KCEM

건설생산성 향상을 위한 사업관리 기술 (Management Practices) 개발 및 컴퓨터 비전 (Computer Vision) 활용 연구 동향

김정렬 The University of Texas at Austin CAEE 박사과정 (현)
한국건설기술연구원 건설관리경제연구실 수석연구원 (휴직)

1. 서론

건설생산성은 공기와 공사비에 영향을 미치는 요인 중의 하나로서 (Jenkins 2004), 프로젝트의 성패를 결정지을 수도 있는 중요한 요소이다 (Cheng 2013). 따라서 점점 더 경쟁이 심화되고 원가의 절감이 요구되는 현 시점에서 건설생산성의 향상은 기업과 연구자들의 중요한 목표이자 연구 주제이기도 하다.

건설생산성 향상을 위해서는 우선적으로 새로운 재료, 도구/장비, 시공법 등과 같은 현장 작업에 직접적인 영향을 미치는 요소에 대한 연구 및 개발이 필수적이다. 그러나 그에 더하여, 생산성의 향상과 관련된 사업관리 기술을 고도화 하고, 정보기술을 활용하여 그러한 사업관리 기술을 지원하는 기술의 연구도 역시 중요하다. 이에 본 고에서는 북미 지역을 중심으로 최근에 수행된 건설생산성의 향상을 위한 사업관리 기술에 대한 연구와 컴퓨터 비전 (Computer Vision)을 이용한 건설생산성 측정 자동화 기술의 연구 동향에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

2. 건설 생산성 관련 사업관리 기술 (Management Practices)의 연구 동향

미국 CII (Construction Industry Institute)에서는 건설생산성 (노무생산성) 50% 향상을 목표로 Construction Productivity Research Program라는 연구 과제를 2007년부터 2013년까지 수행하였다 (CII 2012). 연구진으로는 The University of Texas at Austin, University of Colorado Boulder, 그리고 University of Waterloo의 3개 대학과 남북미에서 자원한 14개 이상의 기업이 참여하였다.

연구의 기본 전략은 그림1과 같이 작업자의 생산적인 작업(Direct Work) 시간은 증가시키고, 동일 작업에 대한 총 투입 시간은 감소시키며, 불필요한 재시공은 최소화하는 방법을 찾는 것이다. 그 결과물들 중 여기에서는 사업관리 기술과 관련된 BPPII (Best Productivity Practices Implementation Index)와 재시공 최소화 프로그램 (Rework Reduction Program)을 소개하고자 한다.

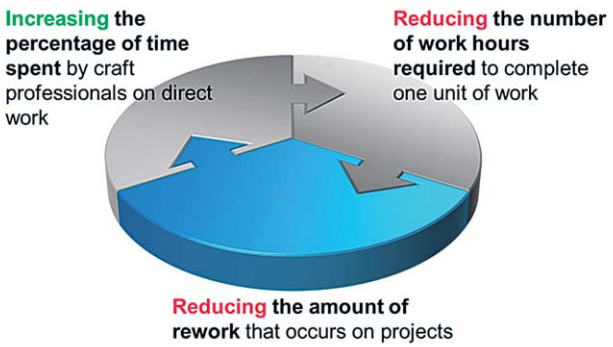


그림 1 Construction Productivity Research Program의 연구전략

BPPII (Best Productivity Practices Implementation Index; CII 2013)

전술한 바와 같이 건설생산성의 향상을 위해서는 그와 관련이 있는 사업관리 기술들을 체계적으로 프로젝트에 적용하는 것이 중요하다. BPPII는 이러한 생산성과 관련된 사업관리 기법들의 실제 프로젝트에서의 실행 수준을 측정하는 지수로서, 시공계획 (Project Execution Planning) 단계와 시공기간 중에 지속적으로 적용할 수 있다. 프로젝트의 책임

자는 이 지수를 이용하여 시공 전에는 자신의 프로젝트가 생산성 관련 문제가 발생할 가능성이 있는지를 검토해 보고, 사전에 부족한 부분을 보완하여 문제를 예방할 수 있다. 또한 시공 중에도 역시 적용하여 도출된 취약한 분야에 대한 보완을 수행하여 건설생산성을 제고할 수 있다.

BPPII에는 다음과 같이 6개의 카테고리들이 있으며 각 카테고리 아래 도합 18개의 섹션과 섹션 아래에는 53개의 엘리먼트들이 있다. 이 엘리먼트들은 건설 생산성에 밀접한 영향이 있는 것으로 판정된 사업관리 기술 (Practice)들이며, BPPII는 이들의 실행 수준을 평가하는 것이다.

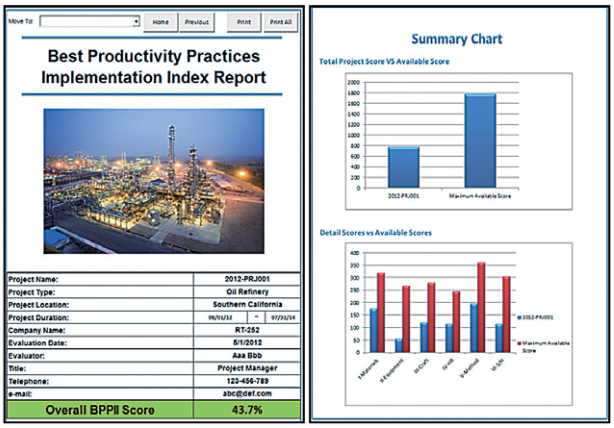
- Materials Management
- Equipment Logistics
- Craft Information Systems
- Human Resources Management
- Construction Methods
- Environment, Safety, and Health

그림2는 BPPII 평가를 위한 툴의 일부로, Materials Management 카테고리의 두 섹션과 그들의 엘리먼트 들을 보여주고 있다. 각각의 엘리먼트는 서로 다른 가중치를 가지고 있다. 사용자는 간단히 우측 부분의 실행 수준을 클릭하여 각각의 엘리먼트에 대한 실행 수준 평가를 수행할 수 있다.

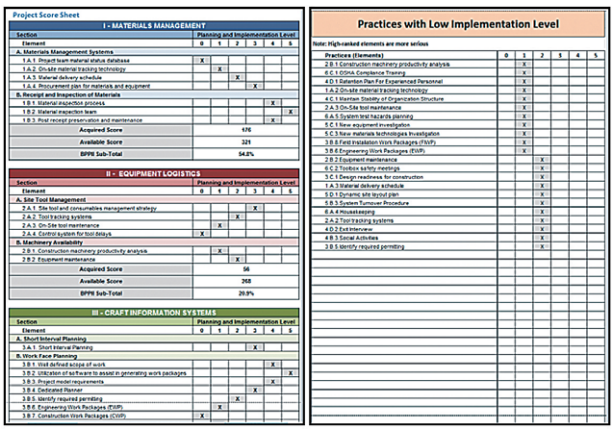
I - MATERIALS MANAGEMENT						
Section	Planning and Implementation Level					
Element	0	1	2	3	4	5
A. Materials Management Systems						
1.A.1. Project Team Material Status Database			■			
1.A.2. On-site Material Tracking Technology					■	
1.A.3. Material Delivery Schedule				■		
1.A.4. Procurement Plan for Materials and Equipment						■
B. Receipt and Inspection of Materials						
1.B.1. Material Inspection Process			■			
1.B.2. Material Inspection Team		■				
1.B.3. Post-receipt Preservation and Maintenance	■					

그림2. BPPII평가 시트 (CII 2013)

평가를 완료하면 그림 3과 같은 결과 보고서를 얻게 된다. 이 보고서는 0%에서 100%까지의 해당 프로젝트의 점수 (그림3(a)), 전체 및 카테고리 별 가능한 점수와 얻은 점수의 비교 (그림 3(b)), 평가 내용 (그림3(c)), 그리고 취약 엘리먼트들의 리스트 (그림3(d))로 이루어져 있다. 점수가 65% 이상이면 해당 프로젝트는 향후 생산성 관련 문제를 겪을 가능성이 적은 것으로 판단할 수 있다. 해당 프로젝트가 부족한 점수를 받았다면 적극적으로 취약 엘리먼트들에 대한 보완을 수행해야 하며, 만족할 만한 점수를 받았더라도 취약 엘리먼트는 존재하기 마련이므로 그들에 대한 보완을 검토하는 것이 바람직하다.



(a) (b)



(c) (d)

그림3. BPPII 평가 결과 보고서의 예(CII, 2013)

BPPII는 BPPII-Industrial Projects와 BPPII-Infrastructure Projects의 두 가지 버전이 있으며, 각각의 엘리먼트들과 그 엘리먼트들의 가중치들은 해당 프로젝트의 특성에 맞게 최적화 되어 있다. 전술한 BPPII의 예들은 BPPII-Industrial Projects의 내용이다. 프로젝트의 책임자들은 이들 지수를 사용하여 효율적으로 생산성을 고려한 시공 계획을 수립할 수 있으며 생산성 관련 문제를 사전에 예방할 수 있다.

재시공 최소화 프로그램 (Rework Reduction Program; CII 2011)

빈번한 재시공은 생산성에 지대한 영향을 미친다. 재시공을 위해서는 기 시공된 부분을 해체하고, 정리 한 후, 다시 시공을 해야 하므로, 몇 배의 시간과 노력, 그리고 비용이 소요된다. 후속 작업이나 동시에 연관된 작업들 역시 지연되는 것은 물론이다. 따라서 재시공은 최소화 되어야 하며, 이를 위한 방법론이 Rework Reduction Program(RRP)이다. RRP는 재시공을 줄이기 위한 지속적인 개선 프로세스로 정의되며, 그림 4는 RRP의 기본적인 프로세스 차트이다.

RRP 프로세스는Inputs, Rework Tracking and Intervention Model, 그리고 Outputs로 구성되어 있다. Inputs에는 조직 프로세스 (Organizational Process), 프로젝트 업무범위 정의 (Project Scope Definition), 프로젝트 사업관리 계획(Project Management Plan) 등이 포함되며, Outputs에는 재작업 분류 리스트 (Rework Classification List), 재작업 비용 분석(Rework Cost Impact Analysis), 수정된 개선 계획(Updated Corrective Action Plan) 등이 포함된다. 핵심적인 부분인 Rework Tracking and Intervention Model에서는 재시공의 발생을 추적하고 그 원인을 분류하며(Rework Tracking and Cause Classification), 재시공의 영향을 평가하고 경향을 분석(Impact Evaluation and Trend Analysis)한다. 이어서, 그에 대한 개선 계획을 수립하며 (Corrective Action Planning), 그 계획을 시행하기 위한 개입을 수행하고, 재시공 감소 프로그램과 프로젝트 관리 시스템과의 통합(Intervention and Integration with the Project Management System)을 수행한다. 이러한 지속적인 일련의 프로세스들을 통해 재작업을 최소화 할 수 있게 된다.

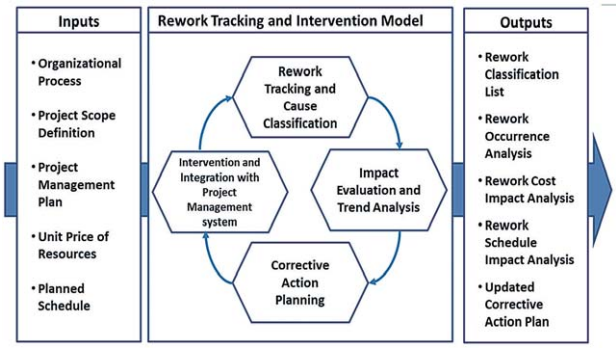


그림4. RRP 프로세스 차트 (CII, 2012)

3. 건설생산성 측정 자동화 기술의 연구 동향

생산성을 향상하기 위해서는 먼저 정확한 측정이 이루어져야 한다 (Liou and Borcherding 1986; Gouett et al. 2011). 생산성을 측정하는 방법에는 PMIS (Project Management Information System)와 같은 프로젝트 레벨의 정보를 이용하는 방법과, 직접적인 관찰에 의한 방법, 설문이나 인터뷰를 이용한 방법 등이 있다 (Gong and Caldas 2010). 그러나 이들 방법들은 현장의 기초(Raw) 데이터를 수집하고 처리하는데 어려움이 있어 실제 활용에 제약이 되고 있다. 그러나 최근의 컴퓨터 비전 (Computer Vision) 기술의 발전으로 이러한 제약을 해소하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 컴퓨터 비전 기술의 활용은 비단 건설생산성 뿐만 아니라, 안전, 품질, 진도측정 등 건설관리의 여러 분야에서 연구되고 있으며, 국내에서도 관련된 다수의 연구가 수행되었다.

본 고에서는 작업 (Activity) 레벨에서의 장비와 노무생산성의 측정에 컴퓨터 비전을 활용한 최근의 연구들을 소개하고자 한다.

2D 비전(Vision) 활용 연구

사진이나 비디오를 활용한 생산성 측정은 역사가 깊다 (Oglesby, 1989). 그러나 그것들을 분석하는 것은 사람이 직접 해야만 하므로, 제한적으로 활용되었다. 그러나 전술한 바와 같이 컴퓨터 비전 기술의 발전은 사진이나 비디오의 자동 분석이 가능하도록 하였으며, 다른 산업분야에서는 많은 부분이 실용화 되어있다.

건설생산성 분야에서도 표1과 같이2D 비전기술의 활용이 매우 활발히 연구되고 있으며, 작업자나 장비의 인식하여 추적(Tracking)하거나, 그들의 동작을 인식하여 건설생산성 측정에 활용하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 지면의 제약으로 모든 연구를 소개하지는 못하나, 아래 표는 그러한 최근의 연구들의 주요 내용과 사용된 기술들을 보여주고 있다.

표1. 2D 비전을 활용한 건설생산성 측정 연구

연구자	내용	사용기술
Peddi et al. (2009)	작업자의 자세 (Pose) 인식	– Silhouette – Human Skeleton – Neural Network
Yang et al. (2009)	크레인의 동작 추적	– 2D-3D Rigid Pose Estimation – Density-based tracking algorithms
Chi and Caldas (2011)	이동하는 작업자와 장비 인식	– Background Subtraction – Naive Bayes – Neural Networks
Gong et al. (2011)	작업자와 장비의 동작 (Action) 인식	– SIFT Descriptor – Bag-of-Video-Feature-Words – Bayesian Network
Heydarian et al. (2012)	장비의 동작인식	– Space-Time Interest Points (STIP) – Visual Codebook – Multiple Binary Support Vector Machine (SVM)
Park and Brilakis (2012)	작업자 인식	– Foreground Blob – Histograms of Oriented Gradients (HOG) – Color Histogram – K-Nearest Neighbors
Rezazadeh Azar et al. (2012)	덤프 트럭 인식	– Haar-HOG Cascade – Blob-HOG Cascade
Memarzadeh et al. (2013)	작업자와 장비 인식	– HOG + Color Descriptor – SVM
Ranaweera et al. (2013)	터널 시공 과정 인식	– Motion Region Segmentation – Parametric Model Fitting

3D 비전 (Vision) 활용 연구

3D 비전은 레이저 스캐너나, 스테레오 비전 (Stereo Vision)과 같은 사진측량 (Photogrammetry) 기술을 이용하여 포인트 클라우드 (Point Clouds)나 깊이 이미지 (Depth Image)와 같은 형태로 획득된다.

3D 비전은 현재 진도측정 (Progress Measurement) 분야에서 매우 활발하게 활용되고 있으며, 건설생산성 분야에서도 활용 연구가 수행되고 있다. 그러나 3D 비전 데이터의 획득에 시간이 소요되어, 현장에서의 작업자나 장비의 생산성의 측정에는 제약이 있었다. 그러나 최근에 출시된 게임 센서인 Microsoft KINECT 센서는 사람의 골격 (Skeleton) 정보와 깊이 이미지, 비디오, 오디오 등의 데이터를 실시간으로 제공하여 건설생산성이나 안전과 같은 분야에서 연구가 시작되고 있다. 단, KINECT 센서는 적외선 기반 센서로 거리에 제약이 있는 것이 단점이다. 다음 표2는 이러한 3D 비전을 활용한 연구들의 내용과 사용된 기술들을 보여주고 있다.

표2. 3D 비전을 활용한 건설생산성 측정 연구

연구자	내용	사용기술
Bosche and Haas (2008)	3D 오브젝트의 인식/검색	– As-Planned Point Clouds from 3D CAD Model – As-Built Point Clouds – Comparison of the Two Point Clouds
Weerasinghe et al. (2012)	작업자의 움직임 추적	– Microsoft KINECT Sensor – Human Skeleton – Pattern Recognition – Object Localization
Escorcia et al. (2012)	작업자의 동작 인식	– Microsoft KINECT Sensor – Human Skeleton – Pose Codebook – K-Means – SVM
Kim and Caldas (2013)	작업자의 동작과 도구 인식 결과의 결합을 통한 정확도 향상	– Microsoft KINECT Sensor – Human Skeleton – Dense SIFT – Bag of Visual Words – Gaussian Mixture Model (GMM) – Naive-Bayes

4. 결론

건설생산성은 기업이나 산업 차원에서의 경쟁력 향상을 위해 지속적으로 연구하고 개선 시켜나가야할 분야 중 하나이다. 본 고에서는 이를 위한 다양한 연구들 중 사업관리 기술의 개선과 컴퓨터 비전 기술을 활용한 건설생산성 측정의 자동화에 대한 연구를 소개하였다. 건설 생산성의 향상에는 다양한 요소들이 관련되어 있으나, 프로젝트의 책임자는 시공 전, BPPII를 활용하여 효율적으로 생산성을 고려한 시공계획을 수립할 수 있으며, RRP의 적용을 통해 재시공을 최소화 하여 결과적으로 건설생산성을 향상시킬 수도 있을 것이다. 건설생산성 측정의 자동화는 최근들어 관심이 고조되는 분야이다. 컴퓨터 비전 기술의 발달과 건설산업에서의 지속적인 연구 및 개발에 힘입어 멀지 않은 미래에는 이들 기술을 실제 현장에서 활용하게 될 것이다. 현재 대한민국의 건설산업이 국내외적으로 도전적인 상황에 직면해 있다는 것은 주지의 사실인 만큼 소개된 연구 분야를 비롯한 다양한 건설생산성 분야의 지속적인 연구/개발을 통해 건설산업의 경쟁력을 더욱 더 확보해 나아가야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

Cheng, T., Teizer, J., Migliaccio, G. C., and Gatti, U. C. (2013). "Automated task-level activity analysis

through fusion of real time location sensors and worker's thoracic posture data." Automation in Construction, 29(0), 24-39.

Chi, S., and Caldas, C. H. (2011). "Automated Object Identification Using Optical Video Cameras on Construction Sites." Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 26(5), 368-380.

CII. (2011). A Guide to Construction Rework Reduction. RT252-2b, Construction Industry Institute, the University of Texas at Austin, Austin, TX.

CII. (2013). Best Productivity Practices Implementation Index ? Industrial Projects. RT252-2c, Construction Industry Institute, the University of Texas at Austin, Austin, TX.

Gong, J., and Caldas, C. (2010). "Computer Vision-Based Video Interpretation Model for Automated Productivity Analysis of Construction Operations." Journal of Computing in Civil Engineering, 24(3), 252-263.

Gong, J., Caldas, C. H., and Gordon, C. (2011). "Learning and classifying actions of construction workers and equipment using Bag-of-Video-Feature-Words and Bayesian network models." Advanced Engineering Informatics, 25(4), 771-782.

Gouett, M., Haas, C., Goodrum, P., and Caldas, C. (2011). "Activity Analysis for Direct-Work Rate Improvement in Construction." Journal of Construction Engineering and Management, 137(12), 1117-1124.

Heydarian, A., Golparvar-Fard, M., and Niebles, J. C. (2012). "Automated Visual Recognition of Construction Equipment Actions Using Spatio-Temporal Features and Multiple Binary Support Vector Machines." American Society of Civil Engineers, 889-898.

Jenkins, J. L., and Orth, D. L. (2004). "Productivity Improvement Through Work Sampling." Cost Engineering, 46(3), 27-32.

Liou, F., and Borcherding, J. (1986). "Work Sampling Can Predict Unit Rate Productivity." Journal of Construction Engineering and Management, 112(1), 90-103.

Memarzadeh, M., Golparvar-Fard, M., and Niebles, J. C. (2013). "Automated 2D detection of construction equipment and workers from site video streams using histograms of oriented gradients and colors." Automation in Construction, 32, 24-37.

Oglesby, C. H. (1989). Productivity improvement in construction. McGraw-Hill series in construction engineering and project management, McGraw-Hill, New York.

Park, M.-W., and Brilakis, I. (2012). "Construction worker detection in video frames for initializing vision trackers." Automation in Construction, 28, 15-25.

Peddi, A., Huan, L., Bai, Y., and Kim, S. (2009). "Development of Human Pose Analyzing Algorithms for the Determination of Construction Productivity in Real-Time." American Society of Civil Engineers, 11-20.

Ranaweera, K., Ruwanpura, J., and Fernando, S. (2013). "Automated Real-Time Monitoring System to Measure Shift Production of Tunnel Construction Projects." Journal of Computing in Civil Engineering, 27(1), 68-77.

Rezazadeh Azar, E., and McCabe, B. (2012). "Automated Visual Recognition of Dump Trucks in Construction Videos." Journal of Computing in Civil Engineering, 26(6), 769-781.

Yang, J., Vela, P., Teizer, J., and Shi, Z. (2009). "Vision-Based Crane Tracking for Understanding Construction Activity." Computing in Civil Engineering (2011), American Society of Civil Engineers, 258-265.