

Obstacle-Free Robot Deployment Algorithm for Wireless Sensor Networks

Chih-Yung Chang
Dept. Computer Science and
Information Engineering
Tamkang University
E-mail:
cychang@mail.tku.edu.tw

Chen-Chi Hsieh
Dept. Computer Science and
Information Engineering
Tamkang University
E-mail:
jenchi@wireless.cs.tku.edu.tw

Hsu-Ruey Chang
Dept. Computer Science and
Information Engineering
Tamkang University
E-mail:
hrchang@wireless.cs.tku.edu.tw

摘要

現今 Wireless sensor networks (WSNs) 已廣泛地應用在環境偵測與軍事作戰監控系統，如何將大量的 sensor nodes 佈置於特定欲監測區域內是個重要的議題。雖然 Random deployment 的方法較容易實行，但是易導致某區 sensors 過於稀疏或密集，分別造成感測空洞或浪費過多的 sensors 等問題。利用機器人來佈置 sensors 的方式，可以採用規則的方式來佈置 sensors，以達到使用最少的 sensors 數量但能完全覆蓋欲監測區域之目的。因此，本論文研發一機器人在 WSNs 佈點、修復及回 Home 的演算法，我們所研發的佈點演算法使機器人能快速且花費最少的 sensors nodes 數量佈點於欲監測區域，並有效地避開障礙物實驗顯示本論文所提出的演算法可以使網路中的 sensor nodes 有效掌握機器人的移動軌跡。

1. 簡介

Wireless sensor networks 是由大量微小、成本低廉且由電池供電的 sensor nodes 所組成。而 wireless sensor networks 的偵測效能決定於所有 sensor nodes 其感測範圍的涵蓋面積，random deployment 的方式是最簡易的佈點方法，然而 random deployment 的方式較易造成 sensor nodes 佈點不均，導致某區域的 sensors nodes 過於稀疏或密集，分別造成感測空洞或浪費過多的 sensors 等問題。

利用機器人來佈置 sensors nodes，除了可以採用規則的方式來佈置 sensors 外，更能達到使用最少的 sensors 數量且完全覆蓋欲監測區域之目的，並可藉由機器人到達不適合人為佈點的地方諸如有毒氣、化學污染等區域佈點[1][4][5]。在 sensor nodes 佈建的研究中，[1][2][3][4][5][6]利用機器人來進行 WSN 中許多重要的工作，包括佈建 sensors、巡邏或修復毀損之 sensor 等任務。在[1][2][3]的研究中，機器人隨南西北東四個方向的優先權逐步移動並佈置 sensors，在不需要位置資訊的條件下，使用已佈下的 sensors 來引導機器人在欲監測環境中行走與佈點，當機器人其通訊範圍內不存在任何一個

sensors 時，機器人即佈置新的 sensor node。而在機器人之通訊範圍內的 sensors，能夠區域性地建議機器人最適當的探勘方向，機器人將這些 sensors 的建議結合起來並選擇出一個最適當的方向進行探勘，亦可不受障礙物的阻擋而在 WSN 中完成佈點的工作，然而，當機器人遇到障礙物時，將無法保證整個欲監測區域為 full coverage，可能造成 hole 或 sensing range 之重疊。

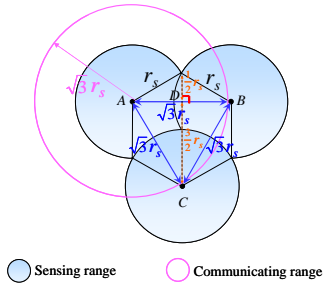
本論文利用 mobile robot 來 deploy sensor nodes，能在最短時間內以最少的 sensor 將整個區域佈建使其具有 full coverage，當網路中有天然障礙物存在時，機器人亦能以最有效率的方式避開障礙物並完成具 Full coverage 的網路佈建。

2. 環境與基本概念

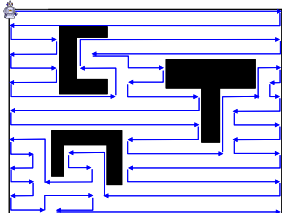
本論文的環境假設如下，我們所使用的單一機器人將配帶有 limited static sensors 與 compass，依據 compass 機器人可以決定行走的方向，一開始環境假設機器人被放置在欲監測區域的邊界，機器人可以不需知道此欲監測區域周圍的邊界資訊。在此，我們假設 communication range 至少是 sensing range 的 $\sqrt{3}$ 倍。

由於感測網路的效能 highly depend on 感測網路中 sensor nodes 的 coverage，為了使佈建的 sensors 能達到 full coverage 的目的並節省 sensors 硬體上的成本，我們希望盡量減少 sensor nodes 其 sensing range 的 overlap 區域[6][7]，圖(一)(a)所示為 sensor nodes 能擁有最大 coverage 其彼此之間最好的距離，假設半徑 r_s 為 sensor nodes 的 sensing range， r_c 為 sensor nodes 的 communication range，在滿足 $r_c \geq \sqrt{3}r_s$ 的條件下，圖(一)(a)中 node A 與 node B 距離為 $\sqrt{3}r_s$ 時，其彼此之間可以互相通訊，若感測網路中的 sensor nodes 排列如圖(一)(a)所示時，將能使 sensor nodes 的 coverage 重覆範圍最小但卻可滿足 full coverage 的要求，具有 coverage 最大且所需佈置的 sensor nodes 點數最少的優點，並使每個 sensor nodes 與其周圍的 nodes 皆具 connectivity。我們將利用此距離作為本論文中 deployment 的依據並設計一個機器人 deployment 的演算法。而為了有效運用

圖(一)(a)中 sensor nodes 彼此之間的最佳距離來執行 deployment，在本論文中，我們將採用由蛇行狀的 deployment 方式，機器人從感測區域的邊界出發並依序放置 sensor nodes。此外，在有障礙物的監測環境中，本論文所設計的蛇行狀佈點也能隨著障礙物的不同與複雜度，克服障礙物並有效地佈點，如圖(一)(b)所示，在有多個障礙物的區域環境中，機器人也能以本論文所設計的蛇行狀佈點法，繞障礙物快速佈點，使網路中的每個區域皆能被 sensor nodes 所覆蓋而不致於因障礙物使佈點產生空洞。



(a) Sensor nodes 彼此相距 $\sqrt{3}$ 倍的 sensing range，將能以花費最少的 sensor nodes 數量來達到最大的 coverage。



(b) 機器人以蛇行狀佈點克服障礙物的環境。

圖(一)：機器人佈點的規則與蛇行狀佈點法。

以下，在後續章節中，我們將詳細介紹我們所研發的演算法。

3. 克服障礙物之機器人佈點技術

在本章節中，我們將正式敘述機器人克服障礙物的蛇形佈點技術。

3.1 Simple Snake-Like Robot Deployment

我們根據圖(一)(a)中 $\sqrt{3}r_s$ 的距離，利用機器人設計一個蛇行狀的佈點演算法，當機器人佈置完一排 sensor nodes 後，將往南方移動 $(3/2)r_s$ ，也就是圖(一)(a)中的 \overline{CD} ，並在上排 sensor nodes 彼此之間的中垂線上佈置 sensor nodes，使 sensor nodes 彼此之間皆相距 $\sqrt{3}r_s$ 。以下，我們首先詳述機器人在欲監測區域內其蛇行狀佈點的規則。

Snake-like Deployment 的規則主要分為兩個 States，分別為向東行走(East Movement，簡稱 East)，與向西行走(West Movement，簡稱 West)，在 East 與 West 中，皆具有兩個行走方向的選擇權且依優先權先後決定機器人應行走的方向，如 Table I 所示，其中 Prefer Direction 1 的設計使機器人有能力東西向蛇行狀行走佈點，而 Prefer

Direction 2 的設計使機器人能在遇邊界時能由北往南移動一步，再以東西向蛇行佈點：

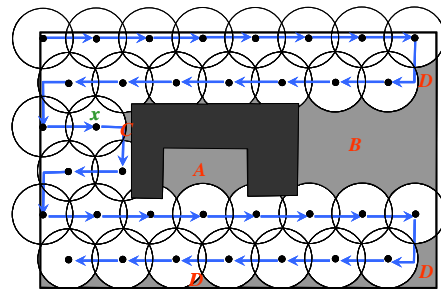
Table I : Snake-like Deployment

States	Prefer Direction 1	Prefer Direction 2
East	→	↓
West	←	↓

而機器人判斷行走方向的時機可隨時判斷或是行走固定長度後才判斷，由於機器人佈點是以圖(一)(a)中每點相距 $\sqrt{3}r_s$ 來佈點，為簡化敘述，在本論文中我們採用機器人每佈下一 sensor 後再判斷下一行走方向來說明；當機器人處於某一 State 時，機器人每次行走，皆先嘗試往 Prefer Direction 1 的方向行走，亦即為欲行走的方向，若遇到 Prefer Direction 1 的方向已有 sensor nodes 存在或是遇到邊界或障礙物時，表示往 Prefer Direction 1 方向行走失敗，則機器人將會選擇 Prefer Direction 2 方向行走，每執行 Prefer Direction 2 成功後，機器人將會切換至另一個 State，如此，East 與 West 兩個 states 交替執行，形成蛇行狀佈點。

3.2 Obstacle-Free Snake-Like Robot Deployment

上述 Snake-like 的佈點方式，在機器人遇有障礙物時，將可能造成部分區域沒有佈置 sensor nodes，且偵測區域的邊界以及障礙物的邊界，皆會有空洞的產生，如圖(二)中的灰色區域所示，其原因在於，機器人由東西向蛇行狀佈點方式，當遇到障礙物後，如圖(二)中的 x 點，機器人僅能以蛇行狀佈點於障礙物的左邊，而對於障礙物的右邊如圖(二)中的 B 區，將造成空洞，此外，圖(二)的 A 區，亦將因 Snake-like 之東西向佈點方式而造成空洞。另一方面，在障礙物的邊界如圖中的 C 區，與欲監測區域的邊界如圖中的 D 區，也會有空洞的產生。因此，我們將本論文所設計的蛇行狀佈點分為 Obstacle handling algorithm 與 Boundary handling algorithm，Obstacle handling algorithm 是本論文 Snake-like Deployment 的主要做法，其能有效地克服障礙物完成蛇行狀佈點，Boundary handling algorithm 是解決欲監測區域的邊界與障礙物的邊界可能產生邊界空洞的問題。



圖(二)：若以簡單的蛇行狀佈點，容易有空洞或是區域沒有佈點的情形。

3.2.1 Obstacle Handling Algorithm

本論文所設計的 Obstacle-free Snake-like deployment，機器人每次行走除了使用簡易蛇行狀佈點(Table I)中的欲行走方向(Prefer Direction 1)與往南行走方向(Prefer Direction 2)外，還需在此兩個 Prefer Directions 行走之前，先後檢視兩個方向，亦即為欲行走方向的反方向行走(如 Table II 中的 Check Direction 1)與往北行走(如 Table II 中的 Check Direction 2)，如此，機器人可有效地克服障礙物佈點。由於遇到障礙物後，必須先處理障礙物所可能引發的空洞問題，因此 Table II 中的 Check Direction 1 及 2 其優先權必須較 Table I 中的 Prefer Direction 為高，當機器人檢視 Check Directions 但卻因無障礙物而無法採用 Check Direction 所建議的方向前進時，即可採用 Table I 中的規則來進行簡易蛇行佈點之走法。

Table II : 為了克服障礙物的 Check Directions .

States	Check Direction 1	Check Direction 2
East	←	↑
West	→	↑

綜合上述，我們將以演算法來詳述本論文所設計的 Obstacle handling algorithm :

機器人依序執行下列四個 Rules 在網路中行走並佈放 sensor nodes，其中 Rules 1 及 2 的設計主要為克服障礙物所引發的空洞問題，而 Rules 3 及 4 可使機器人以 Snake-like 方式佈點，機器人每次在行走前，均會以下列四個規則來決定一行走方向，行走 rule 中所指定的距離，然後佈下 static sensor，並再次以下列四個規則來判斷下一次的行走方向：

Rule1 : 檢查其蛇行狀佈點 Prefer Direction 1 的反方向，亦即為 Check Direction 1，是否不存在任何 sensor node，若是，則機器人往 Check Direction 1 行走 $\sqrt{3}r_s$ ，若否，則機器人執行 Rule2。

Rule2 : 檢查 Check Direction 2 的方向是否有空洞且不存在任何 sensor node，若是，則機器人往 Check Direction 2 行走 $(3/2)r_s$ ，若否，則機器人執行 Rule3。

Rule3 : 若 Prefer Direction 1 的方向可行走且未存在任何 sensor node，則機器人往 Prefer Direction 1 行走 $\sqrt{3}r_s$ ，若 Prefer Direction 1 的方向已存在 sensor node 或是遇到障礙物與邊界時，則執行 Rule4。

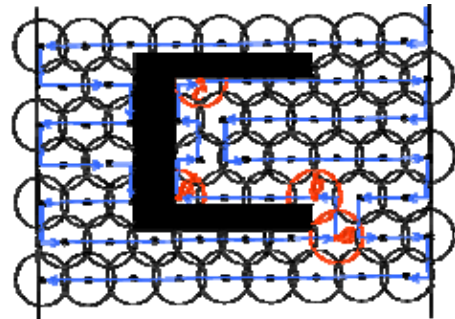
Rule4 : 若 Prefer Direction 2 的方向可行走且未存在任何 sensor node，則機器人往 Prefer Direction 2 行走 $(3/2)r_s$ 。若 Prefer Direction 2 也已存在 sensor node 或是遇到障礙物與邊界時，機器人若還沒執行完佈點的工作，機器人將會走回上一佈點的位置，並再重新自 Rule 1 依序測試，若 Rule1~4 還是沒有一個方向可行走，機器人回再上一佈點位置，直到 Rule1~4 有一個 Rule 可以成功繼續執行佈點為止。

而由於上下兩排的 sensor nodes 彼此水平座標相差 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 單位距離，因此機器人執行 Rule 2 向北行走並佈點時並非直線向北行走，如圖(三)中由 d 點走至 c 點，其分為兩種向北行走的方式，第一種為往北行走 $(3/2)r_s$ 後再往 Check Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，第二種為往北行走 $(3/2)r_s$ 後再往 Check Direction 2 的反方向，即為 Prefer Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，當機器人要往北行走時，會先執行第一種方式，若第一種失敗，機器人才會執行第二種方式，如 Table III 所示，因此，結合 Table II 與 Table III，Rule2 將融入 Table III 的細節，成為 Rule2'，其規則如下：

Rule2' : 檢查 Check Direction 2 的方向是否不存在任何 sensor node，若是，則機器人往北行走，當機器人欲往北行走時，機器人會先執行往北行走 $(3/2)r_s$ 後再往 Check Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，若失敗，則在嘗試為往北行走 $(3/2)r_s$ 後再往 Prefer Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 。若皆失敗，則機器人執行 Rule3。

同理，機器人執行 Rule 4 同樣分為兩種向南行走的方式，如 Table IV 所示，因此，結合 Table II 與 Table IV，Rule4 將融入 Table IV 的細節，成為 Rule4'，其規則如下：

Rule4' : 若 Prefer Direction 2 的方向可行走且未存在任何 sensor node，則機器人往南行走，當機器人欲往南行走時，機器人會先執行往南行走 $(3/2)r_s$ 後再 Prefer Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，若失敗，則在嘗試為往南行走 $(3/2)r_s$ 後再往 Check Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 。若 Prefer Direction 2 也已存在 sensor node 或是遇到障礙物與邊界時，機器人若還沒執行完佈點的工作，機器人將會走回上一佈點的位置，並再重新自 Rule 1 依序測試，若 Rule1~4 還是沒有一個方向可行走，則機器人回再上一佈點位置，直到 Rule1~4 有一個 Rule 可以成功繼續執行佈點為止。



圖(三) : 本論文的蛇行狀佈點克服內凹的障礙物之情形。

Table III : Check Direction 2 的細節。

States	Check Direction 2	
East	←	→
West	→	←

Table IV : Prefer Direction 2 的細節。

States	Prefer Direction 2	
East	↘	↙
West	↙	↘

因此，整合 Table I 的 Prefer Directions 與 Table II 的 Check Directions，並結合 Table III 與 Table IV，Obstacle-Free Snake-Like Movement Rule 的詳細內容為 Table V 所示。

Table V : Obstacle-Free Snake-Like Movement Rule。

States	Check Direction 1	Check Direction 2		Prefer Direction 1	Prefer Direction 2	
East	←	↙	↘	→	↘	↙
West	→	↘	↙	←	↙	↘

我們所設計的 Snake-like deployment，可達到克服障礙物佈點。但是，若僅採用如圖(一)的佈點準則，對於欲監測區域與障礙物的邊界，將容易有空洞的情形，因此在機器人執行 Snake-like movement rule 時，遇到邊界將會採用 Boundary rule 來解決邊界的空洞問題。以下，我們將詳述 Boundary rule 的詳細內容。

3.2.2 Boundary Handling Algorithm

當 robot 遇到邊界或障礙物前，其行走方式可能與邊界或障礙物成垂直或平行關係，由於處理方式不同，以下我們依垂直關係與水平關係來討論其邊界的處理方法。

A. Vertical Problem

在我們所設計的 Snake-like deployment，因邊界或障礙物的存在，機器人可能無法行走其所需的距離後，在理想佈點位置放置 sensor nodes，因此，針對機器人在執行 Obstacle Handling Algorithm 的 Rules 1~4 的過程中，因機器人行走方向與障礙物或監測區域邊界垂直，而行走不足所需行走的距離，導致在邊界產生空洞的問題來討論。

(a) Boundary rule for Rule1 and Rule3

當機器人在執行 Rule1 與 Rule3 佈點時，其行走方向為東向或西向，若行走的距離因遇到障礙物或邊界而不足 $\sqrt{3}r_s$ ，則機器人會判斷是否應該在此邊界旁多放置一個 sensor node 來避免空洞產生，如圖(四)(a)所示，邊界右邊的点及虛線方別代表 robot 下一次佈點的位置與其感應範圍，然而 robot 遇邊界後便無法繼續右行，導致行走的距離因遇到障礙物或邊界而不足 $\sqrt{3}r_s$ ，若邊界與上一佈点的距離為 ℓ ，大於 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，則機器人將在此邊界多放置一個 sensor node，如圖中 a 點所示，若距離 ℓ 小於或

等於 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，則機器人不需在此邊界放置 sensor node，而由於 a 點是為解決邊界空洞所額外需放置的 sensor，機器人須在理想的位置來判斷下一佈點的位置，因此，當機器人放置 a 點後，將退回 b 點重新執行 Obstacle handling algorithm。

(b) Boundary rule for Rule2' and Rule4'

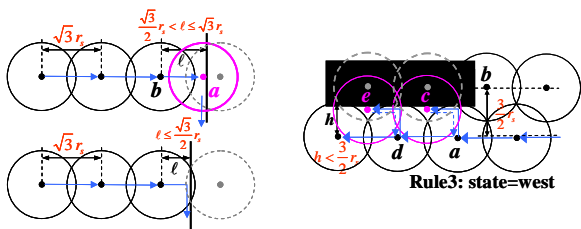
當機器人在執行 Rule2' 佈點時，因 Rule2' 具有兩段走法，為先往北行走 $(3/2)r_s$ 後，再往 Check Direction 1 或 Prefer Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，因此遇到障礙物的情況分為兩種情形，第一種為機器人往北行走不足 $(3/2)r_s$ 便遇到障礙物，此時雖然往北行走不足 $(3/2)r_s$ ，但機器人仍需執行往 Check Direction 1 或 Prefer Direction 1 方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 後佈點，來避免空洞產生，第二種為機器人往北行走 $(3/2)r_s$ 後沒有遇到障礙物，但往 Check Direction 1 或 Prefer Direction 1 方向行走不足 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 則遇到障礙物，此時機器人仍會在障礙物邊界放置 sensor node。

圖(四)(b)即為第一種情況的例子，當機器人執行 State=West 的 Rule3 行走至 a 點並放置 sensor 後，在 a 點時機器人同樣檢查其 Rules 1~4，首先機器人判斷 Rule1 失敗(往東行走)，再判斷 Rule2'，Rule2' 分為兩種，分別為往北行走 $(3/2)r_s$ 後往 Check Direction 1 方向(東方)行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 與往北行走 $(3/2)r_s$ 後往 Prefer Direction 1 方向(西方)行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，而因為從 a 點往北 $(3/2)r_s$ 且往 Check Direction 1 方向(東方) $(\sqrt{3}/2)r_s$ 的位置已有 b 點存在，因此機器人將判斷往北 $(3/2)r_s$ 且往 Prefer Direction 1(西方) $(\sqrt{3}/2)r_s$ 的位置，因此位置不存在 sensor node，此時，機器人將執行佈点的動作，因機器人往北行走距離 h 小於 $(3/2)r_s$ ，則機器人仍執行往 Prefer Direction 1(西方)的方向行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 並佈點，如圖中的 c 點，但因 c 點是為解決邊界空洞所額外需放置的 sensor，因此，當機器人放置 c 點後，將再退回 a 點執行 Obstacle handling algorithm，因此，此時機器人執行 Rule1(東方)與 Rule2'(北方)皆發現已有 sensors 存在後，機器人將執行 Rule3 往 Prefer Direction 1(西方)行走至 d 點佈點，同理，機器人如上述所示佈點。

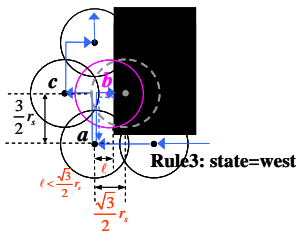
圖(四)(c)為第二種情況的例子，圖中當機器人執行 State=West 的 Rule3 佈點至 a 點並放置 sensor node 後，機器人在 a 點同樣檢查其 Rules 1~4，首先機器人判斷 Rule1 的 Check Direction 1(往東行走)失敗因已有 sensor node 存在後，再判斷 Rule2'，因 Rule2' 分為往北行走 $(3/2)r_s$ 後往 Check Direction 1 方向(東方)行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 與往北行走 $(3/2)r_s$ 後往 Prefer Direction 1 方向(西方)行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ ，此時當機器人執行往北行走 $(3/2)r_s$ 後往 Check Direction 1 方向(東方)行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 的位置不存在 sensor node，因此機

机器人執行往北行走 $(3/2)r_s$ 後往 Check Direction1 方向 (東方) 行走距離 l 遇到障礙物邊界, 雖然 l 小於 $(\sqrt{3}/2)r_s$, 但為了避免空洞的產生, 机器人仍在此障礙物邊界放置 sensor, 即圖中的 b 點。同樣地, 由於 b 點為解決空洞產生所額外佈置的 sensor, 當机器人放置 b 點後, 將再退回 a 點執行 Obstacle handling algorithm, 因在檢查 Rule2' 中已有 b 點存在, 此時机器人將執行往北行走 $(3/2)r_s$ 後往 Prefer Direction 1 方向 (西方) 行走 $(\sqrt{3}/2)r_s$ 並佈點, 即圖中的 c 點所示。

而 Boundary rule for Rule4' 與 Boundary rule for Rule2' 相同, Rule4' 同樣也也分為兩段走法, 因此也分為兩種情形, 其解法同 Boundary rule for Rule2'。



(a) Boundary for Rule1 and Rule3. (b) Boundary for Rule2' (第一種情形)。

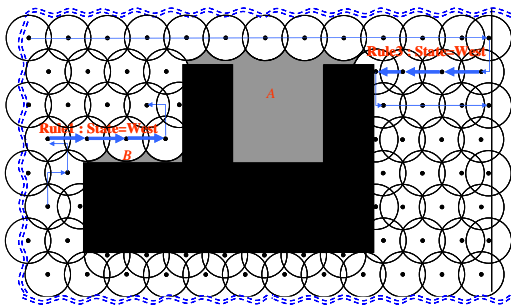


(c) Boundary for Rule2' (第二種情形)。

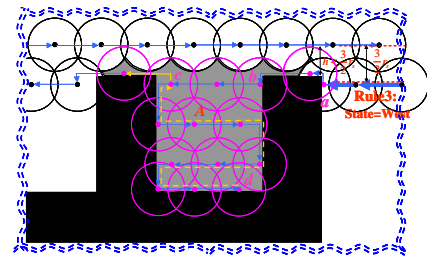
圖(四)：東南西北四個方向若遇到障礙物或邊界時, 因障礙物或邊界與机器人行走方向垂直而產生空洞的情形。

B. Horizontal Problem

机器人在佈點時, 除了遇到障礙物或邊界可能產生上述因剩餘長度不足夠走至下一個欲佈點的位置, 導致小區域空洞產生的問題外, 其餘會產生空洞的情形均為, 机器人行走的方向與障礙物的邊界呈現平行時, 導致机器人順著障礙物邊界的方向行走, 而使障礙物邊界旁形成一排多個區域空洞的情況, 如圖(五)(a)所示, 因此机器人將分別處理因執行 Rule1 及 3 時, 產生邊界空洞的情況。



(a) 机器人執行 Rule1 及 3 時, 對障礙物邊界所產生的空洞問題。



(b) 因執行 Rule1 與 Rule3 時, 障礙物行走方向無法發現 A 區的空洞。

圖(五)：机器人行走方向與障礙物邊界方向同向所產生的邊界空洞問題。

首先, A 區為執行 Rule1 與 Rule3 時所共同可能產生的邊界空洞, 以下以 Rule3 來舉例說明, 當机器人執行 State=West 的 Rule3 時, 因机器人行走方向無法發現如圖(五)(a)中的 A 區的空洞, 我們將利用一個 hole_flag 來解決 A 區的情形, hole_flag 初始為 'false', 表示是否處在處理 hole 的狀態, 首先, 當机器人在執行 Rule3 時若遇到障礙物邊界無法行走, 机器人將往北方移動, 並同時嘗試往 Prefer Direction 1 (西方) 行走, 若机器人往北方移動 $(3/2)r_s$ 仍無法往 Prefer Direction 1 (西方) 方向行走, 則机器人將退回並繼續執行 Obstacle handling algorithm, 反之, 若机器人往北方移動 $(3/2)r_s$ 的長度內, 能往 Prefer Direction 1 (西方) 行走成功, 如圖(五)(b)中的 a 點, 則机器人會判斷 hole_flag 是否為 'false', 若 hole_flag='false' 則机器人將 hole_flag 設為 'true', 且机器人將保持原 state 沿著此邊界邊緣往 Prefer Direction 1 (西方) 繼續執行每隔 $\sqrt{3}r_s$ 佈點, 並每走到固定的 $\sqrt{3}r_s$ 定點的同時嘗試往行走退回正常佈點的位置如 b 點, 當机器人回正常佈點位置如 b 點成功後, 机器人將繼續執行 Obstacle handling algorithm, 而當机器人行走至 c 點時, 若机器人判斷其同樣能在北方移動 $(3/2)r_s$ 的長度內, 能往 Prefer Direction 1 (西方) 方向行走成功時, 如 c 點, 此時机器人判斷 hole_flag='true', 表示正在處理空洞的狀態, 因此机器人將不會執行跨越此邊界的動作, 而直接執行 Obstacle handling algorithm 佈點, 並再將 hole_flag 設回 'false', 因此, 在圖(五)(b)的場景中, 机器人會將此空洞佈滿 sensor nodes, 直到机器人發現四周都已佈點或遇障礙物時, 依據 Rule4' 机器人可一步步依 sensor node 所記錄的資訊執行沿原路往回走的動作, 當机器人由 d 點退回到 c 點的過程中, 机器人皆發現四周已佈點或是有障礙物, 直到机器人退回到 c 點的位置, 机器人同樣偵測到往北方移動 $(3/2)r_s$ 的長度內, 能往 Prefer Direction 1 (西方) 行走成功, 且 hole_flag 為 'false', 則机器人將同樣如上述作法跨越此邊界並佈點, 如圖(五)(b)中的黃色路徑所示, 雖然此法無法完全克

服所有開口往北的障礙物，但機器人能盡其所能佈點。

根據上述的 Obstacle handling algorithm 與 Boundary handling algorithm，可在使用較少的 sensor nodes 下盡可能將欲監測區域佈滿，並克服障礙物的影響。

4. 效能評估

為了評估本論文所設計的 Obstacle-free deployment mechanism 與 Power-conservation repair mechanism，我們將與[4](在此簡稱為 CED)所設計的機器人佈點方法做比較。首先，我們先說明本論文的模擬環境，再探討本論文與 CED 之各參數的模擬結果。

Table VI : Simulation parameters

Parameter	Value
Communication range	40m
Sensing range	20m
Packet transmission cost	0.075J/s
Packet reception cost	0.030J/s
Idle cost	0.025J/s
Maximum energy consumption in motes	324J/hr
Total initial energy	32400J (100hr)

4.1 Simulation Model

我們利用 C++設計一模擬程式來評估本論文所設計的機器人佈點與修復的機制，並與 CED 的機制來做比較。在本論文中，我們參考典型的 Berkeley motes [12] 之條件來模擬，其詳細內容如 Table VI：

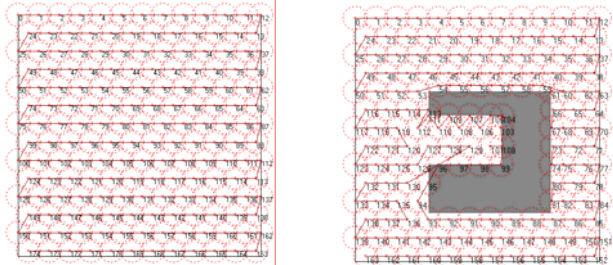
而機器人配帶有(1) compass 來指引方向 (2) 一個 Berkeley mote [12] 作為與網路中 sensors 通訊之無線設備 (3) 固定數量的 Berkeley motes [12]，其 Mobility cost 參考 Robomote I [10]為 8.267J/m，且我們假設機器人其速率為 3m/s，以及其總電量為 64800J。在環境方面，模擬環境大小為 400*400m，此外，各模擬結果為 10 個 independent runs 的平均值。

本模擬包含兩個部份，第一個部分我們將先自我檢視本論文所設計的 Obstacle-free deployment 的佈點效果；第二個部份我們將比較 ODR 與 CED [4]在無障礙物與有障礙物環境中，其將欲監測區域佈滿 sensor nodes 所花費的 Deployment Time 與 Number of Sensors，在此，我們定義當網路中 sensors 的 sensing range 達到欲監測區域面積的 98%，則機器人執行 Deployment 機制結束。

4.2 Performance Study of ODR

在第一部份中，首先我們將先模擬出使用 ODR 佈點在有障礙物與無障礙物環境中的情形，如圖(六)(a)為在無障礙物環境中使用 ODR 佈點的模擬，由圖中可看出機器人能以 Snake-like deployment 使欲監測區域能以幾乎最少的點數來達到 full

coverage 的目的，在此 400*400m 的環境中，數字為機器人佈點的順序，機器人僅花費 174 個 sensors 即能將此區域佈滿，圖(六)(b)為在障礙物環境中使用 ODR 佈點的模擬，可看出機器人採用 ODR 的 Obstacle-free snake-like deployment 能有效避開障礙物並以蛇行狀佈點法將欲監測區域佈滿 sensor nodes。

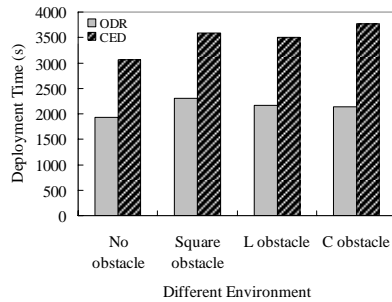


(a) The deployment in an environment without obstacle. (b) The deployment in an environment involved obstacle.

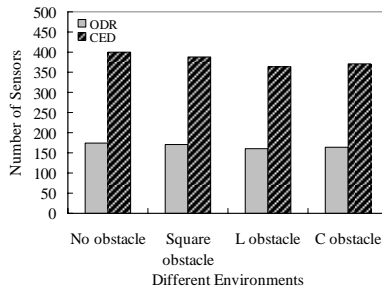
圖(六) : Snapshots of the deployment of ODR mechanism.

4.3 Comparative Study

在第二部份中，首先我們將比較 ODR 與 CED 在無障礙物環境與有障礙物環境中，其執行完 Deployment 所花費的時間與所需花費的 sensor 數量，我們設計在障礙物環境中，障礙物形狀分別有長方形、L型與 C型，圖(七)為 CED 與 ORD 在上述不同環境中達到 full coverage 的 Deployment Time，圖(八)為其分別所花費的 sensor nodes。從圖(七)中顯示出，在沒有障礙物的環境中，CED 使欲監測區域達到 full coverage 的 Deployment Time 較 ODR 久，其原因在於 CED 佈點的條件使 sensor 佈點過密，導致 sensor nodes 之間的 overlap 區域較大，因此需要花費較多的 Deployment Time 才能達到 full coverage 的要求，因此圖(八)中可看出 CED 在沒有障礙物環境中的 Deployment Time 較 ODR 大；在障礙物的環境中，CED 會因為障礙物的影響而產生空洞，且機器人採用往其周圍最久沒行走的方向行走，空洞區域沒有有效的通知機器人至空洞修補的機制，因此從圖(七)中可以看到機器人要達到 full coverage 的時間花費相當長久，反之，ODR 的 Obstacle-free deployment mechanism 幾乎能克服大部分的障礙物佈點，並對於障礙物邊界空洞的問題皆能在行走過程中即時填補，因此達到 full coverage 的時間較 ODR 短，圖(八)也顯示出 ODR 所花費的 sensor 數較 CED 減少許多。



圖(七)：Deployment time of ODR and CED in different environment。



圖(八)：Comparison of the number of sensors deployed by applying ODR and CED schemes in different environment.

5. 結論

本論文所研發的 Obstacle-free snake-like deployment mechanism 能以蛇行狀的方式，在花費最少的 sensor nodes 個數下將欲監測區域達到 full coverage 的目的，且機器人在行走過程中利用 Counter value 留下行走軌跡，使 WSN 中的 sensor nodes 皆能追蹤機器人的位置資訊，而 X-correction mechanism 在盡量產生較少的 control packets 條件下，解決了 sensor nodes 追蹤機器人路徑有繞遠路的情形，當 sensor nodes 即將耗盡電量或是偵測到損毀區域時，其將以較短路徑來快速通知機器人進行修復。

6. REFERENCES

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

[2] 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*, 1997, Vol. 9, No. 2-3, pp. 323-336.

[3] P. Pirjanian, "Behavior coordination mechanisms-state-of-the-art," *Technic Report, Institute for Robotics and Intelligent Systems*, University of Southern California, October 1999, IRIS-99-375.

[4] Maxim A. Batalin and Gaurav S. Sukhatme, "Coverage, Exploration and Deployment by a Mobile Robot and Communication Network," in *Proceedings of the International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, Palo Alto, Apr 2003, pp. 376-391.

[5] Maxim A. Batalin, Gaurav S. Sukhatme and Myron Hattig, "Mobile Robot Navigation using a Sensor Network," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, New Orleans, LA, April 2004, pp.636-642.

[6] Yi Zou and Krishnendu Chakrabarty, "Sensor deployment and Target Localization in Distributed Sensor Networks," in *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, New York, February 2004, Vol. 3, pp.61-91.

[7] Y.-C. Wang, C.-C. Hu, and Y.-C. Tseng, "Efficient Deployment Algorithms for Ensuring Coverage and Connectivity of Wireless Sensor Networks," in *Wireless Internet Conf. (WICON)*, 2005.

[8] Qingfeng Huang, Chenyang Lu, and Gruia-Catalin Roman, "Reliable Mobicast via Face-Aware Routing," in *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, March 2004.

[9] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR:Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," in *Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Boston, Massachusetts, August 2000, pp. 243-254.

[10] Saurabh Ganeriwal, Aman Kansal and Mani B. Srivastava, "Self Aware Actuation for Fault Repair in Sensor Networks," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, April 2004.

[11] G. T. Sibley, M.H. Rahimi, G. S. Sukhatme, "Robomote: A Tiny Mobile Robot Platform for Large-Scale Sensor Networks," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Washington DC, May 2002, pp. 1143-1148.

[12] J. Hill and D. Culler, "A Wireless Embedded Sensor Architecture for System-level Optimization," *Technical report*, Computer Science Department, University of California at Berkeley, 2002.

Enter Paper ID: _____

IEEE COPYRIGHT FORM

To ensure uniformity of treatment among all contributors, the forms may not be substituted for this form, nor may any wording of the form be changed. This form is intended for original material submitted to the IEEE and must accompany any such material in order to be published by the IEEE. Please read the form carefully and keep a copy for your files.

TITLE OF PAPER/ARTICLE/REPORT/PRESENTATION/SPEECH (hereinafter, "the Work"):

COMPLETE LIST OF AUTHORS:

IEEE PUBLICATION TITLE (Conference, Book): Workshop on Wireless, Ad Hoc, and Sensor Networks 2005

Copyright Transfer

The undersigned hereby assigns to the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, the "IEEE" all rights under copyright that may exist in and to the above Work, and any revised or expanded derivative works submitted to the IEEE by the undersigned based on the Work. The undersigned hereby warrants that the Work is original and that he/she is the author of the Work; to the extent the Work incorporates text passages, figures, data or other material from the works of others, the undersigned has obtained any necessary permission. See reverse side for Retained Rights and other Terms and Conditions.

Author Responsibilities

The IEEE distributes technical publications throughout the world and wants to ensure that the material submitted to its publications is properly available to the readership of those publications. Authors must ensure that their Work meets the requirements of IEEE Policy 6.4, including provisions covering originality, authorship, author responsibilities and author misconduct. The full policy may be viewed at <http://www.ieee.org/about/whatis/policies/p64.htm>. Authors are advised especially of IEEE Policy 6.4.1B(k): "It is the responsibility of the authors, not the IEEE, to determine whether disclosure of the material requires the prior consent of other parties and, if so, to obtain it. Authors are also advised of IEEE Policy 6.3.B: "It shall be acknowledged that statements and opinions given in work published by the IEEE are the expression of the authors. Responsibility for the content of published papers rests upon the authors, not IEEE."

General Terms

- The undersigned represents that he/she has the power and authority to make and execute this assignment.
- The undersigned agrees to indemnify and hold harmless the IEEE from any damage or expense that may arise in the event of a breach of any of the warranties set forth above.
- In the event the above work is not accepted and published by the IEEE or is withdrawn by the author (before acceptance by the IEEE), the foregoing copyright transfer shall become null and void and all materials embodying the Work submitted to the IEEE will be destroyed.
- For joint authored Works, all joint authors should sign, or one of the authors should sign as authorized agent for the others.

(1) *Chih-Yung Chang* _____ Date _____
 Author/Author's Agent For Joint Authors

U. S. Government Employee Certification (where applicable)

This will certify that all authors of the Work are U. S. government employees and prepared the Work on a subject within the scope of their official duties. As such, the Work is not subject to U. S. copyright protection.

(2) _____ Date _____
 Authorized Signature

(Authors who are U. S. government employees should also sign signature line (1) above to enable the IEEE to claim and protect its copyright in international jurisdictions.)

Crown Copyright Certification (where applicable)

This will certify that all authors of the Work are employees of the British or British Commonwealth Government and prepared the Work in connection with their official duties. As such, the Work is subject to Crown Copyright and is not assigned to the IEEE as set forth in the first sentence of the Copyright Transfer Section above. The undersigned acknowledges, however, that the IEEE has the right to publish, distribute and reprint the Work in all forms and media.

(3) _____ Date _____
 Authorized Signature

(Authors who are British or British Commonwealth Government employees should also sign line (1) above to indicate their acceptance of all terms other than the copyright transfer.)

IEEE COPYRIGHT FORM *(continued)*

RETAINED RIGHTS/TERMS AND CONDITIONS

1. Authors/employers retain all proprietary rights in any process, procedure, or article of manufacture described in the Work.
2. Authors/employers may reproduce or authorize others to reproduce the Work, material extracted verbatim from the Work, or derivative works for the author's personal use or for company use, provided that the source and the IEEE copyright notice are indicated, the copies are not used in any way that implies IEEE endorsement of a product or service of any employer, and the copies themselves are not offered for sale.
3. Authors/employers may make limited distribution of all or portions of the Work prior to publication if they inform the IEEE in advance of the nature and extent of such limited distribution.
4. In the case of a Work performed under a U.S. Government contract or grant, the IEEE recognizes that the U.S. Government has royalty-free permission to reproduce all or portions of the Work, and to authorize others to do so, for official U.S. Government purposes only, if the contract/grant so requires.
5. For all uses not covered by items 2, 3, and 4, authors/employers must request permission from the IEEE Intellectual Property Rights office to reproduce or authorize the reproduction of the Work or material extracted verbatim from the Work, including figures and tables.
6. Although authors are permitted to re-use all or portions of the Work in other works, this does not include granting third-party requests for reprinting, republishing, or other types of re-use. The IEEE Intellectual Property Rights office must handle all such third-party requests.

INFORMATION FOR AUTHORS

IEEE Copyright Ownership

It is the formal policy of the IEEE to own the copyrights to all copyrightable material in its technical publications and to the individual contributions contained therein, in order to protect the interests of the IEEE, its authors and their employers, and, at the same time, to facilitate the appropriate re-use of this material by others. The IEEE distributes its technical publications throughout the world and does so by various means such as hard copy, microfiche, microfilm, and electronic media. It also abstracts and may translate its publications, and articles contained therein, for inclusion in various compendiums, collective works, databases and similar publications.

Author/Employer Rights

If you are employed and prepared the Work on a subject within the scope of your employment, the copyright in the Work belongs to your employer as a work-for-hire. In that case, the IEEE assumes that when you sign this Form, you are authorized to do so by your employer and that your employer has consented to the transfer of copyright, to the representation and warranty of publication rights, and to all other terms and conditions of this Form. If such authorization and consent has not been given to you, an authorized representative of your employer should sign this Form as the Author.

Reprint/Republication Policy

The IEEE requires that the consent of the first-named author and employer be sought as a condition to granting reprint or republication rights to others or for permitting use of a Work for promotion or marketing purposes.

PLEASE DIRECT ALL QUESTIONS ABOUT THIS FORM TO:

**Manager, IEEE Intellectual Property Rights Office, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331.
Telephone +1 (732) 562-3966**