

# 具一筆劃特質的無線感測器網路佈建

許良政

國立屏東商業技術學院資訊工程所

Email: shiu@npic.edu.tw

王寵凱

國立屏東商業技術學院資訊工程所

Email: s96317011@student-mail.npic.edu.tw

**摘要**—Wireless sensor networks(WSNs)已被大量探討並應用在實際的環境，如何將感測器佈建(deploy)在監測區域是一個重要的議題。先前以機器人佈建感測器的研究是以四邊形為主，所以監測區域的周圍為四個規則的邊界，但實際上邊界有可能為不規則，也就是邊界為凹凸狀，本文稱為邊界不規則。邊界不規則所圍成的區域稱為邊界不規則區域。本文旨在探討將感測器佈建在邊界不規則區域。現存使用機器人為佈建方法的研究，若遇到邊界不規則時因無法進入而形成感測空洞(sensing hole)。使用本文的佈建方法使邊界不規則區域為全覆蓋(full coverage)並且機器人行走路徑具有 Hamilton Circuit，換言之，一筆到底如同同一筆劃之特性。

**關鍵詞**—感測器、機器人、佈建

## 一、簡介

無線感測器網路是由數百個或數千個感測器(sensors)所組成的，這些感測器皆具有體積小、檢測、收集資料、計算和通訊的能力、而且具有容錯、自我組織的特性[1][2]。

感測器網路的佈建有許多方法，隨機佈建(random deployment)是最簡單且最容易被完成的佈建方式，同時它也是在 WSNs 中較沒有效率的，因為其缺點容易造成感測器過於集中而導致感應範圍(sensing range)相互重疊或者過於分散而無法完全涵蓋欲監測區域，而形成空洞(Hole)，所以如何能保證感應範圍覆蓋整個監測區域是一個挑戰。另一種是使用機器人來佈建感測器，利用機器人可以佈建在不適合人為佈建的區域，並且可以採用規則的方式佈建，使得感測器的感應範圍可覆蓋整個監測區域並且使感測器之感測範圍的重複覆蓋區域為最少。像這種佈建方式可以增

加感測器之效率以及保證感測器彼此之間皆可連通(connectivity)，也可讓機器人避開障礙物完成佈建。除此之外，若感測器損壞而造成 WSNs 斷裂，縮短了生命週期(lifetime)，可讓機器人前往再次佈建感測器[3]。

本文所佈建的感測器彼此之間之距離為 $\sqrt{3}r_s$ 如圖 1 所示，若感測器之感測範圍均為 $r_s$ ，則六邊形  $aebich$  為正六邊形， $\triangle aeb$  為等腰三角形， $\angle eab$  與  $\angle eba$  皆為 $30^\circ$ ， $\overline{cd}$  等於 $((3/2)r_s)$ ， $\overline{de}$  為 $((1/2)r_s)$ 。感測器彼此之間的距離為 $\sqrt{3}r_s$ 則覆蓋率最大且重複覆蓋為最小，所以可用較少的感測器去佈建在欲監測區域。

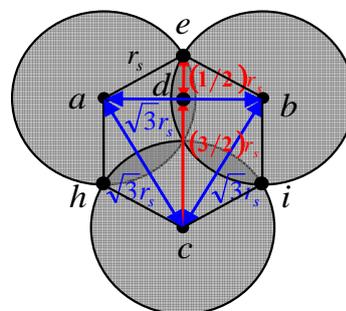


圖 1：機器人佈建方式

## 二、相關文獻與提出問題

在這章節探討的是以機器人來佈建感測器之相關研究，並且提出若使用在本文環境下佈建感測器會有什麼結果。

在[3]的研究中，是使用 obstacle-resistant robot deployment(ORRD)algorithm 來佈建感測器。蛇行佈建演算法佈建的方式為分成兩個 State，一個是向東行走(East Movement，簡稱 East)，另一個是



圖 5：先前研究以機器人佈建之行走方向

### 三、機器人佈建技術

在這章節要探討的是機器人佈建感測器的技術，為描述方便起見，以圖 6 所示的  $B$  區域為本文所需處理的佈建區域，假設在此區域內沒有障礙物。 $B$  區域寬度至少為  $((\sqrt{3}/2)r_s + \sqrt{3}r_s)$  如圖 6B 區域之下方邊界所示。機器人之電量能應付在此區域所耗費之電量，以及具有檢測邊界之設備如超音波，以 360 度發散出超音波。感測器的通訊範圍以  $r_c$  來表示，當感測器的感應範圍為  $r_s$ ，通訊範圍滿足  $r_c \geq \sqrt{3}r_s$ 。

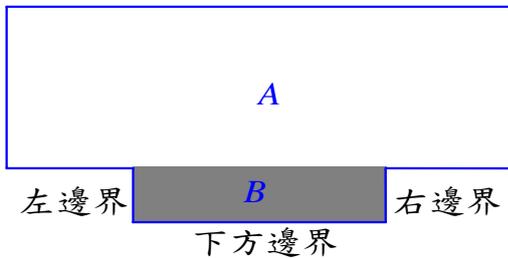


圖 6：佈建環境

#### 3.1 起始位置與方向定義

佈建區域為圖 6 的  $B$  區， $B$  區稱之為邊界不規則區域。首先說明佈建之起始點  $s$ ，它位於左邊界上方的頂點如圖 7 所示，並以其為原點，換言之其座標為  $(0,0)$ 。

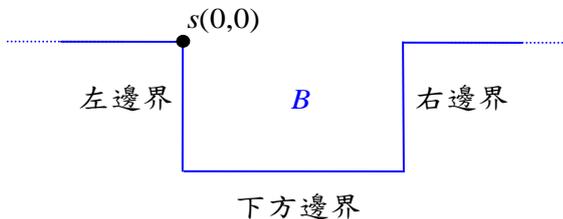


圖 7：佈建之起始點

令機器人所處的座標為  $(x,y)$ ，若機器人的移動向量為  $(k_1,0)$ ，則表示機器人右移至  $(x+k_1,y)$ ，當機器人的移動向量為  $(0,k_2)$ ，則表示機器人下移至  $(x,y+k_2)$ ， $k_1$  與  $k_2$  為機器人所行走的距離。同樣

的，當機器人使用移動向量  $((\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s)$  時，它將移至座標為  $(x+(\sqrt{3}/2)r_s, y+(3/2)r_s)$  的位置，此時機器人行走的距離為  $\sqrt{3}r_s$ ，如圖 8 所示。

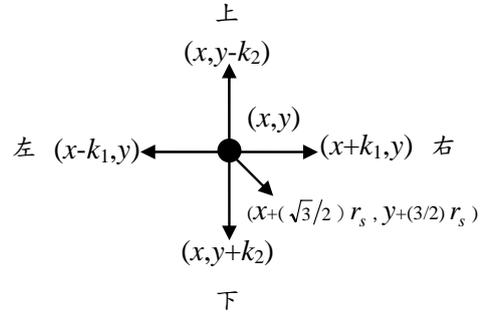
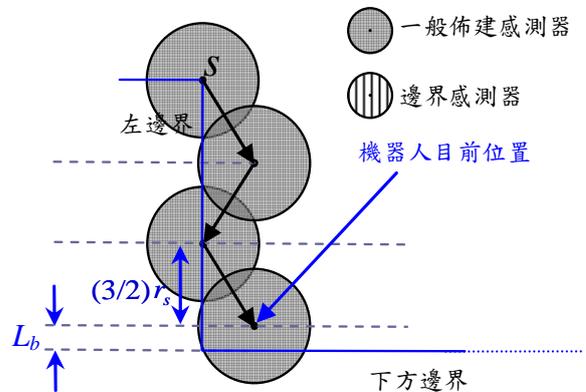


圖 8：機器人方向軸，●為機器人

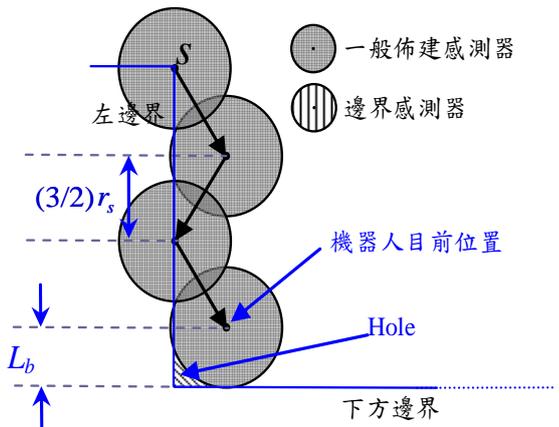
#### 3.2 左邊界之佈建

機器人進入邊界不規則區域後，在起始點的位置上佈建第一個感測器並且將此處定為第 1 列。佈建之後檢測機器人與下方邊界之垂直距離  $(L_b)$ ，若  $L_b > (3/2)r_s$  表示尚未到達下方邊界。若沒有檢測到下方邊界則使用移動向量  $((\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s)$  來佈建感測器，將此處定為第 2 列，佈建之後再檢測是否到達下方邊界，若沒有檢測到邊界則使用移動向量  $(-(\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s)$  來佈建感測器，此處定為第 3 列。重複這個程序並輪流使用此兩移動向量直到  $L_b < (3/2)r_s$ 。

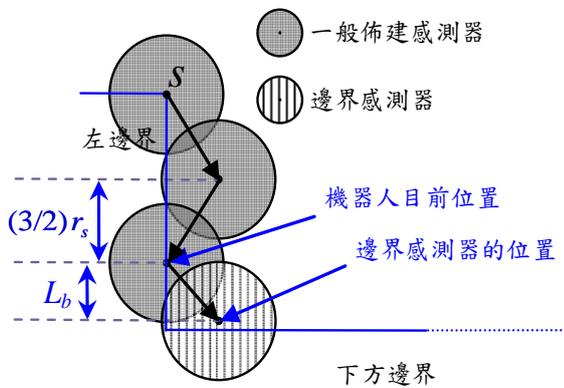
$L_b$  的類型如圖 9(a)與圖 9(b)所示，圖 9(a)表示當  $L_b$  的範圍為  $0 \leq L_b \leq (1/2)r_s$  時表示目前所佈建的感測器能覆蓋至下方邊界不會有 Hole。若此時已佈建第 Row 列，則第 Row 列與第 (Row-1) 列所佈建的感測器之垂直高度相差  $(3/2)r_s$ 。圖 9(b)表示在  $L_b$  的範圍為  $(1/2)r_s < L_b < (3/2)r_s$  時，需要邊



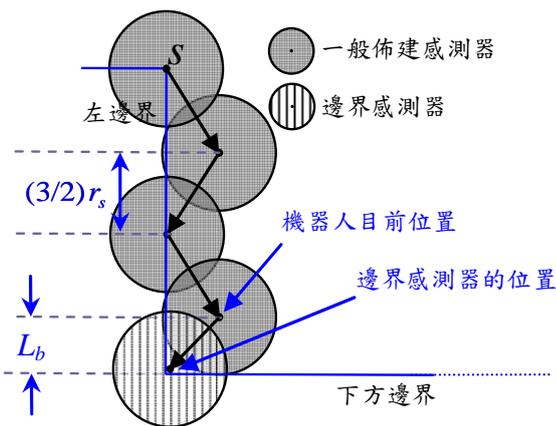
(a)  $0 \leq L_b \leq (1/2)r_s$ ，沒有 Hole 產生



(b)  $(1/2)r_s < L_b < (3/2)r_s$  時會有 Hole 產生



(c)  $(1/2)r_s < L_b < (3/2)r_s$  且邊界感測器的位置為偶數列



(d)  $(1/2)r_s < L_b < (3/2)r_s$  且邊界感測器的位置為奇數列

圖 9：機器人目前位置與下方邊界距離情形  
界感測器，否則在下方邊界會有空洞產生。若此  
邊界感測器位於為偶數列則使用移動向量

$((\sqrt{3}/2)r_s, L_b)$ 來佈建感測器如圖 9(c)所示，反之、若位於奇數列則使用移動向量 $(-\sqrt{3}/2)r_s, L_b)$ 來佈建感測器如圖 9(d)所示。表 2 為佈建左邊界所使用的移動向量。

表 2：佈建左邊界所使用的移動向量

Row 之列數	$L_b \geq (3/2)r_s$ (一般佈建)	$(1/2)r_s < L_b < (3/2)r_s$ (邊界佈建)
偶數列	$((\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s)$	$((\sqrt{3}/2)r_s, L_b)$
奇數列	$(-\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s)$	$(-\sqrt{3}/2)r_s, L_b)$

### 3.3 下方邊界之佈建

此時已完成左邊界的佈建，而所佈建感測器的數量等於列數，此數值保存在 Row 變數中。接著以移動向量 $(\sqrt{3}r_s, 0)$ 沿著下方邊界從左邊界佈建感測器至右邊界，直到機器人目前所處位置與右邊界的垂直距離 $(L_r)$ 小於 $\sqrt{3}r_s$ 。當 $L_r \geq \sqrt{3}r_s$ 表示尚未進入右邊界，繼續以 $(\sqrt{3}r_s, 0)$ 往右邊界方向佈建。同樣地在佈建過程中會記錄佈建感測器的數量，且保存在 Column 變數中。

### 3.4 轉折區之佈建

當 $L_r < \sqrt{3}r_s$ 時表示已進入右邊界，此外本文稱之為轉折區，也就是使機器人由最後一列(第 Row 列)移至倒數第二列(第 Row-1 列)。機器人如何移至第 Row-1 列取決 $L_r$ 的大小。

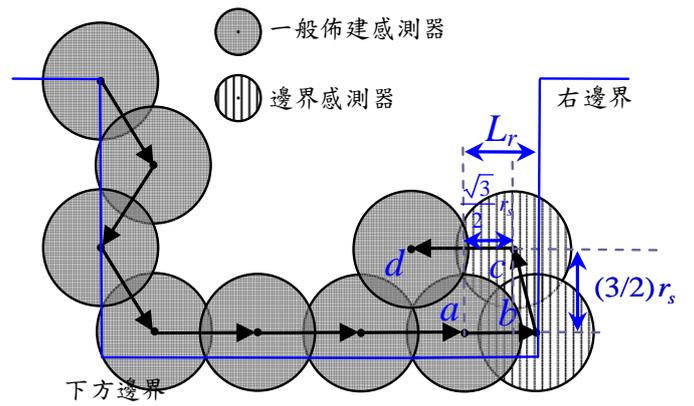
左邊界不需邊界感測器時，則第 Row 列與第 (Row-1) 列的感測器之垂直高度相差 $(3/2)r_s$ ，反之、若需邊界感測器則垂直高度相差 $L_b$ 。當 Row 為偶數且機器人進入轉折區時，依 $L_r$ 之值決定本區之佈建方式，其類型如圖 10 與圖 11 所示。

假設 $L_r=0$ 表示第 Row 列最右一個感測器、位於右邊界上此時以移動向量 $(-\sqrt{3}/2)r_s, -H_{difference})$ 來佈建下一個感測器。若 $H_{difference}=(3/2)r_s$ 則佈建下一個感測器如圖 10(a)的 a 點至 b 點所示，當 $H_{difference}=L_b$ 則佈建下一個感測器如圖 11(a)的 a 點至 b 點所示， $H_{difference}$ 為第 Row 列與第 Row-1 列的距離。 $H_{difference}$ 的值可藉由下列式子得知：

$$H_{\text{difference}} = \begin{cases} (3/2)r_s & \text{左邊界不需邊界感測器} \\ L_b & \text{左邊界需邊界感測器} \end{cases}$$

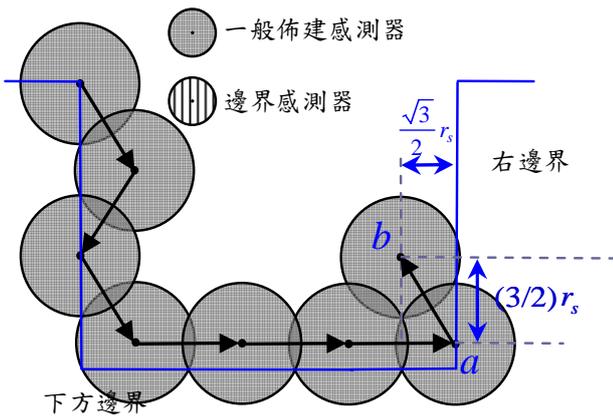
若  $L_r$  的範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  時則使用移動向量  $(L_r, -H_{\text{difference}})$  與  $(-L_r + (\sqrt{3}/2)r_s, 0)$  來佈建下二個感測器。若  $H_{\text{difference}} = (3/2)r_s$  則佈建下二個感測器如圖 10(b) 的  $a$  點至  $b$  點、 $b$  點至  $c$  點所示，當  $H_{\text{difference}} = L_b$  則佈建下二個感測器如圖 11(b) 的  $a$  點至  $b$  點、 $b$  點至  $c$  點所示。

圖 10(c) 表示若  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  則使用移動向量  $(L_r, 0)$ 、 $(-L_r - \sqrt{3}/2, -H_{\text{difference}})$  以及  $(-\sqrt{3}r_s, 0)$  來佈建下三個感測器。若  $H_{\text{difference}} = (3/2)r_s$  則佈建下三個感測器如圖 10(c) 的  $a$  點至  $b$  點、 $b$  點至  $c$  點、以及  $c$  點至  $d$  點所示，當  $H_{\text{difference}} = L_b$  則佈建下三個感測器如圖 11(c) 的  $a$  點至  $b$  點、 $b$  點至  $c$  點、以及  $c$  點至  $d$  點所示。

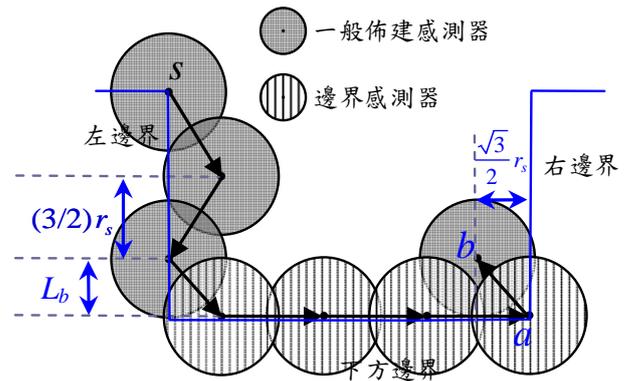


(c) Row 為偶數， $H_{\text{difference}} = (3/2)r_s$ ，  
 $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$

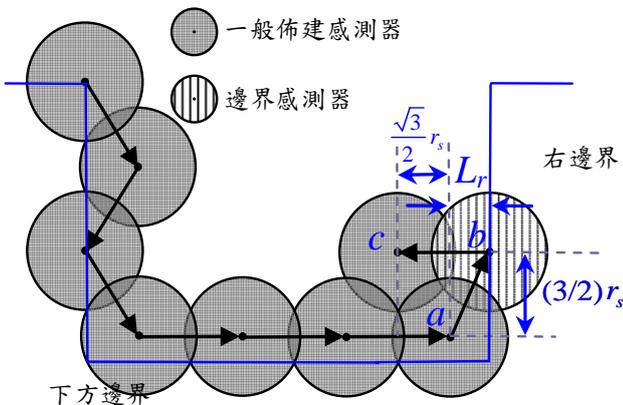
圖 10：Row 為偶數， $H_{\text{difference}} = (3/2)r_s$ ，機器人與右邊界距離情形



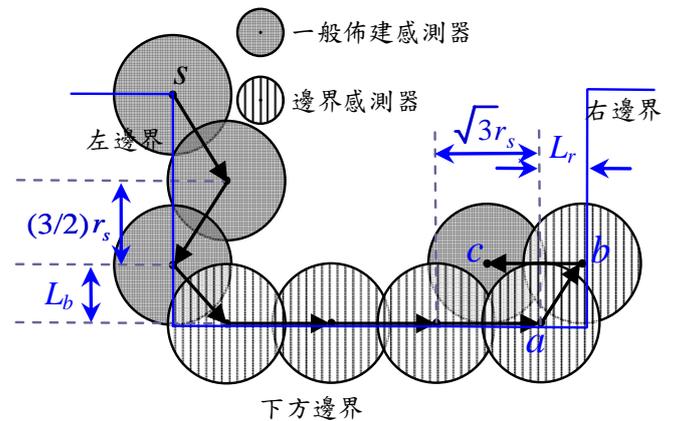
(a) Row 為偶數， $H_{\text{difference}} = (3/2)r_s$ ， $L_r = 0$



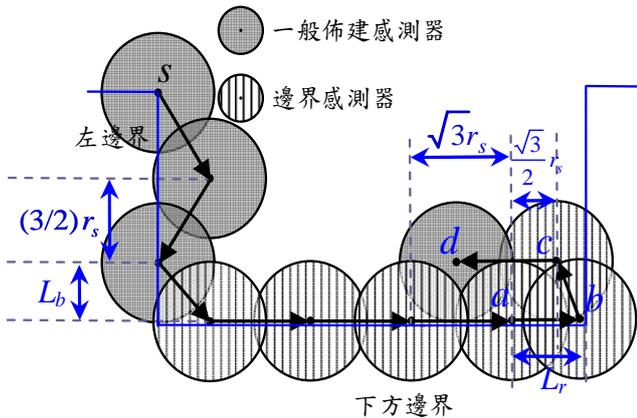
(b) Row 為偶數， $H_{\text{difference}} = L_b$ ， $L_r = 0$



(b) Row 為偶數， $H_{\text{difference}} = (3/2)r_s$ ， $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$



(c) Row 為偶數， $H_{\text{difference}} = L_b$ ， $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$



(c) Row 為偶數， $H_{difference}=L_b$ ， $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$   
 圖 11：Row 為偶數， $H_{difference}=L_b$ ，機器人與右邊界距離情形

當 Row 為奇數時其  $L_r$  的類型分別為  $L_r=0$ 、 $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  以及  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$ ，所使用的移動向量如同 Row 為偶數時所使用的移動向量，表 3 為轉折區所使用的移動向量。

表 3：轉折區所使用的移動向量

$L_r$ 之範圍	佈建順序	移動向量
$L_r=0$	1st	$(-(\sqrt{3}/2)r_s, -H_{difference})$
	2nd	
	3rd	
$0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$	1st	$(L_r, -H_{difference})$
	2nd	$(-L_r + (\sqrt{3}/2)r_s, 0)$
	3rd	
$(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$	1st	$(L_r, 0)$
	2nd	$(-L_r - \sqrt{3}/2)r_s, -H_{difference})$
	3rd	$(-\sqrt{3}r_s, 0)$

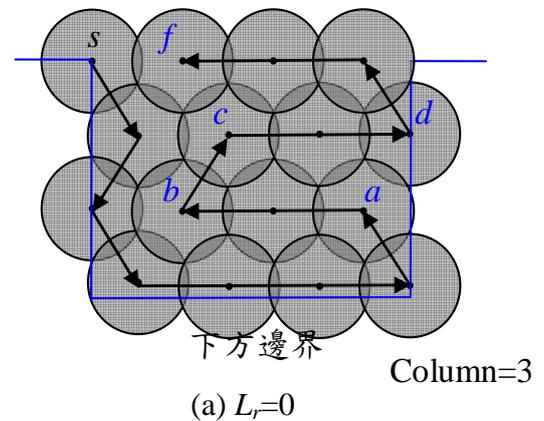
### 3.5 剩餘區域之佈建

已完成了轉折區之佈建的所有類型。接著要處理的是在本文佈建環境中目前尚未佈建感測器的區域，本文稱為剩餘區域。目前機器人位於倒數第二列，接下來要說明如何從倒數第二列回到起始點的位置。

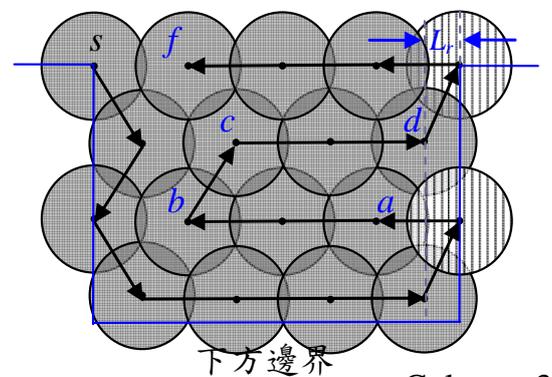
#### 3.5.1 Row 為偶數

當 Row 為偶數的情況下，機器人在此區域佈

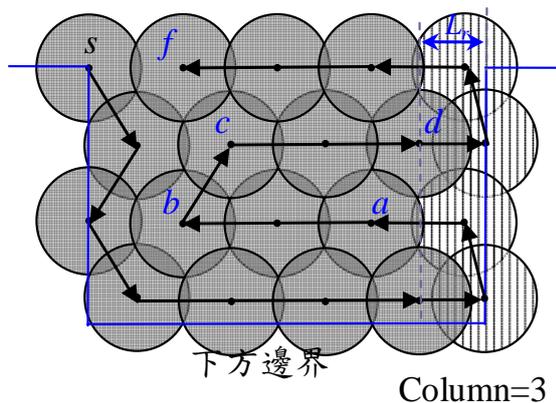
建感測器之行走方式呈彈簧狀，本文稱為彈簧狀佈建。此彈簧狀分成四個步驟分別為 step1~step4。為了描述方便以圖 12 來說明。Step1 為使用移動向量 $(-\sqrt{3}r_s, 0)$ 來佈建感測器。當佈建感測器的數量達到(Column-1)時如圖 12(a)、(b)與(c)的 a 點至 b 點所示。佈建 b 點之後，因為 Row 為偶數則 step2 為使用移動向量 $((\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s)$ 來佈建感測器如圖 12(a)、(b)與(c)的 b 點至 c 點所示。Step3 為使用移動向量 $(\sqrt{3}r_s, 0)$ 來佈建感測器，一直使用當佈建感測器的數量到達(Column-1)如圖 12(a)、(b)與(c)的 c 點至 d 點所示。接著進入右邊界的轉折區，step4 會因為  $L_r$  的大小而使用不同的移動向量如表 5 所示，然而、此  $L_r$  的大小會等於轉折區的  $L_r$ ，且  $H_{difference}=(3/2)r_s$ 。圖 13 的(a)、(b)與(c)分別表示  $L_r=0$ 、 $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  與  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  的情形。依序使用 step1~step4，一直使用到當機器人處在距離起點正右方  $\sqrt{3}r_s$  則表示佈建完成如圖 12(a)、(b)與(c)的 f 點所示，此時機器人已處在距離起點正右方  $\sqrt{3}r_s$ 。



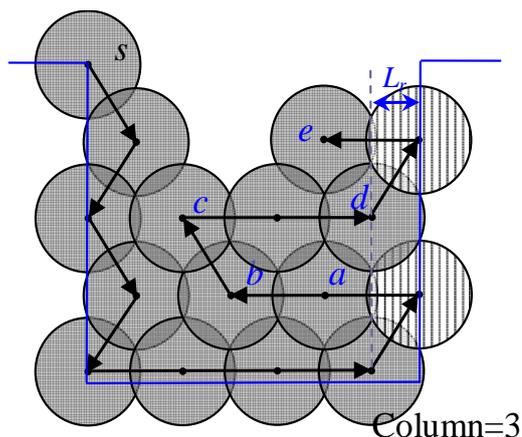
(a)  $L_r=0$



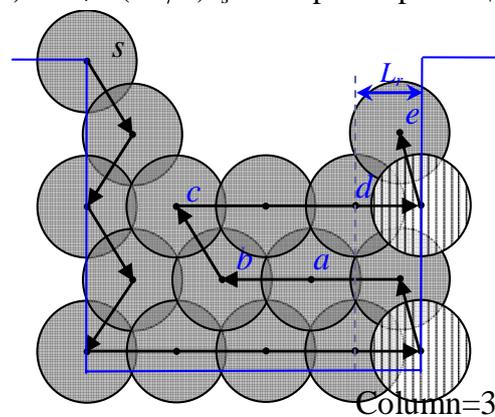
(b)  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$



(c)  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$



(b)  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  之 step1~step4 之佈建



(c)  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  之 step1~step4 之佈建

圖 12：下方邊界之列數為偶數時剩餘區域之佈建

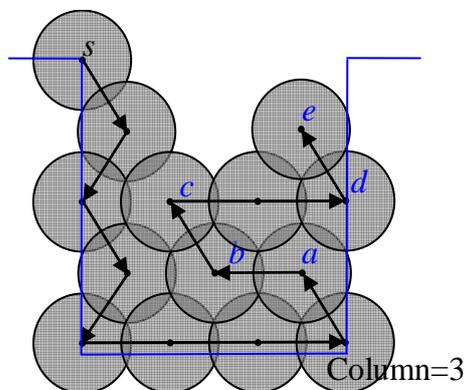
### 3.5.2 Row 為奇數

當 Row 為奇數的情況下並且為了描述方便以圖 13 來說明彈簧狀佈建。step1 為使用移動向量  $(-\sqrt{3}r_s, 0)$  來佈建感測器。當佈建感測器的數量達到 (Column-2) 時，如圖 13(a)、(b) 與 (c) 的 a 點至 b 點所示。佈建 b 點之後因為 Row 為奇數則 step2 為使用移動向量  $(-\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s$  來佈建感測器如圖 13(a)、(b) 與 (c) 的 b 點至 c 點所示。Step3 為使用移動向量  $(\sqrt{3}r_s, 0)$  來佈建感測器，一直使用當佈建感測器的數量到達 (Column-1) 如圖 13(a)、(b) 與 (c) 的 c 點至 d 點所示。此時 step4 會因為  $L_r$  的大小而使用不同的移動向量來佈建感測器如表 5 所示，然而、此  $L_r$  的大小會等於轉則區的  $L_r$ 。依序使用 step1~step4，一直使用到當機器人處在第 2 列，圖 13(a)、(b) 與 (c) 的 e 點為彈簧狀佈建的最後一個感測器，本文以  $S_d$  表示。表 4 為剩餘區域所使用之 step1~step3 的移動向量與使用次數。

圖 13：Row 為奇數 step1~step4 之佈建

表 4：剩餘區域所使用之 step1~step3 的移動向量

彈簧狀佈建	一般使用 (正常佈建)	
step1	$(-\sqrt{3}r_s, 0)$	
step2	Row 為偶數	$((\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s)$
	Row 為奇數	$(-\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s)$
step3	$(\sqrt{3}r_s, 0)$	



(a)  $L_r = 0$  之 step1~step4 之佈建

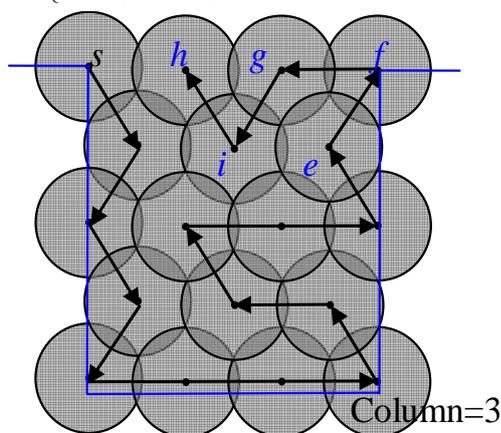
在第一列與第二列佈建感測器主要使用兩移動向量  $(-\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s$  與  $(-\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s$  形成鋸齒狀的行走方式，本文稱為鋸齒狀佈建。當機器人處在  $S_d$  的位置時，此時  $L_r$  有三種情形分別為  $(\sqrt{3}/2)r_s$ 、 $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  與

$0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  如圖 14(a)、(b)與(c)的  $e$  點，若  $L_r = (\sqrt{3}/2)r_s$  則使用移動向量  $((\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s)$  與  $(-\sqrt{3}r_s, 0)$  來佈建感測器如圖 14(a)的  $e$  點至  $f$  點、 $f$  點至  $g$  點，再使用  $S_{vector}$  來佈建感測器，使用  $S_{vector}$  來佈建第一個感測器如圖 14(a)的  $i$  點，再佈建第二個感測器如圖 14(a)的  $h$  點，當佈建感測器的數量達到  $(2 * \text{Column} - 4)$  時則表示佈建完成，此時機器人位在圖 14(a)的  $h$  點並且距離起點正右方  $\sqrt{3}r_s$ 。

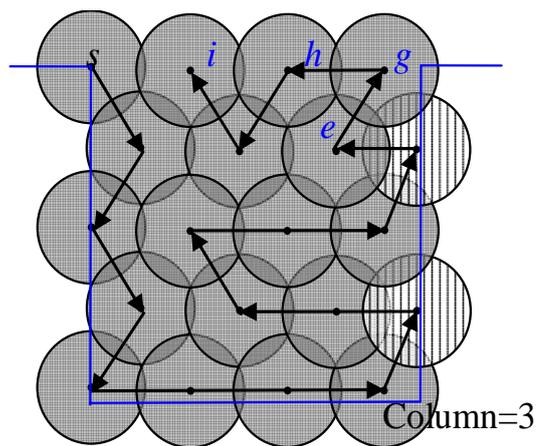
當  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  時則使用移動向量  $((\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s)$  與  $(-\sqrt{3}r_s, 0)$  來佈建感測器如圖 14(b)的  $e$  點至  $g$  點、 $g$  點至  $h$  點，再使用  $S_{vector}$  來佈建感測器，當佈建感測器的數量達到  $(2 * \text{Column} - 4)$  時則表示佈建完成，此時機器人位在圖 14(b)的  $i$  點並且距離起點正右方  $\sqrt{3}r_s$ 。

若  $L_r$  的範圍為  $0 < L_r < (\sqrt{3}/2)r_s$  時，則使用移動向量  $(L_r, -(3/2)r_s)$  與  $(-L_r + (\sqrt{3}/2)r_s, 0)$  來佈建感測器如圖 14(c)的  $e$  點至  $f$  點、 $f$  點至  $g$  點所示，再使用  $S_{vector}$  來佈建感測器，當佈建感測器的數量達到  $(2 * \text{Column} - 2)$  時則表示佈建完成，此時機器人位在圖 14(c)的  $j$  點並且距離起點正右方  $\sqrt{3}r_s$ 。表 5 為 Row 為奇數時且由第 2 列其  $S_d$  之位置至距離起點正右方  $\sqrt{3}r_s$  之佈建所使用的移動向量與使用次數。 $S_{vector}$  的移動向量可藉由下列式子得知：

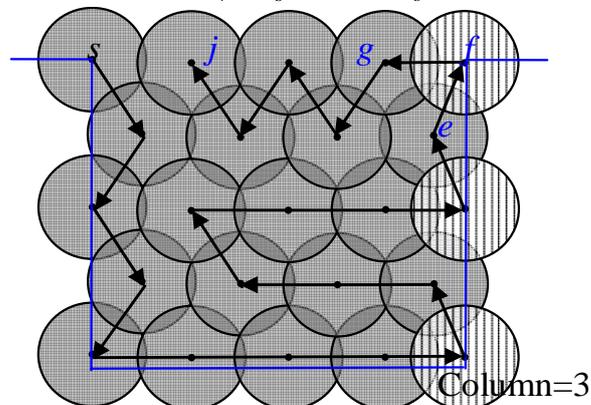
$$S_{vector} = \begin{cases} (-\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s) \text{ 佈建個數為奇數的感測器} \\ (-\sqrt{3}/2)r_s, (3/2)r_s) \text{ 佈建個數為偶數的感測器} \end{cases}$$



(a)機器人在  $S_d$  位置時  $L_r = (\sqrt{3}/2)r_s$



(b)機器人在  $S_d$  位置時， $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$



(c)機器人在  $S_d$  位置時， $L_r$  的範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$

圖 14：Row 為奇數時從第 2 列回到起點

表 5： $S_d$  至距離起點正右方  $\sqrt{3}r_s$  之佈建所使用的移動向量

$L_r$ 之範圍	佈建順序	移動向量
$L_r = (\sqrt{3}/2)r_s$	1st	$((\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s)$
	2nd	$(-\sqrt{3}r_s, 0)$
	3rd	$S_{vector}$
$(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$	1st	$((\sqrt{3}/2)r_s, -(3/2)r_s)$
	2nd	$(-\sqrt{3}r_s, 0)$
	3rd	$S_{vector}$
$0 < L_r < (\sqrt{3}/2)r_s$	1st	$(L_r, -(3/2)r_s)$
	2nd	$(-L_r + (\sqrt{3}/2)r_s, 0)$
	3rd	$S_{vector}$

#### 四、Hamilton Circuit 之探討

在這章節我們探討其佈建之圖形具有 Hamilton Circuit，將每個節點與相鄰的節點相互連接且以座標(x,y)表示第 x 列、第 y 行的節點如圖 15 所示，稱為 triangle grid[8]。若 triangle grid 圖形(簡稱 tg 圖形)具有  $x \times y$  個節點，以  $tg_{x,y}$  表示，例圖 15 為  $tg_{5,5}$ 。

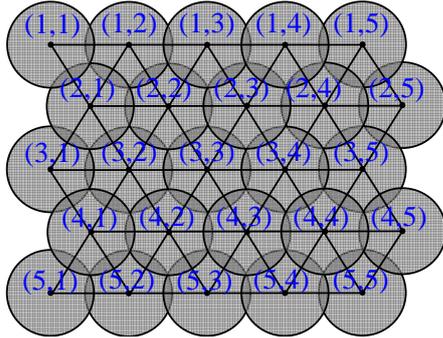


圖 15：triangle grid 圖形

在[9]的研究中，是以 grid 的形式來探討 Hamilton Circuit 如圖 16 所示，所以將 triangle grid 轉換成類似 grid 的形式，稱為 grid\_Triangle\_Mesh 圖形且以座標(x,y)表示第 x 列、第 y 行的節點如圖 17 所示。若 grid\_Triangle\_Mesh 圖形(簡稱 gTM 圖形)具有  $x \times y$  個節點，本文以  $gTM_{x,y}$  表示，例圖 17 為  $gTM_{5,5}$ 。

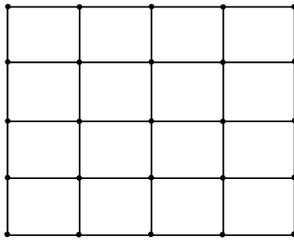


圖 16：grid 圖形

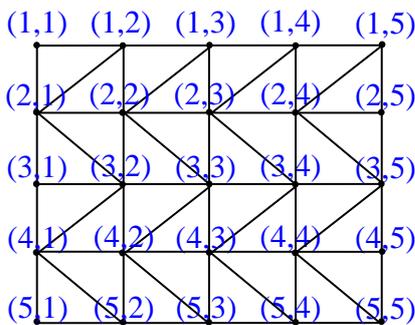


圖 17：grid\_Triangle\_Mesh 圖形

tg 圖形如何形變成 gTM 圖形，可將 tg 圖形的奇數列往右移動，使奇數列的節點與偶數列的節點並行，所以 tg 圖形可轉成 gTM 圖形。我們就可以以 gTM 圖形取代 tg 圖形來探討 Hamilton Circuit。

在[9]的研究中，已證明 grid 圖形除了奇數列與奇數行之外，皆有 Hamilton Circuit。所以 gTM 只需探討奇數列與奇數行。

我們以圖 17 來解說，首先從起點之座標(1,1)往下方移動至座標(5,1)，再向右移至座標(5,2)，之後再往上移至座標(4,2)，到了座標(4,2)之後經由主對角線移至座標(5,3)，接下來再往上移至座標(4,3)之後接重複上述兩個動作可到達座標(4,5)。到了座標(4,5)再往上移至座標(3,5)，接下來再往左移至座標(3,2)，再往上移至座標(2,2)，再往右移至座標(2,5)，此時再往上移至座標(1,5)，最後往左走可移至座標(1,1)。所以在 gTM 圖形上具有 Hamilton Circuit。

#### 五、實驗與評估

為了評估本文所設計的邊界不規則演算法(在此簡稱 OIBA)，我們將與[3](在此簡稱 ORRD)所設計的機器人佈建方法做比較，首先，先說明環境的大小的計算方式，再探討佈建完成時機器人所需行走的路徑長度。

若要計算環境大小，則環境的長度(Length)可藉由在左邊界佈建感測器的 Row 值去計算而得知，令  $R=Row$ ， $Length=(R-1) \times (3/2) r_s$ 。 $L_b$  的範圍分別為  $0$ 、 $0 \leq L_b \leq (1/2) r_s$  與  $(1/2) r_s < L_b < (3/2) r_s$ ，若  $0 \leq L_b \leq (1/2) r_s$  時，則假設  $L_b$  為  $0.25 r_s$ ，當  $(1/2) r_s < L_b < (3/2) r_s$  時，則假設  $L_b$  為  $r_s$  如表 6 所示。

表 6：Length 的值

$L_b$ 的範圍	Length
$L_b = 0$	$((R-1) \times (3/2) r_s)$
$0 \leq L_b \leq (1/2) r_s$	$((R-1) \times (3/2) r_s + 0.25 r_s)$
$(1/2) r_s < L_b < (3/2) r_s$	$((R-1) \times (3/2) r_s + r_s)$

環境的寬度(Width)可藉由在下方邊界佈建感測器的 Column 值去計算而得知，令  $C=Column$ 。假設在轉折區時  $L_r=0$ ，若  $R$  為偶數則 Width 為  $(C \times \sqrt{3} r_s + (\sqrt{3}/2) r_s)$ ，若  $R$  為奇數則 Width 為  $(C \times \sqrt{3} r_s)$  如表 7 所示。

本文所比較的行走路徑長度之環境，是比較

當下方邊界需邊界感測器或者右邊界需邊界感測器時，機器人所走的路徑長度。若下方邊界需感測器的情形只有  $L_b$  的範圍為  $(1/2)r_s < L_b < (3/2)r_s$  時才會發生，只探討該情形。

當右邊界需邊界感測器時， $L_r$  的範圍分別為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  與  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$ 。若  $L_r$  的範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  則假設機器人距離右邊界為  $(r_s - (\sqrt{3}/2)r_s)$ ，當  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  則假設機器人距離右邊界為  $r_s$ 。當 Row 為偶數且在轉折區的  $L_r$  之範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  時，則  $Width$  為  $(C \times \sqrt{3}r_s + r_s)$  或  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  時則  $Width$  為  $(C \times \sqrt{3}r_s + (1 + \sqrt{3}/2)r_s)$  如表 7 所示。

當 Row 為奇數且在轉折區的  $L_r$  之範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  時，則  $Width$  為  $(C \times \sqrt{3}r_s + (1 - \sqrt{3}/2)r_s)$  或  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  時則  $Width$  為  $(C \times \sqrt{3}r_s + r_s)$  如表 7 所示。

表 7：Width 的值

Row 值	偶數	奇數
$L_r = 0$	$C \times \sqrt{3}r_s + (\sqrt{3}/2)r_s$	$C \times \sqrt{3}r_s$
$0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$	$C \times \sqrt{3}r_s + r_s$	$C \times \sqrt{3}r_s + (1 - \sqrt{3}/2)r_s$
$(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$	$C \times \sqrt{3}r_s + (1 + \sqrt{3}/2)r_s$	$C \times \sqrt{3}r_s + r_s$

已知道環境長度與寬度之式子。在佈建偶數列的情況下，若佈建  $R$  列感測器與  $(C+1)$  行感測器，且  $L_r$  的範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  時以  $RER, C+1$  來表示， $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  時以  $RE'R, C+1$  來表示。反之，在佈建奇數列的情況下，若佈建  $R$  列感測器與  $(C+1)$  行感測器且  $L_r$  的範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  時以  $ROR, C+1$  來表示且  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  時以  $RO'R, C+1$  來表示。路徑長度比較結果如圖 18~圖 21 所示。皆可發現 OIBA 行走距離少於 ORRD 之機器人行走距離。

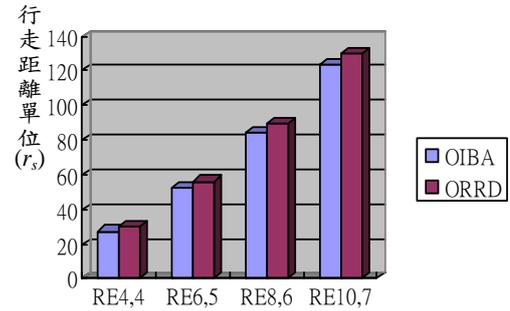


圖 18：機器人佈建偶數列且  $L_r$  的範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  時所走的路徑

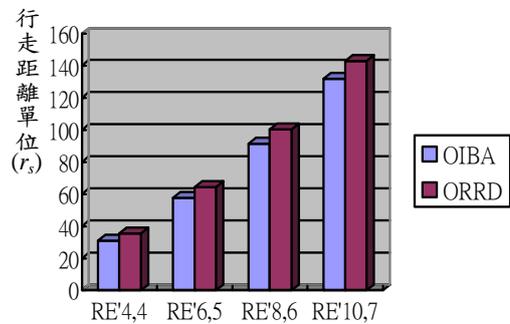


圖 19：機器人佈建偶數列且  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  時所走的路徑

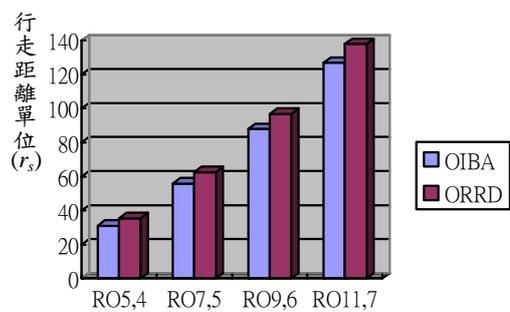


圖 20：機器人佈建奇數列且  $L_r$  的範圍為  $0 < L_r \leq (\sqrt{3}/2)r_s$  時所走的路徑

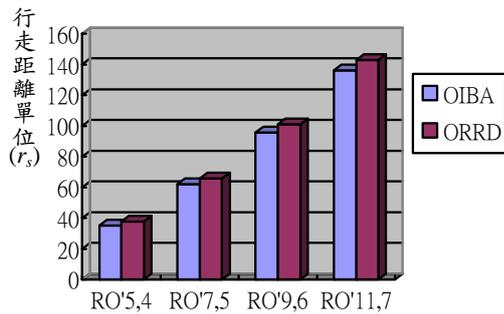


圖 21：機器人佈建奇數列且  $L_r$  的範圍為  $(\sqrt{3}/2)r_s < L_r < \sqrt{3}r_s$  時所走的路徑

## 六、結論

在邊界不規則區域內，本文區分成四部分，分別為左邊界、下邊界、轉折區、剩餘區域，當佈建感測器完成時，機器人搭配本文所設計邊界不規則演算法之行走路徑具有一筆劃之特性，所以不會重覆走過已佈建的感測器而造成感測器損毀，但本文使機器人佈建至距離起始點正右方  $\sqrt{3}r_s$ ，若要離開邊界不規則區域可提供給後人選擇是要先回到起始點再離開還是在距離起始點正右方  $\sqrt{3}r_s$  直接離開此區域。本文解決邊界上發生不規則的情況，在邊界不規則區域內做了是否需要補空洞的機制，即便是機器人在佈建過程中使用補空洞的機制，當佈建完成時，機器人之行走路徑也是具有一筆劃之特性。佈建完畢之後，機器人離開邊界不規則區域之後可繼續未完成之佈建。

## 七、參考文獻

[1] 陳麗文，“在無線感測網路上部分節點覆蓋率之研究”，義守大學資訊工程所碩士論文，2008

[2] 陳宗凱，“無線感測網路中放置中繼節點之研究”，義守大學資訊工程所碩士論文，2008

[3] C. Y. Chang, C. T. Chang, Y.C. Chen and H. R. Chang, “Obstacle-Resistant Deployment Algorithms for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (IEEE TVT), vol. 58, no. 6, July 2009, pp. 2925-2941.

[4] Gaurav S. Sukhatme and Maxim A. Batalin, “Efficient Exploration without Localization,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Taipei, Taiwan, 2003, pp. 2714–2719.

[5] M. J. Mataric, “Behavior-based control: Examples from Navigation, learning, and group behavior,” *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, special issue on Software Architectures for Physical Agents*, Vol. 9, No. 2-3, pp. 323-336, 1997.

[6] P.Pirjanian, “Behavior coordination mechanisms -stateof-the-eart,” *Technic Report, Institute for Robotics and Intelligent Systems*, University of Southern California, IRIS-99-375, October 1999.

[7] C. Y. Chang, Y. C. Chen, and J. P. Sheu, “Obstacle-Free and Power Efficient Deployment Algorithm for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics--Part A: Systems and Humans*, vol. 39, no. 4, July 2009, pp. 795-806.

[8] V. Polishchuk, E. M. Arkin, and J. S. B. Mitchell. Hamiltonian cycles intriangular grids. In Proc. of the 18th Canadian Conf. on Comp. Geom., pages63–66, 2006.

[9] Dr.ChristopherP.Mawata, <http://oneweb.utc.edu/~Christopher-Mawata/Petersen/lesson19.htm>.