

温熱環境調整システムにおける日射制御 IoT デバイスの開発

Development of Solar Control IoT Device in Thermal Environment Adjustment System

深井裕二*

Yuji Fukai

概要

住宅の温熱環境を整備することは人々の健康的かつ快適な生活活動において重要である。窓のカーテンによる入射光の調整は手作業による単純な方法であるが温熱環境制御として効果がある。太陽光による輻射熱は室内温度を大きく変動させるため、冷暖房使用時期における採光や遮光の積極活用は快適な温度調整および省エネルギーに有効である。本研究では温熱環境調整システム構築の一環として、カーテンの自動開閉を行う IoT (Internet of Things) デバイスを開発した。本デバイスは環境センサ値をもとにプログラムによる判断によって動作する。

1. はじめに

快適な住環境づくりは健康維持やエネルギー消費に関わる重要なテーマである。国土交通省国土技術政策総合研究所および独立行政法人建築研究所がスタートさせた自立循環型住宅⁽¹⁾の研究では、省エネルギー性能および居住性や利便性の水準を向上させることが目標とされた。これには自然エネルギー活用技術に属するものとして、日射熱の利用(太陽の利用)がある。日射熱のエネルギー源となる気象要素には、太陽光が直接住居にあたる直達日射および大気中に散乱・反射して全方向から住居にあたる散乱日射がある。これらによる日射熱は季節、時刻、日照時間、天空状態(晴天空、中間天空、曇天空)および風速など、様々な要素が影響して変化する。住居の温熱環境を構築する上で日射を考慮した設計は重要である。これには居間の方位、隣地の建築物による日影との位置関係、日射を遮蔽する屋根の軒・庇の長さ、および窓の面積・日射熱取得率などが関係する。また積極的な採光による明るい住環境づくりなど、居住者の好みを重視した住居設計も日射熱の利用に影響する。窓設計において、総窓面積を大きく確保することで入射光による暖房効果が得られるが、断熱性を低下させてしまう欠点もある。しかし近年では熱貫流率の低い3枚構成の複

層ガラス窓や樹脂製複合サッシなどによって断熱性能を高め、室外へ逃げる熱を抑えている。窓による採光を重視する場合、強い入射光の継続は暑すぎる状況を引き起こしてしまう。そのためカーテンによる調節が不可欠となる。太陽光の輻射熱は室内温度を大きく変動させる要素であるため、入射量の調整は冷暖房機器のエネルギー消費抑制と快適性維持に有効となる。暖房使用時期における採光や冷房使用時期における遮光を積極的に活用することは省エネルギーに効果的である。カーテンの開閉は主に天候・屋内温度に応じて居住者が操作するが、開閉操作を自動化すれば省力化および適切な温熱環境維持に貢献できるものと思われる。

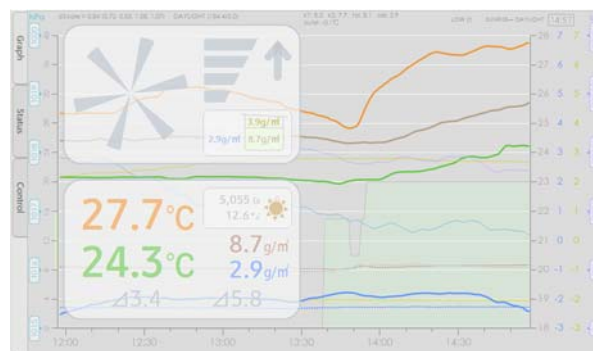


図1 温熱環境調整システム

* 北海道科学大学工学部情報工学科

本稿の前段研究である温熱環境調整システム⁽²⁾ (図1)において, IoT (Internet of Things) によるセンサデバイスと制御デバイスを用いた拡張性および連携性を考慮した開発を実践してきた。本研究では, システムへの機能拡張としてカーテンの自動開閉を行うサブシステムを開発した。本システムでは IoT 関連のクラウドサービスは利用せず, ローカルネットワークで完結したシステム形態となる。本研究の目的は, 快適な温熱環境の実現および, システム開発を通じて IoT 技術・デバイスの活用や開発効率について検討することである。

2. システム構成とデバイスの連携

本システムは各種環境センサを搭載したデバイスから計測値を収集し, それらをもとにカーテンの開閉を判断し入射制御を行うデバイスへ指示を送る。指示を受けたデバイスはアクチュエータによりカーテンを開閉させる。図2は本システムの無線ネットワーク上の構成である。大きく分けてホストコンピュータ, センシング部およびコントロール部で構成され, 各部は Bluetooth および Wi-Fi による無線データ通信で連携する。

センシング部は複数の環境センサで構成される。屋内外に設置した温湿度センサ^{(3) (4)} (屋内: Inkbird 社 IBS-TH1, 屋外: SANWA SUPPLY 社 MM-BLEBC7) は Bluetooth によって定期的に計測値を送信する機能を有している。窓の屋内側に設置した照度センサ⁽⁵⁾ (SparkFun 社 VEML6030) および気圧センサ⁽⁶⁾ (Bosch Sensortec 社 BMP280) はマイクロコンピュータ⁽⁷⁾ (Raspberry Pi Zero) (図3) を用いてセンサの値を読み取り, 無線 LAN 上の HTTP 通信によりホストコンピュータに定期的に送信する。コントロール部は複数のカーテンをそれぞれ担当する入射制御アクチュエータで構成され, これらは IoT デバイスとして機能する。ホストコンピュータには常時稼働を考慮し低消費電力のスモールフォームファクタ PC⁽⁸⁾ (ECS 社 LIVA Z, Intel Pentium N4200, DDR3L 4GB, eMMC 64GB, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 4.0, Windows 10 Pro 64bit) (図4) を用いた。ホストコンピュータのシステムは C# 言語でプログラミングしており, 今回の機能拡張に関係する処理として, センサ計測値の受信, カーテン開閉の判断および機械学習, アクチュエータ駆動指示の送信, 収集した計測値のデータベースへの記録, カーテンの手動操作ユーザインタフェースなどがある。

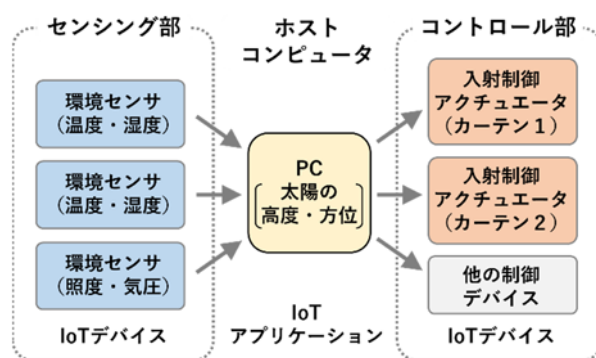


図2 無線ネットワーク上のシステム構成



図3 マイクロコンピュータ Raspberry Pi Zero (上), モータドライバモジュール A4988 (下)



図4 ホストコンピュータ用の低消費電力 PC

3. 入射制御 IoT デバイスの製作

カーテン開閉用の入射制御デバイスでは, Raspberry Pi Zero 上で動作する Python 言語で記述したプログラムによってデータ通信およびモータ制御を行う。カーテンの開閉量を正確に制御するために回転角制御型であるステッピングモータを用い, モータドライバによって駆動させている。

本装置はカーテンとの干渉の抑制および美観を

考慮し、筐体には薄型の樹脂ケース⁽⁹⁾ (Takachi 社 TWN7-4-11W : 外寸 70×35×105mm, 内寸 61.2×25.5×83mm) を用いた。モータは本筐体に収納可能なスリムサイズのステッピングモータ⁽¹⁰⁾ (Oriental motor 社 PKP223D15A-CS20, 2 相バイポーラ, 基本ステップ角 0.09°) を採用した。PKP223D15A-CS20 は減速ギヤ (20:1) を内蔵し, 0.8Nm の最大静止トルクを有する。これは対象カーテンの開閉に必要な駆動力が得られるものである。モータドライバモジュール⁽¹¹⁾ (Pololu 社 A4988) (図 3) は定電流駆動方式であり, 基板上の半固定抵抗でモータ駆動電流を制御する。駆動電流値は発生トルクおよび発熱量を考慮し定格内で適当な値に設定した。本装置の電源として, マイコンおよびモータドライバ動作用に USB 電源 (DC5V) を, またモータ駆動用に AC アダプ

タ (DC24V, 2A) を用いている。

カーテンはタイプにより開閉操作形態が異なる。本研究の対象は, ボールチェーンを引き下ろすロールスクリーン⁽¹²⁾ (図 5) タイプおよびボタンを回すバーチカルブラインド⁽¹³⁾ (図 6) タイプとなる。本装置は対象カーテン開閉操作部にアクセス可能な内壁面に設置し運用する (図 7, 図 8)。モータからの動力伝達には各操作部に適合するモータ軸のアタッチメントが必要となり, これらを 3D プリンタ⁽¹⁴⁾ (XYZprinting 社 da vinci nano w) で製作した。アタッチメントの設計にはフリーウェアの 3DCAD である FreeCAD⁽¹⁵⁾ を用いた。FreeCAD で設計したモデリング (図 9, 図 10) は 3D プリンタ用の STL データに変換し造形に使用した。ボールチェーン用のギヤ型アタッチメントはチェーンと噛み合う部分



図 5 ロールスクリーン



図 6 バーチカルブラインド



図 7 ロールスクリーン用入射制御デバイス
(ボールチェーンアタッチメント使用)



図 8 バーチカルブラインド用入射制御デバイス
(ボタンアタッチメント使用)

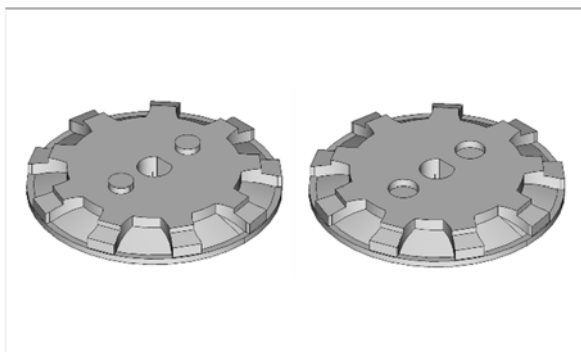


図9 3DCADによるボールチェーンアタッチメントの設計

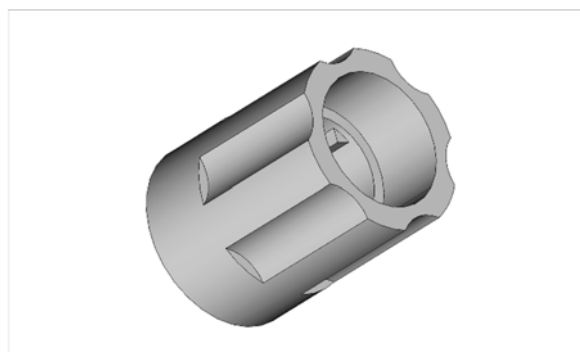


図10 3DCADによるボタンアタッチメントの設計

が窪む構造であり、上半分がオーバーハングとなるため、製作を容易にするために上下部を分けて設計・造形し、アクリル樹脂用溶着剤で貼り合わせた。

本装置の製作にあたり、快適な住環境維持のために低騒音化を重視した。A4988はマイクロステップ駆動に対応しており、モータの基本ステップ角度を $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ に細分化可能である。ステップ角度が小さいと回転時間を要するが、動作による振動・騒音を低減させるメリットがある。また騒音継続時間を短くするためにプログラムにおける待ち時間の調整で高速回転させる方法が挙げられる。なおステッピングモータは高速回転時にパルスと回転の同期が失われる脱調状態を起こす性質がある。本装置では騒音が最小となる $1/16$ のステップ角度を採用し、脱調が発生しない最大回転速度となるよう、実験によりプログラムを調整した。

またモータの回転開始時の突然の騒音発生は居住者を驚愕させる可能性がある。これは驚愕性瞬目反射と呼ばれ、直前の弱い刺激により抑えられる現象（先行刺激抑制）が知られている⁽¹⁶⁾。そこで小さな音から徐々に大きくすれば騒音発生を予測できこうしたストレスが軽減できると考えた。モータ制御プログラムでは、回転の開始・停止時に図11のように回転速度を緩やかに加速・減速させている。これにより回転開始時の騒音レベルは小さく抑えられる。また静音化対策の一環として、筐体の蓋とモータの隙間に遮音材として高比重不乾性パテを使用した。本素材は高比重であるため遮音性が高い。また絶縁性および粘着性が高いため、電子装置への使用に対する安全性や利便性が高い。ただし筐体内部空間への充填となるため、装置の放熱性能を損なわないようエアフローの確保などが必要となる。

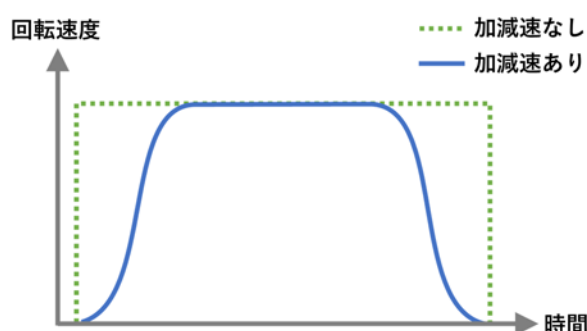


図11 ステッピングモータの回転速度制御

4. 入射制御処理の設計と実装

快適な住環境のための日射制御では条件判断の入力要素や処理をどのように設計するかが重要となる。まず次のような動作ルールを基本とした。

- (1) 日射熱によって室内が高温になれば遮光する。
- (2) 室内が低温ならば日射熱を得るために採光する。

次に入力要素とすべき環境センサ値を検討した。

(1)(2)に対応する候補として、室内の温度センサおよび照度センサが挙げられる。居住者の快適性を考慮した場合、日射による輻射熱は暑さにつながりやすい要素である。直達日射や散乱日射は季節・時刻で変化する太陽の高度・方位や窓との位置関係、天空（気象）および外気の状態などに影響される。これらは単純な室内の温度および照度の計測では把握しにくく高精度の日射制御は難しい。

人体の熱収支に大きく影響する要素である気温、湿度、輻射熱を取り入れた暑さの指標としてISO 7243で規格化されたWBGT⁽¹⁷⁾（湿球黒球温度、Wet Bulb Globe Temperature）がある。この規格ではWBGT

を用いて生活活動や運動・作業時に人が受ける熱ストレスによる危険性が示されている。WBGT 値は黒球温度、湿球温度、乾球温度の計測によって得られる。よって、それらの温度に影響する気温・湿度・気圧・日射量・風速などは居住者の快適性に関わる要素であると考えられる。

本システムでは、快適性に影響する要素のうち、環境センサを用いて比較的容易に実装できるものを対象とした。計測対象は、屋外に対する①温度、②湿度および③照度、居間に対する温度（④天井付近、⑤椅座位での頭部の高さ、⑥床上付近）、⑦湿度および⑧気圧である。これらは各種環境センサを用いた IoT デバイスにより取得する。なお住環境が対象となるため、屋内環境に影響しにくい風速は計測対象から除外した。また太陽の⑨高度、⑩方位は日付、時刻、緯度、経度から算出している。計測値①～⑩をもとに、日射熱による居住者への熱ストレスを把握しようとする場合、さらに考慮すべき要素がある。主なものとして、活動（運動）状態、衣類、食事誘発性熱産生（Diet Induced Thermogenesis, DIT）などの人側の状態要素が考えられる。WBGT を用いた熱ストレス判定も、最終的には人による日常生活・運動状態の判断で得られるため、システムによる全自動化には不向きである。これらの人側の状態要素は計測が難しいため今後の検討課題とした。

カーテン開閉の判断において、例えば各計測値に閾値を設けた条件判断を用いる場合、閾値の決定は試行錯誤によるものとなり、変数の多さから困難な作業となる。さらに、低温でも日射が強い場合や日射が弱くても高温の場合といったように、複合的な条件も考慮しなければならず煩雑となる。そこで、本システムではニューラルネットワーク（Neural Network, NN）による機械学習を用いた。これには以下の利点が挙げられる。

- (1) 人の操作によるカーテン開閉状態を教師信号として学習することで、それに近い入力状態で同様の結果が得られる。
- (2) 各値の閾値条件や複合的な条件に相当する判定基準を学習によって自動的に獲得できる。
- (3) 学習していない未知の入力セットに対し、汎化能力によって開閉を確率値として予測できる。

NN では処理ルールが学習により自動構築されるため、多変数による複雑な条件判断の設計が不要であり開発は容易になる。本システムでは、入力計測値①～⑩とし、出力は開状態および閉状態の 2 つ

とし、3 層の全結合層による NN を構成した。活性化関数には ReLU 関数および多クラス分類用に Softmax 関数を用いた。NN の学習では過去の計測記録をもとにカーテン開閉状態について各同数のサンプルを抽出し、それらを学習・教師データとした。学習データは過去の計測記録から最大・最小値を取得し 0～1.0 に標準化してあり、それらを用いて初期学習を実施し NN の重み求めて保存した。以降の運用では、保存された重みを用いて 1 分おきの計測および標準化した各計測値から NN による多クラス分類を実行する。その結果をもとに開閉状態を判断し入射制御を行う。また、運用中に居住者が暑さを感じるなどして、人によるシステム操作で開閉した場合、その時のデータを学習・教師データに加え、再学習および重みの更新を自動的に実行している。

5. システムの評価と解決案

本システムの運用を通じ、温熱調整システムとして快適性維持の効果が概ね得られたが、いくつかのケースで望ましくない結果が生じた。

1 つ目は、寒冷時期の暖房使用時において、室内温度が暖房によって高められるため照度がそれほど高くなってもカーテンが閉じられる状況である。これによって寒冷時期での日射熱の活用低下が問題となる。対策として、暖房稼働状態を感知するセンサの構築および入力変数の追加が挙げられる。そして暖房時のカーテン開閉を再学習することでこのようなケースに対応できると考えられる。また本 NN はある時点の計測値で判断しているため、外気の高湿状態の継続による室内の高湿化なのか、暖房によるものなのかは考慮されない。そこで屋内外の高湿継続時間や温度上昇率といった移行状態を表現したデータを入力に追加する手法も考えられる。

2 つ目は、寒冷時期において高温および高照度等でカーテンが閉じられるとき、後に室内温度の低下が予想されるなら、多少暑くても日射熱を多く獲得しておきたい場合である。特に屋外温度が低い冬季では、夕方に近い時間帯に日没とともに室内温度が急下降する傾向がある。対策として、このような場合の遮光を消極的に実施するような手法が挙げられる。NN の出力値は例えば閉状態=0.85、開状態=0.15 のように得られるが、遮光の判断基準が閉状態 ≥ 0.8 であれば、これを閉状態 ≥ 0.9 にすることで消極的な遮光が実現できる。また他の対策として、カーテンが閉じられた時の居住者の判断によるキ

キャンセルを学習する方法が挙げられる。キャンセル時は閉状態の入力データを開状態のそれとして学習させ、さらに季節、時刻、屋外温度下降率などを入力変数に追加することでこのような状況と判断できる可能性がある。こうしたキャンセル時の学習データを追加し再学習していくことで、当該状況下ではカーテンは閉じにくく、閉じても開きやすくなることが期待できる。

本システムの開発手法に対する評価としては、IoT デバイスの開発はモジュール性が高く、デバッグ対象範囲がより限定される。またデバイスとの連携で用いるホストコンピュータ側の Bluetooth・HTTP 通信は他のデバイス用のコードが再利用でき、デバイスが増加しても固有処理に集中した記述で済む。ホストコンピュータ側の記述に用いた C# はオブジェクト指向型であり、各機能はクラスとして独立性・隠蔽性を有し、システムの拡張・発展時の大規模化による著しい生産性低下が起こらない。またクラスの汎用化設計により、コードの再利用で開発効率が向上した。一方デバイス側の Python は大規模化に不向きであるが、マイコン制御において、I/O ポート処理や通信処理の記述は簡易であり、システムの拡張・発展によって大規模化しにくいデバイス側において開発生産性は良好であると思われる。

6. まとめ

本研究では、快適な住環境のための温熱環境調整システムの機能拡張として、カーテンを自動開閉する日射制御デバイスおよびシステム処理を開発した。強い日差しによる熱ストレスを居住者に与えないよう、また冷暖房によるエネルギー消費を抑えるために本システムは貢献できるものと思われる。今後、人の判断をよりの確に代行できるよう高精度な環境管理システムとして発展させたい。

参考文献

- (1) 一般財団法人住宅・建築 SDGs 推進センター：自立循環型住宅とは、<https://www.jjj-design.org/jjj/jjj-about.html>, 参照日：2023-2-24.
- (2) 深井裕二：IoT デバイス構築による温熱環境調整システムの開発，北海道科学大学研究紀要，pp.1-6, No.50, 2022.
- (3) Inkbird：Bluetooth Thermometer IBS-TH1, <https://inkbird.com/products/bluetooth-thermometer-ibs-th1>, 参照日：2023-2-24.
- (4) SANWA SUPPLY：温度・湿度センサー搭載 BLE ビーコン MM-BLEBC7, <https://www.sanwa.co.jp/product/syohin?code=MM-BLEBC7>, 参照日：2023-2-24.
- (5) SparkFun：Ambient Light Sensor - VEML6030, <https://www.sparkfun.com/products/15436>, 参照日：2023-2-24.
- (6) Bosch Sensortec: Digital barometric pressure sensor BMP280, https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bmp280-fl000.pdf, 参照日：2023-2-24.
- (7) Raspberry Pi Foundation: Raspberry Pi Zero, <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero/>, 参照日：2023-2-24.
- (8) 株式会社リンクスインターナショナル：ECS LIVA Z, <https://www.links.co.jp/item/liva-z-n4200-64g/>, 参照日：2023-2-24.
- (9) TAKACHI：難燃型プラスチックケース TWN7-4-11W, <https://www.takachi-el.co.jp/products/TWN>, 参照日：2023-2-24.
- (10) Oriental motor: PKP223D15A-CS20, <https://www.orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=PKP223D15A-CS20%2BLC2B06A&seriesCd=GCG0>, 参照日：2023-2-24.
- (11) Pololu: A4988 Stepper Motor Driver Carrier, <https://www.pololu.com/product/1182>, 参照日：2023-2-24.
- (12) Nichibei：ロールスクリーン, <https://www.nichi-bei.co.jp/jsp/category/rs/soph/>, 参照日：2023-2-24.
- (13) Nichibei：バーチカルブラインド, <https://www.nichi-bei.co.jp/jsp/category/tb/arp/>, 参照日：2023-2-24.
- (14) XYZprinting: da vinci nano w, <https://www.xyzprinting.com/ja-JP/product/da-vinci-nano-w>, 参照日：2023-2-24.
- (15) The FreeCAD Team: FreeCAD, <https://www.freecad.org/index.php>, 参照日：2023-2-24.
- (16) 山田富美雄：ヒトにおける驚愕性瞬目反射の PPI に関する生理心理学的研究，日本生理人類学会誌，pp.103-112, Vol.27, No.4, 2022.
- (17) ISO 7243：Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT index, 2017.