

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

仿生型自主式水下載具之基本研究—子計畫四：仿生型自主式水下載具感測及知覺系統之研發(III)

Research and Development of the Sensing and Perception System for Biomimetic AUVs(III)

計畫編號：NSC 90-2611-E-002-035

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：鄭勝文 台灣大學工程科學及海洋工程學研究所

計畫參與人員：許懷文 台灣大學工程科學及海洋工程學研究所

一、中文摘要

本計畫為整合型總計畫“仿生型自主式水下載具(BAUV)之基本研究”之子計畫(四)，針對總計畫研發具備魚類外形及其感測、知覺、行為規畫、運動控制、學習等功能 BAUV 之目標，擬從自主式水下載具感測器、訊號處理器、運動控制器、致動器、推進器及外形之整合與最佳化觀點，進行感測器模組及知覺模組之規畫／模擬／設計／製作／測試，並結合子計畫(三)之成果，整合成為具學習能力之感知與運動統合系統。

本計畫執行期間為三年，本(第三)年度之預定工作目標為建立感測器融合及強化學習架構及演算邏輯，完成離脫知覺訊號處理軟體，轉為 DSP 執行碼，進而結合行為／運動控制軟體，構成智慧型行為演算系統。

關鍵詞：自主式水下載具、仿生學、感測器融合、人工智慧、學習、水下機器人視覺、數位訊號處理器(DSP)。

Abstract

This report describes the 2nd year result of sub-project no.4 of the joint project titled 'Basic Study on Biomimetic Autonomous Underwater Vehicles(BAUVs),' which aims to build a fish-like underwater vehicle as a testbed to investigate interactions and coordination among appearance, motion, behavior, and perception modules.

In this sub-project, we aim to develop the sensing and perception modules for BAUV. The sensor module consists of visual, auditory, olfactory, tactile, temperature, altitude, and torque sensors. The perception module relies on the sensor module to provide sensory information about the dynamic environment and internal state of vehicle. The active perception mechanism allows the BAUV to learn its sensor fusion operation through training. The perceptual information is controlled by an intention-driven way from sensory data and sent to

the behavior control module, which will be implemented by sub-project no.3.

This sub-project is a three-year one, and the major research goal of this year is to establish the sensor fusion module with real-time operation capability.

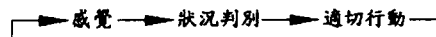
Keywords : Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Biomimetics, Sensor Fusion, Artificial Intelligence, Learning, Underwater Robot Vision, Digital Signal Processor (DSP).

二、緣由與目的

2.1 研究背景

當前的機器人技術水準，無論在民生、國防或科學研究領域，實用上雖已達成熟階段，由於其操控模式仍屬預先程式與人工遙控之組合運用，自主性(autonomy)、環境適應性、強健性(robustness)等方面均有待革命性突破。鑑於此，人型(humanoid)、獸型、昆蟲型、魚型等仿生型機器人已成為此領域主要研發對象，其目的不外瞭解及模仿自然界生物系統所呈現高度環境適應能力之機制。

為了因應變化無常的自然環境，生物系統採行



之無窮迴圈，經由學習(learning)及自我組織(self-organization)，不斷改變內部組織與外形；因此，一個仿生系統之建構，除必須考慮感測器、訊號處理器、控制器、致動器、動力源、機構、外型等構成要素的各自仿生機制外，系統整合架構及演算法之確立成為關鍵課題，其中，階層式整合架構(hierarchical integration structure)[1]，整合多數感測器資訊之感測器融合(sensor fusion)或同時納入運動控制而成的感測運動融合(sensory-motor fusion)[2]等觀念已逐漸普及，其主要目的在於提昇對外界環境之感覺能力並提供生存所需行為能力(如覓食、捕獵、避難

等)；類似想法包括 Aloimonos 等[3]在電腦視覺領域提出的主動式視覺(active vision)，及 Nakadai 等[4]在人型機器人研究中採行的主動式聽覺(active audition)。

魚型機器人之情形，受到

1. 光波在水中之衰減、折射及散射，造成能見距離縮短，影像扭曲及對比降低。

2. 推進與運動操控統御方程式，屬於身體外型變化與周圍介質間之高度非線性耦成問題。(此點與仿生飛行機器人之情形相似)

等水下環境相關因素之影響，除海豚之主動式聲納功能[5]、魚類側線(lateral line)之探討[6]及製作[7]等水下生物特有感測器，以及採形狀記憶合金、高分子人工肌肉等特殊材料之致動器[8]研究外，大多主題集中於推進及運動控制相關流體動力特性之探討[9][10]，至今未見具體可行的感測運動融合模式。

2.2 研究目的

本計畫為整合型總計畫“仿生型自主式水下載具(BAUV)之基本研究”之子計畫(四)。總計畫之目的在於研發一部具備魚類外型及其感測(sensing)、知覺(perception)、行為規劃(behavior planning)、運動控制(motion control)、學習(learning)等功能之水下可適智慧型機器人(underwater adaptive intelligent robot)試驗機(testbed)，並進行相關試驗與改良，以期針對現行自主式水下載具架構適應水下未知環境能力闕如，及低速徘徊運動操控能力不足之問題，提供根本的解決方案。

本子計畫之目的在於建立仿生型自主式水下載具之感測與知覺模組架構及演算法，進而實現一個以主動式立體視覺為主的水下動態視覺系統，使 BAUV 具備掌握本身和外界環境狀態以及標定追蹤運動物體之能力，作為呈現仿生智慧型行為之基礎。

三、感測與知覺模組架構

3.1 處理流程

如 figure 1 所示，分感測器層、處理層及融合層。意圖產生器(intention generator)依任務(mission)內容、本身狀態及外界狀態，決定注意焦點(focus of attention)，用以選擇感測對象及資料內容，進而依據融合所得資料，並參照知識/資料庫，採行適當的行為模式，此稱意圖驅動(intention-driven)。亦可在查覺突發事件(event)發生時，採行應急行為，此稱事件驅動(event-driven)。

視覺、聽覺及環境感測器負責擷取外界環境相關狀態，而本身內部狀態，例如目前位置及姿態資料，可由慣性導航系統(inertia navigation system)取得。感測器資料融合(sensor data fusion)意指依據不同感測器資料間之轉換、比對與綜

合，主要輸出結果含環境重建、事件辨識及物體標定等，其處理架構包括感測器融合法則知識/資料庫(fusion rule knowledge/data base)、感測器選擇器(sensor selector)及推論機(inferring engine)，各採模糊邏輯(fuzzy logic)、基因演算法(GA; Genetic Algorithm)及類神經網路(ANN; Artificial Neural Network)建構。

3.2 感測器配置

仿生型AUV之感測器及各座標系統定義如 figure 2 所示。O-XYZ 為作為所有座標系統基準之世界座標系統(world coordinate system)， $o_c-x_c y_c z_c$ 為固定於 BAUV 之區域座標系統(local coordinate system)。二組聽覺與視覺感測器距離分別為 b_A 與 b_v 。

四、動態視覺系統

4.1 基本觀念

如 table 1 所示，攝影機可分為單眼(monocular)或雙眼(binocular)視覺，依攝影機本身之移動或固定之狀態，可有四種組合情形。本計畫採用移動雙眼，可增大可視範圍作主動大範圍的追蹤；採用掃描式之結構光源，搭配固定雙眼視覺，只需使用單點式之光束投射在物體上，利用立體成像，匯集光源掃描移動時至不同點時，所計算之三維位置，映射(mapping)出物體三維成像之輪廓外形。

4.2 水下雙眼視覺之理論基礎

生物的感知功能有視覺、聽覺、嗅覺、觸覺、溫度感應等，其中視覺系統可快速的提供外界物體種類、大小、位置及運動狀態等資訊，是瞭解外在資訊最直接的方式。

4.2.1 一般化鏡頭配置

三維空間之一點 $P=[X_c Y_c Z_c]^T$ ，經由透視投影投影至左眼影像[12]

$$\begin{bmatrix} x_L' \\ y_L' \\ f \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， (x_L', y_L') 為左眼鏡頭理論成像點， f 為攝影機的焦距。若將二維之點改以線性映射(linear mapping)至三度空間之齊次座標(homogeneous coordinates)，則關係如下：

$$\begin{bmatrix} x_L' \\ y_L' \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 3×4 大小之矩陣稱為投影矩陣。若設每個像素水平及垂直之單位長度之倒數分別為 k_u 、 k_v ，點 (u_0, v_0) 則為光軸 Z_L 通過之像素位置，將 (x_L', y_L') 以像素為單位之表示為

$$u = u_0 + k_u x_L' \quad (3)$$

$$v = v_0 - k_v y_L' \quad (4)$$

齊次座標之表示為

$$P_L' = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f k_u & 0 & u_0 \\ 0 & -f k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_L' \\ y_L' \\ f \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_L' \\ y_L' \\ f \end{bmatrix} \quad (5)$$

A稱為攝影機校正矩陣(camera calibration matrix)，而世界座標上之點與攝影機上之點可用旋轉矩陣R與平移矩陣T來完成之。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T_{3 \times 1} \quad (6)$$

以齊次座標之表示為

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此，從三度空間到平面影像之關係為

$$P_L' = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A[R|T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

即，

$$P_L' = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

將(9)式重新整理可得

$$u = \frac{P_{11}X_w + P_{12}Y_w + P_{13}Z_w + P_{14}}{P_{31}X_w + P_{32}Y_w + P_{33}Z_w + P_{34}} \quad (10)$$

$$v = \frac{P_{21}X_w + P_{22}Y_w + P_{23}Z_w + P_{24}}{P_{31}X_w + P_{32}Y_w + P_{33}Z_w + P_{34}} \quad (11)$$

矩陣型式為

$$\begin{bmatrix} P_{11}u - P_{14} & P_{12}u - P_{13} & P_{31}u - P_{33} \\ P_{21}v - P_{24} & P_{22}v - P_{23} & P_{31}v - P_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{14} - P_{14}u \\ P_{24} - P_{24}v \end{bmatrix} \quad (12)$$

右邊影像點同理可得

$$P_R' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = P_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = A'[R'|T'] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

聯立左右兩個或者多個攝影機，可得一個過定(over-determined)線性方程式。

$$\begin{bmatrix} P_{31}u - P_{14} & P_{32}u - P_{13} & P_{33}u - P_{33} \\ P_{31}v - P_{24} & P_{32}v - P_{23} & P_{33}v - P_{33} \\ P_{31}u' - P_{14}' & P_{32}u' - P_{13}' & P_{33}u' - P_{33}' \\ P_{31}v' - P_{24}' & P_{32}v' - P_{23}' & P_{33}v' - P_{33}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{14} - P_{14}u \\ P_{24} - P_{24}v \\ P_{14}' - P_{14}'u' \\ P_{24}' - P_{24}'v' \end{bmatrix} \quad (14)$$

矩陣型式為

$$A_{2n \times 3} X_w = b_{2n \times 1} \quad (15)$$

可利用最小平方誤差投影法解得

$$X_w = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (16)$$

即求得三維的世界座標位置。

由於水下鏡頭扭曲，而 (x_L', y_L') 為左眼鏡頭理論成像點，必須將實際影像座標 (x_L, y_L) 加上扭曲補償量 $(\Delta x, \Delta y)$ ，為 x_L 及 y_L 的非線性函數。

$$\begin{bmatrix} x_L' & y_L' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L + \Delta x & y_L + \Delta y \end{bmatrix} \quad (17)$$

必須藉由攝影機校正[11]求得。

4.2.2 對應點搜尋

立體匹配(stereo matching)的目的是為了能從二張影像中重建三維的幾何景象。而對應(correspondence)問題，也就是找尋左右影像中對應於同一投影點之共軛對(conjugate pair)。運用之方法即在找尋右影像中元素最相似於左影像中之某元素，而搜尋的元素可以是一個點、一個區域或某種特徵[15]。搜尋時可利用幾何限制(geometrical constraint)以減小搜尋的範圍，例如以左影像已知點為參考點，則對應於右影像的共軛點必發生於相對位置的左邊；同理，因此幾何限制必須滿足下式：

$$d_l(x) = x_r - x_l < 0 \quad (18)$$

$$d_r(x) = x_l - x_r > 0 \quad (19)$$

本計畫採相關比對法之差異絕對值總和法

(SAD; Sum of Absolute values of Difference)來作

為對應點搜尋之方法，為區塊為基礎之方法，就是利用樣板圖樣與影像中所有可能的位置的區域相減並取其絕對值總和，其中具有最小的絕對值總和的那塊區域即為目標物存在的位置，其方程式如下式：

$$\min_{(i,j)} \{d_{(i,j)} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |I_{(i+x,j+y)} - T_{(x,y)}|\} \quad (20)$$

where $0 \leq i < K-N$, $0 \leq j < L-M$

其中 $I_{(i+x,j+y)}$ 為 $K \times L$ 像素(pixel)之影像 $I_{(ij)}$ 中某塊有可能的區域，而 $T_{(x,y)}$ 則為 $N \times M$ 像素之樣板圖樣，必須小於所要搜尋的影像大小。

4.2.3 光學校正

立體匹配的目的就是最重要的就是作如 4.2.2 節所述之對應點搜尋。因此，我們必須在架設相機時，調整左右二相機使得其共軛極點能夠共線，對原始影像做光學對正(rectification)，使左右影像的共軛等視點(conjugate epipolar points)可以達共線。

4.3 水下運動物體標定與追蹤

4.3.1 水下目標物辨識

物體在水下移動時，首先系統必須察覺到，並將目標物辨識且標定其位置，移動能量法是一般最常使用之方法。

差分法(differencing approach)，也稱移動能量法，為連續擷取二張序列影像，並求得二張序列影像灰階強度之差值。若擷取之影像各點在座標點 x, y 時間為 t 之強度值為 $F(x, y, t)$ ，假設每二張影像擷取時間間隔相差 t ，以二張序列影像灰階強度之差值，取一閾值作二值化，稱為差分相(difference picture)。

$$DP_d(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } |F(x, y, t) - F(x, y, t+t)| > T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

將影像上的各像素之座標相加，除以所有像素的總和數目，可得物體出現在影像中之形心位

置。

$$x_c = \frac{\sum_{i,j \in R} x}{A} \quad (22)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i,j \in R} y}{A} \quad (23)$$

其中A為差分相中所有像素的總和數目。

此外，以物體形心為中心點，建立一BxB大小的模板，作為將來目標物搜尋比對的依據。

4.3.2 目標物匹配

目標物之匹配(matching)採階層模板比對法，將絕對值總和改以如下式表示[13][14]

$$SAD_{(x,y)}(u,v) = \sum_{j=0}^{B-1} \sum_{i=0}^{B-1} |I_i(x+i, y+j) - I_{i-1}(x+u+i, y+v+j)| \quad (24)$$

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \arg \min_{(u,v) \in S} SAD_{(x,y)}(u,v) \quad (25)$$

利用影像金字塔結構，產生多組階層影像

$$I'_l(x,y) = I^{l+1}(x,y) + I^{l+1}(x+2^{K-l-1}i, y) + I^{l+1}(x, y+2^{K-l-1}j) + I^{l+1}(x+2^{K-l-1}i, y+2^{K-l-1}j)$$

$$\text{其中, } l=K-1 \sim 0 \quad (26)$$

再找出每階層之絕對差總和。

$$LSAD'_{(x,y)}(u,v) = \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{L-1} |I'_l(x+2^{K-l}i, y+2^{K-l}j) - I'_{l-1}(x+u+2^{K-l}i, y+v+2^{K-l}j)|$$

$$\text{其中, } l=K \sim 0 \quad (27)$$

為了節省匹配時間，對各階層之取樣採

$$I'_l(x,y) = \frac{1}{4} (I^{l+1}(x,y) + I^{l+1}(x+2^{K-l-1}i, y) + I^{l+1}(x, y+2^{K-l-1}j) + I^{l+1}(x+2^{K-l-1}i, y+2^{K-l-1}j))$$

$$\text{其中 } l=K-1 \sim 0 \quad (28)$$

重新找出取樣後每階層之絕對差總和，

$$2^{K-l} 2^{K-l} LSAD'_{(x,y)}(u,v) = \sum_{j=0}^{\frac{B}{2^{l-1}}-1} \sum_{i=0}^{\frac{B}{2^{l-1}}-1} |I'_l(x+i, y+j) - I'_{l-1}(x+u+i, y+v+j)|$$

$$\text{其中, } l=K \sim 0 \quad (29)$$

最後利用 Winner-update 演算法[14]，將各階層誤差得分總和最小之位置，當作最後之比對結果。

4.3.3 追蹤策略

如 figure 7(a)所示，在左右雙眼各別運作時，各具有 ϕ_f 之視角。如 figure 7(b)所示，若採用雙眼視覺(binocular vision)則可視範圍減去重疊的部分 ϕ_s 視角，使得可視範圍成為 $2\phi_f - \phi_s$ 。而重疊的部分 ϕ_s 視角，即為立體成像所需之工作區域，也就是物體必須落在此區，系統才能在左右影像中找到對應點。

追蹤流程部分如 figure 5 所示，一開始攝影機處於靜止狀態，攝影機不斷擷取即時影像，並如 4.3.1 節所述，作影像相減求差分像。一旦物體出現，即差分像大於一預設之閾值，接著以最佳分界值二值化之，並求出物體之形心，存成比對用之模板。若此時僅有單眼之差分像大於預設之閾值，我們將驅動步進馬達，將雙眼重疊的部分 ϕ_s 視角中心對正物體，即為使物體進入立體成像所需之工作區域，並利用 4.2.2 節所述之方法找出

對應點位置，並更新模板。

差分像之重心位置或比對後更新之位置為中心，經由攝影機校正[11]求得校正係數，將校正係數代入追蹤程式中，並利用立體成像法[11]，並作座標轉換，在有效校正距離內，可即時計算出被追蹤物之位置。

在第 t 組左右影像中定出比對樣板之位置，接著設定第 t+1 組左右影像之搜尋範圍。如 4.3.2 節所述，利用階層模板比對法，求出比對出的位置。由於模板比對計算時間，會影響驅動步進馬達反應的時間，比對結果亦可能有誤，故採用灰色預測的方式，預先測得物體之位置，驅動步進馬達，以即時對正物體於影像於可視範圍內，以完成追蹤的任務。

五、動態視覺應用實例

5.1 追蹤

視覺追蹤的基本觀念，就是藉由攝影機機承載平台與目標物之間的同步運動，達成將目標物位置保持在影像上解析範圍內之任務，並假設目標物移物範圍均在攝影機平台的工作在範圍內。

5.1.1 實驗系統架構

請參照 figure 6，水槽上架設三軸可動平台，裝置雙眼機構，並可固定水下麥克風(hydrophones)。影像校正板(back screen)，作為攝影機校正時之基準平面，以利定位計算。步進馬達平台(X-Y-Z stepping motor table)，主要功能為移動攝影機進行主動感測。

微電腦系統控制器內，主控電腦：採用P-III 1G中央處理單元(CPU)，進行主控(host)程式撰寫及影像處理。GPIO介面卡可快速精確的控制步進馬達動作。影像擷取卡則採用具TI C6201型DSP之影像擷取卡，可擷取單張或連續影像視訊(video signals)至主控電腦中。信號處理單元(signal processing unit)，採用具TI C6701型DSP，可擷取聲音訊號(audio signals)至主控電腦中。步進馬達控制器，主要功能為接受電腦經由GPIO介面卡所傳遞的指令，控制X-Y-Z步進馬達平移台。

5.1.2 結果與討論

如 figure 8(a)所示，假設音源位於P點，發出訊號後被水下麥克風 S_1, S_2 收到，所以點 S_2 與 S_1 間之相對時間延遲為 Δt ，若已知方向角度 ϕ 即可定出一個二度空間內之目標。如 figure 8(b)所示，由於方向角度 ϕ 未知，表示當音源至兩水下麥克風間之距離差為一常數時，在二度空間內為一雙曲線之方程式，可經由此雙曲線事先得知物體之方位。

如 figure 10 所示，為物體於空間上移動之軌跡，標識於圖上之位置 1~6，分別對應 figure 9(a)~9(f) 之實際序列影像。影像中之方框，表示比對目標物之位置，其中心即為對應點。

皆顯示目標物移物範圍均在相機平台的工作在範圍內，承載平台與目標物之間的同步運動，達成將目標物位置保持在影像上解析範圍內之任務。由模板比對會累計誤差，須每次更新(update)以減少三維位置之估測誤差。

5.2 主動式光源測距成像

如 4.1 節所述，利用為掃描式之結構光源(scanning structured lighting)，搭配主動雙眼視覺，使用單點式之光束投射在物體上，可測單點之三維位置，映射出物體成像之輪廓外形。

5.2.1 實驗系統架構

實驗設備大致上採用 5.1.1 節所述之設備，如 figure 11 所示，待測物置於水槽內，並將單點式(point beam)結構光源固定於步進馬達平移台上，掃描投射於被測物。在左右影像內皆可看到投射之紅色光點，立用立體成像之方法，可即時求得單點之三維位置。

驅動步進馬達連續掃描一預設路徑，可獲得數組三維位置，作重建物體曲面之數據。

5.2.2 結果與討論

Figure 12(a)所示，為量測所得光點二維座標分布，輪廓與被測物相當一致，重建之資料點數愈密，所呈現之外觀與被測物之實際外型愈接近。Figure 12(b)所示，為物體之等距線圖，可明顯看出物體之深度分布。

實驗過程中投射單點式掃描之結構光源至被測物時，由深度突然變化很大，使得物理世界中某些點無法同時出現在左右影像中，造成遮蔽(occlusion)的問題，使得立體匹配時錯誤。物體表面材質之反射或吸光效果，亦會影響實驗之結果。

六、結論

驗證實驗結果顯示，本計畫所提出階層式感測與知覺系統架構，以及水下運動物體標定追蹤演算法，具備充分的可行性，可作為發展 BAUV 之基礎。

七、參考文獻

- [1] K. Nakadai, H. G. Okuno and H. Kitano, "Real-Time Speaker Localization and Speech Separation by Audio-Visual Integration," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Automation (ICRA-2002)*, pp. 1043-1049, IEEE, May 2002.
- [2] A. Namiki, Y. Nakabo, I. Ishii and I. Ishikawa, "lms Sensory-Motor Fusion System," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 244-252, 2000.
- [3] Y. Aloimonos, I. Weiss and A. Bandyopadhyay, "Active Vision," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 4, pp. 333-356, 1987.
- [4] K. Nakadai, T. Matsui, H. G. Okuno and H. Kitano, "Active Audition System and Humanoid Exterior Design," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2000)*, pp. 1453-1461, Takamatsu, Japan, Nov. 2000.
- [5] W. W. C. Au, *The Sonar of Dolphins*, Springer, New York, 1993.
- [6] H. Bleckmann, G. Tittel and E. Bluebaum-Gronau, "The Mechanosensory Lateral Line," eds S. Coombs, P. Goerner and H. Muenz, pp. 501-526, Springer, Berlin, 1989.
- [7] Z. Fan, J. Chen, J. Zou, D. Bullen, C. Liu and F. Delcomyn, "Design and fabrication of artificial lateral line flow sensors," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, pp. 655-661, 2002.
- [8] *Proceedings of the Special Session on Bio-Engineering Research Related to Autonomous Underwater Vehicles*, 10th Intl. Symposium on UUST, Sept. 1997, New Hampshire, USA.
- [9] N. Kato and M. Furushima, "Pectoral fin model for maneuver for underwater vehicles," *Proc. of IEEE Symp. on Autonomous Underwater Vehicle Tech.*, pp.49-56, 1996.
- [10] P. R. Bandyopadhyay et al., "Low-speed maneuvering hydrodynamics of fish and small underwater vehicles," *ASME Journal of Fluid Engineering*, Vol. 119, pp.136-144, 1997.
- [11] 鄭勝文, 游凌豪, 許懷文, "仿生型自主式水下載具感測及知覺系統之研發(II)", 國科會專題研究成果報告, NSC 89-2611-E-002-038, 民國九十年七月。
- [12] R. Hartley and P. Sturm, "Triangulation," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.68, No.2, pp. 146-157, 1997.
- [13] C.H. Lee and L.H. Chen, "A Fast Motion Estimation Algorithm Based on the Block Sum Pyramid," *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol.6, No.11, pp.1587-1591, 1997.
- [14] Y.S. Chen and Y.P. Hung, "Fast Block Matching Algorithm Based on the Winner-Update Strategy," *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol.10, No.8, pp.1212-1222, Aug. 2001.
- [15] J. Shi and C. Tomasi, "Good Features to track," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.593-600, 1994.

Table 1 Combination of State Parameters and Modes of Behavior in the Dynamic Vision System for Fish Robot

Camera	Stationary	Moving	Stationary	Moving
Illumination	Monocular	Monocular	Binocular	Binocular
Diffuse of Specular	Change Detection of Moving Object (Waiting)	Active Monocular Vision (Tracking)	Motion Estimation of Moving Object (Localization)	Active Stereo Vision (Tracking)
Fixed Structured Lighting	--	3D Imaging Using FanBeam (Searching Mapping)	--	--
Scanning Structured Lighting	3D Imaging Using Fan Beam (Mapping)	--	3D Imaging Using Point Beam (Mapping)	--

$O - XYZ$: World Coordinate System
 $o_c - x_c y_c z_c$: Local Coordinate System of Fish Robot
 $o_L - x_L y_L z_L$: Local Coordinate System of Left Eye
 $o_R - x_R y_R z_R$: Local Coordinate System of Right Eye

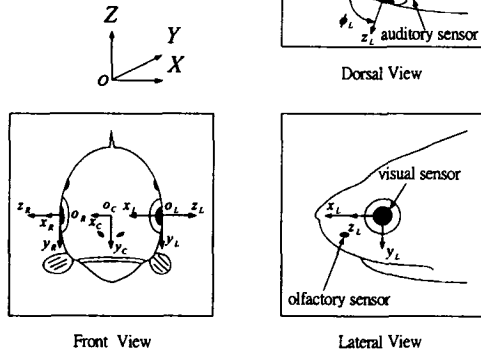


Figure 2 Sensor Allocation and Coordinate Systems of Fish Robot

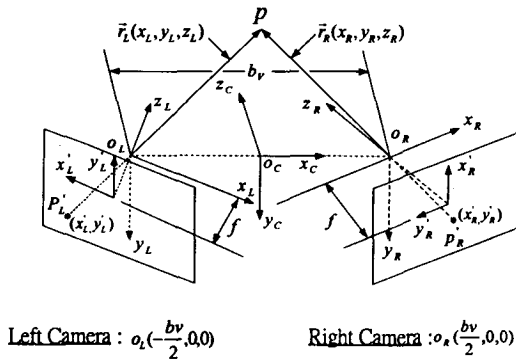


Figure 3 General Arrangement of Binocular Visual System

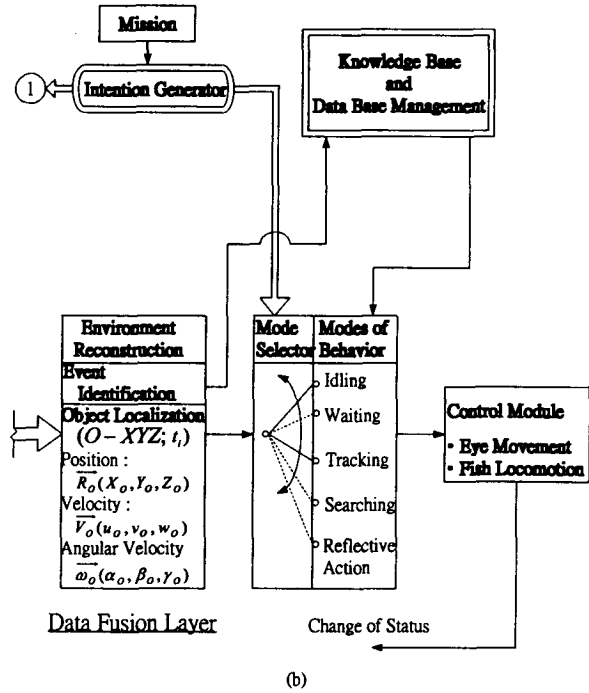
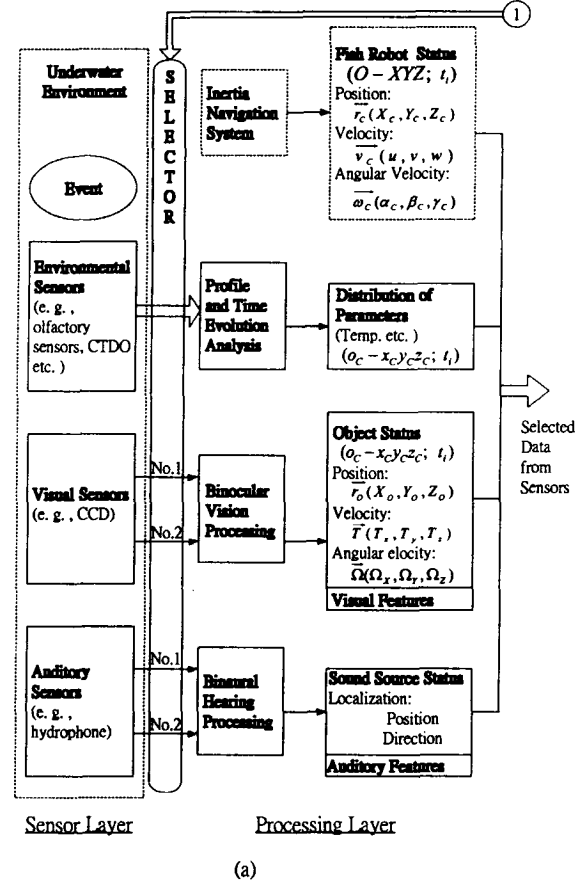


Figure 1 Flow of Processing in Sensing and Perception Module for Fish Robot

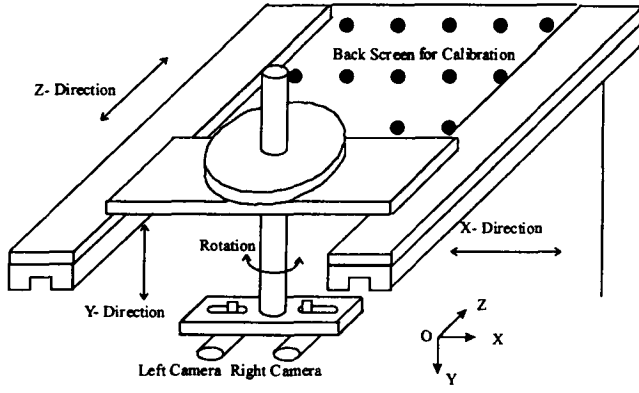


Figure 4 Sketch of Underwater Active Stereo Vision System

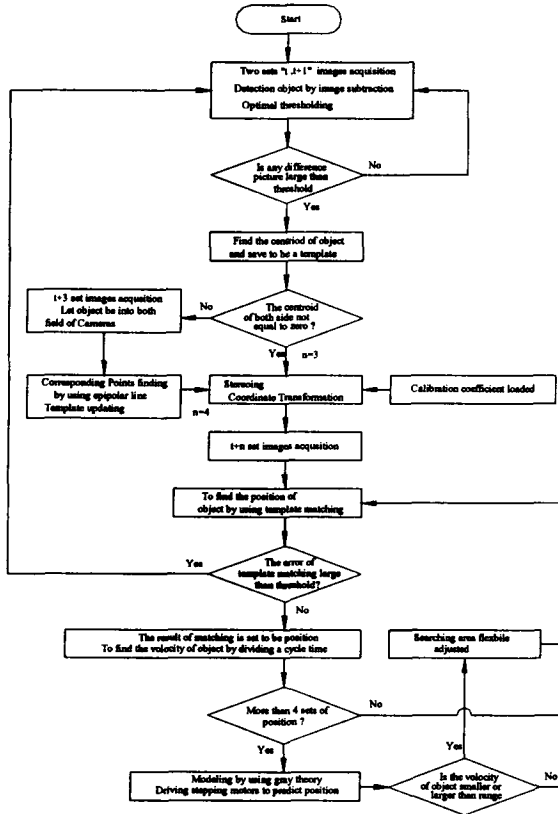
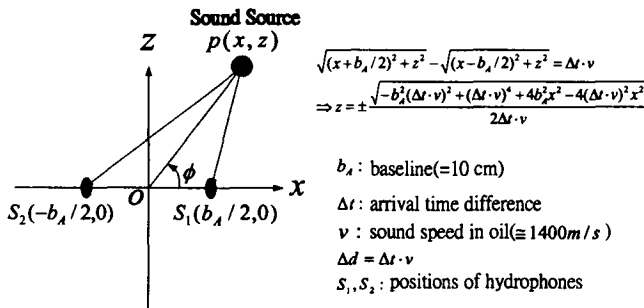


Figure 5 Algorithm of Tracking



(a) Geometry of Binaural Hearing

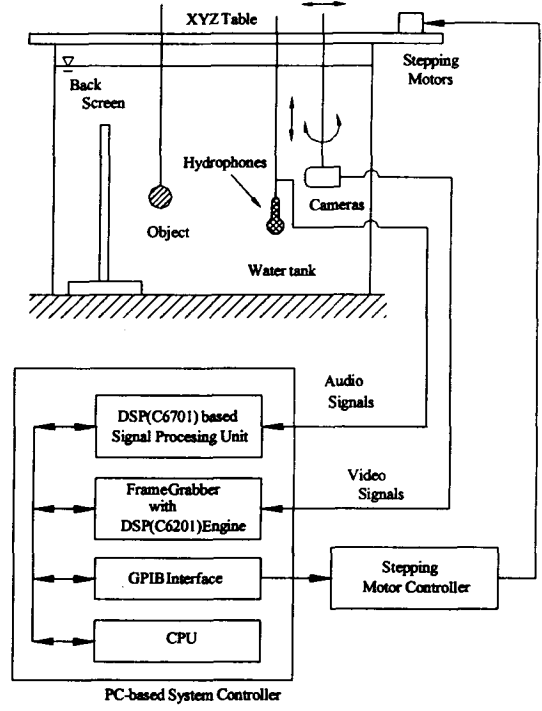
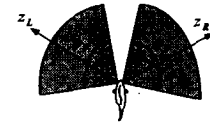
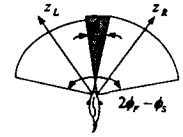


Figure 6 System Configuration of Sensing and Perception

Module Development Platform

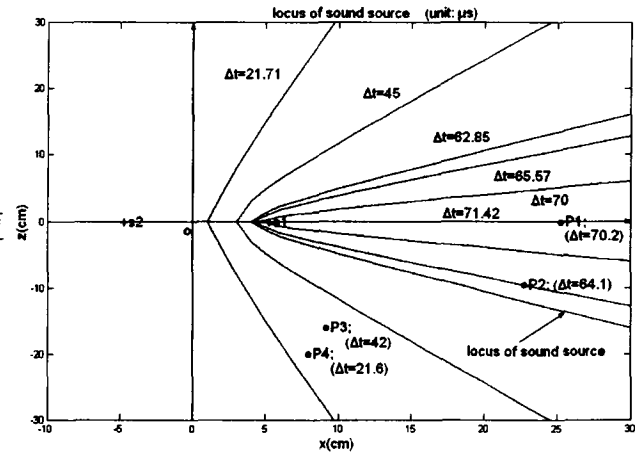


(a) Independent Monocular Visions



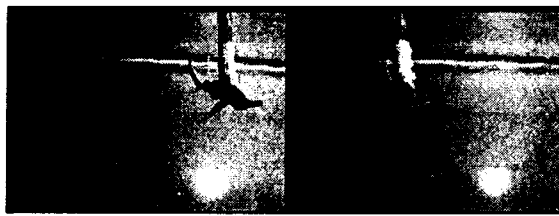
(b) Binocular Vision

Figure 7 Modes and Working Angles of Fish Robot Visual System

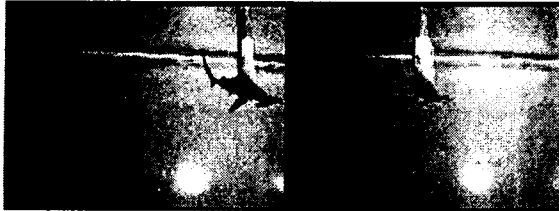


(b) Locus of Sound Source and Results of Experiment

Figure 8 Detection of Sound Source Direction by Binaural Auditory System



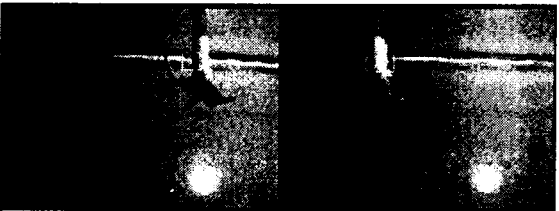
(a) Image pair at position (24.2, 20.4, 163.3) cm



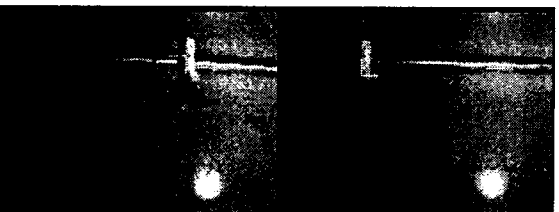
(b) Image pair at position (32.7, 21.3, 163.9) cm



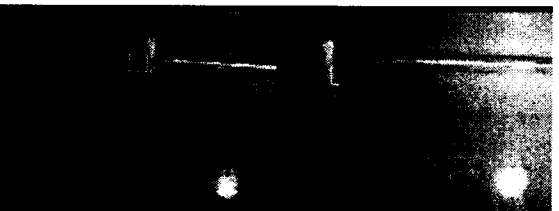
(c) Image pair at position (36.0, 21.8, 164.2) cm



(d) Image pair at position (21.1, 21.4, 65.0) cm



(e) Image pair at position (17.4, 21.2, 165.1) cm



(f) Image pair at position (12.5, 23.1, 167.1) cm

Figure 9 Image Sequence

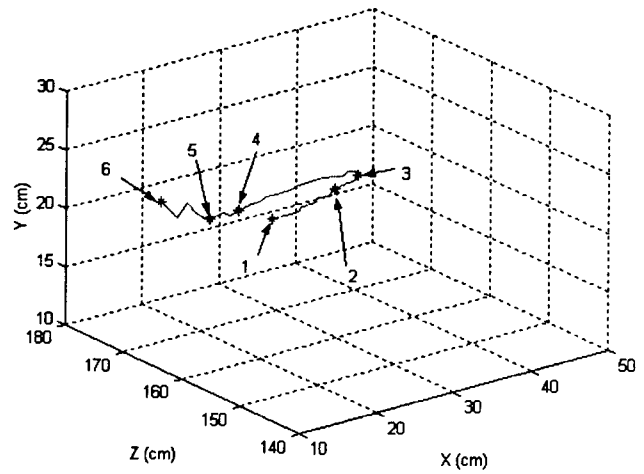
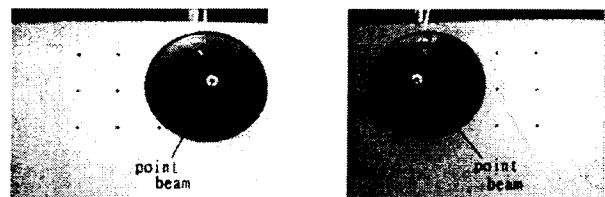


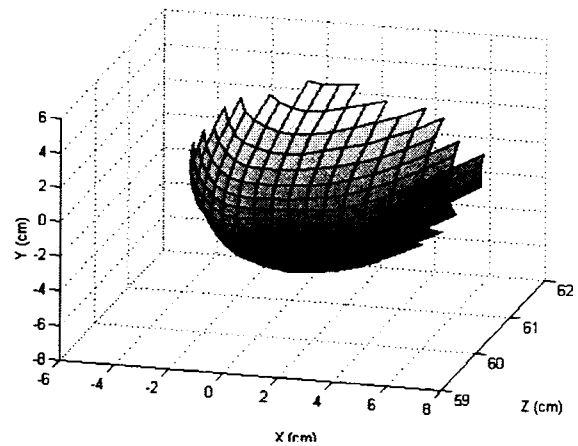
Figure 10 Object Tracking and Motion Trajectory Estimation



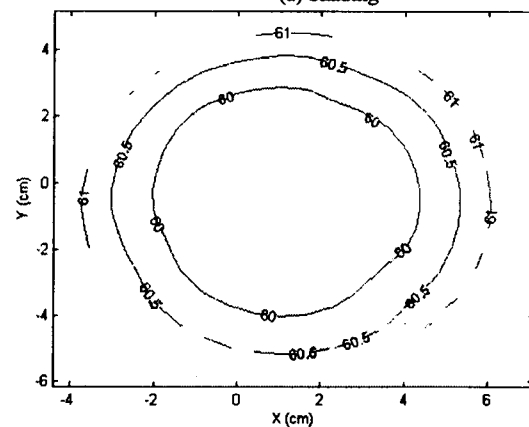
(a) Left

(a) Right

Figure 11 Image Pair



(a) Shading



(b) Contour

Figure 12 Curved Surface Reconstruction by Stereo Vision Using Scanning Point Beam