

携帯端末における歩行者位置の 推定精度向上に関する一考察

立命館大学

白岩諒也, 石田駿祐, 久保幸弘

目次

1. 研究背景・目的
2. 歩行者の位置モデル
3. センサ座標軸
4. PDR測位アルゴリズム
5. 実験
6. 今後の予定

研究背景

スマートフォンの利用者は多く、位置情報を活用するサービスも多い



より高い精度が求められている

位置情報を活用したサービス

- 歩行者ナビゲーションシステム
- カーナビゲーションシステム
- 子供の位置確認
- SNS
- 紛失物の探索 ...etc

衛星測位によって
成り立っている

研究背景-衛星測位の精度が悪い場合

基本的に観測できる衛星数が少ないと精度は悪い

屋内や都市部では、観測できる衛星数が少なくなる

スマートフォンでの対処法

利点: 環境依存しないため、コストがかからない

端末のセンサを利用

歩行者自律航法(PDR)

Wi-Fi測位

BLE(Bluetooth Low Energy)測位

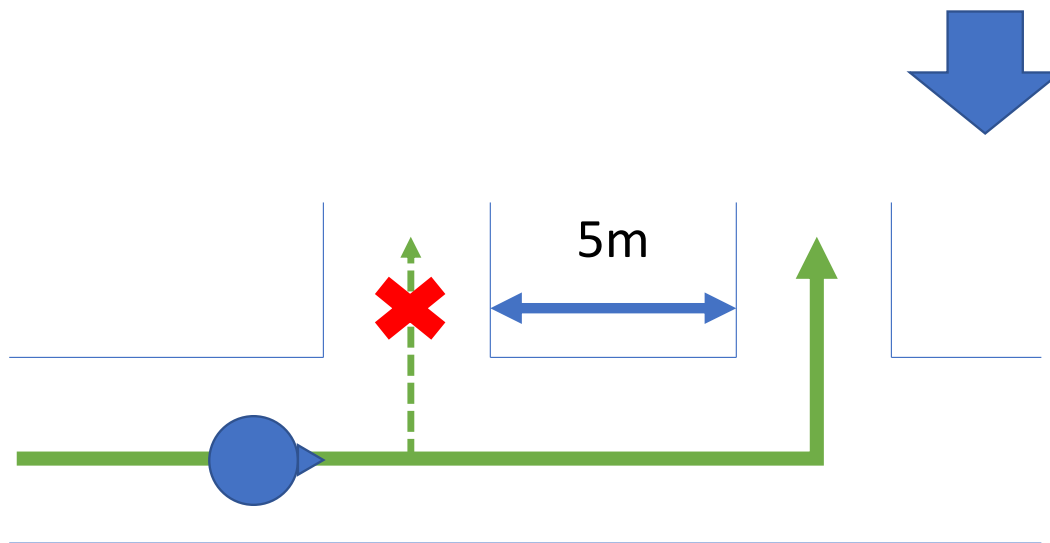
PDR(Pedestrian Dead Reckoning)の概要

- センサだけで歩行者の移動軌跡を推定する(本研究ではスマートフォン搭載のセンサのみ)
- PDRでは相対的な位置しか求められないため、はじめにほかの測位手法で絶対的な位置を求める必要がある

研究目的

都市部における歩行者ナビゲーション

衛星測位に頼れない場合でも、
どの道を歩いているか、どこで曲がるかなどの情報は最低限必要



目標:

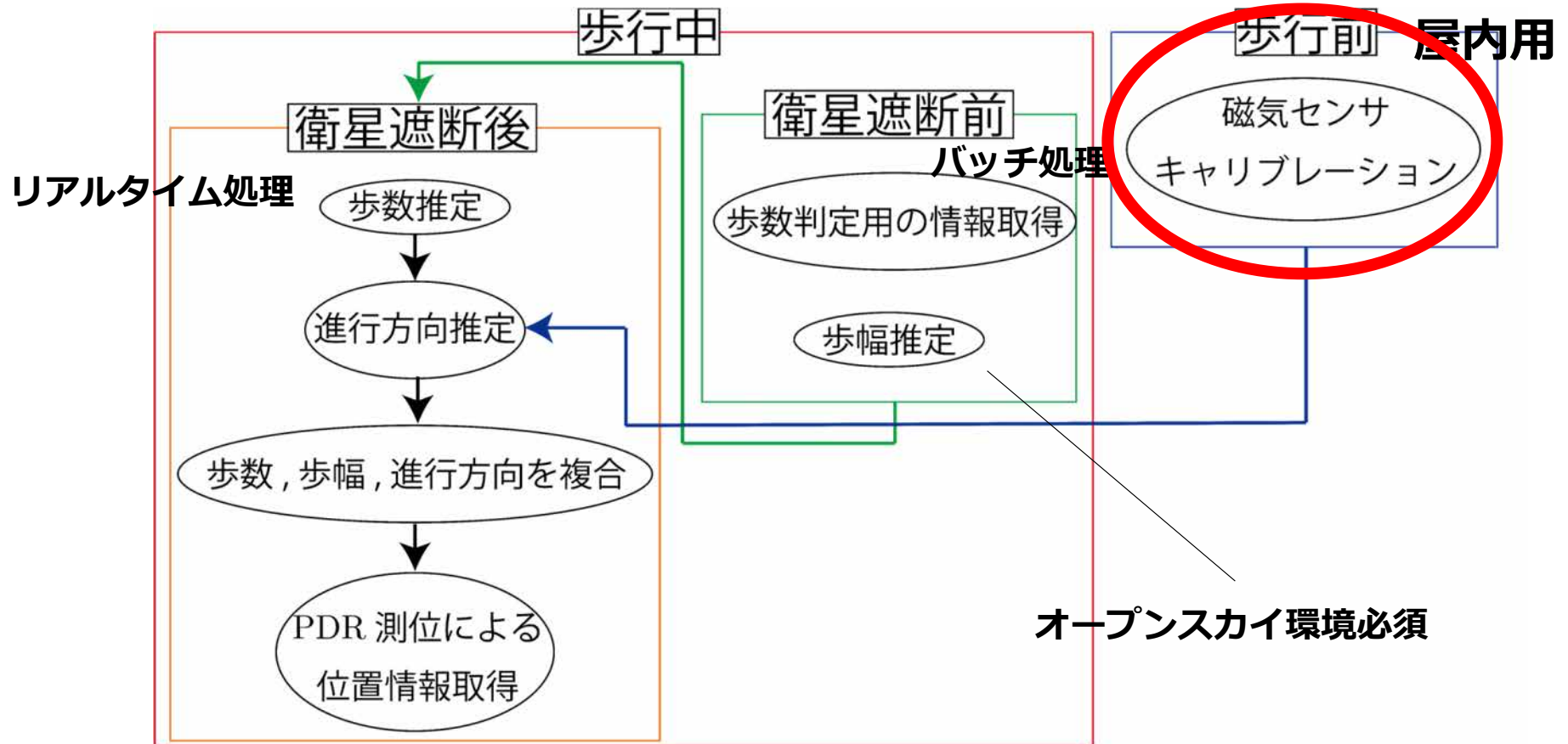
道の間隔を5mと想定し、実際の位置との誤差を2.5m未満に収めること

マップマッチングにより、
進んだ道を決められる精度

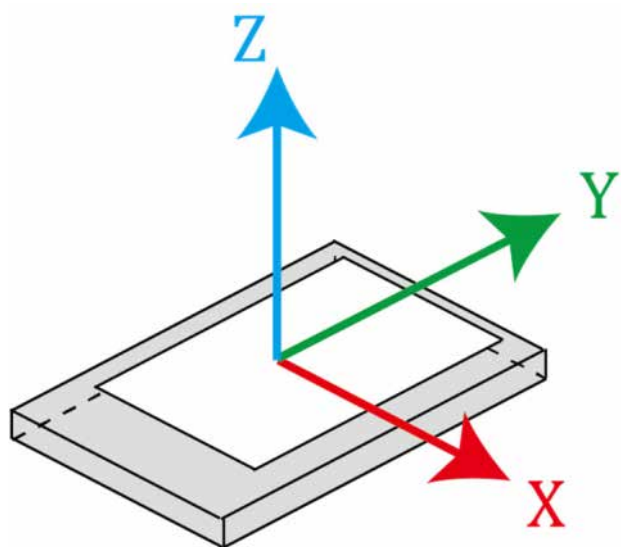
PDR測位に必要な情報と提案手法の概要

必要な情報	提案する求め方
歩数	加速度センサを利用
歩幅	衛星測位の精度が良好時に推定しておく
進行方向	方位角と同じと仮定し、磁気センサを利用

PDR測位アルゴリズム



各種センサの座標軸



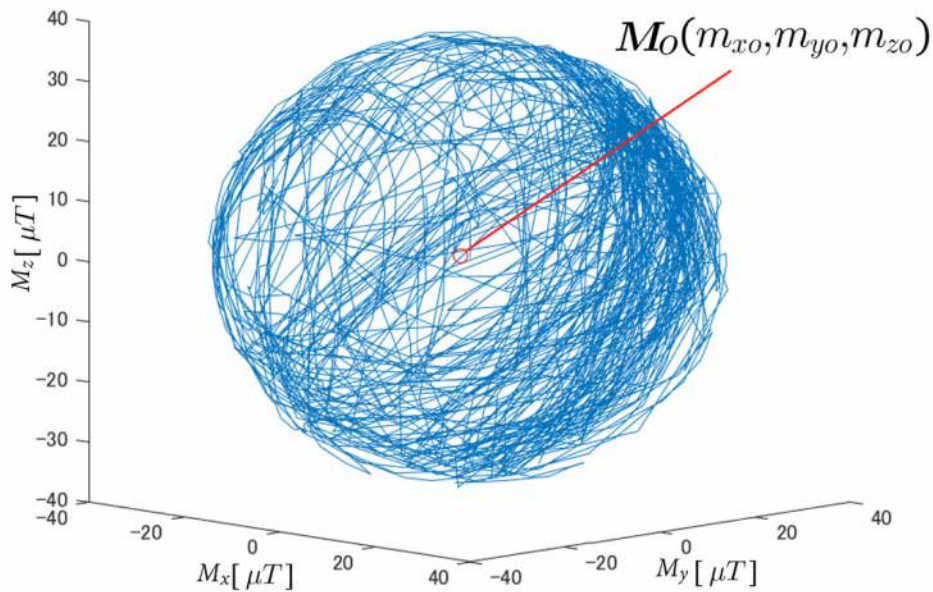
現段階で使うセンサ類

加速度センサ: $A_x[m/s^2]$, $A_y[m/s^2]$, $A_z[m/s^2]$

磁気センサ: $M_x[\mu T]$, $M_y[\mu T]$, $M_z[\mu T]$

仮定: 進行方向とY軸, 鉛直上向きとZ軸は
同軸である

磁気センサのキャリブレーション（歩行前）

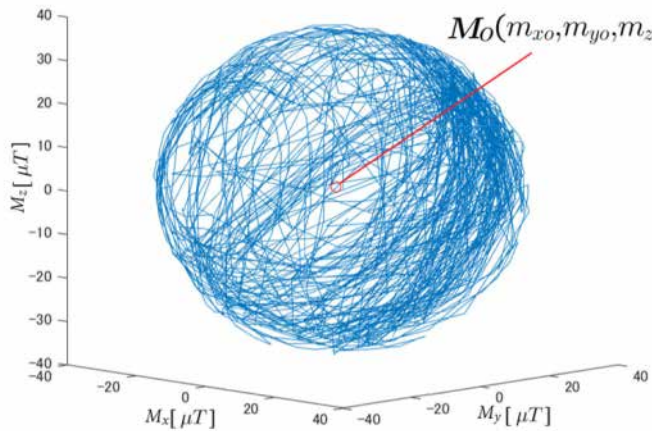


- ・磁気センサは周辺の物体が発する磁気や環境による外乱により，オフセットが生じる

- ・端末を全方向に満遍なく振ると磁気センサが得る値は左図のように球状になる。
⇒**最小二乗法によって球の中心を求める**

- ・球の中心を測位中に磁気センサが取得する値から引くことでキャリブレーションを行う

磁気センサのキャリブレーション（歩行前）



{ 磁気センサが測定する i 番目の磁気 $M_i(m_{xi}, m_{yi}, m_{zi})$
 球の中心 $M_o(m_{xo}, m_{yo}, m_{zo})$
 球の半径 r

球面の方程式:

$$(m_{xi} - m_{xo})^2 + (m_{yi} - m_{yo})^2 + (m_{zi} - m_{zo})^2 = r^2$$

2 乗誤差 J

$$\begin{aligned}
 J &= \sum_{i=1}^N \{(m_{xi} - m_{xo})^2 + (m_{yi} - m_{yo})^2 + (m_{zi} - m_{zo})^2 - r^2\}^2 \quad \text{データ数: } N \\
 &= \sum_{i=1}^N \{ \underbrace{m_{xi}^2}_{a} + \underbrace{(-2m_{xo})m_{xi}}_{b} + \underbrace{m_{yi}^2}_{c} + \underbrace{(-2m_{yo})m_{yi}}_{d} + \underbrace{m_{zi}^2}_{e} + \underbrace{(-2m_{zo})m_{zi}}_{f} + \underbrace{m_{xo}^2 + m_{yo}^2 + m_{zo}^2 - r^2}_{g} \}^2
 \end{aligned}$$

磁気センサのキャリブレーション（歩行前）

$$J = \sum_{i=1}^N \{m_{xi}^2 + am_{xi} + m_{yi}^2 + bm_{yi} + m_{zi}^2 + cm_{zi} + d\}^2$$

$$2 \text{ 乗誤差 } J \text{ が最小} \Rightarrow \frac{\partial J}{\partial a} = \frac{\partial J}{\partial b} = \frac{\partial J}{\partial c} = \frac{\partial J}{\partial d} = 0$$

整理 & 行列で表現

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N m_{xi}^2 & \sum_{i=1}^N m_{xi}m_{yi} & \sum_{i=1}^N m_{zi}m_{xi} & \sum_{i=1}^N m_{xi} \\ \sum_{i=1}^N m_{xi}m_{yi} & \sum_{i=1}^N m_{yi}^2 & \sum_{i=1}^N m_{yi}m_{zi} & \sum_{i=1}^N m_{yi} \\ \sum_{i=1}^N m_{zi}m_{xi} & \sum_{i=1}^N m_{yi}m_{zi} & \sum_{i=1}^N m_{zi}^2 & \sum_{i=1}^N m_{zi} \\ \sum_{i=1}^N m_{xi} & \sum_{i=1}^N m_{yi} & \sum_{i=1}^N m_{zi} & N \end{bmatrix} \quad B = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N m_{xi}(m_{xi}^2 + m_{yi}^2 + m_{zi}^2) \\ \sum_{i=1}^N m_{yi}(m_{xi}^2 + m_{yi}^2 + m_{zi}^2) \\ \sum_{i=1}^N m_{zi}(m_{xi}^2 + m_{yi}^2 + m_{zi}^2) \\ \sum_{i=1}^N (m_{xi}^2 + m_{yi}^2 + m_{zi}^2) \end{bmatrix}$$

$$A \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = B \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = A^{-1}B$$

磁気センサの各軸から得られる値はそれぞれ独立しているため、 $\det(A) \neq 0$

磁気センサのキャリブレーション（歩行前）

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2m_{xo} \\ -2m_{yo} \\ -2m_{zo} \\ m_{xo}^2 + m_{yo}^2 + m_{zo}^2 - r^2 \end{bmatrix} \Rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} m_{xo} \\ m_{yo} \\ m_{zo} \end{bmatrix}}_{M_o} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

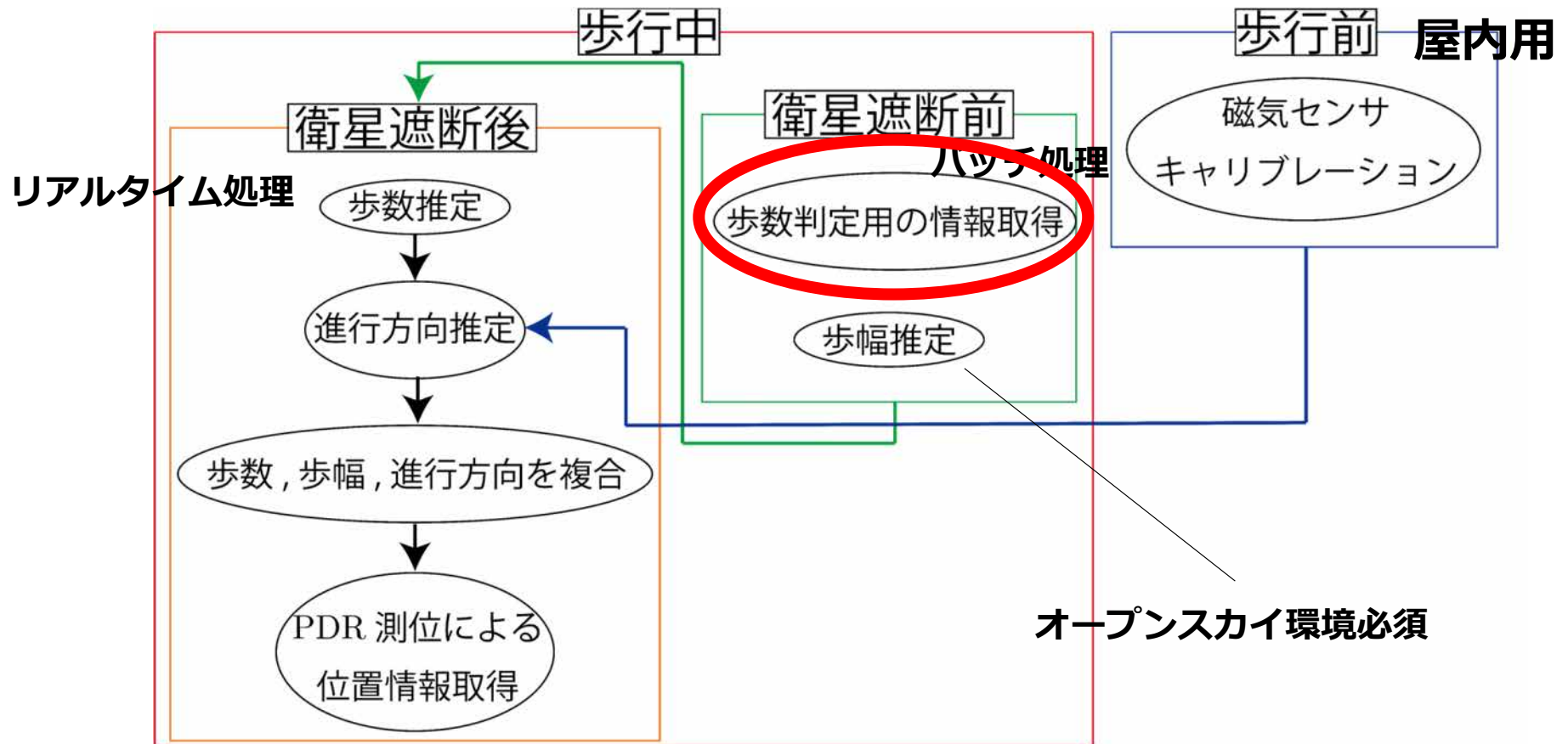
磁気センサが周辺環境の影響を受ける屋内など

$$M' = M - M_o$$

M : 歩行中の磁気センサから得られる磁気

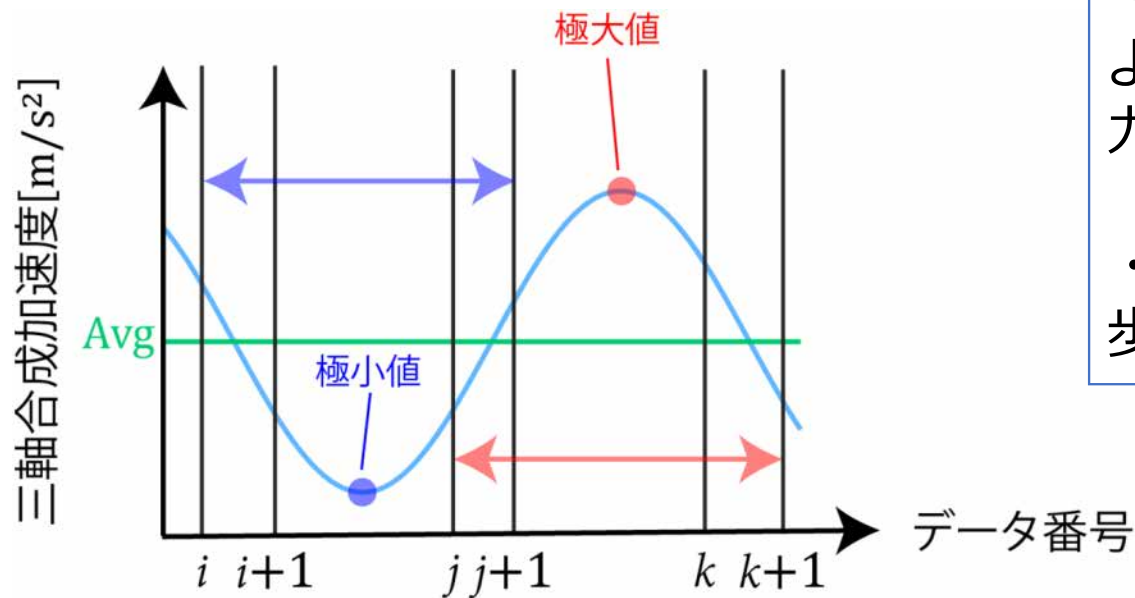
M' : 方位角推定に使う磁気

PDR測位アルゴリズム



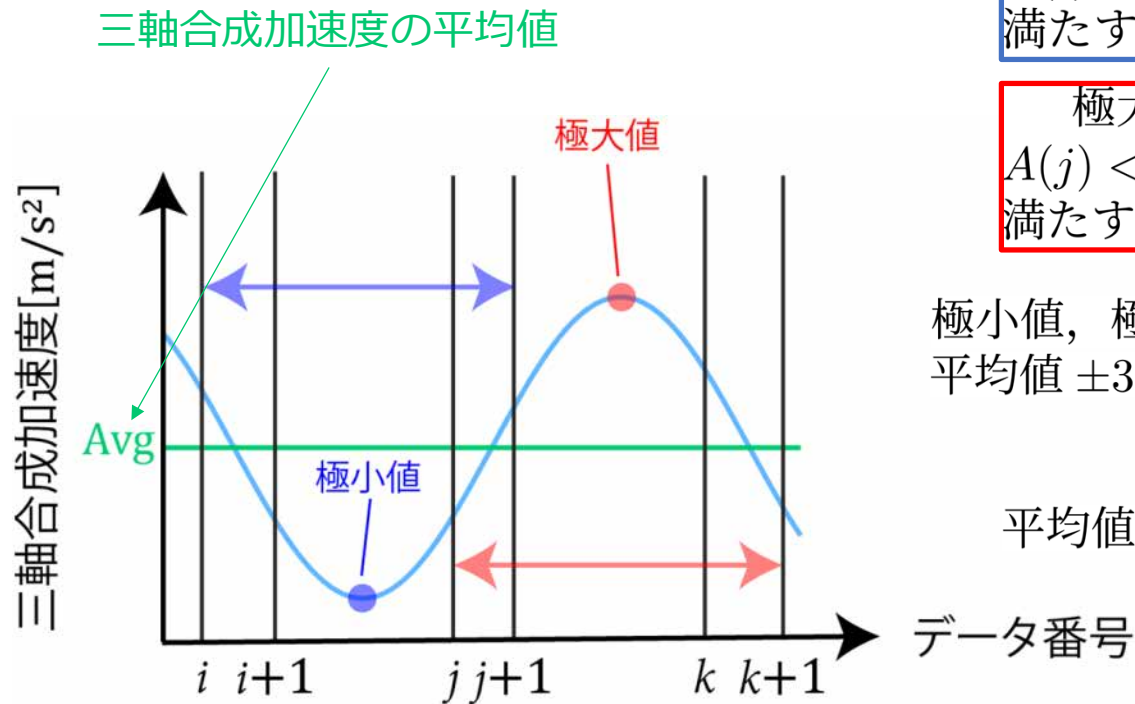
歩数（衛星遮断前）

$$\text{三軸合成加速度 } A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \text{ [m/s}^2\text{]}$$



- ・ 歩行時の三軸合成加速度は正弦波のような波形となり，1歩で1周期分が出力される
- ・ 波の数（極値の数）を数えることで歩数を求められる

歩数（衛星遮断前）



極小値

$A(i) > \text{Avg} > A(i+1)$, $A(j) < \text{Avg} < A(j+1)$ を満たす $(i, j+1)$ における A の最小値

極大値

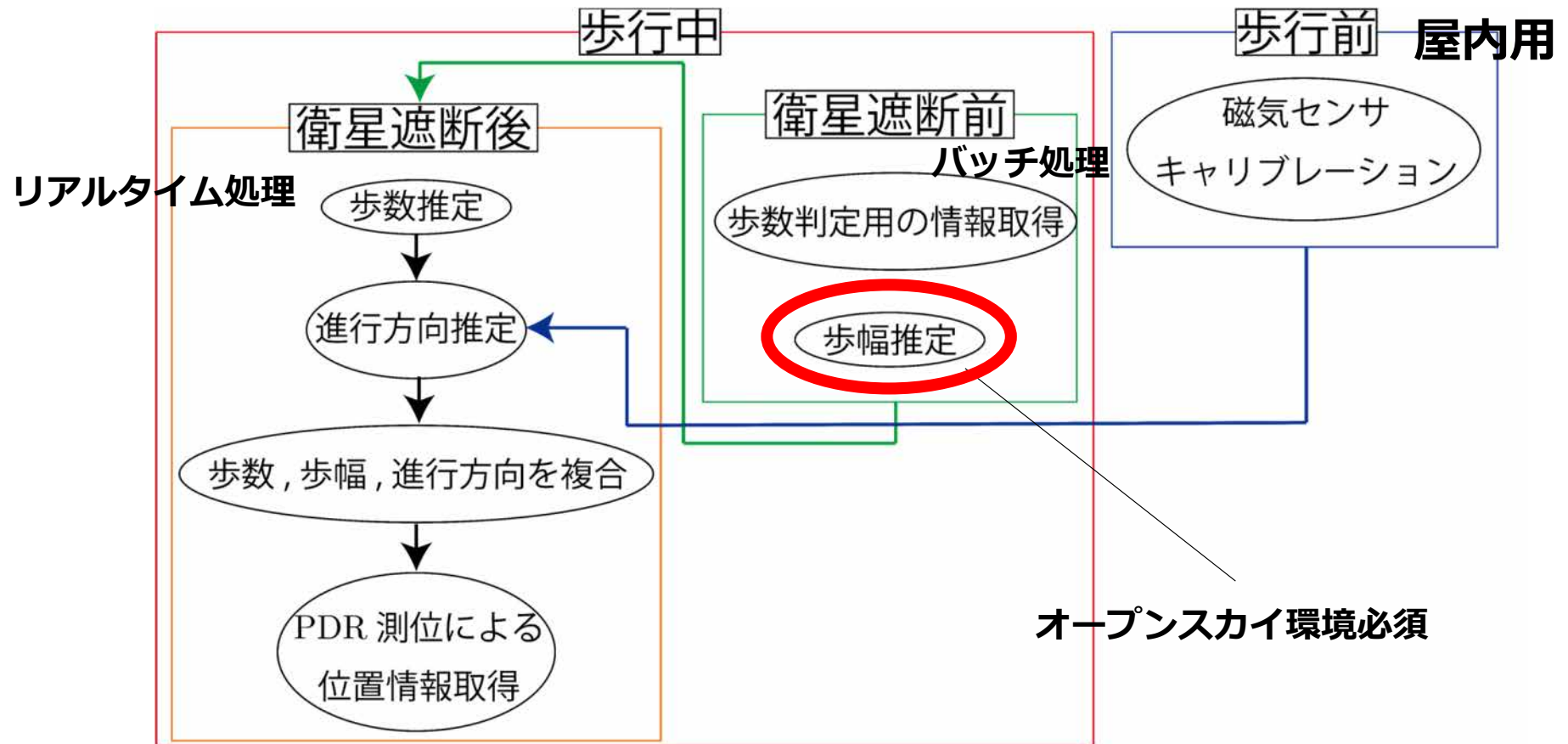
$A(j) < \text{Avg} < A(j+1)$, $A(k) > \text{Avg} > A(k+1)$ を満たす $(j, k+1)$ における A の最大値

極小値，極大値それぞれの平均値と標準偏差 (σ) を求め、平均値 $\pm 3\sigma$ 以内に収まらない値は極値として扱わない



平均値付近で極値扱いしているノイズ成分の除去

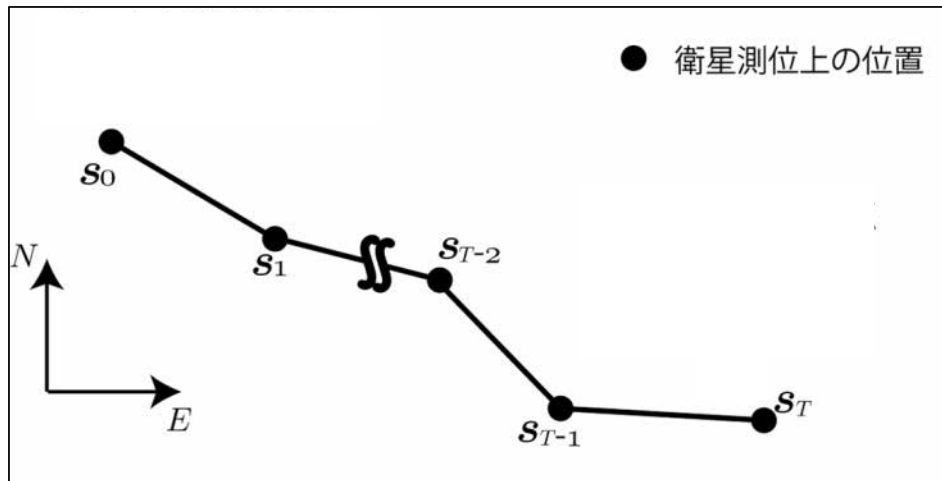
PDR測位アルゴリズム



歩幅（衛星遮断前）

条件

オープンスカイ環境でAndroidのAPI(データ更新間隔1[s])により衛星測位を行えること



歩行者の速度を求める

L : 移動距離 [m]

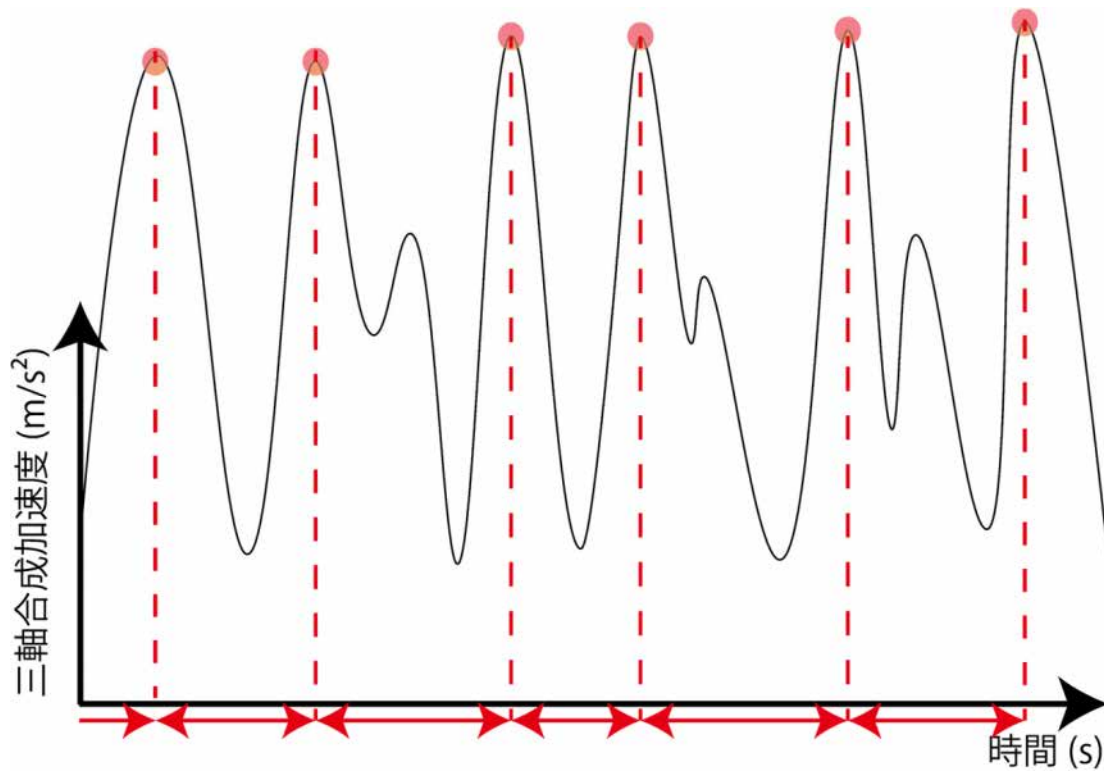
s_t : $t=\{0,1,\dots,T\}$ [s] 時点での位置

$$L = \sum_{t=0}^{T-1} \|s_{t+1} - s_t\|$$

歩行者の移動速度 v_p [m/s]

$$v_p = \frac{L}{T}$$

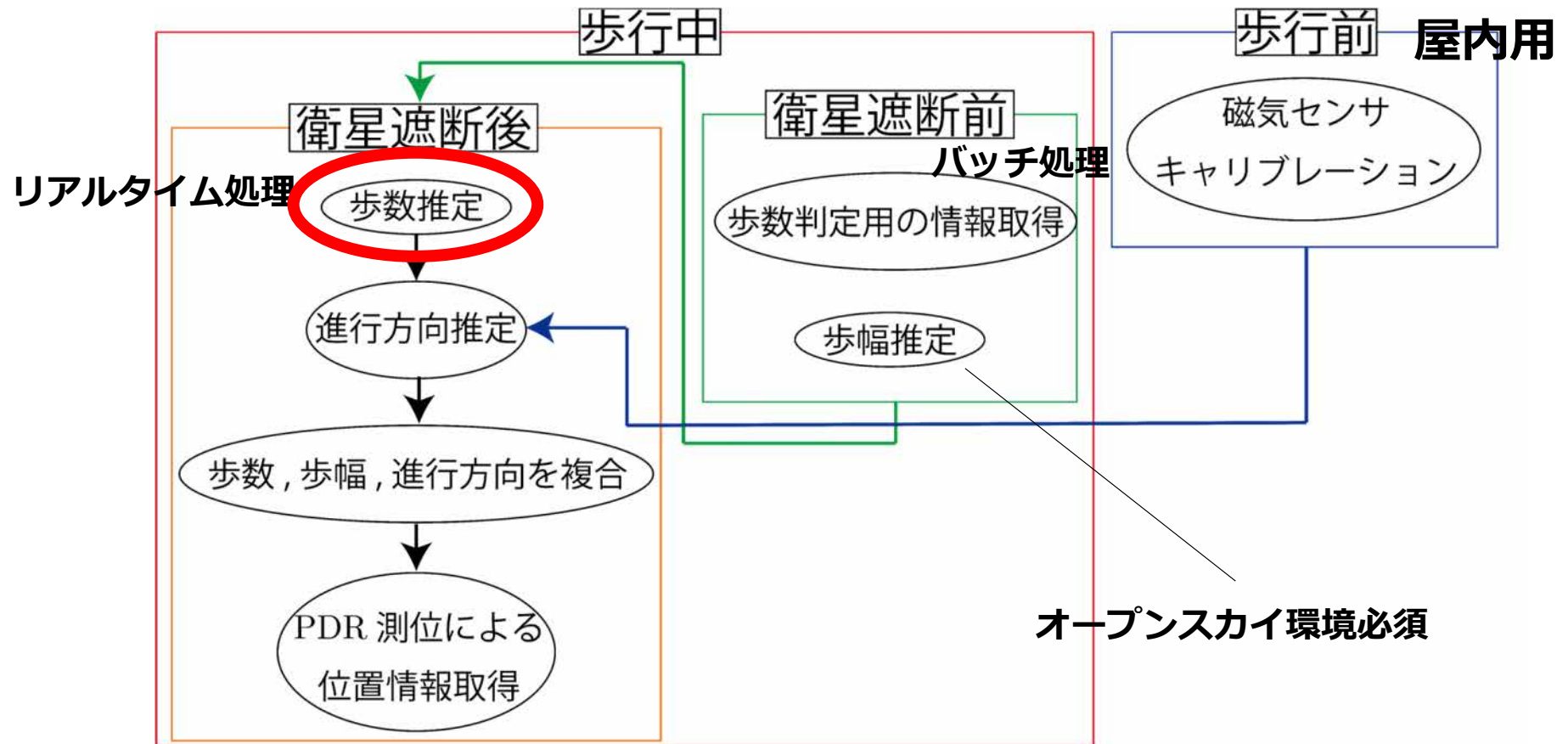
歩幅（衛星遮断前）



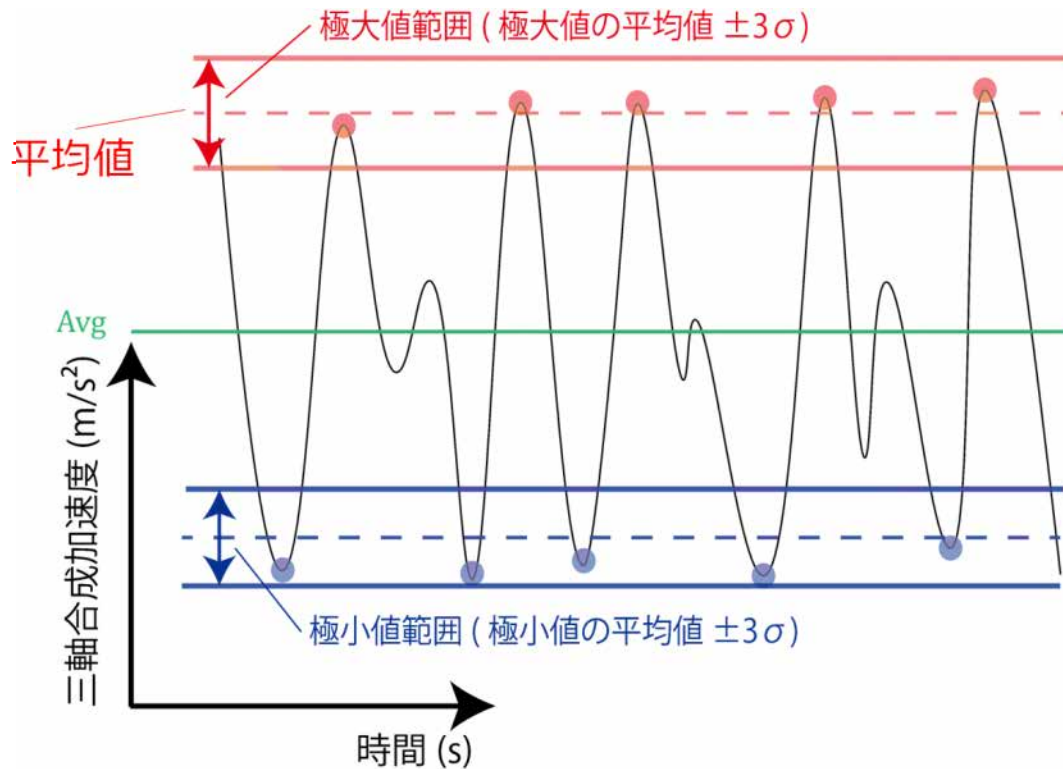
歩行者の速度から歩幅を求める

$$\text{歩幅 (平均)} \hat{W}[\text{m}] = v_p[\text{m/s}] \times \frac{\text{極大値間の平均間隔時間} [\text{s}]}{\text{一歩当たりの平均時間}}$$

PDR測位アルゴリズム



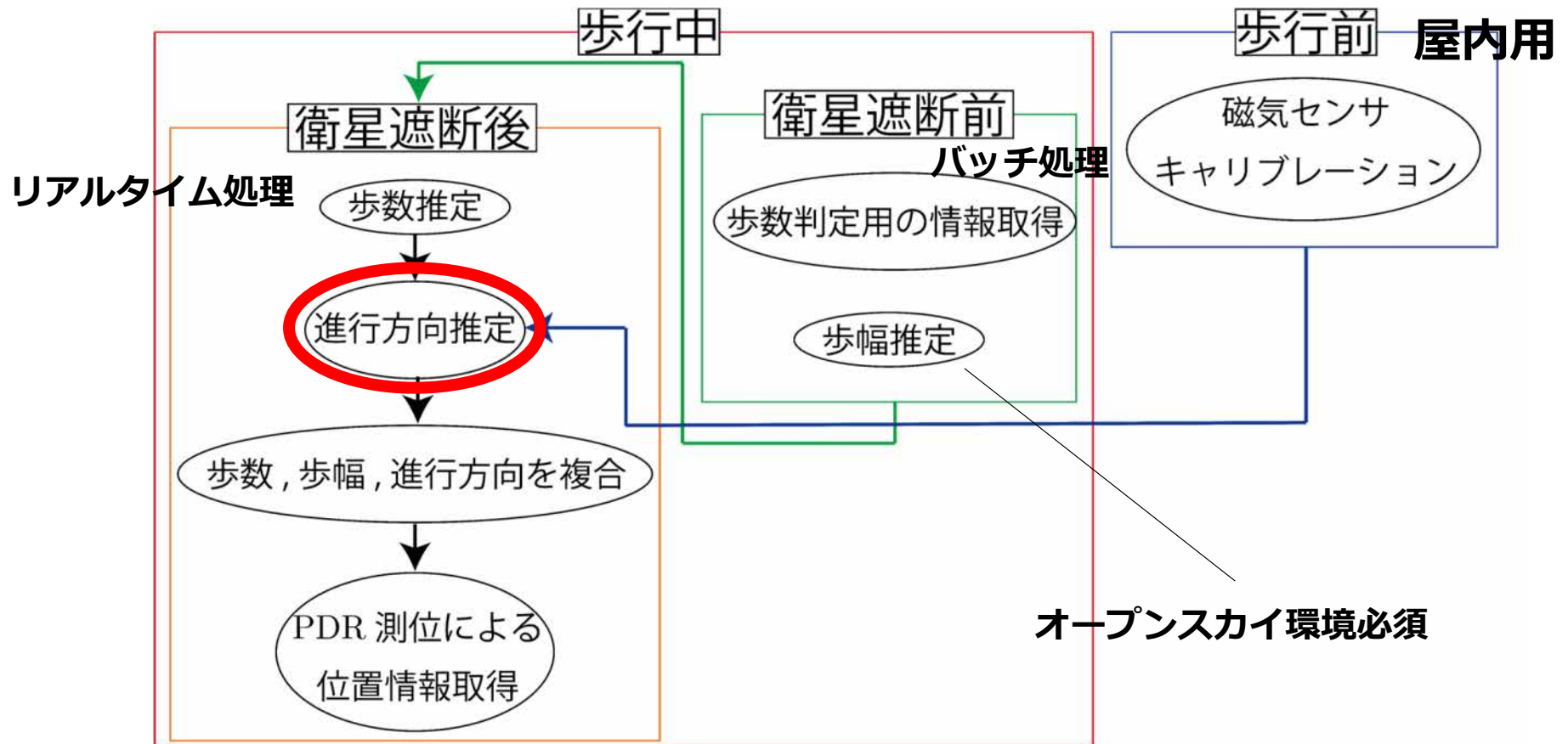
歩数 (衛星遮断後)



- 衛星遮断前に求めた極値ごとの範囲を用いてリアルタイムにカウントを行う
- 極小値の次に極大値が来た場合のみ歩数とカウントする

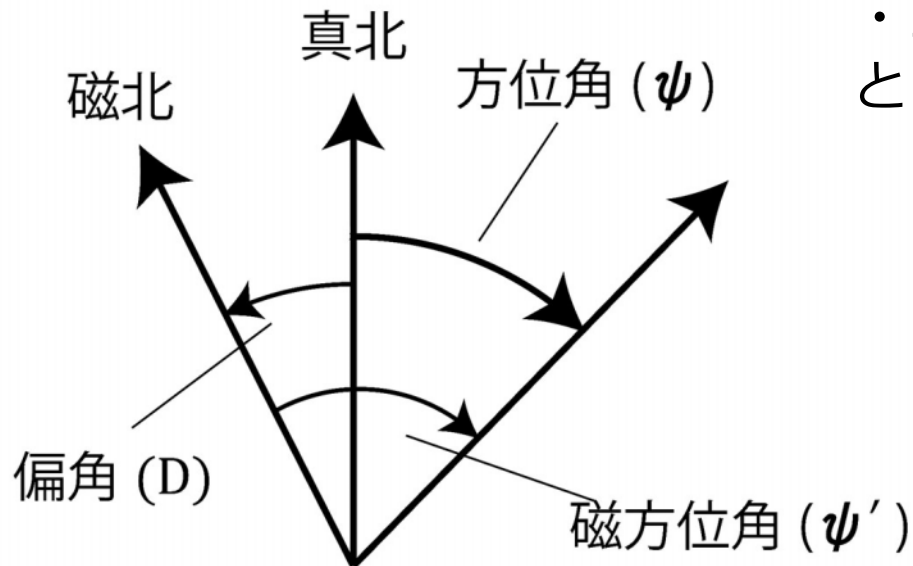
センサのz軸は鉛直上向き
+
歩行の始めは体を持ち上げる

PDR測位アルゴリズム



進行方向（衛星遮断後）

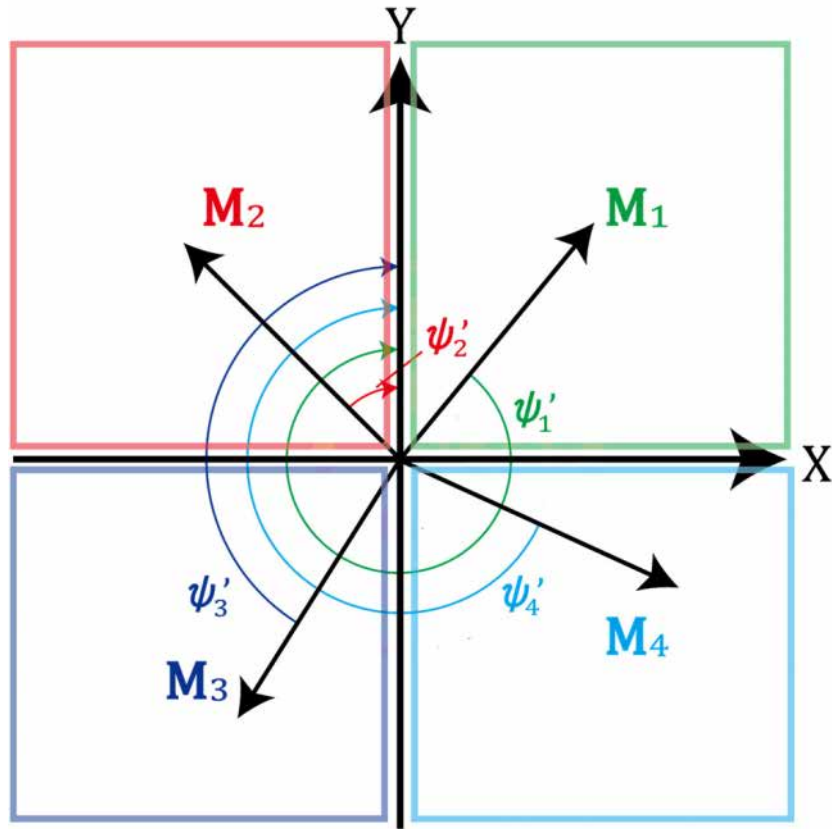
- ・ 進行方向 = 方位角と仮定
- ・ コンパスが指すのは磁北であり，地図上の真北とは地点によって数度の違い（偏角D）が生じる



$$\text{方位角 } \psi [^\circ] = \psi' - D$$

国土地理院が公開している緯度経度ごとの偏角データ(2020)より取得

進行方向（衛星遮断後）



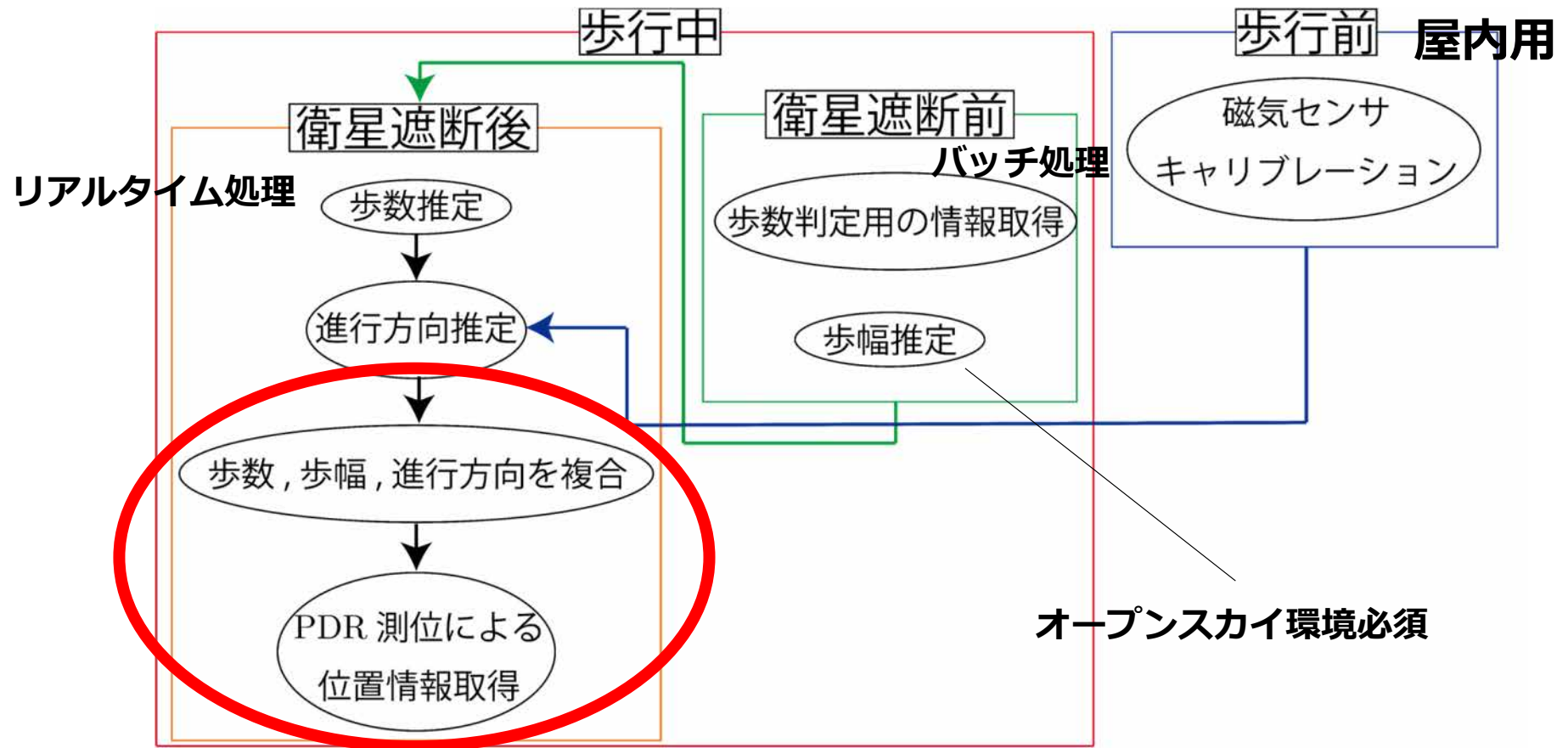
※ M_x, M_y は屋内ではキャリブレーションした値を使う

$-90^\circ < \arctan y < 90^\circ$ より

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi'_1 = 360^\circ - \arctan\left(\frac{M_x}{M_y}\right), (270^\circ < \psi'_1 < 360^\circ) \\ \psi'_2 = -\arctan\left(\frac{M_x}{M_y}\right), (0^\circ < \psi'_2 < 90^\circ) \\ \psi'_3 = 180^\circ - \arctan\left(\frac{M_x}{M_y}\right), (90^\circ < \psi'_3 < 180^\circ) \\ \psi'_4 = 180^\circ - \arctan\left(\frac{M_x}{M_y}\right), (180^\circ < \psi'_4 < 270^\circ) \end{array} \right.$$

方位角 $\psi = \psi' - D$

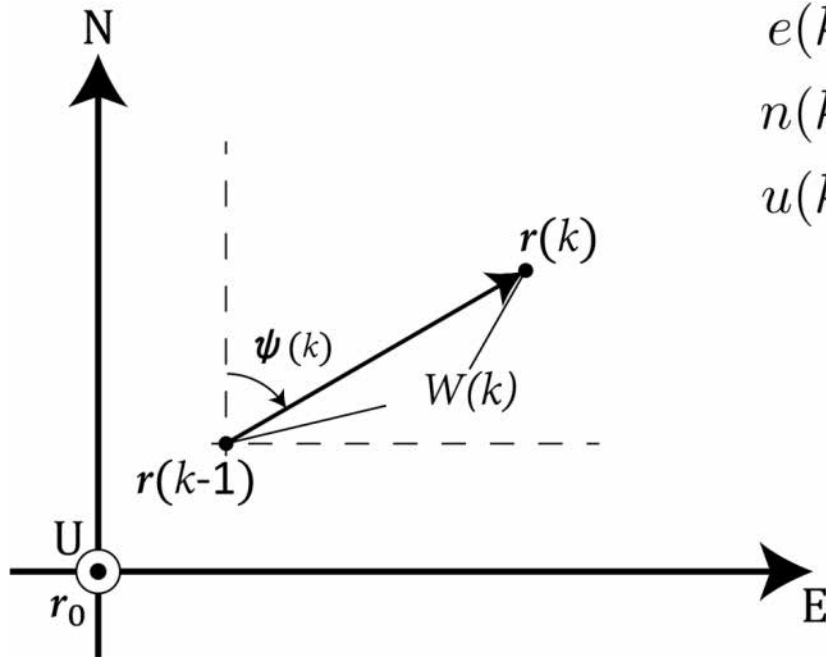
PDR測位アルゴリズム



歩行者の位置モデル

歩行者位置は歩数 k の関数として表せる

ENU(East-North-Up) 座標系



$$\mathbf{r}(k) = [e(k) \ n(k) \ u(k)]^T$$

$$e(k) = e(k-1) + W(k) \sin(\psi(k)) + w_e(k)$$

$$n(k) = n(k-1) + W(k) \cos(\psi(k)) + w_n(k)$$

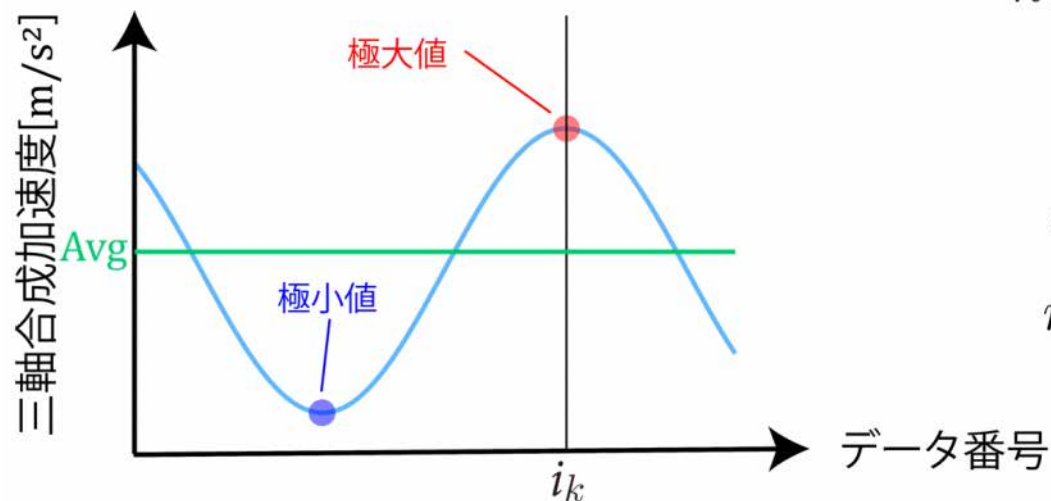
$$u(k) = u(k-1) + \delta u(k-1, k) + w_u(k)$$

$\delta u(k-1, k)$: 歩数 $k-1, k$ 間の鉛直方向の変化量

\mathbf{r}_0	測位開始時の原点
$\mathbf{r}(k)$	k 歩時の歩行者位置
$\psi(k)$	k 歩時の進行方向 (方位角)
$W(k)$	k 歩時の歩幅
$w_e(k), w_n(k), w_u(k)$	k 歩時の雑音成分

歩数・歩幅・進行方向の複合

k 歩目を i_k で判定したとき、直前の方位角を $\psi(k)$ とする → 歩行動作中の方位角(進行方向)



$$e(k) = e(k-1) + W(k) \sin(\psi(k)) + w_e(k)$$
$$n(k) = n(k-1) + W(k) \cos(\psi(k)) + w_n(k)$$



$$e(k) = e(k-1) + \hat{W} \sin(\psi(k)) + w_e(k)$$
$$n(k) = n(k-1) + \hat{W} \cos(\psi(k)) + w_n(k)$$

\hat{W} : 平均の歩幅 [m]

歩行前実験(磁気センサー-キャリブレーション)

実験概要

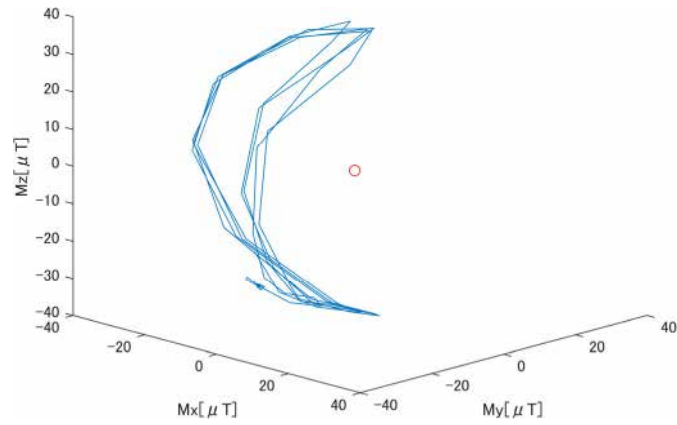
- 端末を8の字に回すことによって、磁気センサーのオフセットを推定する
- 回す回数は5~40回を5回刻み、8パターンを行い、回数による違いをみる

実験条件

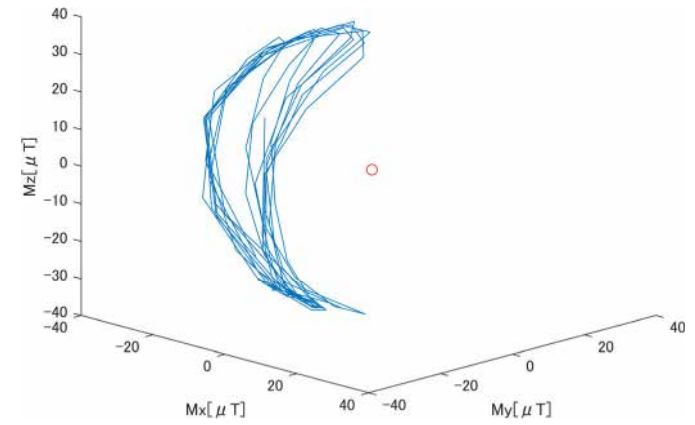
実験日時	2022/06/18 14:12'39"-14:23'37"
実験場所	立命館大学 BKC 研究室内
端末	Google Pixel 5

歩行前実験結果(磁気センサー-キャリブレーション)

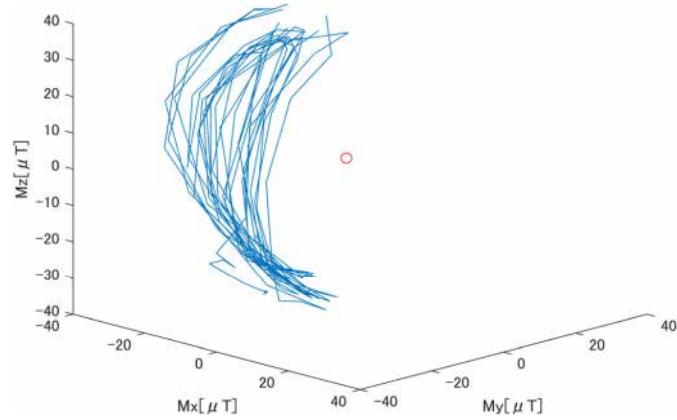
5回



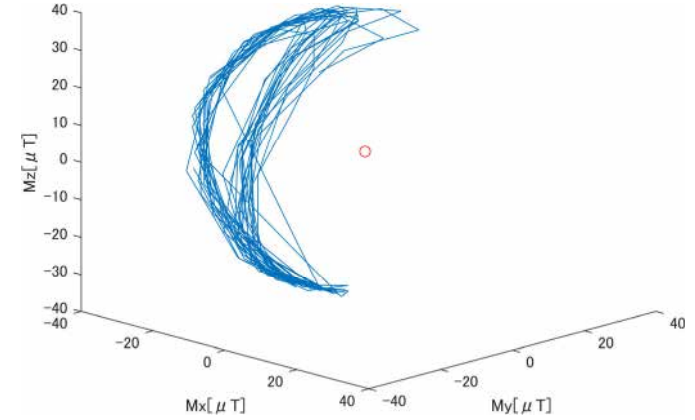
10回



15回

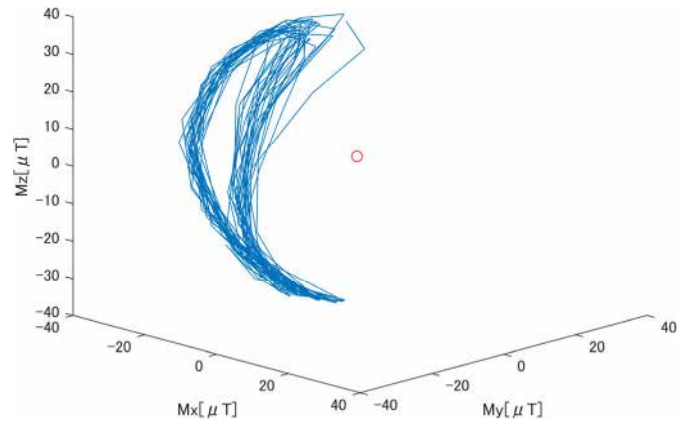


20回

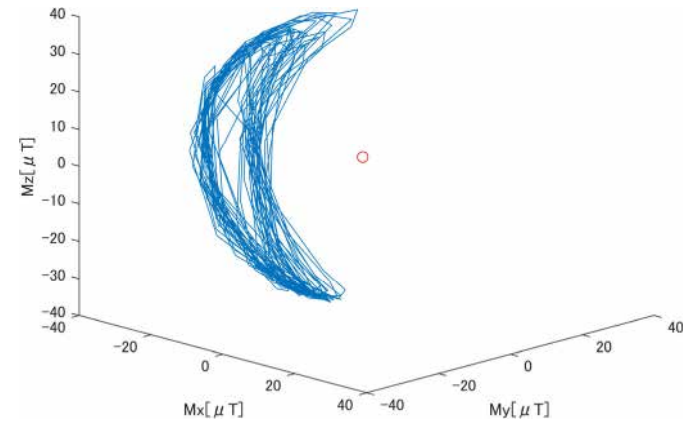


歩行前実験結果(磁気センサー-キャリブレーション)

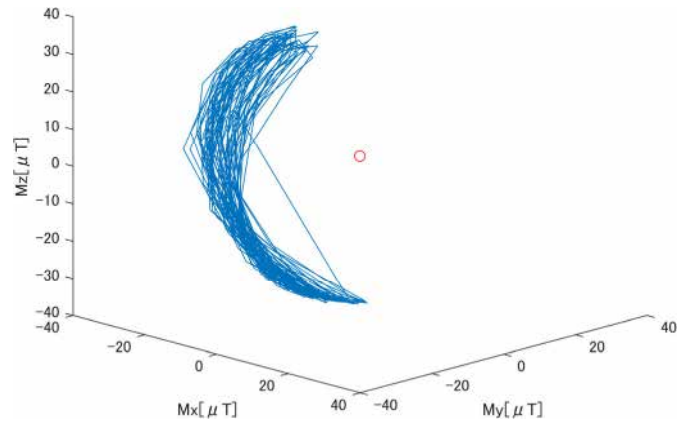
25回



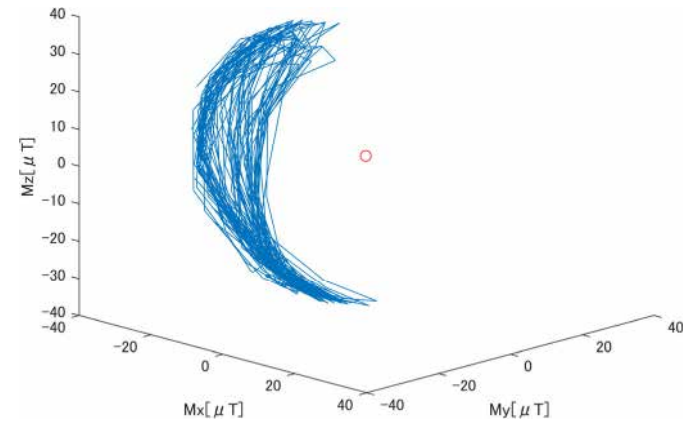
30回



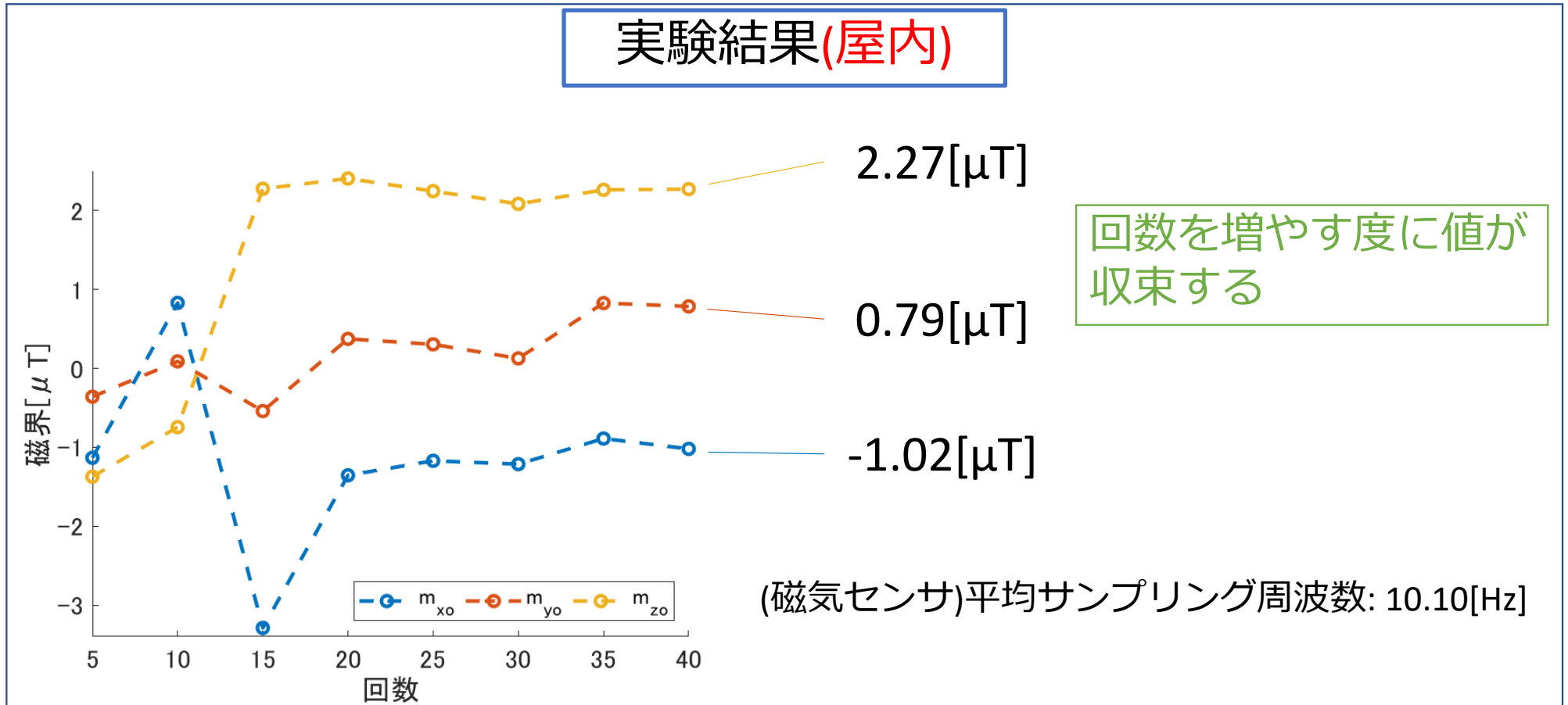
35回



40回



歩行前実験結果(磁気センサ-キャリブレーション)



歩行実験（データ収集→PDR測位）

実験開始時から衛星遮断まで

実験概要

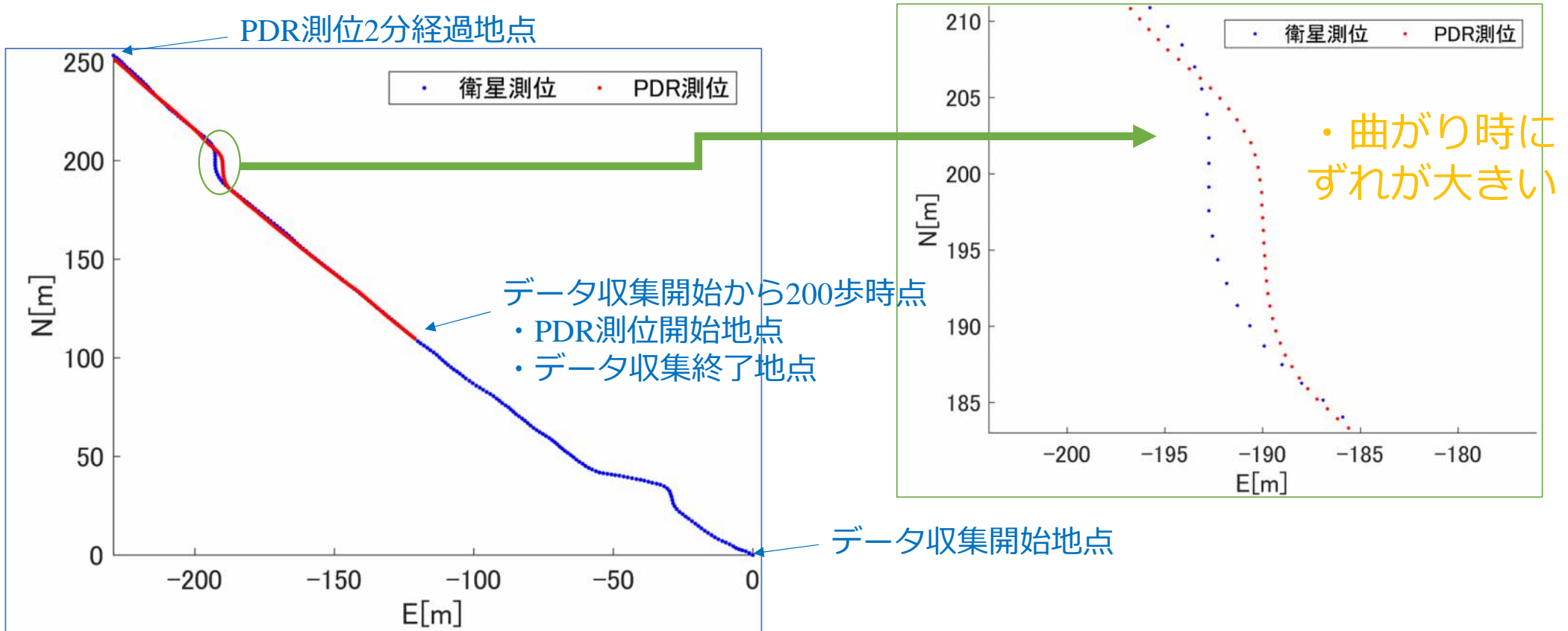
キャリブレーション適用なし

- ・ オープンスカイ環境で行う
- ・ 端末の姿勢をY軸が進行方向，Z軸が鉛直上向きになるように留意する
- ・ 200歩歩行後(データ収集)を行った後，続けて2分程度歩行(PDR測位)する
- ・ PDR測位中も衛星測位によって現在位置を求め，衛星測位の歩行者位置を真値とし，PDR測位の精度を検証する

実験条件

実験日時	2022/06/26 19:45'15"-19:48'59"
実験場所	立命館大学 BKC 屋外
端末	Google Pixel 5
衛星測位(API)間隔	1[s]

歩行実験結果 (データ収集→PDR測位)



歩行実験（データ収集）

データ収集結果

PDR測位に利用する値

データ収集時間	107.0[s]
推定した歩数(真値200[歩])	199[歩]
平均三軸合成加速度	9.81[m/s ²]
(加速度)平均サンプリング周波数	10.5[Hz]
(極大値) 平均値, 標準偏差	12.3[m/s ²], 0.38[m/s ²]
(極小値) 平均値, 標準偏差	6.9[m/s ²], 0.38[m/s ²]
衛星測位による移動距離	350.7[m]
平均歩行者速度	1.57[m/s ²]
平均歩行間隔	0.53[s]
推定平均歩幅	0.83[m]

歩行実験 (PDR測位)

PDR測位結果

PDR測位時間	117.0[s]
APIによる実験開始地点(緯度,経度)	34.982[°],135.964[°]
偏角(D)	7.83[°]
(加速度)平均サンプリング周波数	10.6[Hz]
(磁気) 平均サンプリング周波数	10.0[Hz]
測位終了後の衛星測位との誤差(EN座標)	2.18[m]

目標精度内ではあるが、複雑な経路やPDR測位時間延長によって誤差が大きくなると考えられる

考察

○曲がり時の誤差が大きい

- ・ 曲がっている最中の方位角が進行方向と判定されている
- ・ 実験条件(端末の持ち方)が実用的ではない

○平均の歩幅を利用しているので、歩き方の変化に対応できない

- ・ 歩く速さが変わった場合は誤差が大きい

○精度向上のために

- ・ 進行方向: 任意の端末姿勢でも行えるようにする
- ・ 歩幅: 一歩ごとに推定する