建築作業における運搬経路分析のための3次元座標取得インタフェースシステムの開発

石岡宏晃 ——— * 1

キーワード:
作業測定, 経路分析, 位置情報, トレーサビリティ, 運搬速度研究

Keywords:
Working measurement, Path analysis, Positional information, Data traceability, Velocity research

1. はじめに

移動経路の分析は、建築計画分野における群衆歩行の研究や、建築防災分野の避難行動の研究において、以前から実施されてきた。

これらの研究では一般的に、人の行動を動画により記録し、画像処理プログラムによる自動トラッキングにより時系列的な座標データを取得している。人の移動経路に関する基礎データから人の行動の傾向が分析され、マルチェージェントシステムとして構築された歩行シミュレータ¹⁾により、設計の事前評価が可能となっている。

著者は前述した技術は建築現場内の移動経路分析にも効果的だと考えているが、建築現場に応用するには以下のような課題がある。

一つは建築現場内の作業者の行動は歩行のみではなく、資材の取り回しや道具を使用した組み立てなどの他の動作と共にひとつのプロセスを構成している点である。加えて、建築現場内では歩行よりも所持する資材の影響を受ける「運搬」が重要となる。プロセス内の運搬と、独立した運搬との共通点と差異を分析する必要がある。

もう一つは自動トラッキングの困難さである。作業姿勢は立位に限定されず、また板状資材の取り回しの際等には身体部位の遮蔽が起り、トラッキングが切断されてしまう状況が多く発生する。

最後に、計測機器の設置にも制約が多い。屋外のため天候の考慮が必要であるとともに、作業を計測するための計測機器は仮設物に設置されることが多いため、工事の進捗に伴う盛り替えの手間や、工事に伴う振動による画像のブレを考慮しなければならない。

著者は前述した課題を考慮したうえで、建築現場内の運搬経路分析のための3次元位置座標データ取得の支援技術構築を目指す。本報では動画による記録を前提とした、手作業による情報抽出を実施するインタフェースプログラムを構築したのでその内容を示す。

本手法を用いて建築現場内の運搬の基礎データを整備することにより、作業者の安全性、作業の効率性に対する影響因子の分析が可能となる。それら影響因子を考慮した作業計画は、建築現場内の作業環境向上につながると考えられる。

INTERFACE SYSTEM FOR CAPTURING WORKERS' 3D PATHS IN THE CONSTRUCTION PROCESSES

Hiroaki ISHIOKA ——— * 1

Personnel paths of workers are difficult to capture because there are many objects obscure crew from view in construction site. Today, many devices to capture were supplied but they are too big, expensive, or complicated to use in construction site.

In this paper, the author developed interface system for capture personnel paths of crew. It needs only full view movie of area to analyze. Firstly, the system creates time series pictures from video. Secondary, the system calculates 3D coordinates position from two user's clicks on picture displayed into interface. Lastly, the system saves text data and picture data.

2. 関連する既往の取組み

人の3次元位置情報を取得する技術は表1に示すように分類することが可能であり、本報の手法は分類3に関連する。

人力による計測は、建築現場内の作業を測定する手法に関する70年代以降の各研究機関において実施された研究内容をまとめ、1990年に作業能率測定指針²⁾として日本建築学会が取り纏めている。

この計測手法を用いて三根ら³⁾は作業者の位置情報に関して工区や部位等のエリア名で記録し稼働率や工程を分析している。同手法では計測間隔は粗くなるため、経路を分析するには情報が不足する。

外部センサ計測については、人間の群衆歩行行動の研究として計画分野ならびに防災分野で実施されている。木原ら⁴⁾は群衆歩行を動画として記録し、画像処理プログラムにより人の頭部を自動トラッキングすることで歩行経路を取得している。自動トラッキングにはマッチングパターンとする身体部位が連続的に観測されることが前提であり、遮蔽の多い建築現場には不向きである。

近年発展する計測技術を用いた手法として、石田⁵⁾は3次元のデプスセンサを用いて3次元空間内の作業者の骨格情報を連続的に取得している。当報告執筆時現在において計測範囲・機器サイズ・価格等の面において建築現場に用いるために適する機器はなく、今後のデプスセンサの発展を待つ必要がある。

蔡ら⁶⁾は現場における実施性に着目した現場の計測システムを提案している。タワークレーンに設置した複数のビデオカメラにより得られた画像を合成して5秒間隔の高層建築の施工階の画像を取得する技術であり、施工階の状況を逐次記録する技術として有効であ

表1 人の3次元位置情報取得技術の分類

	分類名	概要
分類1	人力による計測	人による計測 (センサ不使用)
分類2	外部センサ計測	外部環境にのみ受信用センサ設置
分類3	マーカ補助を用いた外部センサ計測	外部環境に受信用センサ設置 計測対象に特定形状のマーカ設置
分類4	装着センサ計測	人へのみ受信用センサ設置
分類5	双方向センサ計測	外部環境と人の双方にセンサ設置

^{*1} 清水建設株式会社 研究所 研究員
(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

^{*1} Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation

る。ただし、ほぼ直上からの画像となるため作業姿勢や所持品に関する情報が抜け落ちやすい点は注意が必要である。

マーカ補助を用いた外部センサ計測については、加戸ら⁷⁾はビジュアルタグを写真に写しこむことで部材の3次元寸法を計測する技術を示している。同手法は寸法既知の2組の並行な線分が画像に写しこまれていれば応用可能であるため、直交する部材の多い建築現場では適用性が高い。本報の手法においては、現場内の寸法既知の点を基準とした同様の写真測量技術を用いている。

3. システムの構成

3.1 システム構成

システム構成を図1に示す。本システムは建築作業風景を記録した動画を静止画として切り出す静止画作成プログラムと、作成された静止画を時系列的に順次ディスプレイに表示し、ディスプレイへのクリック動作を検知して3次元座標を計算する位置・動作選択インタフェースプログラムとにより構成される。

本システムへの入力データとなる動画には、座標系変換の基準となる寸法既知の四角形（以下、基準形状）を計測対象の平面図などから選定し、写しこむ必要がある。また、本システムは人間の目視による位置と動作の判別を前提とするシステムであるため、作業者の姿勢や所持品などが視認できるよう機器選定および設置位置を考慮する必要がある。一般的なAVCHD方式のハンディカムであれば、15m程度までは十分に所持品まで視認可能であった。

静止画作成時には、レンズ歪み補正のためのカメラキャリブレーションデータが必要となる。本報ではZhangの手法を用いた^{注1)}。

位置・動作選択インタフェースプログラムでは、はじめに基準形状の4点を選択することでキャリブレーションデータ内のカメラ位置と回転の補正を実施する。補正を一回のみに省略するため、カメラ固定による動画撮影が推奨される。

データ作成者は、ディスプレイ上の計測対象物を目視で確認し、マウスクリックにより位置および動作分類等を選択する。

図1 システム構成の概要

3.2 静止画作成のタイムスパン

運搬経路の分析には、データ作成の効率性も考慮したタイムスパンでの静止画作成が必要となる。30代男性の平均歩行速度は1.5m/sec程度⁸⁾であり、かつ施工現場の事前調査により経路が十分に観察可能であるという判断から、静止画の作成間隔を1秒とした。

3.3 インタフェース作業の効率化

本システムではデータ作成の効率化のために、位置選択後の動作分類や作業対象物の選択肢を、静止画上へポップアップさせる方法

を採用することで、キーボード操作を最小限とした。図2に入力操作時の選択肢ポップアップの例を示す。

図2 選択肢のポップアップ表示例

図3 基準面座標からの高さ座標の位置関係の模式図

3.4 高さ座標の計算方法

単眼カメラの静止画から基準面上の点を幾何学的に求めることができ、2点の指定とカメラ座標の3点を用いた三角形の相似により高さが計算できる。各座標の位置関係を図3に示す。

実座標系におけるカメラ座標 $P_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$ は、キャリブレーションデータ内のカメラの外部パラメータである回転行列 R と並進ベクトル T から次式の3次元アフィン変換により計算可能である。

$$P_c = R P_o + T \quad \dots (1)$$

ただし P_c : カメラ座標 P_o : 原点座標
 R : 回転行列(3×3) T : 並進ベクトル (3×1)

画面上で作業者の足元のピクセルを選択することで、カメラ座標 $P_c = (X_c, Y_c, Z_c)$ と、作業者座標 $P_w = (X_w, Y_w, Z_w)$ とを結んだ直線と基準面の交点である $A = (X_a, Y_a, 0)$ を得る。次に作業者座標から基準面へ垂直に下ろした点 $W = (X_w, Y_w, 0)$ を画面上で指定することで、次式により高さが計算できる。

$$Z_w = Z_c |AW| / |AC| \quad \dots (2)$$

クリックする画素のずれはカメラ座標からの角度のずれであるため、遠方の点となるほどずれによる変化量が大きくなる。作業者足元と直下の基準面と思われる位置の2点のクリックでは、計算結果に2回のクリックによる誤差が含まれることになる。

建築現場においては高さ方向の寸法 Z_w が既知である場合が多い。そこで本プログラムでは、クリック回数を省略し誤差を減らすために、 Z_w 既知の場合には高さ Z_w を数値から選択することでクリック動作を省略する。次式により点 W の座標を計算する。

$$X_w = X_a + Z_w / Z_c (X_a - X_c) \quad \dots (3)$$

$$Y_w = Y_a + Z_w / Z_c (Y_a - Y_c) \quad \dots (4)$$

3.5 データのトレーサビリティ

目視判断による分類をおこなう本システムにおいてはその分類結果に疑義が生じた際にデータの信頼性を確認できることが重要であ

る。本システム利用時には、以下に示すデータを保管することでデータのトレーサビリティを確保し、データの信頼性を担保する。

- 1) 作業風景の動画ファイル
- 2) カメラキャリブレーションデータ
- 3) 静止画作成プログラムにより作成した静止画ファイル
- 4) 基準形状データ（実座標と画面上のピクセル座標）
- 5) 作成された時刻-位置-動作のテキストデータ
- 6) クリック位置と5)のデータを描画した静止画ファイル

4. システムの試行

4.1 事例の概要

本システムを弊社実験施設内の仮設足場解体工事において試行した。3段の足場の解体から資材の搬出までが実施された一日の動画記録の内、1700mm×2段、1800mm×8スパン+900mm角の連結部によるL字の枠組足場の解体作業を分析対象とした。平面構成を図4に示す。作業は高工2名による組作業として実施され、27分23秒で解体が完了した。2名はフロア上での資材運搬と足場上での資材解体とに作業を分担していた。前者をA、後者をBと呼称する。解体手順は、2段目から順次1スパンごとに上部床付き布枠→交差筋かい→たて枠の順で解体する流れを基本としながら、適宜その場の状況に応じて数スパンまとめて解体する状況などが観察された。

計測にはハンディカム Canon iVIS HFM32を使用した。1440×810ピクセルの解像度のAVCHD規格の動画を撮影した。作業の全景が俯瞰できる2階廊下に三脚で固定して撮影を実施した。

座標系変換に用いる基準形状には、床面に固定された4000mm×4000mm正方形の鉄板を選定した。

プログラムの実行ならびに作成されたテキストデータの分析には、OSにWindows7Pro 64bit、CPUにIntel Core i7×2、RAMに16GBを搭載したPCを用いた。

4.2 プログラムを使用した際のデータ作成速度

1) 静止画作成プログラム

試行事例とした約27分間の作業を表す静止画の作成時間は、約10分（3枚/秒程度）であった。これはレンズ歪み補正処理にかかる時間に加えて、作成状況確認のために10枚おきに静止画をディスプレイに表示させる描画処理にかかる時間も含まれている。長時間の動画を処理するには更なる高速化が望まれる。

2) インタフェースプログラム

座標データの取得と画像の保存には、足元・高さ選択・動作分類選択・対象部材分類選択・部材数選択・保存可否の確認、の計6クリックが必要となる。

プログラム内のログから操作時間を計算した結果、データ作成開始時点では9.8秒/枚、終了時点では5.7秒/枚であった。長時間のデータを処理するには作業速度を向上させる工夫が必要である。

4.3 作成されたデータ

時刻-位置-動作のテキストデータとして、[日付,時刻,作業名,動作分類,作業対象物,部材数,位置座標(X,Y,Z),足元のピクセル座標(u1,v1),基準面のピクセル座標(u2,v2)]を1行としたテキストのリストを出力した。

クリック位置記録静止画の記録部分の例を図5に示す。ピクセル座標を足元と基準面上の2つの円と線分により描画し、作業者の位

置座標と動作状況をテキストで描画する。

クリックの際に発生する誤差に関して、画像の縦方向の画素から計算される水平距離の10ピクセルごとの変化量を図6に示す。

俯瞰する視点での撮影においては画面の上方のクリックとなるほど変化量が大きくなることがわかる。本事例においてはv=380に設置された仮設足場の床の1段目がv=280,2段目がv=170付近に表示されている。誤差の大きくなる2段目床の作業位置に関しては、1ピクセルの誤差は200mm程度であり、式(2)にある通りこの誤差は $AW/$ と $AC/$ の双方に影響するため相殺され、位置座標への影響は小さい。撮影時の画角が浅くなるような事例や解像度の粗いカメラの場合には画素ズレによる誤差が大きくなるので注意が必要である。

図4 作業環境の平面概要 図5 クリック位置記録静止画（部分）

図6 選択する画素と計算される水平距離の関係

4.4 分析の試行

1) 部材ごとに作業分割

今回収集した詳細な位置情報を作業速度の分析に活用するためには、部材ごとに作業を分割することが有効である。本項では試行的に、ひとつの作業を構成する動作順序の違いは言及せず、ひとつの資材の設置から次の資材の設置までという単純な区切りで作業を分割した例を示す。資材から手が離れたことが観察された時刻を次の作業の開始時刻として作業を分割した。

前述した分割は、動作分類が“Place（設置）”から他の動作へ移行した時刻としてデータリストから検出した。

検出の結果、運搬主体のAは92の作業、解体主体のBは101の作業として分割された。BよりもAの作業数が少ないのは、軽量の部材を複数まとめて運搬するためにAがBの解体を待ったためである。

前述した193の作業ごとの作業時間の分布を図7に示す。11秒から15秒の作業が多く、ペアとしての協調作業であるためAとBの作業時間構成に大きな差がないことが読み取れる。

作業時間の分布を調べることで、平均的作業時間からの増減の影響因子を求めるといふ分析のアプローチをとることが可能となる。

2) 移動経路の分析

移動経路の表示をおこない、個々の経路を観察することにより、作業者の経路選択傾向を分析することが可能となる。

得られた座標データを平面上にプロットした結果を図8に示す。グリッド線は1m 間隔を示し、足場とストックヤードおよび障害物の位置を白い点線の長方形で描画した。図中には193本の経路から1本を強調表示した。強調表示した経路は、Aが実施した交差筋かいの回収とストックヤードへの運搬による27秒間の作業による経路である。白線枠の黒丸が1秒ごとの作業者位置を示し、白矢印が位置の推移を表している。曲線となる経路や位置の停滞の状況が取得できていることがわかる。本事例においては足場とヤードの間の障害物に影響を受けた、直線に近い曲線を描くことが観察された。

データからは昇降階段部という遮蔽の多い位置でも座標が取得できていることが観察された。

足場上の経路が各辺の中心線に対してわずかに偏心している様子が観察される。足場自体が偏心することは考えにくいので、カメラキャリブレーションデータの誤差の影響である可能性がある。

3) 速度の分析

移動と運搬の位置変化量を速度[m/sec]に変換し、その分布を表2に示す。表には2名分の件数を合計したALLと、作業者ごとの件数とを示している。速度分布は作業者により異なることから、平均値ではなく作業者毎に速度を分析する必要があることがわかる。

4) 可視化における4次元表現

作業の傾向を把握する上でデータの可視化は有効である。3次元モデリングソフト内の仮想空間において、XYZおよび色の4次元の表現が可能となる。例としてXYZ座標系にXY座標データと時刻Tデータを当てはめ、作業者ごとに色分けした例を図9に示す。図に示す通り、位置を固定した作業は直線状の点群となり、位置変化の多い作業は面状の点群として観察される特徴がある。4次元表現では認識に多少の慣れは必要となるものの、取得されたデータの相互関係を時間と空間とを関連付けて把握することが可能となる。

5. まとめ

本報では建築作業における3次元座標取得インタフェースシステムの内容を示した。仮設足場作業事例における試行により、本システムによって、ビデオカメラ1台による簡易な測定から、作業者の遮蔽に対応した位置座標取得が可能であることを示した。

今後は本手法を用いた建築作業のデータ収集および評価法の検討により、建築作業における運搬の経路選択・運搬速度への影響因子の分析を進めていく予定である。

参考文献

- 例えば、海老原学、掛川秀史：オブジェクト指向に基づく避難・介助行動シミュレーションモデル，日本建築学会計画系論文報告集，第467号，pp. 1-12, 1995. 1
- 作業能率測定指針，日本建築学会，1990. 2
- 三根直人：鉄筋コンクリート工事における作業管理の適正化に関する研究－型枠工事を中心とする作業管理のシステム化－，早稲田大学博士論文，1992. 3
- 石田航星：モーションキャプチャーによる内装工事の作業分析に関する研究－作業者の運搬経路の3次元計測手法－，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）8063，pp. 125-126, 2014. 9

図7 作業時間の分布

図8 移動経路の平面図表示

表2 移動および運搬における位置変化速度

V [m/sec]	ALL	workerA	workerB
$0 \leq v < 0.5$	262 (24.9%)	96 (14.5%)	166 (42.2%)
$0.5 \leq v < 1.0$	255 (24.2%)	152 (23%)	103 (26.2%)
$1.0 \leq v < 1.5$	316 (30%)	224 (33.9%)	92 (23.4%)
$1.5 \leq v < 2.0$	185 (17.6%)	158 (23.9%)	27 (6.9%)
$2.0 \leq v < 2.5$	22 (2.1%)	18 (2.7%)	4 (1%)
$2.5 \leq v < 3.0$	5 (0.5%)	4 (0.6%)	1 (0.3%)
$3.0 \leq v < 3.5$	5 (0.5%)	5 (0.8%)	0 (0%)
$3.5 \leq v < 4.0$	3 (0.3%)	3 (0.5%)	0 (0%)
	1053 (100.0%)	660 (100.0%)	393 (100.0%)

図9 可視化における4次元表現の例 (XY+T+作業者分類)

- 蔡成浩，水谷亮：カメラ映像を用いた高層建物の施工階モニタリング装置の開発，日本建築学会技術報告集，Vol.120，No. 46，pp.861-864，2014. 10
- 佐野友紀，高柳英明，渡辺仁史：空間-時間系モデルを用いた歩行者空間の混雑評価，日本建築学会計画系論文集，No. 555，pp. 191-197，2002. 5
- 加戸啓太・平沢岳人：コンピュータビジョンによる建築部位等の採寸に関する研究，日本建築学会技術報告集，vol. 14，No. 27，pp. 307-310，2008. 6
- 建築設計資料集成－人間，日本建築学会，2003. 1 (p. 59 図[13]年齢と自由歩行速度より)

注

注 1) 座標系変換行列の取得やカメラキャリブレーションに関しては，写真測量技術として一般化されている空間幾何学の理論を用いており，近年ではオープンソースライブラリ OpenCV に `cvGetPerspectiveTransform()` や `cvCalibrateCamera2()` といった関数で実装されている。

[2015年2月18日原稿受理 2015年3月30日採用決定]