Water Jet Printer 散水領域が設定可能なスプリンクラーシステム

永渕　玲緒菜[1,a)]　的場　やすし[1]　椎尾　一郎[1,b)]

概要：水流によりノズルが回転する形式のスプリンクラーが，芝生や庭木への散水に一般的に使用されている．このタイプのスプリンクラーは水を円形に散布する．そこで，たとえば矩形などの庭の場合，庭の外部にはみ出すことなく，庭全体に散水することが不可能である．場合によっては，特定の庭木に多く散水したかったり，庭のベンチなどに散水したくない場合もありうるが，そのような対応も不可能であった．本研究では，コンピュータでスプリンクラーを制御し，水を必要としている場所にのみ水を射出することで，効率的に散水が可能なスプリンクラーを開発した．本システムのユーザは，コンピュータに表示された庭図面を，お絵かきソフトウェアを操作する要領で塗ることで，散水領域を指定する．これに基づいて，マイクロコンピュータ Raspberry Pi がスプリンクラーの水圧，方向，散水時間を制御する．将来，水により地面に文字や絵を描く装置に発展させることで，広告やアートへの応用も可能になるであろう．

キーワード：Water Jet Printer，スプリンクラー，散水装置，水ディスプレイ

Water Jet Printer The system of sprinkler which it can specifies the watering location

Nagafuchi Reona[1,a)]　Matoba Yasushi[1]　Siio Itiro[1,b)]

Abstract: A sprinkler waters circular place evenly. However, some plants may require larger amount of water, and some objects like a table or chars in a garden may be required to be kept dry. Moreover, watering area by a common sprinkler does not fit in an average garden that is not circularly shaped. Therefore, we have developed a sprinkler system that can specify the watering location. The range and direction of water is adjusted by electric valves and a stepping motor, which are controlled by a micro computer (Raspberry Pi). The user can specify the watering areas by drawing over garden map displayed on a web page that is served by the Raspberry Pi.

Keywords: Water Jet Printer, computer controlled sprinkler, water display

1. はじめに

庭や芝生で使われるスプリンクラーには，水流によりノズルが回転し散水するものが多い．このタイプのスプリンクラーは，円形の領域に，均一に散水するように設計されている．しかし一般的に，庭園，公園，散水したい芝生領域などは，円形・扇形ではない．そこで，これらの形の敷地，たとえば矩形の敷地からはみ出さずに，その全体に散水することは不可能である．日本のように住宅が密集する地域では，敷地境界ぎりぎりまで造園されることが多く，庭の外へ水を撒いてしまうことは，隣接住民や公共道路利用者に迷惑をかけることになる．そのこともあり，住宅密集地域には円形に自動散水するスプリンクラーは適していない．また庭園によっては，より多くの水を必要とする庭木が一部の場所に植樹されていたり，逆に，庭に置かれた

[1] お茶の水女子大学
Ochanomizu University, Bunkyo, Tokyo, 112-8610, Japan
[a)] nagafuchi.reona@is.ocha.ac.jp
[b)] siio@acm.org

ベンチやテーブルなど，散水したくない物体が置かれる場合もある．従来のスプリンクラーでは，庭の一部に多くの散水を行ったり，特定箇所に散水を行わないなどの動作は不可能であった．

一方，農業の現場では、作物の根の部分に小さなスプリンクラーをおき，水が不足すると点滴するように散水する点滴灌漑が利用されることがある．これを用いれば，特定の庭木にのみ散水することが可能である．しかし，庭木それぞれに配管を設置する必要があり，コストが高くなり，柔軟な変更に対応できない問題点がある．また，芝生のように広い領域に均一に散水する目的には適していない．

これらの問題は，ユーザが指定した領域にのみ散水を行うスプリンクラーにより解決できると考えた．不要な場所に散水しないことで，従来のスプリンクラーと比較して，節水効果も期待できる．そこで本研究では，コンピュータでスプリンクラーを制御して，水を必要としている場所にのみ射出することで，効率的に散水が可能なスプリンクラーを開発した. 本システムは，マイクロコンピュータのRaspberry Pi によりモーターとバルブを制御して散水位置をコントロールする．また，庭の見取り図を web ページ上に表示し，ユーザがこの部分にお絵描きソフトウェアの操作要領で色を塗り，直感的な操作で散水領域を指定する機能を実装した．将来は，水により地面に文字や絵を描く装置に発展させることで，広告やアートへの応用も検討している．

2. 関連研究

2.1 庭に関連するシステム

庭への散水を制御する研究や製品に以下がある．Pearce らは，庭師 20 人のガーデニング方法調査し，ガーデニングをする人たちのために，散水スケジュールや，水の量などを提案するソフトウェアツールを開発した [11]．また，土壌センサーから個人の庭の状態を知らせる Edyn [*1] や，精密農業を実現するオープンソースのロボット Farmbot [*2] などが，商品化を目指して開発されている．

また，川上らは，人と植物のコミュニケーションを支援するロボットシステムの考案をおこなった．水がたりなくなったらユーザの目のつきやすいところまで植木鉢が移動するなど，ユーザが直感的に植物からのフィードバックが得られるようになっている [6] .

2.2 水を使ったインタラクティブシステム

コンピュータ画面上でユーザが描いた散水領域に散水する本システムは，ユーザの描画を水を使って地面に表示するデバイスと考えることができる．本研究と同様に，水を使って情報を表示したり，人とのインタラクションを実現する研究や作品は多数ある．

Janzen らは，パイプに複数の穴を開けここから水を出し，人がこれを塞ぐ操作により様々な音を提示するインタラクティブな入力装置を開発した [5]．また，Garden Agua という作品では，ノズルから噴出された水の上にボールをのせ，空気中でボールを回転させるインタフェースを実現した [3].

小池，的場らは，入浴剤で白濁させた浴槽内の水に，上方に設置したプロジェクターから映像を投影し，浴槽内に情報表示した．これにより，手で水を掬うなどの自然で直感的なジェスチャをつかって情報閲覧ができる，インタラクティブ・サーフェスの提案と実装を行った [7] [8] .

Jeremy らは，水を満たした複数の透明パイプを並べ，下部から空気ポンプで気泡を注入することで，浮上する気泡群を利用したディスプレイを実装した [4] .

Eitoku らは，水滴を利用した空間充填型ディスプレイの提案を行った．水滴群を平面状に並べて落下させ，水滴下方からプロジェクタで光を当てることにより映像表示を試みた [2] .

Peter C. らは，上方から水を流し．これにプロジェクタで光をあてることで水ディスプレイを実現した，また，この水ディスプレイを複数枚重ね，レイヤーを形成することで，2.5 次元ディスプレイとしての提案も行なっている [1] .

奥出らは，FTIR を利用したタッチセンシング技術を応用し，雨粒の位置を検出する水面インタフェースを製作した．水面上の雨粒が落下した位置を水面下部に設置したカメラにより検出し，水滴検出箇所にプロジェクタにより画像や映像を投影することで，雨滴に反応するデバイスを考案した [10] .

宮崎らは，マトリックス配置されたペルチェ素子を用いて冷温制御を行い，結露により表示を行うディスプレイを提案した [9] .

3. Water Jet Printer

従来のスプリンクラーは，水圧で動作する機構により円形または扇形の領域に均一に散水する装置であった．Water Jet Printer は，水の飛距離と水平方向をマイクロコンピュータで制御することで，水の着地場所をコンピュータで制御できるスプリンクラーである．

本システムでは，水を射出するノズルに加える水圧を調整し，飛距離を制御する．そのために，異なる水圧の 4 本の水路からの水を 4 個の電磁バルブで混合している．一方，ノズルをターンテーブルに載せて，水平方向角を制御している．ターンテーブルはステッピングモータで回転させている．本デバイスは，電磁バルブとステッピングモーターの制御のために，マイクロコンピュータ Raspberry Pi

*1 https://www.kickstarter.com/projects/edyn/edyn-welcome-to-the-connected-garden
*2 http://go.farmbot.it/

を内蔵している．

このマイクロコンピュータでは web サーバが稼働している．ユーザはスマートフォンなどからこれに接続して，散水場所を指定する．ユーザが web ページに接続すると，手元のデバイスに庭の見取り図が表示される．この図に対して水を撒きたい場所に色を塗ることで，散水場所と水量を指定することができる．一般のお絵描きプログラムの操作のように，グラフィカルで直接的な操作により，わかりやすく散水場所指定できることをめざした．

以下の節で，散水制御機構と散水領域ツールについて説明する．

4. 散水制御機構

4.1 散水制御の概要

本システムでは，水を射出するノズルに加える水圧を調整することで，飛距離を制御し，ノズルを搭載したターンテーブルを回転させることで，水平方向を制御している．本システムの外観を図 1 に，概要を図 2 示す．

水道からの水路は 4 分岐されて，それぞれ圧力調整バルブと電磁バルブを経由して，ふたたび一本にまとめられ，射出ノズルに接続されるている．電磁バルブは，マイクロコンピュータからの電気信号により，水を遮断もしくは通過させることができる．一方，4 個の圧力調整バルブは異なる水圧値に設定されている．そこで，水圧の異なる 4 水路を電磁バルブで開閉することで，様々な水圧を作り出すことができる．たとえば，4 水路の水圧を 1:2:4:8 の比率に設定できれば，4 個の電磁バルブの開閉により，15 段階の線形な圧力を作り出すことができる．これによりノズルの仰角が一定であっても，異なる飛距離を達成することができる．

これらの圧力調整バルブ，電磁バルブ，射出ノズルを含む水路部分全体は，ターンテーブルの上に設置されている．ターンテーブルは，ステッピングモータで回転し，これにより水平方向の射出角度を制御する．以上の機構により，水の着地点をマイクロコンピュータで制御することができる．

4 個の電磁バルブとステッピングモータは，マイクロコンピュータ Raspberry Pi により制御される．Raspberry Pi は Linux ベースの OS を搭載できるシングルボードコンピュータである．Raspberry Pi では，散水機構制御プログラムが稼働する他に，web サーバが稼働し，散水領域を指定する web ページを提供している．後述のように，これにスマートフォン等を経由して接続したユーザは，web ページ上に色で庭の設計図上色を塗ることで散水領域を指定できる．

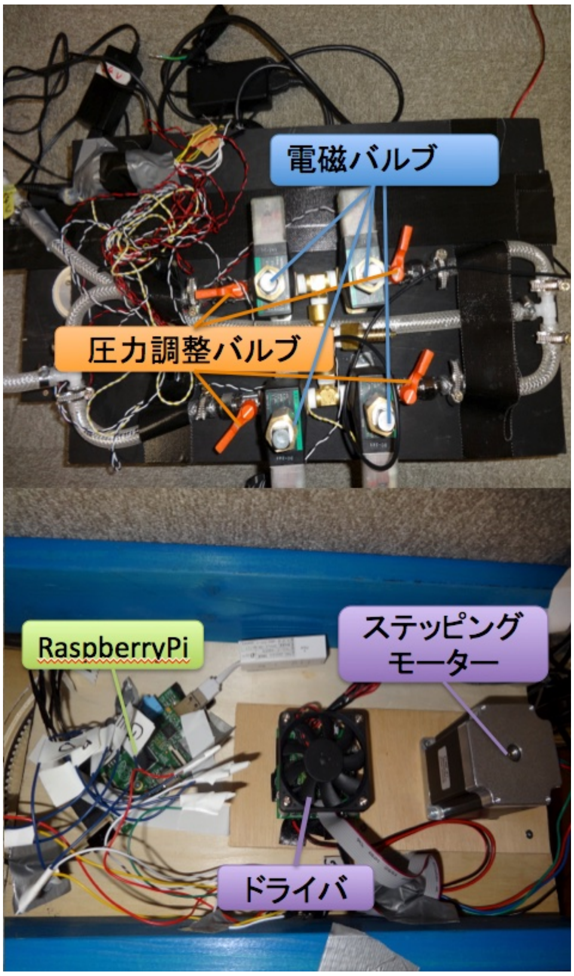

図 1 システム全体写真．上面と内部の写真

4.2 バルブとモーターの制御

電磁バルブとステッピングモータの動作には大電力を必要とするため，Raspberry Pi との間にドライバ回路を用意した．4 個の電磁バルブ[*3]は，電圧を印加することでバルブを開閉できるので，ドライバ回路を経由して Raspberry Pi の 4 本のデジタル出力ピンに接続した．この結果，C 言語で記述した制御プログラムから出力ピンを On/Off することで，電磁バルブを開閉することができた．

ステッピングモータは，加えるパルス数によって正確に回転角度を制御することができるモーターである．ステッピングモータ駆動パルスは，規定のタイミングに従って印加する必要があるため，今回は専用コントローラを搭載したドライバ基板[*4]を利用した．これにより，ステッピングモータ[*5]を制御した．このドライバ基板は，SPI (Serial Peripheral Interface) によるインタフェースを装備している．SPI の概要を図 3 に示す．双方のデバイスに 8 ビットシフトレジスターがあり，片方にあるクロックにより，1 ビットずつデータ交換し，8 クロックで 1 バイトのデータを双方で送受信する．ドライバ基板はステッピングモータを動かす各種命令をこの方式で受け取る．そこで，Raspberry

[*3] CKD 社製　直動式電磁弁 AG41-03-2
[*4] ストロベリー・リナックス社，L6480 大電流ステッピングモータ・ドライバキット
[*5] Mercury Motor 社，ST-57BYG076-3004D

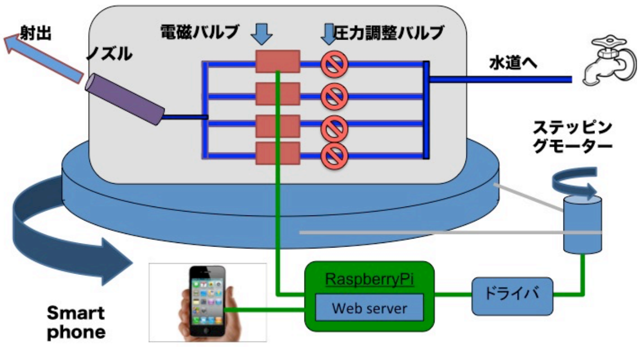

図 2　全体概要図

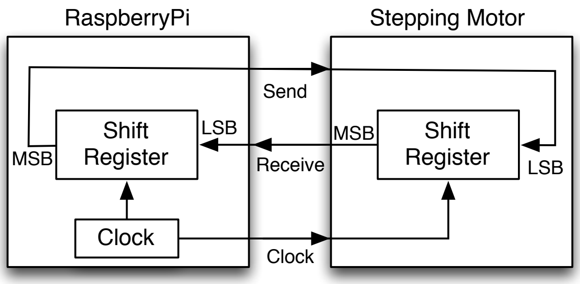

図 3　SPI の概要

Pi に SPI 通信を実現するライブラリを導入し，C 言語からステッピングモータ制御命令を送信して，モータを制御し，ノズルの水平角を設定した．

4.3　散水機構の動作実験

試作した散水機構の性能評価のために，本学キャンパス内にある実験住宅の「Ocha House」の庭（図 8）で動作実験を行った．Ocha House は，家庭におけるユビキタスコンピューティング研究のために，建設された庭付き一戸建て実験住宅である [12].

電磁バルブによる飛距離制御の動作確認のために，圧力調整バルブを調整し，様々な組み合わせで電磁バルブを開閉し，散水を行った．この結果，飛距離の異なる 15 通りの散水が可能であることを確認した．最大飛距離は 10m であった．これは，Ocha House の庭全体をカバーできる性能である．また当然ではあるが，水圧によって時間あたりの水量が変化することも確認した．実験時の設定で，スプリンクラーに一番近い場所に 1s 散水（最小圧力の電磁バルブのみを開いて散水）したところ，約 30ml の水が散水され，一番遠い場所（全部の電磁バルブを開いて散水）には 1s で約 75ml の水が散水された．

水の広がりを確認するために，バルブから 1s 間水を射出し，コンクリートの上に落ちた水の幅を計測した．1.6m 先に水を落とした場合，横幅 20cm，縦幅 45cm の範囲で水が広がり，5m 先に水を落とした場合，横幅 25cm，縦幅 80cm の範囲で広がっていた．同時間の射出であるため，

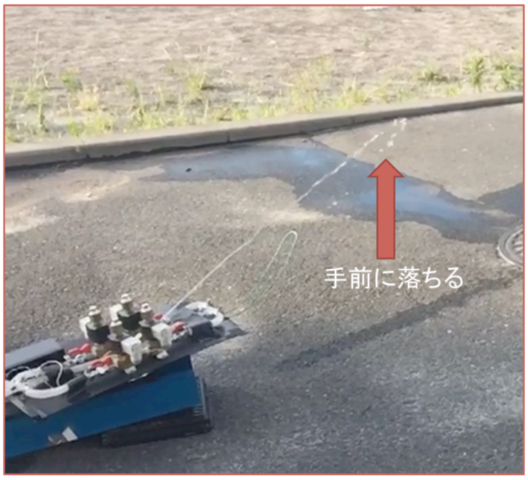

図 4　射出直後の水の状態

圧力が高い後者の方が水量が多いはずであるが，横幅に関しては変化は少なかった．

一方，水が射出方向に長く広がって散布される原因は，電磁バルブの応答性能にあると考えている．すなわち，電磁バルブが完全に開閉するまでに時間がかかり，所定の水圧に至るまでにある程度の時間がかかることが原因であると思われる．この結果少量の水が，スプリンクラーと目的の散水地点のまでの直線上に落ちてしまうことになる．図 4 に，水が射出された瞬間を捉えた写真を示す．射出された水の先端が，下向きに折れ曲がっているように見える．これは，最初に射出された水滴に対する水圧が所定の値に十分に達していないために，後に続く水滴よりも早めに下降したために，曲がって見えていると考えられる．落下する水の範囲が広がってしまうことで，指定した散水領域以外に散水されてしまう可能性が高くなる．また，地面に水で情報を描くデバイスとしてとらえると，解像度が低下することになる．落下水の広がりは，より応答速度の高い電磁バルブの採用を検討する，もしくは，最初に射出された水を遮断するシャッター機構を追加することにより，改善できるのではと考えている．また一筆書きのように，隣接する散水領域に優先して散水するようプログラミングを工夫して，射出水圧が大きく変化する電磁バルブ動作を回避できれば，水の広がりを低減できるであろう．現在は，図 5 に示すように，遮蔽板を設置して，スプリンクラーに近い手前部分に水が落ちることを防止している．

5.　散水領域指定ツール

本システムのソフトウェア構成図を図 6 に示す．本システムのユーザは，スマートフォンなどからスプリンクラー制御用 Raspberry Pi に接続して，散水場所を指定する．ユーザが Raspberry Pi 上の web ページに接続すると，手元のデバイスに庭の見取り図が表示される．この図に対して水を撒きたい場所に色を塗ることで，散水場所と水量を

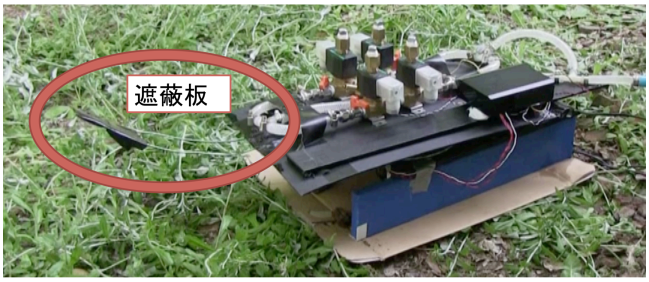

図 5　遮蔽板

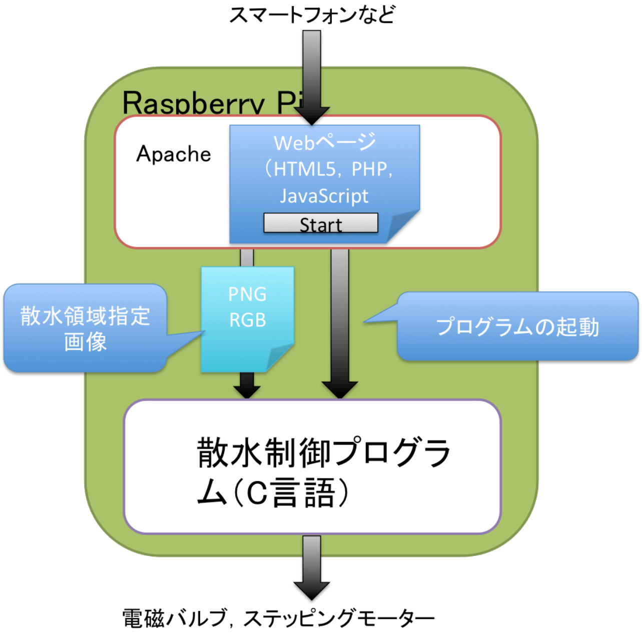

図 6　ソフトウェア構成図

指定することができる．指定が終了したところで，ユーザが web ページ上の Start ボタンを押すと，指定した場所へ指定した水量の散水が開始される．散水領域指定ツールを web ページ上に構築したことで，スマートフォン，タブレット端末，パソコンの様々な機器から，アプリケーションを用意することなく利用できる．

スプリンクラー内蔵 Raspberry Pi には Wi-Fi モジュールを USB 接続しネットワーク接続した．Raspberry Pi は Ethernet ポートも装備しているが，Wi-Fi 接続としたことでスプリンクラーの設置が容易になる．また，Raspberry Pi 上の web サーバソフトウェアには Apache を使用した．

散水位置を指定する web ページは HTML5 と PHP で作成し，JavaScript によりお絵かきプログラム風の散水領域指定ツールを実装した．このスクリーンショットを図 7 に示す．ここでは，ユーザの庭を俯瞰した図面が表示されている．これに対応する Ocha House の庭を図 8 に示す．ツールの画面には，Marker(色を塗る)，Eraser(消しゴムで消す)，Start(散水を開始する) の 3 つのボタンがある．ユーザは，画面表示された庭図面上の散水したい場所に色を塗ることで，散水場所を指定する．また消しゴム機能

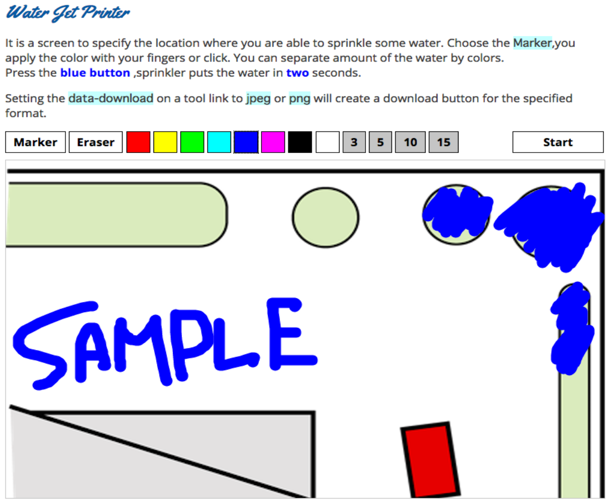

図 7　散水指定ツールの画面例

図 8　Ocha House の庭

で色を消せば，指定を解除できる．散水領域の指定が終了したところで，ユーザが Start ボタンを押すと，画像が Raspberry Pi 内に png フォーマットの画像として保存される．このあと，web ページの PHP スクリプトが，画像を rgb ファイルに変換し，C 言語で開発された散水制御プログラムを起動する．

散水制御プログラムは，ユーザが描画した rgb ファイルから色が塗られた画素を検出する．色が塗られた部分の画素座標と，あらかじめ設定したスプリンクラー設置場所から，その画素に相当する場所への飛距離と水平角を計算する．電磁バルブを全開したときに，庭の一番遠い場所に水が届くよう水圧を調整することを想定して，この距離を 15 分割して飛距離の単位長さとしている．

またスプリンクラーは庭の縁に設置することにし，0 度から 180 度の間を回転することとした．また回転の刻みは 5 度とした．飛距離に関しては 15 段階の設定のみが可能であるが，ステッピングモーターを利用している水平方向の角度は，飛距離より細かい設定が可能である．しかしながら，飛距離に比べて著しく細かい角度指定をすることはオーバスペックであると考え，水平方向の角度を 5 度ずつ変化させて散水することにした．180 度の領域に散水する場合，角度方向に 36 分割されることになり，飛距離の 15

分割と同程度の値となり適切と考えた．これらのことから散水領域を，飛距離 15 段階，水平角が 36 段階の 540 の扇形エリアに分割して，それぞれへの散水量を，ユーザ描画データから算出する．散水量は，それぞれの扇形エリアに対して塗られた画素数と色の種類から計算する．

各散水エリアへの散水量が確定したら，散水制御プログラムは次に，ステッピングモータと電磁バルブを制御して，散水を行う．

6. まとめと今後の展望

散水位置を制御できるスプリンクラーの開発を行い，電磁バルブとステッピングモータの制御を実装した．現在，作成したシステムでは，15 段階飛距離の制御と，5 度単位の水平角の制御を行っている．また，お絵かきプログラム風のインタフェースにより，水をまきたい場所を色で塗りつぶすことによって，散水領域と水量を簡単に指定できる web ページ上のツールを作成した．

水を落とす場所の精度や分解能に関してはまだ課題が多い．特に，飛距離方向に水が広がる問題に関しては，電磁バルブ部分の改良や，散水順番の工夫などのより対応したいと考えている．

現在の実装では，ユーザが直接操作で散水領域を指定している．これに対して，土壌水分計などのセンサを利用して水の乾き具合をはかり，散水が必要な場所を提示したり，自動散水する機能の実装も検討したい．また，庭や畑を荒らす害鳥，害獣をセンサで検出し，散水により撃退することも可能であろう．

一方，本システムを使って，砂浜やグラウンドのような広い土地に，文字やイラストを水で描くことも可能である．水により地面に情報を描くディスプレイを用いた，サイネージやアートとしての可能性も検討していきたい．

参考文献

[1] Ocha House とユビキタスコンピューティング, Ocha House とユビキタスコンピューティング. A multi-layered display with water drops, SIGGRAPH '10, pp. 76:1–76:7, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[2] year, year, year. Study on design of controllable particle display using water drops suitable for light environment, VRST '09, pp. 23–26, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[3] year, year, year, year. Garden agua: Three-dimensional tangible display enabled by arranged water jet, SA '13, pp. 9:1–9:3, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[4] year, year. The information percolator: Ambient information display in a decorative object, UIST '99, pp. 141–148, New York, NY, USA, 1999. ACM.

[5] year. Arrays of water jets as user interfaces: Detection and estimation of flow by listening to turbulence signatures using hydrophones, MULTIMEDIA '07, pp. 505–508, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[6] year, year, year. Potpet: Pet-like flowerpot robot, TEI '11, pp. 263–264, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[7] year, year. Aquatop display: Interactive water surface for viewing and manipulating information in a bathroom, ITS '13, pp. 155–164, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[8] year, year, year, year, year. Aquatop display: A true "immersive" water display system, SIGGRAPH '13, pp. 4:1–4:1, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[9] year, year, year, year. Ketsuro-graffiti: Water condensation display, ACE '14, pp. 49:1–49:2, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[10] year. Rainterior: An interactive water display with illuminating raindrops, ITS '11, pp. 270–271, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[11] year, year, year. Smartgardenwatering: Experiences of using a garden watering simulation, OZCHI '09, pp. 217–224, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[12] year, year, year, year. Ocha house とユビキタスコンピューティング. ヒューマンインタフェース学会誌 = Journal of Human Interface Society : human interface, 12(1):7–12, feb 2010.