

ARToolKit を用いたヒューマノイドロボットのモーション推定

Motion Estimation for Humanoid Robot Using ARToolKit

清水彰一 藤田征士 草富省吾 伊藤孝浩 藤吉弘巨

Shoichi Shimizu, Masashi Fujita, Shogo Kusatomi, Takahiro Ito and Hironobu Fujiyoshi
中部大学

Chubu University

shiyou@vision.cs.chubu.ac.jp

Abstract

The RoboCup SSL Japanese teams have proposed a new league that uses humanoid robots and a global vision system. The humanoid robot is able to execute motions by selecting them from a list implemented in advance. While the humanoid robot is moving, it cannot change the motion. Therefore, it is important to estimate the motion by observing the humanoid robot using global vision systems. We propose a method of motion estimation for humanoid robots using ARToolKit. Our method uses the ARToolKit to obtain this observed information, which includes the position and pose of the humanoid robot. We show that the proposed method can estimate the motion within 15 frames from the frame in which the current motion was started.

1 はじめに

ロボカップ小型リーグの日本チームは、小型リーグの次のステップとして、ヒューマノイドロボットとグローバルビジョンシステムを用いた新しいリーグを提案している [Japanese SSL teams, 2007]。グローバルビジョンシステムを用いることで、広い領域の状況を一度に知ることが可能となり、ヒューマノイドロボットに搭載されているローカルビジョンの視野の狭さを補うことができる。グローバルビジョンを用いて状況把握を行うことで、戦略の幅を広げ、人間との対戦に向けヒューマノイドロボットの製作と制御法の向上が期待できる。

小型のヒューマノイドロボットを制御する手法には、モーションベースの手法 [Friedmann, 2006] が一般に用いられている。モーションベースの手法は、一度モーションが始

まると、そのモーションが終了するまで他のモーションを受けつけないという問題点がある。そこで我々は、敵のモーションを考慮に入れた戦略を作成するために、敵のモーションを初期段階で推定する手法を提案する。モーションベースの手法では、同じモーションの動作は毎回同じになるはずであるので、ビジョンシステムによって観測したモーションと予め登録しておいたモーションを DP マッチングで比較し、ヒューマノイドロボットのモーション推定を行う。

提案するシステムでは、ロボカップ小型リーグと同様にヒューマノイドロボットの頭部にマーカを設置し、ID 認識と位置・姿勢推定を行う。ロボカップ小型リーグではマーカの色情報よりロボットの ID 認識、位置・方向を推定しており、高精度に向きや ID 認識を行う手法が提案されている [Murakami, 2003][Ball, 2004][Bruce, 2003][Shimizu, 2005]。しかし、ヒューマノイドロボットの頭部に取り付けられたマーカの認識、位置・姿勢推定をする場合、マーカは 3 次元空間中で回転と移動をするため、今までの推定法を適応することは困難である。そこで我々は、1 台のカメラのみでマーカ認識と位置・姿勢推定を行うことができる ARToolKit [Kato, 1999] を使用することで、ヒューマノイドロボットの観測データを取得する。

2 Small Size robot League next generation (SSLng)

グローバルビジョンシステムはフィールド上の情報をリアルタイムで得ることが可能である。これらの情報から戦略を作成し、命令をロボットに送信することでスピーディーな試合が展開される。このようなビジュアルフィードバックによるロボット制御技術はロボカップ小型リーグですでに確立されている。現在提案されているヒューマノイドロボットを用いた新しい小型リーグ SSLng では、ロボカップ小型リーグで使用している戦略や、ビジョンシステムなどを利用することで、新しいリーグを容易に立ち

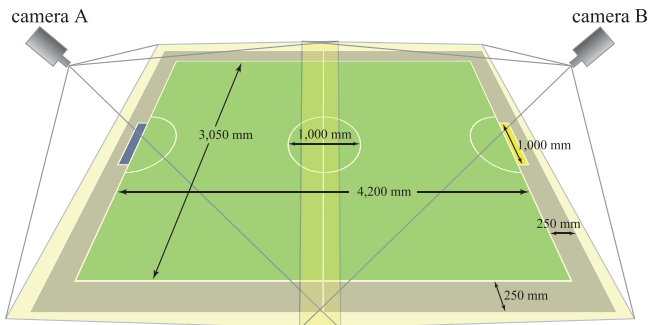


Figure 1: SSLng のフィールド

上げることができる．この新しいリーグのロボットは統一規格であり，4 足リーグのチームも容易に参加することができると思われる．以下に，SSLng の特徴を示す．

1. 4 軸ホイールの代わりにヒューマノイドロボットを 5 台使用する．
2. 使用するロボットは，統一規格で作成され，すぐに入手できるものとする．また，チームでオリジナルのロボットの作成も可能とする．
3. 現在のグローバルビジョンシステムの代わりに，図 1 に示すようにカメラを設置する．基本的に，カメラの台数は 2 台とする．
4. 共有ビジョンシステム (カメラも含めて) を委員会が提供する．ロボットの位置と姿勢，ボールの位置の情報を得ることが可能である．また，チーム独自のビジョンシステムも使用可能とする．

このように，SSLng では，ヒューマノイドロボットの状態をグローバルビジョンで検出し，戦略を作成することが要求される．本稿では，SSLng の実現に向け，マーカをヒューマノイドロボットの頭部に設置し，ARToolKit を用いたヒューマノイドロボットの ID 認識と位置・姿勢推定を行う手法を提案する．また，ヒューマノイドロボットの動作はモーション毎に一定であることから，モーション推定法も提案する．

3 ARToolKit を用いたグローバルビジョンシステム

ヒューマノイドロボットのマーカは 3 次元空間を移動し，回転するため，1 台のカメラからヒューマノイドロボットの位置と姿勢を推定することは難しい問題となる．そこで，提案手法では ARToolKit を用いて，ヒューマノイドロボットの ID 認識と位置・姿勢推定を行う．ARToolKit は，拡張現実感の世界で使用されているシステムであり，予め登録しておいたマーカを認識し，位置と姿勢推定することで，画像上に仮想物体を表示するシステムである．

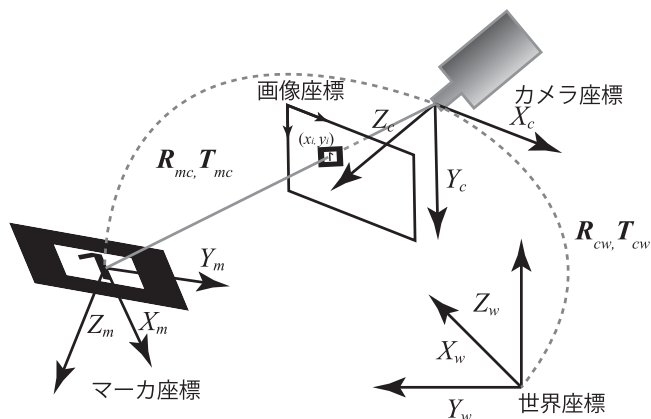


Figure 2: 各座標系の関係

ARToolKit を用いることで，1 台のカメラから ID の認識，マーカの位置と姿勢推定を行うことが可能となる．

ARToolKit は，図 2 に示すマーカ座標系とカメラ座標系を持つ．ARToolKit の出力は，マーカ座標とカメラ座標間の回転行列 R_{mc} と平行移動ベクトル T_{mc} であり，マーカの姿勢と位置である．マーカ内部のパターンは，ID 認識するためのパターンであり，ユーザが任意に作成することができる．図 3 に，我々が使用するマーカを示す．ARToolKit では，色情報も用いたパターン認識を実現しており，現行のロボカップ小型リーグと同様に，色毎にチームを分けて使用することが可能である．また，活字認識の分野で高精度に認識できるように設計された OCR 用の活字 (OCR-B フォント) を背番号としてマーカにつけることで，ロボットの ID 認識を行うことが可能である．

3.1 ID 認識

ARToolKit の ID 認識はテンプレートマッチングを用いて行う．まず，図 4(a) の入力画像からマーカの正方形の 4 頂点を検出する．次に，この 4 頂点間の 1 辺の長さが既知であることと検出した 4 頂点の関係から，式 (1) の H を求める．

$$\alpha \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

この式は，マーカ座標系 $X_m - Y_m$ 平面内の点 $(X_m, Y_m, 0)$ を，画像座標系上の点 (x_i, y_i) に変換する．したがって，マーカ内部のパターンは式 (1) により，図 4(b) の正規化画像を得る．この正規化を行った画像と予め登録してあるパターンとテンプレートマッチングをすることでマーカの ID を識別する．また，登録パターンを 90 度ずつ回転したパターンも登録しておくことにより，マーカの回転に対する不変性を得る．



Figure 3: 黄色と青のマーカ

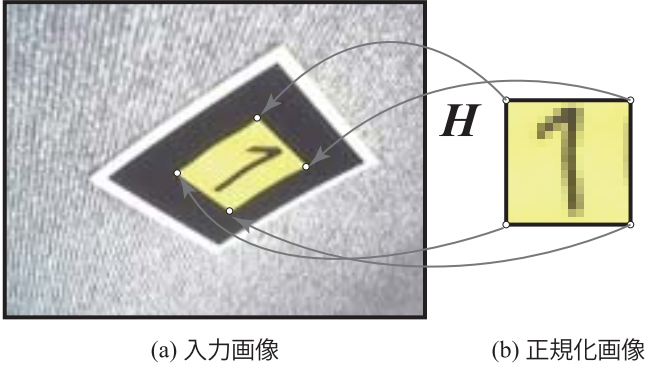


Figure 4: パターンの正規化

3.2 マーカ位置と姿勢推定

ARToolKit は 1 台のカメラを用いて、カメラ座標のマーカの 3 次元位置 $T_c = [X_c Y_c Z_c]^T$ と姿勢 R_c を出力する．図 5 に ARToolKit を用いて ID 認識とマーカの位置・姿勢を推定した例を示す．黄色のマーカを球，青色のマーカを立方体で表示し，球と立方体の数が ID のナンバーと対応する．

ARToolKit によって得られる 3 次元位置は，カメラ座標系であるので，ヒューマノイドロボットがサッカーを行うためには，世界座標系へ変換する必要がある．図 2 に示すようにカメラ座標系から世界座標系への変換は，回転行列 R_{cw} と平行移動ベクトル T_{cw} から行うことができる．これらのパラメータは，予めカメラキャリブレーションによって取得しておく．世界座標のマーカの 3 次元位置 $X_w = [X_w Y_w Z_w]^T$ を以下の式を用いてカメラ座標系の 3 次元位置 $T_c = [X_c Y_c Z_c]^T$ から求める．

$$X_w = R_{cw}T_c + T_{cw} \quad (2)$$

また，マーカの向き θ は，マーカ座標系の単位ベクトル $e = [1 0 0]^T$ と R_{cw} と R_{mc} ，世界座標系に変換された単位ベクトル $e' = [e'_x e'_y e'_z]^T$ を用いることで求められる．

$$\theta = \arctan(e'_x, e'_y) \quad (3)$$

$$e' = R_{cw}R_{mce} \quad (4)$$

このマーカの 3 次元位置と向きがヒューマノイドロボットの位置と向きとなり，サッカーの戦略を作成するために使

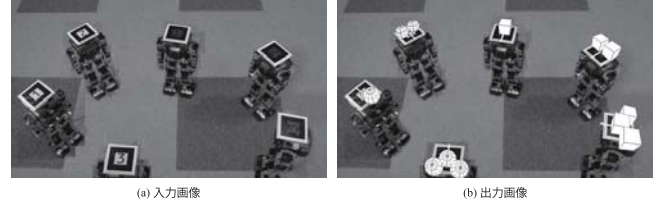


Figure 5: ARToolKit を用いた ID 認識と位置・姿勢推定

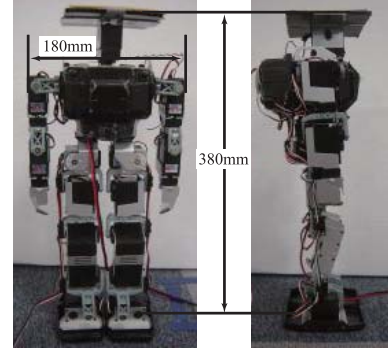


Figure 6: ヒューマノイドロボット

用する．本提案手法では，これらの情報を用いることで，モーションを観測し，推定を行う．

4 ロボットのモーション推定

多くのロボットはモーションベースで制御される．この場合，モーションは毎回同じ動作となる．そこで我々は，ARToolKit を用いてロボットを観測し，得られる頭部の 3 次元位置情報から DP マッチングを行い，ヒューマノイドロボットのモーションを推定する手法を提案する．

4.1 ヒューマノイドロボットのモーション

図 6 に我々が使用するヒューマノイドロボット (近藤科学社製 KHR-1HV) を示す．このヒューマノイドロボットは，歩行や旋回などのモーションが提供されており，ヒューマノイドロボットの製作知識を必要とせず，SSLng リーグに参加することが期待される．

提供されているモーションの中で，サッカーに必要なモーションは，歩行，サイドステップ (左右)，旋回 (左右) の 5 種類となる．これにキックの動作を加えた計 6 種類のモーションがサッカーに最低限必要である．したがって，これらのモーションを推定することにより，サッカーを行うヒューマノイドロボットの状況を把握することができる．

4.2 モーションの観測

ARToolKit の出力から式 (2) と式 (3) を用いて，世界座標のヒューマノイドロボットの位置と向き $X' = [X_w Y_w Z_w \theta]^T$ を算出する．モーションを推定するための観測データとして，各変位 $\Delta X = [\Delta X_w \Delta Y_w \Delta Z_w \Delta \theta]^T$

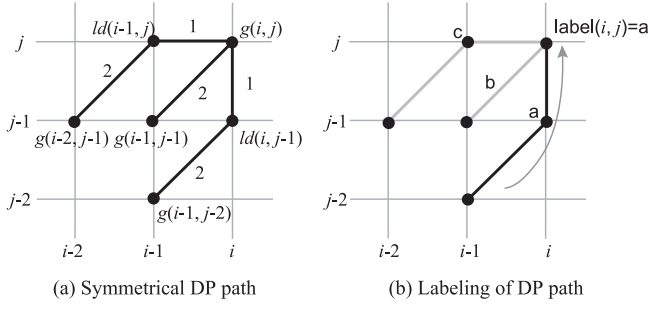


Figure 8: 対称 DP パス

を次式から計算する．

$$\Delta X_i = X'_0 - X'_i, \quad (i: \text{フレーム番号}) \quad (5)$$

図 7 に各モーションの観測データを示す．この図から，各モーション間で類似性が低く，分離することが可能であると推測できる．

4.3 DP マッチングを用いたモーション推定

DP マッチングは，異なる二つの時系列信号の類似度と最適な対応を求める手法であり，音声認識等の，さまざまな分野で利用されている．DP マッチングは非線形の伸縮により，長さの異なるパターンの類似度を計算することができる[Sakoe, 1978]．

提案手法では，データの始点を固定しない DP マッチングを行う．以下に，DP マッチングの適用法について示す．

DP マッチングにおける始端領域においては，式 (6) に示すような初期値を設定する．

$$\begin{cases} g(i, 0) = 0 & (i = 0, 1, \dots, I) \\ g(0, j) = \infty & (j = 1, 2, \dots, J) \end{cases} \quad (6)$$

DP マッチングに用いる DP パスを図 8(a) に示す．各格子点 (i, j) における累積距離 $g(i, j)$ を次式より求める．

$$g(i, j) = \min \begin{cases} g(i-1, j-2) + 2 \cdot ld(i, j-1) & : (a) \\ g(i-1, j-1) + ld(i, j) & : (b) \\ g(i-2, j-1) + 2 \cdot ld(i-1, j) & : (c) \end{cases} + ld(i, j) \quad (7)$$

ローカルディスタンス $ld(i, j)$ は式 (8) より求める．

$$ld(i, j) = \|\Delta X_i - \Delta X_j\| \quad (8)$$

このとき使用するデータは，初期フレームのヒューマノイドロボットの向きを軸とするように，観測データを変換したものをを用いる．格子点 (i, j) までに選択された経路の長さを式 (9) より求める．

$$c(i, j) = \begin{cases} c(i-1, j-2) + 3 & \text{if (a)} \\ c(i-1, j-1) + 2 & \text{if (b)} \\ c(i-2, j-1) + 3 & \text{if (c)} \end{cases} \quad (9)$$

以上の操作を各格子点にて行い，式 (10) より累積距離をそれまで辿った経路の長さ $c(i, J)$ で正規化する．

$$G(i) = \frac{g(i, J)}{c(i, J)} \quad (10)$$

予め測定しておいたモーションを登録パターンとする．推定するモーションは，歩行(前)，サイドステップ(左右)，旋回(左右)，キックの 6 種類とする．ARToolKit を用いて観測した入力パターンと全登録パターンとの DP マッチングを行う．そして，累積距離が最小となる登録パターンのモーションの累積距離 G_0 と次に小さい登録パターンのモーションの累積距離 G_1 が以下の条件を満たすとき，累積距離が最小となる登録パターンを入力パターンのモーションとして決定する．

$$G_0 < G_1 \times \beta \quad (11)$$

β を低く設定することで信頼度の高い結果を出力することになる．この条件を満たさないときは，登録パターンになりモーションとして該当なしとする．例えば，ヒューマノイドロボットが倒れた際などは，該当なしとして判定される．

5 実験

提案手法の有効性を図るため，モーション推定実験，モーションに必要なフレーム数の評価，連続モーションによるモーション推定実験を行う．本実験では，式 (11) の β を 0.7 として設定して，モーションの推定を行う．

5.1 モーション推定

提案手法を評価するために，モーションの推定実験を行う．各モーションを上下左右にヒューマノイドロボットの方向を変更して，10 回ずつ測定する．したがって，モーションの合計は 40 シーンとなる．フレーム数は，全シーン共に 120 フレームとする．各モーションの 1 シーン目を登録パターンとして登録し，1 シーン目以外と DP マッチングを行い，モーションの推定を行う．

提案手法によってモーションを推定した結果，100% の識別率を得ることができた．これは，入力するパターンが登録パターンと同じフレーム数であるため簡単な問題であるといえる．

5.2 入力フレーム数と認識率の評価

モーション推定では，いかに早い段階でモーションを推定できるかが重要となる．したがって，少ない入力フレームでモーションが推定されるべきである．そこで，入力フレーム数を 10 フレームから全フレーム (120 フレーム) に変化させたときの認識率を評価する．表 1 にモーション推定に必要なフレーム数を示す．この結果から，モーションは動作の始まりから 15 フレーム以内で推定できることが

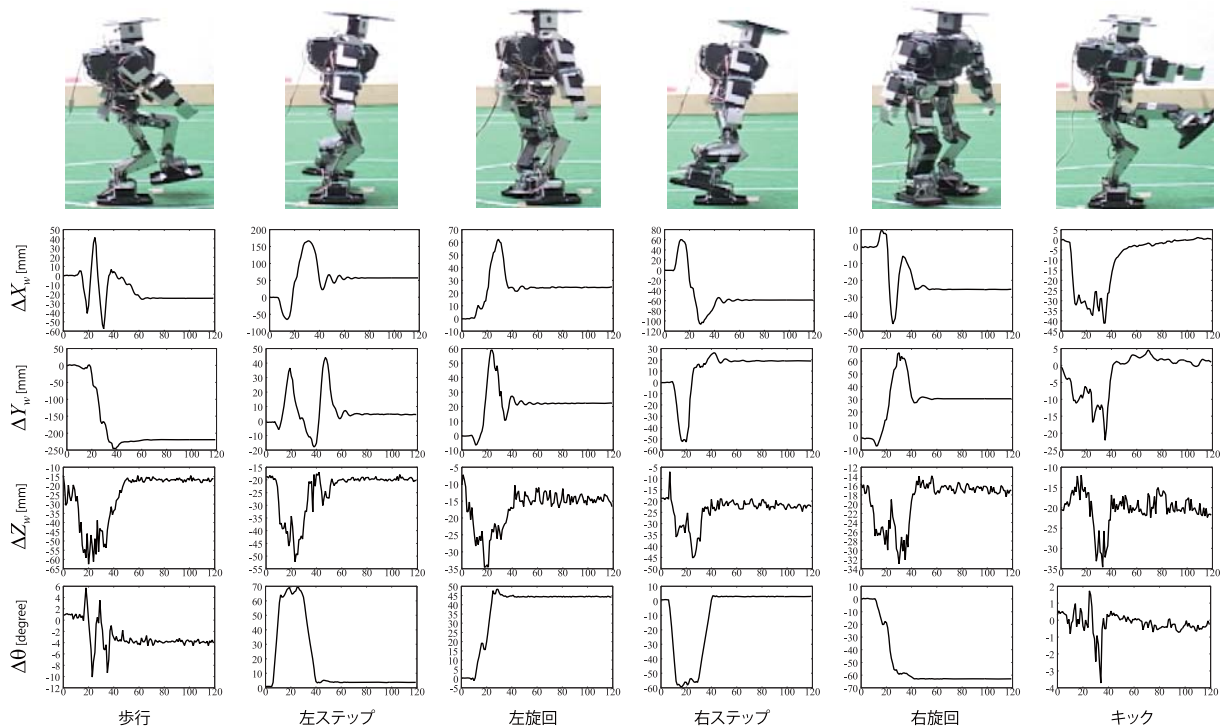


Figure 7: 各モーションの観測データ

Table 1: モーション推定に必要なフレーム数

歩行	左ステップ	左旋回	右ステップ	右旋回	キック
10.6	10.1	14.7	10.4	12.0	10.2

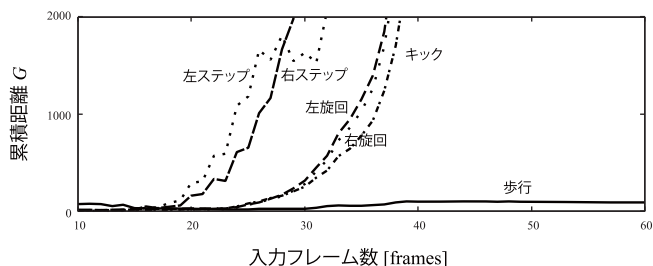


Figure 9: 入力パターンが歩行のときの累積距離

わかる．したがって，敵ロボットのモーション開始後 15 フレームで，モーションを推定可能であり，敵のモーションを考慮に入れた戦略を作成することが可能となる．また，図 9 に示すように，フレーム数が増えるにつれ累積距離 (式 (10)) が他の登録モーションより大幅に小さくなるため，高精度にモーション推定が可能である．また，式 (11) を満たす必要があるため，入力フレームが少ない場合でも，信頼度の高いモーション推定が期待できる．

5.3 連続モーションの推定

実際のシーンでは，モーションは連続して観測される．そこで，二つのモーションと待機からなる連続モーションについて推定を行う．

図 10 にモーションを推定した結果を示す．11 フレーム

から 86 フレーム目まで，歩行モーションとして推定されており，143 フレームから 214 フレームは左旋回と推定されていることがわかる．また，歩行と左旋回の間には待機状態が含まれていることもわかる．しかし，待機モーション中に式 (11) の条件を満たさないため，該当なしと判定されているフレームがある．これは，キックモーションの x 軸と y 軸の変化が少なく累積距離が小さいため，待機モーションと有意な差が表れなかったためである．連続したフレームであることを考慮に入れることで，この問題を解決することが可能であると考えられる．以上の結果から，連続したモーションにおいても提案手法は誤認識が少なくモーションの推定を可能とすることを示した．

6 まとめ

本稿では，DP マッチングを用いてロボットのモーション推定を行う手法を提案した．ARToolKit を用いることにより，ヒューマノイドロボットの頭部に取り付けたマーカの認識と位置・姿勢推定を行い，それらの情報を DP マッチングのパターンとして使用した．入力パターンと登録パターンのフレーム長が同じ時，モーションの推定は 100 % 成功することを確認した．また，初期フレームから 15 フレーム以内にモーションの推定が可能であることを示した．したがって，敵のモーションが動き始めから 15 フレーム以内にわかり，そのモーションにしたがって戦略を作成することが可能となる．

今後の予定として，カメラの解像度を FULL HD (1920x1080 pixels) にして，実際のフィールドサイズで

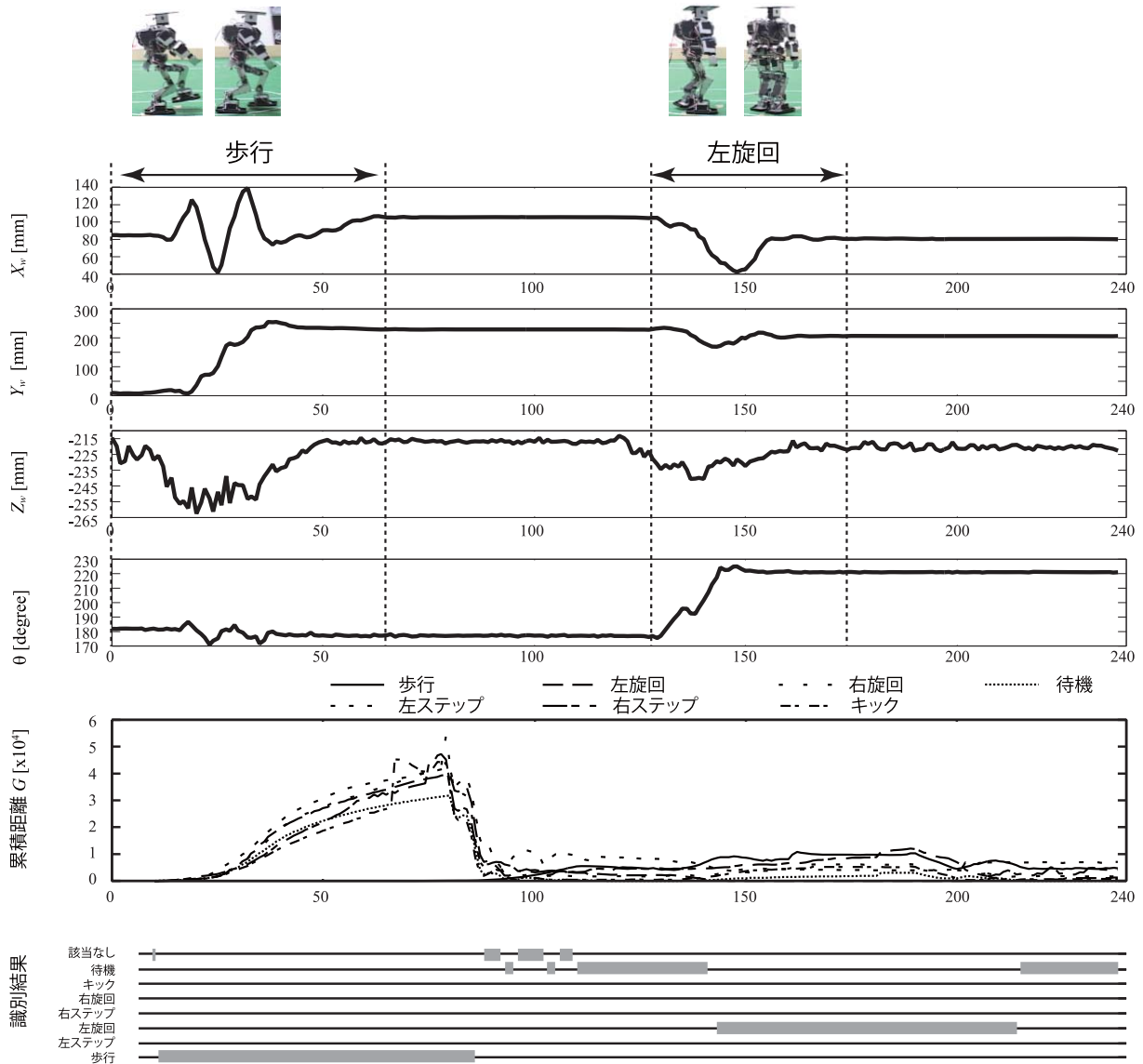


Figure 10: 連続した入力からのモーション推定

の実験である。

参考文献

[Japanese SSL teams, 2007]

SSL Next Generation : <http://www.aichi-pu.ac.jp/ist/lab/narulab/indexNewSSL.html>

[Friedmann, 2006] M. Friedmann, et al.: Versatile, high-quality motions and behavior control of humanoid soccer robots, Proc. of the Workshop on Humanoid Soccer Robots of the 2006 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 9–16, 2006.

[Murakami, 2003] K. Murakami, S. Hibino, Y. Kodama, T. Iida, K. Kato, S. Kondo and T. Naruse: Cooperative Soccer Play by Real Small-Size Robot, RoboCup 2003: Robot Soccer World Cup VII, Springer, pp. 410–421 2003.

[Ball, 2004] D. Ball, G. Wyeth and S. Nuske: A Global Vision System for a Robot Soccer Team, Proc. of the

2004 Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), 2004.

[Bruce, 2003] J. Bruce and M. Veloso: Fast and Accurate Vision-Based Pattern Detection and Identification, Proc. of ICRA-03, the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (ICRA'03), 2003.

[Shimizu, 2005] S. Shimizu, T. Nagahashi, and H. Fujiyoshi: Robust and Accurate Detection of Object Orientation and ID without Color Segmentation, Proc. of ROBOCUP2005 SYMPOSIUM, 2005.

[Kato, 1999] H. Kato, M. Billingham: Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of the 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR 99), pp. 85–94 1999.

[Sakoe, 1978] H. Sakoe and S. Chiba: Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition, IEEE Trans. on ASSP, Vol. 26, No. 27, pp. 43–49, 1978.