

APLICACIONES DE LEVANTAMIENTOS CINEMÁTICOS DE ALTA PRECISIÓN

Marc Bos

Geoconcept, SL

Lourdes Pascual Llorens

Geoconcept, SL

Gunnar Gräfe

3D-Mapping GmbH

Abstract:

Los levantamientos cinemáticos de alta precisión han sido las aplicaciones centrales del sistema de levantamiento móvil MoSES (Mobiles Strassen-Erfassungssystem) en los últimos años. El avance en el desarrollo de los métodos cinemáticos por parte de 3D-Mapping ha llegado a un nivel que permite utilizar la tecnología cinemática para aplicaciones de alta precisión. Así se pueden sustituir levantamientos estáticos por taquimetría a lo largo de carreteras o ferrocarriles por métodos cinemáticos. Recientemente se han rediseñado los módulos cinemáticos cámara y láserescan. El nuevo módulo cámara permite hasta ocho cámaras fotogramétricas paralelas cubriendo los 360° del campo de visión del vehículo. Este módulo se completa con la incorporación de cámaras infrarrojas que permiten levantamientos con escasez de luz como en túneles o trabajos nocturnos en campos de vuelo de aeropuertos. El nuevo módulo láserescan permite el uso de dos escáneres láser de alta precisión en paralelo. Estos desarrollos han permitido la realización de proyectos denominados como “levantamientos cinemáticos de ingeniería”. Ahora es posible realizar trabajos donde se requieren precisiones del rango de pocos milímetros o centímetros con las posibilidades de la tecnología del levantamiento cinemático. Comparándolos con los métodos de levantamientos convencionales, los levantamientos cinemáticos permiten precisiones equivalentes pero con una resolución mucho mayor en un tiempo de ejecución mucho menor y además con un coste menor. Los resultados se basan en la precisión y la re-

solución de la nube de puntos del láser scan en combinación con una cobertura total de imágenes para fotogrametría. Los métodos del levantamiento preciso de carreteras y ferrocarriles requieren un alto grado de fusión de sensores, una calibración cuidadosa y un sistema de gestión de calidad adecuado. Ejemplos de aplicaciones de levantamientos cinemáticos realizados son proyectos de construcción o mantenimiento de autovías, circuitos de pruebas de automóviles, levantamientos de alta precisión en túneles de ferrocarriles y campos de vuelo y entorno de aeropuertos.

1. Introducción

En un sistema de levantamiento cinemático multisensorial los siguientes grupos de sensores son los más habituales para aplicaciones de alta precisión:

- Sistema de determinación de la trayectoria (IMU, DGPS, odómetro)
- Escáneres láser
- Cámaras fotogramétricas

que además tienen que ser técnicamente cualificados para aplicaciones de alto rendimiento:

- El sistema de determinación de la trayectoria tiene que ser capaz de registrar la trayectoria con una precisión interna y fiabilidad muy alta para obtener unos resultados sin cambios no predecibles, saltos etc. Este criterio no sólo es una especificación del hardware sino más aun una especificación para la integración de los sensores y del software.
- Los escáneres láser deben de tener una precisión del punto medido adecuada, normalmente con una desviación estándar por debajo de 5mm, un ruido de señal de medición bajo y un buen rendimiento sobre una gran variedad de superficies y materiales, desde un blanco brillante hasta superficies metálicas o muy oscuras.
- Las cámaras han de ser sensores calibrados para su uso fotogramétrico.



Ilustración 1: El sistema de levantamiento cinemático MoSES que actualmente esta equipado con 8 cámaras, 2 escáneres láser estándar y opcionalmente 2 escáneres láser de alto rendimiento como Zoller&Fröhlich 5006, Leica HDS 6000 o FARO Photon.

En cuanto se cumplen los requisitos de la integración del hardware, de los sensores y del software se puede utilizar el sistema cinemático multisensorial para diversas tareas. Los proyectos de carretera o de ferrocarril requieren datos de levantamiento fiables. Los métodos cinemáticos ofrecen nuevas posibilidades para los levantamientos de alta precisión. Las ventajas más importantes de los métodos de levantamiento cinemático de ingeniería son:

- El tiempo de medición in situ es reducido al mínimo. Sólo hace falta un corto tiempo de conducción del vehículo por la zona a levantar para obtener los datos requeridos. El flujo del tráfico en la zona del levantamiento está afectado sólo mínimamente. Esto es una ventaja especialmente en zonas de levantamiento donde los tiempos de acceso permitidos al objeto están limitados como en las redes de ferrocarril, metro o autovías. Este aspecto reduce no sólo los costes sino también los riesgos de seguridad a la hora del levantamiento.
- La preparación de los trabajos de levantamiento se pueden realizar en un corto espacio de tiempo. Un sistema cinemático es fácilmente utilizable también en zonas de levantamiento muy amplias. Aparte de estaciones de referencia DGPS no hace falta más equipamiento local para apoyar la medición.
- Con el sistema de medición cinemático el trabajo con los objetos a medir, se traslada del campo a la oficina que permite además el trabajo de varias personas en el mismo proyecto utilizando el mismo set de datos.

2. El Sistema de Levantamiento Cinemático MoSES



Ilustración 2: Arquitectura del sistema MoSES

MoSES ha sido diseñado como una furgoneta de levantamiento multisensorial para captar todos los datos relevantes en carretera y ferrocarril de una manera eficiente en coste y tiempo sin la necesidad de obstruir el tráfico de la zona a levantar (véase

ilustración 1). MoSES está compuesto por sensores con características especiales que los hacen aptos para este tipo de mediciones. El sistema de múltiples cámaras para mediciones fotogramétricas y los escáneres láser están conjuntamente montados sobre una plataforma de medición calibrada. El equipo multisensorial cubre una franja de medición a lo largo del camino recorrido de aproximadamente 25m a cada lado del vehículo. La orientación exterior para georreferenciar todo el conjunto de datos levantados está realizada con un módulo de trayectoria compuesto por múltiples sensores combinando mediciones de alta precisión del sistema inercial (IMU), del DGPS y del odómetro. La fiabilidad y la estabilidad del módulo de trayectoria es la clave de la capacidad del MoSES para la realización de tareas de alta precisión.

La arquitectura del sistema es modular (véase ilustración 2) lo que permite adaptar el sistema al proyecto usando diferentes configuraciones de conjuntos de sensores. La cobertura total de la zona a levantar está asegurada por el número variable de cámaras digitales, para las tareas de documentación y fotogrametría, en combinación con los escáneres láser. La ilustración 3 muestra la configuración estándar de las cámaras en el sistema MoSES. Desde el año 2000 ha sido utilizado satisfactoriamente en una variedad de proyectos con diferentes combinaciones de sensores.

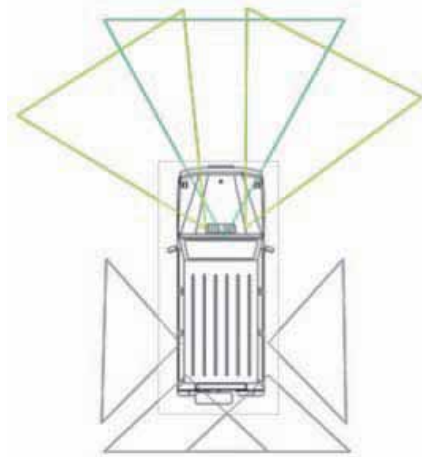


Ilustración 3: Configuración de las cámaras del sistema MoSES

3. Combinando múltiples cámaras y escáneres laser

3.1. Levantamientos con múltiples cámaras

Dependiendo de la configuración de las cámaras, el módulo de múltiples cámaras cubre los 360° del campo visual. Todas las cámaras son sensores debidamente calibrados y sus orientaciones dentro del sistema de coordenadas del vehículo son conocidas con alta precisión. Bajo la condición que la captura de las imágenes y el registro de la trayectoria están totalmente sincronizadas en el tiempo, se puede trans-

formar la orientación del vehículo a cada cámara individualmente sin pérdida significativa de la precisión. Esto permite una libre configuración del levantamiento con cámaras múltiples y permite la determinación de coordenadas para un objeto con la combinación de cualquier imagen donde este visible el objeto. En este caso, la base para la fotogrametría estéreo es una combinación de las diferentes posiciones de las cámaras en la trayectoria y de las orientaciones de las cámaras en el vehículo. Esto le da al operador una total flexibilidad en la determinación fotogramétrica del objeto. Para un objeto tipo se puede estimar una desviación estándar en la posición de aproximadamente 2cm. Una vez extraído el objeto se guarda toda la información correspondiente a éste en una base de datos.



Ilustración 4: Software RoadView para la visualización de las imágenes (arriba) y ventana de medición fotogramétrica (abajo)

3.2 Nubes de puntos con escáner láser

El módulo de laserscan permite el uso de escáneres láser industriales 2D preferentemente para el uso en exteriores. La orientación de los escáneres es flexible para obtener un campo de visión hasta 360° especialmente para aplicaciones en túneles. La

tecnología de MoSES además permite adicionalmente el uso de escáneres de alto rendimiento 3D en modo perfilómetro. Los escáneres de Zoller&Fröhlich o FARO están montados en plataformas especiales en el vehículo que permiten la integración en la plataforma de medición de la manera “plug+play”. Previo al levantamiento se calibran los escáneres dentro del sistema de coordenadas del vehículo en un procedimiento rápido con suficiente precisión, que tiene la ventaja de no necesitar equipamiento externo adicional para la integración. El concepto de la utilización de los escáneres 3D ha seguido la filosofía del uso dual de estos equipos. Por una parte, se pueden utilizar los escáneres de manera estática en modo 3D para las tareas clásicas del laserscan y además si es necesario, se pueden montar en un dispositivo especial en la plataforma del MoSES y prepararlos y calibrarlos en muy poco tiempo directamente in situ en la zona a levantar. Una vez acabado el levantamiento cinemático el escáner puede volver a ser utilizado para tareas normales 3D en levantamientos clásicos de laserscan. La característica más importante de los escáneres láser modernos es la densidad enorme de puntos combinado con una alta resolución de la medida por debajo del mm. Las coordenadas polares de la medición con el escáner láser están sincronizadas con respecto a la trayectoria con alta precisión, lo que permite la georreferenciación directa de cada punto medido. Las nubes de puntos resultantes son la base para toda la información derivada posteriormente de los datos de los escáneres láser. Los resultados pueden ser modelos digitales de superficies, por ejemplo para carreteras, o para la generación de perfiles para túneles de carreteras o ferrocarriles. Gracias a la alta densidad en las nubes de puntos es posible la extracción de coordenadas de objetos directamente desde la nube de puntos dependiendo de la densidad de los perfiles, que está directamente correlada con la velocidad del vehículo durante el levantamiento.



Ilustración 5: Nube de puntos derivada del levantamiento cinemático.

Los escáneres láser utilizados en el sistema MoSES permiten frecuencias de rotación del espejo desde 50Hz (FARO Photon, ZF5006), 75Hz (Sick) hasta 100Hz (ZF Profiler). Cada perfil de un escáner de alto rendimiento puede contener hasta 10000 puntos (ZF5006). La evaluación de las precisiones de los levantamientos cinemáticos con láseres de alto rendimiento permite estimar la desviación estándar en aproximadamente 2mm (ZF5006). Investigaciones previas con escáneres mucho más simples (Sick) permitían estimar la desviación estándar para la medición de la distancia en 5mm o mejor utilizando un método de calibración muy complejo. Las ilustraciones 5 y 6 demuestran los resultados de levantamientos cinemáticos con escáneres láser. Los paquetes de software modernos permiten al operario un trabajo eficiente con las nubes de puntos resultantes que pueden contener una cantidad de puntos del rango 108 hasta 109.

3.3. Puntos de control

Los sets de datos cinemáticos están georreferenciados utilizando las trayectorias obtenidas en el levantamiento. La precisión absoluta de la trayectoria depende de la calidad de la información del GPS diferencial que en la mayoría de los casos no es suficiente para los proyectos de ingeniería. Para garantizar la precisión absoluta se requieren puntos de control. Para aplicaciones en autovías por ejemplo, una distancia entre 250m hasta 300m entre los puntos de control permite resultados con una precisión de 1-2cm en posición y mejor de 5mm en cota.

3.4. Modelos digitales 3D de superficies de carreteras

Modelos digitales 3D de superficies de carreteras se pueden generar desde los datos obtenidos con los escáneres láser. La determinación del modelo de la superficie se puede describir como un proceso de filtro que transforma las nubes de puntos de los escáneres láser en resultados de levantamiento que cumplen los estándares de representación de la ingeniería civil. La generación de modelos 3D de superficies basados en levantamiento con escáneres laser requiere unos modelos de cálculo robustos y un control de calidad sofisticado. La malla regular del modelo de la carretera está orientada con respecto al eje de la carretera. La malla está basada en secciones transversales con una distancia regular entre secciones y una equidistancia constante entre los puntos que componen cada perfil. La densidad de la malla es flexible. Este método de generación de malla ha sido adoptado porque el resultado es fácilmente integrable en los paquetes de software estándar de planificación y proyecto de carreteras. Hasta la fecha se han generado modelos de superficie desde 0,5km hasta 120km de longitud con una densidad de la malla de 0,005m hasta 0,5m. Para cada coordenada de la malla se determina una función multidimensional “best-

fit” utilizando técnicas de estimación robustas. La estimación se basa en las mediciones láser cercanas al punto de la malla. La función resultante se usa para calcular la altura suavizada para cada punto de la malla. Los resultados son modelos digitales de carreteras de alta calidad (véase la ilustración 7). El sistema de levantamiento cinemático MoSES permite llegar a la precisión en altura de los modelos digitales de carreteras de 3 a 4mm.

4. Ejemplo de aplicación: Levantamiento cinemático de gálibos bajo puentes

Para asegurarse contra indemnizaciones en caso de accidentes y para la planificación de transportes excepcionales se están registrando gálibos de los puentes en Alemania. Los resultados más fiables los dan los métodos con laserscan 3D. Pero en la práctica el levantamiento completo de la estructura desde el arcén no sólo es difícil por la geometría del objeto y el tráfico, sino también bastante peligroso para los operarios. Por ello se ha desarrollado un método para el registro de los gálibos bajo puentes más eficiente. Desde de las nubes de puntos de la calzada y del puente se derivan modelos de superficies que permiten un análisis de los gálibos en la totalidad de la luz del puente con una fiabilidad del gálibo de menos de 1cm. Este método permite representar los puentes y túneles tridimensionalmente y hacer un análisis exacto.

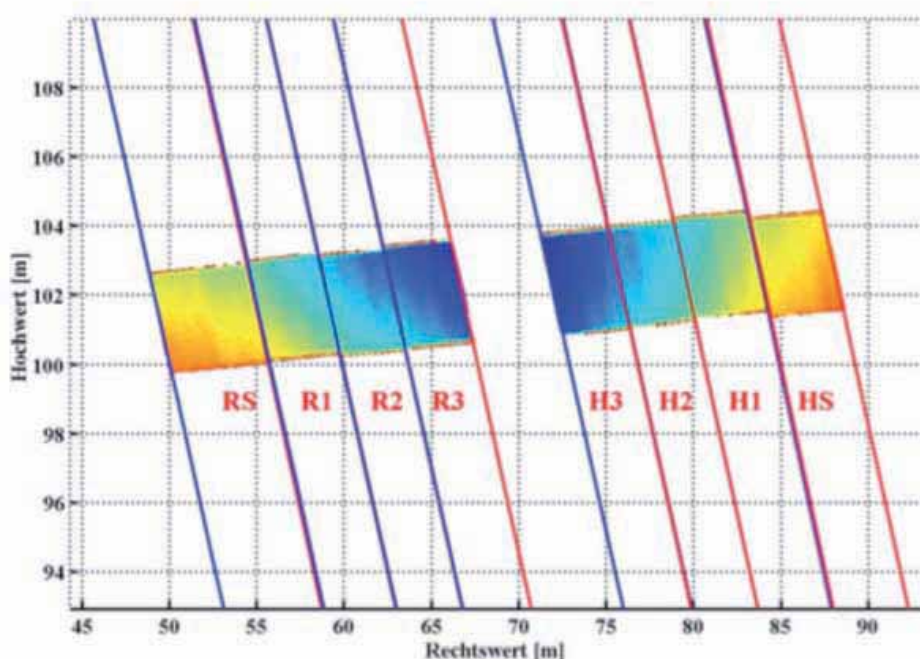


Ilustración 6: Representación de los gálibos de un puente sobre una autovía de 3 carriles y un arcén en cada dirección.

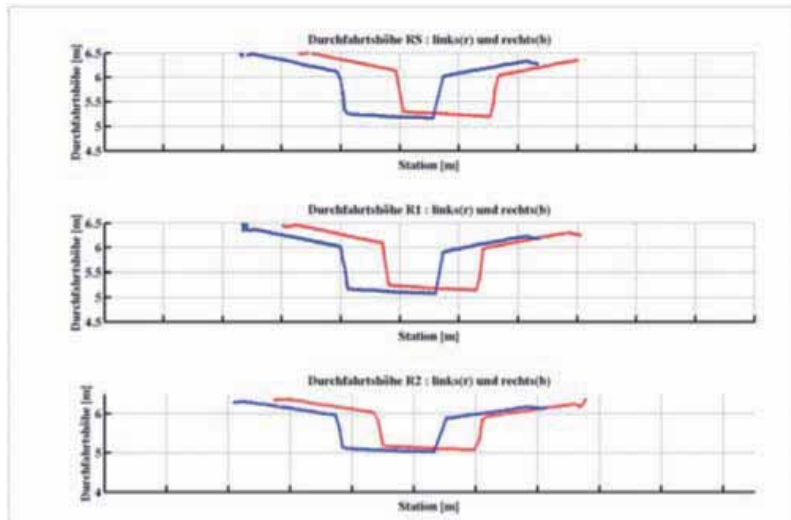


Ilustración 7: Perfiles con los gálibos por encima de la señalización horizontal.

5. Ejemplo de aplicación: Levantamiento de túneles de carretera

El túnel “Lämmerbuckeltunnel” en la A8 en Alemania en dirección Stuttgart-Ulm ha sido un proyecto típico de aplicación de métodos cinemáticos. Para la preparación de la subsanación de las deficiencias del túnel y como base de planificación de obra, se necesitaba un levantamiento 3D exacto de la estructura. A causa del denso tráfico en este tramo de la A8 ha sido descartado el levantamiento del túnel por métodos clásicos por razones de tiempo y por la seguridad para el personal de medición. Con el levantamiento cinemático no ha sido necesario cortar la autovía al tráfico temporalmente, sino que con las medidas de seguridad necesarias ha sido posible realizar la medición con el flujo de tráfico normal, reduciendo así las molestias para el tráfico, reduciendo el tiempo de medición y aumentando la calidad de datos.



Ilustración 8: Entrada al túnel y los vehículos de seguridad detrás de MoSES.

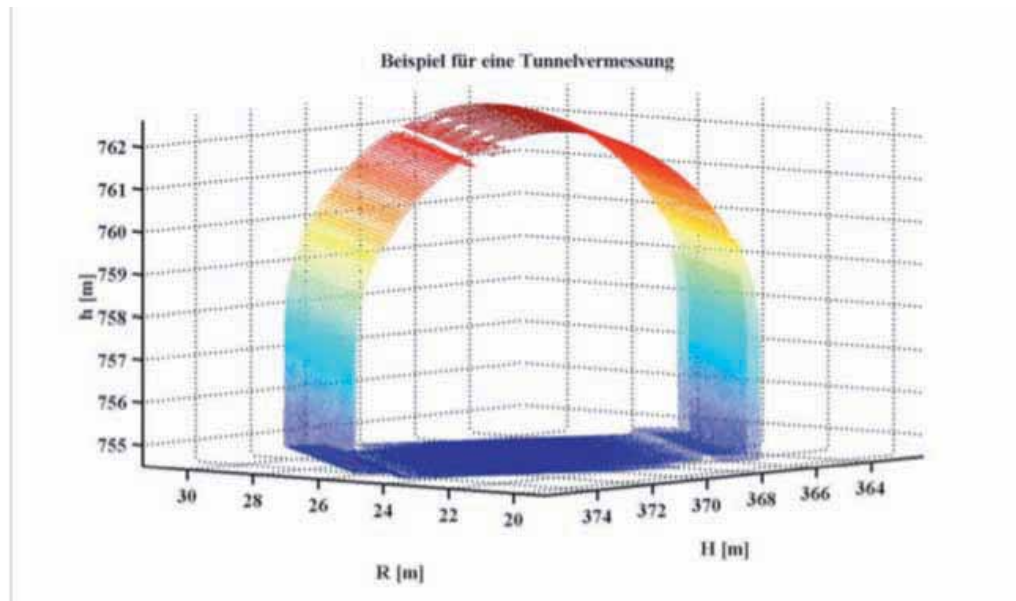


Ilustración 9: Extracto de los datos del levantamiento del túnel.

6. Ejemplo de aplicación: Levantamiento de autovías



Ilustración 10: Ejemplo de una nube de puntos de un levantamiento de una autovía incluyendo una serie de pasos inferiores.

La aplicación más habitual para los métodos cinemáticos de ingeniería son proyectos en autovías con el fin de obtener todos los datos relevantes del entorno para la planificación precisa de proyectos de reformas y mantenimientos de carreteras. En este campo el sistema MoSES puede sustituir los métodos estáticos de levantamiento en el corredor de la carretera. El enlace entre el trabajo de topografía estática, la reforma de la carretera y el levantamiento cinemático son los puntos de control (véase capítulo 3.3) que permiten la transformación de los levantamientos cinemáticos al sistema de coordenadas local.

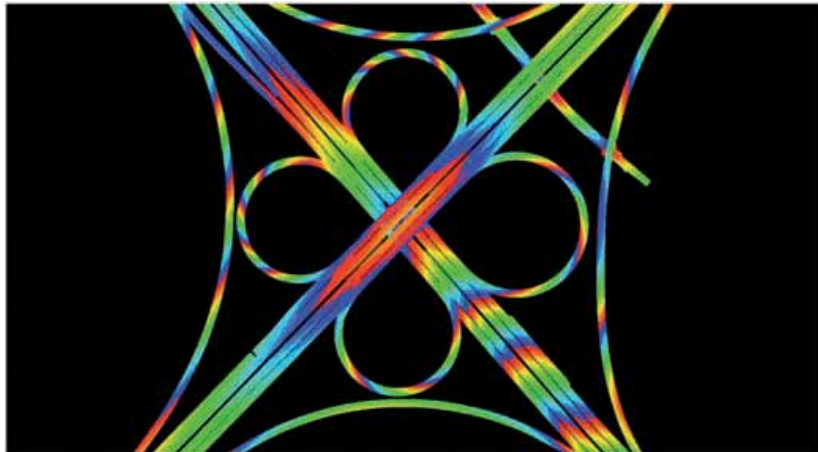


Ilustración 11: Ejemplo de un modelo digital de superficie de una intersección de autopistas.

7. Ejemplo de aplicación: Levantamiento de una red de metro

El levantamiento de redes de metro es otra de las aplicaciones más importantes para los métodos del levantamiento cinemático de alta precisión. El objetivo de los levantamientos de redes de metro es proporcionar información con coordenadas absolutas precisas. El levantamiento tiene que cubrir los 360° del entorno para obtener una documentación visual completa del túnel con el fin de proporcionar información visual de todos los objetos relevantes de las instalaciones en los túneles como la vía, las fijaciones, la electrificación, la señalización, etc. Para aplicaciones de precisión en vía, normalmente se utilizan carros de medición que en algunos casos se pueden equipar también con escáneres láser. El uso de técnicas de levantamientos cinemáticos de ingeniería ofrece grandes ventajas como mayor rapidez y mayor calidad de datos. Los datos se graban mientras el vehículo circula por los túneles. Una condición importante para los levantamientos de redes de túneles es la integración de un sistema inercial (IMU) de alta precisión (giróscopos láser) ya que no hay disponibilidad de DGPS.



Ilustración 12: Imágenes de cámaras infrarrojas para la fotogrametría.

Los levantamientos de túneles de metro se pueden realizar de una manera rápida y flexible. La adquisición de los datos del levantamiento se puede realizar en unos pocos días. Las trayectorias del vehículo se transforman a los puntos de control y la extracción de información puede realizarse desde las nubes de puntos del laserscan, de las imágenes fotogramétricas o una combinación de ambos métodos.

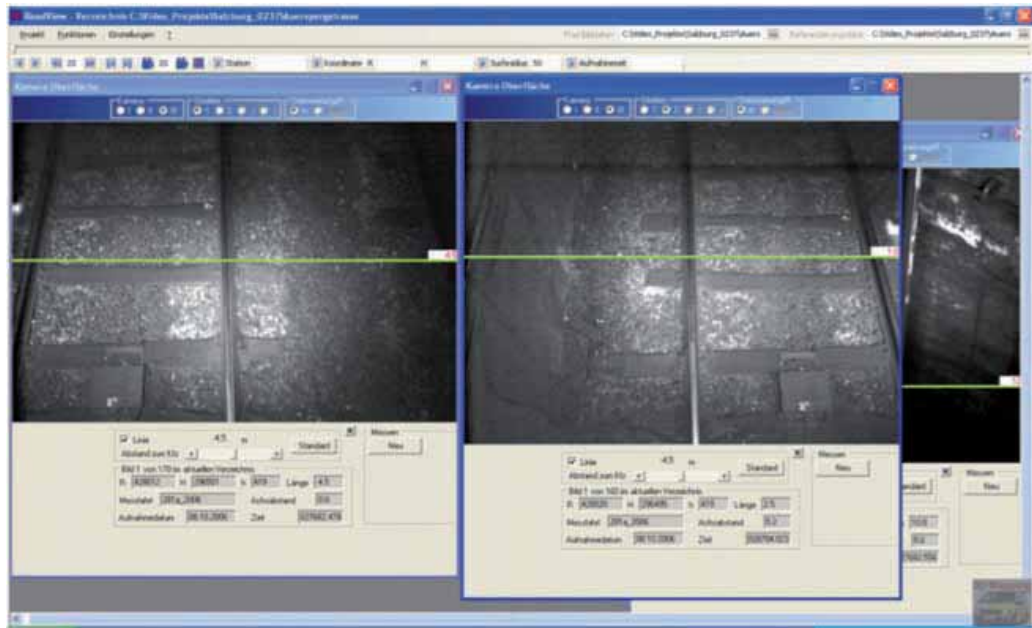


Ilustración 13: Ejemplo de la extracción de información utilizando el paquete de software 3D Road View



Ilustración 14: Ejemplo de una nube de puntos de un túnel de metro resultado de un levantamiento cinemático. En este caso se visualiza únicamente una nube de puntos. En un levantamiento de túneles normalmente se utilizan dos escáneres de alto rendimiento en paralelo.

9. Conclusión

Los levantamientos con escáneres láser de alta precisión y sistemas de cámaras múltiples abren un nuevo campo para una serie de aplicaciones en carretera y ferrocarril. Especialmente interesante para esta tecnología son los proyectos que requieren una alta precisión. La calidad de los resultados ha sido comprobada en una variedad de proyectos y bajo diferentes condiciones. Geoconcept en colaboración con 3D Mapping ofrece sus servicios no sólo en proyectos para levantamientos cinemáticos sino también como integrador de sistemas según especificaciones del cliente. Especialmente la integración de escáneres láser de alto rendimiento ha causado hasta ahora gran interés porque abre la posibilidad de utilizar los escáneres laser 3D estáticos para aplicaciones cinemáticas. El siguiente avance en el sistema MoSES será la integración de la auscultación mediante técnicas de georradar que permitirá no sólo la evaluación de superficies, sino también el análisis del subsuelo en la zona del levantamiento sin costosas técnicas invasivas. Las aplicaciones para el georradar serían por ejemplo la determinación de capas de asfalto en carreteras o el estado del cuerpo de balasto en ferrocarril.