

建物のファサードとロボティクス

○木下 拓^{*1,*2}, Kepa Iturralde^{*1}, Meysam Taghavi^{*1}, Wen Pan^{*1}, Thomas Bock^{*1}

Robotics for Façades and their Lifecycles

Taku Kinoshita^{*1,*2}, Kepa Iturralde^{*1},
Meysam Taghavi^{*1}, Wen Pan^{*1}, and Thomas Bock^{*1}

^{*1} ミュンヘン工科大学, Technical University of Munich,
Chair of Building Realization and Robotics

^{*2} 北海道大学大学院, 工学院,
Hokkaido University, Graduated School of Engineering

近年, 建設業界においてロボット技術導入が活発になっている. ファサード (建物の正面) の設置および外観のカーテンウォールの取り付け作業は危険が伴うため, ロボット技術の導入が強く望まれている. ミュンヘン工科大学ではファサードに関するロボット技術について3つの異なる研究プロジェクトが勧められている. ファサードの組み立ての自動化を目指すプロジェクト BERTIM ではロボットが掴んだ物体の位置にずれが生じることが問題となっていた. 本論文では, これを補正するため ArUco マーカーを使用する方法とデジタルセオドライトを利用する方法が試し, ずれが改善されることが確認された.

Key Words: ファサード, 自動化, マニピュレーション, 位置推定

1. 序 論

世界的な建設作業者の高齢化により, 熟練労働者の数が減少している. また建設作業は手作業が多く, 長年生産性向上が課題となっている. これらの問題に対応するため, 建設作業へのロボット技術導入が活発になっている. ヨーロッパ連合の助成を受けているプロジェクト「HEPHAESTUS」⁽¹⁾では, カーテンウォール取り付け作業を行うロボットの開発が行われている. このロボットは, 建物屋上および地上から伸びる8本のケーブルを用いて, 建物外壁を移動する. これにより建物壁面を平行に移動することができる. またロボットに搭載されたロボットアームを使い, カーテンウォール取り付け用のドリル穴を開ける, ドリル穴への金具を設置するといった複数のタスクを可能にしている. 一方, 香港の公営住宅建設業界では需要の増加や安全性, 労働者の高齢化, 不均等な品質, 生産性の低さといった諸問題に直面している. ミュンヘン工科大学と香港の Construction Industry Council⁽²⁾は共同で行なった現場の事例調査やワークショップをもとに, 外装工事の完全自動化施工を目的としたロボットシステムの開発を行っている. その一環として, 現在は外装塗装とコンクリート壁の研削, 水密検査の三種類の作業を1台でこなすロボットの研究が行われている.

他方, プロジェクト「BERTIM」⁽³⁾では, 既存建物の断熱性やエネルギー効率の向上を目的として建物外壁に取り付ける組み立て式モジュールの設計及びモジュール組み立てのロボット化に関する研究が行われている. モジュールの形状は対象となる既存建物の構造に合わせる必要があるため, 設計対象の形状をパラメータで表現するパラメトリックデザインを用いることにより, 設計の簡易化を計っている. ロボットによるパラメトリックデザインされた物の自動加工に関しては, いくつかの研究が行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 一方で生成した組み立てモジュールを, ロボットを使って設置する研究は殆ど行われていない.

そこで本研究では, 光学機器から得られる情報を元にロボットの動作を修正することを特徴とする, 組み立て式モジュールの自動施工システムを提案する. 提案システムは, 光学装置としてウェブカメラとデジタルセオドライトを使い, 提案システムの有用性を検証した. 以降では, まず組み立て式モジュールを組み立てる際の問題点について述べる. そして提案システムとその妥当性検証の結果について述べる.

2. ファサードの組み立て時の問題点

Kodama ら⁽⁷⁾が30年前に, 壁を築く際に建設用ブロックを掴んで配置する間にずれが生じること

を報告している。これらのブロックはロボット指向設計 (Robot Oriented Design: ROD) の概念⁽⁸⁾に基づいて組立工程を容易にするために設計されていたにも関わらず、壁に生じたずれはかなりのものだった。Gambao ら⁽⁹⁾の ROCCO プロジェクトにおいてもロボットで壁を建設する際に同様の問題に直面していた。Bomwetch⁽¹⁰⁾は、10mm にもなるずれが生じたと報告している。同様のずれは建物の木材の枠組みを組み立てる研究プロジェクトでも見られ、Willman⁽¹¹⁾はセンサによるフィードバックシステムを提案した。Bomwetch と Willman の研究ではオブジェクトは ROD のように部品同士を容易に組み合わせられる特別な結合方法を取っていなかった。また、参考文献⁽¹²⁾に見られるように、ボード状の物体の場合、掴まれた際に湾曲し、正確な位置を把握することが難しくなる。

以上のように、現在使用されているロボットツールは、物体を掴む際の正確さは保証されていない。掴む対象が既知の場所に配置されていないような一定の規定がない環境ではさらに悪くなる。さらに組み立て式モジュールのデザインの多様さは自動化を妨げる要因になっている。これらが BERTIM における課題となる。

BERTIM では既にいくつかの実験が行われている⁽¹³⁾。その中で以下のような位置ずれの発生する要因が見つかっている。

- ・ 部品の初期位置のずれ
- ・ 部品を掴む際に生じるずれ
- ・ 一部の部品、特にボード状の部品の場合、ロボットが把持する際に曲がること
- ・ ロボットアームのキャリブレーションおよび精度による誤差

これらを解決するためには、掴まれた対象物の位置を認識する必要がある。そこで、建設用ロボットアセンブリに Maropoulos ら⁽¹⁴⁾が提案した測定補助アセンブリ (Measurement Assisted Assembly: MAA) の概念が利用できる。Maropoulos らはアクティブツーリングとフィードバック制御を利用して予測可能で柔軟な組立工程を可能にする手法を示した。このアイデアを元に、Drouot ら⁽¹⁵⁾はロボットによる高精度航空宇宙部品の組み立てに MAA を適用し、誤差 0.1mm の高精度の結果を得た。このコンセプトは、航空業界の複雑で大規模な組立工程用に作られたものだが、同様に大きなものを扱う建設業にも応用できる。

ロボットによる組立工程では、ロボットのモーションを調整する必要がある。様々なセンサから受信するデータによるフィードバックに応じてロボットのモーションを調整する研究やロボットによる組み立てに関する研究はいくつか存在する。例えば、Nottensteiner ら⁽¹⁶⁾は二本のロボットアームを使い、オブジェクトを認識し組立工程を計画するシステムを構築した。Feng ら⁽¹⁷⁾の研究では、オブジェクトの認識とパラメトリックデザインされた壁の組み立てにマーカーを利用した。また、Lundeen ら⁽¹⁸⁾は間接式パワーショベルのエンドエフェクタにマーカーを貼り、ショベルの位置を推定した。ただ、ロボットが掴んだ物体の位置と姿勢を認識しロボットのモーションを補正する研究は殆どない。

この研究の目的は、掴んだ物体の位置に応じて、ロボットの経路を調整することだ。この目的を達成するため、本論文では、モーションプランを補正するにあたり、物体につけたマーカーと作業空間に配置したマーカーから物体の位置を認識する方法と、デジタルセオドライトで計測された物体の3点の座標から位置を把握する方法の二つを提案する。これらの手法により組み立て中に発生するずれが改善されるかを実験により確認する。

3. 実験

3.1 実験機器および実験手法 実験は実際のファサードのフレームの代わりに PLA 樹脂を材料に 3D プリンタ (German RepRap X400©) で作られた約 10 分の 1 の縮尺の模型を使用して行った (Fig. 1)。

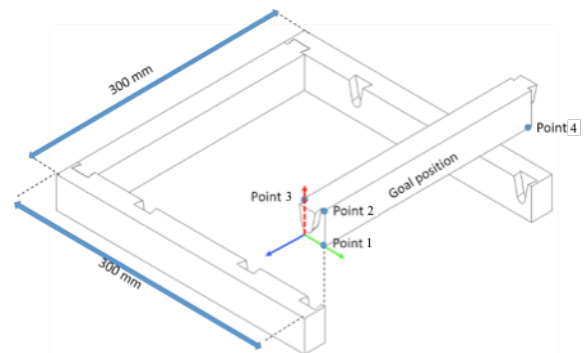


Fig. 1 Prefabricated module mockup used for the assembly in laboratory environment experiments

モジュールを組み立てる位置に対するロボットアームの位置および部品の初期位置は既知とした。6 自由度のロボットアーム Kinova Jaco®を組み立てて使用した (Fig. 2)。

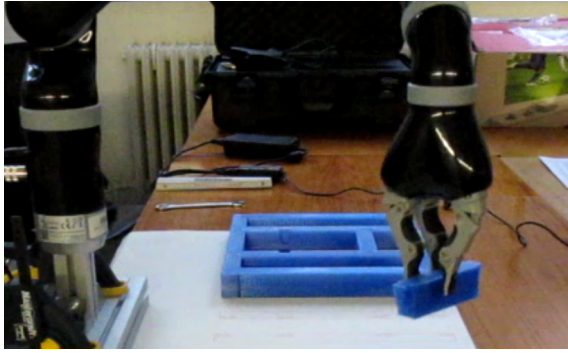


Fig. 2 Assembly process carried out by the Kinova Jaco® robotic arm

Table 1 に使用した機器をまとめた。システムの構築にはオープンソースのロボット開発向けフレームワーク ROS (Robot Operating System) を利用し、モーションプランニングには MoveIt! を利用している。

Table 1 Equipments, materials and resources used

Computer processor	Intel CORE i7 8th Gen
Robotic arm	Kinova Jaco®
Motion planning	MoveIt!
Camera	Logitech C170©
Digital theodolite	Leica 3D Disto©

3 種類の実験を行なった。第一に、モーションの補正を一切しない実験、第二に ArUco マーカーと OpenCV を利用してモーション補正をする実験、第三に距離と角度を高い精度で測ることができるデジタルセオドライトを用いてモーション補正をする実験をそれぞれ 5 回ずつ行なった。行なった。ゴール地点にモジュールの部品を移動させた時点での部品の 4 つの角の位置 (Fig. 1 の Point 1~4) をデジタルセオドライトを用いて計測し、それぞれの結果を比較した。評価方法は、得られたデータを可視化し、計画された最終位置との差を視覚的に評価する方法と、計測された 4 点の位置と計画された 4 点の最終位置との距離から比較する方法の 2 つを用いた。

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2 + (z_i - z_{i0})^2} \quad (1)$$

ここで、 (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) は目的の位置、 (x_i, y_i, z_i) は計測された Point i の位置を表す。Table 2 に目的の位置における Point 1~4 の座標を示す。

Table 2 Planned location for point 1, 2, 3 and 4 (mm)

Name	Position X	Position Y	Position Z
Point 1	0.0	25.0	0.0
Point 2	0.0	25.0	37.5
Point 3	0.0	0.0	37.5
Point 4	-250.0	25.0	0.0

3.2 補正なしでの実験 実験結果の指標およびロボット本来の性能を見るため、補正なしの実験を行った。Fig. 3 にこの実験の手順を示す。ロボットアームの制御は ROS を用いて行い、モーションプランニングには MoveIt! を使用した。モジュールの部品を持ち上げ、目的の位置まで移動させた時の位置姿勢を計測し、理想の位置姿勢と比較した。3D 可視化ツール RViz はモーションプランニングの確認に使用した。

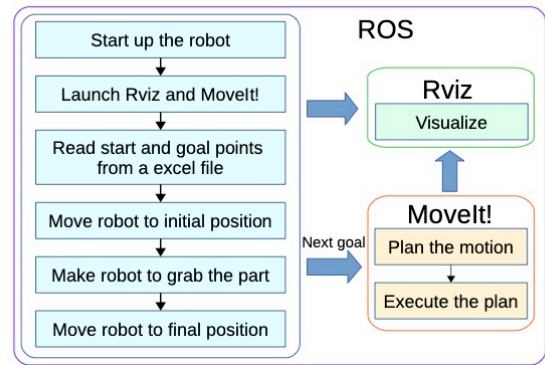


Fig. 3 Protocol of the assembly process for the test without any deviation correction

Kinova Jaco® のエンドエフェクタの 3 本の指の内 1 本が破損していた (ただし、残った指で物体を把持できる状態であった) 為、全ての試行で大きなずれが生じた。実験結果を可視化した図を Fig. 4 に示す。緑が理想の位置を示し、赤が試行の結果を示している。

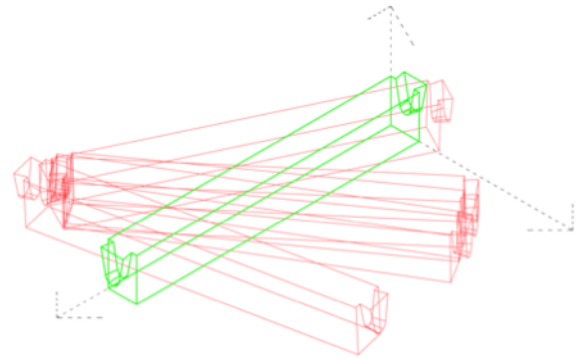


Fig. 4 Goal position results without any deviation adjustment

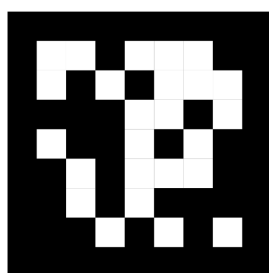
Table 3 に想定された位置からのずれの平均値をまとめた結果を示す。100~150 mm 前後のずれが生じた。

Table 3 Average location in the test without deviation correction and distance from planned location (mm)

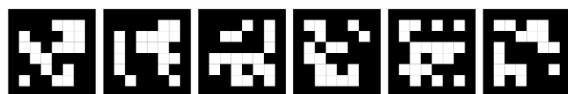
Name	Position X	Position Y	Position Z	Distance
Point 1	-65.20	-106.50	14.90	147.53
Point 2	-47.70	-94.10	-10.10	136.84
Point 3	-47.10	-93.00	-1.80	111.41
Point 4	-188.60	99.20	-22.60	98.93

3.3 ArUco マーカーを用いた実験 OpenCV

(Open Source Computer Vision Library)⁽¹⁹⁾を用いてウェブカメラで ArUco マーカー⁽²⁰⁾を認識し、位置情報を受け取り補正する実験を行った。マーカーは2種類用意した。一つは202mm 四方の大きいマーカー (Fig. 5 - a) で Fig. 2 の机上の台紙に設置し、ロボットとの位置関係が既知のものとした。もう一方の36mm 四方の小さいマーカーが5mmの間隔をあけて6個連なったもの (Fig. 5 - b) を部品の側面に貼り付けてあり、1個でもマーカーが認識されれば、カメラに対する部品の中心の座標がわかるようにした。この2つの相対関係から、モジュールの部品の作業空間における位置と姿勢を計算することができる。そのため、カメラは Fig. 7 のように大小それぞれのマーカーを同時に検出できる位置に設置しなければいけない。Fig. 6 に示すように対象物を持ち上げた時点でマーカーから対象物の位置姿勢を検出し、理想の姿勢との差を算出し、ロボットの姿勢を補正した。その補正の情報を踏まえ、目的の位置まで持っていき、理想の姿勢との差を計測した。



(a)



(b)

Fig. 5 The ArUco markers used in the experiment

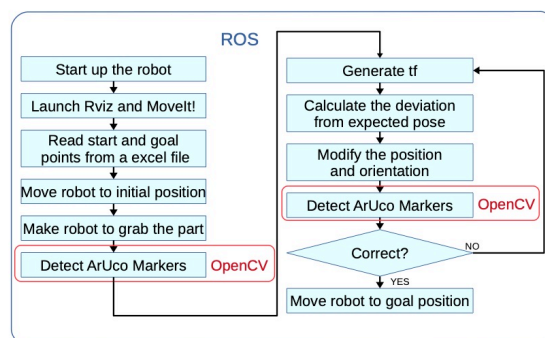


Fig. 6 Protocol of the assembly process for the test with the ArUco markers

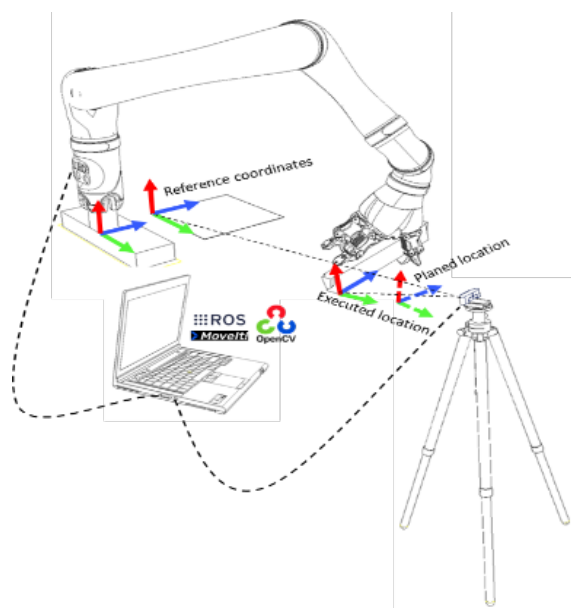


Fig. 7 Scheme of the recognition of the grasped object by using the ArUco markers

5回の試行の結果を可視化したものを Fig. 8 に示す。緑が理想の位置を示し、オレンジが試行の結果を示している。補正なしの場合 (Fig. 4) に比べると、大きく改善されたことが明らかである。光の加減によってマーカーの認識精度が変化するため、明るさの管理が求められるが、これは工場にて作業が行われる場合には、問題にならないと考えられる。また、マーカーを貼る手間とマーカーが見た目に影響することが、この手法のデメリットとして挙げられる。

Table 4 に計測された最終位置と目的の位置との距離を示す。100~150mm だった誤差が20~40mm に改善された。

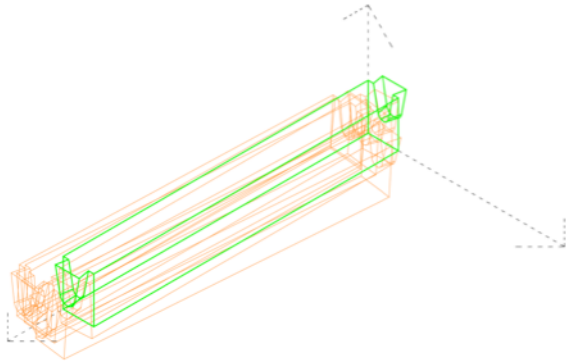


Fig. 8 Goal position results using markers

Table 4 Average location in the test with ArUco markers and distance from planned location (mm)

Name	Position X	Position Y	Position Z	Distance
Point 1	11.50	11.80	9.40	19.87
Point 2	11.40	10.10	1.90	40.24
Point 3	13.20	-10.30	28.20	19.15
Point 4	-238.10	18.10	-14.20	19.77

3.4 デジタルセオドライトを用いた実験

セオドライトとは、水平面および垂直面における角度を測る精密機器である。デジタルセオドライトは角度の読み取りを電子的に行い、角度をデジタル表示するものである。近年ではトータルステーションのように距離測定も可能なセオドライトが発売されている。トータルステーションより精度は劣るが、取り扱いが簡単で価格が安い。この実験では、距離と角度を高い精度で測ることができる the Leica 3D Disto[®]を使用し、Fig. 10 のように機器を設置した。Fig. 9 に示すように、ロボットがモジュールの部品を持ち上げた後、一時停止させ、the Leica 3D Disto[®]で部品の3点 (the Leica 3D Disto[®]から確認できる面の3つの角に近い点) および作業スペースに固定された参照点の位置を計測し、部品の位置と姿勢を計算後、補正した。

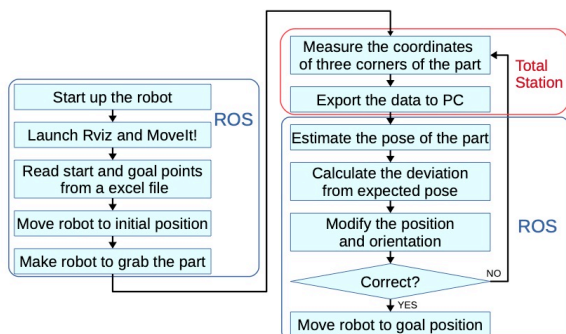


Fig. 9 Protocol of the assembly process for the test with the digital theodolite

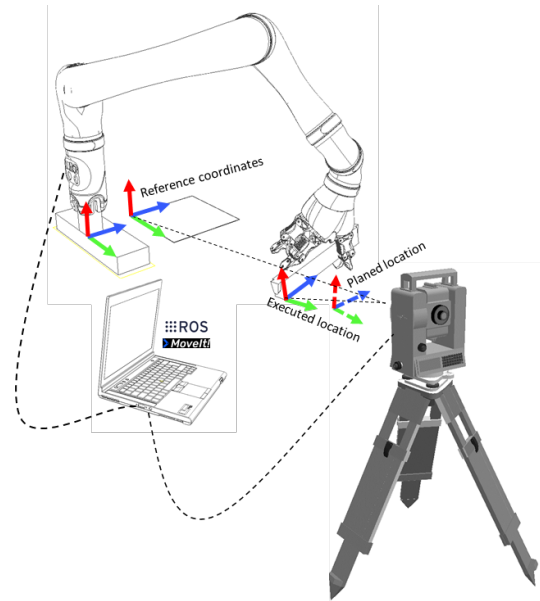


Fig. 10 Scheme of the localization of coordinate recognition by using a digital theodolite

この実験の不安定な要素は、3点を計測する際に、モニター上にて手動で3点を選択する点であった。上手く部品の角に当てることができれば最も良いのだが、外れた場合に後ろの壁などの大きく外れた値を返す恐れがあるため、少し内側の点を選択した。その分、実際の位置とずれが発生する可能性があった。

この不安要素を解決するため、3点から位置と姿勢を計算する方法をFig. 11に基づいて説明する。ただし、原点は理想の位置の部品の中央にあるとする。

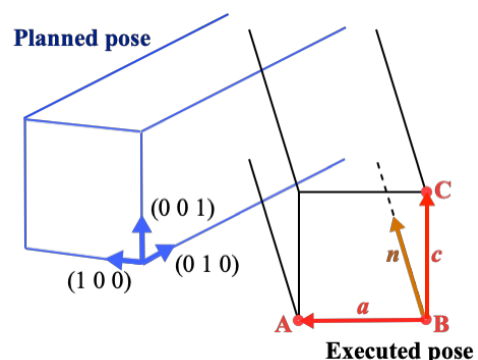


Fig. 11 Deviation between the planned pose and the executed pose

3点 A, B, C が観測された点であるとき、2つのベクトル ($\mathbf{a} = \mathbf{A} - \mathbf{B}$, $\mathbf{c} = \mathbf{C} - \mathbf{B}$) が得られる。この2つのベクトルの外積を取ると、3点がなす平面の法線ベクトルが得られる。

$$\mathbf{n} = \mathbf{a} \times \mathbf{c} \quad (2)$$

3つのベクトルの単位ベクトルは式(3)から(5)で求められる。

$$\mathbf{u}_a = \mathbf{a} / \|\mathbf{a}\| \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{c} / \|\mathbf{c}\| \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{n} / \|\mathbf{n}\| \quad (5)$$

このとき、この3つの単位ベクトルは(1 0 0), (0 1 0), (0 0 1)が回転したものとみなせるので、次式が成り立つ。

$$(\mathbf{u}_a \quad \mathbf{u}_n \quad \mathbf{u}_c) = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \quad (6)$$

ただし、 \mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y , \mathbf{R}_z はそれぞれ部品の中央のx軸, y軸, z軸に関する回転行列である。それぞれの回転角を α , β , γ としたとき、

$$\mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x = \begin{pmatrix} C\beta C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ C\beta S\gamma & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma \\ -S\beta & S\alpha C\beta & C\alpha C\beta \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし、 $C\theta$ は $\cos \theta$, $S\theta$ は $\sin \theta$ を表す。ここで、 \mathbf{u}_a , \mathbf{u}_n , \mathbf{u}_c を次のように定義すると、

$$(\mathbf{u}_a \quad \mathbf{u}_n \quad \mathbf{u}_c) = \begin{pmatrix} u_{ax} & u_{nx} & u_{cx} \\ u_{ay} & u_{ny} & u_{cy} \\ u_{az} & u_{nz} & u_{cz} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式(6)と式(7)より、回転角すなわち姿勢は次のように求められる。

$$\alpha = \tan^{-1}(u_{nz}/u_{cz}) \quad (9)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(-u_{az}/\sqrt{u_{nz}^2 + u_{cz}^2}\right) \quad (10)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(u_{ay}/u_{ax}) \quad (11)$$

一方、部品の中心の座標は次の式で求められる。

$$\mathbf{P} = \mathbf{B} + (\mathbf{a} + \mathbf{c})/2 + l\mathbf{u}_n/2 \quad (12)$$

ただし、 l は部品の長さを表す。

以上の計算からロボットが掴んでいる部品の位置と姿勢が得られる。これに基づき位置と姿勢の補正をロボットに与えた。

実験の結果を可視化したものを Fig. 12 に示す。緑が理想の位置を表し、紫が実験で得られた位置を表す。Table 5 に実際の位置の平均値と理想の位置までの距離を示す。こちらも、ずれは10~40mmと改善された。しかし Fig. 8 と Fig. 12 を比較するとデジタルセオドライトで補正した場合はマーカーで補正した場合に比べて、理想の位置から外れた結果が見られた。

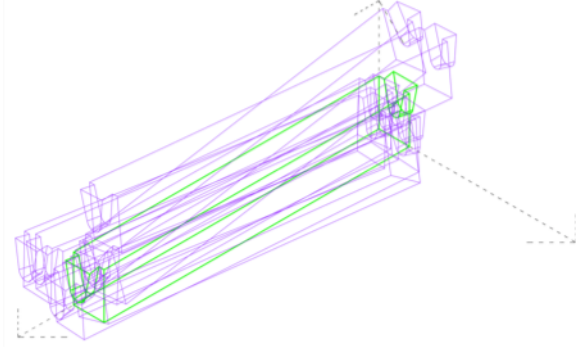


Fig. 12 Goal position results by using digital theodolite

Table 5 Average location in the test with digital theodolite and distance from planned location (mm)

Name	Position X	Position Y	Position Z	Distance
Point 1	-6.10	10.60	6.90	17.09
Point 2	-7.90	-18.60	40.70	44.43
Point 3	-6.40	6.00	43.80	10.80
Point 4	-254.40	26.00	5.40	7.04

3.5 考察 以上のように3パターンの実験を行なった。最初の補正なしの場合、最終位置のずれは組み立てを行うには許容できないほど大きかった。他の2つの場合では、70 mmほど改善された。ArUco マーカーを使った実験が最も良い結果を残した。デジタルセオドライトを用いた実験は、ArUco マーカーを使用した実験に比べ、ずれは大きくなった。

前述の方法の通り、第三のデジタルセオドライトを用いる場合は、使用者は慎重さを求められる。一方で、様々な種類の部品を含む組み立て式ファサードにおいて、全てにマーカーを貼り付ける手間がない点は優れていると言える。必要な点をマークするだけで良いので、この方法は適していると考えられる。

石膏ボードのような大規模で折れ曲がったものを扱う場合には、マーカーを用いたほうが良いかもしれない。なぜなら、掴んでいる対象物が他の残りの部品に近づいた時に、マーカーを用いた方がセオドライトを用いる場合に比べ識別が容易だからである。

本研究の結果は、ロボットシステムの精度が、組み立て部品の設計に影響を与えることを示している。特に部品の結合システムの難易度は、ロボットの精度に応じて変えなければいけない。従って、木骨の製造において、ロボットシステムに合わせた CNC 加工や製造工程を考える必要がある。

4. 結 論

本論文では、まずミュンヘン工科大学が行なっている建物の外観の施工に関わる研究について触れた。HEPHAESTUS ではファサードの取り付けについて、CIC 香港とのプロジェクトではファサードの装飾・点検について、BERTIM はファサードの組み立てについて研究している。

BERTIM において問題となっていたのが、ロボットがものをつかんだ際に、想定的位置と異なっており、組み合わせたときの精度が悪いことであった。これを解決するため、本研究では2つの方法を提案した。一つは、マーカを部品の側面と作業空間に設置し、画像認識を使用し位置姿勢の補正を行う方法。そして、もう一つは、デジタルセオドライトで位置を計測し位置姿勢の補正を行う方法だった。実験により、両方の方法で、位置と姿勢のずれは改善されることが示された。現在は、3D の点群データと対象物の CAD データを用いて、より高精度の姿勢補正を行う方法を検討中である。

謝 辞

本研究の一部は欧州連合の研究及びイノベーションを促進するためのフレームワークプログラム



「Horizon 2020」(No. 636984 及び No. 732513) による助成を受けたものである。

参 考 文 献

- (1) HEPHAESTUS WEB PAGE. About the project.
On-line: <http://www.hephaestus-project.eu/>
- (2) Construction Industry Council, Homepage.
On-line: <http://www.cic.hk/eng/index.html>
- (3) BERTIM – Building energy renovation through timber.
On-line: <http://www.bertim.eu/index.php?lang=en>
- (4) Braumann, J., Brell-Cokcan, S., “Parametric Robot Control: Integrated CAD/CAM for Architectural Design.” In Proceedings of the 31st annual conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, pp. 242-251, Calgary, Canada, 2011.
- (5) Lloret, E., Shahab, A.R., Mettler, L., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., and Langenberg, S. “Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication.” *Computer-Aided Design*, Vol.60, pp.40-49, 2015.
- (6) King, N., Bechthold, M., Kane, A. and Michalatos, P. “Robotic tile placement: Tools, techniques and feasibility.” *Automation in Construction*, Vol.39, pp.161-166, 2014
- (7) Kodama, Y., Yamazaki, Y., Kato, H., Iguchi, Y., Naoi, H., “A robotized wall erection system with solid components,” *Proceedings of the 5th ISARC*, pp.441-448, 1988.
- (8) Bock, T., “A Study on Robot-Oriented Construction and Building System.” Ed: University of Tokyo, In: National Institute of Informatics, Tokyo, 1989.
- (9) Gambao, E., Balaguer, C., Barrientos, A., Saltaren, R., Puente, E.A., “Robot assembly system for the construction process automation,” *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 46-51, 1997.
- (10) Bonwetsch, T., “Robotically assembled brickwork: manipulating assembly processes of discrete objects,” PhD diss., ETH Zurich, 2015.
- (11) Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A.A., Gramazio, F. and Kohler, M., “Robotic timber construction—Expanding additive fabrication to new dimensions,” *Automation in construction*, Vol.61, pp.16-23, 2016.
- (12) Randek Zero labor.
<http://www.randek.com/en/wall-floor-and-roof-product-on-lines/zerolabor>, On-line: 30/04/2020
- (13) Iturralde, K., Linner, T., Bock, T. “First Monitoring and Analysis of the Manufacturing and Installation Process of Timber Based 2D Modules for Accomplishing a Future Robotic Building Envelope Upgrading.” In *Proceedings of ISARC 2017*, pp. 65–73, Taipei, Taiwan, 2017.
- (14) Maropoulos, P. G., Muelaner, J. E., Summers, M. D., Martin, O. C., “A new paradigm in large-scale assembly—research priorities in measurement assisted assembly,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1-4), pp.621-633, 2014.
- (15) Drouot, A., Zhao, R., Irving, L., Sanderson, D. and Ratchev, S., “Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing,” *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), pp.393-398, 2018.

- (16) Nottensteiner, K., Bodenmueller, T., Kassecker, M., Roa, M.A., Stemmer, A., Stouraitis, T., Seidel, D. and Thomas, U., "A complete automated chain for flexible assembly using recognition, planning and sensor-based execution." Proceedings of 47st International Symposium on Robotics, pp. 1-8, 2016.
- (17) Feng, C., Xiao, Y., Willette, A., McGee, W. and Kamat, V.R., "Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on unstructured construction sites," Automation in Construction, Vol.59, pp. 128-138, 2015.
- (18) Lundeen, K.M., Dong, S., Fredricks, N., Akula, M., Seo, J. and Kamat, V.R., "Optical marker - based end effector pose estimation for articulated excavators," Automation in Construction, Vol. 65, pp. 51-64, 2016.
- (19) OpenCV. <https://opencv.org/>
- (20) OpenCV: Detection of ArUco Markers. https://docs.opencv.org/3.4.0/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html On-line: 07/05/2020