

小型船舶軌跡控制測試及GIS整合討論

李 信 德 何 羽 立 林 蔚 良 曾 慶 耀[†]

國立台灣海洋大學 運輸與航海科學系 通訊與導航工程系
關鍵詞：軌跡控制、導航律、自航器、內模式控制、即時動態量測

摘 要

本文以內模式控制IMC(Internal Model Control)設計法，針對Nomoto船舶模式進行航向控制自航器設計，再以PID控制器架構實現之。經由結合高精度即時動態RTK (Real Time Kinematics) GPS定位，並運用所提出之修正四象限導航律計算參考航向角，經由一序列之航向變換控制，進行軌跡追蹤之任務，成功達成船舶自動操縱控制之目的。於此透過NavCOM生產之NCT-2000D GPS接收機、Pacific Crest所生產無線電資料傳輸設備PDL (Positioning Data Link)及電子羅盤TCM2等系統整合，以提供實驗船舶位置、艏向資訊作為導航及控制計算依據。實驗介面乃使用研華公司之ADAM 4000系列模組作為類比/數位訊號轉換器，且運用線性電阻尺為舵機舵角之迴授訊號，於海洋大學小艇碼頭進行小型船實驗測試。本研究先經由電腦模擬，找出可行之控制器增益參數，並發現該增益值可以直接引用於實船測試，因而大幅節省實驗需求時間。本文順利完成航向控制及軌跡控制之任務，並於航行過程蒐集位置、航向、橫搖、水深、風向/風速等環境及本船資料，建構一小型地理資訊系統架構。本研究所建構之系統，除可供作不同自航器設計法之測試平台，亦提供一經濟且便於操作的港域水文資料調查平台。

前 言

船舶的自動航行愈來愈受到重視，乃因船舶航行於多變及廣闊的海洋中，自動航行能夠大幅的減少人員的工作量，進而達到自動化及節省人力成本的目的[1]。在GPS應用技術日漸成熟之下，要使船舶維持特定航向及特定航路已非難事[2-3]。GPS的應用雖然廣泛，其定位的精度卻隨著應用的層面不同而有不同考量。現實中應用於船舶導航的誤差可容許達數公尺，而在本論文實驗中，為要求其精確度所以用RTK GPS提供定位資訊，以達到公分級定位為目的[4-5]。

本文於設計自航器之前，先分析船舶數學模式，並將之簡化轉換成系統轉移函數，此即受控體模式。其次將實驗船進行迴旋試驗，並利用系統鑑定技巧找出受控體模式中之參數。而經由內模式控制(IMC, Internal Model Control)方法設計所得控制器，可找出相關控制參數及受控體模式參數彼此對應關係。其特色在易於了解各控制參數之意義，並可藉以較有系統的方式來調整系統控制行為[6]。至於軌跡追蹤控制乃以一系列之航向變換來達成，其中之參考航向乃以本文

提出修正之四象限法，利用本船位置與目標點計算之，以提供航向自航器之用。最後則整合GPS、舵角、風速、風向及水深資訊，利用MapInfo軟體，建構一地理資訊系統GIS(Geographic Information System)展示平台。本案完成航向及軌跡控制自航器之設計及實驗驗證，除了可作為不同自航器設計方法之可行性測試平台外，亦提供一使用方便、低成本之港域環境調查以及水文資訊即時監控平台。

船舶運動數學模式

通常於討論船舶運動時，若不考慮其結構應變影響，可將之視為六個自由度運動空間剛體運動，圖1為船舶運動六自由度示意圖。依牛頓第二運動定律求得六個自由度的方程式，其分別為三個平移運動方程式，及三個旋轉運動方程式。而在討論船舶操縱性能時，大都假設外在環境為一無風無浪之情況，只將船舶視為一縱移(surge)、橫移 sway)、平擺(yaw)之三自由度平面運動。但對於瘦長、高船速、高重心之船舶時，其橫搖之情況較為劇烈而無法忽視之[1,7]。

[†] 責任作者(B0102@mail.ntou.edu.tw)

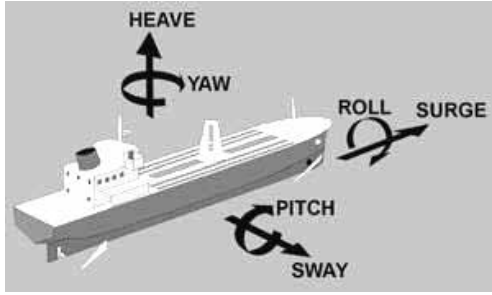


圖1 船舶運動六自由度示意圖

本實驗進行場所在海洋大學小艇碼頭，其為一防波堤內三面封閉海域，遮蔽效果良好，由波浪所造成之影響幾可忽略不計，因此可將本實驗船之運動視為三自由度之平面運動。

由力量方程式及力矩方程式出發並將之簡化可得下列三個自由度的運動：

$$\text{縱移方程式 } X = m(\dot{u} - rv) \quad (1)$$

$$\text{橫移方程式 } Y = m(\dot{v} + ru) \quad (2)$$

$$\text{平擺方程式 } N = I_z \dot{r} \quad (3)$$

(1)~(3)中， X 、 Y 、 Z 分別表示縱移、橫移及平擺方向所受之力及力矩， m 代表船體質量， u 、 v 、 r 分別為縱移、橫移及平擺速度， $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\dot{r}$ 分別為縱移、橫移及平擺加速度， I_z 為船體對 z 軸之旋轉慣性矩。將(1)~(3)式在等速直線運動下予以線性化，此時縱移方程式與其它方程式解偶合(decoupled)，因此只剩下橫移(2)及平擺(3)兩個方程式。經拉氏轉換，可得Nomoto二階模式如下

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{k(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (4)$$

而一般實船資料處理得知(4)式中的時間常數 T_3 和 T_2 相近，所以在自航器之設計可再將(4)簡化，得到Nomoto一階模式

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{k}{1+Ts} \quad (5A)$$

其中 $\delta(s)$ 為舵角，而

$$T = T_1 + T_2 - T_3 \quad (5B)$$

T 相當於船舶之時間常數，表示船舶反應速率， K 相當於舵效增益。由(5)式可看出船舶的穩態平擺角速率為 $K \cdot \delta$ 。

對(5)式求解可得方向角速度方程式如下：

$$r(t) = K\delta(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (6)$$

將上式微分可得方向角加速度方程式如下

$$\dot{r}(t) = \frac{K\delta}{T}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (7)$$

又因為方向角 ψ 微分 $\dot{\psi} = r$ ，因此可將(5)式改寫成如下

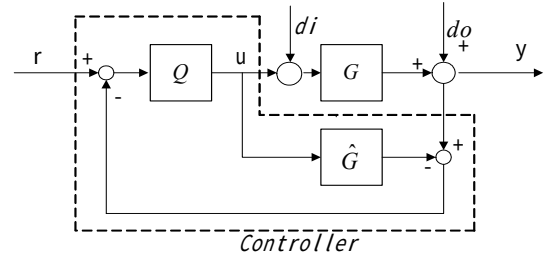


圖2 內模式控制系統架構

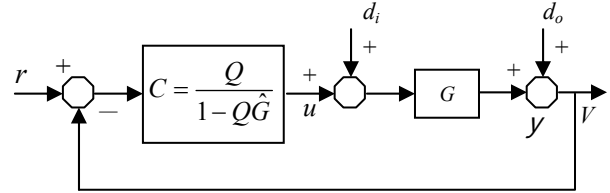


圖3 等效閉迴路控制架構

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{k}{s(1+Ts)} \quad (8)$$

對(8)式求解可得方向角方程式如下

$$\psi(\delta) = K\delta(t - T + Te^{-\frac{t}{T}}) \quad (9)$$

當輸入舵角命令時，再配合實測所得之 K 、 T 值，由(5)式至(9)式即可得到船舶任一時間之方向角、方向角速度，進而達到控制船舶航向及追跡之目的。本研究即以(8)式為受控體模式，作為控制器設計之依據。(8)式中之 K 及 T 值則由實船迴旋試驗資料，利用系統鑑定方法，分別求出其值為0.36及6.0。

內模式控制(IMC)原理

圖2為IMC控制架構， $\hat{G}$ 為受控系統 G 之近似模式， Q 為待設計之轉移函數。從架構圖中可明顯看出，當 $\hat{G}$ 等於 G 時，則整個系統將等效於一個開路系統，其回授信號將等於干擾訊號。整個系統簡化為只要受控系統 G 和控制器 Q 穩定則全系統就會穩定， Q 控制器可用來表示出所有能被設計出的傳統控制器，此為IMC架構上之優點。

利用 $C = Q / (1 - Q\hat{G})$ 之關係轉換，可將圖2之內模式架構，經由修正內模式架構後，等化成傳統閉迴路控制架構如圖3 [6]。

圖2中 $Q = F \hat{G}_{inv}$ ，其中 F 為調變濾波器 $F = (\beta S + 1)^{-m}$ ， $\hat{G}_{inv}$ 為受控體模式 $\hat{G}$ 之近似逆模式，而 m 為一正整數，選取特定之值使得 Q 之分子分母階數相同，於實驗進行時選取不同之 β 值以決定閉迴路系統的反應速率。

IMC不穩定系統之設計

於(8)式方向角對舵角的關係式存在一極點於虛軸上，因此該系統為一不穩定受控系統。而針對不穩

定系統設計時，需將系統區分為穩定及不穩定之部分。

本研究中參考[8]，將船舶方向角對舵角之轉移函數，依不穩定系統設計方式進行自航器設計如下：

<步驟1> 分解

$$\hat{G} = \frac{\psi}{\delta} = \frac{k}{s(Ts+1)} = \frac{\hat{B}_s \hat{B}_u}{\hat{A}_s \hat{A}_u} \quad (10)$$

其中 $\hat{B}_s = K$ ， $\hat{B}_u = 1$ ， $\hat{A}_s = (1+Ts)$ ， $\hat{A}_u = s$ ，(10) 式中之下標 s 表穩定部分， u 表不穩定部分。

<步驟2> 定義下列各式

$$N_f = n_m s^m + \dots + n_1 s + n_0 \quad (11)$$

$$L = l_q s^q + \dots + l_1 s + l_0 \quad (12)$$

$$D_f = d_n s^n + \dots + d_1 s + d_0 \quad (13)$$

<步驟3> 找出步驟<2>中各式之階數

$$\deg^*(\hat{A}_u) = m = \deg(N_f) \quad (14)$$

$$\deg(L) = q = \deg(\hat{A}_u) + \deg(\hat{A}_s) - \deg(\hat{B}_s) - 1 \quad (15)$$

$$\deg(D_f) = n = \deg(\hat{A}_s) + 2\deg(\hat{A}_u) - \deg(\hat{B}_s) \quad (16)$$

<步驟4> 選擇 D_f 來決定閉迴路極點

$$D_f = (\beta s + 1)^n \quad (17)$$

依據步驟<2>、<3>、<4>，分別可得到

$$N_f = n_1 s + n_0 \quad (18)$$

$$D_f = (\beta s + 1)^3 \quad (19)$$

$$L = l_1 s + l_0 \quad (20)$$

<步驟5> 解Diophantine equation

$$\hat{A}_u L s + \hat{B}_u N_f = D_f \quad (21)$$

並找出 N_f

<步驟6> 調變濾波器 F 如下

$$F = \frac{N_f}{D_f} \quad (22)$$

<步驟7> 將 $Q = F\hat{G}_{inv}$ 帶入下式得控制器為

$$C = \frac{Q}{1 - Q\hat{G}} = \frac{F\hat{G}_{inv}}{1 - F\hat{G}_{inv}\hat{G}} \quad (23)$$

依據步驟1至步驟7，最後可得到本研究中所使用之控制器如下所示：

$$C = \frac{\frac{3\beta Ts^2}{3\beta^2 K} + \frac{(3\beta + T)}{3\beta^2 K} + \frac{1}{3\beta^2 K}}{\frac{\beta}{3}s^2 + s} \quad (24)$$

亦可將(24)式表示為PID之型式

$$C = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1 + \gamma s}$$

$$= \frac{(K_D + K_p \gamma)s^2 + (K_p + K_I \gamma)s + K_I}{s(\gamma s + 1)} \quad (25)$$

而 $(\gamma s + 1)^{-1}$ 之目的在於消除高頻區微分作用所產生之不良影響。比較(24)與(25)式可得到PID控制器之相關係數如下

$$\gamma = \frac{\beta}{3} \quad (26)$$

$$K_I = \frac{1}{3\beta^2 K} \quad (27)$$

$$K_p = \frac{8\beta + 3T}{9\beta^2 K} \quad (28)$$

$$K_D = \frac{24T - 8\beta}{27\beta K} \quad (29)$$

即便是一個具有豐富經驗的工程師，通常欲將PID控制中的三個控制增益參數調整至適當之值，皆非易事。而內模式控制法所設計之PID控制器，其 K_p 、 K_I 、 K_D 跟船舶參數 K 、 T 及 β 有關，其精神在於捨棄了參數之個別調整，經由調整 β 單一參數，而得到整體性能之提升。本研究即從實船迴旋測試得到載具之相對應 K 、 T 值並選取適當的 β ，即可達到使用者所需求之反應速度。

軌跡追蹤自航器架構及導航律

本研究中利用一序列之航向變換控制，進而達成軌跡控制任務，將船舶駛向目標點之目的，亦即實驗所使用軌跡控制器乃架構於航向控制器之上，如圖4所示。其中之導航器由RTK GPS提供本船座標，依據本文所提之修正四象限導航法，並與欲達目標點之座標加以計算出參考航向角。而本船之實際航向角資訊則由TCM2電子羅盤提供之。在本實驗中所使用的類比/數位訊號轉換器乃採用研華股份有限公司ADAM 4000系列模組，計有ADAM 4520 RS-485轉RS-232模組、ADAM 4016單類比輸出及4組類比輸入，其搭配有圖控軟體GeniDAQ。

為了配合GeniDAQ所提供較簡易之運算式及實現可行性下，本研究中簡化計算參考航向角，採用四象限法導航律[9]，並加以修正如下。首將程式運算中之sine函數以泰勒級數展開式並取其線性項近似之，即

$$\sin \theta \approx \theta \quad (30A)$$

其中 θ 為徑度量。(30A)可改寫為

$$\theta = \frac{\sin \theta}{\pi} \cdot 180 \quad (30B)$$

於(30B)式等號左邊之 θ 為角度量(deg.)。而(30B)式中 $\sin \theta$ 之值可於實驗中由GPS量測值及目標點座標值計算而得。導航所需之GPS定位資料每秒更新一次，如此即可求出計算參考航向角所需之 θ 值。

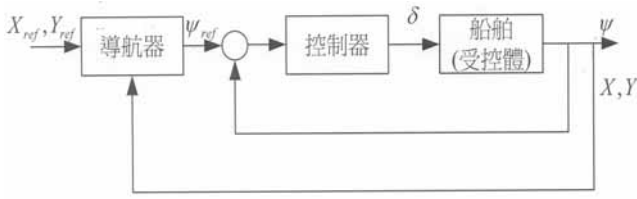


圖4 軌跡控制系統架構



圖5 ADAM 4000類比/數位系列模組

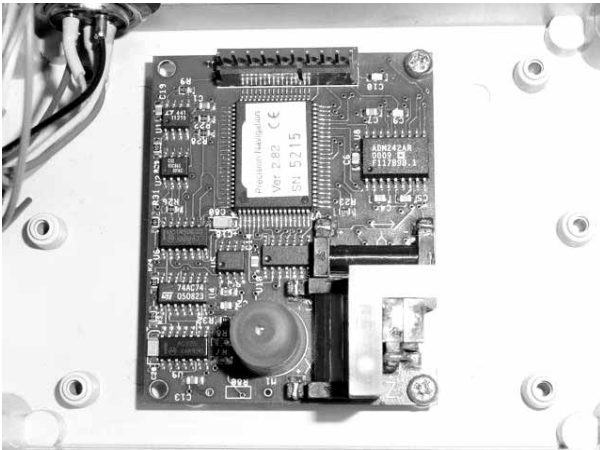


圖6 電子羅盤TCM2

為了減少(30A)式線性化只取一項而產生之誤差，另將以實驗船位置為原點之四個象限各再劃分為二，共可分為8個部分，於此僅將第一象限情形加以說明如下(見圖7-8)：

首先定義 x_b 、 y_b 分別為實驗船的東經、北緯上之相對座標值位置 x_l 、 y_l 分別為目標點1之東經、北緯上之相對座標值位置。

目標點1相對於實驗船之位置為第一象限，先取 y 軸夾角如下

$$\theta = \frac{\sqrt{(x_b - x_l)^2 + (y_b - y_l)^2}}{\pi} \cdot 180 \quad (31A)$$

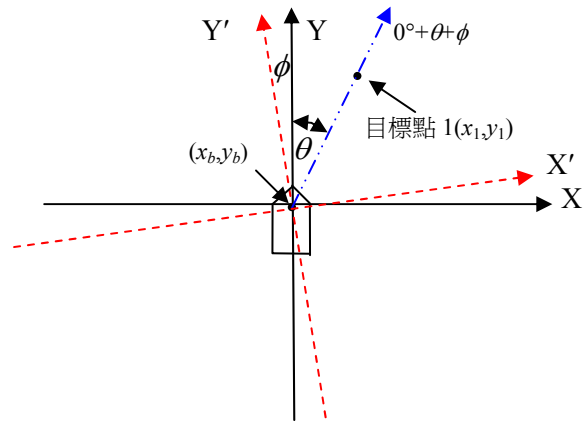


圖7 第一象限與y軸夾角<45°示意圖

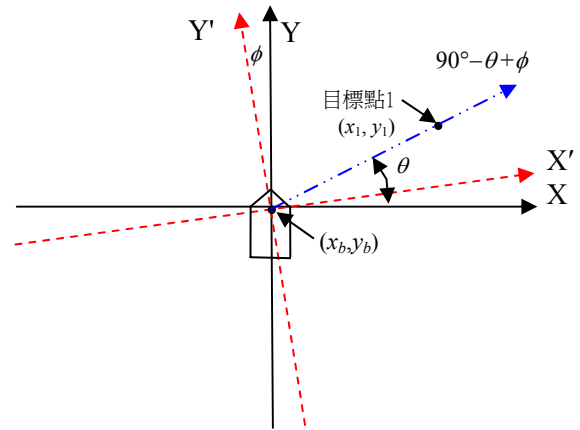


圖8 第一象限與y軸夾角≥45°示意圖

若 $\theta < 45^\circ$ ，則實驗船參考航向角為 $0^\circ + \theta + \phi$ (見圖7)。

若 $\theta \geq 45^\circ$ ，則取x軸夾角如下

$$\theta = \frac{\frac{|y_b - y_l|}{\sqrt{(x_b - x_l)^2 + (y_b - y_l)^2}} \cdot 180}{\pi} \quad (31B)$$

則實驗船參考航向角為 $90^\circ - \theta + \phi$ (見圖8)。

圖7-8中，X-Y軸系為GPS座標軸系，而X'-Y'為電子羅盤軸系。其中之 ϕ 角表示地球正北與磁北之夾角在基隆海域其值約為2-3度。以上導航律之優點在於其計算式簡單易於實現，利用 x 、 y 位置迴授，間接求出導航方向進而達到追跡之目的。而將四個象限以 45° 劃分可將誤差大幅降低，因程式中之運算式最大計算至 45° 角，此時解算出角度誤差約為 4° 左右。

實驗船舶系統架構

本研究中所使用的實驗船為FRP玻璃纖維材質之船舶，其動力使用電動馬達之船外機，其外觀及相關儀器之配置如圖9所示；而實驗船之相關尺寸如表1所示：

表1 實驗船基本資料

船長	400公分
船寬	90公分
船重	300公斤
滿載吃水	艏：11公分；艉：14公分
動力系統	12V直流馬達； 工作電流6.33A~17.05A

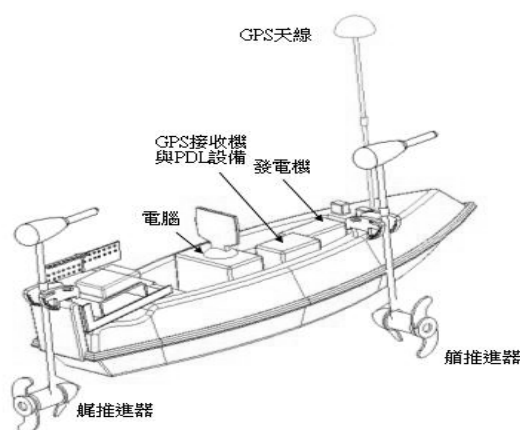


圖9 實驗船舶外觀及儀器配置示意圖

即時動態全球定位系統(RTK GPS)

一般而言，在定位時若只採用單機定位的方式，定位精度約為30公尺左右。為提高定位精度，常採用架設兩部接收機，一架設於待測移動站上，另一個架設於已知點上，盡可能消除誤差來源所造成之偏差，此即差分式(differential) GPS，其精確度可達數公尺以內。若要達到公分級定位精度，則需利用載波相位(carrier phase)訊號作為修正依據，其主要技術關鍵在於解算整數週波未定值(integer ambiguity)[4]，並以無線電裝置即時將基地站所計算之修正量傳送至移動站，此即所謂即時動態量測(Real Time Kinematics RTK) GPS。

本實驗中使用NavCOM 生產之NCT-2000D GPS接收機作為基地站定位系統，其內建有整數週波解算功能，乃利用最小平方法，以找出整數週波未定值[5]。而移動站上安置一NCT-2000D GPS Engine Board，其體積較小但功用與基地站之GPS接收機相同。基地站已知點為海洋大學延平技術大樓頂樓天線位置。移動載具定位資料之修正乃經由Pacific Crest所生產無線電資料傳輸設備PDL (Positioning Data Link)將基地站解算之精確衛星修正資料，傳送至移動載具NCT-2000D GPS Engine Board，以達到公分級的定位精度。本實驗之小艇碼頭與基地站之距離約為500公尺，基地站及載具上之訊號傳送流程如圖10所示。其中方框內設備位於基地站，所在地為海洋大學延平技術大樓9樓。



圖10載具上 PDL及 Engine Board

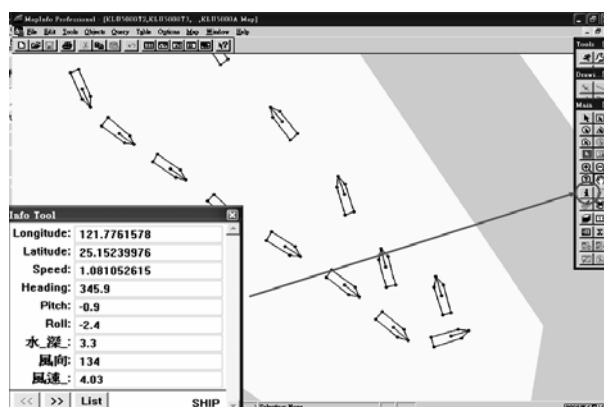


圖11 GIS查詢資料示意圖

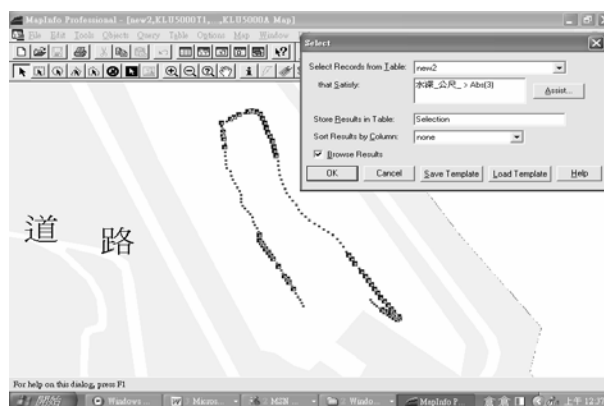


圖12 水深>3公尺查詢示意圖

地理資訊系統(GIS)

本研究中利用MapInfo軟體整合GPS、舵角、風速、風向及水深等量測資訊，建構一地理資訊系統展示平台，將可提供為一使用方便、低成本之港域環境調查以及水文資訊即時監控平台。地理資訊系統之套裝軟體基本功能不外乎下列四類：空間資料的管理與分析、空間資料與屬性資料之整合分析、屬性資料的管理與分析，以及圖形製作功能。

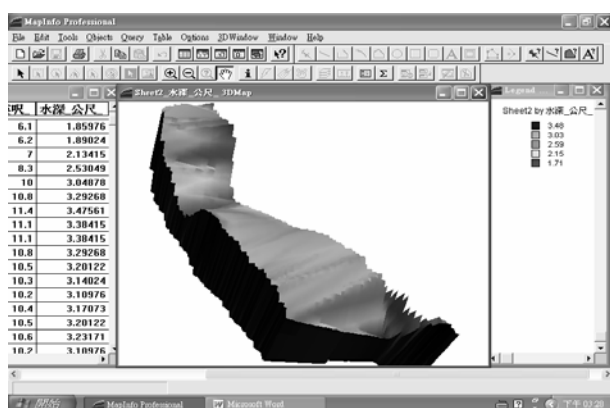


圖13 海洋大學小艇碼頭水深示意圖

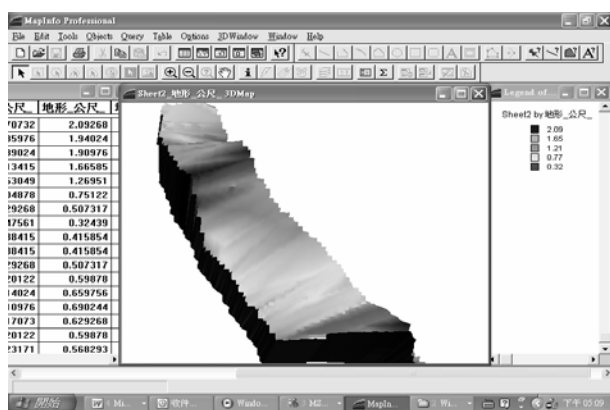


圖14 海洋大學小艇碼頭海底地形圖

而GIS資料庫型態包含了空間資料庫(spatial data)，與屬性資料庫(attribute data)。空間資料庫和地圖相對應；屬性資料庫則是與文字和數字資料相對應，兩者可互相查詢。本文由GIS系統之資料數化、連結、儲存、圖層套疊、整合分析、展示查詢等功能，最終建立一船舶航行時之資料查詢，如圖11及圖12所示。

而以本實驗中蒐集之水深資料及海底地形為主題變數例子，將海洋大學小艇碼頭水深資料圖及海底地形資料圖繪出如圖13及圖14所示。

電腦模擬及分析

本節將內模式控制(IMC)法所設計之航向控制自航器進行電腦模擬，並以小型船舶進行航向保持(course keeping)、航向變換(course changing)、軌跡控制等實驗，其受控體模式如(8)式所示。

本研究使用之小型船舶特性參數 K 、 T 值經迴旋試驗及系統鑑定求出，分別為 $K=0.36$ ， $T=6$ ，再經由選取不同之 β 值來設計控制器，使實驗船達成欲想之反應動作。模擬時於時間 $t=5$ 秒時，下達一方向角 25° 之命令，分別繪出考慮舵機速率限制(SRL)、舵角飽和(SAT)、Dead-Band濾波器及不加入上述三種影響之比

表2 IMC設計航向控制器參數表

	K_p	K_i	K_d	β
Course1	580.247	92.5926	147.325	0.1
Course2	27.1605	3.703704	28.8066	0.5
Course3	8.02469	0.92593	13.99177	1
Course4	2.62346	0.23148	6.58436	2
Course5	1.44033	0.10288	4.11523	3
Course6	0.96451	0.05787	2.88066	4
Course7	0.71605	0.037037	2.13992	5
Course8	0.3025	0.00926	0.65852	10
Course9	0.27041	0.00765	0.52382	11
Course10	0.244367	0.00643	0.41157	12
Course11	0.22283	0.005479	0.3166	13
Course12	0.20473	0.004724	0.23519	14
Course13	0.189321	0.004115	0.16463	15
Course14	0.17604	0.003617	0.10289	16
Course15	0.164485	0.003204	0.04842	17
Course16	0.154338	0.002858	0.0001	18
Course17	0.14536	0.002565	-0.04331	19
Course18	0.13736	0.002315	-0.0823	20
Course19	0.1302	0.0021	-0.11758	21
Course20	0.12373	0.001913	-0.14964	22

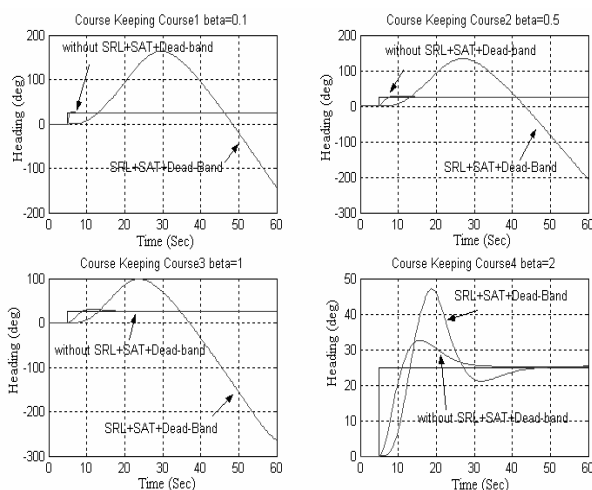


圖15 Course1~Course4模擬圖

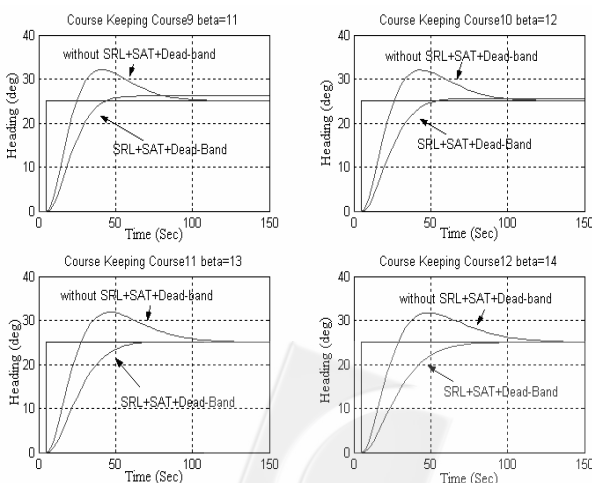


圖16 Course9~Course12模擬圖

較示意圖。而本實驗船舶之舵機速率限制為8.75 deg/sec，舵角飽和為 $\pm 35^\circ$ ，Dead-Band濾波器為 $\pm 3^\circ$ 。圖15及圖16為模擬圖，表2為各種實驗測試項目編號其所對應之控制器參數值。

實船測試結果與討論

本研究共進行三項實船控制測試，包含航向保持控制(圖17-18)，航向變換控制(圖19-20)及軌跡控制測

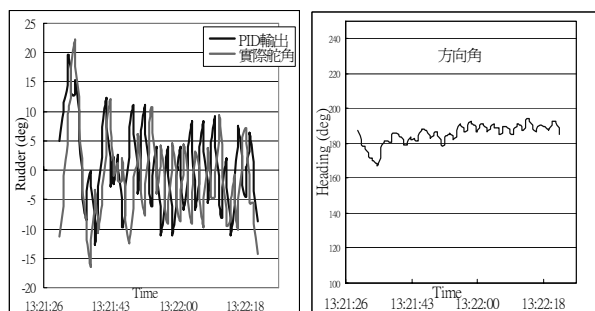


圖17 航向保持Course11軌跡、航向、舵角、誤差圖

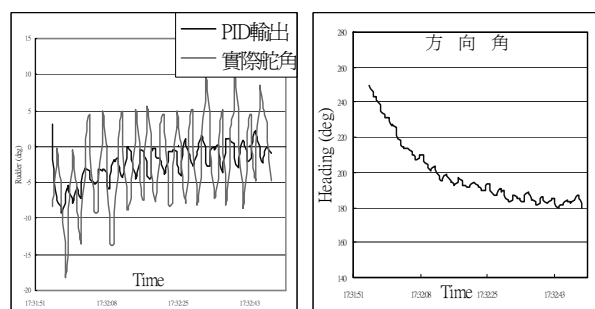


圖18 航向保持Course15軌跡、航向、舵角、誤差圖

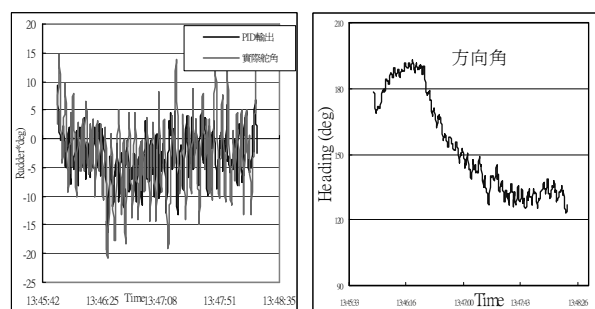


圖19 航向變換Course14軌跡、航向、舵角、誤差圖

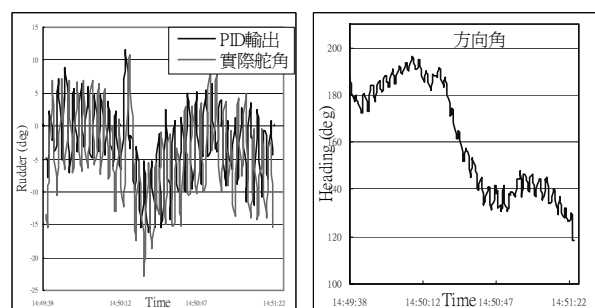


圖20 航向變換Course20軌跡、航向、舵角、誤差圖

試(圖21-23)。各圖型標示之course編號，其對應之控制器參數值如表二中所示。

於航向保持實驗中(圖17-18)，係將航向保持於 180° ，而圖18中刻意將初始艏向朝向 250° 再進行實驗。從圖17方向角圖中可得知實驗結果方向角保持在 $180^\circ \sim 190^\circ$ 左右，其方向角誤差保持在 10° 以內，而用舵量幾乎維持在 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 之間，實驗過程歷時約50秒，實驗船行進約55公尺，顯示其結果良好。由圖18之方向角圖可得知，在程式執行後約35秒，實驗船行進約40公尺時，已能夠將實驗船航向修正回 180° ，其方向角誤差幾乎可降低至零，舵角輸出大多維持小舵角輸出，顯示出設計控制器之強健性能。

於圖19~20航向變換實驗中，係將初始艏向朝向 180° ，待其穩定後下達航向 120° 之命令進行實驗。於圖19之方向角圖中，在實驗開始初期前40秒航向保持在 $170^\circ \sim 190^\circ$ 之間，約40秒後將目標航向角設定為 120° ，於轉向後約60秒追上約 125° 航向角，其用舵量在航向角變換過程有較大之輸出量，其餘時間大都保持在 $-12^\circ \sim +12^\circ$ 之間，最終方向角存在 10° 以內之穩態誤差。而在圖20中，於實驗開始後約45秒將目標航向角轉換為 120° ，其方向角誤差圖顯示其誤差不到 10° ，用舵量於轉向過程有較大之輸出，其餘大多保持於 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 之間，整個實驗過程歷時約120秒，實驗船行進距離約130公尺。

於軌跡控制實驗中(圖21-23)，乃將追跡任務以一連串之航向變換達成之。目標點的追跡達成係以目標點為圓心，設定一半徑3~4公尺(視實驗當時風、流而定)之圓形，進入此圓形範圍即追跡成功，切換至下一個目標點。圖21為4個目標點之追蹤結果，小船初始位於(545,833)座標處。於此一實驗中，出現橫向追跡誤差(cross track error)。於圖22為10個目標點追跡結果，初始點位於(431,862)座標處。其軌跡圖大都能維持於預定路徑上，方向角亦能追上計算出之正確航向，10個目標點皆能將誤差縮小至4公尺左右範圍，其舵角圖在目標點轉換時有較大之輸出，其餘時間大多維持在 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 之小用舵量，圖22之橫向軌跡誤差已有明顯下降，顯示出其目標點追跡相當成功。

經由實驗結果歸納，兩目標點間較適當之距離約為20公尺~35公尺，距離過大容易造成直線路徑之橫向偏移量，若將目標點數目增加，即縮短目標點間之距離，則實驗船之偏離量(誤差量)即降低。最短距離至少應大於兩目標點之間圓形所涵蓋的範圍。本研究中所進行之實驗條件範圍廣闊，目標點相距20公尺至100公尺以上，以及初始船舶距目標航向相差至 140° ，而以內模式(IMC)控制法則所設計之控制器均能達成欲想之目標，顯示以IMC所設計控制器之強健性。而

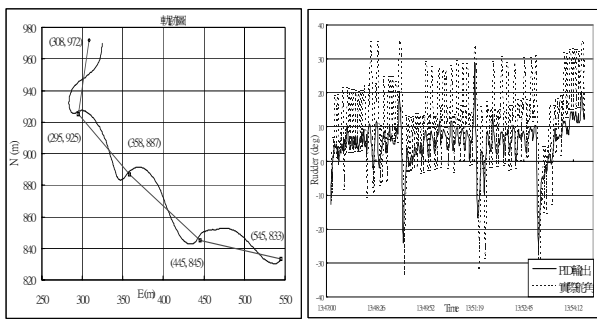


圖21 4 waypoints Course14相關數據圖

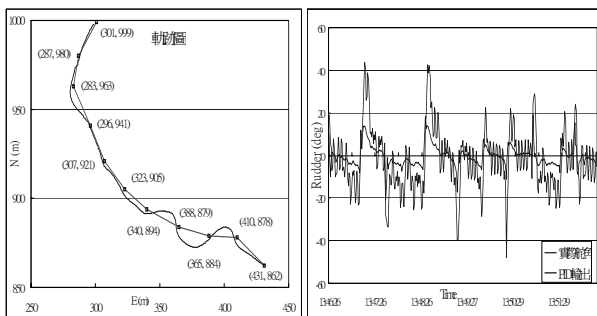


圖22 10 waypoints Course15相關數據圖

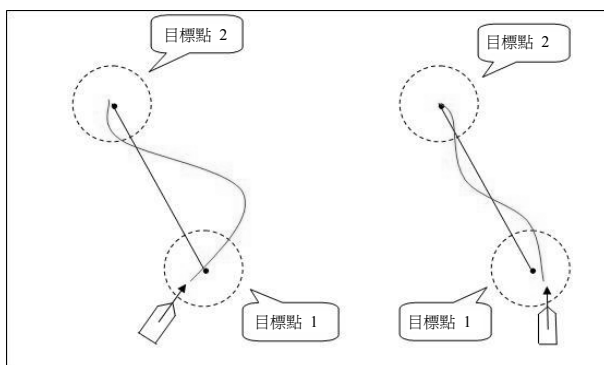


圖23 實驗船進入角度對路徑影響圖

實驗船在進入目標點之圓形範圍時，其進入的角度對於下一目標點之追蹤亦有所影響，進入角度過大將造成直線路徑上的曲折，圖23為其影響示意圖。

結 論

本研究完成了一個航向保持及軌跡控制的實現方案，並就現有之測量儀器，建立一地理資訊系統的初步架構。實驗系統乃整合於一400公分長，90公分寬之小型船舶，並結合高精度之GPS接收機、電子羅盤TCM2、ADAM4000系列模組等設備，對於往後設備的擴充提昇、控制法則之驗證，提供了一完備具整合性的實驗平台。在航向保持及軌跡控制器設計採用內模式(IMC)控制法，其具有簡易設計、易於實現等優點，可經由 β 值控制實驗船反應時間，達到航向保持及追蹤控制之目的。而於模擬階段所獲得之控制器增益可直接應用於實船測試，省卻相當多的實驗時

間。本研究共完成了船舶運動模式參數 K 、 T 值鑑定、航向保持、航向變換、路徑點追蹤等實驗，並將航行過程中所蒐集之水文環境及本船資料，利用地理資訊系統之應用軟體MapInfo作一展示及呈現。在此提出簡化之四象限導航法，可迅速計算參考航向角，成功達成任意路徑點之軌跡控制。後續可考慮同時結合航向角及距離資訊於導航律之計算，以改善軌跡震盪現象。綜觀之，本研究所建構之系統可提供為一使用方便，且十分經濟之航道、水域相關水文資料調查及監控平台。

符 號 說 明

X	沿船舶 x 軸上之外力
Y	沿船舶 y 軸上之外力
N	沿船舶 z 軸上之力矩
r	平擺角速度
u	縱移速度
v	橫移速度
δ	舵角
ψ	方向角
K	舵效增益
T	船舶時間常數
$\hat{G}$	受控體模式
Q	欲設計之轉移函數
G	受控系統
d_i	輸入干擾
d_o	輸出干擾
$\hat{G}_{inv}$	受控體逆模式
$\hat{A}_s$	穩定分母項
$\hat{A}_u$	不穩定分母項
$\hat{B}_s$	穩定分子項
$\hat{B}_u$	不穩定分子項
L	控制器分母多項式
N_f	控制器分子多項式
D_f	閉迴路極點特性多項式
γ	高頻濾波器係數
ϕ	實驗量測磁北與正北誤差
θ	實驗船與座標軸之夾角
K_p	PID控制器之比例參數
K_i	PID控制器之積分參數
K_d	PID控制器之微分參數

誌 謝

本論文研究承國科會經費補助(專題研究計畫編號NSC-93-2611-E-019-017)，使本研究得以順利完成，謹致感謝之意。

參考文獻

1. Fossen T.I., *Marine Control System*, Marine Cybernetics, Trondheim, Norway (2002).
2. Zuidwdg, J.K., "Optimal and Sub-Optimal Feedback in Automatic Track-Keeping Systems," *Proc. 6th Ship Control Systems*, Ottawa, Canada, pp.G1.1.1-G1.1.18 (1981).
3. Morawski L. and J. Pomirski J., "Ship Track-Keeping Experiments with a Physical Tanker Model," *Control Eng. Pract.*, Vol.6, pp.763-769 (1998).
4. 李信德, "模型船航路追蹤自航器之探討", 碩士論文, 國立台灣海洋大學導航與通訊系, 台灣基隆 (2003)。
5. Hatch, R. and T. Sharpe, "A Computationally Efficient Ambiguity Resolution Technique," *Proc. ION GPS*, Salt Lake City, UT, USA, pp.1-7 (2001).
6. Tzeng C.Y., G.C. Goodwin and S. Crisafulli, "Internal Model Control Autopilot Design with Saturating and Slew Rate Limiting Actuator," *Int. J. Adapt. Control*, Vol. 13, pp.23-30 (1999).
7. 曾慶耀, "數學模式與船舶運動方程式", *國立台灣海洋大學海運學報*, 第三期, pp.1-18 (1995)。
8. 林港富, "內模式適應性自航器之設計", 碩士論文, 國立台灣海洋大學航運技術研究所, 台灣基隆 (1997)。
9. 李金河, "水下搖控載具系統設計及導航控制之研究", 碩士論文, 國立台灣大學造船及海洋工程研究所, 台灣基隆 (2001)。

A STUDY ON SMALL BOAT-BASED TRACK-KEEPING CONTROL EXPERIMENTS AND GIS INTEGRATION

S.D. Lee Y.L. Ho W.L. Lin and C.Y. Tzeng

Department of Transportation and Navigation Science
Department of Communications and Guidance Engineering
National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan

Keywords: Course-Keeping, Track-Keeping, Guidance Law, Autopilot, IMC (Internal Model Control), RTK (Real Time Kinematic) GPS Microscope

ABSTRACT

A small boat-based GIS(Geographical Information System) and track-keeping system is proposed in this work. Specifically, the IMC (Internal Model Control) method is used in the autopilot design, and the controller is implemented in the PID structure. The track-keeping mission is achieved through a sequence of course-keeping maneuvers to reach the preselected waypoints. A simplified 4-quadrant guidance law is developed that employs the ownship position and the target waypoint in computing the reference heading needed in the course-keeping loop. Several instruments are used in the experimental studies. Specifically, the high precision NCT-2000D RTK GPS receiver made by NavCom, the electronic compass, the ADAM 4000 A/D D/A modules and two outboard steering engines are installed in the small boat. Simulations for course-keeping and track-keeping are first carried out to examine the feasibility of the proposed approach. Then the small boat-based experiments are conducted in the small boat harbour near the National Taiwan Ocean University to further validate the performance of the proposed guidance and control law. The feasible controller gain values found in the computer simulations are readily applicable in the field tests. Consequently, the time spent on the small boat-based experiments is significantly reduced. Satisfactory course-keeping and up to 10 waypoints track-keeping experimental results are achieved. The data collected with the onboard sensors are integrated in forming the small boat-based GIS platform that may serve as a cost-effective harbour waterway surveying system.

(Manuscript received Apr. 12, 2006,
Accepted for publication Jun. 8, 2006)

