0.624	J_{zz}/I_{zz}	可以自行由 Motora Chart 查表而得
12	0 0 0	水線上船體正向投影面積 水線上船體側向投影面積 水線上船體側向投影面積 中心與船艏的距離	輸入確實之數據，否則請輸入 0，程式將會使用 Isherwood 所附之經驗數值計算。 各係數為獨立分開。各項係數間以空格隔開。
13	800 1800 107	水線下船體正向投影面積 水線下船體側向投影面積 水線下船體側向投影面積 中心與船艏之距離	請輸入確實之數據。注意！如果無確實之數據將無法進行潮流力之計算。 各項係數間以空格隔開。
14	0.1643	$\frac{K'_{xx}}{B}$	
15	2.45	GM	定傾高
16	-.00034	CGZ1	視 GZ 與 ϕ 之曲線為二次曲線。 CGZ1 為二次曲線之二次方項係數。
17	0.0834	CGZ2	同上。 CGZ2 為二次曲線之一次方項係數。
18	6.125	水線以下流體橫移力作用點與水面之距離。	
19	5.44	舵壓中心與重心的距離。	重心下方為正。
20	232563	$I_{propeller}$	
21	18270	J_{pp}	

2-2. 港埠資料檔

欲建立港埠資料檔，使用者需有港埠之佈置圖，定義此圖之最左下角為原點，量取圖形上明顯之曲折點座標值，然後即可建立成檔，其內容如下：

Line	範例	說明
1	111.688	港埠佈置圖之比例尺。
2	35.2 26.2	港埠佈置圖之 X 方向長度與 Y 方向長度，單位為公分。以空格隔開。
3	55	由圖上所量取之曲折點的數目。
4	25.0 0	曲折點之 X，Y 座標值。以空格隔開。
⋮	⋮	同上。
58	24.6 26.2	同上。

2-3. 環境資料檔

環境資料包含風、浪、流之資料，如前述以網格分佈，目前所得之環境資料均為本計畫之另一子計畫所發展得到。在使用這部份資料需特別注意其網格之座標定義是否與程式定義之港埠佈置相同。如果不同使用者仍需自行轉換座標。

2-4. 初始資料檔

此檔主要為定義船體計算模擬時之初始狀態如：初速、初始角速度、初始加速度、初始位置等，內容如下：

Line	說明
1	船體座標系 X 方向之初始速度(m/s)。
2	船體座標系 X 方向之初始加速度(m/s ²)。
3	船體座標系 Y 方向之初始速度(m/s)。
4	船體座標系 Y 方向之初始加速度(m/s)。
5	船體初始之 Heading angle(Degree)。
6	船體初始之平擺角速度(Degree/s)。
7	船體初始之 Rolling angle(Degree)。
8	船體初始之 Rolling 角速度(Degree/s)。
9	船體重心初始所在位置之 X 座標值。
10	船體重心初始所在位置之 Y 座標值。

附錄 3. 程式操作簡介

3-1. 輸入介面

程式執行首先進入的是輸入介面，設定好程式所需之各資料檔之後便可開始進行各流體力之估算，以下將簡介當以交談式輸入時須注意之事項。

螢幕訊息 : With engine feed back control or not ?

說明 : 當主機為 steam turbine 時，一般而言在主機轉速不低於某極限小值時，裝設 steam turbine 的船舶均可利用 feed back control 保持一定轉速，故 $\dot{n}=0$ ，即在做數值積分解運動方程式時，可以不考慮螺槳轉動方程式。

螢幕訊息 : Consider rolling effect or not ?

說明 : 程式雖可考慮橫搖運動之耦合效應，但因與橫搖相關之流體力係數難以獲得，故橫搖運動之模擬尚難以完善進行，目前系統所預估之橫搖相關流體力係數是以某貨櫃輪之試驗值，不可不分船型而誤用。未來應針對特定船型而輸入其相關流體力係數或蒐集經驗公式。針對大型油輪之操船運動，可不考慮其橫搖運動，並不影響其計算結果之準確性。

螢幕訊息 : Which set of curve for propeller ?

說明 : 系統提供了三組螺槳模型試驗回歸資料，可作為螺槳力推算之用。分列如下：

MAU-series , K_T - K_Q curve

Troost-B series , K_T - K_Q curve

Truust-B series , C_T - C_Q curve

其中 C_T - C_Q 曲線之產生乃由 14 個模型試驗結果內插求得，此外 K_T - K_Q 曲線若有實船螺槳之確切資料，則亦可將其視為二次曲

線，輸入如下之係數：

$$K_T = CKT3 + CKT2 \times J + CKT1 \times J^2$$

$$K_Q = CKQ3 + CKQ2 \times J + CKQ1 \times J^2$$

螢幕訊息 : Order of resistance curve ? (2 or 3)

說明 : 若有阻力曲線之資料，則先回歸求得二次或三次多項式之各次方項之係數，而後輸入各項係數，其方程式如下：

$$(\text{二次}) \text{ RTS} = CR1 \times V_s^2 + CR2 \times V_s + CR3$$

$$(\text{三次}) \text{ RTS} = CR1 \times V_s^3 + CR2 \times V_s^2 + CR3 \times V_s + CR4$$

如果沒有確實之資料，則由 NSMB 統計方法估算之。因 wake 隨著船速而變動，故估算結果輸出之後，使用者可由螢幕之輸出值判斷輸入在其他個船速下之平均值(AEWF)，而推進因子大致不隨船速而變，故直接採用 NSMB 之統計結果即可。

螢幕訊息 : WR0 in deep water = ?

說明 : 舵面上，當船舶直進時之有效跡流，因船型而異。

螢幕訊息 : Rudder resistance deduction factor = ?

說明 : 一般而言，此值介於 0.2~0.3 之間，因船型而異。

在輸入介面中遇到多個數值需同時輸入時，請在各數值間以空格隔開。以下將概略介紹初始條件之計算。

欲進行運動模擬必須先給定或計算一組完整之初始條件。因共有五個聯立運動方程式，故可求得五個解；但卻有十二個未知數，所以必須給定七個初始條件，然後在程式中再計算其餘五個初始條件，此五個初始條件如下：

$$n_0, \dot{n}_0, \ddot{\phi}_0, \delta_0, \ddot{\phi}$$

就一般操船運動而言，其初始狀態多為直進，即 $u \neq 0$ 。此時程式所要計算的主要為 n_0 (propeller RPM) 與 δ_0 (residual rudder angle)。計算此五個初始條件時必須先給定起始猜值，若起始猜值給的太離譜，則會有不合理之解。因此程式將會以迴圈的方式不斷詢問使用者是否繼續求解，若已求得之解為合理，即可停止計算。

螢幕訊息 : Initial guess value for delta0 and RPM1 = ?

說明 : n_0 、 δ_0 之起始猜值，正值代表右舵，負值代表左舵。

螢幕訊息 : Input C1 value (1.065 for left rudder, 0.935 for right rudder)

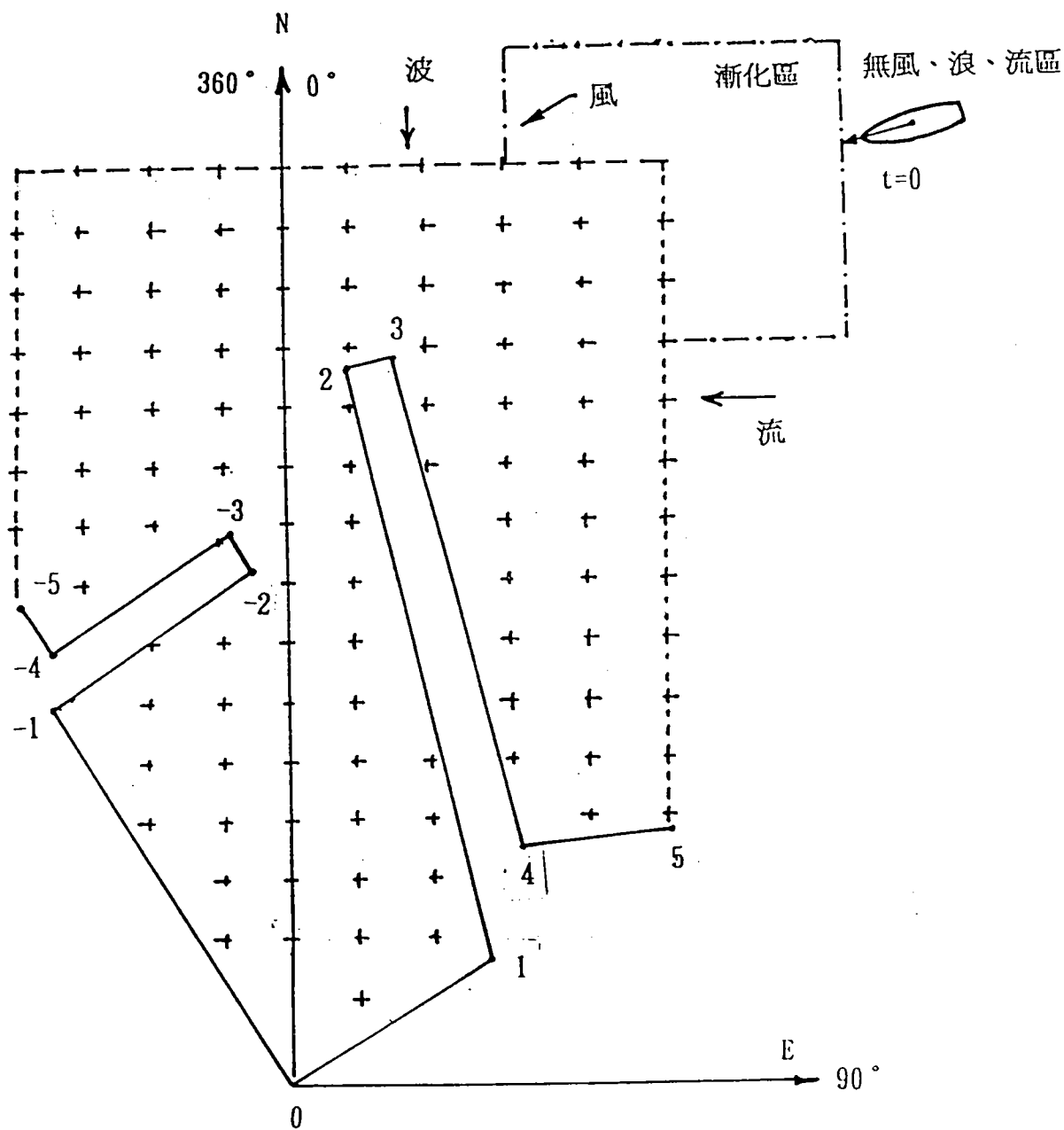
說明 : C1 為與單螺槳左右旋不對稱性有關之係數，若所求得之 δ_0 為右舵(正值)，且 C1 為 0.935，則所求得之初始條件為合理，同理若 δ_0 為左舵(負值)，且 C1 為 1.065，則所求得之解亦為合理。否則應重新給定起始猜值，再行計算。

3-2. 操船模擬介面

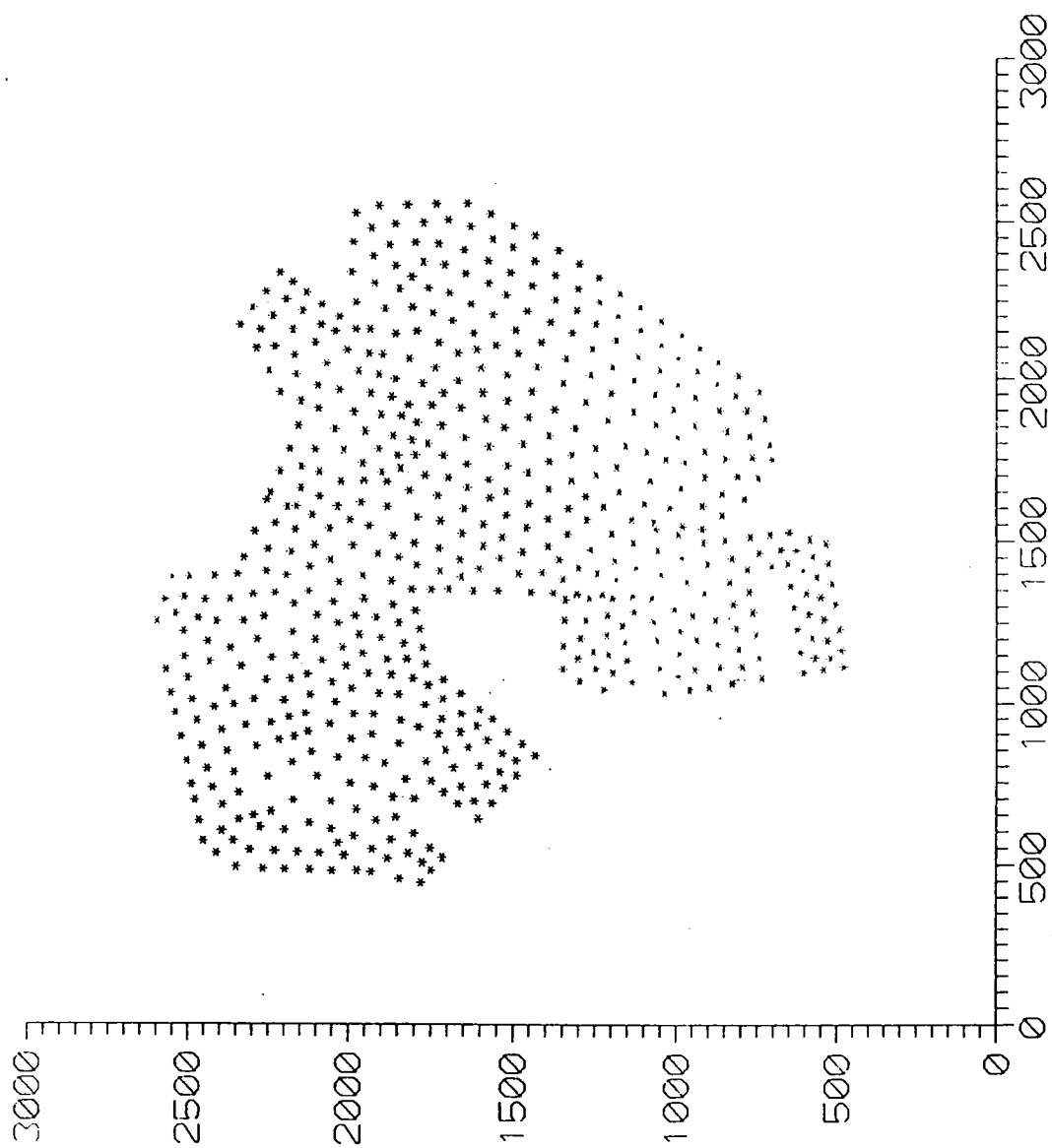
在操船模擬介面中，使用者可隨時改變船舶之操縱狀態與環境狀態。使用者可控制之變因如下：

選項	說明
Time interval	即 Newmark- β 時間積分法之迭代週期，內定值為 2 秒。
Rudder rate	操舵角速度，內定值為 2.3 Degree/Second。
Rudder angle	舵角，正值代表右舵，負值為左舵。
Propeller RPM	螺槳轉速。

Time to change RPM	由現在之轉速達到預定轉速所需之時間。
Convergence criteria	Newmark- β 時間積分法之收斂值，內訂為 10^{-7} 。
Wind effect	是否考慮風力作用。
Wave effect	是否考慮波浪力作用。
Current effect	是否考慮潮流力作用。
Shallow water	是否為 shallow water。此部份不在本計畫之範圍內，如前述相對應之淺水域效應仍未發展完成，故目前仍無法使用，僅列出選項待以後對於淺水域之操船模式發展完成後，即可合併使用。



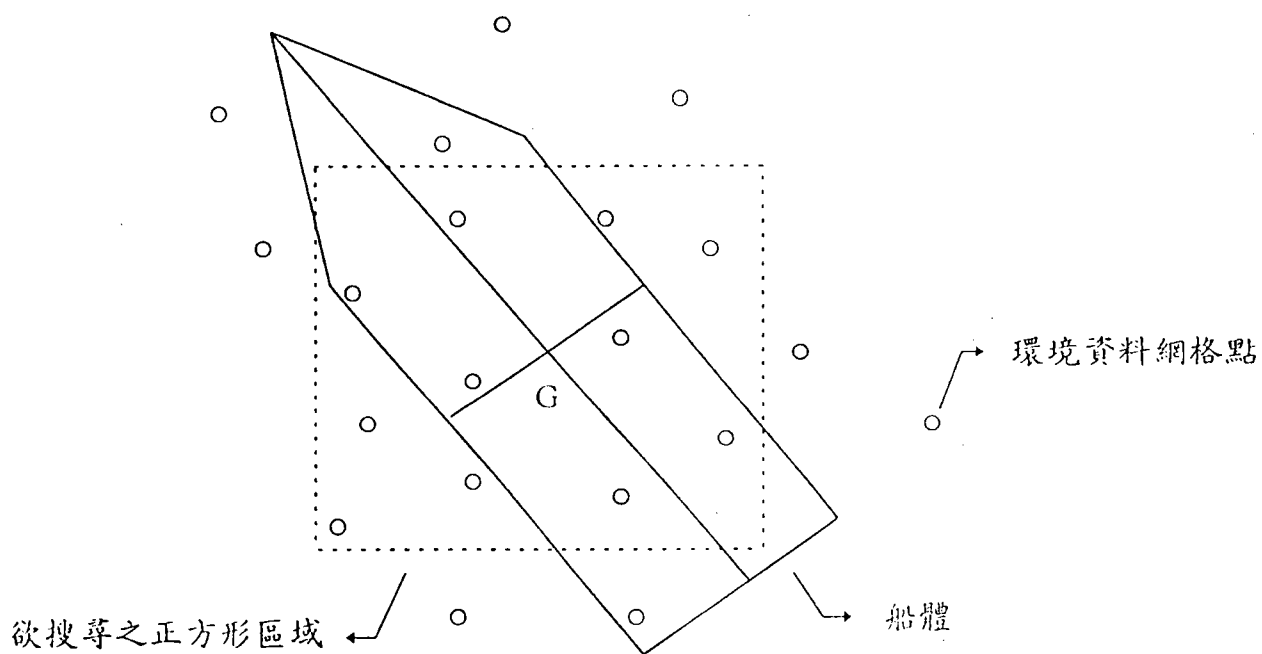
圖一 港埠佈置座標系及環境資料輸入



圖二 環境資料網格配置圖

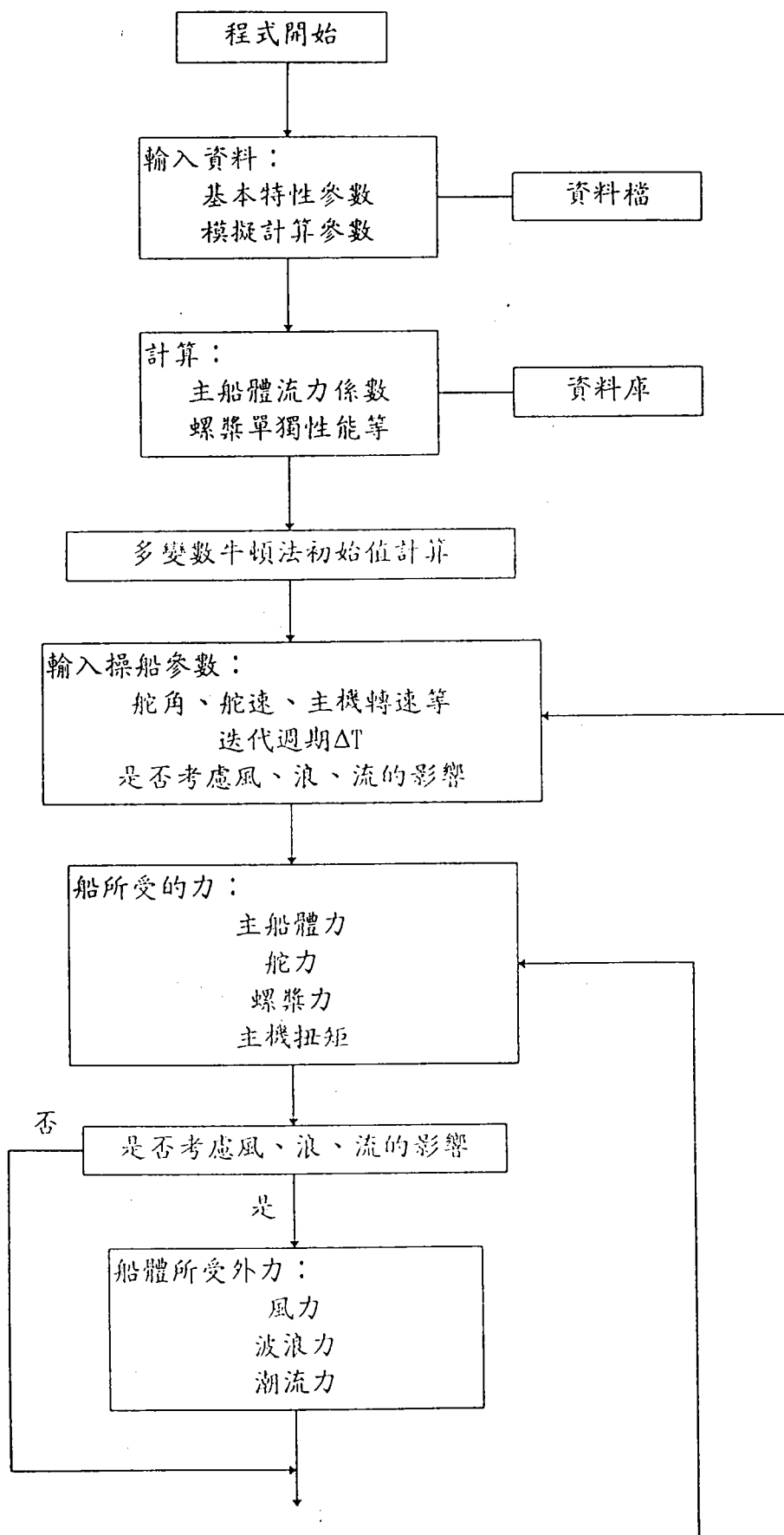
圖三、環境資料擷取示意圖

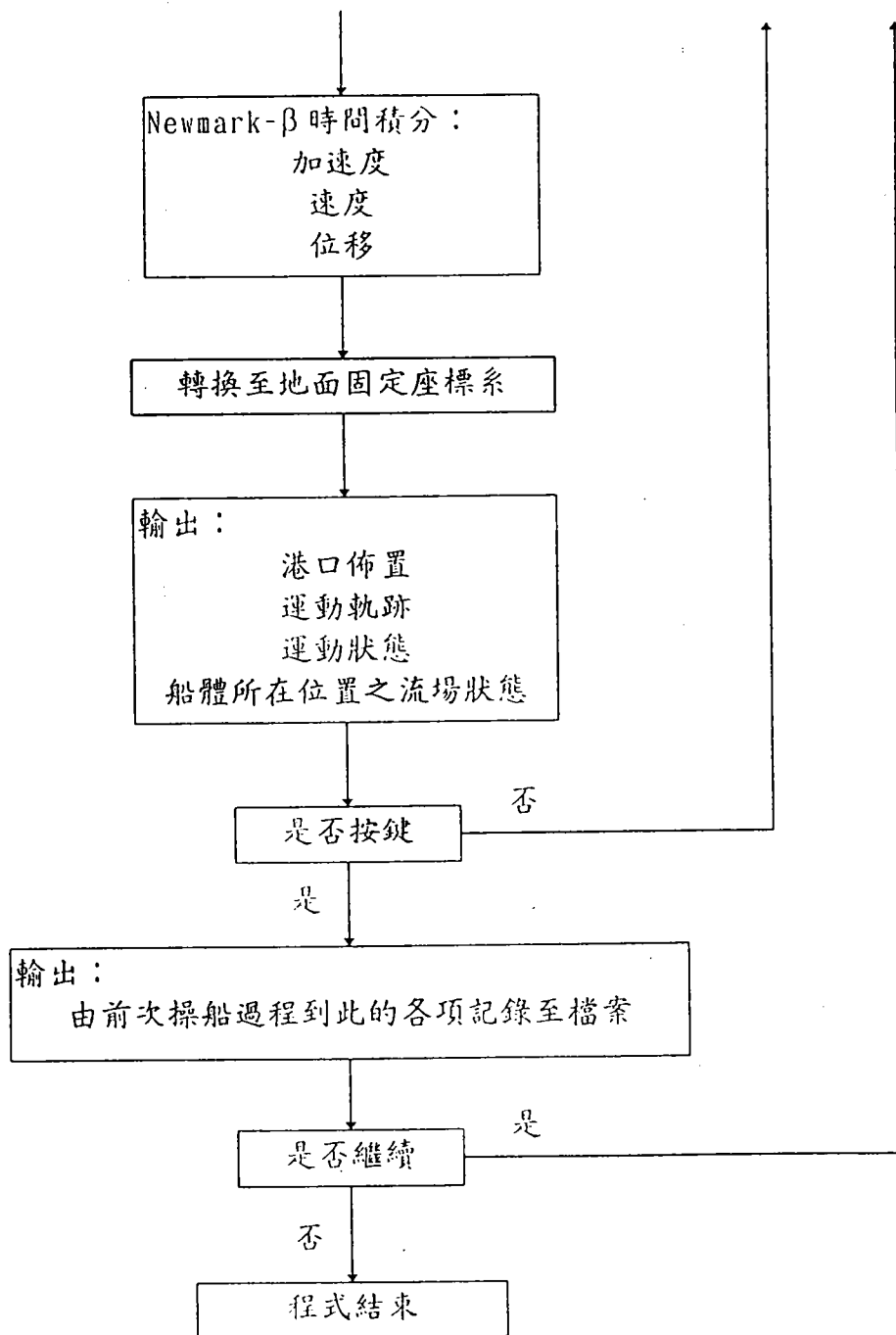
圖中 G 表船體重心，虛線為所欲搜尋之正方形區域，各小圓點則代表環境資料網格點。



起始階段

計算階段





圖五 程式流程圖

fum2.for : 計算船體各(NOS)斷面, 各(NZL)吃水, 在各橫搖角(J=1,30 直到甲板沒水即自動中止)狀態下之附加質量矩陣及減衰係數矩陣。亦即對船艏斷面吃水種類數設限, 避免在斷面露出水面之狀態下仍作計算。

f3.for : 計算各斷面在各吃水、各橫搖角狀態下附加質量對吃水之斜率(dy.out)以及對橫搖角之斜率(dx.out)。

moor3.for: 繫纜船舶 5D 運動及繫纜力計算(一波向、一波頻、一波高、最多 12 條繫纜之狀態下)

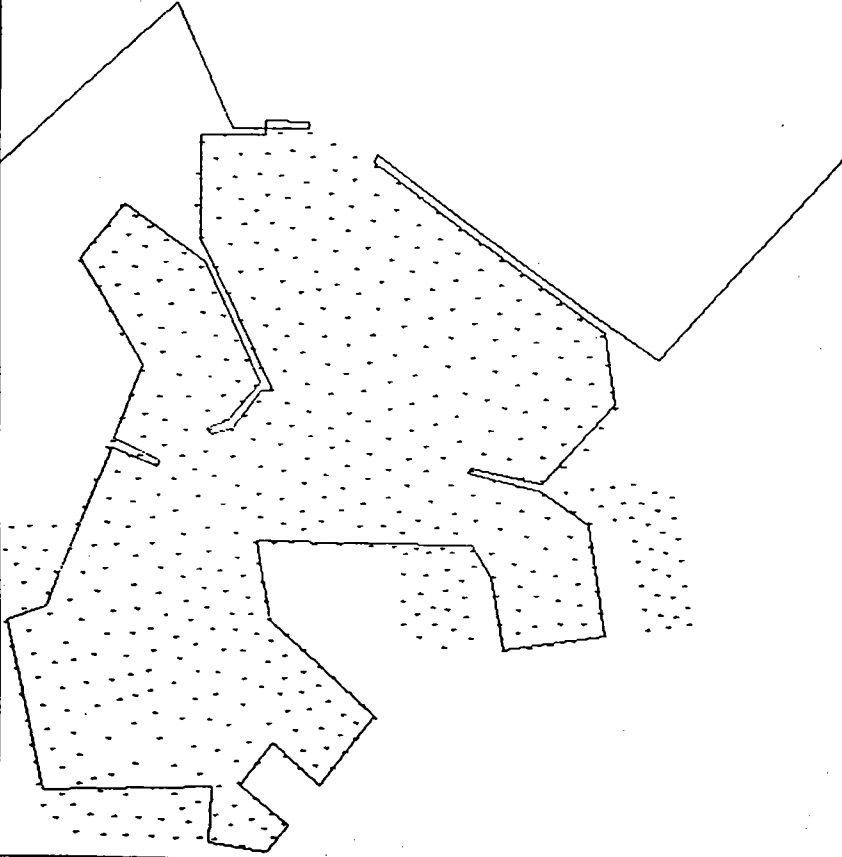
執行步驟: (1)fum2 (2)rename frankusy.out ?? .dat 指定為 f3 之輸入檔 (3)f2 (4)rename dy.out dy.dat (5)rename dx.out dx.dat (6)moor3

輸入檔: 1) *frankusy.dat* (offsets 及波況) 2) *m.dat* (offsets、波況、繫纜資料及計算條件) 4) *dphi.dat* (吃水、橫搖角狀態表; 二者皆可由 fum2.for 之計算結果得知, 而前者可加入適當之強制)

最終輸出檔: (1)m.out : 靜水計算結果。

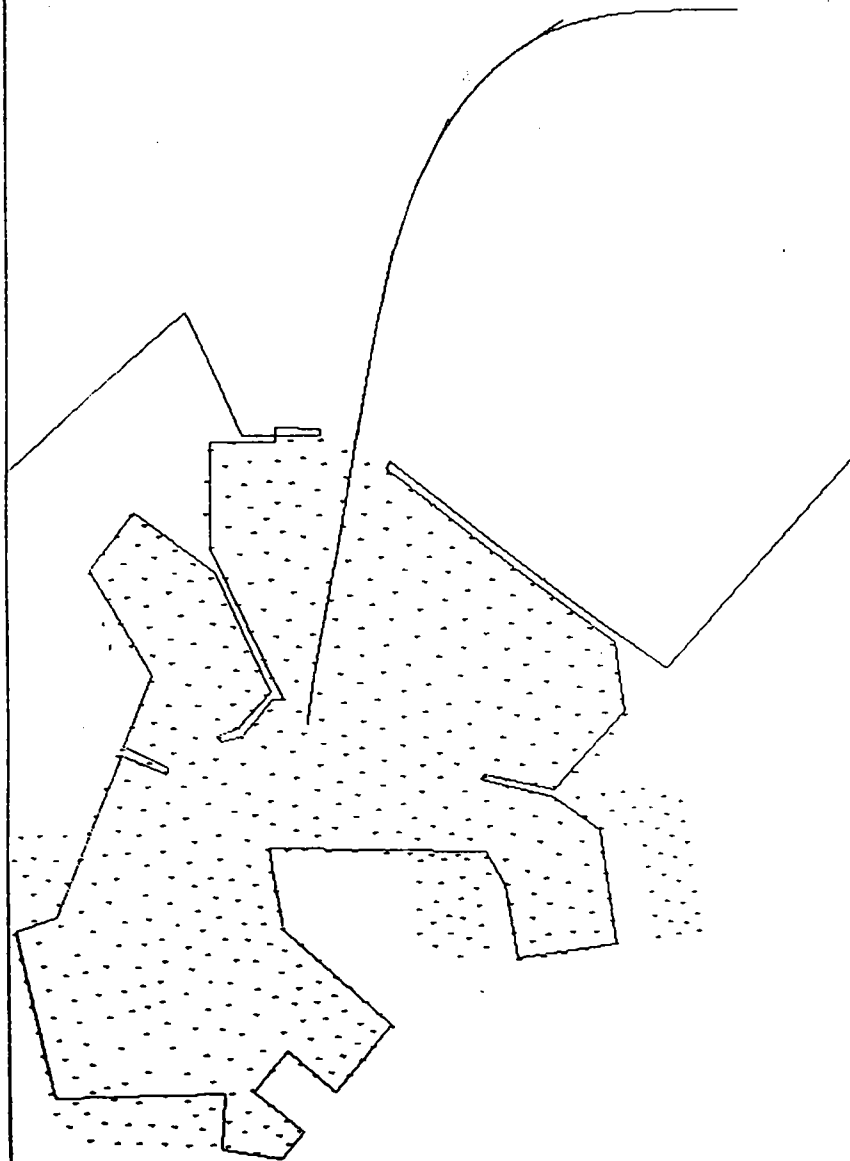
(2)m2.out ~m6.out : 依序為 sway、heave、roll、pitch、yaw 等運動之無因次時間歷程(位移以波振幅, 角位移以波斜率振幅作無因次化)。

(3)mf.out : 各列依序為各纜之繫纜力(單位 kgf)時間歷程。

	Ship Condition Velocity X-way: kts Velocity Y-way: kts Rudder angle: Deg Rudder rate: Deg/S Propeller RPM: C/Min Heading Angle: Deg X position: M Y position: M	
	Wave Condition Wave effect: Deg Direction: M Height: M Length: M	
	Wind Condition Wind effect: Deg Direction: M/S Speed: M/S	
	Current Condition Current effect: Deg Direction: CM/S Speed: CM/S	
	Shallow water Shallow water: Deg Water Depth: Deg	
	Time Report Time Interval: Sec Total Time: Sec	
	0.1000E-06 Disable Disable Disable Disable	
	Time Interval (Second) : 2.000 Rudder Rate (Deg/Sec) : 0.000 Rudder Angle (Degree) : 0.000 Propeller RPM (Cyc/Min) : 53.018 Time to Change RPM (Sec) : 1.000	
	Convergence Criteria : Hind Effect : Wave Effect : Current Effect : Shallow Water :	
	««««« Press here when everything is OK! »»»»»	

圖七 港灣佈置及流場網格

UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

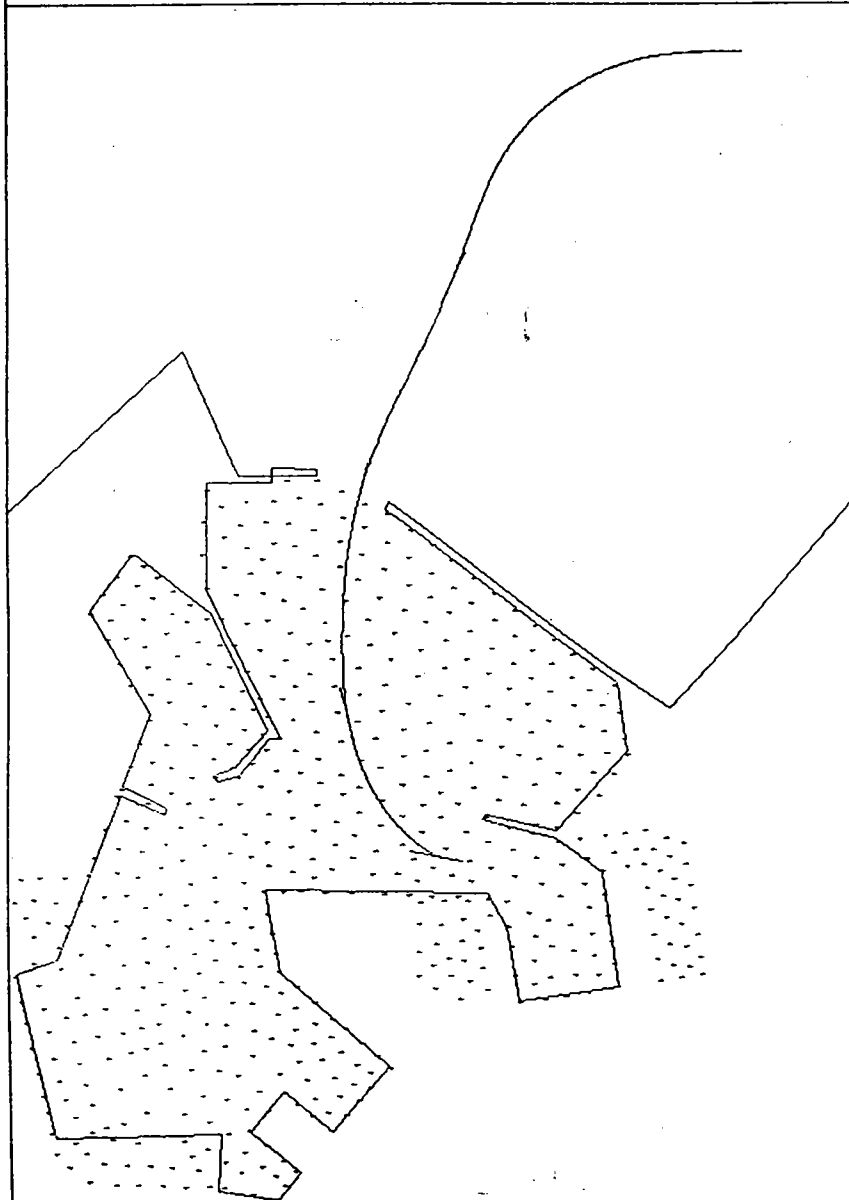


««««« Press here when everything is OK! »»»»»
 Time Interval (Second) : 2.000 Convergence Criteria : 0.1000E-06
 Rudder Rate (Deg/Sec) : 2.300 Wind Effect : Disable
 Rudder Angle (Degree) : -3.000 Wave Effect : Disable
 Propeller RPM (Cyc/Min) : 20.000 Current Effect : Disable
 Time to Change RPM (Sec) : 1.000 Shallow Water :
 Do you want to continue simulation : [Yes] or [No]

— Ship Condition —	
Velocity X-way:	2.8158 kts
Velocity Y-way:	-0.0933 kts
Rudder angle :	-3.000 Deg
Rudder rate :	2.300 Deg/S
Propeller RPM :	20.000 C/Min
Heading Angle :	275.192 Deg
X position :	1453.392 M
Y position :	1900.192 M
— Wave Condition —	
Wave effect :	
Direction :	0.000 Deg
Height :	0.000 M
Length :	0.000 M
— Wind Condition —	
Wind effect :	
Direction :	0.000 Deg
Speed :	0.000 M/S
— Current Condition —	
Current effect :	
Direction :	0.00 Deg
Speed :	0.00000 CM/S
— Shallow water —	
Shallow water :	
Water Depth :	
— Time Report —	
Time Interval :	2.0 Sec
Total Time :	1590.0 Sec

UNI-Plot Sys. 1996, 05.00

圖八 供試船於滿載狀況且無外力作用下進港之軌跡圖



««««« Press here when everything is OK! »»»»»

Time Interval	(Second)	2.000	Convergence Criteria	0.1000E-06
Rudder Rate	(Deg/Sec)	2.300	Wind Effect	Enable
Rudder Angle	(Degree)	-35.000	Wave Effect	Disable
Propeller RPM	(Cyc/Min)	20.000	Current Effect	Enable
Time to Change RPM	(Sec)	1.000	Shallow Water	Disable

Do you want to continue simulation : [Yes] or [No]

— Ship Condition —
 Velocity X-way: 3.5387 kts
 Velocity Y-way: -0.9110 kts
 Rudder angle : -35.000 Deg
 Rudder rate : 2.300 Deg/S
 Propeller RPM : 20.000 C/Min
 Heading Angle : 188.176 Deg

X position : 1147.768 M
 Y position : 1443.471 M

— Wave Condition —
 Wave effect :
 Direction : 0.000 Deg
 Height : 0.000 M
 Length : 0.000 M

— Wind Condition —
 Wind effect :
 Direction : 45.000 Deg
 Speed : 15.000 M/S

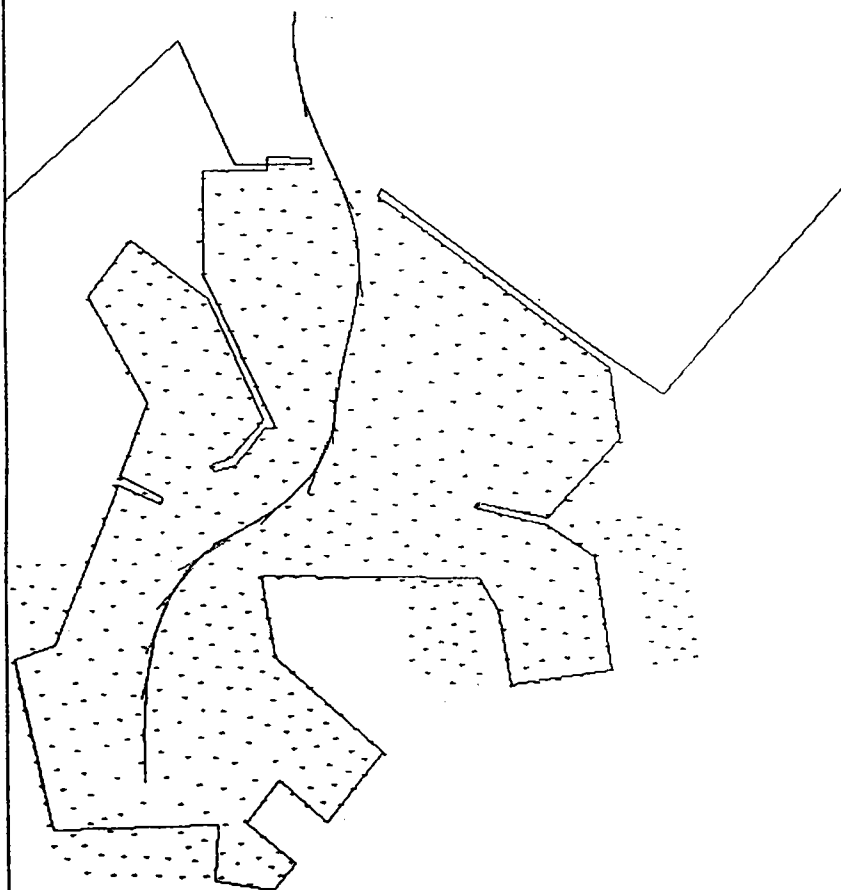
— Current Condition —
 Current effect :
 Direction : 64.87 Deg
 Speed : 0.00497 CM/S

— Shallow water —
 Shallow water :
 Water Depth :

— Time Report —
 Time Interval : 2.0 Sec
 Total Time : 1208.0 Sec

UNI-Plot Sys. 1996, U5.00

圖九 供試船於滿載狀況及外力作用下進港之軌跡圖



««««« Press here when everything is OK! »»»»»
 Time Interval (Second) : 2.000 Convergence Criteria : 0.1000E-06
 Rudder Rate (Deg/Sec) : 2.300 Wind Effect : Disable
 Rudder Angle (Degree) : 10.000 Wave Effect : Disable
 Propeller RPM (Cyc/Min) : 50.000 Current Effect : Disable
 Time to Change RPM (Sec) : 1.000 Shallow Water : Disable
 Do you want to continue simulation : [Yes] or [No]

— Ship Condition —
 Velocity X-way: 2.8465 kts
 Velocity Y-way: 0.4805 kts
 Rudder angle : 10.000 Deg
 Rudder rate : 2.300 Deg/S
 Propeller RPM : 50.000 C/Min
 Heading Angle : 107.923 Deg

X position : 2892.816 M
 Y position : 1908.396 M

— Wave Condition —
 Wave effect : —
 Direction : 0.000 Deg
 Height : 0.000 M
 Length : 0.000 M

— Wind Condition —
 Wind effect : —
 Direction : 0.000 Deg
 Speed : 0.000 M/S

— Current Condition —
 Current effect : —
 Direction : 0.00 Deg
 Speed : 0.00000 CM/S

— Shallow water —
 Shallow water : —
 Water Depth : —

— Time Report —
 Time Interval : 2.0 Sec
 Total Time : 3288.0 Sec

UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖十 供試船於滿載狀況且無外力作用下出港之軌跡圖

	Ship Condition	
	Velocity X-way:	2.8686 kts
	Velocity Y-way:	-0.4077 kts
	Rudder angle :	-10.000 Deg
	Rudder rate :	2.300 Deg/S
	Propeller RPM :	80.000 C/Min
	Heading Angle :	11.709 Deg
	X position :	3191.632 M
	Y position :	2104.095 M
	Wave Condition	
Wave effect :		
Direction :	45.000 Deg	
Height :	1.500 M	
Length :	76.000 M	
Wind Condition		
Wind effect :		
Direction :	45.000 Deg	
Speed :	15.000 M/S	
Current Condition		
Current effect :		
Direction :	0.00 Deg	
Speed :	0.00000 CM/S	
Shallow water		
Shallow water :		
Water Depth :		
Time Report		
Time Interval :	2.0 Sec	
Total Time :	2664.0 Sec	

UNI-Plot Sys. 1996, V5.00

圖十一 供試船於滿載狀況及外力作用下出港之軌跡圖

Time Interval (Second) : 2.000 Convergence Criteria : 0.1000E-06
 Rudder Rate (Deg/Sec) : 2.300 Wind Effect : Enable
 Rudder Angle (Degree) : -10.000 Wave Effect : Enable
 Propeller RPM (Cyc/Min) : 80.000 Current Effect : Disable
 Time to Change RPM (Sec) : 1.000 Shallow Water : Disable
 Do you want to continue simulation : [Yes] or [No]

Table 1 供試油輪之基本尺寸與特性

<u>Hull</u>	
Length overall	191.00m
Length between perpendiculars	181.00m
Breadth molded	29.50m
Depth, molded	15.76m
Draft, extreme	12.13m
Block coefficient	0.8310
Prismatic coefficient	0.8306
Midship coefficient	0.9984
Waterplane coefficient	0.8600

<u>Rudder</u>	
Number of rudders	1
Rudder area	37.15m ²
Rudder height	7.71m
Aspect ratio	1.539

<u>Propeller</u>	
Number of propellers	1
Number of blades	5
Expanded area ratio	0.682
Diameter	5.07m
Pitch	3.62m

<u>Engine</u>	
Type	Steam turbine

Table 2 Linear damping obtained by different methods

	Y_{β}	Y_{γ}	Y_{β}	Y_{γ}
Wagner	0.022434	0.004515	0.008748	-0.002963
Norbbin	0.024571	0.005652	0.008667	-0.004998
Inoue	0.026817	0.007055	0.008982	-0.003647
Clarke	0.025516	0.004741	0.009324	-0.003578

Added mass and moment of inertia obtained by empirical formula

	Clarke(船舯)	Motora(重心)	Mikelis(船舯)
$\frac{m_y}{m}$	0.923275	0.944000	0.966292
$\frac{J_{zz}}{I_{zz}}$	0.794723	0.624000	0.816388

Table 3 Relevant datas obtained by empirical formula, used in simulation

a_H	.3720	I_{xx}	$3.239 \times 10^{10}(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
w_{R0}	.25	J_{xx}	$7.479 \times 10^9(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
t_R	.25	I_{prop}	$72375(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
$w_{p0}(\text{mean})$	.467	J_{pp}	$20556(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
t_p	.2288	I_{ps}	$121732227(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$

第八子計劃

第二部份

繫纜船舶運動計算系統之研究

計劃主持人：國立台灣大學

造船及海洋工程研究所

教授 邱逢琛博士

共同主持人：國立台灣大學

造船及海洋工程研究所

副教授 蔣德普博士

港研所海岸工程組

副研員 洪憲忠博士

中文摘要

本研究依循邱、廖所發展之斜波中船體運動非線性截片理論計算法，並予以擴充，考慮大波高波浪中繫纜船體水下形狀之時間變化所造成的橫向與縱向運動之耦合效應，以及包含依動量理論處理的橫傾衝擊力(flare impact)在內的非線性效應，而船速效應則予以去除，至於繫纜復原力則為簡便計，且考慮不規則波中線性疊加之應用而採用線性彈性常數。

在此理論架構下，本研究對於繫纜船舶，建立了可輸入繫纜位置、方向、彈性常數，而計算其船體運動與繫纜力時序列之程式，提供港灣技術研究所於算得反應函數，並給定港池內之波浪分布時，即可進行繫纜船舶運動與繫纜力統計分析之用，而有助於考慮繫纜船舶運動之港埠規畫之進行。

目錄

中文摘要	I
目錄	II
圖目錄	V
符號說明	VII
一、前言	1
二、理論計算式	2
2-1 座標系	3
2-2 座標系間之轉換	4
2-2-1 Euler's angle 與轉換矩陣	4
2-2-2 空間固定座標系與隨航垂直座標系之間的轉換	
關係式	5
2-2-3 隨航垂直座標系與船體固定座標系之間的轉換	
關係式	5
2-2-4 空間固定座標系與船體固定座標系之間的轉換	
關係式	6
2-2-5 剛體六自由度運動速度之轉換	7
2-2-6 船體任意點之平移速度	9
2-3 入射波	10
2-3-1 波面位移	10
2-3-2 波之軌道速度	11
2-3-3 波之水壓	12

2-4 斷面附加質量矩陣之轉換-----	13
2-4-1 F_{V_o} 與 F_{V_s} 之間的轉換關係式-----	13
2-4-2 F_{V_o} 與 F_B 之間的轉換關係式-----	16
2-4-3 F_{V_s} 與 F_B 之間的轉換關係式-----	17
2-4-4 斷面興波減衰係數矩陣之轉換-----	17
2-5 船體斷面作用力成份-----	17
2-5-1 船體斷面相對速度成份-----	17
2-5-2 由 Kirchhoff's equation 推導二維斷面內 運動量變化引起之作用力-----	18
2-5-3 二維斷面之興波減衰力-----	21
2-5-4 二維斷面之復原力與 Froude-Krylov Force f_s -----	22
2-5-5 二維斷面之 diffraction force 之中有關運動 量變化引起之作用力 18-----	22
2-5-6 二維斷面之 diffraction force 之中有關興波 減衰之作用力-----	23
2-6 繫纜復原力-----	23
2-6-1 座標系及繫纜條件輸入-----	23
2-6-2 繫纜復原力係數矩陣之推導-----	24
2-7 運動方程式-----	26
三、計算例-----	33
3-1 供試船-----	33
3-2 繫纜狀態-----	33
3-3 波浪狀態-----	34

3-4 計算結果	34
四、計算程式系統架構說明	35
五、結論	37
六、參考文獻	38

圖目錄

圖一	Coordinate System -----	40
圖二	繫纜座標系 -----	41
圖三	繫纜佈置 -----	42
圖四(1)	sway($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	43
圖四(2)	heave($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	43
圖四(3)	roll($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	43
圖四(4)	pitch($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	44
圖四(5)	yaw($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	44
圖四(6)	No.1 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	44
圖四(7)	No.2 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	45
圖四(8)	No.3 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	45
圖四(9)	No.4 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	45
圖四(10)	No.5 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	46
圖四(11)	No.6 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	46
圖四(12)	No.7 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	46
圖四(13)	No.8 mooring force($c=135\text{deg}$, $l/Loa=1.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	47
圖五(1)	sway($c=135\text{deg}$, $l/Loa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	48
圖五(2)	heave($c=135\text{deg}$, $l/Loa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	48
圖五(3)	roll($c=135\text{deg}$, $l/Loa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	48
圖五(4)	pitch($c=135\text{deg}$, $l/Loa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	49
圖五(5)	yaw($c=135\text{deg}$, $l/Loa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$) -----	49

圖五(6)No.1 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	49
圖五(7)No.2 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	50
圖五(8)No.3 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	50
圖五(9)No.4 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	50
圖五(10)No.5 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	51
圖五(11)No.6 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	51
圖五(12)No.7 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	51
圖五(13)No.8 mooring force($c=135\text{deg}$, $1/L_oa=5.0$, $z_a=1.0\text{m}$)-----	52

符號說明

d	靜水中靜止時船體任意點之沒水深度
D_j	波浪繞射力向量
F_j	靜水中之靜壓力向量
g	重力加速度
K_{jk}	繫纜復原力矩陣
L_{BV}	F_V 系與 F_B 系間之轉換矩陣
$m^{o'}$	$o'-x'y'z'$ 座標系描述之附加質量矩陣
m^o	$o-x'y'z'$ 座標系描述之附加質量矩陣
m	$o-xyz$ 座標系描述之附加質量矩陣
N_{jk}	興波減衰係數矩陣
$O-XYZ$, F_o	空間固定座標系
$o'-x'y'z'$, F_v	隨航垂直座標系
$o-xyz$, F_B	船體固定座標系
p	F_B 描述之 x 方向角速度
P	波壓
q	F_B 描述之 y 方向角速度
r	F_B 系描述之 z 方向角速度
R_j	波浪中之靜壓力向量
u	F_B 系描述之 x 方向速度
U	船速

v	F_B 系描述之 y 方向速度
V_X	入射波之軌道速度在 X 方向之分量
V_Z	入射波之軌道速度在 Z 方向之分量
V_x	入射波之軌道速度在 x 方向之分量
V_y	入射波之軌道速度在 y 方向之分量
V_z	入射波之軌道速度在 z 方向之分量
w	F_B 系描述之 z 方向速度
Z_d	波浪中船體任意點之沒水深度
f_v	入射波流場速度勢
k	波數
ω	入射波之角頻率
t_i	初始仰角
x, z_1	縱移
h, z_2	側移
z, z_3	起伏
f, z_4	橫搖
q, z_5	縱搖
y, z_6	平擺
z_v	入射波之波面位移
z_a	波面振幅
z_e	副波面位移

第一章 前言

港內繫纜船舶之運動及繫纜力之估算在港埠規畫上頗為重要而有必要建立實用的分析工具。在船體運動方面，美國海軍研究中心以截片理論為架構所發展之船舶運動程式(SMP)是一套以航行中之船舶運動為對象，而廣泛被應用的實用程式，但因其理論係在線性假設之架構下發展，故在應用以及發展性上恐有較大之限制。是故，本研究乃決定採用邱、廖所發展之斜波中之非線性截片理論[1,2]與程式作為架構，對於繫纜船舶，建立可輸入繫纜位置、方向、彈性常數，而計算其船體運動與繫纜力反應函數之程式，提供港灣技術研究所於給定港池內之波浪分布時，可進行繫纜船舶運動與繫纜力統計分析之用。以期有助於考慮繫纜船舶運動之港埠規畫之進行。

第二章 理論計算式

自 1955 年 Krovin-kroukovsky 將截片法引進到船舶運動計算[3]之後，歷經渡邊[4]，田才等[5]以至 1970 年 Salvesen 等[6]之進一步發展，已普遍確認了截片理論(Strip Theory)作為船舶運動計算實用方法之有效性。然而前述運動理論計算法主要以微小波高及微小運動假設下之線性問題為對象。而後隨著高速貨櫃輪船艏橫傾衝擊(Bow Flare Impact)現象探討之需要，而有山本等[7]考慮波擊力之非線性截片理論之發展，其後為了因應高速滑航快艇大型化所伴隨著對耐航性能探討之必要性，藤野等[8]及邱等[9]更擴充非線性截片理論使可考慮滑航動昇力在波浪中變動之效應，惟上述非線性截片理論發展之探討目標皆係以波浪負荷為主，所以僅以負荷最嚴厲的迎波航行狀況的垂向運動與負荷為對象。由於斜向波中之大波高、大運動必然伴隨五自由度運動的耦合效應，因此藤野等[10]、[11]提出了考慮斜向波中耦合效應的非線性截片理論，惟該理論並未考慮前述波擊力及動昇力變化之影響，故並不能直接適用於高速船舶，且其座標係仍沿用傳統耐航性能探討時採用的隨航垂直座標系，故在進行大運動解析時將會受限於此座標系之使用。是故，發展一個考慮波擊力及動昇力變動，適用於高速船舶在斜向波中之大運動計算之實用方法及計算程式乃是必要的。邱、廖即在此目標下建立了預估高速船艦在大波高斜向波浪中運動之理論計算程式。其主要內容為建立一個適用於高速船舶在任意方向之大波高波浪中定速航行時的五自由度耦合非線性運動理論計算方法，發展計算機程式，並以一 60 呎快艇為例進行確認[1,2]。

高速船艦在大波高斜向波中航行時，其運動必然為六自由度（縱移—側移—起伏—橫搖—縱搖—平擺）耦合的非線性運動，惟一般而言，縱移運動對其它五個自由度運動之耦合效應較低，因此在考慮不

失精度，且先將重點置於船型上，邱、廖[1,2]研究之主要內容即在建立一個適用於高速船艦在大波高斜向波中以定速定向航行時，除了縱移以外的五自由度耦合非線性運動理論計算程式。

本研究即依循邱、廖之理論計算法，以擴充之非線性截片理論為主幹，考慮大波高波浪中繫纜船體水下形狀之時間變化所造成的橫向與縱向運動之耦合效應，以及包含依動量理論處理的橫傾衝擊力(flare impact)在內的非線性效應，而船速效應則予以去除，至於繫纜復原力則為簡便計，且考慮不規則波中線性疊加之應用，乃採用線性彈性常數。

2.1. 座標系

採用圖一所示座標系，進行理論之數式化。

0-XYZ 為空間固定座標系(space-fixed frame F_0)X-Y 平面

置於靜水面上，Z 軸向下為正。 $o'-x'y'z'$ 為隨航垂直座標系

(vehicle-carried vertical frame F_v)， $x'-y'$ 平面亦置於靜水面上， $o'-x'$ 軸與 0-X 軸之夾角為 c ， F_v 沿 $o'-x'$ 軸方向以船之平均速度 U 等速移動，對繫纜船舶而言，則 $U=0$ ，當 $t=0$ ，船在靜水中開始遭遇波浪時， o' 與 0 重合。 $o-xyz$ 為船體固定座標系(body-fixed frame F_b)，原點 o 置於船重心(C.G.)， $o-x$ 軸平行於基線(baseline)，向船艏為正； $o-z$ 軸平行於中線(center line)，向下為正，當 $t=0$ ，船在靜水中開始遭遇波浪時， o' 與 0 皆與船舢斷面重合，而 o 點在 F_v 之座標為 (x'_0, y'_0, z'_0) ， $o-x$ 軸與 $x'-y'$ 平面之夾角為 t_i ， t_i 為初始仰角(initial trim)。當 $t>0$ ，遭遇波浪時，即引起 $o-x$ 軸與 $x'-y'$ 平面之夾角變化 q ，亦即波浪中 $o-x$ 軸與 $x'-y'$ 平面之夾角為 $t = t_i + q$ ，而 $x-z'$ 平面與 $x'-z'$ 平面之夾角為 y ， $x-z$ 平

面與 $x-z'$ 平面之夾角為 f ； o 點在 $o'-z'$ 軸方向之位移變化為 z 。
 x ， h ， z ， f ， q ，及 y 分別稱為縱移(surge)，側移(sway)，起伏(heave)，橫搖(roll angle)，縱橫(pitch angle)及平擺(yaw angle)，或分別以 $z_1, z_2, \dots, z_6$ 表示此六自由度位移量。(o 點在 $o'-y'$ 軸方向之位移變化為 h ，在 $o'-x'$ 軸方向之位移變化為 x 。)

2.2. 座標系間之轉換

2.2.1. Euler's angle 與轉換矩陣

F_o, F_v 與 F_B 三組座標系之間的轉換，以 Euler's angle 描述如下：

$$F_o \xrightarrow{(x,0,0)} F_v$$

$$F_v - \begin{Bmatrix} x'_0 + \xi \\ y'_0 + \eta \\ z'_0 + \zeta \end{Bmatrix} \xrightarrow{(\varphi, \gamma, \phi)} F_B$$

以轉換矩陣描述則得：

$$F_v = L_{vo} F_o = L_z F_o$$

$$\text{或} \quad F_o = L_{ov} F_v = L_z^T F_v \quad (1)$$

$$F_B = L_{Bv} \left(F_v - \begin{Bmatrix} x'_0 + \xi \\ y'_0 + \eta \\ z'_0 + \zeta \end{Bmatrix} \right)$$

$$\text{或} \quad F_V - \begin{Bmatrix} x'_0 + \xi \\ y'_0 + \eta \\ z'_0 + \zeta \end{Bmatrix} = L_{VB} F_B = L_{BV}^T F_B$$

$$\text{或} \quad F_V = L_{BV}^T F_B + \begin{Bmatrix} x'_0 + \xi \\ y'_0 + \eta \\ z'_0 + \zeta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

以上諸式中，

$$L_{OV} = L_{VO}^T = L_Z^T = \begin{pmatrix} \cos X & -\sin X & 0 \\ \sin X & \cos X & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} L_{VB} &= L_{BV}^T \\ &= \begin{pmatrix} \cos \tau \cos \psi & \sin \phi \sin \tau \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \tau \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \tau \sin \psi & \sin \phi \sin \tau \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \tau \cos \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \psi & \sin \phi \cos \tau & \cos \phi \cos \tau \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2.2. 空間固定座標系與隨航垂直座標系之間的轉換關係式

由(1)式，得

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos X & -\sin X & 0 \\ \sin X & \cos X & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} \quad (5)$$

2.2.3. 隨航垂直座標系與船體固定座標系之間的轉換關係式

由(2)式，得

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\tau \cos\psi & \sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\tau \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\tau \sin\psi & \sin\phi \sin\tau \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\tau & \sin\phi \cos\tau & \cos\phi \cos\tau \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x'_0 + \xi \\ y'_0 + \eta \\ z'_0 + \zeta \end{Bmatrix}$$

2.2.4. 空間固定座標系與船體固定座標系之間的轉換關係式

由 2.2.1 ~ 2.2.3 節所述，知(2)式代入(1)式可得

$$F_o = L_z^T F_v = L_z^T (L_{Bv}^T F_B + \begin{Bmatrix} x'_0 + \xi \\ y'_0 + \eta \\ z'_0 + \zeta \end{Bmatrix}) \quad (7)$$

亦即

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos X & -\sin X & 0 \\ \sin X & \cos X & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\tau \cos\psi & \sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\tau \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\tau \sin\psi & \sin\phi \sin\tau \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\tau & \sin\phi \cos\tau & \cos\phi \cos\tau \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x'_0 + \xi \\ y'_0 + \eta \\ z'_0 + \zeta \end{Bmatrix} \quad (8)$$

上式 $\begin{Bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \end{Bmatrix}$ 係水中靜止時的船重心， o 點在 F_v 之座標，此時之 o' 在

靜水面內，而 F_V 與 F_B 之 Euler's angle 為 $(0, \tau_i, 0)$ ，若令此刻之

O' ，以 F_B 描述為 $\begin{Bmatrix} X_{O'} \\ Y_{O'} \\ Z_{O'} \end{Bmatrix}$ ，則其間之轉換關係如

$$\begin{Bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{Bmatrix} \xrightarrow{(0, \tau_i, 0)} \begin{Bmatrix} X_{O'} \\ Y_{O'} \\ Z_{O'} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

亦即

$$\begin{Bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \tau_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cos \tau_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_{O'} \\ Y_{O'} \\ Z_{O'} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

2.2.5. 剛體六自由度運動速度之轉換

以 F_B 描述重心 O 點之平移速度為 $\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ ，繞三軸之轉動角速度

為 $\begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix}$ 。而此 F_B 座標系原點 O 之平移速度若以 F_V 描述則為 $\begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{Bmatrix}$ ，而剛

體轉動角度若以 Euler's angle rate 表示則為 $\begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix}$ 。

此二者之間有轉換關係式如下：

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} &= L_{BV} \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{Bmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \cos\tau \cos\psi & \cos\tau \sin\psi & -\sin\tau \\ \sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \sin\phi \sin\tau \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \sin\phi \cos\tau \\ \cos\phi \sin\tau \cos\psi + \sin\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\phi \cos\psi & \cos\phi \cos\tau \end{pmatrix} \\
&\quad \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{Bmatrix} &= L_{BV}^T \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \cos\tau \cos\psi & \sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\tau \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\tau \sin\psi & \sin\phi \sin\tau \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\tau & \sin\phi \cos\tau & \cos\phi \cos\tau \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} &= R \begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin\tau \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\tau \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\tau \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \phi - \psi \sin\tau \\ \theta \cos\phi + \psi \sin\phi \cos\tau \\ -\theta \sin\phi + \psi \cos\phi \cos\tau \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\text{或} \quad \begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix} = R^{-1} \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \tau & \cos \phi \tan \tau \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \tau & \cos \phi \sec \tau \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} \quad (12)$$

2.2.6. 船體任意點之平移速度

船體任意點 (x, y, z) 之運動速度以 F_B 描述，則其平移速度成分為

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} + \begin{vmatrix} i & j & k \\ p & q & r \\ x & y & z \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} u + zq - yr \\ v + xr - zp \\ w + yp - xq \end{Bmatrix} \quad (13)$$

若此平移速度以 F_v 描述，則同(11)式成為 $L_{Bv}^T \begin{Bmatrix} u + zq - yr \\ v + xr - zp \\ w + yp - xq \end{Bmatrix}$

亦即

$$\begin{pmatrix} \cos \tau \cos \psi & \sin \phi \sin \tau \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \tau \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \tau \sin \psi & \sin \phi \sin \tau \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \tau \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \tau & \sin \phi \cos \tau & \cos \phi \cos \tau \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u + zq - yr \\ v + xr - zp \\ w + yp - xq \end{Bmatrix} \quad (14)$$

2.3. 入射波

2.3.1. 波面位移

以 F_0 描述入射波之波面 (wave surface) 位移為

$$\zeta_r = \zeta_a \cos(\kappa X - \omega t) \quad (15)$$

副波面 (wave subsurface) 位移為

$$\zeta_e = \zeta_a e^{-\kappa Z} \cos(\kappa X - \omega t) \quad (16)$$

對深水波言，波數 $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega^2 / g$ ， ω 為角頻率， ζ_a 為波面振幅。若令入射波流場速度勢為 ϕ_r ，則 ϕ_r 與 ζ_e 滿足 ($\nabla \phi_r \equiv V$)

$$\frac{\partial^2 \phi_r}{\partial t^2} - g \frac{\partial \phi_r}{\partial Z} = 0 \quad \text{及} \quad \frac{\partial \zeta_e}{\partial t} = \frac{\partial \phi_r}{\partial Z}, \quad \text{亦即} \quad \zeta_e = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi_r}{\partial t} \quad (17)$$

而 ϕ_r 可表示如下：

$$\phi_r = -\frac{g\zeta_a}{\omega} e^{-\kappa Z} \sin(\kappa X - \omega t) \quad (18)$$

由(8)式知：

$$\begin{aligned} X = & \cos\chi (x'_0 + \xi - \sin\chi (y'_0 + \eta)) \\ & + (\cos\chi \cos\tau \cos\psi - \sin\chi \cos\tau \sin\psi)x \\ & + (\cos\chi \sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\chi \cos\phi \sin\psi \\ & - \sin\chi \sin\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\chi \cos\phi \cos\psi)y \\ & + (\cos\chi \cos\phi \sin\tau \cos\psi + \cos\chi \sin\phi \sin\psi \\ & - \sin\chi \cos\phi \sin\tau \sin\psi + \sin\chi \sin\phi \cos\psi)z \end{aligned} \quad (19)$$

$$Z = z'_0 + \zeta - x \cdot \sin \tau + y \cdot \sin \phi \cos \tau + z \cdot \cos \phi \cos \tau \quad (20)$$

(19)式與(20)式代入(16)及(17)式即得船體任意點 (x, y, z) 所在位置所對應之波面與副波面位移 $(o' - z'$ 軸方向位移)，而船體任意點 (x, y, z) 在各瞬間之沒水深度 Z_d ($o' - z'$ 軸方向)可表示如下：

$$Z_d = Z - \zeta_w = z'_0 + \zeta - \zeta_w - x \cdot \sin \tau + y \cdot \sin \phi \cos \tau + z \cdot \cos \phi \cos \tau \quad (21)$$

上式亦即由(20)式之 Z 與(16)式之 ζ_w 相減而得。上式可用以求得船體表面與入射波面之交線，以定義出各瞬間之斷面沒水形狀。交線面內之波面亦可求得。

靜水中靜止時，船體任意點 (x, y, z) 之沒水深度

$$d = z'_0 - x \cdot \sin \tau_i + z \cdot \cos \tau_i \quad (22)$$

即可由(21)式推得。

2.3.2. 波之軌道速度 (orbital velocity)

以 F_0 描述入射波之軌道速度，其 X 與 Z 方向之分別為 V_x ， V_z 則

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{\partial \phi_w}{\partial X} = -\kappa \frac{g\zeta_a}{\omega} e^{-\kappa Z} \cos(\kappa X - \omega t) \\ &= -\omega \zeta_a e^{-\kappa Z} \cos(\kappa X - \omega t) = -\omega \zeta_e \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{\partial \phi_w}{\partial Z} = \kappa \frac{g\zeta_a}{\omega} e^{-\kappa Z} \sin(\kappa X - \omega t) \\ &= \omega \zeta_a e^{-\kappa Z} \sin(\kappa X - \omega t) = \frac{d\zeta_e}{dt} \equiv \zeta_e \end{aligned} \quad (24)$$

若以 F_b 描述入射波之軌道速度，其 x ， y 與 z 方向之分量分別為

V_x, V_y, V_z 則由 $V_B = L_{BV} V_V = L_{BV} L_{V0} V_0 = L_{BV} L_Z V_0$ 知

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos\tau \cos\psi & \cos\tau \sin\psi & -\sin\tau \\ \sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \sin\phi \sin\tau \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \sin\phi \cos\tau \\ \cos\phi \sin\tau \cos\psi + \sin\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\phi \cos\psi & \cos\phi \cos\tau \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos\chi \cos\tau \cos\psi - \sin\chi \cos\tau \sin\psi & \cdots & -\sin\tau \\ \cos\chi (\sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\phi \sin\psi) & \cdots & -\sin\tau \\ -\sin\chi (\sin\phi \sin\tau \sin\psi + \cos\phi \cos\psi) & & \\ \cos\chi (\cos\phi \sin\tau \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) & \cdots & \cos\phi \cos\tau \\ -\sin\chi (\cos\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) & & \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ 0 \\ V_z \end{Bmatrix} \\
 &= \begin{Bmatrix} V_x \cdot (\cos\chi \cos\tau \cos\psi - \sin\chi \cos\tau \sin\psi) - V_z \sin\tau \\ V_x \cdot [\cos\chi (\sin\phi \sin\tau \cos\psi - \cos\phi \sin\psi)] \\ -\sin\chi (\sin\phi \sin\tau \sin\psi + \cos\phi \cos\psi) + V_z \cdot \sin\phi \cos\tau \\ V_x \cdot [\cos\chi (\cos\phi \sin\tau \cos\psi + \sin\phi \sin\psi)] \\ -\sin\chi (\cos\phi \sin\tau \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) + V_z \cdot \cos\phi \cos\tau \end{Bmatrix} \quad (25)
 \end{aligned}$$

2.3.3. 波之水壓

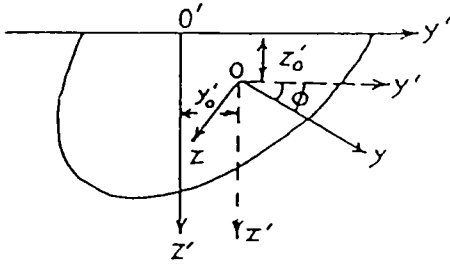
船體任意點 (x, y, z) 所在位置各瞬間之水壓 P 可表示如下

$$\begin{aligned}
 P &= \rho g Z_d - \rho \left(\frac{\partial \phi_w}{\partial t} - \left[\frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right]_{\zeta_w} \right) - \frac{1}{2} \rho ([\nabla \phi_w]^2 - [\nabla \phi_w]_{\zeta_w}^2) \\
 &= \rho g Z_d - \rho g (\zeta_e - \zeta_w) - \frac{1}{2} \rho ([V_x^2 + V_z^2] - [V_x^2 + V_z^2]_{\zeta_w}) \\
 &= \rho g Z_d - \rho g (\zeta_e - \zeta_w) - \frac{1}{2} \rho (\omega^2 \zeta_e^2 + \zeta_e^2 - \omega^2 \zeta_w^2 - \zeta_w^2) \\
 &= \rho g (Z - \zeta_e) + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \zeta_a^2 (1 - e^{-2\kappa Z}) \quad (26)
 \end{aligned}$$

上式右邊， Z 以(20)式， ζ_e 以(17)式代入即得。

2.4. 斷面附加質量（慣性矩）矩陣之轉換

斷面附加質量（慣性矩）矩陣以 $F_{V_{o'}}$ ， F_{V_o} 及 F_B 描述，分別如下



座標系 附加質量矩陣

$$\begin{array}{ll} F_{V_{o'}} : O' - x'y'z' & [m^{o'}] \\ F_{V_o} : O - x'y'z' & [m^o] \\ F_B : O - xyz & [m] \end{array}$$

$$[m^{o'}] = \begin{pmatrix} m_{x'x'}^{o'} & m_{x'y'}^{o'} & m_{x'z'}^{o'} \\ m_{y'x'}^{o'} & m_{y'y'}^{o'} & m_{y'z'}^{o'} \\ m_{z'x'}^{o'} & m_{z'y'}^{o'} & m_{z'z'}^{o'} \end{pmatrix} \quad [m^o] = \begin{pmatrix} m_{x'x'}^o & m_{x'y'}^o & m_{x'z'}^o \\ m_{y'x'}^o & m_{y'y'}^o & m_{y'z'}^o \\ m_{z'x'}^o & m_{z'y'}^o & m_{z'z'}^o \end{pmatrix}$$

$$[m] = \begin{pmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & m_{yy} & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & m_{zz} \end{pmatrix}$$

2.4.1. $F_{V_{o'}}$ 與 F_{V_o} 之間的轉換關係式

當斷面以 $o' - x'$ 軸之角速度 p ， $o' - y'$ 方向速度 v ， $o' - z'$ 方向速度 w 運動時，流體之運動角動量與動量為 $[m^{o'}] \begin{Bmatrix} p \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ 。若斷面運動以 F_{V_o} 描述，即當斷

面以 $o - x'$ 軸之角速度 p ， $o - y'$ 方向速度 v ， $o - z'$ 方向速度 w 運動時，則流

體之運動角動量與動量為 $\{m^o\} \begin{Bmatrix} p \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ ，而在此狀況下， o' 點之角速度仍為 p ，但

$o' - y'$ 方向速度則為 $v + z'_o p$ 而 $o' - z'$ 方向速度則為 $w - y'_o p$ ，於是

$$\{m^o\} \begin{Bmatrix} p \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \{m^{o'}\} \begin{Bmatrix} p \\ v + z'_o p \\ w - y'_o p \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} P^* \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

而

$$\begin{aligned} P^* &\equiv m_{y'y'}^{o'} z'_o - m_{z'z'}^{o'} y'_o \\ &= [m_{y'x'}^{o'} p + m_{y'y'}^{o'} (v + z'_o p) + m_{y'z'}^{o'} (w - y'_o p)] z'_o \\ &\quad - [m_{z'x'}^{o'} p + m_{z'y'}^{o'} (v + z'_o p) + m_{z'z'}^{o'} (w - y'_o p)] y'_o \end{aligned}$$

由(27)式之三個分量整理得下式

$$\begin{cases} m_{x'x'}^o p + m_{x'y'}^o v + m_{x'z'}^o w \\ = m_{x'x'}^{o'} p + m_{x'y'}^{o'} (v + z'_o p) + m_{x'z'}^{o'} (w - y'_o p) + P^* \end{cases} \quad (28-1)$$

$$\begin{cases} m_{y'x'}^o p + m_{y'y'}^o v + m_{y'z'}^o w \\ = m_{y'x'}^{o'} p + m_{y'y'}^{o'} (v + z'_o p) + m_{y'z'}^{o'} (w - y'_o p) \end{cases} \quad (28-2)$$

$$\begin{cases} m_{z'x'}^o p + m_{z'y'}^o v + m_{z'z'}^o w \\ = m_{z'x'}^{o'} p + m_{z'y'}^{o'} (v + z'_o p) + m_{z'z'}^{o'} (w - y'_o p) \end{cases} \quad (28-3)$$

由(28)，(28-3)式，以及 $\begin{pmatrix} m_{y'y'}^o & m_{y'z'}^o \\ m_{z'y'}^o & m_{z'z'}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{y'y'}^{o'} & m_{y'z'}^{o'} \\ m_{z'y'}^{o'} & m_{z'z'}^{o'} \end{pmatrix}$ 之關係式，可得

$$\begin{cases} m_{y'x'}^o = m_{y'x'}^{o'} + m_{y'y'}^{o'} z'_o - m_{y'z'}^{o'} y'_o \end{cases} \quad (28-4)$$

$$\begin{cases} m_{z'x'}^o = m_{z'x'}^{o'} + m_{z'y'}^{o'} z'_o - m_{z'z'}^{o'} y'_o \end{cases} \quad (28-5)$$

利用 $[m_{x'x'}^o]$ 與 $[m^o]$ 皆為對稱矩陣之特性，並將(28-4)，(28-5)式代入(28-1)式得

$$\begin{aligned} & m_{x'x'}^o p + (m_{y'x'}^{o'} + m_{y'y'}^{o'} Z'_o - m_{y'z'}^{o'} y'_o) v \\ & + (m_{z'x'}^{o'} + m_{z'y'}^{o'} Z'_o - m_{z'z'}^{o'} y'_o) w \\ & = m_{x'x'}^{o'} p + m_{x'y'}^{o'} (v + Z'_o p) + m_{x'z'}^{o'} (w - y'_o p) + P^* \end{aligned}$$

整理，得

$$\begin{aligned} m_{x'x'}^o &= m_{x'x'}^{o'} + 2m_{x'y'}^{o'} Z'_o - 2m_{x'z'}^{o'} y'_o \\ &\quad - 2m_{y'z'}^{o'} y'_o Z'_o + m_{y'y'}^{o'} Z_o'^2 + m_{z'z'}^{o'} y_o'^2 \end{aligned} \quad (28-6)$$

上式右邊可再整理得

$$\begin{aligned} m_{x'x'}^o &= m_{x'x'}^{o'} + m_{x'y'}^{o'} Z'_o + (m_{x'y'}^{o'} + m_{y'y'}^{o'} Z'_o - m_{y'z'}^{o'} y'_o) Z'_o \\ &\quad - m_{x'z'}^{o'} y'_o - (m_{x'z'}^{o'} + m_{z'y'}^{o'} Z'_o - m_{z'z'}^{o'} y'_o) y'_o \end{aligned}$$

(28-4)，(28-5)式右邊與上式右邊括號內相等，代換整理得

$$m_{x'x'}^o = m_{x'x'}^{o'} + (m_{x'y'}^{o'} + m_{y'y'}^{o'}) Z'_o - (m_{x'z'}^{o'} + m_{z'z'}^{o'}) y'_o \quad (28-7)$$

於是，對稱矩陣 $[m^o]$ 與 $[m_o']$ 之六個成份之間的關係式如下

$$\left\{ \begin{aligned} m_{x'x'}^o &= m_{x'x'}^{o'} + 2m_{x'y'}^{o'} Z'_o - 2m_{x'z'}^{o'} y'_o \\ &\quad - 2m_{y'z'}^{o'} y'_o Z'_o + m_{y'y'}^{o'} Z_o'^2 + m_{z'z'}^{o'} y_o'^2 \\ (or) &= m_{x'x'}^{o'} + (m_{x'y'}^{o'}) Z'_o - (m_{x'z'}^{o'} + m_{z'z'}^{o'}) y'_o \\ m_{x'y'}^o &= m_{y'x'}^o = m_{y'x'}^{o'} + m_{y'y'}^{o'} Z'_o - m_{y'z'}^{o'} y'_o \\ m_{z'x'}^o &= m_{x'z'}^o = m_{z'x'}^{o'} + m_{z'y'}^{o'} Z'_o - m_{z'z'}^{o'} y'_o \\ m_{y'y'}^o &= m_{y'y'}^{o'}, \quad m_{z'z'}^o = m_{z'z'}^{o'}, \quad m_{y'z'}^o = m_{z'y'}^o = m_{y'z'}^{o'} = m_{z'y'}^{o'} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

2.4.2. F_{V_o} 與 F_B 之間的轉換關係式

當斷面以 $O-X$ 軸之角速度 p ， $O-Y$ 方向速度 v ， $O-Z$ 方向速度 w 運動時，流體之運動角動量與動量以 F_B 描述即為 $[m] \begin{Bmatrix} p \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ ，而在此狀況下，斷面

運動速度若以 F_{V_o} 描述，則為 $L_{BV}^T \begin{Bmatrix} p \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ ($? F_V = L_{VB} F_B = L_{BV}^T F_B$)，而流體之運動角

動量與動量以 F_{V_o} 描述，則為 $[m^o] L_{BV}^T \begin{Bmatrix} p \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ ，若以 F_B 描述則為

$L_{BV} [m^o] L_{BV}^T \begin{Bmatrix} p \\ v \\ w \end{Bmatrix}$ ，於是可知

$$[m] = L_{BV} [m^o] L_{BV}^T \quad (30)$$

基於細長體假設，忽略 τ 與 ψ 對斷面流體運動量之影響，亦即假設 $\tau, \psi \approx 0$ ，則 L_{BV}^T 簡化表示如下，由(4)式得

$$L_{BV}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}$$

代入(30)式，得對稱矩陣 $[m]$ 與 $[m^o]$ 之六個成份之間的關係式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{xx} = m_{x'x'}^o \\ m_{xy} = m_{yx} = m_{x'y'}^o \cos\phi + m_{x'z'}^o \sin\phi \\ m_{xz} = m_{zx} = -m_{x'y'}^o \sin\phi + m_{x'z'}^o \cos\phi \\ m_{yy} = m_{y'y'}^o \cos^2\phi + m_{z'z'}^o \sin^2\phi + 2m_{y'z'}^o \sin\phi \cos\phi \\ m_{yz} = m_{zy} = m_{y'z'}^o (\cos^2\phi - \sin^2\phi) + (m_{z'z'}^o - m_{y'y'}^o) \cos\phi \sin\phi \\ m_{zz} = m_{z'z'}^o \cos^2\phi + m_{y'y'}^o \sin^2\phi - 2m_{y'z'}^o \sin\phi \cos\phi \end{array} \right\} \quad (31)$$

2.4.3. F_{V_o} 與 F_B 之間的轉換關係式

由 2.4.1 與 2.4.2 可知，將(29)式代入(31)式右邊即得對稱矩陣 $[m]$ 與 $[m']$ 之六個成份之間的關係式。

2.4.4. 斷面與波減衰係數矩陣之轉換

斷面與波減衰係數矩陣以 F_{V_o} , F_{V_e} 及 F_B 描述，分別如 $[N']$, $[N^o]$ 及 $[N]$ ，以上 2.4.1. ~ 2.4.3. 所述之轉換關係式亦適用於 $[N']$, $[N^o]$ 及 $[N]$ 。

2.5. 船體斷面作用力成份

2.5.1. 船體斷面相對速度成份

船體上任一點 (x, y, z) 對水之相對速度以 F_B 描述，由(13)式及(25)式知其 x, y, z 三軸之分量分別為

$$\begin{cases} u_r = (u + zq - yr) - V_x \\ v_r = (v + xr - zp) - V_y \\ w_r = (w + yp - xq) - V_z \end{cases} \quad (32)$$

而船體斷面 x 對水之斷面平均相對速度及橫搖平均相對角速度以 F_B 描述則為

$$\begin{cases} \bar{u}_r = u - \bar{V}_x \\ \bar{v}_r = v + xr - \bar{V}_y \\ \bar{w}_r = w - xq - \bar{V}_z \\ \bar{p}_r = p - \bar{p}_\omega \end{cases} \quad (33)$$

上式中，斷面 x 之運動速度以 $y = z = 0$ 點之速度代表，而 $\bar{V}_x$, $\bar{V}_y$, $\bar{V}_z$ 分別表示波之軌道速度在斷面 x 上之平均，而 $\bar{p}_\omega$ 為其分佈對 $y = z = 0$ 點之平均角速度。

2.5.2 由 Kirchhoff's equation 推導二維斷面內運動量變化引起之作用力

先就 radiation force 論，亦即暫令 $\bar{V}_x = \bar{V}_y = \bar{V}_z = 0$ ，而斷面 x 以

$$\bar{V}_r = v + xr \equiv V, \bar{W}_r = w - xq \equiv W, \bar{P}_r = p. \quad (34)$$

運動，於是二維斷面之流場速度勢

$$\Phi = (v + xr)\Phi^y + (w - xq)\Phi^z + p\Phi^x \quad (35)$$

由 $T_F = -\frac{\rho}{2} \int_s \int \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial n} ds$ 知二維斷面之流體動能

$$T_F = -\frac{\rho}{2} \int_l [V\Phi^y + W\Phi^z + p\Phi^x] \left(V \frac{\partial \Phi^y}{\partial n} + W \frac{\partial \Phi^z}{\partial n} + p \frac{\partial \Phi^x}{\partial n} \right) dl \quad (36)$$

將上式右邊展開，並利用 $m_{ij} \equiv -\rho \int_l \Phi^i \frac{\partial \Phi^j}{\partial n} dl$ 得

$$T_F = \frac{1}{2} V^2 m_{yy} + \frac{1}{2} W^2 m_{zz} + \frac{1}{2} p^2 m_{xx} + V W m_{yz} + V p m_{xy} + W p m_{xz}$$

將(34)式代入上式整理得

$$\begin{aligned} T_F = & \frac{1}{2} (v + xr)^2 m_{yy} + \frac{1}{2} (w - xq)^2 m_{zz} + \frac{1}{2} p^2 m_{xx} \\ & + (v + xr)(w - xq) m_{yz} + (v + xr) p m_{xy} + (w - xq) p m_{xz} \end{aligned} \quad (37)$$

同理，船體斷面之動能 T_H 可由上式，令 $m_{yy} = m_{zz} = m$, $m_{xx} = i_{xx}$, $m_{yz} = m_{xy} = m_{xz} = 0$ ，得

$$T_H = \frac{1}{2} (v + xr)^2 m + \frac{1}{2} (w - xq)^2 m + \frac{1}{2} p^2 i_{xx} \quad (38)$$

以 Kirchhoff's equation 適用在二維斷面 x 上，亦即

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \vec{u}}\right) + \vec{w} \times \frac{\partial T}{\partial \vec{u}} = \vec{F} \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \vec{w}}\right) + \vec{w} \times \frac{\partial T}{\partial \vec{w}} + \vec{u} \times \frac{\partial T}{\partial \vec{u}} = \vec{M} \end{cases} \quad (39)$$

式中， $\vec{u} = (0, V, W)$ ， $\vec{w} = (p, 0, 0)$ ， $T = T_H + T_F$ 而 $V = v + xR$ ， $W = w - xQ$ 於是，將(37)式及(38)式代入(39)式，即得

$$\begin{aligned} -F_y &= \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right) - p \frac{\partial T}{\partial W} \\ &= \frac{d}{dt}[(m_{yy} + m)(v + xR) + m_{yz}(w - xQ) + m_{xy}p] \\ &\quad - p[(m_{zz} + m)(w - xQ) + m_{yz}(v + xR) + m_{xz}p] \\ -F_z &= \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial W}\right) - p \frac{\partial T}{\partial V} \\ &= \frac{d}{dt}[(m_{zz} + m)(w + xQ) + m_{yz}(v + xR) + m_{xz}p] \\ &\quad + p[(m_{yy} + m)(v + xR) + m_{yz}(w - xQ) + m_{xy}p] \\ -M_x &= \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right) + V\left(\frac{\partial T}{\partial W}\right) - W\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right) \\ &= \frac{d}{dt}[(m_{xx} + i_{xx})p + m_{xy}(v + xR) + m_{xz}(w - xQ)] \\ &\quad + (v + xR)[(m_{zz} + m)(w - xQ) + m_{yz}(v + xR) + m_{xz}p] \\ &\quad - (w - xQ)[(m_{yy} + m)(v + xR) + \frac{1}{2}(w - xQ) + m_{xy}p] \end{aligned}$$

將 $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} - \bar{u}_r \frac{\partial}{\partial x}$ 且 $\bar{u}_r \equiv 0$ for T_F ， $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t}$ for T_H 對以上三式展開，得

$$\frac{d}{dt}(v + xR) = \frac{\partial}{\partial t}(v + xR) - \bar{u}_r r \approx v + xR \quad (40)$$

$$\frac{d}{dt}(w - xq) = \frac{\partial}{\partial t}(w - xq) + \bar{u}_r q \approx w - xq \quad (41)$$

代入整理，得

$$\begin{aligned} F_y = & -m(v + xr) - m_{yy}(v + xr) - m_{yz}(w + xq) - m_{xy}p \\ & - (v + xr)\frac{\partial m_{yy}}{\partial t} - (w - xq)\frac{\partial m_{yz}}{\partial t} - p\frac{\partial m_{xy}}{\partial t} \\ & + p[(m_{zz} + m)(w - xq) + m_{yz}(v + xr) + m_{xz}p] \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} F_z = & -m(w - xq) - m_{zz}(w - xq) - m_{yz}(v + xr) - m_{xz}p \\ & - (w - xq)\frac{\partial m_{zz}}{\partial t} - (v + xr)\frac{\partial m_{yz}}{\partial t} - p\frac{\partial m_{xz}}{\partial t} \\ & - p[(m_{yy} + m)(v + xr) + m_{yz}(w - xq) + m_{xy}p] \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} M_x = & -(m_{xx} + i_{xx})p - m_{xy}(v + xr) - m_{xz}(w + xq) - p\frac{\partial m_{xx}}{\partial t} \\ & - (v + xr)\frac{\partial m_{xy}}{\partial t} - (w - xq)\frac{\partial m_{xz}}{\partial t} - (v + xr) \\ & [(m_{zz} + m)(w - xq) + m_{yz}(v + xr) + m_{xz}p] - (w - xq) \\ & [(m_{yy} + m)(v + xr) + m_{yz}(w - xq) + m_{xy}p] \end{aligned} \quad (44)$$

假設運動速度 v, w, p, q, r 皆為微小量，於是忽略其二次項，則(42)式～(44)式簡化如下：

$$\begin{aligned} F_y = & -(m + m_{yy})v - \frac{\partial m_{yy}}{\partial t}v - m_{yz}w - \frac{\partial m_{yz}}{\partial t}w - m_{xy}p - \frac{\partial m_{xy}}{\partial t}p \\ & + m_{yz}xq + x\frac{\partial m_{yz}}{\partial t}q - (m + m_{yy})xr - x\frac{\partial m_{yy}}{\partial t}r \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned}
F_z = & -m_{yz}V - \frac{\partial m_{yz}}{\partial t}V - (m + m_{zz})W - \frac{\partial m_{zz}}{\partial t}W - m_{xz}P - \frac{\partial m_{xz}}{\partial t}P \\
& + (m + m_{zz})XQ + X\frac{\partial m_{zz}}{\partial t}Q - m_{yz}XR - X\frac{\partial m_{yz}}{\partial t}R
\end{aligned} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
M_x = & -m_{xy}V - \frac{\partial m_{xy}}{\partial t}V - m_{xz}W - \frac{\partial m_{xz}}{\partial t}W - (m_{xx} + i_{xx})P - \frac{\partial m_{xx}}{\partial t}P \\
& + m_{xz}XQ + X\frac{\partial m_{xz}}{\partial t}Q - m_{xy}XR - X\frac{\partial m_{xy}}{\partial t}R
\end{aligned} \tag{47}$$

2.5.3. 二維斷面之興波減衰力

由(34)式之相對速度，可得斷面興波減衰力如下：

$$N_y = -N_{yy}V - N_{yz}W - N_{yx}P$$

$$N_z = -N_{zz}W - N_{zy}V - N_{zx}P$$

$$N_x = N_{xx}P - N_{xy}V - N_{xx}W$$

(34)式代入上列諸式，整理得

$$N_y = -N_{yy}V - N_{yz}W - N_{yx}P + N_{yz}XQ - N_{yy}XR \tag{48}$$

$$N_z = -N_{yz}V - N_{zz}W - N_{xz}P + N_{zz}XQ - N_{yz}XR \tag{49}$$

$$N_x = -N_{xy}V - N_{xx}W - N_{xx}P + N_{xz}XQ - N_{xy}XR \tag{50}$$

2.5.4. 二維斷面之復原力與 Froude-Krylov Force f_s

$$f_{sy} = \int_c p dz \quad (51)$$

$$f_{sz} = \int_{c_o} -p dy - \int_{c_o} -p_o dy \quad (52)$$

$$f_{sx} = \int_c p(-y dy - z dz) + m g (z'_o - z'_g) \sin \phi + m g (y'_o - y'_g) (1 - \cos \phi) \quad (53)$$

式中， c_o, p_o 分別為靜水中之浸水面與水壓，而 c, p 分別為波浪中之浸水面與水壓。 y'_g, z'_g 為船體在靜水中靜止時，斷面重心在 F_v 之 y' 及 z' 軸之座標。由(20)式知

$$p_o = \rho g z_o = \rho g \{ z'_o - x \cdot \sin \tau_i + z \cdot \cos \tau_i \} \quad (54)$$

而 p 如(26)式所示，浸水面 c_o 及 c 可分別由(54)式及(21)式內插求出 $z_o = 0$ 及 $z_d = 0$ 之點，且線積分沿 c_o 及 c 是以由左舷至右舷為正。

2.5.5 二維斷面之 diffraction force 之中有關運動量變化引起之作用力

比照 2.5.2. 所述，就 diffraction force 論，亦即暫令 $v = w = p = q = r = 0$ ，於是 $\bar{u}_r = 0, \bar{v}_r = -\bar{V}_y, \bar{w}_r = -\bar{V}_z, \bar{p}_r = -\bar{p}_w$ ，亦即有如斷面以前述速度運動所引起之流體運動量變化所產生之作用力。

$$-F_y^d = -\frac{d}{dt} (m_{yy} \bar{V}_y + m_{yz} \bar{V}_z + m_{xy} \bar{p}_w) - \bar{p}_w (m_{zz} \bar{V}_z + m_{yz} \bar{V}_y + m_{xz} \bar{p}_w)$$

$$-F_z^d = -\frac{d}{dt} (m_{zz} \bar{V}_z + m_{yz} \bar{V}_y + m_{xz} \bar{p}_z) + \bar{p}_w (m_{yy} \bar{V}_y + m_{yz} \bar{V}_z + m_{xy} \bar{p}_w)$$

$$\begin{aligned} -M_x^d = & -\frac{d}{dt} (m_{xx} \bar{p}_w + m_{xy} \bar{V}_y + m_{xz} \bar{V}_z) + \bar{V}_y (m_{zz} \bar{V}_z + m_{yz} \bar{V}_y + m_{xz} \bar{p}_w) \\ & - \bar{V}_z (m_{yy} \bar{V}_y + m_{yz} \bar{V}_z + m_{xy} \bar{p}_w) \end{aligned}$$

將 $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} - \bar{u}_r \frac{\partial}{\partial x}$ 且 $\bar{u}_r \approx 0$ 代入上式展開，並假設 $\bar{V}_y, \bar{V}_z, \bar{P}_w$ 皆為微小

量，忽略其二次項，整理得

$$F_y^d = m_{yy} \bar{V}_y + m_{yz} \bar{V}_z + m_{xy} \bar{P}_w + \bar{V}_y \frac{\partial m_{yy}}{\partial t} + \bar{V}_z \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} + \bar{P}_w \frac{\partial m_{xy}}{\partial t} \quad (55)$$

$$F_z^d = m_{zz} \bar{V}_z + m_{yz} \bar{V}_y + m_{xz} \bar{P}_w + \bar{V}_z \frac{\partial m_{zz}}{\partial t} + \bar{V}_y \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} + \bar{P}_w \frac{\partial m_{xz}}{\partial t} \quad (56)$$

$$M_x^d = m_{xx} \bar{P}_w + m_{xy} \bar{V}_y + m_{xz} \bar{V}_z + \bar{P}_w \frac{\partial m_{xx}}{\partial t} + \bar{V}_y \frac{\partial m_{xy}}{\partial t} + \bar{V}_z \frac{\partial m_{xz}}{\partial t} \quad (57)$$

2.5.6. 二維斷面之 diffraction force 之中有關興波減衰之作用力
比照 2.5.3. 所述，得

$$N_y^d = N_{yy} \bar{V}_y + N_{yz} \bar{V}_z + N_{xy} \bar{P}_w \quad (58)$$

$$N_z^d = N_{zz} \bar{V}_z + N_{yz} \bar{V}_y + N_{xz} \bar{P}_w \quad (59)$$

$$N_x^d = N_{xx} \bar{P}_w + N_{xy} \bar{V}_y + N_{xz} \bar{V}_z \quad (60)$$

2.6 繫纜復原力

2.6.1. 座標系及繫纜條件輸入

繫纜力之描述先採空間固定右手直角座標系，且將原點定在重心位置，z 軸向下為正，x 軸向前為正，y 軸向左舷為正，此座標系如圖二所示。

令繫纜點 i 之位置向量為 $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ ，而繫纜施力方向之單位向量為 $\vec{n}_i = (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi})$ ，此二向量之成份即為各纜所需輸入之資料，本研究考慮處理至多 12 條纜，亦即 $i=1, 2, \dots, 12$ 。

2.6.2. 繫纜復原力係數矩陣之推導

(1) 點 i 位移量 $\vec{S}_i = (S_{xi}, S_{yi}, S_{zi})$ 可表示如下式：

$$\begin{Bmatrix} S_{xi} \\ S_{yi} \\ S_{zi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i & -y_i \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & x_i \\ 0 & 0 & 1 & y_i & -x_i & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \varsigma \\ \phi \\ \tau \\ \psi \end{Bmatrix} \quad (61)$$

(2) 點 i 位移量在繫纜施力方向之分量可表示如下式：

$$\begin{aligned} \vec{S}_i \cdot \vec{n}_i &= \vec{n}_i \cdot \vec{S}_i = \begin{Bmatrix} n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{xi} \\ S_{yi} \\ S_{zi} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & -z_i n_{yi} + y_i n_{zi} & z_i n_{xi} - x_i n_{zi} & -y_i n_{xi} + x_i n_{yi} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \varsigma \\ \phi \\ \tau \\ \psi \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (62)$$

(3) 點 i 繫纜之 $\vec{f}_i = K_i (\vec{S}_i \cdot \vec{n}_i) \vec{n}_i$ 亦即

$$\begin{Bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ f_{zi} \end{Bmatrix} = K_i \begin{Bmatrix} n_{xi} \\ n_{yi} \\ n_{zi} \end{Bmatrix} \left\{ \begin{matrix} n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & -z_i n_{yi} + y_i n_{zi} \\ z_i n_{xi} - x_i n_{zi} & -y_i n_{xi} + x_i n_{yi} \end{matrix} \right\} \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \\ \varsigma \\ \phi \\ \tau \\ \psi \end{Bmatrix} \quad (63)$$

(4) 點 i 繫纜對座標原點之復原力矩 $\vec{f}_i \times \vec{r}_i$

$$\text{亦即 } \begin{Bmatrix} m_{xi} \\ m_{yi} \\ m_{zi} \end{Bmatrix} = \vec{f}_i \times \vec{r}_i = \begin{Bmatrix} -z_i f_{yi} + y_i f_{zi} \\ -x_i f_{zi} + z_i f_{xi} \\ x_i f_{yi} - y_i f_{xi} \end{Bmatrix} \quad (64)$$

(5) 繫纜復原力係數矩陣 K_{jk}

將(63)式及(64)式分別對 i 作總和 $\sum_i$ ，並與(66)式之 $\sum_{K=1}^6 K_{jk} \zeta_K$ 比較，整理即得以空間固定座標系描述之復原力係數矩陣 K_{jk} 之各成份如 2.7 節所示。

2.7. 運動方程式

由船體固定座標系 F_B 描述之力與力矩平衡方程式如下：

$$\begin{aligned}
 v: - \int_A^F (F_y + N_y + f_{sy} + F_y^d + N_y^d) dx &= 0 \\
 w: - \int_A^F (F_z + N_z + f_{sz} + F_z^d + N_z^d) dx &= 0 \\
 p: - \int_A^F (M_x + N_x + f_{sx} + M_x^d + N_x^d) dx &= 0 \\
 q: - \int_A^F (-x)(F_z + N_z + f_{sz} + F_z^d + N_z^d) dx &= 0 \\
 r: - \int_A^F x(F_y + N_y + f_{sy} + F_y^d + N_y^d) dx &= 0
 \end{aligned} \tag{65}$$

將 2.5. 所示諸式，代入上式左邊，並加入 2.6. 所示繫纜復原力，整理如下：

$$\begin{pmatrix} m_{22} & \cdots & m_{26} \\ \vdots & & \\ m_{62} & \cdots & m_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{v} \\ \tilde{w} \\ p \\ q \\ r \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} N_{22} & \cdots & N_{26} \\ \vdots & & \\ N_{62} & \cdots & N_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{v} \\ \tilde{w} \\ p \\ q \\ r \end{Bmatrix} + \{R\} + \begin{Bmatrix} L_{BV} & 0 \\ 0 & R \end{Bmatrix} \{K\} \begin{Bmatrix} \eta \\ \varsigma \\ \phi \\ \tau \\ \psi \end{Bmatrix} = \{F\} + \{D\} \tag{66}$$

式中，各係數矩陣與向量之各成份如下：

$$m_{22} = \int (m + m_{yy}) dx$$

$$m_{23} = \int m_{yz} dx$$

$$m_{24} = \int m_{xy} dx$$

$$m_{25} = - \int m_{yz} \cdot x dx$$

$$m_{26} = \int (m + m_{yy}) x dx$$

$$N_{22} = \int \frac{\partial m_{yy}}{\partial t} dx + \int N_{yy} dx$$

$$N_{23} = \int \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx + \int N_{yz} dx$$

$$N_{24} = \int \frac{\partial m_{xy}}{\partial t} dx + \int N_{xy} dx$$

$$N_{25} = - \int x \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx - \int N_{yz} x dx$$

$$N_{26} = \int x \frac{\partial m_{yy}}{\partial t} dx + \int N_{yy} x dx$$

$$R_2 - F_2 = - \iint_x p dz dx$$

$$D_2 = \int \{ m_{yy} \bar{V}_y + m_{yz} \bar{V}_z + m_{xy} \bar{P}_w + (\frac{\partial m_{yy}}{\partial t} + N_{yy}) \bar{V}_y \\ + (\frac{\partial m_{yz}}{\partial t} + N_{yz}) \bar{V}_z + (\frac{\partial m_{xy}}{\partial t} + N_{xy}) \bar{P}_w \} dx$$

$$m_{32} = \int m_{yz} dx$$

$$m_{33} = \int (m + m_{zz}) dx$$

$$m_{34} = \int m_{xz} dx$$

$$m_{35} = - \int (m + m_{zz}) x dx$$

$$m_{36} = \int m_{yz} x dx$$

$$N_{32} = \int \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx + \int N_{yz} dx$$

$$N_{33} = \int \frac{\partial m_{zz}}{\partial t} dx + \int N_{zz} dx$$

$$N_{34} = \int \frac{\partial m_{xz}}{\partial t} dx + \int N_{xz} dx$$

$$N_{35} = -\int \frac{\partial m_{zz}}{\partial t} dx - \int N_{zz} x dx$$

$$N_{36} = \int \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx - \int N_{yz} x dx$$

$$R_3 - F_3 = \iint_c p dy dx - \iint_{c_o} p_o dy dx$$

$$D_3 = \int \{ m_{yz} \bar{V}_y + m_{zz} \bar{V}_z + m_{xz} \bar{P}_w + (\frac{\partial m_{yz}}{\partial t} + N_{yz}) \bar{V}_y \\ + (\frac{\partial m_{zz}}{\partial t} + N_{zz}) \bar{V}_z + (N_{xz} + \frac{\partial m_{xz}}{\partial t}) \bar{P}_w \} dx$$

$$m_{42} = \int m_{xy} dx$$

$$m_{43} = \int m_{xz} dx$$

$$m_{44} = \int (m_{xx} + i_{xx}) dx$$

$$m_{45} = -\int m_{xz} x dx$$

$$m_{46} = \int m_{xy} x dx$$

$$N_{42} = \int \frac{\partial m_{xy}}{\partial t} dx + \int N_{xy} dx$$

$$N_{43} = \int \frac{\partial m_{xz}}{\partial t} dx + \int N_{xz} dx$$

$$N_{44} = \int \frac{\partial m_{xx}}{\partial t} dx + \int N_{xx} dx$$

$$N_{45} = -\int \frac{\partial m_{xz}}{\partial t} dx - \int N_{xz} x dx$$

$$N_{46} = \int \frac{\partial m_{xy}}{\partial t} dx + \int N_{xy} x dx$$

$$R_4 - F_4 = \iint_c p(y dy + z dz) dx - g \sin \phi \int m(z'_o - z'_g) dx \\ - g(1 - \cos \phi) \int m(y'_o - y'_g) dx$$

$$D_4 = \int \{ m_{xy} \bar{V}_y + m_{xz} \bar{V}_z + m_{xx} \bar{P}_w + (\frac{\partial m_{xy}}{\partial t} + N_{xy}) \bar{V}_y \\ + (\frac{\partial m_{xz}}{\partial t} + N_{xz}) \bar{V}_z + (\frac{\partial m_{xx}}{\partial t} + N_{xx}) \bar{P}_w \} dx$$

$$m_{52} = -x \int m_{yz} dx$$

$$m_{53} = -\int x(m + m_{zz}) dx$$

$$m_{54} = -\int x m_{xz} dx$$

$$m_{55} = -\int x^2 (m + m_{zz}) dx$$

$$m_{56} = -\int x^2 m_{yz} dx$$

$$N_{52} = -\int x \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx - \int x N_{yz} dx$$

$$N_{53} = -\int x \frac{\partial m_{zz}}{\partial t} dx + \int x N_{zz} dx$$

$$N_{54} = -\int x \frac{\partial m_{xz}}{\partial t} dx - \int x N_{xz} dx$$

$$N_{55} = \int x^2 \frac{\partial m_{zz}}{\partial t} dx + \int x^2 N_{zz} dx$$

$$N_{56} = -\int x^2 \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx - \int x^2 N_{yz} dx$$

$$R_5 - F_5 = \int x \int_c p dy dx + \int x \int_{c_o} p_o dy dx$$

$$D_5 = -\int x \{ m_{yz} \bar{V}_y + m_{zz} \bar{V}_z + m_{xz} \bar{p}_v + (\frac{\partial m_{yz}}{\partial t} + N_{yz}) \bar{V}_y \\ + (\frac{\partial m_{zz}}{\partial t} + N_{zz}) \bar{V}_z + (\frac{\partial m_{xz}}{\partial t} + N_{xz}) \bar{p}_v \} dx$$

$$m_{62} = \int x (m + m_{yy}) dx$$

$$m_{63} = \int x m_{yz} dx$$

$$m_{64} = -\int x m_{xy} dx$$

$$m_{65} = -\int x^2 m_{yz} dx$$

$$m_{66} = \int (m + m_{yy}) x^2 dx$$

$$N_{62} = \int x \frac{\partial m_{yy}}{\partial t} dx + \int x N_{yy} dx$$

$$N_{63} = \int x \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx + \int x N_{yz} dx$$

$$N_{64} = \int x \frac{\partial m_{xy}}{\partial t} dx + \int x N_{xy} dx$$

$$N_{65} = -\int x^2 \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} dx - \int x^2 N_{yz} dx$$

$$N_{66} = \int x^2 \frac{\partial m_{yz}}{\partial t} - \int x^2 N_{yy} dx$$

$$R_6 - F_6 = -\int x \int_c p dy dx$$

$$D_6 = \int x \{ m_{yy} \bar{V}_y + m_{yz} \bar{V}_z + m_{xz} \bar{p}_v + (\frac{\partial m_{yy}}{\partial t} + N_{yy}) \bar{V}_y \\ + (\frac{\partial m_{yz}}{\partial t} + N_{yz}) \bar{V}_z + (\frac{\partial m_{xz}}{\partial t} + N_{xz}) \bar{p}_v \} dx$$

$$K_{45} = \sum_i K_i (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) \cdot (z_i n_{xi} - x_i n_{zi})$$

$$K_{46} = \sum_i K_i (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) \cdot (-y_i n_{xi} + x_i n_{yi})$$

$$K_{51} = \sum_i K_i (-x_i n_{zi} + z_i n_{xi}) n_{xi} = K_{15}$$

$$K_{52} = \sum_i K_i (-x_i n_{zi} + z_i n_{xi}) n_{yi} = K_{25}$$

$$K_{53} = \sum_i K_i (-x_i n_{zi} + z_i n_{xi}) n_{zi} = K_{35}$$

$$K_{54} = \sum_i K_i (-x_i n_{zi} + z_i n_{xi}) (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) = K_{45}$$

$$K_{55} = \sum_i K_i (-x_i n_{zi} + z_i n_{xi})^2$$

$$K_{56} = \sum_i K_i (-x_i n_{zi} + z_i n_{xi}) (-y_i n_{xi} + x_i n_{yi})$$

$$K_{61} = \sum_i K_i (x_i n_{yi} - y_i n_{xi}) n_{xi} = K_{16}$$

$$K_{62} = \sum_i K_i (x_i n_{yi} - y_i n_{xi}) n_{yi} = K_{26}$$

$$K_{63} = \sum_i K_i (x_i n_{yi} - y_i n_{xi}) n_{zi} = K_{36}$$

$$K_{64} = \sum_i K_i (x_i n_{yi} - y_i n_{xi}) (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) = K_{46}$$

$$K_{65} = \sum_i K_i (x_i n_{yi} - y_i n_{xi}) (z_i n_{yi} - x_i n_{zi}) = K_{56}$$

$$K_{66} = \sum_i K_i (x_i n_{yi} - y_i n_{xi})^2$$

$$\begin{aligned}
K_{11} &= \sum_i K_i n_{xi}^2 \\
K_{12} &= \sum_i K_i n_{xi} n_{yi} \\
K_{13} &= \sum_i K_i n_{xi} n_{zi} \\
K_{14} &= \sum_i K_i n_{xi} (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) \\
K_{15} &= \sum_i K_i n_{xi} (z_i n_{xi} - x_i n_{zi}) \\
K_{16} &= \sum_i K_i n_{xi} (-y_i n_{xi} + x_i n_{yi}) \\
K_{21} &= \sum_i K_i n_{yi} n_{xi} = K_{12} \\
K_{22} &= \sum_i K_i n_{yi}^2 \\
K_{23} &= \sum_i K_i n_{yi} n_{zi} \\
K_{24} &= \sum_i K_i n_{yi} (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) \\
K_{25} &= \sum_i K_i n_{yi} (z_i n_{xi} - x_i n_{zi}) \\
K_{26} &= \sum_i K_i n_{yi} (-y_i n_{xi} + x_i n_{yi}) \\
K_{31} &= \sum_i K_i n_{zi}^2 \\
K_{32} &= \sum_i K_i n_{zi} n_{yi} = K_{23} \\
K_{33} &= \sum_i K_i n_{zi}^2 \\
K_{34} &= \sum_i K_i n_{zi} (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) \\
K_{35} &= \sum_i K_i n_{zi} (z_i n_{xi} - x_i n_{zi}) \\
K_{36} &= \sum_i K_i n_{zi} (-y_i n_{xi} + x_i n_{yi}) \\
K_{41} &= \sum_i K_i (-z_i n_{yi} n_{xi} + y_i n_{zi} n_{xi}) \\
K_{42} &= \sum_i K_i (-z_i n_{yi}^2 + y_i n_{zi} n_{yi}) \\
K_{43} &= \sum_i K_i (-z_i n_{yi} n_{zi} + y_i n_{zi}^2) \\
K_{44} &= \sum_i K_i ((-z_i n_{yi} + y_i n_{zi}) \cdot (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi})) \\
&= \sum_i K_i (-z_i n_{yi} + y_i n_{zi})^2
\end{aligned}$$

第三章 計算例

為了顯示本研究所建計算程式之功能，乃選取一油輪作為供試船進行繫纜狀態下，受斜向規則波作用時之船體運動及繫纜力試算。

3.1 供試船

供試船為一艘三萬五千噸排水量之油輪，其主要尺寸如下表所示。

供試船型		油輪
全長	Loa	200 公尺
水線長	Lwl	198 公尺
模寬	B	38.33 公尺
吃水	d	6.00 公尺
排水量	D	35,000 噸

3.2 繫纜狀態

本計算程式設定最大繫纜數為 12，而試算以 8 條繫纜為例，其繫纜佈置如圖三所示，各繫纜之輸入條件則示於下表。表中之數據是採用線型模座標(Offsets)描述上常用之座標系，即 z 軸以向上為正，而原點置於基線上。計算程式在進行運動計算之前會自動先執行轉換至第二章所述之座標系。

i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)	n_{xi}	n_{yi}	n_{zi}	$K(\text{kgf/m})$
1	-100	0	14.2	-0.707	0	0.707	3500
2	-50	18.94	14.2	-0.577	0.577	0.577	3500
3	0	19.17	14.2	0	0.707	0.707	3500
4	50	19.17	14.2	0.577	0.577	0.577	3500
5	100	0	14.2	0.707	0	0.707	3500
6	50	-19.17	14.2	0.577	-0.577	0.577	3500
7	0	-19.17	14.2	0	-0.707	0.707	3500
8	-50	-18.94	14.2	-0.577	-0.577	0.577	3500

3.3 波浪狀態

本計算例以波向角 135 度之艏波(Bow Sea)，波高 2 公尺，波長船長比分別為 1.0(case 1)及 5.0(case 2)之兩種規則波為例進行船體五自由度運動及繫纜力之計算。

3.4 計算結果

側移(sway)，起伏(heave)，橫搖(roll)，縱搖(pitch)，平擺(sway)等船體運動及 8 條繫纜拉力之時序列計算結果依序分別就 case 1 示於圖四(1)~(13)，就 case 2 示於圖五(1)~(13)。另就繫纜力振幅整理如下表。

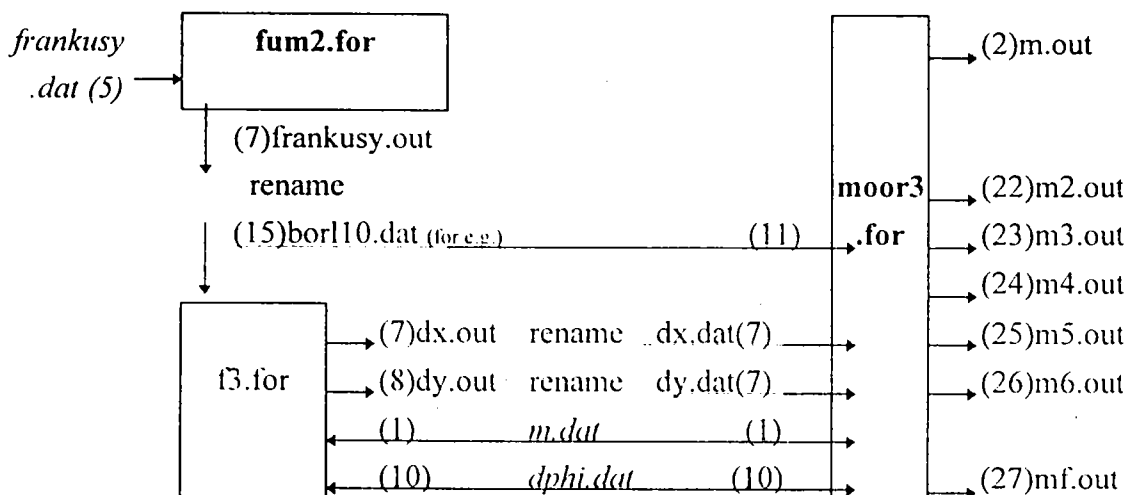
繫纜編號	波長船長比 1.0	波長船長比 5.0
1	4.2 ton	2.7 ton
2	1.4 ton	2.4 ton
3	3.5 ton	3.4 ton
4	4.4 ton	3.2 ton
5	4.2 ton	2.6 ton
6	2.5 ton	2.5 ton
7	4.5 ton	3.5 ton
8	5.2 ton	3.3 ton

由上表顯示波向角 135 度之艏波於短波長時，4 號及 8 號纜之受力最大；長波長時，3 號及 7 號纜之受力最大，而受力最小者則皆發生在 2 號及 6 號纜，此結果顯示了定性上合理之趨勢。

第四章 計算程式系統架構說明

本研究所發展之繫纜船舶運動及繫纜力計算程式系統之架構如下表所示，其各子程式之功能及 I/O 之說明並簡述於其後。

繫纜運動計算程式(5dmon\moor\work\)架構說明



fum2.for : 計算船體各(NOS)斷面, 各(NZL)吃水, 在各橫搖角(J=1,30 直到甲板沒水即自動中止)狀態下之附加質量矩陣及減衰係數矩陣。亦即對船艏斷面吃水種類數設限, 避免在斷面露出水面之狀態下仍作計算。

f3.for : 計算各斷面在各吃水、各橫搖角狀態下附加質量對吃水之斜率(dy.out)以及對橫搖角之斜率(dx.out)。

moor3.for: 繫纜船舶 5D 運動及繫纜力計算(一波向、一波頻、一波高、最多 12 條繫纜之狀態下)

執行步驟: (1)fum2 (2)rename frankusy.out ?? .dat 指定為 f3 之輸入檔 (3)f2 (4)rename dy.out dy.dat (5)rename dx.out dx.dat (6)moor3

輸入檔: 1) *frankusy.dat* (offsets 及波況) 2) *m.dat* (offsets、波況、繫纜資料及計算條件) 4) *dphi.dat* (吃水、橫搖角狀態表; 二者皆可由 fum2.for 之計算結果得知, 而前者可加入適當之強制)

最終輸出檔: (1)m.out : 靜水計算結果。

(2)m2.out ~m6.out : 依序為 sway、heave、roll、pitch、yaw 等運動之無因次時間歷程(位移以波振幅, 角位移以波斜率振幅作無因次化)。

(3)mf.out : 各列依序為各纜之繫纜力(單位 kgf)時間歷程。

第五章 結 論

本研究針對原已發展完成之非線性運動截片理論及程式，予以擴充考慮繫纜復原力之作用，進行計算式之推導與程式擴充，並以一試算實例顯示了此程式系統之功能及其實用上之有效性。利用本程式系統即可算得繫纜船舶在任意波向及波頻之規則波狀態下之船體運動及繫纜力之反應函數，進而利用一般線性統計分析即可探討任意給定波譜之不規則波中之船體運動與繫纜力。

參考文獻

- [1] 邱逢琛、廖元進：高速船艦在斜波中之非線性運動， NTU-NAOE-Tech. Report 416 (1993)
- [2] 邱逢琛、廖元進：A Practical Method for Estimating Ship Motions of High-speed crafts in Oblique Waves, 日本造船學會論文集 174 號(1993)
- [3] Krovin-Krowkovsky, B. V.: Investigation of ship motions in Regular waves, TSNAME, Vol. 63, (1955)
- [4] 渡邊惠弘：船之上下動及縱搖理論，九州大學工學集報， 31 卷 1 號 (1958)。
- [5] 田才福造、高木又男：規則波中之應答理論及計算法，耐航性研討會(第 1 回)，日本造船學會(1969)。
- [6] Salvesen, Tuck and Faltinsen: Ship Motions and Sea Load, TSNAME, Vol. 78 (1970).
- [7] 山本善之、藤野正隆、深澤塔一：考慮非線形性之波浪中船體縱運動及縱強度，日本造船學會論文集 143 號(1978)， 144 號(1978)， 145 號(1979)， 150 號(1981)。
- [8] 藤野正隆、邱逢琛：向波中航走之高速艇縱運動及波浪荷重，日本造船學會論文集 154 號(1983)。
- [9] 邱逢琛、李雅榮、周顯光：大型高速艇縱波浪荷重之考察，日本造船學會論文集 163 號(1988)。

- [10] 藤野正隆、尹範相：大波高波浪中船體波浪荷重之研究，日本造船學會論文集 156 號(1984)，157 號(1985)。
- [11] Fujino, M. and B. S. Yoon: A practical Method of Estimating Ship Motions and Wave Loads in Large Amplitude Waves, ISP. Vol. 33, No.385(1986).

$O - XYZ : F_0$ Frame

$o' - x'y'z' : F_v$ Frame

$o - xyz : F_B$ Frame

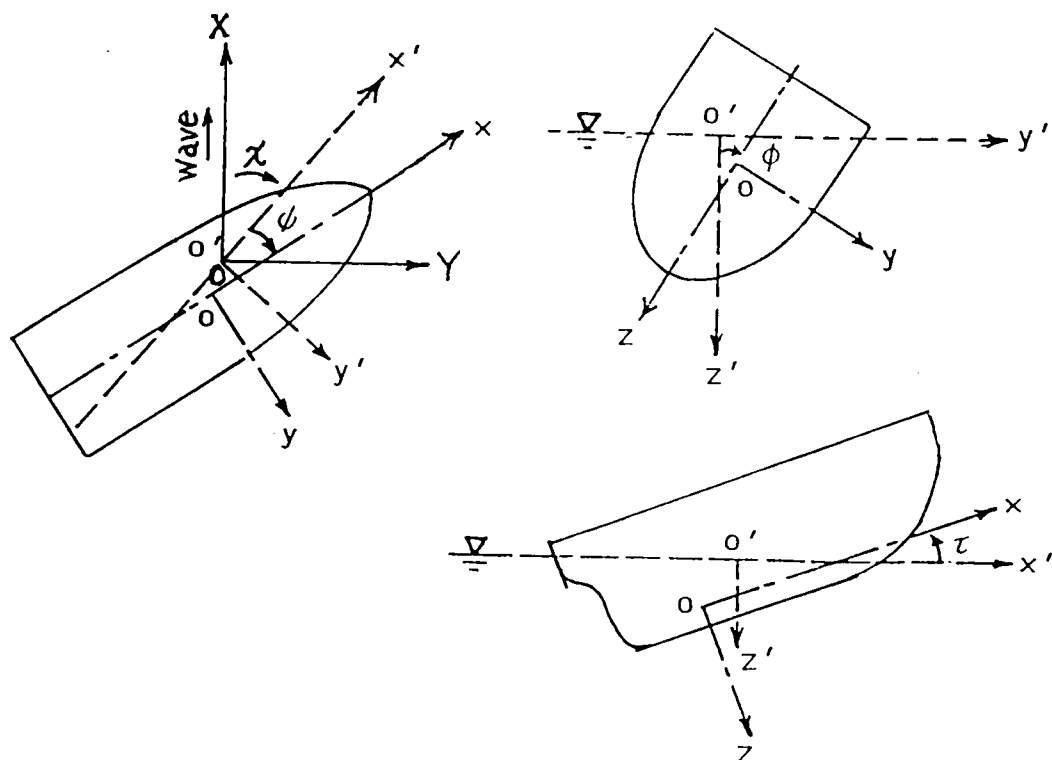
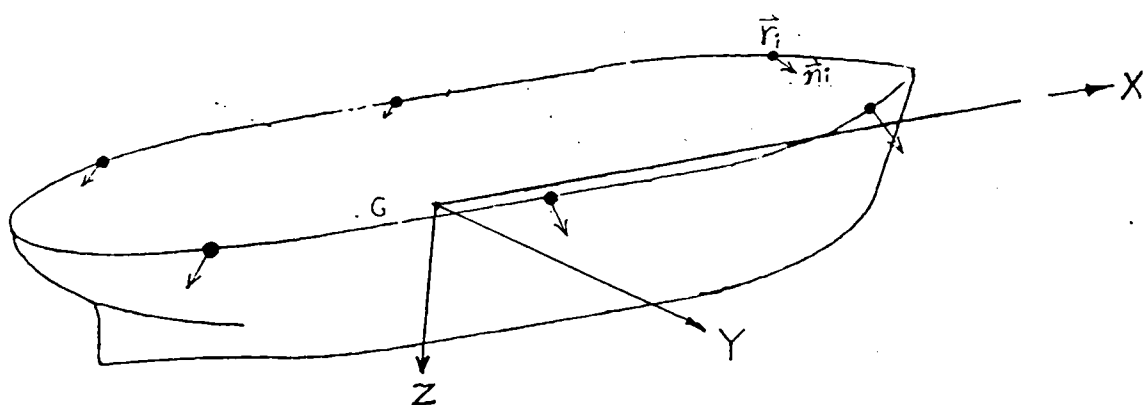
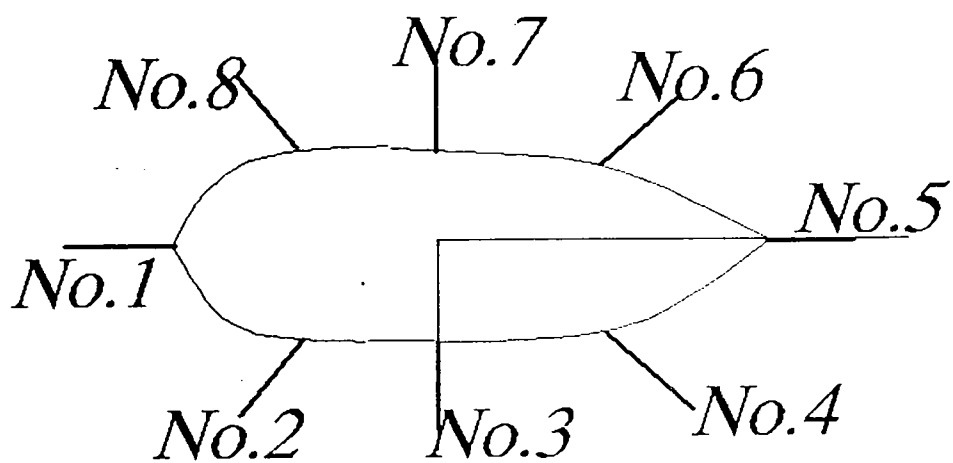


Fig. 1 Coordinate System



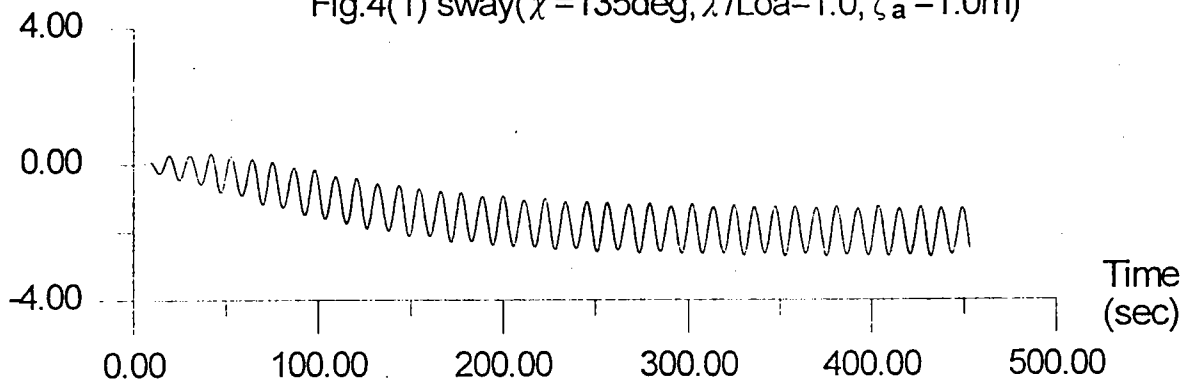
圖二 繫纜座標系



圖三 繫纜佈置

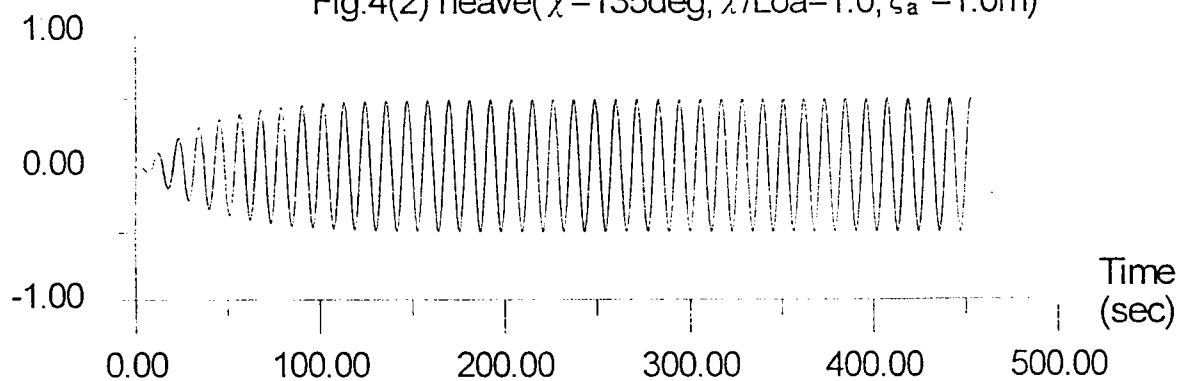
η / ζ_a

Fig.4(1) sway($\chi = 135\text{deg}$, $\lambda / \text{Loa} = 1.0$, $\zeta_a = 1.0\text{m}$)



ζ / ζ_a

Fig.4(2) heave($\chi = 135\text{deg}$, $\lambda / \text{Loa} = 1.0$, $\zeta_a = 1.0\text{m}$)



$\phi / \kappa \zeta_a$

Fig.4(3) roll($\chi = 135\text{deg}$, $\lambda / \text{Loa} = 1.0$, $\zeta_a = 1.0\text{m}$)

