

基于 Zernike 矩的距离选通激光成像的畸变评价

郑磊 陆威 李思宁 王岩 王泽皓

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 距离选通激光主动成像在动态环境下会产生错位畸变。针对错位畸变,采用 Zernike 矩不变量作为图像畸变评价参数,在运动成像条件下,计算不同成像帧频下矩不变量的标准差。通过矩不变量的标准差的相对变化,反映出图像的畸变程度。利用 Vega 仿真平台模拟激光成像雷达,获取距离选通成像的仿真图像。在实验室建立成像装置和车载平台以获取实验图像。仿真与实验结果都表明,成像帧频大于 5 Hz 时,合成图像无畸变。实验与仿真结果证明 Zernike 矩不变量可以对动态成像的畸变进行有效的评价。

关键词 激光成像;距离选通;Zernike;图像畸变

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.s214003

Distortion Assessment of Range-Gated Laser Imaging Based on Zernike Moment

Zheng Lei Lu Wei Li Sining Wang Yan Wang Zehao

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Range-gated lidar imaging has dislocation distortion in dynamic environment. An assessment criterion is introduced for lidar image with Zernike moment invariants. Zernike moment invariant standard deviations of images under different imaging frame frequencies are calculated in dynamic imaging. The image distortion can be effectively indicated by the relative change of various moment invariant standard deviations. Laser imaging radar is simulated by Vega simulation platform and emulation image of range-gated imaging is obtained. Experiment image is obtained by imaging system and vehicular platform, which are built in our laboratory. Both experiment and simulation results show that if the imaging frequency is larger than 5 Hz the composite image has no distortion, and the image distortion can be evaluated effectively with Zernike moment invariants.

Key words laser imaging; range-gated; Zernike; image distortion

OCIS codes 110.6915; 110.5200; 110.3000

1 引言

激光主动成像一直都是研究热点,激光成像的成像方式有多种,如条纹管成像^[1]、距离选通成像^[2]、太赫兹成像^[3]和合成孔径成像^[4]等。距离选通激光成像利用动态门控技术,获取不同距离范围的目标图像。目标的完整图像信息是由这一个序列的图像合成的,它能有效合成图像的前提是距离序列中各图像在空间能精确配准,这在静态成像条件下很容易实现,但在成像系统与目标之间有相对运动的动态成像条件下,各图像空间配准精度会下降,

合成后的目标会产生畸变。畸变产生的主要原因是成像系统与目标的相对运动产生的几何畸变和成像系统由于运动导致自身振动而产生的错位畸变。前者较小,并且是规律性畸变,可通过算法进行补偿。后者具有随机性,难以通过简单的算法进行修复,并且在地面车载实验条件下,路况的复杂及车辆自身情况都可能导致汽车行驶发生颠簸,使得序列图像严重错位,最终合成图像的错位畸变严重。所以距离选通成像产生畸变的主要来源是错位畸变。

由于系统的振动总是连续的,成像系统的运动

收稿日期: 2012-05-29; 收到修改稿日期: 2012-07-02

作者简介: 郑磊(1987—),男,硕士研究生,主要从事距离选通激光主动成像方面的研究。

E-mail: zhenglei_1983@yahoo.com.cn

导师简介: 李思宁(1968—),男,博士,教授,主要从事激光成像方面的研究。E-mail: siningli@sina.com

速度越大,每帧成像间隔时间越长,振动所造成的图像偏移越大,引起的畸变也就越大,因此动态成像的畸变与系统运动速度和成像帧频紧密相关。通过对运动条件下不同帧频成像得到的图像进行畸变评价,可以得到成像系统的运动速度和能有效合成图像的成像帧频之间的关系。

矩可以用作图像识别^[5],但是目前国内外尚没有发现将其用于动态距离选通成像畸变评价的研究工作。矩不变量具有优秀的表达目标全局几何特征的能力^[6]。Zernike 矩是一种连续的正交矩,不同阶的 Zernike 矩不变量可以表达不同细节的目标信息,使 Zernike 矩技术可以进行多层次表达,目标信息更丰富,因此被广泛应用于目标识别、图像处理等领域^[7]。Zernike 矩的幅值具有平移、旋转和缩放不变性,适合在运动条件下作为成像畸变的评价函数;同时它还具有对噪声不敏感和信息冗余少的特点。因此,本文采用 Zernike 矩不变量为评价函数,对运动条件下距离选通激光成像的图像畸变进行评价,计算不同成像帧频情况下矩不变量的标准差,通过标准差的相对变化,反映出图像的畸变程度,并给出成像系统的运动速度和能有效合成图像的成像帧频之间的关系。

2 动态距离选通成像原理及图像畸变

激光成像的核心是获得目标的距离信息,基于

距离选通技术的激光成像的原理是利用激光脉冲飞行时间测量成像目标的距离。将整个景深内的目标分成不同的距离段,通过控制选通门的开门时间来对这些距离段进行短景深成像,即切片成像。得到一系列的切片像后,采用合适的算法将其叠加成全景深的激光像,即目标的强度像和距离像。距离选通成像原理如图 1 所示。

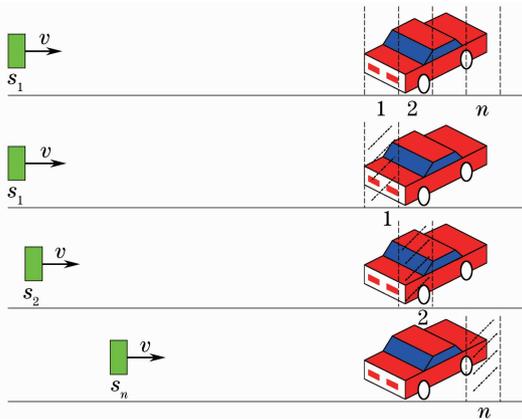


图 1 动态距离选通切片成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic range-gated slice imaging

最终得到的图像由多个切片图像合成。在动态成像过程中,由于系统的抖动,使各个切片图像发生偏移,使得最终合成图像产生错位畸变。畸变图像与无畸变图像的对比如图 2 所示。

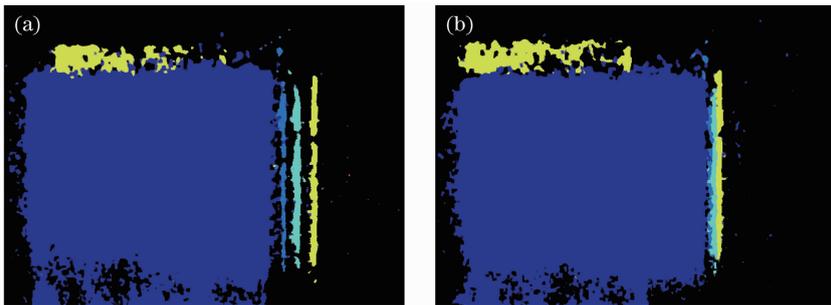


图 2 (a)畸变图像;(b)无畸变图像

Fig. 2 (a) Image with distortion; (b) image without distortion

3 Zernike 矩不变量评价动态成像畸变

3.1 畸变评价方案

计算动态距离选通激光距离图像的 Zernike 矩不变量,需要对距离图像做相应的变换处理:将需要参与计算的图像坐标映射到单位圆 $x^2 + y^2 = 1$ 中,用于计算 Zernike 矩的基函数;进行归一化处理,使 Zernike 矩不变量具有旋转、平移和缩放等几何不变特性。由于 Zernike 矩不变量具有不变性,那么无

畸变的序列图像的矩不变量会保持相对稳定,标准差较小。Zernike 矩不变量的标准差越大,则 Zernike 矩不变量波动越大,即保持不变的能力越差,表明图像畸变越严重。因此,可以用 Zernike 矩不变量的标准差相对地反映出图像的畸变大小。

3.2 Zernike 矩不变量的构建

将目标距离像坐标映射进单位圆中,假设图像分辨率为 $N \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 的距离像 I ,映射到直

角坐标系后与单位圆 $x^2 + y^2 = 1$ 外接,那么,两者坐标之间的映射关系为

$$\begin{cases} x = \sqrt{2} \times \frac{j - \left(\frac{N+1}{2}\right)}{N} \\ y = \sqrt{2} \times \frac{\left(\frac{N+1}{2} - i\right)}{N} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 (i, j) 为距离像的坐标, $i, j = 0, 1, \dots, N$; (x, y) 为单位圆坐标, $x, y \in [0, 1]$ 。进行坐标转换后, $(n+m)$ 阶 Zernike 矩基函数 $V_{nm}(i, j)$ 满足

$$V_{nm}(x, y) = R_{nm}(x, y) \exp\left(jm \arctan \frac{y}{x}\right), \quad (2)$$

$$R_{nm}(x, y) = \sum_{s=0}^{n-|m|/2} (-1)^s \times \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \times (x^2 + y^2)^{n/2-s}. \quad (3)$$

将基函数代入

$$Z_{nm} = \left| \frac{n+1}{\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} V_{nm}^*(i, j) R(i, j) \right| \quad (4)$$

中,从而得到 $(n+m)$ 阶 Zernike 矩不变量。动态成像环境下,目标图像会发生平移、缩放等几何变化,通过对 Zernike 矩的径向多项式 R 进行归一化处理,使 Zernike 矩不变量具有几何不变性,使其适用于动态成像环境。假设原图像的径向多项式为 $R(i, j)$,经过归一化处理后的图像的径向多项式为 $R_{\text{new}}(i, j)$,归一化过程中取

$$R_{\text{new}}(i, j) = R\left(\frac{i}{\alpha}, \frac{j}{\alpha}\right), \quad (6)$$

式中 α 为比例系数,设规则矩为

$$m_{pq} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} i^p j^q R'(i, j), \quad p = 1, 2, 3, \dots, \\ q = 1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

则 α 定义为

$$\alpha = \sqrt{\frac{\beta}{m_{00}}}, \quad (8)$$

式中 m_{00} 为零阶规则矩, β 为归一化后的图像面积值,可以根据具体情况设定,但是要和 m_{00} 具有同等数量级。将归一化后的 $R_{\text{new}}(i, j)$ 替换原图像的 $R(i, j)$,并代入(4)式中,得到归一化后的 Zernike 矩不变量:

$$Z_{nm} = \left| \frac{n+1}{\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} V_{nm}^*(i, j) R_{\text{new}}(i, j) \right|. \quad (9)$$

高阶 Zernike 矩不变量对噪声敏感,受噪声影

响严重,而动态距离选通激光成像的图像噪声均较大,所以只对低阶 Zernike 矩不变量进行计算。

4 动态成像畸变评价仿真结果与分析

在 Vega 仿真环境中建立了一个距离选通激光成像雷达仿真软件,仿真界面如图 3 所示。设定平台的运动速度为 10 m/s,视场为 5° ,采集图像的分辨率为 $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$,成像距离由 2000 m 向目标逼近,并且可以采用不同的成像帧频进行成像。为了研究图像的畸变,给成像镜头添加了随机振动。

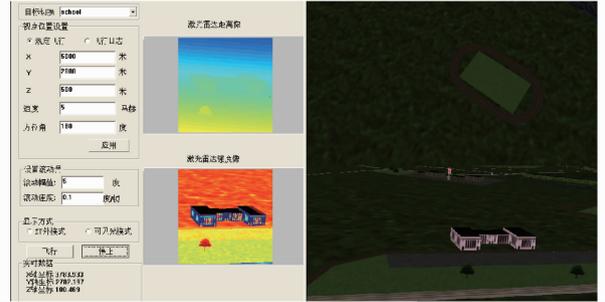


图 3 Vega 仿真软件界面

Fig. 3 Interface of simulation software Vega

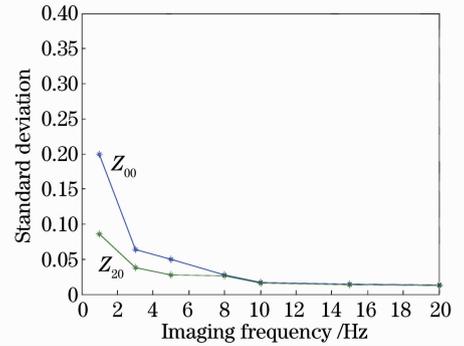


图 4 1500 m 处 Zernike 矩不变量的标准差

Fig. 4 Zernike moment invariant standard deviation at 1500 m

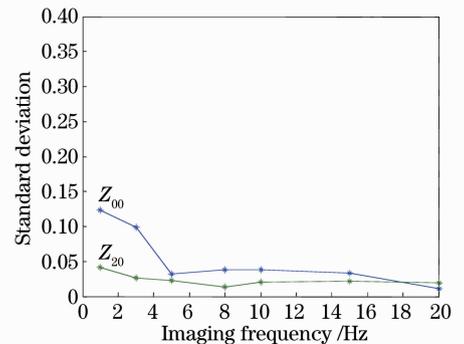


图 5 1100 m 处 Zernike 矩不变量的标准差

Fig. 5 Zernike moment invariant standard deviation at 1100 m

仿真实验中,采集不同成像帧频下的目标距离信息,经过处理得到多组仿真动态距离图像序列。由获取的图像计算出 Zernike 矩不变量 Z_{00} , Z_{20} 以及矩不变量的标准差 σ_{00} , σ_{20} 。选取不同成像帧频情况下,距离为 1500 m 和 1100 m 附近的图像矩不变量的标准差 σ_{00} , σ_{20} , 得到矩不变量标准差与帧频的关系,如图 4 和图 5 所示。

由图可以看出,Zernike 矩不变量的标准差随成

像帧频的变化规律在这两个距离段上是基本一致的。成像帧频越低,Zernike 矩不变量的标准差越大,反映出图像的畸变越严重。如图 6 所示,成像帧频为 1 Hz 时,图像有严重畸变,当成像帧频大于 5 Hz 时,标准差 σ_{00} 和 σ_{20} 均较小,并趋于稳定,Zernike 矩不变量保持稳定不变,图像畸变较小。如图 7 所示,成像帧频为 20 Hz 时,畸变现象不明显,可以忽略。

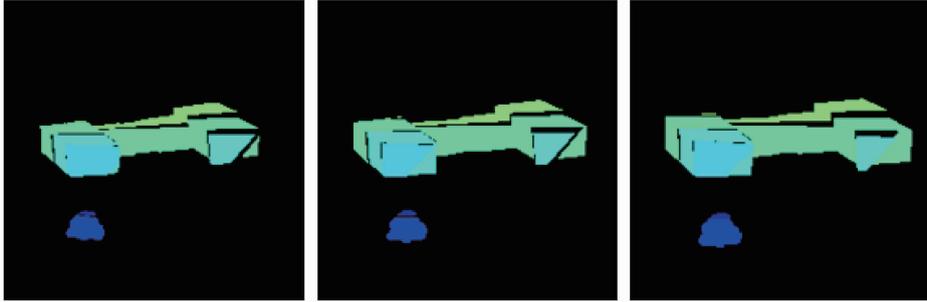


图 6 成像帧频为 1 Hz 时的目标合成距离像

Fig. 6 Target's distance image under the condition that the imaging frame frequency is 1 Hz

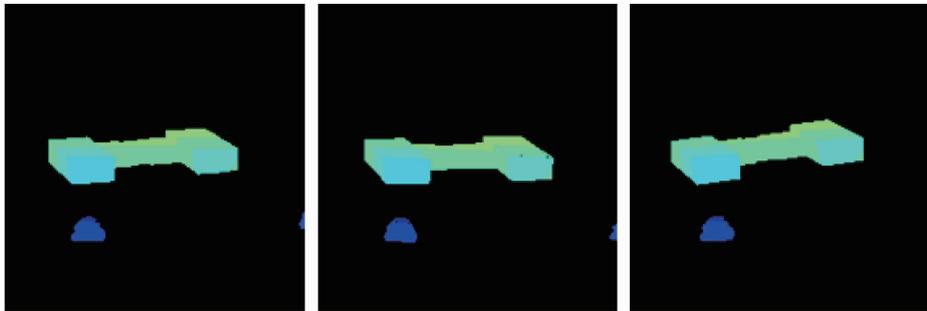


图 7 成像帧频为 20 Hz 时的目标合成距离像

Fig. 7 Target's distance image under the condition that the imaging frame frequency is 20 Hz

5 动态成像畸变评价实验结果与分析

利用车载成像平台,从距目标 500 m 处以 20 km/h 的速度向目标运动。设定不同的成像帧频对目标成像,在其他条件均相同的情况下,获得不同成像帧频对目标成像的序列图像。

每个成像帧频下的图像均在距离为 400, 500 m 附近,选取一定数量的距离像,计算 Zernike 矩不变量标准差 σ_{00} 和 σ_{20} , 得到标准差随成像帧频的变化曲线,如图 8 和图 9 所示。

从图中可以看出,在不同距离段,Zernike 矩不变量的标准差变化趋势一致,标准差随成像帧频增加而减小,但 σ_{20} 的变化比 σ_{00} 的要大,这是因为 σ_{20} 是高阶矩,它代表目标更精细的几何细节,对畸变更敏感。综合考虑 σ_{00} 和 σ_{20} 的变化对目标畸变的影响,可得出在 20 km/h 的成像条件下,成像帧频大

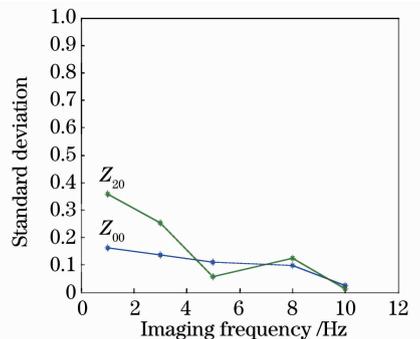


图 8 500 m 处 Zernike 矩不变量的标准差
Fig. 8 Zernike moment invariant standard deviation at 500 m

于 5 Hz 时,Zernike 矩不变量的标准差较小并趋于稳定,图像的畸变不明显,能有效地合成距离像与强度像。图 10 为成像帧频为 10 Hz 时的序列图,可以看出,基本没有畸变,可以有效合成图像。成像帧频

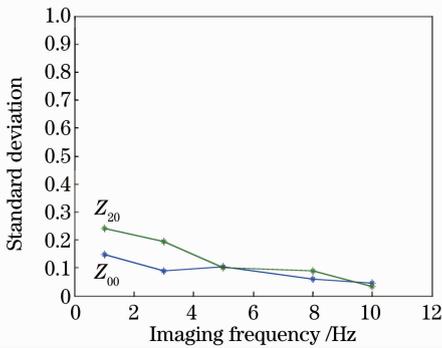


图 9 400 m 处 Zernike 矩不变量的标准差

Fig. 9 Zernike moment invariant standard deviation at 400 m

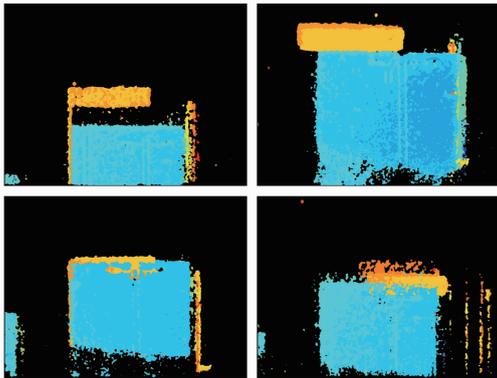


图 10 成像帧频为 1 Hz 时畸变较大的距离像

Fig. 10 Range images with high distortion when the imaging frequency is 1 Hz

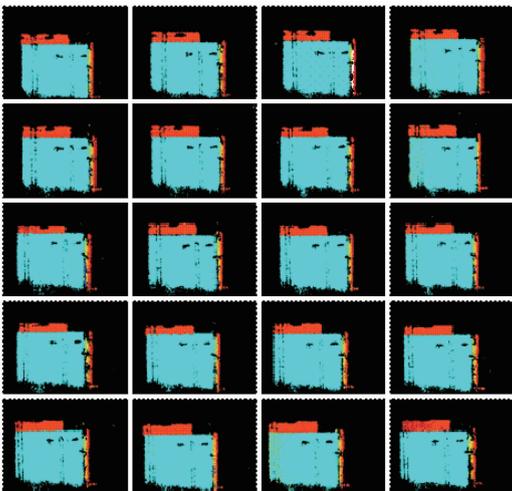


图 11 成像帧频为 10 Hz 时没有畸变的距离像

Fig. 11 Range images without distortion when the imaging frequency is 10 Hz

低于 5 Hz 时,矩不变量的标准差开始快速增加,说明图像的畸变增大,使得合成的图像与实际目标不一致。图 11 为成像帧频为 1 Hz 时的序列图,可以看出图像畸变严重,不能有效地合成图像。

6 结 论

利用 Zernike 矩不变量对图像进行畸变评价,可以相对地比较不同成像条件下的图像畸变程度。根据矩不变量的标准差随成像帧频的变化关系,得出在运动条件下使序列像不能有效合成图像的成像帧频大小。仿真结果显示,速度为 10 m/s 时,成像帧频必须大于 5 Hz,图像畸变才不会明显,切片像能有效合成图像。而实验图像评价结果表明,速度为 20 km/h 时,成像帧频必须大于 5 Hz,图像才不会有明显畸变,可以有效地合成图像。仿真结果与实际运动成像实验的结果趋势是完全一致的,都表明 Zernike 矩不变量可以作为运动条件下距离选通激光成像图像的畸变评价参数。通过运动图像的畸变评价找到实现运动条件距离选通激光焦平面成像的条件,即距离选通激光成像的帧频与系统运动条件之间的关系,为距离选通激光焦平面成像在运动条件下的应用提供参考。

参 考 文 献

- Sun Jianfeng, Wei Jingsong, Wang Tianjiao *et al.*. Design of streak tube imaging lidar with wide-field of view and research of imaging experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100413
孙剑峰, 魏靖松, 王天骄 等. 大视场条纹管激光雷达设计及成像实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100413
- Xu Kaida, Jin Weiqi, Qiu Su *et al.*. Survey on technical development and combined application mode of laser range-gated imaging system[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(1): 16~23
许凯达, 金伟其, 裘溯 等. 激光距离选通成像技术及其组合应用模式综述[J]. *红外技术*, 2012, **34**(1): 16~23
- Zhao Yaqin, Zhang Liangliang, Zhu Dechong *et al.*. Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111003
赵亚芹, 张亮亮, 祝德充 等. 基于压缩传感的单点太赫兹成像[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s111003
- Yan Yi, Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng *et al.*. Research of spotlight mode incoherently synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0211003
严毅, 金晓峰, 孙建锋 等. 聚束非相干合成孔径激光成像雷达研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0211003
- Liu Zhengjun, Li Qi, Wang Qi. Object recognition of lidar range image using combined moment invariants[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0609002
刘正君, 李琦, 王骥. 基于组合矩的激光雷达距离像目标识别[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0609002
- Jiang Ke, Chen Beijing, Zhang Hui *et al.*. Construction of complete set of Zernike moment invariants and its application[J]. *J. Southeast University*, 2011, **41**(1): 58~62
江克, 陈北京, 张辉 等. 完备的 Zernike 矩不变量集的构造及应用[J]. *东南大学学报*, 2011, **41**(1): 58~62
- Zhang Miao. On Moment Invariants Based Seal Verification Technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2005. 14~18
张森. 基于矩不变性的印鉴鉴别技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005. 14~18