

Ревю

Приложение на Фотограмметрия от близък обсег в измерването на мостове

Ruinian Jiang^{a,*}, David V. Jáuregui^b, Kenneth R. White^b^a *New Mexico State University, Department of Engineering Technology and Surveying, EC III, Room 382, Box 30001, MSC 3566, Las Cruces, NM 88003, United States*^b *New Mexico State University, Department of Civil Engineering, Hernandez Hall, Box 30001, MS 3CE, Las Cruces, NM 88003, United States*

Received 24 August 2007; received in revised form 20 December 2007; accepted 27 December 2007

Available online 9 January 2008

Въведение

Фотограмметрията в близък обсег намира много разнообразни приложения в областта на промишлеността, биомеханиката, химията, биологията, археологията, архитектурата, автомобилостроенето и аерокосмическото пространство, както и при възстановяването на аварии. Въпреки че фотограмметрията от близко разстояние не е била толкова популярна в мостовото инженерство, както в други области, проведените проучвания показват потенциала на тази техника. Наличието на евтини, обикновени цифрови фотоапарати и софтуерни системи за фотограмметрия, направи фотограмметрията от близко разстояние много по-възможна и удобна за инженерни приложения на мостове. За да се повиши осведомеността за използването на тази мощна безконтактна, неразрушителна техника в мостовото инженерство, този документ представя преглед на литературата за основното развитие на фотограмметрията в близко разстояние и кратко описание на предишната работа, свързана с деформацията на моста и измерването на геометрията; структурен мониторинг на изпитванията; и историческа документация. Основните аспекти на измерването на мост с фотограмметрия са обхванати от края на 70-те години на миналия век и включват описание на видовете измервания, камери, цели, мрежов контрол и софтуер. Показано е, че ранните приложения включват използването на метрични камери (специално проектирани за фотограмметрия), светлоотразителни платна, стереоскопична фотограмметрична мрежа и аналогови аналитични инструменти, които с течение на времето се превръщат в използване на не-метрични камерисилно конвергентно разположение на мрежата и цифрови компютърни аналитични инструменти.

Ключови думи: Близък обсег; Фотограмметрия; Мостове; Деформация; Наблюдение; Геометрия

© 2008 Elsevier Ltd. Всички права запазени.

Съдържание

1. Въведение	824
2. Развитие на фотограмметрията от близко разстояние	824
3. Измерване на деформация на моста и геометрия	825
4. Структурен тест мониторинг	830

* За връзка с автора. Tel.: +1 505 646 1506; fax: +1 505 646 6049.

E-mail address: rjiang@nmsu.edu (R. Jiang).

5. Приложение върху исторически мостове	832
6. Заключение	832
Източници	833

1. Въведение

Фотограмметрията е техника за определяне на триизмерната геометрия (местоположение, размер и форма) на физически обекти чрез измерване и анализ на техните двуизмерни фотографии. Като цяло фотограмметрията е разделена на две категории: въздушна и наземна фотограмметрия. При въздушната фотограмметрия изображенията се получават чрез надземни снимки от самолет, предоставящи топографски карти и детайли за използването на земята. При наземната фотограмметрия (наричана още нетопографска фотограмметрия) изображенията се придобиват на места близо до или на повърхността на земята и предоставят подробна информация за размерите на даден обект. Когато размерът на обекта и разстоянието между камерата и обекта са по-малко от 100м (330 фута), наземната фотограмметрия се определя по-нататък като фотограмметрия от близко разстояние, подход, при който изображенията се получават около обект със силно сближаващи се ориентации на камерата, като обикновено сочи към центъра на обекта [1]. Много успешни и разнообразни приложения на фотограмметрията от близко разстояние могат да бъдат намерени в полетата на промишлеността, биомеханиката, химията, биологията, археологията, архитектурата, автомобилостроенето и аерокосмическото инженерство, както и реконструкцията на аварии, за да назовем няколко [2-4]. Въпреки че фотограмметрията от близко разстояние не е била толкова популярна в мостовото инженерство, както в други полета, много пионерски приложения в това поле, както е описано в този документ, илюстрират потенциала за растеж. Освен това, бързото развитие на цифровите изображения и компютърните технологии от началото на 90-те години на миналия век направи фотограмметрията в близък обхват много по-възможна и удобна за приложенията за мостово инженерство. Наличието на евтини, обикновени цифрови фотоапарати и софтуерни системи, направи повече мостови инженерни приложения на фотограмметрията от близко разположение. За да направи инженерите по-запознати с тази модерна техника, настоящият документ прави преглед на развитието на фотограмметрията на близки разстояния и приложенията в мостовата техника, включително измерване на деформация и геометрия; структурен мониторинг и историческа документация.

2. Развитие на фотограмметрията от близко разстояние

Историята на фотограмметрията от близко разстояние може да се проследи до края на 40-те години, когато първата фотограмметрична система е разработена от Aim'e Laussedat, полковник в Инженерния корпус на френската армия. През 1849 г. Лауседат пръв използва наземни фотографии, за да състави карти, а подходът официално е приет от Научната академия в Мадрид през 1862 г. По-късно Лауседат прави план на Париж от снимки, направени от покривни конструкции, които са изложени на изложението в Париж през 1867 г. Поради своя пионерски труд, Лауседат е широко признат за „баща на фотограммата-опит“ [5-7]. Друг пионер в областта на фотограмметрията от близко разстояние е пруският архитект Мей-Денбауер. Той записва много исторически паметници, църкви и сгради с метод на грамметрия от близко разстояние, базиран на техниките на Лауседат. През 1885 г. Майденбауер създава държавен институт в Берлин за записване на архитектурни сгради [5].

Пионерските постижения на Лауседат, Майденбауер и много други фотограмметристи доведоха до създаването на Международното дружество за фотограмметрия (ISP) през 1910 г., едно от най-важните събития в историята на фотограмметрията [5,7]. През 1926 г. техническите комисии на обществото започват работа в специфични области на фотограмметрията, включително въздушна, наземна, архитектурна и инженерна фотограмметрия [5]. Оттогава фотограмметрията на близки разстояния се счита за клон на наземната фотограмметрия и се игнорира виртуално до 60-те години на миналия век, когато фотограмите-тристори започват да използват евтини, не персонализирани камери за събиране на изображения. До 70-те години на миналия век използването на близък обхват на фотограмметрията се ускори поради бързото развитие на компютърните технологии и се разшири с още по-бързи темпове през 90-те години на миналия век с появата на цифровата ера.

Според Груен [8], историята на фотограмметрията от близко разстояние може да бъде разделена на четири епохи. „Първа епоха“ обхваща годините от 1850 до 1984 г. и поставя основите на технологията, като изследва основни системи. Теориите, разработени през този период, включват алгоритми за обработка на изображенията;

методи за анализ на пространствената мрежа; устройства, свързани с зареждане (CCD) за цифрово записване на изображения; и най-малко квадратни методи за съвпадение на изображения. „Втора епоха“ обхваща годините от 1984г. до 1988г. и се фокусира върху разработването на системи за ранен прототип, включително калибриране и приложение на цифрови системи за цифрови изображения на CCD и високоскоростни методи за събиране на данни и обработка. През този бързо растящ период името на ISP комисия V е променено на „Close-up and Machine Vision“. „Трета епоха“ обхваща годините от 1988г. до 1992г. по време на която настъпи по-нататъшно приемане и преразглеждане на фотограметрията от близко разстояние. Напредъкът в този период включва бързо разрастващи се и разнообразни приложения и ускорени изследвания и внедряване. Докато напълно автоматизирани системи продължават да бъдат проучвани, фотограметричните измервания с висока точност в широк спектър от приложения бяха навлезли в употреба. „Четвърта епоха“ (1992г. - до днес) е период, в който дигиталната фотограметрия от близки разстояния непрекъснато се развива. Добър пример за този напредък е полето на образните сензори. През този период са станали достъпни чипове с висока плътност, голям формат и малки пиксели и сега технически е възможно да се произведе CCD чип, съдържащ 20 000x20 000 пиксела с размер на 5 lm пиксел. О-рафтовите потребителски камери, като например SLR модел Kodak Pro, предлагат резолюция до 14 милиона пиксела при сравнително ниска цена [9,10]. В допълнение към сензорите за изображения, разходите за други компоненти на фотограметричните системи също значително намаляха; в резултат на това по-широк спектър от приложения се превърна в възможност за инженерни цели. Другият напредък в този период включва разработването на напълно цифрови системи; автоматизирано събиране на данни и обработка чрез системи за машинно виждане; бърза и ясна интерпретация на данни.

Като обобщение на приложението на фотограметрията на близко разстояние в полето на инженерите на строежи, Mills and Barber [11] направи преглед на състоянието на техниката в това поле и забеляза следното:

- подобреният дизайн на фотограметрия на мрежата, като многоканални конвергентни мрежи, осигурява по-голяма точност, прецизност и надеждност;

- техники за самокалибриране и аналитична обработка на камерата позволяват използването на неметрични камери и опростен процес на калибриране на камерата;

- по-евтин софтуер достъпен за потребителите

- развитието на интернет технологиите направи възможни линейни фотограметрични измервания;

- напредъкът в дигиталните техники елиминира неудобния процес на дигитализация на изображенията и предоставя на потребителите пълна цифрова работа;

- модерните цифрови камери и по-добрите аналитични инструменти осигуряват по-голяма видимост и подобрена ефективност за фотограметрични измервания.

Jauregui and White [12] обобщава основните елементи и системните изисквания за мостови инженерни приложения на фотограметрията от близко разстояние. За типичен проект за измерване на мост, основните инструменти включват цифров фотоапарат с висока и висока резолюция (като Kodak DCS и Pro SLR серия); 2–4 скали (за установяване на мрежов контрол); равномерно разпределени артистични и / или естествени цели (повече цели са за предпочитане за по-висока точност на измерване); фотограметричен софтуер (като PhotoModeler и Australis); и обща станция за измерване на контролната точка. Флаш-фотографията и ретро-рефлексивните цели обикновено се използват за измерване с висока точност.

Може да се заключи, че след повече от сто и петдесет години на развитие, фотограметрията в близко разстояние сега навлезе в напълно дигитализирана ера, в която употребата му бързо се разраства. Тази технология има голям потенциал в инженерното проектиране на мостове и се прилага при все по-голям набор от задачи, които се отразяват от примерите, дадени в следващите раздели.

3. Измерване на деформация на моста и геометрия

Основните аспекти на приложенията за измерване на мостове са обобщени в таблица 1, която включва видове измервания, камери, цели, мрежов контрол и софтуер, обхващащи годините от 1985 до 2003 г.

Ранните приложения в това поле включват използването на метрични камери (специално проектирани за целите на фотограметрията), дигитални цели (неретрорективни), оформление на стереоскопичната фотограметрия и аналитични аналитични инструменти, които с времето се преобразуват в използване на неметрични камери, ретро-рефлексивни цели, силно конвергентно разположение на мрежата и цифрови компютърни аналитични инструменти. Заявленията, дадени в Таблица 1, се преглеждат по реда на датата, изпълнена в следващите параграфи.

През 1985 г. Вирджинският съвет за магистрали и транспортни изследвания спонсорира проект за фото-

Таблица 1

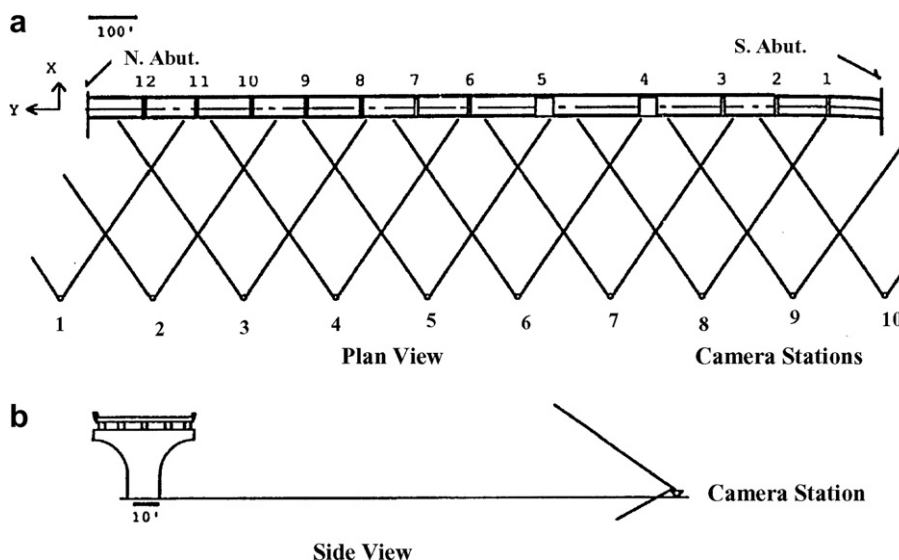
Приложение за измерване на деформация и геометрия на моста

Изследовател	Тестов обект	Вид на измерването	Цел и тип на фотографията	Използвана камера	Network control	Използван софтуер
Bales (1985)	Reinforced concrete deck	Crack length and width	Diffuse targets, non-flash photography	Zeiss UMK 10/1318, metric film camera (100 mm lens)	Control point survey	Stereoscopic comparator
Bales and Hilton (1985)	Steel I – beam bridge	Vertical deflection				
Kim (1989)	Highway bridge	Thermal and dead load deflection				
Abdel-Sayed et al. (1990)	Soil-steel bridge	Long-term deformation monitoring	Diffuse targets, non-flash photography	Metric film camera (150 mm lens)	Control point survey	Self-developed
Cooper and Robson (1990)	Steel bridge	Geometry, deformation	Retro-reflective targets, flash photography	Leica film camera (24 mm lens)	Scale bars	Elcovision 10
Forno et al. (1991)	Arch bridge	Deformation	Retro-reflective targets, flash photography	Zeiss UMK 10/1318 metric film camera (100 mm lens)	Control points	Intermap analytical comparator
Albert et al. (2002)	Arch bridge	Deformation	Retro-reflective targets, flash photography	Zeiss UMK-10 N metric camera (2.1 m lens)	Control points	Microscope
Leitch (2002)	Reinforced concrete beam	Vertical deflection	Diffuse targets, non-flash photography	Kodak DCS660 digital camera, machine vision camera (24 mm lens)	Distance measurement between targets	Ellipse operator
Jauregui et al. (2003)	Concrete arch bridge	Vertical deflection				
	P/C girder bridge	Girder camber and dead load deflection	Diffuse targets, non-flash photography	Kodak DCS660 digital camera (28 mm lens)	Control point survey	FotoG
Norris (2003)	Steel girder bridge	Live load deflection				
Johnson (2001)	Suspension bridge	Geometry	Retro-reflective targets, flash photography	Imetric and Kodak DCS660 digital cameras	Control point survey	Imetric

граметрична оценка на моста, включително изследване на състоянието и измерване на вертикално отклонение [13,14]. При първото проучване на проекта е била приложена фотограметрия от близко разстояние, за да се оцени състоянието на моста, по-специално разслоенията в стоманобетонната мостова палуба; като бяха записани както дължината, така и ширината на пукнатините. Във второто изследване вертикалното отклонение на стоманен I лъч беше измерено както с помощта на фотограми, така и на циферблатите, а средната разлика между двете измервания беше 1,0 mm (0,040 инча). В третото проучване бяха измерени отклоненията на топлинния и мъртвия товар на стоманените носачи на лек релсов мост. Мостът представляваше 3-участъка непрекъснатата конструкция с обща дължина 139 m (464 фута); измерената дължина на централния участък е 51 m (170 ft). Камерата беше позиционирана на три места под средната дължина, обърната нагоре, на разстояние около 10,8 m (36 фута) от дъното на носа.

Средната разлика между измерванията на фотограметрията и показанията на нивата беше приблизително 3 mm (0,12 инча), с максимална стойност около 9 mm (0,36 in.).

Ким [15] извърши дългосрочен мониторинг на деформацията на 526 m (1727 фута) дълъг мост на магистрала на Уисконсин чрез фотограметрия (виж фиг. 1). Проектът използва камера с обектив от 150 mm (6 инча), а разстоянието, разделящо моста и камерата, е 122 m (400 фута). Изображенията се записват върху конвенционални 230x230 mm (9x9 инча) ленти и се анализират с помощта на програма, разработена специално за проекта. Всички контролни точки бяха поставени в северния край на моста поради полеви условия и в резултат на това точността на измерването се влоши, като се движеше от север на юг. Беше направено заключението, че точността на измерването на деформацията чрез фотограметрия е в рамките на ± 14 mm (0,6 инча) в



Фиг. 1. Позиция на камерите и ориентация [15].

посоките на дължината и височината и ± 30 mm (1,2 инча) в посока на ширината, с 95% ниво на точност.

Abdel-Sayed et al. [16] съобщават за използването на близък обсег на фотограметрия за наблюдение на деформацията на мостовите от стомана. Основните цели на програмата за мониторинг бяха да се определи формата на напречното сечение на металния тръбопровод на определени места и да се оценят деформациите чрез периодичен мониторинг. Целите бяха 6 mm (0,25 инча)

диаметър отразяващи кръгове, които бяха равномерно разпределени по напречното сечение (виж фиг. 2a). Използвани са скални пръти, състоящи се от отразяващи мишени върху алуминиеви ъгли, които са поставени в различни посоки в пространството на обекта, за да осигурят еднакъв мащаб на обекта във всички посоки. Снимките са направени с 24-милиметрова широкоъгълна камера на обектива по тръбата на две места за всеки участък (виж фиг. 2b). Точността се оценява чрез сравняване на разстоянията между изчислените точки

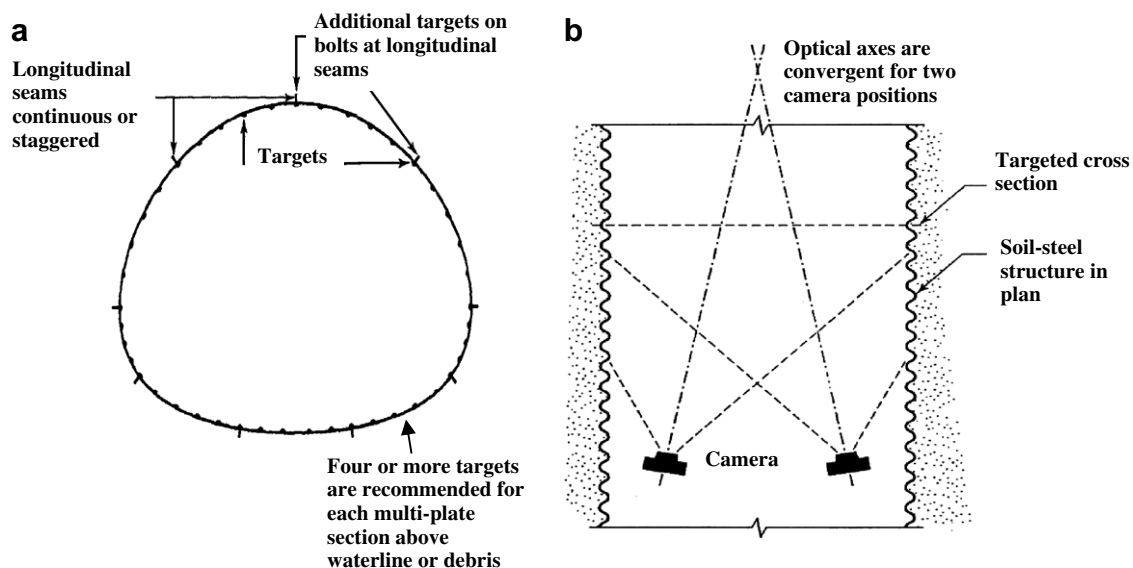


Fig. 2. Soil bridge measurement: (a) target layout; (b) camera placement [16].

чрез фотограмметрия и получени чрез директни измервания. За конструкция с размах от приблизително 4 m (12 фута), средната разлика на разстоянията варира от 2 до 7 mm (0,080 до 0,276 инча) за напречни сечения с устройства за мащабиране и от 30 до 80 mm (1.18–3.15 инча) за напречни сечения без мащабиращи устройства. Средната разлика на разстоянията в надлъжна посока варира от 20 до 40 mm (0,787–1,575 инча).

Градският университет в Лондон наблюдава деформацията на военен стоманен мост [17].

Измерванията бяха съсредоточени върху мостова секция от 18 m (59 фута), използвайки седем камери, както е показано на фиг. 3. Направени са общо 768 измервания на целеви координати, чиито максимални стандартни отклонения бяха $\pm 0,39$ mm (0,015 инча), $\pm 0,62$ mm (0,024 инча) и $\pm 0,23$ mm (0,009 инча) в посока x, y и z (виж фиг. 3), съответно.

Forno et al. [18] отчита проучванията, проведени в Университета в Дънди в Шотландия, относно измерването на унищожаването на изваден от строя мост на зидария и пълномащабен лабораторен модел на моста. Мостът е имал единична арка със затворена ивица с диаметър 4 m (13,2 фута) и общи размери от 6 m 4m 6 m (20 ft 13 ft 20 ft, дължина височина ширина). Мостът се изпитва при концентриран товар, приложен в горната част на притвора. За измерване на деформацията на моста бяха приложени както фотографията на Муара, така и фотограмметрията в близко разстояние. Резултатите от фотографията на Моире предоставиха контрол върху фотограметричните измервания, тъй като скалите на мащаба изглеждаха твърде тъмни на снимките, за да послужат за точна справка. Стандартното отклонение на фотограметричното измерване е приблизително 0,2 mm или 0,008 инча.

Университетът Bauhaus и Технологичният университет в Дрезден (и двете в Германия) извършват проучвания

за измерване на деформацията на лабораторен лъч и полев мост с помощта на една настройка на камерата [19]. Основният използван принцип е показан на фиг. 4; тоест, ако изображението на камерата и плоскостите на обекта са успоредни, действителното измерение на обекта ще бъде пряко пропорционално на измереното в изображението. Като се има предвид деформацията в равнината на изображението (Δx и Δy), деформацията на действителния обект (ΔX и ΔY) може да се изчисли чрез следващите уравнения:

$$\Delta X = \beta \cdot \Delta x; \Delta Y = \beta \cdot \Delta y$$

където β е коефициентът на мащаба, който може да бъде определен чрез контролни точки или скали.

При лабораторното изследване беше измерено отклонението на бетонна греда от 2 m (6,6 фута). Девет отразяващи кръгови цели с диаметър 14 mm (0,55 инча) бяха поставени към дъното на гредата за измерване на отклонението на тези места (виж фиг. 5a). Естествените цели, като естествени пластири върху бетонни повърхности, също бяха идентифицирани, за да се оцени точността на такива цели. Конвенционалните сензори за преместване бяха поставени на три места за проверка на фотограметричните измервания. Прецизна точност на измерване приблизително 0,01 mm (0,0004 инча) е постигната с камера

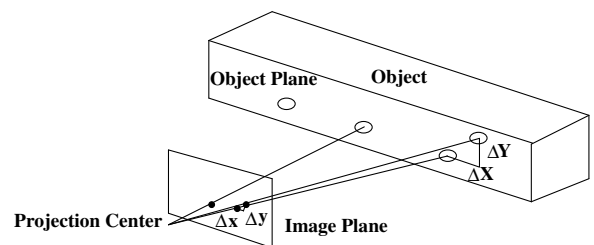


Fig. 4. Single-camera deformation measurement [19].

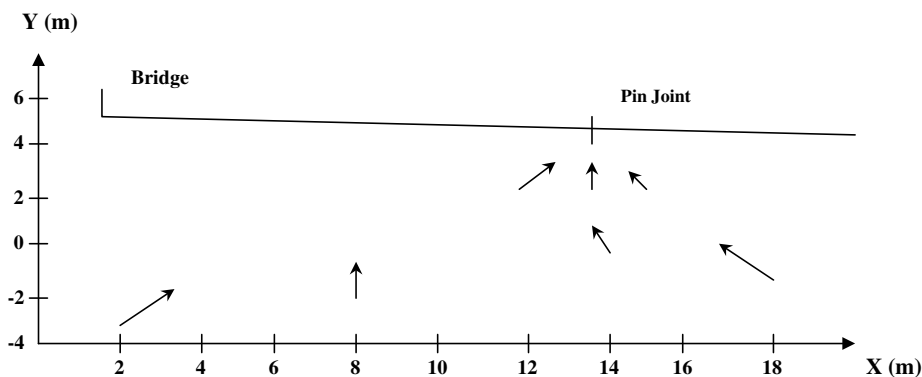


Fig. 3. Layout of the camera positions [17].

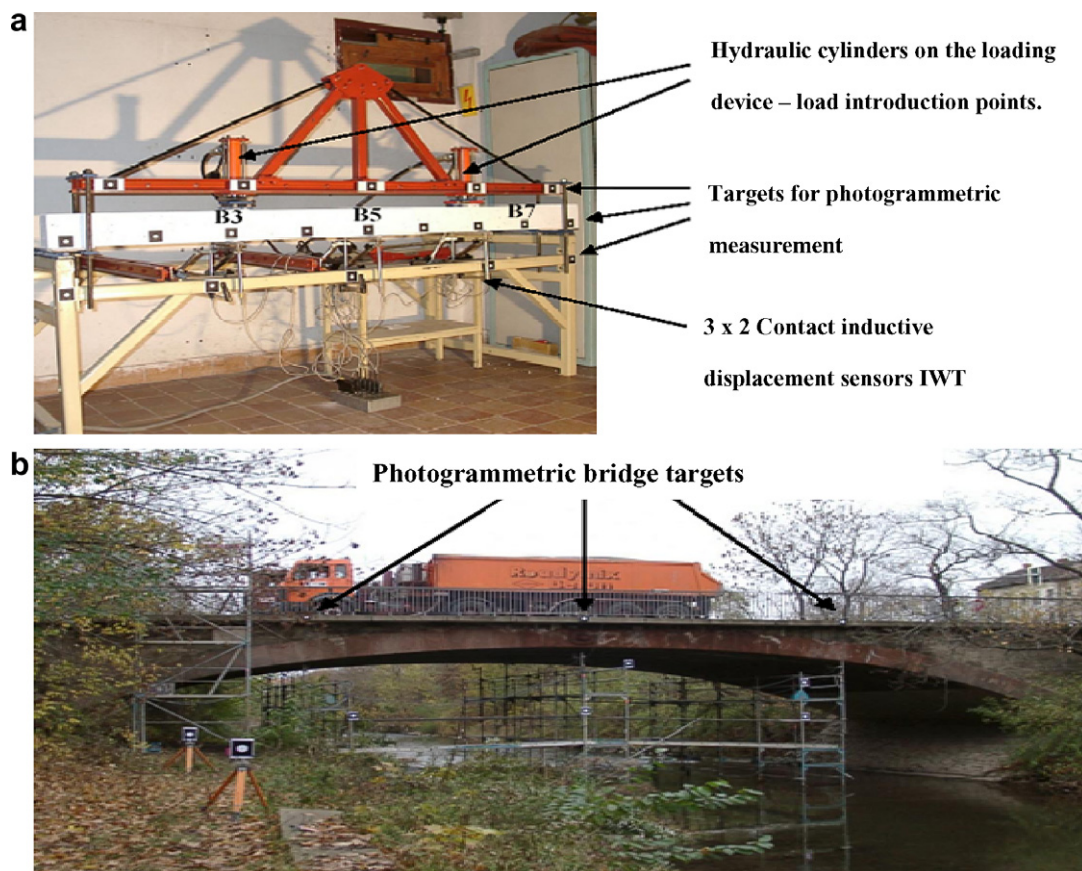


Fig. 5. Photogrammetry deflection measurement: (a) beam; (b) field bridge [19].

Kodak DCS660 и 0,04 mm (0,0016 инча) с камера за машинно зрение. Най-голямата разлика между фотограмметричните и измервателните сензори за разместване е приблизително 0,1 mm (0,004 инча). В полето за изследване беше измерено вертикалното отразяване на бетон от армиран бетон, разположен в Ерфурт, Германия. Мостът е построен през 1900 г. и има единичен пея, дълъг 27 м (89 фута) и широк 12,5 м (виж фиг. 5б). За да се провери планът за възстановяване на моста, беше извършено изпитване за натоварване, за да се определи неговата безопасна товароносимост и беше избрана фотограма-метрия от близко разстояние, за да се измери деформацията на моста при приложеното натоварване. 1300 vision 1030 пиксела камера за визуализиране на машината беше поставена на западния бряг на реката, на около 32 м от моста. Това разстояние осигурява хоризонтално поле от 32,5 m (107 фута), така че едно изображение може да покрие целия мост. Фиг. 5б показва примерно изображение на моста на дъгата, заснет от камерата за машинно зрение. Вертикалната деформация се визуализира онлайн в диаграмите за отклонение от времето.

Девет индуктивни датчика за дължина бяха поставени върху маншет, монтиран под моста, за да се проверят фотограмметричните измервания. Фотограмметричните цели са бели кръгове с диаметър 100 mm (3,94 инча), поставени на черен фон. Максималното вертикално отклонение на измерения мост е приблизително 2 mm (0,079 инча) и е установено стандартно отклонение от 0,1–0,2 mm (0,004–0,008 инча) между фотограмметричните и измервателните измервания.

Държавният университет в Ню Мексико (NMSU) проведе цялостно проучване на измерването на отклонението на моста, като използва фотограмметрия на близко разстояние [20,21]. Проучванията са извършени на лабораторна стоманена гредка и на два полски моста. Първият тестван мост беше еднополост, предварително напрегнат бетонен мост; вторият беше 7-пея, просто поддържан стоманен носещ мост.

При лабораторното изследване 12,2 м (40 фута) дълъг стоманен лъч W21x62 е натоварен на средно разстояние от концентриран товар при слабо огъване на оста. Двадесет и една двустранни цели бяха равномерно поставени на върха на гредата. Изображенията бяха получени около лъча и отклонения, измерени с фотограмметрия

от близко разстояние и се сравнява с тези, които се четат от датчиците за набиране; разликите в измерванията варират от 0,51 mm (0,02 in.) до 1,27 mm (0,05 in.).

При първия тест е измерен гребенът на гредата на предварително напрегнат бетонен мост, разположен в Лас Крус, Ню Мексико, включително първоначалната гредна на носачките преди натоварването и окончателната гредна след поставянето на стоманобетонната палуба и трафик бариери. Мостът е с един дълг 32,2 m (105 фута), 18 изкривени педя с най-напрегнати BT-1600 луковици-тройници. Общо четиринадесет контролни цели бяха поставени върху подпорите и подпорните стени в двата края на моста. Снимките бяха направени от източната страна на моста, а също и под носа; средното разстояние от камера до обект беше около 18,3 m (60 фута). Фотограметричните измервания на първоначалния разклонител са сравнени с показанията на нивото на пръта; максималното отклонение на двете измервания беше в рамките на ± 17 mm (0,67 инча) за четири от носачите и 28 mm (1,1 инча) за останалата гредна. Максималният първоначален гребен е възникнал в средната дължина на гредата 2 със стойност около 140 mm (5,5 инча). Отклоненията на мъртвия товар под палубата и преградното тегло, измерени чрез фотограметрия, след това се сравняват с проектните разчети (т.е. диаграмата на отражение на мъртвия товар); разликите варираха от 2,9 mm (0,11 инча) до 5,4 mm (0,21 инча) за всички носачи. Максималното отклонение на мъртвия товар се оказа приблизително до 35 mm (1,38 инча). За ъгловия ъглов камбър беше направено сравнение с общите измервания на станцията. За местоположението на 15-те греди средно абсолютната разлика е 2,95 mm (0,116 инча) с диапазон между 406,40 mm (0,252 инча) и + 4,27 mm (0,168 инча).

Второто тестово проучване е проведено върху некомпозитен, стоманен носещ мост, построен през 1937 г. и разположен в близост до Истината или Консеквентите, Ню Мексико. Мостът има седем просто поддържани педя, единият от които е тестван при товарене на камиони. Тестваният диапазон се състоеше от шест ленти SV30x116 с дължина 14,9 m (49 фута) (подобно на W30x116). Двустранни фотограметрични цели бяха използвани както за контрол, така и за връзки. Резултатите от фотограметричните измервания бяха сравнени с тези, получени от анализ на крайни елементи, показания на нивото на пръта и измервания на базата на кривината, получени от тензодатчиците. С максимално отклонение от около 8 mm (0,31 инча), разликите в измерванията на отклонения от фотограметрия, кривина и нивото на пръта бяха в рамките на 0,5–1,5 mm (0,02–0,06 инча) за всички носачи на средния обхват.

Компанията Sewall прилага дигитална фотограметрия от близко разстояние, за да измери геометрията на 622 m (2040 фута) дългг окачващ мост Waldo-Hancock между проспекта и Верона, Мейн [22]. Мостът е построен през 1931 г. и е показал сериозно влошаване както в своята надстройка, така и в палубата [23]. Размерите на моста, измерени чрез фотограметрия, бяха използвани при планирането на рехабилитацията на моста. Контролните точки бяха поставени на подходите към моста и изследвани с помощта на обща станция, заедно с кинематични (RTK) методи в реално време. Изображенията са получени от хеликоптер. От фотограметричния анализ Sewall предостави информация за моста и геометрията на кабелите за допълнителен структурен анализ. Измерванията включваха кота и ff комплект кабели, ферми, стълбове, главната кула и огнати кабели. Точността на измерването на критичните размери на моста е сравнима с тази на конвенционалното проучване. Стандартното отклонение на фотограметричните измервания беше 3 mm (0,12 инча) на дължина от 213 m (700 фута) от мостова секция и 15,9 mm (0,625 in.) По цялата дължина на моста [23]. В сравнение с традиционните методи за изследване, фотограметрията в близко разстояние се оказа по-ефективна. Измерванията, извършени за по-малко от три дни в полето, биха отнели 10 дни за конвенционално проучване, а изображенията са получени без физически достъп до всяка точка на измерване. Целият процес беше ненаатрапчив и създаде само минимално въздействие върху трафика.

От горните примери се вижда, че фотограметрията в близко разстояние осигурява много удобен начин за мониторинг на деформацията на моста и измерване на геометрията. Точността на фотограметрията на близки разстояния е достатъчна за повечето мостови инженерни приложения и прилагането може да се окаже по-лесно и по-ефикасно в сравнение с традиционните методи

4. Структурен тест мониторинг

Често компонентите на моста се тестват вместо целия мост поради ограниченията на разходите, времето и други експериментални ограничения. Проведени са много тестове на мостови елементи като греди и колони, където е използвана фотограметрия за наблюдение на деформацията, няколко примера за които са дадени в този раздел.

Скот [24] извърши проучване за мониторинг на отклонението на фотограметър с отклонение от многогранна кутия, извит мост на гредата, за да открие изпъкналия товар на

компресия и изследване на най-добрия механизъм за отказ на моделния мост. Снимките бяха заснети на 27 камери в двете страни на моста. Общо около 4000 цели бяха поставени на дъното, а 1800 изображения бяха използвани при обработката на изображения с аналогов стереоскоп. В сравнение с резултатите от датчика за набиране, точността от $\pm 0,2$ mm ($\pm 0,008$ инча) е постигната чрез измерването на фотограметричното отклонение.

Woodhouse et al. [25] проведе няколко теста с бетонни колони с висока якост. Целта на тестовете беше да се определи влиянието на задействането на стоманените обръчи върху повредата на колоните. Отклонението на колоната се следи по време на тестовете чрез фотограметрия на близки разстояния. За измерване на деформация на колоната за сравнение бяха използвани линейни променливи преобразуватели на изместване (LVDT). Използвани са четири цифрови камери, две от които имат резолюция от 1534 x 1024 пиксела, а другите две - 1008 x 1018 пиксела. Използвана е зрителна метрологична система, която се контролира дистанционно по такъв начин, че изображенията да бъдат заснети автоматично и синхронно от четирите камери.

Фрейзър и Ридел [26] извършиха проучване на мониторинга на топлинните деформации на стоманените греди. Температурното изменение на стоманените лъчи варира от 1100 C до 50 C, а скоростта на измерване е една настройка на всеки 15 s. За да се съберат приблизително 70–80 комплекта измервания за около 2 часа, се използва високо автоматизирана система за онлайн обработка на данни. Бяха използвани две групи цели. Група 1 имаше около 10 до 15 цели и се използва за наблюдение на деформацията на лъча; група 2 имаше около 30 цели, които бяха поставени на стената зад гредите и останаха неподвижни по време на целия тест, служейки за ориентир.

Средното разстояние между камерата и обекта за външните камери беше 9,6 м (31,7 фута) и 6,7 м (22,1 фута) за централната камера. Използвана е система Australis за онлайн фотограметричен анализ, който е модифициран за он-лайн процеса на измерване в реално време. Промените в координатите на целите върху стоманената греда се записват непрекъснато във времето. Номиналната стойност на RMS на координатните остатъци при приблизително 800 точкови измервания е средно 1,6 lm (близо до 0,2 пиксела), което дава точност в пространството на обекта от 0,7–1,3 mm (0,03–0,05 инча).

Катедрата по строителство в Университета на технологиите Къртин в Австралия извърши серия лабораторни изследвания за измерване на деформация на бетонната греда [27]. Гредите са взети от разрушен мост в Западна Австралия и включват обърнати U-образни стоманобетонни и правоъгълни предварително напрегнати бетонни греди. Гредите бяха опростени в двата края и бяха проведени тестове за разрушително натоварване, за да се оцени тяхната крайна сила. Схемата на теста е показана на фиг. 6а. Две видеокамери с 8 мм обектив бяха поставени на две места с ъгъл на конвергенция от около 47° (вижте фиг. 6а) с размер на изображението 768 x 574 пиксела. Двете камери останаха неподвижни през целия тест и бяха самокалибрирани с помощта на тестовите изображения. Аналитичният софтуер за фотограметрия Australis (Версия 5.02) е използван както за изчисление на самокалибрирането на камерата, така и за изчисляване на координатната цел. Бяха получени диаграми за натоварване за три напрегнати бетонни греди, както е показано на фиг. 6б.

Определението, измерено с LVDTs, се използва за проверка на получените чрез фотограметрия. Авторите заявиха, че очевиден недостатък на конвенционалните инструменти като LVDT е ограничаването му диапазон на измерване от само 25 mm или 0,98 in.

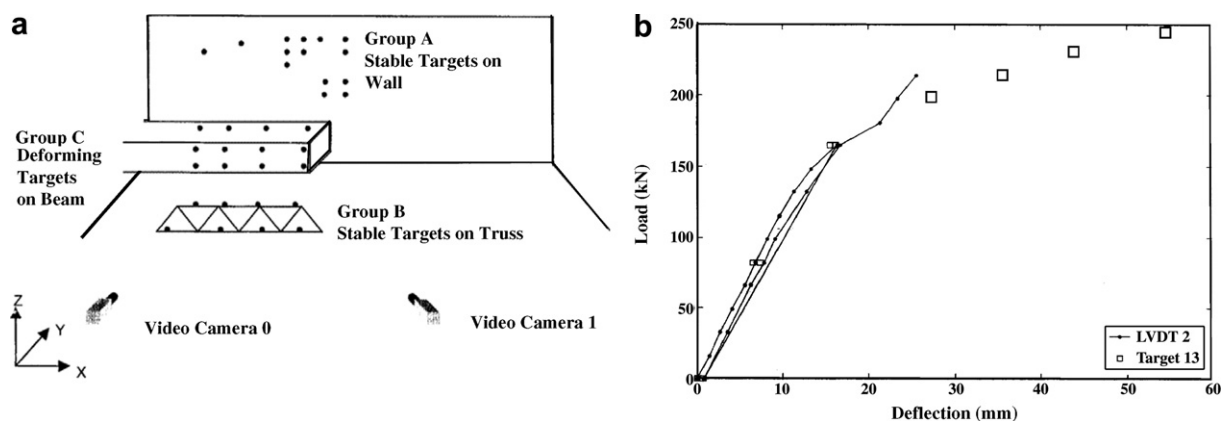


Fig. 6. Bridge beam test: (a) network layout; (b) load vs. deflection [27].

За разлика от тях, фотограметрията от близко разстояние осигурява измервания в целия диапазон на деформация (виж фиг. 6б). Друга разлика между традиционните измервателни уреди и фотограмата е, че последните могат да измерват триизмерното изместване, докато първите измерват отклонение само в една посока. Изпитванията за якост на срязване също бяха извършени върху обърнати U-образни бетонни греди, напоени с бетон. За тези U-образни лъчи също бяха получени диаграми за намаляване на натоварването и 3D модели на изместване. Средната точност на измерване, получена чрез фотограметрия, определена от 25 координати на груповата точка, беше $\pm 0,27$, $\pm 0,54$ и $\pm 0,24$ в посока x, y и z (виж фиг. 6а), съответно. Изпитан е и бордюр с обърната U-образна греда с асиметрично напречно сечение; торсията на лъча се записва чрез фотограметрия. Установено е, че фотограметрията от близко разстояние осигурява ефективен начин за измерване на торсионни измествания, които са други много трудни за измерване условно. Hegger et al. [28] докладва тест за поведение на срязване преди и след напукване на предварително напрегнати бетонни лъчи с помощта на лазерна интерферометрия и фотограметрия на близко разстояние. Използвана е лазерна интерферометрия за измерване на поведението преди напукване, докато фотограметрията в близко разстояние се прилага за измерване на срязването след спукване. Лъчът на лъча беше маркиран с черни измервателни точки с разстояние 25 mm (0,98 инча) за измерване на фотограметрия. Снимките са направени на девет станции от две височини около маркираната зона за всяка стъпка на зареждане. Калибрираните пръти бяха поставени в горната и долната част на гредата за настройка на мащаба. Точността на 3D координатите на измерените точки беше 0,02 mm (0,0008 инча), което точно определи местата на пукнатините и отворите. От измерването на пукнатините и проследяването на тяхното развитие се оценява срязването, прехвърлено през пукнатините чрез триене на срязване.

5. Заявления за исторически мостове

Този раздел разглежда приложенията на близък обсега на фотограметрия за историческо възстановяване и наблюдение на мостове. Тук не са включени примери за архитектурна фотограметрия, които се фокусират върху исторически документи за сгради. Читателят е насочен към Далас [4] за тази информация.

Spero [29] проведе проучване на приложимостта и точността на фотограметрията в близко разстояние

документация на исторически мостове и други транспортни структури. За документацията бяха избрани различни типове конструкции като бетонни арки, стоманени ферми и тухлени и дървени греди и беше избран широк диапазон от полеви условия за тестване на възможностите за фотограметрия на близки разстояния. За получаване на изображения е използвана метрична камера Zeiss UMK 10/1318 с фокусно разстояние 99 mm (3,90 инча). Около обекта бяха инсталирани смоли и разстоянията между целите бяха измерени ръчно, за да се установи еталонът. В допълнение към създаването на чертежи е проучен и проверен с ръчни измервания потенциалът на фотограметрията за измерване на площта на напречното сечение и дебелината на конструктивните елементи. Разликите между фотограметрията и измерването на ръцете бяха много малки. В един пример разликата при 18 точкови измервания е по-малка от 3,18 mm (1/8 инча). Shigenori et al. [30] докладва за проект, при който фотограметричните информационни и географски информационни системи (ГИС) са използвани за разработване на интегрирана система за проектиране и управление за възстановяване на исторически мост в Япония. Мостът (обозначен за Нишидския мост) имаше четири аркови пролуки и беше направен от блокове от естествен камък. Интегрираната система се състои от опити с фотографии, управление на координати, управление на снимки и 3D подсистеми за визуализация. Модел на моста е създаден от стари снимки, направени през 1870 г., използвайки аналитични технологии за единични снимки и проверени в полето. Формата на дъгата на моста (дължина 160 м или 528 фута) се изчислява чрез разделяне на цялата дъга на 88 елемента. Приложена е система с много прозорци за трансформиране на фото-графики в AutoCAD чертежи; чрез преместване на курсор до изчислена точка на стара снимка в един компютърен екран, аналитичният резултат може да бъде проверен лесно в чертеж на AutoCAD, възпроизведен на друг монитор. Общо 31 точки бяха измерени на фотограметричната повърхност на моста и се изчисли радиусът на дъги и координати на тези точки. Фотограметрията беше използвана и за излагане на информация за моста относно свойствата на материала и механиката, строителната технология, реконструкцията, историята на мостовете и документацията за изграждане на реставрация.

6. Заключение

Фотограметрията в близост е техника, която има много уникални предимства, няколко от които са

(1) това е безконтактна техника, която е в състояние да измерва структурите, достъпни за достъп; (2) е по-малко трудоемка; (3) той записва голямо количество геометрична информация за кратък период от време чрез придобиване на изображения; (4) позволява преразглеждане на визуалните записи и извършване на допълнителен анализ по-късно; и (5) може да се използва като удобен инструмент за рутинни приложения за измерване. С бързото развитие на компютърните технологии и цифровизираните системи за запис и обработка на изображения, близко разположената фотограмметрия навлезе в напълно дигитализирана ера с голям потенциал за мостови инженерни приложения. Има няколко успешни примера в областта на измерване и наблюдение на деформацията на моста, повечето от които достигат ред на точност от около 1 мм (0,04 инча). За измерване на геометрията на моста е установено, че полевата работа е намалена с повече от 50%, като същевременно се поддържа същото ниво на точност в сравнение с конвенционалните методи за проучване. Фотограмметрията на близки разстояния се оказва много полезна при мониторинга на теста поради способността му да измерва 3D деформация и поведение до отказа на мостовите елементи, което го прави много полезен при експерименти с усукване, срязване, аксиално и огъване. Фотограмметрията от близко разстояние е намерена и в историческата документация на мостовете и рехабилитацията. Заключено е, че фотограмметрията в близко разстояние е мощна технология за измерване, която може да предостави уникални решения за широки и разнообразни приложения за мостово инженерство.

Източници

- [1] M.A.R. Cooper, S. Robson, Theory of close range photogrammetry, in: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, 2000, pp. 9–50.
- [2] C.S. Fraser, Industrial measurement applications, in: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, 2000, pp. 329–361.
- [3] P.S. Pappa et al., Photogrammetry of a 5 m inflatable space antenna with consumer-grade digital cameras, *Experimental Techniques* 25 (4) (2001) 21–29.
- [4] R.W.A. Dallas, Architectural and archaeological photogrammetry, in: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, 2000, pp. 283–302.
- [5] J.G. Fryer, Introduction, in: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, 2000, pp. 1–7.
- [6] E.M. Mikhail, J.S. Bethel, J.C. McGlone, Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [7] R. Burtch, History of Photogrammetry, Center for Photogrammetric Training, Ferris State University, Big Rapids, Michigan, 2004.
- [8] A. Gruen, Development of digital methodology and systems, in: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Roseleigh House, Latheronwheel, Caithness, KW5 6DW, Scotland, UK, 2000, pp. 78–104.
- [9] Eastman Kodak Company, Kodak Professional DCS Pro SLR/n Digital Cameras User's Guide, Rochester, NY, 2004.
- [10] Micron, CMOS image sensors. <<http://www.micron.com/products/imaging>>. (accessed July 2007).
- [11] J. Mills, D. Barber, Geomatics techniques for structural surveying, *Journal of Surveying Engineering* 130 (2) (2004) 56–64.
- [12] D.V. Jauregui, K.R. White, Bridge inspection using virtual reality and photogrammetry, in: Inspection and Monitoring Techniques for Bridges and Civil Structures, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge CB 1 6AH, England, pp. 216–246.
- [13] F.B. Bales, Close-range photogrammetry for bridge measurement, in: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 950, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1985, pp. 39–44.
- [14] F.B. Bales, M.H. Hilton, Application of Close-range Terrestrial Photogrammetry to Bridge Structures, Virginia Highway and Transportation Research Council, 1985.
- [15] B.G. Kim, Development of a photogrammetric system for monitoring structural deformations of the sturgeon bay bridge, PhD Dissertation, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [16] G. Abdel-Sayed, B. Bakht, L.G. Jaeger, Soil-steel Bridges: Design and Construction, McGraw-Hill Inc., New York, 1990.
- [17] M.A.R. Cooper, S. Robson, High precision photogrammetric monitoring of the deformation of a steel bridge, *Photogrammetric Record* 13 (76) (1990) 505–510.
- [18] C. Forno, S. Brown, R.A. Hunt, A.M. Kearney, S. Oldfield, The measurement of deformation of a bridge by Moiré photography and photogrammetry, *Strain* 27 (3) (1991) 83–87.
- [19] J. Albert, H. Maas, A. Schade, W. Schwarz, Pilot studies on photogrammetric bridge deformation measurement, 2002. <http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ-2002/IAG_Berlin-2002.pdf> (Accessed July 2005).
- [20] D.V. Jáuregui, K.R. White, C.B. Woodward, K.R. Leitch, Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection, *Journal of Bridge Engineering* 8 (4) (2003) 212–222.
- [21] K.R. Leitch, Close-range photogrammetric measurement of bridge deformations. Ph.D. Dissertation, Civil and Geological Engineering Department, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, 2002.
- [22] B. Norris, Close-range photogrammetric measurement for structural analysis, Sewall Company, 147 Center St., Old Town, ME 04468, 2003, <www.cif.org/Nom2003/Nom29_03.pdf> (accessed July 2007).
- [23] G.W. Johnson, Digital close range photogrammetry – a portable measurement tool for public works. Presented at the Coordinate Measurement Systems Committee 2001 Conference, Albuquerque, NM, 13–17 August 2001.

- [24] P.J. Scott, Structural deformation measurement of a model box girder bridge, *Photogrammetric Record* 9(51)(1978) 361–378.
- [25] N.G. Woodhouse, S. Robson, J.R. Eyre, Vision metrology and three dimensional visualization in structural testing and monitoring, *Photogrammetric Record* 16(94)(1999) 625–641.
- [26] C.S. Fraser, B. Riedel, Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 55(4)(2000) 268–276.
- [27] T. Whiteman, D.D. Lichti, Measurement of deflections in concrete beams by close-range digital photogrammetry, 2002, <www.isprs.org/commission4/proceedings/pdfpapers/181.pdf> (accessed July 2005).
- [28] J. Hegger, A. Sherif, S. Gortz, Investigation of pre- and post-cracking shear behavior of prestressed concrete beams using innovative measuring techniques, *ACI Structural Journal* 101(2)(2004) 183–192.
- [29] P.A.C. Spero, The photogrammetric recording of historic transportation sites. VHTRC 83-R35, Virginia Highway & Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, 1983.
- [30] Shigenori Nishimura, Haseba Yoshihara, Utilization of digital information on Nishida bridge relocation and restoration, 2001. <http://www.krcnet.co.jp/papers/pdf/International/AsiaGIS2001_nishimura.pdf> (accessed July 2007).