

應用影像辨識及 GM(1, 1) 灰預測技術於固定式起重機操作之安全裝置研究

劉國青¹、黎文龍¹、沈志陽¹

¹ 國立台北科技大學機電科技研究所

² 勞工安全衛生研究所

摘要

天車屬於危險性機械種類，本研究為強化天車操作管理，設計預防撞擊人員的安全警報裝置；在天車上加裝一個攝影機，利用視覺影像判別吊掛物體與人員之間相關距離，應用移動物體辨識、影像特徵模版比對、型態標記及描述等影像技術，紀錄吊勾的運動軌跡，估算吊掛物的擺動方向、幅度等；實驗測試時吊掛物件不設限形狀、顏色等特徵，但限定關鍵物如吊勾、人型頭髮、安全帽顏色及型態等符合工廠實際狀況之特徵。在搜尋樣版比對方面，比較傳立業轉換及統計相關係數比對技術，以後者之統計相關係數比對具有較精準結果，但也相對比對速度較慢，耗費大量電腦計算資源。另為減少比對範圍及時間，研究另比較運動方程式及灰色理論 GM(1,1) 預測搜尋範圍，兩者以灰預測 GM(1,1) 資料 4 筆之預測模型，具有最小的預測誤差，結果實驗測試可行性高。本安全裝置可預知吊掛物可能撞擊人員前，立即發出警報及暫停危險方向的操作等預防措施，初步測試結果顯示效果良好。

關鍵字：固定式起重機、影像處理、安全裝置

1. 前言

起重機(cranes)在現代工程中扮演著相當重要的角色，但隨著重要性的提高，潛在的危險性也受到重視；起重機是國家法律明文規定之危險性機械，包含固定式起重機與移動式起重機，依我國 89-97 年危險性機械類災害中，固定式起重機死亡人數計有 99 人 (34.4%)、災害類型比例中被撞 36 人 (13.8%)、被夾捲 25 人 (9.6%) [1]，故任何可減少此傷害之預警設備或機制，均值得進一步開發研究。

天車是屬固定式起重機之一種，安裝於在室內，進行垂吊上昇、下降及搬運物品的操作工具機，由升降機馬達、驅動馬達、台車、軌道、鍊條、吊勾等所組成，搬運動線及吊升荷重都有受到限制；此外，由於重達數公噸的吊掛物搬運，其重物慣性擺動容易造成職災事故，因而在相關規範中都要求作業空間淨空等規定；但是工廠作業混雜，吊掛時又經常伴隨組裝、搬運及人員走動等；因此，吊掛時必須注意路徑及作業四周環境等，才能確保作業安全。

天車因為在軌道上移動，帶動吊掛物的擺動，如 [1] 之職災案例報告中，不泛因操作者未注意，致使吊

掛物撞擊作業人員，造成被夾、被撞的職災類型。另一方面，目前有相關起重機防搖控制方法的理論研究，如表 1 所示；不管是機械式或電子式之防搖控制及改用變頻馬達等方式，大多具有抑制或降低吊掛物擺幅的功能。本研究基於預防操作危險的設計概念，另提出具有「主動預防撞擊作業人員」預警裝置。

2. 系統之運動方程式

天車系統為三維空間系統，參考文獻[2,3]如圖 1 所示，系統中藉由台車(trolley)的移動，帶動吊掛物負載擺盪，造成 X 軸與 Y 軸方向的擺動角度，加上 Z 軸方向的繩索長度，即建立起 X-Y-Z 三維空間的天車系統； $X_r-Y_r-Z_r$ 是座落在台車之座標系統， θ_x 是投影在 Y_r-Z_r 平面之擺幅角度， θ_y 是從 X_r-Z_r 平面量測之擺幅角度，吊掛物座標點 (x_m, y_m, z_m) 如下：

$$z_m = -l \cos \theta_x \cos \theta_y$$

$$x_m = x + l \sin \theta_x \cos \theta_y$$

$$y_m = y + l \sin \theta_y \quad (1)$$

當 l 為吊掛長度， M_x 為 X 方向運動質量， M_y 為 Y 方向運動質量， m 為吊掛物之質量，運動方程式如下：

$$(M_x + m)\ddot{x}_i + m l \ddot{\theta}_x = f_x \quad \ddot{x}_i + l \ddot{\theta}_x + g \theta_x = 0$$

$$(M_y + m)\ddot{y}_i + m l \ddot{\theta}_y = f_y \quad \ddot{y}_i + l \ddot{\theta}_y + g \theta_y = 0 \quad (2)$$

3. 實驗設備與環境

前節之系統運動理論分析，雖有助於了解吊掛物之運動軌跡，不過過去文獻研究顯示[7,8]，即使額外加入抗搖擺控制，但仍只侷限於小擺角之模型及成本昂貴，另對實際防撞安全之幫助相當有限。本研究利用影像輔助方式，實驗確認輔助安全裝置的有效性。

為能了解影像擷取之吊掛物與現場人員之間的關係，攝影機安裝位置點將影響判別結果；例如將攝影機安裝於天車四周水平位置，由於工廠作業的複雜環境，吊掛物或人員有可能被其它物件遮蔽或重疊等。因此，將攝影機裝在吊掛物正上方之台車附近，其拍攝影像結果如圖 2，圖中影像雖具有容易判讀吊掛物與人員水平距離的優點，但也有會部分影像被鍊條遮蔽，及因為台車行進而造成影像晃動等干擾問題；但實驗結果顯示可由影像擷取速率、解析度及影

像處理技術等方式，予以克服。另外，為符合工廠吊掛作業的實際性，實驗設計吊掛物為不特定的形狀及顏色；但是天車操作必須依循標準方式，參考圖 11 之作業程序為上升、東西/南北移動、下降。由於天車架設在四周圍牆之工廠室內，上方輔以固定水銀燈源照射，因此得以確保影像擷取的品質一致性。

本試驗如圖 3 工廠環境，天車吊升荷重 2000kg，作業高度 7.5m 的工廠環境，攝影機安裝位置如圖 4，水平距離吊勾約 10cm、距離地面高度 8m，實驗之吊掛物為 $1.2 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ 長方型木箱之內容物。另外，研究採用 WINDOW 作業系統電腦及 USB 視訊攝影機，擷取畫面為 240x360 像素、30 幅/秒。

4. 影像辨識與邏輯判斷

參考圖 11 之作業流程，下列說明影像處理及演算步驟：

4.1 起吊（上升過程）

4.1.1 擷取影像

在起吊過程中影像擷取前後二張影像畫面，其次進行灰階、相減及二值化；主要目的在於去除靜態的背景，如圖 11 (a) 說明擷取灰階影像、(b) 說明使移動中目標物被彰顯出來，包含吊掛物、鍊條、操作者及其它環境中移動物件。

4.1.2 彰顯移動中目標物

實驗設計吊掛物並沒有限制顏色、形狀大小及邊緣等特定樣式，步驟 4.1.1 僅能將目標物概略性形狀被顯現出來，如圖 11 (c) 說明再藉由影像斷開（分隔吊掛物與鍊條或其它）、填滿、重疊等，以得到較完整目標物形狀，及連通標記區別各個目標物[5]。

4.1.3 搜尋吊勾座標

進行吊勾影像模版比對，實驗設計吊勾是固定形狀與顏色如圖 11(f)，由於在起吊過程中，吊勾僅上下移動，初始搜尋區域限中間地帶，另上升過程會使吊勾逐漸變大，必須持續更新擷取吊勾影像模版，以作為下次影像搜尋比對的樣本。吊勾影像模版比對，主要原理是將觀察到的圖形影像與一組吊勾模版作樣本比對，利用統計上的正規化交互相關係數（normalized cross correlation），計算模版樣本與觀察圖形最能完全配對的影像，該比對相關係數越高則代表比對越相似[4,5]；如圖 5 說明在起吊上升過程中，搜尋比對相關係數平均 0.95 左右；圖 6 則說明所搜尋吊勾座標位置。

4.1.4 判別吊掛物

由於影像是由上往向下攝影，畫面中吊掛物範圍是包含吊勾；因此，只要連通標記範圍包含吊勾之座標點，則被視為吊掛物；如圖 11 (d) 所示。建立吊掛物型態描述，包含：

Area 面積：區域中像素點數目

橢圓長軸（MajorAxisLength, L）：和區域有相同第二矩之橢圓主軸像素。

橢圓短軸（MinorAxisLength, ℓ ）：和區域有相同第二

矩之橢圓副軸像素。

角度（Orientation, φ ）：X 軸和區域有相同第二矩之橢圓主軸間角度。

4.1.5 計算吊勾中心點(X_c, Y_c)

步驟 4.1.3 紀錄吊勾座標點(X_i, Y_i)，計算平均吊勾座標點 (X_{mean}, Y_{mean})。由於過程中吊勾晃動，最後終於靜止不動，吊勾中心點會等同平均吊勾座標點；另由於影像是由上往向下攝影，理論上吊勾座標點應於吊掛物重心點一致，在實驗設計中，攝影機水平偏差吊勾 10cm、作業高度 $l = 8 \text{ m}$ ，計算 ($\tan(0.1/8) \approx 0$) 誤差忽略不計。

$$X_c = X_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad Y_c = Y_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

4.2 東西/南北移動

4.2.1 吊掛物軌跡

由於天車隨操作東西/南北移動，吊掛物依運動軌跡擺動，由吊勾、中心點座標資料計算擺幅 (dx_i, dy_j)、速度 (V_{xi}, V_{yi})、加速度 (a_{xi}, a_{yi})、最大擺幅 (dx_{max}, dy_{max})、擺幅角度 (α)；吊勾影像搜尋亦採模版比對，如圖 5 說明在移動過程中，搜尋比對相關係數平均 0.7 左右；圖 6 則說明所搜尋吊勾座標位置。

$$dx_i = X_i - X_c \quad ; \quad dy_j = Y_j - Y_c$$

$$V_{xi} = \frac{X_i - X_{(i-1)}}{dt} \quad ; \quad V_{yi} = \frac{Y_i - Y_{(i-1)}}{dt}$$

$$a_{xi} = \frac{V_{xi} - V_{x(i-1)}}{dt} \quad ; \quad a_{yi} = \frac{V_{yi} - V_{y(i-1)}}{dt}$$

$$dx_{max} \in (V_{xi} \times V_{x(i+1)}) < 0 \quad ; \quad dy_{max} \in (V_{yi} \times V_{y(i+1)}) < 0$$

$$\tan(\alpha) = \frac{dx_i}{dy_j} \in \max(dy_{max}, dx_{max})$$

在起吊上升與移動中的吊勾影像搜尋，雖都採用模版比對；在起吊時，吊勾僅作上升動作，影像搜尋範圍可以明確設定初始區域；在移動時，吊勾雖循運動方程式(1)，但也會因人為啟動/停止、寸動操作及摩擦、滑動等因素而被改變；因此搜尋範圍就顯的相當重要，過大的搜尋範圍會增加模版比對計算時間，及錯誤比對結果的機率，過小的搜尋範圍則不確定是否包含實際座標點。

研究應用運動方程式(1)及灰色理論 GM(1,1) [9] 兩者比較，如表 2 說明預測搜尋模型，以實際值與預測值最大差異 $Max(\varepsilon_{x,y})$ 比較，結果顯示以灰預測 GM(1,1) 資料 4 筆之預測模型，具有最小的預測差異。

$$Max\varepsilon_x = |x_i - x_{if}| \quad ; \quad Max\varepsilon_y = |y_i - y_{if}|$$

(x_{if}, y_{if}) 為預測值

4.2.2 吊掛物角度

由於吊掛物會隨著操作的移動，造成旋轉及擺動；擺動部分可由吊勾座標點紀錄軌跡，旋轉部分則另由吊掛物型態描述角度 (φ) 之變化，平均濾波處理獲得如圖 7。

$$\varphi \in 80\% \text{Area} < \text{Area} < 120\% \text{Area}$$

4.2.3 警戒區域設定

由吊勾中心點 (X_c, Y_c) 、吊掛物型態描述資料(橢圓長軸 (L) 、短軸 (ℓ) 、角度 (φ) 、擺幅 (dx_{\max}, dy_{\max}) 及角度 (α) 資料, 計算警戒區域如圖 11 (e)。
計算正交於 X 軸、 Y 軸之區域 $[X_{axis}, Y_{axis}]$

$$X_{axis} = X_c + (dx_{\max} + (L/2) \times \cos \varphi + (\ell/2) \times \sin \varphi)$$

$$Y_{axis} = Y_c + (dy_{\max} + (L/2) \times \sin \varphi + (\ell/2) \times \cos \varphi)$$

修正旋轉於正交於擺幅軸之橢圓區域 $[X_{osc}, Y_{osc}]$

4.2.4 搜尋人員

設定搜尋警戒區域 $[X_{lim}, Y_{lim}]$, 進行人員影像模版比對, 特徵採用如圖 11 (g) 配戴(白色或黃色)安全帽或不戴安全帽之黑頭髮型態, 如圖 8 說明配戴黃色安全帽影像模版比對相關係數, 實驗比對區隔 0.75 以上為搜尋到區域內有人員活動的跡象。

$$X_{lim} \in \text{Min}(X_{axis}) \rightarrow \text{Max}(X_{axis})$$

$$Y_{lim} \in \text{Min}(Y_{axis}) \rightarrow \text{Max}(Y_{axis})$$

4.2.5 警示

在搜尋警戒區域 $[X_{lim}, Y_{lim}]$ 內, 模版比對相關係數 0.75 以上之座標點 (X_p, Y_p) , 如圖 9 說明若不在橢圓區域 $[X_{osc}, Y_{osc}]$ 內, 則不發生警報; 如圖 10 說明同時符合橢圓區域 $[X_{osc}, Y_{osc}]$ 內, 則及時發出警示訊號, 後續可作為警報聲響及警示燈, 及進一步暫停危險方向的操作; 待人員離開警戒區域, 自動恢復允許啟動。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(X_p - X_c)}{(Y_p - Y_c)} \right)$$

$\theta \in -45^\circ \sim 45^\circ$ 暫停向東方向操作

$\theta \in 45^\circ \sim 135^\circ$ 暫停向北方向操作

$\theta \in 135^\circ \sim 225^\circ$ 暫停向西方向操作

$\theta \in 225^\circ \sim 315^\circ$ 暫停向南方向操作

5. 結論與建議

本研究以實際吊掛物實驗的方式, 應用影像辨識技術, 搜尋、紀錄吊掛物擺動軌跡, 及預防碰撞邏輯判斷, 實驗時吊掛物件不設限形狀、顏色等特徵, 但限定關鍵物如吊勾、人型頭髮、安全帽顏色及型態等特徵, 符合一般工廠實際狀況。另一方面, 吊勾搜尋技術採用樣版比對方法, 但為減少比對時間, 本研究利用運動方程式及灰色理論 GM(1,1) 預測搜尋範圍, 兩者比較以灰預測 GM(1,1) 資料 4 筆之預測模型, 具有最小的預測誤差, 結果實驗測試可行性高。另基於研究比較的理由, 試驗搜尋比對也有應用傅立葉轉換及統計相關係數比對方式, 以後者之統計相關係數比對具有較精準結果, 但也相對比對速度較慢, 耗費大量電腦計算資源。

總結本研究實驗結果, 作者認為以影像辨識技術

為基礎, 配合如灰色理論、模糊等人工智慧系統等, 建構輔助之防撞安全警報裝置是可行的方式。

6. 誌謝

感謝勞工安全衛生研究所及協助 2012 年全國精密製造學術研討會的相關人員。

7. 參考文獻

- 2008 Taiwan R.O.C. Labor Inspection Report, published by Council of Labor Affairs, Executive Yuan, printed in August 2009.
- F. Omar, F. Karray, O. Basir and L.Yu., "Autonomous Overhead Crane System Using a Fuzzy Logic Controller," *J. Vib. Control*, vol. 10, pp.1255-1270, 2004.
- Sung-Kun Cho, Ho-Hoon Lee, "A fuzzy-logic anti-swing controller for three-dimensional overhead cranes" *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, Received 26 October 2000.
- Junlong Zhang, Yahui Tsai, Zhaochi Wu, Overview of Robotic Visual Technologies and Applications, *Industrial Mechanics Journal*, August 2006.
- Translation by ShaoGang Mou, Digital Image Processing – Using MATLAB, Tunghua Books Taiwan Ltd., December 2008, third printing of first edition.
- Wu Liwen, Hou Zhen, Wang Zhaohua, "The ground warning devices for overhead crane", China Steel., ROC Patent M362227.
- Chih-Hui Wang, Wen-Yuan Chen, "Study on Anti-Swing of Crane System Using Image Processing Techniques", National Chin-Yi University of Technology Department of Electrical Engineering Master's Thesis, July 2009.
- Wang XunJie, "The anti-swing devices for overhead crane", Wuxi Dali crane Machinery Co., China Patent 200920233896.2.
- Deng, Ju-Long and Kou, Hong, "Grey Prediction – Theory and Applications", Taipei, Chuan-Hua Publication, 1996.

8. 圖表集整

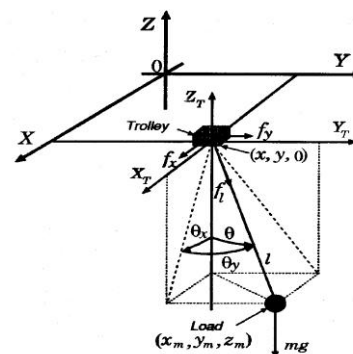


圖 1 三維天車系統座標



圖 2 影像擷取畫面



圖 3 天車作業環境



圖 4 攝影機安裝位置

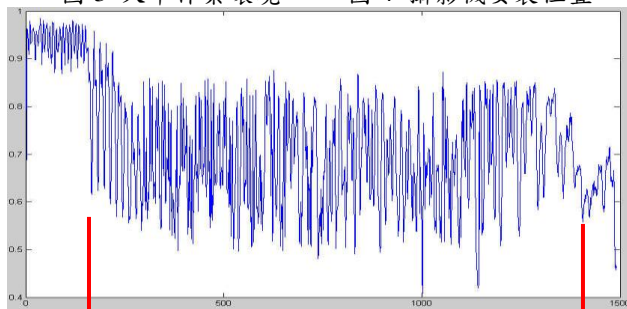


圖 5 吊勾模版比對相關係數

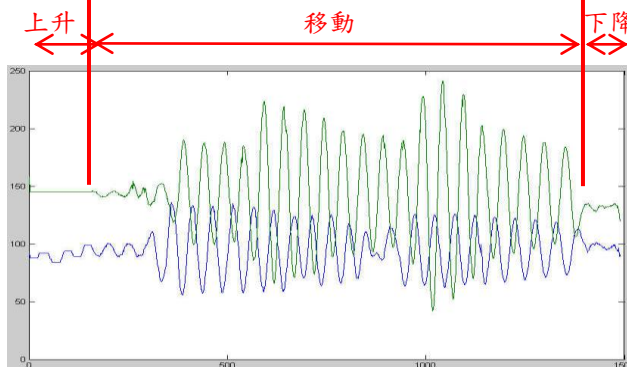


圖 6 吊勾移動座標點

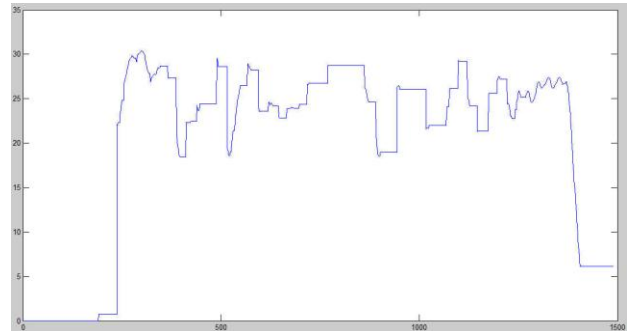


圖 7 吊掛物旋轉角度紀錄(單位：度)

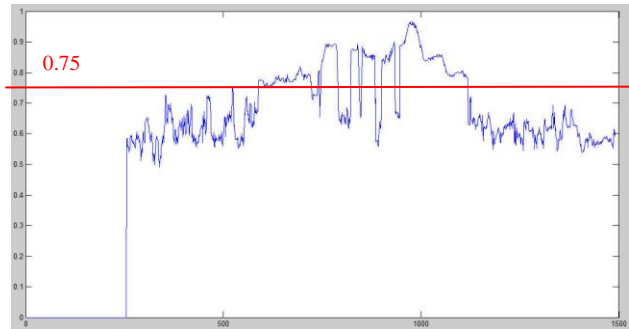


圖 8 配戴黃色安全帽影像模版比對相關係數

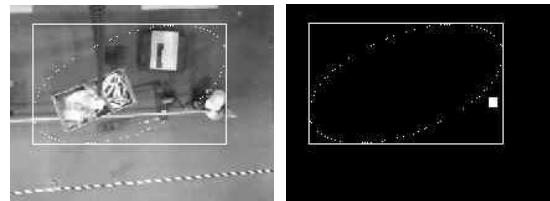


圖 9 第 609 幅，人員在搜尋警戒區域內，但不在橢圓區域內，不發生警報

表 2 預測搜尋模型最大誤差 (單位：像素)

GM(1,1) model 資料筆數	$Max \epsilon_x$	$Max \epsilon_y$
10	10	22
9	10	20
8	10	17
7	10	15
6	11	14
5	10	12
4	9	12
Function (1)	17	22

表 1 相關具有安全裝置概述

裝置	概述	優缺點
機械式防搖控制	利用鋼索纏繞方式使上、下滑輪組隔離一定角度。	裝置複雜，可靠性不高，無法抑制過大擺幅。[7, 8]
電子式防搖控制	利用非線性遞迴步階、模糊適性等控制方法，近年再加上利用雷射、紅外線等感測器回饋控制。	系統複雜、非線性，兼具滑動、摩擦運動及人為不確定性操作等因素，使得控制系統設計困難及無法通案一致。[7]
變頻馬達	具有馬達啟動緩步、節能等功能。	變頻馬達昂貴，馬力受限；對於長軌距離行駛及停止一樣會受到慣性因素搖晃。
地面警示裝置	利用雷射投射警示圖樣到天車正下方地面，主動提示警告訊息。	以安全考量設計，但無法主動防撞停止；中華民國專利M362227。[6]

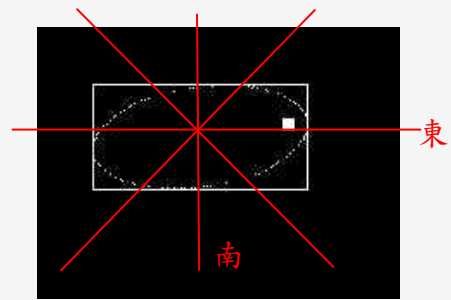
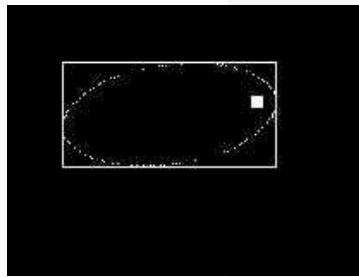


圖 10 第 907 幅，人員在搜尋警戒區域內，也同時在橢圓區域內，發生警報，向東方向無法被啟動

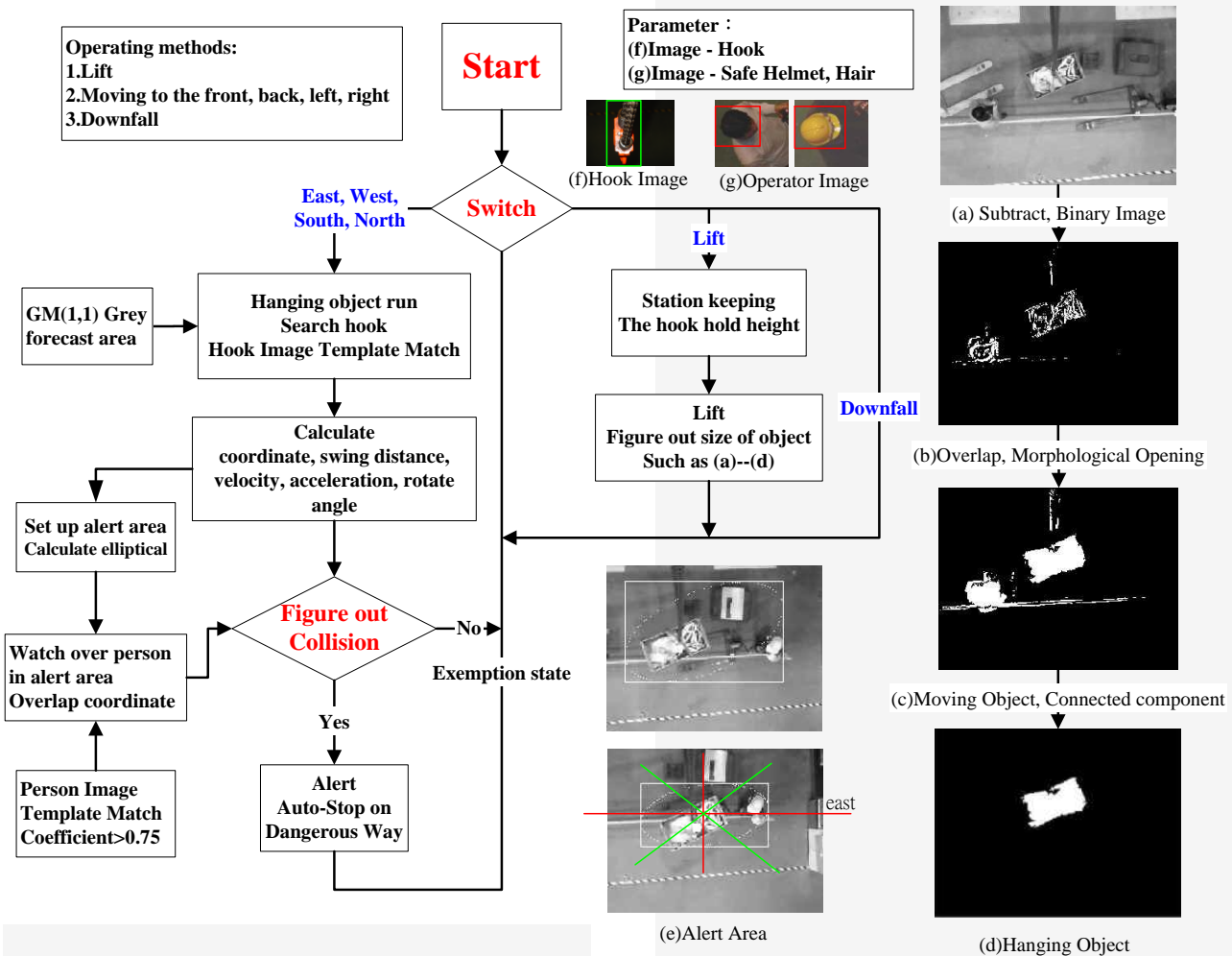


圖 11 天車操作及影像辨識流程

The Study for Safety Devices of Fixed Crane Using Image Recognition and GM(1,1) Technology

Kuo-Ching Liu¹, Wenlung Li¹, Chih-Yang Sheng¹

¹Dept. of Mechanical Eng'g., National Taipei Uni. of Tech., Taipei

²Dept. of Safety, Institute of Occupation Safety and Health, New Taipei

Abstract

The overhead crane is a type of crane and is categorized as dangerous machinery. When operating an overhead crane, the operator must pay close attention to the weight of the load, the movement path, and the environment around the location of operation to ensure safe operation. In this study, we aim to help overhead cranes avoid a specific type of accidental disaster – hitting personnel. To achieve this, we built an alarm device specifically designed for avoiding the potential collision of overhead cranes with personnel. A camera is installed on the overhead crane, and the distance between personnel and the load object hanging from the overhead crane is determined using visual image recognition. The image processing technology used includes moving object recognition, edge detection, image feature template matching, and type tagging and descriptions. At the same time, the movement trajectory of the hanging object is recorded and the range of swing of the load is calculated. When a possible collision with personnel is detected, the alarm is immediately sounded and the operation in the direction of the possible collision is immediately ceased.

Keywords : Fixed Crane, Image Process, Safety Devices