

四旋翼 UAV 定點懸置之模糊控制器實作

鄭文昌

朝陽科技大學資工系
wccheng@cyut.edu.tw

王偉誠

朝陽科技大學資工系
s10127632@cyut.edu.tw

摘要

本論文針對四旋翼 UAV 定點懸置飛行完成一模糊控制器，此控制器針對 Roll、Pitch 和高度分別進行控制，使四旋翼能夠在不穩定的狀態下透過模糊控制器即時修正保持固定高度定點穩定飛行。透過四旋翼 UAV 簡化動態模型的模擬測試，結果顯示此模糊控制器在閉迴路控制下，四旋翼受到外力影響其平衡時，模糊控制器可以快速修正角度與高度，證明此一模糊控制器確實對於四旋翼保持懸置控制是可行的。

關鍵詞：無人載具，模糊系統，智慧型控制，PID 控制器。

Abstract

This paper proposed a fuzzy controller to control a quadrotor UAV and keep hover sentinel. This fuzzy controller included roll, pitch and height controller to make the quadrotor keeping hover sentinel with balance and stability in flying status. Quad-rotor UAV simulation testing by simplify dynamic model. The results show that the quad-rotor UAV will fast to rectify angle and height by closed-loop control when it suffers impact in wind. Simulation results also show that fuzzy control methods are feasible to keep it hover sentinels. In addition, we proposed method is faster than merge input controller.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, fuzzy system, intelligent control, PID control

1. 前言

四旋翼(Quad-rotor)是一種特殊結構的多旋翼空中無人載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)，與傳統的單旋翼直昇機相比，因為具有結構簡單、靈活度好以及六個自由度可以進行多種姿態，容易控制且穩定等特性，所以近年來針對四旋翼 UAV 所進行的研究也越來越多，其中應用包含有軍事用輕巧型偵察[1]、高空對地面探勘[2]、大自然災害的防範[3]以及特定範圍的巡視[4]等，由於這些應用

常需要四旋翼 UAV 進行固定高度的定點懸置飛行，但四旋翼 UAV 飛行時受重力及外在環境風力影響，且以人為操控方式不易長時間保持機身穩定，因此在此論文我們將設計一套四旋翼空中定點懸置飛行的自動駕駛控制器。

一般控制器的設計常見的方法有 PID 控制方法以及模糊(Fuzzy)控制方法[5]，PID 控制器是一種透過比例、積分、微分調整的控制方法，由於使用 PID 控制器設計方法需要分析複雜的數學模型，且適應性差，因此在此論文中不考慮，另一種方法是模糊(Fuzzy)控制方法，由於利用模糊理論設計控制器不需要分析複雜的數學模型，只需透過專家的經驗法則即可完成模糊控制器的設計，當應用於不同四旋翼條件 UAV 時，只要稍加調整參數後即可適用，因此適用性及實用性高，因此在此論文中我們也將採用模糊控制的設計方法。

到目前為止已經有許多基於模糊控制方法被提出，Santos 等人[6]提出一個四旋翼模糊控制器，並且利用模擬實驗驗證四旋翼路徑控制結果，Dydek 等人提出一個具有自適應性的四旋翼模糊控制器[7]，此系統主要針對當四旋翼的其中一個旋翼受到破壞時，系統能自我適應調整模糊控制使四旋翼仍能保持平穩飛行，Huang 等人[8]使用模糊控制結合 PID 控制與硬體搭配，改善馬達輸出的延遲。另外其它平衡控制問題有球桿平衡 (beam-and-ball)[9-11] 或倒單擺 (Inverted pendulum)[12-14] 等非線性動態系統控制，Amjad 等學者[10]設計一球桿系統的模糊控制器，並與傳統的 PID 控制器進行比較分析，結果指出使用模糊控制在平衡時修正速度與穩定效果較好，Chang 等學者[11]利用蟻群最佳化演算法 (Ant Colony Optimal Algorithm) 訓練一個模糊控制器完成球桿的平衡控制的研究，此模糊系統有兩個輸入變數與一個輸出變數，由於模糊規則個數與輸入變數個數成倍數成長，因此為了簡化模糊控制器的設計，作者使用線性加權合併方式將兩個輸入合併

成單一輸入來設計模糊控制器，儘管如此可以減少輸入個數，進而減少模糊規則個數，但是將輸入透過線性加權合併，將降低模糊控制的非線性特性效果。

在此論文中，我們將利用試誤法與經驗法則設計一個穩定模糊控制器來控制四旋翼 UAV 完成固定高度定點懸置飛行，透過模擬實驗進行效果分析，並將此模糊控制器與輸入線性合併模糊控制器進行比較，由模擬實驗結果發現，利用輸入線性加權合併方式設計的模糊控制器比起沒有合併輸入設計方式需要較久時間才能完成穩定。以下論文安排如下，第 2 章介紹四旋翼平台，第 3 章說明模糊控制器的設計流程以及結果，第 4 章說明動態方程式以及第 5 章呈現模擬的結果，最後為結論。

2. 四旋翼簡介

圖 1 為四旋翼 UAV 的結構圖，四旋翼 UAV 有四個螺旋槳，機身為十字形，左右對稱，螺旋槳前後為一組，左右為一組，兩組的旋轉方向相反，彼此抵銷因旋轉造成的扭力，其中 F_1 和 F_3 逆時針轉動， F_2 和 F_4 順時針轉動。四旋翼 UAV 總升力為四個升力總和，表示為：

$$F = \sum_{i=1}^4 F_i . \quad (1)$$

因此同時增加或減少四個馬達的輸出可以達到上升或下降的目的，對於四旋翼 UAV 姿態控制包含有前後傾仰角(Pitch)、左右搖擺角(Roll)以及水平旋轉角(Yaw)，透過 F_1 與 F_3 的動力改變進行前傾與後仰的動作(Pitch)， F_2 與 F_4 動力改變來控制左右搖擺的動作(Roll)，而當 F_1 與 F_3 的動力總和大於 F_2 與 F_4 總和時，則控制水平旋轉動作(Yaw)，在此論文中，我們目的是控制四旋翼 UAV 完成固定高度定點懸置飛行，因此透過模糊控制器的控制，使四旋翼 UAV 可以從地面垂直升起到所設定的高度後停留在空中保持平衡飛行，接下來章節將介紹模糊控制器的設計。

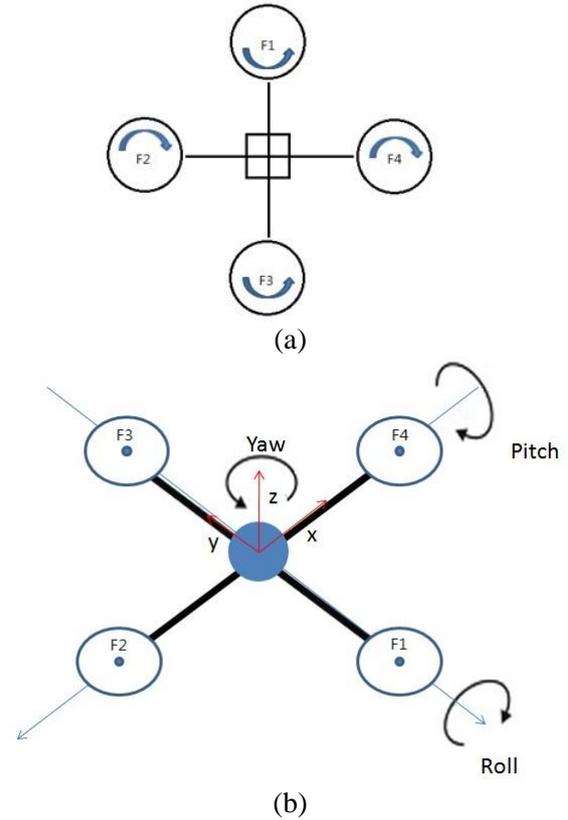


圖 1. 四旋翼結構及姿態控制

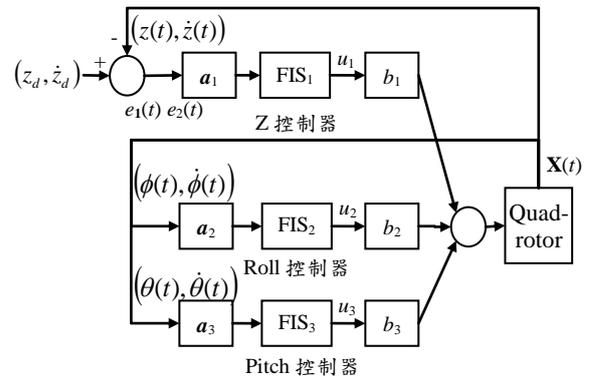


圖 2. 模糊控制器架構

3. 模糊控制器設計

如上所述，在此論文中，我們針對四旋翼 UAV 完成固定高度定點懸置飛行，因此我們只控制四旋翼 UAV 姿態的 Pitch 角、Roll 角以及高度 z ，因此我們分別設計三個模糊控制器，圖 2 為我們設計的閉迴路模糊控制架構，包含有 Roll 控制器、Pitch 控制器、Z 控制器、受控系統、控制器輸入調整係數矩陣 $a_i, i=1, 2, 3$ ，輸出調整係數 $b_i, i=1, 2, 3$ ，其中每一個模糊控制器都是兩個輸入與一個輸出，對於 Roll 模糊控制器，輸入為 Roll 角與 Roll

角的變化量 $(\phi(t), \dot{\phi}(t))$ 以及輸出為 u_2 ，對於 Pitch 模糊控制器的輸入為 Pitch 角度與 Pitch 角度的變化量 $(\theta(t), \dot{\theta}(t))$ 和輸出為 u_3 ，對於 Z 控制器的輸入則為高度與高度變化量 $(z(t), \dot{z}(t))$ 和目標值 (z_d, \dot{z}_d) 的誤差 $e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ ，以及輸出 u_1 ，由於 Roll 與 Pitch 角為零時為系統的穩定狀態，因此針對 Roll 與 Pitch 角度不需設定目標值。確定模糊控制器輸入與輸出後，接著進行模糊規則以及模糊系統設計，以下分別說明。

3.1 模糊規則

由於每一個模糊控制器有兩個輸入與一個輸出，以 Z 控制器為例(Roll 與 Pitch 控制器也相同)，模糊規則型式為：

$$Rule^{(l)} : IF e_1 \text{ is } A_1^l \text{ and } e_2 \text{ is } A_2^l \text{ THEN } u_1 \text{ is } B^l. \quad (2)$$

其中上標 l 代表第 l 規則， $l=1, \dots, M$ ， e_1 和 e_2 為輸入變數， u_1 為輸出變數，針對兩個輸入分別使用五個高斯歸屬函數，定義變數範圍介於 $[-1, 1]$ 之間，且具有正規性、一致性以及完整性的歸屬函數，輸出則使用單值歸屬函數，圖3所示為模糊規則中所使用的歸屬函數，其中 BN 代表較大負值(Big Negative)，SN 代表較小的負值(Small Negative)，Z 為零(Zero)，SP 代表較小的正值(Small Positive)以及 BP 代表較大的正值(Big Positive)。模糊規則的決定通常分為兩種，一種是人類經驗法則直接給予模糊規則，另一種式是透過特定的演算法訓練出來的資料決定歸屬函數，本篇論文主要為初步研究的實驗，因此我們先採用試誤法及經驗法則來判斷決定模糊規則，最後依圖3所示歸屬函數共有25條模糊規則，如表1所示。

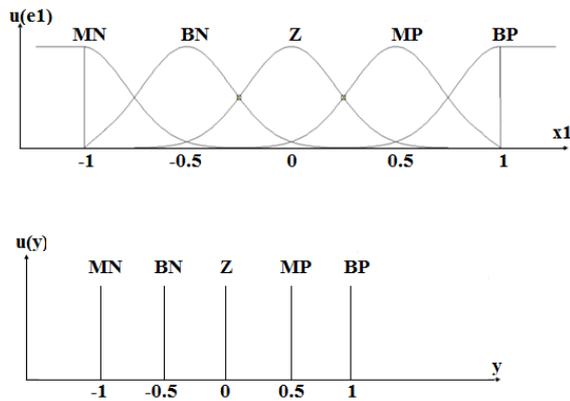


圖 3. 輸出與輸入的歸屬函數

表 1. 模糊規則庫

$e_1 \backslash e_2$	BN	MN	Z	MP	BP
BN	BN	BN	BN	Z	Z
MN	BN	MN	Z	Z	Z
Z	BN	Z	Z	Z	BP
MP	Z	Z	Z	MP	BP
BP	Z	Z	BP	BP	BP

3.2 模糊系統

依據模糊規則設計，我們可以完成模糊控制器的模糊系統。在這論文中我們使用單值模糊化法、乘積堆論引擎(Product Inference Engine)以及中央值平均去模糊化法，因此模糊系統可以表示為：

$$u = f(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)} \quad (3)$$

其中輸入歸屬函數使用高斯歸屬函數，因此模糊規則輸入歸屬函數值可表示為：

$$\mu_{A_i^l}(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right] \quad (4)$$

以及 \bar{y}^l ， $l=1, \dots, M$ 為模糊規則輸出歸屬函數的中心值。

4. 四旋翼的簡化動態模型

為了驗證模糊控制器是效能，我們先採用模擬方式進行實驗，因此針對四旋翼 UAV 的非線性系統動態方程式進行說明。一個非線性動態系統模型可以表示為：

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{u}), \quad (5)$$

其中， \mathbf{X} 表示為系統狀態向量， \mathbf{U} 表示控制輸入向量，表示為：

$$\mathbf{X} = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \phi \ \theta \ \varphi \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\varphi}]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{U} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T, \quad (7)$$

其中 x 、 y 和 z 與 \dot{x} 、 \dot{y} 和 \dot{z} 分別表示空間位置座標以及速度， ϕ 、 θ 和 φ 與 $\dot{\phi}$ 、 $\dot{\theta}$ 和 $\dot{\varphi}$ 分別表示 Roll、Pitch 和 Yaw 角及角速度，依據質心運動定理、歐拉動力方程式以及假設結構上對稱使得 I_{xy} 、 I_{yz} 和 I_{xz} 均為零[8]，因此簡化四旋翼 UAV 的動態方程式表示為：

$$\ddot{x} = (\cos\phi \sin\theta \cos\varphi + \sin\phi \sin\varphi) \frac{u_1}{m}, \quad (8)$$

$$\ddot{y} = (\cos\phi \sin\theta \sin\varphi - \sin\phi \cos\theta) \frac{u_1}{m}, \quad (9)$$

$$\ddot{z} = (\cos\phi \cos\theta) \frac{u_1}{m} - g, \quad (10)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{u_2}{I_x}, \quad (11)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{u_3}{I_y}, \quad (12)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{u_4}{I_z}, \quad (13)$$

其中 \ddot{x} 、 \ddot{y} 和 \ddot{z} 分別表示 x 、 y 和 z 軸加速度，而 $\ddot{\phi}$ 、 $\ddot{\theta}$ 和 $\ddot{\varphi}$ 分別表示 Roll、Pitch 和 Yaw 角的角加速度， g 為重力以及 m 為質量。由於此論文主要是控制四旋翼定點懸置為目的，因此系統狀態向量只考慮 z 軸方向以及 Roll 和 Pitch 角度，因此系統狀態向量只使用為：

$$\mathbf{X} = [z \ \dot{z} \ \phi \ \dot{\phi} \ \theta \ \dot{\theta}]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{U} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T, \quad (15)$$

以及系統非線性動態方程式只考慮方程式 (10)、(11) 以及 (12)。

5. 模擬實驗結果

在此章節中將顯示模擬實驗結果，並且將結果與一個線性加權合併輸入的模糊控制器比較，合併輸入方法是一種簡化控制器設計的方法[11]，此方法將模糊控制器的兩個輸入事先分別乘上一個權重值後線性合併為一個輸入 $e = (\alpha * e_1) + (\beta * e_2)$ ，再輸入至模糊控制器，如此一來，模糊控制器只剩下單一輸入單一輸出，簡化模糊系統的模糊規則數量。模擬實驗的初始 Roll 與 Pitch 角度分別設為 0.9 和 0.5 rad，初始高度設定為 0 公尺，目標高度為 1 公尺，圖 4 為 Roll 與 Pitch 角度控制的模擬結果，圖 4 上圖分別是 Roll 角度與角速度，圖 4 下圖分別是 Pitch 角度與角速度，圖 5 則為合併輸入方式的 Roll 與 Pitch 角度控制的模擬結果，其中 α 和 β 分別設為 1 與 5，由圖 4 和 5 可以看出兩種方式的控制器都可以達到穩定狀態，但是使用合併輸入方法雖然簡單，卻需要更多時間才能達到穩定。圖 6 為高度控制的模擬結果，由地面起飛上升到 1 公尺保持懸置狀態，圖 7 為合併輸入的模擬結果，相同結果使用合併輸入方式需花費的時間較長。模擬結果可以明顯看出個別輸入的控制方法在到達目標的時間比合併輸入控制所花費的時間少，證明個別輸入模糊控制

可以在不平衡的情況下更快速的修正輸出達到穩定懸置的作用，符合我們的目標。

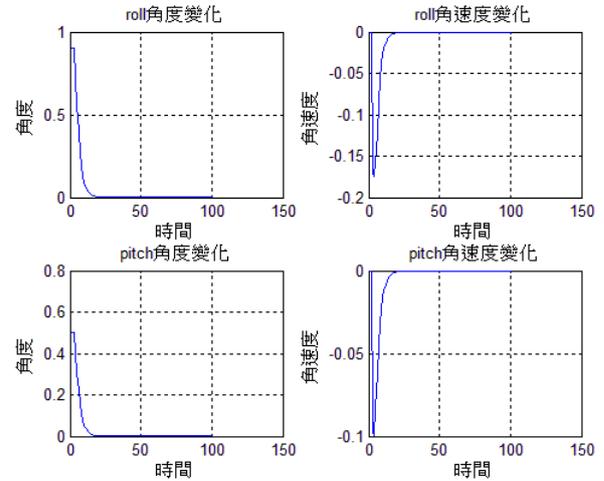


圖 4. Roll 與 Pitch 角度控制的模擬結果。

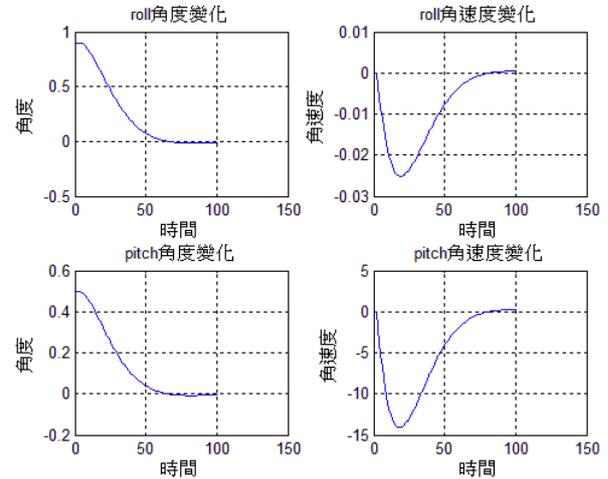


圖 5. 合併輸入的 Roll 與 Pitch 角度控制的模擬結果。

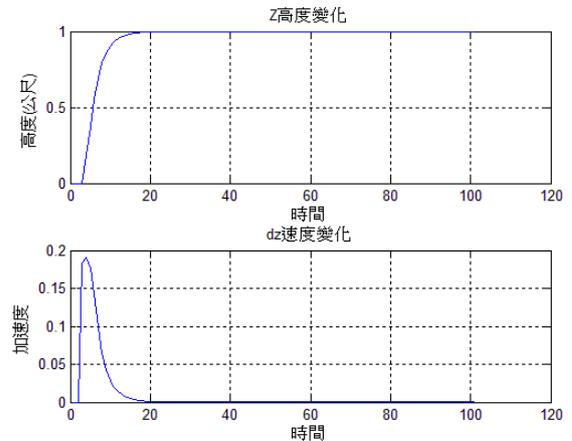


圖 6. 高度控制的模擬結果。

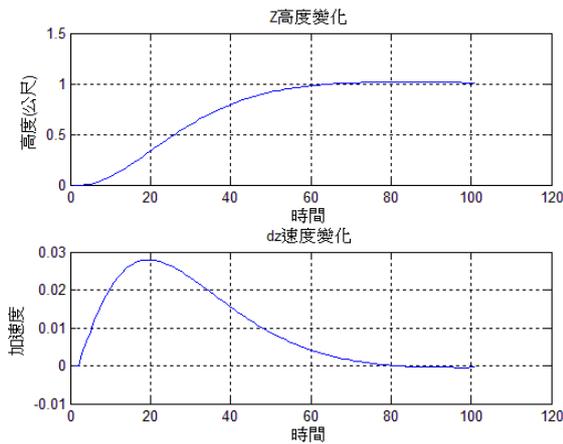


圖 7. 合併輸入高度控制的模擬結果。

為了更進一步評估合併輸入與個別輸入的模糊控制器效果，我們計算模擬過程四旋翼狀態與目標狀態的誤差，計算方式表示為：

$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \|\mathbf{x}_d - \mathbf{x}\|^2}, \quad (16)$$

其中 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}_d 分別為現在與目標狀態向量， N 為時間取樣個數，實驗結果數據如表 2 所示， rms 數值越小代表控制的效果越好，由表中顯示，個別輸入的控制方法效能比合併輸入的 rms 值低，代表個別輸入的控制效果比合併輸入好。

表 2. 性能結果比較(rms)

參數 控制方法	Roll	Pitch	Z	Avg
合併輸入 控制器	0.387	0.212	0.432	0.34
個別輸入 控制器	0.170	0.094	0.189	0.15

6. 結論

本論文針對四旋翼 UAV 定點懸置飛行完成一模糊控制器，此控制器針對 Roll、Pitch 和高度分別進行控制，使四旋翼能夠在不穩定的狀態下透過模糊控制器即時修正保持固定高度定點穩定飛行。在模擬的過程透過動態方程式可以看到 Roll 與 Pitch 的角度從不平衡的狀態修正到平衡狀態，達成四旋翼懸置的目的。最後與合併輸入方法進行效能比較，模擬結果證明四旋翼透過分別輸入的模糊控制方法可以使四旋翼 UAV 較快速達到懸置的

狀態。由於本論文為初期研究成果，因此接下來的研究首先將完成四旋翼 UAV 實機實際測試，接著考慮全姿態控制問題，並且嘗試利用學習演算法則進行最佳化控制器設計，最後將考慮適應性控制問題。

參考文獻

- [1] J. Tisdale, K. ZuWhan and J. K. Hedrick, "Autonomous UAV path planning and estimation," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, Vol. 16, Issue2, 2009, pp. 35-42.
- [2] S. Guznov, G. Matthews, G. Funke and A. Dukes, "Use of the RoboFlag Synthetic Task Environment to Investigate Workload and Stress Responses in UAV Operation," *Behavior Research Methods*, Vol. 43, Issue 3, 2011, pp. 771-780.
- [3] C. Goerzen, Z. Kong and B. Mettler, "A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 57, Issue 1-4, 2011, pp. 65-100.
- [4] D. W. Casbeer, R. W. Beard, T. W. McLain, Sai-Ming Li and R. K. Mehra, "Forest Fire Monitoring with Multiple Small UAVs," *American Control Conference*, 8-10 June, 2005, Portland, USA.
- [5] L.-X. Wang, "A Course in Fuzzy Systems and Control," Prentice Hall.
- [6] Santos, M., López, V., Morata, F., "Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor," *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE2010)*, 15-16 Nov, 2010, Hangzhou.
- [7] Z. T. Dydek, A. M. Annaswamy, and E. Lavretsky, "Adaptive Control of Quadrotor UAVs: A Design Trade Study With Flight Evaluations," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 21, Issue 4, 2013, pp. 1400-1406.
- [8] G. Huang, B. Xian, W. Zeng, C. Diao and F. GUO, "Speed Controller Design for the Actuators of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle," *Chinese Control Conference (CCC)*, 25-27, July, 2012, Hefei, China.
- [9] Tang Dewang and Wang Qinglin, "On Ball and Beam System with fuzzy control," *Chinese Control Conference (CCC)*, 16-18, July, 2008, Kunming.
- [10] M. Amjad, M. I. Kashif, S. S. Abdullah

- and Z. Shareef, "Fuzzy logic control of ball and beam system," *International Conference on Education Technology and Computer* (ICETC), 22-24, June, 2010, Shanghai.
- [11] Y.-H. Chang, C.-W. Chang, H.-W. Lin and C.-W. Tao, "Fuzzy Controller Design for Ball and Beam System with an Improved Ant Colony Optimization," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 32, 2009, pp. 576-581.
- [12] M. E. Magana and F. Holzapfel, "Fuzzy-logic Control of an Inverted Pendulum with Vision Feedback," *IEEE Transactions on Education*, Vol. 41, Issue 2, 1998, pp. 165-170.
- [13] S.-Y. Zhang, R. An, S.-M. Shao and D. Li, "A New Fuzzy Controller for Stabilization of Double Inverted Pendulum System," *Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering* (CCTAE), 12-13, June, 2010, Chengdu.
- [14] L. Wang, S. Zheng, X. Wang and L. Fan, "Fuzzy Control of a Double Inverted Pendulum Based on Information Fusion," *International Conference on Intelligent Control and Information Processing* (ICICIP), 13-15, Aug, 2010, Dalian.